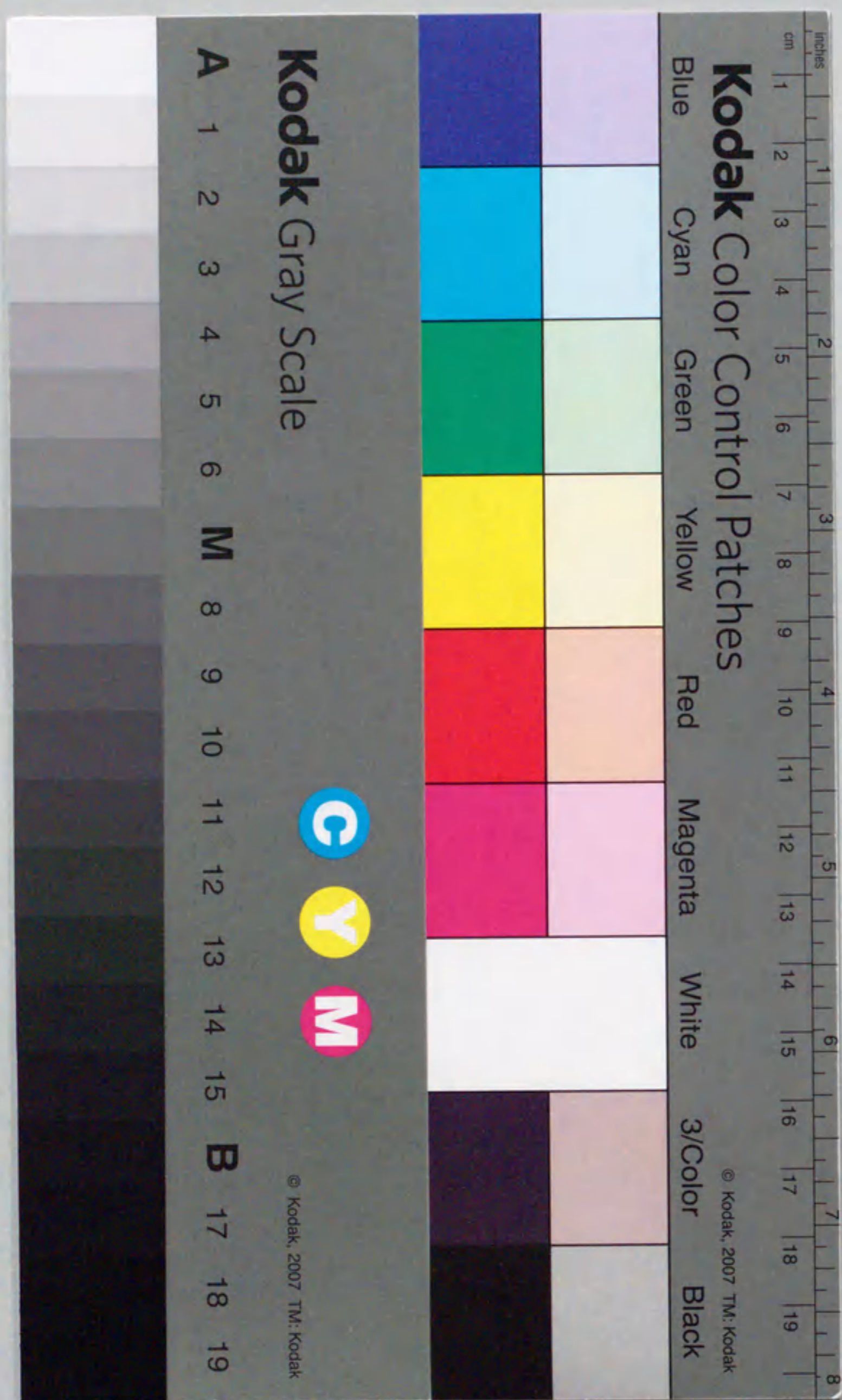


コンクリートおよび鉄筋コンクリート部材の  
強度・塑性変形挙動における寸法効果に関する研究

小池 狭千朗





コンクリートおよび鉄筋コンクリート部材の  
強度・塑性変形挙動における寸法効果に関する研究

小池 狭千朗

2000年10月



## 目 次

|  |     |
|--|-----|
| 第1章 序論   | 3   |
| 1.1 概説   | 5   |
| 1.2 既往の研究  | 7   |
| (1) コンクリートの圧縮強度における寸法効果                            | 7   |
| 1) コンクリートの圧縮強度における寸法効果に関わる要因                       | 7   |
| 2) コンクリートの圧縮強度における寸法効果に関する研究の変遷                    | 10  |
| (2) コンクリートの圧縮破壊性状における寸法効果・形状効果                     | 12  |
| (3) 鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊性状における寸法効果                      | 17  |
| 1.3 本研究の目的   | 21  |
| (1) 第2章の研究目的                                       | 21  |
| (2) 第3章の研究目的                                       | 21  |
| (3) 第4章の研究目的                                       | 22  |
| (4) 第5章の研究目的                                       | 23  |
| 参考文献   | 24  |
| 本章の表   | 31  |
| 本章の図   | 32  |
| <br>   |     |
| 第2章 コンクリートの圧縮破壊における寸法・形状効果                         | 45  |
| 2.1 概説   | 47  |
| 2.2 圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化                         | 48  |
| 2.3 試験体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状                         | 54  |
| 参考文献   | 62  |
| 本章の表   | 64  |
| 本章の写真  | 66  |
| 本章の図   | 67  |
| <br>   |     |
| 第3章 コンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果                        | 73  |
| 3.1 概説   | 75  |
| 3.2 プレーンコンクリートの圧縮特性における寸法効果                        | 76  |
| 3.3 寸法効果を反映したプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式               | 82  |
| 3.4 コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果                     | 87  |
| 3.5 高強度コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果                  | 96  |
| 3.6 超高強度コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果                 | 101 |
| 3.7 コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果に及ぼす帯筋の形状・間隔と骨材寸法の影響 | 106 |
| 3.8 寸法効果を反映したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線表示式             | 111 |
| 参考文献   | 117 |



|   |            |
|---|------------|
| 本章の表  | 121        |
| 本章の図  | 129        |
| <b>第4章 中心圧縮を受ける鉄筋コンクリート柱の塑性変形挙動における寸法効果</b> | <b>173</b> |
| 4.1 概説                                      | 175        |
| 4.2 高強度鉄筋コンクリート柱の圧縮塑性変形挙動における寸法効果           | 176        |
| 4.3 超高強度鉄筋コンクリート柱の圧縮塑性変形挙動における寸法効果          | 180        |
| 4.4 高強度鉄筋コンクリート柱の圧縮破壊時吸収エネルギーにおける寸法効果       | 184        |
| 参考文献  | 188        |
| 本章の表  | 189        |
| 本章の写真                                       | 192        |
| 本章の図  | 193        |
| <b>第5章 鉄筋コンクリート梁の曲げ塑性変形挙動における寸法効果</b>       | <b>205</b> |
| 5.1 概説                                      | 207        |
| 5.2 曲げを受ける鉄筋コンクリート梁の塑性変形挙動における寸法効果          | 208        |
| 5.3 鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊解析における寸法効果の取扱い方法          | 217        |
| 参考文献  | 221        |
| 本章の表  | 223        |
| 本章の図  | 229        |
| <b>第6章 結 論</b>                              | <b>251</b> |
| 6.1 コンクリートの圧縮破壊における寸法・形状効果 (第2章)            | 253        |
| 6.2 コンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果 (第3章)           | 254        |
| 6.3 中心圧縮を受ける鉄筋コンクリート柱の塑性変形挙動における寸法効果 (第4章)  | 257        |
| 6.4 鉄筋コンクリート梁の曲げ塑性変形挙動における寸法効果 (第5章)        | 258        |
| <b>本論文に関連する既発表論文等</b>                       | <b>261</b> |
| 1. 本論文関連論文                                  | 263        |
| 2. 学術論文                                     | 266        |
| 3. 著書・口頭発表論文等                               | 228        |
| <b>謝 辞</b>                                  | <b>273</b> |

## 第1章 序 論

- 1.1 概説
- 1.2 既往の研究
- 1.3 本研究の目的



## 1.1 概説

コンクリート並びに鉄筋コンクリート（以後、RC と略記）部材の強度は、断面寸法の大きさに依存する。一般に、これを「寸法効果」という<sup>1)、2)</sup>。

古くから RC 部材あるいは RC 構造物の力学挙動のデータを得るのに最も確実な方法は、載荷実験によるものであることが知られている。これらの部材の力学挙動を実験的に調べるためには、実験室内で実験を実施することが多く、載荷実験装置もスペースあるいは経費の面から、実大の試験体に対応できないことも多い。そのため、試験体は、縮尺模型タイプの寸法のもが使われることがほとんどである。

RC 部材や RC 構造物を実大で実験するには大型の載荷実験装置を必要とし、多額の経費と手間を要するため、前述の理由から小型試験体を使用して実験を行うことが多い。これらの小型試験体の実験結果を実大構造物や部材に適用する際には、実大と小型の相互関係、すなわち部材の強度や変形挙動に関する寸法効果をあらかじめ確認しておく必要がある<sup>3)~7)</sup>。

コンクリートの圧縮強度、引張強度、曲げ強度、せん断強度などは、部材寸法の増大とともに低下する傾向のあることが知られているが、コンクリート中の骨材の最大寸法や粒度分布、水セメント比、乾湿の養生条件、型枠の材料や仕上げなどにも影響を受け、条件によっては逆の傾向を示すことも知られている。

RC 梁の曲げせん断実験では、あばら筋で補強されていない RC 梁では、曲げ終局強度の寸法効果は少ないが、終局せん断強度は部材寸法や梁の断面せいが大きくなると寸法効果が無視できなくなることが知られている<sup>8)~10)</sup>。一方、あばら筋で補強された RC 梁では、曲げせん断実験による曲げ終局強度にも寸法効果が見られることも報告されている<sup>11)</sup>。これらの点については、いろいろな原因が報告されているが、いまだに明確ではない。

コンクリートの圧縮強度の寸法効果は、引張強度、曲げ強度、せん断強度の寸法効果に比べて小さく、実大部材の圧縮強度は、通常の試験体（直径 $\phi$  10 ~ 15cm）の圧縮強度のおよそ 80 ~ 90%と考えられているが<sup>12)</sup>、高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告<sup>13)~15)</sup>もみられる。また、圧縮下のコンクリートのピーク応力後の破壊性状は、試験体寸法の増大に伴い、かなり脆性的になり、このような寸法効果もまたコンクリート強度に依存して異なるようである<sup>2)、15)</sup>。

RC 部材の圧縮部のコンクリートは、せん断補強筋による拘束効果のために、プレーンコンクリートに比べてその力学性能が改善され、せん断補強筋の多い RC 部材ほど延性的な力学挙動を示す<sup>16)~18)</sup>。RC 部材の力学挙動の寸法効果を論じるには、部材の圧縮域を想定して横補強されたコンファインドコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響についても知る必要がある。これまでも、コンファインドコンクリートの変形挙動に関する研究例は多く、応力-ひずみ曲線の表示式も種々提案されているが、試験体



寸法の影響を考慮した研究例は少ない<sup>19)~21)</sup>。

近年、建設材料の進歩、設計・施工技術の進歩、社会的要請などが重なって、RC構造物は大型化・高層化する傾向にあるが、実大柱の実験例は少ない<sup>22), 23)</sup>。これらの構造物の実物大実験を行い得る載荷試験機の容量は、研究費の制約等からこの大型化に追従できず、実物大実験ができなくなっており、昨今のコンクリートの高強度化はこの傾向を加速している。このような大型構造物の安全性を、実物大実験を行うことなく合理的に確保するための設計手法の確立、あるいはその安全性を実大実験なしで確かめる手法の確立などが望まれている。「寸法効果」の究明は、これらの問題を解決するための極めて重要な研究課題の内の一つである<sup>24)</sup>。

模型実験を行う場合、縮小試験体に使用する材料の力学特性は原型と同じものが望ましい。縮小試験体のコンクリートとして原型試験体と同じものを使用すると、模型試験体中の粗骨材の寸法が試験体寸法に比べて相対的に大きくなり、これがコンクリートの力学挙動に影響することがあり、模型材料に使用するコンクリートの骨材寸法の選択には注意を要する<sup>3)~5), 25), 26)</sup>。

これらのリスクを避けるために、しばしばコンクリート中の骨材の寸法を試験体寸法に合わせて縮小したマイクロコンクリートを用いた縮小試験体による模型実験も試みられ、併せてマイクロコンクリートの圧縮特性に関する研究<sup>27)~29)</sup>も行われている。コンクリートをマイクロ化することによって、原型の圧縮強度にかなり近づけ得るとの報告<sup>30), 31)</sup>もみられる。また、変形状について、応力上昇域については再現性がよいとの報告<sup>32)</sup>もあるが、圧縮強度並びに最大応力時のひずみとは逆に、マイクロコンクリートの弾性係数は縮小化に伴って減少するとの報告<sup>33)</sup>もある。また、骨材寸法が小さくなると圧縮強度が増大し、かつ弾性係数も増大するとの報告<sup>28)</sup>もみられ、その結論とするところは各研究者によって必ずしも一致していない。

構造物の大変形時の塑性変形挙動をマイクロコンクリートを用いた縮小試験体によって調べるには、これらのコンクリートの応力下降域の変形挙動の寸法効果に関する調査が必要不可欠であるが、研究例は極めて少ない。

## 1.2 既往の研究

### (1) コンクリートの圧縮強度における寸法効果

#### 1) コンクリートの圧縮強度における寸法効果に関わる要因

プレーンコンクリートの圧縮強度の寸法効果に関する研究は比較的古くから数多くの研究がなされている。ここでは、寸法効果に関わる要因を大きく次の5つに分類した。

- i) 試験体寸法の影響
- ii) 骨材寸法の影響
- iii) コンクリートの内部組織の影響
- iv) 実験条件の影響
- v) コンクリートに特有の外的因子の影響

以下、それぞれの要因の影響について概要をまとめる。

#### a) 試験体寸法の影響

多くの国で、RC構造物の設計のための基準強度として $\phi 15 \times 30\text{cm}$  または  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱体の圧縮強度を使用している。これらの円柱体と種々の寸法をもつ構造体の強度との比や力学特性の違いを検討する必要上、コンクリート強度の寸法効果に関する研究が、多くの研究者によって古くから行われてきた。これらの研究例については、谷川・山田<sup>6)</sup>が詳しく紹介しており、以下にその後の文献も含めて紹介する。

Blanks・McNamara<sup>3)</sup>、Neville<sup>4)</sup>、Sabnis・Mirza<sup>7)</sup>、Gonnerman<sup>25)</sup>、Gyengo<sup>34)</sup>、Hollis<sup>35)</sup>、Rajendran<sup>36)</sup>、Malhotra<sup>37)</sup>などの研究者は、コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体寸法の影響について調べた。その結果、これらの研究者は、一般に試験体寸法が大きいほどコンクリート強度は低下すると述べている。Blanks・McNamara<sup>3)</sup>やSabnis・Mirza<sup>7)</sup>らは、コンクリートの圧縮強度は直径の約10乗根に反比例して減少する弱い寸法効果を示すことを報告している。

Kim<sup>38)</sup>らは、Bazantの提案した非線形破壊力学に基づく寸法効果則に初期クラックの相対長さの影響を考慮した修正式を提案し、圧縮強度の寸法効果の予測に応用している。Blanks<sup>3)</sup>らの実験結果に本提案式を適用し、試験体寸法に依存しない強度比( $d$ が無限大の時の値)として0.63を得ている。

このような試験体寸法の増大とともに圧縮強度が減少する傾向を説明するモデルとして、次の2つがある。すなわち、

- i) Tucker<sup>39)</sup>、堀<sup>40)</sup>、永松<sup>41)</sup>、Hobbs<sup>42)</sup>、Kamesuwara Rao・Swamy<sup>43)</sup>、三橋<sup>44), 45)</sup>、



谷川<sup>46)</sup>・47)らの研究による確率論的な考察：材料の強度は、試験体中に潜在する材料の欠陥の分布状態、大きさ、量などが一定ではなく、ランダムにばらつく性質をもつためであるとし、寸法効果は一般に、試験体中の欠陥量の多少に依存する容積効果によるものとする考えから、確率論を用いた説明がなされている。コンクリートのような脆性材料の破壊強度は Weibull 分布に従うとし、とくに、そのモデルとしては、Weibull の最弱リンクモデル 並びにそれを改良したモデルを用いている。

ii) 近年、金属材料の破壊現象の説明にめざましい成果を挙げている破壊力学、損傷力学をコンクリートの破壊に適用して、寸法効果を解明しようとする Griffith 理論に代表される「エネルギー変換機構」に基礎を置く理論<sup>48)</sup>・49)：これらの理論で説明できるコンクリートは、コンクリート中の骨材の寸法が試験体寸法に比べて相対的に小さく、コンクリートを等質連続体とみなし得る場合<sup>41)</sup>であり、これらの理論によればコンクリート強度は、試験体寸法の増大とともに減少する。

Griffith 理論によれば、コンクリート柱に蓄えられた弾性ひずみエネルギーの減少が、ひび割れの進展に伴う表面エネルギーの増加を丁度賄うエネルギーの変換条件が整った時に、脆性的な破壊が生じる。前もってコンクリート内に存在しているひび割れ長さが長ければ、より小さい応力で破壊が起こることになる。コンクリートの幾何学的形状が近似であれば、コンクリートの寸法が大きくなるにつれて、該当するひび割れの大きさも比例的に大きくなるため、破壊強度は $\sqrt{1/d}$  に比例して低下する寸法効果を示すとするものである。ここに、 $d$  はコンクリートの代表寸法としている。

#### b) 骨材寸法の影響

これらの研究と併行して、コンクリート中の骨材寸法がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響についても注目が集まり、Powers<sup>50)</sup>、Collier<sup>51)</sup>、並びにその後の Hughes・Chapman<sup>28)</sup>、Walker・Bloem<sup>52)</sup>、Cordon・Gillespie<sup>53)</sup>、らの研究では、一般的に骨材寸法が大きいほど圧縮強度が低下するとの結論を得ている。

一方、Sangha・Dhir<sup>5)</sup>は、試験体寸法と骨材寸法の相互効果がコンクリート強度に及ぼす影響について調べ、試験体寸法と骨材寸法の比が小さい範囲では、試験体寸法が大きくなるほど強度が増大する場合のあることを報告している。

わが国でも、笠井<sup>54)</sup>が約 2000 個の円柱体の実験から  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  円柱体の圧縮強度が、わずかであるが  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱体のそれよりも大きいことを報告している。

谷川・山田<sup>6)</sup>は、試験体寸法が大きいほど圧縮強度が増大するこれらの傾向は、最小値確率論などでは全く説明できない現象であり、コンクリートのような極度に非均質な材料の寸法効果は試験体の容積効果のみでは理解できず、試験体寸法と骨材寸法の相対的な大きさに依存するシステム全体としての幾何学的な非均質性が寸法効果に対する重要な影

響因子となることを指摘した。そして試験体寸法を種々に組み合わせたコンクリートの圧縮実験を行い、圧縮強度の寸法効果を、試験体中の欠陥量の多少に起因する容積効果と試験体内部の幾何学的非均質性に起因する効果との複合効果として表示した。この表示式によれば、試験体寸法に比べて相対的に骨材寸法が小さい場合には、試験体寸法の増大とともに強度は低下し、骨材寸法が大きく試験体内部の幾何学的非均質性が増すと、試験体体積の増大とともに強度も増大しており、後者の現象は Sangha・Dhir<sup>5)</sup> や笠井<sup>54)</sup>の実験結果に基づいた骨材寸法の影響として説明することができるとしている。

#### c) コンクリートの内部組織の影響

コンクリートの内部組織に関わる要因<sup>7)</sup>・55)・56)としては、以下のものが挙げられる。

i) 試験体側面の型枠のせき板効果に起因する寸法効果<sup>57)</sup>・58)：型枠（せき板）とコンクリートの接する粗骨材 1 個分程度の厚さの周辺では、粗骨材の移動が型枠壁面によって拘束されるため、粗骨材の充填割合が内部より低下して、モルタル量の多いコンクリートになり、この部分のコンクリートの強度が増大する。試験体寸法の小さなものほど、この表層部分の占める割合が大きくなって強度が増大し、寸法効果の原因の一つとなる。

ii) 部材寸法の違いによる施工条件の変化に起因する寸法効果<sup>59)</sup>：試験体寸法の小さなものほどよく締め固められ、コンクリートが緻密になり強度が高くなる。これに対して、寸法の大きな試験体では、締め固め不足による空隙や欠陥を内部に含みやすく、強度が低くなる可能性がある。

iii) 水や骨材などの材料の偏りに起因する寸法効果<sup>55)</sup>：まれに、寸法の大きな部材には寸法の大きな粗骨材を使用することがある。大きな粗骨材は欠陥の原因となりやすく、またコンクリート内部で水や骨材の偏りが生じやすく、これが強度を低下させる原因となる。

iv) コンクリートの強度レベル（水セメント比）に起因する寸法効果<sup>13)</sup>～15)：コンクリートが高強度になるほど、強度の寸法効果が大きくなる。また、コンクリートの強度レベルによって応力軟化域の負剛性の寸法依存性が相違する。

#### d) 実験条件の影響

実験条件に関わる要因としては、以下のものが挙げられる。



i) 荷重速度に起因する寸法効果<sup>59)</sup>: 試験体寸法が小さいものほど荷重速度が速くなりやすい。この注意を怠ると、小さい試験体ほど強度が高くなる可能性がある。

ii) 試験体の荷重面の平滑度に起因する寸法効果<sup>56), 60)</sup>: 試験体寸法が大きいほど平滑な端面に仕上げるのが困難になる。試験体端面の仕上げが悪く荷重中に端部が破壊するような試験条件下では、端面の仕上げの程度で強度が異なる。

iii) 養生時の水分の散逸による水和反応の阻害に起因する寸法効果<sup>2), 61)</sup>: 比較的乾燥した大気中で養生されたコンクリートは、水中養生されたコンクリートに比べて試験体寸法の小さなコンクリートほど水分の散逸が顕著で、水和反応が阻害される可能性が高い。このような乾燥条件下で養生されたコンクリートでは、確率論やエネルギー変換機構に基づく寸法効果とは逆に、試験体寸法が大きいほど強度が増大する場合もある。本研究のうち、プレーンコンクリートに関する実験はこれに該当する。

#### e) コンクリートに特有の外的要因

コンクリートに特有の外的因子の影響としては、以下のものが挙げられる。

i) 横補強鉄筋間隔に起因する寸法効果<sup>60)</sup>: 横補強鉄筋の配筋が試験体寸法に相似の場合、試験体寸法が大きくなると横補強筋の絶対量も大きくなり、また横補強筋の一辺の長さが大きくなることにより横拘束力が減少するため、寸法効果はより顕著になる。

ii) 横補強筋量に起因する寸法効果<sup>2), 15), 21), 60), 62)</sup>: 横補強筋の補強量が多いほど、横拘束力が大きくなり、このような場合に圧縮強度や圧縮破壊時の変形性能における寸法効果が大きくなるとの報告もある。

### 2) コンクリートの圧縮強度における寸法効果に関する研究の変遷

コンクリートの圧縮強度は、通常、直径×高さがφ15×30cmまたはφ10×20cmの試験体を用いた試験より求められるが、その寸法が変化した場合(寸法効果)、または高さ/直径の比が変化した場合(形状効果)には、試験によって得られる強度は変化する。本項では、圧縮強度の寸法効果に限って研究の現状を紹介する。破壊性状および形状効果については次項(2)で取りまとめる。

#### a) 実験的研究

図-1.2.1は、ダムコンクリートを対象とした圧縮試験の結果である<sup>3)</sup>。図-1.2.2は、同様な圧縮強度の寸法効果を示す実験結果の比較例である<sup>63)</sup>。これらの図によれば、コンクリートの圧縮強度は、直径のほぼ10乗根に反比例して減少するという弱い寸法効果を示すといえる。

粗骨材の最大寸法の影響について、一般に図-1.2.3に示す傾向が認められている<sup>64)</sup>。すなわち、大きい骨材を用いると骨材の全表面積が減少し、ペーストと骨材の界面における応力が増大するためと、セメントペーストの収縮を拘束するために生じる内部応力が局部的に大きくなるためであると考えられている。

水中養生されたコンクリートに比べて、大気中で養生されたコンクリートでは、試験体寸法の小さなコンクリートほど水分の散逸が顕著で、水和反応が阻害される可能性が高い。このような乾燥条件下で養生されたコンクリートは、確率論に基づく寸法効果とは逆の現象を示す場合もある。筆者ら<sup>2)</sup>は、相対湿度85%程度の室内養生では、水中養生時と同様、圧縮強度についてあまり顕著な寸法効果が見られなかったが、相対湿度60%程度では、試験体寸法が小さい程強度が低下する明確な傾向が見られたことを報告した。

圧縮強度の寸法効果は、次項でも述べるように試験体寸法(b)のみならず、骨材寸法(d)、試験体寸法と骨材寸法との比(b/d)、養生方法などによって異なる。その傾向を模式的に表せば、図-1.2.4のようになる。実大骨材の圧縮強度は、通常の試験体(断面φ10~15cm)の圧縮強度のおよそ80~90%程度と想定され、定量的には圧縮強度の寸法効果はあまり顕著ではない場合が多いといえる。ただし、図-1.2.3および1.2.5からも推定できるように高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告<sup>13)~15)</sup>も見られるため、更なる検討を要する。

#### b) 理論的研究

谷川ら<sup>6), 65)</sup>は、試験体寸法(直径D=5, 10, 15cm)と骨材寸法(d=0.6~25mmの整粒4種類)を種々に組み合わせたコンクリートの圧縮実験を行い、次式のようなコンクリートの圧縮強度の寸法効果(F/F<sub>0</sub>)に関する表示式を提案した。

$$\frac{F}{F_0} = \frac{a - b \{\log(D/d)\}^{-c}}{a - b \{\log(D_0/d)\}^{-c}} \cdot \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{1/(\beta+1)} \dots (1.2.1)$$

ここに、d: 骨材の平均寸法

v: 試験体の体積

β: 材料定数 (=20)

a, b, c: 実験定数

添え字 0: 基準とした試験体の値



上式では、コンクリートのような非均質の材料の寸法効果は、試験体中の欠陥量の多少に起因する容積効果 ( $V_0/V$ ) と試験体内部の幾何学的非均質性 ( $D/d$ ) に起因する効果との複合効果として表示されている。一般には図-1.2.6に示すように、試験体寸法に比べて相対的に骨材寸法が小さい場合には、試験体体積の増大とともに強度は低下するが、骨材寸法が大きくなって試験体内部の幾何学的非均質性が増すと、試験体体積の増大とともに強度も増大することになる。このような現象について、試験体寸法が大きいほど、局所的なマイクロクラックの発生からシステム全体の破壊に至るまでの過程が長くなるため強度が増大するものと説明している。但し、上式は、骨材粒径がほぼ一定の場合について求められており、通常のコンクリートに適用するためには、骨材の粒度分布を考慮する必要がある。

Kim ら<sup>38)</sup> は、Bazant<sup>66)</sup> の提案した非線形破壊力学に基づく寸法効果則に初期クラックの相対長さの影響を考慮した修正式を提案し、圧縮強度の寸法効果の予測に応用している。図-1.2.7 は、Blanks ら<sup>3)</sup> の実験結果に本提案式を適用した例であるが、図中に①-①式として示されているように、試験体寸法  $d$  に依存しない強度比 ( $d$  が無限大の時の値) として、0.63 が得られている。

## (2) コンクリートの圧縮破壊性状における寸法効果・形状効果

### 1) まえがき

コンクリートの圧縮強度が試験体寸法の影響を受けることは前項で述べたが、それに伴い、圧縮応力-ひずみ曲線も試験体の寸法によって相違する。ここでは、試験体寸法の影響を、断面の大きさの影響 (寸法効果) と高さ一直径 (又は断面辺長) 比の影響 (形状効果) に分類して既往の研究を整理する。引用文献は、比較的最近のものに限るが、過去の研究の総説的な紹介は、例えば、文献<sup>67)~70)</sup> になされている。

### 2) 寸法効果

#### a) プレーンコンクリート

Bazant<sup>71)</sup> は、圧縮下のコンクリートの応力下降域の変形挙動について検討を行い、試験体寸法が大きいほど脆性的に破壊すると指摘している。

図-1.2.8 は、筆者ら<sup>2)</sup> によって得られた断面辺長 ( $b$ ) が 7.3 ~ 20cm の角柱試験体 (高さ  $H$ ) の応力-ひずみ曲線である。ひずみの測定長は、試験体のほぼ全長 (0.9H) である。図によれば、圧縮強度は、試験体寸法によってあまり変化していないが、応力下降域の破

壊性状は、Bazant の指摘と一致する。また、別シリーズの実験<sup>1)</sup> では、試験体寸法が小さいほど圧縮強度が低下するという結果を得ている。この点について、筆者らは、養生条件の影響を取り上げ、養生時の湿度が低い場合 (例えば 70%以下) では、試験体寸法が小さいほど乾湿の影響を受け易いため、強度が低下し、応力下降域の破壊が延性的になると説明した。

友澤ら<sup>72)</sup> は、強度レベルの異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を調べ、図-1.2.9 のような結果を得た。ひずみの測定長は、試験体中央部の 1D 区間 ( $D$ : 試験体直径) である。圧縮強度の寸法効果は、高強度コンクリートほど顕著に現れている。また、高強度コンクリートの応力-縦ひずみ曲線の下降域の負勾配は、試験体寸法の影響をほとんど受けず、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  試験体と  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  試験体の間で異なるのは圧縮強度時の横ひずみの値である。試験体寸法の増大により圧縮強度時の横ひずみの値は減少し、その傾向は高強度コンクリートほど著しいといえる。

#### b) コンファインドコンクリート

RC 部材の圧縮部のコンクリートは、せん断補強筋による拘束効果のためにプレーンコンクリートに比べて、その力学性能が改善され、せん断補強筋の多い RC 部材ほど延性的な力学挙動を示す。RC 部材の力学挙動の寸法効果を論じるには、部材の圧縮域を想定して横補強されたコンファインドコンクリートの力学挙動に対する寸法効果を知る必要があるが、研究例は少ない。

筆者ら<sup>62)</sup> は、普通および高強度コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、横拘束筋のピッチ  $S$  を変えて調べた。図-1.2.10 (a) および (b) に実験結果の一例 (図中の  $b$  は断面辺長) を示す。実験結果に基づき、i) 試験体寸法の増大に伴い、応力-ひずみ曲線が脆性的になるというプレーンコンクリートで見られる寸法効果は、コンファインドコンクリートでもほぼ同様に見られること、ii) このような寸法効果は、横補強筋のピッチが密なほど顕著であること (例えば、図-1.2.8 と図-1.2.10 (a) を比較)、iii) 圧縮強度が  $700\text{kgf/cm}^2$  級以上の高強度コンクリートの軟化域の応力-ひずみ曲線の形状は、試験体寸法に拘らず相似しており、ピーク応力点における寸法効果の分だけ平行移動した形となること (図-1.2.10 (b) 参照) などを指摘した。

鈴木ら<sup>21)</sup> は、円形の横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの圧縮特性を調べ、プレーンコンクリートの圧縮特性を基準値とする応力-ひずみ曲線の推定式を提案している。試験体寸法としては、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 、および  $\phi 25 \times 50\text{cm}$  の 3 種類を取り扱っているが、表示式中には、プレーンコンクリートの圧縮特性値以外で試験体寸法に関わる要因は含まれていない。このことは、プレーンコンクリートとコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果が、数式上ではあるが、ある一定の関係にあることを示唆しているといえよう。



### c) まとめ

以上の知見などを踏まえ、コンクリートの圧縮特性に及ぼす試験体寸法の影響について既往の研究結果をまとめてみると、表-1.2.1 のようになる。

## 2) 形状効果

### a) プレーンコンクリート

コンクリートの平均的な圧縮特性は、たとえ試験体の断面寸法が等しくても、その高さ  $H$  - 直径  $D$  (または、辺長  $B$ ) 比によって著しく異なる。図-1.2.11 は、試験体の  $H/D$  がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。図によれば、 $H/D$  が小さいほど圧縮強度は大きくなり、その程度は  $H/D$  が 1 以下の場合に著しい。これは、試験体と載荷板の間に摩擦 (以下、端面摩擦という) が存在し、試験体の膨張に対して横拘束力が働くためである。すなわち、 $H/D$  が小さい試験体の一軸圧縮試験では、端面摩擦を取り除かない限り、コンクリートの応力状態は一軸圧縮試験とはほど遠い状態となる。

小柳ら<sup>73)</sup> は、断面  $7.5 \times 7.5\text{cm}$ 、高さ 7.5、15、30、45cm ( $H/D = 1, 2, 4, 6$ ) の横打ち試験体を用いた圧縮実験を行った。但し、端面摩擦を有し、ひずみ測定長を  $(H - 2)$  cm としている。実験結果によれば、試験体の崩壊までの吸収エネルギー (荷重-変位曲線下の面積) が、試験体高さの影響をほとんど受けないことから、圧縮破壊は、コンクリート試験体内部のある特定の領域で生じているものと推測されるとしている (図-1.2.12 参照)。また、 $H/D=4$  の試験体の荷重-変位曲線を基準とし、図-1.2.13 の考え方にに基づき、 $H/D = 2$  および 6 の荷重-変位曲線を推定した (図 3.3.7 参照)。ここで、 $H/D=1$  の試験体については、端面摩擦が有るため、この考察からは除外してある。モルタルおよび鋼繊維補強コンクリートにおいても、図-1.2.14 と同様な結果を得ている。

小阪ら<sup>74)</sup> は、断面  $\phi 10\text{cm}$ 、高さ 20、30cm ( $H/D=2, 3$ ) の縦打ち試験体を用いた圧縮実験を行った。但し、端面摩擦を有し、ひずみ測定長は  $(H - 1.8)$  cm としている。ひずみの測定方法を図-1.2.15 に、実験結果の例を図-1.2.16 (a) および (b) に示す。図 (a) によれば、 $H/D=2$  の試験体では、 $\varepsilon = (4 \sim 5) \times 10^{-3}$  以上になると試験体のひずみ分布にかなりの乱れが生じる。図 (b) によれば、 $H/D=3$  の試験体では、 $H/D=2$  の場合に比べて、局所的なひずみの集中が著しく、破壊が進展しなかった AB 領域では、ひずみのもどり現象が現れている。

さらに、小阪ら<sup>75)</sup> は、断面  $10 \times 10\text{cm}$ 、高さ 10、12.5、20cm ( $H/D=1, 1.25, 2$ ) の縦打ち試験体を用いた一軸並びに三軸圧縮試験を行った。但し、載荷端面には、減摩材 (ポリプロピレンシート+シリコングリス) を挿入し、ひずみ測定には、応力上昇域ではワイ

ヤーストレインゲージ (W.S.G.) を、応力下降域では載荷板間の変位計を用いている。一軸圧縮試験体の破壊状況 (図-1.2.17 参照) によれば、 $H/D=1$  の試験体がほぼ全域にわたって破壊しているのに対し、 $H/D=2$  の試験体では、破壊が打込み上部に集中している。小阪らは、 $H/D$  の異なる試験体の応力-平均ひずみ関係を推定するため、仮想破壊域モデルを提案した (図-1.2.18 参照)。ここでは、仮想破壊域の応力-ひずみ関係が  $H/D=1$  の試験体のそれと一致し、非破壊域の応力-ひずみ関係は、最大応力以後、初期剛性を有する除荷曲線上を戻ると仮定している。仮想破壊域長さ  $\ell_p$  を試験体の断面辺長  $D$  とした場合 ( $\ell_p = D$ ) の推定状況を図-1.2.19 に示す。他の強度レベル、低側圧三軸圧縮時の実験結果に対しても比較的良い推定値が得られたと報告されている。

Mier<sup>76)</sup> は、断面  $10 \times 10\text{cm}$ 、高さ 5、10、20cm ( $H/D=0.5, 1, 2$ ) の横打ち試験体 (直方体より切り出し) を用いた一軸並びに三軸圧縮実験を行った。但し、載荷には、ブラシ型載荷板を用いて載荷面を減摩し、ひずみ測定には、応力上昇域では W.S.G. を、応力下降域では載荷板間に取り付けた変位計を用いている。実験によれば、応力上昇域の曲線形状および最大応力の値は、試験体の  $H/D$  に拘らずほぼ等しいが、軟化域の曲線は、試験体の  $H/D$  が小さいほど緩やかである (図-1.2.20 参照)。軟化域の応力-変形曲線を比較した図-1.2.21 によれば、最大応力以後の試験体全体の変形量は、試験体の  $H/D$  に拘らずほぼ等しい。

Bazant<sup>77)</sup> は、部材の一軸載荷実験で得られるデータから、ひずみ軟化域の応力-ひずみ関係を特定するため、ひずみの局所化を考慮した Series-coupling モデルを提案している。考え方は、小阪らのモデル<sup>75)</sup> と同様であり、式で示せば、以下のようになる。

$$\bar{\varepsilon} = f \cdot \varepsilon + (1 - f) \varepsilon_u \quad \dots \dots (1.2.2)$$

ここに、 $\bar{\varepsilon}$ : 平均ひずみ、 $\varepsilon$ : ひずみ軟化領域の (真の) ひずみ、  
 $\varepsilon_u$ : 除荷領域のひずみ、  
 $f$ : ひずみ軟化領域 (一様) の部材全体に対する容積比  
(断面が一定の場合、仮想破壊域  $\ell_p$  / 部材長  $L$ )

ひずみ軟化領域のひずみと (true post-peak strain in the loading) は、上式を変形して実験データ  $\bar{\varepsilon}$  を代入すれば、容易に計算できる。図-1.2.22 は、Mier の実験データ<sup>76)</sup> に対し、本提案モデルを適用した例である。部材長  $L=10, 20, 40\text{cm}$  の場合に対し、仮想破壊域  $\ell_p=5\text{cm}$  と仮定している。また、実験データは存在しないが、 $L=40\text{cm}$  の場合には、snapback の現象が得られている。

吉川ら<sup>78)</sup> は、一軸圧縮荷重下の部材について、部材長に対する軟化領域長さの比 ( $\Omega$ , 変動) を用いて、部材の平均応力-ひずみ関係式を定式化した (図-1.2.23 参照)。本モデルでは、軟化領域 (載荷状態) の応力-ひずみ関係式として Popovics 式を用い、軟化領域長さ ( $\Omega L$ ) の最小値を骨材最大寸法 ( $G$ ) の  $n$  倍として与えるものとしている。Mier の



実験データ<sup>76)</sup>に対し、 $n=3$ 、即ち、 $\Omega L=3 \cdot G$ と仮定して、応力-ひずみ曲線を推定している(図-1.2.24参照)。

ここで、小阪ら<sup>75)</sup>の仮想破壊域モデルでは、破壊領域長さを試験体の断面長(D)としているから、 $\Omega L=D$ (一定)に相当する。以上のように、破壊領域長さ $\Omega L (=l_p)$ を表す指標として、断面寸法(D)、骨材最大径(G)、中立軸深さ<sup>79)</sup>などが考えられているが、詳細は今後の検討を要する。

## b) コンファインドコンクリート

### i) ひずみ分布の実測例

中塚ら<sup>80)</sup>は、かぶりのない $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 試験体を用いて、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ測定域の影響を調べた。図-1.2.25によれば、ひずみの測定長が小さいほど、応力-ひずみ曲線はなだらかな形状になる。本論文では、試験体のほぼ全長(27cm、記号1/1)のデータを用いて、応力-ひずみ曲線の数式表示を行っている。

小阪ら<sup>81)</sup>は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体を用いて、コンファインドコンクリートの横ひずみ(鋼輪のひずみ)分布を調べた(図-1.2.26および1.2.27参照)。载荷には、減摩材(ポリプロピレンシート+シリコングリス)を用いている。H/D=2の試験体(図-1.2.27参照)では、破壊の進行しない領域に配置された横補強筋が降伏に至らず、その横拘束能力が発揮されていないことが分かる。

入江ら<sup>82)</sup>は、横補強筋量が異なる場合の正方形断面RC柱試験体の軸ひずみ分布の変遷を調べ、横補強筋が疎に配置された試験体では、ピーク応力以後、ひずみの局所化が急速に進行すると報告している。実験結果の例を図-1.2.28に示す。

佐藤ら<sup>83)</sup>は、試験体寸法・形状(D=11~61cm、H/D=3~12)が異なるアンボンド型充填鋼管コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、内部の充填コンクリートのひずみ分布を調べた。実測結果の一例を図-1.2.29に示す。本実験における充填コンクリートの終局破壊モードがすべり面の形成にあることに着目して、応力-平均ひずみ関係の推定式を導いている。

森下ら<sup>84)</sup>は、一軸圧縮を受ける矩形断面RC柱の断面形状(図-1.2.30参照)と圧縮破壊領域の関係を調べた。軸ひずみが1%を超える部分の範囲は、耐力低下に伴って増加し、その割合は、断面のコア部の幅厚比(D/B)が大きいほど、また、横補強筋量( $P_v$ )が多いほど大きいと報告している(図-1.2.31参照)。

### ii) 破壊領域モデルの適用

加藤ら<sup>85)</sup>は、RC柱試験体の全域の軸ひずみから、破壊領域の軸ひずみを推定し、RC柱の荷重-ひずみ関係の数式モデルを導いた。破壊領域の応力-ひずみ関係を求めるに際しては、以下の仮定を設けた(図-1.2.32参照)。すなわち、i) 破壊領域の長さは、破壊状況の観察に基づき、試験体断面の辺長(D=15cm)と等しい、ii) 応力上昇域の曲線は、破壊領域の内外で等しい、およびiii) 破壊領域外の除荷剛性は、最大応力の1/3の時点の割線剛性とする。

畑中ら<sup>79)</sup>は、低側圧三軸圧縮下のコンクリート試験体の破壊領域長さ( $l_p$ )に及ぼす側圧の大きさの影響を調べた。低側圧三軸圧縮実験は、 $\phi 10\text{cm}$ の低強度鋼輪を有する円柱試験体を用いて行っている。 $l_p$ の値は既報<sup>75)</sup>で提案した仮想破壊域モデルの概念に基づいて求め、破壊領域の応力-ひずみ曲線は、H/D=1の試験体のそれと一致するものと仮定した。その結果、 $l_p$ の値は側圧の増大に伴って長くなる傾向があると報告している(図-1.2.33参照)。

その他にも、類似の適用例として、筆者ら<sup>2)</sup>およびAvilesら<sup>86)</sup>などの研究が見られる。

## c) まとめ

以上の知見を踏まえ、コンクリートの圧縮特性に及ぼす試験体形状の影響についてまとめてみると、表-1.2.2のようになる。

一軸圧縮下のプレーンおよびコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体形状の影響は、試験体全域(L)を破壊領域( $l_p$ )と非破壊領域(L- $l_p$ )の2領域に分割して考える簡単なモデル化でほぼ取り扱うことができそうである。但し、 $l_p$ の値に及ぼす各種要因の影響、とくに、破壊モード(圧壊、せん断すべりなど)、ひずみ勾配<sup>87)</sup>および横拘束力の影響については、今後、データを増して検討する必要がある。また、以上のようなひずみ軟化域における圧縮破壊の局所化を解析的にシミュレートするため、破壊力学的なアプローチの発展が望まれる。

## (3) 鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊性状における寸法効果

RC部材の曲げ破壊性状における寸法効果に関する研究報告を年代順に文献<sup>88)~98)</sup>に示す。なお、既往の研究については、既に日本コンクリート工学協会の研究委員会報告書においていくつかのレビューがなされている。ここでは、これらの内容を参照・引用しながら、比較的新しい研究報告を中心に紹介する。ただし、これまでのところ、部材の曲げ破壊挙動の寸法効果と繰返し载荷との関係に関する報告は見当たらないため、ここでは、主に単調载荷時の寸法効果について考察する。



### 1) 鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力

曲げ破壊する RC 部材では、最大耐力における寸法効果は一般に小さく（図-1.2.34、表-1.2.3 参照）、設計上は無視し得るものと考えられている<sup>88), 90), 93), 95)</sup>。ちなみに、図-1.2.34 (b) 中の降伏耐力の差異は、使用した鉄筋の降伏強度の差異に依存している。曲げ耐力に寸法効果が生じにくいのは、通常の場合、曲げ部材は釣合鉄筋比以下で設計されており、部材の曲げ耐力が、寸法効果を生じにくいひずみ硬化材料である引張鉄筋の降伏で決定されるからである<sup>88)</sup>。

一方、図-1.2.35 (a) に示すように、極めて低鉄筋比の RC 梁の場合、すなわち、降伏荷重がひびわれ発生荷重を下回る場合には、RC 梁の耐力はひずみ軟化材料であるコンクリートの引張破壊で決定されるため、これに見合った（一般に、コンクリートの破壊力学の見地から説明される）寸法効果が生じることになる<sup>88), 91)</sup>。

### 2) 鉄筋コンクリート部材の曲げ変形

RC 梁の終局変形量については、寸法効果は無視できないことが指摘されている<sup>88), 90), 93), 94)</sup>。Hilerborg は、終局時の変形が圧縮側のコンクリートのひずみで決定されるのであれば、塑性ヒンジの回転能には寸法効果が存在することを指摘した。Bigaj らは、この点について実験的に調べ、図-1.2.36 の結果を得た。図によれば、RC 梁の最大荷重時の回転能は梁せいによって大きく異なっており<sup>96)</sup>、その影響は、引張鉄筋比が小さいほど顕著に現れている。また、この傾向は、前掲の図-1.2.34 の結果とも一致する。

曲げ引張破壊する部材の塑性回転能は、一般に引張鉄筋比が小さくなるにつれて向上する。しかし、鉄筋比が極めて小さく、ひびわれ発生後に変形がひびわれ近傍に局所化し、鉄筋が破断する場合には、曲げ耐力の項でも述べたように、主に無筋コンクリートとしての寸法効果が現れることが予測されている<sup>88)</sup>。

### 3) 寸法効果の原因

通常の曲げ部材は、釣合鉄筋比以下で設計されているため、引張鉄筋が降伏した後に圧縮側コンクリートが破壊して終局変形に至ることになる。すなわち、圧縮側コンクリートの終局挙動が支配的な要因となる。ここでは、曲げ部材の終局挙動の寸法効果に関わる要因を、コンクリートの圧縮挙動の寸法効果およびその他の要因に分けて取りまとめる。

#### a) コンクリートの圧縮挙動における寸法効果

プレーンコンクリートおよびコンファインドコンクリートの圧縮挙動の寸法効果については、すでに文献<sup>89)</sup>で詳しく報告されており、表-1.2.1 のように取りまとめられている。これらの要因以外にもブリージングに起因する高さ方向の強度分布などが考えられるが<sup>88)</sup>、この中で構造部材としての挙動を考える際に、とくに注目しておくべき要因は横補強筋の効果である。表中の横補強筋間隔の項にも記述されているように、「配筋が試験体寸法に相似の場合、試験体寸法が大きくなると横補強筋間隔の絶対量も大きくなるため（試験体の破壊はより脆性的となり）、寸法効果はより顕著になる」傾向がある。さらに、角形の横補強筋では、寸法が大きくなればそれだけ直線部分が長くなり、コアコンクリートに対する拘束効果は自ずと低下する<sup>97)</sup>。すなわち、コンファインドコンクリートの圧縮挙動における寸法効果は、内的（材料的）要因もさることながら、むしろ外的（構造的）要因に依存する部分が大きいといえよう。ただし、これらの点を考慮した、すなわち寸法効果則を組み込んだ応力-ひずみ関係の表示式は、調べた範囲では今のところ提案されていない。

Alca ら<sup>98)</sup>は、最近、圧縮鉄筋および横補強筋がない RC 梁に純曲げが作用する場合について、終局挙動の寸法効果を実験的に調べた<sup>99)</sup>。RC 梁の断面寸法は (15 × 30cm) ~ (33.5 × 68cm) で、コンクリートの圧縮強度は 510 ~ 920kgf/cm<sup>2</sup> である。彼らの実験結果および既往の研究結果を分析し、横補強筋のない単筋梁の曲げ終局挙動には寸法効果がほとんど存在しないことを指摘している。

#### b) その他の要因

曲げ部材の終局挙動を支配するのは、塑性ヒンジ部（破壊領域）の回転能とこの領域の広がり具合、すなわち変形の局所化の度合いにあるといえる。塑性ヒンジ部の回転性能における寸法効果は、前項 a) の情報が定量化されればほぼ予測が可能である。一方、塑性ヒンジ部の長さ (  $l_0$  ) に関しては、ひずみの局所化が必ずしもある一定のルールで生じるとの知見は得られておらず、実験的にはおよそ  $l_0 = (0.5 \sim 1.5) \cdot D$  (ここに、D: 梁せい) の範囲にあるとされている。筆者らによれば、RC 梁部材の  $l_0$  の値は梁のせん断スパン比 (すなわち、モーメント勾配) によって変化するが、試験体寸法の影響はほとんど受けなかった<sup>92)</sup>。ちなみに、圧縮下のコンクリートのひずみの局所化については、文献<sup>88), 89)</sup>に詳しくまとめられている。圧縮下のコンクリート試験体の形状効果 (広い意味では、寸法効果に含まれる) として取りまとめた例を表-1.2.2<sup>89)</sup>に示す。

#### 4) 曲げ変形挙動の予測

上田らは、曲げ破壊する RC 梁 (図-1.2.34、表-1.2.3 参照) の変形解析における寸法効果



の取扱いについて検討した<sup>94)</sup>。各寸法の RC 梁の圧縮部を模擬したコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線を数式表示し、これを用いて各寸法の RC 梁のモーメント-部材角関係を計算している(図-1.2.34 参照)。その結果、RC 梁の曲げ変形挙動における寸法効果は、曲げ圧縮部のコンクリートの寸法効果を正確に入力すれば、定量的にほぼ推定することが可能であると報告している。この計算では、断面幅  $b = 9.7\text{cm}$  の RC 梁を基準として他の寸法の RC 梁の挙動を予測している。また、塑性ヒンジの等価長さ(elp)としておよそ  $(1.5 \sim 2.0) \cdot D$  の値が得られており、この値は試験体寸法に拘わらず一定であると仮定されている。ちなみに、この elp 値は上記 3) 項で述べた実験上の破壊領域長さ( $l_p$ )より若干大きい。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、圧縮下のコンクリートの破壊性状、プレーン並びにコンファインドコンクリートの圧縮強度と圧縮破壊性状における寸法・形状効果に関する実験的研究、並びにこれらの成果に基づくプレーン並びにコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を作成するとともに、曲げとせん断を受ける鉄筋コンクリート梁の曲げ塑性変形性能における寸法効果に関する実験的研究を実施し、前述のコンファインドコンクリートにおける寸法効果に関する研究成果を用いて、鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊解析における寸法効果の取扱い方法について考察することにある。

本論文では、上記の研究目的を達成するために概説において述べた点を踏まえて、研究目的を各章別に以下に示す。

#### (1) 第2章の研究目的

コンクリートの破壊モデルの確立のための基礎資料を得るために、中心圧縮下のコンクリートの破壊パターンを整理・分類し、破壊面の角度と破壊領域の長さ(幅)の2つの着眼点から破壊パターンを考察するとともに、コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす試験体の寸法・形状効果について、筆者らの研究を中心に既往の研究を整理する。これらの知見を踏まえて、試験体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験を実施し、一軸並びに三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を実験的に調べるとともに、破壊後の試験体の破壊片の大きさを定量的に調べて、試験体内部のひび割れパターンの分析を行い、分析結果と破壊片分布に関する表示式を用いて、破壊時に単位クラック面で消費されるエネルギー量を概算する。

#### (2) 第3章の研究目的

本研究では、まずプレーンコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を実施し、コンクリート中の骨材の最大寸法をかえたり養生条件をかえた場合の、コンクリートの圧縮強度特性並びに高ひずみ領域までの応力-ひずみ曲線における寸法効果について明らかにするとともに、コンクリートの圧縮強度と応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響を考慮したプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を提案する。

RC 梁の等曲げモーメント区間の塑性域のモーメント-曲率関係は、曲げ圧縮部のコンクリートの応力-ひずみ特性の影響を受ける。試験体寸法が相違したり、打ち込まれたコンクリート中の骨材の最大寸法が相違すると、コンクリートの応力-ひずみ特性もこれら



の要因の影響を受けるため、曲げ塑性変形挙動にも試験体寸法の影響を受けることが予想される。鉄筋コンクリート梁のあばら筋は、梁の圧縮域のコンクリートを横拘束する効果があるため、梁の圧縮域のコンクリートの圧縮塑性変形挙動を知るためには、あばら筋の横拘束力を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を予め知っておく必要があるが、得られている知見は少ない。

プレーンコンクリートの研究に次いで、本研究では試験体寸法、高さ辺長比、養生条件、横拘束筋（帯筋）のピッチと降伏強度、並びにコンクリートの強度をかえたコンファインドコンクリートについて、一軸圧縮実験を実施し、これらの要因がコンファインドコンクリートの圧縮特性、とくに応力下降域を含めた応力-ひずみ曲線に及ぼす影響について実験的に検討し、コンファインドコンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果について考察する。

寸法効果を減らすために、縮小試験体のコンクリートとしてコンクリート中の骨材寸法を試験体寸法の縮小率に合わせたマイクロコンクリートを使用する実験がしばしば試みられている。一方、同じ帯筋比で横拘束しても帯筋の直径や形状をかえると、コンファインドコンクリートの圧縮特性は異なることが予想される。本研究では、これらの点についての知見を得るために、帯筋比を一定に保ったコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋形状、帯筋ピッチの絶対値、並びにコンクリートの骨材最大寸法の影響について実験的に調べる。

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式は多く提案されているものの、試験体寸法とコンクリート強度の影響も併せて考慮したものはほとんど見られない。本章の最後の研究では、これらのコンファインドコンクリートに関する実験から得られた実験データを用いて、寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を作成する。

### (3) 第4章の研究目的

本研究では、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の高強度コンクリート並びに  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートについて、RC 柱の応力-ひずみ挙動に及ぼす試験体寸法と帯筋形状、並びに帯筋の降伏強度の影響を実験的に考察し、前章のコンファインドコンクリートにおける寸法効果についての知見と比較・検討するとともに、これらの実験結果並びに新たに行った RC 円柱体の実験結果に基づき、RC 柱の圧縮破壊時吸収エネルギー（塑性ひずみエネルギー）能に及ぼす試験体寸法、帯筋のピッチと降伏強度、並びにコンクリート強度の影響について考察する。

### (4) 第5章の研究目的

曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の力学特性における寸法効果について調べた研究論文は少なく、得られた成果は少ない。

本章では、曲げ破壊が先行するように設計された曲げとせん断を受ける RC 梁の塑性ヒンジ領域の性状に及ぼす試験体寸法の影響について、あばら筋比、引張鉄筋比、並びにせん断スパン比をかえた柱型付き RC 単純梁の曲げ・せん断実験を実施し、最大モーメント断面近傍における曲率の分布性状を調べ、モーメント勾配の存在する RC 部材における破壊領域の広がりおよび破壊領域内の塑性変型性能について考察するとともに、これらの部材の塑性変形性能に及ぼす試験体寸法の影響について検討する。これらの研究成果に基づき、RC 梁の塑性変形挙動の解析における寸法効果の取り扱いについて、解析的に検討する。



## 参考文献

- 1) Koike, S. and Hatanaka, S. :Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete Under Compression, Proceedings of the Japan Congress on Materials Research, Vol.33, pp.55-61, 1990.4
- 2) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.2, pp.707-712, 1990.6
- 3) Blanks, R.F. and McNamara, C.C. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Journal of ACI, Vol.31, No.3, pp.280-303, Jan.-Feb. 1935
- 4) Neville, A.M. : The Influence of Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Structural Deviation, Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.23, pp.101-110, August 1956
- 5) Sangha, C.M. and Dhir, R.K. : Strength and Complete Stress-Strain Relationships for Concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Conditions, Materiaux et Constructions, Vol.5, No.30, pp.361-370, 1972
- 6) 谷川恭雄・山田和夫：コンクリートの圧縮強度の寸法効果について、日本建築学会論文報告集、No.262, pp.13-21, 1977.12
- 7) Sabnis, G.M. and Mirza, S.M. : Size Effects in Model Concretes?, Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division, Vol.105, No.ST 6, pp.1007-1020, June 1979
- 8) Kani, G.N.J. : How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?, Journal of ACI, Vol.64, No.12, pp.128-141, March 1967
- 9) Taylor, H.P.J. : Shear Strength of Large Beams, Proceedings of the ASCE, Journal of the Structural Division, ST11, pp.2473-2490, November 1972
- 10) 井畦瑞人・塩屋俊幸・野尻陽一・秋山暉：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文集、第348号/V-1(報告)、pp.175-184, 1984.8
- 11) 小池狭千朗：正負繰返し荷重を受ける RC はりの力学特性におよぼす供試体寸法の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.1361-1362, 昭和51年10月
- 12) 塩屋俊幸・長谷川俊昭：コンクリート構造物の寸法効果、コンクリート工学、Vol.30, No.8, pp.5-15, 1992.8
- 13) Department of the Interior : Cement and Concrete Investigations - Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965
- 14) 香田伸次・田中博幸・坂田昇・山崎庸行：中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C分冊(構造II)、pp.751-752, 1989.10
- 15) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.949-954, 1992
- 16) 小阪義夫・小池狭千朗：正負繰返し荷重を受ける軽量RCはりのせん断耐力と靱性に及ぼすあばら筋比と主筋比の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1365-1366, 1973.10
- 17) 六車熙・渡辺史夫・幅伊佐男・浅井政宏：横拘束コンクリートによるコンクリート系部材のじん性改善—片持ち梁によるじん性改善効果の確認、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.2529-2530, 1974.10
- 18) 小池狭千朗：正負繰返し荷重を受けるRCはりの力学特性におよぼす供試体寸法の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1361-1362, 1976.10
- 19) 小池狭千朗：純曲げを受けるRC梁の曲げ塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、No.29, pp.197-200, 1991.2
- 20) 小池狭千朗・畑中重光・奥谷伸幸：鉄筋コンクリート梁の塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.2, pp.27-32, 1989.6
- 21) 鈴木計夫・中塚信・吉田晴彦：円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性、材料、第34巻、第376号、pp.33-39, 1985
- 22) 大石哲哉・嶋津孝之・荒木秀夫・張冠華：実大無筋コンクリート柱の耐力と変形能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.513-518, 1993.6
- 23) Lejano, B.A., Adachi, H., Shirai, N., Nakanishi, M., Tanaka, K. and Yagenji, A. :Size Effect on Stress-Strain Characteristics of High Strength Reinforced Concrete Columns Confined by Lateral Reinforcement, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, Preprints, Sendai, Japan, pp.75-86, 1993.10
- 24) 破壊力学の応用研究委員会報告書：コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状、コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、pp.215-217, 1993.10
- 25) Gonnerman, H.F. : Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, Proceedings of ASTM, Vol.25, Part II, pp.237-250, 1925
- 26) Koike, S., Okufuji, K. and Kobayashi, N. : Size Effect on Inelastic Deformation Behavior and Expression for Stress-Strain Curves of Concrete, Cement Association of Japan, Review of the 41th General Meeting / Technical Session, pp.244-247, 1987
- 27) Roll, F. : Materials for Structural Models, Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division, Vol.94, No.ST 6, pp.1353-1381, June 1968
- 28) Hughes, B.P. and Chapman, G.P. : The Deformation of Concrete and Microconcrete in Compression and Tension with Particular Reference to Aggregate Size, Magazine of Concrete Research, Vol.18, No.54, pp.19-24, March 1966
- 29) Pons, G., Ramoda, S.A. and Maso, J.C. : Influence of the Loading History on Fracture Mechanics Parameters of Microconcrete: Effects of Low-Frequency Cyclic Loading, ACI Material Journal,



- No.85-M37, pp.341-346, Sep.-Oct. 1988
- 30) Alami, Z.Y., and Ferguson, P.M. : Accuracy of Models Used in Research on Reinforced Concrete, *Journal of ACI*, Vol.60, No.11, pp.1643-1664, November 1963
  - 31) 山田稔・河村廣・谷明勲・田原昇・中川博・真船敏和：コンクリートのスケールイフェクトに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.193-194, 1985.10
  - 32) 杉木六郎・福沢公夫：コンクリート構造物の模型実験、*コンクリートジャーナル*、Vol.6, No.6, pp.74-79, 1968.6
  - 33) 石塚秀教・森田司郎・藤井栄・小松勇二郎：マイクロコンクリートについての基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.467-468, 1984.10
  - 34) Gyengo, T. : Effect of Type of Test Specimen and Gradation of Aggregate on Compressive Strength of Concrete, *Journal of ACI*, Vol.34, pp.269-282, 1938
  - 35) Hollis, G.R. : The Effect of Shape and Size on the Compressive Strength of Concrete Test Specimens, Honours Project Report, University of Manchester, 1960
  - 36) Rajendran, S. : Effect of the Size of the Specimen on the Compressive Strength of Concrete, *RILEM Bulletin*, No.26, 1965.3
  - 37) Malhotra, N.M. : Are 4 × 8 Inch Concrete Cylinders as Good as 6 × 12 Inch Cylinder for Quality Control of Concrete ?, *Journal of ACI*, Vol.73-1, pp.33-36, January 1976
  - 38) Kim, J.K. and Eo, S.H. : Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks, *Magazine of Concrete Research*, Vol.42, No.153, pp.233-238, 1990.12
  - 39) Tucker, J.J. : Statistical Theory of the Effect of Dimensions and of Method of Loading upon the Modulus of Rupture of Beams, *Proceedings of the ASTM*, Vol.41, pp.1072-1088, 1941. : Effect of Dimensions of Specimens upon the Precision of Strength Data, *Proceedings of the ASTM*, Vol.45, pp.952-959, 1945
  - 40) 堀素夫：確率過程論によるコンクリートの曲げ破壊強度の解析、*応用物理*、Vol.27, No.11, pp.690-698, 1958
  - 41) 永松静也：コンクリートなどの破断現象についての確率過程理論による考察、日本建築学会論文報告集、No.200, pp.1-8, 1972
  - 42) Hobbs, D.W. : The Compressive Strength of Concrete : A Statistical Approach to Failure, *Magazine of Concrete Research*, Vol.24, No.80, pp.127-138, 1972.9
  - 43) Kamesuwara Rao, C.V.S. and Swamy, R.N. : A Statistical Theory for the Strength of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.4, No.4, pp.669-681, 1974.7
  - 44) 三橋博三：確率過程論に基づいたコンクリートの破壊現象の基礎的統一理論、東北大学学位論文、198pp., 1976
  - 45) 和泉正哲・三橋博三：確率過程理論に基づいたコンクリートの破壊理論、Part III、日本建築学会論文報告集、第310号、pp.1-9, 1984.12
  - 46) Tanigawa, Y., Yamada, K. and Yokoyama, Y.: Statistical Aspect of Strength of Cement Paste, *Proceedings of the Japan Congress on Materials Research*, Vol.20, pp.184-189, 1977.3
  - 47) 谷川恭雄・山田和夫・小阪義夫：セメントペーストおよびモルタルの強度の確率統計性質に関する一考察、*材料*、Vol.26, No.290, pp.73-78, 1977.11
  - 48) 破壊力学の応用研究委員会報告書：コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状、コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、pp.253-256, 1993.10
  - 49) 三橋博三・金鎮根・桐越一紀・成田健：コンクリートの破壊力学特性と寸法効果に関する実験的研究、*コンクリート工学論文集*、Vol.4, No.2, pp.57-67, 1993.7
  - 50) Powers, T.C. : Concrete Studies at the Bull. Run Dam, City of Portland, Oregon, *Journal of ACI*, Vol.25, pp.388-431, 1929
  - 51) Collier, I.I. : Variation of Compressive Strength of Concrete within the Water-Cement Ratio Law, *Proceedings of the ASTM*, Vol.30, Part 2, pp.731-750, 1930
  - 52) Walker, S. and Bloem, D.L. : Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete, *Journal of ACI*, Vol.57, No.3, pp.283-298, 1960.9
  - 53) Cordon, W.A. and Gillespie, H.A. : Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete, *Journal of ACI*, Vol.60, No.8, pp.1029-1050, 1963.8
  - 54) 笠井芳夫：供試体寸法とコンクリートの圧縮強度ならびに強度のバラツキとの関係、日本建築学会論文報告集、No.100, pp.1-12, 1964.7
  - 55) 破壊力学の応用研究委員会報告書：コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状、コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、pp.258-259, 1993.10
  - 56) 岡田清・六車熙 編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.374-381, 1981.11
  - 57) Neville, A.M. : Properties of Concrete, Pitman (Canada), 216pp., 1963 (後藤幸正・尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性、技報堂、211pp., 1979)
  - 58) ACI Committee 446 : Fracture Mechanics of Concrete : Concept, Models and Determination of Material Properties, *Fracture Mechanics of Concrete Structure*, Z.P. Bazant (ed.), Elsevier Applied Science, pp.1-140, 1992
  - 59) Mirza, M.S. : Size Effects in Plain and Structural Concrete, *Small Scale Modelling of Concrete Structures*, F.A. Noor and Boswell, L.F. (ed.), Elsevier Applied Science, pp.41-88, 1992
  - 60) 破壊力学の応用研究委員会報告書：コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状、コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、pp.227-228, 1993.10
  - 61) 森田司郎・藤井栄・石塚秀教・中西浩：鉄筋コンクリートの縮小モデル化に伴う寸法効果（その1、コンクリートの縮小化と寸法効果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.477-478, 1985.10



- 62) 小池狭千朗・畑中重光：形状・寸法の異なるコンファインド高強度コンクリートの圧縮特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.397-402, 1991.6
- 63) Sabnis, G.M. and Mirsa, S.M. : Size Effects in Model Concretes, Proceedings of the ASCE, Journal of the Structural Division, ST6, pp.1007-1020, 1979.6
- 64) Bloem, D. L. : Effect of Maximum Size of Aggregate on Strength of Concrete, National Sand and Gravel Assoc., Circular No.74, 1959.2
- 65) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：コンクリート強度に関する確率破壊モデルの適用性とその定量化、日本建築学会構造系論文報告集、第352号、pp.10-2, 1985
- 66) Bazant, Z.P. : Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal, Jour. Engng Mech. Div. Am. Soc. Civ. Engrs, 110, No.4, pp.518-535, 1984
- 67) 岡田清・六車熙 編：コンクリート工学ハンドブック、第9章 コンクリートの力学的性質、朝倉書店、pp.335-387, 1985.6
- 68) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、第1部 委員会報告 5.1節 プレーンコンクリートの基本的力学特性の寸法効果と破壊力学、コンクリート工学協会、pp.173-179, 1990.3
- 69) 靱性部材配筋詳細研究委員会報告書、第5章 材料強度と靱性および寸法効果、日本コンクリート工学協会、pp.135-160, 1990.5
- 70) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの力学特性に関する調査研究報告書、第9章 コンクリートの破壊の局所化と強度の寸法依存性、土木学会、pp.96-110, 1971.7
- 71) Bazant Z.P. : Instability, Ductility, and Size Effect in Stress-Softening Concrete, Proceedings of the ASCE, Journal of EM-Div, Vol.102, No.EH2, pp.331-344, 1976.4.
- 72) 友澤史紀、野口貴文：高強度・超高強度コンクリートの各種強度、応力・歪関係式一応力ひずみ曲線に及ぼす単位粗骨材容積・最大粗骨材寸法の影響一、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」平成2年度高強度コンクリート分科会報告書、4-4-11-1-1～12, 1991.3
- 73) 小柳治、六郷恵哲、内田裕市：コンクリートの圧縮靱性、セメント技術年報、Vol. 37, pp.268-271, 1983.5
- 74) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫、畑中重光：一軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究、セメント技術年報、Vol.37, pp.279-282, 1983.5
- 75) 小阪義夫、谷川恭雄、畑中重光：低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動、材料、Vol.34, No.376, pp.19-25, 1985
- 76) Van Mier, J.G.M. : Fracture of Concrete under Complex Stress, HERON, Vol.31, 90pp., 1986
- 77) Bazant, Z. P., Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Test by Series Coupling Model for Localization, Cement and Concrete Research, Vol.19, No.6, pp.973-977, 1989.
- 78) 吉川弘道・西村尚朋：局所化したひずみを有するコンクリートの構成則と安定条件、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.903-908, 1992.6
- 79) 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄：コンファインド高強度コンクリートの有効側圧と応力-ひずみ関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.37-42, 1991.6、
- 80) 中塚信・吉田晴彦・島崎敦志：円形補強筋をもつコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係について、セメント技術年報、Vol.36, pp.255-258, 1982.5
- 81) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光：構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.365-368, 1986.6
- 82) 入江正明・竹村淳一・前川宏一：横拘束を受ける矩形コンクリート柱の耐力以後のひずみ分布特性、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.340-341, 1987.9
- 83) 佐藤孝典・下戸芳寛・渡辺泰志：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮性状とその定式化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10, No.3, pp.355-360, 1988.6
- 84) 森下卓明・勅使川原正臣・窪田敏行：鉄筋コンクリートの圧縮靱性領域に関する実験的研究、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.13-20, 1988.3
- 85) 加藤大介・羽廣重夫：鉄筋コンクリート造角柱試験体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.1, No.2, pp.287-292, 1989.6
- 86) Aviles, N. B. and Haruyama, K. : Estimation of Ductility of RC Members under Load Reversals, Proc. of IO WCEE, Madrid, Spain, 1992.7.
- 87) 鈴木計夫・中塚信・鈴木勝博・横木光一郎：高剛性偏心圧縮試験方法と曲げ圧縮部コンクリートの力学特性について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1717-1720, 1978
- 88) 日本コンクリート工学協会：靱性部材配筋詳細研究委員会報告書 - 5.1 寸法効果、pp.135-146, 1990
- 89) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書 - 3.3 コンクリートの圧縮破壊性状の寸法効果・形状効果、pp.226-236, 1993
- 90) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書 - 3.4.1 曲げ挙動の寸法依存性、pp.238, 1993
- 91) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書 - 4.2.3 曲げを受けるRCはりの最小引張鉄筋比、pp.275-276, 1993
- 92) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書 - 3.7 わが国における寸法効果に関する実験の現状、pp.261-269, 1993
- 93) 小町実・岩瀬裕之・六郷恵哲・小柳治：RCはりの曲げ破壊における変形の局所化と寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.329-334, 1993.6
- 94) 上田英明・小池狭千朗・畑中重光：RC梁の曲げ破壊解析における寸法効果の取り扱いについて、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.335-340, 1994.6
- 95) Morita, S., Fujii, S. and Kondo, G. : Experimental Study on Size Effect in Concrete Structures, Size Effect in Concrete Structures, E & FN SPON, pp.27-46, 1994



- 96) Walraven, J.C. : Size Effects : Their Nature and Their Recognition in Building Codes', Size Effect in Concrete Structures, E & FN SPON, pp.375-394, 1994
- 97) 小池狭千朗, 畑中重光, 谷川恭雄 : プレーンおよびコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 471 号, pp.119-130, 1995.5
- 98) Alca, N., Alexander, S.D.B. and MacGregor, J.G. : Effect of Size on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams, ACI Structural Jour., Vol.94, No.1, pp.59-67, 1997

表-1.2.1 コンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する要因

|      | 要因             | 概要  |
|------|----------------|---|
| 内的要因 | ・水セメント比 (圧縮強度) | コンクリートの強度レベルによって、ピーク応力点および軟化域の負剛性の寸法依存性が異なる。                            |
|      | ・骨材寸法          | 粗骨材の最大寸法と試験体寸法の比が、軟化域の応力-ひずみ特性に及ぼす影響は十分に解明されていない。                       |
|      | ・養生湿度          | コンクリートの養生時の乾燥条件によって寸法効果が異なる。  |
|      | ・材料の偏り         | 型枠に接する表面近傍では、モルタル層が多く、強度が高くなる。より小さい寸法のものでは、表層部分の占める割合が大きく強度が高くなる。       |
| 外的要因 | ・載荷面の平滑度       | 試験体寸法が大きいほど平滑な端面を得ることが難しい。したがって、試験体端部が破壊するような試験条件下では載荷面の状態によって寸法効果が異なる。 |
|      | ・横補強筋間隔        | 配筋が試験体寸法に相似の場合、試験体寸法が大きくなると横補強筋間隔の絶対量も大きくなるため寸法効果はより顕著になる。              |
|      | ・横補強筋量         | 横補強筋が多い (拘束力が大きい) ほど、プレーンコンクリートの寸法効果が増幅されるとの報告もある。                      |

表-1.2.2 コンクリートの圧縮特性の形状効果に関する要因

| 要因            | 概要   |
|---------------|--|
| 端面摩擦          | H/D が 2 以下の試験体では、載荷面の摩擦の影響を受け、H/D の減少に伴い、双曲線的に強度が増大する。また靱性も増大する。   |
| ひずみ測定域 (破壊領域) | ・端面摩擦を減じて (破壊の局所化のため) 軟化域の応力-ひずみ曲線はひずみ測定域によって著しく異なる。<br>・軟化域における試験体全体の変形量は、試験体の H/D に拘らずほぼ等しい (H/D = 0.5 ~ 4 の範囲)。 |
| 横拘束力          | 横拘束圧が高いほど、破壊領域が広がる傾向がある。   |
| 断面形状          | 断面の幅厚比が大きいほど (正方形に近いほど) 破壊領域が広がる傾向がある。   |

表-1.2.3 RC 梁試験体の概要 (筆者)

| 梁試験体寸法        |     |            |                         | あばら筋間隔 : S | 引張鉄筋比 : P <sub>t</sub> (%) |
|---------------|-----|------------|-------------------------|------------|----------------------------|
| 断面 : b×h (cm) | 主筋径 | あばら筋径 (mm) | せん断スパン : l <sub>s</sub> |            |                            |
| 7.3 × 14.6    | D10 | φ 3.2      | 4h                      | b          | 1.4                        |
| 9.7 × 19.4    | D13 | φ 3.9      |                         |            |                            |
| 12.5 × 25.0   | D16 | φ 4.9      | 6h                      | b/2        | 2.1                        |
| 15.0 × 30.0   | D19 | φ 5.7      | 8h                      | b/4        | 2.8                        |
| 20.0 × 40.0   | D25 | φ 8.0      |                         |            |                            |



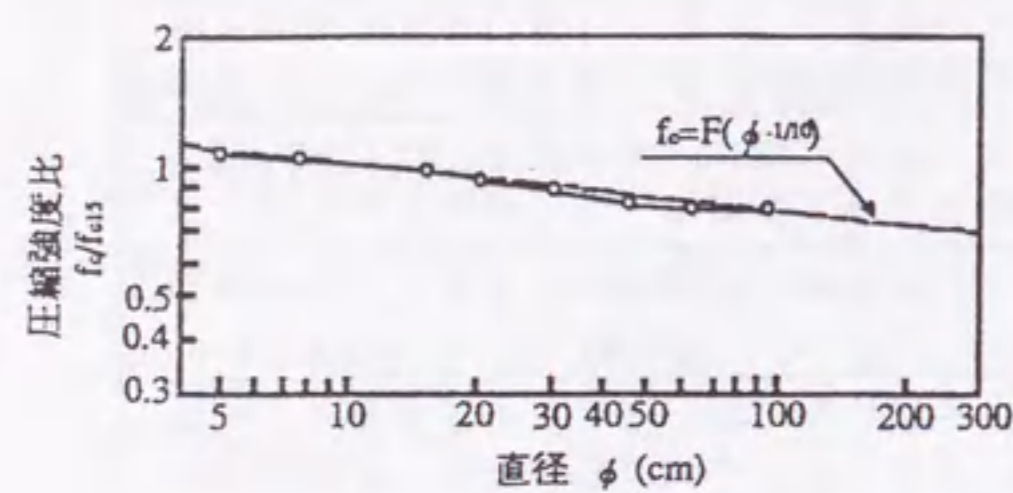


図-1.2.1 Blanksらによる圧縮強度の寸法効果

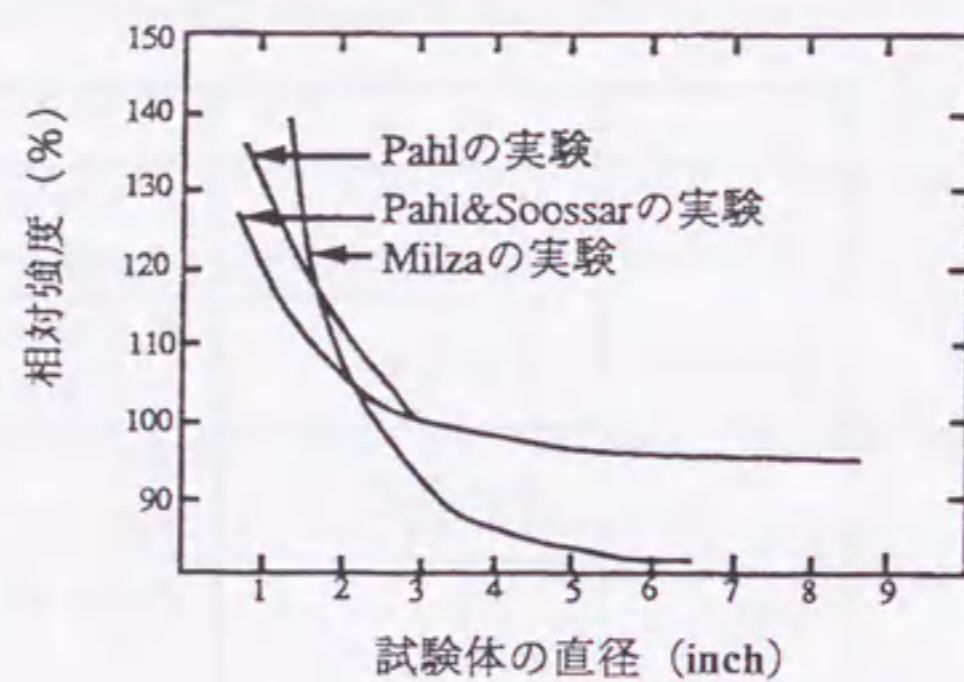


図-1.2.2 Pahl, Mirza による圧縮強度の寸法効果

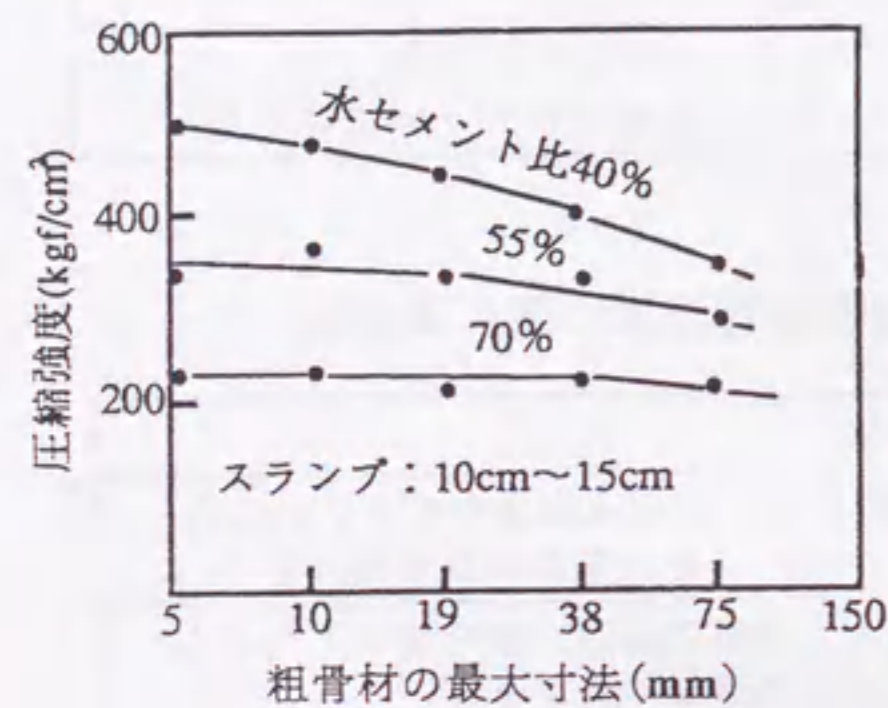


図-1.2.3 粗骨材の最大寸法の圧縮強度に与える影響

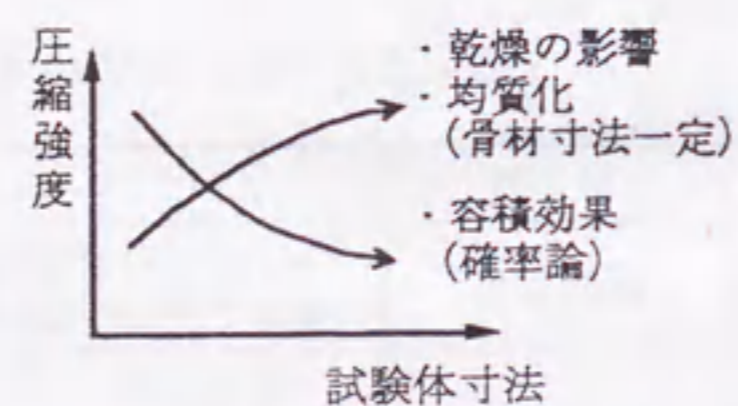


図-1.2.4 圧縮強度の寸法効果に及ぼす各種要因の影響

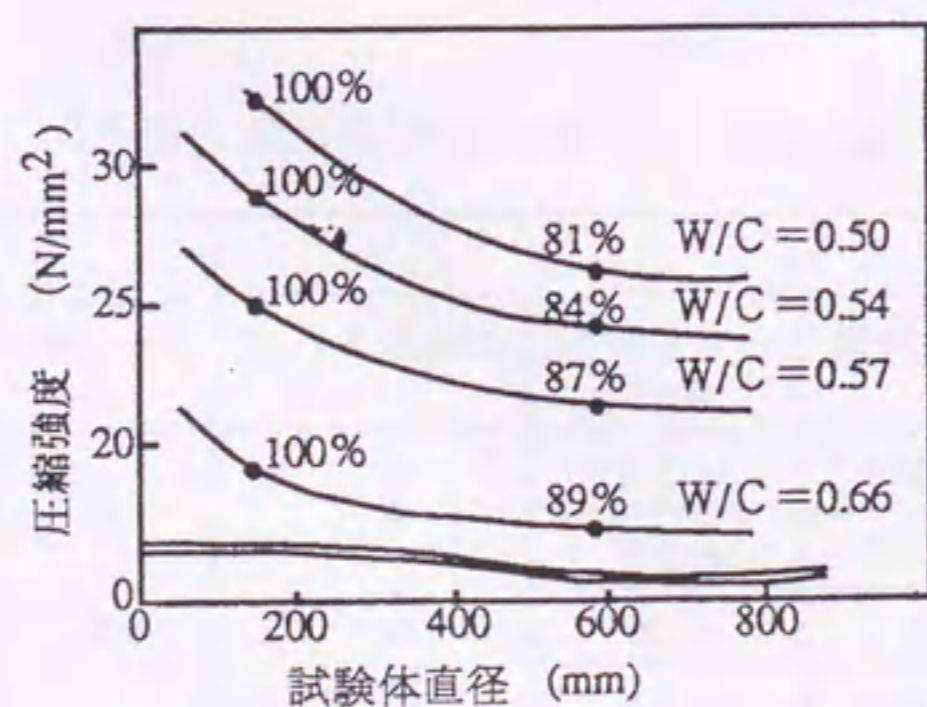


図-1.2.5 圧縮強度の寸法効果に及ぼす強度レベルの影響

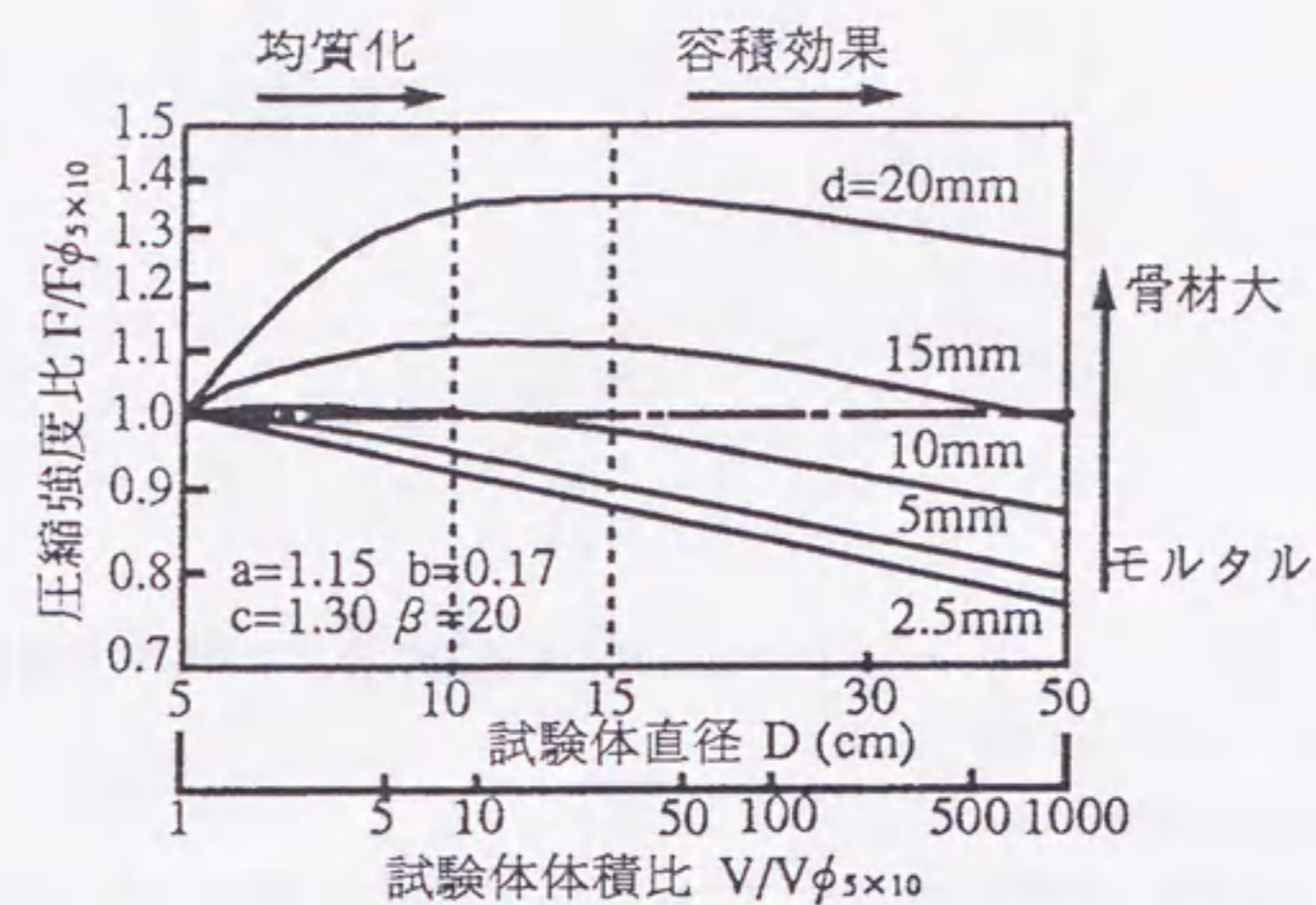


図-1.2.6 谷川らによる圧縮強度比の寸法効果の計算例

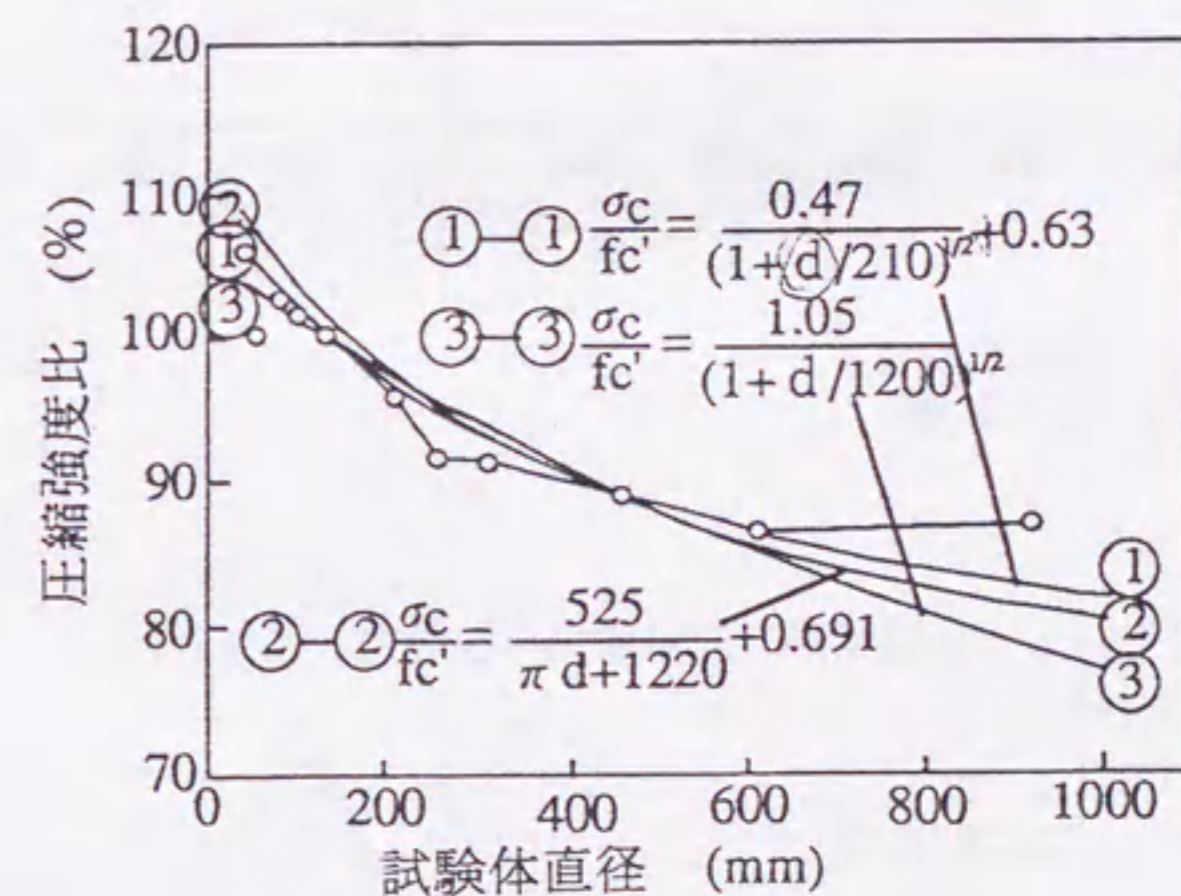


図-1.2.7 Kimらによる圧縮強度の寸法効果の推定



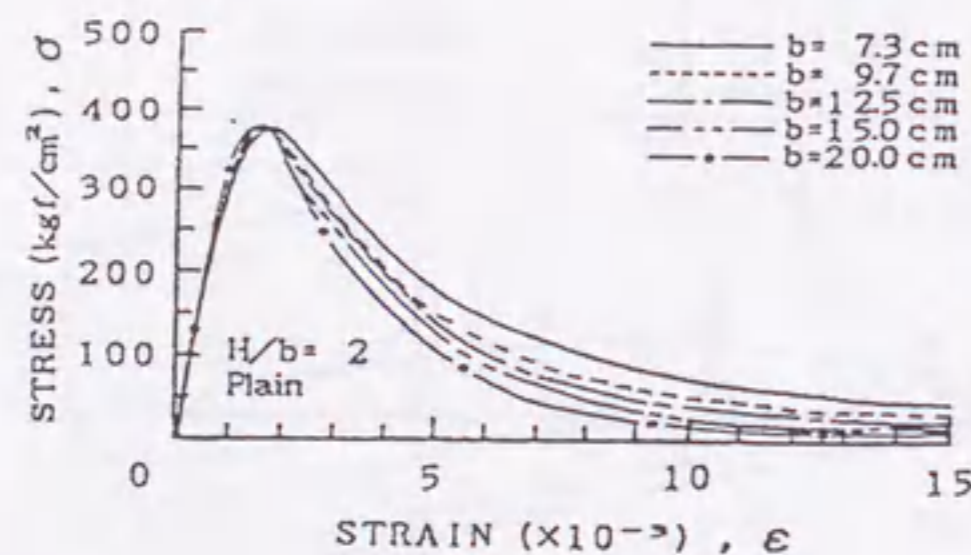


図-1.2.8 プレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響

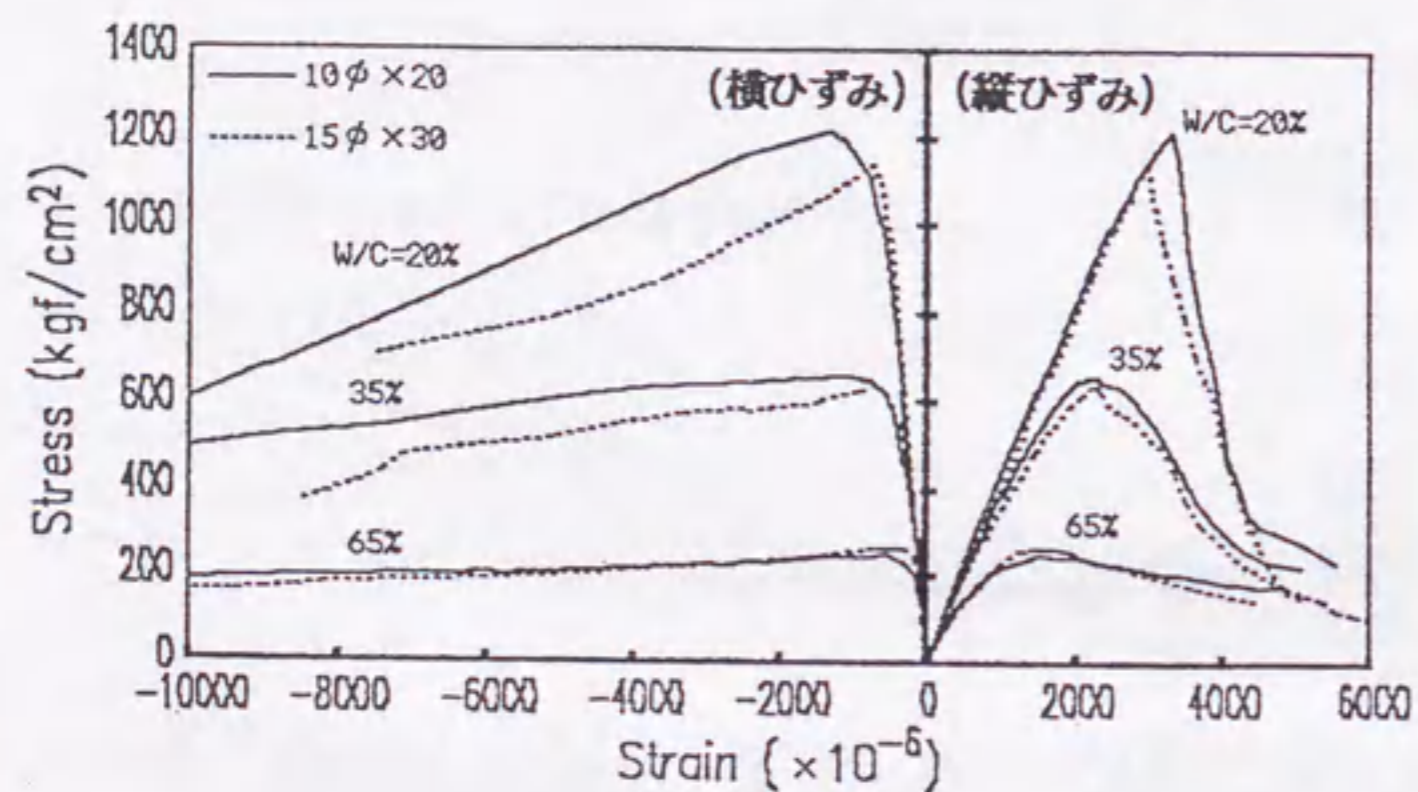


図-1.2.9 強度レベルの異なるプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響

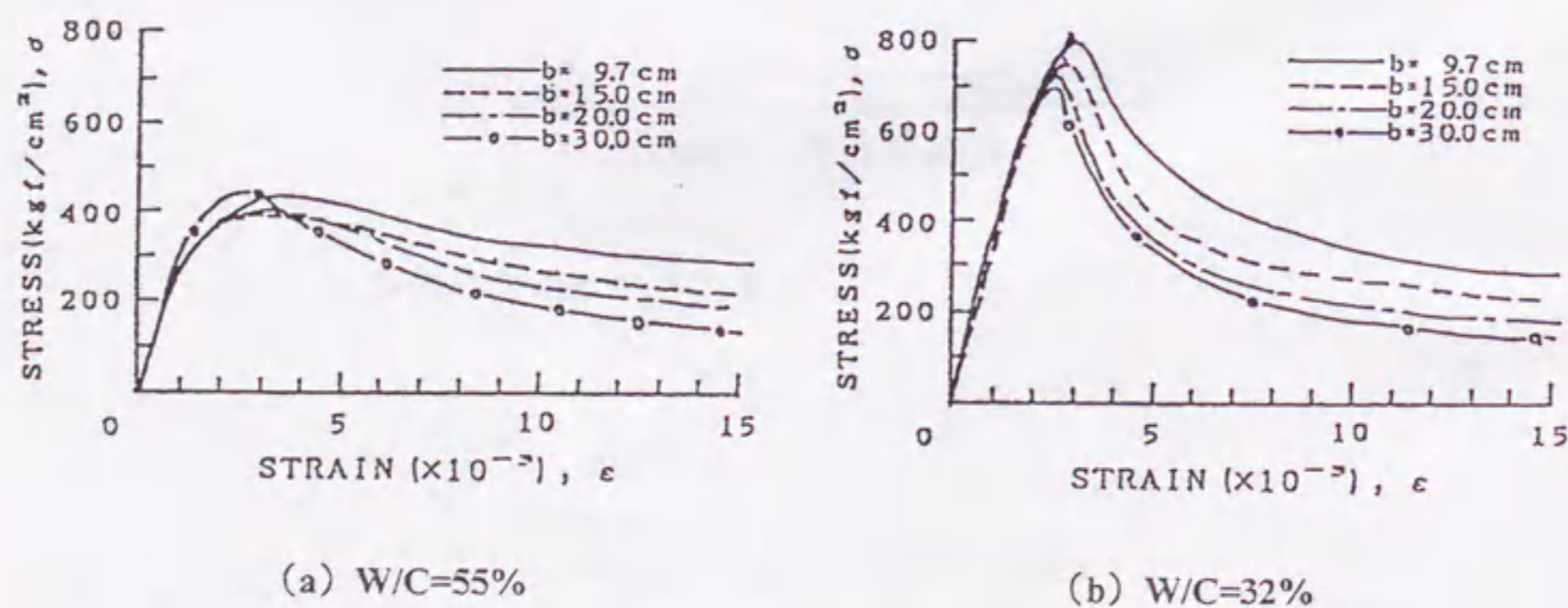


図-1.2.10 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響 (H/b = 2, S=b/4)

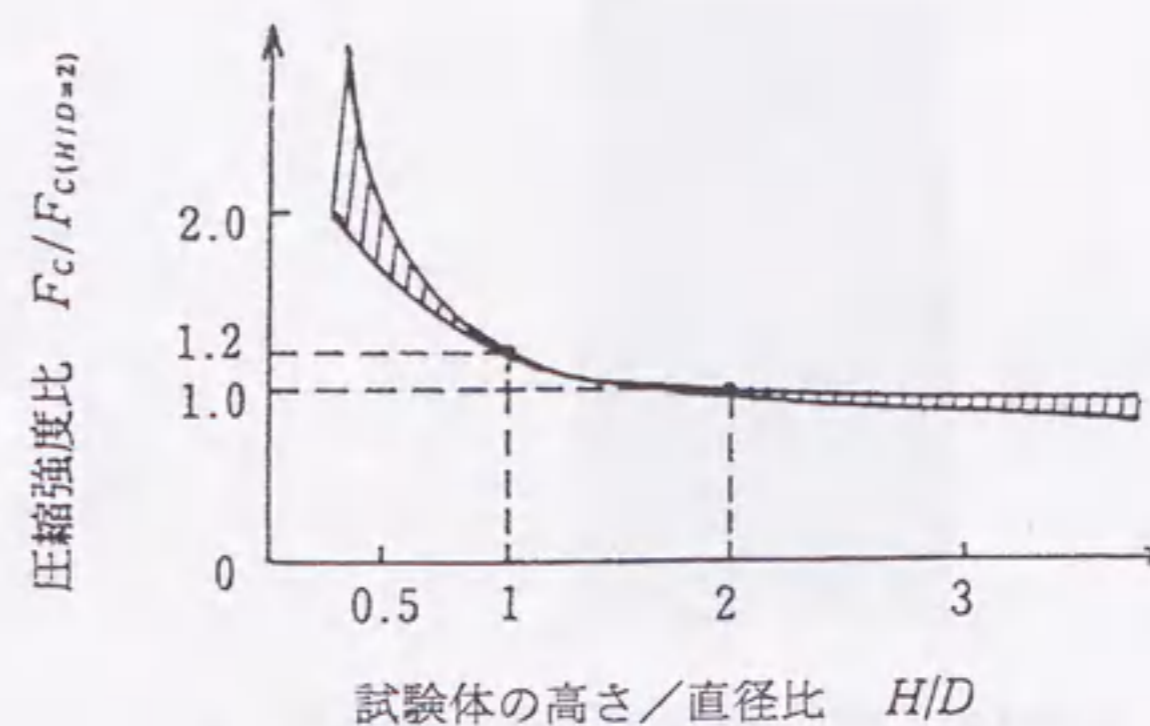


図-1.2.11 試験体の高さ/直径比 (H/D) と圧縮強度との関係 (端面摩擦有り)

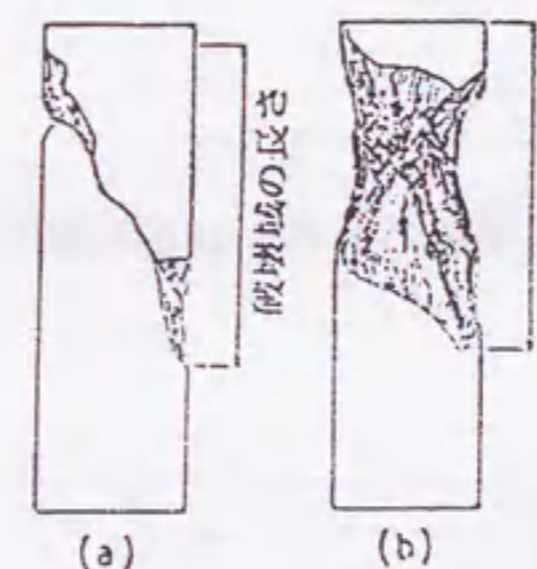


図-1.2.12 試験体の破壊状況 (端面摩擦有り)

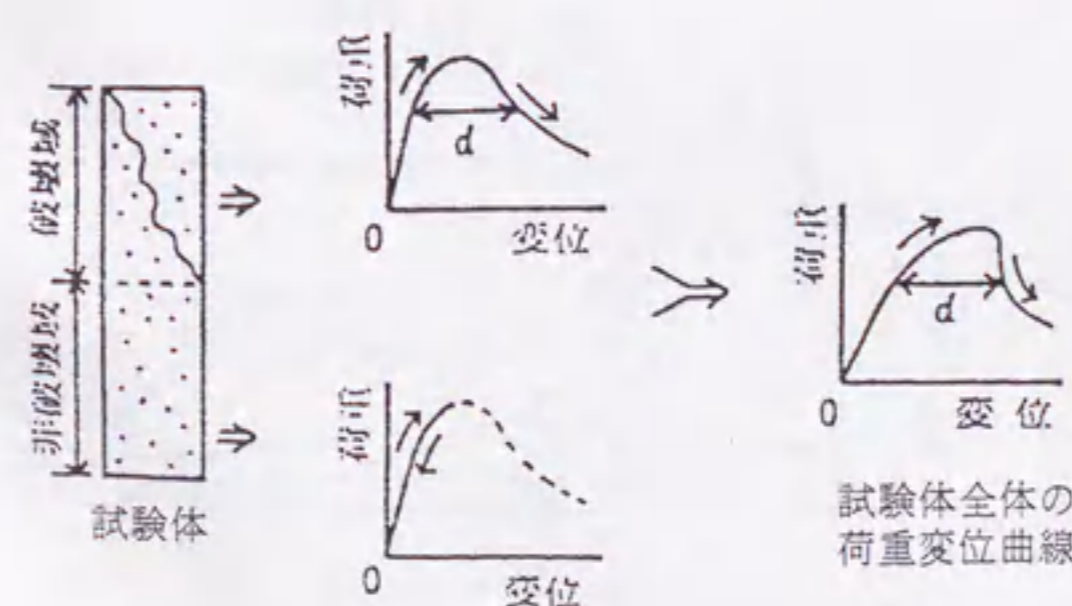


図-1.2.13 荷重-変位曲線の合成

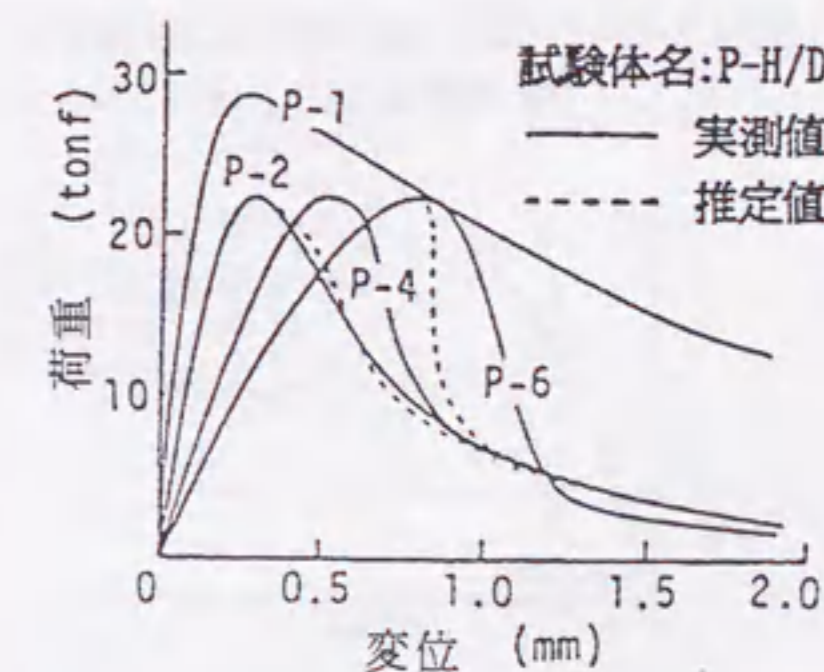


図-1.2.14 荷重-変位曲線の推定





図-1.2.15 ひずみの測定方法

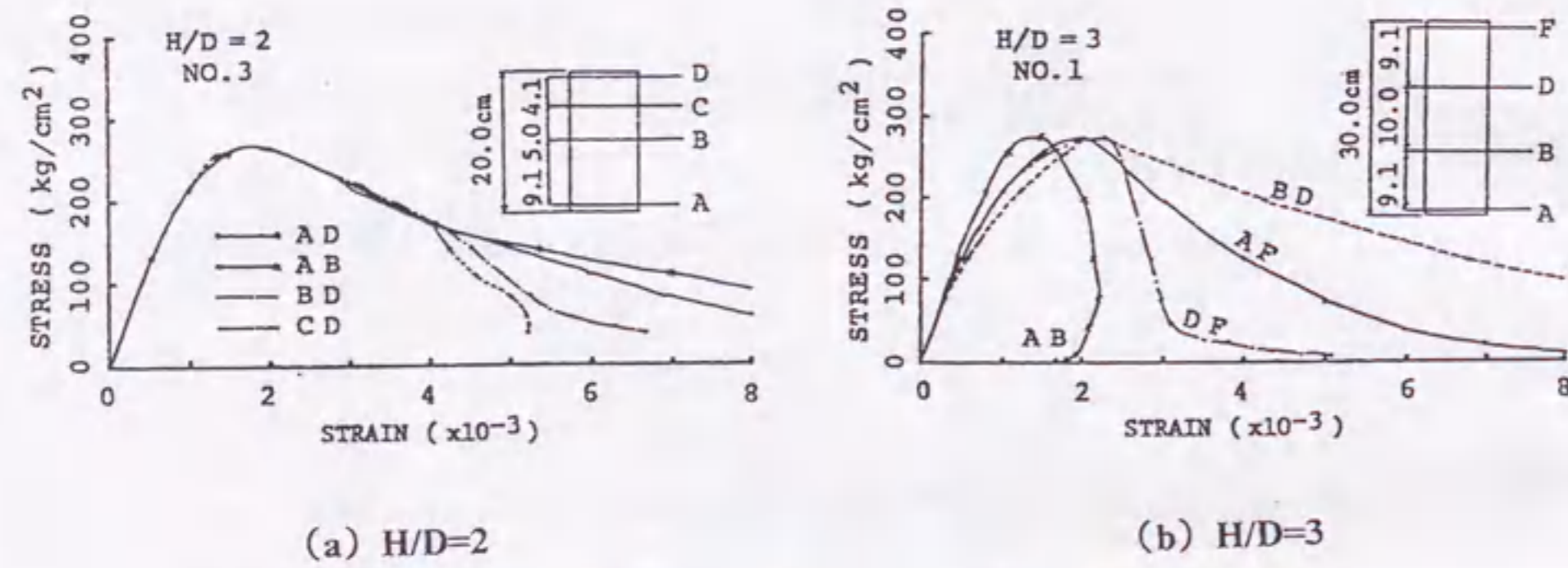


図-1.2.16 試験体の各領域の応力-ひずみ関係 (端面摩擦有り)

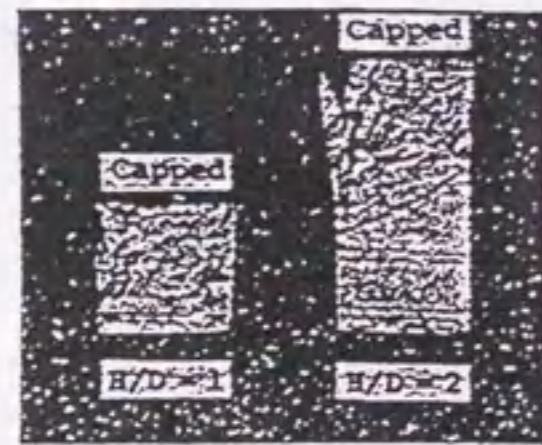


図-1.2.17 一軸圧縮試験体の破壊状況 (端面摩擦なし, 縦打ち)

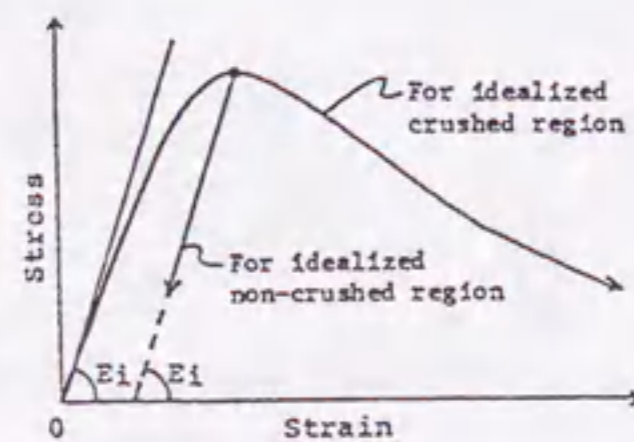


図-1.2.18 仮定破壊域モデル

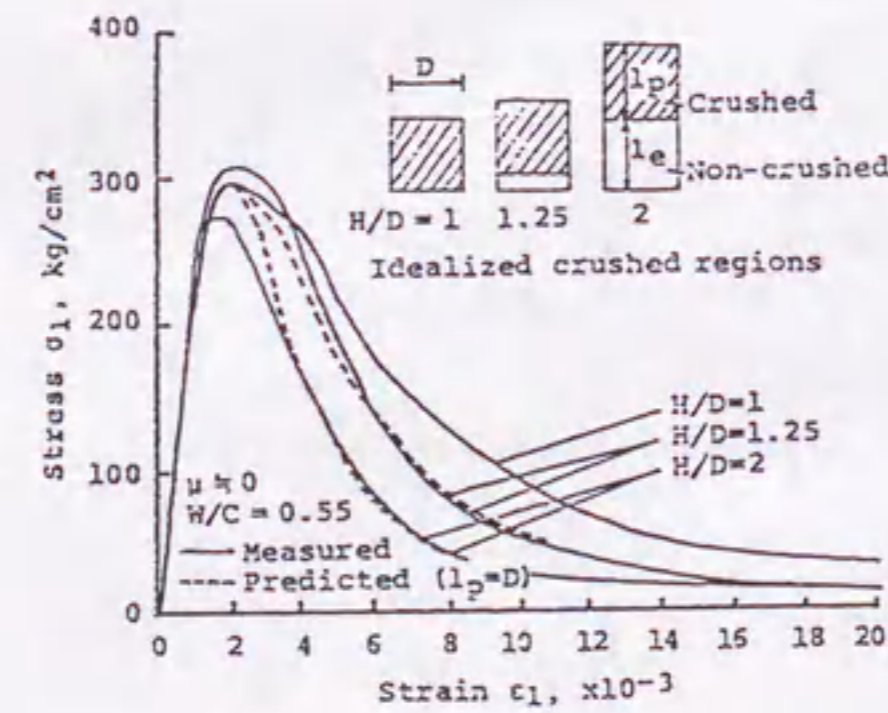


図-1.2.19 H/Dの異なる試験体の応力-ひずみ曲線の推定 (端面摩擦なし)

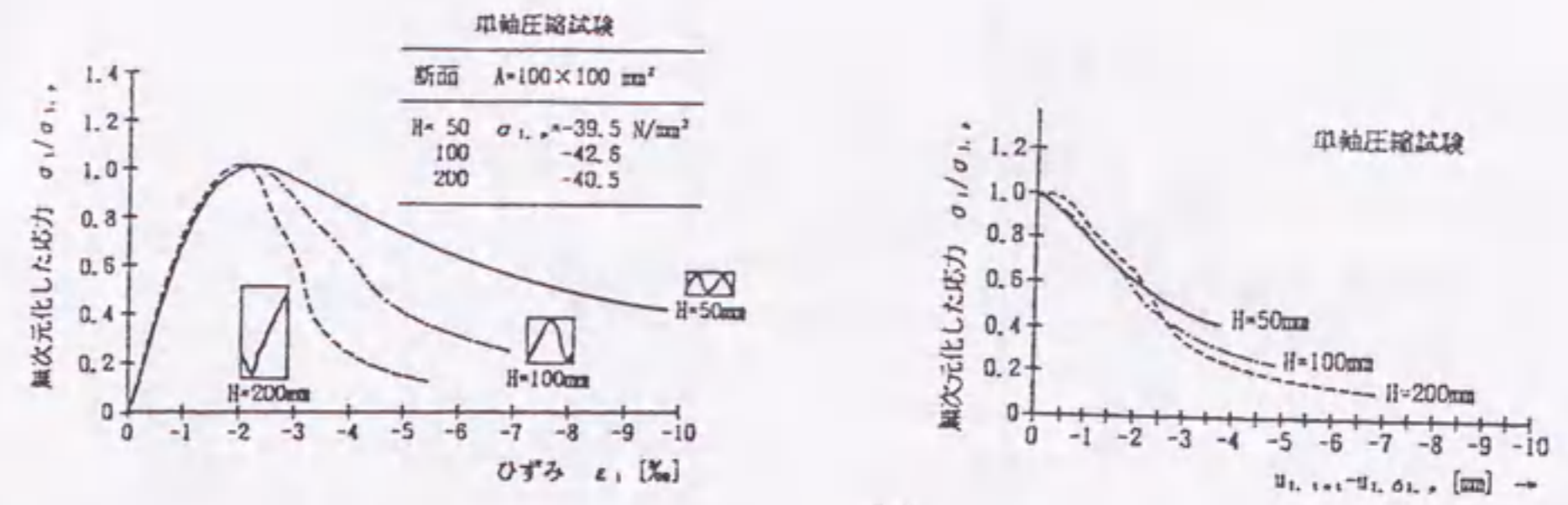


図-1.2.20 H/Dの異なる試験体の応力-ひずみ曲線 (端面摩擦なし)

図-1.2.21 高さHの異なる試験体の軟化域の応力-変形曲線 (端面摩擦なし)

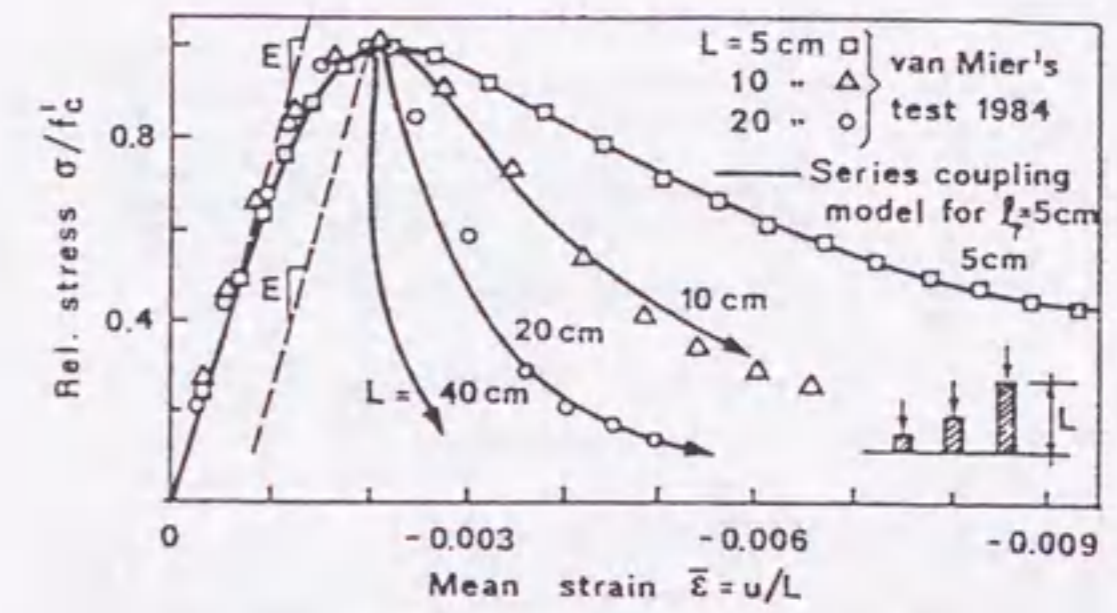


図-1.2.22 Mierの実験データの推定

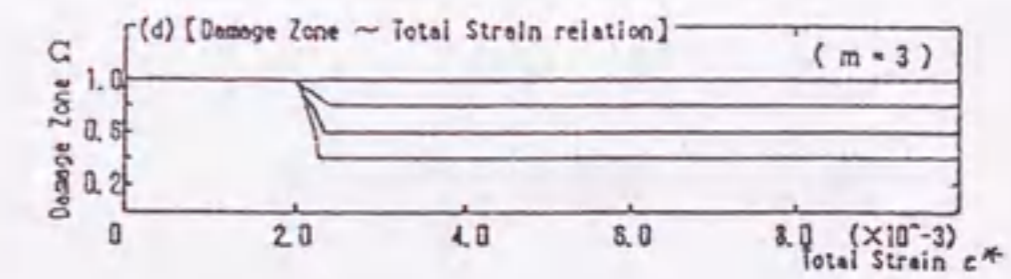


図-1.2.23 軟化領域長さ比 (Q) の変遷

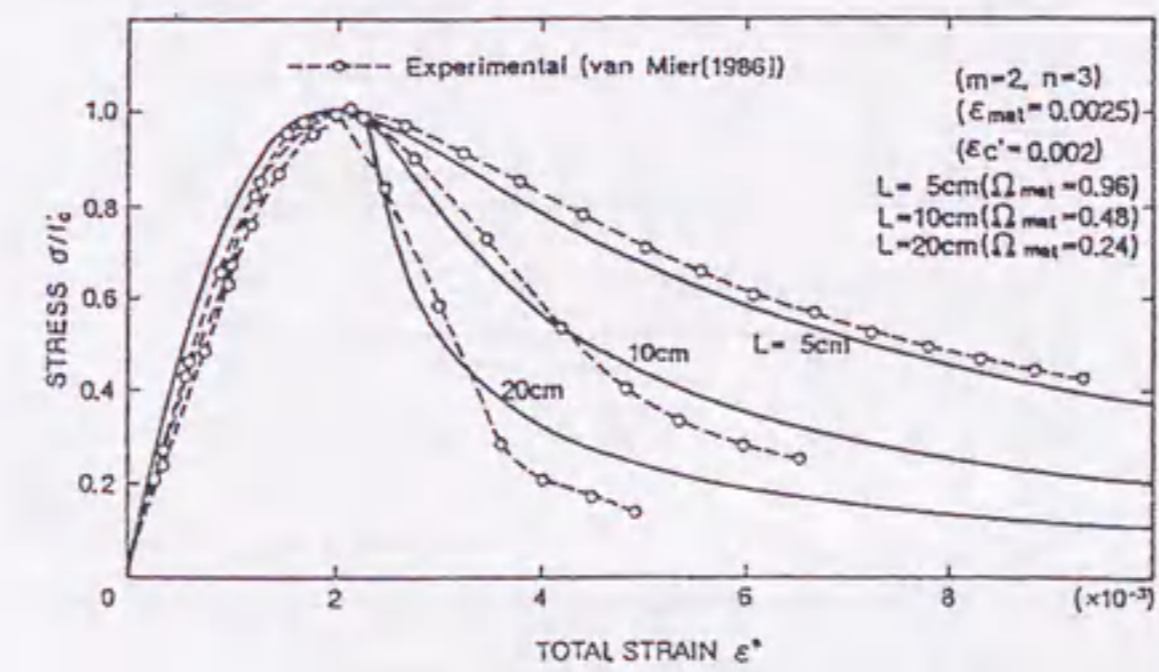


図-1.2.24 Mierの実験データの推定



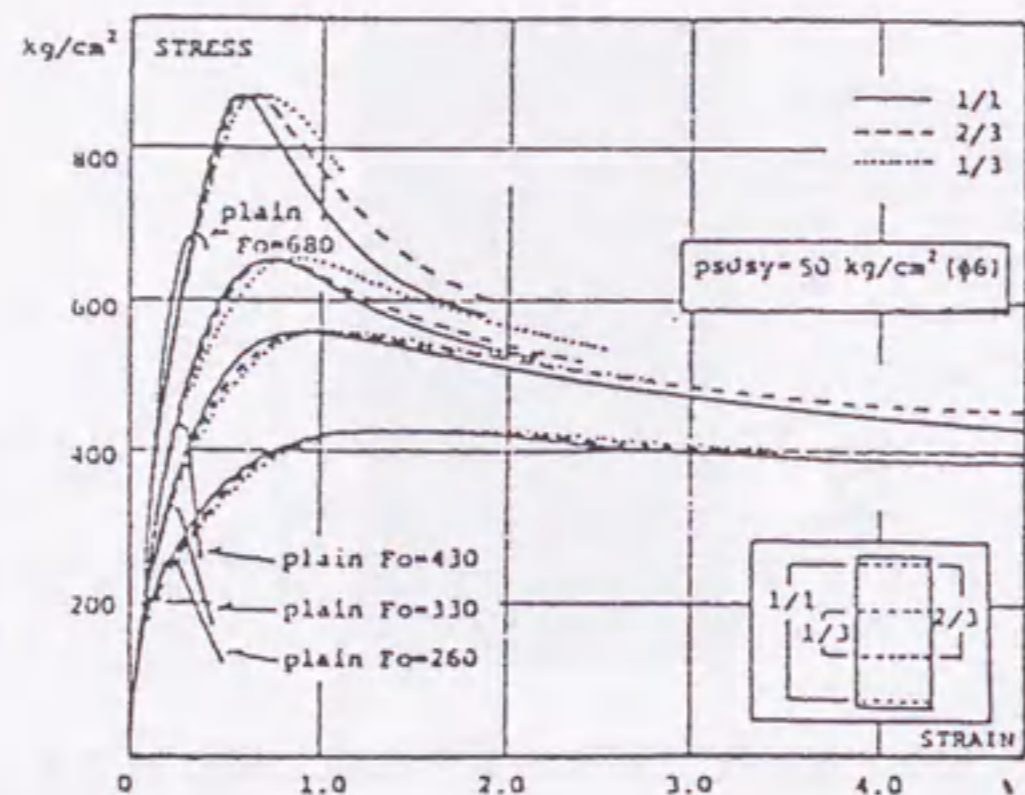


図-1.2.25 コンファインドコンクリート試験体の各区間の応力-ひずみ関係

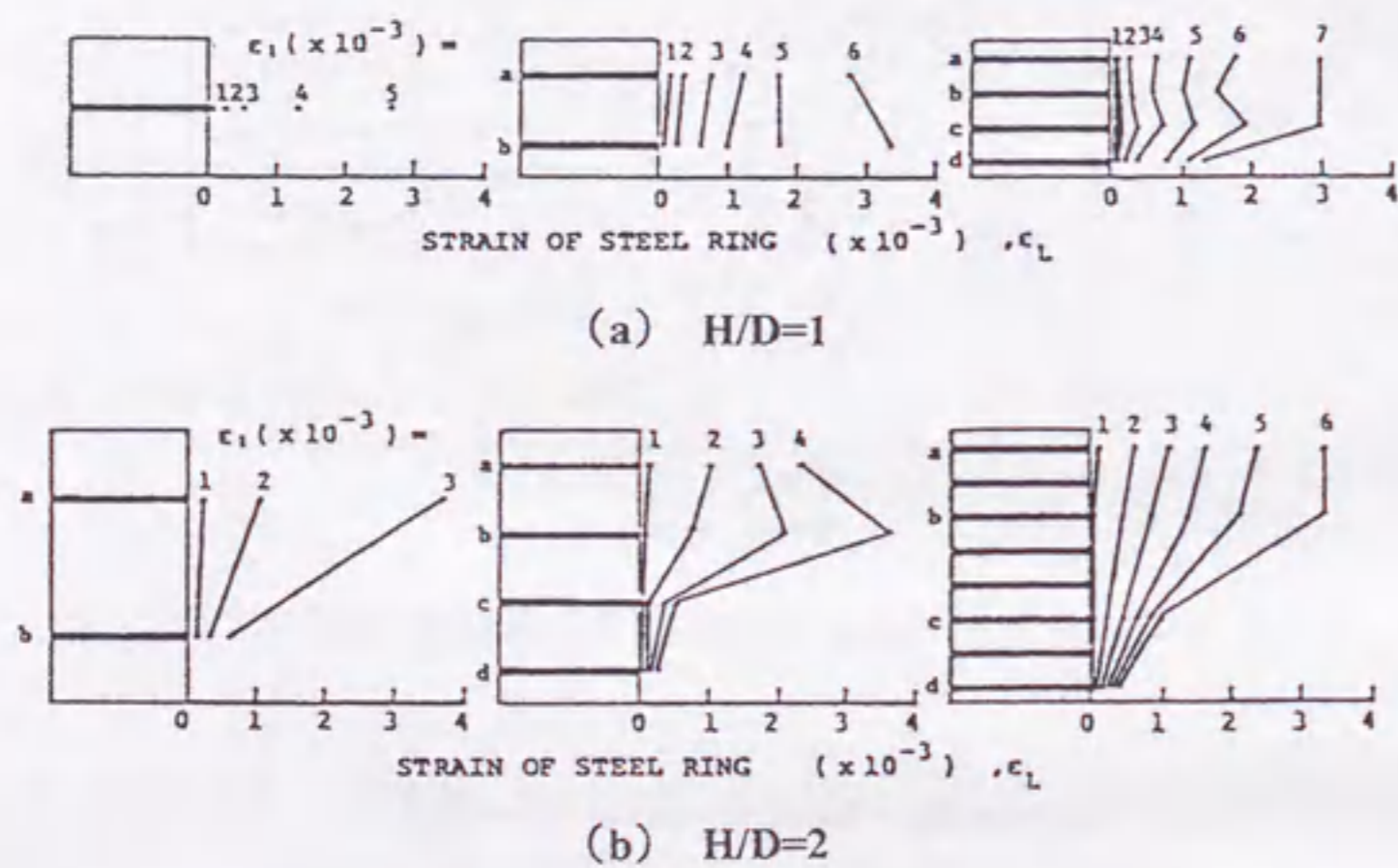


図-1.2.26 鋼輪のひずみ分布

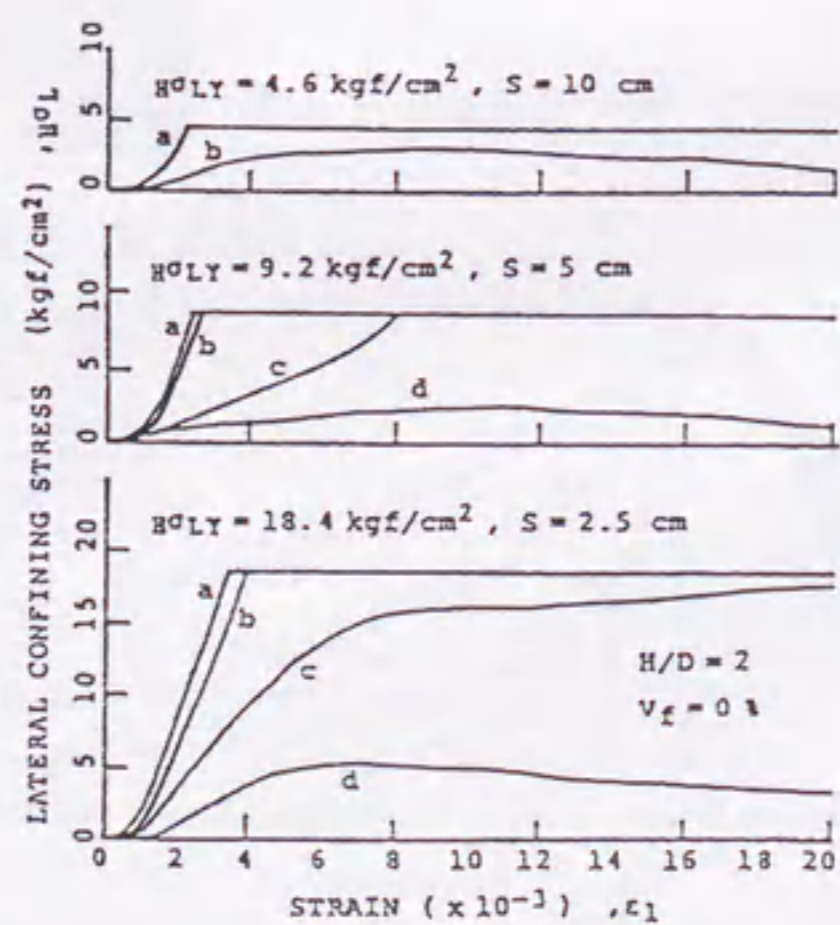


図-1.2.27 鋼輪の計算測圧 ( $H\sigma_L$ ) の推移 (H/D=2の場合)

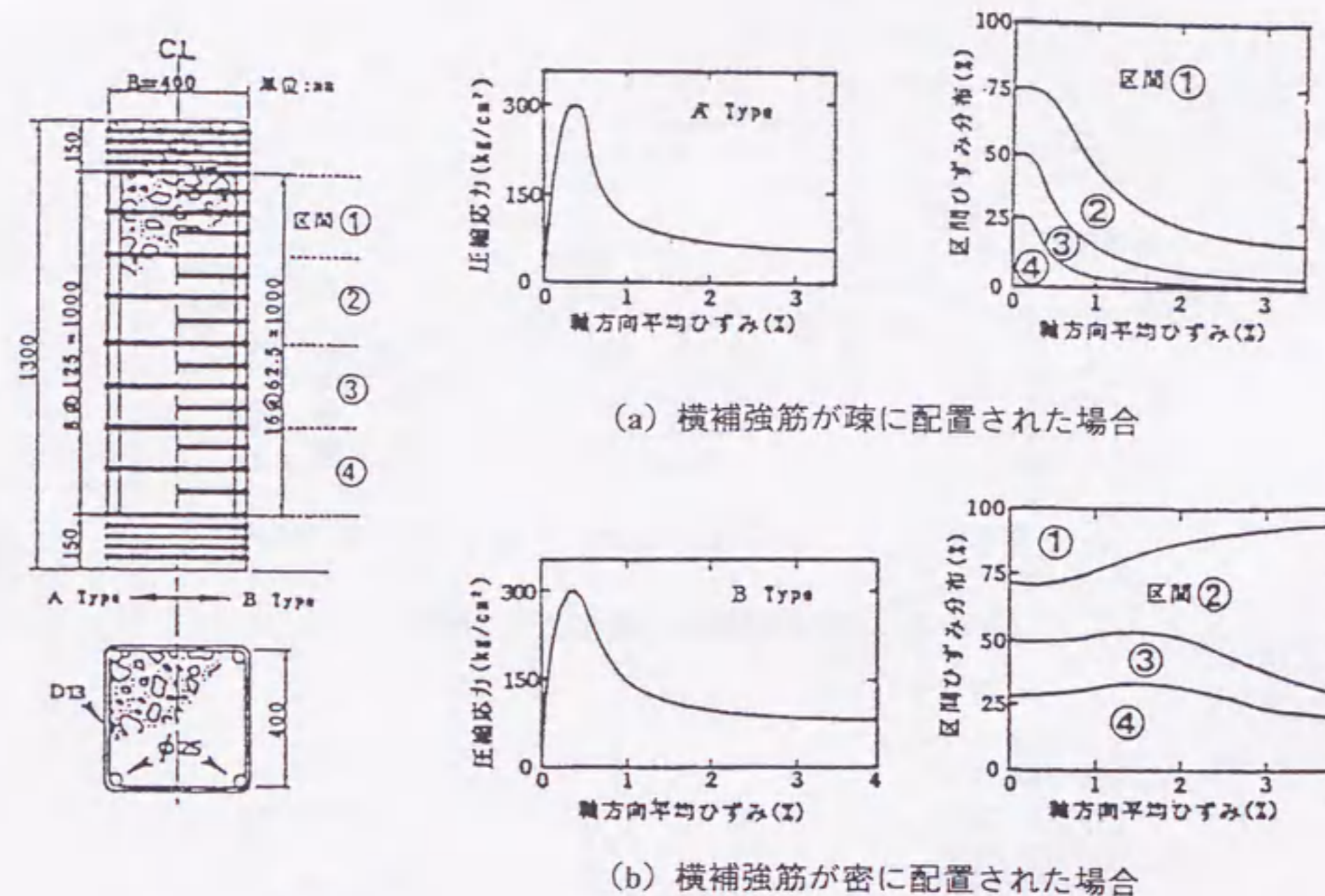


図-1.2.28 RC柱試験体の各区間のひずみ分布

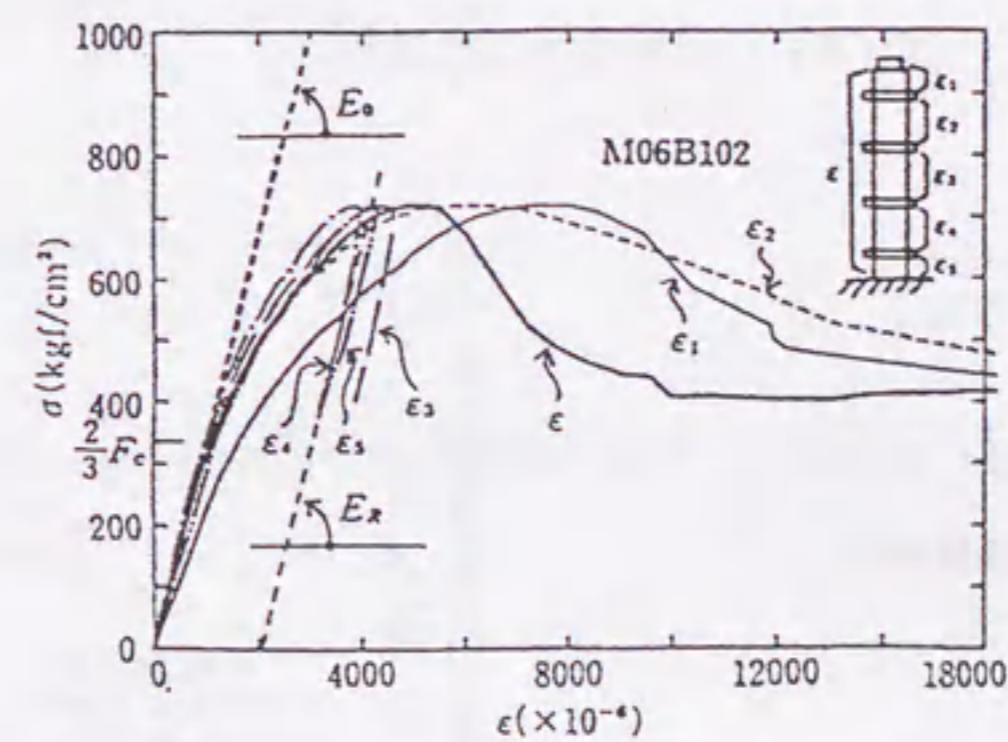
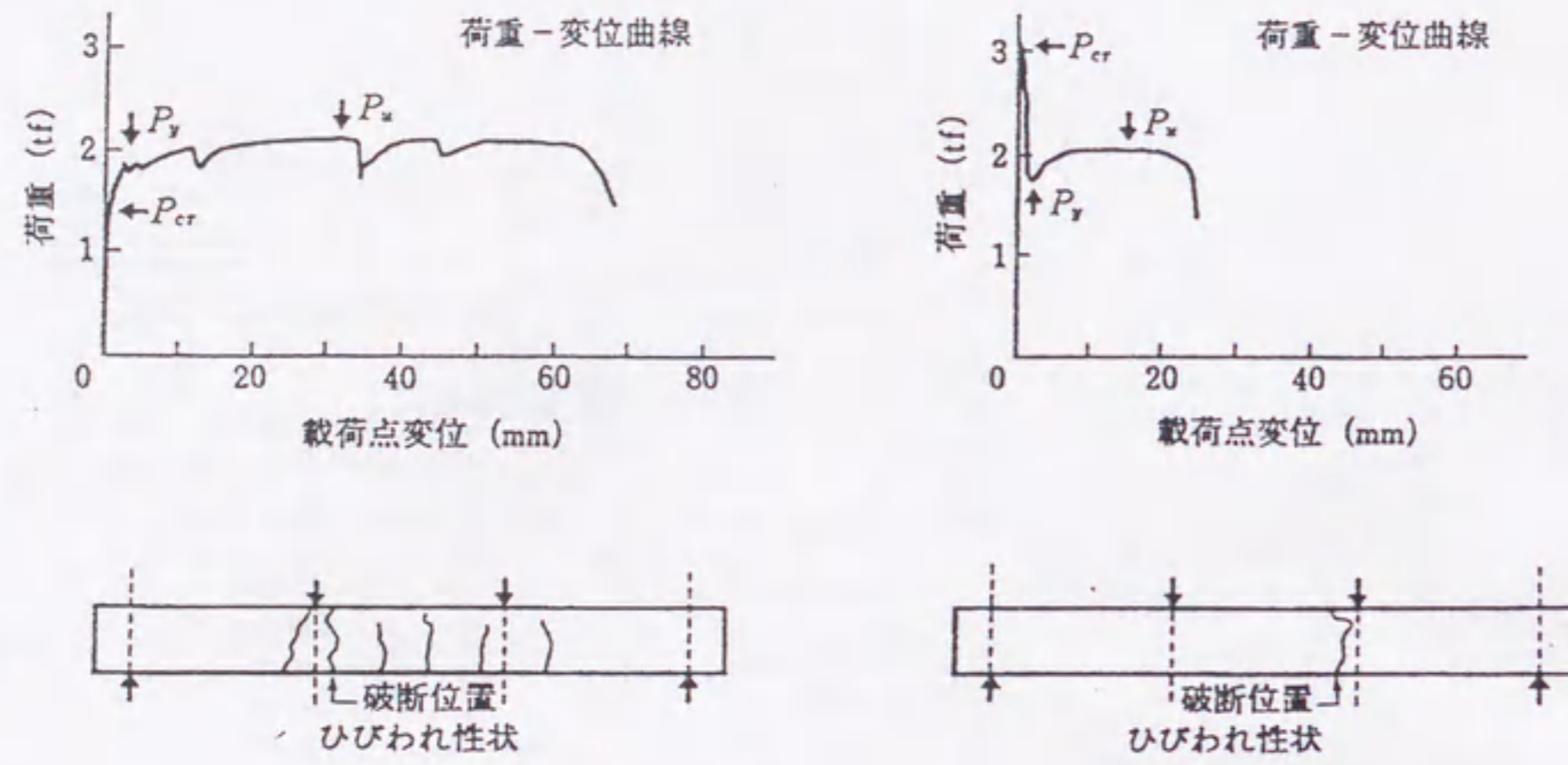


図-1.2.29 アンボンド型充填鋼管コンクリート柱試験体の各区間の応力-ひずみ関係



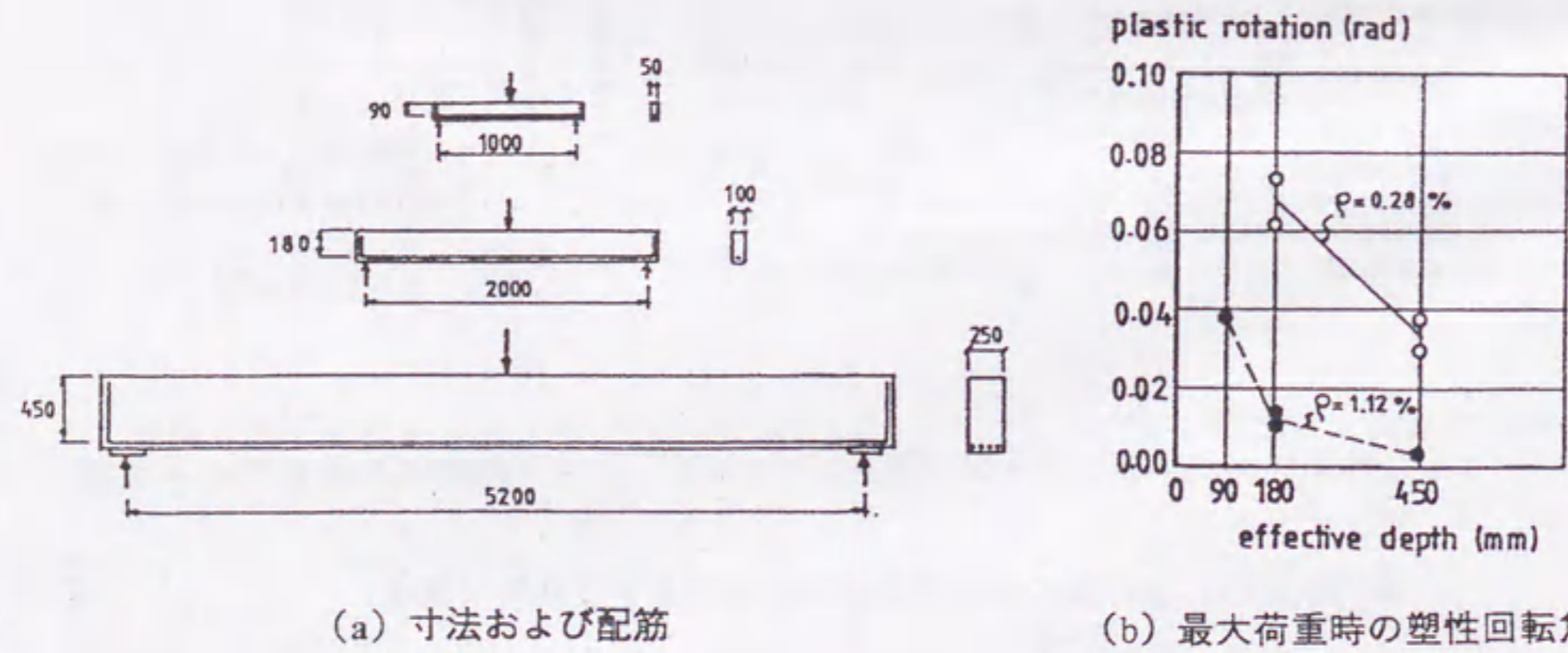






(a) ひびわれ荷重が降伏荷重より小さい場合 (鉄筋比  $p_t=0.2\%$ ) (b) ひびわれ荷重が降伏荷重より大きい場合 ( $p_t=0.1\%$ )

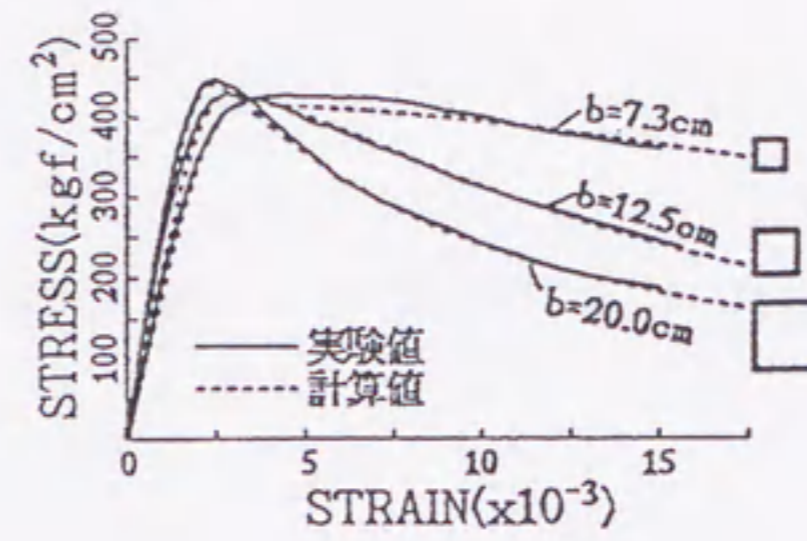
図-1.2.35 低鉄筋比のRC梁の破壊性状 (内田ら)



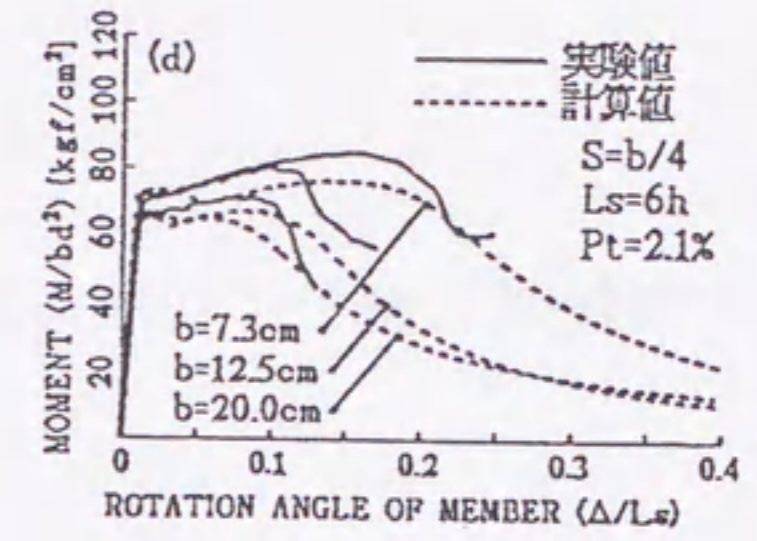
(a) 寸法および配筋

(b) 最大荷重時の塑性回転角

図-1.2.36 RC梁の塑性回転における寸法効果 (Bigajら)



(a) コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の表示



(b) モーメント-部材角曲線の推定

図-1.2.37 寸法 (梁幅  $b$ ) の異なる RC 梁の曲げ破壊挙動の推定例 (上田ら)  
( $S$ : 横補強筋ピッチ、 $L_s/h$ : せん断スパン比、 $P_t$ : 引張鉄筋比、 $h=2b$ )



## 第2章 コンクリートの圧縮破壊における寸法・形状効果

- 2.1 概説
- 2.2 圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化
- 2.3 コンクリートの圧縮破壊における試験体の寸法・形状効果
- 2.4 試験体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状



## 2.1 概説

近年、一軸圧縮並びに低側圧三軸圧縮下のコンクリートのひずみ軟化域をも含めた破壊挙動を、マクロまたはミクロな立場から数学的に表現する種々の力学モデルが提案されている。

コンクリートのひずみ軟化域を含む破壊挙動に及ぼす試験体寸法の影響を解明するには、コンクリートの破壊に関する力学モデルの確立、並びにこの力学モデルに及ぼす試験体寸法の影響を解明する必要がある。圧縮下のコンクリート試験体の破壊性状と力学モデルの作成には破壊パターンの確定が必要であるが、研究者によって一致しておらず、提案モデルにも限界がみられる。また、これらのコンクリートの破壊パターンに及ぼす試験体寸法の影響についての知見はきわめて少ない。

本章、2.2節の主な研究目的は、中心圧縮を受ける条件下でのコンクリートの破壊パターンを整理・分類し、破壊モデルを確立するための基礎資料を得ることにあり、破壊面の角度と破壊領域の長さ（幅）の二つの着眼点から破壊パターンについて考察する。

コンクリートの圧縮強度が試験体の断面寸法の影響を受けることは、前章の既往の研究でも述べたが、このような寸法効果はコンクリートの強度が高くなるほど顕著になることが明らかになってきた。この点については、筆者も早くから指摘してきたが、圧縮強度に寸法効果が観察されるばかりでなく、コンクリートの応力-ひずみ曲線にも試験体寸法の影響がみられることが明らかになってきた。

本章、2.3節の研究では、まず一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を実験的に調べる。また、破壊後の試験体の破壊片の大きさを定量的に調べることによって、試験体内部のひび割れパターンの分析を行う。次にその分析結果に基づきコンクリートの破砕モデルの概念を提示する。また、破壊片分布に関する表示式を定量化し、破壊の際に単位クラック面で消費されるエネルギーを概算する。



## 2.2 圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化

### (1) まえがき

圧縮下のコンクリートの破壊パターンは、応力条件によって異なる。さらに、実験で観察される破壊は、応力条件の他に試験条件やコンクリート自体の品質にも影響されるため、必ずしも一定の破壊パターンが得られるとは限らない<sup>1)</sup>。

近年、一軸圧縮並びに低側圧三軸圧縮下のコンクリートのひずみ軟化域をも含めた破壊挙動を、マクロまたはミクロな立場から数学的に表現するため、種々の力学モデルが提案されている。しかし、上記のような理由から、モデル化の対象としたコンクリートの破壊パターンそのものが研究者によって必ずしも一致していないことから、自ずと提案モデルの適用性には限界が生じる。

本研究の主な目的は、一般に「圧縮下」と呼ばれる条件下でのコンクリートの破壊パターンを整理・分類し、破壊モデルの理解と再構築のための基礎資料を得ることにある。ここでは、圧縮下のコンクリート試験体の破壊パターンについて、破壊面の角度と破壊領域の長さ（幅）という二つの点に着目して考察する。

### (2) コンクリート試験体の破壊パターン

コンクリートの圧縮破壊過程の概要を図-2.2.1 に示す<sup>2)~4)</sup>。圧縮下のコンクリート試験体は、ピーク応力の直前からひずみが徐々に局所化し（臨界応力以降、顕著になると考えられる。ここで臨界応力とは、応力の増加に伴い、体積ひずみが減少から増加に転じる時点の応力と定義する）、さらに軟化域のある高ひずみ点に達すると終局破壊面が決定される。その後の試験体の耐荷力は、終局破壊面の形成状況に依存すると考えられる。ここでは、ひずみの局所化から終局破壊面の形成という段階を、破壊領域の形成段階として捉え、その角度および領域の長さ（幅）について考察する。また、圧縮下のコンクリート試験体の典型的な破壊パターンを図-2.2.2 に示す<sup>1), 2), 5), 6)</sup>。以下、特にことわりがない限り、圧縮とは一軸圧縮並びに低側圧三軸圧縮を表すものとする。

### (3) 破壊面の角度 $\theta$

破壊面の角度は、以下の諸要因の影響を受けると考えられる。

### 1) 端面摩擦の影響

試験体端面と載荷板との間に摩擦が存在するのであれば、それは正しい圧縮荷重とは言えない。しかし、通常の一軸圧縮荷重試験では、端面の摩擦係数（ $\mu$ ）を減じることが面倒であるなどの理由により、端面摩擦（ $\mu \approx 0.4$ ）を存在させたまま圧縮試験が行われる。図-2.2.2 (b) は、 $\mu \approx 0.4$  という条件下での典型的な破壊パターンを模式的に示したものであるが、このケースは、上記のように、純粋な圧縮状態とは考えられないことに注意する必要がある。

### 2) 破壊基準の相違

図-2.2.3 は、モール・クーロンの破壊基準を図示したものである。図のように、せん断応力（ $\tau$ ）と直応力（ $\sigma$ ）が直線関係であれば、せん断すべり面は側圧に拘らず常に一定の角度（ $\beta = \pi/4 - \phi/2$ ）となる<sup>1)</sup>。コンクリートの破壊基準としてかなり精緻なものまで種々提案されているが、一軸圧縮から低側圧三軸圧縮までの範囲であれば、図-2.2.3 のように直線で示された破壊基準と大差ない。したがって、この基準、すなわち応力の基準に従えば、破壊面は常に図-2.2.2 (c) のようなせん断型となる。

ただし、二方向の側圧が均一（ゼロの場合も含む）であれば、せん断破壊面は最大応力 $\sigma_1$ に対して軸対称に生じるべきである。また、その破壊面は角度 $\beta$ を保持して試験体の任意の位置に（均等に）生じるべきである。この考察は、図-2.2.1 に示したひずみの局所化の開始時点では正しいと推測される。しかし、その後はコンクリートの内部の材料不均質性と応力不均等性によって、いわゆるひずみの局所化、そして限られた終局破壊面の形成へと進行するものと考えられる。

次に、図-2.2.2 (a) について考える。この破壊パターンも明らかに存在するが、図-2.2.3 のモール・クーロンの破壊基準では説明できないパターンである。Wu (1974) も指摘しているように、この圧縮破壊パターンは、ひび割れ直角方向の引張ひずみの破壊基準に従っていると考えるのが妥当であろう<sup>7)</sup>。しかし、残念ながら、このひずみの破壊基準に関しては、これを確立するに足る十分なデータが得られていない。また、図-2.2.2 (a) の破壊を、細かいせん断ひび割れの集合と考えられなくもないが、無理があると思われる。

### 3) コンクリート内部の不均質性の影響

コンクリートは、ブリージングや打込み時の締固めによって、一般に打込み方向（重力方向）と直角方向に層状に不均質な状態で仕上がる。図-2.2.2 (d) は、試験体上部がブリージング層となり、そこに圧縮破壊が集中した例である。(e) 図のようにせん断型で破



壊する場合にも、破壊が弱化層に集中することが多い。また、図-2.2.2 は、コンクリートを縦打ちとした場合を対象としたが、横打ちの場合には層が縦方向に生じることになる。この場合には、(d) 図の端部圧縮型は (a) 図の全体圧縮（へき開）型へ、(e) 図の端部せん断型は (c) 図の全体せん断型へと移行する。また、層も完全に水平にできている訳ではないので、(a) 図のタイプに比べて (c) 図のタイプが生じ易くなるようである。

#### 4) 試験体の細長比

試験体が太短い場合には、ひずみの局所化が相対的に緩和され、(d) 図のように試験体全体に圧壊が生じ易くなる。しかし、試験体が長くなると、上部のブリージング層で圧壊が生じて、下部の圧密層では破壊が進行せず、上部の破壊を拘束するように挙動するため、(d) 図のようなせん断面を伴うことになる。同様な破壊パターンはたとえ短柱であっても生じる((g) 図)。

#### 5) 総括

以上の考察は、端面摩擦を十分に減じ、載荷荷重のバランスに注意を払って行う圧縮試験であることを前提にしている（ただし、1) 項を除く）。このような理想に近い圧縮試験であっても、コンクリートの破壊基準を唯一定めて破壊面の角度を予測することは困難である。すなわち試験体の破壊パターンは、コンクリートの二つの破壊条件（応力とひずみ）の遷移、コンクリート内部の（微視的および巨視的）不均質性、境界条件（ここでは、試験体の形状と寸法に相当）などの微妙な関係から決定しているものと考えられる。

また、これらの要因の影響度はひずみのレベルに応じて変化すると考えるのが妥当であろう。すなわち、例えば、図-2.2.1 のひずみの局所化が始まった時点では (a) または (d) タイプの微視的破壊が進行し、ある時点から (c) または (e) タイプの巨視的破壊へと移行し、そして終局破壊面が形成されると考えるのである。

#### (4) 破壊領域（面）の取扱い

破壊領域の取扱いは、図-2.2.2 の破壊パターンに応じて異なるべきであろう。以下、破壊パターンを圧壊型とせん断型に大別して考察する。ここに、(3) 節で論じたように、圧壊型とは、引張ひずみが破壊規準に達し、図-2.2.2 (a) のような縦ひび割れが卓越する破壊タイプであり、せん断型とは、図-2.2.3 のような応力の破壊規準によって生ずる斜めひび割れが卓越する破壊タイプである。

#### 1) 圧壊型

図-2.2.4 は、端部圧壊型の破壊パターンを示す試験体の各区間の応力-ひずみ関係を模式的に示したものである<sup>2)</sup>。ひずみは区間 A の全域と区間 B の一部に集中しており、応力-ひずみ関係は、測定区間の設定位置次第で著しく変動することが予測される。ただ、このタイプの破壊（ $\sigma_1$  軸に関して軸対称）であれば、ひずみの局所化は試験体の高さ方向で生じていると捉えることができるため、比較的容易に、試験体を破壊の程度に応じた複数領域（例えば、最も簡単な例としては、破壊領域と非破壊領域の2領域）の直列モデルと考えることができる<sup>8)</sup>。

#### 2) せん断型

図-2.2.2 (c) または (e) のようなせん断型の破壊パターンを示す試験体に対しては、図-2.2.4 のような直列モデルへの置換えは不適當である。このタイプの破壊では、ひずみの局所化が、終局破壊面のごく限られた領域（局所帯）に集中して起こる。したがって、モデル化にあたっては、この局所帯の幅と挙動を精度良く再現することが要点となる。ただし、前節でも述べたように、この局所帯は必ずしもひずみの局所化の開始時点から形成されるものではなく、圧壊および他のせん断ひび割れの進展を伴いながら、最終的に軟化域のある時点に至って、一本の局所帯に破壊が集中した結果、顕在化したものであることを認識しておく必要がある。

図-2.2.5 は、圧縮強度の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線の間で見られる収束領域の開始点（●）が側圧によってどのように移動するかを示したものである。この時点から試験体の挙動がコンクリート強度に依存しなくなることから、これを近似的に終局破壊面の形成時点であると捉えることができる。図によれば、収束領域の開始点は側圧の増加に伴い、高応力・高ひずみ域に移行している。すなわち、前述した終局破壊面の形成以前に生じる非局所・半局所的な破壊は、側圧の増加に伴い、より高ひずみ域に至るまで継続的に進行することになるのである。

#### 3) 既往のモデル

ここでは、取り扱った破壊領域（面）の角度  $\beta$ （図-2.2.3 参照）に応じて、既往の研究を表-2.2.1 のように分類した。

角度  $\beta = 0^\circ$ 、すなわち図-2.2.4 の直列モデルを考えた場合の破壊領域長さ  $l_p$  の値は、粗骨材最大寸法または試験体幅の関数として与えられている。前者は（幾何学的）材料特性、後者は境界条件（本論文では、試験体の寸法に相当する）の関数と捉えることができるが、両者とも一長一短がある。すなわち、逆に前者では境界条件、後者では材料特性の



影響を考慮できない。また、構造体の有限要素解析では、必ず問題となると思われる内部応力の分布状態（応力・ひずみの境界条件）と破壊領域の拡がりとの関係についても、両式からただちに予測することはできない。

角度  $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 、すなわち、せん断型の破壊面は、一軸圧縮下のプレーンコンクリートのみならず、一軸圧縮下のコンファインドコンクリート、鋼管コンクリート、低側圧三軸圧縮下のプレーンコンクリートなどにおいても確認され、終局変形域に至るまでのモデル化の試みも精力的になされている。

また、一軸圧縮下および低側圧三軸圧縮下のプレーンコンクリートに対し、破壊面の角度  $\theta$  に拘らず、試験体全体の軸応力-軸ひずみ関係を、 $\sigma_p = nD$ （表-2.2.1 参照）としてほぼ表し得るとの報告もある。ただし、この捉え方はあくまで試験体のトータルの変形量を比較したものであり、破壊パターンとは無縁の議論である。

#### 4) 総括

破壊領域（面）は、破壊パターンが圧壊型かせん断型かでその取扱いが自ずと異なる。前節で述べたように、破壊パターンを特定することは甚だ困難であるため、各破壊パターンに対してモデルを作成することが望ましい。その際、圧壊型からせん断型への移行など、支配的破壊形態の遷移についても留意する必要がある。また、一軸圧縮や低側圧三軸圧縮下のように限られた応力条件のもとであれば、破壊パターンに捕らわれずに試験体全体の軸変形量を統一的に概算できる可能性がある。

#### (5) 結 論

本節では、圧縮下のコンクリートの破壊性状について検討した。その内容は以下のよう  
にまとめられる。

- 1) 既往の実験結果に基づき、圧縮下のコンクリート試験体の典型的な破壊パターンを示した（図-2.2.1）。
- 2) 圧縮下のコンクリートの破壊条件として、応力およびひずみの二つの破壊基準を考える必要がある。
- 3) 応力の破壊基準はせん断型、ひずみの破壊基準は圧壊型の破壊面を与えると考えられる。
- 4) 圧壊型の破壊とせん断型の破壊は、コンクリートのひずみレベルに応じて遷移し、そのひずみレベルは、コンクリート内部の不均質性、境界条件などに影響されると考えられる。

- 5) 破壊領域（面）の挙動に関する解析上の取り扱い方法について、破壊パターンの分類を踏まえて検討した（表-2.2.1）。



## 2.3 試験体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状

### (1) まえがき

鉄筋コンクリート部材や構造物を実大で実験するには大型の荷重設備を必要とし、多額の経費と手間がかかるため、小型試験体を使用することが多い。これらの小型試験体の実験結果を実大構造物や部材に適用するに際しては、実大と小型の相互関係、すなわち寸法効果をあらかじめ確認しておく必要がある<sup>1)~5)</sup>。

コンクリートの圧縮強度の寸法効果は、引張・曲げ・せん断強度の寸法効果に比べて小さく、実大部材の圧縮強度は、通常の試験体(断面φ10cm~15cm)の圧縮強度のおよそ80~90%と考えられている<sup>6)</sup>が、高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告<sup>7)~9)</sup>も見られる。また、圧縮下のコンクリートのピーク応力以後の破壊性状は、試験体寸法の増大に伴い、かなり脆性的になり、このような寸法効果もまたコンクリート強度に依存して異なるようである<sup>9)、10)</sup>。

畑中らは、一連の研究により、高強度レベルに至るまでの三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす各種要因の影響を明らかにした<sup>11)~13)</sup>。しかし、用いた試験体は、断面の直径あるいは一辺が10cmであり、実部材と比べるとかなり小さい。そのため、これまで得た知見を実部材の挙動解析に適用するには試験体寸法の影響をも論じておく必要がある。

本研究では、まず一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を実験的に調べる。また、破壊後の試験体の破壊片の大きさを定量的に調べることによって、試験体内部のひび割れパターンを分析を行う。次にその分析結果および破壊片分布に関する表示式を用いて、破壊の際に単位クラック面で消費されるエネルギー量を概算する。

### (2) 実験方法

表-2.3.1に、実験の概要を示す。実験要因としては、試験体の断面寸法(D)、コンクリートの圧縮強度( $F_c$ )、および横拘束圧の大きさ( $\sigma_l$ )を取り上げた。試験体の高さ-直径比(H/D)は1、帯筋(鋼輪)のピッチ(S)はD/4とした。本実験は、受働型の三軸圧縮実験である。すなわち、側圧は、コンクリート外周部の鋼輪によって与えられる。側圧が試験体全体にはほぼ均等に加わるためには、試験体全体が一様に膨張する必要がある。そのために、本実験では、比較的均等な破壊が期待できるH/D=1の円柱体を試験体として用いた<sup>11)</sup>。全鋼輪が降伏した場合に試験体にかかる側圧を表-2.3.2に示す。

鋼管でコンクリートを横拘束する場合、周囲の鋼管とコンクリートとの間には付着が存在するため、鋼管を適当な幅で切断(鋼輪)しておくことが望ましい。筆者らの既往の研究<sup>13)</sup>によれば、鋼輪のピッチをD/4以下とすれば(クリアランスは、表-2.3.2参照)、鋼輪間隔による有効側圧の低下はあまり大きくないものと考えられるが3.2節で述べるようにこの点に関する比較実験も別に行った。

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、川砂(5mm未満)、砕石(5~15mm)、シリカフューム( $F_c = 1000\text{kgf/cm}^2$ シリーズのみ)、高性能AE減水剤、および鋼輪を使用した。設計スランプは20cm、調合強度( $F_c$ )は、400、700および $1000\text{kgf/cm}^2$ とした。

試験体は、材齢1日目にキャッピング、2日目に脱型した後、養生室内(温度 $27\pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $88\pm 2\%$ )で空中養生を行った。試験材齢は、約50日とし、試験体の個数は、各要因毎に2個とした。

荷重には、耐圧試験機(最大耐力600tf)を使用した。また、荷重面には2枚のポリプロピレンシートにシリコングリスを塗布した減摩パッドを挿入した。

軸方向のひずみを測定するため、試験体の上下端から0.05Hの位置に、ボルトによって鋼製枠を固定した(すなわち、軸ひずみの検長は0.9Hである)。応力上昇域のひずみは、鋼製枠に取り付けた一対の変位計で、下降域のひずみは、鋼製枠を外した後、荷重板間に取り付けた一対の変位計でそれぞれ測定した。

鋼輪のひずみは、所定の鋼輪に貼付した一対のワイヤーストレインゲージ(W.S.G.)によって測定した。

### (3) 実験結果および考察

#### 1) 鋼輪のひずみおよび側圧の分布状況

図-2.3.1に、鋼輪のひずみから計算した試験体の側圧(計算側圧)の一例を示す。図および他の実験結果によれば、コンクリートの強度に拘らず、鋼輪による側圧は降伏( $\sigma_{lv}$ )以前では若干ばらつく傾向があるが、降伏時の側圧は試験体全体にはほぼ一様にかかっている。このことから、本実験を受働型の三軸圧縮実験と見なすことができる。

#### 2) 応力-ひずみ曲線

図-2.3.2に、縦応力-縦ひずみ曲線に及ぼす側圧の影響を示す。図-2.3.3は、縦応力-縦ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を示したものである。図および他の実験結果によれば、試験体寸法の増大と共に、ピーク応力および圧縮靱性の低下が顕著にみられる。このような寸法効果は、コンクリート素材の力学挙動における寸法効果に加え、鋼輪のクリア



ランスの絶対量の差異にも依存している可能性がある。そのため  $F_c = 700$  シリーズについて、鋼輪のピッチ  $S$  を  $D/8$  とした試験体を作成し同様な実験を行ったが、応力-ひずみ曲線の実測値は、 $S=D/4$  と  $D/8$  ではほとんど相違しなかった。

### 3) ピーク点に及ぼす試験体寸法の影響

図-2.3.4 に、 $D=10\text{cm}$  の試験体の圧縮強度に対する相対強度を示す。なお、図中の実線は Blanks の実験データ<sup>1)</sup> から求めた Kim らの提案式<sup>1.4)</sup> を、また破線は、相対強度  $R$  を次式で表示した場合の本実験値に対する上限および下限を示している。

$$R = \frac{10}{D + a}$$

ここに、 $D$ : 試験体寸法 (cm)

$a, b$ : 実験定数

図によれば、側圧が大きいほど、低下率が大きくなる傾向がみられる。なお、図中の破線は、参考のため、本実験の範囲外についても描いてある。ここで、上式によれば、 $b$  の値は、実大材の相対強度の概略値 (下限値) を与えることになる。

図-2.3.5 に、ピーク時のひずみに及ぼす試験体寸法の影響を示す。図によれば、試験体寸法の増大に伴い、ピーク時のひずみは、ほぼ比例的に低下し、 $D=20\text{cm}$  の試験体のピークひずみは、多くの場合、 $D=10\text{cm}$  の試験体の約 80% に低下している。

### 4) 一軸圧縮下のコンクリート試験体の破砕状況

一軸圧縮下のコンクリートの破砕状況を写真-2.3.1 に示す。破壊片は原則として、径の大きいものから順に右へ並べてある。また、上下方向の位置については、試験体内の元の位置に対応するように配慮した。

#### a) コンクリート強度の影響

破壊片の表面状態を見ると、 $F_c=400$  シリーズでは、凹凸が顕著であるのに対し、 $F_c=1000$  シリーズでは、凹凸が少ない。大径のものについて破壊片の長さを見ると、 $F_c=400$  シリーズでは、試験体高さを 2 または 3 分割する破壊片が多いのに対し、 $F_c=1000$  シリーズでは、試験体高さと同じ長さの破壊片の数が多くなる。これは、 $F_c=400$  シリーズでは、ひび割れが骨材を迂回して起こるのに対し、 $F_c=1000$  シリーズでは、ほとんどの骨材が破壊して、ひび割れが荷重軸方向にほぼ貫通するようになるからである。また、細かい

破壊片の量 (各写真中の右下の細片群) は、試験体寸法に拘らず、コンクリート強度の増大に伴って減少している。

#### b) 試験体寸法の影響

写真-2.3.1 は、全ての試験体が同寸法となるように、すなわち、試験体の寸法比で縮小してある。写真において、これらの破壊片のうち比較的大きなものを概観すると、破壊片の大きさは、試験体寸法によってあまり変化せず類似している。すなわち、大径の破壊片は、ほぼ試験体の寸法比に応じた大きさになっているといえる。細径の破壊片も含めた定量的な分析は、次節で行う。

### 5) 試験体の破砕状況の分析

ここでは、側圧  $\sigma_l=0$  および 50 シリーズについて、体積が  $2\text{cm}^3$  以上の破壊片の体積分布および度数分布を調べた。 $\sigma_l=50$  シリーズの試験体は、荷重終了後 (軸ひずみがおおよそ  $20 \times 10^{-3}$  の時点で荷重を終了)、周囲の鋼輪を切断、除去し、再度一軸圧縮によって破砕した。したがって、支配的なひび割れのパターンは、おおよそ  $\epsilon=20 \times 10^{-3}$  時点のものを見なすことができる。参考のために、 $\sigma_l=50$  シリーズの破砕状況を  $F_c=700$  シリーズについてのみ写真-2.3.2 に示しておく。 $\sigma_l=0$  シリーズの場合と比較的類似した破砕状況であることがうかがえる。

#### a) 理想的な破壊パターン

図-2.3.6 (a) および (b) は、コンクリート試験体の破壊パターンの概念図を示したものである。(a) 図は寸法効果がないパターンを、(b) 図は最も明解な寸法効果を示すと思われるパターンで、破壊片が試験体寸法比に応じて拡大、縮小するケースである。本研究では、実際の破壊片の分布をこれらの二つのパターンと対照しながら考察する。

#### b) 分析方法

図-2.3.7 は、大径 (体積  $v=36\text{cm}^3$  以上)、中径 ( $2 \leq v < 36\text{cm}^3$ )、および小径 ( $v=2\text{cm}^3$  未満) の破壊片の占有率を各試験体毎に示したものである。ここで、破壊片の区分けの目安とした値は、2 および  $36\text{cm}^3$  である (写真-2.3.1 中に▽印で示した)。 $v=2\text{cm}^3$  は、最大寸法  $\phi = 1.5\text{cm}$  の粗骨材が球と仮定した場合の体積  $v=4\pi(\phi/2)^3/3 \approx 1.8\text{cm}^3$  にほぼ相当する。一方、 $v=36\text{cm}^3$  は、破壊片の度数を増分  $\Delta v=2\text{cm}^3$  毎の階級で求めた場合に、各階級の度数が 0 とならないための階級のおよその最大値である (図-2.3.9 参照)。また  $v$



$=36\text{cm}^3$  は、 $2.7\phi a$  を直径とする球の体積にほぼ相当する。

### c) 破壊片の体積分布

図-2.3.7 (a) および (b) によれば、破壊片の体積分布は、コンクリートの圧縮強度  $F_c$  および側圧  $\sigma_L$  に拘らず試験体寸法毎に比較的類似しており、その平均値を示せば図-2.3.7 (c) のようになる。

### d) 破壊片の度数分布

i) 総数：各試験体の  $2\text{cm}^3$  以上の破壊片の個数を図-2.3.8 に示す。図によれば、破壊片の個数  $N$  は、試験体寸法の増大とともに増加するが、試験体の体積比ほどは増加しない。図中のゾーン (A) および (B) は、それぞれ図-2.3.6 の破壊パターン (A) および (B) に対応する。図によれば、試験体の破壊は、およそ両者の中間に位置していると推測される。破壊片の総数  $N$  の値を試験体寸法  $D$  の一次式で表せば、側圧に拘らずほぼ表-2.3.3 の式 (2.3.1) のようになる。

ii) 中径・大径の破壊片の度数分布：図-2.3.9 に、各階級の体積の破壊片の度数分布を示す。(a) 図は中径の破壊片、(b) 図は大径の破壊片の実測例である。(a) 図の縦軸は相対度数であり、 $N$  は中径の破壊片の総数である。体積  $v$  の階級は、 $v=2\text{cm}^3$  を最小値とし、増分  $\Delta v=2\text{cm}^3$  を与えて  $v=2\text{cm}^3$  までの 17 階級とした。したがって各階級の中央値  $v_m$  は、 $(2m-1)\text{cm}^3$  ( $m$  は、2 ~ 18 の整数) である。図によれば、相対度数  $n/N$  は、破壊片の体積  $v$  の増加とともに急激に減少し、その傾向は試験体寸法に拘らず類似している。この径の破壊片群では、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ同様な関係、すなわち破壊パターン (A) に相当する関係が得られた。これらの関係は、ほぼ表-2.3.3 中の式 (2.3.2) のような関数で表すことができる。

(b) 図の体積  $v$  の階級は、 $v_m=V/3$  (ここに、 $V$ ：試験体体積) を最大値とし、 $v=36\text{cm}^3$  程度までを最大値からの 0.5 倍ピッチで刻んである。この相対体積に対する大径の破壊片の個数は、試験体寸法、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ一定の関係にあり、直線式で表せば、表-2.3.3 中の式 (2.3.3) のようになる。このことは、大径の破壊片の分布が図-2.3.6 に示した破壊パターン (B) (相似形) に相当することを示唆しており、写真-2.3.1 を概観した際に推測された寸法効果と一致するものである。

## 6) 破碎モデル

### a) 理想的な破壊パターンとの関係

本実験で得られたコンクリートの破壊パターンは、既に図-2.3.6 で示したパターン (A) および (B) の中間にあるようである。すなわち、ひび割れ単位面積当りの破壊吸収エネルギーが試験体寸法に拘らず一定であるとする、試験体全体としての平均的なエネルギー吸収能力には自ずと試験体寸法の影響が現れることになる。

### b) 破碎モデル

本実験で得られた結果からコンクリートの圧縮破壊パターンの概念図を示せば、図-2.3.10 のようになる。なお、図の中心部の斜線は、非常に細かい破壊片の集合を表している。ここで、各階級 (径) の破壊片の比率は、表-2.3.3 中の式 (2.3.1) ~ (2.3.3) で表されたように試験体寸法、およびコンクリート強度によって異なる。

### c) 写真-2.3.1 との比較例

5) 項の分析結果 (図-2.3.7 (e)) に基づき、中径および大径の破壊片の合計体積を試験体体積のおよそ 80% とし、その内訳を表-2.3.3 中の式 (2.3.1) ~ (2.3.3) を用いて計算した破壊片の分布例を図-2.3.11 に示す。また、計算上の仮定を表-2.3.4 にまとめて示す。ここでは便宜上、総体積の 20% を占める小径の破壊片 ( $v=2\text{cm}^3$  未満) をすべて  $v=1\text{cm}^3$  の立方体として表した。総体積は必ずしも試験体の原体積と一致はしない (原体積  $\pm 10\%$  以内) が、写真-2.3.1 の破壊片と比較してほぼ類似した分布が得られているといえる。

## 7) ひび割れ単位面積の消費エネルギー

本実験では、 $\sigma_L=0$  シリーズでは軸ひずみ ( $\epsilon$ ) がおよそ  $10 \times 10^{-3}$  の時点で、また  $\sigma_L=50$  シリーズでは、およそ  $20 \times 10^{-3}$  の時点で載荷を終了している。また、 $\sigma_L=50$  シリーズの試験体は、載荷終了後、周囲の鋼輪を切断、除去し、再度一軸圧縮によって破碎した。したがって、支配的なひび割れのパターンは  $\sigma_L=0$  シリーズではおよそ  $\epsilon=10 \times 10^{-3}$  時点、 $\sigma_L=50$  シリーズでは  $\epsilon=20 \times 10^{-3}$  時点のものを見なすことができる。

ひび割れ単位面積当りの破壊吸収エネルギー  $e$  は、次式で求めることができる。

$$e = \frac{W_p}{A} \quad \dots \dots (2.3.4)$$

ここに、 $W_p$ ：塑性仕事量 (kgf·cm)

$$W_p = \int \sigma_i d\epsilon_{ip}$$

で算定。ここに、 $\sigma_i$ ：主応力、 $\epsilon_{ip}$ ：主応力方向の塑性ひずみ



A: ひび割れ面の表面積の和 (cm<sup>2</sup>)

$$A = \{ \sum (v^{2/3}) - (\sum v)^{2/3} \}$$

で算定。ここに、v: 立方体破壊片の体積。

式(2.3.4)において、塑性仕事量  $W_p$  は一軸および三軸圧縮実験データにより求める。また、ひび割れ面の表面積の和は、破壊片の形状を便宜上、立方体と仮定することで、前節で得られた破壊片の体積分布の表示式を用いて求めることができる。

図-2.3.12に、上述の荷終了時点でのひび割れ単位面積当りの破壊吸収エネルギー  $e$  の計算値を示す。但し、 $\sigma_L=0$  シリーズの  $W_p$  の値は、 $\epsilon=10 \times 10^{-3}$  と  $\epsilon=20 \times 10^{-3}$  の時点であまり変化しない。ここでは、大径または中径の破壊片を、まず表-2.3.3の式(2.3.1)~(2.3.3)を用いて求め、総体積の80%となるように比例配分した。また、 $v=2\text{cm}^3$ 未満の小径の破壊片は、平均的に一律  $v=1\text{cm}^3$ と仮定した。図によれば、側圧がかかると  $e$  の値が増大し、 $\sigma_L=50$  シリーズでは、 $\sigma_L=0$  シリーズのおよそ10倍程度の値が得られている。また、試験体寸法の増大にともない  $e$  の値が若干小さくなる傾向が見られるが、これは、 $2\text{cm}^3$ 未満の破壊片の体積を試験体寸法に拘らず一律  $1\text{cm}^3$ としたことに起因しているものと考えられる。ちなみに、 $\sigma_L=0$  シリーズの  $e$  の値はおよそ  $1 \sim 2\text{kgf/cm}$  である。これは引張破壊時のひび割れ単位面積当りの消費エネルギーのおよそ10倍に相当する値である。

#### 8) 小径の破壊片

前節で求めたように各試験体において体積の80%は既に破壊パターンが決定している。(表-2.4.3の式(2.3.1)~(2.3.3)を使用)。前節では、試験体体積の20%を占める  $2\text{cm}^3$ 未満の小径の破壊片の体積を、便宜上全て  $1\text{cm}^3$ であると仮定したが、本節では、ひび割れ単位面積当りの消費エネルギー  $e$  の値が試験体寸法  $D$  やコンクリート強度  $F_c$  に拘らず一定値になる場合について考察する。

図-2.3.13は、 $2\text{cm}^3$ 未満の破壊片の体積  $v$  を  $0.1 \sim 2.0\text{cm}^3$  の範囲で変化させ、それぞれの場合についてひび割れ総面積  $A$  を求め、式(2.3.4)を用いて計算したときの  $e$  の値の変化を示したものである。ここで、塑性仕事量  $W_p$  の値には実測値を用いた。図によれば、 $2\text{cm}^3$ 未満の破壊片の平均体積  $v$  が大きくなると、 $e$  の値は大きくなる。また、 $v$  を一定値とすると、一般に試験体寸法  $D$  が小さいものほど  $e$  の値が大きくなる傾向が見られる。いま、ひび割れ単位面積当りの消費エネルギー  $e$  が試験体寸法によって相違しないと仮定すると、設定できる  $e$  の上限値は、図-2.3.13を参照して、表-2.3.5のようになる。これらの値は、各シリーズにおいて、 $v=2\text{cm}^3$ としたときの最小値として得られたものである。 $e$  の上限値について、横拘束圧  $\sigma_L$ のみをパラメータとして、敢えて概略値を示しておけば、 $\sigma_L=0 \text{ kgf/cm}^2$  のとき  $e=1.0\text{kgf/cm}$ 、 $\sigma_L=50\text{kgf/cm}^2$  のとき  $e=10\text{kgf/cm}$  程度と考えることがで

きる。

#### (4) 結論

本節では、一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を実験的に調べた。また、破壊後の試験体の破壊片の大きさを定量的に調べ、試験体内部のひび割れのパターンを分析した。本節の結果はおよそ次のようにまとめられる。

- 1) 三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響は、一軸圧縮下のそれよりも顕著である。実大部材の靱性の予測にはこの点を考慮する必要がある。
- 2) コンクリート試験体の破壊片の総数および分布、すなわち試験体の破壊パターンは、試験体寸法によって異なり、図-2.3.6に示す典型的なパターンの中間に位置する。この破壊パターンは、コンクリート強度の影響を受けるが、側圧の影響はあまり受けない。
- 3) コンクリート試験体の破壊片の分布結果に基づき、コンクリートの破砕モデルの概念を提示した。本モデルを定量化すれば、圧縮破壊における寸法効果のエネルギー論的取扱いが可能となると考えられる。本節ではその一例を示した。
- 4) 立方体群の破砕モデルを本実験結果に対して定量化した結果、軸ひずみが  $20 \times 10^{-3}$  時点におけるひび割れ単位面積当りの圧縮破壊吸収エネルギー量  $e$  の上限値としておよそ次の値が得られた。

$$\sigma_L=0 \text{ (kgf/cm}^2\text{) のとき } e \approx 1.0 \text{ (kgf/cm)}$$

$$\sigma_L=50 \text{ (kgf/cm}^2\text{) のとき } e \approx 10 \text{ (kgf/cm)}$$

なお、本節では、コンクリートの圧縮破壊性状の寸法効果をひび割れ形成時の吸収エネルギーというミクロ的な視点から検討した。



参考文献

- 1) 破壊力学の応用研究委員会報告書— 3.3 節：コンクリートの圧縮破壊性状の寸法効果・形状効果、日本コンクリート工学協会、pp.226-237, 1993.10
- 2) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光：一軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究、セメント技術年報、Vol.37, pp.279-282, 1983.5
- 3) 西野和弥・村上雅英・大谷恭弘・窪田敏行：低側圧 3 軸圧縮応力を受けるプレーンコンクリートの最大応力以後の破壊性状に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.51-56, 1993.6
- 4) Manojya, P.T. : Efficiency of Lateral Reinforcement on Capacity of Core Concrete in Compression, Dissertation to Univ. of Tokyo, 1993.8
- 5) 小柳治・六郷恵哲・内田裕市：コンクリートの圧縮靱性、セメント技術年報、Vol.37, pp.268-271, 1983.5
- 6) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光：低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動、材料、Vol.34, No.376, pp.19-25, 1985
- 7) Chen, W.F. : Plasticity in Reinforced Concrete、丸善、第 5 章、コンクリートの破壊基準、497pp., 1985.7
- 8) 岩瀬裕之・六郷恵哲・小柳治：コンクリートの破壊における硬化と軟化、セメント・コンクリート論文集、No.47, pp.390-395, 1993.5
- 9) Bazant, Z.P. : Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Test by Series Coupling Model for Localization, Cement and Concrete Research, Vol.19, No.6, pp.973-977, 1989
- 10) 服部尚朋・吉川弘道：コンクリートのひずみの局所化と安定/不安定条件に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.63-68, 1993.6
- 11) 加藤大介・羽廣重夫：鉄筋コンクリート造角柱体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.2, pp.287-292, 1989.6
- 12) Kato,K., Kato,N., and Iwasaka,N. :Loading Capacity of RC Column Considering Complex Shear Strength of Concrete and High-Strength Shear Reinforcement, Proc. of the 34th Japan Congress on Materials Research, pp.177-184, 1991.3
- 13) 村上雅英・大谷恭弘・西野和弥・窪田敏行：低側圧3軸圧縮下で生じたひび割れ面のせん断伝達劣化機構のモデル化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.57-62, 1993.6
- 14) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化、日本建築学会構造系論文報告集、第 452 号、pp.149-158, 1993.10
- 15) Blanks, R.F. and McNamara, C.C. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Jour. of ACI, Vol. 31, No.3, pp.280-303, Jan.-Feb. 1935
- 16) Neville, A.M. : The Influence of Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Structural Deviation, Mag. of Concrete Res., Vol.8, No.23, pp.101-110, August 1956
- 17) Sangha, C.M. and Dhir, R.X. : Strength and Complete Stress - Strain Relationships for concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Conditions, Materiaux et Constructions, Vol.5, No. 30, pp.361-370, 1972
- 18) 谷川恭雄・山田和夫：コンクリートの圧縮強度の寸法効果について、日本建築学会論文報告集、No. 262, pp. 13-21, 1977.12
- 19) Sabnis, G.M. and Mirza, S.M. : Size Effect in Model Concrete, Proc. of ASCE, Jour. of ST-Div., Vol.105, No. ST6, pp.100t-1020, 1979.6
- 20) 塩屋俊幸・長谷川俊昭：コンクリート構造物の寸法効果、コンクリート工学、Vol. 30, No. 8, pp. 5-15, 1992.8
- 21) Department of the Interior : Cement and Concrete Investigations — Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965
- 22) 香田伸次・田中伸幸・板口昇・山崎庸行：中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、C 分冊（構造Ⅱ）、pp. 751-752, 1989.10
- 23) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp. 949-954, 1992. 6
- 24) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 2, pp. 707-712, 1990.6
- 25) 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄：三軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.2, pp. 31-36, 1991.6
- 26) 畑中重光・近藤洋右・谷川恭雄：横補強筋形状の異なるコンファインド高強度コンクリートの有効側圧、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No.2, pp.967-972, 1992.6
- 27) 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄：コンファインド高強度コンクリートの有効側圧と応力-ひずみ関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.37-42, 1991.6
- 28) Kim, J.X. and Eo, S.H. : Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks, Magazine of Concrete Research, Vol.42, No. 153, pp. 233-238, 1990



表-2.2.1 破壊領域（面）の取扱い

| $\theta$  | モデル化の概要   | 文献                  |
|-----------|---|---------------------|
| 0°        | ・破壊領域長さ $L_p$ を与える。<br>$L_p = \begin{cases} nG & (G: \text{粗骨材最大寸法}) \\ nD & (D: \text{試験体幅}) \end{cases}$  | 9), 10)<br>6), 11)  |
| 20° ~ 30° | ・破壊面の応力 ( $\tau, \sigma_s$ ) の伝達を<br>モール・クーロン則で与える。<br>$\tau = C + \mu \sigma_s$<br>$C$ : 粘着力, $\mu$ : 摩擦係数 | 3), 12)<br>13), 14) |
| 任意        | ・ $\theta$ に拘らず $L_p$ を表示 ( $\theta = 0^\circ$ と仮定)。  | 5), 6)              |

表-2.3.1 実験概要

| $D$<br>(cm) | $F_c$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_L$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 10          | 400                             | 0, 25, 50                            |
| 15          | 700                             | 0, 50                                |
| 20          | 1 000                           | 0, 50, 100                           |

注)  $D$ : 試験体呼び寸法,  $F_c$ : コンクリート強度の目標値,  $\sigma_L$ : 鋼輪降伏時の側圧の目標値, 高さ-直径比は 1, 鋼輪ピッチは  $D/4$

表-2.3.2 鋼輪降伏時の側圧の計算値

| $D$<br>(mm) | $f_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $t$<br>(mm) | $d$ (c)<br>(mm) | $\sigma_L$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|---------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------------|
| 95.2        | 2 560                           | 3.2         | 3.6 (20.2)      | 26.3                                 |
|             |                                 |             | 7.2 (16.6)      | 52.6                                 |
|             |                                 |             | 14.5 (9.3)      | 105.2                                |
| 156.2       | 2 600                           | 4.5         | 6.4 (32.7)      | 24.7                                 |
|             |                                 |             | 12.9 (26.2)     | 49.4                                 |
|             |                                 |             | 25.7 (13.4)     | 98.8                                 |
| 204.4       | 3 130                           | 5.8         | 6.9 (44.2)      | 24.1                                 |
|             |                                 |             | 13.9 (37.2)     | 48.2                                 |
|             |                                 |             | 27.8 (23.3)     | 96.5                                 |

注)  $D$ : 試験体寸法 (鋼輪の内径),  $f_y$ : 鋼輪の降伏点,  $t$ : 肉厚,  $d$ : 鋼輪幅,  $c$ : 鋼輪のクリアランス (すなわち,  $S=d+c$ ),  $\sigma_L$ : 鋼輪降伏時の計算側圧,  $\sigma_L = (2 \cdot t \cdot d / S \cdot D) \times f_y$  で算定

表-2.3.3 破壊片の度数分布の表示式  
( $v=2\text{cm}^3$  以上)

|          |  |
|----------|--|
| 式(2.3.1) | $N = a(D-9) + 25$<br>ここに, $a = -0.9\sqrt{F_c} + 35$<br>$F_c$ : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>$D$ : 試験体寸法 (cm)<br>個数 $N$ は切上げ |
| 式(2.3.2) | $\frac{n}{N} = \frac{2}{(v_m - 1)^2}$<br>ここに, $v_m = 2m - 1$ , $m$ は 2~18 の整数<br>度数 $n$ は切上げ   |
| 式(2.3.3) | $n = m, v_m = \frac{V}{3} \cdot 2^m (m=1, 2, \dots)$<br>ここに, $v_m \geq 36$ , $V$ : 試験体の体積 (cm <sup>3</sup> )                         |

表-2.3.4 クラックパターンの計算上の仮定

- 1) 破壊片の形状: 立方体
- 2) 破壊片の容積占有率  
 小径 ( $v < 2 \text{ cm}^3$ ) 20 %  
 中径 ( $2 \leq v < 36 \text{ cm}^3$ ) } 約 80 %  
 大径 ( $v \geq 36 \text{ cm}^3$ )
- 3) 中径および大径の破壊片の度数  
 表(2.3.3)中の式(2.3.1)~(2.3.3)による
- 4) 小径の破壊片の大きさ:  $v = 1 \text{ cm}^3$

表-2.3.5  $e$  の上限値 (kgf/cm)

| $F_c$ | $\sigma_L = 0$ | $\sigma_L = 50$ |
|-------|----------------|-----------------|
| 400   | 1.7            | 9.0             |
| 700   | 0.6            | 14.3            |
| 1 000 | 0.7            | 12.3            |





写真-2.3.1 一軸圧縮時のコンクリートの破壊状況



写真-2.3.2 三軸圧縮時のコンクリートの破壊状況 ( $\sigma_c=50$ ,  $F_c=700$  シリーズ)

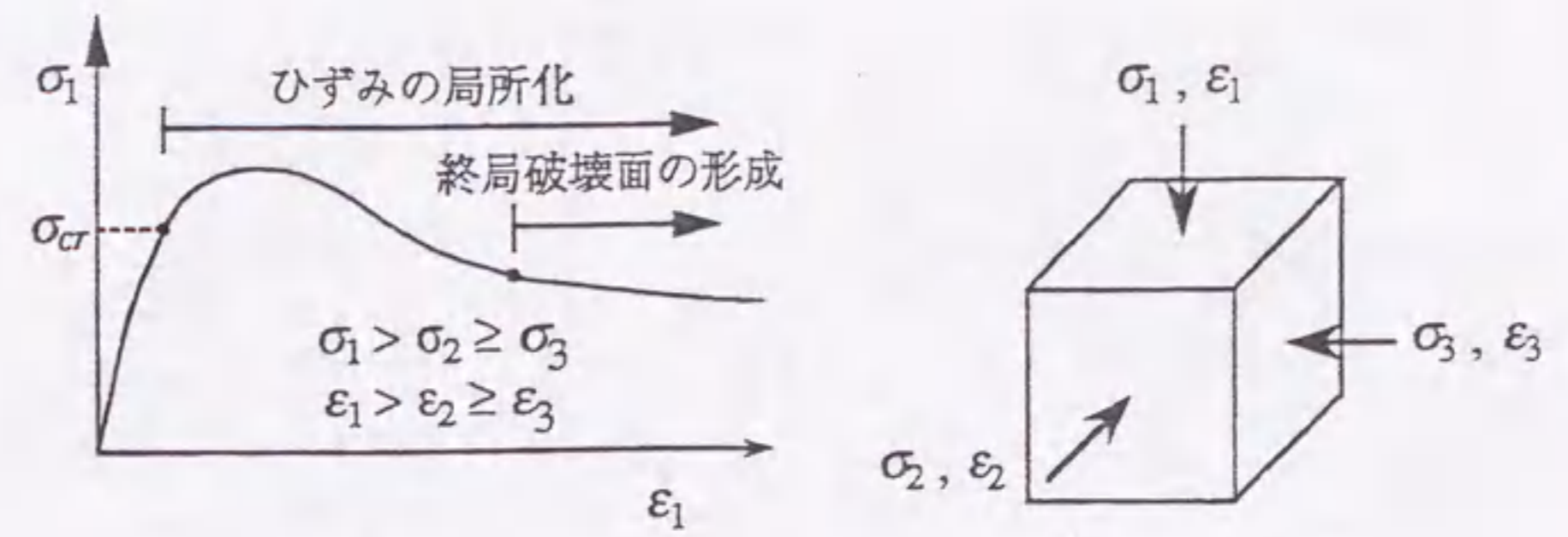
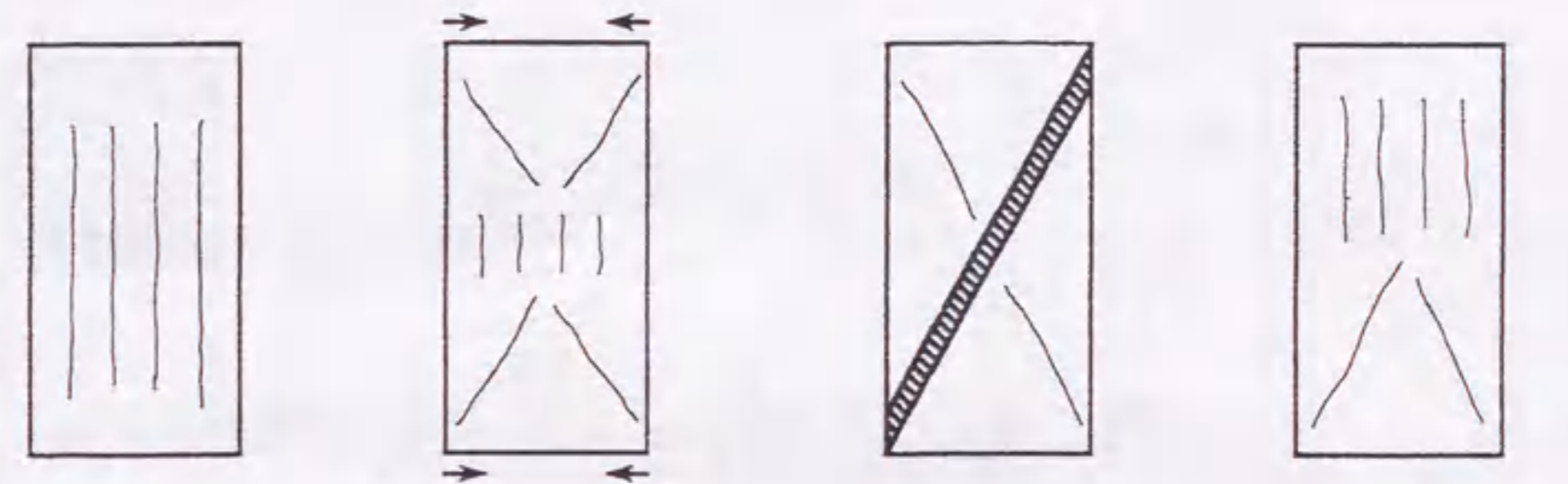
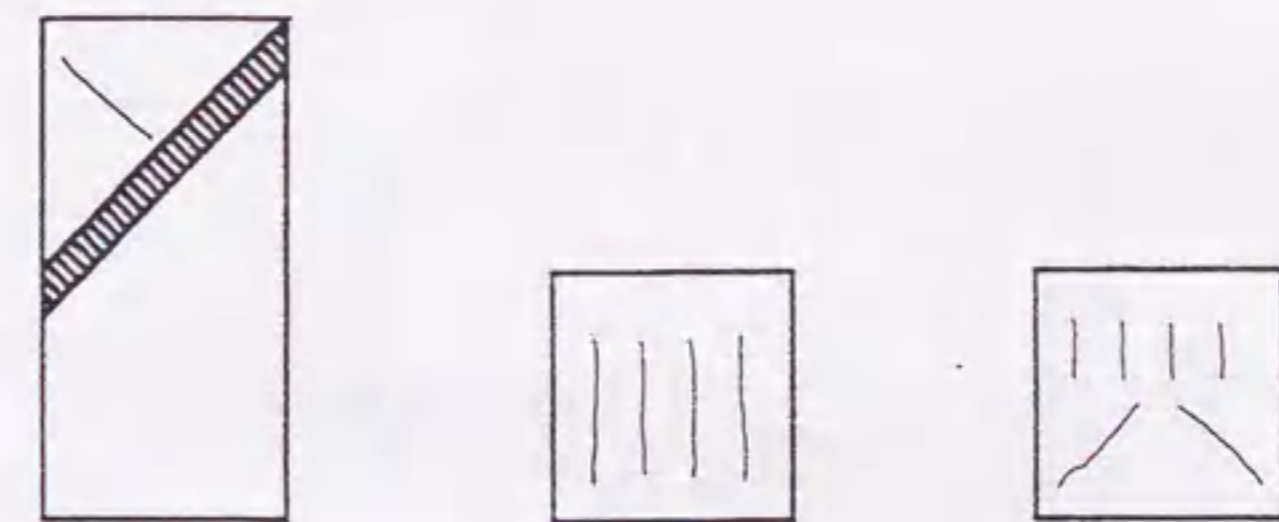


図-2.2.1 破壊過程



(a) 圧壊型 ( $\mu=0$ ) (b) せん断圧壊型 ( $\mu=0.4$ ) (c) せん断型 (d) 端部圧壊型



(e) 端部せん断型 (f) 圧壊型 (短柱) (g) せん断圧壊型 (短柱)

図-2.2.2 破壊パターン (縦打ち、 $\mu=0$ )



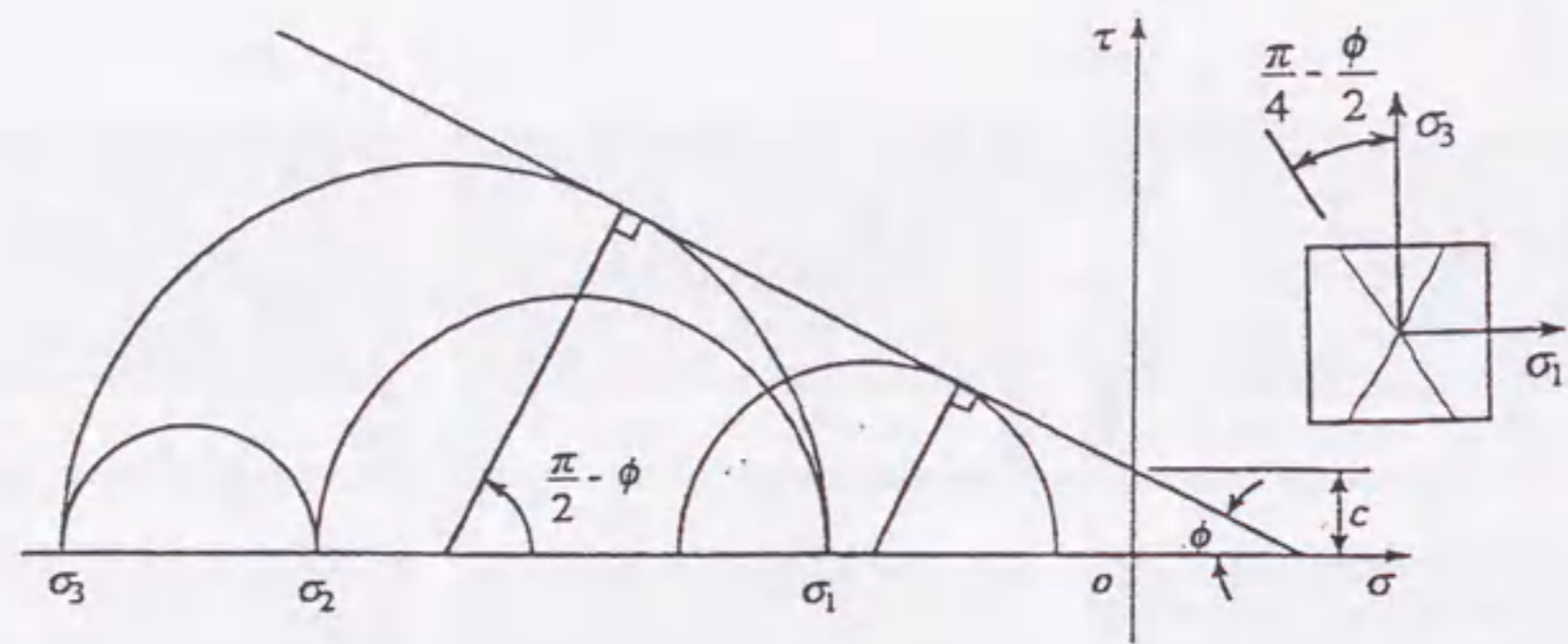
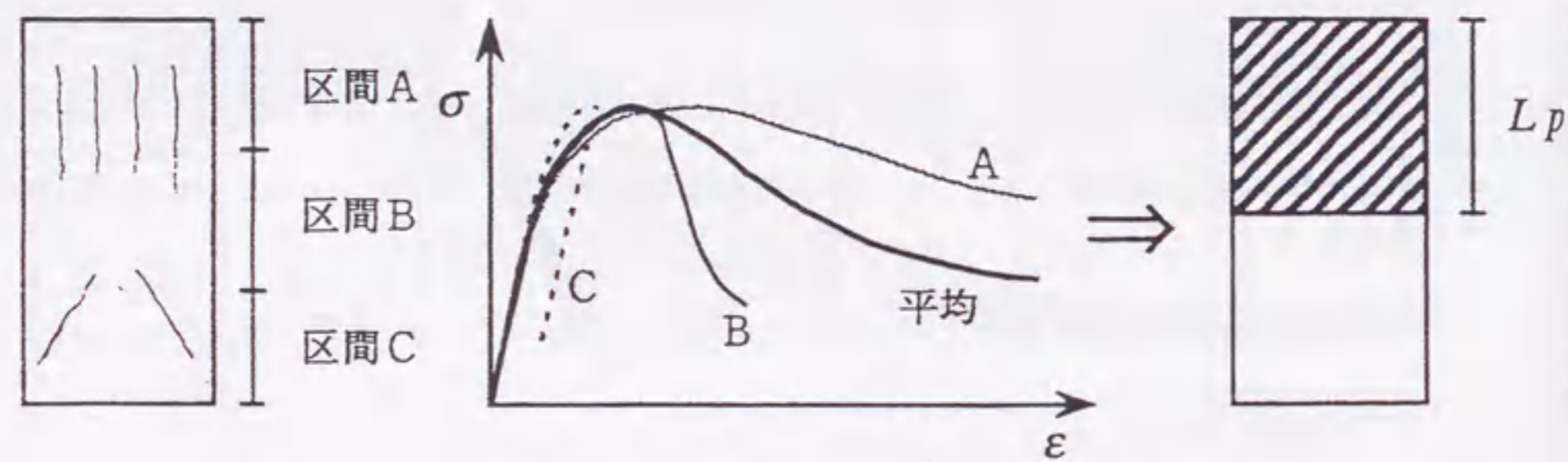


図-2.2.3 モール・クーロンの破壊基準とせん断破壊面



(a) 破壊パターン (b) 応力-ひずみ曲線 (c) 2値化直列モデル

図-2.2.4 端部圧壊型試験体の各区間の応力-ひずみ曲線

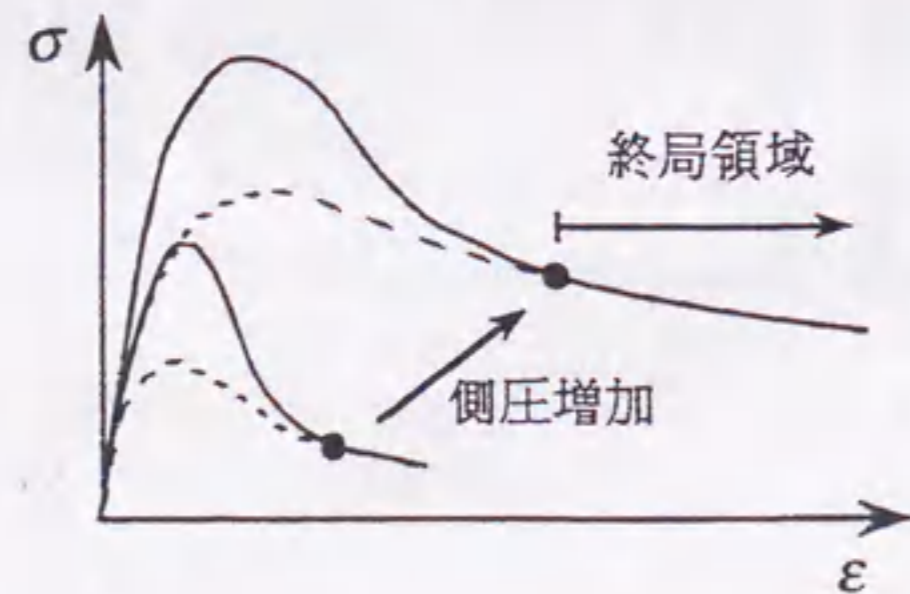
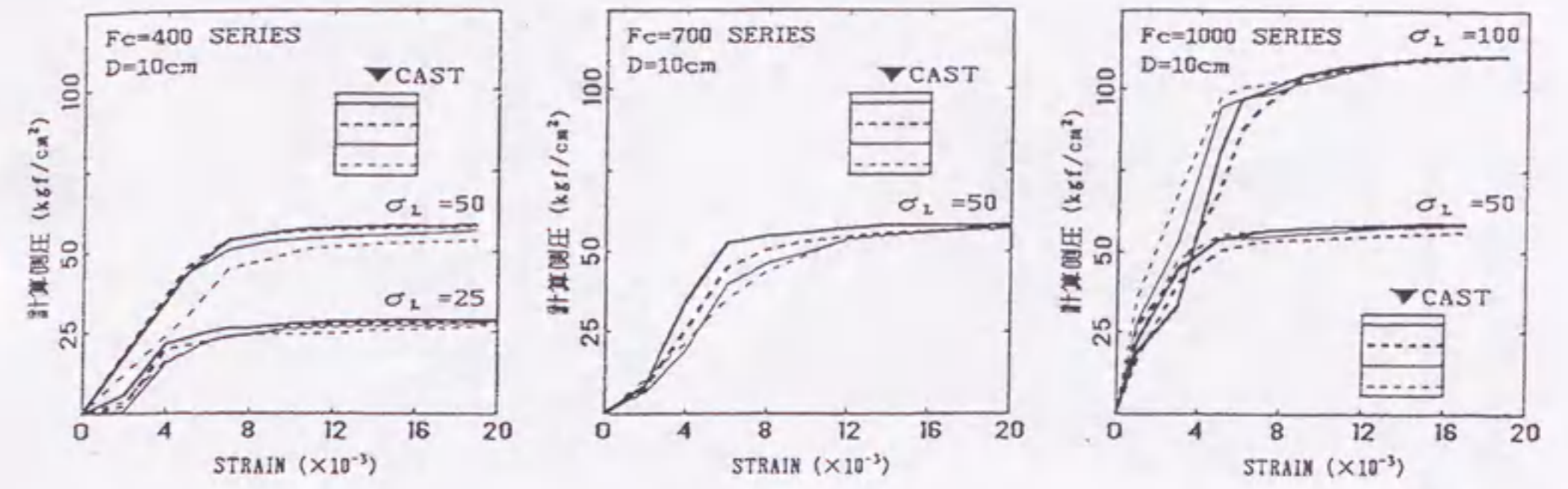
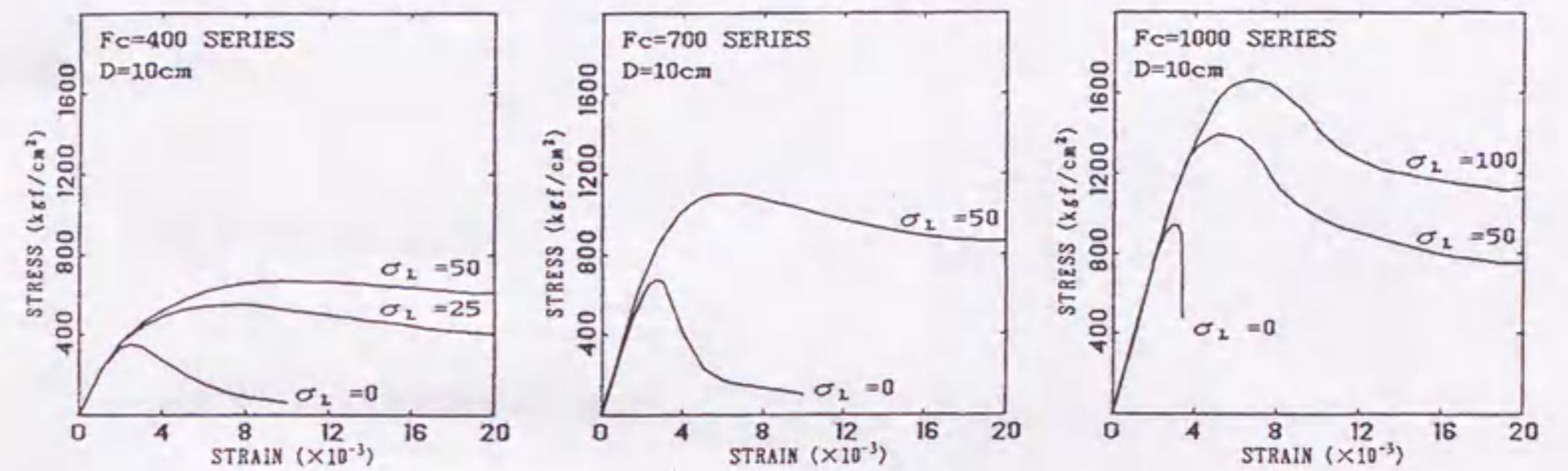


図-2.2.5 側圧増加に伴う収束領域開始点の移動



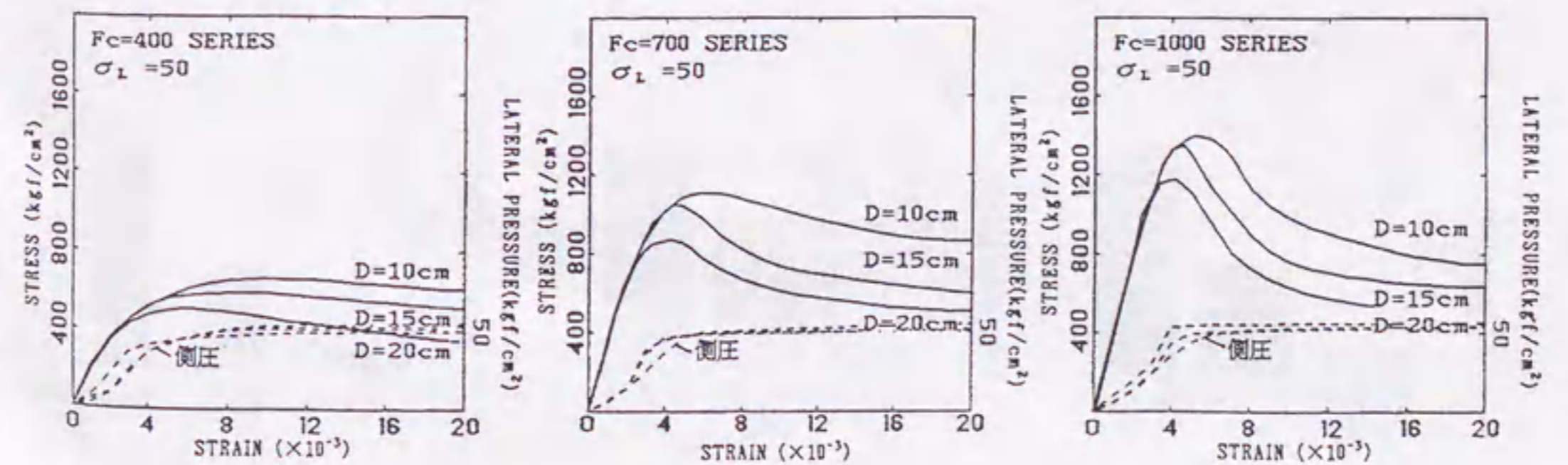
(a) Fc=400 シリーズ (b) Fc=700 シリーズ (c) Fc=1000 シリーズ

図-2.3.1 計算側圧曲線



(a) Fc=400 シリーズ (b) Fc=700 シリーズ (c) Fc=1000 シリーズ

図-2.3.2 応力-ひずみ曲線 (側圧の影響)



(a) Fc=400 シリーズ (b) Fc=700 シリーズ (c) Fc=1000 シリーズ

図-2.3.3 応力-ひずみ曲線 (試験体寸法の影響)



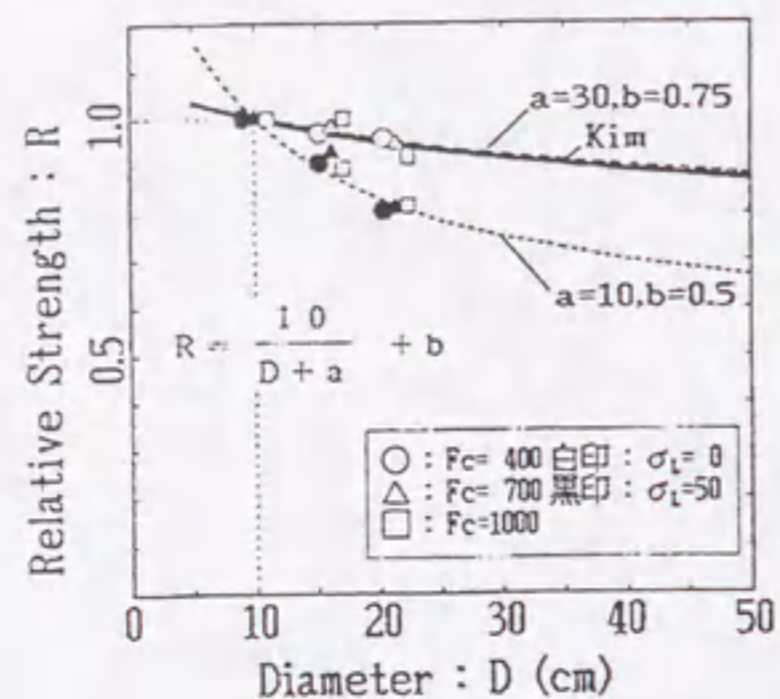


図-2.3.4 ピーク応力に及ぼす試験体寸法の影響

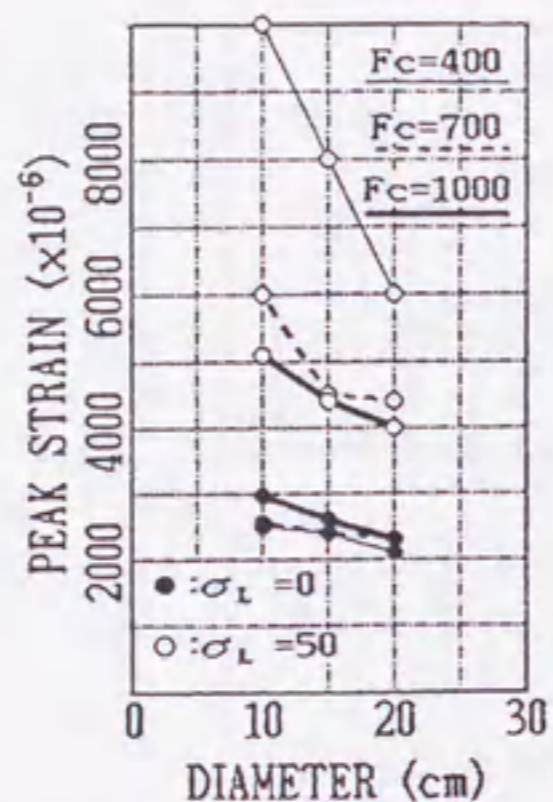
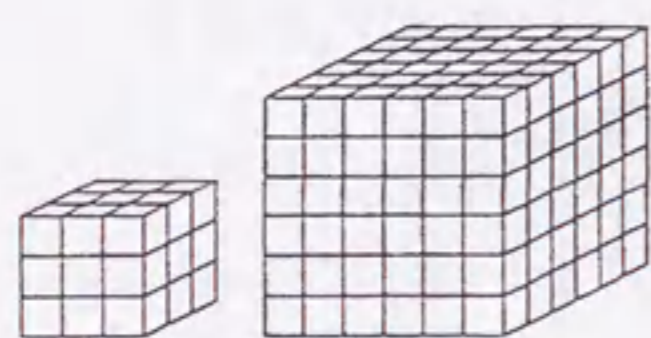
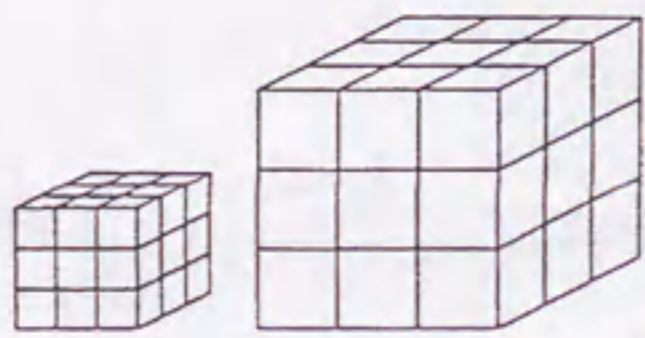


図-2.3.5 ピークひずみに及ぼす試験体寸法の影響



(a) 寸法効果がないケース(パターンA)

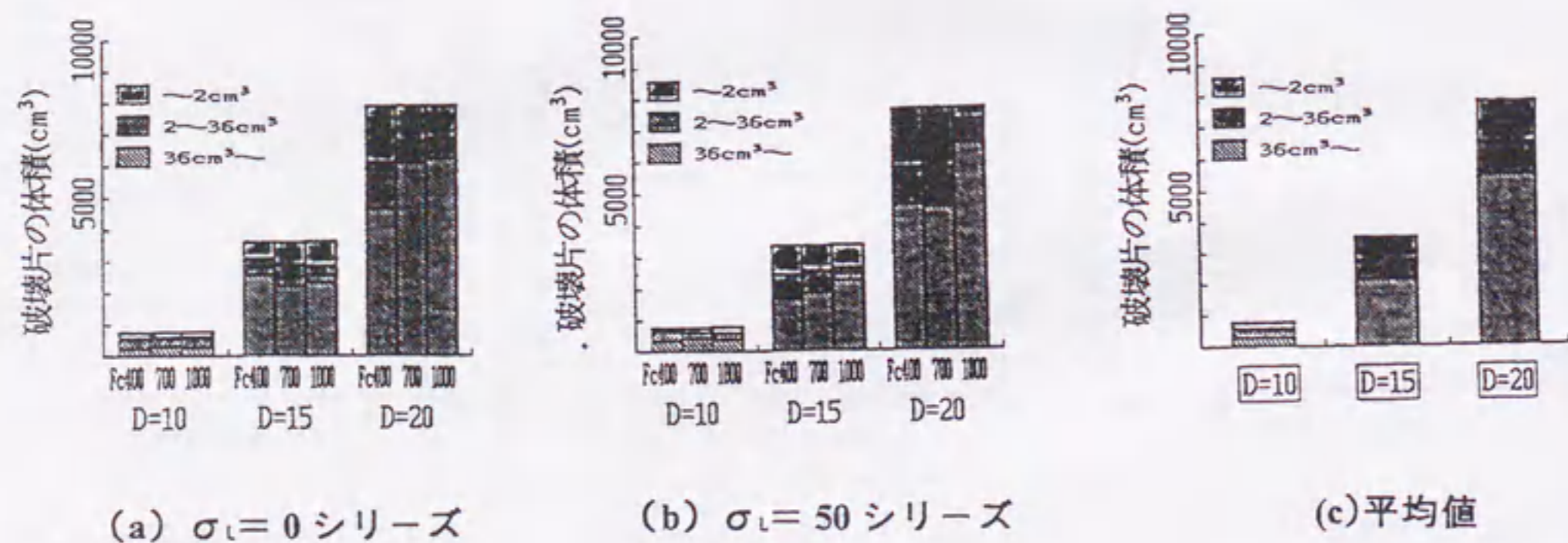
(a) 寸法効果がないケース (パターンA)



(b) 破壊片が相似形となるケース(パターンB)

(b) 破壊片が相似形となるケース (パターンB)

図-2.3.6 試験体の典型的な破壊パターン



(a)  $\sigma_L = 0$  シリーズ

(b)  $\sigma_L = 50$  シリーズ

(c) 平均値

図-2.3.7 体積分布図

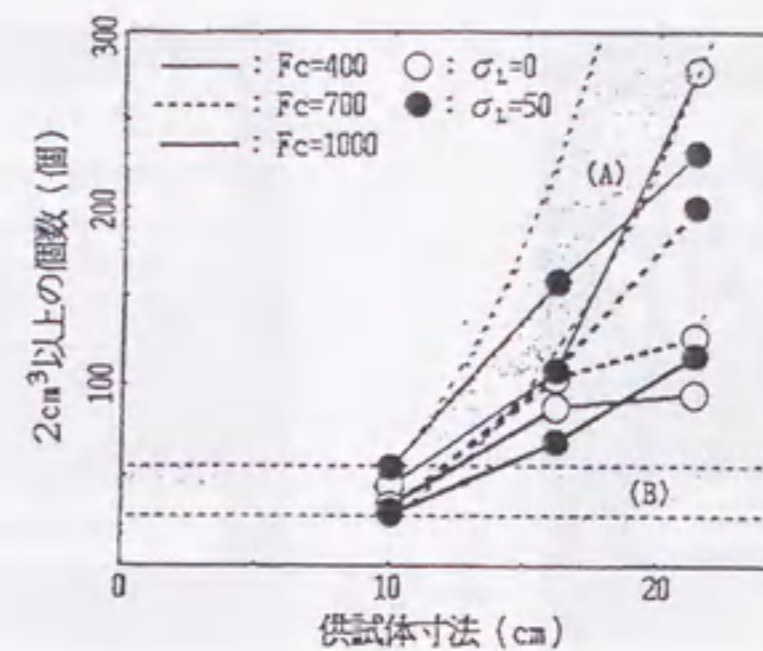
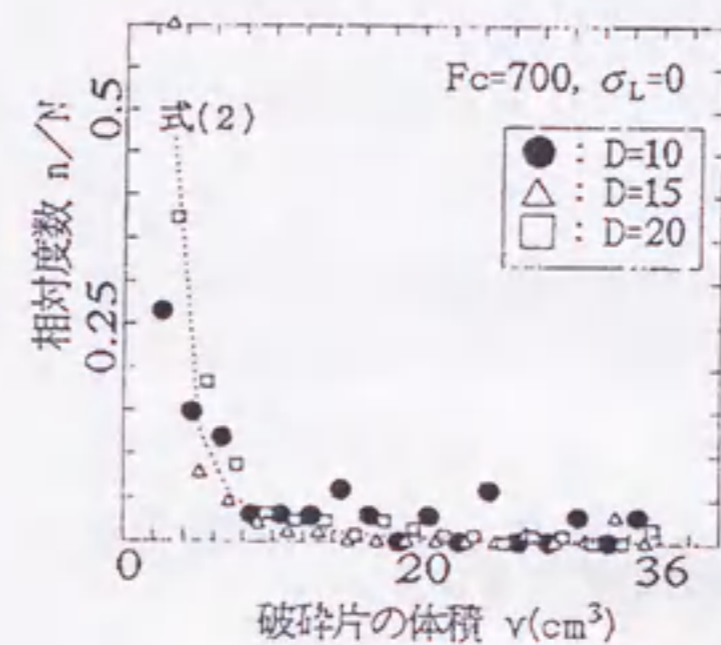
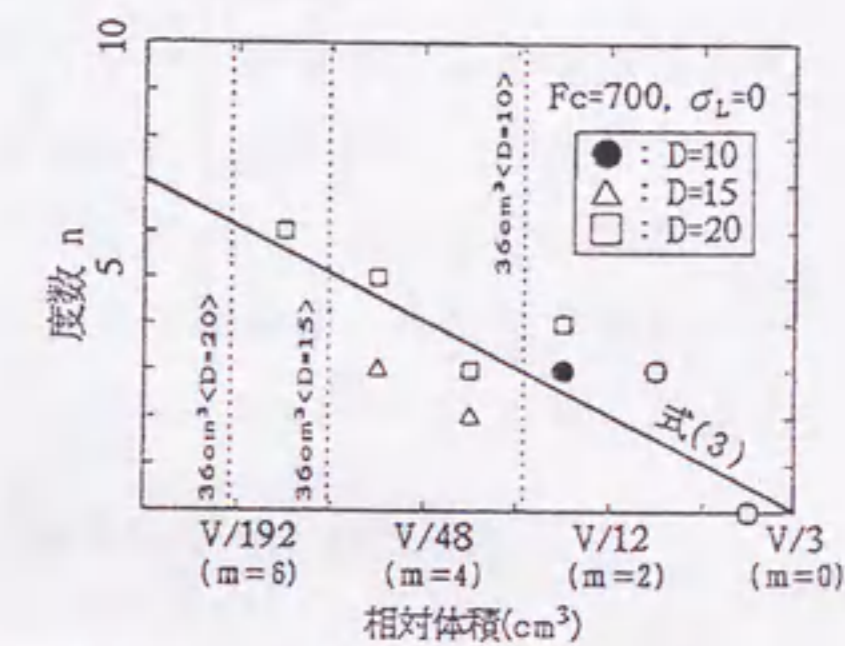


図-2.3.8 破壊片の総数



(a) 中径 (2 ~ 36cm<sup>3</sup>) の破壊片



(b) 大径 (36cm<sup>3</sup> 以上) の破壊片

図-2.3.9 度数分布図

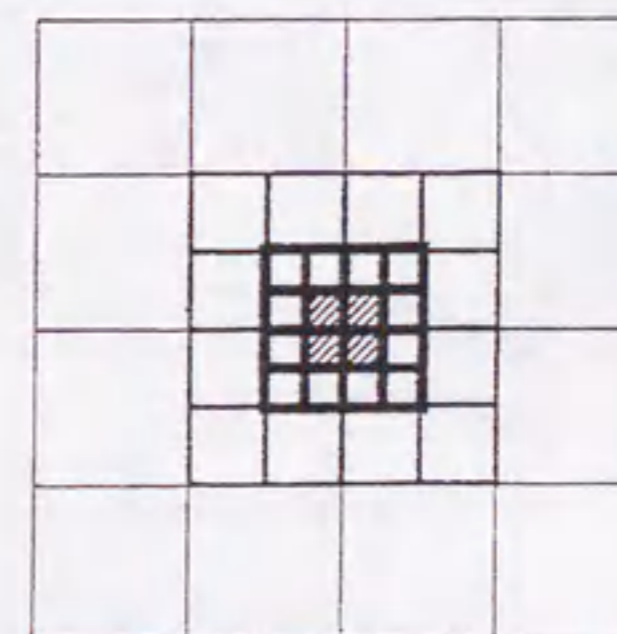


図-2.3.10 破壊パターンの概念図



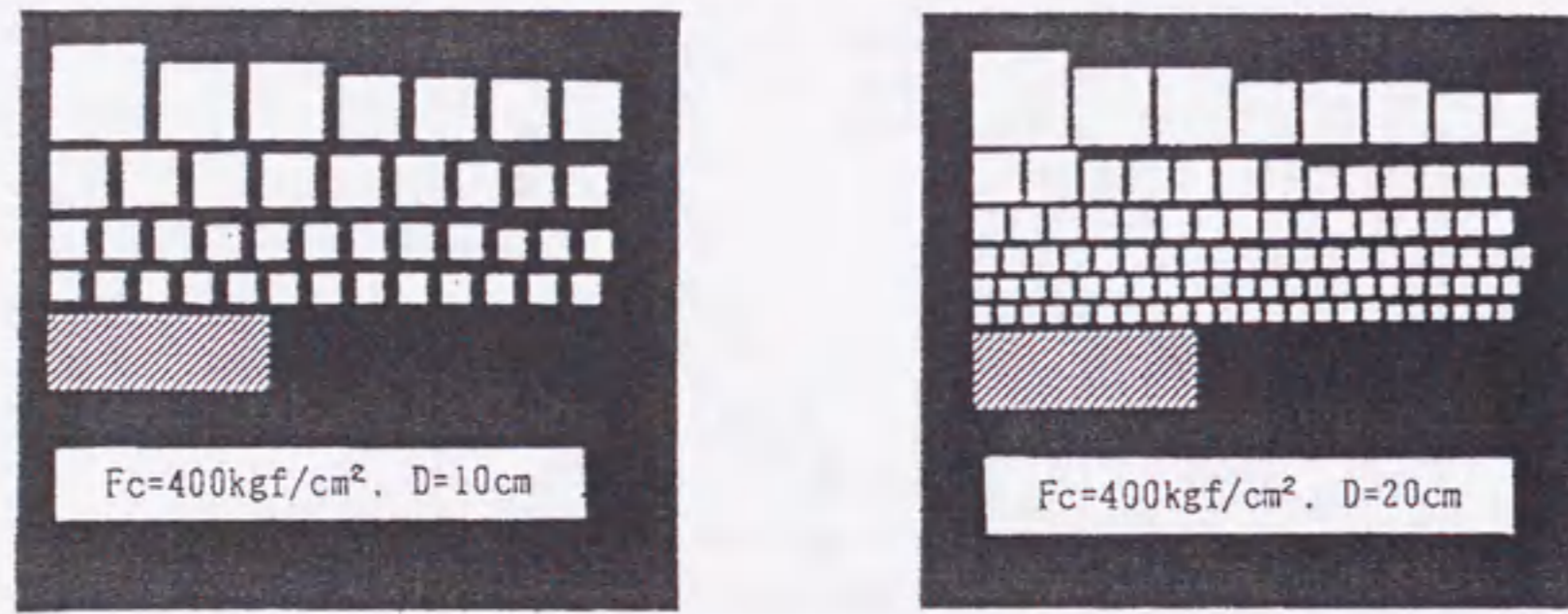


図-2.3.11 破壊片の分布の計算例

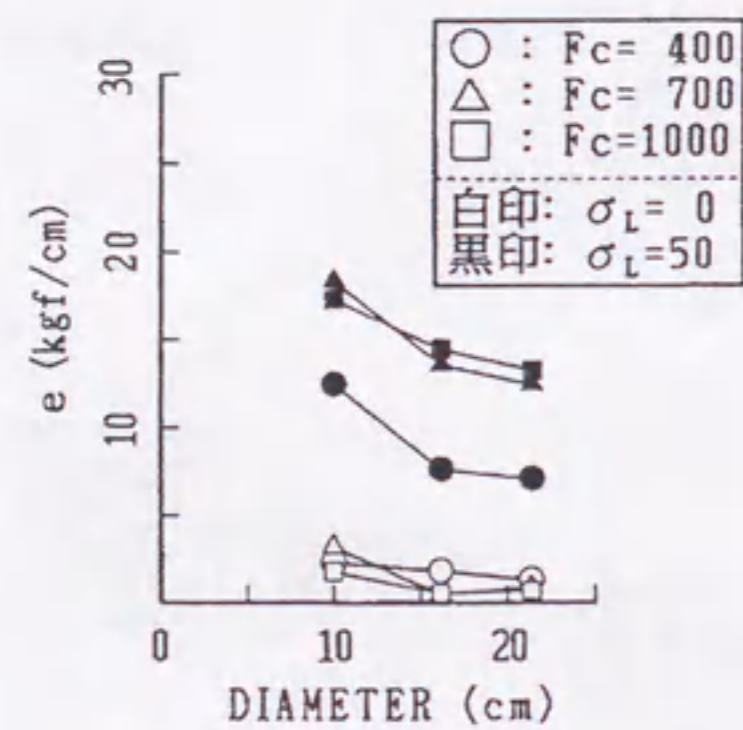
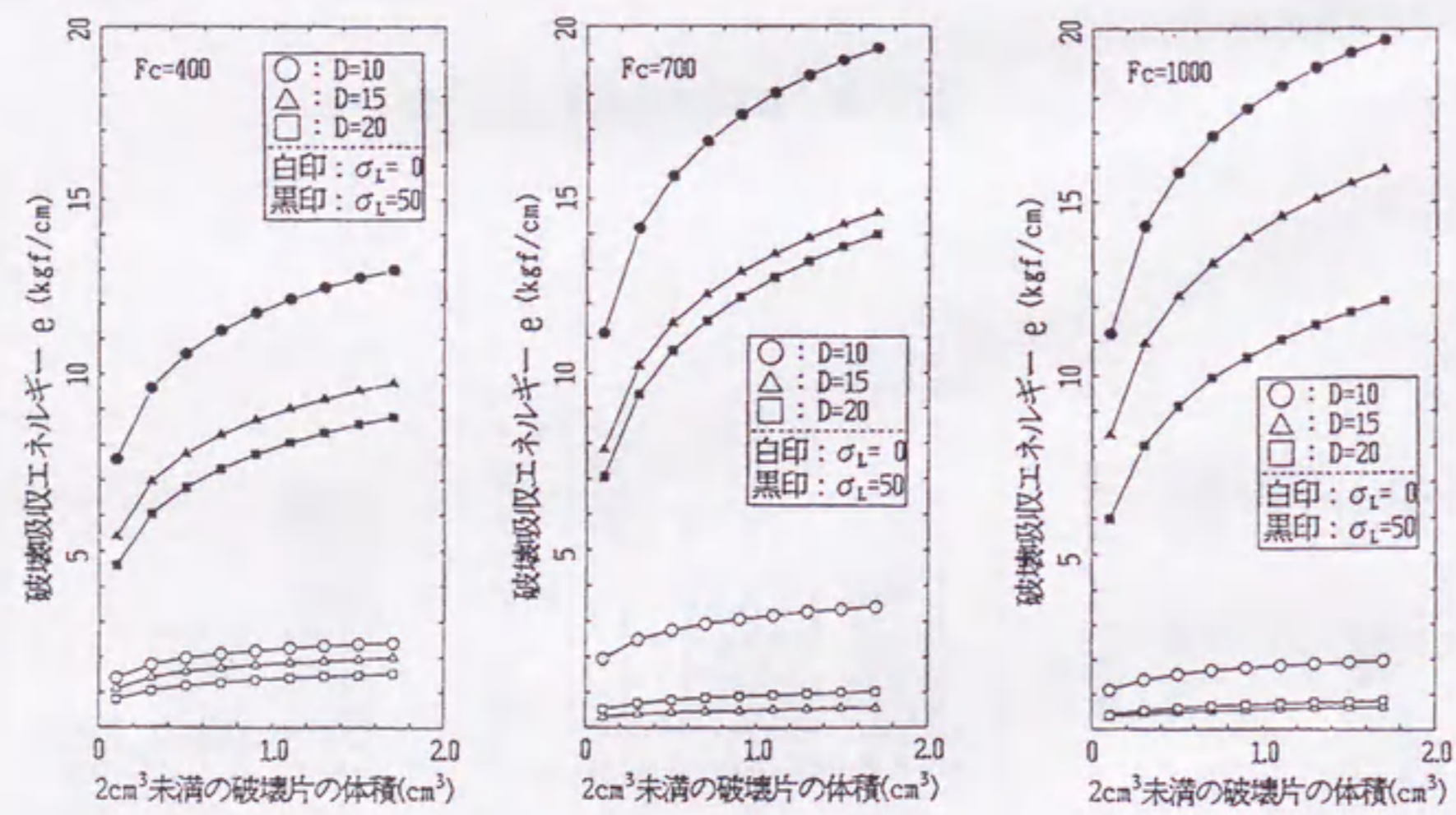


図-2.3.12 クラック単位面積当りの消費エネルギー  
(小径の破壊片:  $v=1\text{cm}^3$ )



(a) Fc=400 シリーズ (b) Fc=700 シリーズ (c) Fc=1000 シリーズ

図-2.3.13 単位クラック面当りの破壊吸収エネルギー  $e$  に及ぼす  $2\text{cm}^3$ 未満の破壊片の体積  $v$  の影響 (○:  $\sigma_t=0$ , ●:  $\sigma_t=50$ )

### 第3章 コンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果

- 3.1 概説
- 3.2 プレーンコンクリートの圧縮特性における寸法効果
- 3.3 寸法効果を反映したプレーンコンクリートの応力ひずみ曲線の表示式
- 3.4 コンファインドコンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果
- 3.5 高強度コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果
- 3.6 超高強度コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果
- 3.7 コンファインドコンクリートの圧縮特性のにおける寸法効果に及ぼす帯筋の形状・間隔と骨材寸法の影響
- 3.8 寸法効果を反映したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線表示式



### 3.1 概説

RC部材の曲げ塑性変形挙動に試験体寸法の影響がみられることから、RC梁の圧縮部を想定したコンクリート角柱体の一軸圧縮荷時の強度と塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響について実験的に検討した。

本章では、まず、プレーンコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験<sup>1)~3)</sup>を行い、これらのコンクリートについて圧縮強度のみならず、高ひずみ域に至るまでの圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を明らかにするとともに、試験体寸法と骨材寸法を考慮した応力-ひずみ曲線の表示式<sup>4)</sup>の作成を試みる。

RC部材は、せん断補強筋によって横拘束を受けるため、プレーンコンクリートに比べて力学特性が改善される。そのため、せん断補強筋の多い部材では、延性的な変形性状を示す。したがって、RC部材の力学挙動の寸法効果を論じるには、部材の圧縮域を想定し、横補強されたコンファインドコンクリートの力学挙動の寸法効果を調べる必要があるが、この種の実験データは、ほとんどみられない。ここでは、まず圧縮強度が $200 \sim 350 \text{kgf/cm}^2$ の普通強度レベルのコンファインドコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を行い、これらのコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響<sup>2), 3)</sup>について調べる。

近年、RC構造物は高層化する傾向にあり、コンクリートも高強度化の傾向がある。コンクリートは高強度になるほど圧縮特性の寸法効果が大きくなるとの報告<sup>5)~14)</sup>も見られるが、普通強度から高強度までを含めて応力-ひずみ曲線の寸法効果を検討した研究例は少ない<sup>15)~17)</sup>。これらの実験データの不足を補うために、普通強度コンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する上記の実験的研究に引き続き、圧縮強度が $500 \sim 700 \text{kgf/cm}^2$ レベルのコンファインド高強度コンクリートについても、圧縮特性の寸法効果について実験的研究<sup>11)</sup>を実施する。

最後に、コンファインド高強度コンクリートの実験に引き続き、圧縮強度が $1000 \text{kgf/cm}^2$ レベルの超高強度コンクリートを用いて、コンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす超高強度コンクリートの影響について実験的に明らかにする<sup>7)</sup>とともに、前述の実験データと併せて、コンクリートの強度レベルの相違がコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす影響について実験的に明らかにする。

また、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式は数多く提案されている<sup>17), 18)</sup>ものの、試験体寸法とコンクリート強度の影響も併せて考慮したものはほとんど見られない。そのため、プレーン並びにコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する筆者らの一連の実験データを用いて、寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式<sup>19)~21)</sup>を作成した。

なお、ここで取り扱うコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果とは、プレーンコンクリートの圧縮特性の寸法効果に加え、帯筋の拘束効果、すなわち帯筋の間隔や辺長といった構造的効果に関わる要因の影響をも含むものである。また、ここでは、マイクロコン



クリートの実験<sup>3)</sup>を除き、基本的に同一調合のコンクリートについて寸法効果を論じるものとする。

この種の研究では、実大試験体の実験データを含めて検討することが望まれるが、載荷試験機の制約から本実験で取り扱っている試験体の寸法の範囲は「縮小模型」と「超縮小模型」の範囲に限られている。

### 3.2 プレーンコンクリートの圧縮特性における寸法効果

#### (1) まえがき

RC 構造物の部材実験では、実験のし易さから縮小モデル試験体を用いる場合が多い<sup>22), 23)</sup>。純曲げ、あるいは曲げとせん断を受ける RC 梁の曲げモーメント区間の塑性域のモーメント-曲率関係は、曲げ圧縮域のコンクリートの応力-ひずみ関係の影響を受ける。これらの解析においては、コンクリートの圧縮特性、とくに RC 梁の曲げ解析に関連するコンクリートの応力-ひずみ関係における寸法効果の影響をも考慮しておく必要があるが、これらの寸法効果<sup>24), 25)</sup>についてはほとんど不明で、解決すべき点が多い。

応力下降域を含むコンクリートの応力-ひずみ曲線は、試験体の形状・寸法やコンクリート中の骨材の粒度分布や最大寸法に大きな影響を受ける。実験室レベルのモデル試験体に対して、部材寸法が大きくなったり、打ち込まれるコンクリート中の骨材の最大寸法が相違したり、また骨材の最大寸法と部材寸法の比が異なる RC 梁では、モーメント-曲率関係の解析には、これらの影響を考慮したコンクリートの $\sigma-\epsilon$  曲線を適用する必要があるが、試験体寸法や骨材の最大寸法の違いを考慮した応力下降域を含む汎用的なコンクリートの応力-ひずみ曲線<sup>26)~29)</sup>は、報告されていない。これらの寸法効果を取り除く方策の一つとして、コンクリート中の骨材を縮小化したマイクロコンクリートを用いる研究<sup>30), 31)</sup>も多いが、コンクリートをマイクロ化してもプロトタイプの圧縮強度や変形挙動を実用できるレベルにトレースできるものはみられず、解決すべき研究課題は多い。

本研究では、水セメント比を 45%、60% および 70% の 3 種類、骨材の最大寸法を 30mm ~ 10mm の 5 種類とした多粒径コンクリートについて、試験体の寸法を相似的に変化させて一連の一軸圧縮実験を実施し、これらの要因がコンクリートの応力下降域を含む塑性変形挙動に及ぼす影響について調べた。なお、比較のためにモルタル試験体も作製した。

#### (2) 実験方法

##### 1) 実験の概要

プレーンコンクリート試験体の一軸圧縮実験の概要を表-3.2.1 に示す。実験要因として試験体寸法、水セメント比、および粗骨材の最大寸法を取り上げた。図-3.2.1 に、コンクリート角柱試験体の形状・寸法を示す。試験体の寸法は、断面の一辺 (b) が 4.5cm ~ 15cm の 5 種類、高さ (H) と幅 (b) の比 (H/b) は 3 とした。試験体の個数は、各要因の組合せごとに 20 体、合計 1800 体である。円柱体は縦打ち、角柱体は横打ちとした。

##### 2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (5mm 未満) と川砂利を使用した。図-3.2.2 に、粗骨材の粒度分布を示す。粗骨材の粒度分布は、骨材最大寸法  $\phi a=25\text{mm}$  の分布を基本とし、その他の骨材最大寸法 ( $\phi a=10, 15, 20$  および 30mm) については、無次元化粒度分布が等しくなるように粒度調整を行った。モルタル試験体については、天竜川産の川砂 (5mm 未満) のみを骨材として使用した。

表-3.2.2 に、使用したコンクリートの調合表を示す。水セメント比 (W/C) は 45、60 および 70% の 3 種類、設計スランプは 15cm とした。コンクリートの混練には、容量 600 l のスミス式可傾ミキサを使用した。角柱試験体の型枠には、試験体の端面を平滑に、また端面の平行度を高めるために、鋼製型枠を使用した。試験体の加圧面は鋼製型枠で打設したため表面の凹凸が極めて少なく平滑に作成することができ、加圧方向と加圧面の角度も 90 度に作成できた。コンクリートの打設に際しては、粗骨材が分離しないように注意し、バイブレータおよび木づちによって十分に締め固めた。すべての試験体は材齢 3 日目に脱型し、室内 (温度  $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $75\pm 10\%$ ) で空中養生を行った。実験材齢は、およそ 6 週とした。

##### 3) 載荷および測定方法

コンクリートの圧縮試験では、試験機の載荷盤と試験体の上下の端面間に加圧板を使用した。加圧板の寸法は、試験体の断面寸法と同一とし、厚さは試験体の断面の一辺 b の 1/4 以上のものを使用した。載荷には、名古屋大学の変位制御型高剛性圧縮試験機を使用した。図-3.2.3 に、載荷装置の概要を示す。ひずみ速度は、毎分およそ  $1\times 10^{-3}$  の一定とし、試験体の縦ひずみ ( $\epsilon$ ) が  $10\times 10^{-3}$  になるまで継続載荷した。

図-3.2.4 に、ひずみの測定方法を示す。試験体の縦ひずみは、試験体の中央部に取り付けた一対の変位計によって測定した。測定長は、角柱体では試験体の中央部 2b、円柱体では (H-2) cm とした。



### (3) 実験結果とその考察

試験体のデータは、各要因とも各 20 個得られている。表-3.2.3 に、実験結果の概要の一例を示す。

#### 1) 圧縮強度

図-3.2.5 および 3.2.6 に、それぞれ角柱体および円柱体の圧縮強度 ( $F_c$ ) に及ぼす試験体寸法 (角柱体:  $b$ 、円柱体: 直径  $d$  で表示) の影響を示す。これらの図によれば、i) 打込み方向の相違にも拘らず、角柱体および円柱体の圧縮強度の寸法効果は極めて類似しており、圧縮強度は試験体寸法が大きいほど増大すること (ここで、粗骨材の最大寸法 ( $\phi_a$ ) は一定)、および ii) 同一寸法の試験体であれば、一般に  $\phi_a$  の値の増加に伴って圧縮強度が減少することが分かる。ここで、すべてのコンクリート試験体は前述のように、空中養生 (相対湿度  $75 \pm 10\%$ ) を行っていることに注意されたい。

森田ら<sup>31)</sup> は、実験条件を広範囲に変化させてコンクリートの圧縮強度の寸法効果を検討している。すなわち、円柱試験体の直径  $d$  を 1.25 ~ 15cm の間で、また、粗骨材最大寸法  $\phi_a$  を 2.5 ~ 10mm の間で変化させ、これらの種々の組合わせに対して、水中養生 (温度 20℃、4 週間) されたコンクリートの圧縮強度を調べた。その結果、 $d/\phi_a$  比が 5 ~ 60 の範囲では、 $\phi_a$  の値が一定の場合、コンクリートの圧縮強度は円柱体の直径  $d$  が 5 ~ 10cm のものではほぼ等しく、縮小率が高くなるほど、すなわち  $d$  が 2.5cm、1.25cm と小さくなるほど強度が低下する傾向を示し、さらに、 $\phi_a$  の値が大きくなるほど圧縮強度が低下する傾向にあると報告している。

本研究では、モルタル ( $d/\phi_a = 9 \sim 30$ ) およびコンクリート ( $d/\phi_a = 1.5 \sim 15$ ) 試験体のいずれの場合も、 $d/\phi_a$  比に拘らず試験体寸法の増大とともに圧縮強度が増加し、また  $\phi_a$  が大きくなるほど強度が低下する傾向を示した。すなわち、森田ら<sup>31)</sup> の実験結果と定性的に類似し、定量的にはより寸法効果が明瞭に現れている。

ここで、養生条件と試験時の試験体の乾湿条件は、セメントの水和反応と硬化コンクリートの乾燥状態に関わる要因であり、その影響の程度は試験体の寸法によって大きく異なるものと考えられる。本実験では、相対湿度が  $75 \pm 10\%$  と低く、乾燥の影響により寸法効果がより明瞭に現れたものと考えられる。

#### 2) 最大圧縮応力時のひずみ

図-3.2.7 および 3.2.8 に、それぞれ角柱体および円柱体の最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) に及ぼす試験体寸法の影響を示す。これらの図から、以下の 3 点を指摘できる。

i) 角柱体および円柱体の最大圧縮応力時のひずみの寸法効果は、圧縮強度の場合と

同様に極めて類似している。図-3.2.7 によれば、 $b=4.5 \sim 9.7\text{cm}$  の範囲では、 $\epsilon_m$  の値は試験体寸法の増大とともに増加するが、 $b=9.7 \sim 15\text{cm}$  の範囲では、ほぼ一定となる。また、同様な傾向が図-3.2.8 においても見られる。

ii) 試験体寸法が同一の場合、コンクリートの  $\epsilon_m$  の値は、 $\phi_a$  の値の増大に伴って減少する。

iii) モルタルの  $\epsilon_m$  の値は、試験体寸法の増大に伴って増大する。

森田ら<sup>10)</sup> は、同一調査のコンクリート ( $\phi_a=2.5, 5$ 、または 10mm) で比較した場合、 $\epsilon_m$  の値に及ぼす試験体寸法 ( $d=1.25 \sim 15\text{cm}$ ) の影響はあまり見られないと報告している。また、 $d/\phi_a$  の比を 5 の一定としたマイクロコンクリート ( $d=1.25 \sim 15\text{cm}$ ) の場合、 $\epsilon_m$  の値は、試験体寸法の増大とともに小さくなることも報告している。本研究では、 $b/\phi_a=4.5 \sim 5.0$  および  $b/\phi_a=8.3 \sim 10$  としたマイクロコンクリートの  $\epsilon_m$  の値に関して顕著な寸法効果は見られなかった (後述の図-3.2.12 (a) または (c) 参照)。

### 3) 応力-ひずみ曲線

図-3.2.9 (a) ~ (f) は、 $W/C=60\%$ 、 $\phi_a=25\text{mm}$  の角柱試験体の応力-ひずみ曲線の一例を、試験体寸法別に示したものである。同一実験要因での実験データのばらつきはかなり認められる。また、応力-ひずみ曲線には寸法効果が認められる。図-3.2.10 は、 $W/C=60\%$ 、 $b=12.5\text{cm}$  の角柱試験体の応力-ひずみ曲線の一例を、骨材寸法別に示したものである。図-3.2.9 と同様に、同一実験要因での実験データのばらつきはかなり認められるものの、骨材寸法が大きくなると、強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降勾配は延性的な性状を示している。一方、骨材寸法が小さくなるにつれて強度は上昇するが、応力-ひずみ曲線の下降域では耐力の低下が大きく、ぜい性的な性状を示している。

応力-ひずみ曲線の変動についての考察はここでは割愛し、以下の考察では 20 体の平均値に基づく考察に限定する。

図-3.2.11 (a) ~ (f) は、応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、骨材寸法別に示した一例である。図によれば、試験体寸法の増大とともに初期剛性および圧縮強度が増大し、軟化域の勾配が急になる。この傾向は、図-3.2.11 (a) ~ (f) のいずれの骨材寸法シリーズにおいても、ほぼ同様に認められた。図には示していないが、この傾向は、水セメント比が小さく圧縮強度の高いコンクリートほど顕著である。

Bazant<sup>32)</sup> は、試験体寸法が大きいほど応力下降域の勾配が急となり、脆性的に破壊すると指摘しており、本実験結果の傾向と同様である。軟化域のおよそ  $\epsilon = (3 \sim 4) \times 10^{-3}$  のひずみ域において、応力-ひずみ曲線が収束する傾向が見られる。この傾向は、水セメント比  $W/C$ 、すなわち圧縮強度の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線に見られる傾向と同様である。

図-3.2.12 (a) ~ (f) は、コンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす粗骨材の最大寸法



$\phi_a$ の影響を、試験体寸法別に示した一例である。図によれば、 $\phi_a$ の値の増加に伴い、応力-ひずみ曲線のピークが早く現れ、低い強度を示し、圧縮強度および圧縮強度時のひずみは減少し、軟化域の負勾配は若干緩やかになる。これは、コンクリート中の骨材の寸法が相対的に大きくなるため、コンクリート中の骨材の幾何学的非均質度が大きくなるためである。さらに、試験体中に占める骨材の寸法が相対的に大きくなるため、ひび割れ発生後の骨材のインターロッキング作用により、応力-ひずみ曲線の下降域が延性的な性状を示すものと考えられる。図-3.2.12 (a) ~ (f) のいずれの試験体寸法シリーズにおいても、ほぼ同様な結果が得られた。

図-3.2.13 (a) ~ (e) と 3.2.14 (a) ~ (f) に最大応力 $\sigma_0$ と最大応力時のひずみ $\varepsilon_0$ で無次元化した応力-ひずみ曲線 ( $\bar{S}$ -E曲線)を示す。図中の縦軸 $\bar{S}$ と横軸Eは、それぞれ $\bar{S} = \sigma / \sigma_0$  ( $\sigma$ : 圧縮応力) および  $E = \varepsilon / \varepsilon_0$  ( $\varepsilon$ : 圧縮ひずみ) として求めた。図-3.2.13 は、無次元化した応力-ひずみ曲線における寸法効果に及ぼす骨材寸法の影響を示したものである。図-3.2.13 によれば、いずれの骨材寸法シリーズのコンクリートでも、試験体寸法が大きなものほど最大応力後の軟化域の下降勾配が急になり、じん性に欠ける性状を示す。一方、図-3.2.14 は、応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材の最大寸法の影響を試験体寸法別に示したものである。図-3.2.14 によれば、骨材寸法の大きな試験体ほど最大応力後の下降勾配が緩やかで、延性的な傾向のあることを示している。しかしながら、試験体寸法が大きなシリーズほど、応力下降域の曲線が接近し骨材寸法の影響が無くなる傾向を示し、 $b=12.5\text{cm}$ 以上の試験体では、すべての骨材寸法の下降曲線がほぼ一致する。

図-3.2.15 (a) ~ (c) は、ほぼ等しい  $b / \phi_a$ 比を有するコンクリートの応力-ひずみ曲線を比較したものである。図によれば、 $b$  または  $\phi_a$ の値の減少、すなわち、寸法の縮小に伴い、コンクリートの圧縮強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降域はより延性的となることが分かる。したがって、本実験時のように比較的乾燥した条件下で空中養生したコンクリートでは、たとえ、試験体寸法に応じて骨材径を縮小したマイクロコンクリートを用いても、小型試験体から得られる応力-ひずみ曲線は、実部材のコンクリートの挙動よりも強度が小さく、より延性的になることが予想される。

#### (4) 結論

本節では、プレーンコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を行い、これらのコンクリートについて圧縮強度のみならず、高ひずみ域に至るまでの圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を明らかにした。なお、本実験では断面寸法の一辺  $b$ の範囲は、実験室レベルの試験体寸法 (プレーンコンクリート:  $b=4.5 \sim 20\text{cm}$ 、コンファインドコンクリート:  $b=7.3 \sim 20\text{cm}$ ) での寸法効果について論じたものである。本節の結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 圧縮強度は、試験体寸法がおよそ 10cm までは、寸法が増大するほど増大する傾向を示す。また、骨材の最大寸法が大きな試験体ほど、低い強度を示す。
- 2) 応力-ひずみ曲線の軟化曲線の下降勾配は、試験体寸法の影響を大きく受ける。すなわち、試験体寸法が増大するにつれて圧縮強度は増大するが、下降勾配が急になる挙動を示す傾向が強くなる。この傾向は、水セメント比が小さく、圧縮強度の高いコンクリートほど顕著である。
- 3) 最大応力 $\sigma_0$ と最大応力時のひずみ $\varepsilon_0$ で無次元化した応力-ひずみ曲線 ( $\bar{S}$ -E曲線)の軟化曲線の勾配は、試験体寸法の影響を大きく受け、試験体寸法が増大するほど下降勾配が急になる挙動を示す (図-3.2.13)。一方、骨材寸法の大きな試験体ほど最大応力後の下降勾配が緩やかで、延性的な傾向のあることを示すが、試験体寸法が大きくなると応力下降域の曲線が接近し、 $b=12.5\text{cm}$ 以上の試験体では、すべての骨材寸法の下降曲線がほぼ一致する (図-3.2.14)。
- 4) 温度  $20 \pm 2$  °C、相対湿度  $75 \pm 10$  %で6週間空中養生したマイクロコンクリート (粗骨材の最大寸法を試験体の寸法と比例させて縮小したコンクリート) の場合でも、実験によって得られる応力-ひずみ曲線は試験体寸法によって異なる。すなわち、試験体寸法の縮小、または粗骨材の最大寸法の減少によって圧縮強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降域は延性的となる。したがって、比較的乾燥した条件下で空中養生されたコンクリートでは、小型モデル試験体をたとえマイクロコンクリートで作成しても、小型試験体から得られる応力-ひずみ曲線は、実部材の挙動よりも強度が小さく、より延性的になると考えられる。



### 3.3 寸法効果を反映したプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式

#### (1) まえがき

応力下降域を含むコンクリートの応力-ひずみ曲線（以下、 $\sigma-\epsilon$ 曲線と略記）は、コンクリート試験体の形状・寸法やコンクリート中の骨材の粒度分布や粒径によって大きな影響を受ける<sup>33)~35)</sup>。また、RC梁の等曲げモーメント区間の塑性域のモーメント-曲率関係は、曲げ圧縮部のコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線の影響を受けるため、試験体寸法が相違したり、打ち込まれたコンクリート中の骨材の最大粒径が相違するRC梁のモーメント-曲率関係の解析には、これらの影響を考慮したコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線を適用する必要がある。

筆者は、水セメント比60%、骨材の最大寸法が25mmの多粒径の骨材からなるコンクリート角柱体の $\sigma-\epsilon$ 曲線の応力軟化域の挙動に及ぼす試験体寸法の影響について考察し、 $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式の作成を試みた<sup>2)</sup>。しかしながら、試験体寸法や骨材寸法の影響を考慮した応力下降域を含む汎用的なコンクリートの応力-ひずみ曲線は、まだ報告されていない。

本章、3.2節では、水セメント比45%、60%および70%のコンクリートについて、骨材の最大寸法5~30mmの多粒径のコンクリートについて、試験体寸法を相似的にかえて、一連の一軸圧縮実験を実施し、応力軟化域を含むコンクリートの応力-ひずみ曲線の諸性質について考察した。

本節では、これらの実験<sup>4), 36), 37)</sup>で得られたプレーンコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線を用いて、試験体寸法と骨材の最大寸法を考慮した応力下降域を含む $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式を作成を試みた。

#### (2) 寸法効果を考慮したプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式

本項では、3.2節で述べたプレーンコンクリートの実験データを用いて、寸法効果を考慮したプレーンコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式を作成した。

##### 1) 解析対象データの概要

解析対象データは、以下の条件で実験したものである。実験要因は、試験体寸法（ $b=4.5\sim 15\text{mm}$ の6種類）、水セメント比（45~70%の3種類）並びにコンクリート中の骨材の最大寸法（5~30mmの6種類）の3種類とした。解析には、コンクリート角柱体の実験

データを使用した。角柱体の高さ（H）と幅（b）の比（H/b）は3とした。解析には、各20個の実験データの平均値を使用した。試験体は、温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度60%の乾燥した恒温恒湿養生室で6週間空中養生した後に実験に供した。

実験から得られたデータの内、角柱体の $\sigma-\epsilon$ 曲線の一例を以下に示す。図-3.3.1(a)~(e)は、最大応力 $\sigma_0$ と最大応力時のひずみ $\epsilon_0$ で無次元化した応力-ひずみ曲線（ $\bar{S}-E$ 曲線）における寸法効果を骨材寸法別に示しものである（図-3.2.13の再掲）。図中の縦軸 $\bar{S}$ と横軸Eは、それぞれ $\bar{S}=\sigma/\sigma_0$ （ $\sigma$ :圧縮応力）および $E=\epsilon/\epsilon_0$ （ $\epsilon$ :圧縮ひずみ）として求めた。図-3.3.1によれば、いずれの骨材寸法シリーズのコンクリートにおいても、試験体寸法が大きなものほど最大応力後の軟化域の下降勾配が急になり、じん性に欠ける性状を示している。

#### 2) 応力上昇域の応力-ひずみ曲線の表示式

コンクリートの応力上昇域の $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式は、式(3.3.1)に示すPopovicsの提案式<sup>38)</sup>を使用した。

$$\bar{S} = \frac{N_a \cdot E}{N_a - 1 + E N_a} \quad \dots \dots (3.3.1)$$

ここに、 $\bar{S}=\sigma/\sigma_0$ ,  $E=\epsilon/\epsilon_0$ ,  $N_a$ : 実験係数

$$N_a = 1 + a (\sigma_0/100)^b \quad \dots \dots (3.3.2)$$

ここに、 $a=0.57$ ,  $b=1.0$

#### 3) 応力下降域の応力-ひずみ曲線の表示式

小阪・谷川・畑中・三輪<sup>39)</sup>の提案した応力下降域の $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式(3.3.3)および(3.3.4)は、式中の係数 $m$ ,  $B$ および $N_d$ の組合わせを替えることにより、 $\bar{S}-E$ 曲線の下降域の形状を広範囲に変えることのできる式である。

$$\bar{S} = \frac{N_d \cdot X}{N_d - 1 + X N_d} \quad \dots \dots (3.3.3)$$

$$X = B (E - 1)^m + 1 \quad \dots \dots (3.3.4)$$

ここに、 $\bar{S}=\sigma/\sigma_0$ ,  $E=\epsilon/\epsilon_0$ ,  $E>1$

$m$ ,  $B$ ,  $N_d$ : 実験係数

今回の実験結果から、式(3.3.3)および(3.3.4)を用いて $\bar{S}-E$ 曲線の下降域にわたって実験値によく一致する係数 $m$ ,  $B$ および $N_d$ の組合わせが得られることが確かめられた



ため、本研究では式(3.3.3)および(3.3.4)を応力下降域の表示式として使用し、これらの実験係数に及ぼす試験体寸法および骨材寸法の影響について調べるとともに、実験係数  $m$ 、 $B$  および  $N_d$  を定量化する。

### (3) 実験係数 $m$ 、 $B$ および $N_d$ の推定と定式化

#### 1) 実験係数 $m$ 、 $B$ および $N_d$ の推定

図-3.3.2 は、式(3.3.3)の係数  $m$  および  $B$  を  $m=0.8$ 、 $B=0.9$  として、係数  $N_d$  を 1 から 8 まで変えた場合の式(3.3.3)から求まる曲線の変化を示したものである。図-3.3.3 は、式(3.3.3)中の係数  $m$  を  $m=0.8$  として、係数  $B$  と  $N_d$  を変えた場合の式(3.3.3)の曲線の変化を示したものである。図-3.3.2 および図-3.3.3 から、式(3.3.3)は実験係数  $m$ 、 $B$  および  $N_d$  を変えることによって、応力下降域の曲線のふくらみやへこみの異なる各種曲線をよく表示できるだけでなく、高ひずみ領域において応力レベルが異なる曲線に対してもよく表示できる特徴をもっていることが分かる。以下に、無次元化したコンクリートの応力-ひずみ曲線の応力軟化域の下降曲線の形状に比較的良好に一致する式(3.3.3)中の係数  $m$ 、 $B$  および  $N_d$  を求めることによって、コンクリートの応力-ひずみ曲線を式(3.3.3)で表示し、合わせて係数  $B$  および  $N_d$  に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響を調べる。

表-3.3.1 に、今回の実験結果に比較的良好に一致する式(3.3.3)の  $B$  と  $N_d$  の値を示す。なお係数  $m$  は、 $m=0.8$  の場合の式(3.3.3)の曲線が比較的良好な実験値の応力下降域の性状をよく表示するものが多かったため、 $m$  を係数とし、 $m=0.8$  とした。

図-3.3.4 (a) ~ (e) に、表-3.3.1 に示した実験結果に最もよく合う  $B$  と  $N_d$  の値を式(3.3.3)に入れて求めた  $\bar{S}-E$  曲線の計算値と実験値(図-3.3.1 に示した曲線)の比較を示す。図-3.3.4 によれば、表-3.3.1 に示した係数を用いて式(3.3.3)より求めた推定曲線は、応力下降域の全領域にわたって  $\bar{S}-E$  曲線の実験値と極めてよい一致を示している。

図-3.3.5 (a) ~ (e) は、最大応力と最大応力時のひずみの実験値を用いて、図-3.3.4 から求めた  $\sigma-\epsilon$  曲線の計算値と実験値を骨材寸法別に比較したものである。実験値と計算値はよく一致している。

#### 2) 実験係数 $B$ および $N_d$ に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響

実験結果の応力-ひずみ曲線の特徴を残しながら、試験体寸法と骨材寸法の関係が明白になるように、式(3.3.3)中の  $B$  と  $N_d$  の値をやや修正して求めた。得られた結果を図-3.3.6 に示す。図-3.3.6 は、縦軸に係数  $B$  を、横軸に係数  $N_d$  をとり、 $B$  と  $N_d$  の関係に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響を示したものである。試験体寸法が小さく、骨材寸法の大きな

試験体シリーズでは、 $B$  と  $N_d$  の値の相関図に乱れがみられる。この乱れがみられる領域は、試験体寸法が小さく、粗骨材の寸法が相対的に大きな組合わせの部分でみられた。試験体寸法に比べて骨材の寸法が相対的に大きな試験体では、骨材によりコンクリート中の骨材の幾何学的非均質度が相対的に大きくなり、実験結果にもこれが大きな影響を与え、ばらつきが大きくなったためと考えられる。模型実験では、このような組合わせのコンクリートでは誤差が現れやすいため、避ける必要がある。

#### 3) 実験係数 $B$ および $N_d$ の定式化

表-3.3.2 は、 $\sigma-\epsilon$  曲線の実験結果の内、コンクリート打込み時の誤差等のために誤差が出ていると考えられる曲線を、過去の実験の傾向を参考にして修正し、試験体寸法と骨材の最大寸法の影響が明白となるように  $B$  と  $N_d$  の値を選び直したものである。図-3.3.7 および 3.3.8 は、これらの係数を用いて求めた  $\sigma-\epsilon$  曲線の計算値と実験値の比較の一例 ( $W/C=60\%$ 、 $\phi=30\text{mm}$ ) である。

図-3.3.9 (a) および (b) は、表-3.3.2 に示す  $B$  と  $N_d$  の値を図示したものである。図の (a) は、水セメント比 45、60 および 70%、骨材寸法 15 および 25mm の  $B$  と  $N_d$  の関係を示したもので、図の (b) は、水セメント比 60%の結果である。試験体寸法の相違および骨材寸法の相違が  $B$  と  $N_d$  の値に及ぼす影響がよく表示されている。

図-3.3.9 (b) に示す  $B$  と  $N_d$  の値の各交点に対する回帰直線を図-3.3.10 に示す。これらの直線の勾配と切片を試験体寸法と骨材寸法で表示するために、図-3.3.10 の各回帰直線の勾配と切片を求め、試験体寸法と骨材寸法を変数として回帰分析を実施し、下式を求めた。

$$B = \frac{0.023 \cdot \phi \cdot b + 0.20 \cdot \phi + 0.0431 \cdot S + 0.0109}{0.21 \cdot \phi + 8.53 \times 10^{-3} \cdot b + 0.805} \quad \dots (3.3.5)$$

$$N_d = \frac{0.1 \cdot b - 2.0 \times 10^{-3} \cdot \phi + 2.85}{0.21 \cdot \phi + 8.53 \times 10^{-3} \cdot b + 0.805} \quad \dots (3.3.6)$$

ここに、試験体寸法  $b$  : cm、骨材寸法  $\phi$  : cm とする。

図-3.3.11 は、式(3.3.5)と(3.3.6)から求めた各回帰直線と図-3.3.9 (b) に示す  $B$  と  $N_d$  の値の各交点を重ねて比較したものである。図-3.3.10 に示すデータと各回帰直線とを比較すると、表示式は解析に用いたデータの傾向をよく表示している。

図-3.3.12 (a) ~ (e) は、式(3.3.5)と(3.3.6)から求めた  $B$  と  $N_d$  の値を、表示式(3.3.3)と(3.3.4)に代入して求めた  $\bar{S}-E$  曲線の一例 ( $W/C=60\%$ ) である。図中の点線は計算値を、実線は実験値を示す。計算値は実験値の曲線の傾向を比較的良好に表示している。



図-3.3.13 (a) ~ (e) は、最大応力と最大応力時のひずみの実験値を用いて、図-3.3.12 から求めた  $\sigma - \varepsilon$  曲線の計算値と実験値を骨材寸法別に比較したものである。実験値と計算値はよく一致している。

#### (4) 結論

本節では、3.2節で行ったプレーンコンクリートの圧縮特性に及ぼす試験体寸法と骨材の最大寸法の影響に関する実験によって得られた  $\sigma - \varepsilon$  曲線のデータを用いて、試験体寸法と骨材の最大寸法を考慮した応力下降域を含む  $\sigma - \varepsilon$  曲線の定量化を試み、比較的よい精度の表示式 (3.3.3)、(3.3.4)、(3.3.5)、および (3.3.6) を得た。

### 3.4 コンファインドコンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果

#### (1) まえがき

RC部材の圧縮部のコンクリートは、せん断補強筋による横拘束効果のために、プレーンコンクリートに比べてその力学特性が改善され、せん断補強筋の多いRC部材ほど延性的な力学挙動を示す。RC部材の力学挙動における寸法効果を論じるには、部材の圧縮域を想定して横補強されたコンファインドコンクリートの力学挙動における寸法効果を知る必要があるが、研究例は少ない(15)、(16)、(40)~(42)。

3.2節および3.3節では、プレーンコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を実施し、コンクリート中の骨材の最大寸法をかえたり養生条件をかえた場合の、コンクリートの圧縮強度特性並びに高ひずみ領域までの応力-ひずみ曲線における寸法効果について明らかにするとともに、コンクリートの圧縮強度と応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響を考慮したプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を提案した(4)、(36)、(37)。

本節の実験 I<sup>4)</sup> では、高さ-辺長比 3、水セメント比 55%、養生温度  $20 \pm 2$  °C、相対湿度  $75 \pm 10\%$  の比較的乾燥した実験室内の作業ヤードで空中養生したコンファインドコンクリートについて、中心圧縮実験を実施した。乾燥空中養生下のコンクリートの試験体寸法並びに帯筋ピッチがコンファインドコンクリートの圧縮特性、とくに応力下降域を含めた応力-ひずみ曲線に及ぼす影響について実験的に考察する。

本節の実験 II<sup>1)、2)</sup> では、コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果に及ぼす養生条件の影響について調べる。養生条件によっては、実験 I の乾燥状態における寸法効果とは大幅に圧縮特性の寸法効果が異なることが予想されるため、実験 II では高さ-辺長比 2 および 3、温度  $20 \pm 1$  °C、水中養生のものと、温度  $20 \pm 1$  °C、相対湿度  $90 \pm 10\%$  で湿空養生したコンクリートについて一軸圧縮実験を実施した。

これらの 2 つの実験シリーズは、いずれも圧縮強度が  $450 \text{ kgf/cm}^2$  以下の強度レベルのコンクリートについての中心圧縮実験である。

なお、ここで取り扱うコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果とは、プレーンコンクリートにおける圧縮特性の寸法効果に加え、帯筋の拘束効果、すなわち帯筋のピッチや辺長といった構造的効果に関わる要因の影響をも含むものである。また、本節では、同一調合のコンクリートについて寸法効果を論じるものとする。



## (2) 実験Ⅰ：乾燥空中養生されたコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果

### 1) 実験方法

本実験<sup>16)</sup>では、比較的乾燥した実験室内で空中養生されたコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果について調べる。

表-3.4.1に、コンファインドコンクリート角柱体の実験の概要を示す。実験要因として、試験体寸法  $b$  (正方形断面の一辺)、および帯筋ピッチ ( $S$ ) を取り上げた。図-3.4.1 および 3.4.2 に、それぞれ試験体の寸法および帯筋の配置を示す。

試験体寸法は、正方形の断面の一辺  $b$  が 7.3、9.7、12.5、15 および 20cm の 5 種類とした。コンクリート角柱体の高さ  $H$  と幅  $b$  の比 ( $H/b$ ) は 3 とした。帯筋ピッチ ( $S$ ) は、 $b/4$ 、 $b/2$  および  $b$  の 3 種類とした。比較のために、無筋 (プレーン) コンクリートの角柱体も製作した。帯筋の直径は、帯筋ピッチ ( $S$ ) が辺長 ( $b$ ) と等しい場合で帯筋比が 0.3% となるように選んだ。試験体数は、各要因ともに 12 体、合計 240 体とした。

表-3.4.2 に、使用した帯筋の力学特性を示す。帯筋の降伏点は、ほぼ 2000 ~ 3000kgf/cm<sup>2</sup> のレベルに納めた。

コンクリートの水セメント比は 55% とした。コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (最大寸法 5mm) および川砂利 (最大寸法 25mm) を使用した。コンクリートのスランプは、15cm となるように設計した。全試験体ともに、材齢 3 日目に脱型し、その後試験材齢まで温度 20±2℃、相対湿度 75±10% の実験室内で養生した。実験は、材齢 6 週で実施した。図-3.4.3 に、コンクリート角柱体のひずみの測定方法を示す。

載荷には名古屋大学の高剛性試験機を使用し、試験体の全長  $3b$  区間の縦ひずみで、最大ひずみが  $10 \times 10^{-3}$  にいたるまで、ひずみ速度が  $1 \times 10^{-3}/\text{mm}$  の一定速度で載荷した。圧縮ひずみの測定域 ( $l_0$ ) は、試験体の高さ中央部の  $2b$  区間とし、円柱体 ( $H/D=2$ ) では、 $(h-2)\text{cm}$  とした。

コンクリート強度のバッチ間変動を調べるために、別に  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱体も製作した。

### 2) 実験結果とその考察

以下の考察では、応力下降域を含むすべての領域において、耐荷力をかぶりコンクリートを含めた全断面積で除した値を "応力" と定義する。主筋の断面積は、コンクリート断面積に比して十分に小さいものとみなし、主筋の軸方向耐荷力の寄与分は無視する。

### a) 圧縮強度

図-3.4.4 に、コンファインドコンクリートの圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ  $S$  の影響を示す。図-3.4.4 によれば、プレーンコンクリート ( $S=\infty$ ) や帯筋ピッチの大きなコンファインドコンクリート ( $S=b$ ) では、試験体寸法の増大とともに圧縮強度が増大しており、この傾向は 3.2 節におけるプレーンコンクリートの実験結果と同様である。一方、帯筋ピッチの狭いコンファインドコンクリート ( $S=b/4$  と  $b/2$ ) では、このような寸法効果は認められない。

### b) 最大応力時のひずみ

図-3.4.5 に、コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ  $S$  の影響を示す。図-3.4.5 によれば、プレーンコンクリートや帯筋ピッチの大きなコンクリート ( $S=b$ ) では、試験体寸法  $b$  が 9.7cm より大きなものでは、 $\epsilon_f$  の値は試験体寸法の影響をほとんど受けない。一方、帯筋ピッチの狭いコンファインドコンクリート ( $S=b/4$  と  $b/2$ ) では、 $\epsilon_f$  の値は試験体寸法の増大とともに、ほぼ直線的に減少している。

### c) 応力-ひずみ曲線

図-3.4.6 (a) ~ (d) は、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を帯筋ピッチ別に示したものである。コンクリートの損傷は、試験体の高さの中央部に集中しており、全ての損傷部が試験体のひずみの測定領域内に納まった。図-3.3.6 によれば、応力-ひずみ曲線の応力下降域の軟化曲線の勾配は、帯筋ピッチに拘わらず試験体寸法の増大とともに急になるという形で、寸法効果が現れている。

図-3.4.7 (a) ~ (d) は、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチの影響を、試験体寸法別に示したものである。図-3.4.7 によれば、帯筋ピッチが小さなコンクリートでは、コンクリートが高強度になるほど応力-ひずみ曲線の下降勾配が急になるという一般的な傾向が、ここでも認められる。この傾向は、小型の試験体ほど顕著になることに注目する必要がある。

## (3) 実験Ⅱ：湿空養生並びに水中養生されたコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果

本研究では、恒温水中養生および恒温恒湿空中養生されたコンファインドコンクリート



の一軸圧縮実験<sup>1), 2)</sup>を行い、試験体寸法と養生条件の関係、および試験体形状(高さ-辺長比)とひずみ測定域の関係が横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響について考察する。なお、本節で得られた実験データおよび知見は、寸法の異なる RC 梁の塑性変形挙動を解析する際、曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係を表現するための基礎資料となるものである。

### 1) 実験方法

表-3.4.3 に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として帯筋比、試験体の高さ-辺長比、試験体寸法および養生条件を取り上げた。図-3.4.8 および図-3.4.9 に、試験体の寸法と帯筋の配置を示す。RC 梁の曲げ試験<sup>1, 6)</sup>に用いた梁部材の曲げ圧縮部に関わる要因を考慮して、角柱体の断面の一边を梁幅(b)と等しく取り、帯筋ピッチ(S)は梁のあばら筋に対応するように b/4、b/2、b の 3 種類とした。RC 梁には、曲率測定用の変位計を取り付けるためネジ鋼棒を埋め込んだ今回の実験でも、これらの梁の曲げ圧縮部を模擬するため図-3.4.9 のように、角柱体に  $\phi 6\text{mm}$  ネジ鋼棒 (b=7.3cm シリーズでは、 $\phi 4\text{mm}$ ) を、ピッチ b ごとに配置した。また、帯筋および鋼棒を配置しない試験体 (Plain) も製作した。

帯筋は、実験 I と同じものを使用した。帯筋径は、実験 I と同様に帯筋ピッチ (S) が辺長 (b) と等しい角柱体で帯筋比が約 0.3% となるように選んだ。帯筋の力学特性は、表-3.4.2 に示すものと同じである。

コンクリート角柱体は横打ちとし、高さとの比 (H/b) は 2 と 3 の 2 種類とした。試験体個数は、各要因ごとに 2 体、合計 160 体である。

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (5mm 未満) と川砂利 (5 ~ 25mm) を使用した。水セメント比は 55%、単位水量は  $180\text{kg}/\text{m}^3$ 、およびスランプは 15cm とした。コンクリートの混練には容量 600 l のスミス式ミキサーを使用し、混練は 6 バッチに分けて行った。水中養生した  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  コンクリートシリンダーの平均圧縮強度は  $402\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、バッチ間の強度差の最大値は  $15\text{kgf}/\text{cm}^2$  であった。表-3.4.5 に、使用した帯筋の力学特性を示す。なお、表中には帯筋の拘束指標 ( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ ) も併示した。この値より、断面が  $12.5 \times 12.5\text{cm}$  の角柱体 (帯筋に  $\phi 4.9\text{mm}$  鉄筋を使用) は、他の寸法の試験体に比べて拘束力が若干小さくなることが予想される。試験体は、前項 (2) の乾燥状態で空中養生した実験結果と比較するために、試験体の半数は  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の水中養生とし、残りの半数は恒温恒湿空中養生 (材齢 8 週までは温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $90 \pm 10\%$ 、その後 16 週間は温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $85 \pm 5\%$ ) とし、材齢 24 週で圧縮試験を行った。

図-3.4.10 に、角柱体のひずみの測定方法を示す。H/b=3 の角柱体の圧縮ひずみの測定域 ( $\angle o$ ) は、試験体の高さ中央部の 2b の領域と、これを含む 2.8b の領域の 2 区間とした。H/b=2 の角柱体の測定域は、試験体の高さ中央部の 1.8b の領域とした。載荷には、最

大容量 200tf のアクチュエータを使用した。応力上昇域において最大応力の 2/3 の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、試験体の中央部 2b 区間の縦ひずみが  $15 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。

### 2) 実験結果とその考察

#### a) 圧縮強度

図-3.4.11 に、コンファインドコンクリートの圧縮強度 ( $F_c$ ) の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を、帯筋ピッチ (S) 別に示す。図-3.4.11 (a) は、本節 (2) 項<sup>1, 6)</sup>で述べた実験室内のヤード (相対湿度  $60 \pm 20\%$  と変動) で空中養生した場合の実験データ (図-3.4.4 の再録) を示したものである。同図によれば、プレーンコンクリートやあばら筋のピッチの粗いもの (S=b) では、試験体寸法が小さくなると若干低い強度を示す。しかし、この寸法効果は、あばら筋のピッチの減少に伴ってほとんど見られなくなる。一方、本実験結果を示した図-3.4.11 (b) によれば、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $90 \pm 10\%$  の恒温室内で空中養生されたコンクリートでは、試験体の縮小化とともに強度が低下する寸法効果は僅かに認められる程度である。これは、図-3.4.11 (a) に示した比較的乾燥した実験室内のヤードで空中養生したコンクリートと比較すると、初期強度の発現時における水分の散逸が少ないためと考えられる。水中養生試験体では、強度の寸法効果は極めて小さい。

ここで、養生時の水分の散逸による水和反応の阻害に起因する寸法効果をより詳しくみるために、相対湿度  $75 \pm 10\%$  の恒温室内で養生された  $\phi a = 25\text{mm}$  シリーズのプレーンコンクリート (3.2 節の図-3.2.1 参照) と水中および相対湿度  $90 \pm 10\%$  の恒温室内で養生されたプレーンコンクリート ( $\phi a = 25\text{mm}$ 、図-3.4.11 (b) 参照) を比較する。両者で材齢、H/b 比および水セメント比はやや異なるものの、比較的乾燥した恒温室内で養生されたコンクリート (3.2 節の図-3.2.1 参照) では、寸法効果が顕著であるのに対して、湿空養生されたコンクリート (図-3.4.11 (b) 参照) では、試験体の縮小化とともに強度が低下する寸法効果は僅かに認められる程度である。すなわち、水分の散逸の程度が大きくなるような養生を行ったコンクリートほど、水和反応の阻害に起因する寸法効果が大きくなるといえよう。

#### b) 最大応力時のひずみ

図-3.4.12 に、コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ ( $\epsilon_r$ ) の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を、帯筋ピッチ (S) 別に示す。プレーンコンクリートの場合にすでに指摘されてきている傾向<sup>4, 3), 4, 4)</sup>と同様に、コンファインドコンクリートにおいても恒温室内で空中養生されたものは、水中養生のものよりも  $\epsilon_r$  の値が大きい。また、その増大量は一般に試験体寸法が小さくなるほど、また帯筋のピッチが密になるほど大きな



っている。なお、本節の恒温恒湿空中養生試験体の最大応力時のひずみの寸法効果は、本節(2)項<sup>16)</sup>で述べた実験室内で空中養生したコンファインドコンクリートのそれとほぼ等しい。また、圧縮強度の場合とは異なり、水中養生されたコンクリートでも試験体寸法が小さいほど $\epsilon_f$ の値がやや大きくなる傾向も示している。なお、図には示していないが、 $H/b=2$ の試験体の場合も、ほぼ同様の傾向を示した。

図-3.4.13に、コンファインドコンクリートの $\epsilon_f$ の値と試験体寸法の関係に及ぼす試験体の $H/b$ の影響を、帯筋のピッチ( $S$ )別に示す。ひずみの測定長は、試験体のほぼ全長である。図によれば、一般に帯筋のピッチと試験体寸法に拘らず $H/b=2$ の試験体の $\epsilon_f$ の値は、 $H/b=3$ のものに比べて大きい。ここで、 $H/b=3$ の試験体では、図-3.4.10(a)に示したように、 $l_0=2b$ 区間のひずみ測定用治具の拘束効果が若干含まれていると考えられる。この影響を考慮すれば、 $H/b=2$ と $3$ の試験体の $\epsilon_f$ の値の差は、図-3.4.14でみられる以上に大きいものと推定される。

図-3.4.14は、ひずみの測定長をほぼ等しくした場合に、 $H/b$ の異なる試験体から得られる $\epsilon_f$ の値を比較したものである。ここで、ひずみの測定長( $l_0$ )は、図-3.4.10に示したよう $H/b=2$ の場合 $l_0=1.8b$ 、 $H/b=3$ の場合 $l_0=2b$ とした。図-3.4.14によれば、 $S=b/4$ のものを除き、 $H/b=2$ の試験体の $\epsilon_f$ の値は $H/b=3$ の場合よりもやや大きい値を示す。なお、図には示していないが、水中養生の場合も $\epsilon_f$ の値のレベルは低い、類似の傾向を示す。

### c) 寸法比の異なる試験体の応力-ひずみ曲線

#### i) 帯筋のピッチの影響

図-3.4.15(a)~(d)に、水中養生したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ( $S$ )の影響を示す。これらの図によれば、一般に帯筋ピッチに拘らず、試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状は脆性的である。この傾向は、本節(2)項<sup>16)</sup>で述べた空中養生したコンクリートのそれとほぼ同じである。しかし、図-3.4.15によれば、 $b=7.3\text{cm}$ の場合を除いて、水中養生時の応力-ひずみ曲線間の相違はさほど大きくなく、とくに帯筋ピッチが $S=b/2$ と $b/4$ のように比較的密な場合には、試験体断面の辺長( $b$ )が $10\sim 20\text{cm}$ の範囲における寸法効果は、きわめて小さいといえる。

#### ii) 養生条件の影響

図-3.4.16は、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を示した一例である。一般に、恒温室内で空中養生されたコンクリートは、水中養生されたものよりも応力下降域が延性的である。

### d) 形状の異なる試験体の応力-ひずみ曲線

#### i) 試験体の高さ-辺長比の影響

図-3.4.17(a)および(b)に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼす試験体の高さ-辺長比( $H/b$ )の影響を示す。 $H/b=2$ の試験体のひずみの測定長は $l_0=1.8b$ 、 $H/b=3$ のそれは $l_0=2.8b$ である。これらの図によれば、 $H/b=2$ の試験体の応力下降域は、 $H/b=3$ のものに比べてかなり延性的である。

ここで、 $H/b=2$ と $H/b=3$ の試験体の応力-ひずみ曲線の相違を定量的に捉えるために、筆者らが提案した仮想破壊域モデル<sup>45)</sup>を適用してみる。図-3.4.18は、仮想破壊域モデルを用いて $H/b=2$ の試験体の応力-ひずみ曲線から推定した $H/b=3$ の試験体の応力-ひずみ曲線の計算値と実験値を比較したものである。同図および他の比較例によれば、比較的よい近似値が得られているといえる。

#### ii) ひずみ測定長の影響

図-3.4.19に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼすひずみ測定長( $l_0$ )の影響を示す。 $H/b=3$ の試験体において、 $l_0=2b$ とした場合、応力下降域の曲線の形状は、 $l_0=2.8b$ のものよりもかなり延性的で、この傾向はどの寸法の試験体でも認められる。すなわち、 $l_0=2.8b$ の場合には、ひずみの測定区間に非破壊領域を含むため、脆性的な塑性変形挙動を示すものと考えられる。一方、載荷盤間で計測したコンクリートの下降域の $\sigma-\epsilon$ 曲線は、 $H/b=3$ 、 $l_0=2.8b$ および $H/b=2$ 、 $l_0=1.8b$ のコンクリートで計測されたものよりも若干脆性的な傾向を示した。

図-3.4.20は、ひずみの測定長 $l_0$ がほぼ一定で、高さ-辺長比が異なる試験体から得られた応力-ひずみ曲線を比較したものである。図によれば、いずれの寸法の試験体の場合も、 $H/b=2$ のものが $H/b=3$ のものよりやや延性的な塑性変形挙動を示している。既往の研究<sup>46)</sup>によれば、縦打ちを行ったプレーンコンクリート円柱体の場合、ひずみ測定長が同じであれば、応力-ひずみ曲線はほぼ等しくなると報告されており、本実験結果とは若干異なる。これは、コンクリートの打込み方向の相違、および横補強筋の存在による破壊パターンの相違が一因と考えられる。

### e) エネルギー吸収能

コンクリートのエネルギー吸収能に及ぼす試験体寸法の影響<sup>47)、48)</sup>を定量的に論じるため、ここでは、ひずみの増加に伴うタフネス(応力-ひずみ曲線下の面積)の変動に



ついて調べる。

図-3.4.21 (a) および (b) に、水中養生したコンファインドコンクリートのタフネス ( $E_t$ ) - ひずみ ( $\varepsilon$ ) 関係に及ぼす試験体寸法の影響を示す。これらの図によれば、タフネス曲線は  $\varepsilon = 4 \times 10^{-3}$  付近から分岐しはじめ、ひずみの増加とともに、寸法効果が顕著になる。すなわち、帯筋のピッチに拘らず、試験体寸法が大きなものほどタフネスが小さくなる傾向を示す。

図-3.4.22 は、コンファインドコンクリートのタフネス ( $E_t$ ) - ひずみ ( $\varepsilon$ ) 関係の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を示した一例である。恒温室で空中養生されたコンクリートのタフネスは、水中養生されたものとはほぼ同じ値を示す。

図-3.4.23 に、縦ひずみが  $15 \times 10^{-3}$  の時のタフネスに及ぼす試験体寸法の影響を、帯筋のピッチ ( $S$ ) 別に示す。図によれば、いずれの帯筋のピッチについても同様の寸法効果が見られる。すなわち、試験体寸法が大きなものほどタフネスが低下し、 $S$  が  $b/4$  以下の本実験の範囲では、 $b=20\text{cm}$  の試験体のタフネスは、 $7.3\text{cm}$  のものに比べて帯筋ピッチにかかわらず、およそ 70 ~ 75% に低下する。

#### (4) 結論

本節では、まず実験 I において、乾燥空中養生されたコンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果についての一連の一軸圧縮実験を行い、乾燥状況下でのコンファインドコンクリートの圧縮強度のみならず、高ひずみ域に至るまでの圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と帯筋ピッチの影響を明らかにした。実験 I に引き続き実験 II では、比較的湿潤状態で空中養生されたコンファインドコンクリートと水中養生されたコンクリートについて、試験体寸法、帯筋ピッチ、並びに高さ-辺長比を実験要因として、圧縮特性における形状・寸法効果について実験を実施した。

なお、本実験では断面寸法の一辺  $b$  の範囲は、実験室レベルの試験体寸法 ( $b=7.3 \sim 20\text{cm}$ ) での寸法効果について論じたものである。本節の結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $75 \pm 10\%$  で 6 週間空中養生したマイクロコンクリート (粗骨材の最大寸法を試験体の寸法と比例させて縮小したコンクリート) の場合でも、実験によって得られる応力-ひずみ曲線は試験体寸法によって異なる。すなわち、試験体寸法の縮小、または粗骨材の最大寸法の減少によって圧縮強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降域は延性的となる。したがって、比較的乾燥した条件下で空中養生されたコンクリートでは、小型モデル試験体をたとえマイクロコンクリートで作成しても、小型試験体から得られる応力-ひずみ曲線は、実部材の挙動よりも強度が小さく、より延性的になると考えられる。

- 2) コンファインドコンクリートの圧縮強度の寸法効果は、養生時の湿度が低いほど顕著に現れ、試験体の縮小化とともに強度が低下する。しかし、水中養生の試験体では、このような寸法効果は無視できるほど小さい。
- 3) コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ ( $\varepsilon_f$ ) は、試験体寸法が小さいほど大きく、その傾向は帯筋のピッチが密になるほど著しい。また、 $\varepsilon_f$  の値は水中養生時に比べて、空中養生時には 10 ~ 40% ほど増大する。
- 4) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、試験体寸法が大きなものほど脆性的な形状となる。また、恒温室で空中養生されたコンクリートでは、水中養生のものよりも応力下降域が延性的となる。
- 5) 以上のような圧縮強度、最大応力時のひずみおよび応力-ひずみ曲線における試験体の形状・寸法および養生の影響は、定性的には従来プレーンコンクリートについて指摘されている傾向<sup>4), 10)</sup>と一致する。コンファインドコンクリートの場合も、プレーンコンクリートの延長線上にあるといえるが、定量的にはこれらの要因の影響の程度は帯筋のピッチに依存して変動する。
- 6) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、試験体の高さ-辺長比 ( $H/b$ ) の影響を受け、試験体のほぼ全長をひずみ測定域とした場合には、 $H/b$  の大きい試験体ほど脆性的となる。その傾向は、仮想破壊域を仮定したモデルによって推定することがほぼ可能である。
- 7) 恒温室で空中養生されたコンクリートのタフネス-ひずみ関係は、水中養生されたものとはほぼ同じ値を示す。縦ひずみが  $15 \times 10^{-3}$  の時のタフネスは、試験体寸法が大きなものほど低下する。すなわち、帯筋ピッチが  $b/4$  以下の本実験の範囲では、帯筋ピッチにかかわらず  $b=20\text{cm}$  の試験体のタフネスは、 $7.3\text{cm}$  のものに比べておよそ 70 ~ 75% に低下する。



### 3.5 コンファインド高強度コンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果

#### (1) まえがき

前節3.4では、水中および空中養生された水セメント比55%のコンファインドコンクリートの一軸圧縮試験を実施し、試験体寸法と養生条件の関係、および試験体形状（高さ一辺長比）とひずみ測定域の関係がコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響について調べた<sup>1)</sup>。その結果、これらのコンクリートの塑性変形挙動が、横補筋のピッチに拘らず試験体寸法の大きなものほど脆性的であることが明らかとなった。

本章、3.4節および3.5節で取り扱ったコンクリートは、圧縮強度が200～350kgf/cm<sup>2</sup>の普通強度レベルのものであるが、近年、設計・施工技術の進歩と社会的要請が重なってRC構造物は大型化・高層化する傾向にあり、コンクリートも高強度化の傾向がある。

コンクリートが高強度になるほど圧縮特性の寸法効果が大きくなるとの報告<sup>6)、7)、11)～14)、17)、49)～53)</sup>もみられるが、普通強度から高強度までを含めて、応力-ひずみ曲線の寸法効果を検討した研究例は少ない<sup>6)、9)、10)、18)、49)、51)</sup>。また、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式は数多く提案されているものの、試験体寸法とコンクリート強度の影響も併せて考慮したものはほとんど見られない。

本節では、前節の研究に引き続きコンクリートの強度レベルの相違がコンファインドコンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果に及ぼす影響について考察する。

#### (2) 実験方法

##### 1) 実験の概要

表-3.5.1に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として、帯筋ピッチ、試験体の高さ一辺長比、試験体寸法および水セメント比の相違を取り上げた。図-3.5.1および3.5.2に、試験体寸法と帯筋の配置を示す。試験体寸法は、正方形の断面の一辺 $b$ が9.7、15、20および30cmの4種類とした。角柱体の高さ $H$ と幅 $b$ の比( $H/b$ )は2と3の2種類とし、帯筋ピッチは、 $b/4$ 、 $b/2$ 、 $b$ の3種類とした。比較のために、無筋(プレーン)コンクリートの角柱体も製作した。帯筋径は、帯筋ピッチ $S$ が辺長 $b$ と等しい角柱体で帯筋比が約0.3%となるように選んだ。試験体の個数は、各要因ごとに2体、合計192体である。コンクリート強度のバッチ間変動を調べるために、別に $\phi 10 \times 20$ cm円柱体も作成した。

##### 2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(5mm未満)および岡崎産の砕石(10～20mm)を使用した。水セメント比は32、42および55%の3種類、水セメント比が32%および42%のものでは高性能AE減水剤を使用した。設計スランプは18cmとした。コンクリートの混練には容量600ℓのスミス式ミキサーを使用し、混練は3バッチに分けて行った。コンクリートの打込み方向は横打ちとした。角柱試験体と同一養生とした $\phi 10 \times 20$ cmコンクリートシリンダーの平均圧縮強度は、 $W/C=55\%$ 、 $42\%$ 、および $32\%$ のコンクリートに対してそれぞれ345、500、および653kgf/cm<sup>2</sup>である。バッチ間の強度差は、変動係数で3.2%以下であった。

表-3.5.2に、使用した帯筋の力学特性を示す。なお、表中には帯筋の拘束指標( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ )も併示した。この値より、断面が $30 \times 30$ cmの角柱体(帯筋に $\phi 13$ mm鉄筋を使用)は、他の寸法の試験体に比べて拘束力が若干大きくなることが予想される。いずれの寸法の試験体も、帯筋比は帯筋ピッチ $S$ が辺長 $b$ と等しい場合で約0.3%となるように帯筋を選んだ。養生方法は、すべて恒温恒湿空中養生(温度 $20 \pm 1$ ℃、相対湿度 $85 \pm 5\%$ )とし、いずれも材齢6週で圧縮試験を行った。

##### 3) 載荷および測定方法

図-3.5.3に、角柱体のひずみの測定方法の一例( $H/b=3$ )を示す。 $H/b=3$ の角柱体の圧縮ひずみの測定域( $l_0$ )は、試験体の高さ中央部の $2b$ の領域と、これを含む $2.8b$ の領域の2区間とした。 $H/b=2$ の角柱体の測定域は、試験体の高さ中央部の $1.8b$ の領域とした。試験体の両端面に接触する型枠部分には、機械仕上げで平滑にした厚さ24mmの鋼製帯板を使用し、両端面が正確に平行になるように鋼製型枠で固定してコンクリートを打設した。載荷には、最大容量200tfのアクチュエータを使用した。応力上昇域において最大応力の $2/3$ の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約 $1 \times 10^{-3}$ のひずみ速度で、試験体の中央部 $2b$ 区間の縦ひずみが $15 \times 10^{-3}$ に至るまで継続載荷した。耐荷力が200tfを越える試験体では、最大容量600tfの圧縮試験機を使用した。

##### (3) 実験結果とその考察

本実験では、試験体-載荷盤間の摩擦は減じられていない。コンファインドコンクリート試験体は、すべてせん断型の終局破壊面が斜めに形成され、ひずみの増大とともに一本の局所帯に損傷が集中し、最終的にはコンクリートが斜めの破壊面に沿って滑り、破壊した。



### 1) 圧縮強度

図-3.5.4 に、 $H/b=2$  のコンファインドコンクリートの圧縮強度における寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響を水セメント比別に示す。図-3.5.4 によれば、水セメント比が 55% のコンクリートでは、試験体寸法が大きくなっても圧縮強度はほぼ一定であるが、水セメント比が 32% の高強度コンクリートでは、試験体寸法が 9.7cm から 30.0cm へと大きくなるにつれて、圧縮強度が徐々に低下しており、 $b=30.0\text{cm}$  のものでは  $b=9.7\text{cm}$  のものに比べ平均で約 10% 低下している。

### 2) 最大応力時のひずみ

図-3.5.5 (a) ~ (c) に、 $H/b=2$ 、ひずみの測定長  $l_0=1.8b$  のコンファインドコンクリートの最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) と試験体寸法の影響に及ぼす帯筋のピッチ ( $S$ ) の影響を、水セメント比別に示す。図-3.5.5 (a) によれば、 $W/C=55\%$  のコンクリートでは、試験体寸法が  $b=9.7\text{cm}$  から 30.0cm に大きくなると  $\epsilon_f$  の値は約 15% 小さくなるという前節と同じ傾向を示した。この傾向は、図-3.5.5 (b) および (c) の  $W/C=32\%$  および 42% の高強度コンクリートにおいても同様である。ただし、帯筋のピッチ ( $S$ ) が細くなることによる  $\epsilon_f$  の値の増大傾向は、コンクリートの強度レベルの増大とともに小さくなり、 $W/C=32\%$  の場合には、 $\epsilon_f$  の値に及ぼす帯筋のピッチの影響は極めて小さい。なお、図は示していないが、 $H/b=3$  の試験体の場合も、ほぼ同様の傾向を示した。

### 3) 寸法比の異なる試験体の応力-ひずみ曲線

#### a) 帯筋のピッチの影響

図-3.5.6 (a) ~ (c) に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、 $S=b/4$  の場合について、水セメント比別に示す。図-3.5.7 (a) ~ (c) に、 $H/b=2$  のプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果に及ぼす水セメント比の影響を示す。図-3.5.8 (a) および (b) は、 $H/b=2$ 、 $W/C=32\%$  のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響を示す。図-3.5.6 (c) の  $W/C=55\%$  のコンクリートでは、前節と同様、帯筋のピッチに拘らず、試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状は脆性的である。また、水セメント比の減少に伴い、同一帯筋比のコンファインドコンクリートの応力下降域は脆性的となるが、 $W/C=55\%$  の場合とほぼ同様の寸法効果があるといえる。

図-3.5.6 (a) および (b) によれば、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$  級以下のコンファインドコンクリートの

場合には、応力下降域の軟化勾配は試験体寸法の増大に伴って急になるという形で寸法効果が現れている。このような寸法効果は、本章、2.2 節および 2.4 節<sup>3)</sup> で指摘したように、帯筋のピッチが密なほど顕著である。また、図-3.5.7 に示すように、プレーンコンクリートの場合には相対的に寸法効果が小さいといえる。この理由として、帯筋形状が角形の場合、コンファインドコンクリートにおける帯筋の拘束効果は、ピッチ  $S$  と試験体断面辺長  $b$  の比 ( $S/b$ ) ばかりでなく、ピッチ  $S$  および帯筋の直線部分の長さ  $b$  の大きさそのものにも依存することが考えられる。すなわち、コンファインドコンクリートでは、試験体寸法が大きいほど帯筋のピッチおよび直線部分の長さが大きくなり、その結果、帯筋の拘束効果も低下することになる。

$W/C=32\%$  の図-3.5.6 (a)、図-3.5.8 (a) および (b) の軟化曲線をみると、 $F_c=500 \sim 700\text{kgf/cm}^2$  級のコンファインド高強度コンクリートの応力下降域の曲線形状は、試験体寸法に拘らずほぼ類似しており、ピーク応力点における寸法効果の分だけ平行移動した形となっている。

### 4) 形状の異なる試験体の応力-ひずみ曲線

#### a) 試験体の高さ-辺長比の影響

図-3.5.9 (a) および (b) に、 $W/C=32\%$  および 55% のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体の高さ-辺長比 ( $H/b$ ) の影響を示す。 $H/b=2$  の試験体のひずみの測定長は  $l_0=1.8b$ 、 $H/b=3$  のそれは  $l_0=2.8b$  である。これらの図によれば、 $W/C=55\%$ 、 $H/b=2$  の試験体の応力下降域は、前節と同様、 $H/b=3$  のものに比べてかなり延性的で、この傾向は  $W/C=32\%$  および 42% の高強度コンクリートでも認められた。

#### b) ひずみ測定長の影響

図-3.5.10 (a) および (b) に、 $W/C=32\%$  および 55% のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ測定長 ( $l_0$ ) の影響を示す。ひずみの測定長を  $l_0=2b$  とした場合、応力下降域の曲線の形状は、同一試験体で  $l_0=2.8b$  のものよりも若干延性的である。すなわち、 $l_0=2.8b$  の場合には、ひずみの測定区間内に非破壊領域を含むため、脆性的な塑性変形挙動を示すものと考えられる。この傾向は、水セメント比および試験体寸法に拘らず認められるが、試験体寸法の増大に伴い、若干緩和される傾向がある。参考として、 $H/b=3$  の試験体の破壊状況を図-3.5.11 に示す。一方、載荷盤間で計測した応力下降域の  $\sigma - \epsilon$  曲線は、 $H/b=3$  ( $l_0=2.8b$ ) および  $H/b=2$  ( $l_0=1.8b$ ) のいずれの試験体についても、試験体に取り付けた変位計で計測された応力-ひずみ曲線よりも若干脆性的な傾向を示した。



#### (4) 結論

- 1) コンファインドコンクリートの圧縮強度における寸法効果は、コンクリートの圧縮強度レベルが上昇するにつれて、顕著になる(図-3.5.4)。
- 2) コンファインド高強度コンクリート(W/C=32%)の圧縮強度は、試験体寸法が9.7cmから30.0cmへと大きくなるにつれて、徐々に低下し、断面辺長 $b=30.0\text{cm}$ のものでは $b=9.7\text{cm}$ のものに比べ平均で約10%低下する。
- 3) コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみは、試験体寸法の増大に伴い小さくなるが、この傾向は帯筋ピッチが密なほど顕著である(図-3.5.5)。
- 4) コンファインド普通・高強度コンクリート(W/C=32%~55%)の最大圧縮応力時のひずみ( $\epsilon_f$ )は、試験体寸法が9.7cmから30cmに大きくなると、約15%小さくなる。ただし、帯筋のピッチ(S)が細くなることによる $\epsilon_f$ の値の増大傾向は、コンクリートの強度レベルの増大とともに小さくなり、W/C=32%の場合には、 $\epsilon_f$ の値に及ぼす帯筋のピッチの影響はほとんどみられなくなる。
- 5) 試験体寸法の増大に伴い応力-ひずみ曲線が脆性的になるという普通強度コンクリートで認められた傾向は、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の強度レベルまでのコンファインドコンクリートでもほぼ同様に認められた(図-3.5.6)。このような寸法効果は、帯筋ピッチが密なほど顕著であり、プレーンコンクリートの場合には、相対的に寸法効果が小さい。これは、試験体寸法の増大に伴い、帯筋の直線部分の長さが大きくなり、帯筋の拘束効果が減少するためである。
- 6)  $F_c=500\sim 700\text{ kgf/cm}^2$ 級のコンファインド高強度コンクリートの応力-ひずみ曲線の軟化域の曲線の形状は、試験体寸法に拘わらず類似しており、ピーク点応力における寸法効果の分だけ平行移動した形となる(図-3.5.6、図-3.5.7)。この傾向は、 $F_c=450\text{kgf/cm}^2$ 級以下のコンクリートの応力-ひずみ曲線で見られた寸法効果とはかなり異なるものである。

### 3.6 コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果

#### (1) まえがき

前節(3.5節)では、圧縮強度 $300\sim 700\text{kgf/cm}^2$ の角形コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体の形状・寸法、ひずみの測定域および帯筋ピッチの影響<sup>1)</sup>を調べた。その結果、試験体寸法の増大に伴い、応力-ひずみ曲線が脆性的になるという普通強度コンクリートで認められた傾向は、強度レベルに拘らずほぼ同様に認められること、このような寸法効果は帯筋ピッチが密なほど顕著であり、プレーンコンクリートの場合には、相対的に寸法効果が小さいこと、などが明らかとなった<sup>1)</sup>。本節では、圧縮強度 $1000\text{kgf/cm}^2$ 級の超高強度コンクリートについて、これらの要因および帯筋の降伏強度の影響を実験的に調べ、前節(3.4節、3.5節)までの結果と比較・検討する。

#### (2) 実験方法

##### 1) 実験の概要

本実験は、前節の実験の延長線上にあり、帯筋強度がコンファインド高強度コンクリート( $1000\text{kgf/cm}^2$ 級)の圧縮特性の寸法効果に及ぼす影響について調べた。

表-3.6.1に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として、帯筋比、帯筋の強度レベル、試験体の高さ-辺長比の相違を取り上げた。図-3.6.1および図-3.6.2に、試験体の寸法と帯筋の配置を示す。試験体の寸法は、正方形の断面の辺 $b$ が9.7、15、20および25cmの4種類とした。角柱体の高さ $H$ と幅 $b$ の比( $H/b$ )は2と3の2種類とした。帯筋の強度レベルは、降伏点( $\text{kgf/cm}^2$ )で、3000級、5000級および15000級の3種類とした。帯筋間隔は、3000級では $b/8$ および $b/4$ の2種類、5000級および15000級では $b/8$ のみとした。帯筋径は、帯筋間隔 $S$ が辺長 $b$ と等しい角柱体で帯筋比が約0.3%となるように選んだ。試験体の個数は、各要因ごとに2体、合計80体である。コンクリート強度のバッチ間変動を調べるために、別に円柱体も作成した。

##### 2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、シリカフェーム、天竜川産の川砂(5mm未満)、岡崎産の砕石(10~20mm)および高性能AE減水剤を使用した。水セメント比は25%、スランプは18cmとした。コンクリートの混練には容量100ℓの二軸強



制練りミキサーを使用した。コンクリートの打込み方向は横打ちとした。試験体の両端面に接触する型枠部分には、機械仕上げで平滑にした厚さ 24mm の鋼製帯板を使用し、両端面が正確に平行になるように鋼製型枠で固定してコンクリートを打設した。角柱試験体と同一養生とした  $\phi 10 \times 20$ cm コンクリートシリンダーの平均圧縮強度は  $977 \text{ kgf/cm}^2$  である。バッチ間の強度差は、変動係数で 3.8% であった。

表-3.6.2 に、使用した帯筋の力学特性を示す。なお、表中には帯筋の拘束指標 ( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ ) も併示した。養生方法は、すべて恒温恒湿空中養生 (温度  $20 \pm 1$  °C、相対湿度  $85 \pm 5\%$ ) とし、材齢 6 週で圧縮試験を行った。

### 3) 載荷および測定方法

図-3.6.3 に、角柱体のひずみの測定方法の一例 ( $H/b=3$ ) を示す。 $H/b=3$  の角柱体の圧縮ひずみの測定域 ( $l_0$ ) は、試験体の高さ中央部の  $2b$  の領域と、これを含む  $2.8b$  の領域の 2 区間とした。 $H/b=2$  の角柱体の測定域は、試験体の高さ中央部の  $1.8b$  の領域とした。載荷には、最大容量 200tf のアクチュエータを使用した。応力上昇域において、最大応力の 2/3 の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、試験体の中央部  $2b$  区間の縦ひずみが  $20 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。耐荷力が 200tf を越える試験体では、最大容量 600tf の圧縮試験機を使用した。

### (3) 実験結果とその考察

本実験では、試験体-載荷盤間の摩擦は減じられていない。コンファインドコンクリート試験体は、すべてせん断型の終局破壊面が斜めに形成され、ひずみの増大とともに一本の局所帯に損傷が集中し、ついにはコンクリートが斜めの破壊面に沿って滑り、破壊した。

#### 1) 圧縮強度

図-3.6.4 (a) ~ (c) に、 $H/b=2$  のコンファインドコンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体寸法の影響を示す。図 (a) は、帯筋ピッチ ( $S$ ) および水セメント比 ( $W/C$ ) が変化する場合の実験データ<sup>1), 11)</sup> である (本章 3.4 節および 3.5 節の図を再掲)。この図によれば、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  級 ( $W/C=32\%$ ) のコンクリートの圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、 $b=30 \text{ cm}$  試験体の圧縮強度は  $b=9.7 \text{ cm}$  のものに比べて平均で約 10% 低下している。図 (b) および (c) は、それぞれ帯筋のピッチ ( $S$ ) および降伏強度 ( $\sigma_y$ ) が変化する場合の本実験結果である。これらの図によれば、 $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートにおいても圧縮強度の寸法効果は顕著であり、 $b=25 \text{ cm}$  の試験

体の圧縮強度は、 $b=9.7 \text{ cm}$  のものに比べて平均で約 15 ~ 20% 低下している。また、帯筋のピッチおよび降伏強度が変化するによる圧縮強度の変動はあまり顕著ではなく、本実験の範囲では、いずれの場合もおよそ  $100 \text{ kgf/cm}^2$  以下である。

#### 2) 最大応力時のひずみ

図-3.6.5 (a) ~ (c) に、 $H/b=2$ 、ひずみの測定長  $l_0=1.8b$  のコンファインドコンクリートの最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) に及ぼす試験体寸法の影響を示す。図 (a) は、帯筋のピッチが変化する場合の前節の実験データである。この図によれば、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  級 ( $W/C=32\%$ ) のコンクリートの  $\epsilon_f$  値は、圧縮強度と同じように、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に小さくなり、 $b=25 \text{ cm}$  の試験体の  $\epsilon_f$  の値は、 $b=9.7 \text{ cm}$  のものに比べて平均で約 15% 減少している。図 (b) および (c) は、それぞれ、帯筋のピッチ ( $S$ ) および降伏強度 ( $\sigma_y$ ) が変化する場合の本実験結果である。これらの図によれば、 $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートにおいても  $\epsilon_f$  の値の寸法効果は顕著であり、 $b=25 \text{ cm}$  の試験体の  $\epsilon_f$  値は、 $b=9.7 \text{ cm}$  のものに比べて平均で約 20% 減少している。また、帯筋のピッチおよび降伏強度が変化するによる  $\epsilon_f$  値の変動は極めて小さい。以上の傾向は  $H/b=3$  の試験体でも同様にみられた。

#### 3) 応力-ひずみ曲線

##### a) 試験体寸法の影響

図-3.6.6 (a) ~ (d) に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ ) 別に示す。但し、図 (a) はプレーンコンクリートである。これらの図によれば、 $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートの応力下降域の曲線形状は、いずれの  $\sigma_y$  の場合も、試験体寸法に拘らずほぼ類似しており、ピーク応力点における寸法効果の分だけ平行移動した形となっている。このような傾向は、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  級のコンクリートでも見られた。ただし、 $F_c=500 \text{ kgf/cm}^2$  級以下の場合には、応力下降域の軟化勾配が試験体寸法の増大に伴って急になるという形で寸法効果が現れている<sup>11)</sup>。以上より、強度レベルの異なるコンクリートの寸法効果を正しく把握するには、破壊モードの相違についても考察することが肝要と思われる。

##### b) 帯筋のピッチの影響

図-3.6.7 (a) および (b) に、それぞれ  $b=9.7 \text{ cm}$  および  $20 \text{ cm}$  のコンファインドコンクリート試験体の応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチ ( $S$ ) の影響を示す。これらの図およ



び他の寸法の場合の比較によれば、帯筋を密に配置することによる靱性改善効果は、試験体の寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。これはコンクリート強度が増大する場合と類似した傾向である。両者を総合して考えると、たとえ帯筋比が同じであってもその拘束効果は、ピーク応力点以後に解放されるエネルギーの総量の増大とともに小さくなると考えられる。

#### c) 帯筋の降伏強度の影響

図-3.6.8 (a) および (b) に、それぞれ、 $b=9.7\text{cm}$  および  $20\text{cm}$  のコンファインドコンクリート試験体の応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ ) の影響を示す。これらの図および他の寸法の場合の比較によれば、帯筋の降伏強度がおよそ  $\sigma_y=3000 \sim 15000 \text{ kgf/cm}^2$  の間で大幅に変動しても、コンファインドコンクリートの圧縮靱性はほとんど変わらない。これは、超高強度コンクリートでは、角形帯筋の降伏強度発現以前にコンクリートが破壊メカニズムに達して、既に損傷が進んでしまったコンクリートを帯筋が拘束することになるからであると思われる。したがって、とくに超高強度コンクリートの場合には、破壊メカニズムに到達する以前、すなわちピーク応力点以前に帯筋による拘束力が十分に発揮されるように工夫することが極めて重要であろう<sup>54)</sup>。

#### 4) 試験体の高さ-辺長比の影響

図-3.6.9 に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体の高さ-辺長比 ( $H/b$ ) の影響を示す。 $H/b=2$  の試験体のひずみの測定長は  $l_0=1.8b$ 、 $H/b=3$  のそれは  $l_0=2.8b$  である。この図および他の比較例によれば、超高強度コンクリートの応力-ひずみ曲線の下降域の形状は、他の強度レベルの場合と同様、 $H/b=2$  に比べて  $H/b=3$  の試験体ではより脆性的となる。

#### (4) 結論

圧縮強度  $1000\text{kgf/cm}^2$  級のコンファインド<sup>\*</sup> 超高強度コンクリートの一軸圧縮実験を実施し、コンクリートの超高強度化の影響、並びに帯筋の降伏強度の影響を調べ、前節の結果と比較・検討した。得られた結果を以下に要約する。

- 1)  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートの圧縮強度の寸法効果は顕著であり、 $b=25\text{cm}$  の試験体の圧縮強度は  $b=9.7\text{cm}$  のものに比べて、平均で約  $15 \sim 20\%$  低下した (図-3.6.5)。
- 2)  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートの最大応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) に及ぼす試

験体寸法の影響は顕著であり、 $b=25\text{cm}$  の試験体の  $\epsilon_f$  の値は  $b=9.7\text{cm}$  のものものに比べて平均で約  $20\%$  減少した。

- 3)  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートの軟下域の応力-ひずみ曲線の形状は、試験体寸法に拘らず類似しており、ピーク応力点における寸法効果の分だけ平行移動した形となる (図-3.6.6)。この傾向は、 $F_c=500\text{kgf/cm}^2$  級以下のコンクリートの応力-ひずみ曲線で見られた寸法効果とはかなり異なるものである。



### 3.7 コンファインドコンクリートの圧縮特性における寸法効果に及ぼす帯筋の形状・間隔と骨材寸法の影響

#### (1) まえがき

本章、3.4節～3.6節の実験的研究では、中心圧縮を受ける角形コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果に及ぼすコンクリート強度と帯筋ピッチの影響を調べた。その結果、コンクリートの強度レベルに拘らず、試験体寸法の増大に伴い応力-ひずみ曲線が脆性的になること、またこのような寸法効果は帯筋ピッチが密なほど顕著であることを報告<sup>1), 3), 7), 11)</sup>した。これらの実験では、帯筋の断面積とピッチ  $S$  を試験体寸法  $b$  に比例させて帯筋比を一定に保つ方法を採用した。コンクリートについては、骨材最大寸法が一定の同一コンクリートを用いた。コンファインドコンクリートの寸法効果に及ぼす帯筋の拘束効果は、ピッチ ( $S$ ) や、帯筋の形状、骨材最大寸法 ( $\phi_{max}$ ) などにも依存することが考えられる。

本節では、帯筋比を一定に保ったコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋形状、帯筋ピッチの絶対値、並びにコンクリートの骨材最大寸法の影響について実験的に調べた。

#### (2) コンファインドコンクリートの「寸法効果」の定義

筆者の一連の研究では、基本的に、以下の条件のもとで「寸法効果」を議論してきた。

- i) プレーンコンクリート：寸法の異なる試験体に対し、コンクリートを同一とする場合と、骨材寸法を試験体寸法に比例させる場合（マイクロコンクリート）がある。本研究では、前者とする。
- ii) コンファインドコンクリート：寸法の異なる試験体に対し、帯筋径および帯筋ピッチを試験体寸法に比例させる場合（幾何学的に相似）と、帯筋径または帯筋ピッチを同一とする場合がある。本研究では前者とする。

ただし、上記の条件が満たされない場合についても知見を得ておくことが重要であると考えられる。本節は、主に上記 i), ii) の後者の場合に相当する条件下での「寸法効果」を調べることを目的としている。

#### (3) 実験方法

#### 1) 実験の概要

表-3.7.1 に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として、試験体寸法、帯筋のピッチと形状、粗骨材の最大寸法などの影響を取り上げた。図-3.7.1 および 3.7.2 に、試験体の寸法と帯筋の配置を示す。試験体の寸法は、正方形の断面の一辺  $b$  が 9.7、15.0、20.0 および 25.0cm の 4 種類とした。帯筋比は 1.5% の一定とし、帯筋ピッチのタイプと形状を、比例ピッチ-ロ型帯筋 ( $S=b/6$ ,  $b=9.7$ cm の試験体で  $S=1.6$ cm)、同一ピッチ-ロ型帯筋 ( $S=1.6$ cm) および同一ピッチ-田型帯筋 ( $S=1.6$ cm) の 3 種類とした。帯筋径は、帯筋比が 1.5% に近いものを選んだ。帯筋を結束するために、 $\phi 2.7$ mm の鉄線を四隅に配した。コンクリートは、粗骨材最大寸法が 15mm の普通コンクリートと試験体寸法と粗骨材最大寸法の比を一定 ( $b/\phi_{max}=16.7$ ) としたマイクロコンクリート（粗骨材最大寸法 12、9 および 6mm の 3 種類）の 2 種類とした。試験体の個数は、各要因ごとに 2 体とし、普通コンクリートで 30 体、マイクロコンクリートで 22 体、合計 52 体である。コンクリート強度の 3 バッチ間変動を調べるために、別に円柱体も作成した。

#### 2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (0.6mm 未満、普通コンクリートのみ 1.2mm 未満) および岡崎産の砕石を使用した。図-3.7.3 に、粗骨材の粒度分布曲線を示す。粗骨材の最大寸法は、普通コンクリートでは  $\phi 15$ mm、マイクロコンクリートでは  $\phi 12$ 、 $\phi 9$  および  $\phi 6$ mm の 3 種類とした。表-3.7.2 に、コンクリートの調合を示す。水セメント比は 50%、骨材容積比は 65% とした。マイクロコンクリートでは、高性能減水剤を使用した。スランプは 15cm を目標とした。コンクリートの混練には容量 100 l の二軸強制練りミキサーを使用した。コンクリートの打込み方向は縦打ちとした。 $\phi 10 \times 20$ cm コンクリートシリンダーの平均圧縮強度は、 $\phi 15$ mm、 $\phi 12$ mm、 $\phi 9$ mm、および  $\phi 6$ mm シリーズのコンクリートに対して、それぞれ 411、468、447、並びに  $406 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

表-3.7.3 に、使用した帯筋の力学特性を示す。養生方法は、すべて恒温恒湿空中養生 (温度  $20 \pm 1$  °C、相対湿度  $85 \pm 5\%$ ) とし、材齢 6 週で圧縮試験を行った。

#### 3) 載荷および測定方法

図-3.7.4 に、角柱体のひずみの測定方法を示す。 $H/b=2$  の角柱体の圧縮ひずみの測定域は、試験体の高さ中央部の  $1.8b$  の領域とした。載荷には、最大容量 200tf のアクチュエーターを使用した。毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、試験体の全高さの縦ひずみが  $15 \times 10^{-3}$  に



至るまで継続荷した。耐荷力が 200tf を越える試験体では、最大容量 600tf の圧縮試験機を使用した。

#### (4) 実験結果とその考察

##### 1) 圧縮強度

以下の考察では、応力下降域を含む全ての領域において、耐荷力をかぶりコンクリートを含めた全断面積で除した値を“応力”と定義する。

図-3.7.5 (a) および (b) に、コンファインドコンクリートの圧縮強度における寸法効果に及ぼす帯筋種類の影響を、コンクリート種類別に示す。図-3.7.5 (a) は、 $\phi 15\text{mm}$  の普通コンクリートの圧縮強度における寸法効果を帯筋種類別に示したものである。帯筋を田型にしたり、ピッチを密にしたものの方が比例ピッチのものより高い圧縮強度を示した。同一コンクリートを用いたコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果について調べた筆者の実験結果と同様に、試験体寸法が 9.7cm から 25cm へと大きくなるにつれて、圧縮強度が徐々に低下しており、同一ピッチの田型帯筋のものでは 5.7% (9.7cm の帯筋は口型の比例帯筋のものを基準とした)、同一ピッチの口型帯筋のものでは 8%、従来と同じ比例帯筋の帯筋では 11.5%低下した。圧縮強度における寸法効果は、帯筋の断面積を細くしてピッチを密にしたり、帯筋形状を田型にするほど低下するが、圧縮強度における寸法効果は消滅しない。図-3.7.5 (b) は、粗骨材の最大寸法を試験体寸法に比例させたマイクロコンクリートの圧縮強度の実験結果である。マイクロコンクリートを用いた方が、大きな寸法効果を示し、その値は普通コンクリートのおよそ 1.5 倍を示した。コンクリートをマイクロ化し、帯筋のピッチを極限まで密にしても、圧縮強度における寸法効果は残るものと考えられる。

##### 2) 最大応力時のひずみ

図-3.7.6 (a) および (b) に、コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) における寸法効果の係数に及ぼす帯筋種類の影響を、コンクリート種類別に示す。図-3.7.6 (a) は、 $\phi 15\text{mm}$  の普通コンクリートの最大応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) における寸法効果を帯筋種類別に示したものである。圧縮強度の場合と同様に、帯筋を田型にしたり、ピッチを密にしたものの方が比例ピッチのものより大きな  $\epsilon_f$  の値を示した。同一コンクリートを用いたコンファインドコンクリートの  $\epsilon_f$  の値における寸法効果について調べた筆者の実験結果と同様に、試験体寸法が 9.7cm から 25cm へと大きくなるにつれて、 $\epsilon_f$  の

値が徐々に低下しており、同一ピッチの田型帯筋のものでは 5.7% (9.7cm の帯筋は口型の比例帯筋のものを基準とした)、同一ピッチの口型帯筋のものでは 28%、従来と同じ比例帯筋の帯筋では 34%低下した。最大応力時のひずみにおける寸法効果は、帯筋の断面積を細くしてピッチを密にしたり、帯筋形状を田型にするほど低下するが、最大応力時のひずみにおける寸法効果は消滅しない。図-3.7.5 (b) は、粗骨材の最大寸法を試験体寸法に比例させたマイクロコンクリートの  $\epsilon_f$  の値の実験結果である。普通コンクリートに比べて、マイクロコンクリートを用いた方が、 $\epsilon_f$  の値における寸法効果は小さくなっており、その値は普通コンクリートのおよそ 0.95 倍を示した。圧縮強度における同様に、コンクリートをマイクロ化し、帯筋のピッチを極限まで密にしても、最大応力時のひずみにおける寸法効果は残るものと考えられる。

##### 3) 応力-ひずみ曲線

###### a) 試験体寸法の影響

図-3.7.7 および 3.7.8 に、コンファインド普通コンクリートおよびコンファインドマイクロコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、帯筋の種類別に示す。これらの図によれば、一般に帯筋の種類に拘らず、試験体寸法が大きなものほど応力下降域が脆性的である。この傾向は、第 3.4 節～3.6 節で述べた実験結果とほぼ同じである。しかし、図-3.7.7 によれば、同一ピッチの田型配筋と比例ピッチの口型配筋の試験体の応力下降域の寸法効果に比べて、同一ピッチの口型配筋の応力下降域の寸法効果は小さい。図-3.7.8 のマイクロコンクリートの実験結果によれば、試験体寸法が大きなものほど応力下降域が脆性的になる寸法効果は、いずれの帯筋種類のものも、普通コンクリートよりやや減少している。

###### b) 帯筋種類の影響

図-3.7.9 に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋種類の影響を、コンクリートの種類別に示す。コンクリートの種類に拘らず、田型帯筋で拘束した試験体の応力下降域が他の補強筋のものより延性的である。同一ピッチ配筋 ( $S=1.6\text{cm}$ ) と比例配筋 ( $S=b/6$ ) の口型帯筋のそれは田型帯筋のものよりかなり脆性的で、両者の曲線の形状は類似している。この傾向は、他の試験体寸法のものでも認められた。

###### c) 粗骨材最大寸法の影響



図-3.7.10 に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす粗骨材最大寸法の影響を、それぞれ同一ピッチのロ型帯筋と比例ピッチのロ型帯筋について示す。両図によれば、試験体寸法および帯筋種類に拘らず、ピーク点応力（圧縮強度）はマイクロコンクリートの試験体が大きい、応力下降域の曲線の形状は、普通コンクリートの試験体の方がやや延性的である。これは、普通コンクリートの粗骨材最大寸法が、マイクロコンクリートよりも大きい、応力下降域で発生する斜めひび割れ部分の骨材のインターロッキング作用によって、応力レベルが上昇するためと考えられる。

### (5) 結論

帯筋比を一定に保ったコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋形状、帯筋ピッチの絶対値、並びにコンクリートの骨材最大寸法の影響について実験的に調べた。本節で得られた知見を以下に要約する。

- 1) 試験体寸法が大きくなるにつれて圧縮強度が低下する寸法効果は、すべてのコンクリートおよびすべての帯筋種類で認められた。同一帯筋比でも、帯筋径を細くして帯筋を田型にしたり帯筋ピッチを密にしたものの方が比例ピッチのものより高い圧縮強度を示し、強度の寸法効果は低下した。マイクロコンクリートの圧縮強度の寸法効果は、普通コンクリートのそれよりも顕著になる傾向がみられた。
- 2) 帯筋の種類およびコンクリートの種類に拘らず、試験体寸法の大きなものほど脆性的な軟化性状を示した。この軟化性状の寸法効果は、比例ピッチ帯筋の試験体よりも同一ピッチ帯筋の場合の方が、すなわち帯筋ピッチの絶対量が小さい方が減少する。
- 3) 前章3.4節～3.6節の研究では、応力-ひずみ曲線の寸法効果は、コンファインドコンクリートの方がプレーンコンクリートよりも顕著であった。上記2)の結果によれば、この理由の一つとして、帯筋ピッチの絶対量を試験体に比例させたことが挙げられる。
- 4) コンクリートの種類および試験体の種類に拘らず、田型帯筋で拘束した試験体の応力下降域が他の補強筋のものより延性的である。同一ピッチ配筋と比例配筋のロ型帯筋の応力-ひずみ曲線の下降域の形状は類似している。
- 5) コンクリートをマイクロコンクリート化すると、ピーク点の応力はやや上昇するが、応力-ひずみ曲線の応力下降域の曲線の形状は、やや脆性的になる。また、マイクロコンクリート化によって寸法効果を解消することは不可能である。

## 3.8 寸法効果を反映したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線表示式

### (1) まえがき

前節(3.2節～3.6節)までの一連の実験により、プレーン並びにコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果を、試験体寸法、コンクリート強度並びに帯筋ピッチを変えて実験的に調べた<sup>1), 3), 7), 11)</sup>。これまでに、コンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の表示式は多く提案されているものの、試験体寸法とコンクリート強度の影響も併せて考慮したものはほとんど見られない。本節では、3.2節～3.6節までの一連の実験データを用いて、寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を作成<sup>4)9)</sup>した。

### (2) 解析対象データ

#### 1) 解析対象データの概要

本節では、コンファインドコンクリート角柱体についての本章3.4節～3.6節に報告した実験データを用いて、寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式の作成を試みた。これらのデータは、以下の条件の下で実験したものである。すなわち、コンクリートは、試験体寸法にかかわらず同一のものを使用した。

図-3.8.1 および 3.8.2 に、解析に使用したコンクリート角柱試験体の形状・寸法と帯筋の配置を示す。試験体の形状は角柱体とし、高さ $h$ と幅 $b$ の比  $H/b$  は 2、試験体断面の一辺の長さ  $b$  は 9.7～30cm、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$  は 300～1000kgf/cm<sup>2</sup>、帯筋の降伏強度  $\sigma_y$  は 3000kgf/cm<sup>2</sup> レベル(普通軟鋼)～15000kgf/cm<sup>2</sup> レベル(PC鋼線)、帯筋のピッチ  $S$  は  $\infty$  (プレーンコンクリート)～ $b/4$ 、帯筋のピッチと断面積は試験体寸法に比例させ、帯筋径は、ピッチ  $S$  が断面辺長  $b$  と等しい角柱体で帯筋比が約 0.3%となるように選んだ。

図-3.8.3 に、解析に用いたコンクリート角柱体のひずみの測定方法を示す。圧縮ひずみの測定域(%)は、試験体の高さ中央部の  $1.8b$  の領域とした。試験体の両端面は鏡面仕上げで平滑にし、両端面が正確に平行になるように配慮した。試験体端面は鏡面仕上げとし、端面と載荷盤との間には摩擦がある。

載荷には、最大容量 200tf のアクチュエータを使用した。応力上昇域において最大応力の  $2/3$  の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、試験体の全長  $2b$  区間の縦ひずみが  $15 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。耐荷力が 200tf を越える試験体では、最大容量 600tf の圧縮試験機を使用した。

解析に使用した実験データは、すべて恒温恒湿空中養生(温度  $20 \pm 1$  °C、相対湿度  $85 \pm 5\%$ )されたものである。



## 2) 解析対象データの寸法効果の傾向

ここでは、応力-ひずみ曲線の表示式の作成に先立ち、解析対象データの寸法効果の傾向を把握しておく。すなわち、 $b=10\text{cm}$  のコンファインドコンクリートを基準とし、その圧縮強度  ${}_{10}\sigma_f$  で無次元化した圧縮強度比  $R_\sigma$  ( $R_\sigma = \sigma_f / {}_{10}\sigma_f$ 、以下、 $R_\sigma$  と略記)、最大応力時のひずみ  ${}_{10}\varepsilon_f$  で無次元化した最大応力時のひずみ比  $R_\varepsilon$  ( $R_\varepsilon = \varepsilon_f / {}_{10}\varepsilon_f$ 、以下、 $R_\varepsilon$ ) と略記、およびパラメータ  ${}_{10}N_d$  で無次元化した  $R_{N_d}$  ( $R_{N_d} = N_d / {}_{10}N_d$ ) のそれぞれが試験体寸法とおよそどのような関係にあるかを実験結果に基づいて考察しておく。ここで、 $N_d$  とは、後掲の表-3.8.3 中に示すように、応力-ひずみ曲線の軟化域の形状を決めるパラメータであり、 $N_d$  の値が大きいほど軟化域の勾配が急になる。

### a) 圧縮強度の寸法効果

図-3.8.4 に、筆者の一連の実験で得られた  $R_\sigma$  と試験体寸法  $b$  の関係を模式的に示す。気中養生されたコンクリートの場合、図-3.8.4 に示すタイプ I の曲線のように、基準寸法の試験体より大きい試験体で  $R_\sigma$  の値が 1.0 より大きくなる可能性がある<sup>3)</sup>。一方、水中養生および高湿気中養生されたものでは、図-3.8.4 のタイプ II の曲線のように、試験体寸法の増大とともに  $R_\sigma$  の値が低下する傾向を示す<sup>3)</sup>。

本節では、湿度 85% 以上の気中で養生されたコンクリートのデータ、すなわちタイプ II のデータに対してモデル化を行った。なお、 $R_\sigma$  の値が試験体寸法によって上昇するという低湿度気中養生時の実験結果(タイプ I)については、養生湿度をパラメータとする実験データが充実していないこともあり、ここでは取り扱わない。

### b) 最大応力時のひずみの寸法効果

図-3.8.5 は、 $R_\varepsilon$  と試験体寸法  $b$  との関係を模式的に示したものである。 $R_\varepsilon$  の値は、コンクリート強度、帯筋のピッチおよび養生条件にかかわらず、一般に試験体寸法の増大とともに低下する。

### c) 応力-ひずみ曲線の軟化域の形状を決めるパラメータ $N_d$ の寸法効果

図-3.8.6 は、 $R_{N_d}$  と試験体寸法  $b$  との関係を模式的に示したものである。 $R_{N_d}$  の値は、コンクリート強度、帯筋ピッチおよび養生条件にかかわらず、試験体寸法の増大とともに大きくなる。すなわち、破壊はより脆性的になる。

## (3) 応力-ひずみ曲線の表示式

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式としては、筆者が先に提案した表-3.8.1 に示す式(3.8.1)および式(3.8.2)を採用し、式中の各係数を定式化する。式(3.8.1)で表す応力上昇域の曲線の形状を決めるパラメータの内、初期弾性係数  $E_i$  については筆者の実験データの解析に基づき、寸法効果は無いものと仮定した。

本データ解析で採用した応力-ひずみ曲線の表示式では、表-3.8.1 中の式(3.8.1)および式(3.8.2)の中の諸量、すなわちコンファインドコンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$ 、最大応力時のひずみ  $\varepsilon_f$  並びにピーク点で正規化した応力-ひずみ曲線の軟化域の形状を決めるパラメータ  $N_d$  を定めれば、応力-ひずみ曲線は定まる。ここでは、これらの諸量を求めるに際し、試験体寸法、コンクリート強度、並びに帯筋の横拘束効果の3つをパラメータに選んだ。なお、本節で取り扱う表示式では、 $b=10\text{cm}$  (基準寸法) のプレーン並びにコンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線は原則として実測による。

データが得られない場合に備えて、 $b=10\text{cm}$  のプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度  $\sigma_c$  並びに帯筋断面積とピッチから定まる横拘束力  $H\sigma_{LV}$  を用い、本実験に対して得られた表示式を参考値として、表-3.8.1 の脚注に示す。

なお、今後 RC 部材の解析において、寸法の異なるコンファインドコンクリートの挙動を定量的に把握しておくことも重要と考え、表示式の作成に際しては、実験データをできるだけ系統的かつ精確に表示することを目指した。

### a) 圧縮強度の表示式

ここでは、 $b=10\text{cm}$  のコンファインドコンクリートの圧縮強度  ${}_{10}\sigma_f$  で基準化した圧縮強度比  $R_\sigma$  ( $R_\sigma = \sigma_f / {}_{10}\sigma_f$ ) と試験体寸法  $b$  との関係を、表-3.8.1 に示す式(3.8.3)で与えることとし、試験体寸法  $b$ 、帯筋ピッチ比  $S'$  ( $S' = S/b$ ) およびコンクリート強度  $\sigma_c$  ( $H/b=2$ ,  $b=10\text{cm}$  のプレーンコンクリートの圧縮強度) を説明変数として回帰分析を行った。その結果、 $R_\sigma$  の値に及ぼす  $S'$  の影響が小さいことが確かめられ、表示式(3.8.3)中の係数  $A$  および  $B$  は  $\sigma_c$  のみの関数として表された。

図-3.8.7 は、式(3.8.3)より求めた  $\sigma_f$  の計算値  $e\sigma_f$  を縦軸に、 $\sigma_f$  の実験値  $e\sigma_f$  を横軸に取り、両者の関係を比較したものである。本図中の対角線の上下の破線は、実験値に対する計算値の誤差  $\pm 10\%$  の境界を示したものである。計算値は、ほぼ実験値の  $\pm 10\%$  以内に納まっている。

図-3.8.8 に、式(3.8.3)から求めた  $R_\sigma$  の計算値と試験体寸法  $b$  との関係に及ぼすコンクリート強度  $\sigma_c$  の影響を示す。図によれば、 $\sigma_c$  が  $335 \sim 978\text{kgf/cm}^2$  の本回帰式の適用範囲では、コンクリート強度が増大するほど寸法効果が大きくなる。例えば、 $\sigma_c = 978\text{kgf/cm}^2$ 、 $b=30\text{cm}$  の試験体の  $R_\sigma$  の計算値は 0.81 となり、圧縮強度の低下が著しい。

### b) 最大応力時のひずみの表示式



圧縮強度の場合と同様に、 $b=10\text{cm}$  の試験体の最大応力時のひずみ  $\epsilon_r$  で基準化したひずみ比  $R_\epsilon$  ( $R_\epsilon = \epsilon_r / \epsilon_{r0}$ ) と試験体寸法  $b$  との関係、表-3.8.3 に示す式(3.8.4)で与えることとし、 $b$ 、 $S$ 並びに  $\sigma_0$  の順に回帰分析を行った。その結果、 $R_\sigma$  の場合とは逆に、 $R_\epsilon$  に及ぼす  $\sigma_0$  の影響は小さく、式(3.8.4)中の係数  $C$  および  $D$  は  $S$  のみの関数として表された。

図-3.8.9 は、 $R_\sigma$  の表示式の場合と同様に、式(3.8.4)から求めた  $\epsilon_r$  の計算値  $c\epsilon_r$  を縦軸に、 $\epsilon_r$  の実験値  $e\epsilon_r$  を横軸に取り、両者の関係を比較したものである。図-3.8.7 の場合と同様に、本図中の対角線の上下の破線は、実験値に対する計算値の誤差  $\pm 10\%$  の境界を示したものである。計算値は、ほぼ実験値の  $\pm 10\%$  以内に納まっており、これを越えるものも  $\pm 20\%$  以内に納まっている。

図-3.8.10 に、式(3.8.4)から求めた  $R_\epsilon$  と試験体寸法  $b$  の関係に及ぼす帯筋ピッチ比  $S$  の影響を示す。図によれば、解析に使用した  $S$  が 0.25 から 2.0 (プレーンコンクリート) までのデータの範囲内では、 $R_\epsilon$  の計算値は試験体寸法が増大するほど減少し、さらに帯筋のピッチが粗くなるほど  $R_\epsilon$  の計算値の低下率は大きくなる。すなわち、寸法効果が顕著になる。例えば、 $b=30\text{cm}$  のプレーンコンクリートでは、 $R_\epsilon = 0.79$  と計算される。

#### c) 軟化域の形状パラメータ $N_d$ の表示式

ピーク点で正規化した応力-ひずみ曲線の軟化域の形状に対して、表-3.8.3 に示す式(3.8.2)中のパラメータ  $N_d$  の値を求め、これを  $b=10\text{cm}$  のコンファインドコンクリート角柱体の  $\epsilon_r N_d$  で無次元化した値  $R N_d$  を、 $b$ 、 $S$ 並びに  $\sigma_0$  の順に回帰分析し、式(3.8.5)を得た。 $R_\epsilon$  の場合と同様に、 $R N_d$  に及ぼす  $\sigma_0$  の影響は小さく、式(3.8.5)中の係数  $E$  および  $F$  は  $S$  のみの関数として表された。

図-3.8.11 は、 $R_\sigma$  および  $R_\epsilon$  の表示式の場合と同様に、式(3.8.5)から求めた  $N_d$  の計算値  $cN_d$  を縦軸に、 $N_d$  の実験値  $eN_d$  を横軸に取り、両者の関係を比較したものである。図-3.8.7 および 3.8.9 の場合と同様に、本図中の対角線の破線は、実験値に対する計算値の誤差  $\pm 10\%$  の境界を示したものである。計算値は、ほぼ実験値の  $\pm 10\%$  以内に納まった。

図-3.8.12 に、式(3.8.5)から求めた  $R N_d$  と試験体寸法  $b$  の関係に及ぼす帯筋ピッチ  $S$  の影響を示す。図によれば、 $S$  が  $b/4$  から  $2b$  (プレーンコンクリート) までの本回帰式の適用範囲内では、 $R N_d$  の計算値は試験体寸法の増大とともに大きくなり (応力-ひずみ曲線の下降勾配がより急になり)、その傾向は  $S$  が小さくなるほど顕著になる。

#### (4) 表示式による応力-ひずみ曲線の計算値と実験値の比較

図-3.8.13 に、式(3.8.3)~(3.8.5)の表示式から求めた  $\sigma_r$ 、 $\epsilon_r$  並びに  $N_d$  の値を、式(3.8.1)および(3.8.2)に代入して応力-ひずみ曲線を求める計算フローを示す。

図-3.8.14(a)~(d)は、 $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ 、 $S=b/4$  のコンファインドコンクリートの応力-ひ

ずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、それぞれ水セメント比 55%、42%、32%および 25%のものについて示したもので、実線は実験値を、破線は表示式から求めた計算値である。計算に用いた入力データは、 $b=10\text{cm}$  のコンファインドコンクリートの  $\sigma_r$ 、 $\epsilon_r$  および  $N_d$  のみである。全般的に見て、表示式から求めた応力-ひずみ曲線は、実験結果の傾向をよく表示している。

本表示式をコンクリートの強度レベルの異なる  $S=b/4$ 、 $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$  のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に適用した結果を、それぞれ試験体寸法  $b=9.7\text{cm}$  および  $20\text{cm}$  のものについて図-3.8.15(a)および(b)に示す。いずれの寸法のものでも、表示式はコンクリート強度の異なる応力-ひずみ曲線の実験値の傾向をよく表示している。

#### (5) 大型断面部材への表示式の適用

寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式(3.8.1)および(3.8.2)は、 $b=9.7 \sim 30\text{cm}$  の範囲の実験データに基づく回帰式であるため、試験体の寸法の適用範囲に制約がある。ここでは、図-3.8.16(a)~(c)に示すように、表示式の適用範囲を越える  $b=90\text{cm}$  (実大) までのコンファインドコンクリート部材の応力-ひずみ挙動を推定した。図によれば、コンクリート強度が増大するほど圧縮強度の寸法効果は顕著で、 $b=90\text{cm}$  のものでは強度低下が著しい。一方、応力軟化域の曲線の形状はコンクリート強度が増大するほど、また部材寸法が増大するほど急勾配になっており、とくに  $b=90\text{cm}$  のものでは、帯筋の拘束効果が減少し極めて脆性的な変形性状を呈する様子がうかがえる。

図-3.8.17 に、他の研究者の実験データ<sup>55)</sup>と本表示式から求めた計算値との比較例を示す。実験データは、帯筋端部のフック形状を変数とした断面寸法  $40 \times 40\text{cm}$  の大型 RC 柱の中心圧縮実験で得られたもので、軸力-軸ひずみ曲線から、主筋を弾塑性体と仮定して主筋の軸力負担分を除き、応力-ひずみ曲線を算定してある。表示式の計算には、実験データとして  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  シリンダーの圧縮強度、帯筋比並びに帯筋の降伏点を用いた。ごく限られた比較例ではあるが、溶接並びに  $135^\circ$  フックフープをもつ柱の換算曲線は、ともに本表示式から求めた  $b=10\text{cm}$  と  $40\text{cm}$  断面のコンファインドコンクリートの両曲線の間であり、比較的良好な表示精度が得られている。

#### (6) 結論

本節では、コンファインドコンクリート角柱体の圧縮特性の寸法効果に及ぼすコンクリート強度と帯筋拘束の影響を調べた一連の圧縮実験のデータを用いて、寸法効果を考慮した応力-ひずみ曲線の表示式を求めた。本節で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 試験体寸法、帯筋のピッチおよびコンクリートの強度レベルの異なるコンファインドコ



ンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式(表-3.8.1中の式(3.8.1)および(3.8.2))中のパラメータ  $R_{\sigma}$ ,  $R_{\varepsilon}$  および  $R_{Nd}$  に対し, それぞれ表-3.8.1中の式(3.8.3)、(3.8.4)および(3.8.5)を誘導した。

- 2) 圧縮強度比  $R_{\sigma}$  の値は, 試験体寸法の増大とともに低下するが, 寸法の増大とともに低下率は減少する。また, コンクリートの強度レベルが高くなるほどその低下率は大きくなる(図-3.8.8)。
- 3) 最大応力時のひずみ比  $R_{\varepsilon}$  の値は, 試験体寸法が増大するほど減少し, さらに帯筋のピッチが粗くなるほど  $R_{\varepsilon}$  の低下率は大きく, 寸法効果が増大する(図-3.8.10)。
- 4) 応力下降域の曲線の形状を表すパラメータ  $N_d$  を  $b=10\text{cm}$  の試験体で無次元化した  $R_{Nd}$  の値は, 試験体寸法の増大とともに増大し, その傾向は帯筋ピッチ  $S$  が小さくなるほど顕著になる(図-3.8.12)。
- 5) 本研究で提案した表示式の精度は比較的良好であった(図-3.8.14、3.8.15)。また, 提案式を用いて実大部材の応力-ひずみ曲線を推定した(図-3.8.16)。

## 参考文献

- 1) 小池狭千朗・畑中重光: 横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.707-712, 1990
- 2) Koike, S. and Hatanaka, S.: Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete Under Compression, Proceedings of the Japan Congress on Materials Research, Vol.33, pp.55-61, 1990.4
- 3) 小池狭千朗・畑中重光・谷川恭雄: プレーンおよびコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第471号, pp.119-130, 1995.5
- 4) 小池狭千朗・奥藤一夫・奥谷伸幸: 寸法の異なるコンクリートの  $\sigma-\varepsilon$  曲線の表示式とRC梁への適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.121-126, 1987.6
- 5) 塩屋俊幸・長谷川俊昭: コンクリート構造物の寸法効果, コンクリート工学, Vol.30, No.8, pp.5-15, 1992.8
- 6) 香田伸次・田中博幸・坂田昇・山崎庸行: 中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C分冊(構造II), pp.751-752, 1989.10
- 7) 小池狭千朗・畑中重光: コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.949-954, 1992
- 8) 六車熙・渡辺史夫・幅伊佐男・浅井政宏: 横拘束コンクリートによるコンクリート系部材のじん性改善-片持ち梁によるじん性改善効果の確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.2529-2530, 1974.10
- 9) 堀栄真・Lejano, B.A., 安達洋・白井伸明・中西三和・葉研地彰・野口和也・田中賢二: 横補強された高強度鉄筋コンクリート造柱の中心圧縮性状に及ぼす寸法効果(その1 実験概要および結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造系, pp.365-366, 1994.9
- 10) 田中賢二・Lejano, B.A.・安達洋・白井伸明・中西三和・葉研地彰・野口和也・堀栄真: 横補強された高強度鉄筋コンクリート造柱の中心圧縮性状に及ぼす寸法効果(その2 応力-軸ひずみ関係の考察および解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造系, pp.367-368, 1994.9
- 11) 小池狭千朗・畑中重光: コンファインド高強度コンクリートの圧縮特性における形状・寸法効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C分冊(構造II), pp.517-518, 1991.9
- 12) Lejano, B.A., Adachi, H., Hirai, N., Nakanishi, M., Tanaka, M. and Yagenji, A.: Size Effect on Stress-Strain Characteristics of High Strength Reinforced Concrete Columns Confined by Lateral Reinforcement, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, Sendai, Japan, Preprint, pp.75-86, Oct.31-Nov.2, 1993
- 13) Kim, J.K. and Eo, S.H.: Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks, Magazine of Concrete Research, Vol.42, No.153, pp.233-238, 1990.12
- 14) 小柳治・六郷恵哲・内田裕市: コンクリートの圧縮靱性, セメント技術年報, Vol.37, pp.268-271, 1983.5



- 15) 小池狭千朗：純曲げを受けるRC梁の曲げ塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、No.29, pp.197-200, 1991.2
- 16) 小池狭千朗・畑中重光・奥谷伸幸：鉄筋コンクリート梁の塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.2, pp.27-32, 1989
- 17) 鈴木計夫・中塚信・吉田晴彦：円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性、材料、第34巻、第376号、pp.33-39, 1985
- 18) 田中賢二・Lejano,B.A., 安達洋・白井伸明・中西三和：横補強された高強度鉄筋コンクリート造柱の中心圧縮性状に及ぼす寸法効果(その3 応力-ひずみ曲線のモデル化)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、構造系、pp.289-290, 1995.9
- 19) 小池狭千朗・畑中重光：寸法効果を反映したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、C分冊(構造II)、pp.799-800, 1997.9
- 20) 小池狭千朗・畑中重光：寸法効果を反映した横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線表示式、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.3, pp.235-240, 1999.7
- 21) 小池狭千朗・畑中重光・水野英二・谷川恭雄：高強度域を含むコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、(印刷中：平成12年12月掲載予定)
- 22) ACI Publication SP-24, Models for Concrete Structures, 1970
- 23) Alami, Z.Y., and Ferguson, P.M.: Accuracy of Models Used in Research on Reinforced concrete, Journal of ACI, Proceedings Vol.60, No.11, pp.1643-1664, Nov. 1963
- 24) Sangha, C.M. and Dhir, R.K.: Strength and Complete Stress-Strain Relationships for Concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Condition, Materiaux et Constructions, Vol.5, No.30, pp.361-370, 1972
- 25) 小池狭千朗・奥藤一夫・小林尚：試験体寸法の異なるコンクリートの塑性変形挙動と $\sigma - \varepsilon$ 曲線の表示式、セメント技術年報、Vol.41, pp.319-322, 1987.5
- 26) Hughes, B.P. and Chapman, G.P.: The Deformation of Concrete and Microconcrete in Compression and Tension with Particular Reference to Aggregate Size, Magazine of Concrete Research, Vol.18, No.54, pp.19-24, March 1966
- 27) Pons, G., Ramoda, S.A. and Maso, J.C.: Influence of the Loading History on Fracture Mechanics Parameters of Microconcrete: Effects of Low-Frequency Cyclic Loading, ACI Material Journal, No.85-M37, pp.341-346, Sept.-Oct. 1988
- 28) Gonnerman, H.F.: Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, Proceedings of ASTM, Vol.25, Part II, pp.237-250, 1925
- 29) Neville, A.M.: The Effect of Slope and Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Standard Deviation, Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.23, pp.101-110, Aug. 1956
- 30) Tanigawa, Y. and Yamada, K.: Size Effect in Compressive Strength of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.8, pp.181-190, 1978
- 31) 森田司郎・藤井栄・石塚秀教・中西浩：鉄筋コンクリートの縮小モデル化に伴う寸法効果(その1、コンクリートの縮小化と寸法効果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.477-478, 1985.10
- 32) Bazant, Z.P.: Instability, Ductility, and Size Effect in Stress-Softening Concrete, Proceedings of the ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.102, No.EM 2, pp.331-344, 1976.4
- 33) 小池狭千朗：コンクリートの各種強度の確率分布に及ぼす供試体寸法の影響、セメント技術年報、Vol.35, pp.134-138, 1981.5
- 34) 小池狭千朗：供試体寸法の異なるコンクリート角柱供試体の一軸圧縮応力-ひずみ曲線の表示式、愛知工業大学研究報告、No.21, B, pp.179-188, 1986
- 35) 小池狭千朗・奥藤一夫・小林尚：コンクリートの塑性変形挙動に及ぼす供試体寸法と骨材の最大粒径の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、pp.167-168, 1986
- 36) 小池狭千朗・大石建次・奥藤一夫・小林尚：供試体寸法と骨材粒径の異なるコンクリートの塑性変形挙動と応力度-ひずみ度曲線の表示式、愛知工業大学研究報告、第22号B, pp.183-192, 1977
- 37) 小池狭千朗・奥藤一夫・小林尚：供試体寸法の異なるコンクリートの塑性変形挙動と $\sigma - \varepsilon$ 曲線の表示式、セメント技術年報、Vol.41, pp.319-322, 1987
- 38) 小阪義夫、森田司郎：鉄筋コンクリート構造、丸善、p.21, 1975
- 39) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光・三輪隆治：鉄筋コンクリート部材の塑性ヒンジ部におけるコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第24号、pp.113-116, 1986
- 40) 小阪義夫・小池狭千朗：正負繰返し荷重を受ける軽量RCばりのせん断耐力と靱性に及ぼすあばら筋比と主筋比の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1365-1366, 1973.10
- 41) 六車熙・渡辺史夫・幅伊佐男・浅井政宏：横拘束コンクリートによるコンクリート系部材のじん性改善-片持ち梁によるじん性改善効果の確認、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.2529-2530, 1974.10
- 42) 小池狭千朗：正負繰返し荷重を受けるRCばりの力学特性におよぼす供試体寸法の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1361-1362, 1976.10
- 43) 谷川恭雄・畑中重光・小阪義夫：高ひずみ領域に至るまでのコンクリートの応力度-ひずみ度曲線の表示式、セメント技術年報、Vol.34, pp.242-245, 1980
- 44) 鈴木計夫・中塚信・出口兼：コンクリートの全応力度-ひずみ度関係に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演論文集、Vol.2, 1980, pp.265-268
- 45) Hatanaka, S., Kosaka, Y. and Tanigawa, Y.: Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete Under Low Lateral Pressure, 日本建築学会構造系論文報告集, No.377, pp.27-40, July 1987



- 46) Watanabe, F.: Complete Stress-Strain Curve for Concrete in Concentric Compression, Proc. of International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, IV, 1971, pp.153-161, 1971
- 47) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗・谷川恭雄：供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.65-73, 1994.1
- 48) 水野英二・畑中重光・伊藤誠：コンクリートの圧縮構成関係に関するエネルギー論的考察とコンクリート充填鋼管柱解析への応用、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.75-87, 1994.1
- 49) 小池狭千朗・畑中重光：寸法効果を反映したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、C分冊（構造Ⅱ）、pp.799-800, 1997.9
- 50) 小池狭千朗・畑中重光：高強度RC柱の圧縮特性の寸法効果、セメント・コンクリート論文集、No.46, pp.744-748, 1992.5
- 51) 小池狭千朗・畑中重光：超高強度RC柱の圧縮特性の寸法効果、セメント・コンクリート論文集、No.47, pp.706-711, 1993.5
- 52) 小池狭千朗・畑中重光・水野英二：高強度RC柱の圧縮破壊時吸収エネルギーの寸法効果、セメント・コンクリート論文集、No.48, pp.590-595, 1994.5
- 53) Department of the Interior, Cement and Concrete Investigations - Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part II, Bulletin 4, 1965
- 54) 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光：低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.257-260, 1984.6
- 55) 石川裕次・木村秀樹・東端泰夫：帯筋端部のフック形状を変数とした柱の中心圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、C分冊（構造Ⅱ）、pp.43-44, 1996.9

表-3.2.1 一軸圧縮実験の概要

| 角柱体の寸法<br>b×b×h (h=3b)<br>(cm)   | 円柱体の寸法<br>d×h (h=2d)<br>(cm)           | 水セメント比<br>W/C<br>(%)   | 粗骨材の<br>最大寸法<br>φ <sub>a</sub><br>(mm)              |
|--|--|------------------------|---|
| 4.5×4.5×13.5<br>5.6×5.6×16.8<br>7.3×7.3×21.9<br>9.7×9.7×29.1<br>12.5×12.5×37.5<br>15.0×15.0×45.0 | φ 7.5×15<br><br>φ 10×20<br><br>φ 15×30 | 45<br><br>60<br><br>70 | 15, 25<br>Mortar<br>10, 15, 20,<br>25, 30<br>15, 25 |

[註] b: 角柱体の断面の一辺、 d: 円柱体の直径

表-3.2.2 コンクリートの調合表

| 粗骨材の<br>最大寸法<br>φ a (mm) | 水<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | セメント<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 細骨材<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 粗骨材<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 細骨材率<br>s/a<br>(%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| (Mortar)                 | 283                       | 472                          | 1571                        | 0                           | -                  |
| 10                       | 191                       | 319                          | 737                         | 1092                        | 40                 |
| 15                       | 186                       | 310                          | 756                         | 1094                        | 41                 |
| 20                       | 182                       | 303                          | 737                         | 1131                        | 40                 |
| 25                       | 178                       | 297                          | 722                         | 1161                        | 39                 |
| 30                       | 174                       | 290                          | 705                         | 1195                        | 37                 |



表-3.2.3 実験結果の概要の一例

| 試験体名         | 骨材の最大寸法<br>φa (mm) | 試験体寸法<br>断面 (b×b)<br>b (cm) | 圧縮強度                          |             | 最大応力時のひずみ<br>平均値<br>(×10 <sup>-6</sup> ) |
|--------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------|--|
|              |                    |                             | 平均値<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 変動係数<br>(%) |  |
| 60-PR-C-4-5  | 5                  | 4.5                         | 225                           | 4.59        | 2950                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 296                           | 4.57        | 2905                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 272                           | 6.30        | 2820                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 312                           | 2.78        | 2600                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 337                           | 3.18        | 2500                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 357                           | 4.11        | 2405                                     |
| 60-PR-C-4-10 | 10                 | 4.5                         | 202                           | 9.30        | 1505                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 217                           | 6.20        | 1650                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 237                           | 4.60        | 1780                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 278                           | 3.30        | 1927                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 283                           | 3.70        | 1842                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 293                           | 5.40        | 1777                                     |
| 60-PR-C-4-15 | 15                 | 4.5                         | 287                           | 8.10        | 1348                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 217                           | 6.40        | 1510                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 228                           | 4.30        | 1710                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 258                           | 4.70        | 1771                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 277                           | 2.50        | 1725                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 280                           | 6.20        | 1577                                     |
| 60-PR-C-4-20 | 20                 | 4.5                         | 196                           | 7.20        | 1420                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 213                           | 4.80        | 1585                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 234                           | 3.90        | 1603                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 289                           | 4.40        | 1686                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 272                           | 4.90        | 1554                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 287                           | 6.70        | 1580                                     |
| 60-PR-C-4-25 | 25                 | 4.5                         | 183                           | 5.00        | 1370                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 198                           | 5.50        | 1450                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 213                           | 5.60        | 1429                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 263                           | 3.00        | 1580                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 262                           | 3.70        | 1560                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 290                           | 7.40        | 1520                                     |
| 60-PR-C-4-30 | 30                 | 4.5                         | 166                           | 10.10       | 1208                                     |
| -5-          |                    | 5.6                         | 183                           | 8.20        | 1203                                     |
| -7-          |                    | 7.3                         | 206                           | 5.70        | 1294                                     |
| -9-          |                    | 9.7                         | 247                           | 4.40        | 1424                                     |
| -12-         |                    | 12.5                        | 260                           | 5.60        | 1421                                     |
| -15-         |                    | 15.0                        | 295                           | 6.70        | 1598                                     |

表-3.3.1 実験結果の概要

| 試験体の記号       | 試験体の実測寸法      | 圧縮強度                            |                                  |             | 圧縮強度時のひずみ                      |                                 |             | 図-3.3.5中の表示曲線の係数(式3.3.3)による |      |
|--------------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------------------|------|
|              |               | 強度の範囲<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 強度の平均値<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 変動係数<br>(%) | ひずみの範囲<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | ひずみの平均値<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | 変動係数<br>(%) | B                           | Nd   |
| 60-PR-C-4-10 | 4,509×4,502   | 147-225                         | 202                              | 8.93        | 1260-1740                      | 1505                            | 8.33        | 0.5                         | 3.2  |
| -5-          | 5,612×5,508   | 188-237                         | 217                              | 5.98        | 1320-2030                      | 1650                            | 12.89       | 0.6                         | 3.1  |
| -7-          | 7,304×7,300   | 215-255                         | 237                              | 4.59        | 1340-2030                      | 1780                            | 9.24        | 0.6                         | 3.7  |
| -9-          | 9,707×9,676   | 263-292                         | 278                              | 3.16        | 1690-2220                      | 1927                            | 7.4         | 0.5                         | 5.0  |
| -12-         | 12,474×12,486 | 265-298                         | 283                              | 3.57        | 1670-2110                      | 1842                            | 6.3         | 1.8                         | 3.7  |
| -15-         | 15,050×15,053 | 242-321                         | 293                              | 8.17        | 1230-2140                      | 1777                            | 16.49       | 1.1                         | 3.9  |
| 60-PR-C-4-15 | 4,499×4,491   | 147-215                         | 186                              | 7.88        | 980-2240                       | 1348                            | 22.56       | 0.6                         | 2.7  |
| -5-          | 5,580×5,575   | 185-235                         | 220                              | 6.26        | 1080-1890                      | 1510                            | 13.99       | 0.8                         | 2.9  |
| -7-          | 7,276×7,283   | 211-258                         | 238                              | 4.36        | 1520-2300                      | 1954                            | 10.48       | 0.8                         | 3.0  |
| -9-          | 9,717×9,697   | 240-277                         | 258                              | 4.73        | 1460-1950                      | 1771                            | 7.7         | 0.8                         | 3.25 |
| -12-         | 12,474×12,490 | 265-288                         | 277                              | 2.52        | 1590-1990                      | 1725                            | 6.74        | 0.9                         | 3.4  |
| -15-         | 15,003×15,046 | 230-306                         | 272                              | 7.20        | 950-1800                       | 1577                            | 14.17       | 1.4                         | 3.3  |
| 60-PR-C-4-20 | 4,506×4,506   | 171-221                         | 196                              | 6.96        | 1160-1900                      | 1502                            | 12.06       | 0.7                         | 2.7  |
| -5-          | 5,605×5,613   | 193-227                         | 213                              | 5.00        | 1140-2020                      | 1668                            | 14.55       | 0.8                         | 2.7  |
| -7-          | 7,303×7,266   | 214-248                         | 234                              | 3.95        | 1390-1840                      | 1506                            | 26.54       | 0.7                         | 3.05 |
| -9-          | 9,720×9,712   | 263-316                         | 289                              | 5.02        | 1450-1940                      | 1686                            | 7.55        | 1.4                         | 2.5  |
| -12-         | 12,547×12,526 | 238-295                         | 272                              | 5.02        | 1240-1880                      | 1554                            | 10.62       | 1.4                         | 2.85 |
| -15-         | 15,058×15,075 | 250-327                         | 287                              | 7.20        | 1340-2510                      | 1716                            | 16.76       | 1.4                         | 3.3  |
| 60-PR-C-4-25 | 4,506×4,502   | 173-203                         | 183                              | 4.89        | 980-2000                       | 1440                            | 20.59       | 0.8                         | 2.6  |
| -5-          | 2,580×5,593   | 174-213                         | 198                              | 5.75        | 1180-1810                      | 1555                            | 12.38       | 1.05                        | 2.22 |
| -7-          | 7,293×7,298   | 190-244                         | 213                              | 5.66        | 1170-1810                      | 1429                            | 11.04       | 0.8                         | 2.65 |
| -9-          | 9,706×9,704   | 250-276                         | 263                              | 3.15        | 1460-2060                      | 1639                            | 8.27        | 1.2                         | 2.8  |
| -12-         | 12,505×12,472 | 249-278                         | 262                              | 3.21        | 1320-1820                      | 1606                            | 8.02        | 1.3                         | 2.75 |
| -15-         | 15,087×15,053 | 254-324                         | 290                              | 7.52        | 1160-1740                      | 1520                            | 11.74       | 1.4                         | 3.1  |
| 60-PR-C-4-30 | 4,503×4,504   | 142-194                         | 166                              | 8.57        | 970-1530                       | 1208                            | 13.78       | 0.7                         | 2.4  |
| -5-          | 5,582×5,591   | 148-206                         | 183                              | 8.25        | 910-1420                       | 1203                            | 12.53       | 0.7                         | 2.3  |
| -7-          | 7,283×7,300   | 185-227                         | 206                              | 5.72        | 970-1530                       | 1294                            | 11.85       | 0.8                         | 2.5  |
| -9-          | 9,709×9,678   | 220-264                         | 247                              | 4.77        | 1110-1820                      | 1424                            | 12.66       | 1.2                         | 2.4  |
| -12-         | 12,463×12,506 | 217-284                         | 260                              | 5.84        | 1260-1560                      | 1421                            | 6.04        | 1.35                        | 2.75 |
| -15-         | 15,099×15,080 | 247-319                         | 295                              | 6.78        | 1320-1770                      | 1598                            | 8.17        | 1.4                         | 3.0  |

表-3.3.2 再修正後の表示式の係数 B と Nd (図-3.3.9 (a) および (b) 対応)

| 粗骨材<br>寸法<br>(mm) | 試験体の寸法 (幅cm) |     |       |     |       |      |       |      |        |      |        |     |
|-------------------|--------------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|--------|------|--------|-----|
|                   | 4.465        |     | 5.550 |     | 7.245 |      | 9.675 |      | 12.450 |      | 15.000 |     |
|                   | PR4          |     | PR5   |     | PR7   |      | PR9   |      | PR12   |      | PR15   |     |
|                   | B            | Nd  | B     | Nd  | B     | Nd   | B     | Nd   | B      | Nd   | B      | Nd  |
| φ10               | 0.5          | 3.1 | 0.6   | 3.2 | 0.65  | 3.5  | 0.75  | 3.6  | 0.8    | 3.7  | 1.1    | 3.9 |
| φ15               | 0.6          | 2.8 | 0.65  | 2.9 | 0.75  | 3.1  | 0.8   | 3.25 | 0.9    | 3.4  | 1.3    | 3.5 |
| φ20               | 0.7          | 2.7 | 0.75  | 2.8 | 0.8   | 2.9  | 1.05  | 2.95 | 1.2    | 3.1  | 1.35   | 3.3 |
| φ25               | 0.75         | 2.4 | 0.85  | 2.5 | 0.9   | 2.55 | 1.2   | 2.75 | 1.3    | 2.9  | 1.4    | 3.1 |
| φ30               | 0.8          | 2.2 | 0.85  | 2.3 | 0.9   | 2.35 | 1.2   | 2.4  | 1.35   | 2.75 | 1.4    | 3.0 |



表-3.4.1 実験 I の概要

| 実験<br>シリーズ<br>名称 | 試験体寸法 (H=3b)     |                | 帯筋          |                      |
|------------------|------------------|----------------|-------------|----------------------|
|                  | 断面 : bxb<br>(cm) | 高さ : H<br>(cm) | 鉄筋径<br>(mm) | 間隔<br>S              |
| PR-C-7           | 7.3×7.3          | 21.9           | φ3.2        | b/4<br>b/2<br>b<br>∞ |
| PR-C-9           | 9.7×9.7          | 29.1           | φ3.9        |                      |
| PR-C-12          | 12.5×12.5        | 37.5           | φ4.9        |                      |
| PR-C-15          | 15.0×15.0        | 45.0           | φ5.7        |                      |
| PR-C-20          | 20.0×20.0        | 60.0           | φ8.0        |                      |

表-3.4.2 実験 I および II の帯筋の力学特性

| 種類    | 実測直径<br>(mm) | 降伏点: $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び率<br>(%) | $\sigma_y \cdot A_s / A_c$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|--------------|---|--------------------------------|------------|--|
| φ 3.2 | 3.19         | 2420                                      | 3430                           | 29.2       | 6.37   |
| φ 3.9 | 3.90         | 2280                                      | 3350                           | 40.9       | 5.04   |
| φ 4.9 | 4.98         | 1940                                      | 3070                           | 41.6       | 4.19   |
| φ 5.7 | 5.93         | 2980                                      | 3890                           | 31.5       | 6.34   |
| φ 8.0 | 7.96         | 2650                                      | 3530                           | 32.5       | 5.71   |

$A_s$ : 帯筋の断面積 (cm<sup>2</sup>),  $A_c$ : コアコンクリートの断面積 (cm<sup>2</sup>)

表-3.4.3 実験 II の概要

| 断面: b×b<br>(cm) | 試験体寸法     |         | 帯筋          |                          | 主筋<br>鉄筋径<br>(mm) | 養生<br>条件 |
|-----------------|-----------|---------|-------------|--------------------------|-------------------|----------|
|                 | 高さ: H(cm) |         | 鉄筋径<br>(mm) | 間隔<br>S                  |                   |          |
|                 | H/b=2.0   | H/b=3.0 |             |                          |                   |          |
| 7.3×7.3         | 14.5      | 21.9    | φ3.2        | b/4<br>b/2<br>b<br>plain | 2.7               | 空中       |
| 9.7×9.7         | 19.4      | 29.1    | φ3.9        |                          |                   |          |
| 12.5×12.5       | 24.9      | 37.5    | φ4.9        |                          |                   |          |
| 15.0×15.0       | 30.0      | 45.0    | φ5.7        | plain                    |                   | 水中       |
| 20.0×20.0       | 40.0      | 60.0    | φ8.0        |                          |                   |          |

表-3.5.1 角柱体の一軸圧縮実験の概要

| 断面: b×b<br>(cm) | 試験体寸法     |       | 帯筋          |         | 主筋<br>鉄筋径<br>(mm) | 水セメント<br>比: W/C<br>(%) |
|-----------------|-----------|-------|-------------|---------|-------------------|------------------------|
|                 | 高さ: H(cm) |       | 鉄筋径<br>(mm) | 間隔<br>S |                   |                        |
|                 | H/b=2     | H/b=3 |             |         |                   |                        |
| 9.7×9.7         | 19.4      | 29.1  | φ 3.9       | b/4     | 2.7               | 32                     |
| 15.0×15.0       | 30.0      | 45.0  | φ 5.7       | b/2     |                   |                        |
| 20.0×20.0       | 40.0      | 60.0  | φ 8.0       | b       |                   |                        |
| 30.0×30.0       | 60.0      | 90.0  | φ 13.0      | plain   |                   | 55                     |

表-3.5.2 帯筋の力学的性質

| 種類     | 実測直径<br>(mm) | 降伏点: $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び率<br>(%) | $\sigma_y \cdot A_s / A_c$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|--------|--------------|---|--------------------------------|------------|--|
| φ 3.9  | 3.90         | 2280                                      | 3350                           | 40.9       | 5.04   |
| φ 5.7  | 5.93         | 2980                                      | 3890                           | 31.5       | 6.34   |
| φ 8.0  | 7.96         | 2650                                      | 3530                           | 32.5       | 5.71   |
| φ 13.0 | 12.55        | 3440                                      | 4820                           | 47.1       | 7.84   |

$A_s$ : 帯筋の断面積 (cm<sup>2</sup>),  $A_c$ : コアコンクリートの断面積 (cm<sup>2</sup>)



表-3.6.1 角柱体の一軸圧縮実験の概要

| 試験体寸法               |           | 帯筋    |             |                       | 主筋      | 水セメント比      |            |
|---------------------|-----------|-------|-------------|-----------------------|---------|-------------|------------|
| 断面<br>: b×b<br>(cm) | 高さ: H(cm) |       | 鉄筋径<br>(mm) | 降伏点<br>強度<br>レベル      | 間隔<br>S | 鉄筋径<br>(mm) | W/C<br>(%) |
|                     | H/b=2     | H/b=3 |             |                       |         |             |            |
| 9.7×9.7             | 19.4      | 29.1  | φ 5.0       | 3000<br>5000<br>15000 | b/8     | 2.7         | 25         |
| 15.0×15.0           | 30.0      | 45.0  | φ 5.6       |                       | b/4 *   |             |            |
| 20.0×20.0           | 40.0      | 60.0  | φ 8.0       |                       | plain   |             |            |
| 25.0×25.0           | 50.0      | 75.0  | φ 10.0      |                       |         |             |            |

注 \* :  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$  シリーズのみ

表-3.6.2 帯筋の力学的性質

| 降伏点<br>強度レベル | 種類     | 実測直径<br>(mm) | 降伏点: $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び率<br>(%) | $\sigma_y \cdot A_s / A_c$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------|--------|--------------|---|--------------------------------|------------|--|
| 3000         | φ 5.0  | 5.0          | 1890                                      | 3020                           | 34.6       | 7.04   |
|              | φ 5.6  | 5.6          | 3190                                      | 4350                           | 23.9       | 6.00   |
|              | φ 8.0  | 8.0          | 2820                                      | 3840                           | 27.4       | 6.14   |
|              | φ 10.0 | 10.0         | 3500                                      | 4500                           | 25.0       | 7.61   |
| 5000         | φ 4.0  | 4.0          | 4990 *                                    | 5100                           | 9.7        | 11.6   |
|              | φ 6.0  | 6.0          | 5360                                      | 5440                           | 5.9        | 11.7   |
|              | φ 8.0  | 8.0          | 5670 *                                    | 5940                           | 32.5       | 12.3   |
|              | φ 10.0 | 10.0         | 5660 *                                    | 6030                           | 7.9        | 12.3   |
| 15000        | φ 3.5  | 3.5          | 14500 *                                   | 16100                          | 9.5        | 25.4   |
|              | φ 5.0  | 5.0          | 16500 *                                   | 21190                          | 10.4       | 24.5   |
|              | φ 7.2  | 7.3          | 17860 *                                   | 16000                          | 6.6        | 28.8   |
|              | φ 9.2  | 9.2          | 15110 *                                   | 15110                          | 8.2        | 27.7   |

注 \* : 0.2% オフセットストレス

A<sub>s</sub>: 帯筋の断面積 (cm<sup>2</sup>), A<sub>c</sub>: コアコンクリートの断面積 (cm<sup>2</sup>)

表-3.7.1 角柱体の一軸圧縮実験の概要

| 試験体寸法               |                       | 帯筋         |   |            |              |            |              | コンクリートの粗骨材最大寸法: φ max |              |   |      |
|---------------------|-----------------------|------------|---|------------|--------------|------------|--------------|-----------------------|--------------|---|------|
| 断面<br>: b×b<br>(cm) | 高さ:<br>H(cm)<br>H/b=2 | 帯筋比<br>(%) | 帯筋ピッチ<br>のタイプと<br>帯筋形状                          | ロ型比例ピッチ    |              | ロ型同一ピッチ    |              | 田型同一ピッチ               |              |   |      |
|                     |                       |            |   | 直径<br>(mm) | ピッチ<br>S(cm) | 直径<br>(mm) | ピッチ<br>S(cm) | 直径<br>(mm)            | ピッチ<br>S(cm) |   |      |
| 9.7×9.7             | 19.4                  | 約 1.5      | 比例ピッチ<br>(ロ型)<br>同一ピッチ<br>(ロ型)<br>同一ピッチ<br>(田型) | φ 4.0      | 1.6          | φ 4.0      | (1.6)        | -                     | -            | φ 15 普通<br>コンクリ<br>ート(mm)<br>マイクロ<br>コンクリ<br>ート(mm) | 6    |
| 15×15               | 30                    |            |   | φ 5.6      | 2.5          | φ 4.5      | 1.6          | φ 4.0                 | 1.6          |   | 9    |
| 20×20               | 40                    |            |   | φ 8.0      | 3.3          | φ 5.6      | 1.6          | φ 4.5                 | 1.6          |   | 12   |
| 25×25               | 50                    |            |   | φ 10.0     | 4.2          | φ 6.3      | 1.6          | φ 5.0                 | 1.6          |   | (15) |
|                     |                       |            |   |            |              |            |              |                       |              |   |      |

表-3.7.2 コンクリートの調合表

| 種類<br>(コンクリートの呼称) | 粗骨材の範囲<br>(mm) | 細骨材率<br>(%) | 単位水量<br>(kg) | セメント<br>(kg) | スランプ<br>(cm) | 空気量<br>(%) |
|-------------------|----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| φ 6 マイクロコンクリート    | φ 6 - φ 0.6    | 30          | 204          | 381          | 20.1         | 1.8        |
| φ 9 マイクロコンクリート    | φ 9 - φ 0.6    | 35          | 214          | 381          | 17.0         | 1.7        |
| φ 12 マイクロコンクリート   | φ 12 - φ 0.6   | 39          | 214          | 381          | 15.1         | 1.8        |
| φ 15 普通コンクリート     | φ 15 - φ 1.2   | 45          | 223          | 393          | 15.1         | 1.0        |

水セメント比: 50%、骨材容積比: 65%、混和剤: 減水剤

表-3.7.3 帯筋の力学的性質

| 種類     | 実測直径<br>(mm) | 降伏点: $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び率<br>(%) |
|--------|--------------|---|--------------------------------|------------|
| φ 4.0  | 4.0          | 2720                                      | 3510                           | 43         |
| φ 4.5  | 4.5          | 2520                                      | 3540                           | 40         |
| φ 5.0  | 5.0          | 2530                                      | 3720                           | 29         |
| φ 5.6  | 5.6          | 3330                                      | 4390                           | 30         |
| φ 6.3  | 6.3          | 3390                                      | 4450                           | 31         |
| φ 8.0  | 8.0          | 3170                                      | 4140                           | 30         |
| φ 10.0 | 10.0         | 3610                                      | 4130                           | 37         |



表-3.8.1 応力-ひずみ曲線の教示式

|   |  |
|---|--|
| 応力-ひずみ曲線  | b=10cmのコンファイト <sup>®</sup> コンクリートを基準としたピーク点(R $\sigma$ , R $\epsilon$ )と形状係数Nd   |
| <p>応力上昇域 *1</p> $\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{Na \cdot (\epsilon / \epsilon_f)}{Na - 1 + (\epsilon / \epsilon_f)^{Na}} \dots(1)$ <p>Na = E<sub>i</sub> / (E<sub>i</sub> - E<sub>f</sub>)<br/>E<sub>i</sub>: 初期弾性係数<br/>E<sub>f</sub> = <math>\sigma_f / \epsilon_f</math> (ピーク点のヤング係数)</p> | <p>圧縮強度比 *2</p> $R\sigma = \frac{\sigma_f}{10\sigma_o} = \frac{A}{10 + b} + B \dots(3)$ <p>A = 0.012 · <math>\sigma_o</math> - 4.0<br/>B = -0.0006 · <math>\sigma_o</math> + 1.2</p> |
| <p>応力下降域</p> $\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{1}{Nd} + \frac{(Nd - 1) \cdot X}{(Nd - 1) + X^m} \dots(2)$ <p>X = (<math>\epsilon / \epsilon_f</math>)<br/>m = 1.2<br/>Nd: 応力下降域の曲線の形状を決める係数</p>  | <p>最大応力時のひずみ比 *3</p> $R\epsilon = \frac{\epsilon_f}{10\epsilon_f} = \frac{C}{b} + D \dots(4)$ <p>C = -0.24 / S' + 3.2<br/>D = 0.024 / S' + 0.68<br/>S': 帯筋ピッチ比 (S' = S/b)</p>        |
|   | <p>応力下降域の曲線の形状パラメータ比 *4</p> $RNd = \frac{Nd}{10Nd} = \frac{E}{b} + F \dots(5)$ <p>E = -0.41 / S' - 1.9<br/>F = 0.041 / S' + 1.2</p>  |

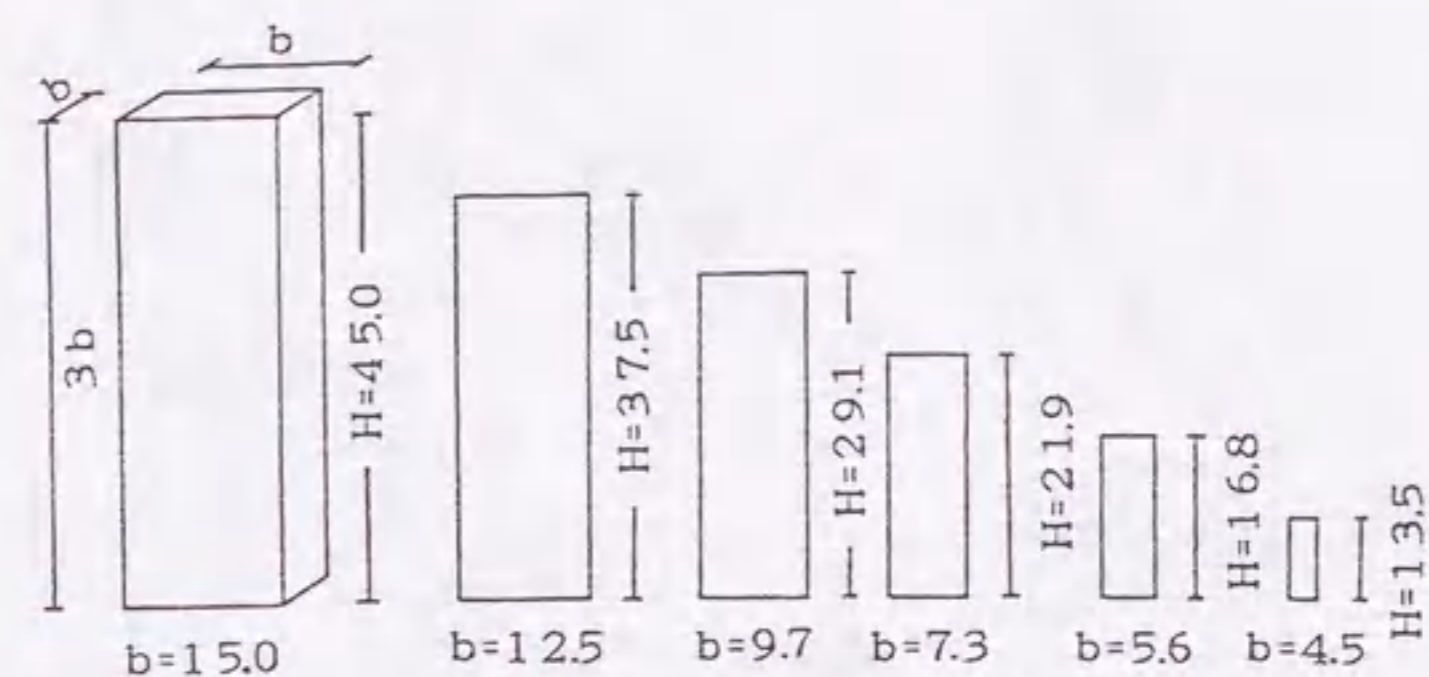
[注] \*1:  $\sigma$ : 応力,  $\epsilon$ : ひずみ,  $\sigma_f$ : 圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>),  $\epsilon_f$ : 最大応力時のひずみ, E<sub>i</sub>: ここではE<sub>i</sub>に大きな寸法効果は無いと仮定し、実験データの平均値式 E<sub>i</sub>=156 ·  $\sigma_o$  + 22100 (kgf/cm<sup>2</sup>)を採用した。  
 $\sigma_o$ : b=10cmのプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

\*2:  $10\sigma_f$ : 帯筋比が同じb=10cmのコンクリート角柱体の圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>), b: 角柱体の断面の一辺(cm),  
参考式  $10\sigma_f = 1.04 \cdot \sigma_o - 2.4 + (-0.03 \cdot \sigma_o + 4.1) \cdot H \sigma_{LY}$ ,  $H \sigma_{LY} = 2 \cdot A_w \cdot f_{sy} / [(b - 2 \cdot \phi_a - 2 \cdot dc) \cdot S]$   
R $\sigma$ : 帯筋比が同じ $10\sigma_f$ で無次元化した圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>), S: 帯筋のピッチ(cm), A<sub>w</sub>: 帯筋断面積(cm<sup>2</sup>),  
f<sub>sy</sub>: 帯筋の降伏点(kgf/cm<sup>2</sup>),  $\phi_a$ : 帯筋径(cm), dc: コンクリートの表面から帯筋の外側までの距離(cm)

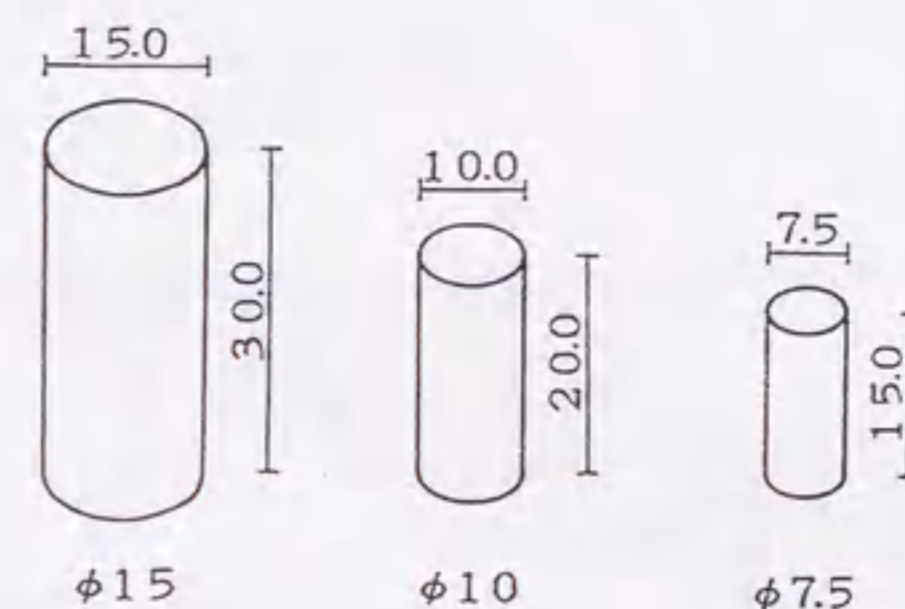
\*3:  $10\epsilon_f$ : 帯筋比が同じb=10cmのコンファイト<sup>®</sup>コンクリート角柱体の最大応力時のひずみ,  
参考式  $10\epsilon_f = \{ (4.8 / \sqrt{H \sigma_{LY}} + 0.6) \cdot \sigma_o + (-4900 / \sqrt{H \sigma_{LY}} + 3700) \} \times 10^{-6}$ ,  
S': 帯筋ピッチ比 S' = S/b (本実験では帯筋ピッチSがbの場合、帯筋比は0.3%とした)  
本実験と異なる帯筋径および降伏点をもつ場合の近似式 S' = 9.2 / H  $\sigma_{LY}$

\*4:  $10Nd$ : 帯筋比が同じb=10cmのコンクリート角柱体のNd値, 参考式  $10Nd = -0.028 \cdot H \sigma_{LY} + 0.0042 \cdot \sigma_o + 1.2$

[計算例] 入力データ : b = 20.0cm, f<sub>sy</sub> = 3060kgf/cm<sup>2</sup>, 帯筋比は0.3%, S = b (5.0cm)とする。したがって S' = 0.25  
 $\sigma_o = 313\text{kgf/cm}^2$ ,  $10\sigma_f = 780\text{kgf/cm}^2$ ,  $10\epsilon_f = 2800 \times 10^{-6}$ ,  $10Nd = 3.2$   
計算結果 : R $\sigma$  = 0.92, R $\epsilon$  = 0.89, RNd = 1.18,  $\sigma_f$  = 720kgf/cm<sup>2</sup>,  $\epsilon_f$  = 2490 × 10<sup>-6</sup>, Na = 7.75, Nd = 3.77

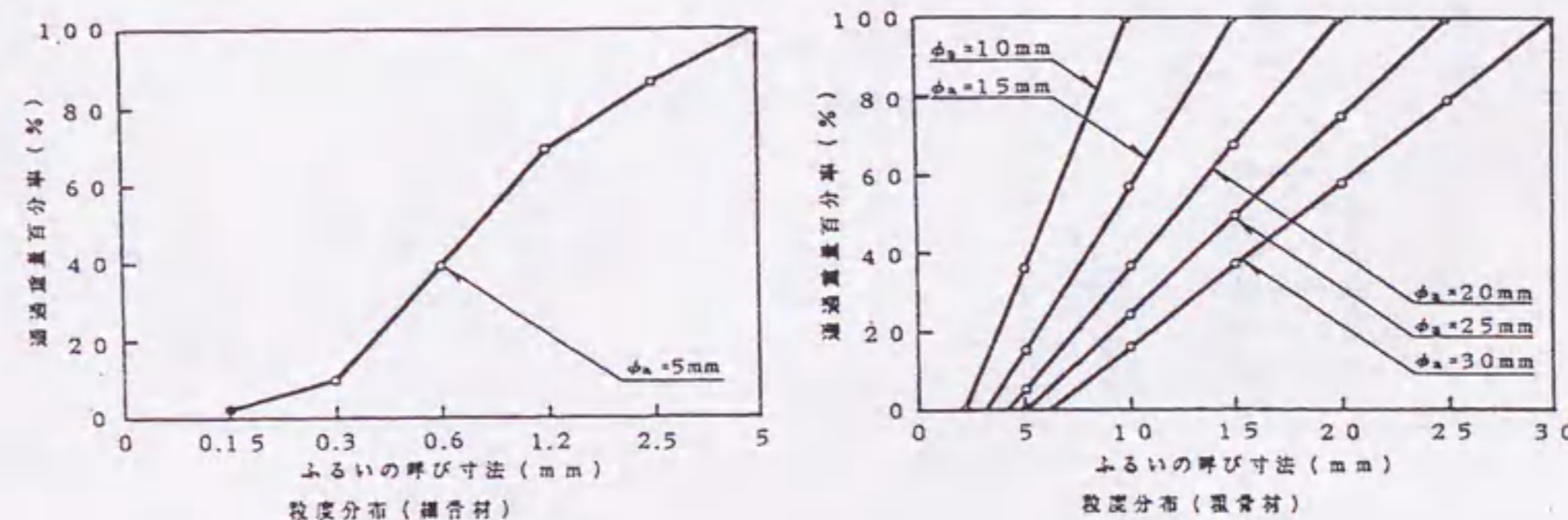


(a) 角柱体



(b) 円柱体

図-3.2.1 コンクリート試験体の形状・寸法



(a) 細骨材

(b) 粗骨材

図-3.2.2 骨材の粒度分布



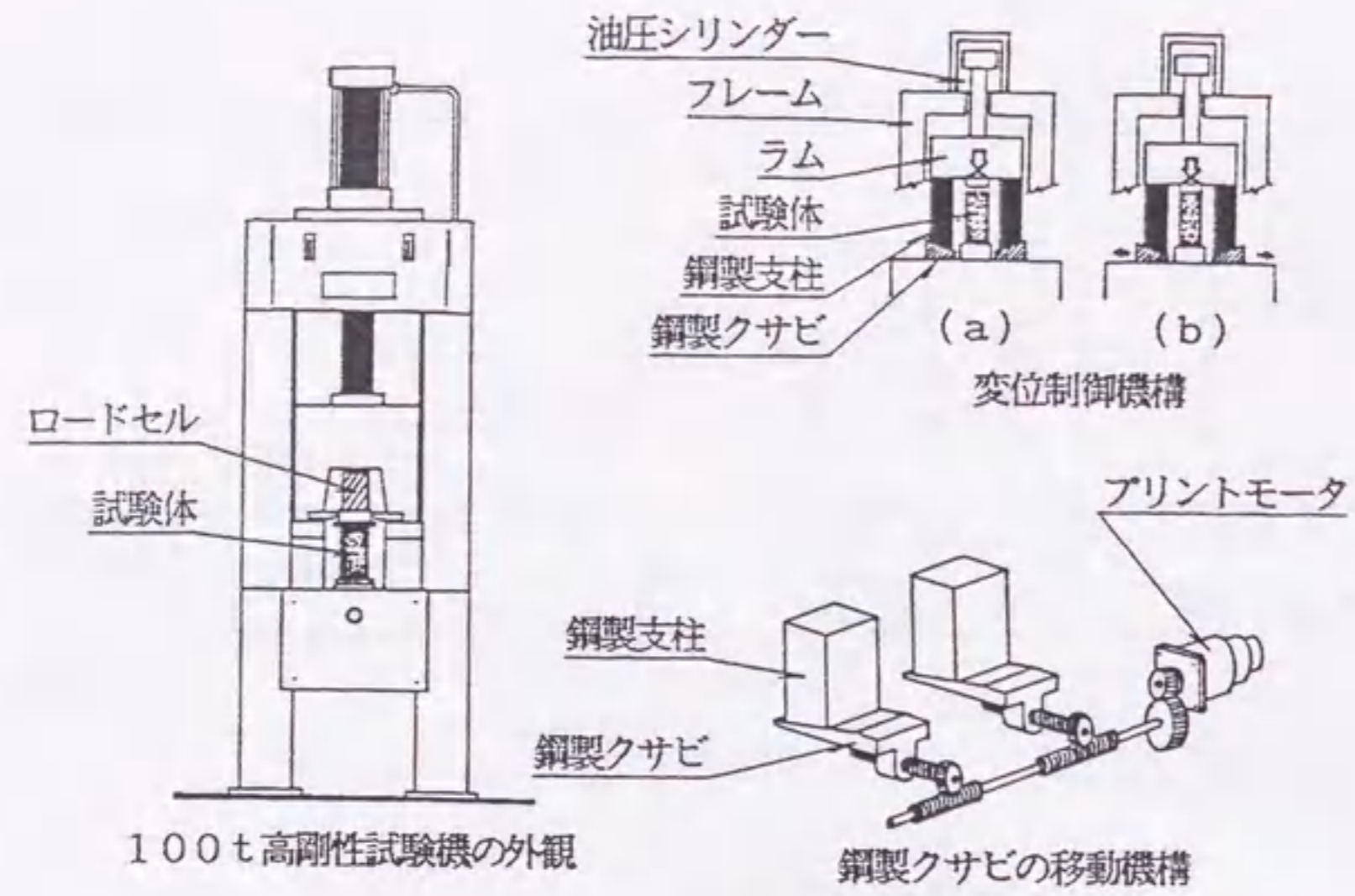


図-3.2.3 載荷装置の概要

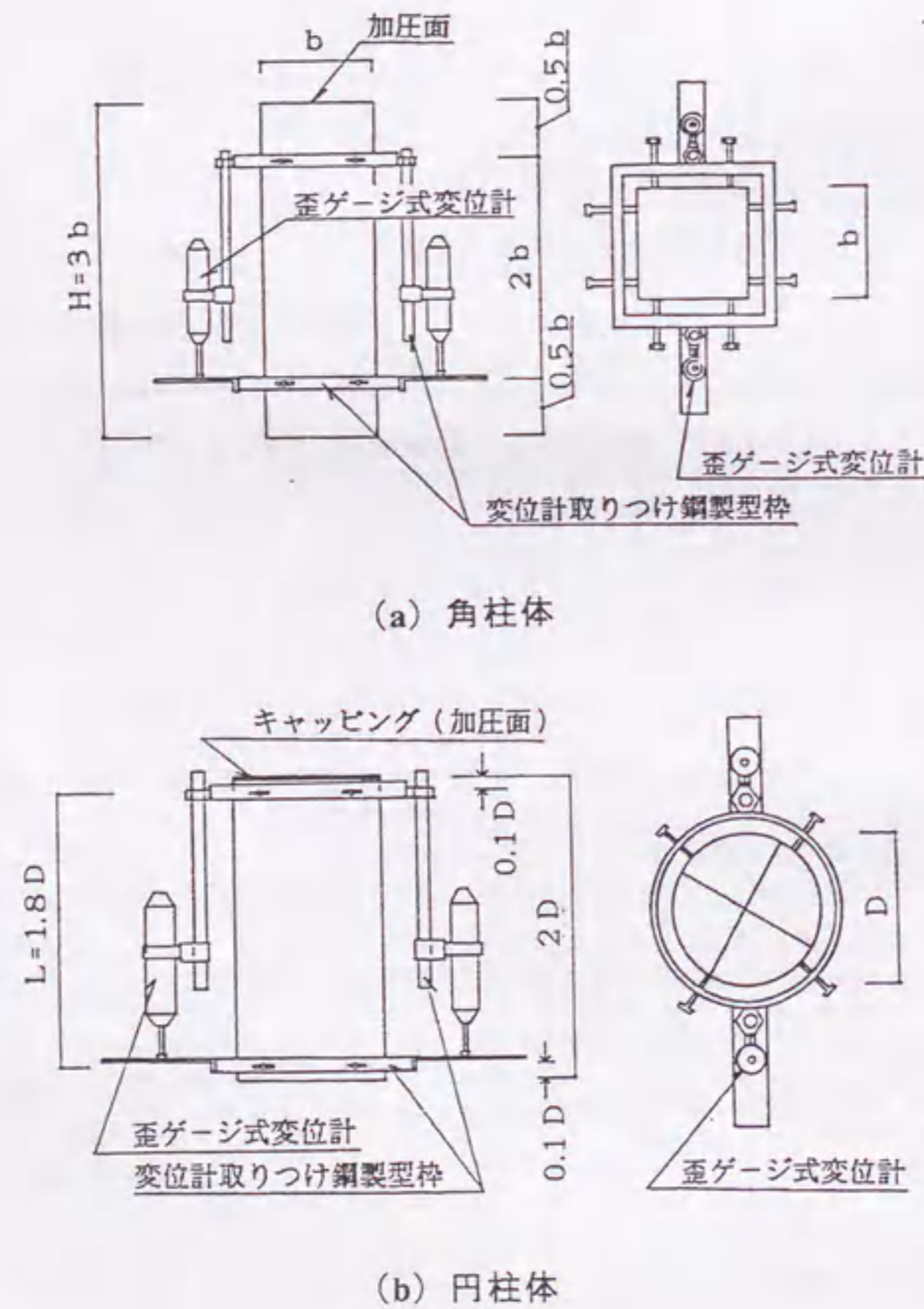


図-3.2.4 ひずみの測定方法

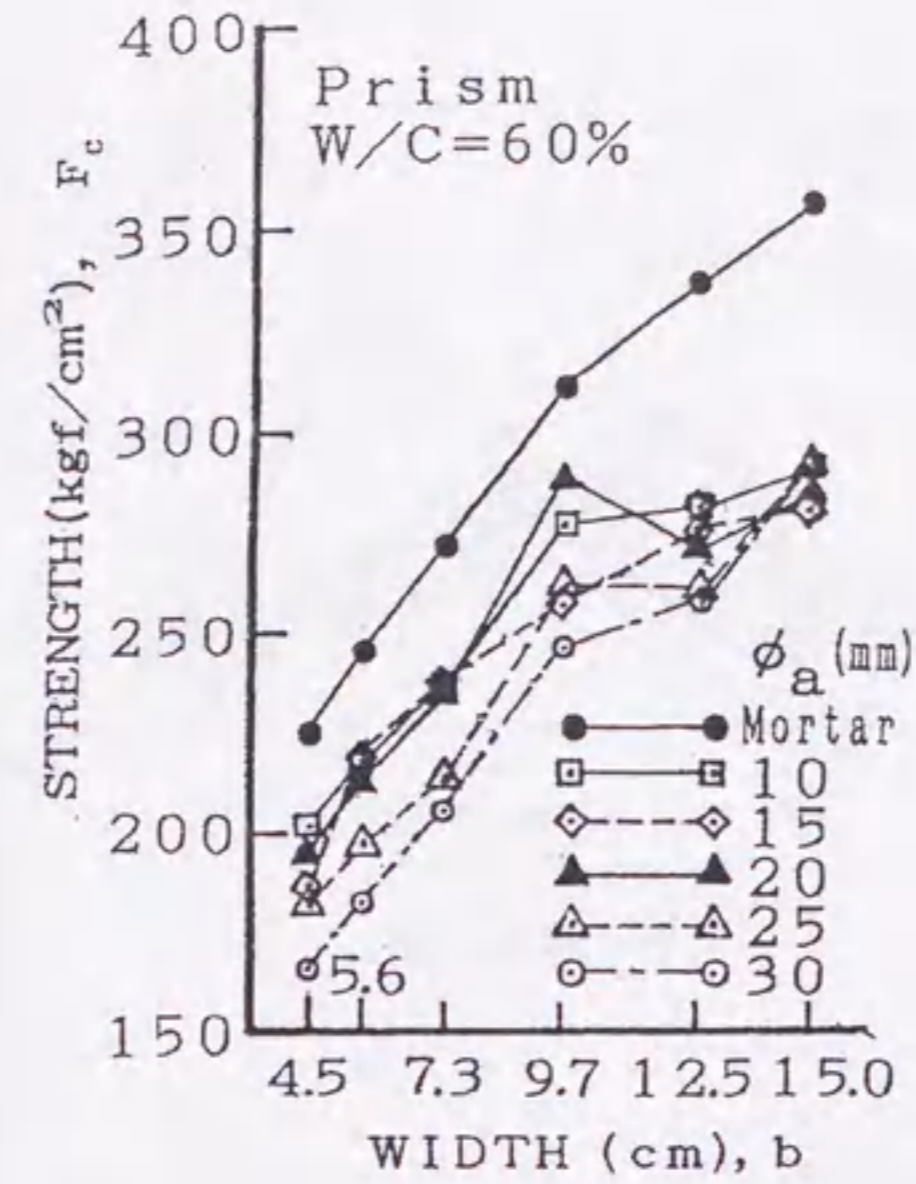


図-3.2.5 圧縮強度の寸法効果 (角柱体)

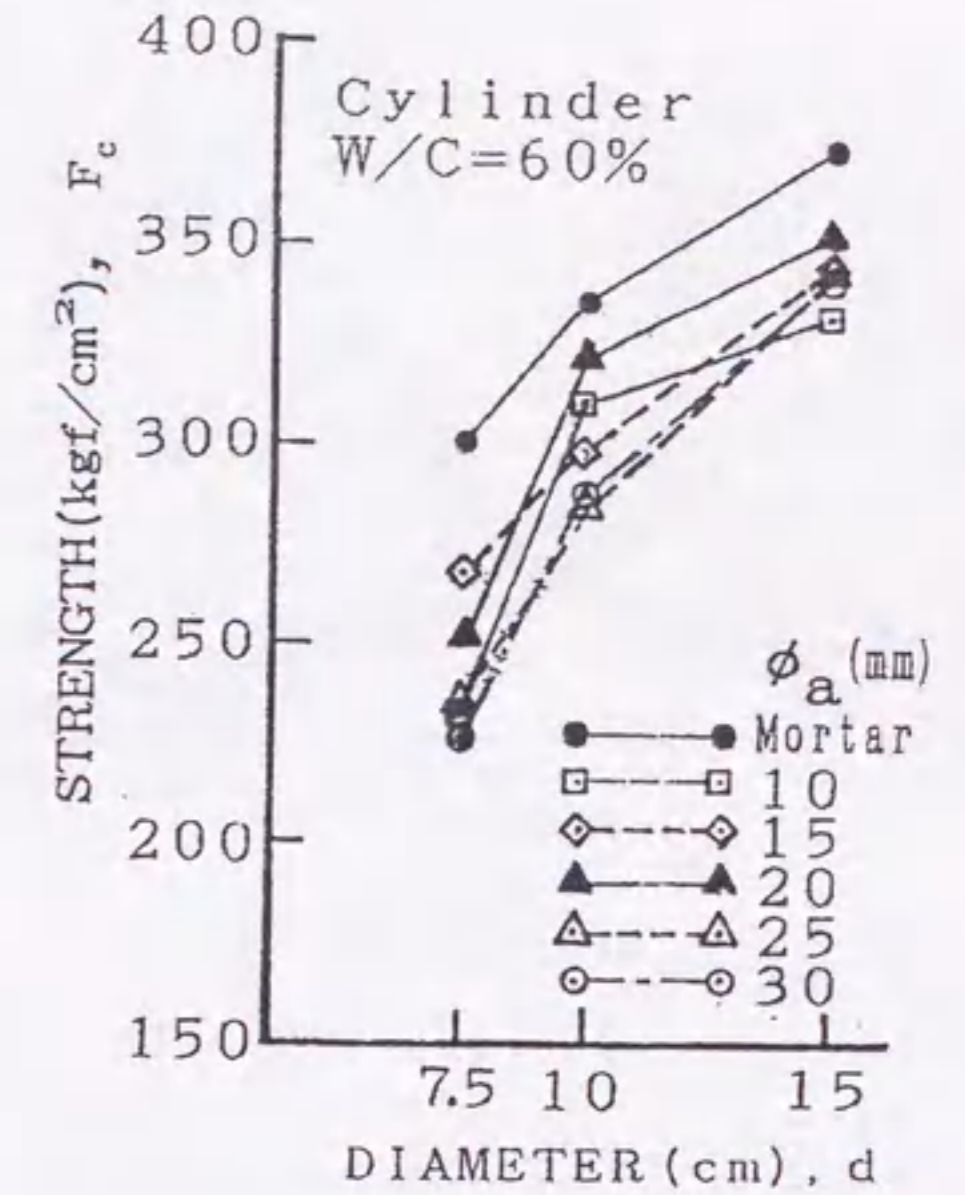


図-3.2.6 圧縮強度の寸法効果 (円柱体)

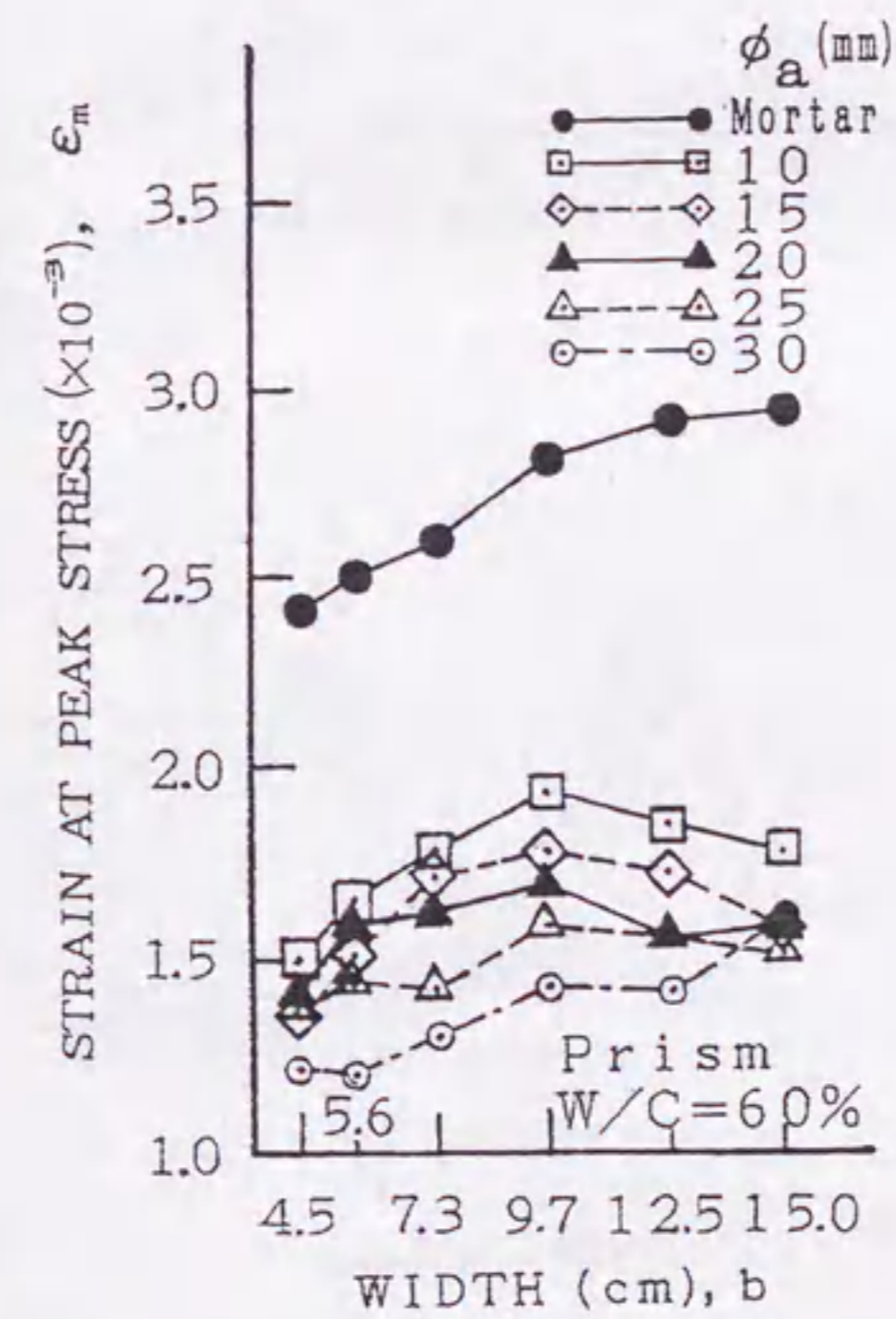


図-3.2.7 最大圧縮応力時のひずみの寸法効果 (角柱体)

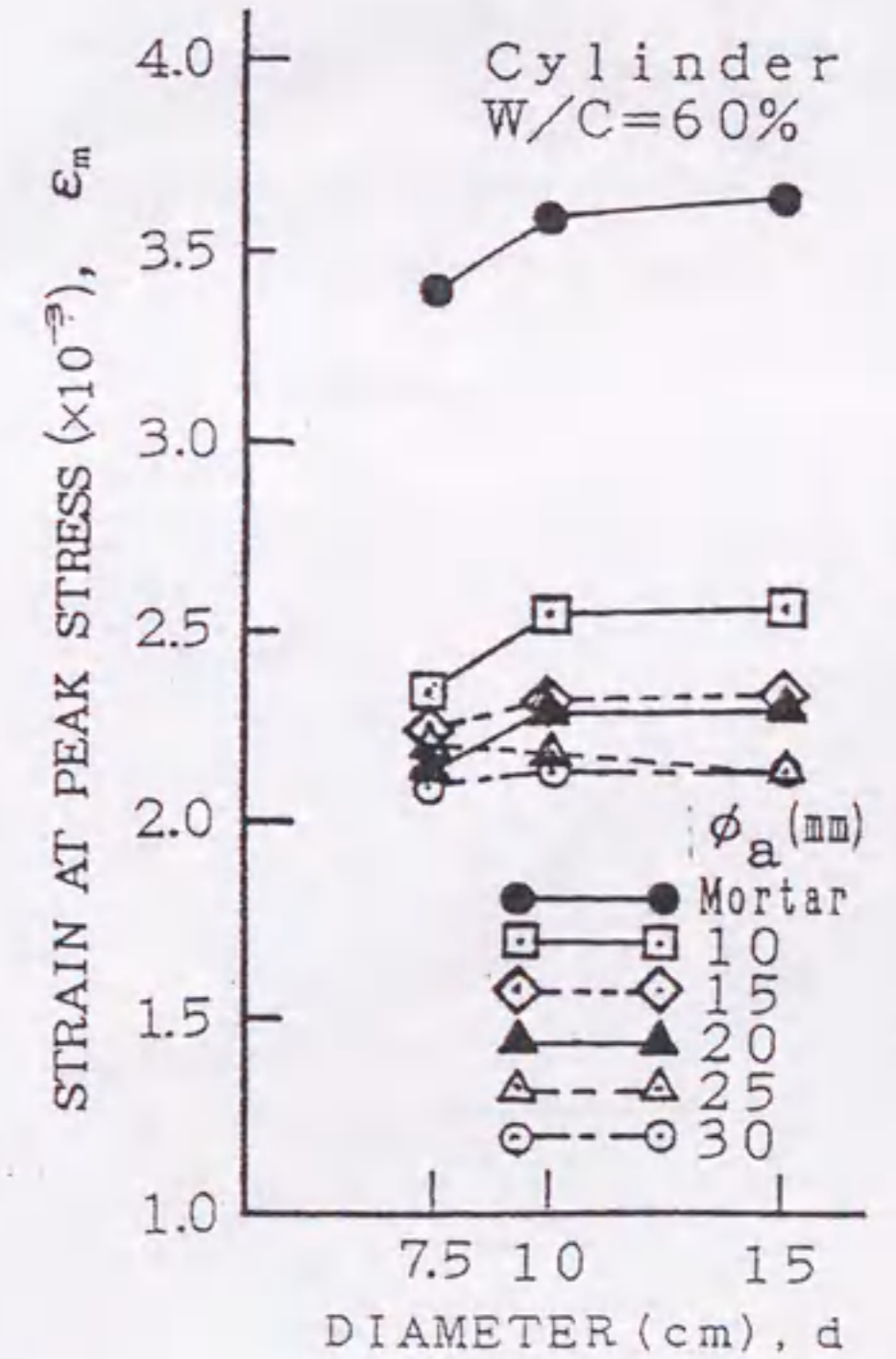
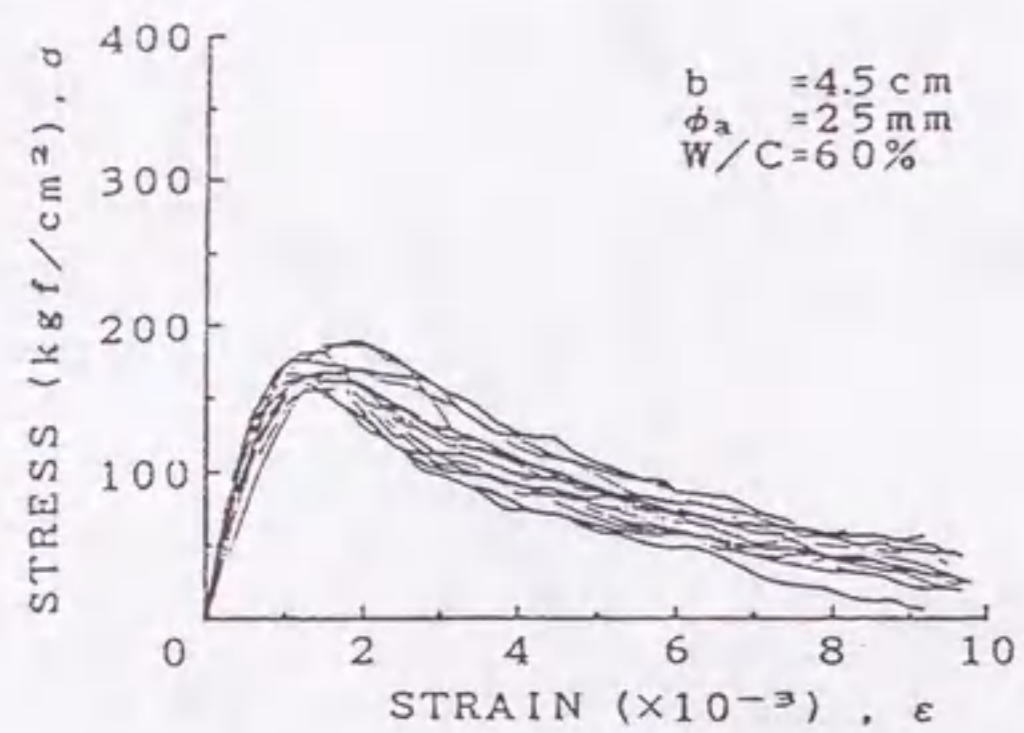
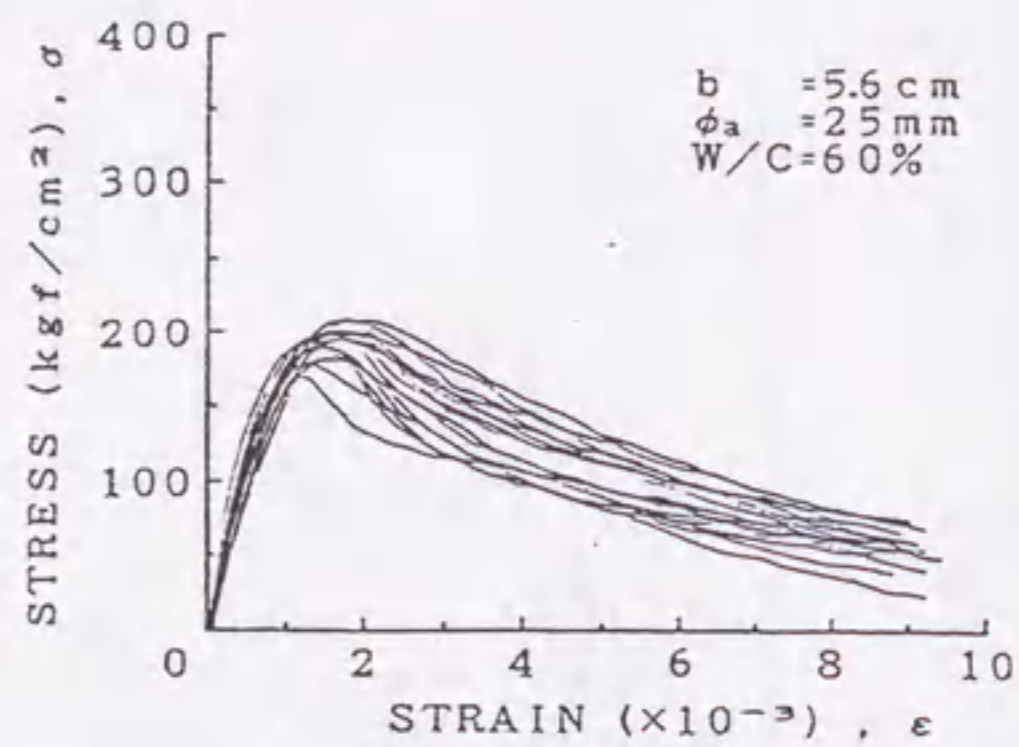


図-3.2.8 最大圧縮応力時のひずみの寸法効果 (円柱体)

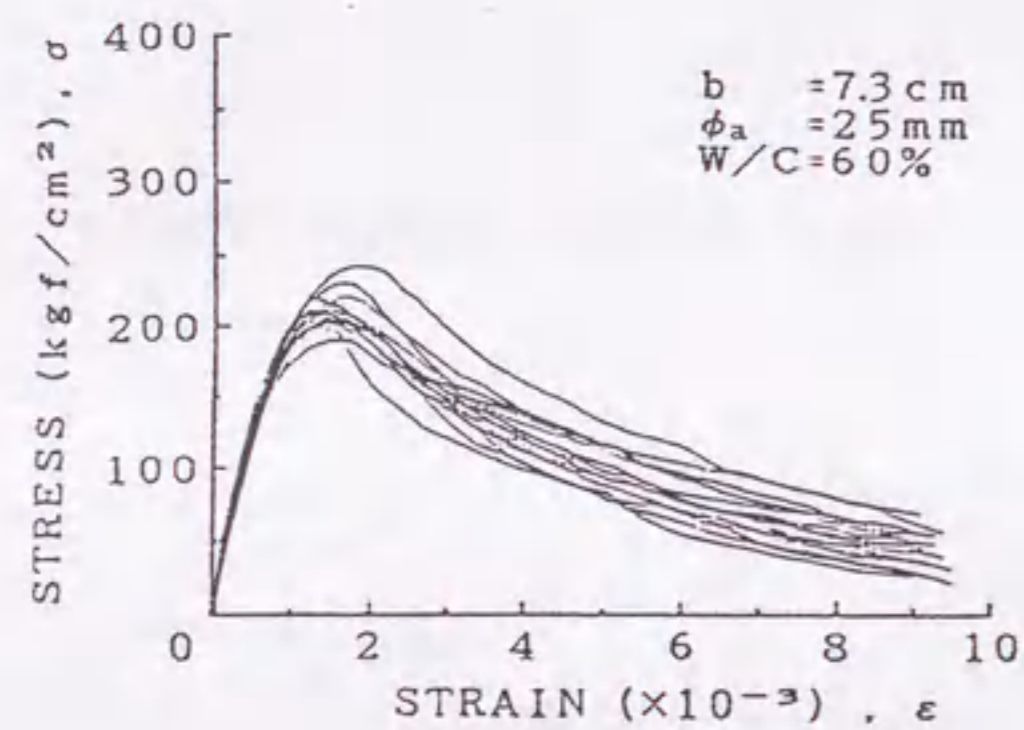




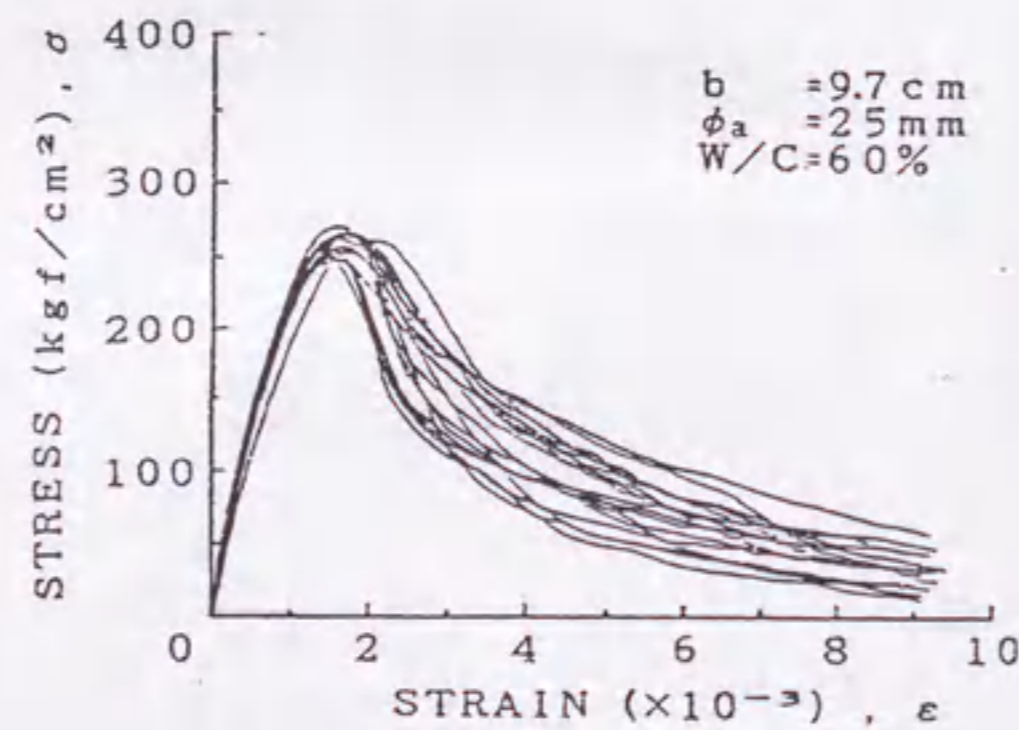
(a)  $b=4.5\text{cm}$



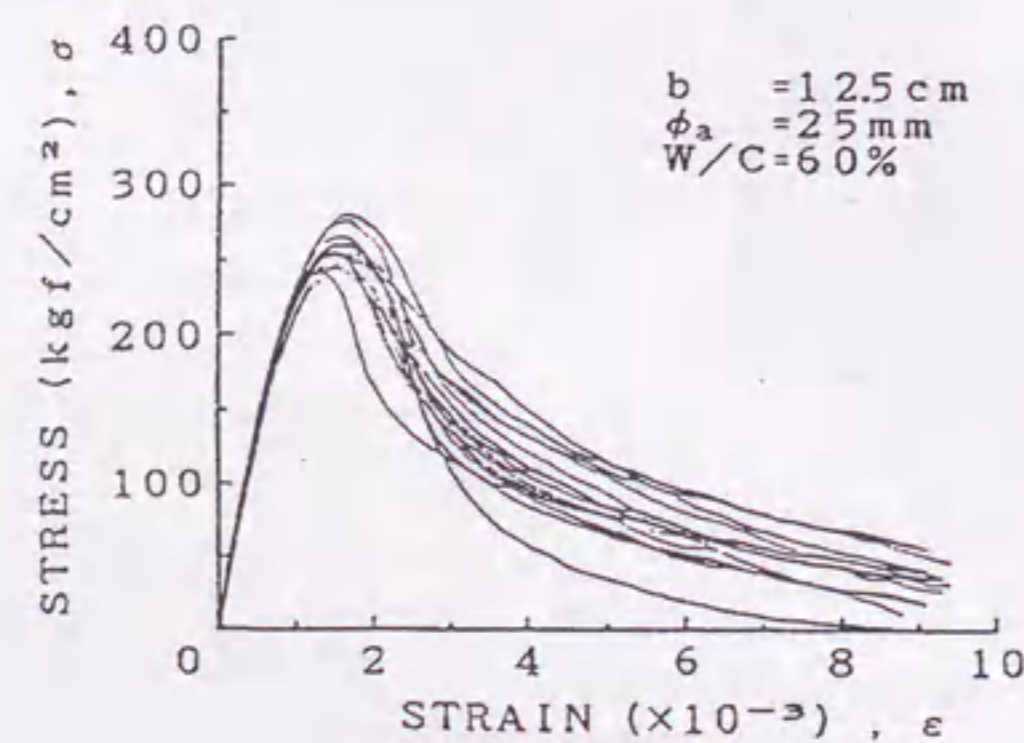
(b)  $b=5.6\text{cm}$



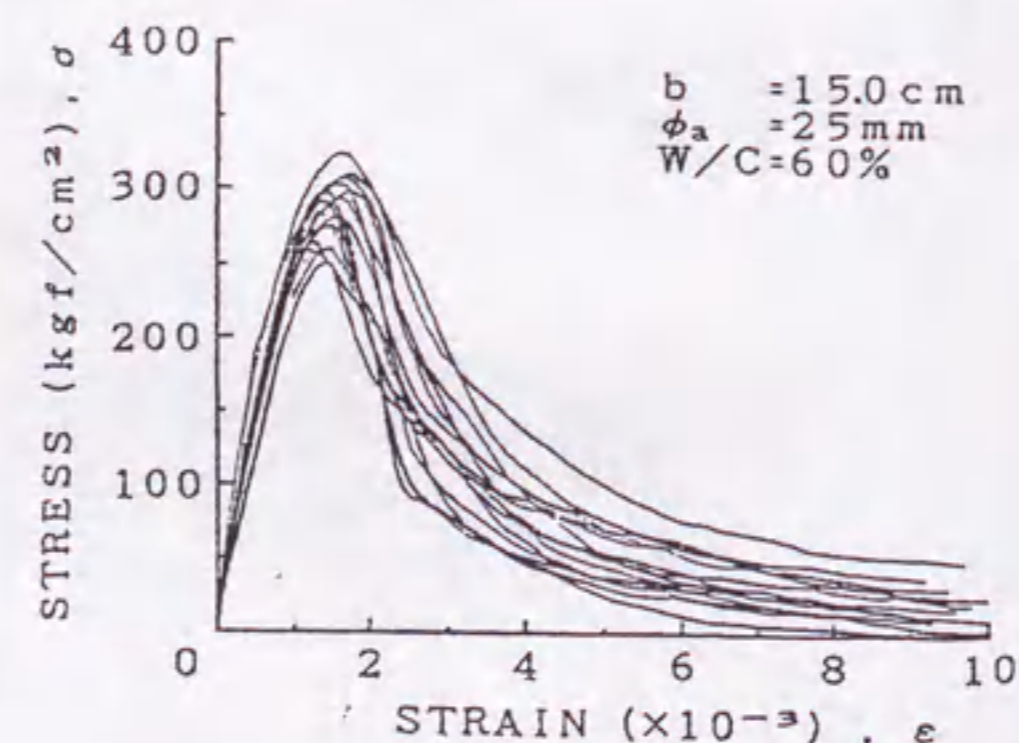
(c)  $b=7.3\text{cm}$



(d)  $b=9.7\text{cm}$

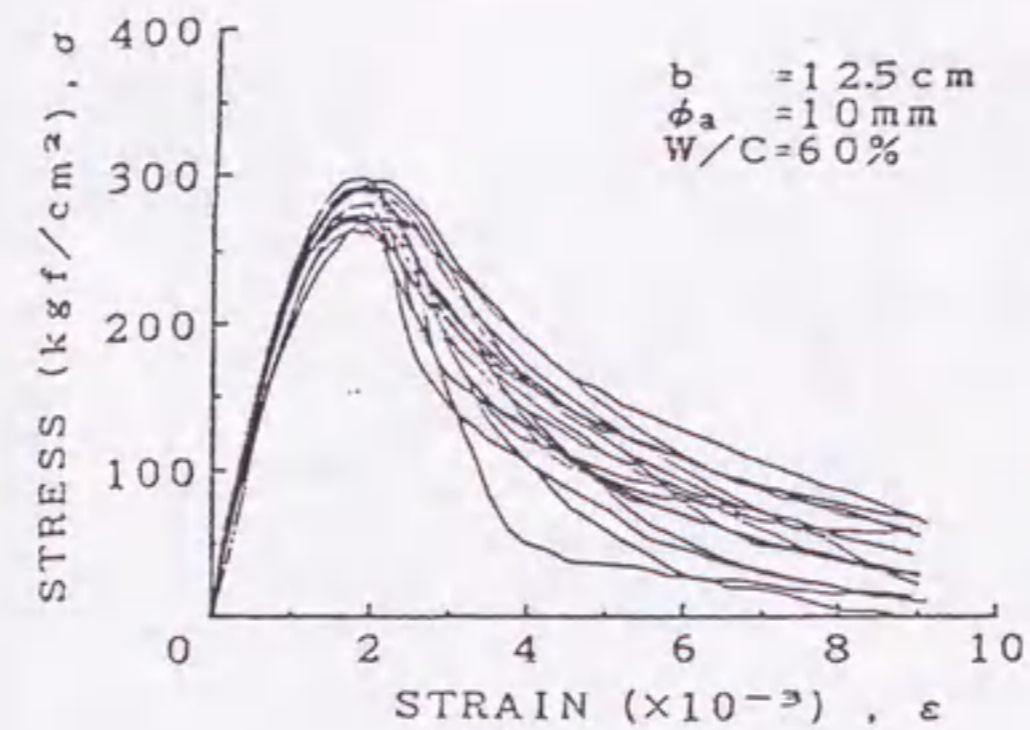


(e)  $b=12.5\text{cm}$

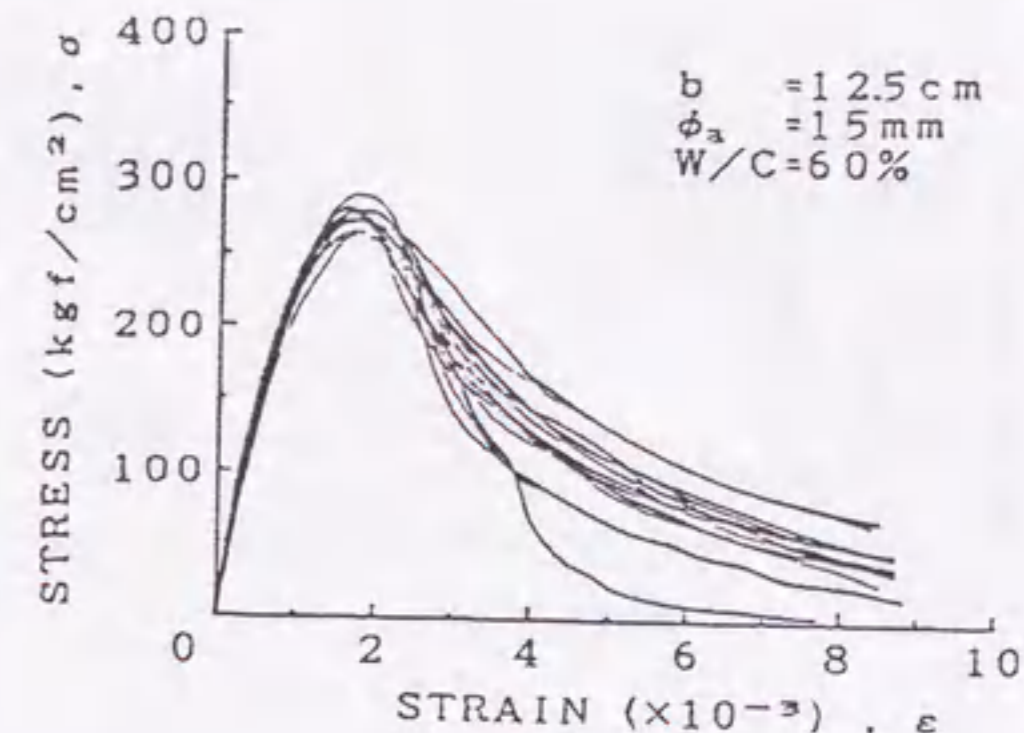


(f)  $b=15\text{cm}$

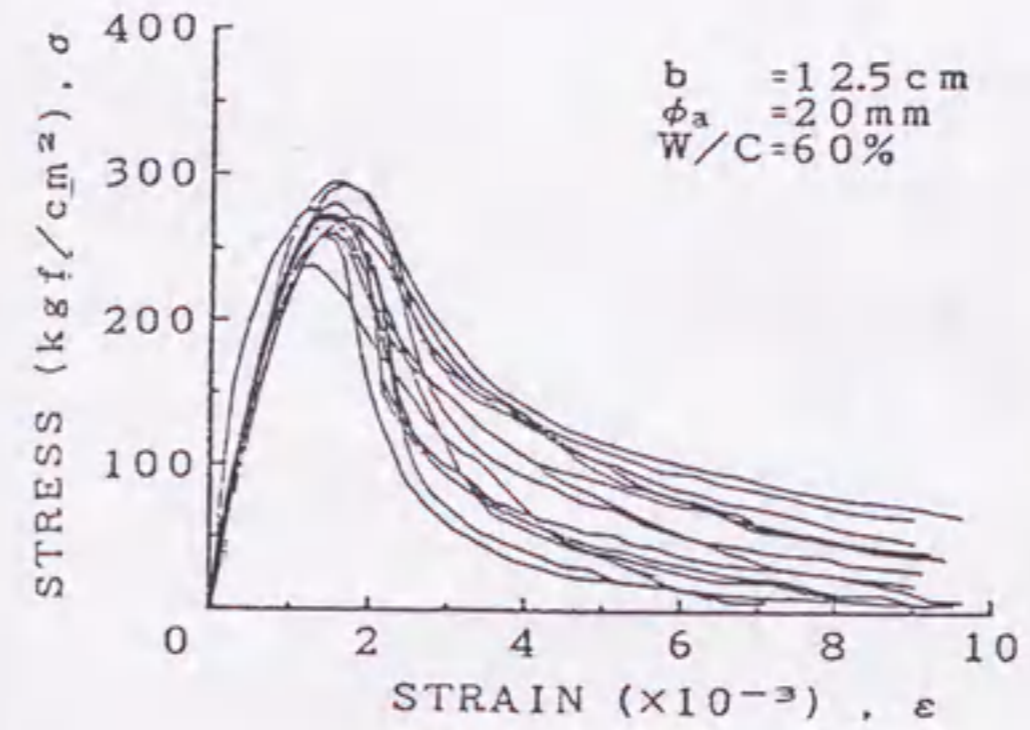
図-3.2.9 応力-ひずみ曲線の一例 (角柱体、試験体寸法別、 $W/C=60\%$ 、 $\phi_a=25\text{mm}$ )



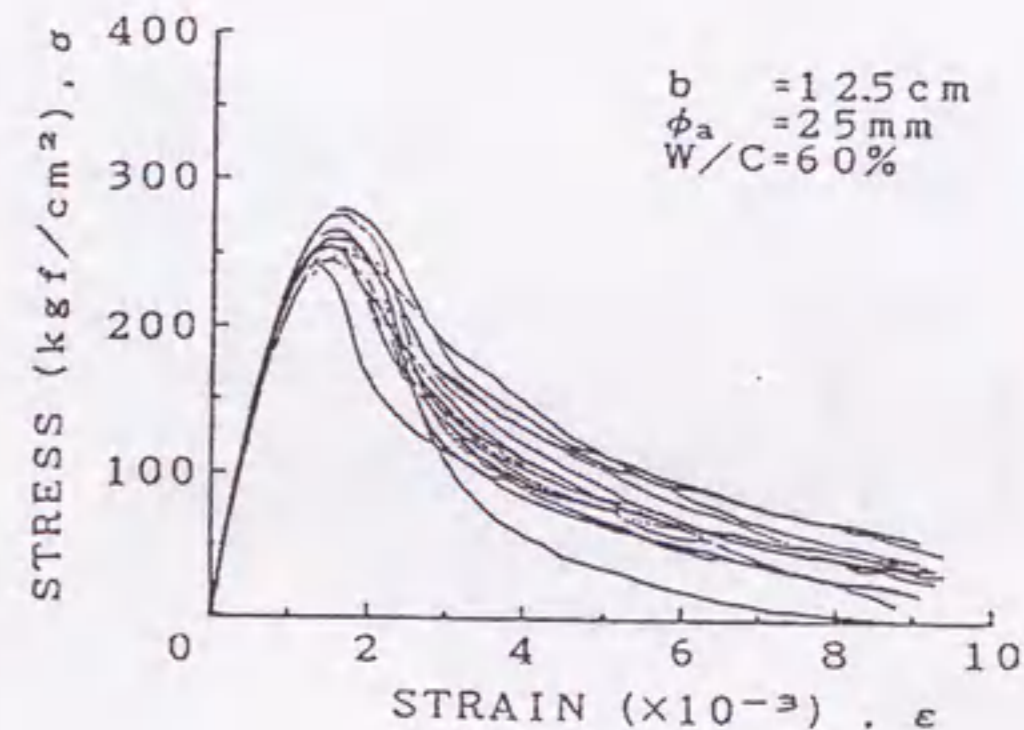
(a)  $\phi_a=10\text{mm}$



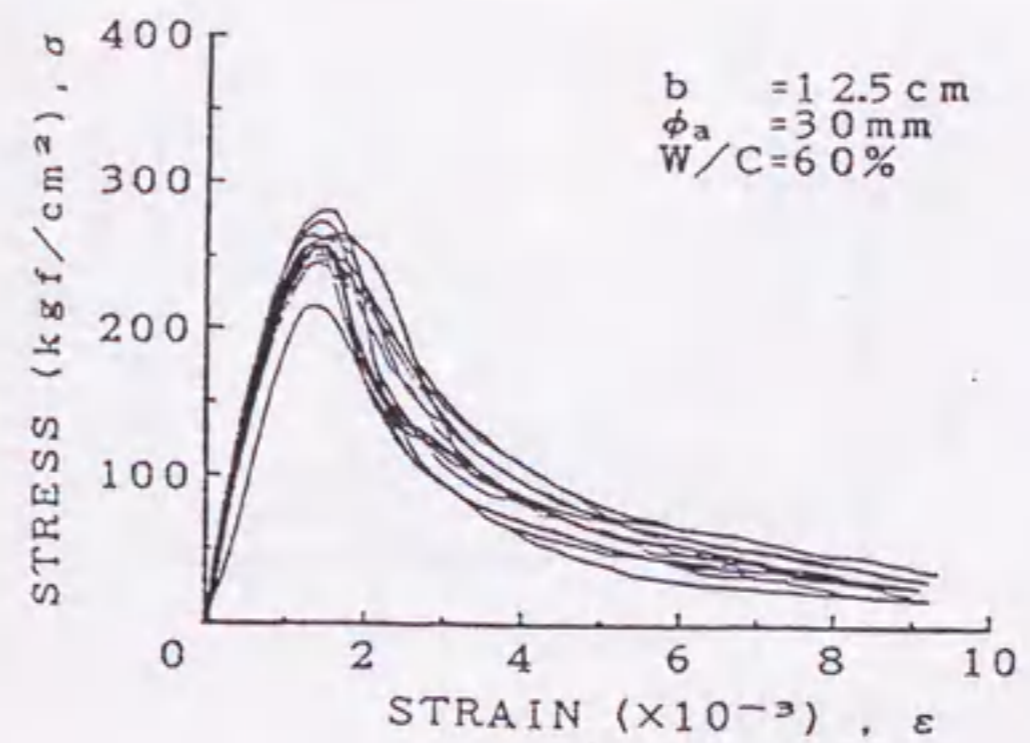
(b)  $\phi_a=15\text{mm}$



(c)  $\phi_a=20\text{mm}$



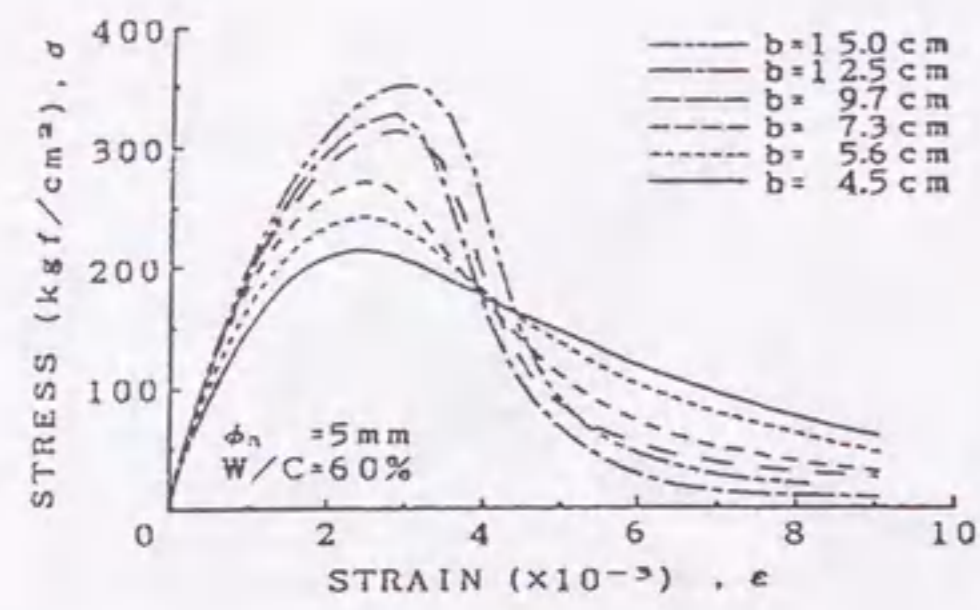
(d)  $\phi_a=25\text{mm}$



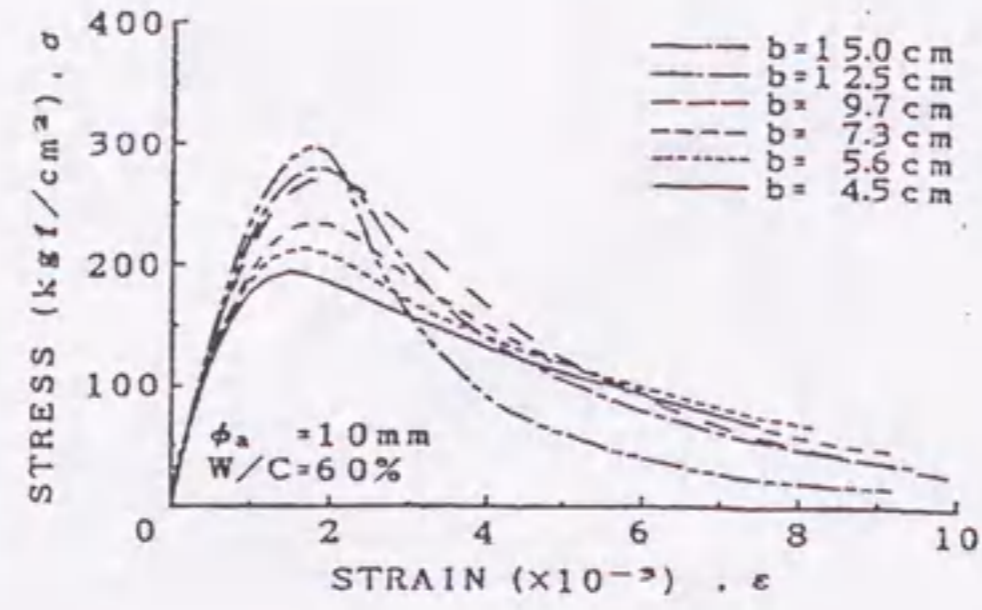
(e)  $\phi_a=30\text{mm}$

図-3.2.10 応力-ひずみ曲線の一例 (角柱体、骨材寸法別、 $W/C=60\%$ 、 $b=12.5\text{cm}$ )

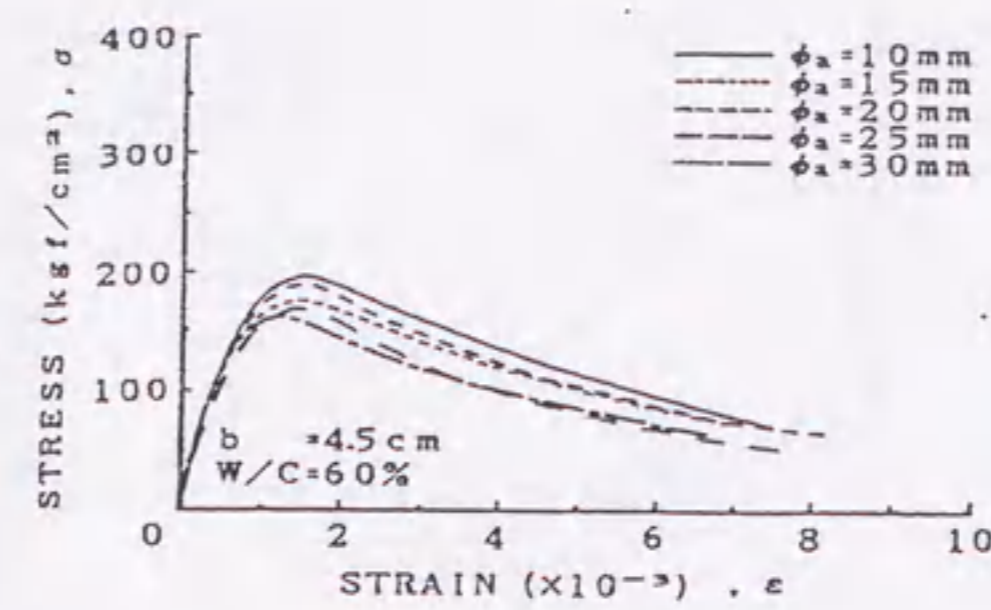




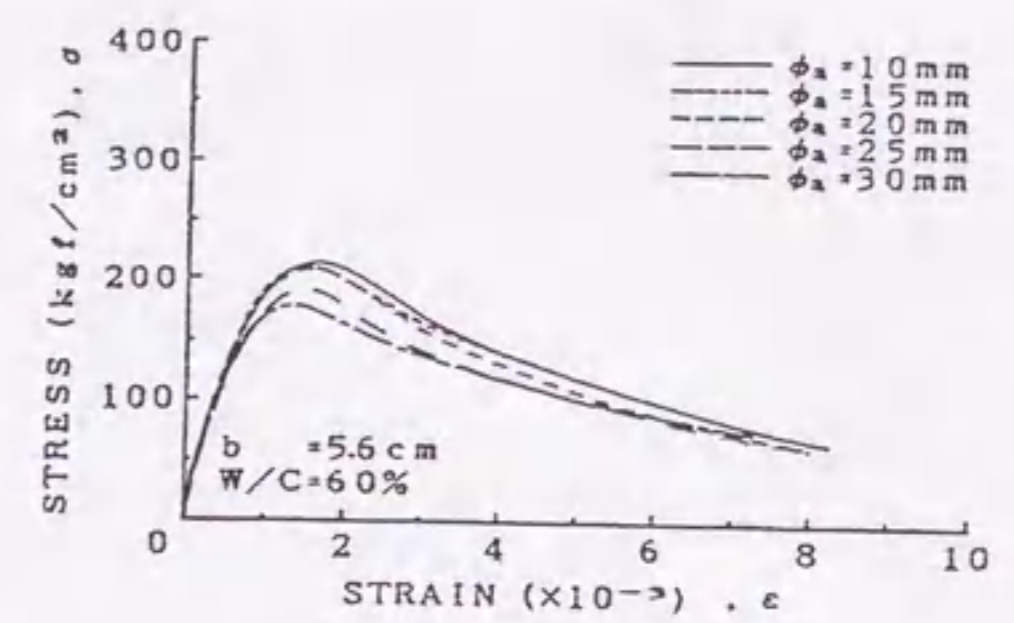
(a)  $\phi_a = 5\text{mm}$



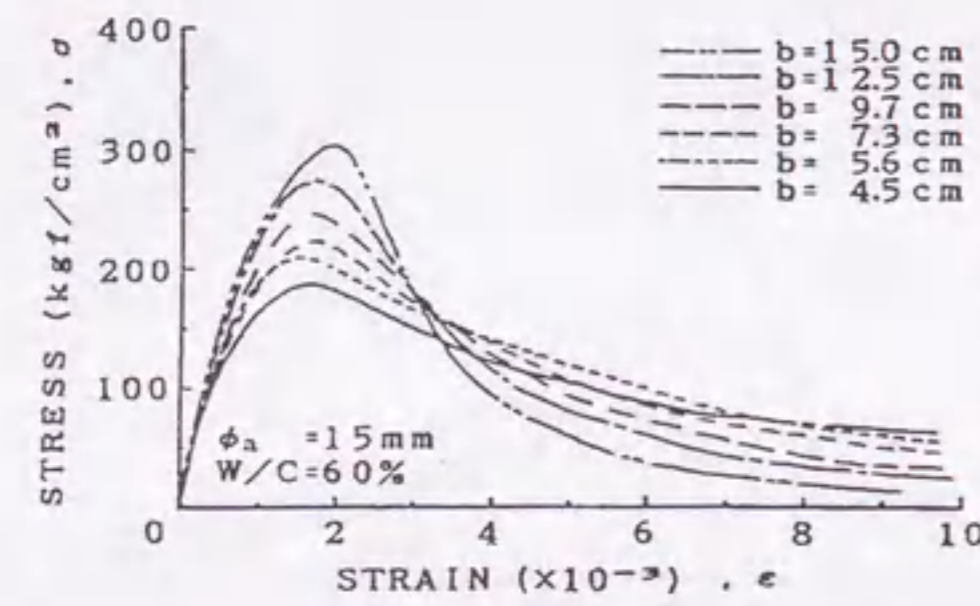
(b)  $\phi_a = 10\text{mm}$



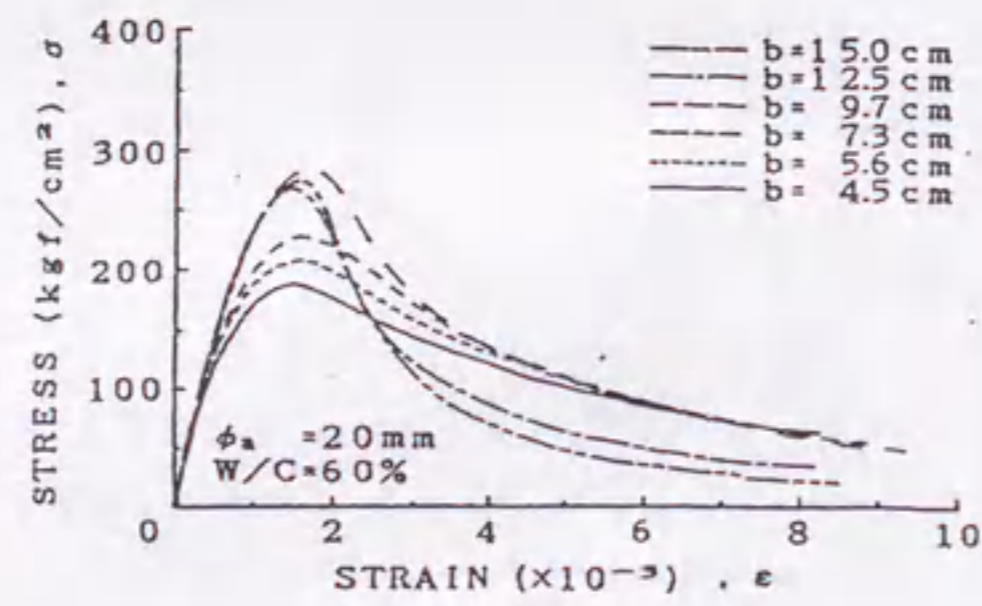
(a)  $b = 4.5\text{cm}$



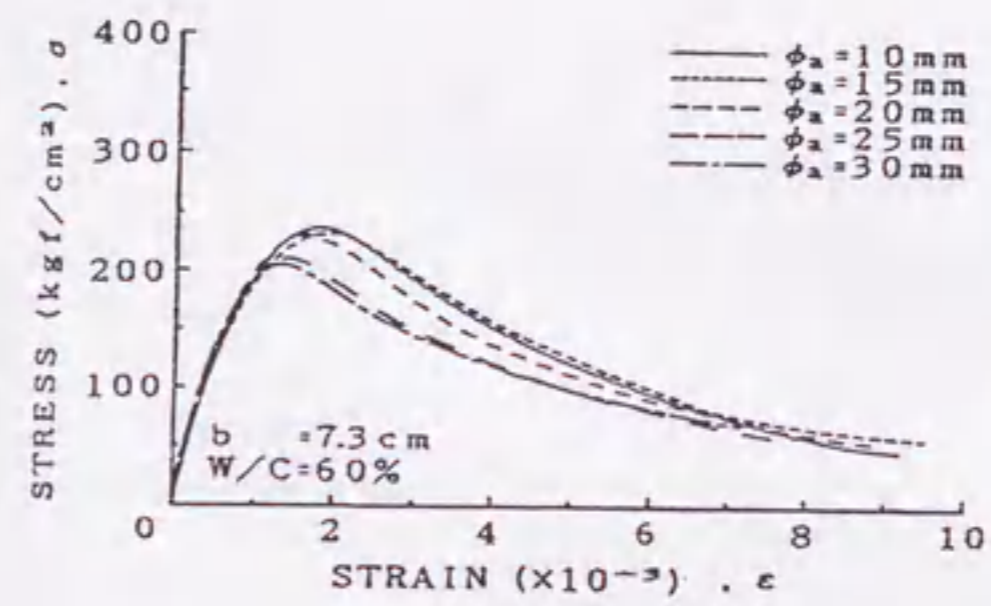
(b)  $b = 5.6\text{cm}$



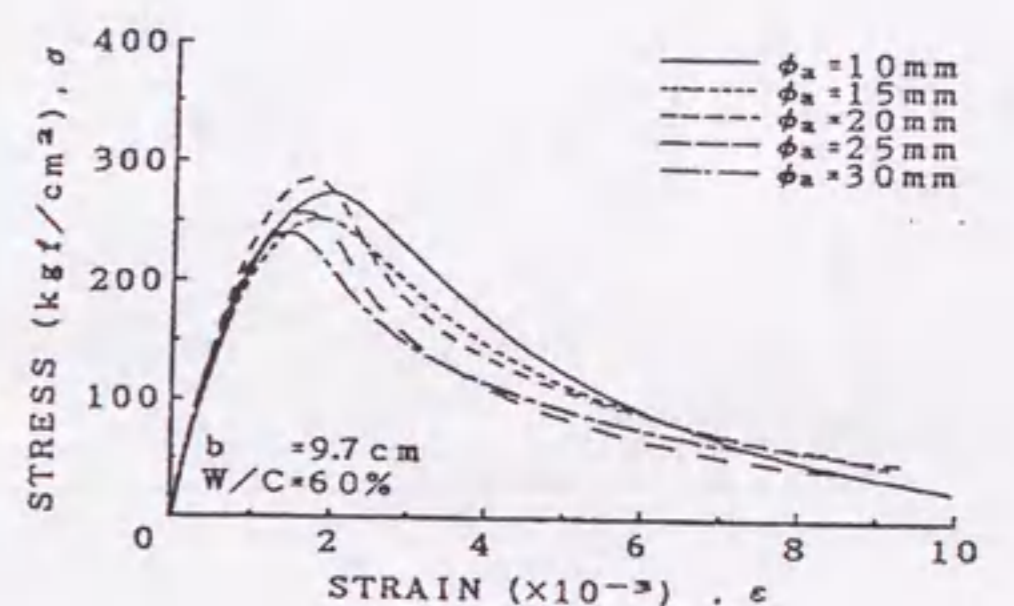
(c)  $\phi_a = 15\text{mm}$



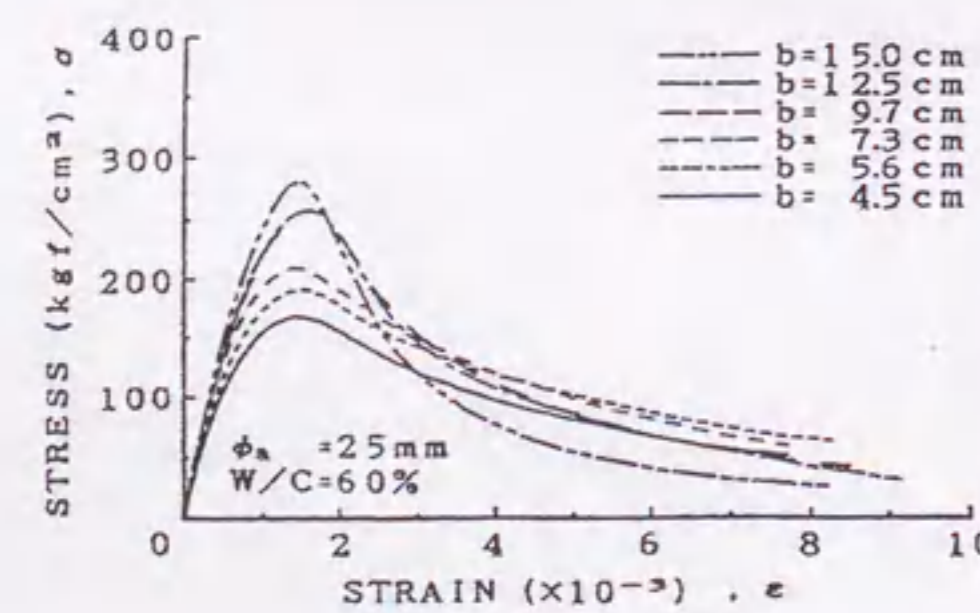
(d)  $\phi_a = 20\text{mm}$



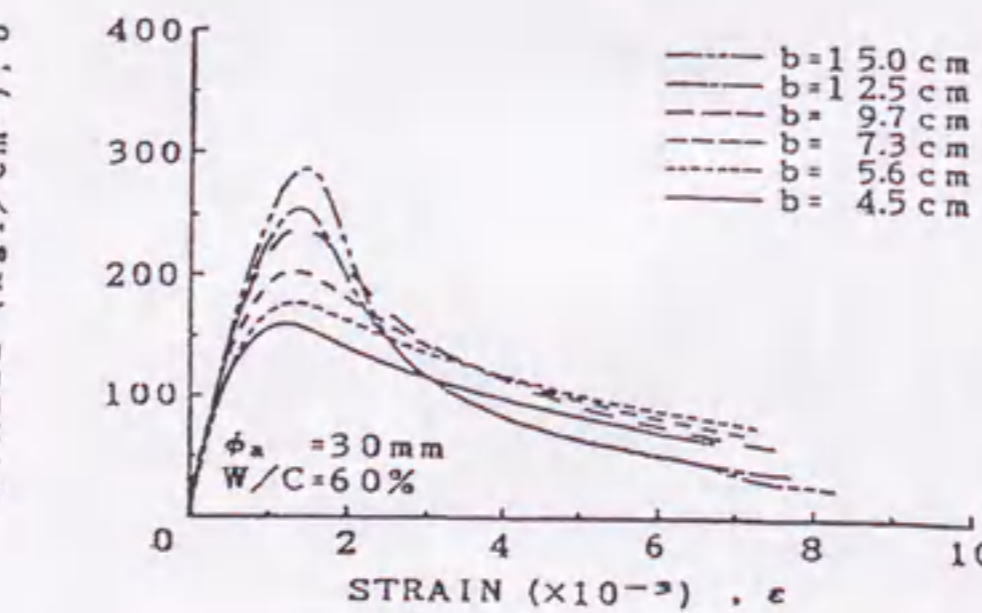
(c)  $b = 7.3\text{cm}$



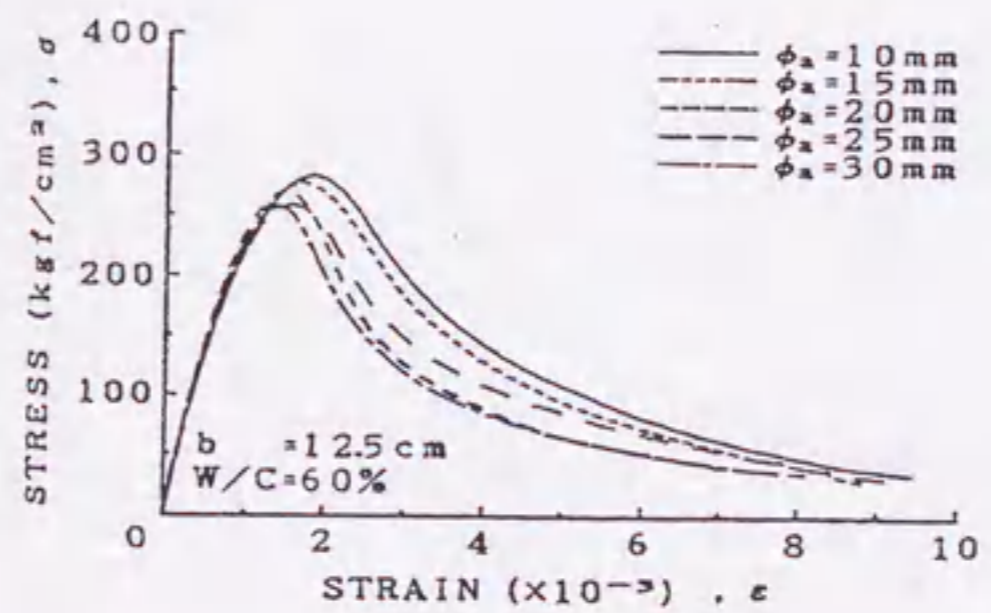
(d)  $b = 9.7\text{cm}$



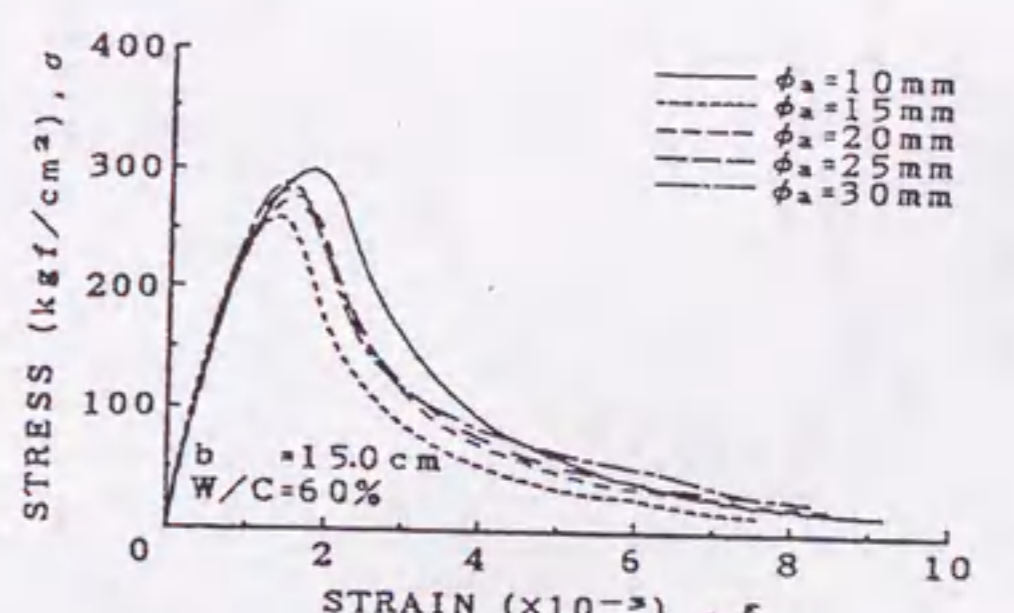
(e)  $\phi_a = 25\text{mm}$



(f)  $\phi_a = 30\text{mm}$



(e)  $b = 12.5\text{cm}$

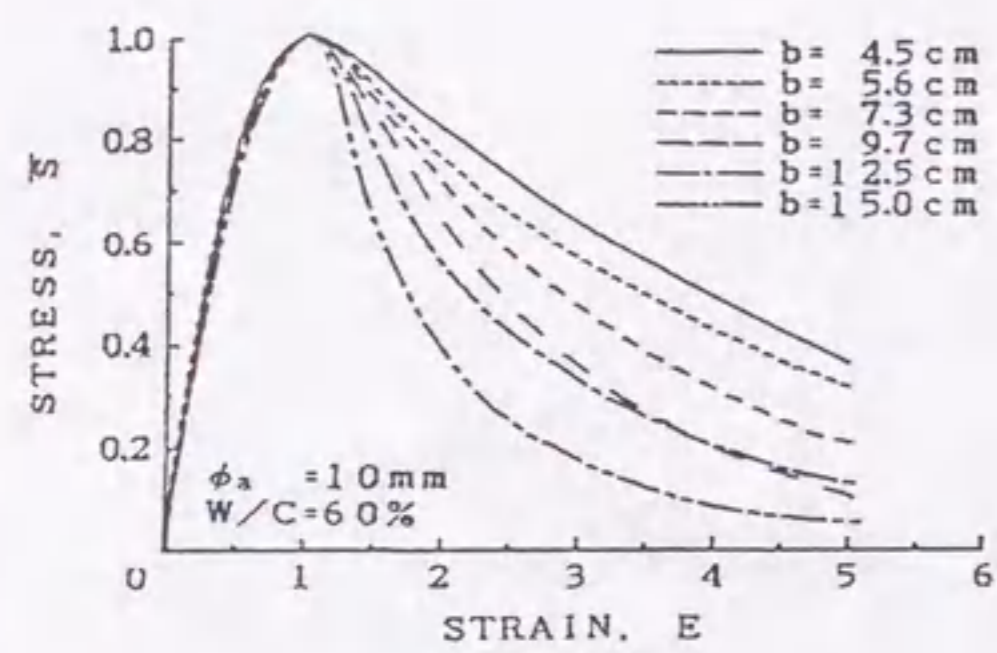


(f)  $b = 15\text{cm}$

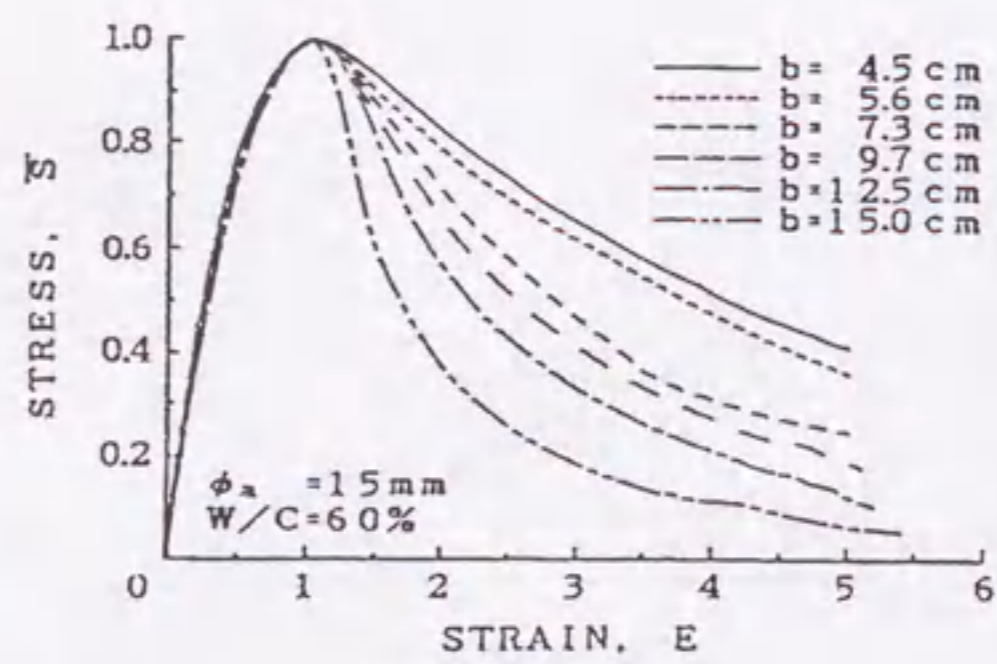
図-3.2.11 応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響  
(角柱体、骨材の最大寸法別、W/C=60%)

図-3.2.12 応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材の最大寸法の影響  
(角柱体、試験体寸法別、W/C=60%)

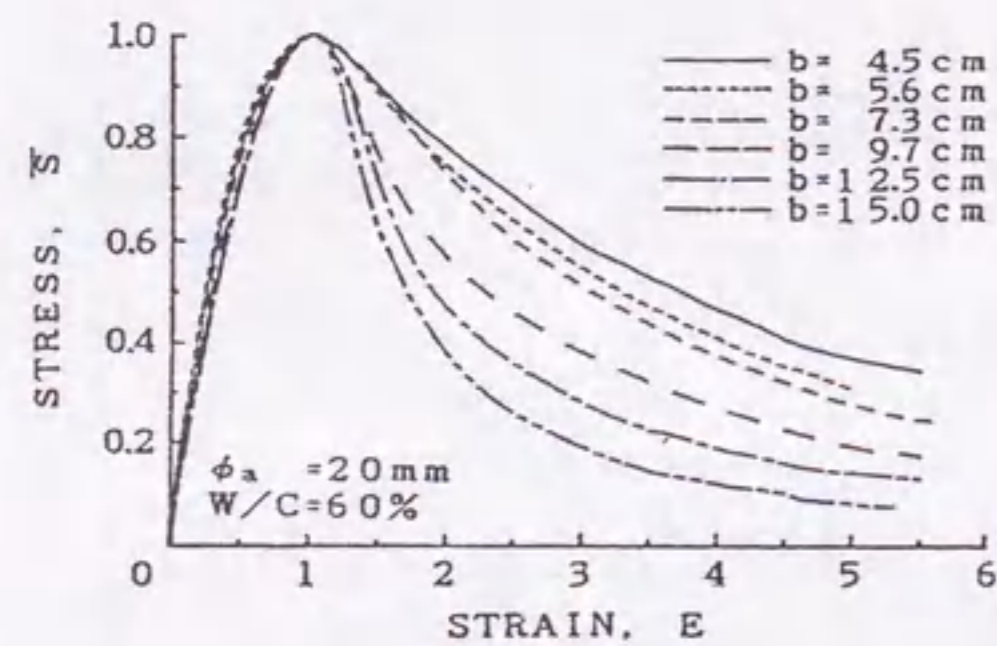




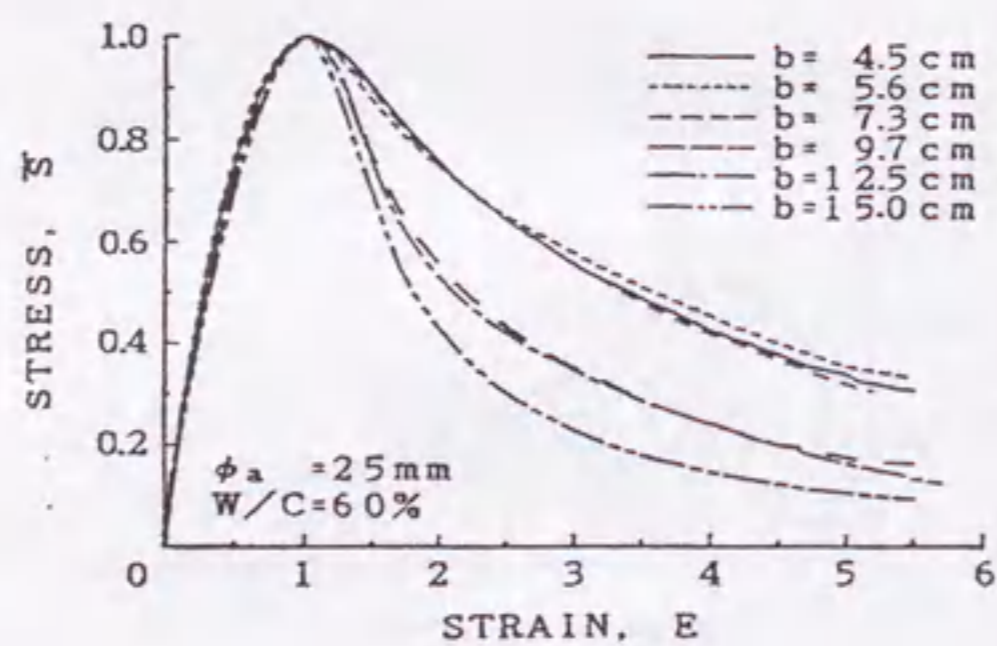
(a)  $\phi_a = 10\text{mm}$



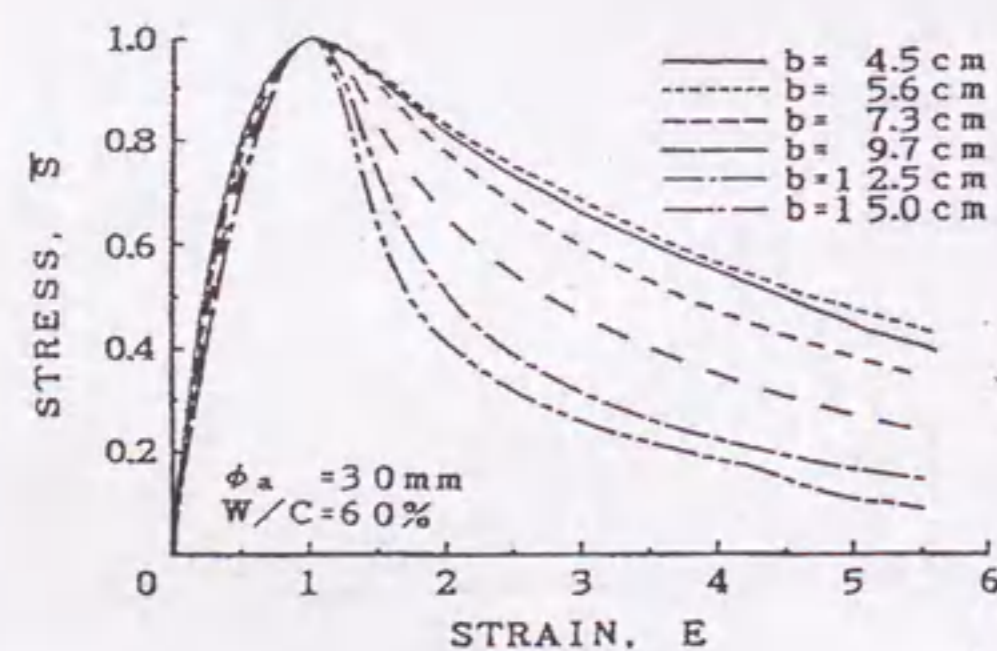
(b)  $\phi_a = 15\text{mm}$



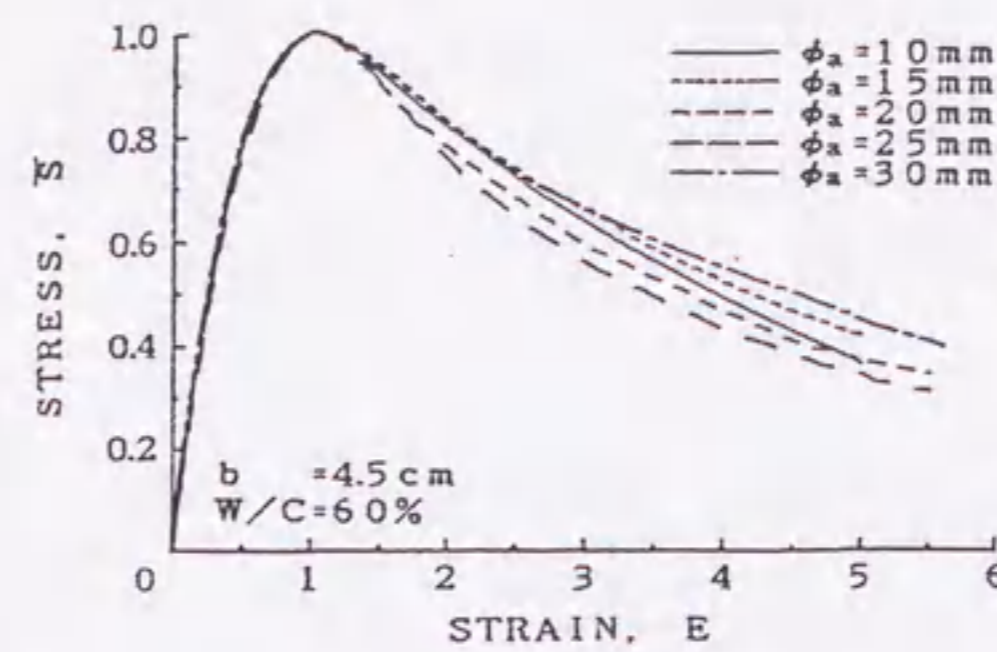
(c)  $\phi_a = 20\text{mm}$



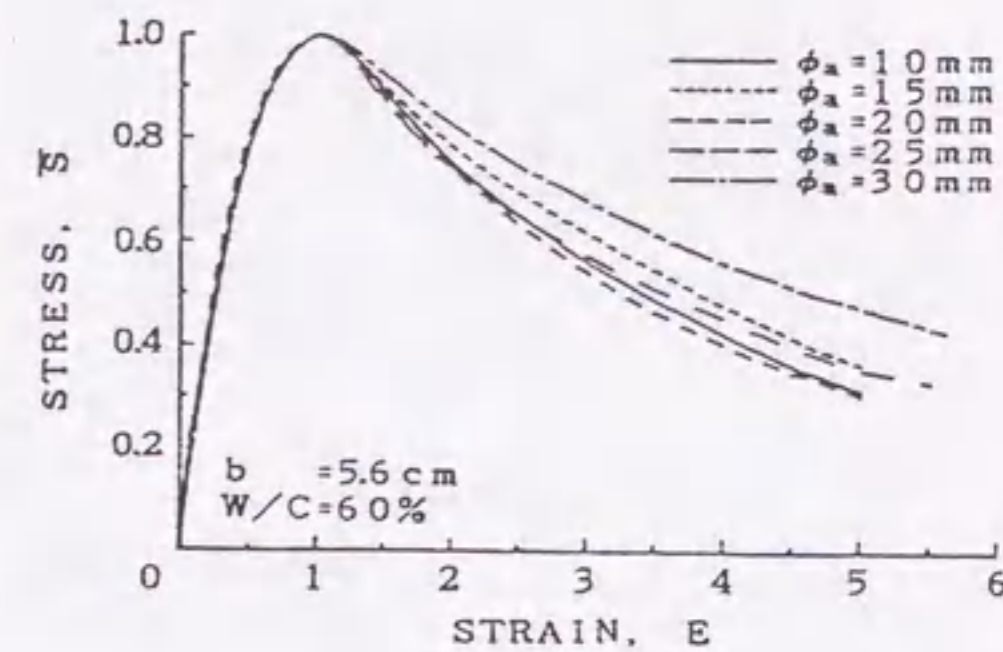
(d)  $\phi_a = 25\text{mm}$



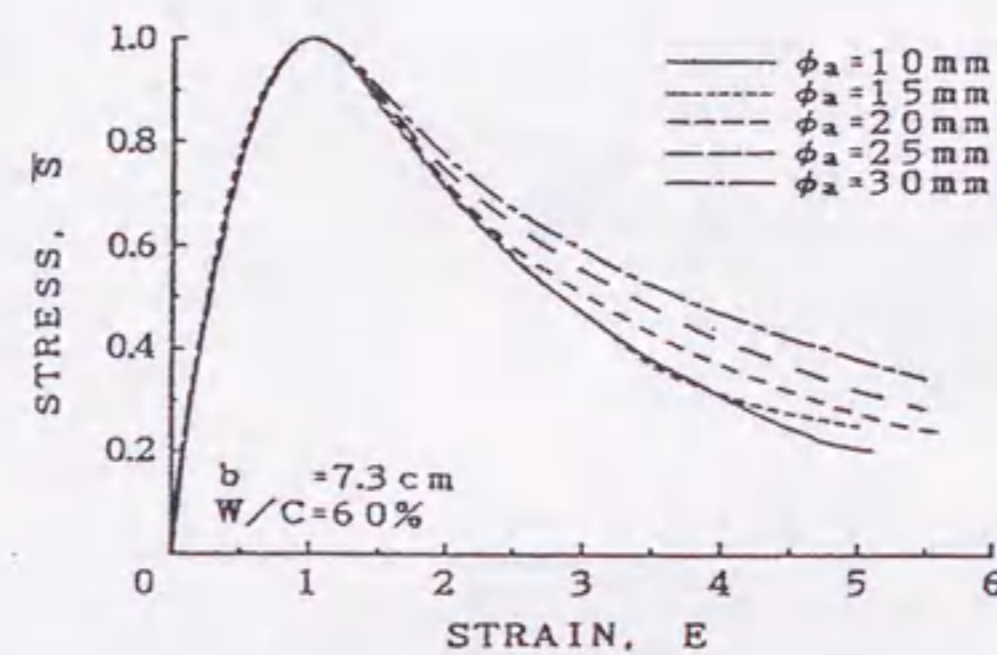
(e)  $\phi_a = 30\text{mm}$



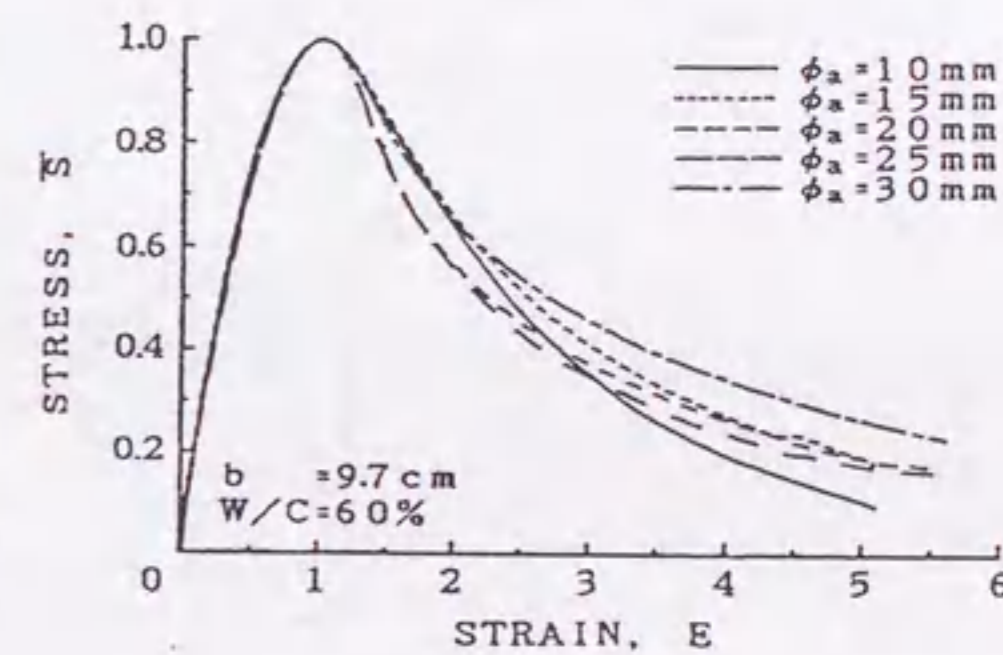
(a)  $b = 4.5\text{cm}$



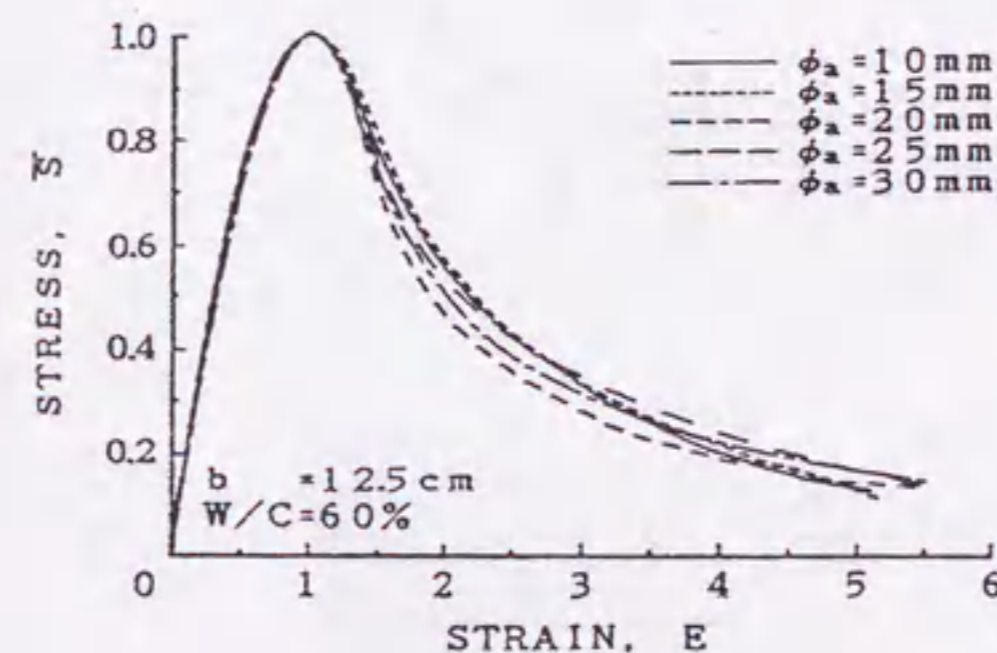
(b)  $b = 5.6\text{cm}$



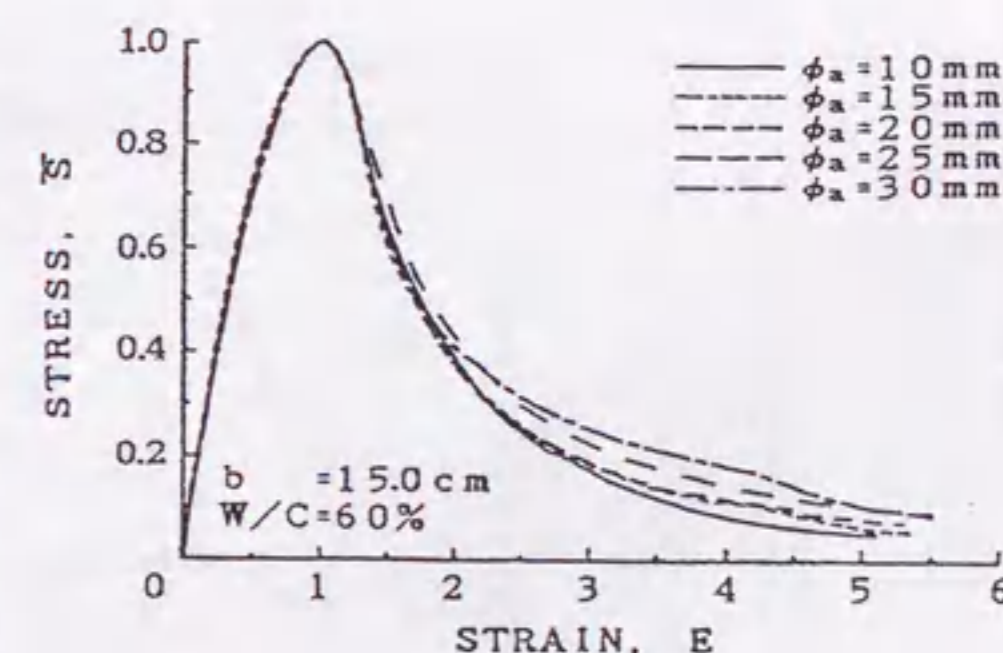
(c)  $b = 7.3\text{cm}$



(d)  $b = 9.7\text{cm}$



(e)  $b = 12.5\text{cm}$

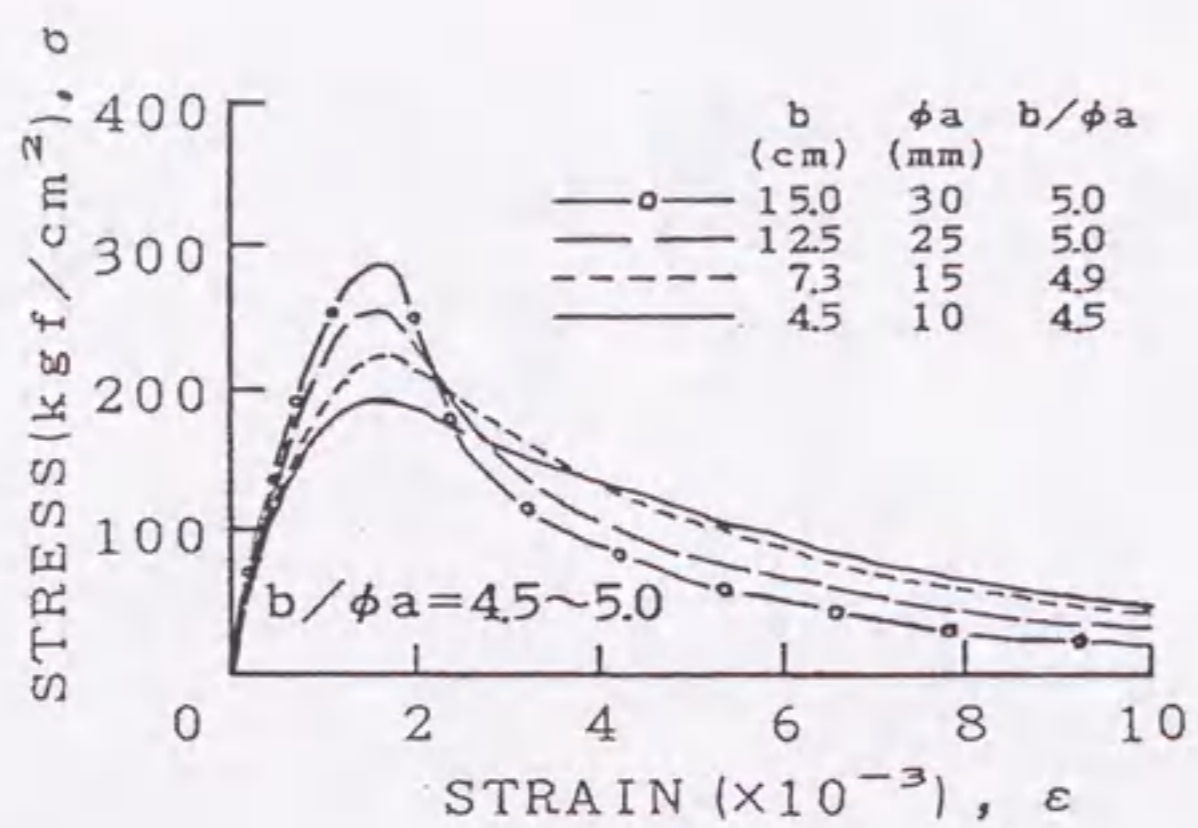


(f)  $b = 15\text{cm}$

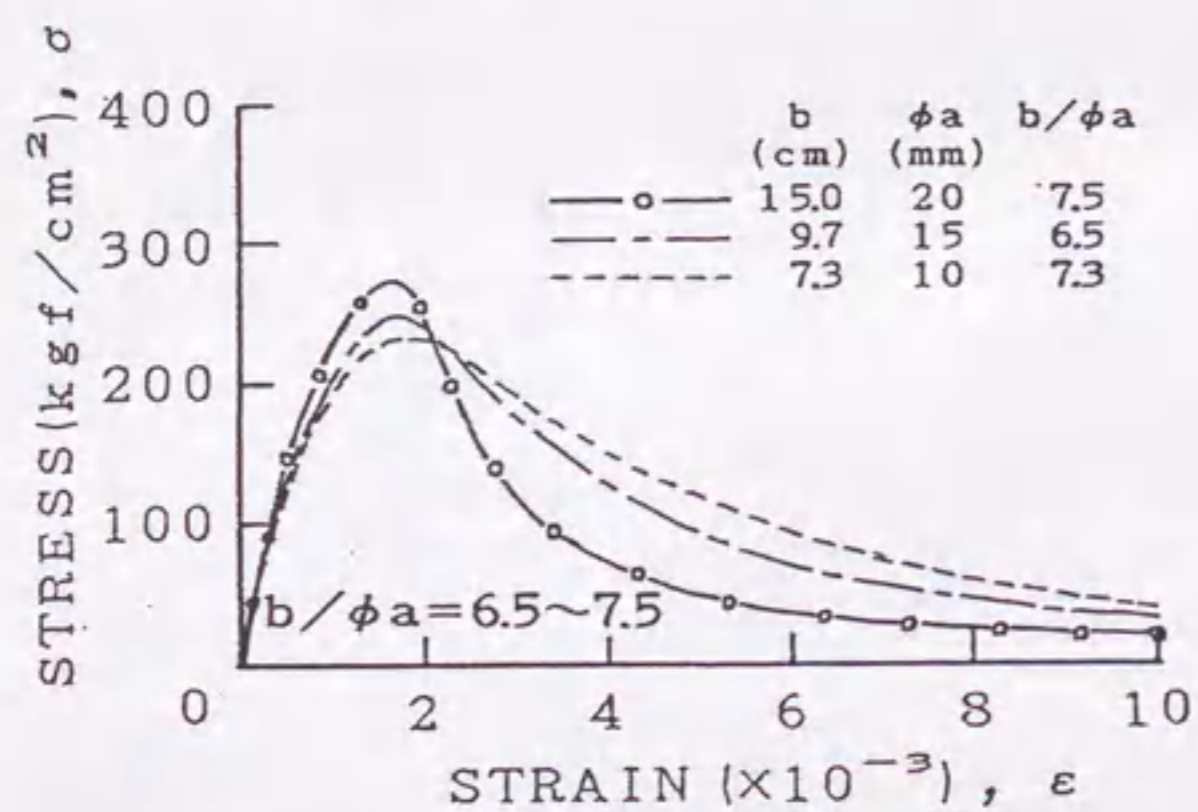
図-3.2.13 無次元化した応力-ひずみ ( $\bar{S}-E$ ) 曲線における寸法効果に及ぼす骨材寸法の影響 (骨材の最大寸法別、 $W/C=60\%$ )

図-3.2.14 無次元化した応力-ひずみ ( $\bar{S}-E$ ) 曲線に及ぼす骨材の最大寸法の影響 (試験体寸法別、 $W/C=60\%$ )

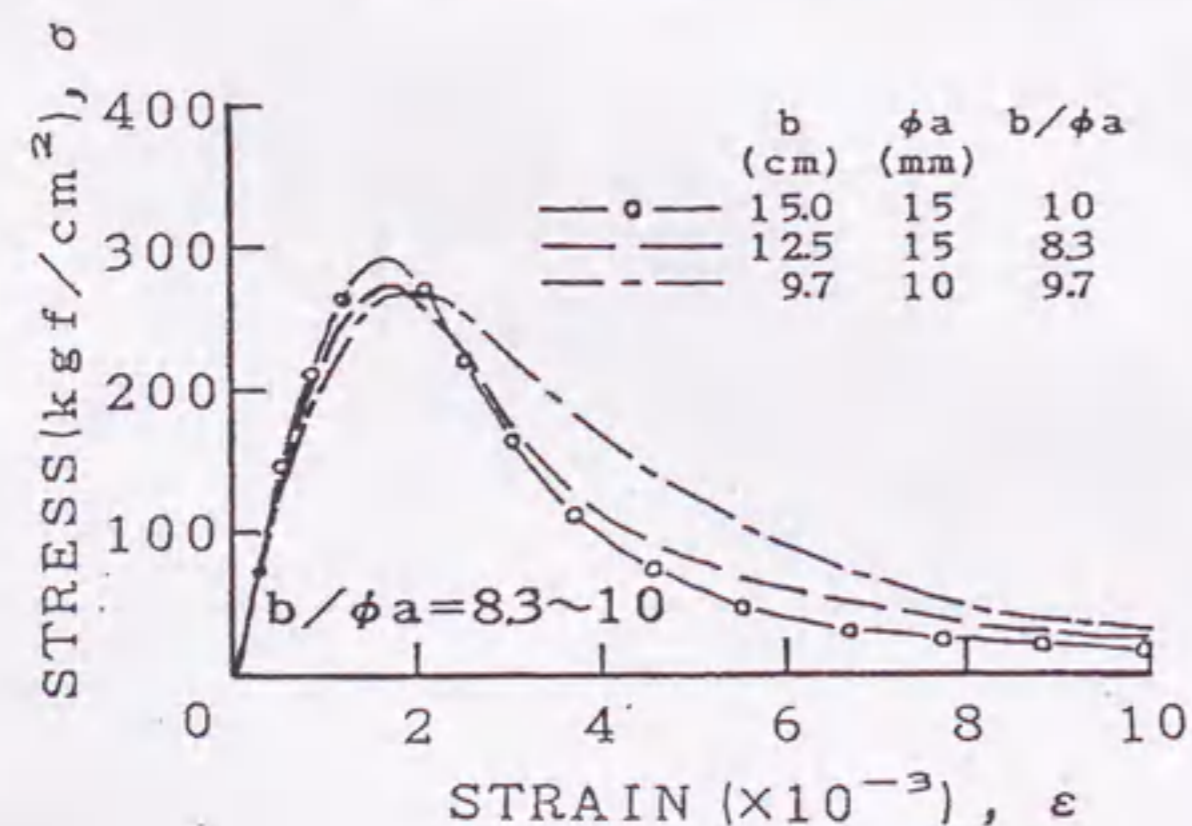




(a)  $b/\phi a = 4.5 \sim 5.0$

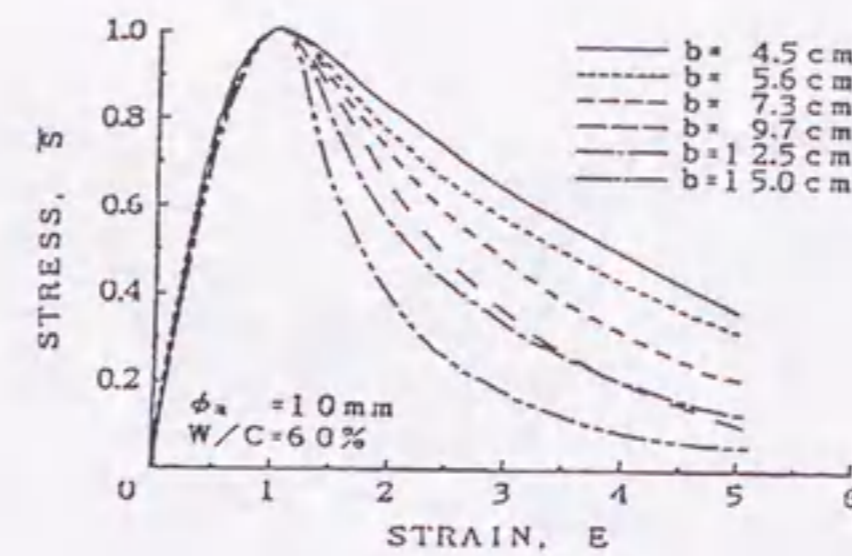


(b)  $b/\phi a = 6.5 \sim 7.5$

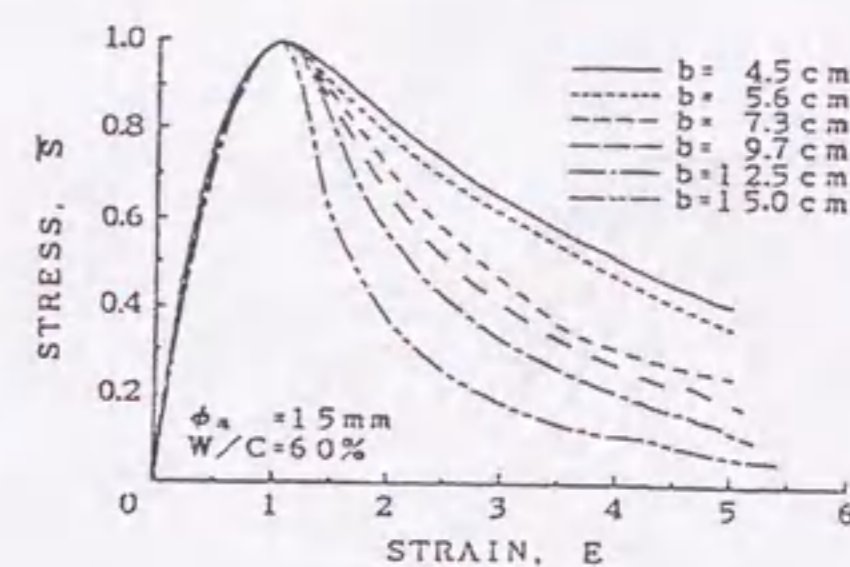


(c)  $b/\phi a = 8.3 \sim 10$

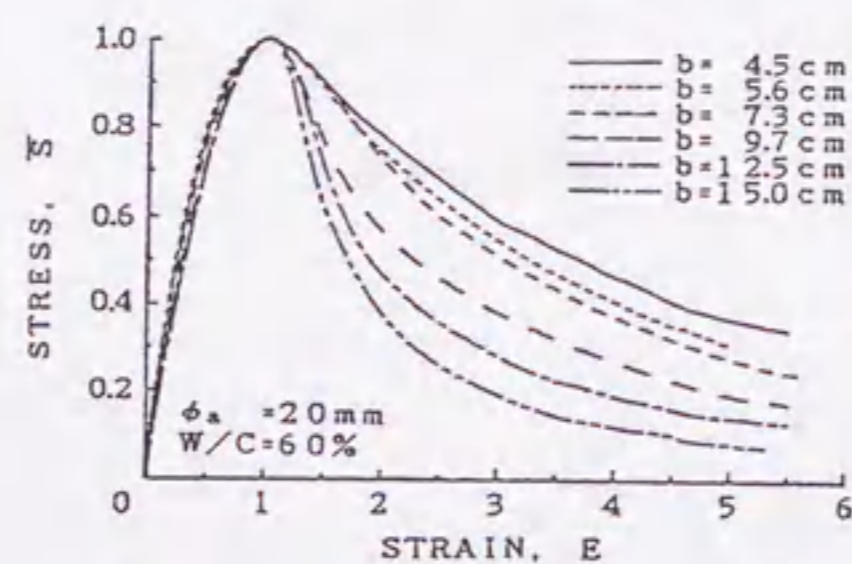
図-3.2.15  $b/\phi a$  がほぼ一定の角柱試験体の応力-ひずみ曲線における寸法効果 ( $W/C=60\%$ )



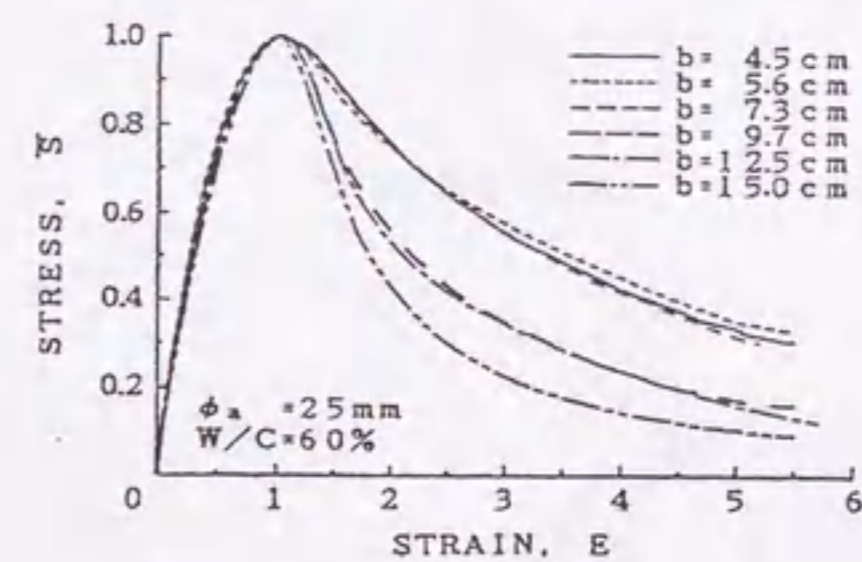
(a)  $\phi a = 10\text{mm}$



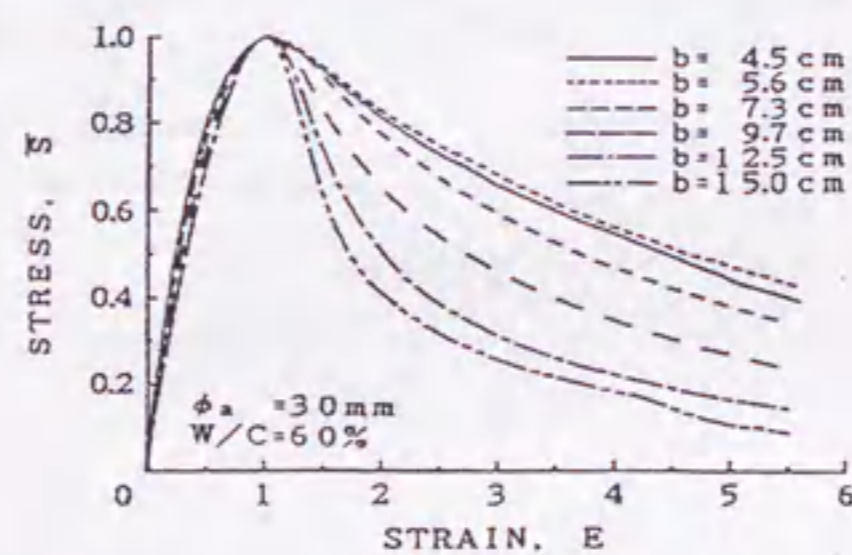
(b)  $\phi a = 15\text{mm}$



(c)  $\phi a = 20\text{mm}$



(d)  $\phi a = 25\text{mm}$



(e)  $\phi a = 30\text{mm}$

図-3.3.1 無次元化した  $\bar{S}-E$  曲線における寸法効果 (骨材寸法の影響)

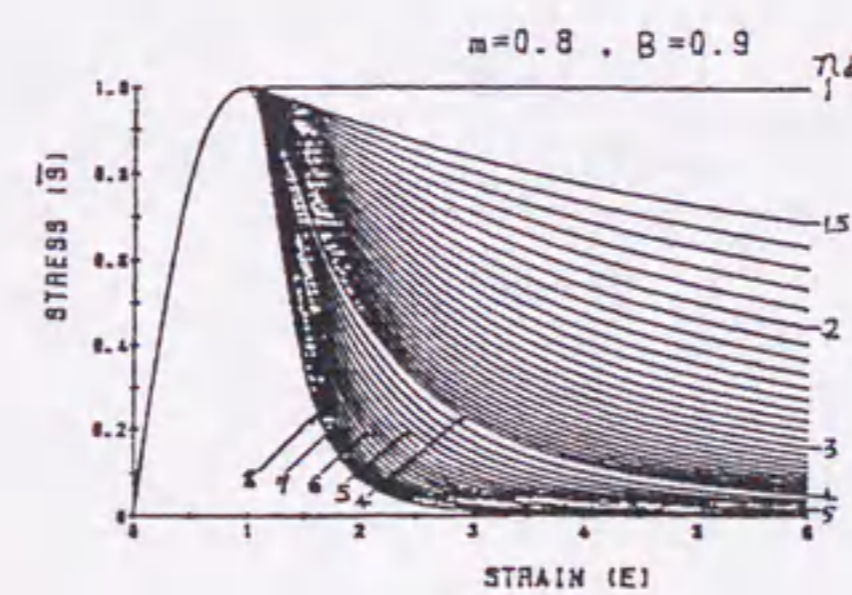


図-3.3.2 式 (3.3.3) 中の係数  $N_d$  を変化させた場合の曲線の変化 ( $m=0.8, B=0.9$  の場合)

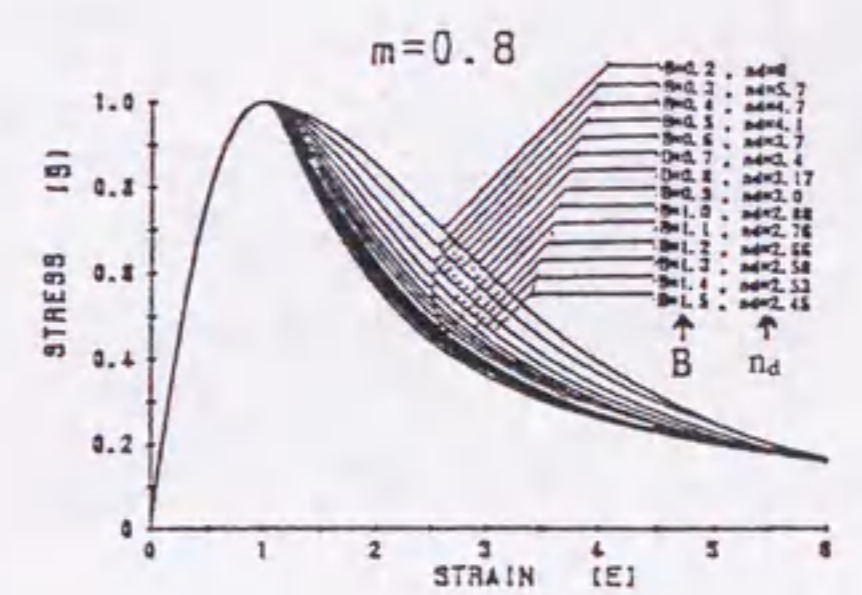
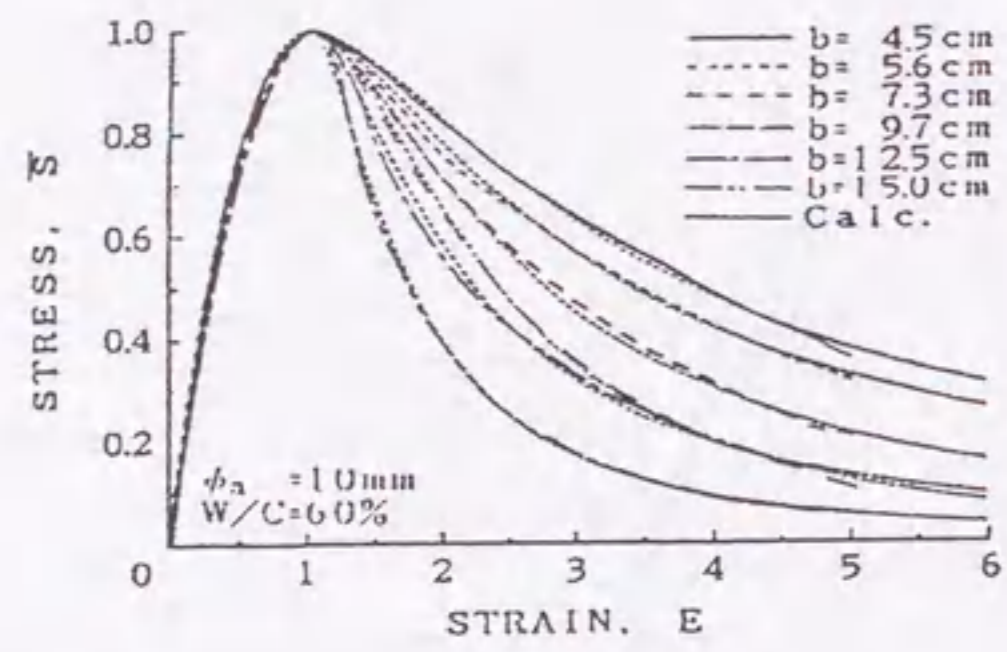
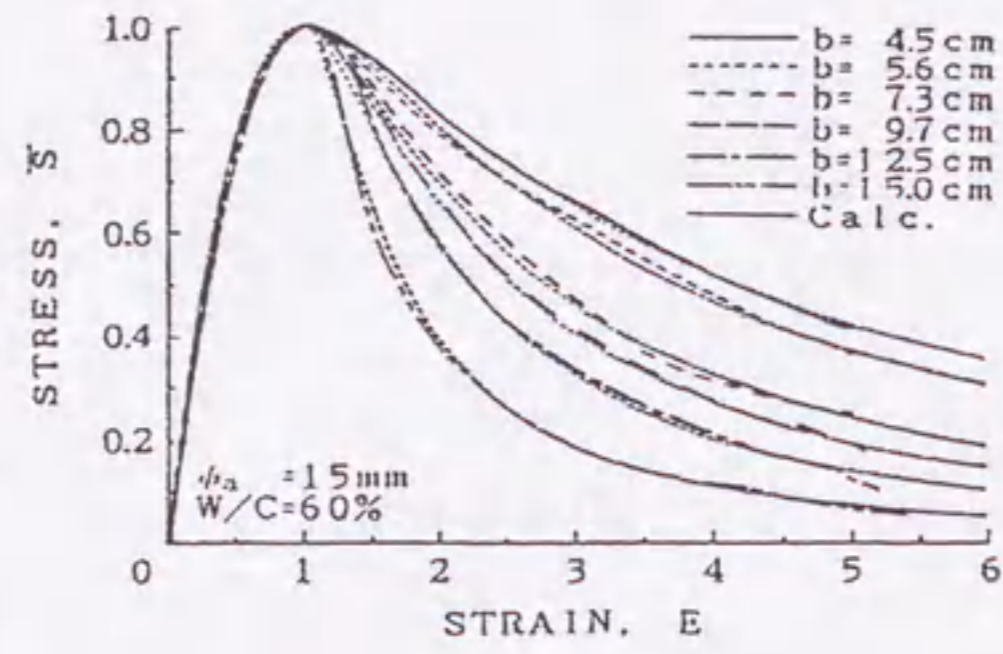


図-3.3.3 無次元化された応力-ひずみ ( $\bar{S}-E$ ) 曲線に及ぼす式 (3.3.3) 中の係数  $N_d$  と  $B$  の影響

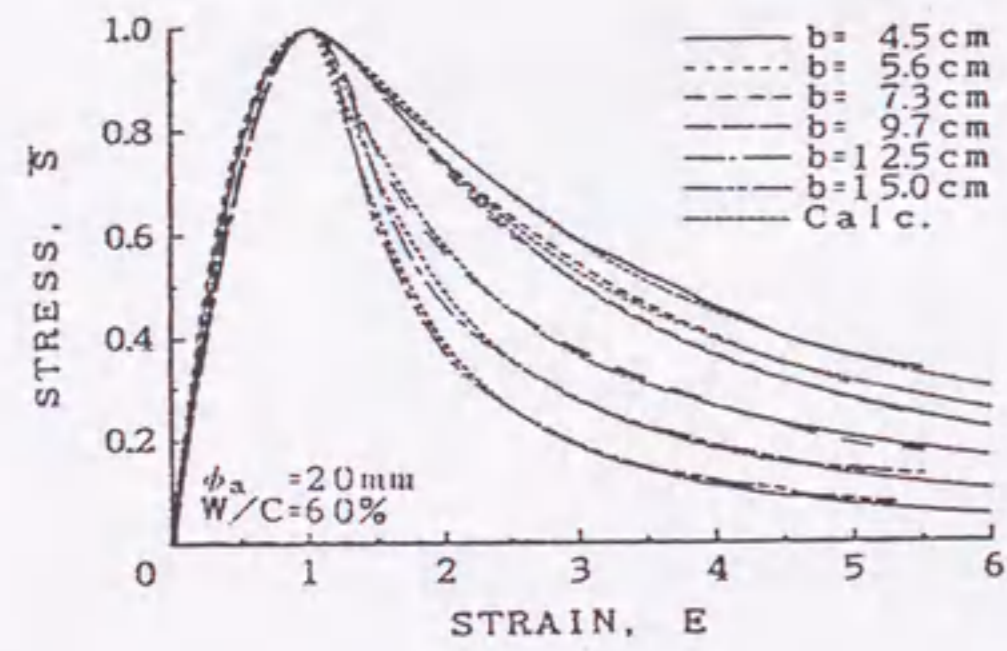




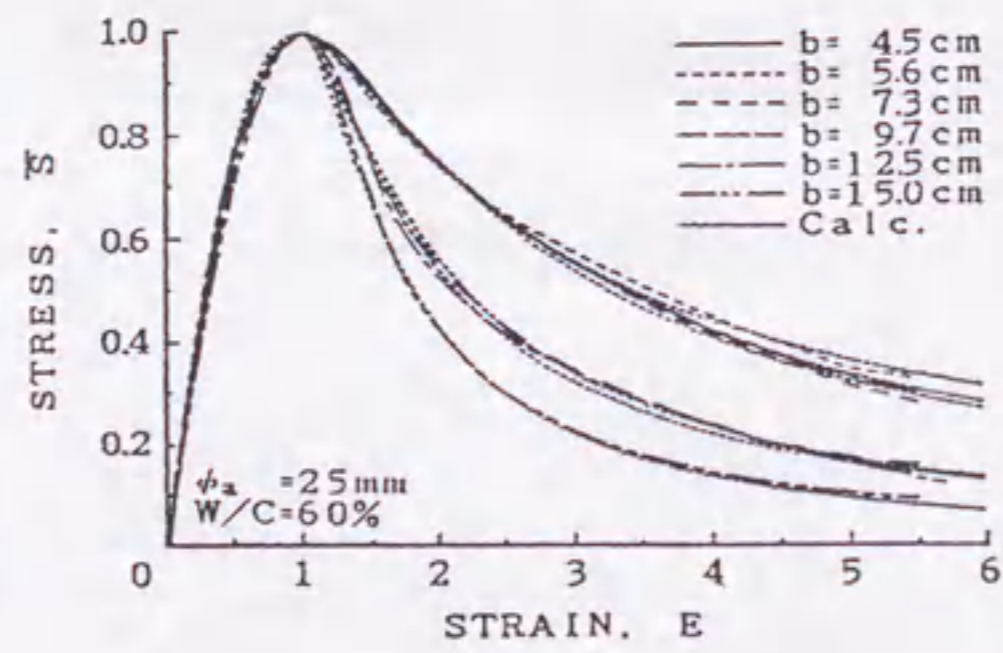
(a)  $\phi a=10\text{mm}$



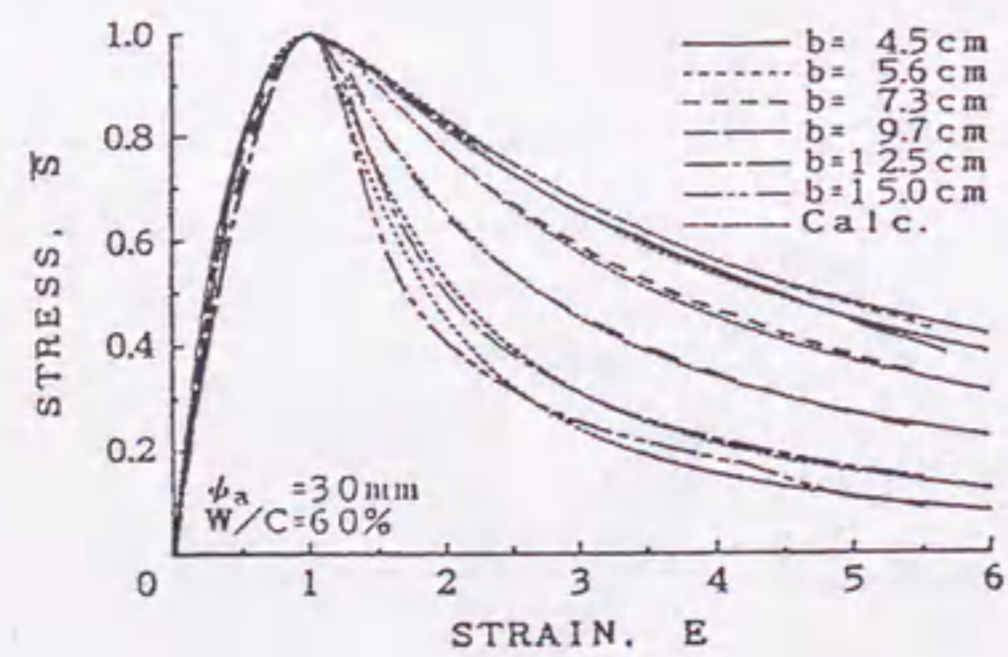
(b)  $\phi a=15\text{mm}$



(c)  $\phi a=20\text{mm}$

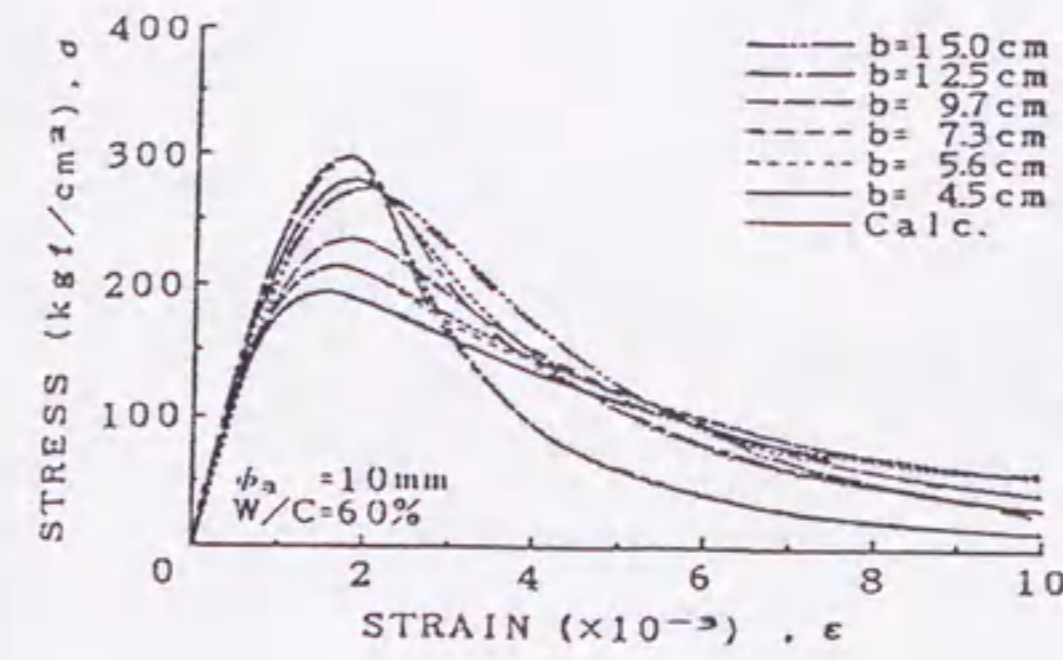


(d)  $\phi a=25\text{mm}$

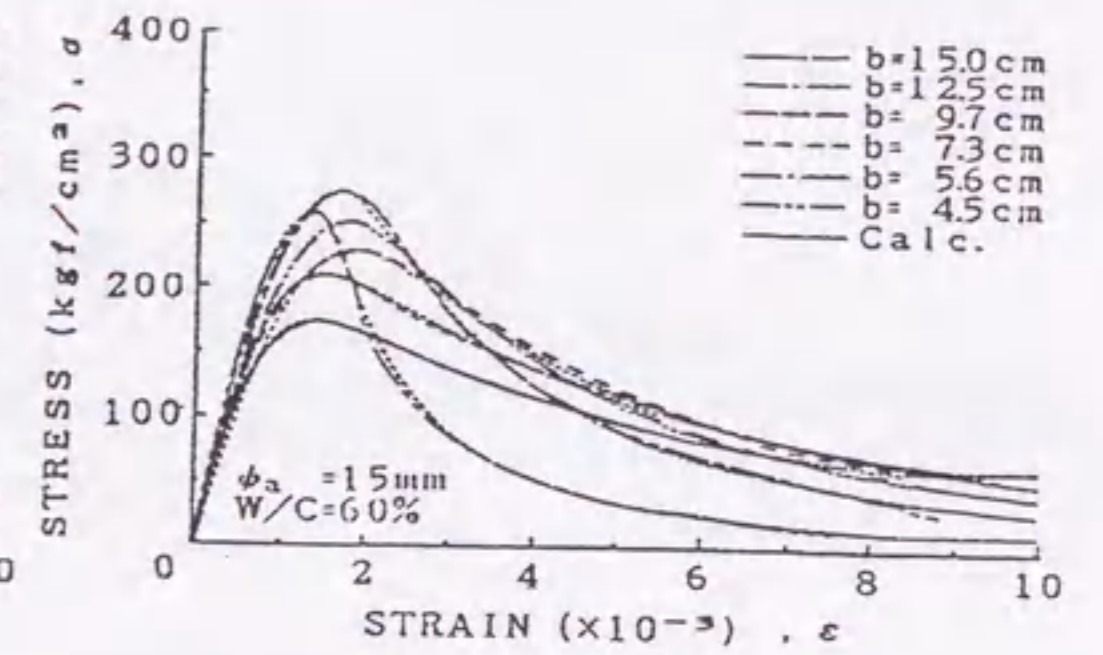


(e)  $\phi a=30\text{mm}$

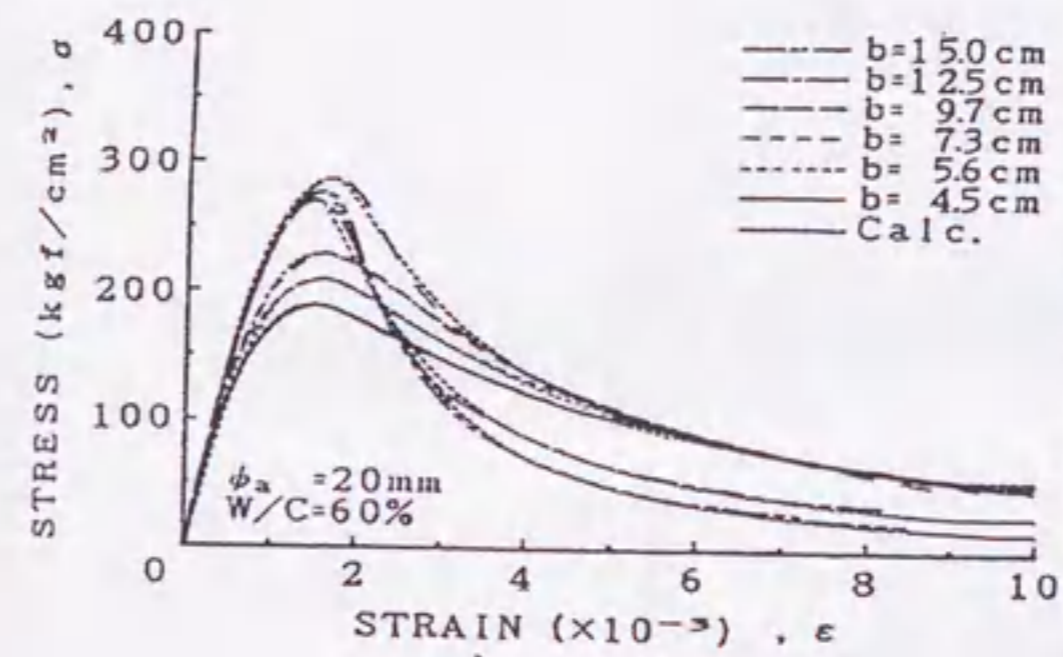
図-3.3.4 表-3.3.1の係数BとNdを用いて表示式(3.3.3)、(3.3.4)から求めたS-E曲線の計算値と図-3.3.1の実験値の比較



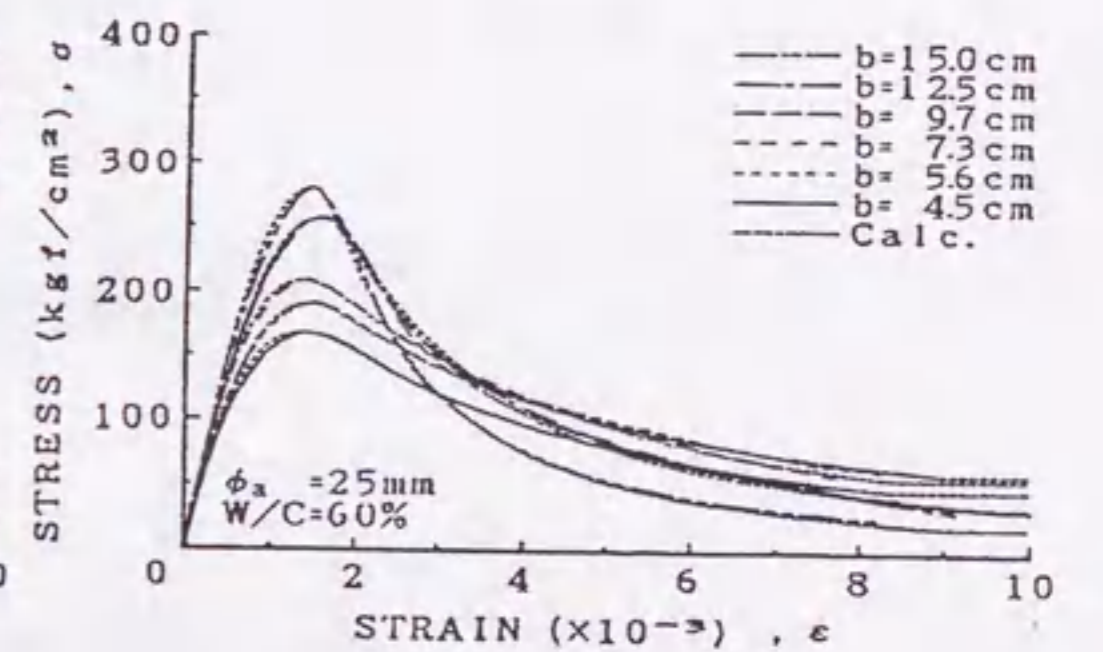
(a)  $\phi a=10\text{mm}$



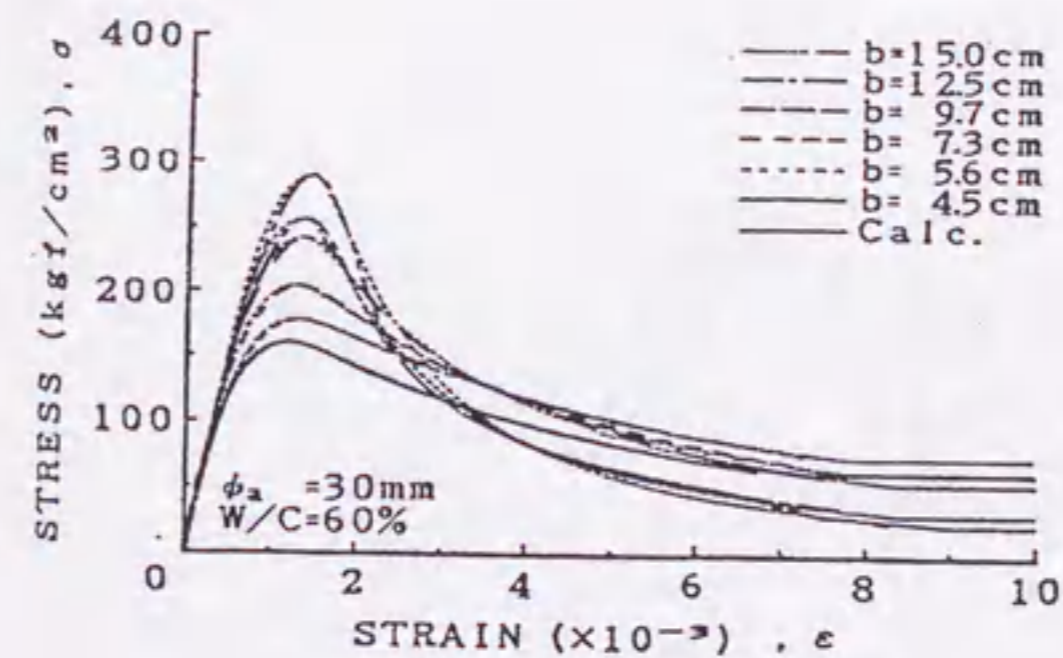
(b)  $\phi a=15\text{mm}$



(c)  $\phi a=20\text{mm}$



(d)  $\phi a=25\text{mm}$



(e)  $\phi a=30\text{mm}$

図-3.3.5 応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較



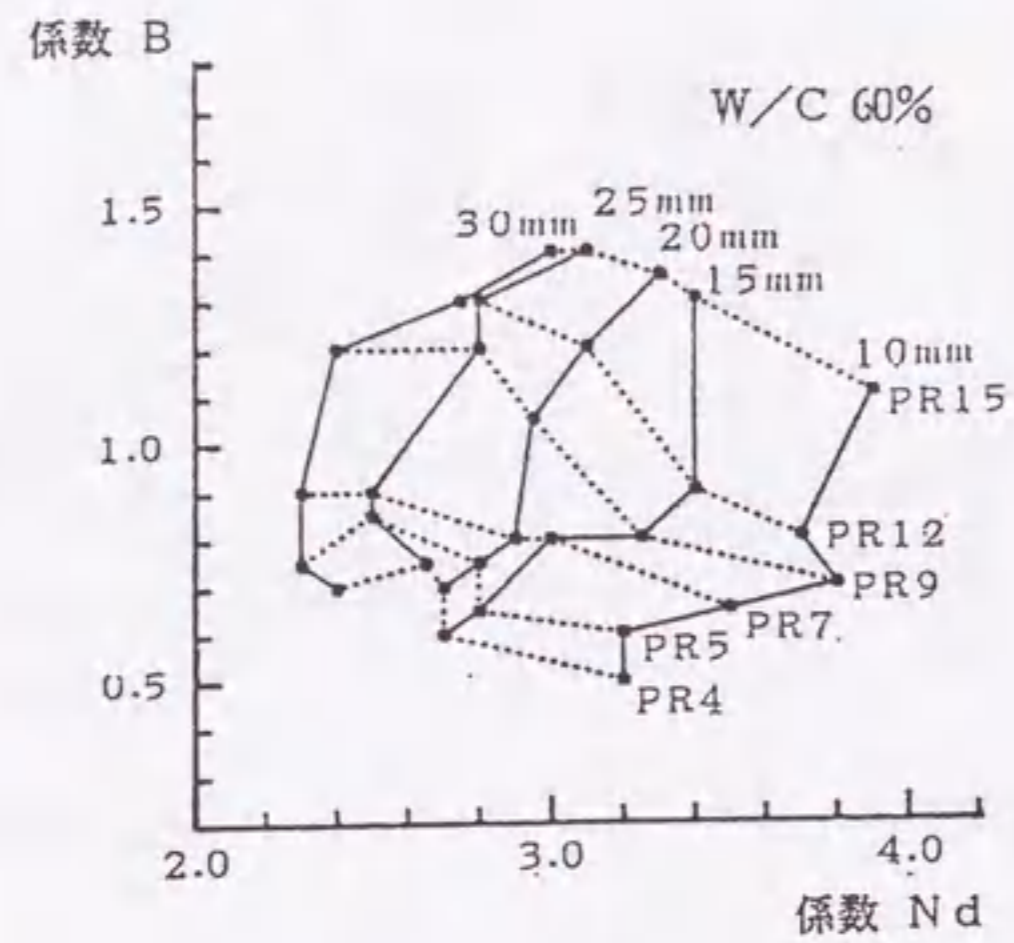
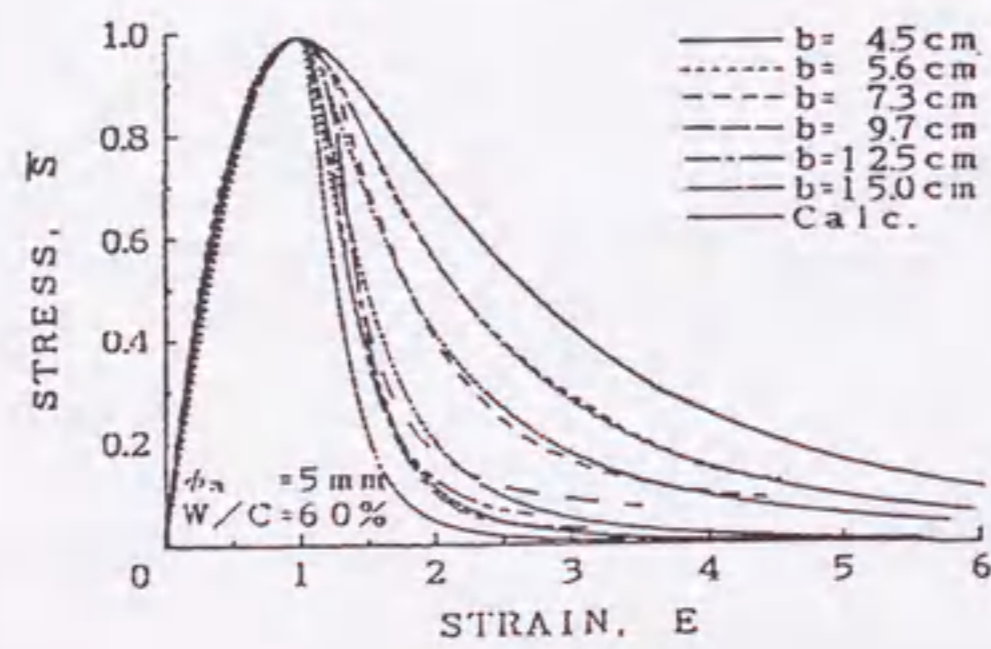
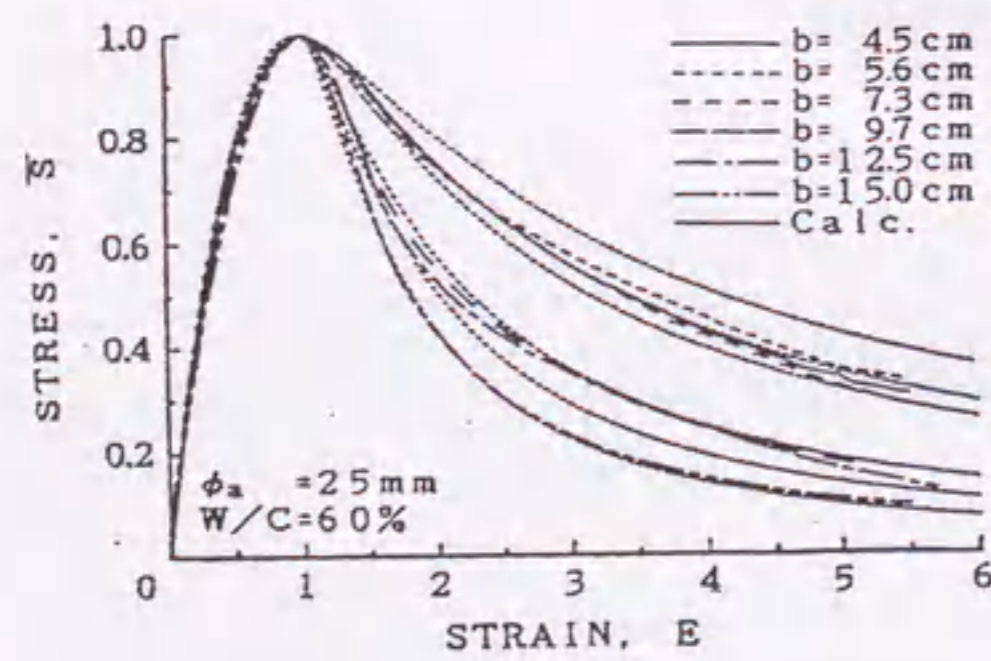


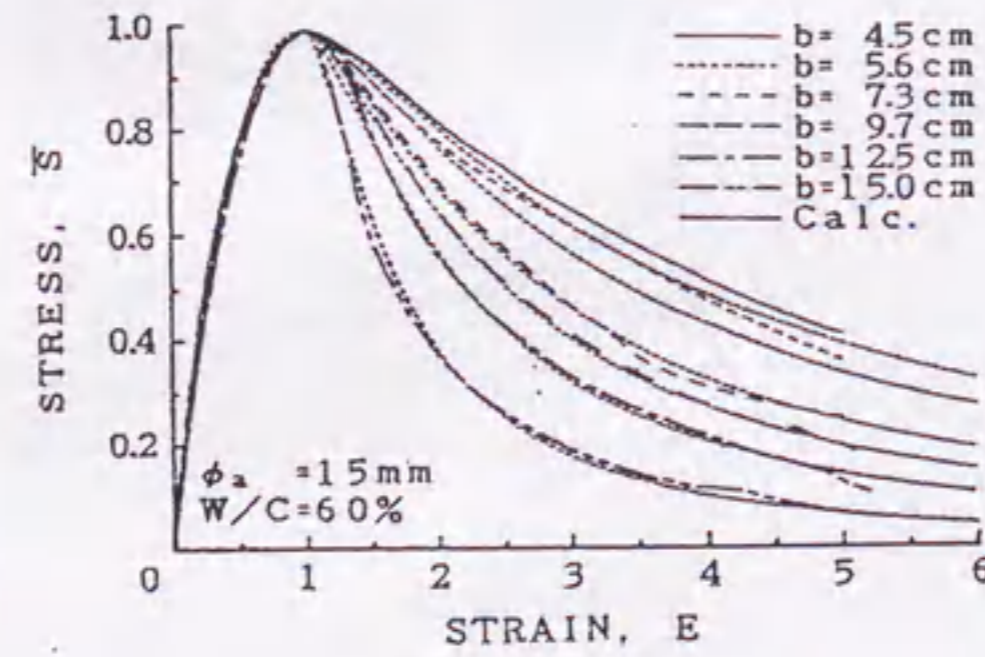
図-3.3.6 実験値をよく表示する修正後の係数 B と Nd



(a)  $\phi a=5\text{mm}$

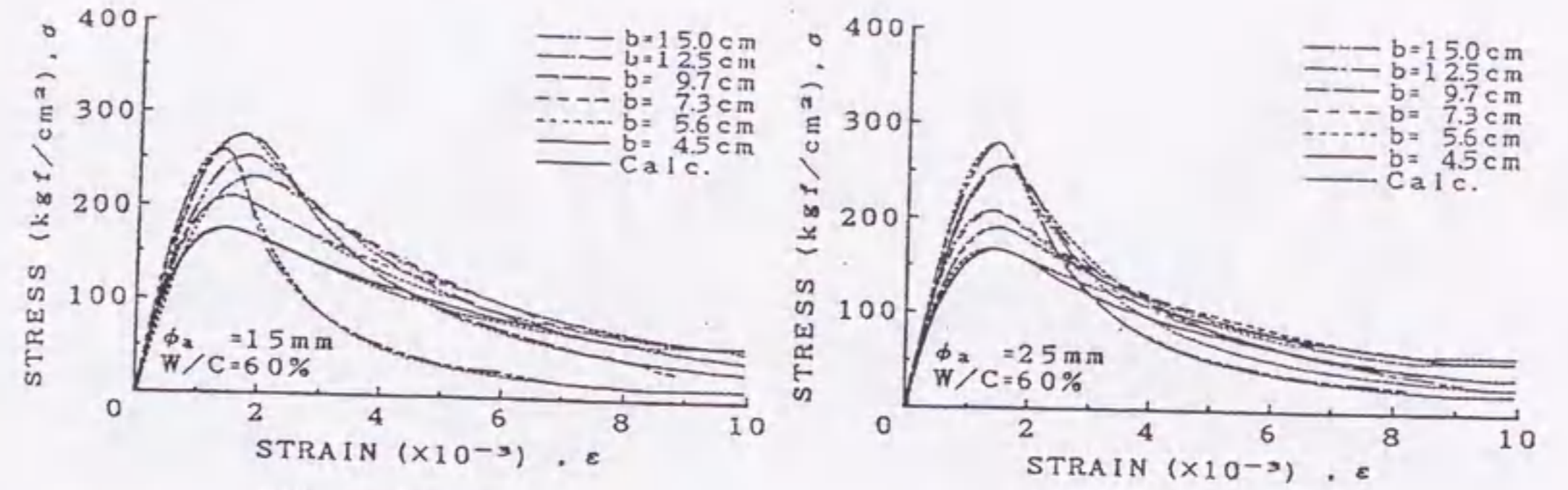


(b)  $\phi a=15\text{mm}$



(c)  $\phi a=25\text{mm}$

図-3.3.7 図-3.3.6 に示す係数 B と Nd から求まる  $\bar{S}-E$  曲線(点線)と実験値の比較 (W/C=60%)



(a)  $\phi a=15\text{mm}$

(b)  $\phi a=25\text{mm}$

図-3.3.8 図-3.3.7 から求まる  $\sigma-\epsilon$  曲線の計算値(点線)と実験値の比較 (W/C=60%)

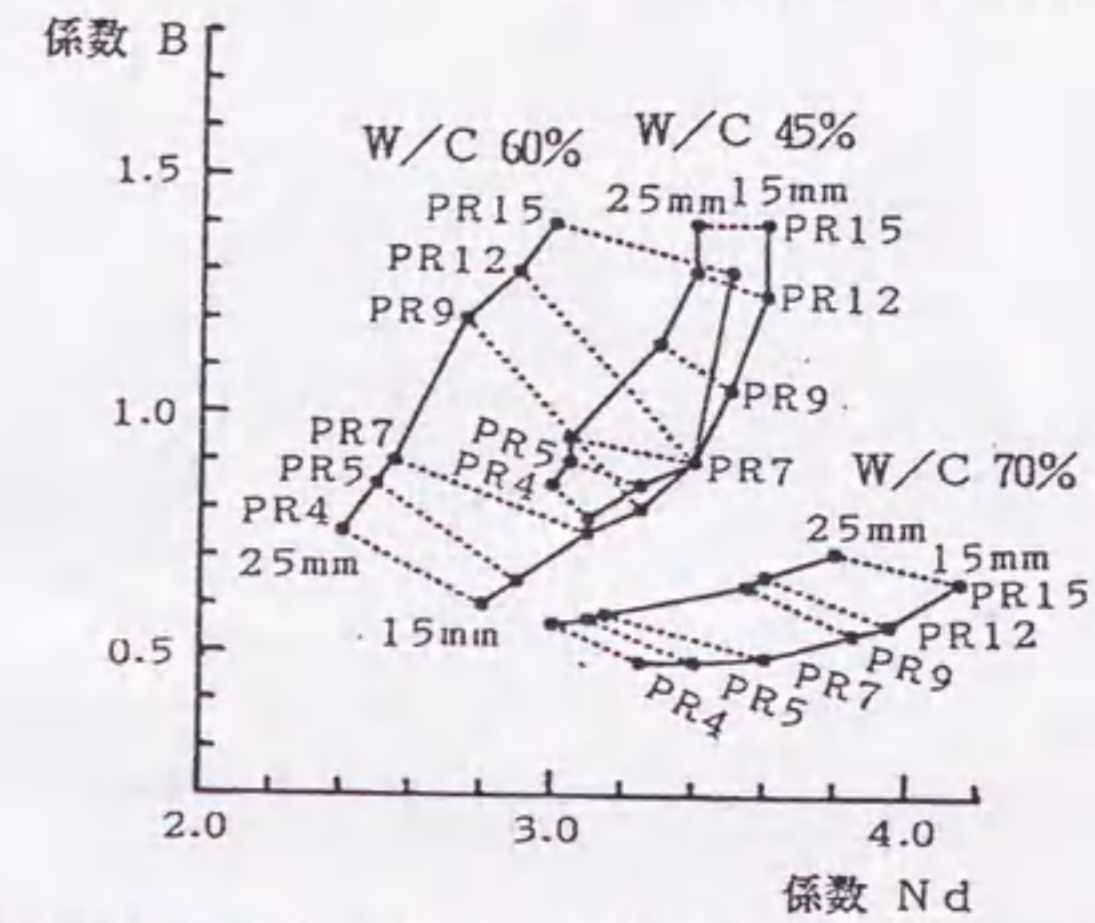


図-3.3.9 表-3.3.2 に示す係数 B と Nd の関係に及ぼす試験体寸法と骨材寸法の影響 (W/C=45 ~ 70%、 $\phi a=15$  および 25mm)

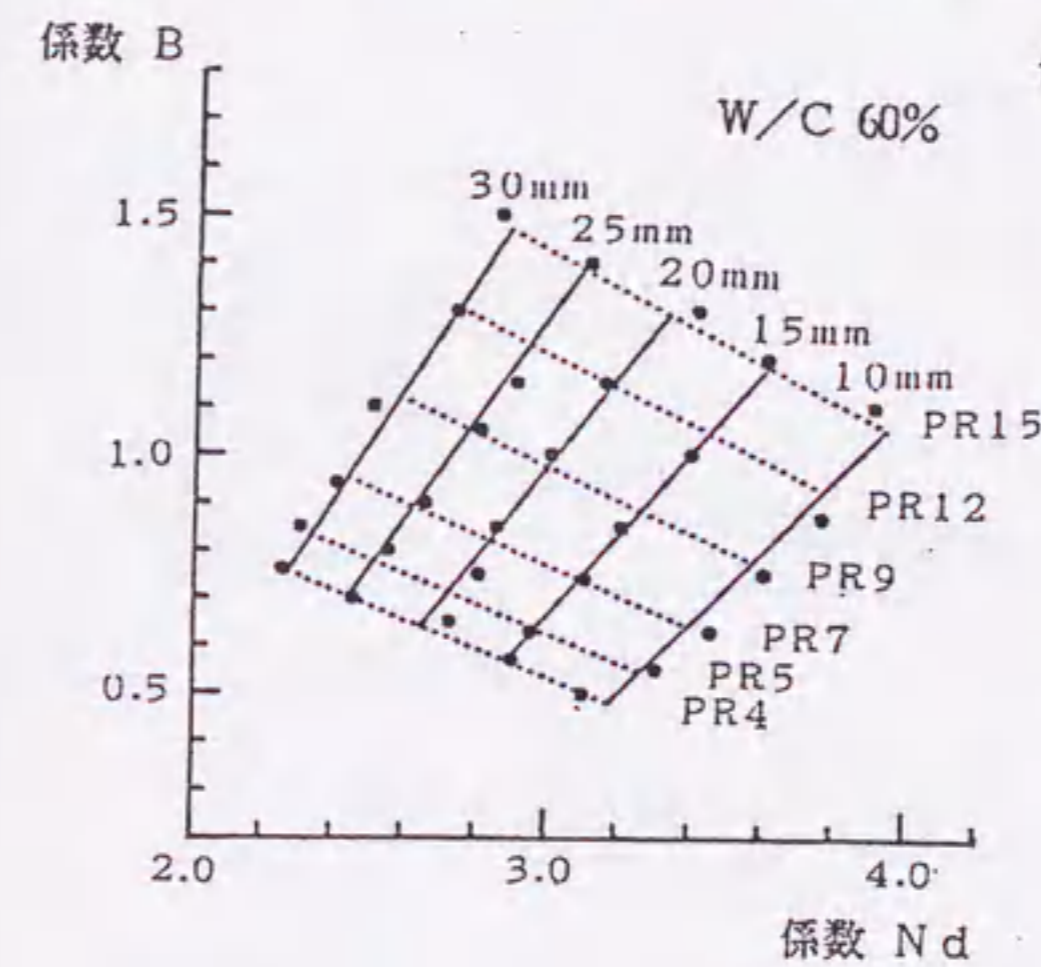


図-3.3.10 表-3.3.2 に示す係数 B と Nd の個別の回帰直線

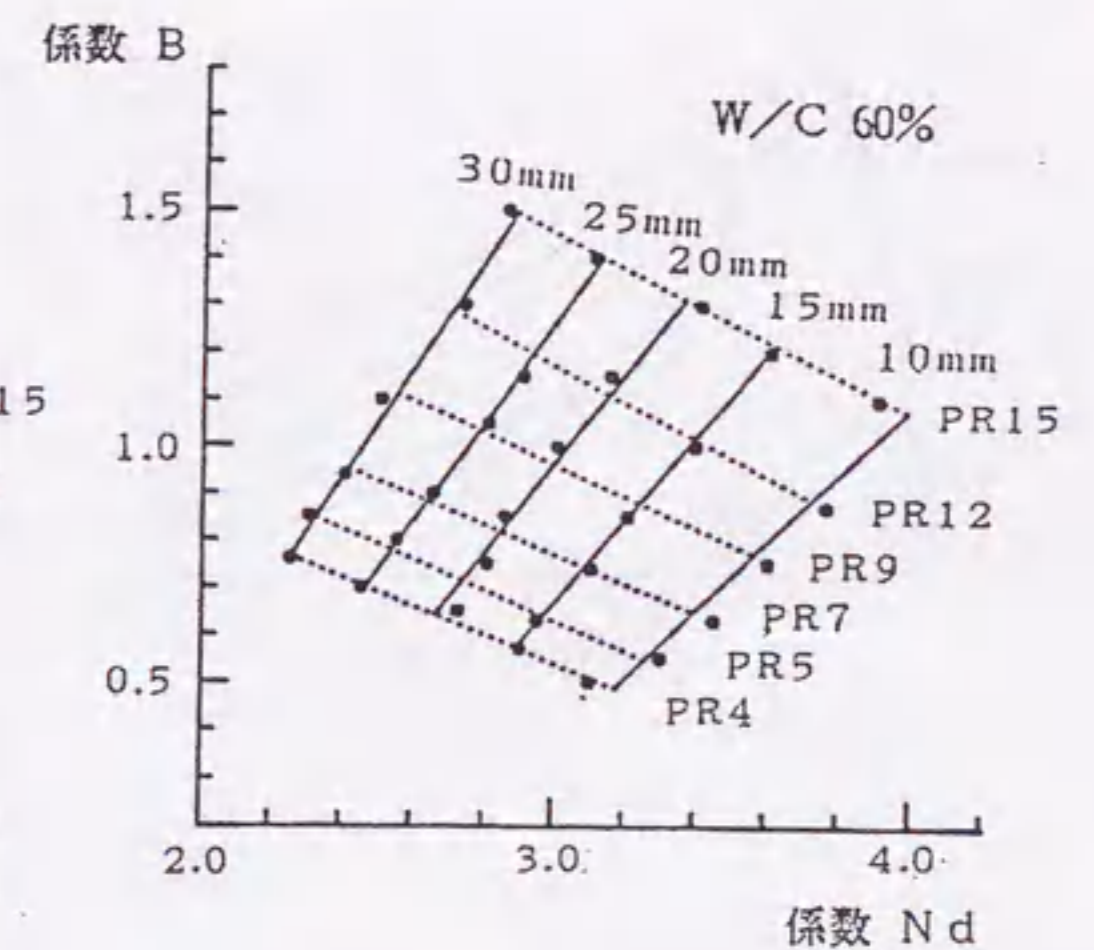
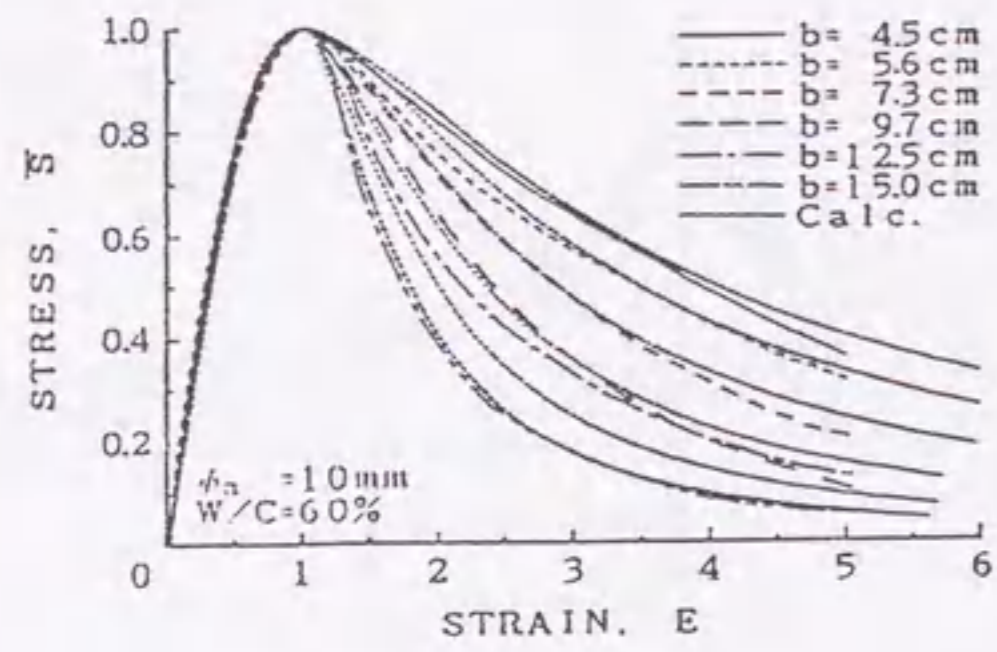
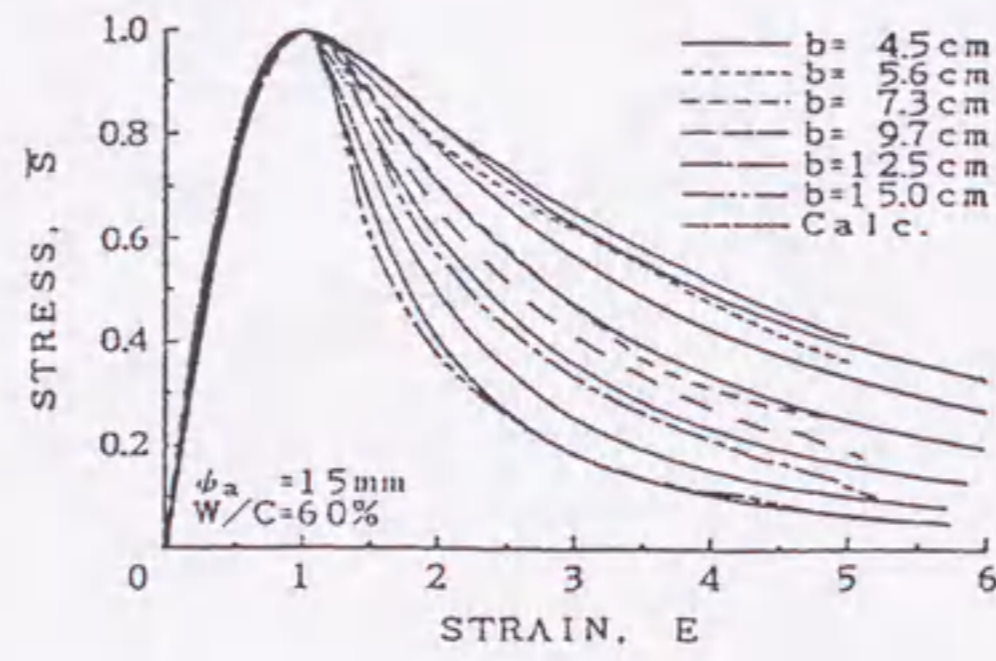


図-3.3.11 表示式(3.3.5)と(3.3.6)より求めた係数 B と Nd の値(実線と点線、●印は図-3.3.9 のデータ)

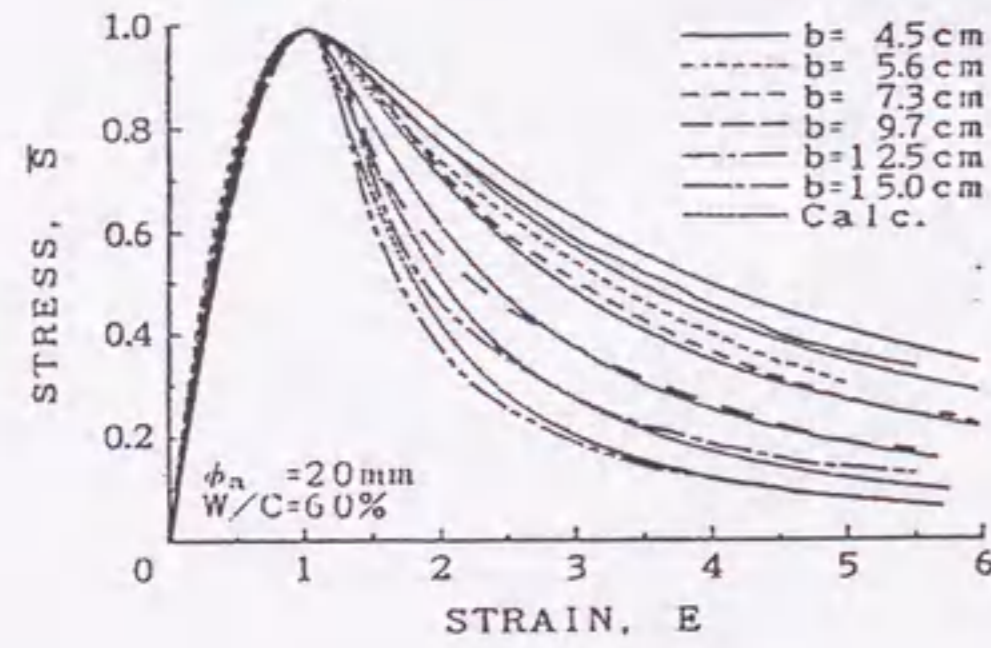




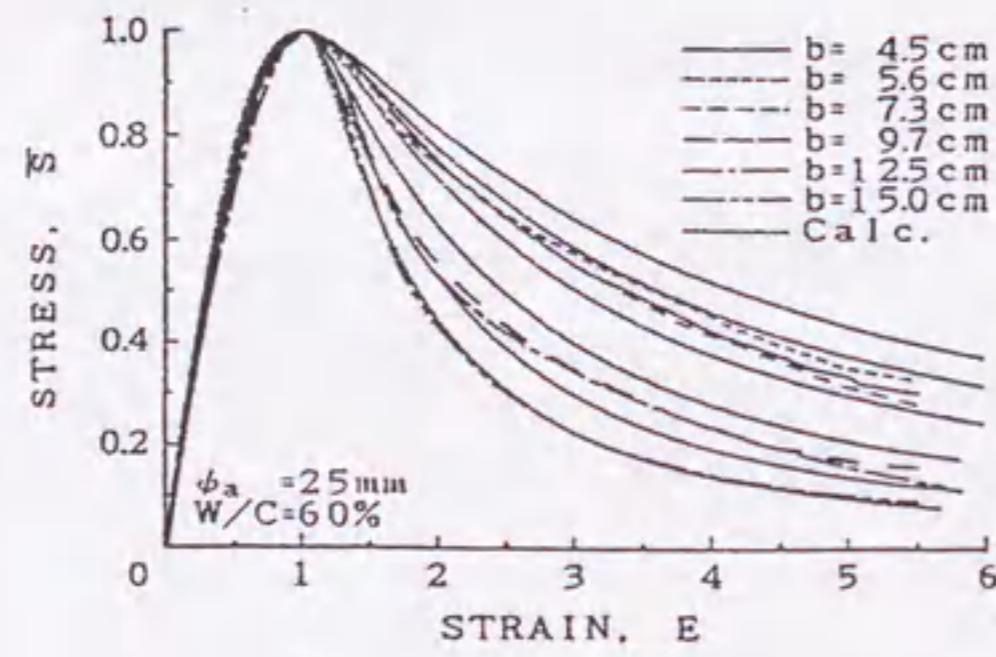
(a)  $\phi a=10\text{mm}$



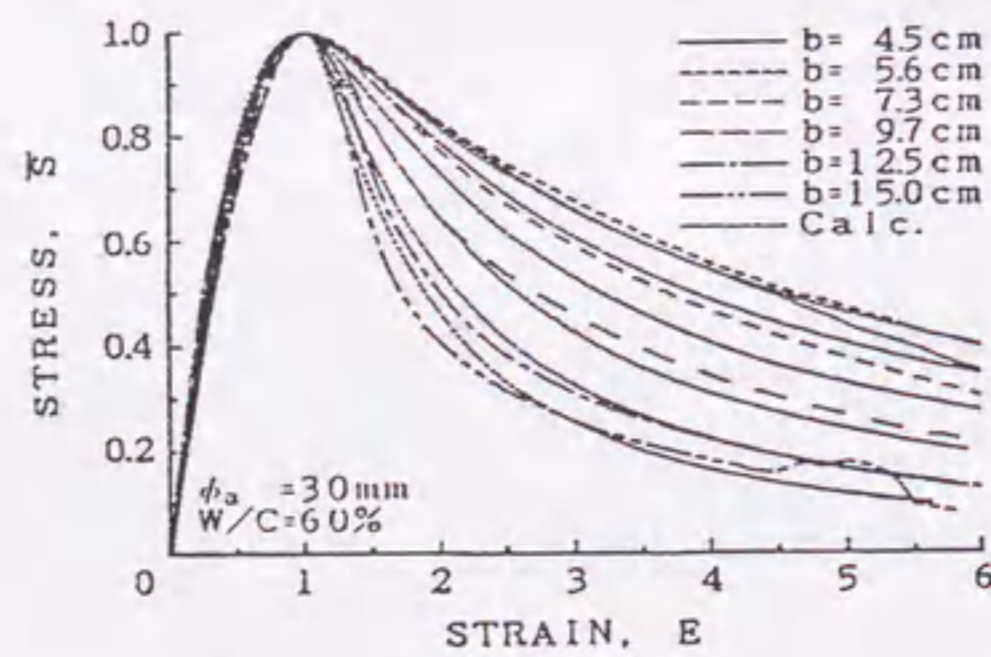
(b)  $\phi a=15\text{mm}$



(c)  $\phi a=20\text{mm}$

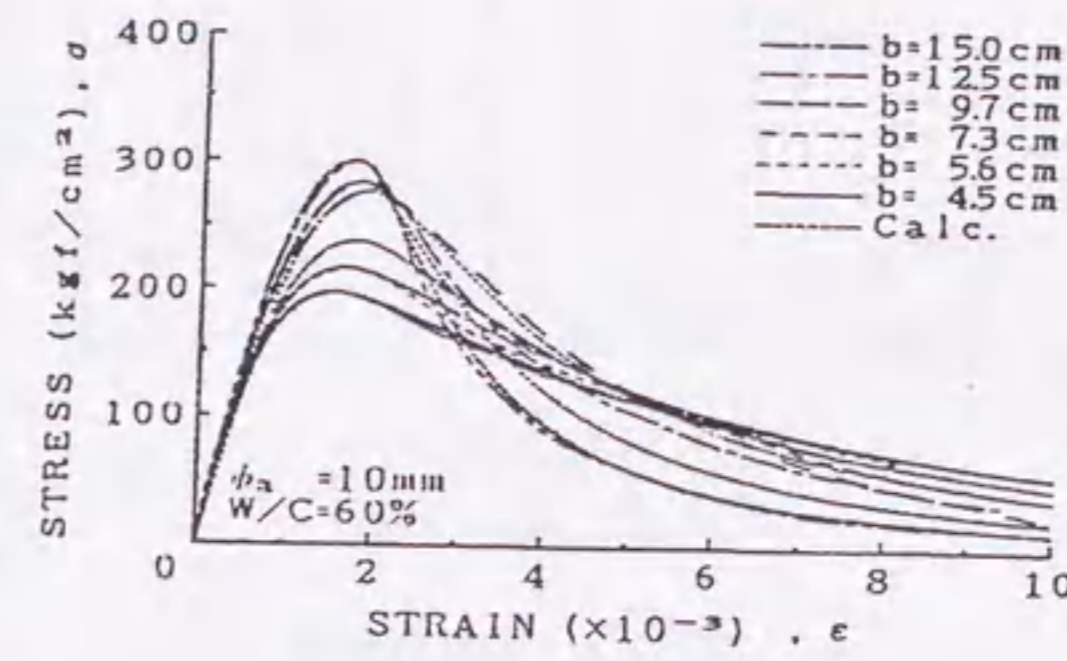


(d)  $\phi a=25\text{mm}$

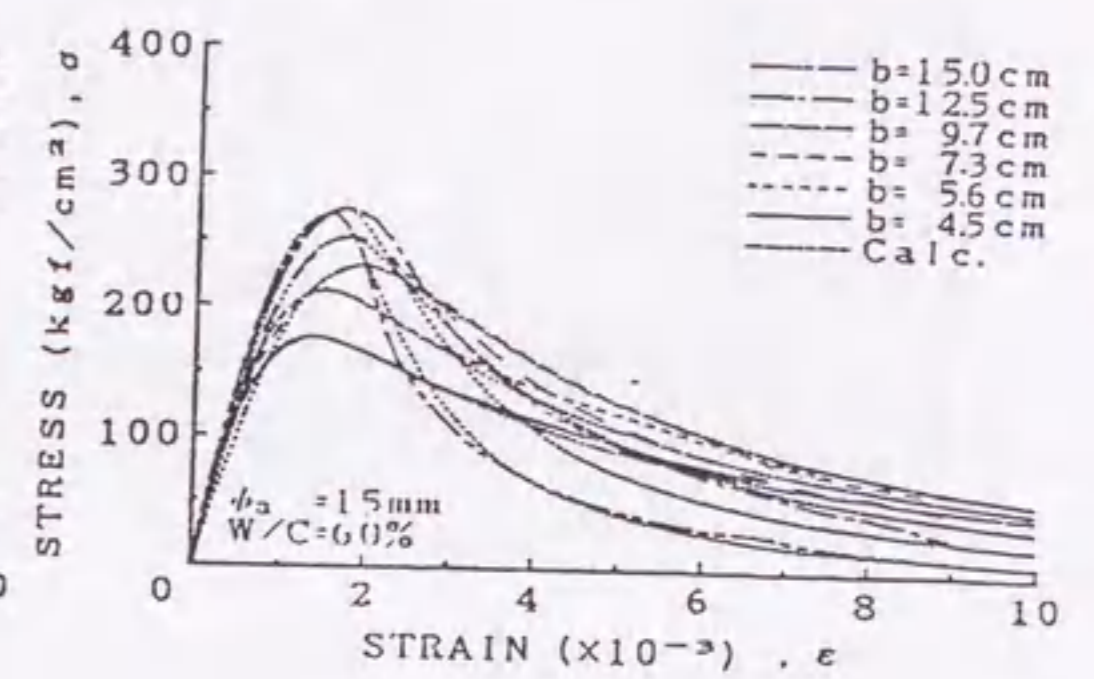


(e)  $\phi a=30\text{mm}$

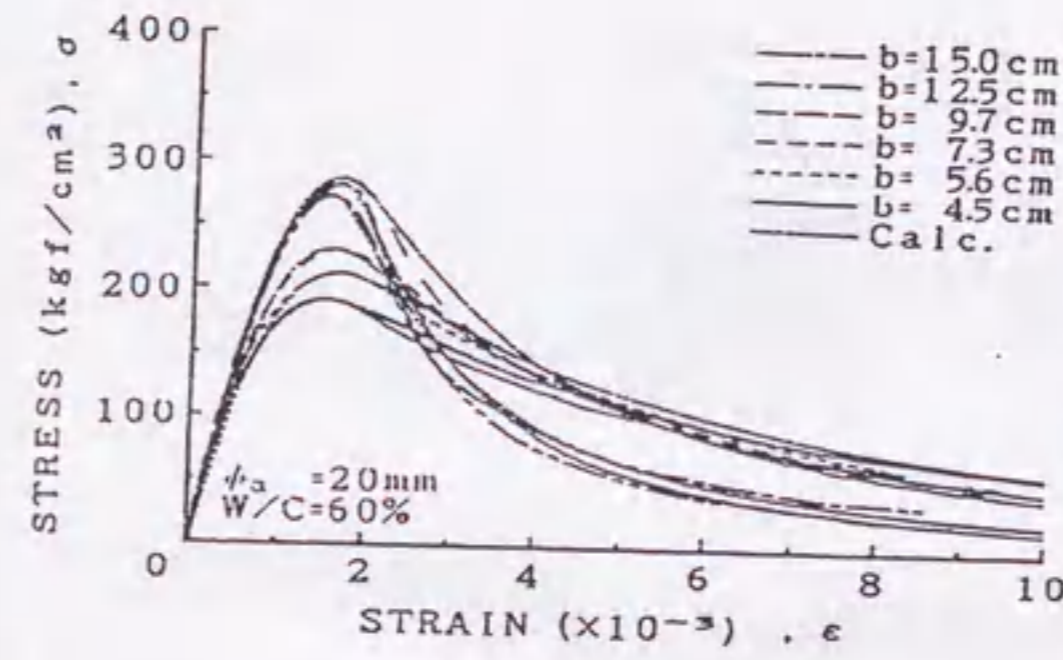
図-3.3.12 表示式 (3.3.5) と (3.3.6) を用いて求めた  $\bar{S}-E$  曲線 (点線) と実験値の比較 (W/C=60%)



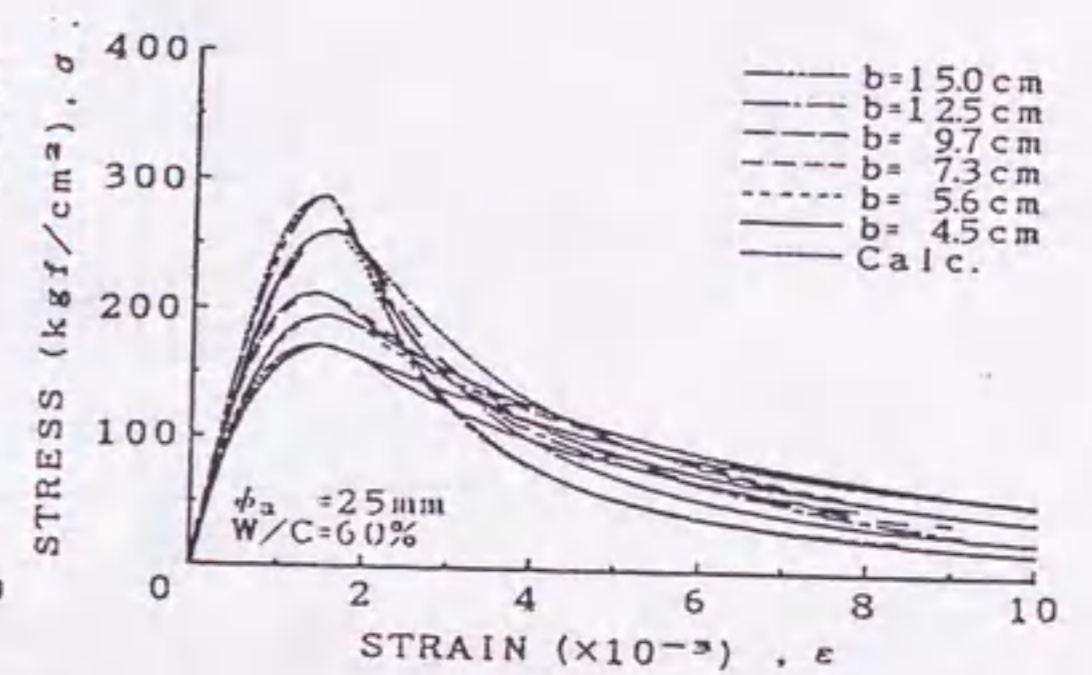
(a)  $\phi a=10\text{mm}$



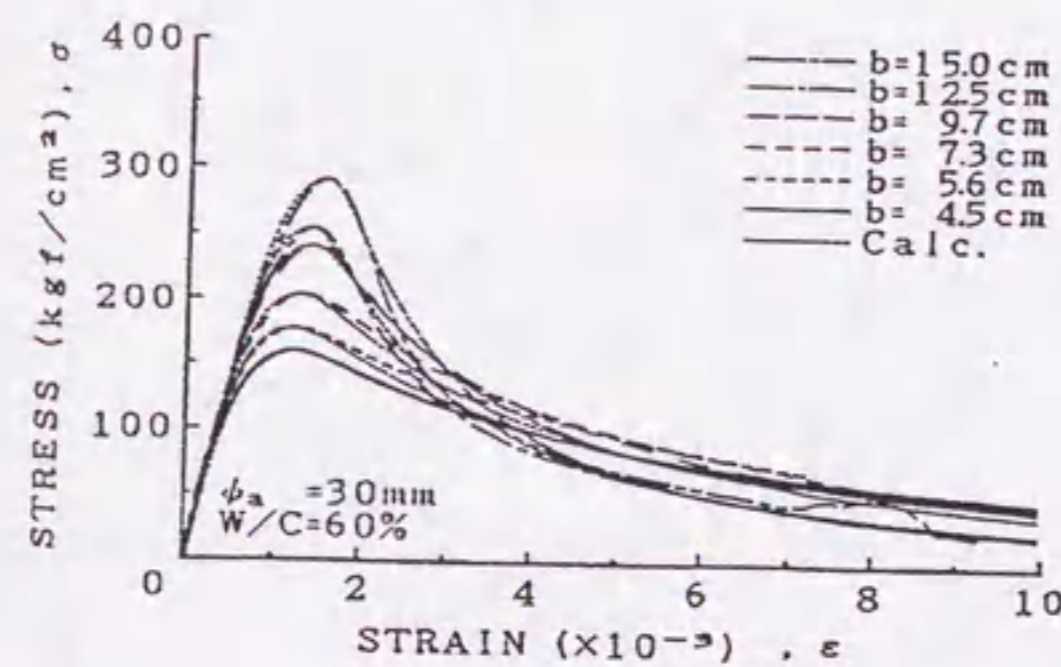
(b)  $\phi a=15\text{mm}$



(c)  $\phi a=20\text{mm}$



(d)  $\phi a=25\text{mm}$



(e)  $\phi a=30\text{mm}$

図-3.3.13 図-3.3.12 から求まる  $\sigma-\epsilon$  曲線の計算値 (点線) と実験値の比較 (W/C=60%)



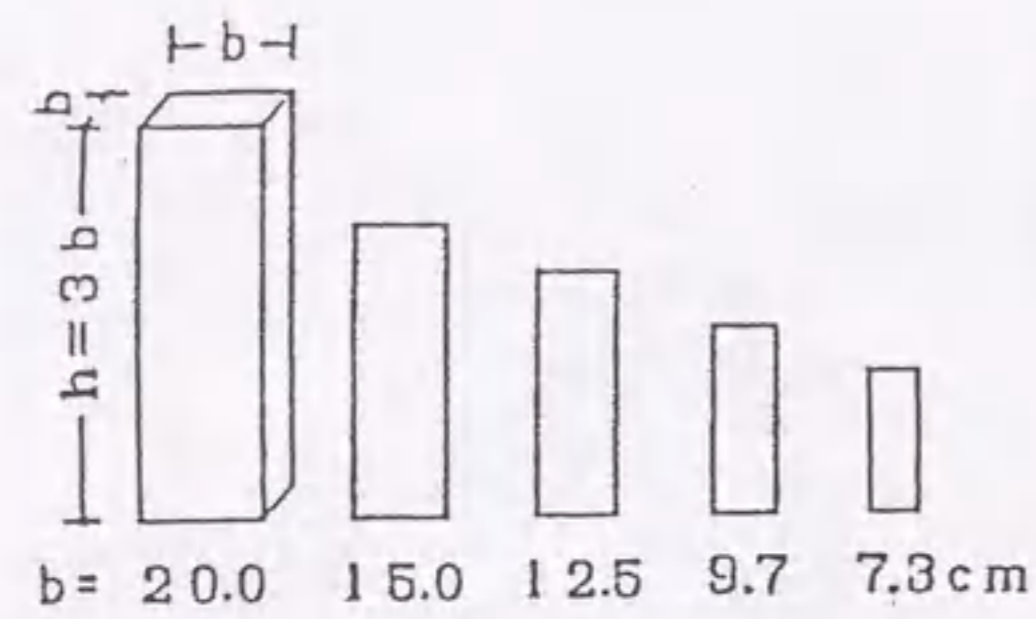


図-3.4.1 コンクリート角柱体の断面寸法 (実験 I)

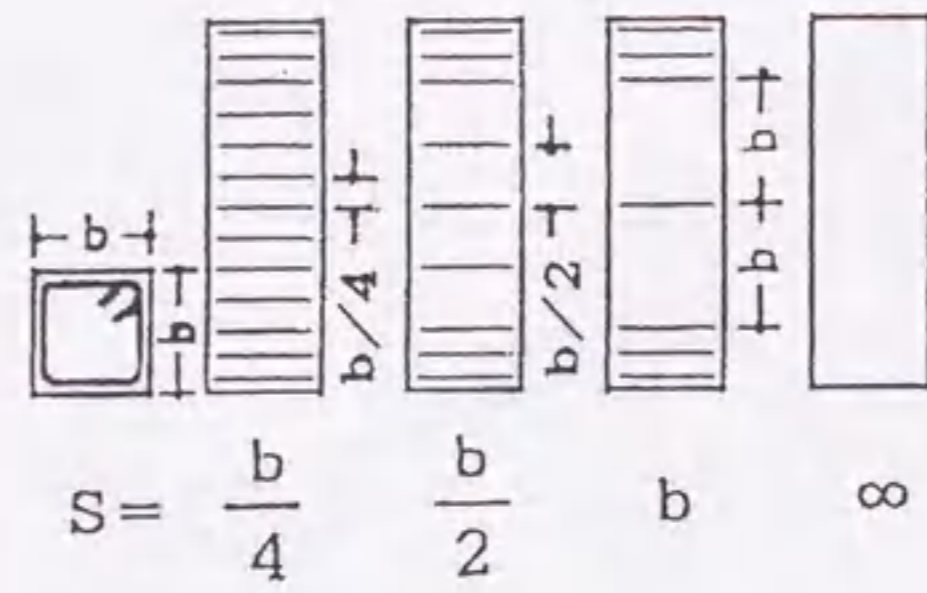


図-3.4.2 帯筋の配置 (実験 I)

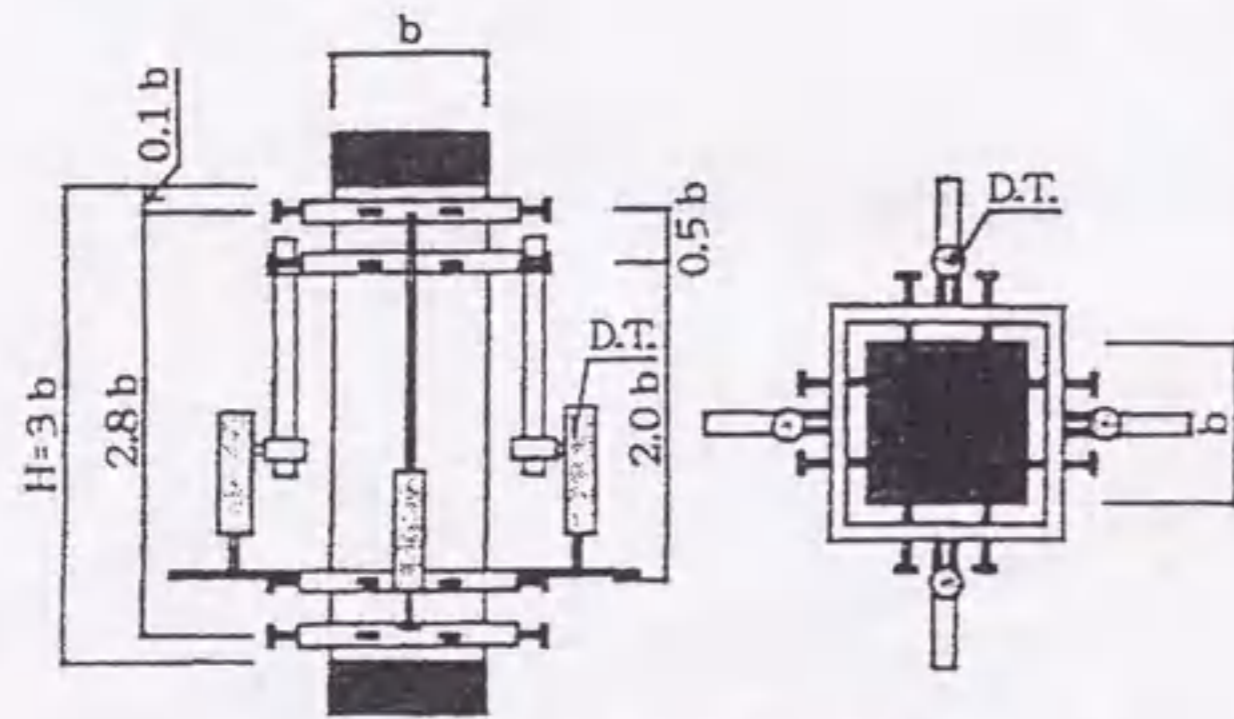


図-3.4.3 ひずみの測定方法 (実験 I)

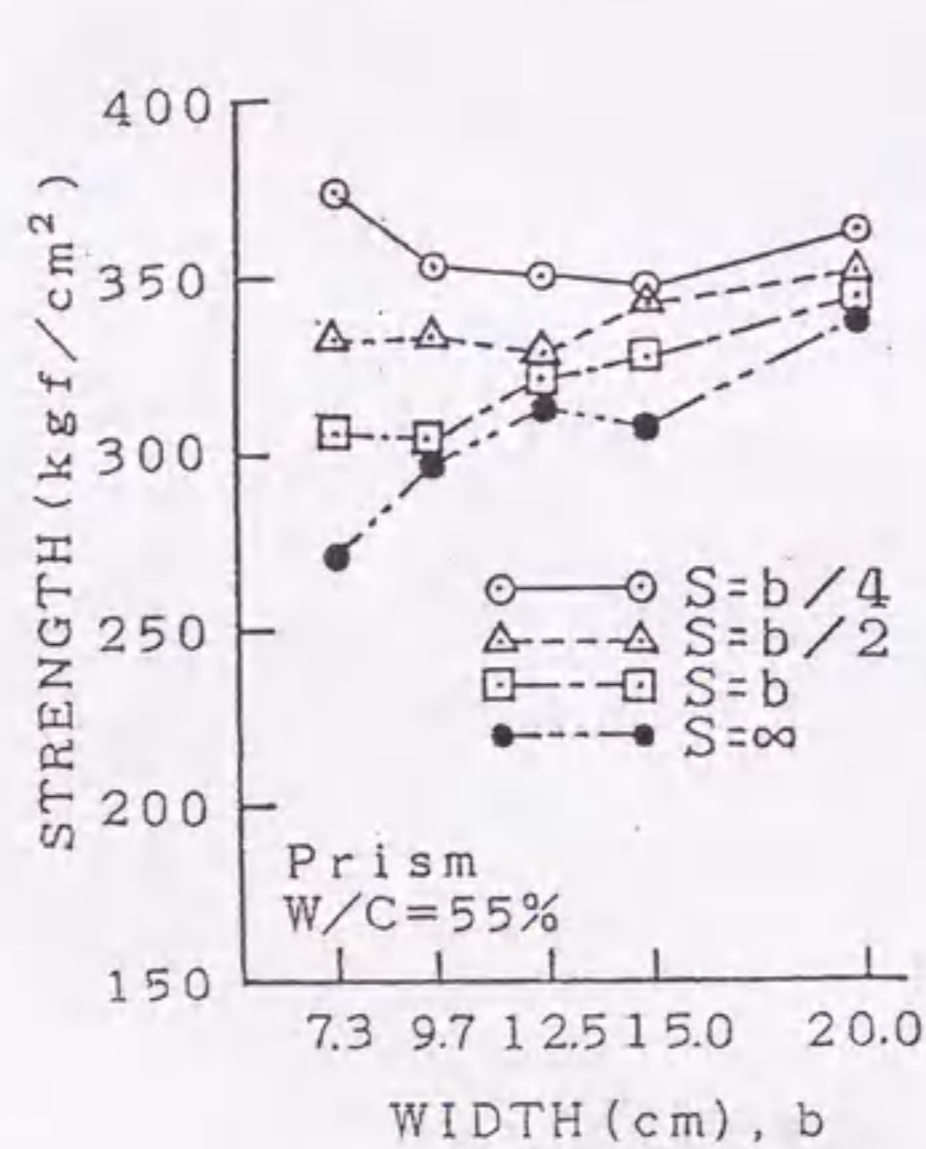


図-3.4.4 圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響

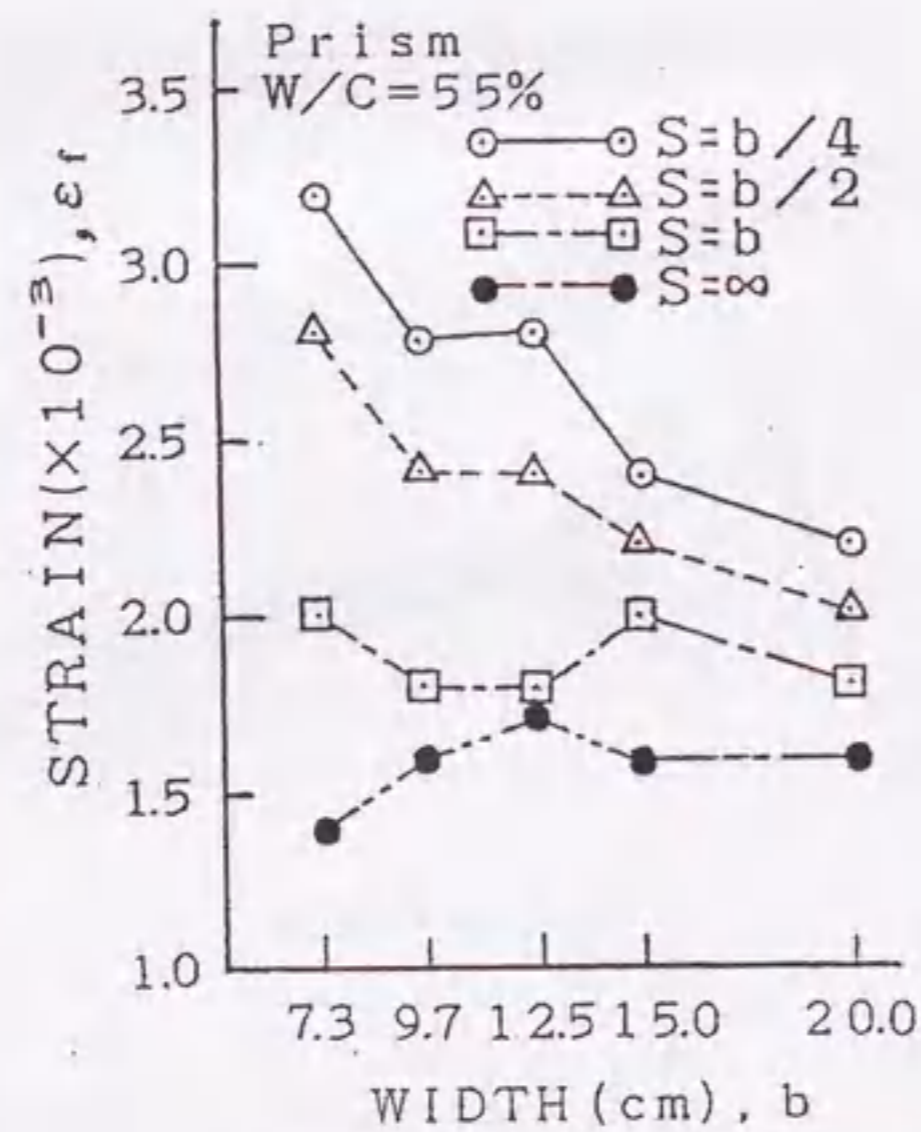
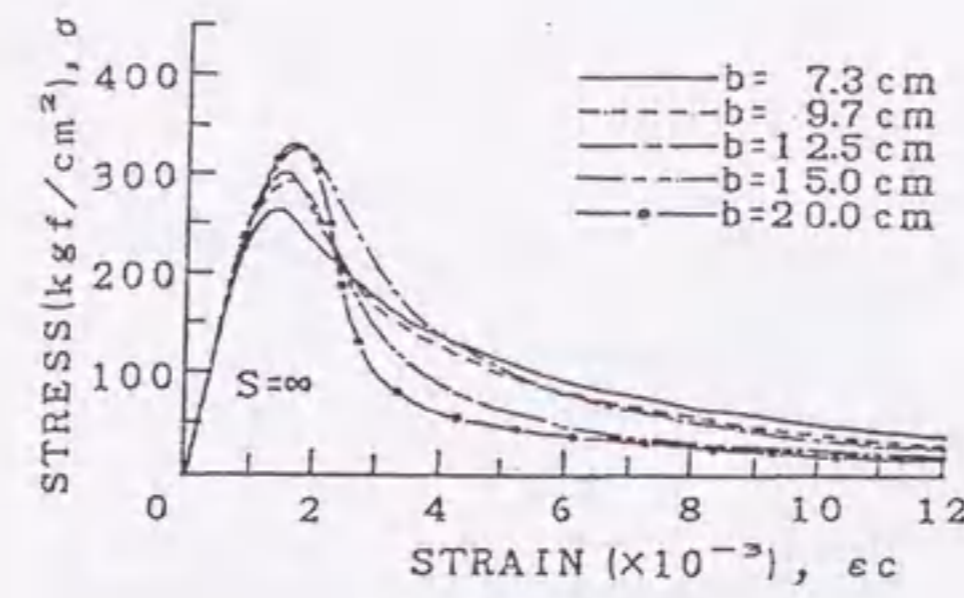
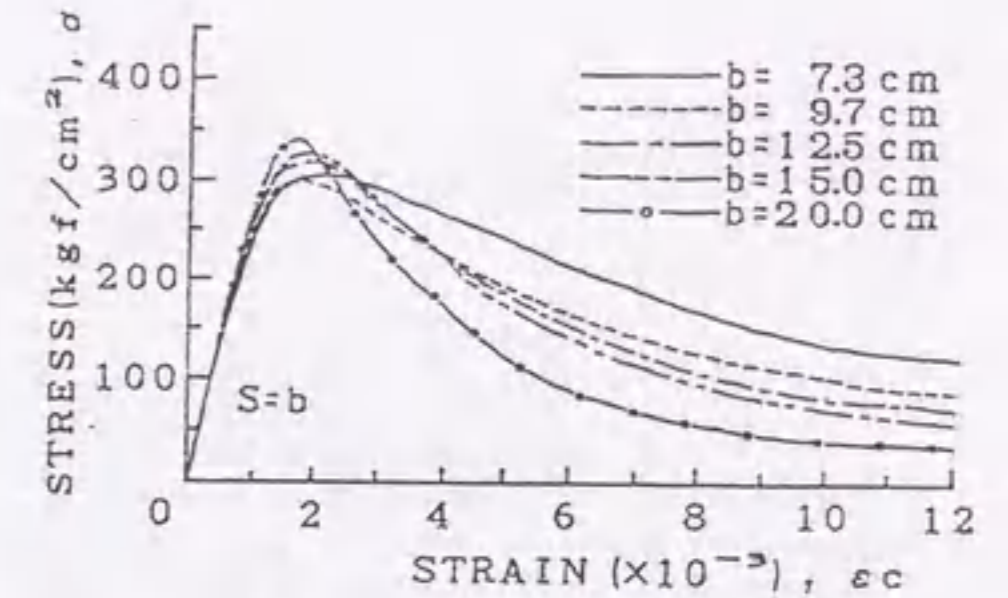


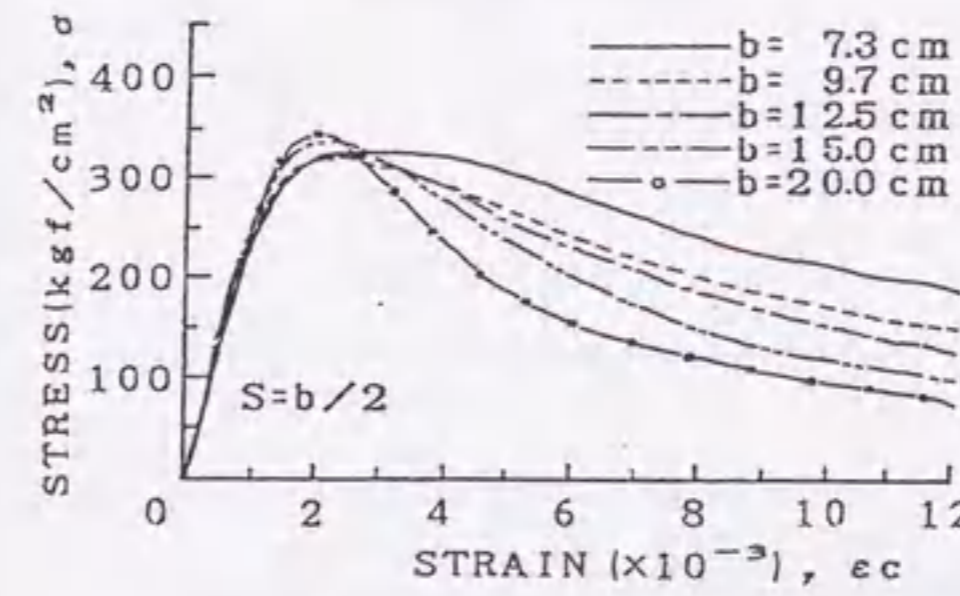
図-3.4.5 最大応力時のひずみ (ε<sub>r</sub>) の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響



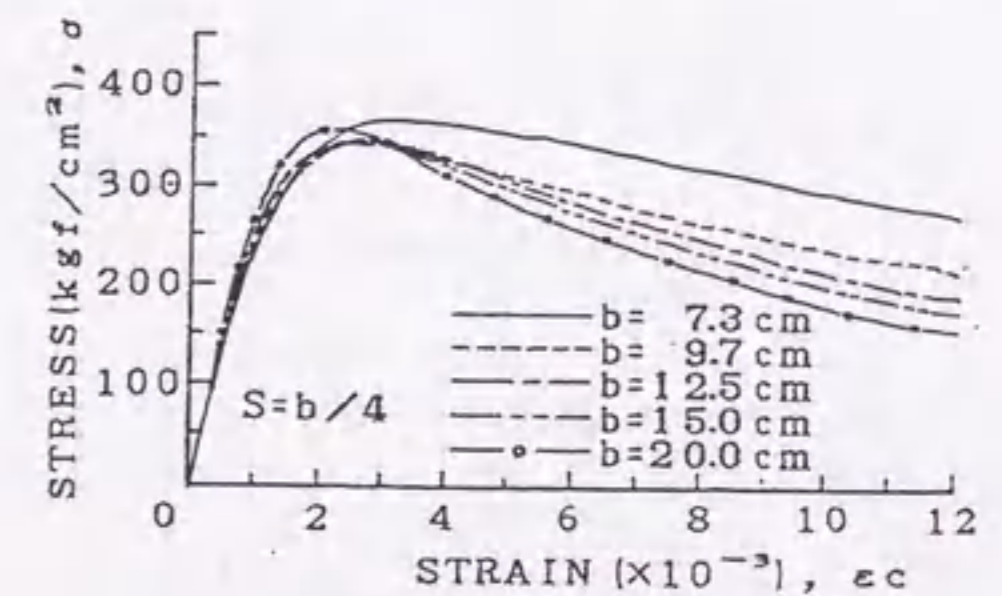
(a) plain (S=∞)



(b) S=b

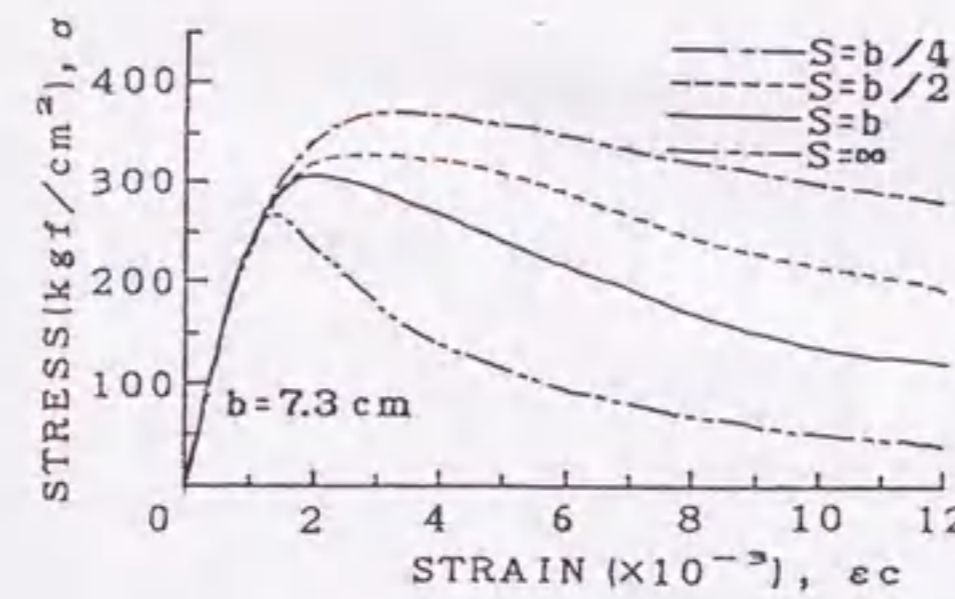


(c) S=b/2

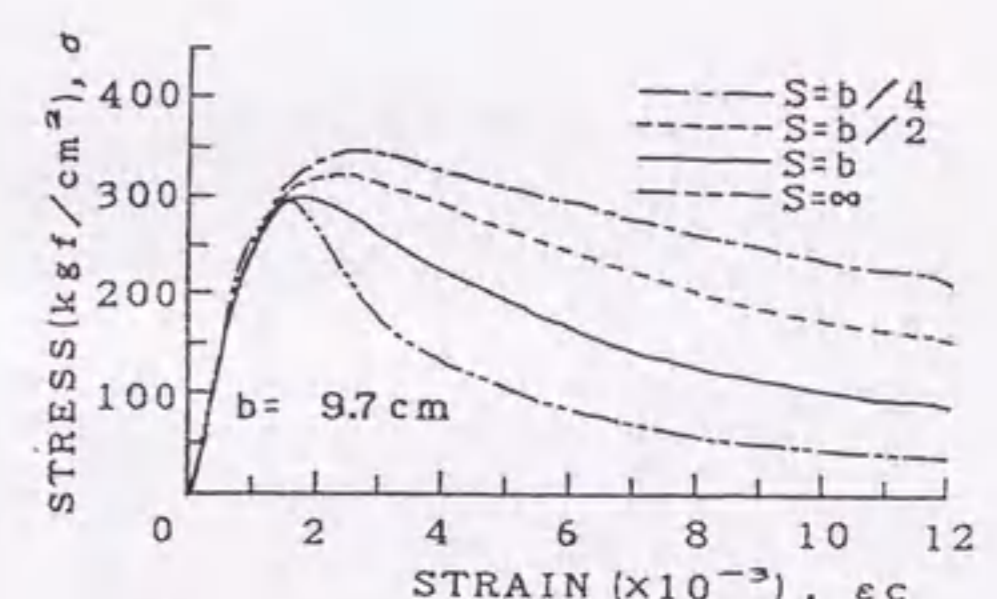


(d) S=b/4

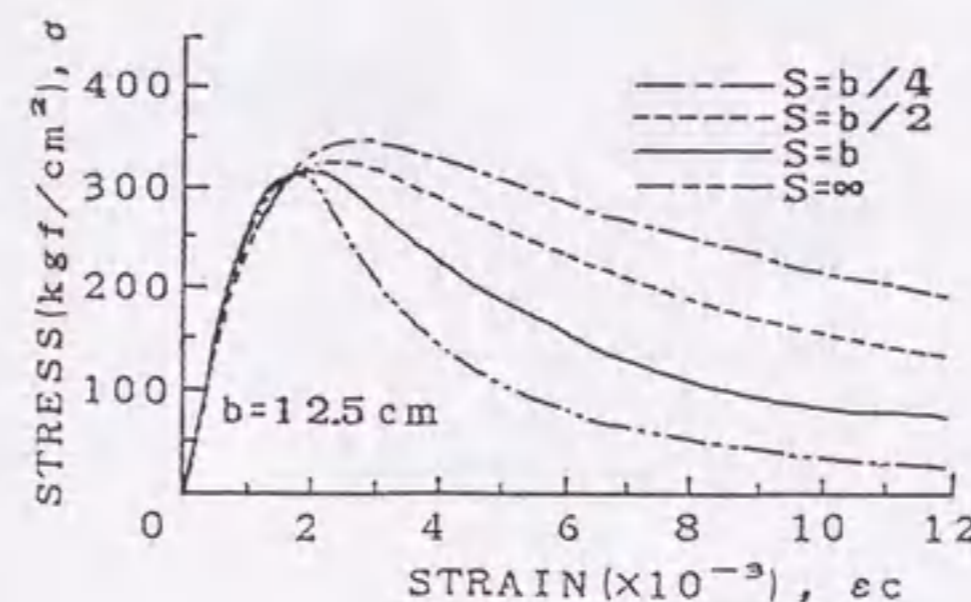
図-3.4.6 応力-ひずみ曲線の寸法効果



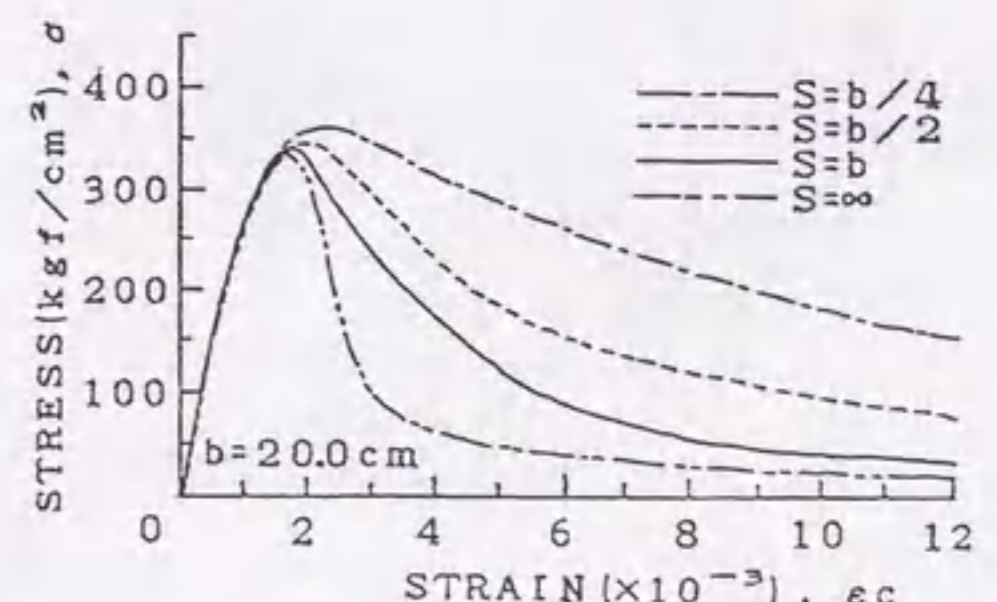
(a) b=7.3cm



(b) b=9.7cm



(c) b=12.5cm



(d) b=20cm

図-3.4.7 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチの影響



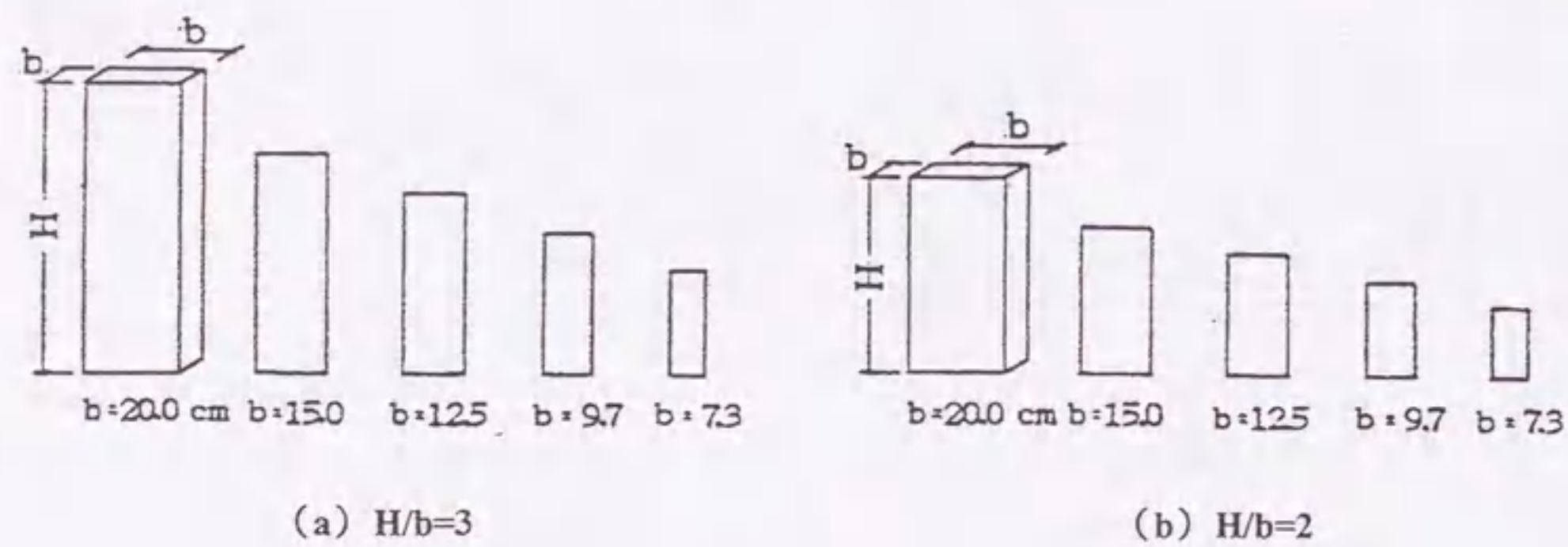


図-3.4.8 コンクリート角柱体の断面寸法 (実験II)

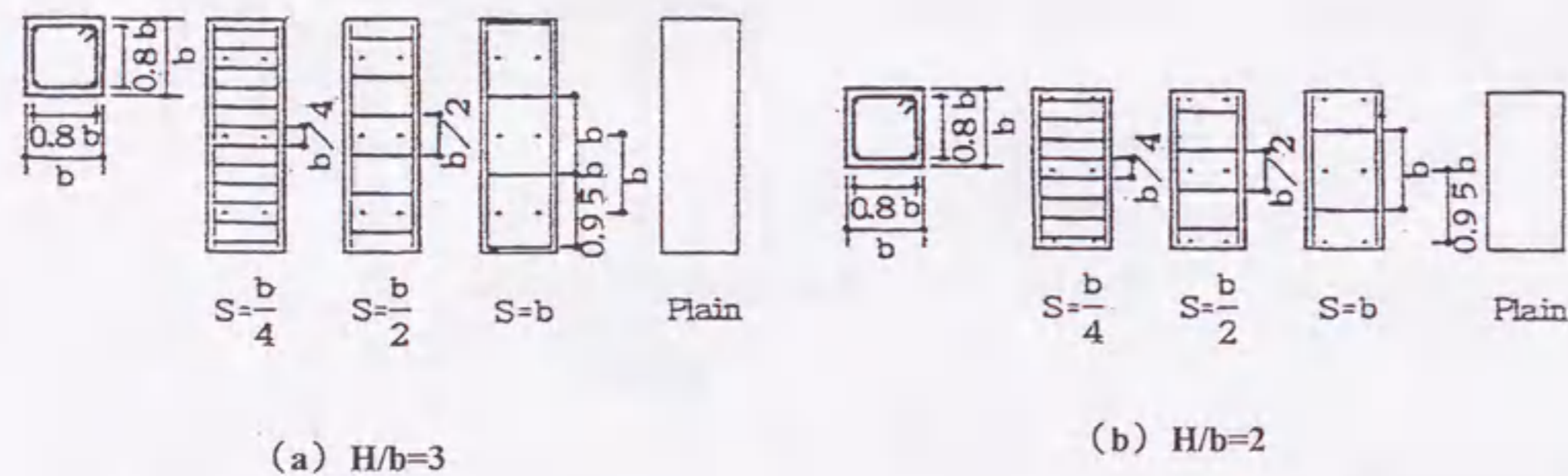


図-3.4.9 帯筋の配置 (実験II)

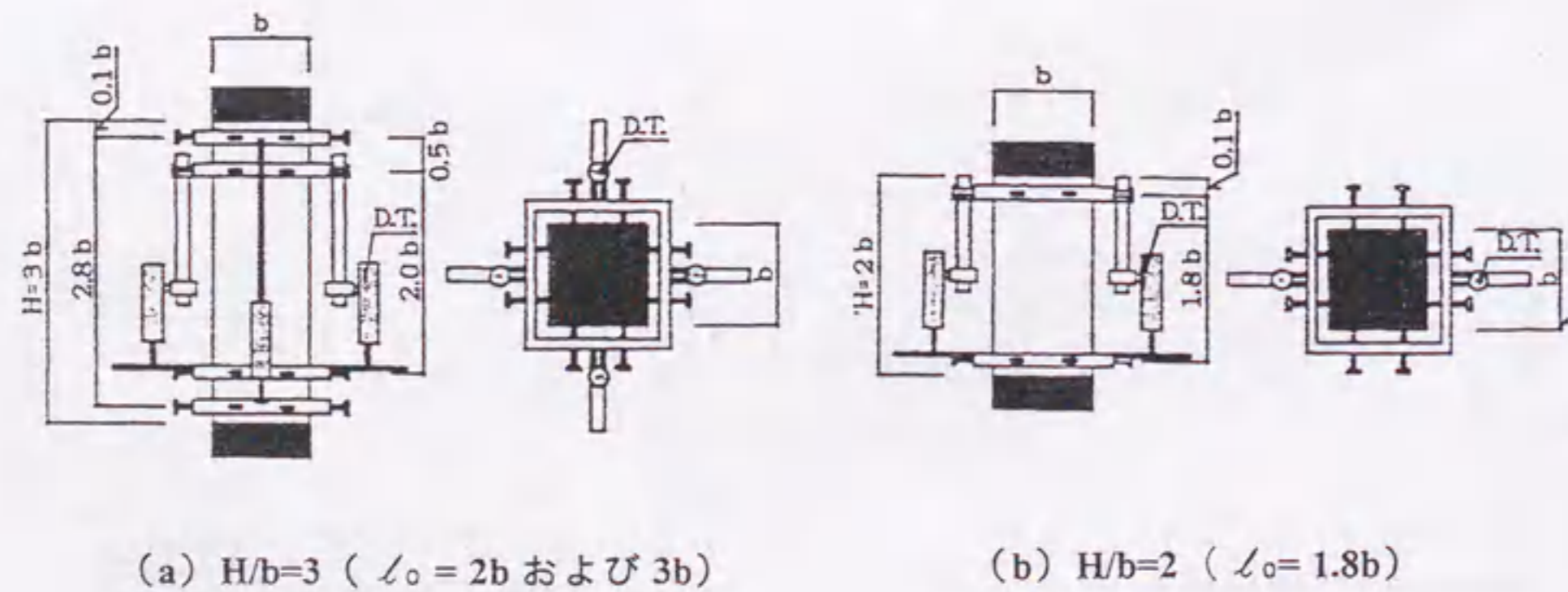
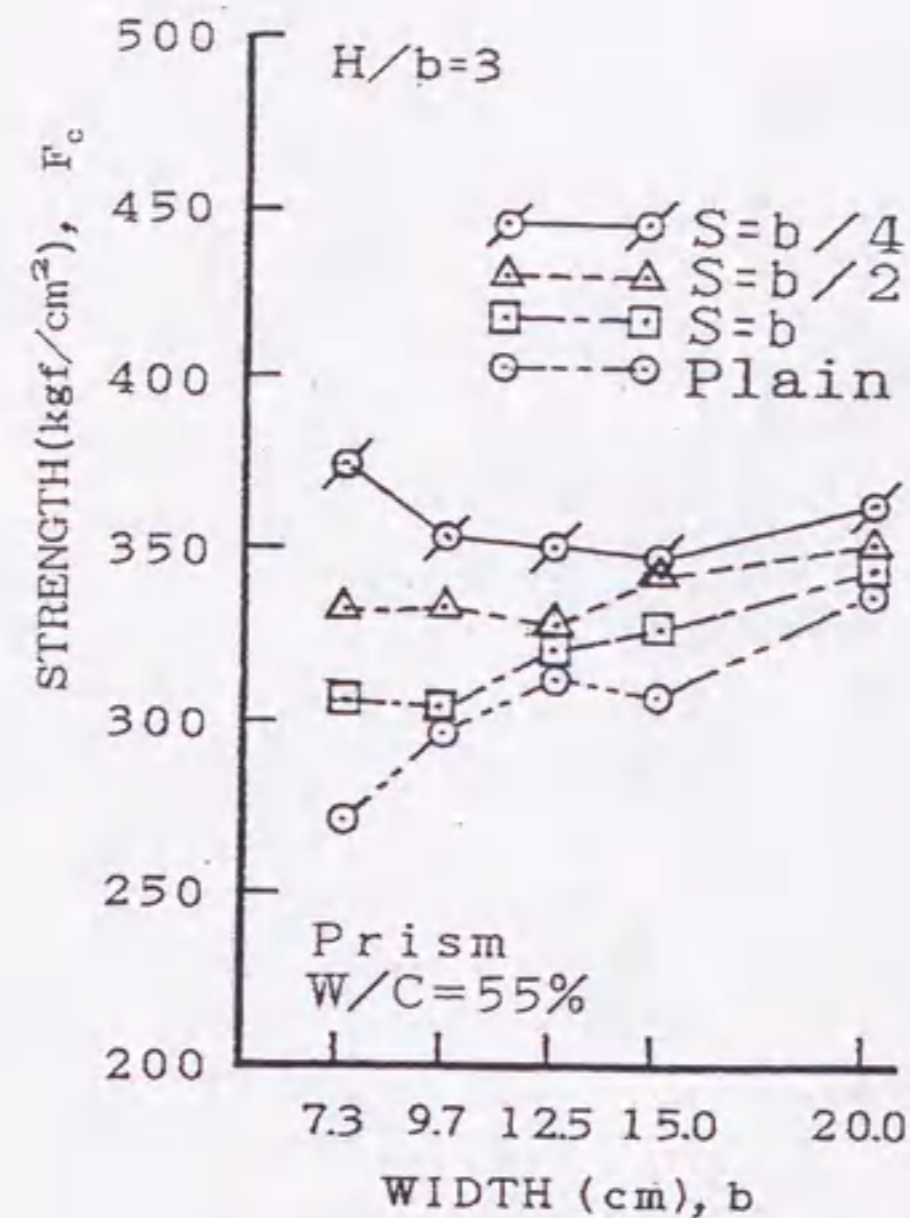
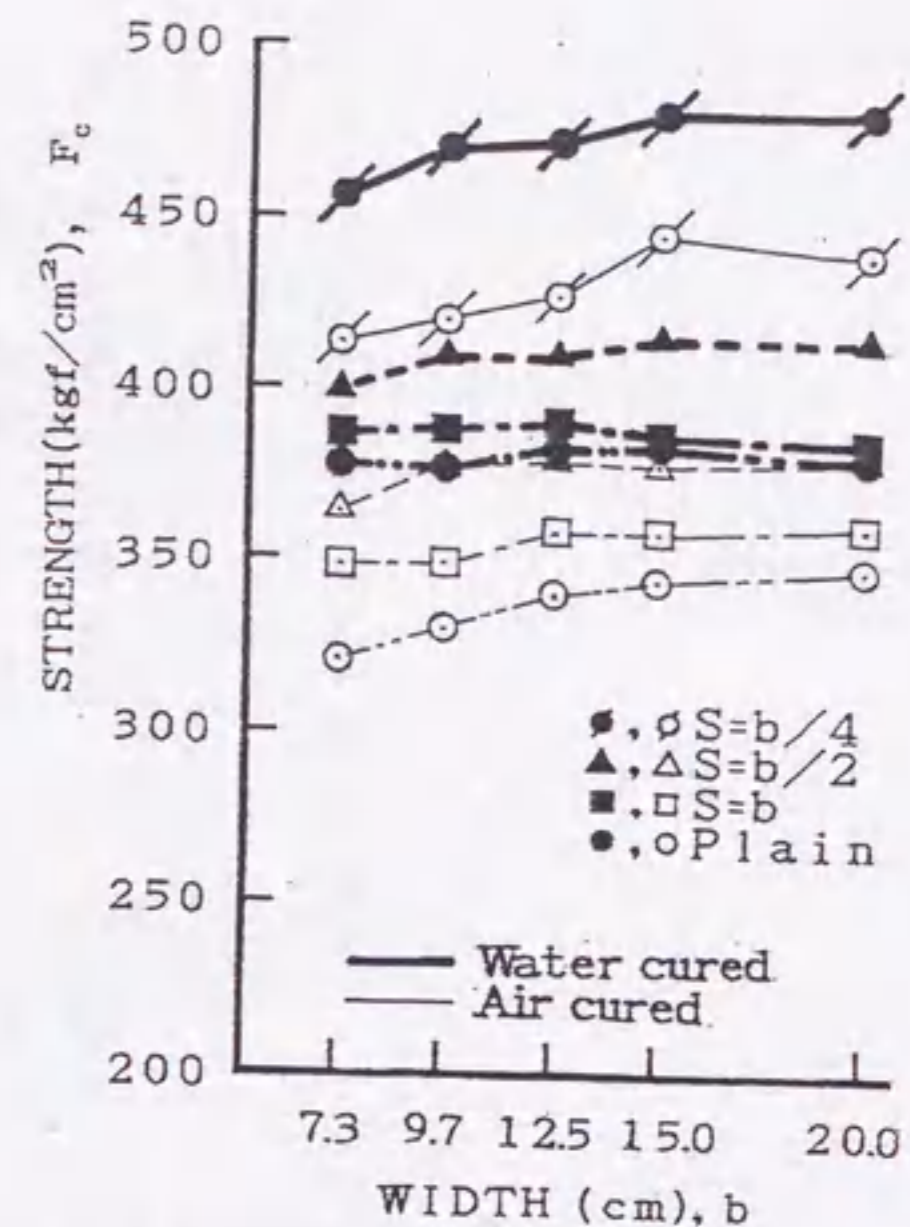


図-3.4.10 ひずみの測定方法 (実験II)



(a) 実験室内空中養生 (実験I) (H/b=3, RH=60±20%)



(b) 湿空養生と水中養生の影響 (実験II, H/b=2)

図-3.4.11 圧縮強度の寸法効果に及ぼす養生条件の影響

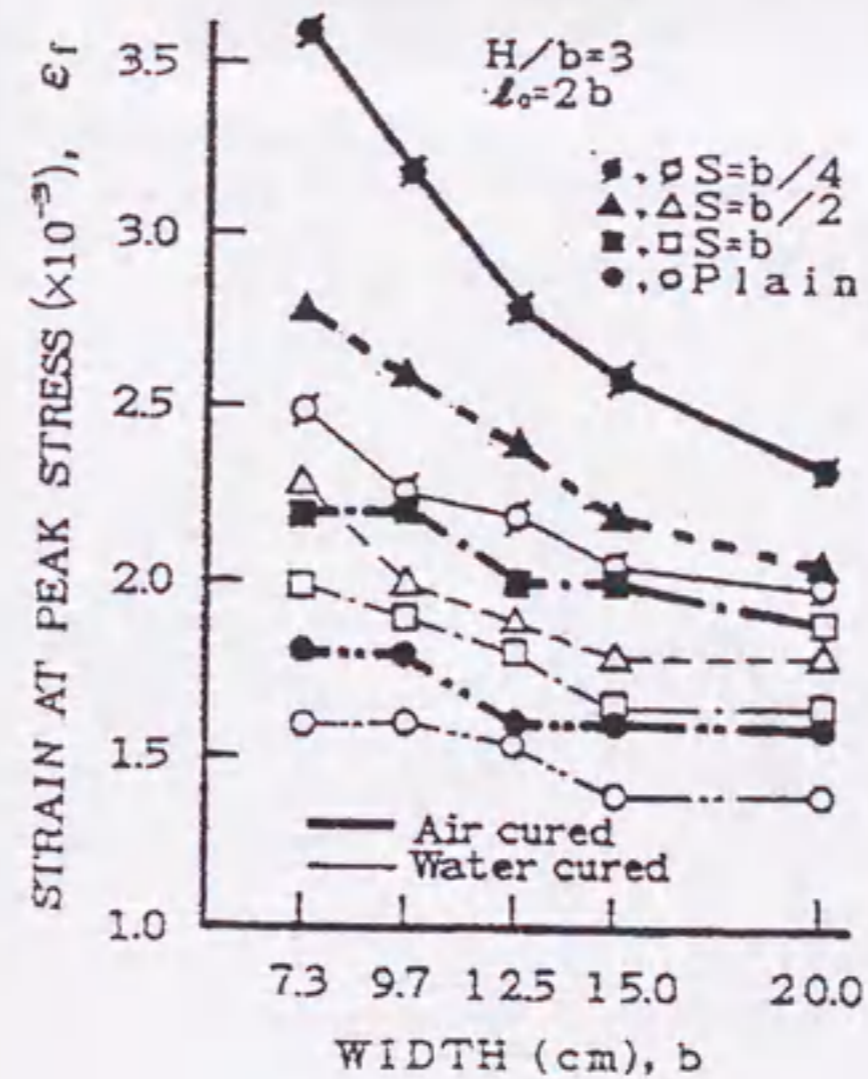


図-3.4.12 最大応力時のひずみ( $\epsilon_f$ )の寸法効果に及ぼす養生条件の影響 (実験II)

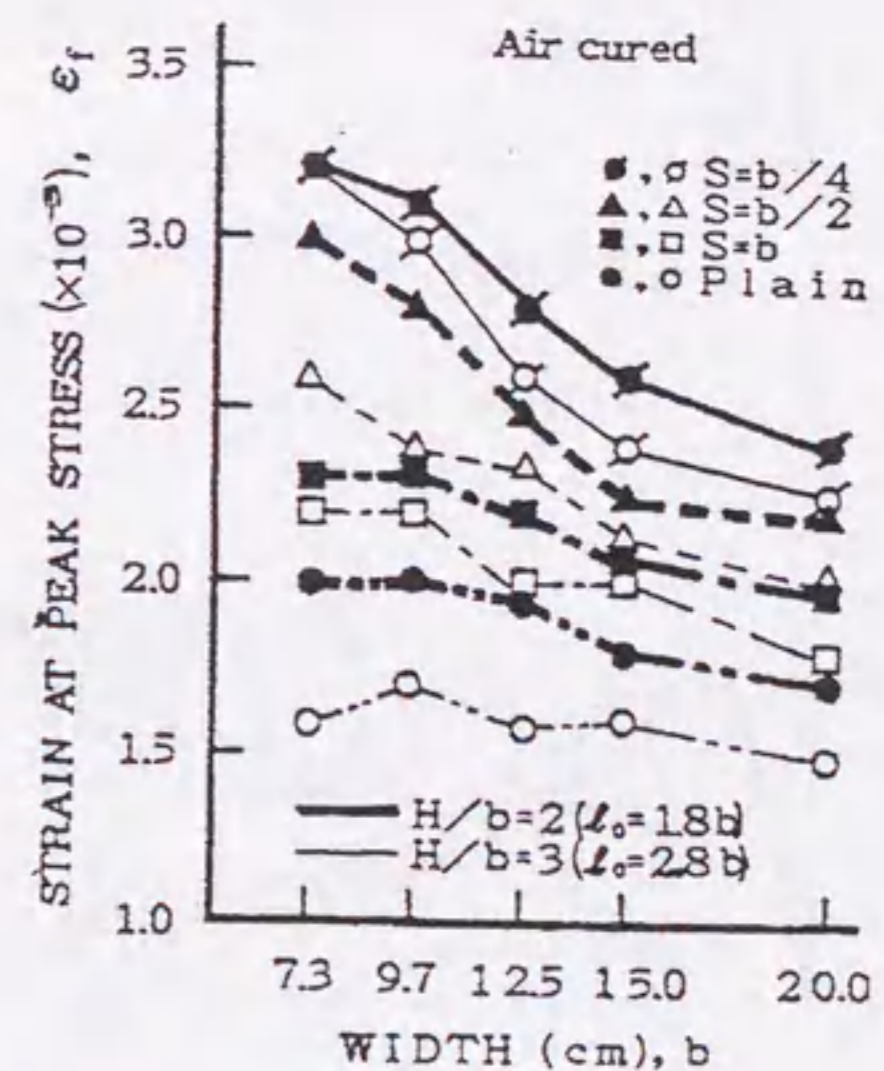


図-3.4.13 最大応力時のひずみ( $\epsilon_f$ )の寸法効果に及ぼす高さ辺長比の影響 (実験II)



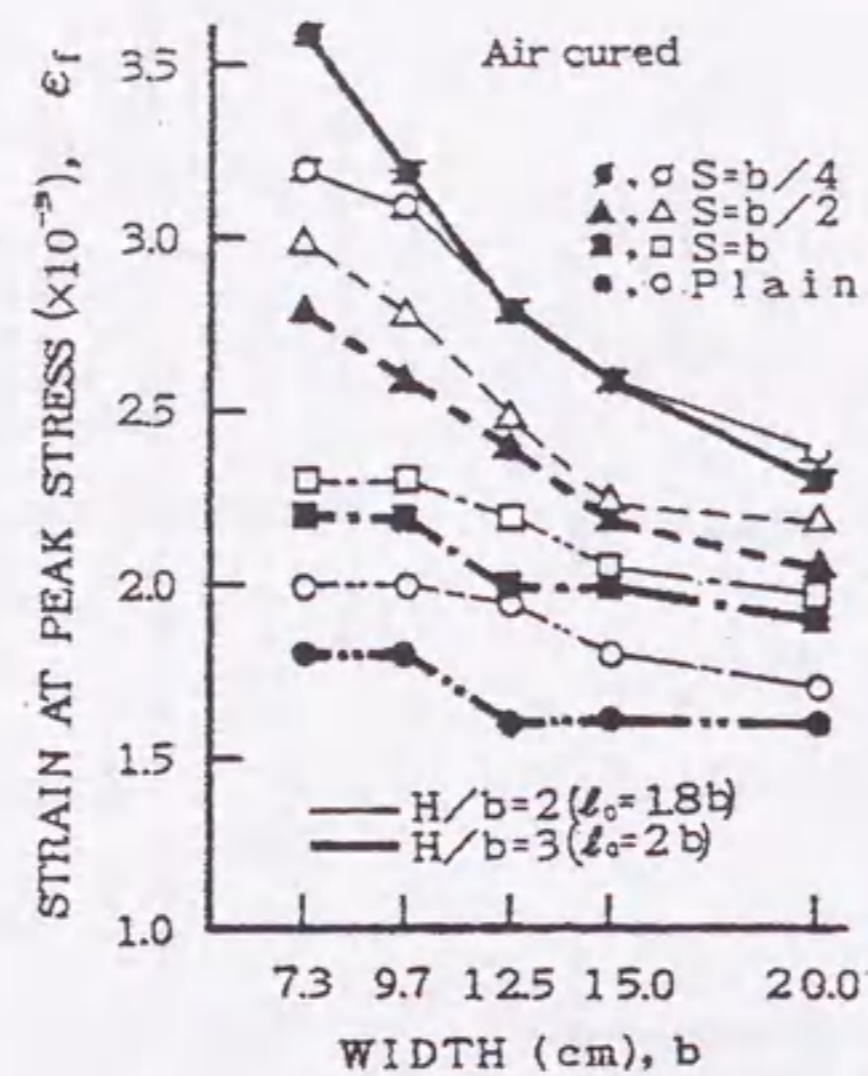
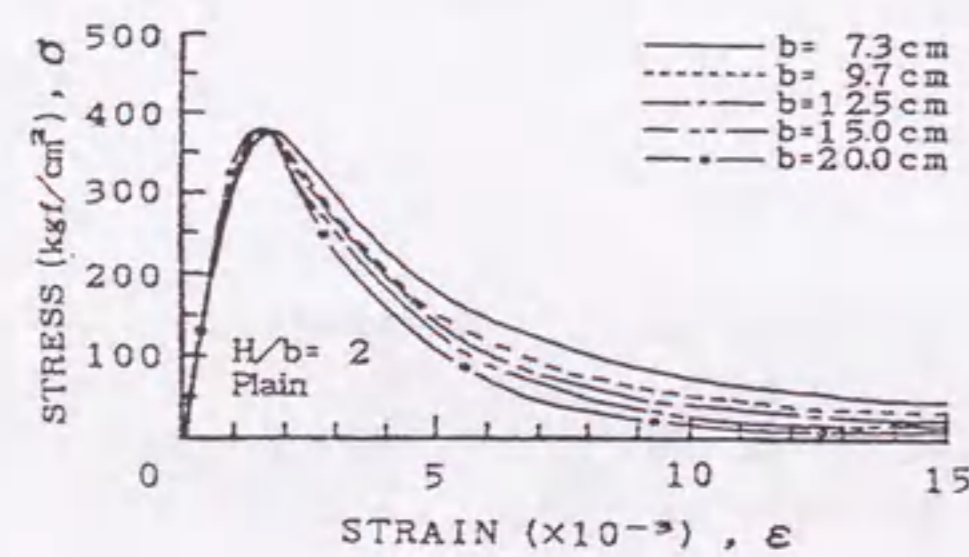
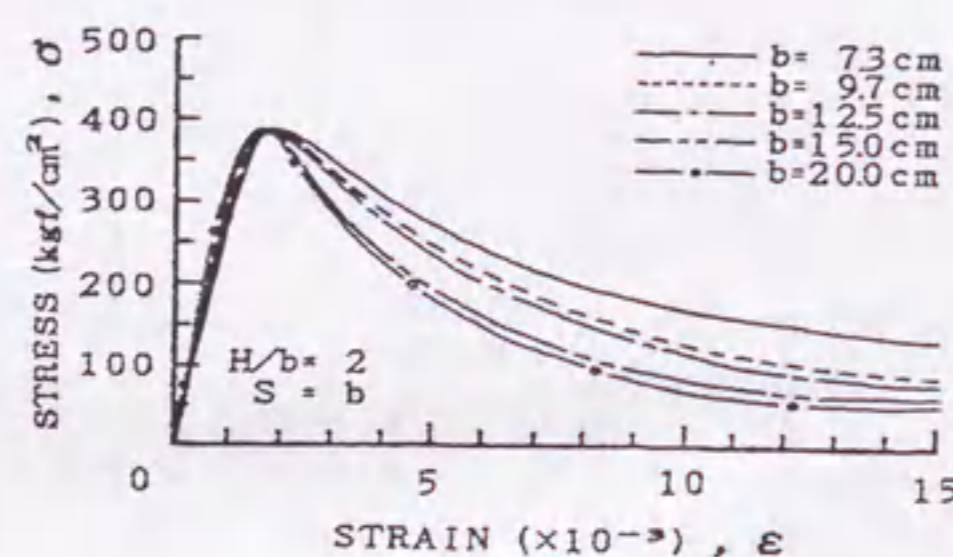


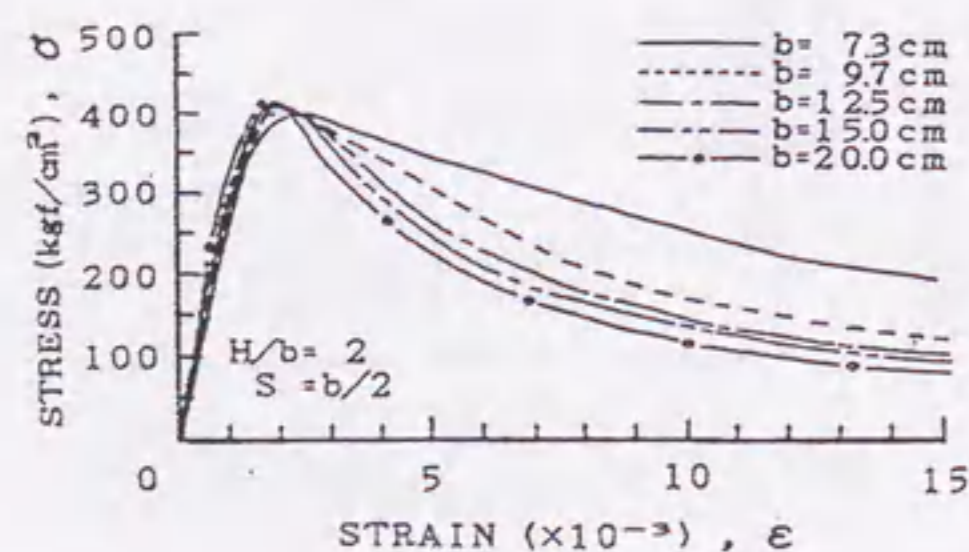
図-3.4.14 最大応力時のひずみ ( $\epsilon_f$ ) の寸法効果に及ぼす高さ辺長比の影響 (実験 II、ひずみ測定長  $l_0$  がほぼ等しい場合)



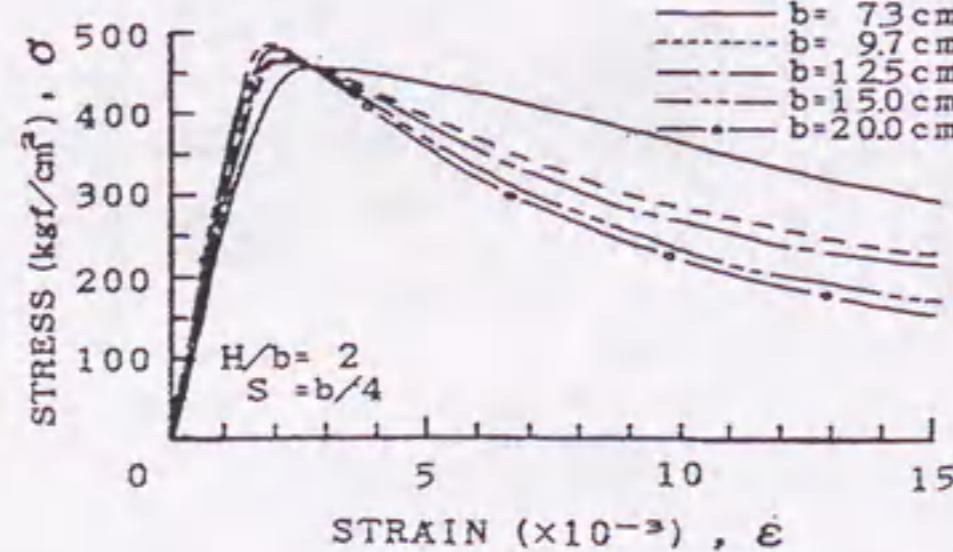
(a) plain ( $S=\infty$ )



(b)  $S=b$



(c)  $S=b/2$



(d)  $S=b/4$

図-3.4.15 応力-ひずみ曲線の寸法効果 (実験 II、 $H/b=2$ 、水中養生)

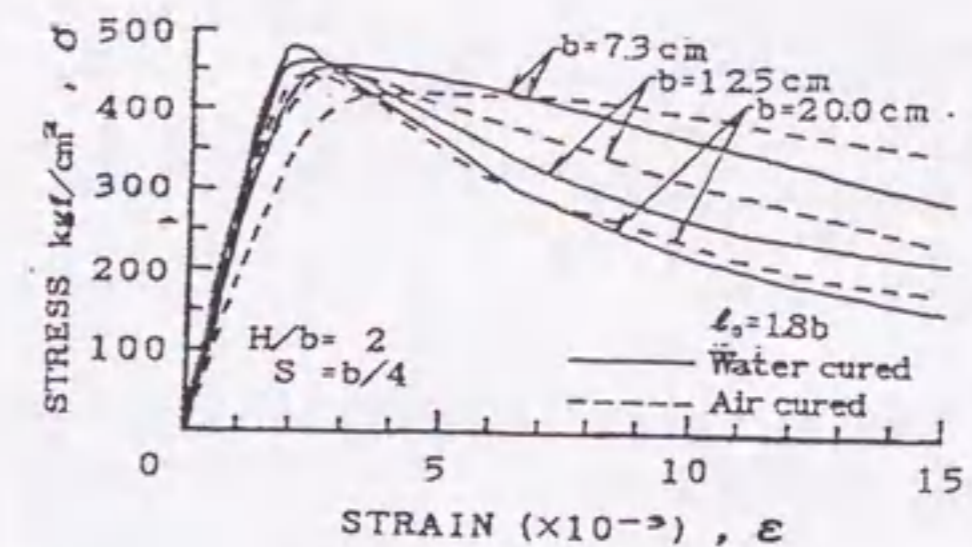
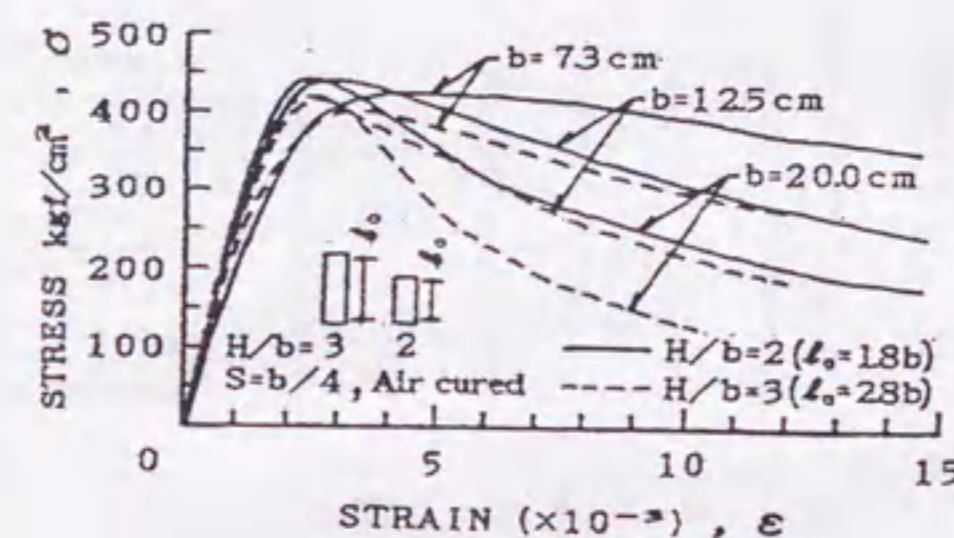
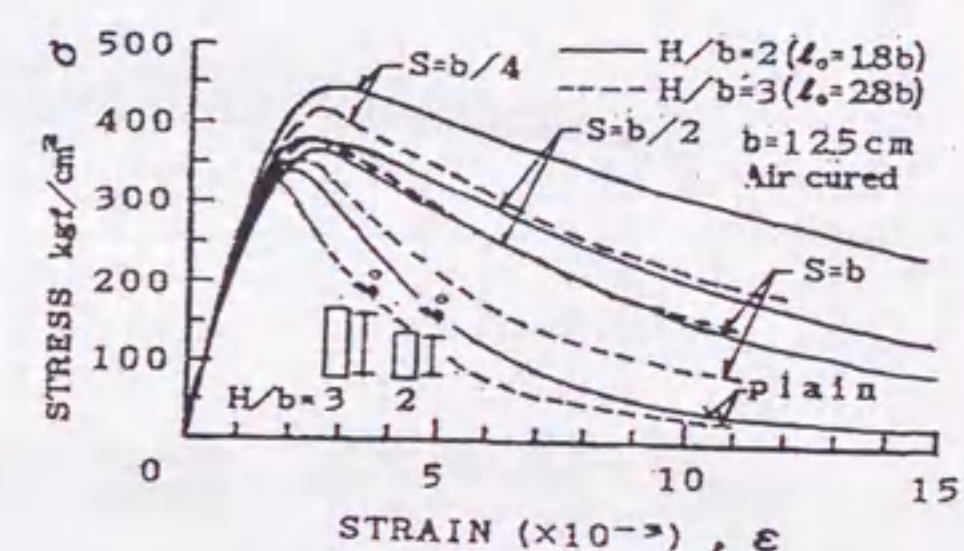


図-3.4.16 応力-ひずみ曲線に及ぼす養生条件の影響 (実験 II)



(a) 試験体寸法が相違する場合



(b) 帯筋ピッチが相違する場合

図-3.4.17 応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体の高さ辺長比 ( $H/b$ ) の影響 (実験 II)

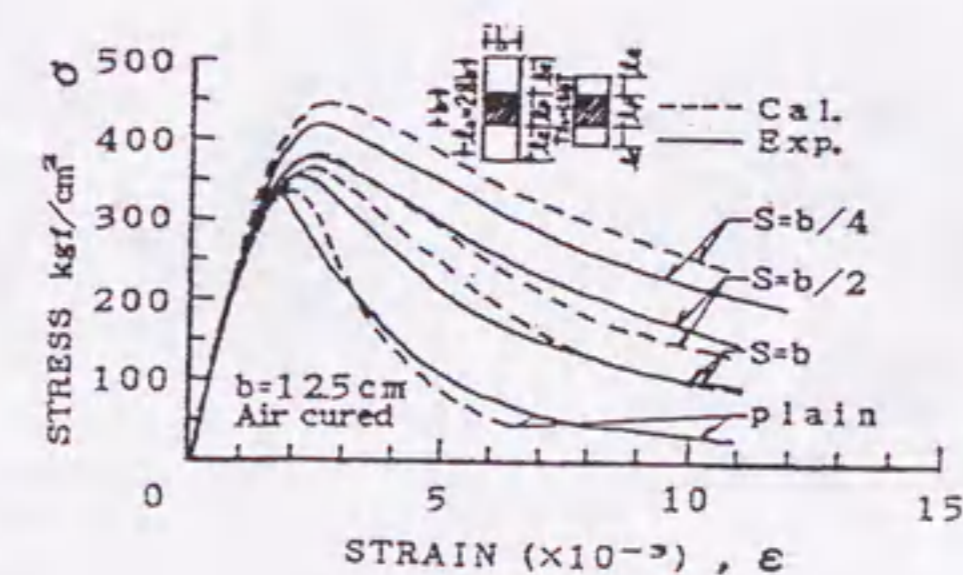


図-3.4.18 仮想破壊域モデルによる計算値と実験値の比較



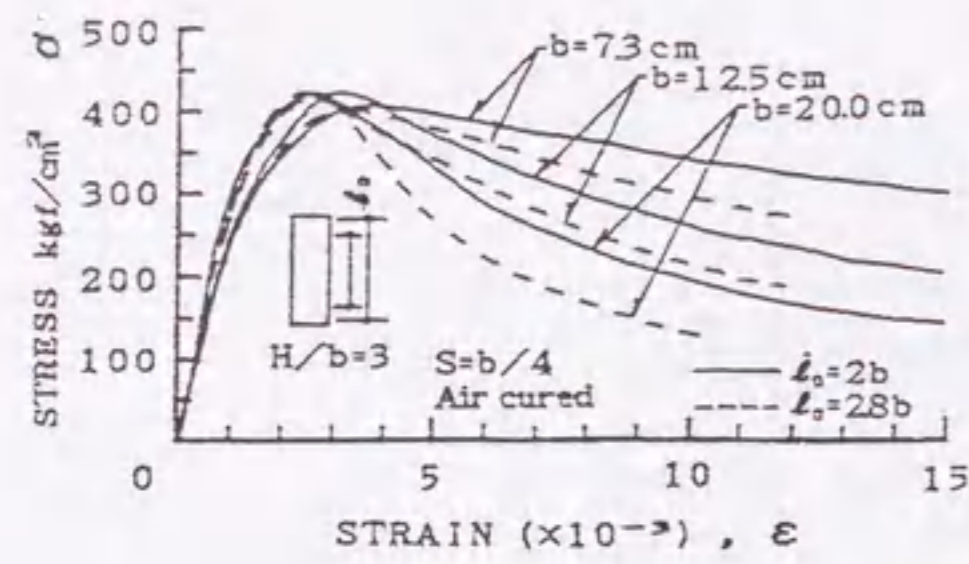


図-3.4.19 応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ測定長の影響(実験II)

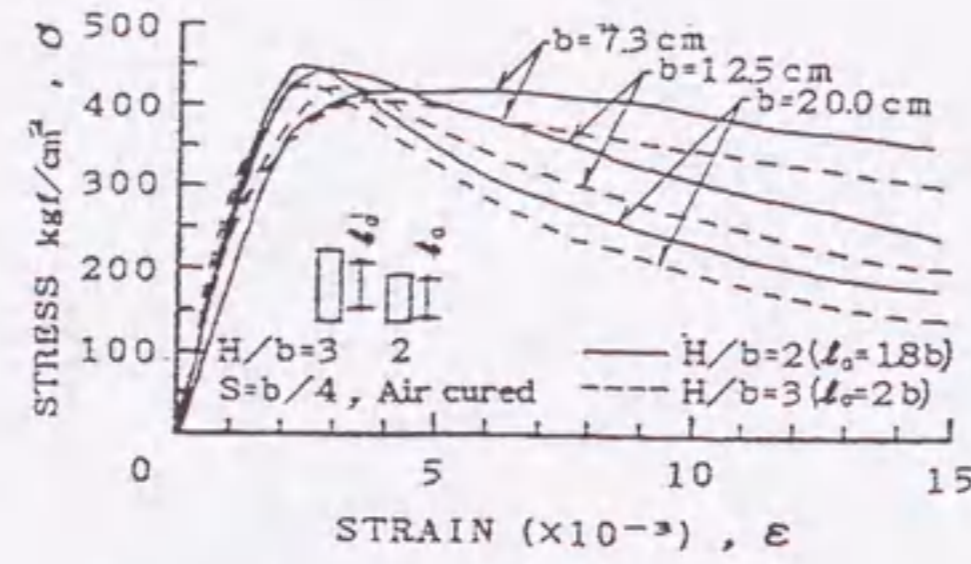
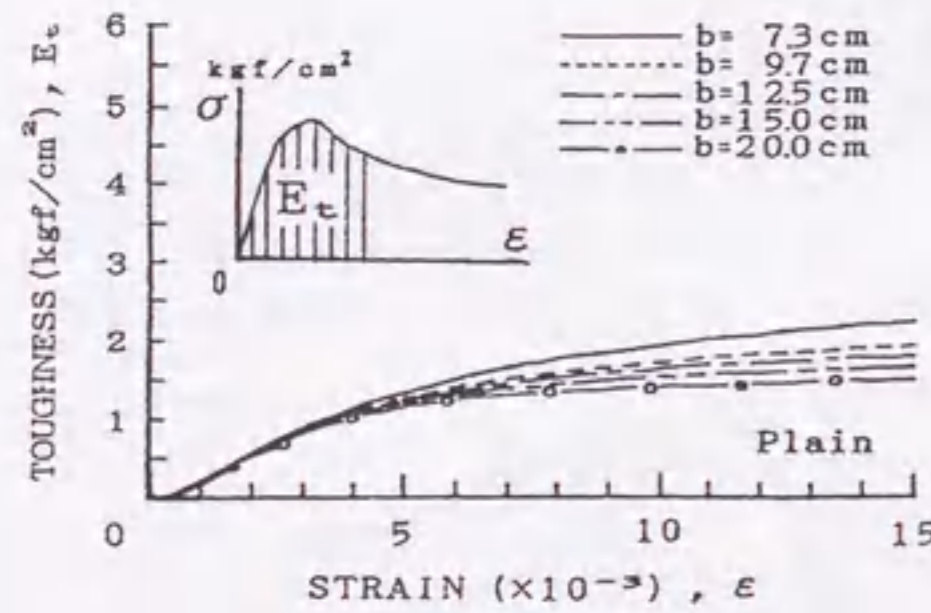
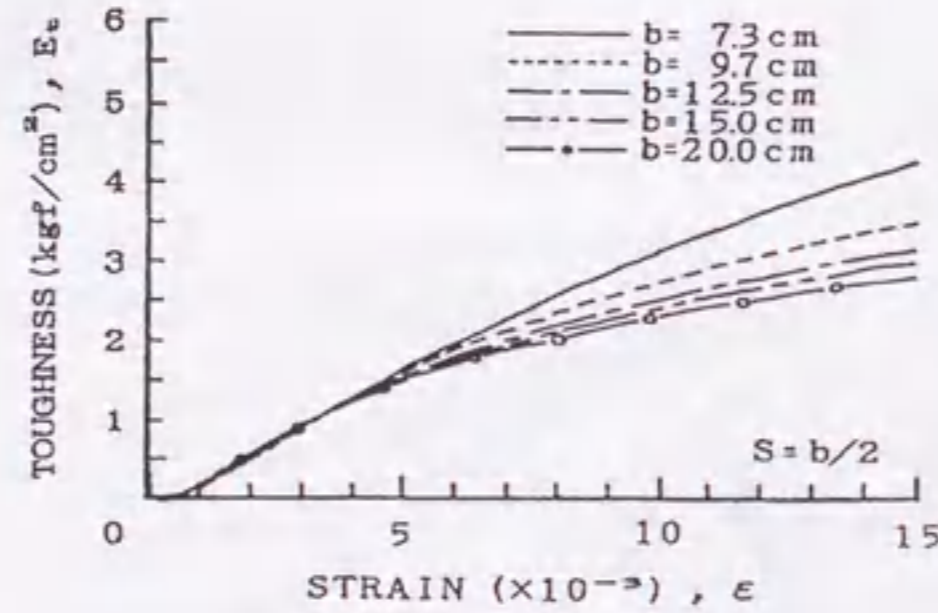


図-3.4.20 応力-ひずみ曲線に及ぼす高さ-辺長比 (H/b) の影響 (ほぼ同じひずみ測定長の場合)



(a) plain (S=∞)



(b) S=b/2

図-3.4.21 コンクリートの吸収エネルギー (E<sub>t</sub>) とひずみ (ε) の関係に及ぼす試験体寸法 (b) の影響 (H/b=2、水中養生)

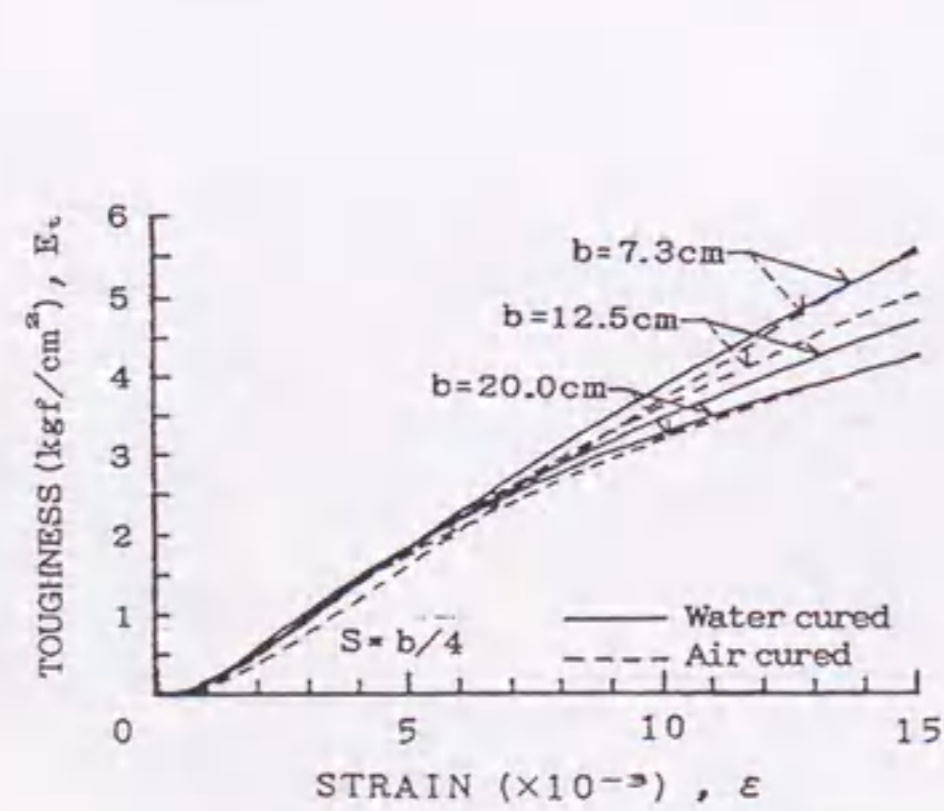


図-3.4.22 吸収エネルギー (E<sub>t</sub>) とひずみ (ε) の関係における寸法効果に及ぼす養生条件の影響 (H/b=2、S=b/4)

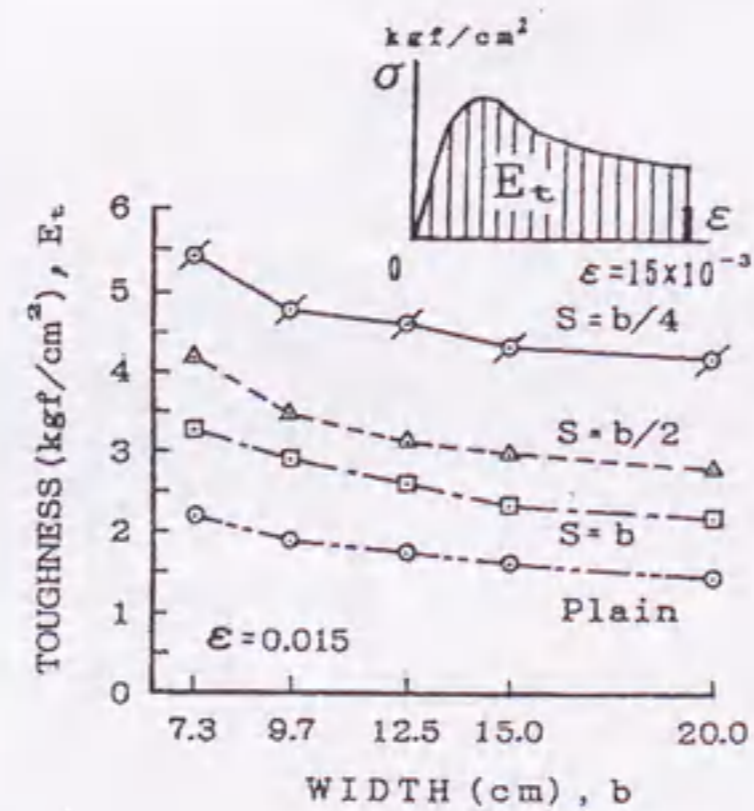
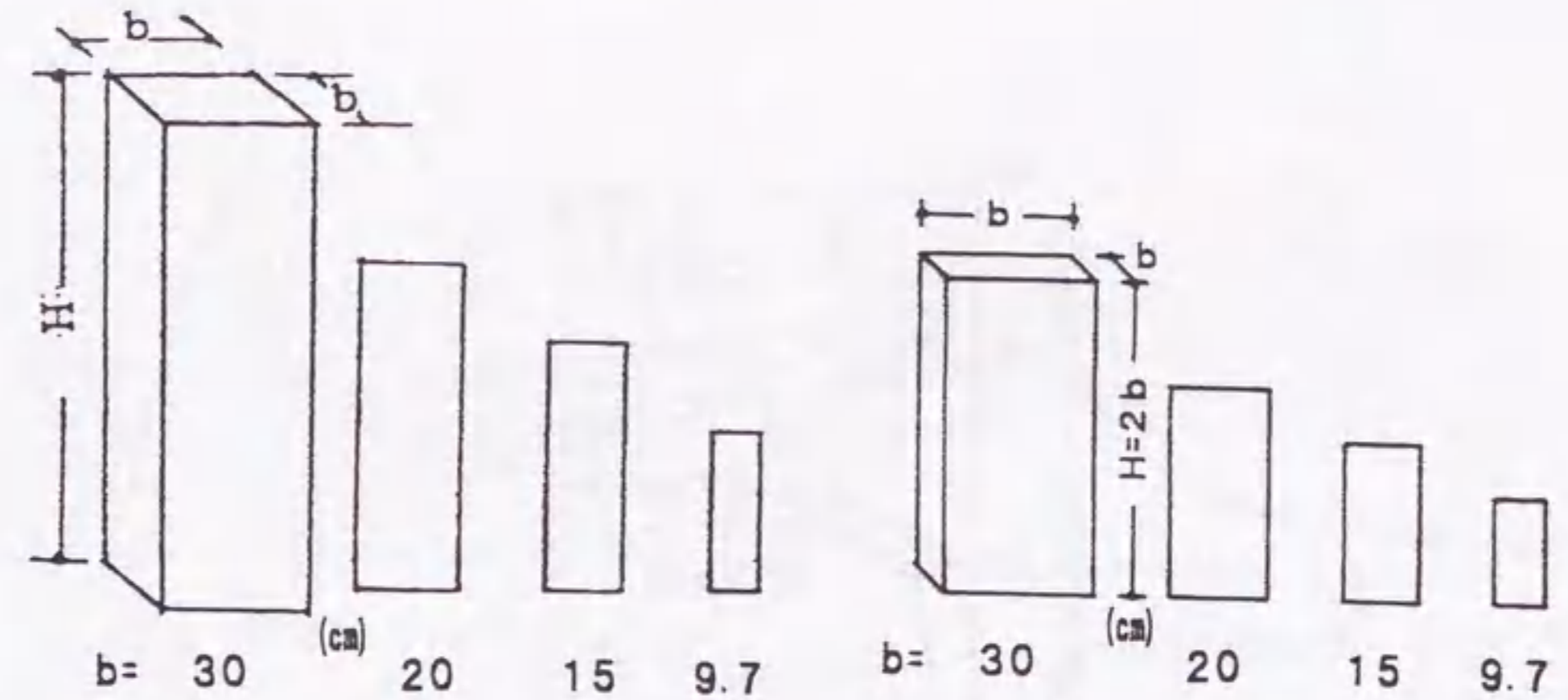


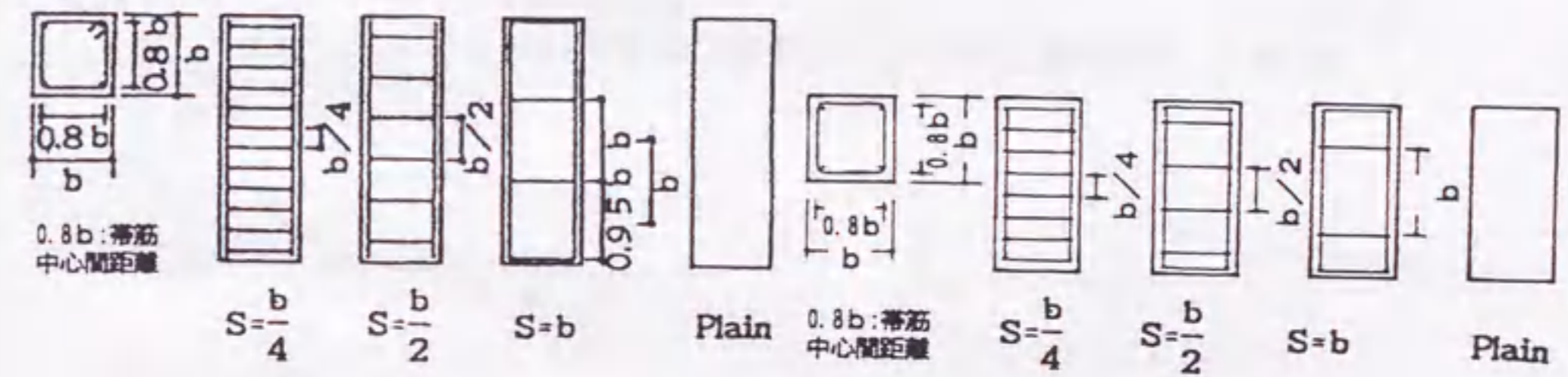
図-3.4.23 ε=0.015 時の吸収エネルギーの寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響 (H/b=2、水中養生)



(a) H/b=3

(b) H/b=2

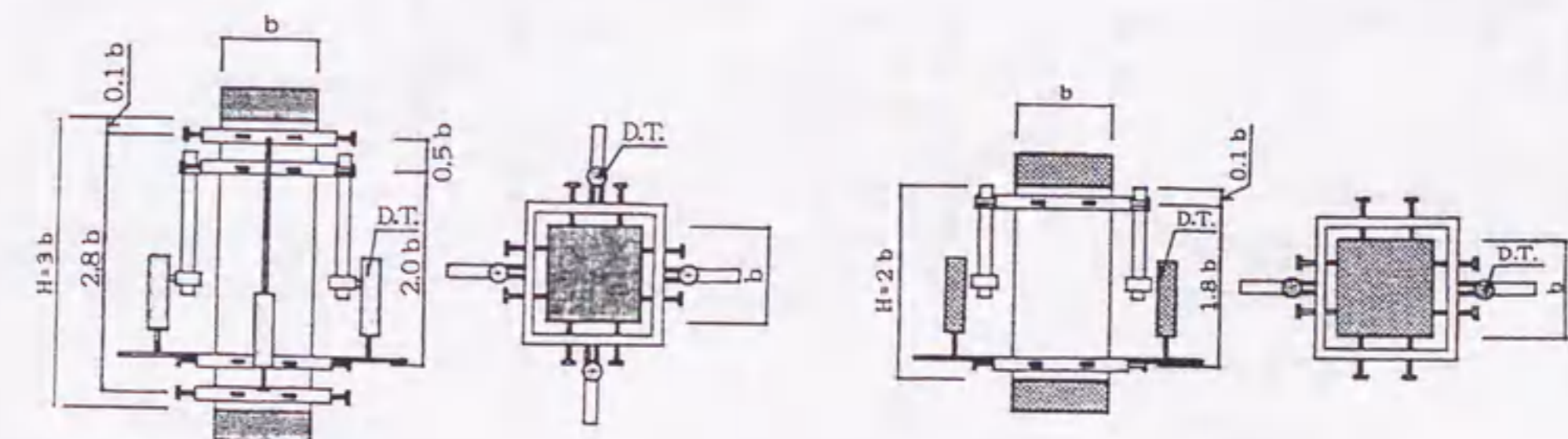
図-3.5.1 コンクリート角柱体の寸法 (H/b=3)



(a) H/b=3

(b) H/b=2

図-3.5.2 帯筋の配置



(a) H/b=3 (∠o=2b および 2.8b)

(b) H/b=2 (∠o=1.8b)

図-3.5.3 ひずみの測定方法



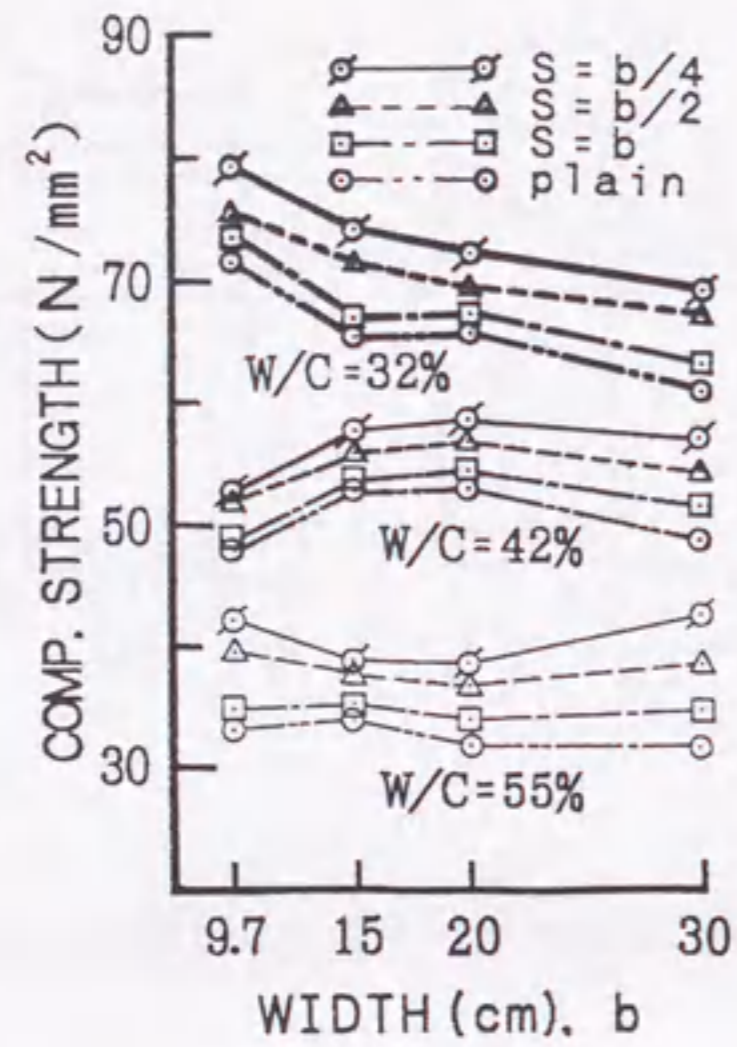


図-3.5.4 圧縮強度における寸法効果に及ぼす水セメント比の影響

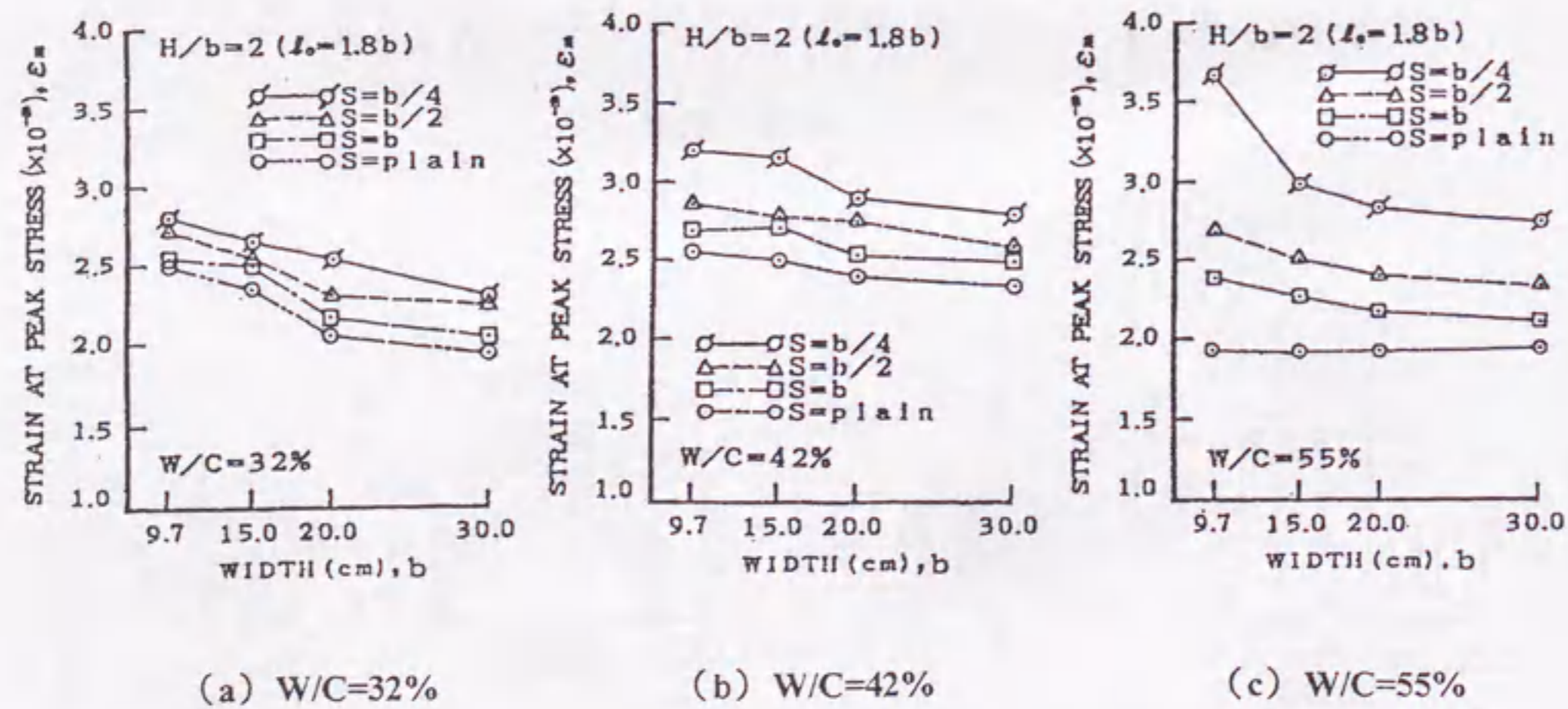
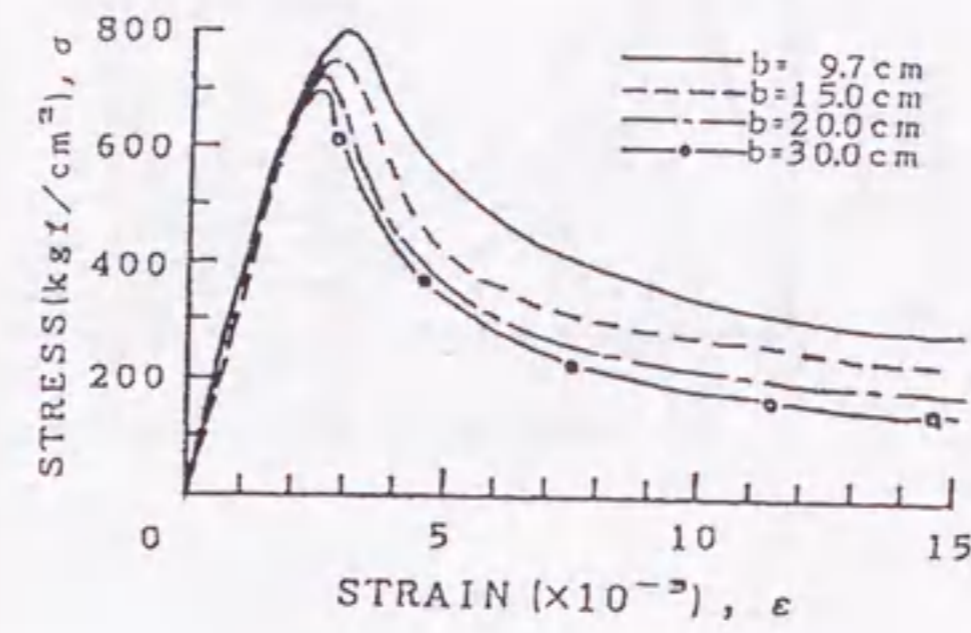
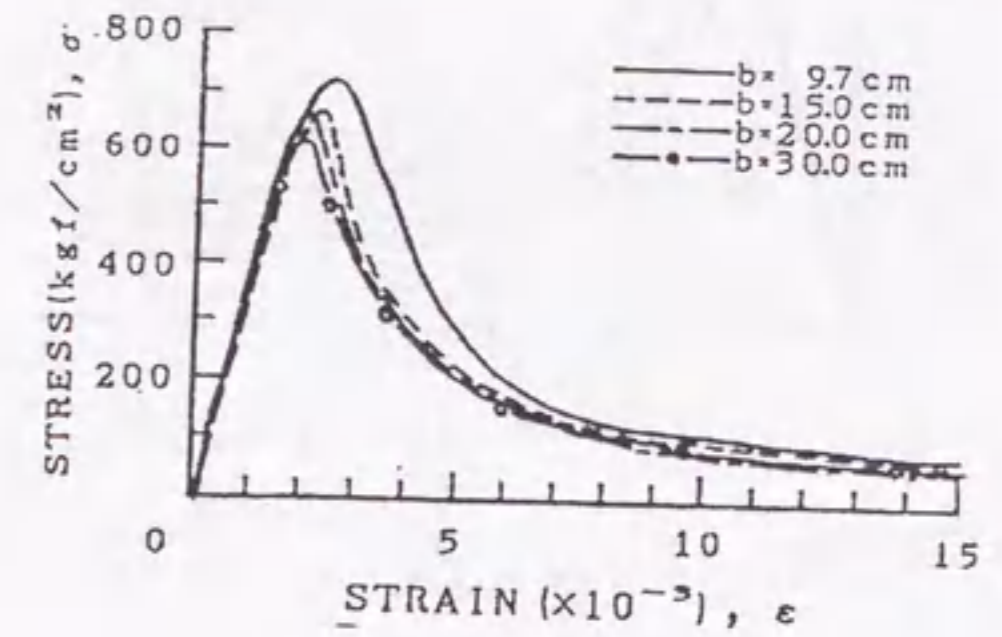


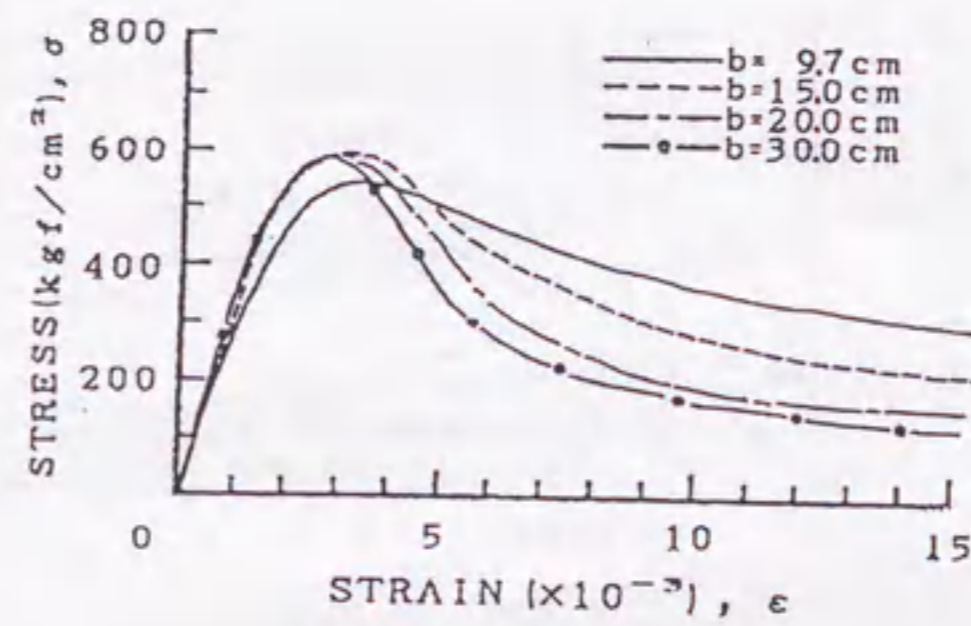
図-3.5.5  $\epsilon_m$  における寸法効果に及ぼす帯筋のピッチの影響 ( $H/b=2$ 、 $\lambda_o=1.8b$ )



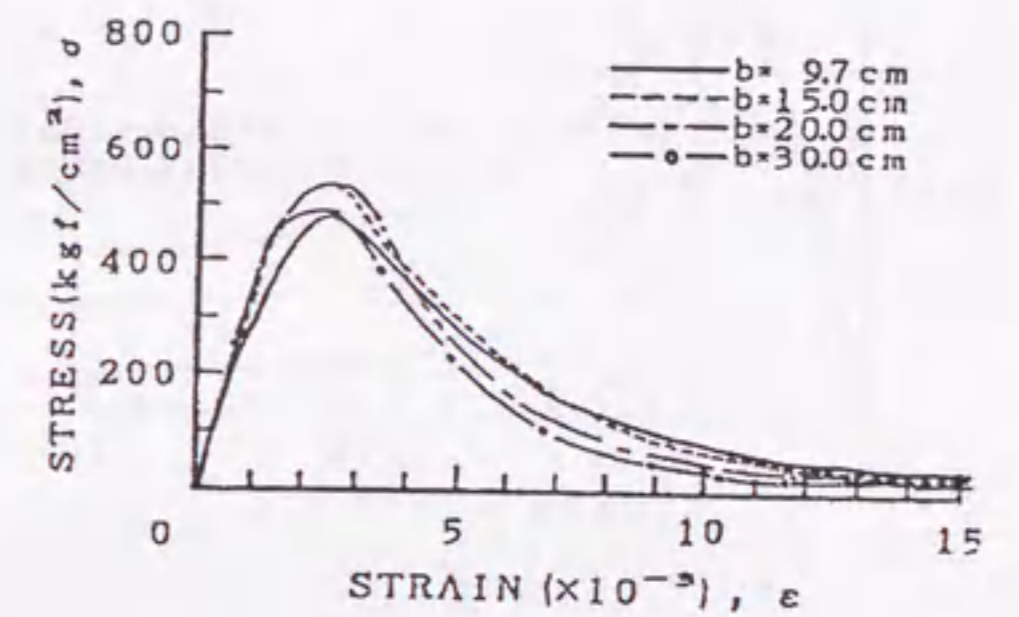
(a) W/C=32%



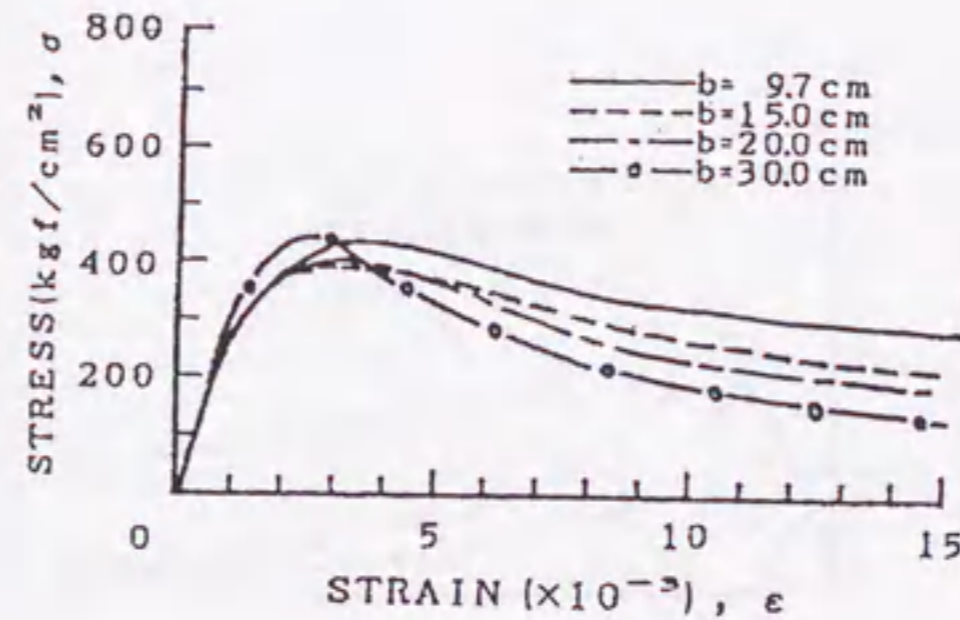
(a) W/C=32%



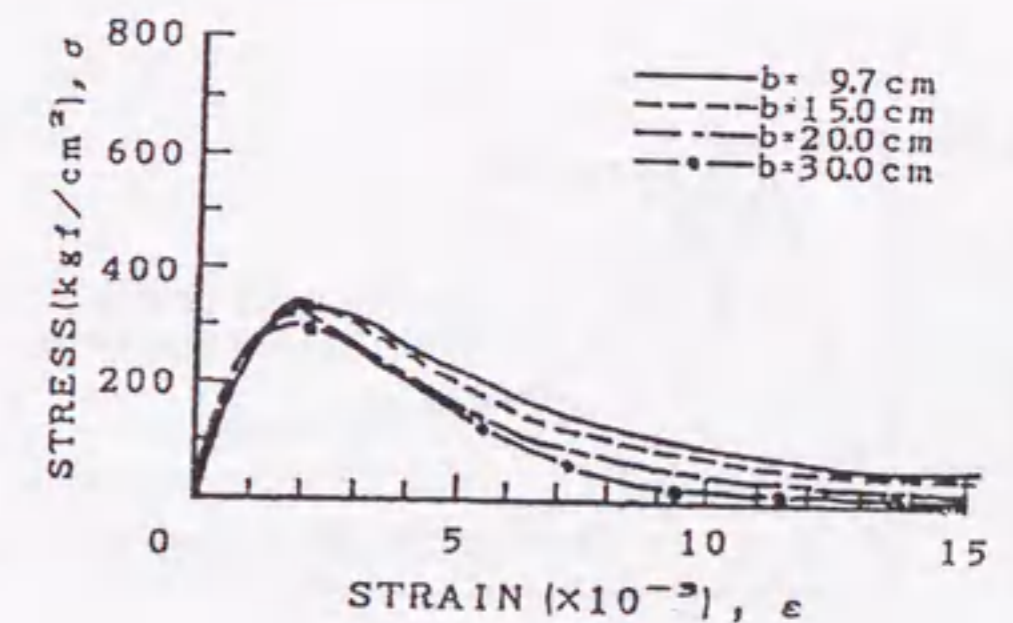
(b) W/C=42%



(b) W/C=42%



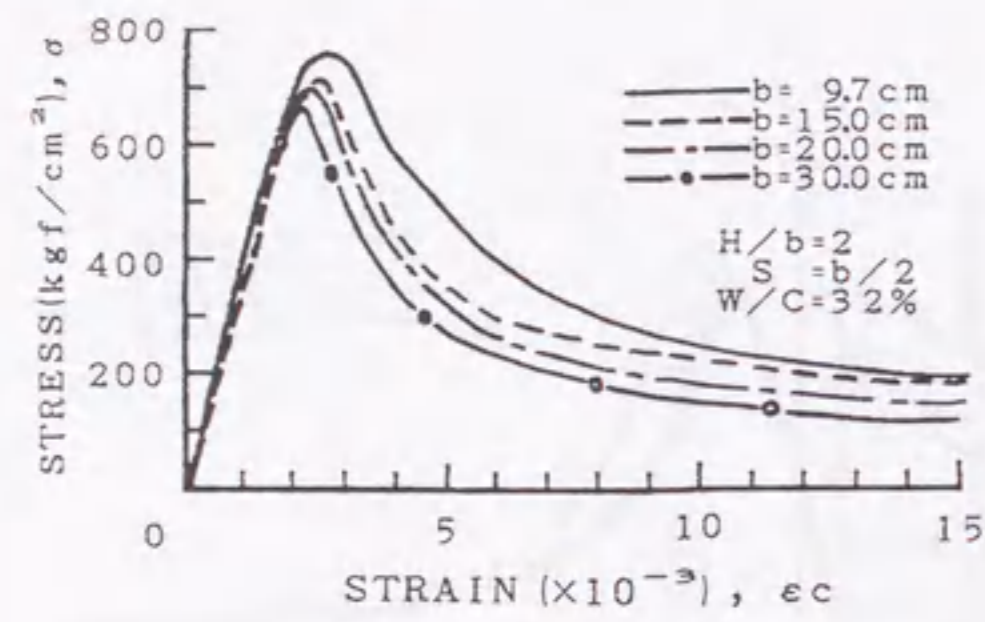
(c) W/C=55%



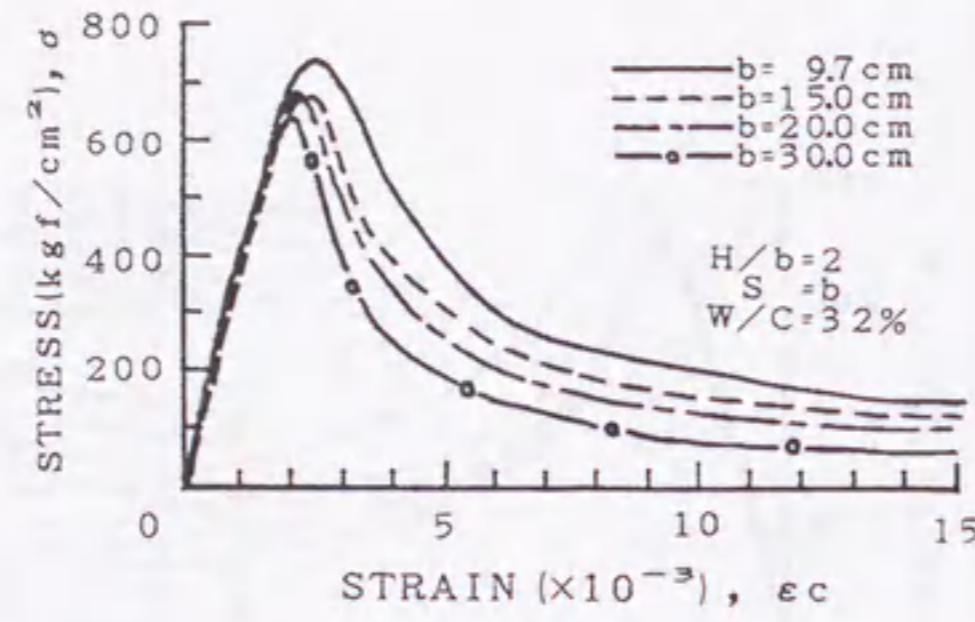
(c) W/C=55%

図-3.5.6 応力-ひずみ曲線における寸法効果 図-3.5.7 応力-ひずみ曲線における寸法効果 ( $H/b=2$ 、 $S=b/4$ ) ( $H/b=2$ 、plain)



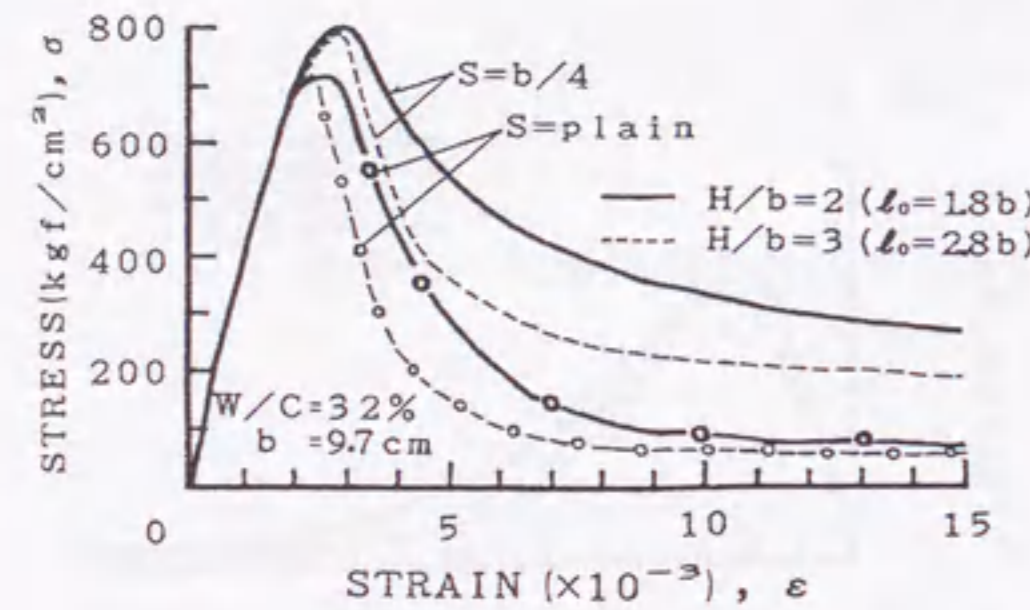


(a)  $S=b/2$

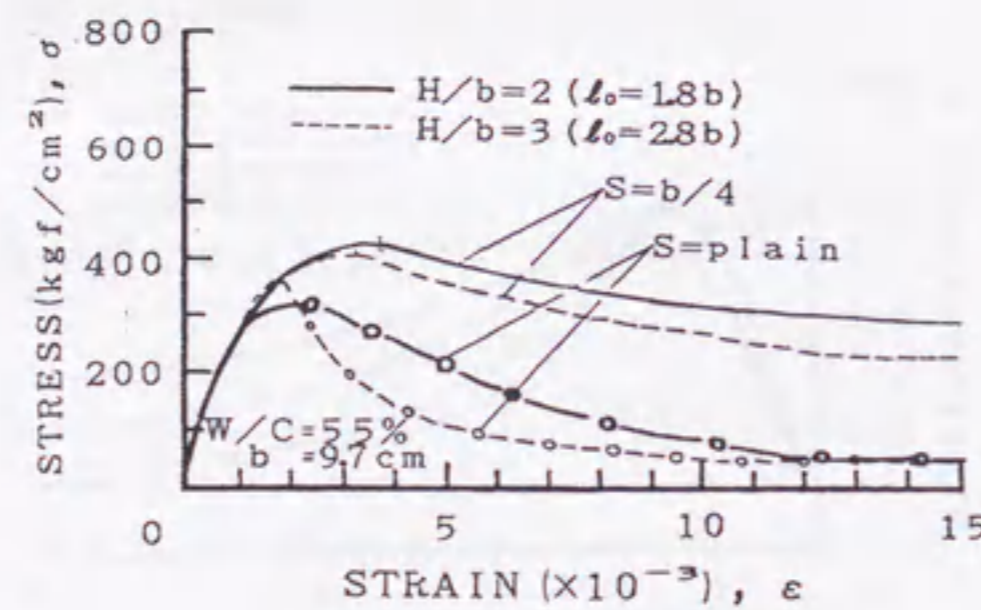


(b)  $S=b$

図-3.5.8 応力-ひずみ曲線における寸法効果 ( $H/b=2$ 、 $W/C=32\%$ )

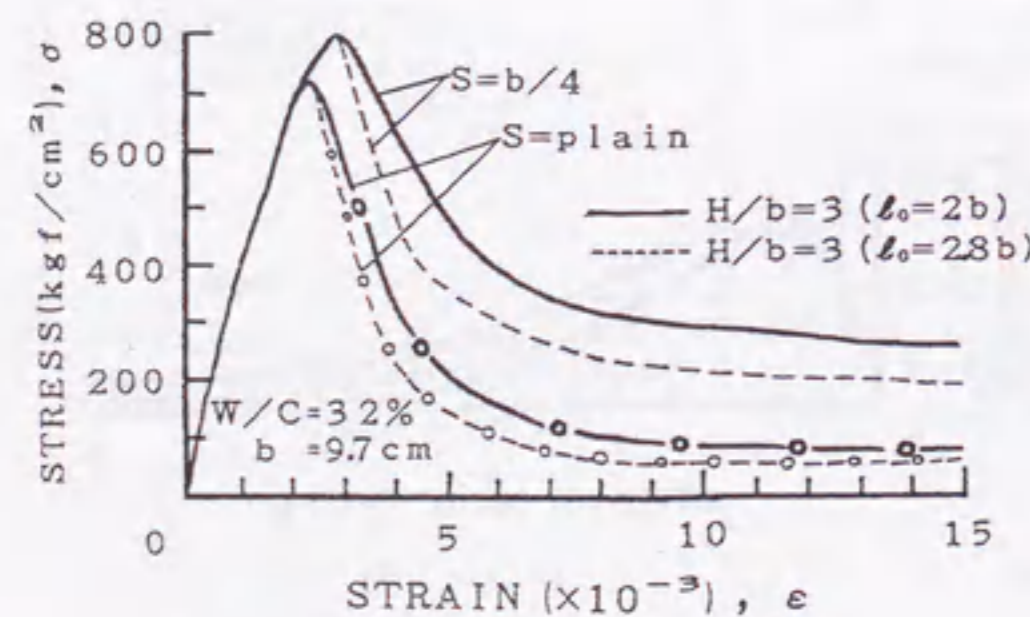


(a)  $W/C=32\%$

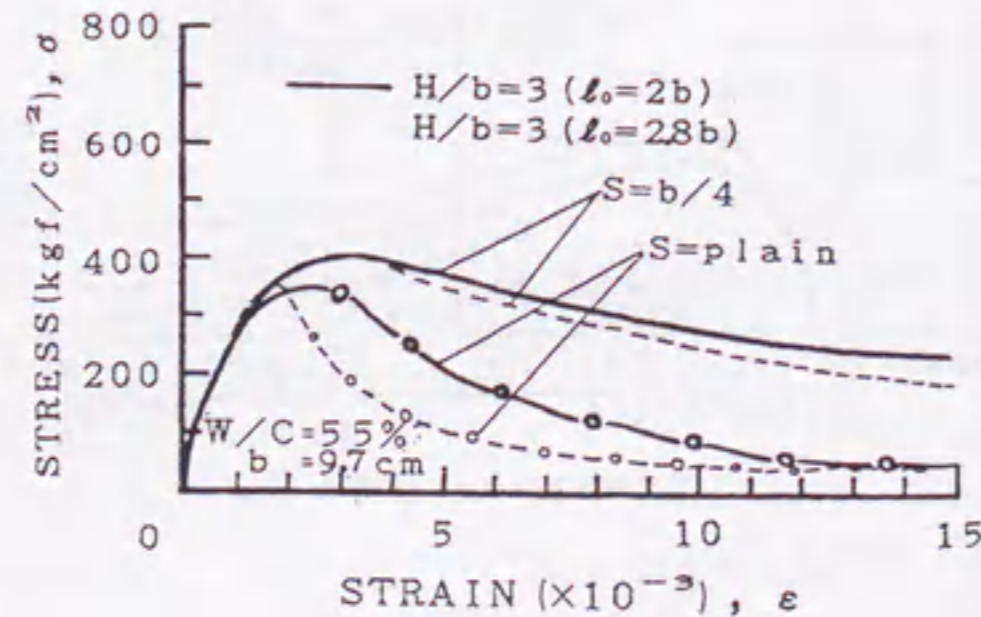


(b)  $W/C=55\%$

図-3.5.9 応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体の高さ-辺長比 ( $H/b$ ) の影響 ( $b=9.7\text{cm}$ )

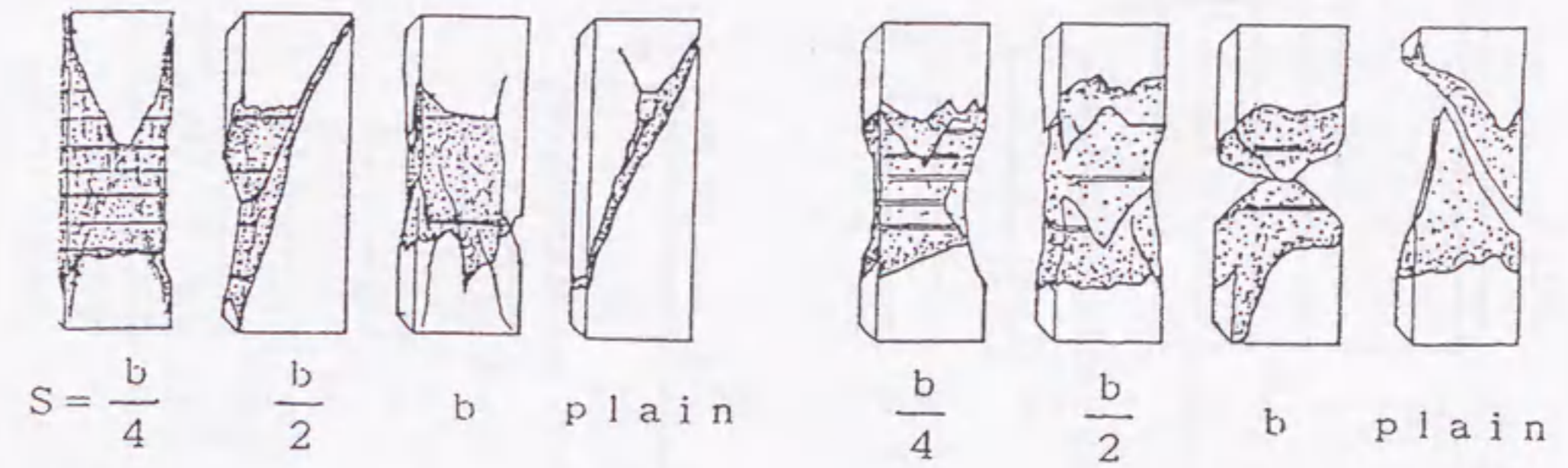


(a)  $W/C=32\%$



(b)  $W/C=55\%$

図-3.5.10 応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ測定長 ( $l_0$ ) の影響 ( $H/b=3$ 、 $b=9.7\text{cm}$ )



(a)  $W/C=32\%$

(b)  $W/C=55\%$

図-3.5.11 破壊状況の一例 ( $b=20\text{cm}$  の場合)



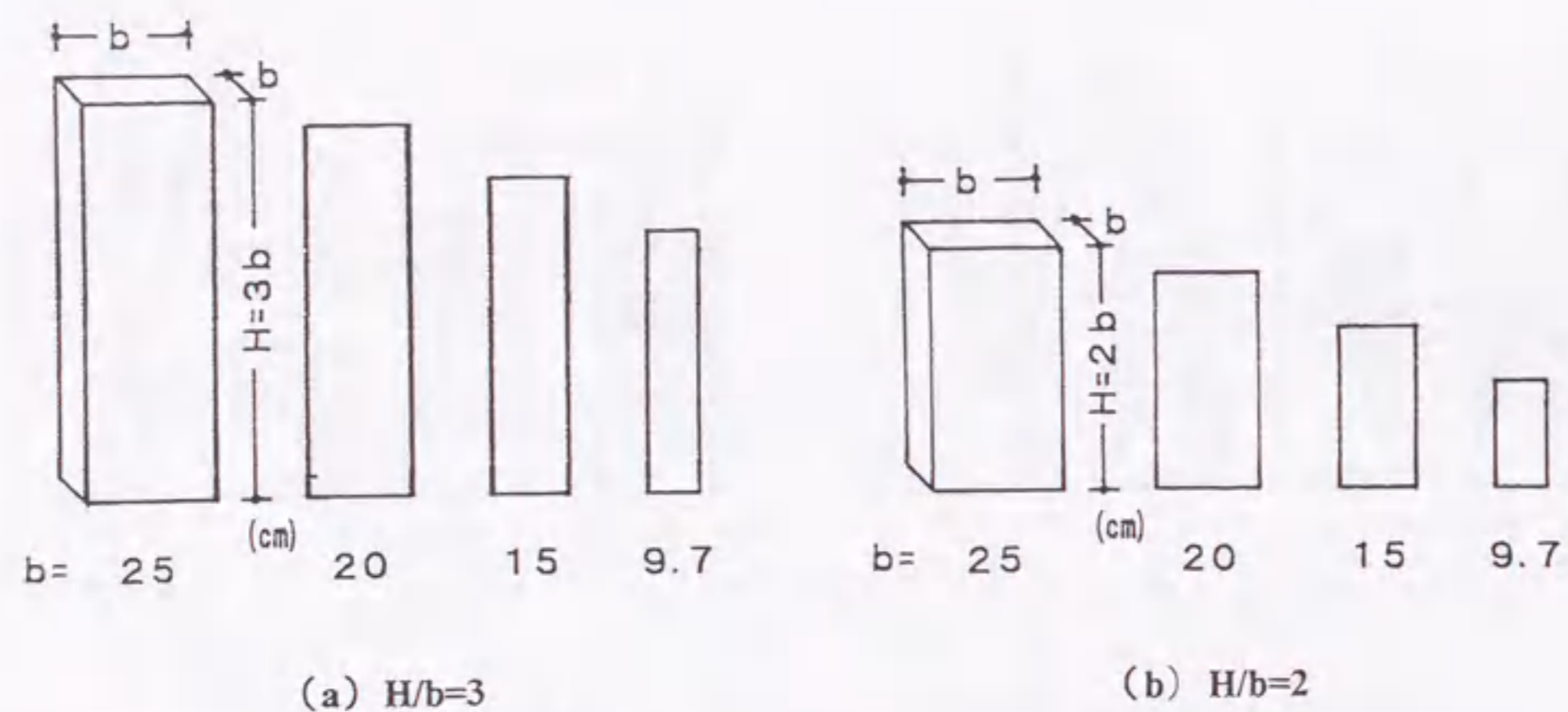


図-3.6.1 コンクリート角柱体の断面寸法

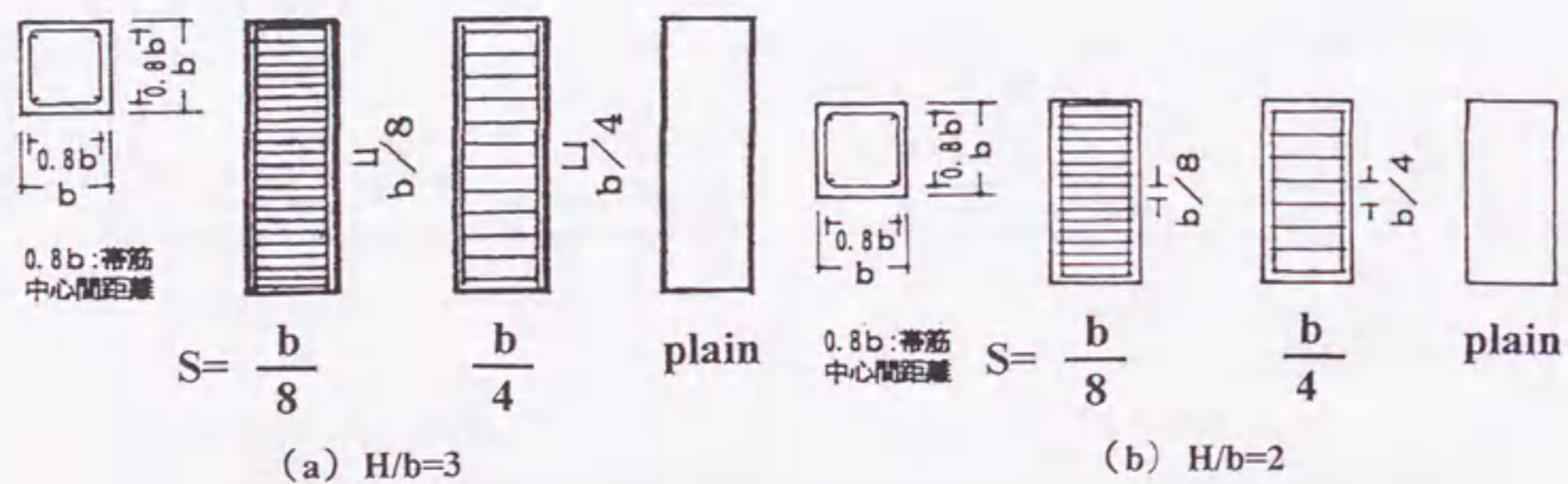


図-3.6.2 帯筋の配置 (H/b=3)

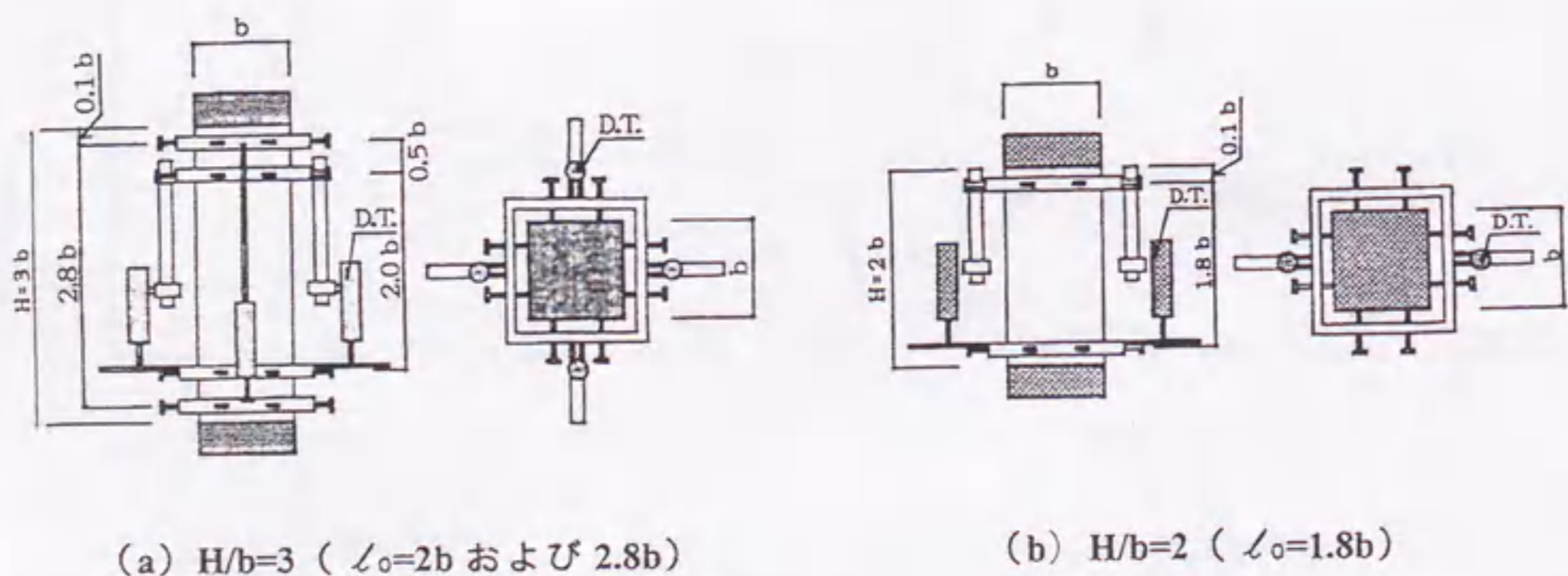
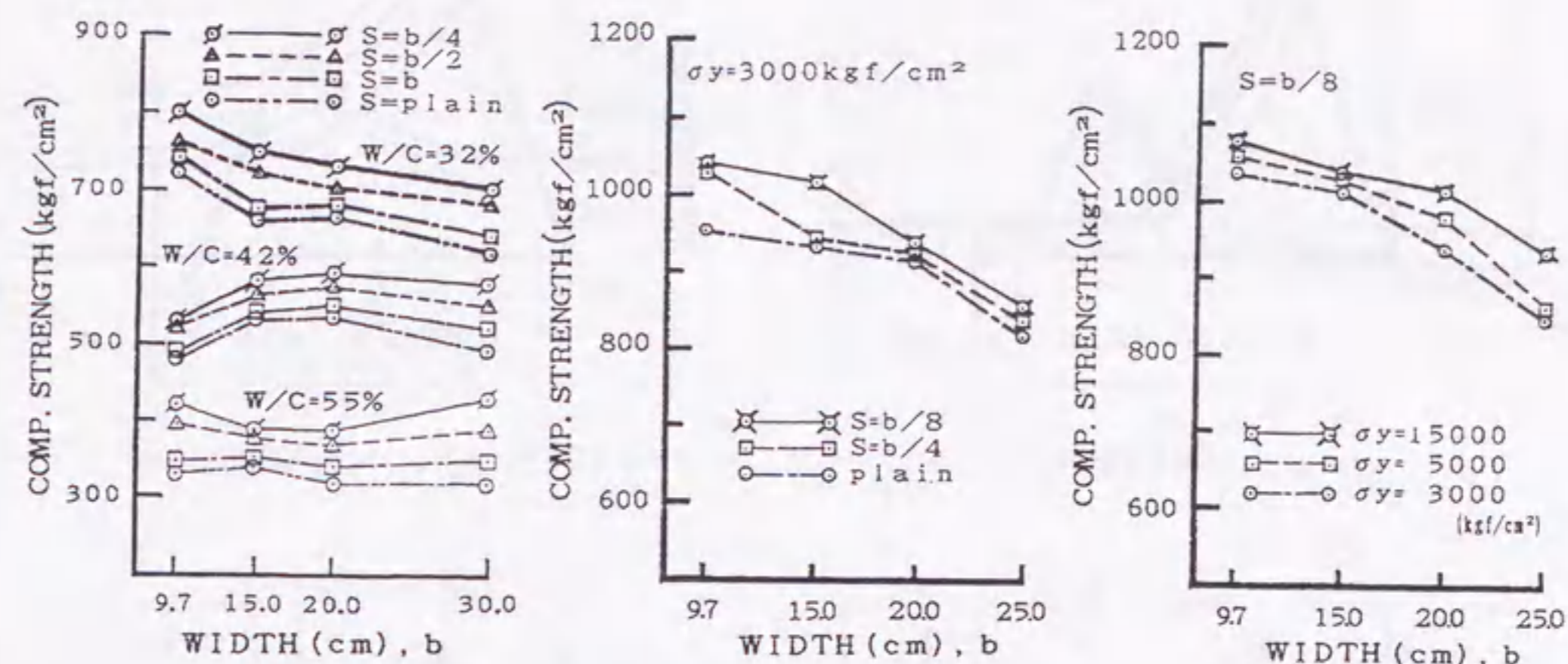


図-3.6.3 ひずみの測定方法

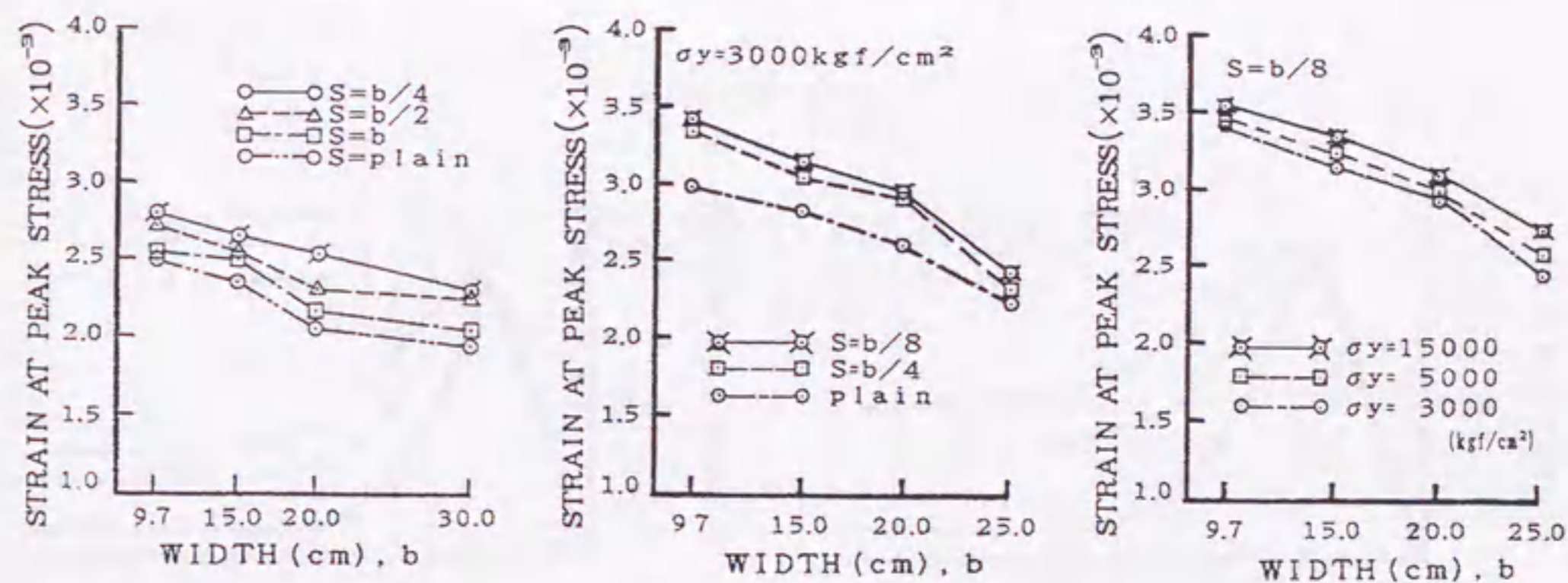


(a) 帯筋ピッチおよび水セメント比の影響 (図-3.5.4 再掲)

(b) 帯筋のピッチの影響

(c) 帯筋の降伏強度の影響

図-3.6.4 圧縮強度における寸法効果 (H/b=2)



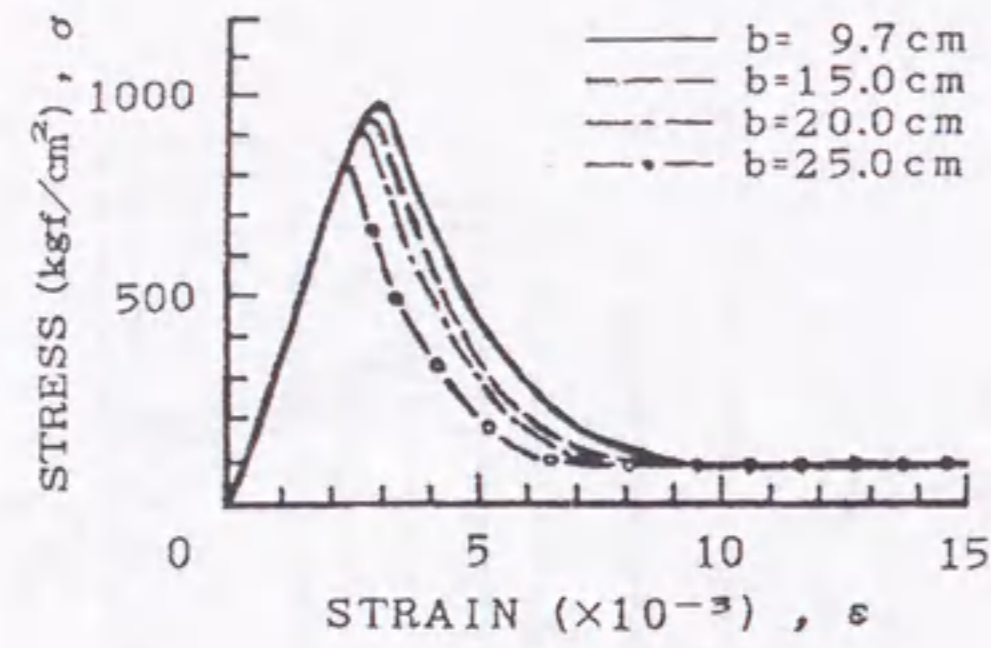
(a) 帯筋ピッチの影響 (W/C=32%、図-3.5.5(a)再掲)

(b) 帯筋ピッチの影響 (W/C=25%)

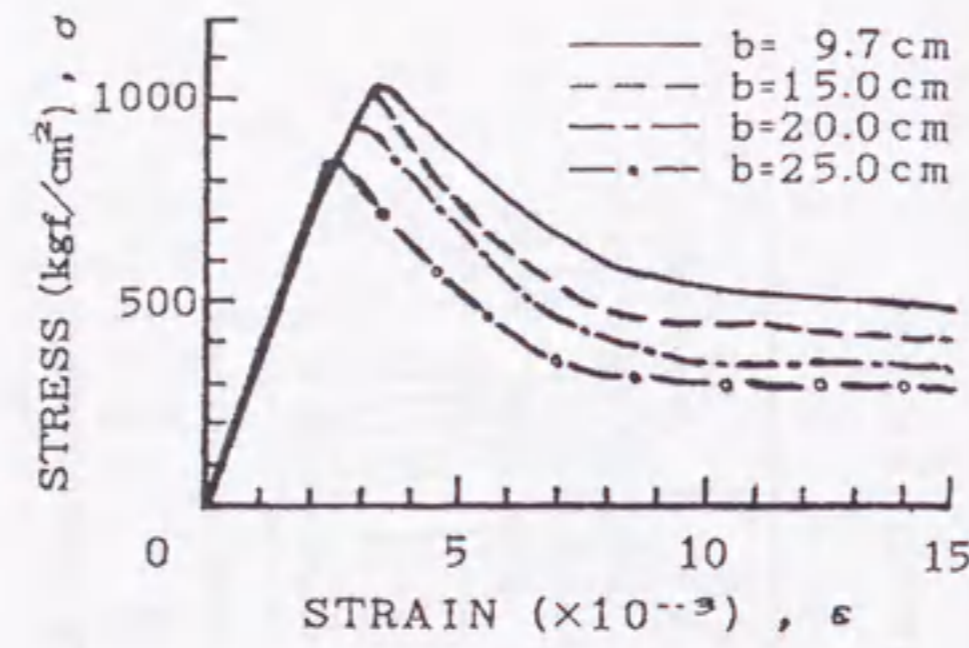
(c) 帯筋の降伏強度の影響 (W/C=25%)

図-3.6.5  $\epsilon_f$  と試験体寸法の関係 (H/b=2、 $l_0=1.8b$ )

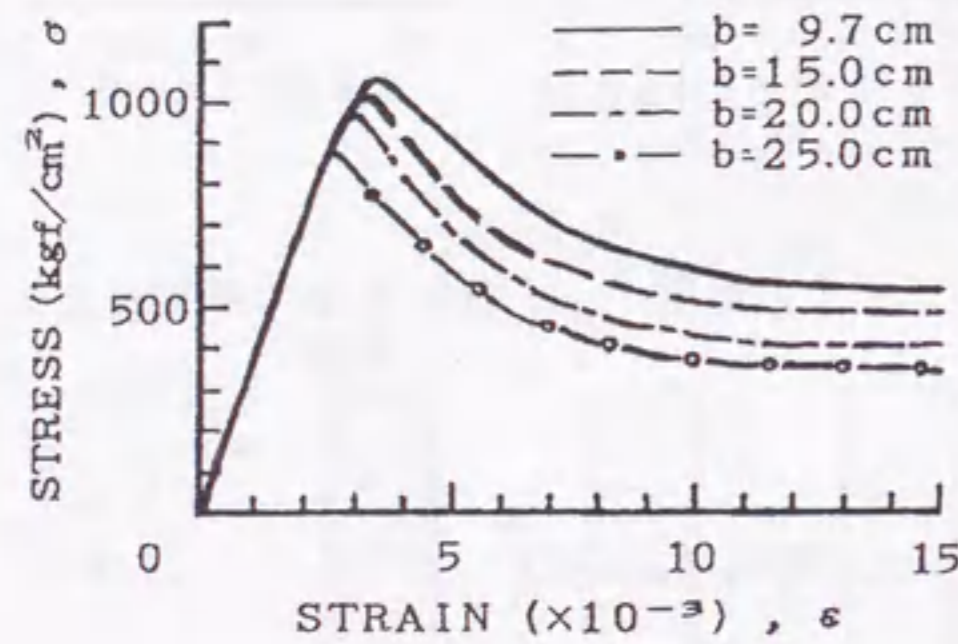




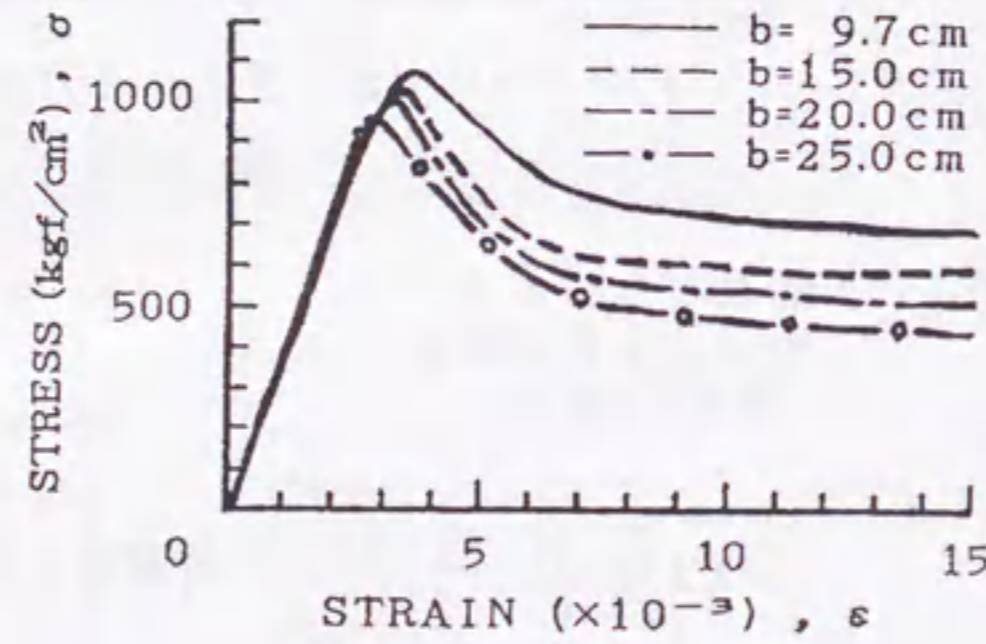
(a) plain



(b)  $S=b/8, \sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$

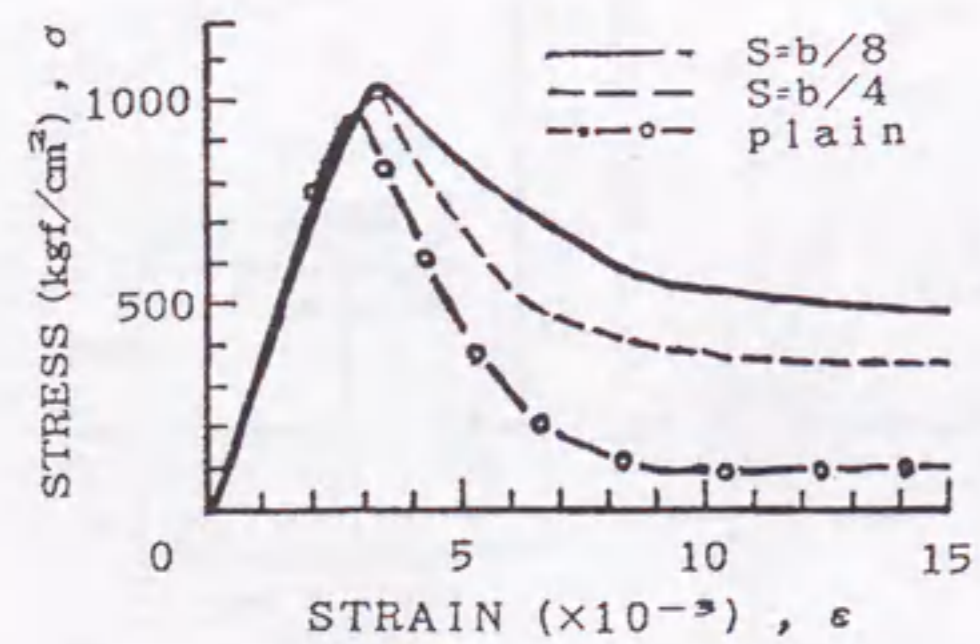


(c)  $S=b/8, \sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$

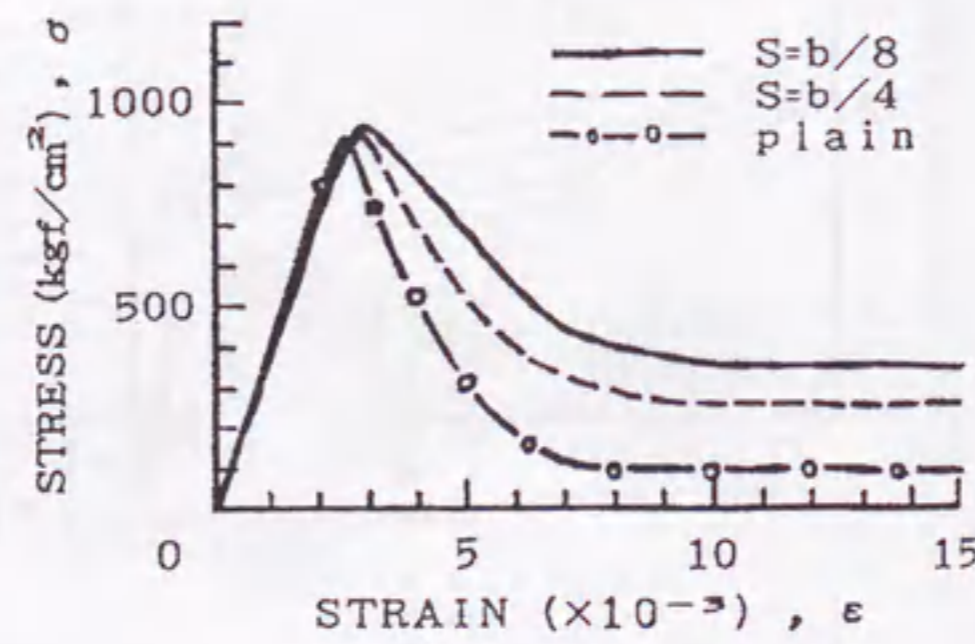


(d)  $S=b/8, \sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$

図-3.6.6 応力-ひずみ曲線における寸法効果 ( $H/b=2, \ell_0=1.8b$ )

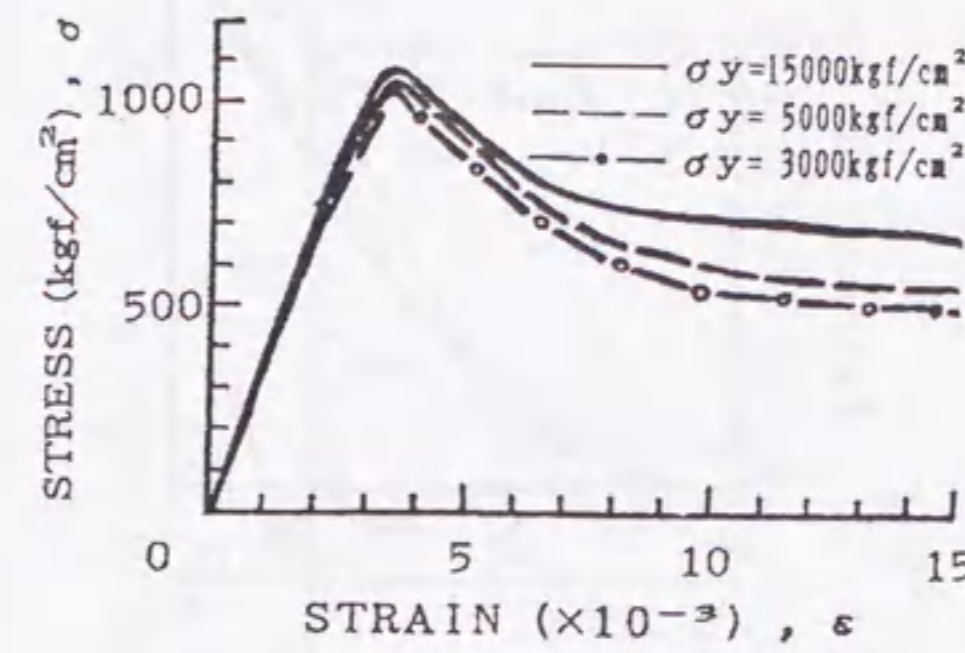


(a)  $b=9.7\text{cm}$

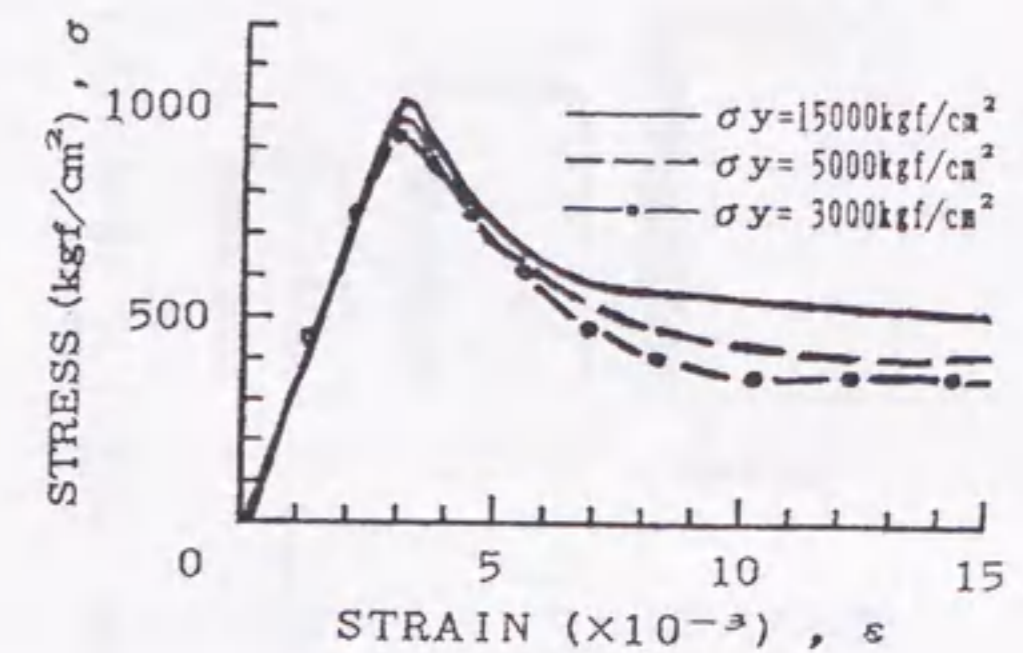


(b)  $b=20\text{cm}$

図-3.6.7 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋のピッチの影響 ( $H/b=2, \ell_0=1.8b, \sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



(a)  $b=9.7\text{cm}$



(b)  $b=20\text{cm}$

図-3.6.8 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋の降伏強度の影響 ( $H/b=2, \ell_0=1.8b, S=b/8$ )

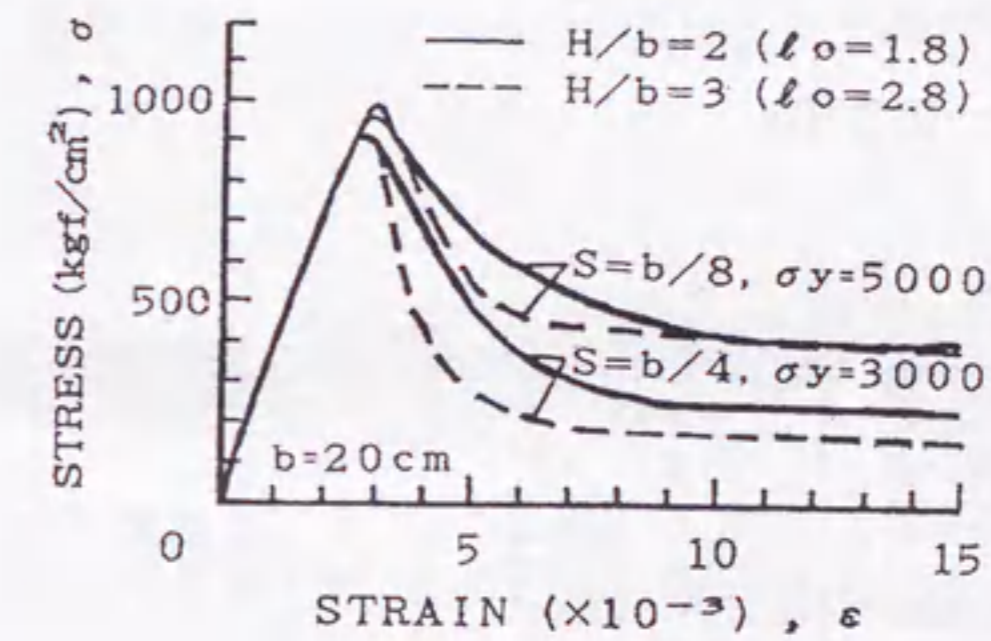


図-3.6.9 試験体の高さ-辺長比 ( $H/b$ ) の影響 ( $b=20\text{cm}$ )



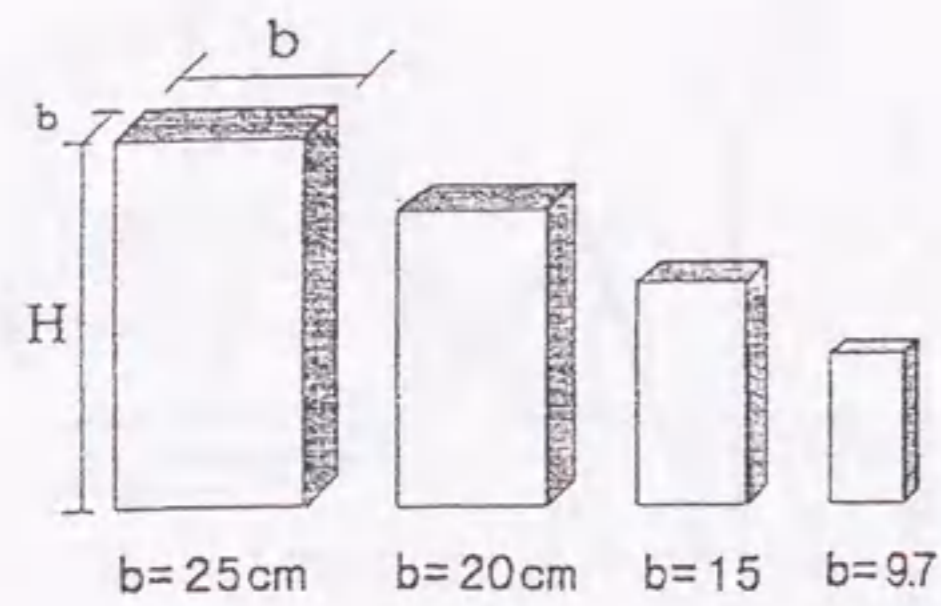
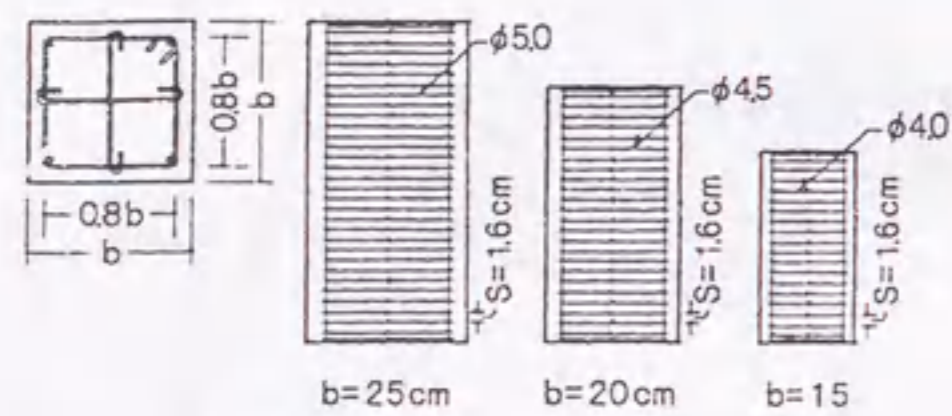
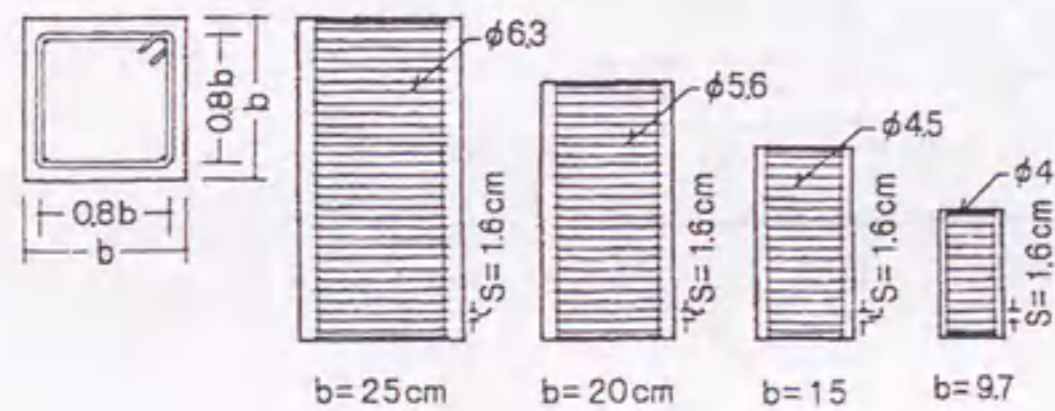


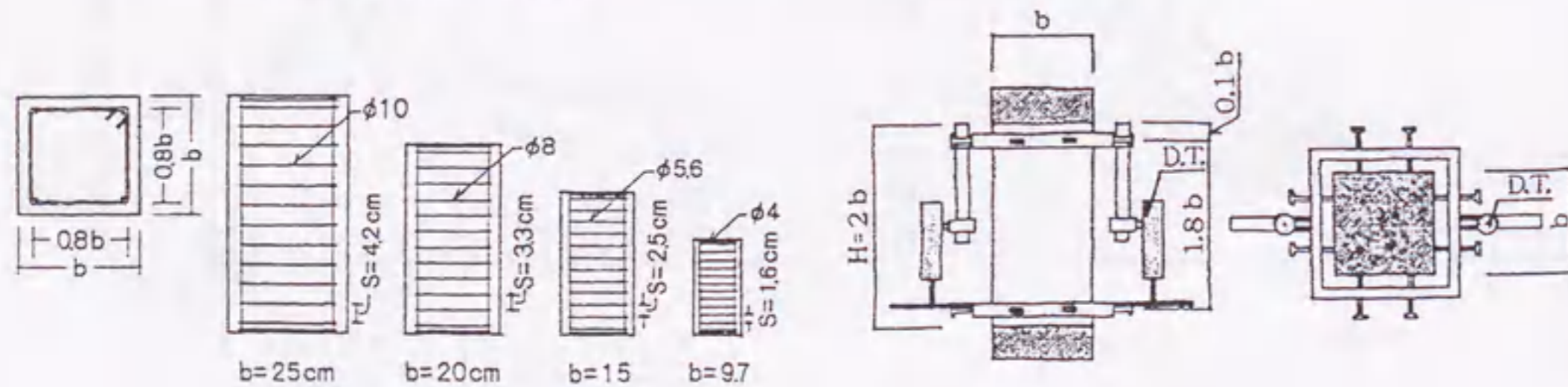
図-3.7.1 コンクリート角柱体の寸法



(c) 同一ピッチ-田型帯筋



(b) 同一ピッチ-口型帯筋



(a) 比例ピッチ-口型帯筋

図-3.7.2 帯筋の配置

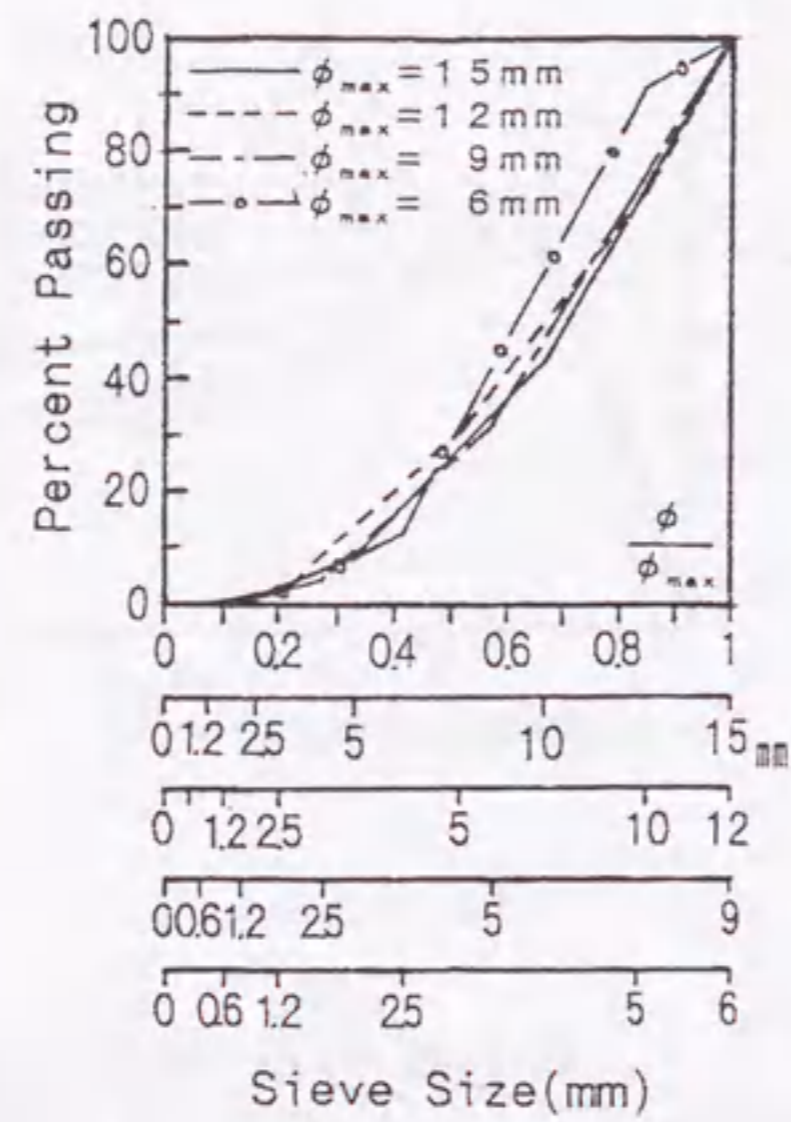
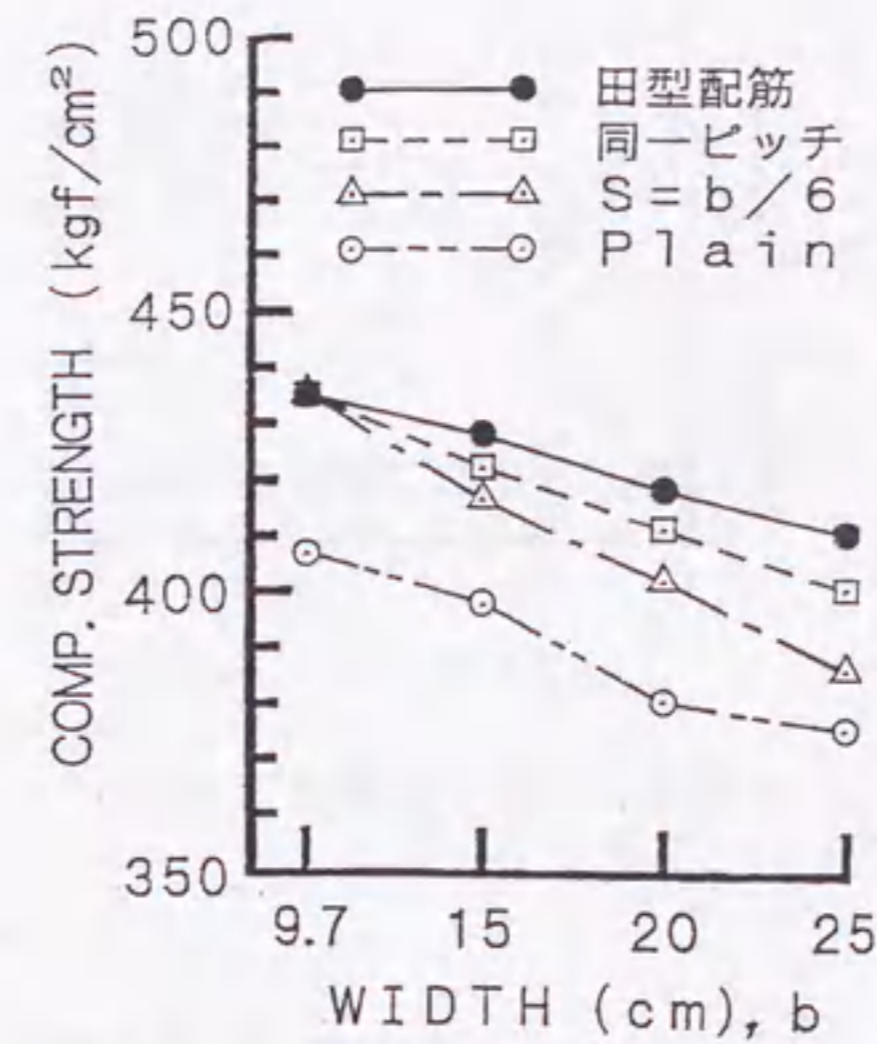
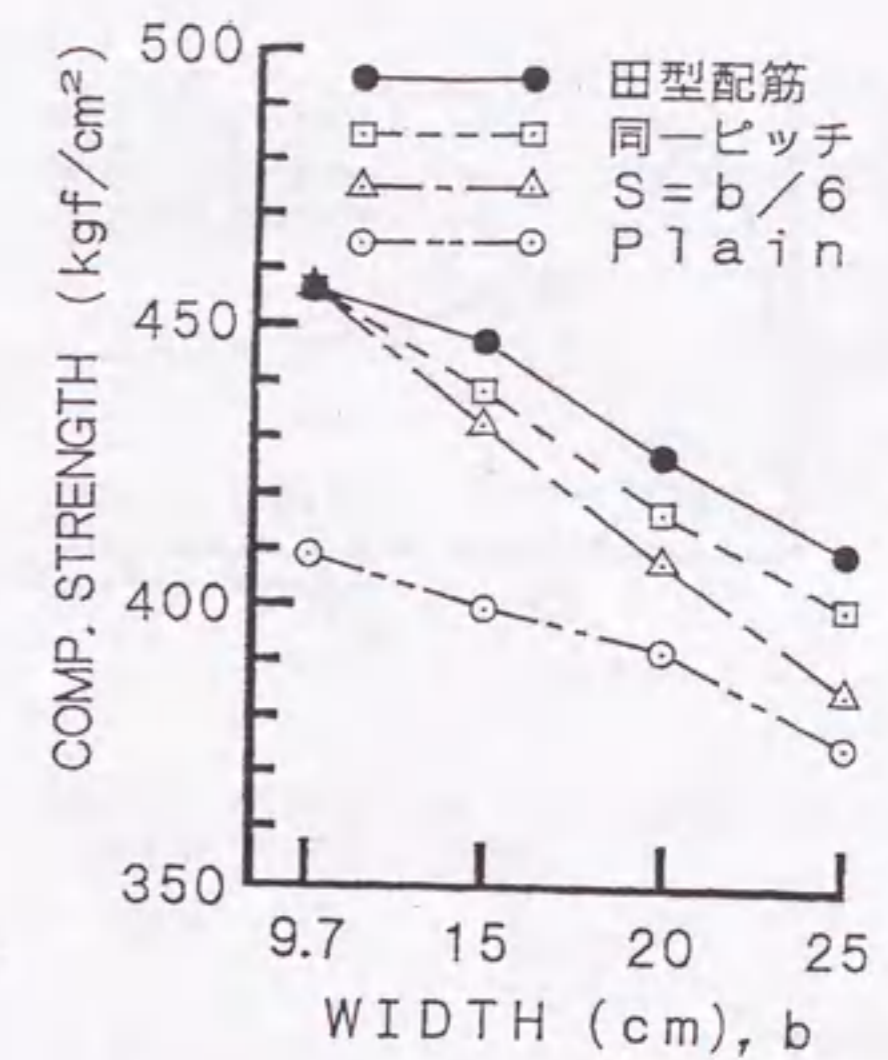


図-3.7.3 粗骨材の粒度分布曲線

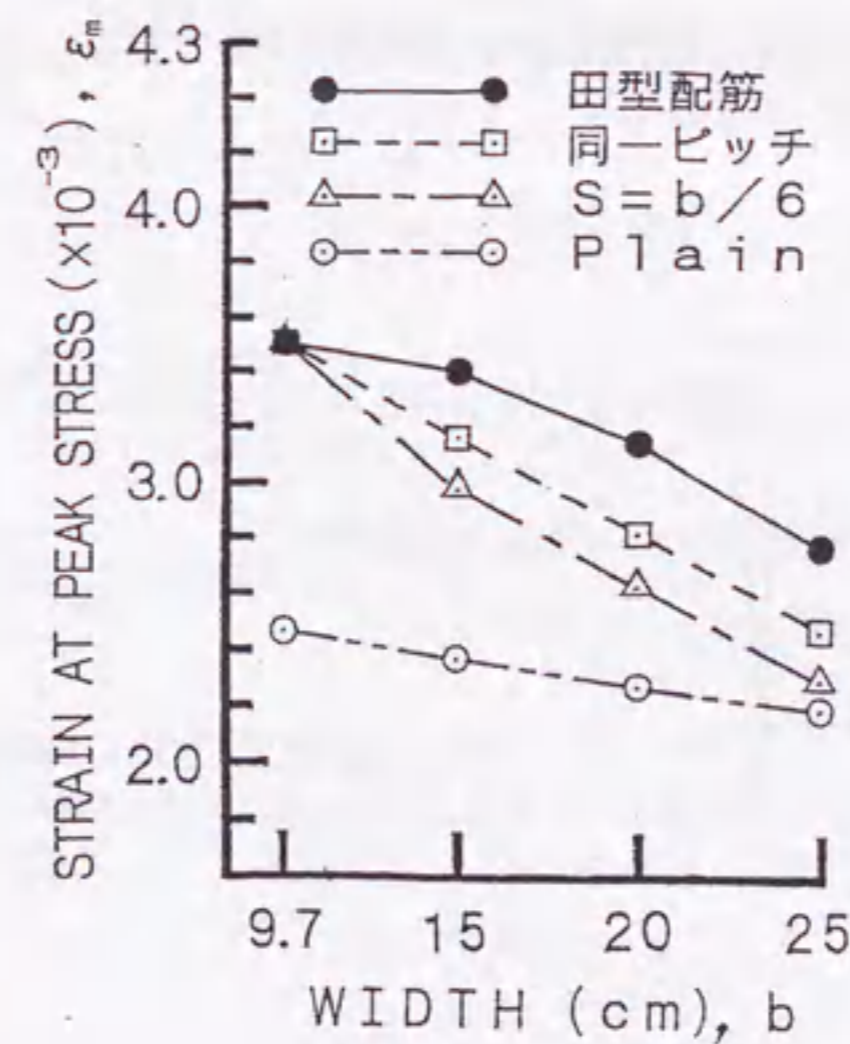


(a) 普通コンクリート

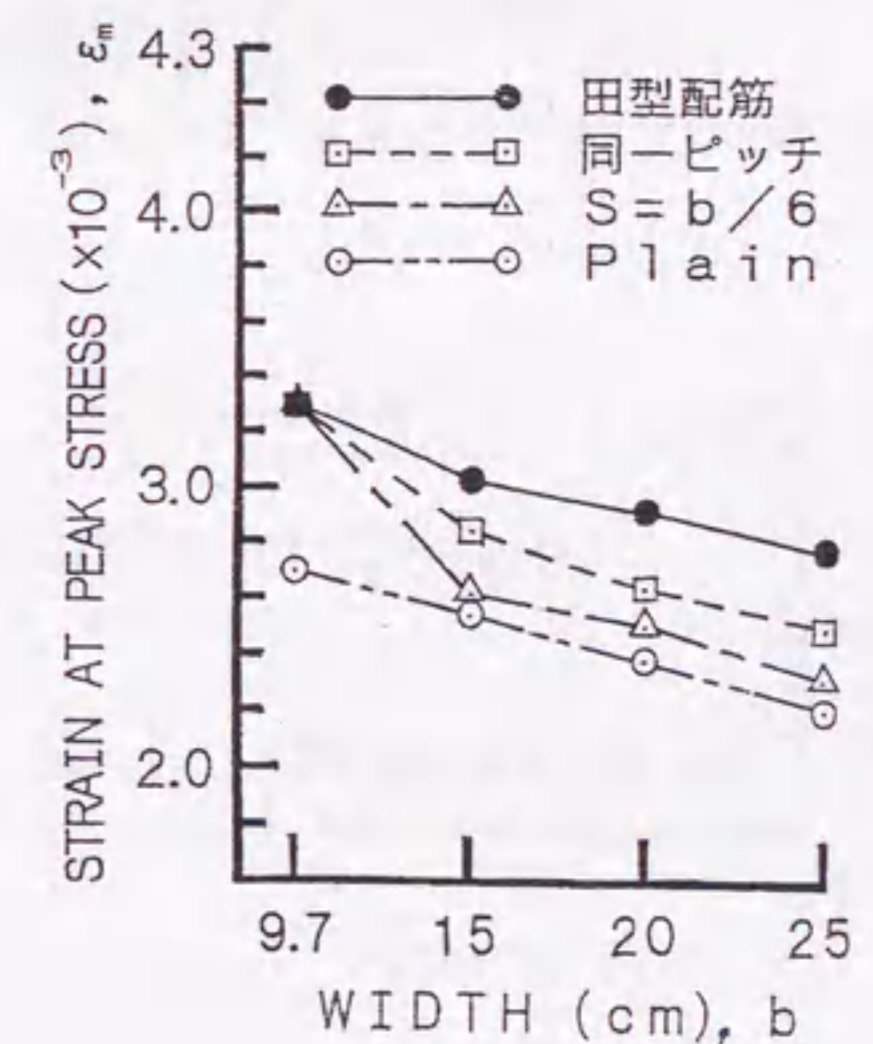


(b) マイクロコンクリート

図-3.7.5 圧縮強度と試験体寸法の関係に及ぼす帯筋種類の影響



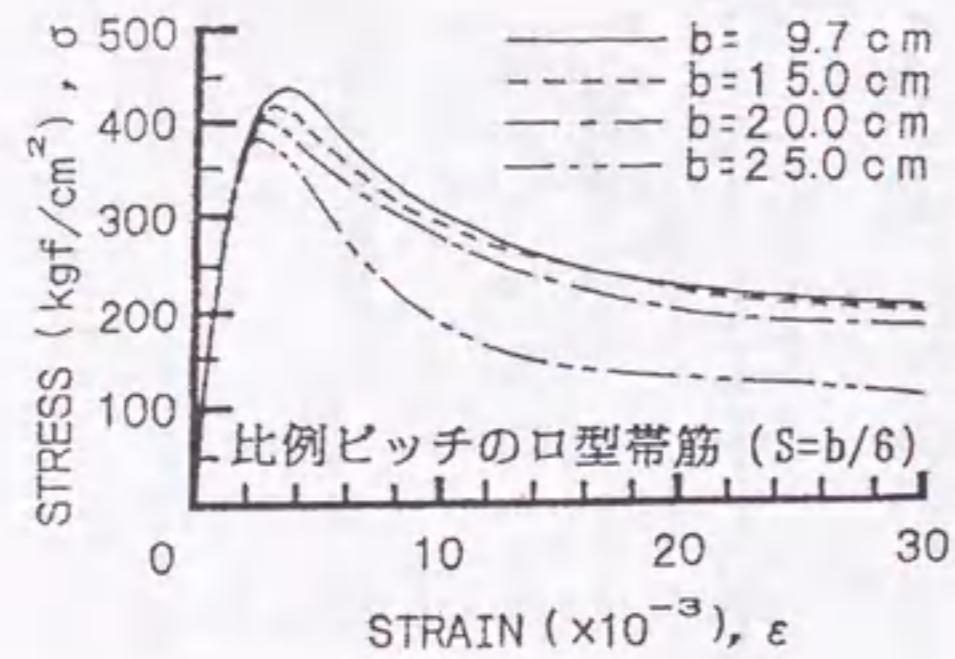
(a) 普通コンクリート



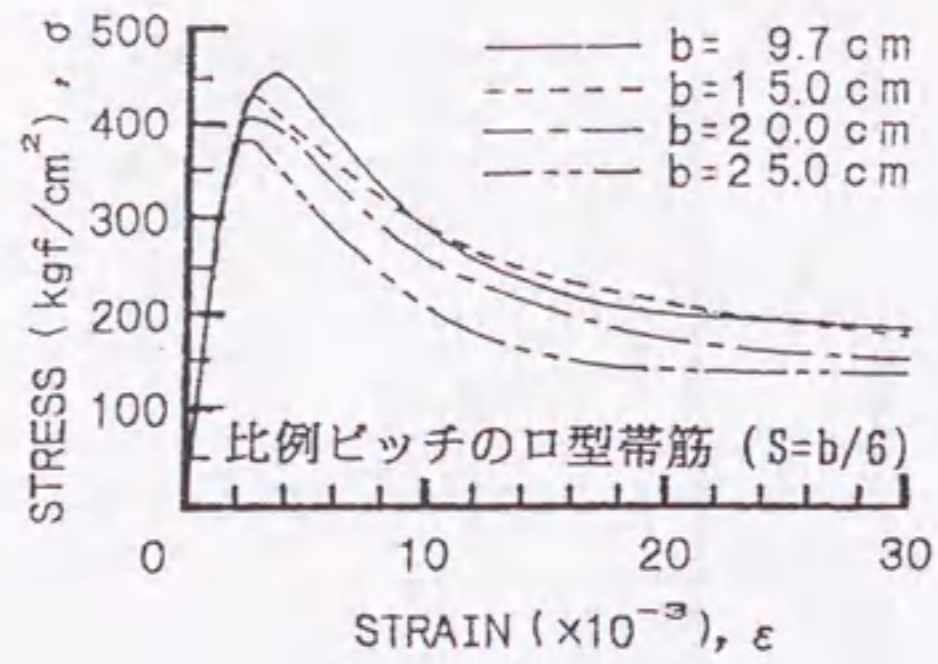
(b) マイクロコンクリート

図-3.7.6 最大応力時のひずみ(ε<sub>f</sub>)における寸法効果に及ぼす帯筋種類の影響

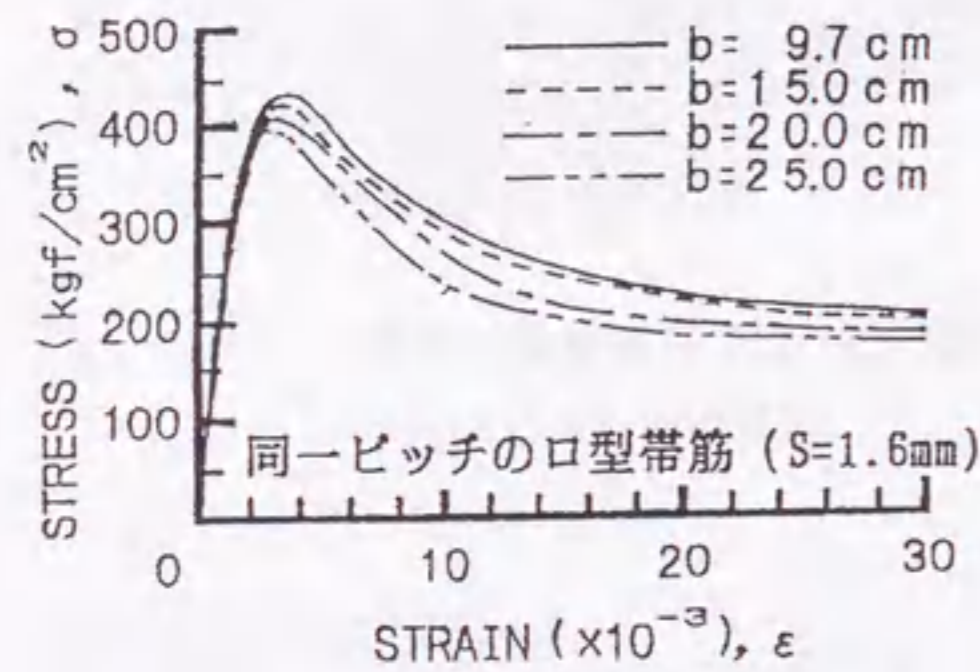




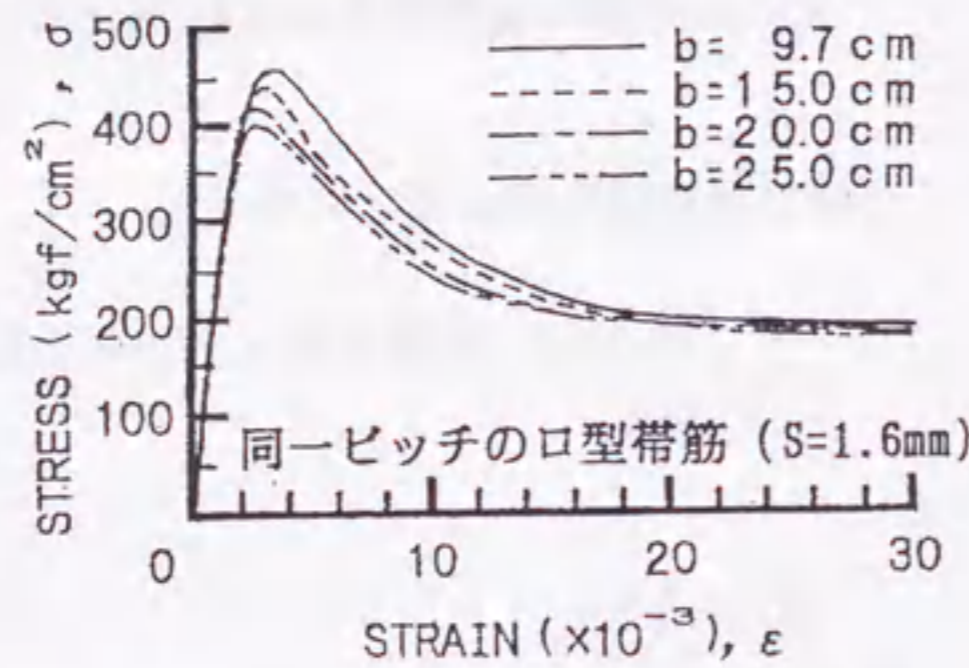
(a) 比例ピッチの口型帯筋 ( $S=b/6$ )



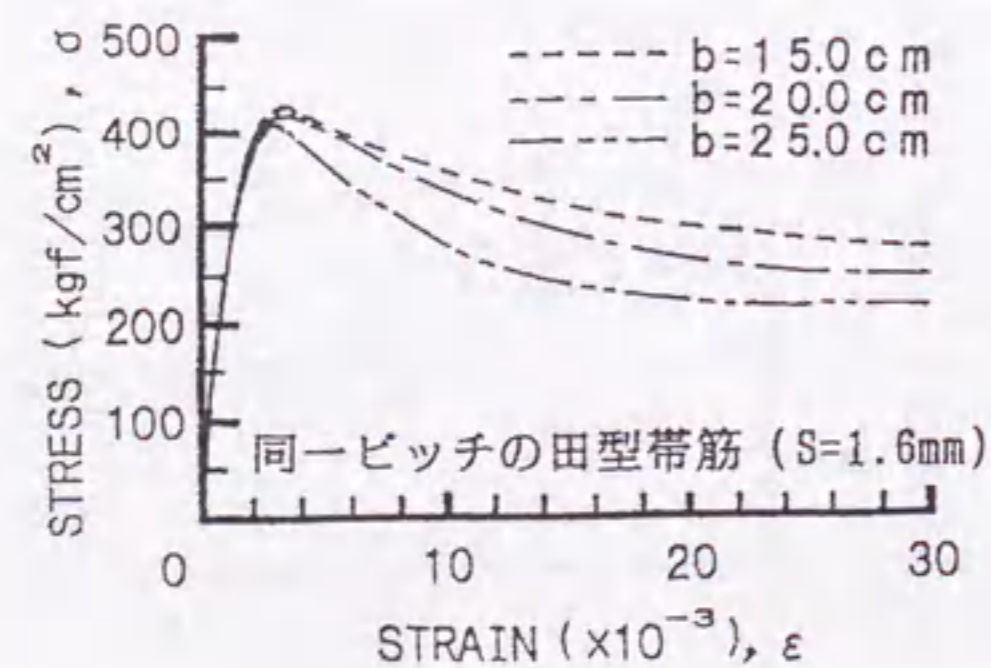
(a) 比例ピッチの口型帯筋 ( $S=b/6$ )



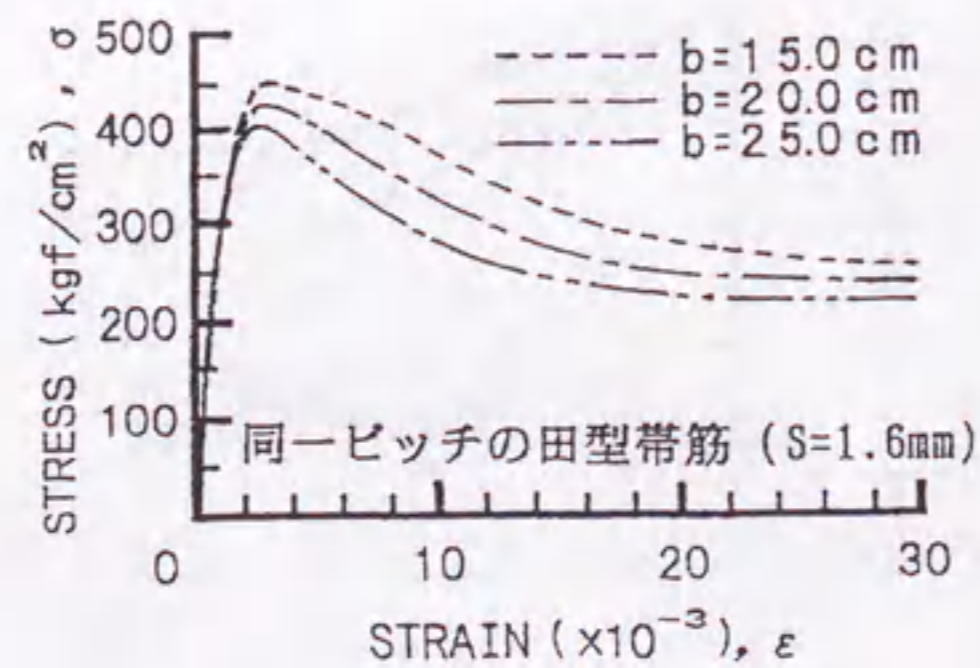
(b) 同一ピッチの口型帯筋 ( $S=1.6\text{mm}$ )



(b) 同一ピッチの口型帯筋 ( $S=1.6\text{mm}$ )



(c) 同一ピッチの田型帯筋 ( $S=1.6\text{mm}$ )



(c) 同一ピッチの田型帯筋 ( $S=1.6\text{mm}$ )

図-3.7.7 応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響 (普通コンクリート)

図-3.7.8 応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響 (マイクロコンクリート)

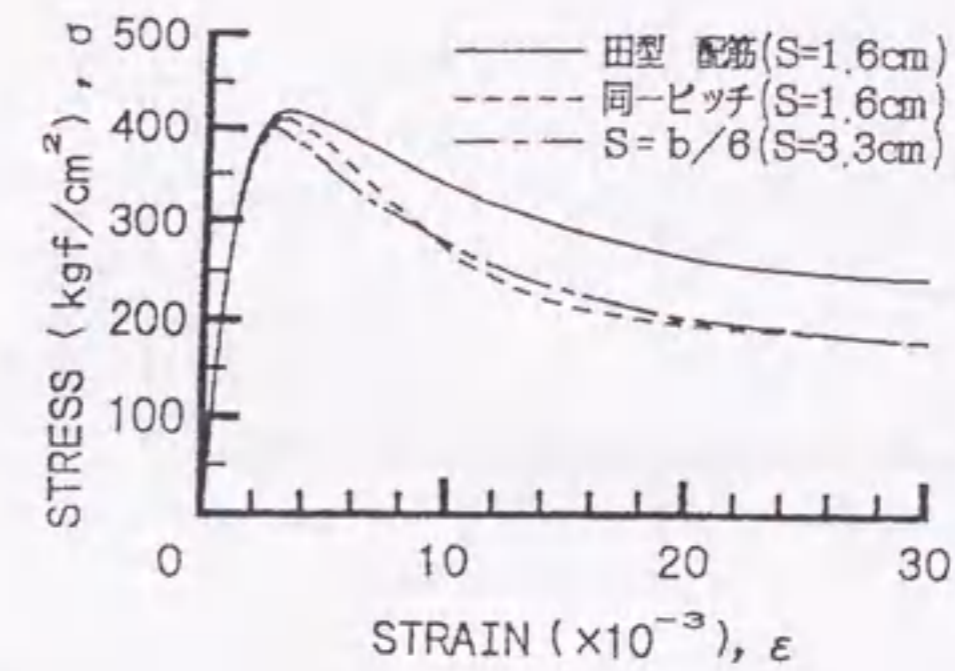
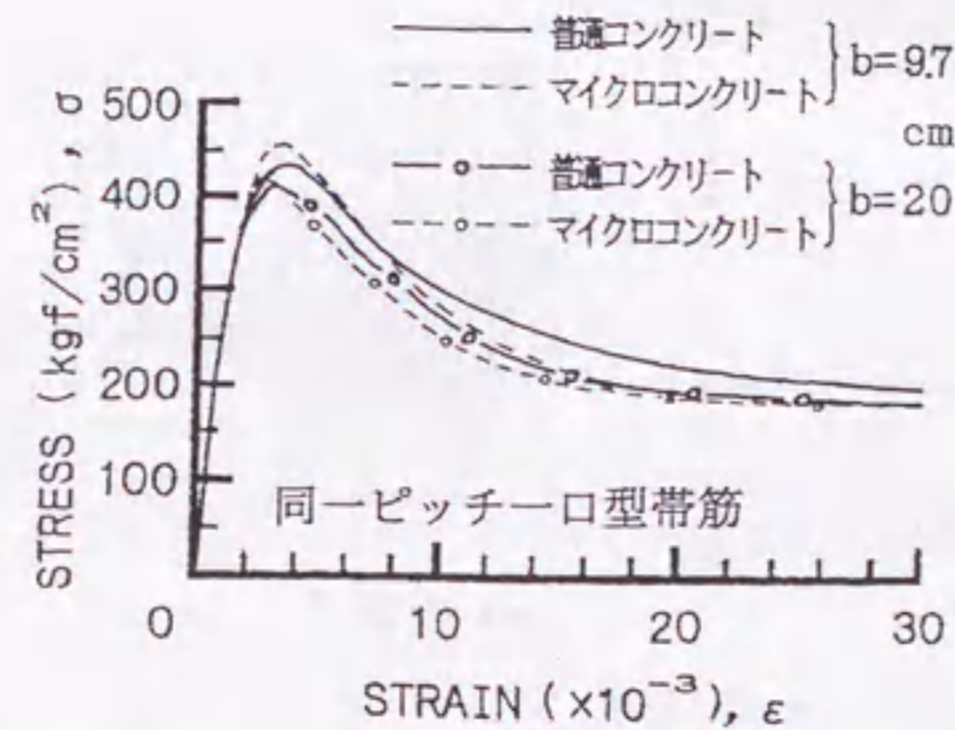
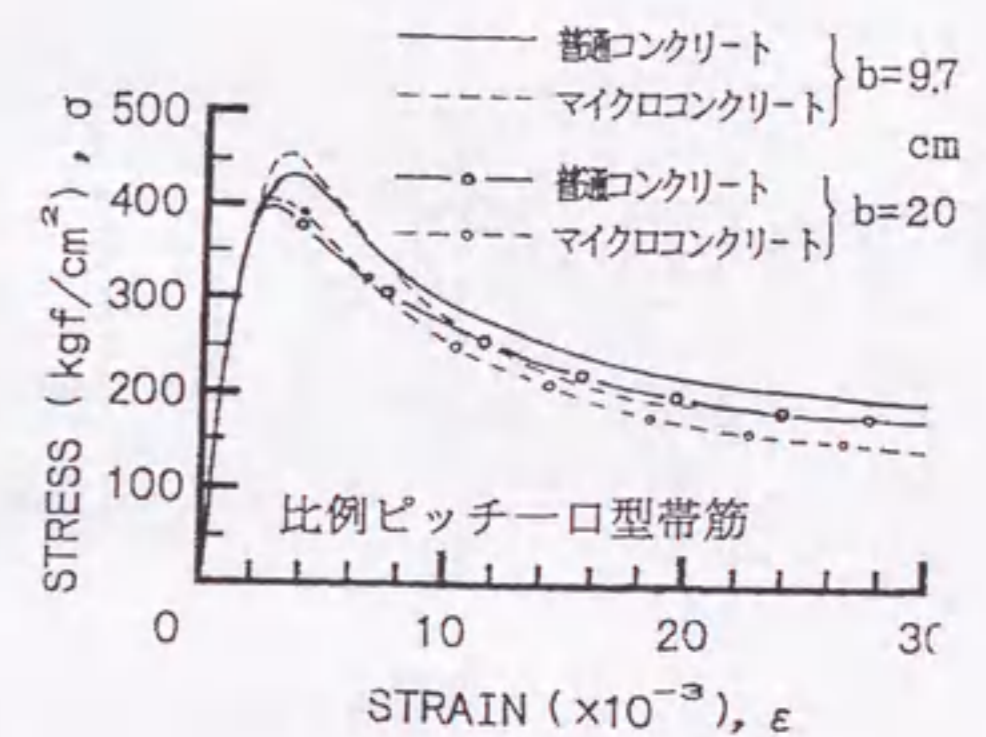


図-3.7.9 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋種類の影響 (普通コンクリート、 $b=20\text{cm}$ )



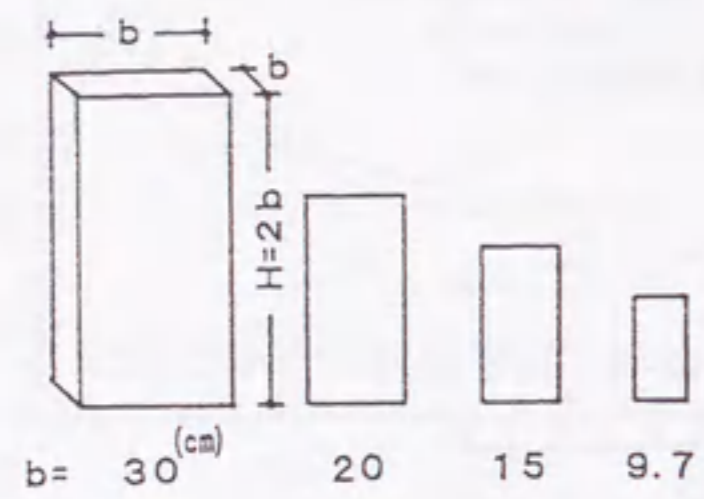
(a) 口型同一ピッチ帯筋



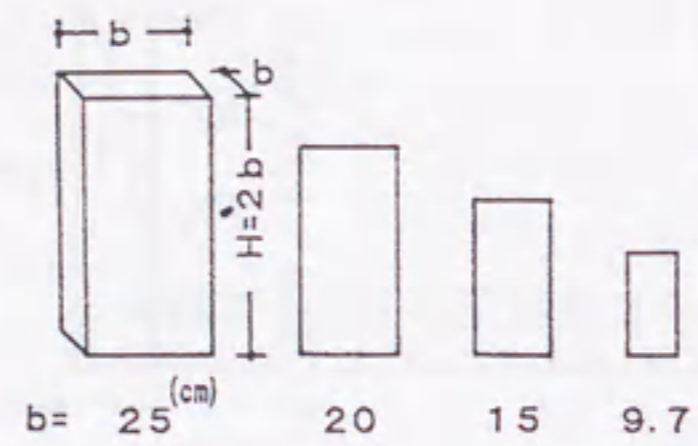
(b) 口型比例ピッチ帯筋

図-3.7.10 応力-ひずみ曲線に及ぼす粗骨材最大寸法の影響



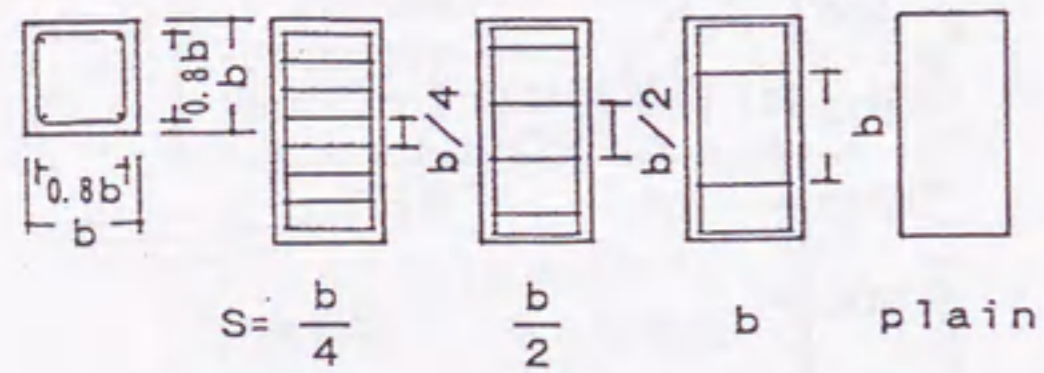


(a) 実験 I

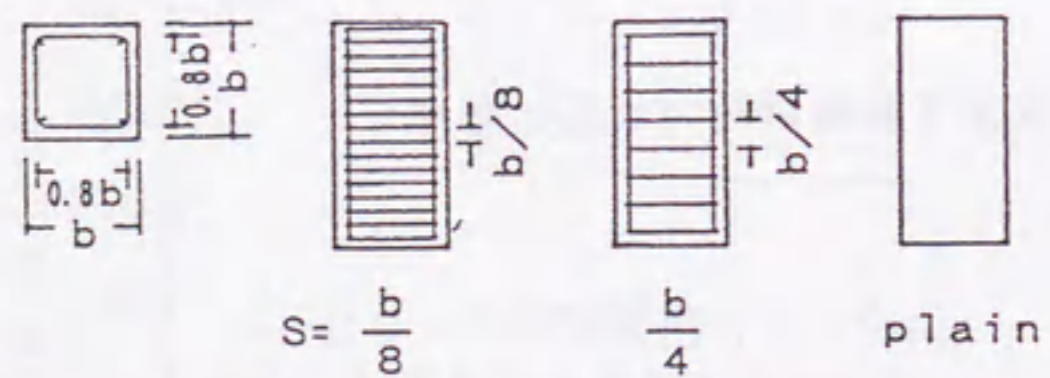


(b) 実験 II

図-3.8.1 コンクリート角柱体の寸法

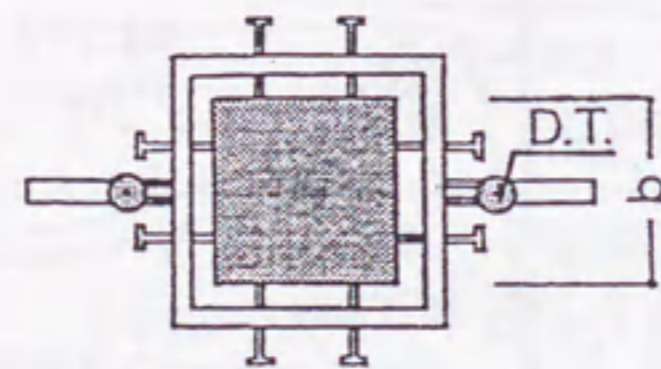


(a) 実験 I

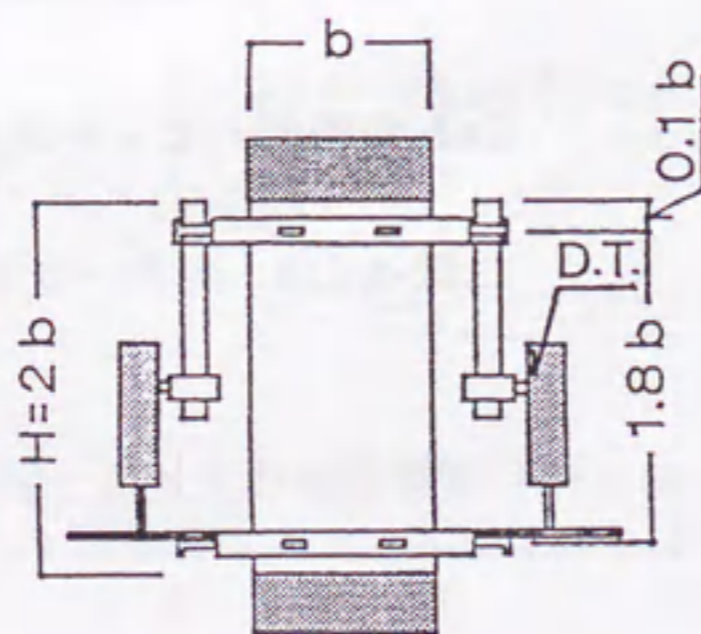


(b) 実験 II

図-3.8.2 帯筋の配置



(a) 断面図



(b) 側面図

図-3.8.3 ひずみの測定方法

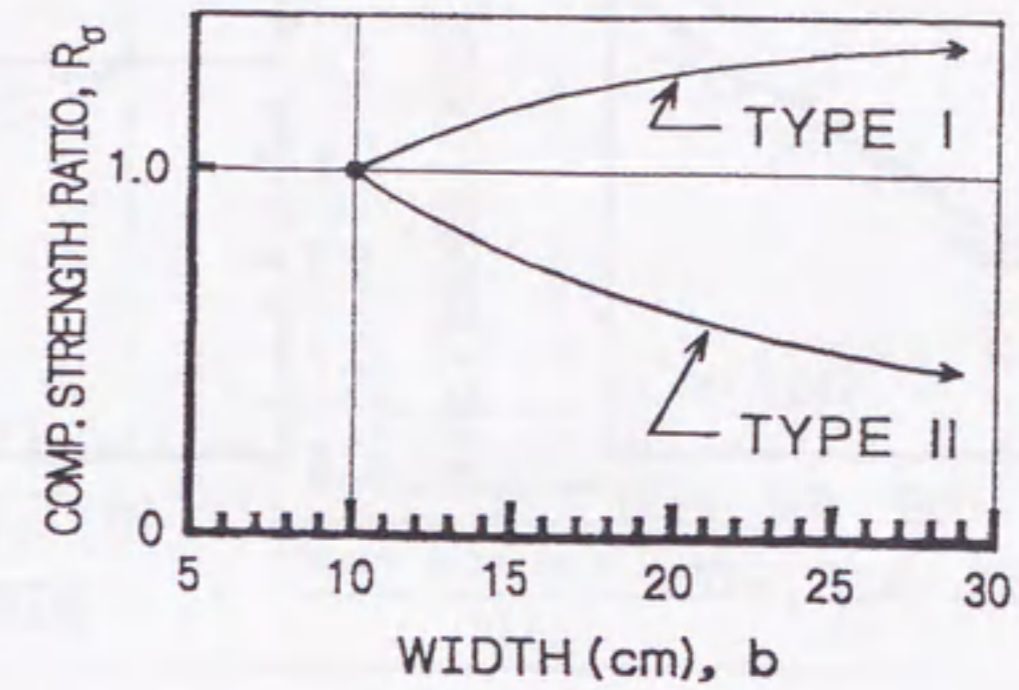


図-3.8.4  $R_\sigma$ と試験体寸法  $b$  の関係の概要

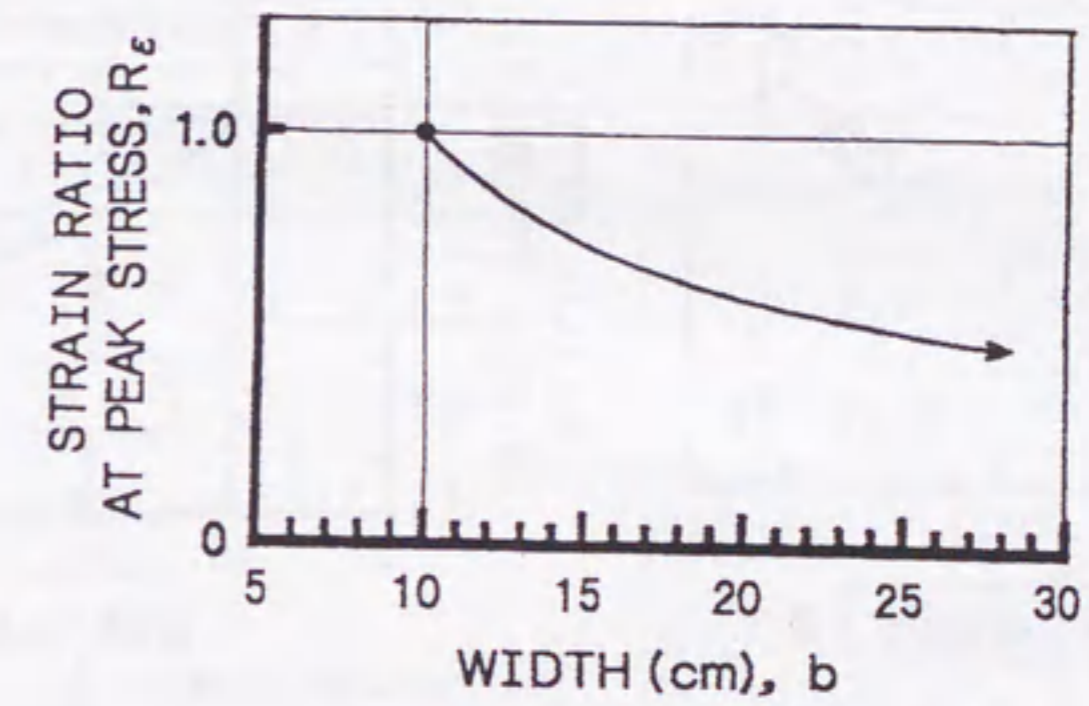


図-3.8.5  $R_\epsilon$ と試験体寸法  $b$  の関係の概要

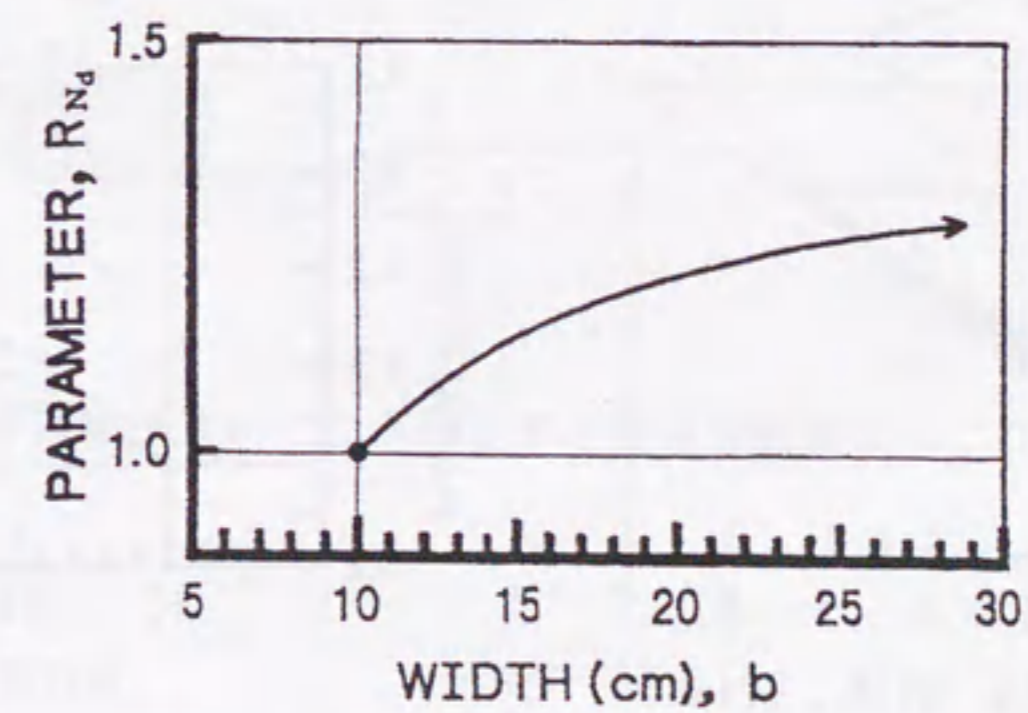


図-3.8.6  $R_{Nd}$ と試験体寸法  $b$  の関係の概要



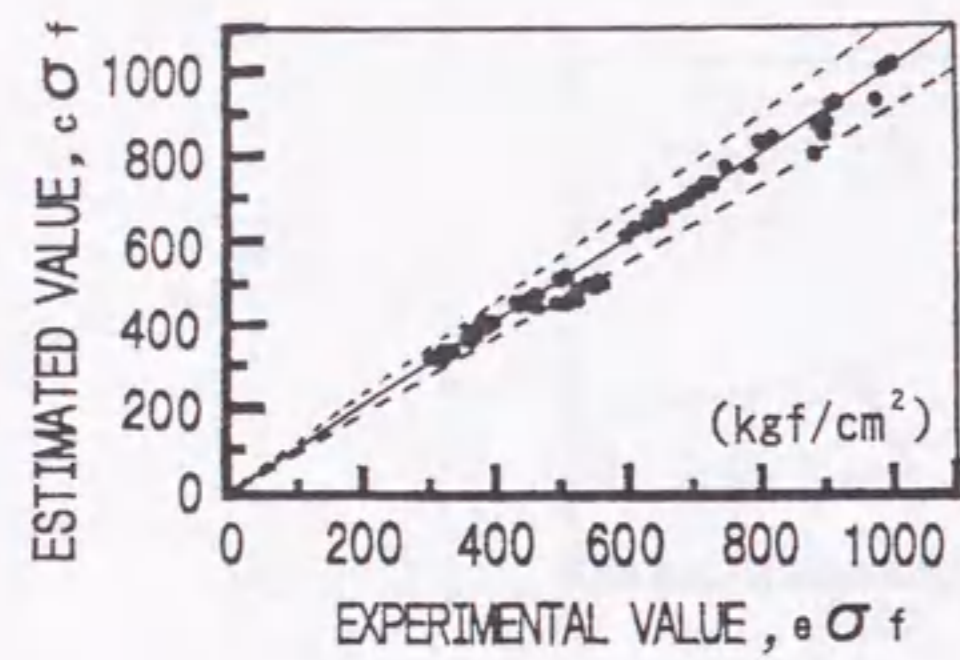


図-3.8.7 圧縮強度の計算値 $c\sigma_f$ と実験値 $e\sigma_f$ の比較

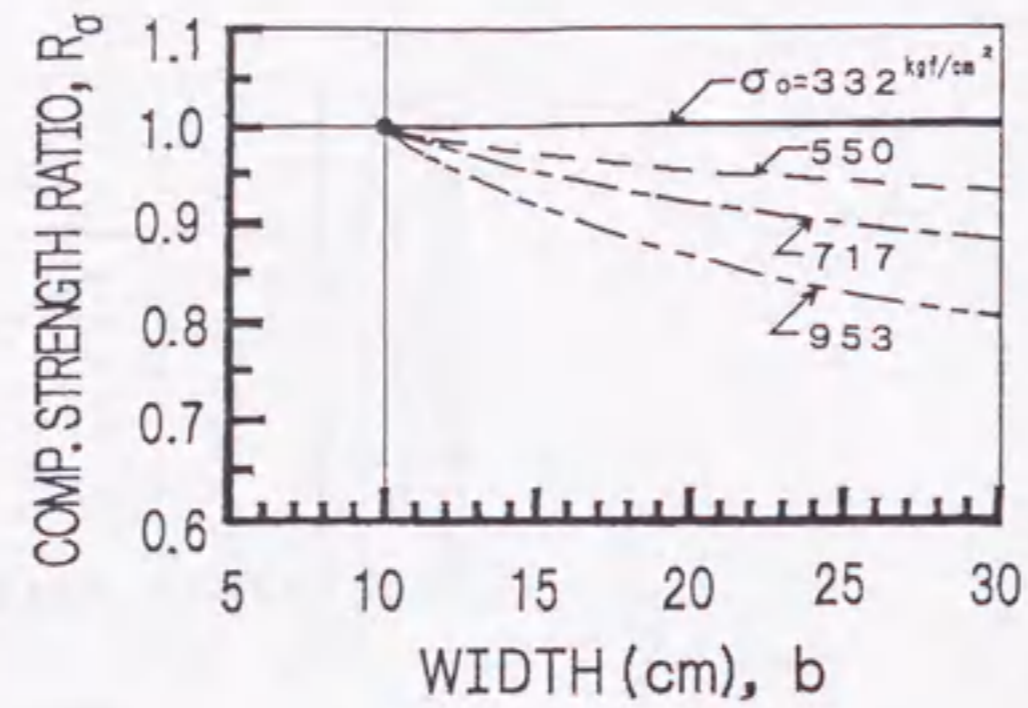


図-3.8.8 圧縮強度比 $cR_\sigma$ と試験体寸法 $b$ の関係 [回帰式(3.8.3)]

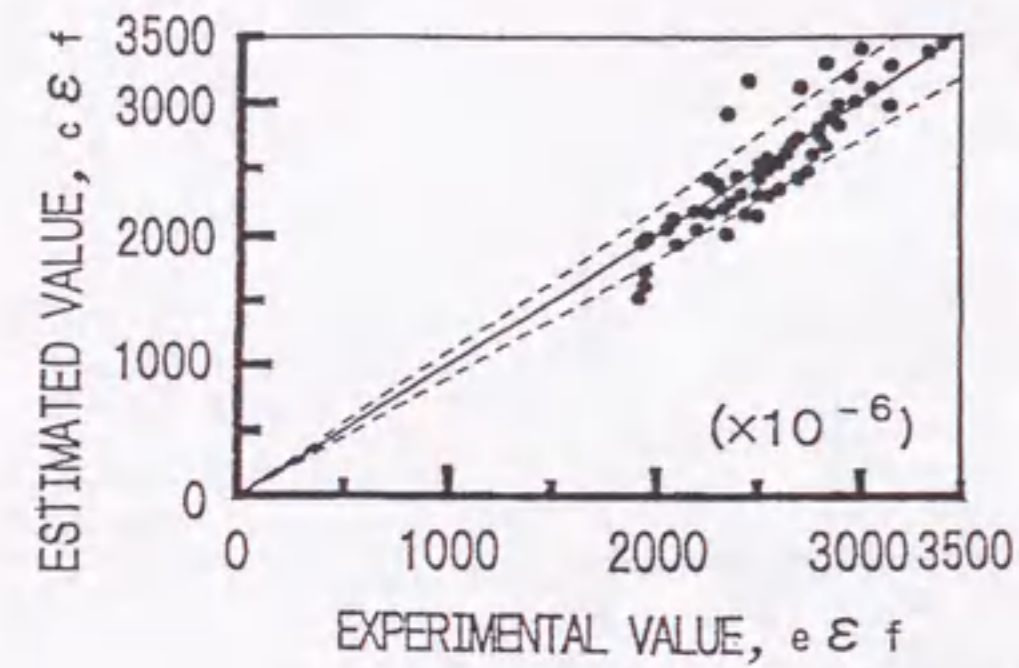


図-3.8.9 最大応力時のひずみの計算値 $c\epsilon_f$ と実験値 $e\epsilon_f$ の比較

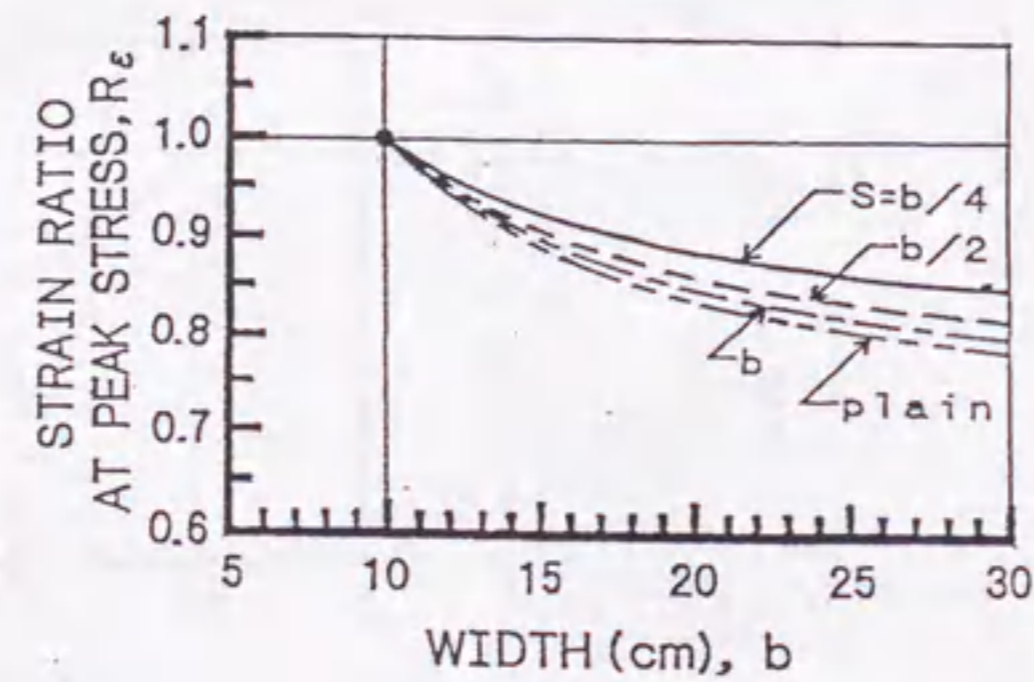


図-3.8.10 相対最大応力時のひずみ $cR_\epsilon$ と試験体寸法 $b$ の関係 [回帰式(3.8.4)]

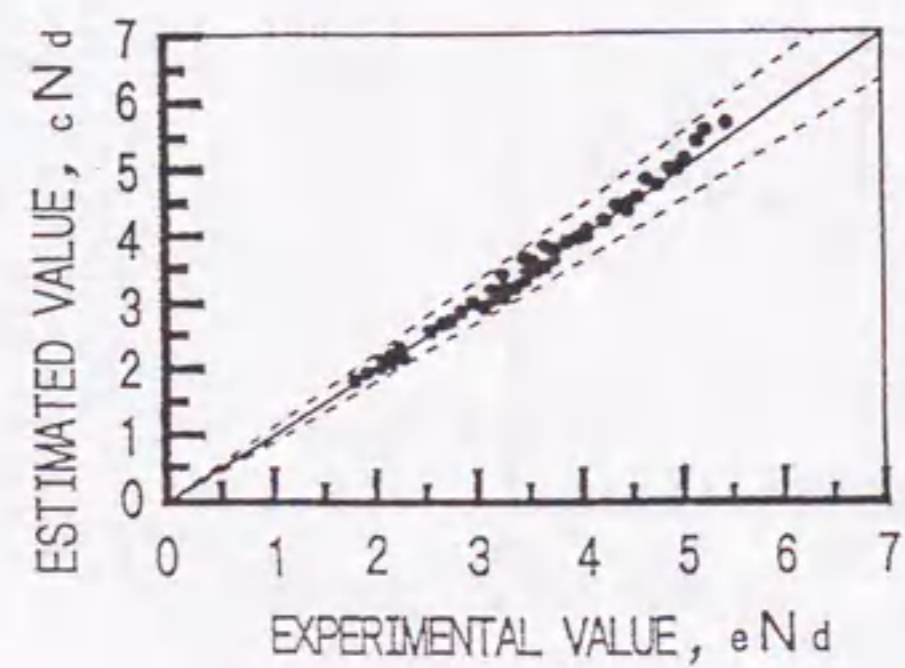


図-3.8.11 応力軟化域のパラメータ $N_d$ の計算値 $cN_d$ と実験値 $eN_d$ の比較

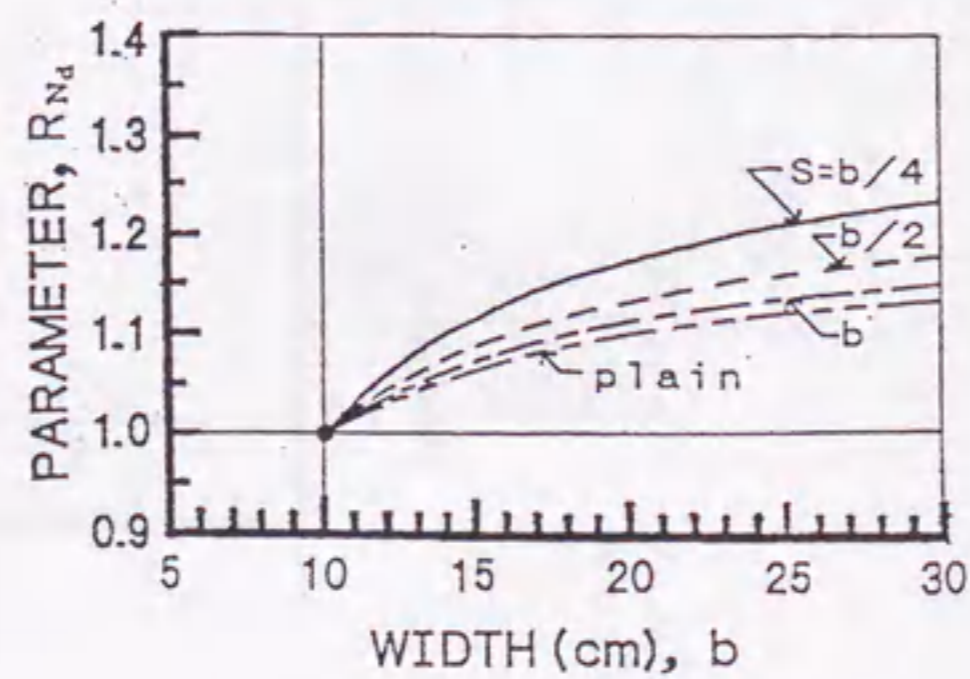


図-3.8.12 応力軟化域のパラメータ $cN_d$ と試験体寸法 $b$ の関係 [回帰式(3.8.5)]

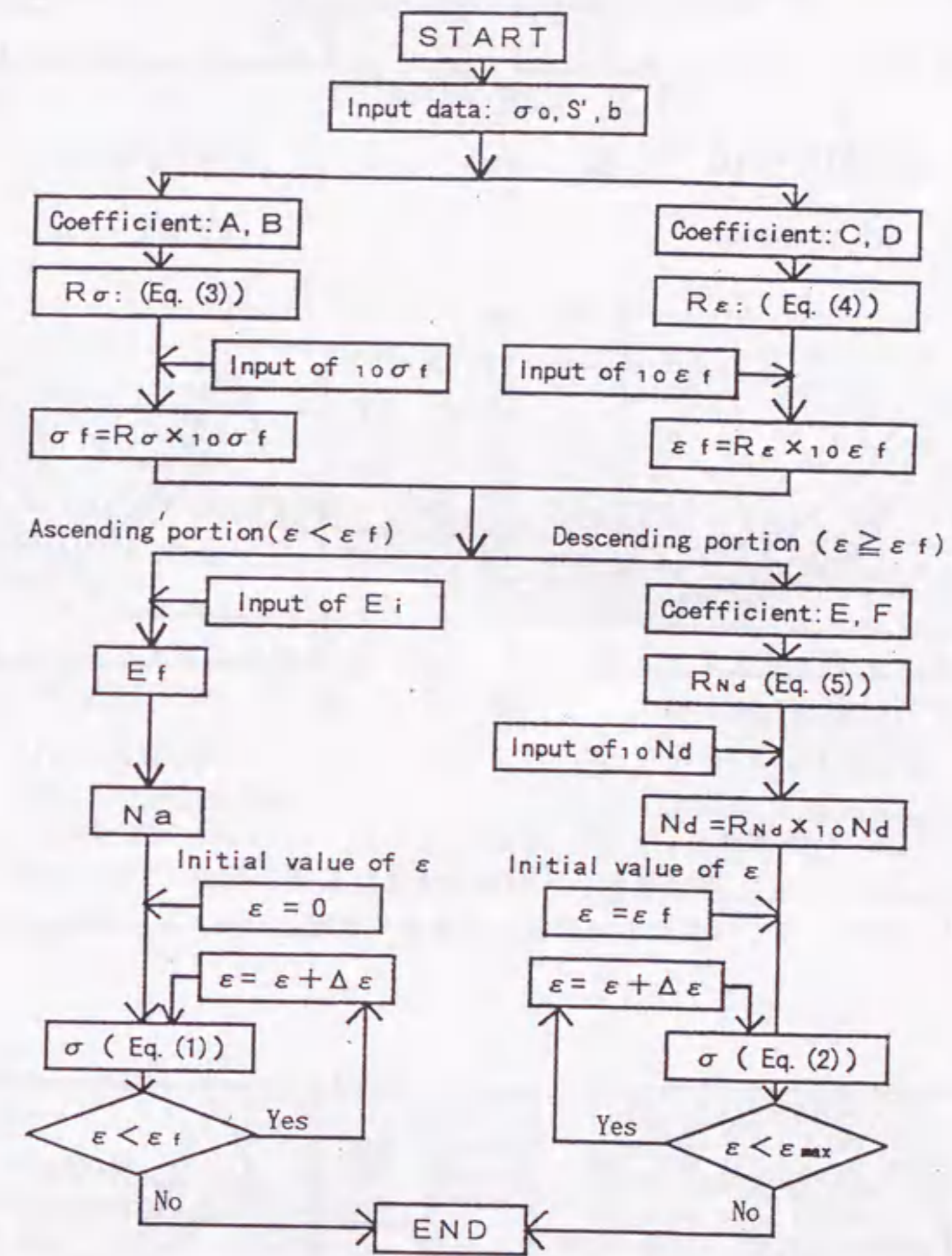


図-3.8.13 回帰式を用いて応力-ひずみ曲線を計算するフローチャート



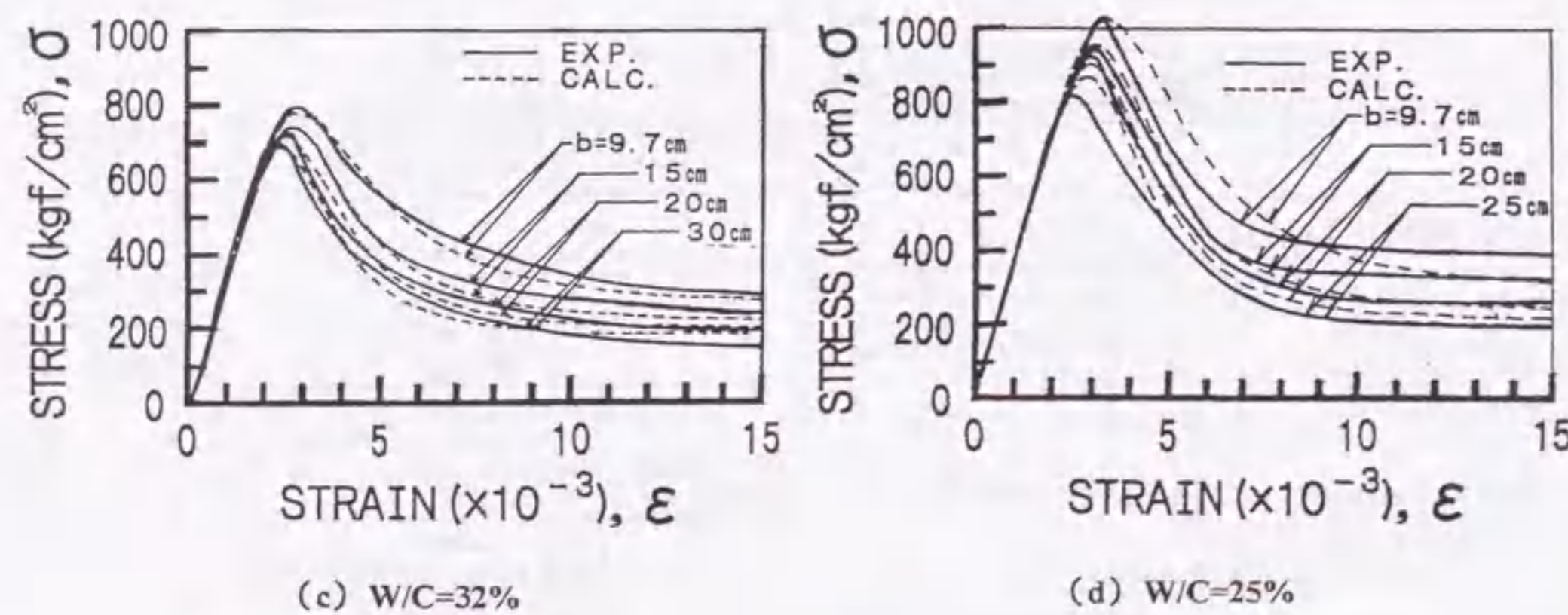
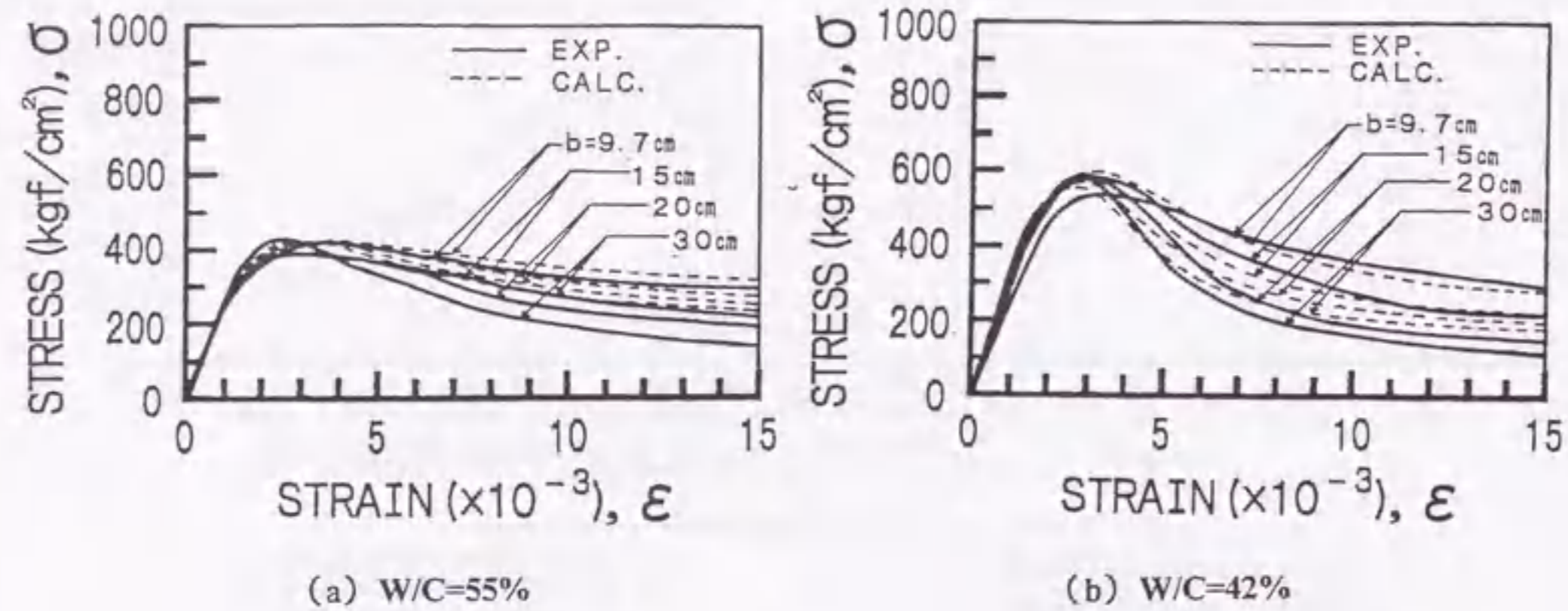


図-3.8.14 応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較 ( $S=b/4$ ,  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )

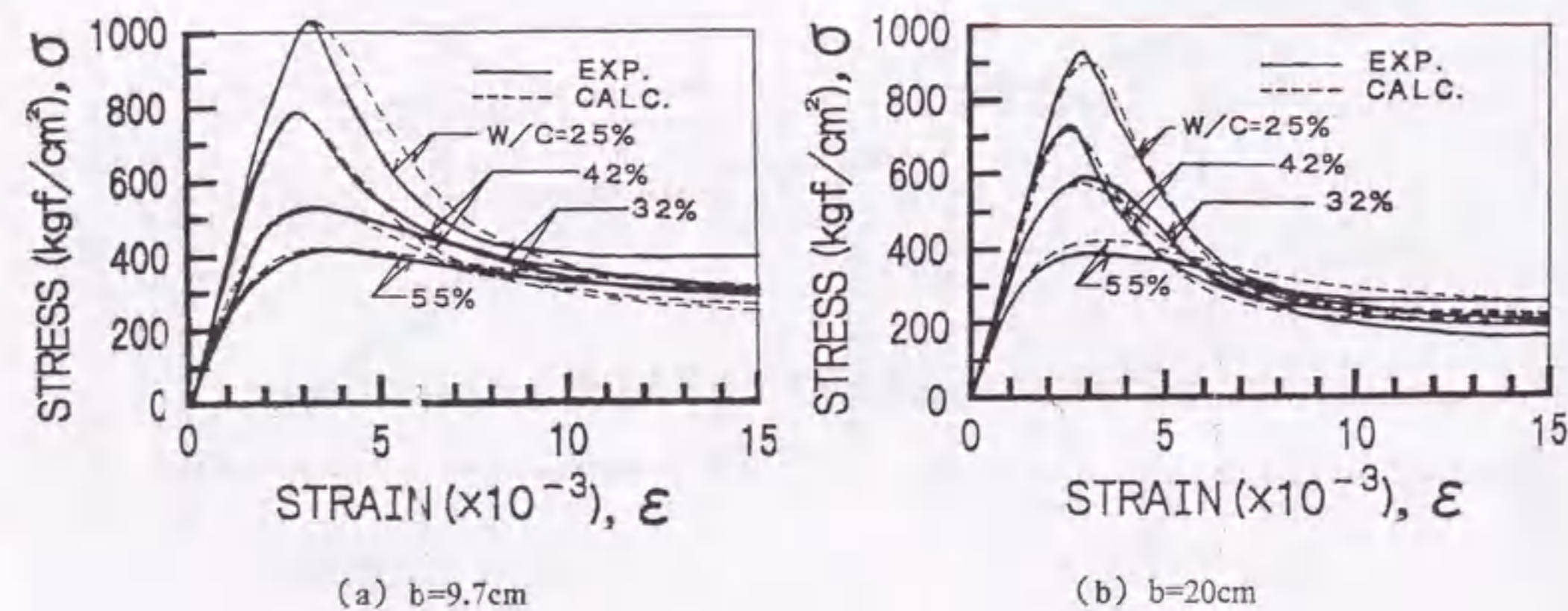


図-3.8.15 応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較 ( $S=b/4$ ,  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )

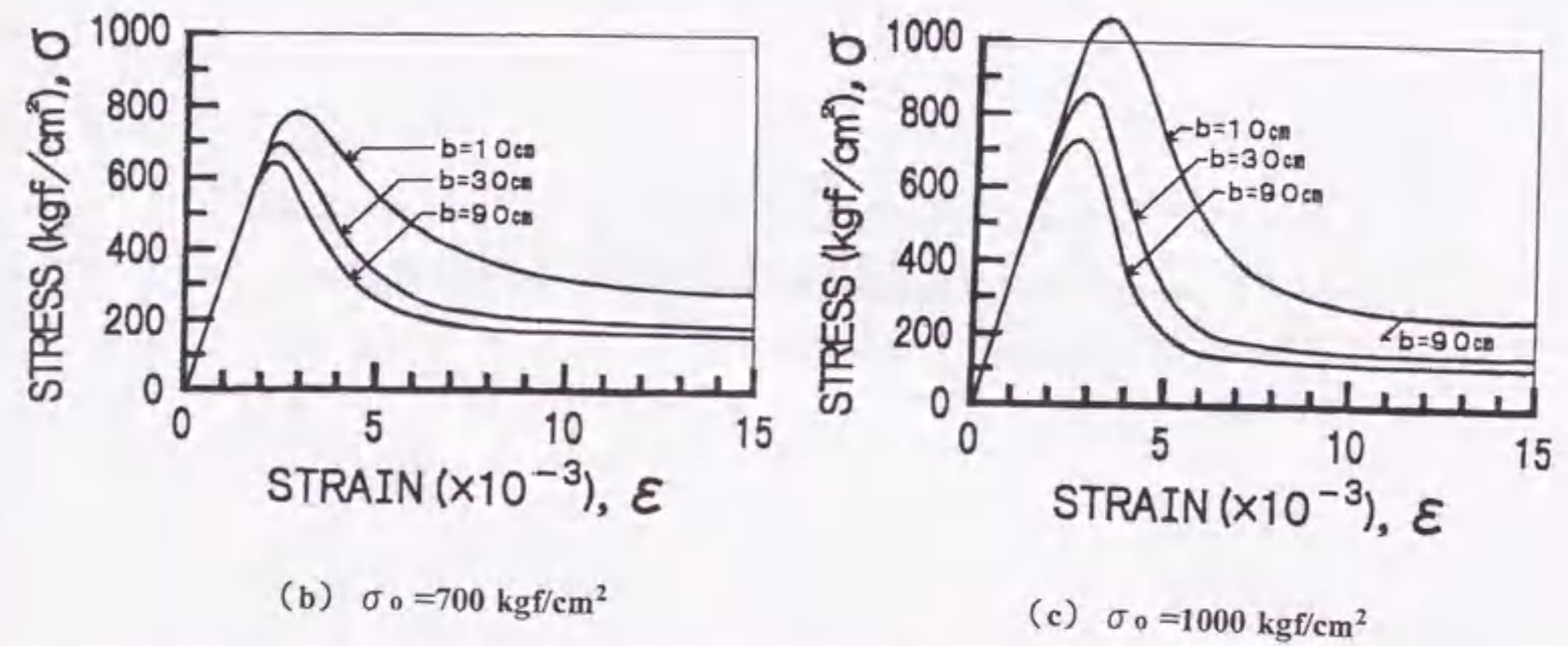
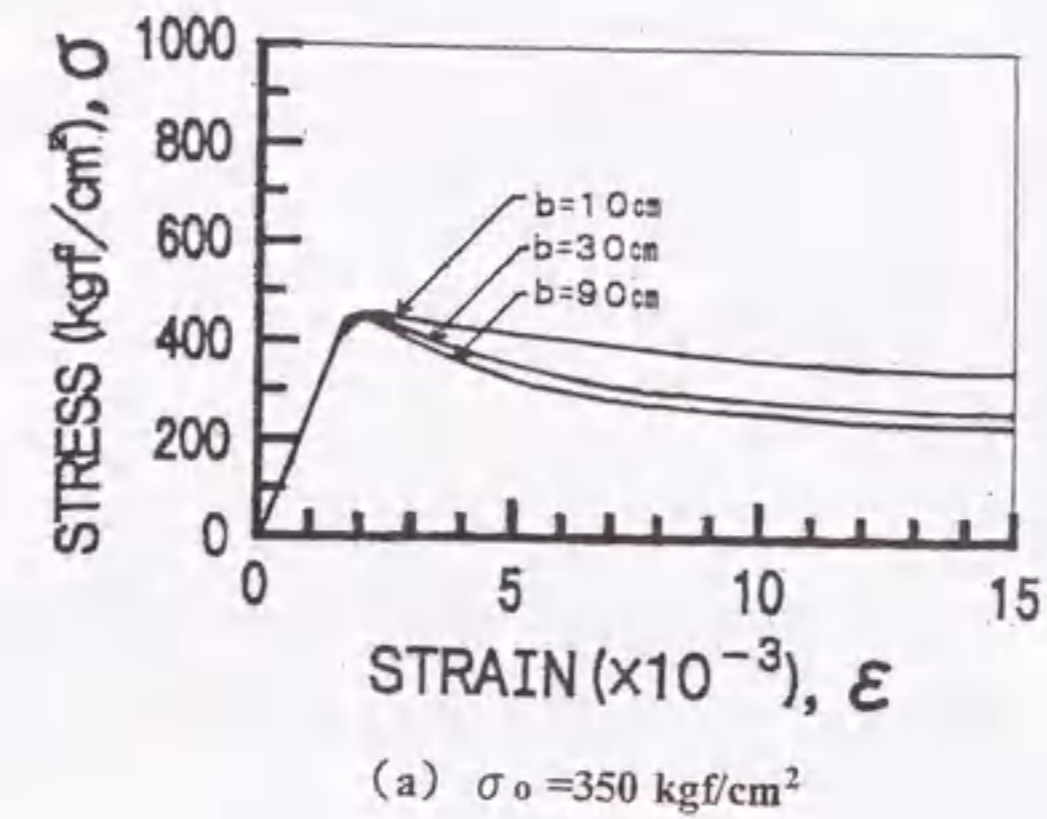
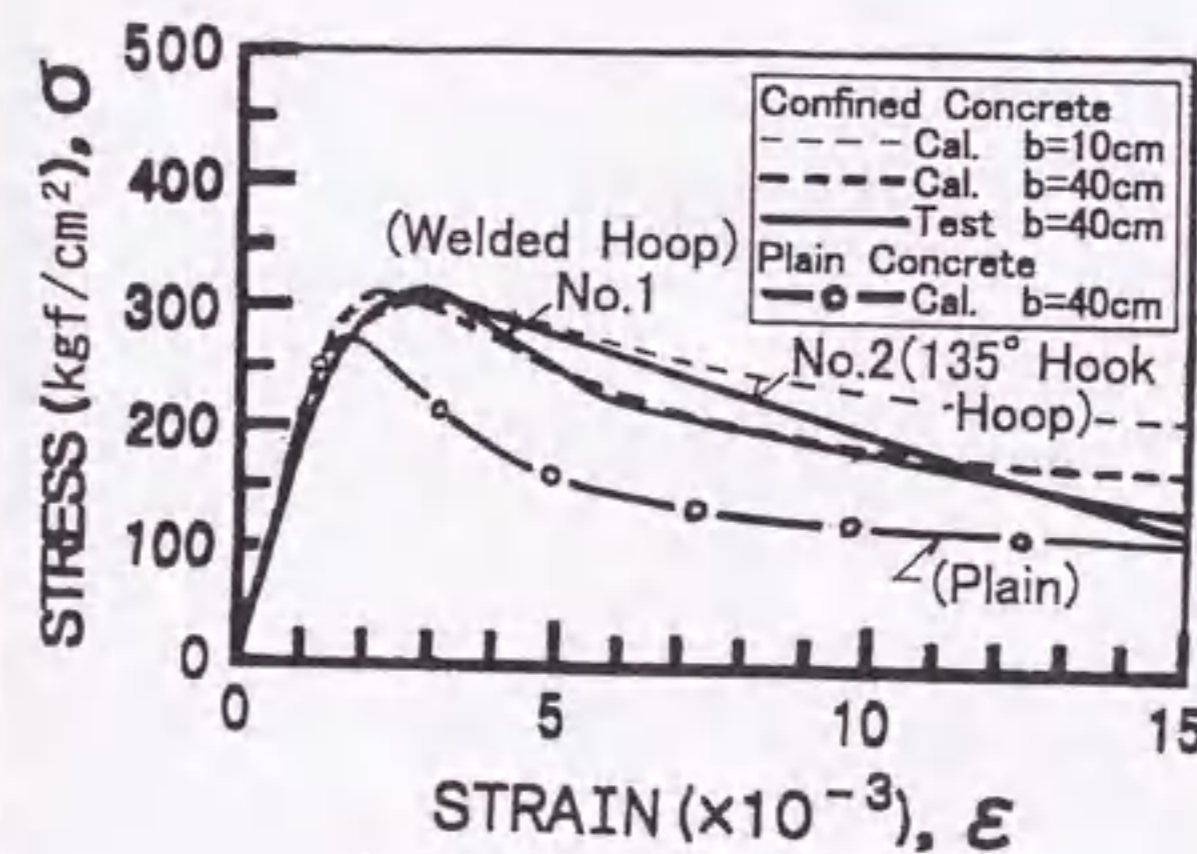


図-3.8.16 応力-ひずみ曲線の表示式の大形部材への適用例 ( $S=b/4$ ,  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



|       |  |
|-------|--|
| 実験データ | No.1 および 2 試験体 $b=40\text{cm}$<br>[主筋] 20 本 D13, $p_g=1.59\%$ , $\sigma_y=3474\text{kgf/cm}^2$<br>[帯筋] D6 @5cm, ロ型, $p_w=0.4\%$<br>No.1 試験体 溶接帯筋, $\sigma_y=3600\text{kgf/cm}^2$<br>No.2 試験体 135° 帯筋, $\sigma_y=3879\text{kgf/cm}^2$<br>$\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱体圧縮強度 $310\text{kgf/cm}^2$<br>ひずみの測定区間 $L_0=1.25b$  |
|       | 解析データ<br>No.1 および 2 試験体<br>$\sigma_0=0.85 \times 310\text{kgf/cm}^2=264\text{kgf/cm}^2$ と仮定<br>No.1 $H \sigma_{LY}=16.6\text{kgf/cm}^2$ , $S'=0.55$<br>No.2 $H \sigma_{LY}=17.8\text{kgf/cm}^2$ , $S'=0.52$<br>プレーン試験体<br>$\sigma_0=0.85 \times 316\text{kgf/cm}^2=269\text{kgf/cm}^2$ と仮定<br>$H \sigma_{LY}=0$ , $S'=2.0$ |

コンクリートの応力-ひずみ曲線の実験値は、主筋を弾塑性体と仮定して主筋の軸力負担分を除いたものを表示した。

図-3.8.17 他の研究者の実験データと本表示式から求めた計算値との比較例