論文 可視化実験手法による高流動コンクリートの変形状態と鉄筋間隙通 過時に生じる圧力損失に関する検討

丸岡 正知^{*1}・渡辺 有寿^{*2}・藤原 浩已^{*3}・岩崎 麻美⁴⁾

要旨:高流動コンクリートの施工性評価の一指標と考えられる間隙通過時の圧力損失推定方 法の検討の一手方法として,可視化技術を用い,流動するモデル高流動コンクリートの間隙 通過時の内部挙動と圧力損失について実験的な検討を行った。その結果,せん断ひずみ速度 の概念を導入することにより,流動するコンクリート内部での粗骨材粒子挙動の変化を把握 でき,圧力損失との相関がわずかに認められた。

キーワード:高流動コンクリート,間隙通過性,圧力損失,可視化,ひずみ速度

1. はじめに

これまで筆者らは,配合条件や配筋状態,型 枠形状を要因とし,高流動コンクリートの施工 性評価を行うべく,実験的な検討を続けている。 この中で,鉄筋間隙を通過流動する高流動コン クリートの挙動において,鉄筋間隙部分で粗骨 材の閉塞現象が生じる状況により,流動障害と なる鉄筋とコンクリートとの間で生じる摩擦を 主とした抵抗力により圧力損失に差が生じるこ とがわかった¹⁾。また、障害近傍において圧力損 失が増大し,流動速度が極端に小さくなる場合, 粗骨材粒子が流動障害のない場合と比較して密 な状態となり,外力によりコンクリートが変形 しにくくなる。また, 粗骨材間隙が形成する連 続空隙があたかも仮想的なパイプを形成し、そ の中をモルタルが流動する状態を確認できた。 この状態を仮想的なパイプ内をビンガム流体と したモルタルが流動する現象に置き換え、仮想 細管モデルと称した簡易的な力学モデルを用い ることにより、コンクリート全体の圧力損失現 象を説明することを試み、種々の実験的検討を 重ね、粗骨材絶対容積割合Xvと鉄筋あき間隔L を用い、圧力損失を推定する手法についてある 程度の妥当性を得た²⁾。

また,仮想細管モデルによる圧力損失推定の 問題点である細管長さおよび細管半径の取り扱 いについても検討を重ねた結果,流動障害から の距離xでの障害上流側の粗骨材量を表す近似 関数f(x)を導入し,このf(x)が配合条件・配筋状態 から得られるパラメータにより推定可能である ことを導いた²⁾。しかし,仮想細管モデルによる 圧力損失推定手法には,細管の長さ・半径につい て仮定を元に推定する必要があるため、その推 定精度の向上に限界があると思われ,別の圧力 損失推定モデルを構築する必要があると考えた。

本研究では、この新たな圧力損失推定モデル を構築するための足がかりとして行った検討結 果を示すものである。

2. 圧力損失メカニズムに関する検討

本研究ではコンクリートをビンガム流体とみ なしたモルタル相と固相である粗骨材粒子の二 相系混相流体として扱う。流動障害となる鉄筋 が配置された型枠に高流動コンクリートを自己 充填する状態について考える。従来から言われ ているように,圧力損失が大きくなる原因とし て次のような現象が考えられる。流動するコン クリート内では,粗骨材粒子が鉄筋間隙近傍に

*1 宇都宮大学 工学部建設学科助手 工修 (正会員)
*2 宇都宮大学 大学院工学研究科建設学専攻 (正会員)
*3 宇都宮大学 工学部建設学科助教授 工博 (正会員)
*4 宇都宮大学 大学院工学研究科建設学専攻

て迂回挙動を示し, 粒子同士が接触・回転しな がら移動を続ける³⁾。このとき、流動するコンク リート中ではモルタル相と粗骨材粒子の流動経 路は一致せず、一体となって流動するはずのコ ンクリート中で局所的な流動速度差が生じ,い わゆる材料分離やモルタルの先流れを生じる。 時間経過に伴い,流動速度差により粗骨材量の 滞留現象が認められる。さらに進むと鉄筋間隙 で架橋を生じ,やがて圧力損失は急激に増大し, 流動停止に至る。この現象より、圧力損失の増 大は, モルタル相と粗骨材粒子の相対速度差が 顕著になり、材料分離状態を示し、粗骨材粒子 の局所的な増大による接触頻度増加により、そ れまではコンクリート全体をビンガム流体とし ての扱うことができた応力伝達状態が、固体粒 子同士の接触による応力伝達状態へ移行するた めと考えることができる。

そこで,この固体粒子同士の接触による応力 伝達状態が如何にして形成されるのかについて, 流動するコンクリート内の粗骨材粒子挙動を直 接的に把握することができる可視化実験手法を 適用し⁴⁾,流動に伴う粗骨材粒子挙動を把握し, これと圧力損失との関係について実験的な検討 を試みた。

また、高流動コンクリートが流動障害となる 鉄筋間隙を流動する際には、コンクリート中の 粗骨材粒子同士の相対的な位置が激しく変化す るものと考えられる。一方で、流動障害がなく 定常的な流れを示す場合や、障害近傍において 閉塞状態を示す場合、粗骨材粒子同士の位置関 係はほとんど変化しないことがこれまでの検討 の結果、経験的に得られている。これらの違い をより明確にするために、ひずみ速度の概念を 導入⁵⁾し、個々の粗骨材粒子の流動状況を追跡し、 粗骨材粒子群の相対距離の変化にひずみロゼッ ト法を応用し、経過時間に伴う最大せん断ひず み速度の分布状況を求めた。

3. ひずみ速度の定義

型枠内を流動する高流動コンクリートは実際



には三次元流れであるが、ここでは便宜上、二 次元平面流れとして扱う。図-1に示す4つの粒 子群で囲まれる四角形領域が、流動の時間経過 とともに変形していく状態を"ひずみ速度"とい う物理量で表現することとした^{4),5)}。"ひずみ速 度"はひずみロゼット法を用いて算出する⁹。4つ の粒子群で囲まれる四角形領域のひずみ速度を 次の方法により求める。すなわち,各頂点A,B,C, Dにおいてひずみロゼット法を適用し,引張を正 とする縦ひずみ速度を求める。例えば、頂点Aに 着目すると、Aを原点と想定し、頂点AとB、A とC,AとDを結んだ直線をひずみロゼット法の3 方向の軸と考え、3方向の軸に関して、縦ひずみ 速度(EI、E、EA)を求める。縦ひずみ速度は各経過 時刻における2点の粒子間距離の時間的変化を 意味する。また経過時間間隔は、相前後する四 角形の相対位置が大きく変化しない程度の微小 時間間隔とする。よって各頂点における三方向 の軸に関する角度の変化は0とみなし、3直線の 長さのみが変化すると考える。次に、この縦ひ ずみ速度成分を全体座標系に関するひずみ速度 成分(ε,ε,Υν)に変換する。その算定式を式(1)に 示す。なお, 0は各直線が流動方向x軸となす角 を示す。

 $\dot{\varepsilon}_{1} = \dot{\varepsilon}_{x} \cos^{2} \theta_{1} + \dot{\varepsilon}_{y} \sin^{2} \theta_{2} + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_{1} \cos \theta_{1}$ $\dot{\varepsilon}_{2} = \dot{\varepsilon}_{x} \cos^{2} \theta_{2} + \dot{\varepsilon}_{y} \sin^{2} \theta_{2} + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_{2} \cos \theta_{2}$ $\dot{\varepsilon}_{3} = \dot{\varepsilon}_{x} \cos^{2} \theta_{3} + \dot{\varepsilon}_{y} \sin^{2} \theta_{3} + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_{3} \cos \theta_{3}$ (1)

4頂点それぞれにおいて各頂点を原点として 三方向の軸に関する縦ひずみ速度および全体座 標系に関するひずみ速度成分を算出する。4頂点 の各ひずみ速度成分の平均値($\dot{\epsilon}_{x,ave}, \dot{\epsilon}_{y,ave}, \dot{\gamma}_{xy,ave}$) を四角形領域全体の平均的な変形性状を定量化 する物理量と見なした。従って各ひずみの速度 成分の平均値は四角形の重心位置でのひずみ速 度成分を表すものである。重心位置での3つのひ ずみ速度成分から最大せん断ひずみ速度,最大 主ひずみ速度および最小主ひずみ速度を算定す ることができる。本研究では、特に領域内の粗 骨材粒子により構成される四角形の変形が流れ の乱れを表すものと考え、せん断ひずみ速度に しぼり検討を行った。

4. 実験概要

4.1 モデル高流動コンクリートの使用材料

高流動コンクリートの可視化モデルとして, モルタル相と粗骨材粒子群からなる固液二相系 混相流体を用いた。モデル粗骨材として最大粗 骨材寸法15mmの人工軽量骨材を用いた。モデル モルタルとしては,高吸水性高分子樹脂に分 離・吸水が生じない程度に水を含ませ,高流動 コンクリートに類似した大きな粘性を付与する ために増粘剤を添加した無色透明な粘性流体を 用いた。

4.2 モデル高流動コンクリートの配合条件

基本的なモデル高流動コンクリートの配合条件は、粗骨材絶対容積割合Xvを0.26~0.38m³/m³まで0.02m³/m³毎に変化させ、各配合においてスランプフローが60cm程度となるように増粘剤添加量を調整した。

4.3 流動状況の可視化実験方法

(1)型枠の形状寸法

本実験における可視化実験方法の概要を図-2に示す。透明アクリル製のモデル型枠を作製 し、図中の水平流動部中央に流動障害となる鉄 筋の代替として、アクリルパイプ製の流動障害 を設置した。流動障害のあき間隔Lは21,24,27お よび30mmとした。これは、一般的なRC構造物に おける鉄筋あき間隔の最小値が粗骨材最大寸法 の4/3倍以上と規定されている⁷⁾こと、および並行 配筋時に粗骨材が鉄筋間で架橋を生じる危険が



取り込み画像の例: Xv=0.30, L=27mm

解析対象範囲を5分割

図-2 可視化実験の用いた型枠の形状,画像撮 影の状況および撮影された画像と領域分 割の例

高いとされる鉄筋間隔が $(2+\sqrt{3})r(r$ は粗骨材最 大半径を示す)である³⁾ことを考慮し決定したも のである。

(2)画像撮影及び画像処理方法

流動状況の把握については,図-2の水平流動 部の直上よりビデオカメラで水平流動部(長さ 200mm×幅150mm)を視野とし,流動状態を撮影 した。撮影画像を市販の画像処理ソフトを使用 し,個々の粗骨材粒子形状が把握しやすいよう に画像処理後,経過時間0.1秒ごとに相前後する 画像から同一粒子の座標を取得し,経過時間に 伴う連続的な移動状況を得た。なお,型枠壁面 近傍の粗骨材粒子の分布状態は壁効果によりそ の他の部分と同一視できないため,実際の画像 処理範囲は水平流動部の壁面から粗骨材の最大 寸法15mmのほぼ半分の8mm程度狭めた領域と した。

(3)流動方向におけるひずみ速度分布の算出

可視化実験における水平流動部を図のように 5分割し,測定画像から粗骨材粒子の座標データ を取得し,時間経過前後の各々の領域内に存在 する粗骨材粒子のデータをグループ分けした。 例えば,時刻t_nにおいて領域1内に存在する粒子a が時刻t_{n+1}においても領域1内に存在するという ような粒子のデータについて領域毎に抽出した。 従って,相前後する時間において異なる領域に 存在する粒子に関する座標データは除外してい る。各領域内で4つの粗骨材粒子を順番に取り出 し,せん断ひずみ速度を求めた。各領域におけ る四角形の形成数にばらつきがあるが,最低10 組程度の組み合わせが得られるようにした。各 領域で得られたひずみ速度を平均することによ り,その領域内での平均せん断ひずみ速度とし た。

このせん断ひずみ速度が大きくなると,流動 しているモデルコンクリート内での変形がその 部分で大きくなっていると考えられる。一方, 図中の領域1のように,流動障害から離れた部分 では,粒子間隔の変化は小さく,ひずみ速度の 変化も小さいと考えられる。

(4) 圧力損失測定方法

本研究における圧力損失 ΔP の測定は, 既報²) と同様に, 可視化実験において流動停止したモ デルコンクリートのタンク側およびせり上がり 部における自由表面の高さの差 Δh を実測し, モ デルコンクリートの密度 ρ および重力加速度gを 用い, $\Delta P = \rho g \Delta h$ として求めた。

5. 実験結果

5.1 せん断ひずみ速度の算出結果について

図-3に各領域におけるせん断ひずみ速度の 時間経過に伴う変化の一例を示す。せん断ひず み速度は、図のように全データを用いると変化 の特徴を捉えにくいため、種々検討した結果、 流動先端が障害鉄筋に接してから5秒毎の平均 値をその5秒間における代表値とした。従って、 これ以降、各々の値は0.1秒ごとに得られた50個 の値を平均したものである。

5.2 間隙条件がせん断ひずみ速度の変化に及ぼ す影響

図-4にXvおよびLの違いによる,各領域にお



けるせん断ひずみ速度の5秒間平均値の時間推移の例を示す。Xv=0.26, L=30mmやXv=0.30, L=30mmの条件においては、鉄筋あき間隔とXv の組み合わせにより表現されると考える間隙条件が緩いため、流動開始初期の段階で、いずれ の領域でも急激なせん断ひずみ速度を示し、そ の後、短時間でせん断ひずみ速度は0.5/s程度に 収束し、あまり大きな変動を示さない傾向が認 められた。また、Xv=0.32, L=24mmの条件では、

流動初期段階のせん断ひずみ速度は先の2例ほ ど大きくはないものの、その後は比較的大きな 変動幅で推移する。これは流動初期では粗骨材 粒子が構造的に緩い閉塞状態を局所的に形成す るものの、流動の外力を受けることにより閉塞 状態が部分的に崩れるような流動を続ける状態 が確認されており、すべての断面で均一な流動 状況を示さないことによると考えられる。また, このような不規則な流動状態を示すことにより, 流動障害の上流側では玉突き的に粗骨材粒子の 局所的な滞留と、モルタル相の先流れが生じや すく、圧力損失が増大する原因となると考えら れる。

また, Xv=0.34, L=27mmの条件では, 他の条件 ではほぼ収束状態を示す経過時間60秒を過ぎて も領域3において大きなせん断ひずみ速度の変 化を示した。これは流動障害付近に粗骨材粒子 が局所的に増大することにより生じる前者より 強固な閉塞構造が, 部分的に崩れることにより 急激な動きを示したためであると考えられ、こ の状況は可視化画像からも確認できた。

5.3 流動障害近傍におけるせん断ひずみ速度

流動障害近傍においてXvの影響を調べた例と して、図-5に領域3におけるL=24および30mm の場合について示す。L=30mmでは、いずれの Xvにおいても流動初期を除き、大きな変化を示 さず, 0.5~1.0/s程度のせん断ひずみ速度を生じ ながら流動している。しかし, L=24mmの場合, 特にXvが0.30より大きくなると流動障害近傍で の閉塞構造が顕著に生じ、一部では崩れるとい う流動現象を示すようになるため、せん断ひず み速度が大きな変化を示しながら推移していく と考えられる。

5.4 せん断ひずみ速度と圧力損失の関係

図-6に領域2および3にて算出されたせん断 ひずみ速度の最大値と圧力損失ΔPとの関係につ いて示す。

プロット群は図ー6に示すグループAおよびB の2群に分けられ、グループBでは、せん断ひず み速度の最大値とΔPとの間には負の相関を見い



だすことができる。また、グループAにおいても、 相関は低いが右下がりの傾向を示していると考 えられるため、2グループ間で相関の程度が異な るが、全体として最大せん断ひずみ速度の減少 に伴いΔPは増大する傾向があると考えられる。 なお、グループAはコンクリートがほとんど圧力 損失を生じることなく鉄筋間隙を通過流動する ことができる条件であると考えられる。

本研究の範囲内では実験数が十分ではなく, 断言はできないと思われるが,せん断ひずみ速 度が大きい場合,モデルコンクリート内部にお いて粗骨材粒子同士の相対的な位置のずれが多 数生じていると考えられるため,内部でのずり 変形による粒子間摩擦力の増大により, ΔPが大 きくなると考えられる。従って,圧力損失が大 きくなる状態では固液二相系流体としたモデル コンクリートにおいて,流体としての応力伝達 状態より固体粒子同士の摩擦による応力伝達状 態が卓越して生じているものと考えることがで きる。

6. まとめ

高流動コンクリートの施工性評価の指標とし て考えられる間隙通過時の圧力損失を把握する 実験の一環として,可視化実験手法を適用し, モデル高流動コンクリートによる流動状態にお ける内部的な挙動と圧力損失の関係について実 験的に検討した。その結果,せん断ひずみ速度 の概念を導入することにより,流動するコンク リート内部での粗骨材粒子の相対的変位を表す せん断ひずみが大きい場合,その部位での粗骨 材粒子同士のずれ変位が大きくなり,粒子の回 転・衝突・摩擦などに代表される現象が生じ, コンクリート内部でのエネルギー損失が増大す るため,圧力損失が増大すると考えられる。

参考文献

- 丸岡正知,藤原浩已,芦澤良一,石澤由:高 流動コンクリートの間げき部圧力損失現象
 に関する研究,セメント・コンクリート論文 集, No.56, pp.562-568, 2002.
- 丸岡正知,藤原浩已,芦澤良一,石澤由:鉄 筋間隙を通過する高流動コンクリートにお ける粗骨材の偏在状態の把握と圧力損失現 象の推定に関する研究,セメント・コンクリ ート論文集, No.57, pp.400-406, 2003.
- 藤原浩已:自己充填性を有する高流動コンク リートの特性に関する研究,東京工業大学学 位論文,pp.47-67,1996.
- (4) 浦野真次:可視化技術によるコンクリートの 施工設計に関する基礎的研究,群馬大学学位 論文,pp.45-82,1999.
- 5) 橋本親典,本間宏記,丸山久一,清水敬二: 変形間を流れるフレッシュコンクリートの 変形性能の評価方法,土木学会論文集 No.433/V-15, pp.91-100, 1991.
- 6) 菅野昭,高橋賞,吉野利男:応力ひずみ解析, 朝倉書店, pp.53-58, 1986.
- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[平成 8 年度制定]設計編, pp.108-109, 1996.