

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解析的研究

5.1 概説

ポンプ圧送技術の発展を背景として、コンクリート施工においてはポンプ工法の採用が一般的となっている。最近では、分岐・開閉弁など、配管計画もより複雑となりつつあり、水平・垂直圧送を含めて圧送距離が数百mに及ぶ事例も珍しくない。日本建築学会コンクリートポンプ工法施工指針案[69]によれば、コンクリートのスランプ値と圧送管の径に応じて圧力損失を略算することができるが、この略算法の根拠となっているものは、従来のコンクリートによる実験データであり、近年新しく開発された各種の高流動・高粘性タイプのコンクリートには適用できない場合が多いことが指摘されている[73,102]。

圧送管内における流動挙動を理論的に解明するため、管内を圧送されるフレッシュコンクリートの挙動を模擬材料を用いて可視化する手法が報告されているが、これらのモデル実験や数値解析によって現象を十分に観察・把握しておくことが重要である[103,104]。特に、テーバー部やベント部における圧力損失・閉塞の問題は、粗骨材の量・形状・寸法が大きな影響要因となるので、均質な力学モデルによる解析では、そのメカニズムを十分に把握することができない。一般に、高強度コンクリートは粘性が高いためポンプ圧送が難しく、圧送中の閉塞事故も多く、場合によってはバケットなどで打設せざるをえない事例もある。

そこで、本章では、以下に示す3つの場合について粘塑性サスペンション要素法解析を実施し、フレッシュコンクリートの管内での流動挙動に関する考察を行った。

解析-5.1では、テーバー管の形状がフレッシュコンクリートの流動挙動に与える影響を観察することを目的としている。また、2.4節でも述べたように、テーバー管内で発生する流動抵抗力は、コンクリートを単相材料と考えると生じにくいことが明らかになっていることから、解析-5.2では、粗骨材量を主な要因として、調合と流動性の関係を明らかにすることを目的としている。さらに、理論式の展開が難しいベント管内での流動挙動について解析-5.3を実施し、ベント管内での2次流れや応力の分布状況などについて考察を行った。

5.2 解析手順

本解析では、直管、テーパー管およびベント管内でのフレッシュコンクリートの流動挙動について調べるために、これらの部位を抽出して解析を行っている。管の形状変化にともなうフレッシュコンクリートが変形する場合、フレッシュコンクリートには強制的な変形抵抗力が発生することが予想されるが、この挙動をよりわかりやすく再現させるために、本研究で取り扱った管は、実際に使用されている管を若干誇張した形状になっている。また、解析に使用した試料も、粗骨材径を通常よりも若干大きいサイズとして、粗骨材の影響を受けやすいコンクリートを仮定している。

5.2.1 解析に用いた管の形状・寸法

(1) 2次元直管およびテーパー管

直管およびテーパー管におけるフレッシュコンクリートの流動を2次元問題として取り扱った解析-5.1に用いた管の形状・寸法を表-5.1および図-5.1に示す。解析-5.1では、コンクリートが流入する側の管径を60mm、出口側の管径を30mm～60mmとし、テーパー率を5%～20%および無限大に変化させることにより、管の形状が流動挙動に与える影響を考察している。この解析では、図-5.1中の断面S付近でコンクリートを発生させ、断面Eを越えたコンクリートは自動的に消滅するように設定し、管の所定の部位における流動挙動をピックアップしている。また、流動速度を測定するために、断面A～Dを設定し、ここを通過する粗骨材の速度によってコンクリートの流動速度の評価を行っている。

(2) 3次元直管およびテーパー管

解析-5.2に用いた管の形状・寸法を図-5.2に示す。解析-5.2では、便宜上コンクリートが流入する側の直管をF管、テーパー管をT管および流出する側の直管をR管と呼ぶこととする。F管の直径は150mm、R管の直径は、直管の場合はF管と同じく150mmであり、テーパー管の場合は100mmである。テーパー管内での流動挙動に関しては、2.4節で述べたように、谷川らによって理論解などが報告されており、解析-5.2では、複相材料がテーパー部を通過する際に生じる閉塞現象などを把握する目的から、実際のテーパー管よりもT管の絞り込みを厳しくし、粗骨材の影響を受けやすいような形状に設定した。

(3) 3次元ベント管

解析-5.3に用いた3次元ベント管の形状・寸法を図-5.3に示す。解析-5.3

では、解析-5.2と同様に、コンクリートが流入する側の直管をF管、ベント管をB管および流出する側の直管をR管と呼ぶこととする。管の径は100mmの一定とした。F管およびR管の長さは、それぞれ250mmおよび300mmと設定したが、以下の考察で述べるように、ベント部における流動挙動の乱れの影響が及ばない長さとして、上記の直管部の長さを設定した。F管とR管のなす角度は90度、B管の中心軸の回転半径は150mmである。コンクリートの流動速度を

表-5.1 解析-5.1 に用いたテーパー管の寸法

Series	Pi	Po	S - A	A - B	B - C	C - D	D - E		
VS66	60	60	35	43	33	48	65		
HS66							15		
HT64-10		40		65					
VT64-10									
VT63-10		30		60	50	65			
VT64-IN		40		23	17	32			
VT65-10		50		27		35			
VT64-20		40		77		67		82	
VT64-05									

[Unit : mm]

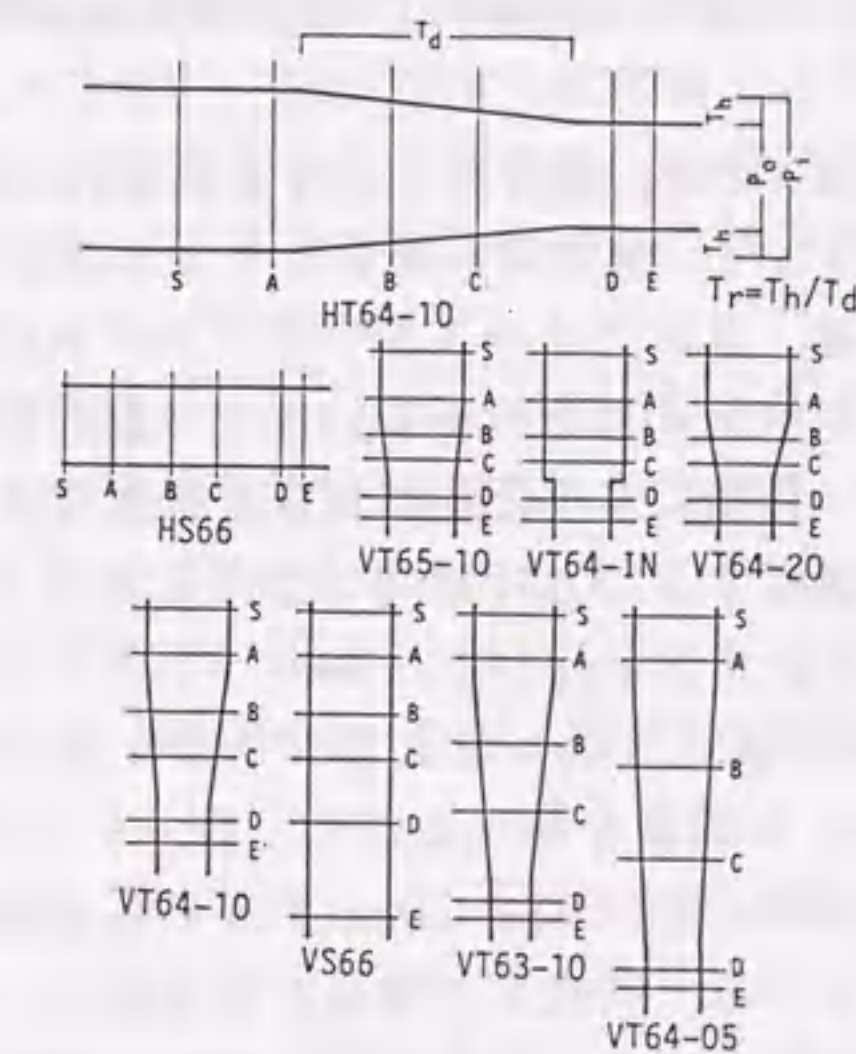


図-5.1 解析-5.1に用いたテーパー管の形状

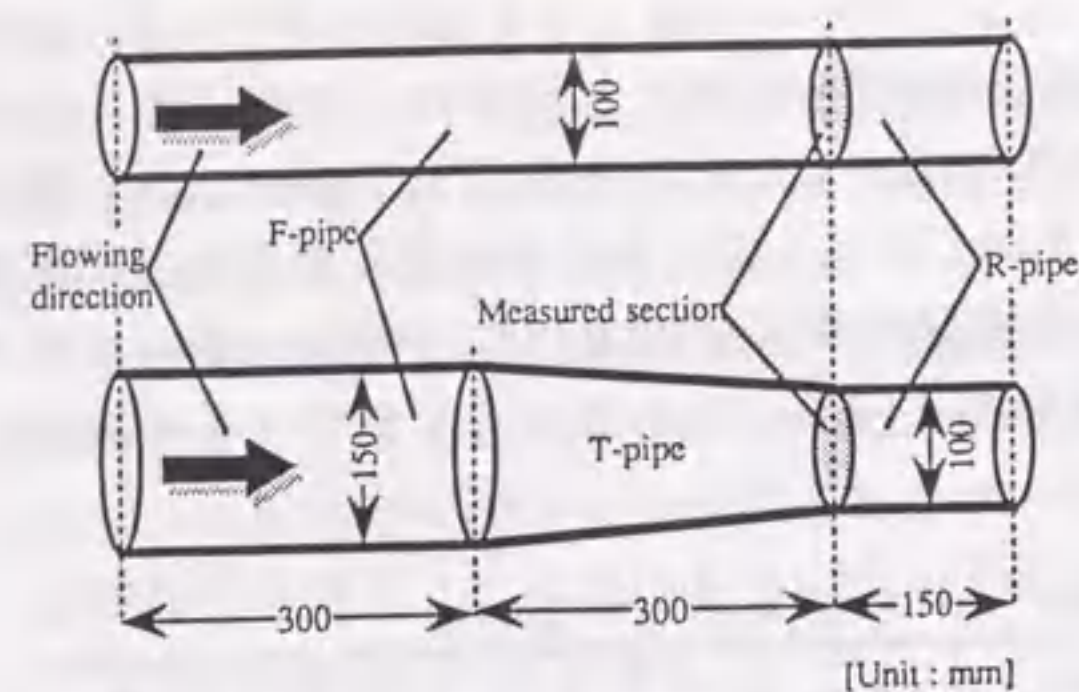


図-5.2 解析-5.2に用いたテーパ管の形状・寸法

計測するために、図-5.3(b)に示すような測定用断面を設け、ここを通過する骨材の流動速度を算出し、以下の考察に用いた。

5.2.2 入力パラメータ

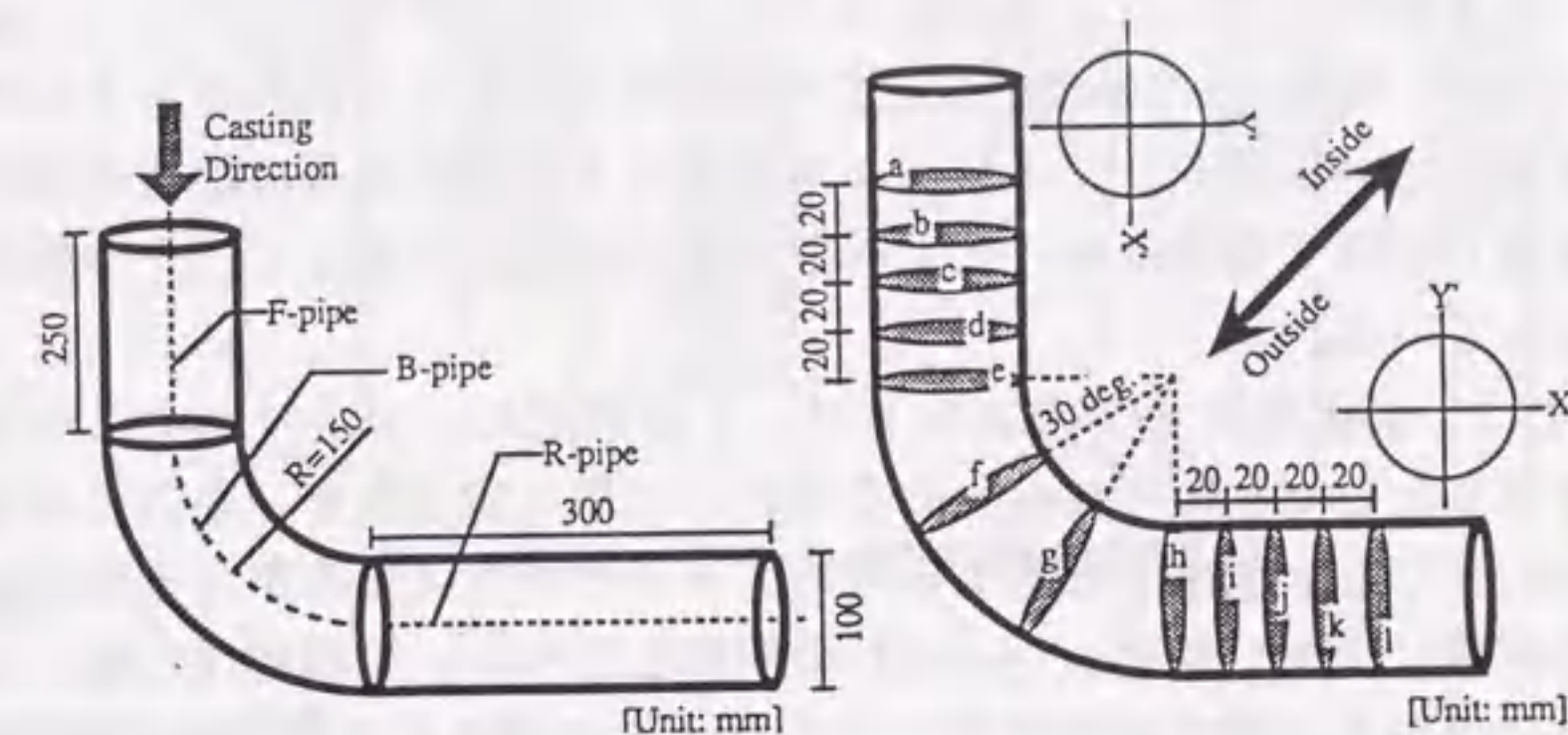
(1) 粗骨材

粘塑性サスペンション要素法では、コンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材の2相から構成されるものとして取り扱っており、粗骨材の寸法や単位粗骨材量を任意に変化させることができる。

解析-5.1では、管の形状が流動挙動に与える影響を観察することを目的として、基本的な流動挙動を観察するために、粗骨材寸法を単純に10mmの一定として解析を行った。

解析-5.2および解析-5.3では、粗骨材寸法をそれぞれ20mm~40mmおよび5mm~20mmの範囲に設定した。流体のシミュレーションと同様に、事前にコンクリートを管内流動させ、コンクリートが十分ランダムに通過した状態で、考察のための流動シミュレーションを行っている。一部の試料では、この事前段階で閉塞が発生したが、実際にも不確定に閉塞が発生することは一般に知られており、このデータを無視することは妥当でないと考え、閉塞が発生した状態を基準としてシミュレーションを行った。

解析-5.2では、粗骨材体積比 (G_v) およびマトリックスモルタルのレオロジー一定数が流動挙動に与える影響を調べるため、表-5.2に示すような範囲で粗骨材径を変化させた。解析-5.2では、20mm未満の粗骨材はマトリックスモルタルの一部として考えている。同表中の粗骨材体積比は、一般に用いられているコンクリートより若干少ないが、粒度曲線を単純な線形に仮定すれば、通常の粗骨材重量は表中の値の2~3倍となり、この値は、高流動コンクリートから超硬練りコンクリートまでをカバーした範囲といえる。



(a) 形状・寸法

(b) 考察に用いた断面の位置

図-5.3 解析-5.3に用いたベント管の形状・寸法

解析-5.1~解析-5.3のいずれの解析でも、粗骨材は球形であると仮定しているが、角ばり係数などを考慮する場合は、3.2.6節を参照されたい。

(2) ポンプ圧力

解析-5.1では、ポンプ圧力に相当する合力を等分して、図-5.1中に示す断面Aより手前の各粗骨材に節点力として加えている。解析-5.2および解析-5.3では、解析-5.1と同様に、ポンプ圧力に相当する合力を等分し、F管より手前の全粗骨材に対して節点力として加えた。この部位では十分均質な栓流を呈していることを確認しており、今回はこの部位における流動挙動に関しては特に議論しない。

解析-5.1、5.2および5.3では、ポンプ圧力をそれぞれ50kPa、1kPaおよび10kPaの定常圧力とし、脈動などは考慮していない。いずれの場合も管の出口部において圧力が0となるような定常流のシミュレーションを行った。

なお、解析-5.1では重力を考慮しているが、ポンプ圧力に比べて、重力の影響が極めて小さいことがわかったので、解析-5.2および解析-5.3では重力を考慮していない。

(3) レオロジー定数

解析-5.1および解析-5.2に用いた試料のレオロジー定数を表-5.3および前掲の表-5.2に示す。解析-5.1で取り扱ったレオロジー定数値は、通常のコンクリートまたはやや硬練りのコンクリートに近い値であるが、解析-5.2で

は、最近盛んに研究されている高流動コンクリートを意識して、若干粘性の高いコンクリートを想定している。高流動コンクリートの降伏値は、かなり小さいと考えられるが、解析-5.2では20mm以下の骨材をマトリックスモルタルの一部として考慮している点や、マトリックスモルタルに加わる垂直応力の増加により内部摩擦力が降伏値をみかけ上上昇させる可能性を考慮して、やや幅の広い設定となっている。

解析-5.3では、高流動タイプのコンクリートを想定し、マトリックスモルタルの降伏値を0としたもの（Type-A）を主として取り扱ったが、圧力に依存して降伏値が大きくなる現象を考慮するため、マトリックスモルタルの降伏値が1kPaという極端に大きい場合（Type-B）の解析も行った。塑性粘度の値としては、いずれの場合も比較的高粘性のコンクリートに相当する200Pa・sを用いている。

5.3 解析結果とその考察

5.3.1 直管およびテーバー管内における流動挙動

(1) 粗骨材の挙動

解析-5.1による結果の一例を図-5.4に示す。この図には、個々の粗骨材の移動を示すため、特定の粗骨材に印を付けてある。直管においても、管壁面におけるすべり抵抗が作用するため、管内を圧送されるコンクリートにプラグフローが観察されている。また、テーバー管内へ流入するにしたがって粗骨材の凝集が見られ、粗骨材のインターロックの発生の危険性を視覚的に確認することができる。

表-5.2 解析-5.2に用いた入力パラメータ

τ_y (Pa)	η (Pa・s)	Gv (%)
100 ~ 800	100 ~ 400	10.6 ~ 33.1

[Notes] τ_y : Yield value, η : Plastic viscosity, Gv: Volume fraction of coarse aggregate.

表-5.3 解析-5.1に用いた入力パラメータ

τ_y (Pa)	η (Pa・s)	Gmax (mm)
100 ~ 800	100 ~ 400	10

[Notes] τ_y : Yield value, η : Plastic viscosity, Gmax: Maximum size of aggregate.

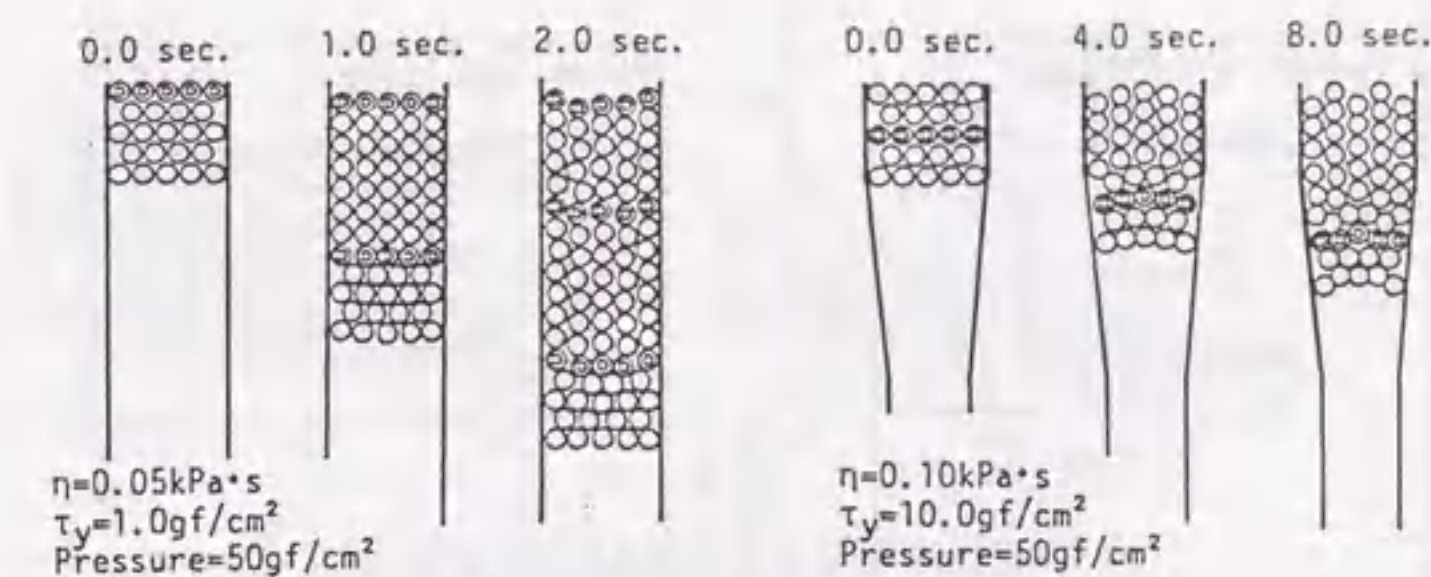


図-5.4 テーバー管内での流動挙動の一例

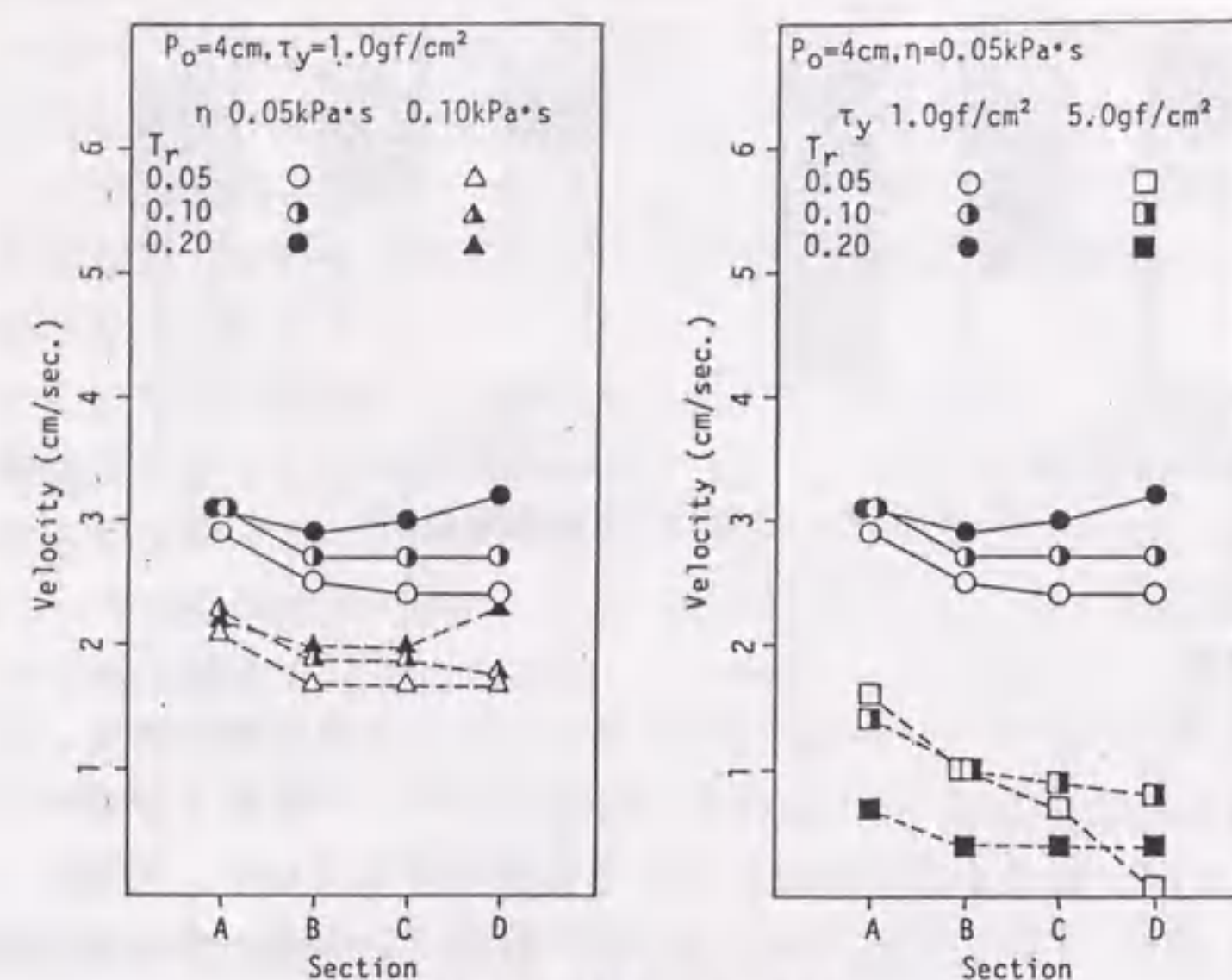
(2) 管の形状の影響

解析-5.1より得られたテーバー管内でのコンクリートの流動速度を、各断面ごとに平均化した結果を図-5.5に示す。同図はテーバー率および管の出口側の径など、テーバー管の形状が流速に与える影響を示している。同図によれば、テーバー率（Tr）が同じであれば、出口部の管径（Po）が小さいほど流速は遅くなり、流動に対する抵抗力が大きくなる。一方、出口径が同じでテーバー率を変化させた場合は、降伏値（ τ_y ）および塑性粘度（ η ）が小さい場合は、テーバー率が大きいほど、テーバー部通過後の流速は速くなっている。しかし、降伏値が大きい場合は、逆にテーバー率が大きいものほど流速が小さくなっており、テーバー管の場合は、試料のレオロジー性質に応じて最適のテーバー率が存在することがわかる。

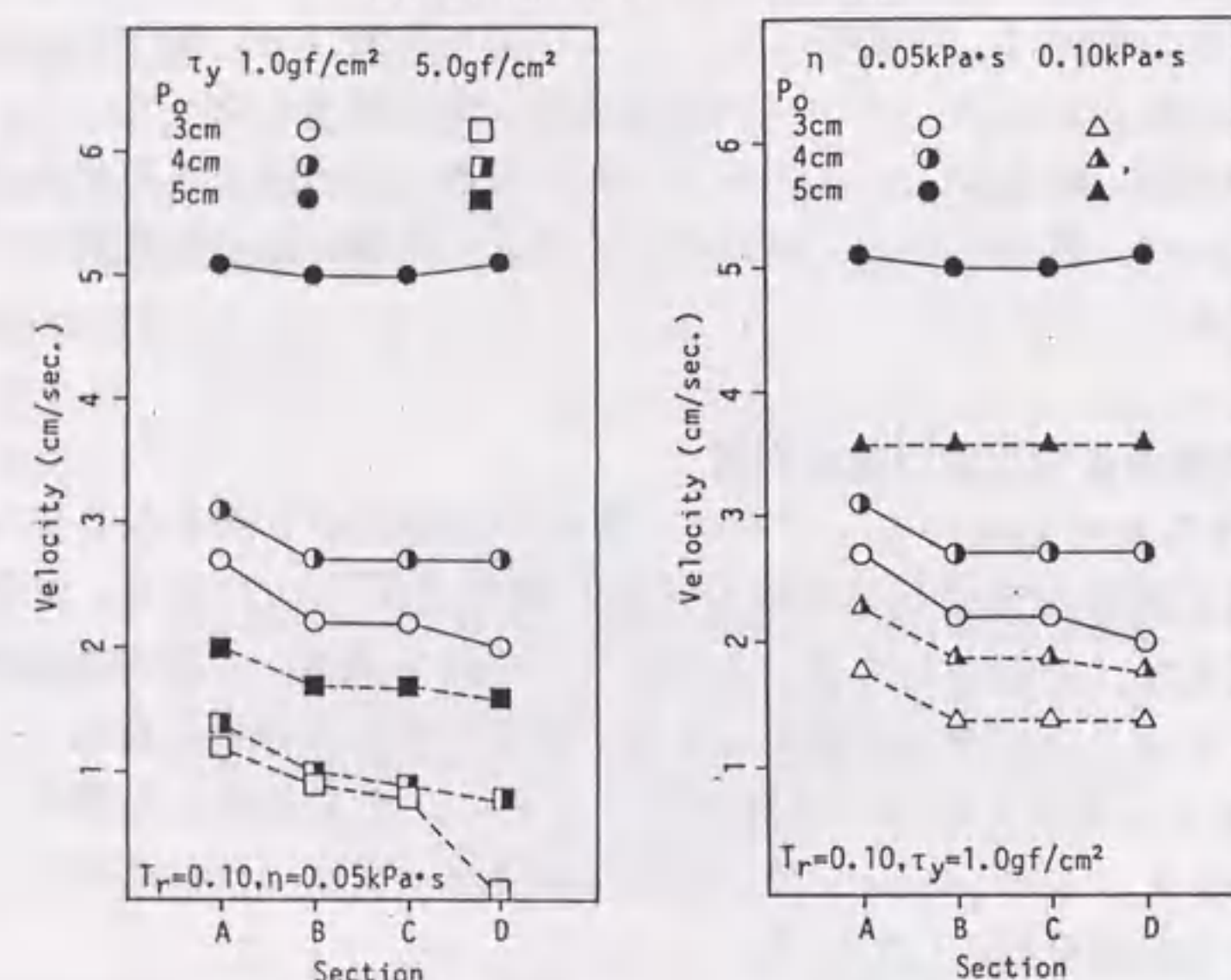
(3) レオロジー定数および粗骨材量の影響

解析-5.2で得られた結果から、テーバー管内の粗骨材がT部からR部へ移る際の平均速度と粗骨材体積比の関係を求めた結果を図-5.6に示す。同図中の白丸および黒丸は、それぞれ直管およびテーバー管を通過した際の流動速度を示している。データにバラツキがあるのは、解析の際に乱数的に発生した粗骨材が次々と流入してきており、流動が均一でないためである。今回のテーバー管内流動のシミュレーションでは、粗骨材体積比（Gv）が27.4%のシリーズの一部が途中で閉塞を起こしている。

直管を通過する粗骨材の流動速度は、マトリックスモルタルのレオロジー定数によって変化しており、同図中にその分布範囲をトーンで示してある。直管の場合、レオロジー定数（ τ_y および η ）や粗骨材量（Gv）が小さいほど流動速度が大きくなり、マトリックスモルタルの物性がコンクリート全体の流動に影響している。また粗骨材の体積比が増加することによって、マトリックスモ



(a) 流速に及ぼすテーパ率の影響



(b) 流速に及ぼす排出口の影響

図-5.5 流速に及ぼす管の形状の影響

ルタルの物性は同じでも、コンクリートのレオロジー定数がみかけ上増加すると考えられ、直管においては、コンクリートを均質な連続体と仮定して流動性質を議論することができると思われる。

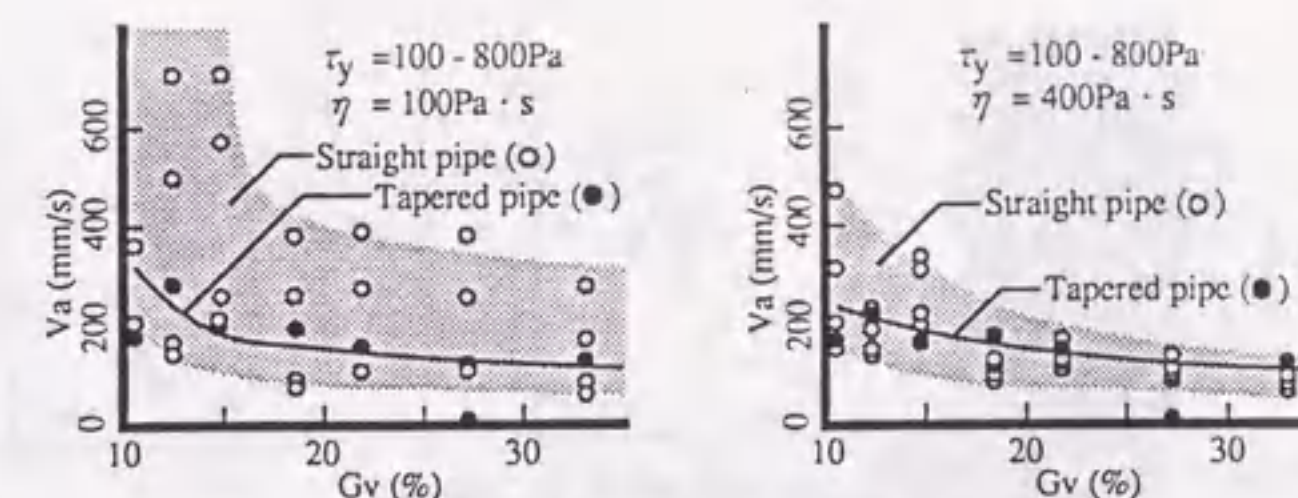


図-5.6 粗骨材の流動速度と粗骨材容積比の関係

一方、今回の解析で用いたようなテーパ管内では、コンクリートの流動速度は、マトリックスモルタルのレオロジー定数（特に降伏値）にはほとんど影響されず、図中に示した1本の曲線で近似できる。テーパ部では粗骨材量が流動速度に対して主導的となる現象は、テーパ管の圧送性を、均質な連続体を用いた解析で算出することが困難であることを示唆している。このことは、2.5.2節で述べた谷川らの理論的研究でも指摘されている。

テーパ管内を流動することは、一種の強制せん断変形を伴う挙動であるが、フレッシュコンクリートのせん断変形抵抗力は、スランプ試験などに代表される開空間の場合と、管内流動のような閉空間の場合では異なる性質を表す可能性がある。この原因の一つとして、コンクリートを均質とみなすことができるマスが状況によって異なることが考えられる。スランプ試験や上記のような直管の場合は比較的均質な流体とみなすことができても、テーパ管内では多相材料とみなして取り扱う必要があり、単純に「直管のn倍の圧力損失がある」という表現は適切ではないことを本解析結果は示唆している。

5.3.2 ベント管内における流動挙動

3次元ベント管内では、骨材は図-5.7に示すようにランダムに流れており、その流動挙動は、可視化手法などを用いなければ、実験によって定量的に評価することは難しい。粘塑性サスペンション要素法では、個々の粗骨材の挙動およびその間に発生するサスペンション要素に関する情報をすべて記憶するため、これをもとに、流動挙動や応力状況を把握することができる。

(1) 管軸方向の流動挙動（1次流れ）

前掲の図-5.3に示した各断面における全骨材の管軸方向流速（節点変位速度の面外方向）成分を取り出したものの一例を図-5.8に示す。同図では、断面のX'方向の位置における流動速度を平均し、この平均流動速度（V）の断面Y'方向の分布を示している。粘塑性サスペンション要素法では、粗骨材が乱数

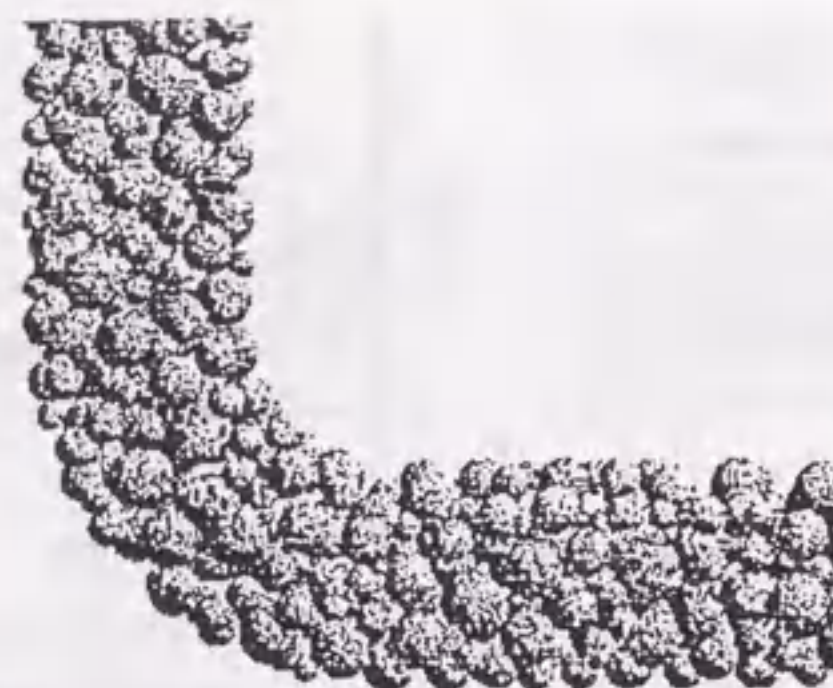


図-5.7 ベント管内でのコンクリートの流動状況の一例

的に断面を通過するため、偶発的に速い速度で断面を通過する粗骨材が観察され、流速のパラツキが生じている。F管部の断面aでは、栓流に近い状態で流れているが、ベント部にさしかかった断面eでは、既に栓流ではなく、外周側の流速が内周側より大きくなっている。このような流速分布の不均衡は、コンクリート内部におけるせん断変形を強制するため、変形抵抗の大きいコンクリートでは、大きな圧力損失が生じるものと思われる。また、この現象がみられる領域は、ベント管自体の長さよりも長くなっていることが、今回の解析結果より判明した。

(2) 断面内の流動挙動（2次流れ）

ベント管内における流動現象で注目される挙動として、断面内の流れ（2次流れ）が挙げられる。シミュレーションより得られた2次流れのベクトルの大きさと位置をプロットしたものの一例を図-5.9および図-5.10に示す。図-5.10より明らかなように、F管からB管の前部までの領域（断面a～e）では、降伏値を持たないType-Aの場合、B管に近づくにつれて2次流れは速くなり、B管内では、ほぼ一定速度の2次流れが観察されている。一方、降伏値の大きいType-Bの場合は、B管入口付近で流速が最高速度に達している。この結果より、マトリックスモルタルの降伏値が、直管部での2次流れをある程度拘束するが、強制的なせん断変形を伴うベント部入口では2次流れが増加すると考えることができる。降伏値を持たないType-Aでは、ベント管内でほぼ一様の2次流れ速度を維持するが、Type-Bでは、降伏値の影響で流速が減少する。再び直管となるR管部に入ると、Type-Aでは、乱流と思われる2次流れの一時的な増加がみられるが、2次流れが急激に小さくなる様子がみられる。

以上のような2次流れの発生は、コンクリートがベント管を通過する際に損

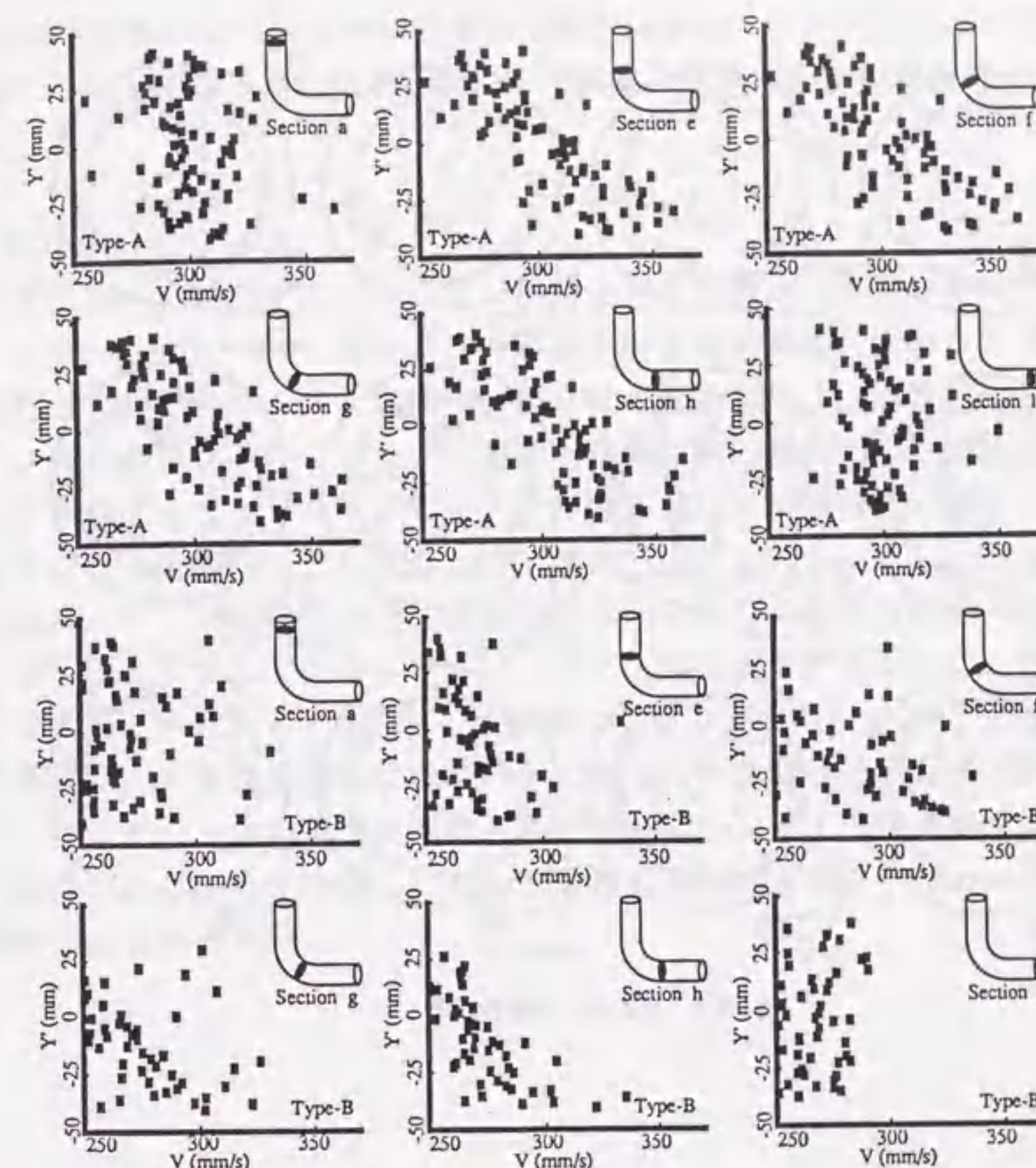


図-5.8 主流れの分布状況

失エネルギーとなり、主流れ（1次流れ）のみによって推定された値よりも大きな圧送圧が必要となる可能性がある。この点は、特に降伏値の小さい高流動タイプのコンクリートでは注意が必要であろう。

(3) 管内の応力分布

ベント管内では、1次流れの不均衡に加えて、2次流れが生じるため、コンクリートには栓流の場合とは異なるせん断応力分布が発生する。図-5.11は、粗骨材間に作用する平均垂直応力(I_1)および偏差応力2次不変量($\sqrt{I_2}$)と断面位置の関係を示したものである。骨材間の圧縮力に関しては、全体を通して線形に減少する傾向にあるが、ベント管内では、線形性を逸脱して圧縮力が若干大きくなる部分が見られる。また、 $\sqrt{I_2}$ で示したせん断応力成分の分布に着目す

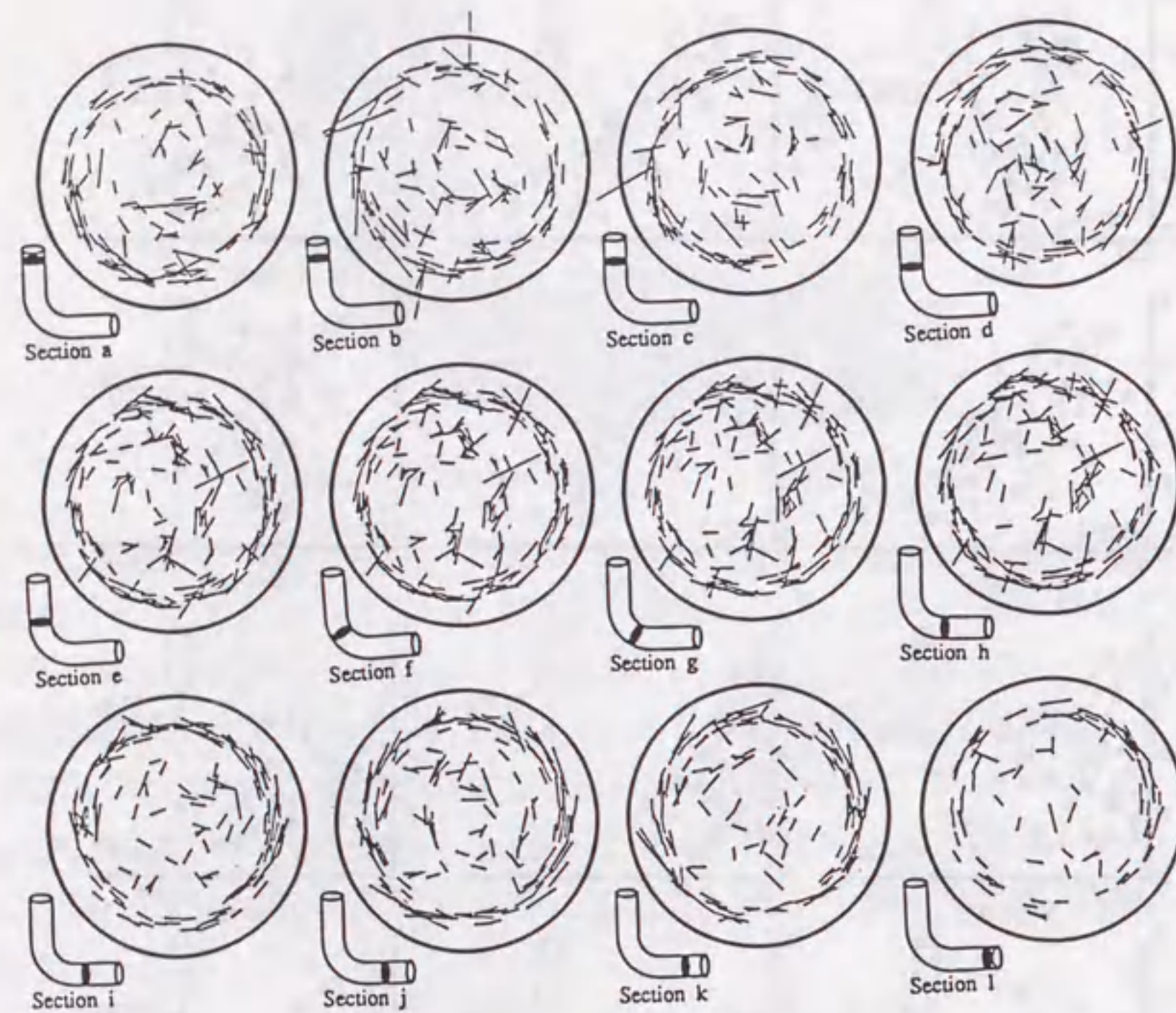


図-5.9 2次流れの発生状況

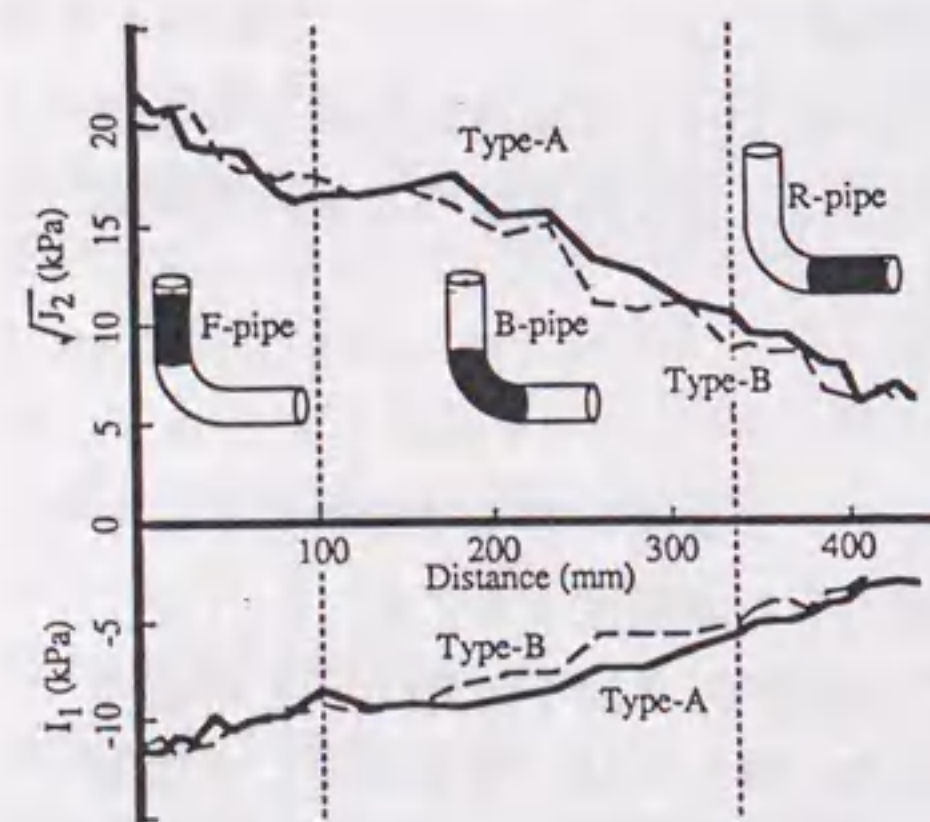


図-5.10 2次流れの分布状況

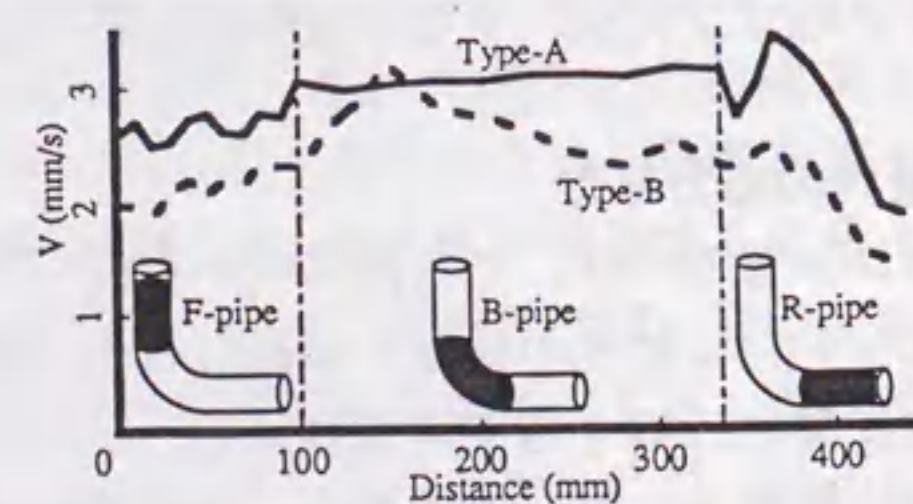


図-5.11 管内の応力分布

ると、全体として、応力が減少することによって、流動モードがせん断変形流(層流)から栓流に変化していく様子が観察されるが、ベント部では一時的にせん断応力の減少率が小さくなり、前述の強制せん断流の影響が現れている。

5.4 まとめ

本章では、粘塑性サスペンション要素法 (VSEM) を用いて、フレッシュコンクリートがテーバー管およびベント管内を通過するときのシミュレーションを行った。テーバー部を通過する粗骨材の流動挙動は、直管部における、マトリックスモルタルのレオロジー定数と粗骨材量の両者による流動速度への影響とは異なり、マトリックスモルタルの性質よりも粗骨材量の影響が顕著になることが明らかとなった。また、ベント部を通過するフレッシュコンクリートの流速は、ベント部の外周側で速くなる傾向を示し、この傾向はベント部の前後の直管部にも及んでいる。さらに、ベント部を通過する際には、管軸方向に垂直な面内での流れ (2次流れ) が顕著となることが明らかとなった。

本解析は、定常流を扱った静的解析である。実際には、ポンプの脈動運動のため、コンクリートの瞬間流速はさらに大きくなり、この効果を解析的に検討する必要がある[104]。今後、これらを考慮した動的な解析を行い、さらに研究を進める必要がある。

図6-10 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

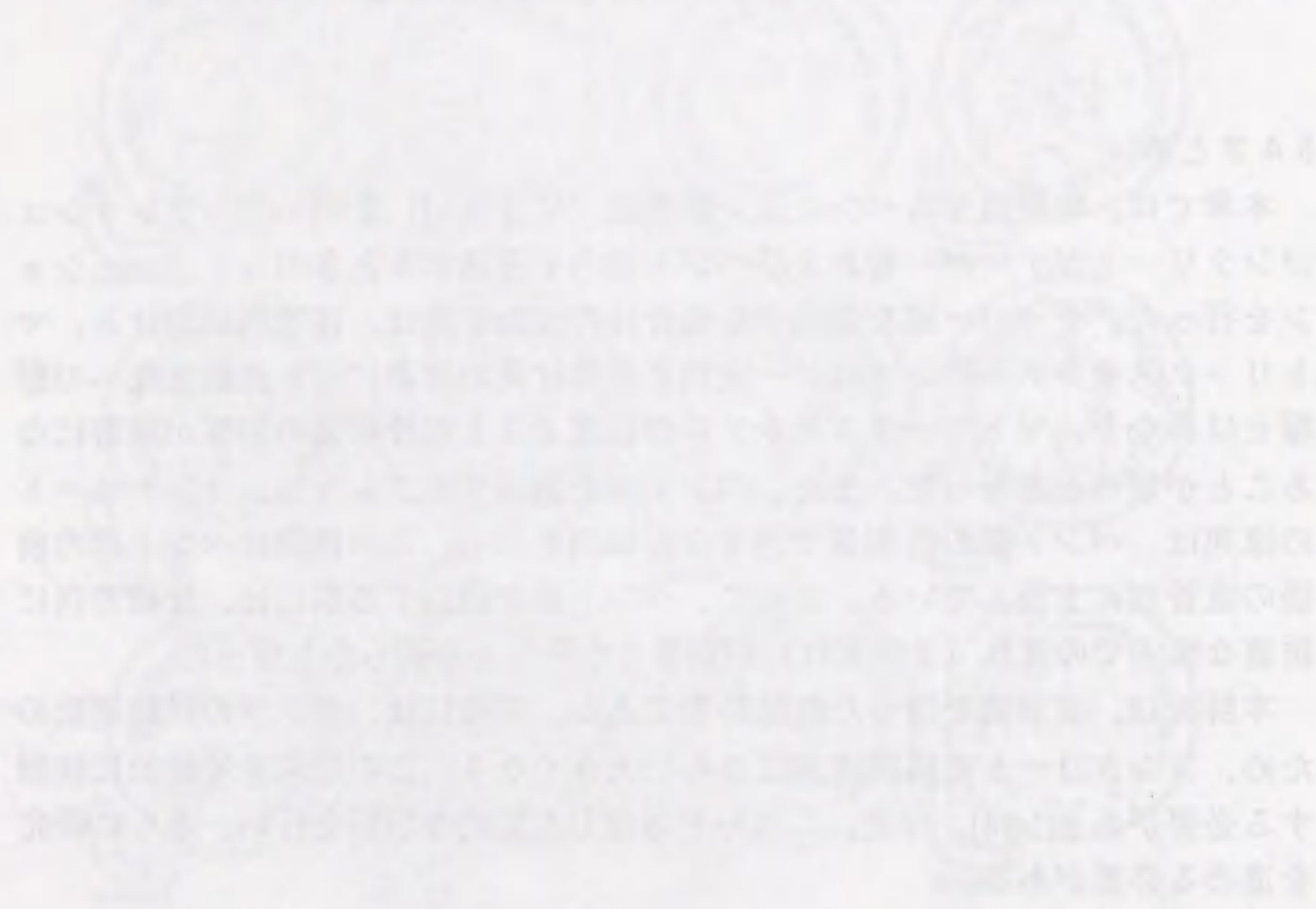


図6-11 フレッシュコンクリートの型枠内における流動挙動に関する研究

図6-12 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

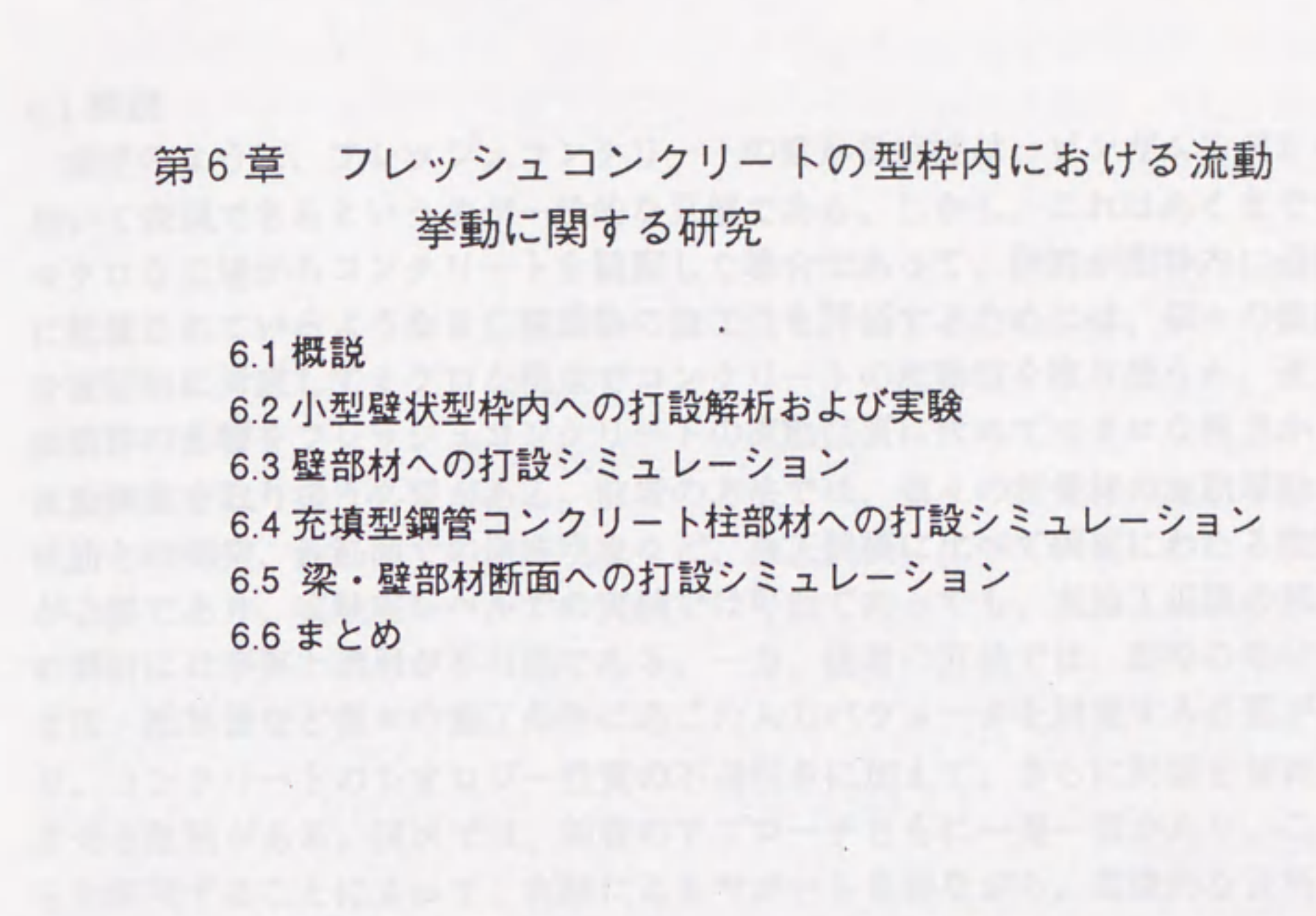


図6-13 フレッシュコンクリートの型枠内における流動挙動に関する研究

図6-14 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

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

前述のように、フレッシュコンクリートの変形抵抗性は、ビンガムモデルを用いて表現できるというのが一般的な見解である。しかし、これはあくまでもマクロな立場からコンクリートを観察した場合であって、鉄筋が型枠内に過密に配置されているようなRC建築物の施工性を評価するためには、個々の鉄筋を直接的に考慮してミクロな視点でコンクリートの流動性を取り扱うか、逆に鉄筋群の影響をフレッシュコンクリートの流動性質に含めてマクロな視点から流動現象を取り扱う必要がある。前者の方法では、個々の粗骨材の流動挙動、鉄筋との衝突、鉄筋間での閉塞現象など、施工規模に比べて細部にわたる検討が必要であり、実験室レベルでの実験では可能であっても、実施工規模の部材の解析には事実上適用が不可能である。一方、後者の方法では、型枠の形状・寸法・配筋量など個々の施工条件に応じた入力パラメータを用意する必要があり、コンクリートのレオロジー性質の不透明さに加えて、さらに問題を複雑化させる危険がある。現状では、両者のアプローチともに一長一短があり、これらを併用することによって、実験によるサポートを得ながら、基礎的な資料を蓄積することが重要である。

本章では、上記のミクロな流動挙動を表現することが可能である粘塑性サスペンション要素法(VSEM)、および、マクロな流動挙動を表現することに卓越している粘塑性空間要素法(VDEM)の両者を用いて、各種施工方法によって打設されるフレッシュコンクリートの流動挙動について検討を行った結果について述べる。

6.2 小型壁状型枠内への打設解析および実験

粘塑性空間要素法を用いた解析では、コンクリートの流動挙動をビジュアルに確認できる反面、コンクリートの流動挙動を定量的に評価することが難しい。そのひとつの理由として、「施工性」が数値で表現できないためであり、現在提案されている施工性の尺度は、いずれもコンシステンシー試験値やワーカビリティ試験値でしかないことが挙げられる。各種の施工条件下においてそれぞれの施工性の尺度が異なるのは自明であり、そのため施工性を統一的に評価することが難しい。

そこで、本節では、3.3節で述べた粘塑性空間要素法の妥当性の検証に用いた単純な壁状型枠の模型を対象として、粘塑性空間要素法による解析を行うとともに、コンクリートのレオロジー定数や施工条件が型枠内部のコンクリートの流動に与える影響を定量的に評価する手法を提案する。さらに、同様の条件下で実験を行い、配筋や振動が試料のみかけのレオロジー性質に与える影響を定量的に評価することとした。

6.2.1 解析の概要

解析-3.2では、前掲の図-3.11(a)に示すような無筋壁状型枠（A型枠）への打設を2次元問題として取り扱った[49]。打設速度（Q）は、300、450および $900 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ （型枠の厚みを60mmとして換算）の3水準とし、打設速度による試料の流動挙動の違いを調べた。配筋を有する型枠（B型枠）内での流動挙動をシミュレートする際には、配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。なお、いずれの解析においても、型枠側面とのすべりによる影響は考慮せず、すべり挙動を含めたみかけのレオロジー性質について考察を行った。

6.2.2 実験の概要

実験-3.2に用いた型枠は合板で製作したが、VTRで内部の試料の流動挙動を撮影するため、前面部のみはアクリル製とした。目視による観察では、型枠の前後面でのすべり抵抗の違いが流動挙動に与える影響はみられなかった。

実験-3.2に用いたモルタル試料の調合を表-6.1に示す。実験-3.2では、水セメント比（W/C）が40%および30%（それぞれM40およびM30シリーズ）の2水準の試料を用いた。水セメント比が30%のモルタルに関しては、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を単位水量に対して1.2%/Cを内割で混入した。解析と同様に、前掲の図-3.11に示すようなAおよびB型枠を用いて、図-6.1に示すような装置を用い、M40シリーズでは $900 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ で、またM30シ

表-6.1 モルタル試料の調合

Series	W/C	S/C	Ad
M40	40	1.8	0
M30	30	1.25	1.2

[Notes] W/C: Water-cement ratio (%), S/C: Sand-cement ratio, Ad: High-performance AE water reducing agent (%/C).

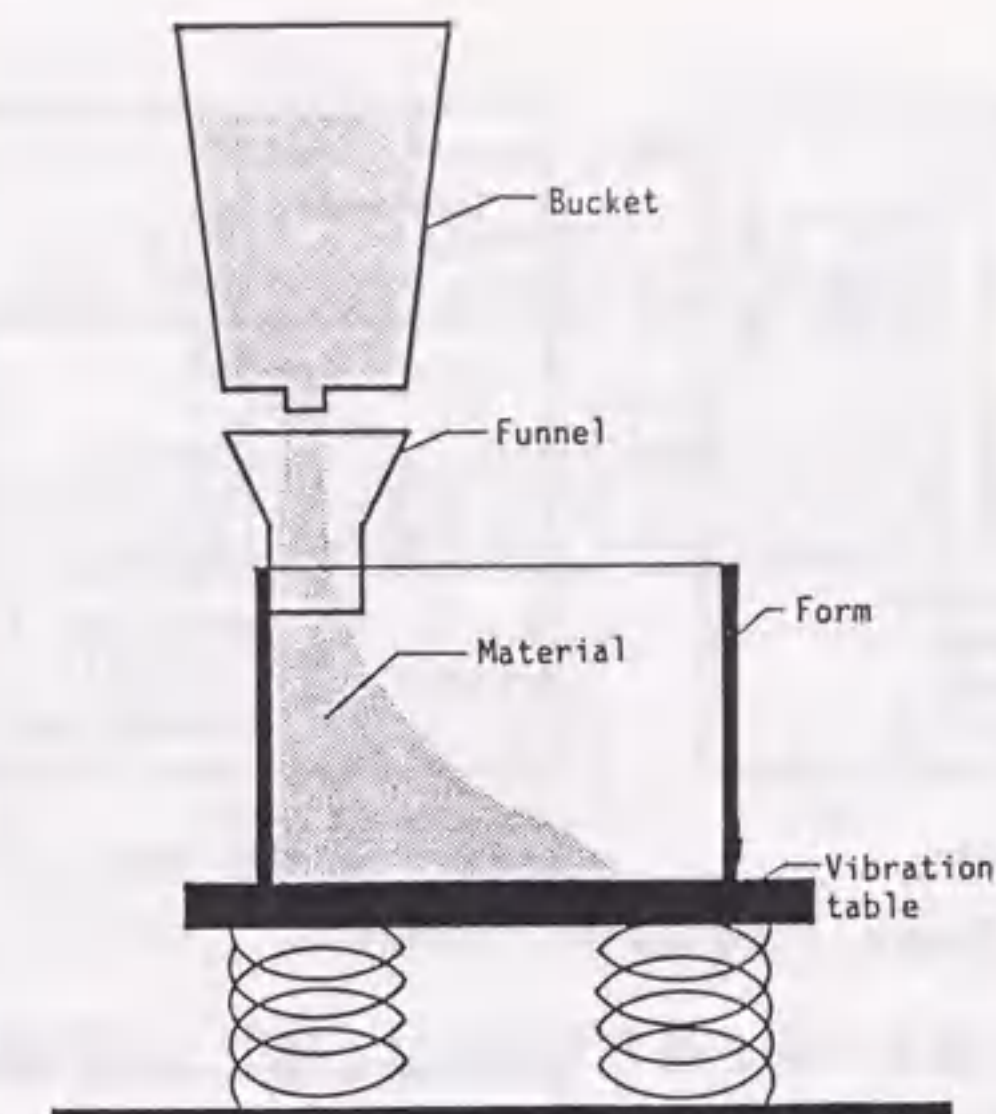


図-6.1 実験-3.2に用いた試験装置の概要

リーズでは $450 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ で型枠内に打設した。型枠容積の2倍以上の試料が上部バケットに貯蔵されており、打設開始から終了まで一定速度で打設されていることをVTR解析で確認している。打設位置を解析と同条件の型枠左端より100mm以内とするために漏斗を設けているが、試料の流入がこの漏斗によって制約されることはなく、試験結果に影響を与えることはなかった。壁状型枠を振動台上に固定し、30Hz（1.5g、ここにg:重力加速度）の縦振動を加えることにより、振動による流動挙動の変化についても調べた。

さらに、試料のレオロジー定数を測定するために、振動台上での球引上げ試験を行い、無振動および加振下におけるみかけのレオロジー性質を調べた。球引上げ試験による結果の解析には、2.2.2節でも述べたように、ストークス式とアンスレー式が利用されている。一般に、コンシステンシー曲線の直線部から降伏値および塑性粘度を直接求める場合には、アンスレー式が正しいとされており[39-42]、本研究でもアンスレー式を採用している。

6.2.3 型枠内における流動挙動

解析および実験結果の比較を前掲の図-3.12および図-6.2に示す。図-3.12は無振動時の結果を示しており、図-6.2は加振時の結果である。図中の点および線はそれぞれ解析-3.2および実験-3.2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。しかし、打設実験では、型枠壁面との摩擦による試料のみかけのレオロジー定数の増加分が

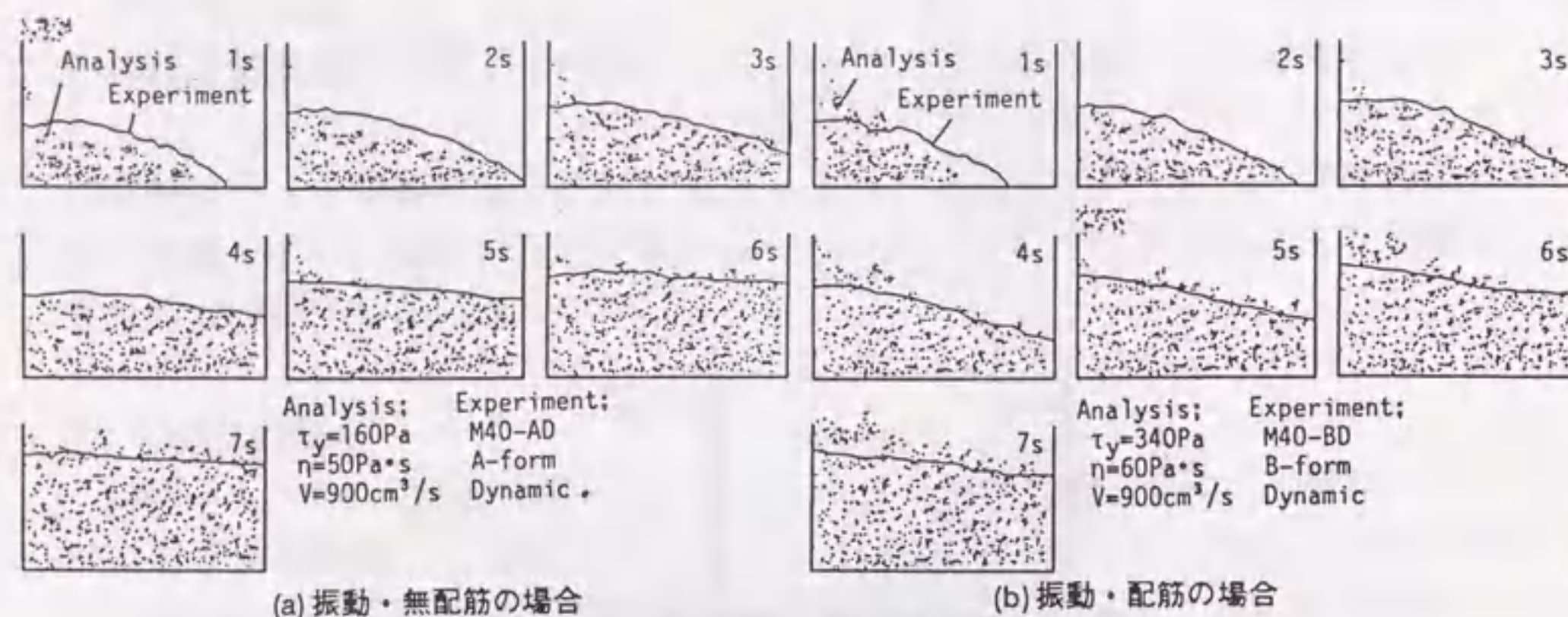


図-6.2 小型壁状型枠内での流動挙動

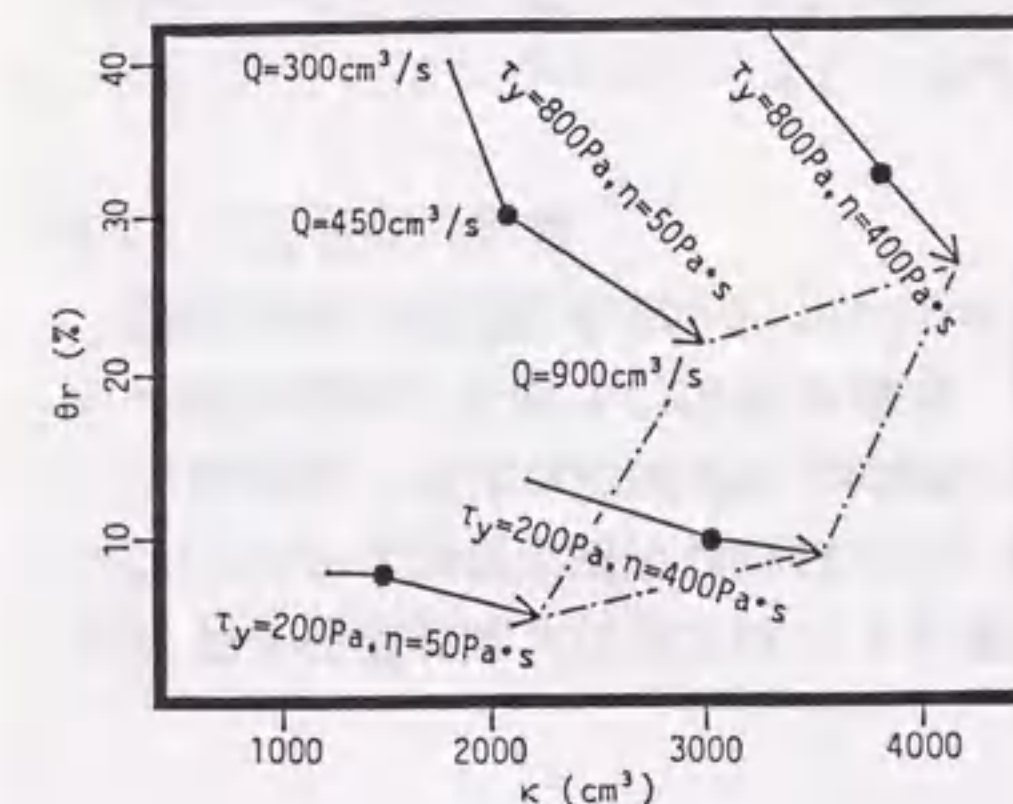
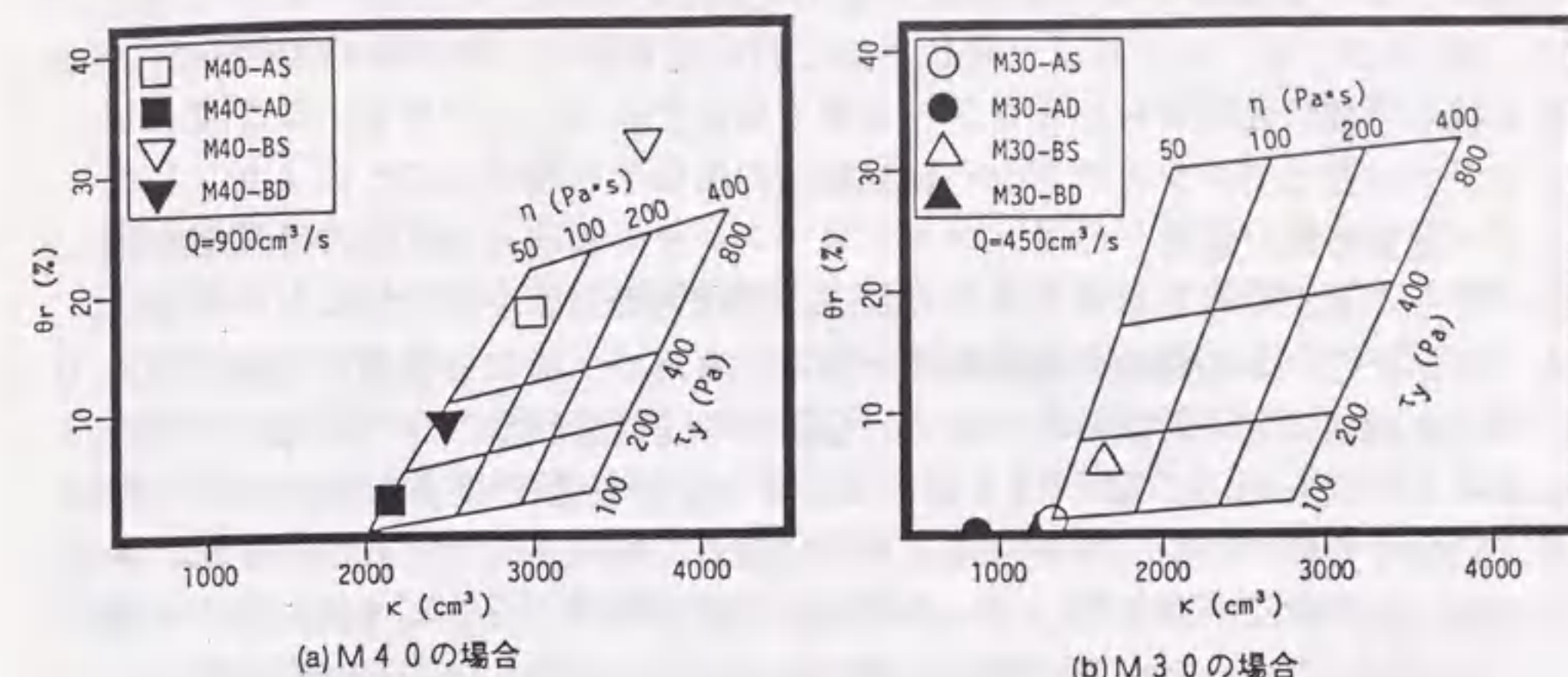
あり、実験結果と解析結果を一致させるためには、球引上げ試験で得られたレオロジー定数よりも今回の解析では大きい値を用いる必要があった。この解析の入力値として用いたみかけのレオロジー定数の定量化手法については6.2.4節で述べる。実験と解析による流動挙動に若干の相違が見られるのは、実験では、落下途中の試料の体積を考慮していないのに対し、粘塑性空間要素法による解析では、対象となる空間に存在するすべての試料の体積を打設量とするためである。

6.2.4 型枠内における流動挙動の定量化

試料の流動性状は、その上面の形状によく現われるため、投入部より右の部分（左端より100mmから右端まで）の試料上面の形状を最小2乗法によって直線近似し、この直線の傾斜角（ θ ）と、型枠内の試料の体積（ V ）の関係を求めた。さらに、次式(6.1)を用いて θ および $\Delta\theta$ （ θ を V で微分した値）から、安息角（ θ_r ）および流動定数（ κ ）を定義し、これらを以下の考察に用いた。

$$\theta = \theta_r - \frac{\Delta\theta}{\kappa} \quad (6.1)$$

安息角（ θ_r ）は、試料上面の最終傾斜角に、また流動定数（ κ ）は、試料上面の角度の変化に関連した実験定数である。安息角（ θ_r ）および流動定数（ κ ）とレオロジー定数の関係の一例を図-6.3に示す。図-6.3(a)は、打設速度が $900 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ の場合の結果を、また、図-6.3(b)は、打設速度を変化させ



(c) 打設速度を変化させた場合

図-6.3 レオロジー定数と流動特性の関係

た場合を示している。図中の直線群は解析結果を、また図-6.3(a)中にプロットした点は実験結果を示している。レオロジー定数が大きくなるにしたがい、安息角（ θ_r ）および流動定数（ κ ）の値は増加しており、安息角（ θ_r ）は降伏値（ τ_y ）の影響を、流動定数（ κ ）は塑性粘度（ η ）の影響を強く受けることがわかる。

コンシステンシー試験値からレオロジー定数を簡易に推定する図-4.1（前掲）と同様に、図-6.3を用いてレオロジー定数を推定することができる。4.1節に提示したコンクリートのレオロジー定数の簡易推定手法では、レオロジー定数とコンシステンシー試験値の関係を明らかにすることができるが、これと

は別に、コンシステンシー試験値と施工性能を再確認する必要があった。一方、図-6.3では、レオロジー定数と施工性能を直接的に結び付けており、求める施工性能の範囲からレオロジー定数を算定することができる。ここで、レオロジー定数とコンシステンシー試験結果の関係を利用することにより、レオロジー定数を媒介変数として、コンシステンシーの管理と施工性の確保を合理的に行うことができるものと考えられる。構造体の強度や耐久性などの面からも、コンクリートの調合の選択範囲は限られるため、従来の経験則や施工事例・施工実験にはほとんど頼ることなく、合理的な「施工設計」を行うことが可能になると考えられる。図-6.3を用いるレオロジー定数の簡易推定方法は、実用上完全なものではなく、個々の施工条件に応じた解析を行う必要があるが、膨大な量の実大施工実験を行っている現状を考慮すれば、コンピュータによる施工シミュレーションと少量の室内実験の組み合わせから得られる結果を参考に、数例の施工実験を行う手法の方がはるかに合理的であり、今後、施工性の評価方法のシステムを含めて十分議論する余地がある。

6.2.5 試料のみかけのレオロジー性質

図-6.4に、各実験条件下で得られたみかけのレオロジー定数の分布を示す。配筋によって試料のみかけのレオロジー定数は増加しており、振動を加えることによって、みかけのレオロジー定数が減少することがわかる。各実験条件下における降伏値 (τ_y) および塑性粘度 (η) の変動を直接比較することはできないが、加振することによって、降伏値 (τ_y) が比較的大きい範囲では、

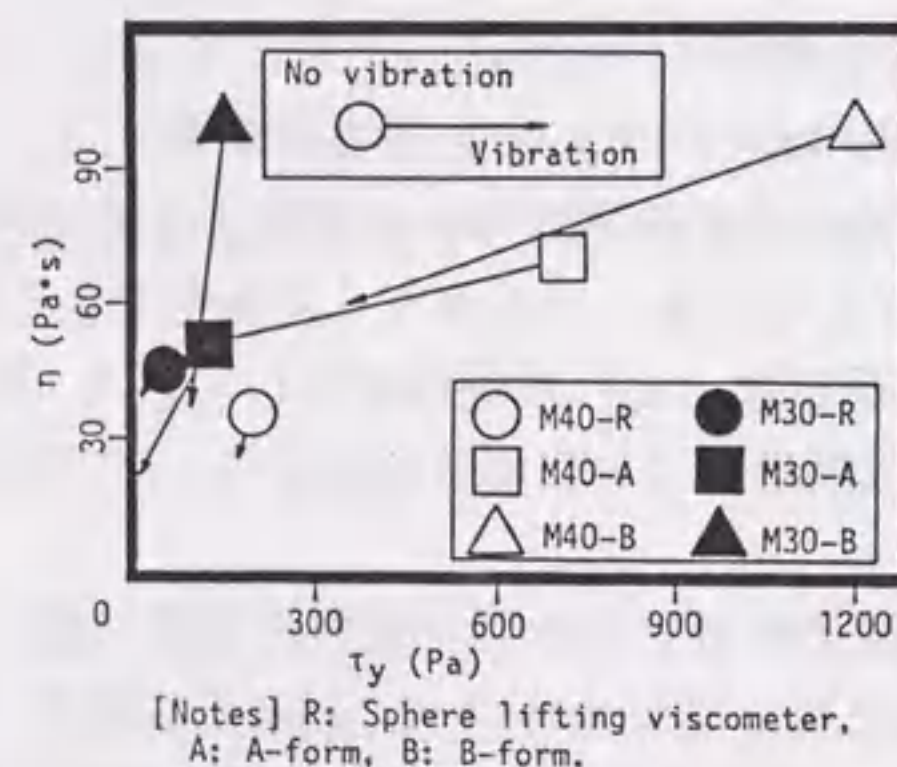


図-6.4 レオロジー定数の分布

降伏値 (τ_y) の減少量が大きくなる。また、配筋の有無による変化に関しても同様の傾向がみられる。

6.3 壁部材への打設シミュレーション

3.3節でも述べたように、粘塑性空間要素法は、大規模な空間へのコンクリートの打設シミュレーションにおいて大きな効果を発揮する解析手法である。また、壁状部材は2次元問題として取り扱うのが比較的簡単であり、施工条件の入力を含めて、計算機を有効に利用することが可能である。しかし、部材内の鉄筋間をコンクリートが十分通過することを判定する場合など、細かい部位での流動挙動を観察する必要がある場合は、コンクリートを多相材料とみなして、粗骨材の影響を考慮する必要がある。粘塑性サスペンション要素法の利用は不可欠となる。本節では、壁部材へ打設されるコンクリートの流動シミュレーションについて述べる。

6.3.1 打設位置の影響

壁状型枠への打設を取り扱った解析-6.1に用いた要素分割および解析結果の一例を、それぞれ図-6.5および図-6.6に示す。

解析-6.1に用いた型枠は、高さ2m、幅3mで、右上に開口部を有するもので、これを6×6個の8節点四角形アイソパラメトリック要素で構成している。型枠上部の空間も、コンクリートの盛り上りを考慮して要素分割を行って

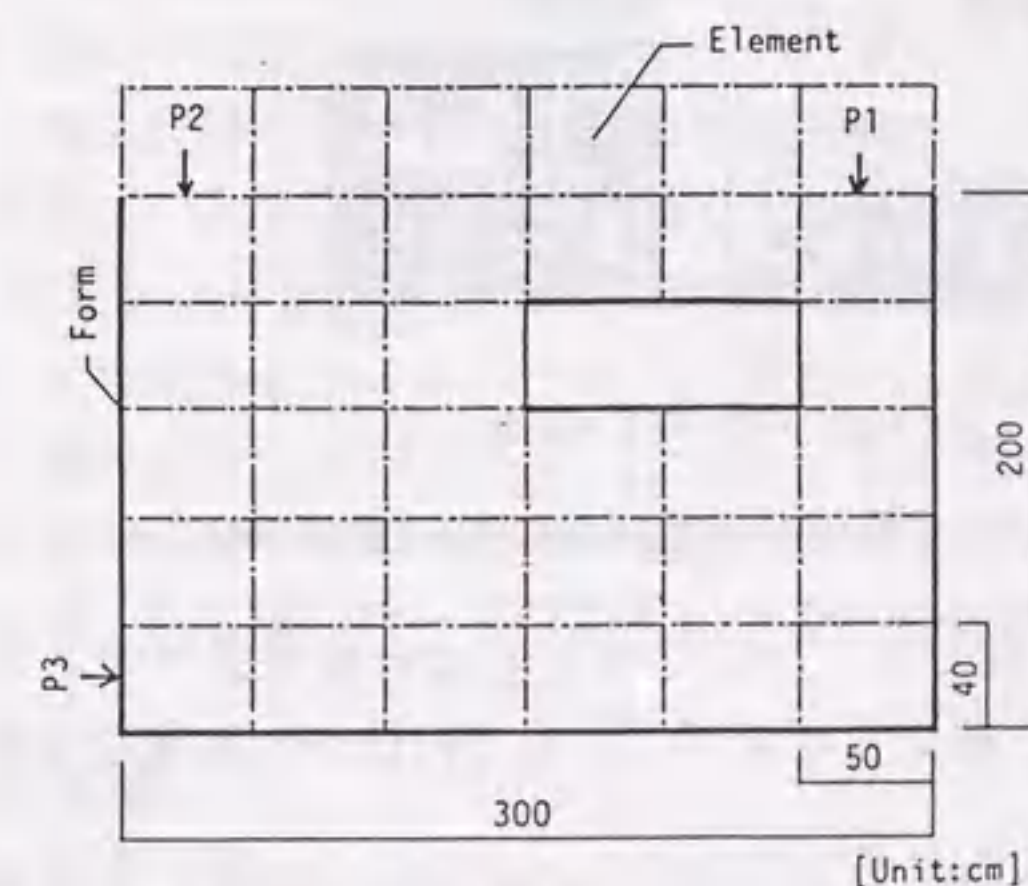
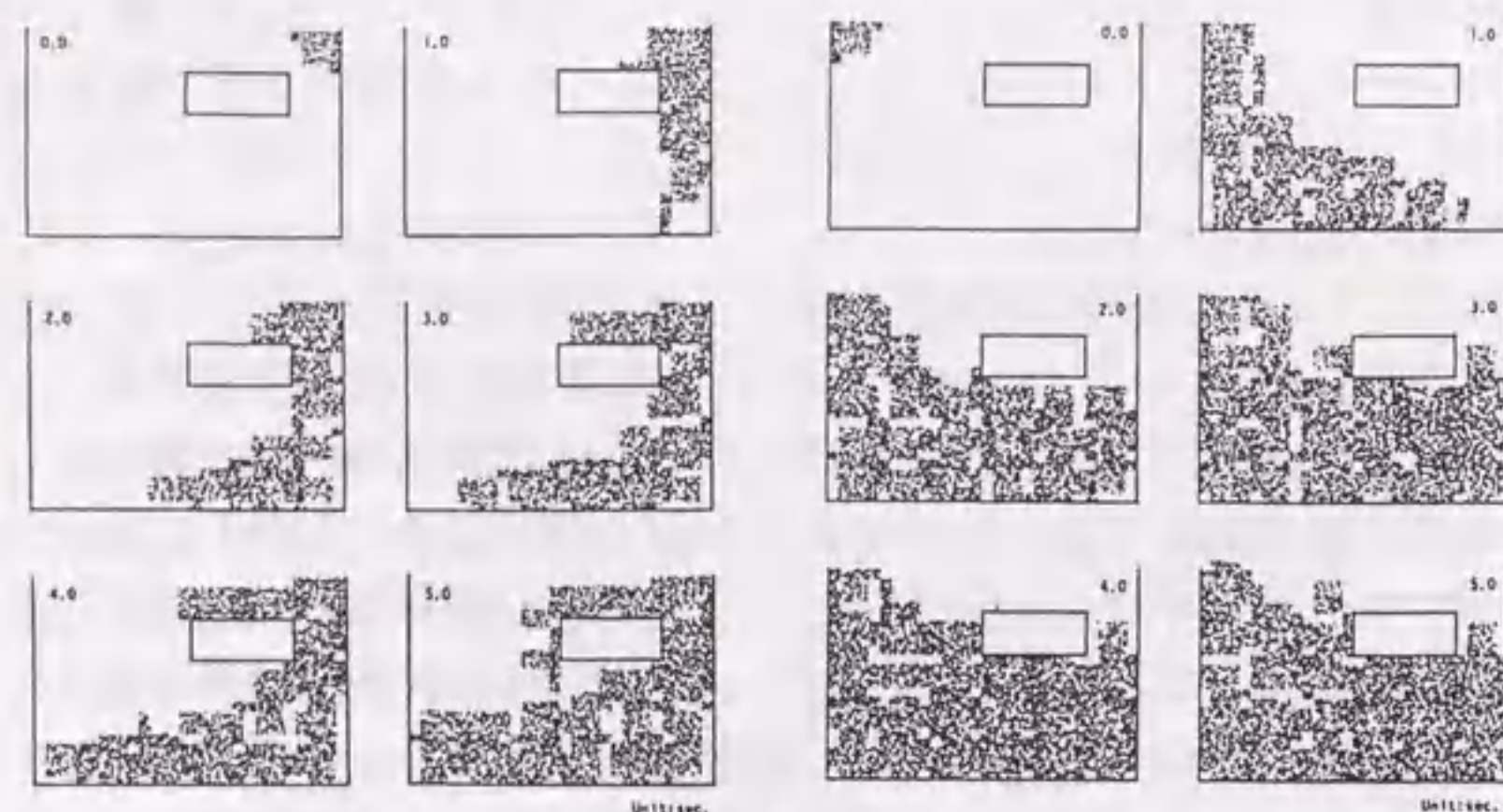
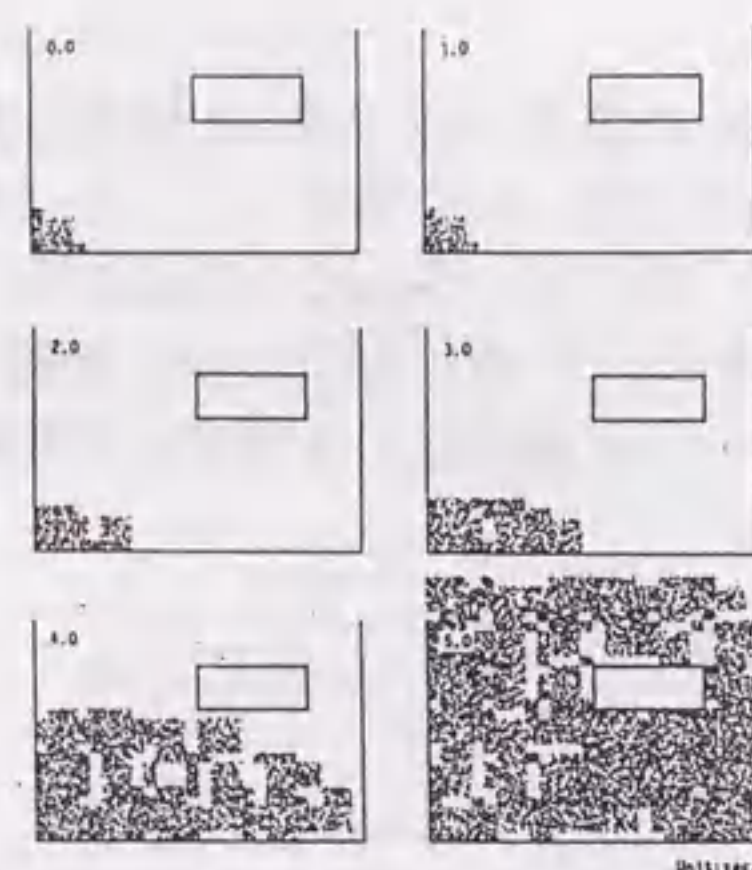


図-6.5 解析-6.1に用いた壁状型枠の形状および打設位置



(a) P 1 からの打設

(b) P 2 からの打設



(c) P 3 からの圧入打設

図-6.6 打設位置がコンクリートの流動挙動に与える影響 (解析-6.1)

る。P1およびP2からの打設では、コンクリートは自重で落下することを想定し、P3からの打設では、下部からポンプの圧力で打設される場合を想定している。

解析結果を比較すると、図-6.6(a)に示した開口部の影響を大きく受けるP1からの打設条件に比べて、図-6.6(b)に示した開口部の影響を受けにくいP2か

らの打設条件の方が、コンクリートが充填されやすい様子が観察される。施工条件の制約で、P2からの打設が困難でP1から打設しなければならない場合、施工性がどの程度低下するかを前もって予測することができる。開口部の影響を避ける方法として、下部からの圧入打設が考えられる。図-6.6(c)に示す解析結果によれば、圧入打設によってコンクリートを型枠内に充填させることは十分可能であり、開口部の影響を受けにくいことがわかる。

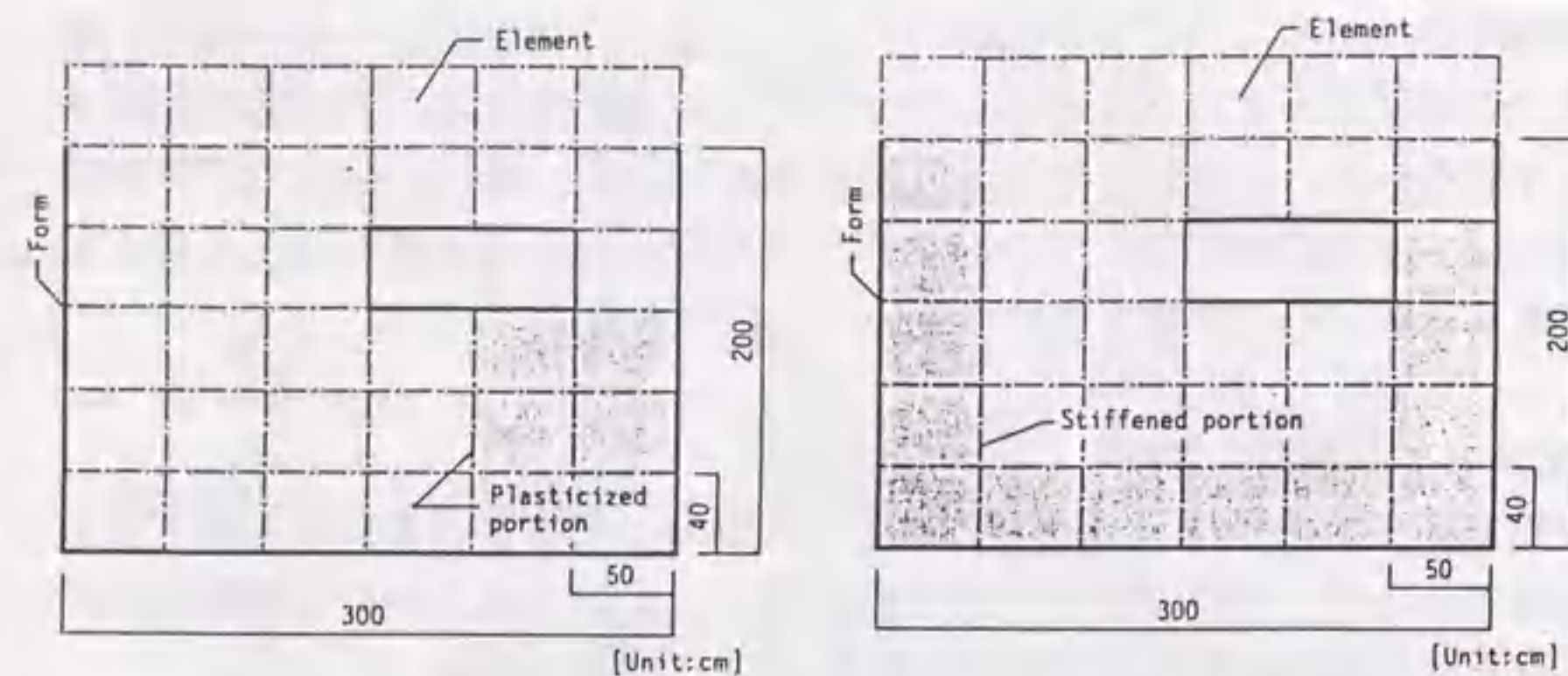
6.3.2 加振および配筋の影響

粘塑性空間要素法では、型枠内の鉄筋・鉄骨などの障害物を直接考慮することも可能であるが、空間要素の性質を制御することができるため、流動抵抗や流動促進効果を特定の部位の性質として与えることができる。

振動・配筋の影響を考慮した解析-6.2に用いた型枠の形状・寸法を図-6.7に示す。これは6.3.1節で述べたP1からのコンクリート打設に、振動や配筋の条件を付加したものである。図-6.7(a)に示すように、充填しにくいとみられる開口部の下部に型枠パイプレータを取り付け、その影響がトーンで示した範囲に及ぶと仮定した場合、および図-6.7(b)に示すように、トーンで示した型枠の外周が過密配筋され、コンクリートが流動しにくい場合の解析を行っている。図-6.8に、シミュレーション結果の一例を示す。空間に特徴付けをしていない図-6.6(a)に比べて、パイプレータの設置を想定した図-6.8(a)では、試料が下部へ流動しやすくなるため、全体としての充填性も向上することがわかる。一方、過密配筋を想定した図-6.8(b)では、コンクリートは外周に沿って流入することができず、開口部の上部を流れて壁内に打設されることがわかる。本例では、開口部の右側よりも左側からの打設の方が充填しやすいことは自明であるが、施工現場の制約からやむを得ず右端から打設する場合も十分予想される。その際に、どの程度施工性が損なわれるか、また、施工性を改善するためにはどのような方策が有効であるかを議論するためには、本例のように、コンピュータで簡単にシミュレーションを行い、流動の傾向と対策の効果について机上で議論することができる。ただし、この場合も、振動や配筋などの条件によるみかけのレオロジー定数の変化性状をあらかじめ正確に把握しておく必要があるが、この種のデータは非常に少ないのが現状である。

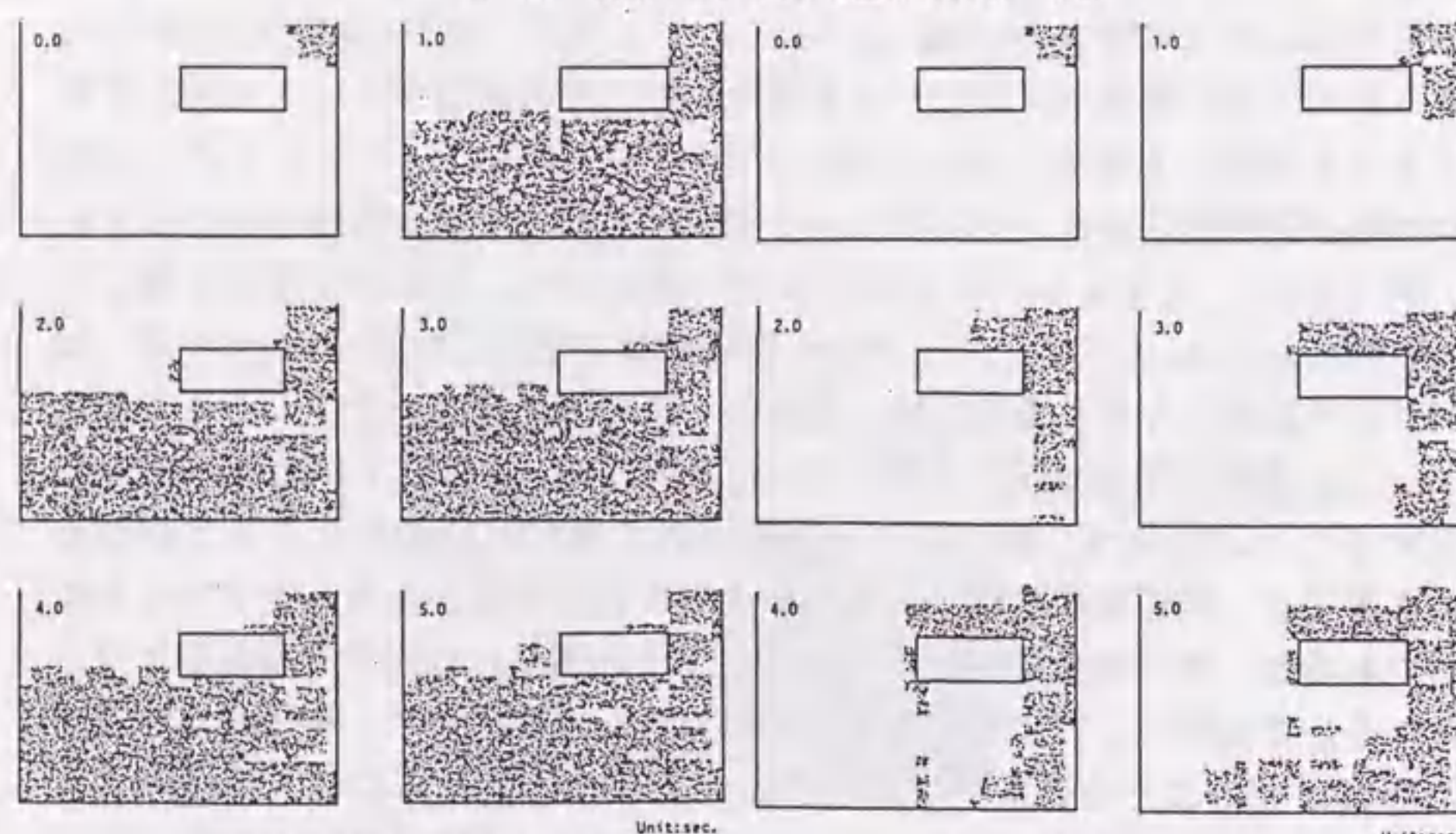
6.3.3 打設方法の影響

粘塑性有限要素法では、フレッシュコンクリートを連続体として取り扱うため、ポンプ吐出口を移動・停止させる場合、障害物などでコンクリートがちぎれ、再度結合する場合、コンクリートの打設容積が変化する場合などのシミュ



(a) 流動を促進させた箇所 (b) 流動を抑制した箇所

図-6.7 解析-6.2に用いた型枠の形状・寸法



(a) 振動機を疑似考慮した場合 (b) 配筋を疑似考慮した場合

図-6.8 振動や配筋を擬似的に考慮した場合 (解析-6.2)

レーションを行うことが極めて困難であった。粘塑性空間要素法では、マーカーの移動によってコンクリートの存在を表現することから、打設位置の要素に対する節点力（圧力）やマーカーの発生条件などを設定することによって、打設位置や打設時の圧力・速度などを考慮した施工シミュレーションを行うことが可能である。

ポンプの吐出口を移動させながら打設した場合のシミュレーション（解析-

6.3) に用いた型枠の形状・寸法を図-6.9に示し、その結果の一例を図-6.10に示す。この例では、打設口を300mm/sで左方へ移動させることによって、比較的硬練りのコンクリートでもコンクリート上面の傾斜角が小さくなり、施工効率が改善される様子を確認することができた。

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

一般のRC部材では、型枠を除去した後、コンクリートの不充填部に対して事後修復することができるが、充填型鋼管コンクリートの場合は、その充填状況を確認することは困難であり、施工性の合否判定が難しい。また、直管やテーパ管などの場合は、その圧力損失を理論的に計算することが可能であるのに対して[57,80]、この種の構造に用いられる鋼管は径が大きく、細管の層流理論を適用することが難しい。また、内ダイヤフラムなど流動に対する障害物がある場合などのように、圧入打設の際の圧力損失を算定するためには、数値解析による予測が有効な手段の一つとなる。

6.4.1 解析方法の概要

解析-6.4に用いたモデル鋼管の形状・寸法を図-6.11に示す。解析では、三角形リング要素を用いて軸対称問題として取り扱った。図-6.11(a)は、鋼管上部から自由落下によってコンクリートを打設する場合であり、図-6.11(b)は、下部から圧入打設する場合である。圧入打設の場合は、ダイヤフラムの開口面積率 (D : 開口部面積/柱断面積) を変化させ、この部分の圧力損失につ

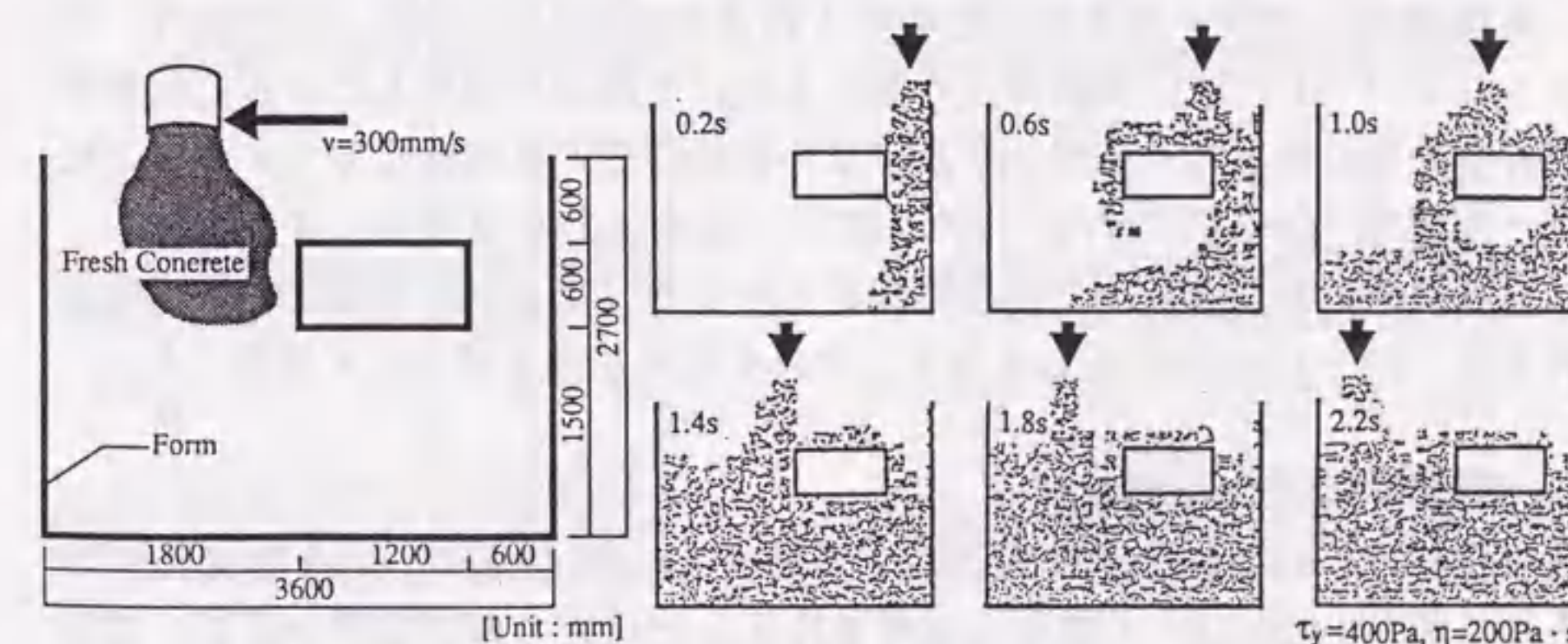


図-6.9 解析-6.3に用いた型枠の形状・寸法

図-6.10 打設口を移動させた場合 (解析-6.3)

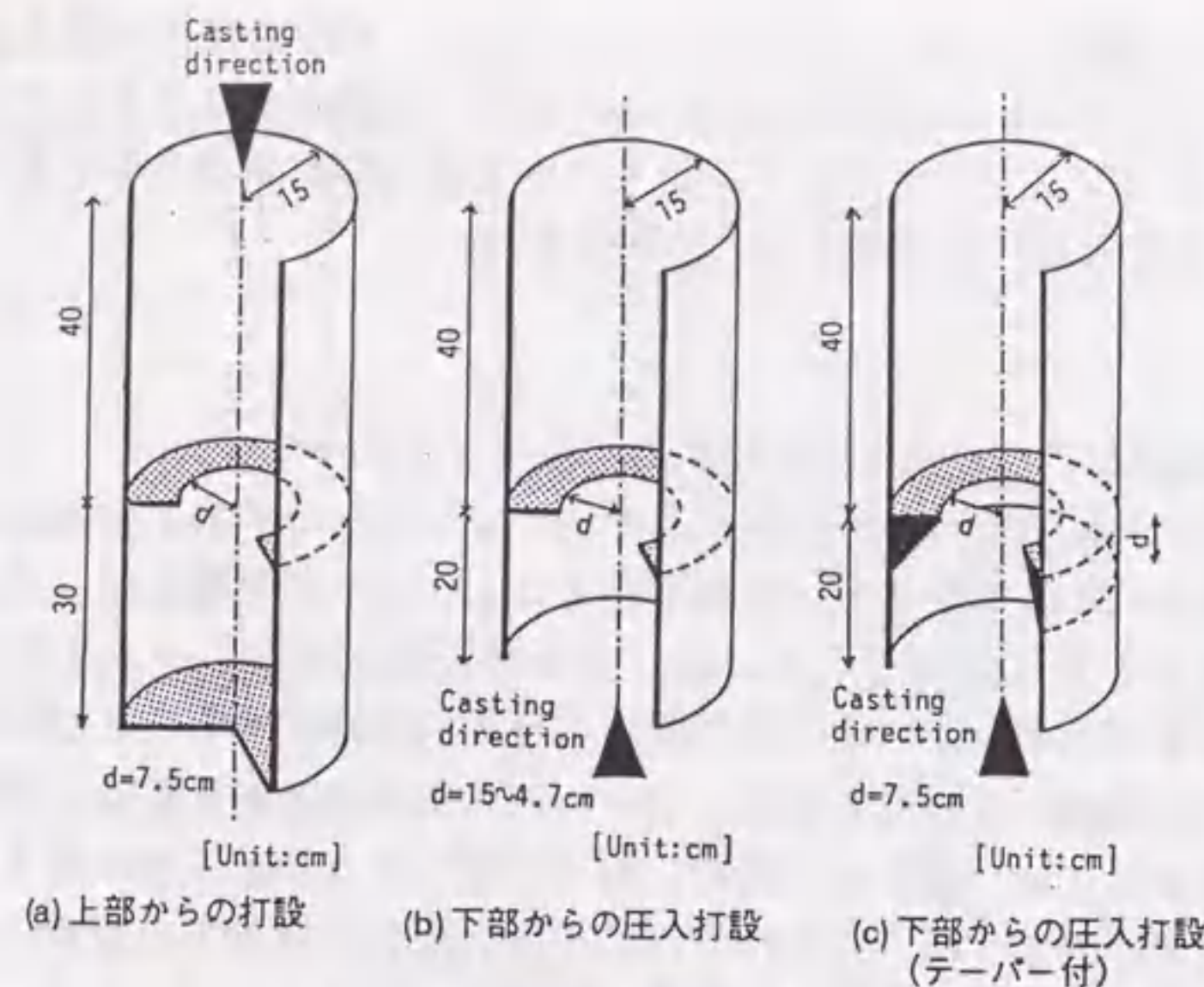


図-6.11 解析-6.4に用いた管の形状

いても調べた。一般に、鋼管柱にコンクリートを打設する場合は下部からの圧入打設による場合が多く、本節でも圧入打設による場合の施工性の検討を主に行っている。

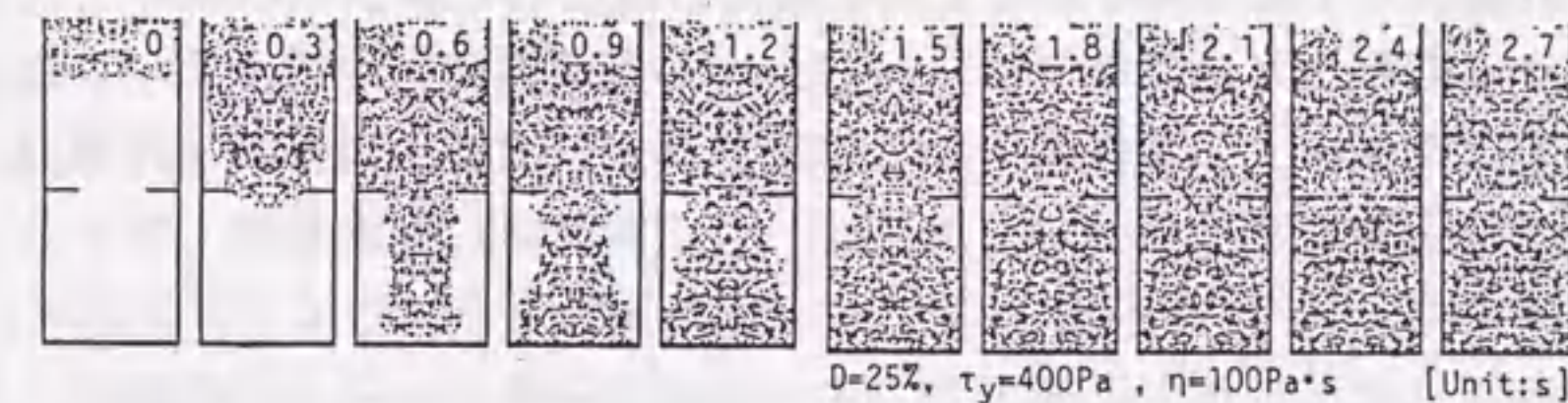
コンクリートのレオロジー定数としては、降伏値を0~800Pa、塑性粘度を40~320Pa・sの範囲で変化させた。これらの値は、スランプ値に換算して約15cm以上、水セメント比にしておよそ60~25%程度のコンクリートを想定したものである。鋼管柱内のコンクリートに軸力を負担させることを目的として、高強度コンクリートを用いた事例も報告されており[105]、高流動コンクリートもカバーした広い範囲の入力値とした。下部からの圧入による充填状況を解析する際には、内ダイヤフラムがない同径の管内を同粘性のニュートン流体が一定速度 ($Q=0.007\text{m}^3/\text{s}$) で流入するような圧力を理論式により算出し、これを節点力として加えた。また、内ダイヤフラムによる圧力損失を算定する解析では、15~100kPaの圧力を加え、それぞれの流速を算出して比較した。

6.4.2 鋼管内における充填挙動

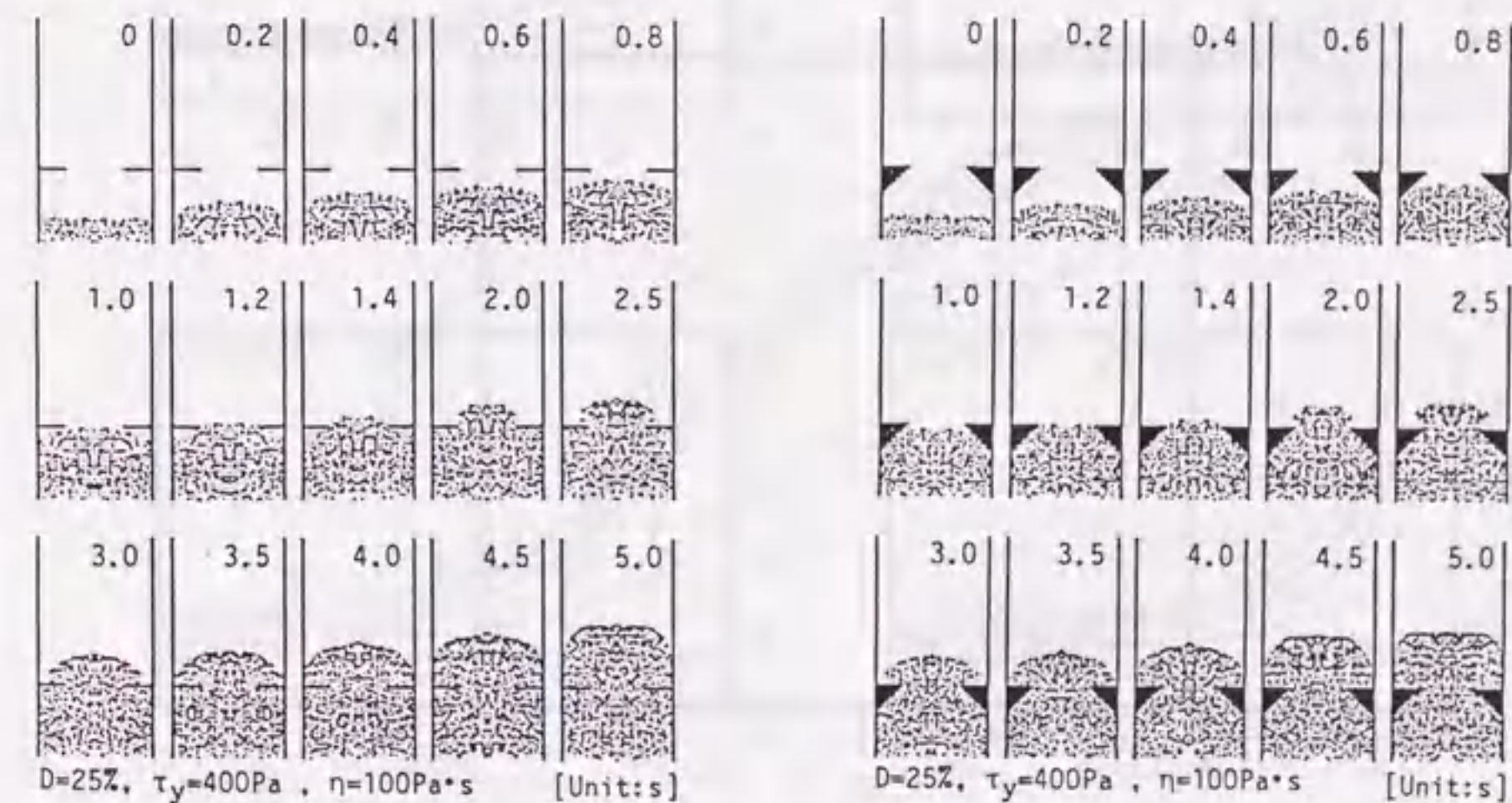
図-6.12は、粘塑性空間要素法による解析-6.4の結果の一例を示したものであり、図-6.12(a)は、上部から試料を投入した場合の解析結果である。本解析に用いた要素分割では、上部からの打設の場合も内ダイヤフラム下部に明瞭な空隙部はみられなかった。図-6.12(b)および図-6.12(c)に示す下部からの圧

入の場合は、試料上面の形状にプラグフロー現象がみられ、また、内ダイヤフラム下部に空隙が残りにくい状況を示している。開口部が小さくなることによって、試料は流動しにくくなるが、本解析のような均質な連続体モデルを用いた場合、最終的にはいずれのシリーズも完全に充填される。

コンクリートに十分な流動性と材料分離抵抗性がある場合、内ダイヤフラム下部の空隙はコンクリートの硬化収縮によるものであると考えられるが、内ダイヤフラムは硬化収縮および圧密沈降を抑制する働きがあるとの指摘もあり[106]、試料の流動性や圧力損失の点のみから内ダイヤフラムの是非を議論するべきではない。



(a) 上部からの打設



(b) 下部からの圧入打設

(c) 下部からの圧入打設 (テーパー付)

図-6.12 鋼管柱内での流動挙動の一例 (解析-6.4)

6.4.3 ダイアフラムによる圧力損失

打設圧力(P)と開口面積率(D)の関係を図-6.13に示す。同図中には、鋼管内に充填されている試料の自重による圧力を一点鎖線で示してある。試料の塑性粘度(η)が小さい範囲では、開口面積率(D)が30%程度まで小さくなくてもダイアフラムが無い場合とあまり変わらない圧力(P)で打設することができる。流速(Q)が大きいほど、また、塑性粘度(η)が大きいほど、比較的大きな開口率(D)でも圧力損失が大きくなる。したがって、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどの高粘性のコンクリートを用いる場合は、注意が必要である。

構造設計の立場からは、内ダイアフラムの開口率(D)は小さいほど、梁との応力伝達には有効であるが、構造設計時において、使用するコンクリートの粘性も十分に考慮して開口部を設計する必要があることを示している。

コンクリートの粘性とスランプ値は、ほとんど無関係と言ってもよい。しかしながら、コンクリートの物性については、スランプ値と空気量および硬化コ

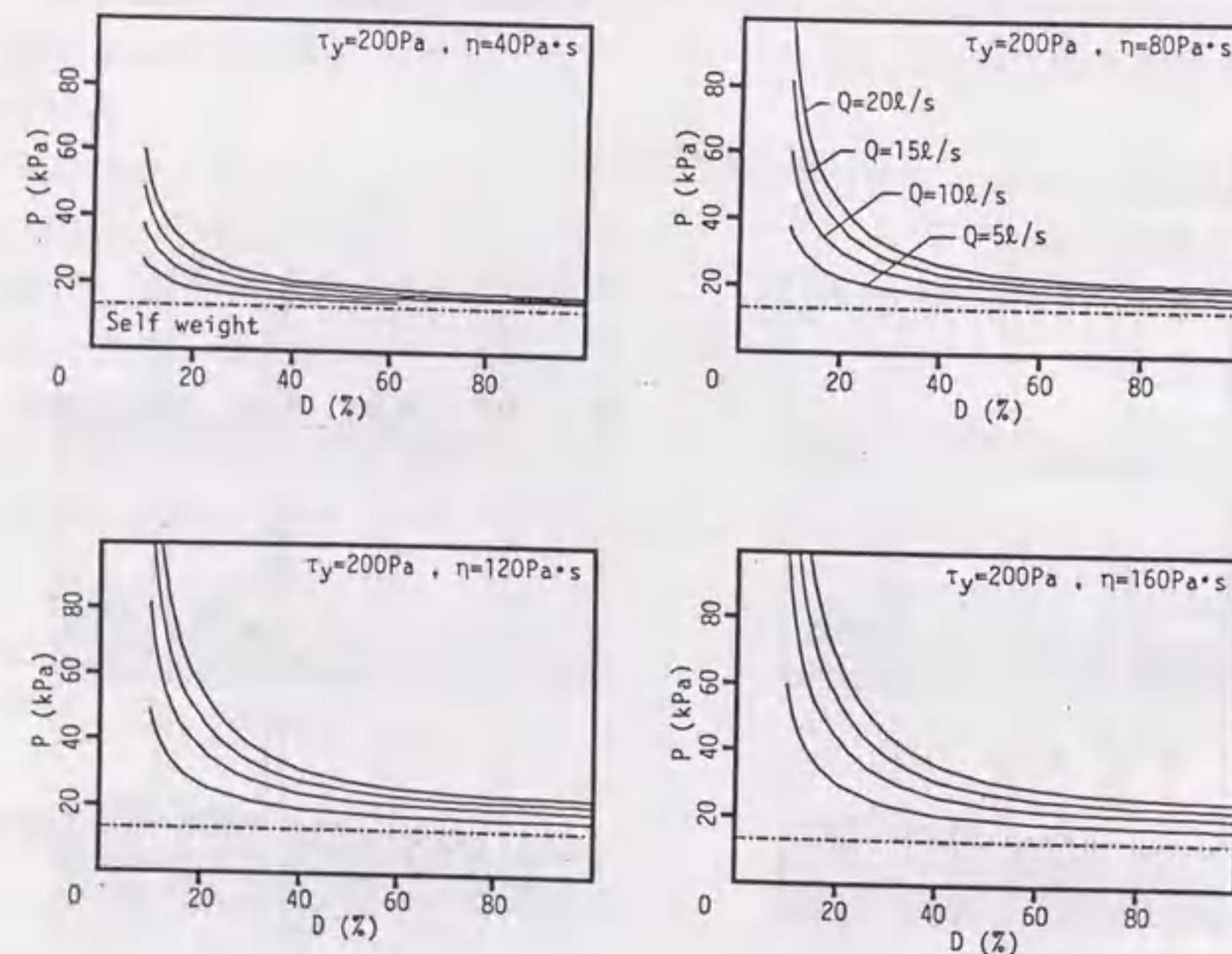


図-6.13 打設圧力とダイアフラムの開口面積率の関係

ンクリートの圧縮強度のみで品質管理を行っている場合が多く、これに加えてスランプフロー値も測定すれば品質管理が十分可能であるという間違った報告もみられる。粘性の影響が大きい施工条件では、目視のみに頼らず、定量的な試験方法が実施されることが望まれる。

粘塑性空間要素法解析では、開口面積率(D)および打設圧力(P)を入力することによって流速(Q)を求めているが、得られた流速(Q)および打設圧力(P)を再度、第4章で述べた圧送管の理論式に代入することによって、円柱管内面積(S^*)を求めることができる。この S^* の値は、ダイアフラムを持つ部位がみかけ上どの程度の面積を持つ円柱管に相当するかを示しており、みかけの鋼管内面積(S)をモデル鋼管の内面積で除したものをみかけの開口面積率(D^*)として、以下の考察に用いた。

解析より得られたみかけの開口面積率(D^*)と実際の開口面積率(D)の関係を図-6.14に示す。同図中の一点鎖線は、ダイアフラムによる圧力損失が、開口部と同じ半径の円管の理論解に相当することを示している。同図より明らかなように、実際の開口面積率(D)に比べてみかけの開口面積率(D^*)は20~30%程度大きな値であり、ダイアフラムによる圧力損失は、開口部と同径の直管よりは多少小さいことを示している。この結果より安全側に見積もるのであれば、鋼管柱での圧力損失は、内ダイアフラムの開口面積と同径の管に対する算定値を用いればよい。

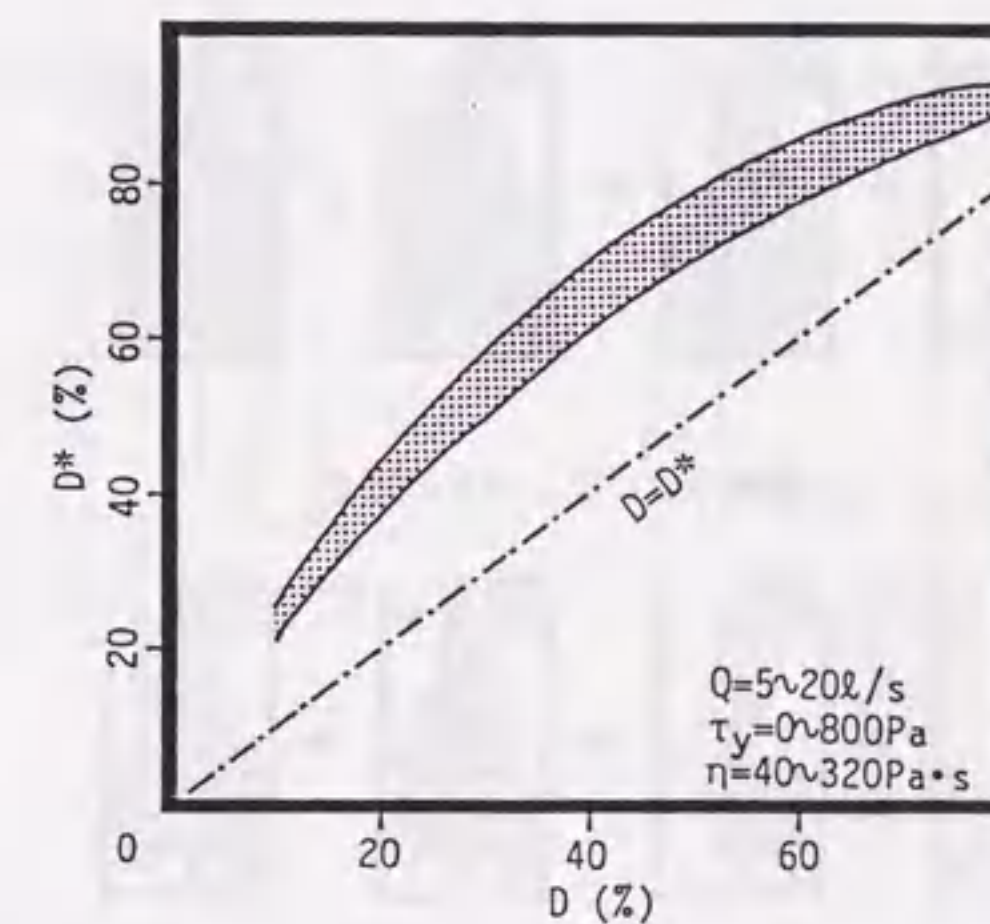


図-6.14 みかけの開口面積率と実際の開口面積率の関係

6.5 梁・壁部材断面への打設シミュレーション

6.5.1 梁断面への打設

梁部材は、曲げ応力を受けるため鉄筋量が多いものの、柱部材や壁部材などと比べて深さ方向の長さが短いため、パイプレータの挿入が容易であったり、上部からの観察でもコンクリートの充填状況を判断しやすい部材である。一般にはコンクリートの横流し距離は制限されているものの、高流動コンクリートの出現により、横流し距離は増大する傾向にあり[107]、そのため型枠上部にも天板を設ける施工例がみられ、梁型枠も従来のように上部からの打設だけではなく、従来と異なる施工方法を立案する際に、本節で取り上げるような施工シミュレーションは、その合理性を判定する上で貴重な資料になるものと考えられる。

(1) RC梁断面への打設

RC梁断面へのコンクリート打設を想定し、粗骨材が流動挙動に与える影響を調べるために行った粘塑性サスペンション要素法シミュレーション（解析-6.5）の結果の一例を図-6.15に示す。図-6.15(a)および図-6.15(b)は、それぞれ軟練りおよび硬練りのコンクリートの場合である。図-6.15(a)に示す軟練りコンクリートの場合に比べて、図-6.15(b)では、コンクリートの流動性が十

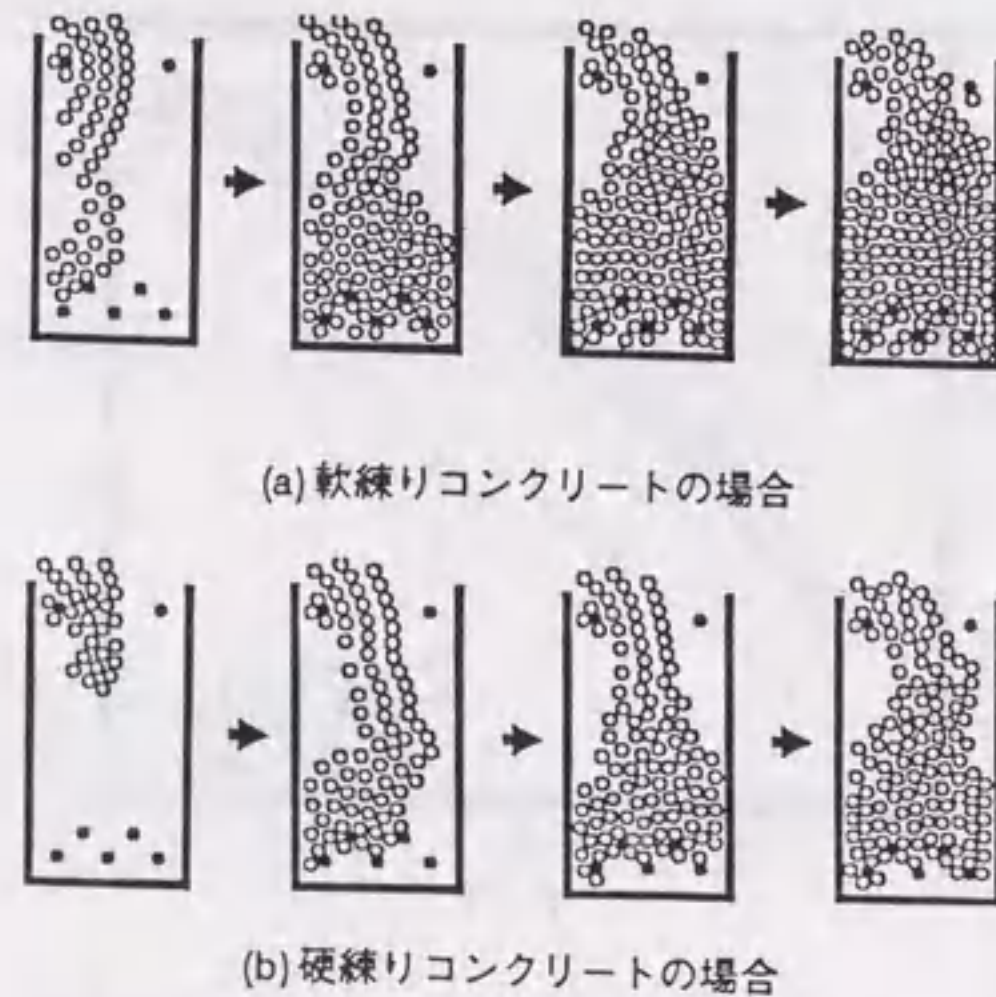
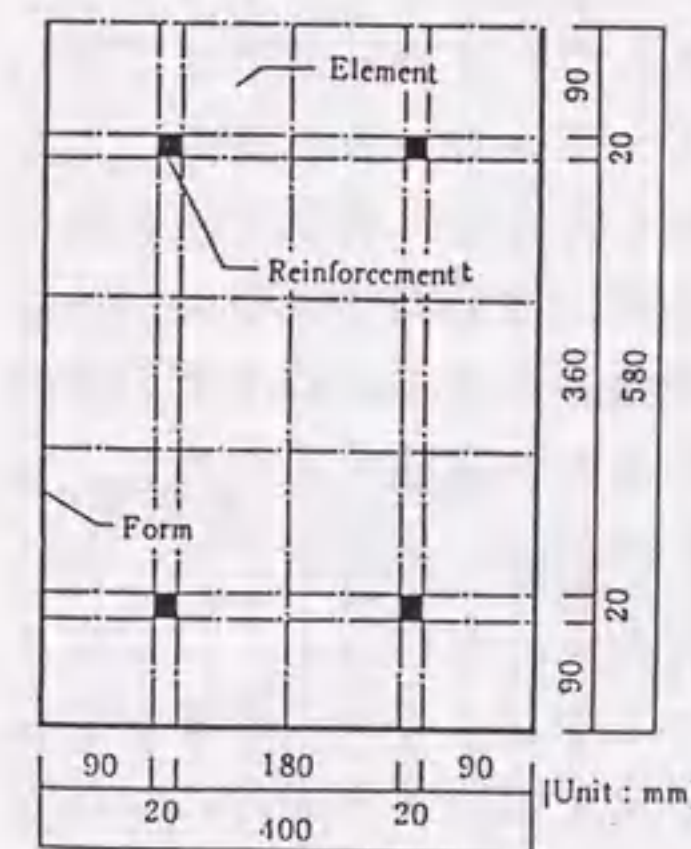


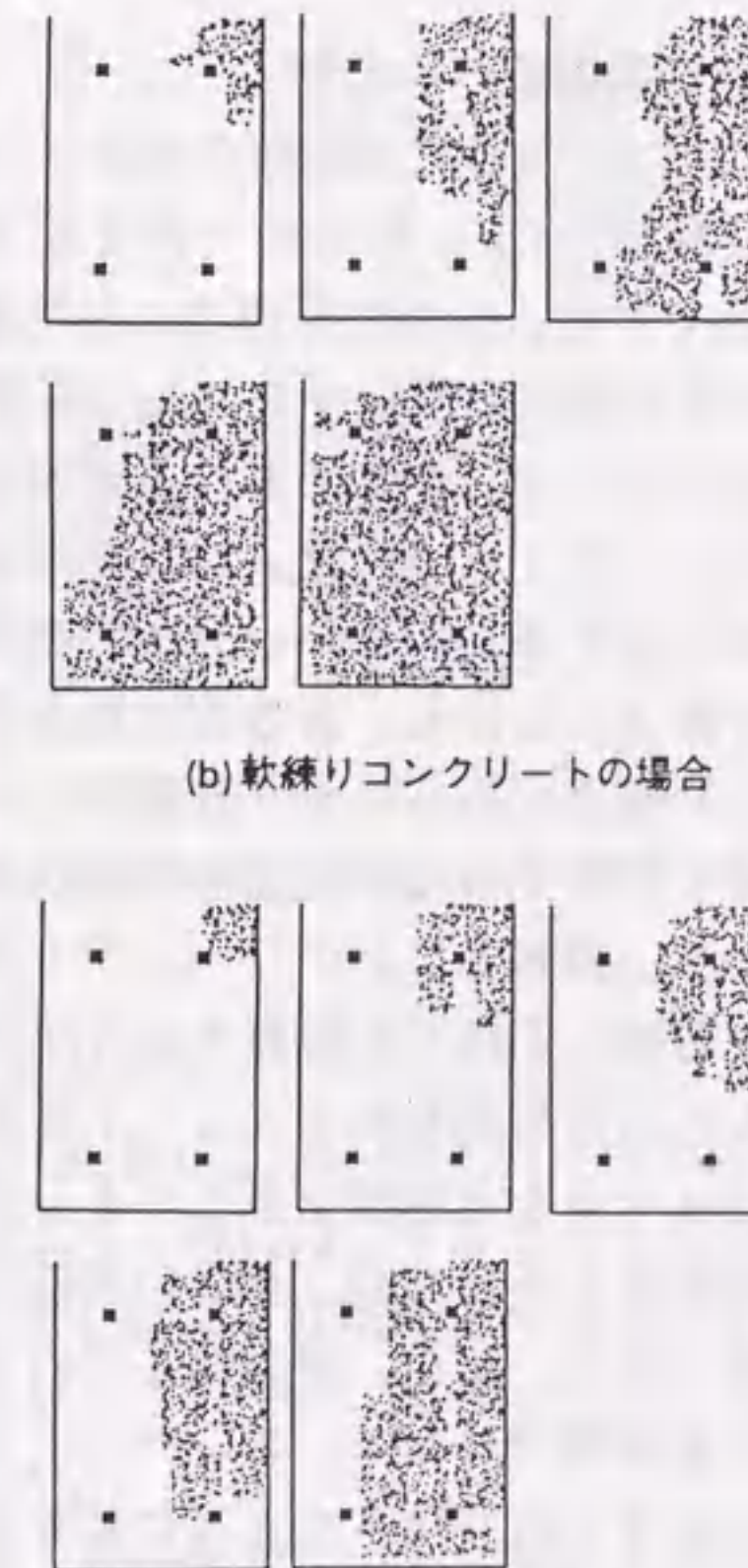
図-6.15 粗骨材相を考慮したRC梁への打設（解析-6.5）

分ではないため、下部の鉄筋の下にコンクリートが回り込むことができない様子が観察される。しかし、実際には密に配筋が施されている場合が多く、コンクリートの鉄筋間通過抵抗性や施工性を、粘塑性サスペンション要素法を用いて正確に論議するためには、膨大な計算容量が必要となる。粘塑性サスペンション要素法では、骨材寸法を解析上の最小単位としており、コンクリートの流動挙動を精密に表現することができる反面、計算量の関係から事実上は小規模な対象しか取り扱うことができない。

しかし、粘塑性空間要素法は、粘塑性有限要素法（VFEM）と同様に、フレッシュコンクリートを均質体として取り扱うため、空間要素の大きさを解析対象に合わせて任意に設定することができる。また、境界条件に関しては、粘塑性有限要素法より高い自由度を持っているなど、粘塑性有限要素法と粘塑性



(a) RC梁断面の形状・寸法



(c) 硬練りコンクリートの場合

図-6.16 粘塑性空間要素法によるRC梁断面への打設（解析-6.6）

サスペンション要素法双方の解析手法の長所を兼ね備えているといえる。

図-6.16に、RC梁型枠の形状・寸法およびコンクリート打設に関する粘塑性空間要素法シミュレーション（解析-6.6）結果の一例を示す。RC梁の梁せいは580mm、梁幅は400mmである。RC梁中の鉄筋は、1辺が20mmの四角形断面としており、解析では四角形要素の節点を固定して処理している。

同図に示すように、軟練りコンクリートであれば十分な充填性を得ることができる場合でも、コンクリートのコンシステンシーが変化することによって充填性が悪くなる。解析で入力したレオロジー定数の違いは、試料の変化と考えることも、振動機の影響とも考えることができ、図-6.16(b)のように打設されるコンクリートも、型枠パイプレタの使用により図-6.16(a)に示すように充填性が改善されたと考えることもでき、このことは、施工設計を行う上で、重要な考え方といえる。

(2) SRC梁断面への打設

図-6.17にSRC梁型枠の形状・寸法および粘塑性空間要素法シミュレーション（解析-6.7）結果の一例を示す。SRC梁の梁せいは600mm、梁幅は400mmである。SRC断面内のH形鋼は、厚さを持たない線材と仮定し、H形鋼の位置の節点を固定することで表現している。

鉄筋やフランジ下面における充填性などの局所的な問題を取り扱う場合は、周辺のコンクリートの流入状況を再度入力データとして、クローズアップされた領域のみをさらに細かい分割の空間要素を用いてシミュレートし直すことも可能である。しかし、ある程度以上細かい要素分割を行うと、骨材寸法を無視できない場合もあるので、無制限にマイクロ化できるというものではない。一般に、過密配筋された部位での充填状況や、ダイヤフラム・フランジ下面の充填状況など、鋼材とコンクリートが十分に付着しているかを確認するために、供試体を切断して様子を観察する方法がとられているが[108]、本解析手法によれば、これらの挙動をシミュレートすることが可能である。ただし、フレッシュ状態では十分な充填性を示しても、硬化収縮によって鋼材との間に隙間が生じるとの報告もあるため、細かい部位における充填挙動を観察する場合には注意が必要である。また、要素サイズの大小とコンクリートのレオロジー定数の入力値は無関係ではない。コンクリートの変形性質は複合材料としてのみかけのものであり、取り扱うサイズに依存している。この問題に関する入力情報は現在皆無であり、前述の粘塑性サスペンション要素法などの解析結果と組み合わせたシミュレーションが今後必要であろう。

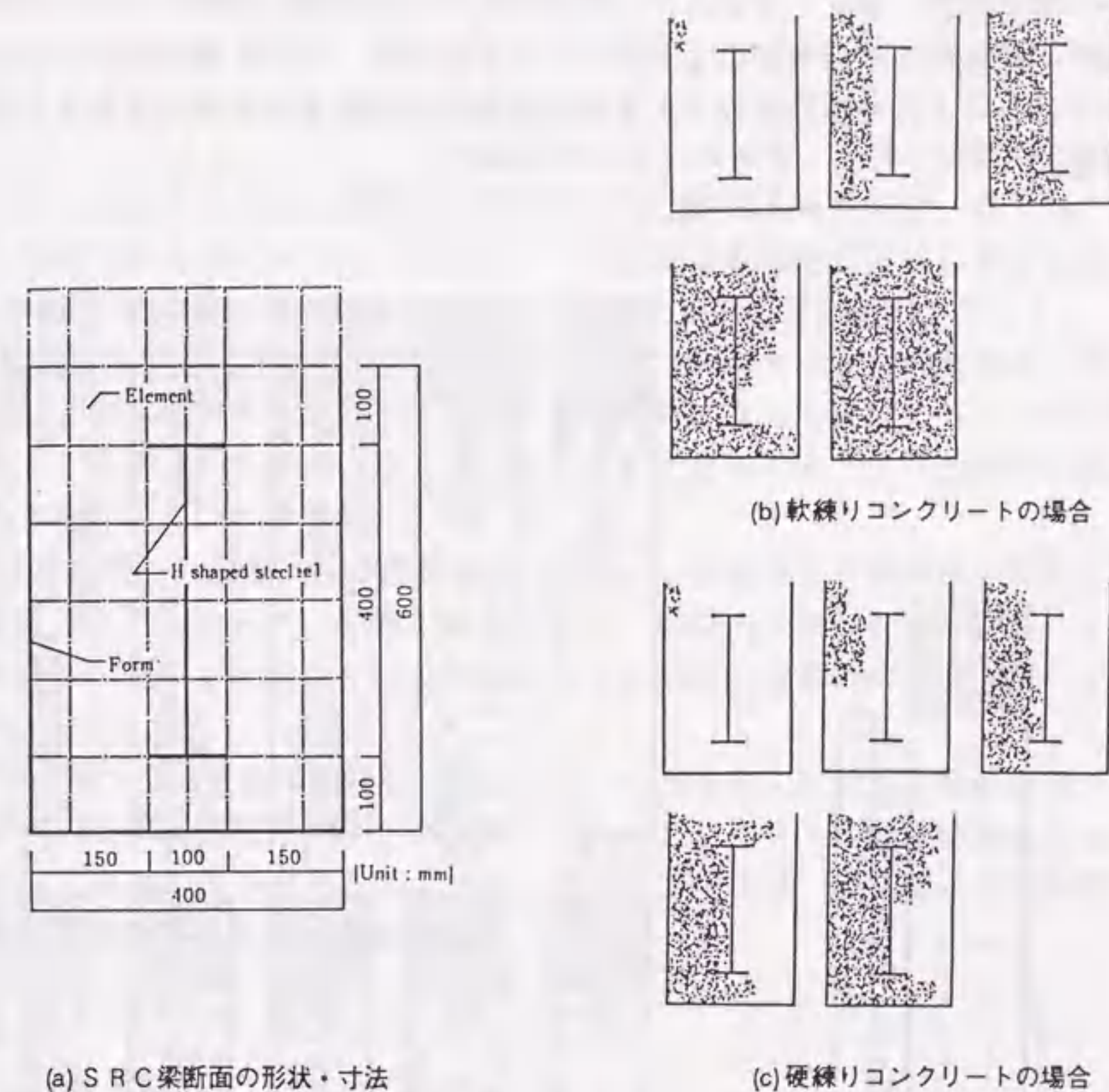


図-6.17 粘塑性空間要素法によるSRC梁断面への打設（解析-6.7）

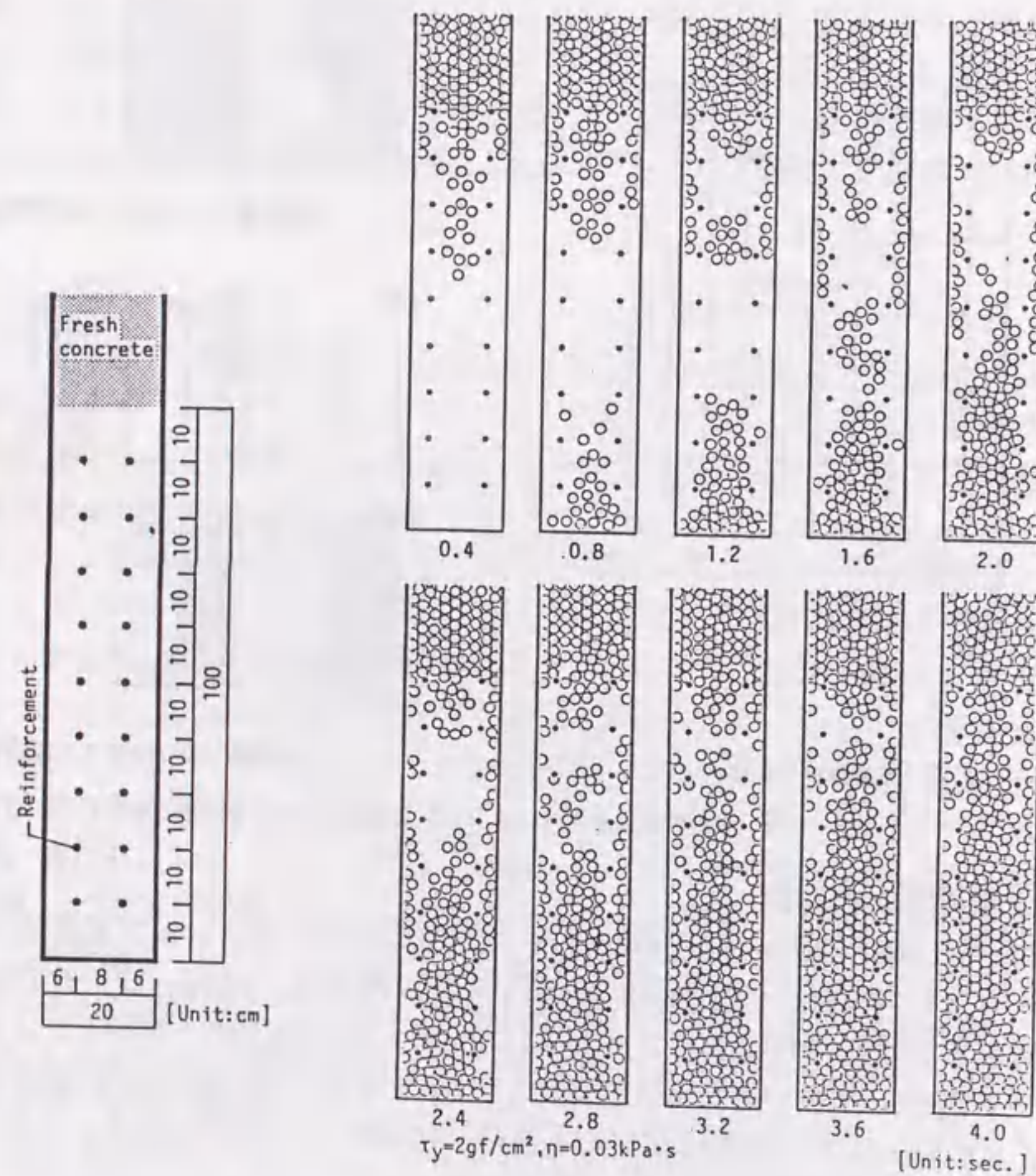
6.5.2 壁断面への打設

図-6.18に、型枠・配筋の位置および粘塑性サスペンション要素法シミュレーション（解析-6.8）結果の一例を示す。鉄筋は、100mmピッチで900mmの高さまで並列に配置されている。1000mmより上部には、フレッシュコンクリートが十分存在していると仮定し、バケットによる打設などを想定している。1000mm以上の位置に存在する粗骨材に対して、その上部のコンクリートの自重に相当する節点力を与えて計算を行った。

図-6.18によれば、コンクリートは、一番上部の鉄筋によって流動を抑制され、まず、開口断面積の比較的大きい中央部（鉄筋間）から下部へ落下する。その後、型枠近傍のコンクリートが落下する様子が観察される。

また、下部では、中央部に堆積したコンクリートが鉄筋のかぶり部に流出す

ることは少なく、この部分にコンクリートが回りにくいことがわかる。この解析では、骨材径を一定としているが、粒度分布なども考慮した解析を行うことによって、粒径の小さい骨材によるベアリング効果や、かぶり部や鉄筋の下部へのコンクリートの充填状況など、さらに詳細な流動挙動を予測できるものと思われる。



(b) 壁断面の形状・寸法

(b) シミュレーション結果の一例

図-6.18 壁断面への打設（解析-6.9）

6.6 まとめ

本研究では、粘塑性サスペンション要素法（VSEM）および粘塑性空間要素法（VDEM）を用いて、梁、柱および壁型枠内でのコンクリートの流動挙動に関する解析を行った。本章の結果は以下のようにまとめることができる。

- 1) 型枠内におけるコンクリートの流動挙動を考える場合、鉄筋や振動の影響を直接的に考慮する方法と間接的に考慮する方法が考えられるが、粗骨材の影響を無視できるサイズでは、配筋による局所的な影響を定量的に評価した上で、みかけのレオロジー性質を用いたマクロな解析方法が現実的である。
- 2) 新しい材料や施工方法を検討する際に、現状では多くの室内実験や実大施工実験などが実施されているが、これを数値解析によって代行することが可能であり、影響要因を的確に取り上げることができるため、より合理的に施工性の評価を行うことができる。
- 3) 壁状型枠内における試料の流動挙動の表現に、安息角と流動定数を用いた評価を行うことによって、配筋や振動などが、型枠内を流れるコンクリートのみかけのレオロジー定数や流動挙動に与える影響を定量的に把握することができる。
- 4) 内ダイヤフラムを持つ鋼管柱内にコンクリートを圧入打設する場合、内ダイヤフラムの開口面積率が小さいほど、またコンクリートの塑性粘度が大きいほど圧入効率の低下が著しい。また、その圧力損失は、開口部より20%程度大きい直径を持つ直管にほぼ等しい。

第7章 結論および今後の課題

7.1 結論

本研究の内容および成果は、以下のようにまとめられる。

第1章では、フレッシュコンクリートの流動性質に関する技術の現状を述べるとともに、コンクリート工事における流動解析技術の必要性和、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、本研究に関連したフレッシュコンクリートに関する既往の研究を、「流動性の評価」、「高強度コンクリート」、「ポンプ施工」および「流動解析技術」をキーワードとして整理した。近年開発、実用化が進んでいる各種のコンクリートは、従来の概念や手法では管理することができず、材料性質や施工性を評価するための新しい概念や手法が模索されていることを明らかにした。

第3章では、フレッシュコンクリートの流動解析技術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述べた。粘塑性サスペンション要素法は、コンクリートをミクロな視点からとらえた解析手法で、多相材料としての挙動を表現することに優れており、粘塑性空間要素法は、コンクリートをマクロな視点からとらえた解析手法で、実施工条件を考慮することが可能な手法であることを、検証実験と比較しながら明らかにした。

第4章では、フレッシュコンクリートのコンシステンシーをレオロジーの立場から整理し、基礎的なデータを得ることを目的として、粗骨材量がコンクリートのレオロジー性質に与える影響、高粘性コンクリートの流動性、材料分離抵抗性などに関する実験を行い、レオロジー定数の簡易推定手法を用いて、これらの物性値の評価を行った。高強度コンクリートは、降伏値は小さいものの粘性の高いため、塑性粘度の測定が重要であることを明らかにした。

第5章では、直管、テーバー管およびベント管内をポンプ圧送されるフレッシュコンクリートの性状について、粘塑性サスペンション要素法を用いて解析的に検討を行い、多相材料であるコンクリートが管内を流れる際に生じる粗骨材の衝突現象などが流動挙動に与える影響について考察した。フレッシュコンクリートが変形管内を流れる場合、降伏値だけではなく、塑性粘度が圧送性に大きな影響を与えることを明らかにした。

第6章では、小型壁状型枠を用いた実験および解析を実施し、型枠内での流動挙動を定量的に評価する手法を提案するとともに、壁・柱・梁などの型枠内に打設されるフレッシュコンクリートの流動挙動について、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解析的に検討した。粘塑性サスペンション要素法および粘塑性空間要素法それぞれの利点を生かすことにより、要求される精度でコンクリートの施工性を予測することが可能であることを明らかにした。

以上のように、本研究では、コンクリート工事の合理化を目的として、レオロジーの観点からフレッシュコンクリートの物性を評価するとともに、レオロジー性質を入力値とする解析手法を用いて、コンクリートの流動挙動の評価を行った。各章の結論については、「まとめ」の項に記述したため、ここに再録することは省略し、本研究によって明らかになった事項を総括的に述べて結論としたい。

フレッシュコンクリートの物性を把握するためには、コンクリートのレオロジー性質を把握することが重要であり、コンクリートのレオロジー定数を測定する試験として、いくつかの試験方法が提案されていることを第2章で述べたが、これらの試験方法は、適用範囲が狭く、また複雑な試験が多いため、実験室や施工現場においてレオロジー定数を簡便に推定することは難しい。これに対して、本研究で取り上げた簡易推定手法は、複数のコンシステンシー試験値を利用することにより、レオロジー定数を簡便に推定できる有望な手法であるといえる。また本研究では、これらのコンシステンシー試験値が持つレオロジー的意味を明らかにして、コンクリートの性質または測定の目的に応じてコンシステンシー試験を選択する必要があることを示した。既存のコンシステンシー試験をレオロジーの観点から整理することによって、新規にコンシステンシー試験を開発する際の有効な基礎データとなりうるものと考えられる。

多相材料であるコンクリートの物性を解明する一つの方法として、コンクリートを構成する個々の要素の物性を明らかにして、これらの影響を重ね合わせることによってコンクリート全体の物性を明らかにするという方法が考えられる。粘塑性サスペンション要素法では、コンクリートを粗骨材相とマトリックスモルタル相から成る2相材料として取り扱っており、マトリックスモルタルと粗骨材の物性それぞれが、コンクリートのコンシステンシーに与える影響を考察することが可能である。本研究では、同一のマトリックスモルタルに対して粗骨材が増減したコンクリートを用いて、粗骨材相がコンクリートのレオロジー性質に与える影響について実験的に検討を行った。コンクリートとマトリックスモルタルの関係が解明されれば、実験室レベルでのコンクリートの膨大な試し練りの多くは、モルタルの実験に置き換えることができるようになるばかりでなく、コンクリートの物性をさらに深く追求する上でも有益である。

また、第5章でも述べたように、粗骨材のインターロック現象なども合理的に評価できるため、フレッシュコンクリートの構成則を解明する上でも、コンクリートを構成する個々の材料の物理的性質の究明は急務であるといえる。

フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関しては、多くの実験的研究が報告されているが、施工事例を紹介しただけのものが多く、粗骨材による圧力損失の増大効果やベント管部での複雑な流動挙動に言及している報告は少ない。今後さらに高層建築物におけるコンクリートの需要が増大し、また施工の自動化を図る際には、ポンプ内でのコンクリートの流動性に関する基礎的な研究は不可欠であると考えられる。コンクリートが管内を流動する際には、余剰ペーストが管内壁に付着し、これが流動を補助する潤滑層の役割を果たすことも予想される。この場合、解析はさらに複雑なものとなるが、すべりサスペンション要素の構成則を設定することによって、現象をシミュレートできるものと考えられる。

各種型枠に打設されるコンクリートの流動シミュレーション結果を第6章で示したが、本研究で示した解析手法は、地中や水中での流動挙動が予測できるばかりでなく、無重力空間などのように地上で実験することが難しい場合におけるコンクリートの流動挙動を予測する場合にも有効な手法になるものと思われる。

7.2 今後の課題

上記のように、本研究では、コンクリートの製造・運搬・打設のそれぞれのステップをレオロジーの立場から実験的に整理するとともに、粘塑性有限要素法、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解析的に考察を加えた。しかし、現在数多くの新しい材料や新しい工法が開発されており、未解決の問題も少なくない。

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は、スランプ試験やコンクリートフロー試験、Lフロー試験などを用いて物性を推定するものであるが、RCCPなどに使用されている超硬練り（降伏値が非常に高い）コンクリートにはこれらは適用することができない。これらのコンクリートはビンガム流体の特性を示さず、また、流動性よりも締固め性を要求される場合が多いため、同一の基準で評価することが難しいことが、その理由として挙げられる。このようなコンクリートをレオロジーの観点から整理するためには、締固め性に関する構成則を確立し、その入力情報を整理する必要がある、そのためには振動力をコンシステンシー座標に導入するための定義づけが不可欠になる

と考えられる。

一方、流動性の高い軟練り（降伏値の低い）コンクリートでは、各コンシステンシー試験の適用範囲を超える場合が多いため、例えば、スランプ値が25cmを超えるようなコンクリートのレオロジー定数を精度よく推定することは難しい。これは、試験規模・装置に比較して、試料のレオロジー定数が小さいためであり、レオロジー定数が小さい試料に適用できる試験装置を新たに考案する必要があると考えられる。しかし、単純に試験装置を小さくしただけでは、多相材料を均質な単相材料と仮定した条件が崩れる危険性があり、発想を転換してマクロな視点からレオロジー定数を推定するなど、新しいアイデアを導入する必要がある。

高強度コンクリートなど、混和材料を混入した高粘性のコンクリートの物性については、第4章で詳説したが、本研究で取り扱った範囲は、高強度コンクリートのごく一部である。さらに、近年、高流動コンクリートなども登場しており、これらの諸物性を完全に把握するには、あまりにも未知な部分が多い。例えば、細骨材一つを取り上げても、全国には無数の種類があり、粗粒率や比重、比表面積だけでは、コンシステンシーに与える骨材の影響を統括的に把握することはできない。これらの物性や構成則に関する研究は、膨大な基礎データの上に立脚すべきもので、本研究では定性的な評価に留まっている。粘塑性有限要素法と粘塑性サスペンション要素法を併用することにより、マトリックスモルタルの物性とコンクリートの物性が明らかになるという現時点では、さらにマトリックスモルタルの物性に関するデータを収集することにより、コンクリートの物性を明らかにするという手法が最も妥当な方法と考えられる。

第5章で述べた、粘塑性サスペンション要素法によるポンプ圧送性に関する研究では、定常圧力下でのコンクリートの流動挙動を取り扱ったが、ポンプ圧の脈動現象が流動挙動に大きな影響を与えることは自明である。粘塑性サスペンション要素法では粗骨材の形状を球として取り扱っているため、粗骨材が角ばりを持つことによって生じるであろうインターロック現象を適切に表現するためには、粗骨材相互の干渉現象を何らかの形で定式化する必要がある。ポンプヘッド部では20MPaを超える圧力が加わる場合もあり、これほど高い圧力下でのコンクリートのコンシステンシーが常圧下でのコンシステンシーと同じであるというのは考えにくく、高圧力下でのコンクリートのコンシステンシーについてさらに検討を加える必要がある。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構成則として単純なビンガムモデルを用いており、圧力とひずみ速度に依存した構成則を導入するためには、さらに幅広い基礎データ

を収集し、定量的に評価する必要がある。

粘塑性空間要素法を用いた型枠内への打設シミュレーションは、2次元の単純な解析が主であったが、これは今後2つの方向へ進むべきであると思われる。一つは、型枠や施工の条件をさらに詳細に入力し、精度よくシミュレートを行い、施工の弱点となる部位を早期に判定するための手法として確立することである。他方は、さらにグローバルに拡張し、施工プランニング全体を事前に計画できる手法として確立することである。前者が個々の部材の施工性を判定するのに対し、後者は当該建築物のコンクリート工事全体の施工性を判定するものである。後者では、配管計画や打設位置、人員や振動機の配置計画などを含めた計画立案が可能である。粘塑性空間要素法は、オブジェクト指向によって施工全体を管理するためのツール（オブジェクト）の一つとして取り扱われるであろう。コンピュータ技術の進歩によって、粘塑性サスペンション要素法や粘塑性空間要素法は、将来的には「施工設計法」確立のための1つの有力な手段として位置づけられるものと思われる。

引用文献

- [1] 関博, 大友忠義: 水中コンクリートの最近の動向, コンクリート工学, Vol.21, No.4, pp.4-13, 1983.4.
- [2] 戸田彰彦, 和泉意登志, 井上和政, 阿部靖弘, 田中恭一, 橋爪進: 超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究 (その1 混和材の種類によるセメントペーストの流動性及び粘性について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.915-916, 1992.8.
- [3] 三浦達男: 流動化コンクリートへの応用例—高所圧送—, コンクリート工学, Vol.18, No.7, pp.37-41, 1980.7.
- [4] 高弊喜文, 両角昌公: 逆打ち工法, コンクリート工学, Vol.27, No.11, pp.56-61, 1989.11.
- [5] Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G.: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 356pp., 1983.
- [6] Banfill, P.F.G.: The Rheology of Cement Paste: Progress since 1973, Proc. of the RILEM Colloquium, Chapman and Hall, pp.3-9, 1990.10.
- [7] Tanigawa, Y. and Mori, H.: Analytical Study on Deformation of Fresh Concrete, Jour. of Engineering Mechanics, Proc. of ASCE, Vol.115, No.EM3, pp.493-508, 1989.3.
- [8] Tanigawa, Y., Mori, H. and Watanabe, K.: Analytical Study on Flow of Fresh Concrete by Suspension Element Method, Proc. of the RILEM Colloquium, Chapman and Hall, pp.309-316, 1990.10.
- [9] 下山善秀: 静的外力による硬練りコンクリートの変形に関する研究, 土木学会論文集, No.390, V-8, pp.141-149, 1988.2.
- [10] 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 小村理恵: フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察, コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.43-48, 1992.5.
- [11] 谷川恭雄, 森博嗣: コンクリートの「施工設計法」の確立を目指して, セメント・コンクリート, No.501, pp.11-20, 1988.11.
- [12] 谷川恭雄, 森博嗣: コンクリートの「施工設計法」の確立を目指して (続), セメント・コンクリート, No.551, pp.2-10, 1993.1.
- [13] 加賀秀治: コンクリートの品質管理に関する歴史的考察, コンクリート工学, Vol.21, No.7, pp.12-19, 1983.7.
- [14] 岩崎訓明: ワーカビリティー判定法, コンクリート工学, Vol.21, No.10, pp.4-

- 12, 1983.10.
- [15] 谷川恭雄, 森 博嗣: フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法, コンクリート工学, Vol.25, No.5, pp.4-16, 1987.5.
 - [16] 岡村甫, 小沢一雅: コンクリートの製造システム研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.23-26, 1992.6.
 - [17] 岡村甫: コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案) について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.15-24, 1989.6.
 - [18] 宮本文穂: 構造物の耐久性設計手法例—ファジー集合論を利用した耐久性設計手法—, コンクリート工学, Vol.26, No.11, pp.43-50, 1988.11.
 - [19] 三井健郎, 米澤敏男, 中島誠, 杉本貢: シリカフェュームの物理化学的性質と高強度コンクリートの特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, pp.63-68, 1993.6.
 - [20] 松藤泰典, 大久保孝昭, 原田志津男: フライアッシュ起源超微粉末を混入したセメントペーストの基礎物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.129-134, 1990.
 - [21] 両角昌公, 林健二, 岩清水隆: 特殊メタカオリンの高強度コンクリートへの適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.135-138, 1990.
 - [22] 芦田公伸, 松本雅夫, 高木聡, 坂井悦郎: 超微粉を用いたポリマーセメントモルタルの基本物性, セメント技術大会講演集, Vol.45, pp.822-827, 1991.
 - [23] 小野義徳, 新井智史, 小川学, 徳井克巳: 高充填コンクリート用混和材を用いたコンクリートの逆打ち工事への適用, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.151-154, 1993.5.
 - [24] 桑野陵一, 篠田佳男, 窪泰浩, 今井澄雄: フライアッシュの品質変動がコンクリート性状に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.45-50, 1991.6.
 - [25] 森 博嗣, 田中政史, 谷川恭雄: フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.1-10, 1991.3.
 - [26] 谷川恭雄, 森博嗣, 筒井一仁, 黒川善幸: スランプ試験およびすべり抵抗試験によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.8, pp.381-384, 1986.6.
 - [27] 森博嗣, 谷川恭雄: 振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.388, pp.18-27, 1988.6.
 - [28] 長滝重義, 米倉重州夫: 回転粘度計によるモルタルの流動解析の1考察, セメント技術年報, Vol.29, pp.207-212, 1975.

- [29] 玉井元治, 川東龍夫: 高性能減水剤を用いたセメントペーストのレオロジー特性, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.3, pp.37-40, 1981.
- [30] 村田二郎: まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究, コンクリート工学, Vol.15, No.1, pp.25-34, 1977.1.
- [31] 村田二郎, 菊川浩治: 回転粘度計によるフレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数測定法, フレッシュコンクリートの物性の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.9-16, 1979.
- [32] 谷川恭雄, 森 博嗣, 増田一幸, 渡辺健治: 回転粘度計によるレオロジー定数測定方法に関する有限要素法解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.321-326, 1988.6.
- [33] Tattersall, G.H.: The Rationable of Two-point Workability Test, Mag. of Conc. Research, Vol.25, No.84, pp.169-172, 1973.
- [34] 水口裕之, 正木位史: フレッシュコンクリート用回転翼型レオメータの開発, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.7-12, 1989.4.
- [35] 角田 忍, 岸本 敏, 明石外世樹: 回転翼型レオメータによる各種コンクリートのワーカビリティ評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.343-348, 1988.
- [36] 児島孝之, 角田忍, 浅野文男: 水中不分離性コンクリートの流動性評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.49-54, 1990.6.
- [37] 岡小天: ビンガム物体に対する平行板プラストメータの理論, 材料, Vol.12, No.116, pp.54-56, 1963.
- [38] 水口裕之, 藤崎茂, 大崎豊治: フレッシュコンクリートの塑性粘度および降伏値の測定, セメント技術年報, Vol.28, pp.154-158, 1974.
- [39] L'Hermite, R. and Tournon, G: Vibration of Fresh Concrete. Technical Publication, No.2: Center d'Etudes et de Recherches de L'Industrie des Liants Hydraulique, Paris, 1948.
- [40] 西林新蔵, 矢村潔, 吉野公: 流動化コンクリートのフレッシュ状態での特性評価に関する一考察, フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.25-32, 1974.
- [41] 明石外世樹, 角田忍: 球引上げ型粘度計によるフレッシュコンクリートの物性値の測定, フレッシュコンクリートの挙動の解析と施工作業のシステム化への応用に関する研究, 文部省科学研究費・総合研究成果報告書, pp.9-

- 18, 1988.3.
- [42] 岸谷孝一, 岡成一: フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定, 日本建築学会論文報告集, No.305, pp.1-7, 1981.
 - [43] 菊川浩治: フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートの降伏値推定法に関する研究, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1989.4.
 - [44] 加藤清志, 南和孝, 北川真: フレッシュコンクリートのせん断型試験によるレオロジー評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.327-330, 1988.6.
 - [45] 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委員会セメントペースト特性ワーキング・グループ: フレッシュコンクリートのワーカビリティ試験方法の調査と評価方法, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.55-66, 1989.4.
 - [46] 黒井登起雄: 練混ぜが流動化コンクリートのスランブロスに及ぼす影響に関する基礎的研究, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.115-120, 1989.4.
 - [47] 米澤敏男, 和泉意登志, 三井健郎, 奥野亨: 高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.171-176, 1989.6.
 - [48] 西林新蔵, 井上正一, 吉野公, 高井伸一郎: フレッシュコンクリートの流動性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.375-380, 1992.6.
 - [49] 坂田昇, 万木正弘, 山本博之, 古沢靖彦: 高流動コンクリートの充填性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.301-306, 1990.6.
 - [50] 佐原晴也, 横田季彦, 庄司芳之, 竹下治之: 高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.137-142, 1991.6.
 - [51] 近松竜一, 竹田宣典, 平田隆洋, 十河茂幸: コンクリートの流下速度試験による打込みやすさの一評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.887-892, 1991.6.
 - [52] 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸: 超流動コンクリートの流動性と分離抵抗性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.381-386, 1992.6.
 - [53] 小沢一雅, 岡村甫, 坂田昇: 締固め不要コンクリートの充填性評価のための

- ロート試験, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.17-22, 1993.5.
- [54] 寺西浩司, 谷川恭雄, 森 博嗣, 江口清: 超高強度コンクリートのワーカビリティ評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.131-136, 1991.6.
- [55] 中島良光, 梶田秀幸, 三浦信一, 牧野英久: 二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.173-178, 1991.6.
- [56] 谷川恭雄, 森博嗣: フレッシュコンクリートのレオロジーと解析, コンクリート工学, Vol.31, No.10, 1993.10.
- [57] 竹内研究一, 石橋忠良, 大庭光商: 高強度コンクリートの高所圧送性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.281-284, 1990.6.
- [58] 谷川恭雄, 森博嗣, 野田豊: 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考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.203-208, 1991.6.
- [59] 南条毅一, 細谷俊夫, 阿部立実: 粒度を粗くしたセメントの高強度への適用性, セメント技術大会講演集, Vol.45, pp.208-211, 1991.
- [60] 名和豊春, 深谷泰文, 鈴木清孝, 柳田克巳: 高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.143-148, 1993.6.
- [61] 三井健郎, 米澤敏男, 中島誠, 杉本貢: シリカフェュームの物理化学的性質と高強度コンクリートの特性の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.63-68, 1993.6.
- [62] 寺西浩司, 岸谷孝一, 江口清, 中込昭: 超高強度コンクリートの調合に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.463-468, 1992.6.
- [63] 石井光裕, 浮田和明, 東邦和, 山本和夫: 分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.263-268, 1991.6.
- [64] 磯谷孝代, 佐原晴也, 星野昭平, 竹下治之: 結合材の配合比が超高強度コンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.451-456, 1992.6.
- [65] 西林新蔵, 吉野公, 湯谷政博: 高性能A E減水剤を添加した高炉スラグ混入コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.367-372, 1989.6.

- [66] 三浦律彦, 十河茂幸, 芳賀孝成: 超微細な高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの凝結硬化性状と環境温度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.349-354, 1989.
- [67] 綾野克紀, 阪田憲次, 小川鑑, 金子泰治: 石灰石微粉末を用いた超流動コンクリートの配合に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.167-172, 1993.6.
- [68] 谷川恭雄, 森博嗣, 淵田安浩: フレッシュ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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.119-124, 1991.6.
- [69] 日本建築学会: コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説, 1979.
- [70] 椎葉大和, 本田悟, 荒木恵: 高強度軽量コンクリートの力学的性状に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.291-296, 1992.6.
- [71] 椎葉大和, 本田悟, 荒木恵: 各種セメントを用いた高強度軽量コンクリートの諸特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.33-38, 1991.6.
- [72] 中西正俊, 内藤憲一, 木村薫, 篠崎明夫: 坑火石微粉末の焼成骨材を使用した軽量コンクリートの高強度化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.43-46, 1993.6.
- [73] 和美広喜, 田村直久, 小森浩之, 笠井浩: 高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.225-230, 1988.6.
- [74] 中根淳, 久保田昌吾, 齊藤裕司, 一瀬賢一: RC超高層建築用コンクリートに関する研究(その13 $F_c 1200 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の超高強度コンクリートを用いた施工実験-実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.471-472, 1992.8.
- [75] 清水正樹, 橋本親典, 丸山久一, 倉林清, 高野菊光: コンクリートの電気抵抗特性によるポンプ圧送時の管内流動性状推定に関する実験的研究, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.157-162, 1989.4.
- [76] 辻村直哉, 橋本親典, 丸山久一, 清水敬二: 管内を流れるコンクリートの閉塞感知システムの開発に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.73-78, 1988.6.
- [77] 橋本親典, 吉田正宏, 辻幸和, 林善彦: アジテータ車のコンクリートの排出性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1,

- pp.107-112, 1992.6.
- [78] 橋本親典, 井上健, 丸山久一, 清水敬二: 可視化実験手法によるポンプ圧送時のコンクリートの変形特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.79-84, 1988.6.
- [79] 橋本親典, 平井秀幸, 丸山久一, 辻幸和: コンクリートポンプの滑り弁内を流れるコンクリートの可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.95-100, 1991.6.
- [80] 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 野田豊: テーパー管を通過するフレッシュコンクリートの挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.427-432, 1992.6.
- [81] 村田二郎: フレッシュコンクリートの挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.378, V-6, pp.21-33, 1987.2.
- [82] 小谷勝昭, 神田享: フレッシュコンクリートの流動解析, フジタ工業技術研究所報, No.21, pp.103-108, 1985.7.
- [83] 森博嗣, 谷川恭雄: 粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.374, pp.1-9, 1982.4.
- [84] 谷川恭雄, 森博嗣, 梅本宗宏, 渡辺健治: サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション方法, 材料, Vol.38, No.431, pp.26-31, 1989.9.
- [85] 森博嗣, 渡辺健治, 梅本宗宏, 谷川恭雄: 二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.427, pp.11-21, 1991.9.
- [86] Y.Tanigawa, H.Mori and K.Watanabe: Flow Simulation of Fresh Concrete by Viscoplastic Divided Space Element Method, Proc. of Japan Congress on Materials Research, Vol.33, pp.227-233, 1990.3.
- [87] 渡辺健治, 寺西浩司, 森博嗣, 谷川恭雄: 型枠内およびパイプ内におけるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文報告集, No.451, pp.1-7, 1993.9.
- [88] 岡本公夫, 上村克郎, 友沢史紀, 清水昭之, 増田佳寛, 中根淳, 平賀友晃: 高強度鉄筋コンクリートを用いた施工実験の概要(NewRC実大施工実験 その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.299-300, 1992.8.
- [89] 川村俊郎, 長滝重義: 高強度コンクリート, コンクリート工学, Vol.18, No.7, pp.8-11, 1980.7.
- [90] 橋大介, 熊谷仁志, 山崎庸行, 鈴木忠彦: 高強度コンクリート ($F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$) の建築構造物への適用に関する研究, コンクリート工学年次

- 論文報告集, Vol.13, No.1, pp.243-244, 1991.6.
- [91] 坂本淳, 松岡康訓, 新藤竹文, Tangtermsirikul, S.: 超流動コンクリートの実構造物への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.881-886, 1991.6.
- [92] Mori, H. and Tanigawa, Y.: Flow Simulation of Fresh Concrete Subjected to Vibration, Magazine of Concrete Research, Vol.42, No.153, pp.223-232, 1990.12.
- [93] 岩崎訓明, 阪本信義: コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性, 土木学会論文集, Vol.10, pp.87-96, 1989.
- [94] Tattersall G.H. and Barker P.H.: The Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.40, No.143, pp.79-89, 1988.6.
- [95] 谷川恭雄, 森博嗣, 中村正行, 増田一幸, 渡辺健治: 振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす鉄筋の影響, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.73-78, 1989.4.
- [96] 森濱和正, 高橋弘人: 種々のフレッシュコンクリートの品質判定法に関する比較実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.159-164, 1989.6.
- [97] 森博嗣, 谷川恭雄: フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.377, pp.16-26, 1987.6.
- [98] 山田浩司, 川上正史, Farahat A.M., 二羽淳一郎: ミクロ的アプローチによるコンクリートの破壊挙動の実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.489-494, 1993.6.
- [99] 藤原浩巳, 下山善秀, 富田六郎, 久保田裕康: 高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.27-32, 1992.6.
- [100] 井上和政, 和泉意登志, 戸田彰彦, 阿部靖弘, 田中恭一, 橋爪進: 超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究 (その2 超ワーカブルコンクリートを構成するフレッシュモルタルの粘性特性と付着特性に関する一考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.917-918, 1992.8.
- [101] 寺西浩司, 谷川恭雄, 森博嗣, 渡辺健治: 振動を受けるビンガム流体のコンシステンシーに関するレオロジー的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.357-362, 1993.6.
- [102] 石橋忠良, 吉田彦三郎, 大庭光商, 竹内研一: ポンプ圧送による高強度コン

- クリート ($\sigma_{sk}=600\text{kgf/cm}^2$) の施工—青森大橋 (仮称) 主塔—, コンクリート工学, Vol.28, No.5, pp.59-70, 1990.5.
- [103] 橋本親典, 堀口和弘, 丸山久一, 清水敬二: テーパ管を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ計測システム, 土木学会論文集, No.402, pp.61-70, 1989.2.
- [104] 谷川恭雄, 森博嗣, 野田豊, 渡部哲巳: フレッシュコンクリートのポンプ圧送に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.421-426, 1992.6.
- [105] 中込昭, 江口清, 寺西浩司, 西川秀則: 充填形鋼管コンクリート柱の圧入施工実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1055-1060, 1993.6.
- [106] 谷口英武, 中根淳, 大池武: コンクリートのポンプ圧入工法に関する研究 (その2 鋼管柱中詰めコンクリートの施工—ダイヤフラム形状の影響—), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.745-746, 1992.8.
- [107] 有馬勇, 金沢克義, 佐藤孝一, 桜井重英: 二成分系低発熱型高流動コンクリートの実用化研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.63-68, 1992.6.
- [108] 大池武, 中根淳: コンクリートのポンプ圧入工法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1043-1048, 1993.6.

付録1 記号一覧

a	: 加速度
B	: 単位結合材量
[B]	: Bマトリックス
C	: 単位セメント量
Ch	: 粘着力
[EK]	: 要素剛性マトリックス
g	: 重力加速度 (9.8m/s^2)
G	: 単位粗骨材量
Gv	: 粗骨材容積比
Go	: 基準となる粗骨材 (重) 量
h	: 高さあるいは垂直距離
HAE	: 単位高性能A E減水剤添加量
I_1	: 平均垂直応力
J_2	: 偏差応力テンソルの2次不変量
P	: 外力または圧力
Pi	: 管入口部の口径
Po	: 管出口部の口径
Qs	: すべりによる流量
Qv	: 変形による流量
r	: 半径
R	: 半径
[R]	: 回転マトリックス
s	: 単位細骨材体積
S	: 単位細骨材量
$S_1 \sim S_4$: すべり定数
Si	: 単位シリカフューム量
Sg	: 単位高炉スラグ微粉末量
t	: 時間
[TK]	: 全体剛性マトリックス
Tr	: テーパー率
Ui	: 節点iの局座標上のX軸方向の変位

V_i : 節点 i の極座標上のY軸方向の変位
 W_i : 節点 i の極座標上のZ軸方向の変位
 W/C : 水セメント比
 W/B : 水結合材比

β : ずり速度
 γ : せん断ひずみ
 κ : 流動定数
 θ : 安息角
 ρ : 密度
 σ_h : すべり抵抗応力
 σ_n : 平均垂直応力
 τ : せん断応力
 τ_y : 降伏値
 η : 塑性粘度
 ϕ : 内部摩擦角

付録2 既発表論文リスト

(1) 学術論文

No.	論文題目	発表誌名	巻, 号, 頁	発表年月	共著者
1	Finite Element Analysis for Determination of Rheological Constants in Cylindrical Rotation Viscometer	Trans. of JCI	Vol.10, pp.43-50	1988.12.	Y.Tanigawa H.Mori K.Masuda
2	サスペンション要素法解析によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション方法	材料	Vol.38, No.431, pp.26-31	1989.8.	谷川恭雄 森 博嗣 梅本宗宏
3	Suspension Element Analysis for Flow of Fresh Concrete in Tapered Pipe	Trans. of JCI	Vol.11, pp.9-16	1989.12.	Y.Tanigawa H.Mori M.Miwa
4	Flow Simulation of Fresh Concrete by Viscoplastic Divided Space Element Method	Proc. of Japan Congress on Materials Research	Vol.33, pp.227-233	1990.3.	Y.Tanigawa H.Mori
5	Computer Simulation of Various Kinds of Consistency and Rheology Tests for Fresh Concrete by Viscoplastic Finite Element Method	Proc. of RILEM Colloquium on Properties of Fresh Concrete, Hannover	pp.301-308	1990.10.	Y.Tanigawa H.Mori
6	Analytical Study on Flow of Fresh Concrete by Suspension Element Method	Proc. of RILEM Colloquium on Properties of Fresh Concrete, Hannover	pp.309-316	1990.10.	Y.Tanigawa H.Mori
7	粘塑性空間要素法によるフレッシュコンクリートの打設シミュレーション	セメント・コンクリート論文集	No.35, pp.612-617	1990.12.	谷川恭雄 森 博嗣
8	Consistency Testing Method for High-strength and Ultra-high-strength Concrete	Trans. of JCI	Vol.12, pp.49-56	1990.12.	Y.Tanigawa H.Mori M.Miwa
9	Flow Analysis of Fresh Concrete by Viscoplastic Suspension Element Method	Trans. of JCI	Vol.12, pp.41-48	1990.12.	Y.Tanigawa H.Mori Y.Noda

10	二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法	日本建築学会構造系論文報告集	No.427, pp.11-21	1991.9.	森 博嗣 谷川恭雄 梅本宗宏
11	Analytical and Experimental Studies on Casting of Fresh Concrete into Modeled Wall Form	Trans. of JCI	Vol.13, pp.33-40	1991.12.	Y.Tanigawa H.Mori
12	高強度コンクリートのフレッシュ状態における性状に関する実験的研究	日本建築学会構造系論文報告集	No.435, pp.1-10	1992.5.	三輪正保 森 博嗣 谷川恭雄
13	高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのコンシステンシーに関する研究	セメント・コンクリート論文集	No.46, pp.362-367	1992.12.	谷川恭雄 森 博嗣 今井信宏
14	Simulation of Concreting Work by Viscoplastic Divided Space Element Method	Trans. of JCI	Vol.14, pp.17-24	1992.12.	Y.Tanigawa H.Mori K.Teranishi
15	型枠内およびパイプ内におけるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション	日本建築学会構造系論文報告集	No.451, pp.1-8	1993.9.	寺西浩司 森 博嗣 谷川恭雄
16	Rheological Study on Consistency of Bingham Fluid Subjected to Vibration	Trans. of JCI	Vol.15, (in print)	1993.12.	K.Teranishi Y.Tanigawa H.Mori
17	Flow Simulation of Fresh Concrete in Bent Pipe and Tapered Pipe	Trans. of JCI	Vol.15, (in print)	1993.12.	H.Mori Y.Tanigawa

(注) JCI : Japan Concrete Institute, RILEM : International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.

(2) 口頭発表論文

No.	論文題目	発表誌名	巻, 号, 頁	発表年	共著者
1	回転粘度計によるレオロジー定数測定法に関する有限要素解析	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.10, No.2, pp.321-326	1988.6.	谷川恭雄 森 博嗣 増田一幸
2	回転粘度計内部のフレッシュコンクリートの流速分布に関する有限要素解析	日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)	A, pp.309-310	1988.10.	谷川恭雄 森 博嗣
3	サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析	日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)	A, pp.307-308	1988.10.	谷川恭雄 森 博嗣 梅本宗宏

4	サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション	日本建築学会東海支部研究報告集	No.27, pp.9-12	1989.2.	谷川恭雄 森 博嗣 梅本宗宏
5	二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション手法	フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会	pp.67-72	1989.4.	谷川恭雄 森 博嗣 中村正行 梅本宗宏
6	振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす鉄筋の影響	フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会	pp.73-78	1989.4.	谷川恭雄 森 博嗣 中村正行 増田一幸
7	フレッシュコンクリートのテーバー管内流動に関するサスペンション要素法解析	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.11 No.1 pp.727-732	1989.6.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保
8	粘塑性空間要素法によるコンクリートの流動シミュレーション	第33回材料研究連合講演会前刷集	pp.53-54	1989.9.	谷川恭雄 森 博嗣
9	振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動に対する鉄筋の抵抗性	日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)	A, pp.241-242	1989.10.	谷川恭雄 森 博嗣 増田一幸
10	粘塑性空間要素法による型枠内へのコンクリートの打設シミュレーション	日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)	A, pp.245-246	1989.10.	谷川恭雄 林 俊雄 森 博嗣 三輪正保
11	型枠内へのコンクリート打設に関する粘塑性空間要素法解析	日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)	A, pp.247-248	1989.10.	谷川恭雄 森 博嗣 中村正行 三輪正保
12	サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートのテーバー管内流動シミュレーション	日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)	A, pp.239-240	1989.10.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保
13	フレッシュコンクリートのレオロジー解析手法	第39回応用力学連合講演予稿集	pp.317-320	1989.12.	谷川恭雄 森 博嗣

14	粘塑性空間要素法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション	日本建築学会東海支部研究報告集	No.28, pp.9-12	1990.2.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保
15	高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価方法に関する基礎的研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.28, pp.13-16	1990.2.	谷川恭雄 森 博嗣 山本常夫 下野敏秀 山中修一 三輪正保
16	粘塑性空間要素法によるフレッシュコンクリートの打設シミュレーション	セメント技術大会講演集	No.35, pp.716-721	1990.5.	谷川恭雄 森 博嗣
17	サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.12, No.1, pp.257-262	1990.6.	谷川恭雄 森 博嗣 野田 豊
18	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に関する研究	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.12 No.1 pp.275-280	1990.6.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保
19	粘塑性空間要素法による壁状型枠内へのコンクリートの打設シミュレーション	日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)	A, pp.693-694	1990.10.	谷川恭雄 森 博嗣 林 俊雄 測田安浩
20	骨材の影響を考慮したフレッシュコンクリートの流動解析手法の開発	日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)	A, pp.855-856	1990.10.	谷川恭雄 森 博嗣 和泉意登志 米沢敏男 野田 豊
21	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に関する基礎的研究	日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)	A, pp.477-478	1990.10.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保
22	小型壁状型枠へのコンクリート打設に関する研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.29, pp.1-4	1991.2.	谷川恭雄 森 博嗣
23	フレッシュ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	日本建築学会東海支部研究報告集	No.29, pp.9-12	1991.2.	谷川恭雄 森 博嗣 測田安浩
24	低水セメント比のフレッシュコンクリートの性状に関する実験的研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.29, pp.13-16	1991.2.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保 和泉意登志 米沢敏男

25	壁型枠へのコンクリート打設に関する解析および実験的研究	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.13, No.1, pp.839-844	1991.6.	谷川恭雄 森 博嗣
26	配筋壁型枠への打設に関する研究(その1:解析的研究)	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)	A, pp.917-918	1991.9.	谷川恭雄 森 博嗣 増田一幸
27	配筋壁型枠への打設に関する研究(その2:実験的研究)	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)	A, pp.919-920	1991.9.	谷川恭雄 森 博嗣 増田一幸 渡部哲巳
28	低水セメント比のコンクリートの材料分離の評価方法に関する研究(その1:コンシステンシー試験)	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)	A, pp.923-924	1991.9.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保 酒井雅康
29	低水セメント比のコンクリートの材料分離の評価方法に関する研究(その2:粗骨材の分離状況)	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)	A, pp.925-926	1991.9.	谷川恭雄 森 博嗣 三輪正保 酒井雅康
30	内ダイヤフラムを持つ鋼管柱内へのコンクリート打設に関する解析的研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.30, pp.29-32	1992.2.	谷川恭雄 森 博嗣 江口 清 寺西浩司
31	振動下での小型壁状型枠内へのコンクリート打設に関する研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.30, pp.25-28	1992.2.	谷川恭雄 森 博嗣 寺西浩司
32	高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの材料分離性状に関する実験的研究	日本建築学会東海支部研究報告集	No.30, pp.9-12	1992.2.	谷川恭雄 森 博嗣 酒井雅康
33	高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのコンシステンシーに関する研究	セメント技術大会講演集	No.46, pp.382-387	1992.5.	谷川恭雄 森 博嗣 今井信宏
34	空間要素法によるコンクリートの打設シミュレーション	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.14, No.1, pp.415-420	1992.6.	谷川恭雄 森 博嗣 寺西浩司
35	高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの振動下における粗骨材の沈下挙動	日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)	A, pp.291-292	1992.8.	谷川恭雄 森 博嗣 今井信宏 酒井雅康

37	内部欠陥を有するコンクリート壁面の表面温度に関する解析的研究	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (北陸)	A, pp.1037-1038	1992.8.	谷川恭雄 森 博嗣 黒川善幸 渡部哲巳
38	振動を受けるビンガム流体のコンシステンシーに関する一考察	日本建築学会東海 支部研究報告集	No.31, pp.21-24	1993.2.	谷川恭雄 森 博嗣 黒川善幸 寺西浩司
39	ベント管内を流れるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション	日本建築学会東海 支部研究報告集	No.31, pp.25-28	1993.2.	谷川恭雄 森 博嗣
40	サーモグラフィ法によるコンクリートの内部欠陥の推定に関する研究(その1:解析的研究)	日本建築学会東海 支部研究報告集	No.31, pp.109-112	1993.2.	谷川恭雄 森 博嗣 黒川善幸 渡部哲巳
41	振動を受けるビンガム流体のコンシステンシーに関するレオロジー的考察	コンクリート工学 年次論文報告集	Vol.15, No.1, pp.357-362	1993.6.	寺西浩司 谷川恭雄 森 博嗣
42	フレッシュコンクリートのベント管内流動のシミュレーション	コンクリート工学 年次論文報告集	Vol.15, No.1, pp.1049-1054	1993.6.	森 博嗣 谷川恭雄
43	ビンガム流体の振動下におけるコンシステンシーに関するレオロジー的考察	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (関東)	A, pp.1223-1224	1993.9.	黒川善幸 谷川恭雄 森 博嗣 寺西浩司
44	フレッシュコンクリートの変形管内の流動解析	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (関東)	A, pp.1221-1222	1993.9.	谷川恭雄 森 博嗣

謝辞

謝辞

本論文は、1987年から6年間にわたって行った研究の成果をまとめたものです。途中、研究の場が三重大学から名古屋大学へと移ったものの、谷川恭雄先生（名古屋大学教授）ならびに森博嗣先生（名古屋大学助教授）からは、終始一貫してご指導・ご助言をいただき、また、正しい方向性をご指示いただきました。ここに深く感謝致します。両先生には、研究活動にとどまらず、公私ともに数々の叱咤激励をいただき、感謝の意を言葉で表すことができない程です。また、本論文の審査に際してご助言をいただいた多賀直恒先生（名古屋大学教授）ならびに松井徹哉先生（名古屋大学教授）に心から感謝いたします。

研究を遂行する上で、多くの先輩や後輩のご助力を得ました。寺西浩司氏（前田建設工業）には、コンクリート充填鋼管柱の解析でご助力をいただきました。三輪正保氏（旭化成工業）には、高強度コンクリートのレオロジー定数測定とポンプ圧送性に関する解析の際に率先してご協力いただきました。細谷朋美氏（長谷工コーポレーション）には、3次元解析の考察方法に関してご助言をいただきました。川俣愛彦氏（大林組）および丹羽嘉一氏（住友林業）には、付着試験装置など新しい試験装置の開発にご協力いただきました。酒井雅康氏（NKK）には、振動下における粗骨材の沈下挙動に関する実験で綿密な計測を手伝っていただきました。刈田安浩氏（大林組）および伊藤瑞子氏（INAX）には、粗骨材量がコンクリートのレオロジー性質に与える影響に関する実験にご協力いただきました。その他多くの方々に有意義なご助言・ご助力を得ました。ここに、貴重なご助言やご助力を得ましたすべての方々に深く感謝します。

最後になりましたが、私の博士課程進学を快諾し、最上級の研究のチャンスを与えていただいた、私の両親に感謝します。

