

論文 自己充填コンクリートの多層流動障害通過時における圧力損失現象に関する研究

渡邊 暢^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}・小倉 恵里香^{*4}

要旨：自己充填性を有する高流動コンクリートの間隙通過時の圧力損失メカニズムに関し、これまで流動障害が鉄筋一段の単層配筋構造について解明を進めてきた。しかし、実構造物では、単層配筋だけでなく、多層配筋された部材が多い。そこで本論では多層配筋構造における挙動を把握し、これまでの解明してきた単層配筋時圧力損失メカニズムが適用可能か、可視化技術を用いて一定流動圧力下における流動実験により検証した。

キーワード：自己充填コンクリート, 多層配筋構造, 圧力損失, 可視化モデル, 流動圧力

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）は締めなしに自己充填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¹⁾。

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のかを解明することが必要である。

これまで、流動障害となる鉄筋が一段の単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^{2), 3)}を行い、仮想細管モデル⁴⁾に基づく検討や混相流体力学の概念に基づく圧力損失メカニズムの検討⁵⁾を進め、理論構築を行ってきた。一方、実構造物では、多層配筋された部材が多くみられる。そこで、本研究では、多層配筋通過時の自己充填コンクリートがどのような挙動をしているかを確認し、多層配筋構造における圧力損失メカニズムを単層配筋構造時と比較し、推定式⁵⁾の応用が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、実施に近い状態を模したものと

した。

また、本実験では多層配筋構造の第一段階として、流動障害を二段の二層配筋構造について、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^{5), 6)}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/cm³）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/cm³）を用いた。

(2) 試験方法

一定流動圧力状態とするため、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ることにより、一定の水頭高さを保持した。B層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。

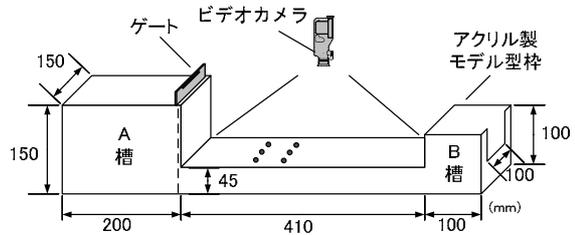


図-1 モデル型枠

*1 (株)ピーエス三菱 工修 (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

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

(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 26, 30 および 34 (%) の 3 水準、増粘剤添加率をモデルモルタルの質量に対して内割で 20 (%) とした。

また、粗骨材最大寸法を実際の自己充填コンクリートでは 20mm であるのに対し、本実験のモデルコンクリートでは 15mm と、実際のものとの比が 4:3 となっている。そこで、本実験におけるモデル型枠の条件については、コンクリート標準示方書⁷⁾に記載されている鉄筋のあきを基に、この比率を考慮して設定した。図-2に示す間隙幅 L が 21, 24, 26, 30 (mm) の 4 水準、流動障害層の間隔 G は 45, 60 および 75 (mm) の 3 水準とした。

(4) コンクリートの流動挙動

表-1に、間隙部における閉塞状況および間隙通過流量 (kg/min) を示す。○は部分的閉塞をしたものを、◎は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、●は完全に閉塞し、モルタルの型枠充填が不可能だった状態をそれぞれ意味する。また、間隙通過流量と間隙幅の関係を図-3に示す。なお、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質量を試験時間で除した値である。

これまでの研究⁵⁾より、粗骨材が鉄筋間隙部分を通過

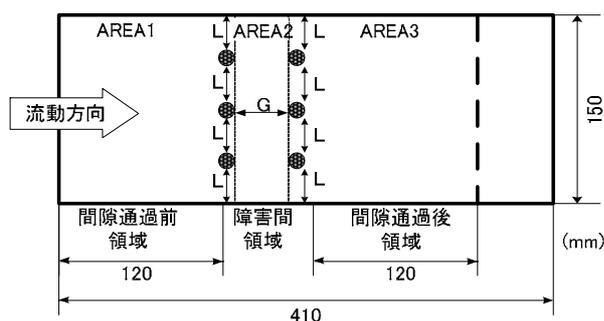


図-2 水平流動部上面図

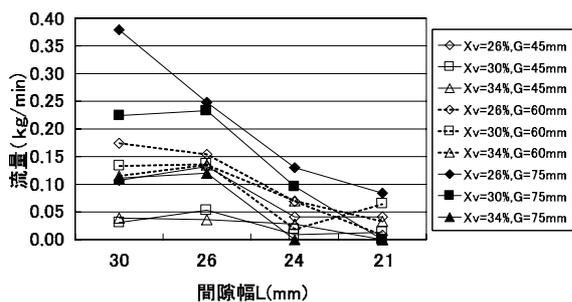


図-3 間隙通過流量

する際、粗骨材の流れに停滞が生じていることが認められている。これより、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)。

また、濃縮が大きいと間隙部で粗骨材のアーチングが起り閉塞する現象 (以下: 閉塞現象) が生じる。この現象は、一層目およ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⁶⁾。

A) 流動障害層の間隔 G の影響

流動障害間隔 G は広い方が閉塞しやすい傾向が認められた。これは図-2中の AREA2 の範囲が違い広がると多くの粗骨材が堆積するため、閉塞しやすくなると思われる。

B) 間隙通過流量

間隙幅 L が広いほど、 X_v が小さいほど、流動障害間隔 G が大きいほど間隙通過流量が大きくなることわかった。また、流動障害間隔 G による流量の変化は、 X_v が小さいほど大きな変化が認められた。

表-1 間隙部における閉塞状況および流量

V (%)	G (mm)	X_v (%)	L (mm)	閉塞現象		モルタル先流れ	流量 (kg/min)
				一層	二層		
20	45	26	30				0.11
			26				0.13
			24				0.04
			21	○	○		0.04
		30	30				0.03
			26				0.05
			24	○			0.01
			21	○	○		0.01
		34	30				0.04
			26				0.04
			24	○			0.03
			21	◎			0.00
	60	26	30				0.17
			26				0.15
			24	○			0.07
			21	○	○	○	0.01
		30	30				0.13
			26	○			0.14
			24	○			0.02
			21	○	○		0.06
		34	30				0.12
			26	○		○	0.14
			24	○		○	0.07
			21	○	○	○	0.03
75	26	30				0.38	
		26	○	○		0.25	
		24	○		○	0.13	
		21	○	○	○	0.08	
	30	30				0.22	
		26	○	○	○	0.23	
		24	○	○	○	0.10	
		21	●	○	×	0.00	
	34	30				0.11	
		26	○		○	0.12	
		24	●		×	0.00	
		21	●		×	0.00	

※○を部分閉塞、◎を全閉塞、●を完全閉塞とする。

3. 可視化実験結果の数値的解析

3.1 解析概要

流動挙動を目視のみでなく、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、動的解析を用いて粗骨材平均流速の算出を、静的解析を用いて粗骨材体積濃度 X_v の変化を、それぞれ時間の経過と共に追った。

これらの解析より、各試験条件における流速の違いと、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) 粗骨材平均流速の算出

図-2に示す各AREAを検査領域をとし、流動方向に直角に短冊状に区間分割する。分割幅はAREA1, AREA3をそれぞれ5分割し、AREA2は要素の幅を粗骨材最大寸法の15mmとし、流動障害間隔Gが45, 60および75mmと変化するに従い、それぞれ3, 4および5分割とした。間隙通過前後領域における各区間の粗骨材の流動速度を市販のPIV (Particle Image Velocimetry) 流動解析ソフトを用いて測定した。

測定範囲は撮影した映像の1~10分間であり、1秒毎流動速度を測定し、各区間で流動速度を平均した。また、時間経過に伴う変化を追った。ここで、測定対象時間 t (min)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。

(2) 時間経過に伴う粗骨材体積濃度の変化の算出

粗骨材体積濃度は、間隙を通過する際、停滞・濃縮現象を生じるため時間経過と共に変化する。間隙通過後粗骨材体積濃度 $X_v'_n$ (%)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およびAREA3における静止画像を図-4のように二値化処理し、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にて測定した。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 (%) とする。このとき、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、間隙通過後の粗骨材体積濃度 X_v' は式(1)で表される。

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

ここに $n=1, 2, 3$ とする。

$X_v'_n$: 間隙通過後粗骨材体積濃度 (%)

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 (mm²)

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

また、測定対象時間は粗骨材平均速度の解析と同一とした。

3.3 実験結果および考察

(1) 粗骨材平均流速

モデルコンクリートにおける粗骨材の平均流速を分割した区間ごと、時間経過に伴う t (min)を追って、測定値を整理した。本節では、流動試験の傾向を強く認められた $X_v=30\%$ における結果を示す。粗骨材平均流速 ($X_v=30\%$, $G=45\text{mm}$) を図-5に、粗骨材平均流速 ($X_v=30\%$, $G=60\text{mm}$) を図-6に、粗骨材平均流速 ($X_v=30\%$, $G=75\text{mm}$) を図-7にそれぞれ示す。また、それぞれ左から間隙幅 $L=30, 26$ および 24mm とした。

A) 流動障害層の間隔Gの影響

測定時間 $t=1.5\text{min}$ を除き、 $t=3\text{min}$ 以後の粗骨材平均流速を流動障害間隔Gごとに比較すると、Gは広い方が、流速が速い傾向が認められた。また、 $t=1.5\text{min}$ において $G=75\text{mm}$ にて低い値を示している。しかし、図-3より間隙通過流量が多いため、本条件の流速は速いと容易に推測できることから、本条件においては、 $t=1.5\text{min}$ 以前にて最大流速をとると考えられる。このため、本解析結果は、最大流速を示すことができなかつたと考えられる。また、図-6に示す ($G=60\text{mm}$, $L=30\text{mm}$) や ($G=60\text{mm}$, $L=26\text{mm}$) の条件も同様に最大流速は $t=1.5\text{min}$ 以前で示すものと考えられる。

B) 流速の安定化

同一間隙幅Lで比較した場合、Gが狭い方が、流速が安定するまでの時間が短い傾向が認められた。また、同一流動障害間隔Gで比較した場合、Lが大きいほうが、流速が安定するまでの時間が短い傾向が認められた。また、同一流動障害間隔Gで比較した場合、Lが大きいほうが、

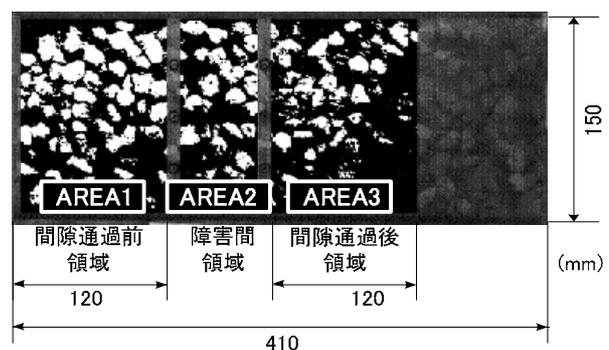


図-4 検査領域の二値化
(一例: $X_v=34\%$, $L=30\text{mm}$, $G=60\text{mm}$)

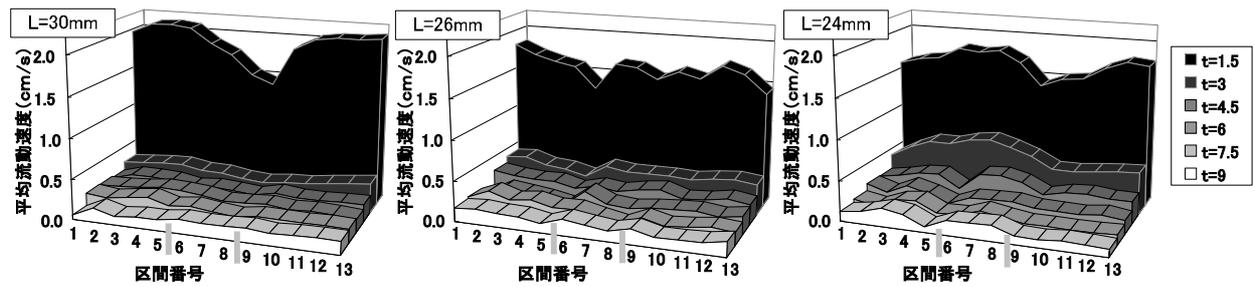


図-5 粗骨材平均流速； $X_v=30\%$, $G=45\text{mm}$

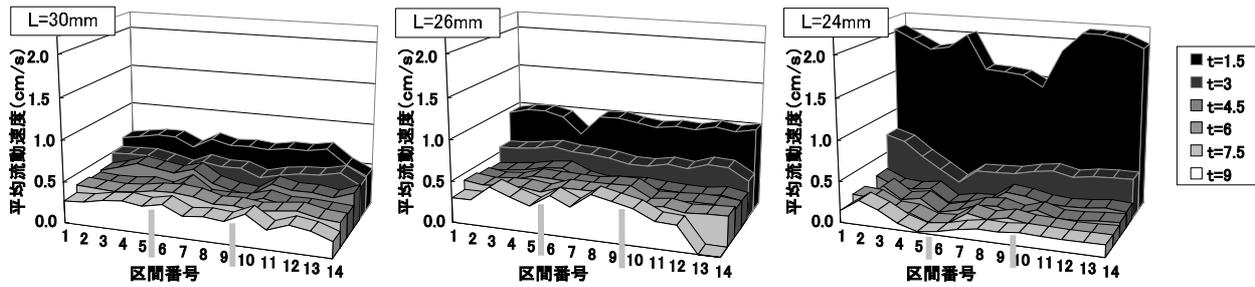


図-6 粗骨材平均流速； $X_v=30\%$, $G=60\text{mm}$

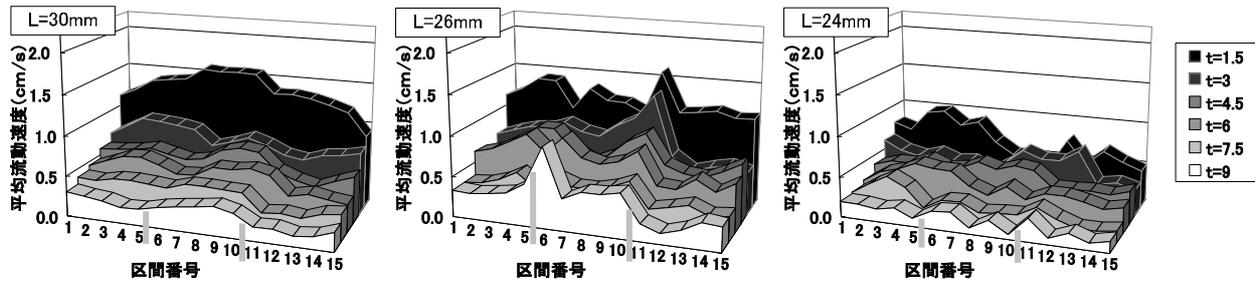


図-7 粗骨材平均流速； $X_v=30\%$, $G=75\text{mm}$

流速が安定するまでの時間が短い傾向が認められた。これらでは間隙通過流量が少なく、閉塞現象が生じていない配合ほど定常流となるまでの時間が短いと考えられる。

C) 間隙周辺における粗骨材流速の変化

モデルコンクリートが間隙を通過する際、粗骨材の流速が、間隙直前で増加する場合と間隙直後で増加する場合が認められた。

間隙直前にて流速が増加する現象は、粗骨材の濃縮が生じない配合に多く認められた。濃縮が生じないとき、モデルモルタルと粗骨材は一体となり流動していると考えられる。このとき、モデルコンクリートを一次元流れで捉えた場合、連続の方程式(2)が成立すると考える。

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

ここで、 Q ：流量 v ：流速

A ：流動断面積

ここで、均等質と考えられる気体や流体が流動し、通過する断面の面積が変化する場合を考える。このとき、断面積が小さくなると式(2)に従い、流速は増大する。し

かし、コンクリートのように固液混相流体と見なされ、固体粒子の寸法が比較的大きくなる場合、式(2)の考えは厳密には成立しないものと考えられる。

実際、モデルモルタルのみを流動させた実験では、間隙を通過する際によりどみなく流動する状況が観察された。しかし、モデルコンクリートの間隙付近の流動状況はやや異なり、粗骨材が間隙部にさしかかると、周囲の流速が増大しているモルタルの流動に引きずられる状態となる。また、粗骨材粒子は比較的大きいため、その一部の流動速度が増大する領域にさしかかると、周囲のモルタルの流動速度が大きく変化していない後端部分も一体となり流動するため、粗骨材粒子全体として流動速度は増大し、周囲のモルタルと流動速度の差を生じることになる。このため、間隙直前の区間における移動速度が増大したように観察されたと考えられる。

この傾向は、 G が狭く、 L は大きいほど、多く認められた。

また、間隙通過直後において、流速が増加する現象は、濃縮および閉塞現象が生じた配合に多く認められた。濃縮が生じた場合、先に示した連続の方程式は必ずしも成立するとは限らない。濃縮および閉塞現象が生じたとき、

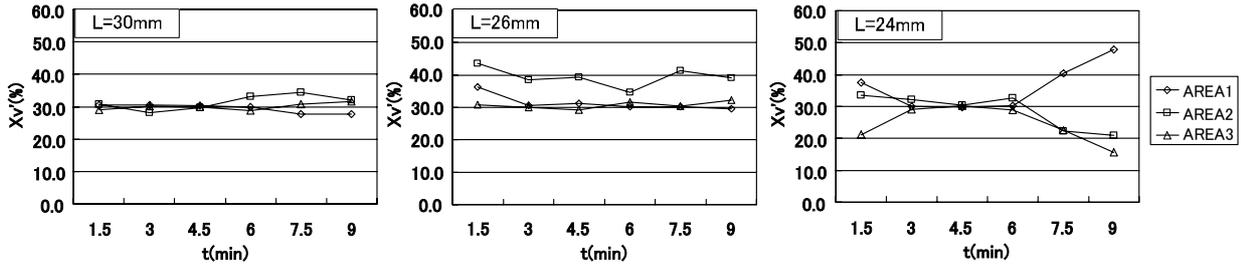


図-8 粗骨材体積濃度の変化； $X_v=30\%$, $G=45\text{mm}$

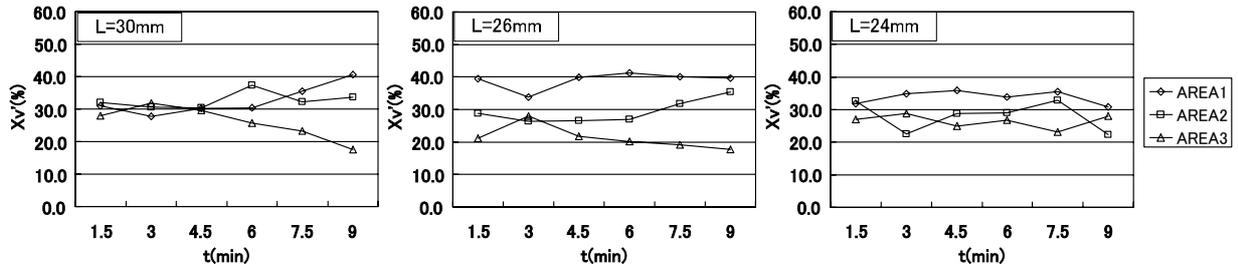


図-9 粗骨材体積濃度の変化； $X_v=30\%$, $G=60\text{mm}$

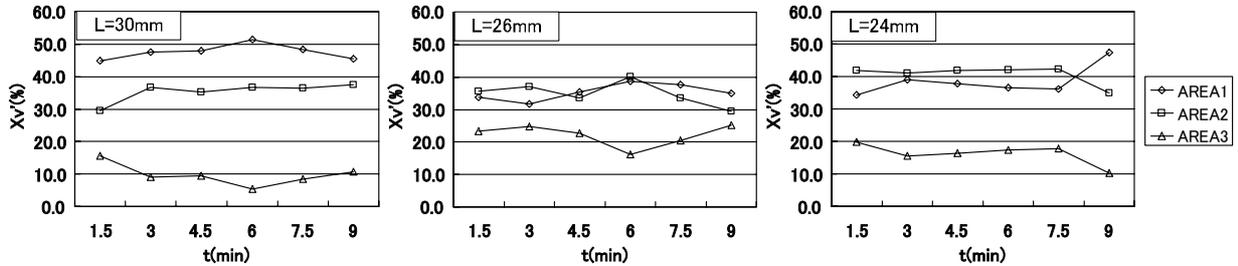


図-10 粗骨材体積濃度の変化； $X_v=30\%$, $G=75\text{mm}$

層の下流側の領域の X_v は希薄になり、さらに、モルタルの先流れ現象が生じる。故に、少なくなっている粗骨材をモルタルで押し出すため、粗骨材流速が増すものと考えられる。この傾向は、特に図-7 ($G=75\text{mm}$, $L=26\text{mm}$)で顕著にみられた。

(2) 時間経過に伴う粗骨材体積濃度の変化

各AREAの粗骨材体積濃度を、時間経過に伴う t (min) を追って、解析を行った。粗骨材の平均流速と同様に、流動試験の傾向を強く認められた $X_v=30\%$ における結果を示す。粗骨材体積濃度の変化 ($X_v=30\%$, $G=45\text{mm}$) を図-8に、粗骨材体積濃度の変化 ($X_v=30\%$, $G=60\text{mm}$) を図-9に、粗骨材体積濃度の変化 ($X_v=30\%$, $G=75\text{mm}$) を図-10にそれぞれ示す。また、それぞれ左から間隙幅 $L=30$, 26 および 24mm とした。

A) 流動障害層の間隔 G の影響

流動障害層の間隙 G は、狭いと濃縮が小さく、広いと濃縮が大きという傾向が認められた。以下にそれぞれの傾向を示す。

$G=45\text{mm}$ において、 $L=30\text{mm}$ では $t=4.5\text{min}$ まで全AREAの X_v の変化がなく、理想的な流動状態といえる。 $t=6\text{min}$ 以降で多少の変化がみられたが濃縮といえるほど大き

な変化ではないと思われる。 $L=26\text{mm}$ では、AREA2の濃縮がみられるが、時間経過に伴う変化も小さくAREA3の X_v も希薄になっていないことより、良好な流動状態であると考えられる。 $L=24\text{mm}$ では、 $t=6\text{min}$ を過ぎた辺りからAREA1で X_v が増大し、一層目の影響による濃縮が認められた。これは表-1の閉塞状況と一致する結果である。

$G=60\text{mm}$ において、 $L=30\text{mm}$ では $t=4.5\text{min}$ まで良好な流動をしていたが、 $t=6\text{min}$ 以降で濃縮が大きくなった。 $L=26\text{mm}$ では、時間の経過と共に徐々に濃縮が大きくなることが認められた。また、 $L=24\text{mm}$ では、多少の濃縮は認められるものの、時間経過による変化は小さい。

$G=75\text{mm}$ では、全体的に濃縮が大きく、早い時点で濃縮が起きていた。AREA3では極端に低い値を示しているが、これは粗骨材が極端に減少し、深さ方向の均一性が失われたためと考えられる。式(1)は深さ方向に粗骨材が均一に存在することを前提とした式であるため、本条件では多少信頼度が低くなるとは思われるが、傾向を把握する上で大きな相違はないと考える。

また、これらより、流動障害層の間隙 G が狭いほど、濃縮が小さくなるということが数値的に明確になった

と考えられる。

B) 濃縮の状況

濃縮の状況として、大きく二つ挙げられる。

一つは、流動初期には濃縮を生じていなかったものが時間経過と共に徐々に濃縮を生じる現象である。この現象を遅れ濃縮と呼ぶこととした。

二つ目は流動開始直後から大きな濃縮を生じるものが挙げられる。この濃縮現象は、Gが広いときに多くみられるため、流動速度が速いと生じ易いと考えられる。

(3) 粗骨材平均流速と粗骨材体積濃度の相関

3.3 (1), (2)をまとめると、以下のようなことが考えられる。

まず、濃縮の小さい配合は、流速が安定するまでの時間が短いという傾向が認められた。この傾向は流量が少ないほど多くみられた。つまり、流速が遅くなり易い配合が、閉塞現象を生じにくいと考えられる。

一方、濃縮の大きい配合は、モルタルの先流れ現象を生じ、流速は安定しにくい傾向が認められた。この傾向は、流量が多いほど多く見られた。つまり、流動速度が速くなり易い配合だと、濃縮および閉塞現象が生じ易いと考えられる。

また、粗骨材体積濃度が濃縮を示した条件では、粗骨材の平均流速は、間隙通過後の流速の増大が認められ、モルタルの先流れを生じることが認められた。これより、粗骨材体積濃度と粗骨材の平均流速には相関が認められた。

4. まとめ

一定流動圧下において、自己充填性を有する高流動コンクリートが二層配筋構造の流動障害を通過する際、流動挙動、粗骨材の流動速度および粗骨材の分布状況（各AREAにおける粗骨材体積濃度）の把握を試みた。

その結果、次のことが明らかになった。

圧力損失が増大する原因とされる粗骨材の濃縮および閉塞現象は、コンクリートの初期の流動速度が速いほど生じ易い。

また、流動障害層の間隔Gが広がるほど、流速は増大し、濃縮および閉塞現象が生じ易くなると考えられる。それから、濃縮および閉塞現象発生において、間隔幅Lと比較して流動障害層の間隔Gの影響が大きい。

濃縮の発生状況として、大きく二つに分類された。

- ・流動開始初期に濃縮を生じていなかったものが流動時間を長くしていくと徐々に濃縮を生じる

この現象を遅れ濃縮と呼ぶとした

- ・流動開始直後から大きな濃縮を生じる

これらの結果より、濃縮および閉塞現象が生じにくい配合条件について、その傾向認められた。今後の検討は、この濃縮が生じにくい配合における試験結果を用いて、各AREAの粗骨材体積濃度 X_v の推定式を求める。更に単層配筋構造において、解明を進めていた推定式を用いて、多層配筋構造における圧力損失値推定式構築を図る予定である。

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:藤原浩己）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) 藤原浩己：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，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
- 7) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.3