

論文 2次元モデルによるフレッシュコンクリートのせん断 変形性質に関する研究

三島直生^{*1}・谷川恭雄^{*2}・黒川善幸^{*3}・寺田謙一^{*4}

要旨：本研究では、2次元にモデル化された固液2相系材料のせん断変形挙動を、実験的および解析的に検証し、フレッシュコンクリートの変形・流動のメカニズムに関する考察を行った。その結果、骨材どうしの接触が生じない試料では、骨材周辺に変形の拘束されるマトリックス部が存在し、骨材に囲まれたマトリックスの中央部付近に変形が集中すること、骨材の量が同一の場合は、骨材を分散させることによりサスペンションの粘度が増加すること、また、骨材どうしの接触が生じる試料では、それらの接触によって試料内部の変形が不規則になること、などが明らかになった。

キーワード：せん断ボックス試験, 粗骨材, 粘塑性有限要素法, フレッシュコンクリート

1. まえがき

一般的に行われているフレッシュコンクリートの流動解析や、せん断ボックス試験¹⁾、球引上げ試験、回転粘度計などのレオロジー試験は、試料を均質と仮定して行われている。しかし、骨材粒子を内包するフレッシュコンクリートは、変形・流動時に材料全体が必ずしも均等には変形していない。このことが、単純な粘度予測式が当てはまらない原因の一つであると考えられる²⁾。

また、骨材粒子のかみ合いがフレッシュコンクリートの流動性に大きく影響すると考えられるが、この現象を実験的に確認した研究は少なく、またその評価指標も明確ではない。

このため、本研究では、せん断ボックス試験器内の固液2相系モデル材料の変形挙動を、実験的および解析的に検証し、サスペンションの変形時における粘性増加のメカニズムに関する検討および骨材の挙動の把握を行った。

本報では、実験-1として、骨材どうしの接触が生じない試料を対象とした実験および解析を行い、実験-2として、骨材どうしの接触の生じる試料を対象とした実験を行った。

2. 骨材粒子間の接触のない場合

2.1 実験の概要

(1) 実験装置と測定方法

図-1に実験装置の概要を示す。鉛直型せん断ボックス試験器内の試料に強制的にせん断変形を与え、このときの試料の半分の領域の変形をVTRで撮影した。強制変位によって生じる領域全体の平均せん断ひずみ Γ が0.4および0.6付近の画像からマ

ーカーおよび骨材周囲の座標をそれぞれ計測し、その時刻変化から試料内の各部分のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を計算した。強制変位によって生じる領域全体の平均せん断ひずみ速度 $\dot{\Gamma}$ は

0.2および0.9

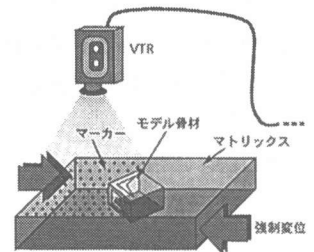


図-1 実験装置の概要

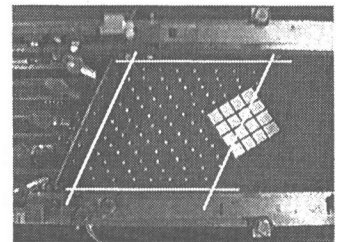


写真-1 測定画像の一例

*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

*3 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*4 (株)銭高組技術研究所主席研究員 工修 (正会員)

試料	降伏値 τ_y (Pa)	塑性粘度 η (Pa·s)
低粘度型	7.6	25.7
高粘度型	76.6	132.5

s^{-1} の2水準とした。

(2) 試料

実際のフレッシュコンクリートでは試料の内部が観察できないため、試料を2次元にモデル化した。マトリックスには吸水性高分子水溶液を用い、水との混合比および増粘剤の添加量により粘度を調整した。

B型回転粘度計で測定したマトリックスのビンガム定数を表-1に示す。ビンガム定数を算定する際には、せん断ボックス試験器で与えられるひずみ速度を考慮し、ひずみ速度が $0.1 \sim 1.5 s^{-1}$ の範囲の4点でコンシステンシー曲線を直線近似して求めた。

モデル骨材はポリエステル樹脂(比重1.1)を整形して製作し、形状は四角柱とした。断面寸法および配置は後述の数値解析に用いる要素分割と同一とした。試験器底面の摩擦による影響を低減するため、マトリックスに骨材を浮かせた状態で測定を行った。骨材高さは30mmとし、試料全体の深さは70mmとした。

マーカには直径約3mmの発泡スチロール粒子を用い、試料表面にはほぼ等間隔になるように配置した。測定画像の一例を写真-1に示す。

2.2 解析の概要

せん断ボックス試験器内におけるマトリックスおよび骨材の挙動を解析的に検証するために、2次元粘塑性有限要素法(VFEM)⁹⁾による数値解析を行った。本解析で用いた要素分割および骨材配置を図-2

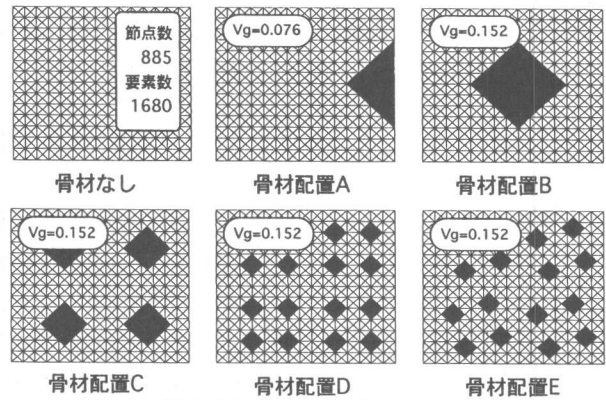
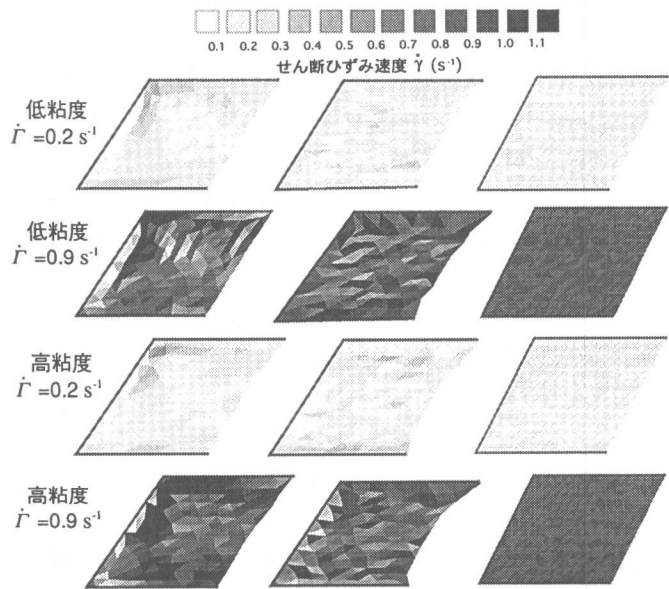


図-2 要素分割および骨材配置 (左半分)

に示す。図中の V_g とは骨材粒子の面積率である。以下の考察で用いる実験結果および解析結果の図は、試料全体の中央から左半分のみを示している。実験においても同様の骨材配置としているが、骨材配置Eについては解析のみとした。

解析の入力値であるマトリックスのビンガム定数には、表-1の実測値を用いた。また、実験時の試料の様子から判断して、試料と壁面の間にすべりは生じないものと仮定した。

解析結果のうち、各要素の応力および試料全



(a) 実験結果 (b) 追加実験結果 (c) 解析結果
図-3 骨材なしの場合の実験結果と解析結果の比較

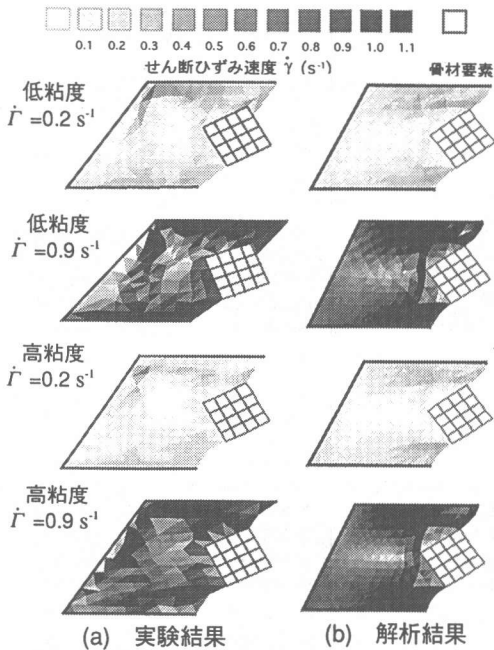


図-4 骨材配置Aの実験結果と解析結果の比較

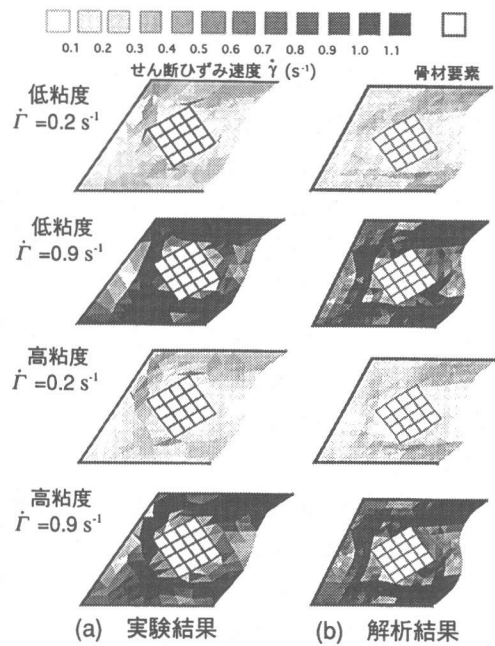


図-5 骨材配置Bの実験結果と解析結果の比較

体の変形抵抗応力は、出力時刻直前の0.1秒間に得られた計算結果の平均値とした。以下の考察では、強制変形によるせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ が0.5となる時の解析結果を用いる。

2.3 実験および解析の結果とその考察

(1) 骨材を混入しない場合

図-3に骨材を混入しないマトリックスのみの実験、追加実験および数値解析の結果を示す。図(c)の解析結果では、ほぼ均等にひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が分布している。一方、図(a)の実験結果からは、試料の左上部の角から下方にかけて高いひずみ速度の集中する部分が検出されたため、側面の板がスライドすることによる影響をなくした状態で追加実験を行ったところ、図(b)の追加実験結果ではその傾向が表れないことから、図(a)の結果が側面の板の影響による実験誤差であることが確認された。図(a)および図(b)の結果より、実験においても解析結果と同様に、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ はほぼ均等に分布していると判断できる。

(2) 骨材を混入した場合

図-4~7に、骨材配置A~Eの場合の実験結果と

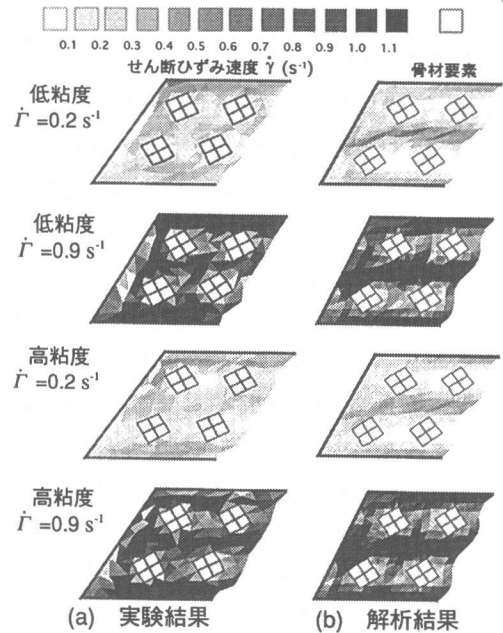


図-6 骨材配置Cの実験結果と解析結果の比較

解析結果の比較を示す。これらの図から明らかのように、混入した骨材の寸法・分布状態により、試料内のマトリックス部のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 分布は激変し、変形の大きい部分と小さい部分の差が明確になる。

ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布傾向に関して解析結果と実験結果を比較すると、前述の側面板による影響を除外すれば、両者は非常に良く対応している。

まず、いずれの結果においても、骨材の周囲に変形が拘束されている、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の小さいマトリックス部が存在しており、その外側にはひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の大きい領域が存在している。

骨材配置CおよびDのように、骨材が層状に複数存在している配置では、せん断面と平行で、かつ、骨材の存在しない層に変形が集中し、骨材の存在する層の変形は小さくなる。

骨材配置Eのように、骨材がせん断面と平行な層状に並んでいない場合は、4つの骨材に囲まれた中心部分にひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の大きい部分が集中している。

いずれの骨材配置においても、今回用いたような性質の試料では、マトリックス粘度の違いによるひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 分布の傾向の違いはあまり見られなかった。

(3) サスペンションのビンガム定数

解析結果より、サスペンションとしての変形抵抗応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を求め、得られたコンシステンシー曲線からビンガム定数を算定した。図-8に、マトリックスのビンガム定数として表-1の値を用いた場合の、相対降伏値および相対塑性粘度と骨材配置の関係を示す。

骨材なしの場合には、ほぼ入力値と同じ値が得られており、図-3に示したような均質なひずみ速度分布であれば、ほぼ正確なレオロジー定数がせん断ボックス試験によって測定されていることが確認された。

骨材配置A~Eでは骨材間の接触が生じていないため、骨材の混入による降伏値の増加傾向は認められない。

骨材配置E以外の試料に関しては、骨材の面積

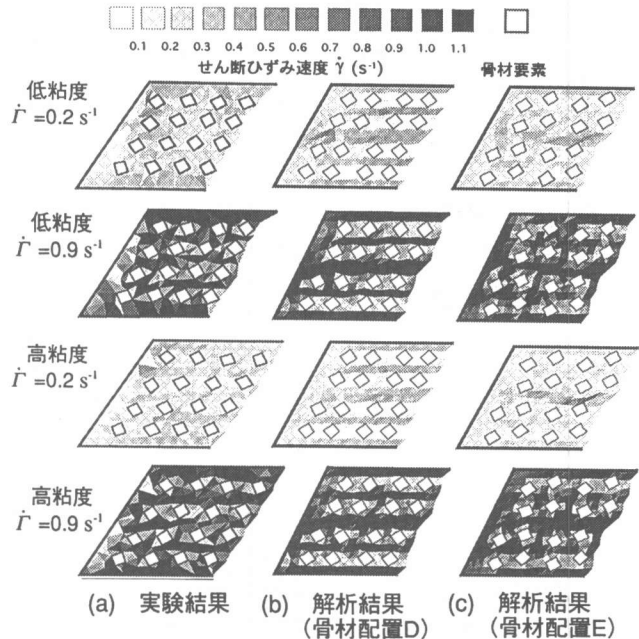


図-7 骨材配置DおよびEの実験結果と解析結果の比較

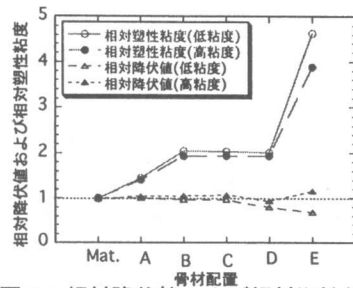


図-8 相対降伏値および相対塑性粘度

率に比例して、みかけ上得られる塑性粘度が増加している。

骨材配置B~Dに関しては、骨材の分散度を変えたにもかかわらず、骨材を層状に配置したために、ビンガム定数にはほとんど差がなかった。しかし、骨材を非層状に配置した骨材配置Eの塑性粘度が、分散度も粗骨材量も同じで、層状に配置した骨材配置Dに比べて非常に大きくなっている。前掲のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布状況によれば、骨材配置Eの方が偏りが少なくなっており、このことは、骨材を分散して配置することによって、変形が試料全体にいきわたり、サスペンションのせん断抵抗力が増加することを示している。

3. 骨材粒子間の接触のある場合

3.1 実験の概要

(1) 実験装置と測定方法

実験装置は前述の実験で用いたものと同様である。1個の骨材につき対角線上の2頂点の座標を画像から読み取り、その座標値から骨材粒子の回転角度、残りの2頂点の座標および骨材の中心の座標を算出した。また、これらの値から、各骨材粒子の回転の角速度 ω と試料内部のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布を求めた。この実験では、側面の板の影響を小さくするために、薄手のゴムシートを側面の板と試料の間に挿入した。測定画像の一例を写真-2に示す。

(2) 試料

マトリックスには前述の実験と同様な低粘度の吸水性高分子水溶液を用い、モデル骨材として、断面12×12mm、高さ30mmのポリエステル樹脂製圆柱体を用いた。本実験では、粗骨材どうしの接触の影響を観察するため、余剰マトリックス膜厚 fm を因子として取り上げた。

3.2 実験結果とその考察

(1) 角速度分布

図-9に、各骨材粒子の角速度 ω の測定結果を示す。図中の背面の色は、せん断ボックス試験器の側板の角速度を示す。図より明らかなように、余剰マトリックス膜厚 fm が小さいほど、また、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が大きいほど、骨材の角速度 ω のばらつきが大きくなり、試料内部の骨材の挙動が

不規則になっている。図-10に、骨材粒子の角速度 ω の確率密度関数を示す。骨材粒子の角速度 ω は、ほぼせん断ボックスの側板の角速度を中心として分布しており、その分布範囲は余剰マトリックス膜厚 fm が小さいほど広がる。

(2) ひずみ速度分布

図-11に、骨材の中心座標を節点として算出した試料内部のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布を示す。図-3の骨材を混入していないものと比較すると、変形が明らかに不均質になっており、試料内部で骨材粒子どうしの接触が生じ

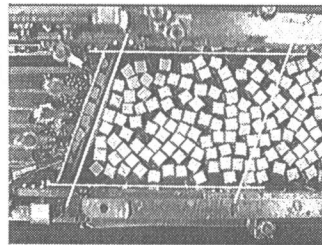


写真-2 測定画像の一例

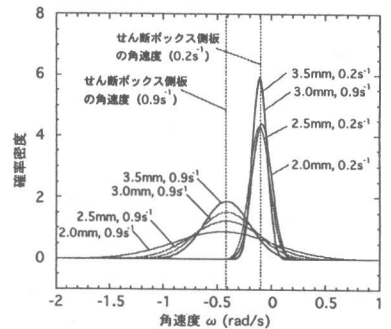


図-10 骨材粒子の角速度 ω の確率密度関数

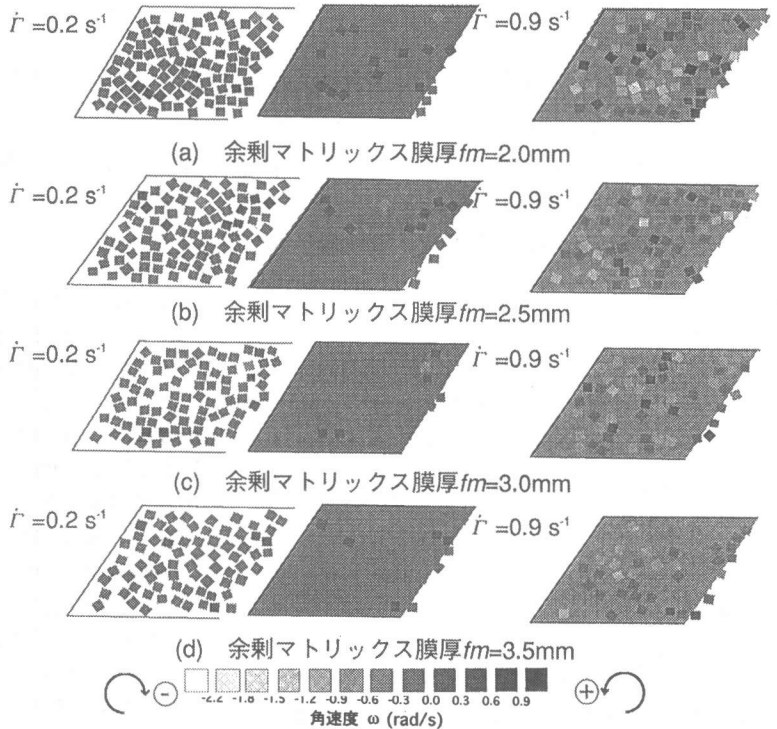


図-9 骨材粒子の角速度 ω の測定結果

る場合には、ミクロに見れば試料内部の変形が極めて局部的に集中することが予想される。

試料内部のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布は、骨材の角速度 ω のばらつきが大きいほど不均等になり、また、骨材の角速度 ω のばらつきは標準偏差によって定量的に表されるため、骨材の角速度分布の標準偏差を、試料内部の変形挙動の不規則さを表す指標とすることができる。また、この標準偏差は、図-12に示すように、余剰マトリックス膜厚 fm およびせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ との間に一定の相関関係がみられる。

骨材粒子の接触による、サスペンション内部の変形挙動の変化に対しては、今回取り上げた要因の他に、骨材粒子の形状、粒度分布、マトリックス粘度などが考えられる。

4. まとめ

本研究では、2次元可視化モデル材料を用いて、せん断変形時のフレッシュコンクリート内部のマトリックスおよび骨材の挙動を実験的・解析的に検討した。その結果、以下に示すような知見が得られた。

- 1) サスペンションの変形時には、骨材粒子周辺に変形の拘束されるマトリックス部が存在し、骨材粒子に囲まれたマトリックスの中央部付近に変形が集中する。
- 2) 骨材粒子の混入量が同一でも、骨材粒子を分散させるとサスペンションとしての粘性は増加する。
- 3) 骨材粒子どうしの接触により、試料内部の変形が不均等になり、余剰マトリックス膜厚が小さいほど、また、領域全体の平均せん断ひずみ速度が大きいほど試料内部のひずみ速度分布は不均等になる。

謝辞

本研究に際して、森博嗣助教授（名古屋大学）の指導を得た。また、本実験に際して、服部俊範君（名古屋大学学生）の協力を得た。本研究費の一部は、平成9年度文部省科学研究費補

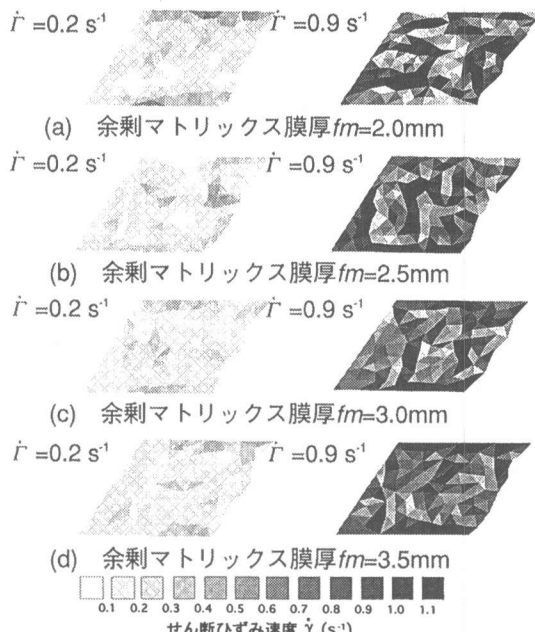


図-11 せん断ひずみ速度分布

助金・基盤研究 (A) (研究代表者：友澤史紀・東京大学教授) および同・基盤研究 (B)、同・奨励研究 (A) によった。付記して謝意を表する。

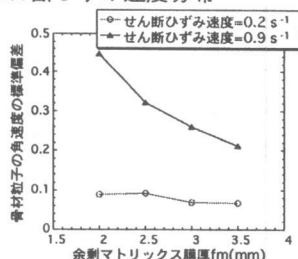


図-12 角速度 ω の標準偏差と余剰マトリックス膜厚 fm の関係

引用文献

- 1) 寺田謙一・谷川恭雄・森博嗣：フレッシュコンクリートのせん断変形における圧力依存性および寸法効果に関する実験的研究，フレッシュコンクリートの流動性と施工性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.25-30, 1996.4.
- 2) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1996.4.
- 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.