

# 論文 非均質流動体の力学相互作用に着目した閉塞機構の基礎検討

酒井 雄也<sup>\*1</sup>・長井 宏平<sup>\*2</sup>・大胡 賢一<sup>\*3</sup>・前川 宏一<sup>\*4</sup>

**要旨:** フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる粘着力のない二相系粒状体とみなし、アルミ棒積層体を用いた実験及びRBSMを用いた数値解析を実施し、鉄筋間を流動するコンクリートの粒子同士の力学相互作用を検討した。本研究では鉄筋をコンクリートに貫入することで流動を模擬した。実験は粗骨材の量、サイズ及び粒度分布をパラメータとして行い、貫入量と反力の関係を記録すると共に、画像解析(PIV)を用いて全体挙動を追跡した。解析では実験との比較と共に、実験では計測できない応力場についての検討を加え、各因子が閉塞に与える影響について考察を行った。

**キーワード:** フレッシュコンクリート, 力学相互作用, 閉塞, RBSM, アルミ棒積層体

## 1. はじめに

コンクリート構造物に関わる設計基準体系が性能照査型へと移行する中、構造細目に関しては依然として仕様規定に近い項目が多く残されており、長年に渡る改訂の中でその数値の根拠が不明瞭となっている項目があることが指摘されている<sup>1),2),3)</sup>。一方、耐震性能への要求の高まりにより、過密配筋を余儀なくされるケースは増加し、特に部材接合部において鉄筋組立作業時間と施工不良の危険性が増している。施工性能に対しては、材料分離抵抗性を確保しながら流動性をもつ配合へと移行しているが<sup>4)</sup>、構造細目に関しては近年新たな定着具や継ぎ手工法開発が行われる一方<sup>5)</sup>、定着長や曲げ、あき等について設計基準を見直すための研究は行われておらず改善の余地を残している。そこで、本研究では鉄筋のあきに着目し、流動性と閉塞に関する基礎的な挙動把握を二次元における実験と解析により試みる。なお、はりにおける軸方向鉄筋の水平のあきの規定は、コンクリート標準示方書昭和36年版において改訂されて以来、基本的に変更がなされていない。

フレッシュコンクリートの移動空間である鉄筋配置のスケールオーダーは、非均質材料であるコンクリートを構成する骨材スケールと等しい。このため、閉塞や施工不良などの連続体理論では考慮されない問題が生じる。これは鉄筋間の流動のみならず、ポンプ圧送においても報告されている<sup>6)</sup>。このような問題に対しては、材料を有限の大きさの粒の集まりとして捉える粒状体理論のアプローチが有効であると考えられる。

既往の研究では、ポンプ閉塞問題のメカニズムを把握するため、コンクリート流動を可視化した実験を実施しており、流れの方向が大きく変化する部分以外では、粗

骨材同士がかみ合うことにより生じるアーチングが閉塞の主な原因であること、また閉塞の発生には粗骨材による影響が支配的であることが明らかにされている<sup>7)</sup>。このように、フレッシュコンクリートの閉塞には流動中に粗骨材が構成する構造体の組成が重要な役割を果たしていると考えられる。ここで、構造体とは複数の骨材が接触することにより応力を伝達する構造を指す。自己充填コンクリートや高流動コンクリートの開発においても、フレッシュコンクリート内での粗骨材同士の相互作用や粗骨材と流動性との関係などが検討されているが<sup>8),9)</sup>、それらは相互作用を緩和し、流動性を確保することを念頭に置いたものであり、非均質場における粗骨材間力学相互作用や閉塞発達に関する研究は行われていない。

## 2. 実験

### 2.1 実験方法

アルミ棒積層体を用い鉄筋間を流動するフレッシュコンクリートを模擬した実験を行った。筆者らはアルミ棒積層体を用いた同様の実験を過去にも実施している<sup>10),11)</sup>。図-1に示す載荷フレームに長さ50.0mmの細径のアルミ棒( $\phi=1.6\text{mm}$ ,  $3.0\text{mm}$ を面積比3:2で混合)を用いて模擬モルタルを形成した。これにより粘性を含むコンクリート流動の定量的再現は困難であるが、試験の再現性が高いこと、粗骨材の基本力学相互作用の抽出には簡素な場が適することを勘案し採用に至った。なお、この積層体は地盤工学分野において豊浦砂を模擬する場合と同様であり<sup>12)</sup>、後述の数値解析におけるパラメータ同定に用いられる。

粗骨材は太径の $\phi=10.0$ 及び $40.0\text{mm}$ のアルミ棒により

\*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 講師 (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (非会員)

\*4 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 (正会員)

模した。幅 20mm の木製杭の先端に  $\phi=40.0\text{mm}$  の塩化ビニール管を取り付けることで鉄筋を模擬し、これを鉄筋間のあきを 50mm として 2 つ配し、根入れ深さ 50mm の位置からスクリージャッキを用いてモーターにより静的に貫入した。模擬コンクリートを流動させるのではなく鉄筋を貫入することによりコンクリート流動を表現し、反力は木製杭頭部に設置したロードセルで測定した。模擬コンクリートの挙動はビデオカメラで撮影し、デジタル画像データから流れの速度を計測する手法である PIV を用いて追跡した。表-1 に実験ケースを示す。M0 は粗骨材なしのケースであり、C シリーズでは M0 へ  $\phi=10\text{mm}$  もしくは 40mm の粗骨材を面積比で 30、45 及び 60% でランダムに混入し、粗骨材の直径と混入量の影響を検討する。CM シリーズでは両サイズの粗骨材を面積比 1:1 で混合したものを混入し、C シリーズと比較することで粒度分布の影響を調べる。いずれの試験も 1 ケースにつき 3 回実施され、粗骨材はランダムに配置されているため 1 回毎に配置が異なる。

## 2.2 実験結果

### (1) 粗骨材の量が流動に与える影響

M0 (図-2) と C シリーズのうち 10mm の粗骨材を混入したケース (C10) (図-3) に着目すると、反力の平均値はほぼ等しいものの、粗骨材の量が増大するにつれ反力の振幅の増加がみられる。原因として、粗骨材同士の噛み合いによる構造体の構成の影響が考えられる。著者ら

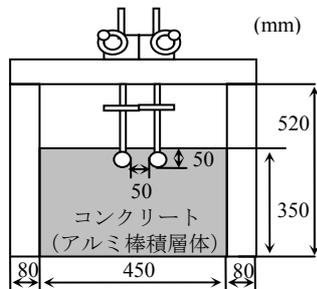


図-1 実験装置外観

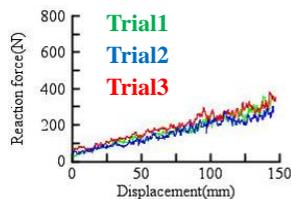


図-2 M0 の反力-貫入量関係

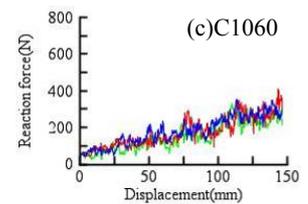
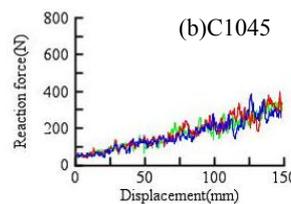
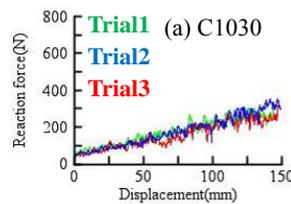


図-3 C10 シリーズの反力-貫入量関係

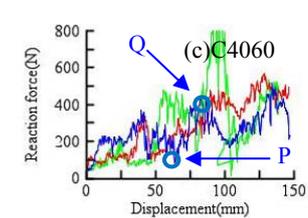
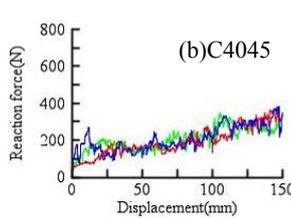
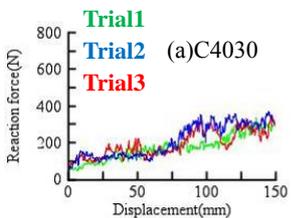


図-4 C40 シリーズの反力-貫入量関係

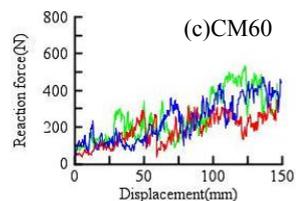
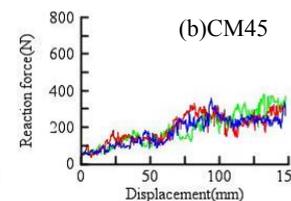
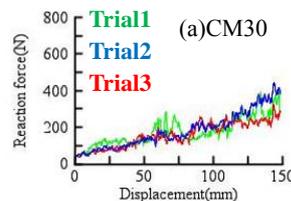


図-5 CM シリーズの反力-貫入量関係

は過去の研究により、粒状体への貫入中には構造体の崩壊、形成が繰り返し生じ、これが反力のばらつきとして表れることを確認している<sup>10)</sup>。さらに今回の実験では、以下のような鉄筋間通過時の挙動の違いも原因であると考えられる。PIVにより算定された、ある貫入量における M0 と C1060 の変位増分を図-6 に示す。M0 では左右の鉄筋に押しつけられたモルタルがどちらも鉄筋間に流入し、ほぼ対称な挙動が確認でき、また閉塞は観察されなかった。ここで、本研究では鉄筋の貫入とともに鉄筋間のコンクリートが下降した場合に閉塞と判断している。一方 C1060 (図-6(b)) では右の鉄筋を避けた粒子のみが鉄筋間に流入しており、非対称な流れとなっている。このような非対称な流れは左右にランダムに生じていた。また C1060 では時折、閉塞が観察された。すなわち鉄筋間流動の際には断面積が減少するため、そのままではコンクリートは鉄筋間を通過することができず、粒子の再配置が必要となる。この際 C1060 では両鉄筋から構成される構造体が重なり、噛み合いが強くなる。貫入中にはこのような粗骨材の構造体の形成と崩壊の繰り返しが観察された。よって、鉄筋間に形成された構

表-1 検討ケース

		全体に対する粗骨材の面積比			
		0%	30%	45%	60%
粗骨材 直径	10mm (C10)	M0	C1030	C1045	C1060
	40mm (C40)		C4030	C4045	C4060
	10mm&40mm 面積比 1:1 で混合		CM30	CM45	CM60

造体により円滑な鉄筋間通過が妨げられ一時的に閉塞が生じ、これが崩壊したときに片方から流入したものと考えられ、これが左右非対称な流れや反力のばらつきの原因であると考えられる。C1030 ではこのような対称・非対称の流れが交互に観察された。

### (2) 粗骨材のサイズが流動に与える影響

次にC10とC40(図-4)を比較する。C1030とC4030の反力-貫入量関係を比較しても、ほとんど違いは見られない。どちらのケースでも粗骨材はモルタルに浮いた状態であり、他の粗骨材や鉄筋に接触することなく鉄筋間を通過した。よって、粗骨材同士の噛み合いがなく、粗骨材径が鉄筋間隔よりもある程度小さければ、粗骨材のサイズは鉄筋間通過挙動にあまり影響しないものと考えられる。複数の粗骨材が鉄筋付近に集中した際に、一時的に鉄筋間への流入が妨げられたが、反力への影響はほとんどなかった。C4030の貫入量100mmにおいて多少反力の増加が見られるが、これは縦に2つ並んだ粗骨材に鉄筋が接触したことによるものである。また著者らは、貫入物体がそれ自体より大きな粗骨材に接触した場合にも反力が増加することを確認しているが<sup>11)</sup>、今回の実験で用いた粗骨材のサイズは鉄筋径以下であるため、この影響は生じていないと考えられる。

次に粗骨材同士の接触のあるC4060を見ると、反力が大きく増加している。Trial1では粗骨材が鉄筋と壁面の間で安定して噛み合うことで、高い反力が水平方向に生じ、杭が傾いたため、他の2ケースを検討する。どちらのケースでも鉄筋間に粗骨材が詰まることで持続的な閉塞が確認されており、一時的であったC1060に比べて安定した閉塞が生じた。閉塞前後の変位増分を図-7に示す。このときの反力が図-4中のTrial3の(P)、(Q)であり、閉塞により変位の範囲が広がり、反力が急増しているのが確認できる。C4045では粗骨材同士は接触しておらず、反力はほとんど増加していないことから、流動中に粗骨材同士が接触すると閉塞が生じやすくなるものと考えられる。C4060では閉塞が生じた際に変位の生じる範囲が側壁にまで達しているが、境界条件が反力や挙動に与える影響については、今後検証する必要がある。

### (3) 粒度分布が流動に与える影響

図-5を見るとCMシリーズでも、粗骨材の増加により反力のばらつきが範囲が大きく増加している。まず45%粗骨材を配置したケースを比較すると、C1045やC4045ではほとんど鉄筋間流動は阻害されなかったが、CM45では閉塞が確認された。C1045では粗骨材同士が接触することはあっても全体への影響は小さく、またC4045では粗骨材同士が接近する確率が低いため、どちらにおいても流動が妨げられなかったものと考えられる。一方CM45では、10mmと40mmの粗骨材が接触す

る可能性が比較的高く、粗骨材同士の干渉が流動中に生じ易い。このため閉塞が何度か確認され、反力もC1045とC4045と比較し増加する箇所があった。次に60%粗骨材を配置したケースを比較すると、45%のケースとは逆に、C4060に比べCM60の反力が若干低くなっている。どちらにおいても粗骨材同士の接触が頻繁に生じるが、CM60では40mmの粗骨材の半分が10mmに置き換えられたことにより、粒子の再配置が容易になったためと考えられる。すなわち40mmの粗骨材の一部が10mmに置き換わると、流動中の粗骨材同士の接触確率が増すことで粗骨材の構造体が構成され、鉄筋間流動を阻害する可能性は高まる。しかし一方で、10mmの粗骨材は40mmに比べ再配置が容易であり、形成された構造体は比較的崩壊しやすく、結果として反力はC4060を下回った。

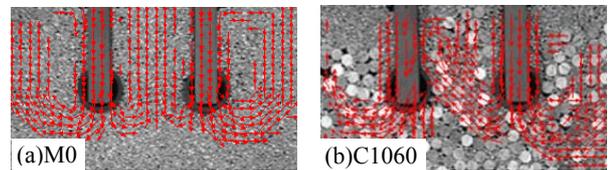


図-6 鉄筋間流動の比較

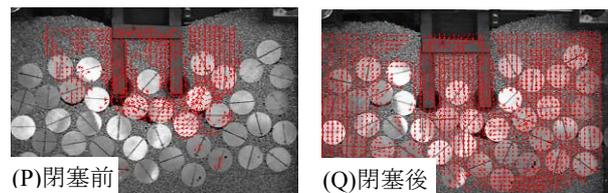


図-7 鉄筋間流動の比較

## 3. 数値シミュレーション

### 3.1 解析手法

離散解析手法により骨材及び鉄筋の力学相互作用の検討を行う。解析には川井により開発された剛体ばねモデル(RBSM)を用いる<sup>12)</sup>。これは離散化された要素間に設定されたバネにより応力を伝える手法であり、長井らはこの手法を用いコンクリート材料の破壊シミュレーションへと適用した<sup>14)</sup>。本研究では長井らが構築した解析システムを粒状体の解析へと拡張した。すなわち、本来微小変形に適したRBSMを、大変形を伴う流動シミュレーションに適用するため以下の変更を行った。1)要素形状を円形とする(図-8(a))、2)解析1ステップごとに座標変更、接触判定を行い、剛性マトリックスを再構築する。代表的な粒状体解析手法である個別要素法(DEM)と比較して、静的に現象を解くことがRBSMの特徴であり、1ステップ毎に力の釣り合いを算定し、収束計算を行う。長井らの解析では解析対象を、ボロノイ分割を利用し離散化し、要素間に伝わる力は要素辺長によって算出された。本研究ではこの接触辺長を簡易的にモルタル要素の直径Lとした(図-8(b))。粗骨材要素に

においても接触辺長をモルタル要素直径としており、要素分割程度とあわせ議論の余地を残している。

### 3.2 構成則及び入力値

図-9 に構成則を示す。垂直ばねは圧縮域で弾性挙動を示し、引張側では応力を伝えない。せん断ばねには弾塑性挙動を導入し降伏値はモールクーロン型の基準により決定される。入力定数は垂直ばね及びせん断ばねの弾性係数 ( $k_n$ ,  $k_s$ ) と粒子間摩擦角 ( $\phi$ ) である。本研究で模擬したモルタル層は豊浦砂と類似した力学挙動を示す。そこで、定圧直接せん断試験の解析を行い豊浦砂と同様の挙動を示すよう入力定数を同定した。せん断容器の大きさは幅 500mm、高さ 250mm とし、直径 4mm の要素をランダムに約 3,000 配置し、モデルを作成した。配置の際、一時的に粒子間摩擦角  $\phi$  を低くすることで密なモデルを、 $\phi$  を高くすることで疎なモデルを作成した。密なモデルにおけるせん断解析の結果を図-10 に、また最終的に採用したパラメータを表-2 に示す。図-11 は解析 (上段) と豊浦砂を用いた定圧直接せん断試験結果<sup>15)</sup> (下段) である。粒径及び粒度分布が異なることから定量的な比較はできないが、密なモデルではせん断応力にピークが表れ体積膨張をし、疎なモデルではピークが現れず体積収縮するなど、豊浦砂と同傾向の挙動が得られたことから、入力した構成則及びパラメータを採用することとした。

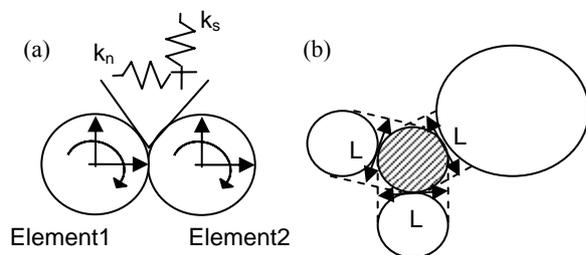


図-8 解析モデル (a)要素とバネ, (b)接触辺長

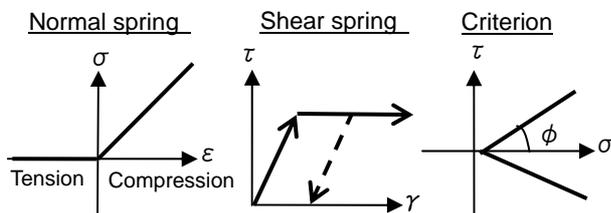


図-9 構成則



図-10 せん断後のモデル

表-2 入力定数

パラメータ	入力値
弾性係数 $k_n$ (MPa)	75
せん断剛性 $k_s$ (MPa)	5
粒子間摩擦角 $\phi$ (degree)	30

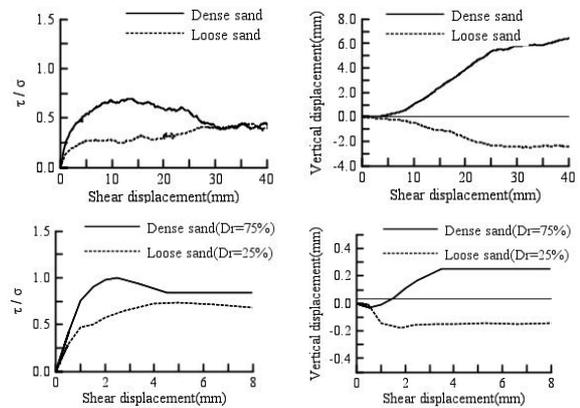


図-11 結果比較 (応力-変位関係及び体積変化)

### 3.3 流動解析

まず幅 500mm、高さ 500mm の領域に直径 4mm の要素を 10,440 個ランダムに配置し、高さ 350mm のモルタル層を作成した。実験のアルミ棒より大きな直径の要素を採用しているのは解析時間コスト軽減のためである。このモデルを基本ケースとし、モルタルの一部を直径 10mm 及び 40mm の要素と置き換えることで実験と同様の状態を再現した。鉄筋を模した直径 40mm の要素を 50mm の間隔で 2 つ配置し、0.2mm/step で貫入した。検討ケースは表-1 と同じである。

### 3.4 解析結果

#### (1) モルタルモデル(M0)

図-12 に解析モデル及び、貫入中に鉄筋に生じた鉛直方向の反力と貫入量との関係を、3 回実施した実験結果と併せて示す。反力のオーダーが一致しており、またばらつきの範囲も解析のほうが若干大きいものの実験と良く対応している。図-13(a)にはある貫入量における 1 ステップの変位の増分を示す。鉄筋を避けたモルタルが左右から鉄筋間に流入するなど、2.2 節で示した実験での変位場が解析で表現されていると言える。このときの応力状態を図-14(a)に示す。線の太さが要素間に設置されたバネの圧縮応力の大きさを表している。これを見ると、左右の鉄筋の下部に根状の応力分布が確認できる。後述のケースに比べ応力の伝達範囲は狭い。解析では非対称な流入も時折見られ、これがばらつきを増加させたものと考えられる。原因として実験で用いたアルミ棒 ( $\phi=1.6\text{mm}$  と  $\phi=3\text{mm}$ ) に比べ解析のモルタル要素 (4mm) の方が大きいこと及び単一粒径で模しているこ

とが挙げられる。実験と同様、閉塞は確認されなかった。

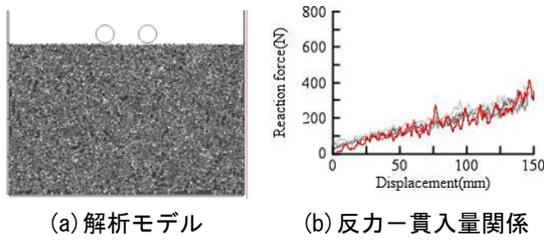


図-12 モルタルモデル M0

(2) 粗骨材の量が流動に与える影響

図-15 に C1030 及び C1060 のモデルを示す。実験と同様、C1030 では粗骨材同士は離れており、モルタルに浮いた状態にあるが、C1060 では粗骨材同士に接触が生じている。図-16 に両ケースの反力-貫入量関係を実験結果とあわせて示す。反力のオーダー及びばらつきは実験と同レベルであり、また粗骨材が増加するにつればらつきが増加するという傾向も一致している。図-16の(R), (S)点に対応する C1060 の変位増分を図-13(b), (c)に示す。M0 では左右の鉄筋を避けた粒子が対称に鉄筋間に流入するが、図-13(b)では右の鉄筋を避けた粒子は下方もしくは右側に移動しており、左の鉄筋を避けた粒子のみが鉄筋間を通過するなど、実験で観察された左右非対称な挙動が再現できた。このような非対称な鉄筋間通過の頻度も、実験と同様、粗骨材量が増えるにつれて増加した。また閉塞も時折観察された(図-13(c))。非閉塞時及び閉塞時の図-16(R), (S)点に対応する応力状態を図-14(b), (c)に示す。どちらの時点でも M0 に比べて応力の伝達範囲が広がっているが、これは粗骨材同士が噛み合い、構造体が形成されたためであると考えられる。非閉塞時には M0 と同様、鉄筋下部に応力が分布しているが、閉塞時には鉄筋間にアーチ状に高い応力が生じ、鉄筋間に粒子の噛み合いによるアーチ状の構造体が形成される。貫入中には、アーチの形成と崩壊が繰り返

返されており、高い応力がアーチ状に分布しているときには閉塞が生じ、反力が増加した。この鉄筋間から発達する構造体のアーチの形成と崩壊が左右非対称な流れや閉塞の原因であると考えられる。

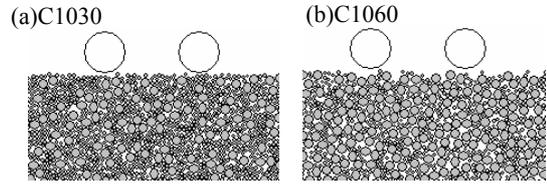


図-15 解析モデル (拡大図)

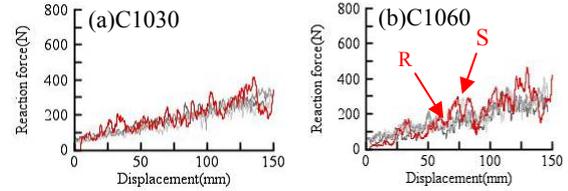


図-16 反力-貫入量関係

(3) 粗骨材のサイズが流動に与える影響

図-17 に C4030 と C4060 のモデルを示す。C4060 では粗骨材同士の接触が生じている。図-18 には反力-貫入量関係を実験結果とあわせて示す。実験に比べ、C4030 ではやや大きめの反力となっているが、C4060 ではよく対応している。非閉塞時及び閉塞時の C4060 の変位増分ベクトルを図-13(d), (e)に示す。それぞれ図-18(T), (U)点に対応する。実験と同様、閉塞の前後で変位の分布範囲が大きく広がっている(図7参照)。またそれらの応力状態を図-14(d), (e)に示す。同じ60%でも C1060 と比べ、発生する応力が大きく、また分布範囲も広い。これは鉄筋間への流入が生じている時点においても確認された。よって粗骨材が大きくなると、形成される構造体の範囲が大きくなり、鉄筋に生じる反力も増加するものと考えられる。なお応力分布を見ると実験と同様に壁面にまで応力が達している。

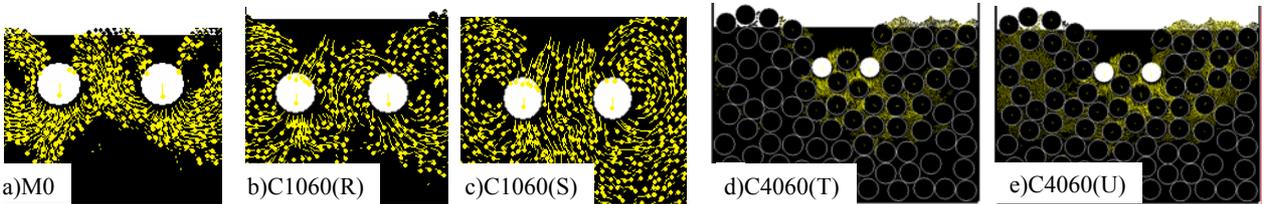


図-13 1ステップにおける変位増分

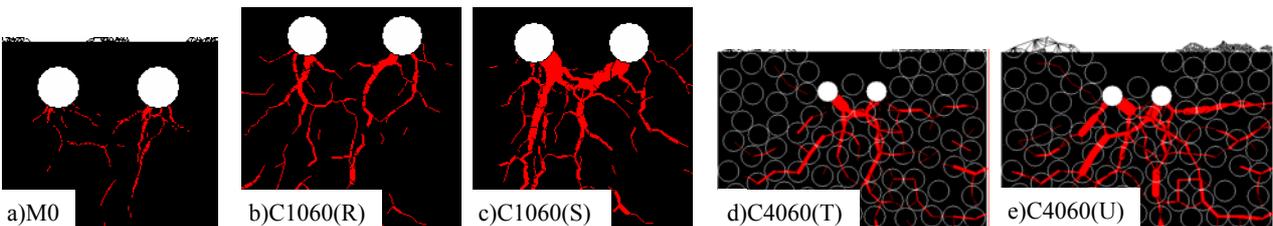


図-14 図-13に対応した応力分布 (0.025kPa/mm)

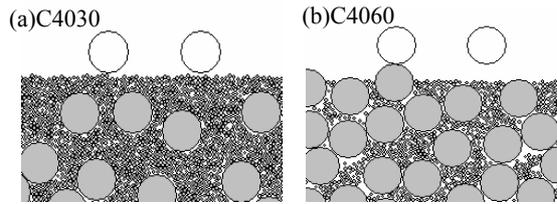


図-17 解析モデル (拡大図)

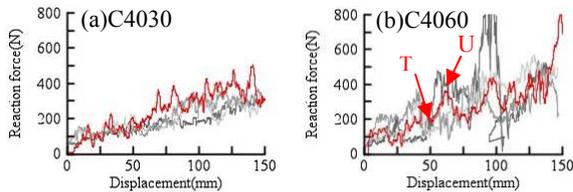


図-18 反力-貫入量関係

#### (4) 粗骨材の粒度分布が流動に与える影響

図-19に直径10mmと40mmの粗骨材を1対1で混ぜたものを面積比30% (CM30)と60% (CM60)配置したモデルを示す。CM60では粗骨材同士の接触が生じている。図-20には反力-貫入量関係を実験結果とあわせて示す。CM30では反力がやや大きくなっているが、CM60では実験結果とよく対応している。またC4060に比べCM60では若干反力が低くなっている。実験と同様に、CM60の方が粗骨材の構造体が形成される可能性は高いが、10mmの粗骨材の再配置が容易となるためその反力はC4060に比べ低くなるのが解析においても示された。

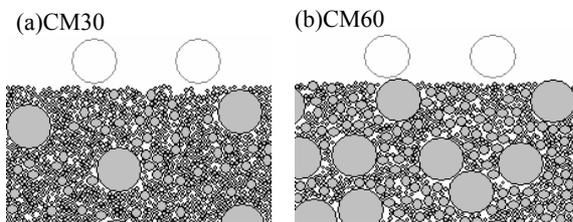


図-19 解析モデル (拡大図)

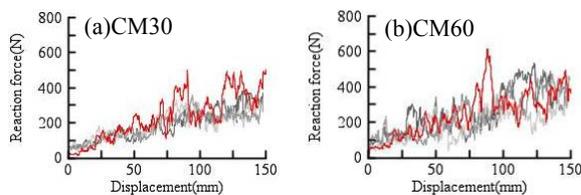


図-20 反力-貫入量関係

#### 4. 結論

以下に実験と解析から得られた結論を纏める。

- 1)フレッシュコンクリートが鉄筋間を通過する際には、隣り合う鉄筋から発達する粗骨材の構造体が干渉しあい、鉄筋間にアーチ状の構造体が形成される。アーチが崩れて流動が生じる場合には左右非対称な流れが生じ、これが崩れない場合に閉塞に至る。
- 2)粗骨材径が増加すると構造体の範囲が広がり、構造体同士の干渉が生じやすくなる。

3) 直径40mmの粗骨材の一部を10mmに置き換えると、流動中の粗骨材同士の接触確率が増すため構造体が形成されやすい。一方10mmの粗骨材は40mmに比べ再配置が容易となるため、形成された構造体は崩壊しやすい。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【2007年制定】，2007
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書改定資料【2007年版】，コンクリートライブラリー129，2007
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書の役割と将来像，コンクリート技術シリーズ68，2005
- 4) 土木学会：施工性能に基づくコンクリートの配合設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー126，2007
- 5) 土木学会：鉄筋定着・継手指針【2007年版】，コンクリートライブラリー128，2007
- 6) 田沢栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点，コンクリート工学，Vol. 21，No. 11，pp. 13-22，1983.11
- 7) 橋本親典ら：フレッシュコンクリートの管内挙動における閉塞過程の可視化実験手法，コンクリート工学，Vol. 17，No. 2，pp. 119-127，1988
- 8) 松尾茂美，小沢一雅：自己充填コンクリートの充填性に及ぼす粗骨材特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 135-140，1994
- 9) 泉達男，前川宏一，小沢一雅，國島正彦：固体間摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 10，No. 2，pp. 135-140，1988
- 10) 酒井雄也，長井宏平，前川宏一：礫の構造体形成が杭貫入抵抗に与える影響，土木学会第63回年次学術講演会，pp. 223-224，V，2008
- 11) 酒井雄也，長井宏平，前川宏一：砂礫地盤における礫の力学相互作用解明のための基礎実験，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1307-1308，2008
- 12) 村山朔郎，松岡元：粒状体の局部沈下現象について，土木学会論文集第172号，pp. 31-41，1969.12
- 13) Kawai, T. : New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structures, Nuclear Engineering Design, 48, pp. 207-229, 1978
- 14) Kohei NAGAI, Yasuhiko SATO and Tamon UEDA : Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 359-374, 2004.10
- 15) 瀬戸内秀規，新城俊也：一面せん断試験箱内面の周面摩擦力を考慮した砂のせん断試験，琉球大学農学部学術報告，NO. 46，1999.12