

論文 可視化実験による自己充填コンクリートの間隙部閉塞現象の把握に関する一考察

丸岡 正知^{*1}・渡辺 有寿^{*2}・藤原 了^{*3}・藤原 浩巳^{*4}

要旨：自己充填コンクリートの流動障害間隙通過時の自己充填性を評価する方法に関する検討の一環として、可視化実験手法を用い、粘性の異なったモデルコンクリートを流動させ、障害近傍における粗骨材絶対容積割合の時間変化について検討した。その結果、圧力損失現象の説明には流動障害直前部分における粗骨材絶対容積割合の変化の影響が最も大きく、この部位における変化を詳細に把握することにより圧力損失の推定精度の向上が期待できると考えられる。

キーワード：自己充填コンクリート、圧力損失、可視化、粗骨材絶対容積割合

1. はじめに

これまで自己充填コンクリートに関する研究は数多くなされており、貴重な成果が蓄積され、多数の実施工への適用されていることは周知である。その中で、最重要性能である自己充填性に関し、土木学会「高流動コンクリート施工指針」¹⁾では、従来の経験値から安全性が確保できる最小鋼材あきや鋼材量の目安を例示し、これに基づき、ある程度の経験がある技術者の指導・確認の元、比較的容易に施工可能であることを示している。また、実際に自己充填性を確認する場合には、試験室レベルでは、自己充填性試験装置による充填性ランクごとの評価を行い、また、施工前に実大規模の模擬型枠を用い自己充填性確認試験を行い、硬化後のコンクリートを切断する、非破壊検査により充填不良個所の確認作業を行うなど、実施工時の不安要因を取り除く努力がなされている。また、実施工における打込みには、荷卸し時に全量検査を行うことにより、充填不良となる可能性のある状態のコンクリートを排除し、自己充填性を保証する手法を採っている。一方、様々な数値解析手法による流動性の評価が数多く行われており、成

果が上がっていると思われる。しかし、これらは手法により得意・不得意があるように思われ、ある程度規格化された型枠内・試験器内におけるコンクリートの流動状態について考察されている²⁾。しかし、充填不良が生じるか否かのような極限状態の解析についてはあまりなされていない。従って、自己充填コンクリートの自己充填性については、最重要性能であるが、未だ試行錯誤を繰り返し、経験的に安全性が確保できる条件を導き出す必要があると思われる。

2. 自己充填性の影響要因に関する従前の検討

これまでの研究により、充填不良の主要因となるのは、自己充填コンクリートが流動時に作用する外力と材料分離を元とする粗骨材の体積割合変化から生じる応力伝達機構の変化に伴う流動力の減少によるものであると推測している。この流動力減少の現象を圧力損失現象と称し、これがいかなるメカニズムで増大するのかに関する検討は、自己充填コンクリートの自己充填性を評価する際に最も重要ではないかと考えている。

これまで筆者らは、簡易な力学的モデルに基

*1) 宇都宮大学 工学部建設学科 助手 工修 (正会員)

*2) 宇都宮大学 大学院工学研究科 建設学専攻 (正会員)

*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)

づく自己充填コンクリートの型枠内鉄筋間隙部を通過流動する際に生じる圧力損失の推定方法に関して種々の検討を続けている。はじめに、実コンクリートを図-1に示すモデル型枠を用い自己充填させ、流動停止時の自由面高さの差から圧力損失量 ΔP を推定し、自己充填コンクリート中の粗骨材絶対容積割合 X_v と流動障害となる鉄筋のあき間隔 L を用いて説明することを試みた。そして、スランプフロー650mm程度かつ材料分離がない粉体系自己充填コンクリートにおいて重回帰分析により次の実験式を得た³⁾。

$$\Delta P = -2839 + 14910X_v - 33.56L \quad (1)$$

また、図-2に示す型枠・方法にて、自己充填後に硬化させたコンクリートの各断面に存在する粗骨材粒子の面積割合を画像処理により求め、流動方向の粗骨材絶対容積割合の分布を推定し、圧力損失増大との関係を検討した⁴⁾。その結果、流動障害近傍で粗骨材量が増大し、粗骨材粒子が閉塞しやすい状態となると、圧力損失が急激に増大した。

また、簡易な力学モデルである仮想細管理論に基づき、圧力損失量を推定する方法についても検討し、圧力損失を大まかに把握することができることを報告した^{4), 5)}。

さらに、可視化実験手法を採入れ、実コンクリートと相似則が成立つと考えられるモデルコンクリートを用い、流動する粗骨材粒子の挙動を動的に捉えることを目的とした実験を行った。その結果、 X_v と L を種々変化させることにより、コンクリートが流動障害を通過する際に、障害直前部分において粗骨材粒子が急激に増大する状態では、圧力損失が急増し、閉塞状態となりやすいこと、流動に伴い粗骨材粒子数が、局所的に変化するため、一般にレオロジー性状としてビンガム流体と見なされているコンクリートにおいて、応力伝達機構が変化し流動・変形抵抗が増大する状態が見られることなどを報告した⁵⁾。一方、これまでの検討は流動停止時を採上げており、流動障害のない場合と比較して、流動障害が存在する場合において、流動初期に

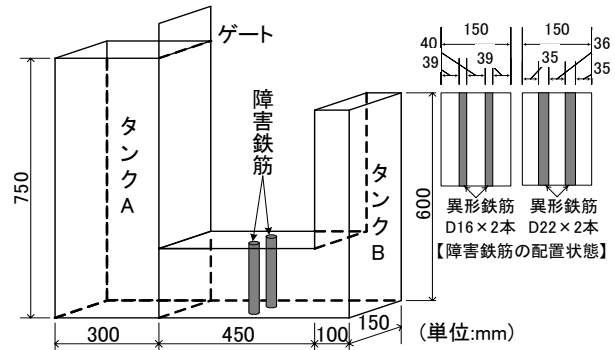


図-1 圧力損失を推定した型枠の形状寸法³⁾

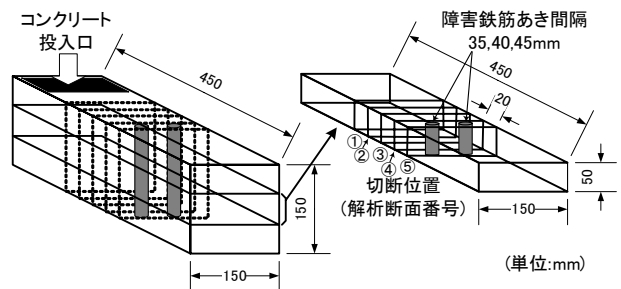


図-2 流動方向の粗骨材分布計測に関する実験で使用した型枠の形状寸法⁴⁾

表-1 可視化実験における使用材料

水(W)	宇都宮市水道水
増粘剤 (Vis.)	主成分:アルキルアリルスルホン酸塩, 密度:1.08g/cm ³ 程度
消泡剤 (Def.)	主成分:非イオン性変性シリコーンエマルジョン, 密度:1.013g/cm ³
粗骨材 (G)	人工軽量骨材 最大寸法:15mm, 密度:1.35g/cm ³ , 吸水率:4.17%

如何にして X_v が変化するかについての動的な検討はあまりしていない。

本検討では、可視化実験手法を用い、流動初期の状態から如何に粗骨材粒子が局所的に変化するかについて、時間経過に伴う流動状態を把握し、検討した結果を報告するものである。

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合条件

本実験に用いた材料を表-1に示す。

本実験におけるモデルコンクリートの配合条件を表-2に示す。本実験では粗骨材粒子体積変化を捉えることが目的であるため、配合条件としては、間隙通過性が低い条件での検討は不都合である。また、粗骨材粒子量が少なすぎる条件では流動障害のあき間隔が小さくても容易に通過流動し、圧力損失量が少ないことは既知

である。よって、本実験では可視化実験の対象とする粗骨材絶対容積割合 X_v の条件を0.30の一水準とした。しかし、粗骨材量の変化に伴うモデルコンクリートの降伏値の影響を検討するため、 $X_v=0.26$ および0.34においても、モデルコンクリートを作製し、フレッシュ性状の測定を行った。また、これまではモデルモルタル部分の性状はほぼ同一の条件で検討しているが、モデルコンクリートの変形のしやすさについてはモルタル部分の変形能力により大きく変化することが予想される。よって、モデルモルタルに添加する増粘剤の混合割合をモルタル体積の10、15および20%とし、粘性を変化させた。また、できる限り透明度を保つため、消泡剤を増粘剤に対して10%添加した。

3.2 モデルモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状

モデルモルタル・コンクリートのフレッシュ性状およびレオロジー定数を表-3に示す。

なお、表-3におけるモデルモルタル・コンクリートの降伏値及び塑性粘度は、既報により得られた簡易的な推定式^{4),7)}を元に求めた。

$$\tau_m = -0.384R_o + 128 \quad (2)$$

$$\eta_{pl} = 0.040t + 3.27 \quad (3)$$

$$\tau_c / \tau_m = 19.6X_v - 3.43 \quad (4)$$

ここで、 τ_m : モルタルの降伏値(Pa)

R_o : 0打フロー値(mm)

η_{pl} : モルタルの塑性粘度(Pa·s)

t : J_{14} 漏斗流下時間(sec)

τ_c : コンクリートの降伏値(Pa)

X_v : 粗骨材絶対容積割合

なお、ここで得られた τ_c を説明変数として重回帰分析を行った結果、次の式(5)を得た。重相関関係数は0.99となり、 τ_c は X_v および R_o により説明することができる。

$$\tau_c = 650.8X_v - 0.941R_o + 119.1 \quad (5)$$

3.3 可視化実験方法

(1) モデル型枠および試験方法について

本実験では図-3に示す透明アクリル製で内部が観察可能なモデル型枠およびビデオ機材を使用し、型枠中央の水平流動部分の状況を撮影し、解析に供した。

表-2 配合条件 (g/L)

増粘剤添加率	X_v	水 (W)	増粘剤 (Vis.)	消泡剤 (Def.)	粗骨材 (G)
W×10%	0.26	658.6	74.0	7.4	351.0
	0.30	623.0	70.0	7.0	405.0
	0.34	667.4	66.0	6.6	459.0
W×15%	0.26	617.9	111.0	11.1	351.0
	0.30	584.0	105.4	10.5	405.0
	0.34	551.1	99.0	9.9	459.0
W×20%	0.26	577.2	148.0	14.8	351.0
	0.30	546.0	140.0	14.0	405.0
	0.34	514.8	132.0	13.2	459.0

表-3 モデルモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状

Vis.	モデルモルタル				モデルコンクリート		
	R_o (mm)	t (sec)	τ_m (Pa)	η_{pl} (Pa·s)	X_v	SLF (mm)	τ_c (Pa)
10%	247.5	6.0	33.2	3.52	0.26	695	55.4
					0.30	675	81.4
					0.34	665	107.5
15%	265.0	16.0	26.5	3.92	0.26	660	44.2
					0.30	650	65.0
					0.34	625	85.7
20%	230.0	65.0	39.9	5.88	0.26	620	66.6
					0.30	505	97.9
					0.34	605	129.2

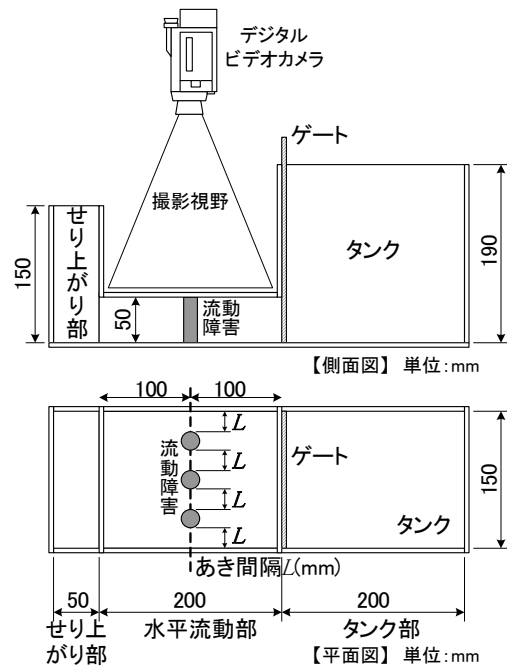


図-3 可視化実験に用いた機材および型枠の寸法形状

モデル型枠の水平流動部には、型枠内に設置した鉄筋の狭隘部を模擬するため、アクリルパイプを3本設置し、間隔が22、24、26および30mmとなるようにパイプ直径を設定した。これは、示方書設計編の規定では、鉄筋あき間隔の最小値は粗骨材最大寸法の4/3倍以上必要であり、本実験のモデルコンクリートの粗骨材最大寸法は

15mmであるため、最小あき間隔は21mm程度となること、また、並行配筋時に粗骨材が鉄筋間で架橋を生じる可能性が高いとされる鉄筋間隔が $(2+\sqrt{3})r$ (r :粗骨材最大半径)である⁶⁾ことを考慮し決定した。

流動試験の手順を次に示す。タンク部にあらかじめよく練り混ぜたモデルコンクリートを上端まで充填し、ゲートを上げ、水平流動部を通過し、せり上がり側へ到達後、流動が停止するまで撮影した。流動停止後、タンク部およびせり上がり部の自由面高さを測定し、その差 Δh を求め、圧力損失とした。圧力損失の測定方法を図-4に示す。なお、本方法では流動障害による圧力損失と壁面の摩擦による流動力損失分も同時に測定することになる。そこで、流動障害がない条件の圧力損失量を同様の方法で測定し、流動障害を設置した結果から差し引き、壁面摩擦による損失分を簡便に補正した。

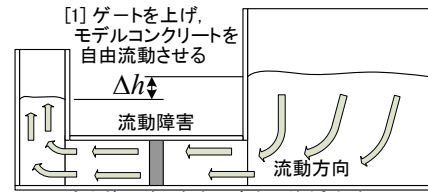
(2) 画像処理方法について

ビデオカメラで撮影した動画をPCへ取り込み、流動するモデルコンクリートの先端が流動障害に接した時点を起点とし、1~10秒まで1秒間隔、10~60秒まで5秒間隔、それ以降を30秒間隔で流動停止まで静止画像を抜き出した。各画像において、図-5に示す検査領域を設定した。次に、図-6のように二値化処理を行い白色が粗骨材粒子、黒色がモルタル部分と見なし、領域ごとに白色の割合を求めた。検査領域の設定においては、型枠の壁効果を考慮し、粗骨材粒子半径だけ内側の範囲について、流動障害の上下流側それぞれについて5分割した。

なお、二値化処理による白色割合と X_v が直接同値であるとはいえない。そこで、ここでは便宜上、流動障害のない条件で取得した流動状況を同一方法で処理し、得られた白色割合の数値の平均値 \overline{Sv}_i を求め、次式により検査領域ごとの粗骨材割合 $X_v(i,j,t)$ を求めた。

$$X_v(i,j,t) = \frac{Sv(i,j,t)}{\overline{Sv}_i} \times X_{v_i} \quad (6)$$

ここで、 i : 実験条件



[1] ゲートを上げ、モデルコンクリートを自由流動させる
 Δh
 流動障害
 流動方向
 [2] 流動停止後、自由面高さの差 Δh を計測し、圧力損失 ΔP を推定 $\rightarrow \Delta P = \rho_c g \Delta h$
 (ρ_c :モデルコンクリート密度、 g :重力加速度)

図-4 圧力損失の測定方法

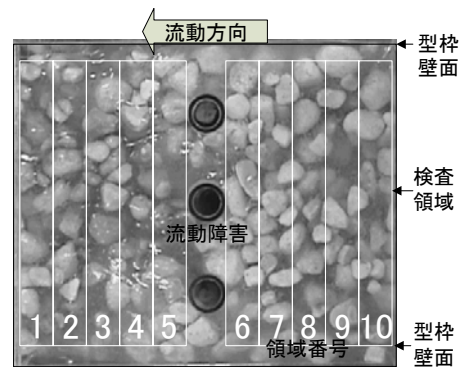


図-5 取得画像と検査領域の設定例

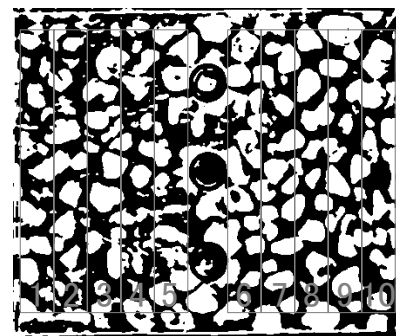


図-6 二値画像の例(元画像は図-5と同一)

j : 検査領域番号

t : 時間

$X_v(i,j,t)$: 検査領域毎の X_v

$Sv(i,j,t)$: 検査領域毎の白色面積率

\overline{Sv}_i : 実験条件毎の白色面積率平均値

X_{v_i} : 配合時 X_v

4. 実験結果

4.1 間隙通過開始からの X_v の時間変化

間隙通過開始からの時間経過に伴う X_v の変化について図-7に示す。縦軸は式(6)で推定した X_v 、底面右軸に通過開始からの時間、同左軸に領域番号を示す。また圧力損失測定結果を表-4に示す。また領域6での時間経過に伴う X_v 変化を図-8に示す。時間経過に伴い X_v の変化傾向が変わるため、経過時間5~10秒、10~60秒、

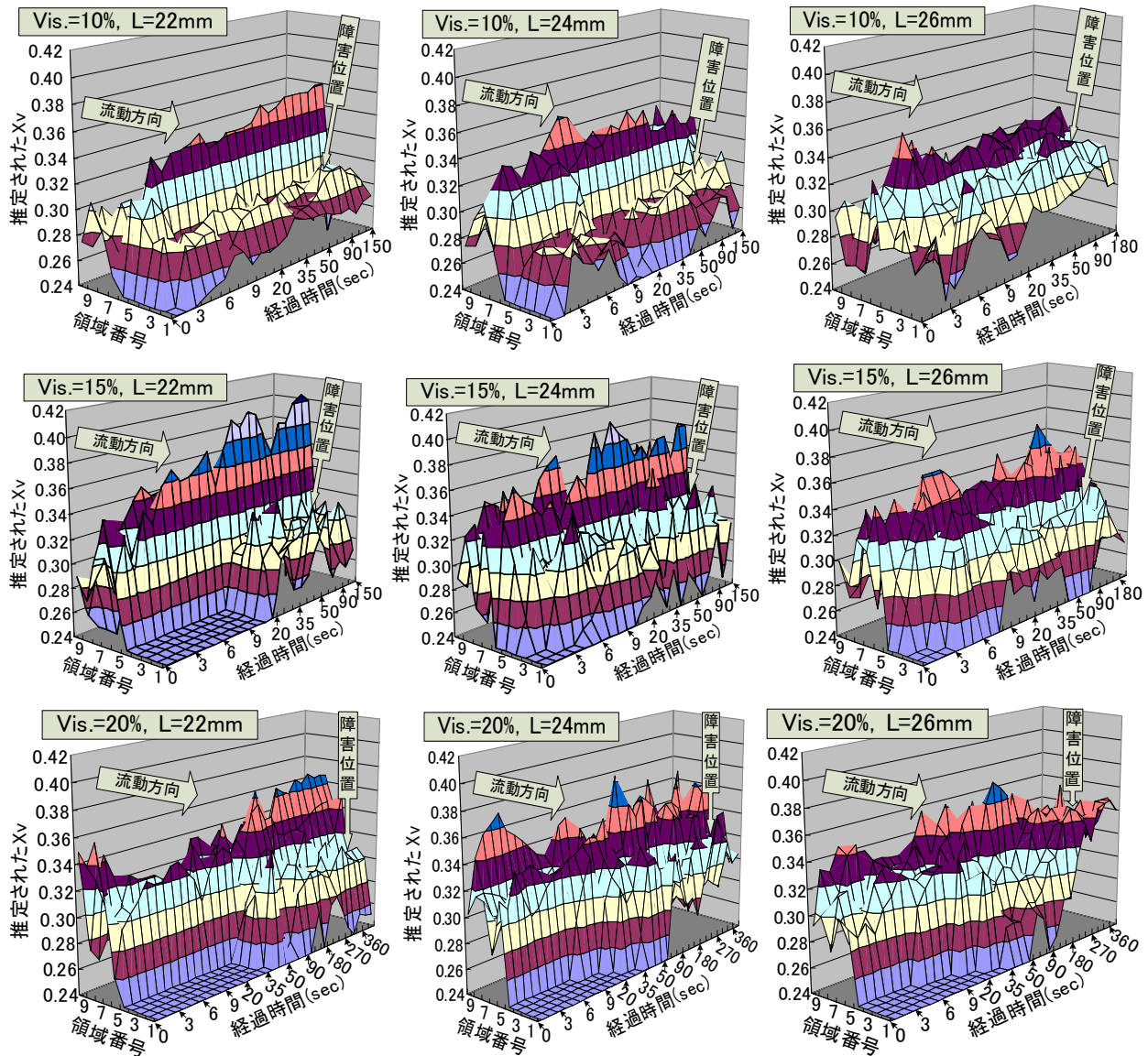


図-7 経過時間に伴う各領域における推定Xvの変化 (L=30mmの条件は省略した)

表-4 圧力損失測定結果 (Xv=0.30, 単位:Pa)

Vis.	L(mm)			
	22	24	26	30
10%	1064.7	208.5	54.9	32.9
15%	1140.6	210.4	243.6	144.0
20%	553.7	166.1	199.30	110.7

60~180秒の間でXvの平均値を算出し比較した。

ΔP が大きくなる場合、流動初期からXvは急増し、流動停止時には領域6のXvは0.36~0.40の範囲となり、流動初期のXvの変化が大きい。また、領域6のXvが0.34程度までの増大であれば、既往の研究^{3), 4), 5)}から閉塞状態とならず流動を続ける200Pa程度の圧力損失となる。また、この範囲では実験結果としても良好な空隙通過性を示した。

そこで、Xvにより異なる τ_c を個別に算出した

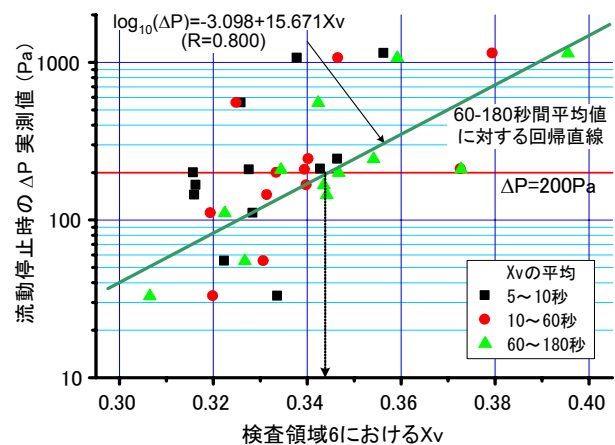


図-8 検査領域6におけるXvと ΔP 実測値の関係

上で、実験パラメータを説明変数とし、 ΔP を目的変数とした重回帰分析を行った。その結果、次式を得た。また、重相関係数は0.833であった。

$$\Delta P = 6498X_{v6} - 64.7L - 1.859J_{14} - 199.6 \quad (7)$$

ここで、 X_{v6} ：検査領域6における X_v

L ：流動障害あき間隔(mm)

J_{14} ：モルタルの J_{14} 漏斗流下時間(s)

なお、ここではすべての検査領域の X_v にて検討したが、流動障害直前部(領域6)での X_v の変化の影響が最も大きく現れる結果となった。

式(7)で得られる ΔP の推定値と実測値を比較したものを図-9に示す。

本検討では粘性のパラメータとして J_{14} 漏斗流下時間を説明変数に加えたが、圧力損失が大幅に増大する領域における実測値と推定値の乖離は未だ大きく、検討の余地がある。

しかし、実測 ΔP が比較的小さい範囲において、それほど大きな乖離を示さないことから、さらなる精度向上が期待できると考えられる。

5. まとめ

自己充填コンクリートが流動障害間隙を通過しながら自己充填する際に問題となる圧力損失の推定に関して、可視化実験手法による間隙通過開始からの粗骨材絶対容積割合の変化について検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) 時間経過に伴い、流動障害直前領域にて X_v は増大する傾向が認められた。その領域において X_v が0.34程度までであれば、圧力損失をほとんど生じず、良好な間隙通過性を示した。
- (2) 圧力損失の推定については、流動障害直前の領域における X_v の変化に大きく依存し、直前部で X_v が大幅に増大すると圧力損失が急激に増大する。

よって、流動障害直前部における X_v の変化について、さらなる検討を進めることにより、流動障害間隙通過時の圧力損失の推定について精度向上が期待できると思われる。

謝辞

本検討で使用した増粘剤について快く提供いただいた花王(株)化学品研究所の関係者各位にこの場を借りて御礼申しあげます。

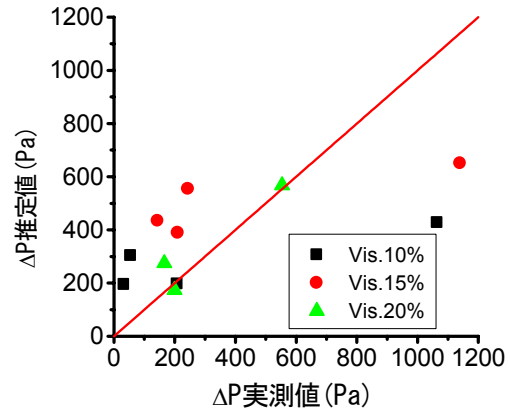


図-9 重回帰分析結果に基づいた ΔP 推定値と実測値の比較

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，1998.7
- 2) 例えば，富山潤，伊良波繁雄，山田義智，矢川元基：3次元フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの粘塑性流動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.887-892，2003.6 など
- 3) 丸岡正知，石澤由，芦沢良一，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.26-1，pp.959-964，2004.6
- 4) 丸岡正知，藤原浩已，渡辺有寿，岩崎麻美，藤江幸人：鉄筋間げきを通過する高流動コンクリートに生じる圧力損失の推定に関する実験的検討，土木学会論文集，No.795/V-68，pp.111-126，2005.8
- 5) 丸岡正知，藤原浩已，芦沢良一，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.400-406，2004.2
- 6) 藤原浩已：自己充填性を有する交流同コンクリートの特性に関する研究，東京工業大学博士論文，pp.47-67，1996.
- 7) 丸岡正知，藤原浩已，石澤由，渡辺有寿：可視化手法を用いた高流動コンクリートの間隙部通過における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.58，pp.359-364，2005.2