

## 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

- 4.1 概説
- 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
- 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
- 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

#### 4.1 概説

前章の3.4節～3.7節では、コンファインドコンクリート角柱体の圧縮特性における寸法効果について実験的に検討し、中心圧縮を受けるコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線、ピーク点の応力とひずみなどに寸法効果がみられること、コンクリートが高強度になるほどこれらの寸法効果が顕著になることなどの知見を報告し、また寸法効果を反映したコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を提案した。

近年、RC 構造物の高層化に伴い、使用されるコンクリートの圧縮強度が年々高強度化されている。これらの構造物の RC 柱は、作用する軸圧縮力が大きく、高耐力と高靱性を確保するために、高強度のコンクリートと主筋を使い、ピッチの接近した各種形状の帯筋やサブタイなどの横補強筋で横拘束されて、塑性変形挙動が改善されるように設計されている。

高層の RC 造建物の柱は、軸圧縮力が大きく、その断面積も大きく、コンクリートの圧縮強度は高強度で、帯筋のピッチは狭い。前章のコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する研究から得られた知見から推測すれば、これらの RC 柱の強度と塑性変形性能は、実験室レベルで作製された小型の試験体で得られた実験データに比べて危険側の結果を与えることが考えられる。

本章の4.2節では、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の高強度コンクリートを用いた RC 柱の圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋の形状の影響についての実験を行い、帯筋の横拘束力の大きな柱ほどピーク点の応力とひずみが低下し、応力下降域の曲線の勾配が急になるという形で、寸法効果が顕著に現れることを述べる。

4.2節に引き続き、4.3節では、水セメント比を25%とした  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートについて、前節で行った帯筋形状の影響についての実験要因の他に、帯筋の降伏強度の影響を実験要因に加えて実験を行い、コンファインドコンクリートの実験結果並びに4.3節の結果と比較・検討する。

4.4節では、4.2節と4.3節で得られた実験結果、並びに新たに行った RC 円柱体の実験結果に基づき、RC 柱の圧縮破壊時エネルギー（塑性ひずみエネルギー）吸収能に及ぼす試験体寸法、帯筋の形状・ピッチ・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。ここで得られる知見は、寸法効果の一般的性質を明らかにする際の基礎資料となる。

## 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

### (1) まえがき

最近、RC造建物の高層化に伴い、高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いたRC柱が用いられるようになった。これらの高強度RC部材に所要の変形能力を付与する必要から、各種の横補強筋で補強された高強度RC柱の塑性変形性能に関する研究が行われている。普通強度のコンクリートでは、一般に試験体寸法が大きなコンクリートほど塑性変形挙動が脆性的で、小型試験体の実験結果は実部材に比して危険側の結果を与える場合が多い。本節では、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の高強度コンクリートを用いたRC柱の圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋の形状の影響について考察する。

### (2) 実験方法

#### 1) 実験の概要

表-4.2.1に、RC柱の一軸圧縮実験の概要を、また図-4.2.1および2に、試験体の寸法と帯筋の配置を示す。コンクリートの水セメント比(W/C)は32%とした。RC柱の高さと幅の比(H/b)は、すべて2とした。帯筋径は、形状がロ型で間隔が断面辺長bと等しい場合に帯筋比が約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56体である。コンクリート強度のバッチ間変動(2バッチ)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(5mm未満)、岡崎産の碎石(5~15mm)および高性能減水剤を使用し、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のスミス式コンクリート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。柱試験体と同一養生とした $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コンクリートシリンダーの圧縮強度のバッチ間の差は、平均圧縮強度の3.9%であった。

表-4.2.2および3に、使用した主筋および帯筋の力学特性を示す。試験体の上端面は鏡面仕上げとし、主筋の上下端面は試験体の上下端面と一致させた。また、試験体の上下端面の横補強筋量を増し端部の補強を図った。なお、表中にはロタイプの場合の帯筋の拘

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 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$ )とし、材齢6週で圧縮試験を行った。

### 3) 裁荷および測定方法

図-4.2.3に、ひずみの測定方法を示す。圧縮ひずみの測定域( $\epsilon_0$ )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、毎分約 $1 \times 10^{-3}$ のひずみ速度で、試験体の中央部1.8b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

#### 1) 圧縮強度の寸法効果

軸圧縮荷重を試験体の断面積で除した値およびピーク点の応力を、以下の考察ではそれぞれ応力および圧縮強度とする。図-4.2.4(a)および(b)に、RC柱の圧縮強度に及ぼす試験体寸法の影響を示す。図-4.2.4(a)は、 $\square$ タイプの柱の圧縮強度を帯筋のピッチ別に示したものである。RC柱の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、 $b=25\text{cm}$ の試験体のものは $b=9.7\text{cm}$ のものに比べて $S=b/8$ のもので約10%、また $S=b/4$ のもので約8%低下している。

この図中のプレーンコンクリートと $\square$ タイプ、 $S=b/4$ の柱の圧縮強度を、筆者が既報<sup>1)</sup>で報告したこれと同じ調合で、横打ちのプレーンコンクリートおよび主筋に $\phi 2.7\text{mm}$ 鉄筋を4本配置し、帯筋形状をロ型としたRC柱(ここでは、主筋比が小さいため、本節のRC柱と区別してコンファインドコンクリートと呼ぶ)の強度を比較した。図には示していないが、プレーンコンクリートの圧縮強度は両者ほぼ同じ値であり、その寸法効果も同様な傾向を示した。また、 $S=b/4$ のものでは、柱の圧縮強度はコンファインドコンクリートよりも約 $50\text{kgf/cm}^2$ 大きい(主筋断面の寄与分)、寸法の増大とともに強度が低下する寸法効果の傾向は定量的にも極めて類似していることが分かった。

図-4.2.4(b)は、帯筋形状の影響を示したものである。横拘束力の大きい順に、すなわち帯筋形状が $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、および $\square$ の順に圧縮強度の寸法効果が顕著である。ただし、ここでは便宜上、主筋本数の違いも帯筋形状の違いとみなして比較している。とくに、 $\square$ タイプの形状のものでは、試験体寸法が25.0cmのものでは9.7cmのものに比べて平均で約18%低下している。また、この図から実大の柱では、帯筋形状の違いによる圧縮強度の差異は、極めて小さくなることが予想される。

## 2) 最大応力時のひずみの寸法効果

図-4.2.5 (a) および (b) に、最大応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) に及ぼす試験体寸法の影響を示す。図-4.2.5 (a) は、 $\square$ タイプの柱の  $\epsilon_m$  の値を帯筋のピッチ別に示したものである。試験体寸法の増大とともに  $\epsilon_m$  の値が減少する寸法効果がみられる。すなわち、試験体寸法が  $b=9.7\text{cm}$  から  $25.0\text{cm}$  に増大すると  $\epsilon_m$  の値は、 $S=b/8$  のもので約 38%、 $S=b/4$  のものでは約 30% 小さくなる。また、帯筋ピッチが  $S=b/8$  と  $b/4$  の場合とで  $\epsilon_m$  の値はさほど変わらない。図-4.2.5 (b) は、帯筋形状の影響を示したものである。図によれば、帯筋形状にかかわらず試験体寸法の大きなものほど  $\epsilon_m$  の値が小さくなる寸法効果が認められる。すなわち、 $\epsilon_m$  の値は  $b=25.0\text{cm}$  のものは  $9.7\text{cm}$  のものに比べて  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  タイプの形状のもので約 38%、 $\square$  タイプのものでは 20% 低下している。また、帯筋形状が  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  タイプのものでは、 $b=15\text{cm}$  以下のもものでは横拘束力の大きな形状のものがやや大きな  $\epsilon_m$  の値を示すが、 $b=20\text{cm}$  以上になると、帯筋形状に拘らずほぼ等しい値になる。

## 3) 応力-ひずみ曲線

### a) 試験体寸法の影響

図-4.2.6 (a) ~ (g) に、RC 柱の応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を帯筋形状別に示す。どの帯筋形状の柱も、試験体寸法の大きなものほど最大応力後の軟化勾配が急になる寸法効果がみられる。図-4.2.6 (g) の  $\square$  タイプと図-4.2.6 (d) の  $\square$  タイプの帯筋形状の柱の応力-ひずみ曲線は、他の帯筋形状のものに比べて応力下降域の変形挙動が延性的で、また試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状が順次、脆性的となる寸法効果が明白にみられる。一方、図-4.2.6 (b)、(c)、(e) および (f) にそれぞれ示す  $\square$  ( $S=b/4$  および  $b/8$ )、 $\square$  および  $\square$  タイプの形状のものでは、試験体寸法  $b$  が  $15\text{cm}$  以上になると、応力-ひずみ曲線の寸法効果が非常に小さくなる。

図-4.2.6 (b) に示す  $\square$  タイプ、 $S=b/4$  の帯筋で補強された柱の応力-ひずみ曲線と、同じ帯筋で補強された前述のコンファインドコンクリート<sup>1)</sup>と比較した。図には示していないが、両者にはほぼ同様の寸法効果が存在することが確認された。

### b) 帯筋ピッチの影響

図-4.2.7 (a) および (b) に、それぞれ  $\square$  タイプの帯筋で補強された  $b=9.7\text{cm}$  および  $25.0\text{cm}$  の RC 柱試験体の応力-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、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。この傾向は、第 3.4 節と 3.5 節で述

べたコンファインドコンクリート<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>において、帯筋ピッチを  $S=b$  から  $S=b/4$  まで変化させた場合と同じ傾向である。

### c) 帯筋形状の影響

図-4.2.8 (a) および (b) に、それぞれ  $b=9.7\text{cm}$  および  $25.0\text{cm}$  の RC 柱の応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋形状の影響を示す。これらの図および他の寸法の場合の比較によれば、応力-ひずみ曲線の下降域の形状は、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  タイプの帯筋形状の順に延性的な変形挙動を示している。ただし、その靱性改善効果は試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。

## (4) 結論

一軸圧縮を受ける RC 柱の応力-ひずみ関係の寸法効果と帯筋形状の関係について実験的に検討した。本節の結果は、およそ以下のようにまとめられる。

- 1) RC 柱の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  の順に圧縮強度の寸法効果が顕著となる。とくに、 $\square$  タイプの形状の圧縮強度は、ピッチ  $S=b/4$  で試験体寸法  $b=25.0\text{cm}$  のものでは、 $9.7\text{cm}$  の場合に比べて平均で約 18% 低下した (図-4.4.4 (b))。
- 2) RC 柱の最大応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) は、試験体寸法が大きくなるにつれて減少する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、 $S=b/4$  の場合、 $b=25\text{cm}$  の試験体の  $\epsilon_m$  の値は、 $9.7\text{cm}$  のものに比べて  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  タイプのもので約 38%、 $\square$  タイプのもので約 20% 低下した (図-4.4.5 (b))。
- 3) RC 柱の応力-ひずみ曲線は、試験体寸法の大きなものほど最大応力後の軟化勾配が急になる。その寸法効果は帯筋形状によって異なり、 $\square$  タイプと  $\square$  タイプの帯筋形状の柱の応力-ひずみ曲線は、試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状が順次、脆性的となる。また、 $\square$  ( $S=b/4$  および  $b/8$ )、 $\square$  および  $\square$  タイプの形状のものでは、試験体寸法が  $b=15\text{cm}$  以上になると、応力-ひずみ曲線の寸法効果が非常に小さくなる (図-4.4.6)。
- 4) 帯筋を密に配置することによる靱性改善効果は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する (図-4.4.7)。
- 5) 横拘束力の大きい形状の帯筋を配置することによる靱性改善効果は試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する (図-4.4.8)。

#### 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

##### (1) まえがき

第4.2節において、圧縮強度  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルの高強度コンクリートを用いた RC 柱の応力-ひずみ挙動に及ぼす試験体寸法の影響について述べた。その結果、RC 柱の圧縮強度および圧縮靱性（ここでは、応力-ひずみ曲線下の面積）は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下すること、その寸法効果は帯筋形状によって異なり、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち  $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$  および  $\square$  の順に圧縮強度および圧縮靱性の寸法効果は顕著であること、などが明らかとなった<sup>3)</sup>。本節では、水セメント比を 25% とした  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  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、第3.6節<sup>3)</sup> および4.2節<sup>4)</sup> の結果と比較・検討する。

##### (2) 実験方法

###### 1) 実験の概要

表-4.3.1 に、RC 柱の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として、帯筋比、帯筋の強度レベルおよび帯筋の形状の相違を取り上げた。図-4.3.1 および4.3.2 に、試験体の寸法および帯筋の形状・配置を示す。コンクリートの水セメント比 (W/C) は 25% とした。RC 柱の高さと幅の比 (H/b) は、すべて 2 とした。帯筋径は、原則として形状が  $\square$  型で間隔が断面辺長  $b$  と等しい場合に帯筋比が約 0.3% となるように選んだ。帯筋の降伏強度レベルは、3000、5000 および 15000  $\text{kgf/cm}^2$  の 3 種類とした。試験体の個数は各要因ごとに 2 体、合計 288 体である。

###### 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)、岡崎産の碎石 (5~15mm) および高性能減水剤を使用し、設計スランブは 18cm とした。コンクリートの混練には容量 100  $\text{l}$  の 2 軸強制練りミキサーを使用した。角柱試験体と同一養生とした  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  コンクリートシリンダーの全平均圧縮強度は、1060  $\text{kgf/cm}^2$ 、バッチ間の差は、平均圧縮強度の 4.0% 以内であった。コンクリートの打込み方向は縦打ちとした。

表-4.3.2 および4.3.3 に、使用した主筋および帯筋の力学的性質を示す。試験体の上端面

は鏡面仕上げとし、主筋の上下端面は試験体の上下端面と一致させた。また、試験体の上下端部の帯筋量を増して補強を図った。なお、表中には、断面寸法の影響を取り除いた鉄筋の横拘束指標 ( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ ) を  $\square$  タイプの場合の帯筋について示した。養生方法はすべて恒温恒湿空中養生 (温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $85 \pm 10\%$ ) とし、材齢約 12 週で圧縮試験を行った。

##### 3) 載荷および測定方法

図-4.3.3 に、ひずみの測定方法を示す。圧縮ひずみの測定域 ( $l_0$ ) は、試験体の高さ中央部の  $1.8b$  の領域とした。載荷には、 $b=9.7\text{cm}$  の試験体には最大容量 200tf のアクチュエータを使用し、毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、試験体の中央部  $1.8b$  区間の縦ひずみが  $30 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。 $b=15.0\text{cm}$  以上の試験体には最大容量 600tf の圧縮試験機を使用した。

##### (3) 実験結果とその考察

典型的な破壊パターンの例を図-4.3.4 に示す。

###### 1) 圧縮強度の寸法効果

軸圧縮荷重を試験体の断面積で除した値およびピーク点の応力を、以下の考察ではそれぞれ応力および圧縮強度とする。コンファインドコンクリートに関する筆者の実験データ<sup>4)</sup> によれば、水セメント比 (W/C) 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、水セメント比の減少に伴って寸法効果が顕著となる。すなわち、W/C=32% の高強度コンクリートでは、 $b=30.0\text{cm}$  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 10% 低下し、W/C=25% の超高強度コンクリートでは、 $b=25.0\text{cm}$  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% 低下した。

図-4.3.5 は、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$  レベルの  $\square$  タイプの帯筋で拘束した主筋本数 8 本の RC 柱の圧縮強度を帯筋のピッチ (S) 別に示したものである。RC 柱の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、いずれのピッチの場合も  $b=25.0\text{cm}$  の試験体の圧縮強度は  $b=9.7\text{cm}$  のものに比べて約 20% 程度低下している。図には示していないが、帯筋の降伏強度レベルの異なる他の試験体でも、強度の寸法効果の傾向は、ほぼ同様である。

図-4.3.6 は、 $S=b/6$ 、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$  レベルの帯筋を配置した RC 柱の圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋形状の影響を示したものである。圧縮強度は帯筋による横拘束力の差異の分だけ増減する関係にあり、いずれの帯筋形状の場合も、 $b=25.0\text{cm}$  の試験体では  $9.7\text{cm}$  の

ものに比べて、圧縮強度が約 25%低下している。すなわち、強度の寸法効果は帯筋形状に拘らずほぼ等しく、プレーンコンクリートの寸法効果に大きく支配されるといえる。これは、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルのコンクリートを用いた第 3.6 節<sup>3)</sup>の結果とも類似している。

図-4.3.7 (a) および (b) は、RC 柱の圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ ) の影響を示したものである。降伏強度が大きい試験体ほど圧縮強度が若干高いが、圧縮強度の寸法効果は、降伏強度に拘らずほぼ同様であり、断面寸法が 25.0cm の試験体では、9.7cm のものに比べて図-4.3.7 の場合、平均で約 26%低下している。

## 2) 応力-ひずみ曲線

図-4.3.8 (a) ~ (h) は、帯筋の形状およびピッチ(S)の異なる RC 柱の応力-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。これらの図によれば、一般に、試験体寸法の増大に伴い、ピーク時の応力およびひずみは減少し、圧縮靱性もまた減少する。但し、応力下降域における曲線形状は、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がそのまま現れる形となっている。前節で述べた  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルのコンクリートを用いた RC 柱の場合、帯筋の拘束力があまり大きくない試験体で同様な傾向がみられた。

図-4.3.9 (a) ~ (d) は、帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ ) および形状の異なる RC 柱の応力-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-4.3.9 (a) および (b) によれば、 $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$  レベルの帯筋を用いた試験体では、図-4.3.8 の  $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$  レベルの帯筋を用いた場合と比べて、相対的に圧縮靱性が小さくなるものの、応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響は極めて類似している。また、応力-ひずみ曲線における寸法効果が取れなくなる傾向も見受けられる。一方、図-4.3.9 (c) および (d) によれば、 $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$  レベルの帯筋を用いた試験体の応力-ひずみ曲線は、圧縮靱性が極めて大きいため、高ひずみ域に至っても応力低下が小さく、やはりピーク応力の差異がそのまま残る傾向がある。

## (4) 結論

$F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  レベルの超高強度コンクリートを用いた RC 柱の一軸圧縮時の応力-ひずみ関係の寸法効果と帯筋の形状、ピッチおよび降伏強度との関係について実験的に検討した。本節の結果は、およそ以下のようにまとめられる。

1) RC 柱の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。その寸法効果は帯筋の形状、ピッチ、降伏強度に拘らず類似しており、 $b=25.0\text{cm}$  の試験体の圧

縮強度は  $b=9.7\text{cm}$  のものに比べ、約 25%低下した。

2) RC 柱の圧縮強度の寸法効果は、帯筋形状に拘らずほぼ等しく、プレーンコンクリートの寸法効果に大きく支配される。この傾向は  $F_c=300 \sim 1000\text{kgf/cm}^2$  のコンクリートについても同様にみられる。

3) RC 柱の圧縮靱性は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。ただし、一般に、軟化域における応力-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がそのまま現れる形となっている。この傾向は、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルのコンクリートを用い、帯筋の拘束力があまり大きくない場合にみられた傾向と一致する。

#### 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

##### (1) まえがき

前節および前々節(4.2節および4.3節)においては、圧縮強度  $F_c=700$  および  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  レベルの高強度コンクリートを用いた RC 柱の応力-ひずみ挙動の寸法効果について調べた。その結果、RC 柱の圧縮強度およびタフネス(応力-ひずみ曲線下の面積)は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下すること、その寸法効果は圧縮強度によって異なり、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  レベルのものでは、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわちⅢ、Ⅱ、ⅠおよびⅣの順に、圧縮強度およびタフネスの寸法効果は顕著であるが、 $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$  レベルのものでは、帯筋の形状、ピッチ、降伏強度に拘らず類似しており、 $b=25.0 \text{ cm}$  の試験体の圧縮強度は  $b=9.7 \text{ cm}$  のものに比べ約 25%低下すること、などが明らかとなった<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>。

本節では、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、およびコンクリート強度の影響について考察する。ここで得られる知見は、寸法効果の一般的性質を明らかにする際の基礎資料となる。また、RC 柱のエネルギー吸収能に及ぼす試験体寸法の影響をエネルギー論的に検討<sup>6)</sup>する際の資料とすることができる。

##### (2) 解析に用いる実験データ

圧縮破壊時の吸収エネルギーの解析に用いた実験データは、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  ( $W/C=32\%$ )<sup>4)</sup> および  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  ( $W/C=25\%$ )<sup>5)</sup> レベルの RC 角柱体および新たに行った  $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$  ( $W/C=25\%$ ) レベルの RC 円柱体の一軸圧縮実験データである。表-4.4.1 に、実験の概要を示す。実験要因として、試験体寸法(角柱体:断面寸法の一辺  $b=9.7, 15, 20, 25 \text{ cm}$ 、円柱体:直径  $D=10, 15, 20, 25 \text{ cm}$ )、試験体の断面形状(円形と角形)、コンクリート強度( $W/C=25, 32\%$ )、帯筋比(帯筋ピッチ  $S=b/4, b/6$ )、帯筋の降伏強度レベル( $\sigma_y=3000, 5000, 15000 \text{ kgf/cm}^2$ ) および帯筋の形状(Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ、Ⅳ、○タイプ)を取り上げた。円柱体には、スパイラルフープを使用した。これらの帯筋で拘束したシリーズの他に、プレーンコンクリートも作製した。

図-4.4.1 および 4.4.2 に、試験体の寸法および帯筋の形状・配置を示す。RC 柱の高さと幅の比(角柱体:  $H/b$ 、円柱体:  $H/D$ )は、すべて 2 とした。帯筋径は、形状がⅢ型でピッチが断面辺長  $b$  の  $1/4$  の場合に帯筋比が約 1.2%となるように選んだ。試験体の個数は

各要因ごとに 2 体、 $W/C=32\%$  (角柱体)<sup>4)</sup> では 56 体、 $W/C=25\%$  (角柱体)<sup>5)</sup> では 288 体、 $W/C=25\%$  (円柱体)では 96 体、合計 440 体である。

新たに製作した円柱体のコンクリート、主筋および帯筋は、 $W/C=25\%$  (角柱体)<sup>5)</sup> シリーズのものと同じ調合・材料とし、試験体の養生条件および載荷・測定方法ともに同一とした。圧縮ひずみの測定域( $l_d$ )は、試験体の高さ中央部の  $1.8b$  ( $1.8D$ ) の領域とした。

##### (3) 実験結果とその考察

###### 1) 破壊状況と破壊片の破砕状況

写真-4.4.1 に、 $\epsilon=30 \times 10^{-3}$  時の円柱体の破壊パターンの一例を示す。写真は、 $W/C=25\%$ 、 $\sigma_y=5000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $S=b/8$  の RC 円柱体のもので、試験体の寸法比で縮小してある。本実験では、試験体-載荷板間の摩擦を減じていないため、写真の試験体では全て、せん断型の終局破壊面が斜めに形成されている<sup>6)</sup>。それは、ひずみの増大とともにこの一箇所の局所帯に破壊が集中し、ついにはコンクリートが斜めの破壊面に沿って滑り出した結果である。多くの場合、滑り量がある限界値に達すると帯筋が破断する。破壊の外観からは、試験体寸法の相違の影響はあまり認められない。

軸ひずみが  $30 \times 10^{-3}$  の時点で載荷を終了した RC 円柱体の  $2 \text{ cm}^3$  以上の破壊片の体積分布を調べた。試験体は載荷終了後、剥落したかぶりコンクリートを除去し、露出した帯筋を全部切断・除去した後、斜めのひび割れ面を横断する主筋を切断して、破壊片を手で分解し、一個ずつ重量を計測した。

写真-4.4.2 に、 $W/C=25\%$ 、 $\sigma_y=15000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $S=b/8$  の RC 円柱体の破砕状況を示す。破壊片(剥落したかぶりコンクリートは除外)は、原則として径の大きいものから順に右へ並べてある。写真は、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。比較的大きな破壊片の分布を概観すると、大径の破壊片(写真-4.4.2(b)~(d)の写真における上段の破壊片の大きさ程度)は、写真間であまり相違していない。すなわち、ほぼ試験体の寸法比に応じた大きさとなっている<sup>7)</sup>。中径の破壊片の分析は、ここでは省略する。

###### 2) 圧縮強度の寸法効果

図-4.4.3 は、 $\sigma_y=5000 \text{ kgf/cm}^2$  レベルの○タイプの帯筋で拘束した円柱体の圧縮強度を帯筋のピッチ( $S$ )別に示したものである。円柱体の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、ピッチが  $D/4$ 、 $D/6$  および  $D/8$  の場合に、 $D=25 \text{ cm}$  の試験体の圧縮強度は  $D=10 \text{ cm}$  のものに比べて、それぞれ約 23、20 および 16%低下している。図には示

していないが、帯筋の降伏強度レベルの異なる他の円柱体でも、強度の寸法効果の傾向は、ほぼ同様である。第4.3節の□タイプの角柱体の強度の寸法効果と比較して、ほぼ同程度の寸法効果が認められたといえる。

### 3) 破壊時吸収エネルギー

コンクリートの破壊片の分析に引き続いて、ここでは、寸法の異なるRC柱の破壊時吸収エネルギー（軟化域まで含めた総エネルギー： $W_P$ 、図-4.4.4参照）の寸法効果について考える。RC柱の吸収するエネルギーは、コンクリートの吸収するエネルギー、軸方向鉄筋の吸収するエネルギーおよび横補強筋の吸収するエネルギーの和と考えられる。本研究では、軸方向鉄筋と帯筋のひずみを計測していないので、コンクリートが吸収するエネルギーとこれらの鉄筋が吸収するエネルギーを分離できない。ここでは、これらの吸収エネルギーの総和（軸ひずみが $20 \times 10^{-3}$ の時点）について考察する。

#### a) コンクリート強度の影響

図-4.4.5 (a) および (b) は、角柱体の  $W_P$  に及ぼす試験体寸法の影響を、 $\sigma_y=3000$  kgf/cm<sup>2</sup>、 $S=b/4$  のものについて帯筋形状別に示したものである。図-4.4.5 (a) は  $W/C=32\%$ 、図-4.4.5 (b) は 25%シリーズの結果を示したものである。これらの図によれば、 $W_P$  の値はどの帯筋形状のものも、試験体寸法が大きくなるにつれてほぼ直線的に低下し、かつ、帯筋形状の違いによる横拘束力の差異の分だけ増減する関係が認められる。コンクリート強度の差異が  $W_P$  の値に及ぼす影響を調べるため、図-4.4.5 (a) および (b) を比較する。図によれば、 $W/C=25\%$  の角柱体では  $W/C=32\%$  のものに比べてコンクリート強度が高い分だけ大きなエネルギーを吸収でき、 $W_P$  が約 10 ~ 20% 増大している。

#### b) 帯筋ピッチの影響

図-4.4.6 (a) ~ (c) は、□タイプの帯筋で拘束した RC 角柱体の  $W_P$  に及ぼす帯筋ピッチの影響を、 $W/C=25\%$  のコンクリートについて帯筋の降伏強度別に示したものである。これらの図によれば、帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が増すほど、 $W_P$  は増大するが、帯筋の降伏強度レベルに拘らず、□タイプの柱の  $W_P$  は試験体寸法が大きくなるにつれてかなり顕著に低下することがわかる。

図-4.4.7 (a) ~ (c) は、○タイプの円柱体について、図-4.4.6 (a) ~ (c) と同様の比較を行ったものである。図によれば、図-4.4.7 (a) の  $\sigma_y=3000$  kgf/cm<sup>2</sup> の円柱体の場合、 $W_P$  の値とその寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響は、□タイプの角柱体のそれとほぼ同じである。一方、帯筋の降伏強度の増大とともに、円柱体の  $W_P$  は角柱体より大きくなる

が、試験体寸法による  $W_P$  の値の差異の絶対量そのものは、□タイプの角柱体の場合と同様あまり変化せず、3 ~ 5 kgf/cm<sup>2</sup> 程度である。但し、拘束力が極めて大きい場合（図-4.4.7 (c) の  $S=b/8$  の場合）には、 $W_P$  の寸法依存性が小さくなる傾向がある。

#### c) 帯筋形状の影響

図-4.4.8 (a) ~ (c) は、 $W/C=25\%$ 、帯筋ピッチ  $S=b/6$  の角柱体の  $W_P$  に及ぼす帯筋形状の影響を帯筋の降伏強度別に示したものである。 $W_P$  の値は、帯筋の横拘束力の大きさが大きいほど、すなわち、帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が増すほど大きな値を示す。 $W_P$  の寸法効果は、前項の○タイプの場合と同様、帯筋の横拘束力が極めて高い場合（□タイプの角柱体のように  $W_P$  の値そのものが大きい場合）には若干減少する傾向がある。

### (4) 結論

RC 角柱体並びに RC 円柱体の実験結果に基づき、RC 柱の圧縮破壊時エネルギー（塑性ひずみエネルギー）吸収能に及ぼす試験体寸法、帯筋のピッチと降伏強度、およびコンクリート強度の影響について考察した。得られる知見を以下に要約する。

- 1) 本研究の範囲内では、高さとの比 ( $H/D$ ) が 2 の RC 円柱体の終局破壊形態は、ほとんどの場合、せん断型の斜め滑り破壊であった（写真-4.4.1）。
- 2) 柱試験体の破壊片分析によれば、大径の破壊片の大きさは、ほぼ試験体の寸法比に応じた大きさであった。この傾向は、既往の研究結果<sup>7)</sup>と一致する（写真-4.4.2）。
- 3) RC 柱の破壊時吸収エネルギー  $W_P$  は、試験体寸法が大きくなるにつれてかなり顕著に低下する。この寸法効果は、帯筋による横拘束力が大きいほど、すなわち帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が大きいほど若干ではあるが減少する傾向がある（図-4.4.6 ~ 4.4.8）。



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, 1990.6
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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.744-749, 1992.6
- 5) 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
- 6) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗、圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.147-152, 1994
- 7) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗・谷川恭雄、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的研究、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.65-73, 1994

表-4.2.1 RC柱の実験の概要

RC柱の寸法		主筋	帯筋		
断面 $b \times b$ (cm)	高さ $H$ (cm)	直径 $\phi$ (mm)	直径 $\phi_w$ (mm)	形状と間隔	
				形状	間隔
9.7 × 9.7	19.4	D6	5.0	plain	b/4    ※3 b/8
15.0 × 15.0	30.0	D10	5.6	□ ※1	
20.0 × 20.0	40.0	D13	8.0	□ ※1	
25.0 × 25.0	50.0	D16	10.0	□ ※2	

[注] ※1 : 主筋8本、※2 : 主筋12本、※3 : □ タイプのみ

表-4.2.2 主筋の力学特性

公称直径	直径 $\phi$ (mm)	降伏点 $\sigma_y$ ※1 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸率 $e$ (%)
D6	6.4	3430	6140	20.4
D10	9.5	3070	5720	22.9
D13	12.7	3500	5210	25.7
D16	15.9	3400	5390	29.2

[注] ※1  $\sigma_y$ : 0.2% オフセットストレス

表-4.2.3 帯筋の力学特性

公称直径	直径 $\phi$ (mm)	降伏点 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸率 $e$ (%)	$\sigma_y \cdot A_s / A_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
φ5.0	5.0	1890	3020	34.6	7.04
φ5.6	5.6	3190	4350	23.9	6.00
φ8.0	8.0	2820	3830	27.4	6.14
φ10.0	10.0	3500	4500	25.0	7.61

[Notes]  $A_s$ : 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-4.3.1 RC柱の実験の概要

試験体寸法		主筋		帯筋		
断面 b×b (cm)	高さ (H=2b) H (cm)	直径 φ (mm)	直径 φ <sub>w</sub> (mm)	形状と間隔		降伏点 σ <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
				形状	間隔	
9.7×9.7	19.4	D6	4.0 ※4	plain ※1	b/4	3000
15.0×15.0	30.0	D10	6.0 ※5	※1	b/6	5000
20.0×20.0	40.0	D13	8.0 ※6	※2	※3	15000
25.0×25.0	50.0	D16	10.0 ※7	※2	b/8	

[注] ※1 : 主筋8本、 ※2 : 主筋20本 ※3 : □タイプのみ、  
 ※4 : φ5(σ<sub>y</sub>=3000), φ3.5(σ<sub>y</sub>=15000)  
 ※5 : φ5.6(σ<sub>y</sub>=3000), φ5(σ<sub>y</sub>=15000), ※6 : φ7.3(σ<sub>y</sub>=15000)  
 ※7 : φ9.2(σ<sub>y</sub>=15000)

表-4.3.2 主筋の力学特性

公称直径	直径 φ (mm)	降伏点 σ <sub>y</sub> ※1 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ σ <sub>u</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 ε (%)
D6	6.4	3430	6140	20.4
D10	9.5	3070	5720	22.9
D13	12.7	3500	5210	25.7
D16	15.9	3400	5390	29.2

[注] ※1 σ<sub>u</sub>:0.2% オフセットストレス

表-4.3.3 帯筋の力学的特性

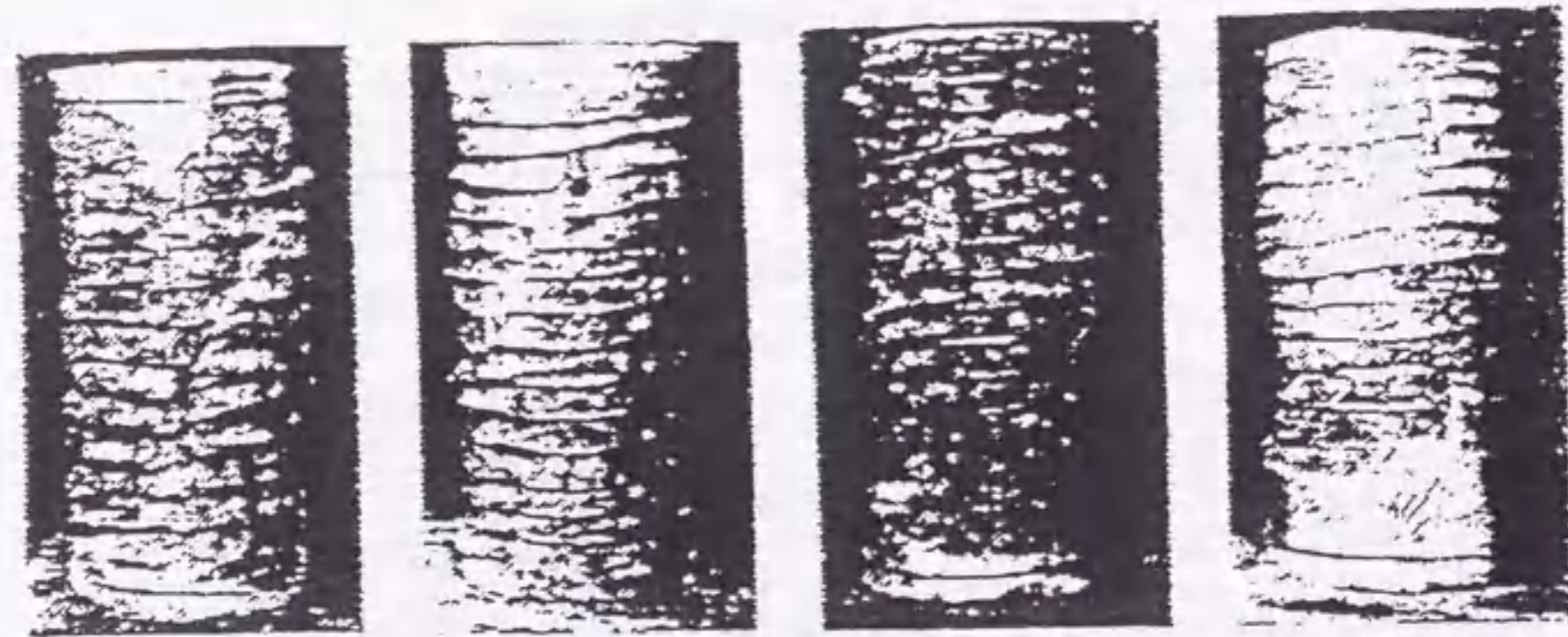
降伏点 レベル	公称直径	実測直径 φ (mm)	降伏点 σ <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ σ <sub>u</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸率 ε (%)	σ <sub>y</sub> ·A <sub>s</sub> /A <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
3000	φ5.0	5.0	1890	3020	34.6	7.04
	φ5.6	5.6	2830	3530	23.9	5.33
	φ8.0	8.0	3050	3960	27.4	5.86
	φ10.0	10.0	2780	3790	25.0	6.05
5000	φ4.0	4.0	5000 *	5240	9.7	11.6
	φ6.0	6.0	5470	5610	5.9	11.9
	φ8.0	8.0	5200 *	5540	32.5	11.3
	φ10.0	10.0	4530 *	4720	7.9	9.84
15000	φ3.5	3.5	14500 *	16100	9.5	25.4
	φ5.0	5.0	16500 *	21190	10.4	24.5
	φ7.4	7.3	17860 *	18370	6.6	33.3
	φ9.2	9.2	15110 *	15320	8.2	27.7

[注] \* : 0.2% オフセットストレス、 A<sub>s</sub>: 帯筋断面積、  
 A<sub>c</sub>: コアコンクリートの断面積

表-4.4.1 RC柱の実験の概要

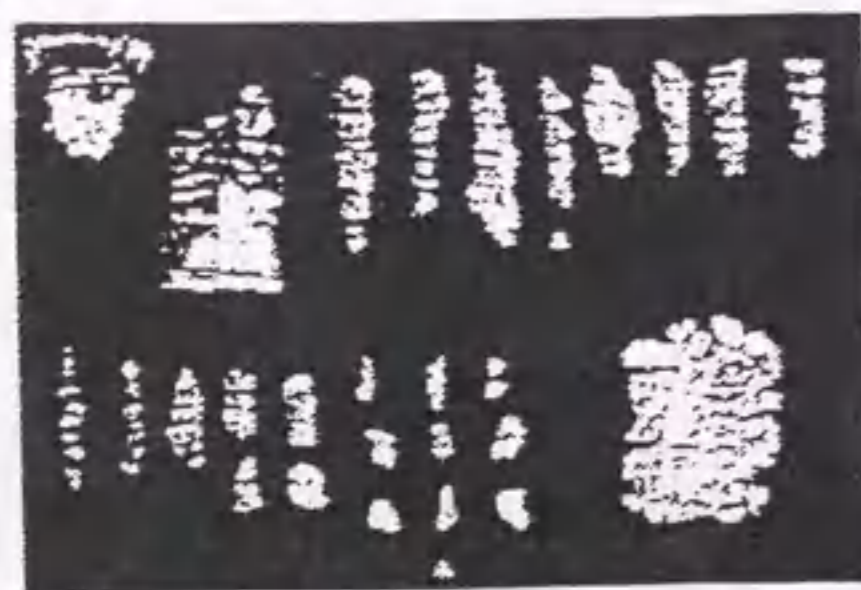
試験体寸法			主筋		帯筋		水セメント比 W/C (%)
角柱体	円柱体	高さ (H=2b) (H=2D) H (cm)	直径 φ (mm)	直径 φ (mm)	形状と間隔		
断面 b×b (cm)	直径 D10 (cm)				形状	間隔	
9.7×9.7	10	19.4(20)	D6	4.0 ※1	plain ※5	b/4	32
15.0×15.0	15	30.0	D10	6.0 ※2	※5	b/6 ※8	
20.0×20.0	20	40.0	D13	8.0 ※3	※6	b/8 ※9	
25.0×25.0	25	50.0	D16	10.0 ※4	※7		

[注] ※1 : φ5(σ<sub>y</sub>=3000, prism), φ3.5(σ<sub>y</sub>=15000), ※2 : φ5.6(σ<sub>y</sub>=3000), φ5(σ<sub>y</sub>=15000)  
 ※3 : φ7.3(σ<sub>y</sub>=15000), ※4 : φ9.2(σ<sub>y</sub>=15000), ※5 : 主筋 8本  
 ※6 : 主筋 12本 ※7 : 円柱体のみ主筋 6本  
 ※8 : W/C=25%のみ ※9 : □ と ○ タイプのみ



(a) D=10cm (b) D=15cm (c) D=20cm (d) D=25cm

写真-4.4.1 円柱体の破壊パターン (W/C=25%,  $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ ,  $S=b/8$ )



(a) D=10cm



(b) D=15cm



(c) D=20cm



(d) D=25cm

写真-4.4.2 破壊後のコンクリート円柱体の破壊片  
(W/C=25%,  $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$ ,  $S=b/8$ )

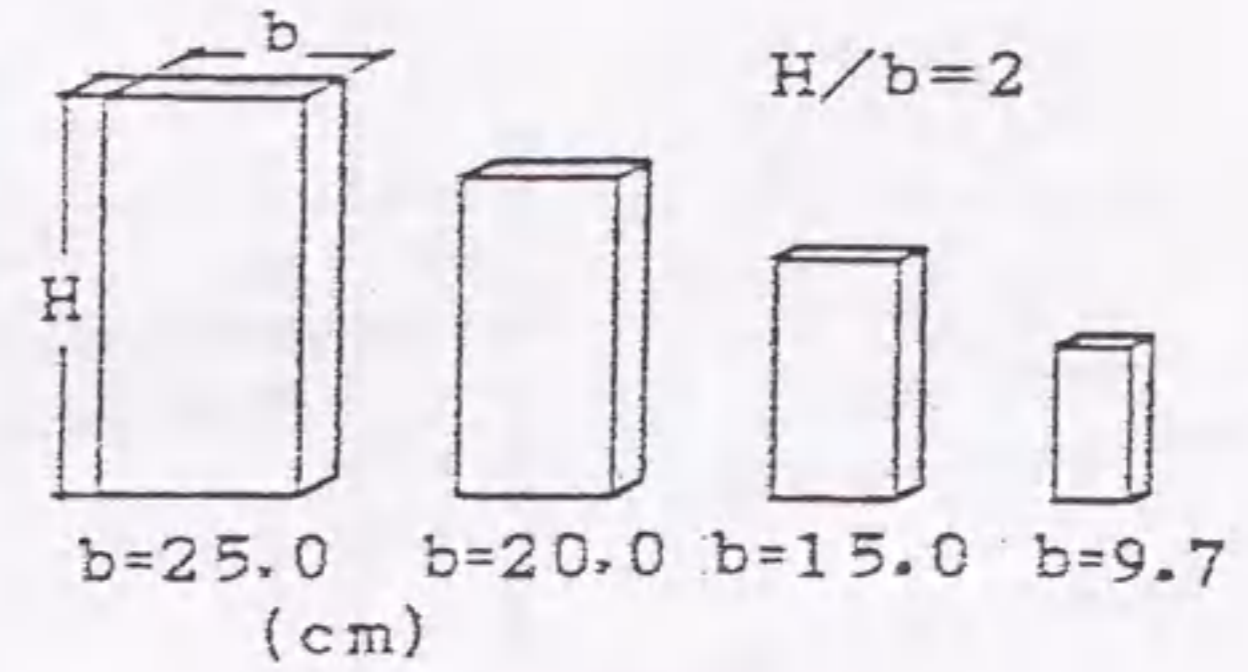


図-4.2.1 試験体の寸法

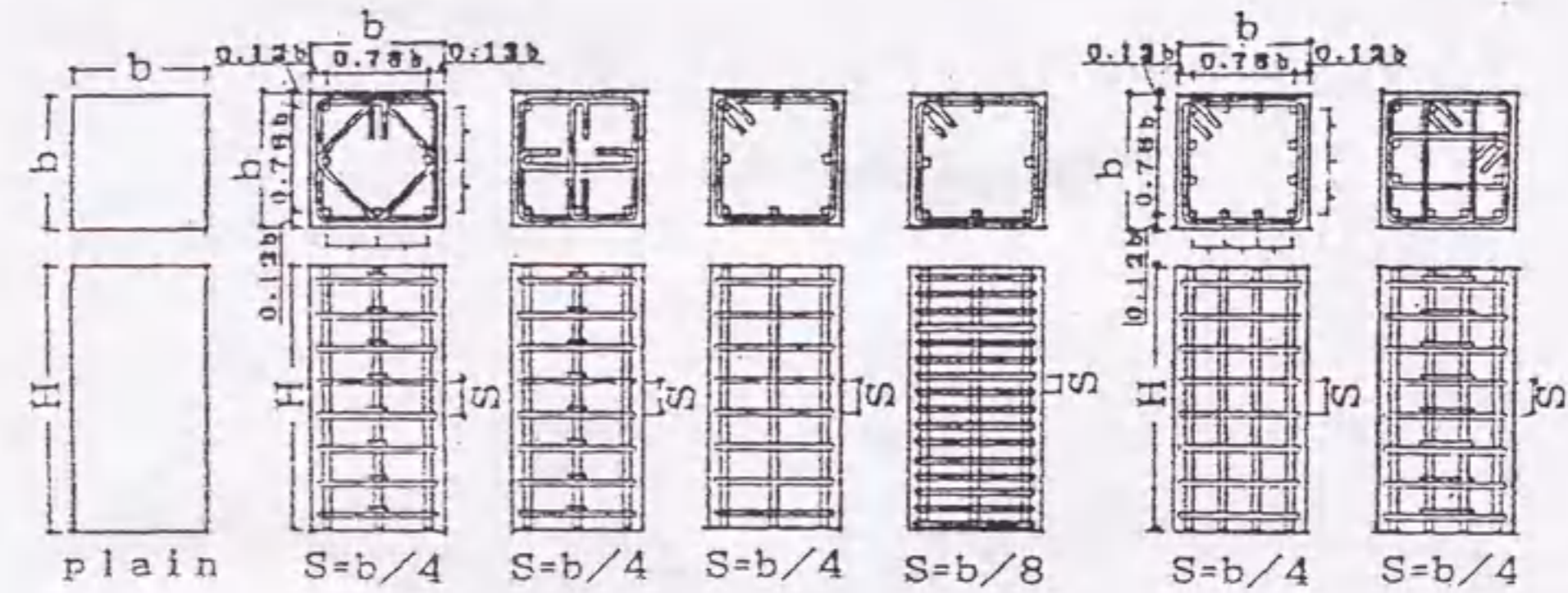


図-4.2.2 帯筋の配置

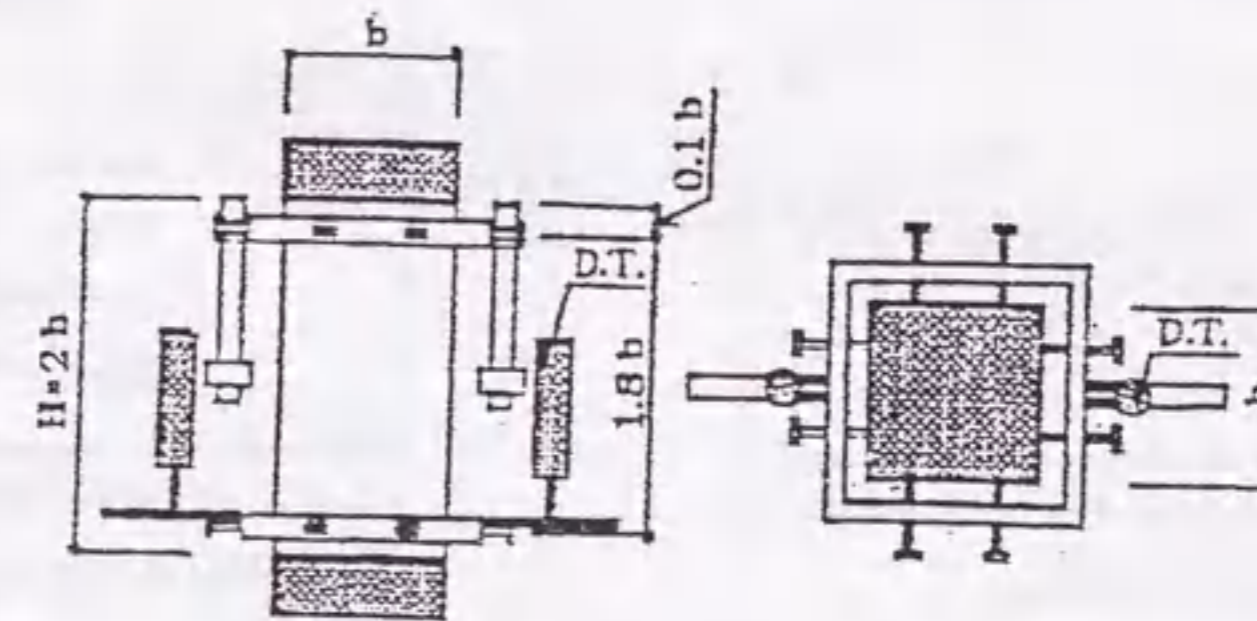
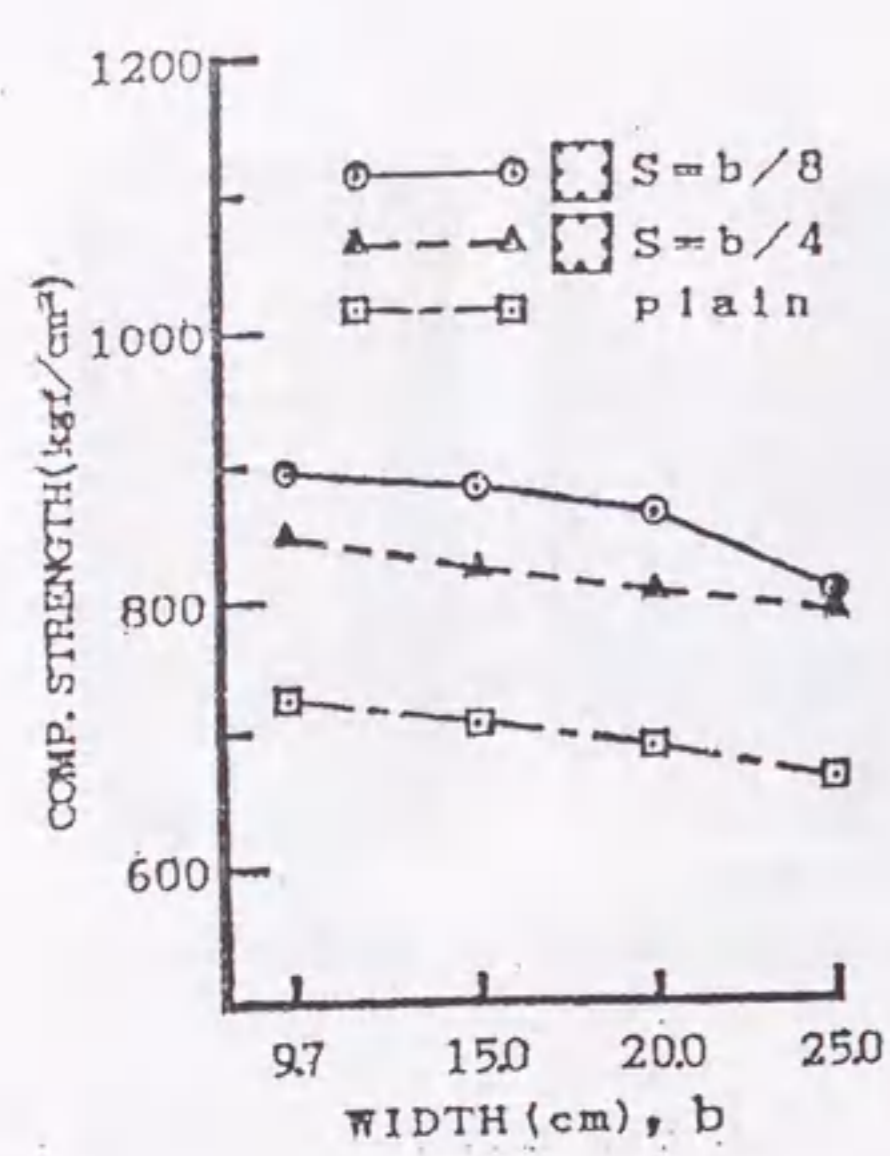
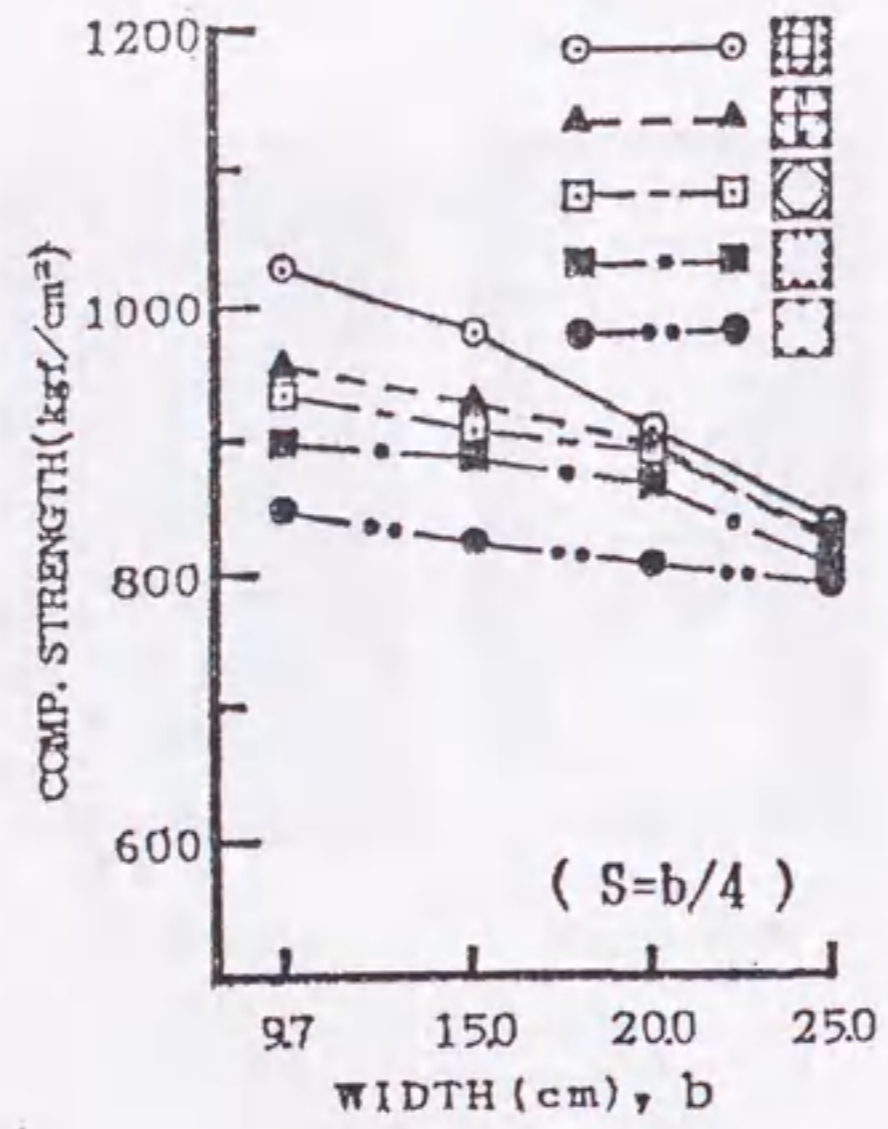


図-4.2.3 ひずみの測定方法

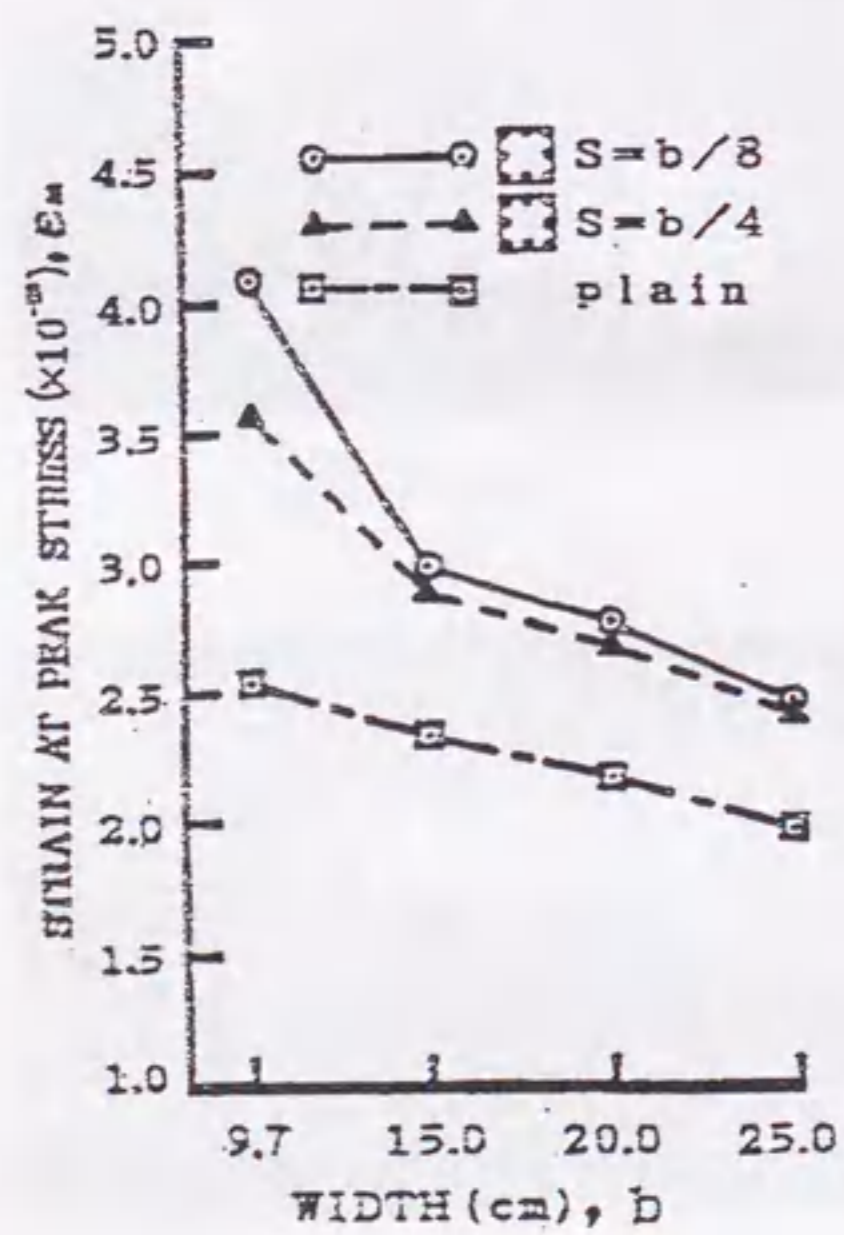


(a) 帯筋ピッチの影響 (□タイプ)

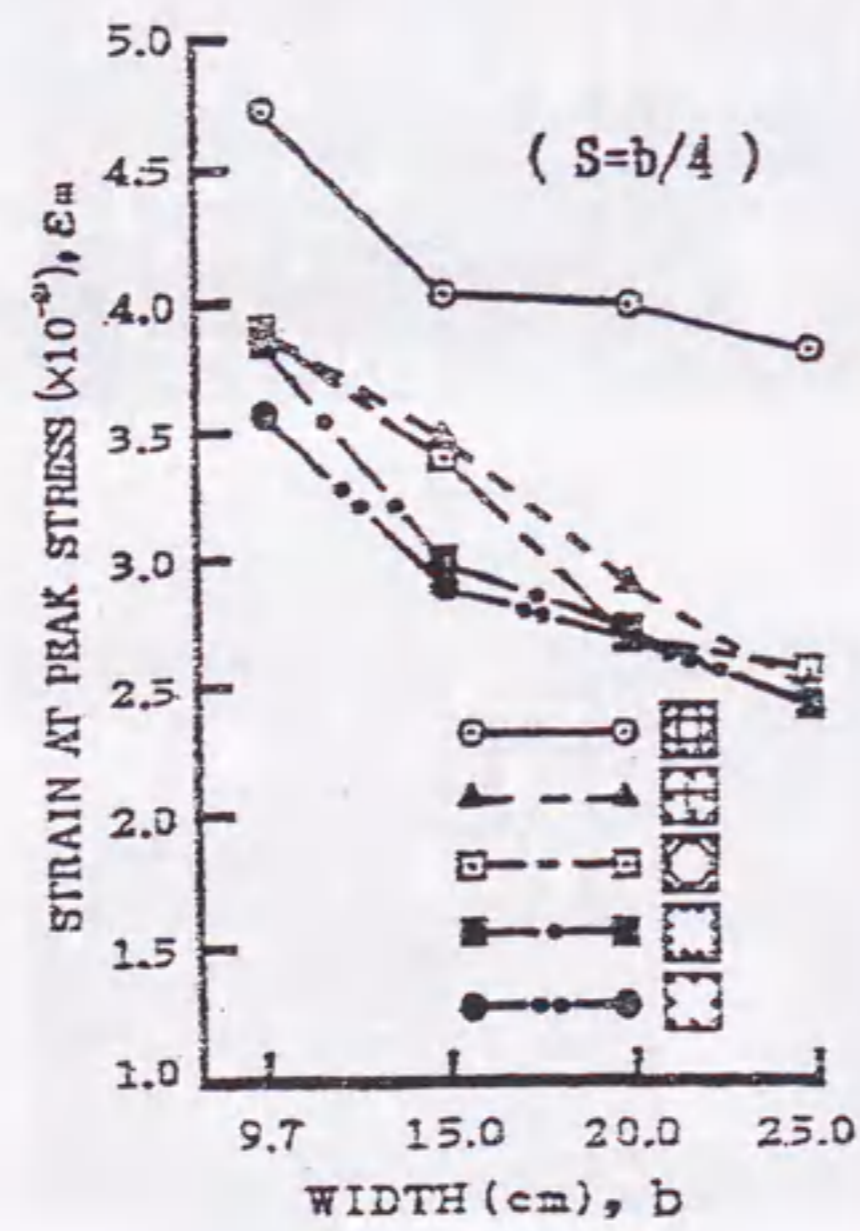


(b) 帯筋形状の影響 (S=b/4)

図-4.2.4 圧縮強度の寸法効果

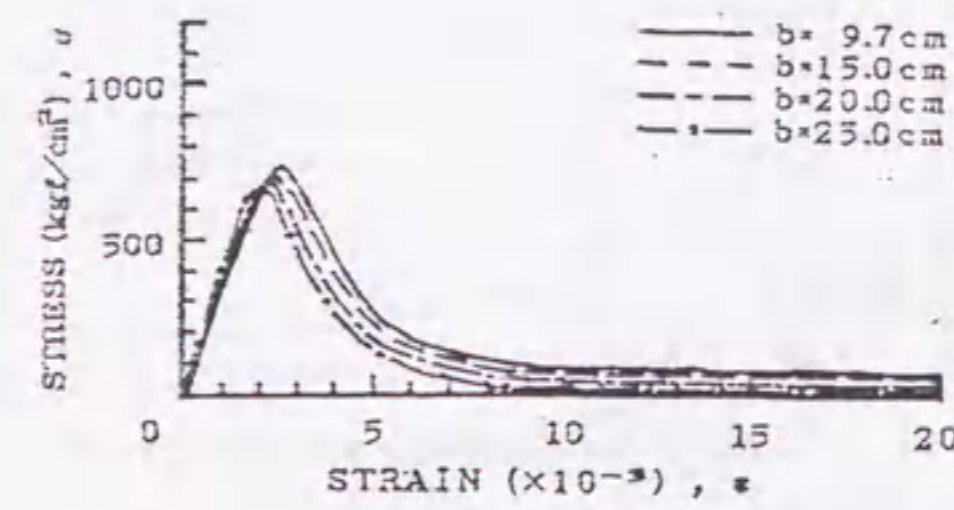


(a) 帯筋ピッチの影響 (□タイプ)

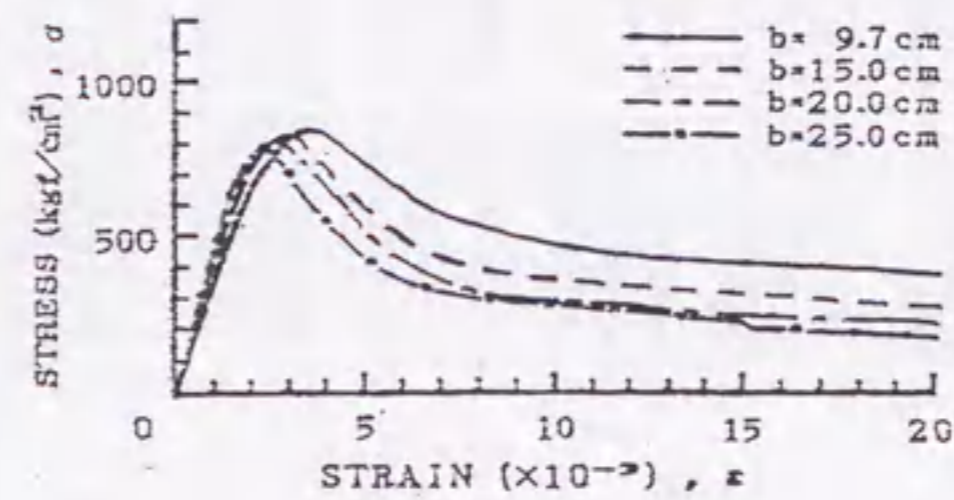


(b) 帯筋形状の影響 (S=b/4)

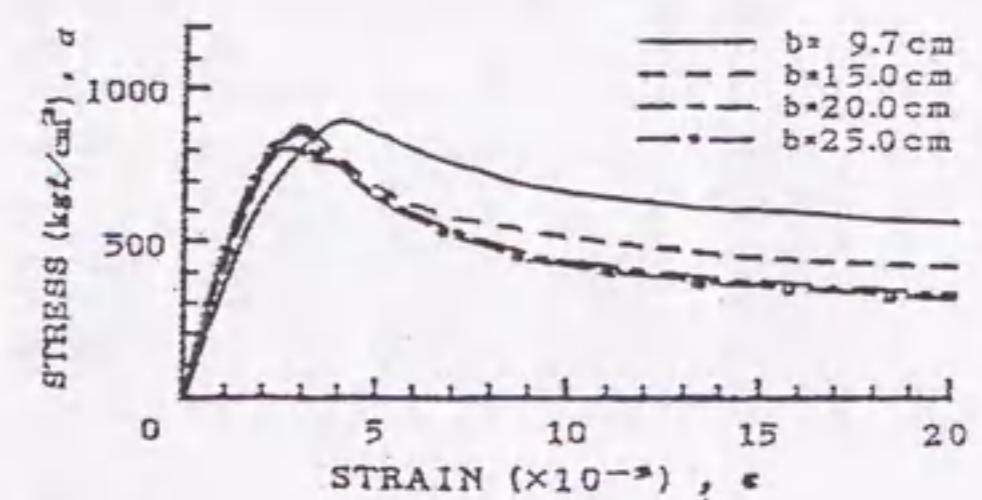
図-4.2.5  $\epsilon_m$ の寸法効果



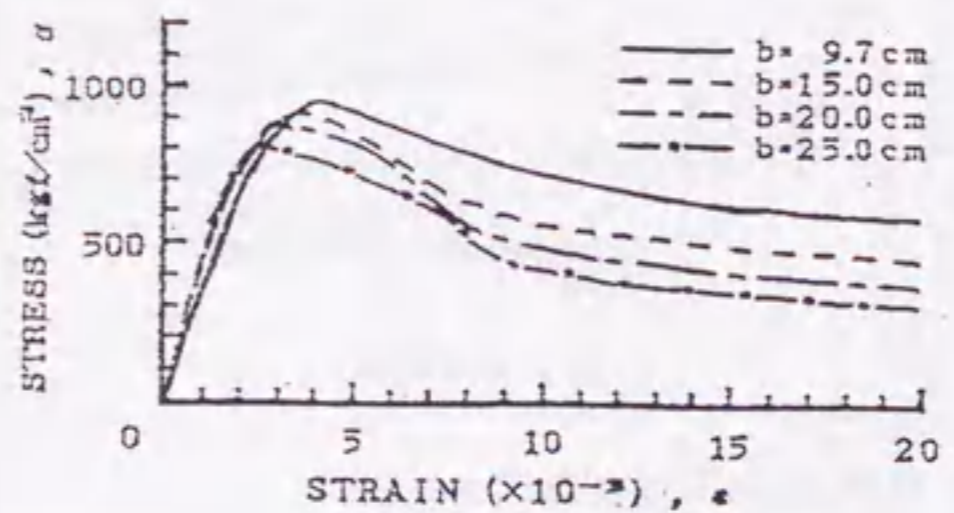
(a) プレーンコンクリート



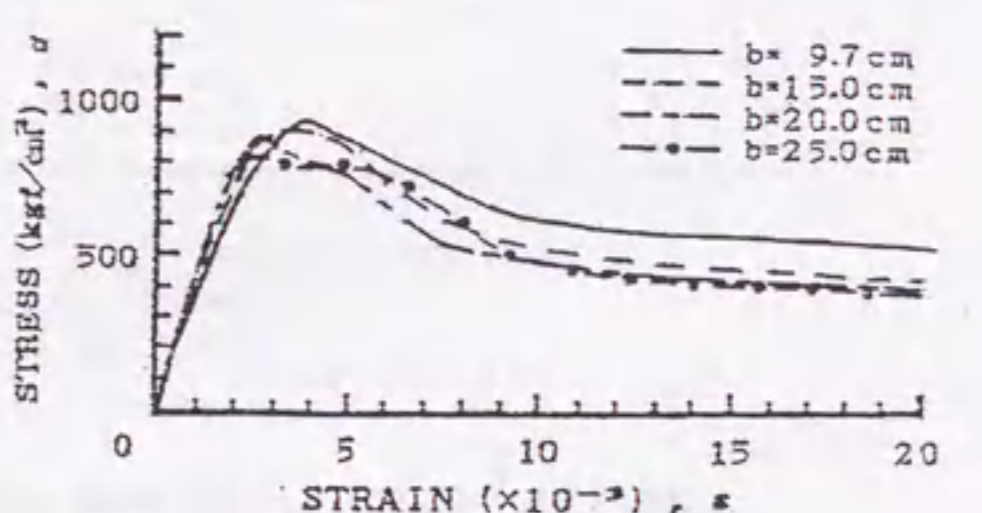
(b) □タイプ (S=b/4)



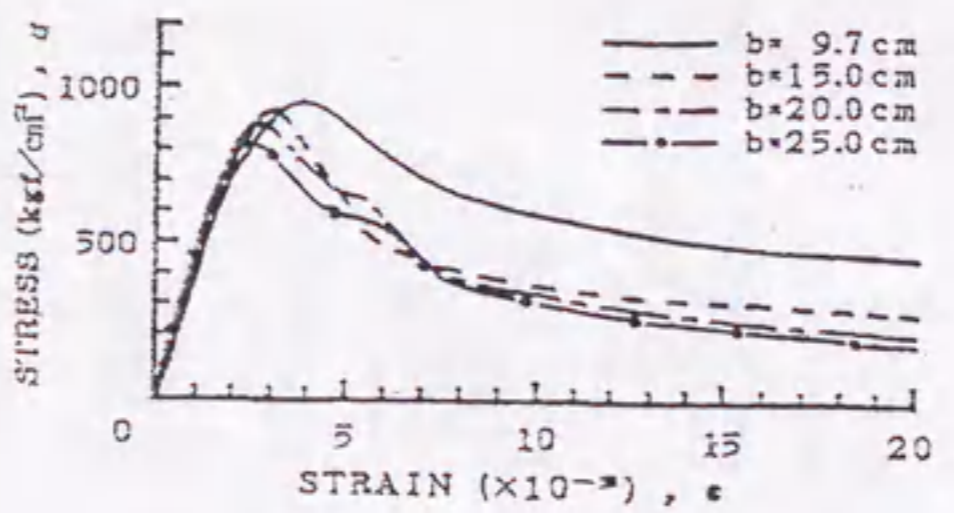
(c) □タイプ (S=b/8)



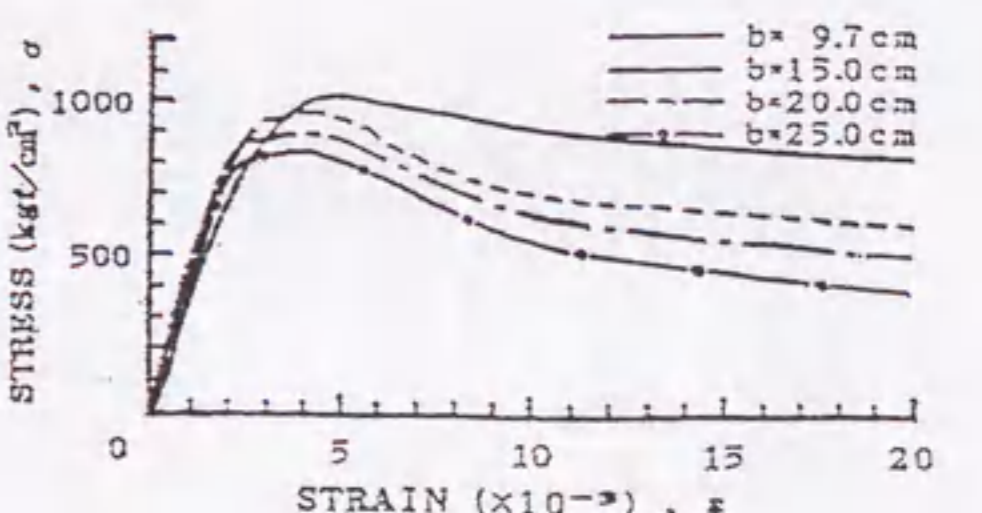
(d) ⊕タイプ (S=b/4)



(e) ⊗タイプ (S=b/4)

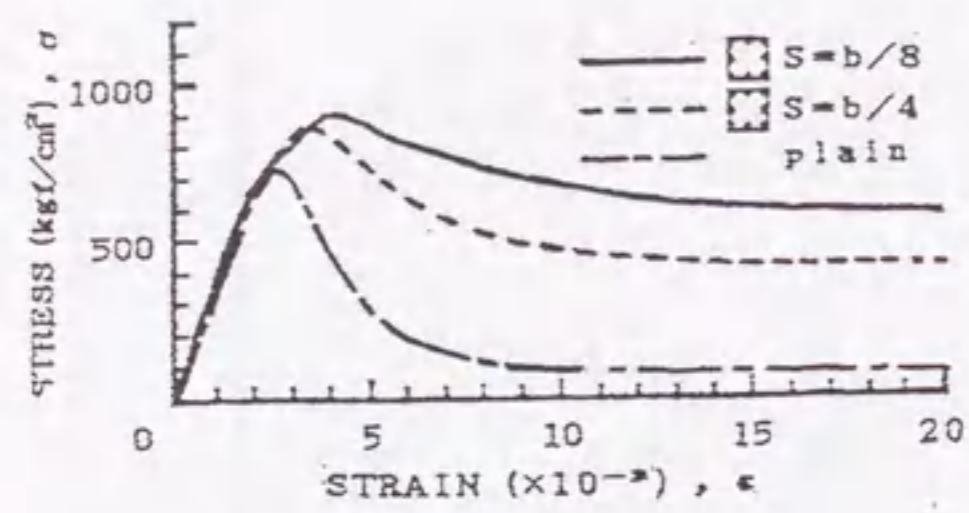


(f) □タイプ (S=b/4)

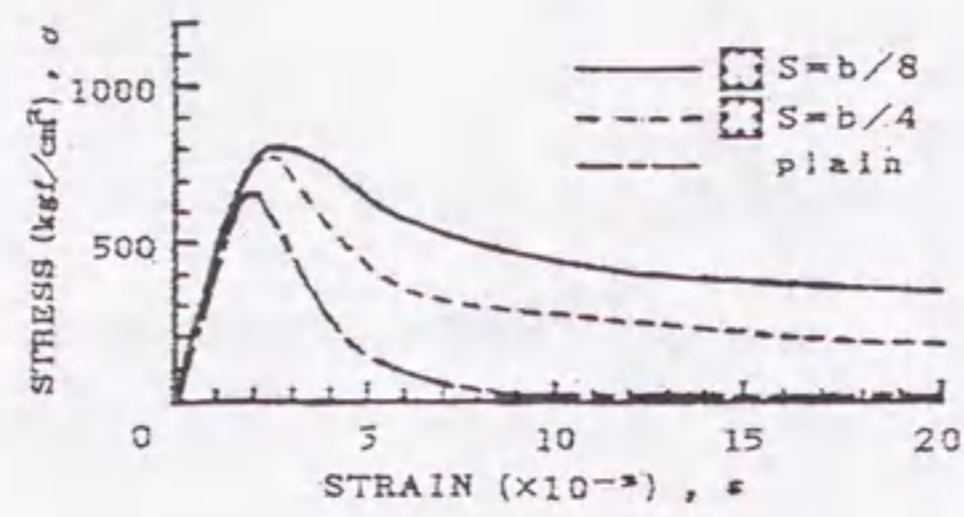


(g) ⊕タイプ (S=b/4)

図-4.2.6 応力-ひずみ曲線の寸法効果

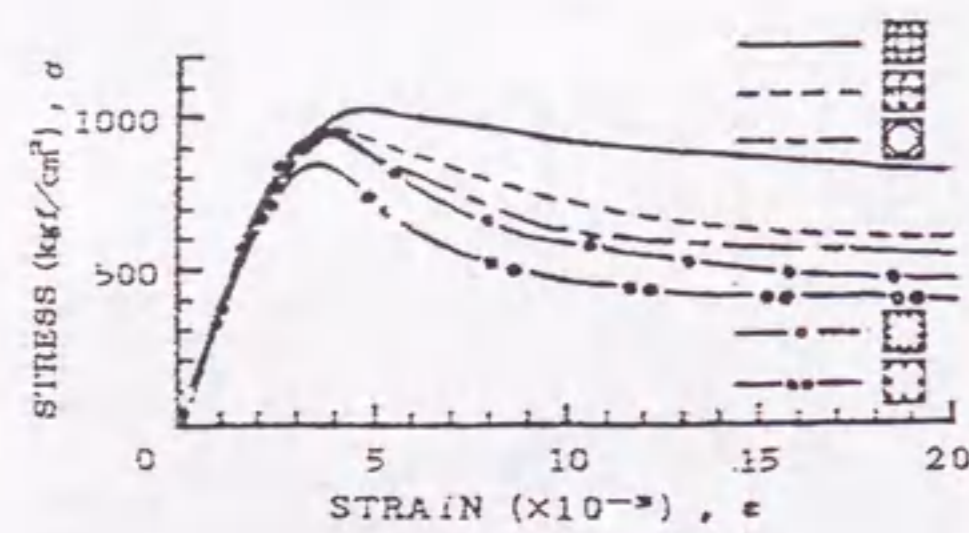


(a) b=9.7cm

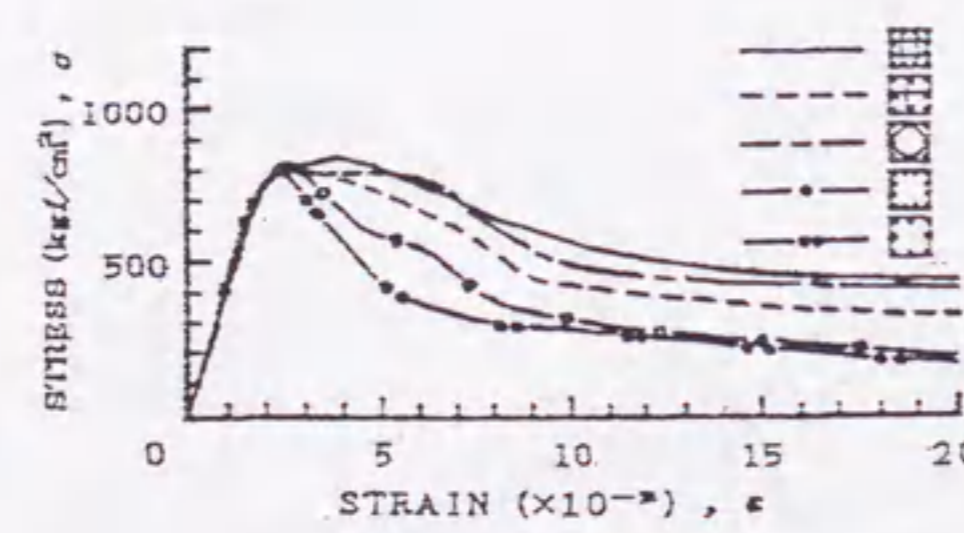


(b) b=25cm

図-4.2.7 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチの影響 (□タイプ)



(a) b=9.7cm



(b) b=25cm

図-4.2.8 応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチの影響 (S=b/4)

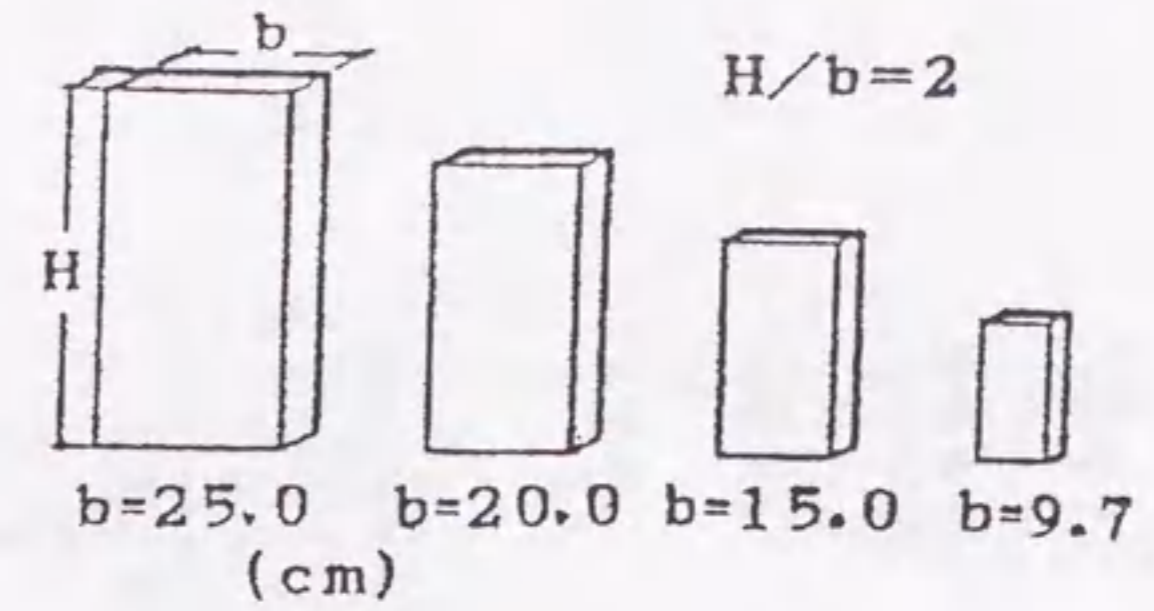


図-4.3.1 試験体の寸法

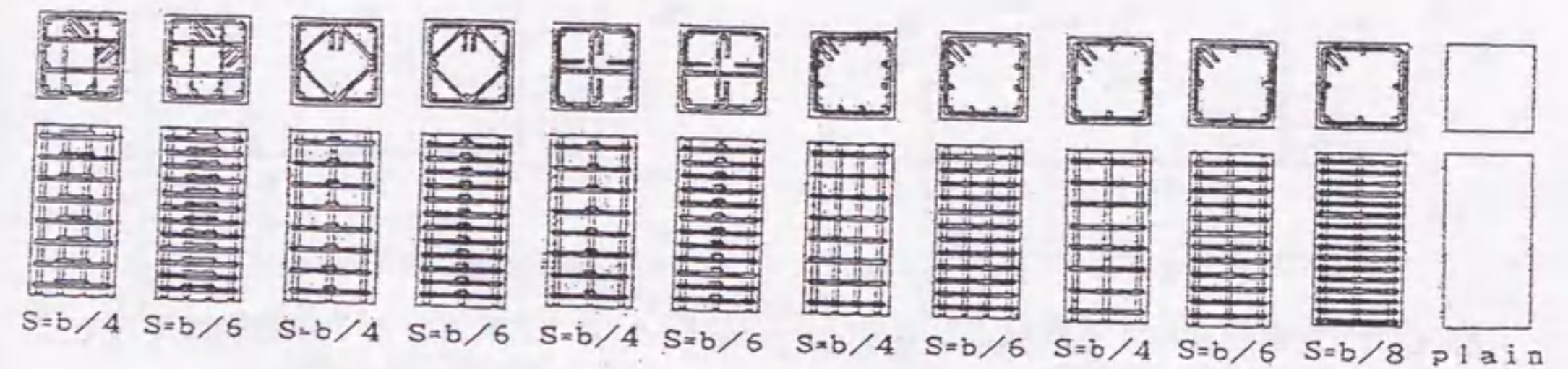


図-4.3.2 帯筋の形状・配置

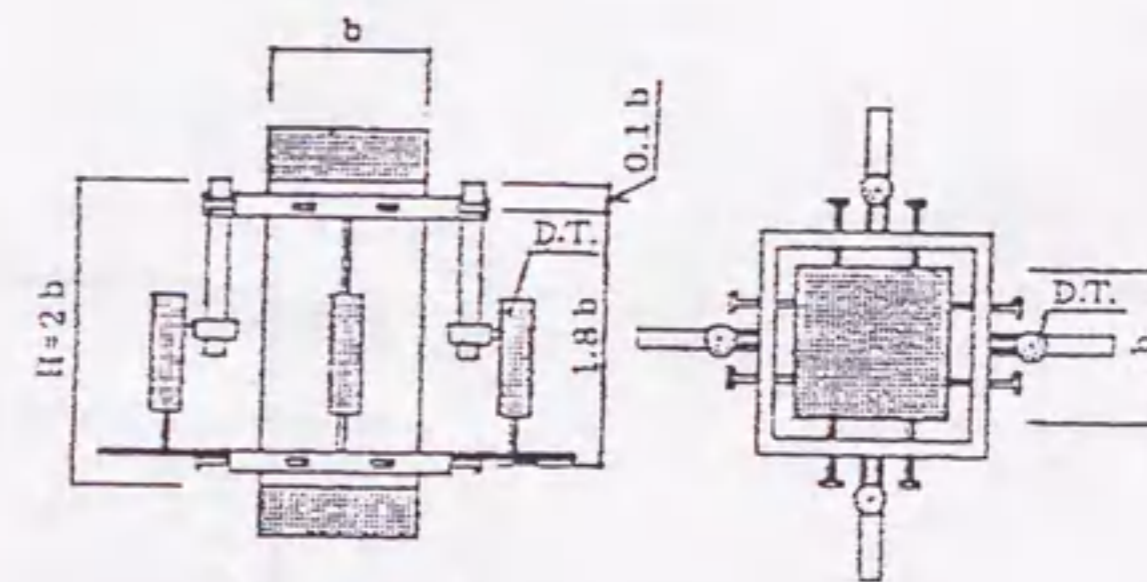
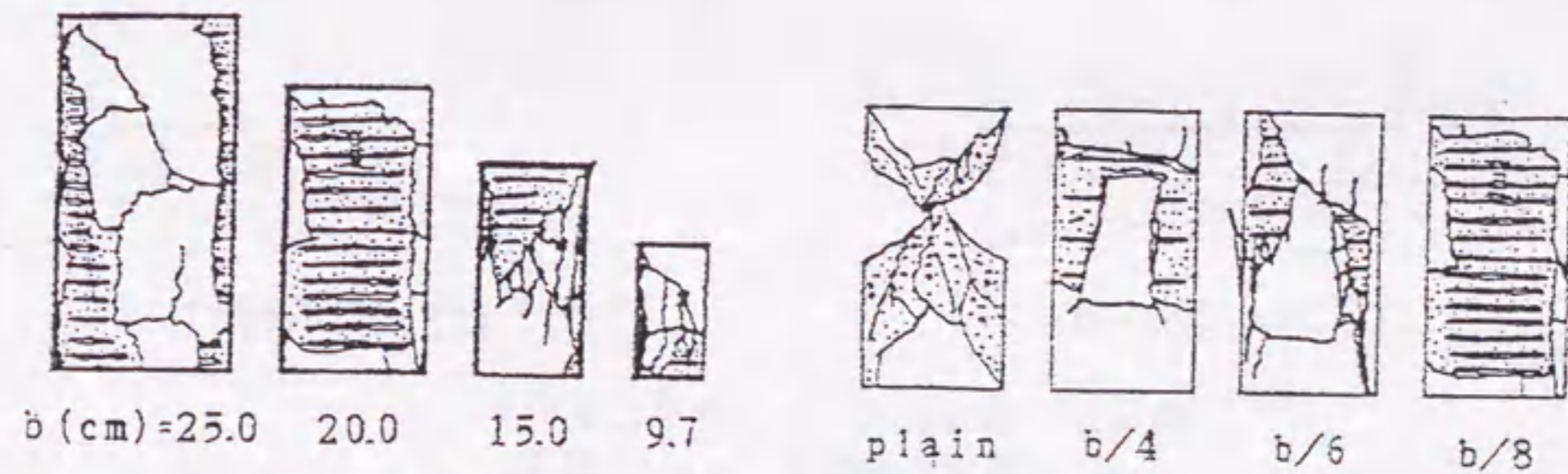


図-4.3.3 ひずみの測定方法



(a) □タイプ (S=b/6)

(b) □タイプ (b=20cm)

図-4.3.4 破壊パターンの一例 ( $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

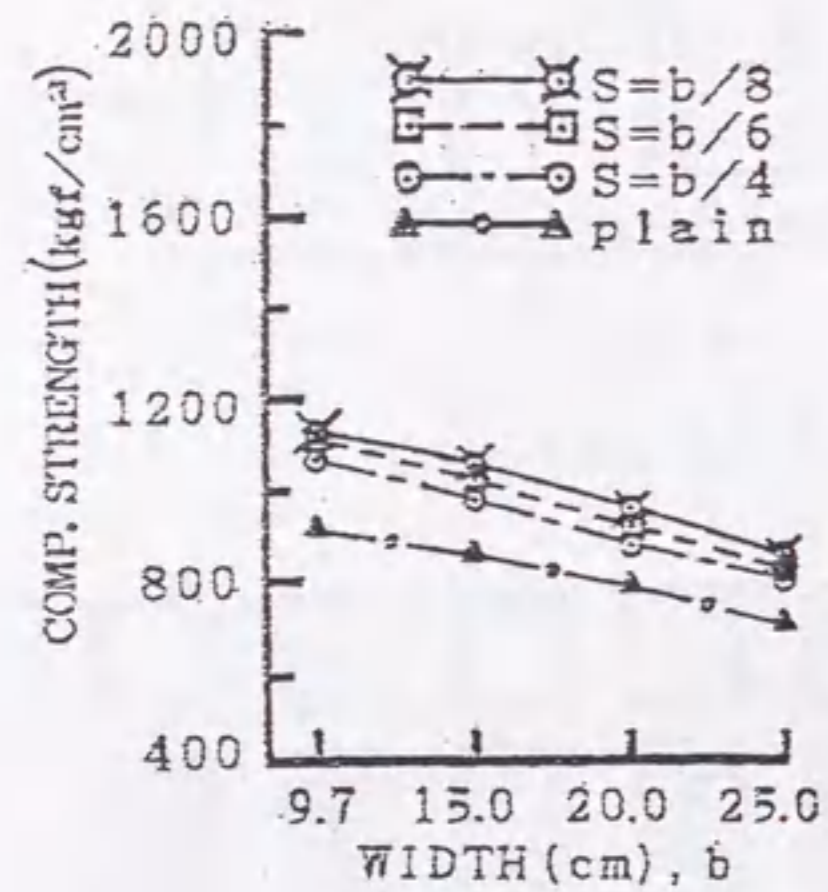


図-4.3.5 圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響 (□タイプ、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

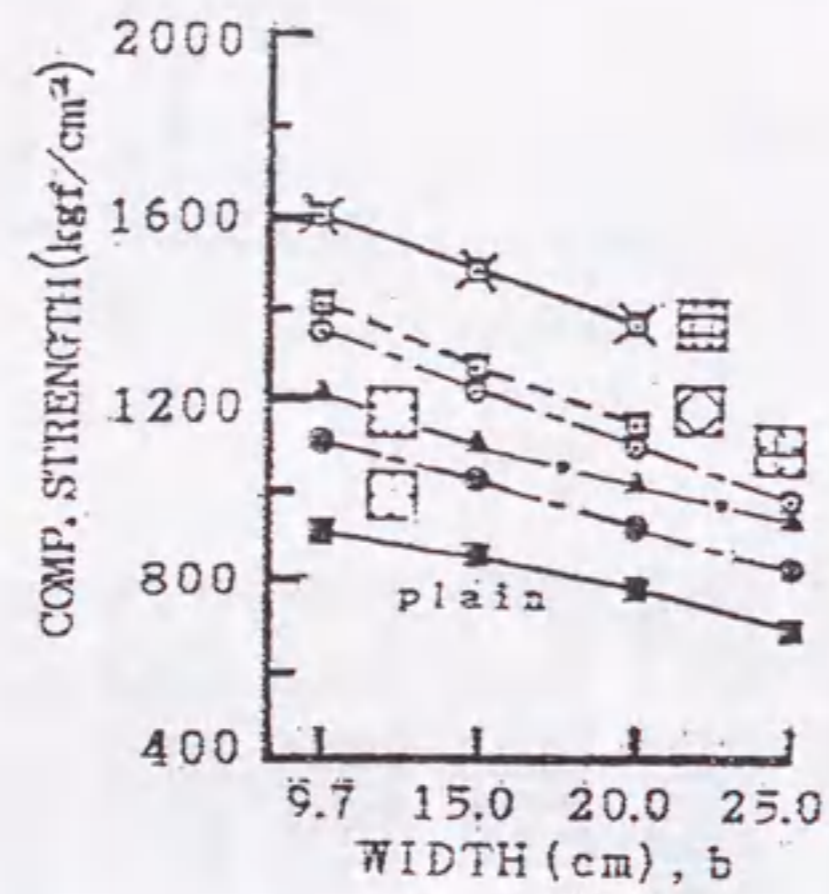
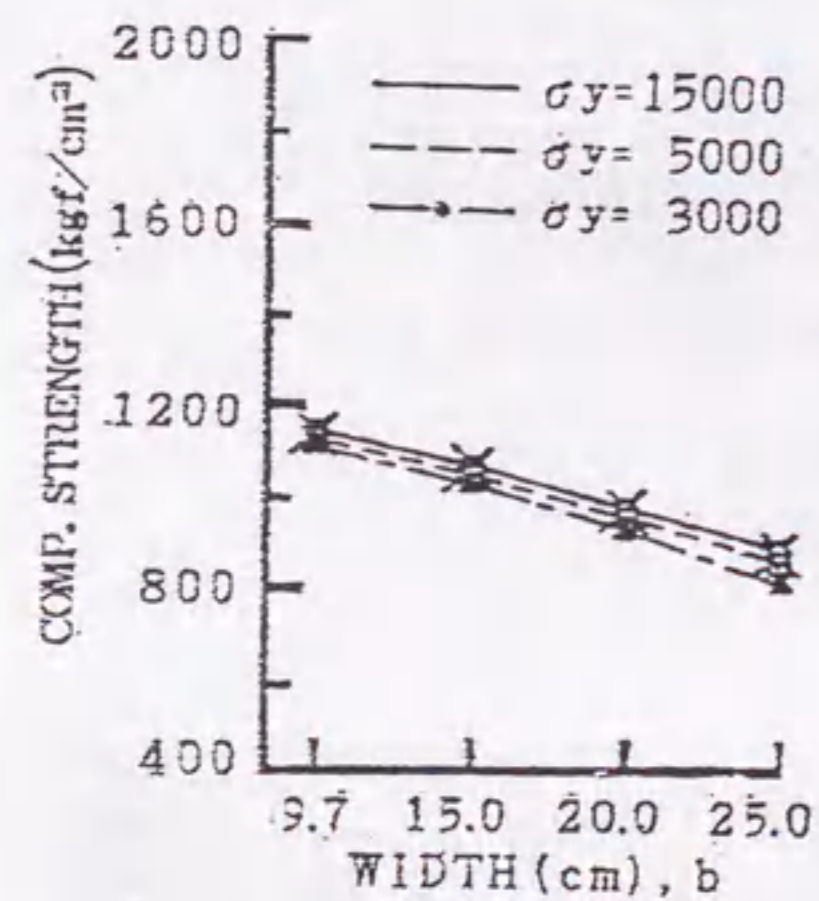
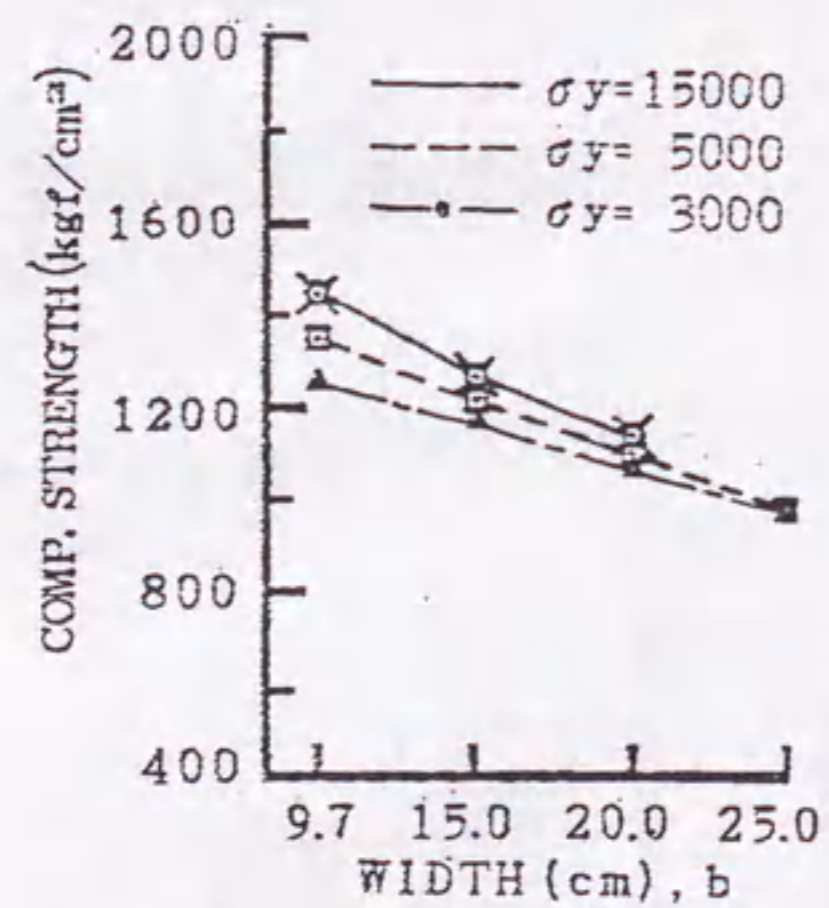


図-4.3.6 圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋形状の影響 ( $S=b/6$ 、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

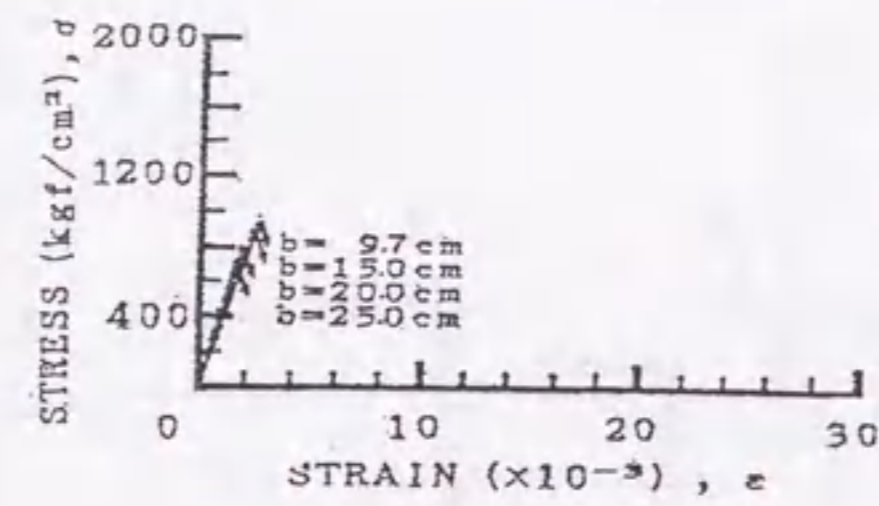


(a) □タイプ ( $S=b/8$ )

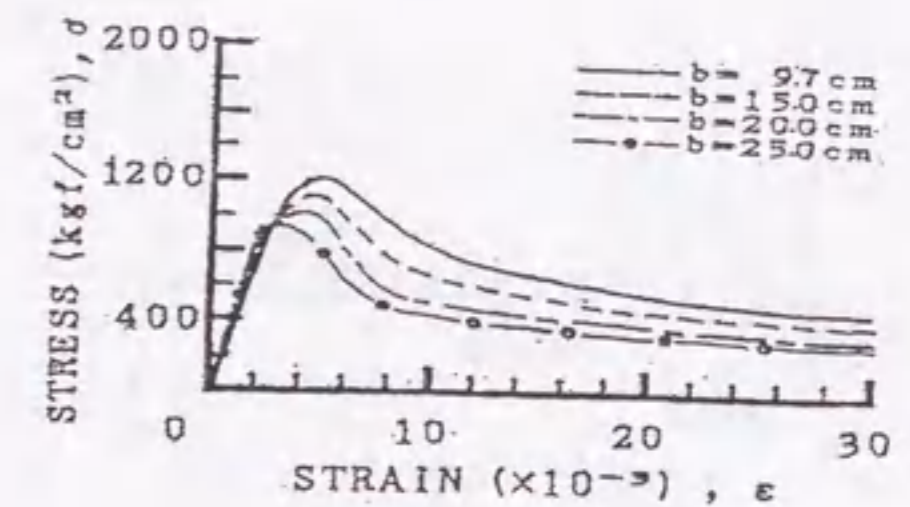


(b) □タイプ ( $S=b/6$ )

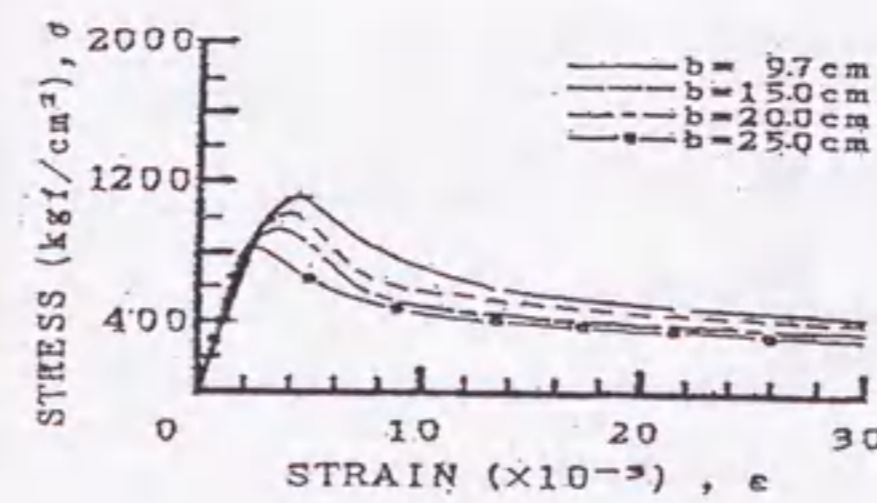
図-4.3.7 圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋の降伏点 ( $\sigma_y$ ) の影響



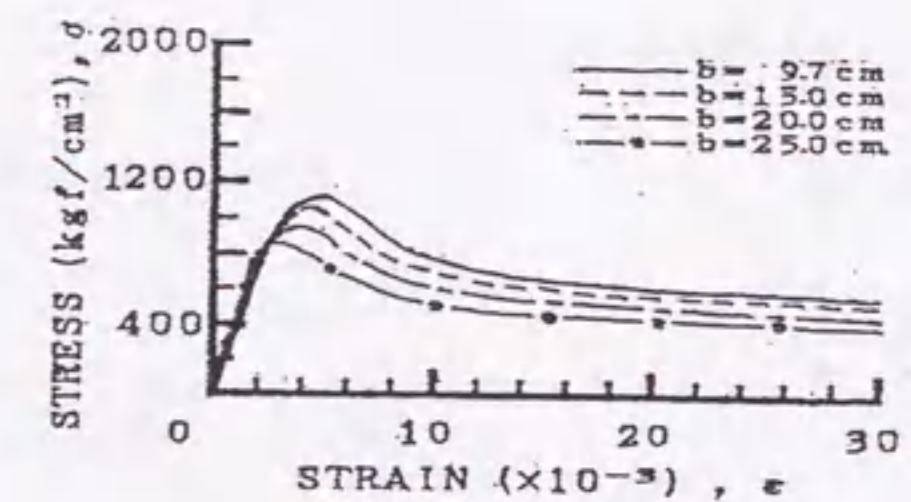
(a) プレーンコンクリート



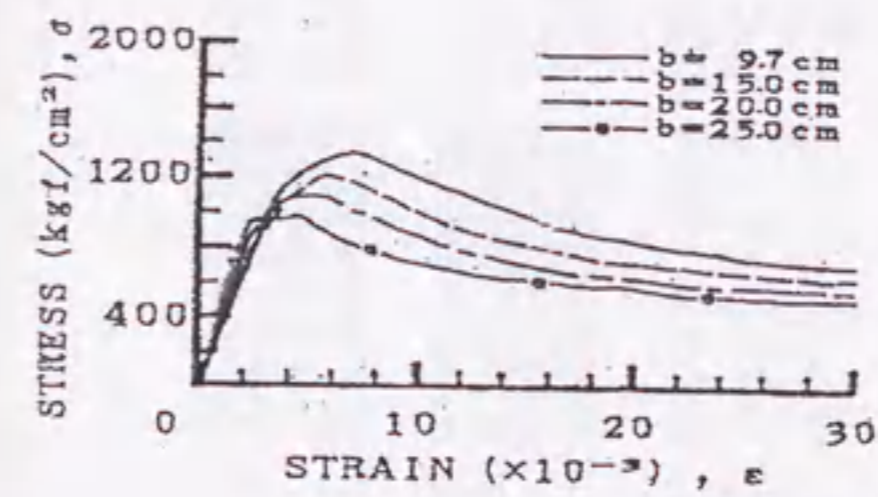
(b) □タイプ ( $S=b/6$ )



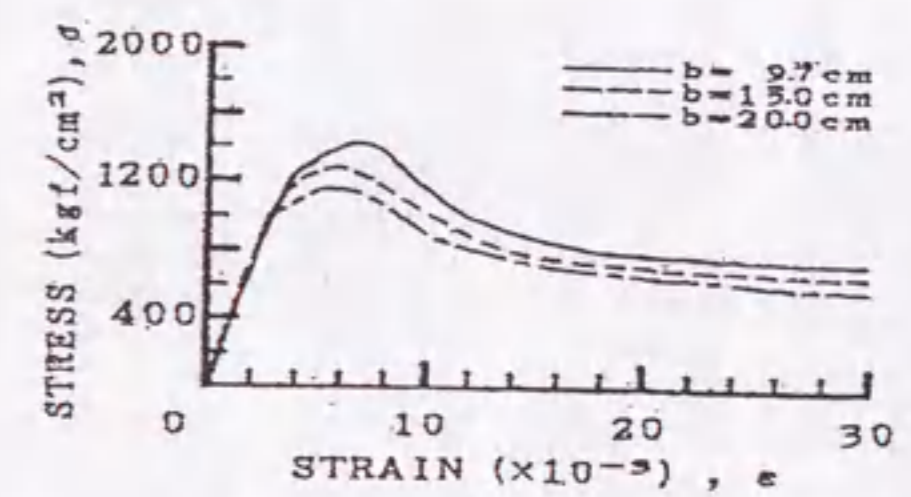
(c) □タイプ ( $S=b/6$ )



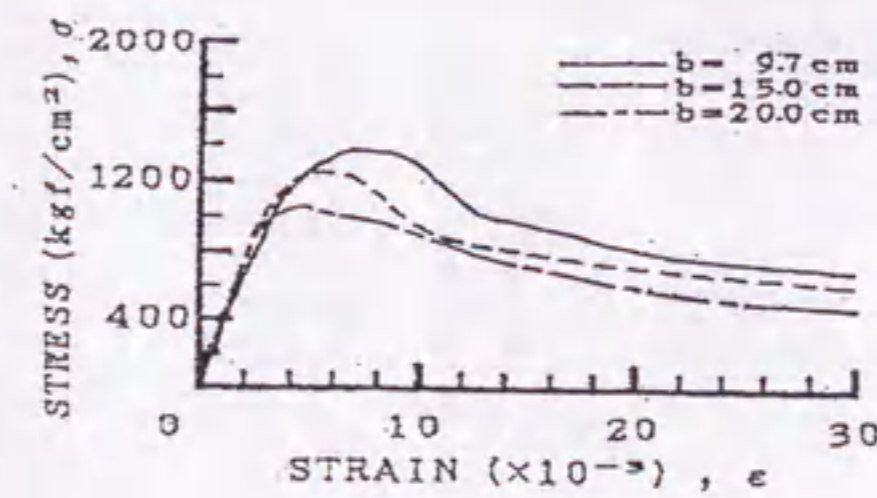
(d) □タイプ ( $S=b/8$ )



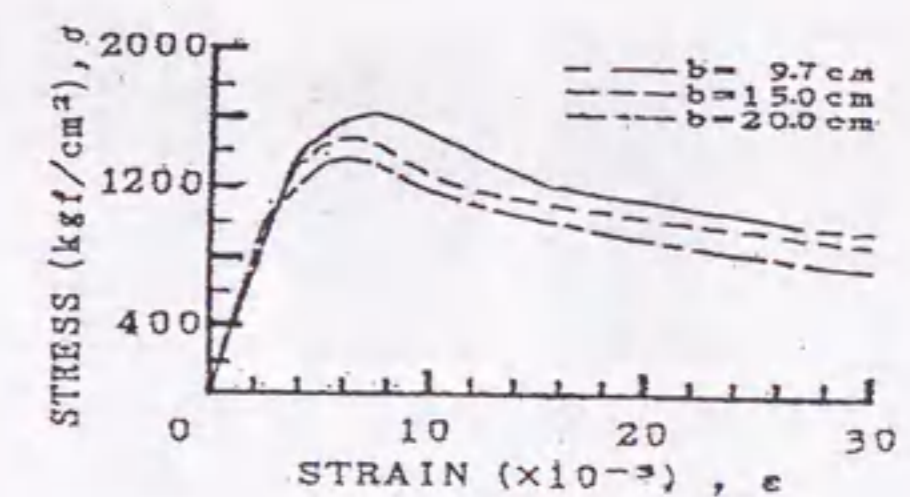
(e) □タイプ ( $S=b/6$ )



(f) □タイプ ( $S=b/6$ )

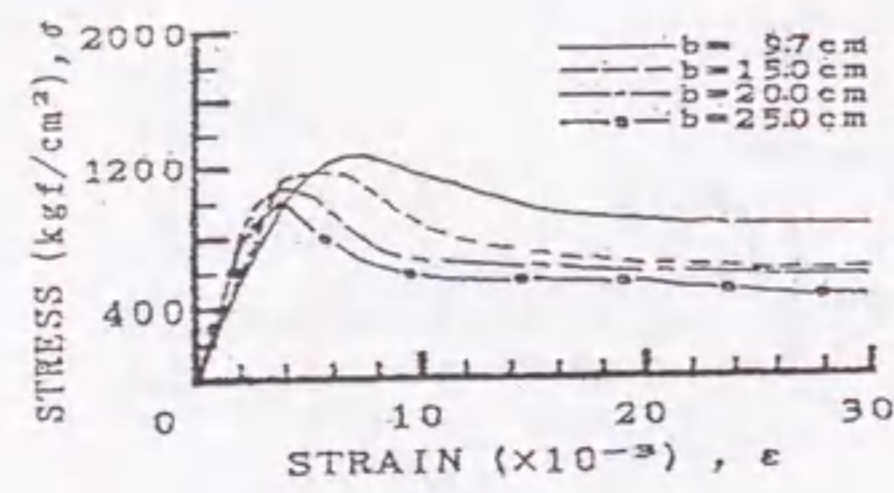


(g) □タイプ ( $S=b/4$ )

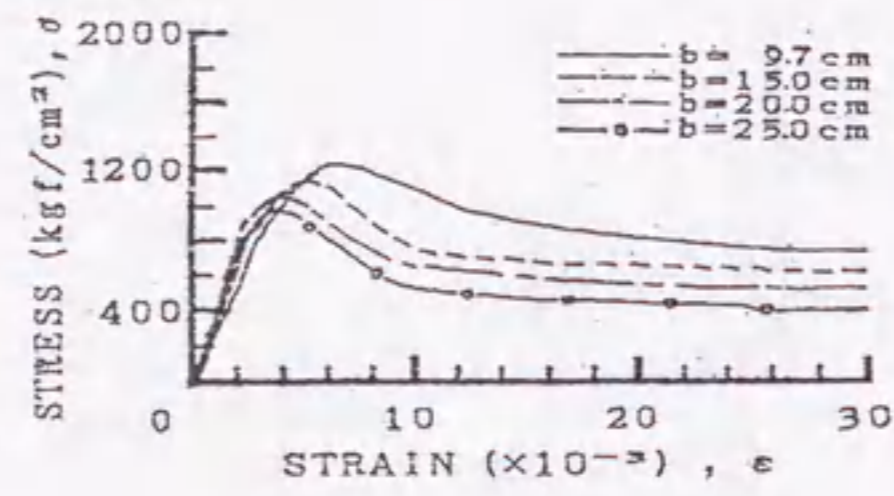


(h) □タイプ ( $S=b/6$ )

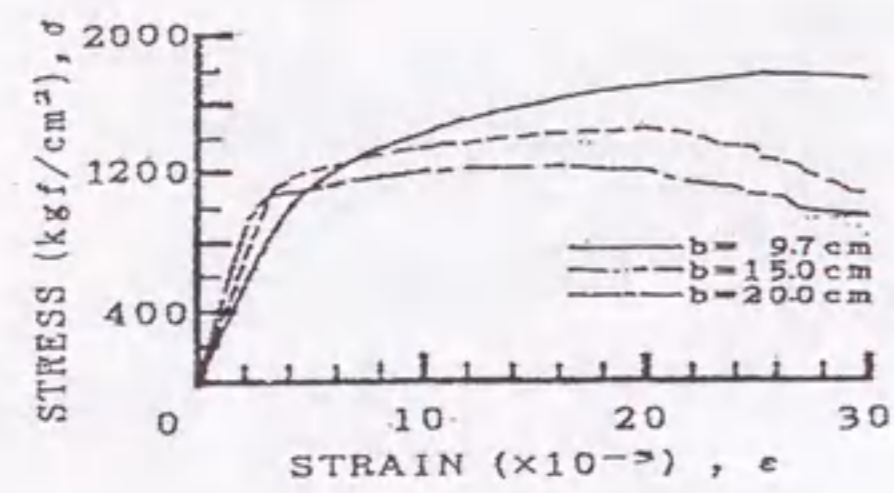
図-4.3.8 応力-ひずみ曲線の寸法効果 ( $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )



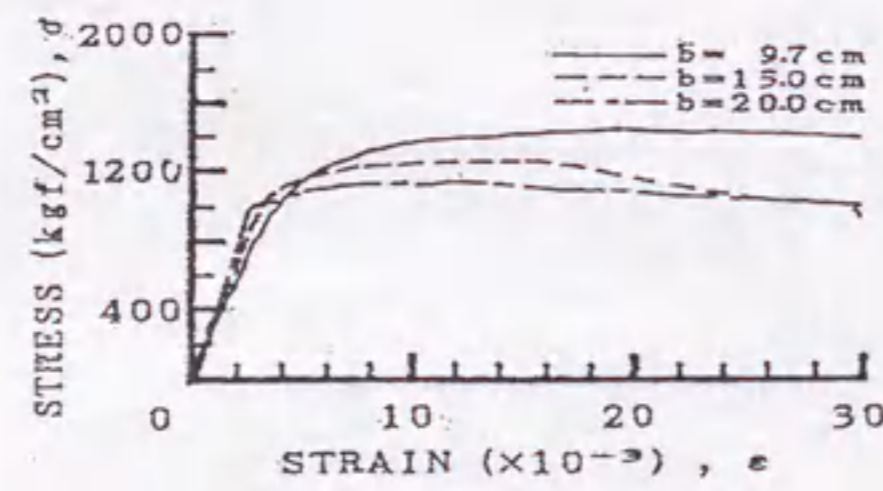
(a) □タイプ ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



(b) □タイプ ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )

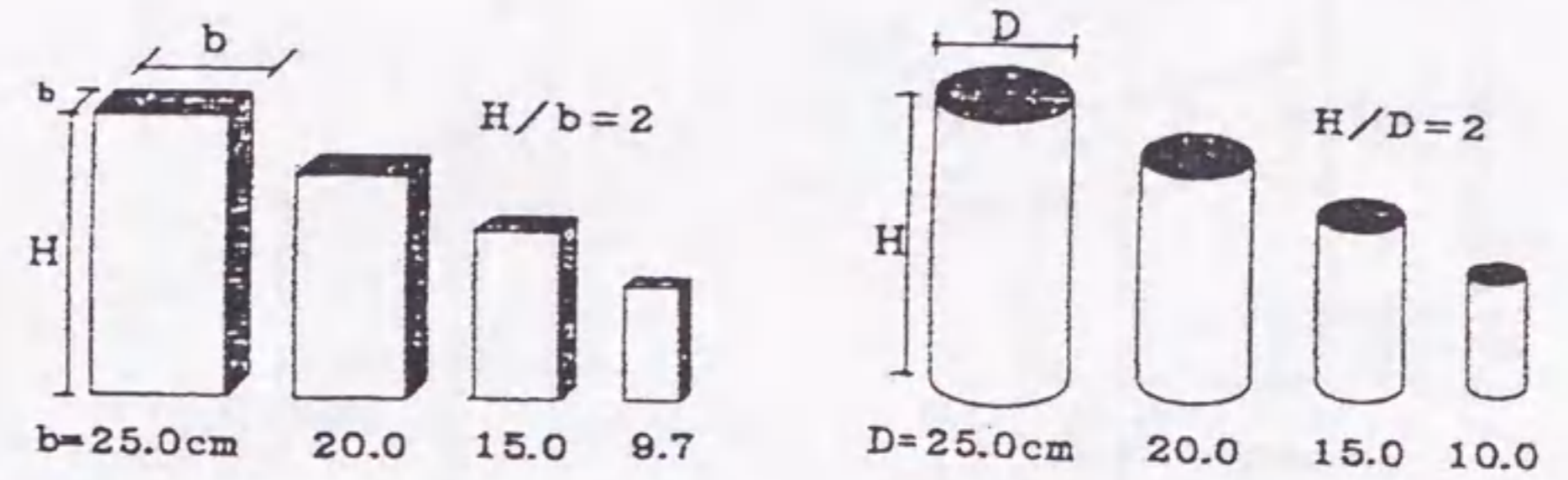


(c) □タイプ ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



(d) □タイプ ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )

図-4.3.9 応力-ひずみ曲線の寸法効果 ( $S=b/6$ )



(a) 角柱体 ( $H/D=2$ )

(b) 円柱体 ( $H/D=2$ )

図-4.4.1 試験体の形状と寸法

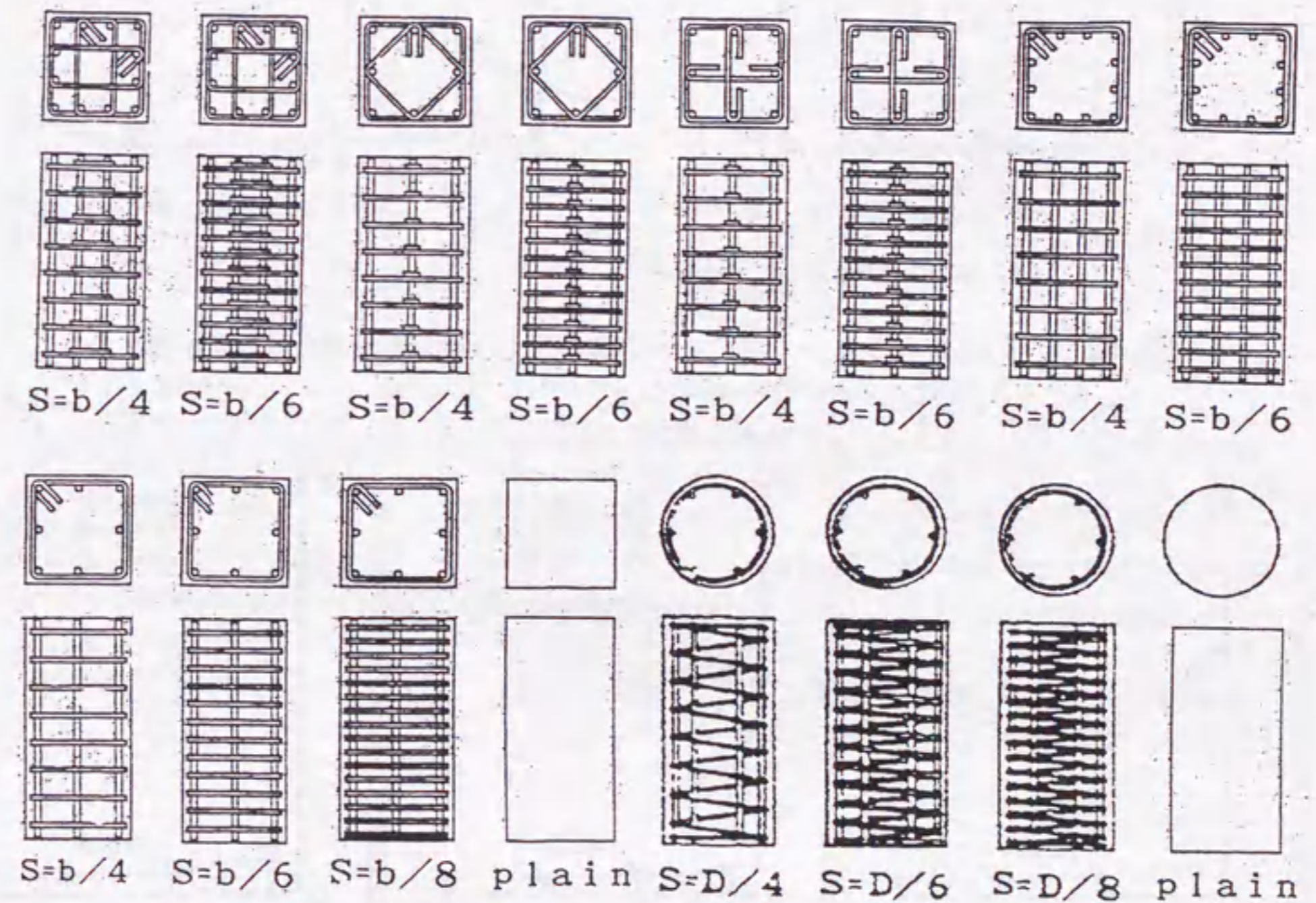


図-4.4.2 主筋と帯筋の配置

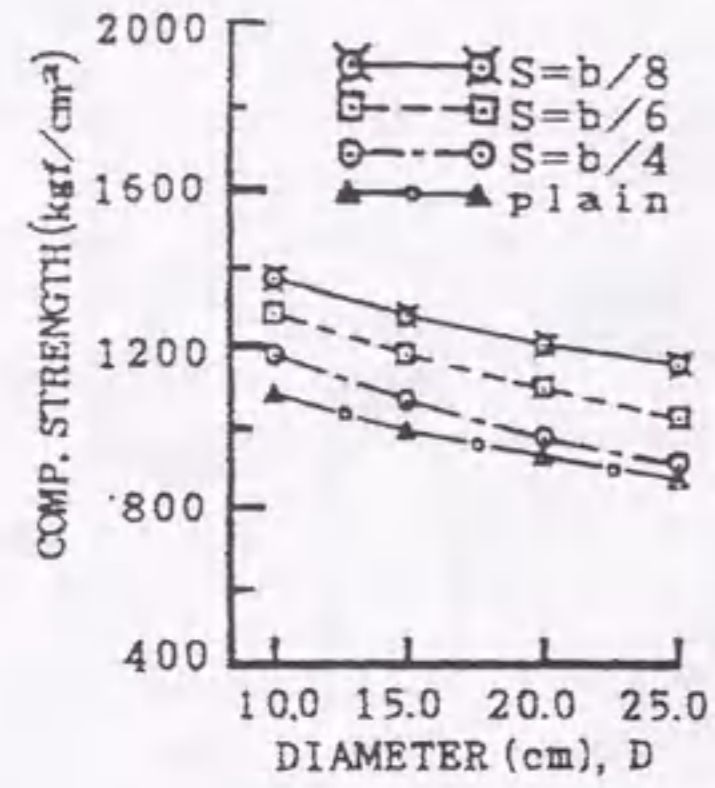


図-4.4.3 圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ(S)の影響 (円柱体、○タイプ、W/C=25%、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

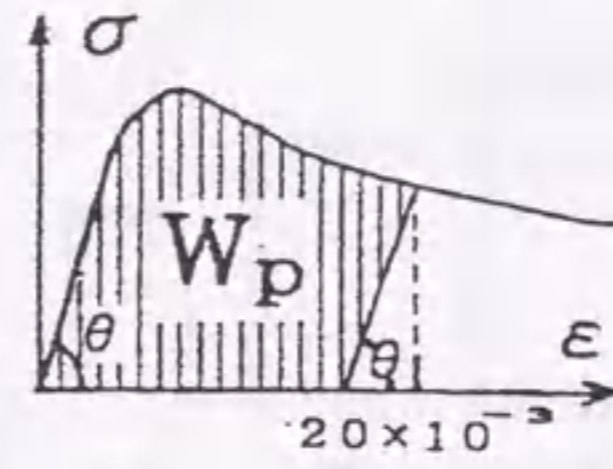
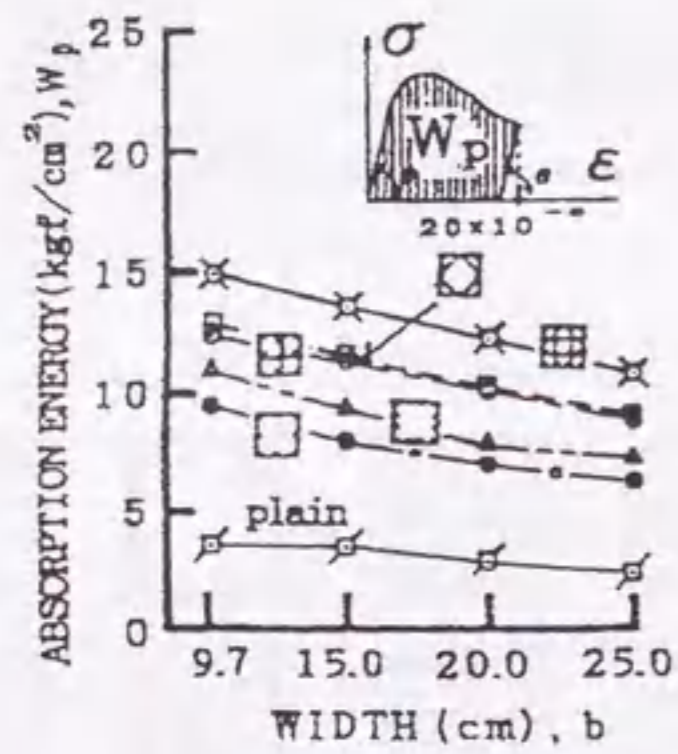
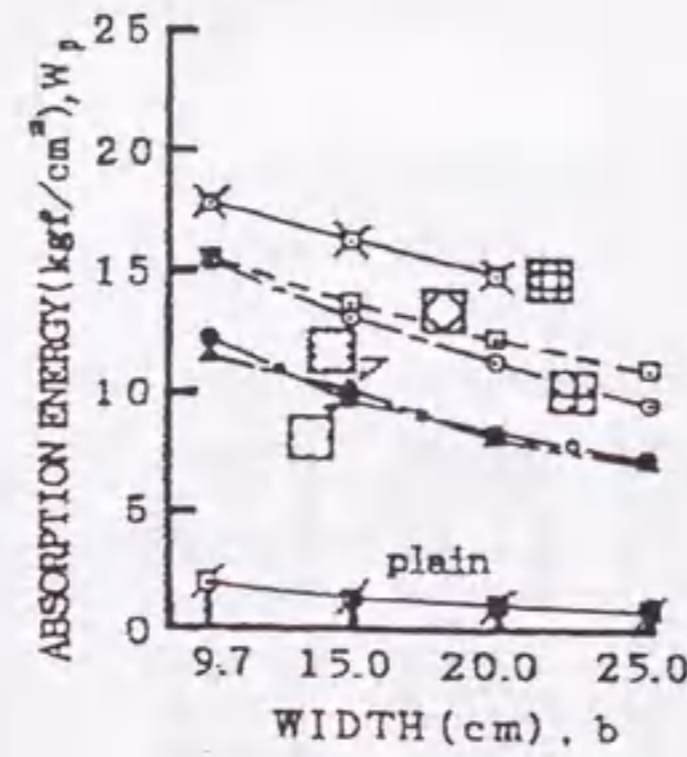


図-4.4.4 吸収エネルギー  $W_p$

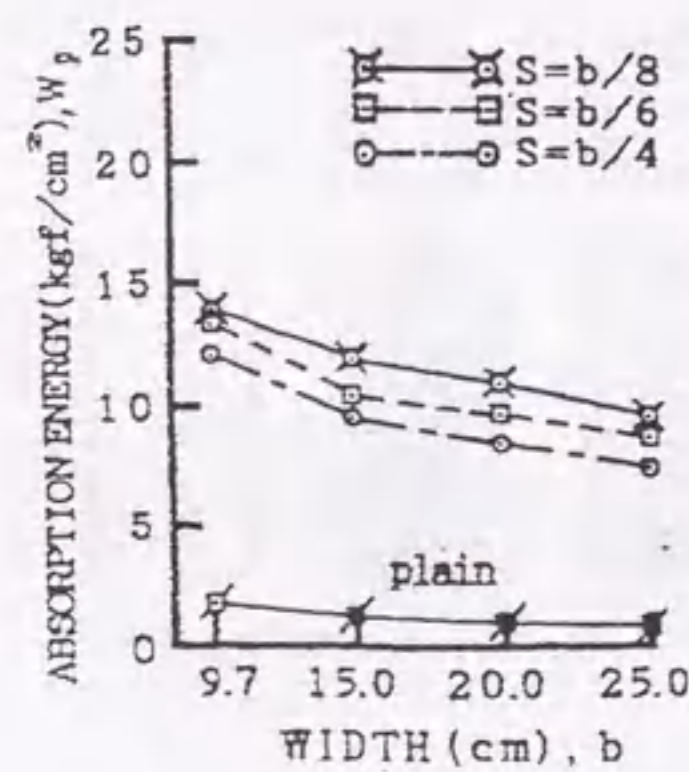


(a) W/C=32%

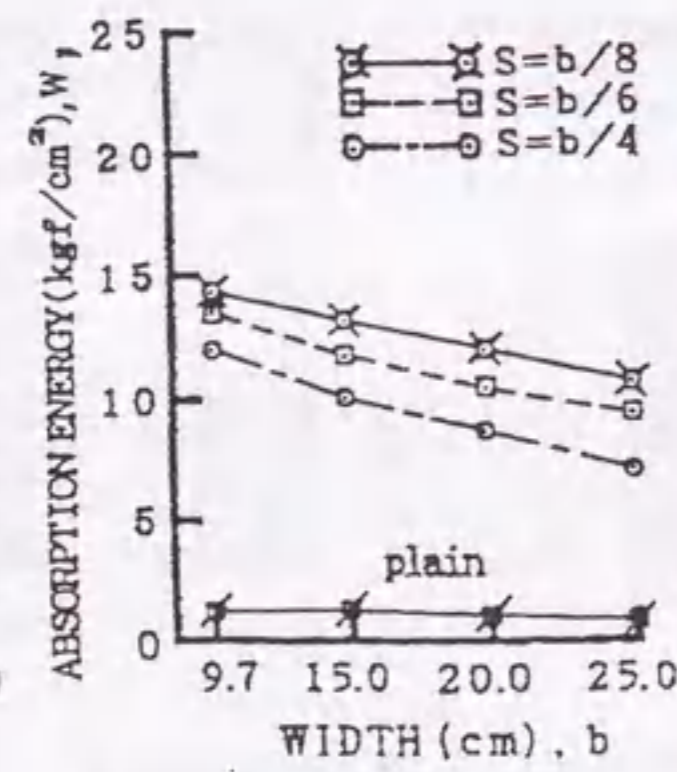


(b) W/C=25%

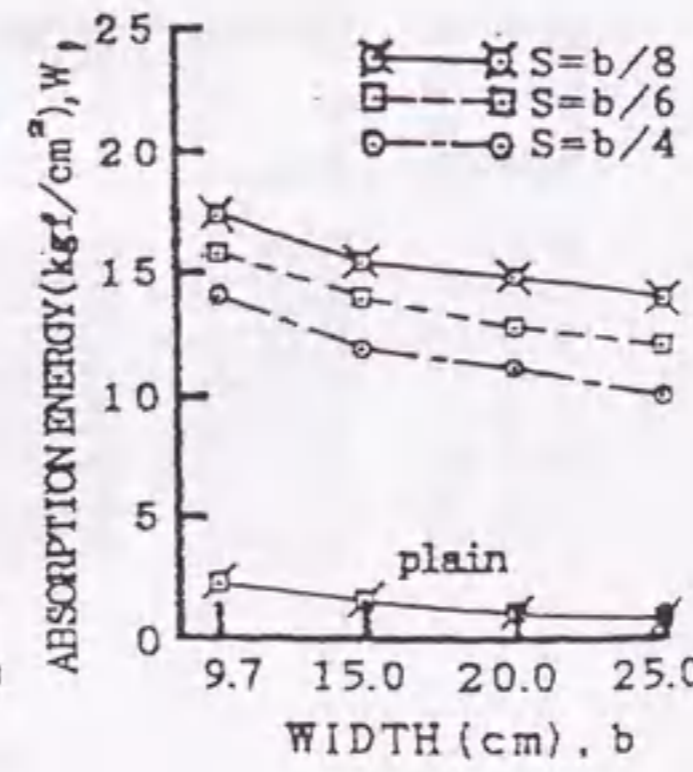
図-4.4.5 吸収エネルギーにおける寸法効果に及ぼす帯筋形状の影響 (角柱体、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ 、 $S=b/4$ )



(a)  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$

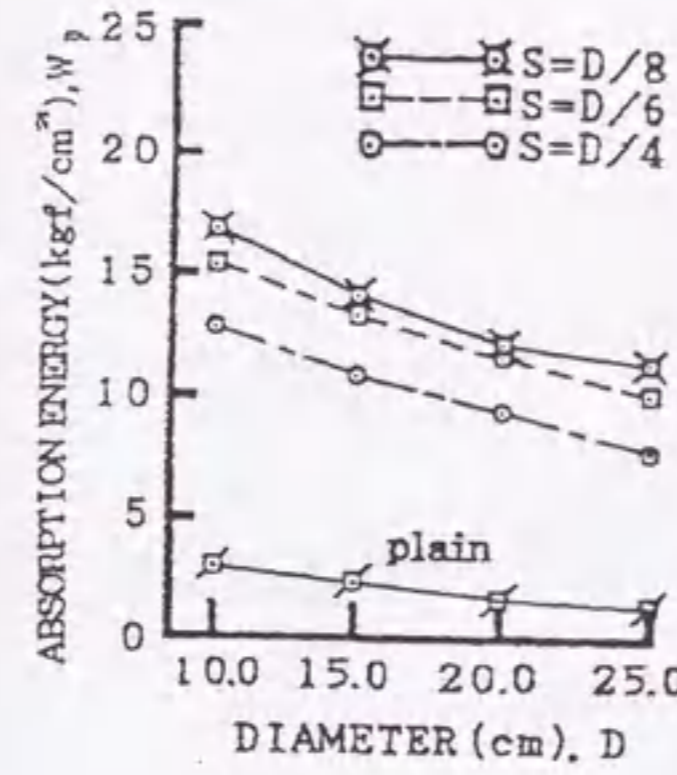


(b)  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$

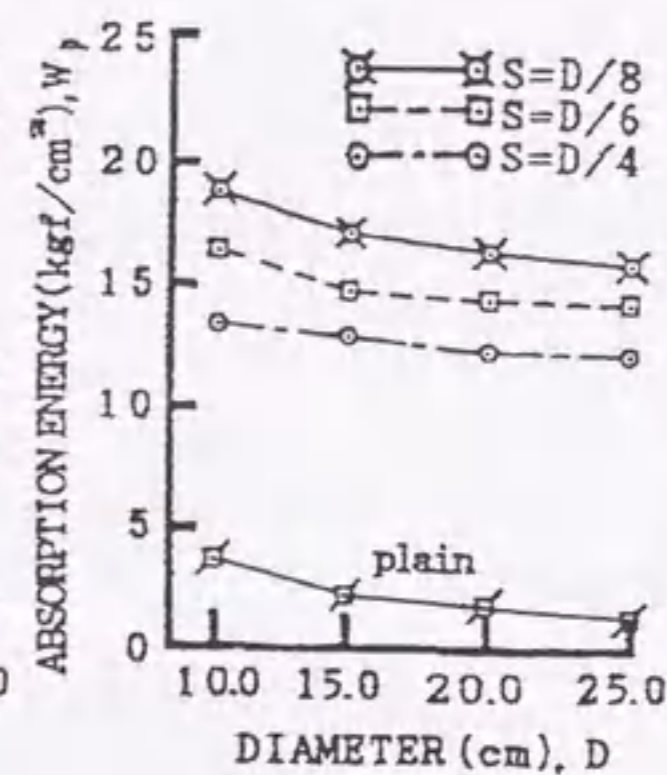


(c)  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$

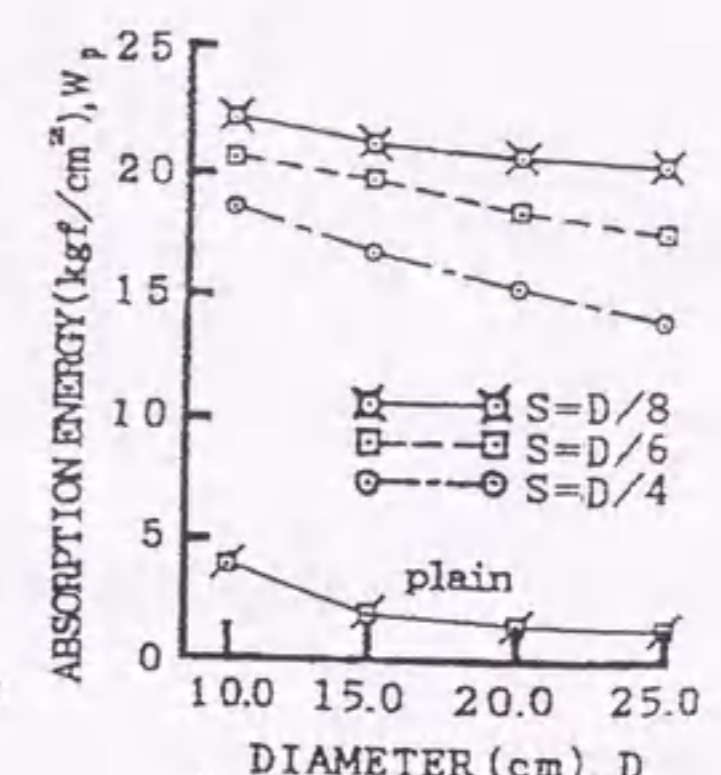
図-4.4.6 吸収エネルギーにおける寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ(S)の影響 (□ type、W/C=25%)



(a)  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$

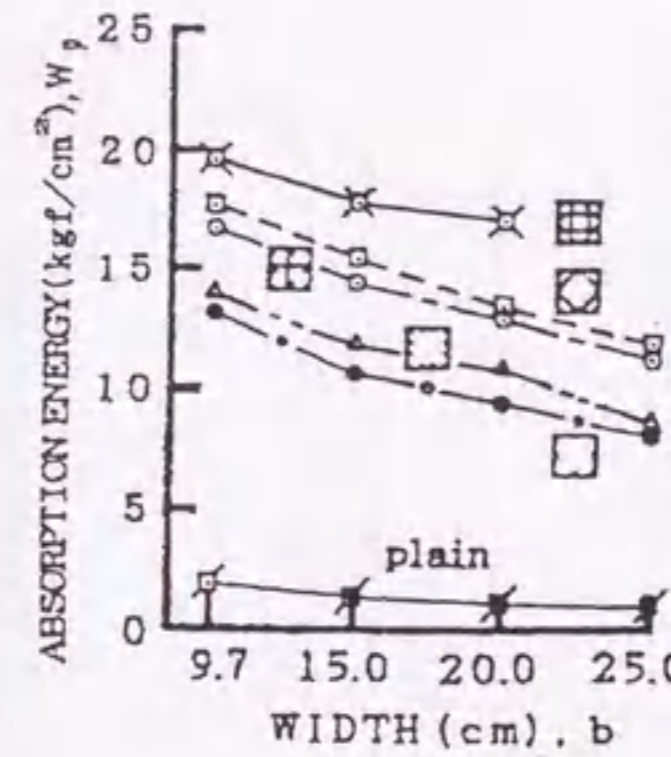


(b)  $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$

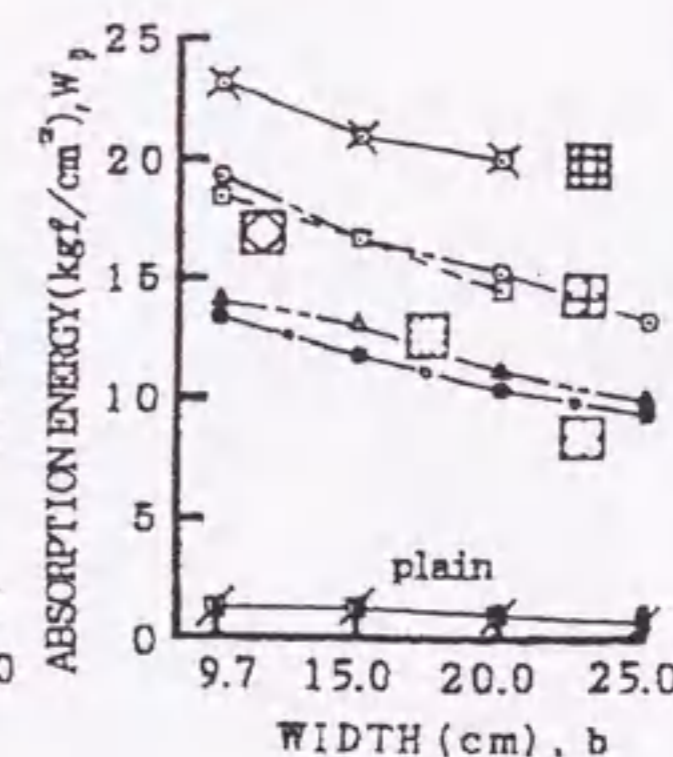


(c)  $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$

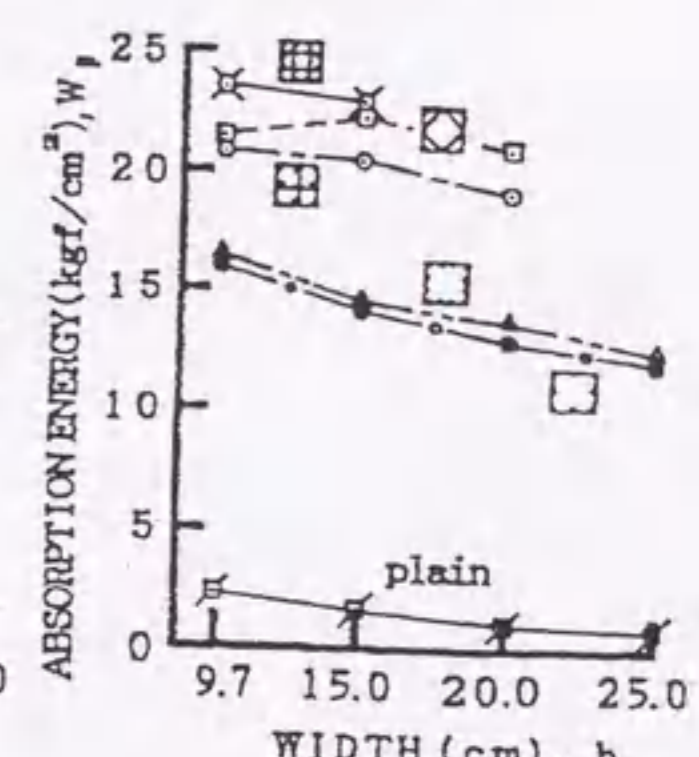
図-4.4.7 吸収エネルギーにおける寸法効果に及ぼす帯筋ピッチ(S)の影響 (○タイプ、W/C=25%)



(a)  $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$



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



(c)  $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$

図-4.4.8 吸収エネルギーにおける寸法効果に及ぼす帯筋形状の影響 (W/C=25%、 $S=b/6$ )





## 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

- 5.1 概説
- 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
- 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

## 5.1 概説

RC 構造物の塑性設計では、骨組みを構成する部材が十分に延性的で、かつ構造物が崩壊機構を形成できるだけのモーメントの再配分が行われることが前提となっている。そのため、RC 部材はその部材寸法の大小にかかわらず、正確に部材の寸法まで考慮した塑性変形挙動の解析が望まれる。従来、曲げを受ける RC 梁の耐力や曲げ挙動には寸法効果はほとんどみられない、との考え方が一般的であった。筆者は、人工軽量骨材を用いた軽量鉄筋コンクリート梁の正負繰返し曲げ変形性状に及ぼす試験体寸法の影響を実験的に調べた<sup>1)</sup>。実験結果より、試験体寸法が増大するほど RC 梁の塑性変形挙動が脆性的な曲げ変形挙動を示すことが確かめられた。この実験的研究以来、曲げを受ける RC 部材の力学特性における寸法効果に関する研究論文を調べたが、報告例は少なく<sup>2)、3)、4)</sup>、得られた成果は少ない。

RC 部材の塑性変形挙動、とくにその回転性能を解析的に論じるには、破壊集中領域（塑性ヒンジ領域）における変形性能と塑性ヒンジ領域の広がり及び各種要因の影響を把握しておく必要がある。筆者は、既に RC 梁の純曲げモーメント区間内における塑性領域の曲率分布の性状を実験的に調べ、破壊領域におけるコンクリートの靱性を増大させると破壊領域が広がり、部材の塑性変形能力が向上することなどを明らかにした<sup>5)~10)</sup>。

コンクリートの塑性変形挙動における寸法効果についての第3章の研究成果<sup>11)~13)</sup>によれば、試験体寸法が大きなコンクリートほど脆性的な塑性変形挙動を示している。RC 梁においても、試験体寸法の大きな梁では、梁の圧縮域のコンクリートは脆性的な塑性変形挙動を示し、結果として RC 梁の曲げ塑性変形挙動も脆性的になる寸法効果を示すことが予想される。

本章では、まず、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実験的に検討する<sup>14)</sup>とともに、これらの実験に基づき RC 梁の塑性変形挙動の解析における寸法効果の取扱い方法<sup>15)</sup>について、解析的に検討する。

## 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

### (1) まえがき

筆者は、純曲げを受ける RC 単純梁の曲げ塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響に関する実験的研究を実施し、RC 梁の純曲げモーメント区間内における塑性域の曲率分布の性状を調べ、破壊領域におけるコンクリートの靱性を増大させると破壊領域が広がり、部材の塑性変形能力が向上することなどを明らかにした<sup>5)~8)、16)</sup>。

本節では、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 梁の塑性変形挙動、とくにヒンジ領域の性状に及ぼす試験体寸法の影響を調べるために、引張鉄筋比、あばら筋比およびせん断スパン長さを変えた柱型付き RC 単純梁の曲げ・せん断実験を実施し<sup>14)</sup>、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形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。

### (2) 実験方法

#### 1) 実験の概要

寸法の異なる RC 梁の曲げ・せん断載荷実験、並びに RC 梁の曲げ圧縮部のコンクリートを模擬したコンクリート角柱試験体の一軸圧縮実験、並びに標準円柱試験体のコンクリート強度を知るために  $\phi 10 \times 20$ cm コンクリート円柱体の一軸圧縮および割裂引張試験を併せて行った。

表-5.2.1 に、曲げとせん断を受ける RC 梁試験体の概要と試験体の記号を示す。実験要因として、試験体の寸法 ( $b \times h \times l_s$ 、ここに  $b$ : 梁幅で 7.3、9.7、12.5、15 および 20cm の 5 種類、 $h$ : 梁せいで梁幅  $b$  の 2 倍、 $l_s$ : せん断スパン長さ)、せん断スパン長さ ( $l_s$ : 4h、6h および 8h の 3 種類)、あばら筋のピッチ ( $S$ :  $\infty$ 、 $b$ 、 $b/2$  および  $b/4$  の 4 種類)、引張鉄筋比 ( $P_t$ : 1.4、2.1 および 2.8% の 3 種類) および複筋比 ( $\gamma$ : 0 および 0.5% の 2 種類) を取り上げた。

表-5.2.2 に、これらの RC 梁試験体の実験要因と試験体の記号の一覧を示す。梁幅  $b$  は梁せい  $h$  の  $1/2$  となる相似断面の梁試験体としたため、以後試験体寸法について論じる場合は、梁せい  $b$  で代表させることとする。あばら筋径は、あばら筋間隔  $S$  が  $b$  の梁であれば筋比が約 0.3% となるように選んだ。

実験に用いた梁試験体の個数は、単筋梁では  $P_t=1.4\%$  の梁が 18 体、 $P_t=2.1\%$  が 39 体、 $P_t=2.8\%$  が 18 体、および  $P_t=2.8\%$  で  $\gamma=0.5\%$  が 4 体、合計 79 体である。表-5.2.2 に示すように、 $b=9.7$ cm の梁では全要因について調べ、 $b=7.3$ 、12.5 および 15.0cm の梁では、 $P_t=2.1\%$  のものはせん断スパン  $l_s$  とあばら筋間隔  $S$  を変化させ、 $P_t=1.4$  と 2.8% のものではせん断スパン  $l_s$  のみ変化させ、あばら筋間隔  $S$  は  $S=b$  のものについてのみ実験を行った。 $b=20.0$ cm の梁では、 $P_t=2.1\%$ 、 $l_s=6h$  としてあばら筋の間隔のみを変化させた。

図-5.2.1 に、実験に用いた  $l_s=6h$ 、 $S=b$  の RC 梁の配筋図を示す。梁試験体は、中央部の断面のせい(高さ)を高くした柱型付き梁とした。非測定スパン側には圧縮主筋を 2 本と腹筋を追加して曲げ補強し、せん断破壊防止のためにあばら筋を  $P_w=1.2\%$  以上 ( $P_w$ : あばら筋比) となるように配置した。あばら筋間隔  $S$  が  $b/2$  と  $b/4$  の梁では、実験に供した当該せん断スパンのみあばら筋間隔を所定の間隔に配筋し、その他の鉄筋は同じ配筋とした。せん断スパン  $l_s$  が 4h と 8h の梁では、これも実験に供したせん断スパンの長さのみを所定の寸法に変え、その他の寸法は  $l_s=6h$  の梁と同じとした。

コンクリートは、水セメント比 55% とした。表-5.2.3 に、コンクリート角柱試験体の一軸圧縮実験の概要を示す。コンクリート試験体は、角柱試験体を実験の主体とし、円柱試験体は他の実験との比較のために作成した。RC 梁の曲げ圧縮部に因る要因を考慮して、角柱体の断面の一辺を梁幅  $b$  と等しく取り、帯筋の径および間隔は梁のあばら筋に対応するように配置した。角柱体の高さ ( $H$ ) は幅 ( $b$ ) の 3 倍とした。図-5.2.2 に、コンクリート角柱試験体の寸法を、図-5.2.3 に、帯筋の配置を示す。円柱試験体は、高さとの比が 2、直径が 10cm のものを使用した。角柱試験体は、表-5.2.3 に示す実験要因のすべての組合せを取り上げ、各要因ごとに 12 体、合計 240 体の圧縮強度試験を実施した。円柱試験体は、圧縮試験では 16 体、割裂引張強度試験では 12 体とした。

#### 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)、川砂利 (5 ~ 25mm) を使用した。使用した天竜川産の骨材の物理的性質を表-5.2.4 に、骨材の粒度分布を図-5.2.4 に示す。骨材の使用量が多量となるため、細骨材および粗骨材ともに含水率が 0.5% の気乾状態になるように調節して使用した。コンクリートは、水セメント比を 55%、単位水量を  $180 \text{kg/m}^3$ 、スランプを 15cm とした。表-5.2.5 に、使用したコンクリートの調合表を示す。

表-5.2.6 および 5.2.7 に、それぞれ使用した主筋およびあばら筋の物理的性質を示す。梁試験体の主筋には、梁の寸法に応じてそれぞれ SD30 異形鉄筋 D10、D13、D16、D19 および D22 を使用した。引張鉄筋比  $P_t=1.4\%$  の梁では、前述の異形鉄筋を梁の引張側に 2 本、2.1% のものでは 3 本、および 2.8% のものでは 4 本使用した。梁のあばら筋およびコンクリート角柱試験体の帯筋には、あばら筋間隔が  $b$  の梁であれば筋比が約 0.3% となるよう

に、それぞれ直径が 3.2mm、3.9mm、4.9mm、5.7mm および 8.0mm の市販のなまし直線を使用した。梁試験体の型枠は合板製とし、コンクリート角柱試験体は鋼製型枠とした。コンクリートの練混ぜには、容量 600ℓの油圧傾胴式スミス型ミキサーを使用した。試験体は、円柱試験体を除きすべて横打ちとした。コンクリート試験体は、材齢 2 日目に脱型し、梁試験体は材齢 4 日目に脱型した。いずれの試験体も、材齢 6 週まで実験室内で空中養生した。

### 3) 載荷および測定方法

#### a) 載荷試験装置

コンクリート試験体の一軸圧縮試験には、最大容量 200tf のアクチュエータを使用し、変位速度制御で試験を行った。コンクリート円柱試験体の割裂引張試験には、200tf 油圧試験機を使用した。RC 梁試験体の曲げ載荷実験には、300tf 長柱試験機を使用した。本試験機は、間口 1.6m、奥行き 1.0m の間隔の位置に 4 本のネジ柱をもち、加力装置の内部が広く、クロスヘッドが上下に移動させやすく、曲げ支点間距離 10m とれる曲げベッドの上に設置されており、曲げ載荷試験が容易な試験装置である。荷重の検出には試験体の寸法に応じて 30tf、10tf および 3tf のロードセルをそれぞれ使用した。

#### b) 載荷方法

コンクリート試験体の圧縮試験では、試験体の上下面に試験体と同一形状・断面の加圧板を当てて載荷した。載荷には、最大容量 200tf のアクチュエータを使用し、毎分約  $2 \times 10^{-2}$  のひずみ速度で、縦ひずみが  $15 \times 10^{-2}$  に至るまで継続載荷した。円柱試験体の割裂引張強度試験は、200tf アムスラー試験機を用い、JIS A 1113 に準じて試験を行った。

図-5.2.5 に、RC 梁試験体の曲げ載荷方法を示す。梁試験体は、測定する側のせん断スパン長  $l_s$  (柱型の端部から支点まで) が  $4h \sim 8h$  ( $h$ : 梁せい) の柱型付き単純梁とし、柱型の中央部に集中載荷した。RC 梁の支点のローラは、ローラを受ける厚さ 35mm の鋼製の耐圧板が水平に自由に移動できるようにし、支点の摩擦が生じないようにした。載荷は、一方向漸増繰返し載荷とし、原則として第 1 測定区間 (後述、柱型端部から 0.5h の区間) の曲率指標 ( $d \cdot \phi_i$ ) の増分が 0.02 に達するごとに除荷した。載荷は、荷重が最大荷重の 70%以下に低下するまで継続した。

#### c) 測定方法

図-5.2.6 に、RC 梁の曲率およびたわみの測定方法を示す。RC 梁の曲率とたわみの測定

対象領域は、柱型端部から 1.5h の領域とし、この領域を 0.5h ずつ 3 等分した 3 区間 (中央部の柱型端部から第 1、第 2、第 3 区間と呼ぶ) について曲率と相対たわみ量を測定した。このほかに、測定スパン側の柱型端部と支点との相対たわみ量を測定した。曲率の測定は、梁の上下端面に取り付けた合計 12 個の変位計により行った。変位計は、コンクリートの打設時に各区間の境界に予めセットした鋼製の寸切りボルトに固定した鋼製の角棒に取り付けた。

図-5.2.7 に、コンクリート角柱体のひずみの測定方法を示す。角柱体の圧縮ひずみの測定域は、試験体の高さの中央部の 2b の領域とした。

図-5.2.8 および 5.2.9 に、RC 梁の荷重、たわみおよび曲率の計測システムおよび実験データ処理のフローチャートを示す。

### (3) 実験結果とその考察

#### 1) コンクリートの力学挙動

本実験のコンクリートの性質については、前章の 3.4 節のコンファインドコンクリートの力学挙動の項で詳しく考察した。以下に、これらの結果を簡単に要約する。

#### a) コンクリートの圧縮強度

表-5.2.8 に、各 12 体のコンクリート試験体の一軸圧縮実験結果の平均値の一覧を示す。図-5.2.10 に、コンクリート角柱体の圧縮強度に及ぼす試験体寸法の影響を、あばら筋のピッチ別に示す。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、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、あばら筋ピッチの減少に伴ってほとんどみられなくなる。

#### b) コンクリートの最大圧縮応力時のひずみ

図-5.2.11 に、コンクリート角柱試験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、帯筋の間隔別に示す。プレーンコンクリート ( $S=\infty$ ) や帯筋のピッチの粗いもの ( $S=b$ ) では、最大圧縮応力時のひずみは試験体寸法の影響はほとんど受けないが、帯筋のピッチが小さい場合 ( $S=b/2, b/4$ ) には、試験体寸法の増大に伴って最大圧縮応力時のひずみが小さくなる傾向が認められる。

### c) コンクリートの応力-ひずみ曲線

あばら筋で補強されたコンクリート角柱体では、破壊はすべて試験体のほぼ中央部に集中して生じ、ひずみの測定区間に納まった。図-5.2.12 に、コンクリート角柱試験体の応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、あばら筋のピッチ別に示す。各曲線は12体の平均値である。あばら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。図-5.2.13 に、あばら筋のピッチの影響を試験体の寸法別に示す。あばら筋が密なコンクリートほど圧縮強度が高く、延性的な塑性変形挙動を示している。この傾向は、寸法の小さなものほど顕著である。

### 2) 曲げ終局強度

柱型付 RC 梁試験体の破壊は、すべて測定用のスパン内に発生し、載荷用のスパンは十分に大きな強度を示し、所期の目的を達した。以下の考察では、すべて測定スパンについて行う。

図-5.2.14 に、寸法の異なる RC 梁の主筋の降伏点の相違を示す。D10 (b=7.3cm の梁) および D19 (b=15.0cm の梁) が、やや高い降伏点を示している。曲げ終局強度の実験結果の考察では、これらの主筋径の相違による降伏点の違いを考慮しなければならない。

図-5.2.15 (a) ~ (d) は、それぞれ曲げ終局強度とあばら筋ピッチ、試験体寸法、せん断スパン長さ、および引張鉄筋比との関係を示したものである。図-5.2.15 (a) は、曲げ終局強度とあばら筋ピッチとの関係を、試験体寸法別に示したものである。どの寸法の梁においても、あばら筋ピッチの狭いものほど曲げ終局強度がやや増大する傾向がみられる。これは、あばら筋ピッチの狭い梁ほどあばら筋によるコンファインド効果によって、圧縮域のコンクリートの強度と塑性変形性能が改善されるためと考えられる。

図-5.2.15 (b) は、曲げ終局強度と試験体寸法との関係をあばら筋の間隔別に示したものである。b=20cm の梁の曲げ終局強度がやや低い値を示すことを除けば、どの寸法の梁の終局強度も、図-5.2.14 に示す主筋の降伏点とほぼ同じ傾向を示しており、寸法による強度差は認められない。

図-5.2.15 (c) は、b=7.3cm、 $P_t=2.1\%$  の梁の曲げ終局強度とせん断スパン長さとの関係をあばら筋間隔別に示したものである。曲げ終局強度は、せん断スパン長さの短いものがわずかに大きな値を示しているが、その差は小さく、あばら筋の間隔の相違による影響の方が大きい。

### 3) モーメント-曲率曲線

図-5.2.16 に、第 1 区間の曲率を漸増載荷 ( $d \cdot \phi = 0.02$  ごとに除荷) して得た  $\angle_s = 6h$ 、

$S=b$ 、 $P_t=2.1\%$ 、梁幅  $b$  が 9.7cm の梁試験体の各測定区間の繰返しの曲率測定区間の破壊図、 $M / bd^2 - d \cdot \phi$  曲線 (以下、 $M - \phi$  曲線と略記) を示す。ただし、各区間の曲げモーメントとしては、当該区間の曲げモーメントの最大値を用いて表してあり、第 1 区間は繰返しの  $M - \phi$  曲線を、第 2、第 3 区間については各繰返し載荷時のピーク荷重時近傍の曲線を示してある。以下の考察は、すべて、この包絡線について行う。図中には、曲率測定区間の破壊状況も併示してある。図-5.2.16 によれば、最大モーメント断面に最も近い第 1 区間の近傍に破壊が集中している。すなわち、実測の  $M - \phi$  曲線は曲率の測定位置によって大きく異なる。第 1 区間がモーメント低下域に至っても、第 2 区間の曲率は減少せず、かなり増加している。第 3 区間では、若干の塑性曲率が生じた後、モーメント低下に伴い曲率も低下している。すなわち、第 2 および第 3 区間では、第 1 区間の降伏モーメントより低いモーメントで曲率が増加し、塑性変形が始まることになる。これらの理由としては、鉄筋とコンクリートの間の付着破壊、平面保持の仮定の不成立、高モーメント側の隣接区間からの圧壊域の波及による断面耐力の低下などが考えられる。したがって、同じ試験体でも曲率の測定区間の長さが異なると、得られる曲率の値に大きな違いが生じる。

図-5.2.17 は、図-5.2.16 に示した試験体について、柱型端部からそれぞれ 0.5h、1.0h および 1.5h の位置までの  $M - \phi$  曲線の平均値を示したものである。図から明かなように、曲率の測定区間が長くなるほど  $M - \phi$  曲線は脆性的になる。

一般に、柱型端部から 1.0h の区間に破壊領域が集中することが多い。そのため、1.0h 区間の平均曲率を用いた  $M - \phi$  曲線の実測値の包絡線によって梁の曲げ変形能に及ぼす各種要因の影響を評価する。

#### a) 試験体寸法の影響

図-5.2.18 および図-5.2.19 に、柱型端部から 1.0h 区間を曲率の測定区間として求めた 1.0h 区間の  $M - \phi$  曲線に及ぼす試験体寸法の影響を、それぞれ引張鉄筋比  $P_t$  並びにあばら筋ピッチ  $S$  別に示す。このうち、図-5.2.18 は、 $\angle_s = 6h$ 、 $S=b$  の RC 梁の  $M - \phi$  曲線に及ぼす試験体寸法の影響をあばら筋のピッチ別に示したものである。図によれば、一部の梁の結果にばらつきはみられるものの、一般にいずれの引張鉄筋比のものも、寸法の小さな梁の  $M - \phi$  曲線の方がより延性的である。

図-5.2.19 は、 $\angle_s = 6h$ 、 $P_t = 2.1\%$  の RC 梁の  $M - \phi$  曲線に及ぼす試験体寸法の影響をあばら筋ピッチ別に示したものである。図によれば、一部の梁の結果にばらつきはみられるものの、一般にいずれのあばら筋ピッチのものも、寸法の小さな梁の  $M - \phi$  曲線の方がより延性的である。

#### b) あばら筋間隔の影響

図-5.2.20 ~ 5.2.22 に、1.0h 区間の M-φ 曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響を、それぞれ試験体寸法 b、せん断スパン長さ  $l_s$ 、並びに引張鉄筋比  $P_t$  別に示す。このうち、図-5.2.20 は、1.0h 区間の M-φ 曲線に及ぼすあばら筋のピッチの影響を  $l_s=6h$ 、 $P_t=2.1\%$  の梁について試験体寸法別に調べたものである。いずれの寸法の梁も、あばら筋ピッチの密な梁ほど延性的な変形性状を示している。

図-5.2.21 は、 $b=9.7\text{cm}$ 、 $P_t=2.1\%$  の梁の M-φ 曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響を、せん断スパン長さ  $l_s$  別に示したものである。あばら筋ピッチの密なものほど延性的な変形性状を示し、この傾向はせん断スパン長さ  $l_s$  の相違の影響を受けない。

図-5.2.22 は、 $b=9.7\text{cm}$ 、 $l_s=6h$  の梁の M-φ 曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響を、引張鉄筋比  $P_t$  別に示したものである。どの引張鉄筋比の梁でも、あばら筋間隔の密な梁ほど延性的な変形性状を示している。

以上のように、あばら筋間隔の密な梁ほど塑性変形挙動が延性的で、この傾向はいずれの試験体寸法 b、せん断スパン長さ  $l_s$ 、並びに引張鉄筋比  $P_t$  のものでも認められた。

あばら筋のピッチが密な梁では、圧縮域のコンクリートがあばら筋の横拘束力によって拘束されるために、圧縮域のコンクリートの強度が増大し、塑性変形挙動が延性的になり、RC 梁の変形性状が延性的な挙動を示すものと考えられる。

### c) せん断スパン長さの影響

図-5.2.23 は、 $S=b$ 、 $P_t=2.1\%$  の梁の M-φ 曲線に及ぼす試験体寸法の影響をせん断スパン長さ  $l_s$  別に示したものである。図-5.2.23 によれば、 $l_s=4h$  および  $6h$  の梁では、寸法の小さな梁の方が延性的な塑性変形性状を示すが、 $l_s=8h$  の梁では塑性変形性能に試験体寸法の影響があまりみられない。せん断スパン長さ  $l_s$  が長い梁では、モーメント勾配が緩やかであり、これが寸法効果を低減させるものとも考えられる。

### d) M-φ 曲線の解析

図-5.2.12 (a) ~ (d) に示したコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線を、以下に示す式を用いて近似した。

#### i) 応力上昇域 ( $E \leq 1$ )

$$S = \frac{Na \cdot E}{Na - 1 + E} \quad \dots \quad (5.2.1)$$

#### ii) 応力下降域 ( $E \geq 1$ )

$$S = \frac{Nd \cdot X}{Nd - 1 + X} \quad \dots \quad (5.2.2)$$

ここに、 $S = \sigma / \sigma_r$ 、 $E = \varepsilon / \varepsilon_r$

$$Na = 1 + a (\sigma_o / 100)^b$$

$$a=0.57, b=1.0$$

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

B, Nd, m: 実験定数 ( $m=0.8$ )

定量化された実験定数 B および Nd の値を用いて、RC 梁の圧縮域のコンクリートの応力-ひずみ曲線を求め、梁のモーメント-曲率関係を解析した。

図-5.2.24 (a) および (b) は、このようにして解析的に求めた M-φ 関係の一例で、 $P_t=2.1\%$ 、 $l_s=6h$  の RC 梁のものである。図-5.2.24 (a) は試験体寸法 b の影響を、図-5.2.24 (b) はあばら筋ピッチ S の影響を調べたものである。図-5.2.18 (b) と図-5.2.20 (b) の 1.0h 区間の M-φ 関係と比較すると、試験体寸法の影響やあばら筋ピッチの影響は、定性的にはよく一致しているが、解析値は実験値よりもかなり脆性的である。本解析には、梁の引張鉄筋の柱型からの抜け出しを考慮していないことも、解析値が脆性的な結果を示す一因と考えられる。

### 4) 1.5h 区間のモーメント-たわみ曲線

梁の曲げ破壊は、多くの場合、柱型端部から 1.0h の区間で発生しており、非破壊領域も含めて最大モーメント断面から 1.5h 区間のたわみを評価すれば、部材全体の変形能力をほぼ把握できると考えられる。曲げとせん断を受ける本実験の試験体では、柱型端部から 1.5h の区間にせん断ひび割れがかなり発生するために、せん断変形によるたわみが相当の割合で含まれている。前項では 1.0h 区間の曲率で RC 梁の塑性変形挙動における寸法効果を考察したが、ここでは、曲げ変形とせん断変形を含んだ柱型端部から 1.5h 区間のたわみで、梁の塑性変形挙動における寸法効果を考察する。以下の考察では、モーメントは柱型端部のモーメント (M) を用いた  $M/bd^2$  で、たわみは寸法の影響を除くために柱型端部から 1.5h 区間のたわみ ( $\delta$ ) を梁せい (h) で無次元化した相対たわみ  $\delta/h$  を用いた  $M/bd^2 - \delta/h$  曲線 (以下、モーメント-たわみ曲線と略記) によって変形挙動を評価する。

図-5.2.25 は、柱型端部から 1.5h の位置のたわみ ( $\delta$ ) に及ぼす試験体寸法の影響を、S

$= b$ 、 $\ell_s=6h$  の梁について引張鉄筋比  $P_t$  別に比較したものである。前述の通り、図の縦軸は  $1.5h$  区間のたわみを梁せい ( $h$ ) で無次元化した相対たわみ  $\delta/h$  としてある。以下、 $M/bd^2 - \delta/h$  関係を、単に  $M-\delta$  関係と呼ぶ。図-5.2.26によれば、 $1.5h$  区間のたわみは、 $P_t=1.4\%$  および  $2.1\%$  の梁では、試験体寸法の小さな梁の方が大きなたわみを示す寸法効果がみられるが、 $P_t=2.8\%$  のものではこの寸法効果が小さくなっている。この傾向は、図-5.2.18 に示した  $M-\phi$  関係と一致する。また、この傾向は、 $\ell_s=4h$  並びに  $8h$  の場合においても確認された。

図-5.2.26 は、 $S=b$ 、 $P_t=2.1\%$  の梁の  $M-\delta$  関係に及ぼす試験体寸法の影響をせん断スパン  $\ell_s$  別に示したものである。 $\ell_s=4h$  および  $6h$  の梁では、寸法の小さな梁の方が  $1.5h$  区間のたわみが延性的であるが、 $\ell_s=8h$  の梁では試験体寸法の影響が非常に小さい。

以上のように、 $1.5h$  区間の  $M-\delta$  関係は、試験体寸法の小さなものの方が延性的な寸法効果を示すが、 $P_t=2.8\%$  の梁ではこの寸法効果が小さくなり、また  $\ell_s=8h$  の梁では寸法効果が非常に小さくなる。

#### 5) 破壊領域長さ

図-5.2.27 (a) ~ (d) は、破壊領域の長さ ( $\ell_p$ ) と本実験で取り上げた各種要因との関係を示したものである。ただし、ここでは圧縮縁ひずみが  $3500 \times 10^{-6}$  を越える領域、または断面の曲率が  $d \cdot \phi = 0.04$  を越える領域を破壊領域とみなした。図-5.2.27によれば、 $\ell_p$  の値は試験体寸法の影響をあまり受けない。せん断スパン長さ  $\ell_s$  が  $6h$  と  $8h$  の梁の値はあまり変わらず、別に行った純曲げの場合とほぼ一致した。せん断スパンの短い  $4h$  のものでは、モーメント勾配の存在によって破壊領域が抑えられ、 $\ell_p$  は小さくなるが、 $\ell_p$  の中での断面の挙動は極めて延性的である。あばら筋のピッチが密になると、 $\ell_p$  の値は大きくなる傾向がみられる。また、引張鉄筋比 ( $P_t=1.4 \sim 2.8\%$ ) が  $\ell_p$  の値に及ぼす影響は、ほとんどみられない。

#### (4) 結論

- 1) コンクリートの応力-ひずみ曲線、並びに RC 梁の  $M-\phi$  曲線の形状は、あばら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。
- 2) 前項 1) の RC 梁の  $M-\phi$  曲線における寸法効果は、せん断スパン長さ  $\ell_s$  が  $8h$  のものでは小さくなる。
- 3) 破壊領域長さに及ぼす試験体寸法の影響は、ほとんど認められない。その他の要因の影響については既往の研究<sup>2)</sup>と同じ傾向を示した。

### 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

#### (1) まえがき

筆者は、曲げとせん断を受け、曲げ破壊する曲げ破壊終局型のスラブ付き RC 梁の塑性変形挙動を実験的に調べ<sup>17)、18)</sup>、塑性ヒンジ等価長さ (elp) 等を定量的に明らかにするとともに、せん断および抜け出しによる材端変位の推定式を提案した。しかしながら、これらのモデルは試験体寸法が実大のおよそ  $1/5$  の梁について提案しているため、実構造物に適用するためには、寸法効果の影響を考慮する必要がある。本節では、第 3.4 節と 5.2 節の実験<sup>11)、14)</sup>に基づき、RC 梁の塑性変形解析における寸法効果の取扱い方法について検討する。

#### (2) 実験の概要

コンクリート角柱体並びに曲げとせん断を受ける RC 梁の曲げ実験の実験方法は、第 3.4 節<sup>11)</sup> および 5.2 節<sup>14)</sup> で報告している。ここでは、その概要を示す。

表-5.3.1 に、RC 梁試験体の実験の概要を示す。実験要因として、試験体の寸法 ( $b \times h \times \ell_s$ 、ここに  $b$ : 梁幅、 $h$ : 梁せい、 $\ell_s$ : せん断スパン比)、あばら筋のピッチ ( $S$ )、および引張鉄筋比 ( $P_t$ ) を取り上げた。

図-5.3.1 に、RC 梁の配筋図の一例を示す。図-5.3.2 に、RC 梁試験体の載荷方法および曲率とたわみの測定方法を示す。

表-5.3.2 に、コンクリート角柱体の実験の概要を示す。RC 梁の曲げ圧縮部のコンクリートの応力-ひずみ挙動を模擬するために、コンクリート角柱体の試験体寸法並びに帯筋のピッチを実験要因とした。RC 梁には、曲率測定用の変位計を取り付けるためのネジ鋼棒を埋め込んだ。したがって、梁の圧縮部を模擬するため、角柱体にもネジ鋼棒を間隔  $b$  ごとに配置した。

#### (3) 実験結果とその考察

##### 1) コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線

図-5.3.3 (a) ~ (d) に、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、あばら筋のピッチ別に示す。図-5.3.3によれば、あばら筋のピッチにかかわら

ず、試験体寸法が大きなものほど最大応力時のひずみは若干小さく、応力下降域の形状は脆性的である。すなわち、コンクリート角柱体の応力-ひずみ関係には、明確な寸法効果が見られる。

## 2) RC梁の曲げモーメント-部材角曲線

図-5.3.4 (a) ~ (e) に、曲げモーメント指数 ( $M/bd^2$ ) - 部材角 ( $\delta/\rho_s$ ) 関係に及ぼす試験体寸法の影響の一例を示す。図-5.3.4 によれば、引張鉄筋比 ( $P_t$ ) 並びにあばら筋のピッチ ( $S$ ) にかかわらず、試験体寸法の増大とともに、若干ばらつきはあるものの、曲げモーメントの低下開始時の変形量は小さくなる。RC梁の塑性変形挙動に対しても、コンクリート角柱体と同様な寸法効果が見られる。このような寸法効果は、引張鉄筋比が小さいほど、また、あばら筋のピッチが密なほど顕著になる。

### (4) 解析結果と実験結果の比較

#### 1) コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の近似

図-5.3.3 に示したコンクリート角柱体の応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線を以下に示す式を用いて近似した。

##### i) 応力上昇域 ( $E \leq 1$ )

$$S = \frac{Na \cdot E}{Na - 1 + E} \quad \dots \quad (5.3.1)$$

##### ii) 応力下降域 ( $E \geq 1$ )

$$S = \frac{Nd \cdot X}{Nd - 1 + X} \quad \dots \quad (5.3.2)$$

ここに、 $S = \sigma/\sigma_r$ 、 $E = \epsilon/\epsilon_r$   
 $Na = 1 + a (\sigma_0/100)^b$   
 $a=0.57$ 、 $b=1.0$   
 $X = B (E - 1)^m + 1$  ( $E \geq 1$ )  
 $B$ 、 $Nd$ 、 $m$  : 実験定数 ( $m=0.8$ )

$\sigma_r$  : コンクリート角柱体の最大応力

$\epsilon_r$  : コンクリート角柱体の最大応力時のひずみ

最大応力時の応力とひずみで標準化された表示式 (5.3.1) および (5.3.2) を用いて、応力下降域にわたってコンクリート角柱体の実験値によく一致する係数  $B$  および  $Nd$  の組合わせを選んだ。これらの係数  $B$  および  $Nd$  の組合わせを表-5.3.3 に示す。図-5.3.5 (a) ~ (d) に、実験値と計算値の比較の一例を示す。図-5.3.5 および他の比較例によれば、全コンクリート試験体を通じて比較的よい近似曲線が得られている。

## 2) 基本寸法のRC梁の塑性ヒンジ等価長さ (elp) の決定

ここでは、梁幅 ( $b$ ) が 9.7cm の試験体を基本寸法の梁とし、まず、これらの梁に対する塑性ヒンジ等価長さ (elp) を求める。

図-5.3.6 (a) ~ (e) に、 $b=9.7$ cm の RC 梁の曲げモーメント-部材角関係の実験値と解析結果との比較の一例を示す。RC 梁の解析では、塑性ヒンジ等価長さ (elp) を梁せいの 1.2 倍 ( $elp=1.2h$ ) から梁せいの 0.3 倍 ( $0.3h$ ) ずつ、梁せいの 3 倍 ( $elp=3h$ ) まで増加させた。梁の曲げ圧縮部のコンクリートの応力-ひずみ関係には、第 3.2 節の (4) の 1) で近似したのを用い、RC 梁の塑性ヒンジ等価長さ以外の解析方法は、文献<sup>17)</sup>、<sup>18)</sup>と同様である。

塑性ヒンジ等価長さの決定に際しては、RC 梁の実験値および解析値のモーメントが降伏時の曲げモーメントのおよそ 80% に低下する点を目標にし、この時点を梁の終局とみなした。図-5.3.6 (a) ~ (e) に示す要領で、実験値の終局時部材角にほぼ一致する計算曲線の塑性ヒンジ等価長さを求めた。

表-5.3.4 に、梁幅 ( $b$ ) が 9.7cm の全試験体について、得られた塑性ヒンジ等価長さの値を示す。表-5.3.4 によれば、本実験データの範囲では、全体的に見て elp の値はせん断スパン比 ( $\rho_s/h$ ) によってあまり大きくは相違しないといえる。本研究では、同一条件下で行われた実験結果に対して寸法効果を論ずるという観点から、基本寸法の梁の elp の値として、ここで得られた値を以下の議論で採用することとした。

## 3) 寸法の異なるRC梁の曲げ変形解析

図-5.3.7 ~ 5.3.9 は、それぞれ  $P_t = 1.4\%$ 、 $2.1\%$ 、および  $2.8\%$  の場合について計算した各寸法 (基本寸法を除く) の RC 梁の曲げモーメント-部材角関係の解析値と実験値を比較したものである。ここで、解析では梁幅が 9.7cm (基本寸法) のものに対して得られた elp の値 (表-5.3.4) を用いている。また、使用材料の特性や設計断面については、それぞれの梁の諸量を入力している。



これらの図によれば、高引張鉄筋比の RC 梁 (図-5.3.9) では、RC 梁の曲げ塑性変形挙動の寸法効果自体が極めて小さく、再現性が明確には分からないなど、ばらつきはみられるものの、全体的な RC 梁の塑性変形挙動における寸法効果、とりわけ曲げモーメントが急激に低下しはじめる終局域の変形能における寸法効果は、比較的よく再現されている。

また、この結果は、本節で取り扱った引張鉄筋比  $P_t$  が 1.4 ~ 2.8%、並びにあばら筋比  $P_w$  が 0.1 ~ 1.2% の範囲で一般的に認められた。これらの結果から、曲げ破壊する RC 梁の塑性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応力-ひずみ関係の寸法効果を考慮するだけでも、およその推測が可能であると考えられる。

### (5) 結論

コンクリート並びに曲げとせん断を受ける RC 梁の寸法効果について調べた実験的研究 (11)、(14) に基づき、RC 梁の塑性変形解析における寸法効果の取扱い方法について解析的に検討した。得られた結果を、以下に要約する。

- 1) RC 梁の曲げ圧縮部を模擬したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係は、式 (5.3.1) および式 (5.3.2) 中のパラメータを、適宜それぞれの曲線に対して設定することで、比較的精度良く表示できた (図-5.3.3)。
- 2) 本節で取り扱った RC 梁<sup>14)</sup> の塑性ヒンジ等価長さ  $el_p$  の値として、およそ  $1.5 h \sim 2.0 h$  の値が得られた (表-5.3.4)。
- 3) RC 梁の曲げ塑性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、定量的にはば推定することが可能であると思われる (図-5.3.7 ~ 9)。

### 参考文献

- 1) 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 (東海)、pp.1361-1362, 1976.10
- 2) 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, 1963.11
- 3) 山田稔・名塩征一郎：鉄筋コンクリート梁試験におけるスケール・イフェクトに関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、号外、pp.218-219, 1965.9
- 4) 谷川恭雄・山田和夫・畑中重光：鋼繊維補強 RC はりの曲げ耐力および変形能力の寸法効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.369-370, 1984.10
- 5) 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  $\sigma - \epsilon$  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
- 6) 畑中重光・小阪義夫・谷川恭雄・三輪隆治：純曲げを受ける鉄筋コンクリート梁の破壊集中性、日本建築学会論文報告集、第371号、pp.27-38, 1987
- 7) 小阪義夫・畑中重光・谷川恭雄・三輪隆治：鉄筋コンクリート梁の塑性ヒンジに関する研究、セメント技術年報、第40巻、pp.580-583, 1986
- 8) 小池狭千朗・奥谷伸幸：主筋比の異なる RC 梁の曲げ強度と変形挙動の寸法効果、日本建築学会学術講演梗概集 (関東) C、構造 II、pp.255-256, 1988.10
- 9) 畑中重光・梁川幸盛・吉田徳雄・小池狭千朗：スラブの効果を受ける RC 梁の塑性変形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.293-298, 1991.6
- 10) 吉田徳雄・畑中重光・上田英明・小池狭千朗：スラブ付き RC 梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, pp.173-178, 1992
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, Vol.2, pp.949-954, 1992.6
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 小池狭千朗・奥藤一夫：曲げスパンの異なる RC 梁の曲げ塑性変形挙動の寸法効果について、日本建築学会大会学術講演梗概集、(近畿)、pp.53-54, 1987.10
- 17) 畑中重光・梁川幸盛・吉田徳雄・小池狭千朗：スラブの効果を受ける RC 梁の塑性変

- 形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.293-298, 1991  
 18) 吉田徳雄・畑中重光・上田英明・小池狭千朗：スラブ付き RC 梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.173-178, 1992

表-5.2.1 梁試験体の概要と試験体記号

梁試験体名	梁試験体寸法				せん断スパン $\angle s$	あばら筋 間隔 S	引張鉄筋比 $P_t$ (%)
	b (cm)	h (cm)	主筋径	あばら筋径			
9-6-1-3	7.3	14.6	D10	$\phi$ 3.2	4h 6h 8h	b b/2 b/4	1.4 2.1 2.8
$P_t$	9.7	19.4	D13	$\phi$ 3.9			
S	12.5	25.0	D16	$\phi$ 4.9			
$\angle s$	15.0	30.0	D19	$\phi$ 5.7			
b	20.0	40.0	D25	$\phi$ 8.0			

梁記号 b : 7 → 7.3cm, 9 → 9.7cm, 12 → 12.5cm, 15 → 15.0cm, 20 → 20.0cm  
 $\angle s$  : 8 → 4h, 6 → 6h, 4 → 8h  
 S : 1 → b, 2 → b/2, 4 → b/4  
 $P_t$  : 2 → 1.4%, 3 → 2.1%, 4 → 2.8%

表-5.2.2 梁試験体の実験要因および記号一覧表

$P_t$ (%)	S (cm)	$\angle s$ (cm)	b (cm)					
			7.3	9.7	12.5	15	20	
1.4	b	4h	7-4-1-2	9-4-1-2	12-4-1-2	15-4-1-2	—	
		6h	7-6-1-2	9-6-1-2	12-6-1-2	15-6-1-2	—	
		8h	7-8-1-2	9-8-1-2	12-8-1-2	15-8-1-2	—	
	b/2	4h	—	9-4-2-2	—	—	—	
		6h	—	9-6-2-2	—	—	—	
		8h	—	9-8-2-2	—	—	—	
	b/4	4h	—	9-4-4-2	—	—	—	
		6h	—	9-6-4-2	—	—	—	
		8h	—	9-8-4-2	—	—	—	
	2.1	b	4h	7-4-1-3	9-4-1-3	12-4-1-3	15-4-1-3	—
			6h	7-6-1-3	9-6-1-3	12-6-1-3	15-6-1-3	20-6-1-3
			8h	7-8-1-3	9-8-1-3	12-8-1-3	15-8-1-3	—
b/2		4h	7-4-2-3	9-4-2-3	12-4-2-3	15-4-2-3	—	
		6h	7-6-2-3	9-6-2-3	12-6-2-3	15-6-2-3	20-6-2-3	
		8h	7-8-2-3	9-8-2-3	12-8-2-3	15-8-2-3	—	
b/4		4h	7-4-4-3	9-4-4-3	12-4-4-3	15-4-4-3	—	
		6h	7-6-4-3	9-6-4-3	12-6-4-3	15-6-4-3	20-6-4-3	
		8h	7-8-4-3	9-8-4-3	12-8-4-3	15-8-4-3	—	
2.8		b	4h	7-4-1-4	9-4-1-4	12-4-1-4	15-4-1-4	—
			6h	7-6-1-4	9-6-1-4	12-6-1-4	15-6-1-4	—
			8h	7-8-1-4	9-8-1-4	12-8-1-4	15-8-1-4	—
	b/2	4h	—	9-4-2-4	—	—	—	
		6h	—	9-6-2-4	—	—	—	
		8h	—	9-8-2-4	—	—	—	
	b/4	4h	—	9-4-4-4	—	—	—	
		6h	—	9-6-4-4	—	—	—	
		8h	—	9-8-4-4	—	—	—	
	2.8 $\gamma=0.5$	b	6h	7-6-1-6	9-6-1-6	12-6-1-6	15-6-1-6	—

b : はり幅, h : 梁せい, S : あばら筋間隔,  
 $\angle s$  : せん断スパン長さ,  $P_t$  : 引張鉄筋比,  $\gamma$  : 複筋比

表-5.2.3 コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要

試験体名	断面 (H=3b)		帯筋		試験体 本数
	断面 (b×b) (cm)	高さ (H) (cm)	帯筋径 (φ) (mm)	帯筋間隔 S	
PR-7-∞	7.3×7.3	21.9	—	∞	12
PR-7-b			b	12	
PR-7-b/2			φ 3.2	b/2	12
PR-7-b/4			b/4	12	
PR-9-∞	9.7×9.7	29.1	—	∞	12
PR-9-b			b	12	
PR-9-b/2			φ 3.9	b/2	12
PR-9-b/4			b/4	12	
PR-12-∞	12.5×12.5	37.5	—	∞	12
PR-12-b			b	12	
PR-12-b/2			φ 4.9	b/2	12
PR-12-b/4			b/4	12	
PR-15-∞	15.0×15.0	45.0	—	∞	12
PR-15-b			b	12	
PR-15-b/2			φ 5.7	b/2	12
PR-15-b/4			b/4	12	
PR-20-∞	20.0×20.0	60.0	—	∞	12
PR-20-b			b	12	
PR-20-b/2			φ 8.0	b/2	12
PR-20-b/4			b/4	12	
CY-C-10	φ10	20.0	—	—	16
CY-SP-10	φ10	20.0	—	—	12

PR：角柱体， CY：円柱体， C：円柱体圧縮試験用  
SP：円柱体割裂引張試験用

表-5.2.4 骨材の物理的性質

骨材の 種類	骨材の粒度 の範囲(mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
川砂利	5 - 25	2.62	0.91
川砂	2.5以下	2.61	1.18

表-5.2.5 コンクリートの調合表

[絶乾]

水セメント 比 W/C (%)	粗骨材の 最大寸法 φa (mm)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	重量 (kg/m <sup>3</sup> )			細骨 材率 (%)	スランブ (cm)
			セメント	粗骨材	細骨材		
55	25	180	327	1148	690	38	15

表-5.2.6 主筋の物理的性質

公称直径 (mm)	実測直径 (mm)	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	ヤング係数 (×10 <sup>6</sup> )
D10	9.4	0.69	3910	5590	26.5	1.98
D13	12.5	1.22	3640	5330	27.3	2.03
D16	15.7	1.93	3660	5390	24.1	1.81
D19	18.8	2.78	3820	5790	24.1	2.09
D25	24.9	4.87	3640	5710	24.8	2.12

表-5.2.7 あばら筋の物理的性質

あばら筋の 呼び径	実測直径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	ヤング係数 (×10 <sup>6</sup> )
φ 3.2	3.19	8.0	2420	3430	29.2	2.14
φ 3.9	3.90	12.0	2280	3350	40.9	2.18
φ 4.9	4.98	19.5	1940	3070	41.6	1.92
φ 5.7	5.93	27.6	2980	3890	31.5	1.96
φ 8.0	7.96	49.7	2650	3530	32.5	1.99

\* コンクリート角柱体では、帯筋として使用

表-5.2.8 コンクリート角柱体の実験結果と係数BおよびNdの一覧

試験体名	b	帯筋間隔 S	圧縮強度 F <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大応力時 のひずみ ε <sub>r</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	ヤング係数 E <sub>c</sub> (×10 <sup>-6</sup> )
PR-7-∞	7.3	∞	271	1400	2.94
PR-7-b		b	306	2000	2.81
PR-7-b/2		b/2	331	2800	2.72
PR-7-b/4		b/4	374	3200	2.68
PR-9-∞	9.7	∞	295	1600	3.01
PR-9-b		b	304	1800	2.83
PR-9-b/2		b/2	332	2400	2.79
PR-9-b/4		b/4	352	2760	2.76
PR-12-∞	12.5	∞	312	1720	3.04
PR-12-b		b	320	1800	2.96
PR-12-b/2		b/2	228	2400	2.84
PR-12-b/4		b/4	350	2800	2.78
PR-15-∞	15	∞	308	1600	3.02
PR-15-b		b	326	2000	2.94
PR-15-b/2		b/2	342	2200	2.92
PR-15-b/4		b/4	347	2400	2.88
PR-20-∞	20	∞	337	1600	3.08
PR-20-b		b	343	1800	3.06
PR-20-b/2		b/2	350	2000	3.06
PR-20-b/4		b/4	363	2200	2.98
CY-C-10	φ10	-	379	2150	2.68
CY-SP-10	φ10	-	36.0*	-	-

\* : 割裂引張強度, PR : 角柱供試体, CY : 円柱供試体  
C : 円柱供試体圧縮試験用, SP : 円柱供試体割裂引張試験用

表-5.3.1 RC梁試験体の概要

試験体寸法 (bxhLs), (h=2b)					S	Pt
断面:bxh(cm)	主筋径	φ	P <sub>w</sub>	Ls		(%)
7.3x14.6	D10	φ3.2	0.30	4h 6h 8h	b/4 b/2 b	1.4 2.1 2.8
9.7x19.4	D13	φ3.9	0.25			
12.5x25.0	D16	φ4.9	0.24			
15.0x30.0	D19	φ5.7	0.23			
20.0x40.0	D25	φ8.0	0.25			

[注] L<sub>s</sub> : せん断スパン長さ φ : あばら筋径 [mm]  
S : あばら筋間隔 P<sub>w</sub> : S = b/2の  
Pt : 引張鉄筋比 ときのあばら筋比

表-5.3.2 コンクリート角柱体の概要

試験体寸法 (H=3b)		帯筋	
断面: bxb (cm)	高さ:H (cm)	鉄筋径 (mm)	間隔 S
7.3x 7.3	21.9	φ3.2	b/4 b/2 b ∞
9.7x 9.7	29.1	φ3.9	
12.5x12.5	37.5	φ4.9	
15.0x15.0	45.0	φ5.7	
20.0x20.0	60.0	φ8.0	

表-5.3.3 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中の係数

試験体寸法 b [cm]	plain				S=b				S=b/2				S=b/4			
	σ <sub>m</sub> <sup>1)</sup>	ε <sub>m</sub> <sup>2)</sup>	B	Nd	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	B	Nd	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	B	Nd	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	B	Nd
7.3	321	2000	0.24	5.20	348	2300	0.18	4.70	366	2980	0.30	3.50	414	3200	0.08	6.00
9.7	330	2000	0.34	5.30	348	2300	0.36	3.20	380	2700	0.45	3.00	420	3090	0.25	3.40
12.5	340	1950	0.50	4.70	358	2200	0.31	4.30	380	2480	0.53	2.80	427	2800	0.34	3.00
15.0	345	1800	0.54	4.70	357	2050	0.33	4.40	380	2240	0.55	2.70	445	2590	0.62	2.35
20.0	347	1700	0.64	4.60	360	1980	0.46	3.90	382	2180	0.70	2.60	440	2380	0.86	2.09

注 1) σ<sub>m</sub> : 最大応力 (kgf/cm<sup>2</sup>) 2) ε<sub>m</sub> : 最大応力時のひずみ (×10<sup>-4</sup>)

表-5.3.4 elp の値

試験体名	実験値				計算値			
	My	$\Delta_{My}$	0.8My	$\Delta_{0.8My}$	My	$\Delta_{My}$	0.8My	elp(xh)
9-4-1-2	52.4	0.012	41.9	0.140	46.3	0.011	37.0	1.6
9-6-1-2	47.1	0.010	37.7	0.143		0.013		1.4
9-8-1-2	47.9	0.012	38.3	0.175		0.015		1.8
9-4-1-3	70.6	0.010	56.5	0.085	67.0	0.010	53.6	1.6
9-6-1-3	66.2	0.011	53.0	0.109		0.013		2.0
9-8-1-3	69.8	0.013	55.8	0.097		0.015		1.6
9-4-2-3	75.6	0.011	60.5	0.108	67.2	0.010	53.8	1.8
9-6-2-3	67.2	0.017	53.8	0.124		0.013		2.0
9-8-2-3	70.9	0.014	56.7	0.129		0.016		2.0
9-4-4-3	70.9	0.010	56.7	0.224	67.8	0.011	54.2	1.5
9-6-4-3	67.5	0.011	54.0	0.161		0.013		1.2
9-8-4-3	70.0	0.015	56.0	0.166		0.016		1.2
9-4-1-4	87.2	0.012	69.8	0.076	86.5	0.009	69.2	2.0
9-6-1-4	86.9	0.013	69.5	0.065		0.012		1.8
9-8-1-4	91.8	0.014	73.4	0.067		0.015		1.8

註) My:降伏モーメント指数  $M/b'd^2$  [kgf/cm<sup>2</sup>] [試験体名]  
 $\Delta_{My}$ :降伏時部材角  $\Delta/Ls$   
 $\Delta_{0.8My}$ :0.8My時部材角  $\Delta/Ls$

9-4-1-2  
 $P_t=1.4\%[x0.7\%]$   
 $S=b$   
 $Ls=4h$   
 $b=9.7cm$

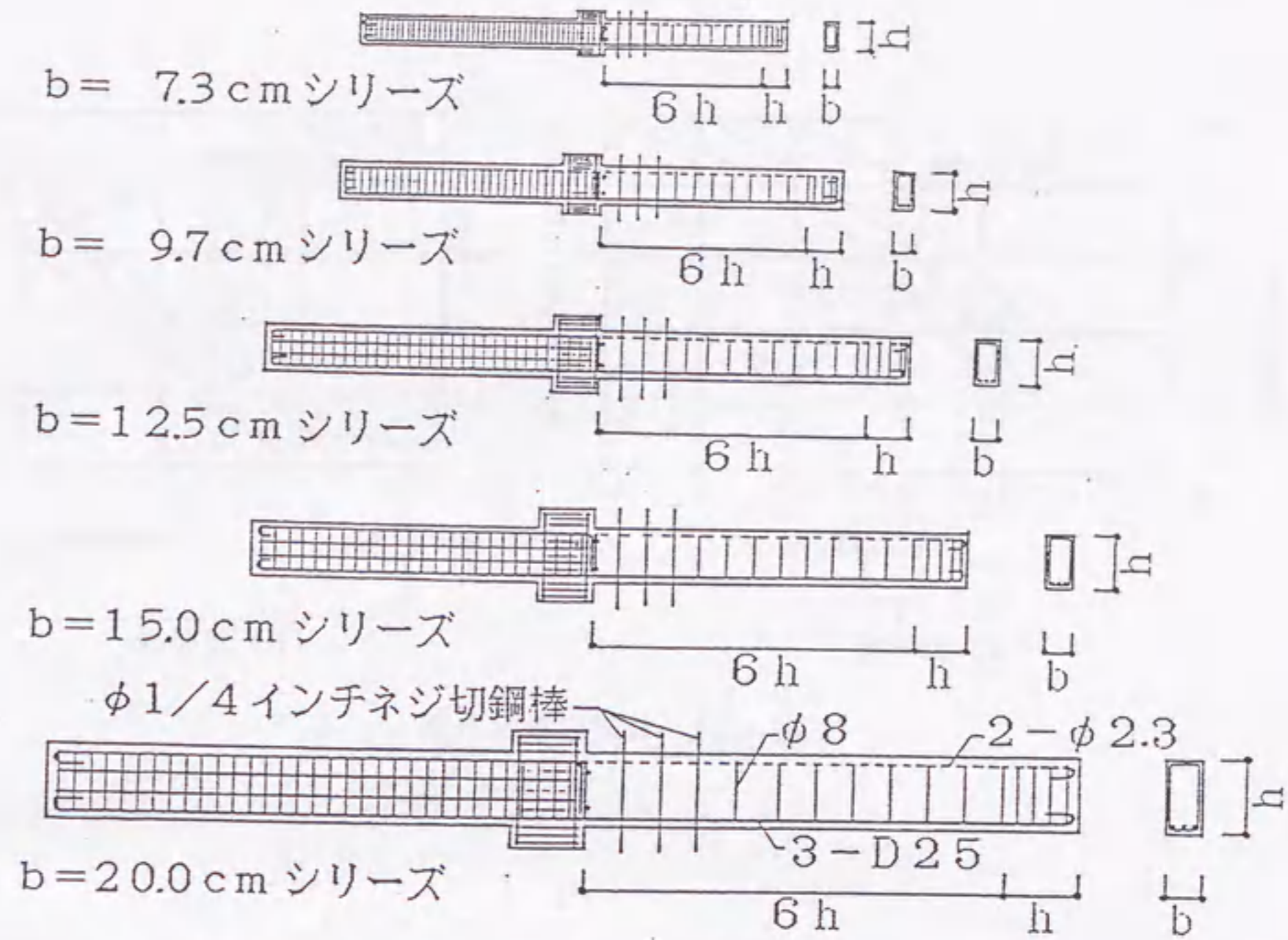


図-5.2.1 RC梁試験体の形状および配筋図の一例 ( $Ls=6h$  シリーズ)

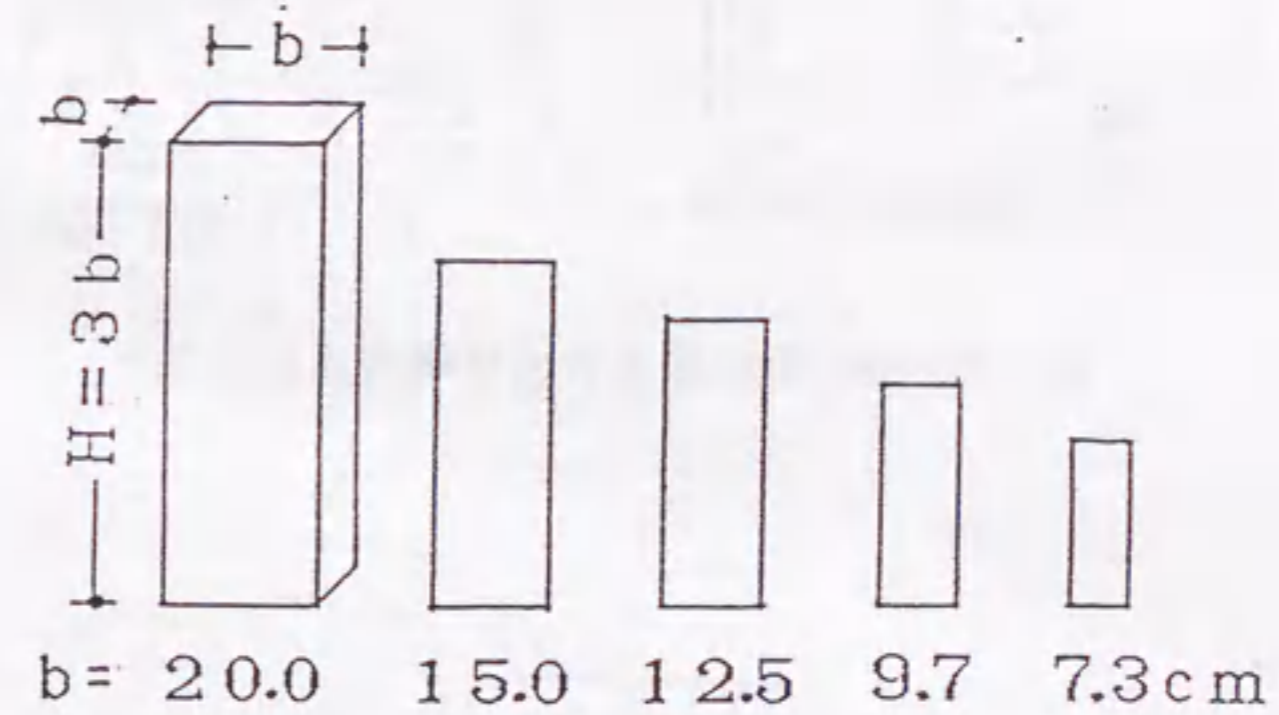


図-5.2.2 コンクリート角柱体の形状・寸法

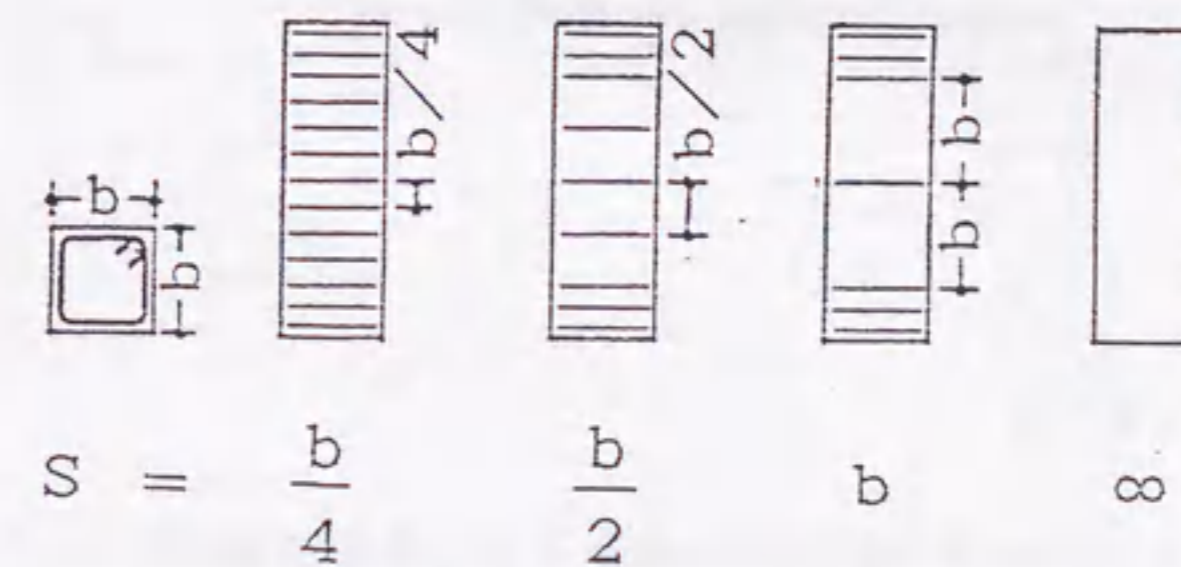


図-5.2.3 コンクリート角柱体の帯筋の配置

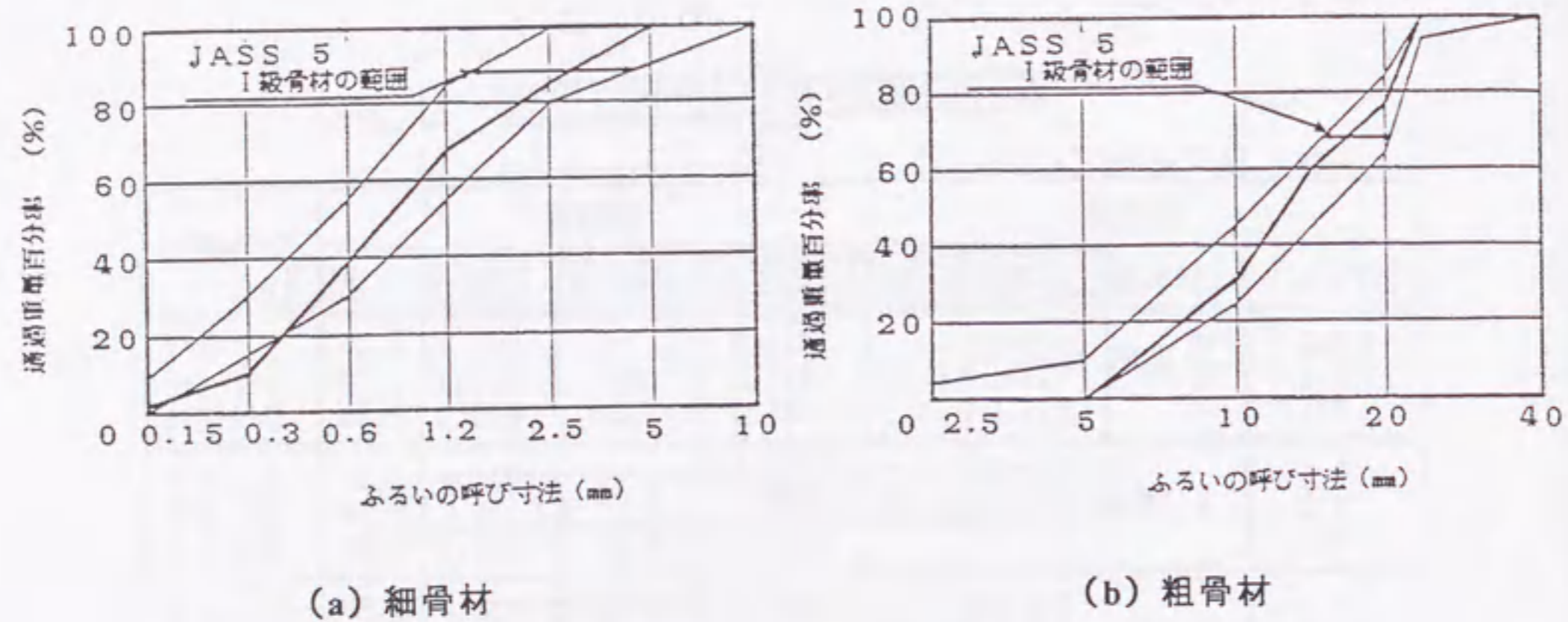


図-5.2.4 骨材の粒度分布

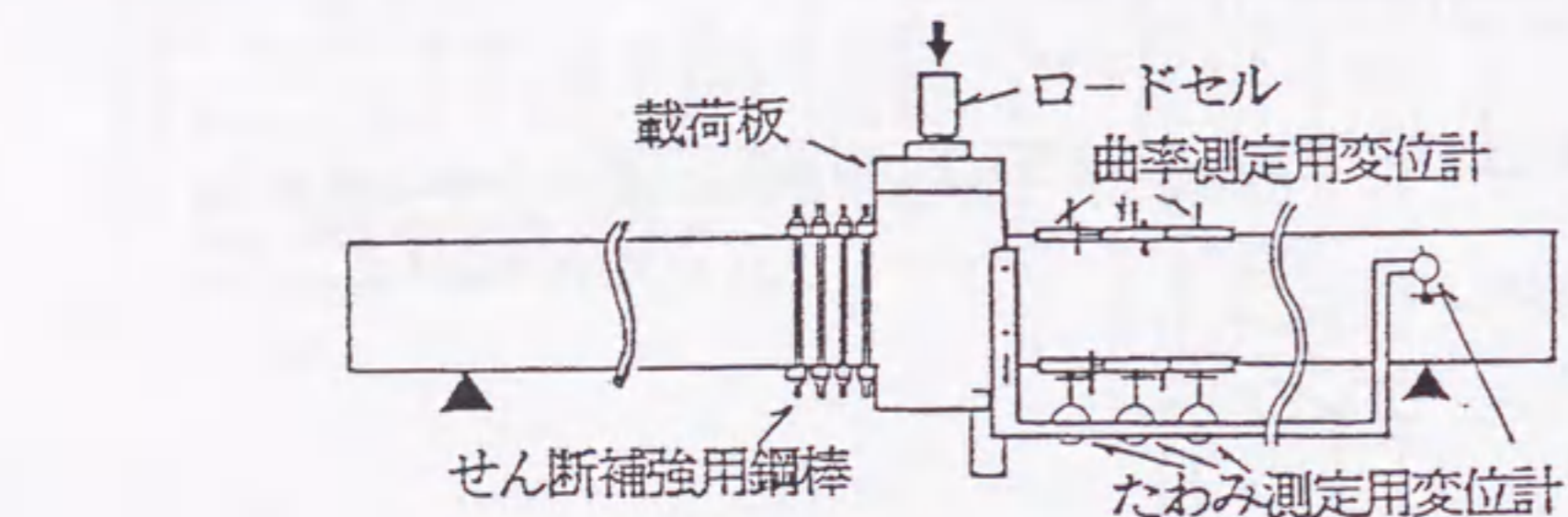


図-5.2.5 RC 梁試験体の曲げ荷重試験方法

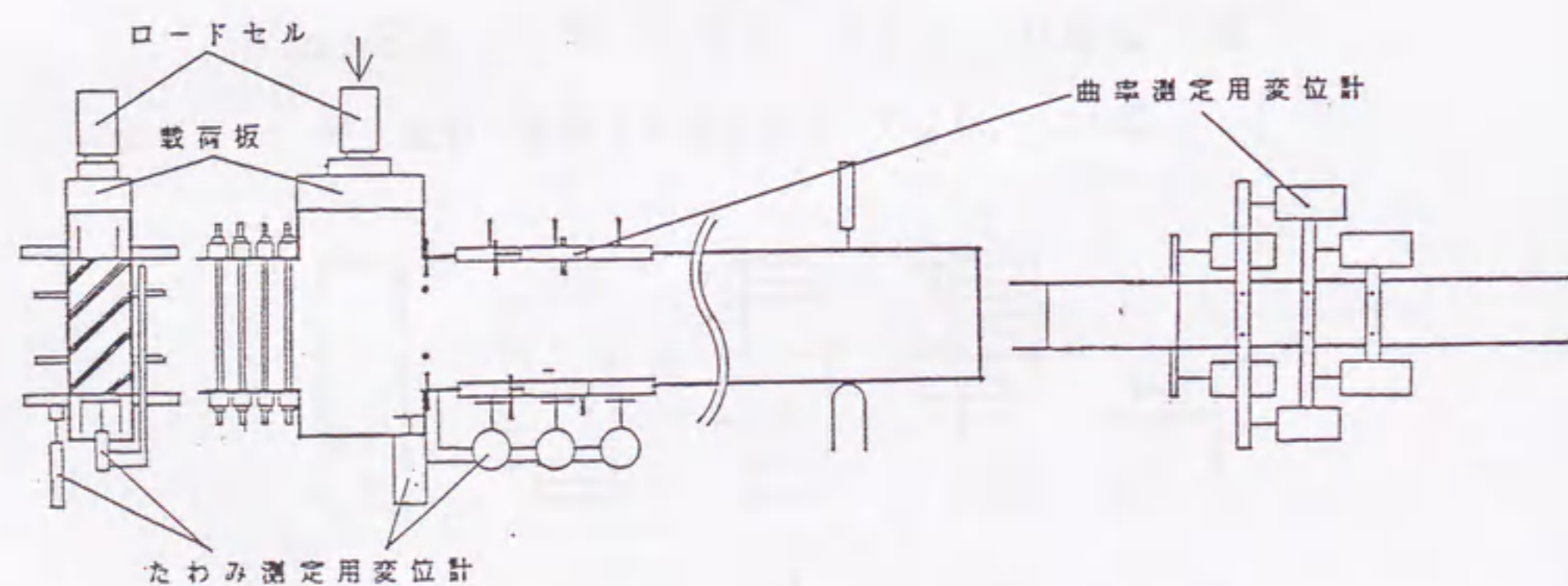


図-5.2.6 RC 梁の曲率およびたわみの測定方法

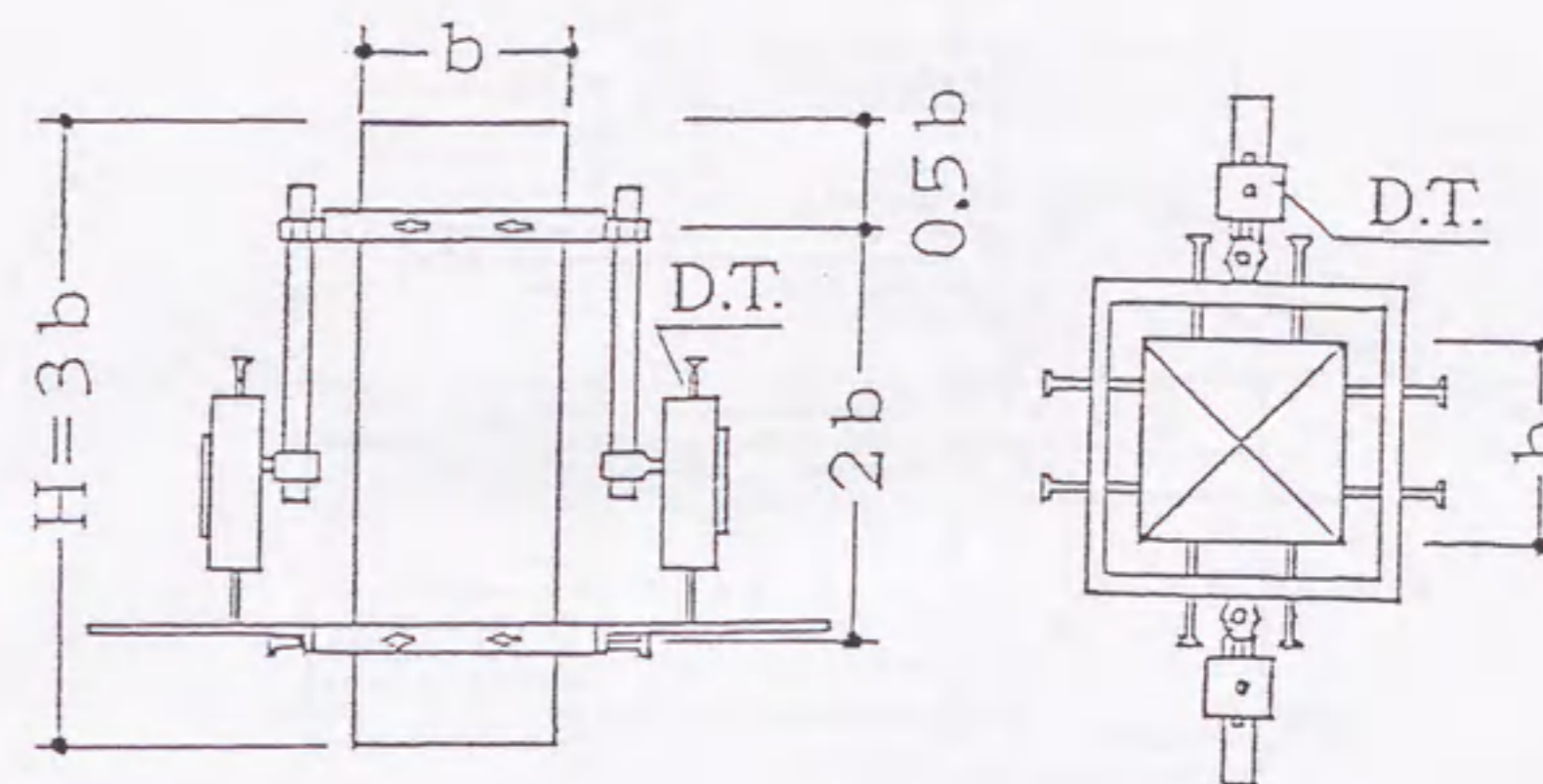


図-5.2.7 角柱体のひずみの計測方法

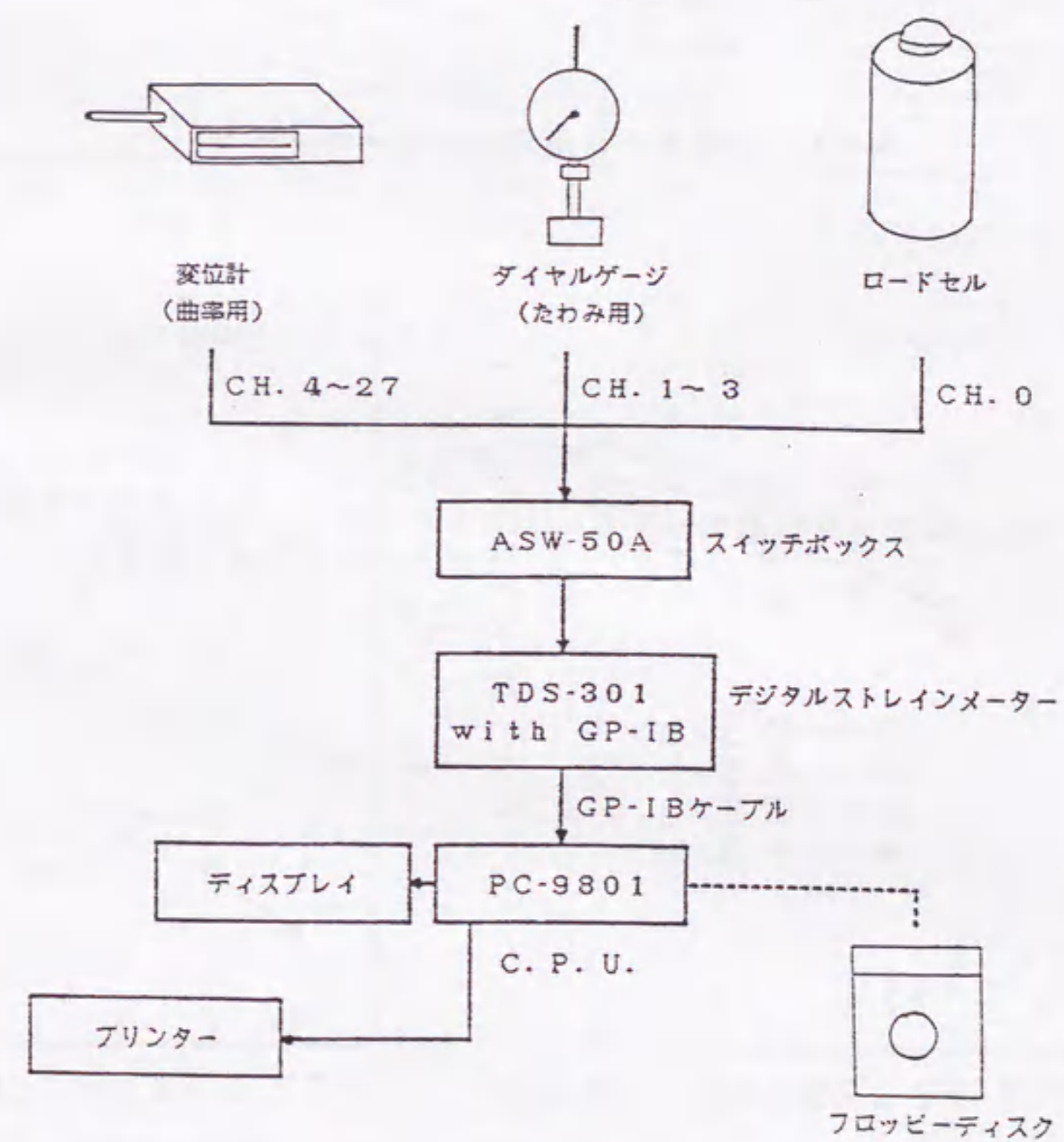


図-5.2.8 RC 梁の荷重、たわみおよび曲率の計測システム

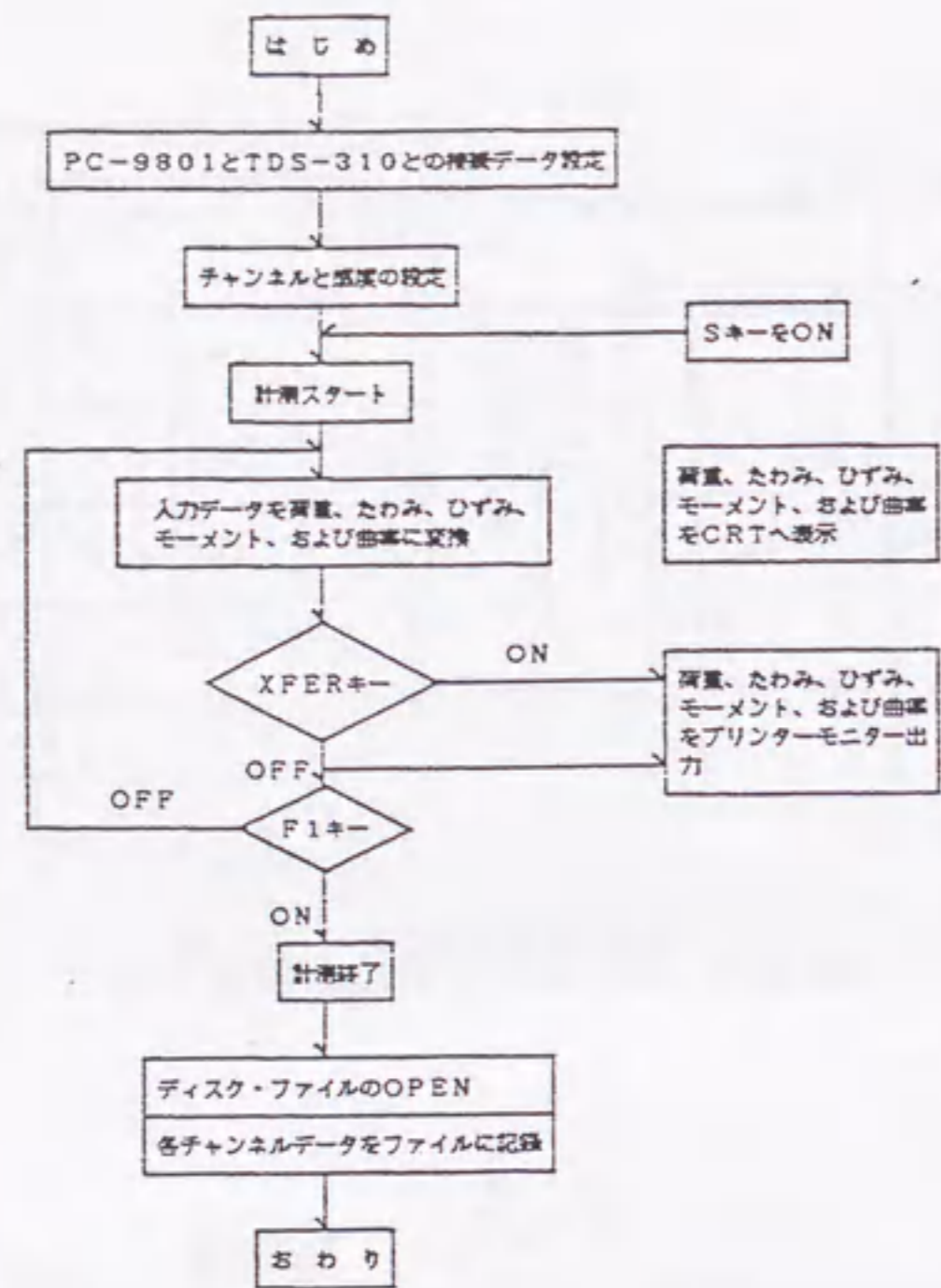


図-5.2.9 実験データ処理のフローチャート

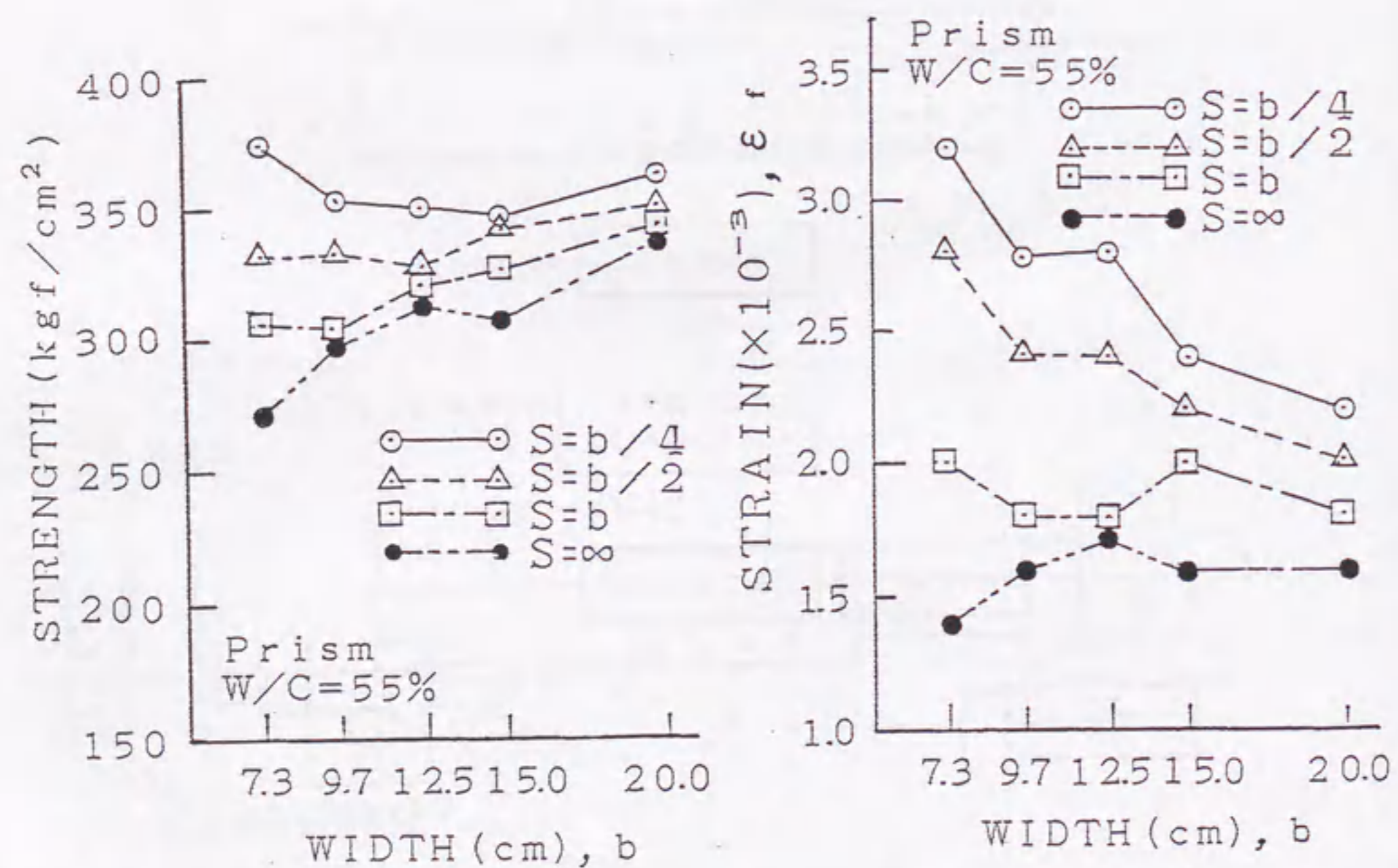
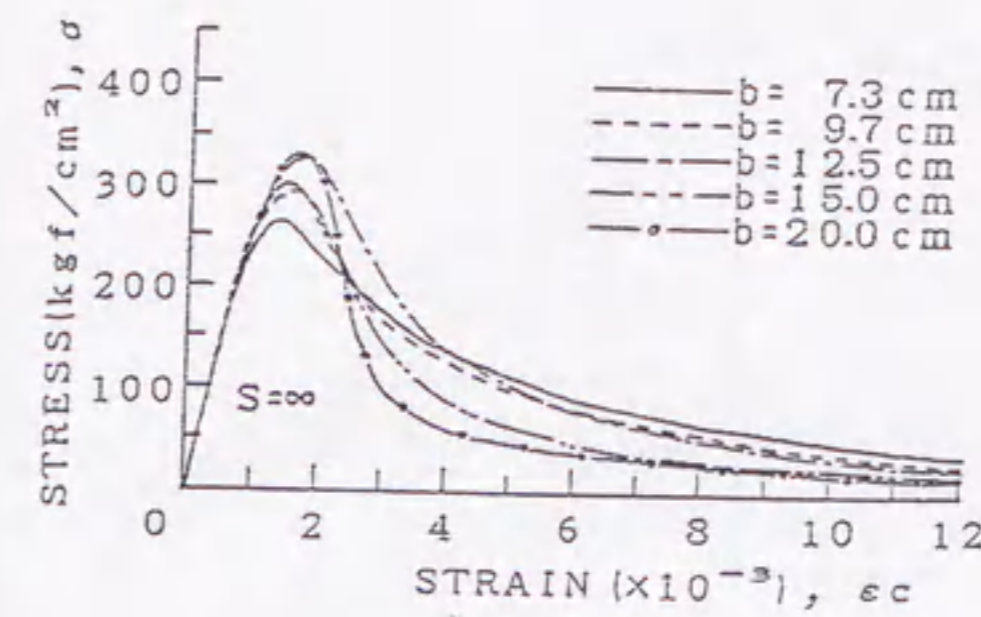
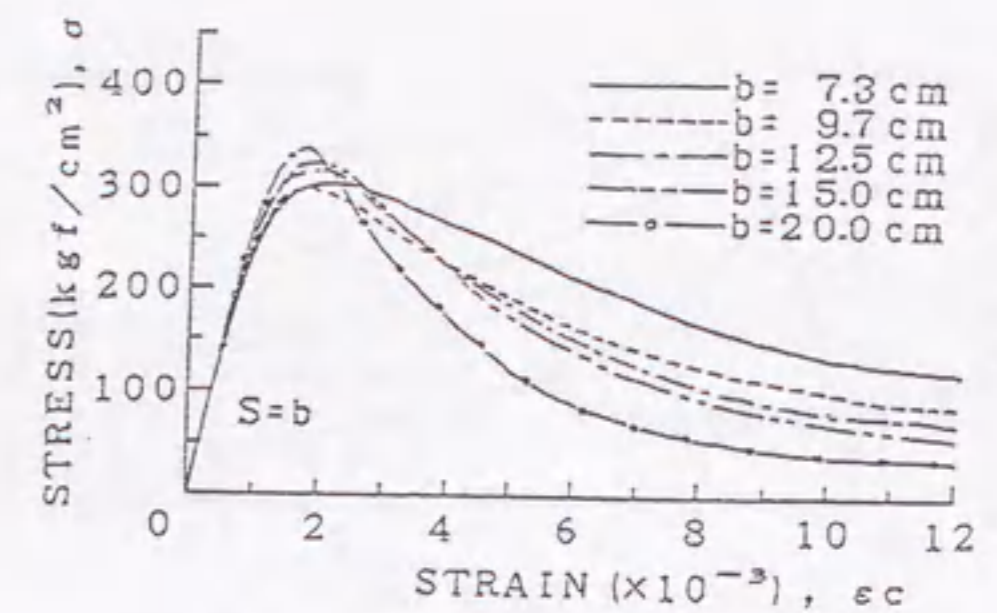


図-5.2.10 コンクリートの圧縮強度の寸法効果に及ぼすあばら筋ピッチの影響

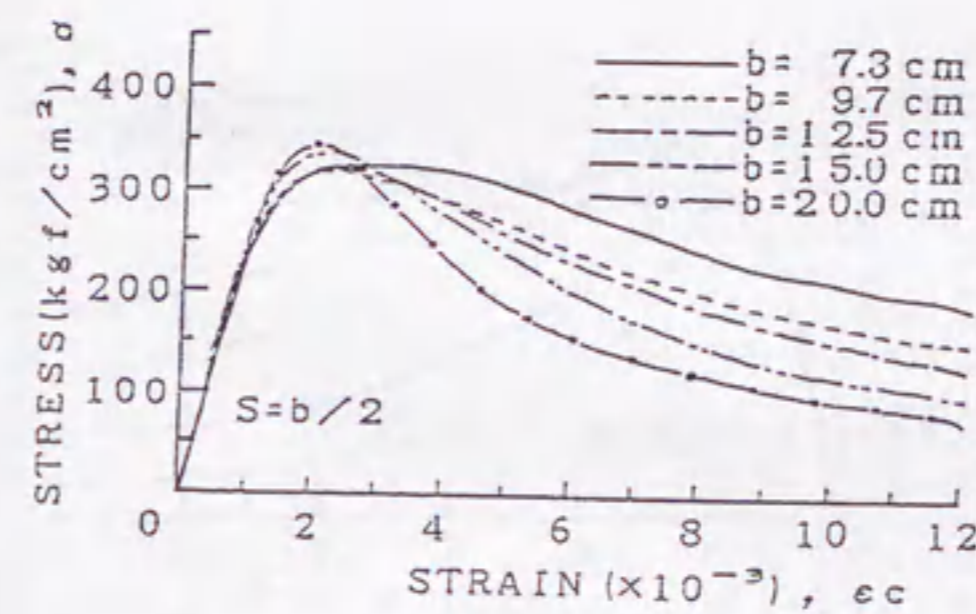
図-5.2.11 コンクリートの最大応力時のひずみ(εf)の寸法効果に及ぼすあばら筋ピッチの影響



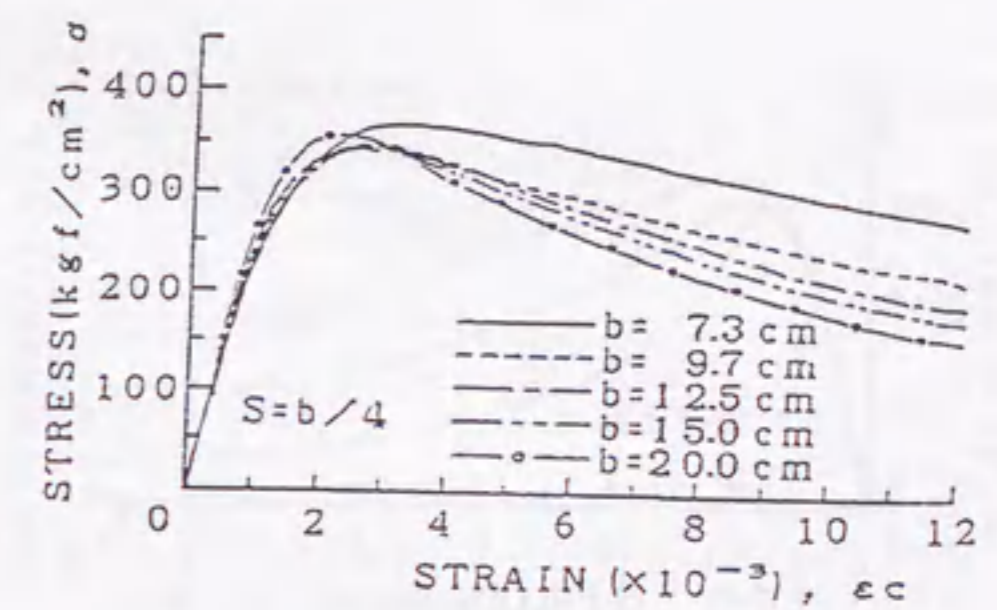
(a) plain



(b) S=b

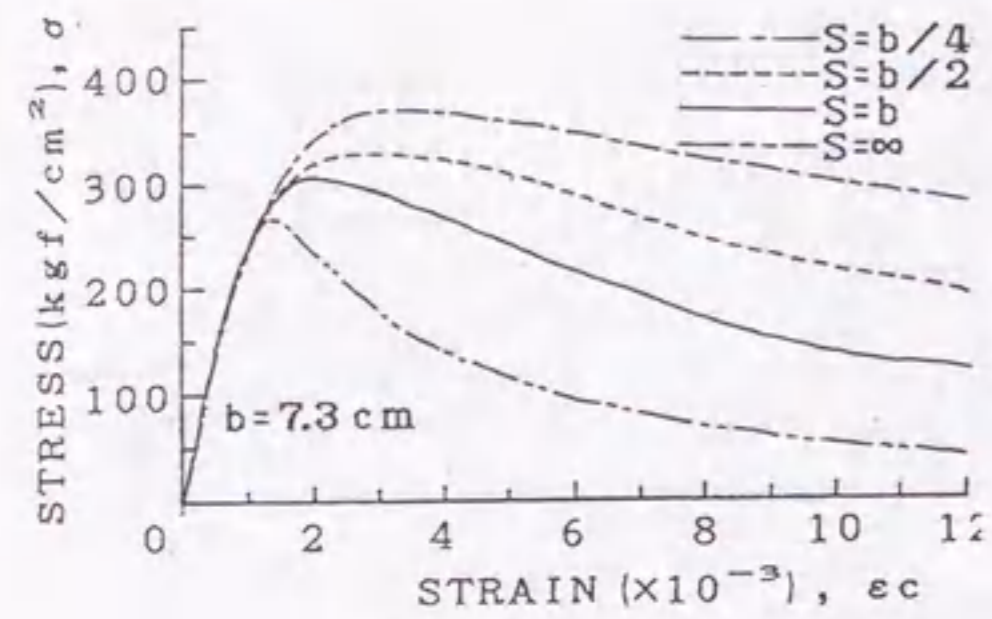


(c) S=b/2

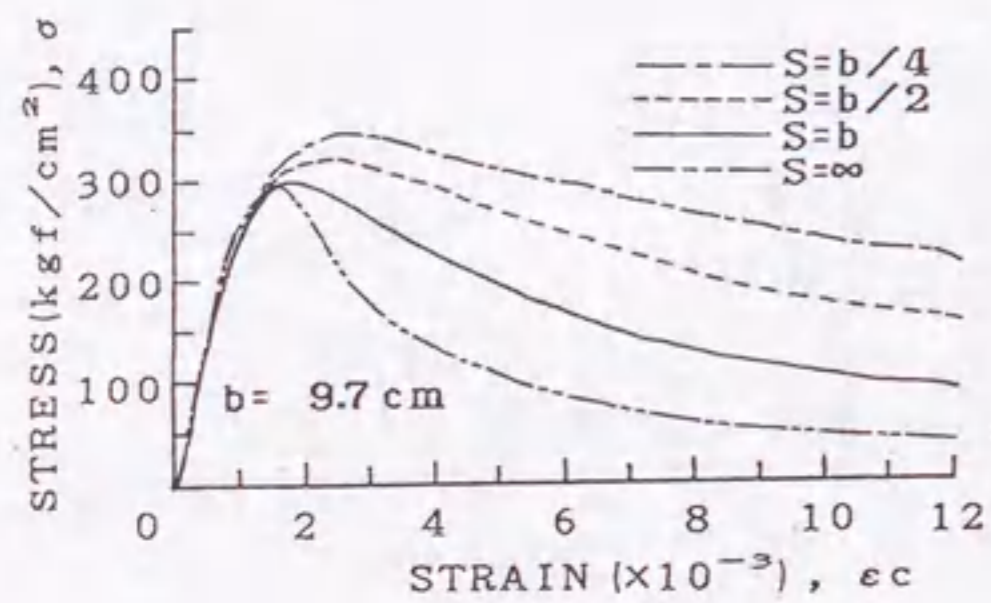


(d) S=b/4

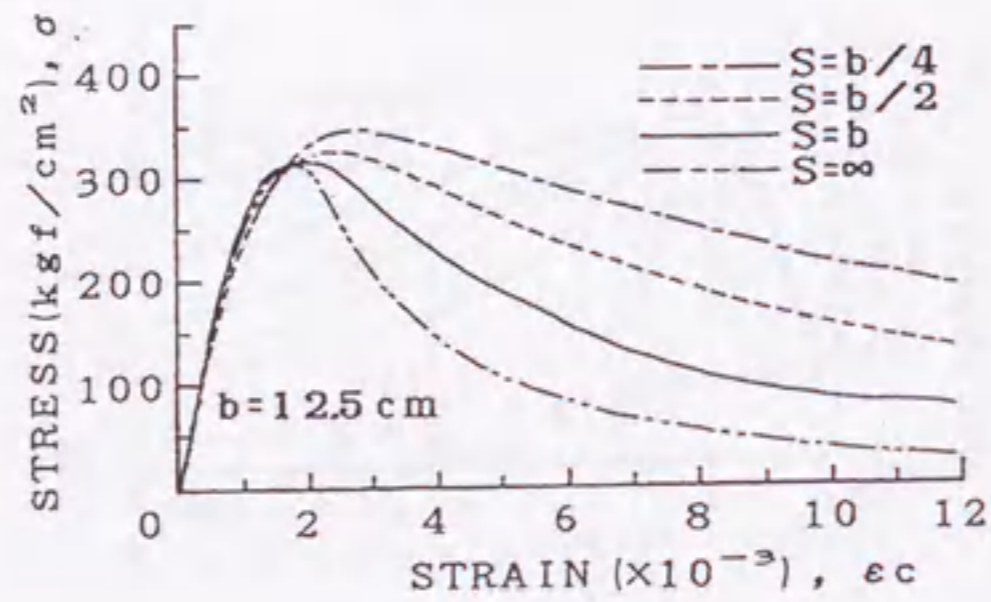
図-5.2.12 コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の寸法効果に及ぼすあばら筋ピッチの影響



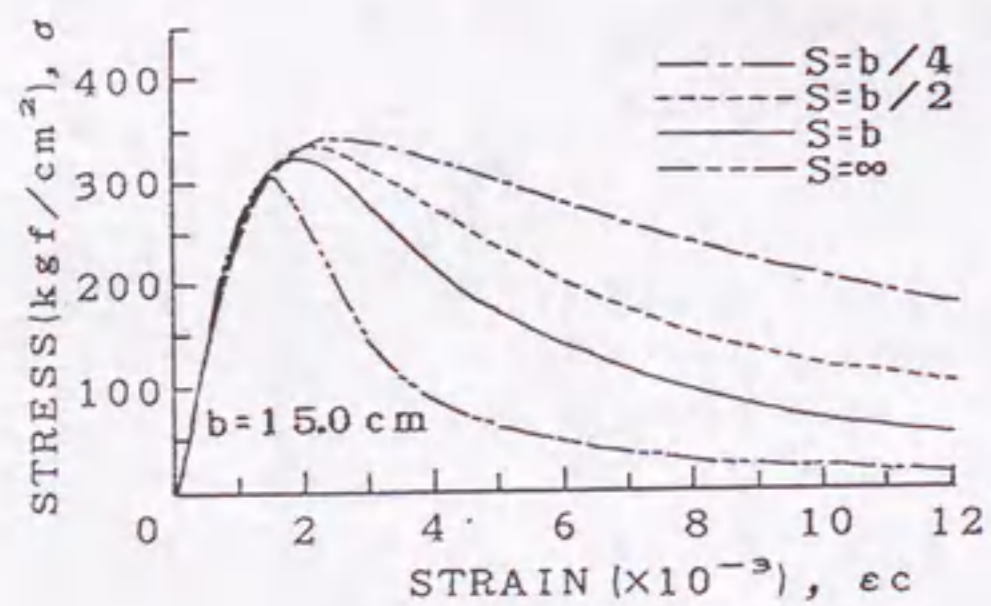
(a) b=7.3cm



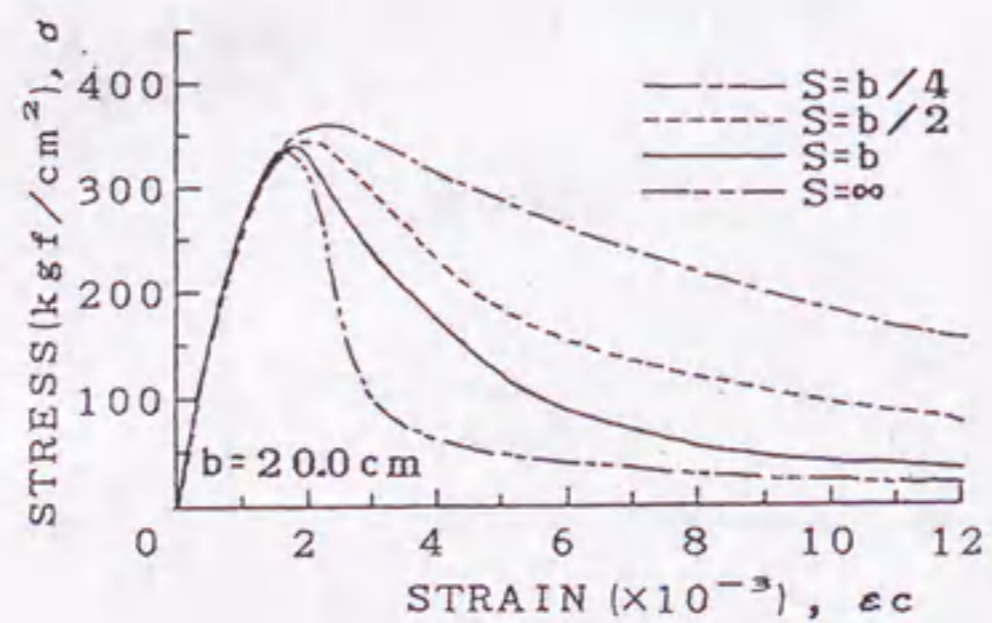
(b) b=9.7cm



(c) b=12.5cm



(d) b=15cm



(e) b=20cm

図-5.2.13 コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線に及ぼすあばら筋ピッチ (S) の影響

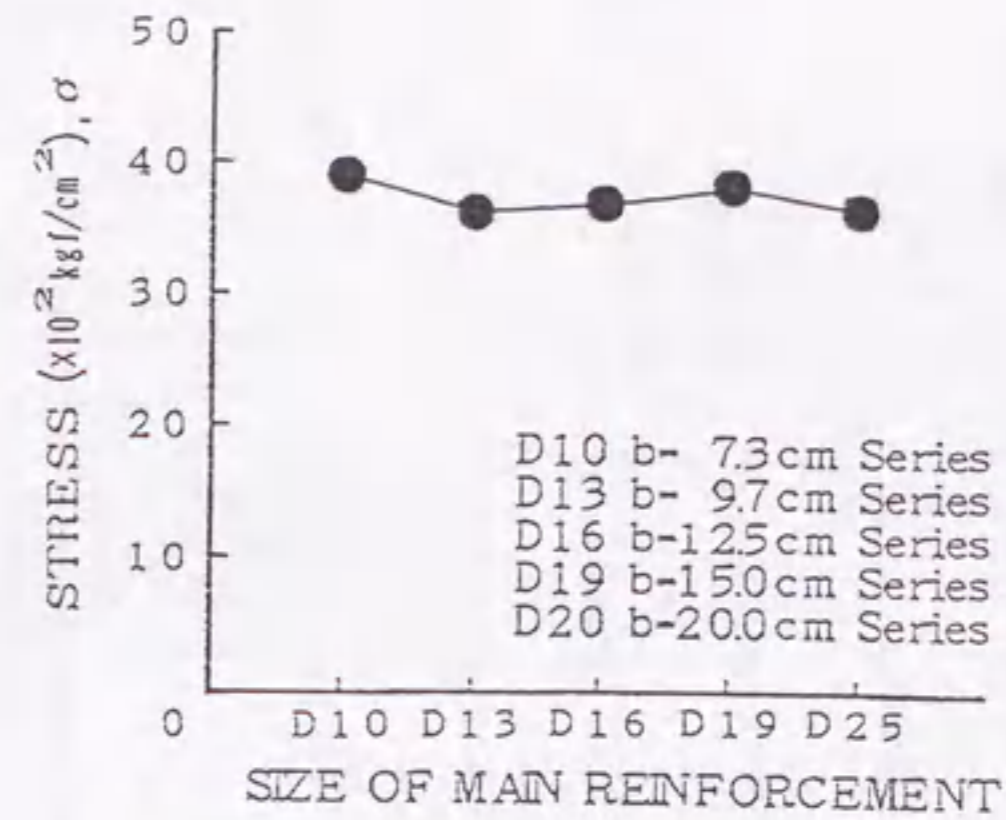
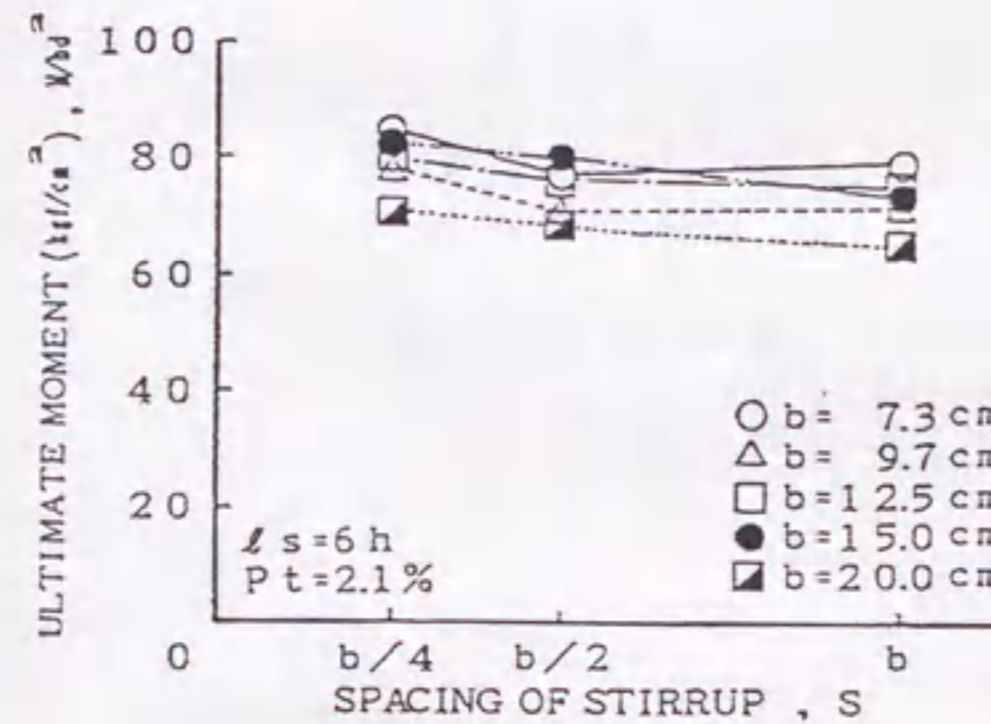
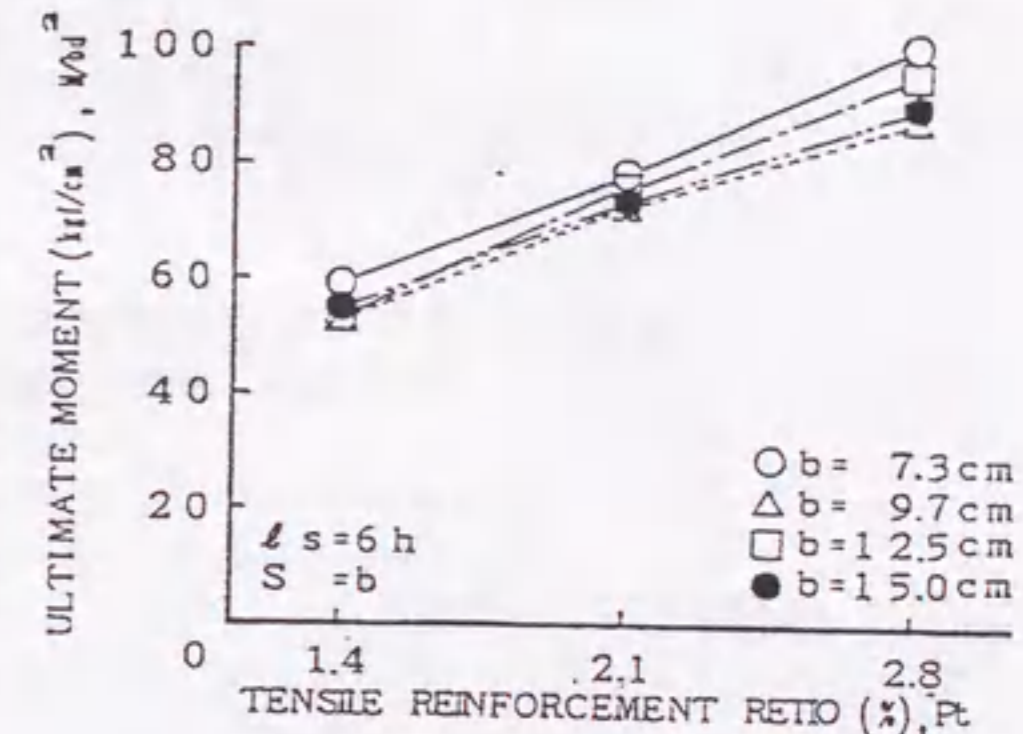


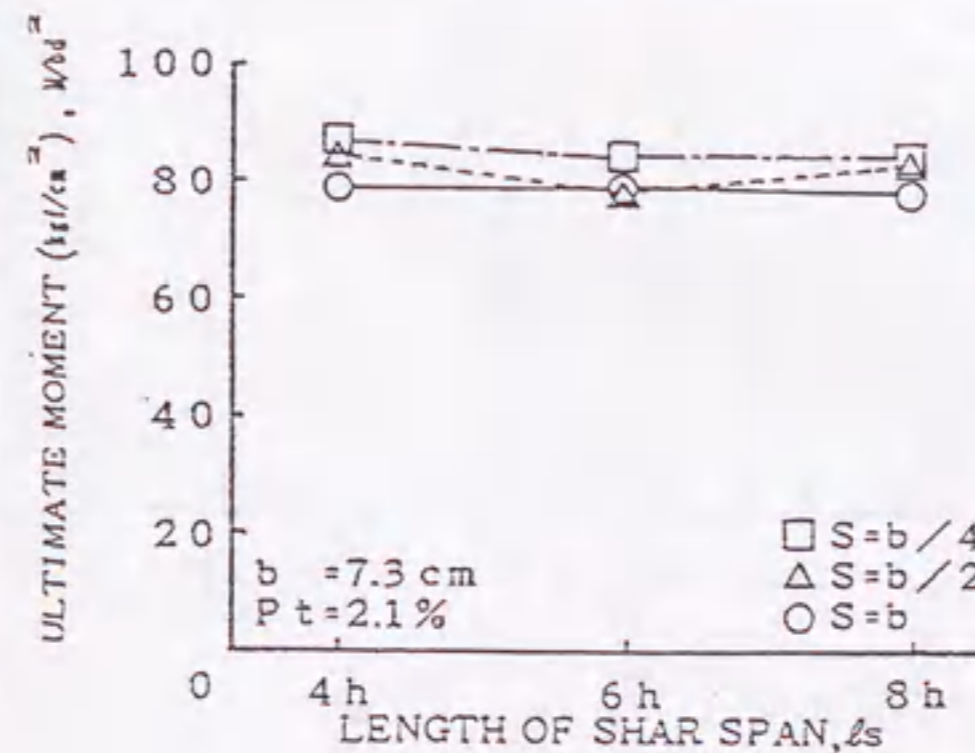
図-5.2.14 主筋の降伏点



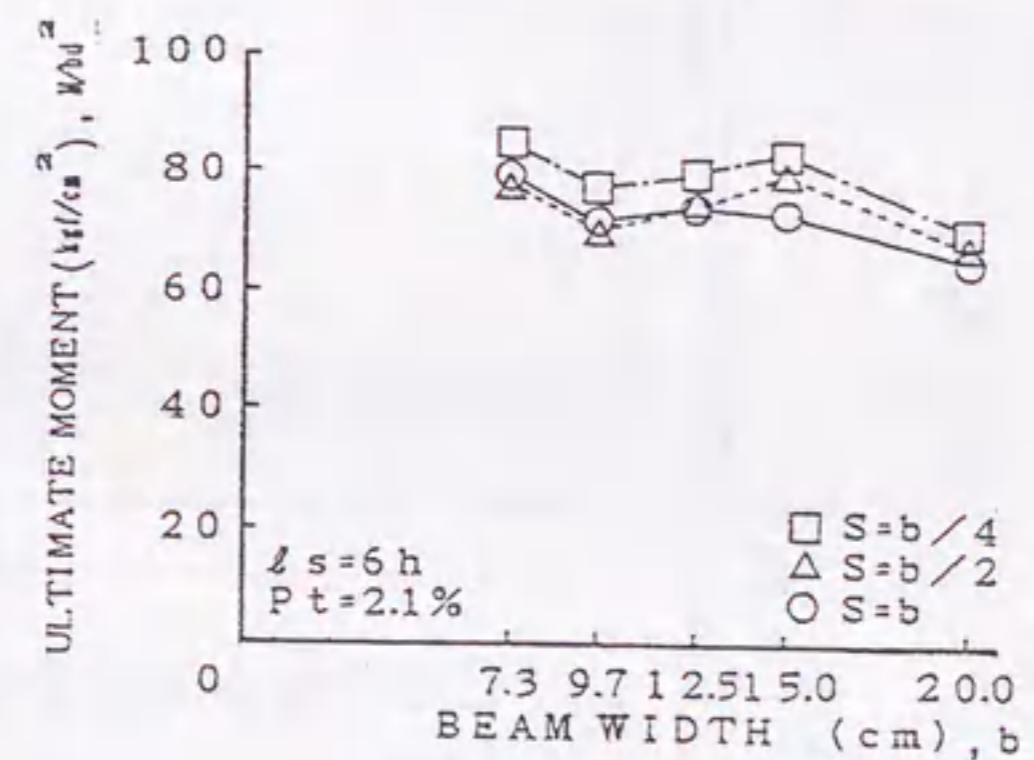
(a) 曲げ終局強度とあばら筋ピッチとの関係に及ぼす試験体寸法の影響



(b) 曲げ終局強度と引張鉄筋比との関係に及ぼす試験体寸法の影響



(c) 曲げ終局強度とせん断スパン長さとの関係に及ぼすあばら筋ピッチの影響



(d) 曲げ終局強度と試験体寸法との関係に及ぼすあばら筋ピッチの影響

図-5.2.15 RC梁の曲げ終局強度の実験結果



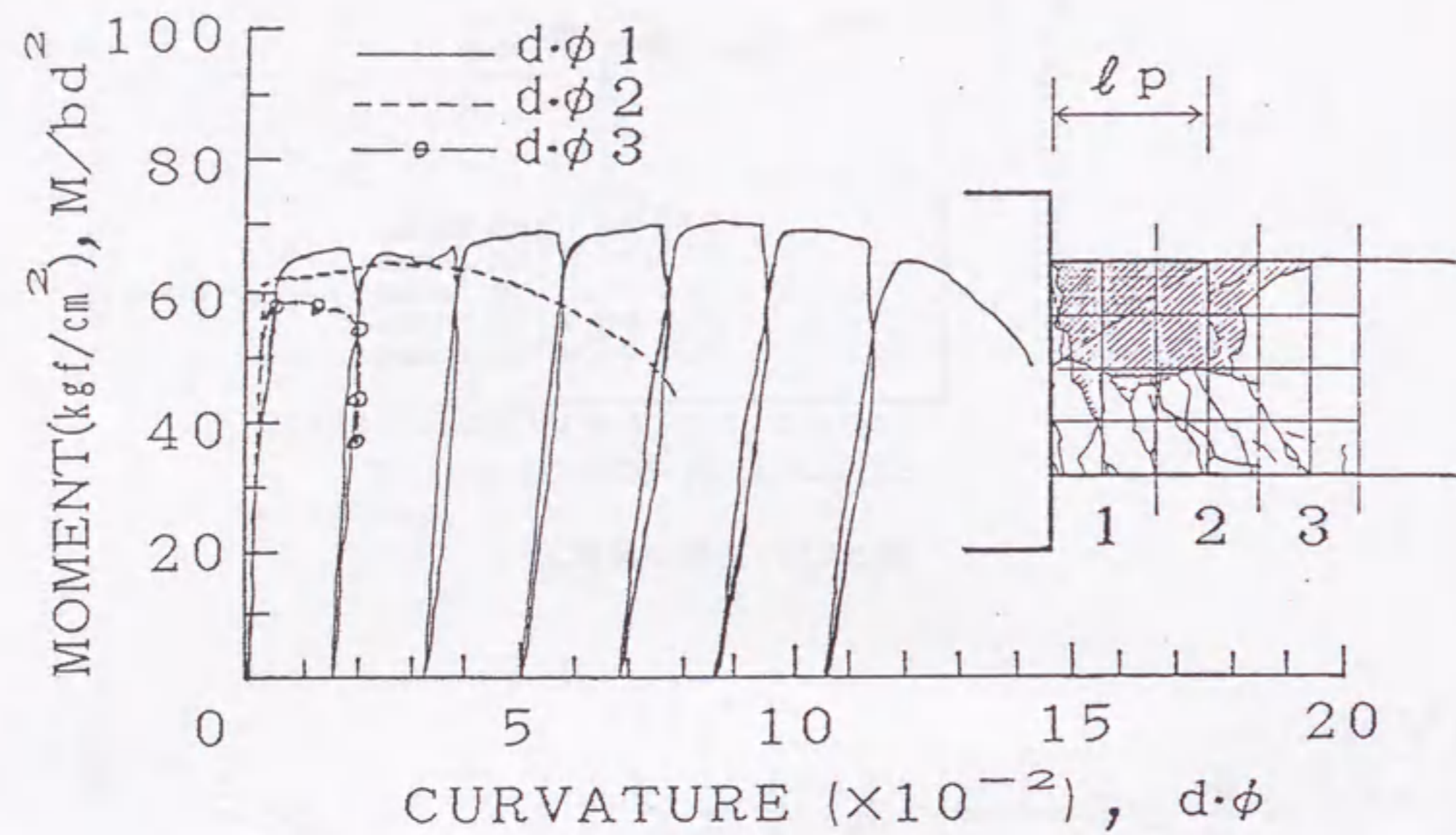


図-5.2.16 各曲率測定区間のモーメント-曲率曲線の実測例  
( $b=9.7\text{cm}$ ,  $S=b$ ,  $l_s=6h$ ,  $P_t=2.1\%$ )

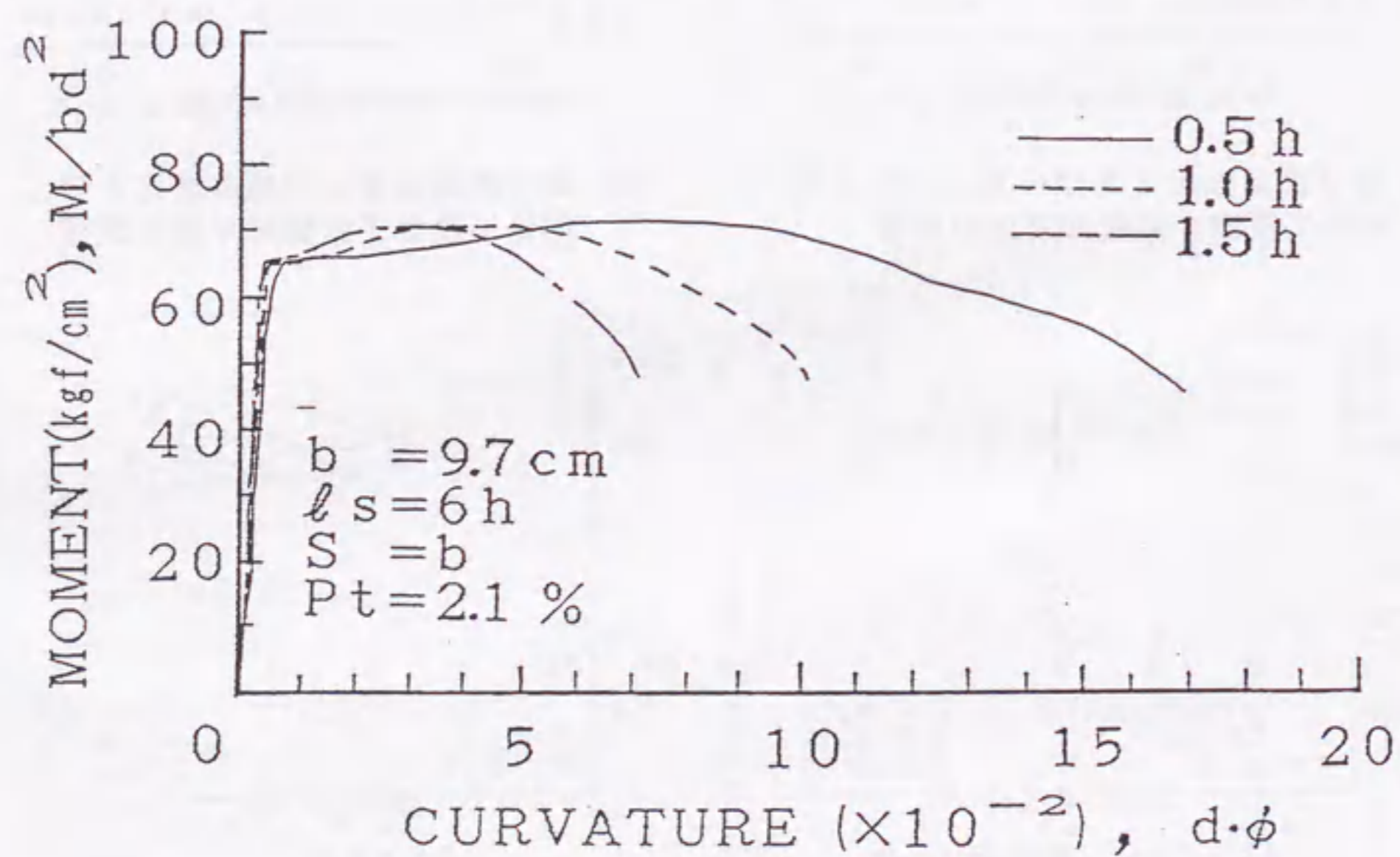
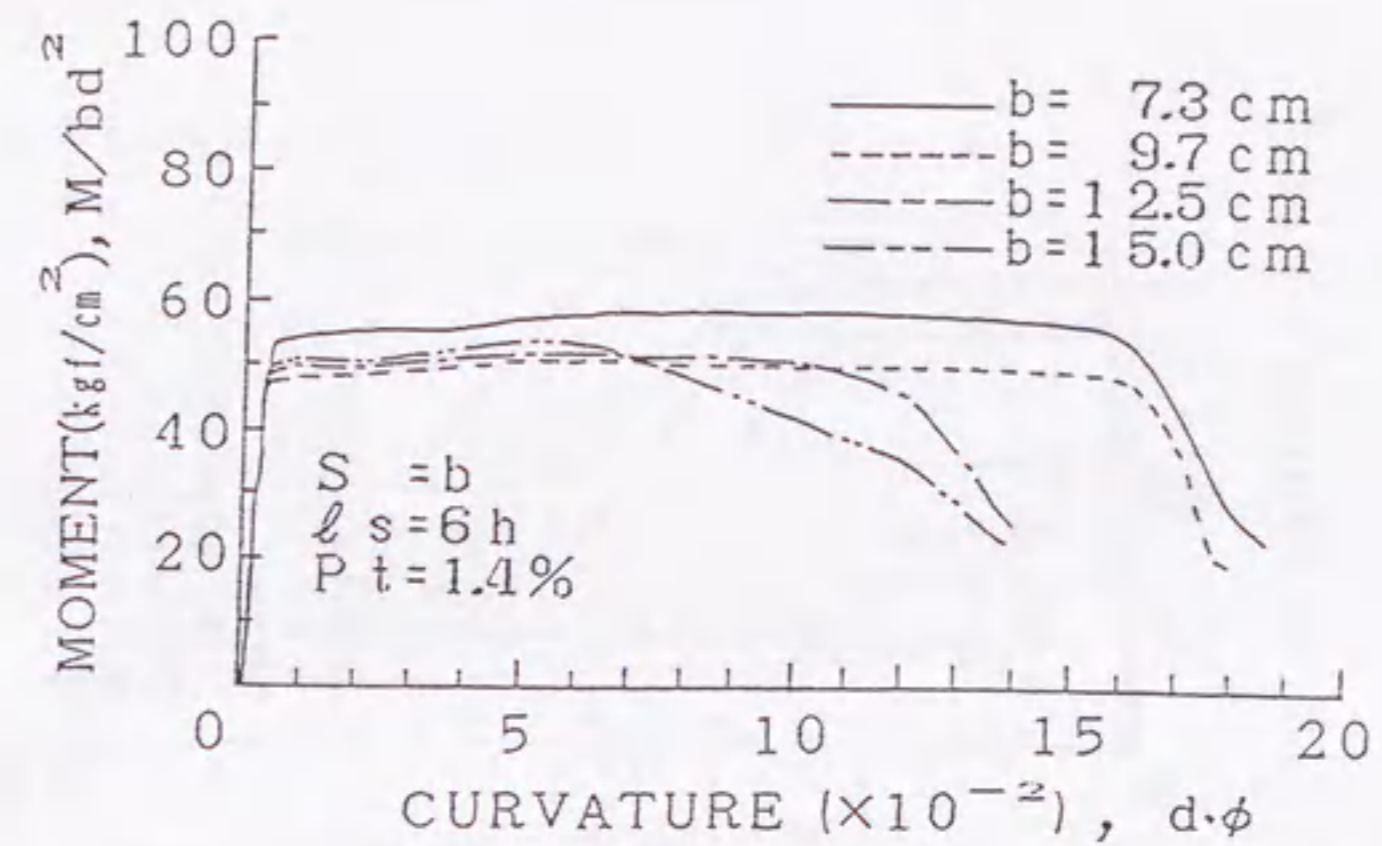
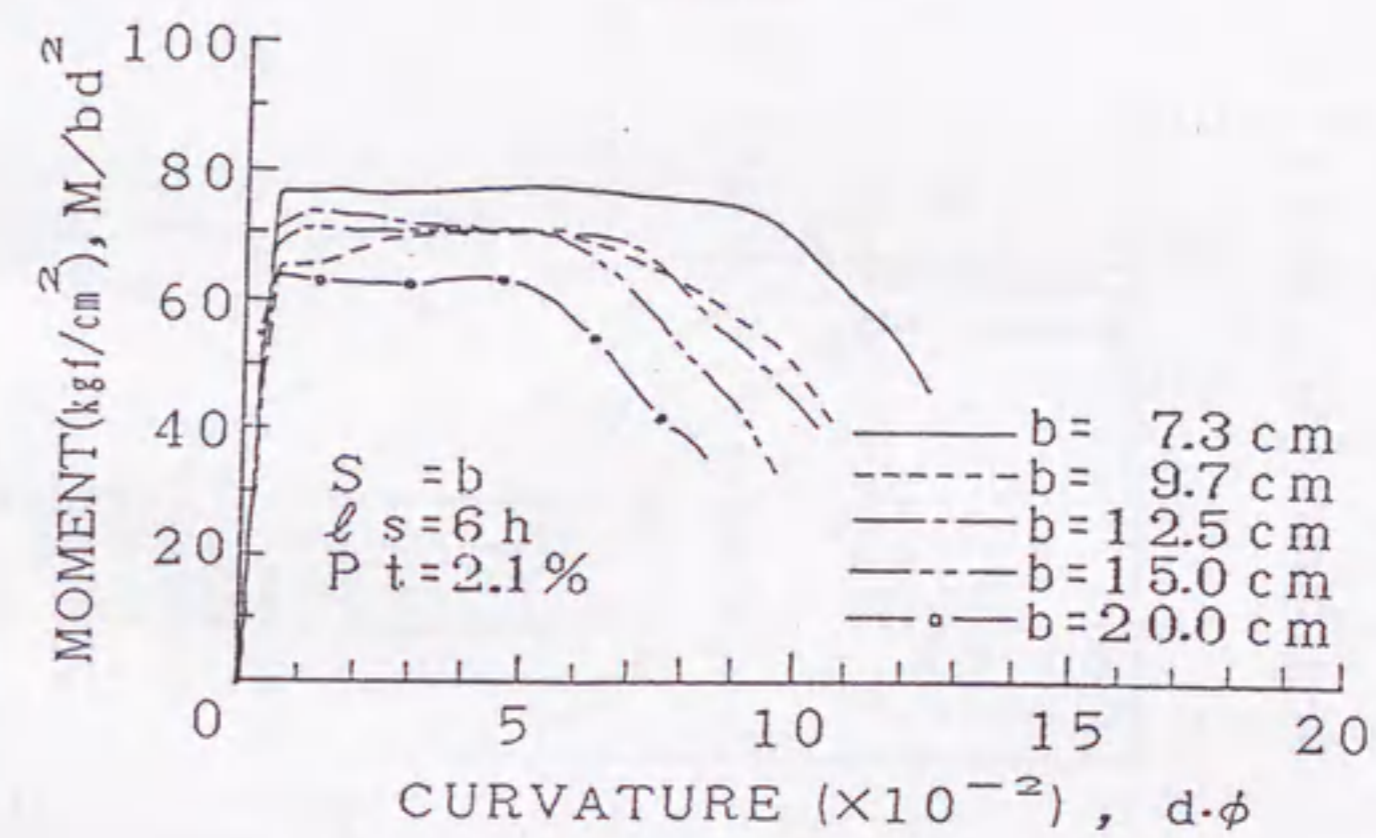


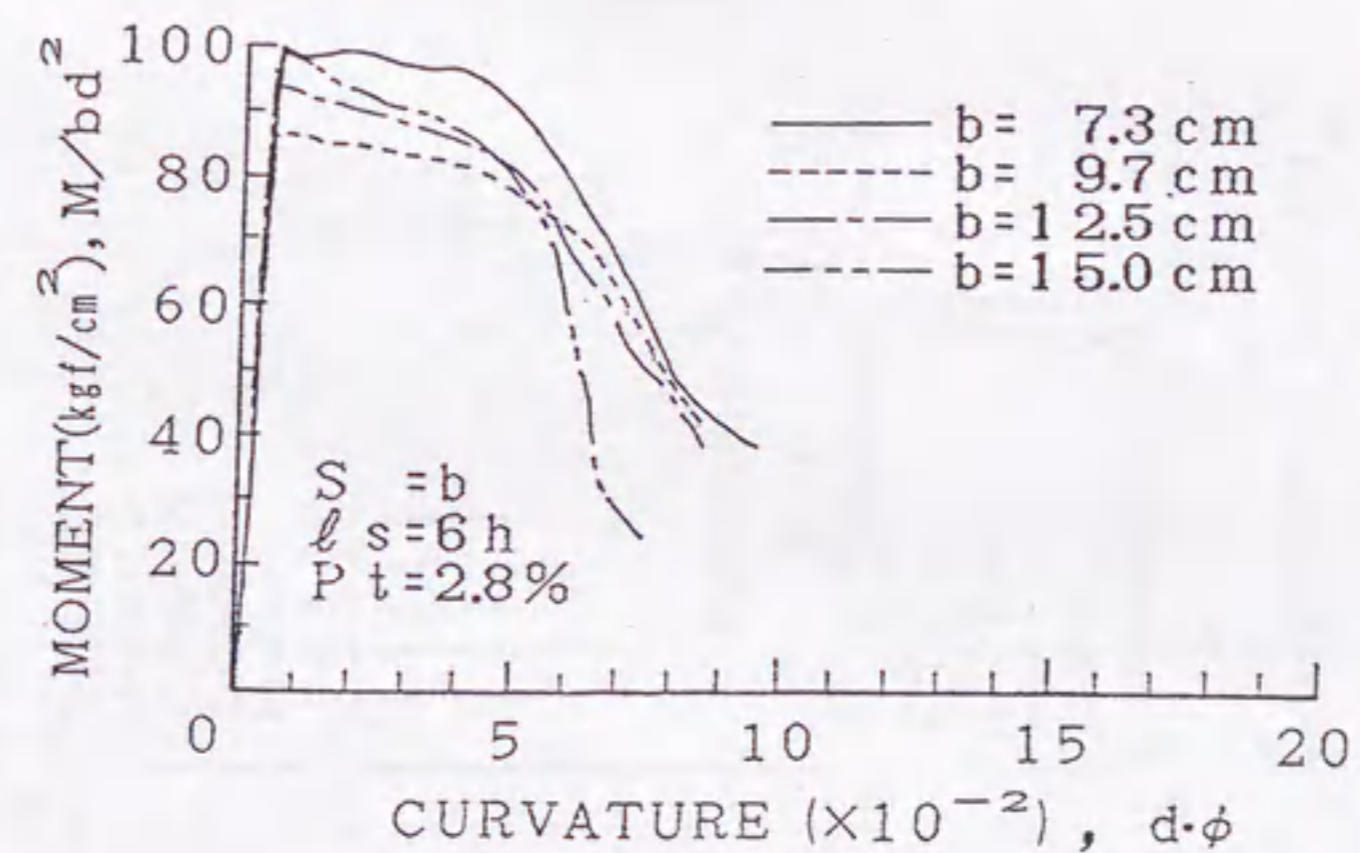
図-5.2.17 柱型端部から任意区間で平均したモーメント-曲率曲線



(a)  $P_t=1.4\%$

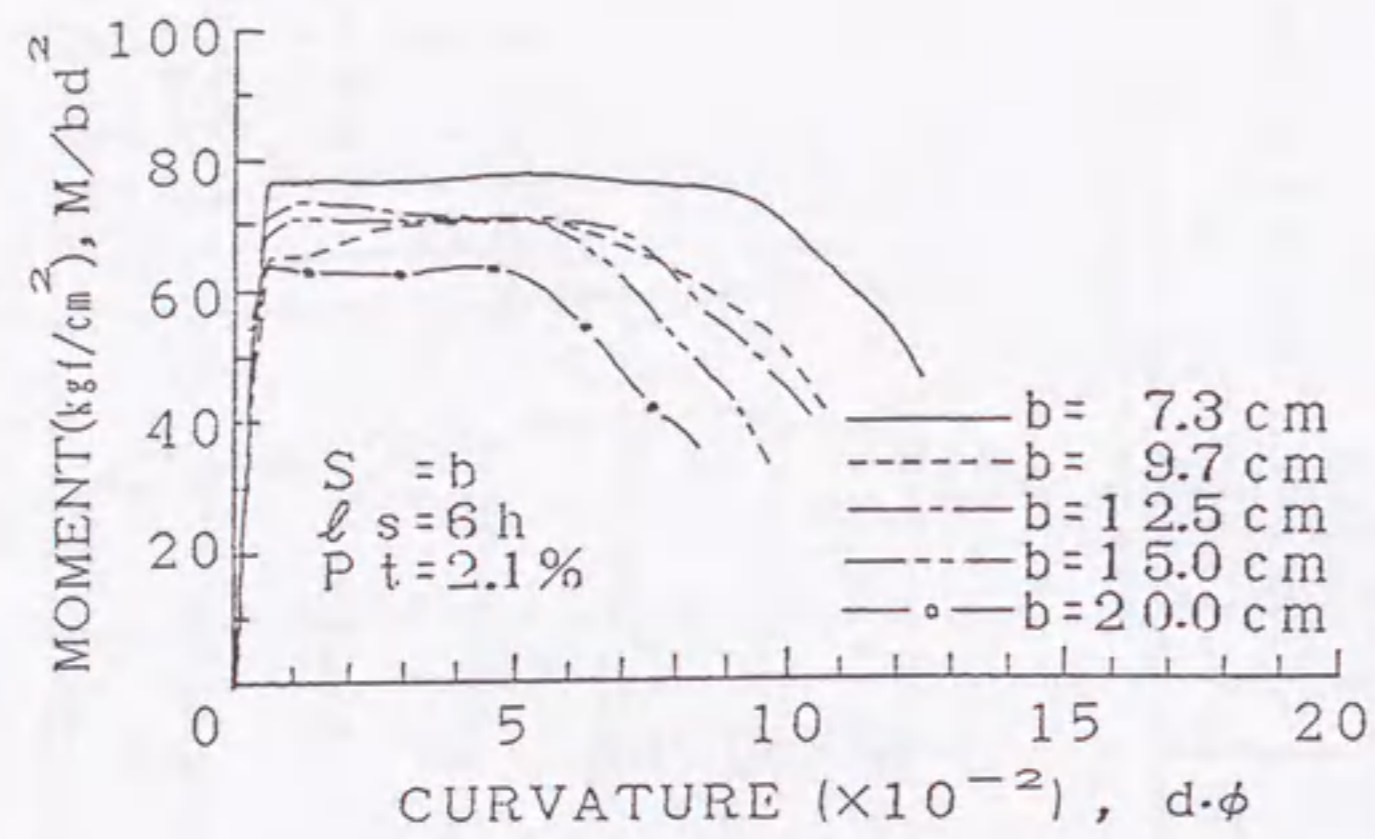


(b)  $P_t=2.1\%$

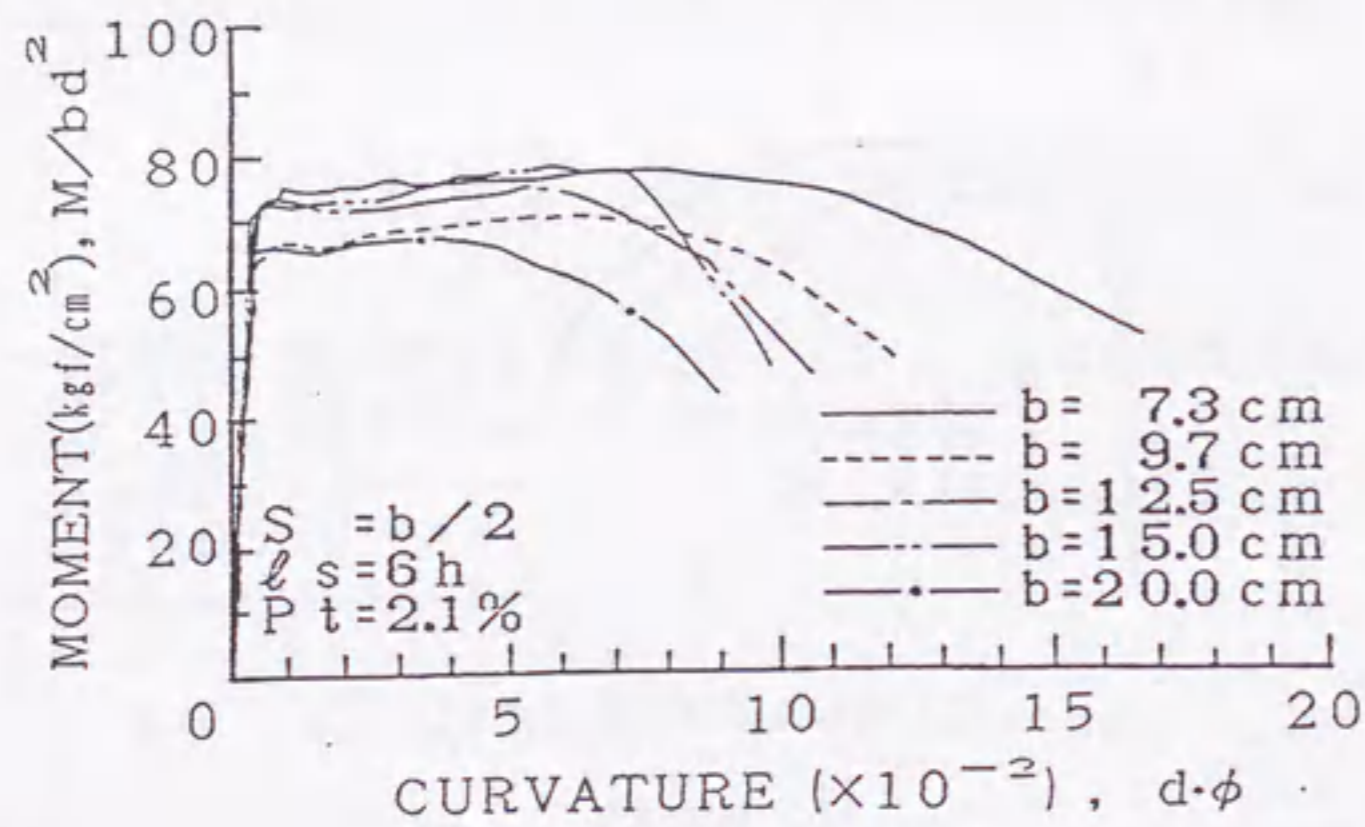


(c)  $P_t=2.8\%$

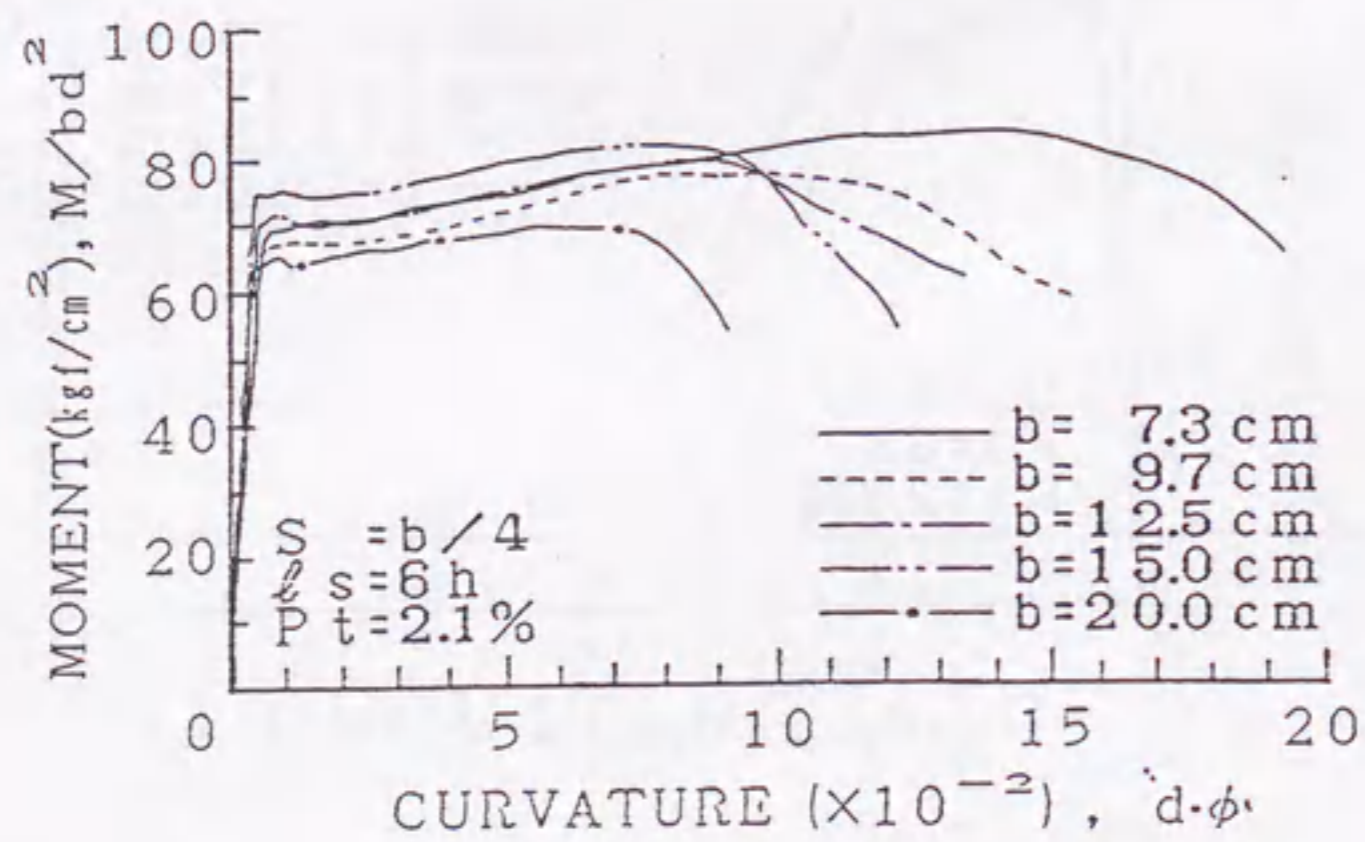
図-5.2.18 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線における寸法効果に及ぼす主筋比の影響  
( $S=b$ ,  $l_s=6h$ )



(a) S=b

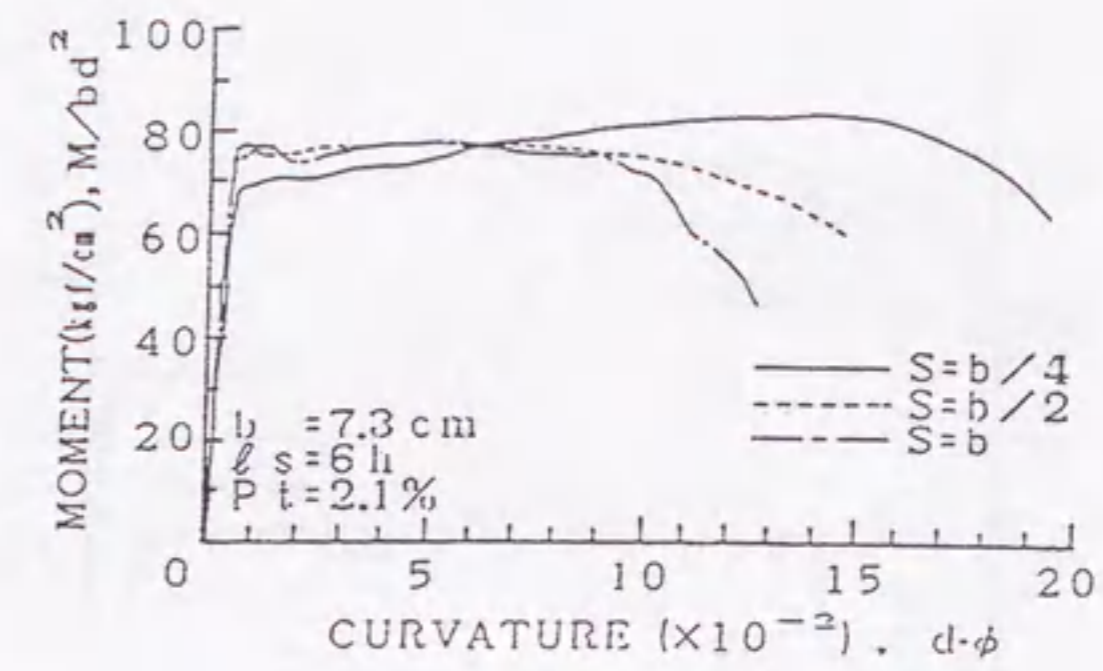


(b) S=b/2

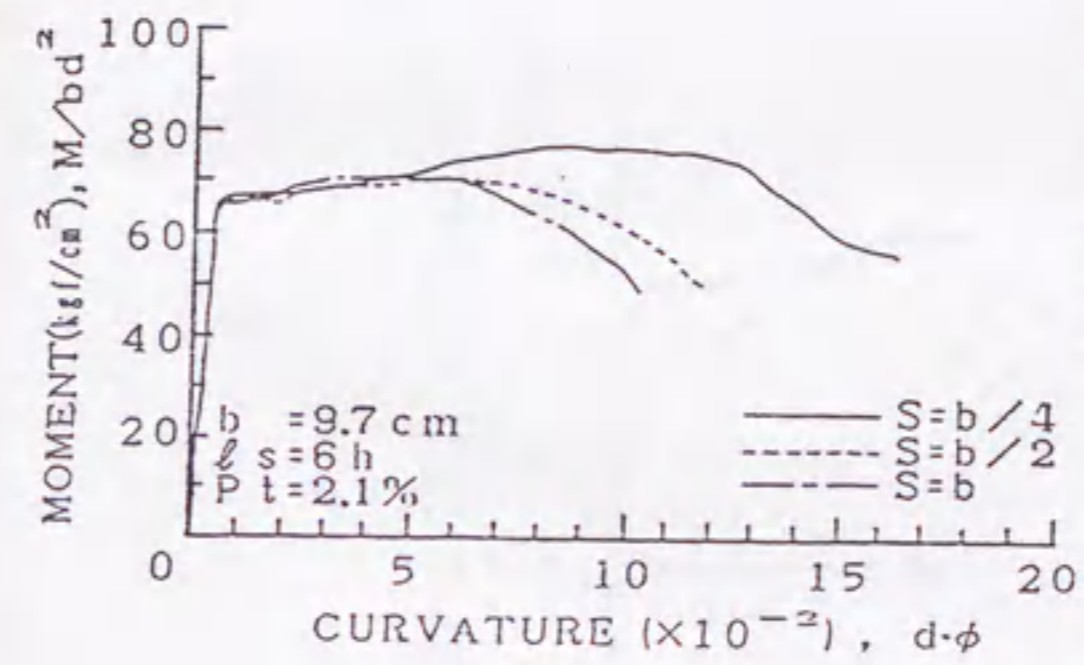


(c) S=b/4

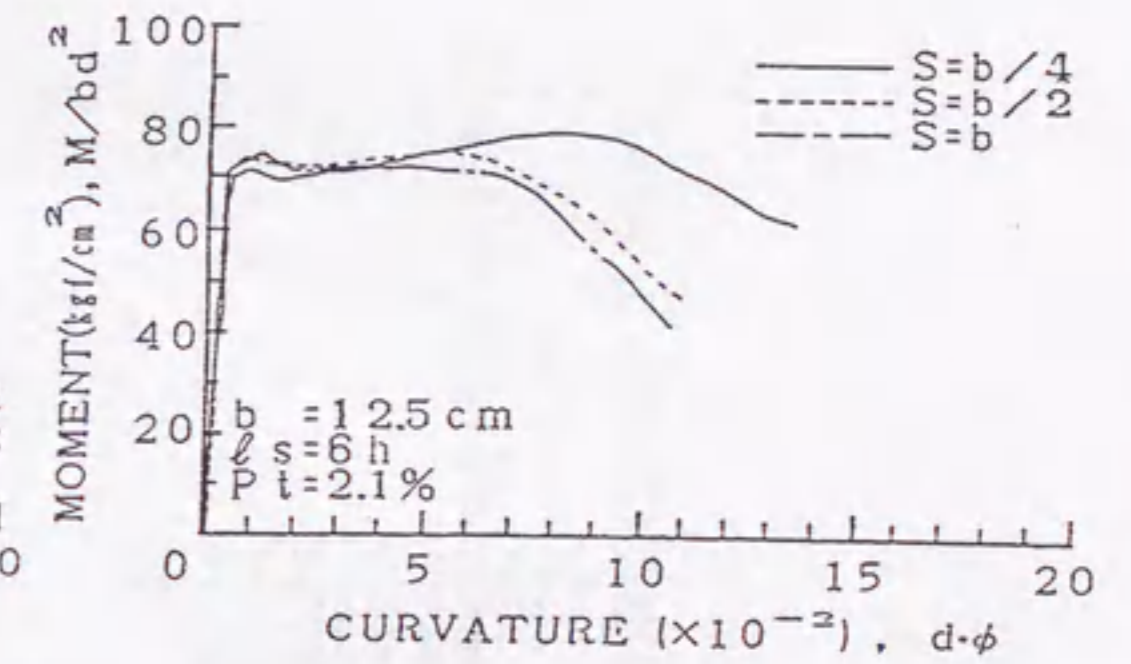
図-5.2.19 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線における寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響 ( $s=6h$ ,  $P_t=2.1\%$ )



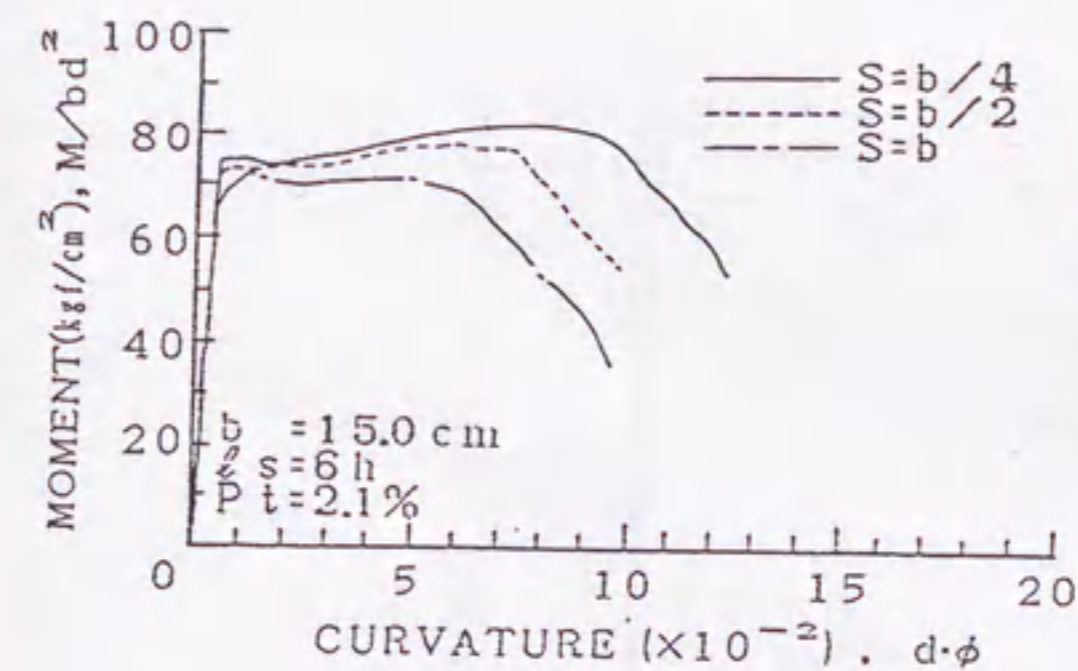
(a) b=7.3cm



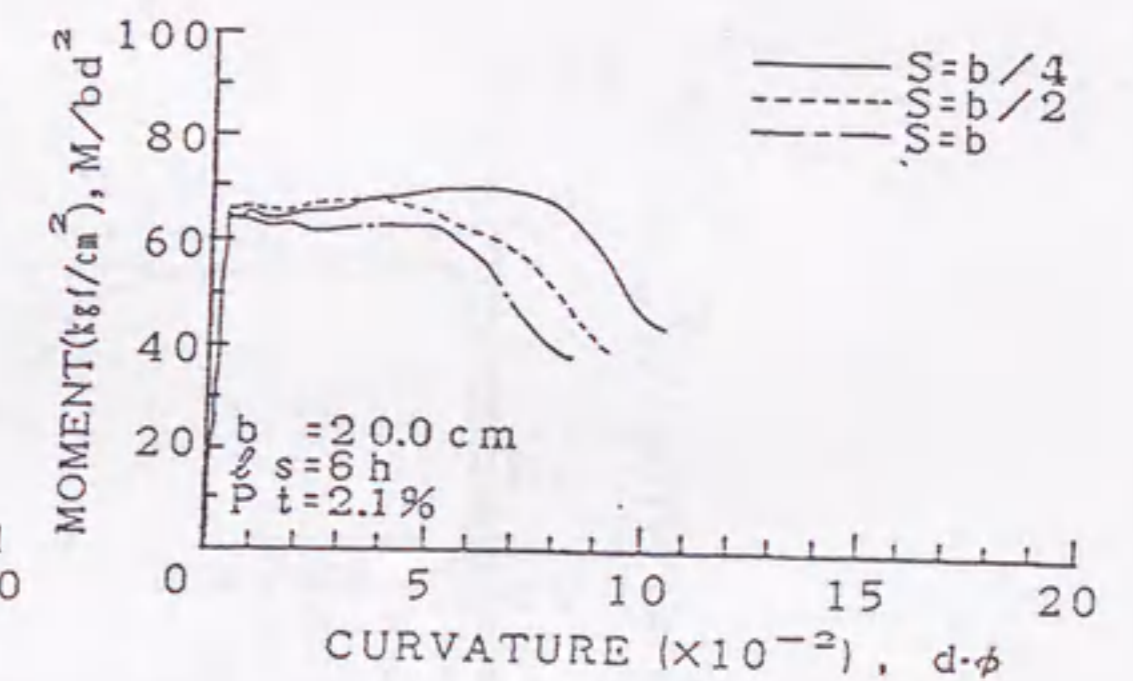
(b) b=9.7cm



(c) b=12.5cm

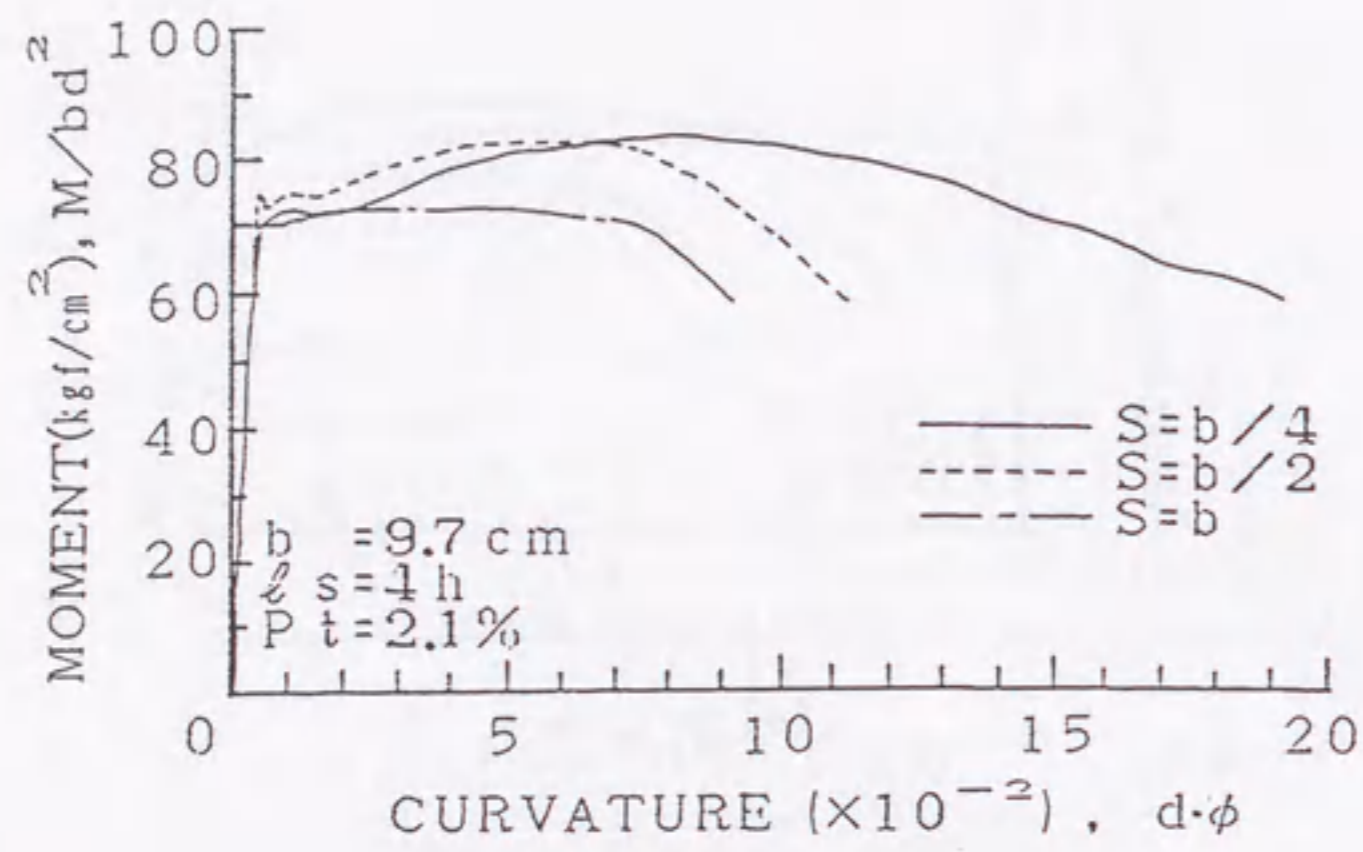


(d) b=15cm

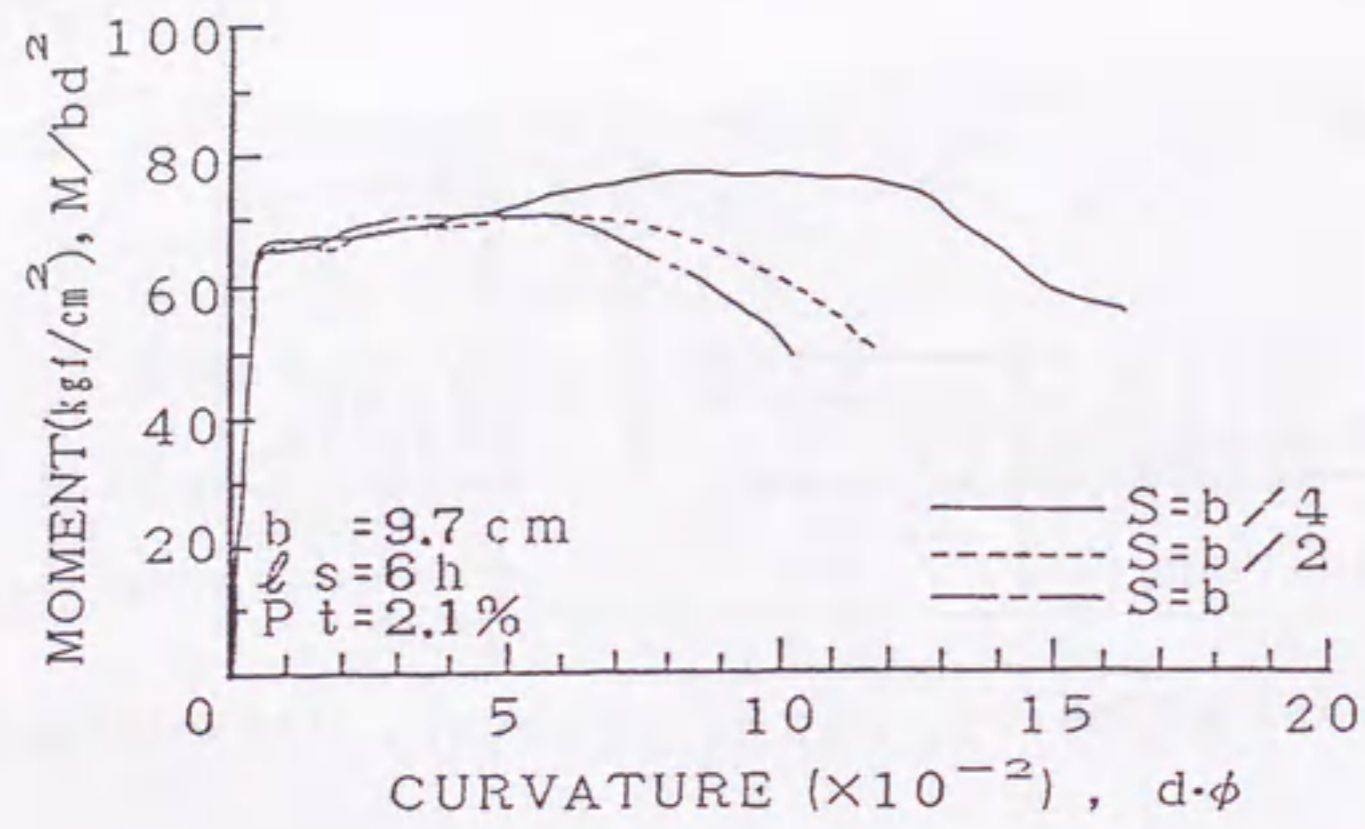


(e) b=20cm

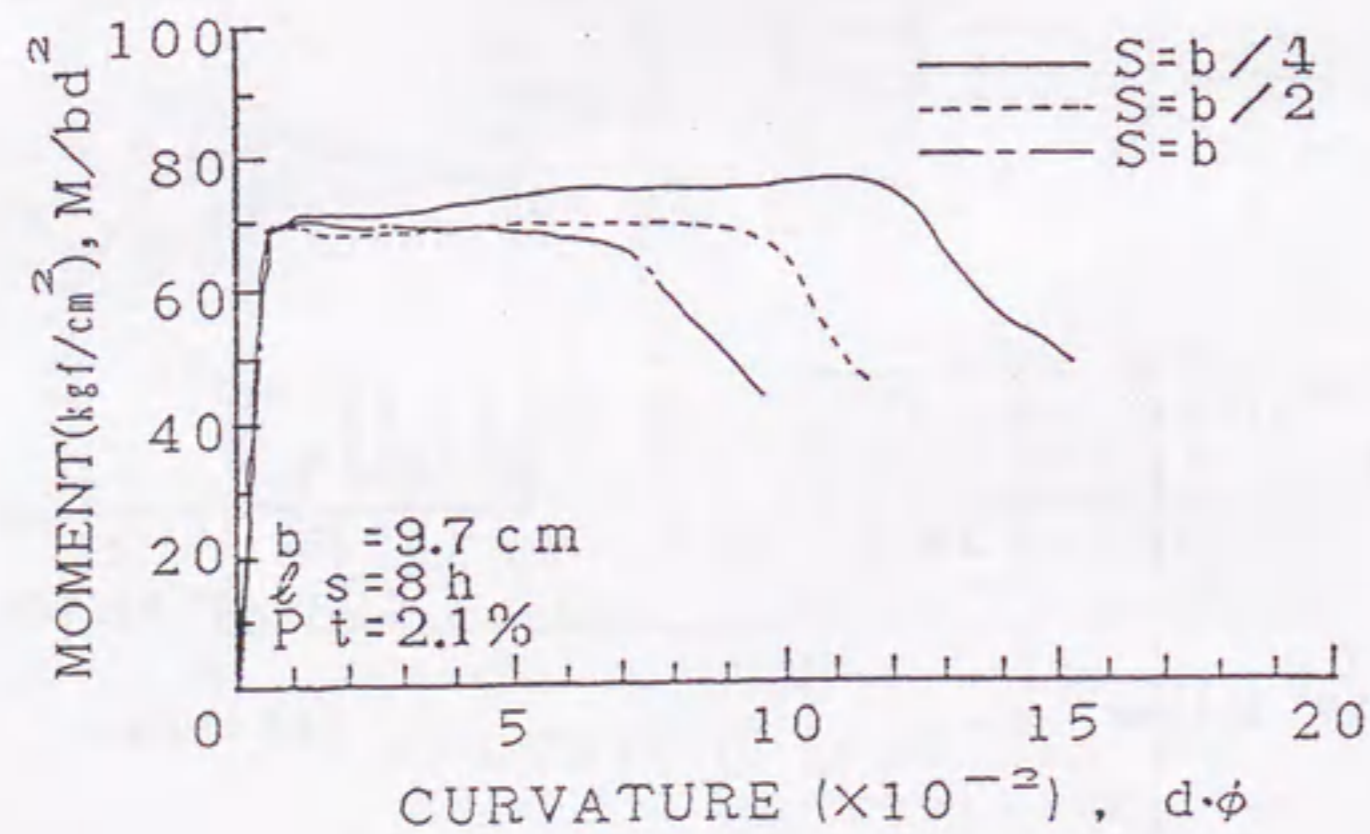
図-5.2.20 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響 ( $s=6h$ ,  $P_t=2.1\%$ )



(a)  $l/s=4h$

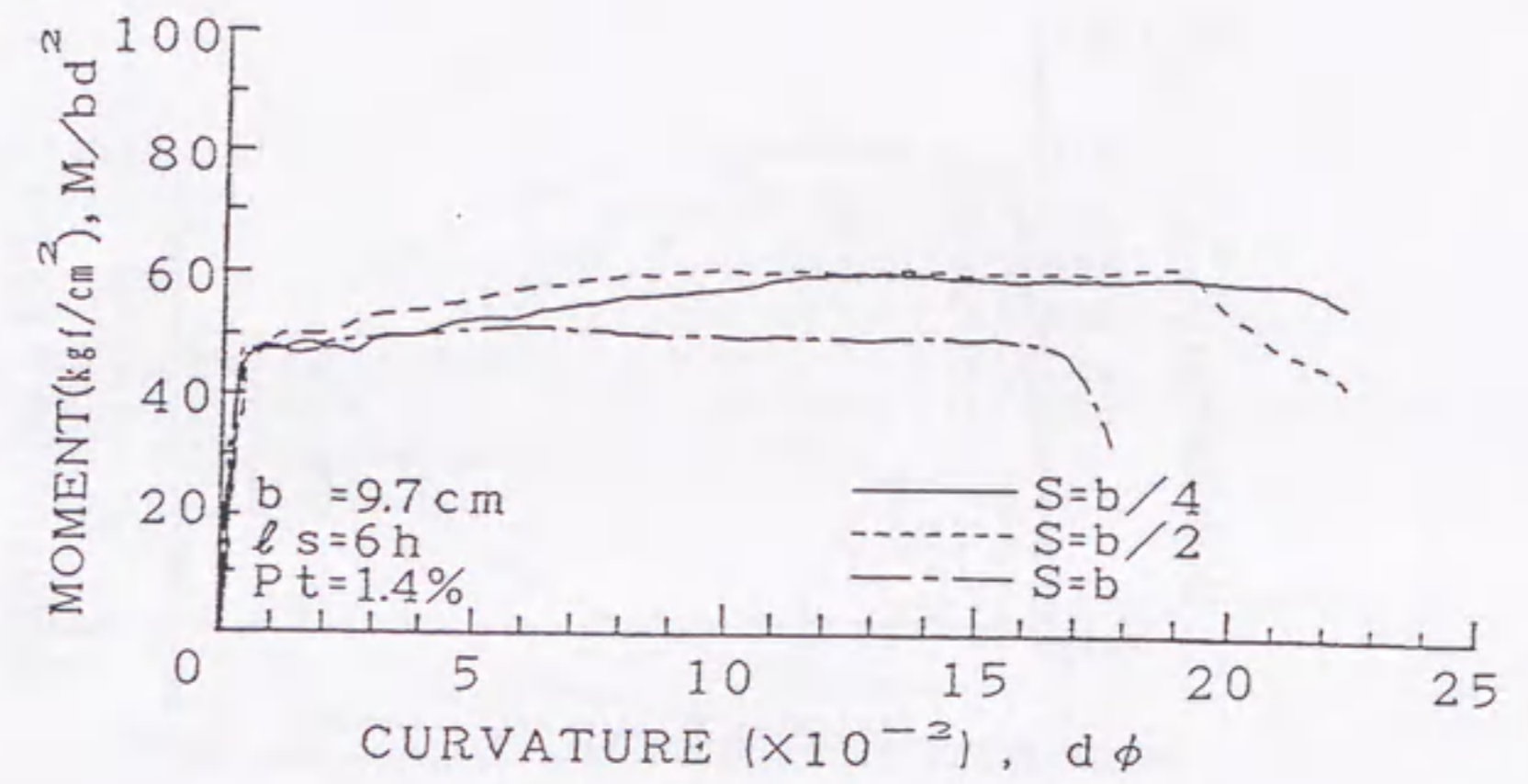


(b)  $l/s=6h$

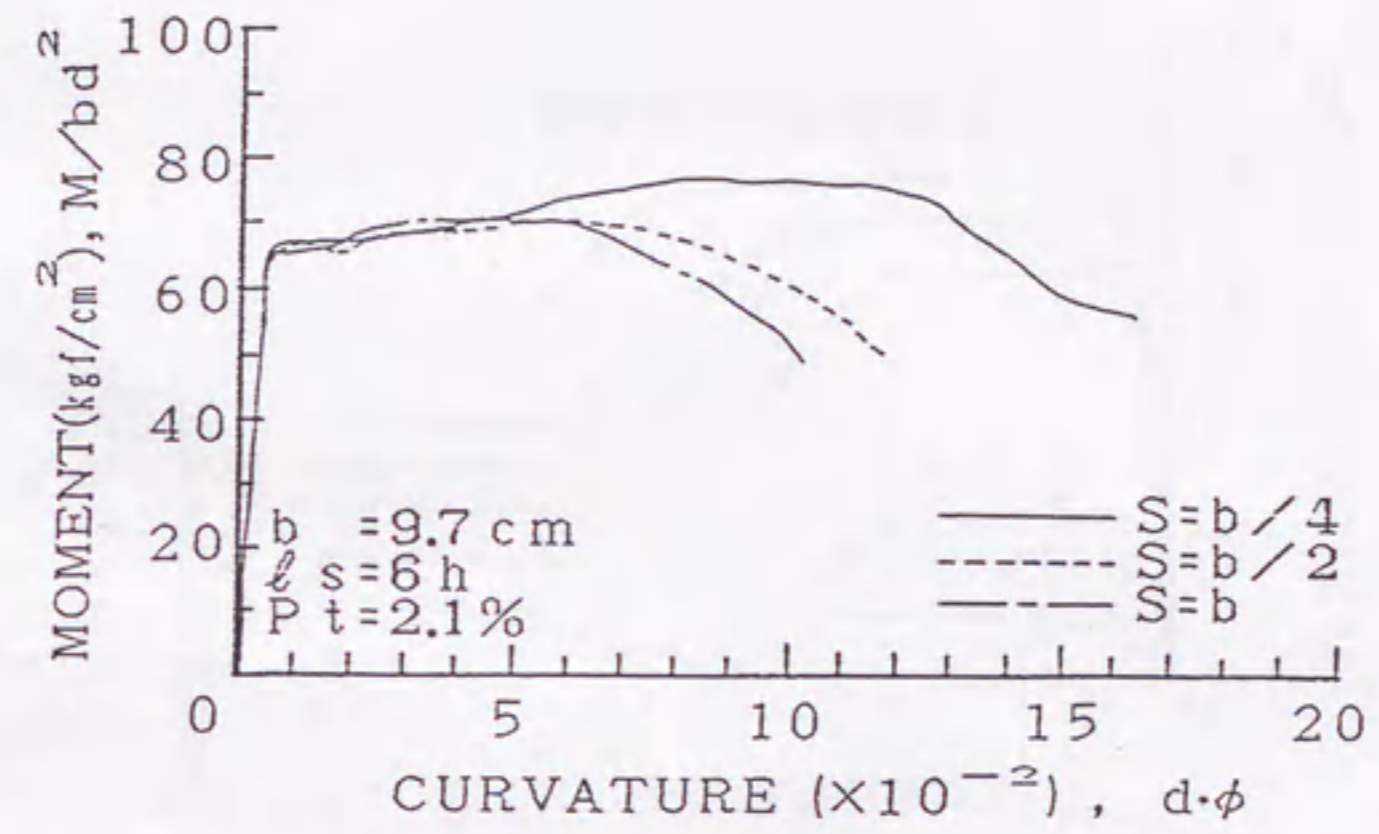


(c)  $l/s=8h$

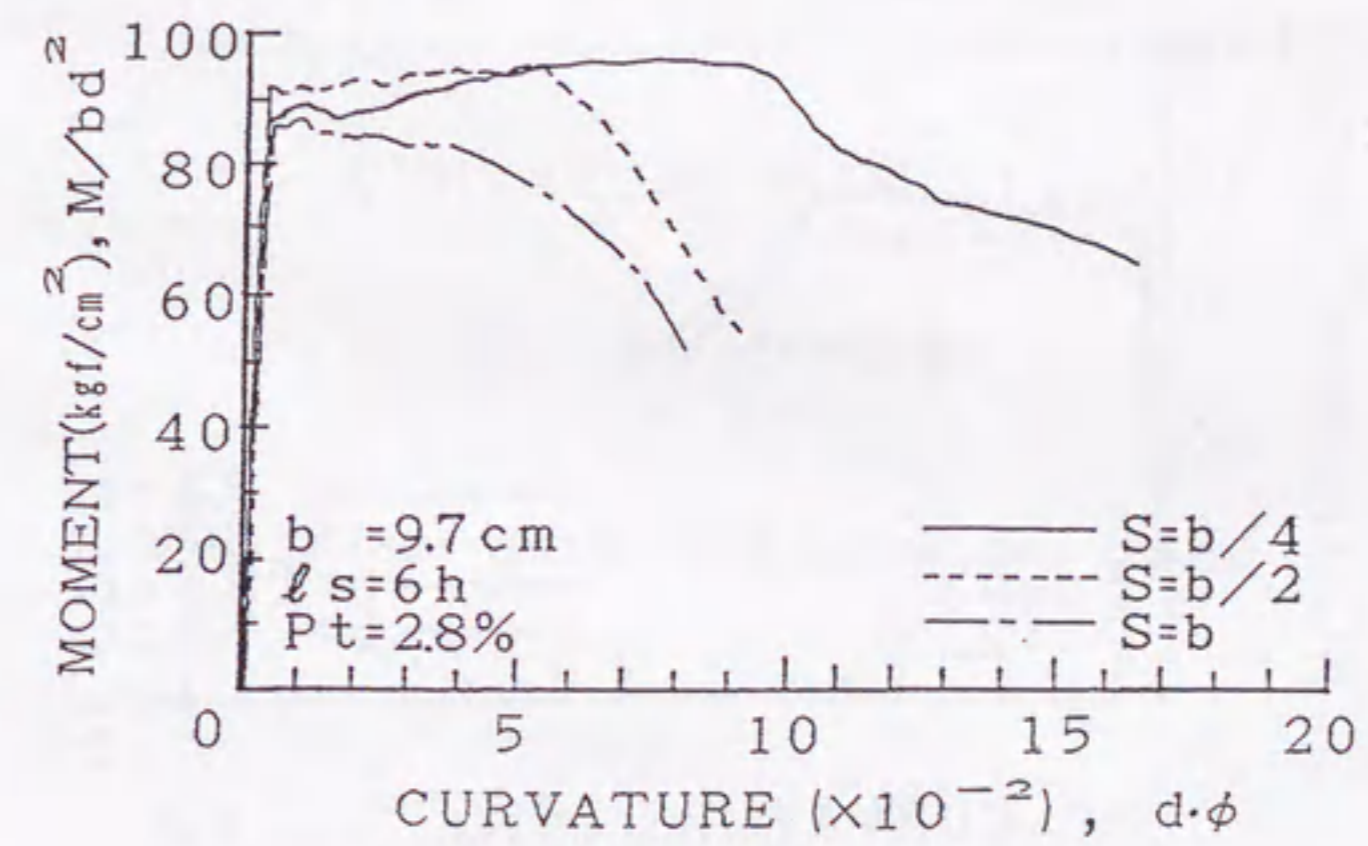
図-5.2.21 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響 (b=9.7cm、Pt=2.1%)



(a) Pt=1.4%

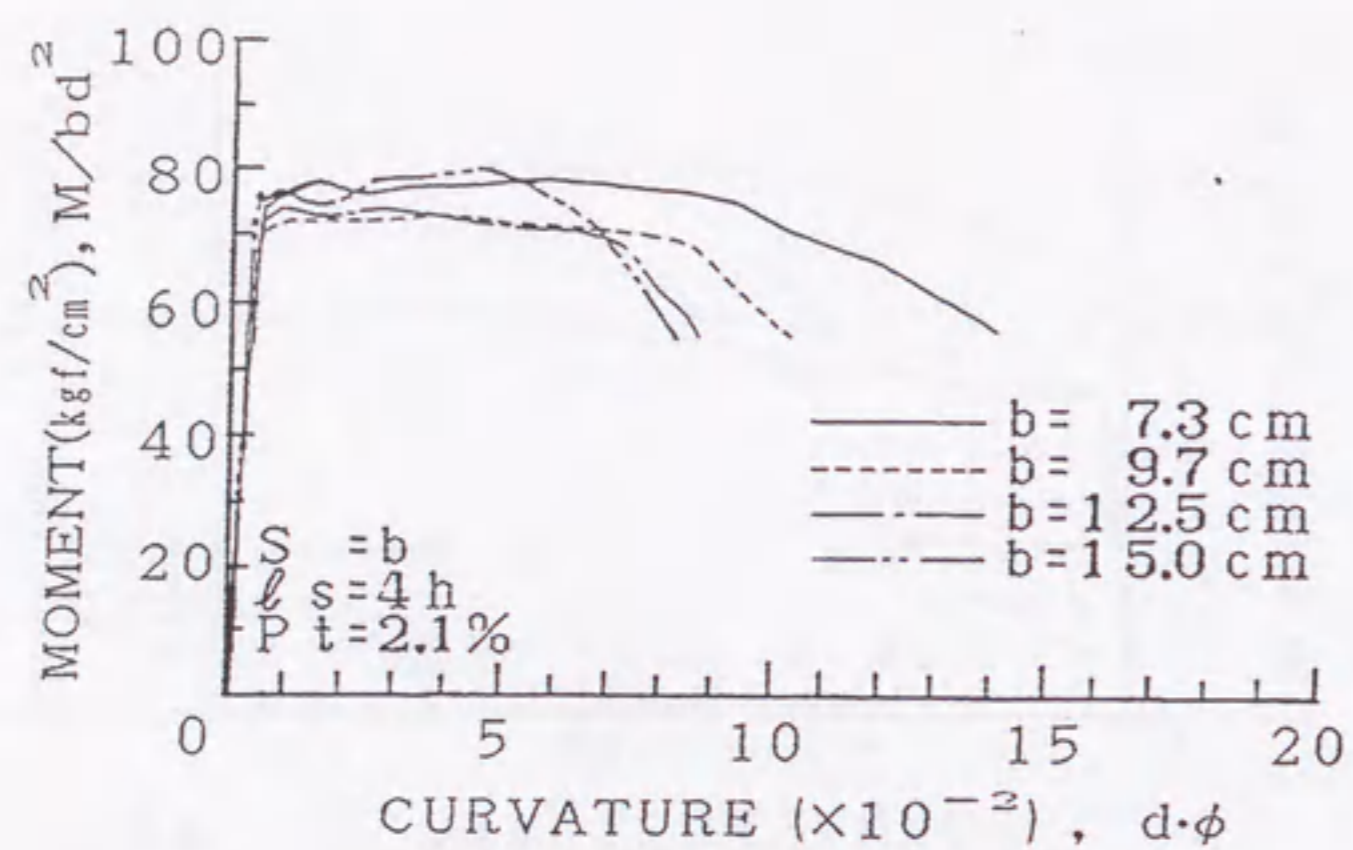


(b) Pt=2.1%

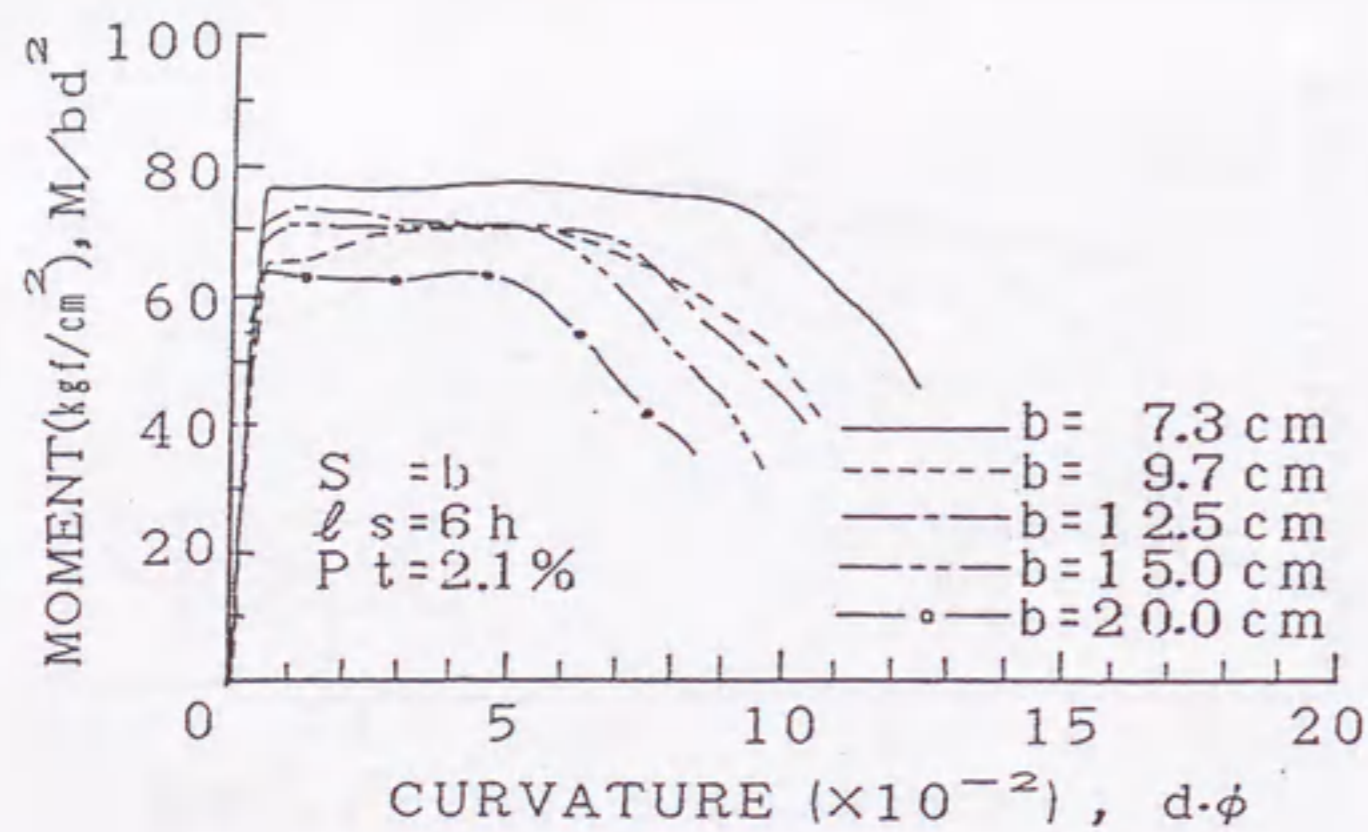


(c) Pt=2.8%

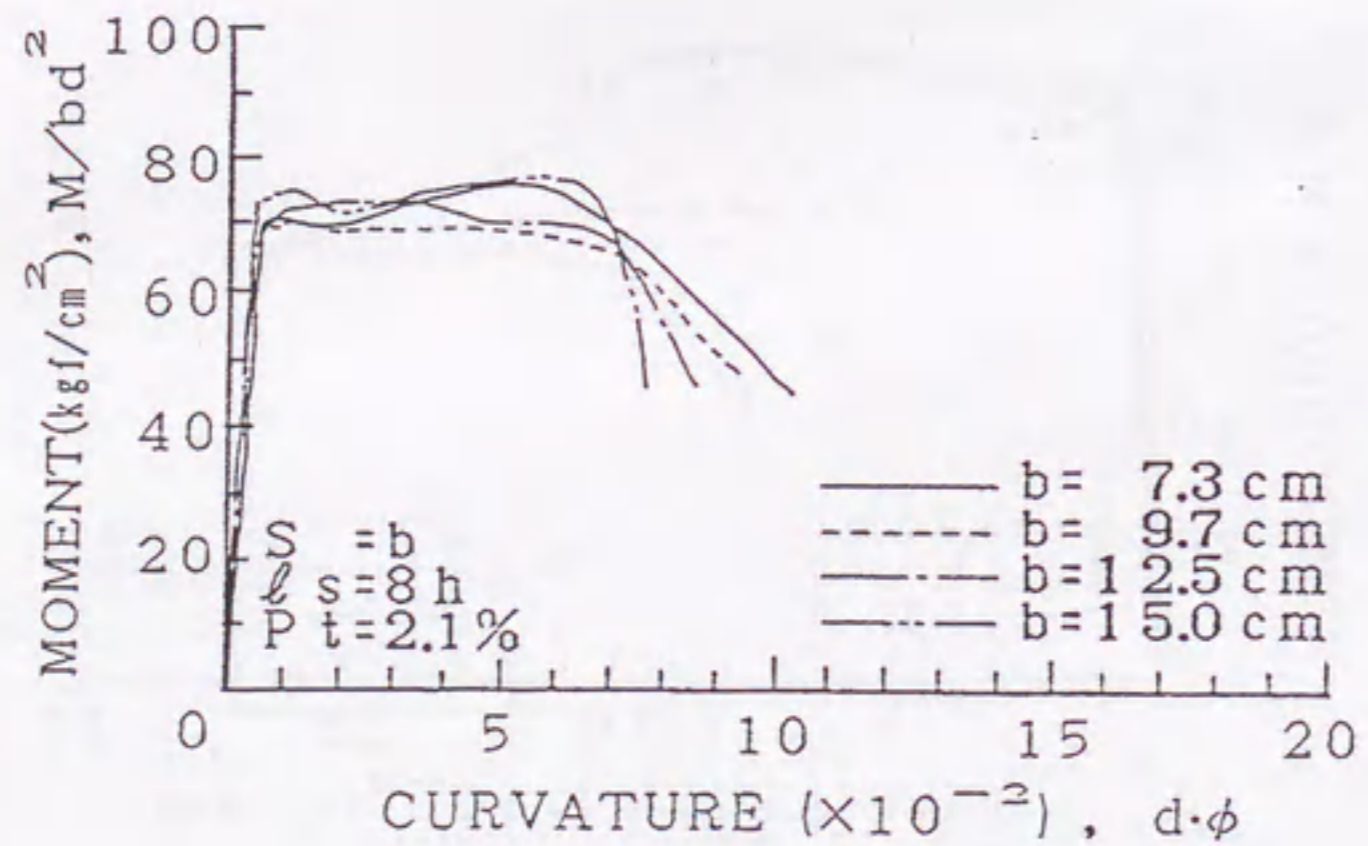
図-5.2.22 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線に及ぼすあばら筋ピッチの影響 (b=9.7cm、 $l/s=6h$ )



(a)  $l_s=4h$

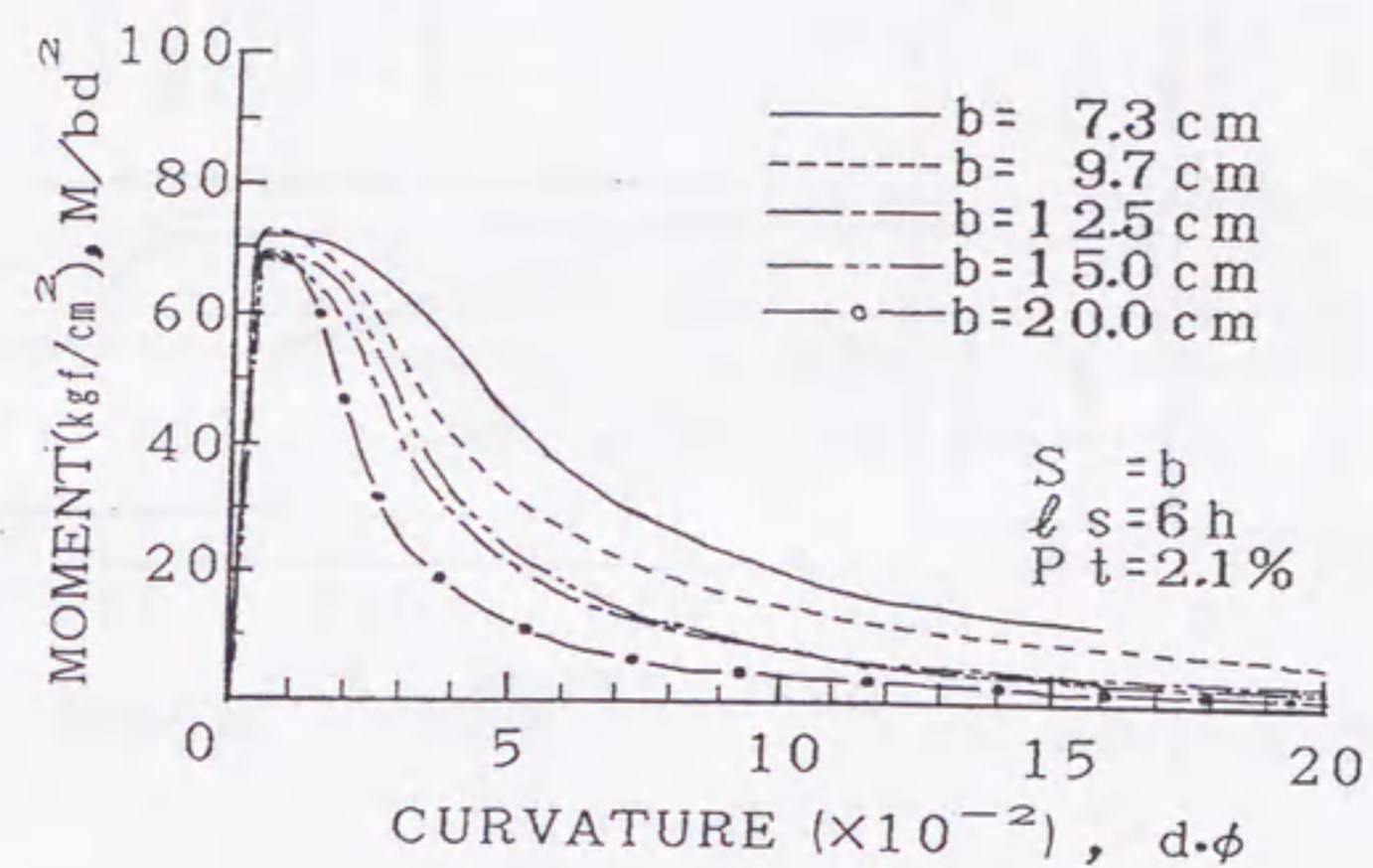


(b)  $l_s=6h$

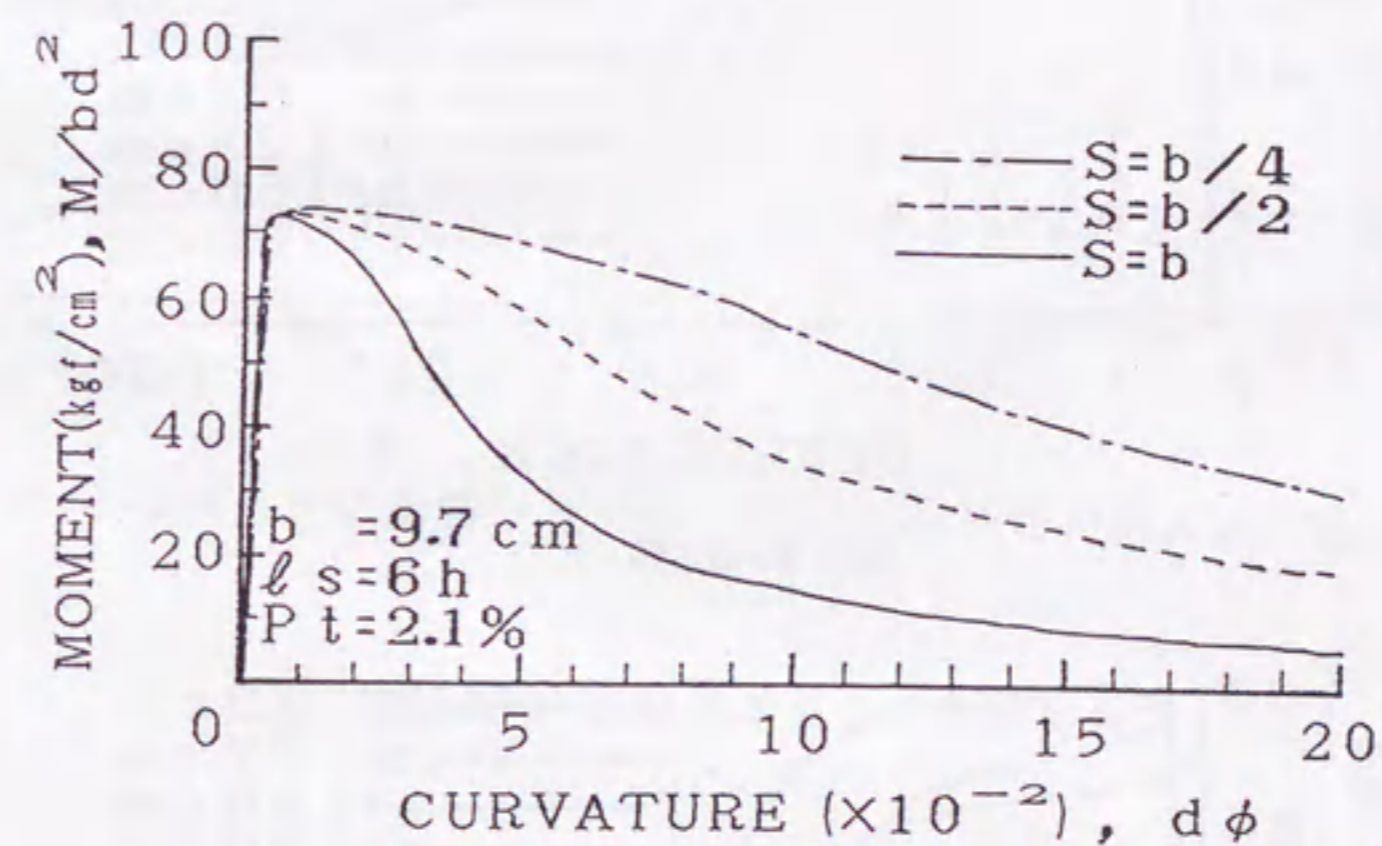


(c)  $l_s=8h$

図-5.2.23 1.0h 区間のモーメント-曲率曲線における寸法効果に及ぼすせん断スパン長さの影響 ( $S=b$ ,  $P_t=2.1\%$ )

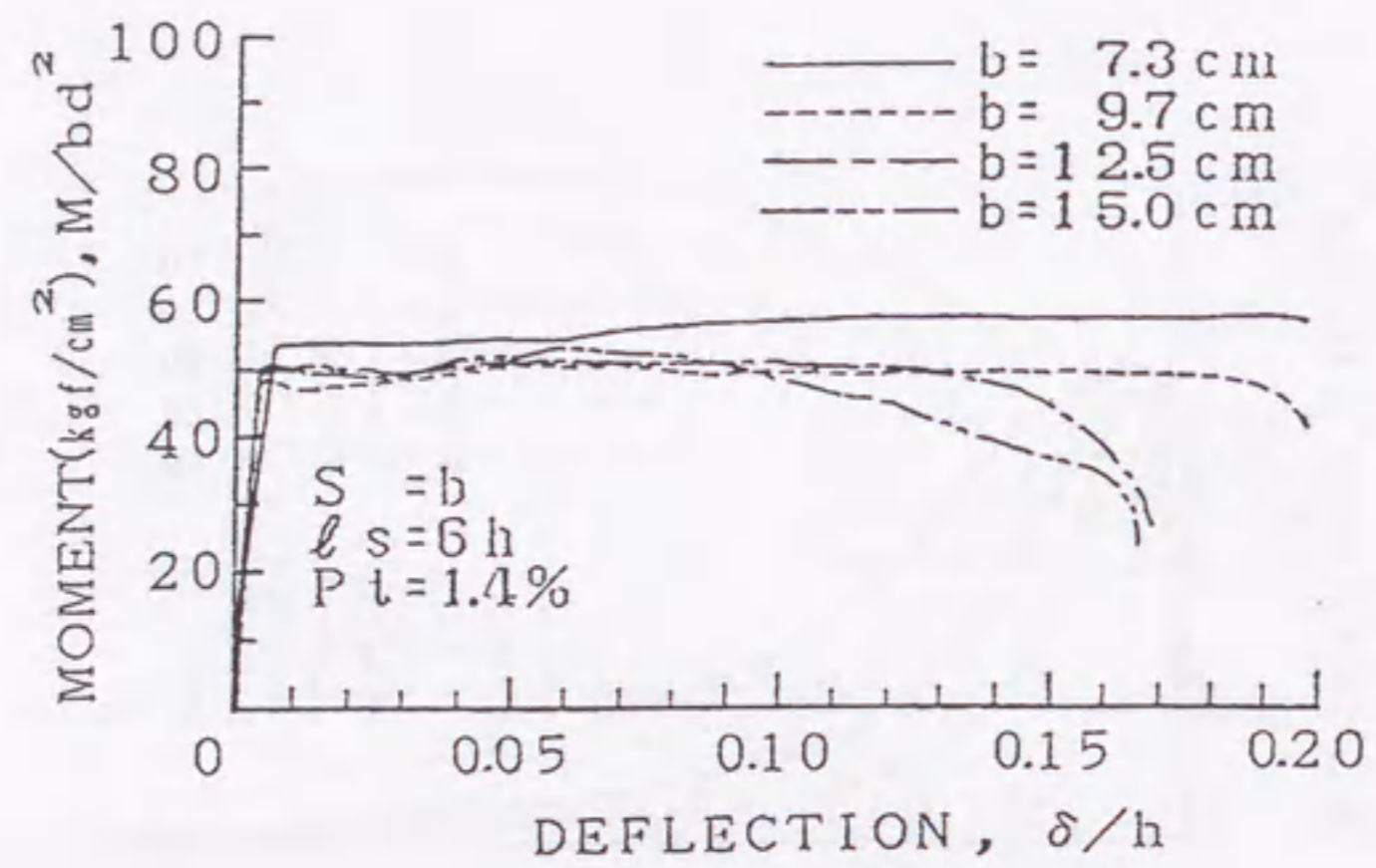


(a) 試験体寸法の影響

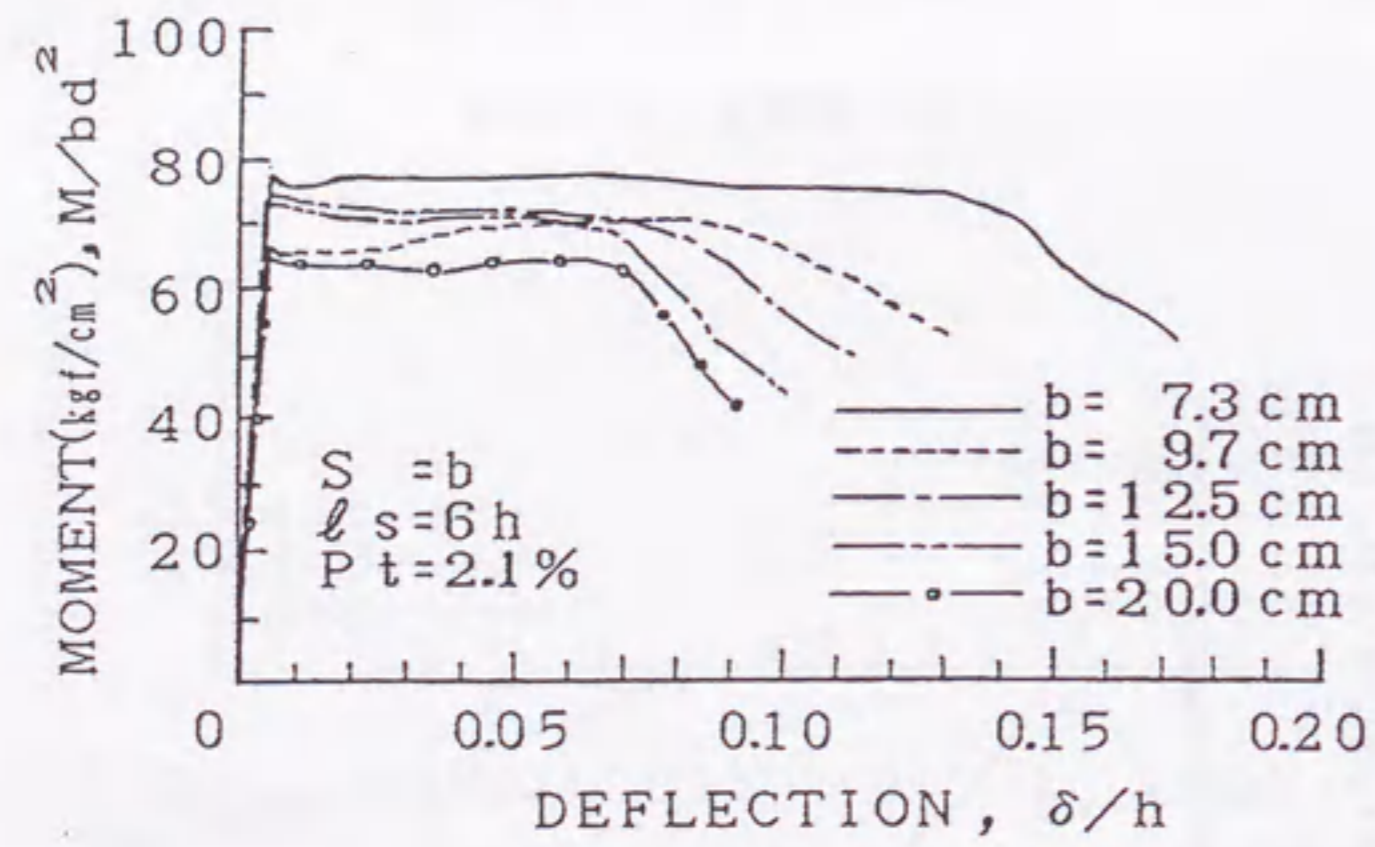


(b) あばら筋ピッチの影響

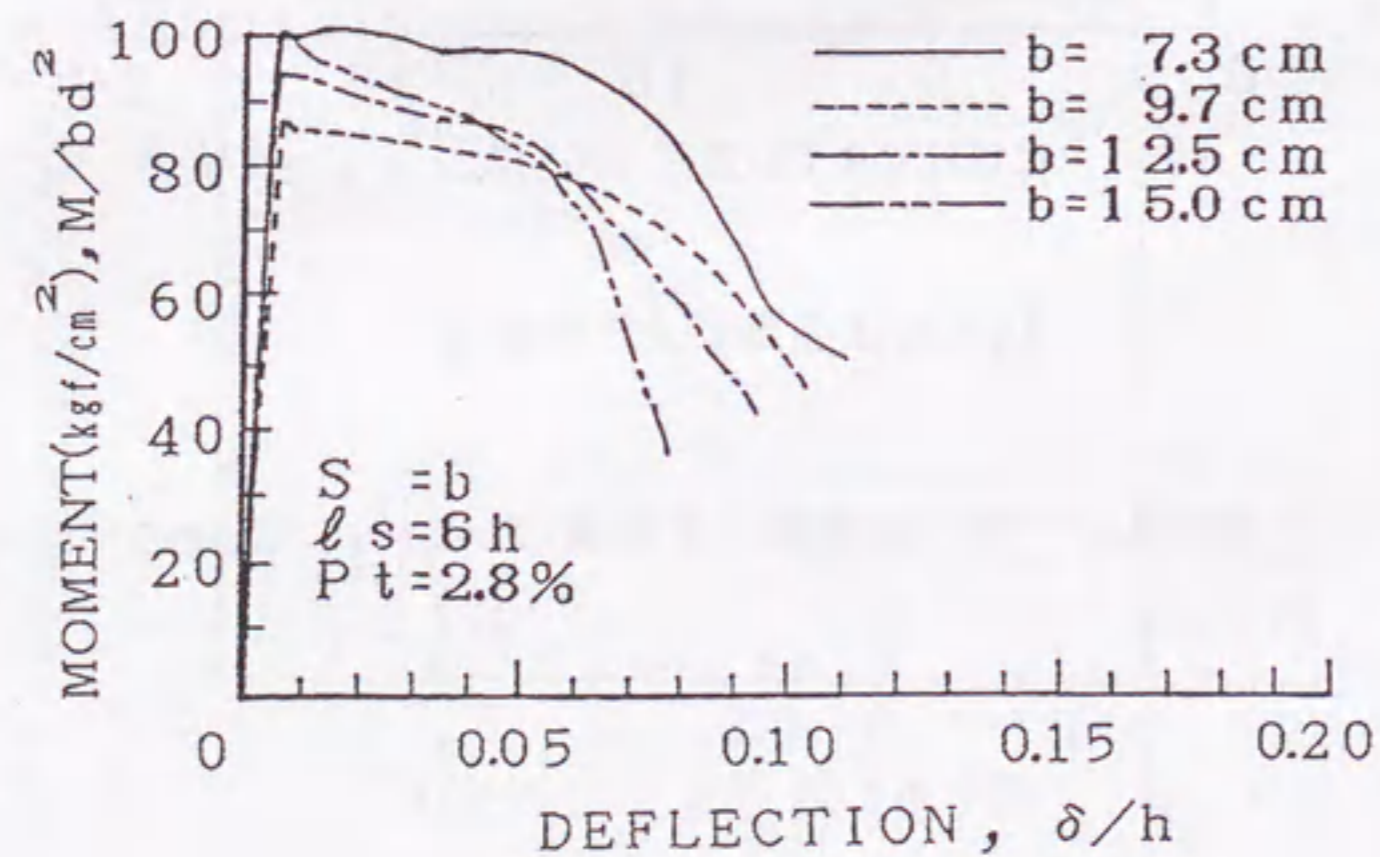
図-5.2.24 M -  $\phi$  曲線の計算値 ( $P_t=2.1\%$ ,  $l_s=6h$ )



(a)  $P_t=1.4\%$

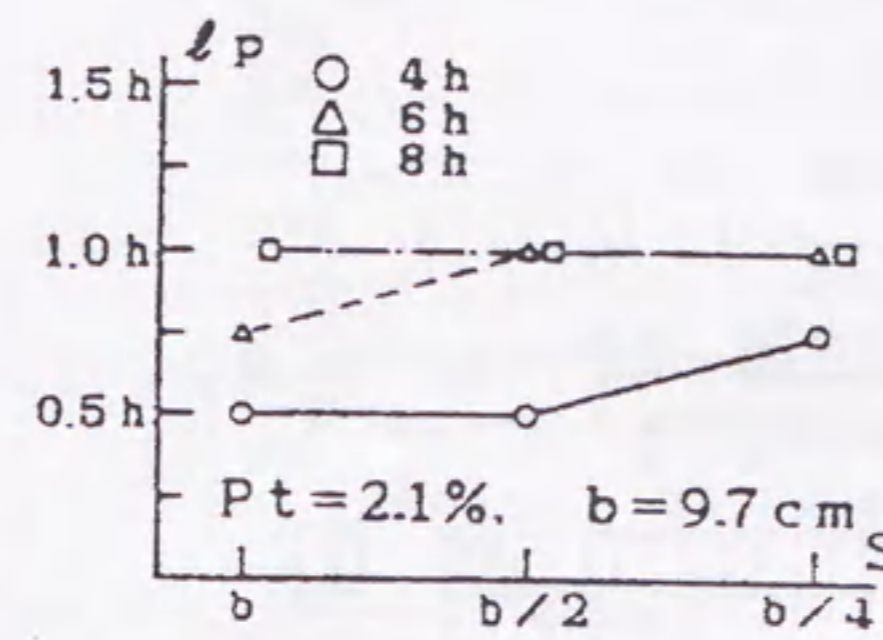


(b)  $P_t=2.1\%$

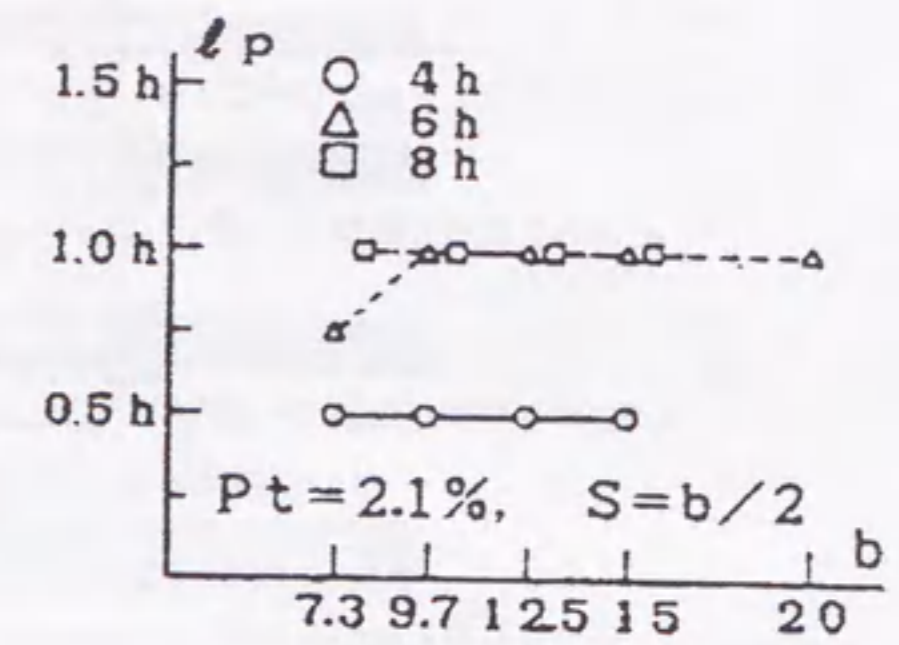


(c)  $P_t=2.8\%$

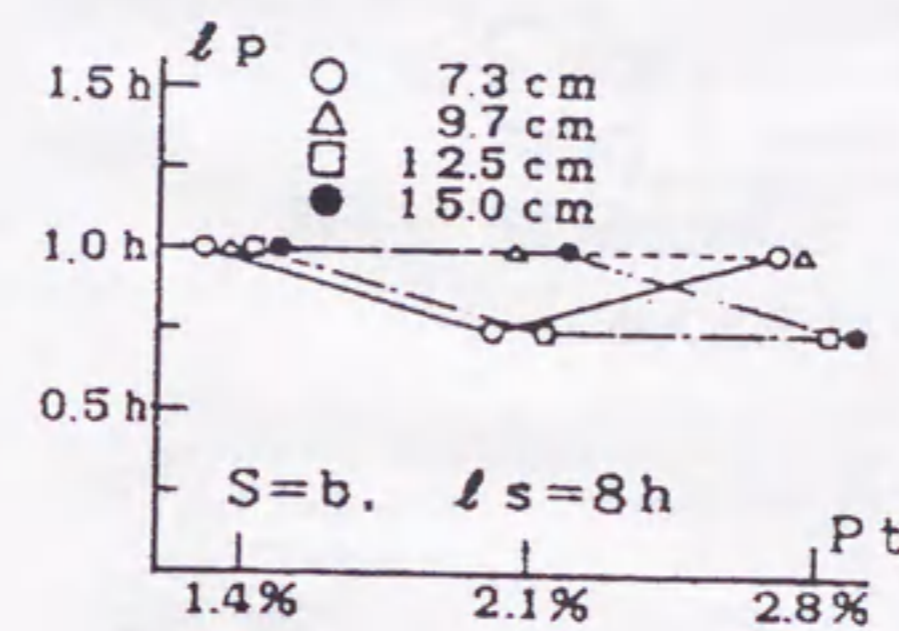
図-5.2.25 1.5h区間のモーメント-たわみ曲線における寸法効果に及ぼす主筋比の影響 ( $S=b$ ,  $\ell_s=6h$ )



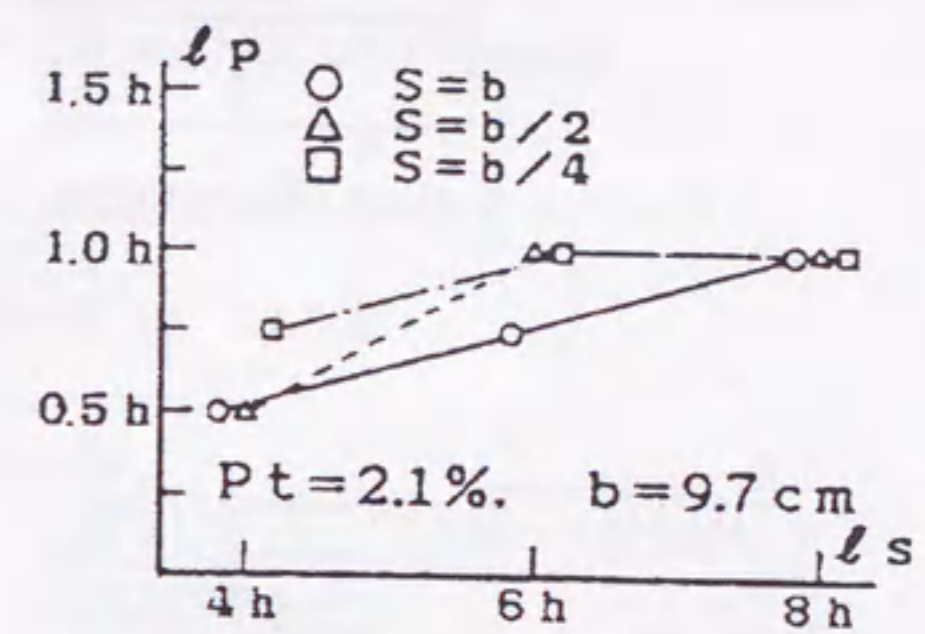
(a) あばら筋ピッチの影響



(b) 試験体寸法の影響



(c) 引張鉄筋比の影響



(d) せん断スパン長さの影響

図-5.2.26 破壊領域長さの実験結果

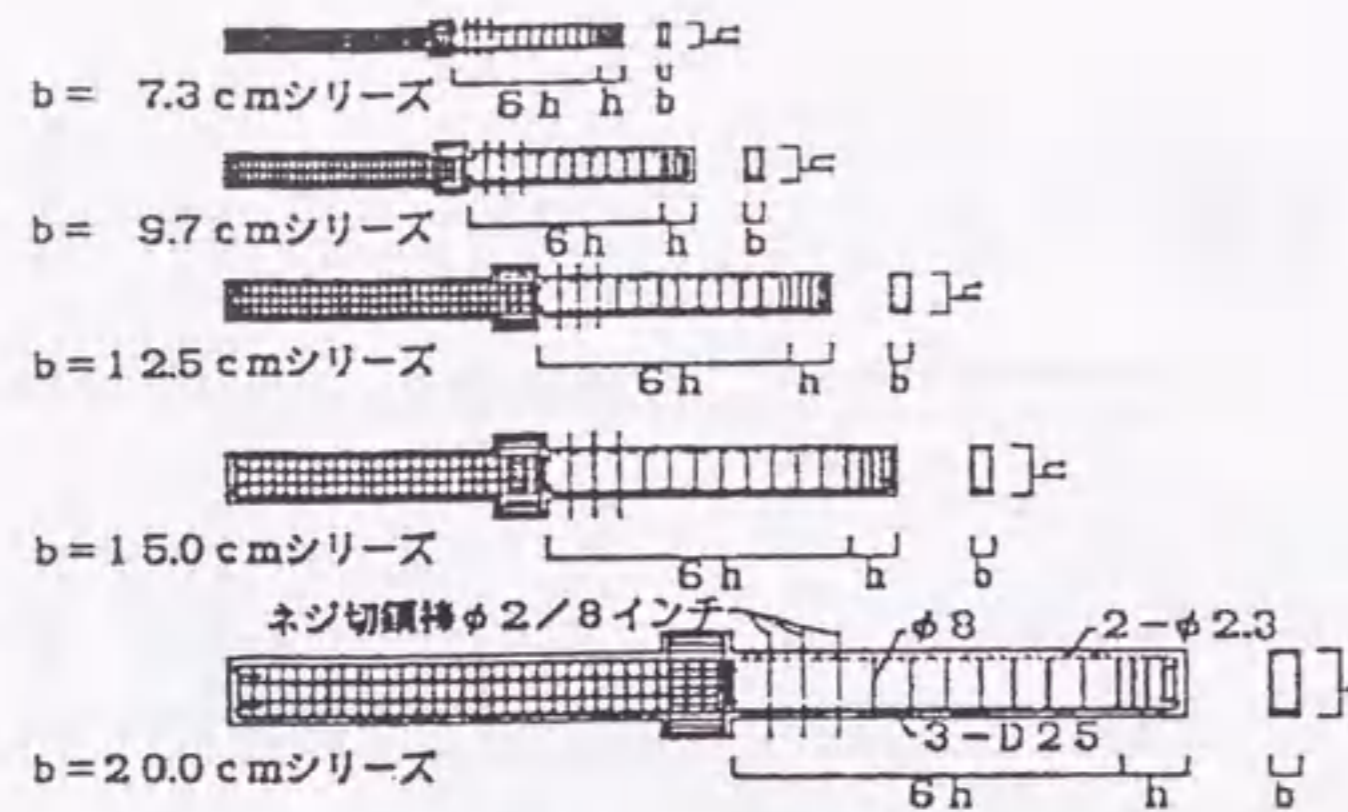


図-5.3.1 RC梁の配筋図 ( $L_s=6h$  シリーズ)

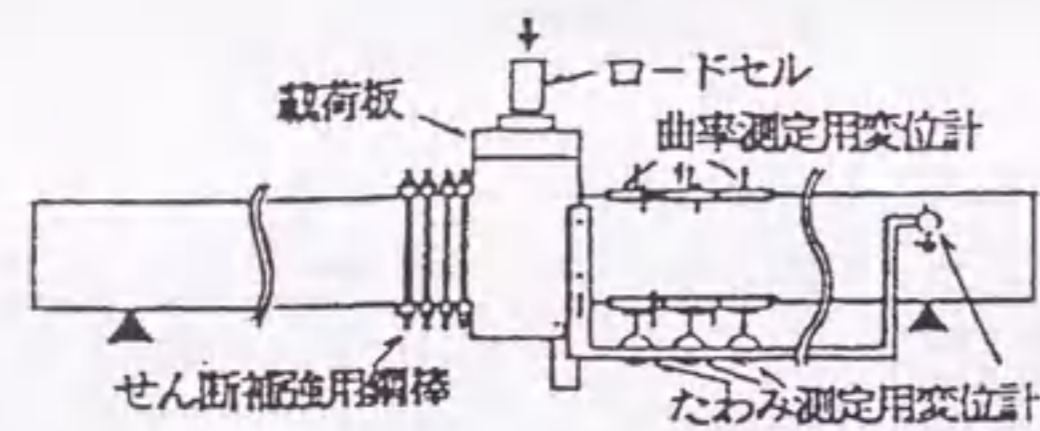


図-5.3.2 RC梁の载荷および測定方法

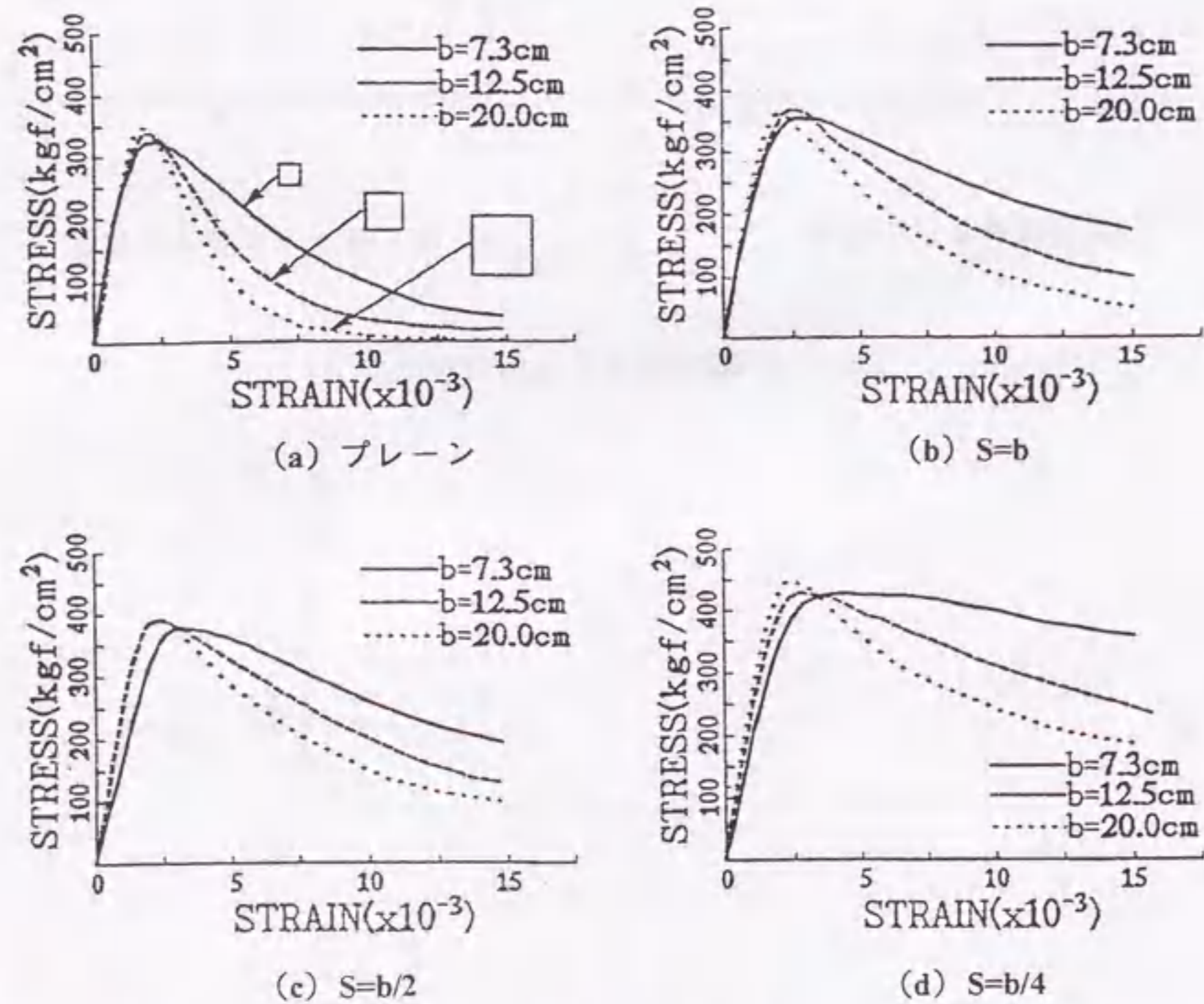


図-5.3.3 コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線における寸法効果

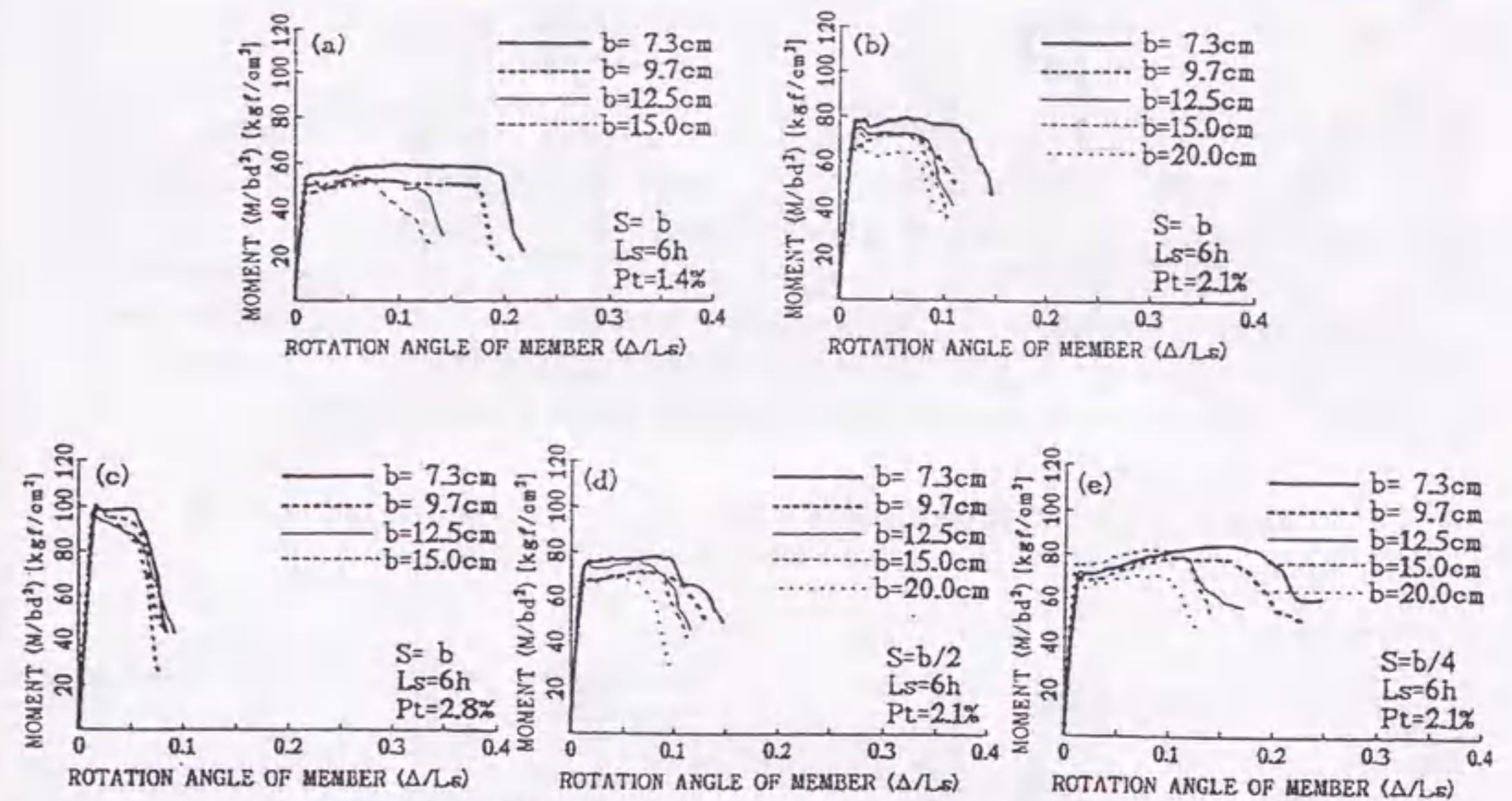


図-4 RC梁の曲げモーメント-部材角関係における寸法効果

図-5.3.4 RC梁の曲げモーメント-部材角関係における寸法効果

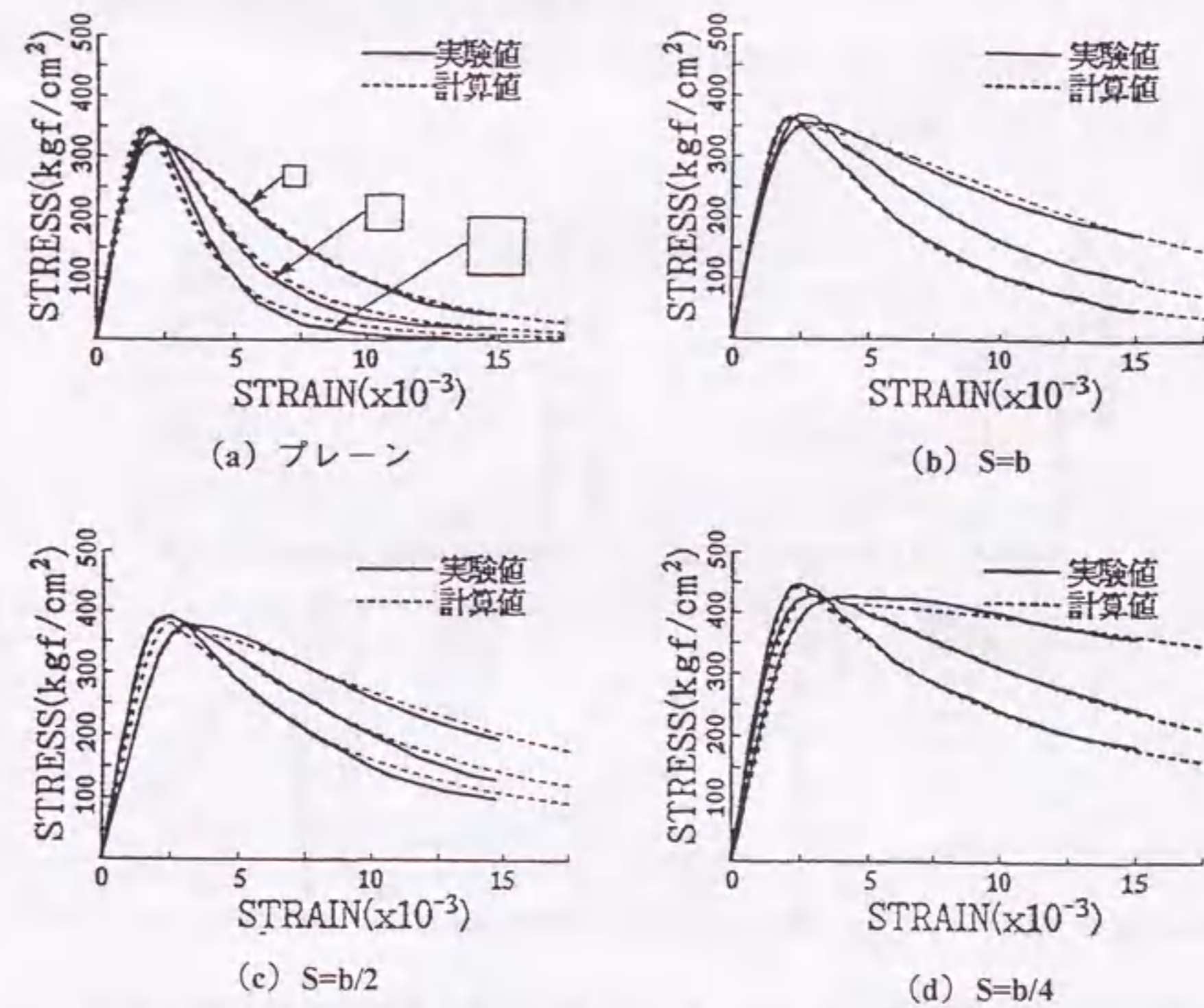


図-5.3.5 コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較

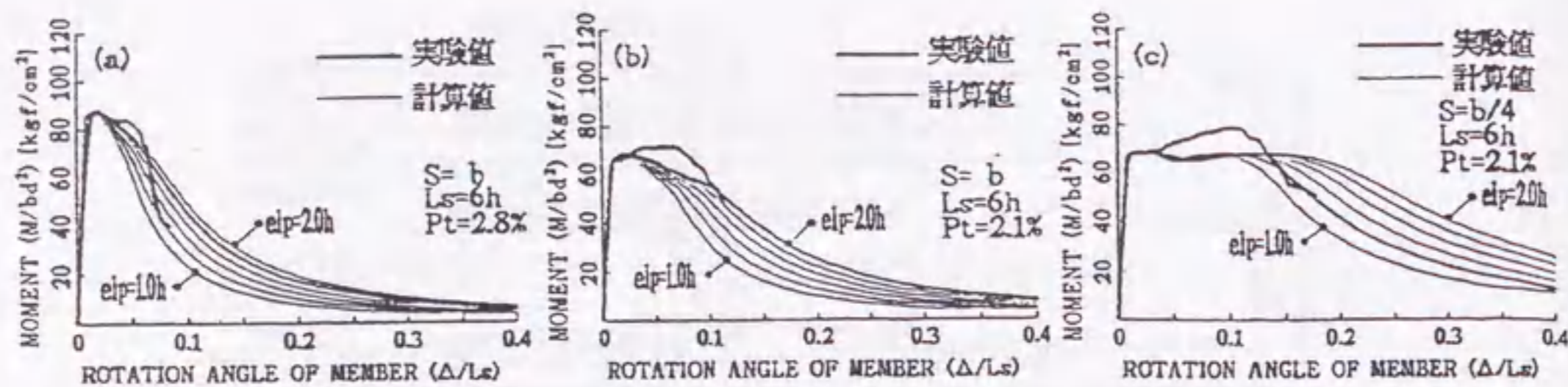


図-5.3.6 塑性ヒンジ等価長さの決定方法

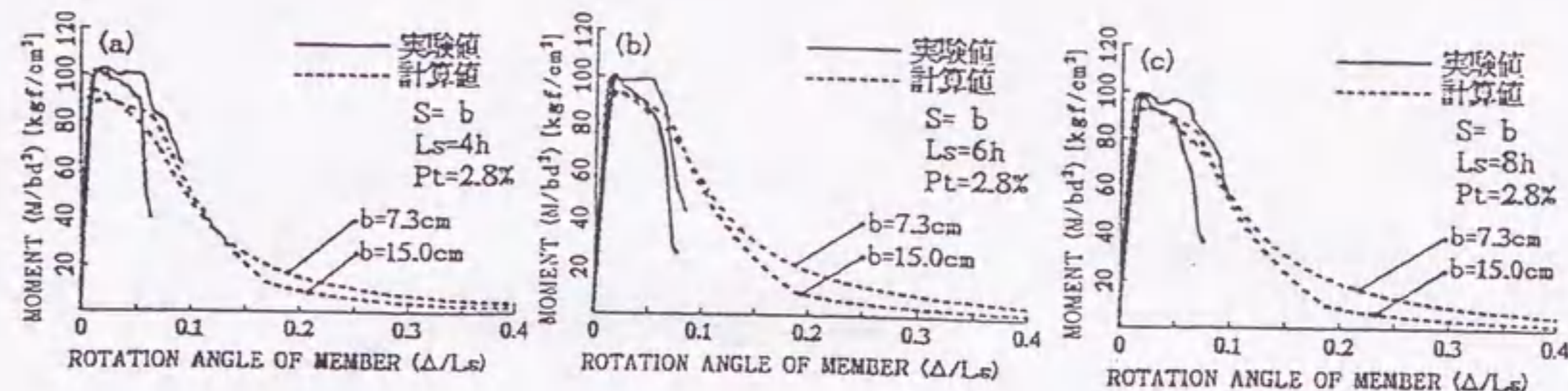


図-5.3.9 RC梁の曲げモーメント一部材角関係の実験値と解析値の比較  
( $b=9.7\text{cm}$  シリーズ以外のものを比較) ( $P_t=2.8\%$ )

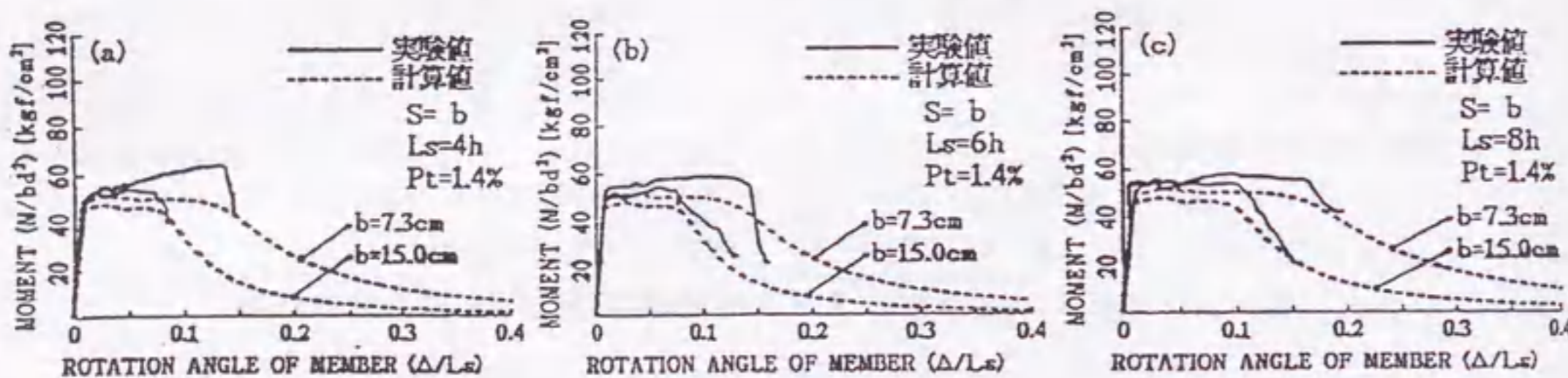


図-5.3.7 RC梁の曲げモーメント一部材角関係の実験値と解析値の比較  
( $b=9.7\text{cm}$  シリーズ以外のものを比較) ( $P_t=1.4\%$ )

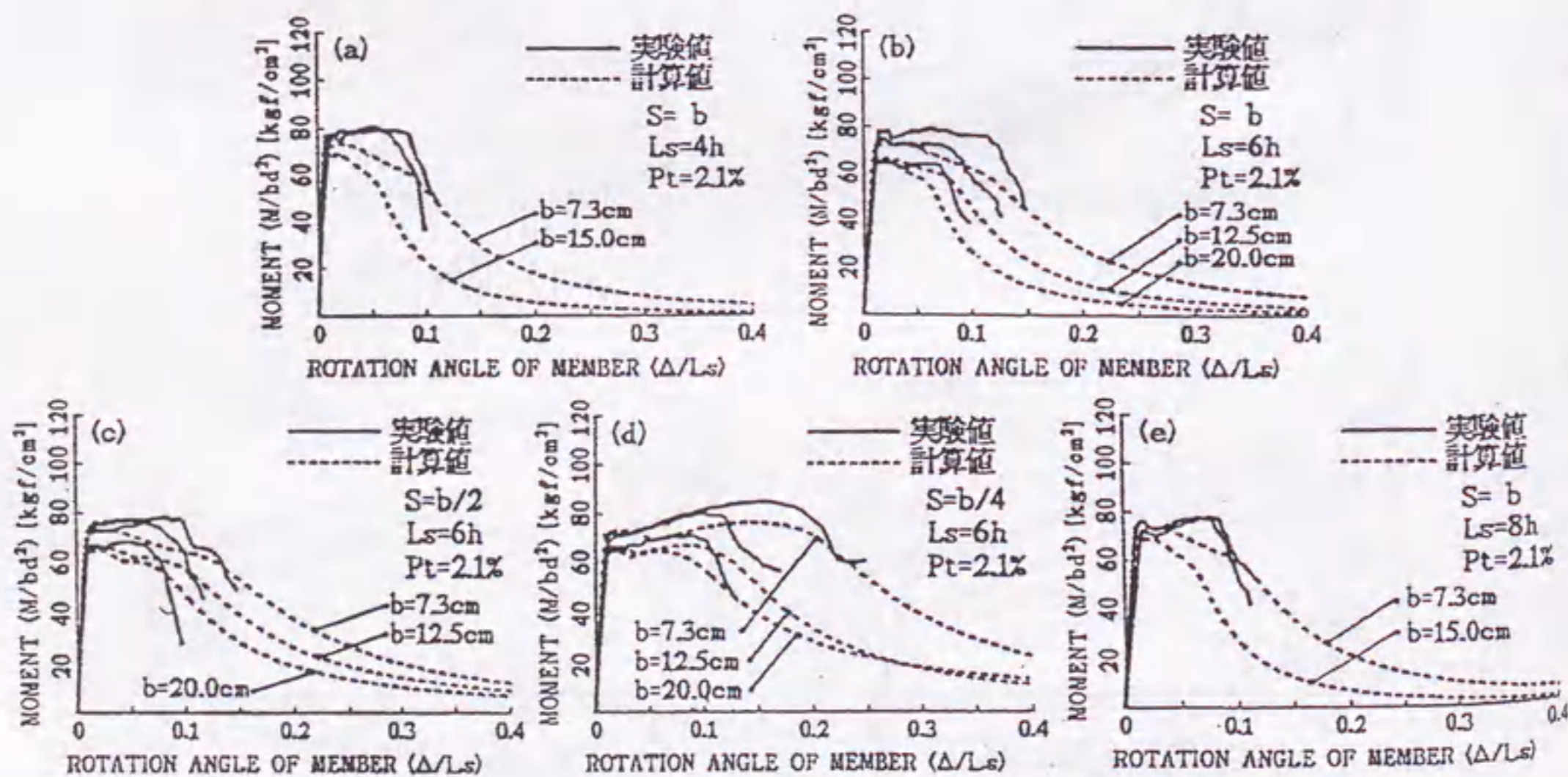


図-5.3.8 RC梁の曲げモーメント一部材角関係の実験値と解析値の比較  
( $b=9.7\text{cm}$  シリーズ以外のものを比較) ( $P_t=2.1\%$ )

## 第6章 結 論

- 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)
- 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)
- 6.3 中心圧縮を受ける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 (第4章)
- 6.4 鉄筋コンクリート梁の塑性変形挙動における寸法効果 (第5章)



本論文は、圧縮を受けるコンクリートの破壊性状、一軸圧縮を受ける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における寸法・形状効果、とくにこれら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、得られた実験データに基づき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した。併せて、中心圧縮を受ける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についての実験的研究を実施するとともに、曲げとせん断を受ける RC 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、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実験成果を用いて RC 梁の曲げ破壊解析を実施した。これらの研究成果を各章ごとに要約すると、以下のようにまとめられる。

### 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)

本章では、圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化、並びにコンクリートの圧縮特性に及ぼす試験体寸法および形状の影響因子を取りまとめた。次に、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、試験体内部のびひ割れのパターンを分析した。本研究の結果は、およそ次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破壊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)。
- 6) 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。
- 7) 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。

8) 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-2.2.6 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。

9) 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。本章ではその一例を示した。

なお、本章では、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。

## 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)

本章では、まず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に及ぼす試験体寸法、帯筋のピッチと降伏強度、養生条件、コンクリート強度の影響などを実験的に調べ、これらのコンクリートの応力-ひずみ曲線における寸法効果についての多くの知見を得るとともに、実験データに基づいて試験体寸法、コンクリート強度、帯筋ピッチなどの要因を考慮した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した。本研究の結果は、以下のようにまとめられる。

### (1) 温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $75\pm 10\%$ の条件下で乾燥空中養生されたプレーンコンクリートの圧縮特性における寸法効果

- 1) 圧縮強度は、試験体寸法がおおよそ 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、試験体寸法が増大するにつれて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) 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。
- 4) 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マイクロコンクリートの実験結果によれば、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。

- 5) 第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。

### (2) 養生条件を相対湿度 $75\pm 10\%$ の乾燥空中養生、相対湿度 $90\pm 10\%$ の湿空養生、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

- 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、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。
- 2) 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。
- 3) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、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。
- 4) 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。
- 5) 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。

### (3) 湿空養生された水セメント比32%および25%のコンファインド高強度・超高強度コンクリートの圧縮特性における寸法効果

- 1) 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%低下した。一方、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ 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、 $b=25\text{cm}$ 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%低下した。すなわち、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のレベルが上昇するにつれて顕著になる。

- 2) 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、試験体寸法の増大に伴い小さくなり、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の超高強度コンクリートでは、この寸法効果がさらに顕著になる。この傾向は帯筋ピッチが密なほど顕著である。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ほとんどみられなくなる。
- 3) 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、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  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。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。
- 4)  $F_c=500 \sim 1000 \text{ kgf/cm}^2$  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。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。

#### (4) 帯筋比を一定に保ち、湿空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をマイクロコンクリート化した場合の影響

- 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し、延性的になる。
- 3) 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同一ピッチ配筋と比例配筋のロ型帯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。
- 4) 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。すなわち、コンクリートをマイクロコンクリート化しても、プロトタイプのコンクリートと相似の力学特性を再現させることはできない。

#### (5) 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

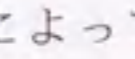
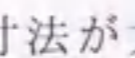
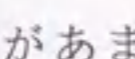
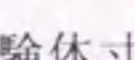

本研究では、コンファインドコンクリート角柱体の圧縮特性の寸法効果に及ぼすコンクリート強度と帯筋拘束の影響を調べた一連の圧縮実験のデータを用いて、寸法効果を考慮した応力-ひずみ曲線の表示式を求めた。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 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  $R_\sigma$ 、 $R_\epsilon$  および  $R_{N_d}$  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) 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)。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)。

#### 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)

$F_c=700 \sim 1000\text{kgf/cm}^2$  級の高強度および超高強度コンクリートを用いた RC 柱の一軸圧縮時の応力-ひずみ関係の寸法効果と帯筋の形状、ピッチおよび降伏強度との関係について実験的に検討した。本研究の結果は、およそ以下のようにまとめられる。

- 1)  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の RC 柱の圧縮強度は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち田、田、田、田および田の順に圧縮強度の寸法効果が顕著である。とくに、田タイプの形状のものは、ピッチ  $S=b/4$  で試験体寸法  $b=25.0\text{cm}$  のものでは、9.7cm のものに比べて平均で約 18%低下した。 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  レベルのものでは、この傾向がさらに顕著になった。
- 2)  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の RC 柱の最大応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) は、試験体寸法が大きくなるにつれて減少する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、 $S=b/4$  の場合、 $b=25\text{cm}$  の試験体の  $\epsilon_m$  の値は、9.7cm のものに比べて田、田、田および田タイプのもので約 38%、田タイプのもので約 20%低下した。
- 3)  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  級の RC 柱の応力-ひずみ曲線は、試験体寸法の大きなものほど最大応

力後の軟化勾配が急になる。その寸法効果は帯筋形状によって異なり、タイプとタイプの帯筋形状の柱の応力-ひずみ曲線は、試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状が順次、脆性的となる。また、帯筋の拘束力があまり大きくない ( $S=b/4$  および  $b/8$ )、 およびタイプの形状のものでは、試験体寸法が  $b=15\text{cm}$  以上になると、応力-ひずみ曲線の寸法効果が非常に小さくなる。

- 4)  $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$  級の RC 柱の圧縮靱性は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。ただし、一般に、軟化域における応力-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がそのまま現れる形となっている。この傾向は、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルのコンクリートを用い、帯筋の拘束力があまり大きくない場合にみられた傾向と一致する。
- 5) 帯筋を密に配置することによる靱性改善効果は、試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。また、横拘束力の大きい形状の帯筋を配置することによる靱性改善効果は試験体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。
- 6) RC 柱の破壊時吸収エネルギー  $W_p$  は、試験体寸法が大きくなるにつれてかなり顕著に低下する。この寸法効果は、帯筋による横拘束力が大きいほど、すなわち帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が大きいほど若干ではあるが減少する傾向がある。

#### 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)

本研究では、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 梁の塑性変形挙動、とくにヒンジ領域の性状に及ぼす試験体寸法の影響を調べるために、引張鉄筋比、あばら筋比およびせん断スパン長さを変えた柱型付き RC 単純梁の曲げ・せん断実験を実施するとともに、RC 梁の塑性変形解析における寸法効果の取扱い方法について解析的に検討した。得られた結果を、以下に要約する。

- 1) コンクリートの応力-ひずみ曲線、並びに RC 梁の  $M-\phi$  曲線の形状は、あばら筋のピッチに拘らず、試験体寸法の大したものほど脆性的となる寸法効果を示す。この寸法効果は、せん断スパン長さ  $l_s$  が  $8h$  のものでは小さくなる。
- 2) 破壊領域長さに及ぼす試験体寸法の影響は、ほとんど認められない。
- 3) RC 梁の曲げ圧縮部を模擬したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係は、式 (5.3.1) および式 (5.3.2) 中のパラメータを、適宜それぞれの曲線に対して設定することで、比較的精度良く表示できた。
- 4) 本章で取り扱った RC 梁の塑性ヒンジ等価長さ  $el_p$  の値として、およそ  $1.5h \sim 2.0h$  の値が得られた。

- 5) RC 梁の曲げ塑性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、定量的にはほぼ推定することが可能であると思われる。

... (faint text) ...

... (faint text) ...

本論文に関連する既発表論文等

## 1. 本論文関連論文

### (1) 第1章関連論文

- 1) 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
- 2) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗：コンクリートの圧縮破壊における供試体の寸法・形状効果、セメント・コンクリート論文集、Vol.47, pp.384-389, 1993.5
- 3) 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、Vol.46, pp.744-749, 1992.5
- 4) 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、Vol.47, pp.706-711, 1993.5
- 5) 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、Vol.48, pp.590-595, 1994.5

### (2) 第2章関連論文

- 1) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗：圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデルについて、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.147-152, 1994.6
- 2) 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, 1991.4
- 3) Hatanaka, S., Mizuno, E., Koike, S. and Tanigawa, Y. : Experimental Study of the Effect of Size on the Physical Properties of Concrete under Compression, Concrete Library of JSCE, No.24, pp.151-161, December 1994
- 4) Hatanaka, S., Mizuno, E., Koike, S. and Tanigawa, Y. : Experimental Study on Size Effect in Constitutive Relationship of Compressive Concrete, Proceedings of Size Effect in Concrete Structures, pp.129-140, Nov.1994

### (3) 第3章関連論文

- 1) 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
- 2) 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、

第 538 号、pp.131-138, 2000.12

- 3) 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, 1987.5
- 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, 1987.5
- 5) Koike, S. and Hatanaka, S.: Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete under Compression, Proceedings of The Thirty Third Japan Congress on Materials Research, pp.55-61, April 1990
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋間隔の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp.833-838, 1996.6
- 10) 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
- 11) Hatanaka, S., Koike, S. and Mizuno, E.: Size Effect on Stress-Strain Curves of Plain and Confined Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of Structures Subjected to Seismic Loads, Japan Society for Promotion of Science, National Science Foundation, Vol.2, pp.273-287, 1999.10

#### (4) 第4章関連論文

- 1) 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、Vol.46, pp.744-749, 1992.5
- 2) 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、Vol.47, pp.706-711, 1993.5
- 3) 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、Vol.48, pp.590-595, 1994.5

#### (5) 第5章関連論文

- 1) Koike, S.: Probabilistic Study of The Variability of Flexural Strength of Reinforced Concrete Simple Beam, Proceedings of The Twenty-Third Japan Congress on Materials Research,

pp.255-261, April 1980

- 2) 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, 1987.5
- 3) 畑中重光・梁川幸盛・吉田徳雄・小池狭千朗：スラブの効果を受ける RC 梁の塑性変形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.293-296, 1991.6
- 4) 吉田徳雄・畑中重光・上田英明・小池狭千朗：スラブ付き RC 梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.173-178, 1992.6
- 5) 上田英明・畑中重光・岸 圭介・小池狭千朗：T形断面 RC 梁のスラブ有効幅について、コンクリート工学論文集、Vol.12, No.2, pp.283-288, 1993.6
- 6) 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
- 7) 岸 圭介・畑中重光・大沢 潤・小池狭千朗：軽量骨材コンクリートを用いた T 型 RC 梁の曲げ破壊挙動と塑性ヒンジモデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.565-570, 1995.6

## 2. 学術論文

- 1) Koike, S.: Probabilistic Study of The Variability of Flexural Strength of Reinforced Concrete Simple Beam, Proceedings of The Twenty-Third Japan Congress on Materials Research, pp.255-261, April 1980
- 2) 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, 1987.5
- 3) 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, 1987.5
- 4) 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
- 5) Koike, S. and Hatanaka, S.: Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete under Compression, Proceedings of The Thirty Third Japan Congress on Materials Research, pp.55-61, April 1990
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 畑中重光・梁川幸盛・吉田徳雄・小池狭千朗：スラブの効果を受ける RC 梁の塑性変形挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.2, pp.293-296, 1991.6
- 9) 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、Vol.46, pp.744-749, 1992.5
- 10) 吉田徳雄・畑中重光・上田英明・小池狭千朗：スラブ付き RC 梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.173-178, 1992.6
- 11) 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
- 12) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗：コンクリートの圧縮破壊における供試体の寸法・形状効果、セメント・コンクリート論文集、Vol.47, pp.384-389, 1993.5
- 13) 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、Vol.47, pp.706-711, 1993.5
- 14) 上田英明・畑中重光・岸圭介・小池狭千朗：T形断面 RC 梁のスラブ有効幅について、コンクリート工学論文集、Vol.12, No.2, pp.283-288, 1993.6
- 15) 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

- 16) 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、Vol.48, pp.590-595, 1994.5
- 17) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗：圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデルについて、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.147-152, 1994.6
- 18) 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
- 19) Hatanaka, S., Mizuno, E., Koike, S. and Tanigawa, Y.: Experimental Study of the Effect of Size on the Physical Properties of Concrete under Compression, Concrete Library of JSCE, No.24, pp.151-161, December 1994
- 20) Hatanaka, S., Mizuno, E., Koike, S. and Tanigawa, Y.: Experimental Study on Size Effect In Constitutive Relationship of Compressive Concrete, Proceedings of Size Effect in Concrete Structures, pp.129-140, Nov.1994
- 21) 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
- 22) 岸圭介・畑中重光・大沢潤・小池狭千朗：軽量骨材コンクリートを用いた T 型 RC 梁の曲げ破壊挙動と塑性ヒンジモデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.565-570, 1995.6
- 23) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋間隔の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp.833-838, 1996.6
- 24) 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
- 25) Hanaka, S., Koike, S. and Mizuno, E.: Size Effect on Stress-Strain Curves of Plain and Confined Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of Structures Subjected to Seismic Loads, Japan Society for Promotion of Science, National Science Foundation, Vol.2, pp.273-287, 1999.10
- 26) 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)



### 3. 著書・口頭発表論文等

- 1) 小池 狭千朗・加藤善之助：鉄筋コンクリート単純ばりの曲げ強度に関する確率論的研究、愛知工業大学研究報告、第 15 号 B、pp.211-218, 1980.3
- 2) 小池 狭千朗・林隆浩・加藤善之助：骨材粒径の異なるコンクリートの引張強度の確率分布と寸法効果に関する研究 その 1. 強度の確率分布、日本建築学会東海支部研究報告集、第 19 号、pp.17-20, 1981.2
- 3) 小池 狭千朗・林隆浩・加藤善之助：骨材粒径の異なるコンクリートの引張強度の確率分布と寸法効果に関する研究 その 2. 強度の寸法効果、日本建築学会東海支部研究報告集、第 19 号、pp.21-24, 1981.2
- 4) Koike, S. and Kato, Z.: Study on Probability Distribution and Size Effect of Compressive and Tensile Strength of Concrete. 愛知工業大学研究報告集、第 16 号 B、pp.203-213, 1981.3
- 5) 小池 狭千朗：コンクリートの各種強度の確率分布と寸法効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.165-166, 1981.9
- 6) 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.120-124, 1981.12
- 7) 小池 狭千朗・谷川恭雄・山田和夫：鋼繊維と横補強筋を併用したコンクリートの圧縮塑性変形挙動、愛知工業大学研究報告、第 17 号 B、pp.181-186, 1982.3
- 8) 小池 狭千朗・加藤善之助：コンクリートの圧縮強度と引張強度の確率分布と寸法効果に関する研究（第 2 報）、愛知工業大学研究報告、第 17 号 B、pp.187-196, 1982.3
- 9) 小池 狭千朗：コンクリートの応力-ひずみ挙動に及ぼす供試体寸法の影響、第 39 回セメント技術大会講演要旨、pp.142-143, 1985.5
- 10) 小池 狭千朗：供試体寸法の異なるコンクリートの応力度-ひずみ度曲線の表示式、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.195-196, 1985.10
- 11) 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、第 20 号 B、pp.179-188, 1986.3
- 12) 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、pp.167-168, 1986.8
- 13) 小池 狭千朗・成瀬治典・中村満喜男・谷川恭雄・森博嗣・山田和夫：建築系のための BASIC プログラミング、1986.12
- 14) 小池 狭千朗・大石健次・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, 1987.3
- 15) 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  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線の表示式、第 41 回セメント技術大会講演要旨、pp.176-177, 1987.5
- 16) 小池 狭千朗・谷川恭雄・馬場研治・畑中重光・太田福男・長谷川和司：鉄筋コンクリ

ート構造 -理論と設計-、単行本（森北出版）、1987.6

- 17) 小池 狭千朗・奥藤一夫：曲げスパンの異なる RC 梁の曲げ塑性変形挙動の寸法効果について、日本建築学会大会学術講演梗概集（構造 II）、pp.53-54, 1987.10
- 18) 小池 狭千朗・奥谷伸幸：RC 梁の曲げ塑性変形挙動の変動と供試体寸法の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、第 26 号、pp.149-152, 1988.2
- 19) 小池 狭千朗・奥藤一夫：曲げスパンの異なる RC 梁の塑性変形挙動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、第 26 号、pp.153-156, 1988.2
- 20) 小池 狭千朗・小林尚：RC 梁のせん断破壊挙動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、第 26 号、pp.157-160, 1988.2
- 21) 小池 狭千朗・大石健次・奥藤一夫・奥谷伸幸：Size Effect on Expression for Stress-Strain Curves of Concrete and Its Application for Moment-Curvature Relationships of Reinforced Concrete Beams、愛知工業大学研究報告、第 23 号 B、pp.219-225, 1988.3
- 22) 小池 狭千朗・小林尚：RC 梁のせん断破壊挙動に及ぼす供試体寸法の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（構造 II）C、pp.195-196, 1988, 10
- 23) 小池 狭千朗・奥谷伸幸：曲げとせん断を受ける RC 曲げ材の塑性回転能に及ぼす供試体寸法の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（構造 II）C、pp.231-232, 1988.10
- 24) 小池 狭千朗・奥谷伸幸：主筋比の異なる RC 梁の曲げ強度と変形挙動の寸法効果、日本建築学会大会学術講演梗概集（構造 II）C、pp.255-256, 1988.10
- 25) 小池 狭千朗・奥藤一夫：純曲げを受ける RC 部材の寸法効果、日本建築学会大会学術講演梗概集（構造 II）C、pp.259-260, 1988.10
- 26) 小池 狭千朗：RC 梁の曲げ挙動に及ぼす供試体寸法の影響、中部セメントコンクリート工学論文集、第 3 号、pp.56-61, 1988.10
- 27) 小池 狭千朗・大石健次・奥谷伸幸：純曲げを受ける供試体寸法の異なる RC 梁の塑性変形性能とその変動に及ぼす主筋比の影響、愛知工業大学研究報告、第 24 号 B、pp.131-141, 1989.3
- 28) 小池 狭千朗：純曲げを受ける RC 梁の曲げ強度と塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、第 43 回セメント技術大会講演、pp.468-473, 1989.4
- 29) 小池 狭千朗・小野博宣・大関一美・太田福男・角徹三・金子林爾・塩田準二・谷川恭雄・馬場研治・畑中重光・森博嗣：建築材料-その選択から施工まで-、理工図書、1989.7
- 30) 小池 狭千朗・畑中重光：コンファインドコンクリートの圧縮塑性変形挙動における寸法効果、第 33 回材料研究連合講演会前刷集、pp.63-64, 1989.9
- 31) 梁川幸盛・畑中重光・小池 狭千朗：鉄筋コンクリート梁部材の塑性ヒンジモデルに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.387-388, 1989.10
- 32) 奥谷伸幸・小池 狭千朗・畑中重光：供試体寸法の異なる RC 梁の塑性回転性能に関する研究（その 1 横拘束コンクリートの圧縮変形挙動）、日本建築学会大会学術講演

- 梗概集 C、pp.389-390、1989.10
- 33) 小池狭千朗・畑中重光・奥谷伸幸：供試体寸法の異なる RC 梁の塑性回転性能に関する研究（その 2 RC 梁の塑性変形挙動）、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.391-392、1989.10
- 34) 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、中部セメントコンクリート工学論文集、第 4 号、pp.70-75、1989.10
- 35) Koike, S. and Hatanaka, S.: Size Effect on Plastic Deformation Behavior of Plain and Confined Concretes under Compression, 愛知工業大学研究報告、第 25 号 B、pp.163-171、1990.3
- 36) Koike, S. and Hatanaka, S.: Size Effect on Plastic Deformation Capacity of Reinforced Concrete Beams under Shear and Flexure, 愛知工業大学研究報告、第 25 号 B、pp.173-181、1990.3
- 37) 小池狭千朗・山田和夫・小阪義夫・谷川恭雄・太田福男・角徹三・金子林爾・畑中重光・森博嗣・ほか 15 名：最新コンクリート技術〈材料・構造・施工に関する最近の諸問題〉小阪義夫監修、森北出版、1990.7
- 38) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインドコンクリートの塑性変形挙動に関する研究（養生条件および供試体寸法の形状・寸法の影響）、第 34 回材料研究連合講演会前刷集、pp.141-142、1990.9
- 39) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインド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、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.623-624、1990.10
- 40) 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、中部セメントコンクリート工学論文集、第 5 号、pp.31-36、1990.10
- 41) 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
- 42) 小池狭千朗：等曲げを受ける RC 梁の曲げ塑性変形挙動の寸法効果、愛知工業大学研究報告、第 26 号 B、pp.107-113、1991.3
- 43) Koike, S. and Hatanaka, S.: Effect of Size and Slenderness Ratio of Specimen on Stress-Strain Curve of Confined Concrete Under Different Curing Condition, 愛知工業大学研究報告、第 26 号 B、pp.115-123、1991.3
- 44) 小池狭千朗・畑中重光：高強度 RC 柱の圧縮特性の寸法効果、第 46 回セメント技術大会講演集、pp.796-801、1992.5
- 45) 上田英明・吉田徳雄・畑中重光・小池狭千朗：材長の影響を考慮した T 形 RC 梁の塑性変形挙動の推定モデル（その 1：実験の方法と結果）、日本建築学会大会講演梗概集、C、pp.701-702、1992.8
- 46) 吉田徳雄・上田英明・畑中重光・小池狭千朗：材長の影響を考慮した T 形 RC 梁の塑性変形挙動の推定モデル（その 2：推定モデルの提案）、日本建築学会大会講演梗概集、C、pp.703-704、1992.8
- 47) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインドコンクリート超高強度コンクリートの圧縮特

- 性の形状・寸法効果、中部セメントコンクリート工学論文集、第 7 号、pp.75-80、1992.10
- 48) 小池狭千朗・畑中重光・水野英二：コンクリートの圧縮破壊における供試体の寸法・形状効果、第 47 回セメント技術大会講演集、pp.408-413、1993.5
- 49) 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、第 47 回セメント技術大会講演集、pp.742-747、1993.5
- 50) 小池狭千朗・畑中重光・岸 圭介・上田英明：T 型断面 RC 梁のスラブ有効幅について（その 1：既往の研究）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、pp.435-436、1993.9
- 51) 小池狭千朗・畑中重光・上田英明・岸 圭介：T 型断面 RC 梁のスラブ有効幅について（その 2：有効幅の推移のモデル化）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、pp.437-438、1993.9
- 52) 小池狭千朗・畑中重光：超高強度 RC 柱の圧縮強度と応力-ひずみ曲線の寸法効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、pp.465-466、1993.9
- 53) 小池狭千朗・谷川恭雄・太田福男・中塚信・馬場研治・畑中重光：鉄筋コンクリート構造—理論と設計—〈第 2 版〉、森北出版株式会社、1994.5
- 54) 小池狭千朗・畑中重光：高強度 RC 柱の圧縮破壊性状と破壊吸収エネルギーの寸法効果、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.351-352、1994.9
- 55) 小池狭千朗・服部宏己・上田英明・畑中重光：RC 梁の終局曲げ変形解析における寸法効果の取り扱いについて（その 1：実験結果とその考察）、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.813-814、1994.9
- 56) 小池狭千朗・上田英明・服部宏己・畑中重光：RC 梁の終局曲げ変形解析における寸法効果の取り扱いについて（その 2：寸法効果の解析的検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集 C、pp.815-816、1994.9
- 57) 小池狭千朗・畑中重光：高強度 RC 柱の圧縮破壊時吸収エネルギーの寸法効果、中部セメントコンクリート工学論文集、Vol.9、pp.64-69、1994.10
- 58) 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、愛知工業大学研究報告、第 31 号、B、pp.137-148、1996.3
- 59) 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）大会号 C-2、pp.799-800、1997.9
- 60) 小池狭千朗・畑中重光：寸法効果、コンクリート強度並びに横拘束力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、愛知工業大学研究報告、第 33 号、B、pp.153-159、1998.3
- 61) 小池狭千朗：実大を含む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、平成 7 年度～9 年度科学研究費補助金 基盤研究 (C) (2) 研究成果報告書、1998.4

- 62) 小池狭千朗・辻誠・畑中重光：炭素繊維シートで横補強したコンクリートの圧縮挙動について（その 1：形状効果）、日本建築学会大会（中国） 学術講演梗概集、C2, pp.637-638, 1999.9
- 63) 小池狭千朗・辻誠・畑中重光：炭素繊維シートで横補強したコンクリートの圧縮挙動について（その 2：寸法効果）、日本建築学会大会（中国） 学術講演梗概集、C2, pp.639-640, 1999.9

## 謝 辞

本研究の遂行と論文の作成に際して、また研究者としての心構え等、数多くの助言と激励を長年にわたっていただきました名古屋大学工学研究科建築学専攻・谷川恭雄教授に深謝いたします。また、同建築学専攻・松井徹哉教授および森博嗣助教授には、論文の作成に際してバックアップいただき、ありがとうございました。本研究の遂行にあたり、三重大学工学部建築学科・畑中重光教授には、共同研究の実施、実験の計画・実施・データの解析等において価値ある助言、ご協力をいただきたいへんお世話になりました。深謝いたします。愛知工業大学工学部建築学科・山田和夫教授には、コンクリート強度の確率分布のデータ解析、学生の実験指導、研究上の相談などでたいへんお世話になりました。

筆者は、名古屋大学工学部建築学教室に昭和 42 年から 48 年まで勤務していた間に、コンクリートの実験方法と RC 梁の製作と曲げ載荷実験方法を学びました。ご指導いただきました名古屋大学工学部建築学科・小阪義夫教授（故人）、同学科・谷川恭雄教授（当時助手）、大同工業大学建設工学科・太田福男教授（当時助手）に深謝いたします。とくに谷川・太田両先生には、第 2 講座の先輩助手としてコンクリート実験のイロハから学びました。名古屋大学赴任当初は亀井・安井両技官に、その後昭和 45 年からの科学研究費補助金奨励研究による RC 梁の曲げ実験では柘植・木村両技官には、実験の実施に際しているいろいろお世話になりました。紙面を借りて深謝します。

この名古屋大学における RC 梁の曲げ実験から、曲げを受ける RC 梁における寸法効果に興味をもちました。昭和 48 年 4 月に、現在の愛知工業大学工学部建築学科に勤務した直後から、RC 梁の曲げせん断実験における寸法効果に関する実験を実施してきました。当時は現在のようなデータ解析装置がそろっていないことも手伝い、塑性変形挙動についての解明が遅れ、強度特性における寸法効果に重点を置いたため、明確な寸法効果についてのデータに巡り会えず、苦勞しました。昭和 56 年から RC 梁の曲げ変形挙動における変動と寸法効果についての実験で、多数の試験体を製作し、がむしゃらに実験を繰り返しました。実験に従事して頂いた愛知工業大学工学部建築学科の加藤・小池研究室の卒研究生のみなさん、とくに院生の林隆浩、板東英貴両君に深謝します。愛知工業大学建築学科・加藤善之助教授（故人）、大石健次教授（退職）並びに愛知工業大学建築工学科・大井孝和教授にはたいへんお世話になりました。深謝します。

昭和 58 年から 60 年頃、試験体寸法の異なる RC 梁の圧縮域のコンクリートを想定して、高さとの比が 3 で、断面の一辺が梁の幅に等しいコンクリート角柱体を各 15 個ずつ製作し、プレーンコンクリートの圧縮強度の寸法効果について実験を繰り返しておりました。

昭和 60 年、曲げを受ける RC 梁における寸法効果を調べる実験で、コンクリート角柱体に RC 梁のあばら筋と同じ径の鉄筋を帯筋として配筋したコンファインドコンクリートの一軸圧縮実験を実施しました。院生の奥藤一夫君の実施したこの実験で、コンファインドコンクリートの塑性変形挙動における寸法効果に関する明確な確証を得ました。奥藤君

に深謝します。

昭和 63 年、院生の奥谷伸幸君を中心として、曲げとせん断を受ける RC 梁の塑性変形挙動における寸法効果を調べるために、81 体の RC 梁の曲げせん断実験を実施し、梁の塑性変形挙動に寸法効果のみられる知見を得ました。奥谷伸幸君以下当時の卒研究生のみなさんの努力に深謝します。あの粘り強い頑張りなくして、あれだけ多くの試験体は壊せませんでした。これ以後、曲げを受ける RC 梁の曲げ塑性変形挙動における寸法効果を解明するために、梁の圧縮域を想定して、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、とりわけ応力-ひずみ曲線における寸法効果に着目し、コンファインド高強度・超高強度コンクリートについての実験を実施し、貴重な研究成果を入手できました。その後、この研究を RC 柱の中心圧縮実験に発展させました。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の知見を RC 梁に適用する研究において、三重大学院生の吉田徳雄・上田英明君にはたいへんお世話になりました。

1991 年に、文部省の私立大学研究装置の補助金で、本学にコンクリートの圧縮実験で変位速度制御のできる 200tf 高剛性圧縮試験機（アクチュエータ）を設置していただき、研究がはかどりました。試験機の設置に際して協力いただいた関係各位に深謝いたします。愛知工業大学構造材料実験室付きの永田昇技術員には、実験に際して実験治具の製作、試験体の製作、実験の実施、学生の指導等、たいへんお世話になりました。ご協力に深謝いたします。

本研究の一部は、文部省から平成 7 年度から 9 年度までの 3 年間にわたって科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））を、また内藤科学技術振興財団より 1992 年度に研究助成金を戴きました。関係各位に深謝します。実験に際してセメントを提供戴いた日本セメント社（太平洋セメント社）、高性能 AE 減水剤を提供戴いた竹本油脂（株）、また PC 鋼線を提供していただき、加工にも協力いただいた（株）高周波熱錬に深謝いたします。実験の実施に際して心強い味方となりました。

最後に、経済的に苦しい中、筆者の教育に力を注いでいただいた両親（小池敏雄、はる子）をはじめ、筆者の健康面その他で終始かわらぬ理解と励ましを戴いた妻・真佐枝に深謝いたします。

