

## 論文 自己充填コンクリートの圧力損失発生機構とコンクリートのレオロジー特性に関する実験的検討

丸岡 正知\*1・石崎 康暖\*2・渡邊 暢\*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圧力損失発生・増大モデルについて、モルタルの粘性を考慮したモデルを示し、その妥当性を、モデル自己充填コンクリートおよびモルタルを使用した可視化実験および回転粘度計によるレオロジー測定値を用い検証した。結果、モルタルの粘性は粗骨材増大量に影響し、圧力損失に影響を及ぼすことを示した。また、本モデルは、既報と比較し、圧力損失の推定値と実測値の乖離が小さくなることを示し、本モデルにおける圧力損失推定方法はおおむね妥当であるとした。

**キーワード:** 自己充填コンクリート、圧力損失、レオロジー、可視化実験

### 1. はじめに

筆者らは、これまで、自己充填コンクリートの型枠内流動時に生じる圧力損失発生機構について、簡易な力学的モデルに基づいた検討を種々行ってきた<sup>1),2)</sup>。この過程で、仮想細管理論に基づき、流動障害となる鉄筋周辺において流動停止寸前のコンクリート中の粗骨材粒子が密集し、その間隙をモルタルが流動する状況をモデル化し、圧力損失を推定する方法、および、粗骨材粒子が局所的に増大することによりコンクリートの見かけの降伏値が増大し、その結果、コンクリートの変形抵抗が増大し、圧力損失が大きくなるとする推定方法について、提案・検討してきた。

しかし、簡易な力学モデルを提案してきたものの、いずれもモルタルおよびコンクリートの降伏値については要因として取り入れているが、粘性については、十分に考慮できておらず、モデルに基づく圧力損失の推定値は実測値の変化の傾向をよく示すものの、値は乖離していた。そこで、本論では、モルタルの粘性を変化させ、モルタルおよびコンクリートのレオロジー特性が圧力損失におよぼす影響について実験的検討を行った結果をまとめたものである。

### 2. 粘性を考慮した圧力損失推定モデル

#### 2.1 圧力損失現象の発生過程について

モデル化した圧力損失発生・増大過程を示す<sup>2)</sup>。

##### [1] 間隙部の粗骨材の停滞

型枠内を流動するコンクリート内部では、流動障害付近で粗骨材が障害を迂回する。また障害周囲で粗骨材自体が接触・回転運動し、見掛け上、粗骨材流速は低下し、流動が停滞しているように見える。

##### [2] 流動障害上流側での粗骨材量の局所増大

上流側から順次コンクリートが流入し、[1]の結果、流動障害上流側近傍にて粗骨材量が局所的に増大する。

##### [3] 応力伝達メカニズムの変化

ここでは、コンクリートを固相の粗骨材と液相のモルタルの固液二相系混相流体と見なす。粗骨材量の局所増大により、コンクリート中に変形しない粗骨材粒子が多数存在することになる。このため、通常はビンガム流体として扱うことができるコンクリートが、この部分では異なる挙動や内部での力の伝達機構が変化すると考えられる。粗骨材が増加すると粗骨材粒子間隙を埋めるモルタル量は減少し、粗骨材粒子の動きが拘束され、密

\*1 宇都宮大学 工学部建設学科助手 工修 (正会員)

\*2 五洋建設 中国支店

\*3 宇都宮大学 大学院工学研究科 建設学専攻 (正会員)

\*4 宇都宮大学 工学部建設学科助教授 工博 (正会員)

になった粗骨材粒子間では鉛直力が生じ、これに伴い表面にはせん断力が生じる(図-1, 図-2)。

#### [4] 降伏値およびせん断抵抗の増大

[3]より、粗骨材量の局所増大は粗骨材粒子間の鉛直力の増大につながる。このため、コンクリートの変形抵抗は局所増大し、コンクリートの見掛け降伏値は増大する。

#### [5] 圧力損失の増大

流動障害鉄筋間を通過する自己充填コンクリートにおける鉄筋周辺の力の釣合を図-3のように模式的に表すと、コンクリートに作用するせん断応力は図中の式となる。鉄筋に作用する力は、鉄筋障害におけるコンクリートの流動力の損失分に等しいとすると、図中の式は圧力損失の推定式とみなすことができる。従って、式(1)により降伏値の増大に伴い圧力損失が増大することが分かる。

$$\Delta P = \frac{2D}{D+L} \tau_c \quad (1)$$

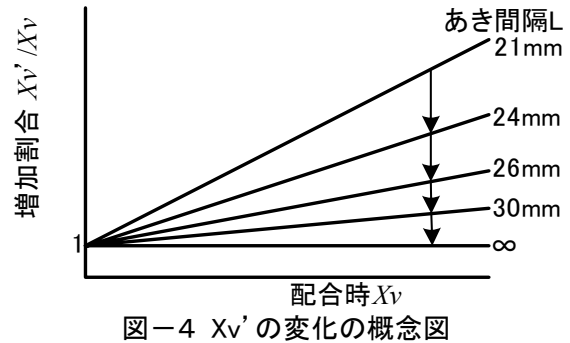
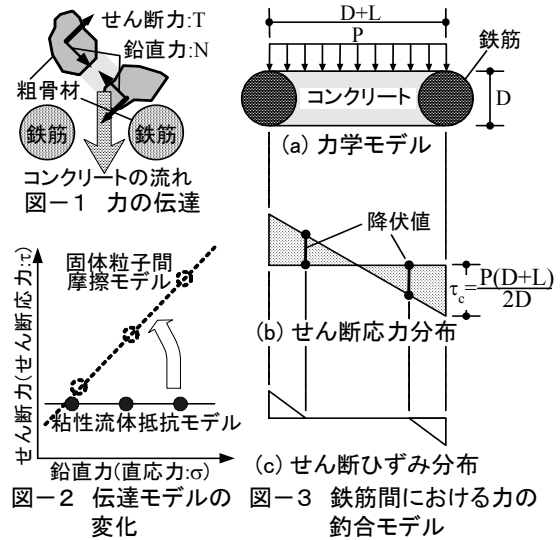
ここで、 $\Delta P$ : 圧力損失(Pa),  $D$ : 鉄筋直径(mm),  $L$ : あき間隔(mm),  $\tau_c$ : コンクリート降伏値(Pa)とした。

### 2.2 モルタルの粘性を考慮した圧力損失推定モデルに関する検討

自己充填コンクリートの粘性変化は、主に分離抵抗性と流動性の変化に関係すると考えられる。また、型枠内流動時には流動速度にも影響する。これらの変化は、コンクリートの流動障害通過性に大きく影響すると考えられる。そこで、粘性の違いが粗骨材量の局所増大に及ぼす影響を考慮するため、次に示す各推定式について検討した。

#### (1) 流動障害近傍での粗骨材粒子の挙動

流動障害近傍にて流動が妨げられる結果、コンクリート中の粗骨材は流動障害と接触・衝突し、また障害を迂回する挙動を呈し、障害周囲に沿った回転運動をする。一方、モルタルでは流動障害により流線は乱れるものの、粗骨材ほどの影響は受けず、流動を続けようとする。このため、コンクリート中では粗骨材とモルタルの間で流動方向の移動速度に差が生じ、均一性を失い、材料分離を生じる。また、後続流により、この現象が連続的に生じ、障害近傍では粗骨材が局所的に増大す



ることになる。既報の試験結果<sup>1),2)</sup>より、この局所増大の程度は配合時粗骨材絶対容積割合と障害あき間隔の影響を受けると予測できた。また、モルタルの粘性の影響も現れると予測された。そこで、この現象に関する推定式の導出を試みた。

#### (2) 局所的粗骨材絶対容積割合増分の算定方法

粗骨材絶対容積割合 $X_v$ が局所増加し、 $X_v'$ となるとすると、 $X_v'$ は $X_v$ の増大に伴い大きくなる。また、障害あき間隔 $L$ が狭小化すると $X_v'$ の変化は大きくなる。この概念図を図-4に示す<sup>3)</sup>。ここで、縦軸は配合時 $X_v$ に対する増分 $X_v'$ の比とし、これと $X_v$ との関係は式(2)のように表せる。

$$\frac{X_v'}{X_v} = \Gamma X_v + 1 \quad (2)$$

また、あき間隔 $L$ が狭小化するに従い、図-4の各直線の傾き $\Gamma$ は大きくなる。そこで、これを表すため、ここでは相対間隙比 $Lr$ を定義した。 $\Gamma$ と $Lr$ の関係を概念的に表すと図-5のようになり、式(3)および式(4)で表されるとした<sup>3)</sup>。

$$\Gamma = a \cdot Lr^{-b} \quad (3)$$

$$Lr = \frac{L}{L+D} \quad (4)$$

ここで、 $D$ : 流動障害径(mm),  $L$ : あき間隔(mm)  
式(3)における係数 $a$ および $b$ は、モルタルのレオロジー特性の影響を含む値と考えられる。そこで、これらの係数を次に示す可視化実験による粗骨材分布状況の把握データからの算出を試みた。

### (3) 可視化実験による流動状況の把握

可視化実験は既報<sup>1),2)</sup>と同様に、増粘剤を添加した水をモデルモルタル、人工軽量骨材(最大寸法15mm, 密度1.31g/cm<sup>3</sup>)をモデル粗骨材とした。絶対粗骨材体積割合 $X_v$ は0.26, 0.30および0.34の3水準として混合し、モデルコンクリートとした。また、モデルモルタルに対する増粘剤添加率(Vis.)を12.5, 15.0および17.5%の3水準とし、モルタルの粘性と粗骨材挙動の変化を検討した。

図-6に可視化実験に用いたモデル型枠の形状を示す。型枠全体は透明アクリル板製であり、内部が直接観察できる。型枠の水平流動部中央に透明アクリルパイプ製の流動障害を設置した。障害の外径は22, 18, 15および10mmとし、これに合わせてあき間隔を21, 24, 26および30mmとした。これは、自己充填コンクリートが閉塞せず通過流動する間隔が並行配筋では $(2+\sqrt{3})r$  ( $r$ は球体と見なした場合の粗骨材半径)以上<sup>4)</sup>とされること、また、この条件となる間隔は、本試験条件では約28mmなり、このあき間隔付近における間隙通過性の詳細な検討を試みたためである。

試験方法は、モデル型枠のタンク部に調製したモデルコンクリートを上縁まで充填し、ゲートを開放し、流動・自己充填させ、流動停止時のタンク部およびせり上がり部の自由表面高さの差 $\Delta h$ を計測し、圧力損失 $\Delta P$ を次式から求めた。

$$\Delta P = \rho_c g \Delta h \quad (5)$$

ここで、 $\rho_c$ : モデルコンクリートの密度(g/cm<sup>3</sup>),  
 $g$ : 重力加速度(=980.665cm/sec<sup>2</sup>)とした。

また、流動開始から停止までの間の流動状況をビデオカメラで撮影した。流動停止時の画像から図-7に示すAREA1およびAREA2における粗骨材

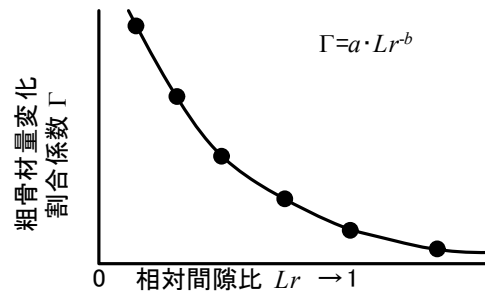


図-5  $\Gamma$ と $Lr$ の関係の概念図

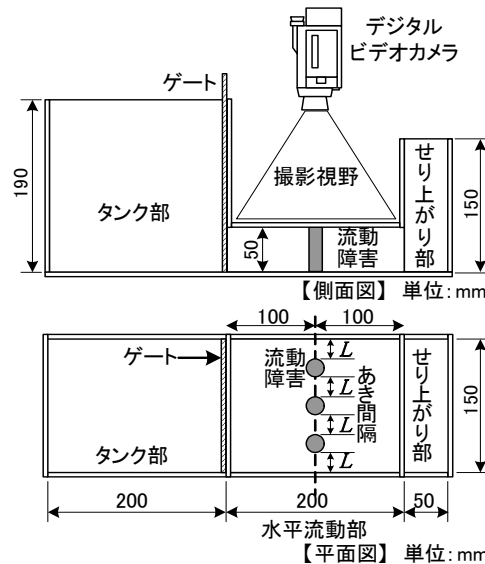


図-6 可視化実験に用いた型枠

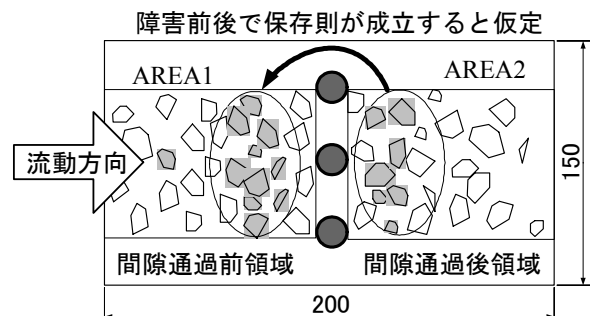


図-7 可視化領域と領域設定の概念図

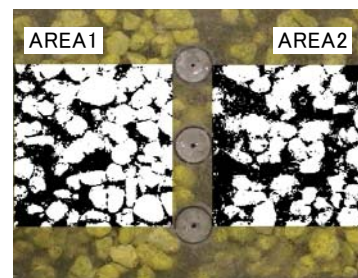


図-8 二値化処理を施した画像の例

について、図-8のように粗骨材が白色となるように画像解析ソフトにより二値化処理を施し、白色の面積割合を粗骨材面積割合 $S_1$ および $S_2$ とした。

また、次式により AREA1における局所粗骨材割合増分 $\Delta X_v$ および $X_v'$ を求めた。

$$\Delta X_v = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} X_v \quad (6)$$

$$X_v' = X_v + \Delta X_v \quad (7)$$

なお、可視化実験で撮影される画像は、流動する試料全体であり、深い部分も撮影される、しかし、深い部分の粗骨材粒子の輝度は低く、二値化処理ではモルタルとほぼ同値となる。このため、粗骨材面積率算出では、型枠上面近くの約15mm程度の深さまでの粗骨材の情報を取得していることになることを付け加える。

#### (4) 粗骨材局所増分とモルタル粘度の関係

図-9にあき間隔毎の $X_v'/X_v$ と $X_v$ の関係について示す。図中の直線は各プロットの近似式を式(2)とし求めたものである。

これらより、あき間隔 $L$ の狭小化に伴い $X_v'$ が増加し、また、モルタルの塑性粘度 $\eta_m$ の増大により粗骨材量の局所増大の程度は小さくなることわかった。

図-10に相対間隙比 $Lr$ と係数 $\Gamma$ の関係について、増粘剤添加率毎に打点し、式(3)の形の関数を近似関数とした曲線を示す。粘度の増大に伴い $Lr$ が小さい場合、 $\Gamma$ が減少し、また、 $\eta_m$ の増大により、粗骨材の局所増加が緩和されることが示された。粘性毎の $Lr$ と $\Gamma$ の関係は次式のとおりである。

$$\Gamma = \begin{cases} 0.0189Lr^{-4.34} (\eta_m = 0.507\text{Pa}\cdot\text{s}) \\ 0.0177Lr^{-4.30} (\eta_m = 0.545\text{Pa}\cdot\text{s}) \\ 0.0158Lr^{-4.21} (\eta_m = 0.748\text{Pa}\cdot\text{s}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)より、式(3)における係数 $a$ および $b$ がモルタルの粘性により異なることが示された。従って、これら係数 $a, b$ は $\eta_m$ の影響を受けるとし、 $\eta_m$ と係数 $a$ および $b$ の関係を調べた。その結果を図-11に示す。また、係数 $a$ および $b$ の $\eta_m$ との関係について、それぞれ直線回帰した場合の近似関数を図中に示す。なお、本検討ではモルタルの粘性を3種類しかないため、打点はそれぞれ3点しかない上、簡便のため直線回帰としたが、重相関係数は0.93および0.97となった。よって係数 $a, b$ が $\eta_m$ と高い

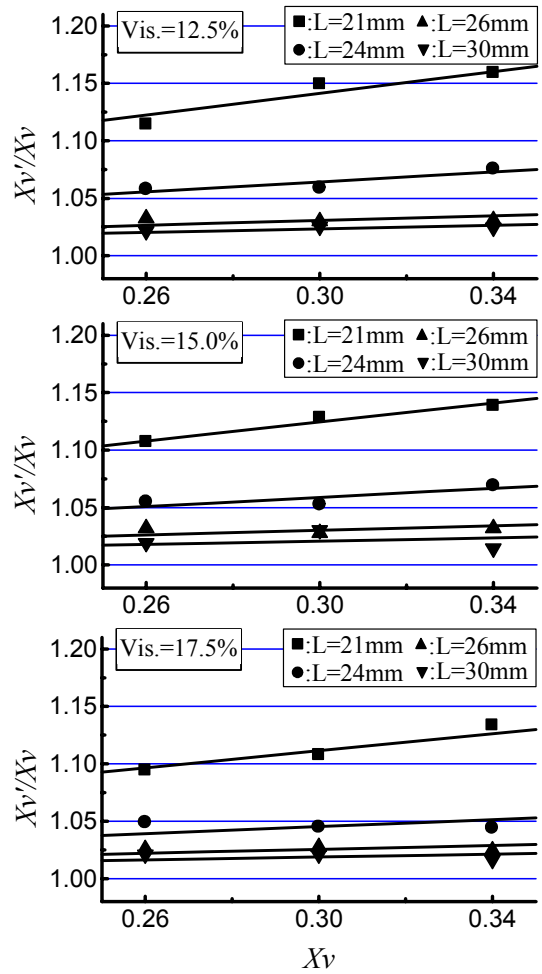


図-9 画像解析による $X_v$ と $X_v'/X_v$ の関係

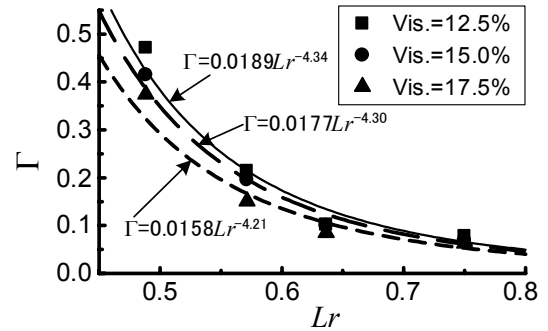


図-10  $\Gamma$ と相対間隙比 $Lr$ の関係

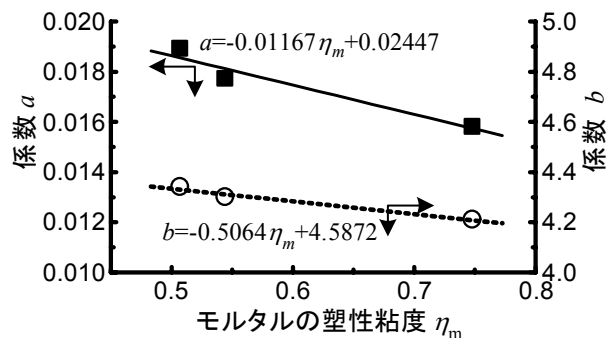


図-11 モルタルの塑性粘度と係数 $a, b$ の関係

相関を有することが示された。なお、本実験から得られた係数 $a$ および $b$ の近似式を次に示す。

$$a = -0.01167\eta_m + 0.02447 \quad (9)$$

$$b = -0.5064\eta_m + 4.587 \quad (10)$$

以上により、実験値からの推定式ではあるが、流動障害近傍にて局所的に増大する粗骨材絶対容積割合に対するモルタルの粘度の影響について示すことができるものとした。

#### (5) 粗骨材絶対容積割合とコンクリートの見掛けの降伏値との関係

コンクリート用回転粘度計を使用し、ツーポイント法<sup>5)</sup>によりモデルコンクリートにおける粗骨材絶対容積割合 $X_v$ とモデルコンクリートとモデルモルタルの降伏値の比である相対降伏値 $\tau_c/\tau_m$ の関係を求めた。図-12に増粘剤添加量毎の相対降伏値と粗骨材絶対容積割合の関係を示す。図中の直線は次式で表される近似直線である。

$$\frac{\tau_c}{\tau_m} = cX_v + 1 \quad (11)$$

この係数 $c$ について、本論と同様の方法で行った増粘剤添加率20%の近似式( $\tau_c/\tau_m=5.830X_v+1$ ,  $R^2=0.956$ )値を加え、モルタル塑性粘度 $\eta_m$ との一次相関について検討した結果、次式を得た。

$$c = 6.816\eta_m - 0.509 \quad (12)$$

従って、モルタルの粘性が増大することにより、粗骨材絶対容積割合 $X_v$ 増大に伴う相対降伏値 $\tau_c/\tau_m$ の変化割合が大きくなること示された。

#### (6) 圧力損失の推定

前述の推定した圧力損失発生・増大メカニズムに基づき、圧力損失の推定を行った。

ここでは、前述(5)の結果を元に、モデルモルタルおよびモデルコンクリートを用いた回転粘度計によるレオロジー定数の測定結果(式(11)および式(12))およびモデルモルタルの0打フロー値、 $J_{14}$ 漏斗流下時間の測定結果から得られた実験式を式(13)および(14)に、コンクリートの推定降伏値の簡易算定式を式(15)にそれぞれ示す。

$$\tau_m = -0.553(2R_0) + 203.7 \quad (13)$$

$$\eta_m = 0.0251t_{14} + 0.387 \quad (14)$$

$$\tau_c/\tau_m = (6.816\eta_m - 0.509)X_v + 1 \quad (15)$$

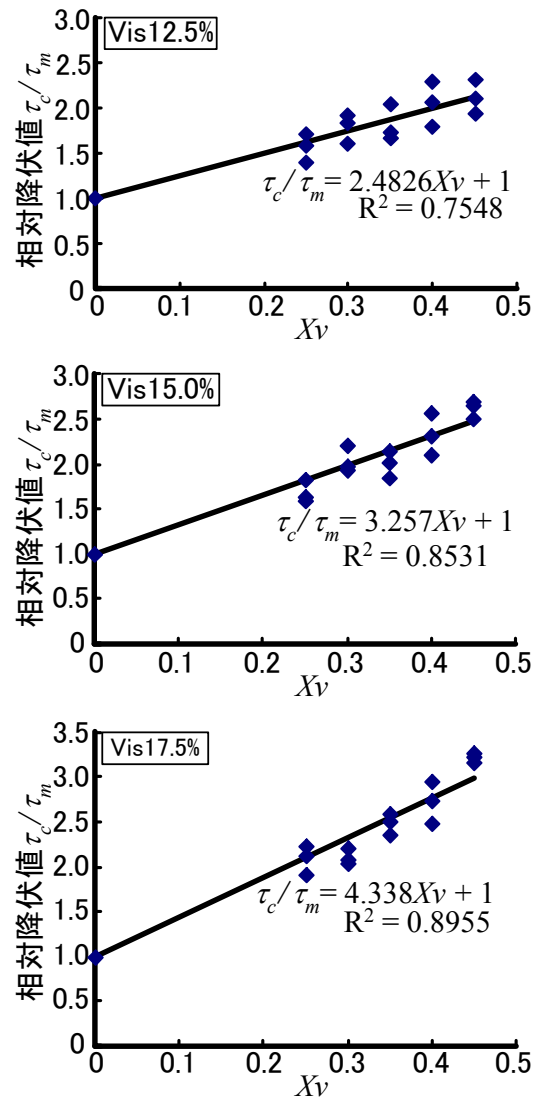


図-12 相対降伏値と粗骨材絶対容積割合の関係

ここで、 $\tau_m$ : モルタル降伏値(Pa),  $\eta_m$ : モルタル塑性粘度(Pa·s),  $R_0$ : 0打フロー半径(mm),  $t_{14}$ :  $J_{14}$ 漏斗流下時間(s), とした。

式(15)に示すように、相対降伏値 $\tau_c/\tau_m$ は、モルタル粘度の影響を考慮した上で、そのコンクリート中の粗骨材絶対容積割合 $X_v$ の影響を受ける。そこで、式(15)の $X_v$ に式(2)、式(3)および式(4)により示される流動障害近傍の局所増大後の粗骨材絶対容積割合 $X_v'$ を代入することにより、局所増大部分のコンクリート降伏値を推定できるとした。

この結果を基に、推定されたコンクリートの降伏値 $\tau_c$ を式(1)に代入することにより、圧力損失 $\Delta P$ を求めた。本論の範囲における $\Delta P$ の推定式として次式を示す。

$$\Delta P = \frac{2D}{D+L} (cXv+1)\tau_m \quad (16)$$

ただし、 $c = 6.816\eta_m - 0.509$  とした。

### (7) 推定値と実測値の比較

式(16)から得られる推定値と可視化流動試験における充填高さの差から算出した圧力損失実測値との比較を行った。その結果を図-13に示す。

図より、圧力損失の実測値と推定値の乖離が既報<sup>2)</sup>と比較して小さくなったため、本論の圧力損失推定方法による精度は向上したと考えられる。しかし、未だ乖離が大きい場合も存在する。乖離が大きいと考えられるの、モルタルの粘性が低く、流動障害あき間隔が小さい条件である。この原因として、粗骨材の接触摩擦増大に伴うコンクリートの流動力減少の影響を十分に勘案できていないことが挙げられ、推定精度向上のため、さらなる検討を続ける。

### 3. まとめ

モルタルの粘性を考慮した自己充填コンクリートにおける流動障害間隙通過時の圧力損失発生・増大モデルを提案し、本モデルによる推定の妥当性について、モデル自己充填コンクリートおよびモルタルを使用した可視化実験および回転粘度計によりレオロジー測定値を用い検証した。

その結果、既報と比較し推定精度の向上がみられたため、本論における圧力損失推定方法は妥当であると思われる。

またモデルモルタルおよびモデルコンクリートのレベルではあるが、モルタル粘性の違いが粗骨材量の局所増大に及ぼす影響について実験を通して推定することが可能となった。

本研究は、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の一部として行われたものである。

### 謝辞

本研究実施にあたり、増粘剤を提供いただいた花王(株)和歌山研究所関係者各位ならびにコンク

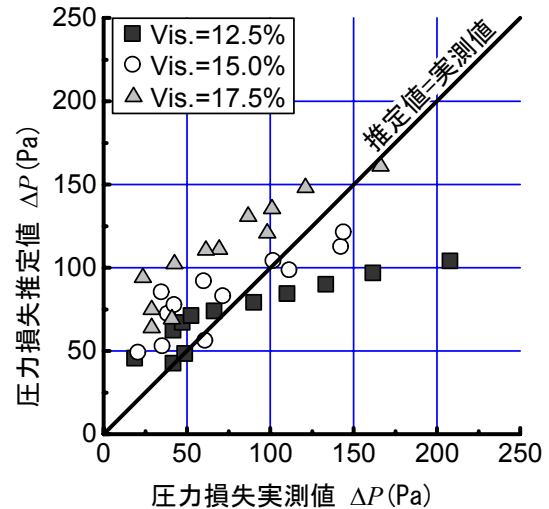


図-13 圧力損失の推定値と実測値の比較

リート用回転粘度計の借用に関し、ご配慮いただいた鹿島建設(株)技術研究所関係者各位にこの場を借り御礼申し上げます。

### 参考文献

- 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研究, 土木学会論文集, No.795, V-68, pp.111-126, 2005
- 渡邊有寿, 丸岡正知, 藤原浩已: 高流動コンクリートの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集, Vol.28, No.1, pp.1139-1144, 2006
- 兼松学, 長井宏憲, 呉相均, 野口貴文, 友澤史紀: 高流動コンクリートの間隙通過性評価 その1. 評価方法, 日本建築学会大会学術講演概要集(中国), pp.361-362, 1999.9
- 藤原浩已: 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, pp.47-48, 1996
- 和美広喜, 笹井浩, 柳田克己, 亀田泰弘: 回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性値測定方法に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第1号, pp.133-141, 1990