# 論文 鉄筋間隙通過時における高流動コンクリートの圧力損失と粗骨材量 増大現象に関する実験的研究

丸岡 正知<sup>\*1</sup>・石澤 由<sup>\*2</sup>・渡辺 有寿<sup>\*3</sup>・藤原 浩已<sup>\*4</sup>

要旨:高流動コンクリートの間隙通過時に生じる圧力損失量の推定に関する1手法として, コンクリート中からの鉄筋引上げ試験に可視化実験手法を取り入れ,モデルコンクリートを 使用し,鉄筋間隔や粗骨材量を変化させ引上げ荷重-変位の関係を調べ,併せて流動障害周 辺の粗骨材の挙動をビデオ画像を二値処理することにより,引上げに伴う粗骨材量増大現象 を確認した。また,間隙条件の厳しい場合に,粗骨材量の増大が顕著なることも確認した。 キーワード:高流動コンクリート,圧力損失,間隙通過性,粗骨材量,可視化実験

1. はじめに

これまで,高流動コンクリートのフレッシュ 性状に関する研究は多岐にわたりかなりの成果 が上がっていると思われる。なかでも,施工時 の型枠内流動を考慮した間隙通過性に関しても, 数多くの研究がなされており,委員会の報告書 にもまとめられている<sup>1)</sup>。

筆者らは、コンクリートの流動障害となる鉄 筋(以下,障害鉄筋と称する)を有する型枠内 を流動する高流動コンクリートの鉄筋間隙部を 流動する際に生じる充填高さの差を圧力損失と 称し、この圧力損失が生じるメカニズムについ て実験的検討を続けている。この中で、高流動 コンクリートが鉄筋間隙を通過して流動してい く場合、条件により、(1)鉄筋間において粗骨材 が閉塞し、流動が停止してしまう場合、(2)鉄筋 間隙を通過するが、圧力損失が生じている場合、 (3)ほとんど圧力損失は発生せず、鉄筋間隙を通 過し、完全充填される場合の3種類の状態に大 別できることを明らかにし、これら3種類の条 件の境界について考察を加えてきた<sup>2)</sup>。

一方,スランプフローを主としたフレッシュ コンクリート性状がほぼ一定の場合、鉄筋間隙 通過時における圧力損失量について、高流動コ ンクリートの示方配合時における粗骨材の絶対 容積割合(以下,単位粗骨材絶対容積割合:*Xv* と称す)と障害鉄筋の純あき間隔(*L*)をパラメー タとし,実験式によりある程度推定することが 可能であることを報告した<sup>3),4)</sup>。

また,障害鉄筋の配筋状態により,コンクリートの流動が停止するいわゆる閉塞状態になる条件について,粗骨材を代表半径rを有する球体と見なした場合,並行配筋の場合 $(2+\sqrt{3})r$ ,クロス配筋の場合 $(2+2\sqrt{2})r$ 以下の鉄筋純あき間隔では閉塞状態となることを実験的に見いだしている<sup>5)</sup>。

これらの研究を進める上で、問題となってい る点は、障害鉄筋間隙を通過する際にコンク リートに生じている材料分離に起因すると思わ れる粗骨材の滞留とモルタル部分の先流れ現象 であり,その発生メカニズムに関する研究は現 在のところ数少ないと思われる。

本研究は,この流動障害近傍で生じる粗骨材 の滞留による粗骨材量の増大現象発生のメカニ ズムを解明する足がかりとして,鉄筋引上げ試 験に可視化実験手法を適用した結果をまとめた ものである。

\*1 宇都宮大学 工学部建設学科 助手 工修 (正会員) \*2 仙台市役所 建設局下水道管理部 管路管理センター 工事係 \*3 宇都宮大学 大学院工学研究科建設学専攻 \*4 宇都宮大学 工学部建設学科 助教授 工博 (正会員) モデルコンクリートを使用した鉄筋引上げ実験

### 2.1 実験概要

(1)使用材料およびモデルコンクリートの配合条件

本研究では,障害鉄筋近傍における粗骨材分 布について検討を行うため,粗骨材粒子を可視 化する必要があった。このため、コンクリート をモルタルと粗骨材の固液二相系材料として扱 い,表-1に示す材料を用い,透明なモデルモル タルを作製した <sup>6)</sup>。ここで,高級水性高分子樹脂 を使用したのは、モルタル部分が透明であり、 実験実施の際に問題となるフレッシュ性状の経 時変化が小さく,水分の散逸が少なく保水性が 高い必要があったこと、また、市販品で容易に 入手できる材料であること等の理由によるもの である。また,表-1に示す人工軽量粗骨材を用 い,表 - 2に示す配合条件に基づいてモデルコン クリートを作製した。実際のコンクリートのフ レッシュ性状を再現するために,モデルコンク リートにおいてもスランプフローが 550~ 600mm 程度となるように予めモデルモルタルの フレッシュ性状を調節して試験に供した。

(2) 実験方法

実験は図 - 1に示す装置を使用し,透明アクリ ル板に所定の間隔離れた状態で長さ150mmのア クリル製丸棒を水平に3本固定した引上げ治具 を,変位制御が可能な引張試験機により定速で 引上げることにより,流動するコンクリート中 における障害鉄筋への作用力を測定することに 置き換えた。治具の引上げ方は,図中の停止位 置(i),(ii)および(iii)の位置にて引上げを一旦停止 し,5秒程度の停止時間の後,さらに引上げると いう手順を繰り返し,流動障害のアクリル丸棒 がモデルコンクリート中から露出するまで引上 げた。この間,引上げ治具上部に取り付けたロー ドセルにより引上げ時の荷重を, また, 試験機 に取り付けた変位計により変位をそれぞれ動ひ ずみ計(サンプリングレート,5Hz)により連続的 に測定することにより荷重~変位の関係を求め

#### 表 - 1 モデルコンクリートの材料諸元

	高吸水性	嵩比重:0.65 (メーカー
モデル モルタル	高分子樹脂	MSDS シートに記載)
	増粘剤	アクリル系,
		密度: 1.00g/cm <sup>3</sup>
	水	上水道水
粗骨材	人工軽量	最大寸法:15mm ,表乾密度:
	粗骨材	1.35g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 4.17%

#### 表 - 2 モデルコンクリートの配合条件

粗骨材絶対容	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )				
積割合(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	水	高分子樹脂	増粘剤	粗骨材	
0.26	716	2.81	21.55	350	
0.30	677	2.65	20.39	410	
0.34	638	2.50	19.22	460	



図 - 1 引き上げ試験装置概要



図-2 画像処理の例

た。また,この模様を流動障害のアクリル丸棒 間隙の状況が観察できる方向からデジタルビデ オカメラにて終始撮影し,撮影データから流動 障害のアクリル丸棒が停止した直後における障 害上部の画像データを用い,粗骨材を白色,そ の他を黒色とし,白黒のみで表されるように画 像処理を施すことにより(図 - 2参照),粗骨材の 占有面積割合を求め,流動するモデルコンク リート内での粗骨材量の変化を便宜的に次式(1) により推定した。

$$Xv_i = Xv_o \times \frac{S_i}{S_o} \tag{1}$$

ここに,

Xv<sub>i</sub>:停止位置 *i* における粗骨材全体容積割
 合の推定値

*Xv<sub>o</sub>*:配合条件で決定した粗骨材絶対容積 割合

*S<sub>i</sub>*:停止位置*i*における粗骨材面積割合

S<sub>a</sub>:引上げ開始前の粗骨材面積割合

なお,引上げ治具に取り付けたアクリル丸棒 の直径 D を 10, 15, 18 および 21mm と 4 水準に変 化させ,これらに合わせ,あき間隔 L をそれぞ れ 30, 27, 24 および 21mm とした。直径 15, 18 お よび 21mm の引上げ治具の流動障害部分の詳細 を図 - 3に示す。

引上げ試験における荷重と変位の関係につい て,測定結果の一例を図 - 4に示す。この結果を 用い,引上げ時に作用している平均荷重 f'を次 のように求めた。すなわち,対象範囲を,変位 速度がほぼ一定となる範囲とし,今回の場合, 変位が 0.5~20cm の範囲とし,荷重 - 変位曲線 と横軸とに囲まれた範囲の面積を計算対象とす る変位の値で除すことによりf'とした。

また,このデータ処理の際に問題となるのは, 引上げ治具側面のアクリル板とモデルコンク リートおよびモデルモルタルとの摩擦抵抗およ び引き上げ治具に作用する浮力と考えられた。 このため,摩擦については障害となるアクリル 丸棒を取り付けていない側板のみの治具による 引き上げ試験を行い,この測定結果による荷重 分を差し引いた。また,浮力については,アク リル製の治具側板がモデルコンクリート中に挿 入されている深度により変化するため,別途測 定し,深度の関数として補正値を求め,試験結 果に加えた。なお,摩擦および浮力による引上 げ荷重の補正値は最大でそれぞれ 2N および 3N 程度であった。



#### 2.2 試験結果

引き上げ試験における粗骨材絶対容積割合の 推定値 Xviと引上げ停止位置の関係について,図 - 5および図 - 6に示す。これらから,停止位置 が高くなるに従い,流動障害近傍における粗骨 材量の増大現象が確認できる。従って,鉄筋間 隙を通過する高流動コンクリートにおいては,



ほぼ均一な状態で型枠内に投入されたコンク リートが,鉄筋間隙を通過する際に流動障害近 傍においてモルタル相と粗骨材相が分離し,骨 材の滞留とモルタル相の先流れ現象を生じなが ら型枠内を充填していく現象を再現できると考 えられる。また,このような流動状態が本論文 1章で述べた(2)のような流動状態の元となる現 象ではないかと考えられる。

次に平均荷重f'とXviの関係について図 - 7に 示す。ややばらつきはあるものの,Xviの増加に 伴い,f'が増大する傾向が見てとれる。従って流 動に伴い,障害鉄筋近傍において粗骨材が滞留 していく現象により,コンクリートの見かけの 塑性粘度及び降伏値が増大した結果<sup>7)</sup>,障害鉄筋 に作用する荷重の増大,摩擦の増大,変形抵抗 の増大により,流動エネルギーのロスが増大す るため,圧力損失量が大きくなることが推察さ れる。



## 2.3 平均荷重と粗骨材絶対容積割合に関する幾 何学的考察

先に述べた粗骨材量の増大と障害鉄筋への作 用力には比較的高い相関関係が認められたため, 幾何学的にどのような状態なのかについて検討 を試みた。

まず 粗骨材は代表半径 r を有する球形粒子と 見なし,コンクリート中に均一に分散している と仮定する。このとき,粗骨材粒子は図-8に 示すように面心立方格子状に配置されていると する。粗骨材絶対容積割合 Xv と代表半径 r を任 意に定めることにより立方格子1ユニットの辺 長さ Lu や粒子間隔 Lg など,幾何学的な条件が 計算される。例えば,面心立法格子状に粗骨材 粒子が配置されるとした場合,次に示す式(2)に より立方格子1ユニットの辺 Lu を求めることが できる。

$$Lu = \sqrt[3]{\frac{16p}{3Xv} \times r}$$
(2)

また *Lu* を元にして骨材粒子間隔 *Lg* を次式(3) により求めることができる。

$$Lg = \sqrt{2Lu - 4r} \tag{3}$$

ここで,本実験における粗骨材の平均粒径を 代表半径 *r* とし, *r*=5mm と仮定した場合, *Xv* 別 に*Lu* および*Lg* を計算した結果を表 - 3 に示す。

この結果を基にし,粒子間隔  $L_g$  と図 - 7 から 得られた回帰直線により求めた平均荷重 f 'との 関係について図 - 9 に示す。元々,f ' ~ Xv につ いて比較的高い相関が認められていたため,Xvを基準として求めた  $L_g$  についても同様にf 'と高 い相関が認められた。

以上の結果から,幾何学的な仮定を元に,力 学的な力の釣り合い条件を基本とした次式を導 くことが出来ると考えた。

平均荷重として測定される値は,主に図-10に おける流動障害となるアクリル丸棒の中心間 2(L+D)の上側に存在する,引き上げにより粗骨 材が滞留したために密度が増大した部分のモデ ルコンクリートの周囲との密度差に体積を乗じ た質量を測定しているものと考える。周囲には 十分な量の均質なモデルコンクリートで満たさ れているとすると,次の式が成り立つと思われ る。

$$f' = (\mathbf{r}_{c}' - \mathbf{r}_{c})gh \times 2 \times (L+D)B + R \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{r}_{c}$$
:試験前の均質なモデルコンクリートの密

度

表 - 3 代表半径 r=5mm における各部寸法

Xv	Lu (mm)	Lg (mm)	図-7 における f'(N)
0.26	20.046	4.174	1.3307
0.30	19.112	3.514	2.5443
0.34	18.331	2.962	3.7580
0.38	17.664	2.345	4.9716





**r**<sub>c</sub>':試験において粗骨材の滞留により増大し

たモデルコンクリートの密度

g: 重力加速度

h:障害鉄筋上部に生ずる粗骨材量増大部分の

#### 高さ

L:鉄筋あき間隔

- D:鉄筋径
- B:障害鉄筋の長さ
- R:粘性流体中を動く際に生じる抵抗

つまり,本引上げ試験の結果得られた平均荷 重は,ある程度の粗骨材の滞留が生じた際に生 じる密度差と粗骨材の滞留が生じた部分のモデ ルコンクリートの体積および重力加速度を乗じ たものに、障害鉄筋に作用するモルタルの流動 抵抗を加えたものとなると考えられる。また, 障害鉄筋に関しては,あき間隔Lと鉄筋径Dの みを取り上げているが, 粗骨材の間隙通過性に 関わる部分であるため,粗骨材の絶対容積割合 Xv あるいは滞留して増大した時点での Xv'をパ ラメータに加える必要があると思われる。また、 粗骨材が鉄筋を迂回して動く場合や,間隙近傍 でアーチングを生じながらも流動する場合など 追加検討が必要な事項も数多くある。加えて、 モルタル部分のフレッシュ性状に関するパラ メータも取り込むべきである。しかしながら、 現在のところ、単一のモデルモルタル性状に絞 り,粗骨材量と鉄筋間隔の関係を中心に検討を 進め、その傾向を把握した段階であるため、こ れらに関しては,今後検討を続ける予定である。

#### 3. まとめ

高流動コンクリートが障害鉄筋間隙部を通過 する際に発生する圧力損失現象についてのメカ ニズムの解明を行う一環として,モデルコンク リートを用いた可視化実験手法を鉄筋引上げ実 験に適用し,障害鉄筋近傍にて滞留による濃縮 現象が確認され,間隙条件が厳しい場合におい て粗骨材の濃縮が顕著に現れることを確認した。

また,引き上げ試験において,簡易的な力学 モデルにより,引上げ荷重について表現を試み たが,データ不足等により改めて検討が必要で ある。 謝辞

本論文に係る実験実施にあたり,当時学生で あった齋藤裕幸氏(現,りんかい日産建設(株)) にご協力いただきました。ここに記して深く感 謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば,日本コンクリート工学協会:フレッシュコンクリートの力学的モデル研究委員 会報告,1996.4
- 2) 丸岡正知,藤原浩已,芦澤良一,石澤由:鉄 筋間隙を流動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.32-38, 2003
- 3) 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
- 4) 丸岡正知,石澤由,芦澤良一,藤原浩已:高
  流動コンクリートの間げき通過時の圧力損
  失に関する研究,コンクリート工学年次論文
  集, Vol.25, No.1, pp.959-964, 2003
- 5)藤原浩已,長瀧重義,大即信明,堂園昭人: 高流動コンクリートの間げき通過性に関す る研究,土木学会論文集,No.550/V-33, pp.23-32,1996.11
- (6) 浦野真次,橋本親典,辻幸和,杉山隆文:可 視化実験手法による高流動コンクリートの 流動性評価に関する基礎的研究,土木学会論 文集,No.585/V-38,pp.163-174,1998.2
- 7)和美広喜,笠井浩,柳田克巳,亀田泰弘:回 転翼型粘度計による高強度コンクリートの 流動特性値測定方法に関する実験的研究,コ ンクリート工学論文集,第1巻第1号,pp.133-141,1990.1