

論文

[1069] 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

正会員 谷川恭雄 (名古屋大学建築学科)
 正会員 森 博嗣 (名古屋大学建築学科)
 正会員 ○渡辺健治 (名古屋大学大学院)
 正会員 寺西浩司 (前田建設工業)

1. まえがき

工期短縮や労務者の不足などの社会情勢から、コンクリート工事の合理化・省力化が求められている。また、近年、コンクリートの耐久性劣化など、コンクリート工事に対する品質管理のあり方が問われている。これらの課題に対して、高強度・超高強度コンクリート、水中コンクリート、繊維補強コンクリートなどの新しいコンクリートや、圧入工法や無振動打設工法[1]などの新工法が次々と開発されている。

一方、フレッシュコンクリートの性質をレオロジーの観点から整理し、コンクリートの流動挙動を予測する技術は、コンクリート工事の合理化さらには自動化の技術開発のための基礎となるばかりではなく、「施工設計」[2]の中枢を成すものの一つである。

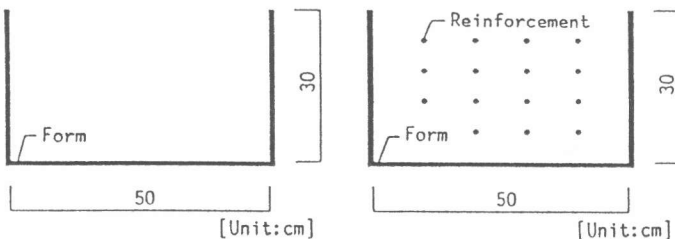
筆者らは、既に粘塑性有限要素法 (V F E M) および粘塑性サスペンション要素法 (V S E M) を提案し、各種レオロジー・コンシステンシー試験を初めとした数多くの解析を行い、それらの妥当性と適用範囲を示してきた[3, 4]。また、実施工条件に適用できる粘塑性空間要素法 (V D E M) を提案し、壁状型枠内に打設されるフレッシュコンクリートの流動挙動に関する解析を行い、実験結果と比較することによってその妥当性を検証してきた[5]。

本報では、振動を受ける配筋壁状型枠および内ダイヤフラムを持つ鋼管柱内でのフレッシュコンクリートの流動挙動をVDEMを用いて解析し、レオロジーの観点から定量的に検討することとした。

2. 壁状型枠内への打設シミュレーション

2.1 解析の概要

解析では、図-1 (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。打設速度 (Q) は、300、450および900cm³/s (型枠の厚みを6cm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



(a) A型枠 (b) B型枠

図-1 壁状型枠の形状・寸法

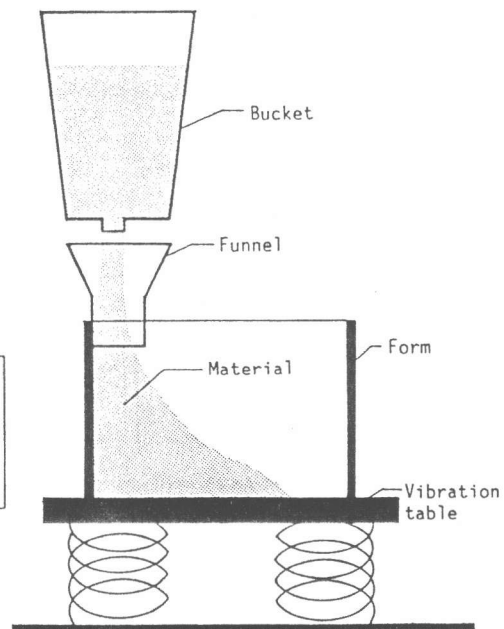


図-2 壁状型枠への打設装置

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。

2.2 実験の概要

実験に用いたモルタル試料の調合を表-1に示す。実験では、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。解析と同様に、前掲の図-1に示すようなAおよびB型枠を用いて、図-2に示すような装置によって測定を行い、M40シリーズは $900\text{cm}^3/\text{s}$ で、またM30シリーズは $450\text{cm}^3/\text{s}$ で型枠内に打設した。打設位置を解析と同条件の型枠左端より10cm以内とするためにロートを設けた。壁状型枠は、振動台上に固定し、0および30Hz（1.5g, 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を調べた。

また、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での同試料のみかけのレオロジー性質を調べた。

2.3 型枠内での流動挙動

解析および実験結果の比較の一例を図-3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。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大きい値を用いる必要があった。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

表-1 試料の調合表

Series	W/C	S/C	Ad.
M40	40%	1.80	-
M30	30%	1.25	1.2%/C

[Notes]
W/C: Water-Cement ratio, S/C: Sand-Cement ratio, Ad: Dosage of high-performance AE water reducing agent.

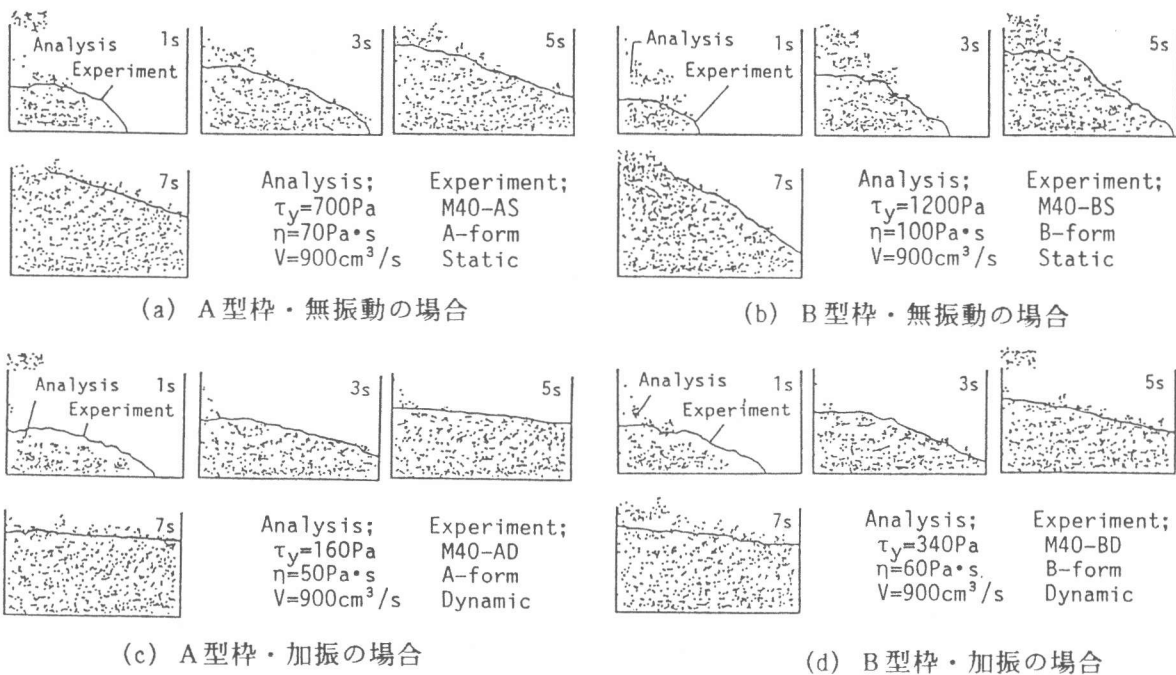
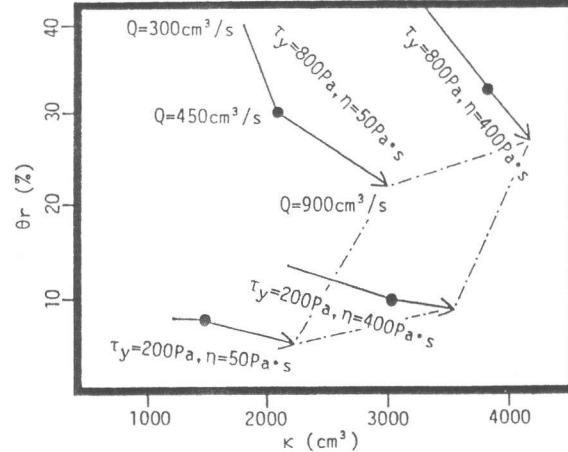
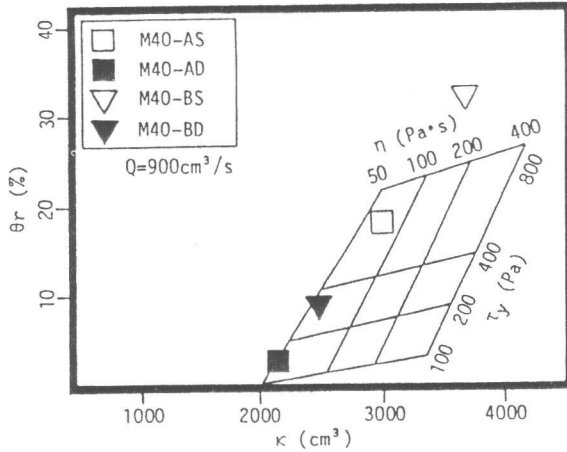


図-3 壁状型枠内での流動挙動



[Notes]
 AS: A-form with no vibration, AD: A-form with vibration,
 BS: B-form with no vibration, BD: B-form with vibration.

(a) 打設速度が一定 ($Q=900\text{cm}^3/\text{s}$) の場合

(b) 打設速度 (Q) の影響

図-4 安息角 (θ_r) および流動定数 (κ) とレオロジー定数の関係

は後述する。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、VDEM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。

2.4 型枠内での試料の流動挙動の定量化

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10cmから右端まで）の試料上面の形状を直線近似し、この直線の傾斜角 (θ) と、型枠内の試料の体積

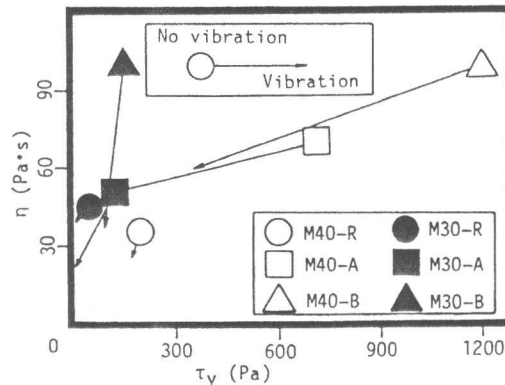
(V) の関係を求めた。さらに式(1)を用いて θ および $\Delta\theta$ (θ を V で微分した値) から、安息角 (θ_r) および流動定数 (κ) を定義し、これらを以下の考察に用いた。

$$\theta = -\kappa^{-1} \Delta\theta + \theta_r \quad (1)$$

θ_r は試料上面の最終傾斜角に、また κ は試料上面の角度の変化に関連した実験定数である。 θ_r および κ とレオロジー定数 (降伏値: τ_y , 塑性粘度: η) の関係の一例を図-4に示す。図-4(a)は、打設速度が $900\text{cm}^3/\text{s}$ の場合の結果を、また、図-4(b)は、打設速度を変化させた場合を示している。図中の直線群は、解析結果を、また図-4(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、 θ_r および κ の値は増加しており、 θ_r は τ_y の影響を、 κ は η の影響を強く受けることが分かる。この図を用いて、みかけのレオロジー定数を求めることができる。

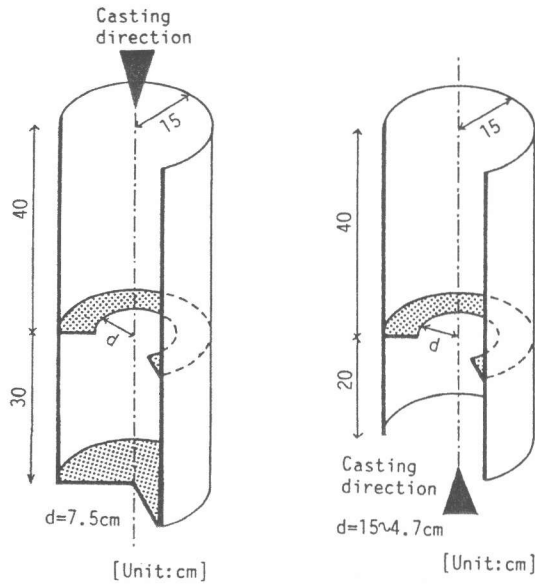
2.5 試料のみかけのレオロジー性質

図-5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



[Notes] R: Sphere lifting viscometer,
 A: A-form, B: B-form.

図-5 レオロジー定数の分布



(a) 上部からの打設 (b) 下部からの圧入打設

図-6 モデル鋼管の形状・寸法

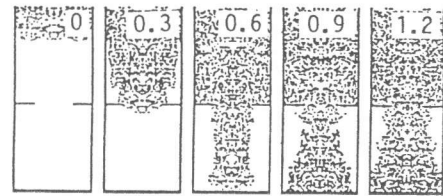
料のみかけのレオロジー定数は増加しており、振動を加えることによって、みかけのレオロジー定数が減少することがわかる。各実験条件下での降伏値 (τ_y) および塑性粘度 (η) の変動を直接比較することはできないが、加振することによって、 τ_y が比較的大きい範囲では、 τ_y の減少量が大きくなる。また、配筋の有無による変化に関しても同様の傾向がみられる。

3. 鋼管柱内への打設シミュレーション

3.1 解析方法の概要

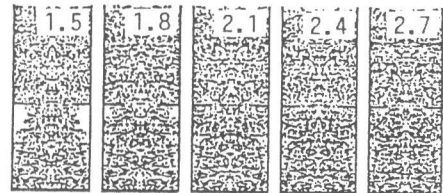
解析に用いたモデル鋼管の形状・寸法を図-6に示す。解析では、鋼管を三角形リング要素を用いて軸対称問題として取り扱った。図-6(a)は、鋼管上部から自由落下によってコンクリートを打設する場合であり、図-6(b)は、下部から圧入打設する場合である。圧入打設の場合は、ダイヤフラムの開口面積率 (D : 開口部面積/柱断面積) を変化させ、圧力損失についても調べた。

レオロジー定数は、降伏値 (τ_y) を $0 \sim 800 \text{ Pa}$ 、塑性粘度 (η) を $40 \sim 320 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 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。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 ($Q = 7 \text{ L/s}$) で流入するような圧力を理論式[6]により算出し、



$D=25\%$, $\tau_y=400\text{Pa}$, $\eta=100\text{Pa}\cdot\text{s}$
[Unit:s]

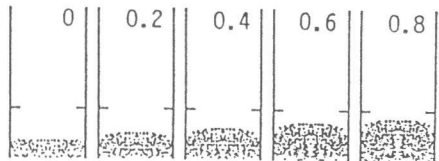
(a) 上部からの打設



$D=6\%$, $\tau_y=400\text{Pa}$, $\eta=100\text{Pa}\cdot\text{s}$
[Unit:s]

(b) 下部からの圧入打設

(開口部が小さい場合)



$D=56\%$, $\tau_y=400\text{Pa}$, $\eta=100\text{Pa}\cdot\text{s}$
[Unit:s]

(c) 下部からの圧入打設

(開口部が大きい場合)

図-7 鋼管内での試料の流動挙動
(解析結果)

これを節点力として加えた。内ダイヤフラムによる圧力損失を算定する解析では、15~100 kPaの圧力を加え、それぞれの流速を算出した。

3.2 鋼管内での充填挙動

図-7は、VDEMによる解析結果の一例を示したものであり、図-7(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、上部からの打設による内ダイヤフラム下部の空隙部は、明確にはみられなかった。図-7(b)および図-7(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。

3.3 ダイヤ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-8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ヤ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)が大きいくほど、また、塑性粘度(η)が大きいくほど、比較的大きい開口率(D)でも圧力損失が大きくなる。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。

VDEM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、圧送管の理論式に代入することによって、円柱管の断面積(S^*)を求めることができる。この S^* の値は、ダイヤ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、みかけの鋼管断面積(S^*)をモデル鋼管の断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-9に示す。同図中の一点鎖線は、

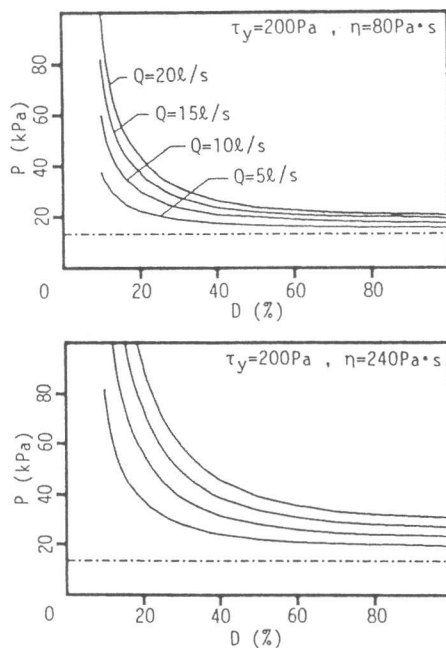


図-8 打設圧力(P)と開口面積率(D)の関係

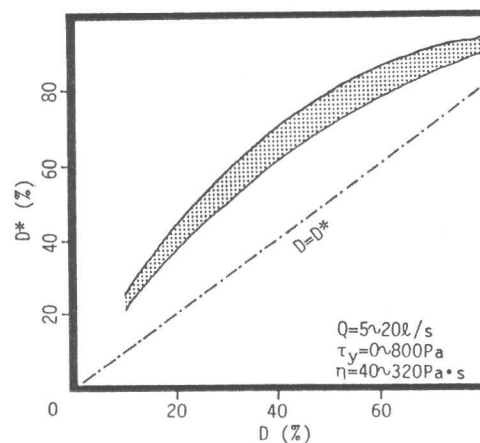


図-9 みかけの開口面積率(D^*)と実際の開口面積率(D)の関係

ダイヤ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、ダイヤ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。

4. まとめ

本研究では、粘塑性空間要素法(VDEM)を用いて、小型の壁状型枠および内ダイヤフラムを持つモデル鋼管柱内でのコンクリートの流動挙動に関する解析を行った。本研究で得られた知見は、以下のようにまとめることができる。

- 1) 壁状型枠内での試料の流動挙動の表現に、安息角と流動定数を用いることによって、配筋や振動などが、型枠内を流れる試料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評価することができる。
- 2) 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く、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。

[謝辞]

本研究に際して、鈴木潤君(名古屋大学学生)の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成3年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)、同一般研究(B)、同特別研究員奨励費、竹中育英会建築研究助成金などによった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- [1]小沢一雅・前川宏一・岡村甫: ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.699-704, 1989.6.
- [2]谷川恭雄・森博嗣: コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして, セメント・コンクリート, No.501, pp.11-209, 1988.11.
- [3]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, 1987.4.
- [4]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.
- [5]谷川恭雄・森博嗣・渡辺健治: 壁型枠へのコンクリート打設に関する解析的および実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.839-844, 1991.6.
- [6]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.