

# 論文 自己充填コンクリートの多層配筋状態における粗骨材閉塞現象に関する研究

大森 祐助\*1・藤原 浩巳\*2・丸岡 正知\*3・小倉 恵里香\*4

**要旨:** モデル自己充填コンクリートを用いた一定圧力流動下における流動実験を行い、多層配筋状態における障害の前後間隔を変化させた場合の流動挙動、粗骨材の流速及び粗骨材体積濃度の変化を検証した。その結果、障害あき  $L$  が大きく、流動障害間隔  $G$  が大きい場合ほど、粗骨材の流速が速くなり、AREA1 での粗骨材体積濃度の増加が少なくなることが明らかとなった。さらに、3 パターンの濃縮状況を把握することができた。

**キーワード:** 自己充填コンクリート, 多層配筋状態, 閉塞現象, 可視化モデル

## 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）は締めめなしに自己充填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。

既往の研究では、流動障害となる鉄筋が一段の単層配筋状態と二段の多層配筋状態について、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、理論的な検討が行われてきた。しかし、単層配筋状態時の圧力損失メカニズムを多層配筋状態時に適用できるまでには至っていない。そこで本研究では、多層配筋状態時の障害の前後間隔を変化させた場合の自己充填コンクリート流動挙動の変化を把握し、単層配筋状態における圧力損失メカニズムが多層配筋状態時に適用可能かを解明するための現象把握を目的として、モデル自己充填コンクリートの可視化実験を行った。

## 2. 可視化技術を用いた一定圧力流動試験

### 2.1 実験概要

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、多層配筋状態での間隙通過試験を行った。実験は、流動圧力をほぼ一定とすることにより、実施工における型枠内充填状況を模したものである。また、本実験は流動障害を二段の二層

配筋状態とし、モデルコンクリートの粘性及び粗骨材体積濃度は一定として試験を行った。

### 2.2 間隙通過試験

#### (1) 使用材料

本研究では既往の研究<sup>5), 6)</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（アルキルアリルスルホン酸塩、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自己充填コンクリートとした。

#### (2) 試験方法

型枠内を流動するコンクリートに作用する圧力をほぼ一定とするため、図-1に示すモデル型枠のA槽にモデルコンクリートを投入し続け、一定の水頭高さを保持した。水平部を通過し、B槽に達したモデルコンクリートは、端部の切欠部より流れ出るようにした。また、実験ではモデルコンクリートを10分間投入し続け、この間に排出された質量を測定し、流量として換算した。

また実験中は、図-2に示す水平流動部の様子を図-1の様に、上方よりビデオカメラで撮影し、各種解析に用いた。

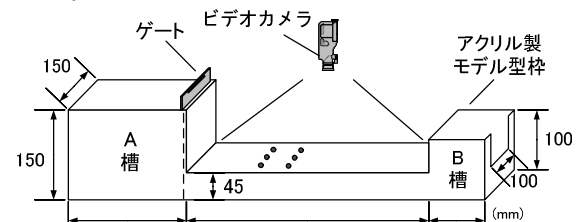


図-1 モデル型枠

\*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 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学 工学部建設学科助教 工博 (正会員)

\*4 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻

### (3) 試験条件

モデルコンクリートの配合条件は、モデルコンクリートの粗骨材体積濃度  $X_v$  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-2 に示す障害のあき  $L$  が 21, 24, 26, 30mm の 4 水準、障害の前後間隔  $G$  は、粗骨材最大寸法の 6 倍~10 倍に相当する 90, 105, 120, 135 及び 150mm の 5 水準とした。なお、粗骨材最大寸法の 5 倍以下の間隔については、これまでに実施し、 $G$  とモデルコンクリートの流動状況の間には、明確な規則性が見出せている。

### (4) コンクリートの流動挙動

表-1 に、流動障害近傍における粗骨材の閉塞状況及び障害通過流量 ( $m^3/min$ ) を示す。また、図-3 の左図に示すように、部分的閉塞を生じたものを◎、右図に示すように、モルタルの型枠内充填は可能だが、すべての間隙が粗骨材により閉塞したもの（全閉塞）を●としてそれぞれ示す。さらに、モルタルのみが流動する、モルタルの先流れの有無を示す。また、障害通過流量と障害のあき  $L$  の関係を図-4 に示す。ここに示す流量とは、B 槽から排出されたモデルコンクリートの体積を試験時間で除した値である。

これまでの研究<sup>5)</sup>より、障害間で粗骨材のアーチングが起こることによって閉塞する現象（以下、閉塞現象）が生じることが確認されている。

また、粗骨材が障害部分を通過する際、粗骨材の流れに停滞が生じ、閉塞現象を生じることにより、流動障害上流側で粗骨材体積濃度  $X_v$  が増大する現象が確認されている。（以下、この現象を濃縮と称す）

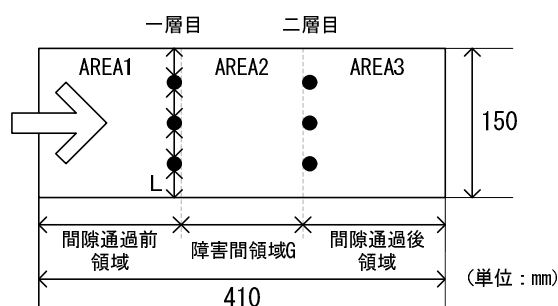


図-2 水平流動部上面図

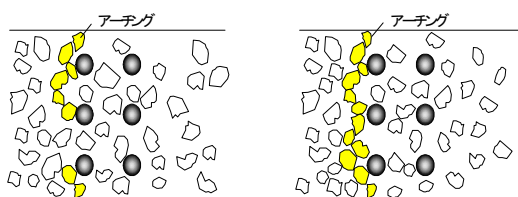


図-3 閉塞状況

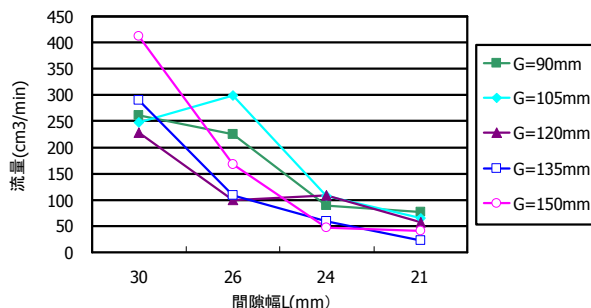


図-4 障害通過流量と障害あきの関係

この現象は、一層目及び二層目共に生じることが、これまでの研究より確認されている<sup>6)</sup>。

障害のあき  $L$  が大きい場合、障害の前後間隔  $G$  の大きい方が、流量が大きくなる傾向が認められた。また、障害のあき  $L$  が小さい場合は、障害の前後間隔  $G$  の大小に関係なく、流量は小さくなる傾向が認められた。

流量の変化や閉塞現象の発生には、障害の前後間隔  $G$  と障害のあき  $L$  が相互に影響していると考えられる。

表-1 間隙部における閉塞状況及び流量

V (%)	$X_v$ (%)	G (mm)	L (mm)	閉塞現象		モルタル先流れ	流量 (cm³/min)
				一層	二層		
15	30	90	30	◎	◎		261.50
			26	◎	◎	○	225.43
			24	◎	◎	○	89.27
			21	●		○	77.55
		105	30	◎	◎	○	247.97
			26	◎	◎	○	299.37
			24	●	◎	○	107.30
			21	●		○	64.92
		120	30	◎	◎		228.13
			26	◎	◎	○	100.09
			24	●	◎	○	109.11
			21	●	◎	○	57.71
		135	30				289.45
			26	●	◎	○	108.21
			24	●		○	58.61
			21	●	◎	○	22.54
150	30	◎			412.98		
	26	◎	◎	○	167.72		
	24	●	◎	○	46.89		
	21	●	◎	○	40.58		

※◎を部分閉塞、●を全閉塞とする

## 3. 可視化実験結果の数値的解析

### 3.1 解析概要

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処理し、解析

を行った。本研究では、動的解析として粗骨材平均速度の算出をし、また静的解析として粗骨材体積濃度  $X_v$  の変化をそれぞれ時間変化として追跡した。

これらの解析より、各試験条件におけるモデルコンクリート中の粗骨材の流速の違いと、それに伴う濃縮現象の発生傾向の把握を試みた。

### 3.2 解析方法

#### (1) 粗骨材平均速度の算出

図-2 に示す各 AREA を検査領域とし、図-5 のように流動方向と直角に区間分割する。分割幅は AREA1, AREA3 をそれぞれ 5 分割し、AREA2 は粗骨材最大寸法の 15mm とした。よって AREA2 では、障害の前後間隔  $G$  が 90, 105, 120, 135 及び 150mm と変化するに従い、それぞれ 6, 7, 8, 9 及び 10 分割とした。各検査領域における粗骨材の流動速度を市販の流動解析ソフト PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて測定した。

測定時間は 10 分間とし、流動開始から 1 分間の流動速度と 1~10 分間の流動速度を測定した。また、測定対象時間は、全試験条件においてモデルコンクリートがモデル型枠内の充填完了を確認することができた流動開始から 1.5 分後を基準に、1.5 分間隔でそれぞれ 3, 4.5, 6, 7.5, 9 分後とした。また、この測定値は各時間前後 10 秒間の平均値とした。

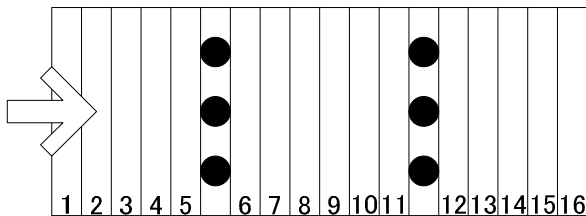


図-5 検査領域の区間分割 (一例:  $G=90\text{mm}$ )

#### (2) 時間変化に伴う粗骨材体積濃度 $X_v$ の変化の算定

粗骨材体積濃度は、障害を通過する際、濃縮及び閉塞現象を生じるため、流動の時間経過と共に変化する。障害通過後の粗骨材体積濃度  $X_v'_n$  % は、間隙通過試験中の図-2 に示す各 AREA における  $X_v$  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。まず AREA1, AREA2 及び AREA3 における静止画像を図-6 のように二値化処理を行い、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した。ここで、AREA1, AREA2 及び AREA3 における粗骨材面積割合をそれぞれ  $S_1$ ,  $S_2$  及び  $S_3$  とした。なお、モデル型枠の水平流動部は、流動に影響を与えないような範囲で極力深さ方向を小さくし (45mm)、コンクリートの流動を二次元とみなし、二値化による解析領域の粗骨材面積割合が

実際の  $X_v$  と等しいとした。

これから、障害通過後の粗骨材体積濃度  $X_v'$  は式 (1) で表されるとした。

$$X_v'_n = \frac{S_n(A_1 + A_2 + A_3)}{A_1S_1 + A_2S_2 + A_3S_3} X_v \quad (1)$$

ここに  $n=1, 2, 3$  とする。

$X_v'_n$ : 障害通過後の粗骨材体積濃度 (%)

$X_v$ : 配合時の粗骨材体積濃度 (%)

$A_1, A_2, A_3$ : 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 (%)

また、対象時間は粗骨材平均速度の解析と同一とした。

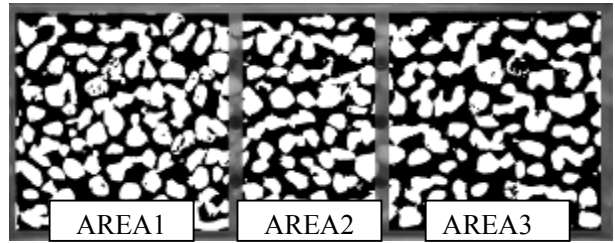


図-6 検査領域の二値化 (一例:  $G=90\text{mm}$ ,  $L=30\text{mm}$ )

### 3.3 実験結果及び考察

#### (1) 粗骨材平均流速

モデルコンクリート中の粗骨材の平均流速を、分割した区間ごとに時間経過に従い、測定値を整理した。ここでは、障害のあき  $L$  が 30mm 及び 26mm における時間変化に伴う流速の変化を示す。粗骨材平均流速について、 $G=90\text{mm}$  の場合を図-7 に、 $G=105\text{mm}$  の場合を図-8 に、 $G=135\text{mm}$  の場合を図-9 に、 $G=150\text{mm}$  の場合を図-10 にそれぞれ示す。また、各図において左図を障害あき  $L=30\text{mm}$ 、右図を 26mm とした。

#### A) 障害の前後間隔 $G$ の影響

測定時間  $t=1.5\text{min}$  を除き、 $t=3\text{min}$  以後の粗骨材平均速度を比較すると、障害のあきが 30mm の場合、 $G$  は大きい方が、流速が速い傾向が認められた。また、障害のあきが 26mm の場合、 $G$  が大きい方が、流速が遅くなる傾向が認められた。

#### B) 時間変化に伴う流速の減少

障害のあきを 30mm で比較した場合、 $G$  が小さい方が、流速が減少するまでの時間が短い傾向が認められた。また、障害のあきを 26mm で比較した場合、 $G$  が大きい方が、流速が減少するまでの時間が短い傾向が認められた。

#### C) 流動障害周辺における粗骨材流速の変化

図-8 の右図及び図-9 の右図のように、モデルコンクリートが流動障害を通過する前では粗骨材の流速が減少し、通過後には粗骨材の流速が増加する傾向が認められた。

障害を通過後に流速が増加する現象は、モデルコンク

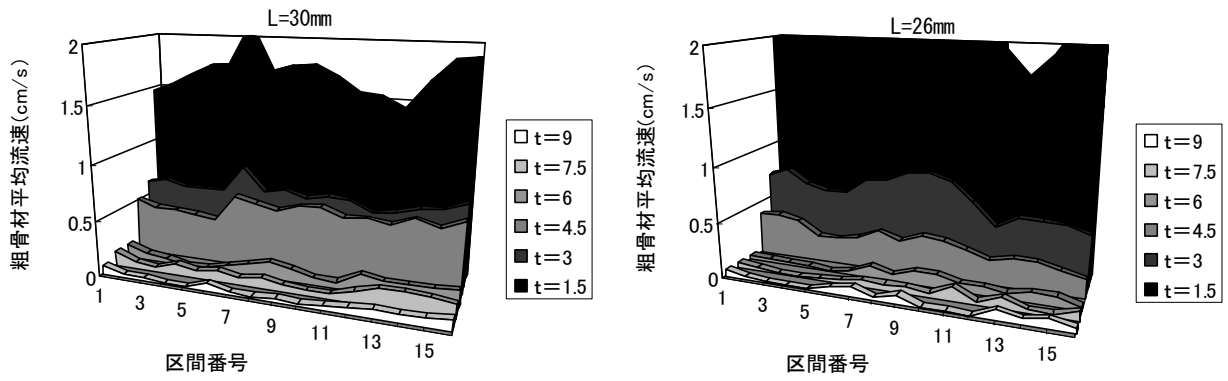


図-7 粗骨材平均流速：G=90mm

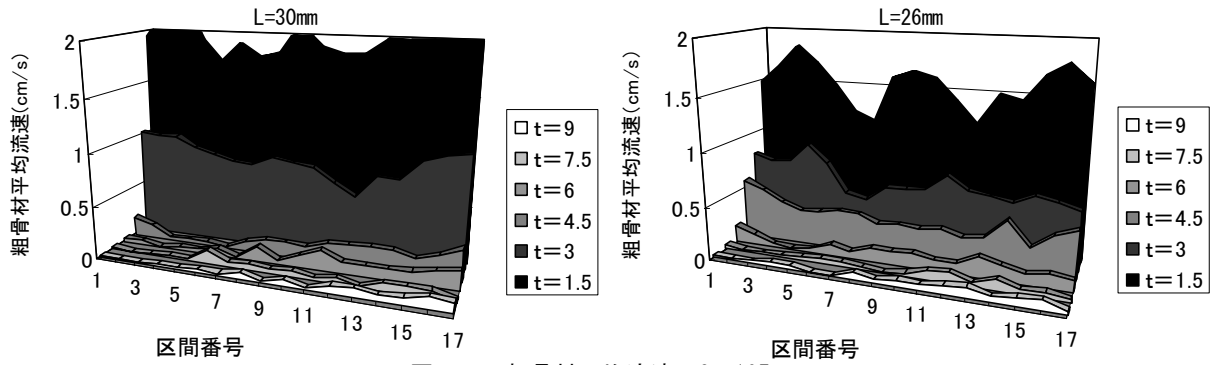


図-8 粗骨材平均流速：G=105mm

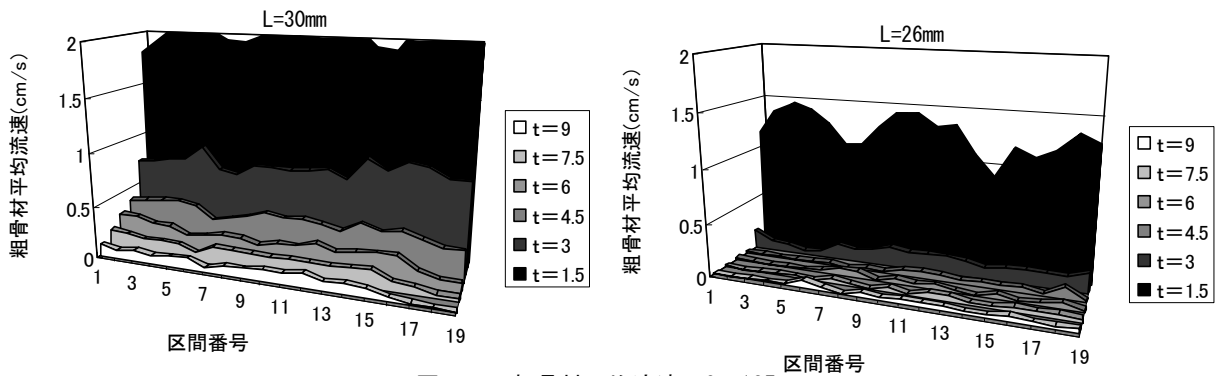


図-9 粗骨材平均流速：G=135mm

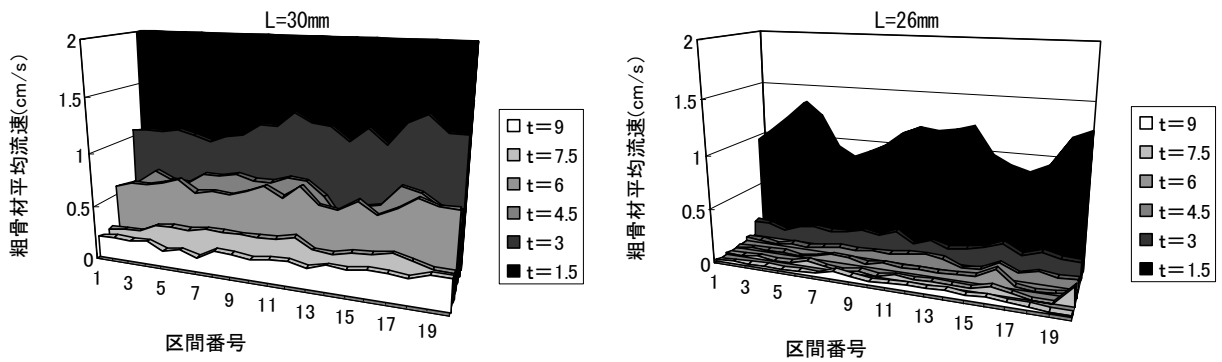


図-10 粗骨材平均流速：G=150mm

リートを均質な流体の一次元流れとして捉えた場合、連続の方程式が成立すると考えられる。

$$Q=vA=\text{const} \quad (2)$$

ここで、Q：流量 v：流速 A：流動面積

障害を通過する際、障害の投影面積分だけ通過可能な面積は小さくなり、流速は増加する。ここで、一般的に

流速が増加するのは、この面積が小さくなる障害部のみである。この考え方が成立するのは、気相あるいは液相のみの場合であり、モデルコンクリートのような固液混相流体では、流動の状況が異なると考えられる。すなわち、液相であるモルタルは、連続の方程式が成立するように通過流動可能な面積の小さくなる部分で、流速が増

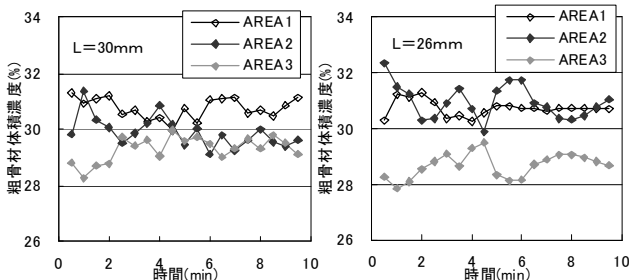


図-1 1 粗骨材体積濃度の変化 (G=90mm)

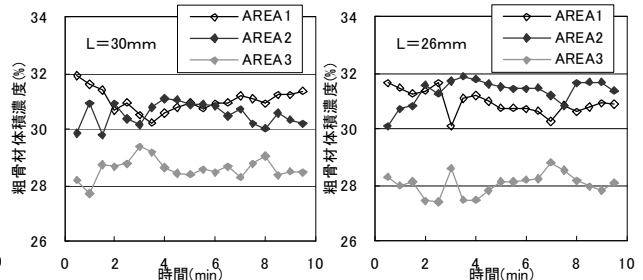


図-1 2 粗骨材体積濃度の変化 (G=105mm)

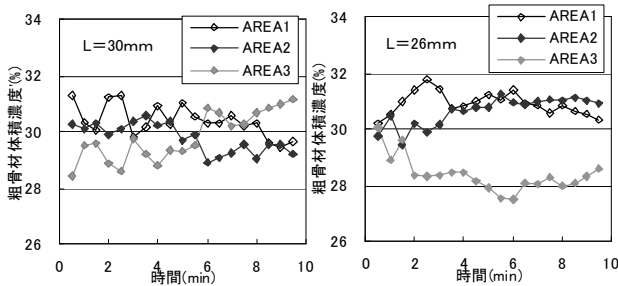


図-1 3 粗骨材体積濃度の変化 (G=135mm)

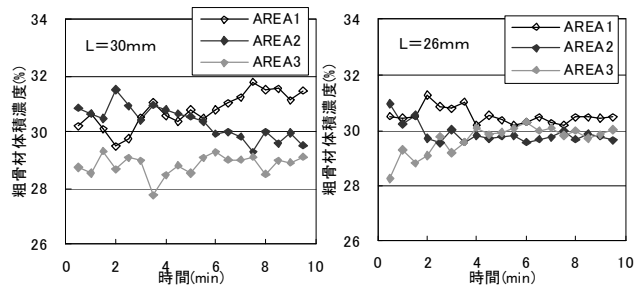


図-1 4 粗骨材体積濃度の変化 (G=150mm)

加する。粗骨材は、モルタルの流れにより障害部で連行されるような状態になる。このような状態から、粗骨材は先端が障害間に達した時から、流速の増加を生じ、障害間に達していない後端部も同様に流速の増加を生じたため、図-8の右図の区間6や12周辺のような流動障害部での流速変化を計測したと考えられる。

この傾向は、障害のあきLが小さく、障害の前後間隔Gが大きいほど多く認められた。

また、濃縮及び閉塞現象が生じた場合、粗骨材の影響が大きくなると考えられ、先に示した連続の方程式が成立しないと考えられる。

## (2) 時間変化に伴う粗骨材体積濃度の変化

各AREAの粗骨材体積濃度を、時間t(min)を追って、解析を行った。粗骨材の平均流速と同様に、障害あきLが30及び26mm、障害の前後間隔Gが90、105、135及び150mmにおける結果を示す。粗骨材体積濃度の変化についてG=90mmの場合を図-1 1に、G=105mmの場合を図-1 2に、G=135mmの場合を図-1 3に、G=150mmの場合を図-1 4に示す。また、各図において、左図を障害あきL=30mm、右図を26mmとした。

### A) 障害の前後間隔Gの影響

障害のあきLが30mm及び26mmで、障害の前後間隔Gが大きい場合、AREA1での粗骨材体積濃度の増加が1%程度であるため濃縮の程度は小さいと考えられる。また障害の前後間隔Gが小さい場合、AREA1での粗骨材体積濃度の増加が2%程度であるため、濃縮の程度が大きくなるという傾向が認められた。

### B) 濃縮の状況

濃縮の状況としては、一つ目は、図-1 2の右図のように、流動開始直後からAREA1での粗骨材体積濃度の増加が2%と大きな濃縮を生じ、その状態のまま流動し続ける現象である。この現象は、障害のあきLが小さい場合に多く認められるため、濃縮を生じやすい条件であると考えられる。

二つ目は、図-1 4の右図のように、流動開始直後からAREA1での粗骨材体積濃度が増加し、大きな濃縮を生じるが、流動開始3分程度で粗骨材体積濃度が減少していく現象が挙げられる。この現象は、障害の前後間隔Gが大きい場合に多くなる傾向が認められた。この現象の場合、時間変化に伴う流速の変化が小さいため、濃縮をあまり生じない条件であると考えられる。

三つ目は、図-1 3の右図のように、流動開始直後では濃縮を生じないが、徐々に濃縮を生じるものである。

### (3) 両解析の相関

粗骨材平均流速が遅くなり、流れがほぼ停止する状態に至る時間が短い場合、濃縮を生じる傾向が認められた。つまり、流動開始時の流速が短時間で大幅に減少するような条件で、濃縮を生じやすいと考えられる。

時間変化に伴う流速の変化が、閉塞現象を生じる条件のものより小さい場合、濃縮をあまり生じない傾向が認められた。つまり、流動開始時の流速が徐々に減少する条件が、濃縮を生じにくいと考えられる。

また、濃縮を生じた条件では、流速が短時間で遅くなる傾向が認められた。これにより、粗骨材体積濃度と粗骨材平均流速には相関が認められた。

#### 4. まとめ

型枠内を流動するコンクリートに作用する圧力をほぼ一定とした場合、自己充填性を有する高流動コンクリートが二層配筋状態の流動障害を通過する際の流動挙動、粗骨材の流動速度及び粗骨材の分布状況から得られた知見を以下に示す。

- (1) 障害のあき  $L$  が大きい場合、障害の前後間隔  $G$  の大きい方が、流量が大きくなり、障害のあき  $L$  が小さい場合は、障害の前後間隔  $G$  の大小に関係なく、流量は小さくなる。
- (2) 障害のあき  $L$  が 30mm の場合、 $G$  は大きい方が、流速が速く、障害のあき  $L$  が 26mm の場合、 $G$  が大きい方が、流速が遅くなる。
- (3) モデルコンクリートが流動障害を通過する前では粗骨材の流速が減少し、通過後には粗骨材の流速が増加する。
- (4) 障害のあき  $L$  が 30mm 及び 26mm で、障害の前後間隔  $G$  が大きい場合、AREA1 での粗骨材体積濃度の増加が 1%程度と濃縮の程度は小さい。また障害の前後間隔  $G$  が小さい場合、AREA1 での粗骨材体積濃度の増加が 2%程度と濃縮が大きくなる。
- (5) 3 パターンの濃縮状況が認められた。
  - ①流動開始直後から AREA1 での粗骨材体積濃度の増加が 2%と大きな濃縮を生じ、その状態のまま流動し続ける現象。
  - ②流動開始直後から AREA1 での粗骨材体積濃度が増加し、大きな濃縮を生じるが、流動開始 3 分程度で粗骨材体積濃度が減少していく現象。
  - ③流動開始直後では濃縮を生じないが、徐々に濃縮を生じる現象。

#### 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) 渡辺有寿ほか: 高流動コンクリートの鉄筋間隙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
- 6) 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