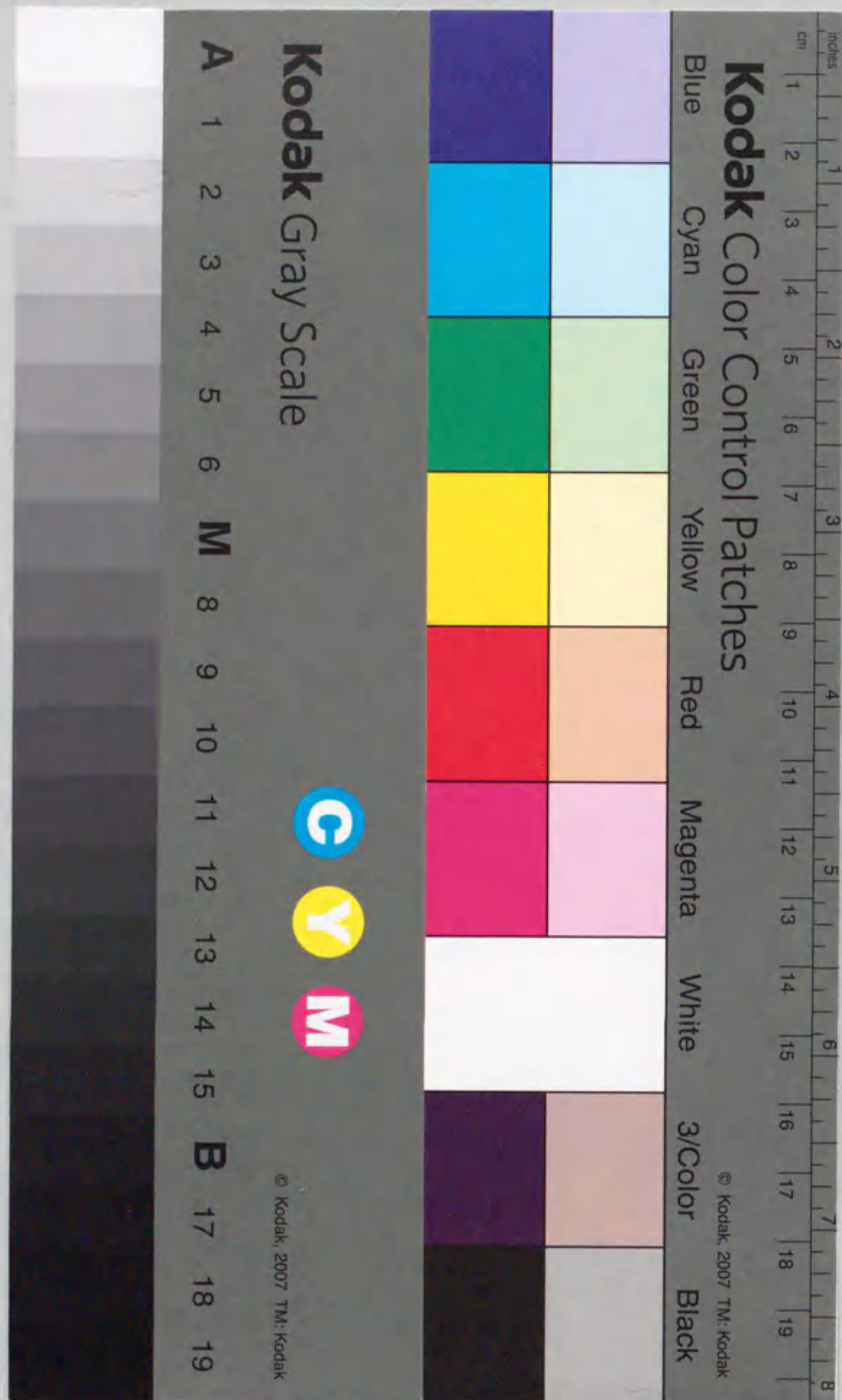


報告番号 甲第 2951 号

フレッシュコンクリートの流動挙動に関する 解析的・実験的研究

渡辺 健治



①

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.2 本研究の目的

フレッシュコンクリートの流動挙動に関する
解析的・実験的研究

第2章 フレッシュコンクリートに関する基礎的知識

2.1 概説

2.2 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.3 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.4 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.5 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.6 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.7 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.8 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.9 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.10 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.11 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.12 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.13 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.14 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.15 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.16 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.17 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.18 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.19 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

2.20 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する基礎的知識

渡辺 健治

目 次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	... 3
1.2 本研究の目的	... 4
1.3 本論文の構成	... 5

第2章 フレッシュコンクリートに関する既往の研究

2.1 概説	... 9
2.2 フレッシュコンクリートの流動性評価方法に関する研究	... 10
2.2.1 フレッシュコンクリートのレオロジーに関する研究	... 11
(1) レオロジーモデル	... 11
(2) 回転粘度計	... 14
(3) ツーポイント試験	... 14
(4) 平行板ブラストメータ	... 15
(5) 球引上げ試験	... 16
(6) その他のレオロジー試験	... 17
2.2.2 コンシステンシー試験	... 18
(1) スランプ試験	... 19
(2) Lフロー試験	... 20
(3) 充填性試験	... 22
(4) 流下試験	... 23
(5) V F 試験	... 25
2.2.3 施工設計法	... 26
(1) 施工設計法の入力条件	... 27
(2) 施工設計法におけるソルバーの役割	... 27

2.3 高強度コンクリートのフレッシュ時における性状に関する研究...	28
2.3.1 高強度コンクリートのフレッシュ時の一般的性状	... 28
2.3.2 使用材料の影響	... 29
(1) セメント	... 30
(2) シリカフューム	... 30
(3) フライアッシュ	... 31
(4) 高炉スラグ微粉末	... 32
(5) 細骨材率	... 34
2.4 フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する研究	... 35
2.4.1 フレッシュコンクリートの管内流動に関する実験的研究	... 35
(1) 高所圧送	... 35
(2) 管内閉塞	... 37
(3) 可視化手法による管内流動の観察	... 38
2.4.2 フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的研究	... 38
(1) 直管内を流れるフレッシュコンクリートの流動挙動	... 38
(2) テーバー管内を流れるフレッシュコンクリートの流動挙動	... 40
2.5 フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究	... 41
2.5.1 スランプ試験に関する理論的研究	... 41
(1) 硬練りコンクリートの場合	... 41
(2) 軟練りコンクリートの場合	... 42
2.5.2 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する数値解析手法	... 43
(1) MAC法による流動解析	... 43
(2) 粘塑性有限要素法による流動解析	... 45
2.6 まとめ	... 46
第3章 フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究	
3.1 概説	... 51
3.2 粘塑性サスペンション要素法	... 51
3.2.1 サスペンション要素	... 52

(1) サスペンション要素の構成	... 52
(2) 調合条件とサスペンション要素の関係	... 54
3.2.2 境界条件	... 55
3.2.3 構成則	... 55
3.2.4 解析手順	... 55
3.2.5 解析例	... 56
(1) 配筋小型ボックス試験	... 56
(2) スランプ試験	... 58
3.2.6 解析手法の特徴	... 58
3.3 粘塑性空間要素法	... 60
3.3.1 空間要素	... 61
3.3.2 境界条件	... 62
3.3.3 構成則	... 63
3.3.4 解析手順	... 64
3.3.5 解析例	... 65
3.3.6 解析手法の特徴	... 66
3.4 まとめ	... 67

第4章 フレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究

4.1 概説	... 71
4.2 フレッシュコンクリートのレオロジー定数の簡易推定手法	... 72
4.2.1 コンシステンシー試験の組合わせ	... 73
4.2.2 レオロジー定数推定図	... 73
4.2.3 各種コンシステンシー試験のレオロジー的意味	... 74
(1) スランプ試験	... 74
(2) テーブル落下型フロー試験	... 75
(3) Lフロー試験	... 76
4.3 粗骨材がコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響	... 79
4.3.1 実験手順	... 79
(1) 測定項目	... 79
(2) 試料	... 79
4.3.2 実験結果とその考察	... 80

(1) コンシステンシー試験	... 80
(2) レオロジー定数の変化	... 82
4.4 粘性の大きいフレッシュコンクリートの流動性	... 82
4.4.1 実験手順	... 82
(1) 測定項目	... 82
(2) 試料	... 83
4.4.2 実験結果とその考察	... 85
(1) スランプ試験	... 85
(2) コンクリートフロー値およびLフロー値	... 85
(3) すべり挙動に関する試験値	... 87
(4) レオロジー定数の推定値	... 89
4.5 コンクリートの分離抵抗性	... 90
4.5.1 実験手順	... 91
(1) 測定項目	... 91
(2) 試料	... 91
4.5.2 実験結果とその考察	... 92
(1) 気泡の上昇	... 92
(2) 強度の発現状況	... 93
(3) 粗骨材の沈下状況	... 94
(4) マトリックスモルタルのレオロジー性質が分離抵抗性に及ぼす影響	... 96
4.6 まとめ	... 102

第5章 フレッシュコンクリートの管内における流動挙動に関する研究

5.1 概説	... 107
5.2 解析手順	... 108
5.2.1 解析に用いた管の形状・寸法	... 108
(1) 2次元直管およびテーパ管	... 108
(2) 3次元直管およびテーパ管	... 108
(3) 3次元ベント管	... 108
5.2.2 入力パラメータ	... 110
(1) 粗骨材	... 110

(2) ポンプ圧力	... 111
(3) レオロジー定数	... 111
5.3 管内における流動挙動に関する解析結果とその考察	... 112
5.3.1 直管およびテーパ管内における流動挙動	... 112
(1) 粗骨材の挙動	... 112
(2) 管の形状の影響	... 113
(3) レオロジー定数および粗骨材量の影響	... 113
5.3.2 ベント管内における流動挙動に関する解析結果とその考察	... 115
(1) 管軸方向の流動挙動（1次流れ）	... 115
(2) 断面内の流動挙動（2次流れ）	... 116
(3) 管内の応力分布	... 117
5.4 まとめ	... 119

第6章 フレッシュコンクリートの型枠内における流動挙動に関する研究

6.1 概説	... 123
6.2 小型壁状型枠内への打設解析および実験	... 123
6.2.1 解析の概要	... 124
6.2.2 実験の概要	... 124
6.2.3 型枠内における流動挙動	... 125
6.2.4 型枠内における流動挙動の定量化	... 126
6.2.5 試料のみかけのレオロジー性質	... 128
6.3 壁部材への打設シミュレーション	... 129
6.3.1 打設位置の影響	... 129
6.3.2 加振および配筋の影響	... 131
6.3.3 打設方法の影響	... 131
6.4 充填型鋼管コンクリート柱部材への打設シミュレーション	... 133
6.4.1 解析方法の概要	... 133
6.4.2 鋼管内における充填挙動	... 134
6.4.3 ダイアフラムによる圧力損失	... 136
6.5 梁・壁部材断面への打設シミュレーション	... 138
6.5.1 梁断面への打設	... 138

(1) R C 梁断面への打設	... 139
(2) S R C 梁断面への打設	... 140
6.5.2 壁断面への打設	... 141
6.6 まとめ	... 143

第7章 結論および今後の課題

7.1 結論	... 147
7.2 今後の課題	... 149

引用文献	... 155
------	---------

付録1 記号一覧	... 167
----------	---------

付録2 既発表論文リスト	... 169
--------------	---------

謝辞	... 177
----	---------

第1章 序論

1.1 本研究の背景
1.2 本研究の目的
1.3 本論文の構成

1.1 本研究の背景

近年、コンクリートの高強度化や施工環境の悪化に伴って、鉄筋コンクリート（RC）構造の設計・施工に課題が生じている。特に、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。

このように、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。

しかし、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。

また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。

さらに、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。また、高強度コンクリートの採用に伴って、鉄筋の配置や施工方法に課題が生じている。

第1章 序論

1.1 本研究の背景

従来、コンクリートの品質管理や施工管理は、多くの場合、実験データに基づく経験則によって行われてきた。しかし、経験則には限界があり、この限界を越えるために、各種技術の開発・改良が試みられてきた。その一つに、混和材料の開発が挙げられる。高強度コンクリート、水中不分離性コンクリート、高流動コンクリートなど[1,2]は、新しい混和材料の開発によって実現したものである。また、新しい施工方法も開発され、地上から数百メートルの高所へコンクリートを一気に圧送し連続的に打設するポンプ工法や、上層階から先にコンクリート打設を行う逆打ち工法など、数多くの新しい技術が次々と開発されている[3,4]。

これらの新技術の開発・導入により、従来のような経験則のみで施工を充分に管理することが次第に困難になってきている。そこで、ある種の工学量や物理定数を用いてコンクリートの流動性や施工性を普遍的に評価する手法を確立する必要性が高まり、フレッシュコンクリートをビンガムモデルと仮定し、そのレオロジー定数を用いて評価する方法が提案されている[5]。

しかし、ビンガムモデルを用いたフレッシュコンクリートの統一的な物性評価への道は、まだ切り開かれたばかりであり、不明な点が多い[6]。コンクリートからモルタル、モルタルからペーストへと測定対象をよりミクロな構成因子へ移しても、ペーストのレベルですらレオロジー定数を合理的に測定することが難しく、コンクリートのレオロジー定数に至っては、測定者・測定装置間で数倍から数百倍の違いがある。

また、フレッシュコンクリートの物性に関する一般的な認識の低さが、このような研究の障害になっているのもまた事実である。施工現場において、熟練した職人の経験と勘によって成立してきた分野であるだけに、未成熟な測定方法によって得られた物理定数よりも、彼らの経験則の方が迅速かつ適切に施工性を評価できる場合が依然として多く、新技術を施工現場へ導入することを一層難しくしている。

次に問題となるのは、測定されたレオロジー定数と流動挙動の関係を明らかにすることである。最も簡単な方法としては、レオロジー定数が既知である材料を用いて流動実験を行うことであるが、すべての施工条件ごとに、このような流動挙動を再現させることは非現実的であり、コンピュータによる数値シミュレーションが最も有効となる。ただし、このシミュレーション手法も、国の

内外を問わず、谷川らによって提案された数例の手法が報告されているだけであり、まだ完成された汎用的な技術とはなっていない[7,8]。また、理論的なアプローチも試みられているが[9,10]、複雑に配筋された型枠内を流動するコンクリートの流動挙動を理論的に推定することは、いまのところ不可能である。

与えられた施工条件に対して、最も効率的な材料・施工方法を選択するためには、2つのステップを踏む必要がある。まず第1ステップは、与えられた施工条件下で、必要な流動性・充填性・施工性を発揮する材料の物性値の「範囲」を特定することである。第2ステップでは、その「範囲」の中で、材料分離の可能性を考慮しつつ、品質管理上および製造コスト上、最適なコンクリートの物性値を絞り込み、得られたレオロジー定数から調合条件を逆算することである。第2ステップにおいて満足のいく結果が得られない場合には、第1ステップに用いた施工条件を修正する必要がある、これは、打設方法や配筋などを含めた部材断面の再設計を意味する。

上記の方法は、従来のコンクリート工事に新しい考え方を導入するものである。コンクリート工事はその自由度の高さゆえに、最適値を求めにくい面があるが、提案するような設計手法を用いれば、「どの程度困難か」を理由づけることができ、より適切な製品を生産することができる。

1.2 本研究の目的

本研究では、「施工設計法」[11,12]を確立するために、フレッシュコンクリートの流動挙動を予測する技術を開発することを第一の目的としている。

筆者が着目したテーマの一つは、均質材料としてのフレッシュコンクリートの物性に関する実験的な測定・評価方法の確立である。次に着目したテーマは、多相材料としてのフレッシュコンクリートの物理的な性状を正しく理解するための技術の開発である。軟練りコンクリートやモルタルは、均質材料とみなせる場合が多いが、コンクリートは本来多相材料であり、また骨材の分散・集合などが物性値に大きな影響を及ぼす。そのため、フレッシュコンクリートを骨材相とマトリックス相から成る2相材料として取り扱う粘塑性サスペンション要素法を用いて、多相材料としてのフレッシュコンクリートの流動メカニズムの解明を試みる。さらに、より現実的な問題に対処するため、施工条件を考慮し得る解析技術の開発を試みる。施工性の良否を判定するためには、施工条件とフレッシュコンクリートの物性値の両者を同時に評価する必要がある。現状では、たとえば「スランプ値が18cm」という評価のみで施工性を評価しているが、施工の難易度に応じたコンクリートを、またはコンクリートの物性値

に応じた施工条件を選択するべきである。そのためには、施工条件とコンクリートの物性の両者を関連づけ、適切な施工性を確保するためのシステムを提案することが重要である。

1.3 本論文の構成

本論文は、7章から構成されている。

第2章では、本研究に関連する既往の研究報告を分類・整理し、研究の現状と問題点を明らかにする。

第3章では、フレッシュコンクリートを粗骨材相およびマトリックスモルタル相の2相材料として取り扱う粘塑性サスペンション要素法および実施工条件と材料性質を考慮し得る粘塑性空間要素法について、その解析手順と解析例を含めて解説する。

第4章では、近年実用化されている高強度コンクリートを対象として、従来のコンクリートと比較しながら、その流動性状をレオロジーに基づいて定量的に評価した結果について述べる。

第5章では、直管、テーパー管およびベント管内を流動するフレッシュコンクリートの挙動を粘塑性サスペンション要素法によって解析することにより、コンクリートの圧送性およびそれに与えるコンクリートの物性について考察する。

第6章では、粘塑性サスペンション要素法および粘塑性空間要素法を用いて、各種施工条件や材料性質がフレッシュコンクリートの施工性に与える影響について解析的に検討するとともに、実験による検証結果について述べる。

最後の第7章では、本論文の成果をまとめ、これらの位置づけについて述べる。

2.1 概説

2.2 フレッシュコンクリートの流動性評価方法に関する研究

2.3 高強度コンクリートのフレッシュ時における性状に関する研究

2.4 フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する研究

2.5 フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究

2.6 まとめ

第2章

フレッシュコンクリートに関する既往の研究

2.1 概説

1824年にJ.Asplinがポルトランドセメントを発明してから50年後の1874年に日本で初めてのセメント工場が深川に建設されたのが、わが国におけるコンクリートの歴史の始まりといえる。当時のセメントは高価なものであったことから、一般には石灰と混合して使われており、調合理論も確立されていなかったため、調合比は経験的に定められていた。また、当初はまだ無筋コンクリートであり、非常に硬練りのコンクリートが施工されていたようである。硬練りコンクリートでは軟らかさの規定がないので、水は、しまり具合をみながら適当に加えられており、1882年の皇居造営工事の際に行われたコンクリート強度試験によれば、圧縮強度は最大4,600kPa、最低800kPaであったと記録されている[13]。

しかし、現代においては、多種多様な要求に対応するために、さまざまな新しいコンクリートが出現しており、これらの物性値を定量的に評価する必要性が生じている。特に、フレッシュコンクリートのワーカビリティを定量的に評価することの重要性が近年になって指摘され、岩崎は、フレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定値による「ワーカビリティ判定法」[14]を提案している。たとえば、日本建築学会建築工事標準仕様書5:鉄筋コンクリート工事では、ワーカビリティは「まだ固まらないモルタルまたはコンクリートの作業性の難易の程度」という曖昧な定義がなされており、まったく同質のコンクリートであっても、構造物の種類、断面寸法、配筋状態、施工方法、その他さまざまな条件が変わればワーカビリティの判定結果が異なるはずであるが、その表示は「適、不適」などの比較表現に留まっている。そこで、ワーカビリティを構成する要素を、図-2.1に示すように分類・整理するとともに、コンクリート自体の力学的性質あるいは物理量を測定してワーカビリティの指標とする、いわば絶対表現が可能となるような方法でワーカビリティを定義しようという考え方が注目を集めている。

また一方、谷川らは、レオロジー理論に基づくフレッシュコンクリートの流動シミュレーション手法を提案し、さらにスランプ試験などコンシステンシー試験からレオロジー定数を簡易に推定する方法を提案している[15]。この一連の手法の特徴は、粘塑性有限要素法を利用して各種コンシステンシー試験のシミュレーションを理想的な条件下で行うことにより、これらの試験および試験

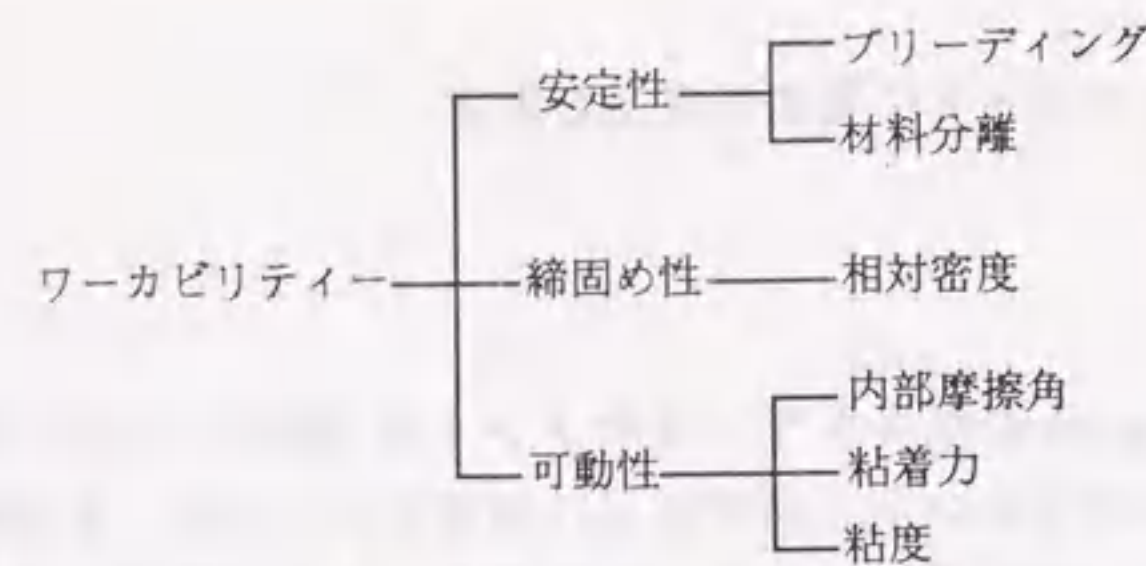


図-2.1 ワーカビリティーを構成する要素 [14]

値のレオロジー的な意味を明確にし、コンシステンシーを再評価しようとする点にある。

レディーミクストコンクリートプラントにおけるコンクリートの製造・品質管理のために、日本コンクリート工学協会・コンクリートの製造システム研究委員会では、レディーミクストコンクリートプラントの現状の調査・研究を行うとともに、信頼性向上を主眼としたコンクリートの新しい製造・品質管理システムの開発研究を行っている[16]。また、施工条件を「耐久性指数」や「環境指数」という数値によって評価し、総合的な耐久性を判断する手法が土木学会耐久性設計小委員会から提案されている[17]。これとは別に、ファジー集合理論を用いた耐久性設計手法が宮本によって提案されているが[18]、いずれも、施工条件や周辺環境をどのように数値化するかが問題となっている。

上述のように、フレッシュコンクリートのワーカビリティー、コンシステンシー、充填性などを統一的に絶対量を用いて評価する手法が模索される背景には、従来の管理基準では判定の難しい新しい材料、新しい工法[19-24]が次々と開発・実用されていることが挙げられる。

本章では、本研究に関連するフレッシュコンクリートの挙動に関する研究の現状と問題点について述べる。

2.2 フレッシュコンクリートの流動性評価方法に関する研究

フレッシュコンクリートのコンシステンシーやワーカビリティーに関する研究は、高スランプの高強度コンクリートの出現により大きく飛躍した部分が多い。普通のコンクリートでは、スランプ値は18cm以下と定められている場合がほとんどであるが、高強度コンクリートではスランプが25cm程度のものも多く、フレッシュコンクリートをどの程度まで流動化させることが可能なのかを

スランプ試験だけで評価することは難しい。そのため、シフロー試験など、新しいコンシステンシー評価試験が登場するとともに、レオロジーの側面からアプローチする試みがなされている。

本節では、フレッシュコンクリートの流動性評価方法に関する研究の現状について概説する。

2.2.1 レオロジー試験

フレッシュコンクリートをレオロジーの側面から検討した研究は、比較的少ない。これは主として、コンクリートが多相材料であるため、取り扱う規模によってその物性を単純にモデル化することが難しいためである。また、物性が経時的にも、また環境条件によっても変化するため、その測定を一層困難にしている。そのため、一般的な調合比をもつコンクリートのレオロジー定数も、測定者間で数十から数百倍の差がある場合も稀ではない。さらに、すべりや付着特性など、まだ明確に把握されていない物性値が測定値に影響を及ぼすため、レオロジー定数を測定する際に、すべりや付着に関する事前の測定や、これらの影響を取り除く工夫がそれぞれの研究者によって行われている。

(1) レオロジーモデル

フレッシュコンクリートの構成則としては、式(2.1)および式(2.2)に示すような、G.H.Tattersall, P.F.G.Banfillらによって初めてコンクリートに適用されたビンガムモデルが一般に用いられているが、森らは、図-2.2および式(2.3)に示すようなモール・クーロンの降伏条件を導入した複合モデルを提案しており、このモデルの妥当性を実験によって検証している[25]。

$$2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F\sigma'_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (2.2)$$

$$\tau_y = \left(\text{matrix } \tau_y, \frac{3C_h - I_1 \tan \phi}{\sqrt{9 + \tan^2 \phi}} \right)_{\max} \quad (2.3)$$

ここに、 η : 塑性粘度, V_{ij} : 変形速度テンソル, σ'_{ij} : 偏差応力テンソル, τ_y : 降伏値, J_2 : 偏差応力テンソルの2次不変量, $\text{matrix } \tau_y$: マトリックスの降伏値, C_h : 粘着力, I_1 : 平均垂直応力, ϕ : 内部摩擦角。

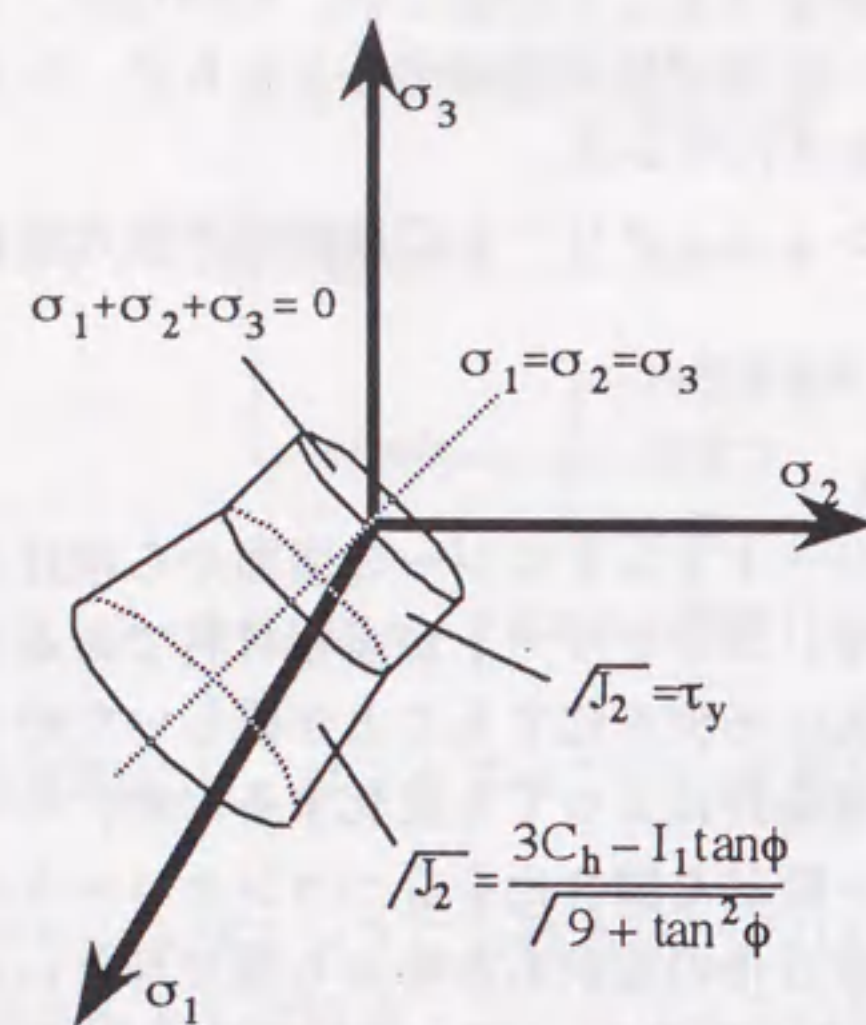


図-2.2 複合モデルの降伏条件[25]

同研究では、図-2.3および図-2.4に示すような1面せん断粘性試験装置およびせん断ボックス粘性試験装置を用いて、提案されたフレッシュコンクリートの構成則（複合モデル）に関するレオロジー定数の定量化を行った結果、フレッシュコンクリートの降伏値および塑性粘度が、内部応力の増大に伴って増大することなどを明らかにしている。

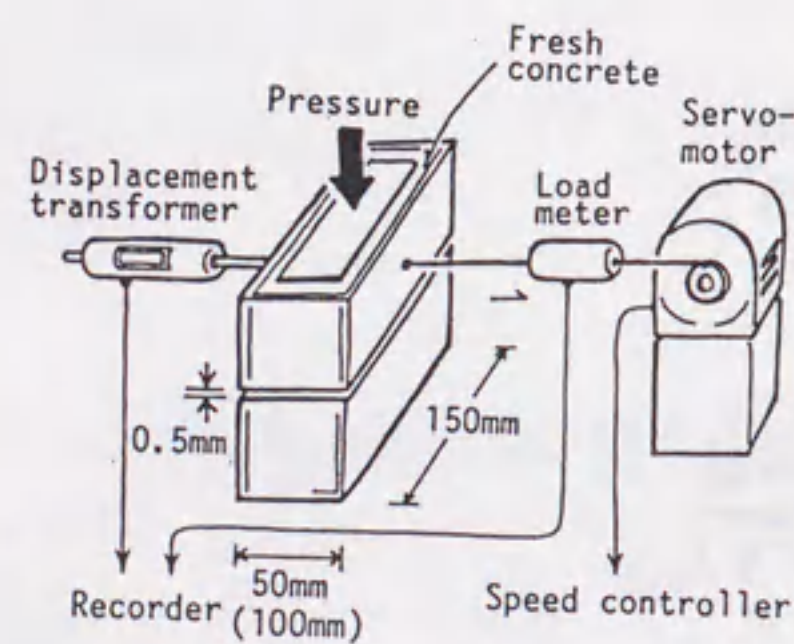


図-2.3 1面せん断試験装置[25]

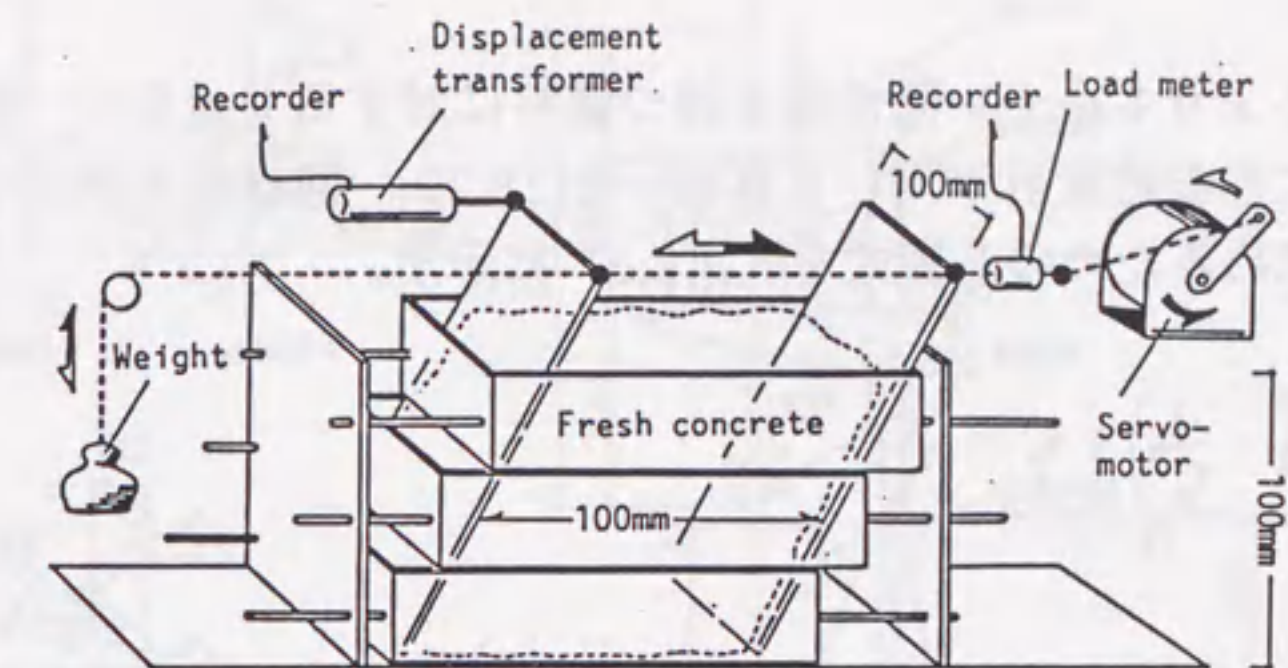


図-2.4 せん断ボックス試験装置[25]

また、試料のすべり挙動に関するレオロジー性質として、森らは式(2.4)に示すようなすべり抵抗応力に関する構成則も提案している。

$$\sigma_h = S_1 \sigma_n \beta + S_2 \beta + S_3 \sigma_n + S_4 \quad (2.4)$$

ここに、 σ_h : すべり抵抗応力、 σ_n : 垂直応力、 β : すり速度、 $S_1 \sim S_4$: 実験定数。

式(2.4)は、垂直応力およびすり速度の双方に依存したモデルであり、図-2.5に示すような実験装置を用いて実験的に S_1 から S_4 を測定した結果を報告している[26,27]。

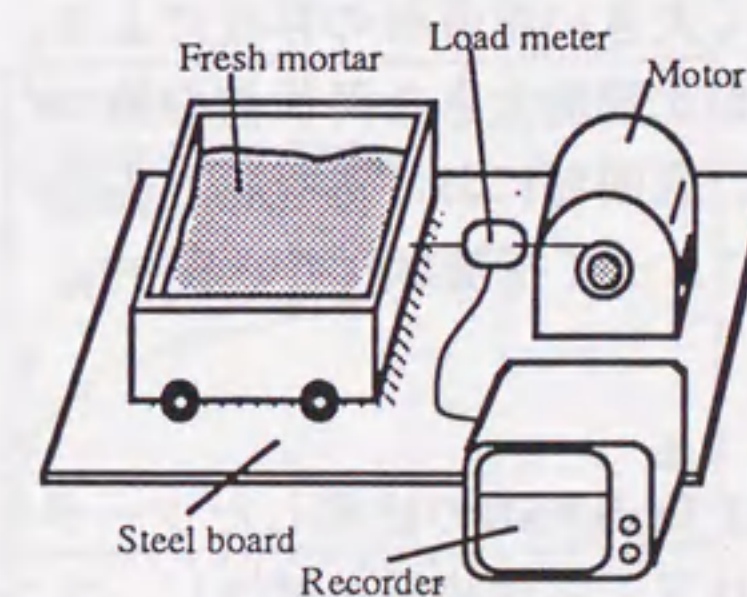


図-2.5 すべり抵抗試験装置[26]

(2) 回転粘度計

コンクリートよりも小さい降伏値を持つ試料に対するレオロジー試験装置としては、一般に回転粘度計が用いられている[28,29]。回転粘度計によってレオロジー定数を求めるための基礎式を式(2.5)に示す。

$$\omega = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_o^2} \right) + \tau_y \ln \left(\frac{r}{r_o} \right) \quad (2.5)$$

ここに、 ω : 半径 r における角速度, M : トルク, r_o : 試料の流動領域の外側半径, r : 試料の流動部の任意点の半径, h : 試料の深さ。

回転粘度計によって試料の粘度測定を行う場合には、次のような仮定を設けている。

- 1) 試料は非圧縮性である。
- 2) 回転軸に垂直な面における流線は円である。すなわち層流をなす。
- 3) 回転軸に垂直な各面における試料の運動は相等しい。
- 4) 円筒と試料の間に相対移動がない。

コンクリートやモルタルを用いた実験では、これらの仮定に従わないことが多いことから、村田らは、4)の問題を解決するために、試料の上面に浮子を散布してこれを標点とし、試料の流速を補正する試みを行っている[30,31]。

しかし、コンクリートのレオロジー試験として回転粘度計を用いる場合、装置サイズに比較して著しく大きい粗骨材の存在により、層流の仮定が乱される可能性があること、試料が比較的大きな降伏値を持つため、側壁面におけるすべりが無視できないこと、底面部における吸収トルクの影響の程度が不明確であること、などが谷川らによって指摘されている[32]。

(3) ツーポイント試験

水口らや角田らは、G.H.Tattersallの提案したツーポイント試験[33]を応用して、回転翼を持ったレオロジー試験装置を試作し、コンクリートのコンシステンシーを測定している[34,35]。水口らは、図-2.6に示すような回転翼型レオメータおよび3種類の形状の回転翼を用いて、それぞれの翼の回転による粗骨

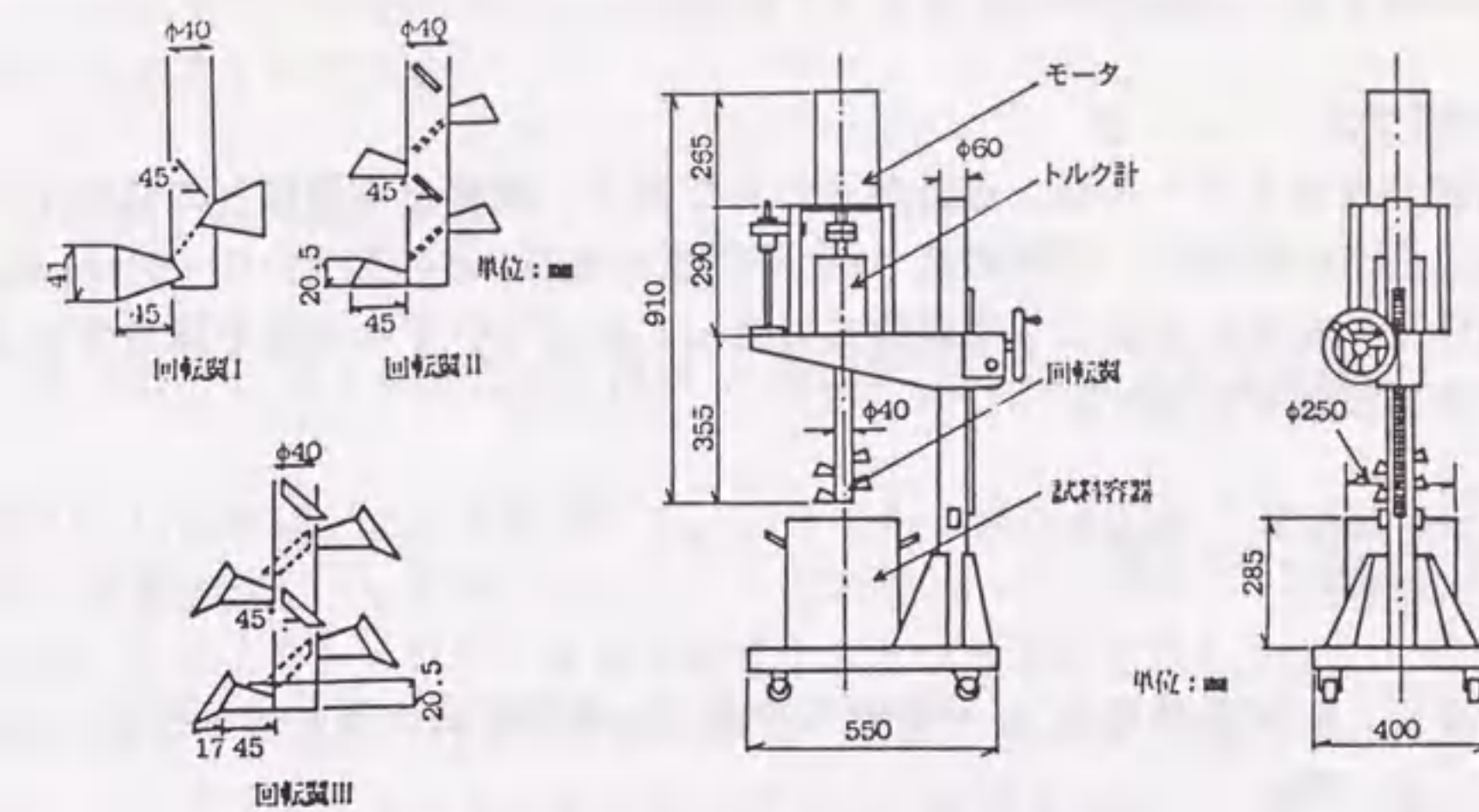


図-2.6 回転翼型レオメータの概要[33]

材の分離の程度を定量的に把握した上で測定を行っている。また、角田らは、各種の翼形状が測定値に与える影響を調べるとともに、偏心モータの偏心錘を調整することによって3軸の加振が可能な振動テーブル上で試料を加振し、振動下におけるレオロジー性質のみかけの変化についても考察を行っている。児島らの報告した、回転翼型レオメータのトルク-回転数曲線を図-2.7に示す[36]。同図によれば、トルク-回転数曲線は、緩やかな立上りを見せた後ほぼ直線的に伸びており、回転粘度計で得られるコンシステンシー曲線のような曲線を示している。回転粘度計などの場合、せん断変形を起こす範囲がひずみ速度によって変化するため、1次図面として出力される応力-ひずみ速度曲線は、立上り部が曲線となる。ただし、回転翼型レオメータで得られる値は回転数とトルクを両軸とするコンシステンシー曲線であり、これを直接レオロジー

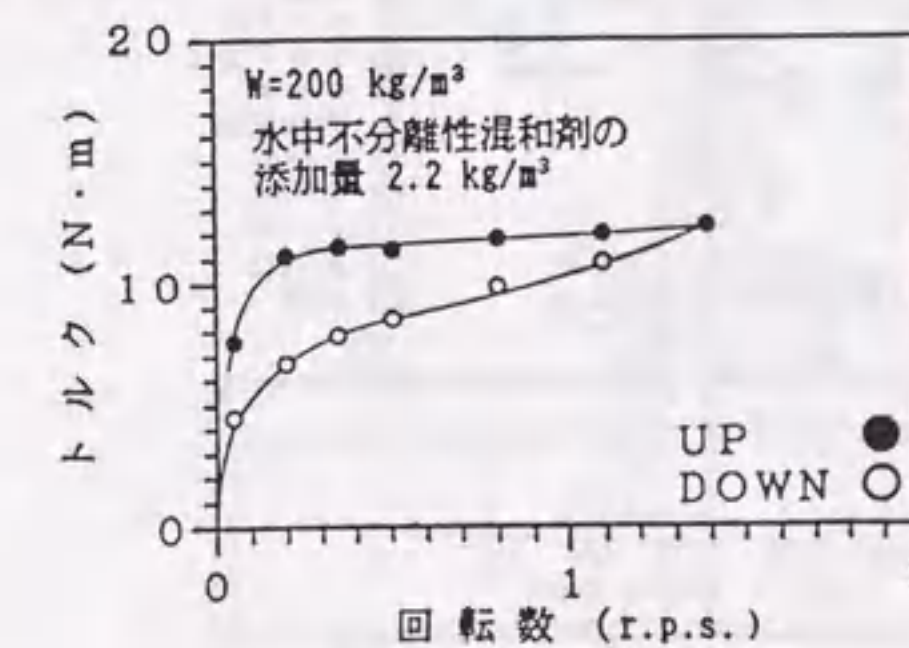


図-2.7 トルク-回転数曲線の一例[36]

定数に変換することは難しい。

(4) 平行板プラストメータ

平行板プラストメータは、流動がきわめて遅く、試料と平行板との間にすべりが起こらない場合に、試料の高さ h と平行板の直径 D との比 (h/D) が $1/10$ 以下の条件で、次式に示すような理論式によって応力とひずみ速度を算定することができる試験である[37]。

$$\dot{\gamma} = \frac{9r}{2h^2} \frac{dh}{dt}, \quad \tau = \frac{3hf}{\pi r^3} \quad (2.6)$$

ここに、 h : 試料の高さ, r : 平行板の半径, F : 平行板に作用させる荷重, t : 時間。

水口らは、図-2.8に示すような平行板プラストメータを試作するとともに、平行板プラストメータおよび球引上げ試験を同一の試料に対して適用し、比較的硬練りコンクリートでは平行板プラストメータを、また、比較的軟練りコンクリートに対しては球引上げ試験を用いることが、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定する際に有効な方法であるとしている[38]。

(5) 球引上げ試験

フレッシュコンクリート、モルタルおよびセメントペーストを非圧縮性ビンガム流体と仮定するとき、その流体中を一定速度で運動する球が受ける抵抗

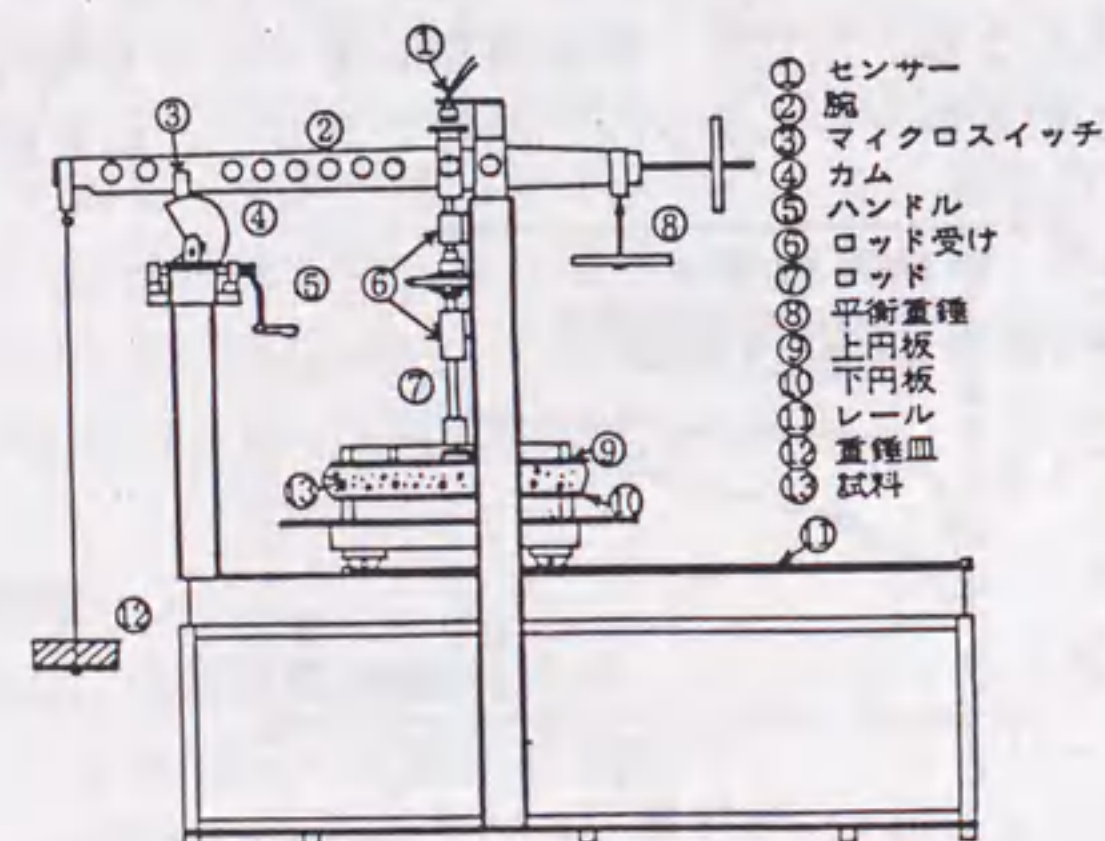


図-2.8 平行板プラストメータの概要[38]

は、一定速度で一様な流れの中に球が静止している状態と考えることにより、次式で表すことができる。

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{2r}, \quad \tau = \frac{F}{4\pi r^2} \quad (2.7)$$

ここに、 V : 球と試料の相対速度, r : 球の半径, F : 球に加わる抵抗力。

球引上げ試験は、上式を利用して、いくつかの異なるひずみ速度におけるせん断応力を測定し（いわゆる多点法）、これをコンシステンシー座標にプロットすることによりレオロジー定数を測定するという手法である[39]。

図-2.9に、西林らの行った実験結果の一例を示す[40]。西林らは、流動化コンクリートのマトリックスモルタルに球引上げ試験を適用し、調合や静置時間がモルタルのレオロジー定数に与える影響を検討している。このほかにも、明石らや岸谷らも、球引上げ試験を行い、フレッシュペーストやフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定および検討を行っている[41,42]。

(6) その他のレオロジー試験

非常に簡易な方法としては、菊川が、ごく限られた範囲の調合のコンクリートに対して、ミニスランプ試験によるスランプ値からレオロジー定数を推定する手法を提案している[43]。菊川は、コンクリートの降伏値と、スランプ値や単位水量など調合条件との関係について実験的に検討し、実験定数を含む推定

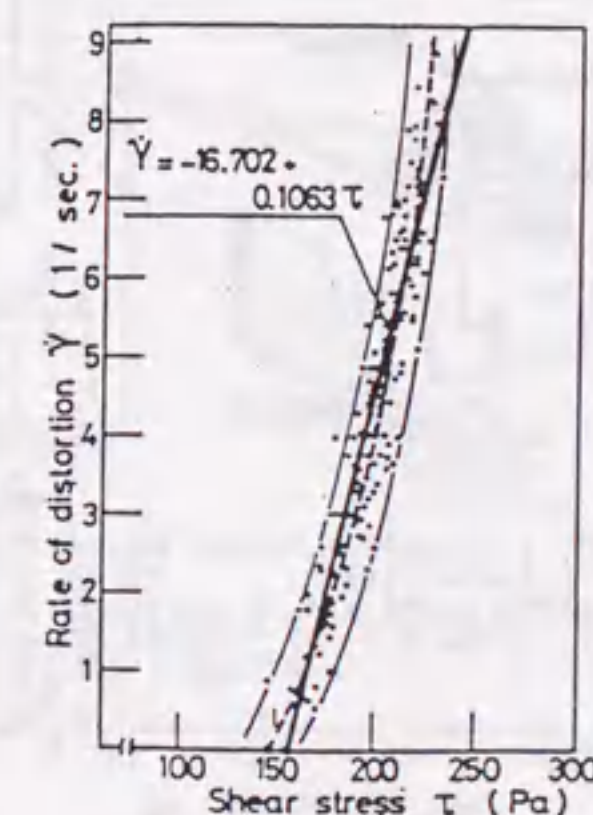


図-2.9 コンシステンシー曲線[40]

式を求めている。また、混和材料を用いないプレーンペーストに限った条件下における降伏値と塑性粘度の関係についても報告している。

一方、従来のレオロジー試験装置を改良し、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定しようと試みる研究も少なくない。加藤らは、より簡便な測定方法の開発を目指して、簡易せん断箱を用いた硬練りコンクリートのレオロジー定数測定装置を開発・提案している[44]。この試験装置の概要を図-2.10に示す。この試験では、図中の右側の重りが増加することによってコンクリートに加わるせん断力が増加し、強制的にせん断変形を起こすことによってコンクリートのせん断変形抵抗性を測定しようというものである。この試験は、森らの提案する1面せん断試験[25]におけるせん断方向を変えた場合と考えることもできるが、水平変位を最大で1.5mmに抑えていること、粘性の測定を行っていないこと、垂直応力の影響を考慮していないこと、などの違いがみられる。

2.2.2 コンシステンシー試験

コンクリートの品質を確保するためには、使用材料の品質、製造方法およびコンクリート自身の品質の3点を管理する必要がある。シリカフュームや高炉スラグ微粉末など、多種多様な混和材料が使われているコンクリートでは、こ

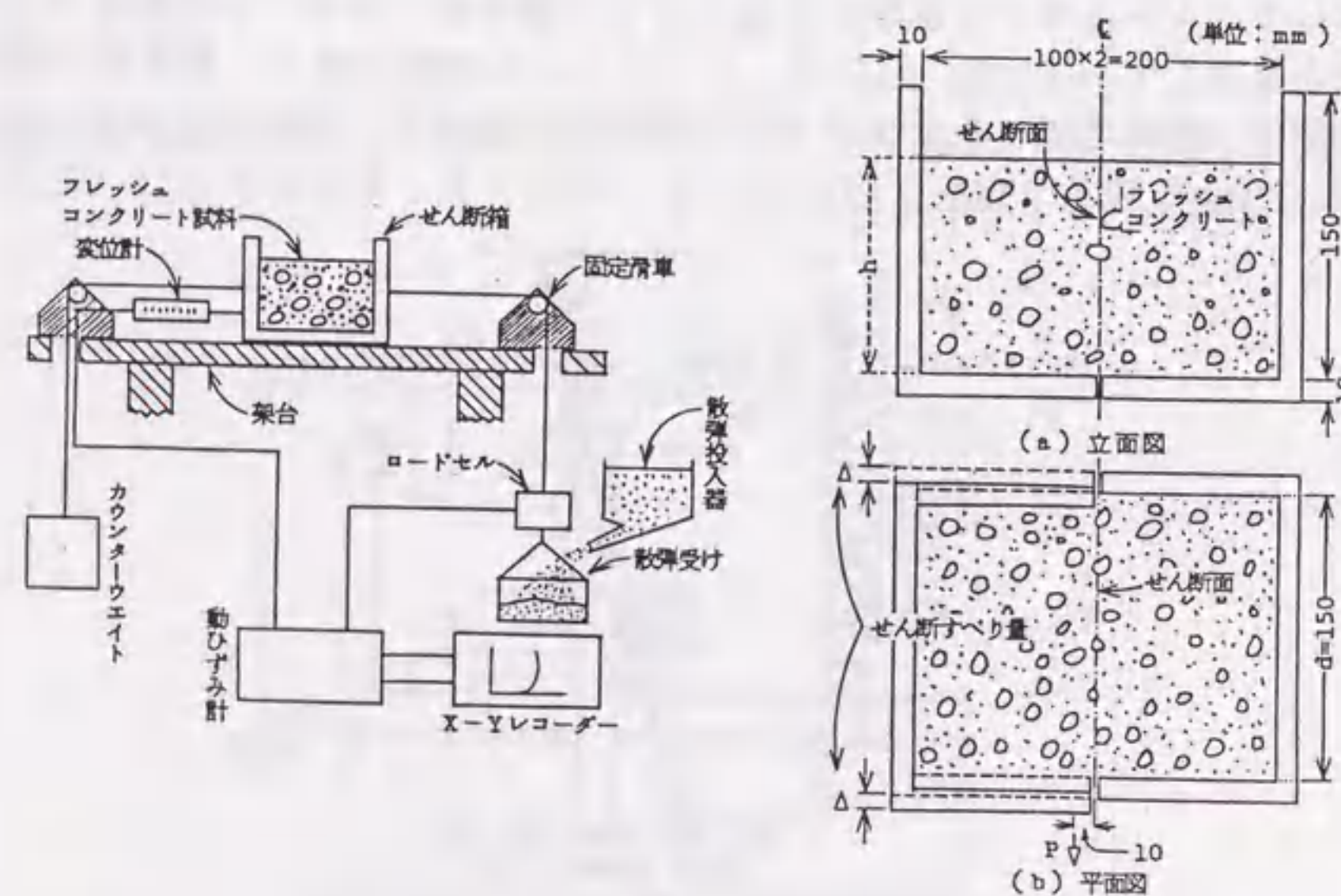


図-2.10 簡易せん断ボックス試験の概要[44]

れらの適正な利用が望まれており、混和材料の性質を物理・化学的な性質だけで評価する試みが行われていると同時に、複合して利用された状態の挙動も注目されている。

ワーカビリティ試験・評価方法に関して、日本コンクリート工学協会・フレッシュコンクリートの挙動研究委員会・セメントペースト特性ワーキンググループが大略をアンケート調査した結果[45]によれば、まだスランプ試験にのみ依存している研究者が多いことがわかる。しかし、今後は回転粘度計などのレオロジー試験装置の導入を希望する数が多い結果となっており、レオロジー定数を測定する必要性が徐々に浸透していることがうかがえる。

(1) スランプ試験

スランプ試験は、試料の降伏値または軟度を簡便に測定する手法として、優れた試験である。混練方法の影響がスランプ値に与える影響を検討した黒井らの研究[46]によれば、図-2.11に示すように、初期のスランプ値が同程度であってもスランプロスの傾向は混練方法によって異なっている。コンクリートの軟度は経時的に変化するため、スランプ試験によりコンクリートの軟度を常に確認しておく必要性を同実験結果は示している。

一方、近年多くの研究・開発が行われている高流動コンクリートなど、小さい降伏値を持つコンクリートの中には、高性能AE減水剤の混入などにより、高いスランプ値を数時間保持できるものも出現しており、また、スランプ値が27cm程度のものも存在する。そのため、試料の軟度をスランプ値で表現することは難しく、スランプフロー値を用いて表現する場合が多い。スランプフ

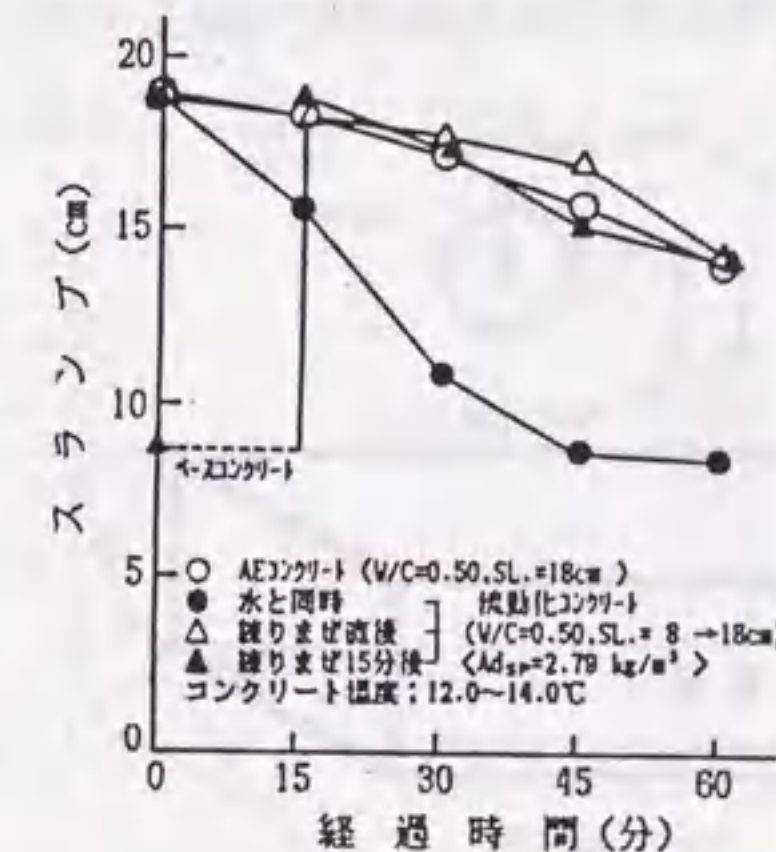


図-2.11 混練方法がスランプ値に与える影響[46]

ロー値は、試料の流動が停止したときの値であることから降伏値の影響が大きい測定値と考えることができる。さらに、スランブフロー値が直径500mmに達するまでの時間を測定することにより、試料の軟度を測定しようとする研究もみられる。なお、スランブ値とレオロジー定数の関係を理論的に検討した研究については、2.4.1節で紹介する。

また、前述の2.2.1節で述べたように、スランブコーンの寸法を変化させて、モルタルのレオロジー定数を推定した報告も見られる。スランブ試験は、一般に普及しているばかりでなく、試験方法が簡便であるだけに、形状・寸法や用途を工夫することによって新しい知見が得られる可能性のある試験といえる。

(2) Lフロー試験

図-2.12にLフロー試験の概要を示す。Lフロー試験[47]では、Lスランブ値、Lフロー値、Lフロー速度およびLフロー初速度などを測定することができるが、特にLフロー初速度はコンクリートの粘性を示す指標として有効である。スランブ試験が試料の軟度を測定するのに適した試験であることから、スランブ試験と、Lフロー試験を組み合わせることは、試料の変形特性を把握する上で有効な手法といえる。試料の流動開始から停止までを平均したフロー速度であるLフロー速度に比べ、変形初期のフロー速度であるLフロー初速度は、装置の底面におけるすべり抵抗の影響を受けにくく、定量的にコンクリートの粘性を把握することが可能であり、施工を管理する測定値としては有効な指標であると考えられる。しかし、Lフロー初速度を測定するためには、特別な非接触型のセンサーが必要なため、Lフロー速度を用いて検討している報告が多い。図-2.13に、米澤らが行った実験から得られたLフロー速度と水

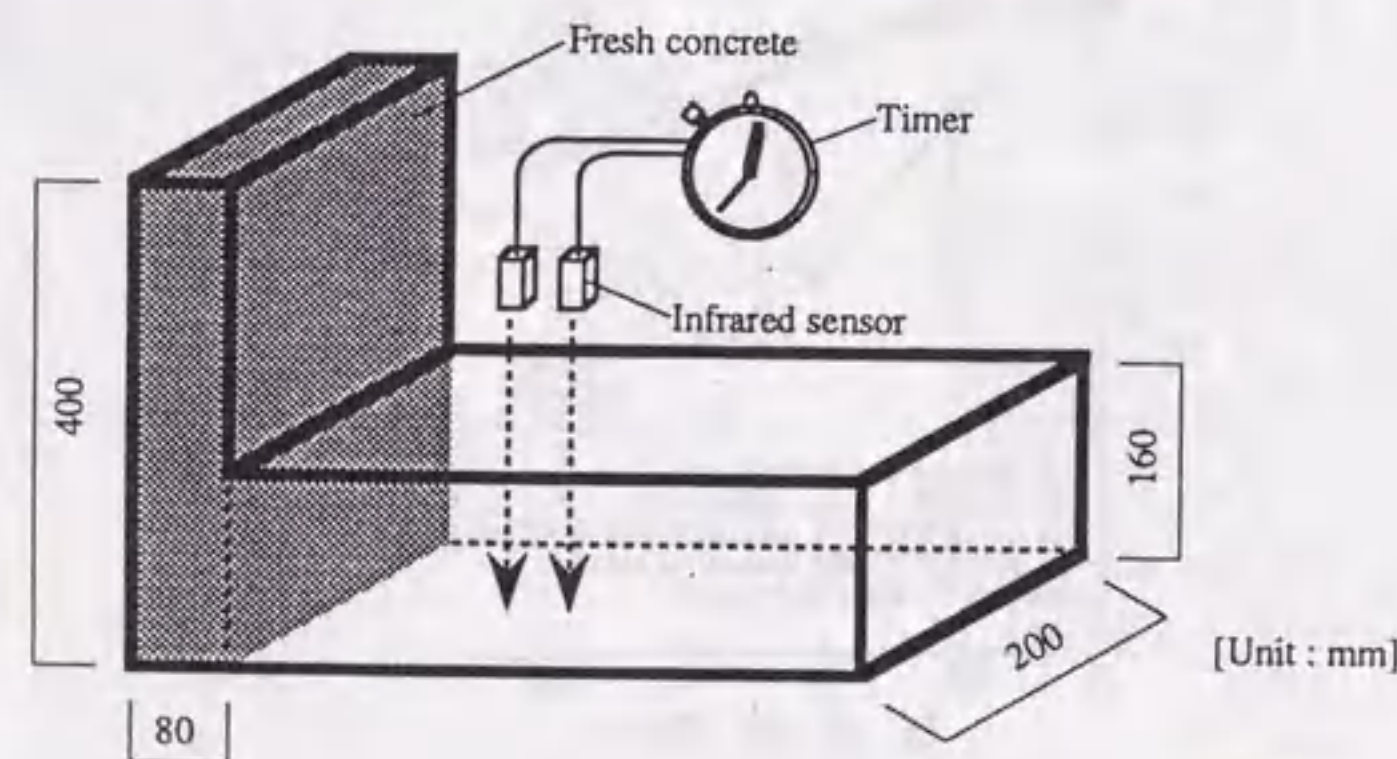


図-2.12 Lフロー試験装置[47]

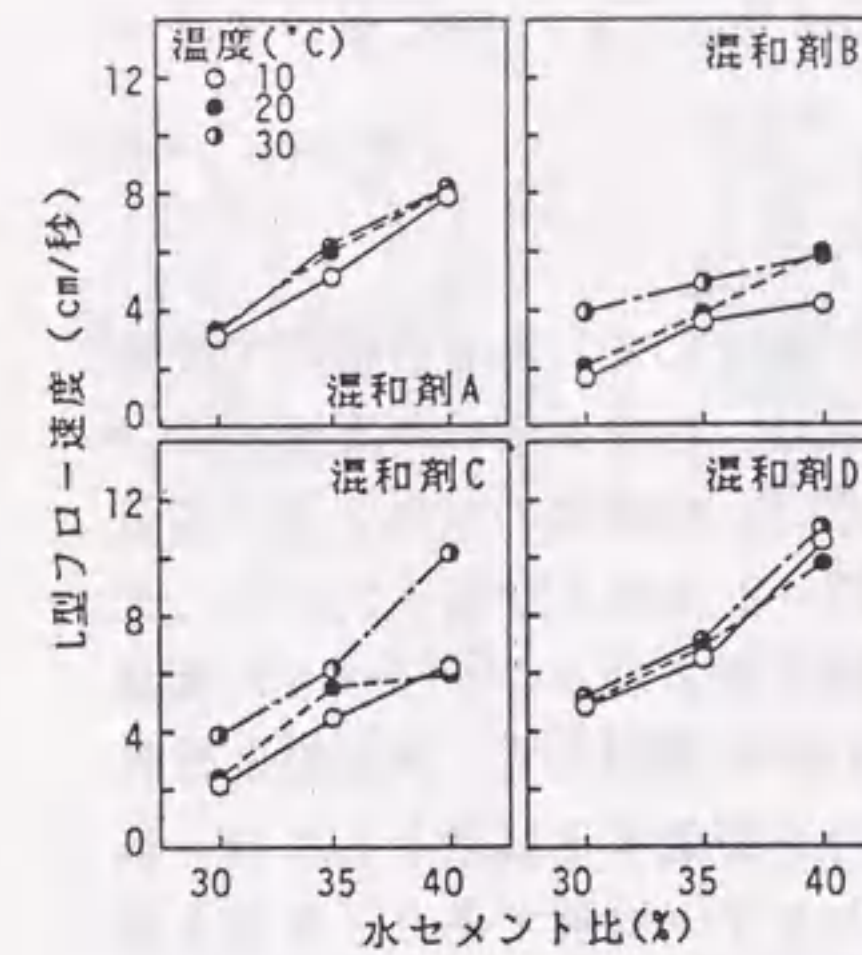


図-2.13 Lフロー速度と調合の関係の一例[47]

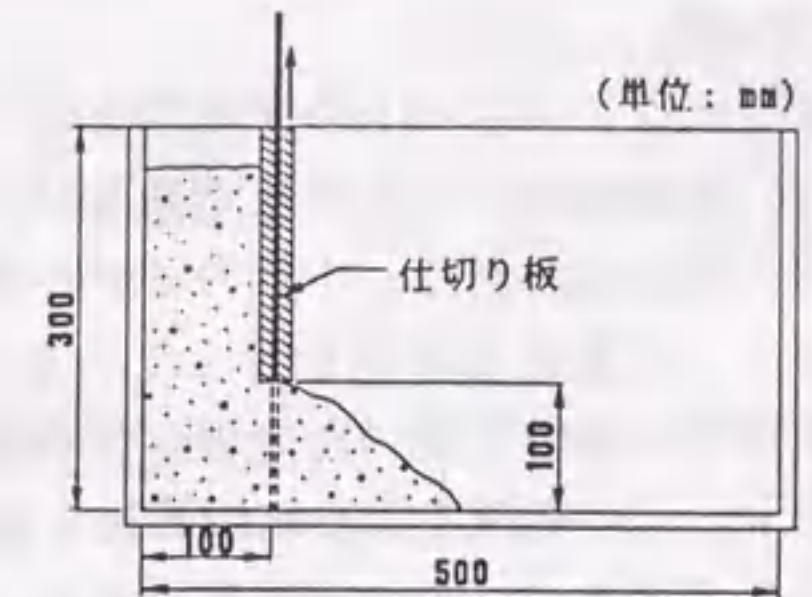


図-2.14 ボックスフロー試験装置[36]

セメント比の関係を示す[47]。同図から、水セメント比の増加とともに粘性は小さくなり、Lフロー速度は大きくなる現象を確認することができる。

Lフロー試験に類似した試験として、いくつかの試験装置が提案されているが、いずれも容器の片側に試料を充填して、他方に流動させる装置がほとんどである。児島らは、図-2.14に示すようなボックスフロー試験装置を用いて、水中コンクリートの流動性評価を試みており[36]、西林らは、さらに流動抵抗となる鉄筋などを含む各種の試験装置を用いて、評価手法の確立を試みている[48]。児島らは、図-2.15に示すようなボックスフロー速度の経時変化も測定し、この曲線を指数関数として処理しており、このように経時変化曲線を定量

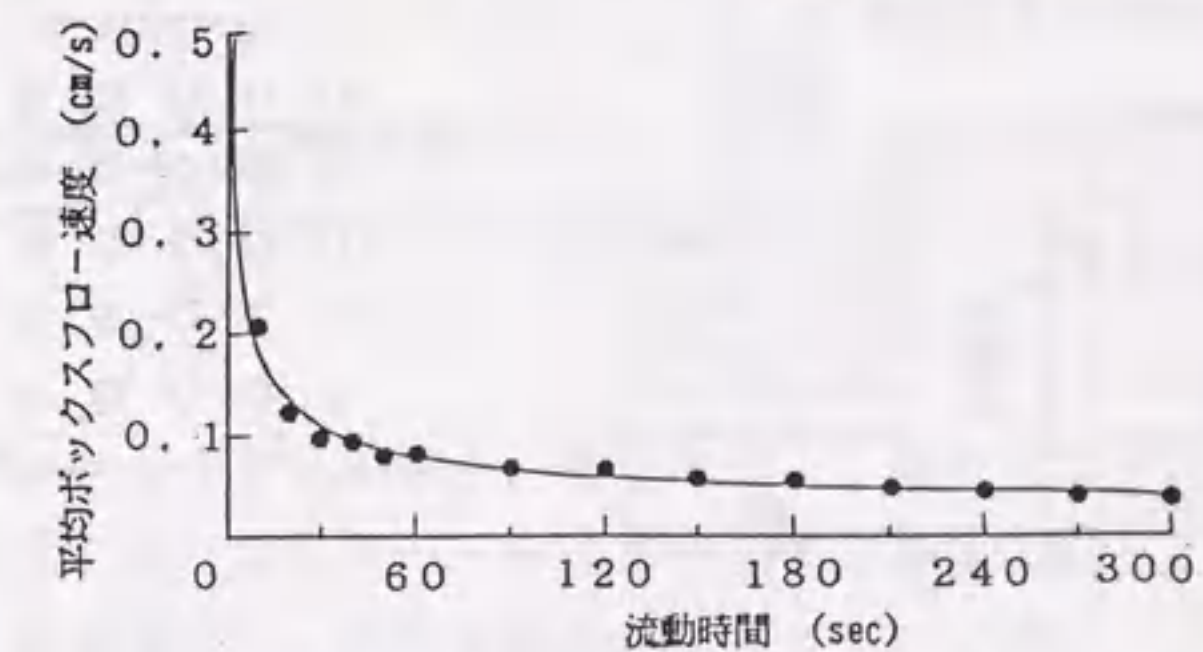


図-2.15 ボックスフロー速度の経時変化[36]

的に評価についてしている。

しフロー試験のレオロジー的意味および解析結果は、4.2.3節において述べる。

(3) 充填性試験

フレッシュコンクリートの充填性を判定する手法として、最も直接的で簡単なものは、模型実験による方法であるが、坂田らは、石粉を用いた高流動コンクリートの流動性評価に、小型のモデル型枠を用い、打設後の試料上面の高低差によって、定量的な評価を行っている[49]。図-2.16および図-2.17に、それぞれ坂田らの実験で用いた充填性試験装置の概要およびコンクリートの充填状況を示す。この実験では、石灰石粉を最大 $313\text{kg}/\text{m}^3$ 使用して、流動性と材料分離抵抗性を高めているのが特徴である。充填性を評価する試験としては、汎用性に欠ける試験ではあるが、直観的にもわかりやすい試験であり、単位水量や石灰石粉の混入量の影響などが定量的に評価されている点なども、今後各種の実験を行う際の貴重なデータとなるものと思われる。

上記のような直接的な試験としフロー試験のように抽象化された試験の中間的なものとして、比較的複雑な形状のコンシステンシー試験が考えられる。佐原らは、図-2.18に示したL字管試験装置などを用いて、高流動コンクリートの流動性の評価を試みている[50]。これらの試験装置の持つ意味を、流動性と分離抵抗性に大別し、施工性の概念を示したのが図-2.19、具体的にL字管試験値とスクリーニング試験値をとったものが図-2.20である。増粘剤量とスランプフローの範囲を広く取ると、流動性を表す曲線と分離抵抗性を表す曲線の交点を結ぶ曲線は、上に凸の関係になると考えられ、この曲線のピーク点は、

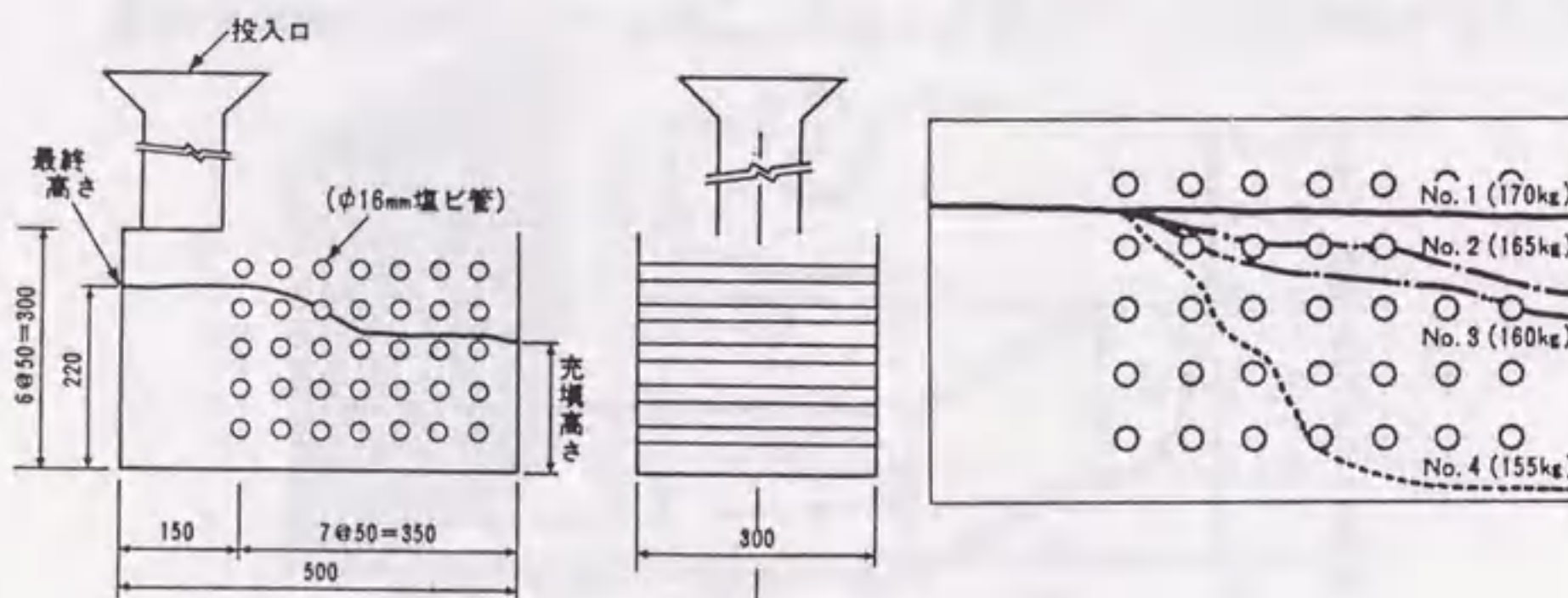


図-2.16 充填性試験装置[49]

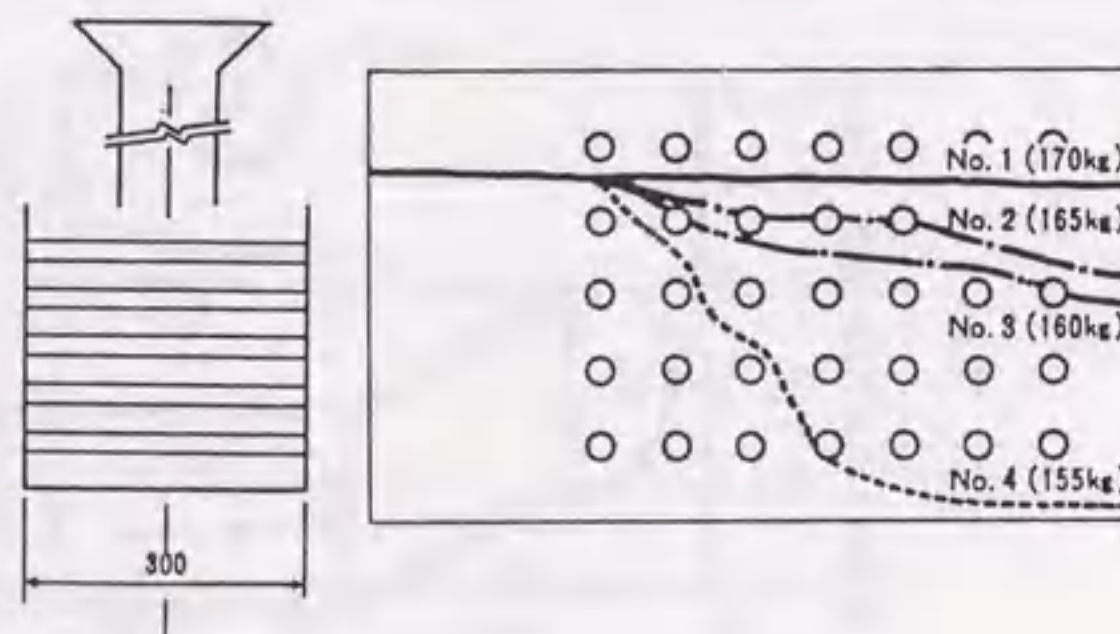
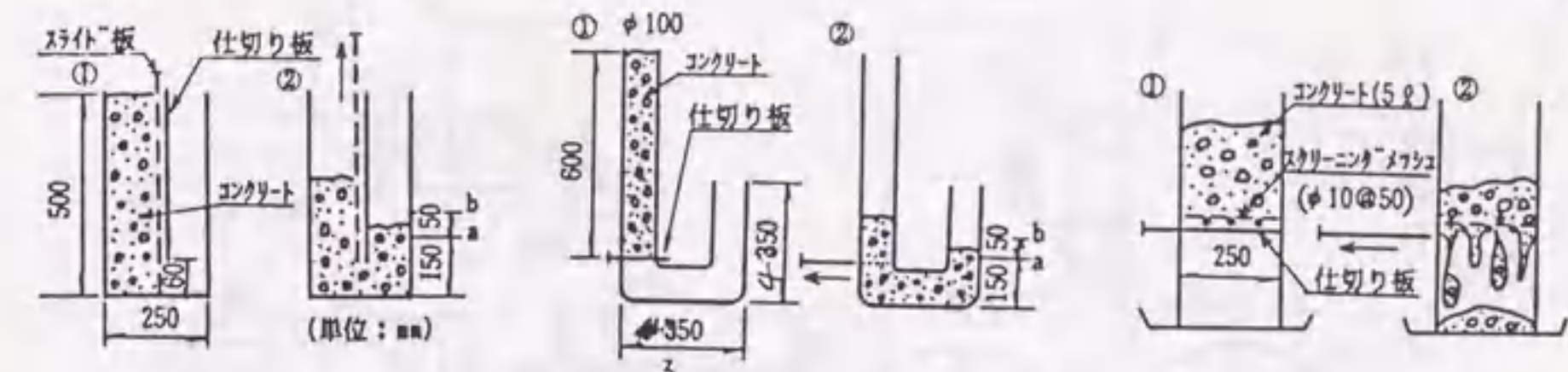


図-2.17 充填性試験結果の一例[49]



(a) ボックス試験

(b) L字管試験

(c) スクリーニング試験

図-2.18 各種ワーカビリティ試験装置[50]

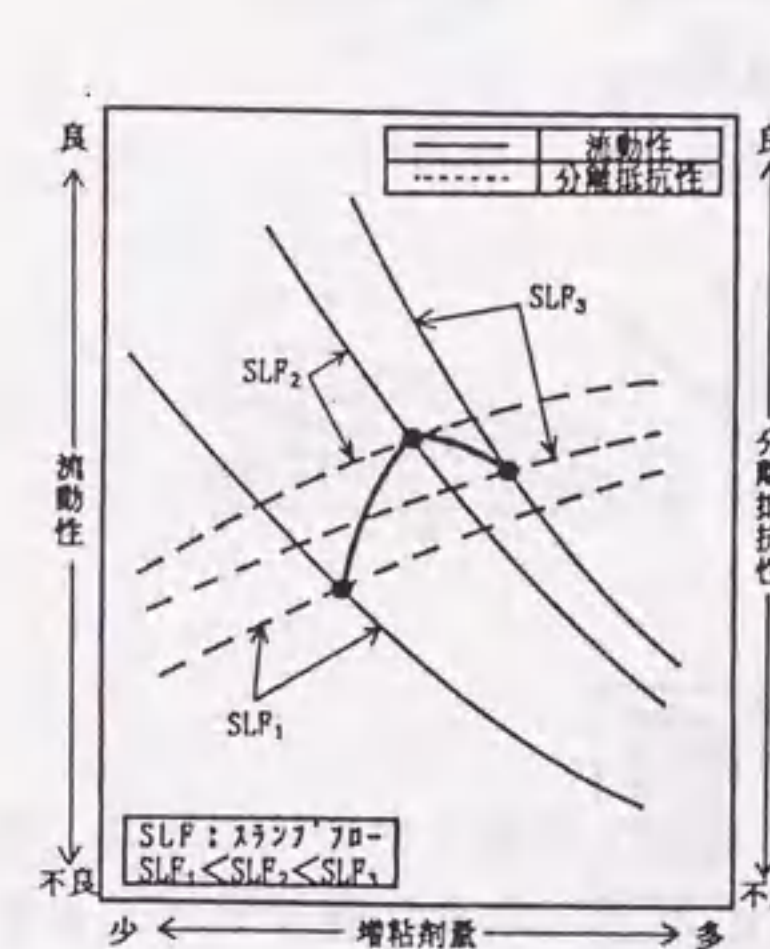


図-2.19 ワーカビリティの概念[50]

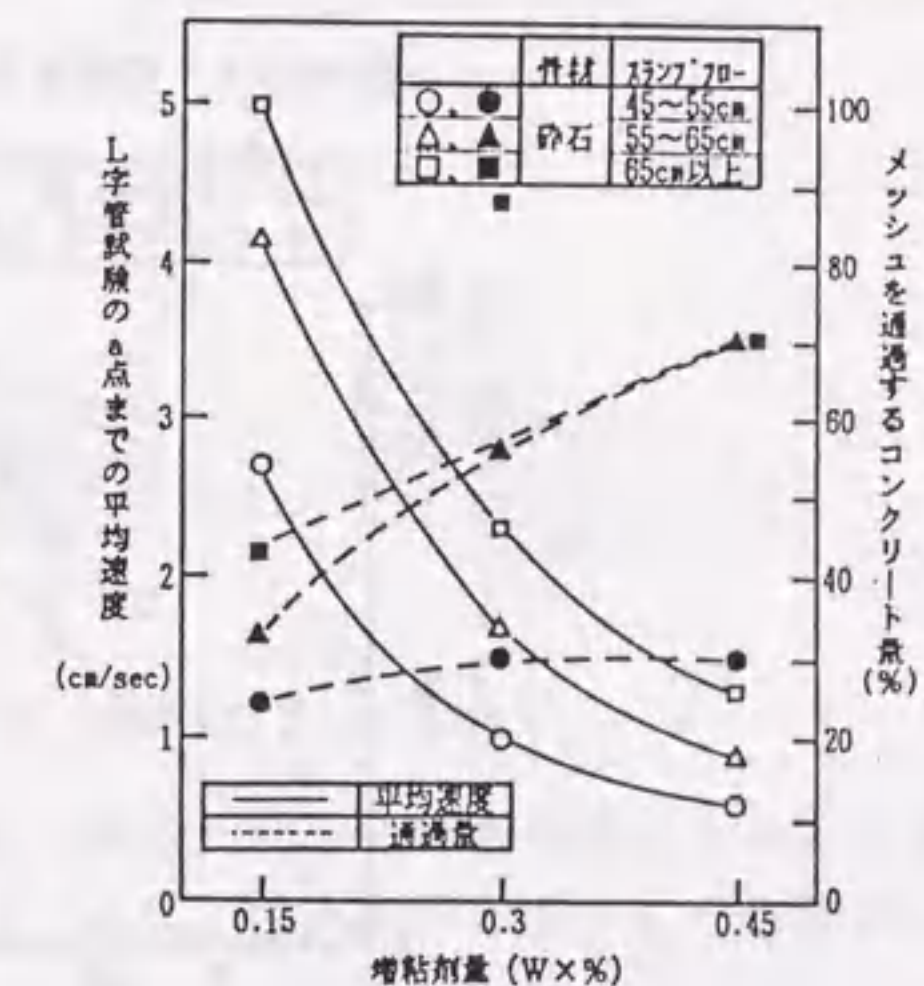


図-2.20 L字管試験とスクリーニング試験結果の関係[50]

ある一つの割合に対して、高流動コンクリートの充填能力が最大となるような、スランプフローと増粘剤の組合わせを与えている。

(4) 流下試験

JロートやPロートなどを用いた、各種のロート流下試験があるが、近松らは、図-2.21に示すようなOロートを基本形とする各種のロートおよびボックスを用いた流下試験を行い、その流動挙動によってコンクリートのコンシステンシーの定量的な評価を行っている[51,52]。開口部に鉄筋を配置した方が現実的であるが、図-2.22に示す実験結果によれば、鉄筋の有無は流下時間にこそ

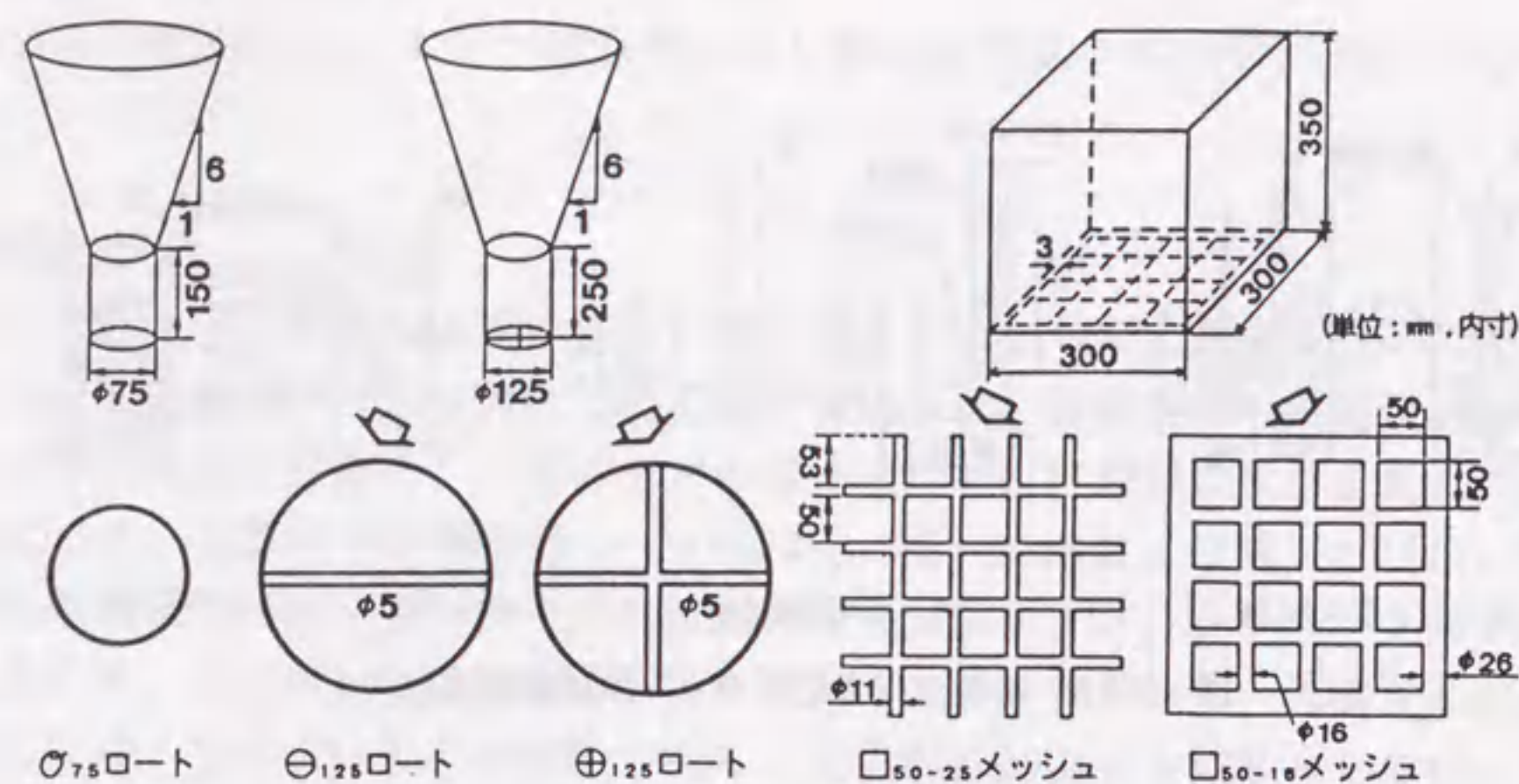


図-2.21 各種流下試験装置[51]

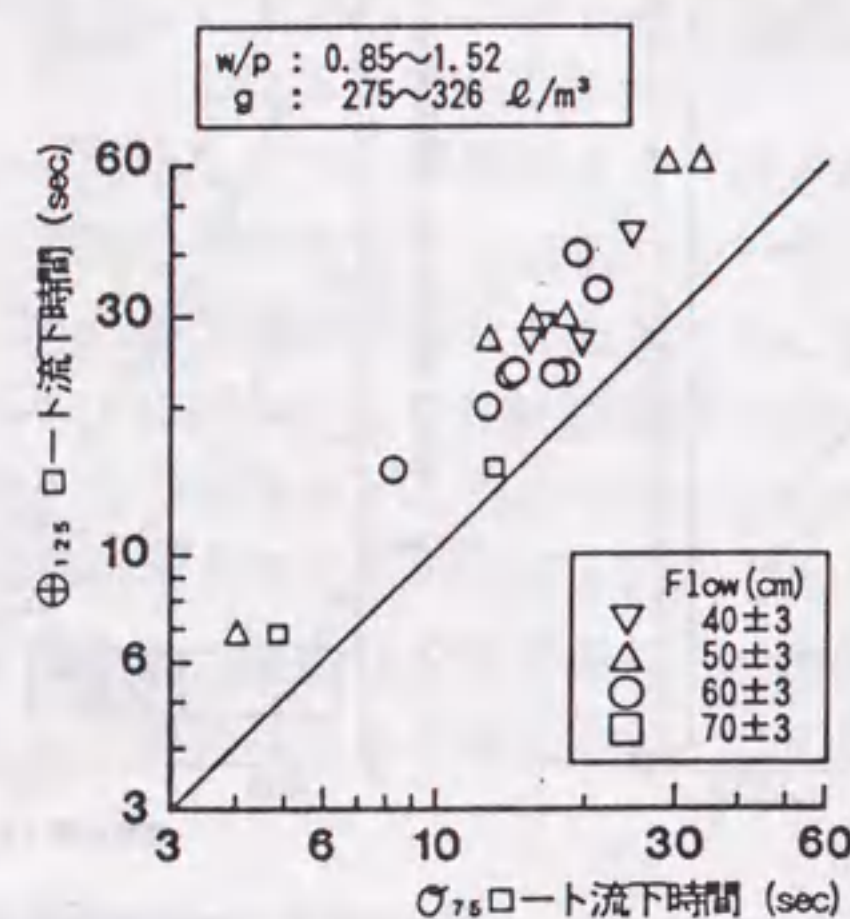


図-2.22 ロート流下試験結果の一例[51]

影響するが、それら是对数グラフ上で線形に対応しているため、試験を簡便にする意味からも、鉄筋を持たない単純な形状の方が望ましいと思われる。配筋されていない場合は、コンクリートを均質な材料と仮定していると考えられるが、実際には粗骨材のインターロックが流動挙動に影響し、狭い空間を通過する能力を測定する試験として、十分な性能を有しているものと考えられる。

一方、ロート試験を2次元化したV型ロート試験が小沢らによって提案されている[53]。V型ロート試験の概要を図-2.23に示す。小沢らは、図-2.24に示すような施工シミュレーションを行ってランクづけたコンクリートの充填性

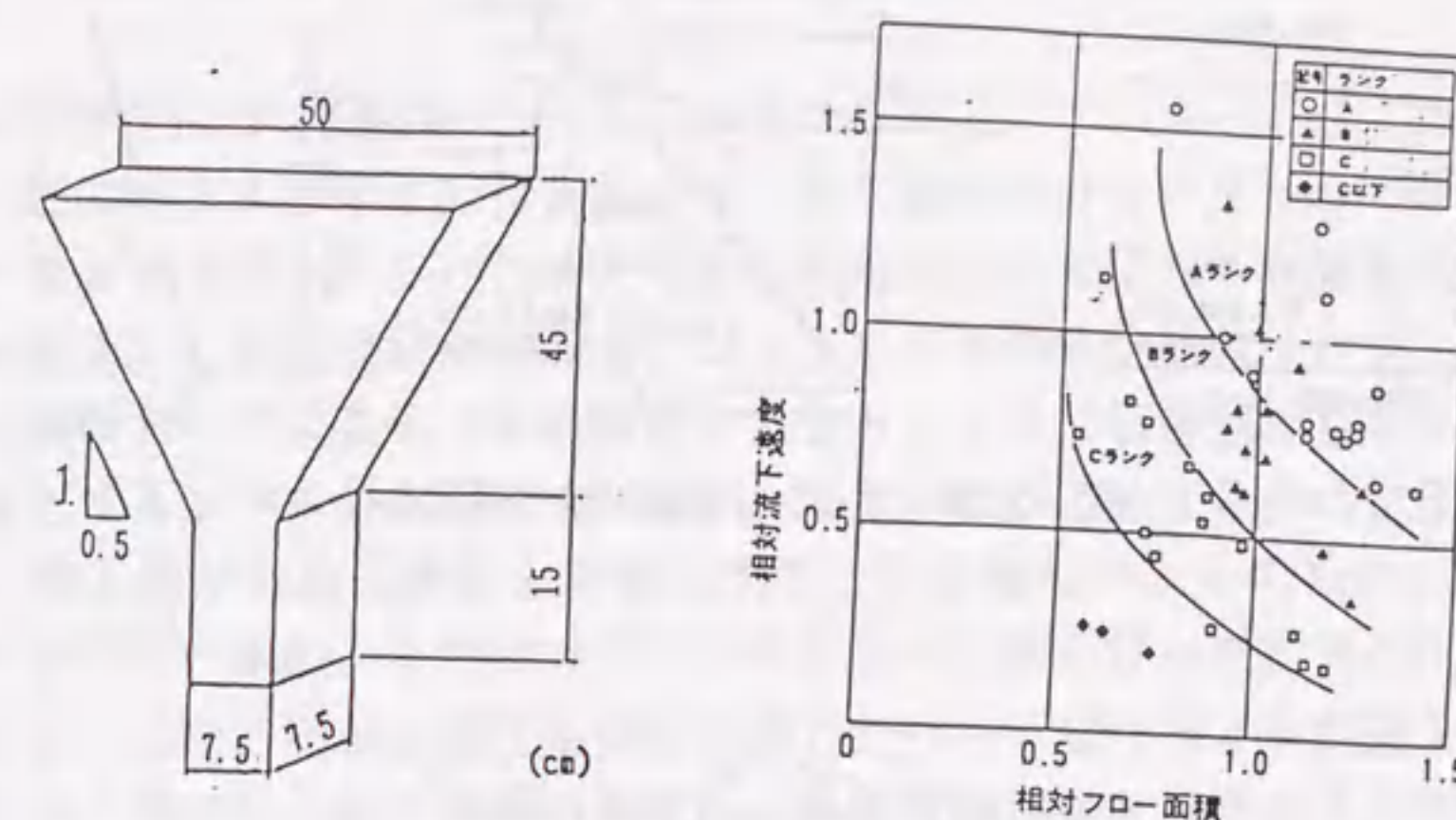


図-2.23 V型ロート試験[53]

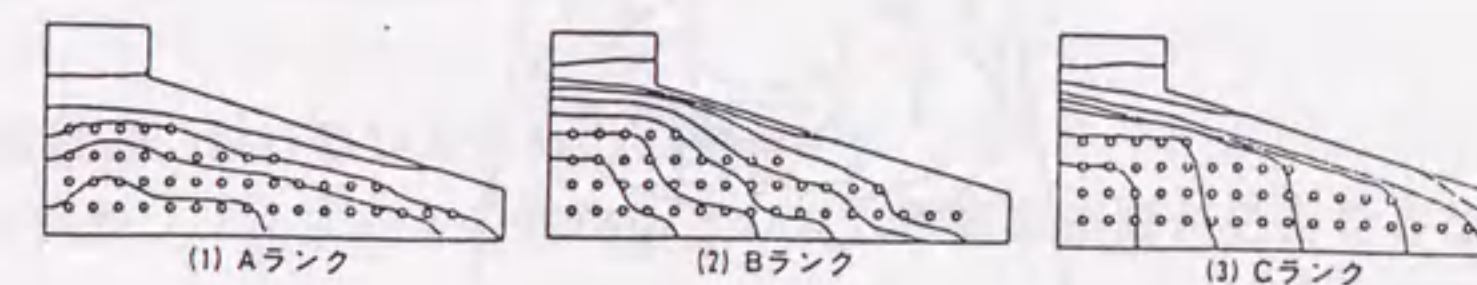


図-2.24 充填性のランク[53]

を、スランプフロー値および流下時間を無次元化した評価指標によっても判別することが可能であり、充填性ランクごとに、図-2.23に示すような分布が得られるとしている。

寺西らは、独自のメッシュ透過型の流下試験を提案し、レオロジー定数と関係の深い値 T_y と I を求めることに成功している[54]。 T_y と I は、図-2.25に示すように、単位時間に透過するコンクリートの重量(ΔW_L)とメッシュ上のコンクリートの重量(W_M)の関係から導かれる値であり、試料の流動挙動を連続的に測定することから、精度のよい手法といえる。

(5) V F 試験

既存の試験方法を流用した手法として、中島らが、ハイパフォーマンスコンクリートの調合決定の際に、図-2.26に示すV F試験を静的な状態で行い、吐出量によって流動性を評価しているが[55]、時間項を含まない静的な実験で

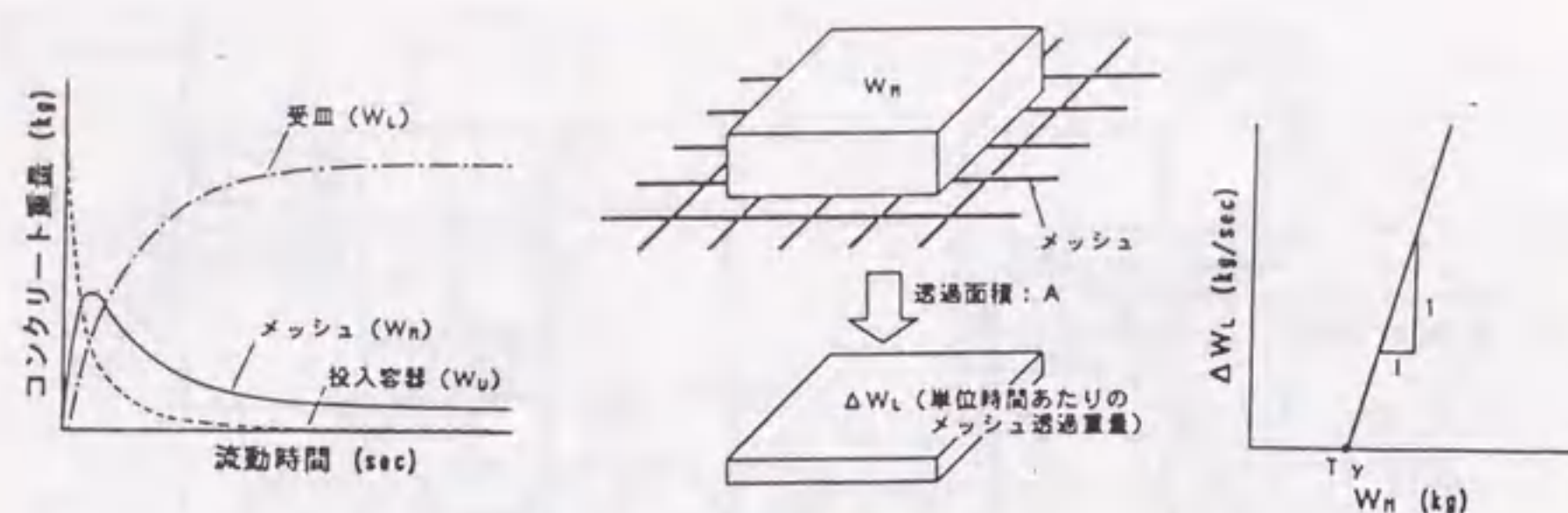


図-2.25 メッシュ透過試験の概念[54]

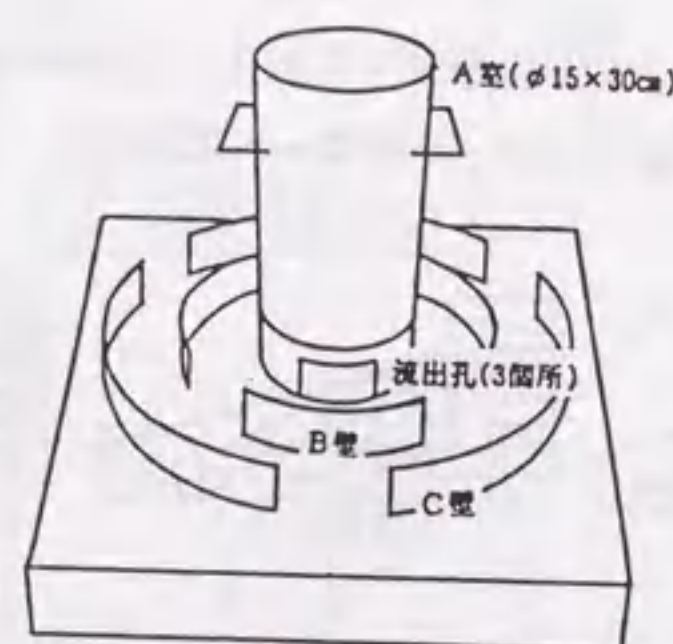


図-2.26 VF試験装置[55]

は、降伏値に関係した材料不分離性の一部を示しているに過ぎないものと考えられる。ただし、自重だけでシリンダ外周の障害物を十分に回避しうるような、高い粗骨材連行性とセルフベリング性能を有するコンクリートは、現在報告されている範囲においては、優れた高流動コンクリートであると判定できることから、本試験法が必要条件としての意味を持つものと思われる。

2.2.3 施工設計法

施工設計法[11,12]は、材料性質と施工方法を評価し、合理的な施工システムを選択するための手段である。施工設計法には、コンクリート工事の他に、鉄筋工事や型枠工事など多くの工事との連携も含まれているが、狭義としては、コンクリートのワーカビリティを判定するための手段と位置づけることもできる。図-2.27に、施工設計法の中でのワーカビリティ判定の概念を示す。ワーカビリティを判定するためには、フレッシュコンクリートのコンシステ

ンシー、施工条件などを入力値として流動解析を行い、出力された流動情報が要求条件を満足するかどうかを確認する必要がある。

(1) 施工設計法の入力条件

施工設計法に入力する条件としては、施工条件やコンクリートのコンシステンシーなどが挙げられるが、「入力」の段階においてこれらを定量的に捉える必要がある。しかし現在のところ、コンクリートのコンシステンシーをレオロジー定数によって定量化する段階にとどまっており、調合表からレオロジー定数を算定するレベルには至っていない。また同様に、施工条件の定量化についても、施工図から施工条件を定量化することは難しい。そのため、現段階では、レオロジー試験、またはコンシステンシー試験を行った結果を試料の入力情報とし、また、簡単な施工条件を模擬したワーカビリティ試験より得られた結果から推定した施工指数とも言うべき定量的な値を施工の入力情報とすることが最も現実的な対応と考えられる。施工性に関する定量的な値の定義方法などについては、6.2節において述べる。

(2) 施工設計法におけるソルバーの役割

施工条件やコンクリートの物性などの入力情報の整備が必要なことは、上述

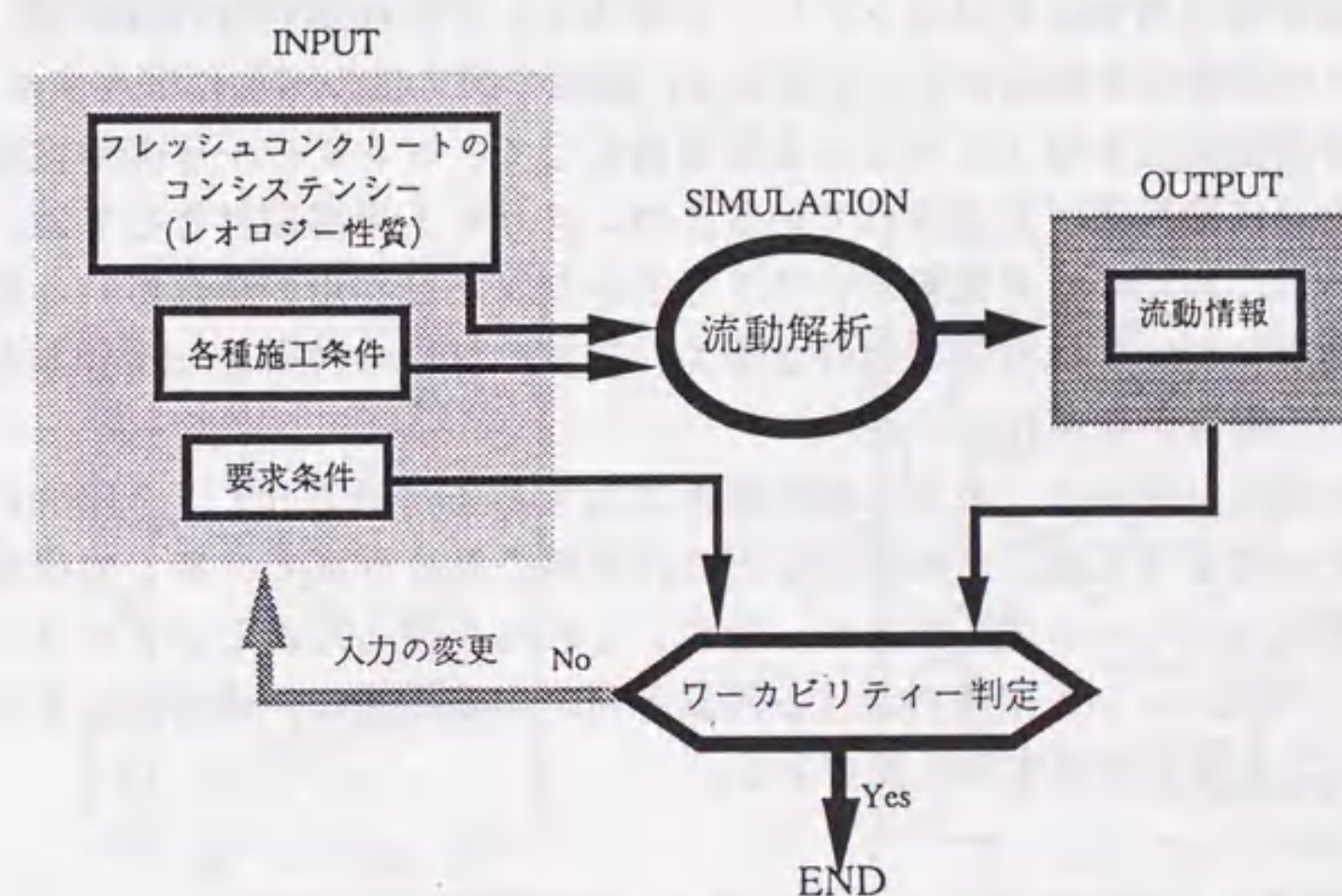


図-2.27 施工設計法の概念[11,12]

したが、施工設計法の核となるソルバー（解析手法や理論式など）の整備も欠かすことのできないテーマである。

解析を行うためにはコンクリートの構成則を解明する必要があるが、ビンガムモデルだけでは表現できない現象が多い。物性値の測定とともに、フレッシュコンクリートの構成則を明らかにすることも重要な課題と考えられる。ポンプ圧送時の圧力損失は、フレッシュコンクリートのすべり抵抗性が、また高流動コンクリートの鉄筋間通過性は、モルタルの付着抵抗性などが問題になると考えられ、これらの現象に関しても、定量的表現を行うことが可能なモデルを構築する必要がある。

2.3 高強度コンクリートのフレッシュ時における性状に関する研究

コンクリートの早強化と高強度化に対してさまざまな努力と改善が重ねられてきた。セメントによる早強化に対して、早強ポルトランドセメントから超早強ポルトランドセメント、さらに超速硬セメントが開発され、また、常圧蒸気養生やオートクレーブ養生などの新しい養生方法も開発された。

シリカフュームや高炉スラグ微粉末などを混入したコンクリートを、従来の流動化剤では十分流動化させることはできなかったが、高性能減水剤や高性能AE減水剤の出現により、微粉末量が多いコンクリートも製造できるようになった。粉末量の増加またはコンクリート全体としての粒度分布の調整は、コンクリートの緻密化を促進することになり、強度や耐久性の増加に寄与する。

近年、分離抵抗性を増大させることを目的として、コンクリートの粘性を増加させるために微粉末が多用されている。コンクリート用混和材としては、シリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどが用いられているが、これらの性質については未知の部分が多く、複数の材料を併用した場合なども含めて多くの報告がなされている。

これらの新しい材料は、近年の新技术と併用することによって、合理的に利用することができる反面、その作用などには不明な部分が多く、多くの研究者によって研究されている段階にある。特に、これらを使った新しいタイプのコンクリートのフレッシュ状態における品質を判定する手法は、まだ確立されていないため、早急に対処する必要がある。

2.3.1 高強度コンクリートのフレッシュ時の一般的性状

高強度コンクリートは、高い圧縮強度を持つばかりでなく、フレッシュ時においても、通常のコンクリートとは異なる性状を示す。水結合材比が小さいた

め、結合材量を減らす意味から、一般に単位水量は 160kg/m^3 前後と小さいが、高性能AE減水剤を添加しているため、そのスランプ値は $18\text{cm}\sim 24\text{cm}$ 程度と大きいものが多い。

単位結合材量が多く、また場合によってはフライアッシュなど水硬性に寄与しない粉体を混入する場合もあることから、粘性が高く、また材料分離抵抗性が高い場合が多い。フレッシュコンクリートのレオロジー定数の分布する領域を図-2.28に示す[56]。同図に示すように、普通コンクリートに比べて、水セメント比(W/C)が30%程度の高強度コンクリートの降伏値は小さいものの、塑性粘度が大きく、施工性を降伏値のみによって判定することが難しいことは明らかである。

塑性粘度が大きくなることによって最も問題となるのは、ポンプ圧送時における圧力損失が考えられる[57]。図-2.29は、ポンプ圧送理論より得られたポンプ圧力損失と圧送距離の関係の一例である[58]。同図に示されるように、普通コンクリートの場合に比べて高い粘性を持つ高強度コンクリートでは、同一の降伏値（同一のスランプ値）であっても、高い圧力損失が生じる結果となっており、また、これは筒元と筒先では圧力損失の度合いが異なることを示している。なお、ポンプ圧送時のフレッシュコンクリートの変形に関する理論的研究に関しては、2.5.2節で述べる。

2.3.2 使用材料の影響

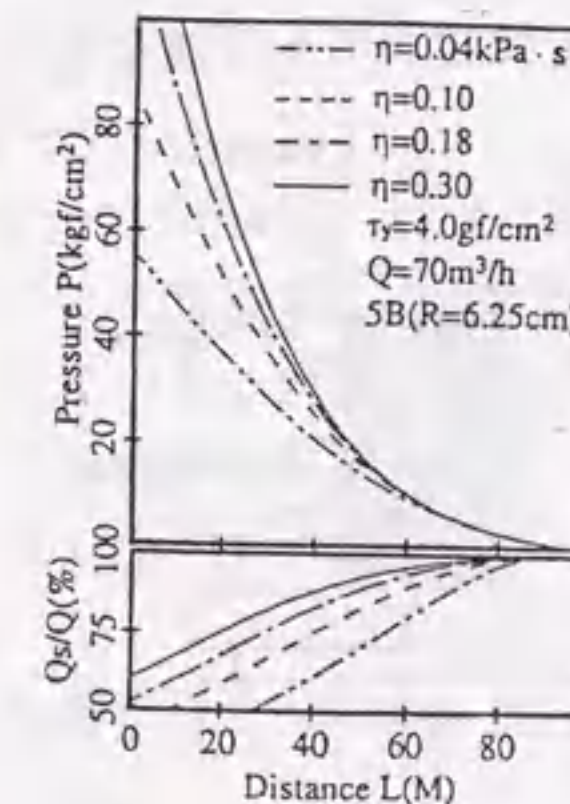


図-2.28 レオロジー定数の分布[56]

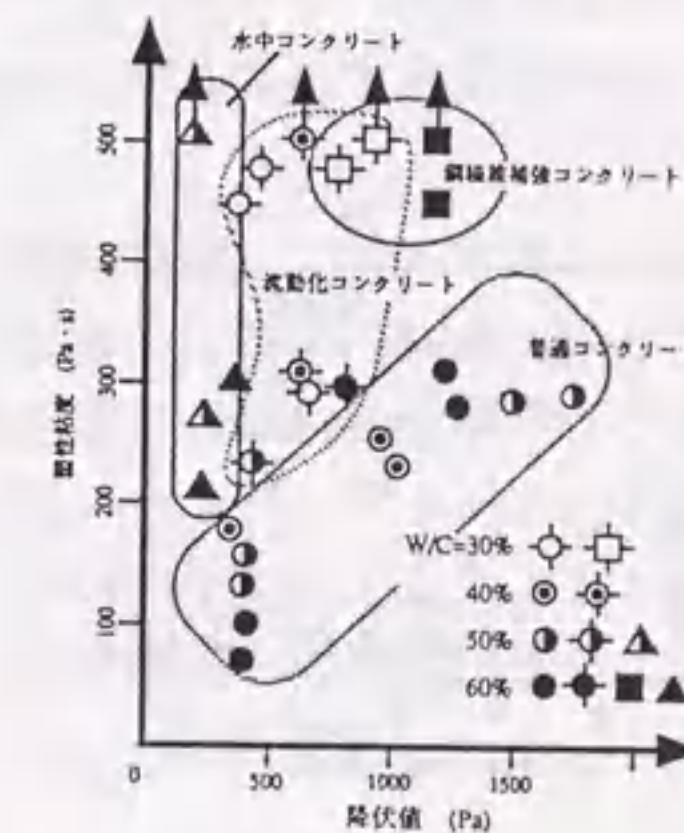


図-2.29 ポンプの圧力損失の分布[58]

(1) セメント

南条らは、市販セメントを細、中、粗粉に分級し、これらを合成することによって、市販セメントに比べて粒度の粗いセメントを作り、モルタルによる実験を行った。この結果によれば、セメントの粒度分布を粗い側に拡大することにより、低水セメント比における流動性を改善しながら、市販セメントと同等の強度が得られるセメントが開発できると報告している[59]。

名和らは、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの流動性、断熱温度上昇（図-2.30参照）および強度発現について検討し、高流動・高強度コンクリートの製造の可能性を考察した結果、高ビーライト系セメントと高性能AE減水剤を組み合わせたコンクリートは、スラグを添加した2成分系の高流動コンクリートとほぼ同程度の充填性を示すとともに、普通セメントに比べ断熱温度上昇量が小さく、かつ水和初期の温度上昇速度も小さいことなどを明らかにしている[60]。

(2) シリカフューム

シリカフュームは、フェロシリコンやシリコンメタルの製造時に発生する排ガスを集塵することによって得られる超微粒子の産業副産物であるが、フェロシリコンなどを製造するのに大量の電力を必要とするため、フライアッシュや高炉スラグ微粉末のように大量かつ安価に供給されるものではない。比重は2.1~2.2程度のものが多いが、単位容積重量は250~300kg/m³と普通ポルトランドセメントの約1,200kg/m³に比較して著しく小さい。粒径は1μm以下の球形で、平均直径は0.1μm程度である。このシリカフュームをセメントペーストに混入することにより、シリカフュームがセメント粒子の間に入り込んでボールベアリングの作用をすることや、セメント粒子で囲まれて水で満たされた空

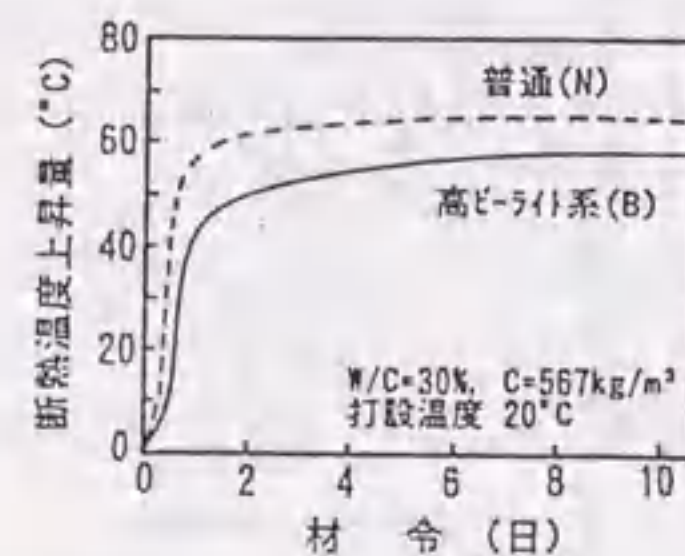


図-2.30 材齢と断熱温度上昇の関係[60]

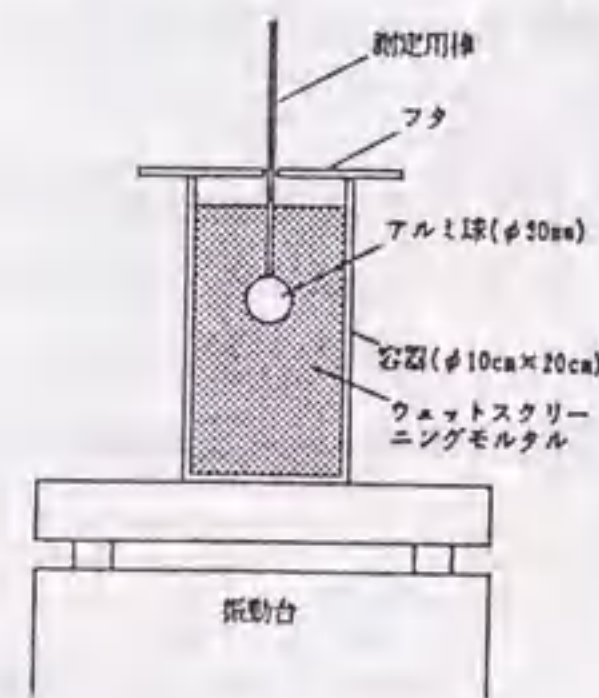


図-2.31 模擬粗骨材沈下試験装置[62]

隙にシリカフュームの超微粒子が侵入して空隙を充填し、水を追い出すため、流動性が改善される。シリカフューム置換率が增大すると粘性が著しく増加し、またセメント粒子間に存在するシリカフュームの粒子と水酸化カルシウムが極めて短時間に反応して、水和生成物であるゲル層を作り、このゲル層がブリーディング水の移動を抑制するため、ペーストレベルにおける材料分離抵抗性が高まると言われている。

三井らは、高強度コンクリートを対象として、銘柄、工場および品質形態の異なる14種類のシリカフュームの化学成分や物理的性質の違いを検討し、シリカフュームの品質の違いと、シリカフュームを使用した高強度コンクリートの流動性や圧縮強度との関係について検討している[61]。その結果によれば、シリカフュームの諸物性のうち化学成分であるSiO₂含有量や炭素量などは、欧米の規格に定められたような範囲の品質を有する場合、高強度コンクリートの性質との間には特に有意な相関関係は認められなかったが、シリカフュームに超音波による外力を加えたときの1μm以下の粒子量の割合を指標として表された分散性は、フレッシュコンクリートの性質や圧縮強度と密接に関係づけることができると述べている。

寺西らが実施した材料分離を定量的に把握するための模擬骨材沈下試験（図-2.31参照）によれば、水結合法比30%以下の超高強度コンクリートにおいて粘性を抑えるためには、シリカフュームを5~10%程度混入することが有効であり、必要なシリカフュームの置換率は水結合法比が低くなるほど大きくなり、圧縮強度はシリカフュームを10%以上置換しても大きくは増加しないことも考え合わせ、シリカフュームが圧縮強度と粘性に効果的に作用する置換率を選定する必要があると報告している[62]。

(3) フライアッシュ

フライアッシュは、ボゾランを代表する混和材で、フライアッシュが日本のコンクリート構造物に適用されたのは、建築物としては1952年の鉄道会館が最初とされている。現在、国内の石炭火力発電所では微粉炭燃焼ボイラーが主流であり、発生する石炭灰は、フライアッシュ、シンダーアッシュ、クリンカーアッシュに分類されている。コンクリート用混和材としてのフライアッシュは、フライアッシュとシンダーアッシュの混合源粉を粗粉と細粉の二分級して得られた細粉部分である。JIS A 6201によって比表面積は320m²/kg以上と定められている。

石井らは、分級フライアッシュを水結合法比25~30%の高強度コンクリートに用いた場合の諸特性の改善効果をシリカフューム、高炉スラグ微粉末の場合

と比較し、また、生コンプラントにおける実機混練試験および実大供試体により施工性と品質改善効果を確認している[63]。その結果によれば、低水セメント比のコンクリートに分級フライアッシュを混入すると粘性が小さくなること、シリカフュームにも同様な効果がみられるが、高炉スラグ微粉末の場合は若干粘性が高くなる傾向があること、分級フライアッシュには、球形微粒子による減水効果があり、セメント単味の調合と比べて同一スランプを得るための単位水量を減らすことができること、などを指摘している。

磯谷らは、結合材の調合比が超高強度コンクリートの品質に及ぼす影響について検討している[64]。図-2.32にVF試験値と変形度（スランプフロー値をスランプ値で除した値）の関係を示す。VF試験値の下がり度が20cm以上であれば、十分な分離抵抗性が認められ、このときの変形度によって簡易に判定することが可能であると報告している。セメントの一部をフライアッシュあるいはスラグで置換した場合、シリカフュームのみのコンクリートと比べてワーカビリティが改善されること、フライアッシュで置換した場合はスラグの場合に比べてモルタル粘性が低くなり、扱いも容易になること、置換率が大きくなるとコンクリートの粘性は低下する傾向にあるが、逆に20%になると粘性は増加し、特にスラグで置換した場合、シリカフュームのみの場合より粘性は増加すること、VF試験によって、振動下におけるコンクリートの流動特性および骨材の分離が判断できるが、変形度を2.7程度にすれば骨材分離を防止できること、ワーカビリティを改善するためには、フライアッシュおよびスラグともに、その置換率は5~15%がよいこと、などを明らかにしている。

(4) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグは、高炉における副産物である溶融スラグを、多量の水あるいは

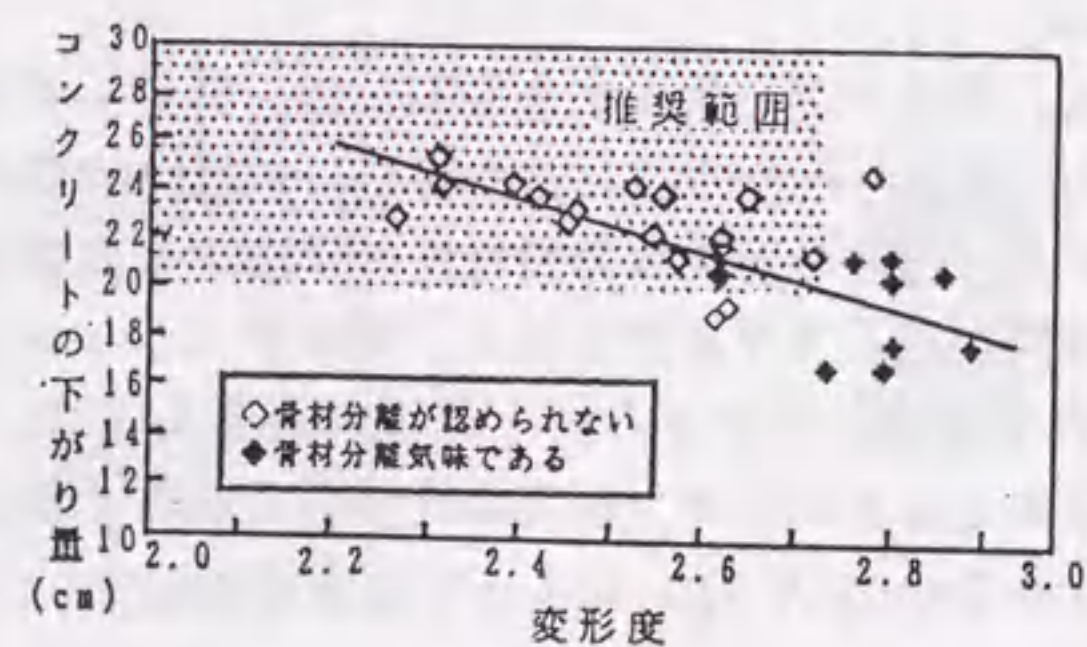


図-2.32 VF試験値とスランプ試験値による材料分離抵抗性の評価の一例[64]

空気によって高温状態から一気に急冷したものであり、これによってスラグは結晶化することなく固化した粒状態になり、これを微粉碎し調整したものが高炉スラグ微粉末である。高炉スラグ微粉末の銘柄によっては、石膏を添加したものがある。高炉スラグ微粉末の粉末度は $275\text{m}^2/\text{kg}$ 以上に規定されており、一般に $340\sim 450\text{m}^2/\text{kg}$ 程度であるが、 $1,200\text{m}^2/\text{kg}$ 程度にまで微粉碎されるケースもある。単位容積重量の規格値は $2.8\text{ton}/\text{m}^3$ 以上で、一般に $2.90\sim 2.95\text{ton}/\text{m}^3$ の範囲にある。

高炉スラグ微粉末のセメント置換率を0~70%まで変化させて実験を行った西林らの結果[65]によれば、図-2.33に示すように、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるにつれてスランプの経時変化に及ぼす細骨材率の影響が大きくなることがわかる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が大きい方がスランプロスが大きくなる時間が短くなっており、高炉スラグ微粉末を利用する上で十分

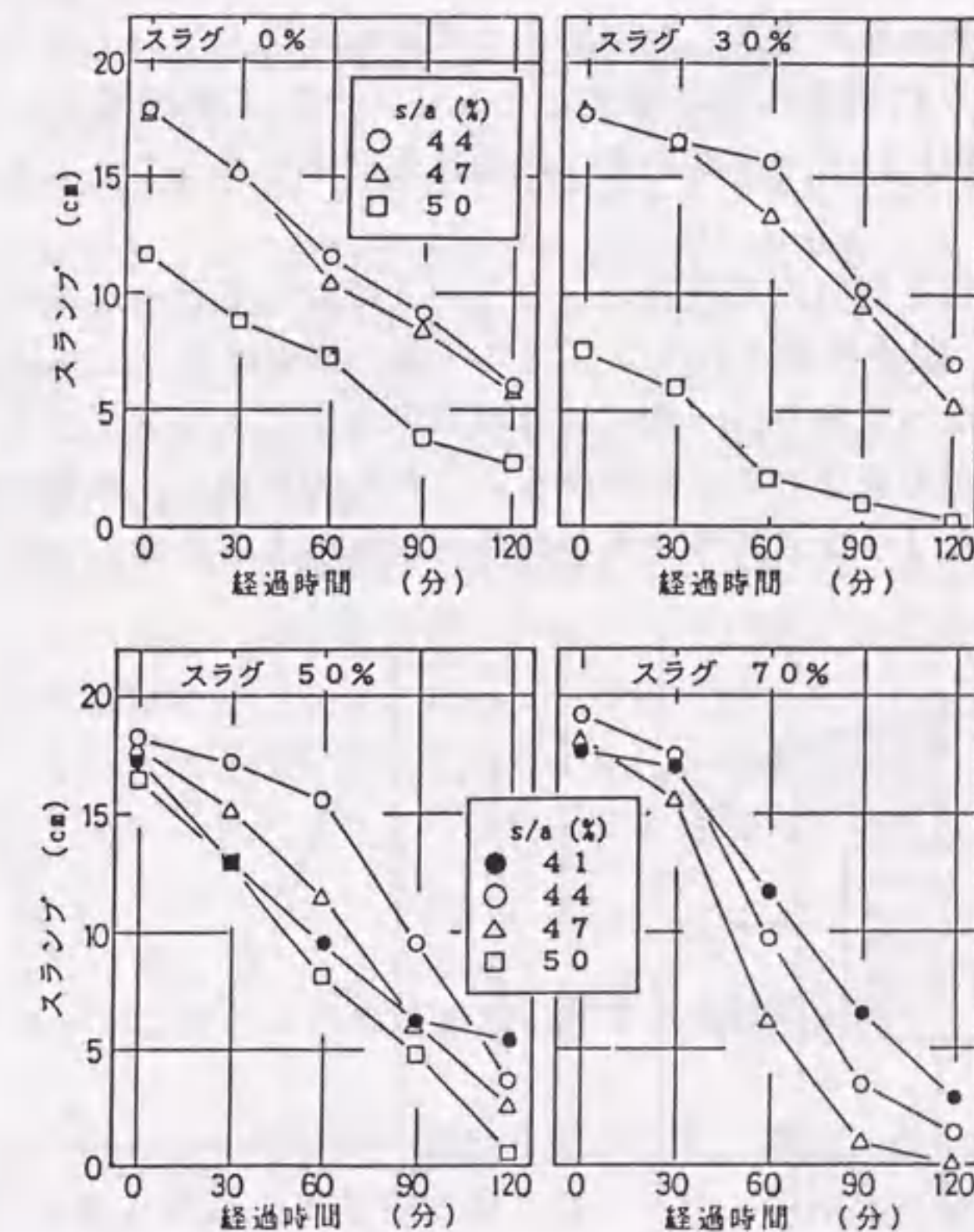


図-2.33 高炉スラグ微粉末混入量とスランプロスの関係[65]

注意しなければならない。

三浦らは、超微細なスラグ粉末を用いたコンクリートの凝結・強度発現性状に影響を及ぼすと思われる凝結・硬化過程の温度条件を取り上げ、実験的に検討した結果、粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートの強度特性は従来の高炉セメントを用いたものとは異なり、材齢初期における強度発現がかなり大きくなるとともに、材齢28日以降の強度増進も比較的大きくなることなどを明らかにしている[66]。

(5) 細骨材率

コンクリートの細骨材率は、スランプ値や空気量を調整するためのパラメータとして用いることが多いが、高性能A E減水剤など、空気量や減水効果を自由にコントロールすることの可能な混和剤が出現したことにより、細骨材率を経験則によって最適化させることが難しくなっている。西林らの研究によれば、高性能A E減水剤を添加した高炉スラグ微粉末混入コンクリートでは、図-2.34に示すように細骨材率の増加とともにスランプ値が減少していくものの、これらの曲線にはピークがあり、最適細骨材率が存在することを示している[65]。

一方、石灰石粉を用いた高流動コンクリートに対して行った綾野らの実験結果[67]によれば、細骨材率とスランプフロー値の関係は図-2.35に示すように下に凸の曲線となっており、一概に細骨材率の大小とスランプフローの大小を関係づけることができないことがわかる。これらの挙動は、細骨材率が増加することによりマトリックスモルタル中の骨材が増加するため、一概に議論する

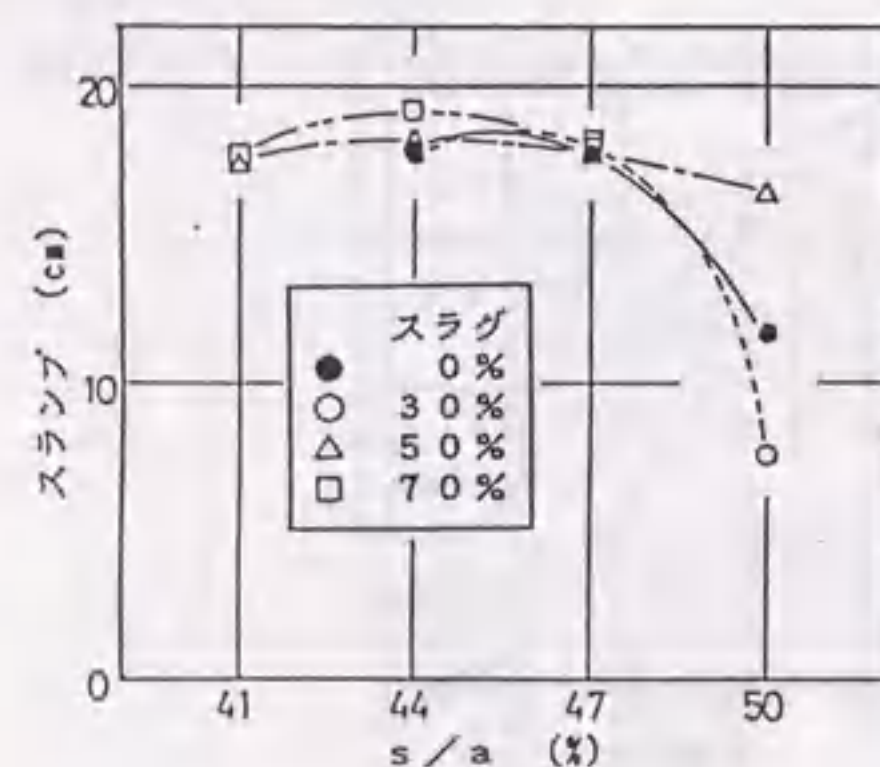


図-2.34 スランプ値と細骨材率の関係[65]

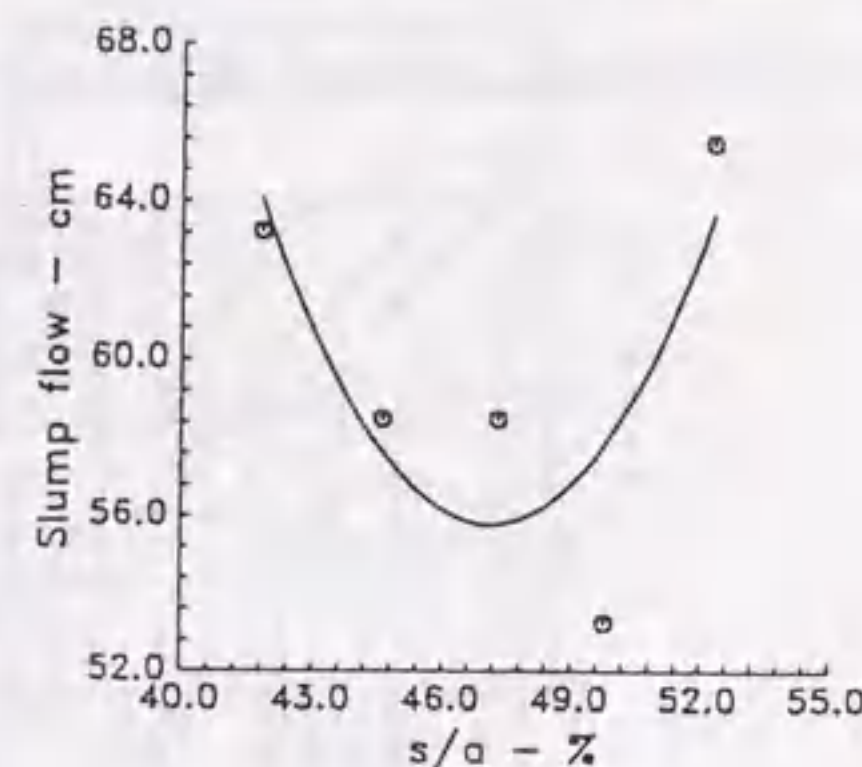


図-2.35 スランプフロー値と細骨材率の関係[67]

ことは難しい。マトリックスモルタルの調合を一定にした条件で行われた実験報告は少ないが、4.3節で述べるように、同一マトリックスモルタルに対して粗骨材を単純増加したコンクリートでは、粗骨材量の増加によりレオロジー定数は増加する[68]。

2.4 フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する研究

昭和40年代に急速に発展したコンクリートのポンプ圧送技術は、いまや完全にルーチンワークとして定着したといえる。コンクリートの長距離圧送や高所圧送について新しい挑戦が繰り返され、実績はより広い分野で積み重ねられている。管内のコンクリートの流動状態も、圧力の実測などから次第に明らかになり、圧送の限界を単位長さ当りの圧送抵抗とポンプの能力から求める方式が提案されている[69]。

現在、コンクリートポンプの機種を選定と配管の検討には、圧送限界だけをチェックする方法がとられている。すなわち、垂直管、テーバー管、ベント管などを圧力損失の実測値を基に、それぞれ等価な水平管の長さに換算して、水平換算距離を計算する。この長さがポンプ吐出圧力と水平管1m当りの圧力損失から計算で求まる最大水平圧送可能距離以内であることをチェックする。圧力損失は、圧送速度とスランプ、管径によって定まるので、上記の計算値が圧送限界内の収まらないときには、ポンプの吐出圧力、管径、コンクリートのスランプ、施工速度などを設定し直す。

この方法の問題点は、圧送負荷のみに着目しているので、閉塞条件のチェックにはなっていないこと、水平換算長さがスランプだけでは代表できないコンクリートの性質の影響を受けることである。本節では、主として高強度コンクリートを対象とした圧送事例を紹介するとともに、可視化手法を用いた解析的研究およびフレッシュコンクリートの管内流動を理論的に考察した研究報告を紹介する。

2.4.1 フレッシュコンクリートの管内流動に関する実験的研究

(1) 高所圧送

高強度コンクリートは一般に高い粘性を持つため、高所・長距離圧送の際に高い圧力が要求され、そのため配管計画やコンクリートの品質管理が重要になる。図-2.36に示すような橋主塔部に設計基準強度が60MPaの高強度コンクリートを圧送した竹内らの報告[57]によれば、圧送高さが40~50m程度の場合、ポンプ車付近の水平管では、管内圧力が普通コンクリートの標準値の20倍

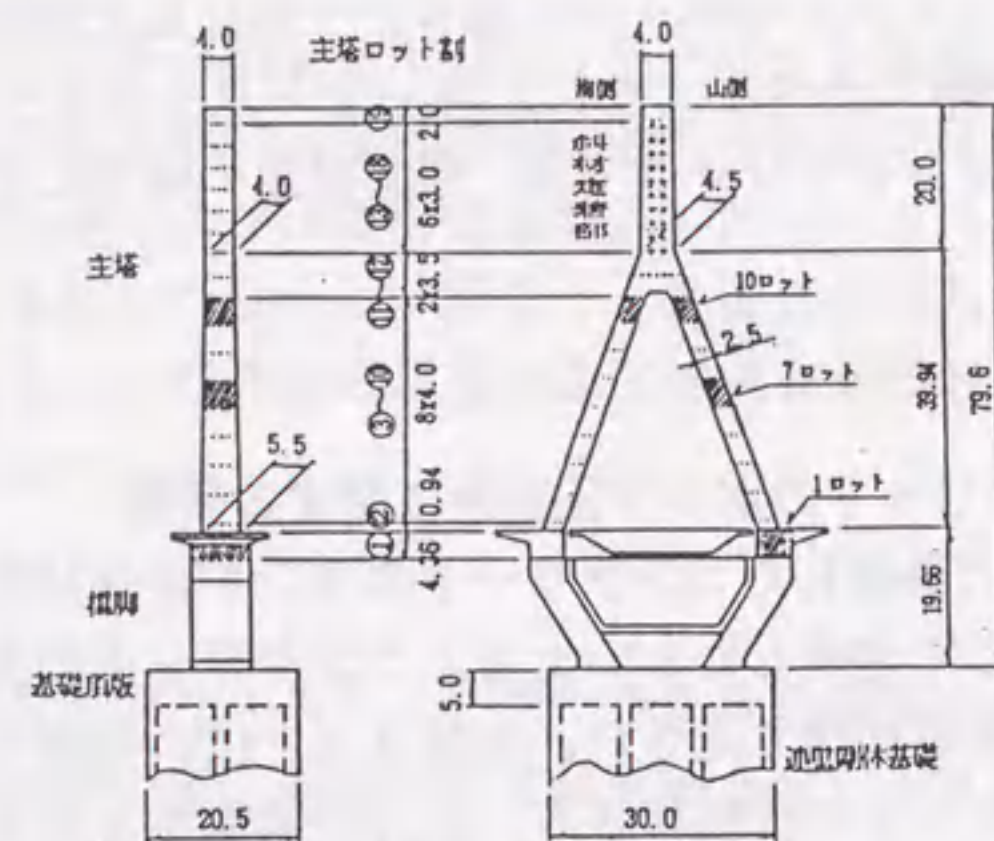


図-2.36 主塔の概要[57]

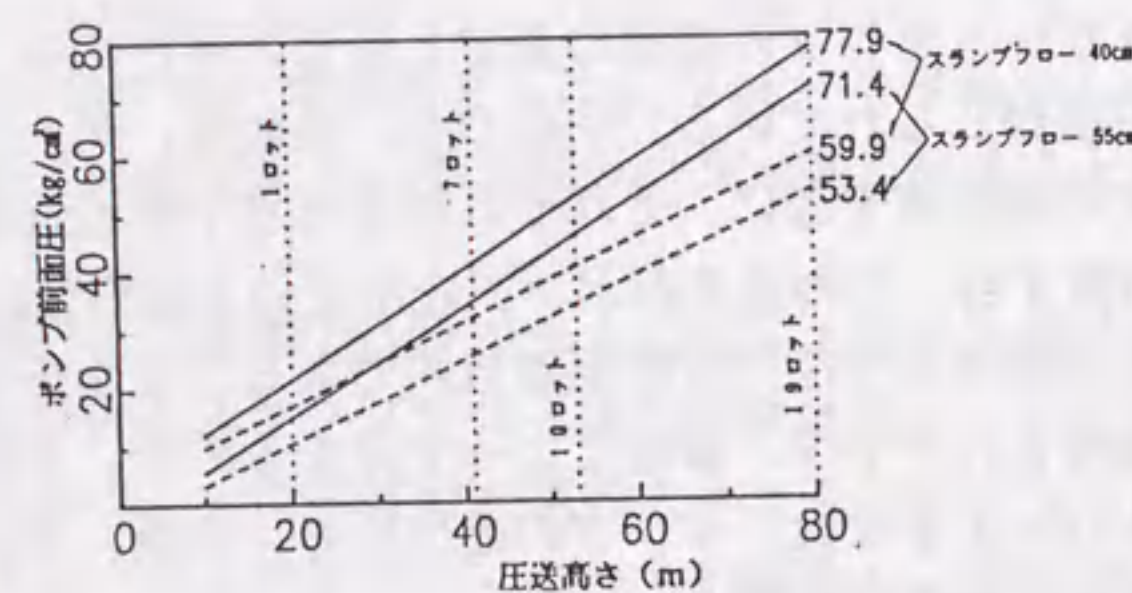


図-2.37 ポンプ圧力損失と圧送高さの関係[57]

に達する場合もあり、全体として、図-2.37に示すような高い圧力が圧送管に加わることが明らかとなった。

軽量コンクリートでは、軽量骨材特有の圧力吸水に伴うコンクリートの品質変化が発生することが予想される[70-72]。和美らが高強度軽量コンクリートを圧送した結果[73]によれば、現状のポンプ車能力としては、圧送能力には不足がないものの、図-2.38に示すようにスランプ値が増減するなどの結果が得られており、その利用には十分な注意が必要であると指摘している。軽量コンクリートの場合は、圧送による影響が特に大きく現れているが、通常のコンクリートの場合でもスランプ値が変動する例が数多く報告されており、圧送距離や圧力が増加するほど、圧送後のコンクリートの品質の確保は重要な課題である。

(2) 管内閉塞

中根らの研究[74]によれば、設計基準強度が120MPaを超える超高強度コンクリートでも、圧送速度を抑えることによって、水平換算距離100m以上を閉塞することなく圧送できると報告されている。しかし、管内閉塞の発生メカニズムや発生条件に関する理論的研究や実験的研究[75]は進展しておらず、そのため管内閉塞を避けるために、単位水量や細骨材率を大きめに調整したコンクリートを用いることが多い。辻村らは、電気抵抗を測定することによって管内を流れるフレッシュコンクリートの閉塞を感知するシステムを提案している[76]。同システムでは、図-2.39に示すように、電極を取り付けたカートリッ

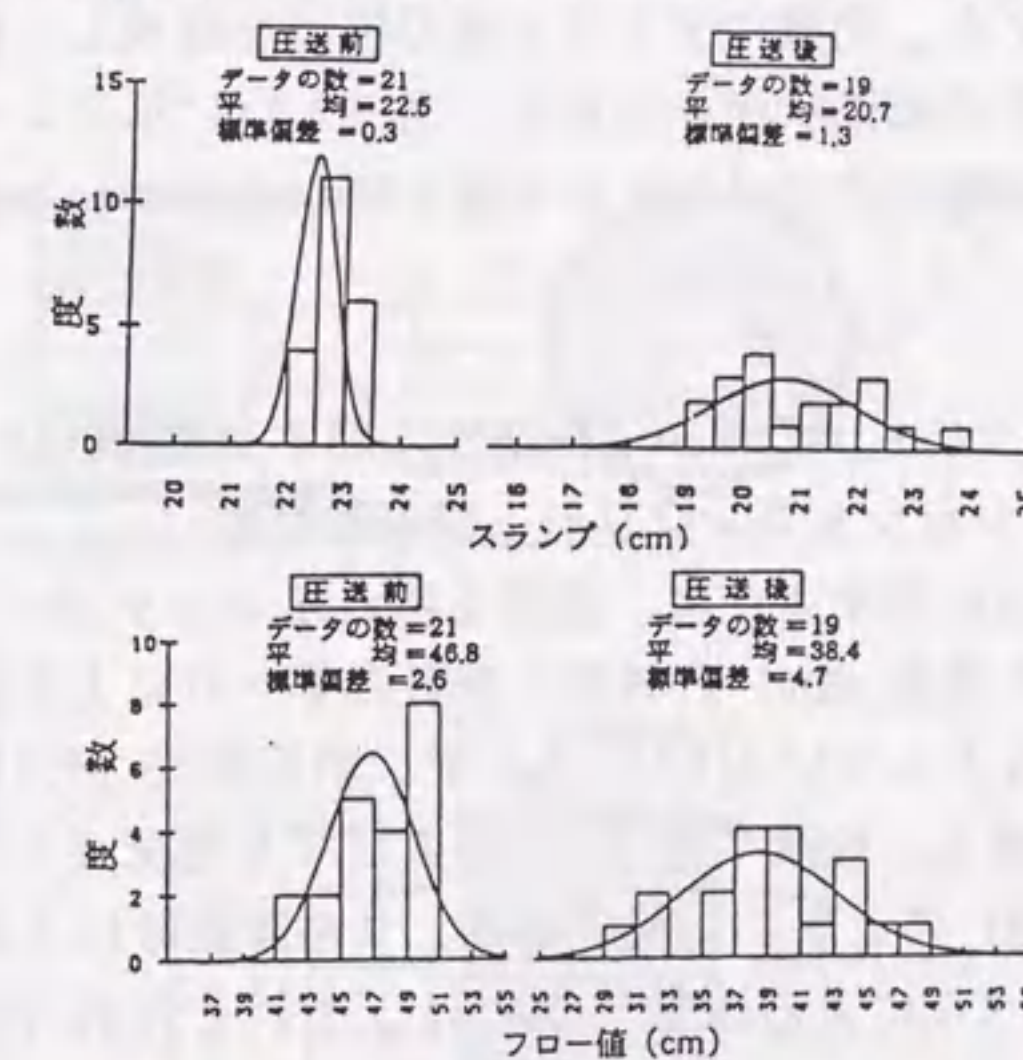


図-2.38 圧送前後のスランプ値の分布[73]

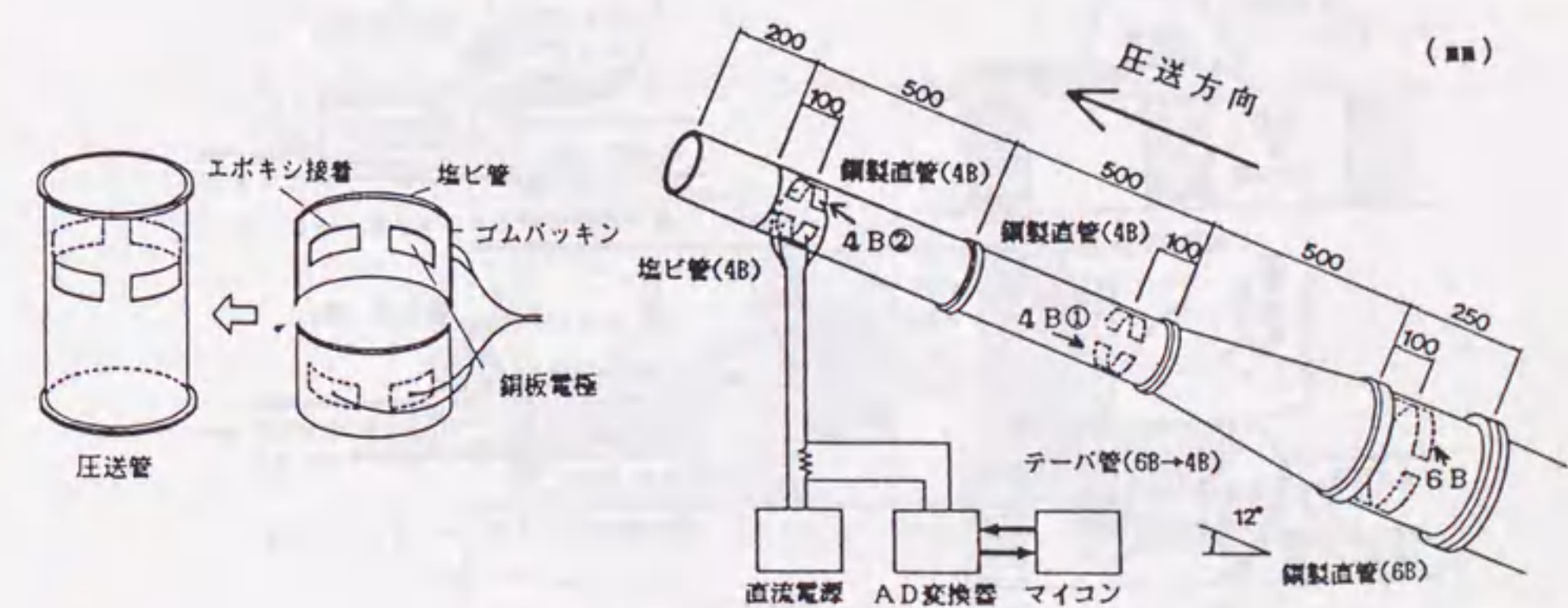


図-2.39 閉塞感知システムの概要[76]

ジ式のパイプを配管の途中に取り付け、電気抵抗の変動を測定している。辻村らによれば、同システムによってベント管前後のコンクリートの乱れ特性を測定することができ、さらにデータを集積することにより閉塞の予想が可能であるとしている。

(3) 可視化手法による管内流動の観察

橋本らは、閉空間を流れるフレッシュコンクリートの流動挙動を解明するために可視化手法を提案し、これをベント管内などでの流動挙動に適用した結果を報告している[77,78]。図-2.40に示すような滑り弁型コンクリートポンプ内での流動挙動についても、同様にアクリル製の模型を作成し、吐出・吸入過程におけるコンクリートの流動状況を分析し、図-2.41に示すような状態で試料が圧送される際に、瞬間的にはあるが材料分離が生じていることを報告している[79]。

2.4.2 フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的研究

(1) 直管内を流れるフレッシュコンクリートの流動挙動

谷川らは、図-2.42に示すように、直管を流れるコンクリートの流量 (Q) は、せん断変形による流量 (Q_v) と管壁と試料のすべりによる流量 (Q_s) の総和で表すことができるとしている[58]。ここで、前出の式 (2.4) によってすべり抵抗 (σ_s) を定義し、栓流半径 (r_0) およびずり速度 (β) をそれぞれ式 (2.8) および式 (2.9) のように定義すると、せん断変形による流量 (Q_v) および管壁と試料のすべりによる流量 (Q_s) は、それぞれ式 (2.10) および式

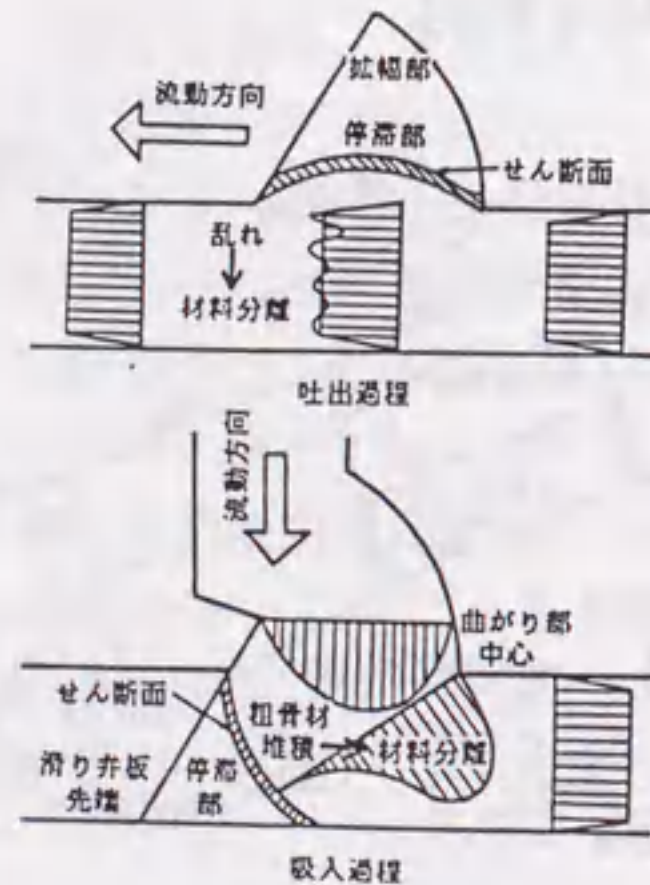


図-2.40 滑り弁型ポンプの概要[79]

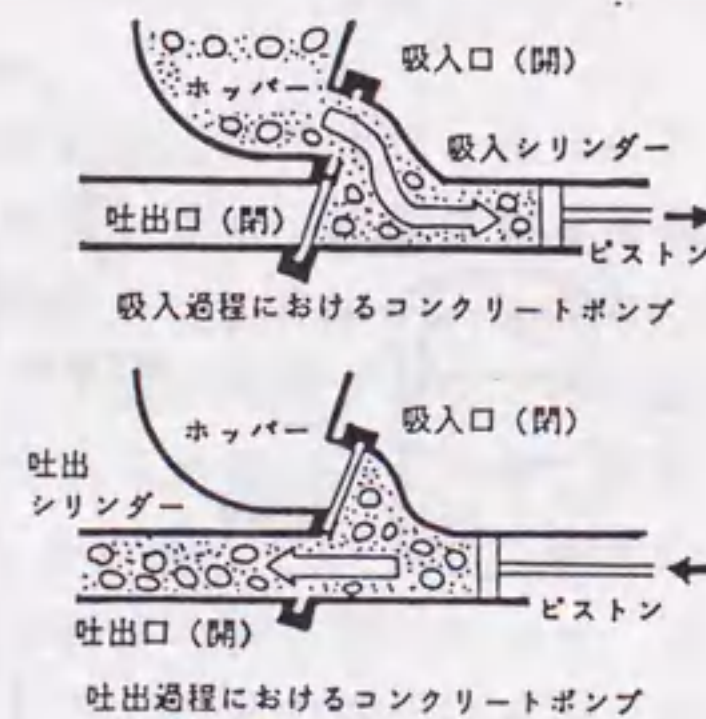


図-2.41 ポンプ内での分離の発生状況[79]

(2.11) で表すことができる。

$$r_0 = \frac{2\tau_y L}{P} \quad (2.8)$$

$$\beta = \frac{\frac{dP}{dx} R - \left\{ S_3 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + S_4 \right\}}{S_1 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + S_2} \quad (2.9)$$

$$Q_v = \frac{\pi P R^4 \left\{ 1 - \frac{4r_0}{3R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right\}}{8L\eta} \quad (2.10)$$

$$Q_s = \pi R^2 \beta \quad (2.11)$$

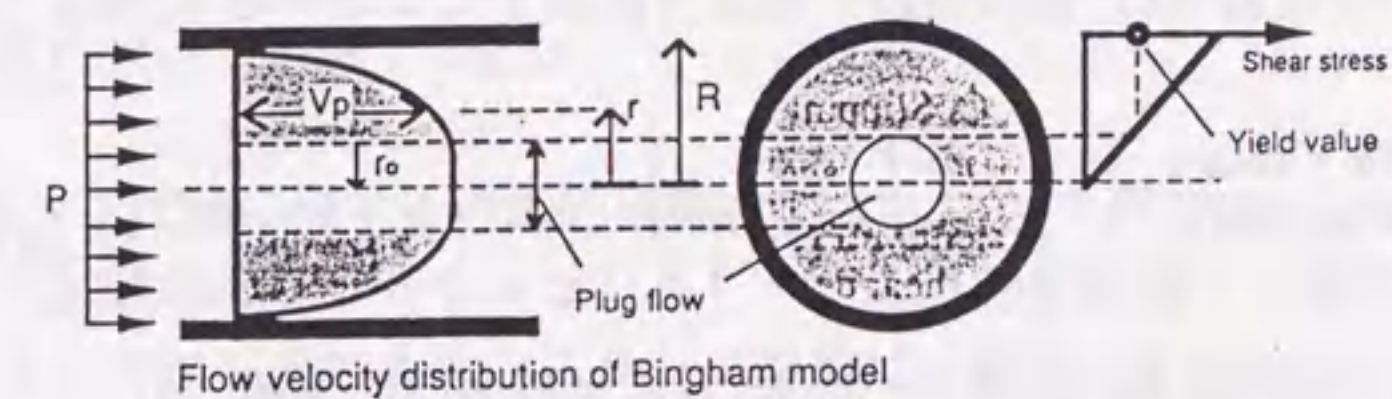


図-2.42 管内を流れるコンクリートの状態の概念[58]

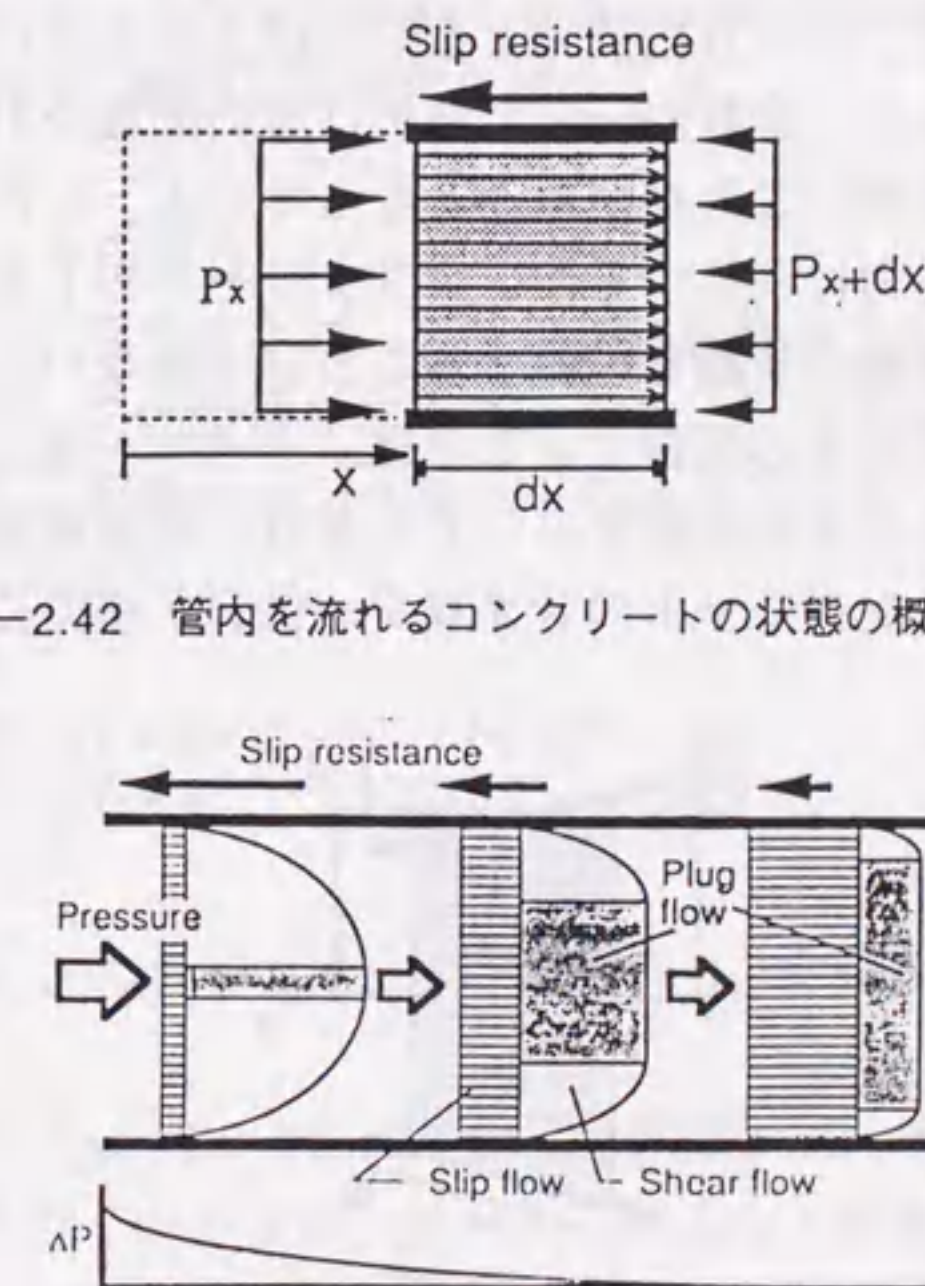


図-2.43 管内における流動モードの変化[58]

ここに、P: 単位面積当りの圧力, R: 管の半径, L: 管の長さ。

せん断変形抵抗力およびすべり抵抗力によってポンプ圧力が減少するため、図-2.43に示すように管内における流動モードは次第に変化することがわかる。谷川らは、上記の理論式をもとに、コンクリートのレオロジー定数や施工条件（ポンプ圧力や管径など）が流量や圧力損失に与える影響について考察している。

(2) テーパー管内を流れるフレッシュコンクリートの流動挙動

谷川らによれば、図-2.44に示すような座標系においては、テーパー管における圧力損失 (dP/dz) は、式 (2.12) のように表すことができる[80]。

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2}{R} \left\{ \frac{\sin \varphi + \mu \cos \varphi}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi} \sigma_r + \frac{\mu P + C_h}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi} \right\} \quad (2.12)$$

ここに、 φ : テーパー角, μ : まさつ係数, σ_r : 半径方向の偏差応力。

谷川らの計算によれば、すべり抵抗力と変形抵抗力がともに圧力に無関係であるとした場合、レオロジー定数が一定であれば管の閉塞を引き起こすような大きな圧力損失が発生しないことが明らかとなっている。したがって、すべり抵抗力と変形抵抗力が圧力に依存するか、コンクリートのレオロジー性質が圧力に依存しない限り、実際の挙動を説明することはできない。すべり抵抗力と変形抵抗力が圧力に依存すると仮定することは、テーパー部に限らずいずれの部位でも閉塞が発生することを示唆することとなり、実験結果とは必ずしも一致しない。すなわち、コンクリートのレオロジー性質が圧力に依存する性質を

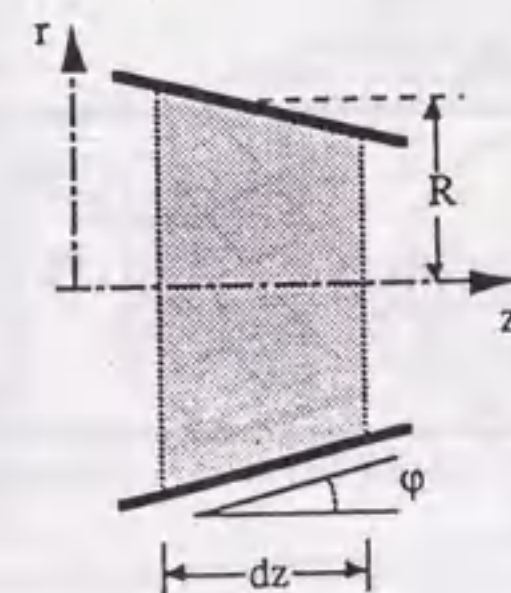


図-2.44 テーパー管の座標系[80]

持っていることがこの理論式より導かれ、谷川らは実験によってもこの傾向を測定している[25]。

2.5 フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究

フレッシュコンクリートの流動挙動に関する解析技術は、理論式を展開して理論的に挙動を解明する手法と数値解析を用いる手法の2つに大別することができる[81]。前者に関しては、スランプ試験や管内流動の解析例が報告されている。後者としては、流体力学などの分野で用いられるMAC法を適用した解析手法や、有限要素法を用いた解析手法が提案されている。

本節では、このようなフレッシュコンクリートの流動挙動解析技術に関する既往の研究について概説する。

2.5.1 スランプ試験に関する理論的研究

スランプ試験時のフレッシュコンクリートの流動挙動は、3次元軸対象問題として解くことが可能である。スランプ試験は一般に広く行われている試験であるため、この試験から得られる情報をさらに有効に利用するための検討がなされている。本節では、スランプ試験を理論的に取り扱い、変形挙動とレオロジー性質の関係について報告した研究を紹介する。

(1) 硬練りコンクリートの場合

下山は、図-2.45に示すように、スランプ試験時のフレッシュコンクリートの変形状態を理想化して理論解を求めている[9]。ここでは、モール・クーロンの破壊条件を適用し、硬練りコンクリートのスランプ値 (Sl) は、以下のような式で表されるとしている。

$$Sl = H - \left\{ h_0 + \frac{2C_h(1 + \sin \phi)}{\rho \cos \phi} \ln \left(\frac{7H^3}{(H + h_0)^3 - H^3} \right) \right\} \quad (2.13)$$

ここに、H: もとのスランプコーンの高さ, h_0 : 非降伏領域の高さ。

非降伏領域の高さ (h_0) は、式 (2.14) の判別式 (D: 式 (2.15) 参照) が0となる時の垂直応力 (σ_n) を式 (2.16) に代入して求めることができる。

$$(1 + \tan^2 \phi)^2 + (2C_h \tan \phi - \sigma_n) \sigma + C_h^2 = 0 \quad (2.14)$$

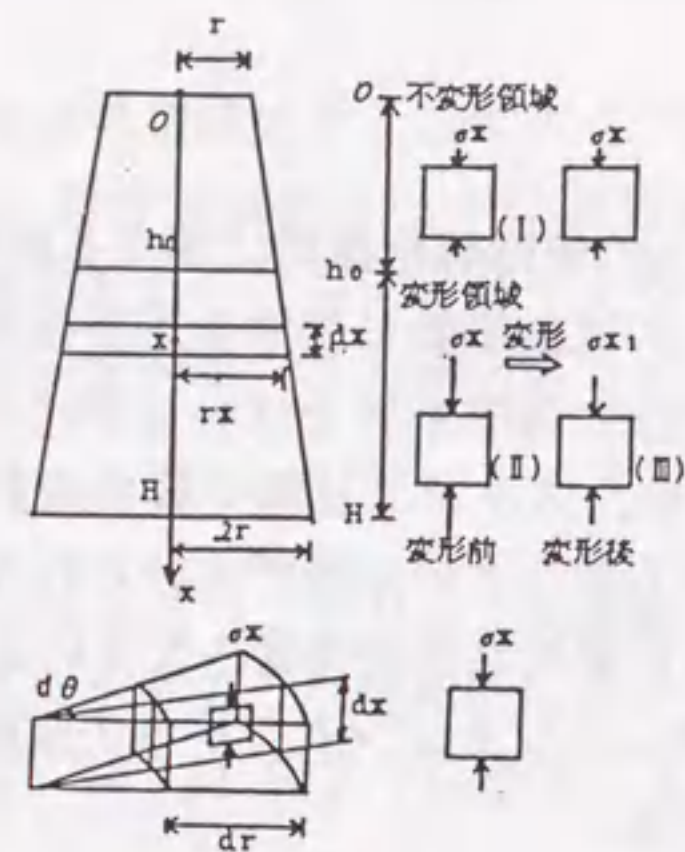


図-2.45 スランプコーン内のフレッシュコンクリートの変形[9]

$$D = \sigma_n^2 - 4C_h \sigma_n \tan \phi - 4C_h^2 \quad (2.15)$$

$$\sigma_n = \frac{\rho \{ (H + h_0)^3 - H^3 \}}{3(H + h_0)^2} \quad (2.16)$$

下山は、上記の理論式を提案するとともに、比較的硬練りのコンクリートおよびモルタルに対して実験的に検討を行った結果、本理論式によって十分満足のいく精度が得られたとしている。

(2) 軟練りコンクリートの場合

谷川らは、スランピング中の試料の形状を図-2.46に示すように仮定して、スランピングとフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する理論的な研究を行っている[10]。これによれば、スランプ値 (Sl:cm) およびスランピング値 (sl:cm) は、式 (2.17) に示すような形状のパラメータ α を媒介変数として、それぞれ式 (2.18) および式 (2.19) のように表すことができると報告している。

$$\alpha = \frac{1 + a + a^2}{3} \quad (2.17)$$

$$Sl = 30 - \frac{100\sqrt{3} \tau_y}{\alpha \rho G} \quad (2.18)$$

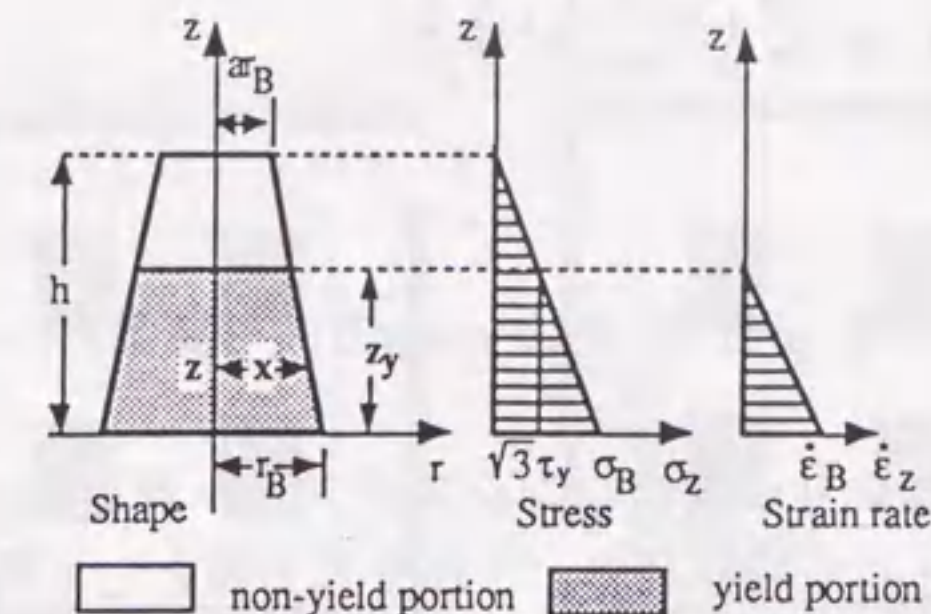


図-2.46 スランピング中の形状[10]

$$sl = Sl - \frac{1}{\frac{\alpha \rho G}{600 \eta} t + \frac{1}{Sl}} \quad (2.19)$$

ここに、 a : 上面半径と下面半径の比, ρ : 密度, G : 重力加速度。

谷川らは、上記の理論式とスランプ試験を拡張したスランピング試験を行って、理論式の妥当性を検討するとともに、コンクリートのレオロジー定数の推定を試みている。

2.5.2 フレッシュコンクリートの流動挙動に関する数値解析手法

フレッシュコンクリートの流動挙動を予測する手法としては、上記の理論的なアプローチの他に、数値解析を用いた手法がいくつか提案されている。数値解析手法は、理論化が難しい複雑な形状の対象物にも適用でき、また、特殊な施工条件を考慮することが可能であるという利点があり、今後の発展と実用化が期待される。本節では、これらの数値解析手法に関する既往の研究を紹介する。

(1) MAC法による流動解析

小谷らは、差分法の一つであるMAC (Marker and Cell) 法を用いてフレッシュコンクリートの流動挙動に関する数値シミュレーション技術の開発を行っている[82]。この手法では、式 (2.20) および式 (2.21) に示すようなNavier-Stokesの方程式と非圧縮性を示す式 (2.22) を基礎式として用いている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.22)$$

ここに、 u, v : x, y 方向流速, p : 圧力, F_x, F_y : x, y 方向の質量力, ν : 動粘性係数。

また、フレッシュコンクリートのコンシステンシーは、図-2.47に示すような指数法則に従う流体として近似して、これを入力値として用いている。

小谷らの解析によって得られた結果の一例を図-2.48および図-2.49に示す。図-2.48はスランプ試験をシミュレートしたものであるが、底面の拡がり方や上部の形状が元のまま残っている状況など、実際のスランプ試験に近い結果が得られている。図-2.49は、試料が充填されている房内に、さらに試料を注入した場合に、どのような軌跡を描くかを示すために、マーカーを注入部付近に配置してその移動をトレースしたものである。これは狭い空隙や粗骨材間をモルタルなどが充填される場合を想定したものであり、試料が手前の骨材に

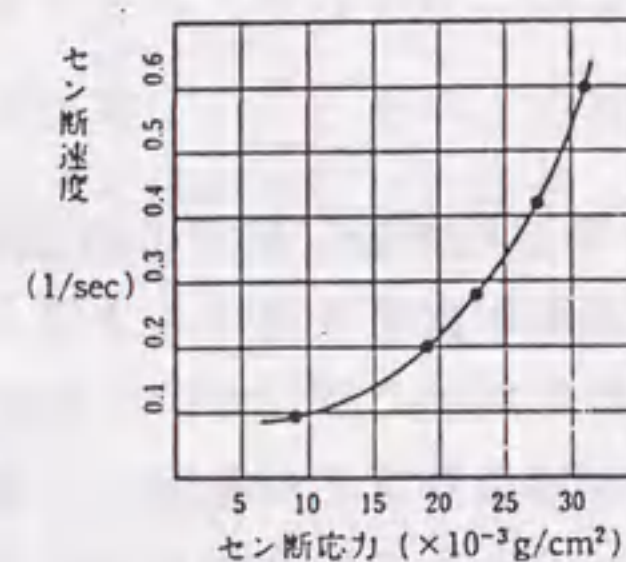


図-2.47 コンシステンシー曲線[82]

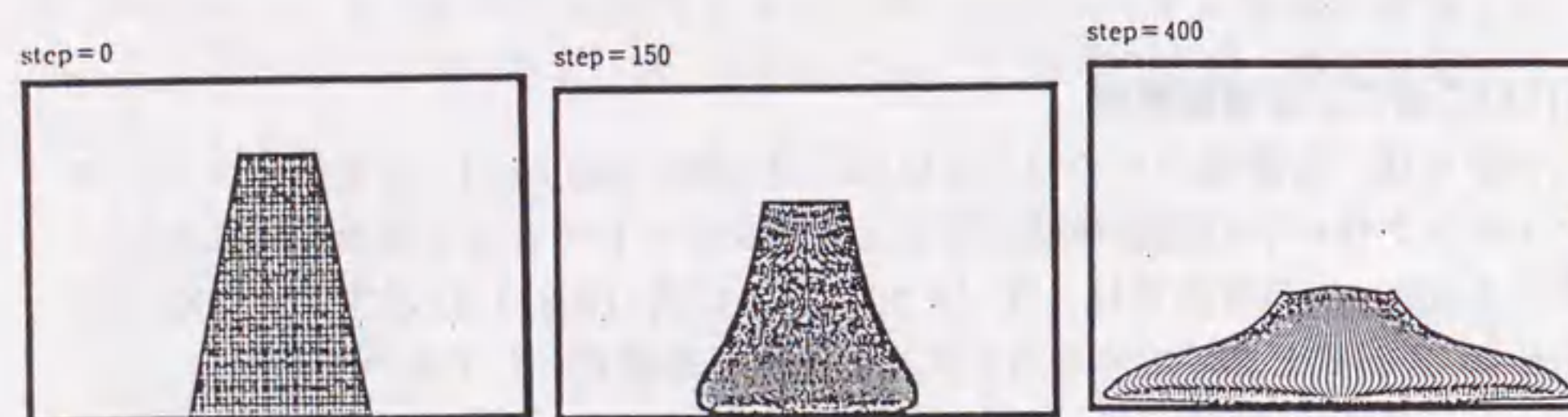


図-2.48 スランプ試験のシミュレーション結果の一例[82]

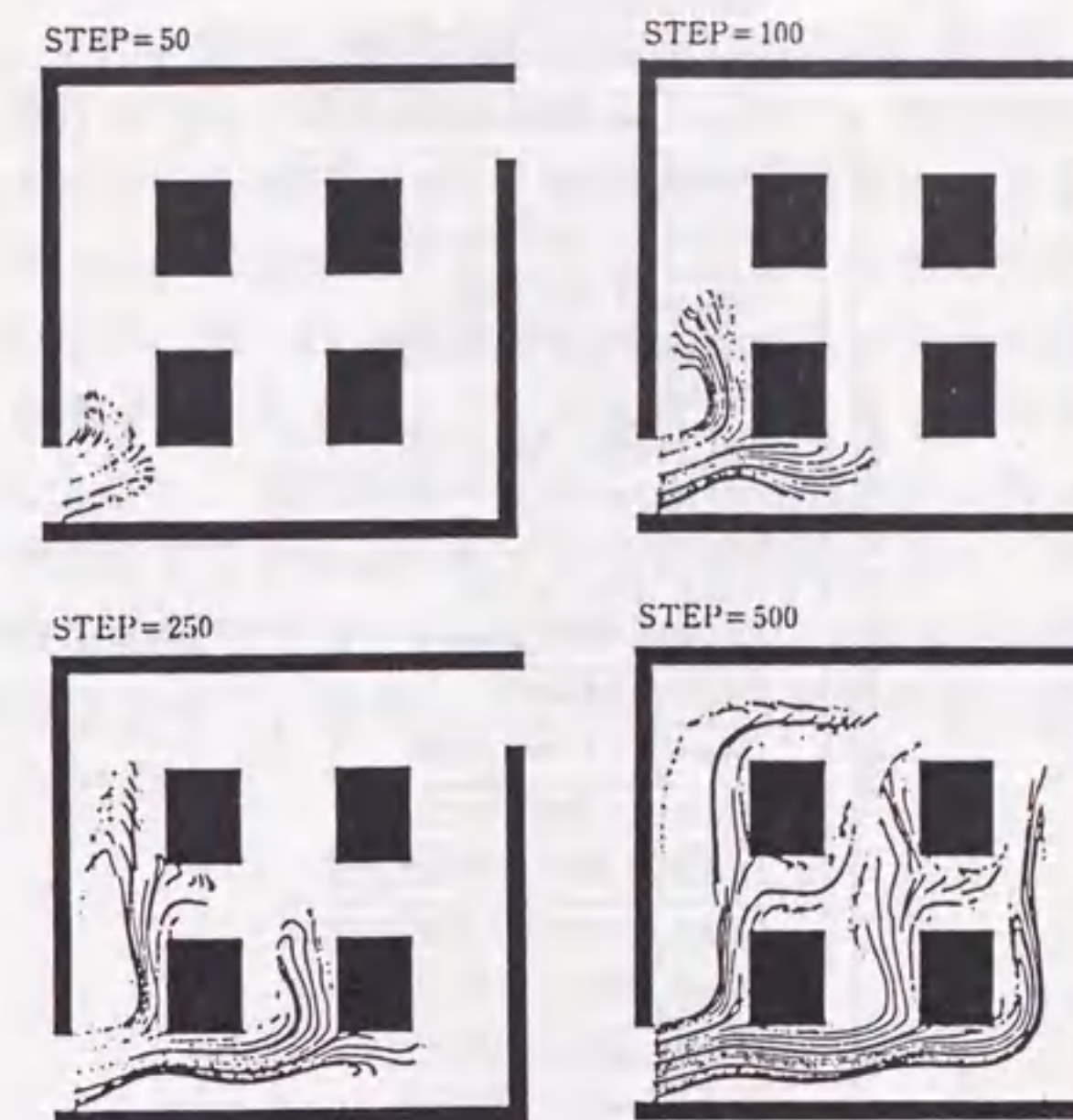


図-2.49 狭部への充填シミュレーション結果の一例[82]

当たって左右に分流する様子などが再現されている。

(2) 粘塑性有限要素法による流動解析

森らは、フレッシュコンクリートの変形・流動シミュレーションを行う一手段として、粘塑性有限要素法解析を提案し、これを理論解の得られているいくつかの問題に適用して、解析手法の妥当性を検討している[83]。

Binghamが提案した降伏関数は、単純せん断状態にある粘塑性材料を表現するものであるが、この研究では、Hohenemser・Pragerによって任意応力状態に対して拡張された構成則（式(2.1)参照）を用いている。

また、境界条件として、式(2.4)に示すような垂直応力とずり速度の双方に依存するすべり要素を提案し、境界におけるすべり現象を表現している。

粘塑性有限要素法では、まず、弾性計算によって得られる応力を式(2.1)に代入し、得られた要素ひずみ速度に、弾性剛性マトリックスを乗じてみかけの弾性応力を求める。次に、みかけの弾性応力を生じさせるのに必要な節点力を積分して逆算し、全体の変形をみかけの節点力に対して弾性計算で求める。その結果として、単位時間当りの変形量を算定する。このフローチャートを図

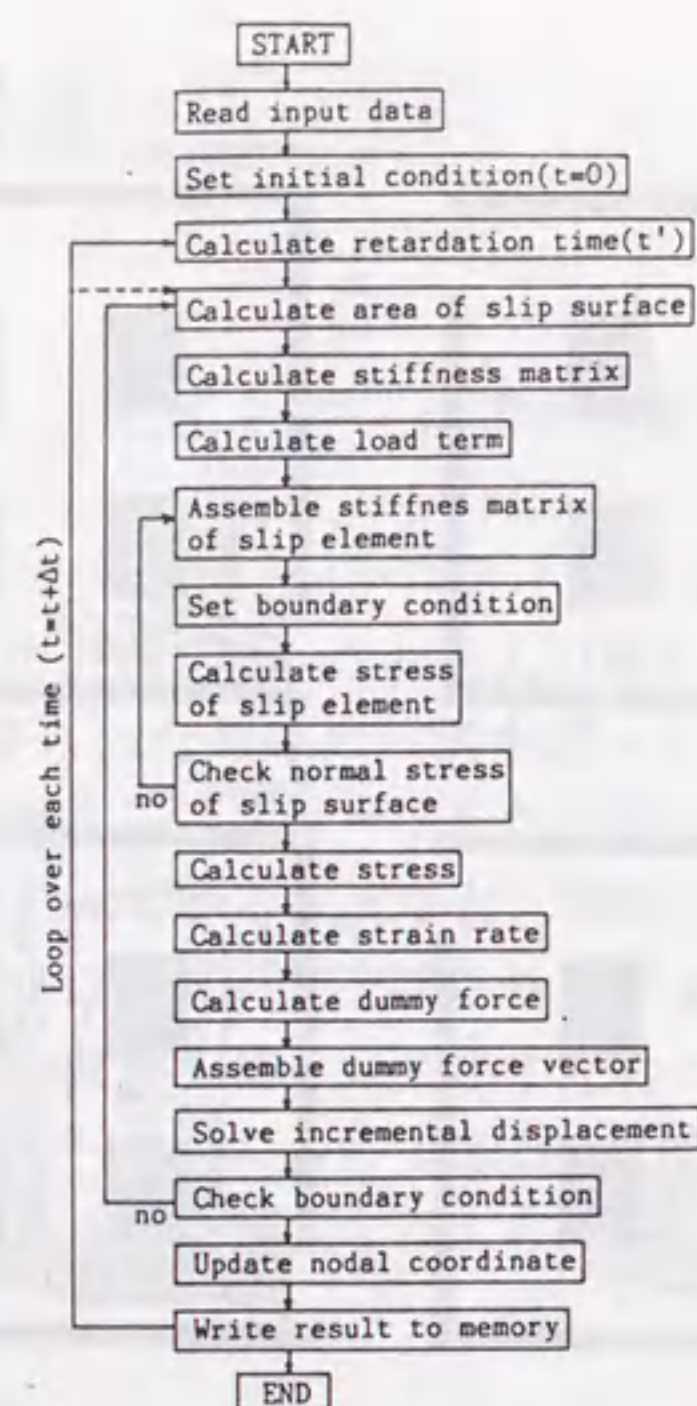


図-2.50 粘塑性有限要素法のフローチャート[83]

図-2.50に示す。森らは、粘塑性有限要素法を各種コンシステンシー・レオロジー試験に適用し、これらの試験値のレオロジー的な意味を明らかにしている。なお、粘塑性有限要素法と、本研究で用いる粘塑性サスペンション要素法および粘塑性空間要素法との特徴の比較は第3章で述べる。

2.6 まとめ

本章では、フレッシュコンクリートの流動性評価試験方法として、各種のレオロジー試験およびコンシステンシー試験を紹介するとともに、それらの特徴や適用範囲を明らかにした。また、高強度コンクリートのフレッシュ時の一般的性質および各種の混和材料が高強度コンクリートのフレッシュ時の性質に及ぼす影響について検討した既往の研究成果を紹介した。さらに、高強度コンクリートの圧送性やポンプ圧送時のコンクリートの挙動に関する研究を紹介した。最後に現在提案されているフレッシュコンクリートの流動挙動を予測するための既往の解析的および理論的研究の概要について述べた。

フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定するための手法としては、

2.2.1節で示したような各種の試験方法が提案されているが、いずれも適用範囲に制限があり、また、試料の変形性質以外のレオロジー性質（たとえば付着特性）の影響を受けるため、その測定が難しい。また、高強度コンクリートは、高性能A E減水剤やシリカフューム、高炉スラグ微粉末などを用いることにより降伏値が小さいものの粘性は大きくなっており、これらの品質管理が重要であるにもかかわらず、統一的な試験方法が決まっていなかったため、品質管理方法を模索している段階と言える。また、高強度コンクリートのポンプ圧送時の圧力損失は非常に大きく、管内閉塞のメカニズムも明らかとなっていないため、メカニズムを可視化手法や理論解析または数値解析によって明らかにする必要がある。現状の理論解析手法や数値解析手法については2.5節に述べたが、さらにこれらを発展させて、各種コンクリートの流動挙動に関する理論的なサポートを行う必要がある。

- 3.1 概説
- 3.2 粘塑性サスペンション要素法
- 3.3 粘塑性空間要素法
- 3.4 まとめ

第3章

フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究

3.1 概説

フレッシュコンクリートの流動挙動を解明するためには、各種調合条件とフレッシュコンクリートのレオロジー性質の関係を明らかにするとともに、流動挙動に与えるレオロジー定数の影響を調べる必要がある。このことは、測定されたレオロジー性質とコンクリートの流動性（コンシステンシー）、さらには施工性（ワーカビリティ）とを結び付ける流動解析技術を確立することの必要性を示唆しており、流動解析技術は「施工設計法」[11,12]を構築する上で必要不可欠な要素である。

レオロジー定数と流動挙動の関係を明らかにする検討は、実験的には行われているが、コンピュータシミュレーションは、理想的な条件下でのデータが得られるため、流動挙動に及ぼすレオロジー性質の影響を系統的に調べるのに有効な手段である。

本章では、フレッシュコンクリートの流動挙動に関する解析技術として、粘塑性サスペンション要素法（Viscoplastic Suspension Element Method, V S E M）および粘塑性空間要素法（Viscoplastic Divided Space Element Method, V D E M）について述べる。なお、これら二つの解析手法に関する基本的な概念は、すでに森によって提案されているが[84-87]、本研究では、森によって提案された手法を進展させ、解析プログラムの拡張を行った。筆者が新たに開発した部分は、本文中に明記する。

3.2 粘塑性サスペンション要素法

粘塑性サスペンション要素法は、静的解析手法と動的解析手法に分けられる[84,85]。このうち、本研究では静的解析手法を用いて解析を行った。以下、特にことわらない場合は、粘塑性サスペンション要素法という記述は、静的解析手法を指す。

図-3.1に、粘塑性サスペンション要素法（V S E M）の概念を示す。フレッシュコンクリートの流動は、骨材間のマトリックス部の変形によるものであり、骨材の接触による抵抗性もコンクリートとしてのみかけのレオロジー性質に影響を与える。本解析では、粘塑性流体で覆われたある大きさの球形剛体（骨材）を考え、接近した2つの骨材間の力の伝達が、これらの骨材間に形成

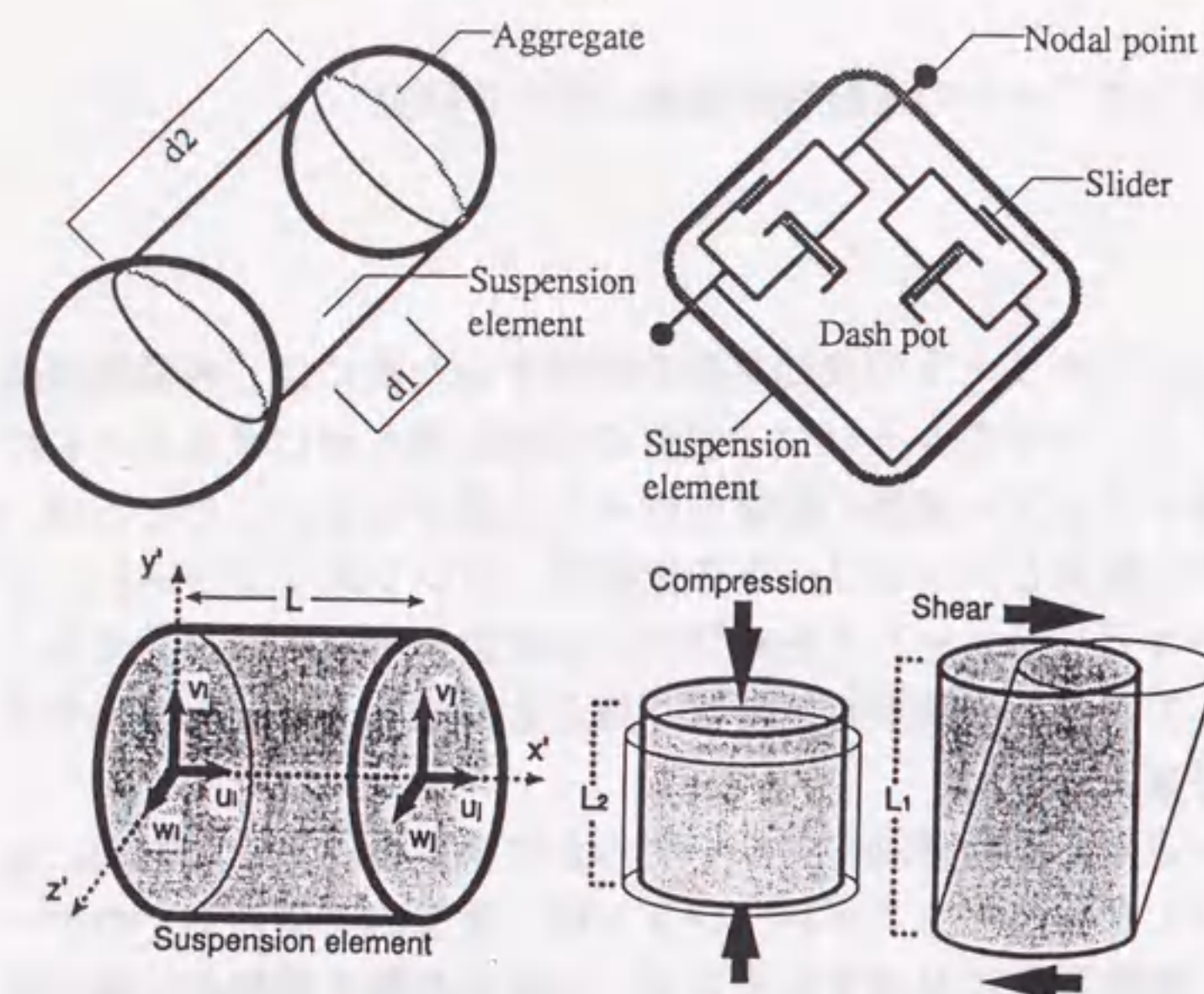


図-3.1 サスペンション要素

された粘塑性性質をもつ円柱形の要素（以下、サスペンション要素と呼ぶ）によって行われると仮定して計算する。ここでいう骨材とは、解析対象がコンクリートであれば粗骨材を、また、モルタルであれば細骨材を意味するが、ここでは、コンクリートを対象としている。コンクリートの変形が進むにしたがって、骨材の位置関係が変化し、サスペンション要素は発生あるいは消滅する。

3.2.1 サスペンション要素

(1) サスペンション要素の構成

本解析は、レオロジー流動する粘塑性流体中に点在する球体（剛体）の運動をシミュレートするために、図-3.2に示すような、ある程度接近した2つの骨材の間にサスペンション要素を設け、サスペンション要素の変形量から全骨材の移動量を計算するものである。すなわち、骨材を節点とし、この節点間にサスペンション要素を立体トラス構造のように形成する。サスペンション要素の変形としては、同図に示すように、軸方向およびせん断方向の変形を取り上げ、節点の回転運動は無視した。

骨材、すなわち節点の座標値および骨材半径から、所定の距離以下の隣接する2節点を選び、粘塑性計算に入る前に、サスペンション要素は自動的に構成される。粘塑性解析では、微少の時間で刻んで変形量を逐次計算しているが、

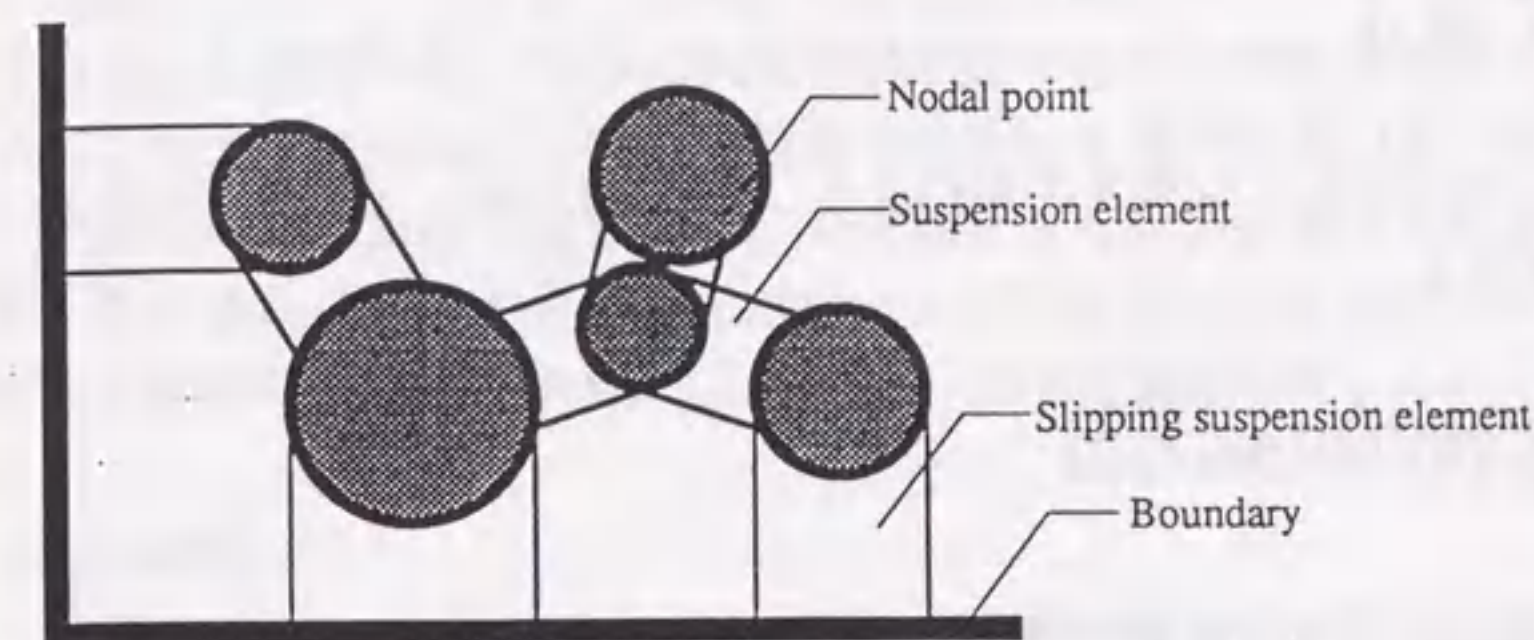


図-3.2 サスペンション要素の構築

サスペンション要素の形成は、この繰返し計算ごとに行われる。したがって、サスペンション要素法では、要素の個数や要素と節点の構成関係が固定したものではなく、流動に応じて逐次変化する。

サスペンション要素の形状マトリックス[B]としては、次式を用いる。

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{d_1} & 0 & 0 & \frac{1}{d_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{d_2} & 0 & 0 & \frac{1}{d_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{d_2} & 0 & 0 & \frac{1}{d_2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

また、回転マトリックス[R]は、式(3.2)または式(3.3)の[R_e]を用いて、式(3.4)のように表現する。

$$[R_e] = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ \frac{-C_x C_y}{M} & M & \frac{-C_y C_z}{M} \\ \frac{-C_z}{M} & 0 & \frac{C_x}{M} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ここに、 $C_x = \frac{x_j - x_i}{d_1}$, $C_y = \frac{y_j - y_i}{d_1}$, $C_z = \frac{z_j - z_i}{d_1}$, $M = \sqrt{C_x^2 + C_z^2}$
ただし、 $M=0$ の場合、

$$[R_e] = \begin{bmatrix} 0 & C_y & 0 \\ -C_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_e] & 0 \\ 0 & [R_e] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

したがって、サスペンション要素の剛性マトリックス $[K_e]$ は、式(3.5)のように表すことができる。

$$[K_e] = \frac{\pi r^2}{4} [R]^T [B]^T [D] [B] [R] \quad (3.5)$$

(2) 調合条件とサスペンション要素の関係

森によって提案された粘塑性サスペンション要素法は、コンクリートをマトリックスモルタル相と粗骨材相から成る単純な二相モデルと仮定し、粗骨材の直径は一定であるとして取り扱っている。しかし、大小の粗骨材が存在することによって発生する粗骨材同士のベアリング現象や粗骨材の粒度分布が流動挙動に与える影響を予測する場合、粗骨材を同一径と仮定した解析では問題が生じる。

そこで、本研究では、粗骨材の直径を任意に変化させ、異なる直径を持つ粗骨材間にサスペンション要素を構築することとした。サスペンション要素の直径は、小さい方の粗骨材の直径に準じており、境界面と粗骨材の間に構築されるすべりサスペンション要素の場合は、当該粗骨材の直径に準じるものとした。

一方、高流動コンクリートなど、高い流動性を要求されるコンクリートでは、粗骨材量が調合を決める上で非常に重要な要素となる。粘塑性サスペンション要素法では、サスペンション要素の長さを変化させることによって、調合上のマトリックスモルタル量と粗骨材量の比を変化させる。サスペンション要素が発生・消滅するときの骨材の相互の臨界距離 (d_c) は、粗骨材量によって決定されるが、本研究では、臨界距離 (d_c) を変化させ、粗骨材量を逆算するという手法をとっている。

また、粗骨材の接近を無制限に許容することはコンクリートの体積を縮小させることになり、非圧縮性流体をシミュレートしているとはいえない。本解析手法では、マトリックスモルタルの体積は考慮していないため、サスペンション要素の長さを一定の範囲に抑制することにより、全体としての体積を一定に保持している。すなわち、粗骨材間距離が通常範囲にある場合は、粗骨材相互の接近によってマトリックスモルタルは周囲に流出するが、粗骨材が十分接近し、一定の距離 (d_c) に達すると、粗骨材間のマトリックスモルタルがこれ

を回避することができず、圧縮側に関してのみ、サスペンション要素の剛性が増加すると仮定した。さらに粗骨材が接近すれば、粗骨材相互の接触剛性が生じるものと思われる。この接触剛性が発生する臨界距離 (d_c) は、骨材の形状・寸法の関数(角ばり係数など)で表現されるものと考えられる。しかし、これらを一義的に決定するにはまだデータが不足しているため、本研究では、接近時の剛性の増加率を単純に10倍とし、 $d_c = d_s$ と仮定した。

3.2.2 境界条件

前掲の図-3.2に示すように、フレッシュコンクリートが容器や型枠などの壁面に接している部分にも、壁面に垂直な軸を持つサスペンション要素(通常のサスペンション要素と区別して、すべりサスペンション要素と呼ぶ)が形成される。すべりサスペンション要素は1節点のみで構成されるが、計算上、仮定の固定節点が壁面上に作られ、すべりサスペンション要素の変形性質によって、コンクリートと壁面の間の付着およびすべり(すなわち、壁面に垂直および平行な方向の抵抗)挙動を表現することができる。すべりサスペンション要素の場合も、壁面と節点の座標値から両者の距離を求め、その値が所定の距離以下に接近すると自動的に形成される。

3.2.3 構成則

サスペンション要素に用いる構成則は、式(2.1)および式(2.2)、すなわち、降伏値 (τ_y) および塑性粘度 (η) からなるビンガムモデルを使用している。

谷川らは、前掲の式(2.3)に示すような、骨材のインターロック(内部摩擦)を考慮できる汎用的な構成則として、ビンガムモデルに内部摩擦を組み合わせた複合モデルを提案し、コンクリートのレオロジー性質を的確に表現するためには、この複合モデルを用いる必要があることを実験的に示している[25]。しかし、粘塑性サスペンション要素法では、球形剛体である骨材相互の接触現象として、骨材のインターロックがメカニズム的に考慮できるため、垂直応力の増加に伴ってマトリックスのレオロジー性質を変化させる必要性が低い。さらに、ミクロな現象を再現するために、細骨材のインターロックを表現する場合などでは、複合モデルを利用する場合も考えられるが、ペーストと細骨材から成る2相材料として取り扱うことにより、モルタルのインターロックを表現することが可能であることから、本研究では、ビンガムモデルをサスペンション要素の構成則として採用している。

3.2.4 解析手順

粘塑性サスペンション要素法 (VSEM) のフローチャートを図-3.3に示す。2.5.2節で示した粘塑性有限要素法では、解析の入力条件として、節点座標および要素を構成する節点情報が与えられるが、粘塑性サスペンション要素法では、粗骨材それぞれの位置関係から自動的にサスペンション要素を構築する。振動力などの外力や自重は、等価な節点力として与えられる。各要素の粘塑性変形によって生じる変位は、微小時間単位の変形量として評価され、節点座標を更新することによりコンクリートの流動挙動を表現している。解析は、微小な時間刻みで前進し、サスペンション要素を各ステップごとに組み立てるため、節点相互の関係は逐次変化しており、それに伴いサスペンション要素は発生・消滅する。粘塑性有限要素法とは異なり、粘塑性サスペンション要素法では節点と要素の関係が一定ではないため、要素構成や節点の並びに拘束されず、連続体モデルでは表現できない複雑な変形をシミュレートすることができる。

3.2.5 解析例

(1) 配筋小型ボックス試験

振動を受ける配筋小型モデル型枠内での流動実験を行い、粘塑性サスペンシ

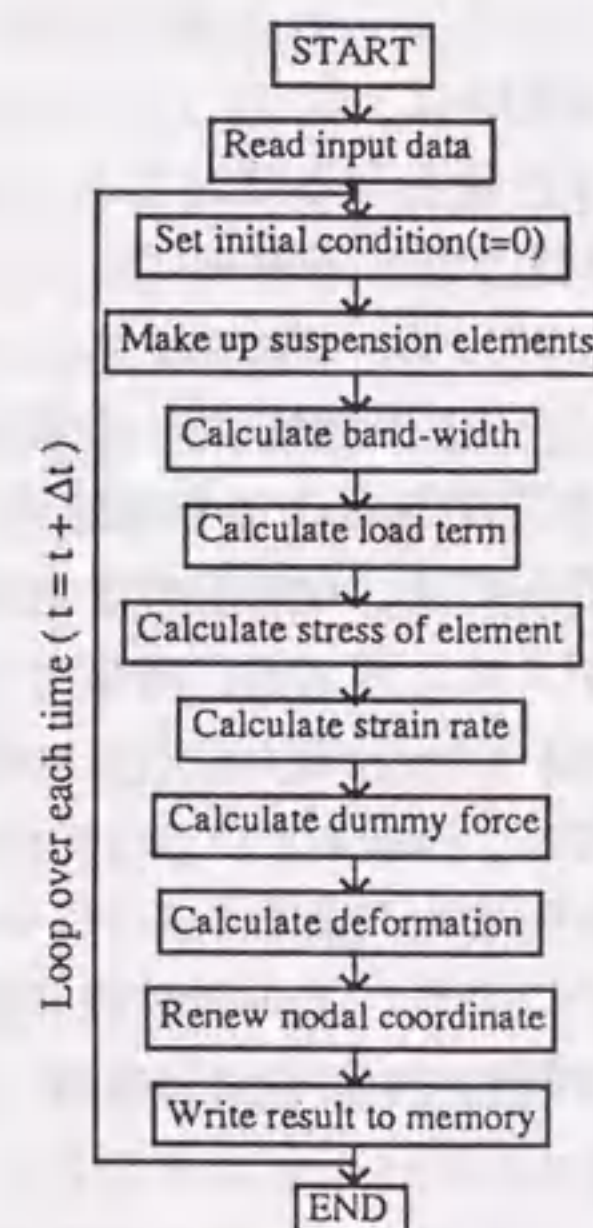


図-3.3 サスペンション要素法のフローチャート

ョン要素法の妥当性を検討するとともに、フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的な検討を行った。配筋小型モデル型枠内流動実験 (実験-3.1) に用いた試験装置の概要を図-3.4に示す。この実験では、まず試料を容器の右半分に充填した後、加振を開始し、中央部の仕切板を取り除くことにより試料を左側へ流出させている。このとき、容器の中央にある仕切板が試料の崩れを防ぎ、鉄筋の上部から流出するのではなく、横流れの状態で鉄筋を通過させるように設定されている。試料の上面の沈下挙動の経時変化は、変位計を用いてコンピュータに記録された。

解析-3.1では、実験-3.1と同じ型枠を用い、同条件の周波数・加速度の振動力を入力値として用いている。また、粗骨材の寸法が5~10mmのコンクリートに対して、直径が10mmの球状骨材を用いている。なお、マトリックスモルタルのレオロジー定数としては、実験-3.1に用いたコンクリートのモルタル部をウェットスクリーニングによって抽出し、後述の4.2節に示す簡易推定手法を用いて推定した値を、シミュレーションの入力値として用いた。解析-3.1より得られた結果を図-3.5に示す。同図には、実験-3.1で得られたコンクリート上面の降下量 (スランピング) を▲印で示してある。同図に示すように、シミュレーションで得られたコンクリート上面の沈降挙動は、実験で観察された沈降挙動と類似しており、本解析手法の妥当性を検証している。

図には示していないが、無振動の場合は、実験および解析結果とも、ほぼ鉄筋位置で流動が停止してしまう。これと比較すると、振動によって流動が促進される様子が図-3.5から観察される。また、鉄筋間や開口部から流出すると

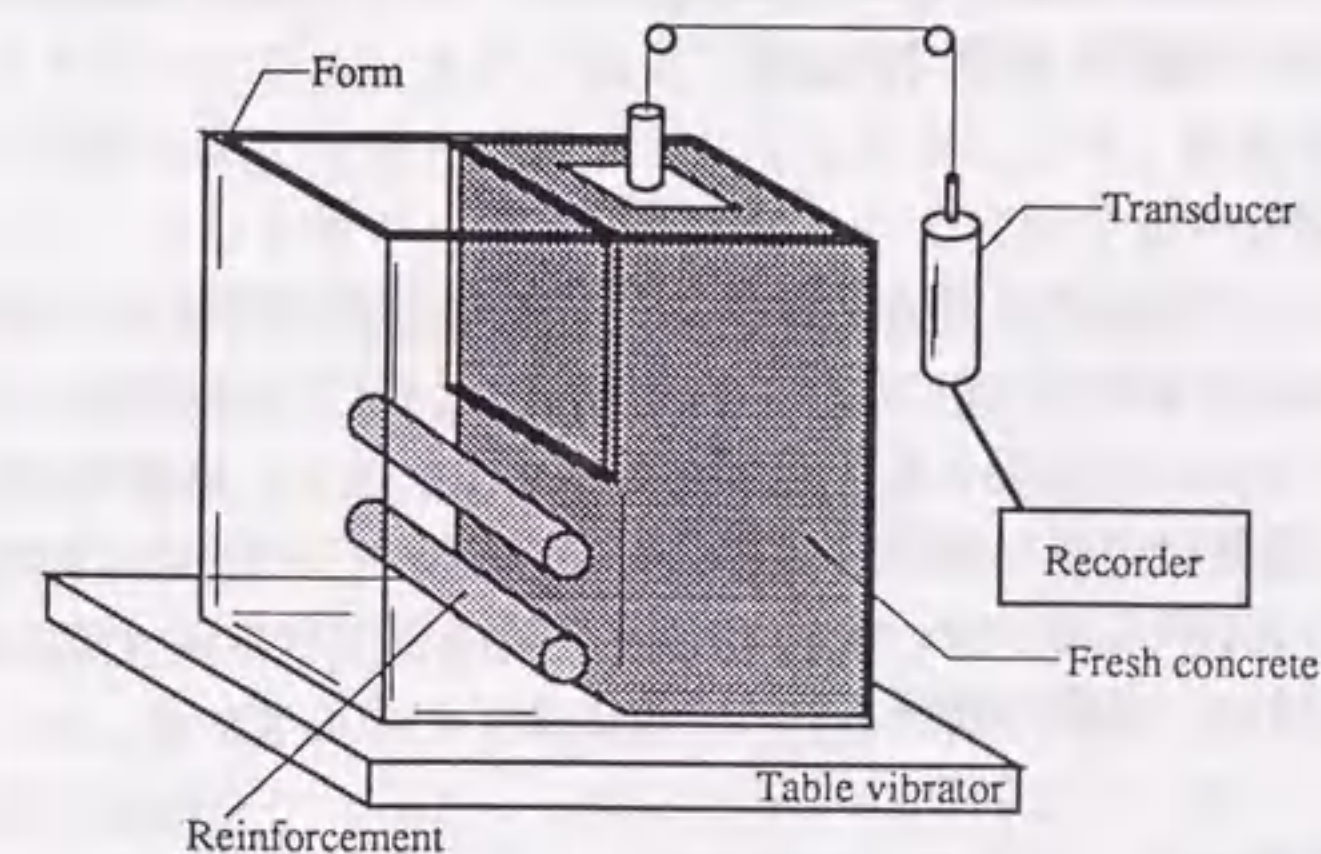


図-3.4 配筋小型モデル型枠内での流動実験の概要

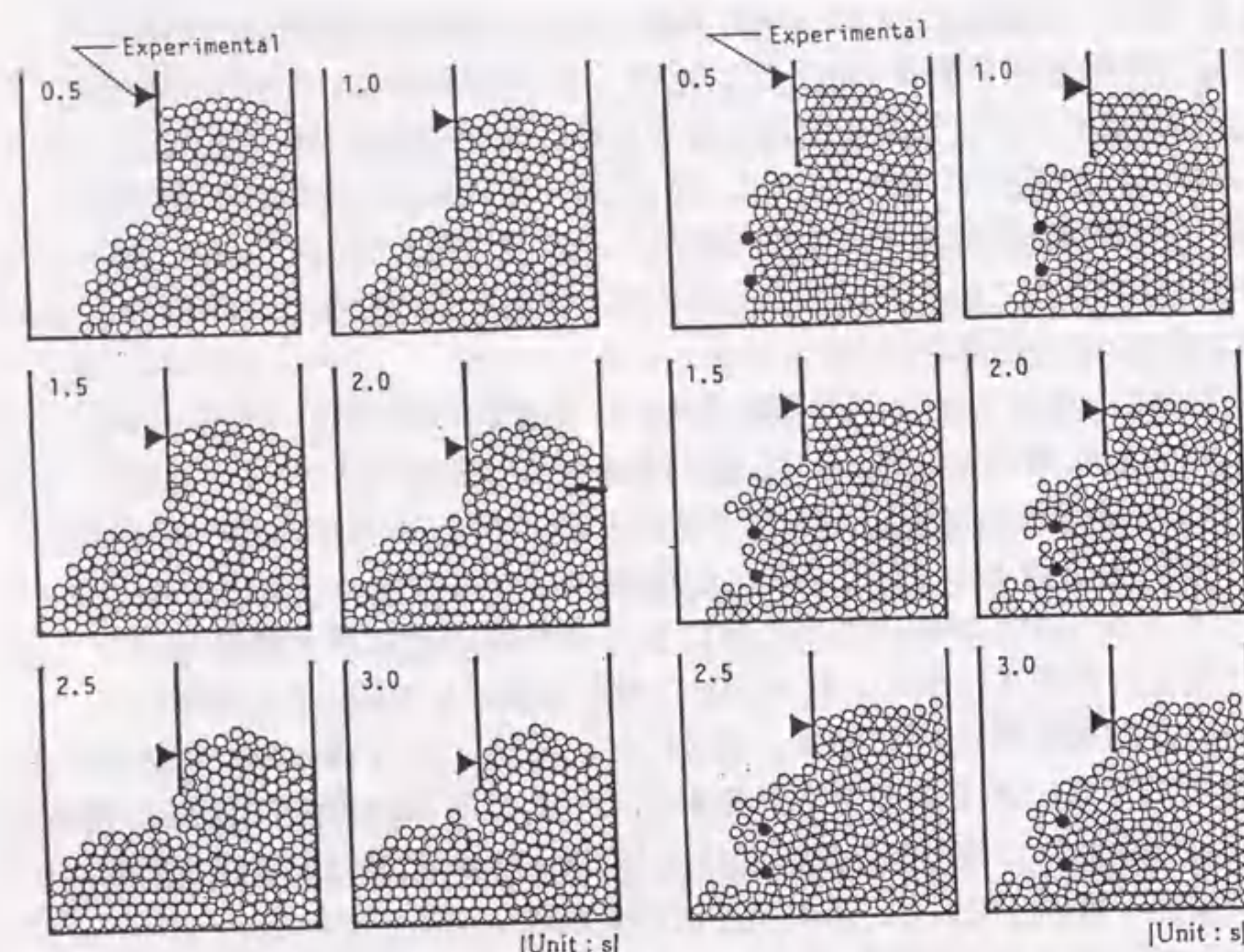


図-3.5 配筋小型モデル型枠内でのコンクリートの流動状況

きの形状は、実験で観察されるものとよく一致している。解析結果から、右下部分のコンクリートがほとんど動かず、上部のコンクリートが覆いかぶさるように左側へ流出していく様子が観察された。

(2) スランプ試験

粘塑性サスペンション要素法を用いてスランプ試験を2次元問題としてシミュレートした結果の一例を図-3.6に示す。本解析例は、2次元解析ではあるが、粗骨材粒径を5~20mmの範囲として粒度を分布させ、また、粗骨材の少ない富調合の場合と、粗骨材の多い貧調合の場合とを比較している。コンクリートの上面が変形後凹んで残る様子や、底面の摩擦を受けながらフローする変形挙動など、全体の形状は、実験で観察される性状とよく一致している。

3.2.6 本解析手法の特徴

粘塑性有限要素法 (VFEM) と粘塑性サスペンション要素法 (VSEM)

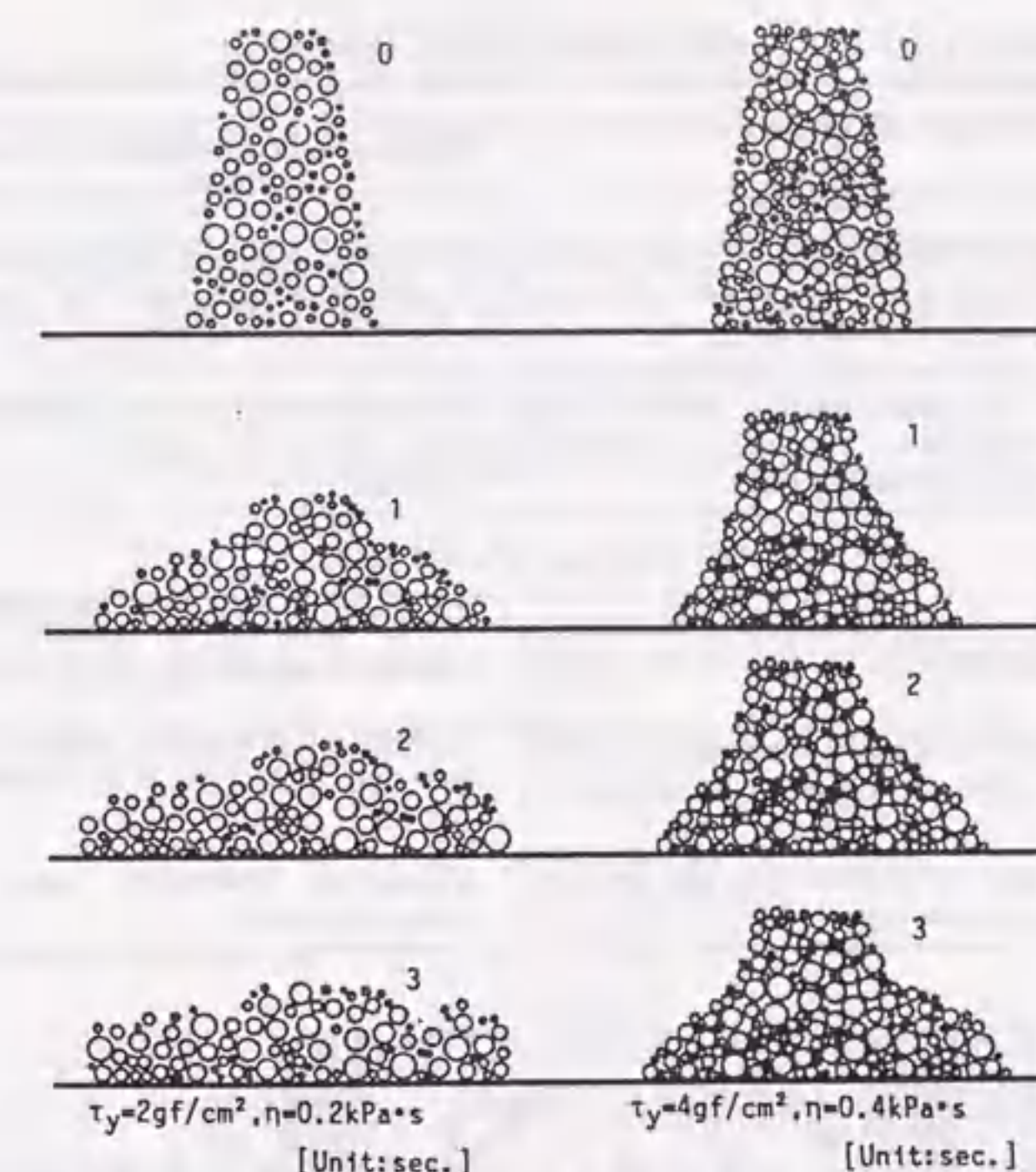


図-3.6 スランプ試験のシミュレーション結果の一例

の特徴の比較を表-3.1に示す。粘塑性有限要素法では、境界面との衝突判定などの処理は複雑なものとなるが、粘塑性サスペンション要素法では、逐次サスペンション要素を再構築するため、境界面との接触など境界条件を比較的簡単に導入することができる。また、節点(粗骨材)は要素構成に拘束されないため、非常に複雑な流動挙動を表現することも可能になる。粘塑性有限要素法ではコンクリートのレオロジー定数を入力値として使用するが、粘塑性サスペンション要素法では、回転粘度計などで比較的測定が容易とされているモルタルのレオロジー定数を入力値として使用するため、レオロジー試験結果を反映させやすい手法であるといえる。

一方、粘塑性有限要素法ではコンクリートの体積が一定となるように考慮しているが、粘塑性サスペンション要素法ではサスペンション要素が自由に発生・消滅するため、コンクリートの体積は、別途に考慮する必要がある。また、個々の粗骨材の運動をシミュレートするため、粗骨材がコンクリート全体系の流動挙動に与える影響を考慮することが可能である反面、計算容量が膨大となり、大規模な流動挙動を解析することが難しい。

表-3.1 粘塑性サスペンション要素法と粘塑性有限要素法の比較

Item	Viscoplastic suspension element method - VSEM -	Viscoplastic finite element method - VFEM -
Input parameters	* Rheological constants of fresh mortar	* Rheological constants of fresh concrete
Analytical method	* Consider matrix mortar and aggregate, and calculate deformation of matrix.	* Divide fresh concrete into elements, and calculate deformation of elements.
Description of flow	* Displacement of nodal points.	
Characteristics	* It is simple to dispose of restrictive condition. * Motion of node is free, and it is able to simulate the effects of aggregate. * Large calculation time and memory are necessary.	* It is complex to dispose of restrictive condition. * Accuracy of calculation is good in case of homogeneous continuum model. * Calculation memory used is relatively small.

マトリックスモルタルのレオロジー定数を入力値としているため、コンクリートの調合を模索する際に、どの程度のレオロジー定数を持つマトリックスモルタルであれば所用のコンクリートを得ることができるかを事前に検討することができる。実際にも、コンクリートを製造する前段階として、マトリックスモルタルの流動性によって調合を検討していることから、本手法を用いることにより、コンクリートの品質管理をさらに簡便に行うことができるものと思われる。

3.3 粘塑性空間要素法

粘塑性サスペンション要素法がミクロな視点からフレッシュコンクリートを取り扱うのに対して、粘塑性空間要素法では、マクロな視点からフレッシュコンクリートの流動挙動を解析する手法である。細かい鉄筋間を流動する様子を観察することは実施工を理解する上で重要なことであるが、実施工規模でのコンクリートの流動挙動を理解するために、何トンにもおよぶ粗骨材個々の運動をトレースするのは非現実的である。粘塑性サスペンション要素法の自由度を持ちながらも、各種施工条件下の流動挙動を容易にシミュレートしうる解析手法が必要である。

粘塑性空間要素法 (Viscoplastic Divided Space Element Method, VDEM) の

概念を図-3.7に示す。粘塑性空間要素法では、フレッシュコンクリートが流動すると予想される空間全体を空間要素に分割し、フレッシュコンクリートが存在する空間要素には、仮想の浮子（マーカー）をランダムに配置する。ここで、粘塑性有限要素法 (VFEM) と同様の粘塑性計算を行い、節点変位量を求めるが、粘塑性有限要素法の場合とは異なり、粘塑性空間要素法では、同図に示すように、節点変位量から各マーカー位置における変位量（流速ベクトル）を計算し、マーカーのみを移動させる。これによって、要素構成に捕らわれることなく、大変形問題を取り扱うことができる。

3.3.1 空間要素

本解析手法では、コンクリートの流動が予想される空間を有限個の要素（以下、空間要素と呼ぶ）に分割し、各要素ごとに異なる属性を持たせることがで

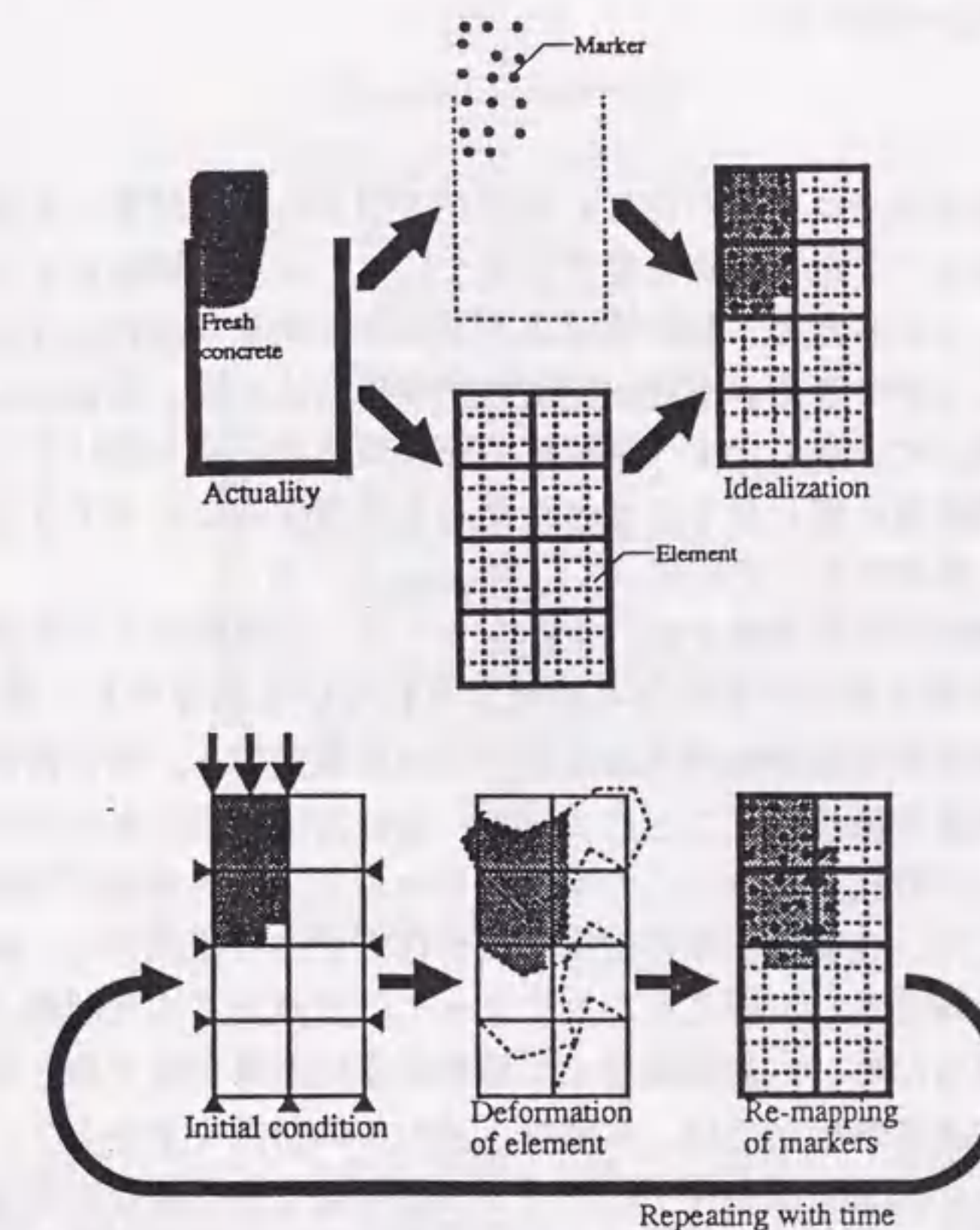


図-3.7 粘塑性空間要素法の概念

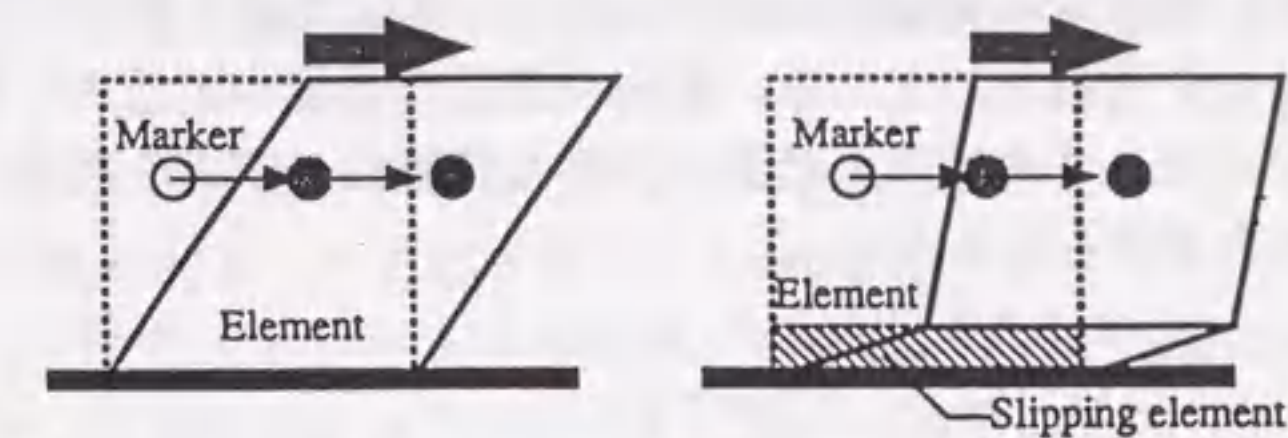
きる。マーカーが存在する空間要素には、ビンガム流体の性質と自重を与え、その他の空間要素には、粘性が非常に小さい（後述の解析例では1Pa）ニュートン流体の性質を与える。この解析では、コンクリートの属性を持つ空間要素は非圧縮性の流体であると仮定しているが、マーカーのない非コンクリートの属性を持つ空間要素は、自重の無い圧縮性の流体であると仮定している。連続地中壁の施工など、水中での施工では、非コンクリートの属性を持つ空間要素にも比重と非圧縮性の性質を与える必要がある。

また、空間要素には、型枠内の特性を与えることもできる。すなわち、型枠振動機や配筋が施されている部分など、他の空間と異なる状態を、みかけのレオロジー定数の変動として設定することができる。みかけ上は、同一調合のコンクリートであっても、配筋を想定した位置ではレオロジー定数を増大させ、振動による流動化を想定した場合は、当該空間でのレオロジー定数を小さく設定する。振動や配筋状態がみかけのレオロジー定数に与える影響については、6.2節および6.3節で述べる。

3.3.2 境界条件

粘塑性空間要素法では、あらかじめ流動が予想される空間すべてを要素として取り扱っており、また、節点を変位させずにマーカーの移動によってその流動挙動を表現しているため、粘塑性有限要素法と比較して境界条件を比較的簡単に設定することができる。また、粘塑性空間要素法では、垂直応力とすべりせん断速度の双方に依存したすべり抵抗を持つ境界節点を設けることによって、試料と境界壁面の間に生じるすべり挙動を表現することができる。すべり抵抗に関する構成則としては式(2.4)を用いている。

しかし、粘塑性空間要素法では、流動をマーカーの移動によって表現することから、ある空間要素の一部の節点が固定されている場合でも、図-3.8に示すように、その空間要素が変形すればマーカーは移動する。壁面近傍の空間要素のサイズや性質を調整することによって、疑似的に壁面におけるすべり挙動を表現することが可能となる。この手法を用いると、境界条件を単純化することができる。また、3次元壁体の前後面におけるすべり抵抗を、みかけのレオロジー定数の増加として捉えることによって、単純な2次元問題として解析することができるため、大規模問題を比較的少ない計算容量で取り扱うことが可能となる。後述の解析例では、本解析手法のこの特徴を活かして、フレッシュコンクリートの実大施工条件下における流動挙動を小規模な計算能力で再現することに重点を置いている。このような理由から、本研究では、すべり挙動などの局所的な現象を考慮していない。



(a) すべりを直接考慮する場合

(b) すべり要素を用いる場合

図-3.8 すべり抵抗力の表現方法の概念

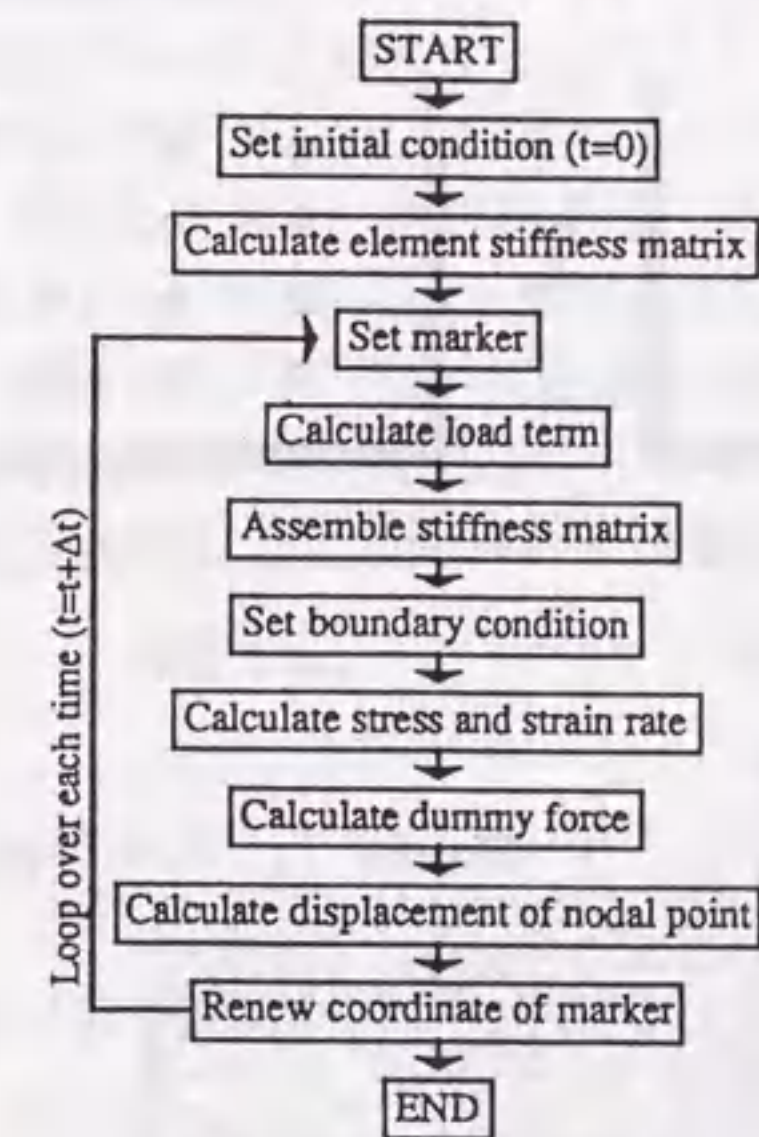


図-3.9 粘塑性空間要素法のフローチャート

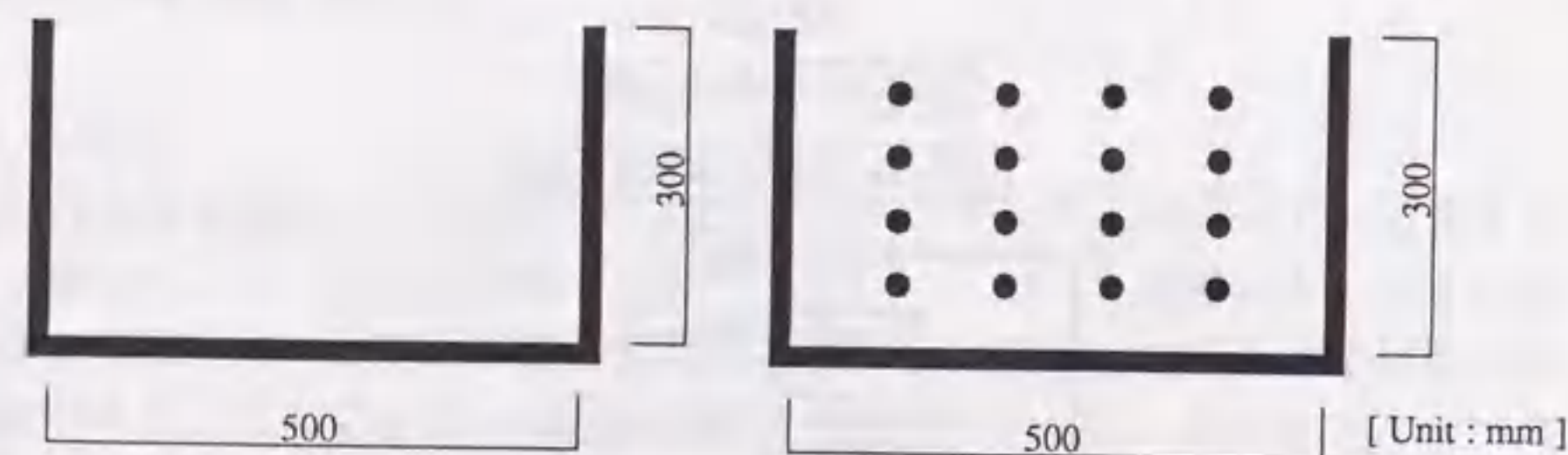
3.3.3 構成則

ここでは、粘塑性サスペンション要素法の場合と同様に、構成則として式(2.1)および式(2.2)に示したHohenemser・Pragerによる式を用いる。大規模構造物では、自重による高い静水圧が生じ、粗骨材のインターロックなどが

試料の流動挙動に大きな影響を与える。しかし、本解析手法が対象とする規模や用途では、試料のコンシステンシーのみで空間要素のレオロジー的性質が決定されるのではなく、配筋や振動機の配置状況などの施工条件を間接的に考慮したレオロジー定数を入力値としている。配筋や振動の影響が定量的に明らかではない現状では、これらを直接入力できるような複雑なモデルを利用するメリットは少ないものと考えられる。

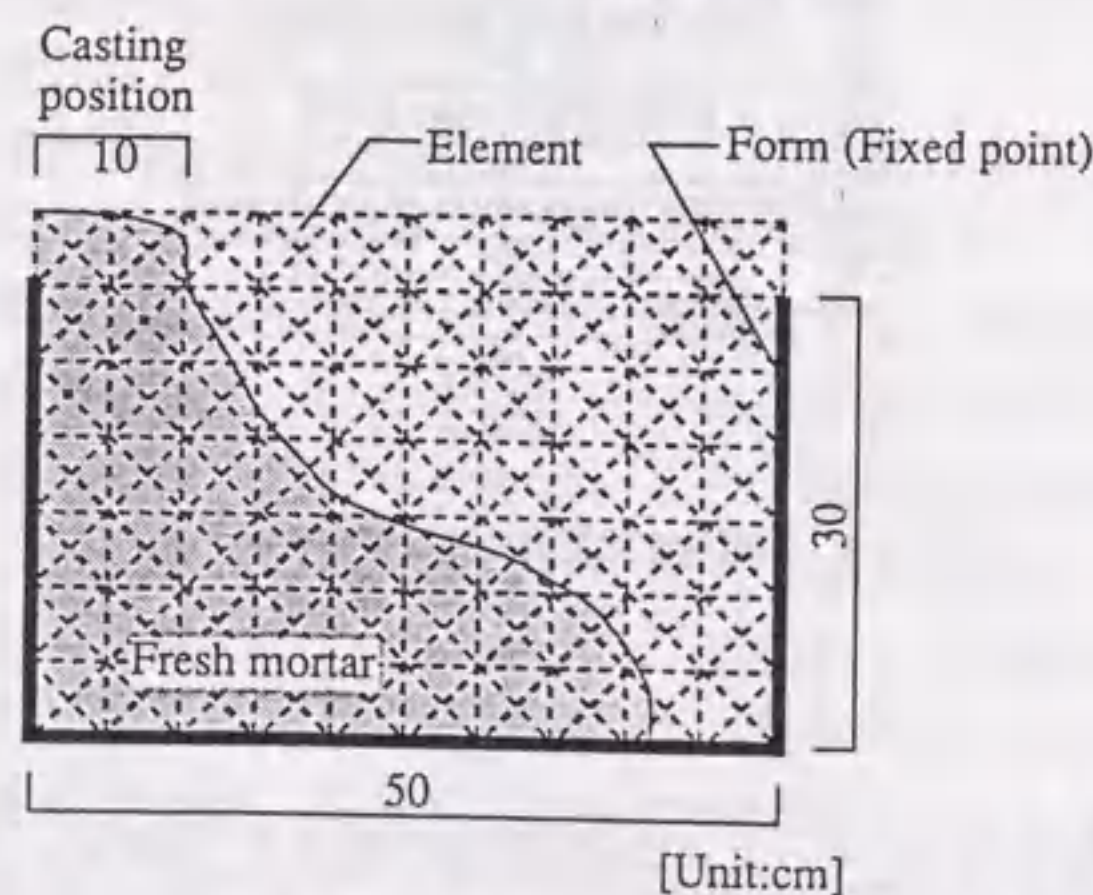
3.3.4 解析手順

粘塑性空間要素法のフローチャートを図-3.9に示す。粘塑性空間要素法では、前掲の図-3.7に示すように、有限個の空間要素を、マーカーの有無によってコンクリート要素と非コンクリート要素に分類する。粘塑性計算によって得られた節点変位量から各マーカー位置における変位量（流速ベクトル）を計算し、マーカーのみを移動させる。マーカーは、以前に存在した空間要素の領



(a) A型枠

(b) B型枠



(c) 解析-3.2に用いた要素分割

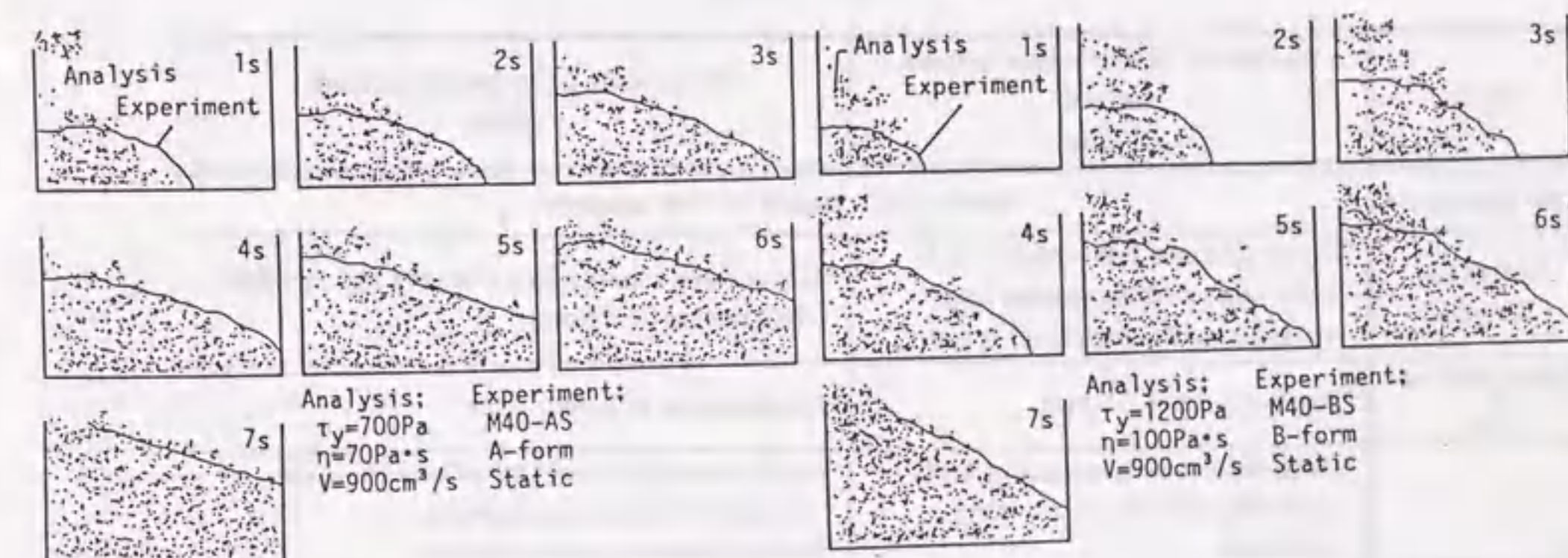
図-3.10 解析-3.2および実験-3.2に用いた型枠の形状・寸法

域から別の空間要素の領域へも移動することができ、ある空間要素の属性（コンクリートか非コンクリートか）は、その空間要素にマーカーが存在するか否かに依存している。節点変位は計算の過程で求められるが、実際には節点は移動させない。

コンクリートが打設される際のポンプ圧力やコンクリートの自重などの外力は、等価な節点力として入力される。6.4節で述べるコンクリート充填鋼管柱への打設などをシミュレートする場合、柱やポンプの一部を抽出して解析を行っているが、この場合はコンクリートに加わる実際の圧力ではなく、解析対象区間での圧力損失分を入力値として使用している。

3.3.5 解析例

実験-3.2および解析-3.2に用いた型枠の形状・寸法を図-3.10に示す。配筋を有する型枠内での流動挙動をシミュレートする際には、鉄筋の抵抗によって試料のレオロジー定数がみかけ上増大するものとして取り扱った。解析結果および実験結果の比較の一例を図-3.11に示す。図中の点および線はそれぞれ解析および実験の結果を示しており、解析結果は、実験結果を十分な精度でシミュレートしているといえる。実験-3.2と解析-3.2による流動挙動に若干の相違が見られるのは、実験では、落下途中の試料の体積を考慮していないのに対し、解析-3.2では、対象となる空間に存在するすべての試料の体積を打設量と算定するためである。なお、この実験および解析の詳細については、6.2節で述べる。



(a) 無振動・無配筋の場合

(b) 無振動・配筋の場合

図-3.11 小型壁状型枠内での流動挙動

3.3.6 本解析手法の特徴

粘塑性空間要素法 (VDEM) と粘塑性有限要素法 (VFEM) の特徴の比較を表-3.2に示す。粘塑性有限要素法および粘塑性空間要素法のいずれも粘塑性計算によって節点変位を計算しているが、粘塑性空間要素法では、節点を変位させずマーカーを移動させている。したがって、要素の構成や大小は、計算精度に影響を与えるが、大変形問題を解く際の障害となるものではない。この点が本解析手法の最大の特徴であり、この処理によって、要素構成に捉らわれることなく、コンクリートの大変形 (流動) を表現することが可能となる。

また、基本的に粘塑性有限要素法は単相材料を取り扱う解析手法であるのに対し、粘塑性空間要素法では、複数の性質を各空間要素に与えており、配筋の有無をはじめとして、マーカーの有無、時間経過、などによって空間要素の性質を変化させている。この自由度の高さは施工条件を再現する際に有用である。

さらに、粘塑性有限要素法と粘塑性空間要素法の相違点の一つとして、粘塑性有限要素法では、取り扱っているコンクリートの体積が一定であるのに対し、粘塑性空間要素法では、基本的にコンクリートが打設され続けている点が挙げられる。粘塑性空間要素法では、打設されたコンクリートの体積を逐次計算することによって所定量と比較し、過不足がないかをチェックすることによって、打設されたコンクリートの体積が所定量よりも大きい場合は、コンクリートの打設を瞬間的に停止する。

表-3.2 粘塑性空間要素法の特徴

Items	Viscoplastic divided space element method - VDEM -	Viscoplastic finite element method - VFEM -
Input parameters	*Rheological constants of fresh concrete	
Analytical method	*Divide all space into elements and cells, and calculate whether fresh concrete exists in each cell or not.	*Divide fresh concrete into elements, and calculate deformation of elements.
Description of flow	*Displacement of markers.	*Displacement of nodal points.
Characteristics	*Large deformation, separating and gathering of concrete are easily analyzed. *Accuracy of solution depends on size of cell. *Boundary condition is simple.	*Applicable subjects are limited because of the restraint of element construction. *It is applicable to micro problem. *Accurate solution can be obtained if deformation is small. *Boundary condition is complicated.

3.4 まとめ

本章では、フレッシュコンクリートの流動挙動をシミュレートするための数値解析手法である粘塑性サスペンション要素法および粘塑性空間要素法について、その基本原理および解析手順を解説するとともに、粘塑性有限要素法と比較しながらその特徴について述べた。また、実験結果と比較した解析例を示し、本解析手法の妥当性を示した。

フレッシュコンクリートのレオロジー特性は、その組成、配合、施工条件などに大きく影響を受ける。特に、骨材の形状、サイズ、含有率、そしてセメントの種類、配合比、水灰比などが、フレッシュコンクリートの流動性、粘着性、分離抵抗性に大きな影響を与える。本章では、これらの要因がフレッシュコンクリートのレオロジー特性にどのように影響を与えるかを検討する。

まず、骨材の形状とサイズの影響について検討する。骨材の形状が球形に近いほど、コンクリートの流動性は向上する。一方、骨材のサイズが大きくなると、コンクリートの流動性は低下する。これは、骨材のサイズが大きくなると、コンクリートの流動性に対する抵抗が増えるためである。

次に、セメントの種類と配合比の影響について検討する。セメントの種類によって、コンクリートの流動性は異なる。一般的に、セメントの配合比が高くなると、コンクリートの流動性は低下する。これは、セメントの配合比が高くなると、コンクリートの流動性に対する抵抗が増えるためである。

表 4.1 フレッシュコンクリートのレオロジー特性

項目	単位	測定方法
流動性	cm/s	流動性試験機による測定
粘着性	Pa	粘着性試験機による測定
分離抵抗性	%	分離抵抗試験機による測定
骨材の形状	mm	骨材の形状試験機による測定
骨材のサイズ	mm	骨材のサイズ試験機による測定
セメントの種類	kg/m ³	セメントの種類試験機による測定
配合比	kg/m ³	配合比試験機による測定
水灰比	kg/m ³	水灰比試験機による測定

第4章 フレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究

4.1 概説

4.2 フレッシュコンクリートのレオロジー定数の簡易推定手法

4.3 粗骨材がコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響

4.4 粘性の大きいフレッシュコンクリートの流動性

4.5 コンクリートの分離抵抗性

4.6 まとめ

フレッシュコンクリートのレオロジー特性は、その組成、配合、施工条件などに大きく影響を受ける。本章では、これらの要因がフレッシュコンクリートのレオロジー特性にどのように影響を与えるかを検討する。まず、骨材の形状とサイズの影響について検討する。骨材の形状が球形に近いほど、コンクリートの流動性は向上する。一方、骨材のサイズが大きくなると、コンクリートの流動性は低下する。これは、骨材のサイズが大きくなると、コンクリートの流動性に対する抵抗が増えるためである。次に、セメントの種類と配合比の影響について検討する。セメントの種類によって、コンクリートの流動性は異なる。一般的に、セメントの配合比が高くなると、コンクリートの流動性は低下する。これは、セメントの配合比が高くなると、コンクリートの流動性に対する抵抗が増えるためである。

第4章

フレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究

4.1 概説

フレッシュコンクリートのコンシステンシーを的確に把握するためには、現行のスランプ値のみによる評価方法では限界がある。特に、高強度コンクリート、水中不分離性コンクリート、高流動コンクリートなどは、従来のコンクリートに比べて粘性が高く、同一のスランプ値でも、その施工性は著しく異なることが報告されている[88-91]。フレッシュコンクリートの流動性を、そのレオロジー性質を入力値として予測する技術が、数値解析および理論解析によって可能になりつつある。これらの技術の基礎となるのは、フレッシュコンクリートのレオロジー性質の把握であり、レオロジー性質を測定するための技術の確立が、この分野における緊急を要する課題となっている。しかし、現在、実験室レベルで適用されている各種のレオロジー試験装置[25-42]は、測定範囲が限られている上、測定方法が複雑であるため、実用化が難しい。

フレッシュコンクリートのあらゆる条件下におけるワーカビリティを正確に予測するためには、ある種の物理量に基づいた理論的・解析的な対応による汎用的な解析技術を確立することが重要であり、これを実現するためには、レオロジーの立場からのアプローチが最も有力である。フレッシュコンクリートの挙動を表現するレオロジーモデルとしては、ビンガムモデルをはじめとして、各種の構成則に関する研究が報告されており、フレッシュコンクリートのレオロジー性質が徐々に解明されつつある[5,25]。しかし、シリカフュームや高炉スラグ微粉末、高性能AE減水剤など、フレッシュコンクリートの性能改善に有用な新材料が次々と開発され、コンクリート工事の合理化に大きな成果をもたらしているものの、これらの材料を使用することによって、多種多様なコンクリートが出現し、物性解明の基礎となるレオロジー的なデータに関する研究報告は材料開発の速度や量に比較して決して十分なものとはいえない。

従来のコンクリートに対して、調合とコンシステンシーの関係を実験的に調べた研究は数多く報告されているが、前述のように多種多様な混和材料の出現により、これらを合理的に評価するためにはレオロジー理論の観点からデータを取り扱わなければならない。しかし、すべての調合に関してレオロジー性質を調べることは現段階では不可能であり、比較的レオロジー定数を測定しやすいとされているモルタルの物性をレオロジー試験で定量化し、モルタルに対し

で粗骨材が混入することによって生じるレオロジー性質の変化を定量的に評価する手段を確立することが現実的な選択といえる。化学的な影響を及ぼす混和材料とは異なり、フレッシュ状態における性状は、粗骨材の物理的な性質にしか影響されないことから、このアプローチの発展が期待できる[68]。

さらに、ワーカビリティを判定するためには、上記のようなコンクリートのコンシステンシーに加え、各種施工条件に対する適用性を適切に評価する必要がある。これには鉄筋を回避して粗骨材を連行して流れる能力や、振動下での流動性や加振されても粗骨材を分散した状態で保持する能力などが挙げられる。しかし、振動下におけるフレッシュコンクリートの性状をレオロジー的に解明した研究報告は少なく[92-95]、施工性に関する合理的な評価方法を模索している段階にあるといえる。この原因の一つとして、フレッシュコンクリートの性状評価に「材料分離」と総称される曖昧な評価基準が用いられていることが挙げられる。材料分離は、材料自身の性質と施工環境の両者に起因するものであり、また、粗骨材とマトリックスモルタルの分離、ペーストと細骨材との分離、水の分離（ブリーディング）など、異なる現象を材料分離という単一の用語で包括して議論しているため、研究対象も曖昧となっている。高流動コンクリートの出現により、粗骨材とマトリックスモルタルの分離抵抗性に関するデータが徐々に報告されてきているが、体系的にかつ定量的に報告された例は非常に少ない。

本章では、フレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼす粗骨材の影響について検討するとともに、高性能A E減水剤、シリカフューム、高炉スラグ微粉末などの混和材料を用いた低水セメント比で高粘性のフレッシュコンクリートに、粘塑性有限要素法による解析結果に基づくレオロジー定数推定手法を適用して、そのレオロジー性質を明らかにするとともに、この種のコンクリートの材料分離性状を含めたコンシステンシーの評価方法について検討を行った結果について述べる。

4.2 フレッシュコンクリートのレオロジー定数の簡易推定手法

フレッシュコンクリートのレオロジー定数を、現行のコンシステンシー試験による測定結果から推定するためには、それぞれのコンシステンシー試験値とレオロジー定数の関係が明らかになっていることが前提となる[96]。この関係を究明するために、実験および解析の双方から数多くの研究が進められている。

まず、実験的なアプローチとしては、コンシステンシー試験とレオロジー試験を同一の試料に対して行うことになるが、この場合、広範囲の割合に対して信頼できる測定が可能なレオロジー試験が存在しないという問題があり、実用的な推定を可能にするようなデータはほとんど得られていない。これに対して、解析的なアプローチでは、広範囲の条件に対してデータを得ることが可能となるが、一般に数値解析手法は複雑になることが多い。

4.2.1 コンシステンシー試験の組合わせ

現在用いられている各種レオロジー試験では、フレッシュコンクリートの流動性状はビンガムモデルで表現できると仮定するため、レオロジー定数は、降伏値と塑性粘度の2つの値となり、単一のレオロジー試験値から両者を推定することは数学的に不可能である。つまり、2つのレオロジー定数を求めるためには、異なる速度条件下における測定値を求めるツーポイント試験の概念[33]と同様の考え方が必要となる。また、降伏値が静的な試験値からほぼ推定できるのに対して、塑性粘度を求めるためには、運動中の流動速度あるいは流動時間を測定する必要がある。現行のコンシステンシー試験では、特に後者の測定項が不足している。例えば、スランプ試験などでは、停止時の静的釣合状態を測定の対象とするため、試験結果が降伏値の影響を強く受けるのに対して、フロー試験などのように比較的動的に近い応力下で行われる試験は、塑性粘度の影響も受けやすい。

したがって、2つのレオロジー定数を推定するには、これらの両試験のように、2つのレオロジー定数の影響の度合いができるだけ異なるコンシステンシー試験値を組み合わせることが精度の向上につながる。

レオロジー定数である降伏値および塑性粘度がスランプ値、フロー値などの測定値に与える影響を、粘塑性有限要素法によって解析し、この結果を整理することによって、実測の複数の試験値から、レオロジー定数を推定することができる。コンシステンシー試験値の組合わせは、数多く存在するが、複数の試験が共通して適用できる試料の範囲や推定精度上の限界から実用に耐えうる組合わせは比較的少数となる。これらの組合わせとその特徴を表-4.1に示す。

4.2.2 レオロジー定数推定図

図-4.1は、スランプ (SI)、コンクリートフロー値 (Cfl₁₅)、モルタルフロー値の変化量 (Mfl₁₅₀: 落下15回目の値と落下0回目の値の差)、Lスランプ値 (Ls)、小型Lスランプ値 (sLs)、Lフロー初速度 (Lv) および小型Lフ

表-4.1 コンシステンシー試験の特徴

Test		Portability	Accuracy	Applicability
Slump	Concrete flow	○	○○	Dry mixed concrete
	L flow	○○	○○○	Wet mixed concrete
○○○		○		
Slump	Mortar flow	○○	○○○	Dry mixed mortar
		○○○	○	Wet mixed mortar
Slump	○○	○○○		
Small L flow	○○○	○		

ロー初速度 (sLv) とレオロジー定数 (降伏値 τ_y および塑性粘度 η) の関係を示したものである。表中に示した複数のコンシステンシー試験値を測定することによって、モルタルまたはコンクリートのレオロジー定数を予測することができる。

4.2.3 各種コンシステンシー試験のレオロジー的意味

(1) スランプ試験

スランプ試験では、スランプ値とスランプフロー値が測定できるが、いずれも降伏値の影響を強く受ける。高粘性のコンクリートは、スランピング速度が遅いので、慣性力によるオーバーランが少なくなり、スランプ値およびスランプフロー値は若干小さくなるが、ある程度以上高粘性になると、粘性の影響は小さくなるので、これらの試験値はほぼ降伏値に支配される。したがって、スランプフロー値を用いてコンクリートの粘性が検出できるとする考え方は正しくない。スランプフロー値は、スランプの測定範囲を越えるような一部の試料の評価値としては使用できるが、底面のすべり抵抗の影響を強く受けるため、試料の変形性質の測定には精度上適さない。また、すべり抵抗と粘着性との間には関連性があるため、スランプフロー値で材料分離を評価しようとする考え方も、影響要因の複雑さを考慮すれば現実的ではない。

コンクリートフロー試験、スプレッド試験、モルタルフロー試験などでは、静止状態の形状に関する値が測定できるが、フローテーブルの落下を繰り返すことによって衝撃力が瞬間的に作用するため、変形速度の減衰の速さによる影響が積算され、結果的に測定値に時間項 (すなわち粘性項) が含まれると考えることができる。この点では、通常のスランプ試験も重力加速度の影響を受けるので、最終的に静止したときの形状にも塑性粘度の影響が若干現れるはずで

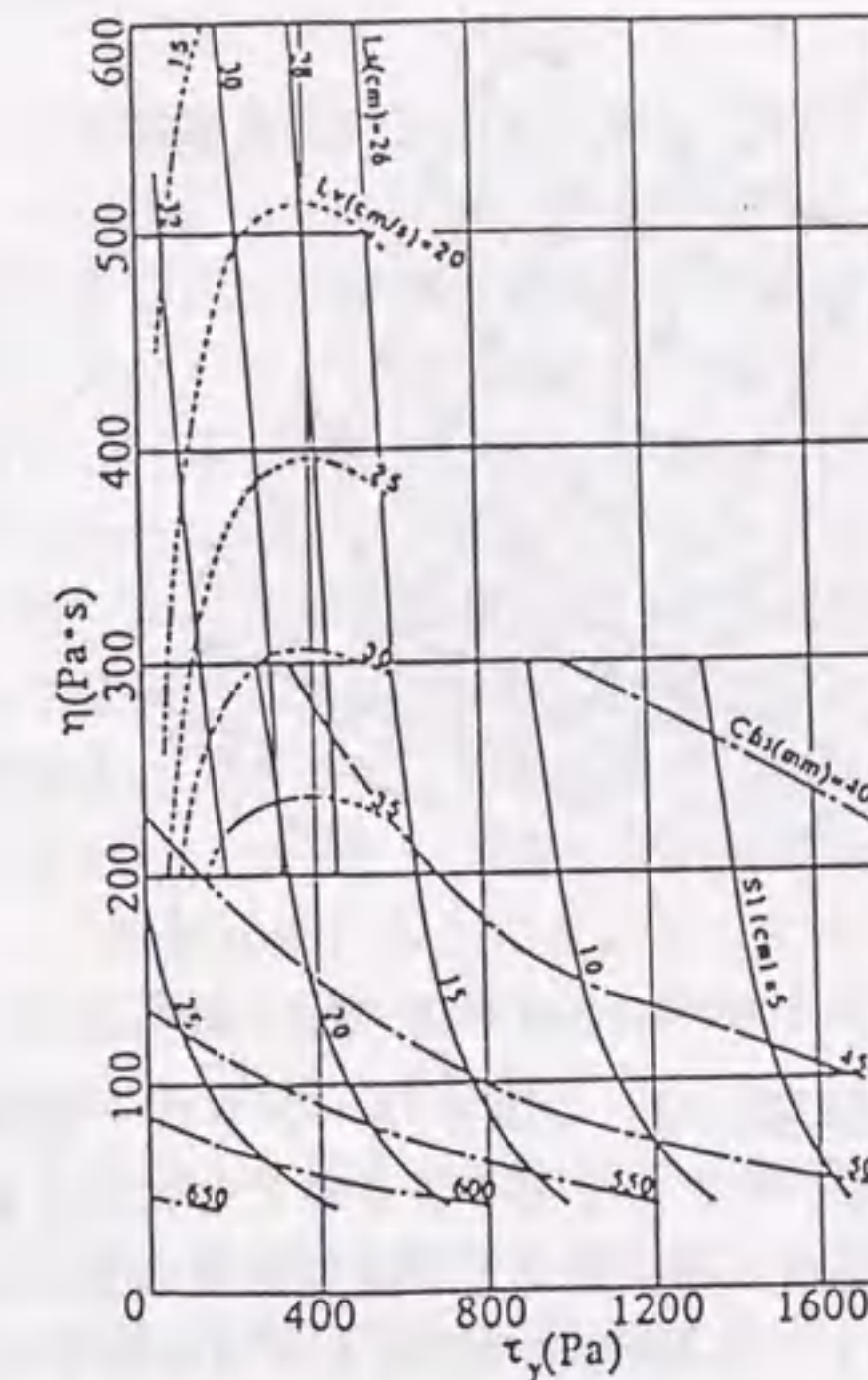


図-4.1 レオロジー定数の簡易推定図

ある。森らの解析的な研究[15,97]によれば、図-4.2に示すように、スランプ値では降伏値の影響が支配的となり、塑性粘度の影響が小さく、この測定値から塑性粘度を推定することが難しいという結果が報告されている。同図に示すように、スランプ値から、およそその降伏値を推定することができる。したがって、他の比較的粘性の影響を受けやすいコンシステンシー試験とスランプ試験を組み合わせることによって、高い精度のレオロジー定数推定が期待できる。

一方、スランピング (スランプ試験時のスランプ値の時間変化) 曲線によるレオロジー定数推定手法については、数値解析の他に、単純なモデルによる理論解が得られており[10]、測定装置が実用化されれば、レオロジー定数推定手法として精度のよいシステムといえるが、現段階では、装置は簡便性を欠き、本試験の最大の長所を損なうものである。

(2) テーブル落下型フロー試験

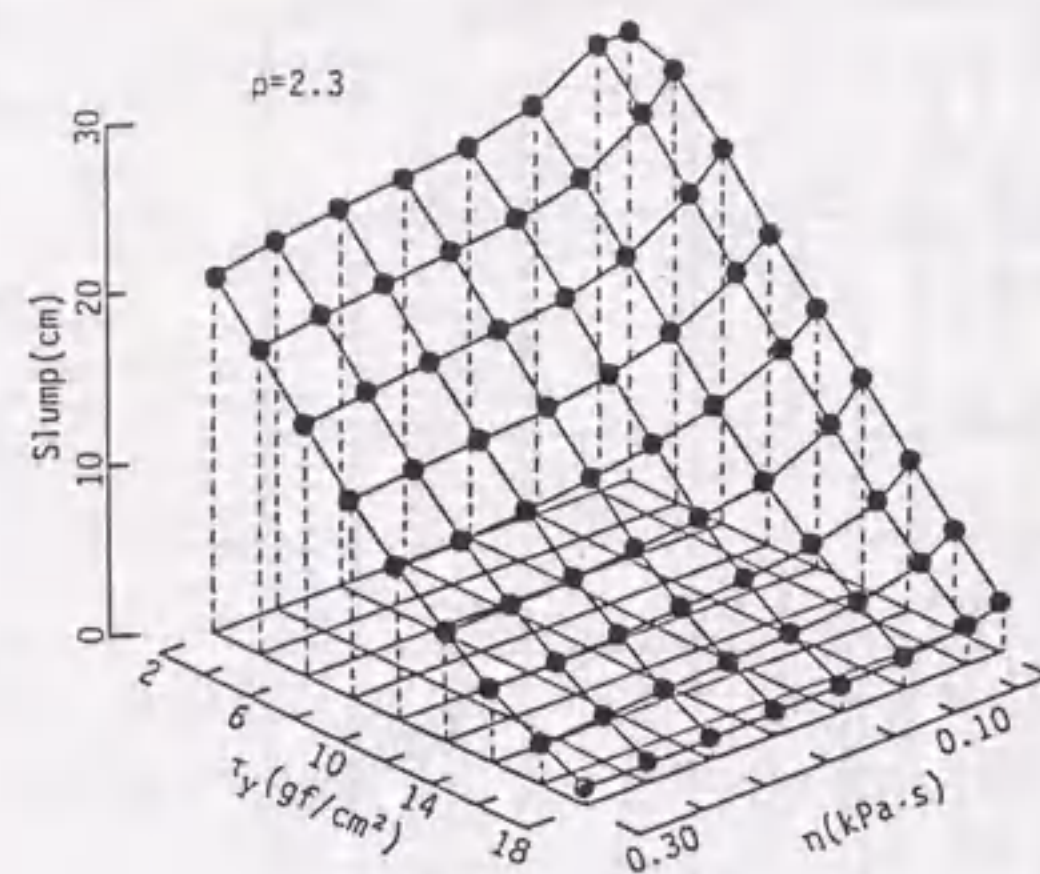


図-4.2 スランプ値とレオロジー定数の関係

テーブル落下型のフロー試験には、コンクリートフロー試験とモルタルフロー試験があるが、いずれもテーブルを落下させることによる瞬間的な加速度によって、変形を強制するため、降伏値および塑性粘度の影響を含む測定値が得られる。しかし、底面のすべり抵抗の影響も大きいのが欠点である。フロー試験のみからレオロジー定数を推定するには、15回の落下後のフロー値のみではなく、途中のフロー値（例えば、0および4回目）を測定する必要がある。また、スランプ値と組み合わせれば、降伏値の推定精度が格段によくなり、結果として、塑性粘度も正確に推定できる。

(3) Lフロー試験

高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法の1つとして開発されたLフロー試験の測定値としては、Lスランプ値、Lフロー値、Lフロー速度およびLフロー初速度の4つがある。Lスランプ値はスランプ値と強い相関があり、この値から降伏値を推定することができる。Lフロー値は、スランプフロー値と同様である。この試験の最大の特徴は、Lフロー初速度の測定にある。Lフロー速度とLフロー初速度の違いは、測定区間が、前者はフロー距離全域であるのに対して、後者は、最初の50mmの区間で、センサーを用いて自動計測を行う点にある。これは、すべり抵抗の影響を比較的受けにくい初期領域で速度を測定しようとするものである。後述の実験では、Lフロー

試験装置に光センサーを取り付け、開口部から30mm～80mmの区間におけるコンクリートの通過時間を計測して、フレッシュコンクリートの粘性の検出を試みている。

粘塑性サスペンション要素法によるLフロー試験のシミュレーション（解析-4.1）の結果の一例を図-4.3に示す。同図に示されるように、軟練りコンクリートほど、試験装置下部に設けられた吐出部から流出するコンクリートの速度が速い。粘塑性サスペンション要素法では、マトリックスモルタルのレオロジー定数を入力値として用いるので、コンクリートのレオロジー定数をこの解析結果から推定するためには、コンクリートとマトリックスモルタルのレオロジー性質の関係を明らかにする必要がある。そのためには、粘塑性有限要素法を用いて、スランプ試験やLフロー試験の解析を行い、これらの結果と粘塑性サスペンション要素法によるシミュレーション結果を比較して相関を求める必要がある。しかしながら、マトリックスモルタルの物性が等しくても、後述の4.3節に示すように、粗骨材量の多少などによってもコンクリートとしての物性は異なるので、現実にはコンクリートとマトリックスモルタルのレオロジー性質の関係を一律に対応させることは難しい。

シミュレーションによって得られたLフロー値の初期経時変化を図-4.4に示す。コンクリートは、降伏値と塑性粘度の両者に影響されながら流動することがわかるが、この試験装置の適用範囲を考えると、降伏値は比較的狭い範囲のものに限られるため、実用上は、変形初期のフローイング挙動は塑性粘度に支配されていると考えて差し支えないものと思われる。さらに、実際にはLフロー試験の他にもスランプ試験を併用して実施することが多い点を考慮すれば、塑性粘度を推定する際に、降伏値による影響を修正することが可能であ

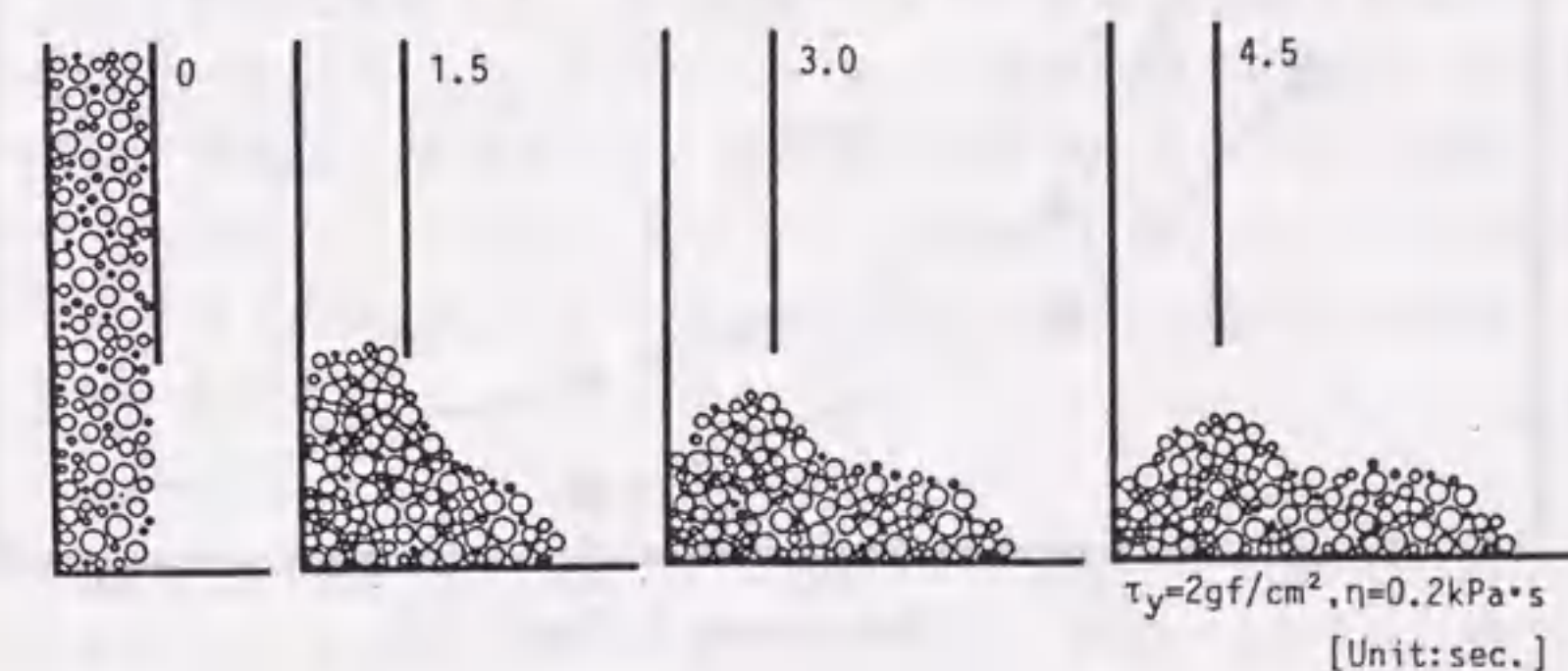


図-4.3 Lフロー試験のシミュレーション結果の一例

り、結果的に、Lフロー試験は十分な簡便性と推定精度を有しているものと判断できる。

Lフロー初速度 (L_v) とマトリックスモルタルの塑性粘度 (η) の関係を

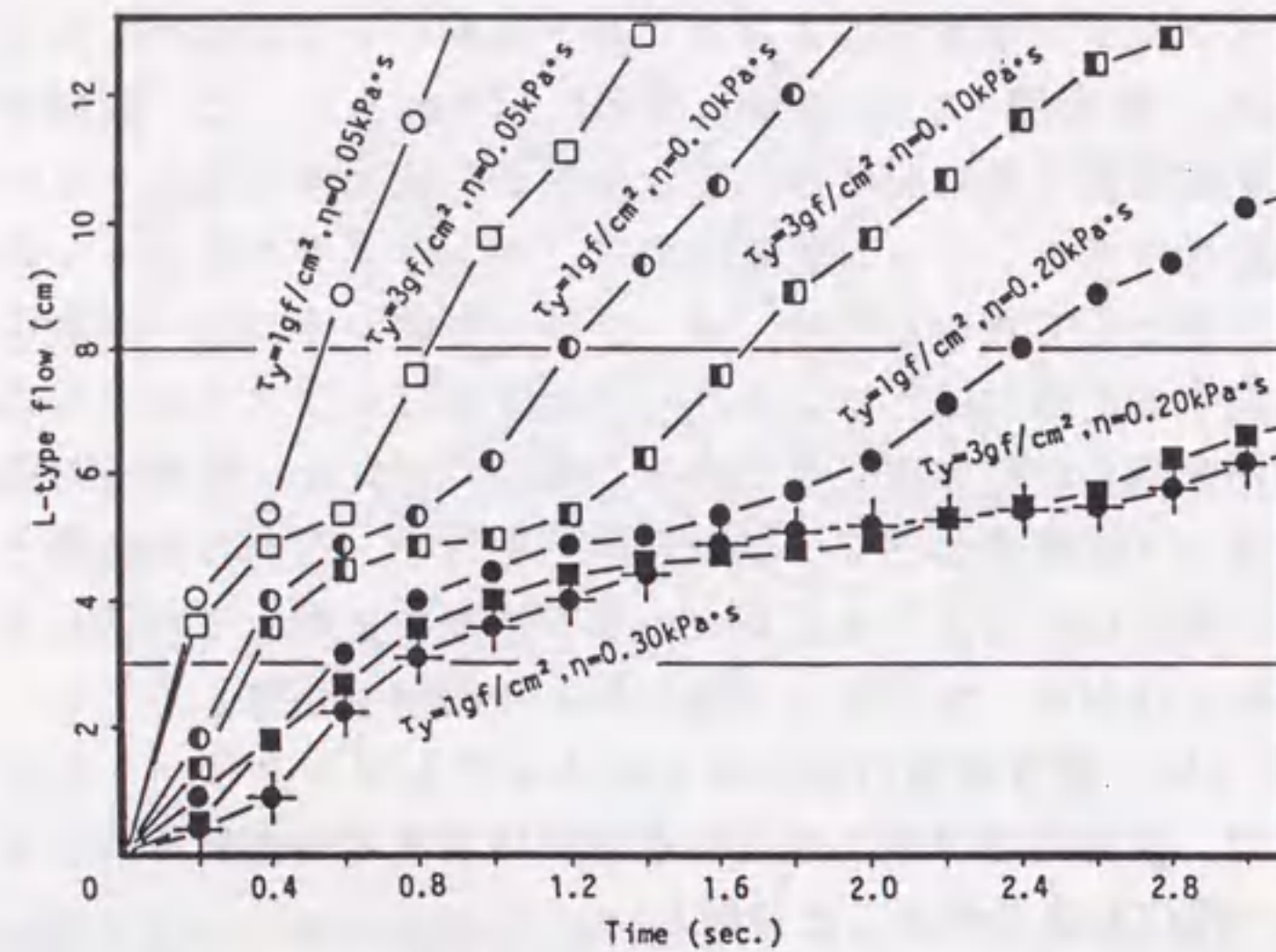


図-4.4 Lフロー試験でのコンクリートの流出状況

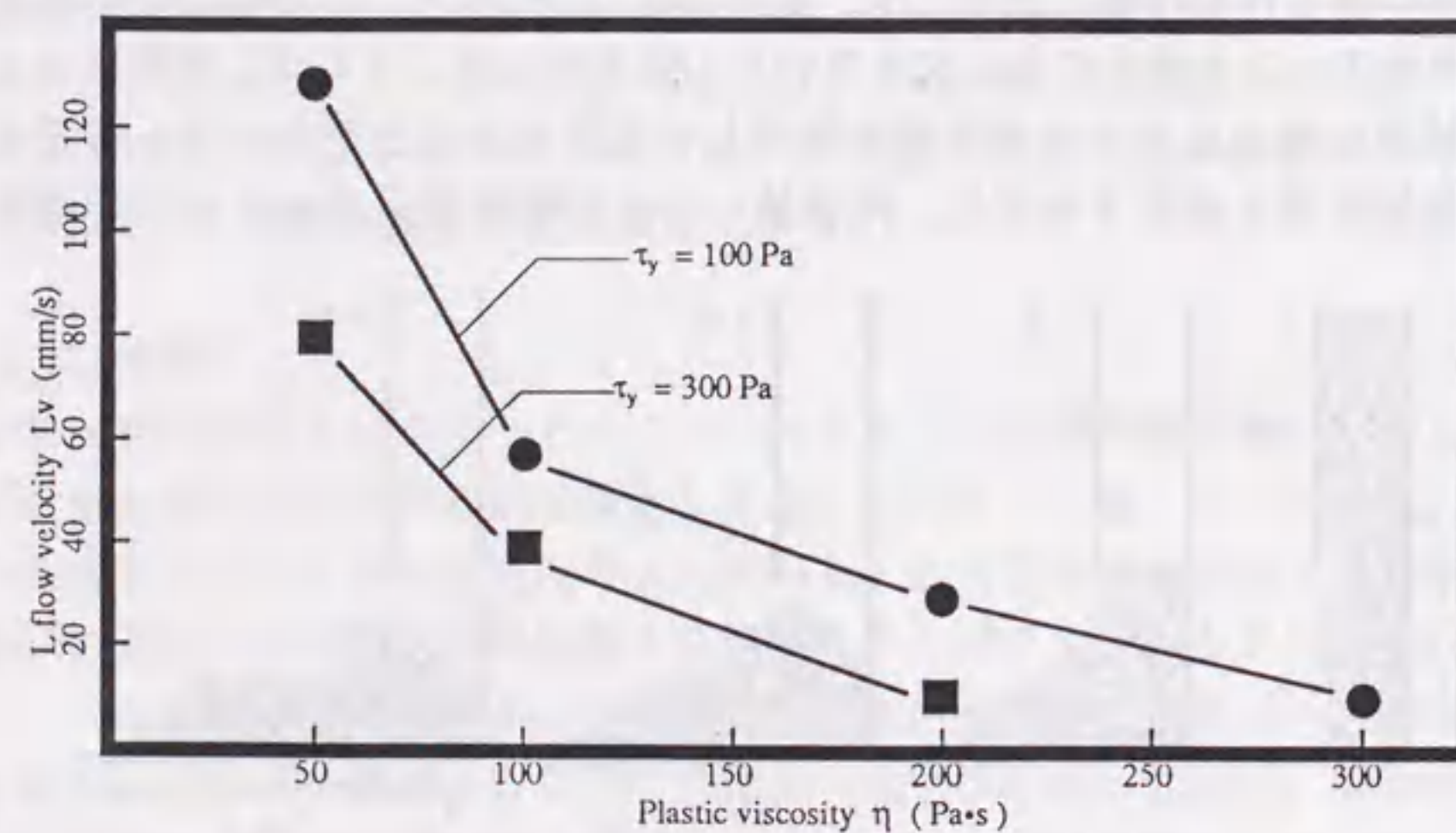


図-4.5 Lフロー初速度とレオロジー定数の関係

図-4.5に示す。この図から明らかなように、Lフロー初速度は、マトリックスモルタルの塑性粘度の変化に敏感であり、この測定値が粘性測定試験値として適していることがわかる。また、塑性粘度が大きくなるほど、降伏値の大小に影響される程度が小さくなり、この測定値を用いて塑性粘度を精度よく推定することが可能となる。塑性粘度が小さい領域では推定精度が悪くなるが、Lフロー試験は比較的高粘性のコンクリートに適用される場合が多く、実用上の問題は少ない。また、後述の4.4節に示す実験結果のように、本試験に適用されるコンクリートのマトリックスモルタルの降伏値は、通常100Pa程度であり、図-4.5によれば、この範囲では、降伏値のばらつきがLフロー初速度に与える影響および塑性粘度の推定に与える影響は小さいことがわかる。

4.3 粗骨材がフレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響

実験-4.1では、フレッシュコンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材の2相材料として取り扱うことによって、フレッシュコンクリートに与える粗骨材の影響を考察する。このことは、粘塑性サスペンション要素法のための入力値に関する情報を収集し、また、フレッシュコンクリートの流動メカニズムを考える上でも重要である。

4.3.1 実験手順

(1) 測定項目

実験-4.1では、コンクリートのレオロジー定数を前述の4.2節で示した簡易推定手法によって推定するために、スランプ試験、コンクリートフロー試験およびLフロー試験を実施した。さらに、モルタルおよび粗骨材量が少ない（基準粗骨材量の80%以下）コンクリートでは、比較的軟練りの試料に対してレオロジー定数を精度よく推定することが可能であるモルタルフロー試験および小型Lフロー試験によってコンシステンシーを測定した。Lフロー試験装置には、コンクリートの吐出口より3～8cmの区間のLフロー初速度を測定するために光センサーを設置した。

(2) 試料

実験-4.1に用いた試料の調合を表-4.2に示す。実験-4.1では、水セメント比および単位粗骨材量の変化がコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響を調べる目的で、水セメント比 (W/C) は55、40および30%の3水準とし、単位

表-4.2 実験-4.1 に用いた試料の調合表

Series	W/C	W	C	S	G	HAE	SI'
NC55M	55	175	318	984	984	0	18
NC40H			438				15
NC40M	40	180	450	987	987		18
NC40S		185	463				21
NC30M	30	165	550	971	971	0.8	18

[Notes] W/C: Water-cement ratio (%), W: Water (kg/m³), C : Cement (kg/m³), S: Sand (kg/m³), G: Gravel (kg/m³), HAE: Dosage of High-performance AE water reducing agent (%/C), SI': Designed slump value (cm).

粗骨材量 (G) を段階的に変化させた川砂利コンクリートを用いて測定を行った。スランプ値を18cmに設定した基準調合に対して、粗骨材量のみを0~120%まで20%刻みで変化させたコンクリートを実験に用いた。また、W/C=40%の調合では、基準調合の設定スランプ値を15cmおよび21cmとしたコンクリートについても測定を行った。W/C=30%のコンクリートでは、ナフタレンスルホン酸系の高性能AE減水剤を単位水量に対して内割で混入してスランプ値を調整した。

4.3.2 実験結果とその考察

(1) コンシステンシー試験

スランプ値 (SI)、スランプフロー値 (Sf)、コンクリートフロー値 (Cfl₁₅) およびLフロー初速度 (Lv) と粗骨材重量比 (G/Go) の関係を図-4.6に示す。ここに、G/Goは、粗骨材基準量に対する比を表している。図-4.6(a)に示すスランプ値の測定結果によれば、基準調合のときの測定スランプ値が、若干バラツキを示しているが、粗骨材量の増加に伴って、全シリーズがほぼ同様のスランプ低下傾向を示すことが認められる。前章で述べたように、スランプ値の変化は、レオロジー定数の降伏値の変化状況を表しており、他の試験値は、もう一つのレオロジー性質である塑性粘度を含んだ性状を表しているといえる。したがって、粗骨材の増加に伴って、塑性粘度は比較的早く増大し、また、降伏値は粗骨材重量比が特定の値よりも大きい場合に急速に増大する傾向を示すものと考えられる。

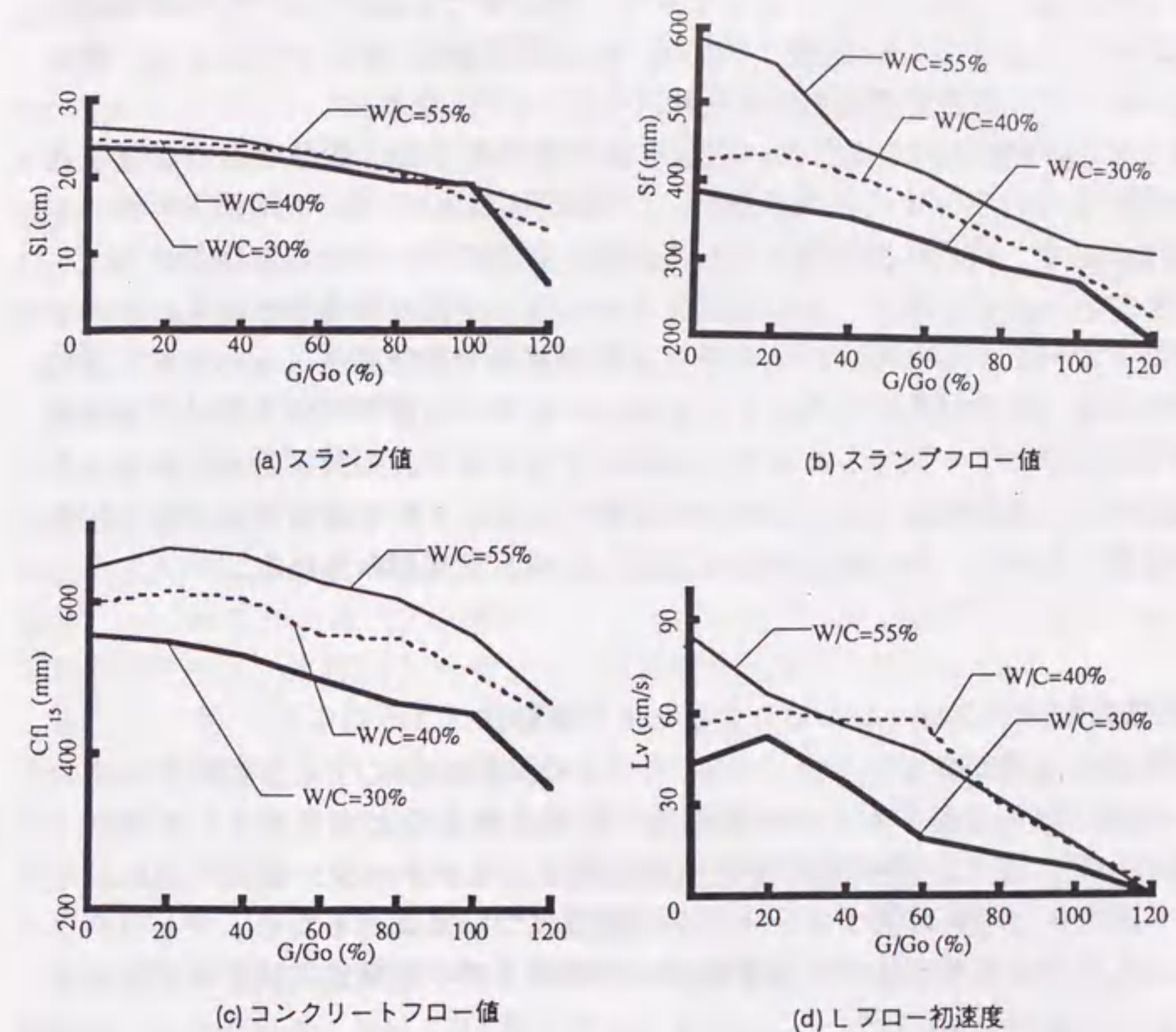


図-4.6 粗骨材量がコンシステンシー試験結果に与える影響

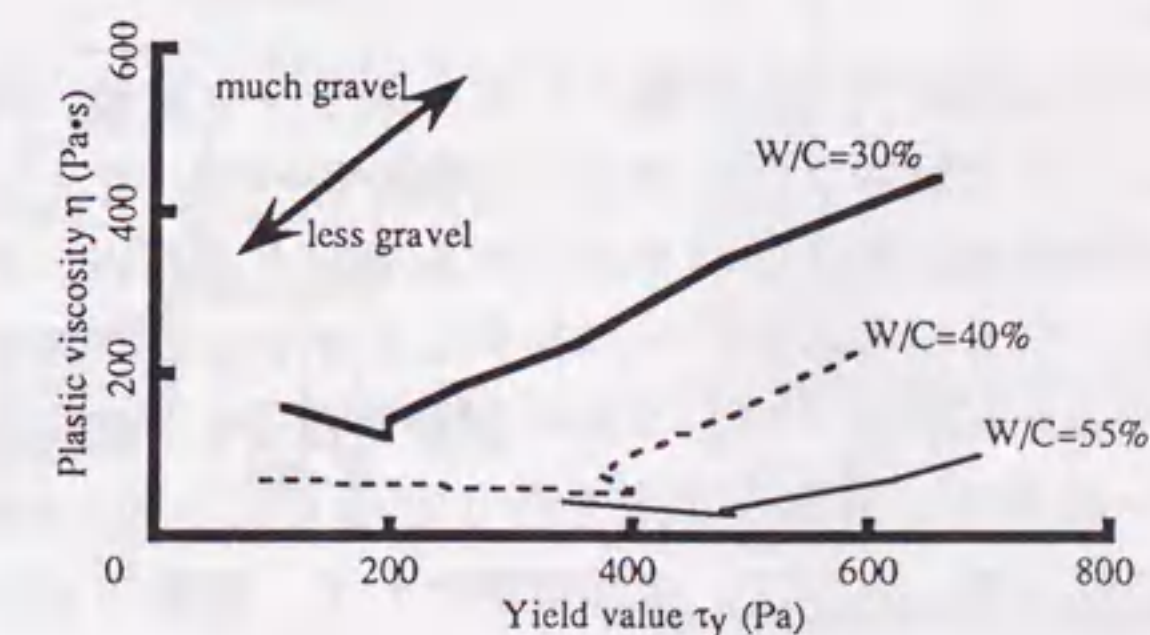


図-4.7 レオロジー定数の分布

(2) レオロジー定数の変化

以上の実験で得られたコンシステンシー測定値と4.2節で述べた簡易推定手法を用いて、レオロジー定数（降伏値: τ_0 、塑性粘度: η ）を推定した。得られたレオロジー定数の推定値の変化状況を図-4.7に示す。

図-4.7より明らかなように、粗骨材量が極めて少ない範囲では、降伏値のみが増加しているシリーズがあるが、この範囲においては、液状に近いモルタル相に対して、粗骨材相が混入されるため、流動のモードが急激に変化しているものと思われる。また、この範囲においては、少量の粗骨材の混入によって混練効率が向上するため、レオロジー定数が減少するシリーズもみられ、測定結果は不安定な性状を示している。しかし、これら一部の例外を除けば粗骨材量の増加に伴って一般にレオロジー定数は大きくなり、粗骨材量が比較的少ない範囲では、塑性粘度（ η ）の増加が顕著である。また、粗骨材量がある程度よりも多くなると、降伏値（ τ_0 ）も増加し始める傾向がみられる。

4.4 粘性の大きいフレッシュコンクリートの流動性

各種調合条件がフレッシュコンクリートの流動挙動に与える影響をレオロジーの観点から考察するための基礎的な資料を得ることを目的として実験-4.2を行った。また、降伏値と塑性粘度で表されるレオロジー性質の他に、すべり挙動や付着挙動に関するレオロジー性質について調べるため、マトリックスモルタルのすべり挙動や付着挙動および振動下での流動性に関する実験を行った。

4.4.1 実験手順

(1) 測定項目

コンクリートのコンシステンシー試験として、スランプ試験、コンクリートフロー試験、スプレッド試験およびLフロー試験を行った。また、フレッシュコンクリートのすべり性状に関するパラメータを測定するため、すべり抵抗試験を行った。さらに、ウェットスクリーニングしたマトリックスモルタルに対しては、モルタルフロー試験およびLフロー試験装置を1/2に縮小した小型Lフロー試験によるレオロジー定数の推定を行うとともに、図-4.8に示すような付着試験を同時に行った。さらに、追加実験として、振動下でのモルタルのレオロジー性状を調べるため、図-4.9に示すように、小型Lフロー試験装置を振動テーブル上に固定し、振動下における試験を行った。

(2) 試料

実験-4.2に用いた試料の調合を表-4.3に示す。ここでは、混和材を使用していないコンクリートをPタイプ、シリカフェュームを混入したコンクリートをSタイプ、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートをBタイプと呼ぶこととする。いずれのタイプのコンクリートにも、普通ポルトランドセメントを用いた。PタイプおよびSタイプに用いた細骨材および粗骨材（最大寸法 20mm）の粗粒率はそれぞれ、2.79および6.65、Bタイプに用いた細骨材および粗骨材（最大寸法25mm）の粗粒率はそれぞれ、2.94および6.50である。

PタイプおよびSタイプでは、スランプ値が18~22cmの範囲（Hシリーズ）のものと22~25cmの範囲（Sシリーズ）のものを製作し、ポリカルボン酸系の高性能A E 減水剤の添加量でスランプ値を調節した。高性能A E 減水剤はすべて単位水量に対して内割で混入した。また、水結合材比（W/B）が30%以下の場合、シリカフェューム（アンデシファイトタイプ、比表面積20,000m²/kg、平均粒径0.15 μ 、比重2.2）をセメント重量の20%代替で混入した。

さらに、表-4.3中に示したように、S-30およびSS30シリーズの高性能A E 減水剤の添加量を1としたときの、1.2倍および1.4倍の高性能A E 減水剤を添加した試料（それぞれS-302,SS302およびS-303,SS303）を使用した実験も行った。表-4.3においてSS30とSS301の高性能A E 減水剤の添加量が異なるのは、シリカフェュームのロットの違いによる性質の差異によるものである。

Bタイプでは、比表面積が450、800および1,200m²/kgの3種類の高炉スラグ微粉末（それぞれをA,BおよびC類と呼ぶ）をセメント重量置換率50%で混入し

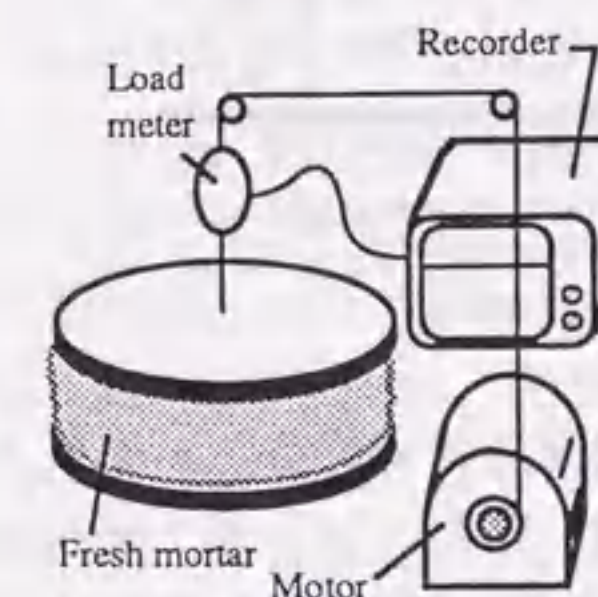


図-4.8 付着試験

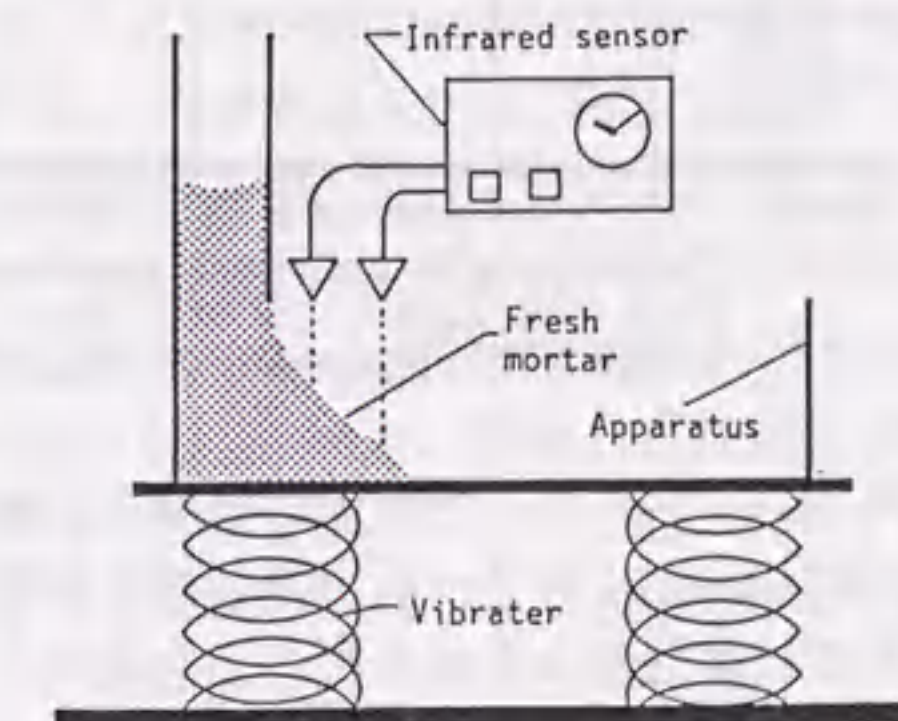


図-4.9 振動小型Lフロー試験

表-4.3 実験-4.2に用いたコンクリートの調合表

Series	W/B	W	C	Sg	Si	S	G	HAE
H-55	55	180	327			821	971	0
H-550								
H-35	35		471	0		723		0.9
S-35								1.1
H-30	30	165	550		0	684	987	1.4
S-30								1.5
S-301								1.5
S-302								1.8
S-303								2.1
A301								0.6
A302			0.72					
A303			0.84					
B301			275	275		678	0.65	
B302							0.78	
B303							0.91	
C301							0.7	
C302							0.84	
C303							0.98	
HS30			440	0	110	644	3.0	
SS30							4.0	
SS301							3.0	
SS302							3.6	
SS303	4.2							
HS27	27	489						122
SS27			4.5					
HS25	25		528		132	550	1035	5.0
SS25								6.0

[Notes] W/B: Water-binder ratio (%), W: Water (kg/m³), B=C+Si, C: Cement (kg/m³), Sg: Ground granulated blast-furnace slag (kg/m³), Si: Silica fume (kg/m³), S: Sand (kg/m³), G: Gravel (kg/m³), HAE: Dosage of High-performance AE water reducing agent (%/B).

た。試料のコンシステンシーは高性能A E減水剤の添加量で調節し、目標スランプ値が24cm (301シリーズ) のものを基準とした。また、シリカフェームの場合と同様に高性能A E減水剤の添加量の1.2倍および1.4倍添加したシリーズ (それぞれ302シリーズおよび303シリーズ) の試料も製作し、実験に供した。

4.4.2 実験結果とその考察

(1) スランプ試験

通常のコンクリートは、混練直後からスランプダウンが始まり、冬期であれば120分、夏期であれば90分以内に打設しなければならないとされている。スランプダウンしたコンクリートは、流動化剤を後添加し、攪拌することによって、施工直前に流動性を改善させる手法が一般にとられている。しかしながら、本研究で取り上げたような粉体量の多いコンクリートでは、必然的に高性能A E減水剤を使う必要がある。

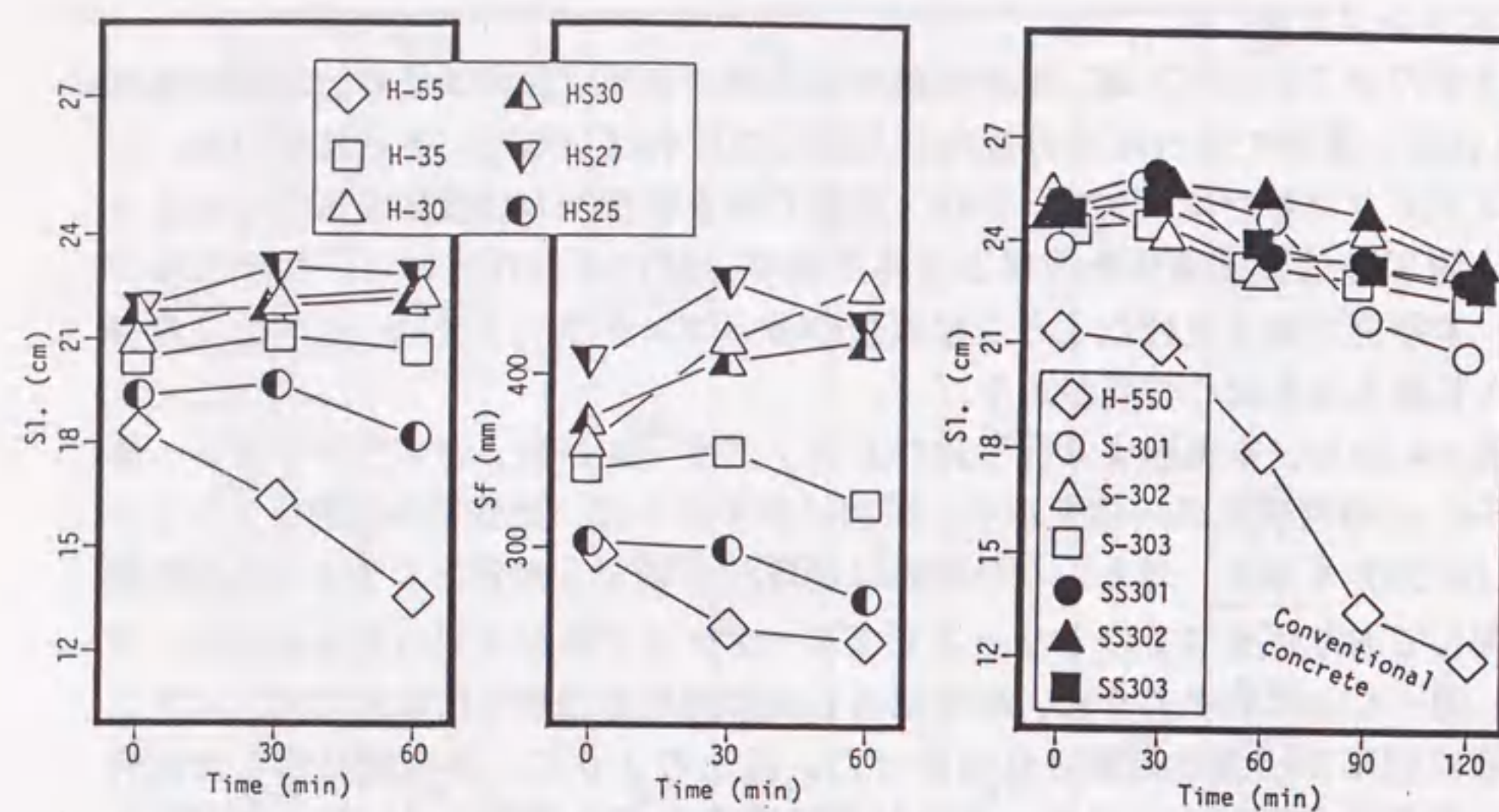
図-4.10に、本実験より得られたスランプ値 (Sl.) およびスランプフロー値 (Sf) の経時変化の一例を示す。同図に示すように、比較用の普通コンクリート (H-55) を除き、ほとんどの試料は混練60分後でも十分なスランプ保持性能を有しており、すべてのシリーズでブリーディングは全く見られなかった。また、図-4.10に示すように、高性能A E減水剤を過添加した場合でも、スランプ値に明確な相違は観察されなかった。以上のように、本実験に供した試料は、降伏値が小さく、また、比較的長時間その値を保持していることがわかる。

(2) コンクリートフロー値およびLフロー値

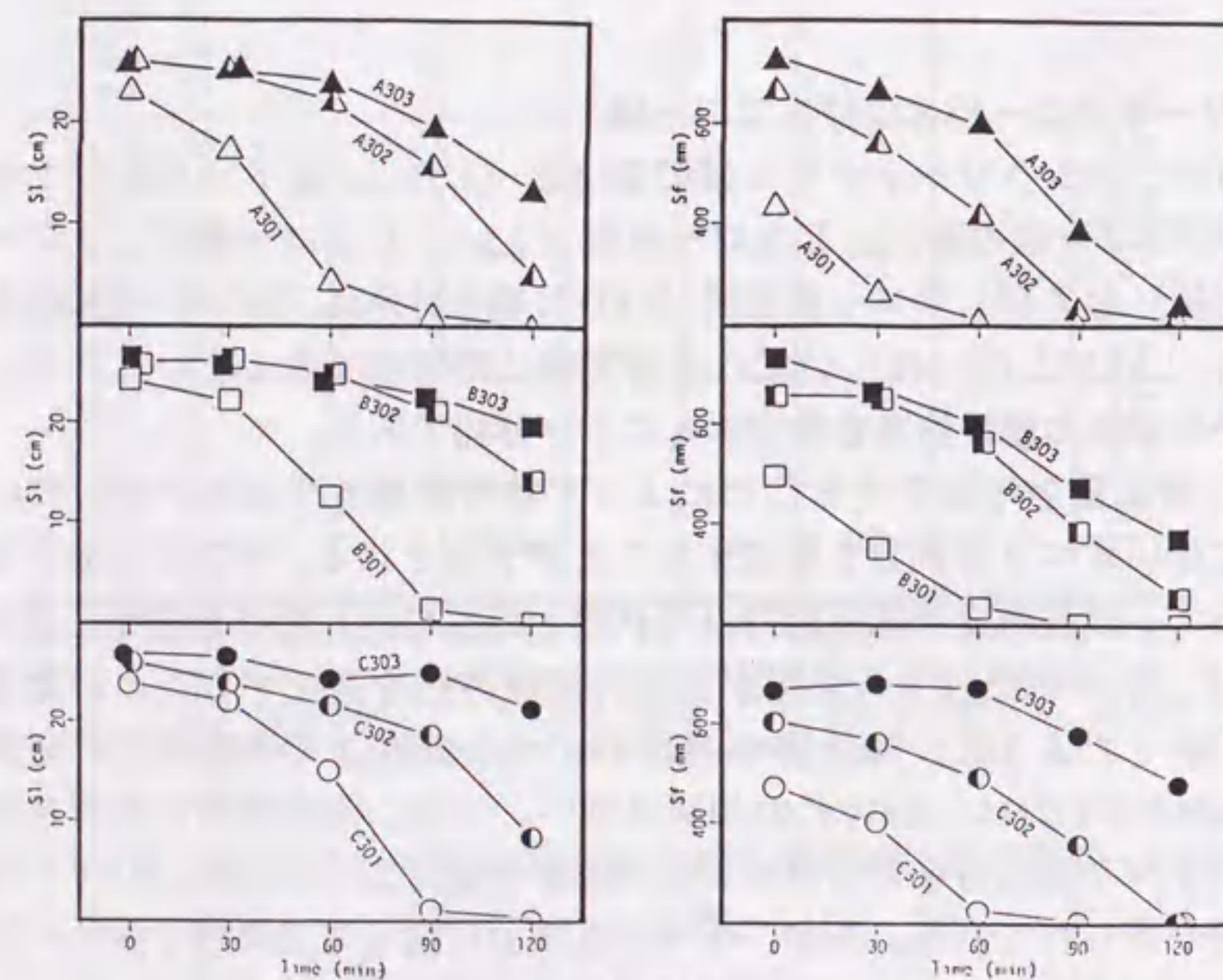
図-4.11に、コンクリートフロー値の変化量 (Cfl₁₅₀、落下15回目のフロー値と0回目のフロー値の差)、Lフロー速度 (Lf/t、Lフロー値をLフロー時間で徐した値) およびLフロー初速度 (Lv) と結合材水比 (B/W) の関係を示す。Cfl₁₅₀、Lf/tおよびLvは、いずれも測定値に時間項を含んでいるため、これらの値から試料の塑性粘度を推定することが可能である。

一般に、粉体量を増加させることによって粘性が増加するといわれているが、これに伴いすべり抵抗も増加することが予想される。コンシステンシー試験によって、試料の変形抵抗能力 (降伏値と塑性粘度) だけを検出しようとするならば、すべり抵抗の影響が少ない試験方法を選択することが望ましい。同図に示したように、降伏値や底面のすべり抵抗の影響を比較的受け易いCfl₁₅₀およびLf/tは、B/Wとの相関は低い。一方、流動初期の変形速度であるLvは、すべり抵抗などの外的要因の影響を受けにくいため、B/Wと比較的よい相関が得られている。なお、すべり抵抗に関しては次項で詳しく述べる。

近年、建築分野ではLフロー試験が施工現場における品質管理手法として実用される場合があり、レディーミクストコンクリート工場および荷卸し地点で



(a) SおよびPシリーズ



(b) Bシリーズ

図-4.10 スランプ試験値の経時変化

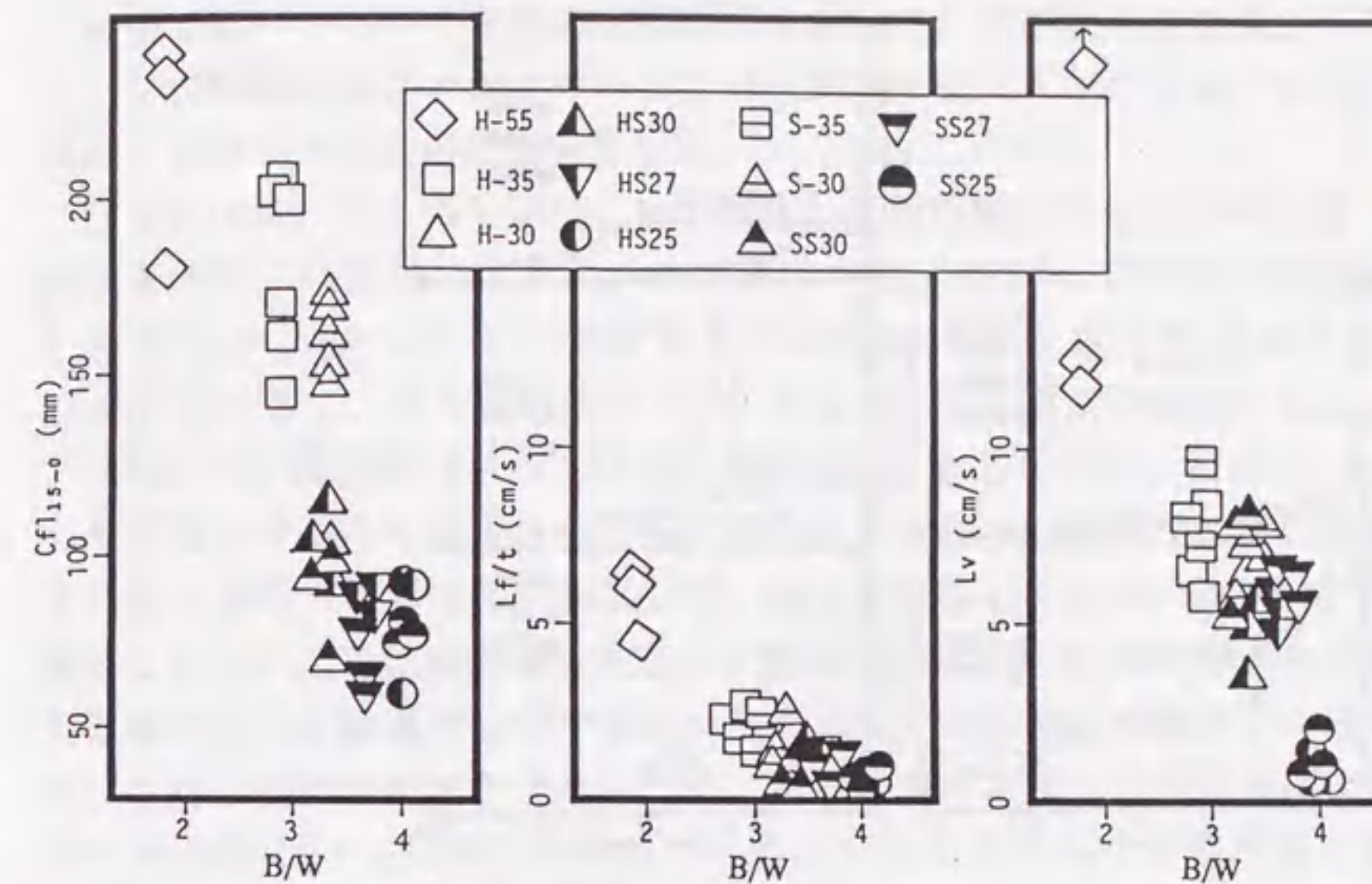


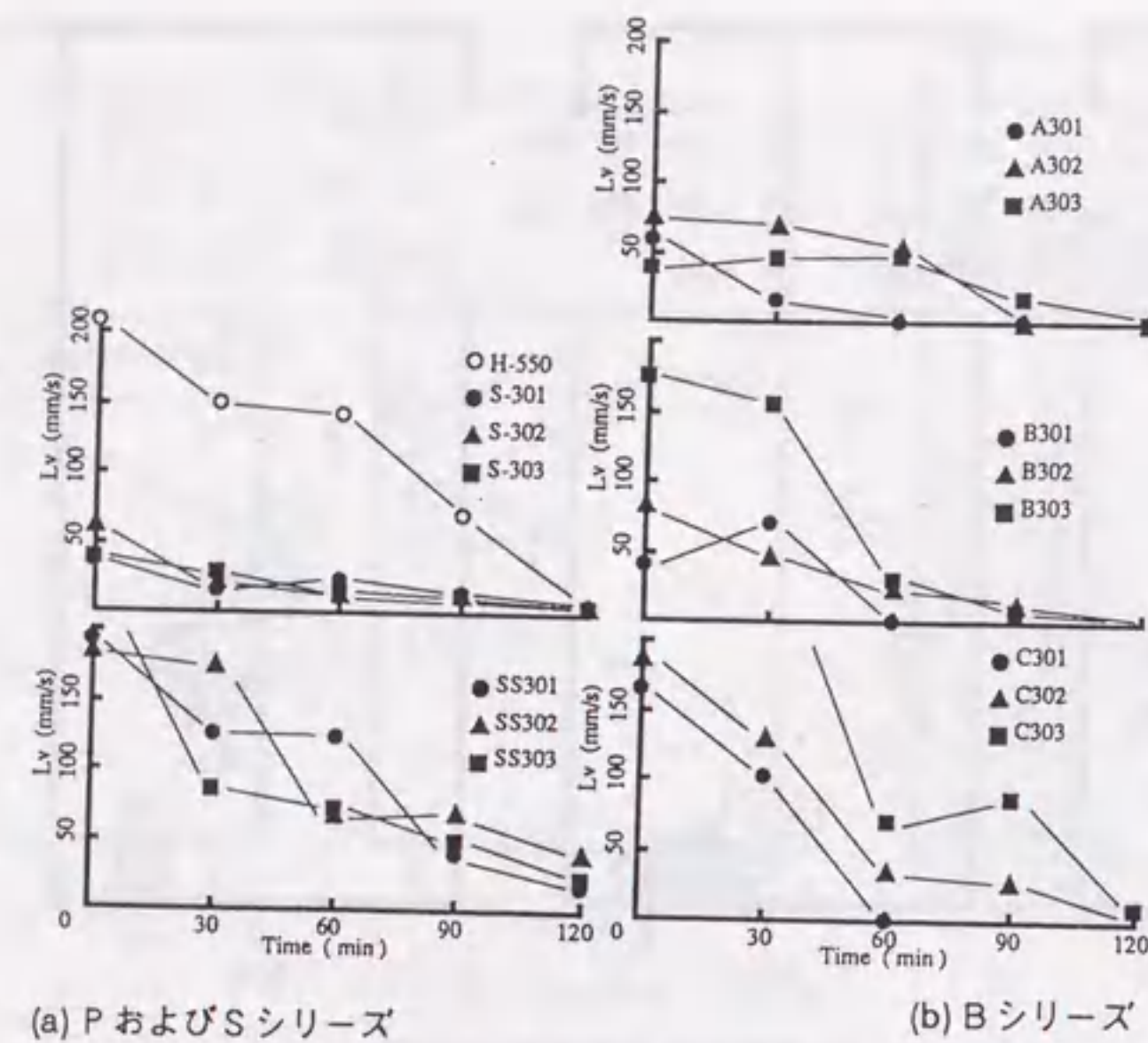
図-4.11 コンシステンシー試験値と水結合材比の関係

その流動速度を測定して、可否を判定している。

スランプ初速度 (Lv) の経時変化を図-4.12に示す。前述のスランプ値やスランプフロー値の結果とは異なり、Lvは時間経過に伴い顕著な減少傾向を示しており、降伏値が保持されるのに対して試料の粘性が時間に伴って増加する様子が観察される。つまり、高性能AE減水剤の添加によって、降伏値を長時間小さく保つことは可能であるが、低粘性状態を保持することが難しいことを示している。以上の傾向は、高性能AE減水剤を過剰に添加した試料についても同様であることが、図-4.10より明らかである。この結果は、スランプダウンする以前であっても粘性が高くなっていることにより各種施工の障害となる危険性を示唆しており、スランプ値のみによる管理で、調合計画時と同等のスランプ値が得られても、経時変化による粘性の増大を見落とす可能性がある点に注意しなければならない。

(3) すべり挙動に関する試験値

谷川らの研究によれば、フレッシュコンクリートのすべり抵抗挙動は、ずりせん断速度と垂直応力の双方に影響されると考えられている[26]。一般に、すべり抵抗力は、高粘性コンクリートほど高くなる傾向を示し、変形抵抗性を表



(a) PおよびSシリーズ
図-4.12 Lフロー初速度の経時変化

現するレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）を測定・定量化する際には、測定値に与えるすべり抵抗挙動の影響を除去する必要がある。

本研究で用いたレオロジー定数推定手法の基本となっている流動解析には、すべり速度と垂直応力の関数で表されるすべり抵抗応力のレオロジーモデルが用いられている。すべり抵抗に関する構成則および今回の実験で測定・定量化された式(2.4)中のすべり定数($S_1 \sim S_4$)を表-4.4に示す。

表-4.4 すべり抵抗パラメータの一例

Series	W/B (%)	S_1 ($\times 10^2$ s/m)	S_2 ($\times 10^4$ Pa·s)	S_3 (x1)	S_4 ($\times 10^2$ Pa)
H-35	35	0.14	0.18	0.03	3.5
H-30	30	0.19	0.6	0.02	3.0
HS30	30	0.09	1.75	0.04	3.5
HS25	25	0.11	0.80	0.06	6.4
H-55	55	0.08	0.10	0.29	0.3

[Notes] W/B: Water binder ratio. $S_1 \sim S_4$: Parameters of slipping resistance.

(4) レオロジー定数の推定値

前項で述べたすべり定数の実測結果を用いて、粘塑性有限要素法解析によるスランプ試験およびコンクリートフロー試験のシミュレーションを行い、各試料のレオロジー定数の推定を行った。

図-4.13に、以上の手順によって推定した塑性粘度(η)と降伏値(τ_y)の関係を示す。同図中には、スランプ値21cmおよび24cmの場合の解析結果が示してあるが、同一スランプ値であれば、W/Bが小さくなるほど、降伏値(τ_y)が小さく、また塑性粘度(η)が大きくなる傾向が認められる。

一般には、降伏値はスランプ値と線形関係にあることが、前述の2.4.1節に示した下山らや森らの提案する理論式からも知られているが、上記の解析結果によれば、両者の線形関係が成立しない領域が存在している。これは、降伏値が極めて小さいために変形量が大きく、理論式において試料の形状を円錐台とした仮定や応力が積層で分布するといった応力分布の仮定の範囲からはずれること、また、底面積が大きくなるため、床面におけるすべり挙動が固定端またはローラー端といった簡単な仮定では処理できなくなることが原因と考えられる。粘塑性有限要素法解析では、粗骨材のインターロック現象を内部摩擦角と

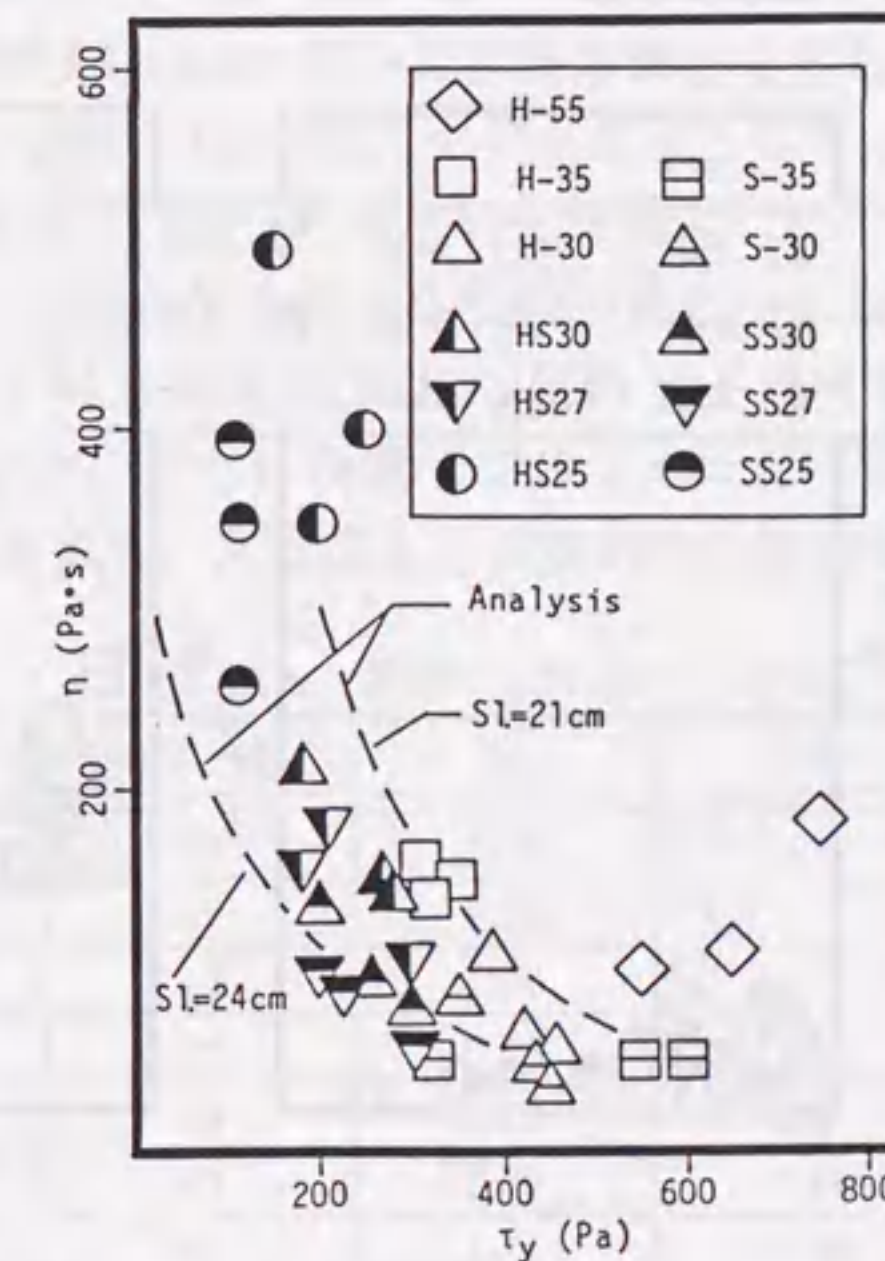


図-4.13 レオロジー定数の分布

付着力を用いた構成モデル[25]によって近似的に表現することが可能であるが、入力値に関する実験的なデータが不足しており、また、仮定条件を単純化する目的から、本研究では、粗骨材のインターロックや崩れ現象を考慮せず、コンクリートを均質なビンガム流体として取り扱っている[5]。

次に、 Cf_{150} 、 Lf/t および Lv の各測定値と推定された η の関係を図-4.14に示す。同図にみられるように、 Cf_{150} および Lf/t と η の相関性は比較的低い。これは、これらの測定値が、降伏値やすべり抵抗などの影響を受けるためであり、 Cf_{150} や Lf/t のみではコンクリートの塑性粘度の推定が難しいことを示している。一方、同図に示されるように、 Lv と η の間には、比較的良好な相関がみられる。光センサーによるフロー初速度の測定は、試験も簡便であり、施工現場における管理も含めて、コンクリートの粘性の把握には、この測定方法が有効なコンシステンシー評価試験になりうると思われる。

4.5 コンクリートの材料分離抵抗性

フレッシュコンクリートの振動下における材料分離性状は、コンクリート構造物の均質性を確保する上で重要な要素である。実験-4.3および実験-4.4で

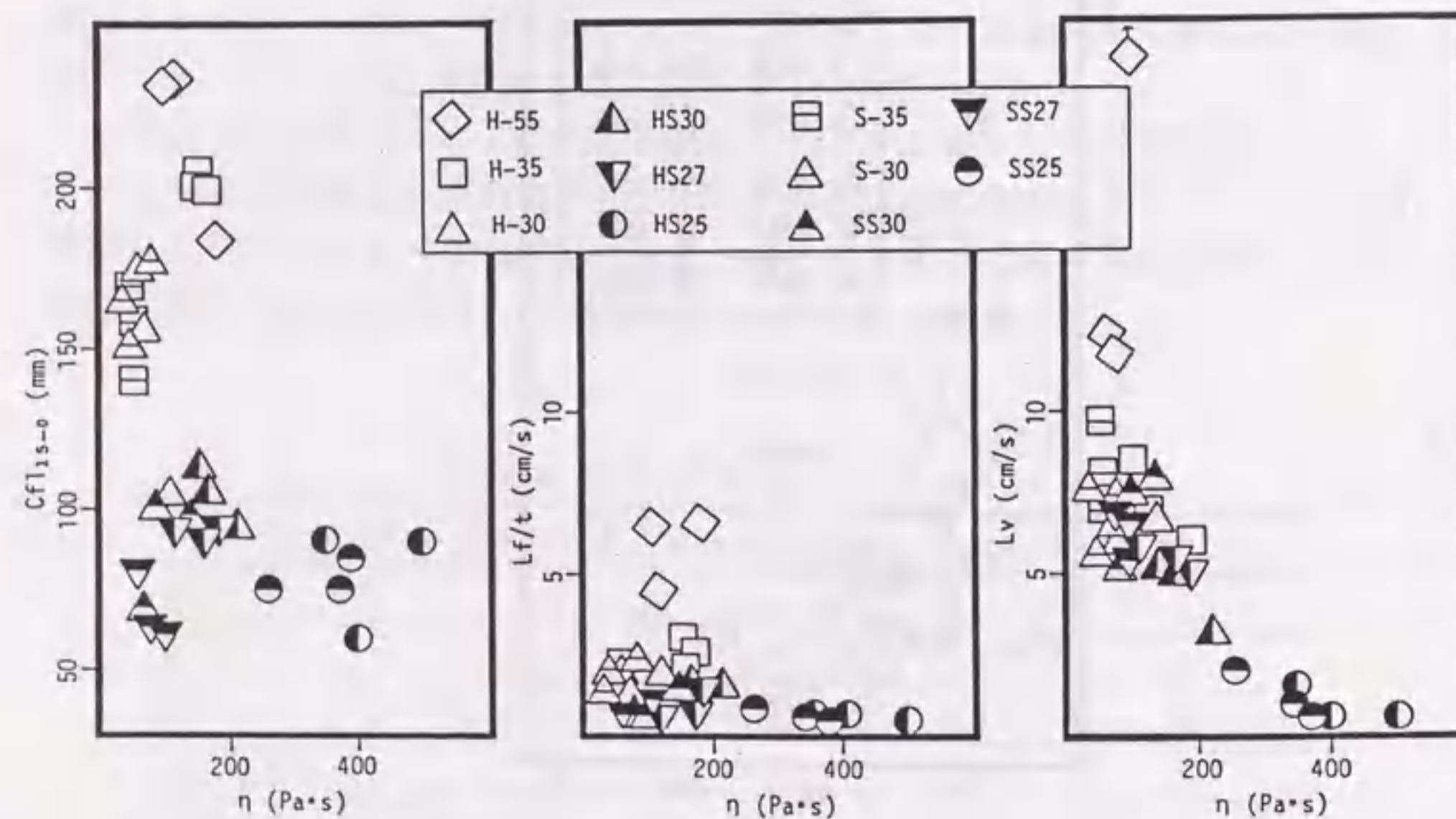


図-4.14 コンシステンシー試験値と塑性粘度の関係

は、それぞれ、コンクリート内部から空気が抜ける現象および粗骨材が沈下する現象という2つの材料分離を取り上げた。材料分離現象のメカニズムは、まだ解明されておらず、定量的な評価も行われていないのが現状である。本実験では、粗骨材の材料分離性状を定量化する一手法を提案するとともに、材料分離に与える影響因子についても若干の考察を行った。

4.5.1 実験手順

(1) 測定項目

実験-4.3では、試料を $\phi 10 \times 20$ cmの円柱型枠内に打設し、棒状バイブレータで所定の時間(0~30秒)加振した後、コンクリートを表層部、上層部および下層部(それぞれ打込み上面より1cm、1~10.5cmおよび10.5~20cmの区間)に3分割し、それぞれの層に存在するモデル気泡の体積を測定した。

実験-4.4では、圧縮強度(材齢4週)および振動による粗骨材の沈下状況を調べるために、 $W/B=55\%$ および $W/B=30\%$ の試料を $\phi 10 \times 20$ cmの円柱型枠内に打設した後、振動テーブル上で所定の時間(0~90秒)振動を加えた。

(2) 試料

実験-4.3および実験-4.4に用いた試料の調合をそれぞれ表-4.5および前掲の表-4.3に示す。実験-4.3では、モデル気泡として、発泡スチロール球(粒径約1mm)を体積比でコンクリートの2%混入した。実験-4.4では、実験-4.2で用いたS-30およびSS30の添加量を1としたときの、1.2倍および1.4倍の高性能AE減水剤を添加した試料(それぞれS-302,SS302およびS-303,SS303)を用いた。さらに振動下でのレオロジー定数を測定することを目的とした追加実験として、高性能AE減水剤の添加量を0.1~1倍まで変化させ

表-4.5 実験-4.3に用いた調合

Series	W/C (%)	S/C	S/A	Sl. (cm)
M50	50	1.96	—	—
M45	45	1.05		
M40	40	1.00		
M35	35	0.75		
C50	50	1.00	0.33	17.6
C40	40	0.47	0.33	19.3
C30	30	1.11	0.38	18.0

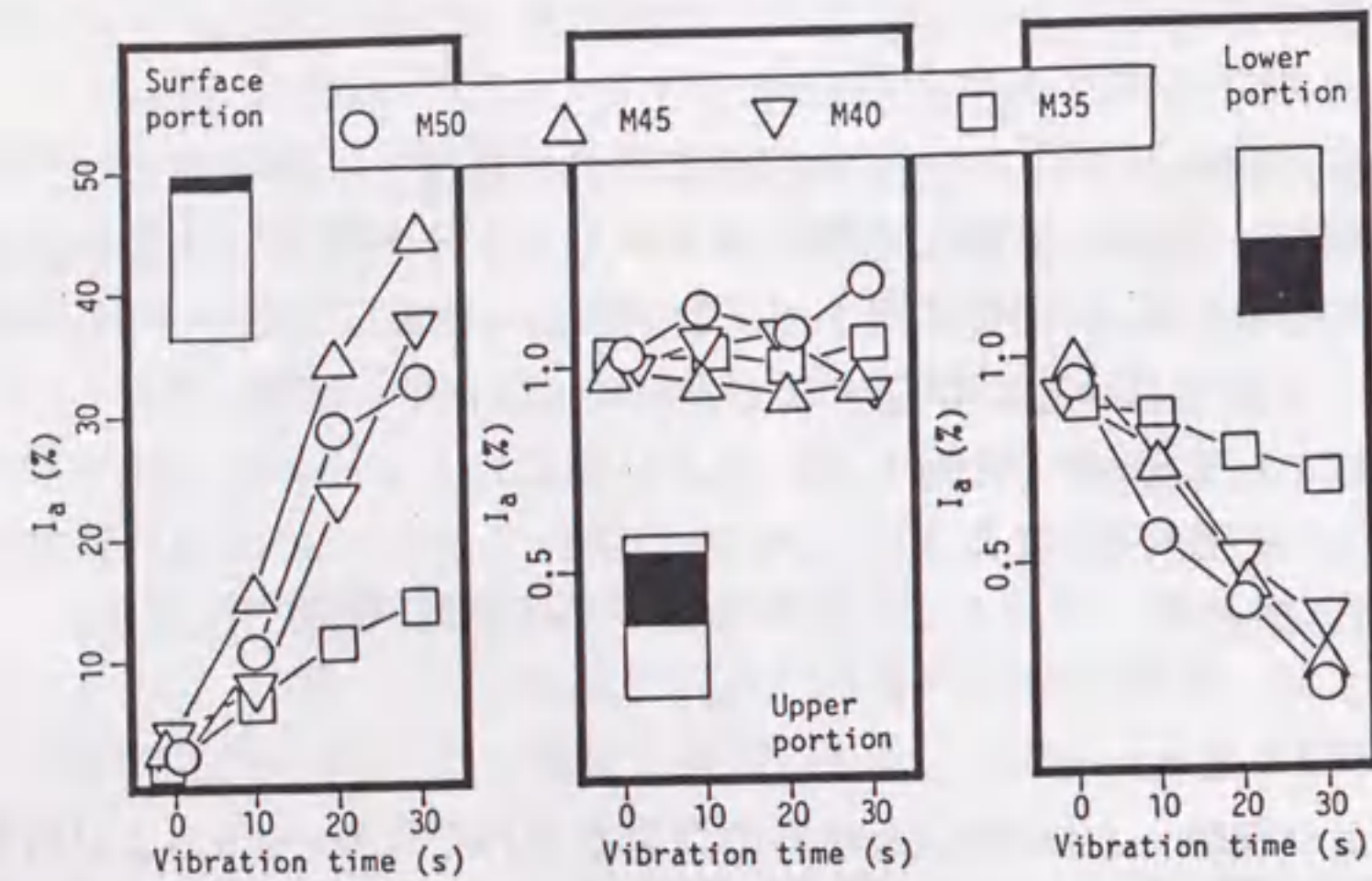
[Notes] W/C: Water - cement ratio, S/C: Sand - cement ratio, S/A Sand - aggregate ratio, Sl.: Slump value.

たモルタルについて、振動下におけるレオロジー性状の測定を行った。

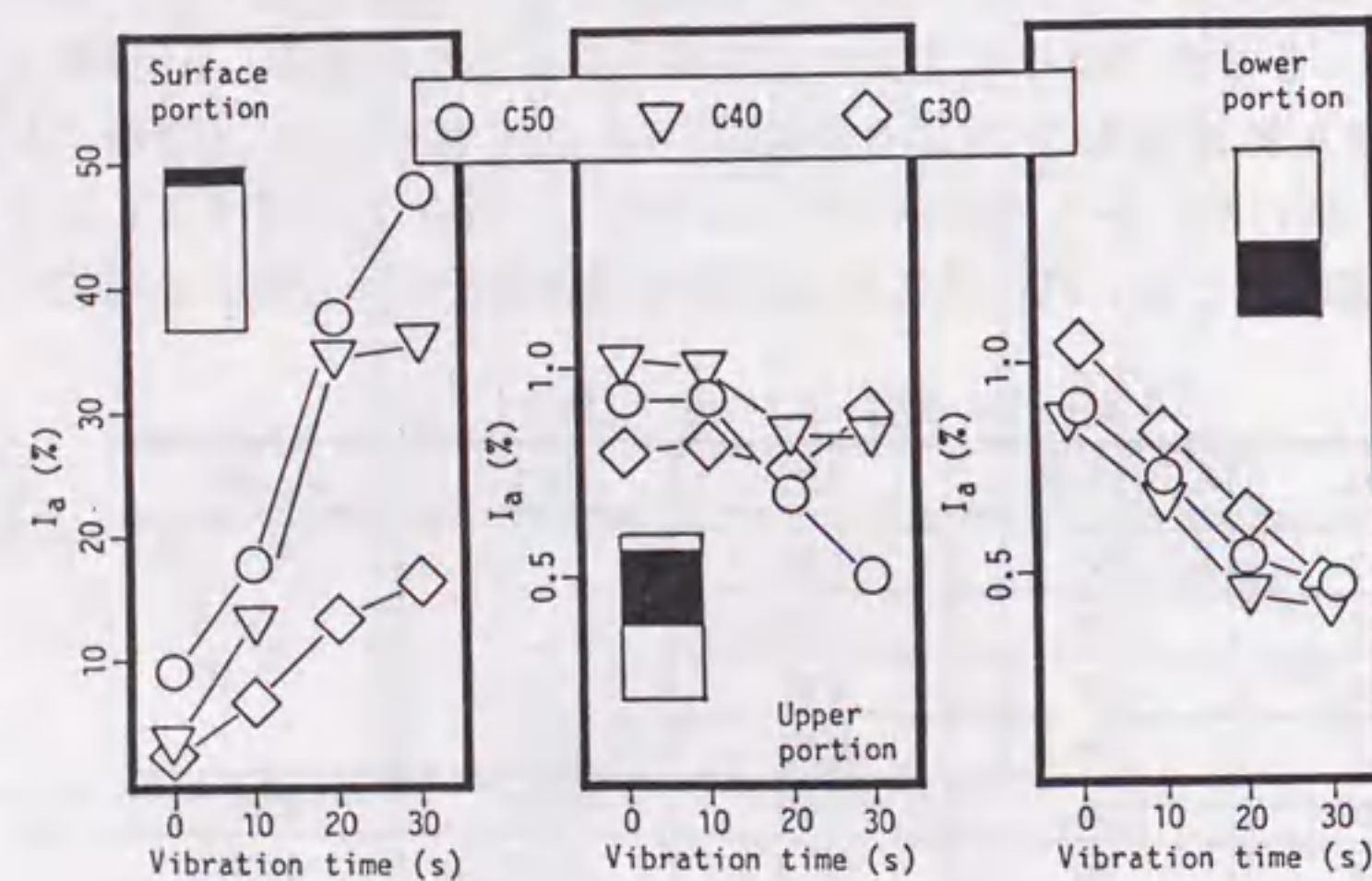
4.5.2 実験結果とその考察

(1) 気泡の上昇

加振後の表層部、上層部および下層部（それぞれ打ち込み上面より1cm、1～10.5cmおよび10.5～20cm）に存在するモデル気泡の比率（ I_a ：各層における



(a) モルタル試料の場合



(b) コンクリート試料の場合

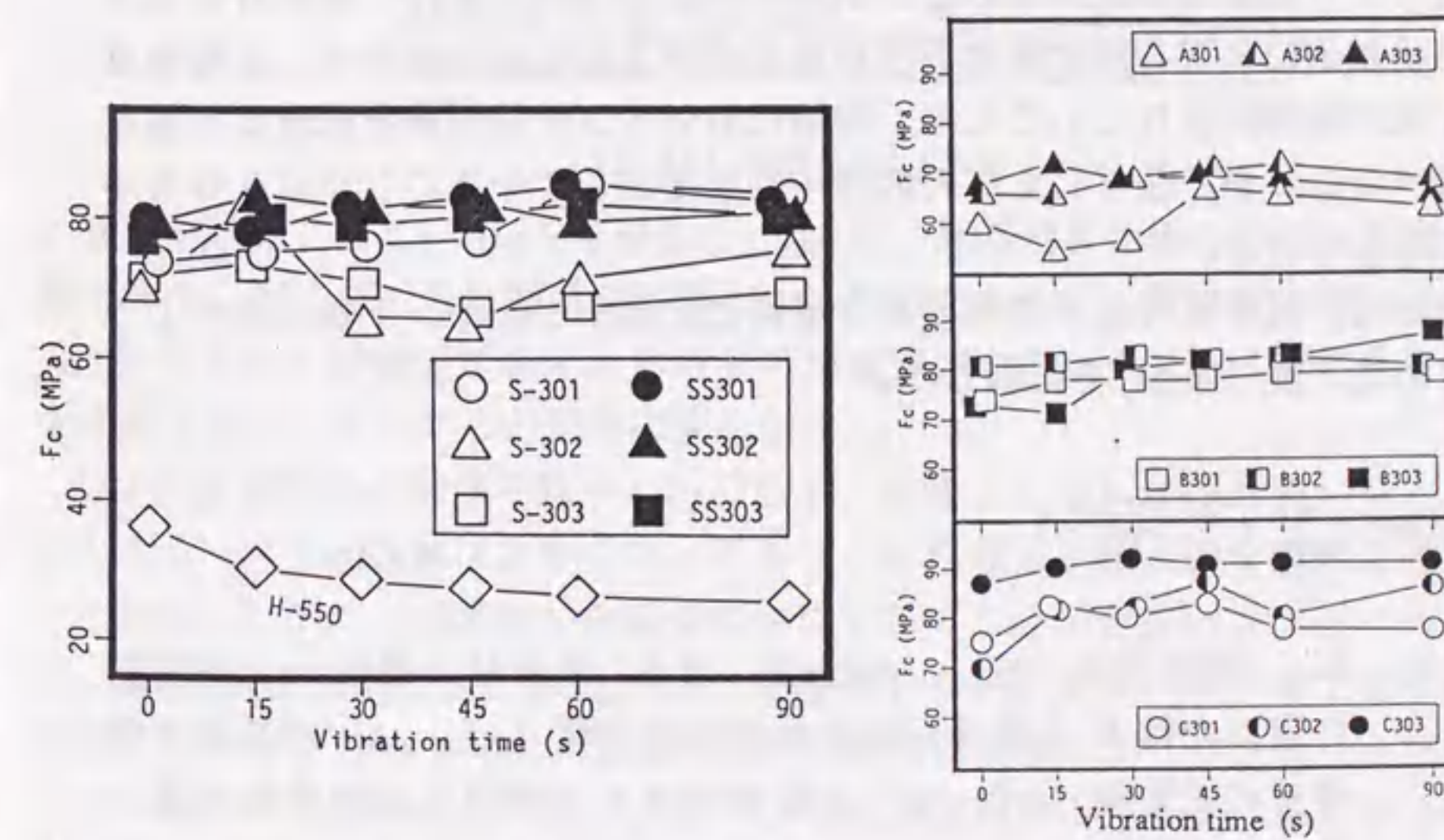
図-4.15 模擬空隙の上昇量と加振時間の関係

モデル気泡の体積比を全体の体積比で除した値）と加振時間の関係を図-4.15に示す。表層部の I_a の値は、加振時間の増加にともなって大きくなり、またこの傾向は試料の水セメント比 (W/C) が大きく粘性が小さくなるほど著しい。上層部は、入出量のバランスがとれるため、下層部に比べて I_a の変動は少ない。モデル気泡は、粒径や変形性の点で実際の気泡とは異なるが、実際のコンクリートでも加振による気泡の上昇の程度は、マトリックスモルタルのレオロジー性状によって著しく異なることが予想される。

(2) 強度の発現状況

図-4.16に、圧縮強度 (F_c) と加振時間の関係を示す。同図にみられるように、比較用の普通コンクリート (H-55) では、加振時間の増加に伴って材料分離が進行して F_c が低下しているのに対し、高性能A E減水剤を添加した低水結合材比のコンクリートでは、高性能A E減水剤を過剰に添加したシリーズでも、加振による圧縮強度の低下が観察されなかった。

本研究で用いたフレッシュコンクリートは、流動性が良好であるため微弱な振動を加えただけのシリーズでも十分な充填性が得られている。一般に、高強度コンクリートは、マトリックスモルタルの強度が骨材強度に比較して高いた



(a) PおよびSシリーズ

(b) Bシリーズ

図-4.16 圧縮強度と加振時間の関係

め、圧縮破壊するときの形態としては骨材破壊を呈し、マトリックスと粗骨材間の付着破壊が発生する場合は少ない。そのため、マトリックスモルタルが粗骨材の周囲を充填するのに必要な分だけ存在すれば、粗骨材の分布にかかわりなく、圧縮強度には材料分離の程度が表れにくいものと推測することができる[98]。

(3) 粗骨材の沈下状況

前項で述べたように圧縮強度の面からは、過剰な振動による力学性状の劣化を把握することはできなかったが、流動性が高い、すなわち降伏値の小さいコンクリートであるため、粗骨材の材料分離（沈下）が発生している可能性は高いものと考えられる。そこで、所定の加振を受けた供試体を硬化後に軸方向に切断し、供試体断面における粗骨材の分布状況を調べた。

切断面の様子と各層における粗骨材の面積占有率の一例を図-4.17に示す。この図から明らかなように、加振時間が長いものほど粗骨材が沈下している。これは、先に述べた仮定を裏付けるものであり、本実験で用いたような低降伏値のコンクリートのマトリックスモルタルは、この程度の振動条件下では、粗骨材を初期の位置に留めておくことができず、粗骨材とマトリックスモルタルの比重差により粗骨材が沈降することが明らかとなった。また、粗骨材が沈下し、圧縮供試体に上下方向に非均質性が生じているにもかかわらず、圧縮強度に明瞭な低下傾向が表れないことは、現場においてコア供試体を採取して強度分布を調べることが、必ずしも材料の均一性を確認していることにはならないことを意味している。

本実験では、粗骨材の沈下の程度を定量的に評価するため、下式に示すように粗骨材の沈下度（Dag）を定義した。

$$Dag = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{A_i}{A} \frac{L_i - 0.1}{0.1} \right\} \quad (4.1)$$

ここに、Dag：粗骨材沈下度、n：切断面に現れた粗骨材の個数、 A_i ：切断面に現れた個々（i番目）の粗骨材の断面積（ m^2 ）、 A ：切断面の粗骨材の総面積（ m^2 ）、 L_i ：上面から個々（i番目）の粗骨材の重心点までの距離（m）

切断面の映像をコンピュータ処理して、切断面に $2mm^2$ 以上面積が現われてい

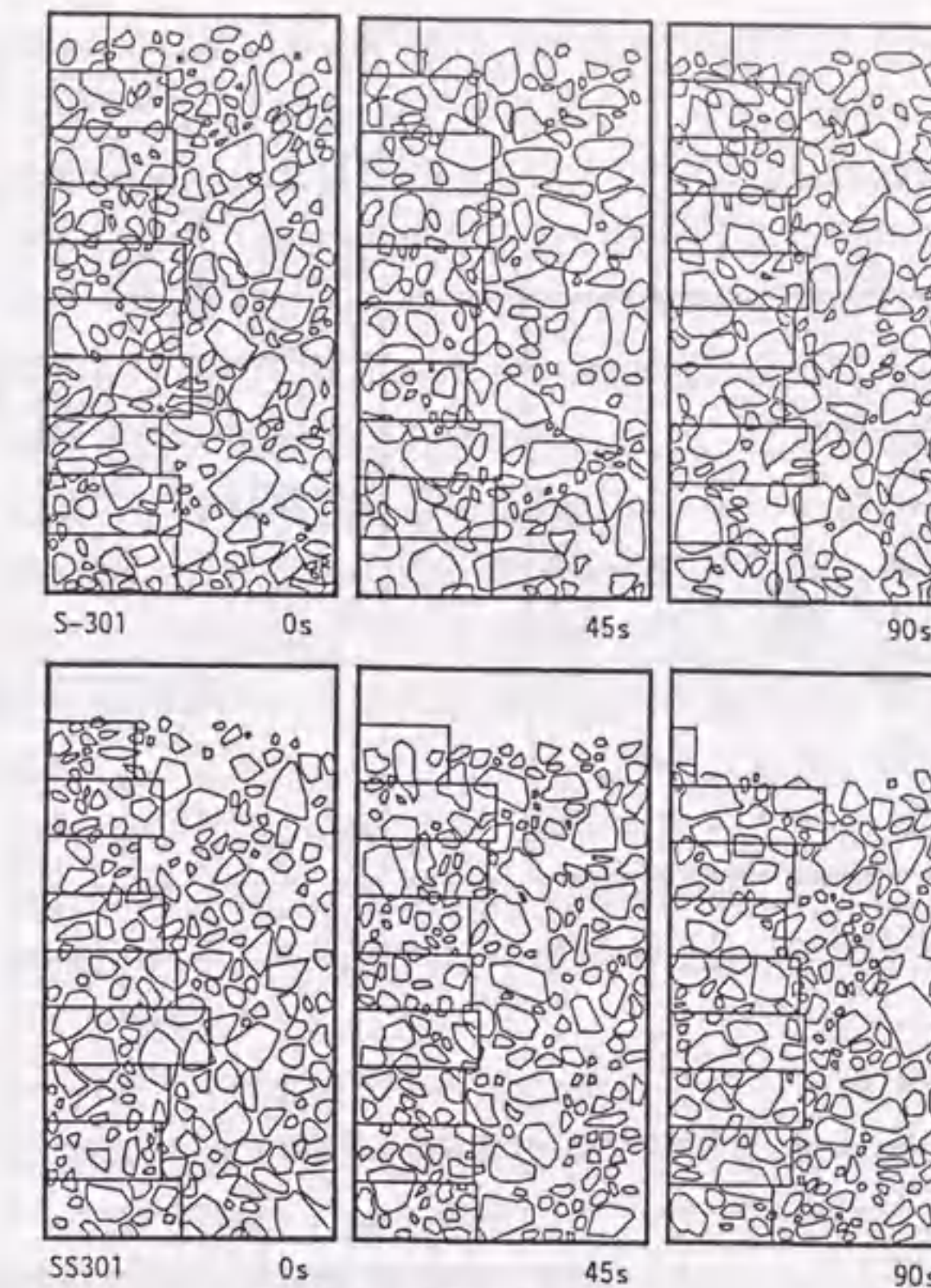


図-4.17 粗骨材の沈下状況

る骨材を対象として、Dagを算出した。Dagは、総粗骨材の重心のズレを示す係数であり、例えば、単位粗骨材容積が $0.4m^3/m^3$ であれば、数学的には $-0.3 \times Dag$ （0.3をとりうる評価値である。粗骨材の実績率が60%から70%程度であることを考慮すれば、さらにこの範囲は狭くなる）。

Dagと加振時間の関係を図-4.18に示す。全体として、加振時間が長くなるにしたがってDagの値は大きくなっており、高性能AE減水剤を過剰に添加したS-303のように、加振前から粗骨材が沈下してDagが大きいコンクリートでは、加振時間が増加してもDagがあまり増大しない。また、シリカフュームを混入したコンクリートでは、加振時間が90秒間の場合、シリカフュームを混入しないものより粗骨材沈下度が大きい。この原因はマトリックスモルタルの変形性質および粗骨材との比重差にあるものと考えられる（シリカフュームを混入したモルタルの方が軽い）。粗骨材の沈下は、単純に比重差のみに依存するのではなく、粗骨材同士のインターロックも関与するものと考えられる。

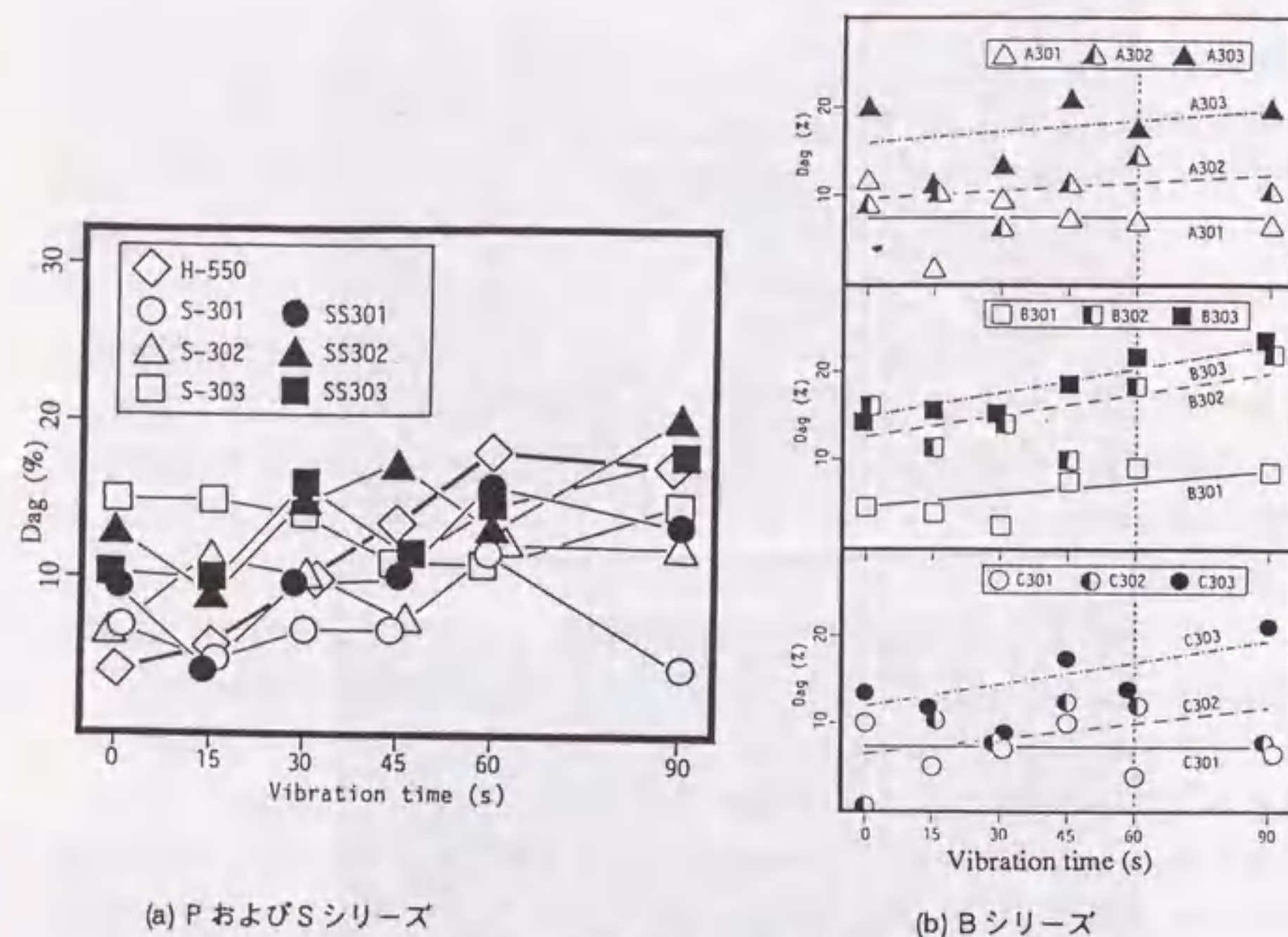


図-4.18 粗骨材の沈下度と加振時間の関係

シリカフュームを混入したシリーズは、高性能A E減水剤の添加量も多く、単純にシリカフュームの混入による影響と断言することはできないが、シリカフュームを添加したコンクリートと添加していないコンクリートでは、付着性状やすべり性状が異なるため、これらの影響が複雑に影響しているものと考えられる。しかし、これらの沈下性状はコンクリート全体の平均化された性状で判断することは難しく、マトリックスモルタルの性状に注目することが必要である。

近年、研究・開発が盛んに行われている高流動コンクリートに関する研究によれば、材料分離性状は、マトリックスモルタルの物性と粗骨材量に依存していると報告されており[99]、鉄筋通過性を含めた流動性や材料分離抵抗性の試験を行う際に、マトリックスモルタルをウェットスクリーニングで抽出して各種の試験に供している例も多い。この点に関しては次節でさらに検討する。

(4) マトリックスモルタルのレオロジー性質が分離抵抗性に及ぼす影響

マトリックスモルタルのレオロジー定数 (η, τ_y) の推定値を図-4.19に示

す。比較用の普通コンクリートに比べて、W/B=30%のマトリックスモルタルの降伏値 (τ_y) はいずれも100Pa以下であり、シリカフュームを混入したシリーズは、塑性粘度 (η) も小さくなっている。普通コンクリートの場合、マトリックスモルタルの τ_y を100Pa程度に小さく設定すると材料分離を起こすことが経験的に知られているが、粉体量の多いW/B=30%のコンクリートのマトリックスモルタルでは、この程度まで小さい降伏値を取ることが可能となる。一方、高性能A E減水剤を過剰添加したシリーズと、標準量を添加したシリーズのレオロジー定数の間には顕著な差異は認められない。前述したように、粗骨材の沈下量は高性能A E減水剤の添加量によって異なるのに対し、マトリックスモルタルのレオロジー定数に大きな差がみられないことは、マトリックスモルタルのレオロジー定数のみでは材料分離抵抗性を評価できないことを示している。この知見は、一見矛盾しているように思われるが、従来は、降伏値が大きくなれば塑性粘度も大きくなるようなコンクリートしか存在せず、一般には、塑性粘度が増加すれば材料分離抵抗性も増加すると考えられていたためである。同図によれば、必ずしも塑性粘度の増減が材料分離性状の優劣を決定するものではないことが明らかとなった。

そこで、本研究では、材料分離性状に深い関係を持つと考えられるマトリックスモルタルの付着抵抗性を測定する試験を行った。図-4.20に、付着応力 (σ_a) と変位 (Δ) の関係の一例を示す。ここでは同曲線によって囲まれる面積を付着タフネス (T_a) と定義して考察に用いた。

マトリックスモルタルの付着性能に関しては、井上らが引張強度を評価基準

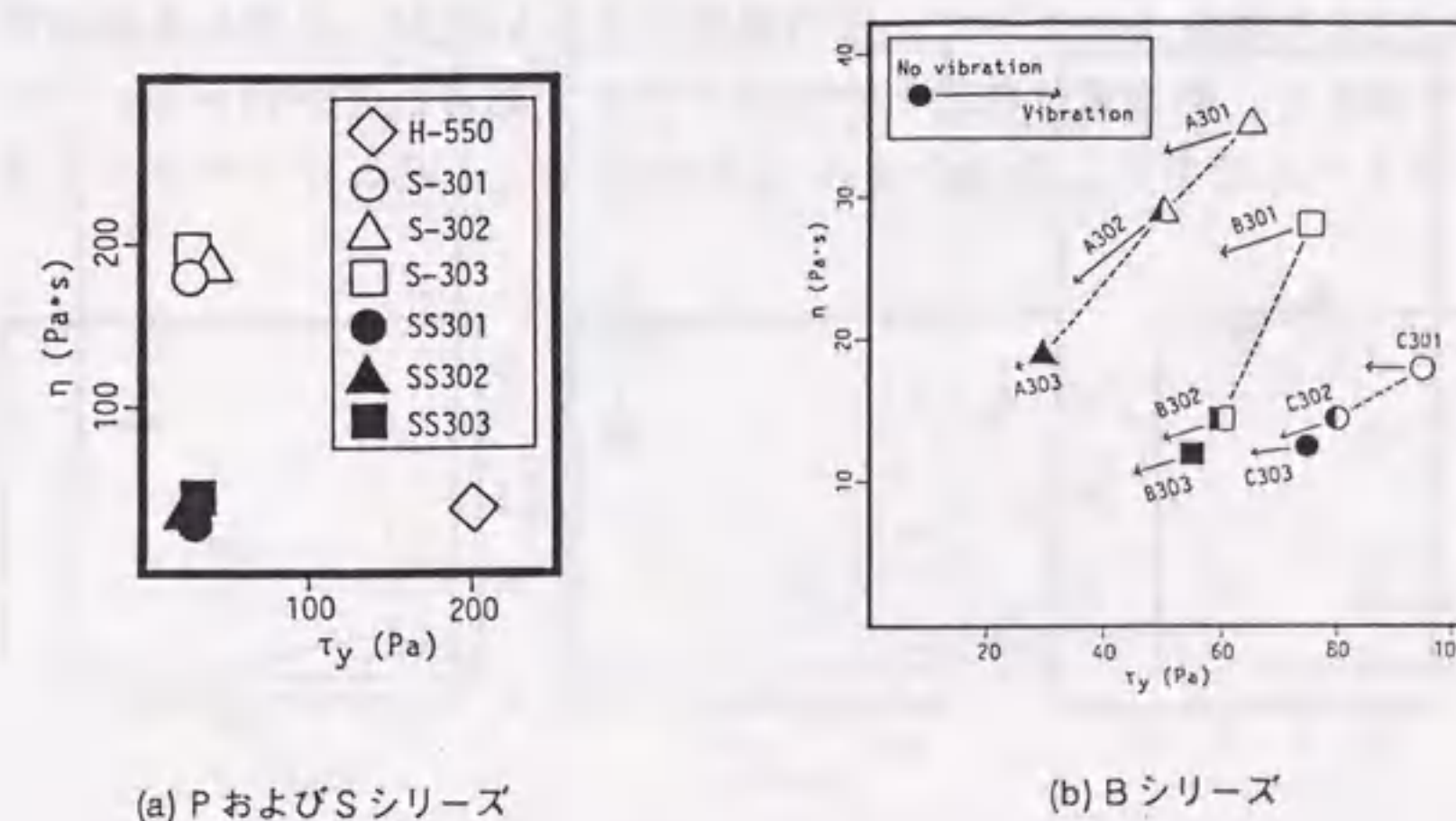


図-4.19 マトリックスモルタルのレオロジー定数の分布

とした報告[100]を行っているが、同図に示すように変位の大小もその付着性状の大きな特質の一つとして考えることができるため、これも加味した付着タフネス (T_a) を本研究では取り上げた。最大引張応力と変位という2変数を考慮する必要があることは、付着性状も変形性状と同じく、付着降伏値と付着粘度という2つの性質で表現できる可能性があることを示唆している。しかし、その測定方法がまだ確立されておらず、実験データも少ないことから、ここでは T_a による総合評価を行うこととした。

T_a および加振時間が90秒の時の D_{ag90} と高性能A E減水剤の添加量の関係を図-4.21に示す。同図によれば、高性能A E減水剤を過剰に添加することによって、 T_a は減少し、また D_{ag90} は増大する傾向がみられ、シリカフュームを混入したコンクリートでは、 D_{ag90} 、 T_a ともに大きい。すなわち、マトリックスモルタルの主成分が同じで高性能A E減水剤の添加量のみが異なる場合などでは、 T_a の増減によって分離抵抗性の大きさを判断できる可能性があるが、シリカフュームや高炉スラグ微粉末などを混入した場合には、共通の評価指標を用いて比較することは難しい。さらに、水結合材比が異なる場合には、全く異なった水準で材料分離が発生することが容易に予想され、品質管理を行うための参考値としては T_a を使用できるかもしれないが、付着性状だけで品質判定を行うことは困難である。

また、 T_a 、 D_{ag90} およびマトリックスモルタルの η の関係を図-4.22に示す。一般に、粗骨材の分離抵抗性は、マトリックスモルタルの付着性に支配されるが、モルタルの付着性は、塑性粘度と強い相関があるといわれている。しかし、図-4.22より明らかなように、塑性粘度が大きい方が、必ずしも付着性が高いわけではなく、両性質は独立したパラメータであることがわかる。一般に、シリカフュームを混入したコンクリートの性状は「粘るけどサラっとす

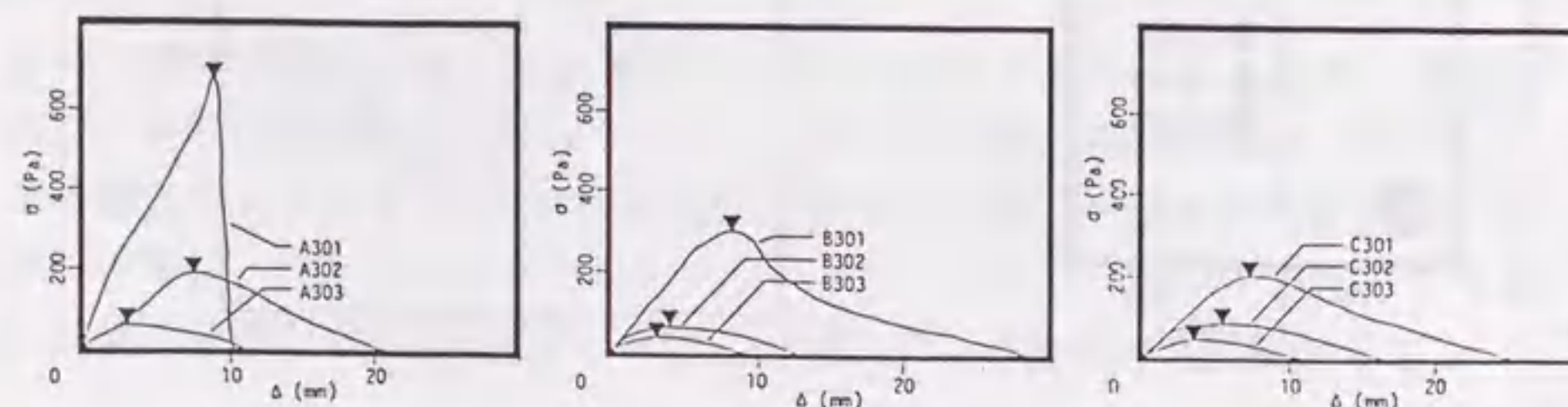


図-4.20 付着応力と変位の関係の一例

る」などと表現されることが多く、塑性粘度だけではその性状を表現できないことが指摘されてきたが、図-4.22によれば、このような性状の違いは、すべり抵抗や付着力の影響によるものと考えられる。

塑性粘度および付着性が粗骨材の沈下挙動に与える影響は、本実験の範囲内では、図-4.23のように表され、粗骨材の沈下抵抗性は、変形性能および付着性能の相乗効果によって表示できる。

次に、加振状態で測定したモルタルの小型Lフロー初速度 (sLv) と高性能

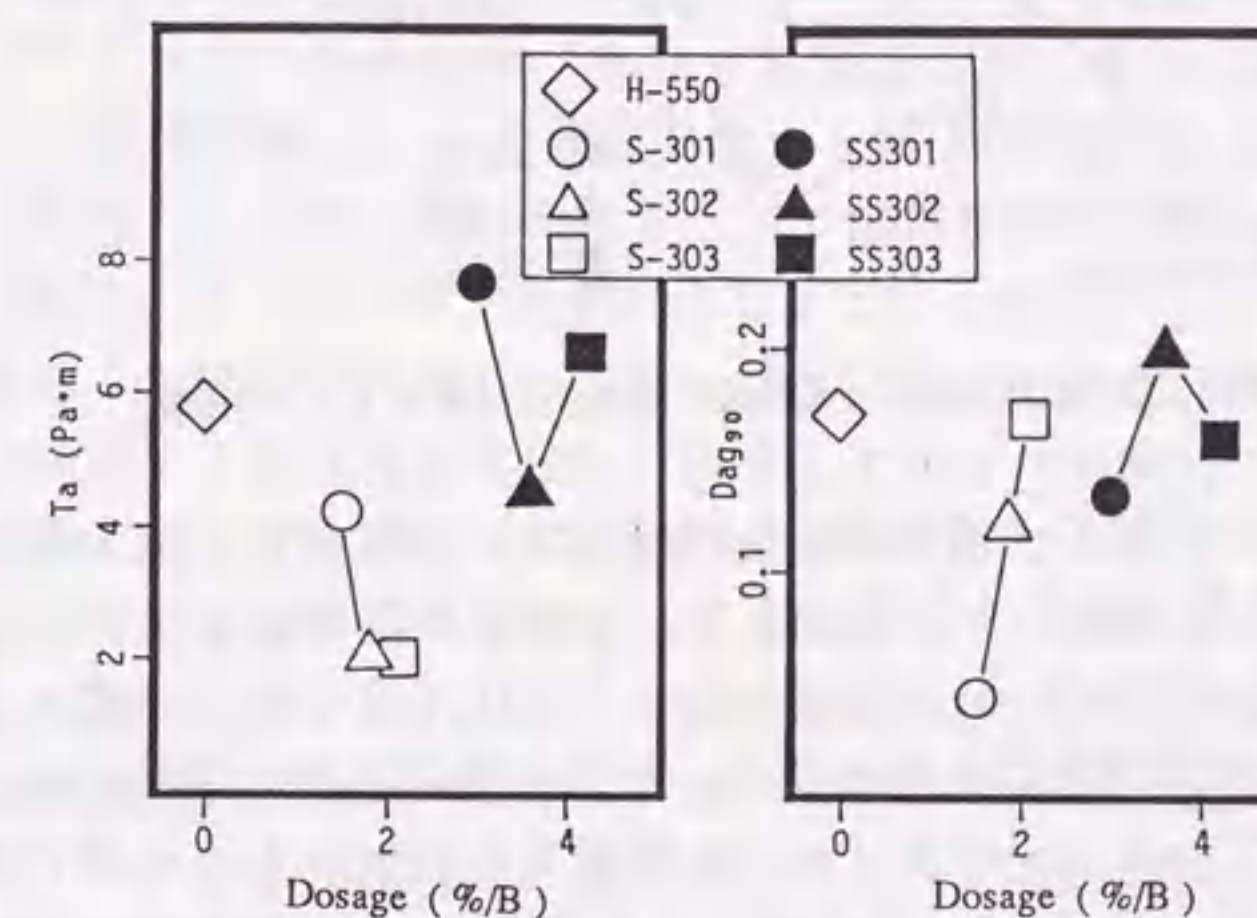


図-4.21 付着タフネスおよび沈下度と高性能A E減水剤の添加量の関係

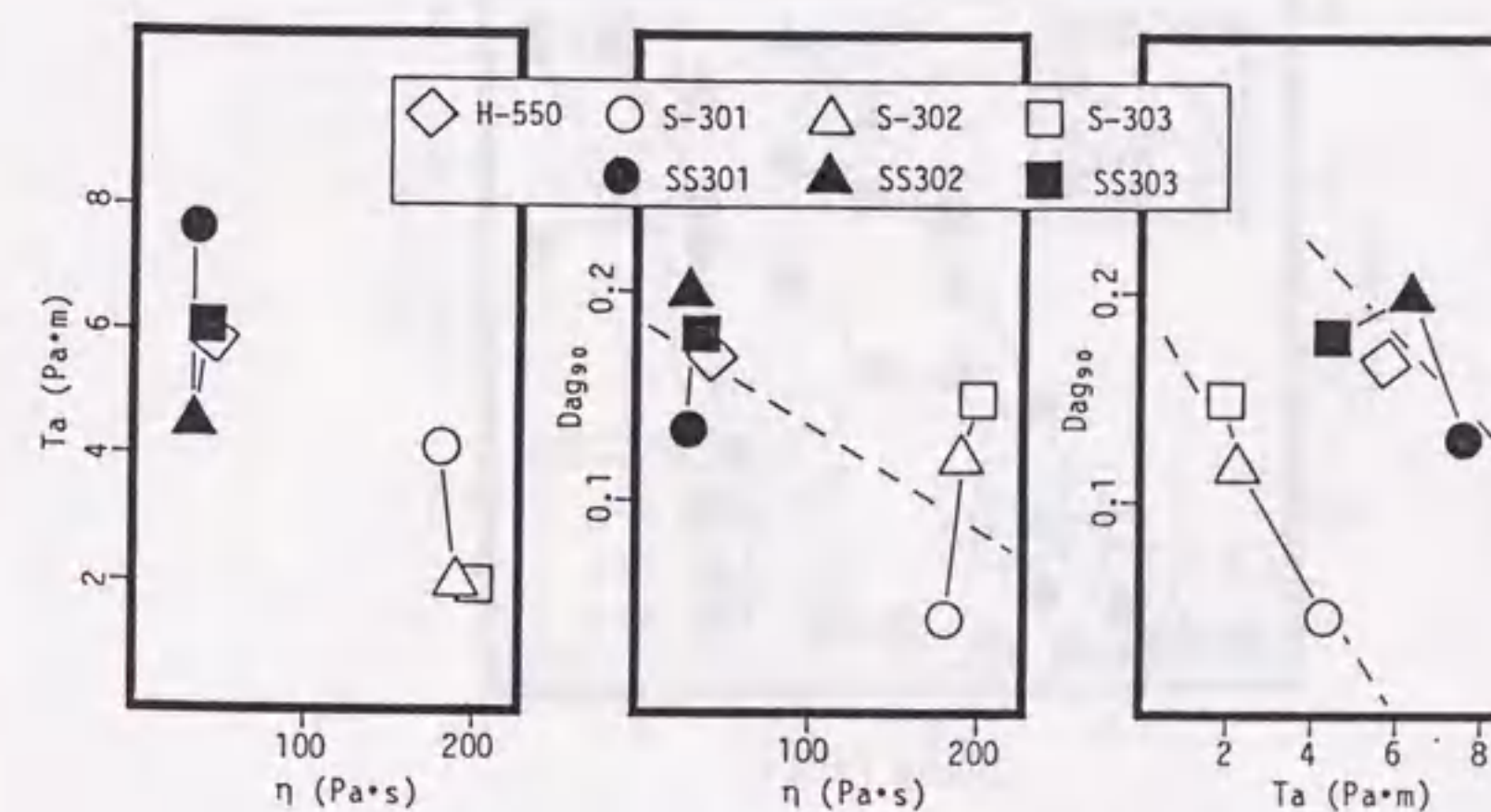


図-4.22 付着タフネスおよび沈下度と塑性粘度の関係

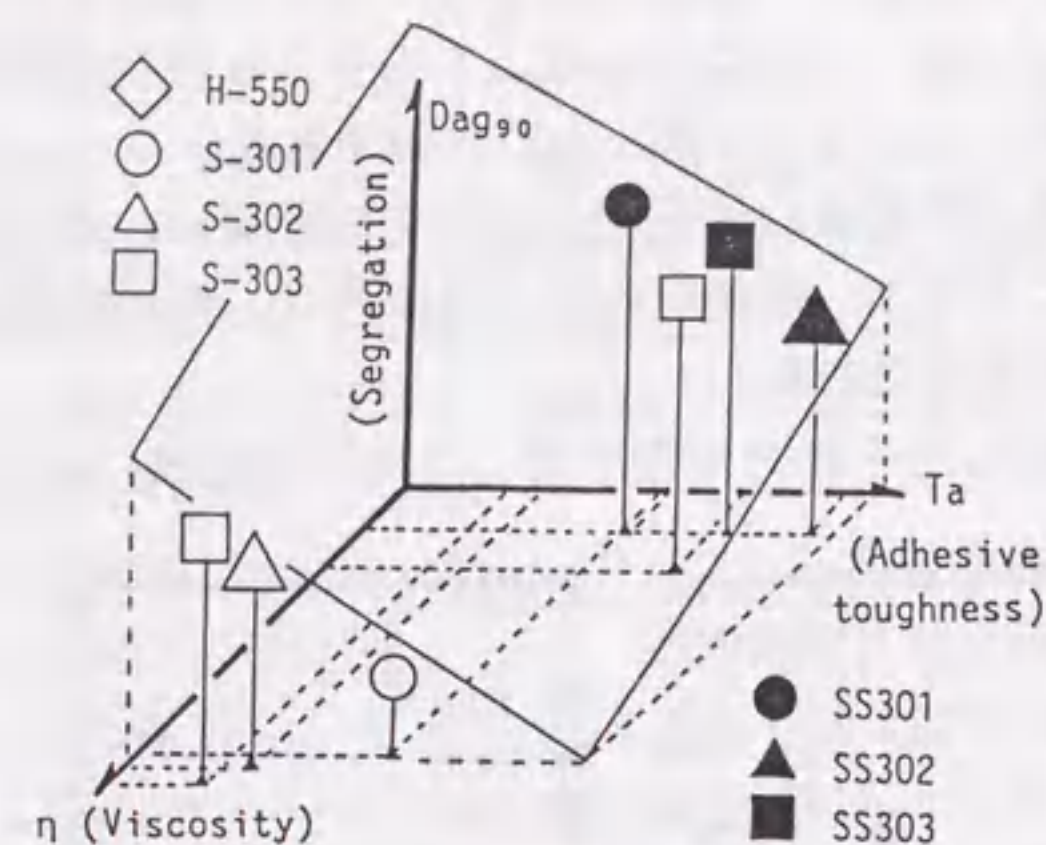


図-4.23 粗骨材の沈下抵抗性に与える塑性粘度および付着タフネスの影響

A E減水剤の添加量の関係の一例を図-4.24に示す。高性能A E減水剤の添加量の増大に伴いsLvの値は大きくなる。また、加振することによって、流動が促進され、sLvはさらに増大する。S-30シリーズでは、高性能A E減水剤の添加量が1.2%/B程度で流動速度が上限となり、その上限の速度は振動の最大加速度の大きさに依存している。シリカフュームを混入したSS30シリーズでは、流動速度は飛躍的に大きくなるが、この場合も高性能A E減水剤の添加量2~3%/Bの範囲に限界がみられる。高性能A E減水剤は水量の内割で混入されてい

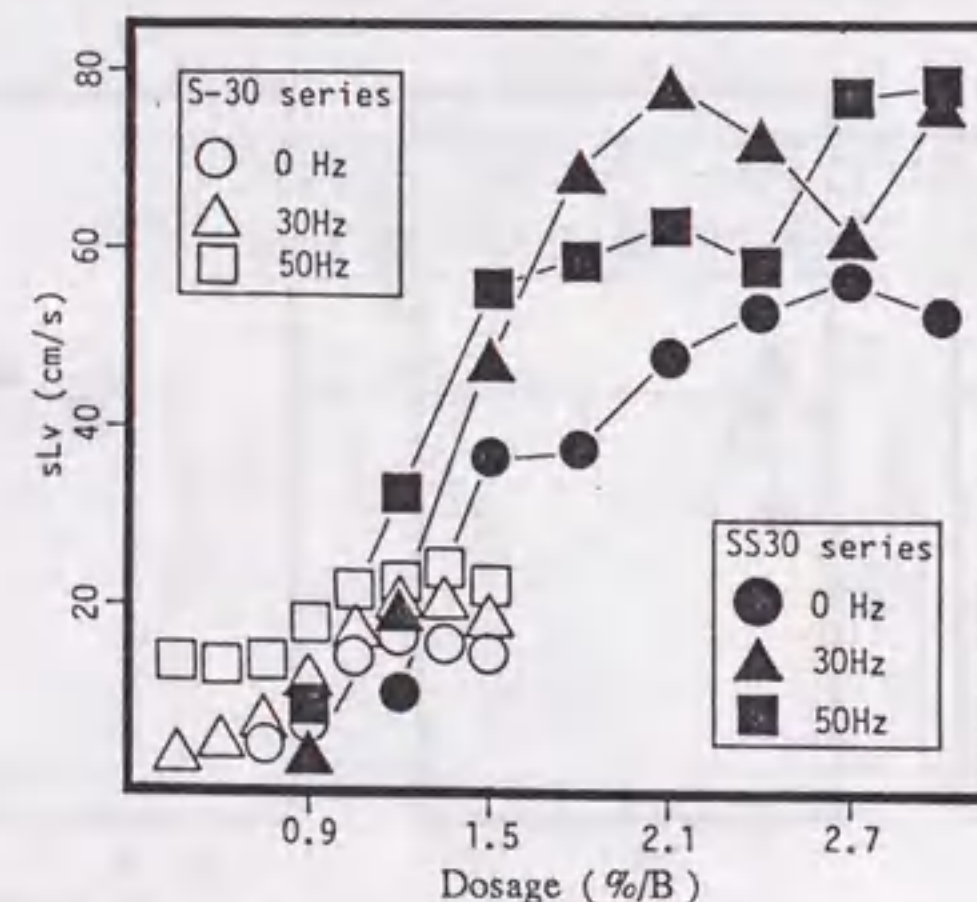


図-4.24 振動下における小型Lフロー初速度と高性能A E減水剤の添加量の関係

るため、高性能A E減水剤の過剰な添加は水量の減少につながる。このため、高性能A E減水剤を極端に多量添加しても、セメントなどの微粉末の分散性に寄与できないことが、高性能A E減水剤の添加量と流動速度が単調増加の関係にならない原因の一つと考えられる。一方、振動力の増加は外力の増加と同じであり、本実験で加えた範囲であれば、外力の増加に伴い流動速度が増加することが容易に想像できる。

レオロジー定数は、無振動の場合は、小型Lスランプ値 (sLs) および小型Lフロー初速度 (sLv) を用いて推定し、また加振した場合は、Lフロー試験時に試料がフラットになるので、 τ_y を0と仮定して、sLvを用いて振動下におけるみかけの塑性粘度 (η^*) を推定した。 η^* と高性能A E減水剤の添加量の関係を示した図-4.25より明らかなように、無振動時と比較して、いずれの試料も加振されることによって、みかけ上レオロジー定数が小さくなっている。

加振によるみかけのレオロジー定数の減少に関して、寺西らはコンシステンシー曲線が変化する性状を数式化して提案しており、実験的にもそれを証明している。振動下における球引上げ試験の結果がチクソトロピーを示すこと、また振動機の加速度が周期的に加わることを勘案して、振動下におけるフレッシュコンクリートのコンシステンシー曲線を修正する方法を提案している[101]。この場合、コンシステンシー曲線は、図-4.26に示すような曲線で表される。本研究では、これらをバイリニア型のビンガムモデルに変換したときのみかけのレオロジー定数を求めた。

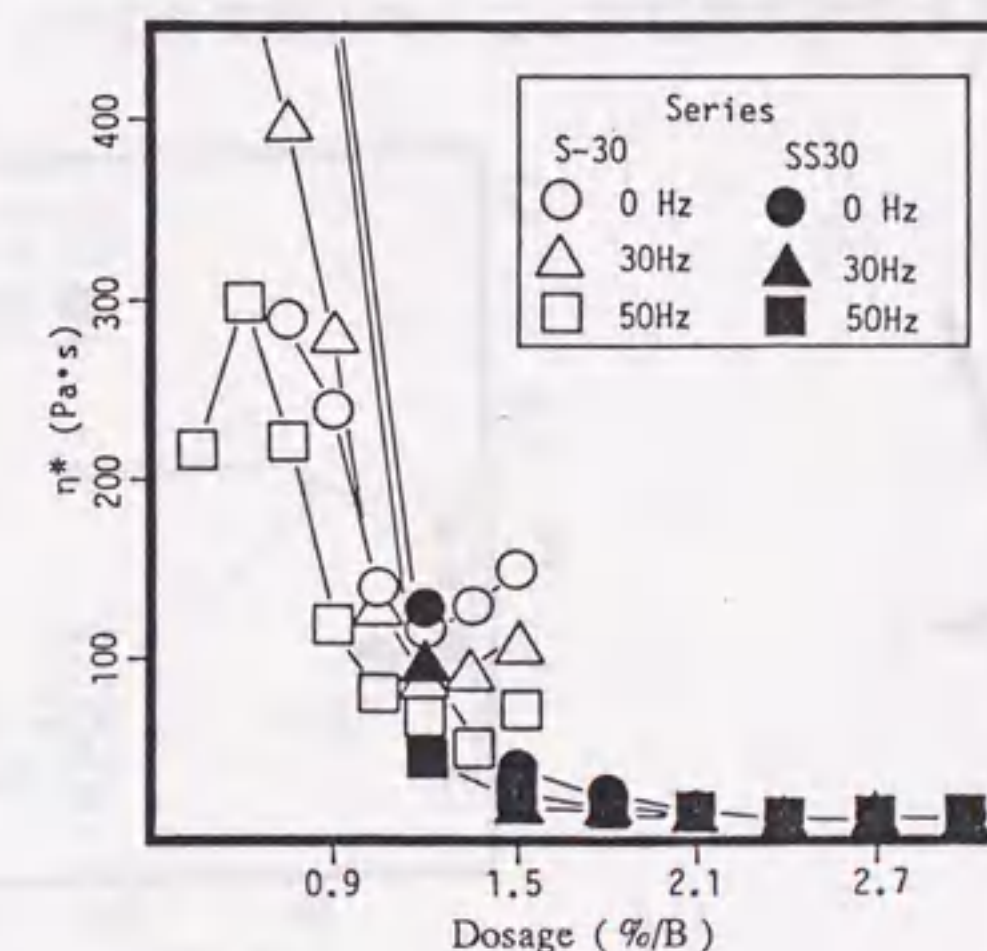


図-4.25 みかけの塑性粘度と高性能A E減水剤の添加量の関係

図-4.27は、粗骨材沈下度(Dag)に与える、みかけの塑性粘度(η^*)の影響を示したものである。先に述べたように、粗骨材の沈下抵抗性は、静的な試験値では、粘性と付着性の両者の影響を考慮しなければならなかったが、振動下の場合には、みかけの塑性粘度のみで評価できる。これは、みかけの塑性粘度が、振動によって変化する抵抗性をすべて含んだ値として測定されるためであり、厳密な意味では振動下における塑性粘度ではない。

振動下におけるレオロジー定数を各種のツーポイント試験などで測定する場合、負の降伏値を算出する例が数多く報告されている。これは、荷重が加わっていない場合においても振動力が加わるため、みかけ上試料が流動しているように挙動するためと考えられる。振動下における性状を正しく理解しないとサンプリングデータのバラツキと判断され、正しいデータが失われる危険性がある。

4.6 まとめ

本章で得られた知見は、以下のようにまとめられる。

- 1) 単位粗骨材量が多いほど、レオロジー定数は大きくなり、粗骨材量が比較的小さい範囲では、塑性粘度の増加が顕著である。粗骨材量が多い範囲では降伏値も増加し始め、粗骨材量によって流動のモードが変化する。
- 2) 高性能A E減水剤を使用した低水結合材比の高粘性コンクリートでは、スランプ値、すなわち降伏値を長時間維持することが可能であるが、塑性粘度は

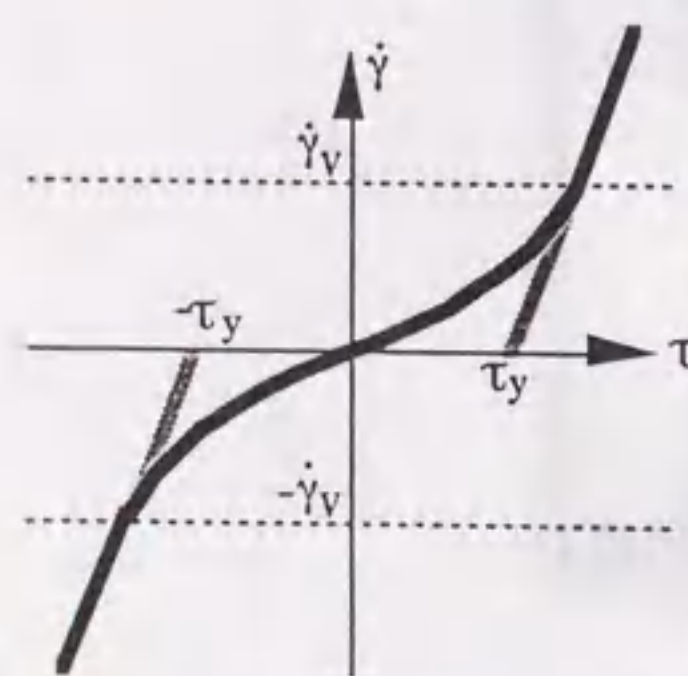


図-4.26 振動下におけるコンシステンシー曲線

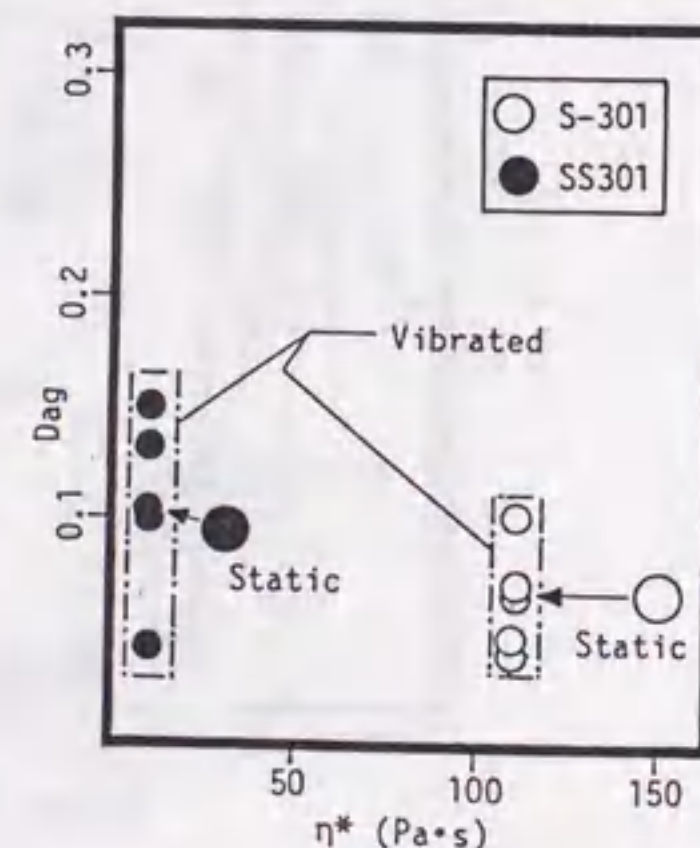


図-4.27 沈下度とみかけの塑性粘度の関係

時間経過とともに増大する傾向を示す。

- 3) 徐放性のない高性能A E減水剤を用いたコンクリートのスランプ値は時間経過とともに減少するが、高性能A E減水剤によっては、所定の時間を経過するとスランプアップするものもあり、スランプ値が設計通りであっても、粘性が予想されたものと同じであるとは限らない。
- 4) 高強度・超高強度コンクリートのすべり挙動を含めたレオロジー性質は、従来のコンクリートとは大きく異なり、通常のコンシステンシー試験方法では、その物性値を正確に評価することができない。本実験の範囲では、この種のコンクリートの塑性粘度を推定するには、スランプ値とLフロー初速度を用いる推定方法が最も有力である。ただし、すべり抵抗や付着力がそれぞれのコンクリートで大きく異なるので、それらの性質を含む解析を行う必要がある。
- 5) 高性能A E減水剤を使用した高粘性コンクリート中の気泡の上昇や粗骨材沈下現象を、スランプ試験やLフロー試験などのコンシステンシー試験の結果から予測することは難しく、マトリックスモルタルのレオロジー性質を調べる必要がある。
- 6) 加振時の粗骨材の沈下抵抗性は、マトリックスモルタルの振動下でのみかけ上の塑性粘度に大きく支配される。また、この沈下抵抗性は、静的試験によるモルタルの塑性粘度および付着性状によって推定することが可能である。