

多層配筋を通過する自己充填コンクリートの圧力損失現象に関する研究

宇都宮大学大学院 学生会員 ○大森祐助
 宇都宮大学大学院 正会員 藤原浩巳
 宇都宮大学大学院 正会員 丸岡正知

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を生じる可能性がある指摘されている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。また、型枠条件およびコンクリートのフレッシュ性状等から充填性を評価できれば、コンクリート構造物の信頼性向上、省人化、コスト削減等が可能になると考えられる。

そこで本研究では、型枠条件およびコンクリートのフレッシュ性状を変化させた場合における圧力損失および流動挙動への影響を把握し、圧力損失簡易推定式を構築することを目的としている。本論では、流動障害が一段の単層配筋構造と二段の多層配筋構造の型枠を用いて間隙通過試験を行い、配筋条件の違いによる圧力損失および流動挙動への影響を把握することを目的としている。

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、単層および二層配筋構造の間隙通過試験を行った。本試験では、流動障害を一段の単層配筋構造および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算出した推定値を比較し、推定式の妥当性について検討した。

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, 35, 36.5, 42.5mm の 4 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。

(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、

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 Δh_2 とし、圧力損失 ΔP は、式 (1) より算出した。

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

ρ : コンクリートの密度 (kg/m³) g : 重力加速度 (m/s²)

(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²⁾を式(2)に示す。

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 ³)
細骨材	S	栃木県鬼怒川産川砂(密度:2.58g/cm ³)
粗骨材	G5	茨城県笠間産5号砕石(密度:2.65g/cm ³)
	G6	茨城県笠間産6号砕石(密度:2.65g/cm ³)
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 (%)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
31.8	30	650±50	2.5±1.0

表-3 示方配合

単位量 (kg/m ³)				
W	C	S	G5	G6
175	550	840	398	398

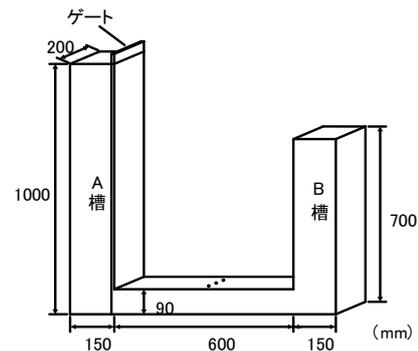


図-1 間隙通過試験型枠

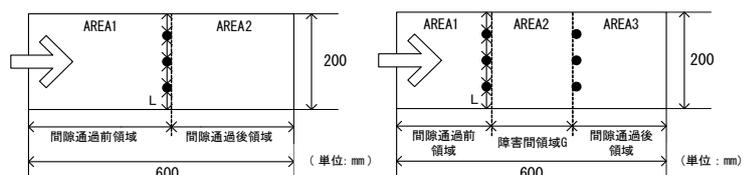


図-2 水平流動部における流動障害

$$\Delta P = \left\{ \frac{2xD}{xD + (x+1)L} \cdot \tau_c \right\} \times n \quad (2)$$

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

x : 一層における鉄筋数 D : 鉄筋径 (m) L : 間隙幅 (m)
 n : 層数 ρ : 密度 (kg/m³) X_v : 粗骨材体積割合 (%)
 g : 重力加速度 (m/s²) τ_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、単層配筋構造では $n=1$ 、二層配筋構造では $n=2$ となるので、式 (3) および (4) で表わせる。

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

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

また、コンクリートの降伏値 τ_c は、既往の研究³⁾ 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 (5) および (6) に示す。

$$\frac{\tau_c}{\tau_m} = 0.196X_v - 3.426 \quad (5)$$

$$\tau_m = -0.384R_0 + 128.23 \quad (6)$$

τ_c : コンクリート降伏値 (Pa) τ_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 ΔP は小さくなる傾向が認められた。また、単層配筋構造および二層配筋構造の圧力損失を比較すると、大きな差は生じていないことがわかる。一般的には、障害層が増加すれば圧力損失も増加する傾向にあると考えられるが、そのような傾向を示さなかった原因としては、粘性が影響したと考えられる。しかし、同配合で試験を行っているため大きな影響は認められない。よって、再度試験を行い検討する必要がある。

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 ΔP 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、局所的に粗骨材量が增大する現象⁴⁾ (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。

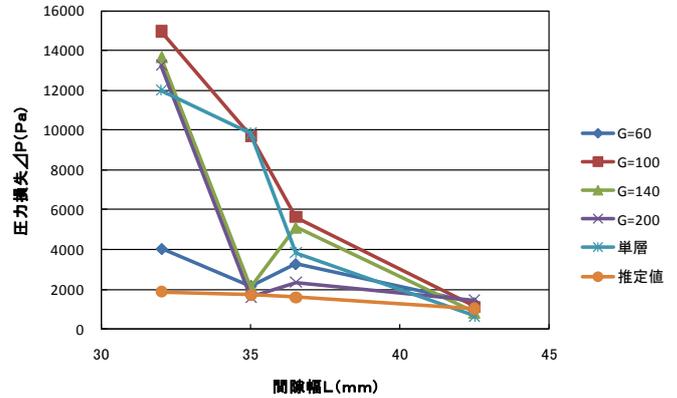


図-3 試験結果と推定値の比較

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、単層および二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、流動障害を一段の単層配筋構造および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⁴⁾ 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/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、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-4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。

(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-5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。

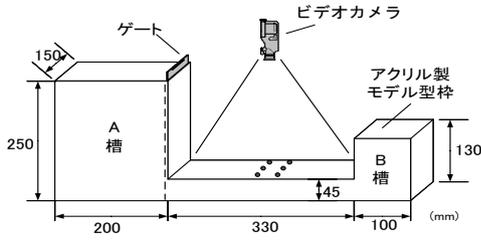


図-4 モデル型枠

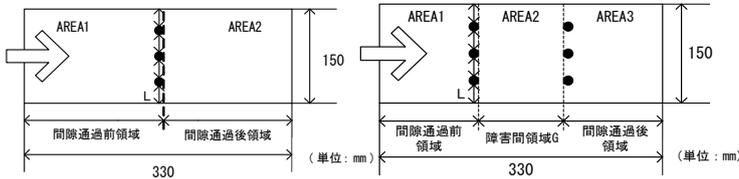


図-5 水平流動部

3.3 試験結果

間隙通過試験結果を図-6に示す。図-6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 ΔP は小さくなる傾向が認められた。また 単層配筋構造と二層配筋構造を比較すると、間隙幅 L が大きい範囲では、2~3倍程度の差を生じ、自己充填コンクリートの間隙通過試験の場合と異なる結果を得た。自己充填コンクリートの場合はばらつきが多く再度検討が必要であるが、モデル自己充填コンクリートと同様の傾向を示す可能性がある。

また、流動障害間隔の比較を図-7に示す。図-7から間隙幅 L が小さい範囲では、流動障害間隔が $5G$ および $9G$ 付近で圧力損失が増大する傾向にある。よってこの2つの流動障害間隔の範囲で流動挙動が変化すると考えられる。

3.4 粗骨材体積割合と解析結果

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-5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 AREA1, AREA2 および AREA3 における静止画像を図-8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。さらに、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 Xv' は式(7)を用いて算出した。

$$Xv'_n = \frac{S_n(A_1 + A_2 + A_3)}{A_1S_1 + A_2S_2 + A_3S_3} Xv \quad (7)$$

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 (mm^2)

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

次に解析結果を図-9および図-10に示す。図-9

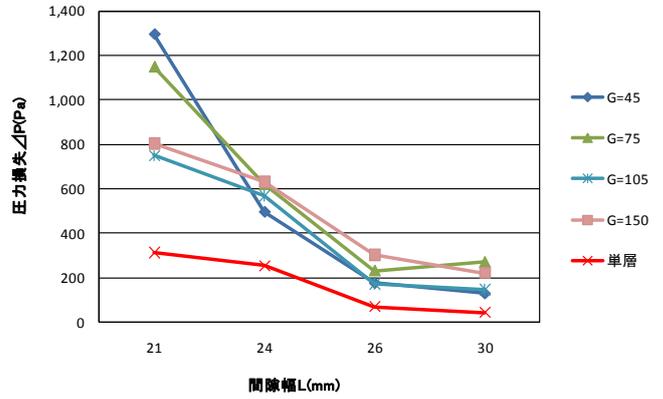


図-6 間隙通過試験結果

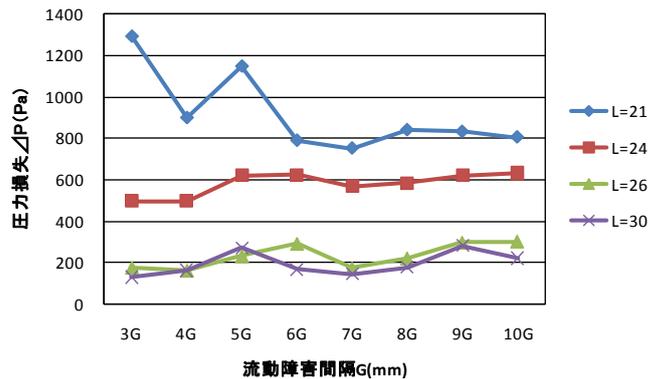


図-7 流動障害間隔の比較

においては、各 AREA とも配合時の Xv 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-6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-10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、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、画像処理計測法の一つである PTV (Particle Tracking Velocimetry) ⁵⁾ 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。

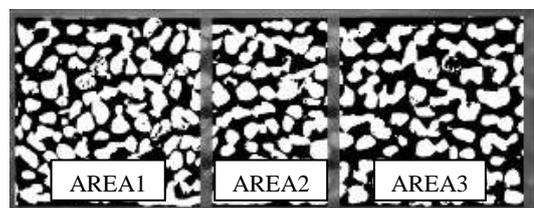


図-8 検査領域の二値化 (例: $G=90mm, L=30mm$)

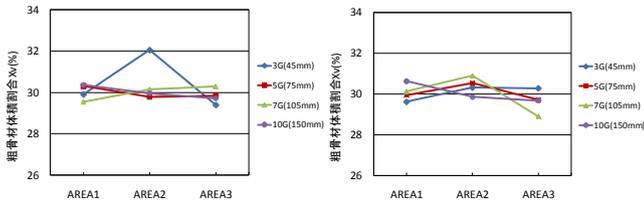


図-9 粗骨材体積割合の変化 (左: L=30mm, 右: L=26mm)

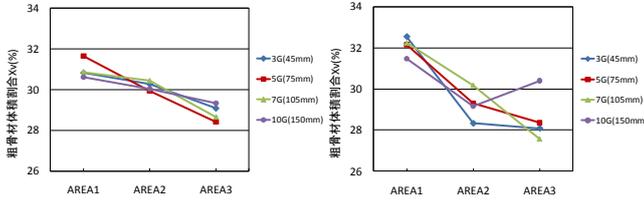


図-10 粗骨材体積割合の変化 (左: L=24mm, 右: L=21mm)

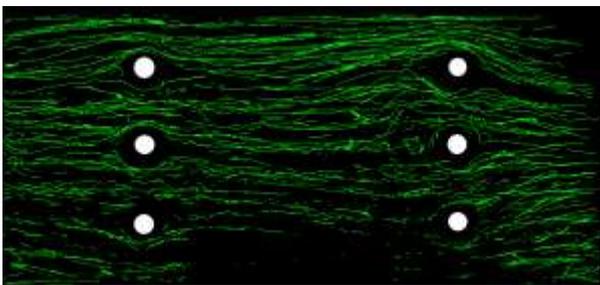


図-11 粗骨材の流線 (G=150mm, L=30mm)

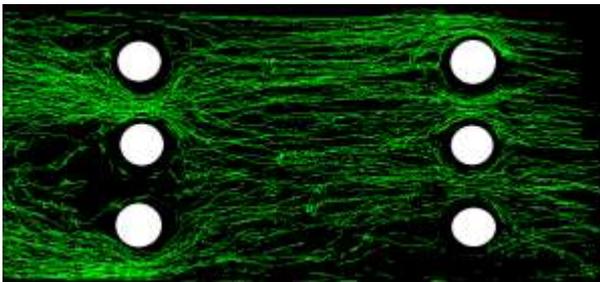


図-12 粗骨材の流線 (G=150mm, L=21mm)

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-11および図-12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-11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-12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。

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 が大きく濃縮現象および閉塞現象の生じない範囲で適用可能である。
- (2) モデル自己充填コンクリートを用いることにより、単層配筋構造と二層配筋構造における圧力損失の傾向を捉えることができる。
- (3) モデル自己充填コンクリートを用いることにより、流動障害間隔 G の圧力損失への影響を把握できる。
- (4) 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、より精度の向上が見込める。

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，東京工業大学学位論文，1996.3
- 2) 大森祐助：二層配筋構造における自己充填コンクリートの圧力損失現象に関する研究，宇都宮大学，卒業論文，2008
- 3) 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，修了論文，2004
- 4) 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
- 5) 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