

W 5804325

05 埼大

6/11/77

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗特性に関する研究

05452225

平成6年度科学研究費補助金（一般研究（B））研究成果報告書

平成7年3月

研究代表者 町田篤彦
（埼玉大学工学部教授）

科学研究費補助金（一般研究（B））

研究成果報告書

1. はしがき

打込みに際して締固めを必要としない高流動性のコンクリートが開発されつつある中において、その特性を評価する上で、分離抵抗性を定量的に表すことの必要性が強く叫ばれている。この場合の材料分離では、粗骨材がモルタルから分離する現象の把握が特に重要である。

粗骨材がモルタルから分離する場合、モルタルの粘性が重要な役割を果たしている。一方で、同じコンクリートであっても、材料分離特性は施工過程でコンクリートが受ける外力の種類によって相違する。そこで、まず、モルタルの性状を降伏値、塑性粘度係数というような基本物理量で表し、これと粗骨材がコンクリート中で移動する場合の抵抗力との関係を実験的に明らかにする。ついで、粗骨材を要素とする個別要素法にこの抵抗力を組み込み、様々な外力によってコンクリートが移動する場合の粗骨材の移動を明らかにする解析法を定式化する。このような実験ならびに解析によって、コンクリートの材料分離抵抗性全体の解明を図ろうとして、研究を開始した。

研究の結果、フレッシュコンクリートの挙動解析に関しては、個別要素法の適用が有望であるとの見通しを得ることができた。すなわち、2次元の解析ではあるが、コンクリートの配合が与えられれば、解析に必要なパラメータをある程度与えることが可能であるという完全な定式化に近い成果を得ることができたのである。これにより、従来、経験的に明らかにされてきた材料分離に及ぼす配合要因の影響を解析的に明らかにすることができた。ただ、モルタルの性状を基本的物理量で表すことが予想以上に困難で、十分な成果が上げられなかったため、完全な定式化には至らなかった。また、計算時間の問題で、3次元解析の定式化はできていない。このような理由で、残念ながら、当初期待したコンクリートの材料分離抵抗特性全体の解明には至らなかった。得られた成果を基として研究を続行すれば、初期の成果を得られることと考えられる。

科学研究費補助金により、研究が可能となり、不満足ではあるがある程度の成果を上げることができたことに、厚く御礼申しあげる次第である。



研究組織

研究代表者：町田 篤彦 (埼玉大学工学部教授)
研究分担者：睦好 宏史 (埼玉大学工学部助教授)
研究分担者：岩下 和義 (埼玉大学工学部助教授)

研究経費

平成5年度	2,200千円
平成6年度	800千円
計	3,000千円

研究発表

(1) 鍋田克己、岩下和義、町田篤彦、個別要素法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、コンクリート工学年次論文報告集、16巻、平成6年6月

K.Nabeta, K.iwasita and A. Machida, Flow Simulation of Fresh Concrete by Distinct Element Method, Proceedings of Japan Concrete Institute, 発表予定

(2) 鍋田克己、町田篤彦、特殊混和剤を用いたフレッシュコンクリートの流動性状の解明、第47回土木学会年次学術講演会、平成5年10月

鍋田克己、岩下和義、町田篤彦、個別要素法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に関する研究、第48回土木学会年次学術講演会、平成6年9月

研究成果

研究成果は、次ページ以降に記すとおりである。

第1章 序論

1. 1 研究の背景

近年、流動化剤、高性能 A E 減水剤などの化学混和剤の進歩や高炉スラグやシリカフュームなどの混和剤の混入、さらにはポンプに代表される施工の機械化、省力化による新しい製造方法の開発などにより、フレッシュコンクリートの性状は極めて多様化してきている。また、一方では、コンクリート構造物の大型化や高層化が進み、現場作業者の不足、高齢化等から、コンクリート工事の省力化や合理化を目的とした施工技術の改善が必要とされている。

施工改善技術として盛んに研究されているものに、高流動コンクリートがある。高流動コンクリートとは、その配合において、高性能減水剤の添加量を比較的多くするとともに、骨材の一部を石灰石粉などに置換して微粉末量を増加する事により、流動性を著しく高め、振動による締め固めを行わなくても型枠の隅々にまで、行き渡り、高密度配筋部においても自重のみで密実に充填できる特徴がある。

新しい材料を用いる場合や、特殊な工法を実施する場合には、実工事の条件を模擬した施工実験が行われのだが、その際、この実験にかかる材料費、設備費、人件費等は多額となるばかりでなく、大量のコンクリートや鉄筋等の実験材料を廃棄することとなり、環境的にも考え直さなければならない点がある。

一方、フレッシュコンクリートの変形抵抗性をレオロジー的な立場から数値によって評価するために、主として実験的な研究が、国の内外を問わず、比較的古くから精力的に行われてきた。これらの実測結果によって、フレッシュコンクリートの材料特性の物理的な意味は次第に明らかにされてきている。

しかし、このようにして得られた材料物性値を、実際のコンクリート工事における施工性に関連づけて考えると、さらに、その材料物性値からコンクリート工事の作業能率を予測する手段を考案する事は、この分野の最大の目的であるにも関わらず、確立されずにいる。フレッシュコンクリートの特性や流動挙動波予想外に複雑であり、単純な力学モデルから定量化されたレオロジー定数だけで、多種多様な条件化のコンクリートの挙動を厳密に表現できるとは思われず、フレッシュコンクリートのワーカビリティに対して、そのレオロジー性質は、影響要因のごく一部であり、また降伏値や塑性粘度などは、材料特性を表す1部の数値に過ぎず、これをコンクリートの施工性と直接結びつけることはできない。

また、実験でコントロールできる影響要因（原因）は、いずれも限られているので、原因と結果の因果関係を明らかにすることは、少なくとも実験的なアプローチだけでは難しい。硬化コンクリートのように、流動するフレッシュコンクリートの内部に、ひずみゲージを貼るわけにもいかず、流動現象を力学的に扱うためには、極めて大胆な仮定が必要であった。この困難な環境は、近年になって、数値解析手法の導入により、緩和されつつある。

そこで、フレッシュコンクリートの流動状態を計算機によりシミュレートでき、

充填の状態、鉄筋間の通過状況、材料分離の有無等を精度良く捕らえることができるとしたなら、実験による労力等を著しく削減することができ、その結果、製品のコストを下げることが可能と思われる。現存するフレッシュコンクリートのシミュレーションシステムの信頼性は低いため、一日も早い信頼性の高いシステムの構築が期待されている。本研究では個別要素法を採用し、フレッシュコンクリートのシミュレーションのシステム開発を行った。

1. 2 本研究の目的および概要

フレッシュコンクリートの変形特性を表現する力学モデルは、一般に、ビンガムモデルが用いられるが、この単純化は極めて大胆であり、したがって、解析から得られる結果もこれに応じたおおざっぱなものとならざるを得ない。例えば、数値解析によって、型枠のどの範囲までコンクリートが充填されるかは、だいたいの予想することができる。ところが、要求されているものの多くは、型枠隅角部の充填性、鉄筋間の通過性、粗骨材の分離抵抗性、表面の仕上げ性などの確認であり、いずれも極めて局所的な問題である。

流動解析の最終目的である「施工設計」を実現するためには、ビンガムモデルよりもさらに精密な力学モデルを用いる必要がある。

粘性流体の流動解析は、水理学や流体力学を始めとする様々な分野で利用され、そのシミュレーションシステムも大型計算機の性能の向上に伴って確立されつつある。しかしながら、フレッシュコンクリートを始めとする降伏値をもつ粘塑性流体の流動解析手法は未だ確立されてない。そこで本研究においては、主に土質工学の分野で地盤の解析手法として、近年実績を上げている個別要素法(Distinct Element Method : DEM)を用いてフレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行った。

本研究の目的は、コンクリート配合表および各材料の性質から算出されるいくつかの数値をプログラムに入力することにより、そのフレッシュコンクリートの流動状態をシミュレーションすることである。このシミュレーションはスランプ等の単純なものに留まらず、例えば、鉛直・水平方向に密に配筋されている場合や逆打ちとなる場合などもシミュレーションできることを最終目的とする。

その第一段階としての、スランプフロー試験と箱形フロー試験の2つのシミュレーションが、行いやすい単純なモデルとして、取り上げられ、シミュレーションパラメーター(バネ定数、ダッシュポット定数、要素間摩擦定数、底面との摩擦定数など)と、高流動コンクリートの配合に不可欠である単位水量、増粘剤の使用量との関係は、おおよそ導き出されている。

スランプフロー試験、箱形フロー試験は、両者とも変形ポテンシャルに注目したものであるので、第2段階として変形速度に注目し、シミュレーションパラメーターを導き出すことを目的とする。

充填の状態、鉄筋間の通過状況、材料分離の有無等を精度良く捕らえることができるとしたなら、実験による労力等を著しく削減することができ、その結果、製品のコストを下げることも可能と思われる。現存するフレッシュコンクリートのシミュレーションシステムの信頼性は低いため、一日も早い信頼性の高いシステムの構築が期待されている。本研究では個別要素法を採用し、フレッシュコンクリートのシミュレーションのシステム開発を行った。

1. 2 本研究の目的および概要

フレッシュコンクリートの変形特性を表現する力学モデルは、一般に、ビンガムモデルが用いられるが、この単純化は極めて大胆であり、したがって、解析から得られる結果もこれに応じたおおざっぱなものとならざるを得ない。例えば、数値解析によって、型枠のどの範囲までコンクリートが充填されるかは、だいたいの予想することができる。ところが、要求されているものの多くは、型枠隅角部の充填性、鉄筋間の通過性、粗骨材の分離抵抗性、表面の仕上げ性などの確認であり、いずれも極めて局所的な問題である。

流動解析の最終目的である「施工設計」を実現するためには、ビンガムモデルよりもさらに精密な力学モデルを用いる必要がある。

粘性流体の流動解析は、水理学や流体力学を始めとする様々な分野で利用され、そのシミュレーションシステムも大型計算機の性能の向上に伴って確立されつつある。しかしながら、フレッシュコンクリートを始めとする降伏値をもつ粘塑性流体の流動解析手法は未だ確立されてない。そこで本研究においては、主に土質工学の分野で地盤の解析手法として、近年実績を上げている個別要素法(Distinct Element Method : DEM)を用いてフレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行った。

本研究の目的は、コンクリート配合表および各材料の性質から算出されるいくつかの数値をプログラムに入力することにより、そのフレッシュコンクリートの流動状態をシミュレーションすることである。このシミュレーションはスランプ等の単純なものに留まらず、例えば、鉛直・水平方向に密に配筋されている場合や逆打ちとなる場合などもシミュレーションできることを最終目的とする。

その第一段階としての、スランプフロー試験と箱形フロー試験の2つのシミュレーションが、行いやすい単純なモデルとして、取り上げられ、シミュレーションパラメーター(バネ定数、ダッシュポット定数、要素間摩擦定数、底面との摩擦定数など)と、高流動コンクリートの配合に不可欠である単位水量、増粘剤の使用量との関係は、おおよそ導き出されている。

スランプフロー試験、箱形フロー試験は、両者とも変形ポテンシャルに注目したものであるので、第2段階として変形速度に注目し、シミュレーションパラメーターを導き出すことを目的とする。

第2章 フレッシュコンクリートのモデル化

2. 1 概要

個別要素法は主に土質工学の分野で利用されてきたため、これをフレッシュコンクリートに適用するためには、改良しなければならない点も多い。この章では、個別要素法をフレッシュコンクリートに適用する際の、粗骨材間の力の伝達方法のモデル化、粗骨材のモデル化等について述べる。

2. 2 個別要素法の特徴

個別要素法とは、有限要素法や境界要素法のような連続体を解析するものではなく、非連続体を解析する手法ナノで、粒状材料集合体を扱うのに適している。粗骨材の運動に視点を合わせれば、個別要素法はフレッシュコンクリートの解析手法として適していると思われる。個別要素法の特徴としては、境界処理が非常に簡単で、障害物等の影響も考慮でき、また、変形の自由度も非常に高く、大変形に追従できるほか、各要素ごとに独立な運動法定式をたて、時間領域で漸進的に、解き個々の要素の運動を追跡していくものであるため、データの出力が容易であるという長所をもつ。

2. 3 個別要素法の基本原理

個別要素法では各粒状体を剛体として取り扱う。そして物質の線形・非線形は、要素の接触点に弾性スプリング、粘性ダッシュポット、スライダを想定することで表現する。各要素ごとの力とモーメントの運動方程式は、以下の式で表される。

$$F = \sum f_c + \sum f_{body} + \sum f_{bound} = m \ddot{u} \quad (1)$$

$$N = \sum m_c + \sum m_{bound} = I \ddot{\phi} \quad (2)$$

F : 要素に働く合力

m : 要素の質量

u : 要素の変位

$\sum f_c$: 要素間の相互作用による力 (要素間のバネとダッシュポットによる力)

$\sum f_{body}$: 要素に働く重力等の体積力

$\sum f_{bound}$: 要素表面に働く表面力の和

N : 要素に働く合モーメント

I : 要素の慣性モーメント

ϕ : 要素の回転変位

$\sum m_c$: 要素間の相互作用力によるモーメント

$\sum m_{bound}$: 表面力によるモーメントの和

これらの式を全ての粒状要素について求めるが、運動方程式を連立して解くのは困難である。そこで、連立方程式を直接解くのではなく時間領域で差分近似することにより数値解析で追跡するのが個別要素法である。以前の時刻の要素の位置より、各接触点に作用する相互作用力を求め、式(1)、(2)により加速度、角加速度を求め、数値積分により変位を求める。任意の円形要素 I、J の間の接触を考える。解析のタイムステップの時間増分を Δt とする。時間 t における I、J の間の座標を (X_i, Z_i) 、 (X_j, Z_j) 半径を r_i, r_j とする。2つの要素 I と J が接触しているかどうかの判別条件は、以下の式で表される。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad (3)$$

ここで、

$$R_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}$$

とする。要素の接触が外れると、式(3)が成り立たなくなる。要素 I、J の中心を結んだ線が要素衝突の法線方向となる。図-1 に示すようにこの線と軸のなす角を α_{ij} とする。 α_{ij} は反時計周りを正とする。この角の正弦と余弦は、

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{ij} &= (Z_j - Z_i) / R_{ij} \\ \cos \alpha_{ij} &= (X_j - X_i) / R_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。接触する2要素 I、J の Δt 間の X、Z、回転方向の変位を $(\Delta X_i, \Delta Z_i, \Delta \phi_i)$ 、 $(\Delta X_j, \Delta Z_j, \Delta \phi_j)$ とおき、要素 I、J 間の相対変位がすべて接触点に集中すると仮定すれば、接触点における法線および接線方向の相対変位増分 ΔU_n (接近を正)、 ΔU_t (反時計周りを正) は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta U_n &= -(\Delta X_j - \Delta X_i) \cos \alpha_{ij} - (\Delta Z_j - \Delta Z_i) \sin \alpha_{ij} \\ \Delta U_t &= -(\Delta X_j - \Delta X_i) \sin \alpha_{ij} + (\Delta Z_j - \Delta Z_i) \cos \alpha_{ij} \\ &\quad - r_i \Delta \phi_i - r_j \Delta \phi_j \end{aligned} \quad (5)$$

ΔU_n の式の右辺第3項と第4項は要素の回転による変位増分を示している。接触点に想定する力学モデルを図-2 に示す。

K : バネ定数

μ : 粘性ダッシュポットの粘性係数

要素 I に法線方向に作用する力を求める。 ΔU_n による法線方向の弾性スプリングの力の増分を $[\Delta e_n]_t$ 、粘性ダッシュポットの力を $[d_n]_t$ とする。法線方向のバネ定数を k_n 、粘性定数を η_n とすれば、以下の関係が求まる。圧縮方向を正とすれば、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} [\Delta e_n]_t &= k_n \Delta U_n \\ [d_n]_t &= \eta_n (\Delta U_n / \Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

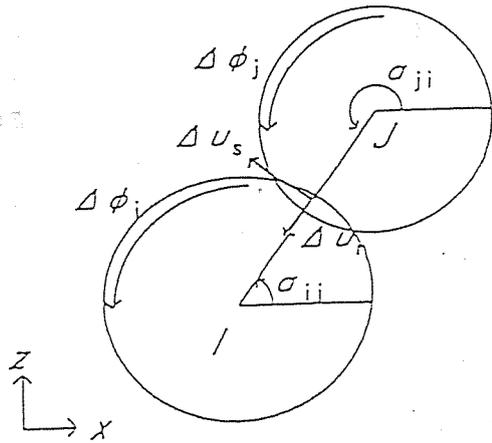


図-1 要素の接触時の相対変位

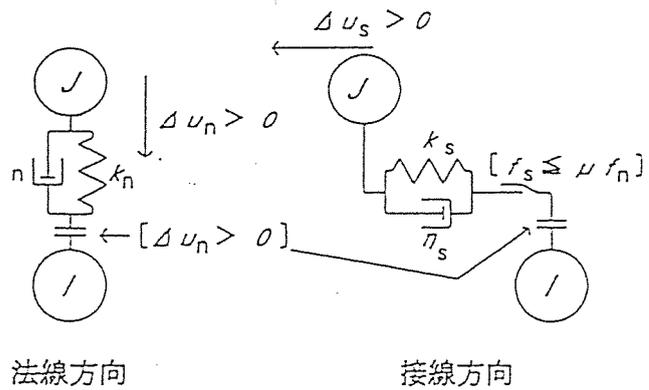


図-2 個別要素法の接触点モデル

ΔU_n が正の時、I-J間の法線方向弾性スプリングの受け持つ力の増分は正となり反発力が増すことになる。

同様に、接線方向の力も求まる。接線方向変位増分 ΔU_s による接線方向の弾性スプリングの力の増分を $[\Delta e_s]_t$ 、粘性ダッシュポットの力を $[d_s]_t$ とする。バネ定数を k_s 、粘性定数を η_s とすれば、以下の関係が求まる。 ΔU_s が正の時、I-J間の接線方向弾性スプリングの受け持つ力の増分は正となり要素 I、J は接点において反時計方向の接触力を受けることになる。

$$\begin{aligned} [\Delta e_s]_t &= k_s \Delta U_s \\ [d_s]_t &= \eta_s (\Delta U_s / \Delta t) \end{aligned} \quad (7)$$

増分が得られるので $[e_n]_t$ 、 $[e_s]_t$ も求まる。ここで、要素間の引張り力を認めず、要素間の接触が外れた場合には法線・接線方向ともに力を働かなくするため、以下の条件を付加する。

$$\begin{aligned} [e_n]_t < 0 \quad \text{のとき} \\ [d_n]_t = [e_n]_t = [d_s]_t = [e_s]_t = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

以上より時刻 t における 2 要素間に作用する法線方向と接線方向の力 $[f_n]_t$ と $[f_s]_t$ が求まる。

$$\begin{aligned} [f_n]_t &= [e_n]_t + [d_n]_t \\ [f_s]_t &= [e_s]_t + [d_s]_t \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、接線方向の接触力はクーロンの摩擦則に従うと仮定して、 $[f_t]_i$ に以下の条件を付加する。

$$\begin{aligned} ABS([f_t]_i) &> ABS(\mu [f_n]_i) \\ [f_t]_i &= \mu [f_n]_i \times SIGN([f_t]_i) \end{aligned} \quad (10)$$

μ は、要素間の摩擦定数、 $SIGN()$ は()内の正負の符号をとる関数とする。次に、この要素Iと接触している全ての要素Jとの間の合力を求める。この際、要素は接触点において相互作用の力を受けている。この力により要素の剛体的並進運動と回転運動が引き起こされるとする。

接触点での局所座標から全体座標への変換を用い要素IにおけるX方向合力を f_{xi} 、中心周りのモーメントを f_{mi} (反時計回りを正)とすれば、以下の式により求められる。

$$\begin{aligned} [f_{xi}]_i &= \sum \{-[f_n]_{ij} \times \cos \alpha_{ij} - [f_t]_{ij} \times \sin \alpha_{ij}\} + f_{bx_i} \\ [f_{zi}]_i &= \sum \{-[f_n]_{ij} \times \sin \alpha_{ij} - [f_t]_{ij} \times \cos \alpha_{ij}\} + f_{bz_i} \\ [f_{mi}]_i &= \sum \{[f_t]_{ij}\} + m b_i \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 \sum は要素Iと接触している全ての要素Jについての総和を表す。また f_{bx_i} 、 f_{bz_i} は各方向の時刻tにおける物体力(重力等)と境界外力の和、 $m b_i$ は境界外力によるモーメントを示す。なお、要素Jの受ける要素間力は要素Iの受ける要素間力の反作用力であり、要素Jの受ける合力も同様に求まる。

要素IのX軸方向変位を X_i 、Z軸方向変位を Z_i 、回転方向変位を ϕ_i とする。要素Iの質量を m_i とすれば、ニュートンの法則により要素に働く加速度

$[\ddot{x}_i]_i$ 、 $[\ddot{y}_i]_i$ 、 $[\ddot{\phi}_i]_i$ を以下のように決める。

$$\begin{aligned} [\ddot{x}_i]_i &= [f_{xi}]_i / m_i \\ [\ddot{y}_i]_i &= [f_{zi}]_i / m_i \\ [\ddot{\phi}_i]_i &= [f_{mi}]_i / I_i \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 I_i は要素Iの慣性モーメントとする。

要素の速度、変位は上式の加速度を台形則等で積分することで順次求めることができる。次のタイムステップでは今回求めた新たな要素変位を用いて同じ計算を続けていく。

2. 4 個別要素法のフレッシュコンクリートへの適用

本研究においては、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる二成分系と考える。コンクリートには、水、セメント、細骨材、粗骨材、その他混和剤等、種々の構成要因があるが、これら全てを一つずつ解析の構成要因とすると、まだ未知のシュミレーションパラメーターが、多数になり、パラメーターの決定が非常に困難になるばかりか、解析時間も非常に長くなり、シュミレーションの意味を成さなくなる。

高スランプフローのフレッシュコンクリートの流動性を考える場合は、フレッシュコンクリートを単体からなる一成分系とみなす場合もある。しかし、二成分系として考えた方がシミュレーションの難度は上がるが、フレッシュコンクリート中の粗骨材の運動を適確に捕らえることができるため、より、現実的なシミュレーションとなるばかりでなく、水平方向鉄筋等の流動に対する障害物の影響もシミュレーションできるため、適応と発展の範囲が広い。

シミュレーションに用いる粗骨材の粒径は5~20mmとし土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とした。シミュレーションに用いる要素の粒径は一定の方が、要素と要素の接触判定などを行う上で都合が良いが、一定な粒径を用いると要素間の空隙が大きくなり、破壊包絡線が生じることが多いため、正確なシミュレーションを行うことは困難である。これに対して、実在する粗骨材と同様のバラつきを持った要素の集合を用いると、空隙率や単位体積重量は実際の粗骨材と同じになり、理想的なシミュレーションが可能となる。

シミュレーションに用いた要素の形状は完全な円形である。実際の粗骨材は表面に凹凸があるため、円形要素より表面摩擦が大きいので、要素間の摩擦定数なるパラメーターを設けて対応した。

さらに、本研究では、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる二成分系として考えるため、それぞれの粗骨材の周辺にモルタルが付着している様子を粒径を1.2倍し、修正粒径とすることによって理想化した。(図-3)力の伝達は、このつけ加えられたモルタル部分で行われているとした。また、要素どうしの重なり合いについては、粗骨材どうしが重なり合わぬようにバネ定数などの決定に配慮をした。

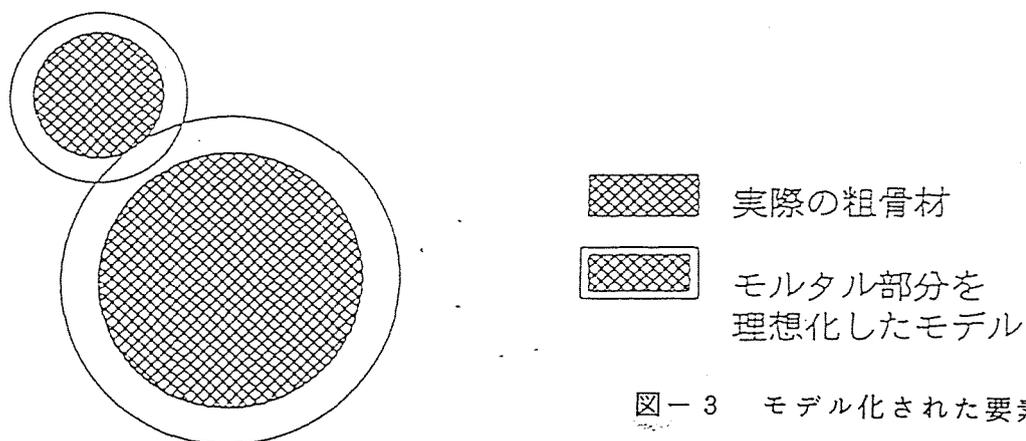


図-3 モデル化された要素

第 3 章 個別要素法プログラムの構造

3. 1 概要

本研究の個別要素法は、要素数、タイムステップの設定等によって解析時間に大きな影響を及ぼす。スランプ試験の解析における解析時間は、ワークステーションで数時間、個人用パーソナルコンピュータであれば、数十時間を要する。また、よりよい精度をめざすためには多くの解析時間を必要とする。ロート流下試験の解析になると最低でも、ワークステーションで半日、個人用パーソナルコンピュータの場合、データ数が多すぎて解析できない場合も生じる。今後、より複雑なモデルを解析する場合、予想される解析時間は膨大なものとなるであろう。近年の計算機の高性能化に伴い、計算機によるシミュレーションがさまざまな分野で実用化されているが、この解析時間の問題は、現時点の最大の問題となっている。解析に要する時間、人件費、設備費などを考慮した場合、実際に実験を行い結果を確かめる方が経済的であればシミュレーションシステムの開発は無意味になってしまう。そのような中で実用化を目指すためには解析時間の短縮、精度の良い結果を得るための信頼のおける初期データの作成が大きな課題となる。シミュレーションのパラメーターの設定のしかたによっては、無意味に時間を浪費する事に成りかねないので以下、パラメーターの設定について述べる。

3. 2 解析時間短縮のための手法

個別要素法では、要素の中心間距離とそれぞれの半径から接触判定をしているが、要素数が大きくなってくると接触判定に要する計算時間が大きな負担となってくる。そこで今回使用したプログラムでは計算のはじめに領域をブロックで区切り、各要素がどのブロックに入っているかを記憶しておく手法を取った。2次元での解析なので、X方向とZ方向に適当な大きさを計算領域を区切り、要素がどのブロックにはいるかを記憶させ、そのブロックの接するブロックのみ接触判定を行う。この手法ならば、要素数が大きくなっても接触判定に要する計算を最小限にとどめる事ができる。この手法は非常に有効であるが、一つのブロックの大きさがその効果に大きく影響する。要素の粒径に対してブロックの大きさが大きすぎる場合、一つのブロックに多くの要素が入ってしまい、効果が薄れてしまう。逆にブロックの大きさが小さいと接触しているはずの要素が正しく判定されない。以上から最適なブロックの大きさは粒径と同じ大きさであると考えられる。今回は要素の粒径がそれぞれ違う値であったので、最大粒径にブロックの一辺の大きさを合わせたが、計算時間の短縮には要素の粒径をすべて同じにする方がより良いと言える。

3. 3 初期データの作製

3. 3. 1 タイムステップ

タイムステップの求める方法は、ダッシュポットの効果をなくし、十分な高さから要素を落下させる方法である。この場合完全にニュートン式に従うので、この結果より精度のを判定しタイムステップの最低ラインを決定した。スランプ試験の解析では要素の変位を 1.0×10^{-4} 秒ごとに解析した。タイムステップは小さくするほどに精度が向上するが、それとともに計算時間が増大する。タイムステップに関係する要因としては、要素の速度があげられる。図-4に示すように速度が増大すると、接触していなかった要素が次の変位を出力したときには、大きく接触しているという現象が起きる。すると要素間のバネが実際以上に圧縮され、その反発力より発生する速度により正しい解析結果が得られない。第二の要因としては、要素間のバネ定数の大きさがある。上記のように実際以上に要素間のバネが圧縮された場合、バネ定数が大きいと、要素に加えられる力が非常に大きくなり、接触するごとに要素の速度が増大してしまう事がある。ロート流下試験になると、 $2.0 \sim 3.0 \times 10^{-5}$ が最低ラインでこれ以上大きくすると小さな要素が発散してしまう。そこで本研究では、スランプフロー試験の解析ではタイムステップ 1.0×10^{-4} 、ロート流下試験では、 $1.0 \sim 2.0^{-5}$ とした。

3. 3. 2 床の摩擦定数

スランプフローの解析では、床の摩擦定数は大きく解析値に影響する。しかし、床の摩擦定数は同じ材質でも使用環境により大きく違ってくる。そのため、初期データを設定する際最適な値を求めることは出来ない。骨材をモルタルが包んでいるというモデルを想定したので実験で確かめる事もできなかった。今回の解析では、適当な値を最初に決めて解析の段階で微調整をした。ロート流下試験は、時間測定する物なので、床の摩擦定数については、考慮しなかった。

3. 3. 3 要素の半径

今回の解析では、要素の半径を各要素ごとに変化させたが、小さな要素が多いと、一つのブロックに多くの要素が入ってしまい、解析時間に大きく影響し、小さな要素が非常に大きな運動エネルギーを持ち正しい解析が出来なくなってしまう。これを回避する方法としては、タイムステップをより小さくする事であるが、解析に要する時間を考えるとこの方法にも限界がある。今回のスランプ試験の解析では、初期データでは小さな要素も多数入っていたが、解析の途中で領域の外にはじき飛ばされてしまう事が多く、小さな要素はデータの粗粒率や全体の面積に影響を及ぼさない範囲で取り除いた。しかし、ロート流下試験では、小さな要

素がロートに付着している場合も認められたので、ロート流下試験では、もとよりタイムステップをスランプの解析に比べ小さく取っているので、小さな要素を取り除きはせず、土木学会標準粒度範囲に正確にしたがった。

3. 3. 4 壁要素

今回の解析のデータでは、小さな要素を多数組み合わせで作製している。接触判定は内部要素だけでなく壁要素とも行う。極端に小さくすると、一つのブロックに多数の要素が入り、接触判定の部分に無駄が生じ、解析時間に大きく影響してしまうので、精度に影響の出ない範囲で要素の大きさを決定した。将来的に複雑な解析を行う場合、要素を組み合わせで枠を作製する方法は時間的に大きな損失があると思われるので、直線で領域を区切るプログラムを作成してみたが直線と要素との不確定変数が増えること、また、本研究では、時間的にそれほど大差は認められなかったので、プログラムの構造的に簡単な要素を配置するものを選択した。

3. 3. 5 要素間のバネ定数

モルタルに包まれた骨材のモデルを考えた場合、そのバネ定数を実験などから求める事は難しい。本研究では、粒径の約2割をモルタル部と考えているので、要素の半径を決定する際、ロート、スランプコーンに、要素が粒径の2割以上が重ならない状態で満たされるように考慮し、バネ定数を採用する方法をとった。途中からバネ定数を大きくすると要素が発散してしまい、計算を続ける事が不可能であるため、バネ定数の変更は行わなかった。

3. 3. 6 要素間バネの引張りを認める割合

個別要素法では、要素の接触により力のやりとりが行われているが、要素間バネが圧縮のみ作用する場合、離れる要素を引き留めようとする粘性力は全く考慮されない。フレッシュコンクリートの場合、骨材と骨材の間には粘性力が存在し、その性状に多大な影響を及ぼしている。解析において粘性力を全く考慮しないと一つの要素が完全に分離し運動することが起こりうる。そこで、解析においての粘性力は要素間のバネの引張りの力で表した。一度接触した要素が離れる場合、ふたつの要素の半径の和の数パーセントの距離まで要素間バネの効果を認めた。

3. 3. 7 要素間のダッシュポット定数

ダッシュポット定数が大きくなりすぎると要素が接触した瞬間に過制御により

逆の方向に大きな速度が発生してしまう。ダッシュポット定数を小さくすることは可能であるが、実際にはばね定数によりダッシュポット定数はおおむね決定される。そこで、過制御の起こらない安全側の範囲で変化させ、スランプフロー、ロート流下時間に対する影響を調べた。バネ定数を大きくすると、ダッシュポット定数の許容範囲も大きくなるが、本研究においては、スランプフロー、ロート流下試験の解析の充填状態より決定したバネ定数は変化させずにパラメーターの及ぼす影響を考えたので、ダッシュポット定数はバネ定数の約4分の1とし、それ以上大きな値は用いなかった。

3. 4 スランプデータの作製

スランプコーンの中に一つ一つ要素を配置する方法が効率としてはよいと考えられるが、(以下配置法と記す)要素の半径がそれぞれ違う場合、同じような半径を持つ要素がかたまってしまう恐れがある。そのため、今回はスランプコーンの上にサイロをつくり、要素を上から発生させ、重力により落下させて、スランプコーンの中で、なるべくランダムに要素が配置されるようにした(以下落下法と記す)。

第4章 スランプ試験およびロート試験

4. 1 概要

フレッシュコンクリートのワーカビリティを評価する指標として最も一般的に使用されているものが、スランプ試験である。しかし、フレッシュコンクリートの充填性は主にスランプフロー試験だけでは不十分である。そこで、本研究ではフレッシュコンクリートの充填性を評価する一方法として、ロート試験（ロートの中をコンクリートが流下するのに要する時間を測定する方法）をスランプ試験を補足するものとして取り上げた。ロートの形は、従来の円形の物と二次元の変形を強制的に与える角形の物と二種類行った。

コンクリートの配合とスランプフロー値、ロートの流下時間の関係について、考察した。

4. 2 ロート流下試験の意義

既往の研究で、フレッシュコンクリートの充填性は、均質な状態での流動性に関する広がり能力「変形ポテンシャル」および時間的依存性「変形速度」と、流動に伴う「分離抵抗性」を併せて評価する必要があること、また、変形ポテンシャルが大きくなるほど流動に伴う材料分離が生じやすくなる傾向にあることが、分かっている。

そこで、ロート流下試験によって得られる流下時間を用いると、コンクリート全体が均質に流下する場合、変形ポテンシャルとは独立粘性に起因する変形速度を評価する簡便な指標として用いることができ、流下時に骨材のアーチングが生じる場合には流動に伴う分離の度合いを表現する尺度とすることができる。また、スランプフロー試験では表現しえなかった粗骨材容積の違いによる、充填性への影響をも考慮することができる。

4. 3 実験配合

表-1の材料、表-2の配合を用いてスランプ試験、およびロート試験二種類を行いスランプフロー、およびロート流下時間を計測した。高性能AE減水剤はポリカルボン酸エーテル系の複合体、増粘剤はセルロース系水溶性高分子化合物を用いた。粗骨材の最大寸法は20mmとし、シミュレーションと同様に土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とした。増粘剤の使用量は、水中不分離性コンクリートの配合を一つの目安としている。増粘剤はフレッシュコンクリートに粘性を与えることにより、水中または海水中での洗いに対する抵抗性を増大させている。粘性の増大は材料分離に対する抵抗性を大きくするにも効果があり、流動性の高いコンクリートにはしばしば用いられる。増粘剤の使用量 1.0kg/m^3 のコンク

リートは最近盛んに研究が行われている高流動コンクリートと同じ使用量である。増粘剤の使用量の変化がフレッシュコンクリートに及ぼす影響を考慮するため2.0kg/m³と2種類行った。本研究の配合では、単位セメント量が多いため、実際にこのコンクリートを施工に用いるとセメントの水和熱による温度ひび割れが発生し易いと考えられる。そのため、実施工では発熱量の少ない石灰石微粉末や高炉スラグ微粉末を結合材として用いる。しかし、本研究ではセメント以外の結合材は使用しないことにした。その理由は、結合材は流動性状に与える影響が大きいいため、この種類を増やすと、コンクリートを構成する各材料と流動性状との関連性が把握しにくくなるためである。このことより、セメント以外の結合材の影響はシミュレーションシステムがある程度確立してから考えることとしたのである。

実験方法

スランプ試験の実験方法は「JIS A 1101 スランプ試験方法」に従って行った。スランプ試験の目的はフレッシュコンクリートのコンシステンシーを測定しワーカビリティを判定し、シミュレーションを確立するための指標にするためである。

[使用機器] スランプコーン、突き棒、スランプ測定器、ハンドスコップ
水密性平板、ストップウォッチ
アイリッヒ型ミキサー

- [実験方法] (1) 表-1, 2に示す材料を用意する。
(2) コンクリートミキサーの内面を湿布でふく。
(3) 細骨材を全量の2分の1だけミキサーに入れる。
(4) セメントの全量をミキサーに入れる。
(5) 増粘材(セルローズエーテル)の全量をミキサーに入れる。
(6) 細骨材の残りの2分の1をミキサーに入れる。
(7) ミキサーの翼を回転させ、空練りを5分間行う。
(8) 全水量の90%の水をミキサーに入れる。
(9) ミキサーの翼を回転させ、練り混ぜを5分間行う。
(10) 粗骨材の全量と残りの10%の水をミキサーに入れる。
(11) ミキサーの翼を回転させ、練り混ぜを5分間行う。

以上で、コンクリートの練り混ぜを終え、スランプ試験およびロート流下試験2種類を行う。

(1) --- スランプ試験 ---

- (1.1) スランプコーンの内面と水密性平板を湿布でふき、水密性平板の上にコーンを鉛直に立ててしっかりおさえる。
(1.2) コーンの容積の3分の1ずつ、3層に分けて試料をつめる。各層は、突き棒でならした後25回均等に突く。(つめ始めてから3分以内につめ終わる。周辺部からしだいに中央

部に突くようにする。)

- (1.3) 最上層を突いた後、コンクリートの上面をコーンの上端にあわせ小手で平らに仕上げる。
- (1.4) 直ちに、コーンを鉛直上方に静かに引き上げる。(コーンは2～3秒で引き上げ終わるようにする。)
- (1.5) コンクリートの下部の広がりを測定し、これをスランプフロー何センチメートルと表示する。

(2) --- ロート流下試験(角型, 筒型) ---

- (2.1) ロートの内面を湿布でふき、ロート内に均質にコンクリートが広がるように注意しながらつめる。
- (2.2) コンクリートの上面をコーンの上端にあわせ小手で平らに仕上げる。
- (2.3) 直ちに、ロート下部のストッパーをはずし、コンクリートを流下させる。
- (2.4) 流下時間は、吐出口の開放時から、ロート上部より観察して、吐出口から下の空間が見えるまでとし測定する。
- (2.5) 角形ロートを始めに実験し、もう1度、ミキサーで練り混ぜを行い、次に筒形ロートで実験を行う。

表-1 各材料の品質

材料	品質
セメント	普通ポルトランドセメント 比重: 3.15
細骨材	表乾比重: 2.63 FM: 2.85
粗骨材	表乾比重: 2.68 FM: 6.88
増粘剤	セルロースエーテル系水溶性高分子化合物
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系の複合体

表-2 配合表

W/C (%)	s/a (%)	Unit Content (kg/m ³)						NO.
		W	C	S	G	VA	Ad	
50	40	175	350	752	1108	2.0	C×2.0 OR C×2.5 (%)	1
		175	350	752	1108	1.0		2
		190	380	701	1068	2.0		3
		190	380	701	1068	1.0		4
		205	410	664	1017	2.0		5
		205	410	664	1017	1.0		6

4. 4 実験結果とその考察

表-3, 4 にスランプフロー試験, ロート流下時間の結果を示す

表-3 スランプフロー試験, ロート (筒型) 流下試験結果

高性能 A E 減水剤使用量 C x 2.0 (%)			高性能 A E 減水剤使用量 C x 2.5 (%)		
NO	スランプフロー (CM)	流下時間 (S)	NO	スランプフロー (CM)	流下時間 (S)
1			1	48.0	58.44
2	53.0	22.33	2	62.0	42.63
3	50.0	30.36	3	55.0	65.00
4	67.0	14.35	4	68.0	28.78
5	52.0	35.06	5	60.0	43.89
6	79.0	27.00	6	70.0	13.55

表-4 スランプフロー試験, ロート (角型) 流下試験結果

高性能 A E 減水剤使用量 C x 2.0 (%)			高性能 A E 減水剤使用量 C x 2.5 (%)		
NO	スランプフロー (CM)	流下時間 (S)	NO	スランプフロー (CM)	流下時間 (S)
1			1	48.0	99.00
2	53.0	47.77	2	62.0	79.00
3	50.0	36.00	3	55.0	93.00
4	67.0	65.29	4	68.0	62.49
5	52.0	53.83	5	60.0	58.03
6	79.0	31.26	6	70.0	34.62

4. 4. 1 スランプフロー試験の実験結果とその考察

図-4 にスランプ試験、高性能 A E 減水剤使用量 2. 0 % の場合、図-5 に高性能 A E 減水剤使用量 2. 5 % の場合の、単位水量とスランプフローの関係を示す。増粘剤の使用量が 1. 0 kg/m³、2. 0 kg/m³ の場合とも、著しく直線的な関係がある。既往の研究結果より、増粘剤の使用量が 3. 0 kg/m³ 以下の場合には、その使用量は直線的に粘性に影響を及ぼすことが分かっている。これから考えると、スランプ試験におけるスランプフロー値は、正しく粘性を評価しているといえる。これと同時に、増粘剤の使用量が一定の場合、単位水量によるスランプフローの予測が可能であることがわかり、従来から考えられている、単位水量とコンシステンシーは直線的であると言う説が立証された。

図-6, 7 に、スランプ試験における、増粘剤の使用量とスランプフローの関係を示す。図-7 の高性能 A E 減水剤使用量 2. 5 % の場合を見ると、単位水量の違う直線が平行に走っていることより、単位水量の違いは有っても、スランプフローに及ぼす増粘剤の使用量の影響は一定であることを示している。しかし、高性能 A E 減水剤使用量 2. 0 % のときは、その直線の傾きは著しく異なっており、増粘剤の使用量より、スランプフローの予測は難しいことがわかる。図-8 には高性能 A E 減水剤の使用量とスランプフロー値の関係をしめすが、本実験では、混和剤を加えなければ、スランプ 8 CM 程度のコンクリートを、高性能 A E 減水剤を多量にしようすることにより、強制的にスランプフロー値を増大させているので、高性能 A E 減水剤を増すことによるスランプフロー値への効果はあまり見られない。しかし、注目する点は、むしろ、スランプフロー値よりも、増粘剤、単位水量に及ぼす影響で、高性能 A E 減水剤の使用料 2. 0 % では、増粘剤使用量 1. 0, 2. 0 kg/m³ の場合では、スランプフロー値に大きなばらつきがある。

本研究に用いたものとは違う成分の高性能 A E 減水剤を使用した場合の、単位水量とスランプフロー値の関係を図-10 に、増粘剤使用量とスランプフロー値の関係を図-11

に示す。本研究の場合と、明らかにその混和剤のフレッシュコンクリートへの影響はちがうことがわかる。

つまり、その使用する混和剤の成分、また使用量により、フレッシュコンクリートのコンシステンシーへの影響は全く異なるので、スランプフロー試験のみで、それを短絡的に決定することはできない。

4. 4. 2 ロート流下試験の実験結果とその考察

図-12, 13 にスランプフロー値とロート流下時間の関係を示す。増粘剤の使用量 1. 0 kg/m³ を図-12 に、2. 0 kg/m³ を図-13 に示す。両図よりスラ

ンプフロー値によって表される変形ポテンシャルと筒型、角型ともにロート流下時間による変形速度は独立したものであることを示している。同一スランプフローであってもロート流下試験の平均流下速度はコンクリートの配合条件によって異なっており、この流下速度を測定することによってモルタルの特性だけでなく骨材の干渉や粘性の程度をも評価できることが、あらためて確認された。

図-14～17に、単位水量とロート流下時間の関係を高性能AE減水剤の使用量別と筒型、角型別に示す。図-14の高性能AE減水剤使用量2.5%は、筒型、角型ともに単位水量により単純に変形速度が増したことを示しており、このような混和剤の使用量の範囲では、容易に配合からその変形速度を推定できることをものがたっている。しかし、図-15の高性能AE減水剤使用量2.0%、増粘剤使用量2.0 kg/m³の場合は流動時間の違いが非常に大きいいため、配合よりその変形速度を推定する事は難しい。

本研究で実験した粗骨材量は、ロート中をフレッシュコンクリートが流下する際、閉塞を起こす可能性を持っているので、粘性の増大による流下時間への影響と、粗骨材の干渉による影響と両方を考慮しなければならない。このような粗骨材量の場合、最も充填性のよい粘性が存在することが、わかっている。

また、スランプフローが40～60 cm程度まではコンクリートの平均流下速度にモルタルの特性が主に影響するのに対し、スランプフロー60 cm以上となると粗骨材どうしが接触することによる干渉が卓越するため平均流下速度が遅くなる場合も存在する。

つまり、粗骨材量を小さくしたコンクリートでスランプフロー65 cm以上としたものは締固め不要コンクリートとして充填性が高いものであるのに対し、本実験のように、単位水量や高性能AE減水剤の添加量を変化させて、スランプフローを65 cm以上としたものは、充填性が低いものであることが知られており、図-14の高性能AE減水剤2.5%と使用量の多いものが全体的に流下速度が遅いことから確認できる。

図-16, 17のロート形状別にしたものからは、予想していたとうり、フレッシュコンクリートの動きを強制的に二次元的に与えた角型の方が、摩擦により、流下時間が長い。しかし、図-14, 15よりその2つの流下時間の直線がほぼ同様の傾向を示していることから、二次元解析の適応性をしめしている。

図-18, 19の増粘剤の使用量とロート流下時間の関係からは、ただ一つを除いて、増粘剤により、粘性を増せば流下時間が大きくなることしめしている。つまり粘性の増大は、ほぼ確実に変形速度に影響を及ぼすものと思われる。

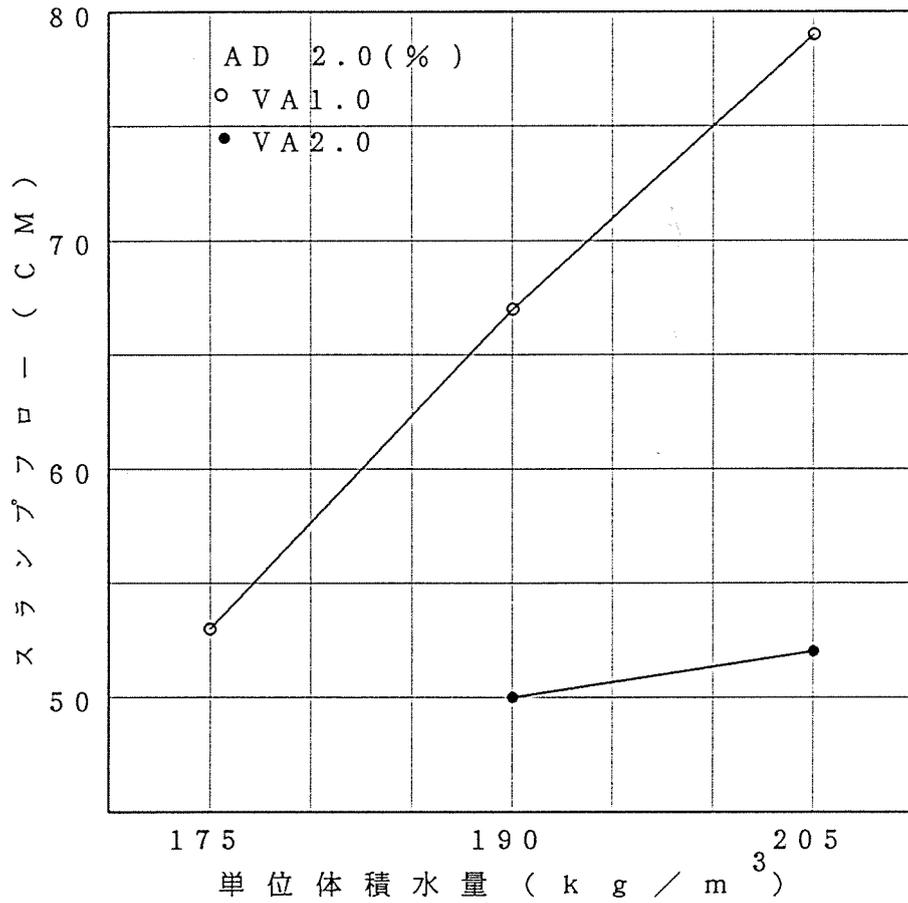


図 - 4 単位水量とスラップフローの関係

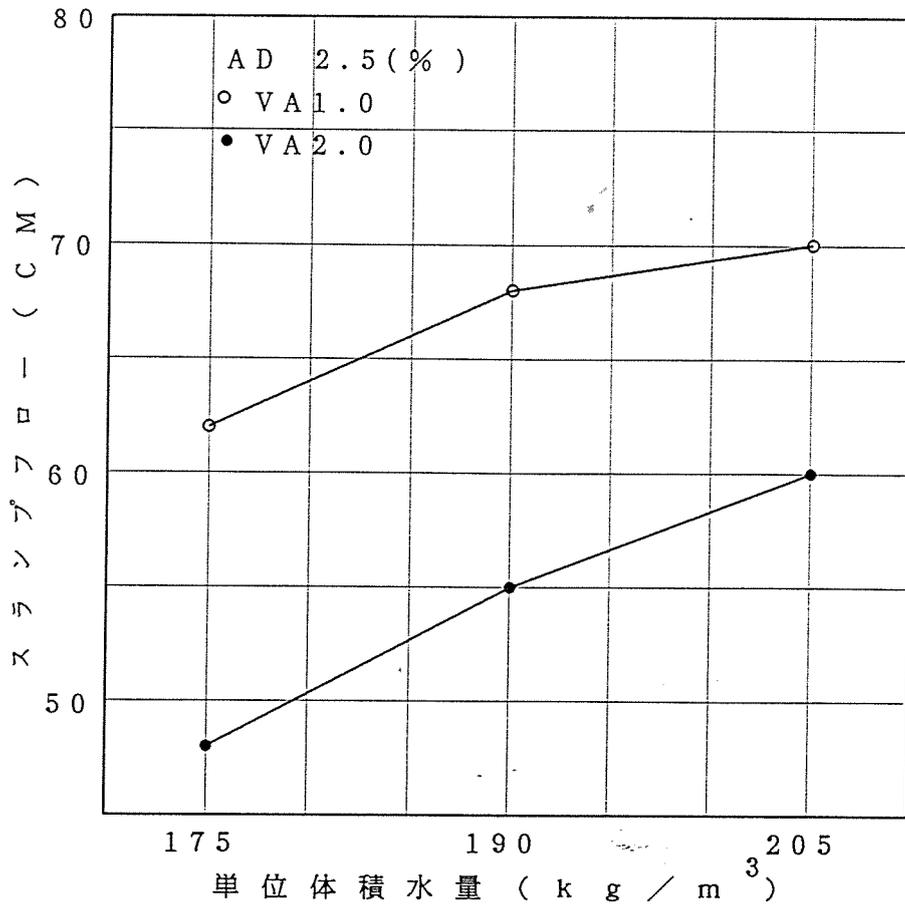


図 - 5 単位水量とスラップフローの関係

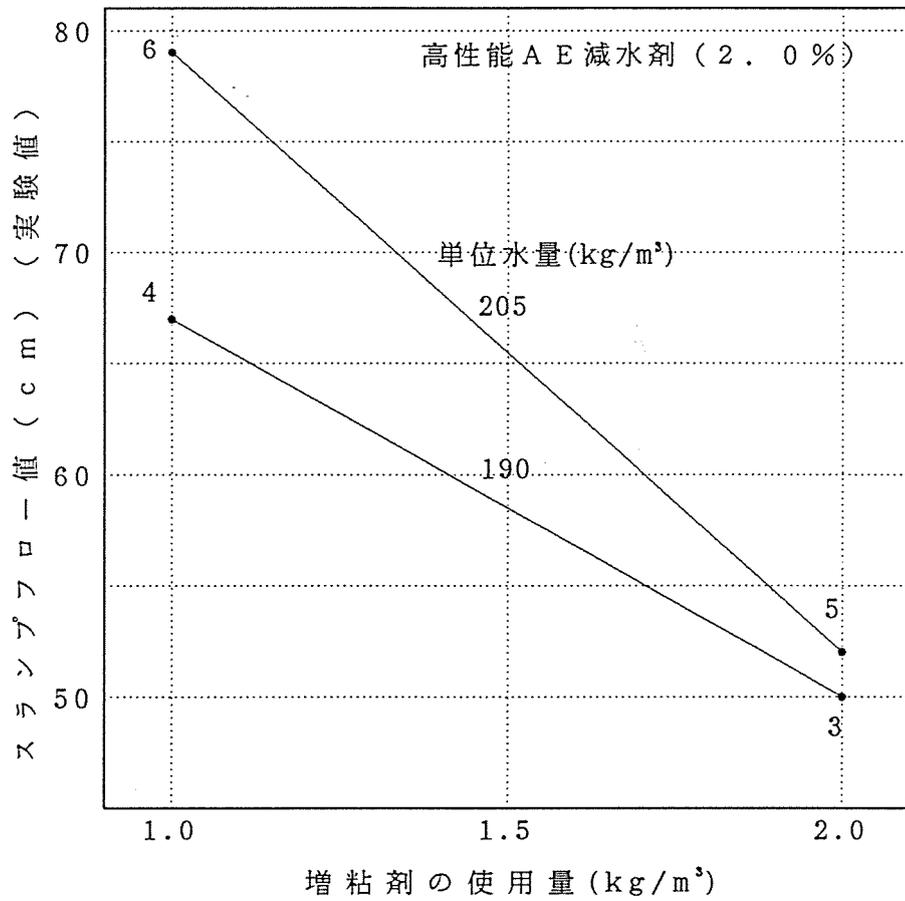


図 - 6 増粘剤の使用量とスランプフロー値の関係

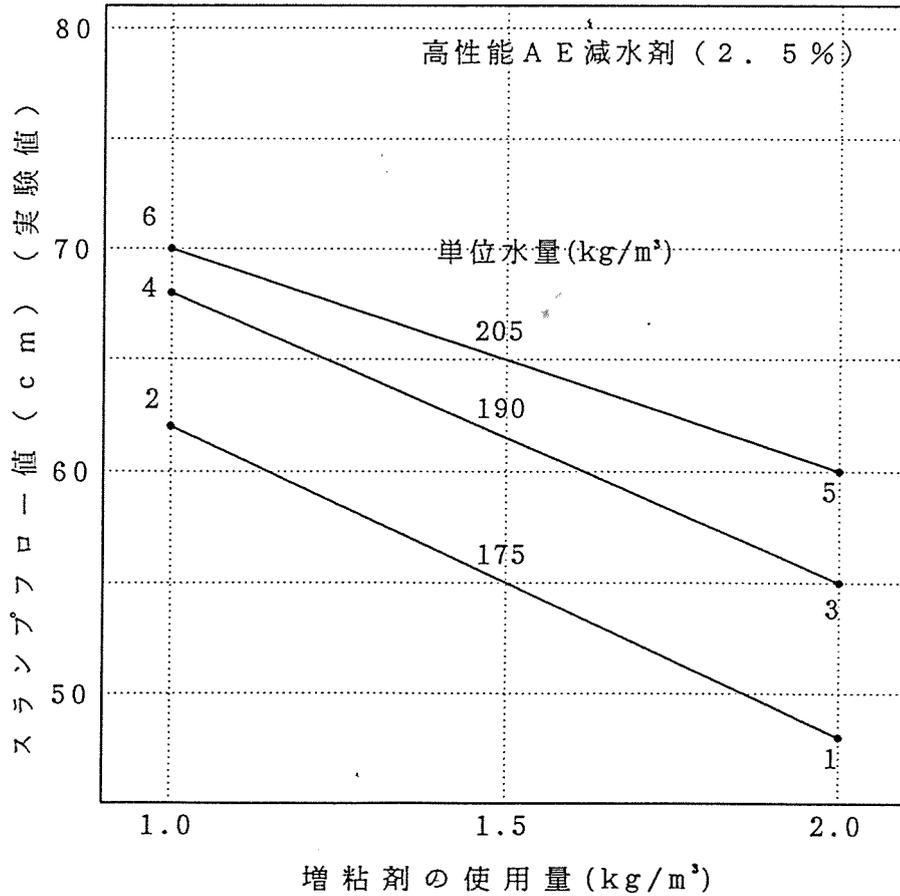
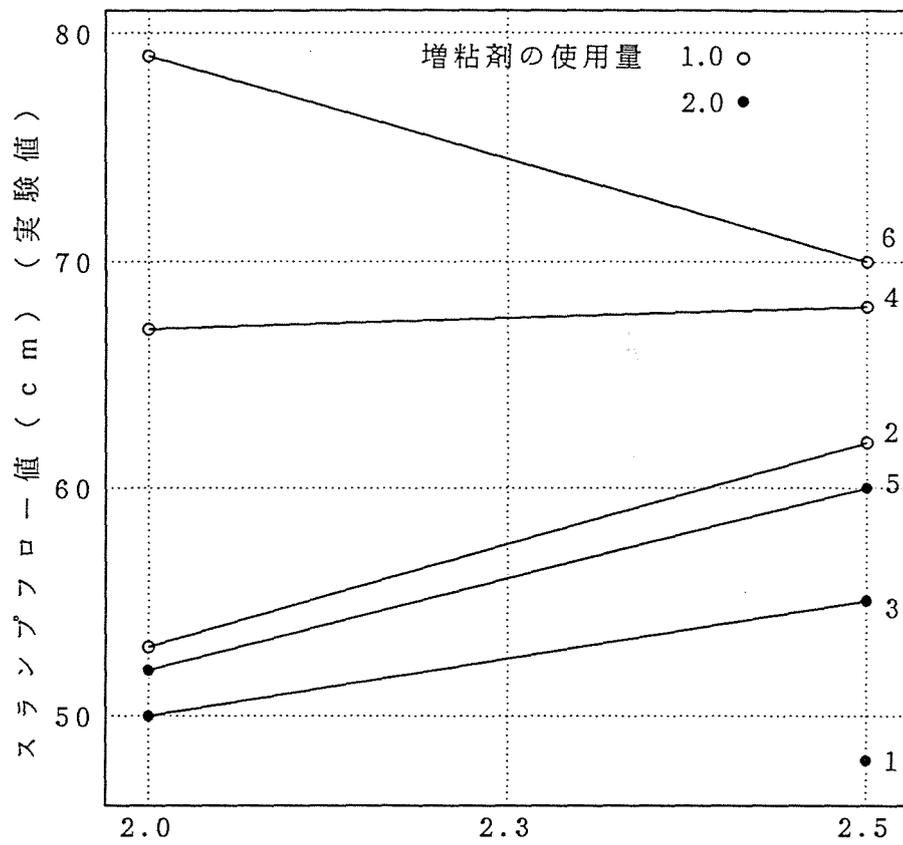


図 - 7 増粘剤の使用量とスランプフロー値の関係



高性能AE減水剤の使用量 (%)

図 - 8 高性能AE減水剤の使用量とスランプフロー値の関係

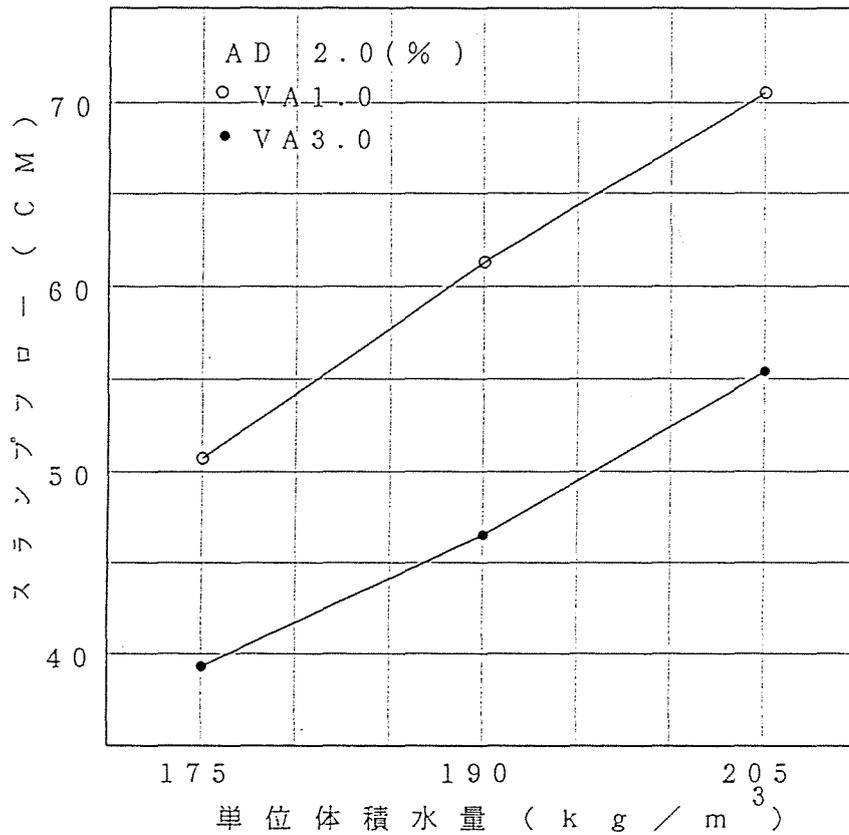


図-10 単位水量とスラップフローの関係
(成分の違うADを用いた場合)

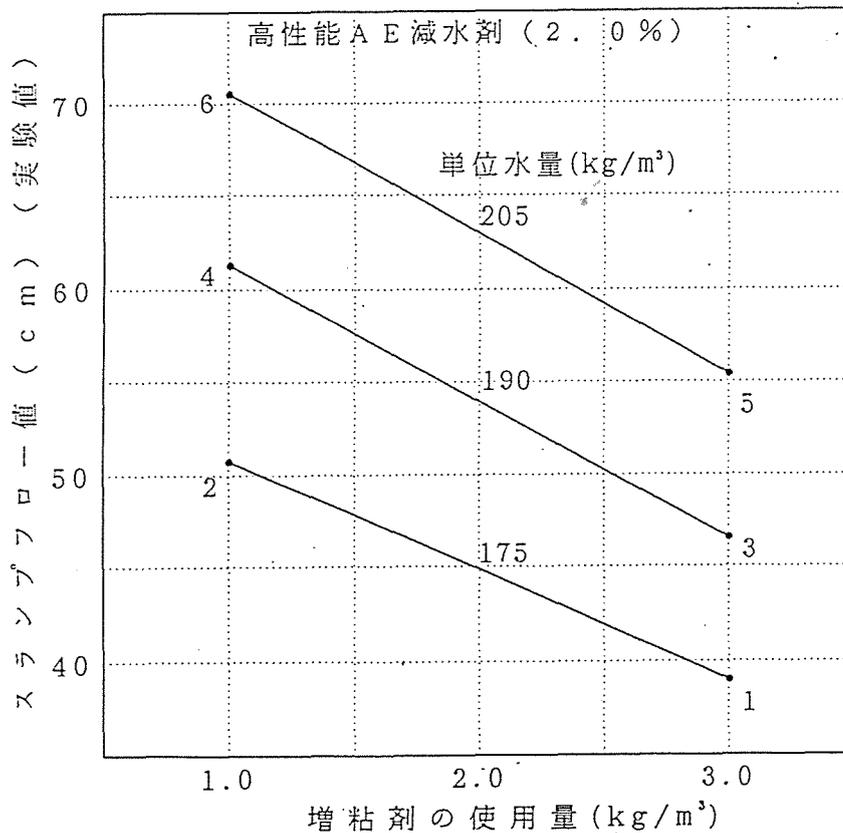


図-11 増粘剤の使用量とスラップフロー値の関係
(成分の違うADを用いた場合)

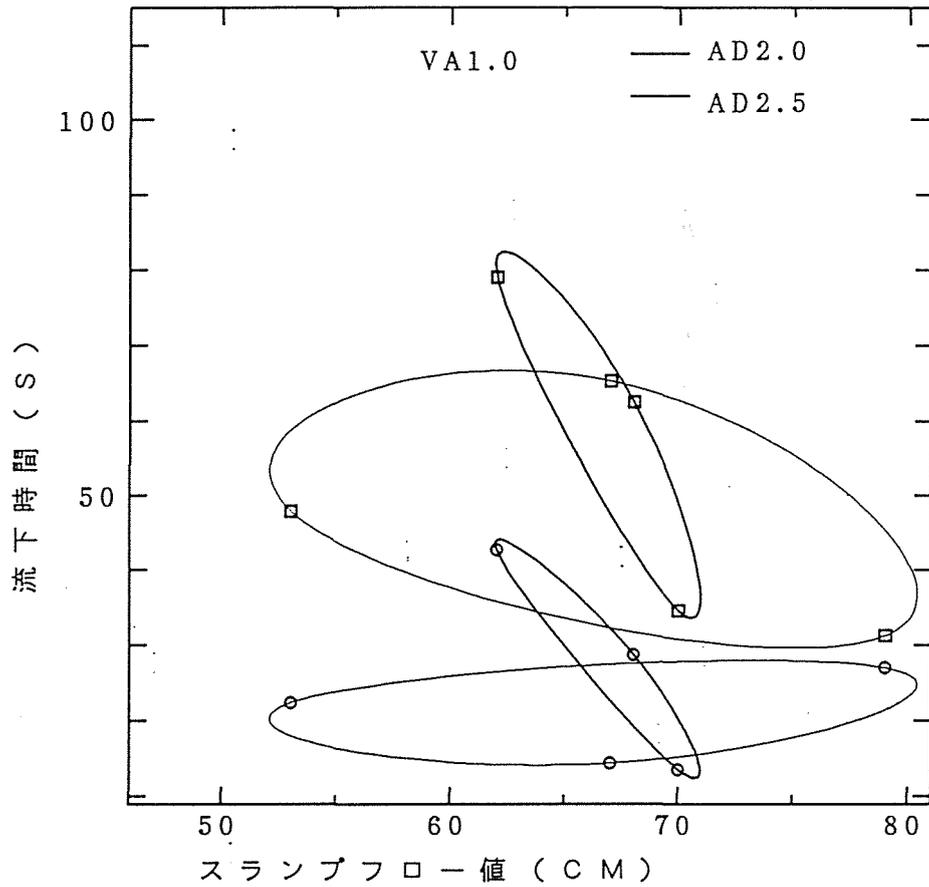


図 - 1 2 スラップフロー値と
ルート流下時間の関係

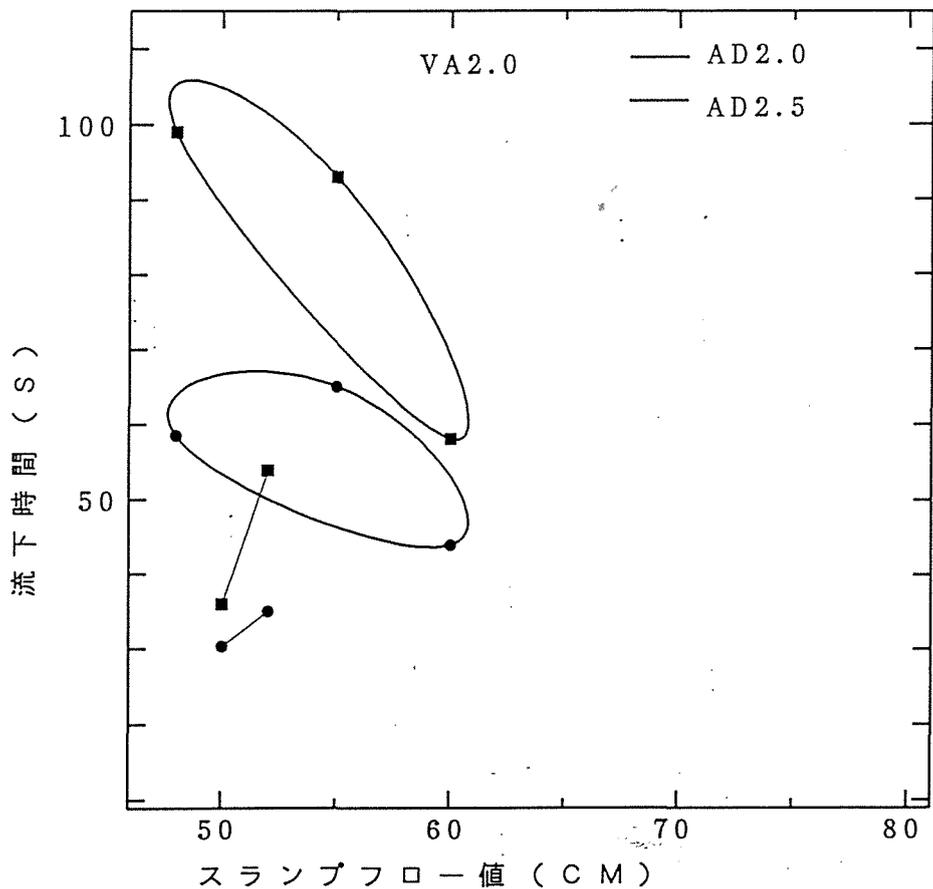


図 - 1 3 スラップフロー値と
ルート流下時間の関係

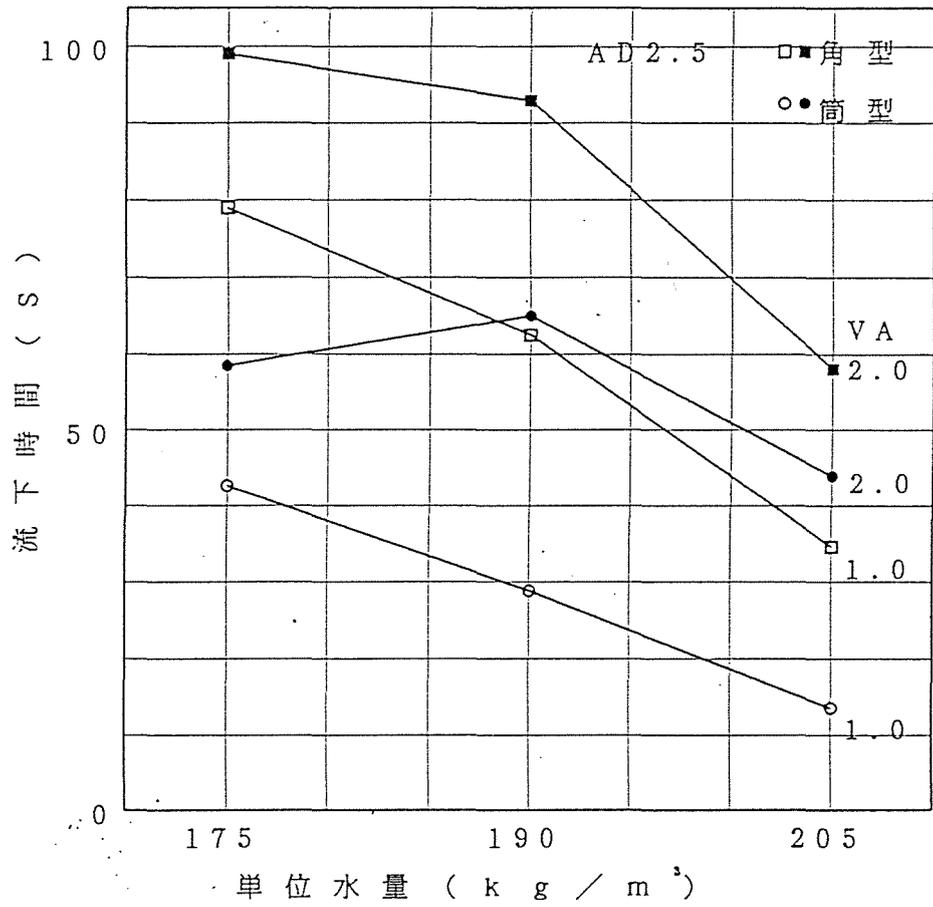


図-14 単位水量と流下時間の関係

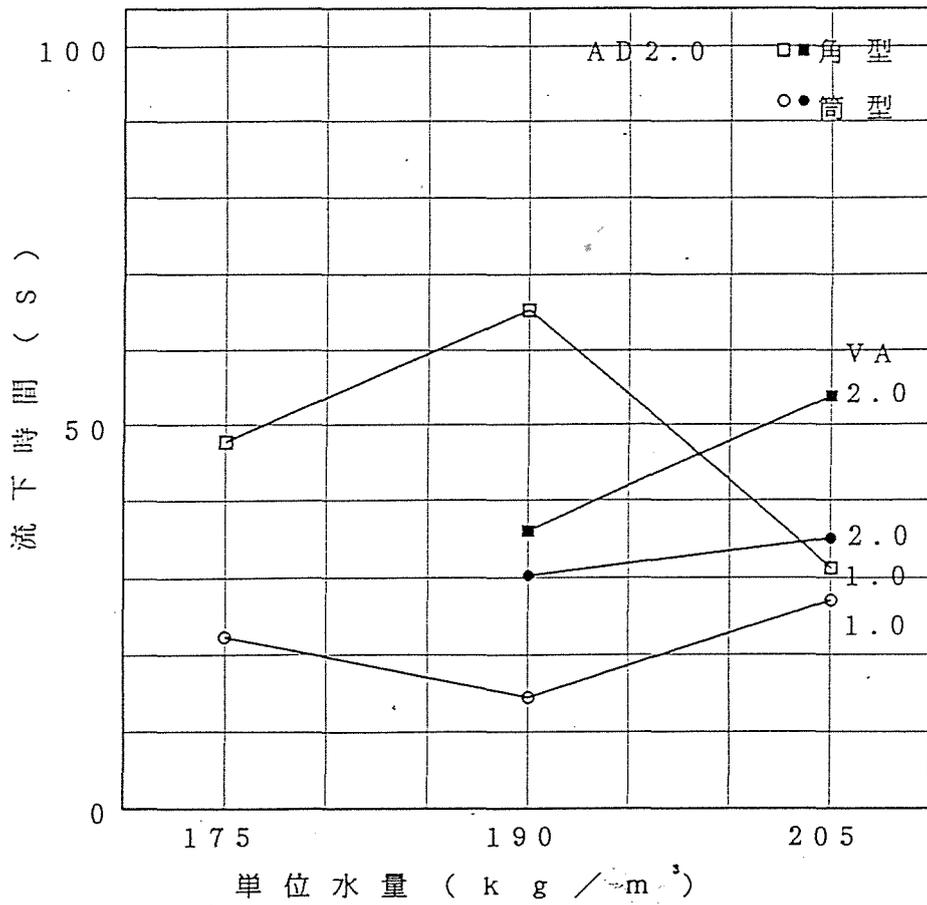


図-15 単位水量と流下時間の関係

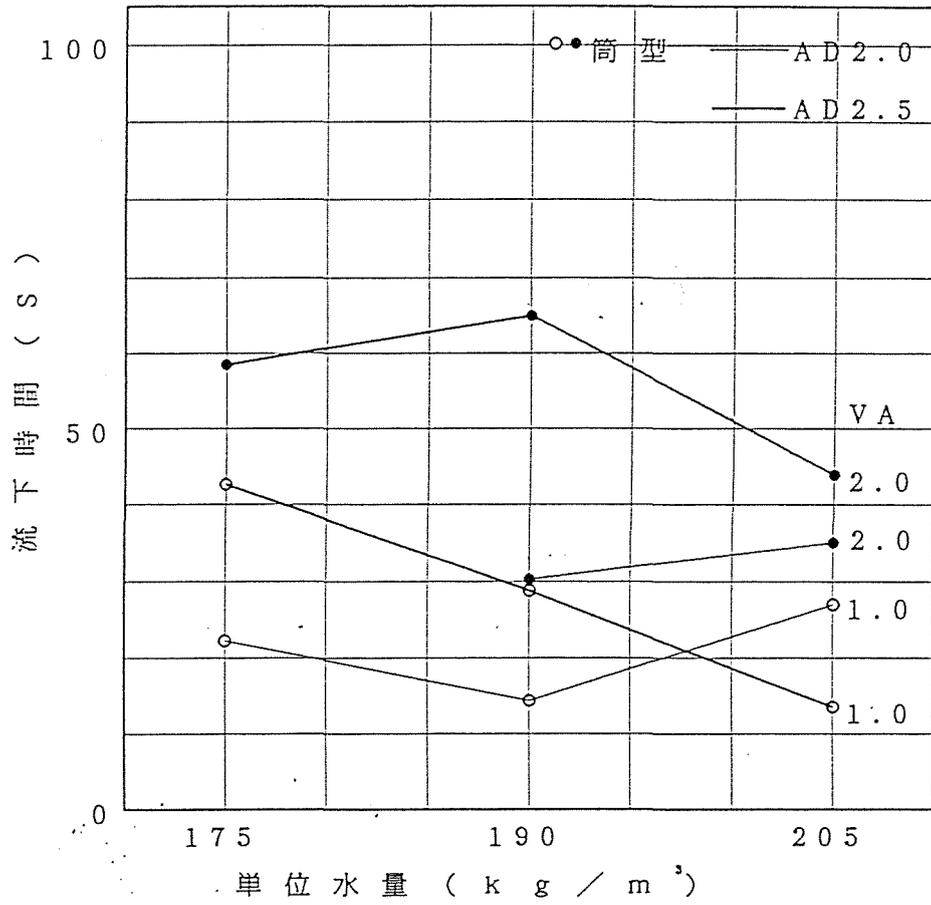


図-16 単位水量と流下時間の関係

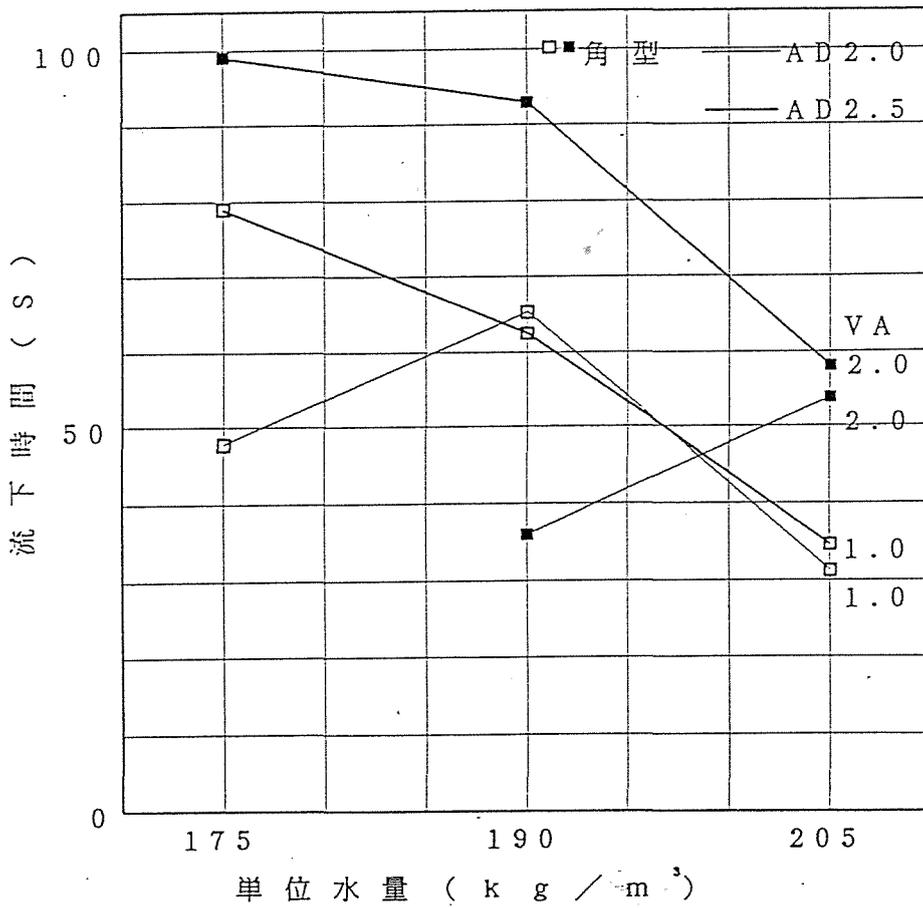


図-17 単位水量と流下時間の関係

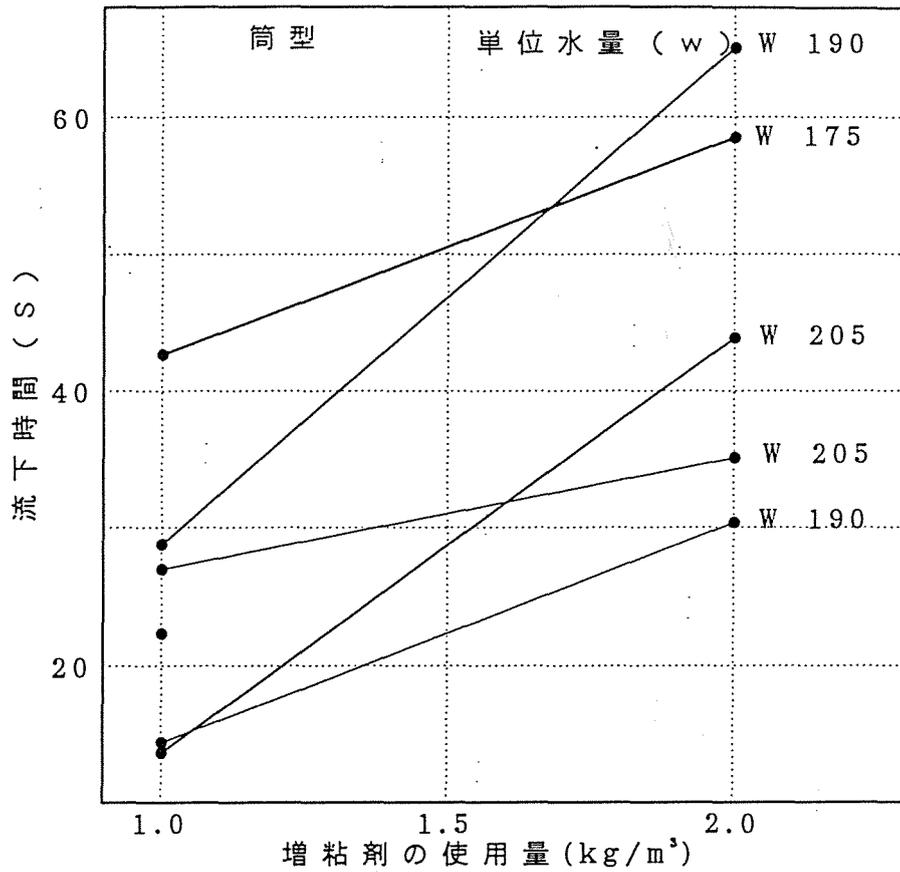


図 - 1 8 増粘剤の使用量と
□ - ト流下時間の関係

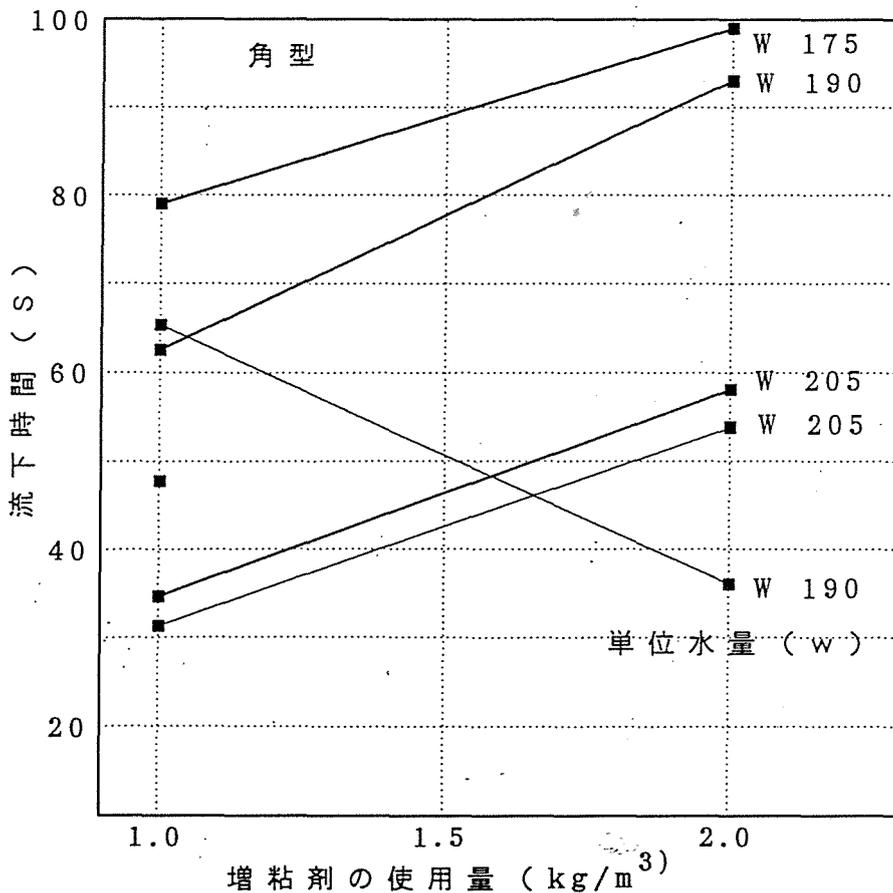


図 - 1 9 増粘剤の使用量と
□ - ト流下時間の関係

第 5 章 スランプフロー試験および ロート流下試験の解析

5. 1 概要

スランプフロー試験およびロート流下試験ともに、配合、混和剤の使用量等による変形ポテンシャル、変形速度、粘性や材料分離の可能性への影響はとらえることができた。しかし、それを配合から定量的に求めることはできなかった。ここでは、解析においても実験のような傾向をとらえられるかについて論じる。なお、筒型ロート、角型ロートは、両方とも実験では、同様の傾向を示していたので、解析は筒型ロート試験についてのみ行った。

5. 2 パッキング

スランプ試験のパッキングに用いた各パラメーターは表-5に、ロート流下試験に用いた各パラメーターは表-6に示す。

別図にスランプ試験、ロート流下試験のパッキングの様子を示す。どちらの場合も、パッキング時には要素を落下させて行っているため、非常に大きな速度をもってしまい要素が壁要素を突き抜けてしまう様子が見られた。今回のプログラムでは、要素の重なりに制限をもうけていないので、タイムステップに比例するように、予想外の速度をもってしまうようである。表のタイムステップはエラーのでない最低ラインであるが、パッキングの目的はスランプコーン、ロートに均質に要素をおくためのものなので、試験の解析結果に及ぼす影響は、ほとんど見られなかった。

表-5 スランプ用パッキングに用いた各パラメーター

パラメーターの名称	記号	単位	値
鉛直方向バネ定数	k n	kg/sec ²	30.0
せん断方向バネ定数	k s	kg/sec ²	7.5
鉛直方向ダッシュポット定数	η n	kg/sec	5.7
せん断方向ダッシュポット定数	η s	kg/sec	7.0
要素間摩擦定数		—	0.01
底面と要素間の摩擦定数		—	0.1
バネの引張り許容百分率		%	0.06
タイムステップ	Δt	sec	1.0×10^{-4}

表-6 スランプ用パッキングに用いた各パラメーター

パラメーターの名称	記号	単位	値
鉛直方向バネ定数	k n	kg/sec ²	30.0
せん断方向バネ定数	k s	kg/sec ²	7.5
鉛直方向ダッシュポット定数	η n	kg/sec	5.7
せん断方向ダッシュポット定数	η s	kg/sec	7.0
要素間摩擦定数		—	0.01
底面と要素間の摩擦定数		—	0.1
バネの引張り許容百分率		%	5.5
タイムステップ	Δt	sec	1.0×10^{-5}

5. 3 スランプ試験と 筒型ロート流下試験の解析

パッキングを終えた要素の集合から、スランプ試験の解析では、側面を取り除き自由流動させ、ロート流下試験の解析ではロートの底面を取り除き自由流動させた。まずは、各パラメーターのその流動性状に与える影響を考えるため、一種類のパラメーターのみを変化させて、そのパラメーターは何と関係があるかを調べた。その後、各パラメーターの役割をある程度まで理解し、実験との比較した。

5. 3. 1 解析結果と実験結果との 比較と考察

図-20に床の摩擦定数とスランプフローの関係を示す。床の材質により床の摩擦定数を変更する必要がある。大きく違う値を設定すると、他のパラメーターを調整してもスランプフローの実用域に一致しない事が起こり得る。床の摩擦定数とスランプフローの関係は直線的であるので、おおよその解析範囲を決定する事ができる。

図-21, 22にバネの引張り許容百分率とスランプフローの関係, バネの引張り許容100百分率とロート流下時間の関係を示す。バネの引張り許容100百分率は、スランプフロー, ロート流下時間ともに大きな影響を及ぼしていることがわかる。

本研究のプログラム中では、引張り許容百分率は、粘性を表すものとしているが、粘性の変化は、実験においても、ともに影響が大きいことがわかっているため、この仮定が正しいことが証明された。

図-23, 24に、このシミュレーションで得られたダッシュポット定数とスランプフローの関係, ダッシュポット定数とロート流下時間の関係を示す。図-23より、ダッシュポット定数のスランプフローへの影響は比較的小さいことが解り、また小さいのみならずこの範囲では、50~60%が最低値の二次曲線的な弧を描いている。図-24からはダッシュポット定数の減少に比例して流下時間が減少すること示しており、ダッシュポット定数は、フレッシュコンクリートの変形ポテンシャルとは、独立した変形速度を表していることが解る。つまり、スランプフローが同じであっても、ロート流下時間の違うものを表現できることを示している。これは、実験の同様の結果であり、フレッシュコンクリートの流動解析における個別要素法の有効性を示しているものと思われる。

図-25, 26に要素間の摩擦定数とスランプフローの関係, 要素間摩擦定数とロート流下時間の関係を示す。図-25では要素の摩擦とスランプフローは直線的な関係にあるが、要素間の摩擦定数の変化に対するスランプフローの変化は比較的小さく、弱い相関を示している。それに対して図-26からは、要素間の摩擦とロート流下時間は、強い相関を示し、ある値以下では、流下時間は横這いとなっており、これは、要素の摩擦がある値以下では流下時間が、これ以外のバ

ラメーターに支配されていることを示している。しかし、要素間摩擦定数がある値以上では、流下時間が非常に大きくなっており粗骨材の摩擦が卓越した為の要素の干渉によるものと思われる。本研究のプログラムは、粗骨材に注目しているので、この摩擦は粗骨材によるものと考えられ、既往の研究より粗骨材量を変化させた場合、図-26と全く同様の傾向を示す結果が、得られているので、この要素間摩擦定数により、粗骨材量の違うものや、粘性の違いによる粗骨材の干渉の程度の違うものを表現できることが明らかとなった。

5. 3. 2 解析結果の視覚的な考察

別図にスランプ試験、ロート流下試験のシミュレーション結果を示す。この両図の様に、スランプ試験時におけるコンクリートの変形状況は、解析結果で概ね良く表現されており、また、ロート流下試験においても良く表現されている。

ロート流下試験において、粘性の大きな場合を別図、引張許容100分率5.5%で表しているが、そのロート上端の要素に着目するとロート中心から流下していく様子がわかる。これは、実験においても確認された。要素が流下終了後のロートの状態でも、実験と同様に要素がロートに付着している様子がかくにんできる。また、逆に、粘性の小さい場合、実験ではロート上端のフレッシュコンクリートは、ロート中心からではなく地面と平行なラインを保ちつつ流下したが、別図、引張許容100分率0.5%から、解析においても良く表現されていることがわかる。しかし、骨材の干渉については、摩擦定数という、パラメーターで表現しているので、視覚的に確認することはできなかった。

別図、ダッシュポット定数30%（引張許容100分率2.5%）の場合には、ロート上端のフレッシュコンクリートの状態が示すように粘性があり、しかも変形速度も大きく、充填性の高い場合を見事に表現している。

5. 3. 3 DEM（個別要素法）の フレッシュコンクリートの 流動解析への適応性

上記のように、本実験において配合要因、つまり単位水量や、増粘剤、高性能AE減水剤等の混和剤量が、フレッシュコンクリートに及ぼす影響を定式化することは成し得なかったが、その大まかな傾向をとらえ解析におけるパラメーターとの関係は、とらえることができた。解析において、その要素の動きは非常に良くフレッシュコンクリートの動きと類似していることが確認できたので、DEMのフレッシュコンクリートの流動解析への適応性が認められた。

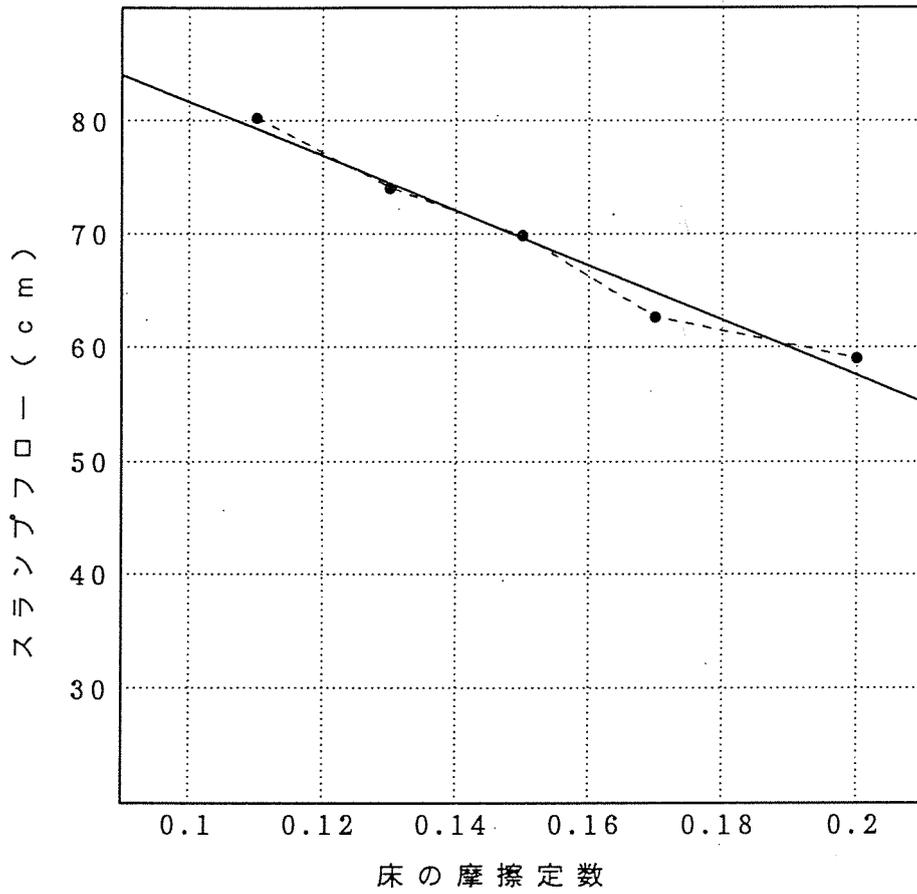


図 - 20 床の摩擦定数とスランプフローの関係

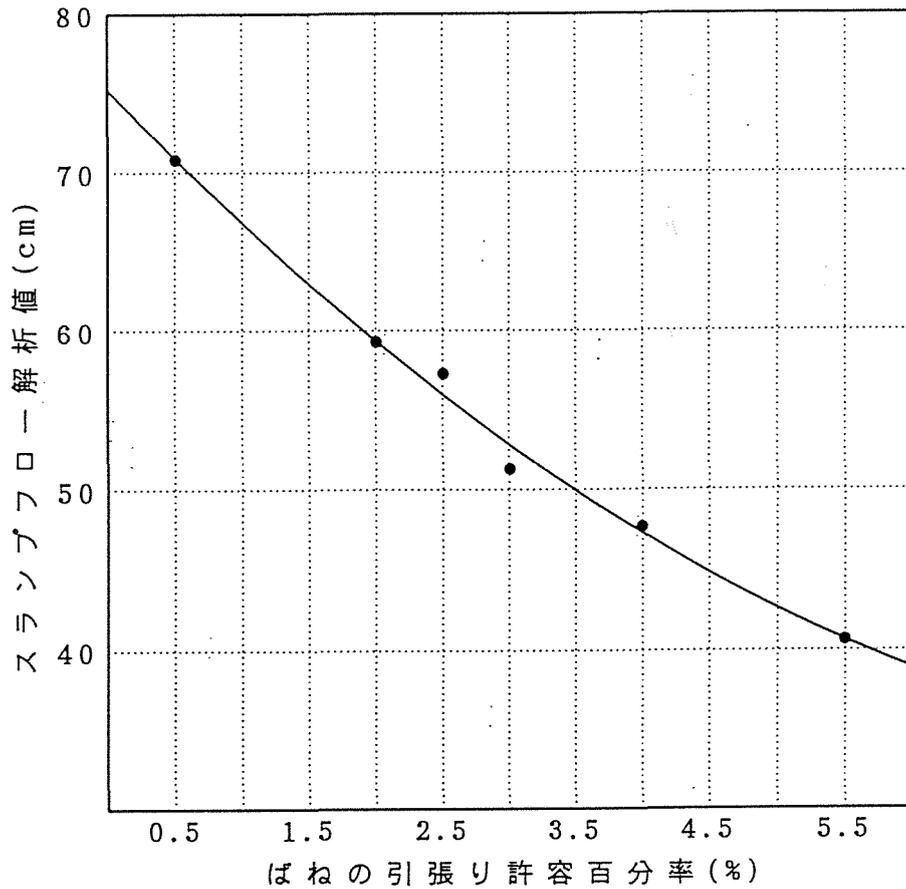


図 - 2 1 バネの引張り許容百分率とスランプフロー値の関係

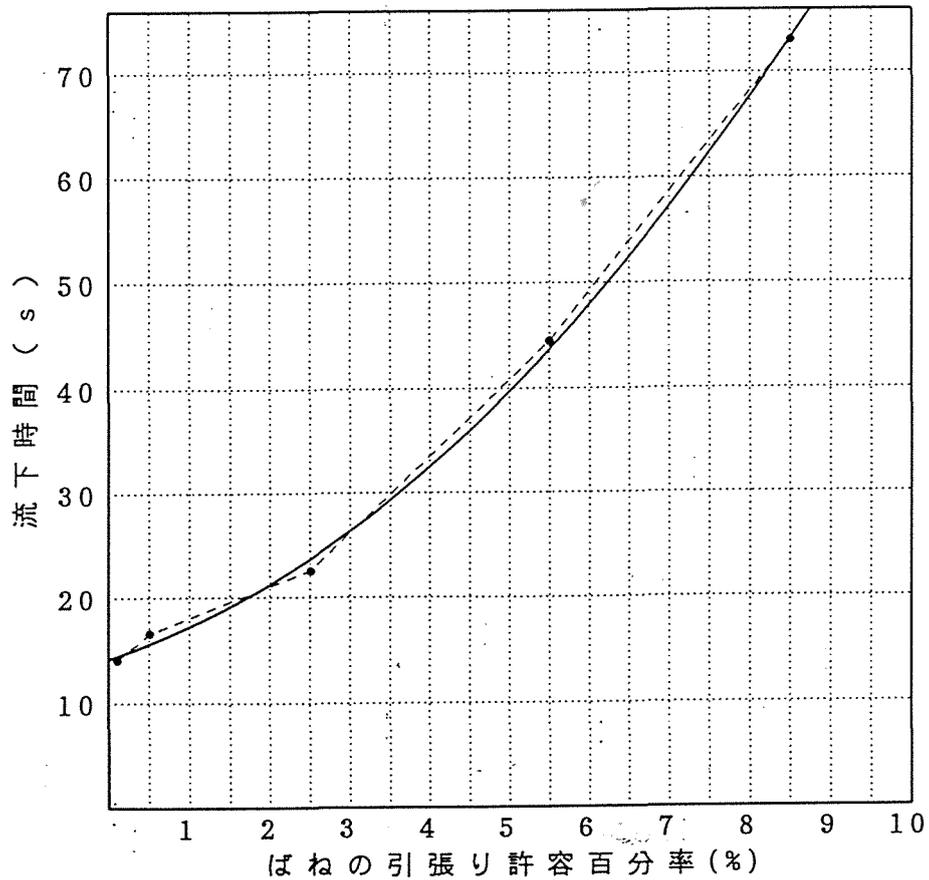


図 - 2 2 バネの引張り許容百分率と流下時間の関係

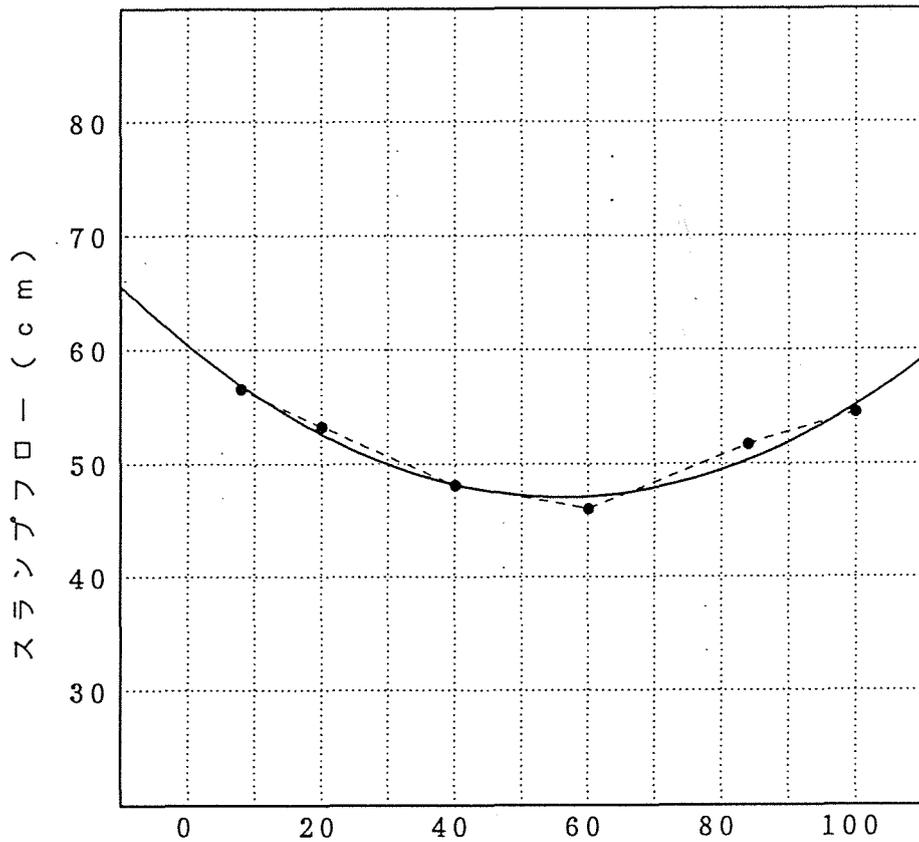


図 - 23 ダッシュポット定数の変化百分率 (%) とスランプフローの関係

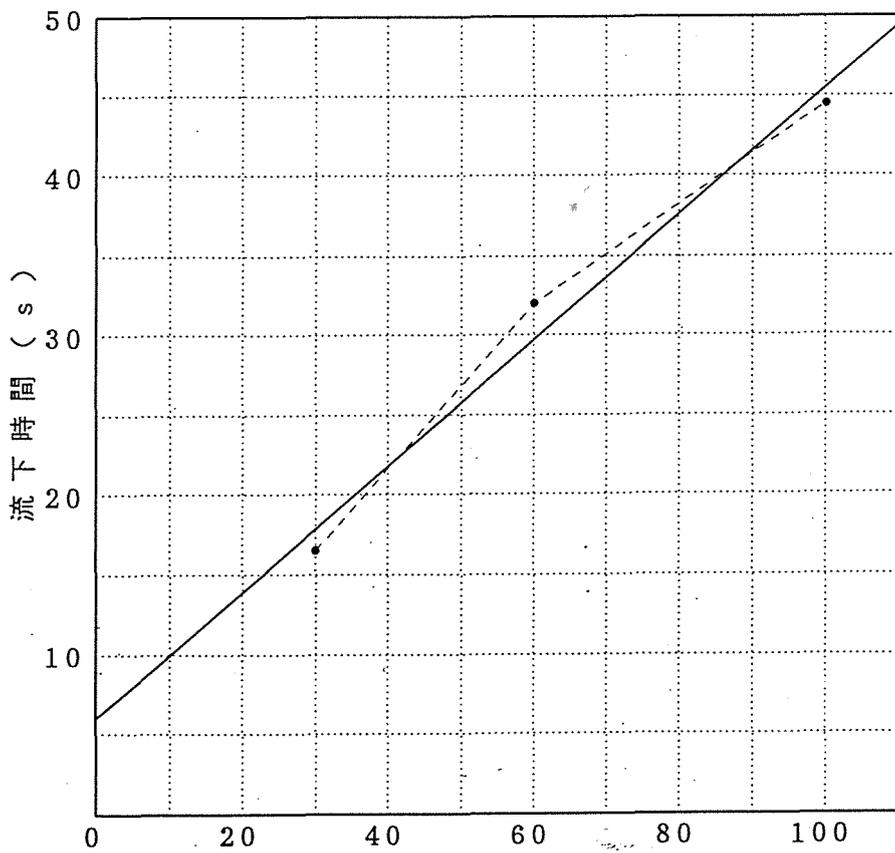


図 - 24 ダッシュポット定数の変化百分率 (%) と流下時間の関係

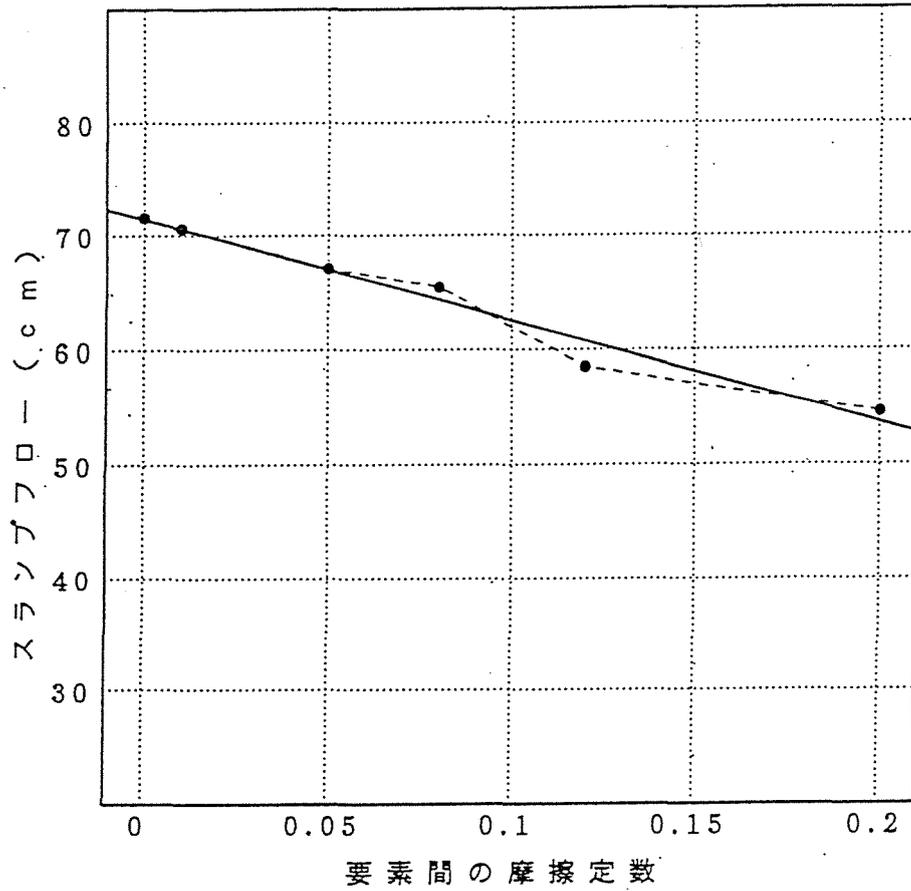


図 - 2 5 要素間摩擦定数とスランプフローの関係

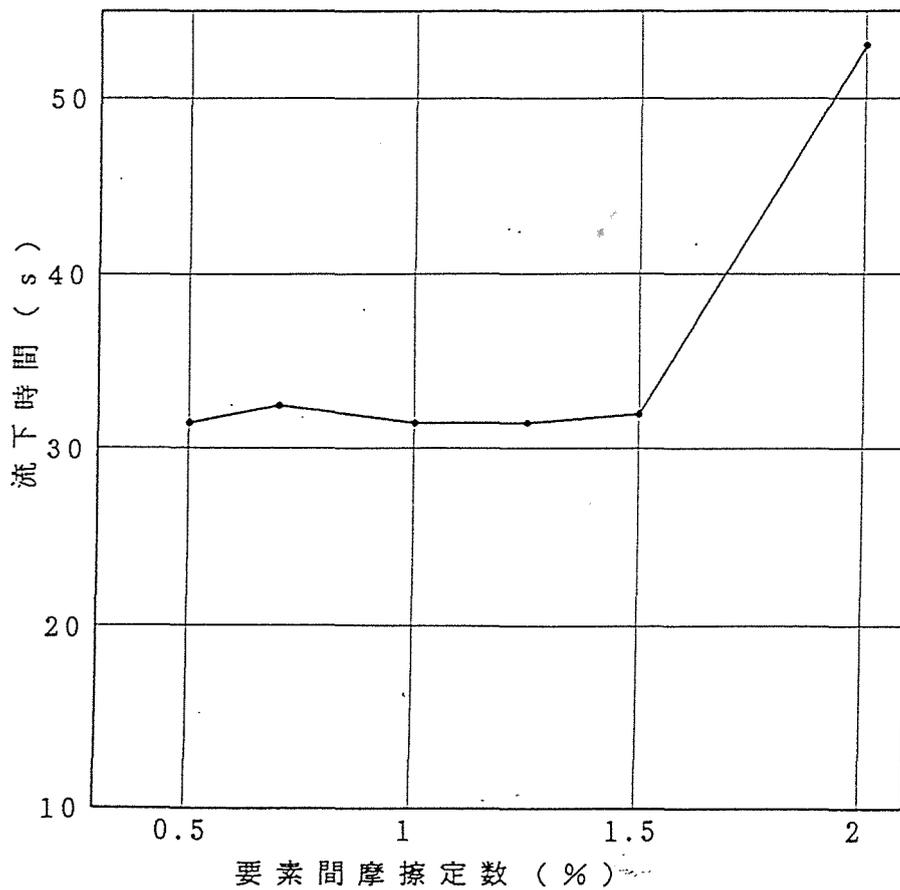


図 - 2 6 要素間摩擦定数の変化と流下時間の関係

第 6 章 結論

1) スランプフロー試験の実験結果、単位水量とスランプフロー値は、他の配合要因の一定の場合、スランプフロー値と著しく直線的な関係があることが分かった。この結果により、混和剤の種類、量によらず単位水量による変形ポテンシャルへの影響は独立したものであることがわかった。

2) スランプフロー試験、ロート流下試験の実験において、高性能 A E 減水剤、増粘剤等の混和剤のスランプフロー値への影響は、ある程度までは予測がつくのだが、その使用量等により、混和剤同士の影響をも考慮しなければならないことがわかった。反対に、その混和剤の使用量がある範囲内では、フレッシュコンクリートの流動性状つまり変形ポテンシャル、変形速度を予測しやすくなるような場合も存在することがわかった。

3) スランプフロー値とロート流下試験の実験結果より、スランプフロー値とロート流下時間に相関が見られないことから、鉄筋間の通過性等を考慮しなければならない場合、フレッシュコンクリートの性状を考えるうえで、変形ポテンシャルと変形速度を別々に考慮しなければならないことがわかった。

4) ロート流下試験の実験結果より、ロート流下時間に及ぼす、混和剤の影響がある程度まで確認されたが、その影響を定式化するまでにはいたらなかった。粗骨材量についてもロート内での粗骨材の閉塞には種々の原因が混在しているために、定量的に把握することはできなかった。

5) ロート流下試験の筒型および角形ロートを、比較すると、摩擦の違いにより全体的に流下時間を要したが、同配合の場合、同様の傾向をしめしていたことから、ロート流下時間つまりフレッシュコンクリート充填性の支配的要因はロートとの摩擦以外にあることが確認された。

6) スランプフロー試験およびロート流下試験の実験ともに、配合、混和剤の使用量等による変形ポテンシャル、変形速度、粘性や材料分離の可能性への影響を定量的ではないにしても、その影響要因となるものをある程度とらえることができた。これは、解析におけるパラメーターとの相関を考える上で非常に有効であると思われる。

7) 解析において、スランプフロー試験とロート流下試験の必要なタイムステップを比べた場合、要素数が多くなるほど、要素に加わる力が大きくなるほど、小さくタイムステップを選定しなければならないことから、将来、大きく複雑な解析を要する場合には、修正粒径や要素の重なりについて、制限値を要することがわかった。

8) スランプフロー試験の解析結果から、スランプフロー値の支配的なパラメーターは、床の摩擦定数と引張許容100分率であることがあらためて確認できた。スランプフロー値との関係は直線的であるので、おおよその解析範囲を決定する事ができる。

9) ロート流下試験の解析結果より、引張許容100分率はスランプフロー値のみではなく、ロート流下時間にも大きな影響を及ぼすことがわかった。これにより、モルタルの粘性を表すものとして引張許容100分率というパラメーターを設けたことの有用性が示された。

10) スランプフロー試験、ロート流下試験の解析結果より、ダッシュポット定数により同一の変形ポテンシャルを持ちながら、変形速度の異なるフレッシュコンクリートを表現できることがわかった。

11) スランプフロー試験とロート流下試験の解析結果から要素間摩擦定数は粗骨材の干渉を表していることがわかった。これにより粗骨材量の違うフレッシュコンクリートの流動性状をも表現できることがわかった。

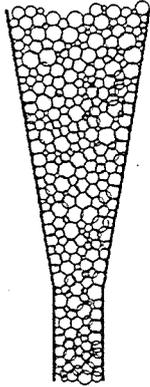
12) スランプフロー試験、ロート流下試験の解析結果ともにフレッシュコンクリートの挙動性状をも、的確に表現していることがわかった。

以上のことから、解析における変形ポテンシャルは引張許容百分率と要素間摩擦定数により決定され同変形ポテンシャルでも、その二つの定数の取り方により粗骨材の干渉の程度の違うもの、つまり粗骨材量の違う場合や材料分離の傾向にあるもの等も表現できることがわかった。またダッシュポット定数により、変形ポテンシャルが同様のコンクリートで、粘性の違いによる変形速度の違うものを表現できることがわかった。これより、DEM解析はフレッシュコンクリートの流動性状を良く表現していることがわかった。配合要因のフレッシュコンクリートへの影響が定量化される範囲では、簡単な実験により、より複雑な状況での流動性状を予測する事が可能であると思われる。

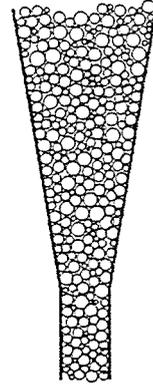
参考文献

- 1) 鍋田克己ほか：特殊混和剤を用いたフレッシュコンクリートの流動性状の解明，土木学会 第47回年次学術講演概要集，第5部 pp.574-575, 1992.9
- 2) 藤原浩己ほか：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
- 3) 吉野公ほか：高流動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.15, No.1, pp.119-124, 1993.6
- 4) 坂田昇ほか：高流動コンクリートの配合が施工性及び充填性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No1, pp.131-136, 1993.6
- 5) 坂田昇ほか：フレッシュコンクリートの充填性評価のためのロート試験，土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.566-567, 1992.9
- 6) 伊藤祐二ほか：高流動コンクリートの充填評価に方法に関する一考察，土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.570-571, 1992.9
- 7) 三浦律彦ほか：高流動コンクリートのロート流下時間に及ぼす配合要因の影響に関する一考察，土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.576-677, 1992.9
- 8) 佐々木哲ほか：高性能A E減水剤を用いたセメントペーストの性状について，土木学会 pp.594-595, 1992.9
- 9) 低発熱セメントを使用した高流動コンクリートの性質に及ぼす高性能A E減水剤の種類の影響についてほか：土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.602-603, 1992.9

0.000(sec)



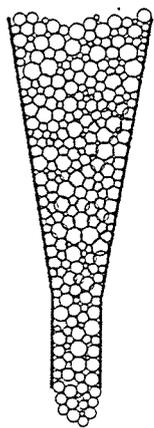
0.000(sec)



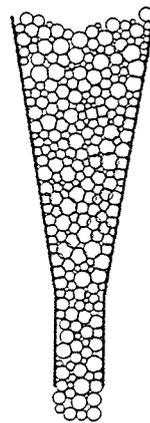
モルタルに包まれた状態 モルタルを除いた状態

図 流下試験初期状態

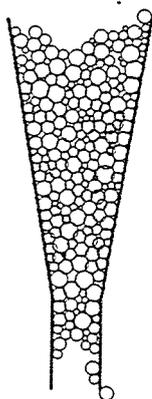
2.500(sec)



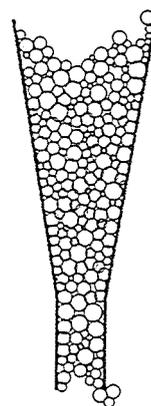
5.000(sec)



7.500(sec)



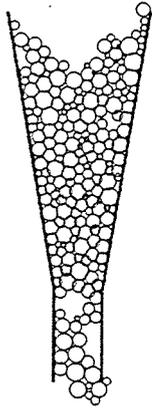
10.000(sec)



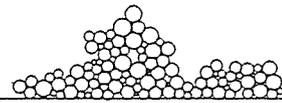
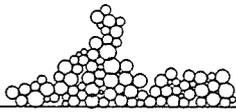
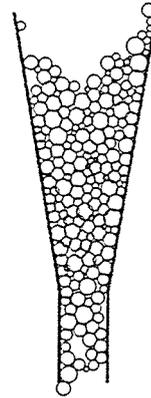
図

引張許容100分率5.5%

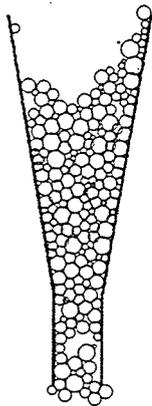
12.500(sec)



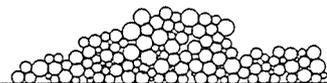
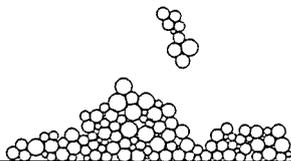
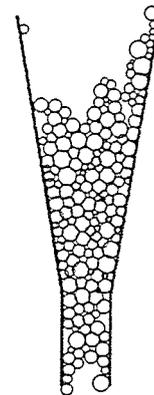
15.000(sec)



17.500(sec)



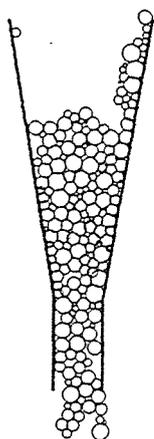
20.000(sec)



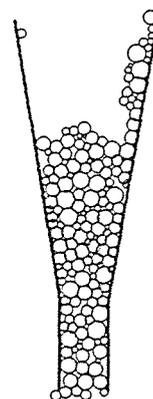
図

引張許容100分率5.5%

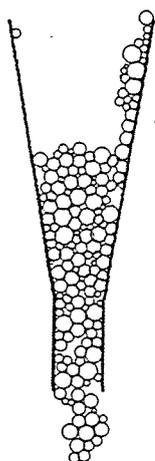
22.500(sec)



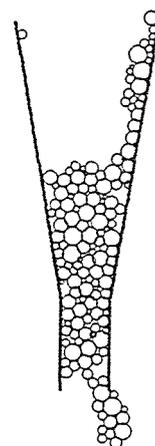
25.000(sec)



27.500(sec)



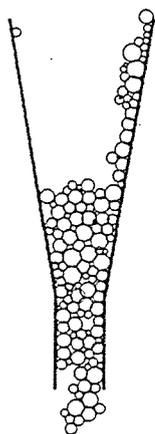
30.000(sec)



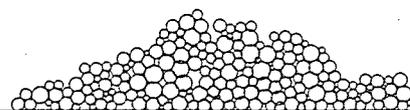
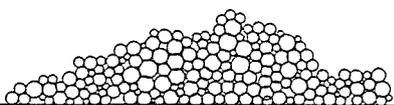
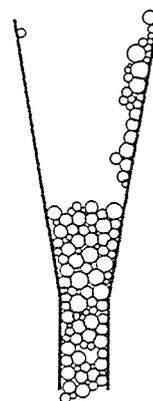
図

引張許容100分率5.5%

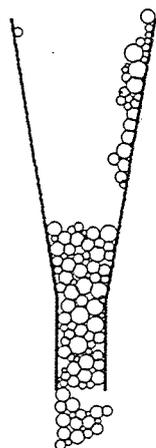
32.500(sec)



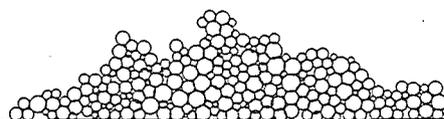
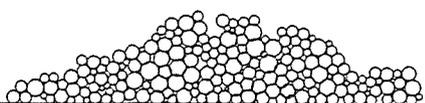
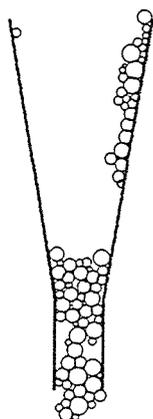
35.000(sec)



37.500(sec)



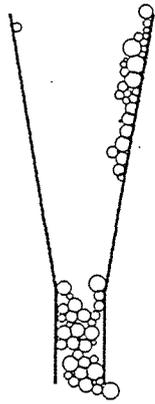
40.000(sec)



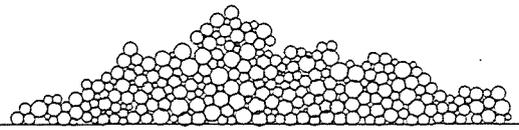
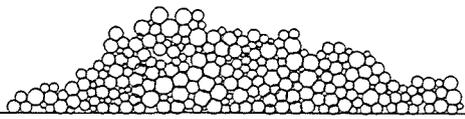
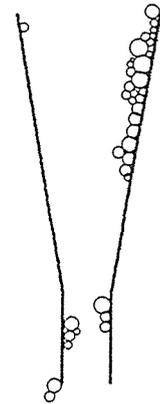
図

引張許容100分率5.5%

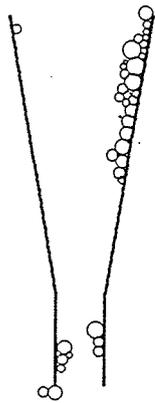
42.500(sec)



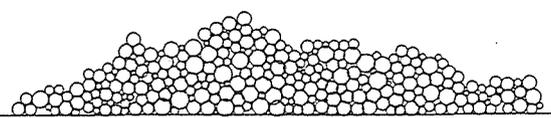
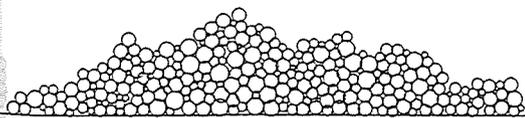
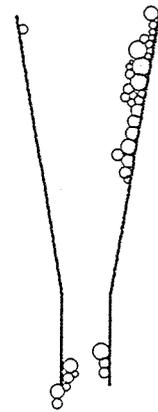
45.000(sec)



47.500(sec)



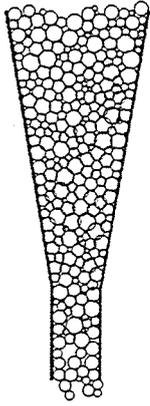
50.000(sec)



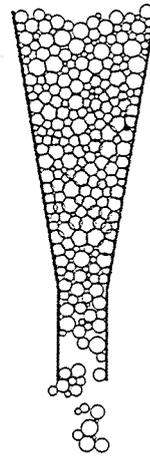
図

引張許容100分率5.5%

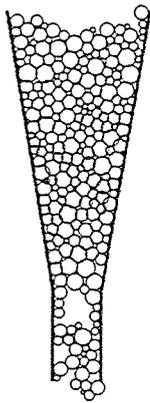
1.000(sec)



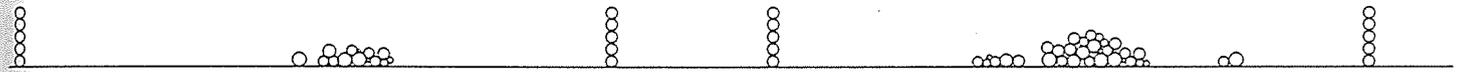
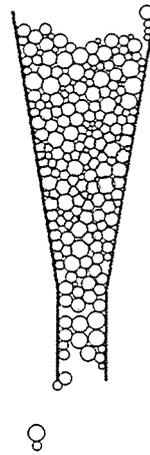
2.000(sec)



3.000(sec)



4.000(sec)

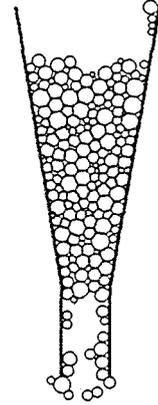
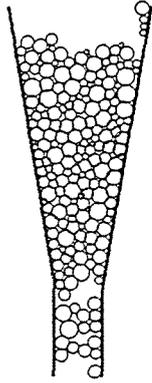


図

引張許容 100 分率 0.5%

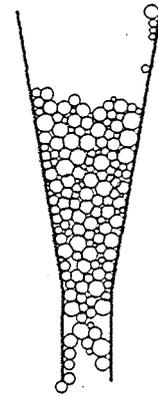
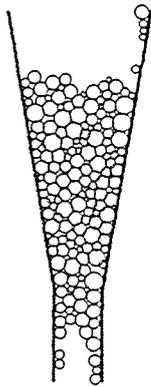
5.000(sec)

6.000(sec)



7.000(sec)

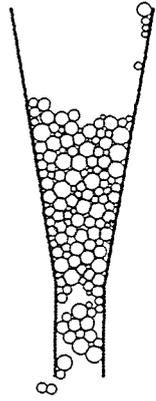
8.000(sec)



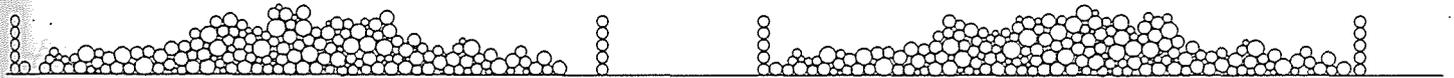
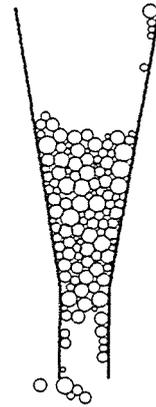
図

引張許容 100 分率 0.5%

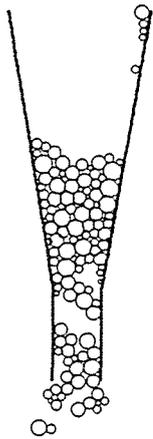
9.000(sec)



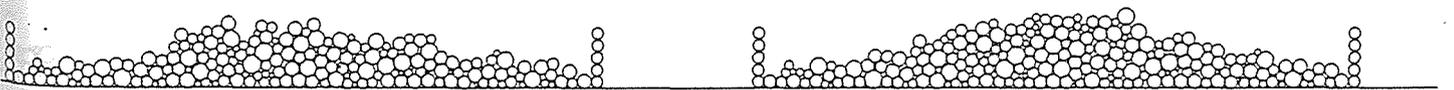
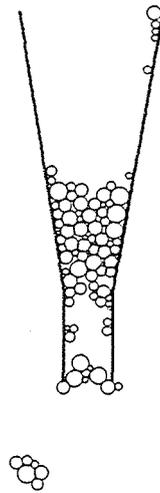
10.000(sec)



11.000(sec)



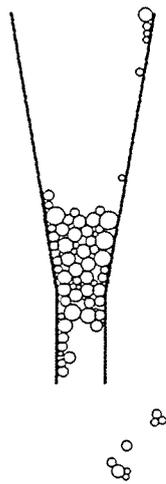
12.000(sec)



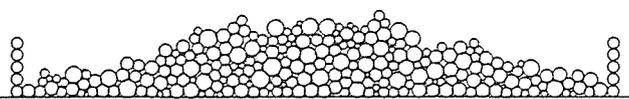
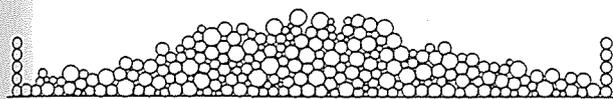
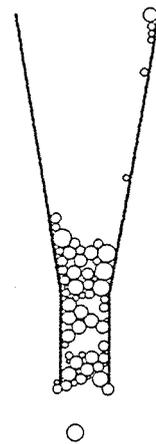
図

引張許容100分率0.5%

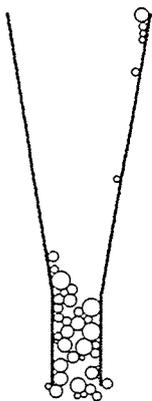
13.000(sec)



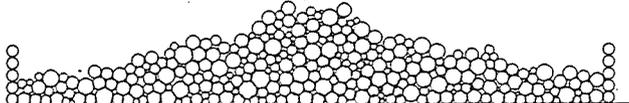
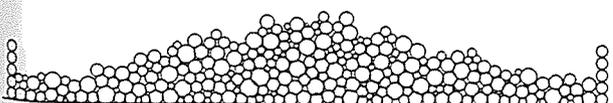
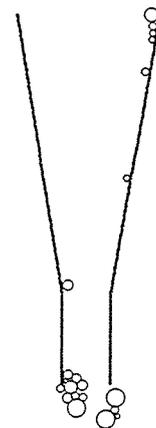
14.000(sec)



15.000(sec)

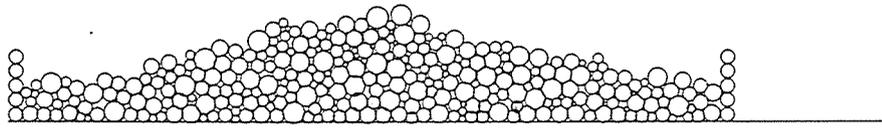


16.000(sec)



図

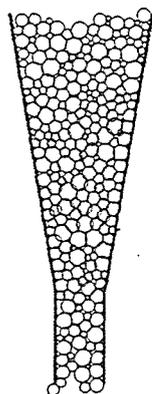
引張許容 100 分率 0.5%



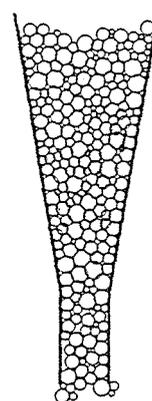
図

引張許容 100 分率 0.5%

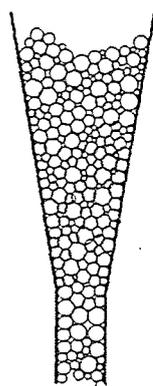
1.000(sec)



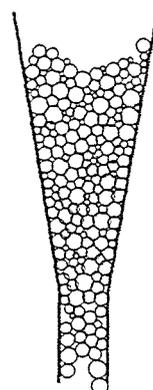
2.000(sec)



3.000(sec)



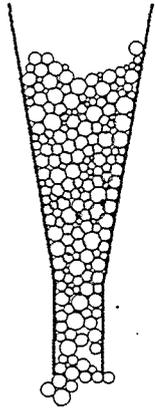
4.000(sec)



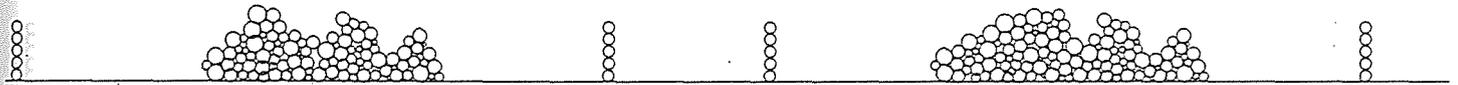
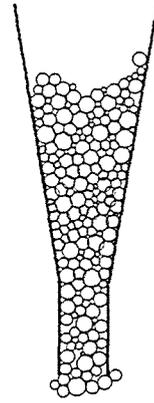
図

ダッシュポット30%の場合
(引張許容100分率2.5%)

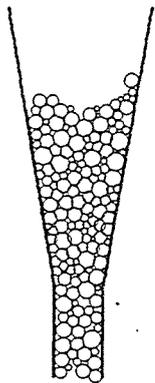
5.000(sec)



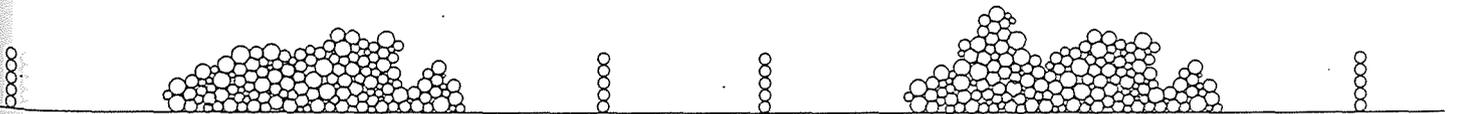
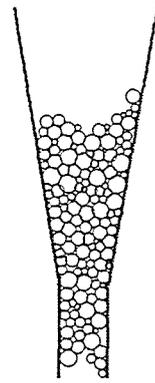
6.000(sec)



7.000(sec)



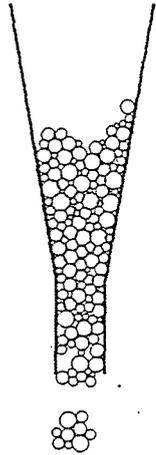
8.000(sec)



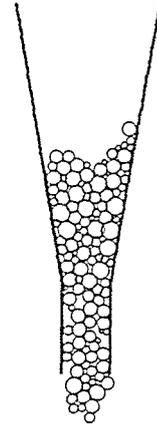
図

ダッシュポット30%の場合
(引張許容100分率2.5%)

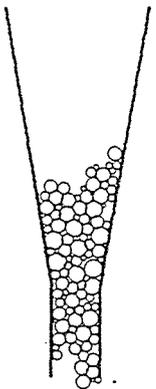
9.000(sec)



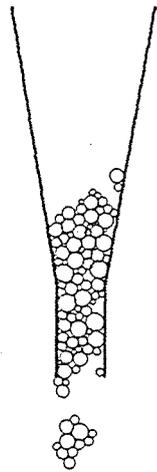
10.000(sec)



11.000(sec)



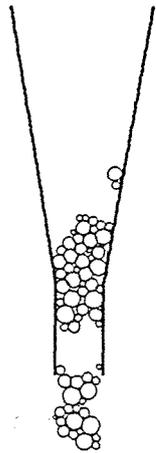
12.000(sec)



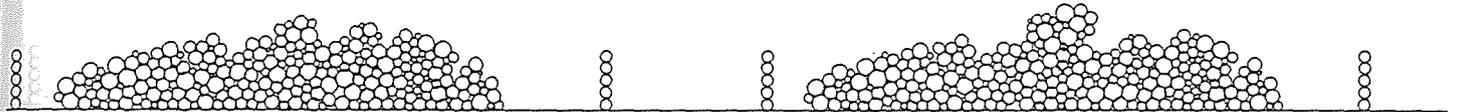
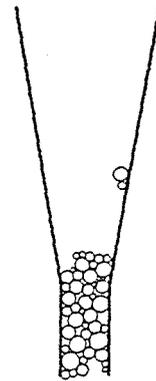
図

ダッシュポット30%定数の場合
(引張許容100分率2.5%)

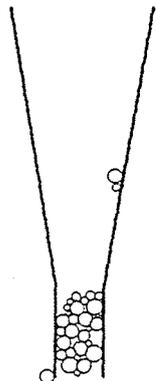
13.000(sec)



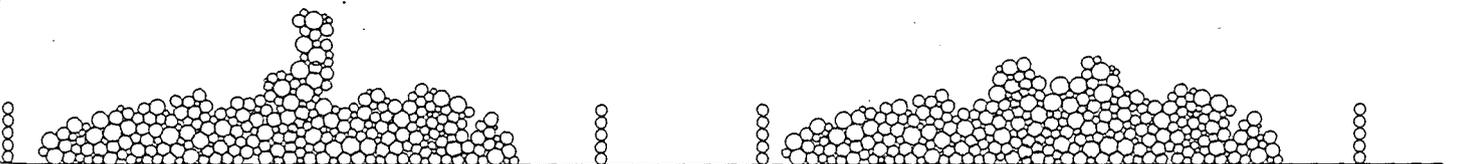
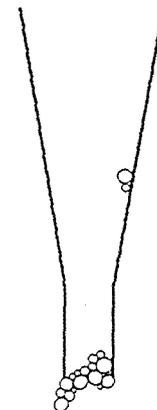
14.000(sec)



15.000(sec)



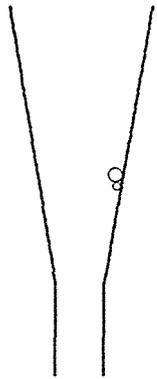
16.000(sec)



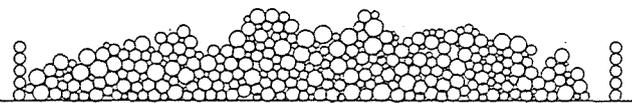
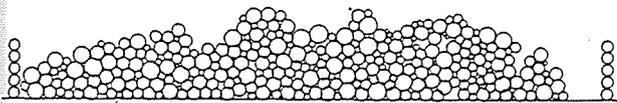
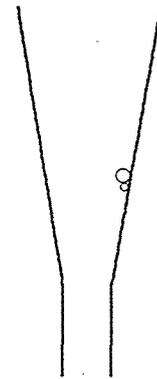
図

ダッシュポット30%定数の場合
(引張許容100分率2.5%)

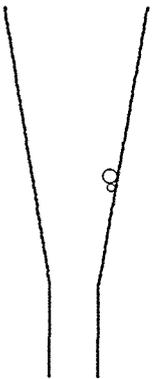
17.000(sec)



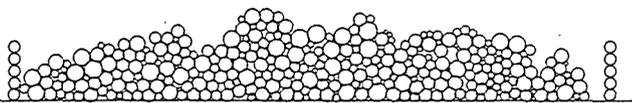
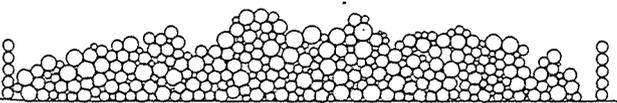
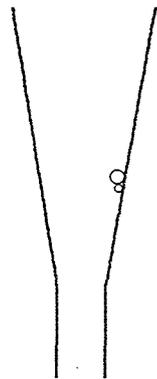
18.000(sec)



19.000(sec)



20.000(sec)



図

ダッシュポット30%定数の場合
(引張許容100分率2.5%)

V-272 特殊混和剤を用いたフレッシュコンクリートの流動性状の解明

埼玉大学大学院 学生員 鍋田克己
 埼玉大学工学部 正会員 睦好宏史
 埼玉大学工学部 正会員 町田篤彦

1. まえがき

水中不分離性混和剤の使用量と単位水量が、水中不分離性コンクリートのコンシステンシー及び材に対する抵抗性に及ぼす影響につき明かにするため、図-1に示す回転翼型粘度計及び図-2に示す分離の定量的評価の装置を試作して検討を重ねた。

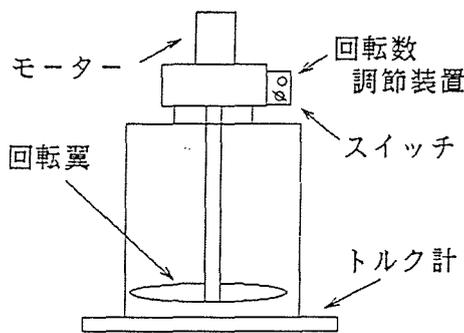


図-1 回転翼型粘度計

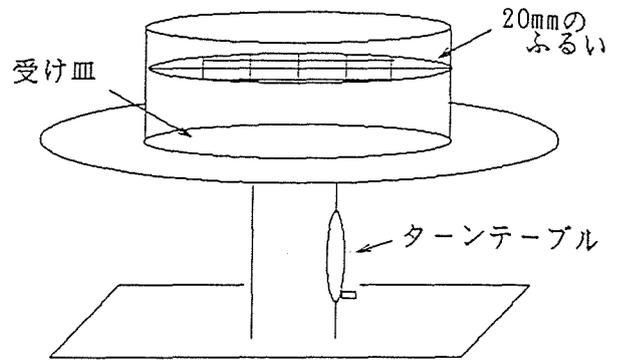


図-2 材料分離の定量的評価の実験器具

2. 実験概要

実験に用いたコンクリートの配合は表-1のようであり、水中不分離性混和剤の使用量が 3.0kg/m^3 で表に示すスランプフローが得られるように定めたものである。回転翼型粘度計で用いたモルタルの配合は、表-1から粗骨材を取り除き、水、セメント、細骨材を同率で増加させたものである。各配合とも水中不分離性混和剤の使用量を $1.0\ 2.0\ 3.0\ 4.0\ 5.0\text{kg/m}^3$ と変化させて実験をおこなった。

①回転翼型粘度計による実験：水中不分離性混和剤を用いたフレッシュモルタルのコンシステンシーを評価するために、フレッシュモルタル中で翼を回転させる際の翼の回転数と回転軸に生じるトルクとの関係を求めた。これより、塑性粘度係数と降伏値を算出した。その結果は、図-3及び図-4のようである。

②材料分離の定量的評価の実験：材料分離傾向の定量的評価として、水中不分離性混和剤を用いたフレッシュコンクリートを20mmのふるいに乗せ、これに振動を与え、ふるいを通過する重量を測定し、図-5を得た。図-5の作成にあたり、ふるいを通過した粗骨材重量の全粗骨材重量に対する百分率を粗骨材通過百分率とし、ふるいを通過したモルタル重量の全モルタル重量に対する百分率をモルタル通過百分率とした。これより、材料分離傾向 = (モルタル通過百分率) - (粗骨材通過百分率) として評価した。

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

Gmax (mm)	Slump Flow (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m^3)				
					W	C	S	G	ad(cc)
20	45	4.0	40	40	205	410	645	953	12300
	50				220	440	619	914	13200
	55				235	470	593	876	14100

*高性能減水剤として、高縮合トリアジン系化合物を用いた。

3. 結果および考察

図-3より水中不分離性混和剤の使用量が 3.0kg/m^3 以下では単位水量の違いにかかわらず使用量の増大に伴い塑性粘度係数が比例的に増大していることが分かる。また、これ以上では、単位水量の違いによって異なった挙動を示しているのであって、単位水量 205kg/m^3 では、水中不分離性混和剤の使用量の増加の効果は継続するが、これに対して、単位水量 220kg/m^3 では効果は無くなり、単位水量 235kg/m^3 では、逆効果となっている。これは、単位水量が大きい場合、塑性粘度係数に及ぼす影響には一定の限度があることを示している。

図-4から水中不分離性混和剤の使用量と降伏値の関係は、ほぼ比例的であり、使用量が 3.0kg/m^3 以上でも図-3に示す塑性粘度係数の様な単位水量による差は小であることが分る。

図-5から水中不分離性混和剤の使用量が少ないとき、または、単位水量が大きいときは材料分離傾向が大きくなっていることが分かる。また、水中不分離性混和剤の使用量と材料分離傾向の関係も、ほぼ比例的であることが分かる。材料分離抵抗性を向上させる効果は単位水量を減少させるより水中不分離性混和剤の使用量を増すことの方が、大きい傾向がうかがえる。

図-6は、材料分離傾向と塑性粘度係数の関係を示したもので、これより、水中不分離性混和剤の使用量が 3.0kg/m^3 以下では、ほぼ比例的な関係があるが、これ以上では、一様ではないことが分かる。

図-7は、材料分離傾向と降伏値の関係を示したもので、図-6より規則的である。これより、材料分離傾向は塑性粘度係数よりも降伏値と関係が深いことが分る。この結果、材料分離傾向は、流動状態より静止状態から流動状態に移行するときのフレッシュコンクリートの抵抗性で評価し易いと思われる。

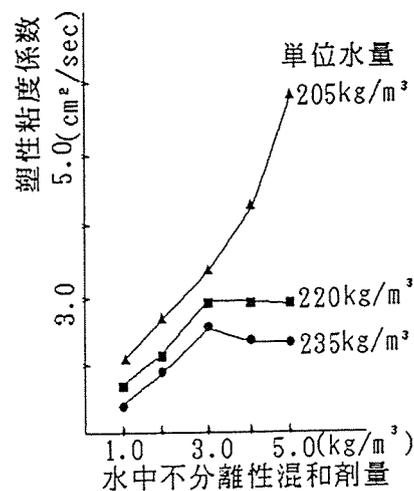


図-3

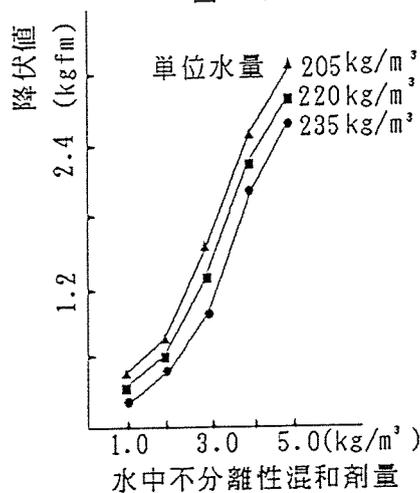


図-4

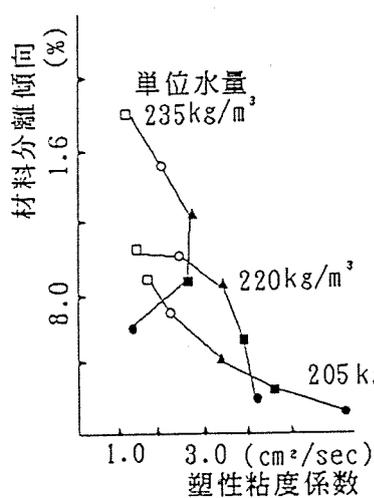


図-6

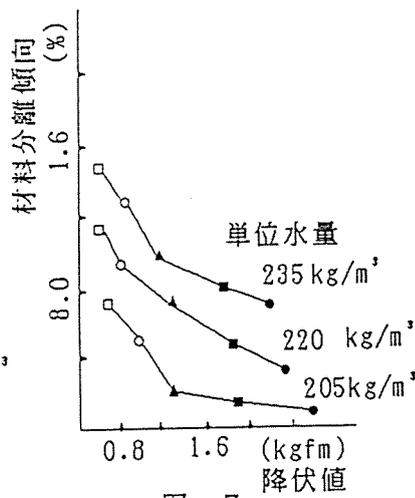


図-7

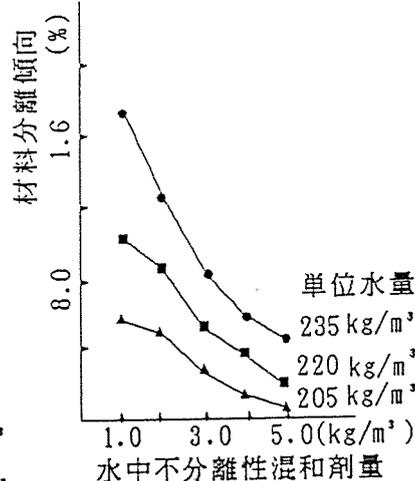


図-5

水中不分離性混和剤量 (kg/m³) □ 1.0 ○ 2.0 ▲ 3.0 ■ 4.0 ● 5.0

防衛施設庁 正会員 鍋田克己
 埼玉大学工学部 正会員 町田篤彦
 埼玉大学工学部 正会員 岩下和義
 (株)ハザマ 佐々木尊廣

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化や高層化が進む中、コンクリート現場作業者の不足や高齢化が顕在化している。このため、施工改善技術として高流動コンクリートを始めとする様々な流動性状を持つコンクリートが実用化されているが、フレッシュコンクリートの流動・変形性状を定量的に把握し、精度の良いシミュレーション手法を確立した例はない。本研究は、個別要素法を用い、フレッシュコンクリートの流動を2次元的にシミュレーションする手法について研究したものである。

2. 個別要素法の基本原理

個別要素法では要素の変形は別の要素との接点のみで生じるものとし、この接点を通じて粒子間の力の伝達が行われるものとする。そして、各要素ごとに独立な運動方程式をたて時間領域で漸進的に解く。物質の線形・非線形は、要素の接点に弾性スプリング、粘性ダッシュポット、スライダ-を想定することで表現する。各要素ごとの力とモーメントの運動方程式は、以下の式で表される。

$$F = \sum f_c + \sum f_{body} + \sum f_{bound} = m \ddot{u} \quad (1)$$

$$N = \sum m_c + \sum m_{bound} = I \ddot{\phi} \quad (2)$$

F : 要素に働く合力 m : 要素の質量 u : 要素の変位
 $\sum f_c$: 要素間の相互作用による力(要素間のバネとダッシュポットによる力)
 $\sum f_{body}$: 要素に働く重力等の体積力 $\sum f_{bound}$: 要素表面に働く表面力の和
 N : 要素に働く合モーメント I : 要素の慣性モーメント ϕ : 要素の回転変位
 $\sum m_c$: 要素間の相互作用力によるモーメント $\sum m_{bound}$: 表面力によるモーメントの和

これらの式を全ての粒状要素について求めるが、運動方程式を連立して解くのは困難である。そこで、連立方程式を直接解くのではなく、時間領域で差分近似することにより数値解析で追跡するのが個別要素法である。以前の時刻の要素の位置より、各接点に作用する相互作用力を求め、式(1)、(2)により加速度角速度を求め、数値積分により変位を求めた。

3. シミュレーション方法

シミュレーションに用いるコンクリートの粗骨材の粒径は5~20mmとし土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とした。要素の形状は完全な円形とした。実際の粗骨材は表面に凹凸があるため、円形要素より表面摩擦が大きいので、要素間摩擦定数なるシミュレーションパラメーターを設けて対応した。本研究では、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる二成分系と考え、それぞれの粗骨材の周辺にモルタルが付着している様子を粒径を1.2倍にすることによって理想化した。力の伝達は、つけ加えられたモルタル部分で生ずるとし、要素相互の重なり合いについては、モルタル部分の重なり合いは許すが、粗骨材相互が重なり合わぬように配慮した。

4. 実験方法

スランプ試験と箱型フロー試験の2種類を行った。スランプ試験については、スランプ値を指標とすると、これが20cm以上となり差異が明確でなくなるため、スランプフロー値を指標とした。考案し

た箱型フロー試験器は図-1に示す形状で、試験器具の左端の区切られた部分に、全高の半分までフレッシュコンクリート(20リットル)を充填させ、その後仕切を引抜き、流動の様子を観察し、最終状態のフロー値を箱型フロー値として計測した。

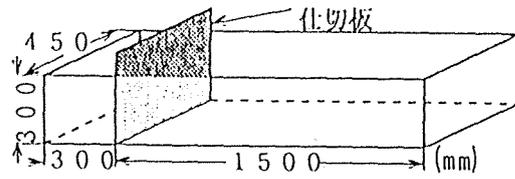


図-1 箱型フロー試験器

5. 実験配合

実験に用いたコンクリートの粗骨材の最大寸法は20mmでシミュレーションと同様に土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とし、水セメント比は50%、細骨材率は40%とし、高性能減水剤は高縮合トリアジン系化合物、増粘剤はセルロース系水溶性高分子化合物を用いた。単位水量は175, 190, 205kg/m³とし、それぞれに、増粘剤の使用量が1.0, 3.0kg/m³とした合計6種類の実験を行った。

6. 結果および考察

図-2ではシミュレーションパラメーターであるバネの引張り許容百分率とスランプフロー値および箱型フロー値を比較した。フレッシュコンクリートの流動・変形の最終状態である各フロー値と引張り許容百分率は強い相関がみられ、引張り許容百分率は、スランプフロー値および箱型フロー値を決定する最も大きな要因であると同時に、レオロジ的に考えた場合、流動・変形の最終状態を支配する降伏値に相当することが明かとなった。図-3の結果から、単位水量および増粘剤の使用量と、バネの引張り許容百分率の関係は直線的になり、シミュレーションのパラメーターであるバネの引張り許容百分率が、ある程度、コンクリートの配合である単位水量および増粘剤の使用量から予測することが可能となった。実験結果とシミュレーション結果の比較は図-4のようである。底面と要素間の摩擦定数は、スランプ試験の解析では0.15とし、箱型フロー試験でも同値を用いたが、実験値と解析値が一致しないため、箱型フロー試験の解析では底面と要素間の摩擦定数は0.004とした。その他のシミュレーションパラメーターは、スランプ試験、箱型フロー試験で同一とした。このような実験値とシミュレーション値が良い一致を見たことは、個別要素法によるシミュレーションに用いたパラメーターが適切であったためであり、パラメーターさえ適切に設定できれば、個別要素法はフレッシュコンクリートの流動性状をシミュレーションする上で有望な手法であると言える。

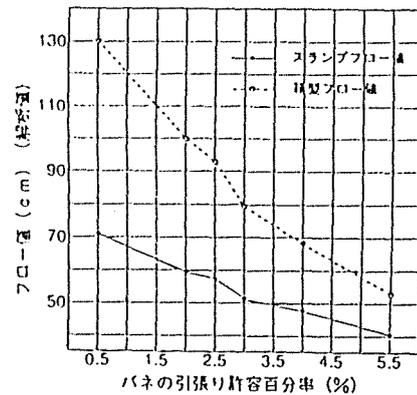


図-2 引張り許容百分率とフロー値の関係

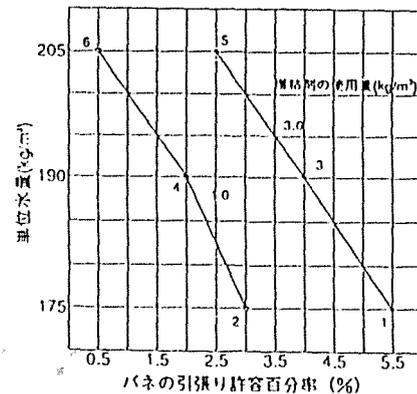


図-3 引張り許容百分率と単位水量の関係

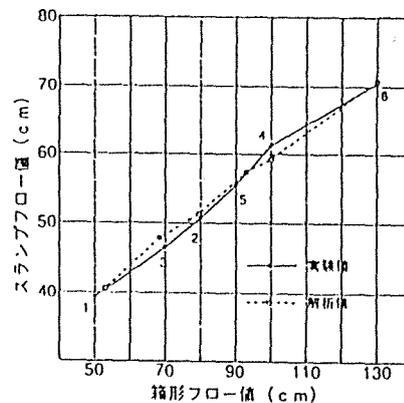


図-4 実験値と解析値の比較

[参考文献] 岩下和義: 粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析-その1-, 地震研究所彙報Vol. 63, pp. 201-235, 1988

論文

[1078] 個別要素法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

鍋田克己^{*1}・町田篤彦^{*2}・岩下和義^{*3}・佐々木尊廣^{*4}

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化や高層化が進み、コンクリート現場作業者の不足や高齢化が顕在化しているため、コンクリート工事の省力化や合理化が求められている。その様な中において、高流動コンクリートは施工改善技術として大きな期待を持たれているが、その流動性状は理論的に十分に説明されるには至っていない。フレッシュコンクリートの物性を捕らえ、流動シミュレーションを行うことはコンクリート工事の省力化のための技術開発において、重要な位置を占めるものと考えられる。

本研究では、個別要素法(Distinct Element Method)を用いてフレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行い、粘塑性流体としての高流動コンクリートの流動解析を試みたものである。

2. 個別要素法の基本原理

個別要素法は非連続体をシミュレーションするための一手法であり、有限要素法や境界要素法のような連続体を解析する手法ではない。個別要素法はその性格上、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適しているため、フレッシュコンクリートへ適用しやすいと考えられる。個別要素法では、要素の変形は別の要素との接点のみで生じるものとし、この接点を通じて粒子間の力の伝達が行われるものとする。各要素ごとに独立な運動方程式をたて、時間領域で漸進的に解き、個々の要素の運動を追跡していくものである。そして物質の線形・非線形は、要素の接点に弾性スプリング、粘性ダッシュポット、スライダを想定することで表現する。各要素ごとの力とモーメントの運動方程式は、以下の式で表される。[1-2]

$$F = \sum f_c + \sum f_{body} + \sum f_{bound} = m \ddot{u} \quad (1)$$

$$N = \sum m_c + \sum m_{bound} = I \ddot{\phi} \quad (2)$$

- F : 要素に働く合力 m : 要素の質量 u : 要素の変位
 $\sum f_c$: 要素間の相互作用による力 (要素間のバネとダッシュポットによる力)
 $\sum f_{body}$: 要素に働く重力等の体積力 $\sum f_{bound}$: 要素表面に働く表面力の和
 N : 要素に働く合モーメント I : 要素の慣性モーメント ϕ : 要素の回転変位
 $\sum m_c$: 要素間の相互作用力によるモーメント
 $\sum m_{bound}$: 表面力によるモーメントの和

* 1 防衛施設庁、工修 (正会員)
 * 2 埼玉大学教授 工学部 建設工学科、工博 (正会員)
 * 3 埼玉大学助教授 工学部 建設工学科、工博
 * 4 (株) ハザマ

これらの式を全ての粒状要素について求めるが、運動方程式を連立して直接解くのは困難であるので、時間領域で差分近似することにより数値解析で追跡を行う。以前の時刻の要素の位置より、各接触点に作用する相互作用力を求め、式(1)、(2)により加速度、角加速度を求め、数値積分により変位を求める。

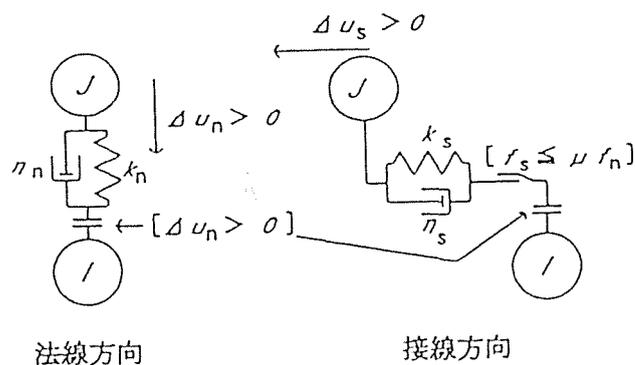


図-1 個別要素法の接触点モデル

3. 個別要素法のフレッシュコンクリートへの適用

個別要素法をフレッシュコンクリートの流動シミュレーションに適用するためいくつかの改良を行った。[3-5]

3.1 粒径

本研究においては、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる二成分系と考えた。粗骨材の粒径は5~20mmとし土木学会標準粒度範囲に適合する連続粒度とし、形状は完全な球形とした。

3.2 修正粒径

さらに、3.1で求めた粒径を1.2倍したものを修正粒径として解析に用いた。これは、図-2に示すように、それぞれの粗骨材の周辺にモルタルが付着している様子を粒径を1.2倍にすることによって理想化したもので、このモルタル部分で力を伝達できるようにしたものである。また、要素相互の重なり合いは、モルタル部分で生じ、実際の粗骨材相互が重なり合わぬ様に、鉛直・せん断方向のバネ定数を定めた。

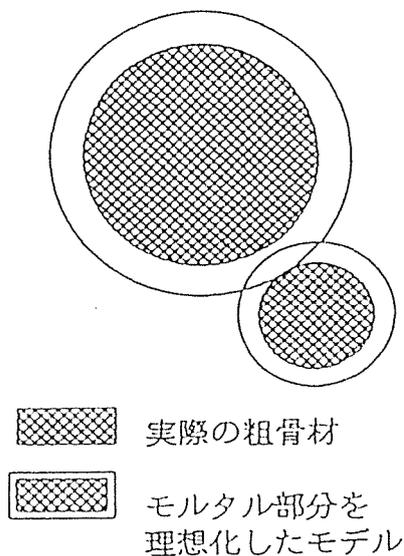


図-2 モデル化された要素

4. スランプ試験のシミュレーション結果

4.1 初期設定

第一に、フレッシュコンクリートをスランプコーンに充填させるシミュレーションを行った。(以下、パッキングと言う)。パッキングの方法は落下法とした。落下法は、図-3に示すように、要素を不規則に発生させた後、自由落下させ各要素の運動エネルギーの総和が0と成った時点を締固め十分と考えた。なお、パッキングのシミュレーションに用いた要素数は92個であり、粒径の決定方法は3.2に従う。パッキングに要した計算時間は、大型計算機を使用して30時間程度であった。

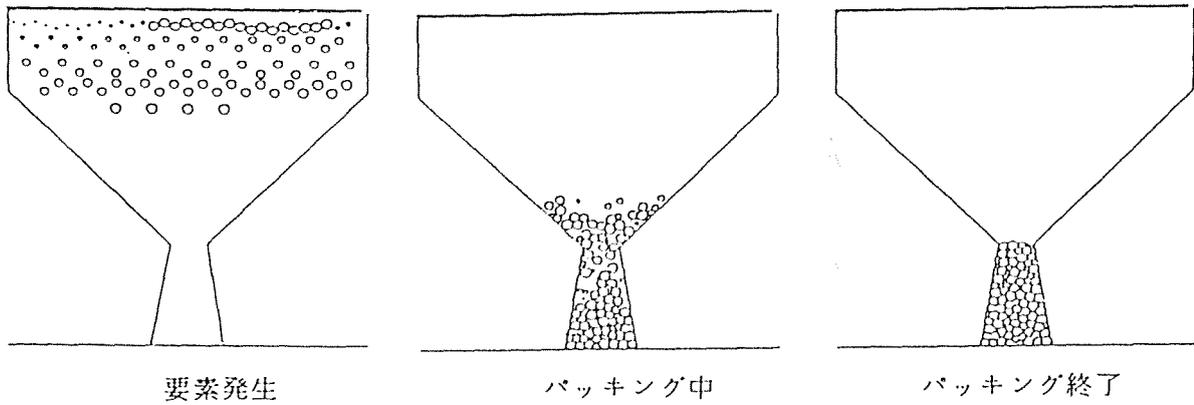


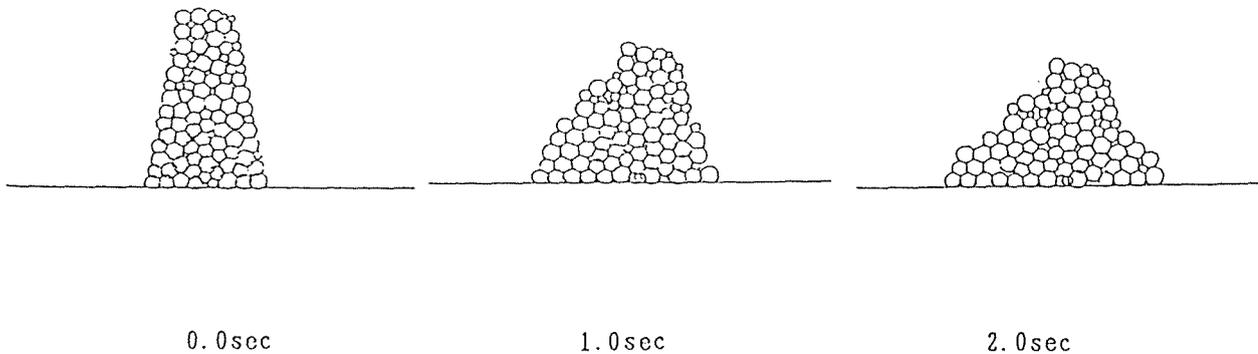
図-3 落下法によるスランプコーンへのパッキング

4.2 スランプ試験

図-4 にスランプ試験のシミュレーション結果の一例を示す。この図の様に、スランプ試験時におけるコンクリートの変形状況は、解析結果で概ね良く表現されている。シミュレーションに用いた各定数はパッキングに用いた定数と同様であり、表-1 に示す。[6-8]

表-1

鉛直方向バネ定数 (N/m)	30.0	せん断方向バネ定数 (N/m)	7.5
鉛直方向ダッシュポット定数 (Nsec/m)	5.7	せん断方向ダッシュポット定数 (Nsec/m)	7.0
要素間摩擦定数	0.01	底面と要素間の摩擦定数	0.1
バネの引張り許容百分率 (%)	0.06	タイムステップ (sec)	1.0×10^{-4}



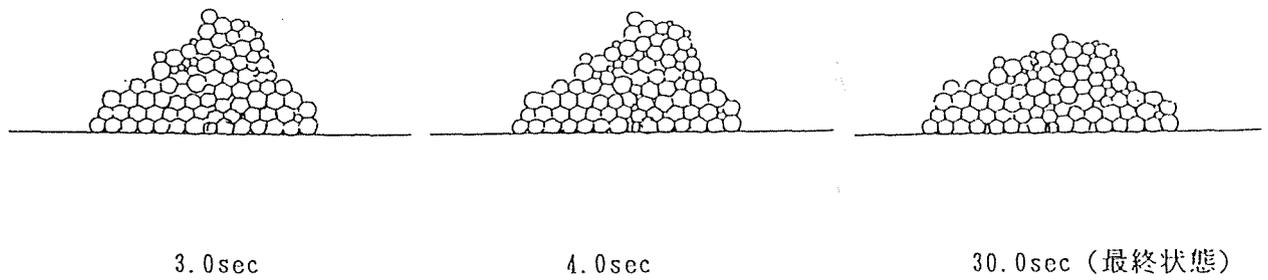


図-4 スランプ試験のシミュレーションの一例

4. 3 各定数とスランプフローの関係

図-4と同様のシミュレーションを鉛直方向ダッシュポット定数を 5.7(kg/sec)、せん断方向ダッシュポット定数を 7.0(kg/sec)を100%とし、同時に両方向の定数を低減させた場合について行った。図-5は、このシミュレーションで得られた、ダッシュポット定数とスランプフローの関係である。ダッシュポット定数の変化百分率が60%のときにスランプフロー値が最小となっているが、ダッシュポット定数の変化によるスランプフロー値の変化は少なく、最大でも10cm程度の違いしかないので、最終状態への影響は小さいと考えられる。

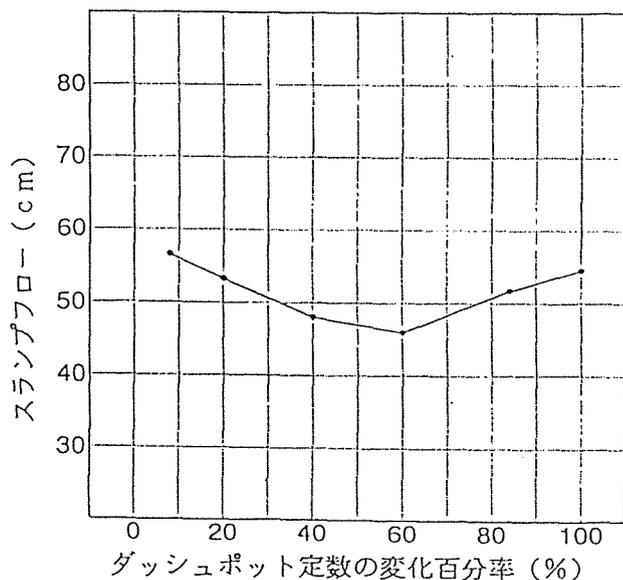


図-5 ダッシュポット定数とスランプフローの関係

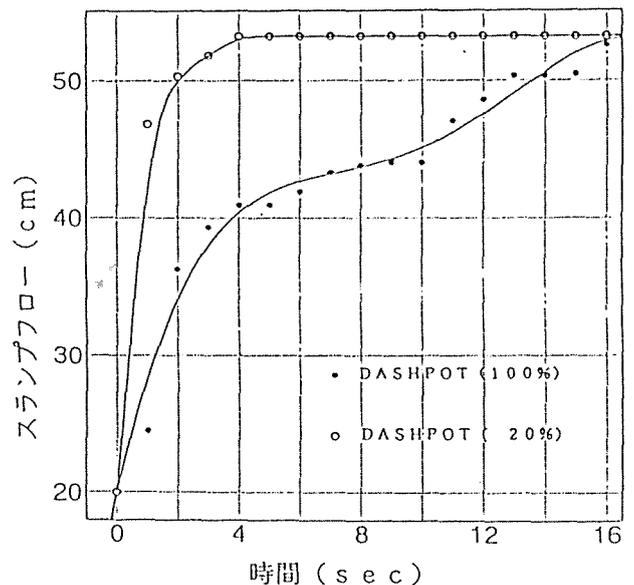


図-6 ダッシュポット定数が変形速度に与える影響

しかし、図-6に示すようにダッシュポット定数は変形速度に大きく影響する。ダッシュポット定数が小さい場合には、変形速度は速く、短い時間で最終状態に達する。逆に、ダッシュポット

ト定数を大きくすると、ゆっくりと変形し、同一の、最終状態になる。このことから、ダッシュポット定数は、スランプ試験の、変形速度を決定するパラメータであることが分かった。

図-7は要素間摩擦定数とスランプフローの関係である。両者は直線的な関係にあるが、要素間摩擦定数の変化に対するスランプフローの変化は比較的小さく、最終状態への影響は小さいと考えられる。

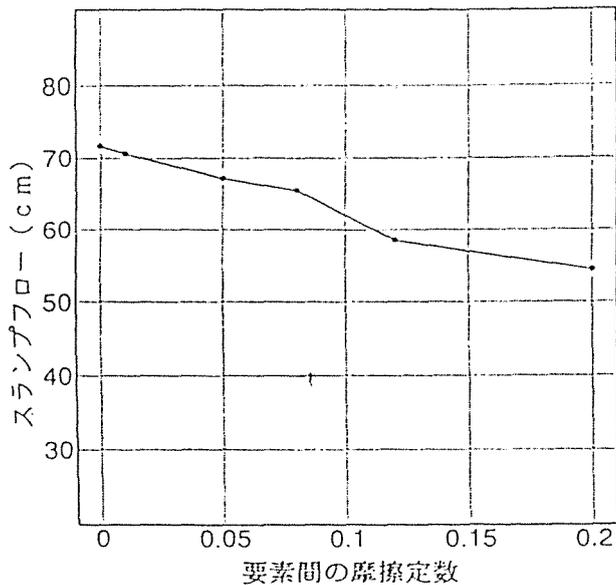


図-7 要素間摩擦定数とスランプフローの関係

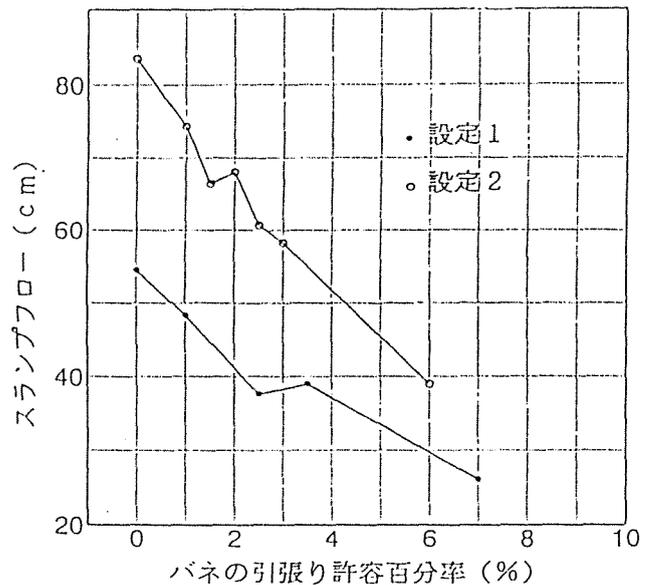
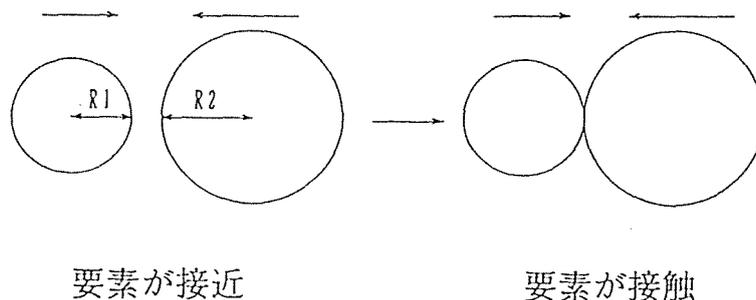


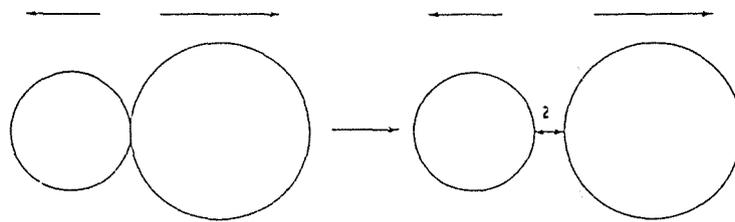
図-8 バネの引張り許容百分率とスランプフローの関係

図-8にバネの引張り許容百分率とスランプフローの関係を示す。バネの引張り許容百分率については、以下に示す。設定1はバックングに用いた定数、設定2は要素間摩擦定数のみ2倍としたものである。両者とも、バネの引張り許容百分率とスランプフローは直線的な関係がみられ、フレッシュコンクリートの最終状態を支配するパラメータであると考えられる。



バネの引張り許容百分率は、要素相互の力の伝達を行うモルタル部分を、シミュレーションパラメータにするために設けた。具体的には、要素が接近するときは全く関係がない。要素が接触したときも、引張り許容百分率とは関係なく力の伝達をする。次に、要素が離れようとしたと

き、要素が多少離れても接触していると仮定して、計算するのが、バネの引張り許容百分率となる。



$$\text{バネの引張り許容百分率 (\%)} = \frac{a}{R1+R2} \times 100$$

5. まとめ

本研究では、個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの解析手法の基本原理と解析結果を示した。数種類のシミュレーション結果から以下のことが言える。

- (1) ダッシュボット定数の影響は、最終状態にはほとんどみられず、変形速度と関係する。
- (2) 要素間摩擦定数、バネの引張り許容百分率は共にスランプフローと直線的な関係があり、変形の最終状態を考える上で重要な指標となる。
- (3) これらの結果をもとにすれば、型枠内を流動する場合のような、さらに複雑な流動状態のシミュレーションが可能と考えられる。

[参考文献]

- 1) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その1—、地震研究所彙報、Vol. 63、pp. 201-235、1988
- 2) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その2—、地震研究所彙報、Vol. 64、pp. 71-118、1989
- 3) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・小高茂央：動的粘塑性解析手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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 409-414、1992. 6
- 4) 小高茂央・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：動的粘塑性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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 345-350、1993. 6
- 5) 黒川善幸・谷川恭雄・森博嗣・小村理恵：フレッシュコンクリートのスランピング試験に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 351-356、1993. 6
- 6) 鍋田克己・睦好宏史・町田篤彦：特殊混和剤を用いたフレッシュコンクリートの流動性状の解明、土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 574-575、1992. 9
- 7) Treval, C. Powers: The Properties of Fresh Concrete、John Wiley & Sons, Inc、pp. 87-304、1968
- 8) 村田二郎・岡田清：最新コンクリート技術選書1 フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂、pp. 1-91、1981