

# 論文 自己充填コンクリートの多層配筋構造における圧力損失現象に関する研究

大森 祐助\*1・藤原 浩巳\*2・丸岡 正知\*3

**要旨:** 自己充填コンクリートの間隙通過試験を行い圧力損失簡易推定式との比較を行った。さらに粗骨材体積割合の変化や流動挙動を把握するため、モデル自己充填コンクリートの間隙通過試験を行った。その結果、圧力損失簡易推定式は、間隙幅  $L$  が大きく、圧力損失の少ない条件では概ね傾向を捉えることができる。また、圧力損失簡易推定式の精度向上のためには、濃縮および閉塞現象が生じにくい間隙幅  $L$  の把握および間隙幅  $L$  が小さい場合に確認できる、粗骨材の廻り込みによる粗骨材同士の衝突に関して、圧力損失簡易推定式に組み込むことにより精度向上が可能である。

**キーワード:** 自己充填コンクリート, 圧力損失現象, 多層配筋構造, 粗骨材体積割合

## 1. はじめに

自己充填性を有する高流動コンクリート（以下、自己充填コンクリート）は、締固めなしに型枠内を充填することが可能なコンクリートである。しかし、実際には型枠内の流動途中で圧力損失現象により充填不良が生じる可能性があることが指摘されている<sup>1)</sup>。

このような充填不良を解決するためには、圧力損失現象がどのようなメカニズムで生じているかを解明することが必要である。

これまでの研究で、流動障害となる鉄筋が一段の単層配筋構造と二段の多層配筋構造について、モデル自己充填コンクリートを用いた可視化実験<sup>2), 3)</sup>を行い、仮想細管モデル<sup>4)</sup>を用いた流動挙動の解析や混相流体力学の概念を用いた圧力損失メカニズムの解析<sup>5)</sup>を進めてきた。

さらに、圧力損失メカニズムの理論的な検討を行い、圧力損失簡易推定式<sup>6)</sup>を導出した。そこで本研究では、既往の研究から得られた圧力損失簡易推定式が実際の自己充填コンクリートに適用可能かを検討し、問題点を抽出することで圧力損失簡易推定式の改善および精度向上を目的とした。

## 2. 自己充填コンクリートの間隙通過試験

### 2.1 試験概要

本章では、自己充填コンクリートを用い、多層配筋構造の間隙通過試験を行った。本試験では、流動障害を二段の二層配筋構造とし、粗骨材の絶対容積割合を示す粗骨材体積割合  $X_v$  を一定とした。さらに、試験結果と圧力損失簡易推定式からの推定値を比較し、推定式が適用可能かを検討した。

また、コンクリートを硬化させた後の水平流動部を抽

出し、水平方向に切断した。その切断面をカメラで撮影し、粗骨材体積割合の解析を行った。

### 2.2 間隙通過試験

#### (1) 試験条件

使用材料、配合条件および示方配合を表-1、表-2、および表-3に示す。配合については、スランプフロー値および空気量が条件を満たすように、高性能 AE 減水剤および消泡剤を添加し調整した。また、粗骨材の最大寸法は 20mm、粗骨材体積割合  $X_v$  は 30%とした。また、本試験に使用した型枠を図-1示す。流動障害の条件は、図-2に示す間隙幅  $L$  が 32, 36.5, 42.5mm の 3 水準、障害の前後間隔  $G$  は粗骨材最大寸法の 3, 5, 7, 10 倍の 4 水準とした。

表-1 使用材料

材料	記号	材料名
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	栃木県鬼怒川産川砂(密度:2.58g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G5	茨城県笠間産5号砕石(密度:2.65g/cm <sup>3</sup> )
	G6	茨城県笠間産6号砕石(密度:2.65g/cm <sup>3</sup> )
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 配合条件

W/C (%)	$X_v$ (%)	flow (mm)	空気量 (%)
31.8	30	650±50	2.5±1.0

表-3 示方配合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
W	C	S	G5	G6
175	550	840	397.5	397.5

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (正会員)

\*2 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学教授 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学助教 工博 (正会員)

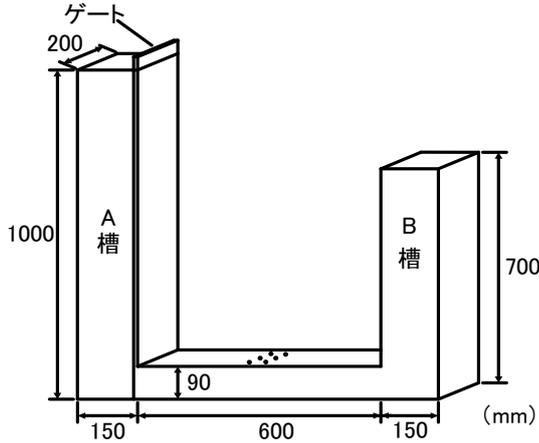


図-1 間隙通過試験型枠

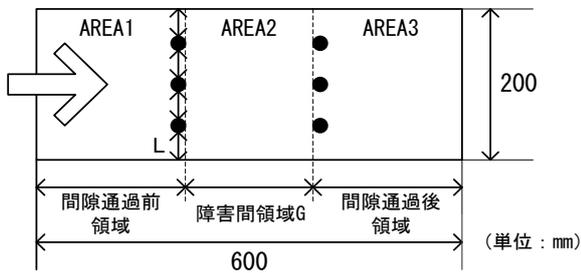


図-2 水平流動部

## (2) 試験方法

二層の流動障害を配置した、図-1の型枠のA槽に自己充填コンクリートを満たし、ゲートを開き自重のみで流動させた。流動停止後、A槽およびB槽の自由面高さの差を測定し、損失高さを $\Delta h_1$ とする。ここで、コンクリートと型枠との壁面摩擦を排除し、間隙通過による影響のみを抽出するため、鉄筋を配置しない場合についても同様の試験を行った。このときの損失高さを $\Delta h_2$ とし、圧力損失 $\Delta P$ は、式(1)より算出した。

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2) \quad (1)$$

$\rho$  : コンクリートの密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

## (3) 圧力損失簡易推定式

既往の研究から導いた圧力損失簡易推定式<sup>6)</sup>を式(2)に示す。

$$\Delta P = \left\{ \frac{2xD}{xD + (x+1)L} \cdot \tau_c \right\} \times n + \left\{ \frac{xD}{xD + (x+1)L} \cdot \rho g H X_v \cdot \sum_{m=1}^n \left( 1 - \frac{xD}{xD + (x+1)L} \right) \right\}^{n-m} \quad (2)$$

$x$  : 一層における鉄筋数  $D$  : 鉄筋径 (m)  $L$  : 間隙幅 (m)

$n$  : 層数  $\rho$  : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )  $X_v$  : 粗骨材体積割合 (%)

$g$  : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )  $\tau_c$  : コンクリートの降伏値 (Pa)

$H$  : A槽高さ (m)

本試験において、1つの層における鉄筋数 $x=3$ であり、二層配筋構造であるので $n=2$ となるので、式(3)で表わせる。

$$\Delta P = \left\{ \frac{6D}{3D+4L} \cdot \tau_c \right\} \times 2 + \left\{ \frac{3D}{3D+4L} \cdot \rho g H X_v \cdot \left( 1 - \frac{3D}{3D+4L} \right) \right\} \quad (3)$$

また、コンクリートの降伏値 $\tau_c$ は、既往の研究<sup>7)</sup>から回転粘度計を用いたツーポイント法より算定した式を用いた。この式を式(4)および(5)に示す。

$$\frac{\tau_c}{\tau_m} = 0.196X_v - 3.426 \quad (4)$$

$$\tau_m = -0.384R_0 + 128.23 \quad (5)$$

$\tau_c$  : コンクリート降伏値 (Pa)  $\tau_m$  : モルタル降伏値 (Pa)  
 $R_0$  : モルタル0打フロー値 (mm)

## 2.3 試験結果

間隙通過試験結果および推定値を図-3に示す。図-3から、自己充填コンクリートは間隙幅 $L$ が大きいほど圧力損失 $\Delta P$ は小さくなる傾向が認められた。

推定値と比較すると、間隙幅 $L$ が42.5mmの場合にのみ試験結果と同程度の値を示した。よって、圧力損失 $\Delta P$ が小さくなる間隙幅の場合、既往の研究から導いた圧力損失推定式は傾向を捉えることができる。

しかし、間隙幅 $L$ が32mm、障害の前後間隔 $G$ が100、140および200mmの場合について、推定値との差が非常に大きい。これは、コンクリートの流動を停止させる閉塞現象を生じたことが原因であり、これにより大きな圧力損失を生じたと考えられる。また圧力損失簡易推定式は、コンクリートが障害を通過する際、粗骨材の流れに停滞が生じ、局所的に粗骨材材量が増大する現象<sup>5)</sup>(以下、濃縮と称す)に関しては考慮しているものの、閉塞現象については考慮していないため、試験結果と推定値に大きな差が生じたと考えられる。

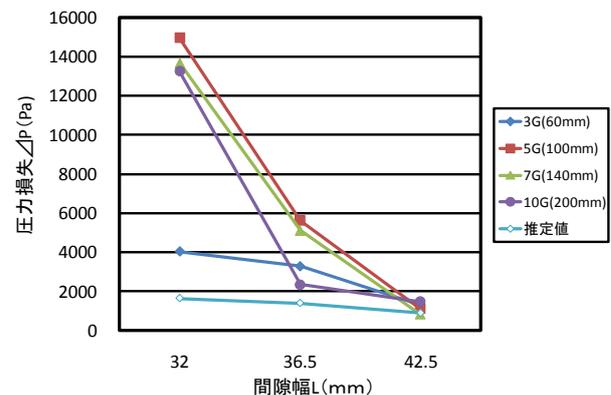


図-3 試験結果と推定値の比較

## 2.4 粗骨材体積割合の数値的解析

粗骨材が障害を通過する際、粗骨材の流れに停滞が生じる濃縮が確認されている。障害通過後の粗骨材体積割合  $Xv'_n$  は、間隙通過試験中の図-2に示す各 AREA における  $Xv$  を示すものであり、濃縮の程度が大きいほど大きくなるものと考えられる。

そこで間隙通過試験後、コンクリート中の各 AREA の粗骨材量を把握するために、硬化後のコンクリートを切断、撮影、および画像処理を行い、粗骨材の分布状況を調べた。手順は次の通りとした。

試験後、コンクリートを硬化させた後の水平流動部を抽出し、水平方向に切断した。その切断面をカメラで撮影し、静止画像を図-4のように二値化処理した。ここではペースト部分を白色、骨材を黒色となるように画像処理し、図-2の各 AREA に黒色の占める面積割合を、画像解析ソフトを用い測定した。また解析対象は粗骨材のみとしたが、画像処理に際し、細骨材も骨材として黒色に処理してしまうため、細骨材分を差し引く目的で高流動モルタルを用い、流動障害条件毎に間隙通過試験および画像処理を行い、各 AREA に黒色の占める細骨材面積割合を測定した。骨材の面積割合から細骨材の面積割合を差し引くことにより、粗骨材面積割合とした。

これにより、障害通過後の粗骨材体積割合  $Xv'$  は式(6)で表されるとした。

$$Xv'_n = \frac{S_n(A_1 + A_2 + A_3)}{A_1S_1 + A_2S_2 + A_3S_3} Xv \quad (6)$$

ここに  $n=1, 2, 3$  とする。

$Xv'_n$  : 障害通過後の粗骨材体積割合 (%)

$Xv$  : 配合時の粗骨材体積割合 (%)

$A_1, A_2, A_3$  : AREA1, 2, 3 の検査領域面積 ( $\text{mm}^2$ )

$S_1, S_2, S_3$  : AREA1, 2, 3 の粗骨材面積割合 (%)

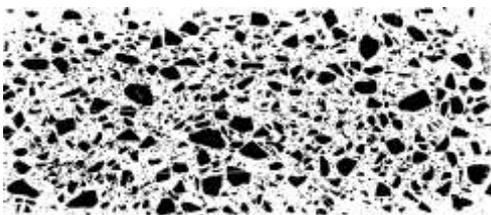


図-4 検査領域の二値化 (例:  $G=90\text{mm}$ ,  $L=30\text{mm}$ )

## 2.5 解析結果

粗骨材体積割合の解析結果を図-5～図-7に示す。図-5より、AREA1における粗骨材体積割合は配合時の  $Xv$  よりも増加し、AREA2での粗骨材体積割合は減少している。しかし、AREA3では配合時の  $Xv$  である30%程度の値を示していることから、濃縮の程度はあまり大きくないと考えられる。また図-6では、障害の前後間隔  $G$  が60および200mmである3Gおよび10Gにおいて、

AREA1～AREA3における粗骨材体積割合の若干変化はあるものの、配合時の  $Xv$  と同程度の値を示していることから、濃縮の程度はあまり大きくないと考えられる。しかし、障害の前後間隔  $G$  が100および140mmである5Gおよび7Gにおいては、AREA1からAREA3にかけて粗骨材体積割合は減少傾向にある。また5Gおよび7Gは、図-3からも圧力損失  $\Delta P$  が3Gおよび10Gと比べ大きな値を示していることから、AREA1において濃縮を生じたと考えられる。図-7の5Gにおいては、一層目の障害で閉塞現象を生じ測定不能であった。10Gに関しては、二層目の障害で閉塞現象を生じたため、AREA3について測定不能であった。しかし、3Gに関しては、図-5と同様にAREA1～AREA3における粗骨材体積割合の若干変化はあるものの、AREA3では配合時の  $Xv$  である30%程度の値を示していることから、濃縮がほとんど生じなかったため、圧力損失は小さな値を示したと考えられる。

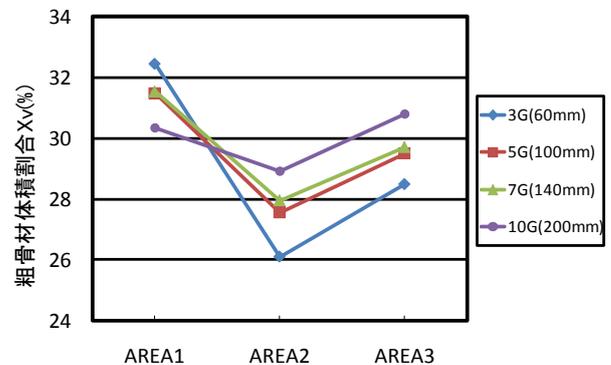


図-5 粗骨材体積割合の変化 ( $L=42.5\text{mm}$ )

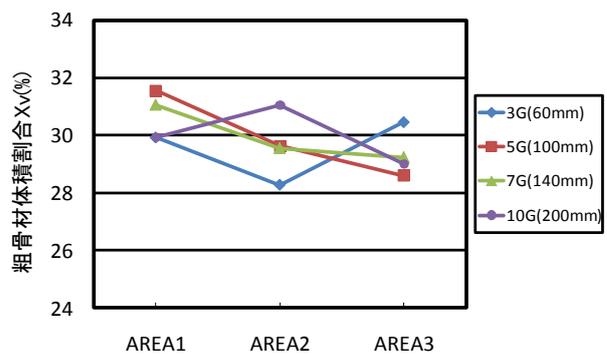


図-6 粗骨材体積割合の変化 ( $L=36.5\text{mm}$ )

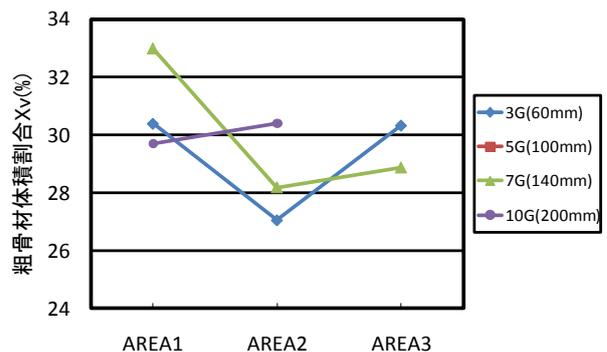


図-7 粗骨材体積割合の変化 ( $L=32\text{mm}$ )

図-5～図-7より、濃縮を生じにくいと考えられる間隙幅の条件においては、式(2)の圧力損失簡易推定式は概ね傾向を捉えることができる。よって、圧力損失推定式の精度向上のためには、濃縮および閉塞現象を生じにくい間隙幅 $L$ の把握が必要であると考えられる。また、圧力損失 $\Delta P$ と粗骨材の分布状況には関係があることが確認された。よって、可視化可能なモデル自己充填コンクリートを用いた流動挙動の検討を行った。

### 3. モデル自己充填コンクリートの間隙通過試験

#### 3.1 試験概要

本章では、可視化可能なモデル自己充填コンクリート（以下、モデルコンクリート）を用い、多層配筋構造における間隙通過試験を行い、自己充填コンクリートの流動挙動の検討に用いた。本試験は、流動障害を二段の二層配筋構造とし、モデルコンクリートの粘性および粗骨材体積割合 $X_v$ は一定とした。

また、モデルコンクリートの流動挙動を目視だけではなく数値的に捉えるため、撮影した映像を画像解析ソフトおよび流体解析ソフトを用いて映像を処理し、条件毎に粗骨材体積割合 $X_v$ の変化および流動挙動についての解析を行った。

#### 3.2 モデルコンクリートの間隙通過試験

##### (1) 使用材料

本研究では既往の研究<sup>5)</sup>同様、自己充填コンクリートをモルタルと粗骨材の固液二相系流体と捉えた。コンクリート中の粗骨材を可視化するため、モデルモルタルとして、水道水に増粘剤（アルキルアシルスルホン酸塩、密度：1.08g/cm<sup>3</sup>）を添加したものを、粗骨材はカラーリングを施した人工軽量骨材（最大寸法：15mm、絶乾密度：1.34g/cm<sup>3</sup>）を用い、これらを混合してモデルコンクリートとした。

##### (2) 試験方法

試験方法は、自己充填コンクリートの間隙通過試験と同様とする。また、モデルコンクリートの間隙通過試験では、試験中図-8に示す水平流動部の様子を上方よりビデオカメラで撮影し、各種解析に用いた。

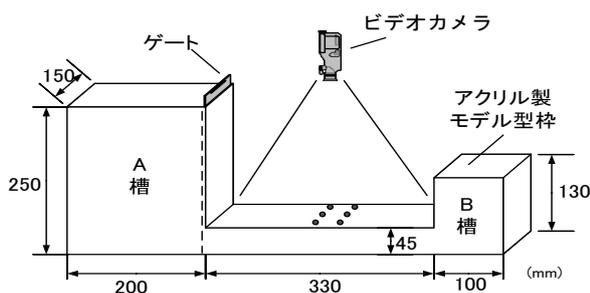


図-8 モデル型枠

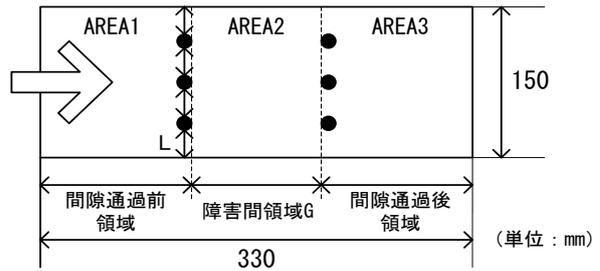


図-9 水平流動部

#### (3) 試験条件

モデルコンクリートの配合条件は、粗骨材体積割合 $X_v$ が30%、増粘剤添加率 $V$ を15%とした。増粘剤添加率については、予備実験を行い、モデルモルタルの0打フローが250mm程度になるように調整した結果より設定した。

また、モデル型枠の条件として、図-9に示す間隙幅 $L$ が21, 24, 26, 30mmの4水準、障害の前後間隔 $G$ は、モデル粗骨材最大寸法の3倍～10倍に相当する45, 60, 75, 90, 105, 120, 135および150mmの8水準とした。

#### 3.3 試験結果

間隙通過試験結果と推定値を図-10に示す。ここでは、実際の自己充填コンクリートとの傾向を比較するため、障害の前後間隔 $G$ が45, 75, 105および150mmの3G, 5G, 7および10Gについてのみ記載する。図-10から、自己充填コンクリートと同様に間隙幅 $L$ が大きいほど圧力損失 $\Delta P$ は小さくなる傾向が認められた。また推定値と比較した場合においても、自己充填コンクリートと同様に間隙幅 $L$ が大きい場合についてのみ、傾向を捉えることができる。

#### 3.4 可視化実験結果の数値的解析

まずAREA1, AREA2およびAREA3における静止画像を図-11のように二値化処理を行い、本章では白色を粗骨材、黒色をモルタル部分とみなし、領域毎に白色が占める粗骨材面積割合を、画像解析ソフトを用い測定

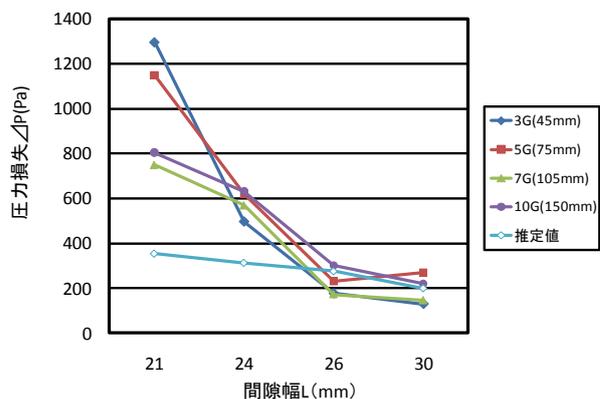


図-10 試験結果と推定値の比較

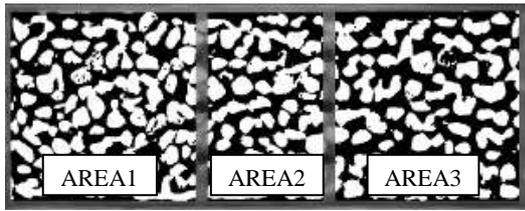


図-1-1 検査領域の二値化 (例: G=90mm, L=30mm)

した。さらに、2.4と同様にして AREA1, AREA2 および AREA3 における粗骨材面積割合をそれぞれ  $S_1$ ,  $S_2$  および  $S_3$  とし、粗骨材体積割合  $X_v$ 'は式 (6) を用いて算出した。

### 3.5 解析結果

解析結果を図-1-2~図-1-5に示す。図-1-2および図-1-3においては、各 AREA とも配合時の  $X_v$  と同程度の値を示していることから、濃縮をあまり生じていないと考えられる。これは図-1-0において圧力損失が小さな値を示していることから確認できる。また、図-1-4および図-1-5においては、AREA1 から AREA3 にかけて粗骨材体積割合は減少傾向にある。この条件では圧力損失も大きいため、濃縮を生じていることが原因であると考えられる。これらの結果から、自己充填コンクリートとモデルコンクリートの圧力損失および粗骨材体積割合の変化は、概ね同様の傾向を示していることが

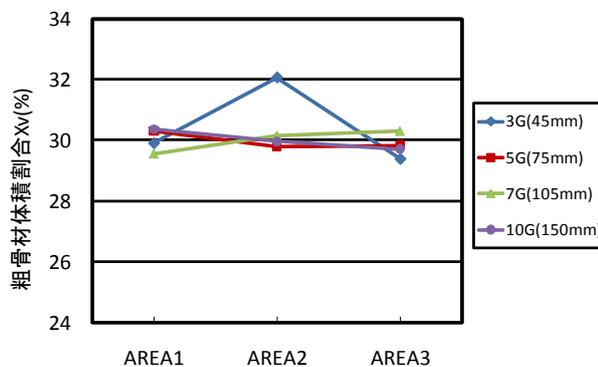


図-1-2 粗骨材体積割合の変化 (L=30mm)

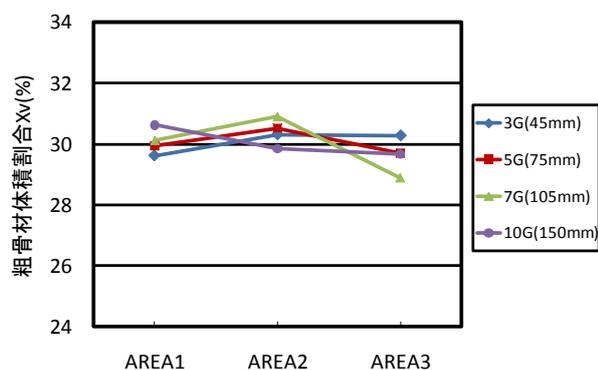


図-1-3 粗骨材体積割合の変化 (L=26mm)

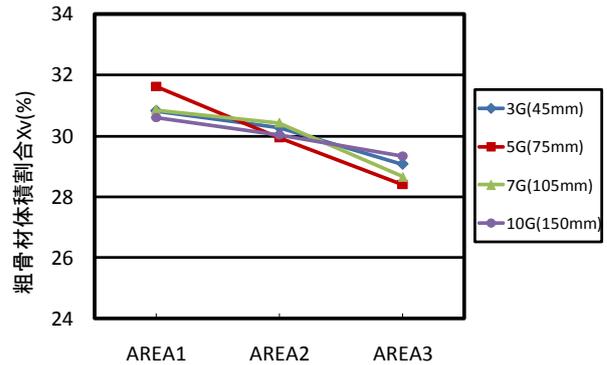


図-1-4 粗骨材体積割合の変化 (L=24mm)

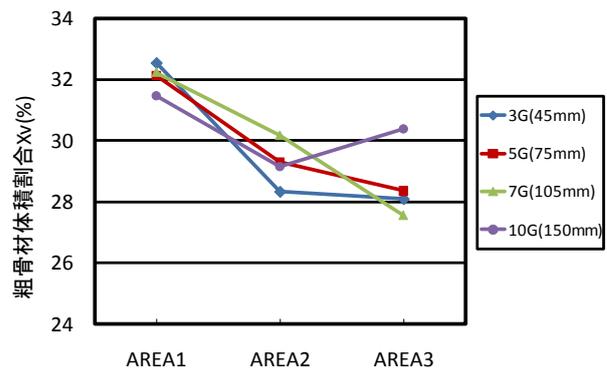


図-1-5 粗骨材体積割合の変化 (L=21mm)

確認され、粗骨材体積割合の変化は、間隙幅  $L$  の影響が大きいことが確認された。さらに、粗骨材の流動挙動についての解析を行い、圧力損失を生じる原因を検討する必要がある。

### 3.6 可視化実験結果の流動挙動解析

間隙通過試験中において撮影した映像を、画像処理計測法<sup>8)</sup>の一つである PTV (Particle Tracking Velocimetry) を用いた流動解析ソフトを使用し、粗骨材が間隙を通過する際の流動挙動の把握を行った。このソフトを用いることにより、粗骨材の流速、流動方向、移動距離等を計測することができる。本解析では、粗骨材がどのように流動しているかを把握するため、各々の粗骨材の流線の解析を行った。

### 3.7 解析結果

図-1-6および図-1-7に、障害の前後間隔  $G$  が 150mm, 間隙幅  $L$  が 30mm および 21mm についての解析結果のみを示す。間隙幅  $L$  が大きい場合の図-1-6では、障害を通過する際には障害を廻り込む流動挙動を示しているが、障害の前後においては、流動挙動に大きな変化は見られない。しかし、図-1-7の間隙幅  $L$  が小さい場合には、障害を通過する際に障害を大きく廻り込むような流動挙動を示し、障害の前後における粗骨材の流動に乱れを生じている。このような障害を大きく廻り込む流動挙動や流動が乱れることにより、粗骨材同士が接触す

る可能性が高くなると考えられ、これも圧力損失現象の要因の一つであると考えられる。よって、この粗骨材の廻り込みによる粗骨材同士の衝突と間隙幅  $L$  との関係を圧力損失簡易推定式に組み込むことで、より精度が向上すると考えられる。

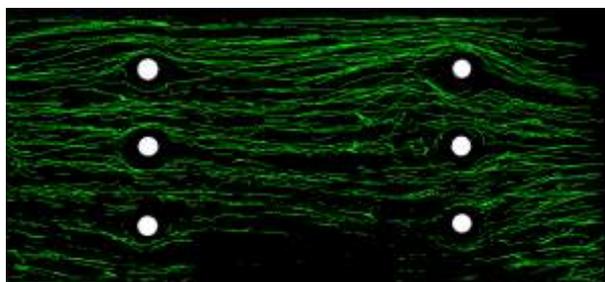


図-16 粗骨材の流線 ( $G=150\text{mm}$ ,  $L=30\text{mm}$ )

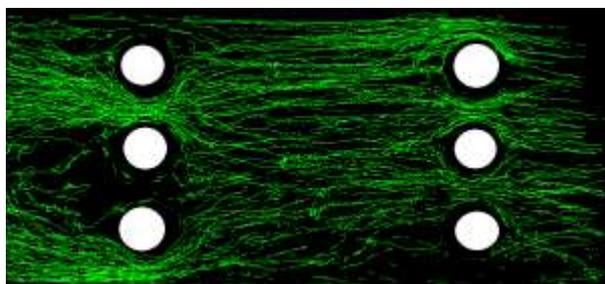


図-17 粗骨材の流線 ( $G=150\text{mm}$ ,  $L=21\text{mm}$ )

#### 4. まとめ

自己充填コンクリートの間隙通過試験、モデルコンクリートの間隙通過試験、粗骨材体積割合の解析および粗骨材の流動挙動の解析を行い、そこから得られた知見を以下に示す。

- (1) 既往の研究から導いた圧力損失簡易推定式は、間隙幅  $L$  が大きく、圧力損失の少ない条件では概ね傾向を捉えることができる。
- (2) 二層配筋構造において、圧力損失簡易推定式の精度向上のためには、濃縮および閉塞現象が生じにくい間隙幅  $L$  の把握が必要である。
- (3) 間隙幅  $L$  が小さい場合に確認できる、粗骨材の廻り込みにより、粗骨材同士の衝突をする可能性が高いため、これを圧力損失簡易推定式に組み込むことで、より精度の向上が可能である。

#### 謝辞

本研究で使用した増粘剤を提供していただいた花王(株)関係者各位に御礼申し上げます。

また、本研究の実験結果の一部は平成18年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号:18560447, 研究代表者:藤原浩巳)により実施したものである。付記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 藤原浩巳: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, 東京工業大学位論文, 1996.3
- 2) 例えば, 橋本親典, 吉田正宏, 安積淳一, 辻幸和:フレッシュコンクリートの可視化実験手法に関する相似則の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp89-94, 1991.7
- 3) 谷川恭雄ほか:超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関するレオロジー的考察, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.79-84, 1993.5
- 4) 芦澤良一ほか:高流動コンクリートの鉄筋間通過における圧力損失に関する研究, 第57回セメント技術大会講演要旨, pp.254-255, 2003.4
- 5) 渡邊暢ほか:多層流動障害通過時の自己充填コンクリートの圧力損失メカニズムに関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp73-78, 2007.7
- 6) 渡辺有寿ほか:高流動コンクリートの鉄筋間通過時における圧力損失メカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp1139-1144, 2006.7
- 7) 石澤由:高流動コンクリートの間げき部流動挙動に関するレオロジー的考察, 宇都宮大学大学院, 工学研究科, 建設学専攻, 修了論文, 2004
- 8) 可視化情報学会:可視化情報ライブラリー, 光学的可視化法, 2001