

論文 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

渡辺 有寿^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}

要旨：高流動コンクリートの型枠内流動時に、圧力勾配がすべて消費されず、充填不良を招く圧力損失現象が問題となっている。本研究は圧力損失が起こるメカニズムを「コンクリートが間隙通過する際に、骨材の流れに停滞が生じ、骨材量の濃縮が起こることにより、コンクリートの見かけの降伏値が増大し圧力損失が生じる」と構築し、メカニズムについて、混相流体力学の概念により理論式の導出および可視化実験による理論の検証を試みた。その結果、混相流体力学により圧力損失現象を説明できる可能性が見出された。

キーワード：高流動コンクリート、圧力損失、可視化モデル、混相流体力学

1. はじめに

高流動コンクリートは締め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。

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起こっているのかを解明することが必要である。

これまで仮想細管モデル¹⁾を用いて解析を進めてきたが、細管径および細管長さを理論的に求めることは極めて難しく、細管長さを粗骨材増大区間と等しいと仮定するなど、様々な仮定を立てなければならず、実現象と理論との整合性を図ることが困難である。そこで本研究では、圧力損失メカニズムを理論的に解明することを目的として、混相流体力学の概念を用いて、これまでの困難な仮定を改善する新たな圧力損失メカニズムを構築し、理論式の導出を試みた。そして、モデル高流動コンクリートの可視化実験²⁾により理論の検証を行った。

2. 圧力損失メカニズム

2.1 概要

本章では圧力損失現象を力学的なモデルと捉え、高流動コンクリートが間隙部を通過する際の圧力

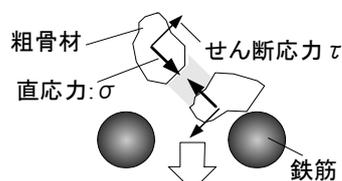


図-1 応力伝達機構

損失メカニズムモデルを以下の様に構築した。

(1) 間隙部の粗骨材の停滞

高流動コンクリートが型枠内を流動する際、鉄筋間隙部において粗骨材が鉄筋表面を迂回し、回転運動を起こすため粗骨材の流動が停滞する。

(2) 間隙部前での粗骨材の濃縮

間隙部での粗骨材の停滞により、間隙直前部で粗骨材濃度の濃縮現象が生じる。

(3) 応力伝達メカニズムの変化

固体粒子(粗骨材)が粘塑性流体中を流動する際、粗骨材には図-1のように、直応力 σ と鉛直方向にせん断応力 τ が作用する。粗骨材間のモルタル量が十分である場合、せん断応力は直応力に依存しない。しかし、粗骨材の濃縮により骨材同士の接触等が生じ易くなると、応力伝達メカニズムが局所的に変化し、 σ と τ は比例関係となる(図-2)³⁾。

(4) 降伏値およびせん断抵抗の増大

直応力増加に伴いせん断応力が増大し、コンク

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科助教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設学科助手 工修 (正会員)

リートのせん断抵抗が局所的に増大する。したがって、濃縮部ではコンクリートの変形抵抗性が増し、見掛け上降伏値が増加する。

(5) 圧力損失の増大

間隙を通過する高流動コンクリートの流動挙動を二次元で考えると、間隙部が受け持つ圧力は式(1)で示される⁴⁾。また、図-3より、間隙が支持する圧力 P は間隙通過における圧力損失 ΔP に等しいと考えられるため、式(1)は圧力損失の推定式となる。式より、降伏値が増大することによって圧力損失が増大することが分かる。

以上を間隙部における粗骨材の停滞により、濃縮が起こり、圧力損失が生じるメカニズムとした。

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

ここに、 τ_c ：コンクリートの降伏値 (Pa)

ΔP ：間隙部に作用する圧力差 (Pa)

D ：鉄筋直径 (mm)

L ：間隙幅 (mm)

3. 粗骨材の停滞・濃縮現象の理論式

3.1 概要

本章では、前章で構築したメカニズムを混相流体力学の考え方をを用いて、間隙部における粗骨材の停滞現象から濃縮現象までの流れを理論的に推定した。

3.2 流動の停滞現象時における理論式

コンクリートのような高濃度の固液混相流体では、せん断力によって粒子構造が変化し、粒子同士の噛み合いによりせん断垂直方向に応力が生じることがわかっている。この垂直応力は、せん断変形率と流体の粘度に依存すると考えられている。これは、前章にて構築した応力伝達メカニズム中の、粒子同士の接触による固体粒子間摩擦メカニズムで説明が出来る。

本研究ではチクソトロピー性流体の構成方程式として、Fredricksonによって提案された式(2)を用いた。

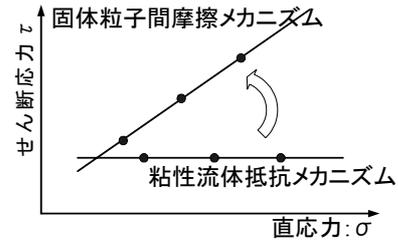


図-2 応力伝達メカニズムの変化

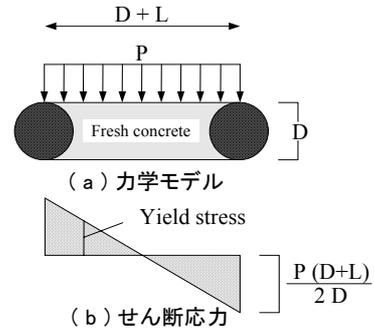


図-3 圧力損失の力学的モデル

$$\frac{D}{Dt} \phi = -\frac{1}{\lambda} (\phi - \phi_0) + k\Gamma \frac{\phi_\infty - \phi}{\phi} \quad (2)$$

ここに、 ϕ ：流動度 (1/Pa·s)

ϕ_0 ：初期の流動度 (1/Pa·s)

ϕ_∞ ：終端の流動度 (1/Pa·s)

λ ：緩和時間 (s)

k ：見かけの降伏応力で示される関数

式(2)を代表長さ L および代表流速 U で無次元化すると、以下ようになる。

$$\frac{\bar{D}}{Dt} \bar{\phi} = -\alpha \bar{\phi} + \beta + \gamma \bar{\Gamma} \frac{1 - \bar{\phi}}{\bar{\phi}} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\phi} = \frac{\phi}{\phi_\infty}$ $\bar{\Gamma} = \left(\frac{L}{U}\right)^2 \Gamma$

$$\alpha = \frac{L}{\lambda U} \quad \beta = \frac{L}{\lambda U} \frac{\phi_0}{\phi_\infty} \quad \gamma = \frac{kU}{L\phi_\infty}$$

$$\lambda = \frac{2\rho_2 r^2}{9\mu_1} \quad (4)$$

ここに、 ρ_2 ：粒子の密度 (g/cm³)

r ：粒子の半径 (mm)

μ_1 ：流体の粘性 (Pa·s)

また、式(2)中の緩和時間 λ は粒子・流体間の運動量輸送に関する値であり、式(4)で与えられる。以上の理論式を解くことにより、粗骨材の流速を求めた。

3.3 粗骨材の濃縮現象時における理論式

既往の研究ではコンクリートを固液二相流として取り扱うのが一般的であるが、混相流体力学においては、固液二相流は2相の物理的構成、基礎方程式の構成が固気二相流に似ていることから、固気二相流で考えることが多い。

そこで、本研究ではコンクリートをモルタル(流体)と粗骨材(粒子)の固液二相流体とみなし、固気二相流の概念を用いて濃縮現象の理論式の導出を試みた。ここで、固気二相流と違い、固液二相流は液体相の流れ場における粘性応力の効果が無視できなくなることを考慮した⁵⁾。

固気二相流を一次元流れで考えた場合、以下の保存式が成り立つ。

$$\rho q A = \text{Const} \quad (5)$$

$$\rho q \frac{dq}{dx} + \frac{dp}{dx} = 0 \quad (6)$$

$$\rho q \frac{dh}{dx} - q \frac{dp}{dx} = 0 \quad (7)$$

ここに、 ρ : 流体(気体)の密度

q : 流速

p : 圧力

A : 断面積

これらの式より、次式が得られる。

$$\frac{1}{\rho q} \frac{d}{dx} \rho q = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \quad (8)$$

ここに ρq : 流量密度

式(8)中の ρq は流れに直角な単位断面積を単位時間に通過する質量流量であり、式は断面積の減少によって増加し、逆に断面積の増加によって ρq が減少することを示している。つまり、コンクリート流の流量が一定の場合、断面積が減少する間隙部では流量密度が増加し、粗骨材が局所的に濃縮することを示している。

また流体に対する運動方程式は次式となる。

$$\sigma_1 q_1 \frac{dq_1}{dx} = - \frac{dp_1}{dx} - \frac{\sigma_2}{\lambda} (q_1 - q_2) \quad (9)$$

ここに、 σ_1 : 単位体積当りの粒子相の質量

σ_2 : 単位体積当りの液相の質量

q_1 : 液相の流速

q_2 : 粒子相の流速

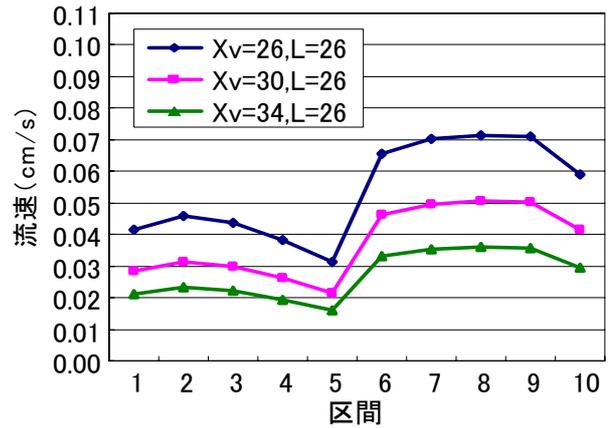


図-4 流速の計算値 (L=26mm)

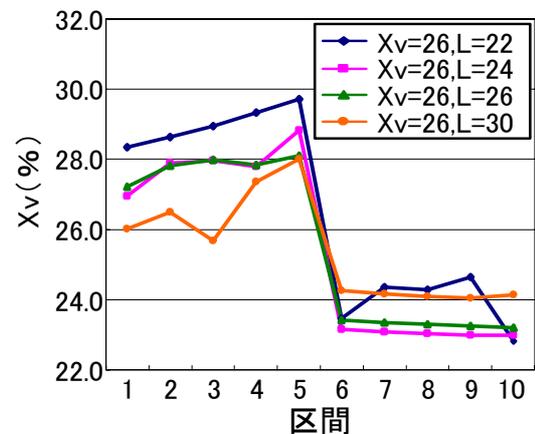


図-5 各区間の粗骨材体積濃度の

λ : 緩和時間

式(9)は、断面減少部において負の圧力勾配によって流体が加速され、粒子相は流体の粘性抵抗により流体に引きずられるが、液相の流速からは遅れてしまう($q_2 < q_1$)ということを示している。すなわち、間隙部での粗骨材とモルタルに相対的な速度差が生じ、モルタルの先流れ現象が起こっていると考えられる。

よって、式(8)および(9)により次の方程式を得る。これが流動方向に等分割した短冊状の領域間の流体・粒子の流速と単位体積当たりの粒子相質量の関係式となる。(詳細は3.4で述べる)

$$\frac{1}{\sigma_2} \frac{d\sigma_2}{dx} = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} - \frac{1}{q_2^2 \lambda} (q_1 - q_2) \quad (10)$$

3.4理論式の計算結果

図-4に本研究で導出した停滞現象の理論式の結果を示す。解析条件は間隙幅 $L=26\text{mm}$ において粗骨材体積濃度 X_v を26,30,34%の3水準とした。ま

た、図中の「区間」とは障害部を中心とした流動領域を短冊状に区切った区間の番号である（障害部：区間5~6）。図より、粗骨材の流速は間隙部に接近するに従い低下し、間隙部を通過すると停止している骨材が少ないために平均流速は大きくなるという傾向を得た。また、骨材量が多いほど流速が小さい結果となった。

また、図-5に方程式で得た各区間の粗骨材体積濃度の結果を示す。解析条件は $X_v=26\%$ において L を22,24,26,30mmの4水準とした。図より、間隙直前で粗骨材量が局所的に増加し、間隙幅が小さいほど濃縮が顕著となる結果となった。

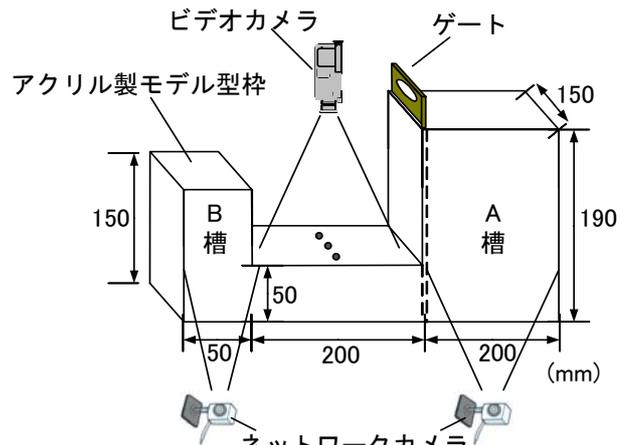


図-1-6 モデル型枠

4. モデル高流動コンクリート可視化実験

4.1 実験概要

本章では可視化可能なモデル高流動コンクリート（以下、モデルコンクリート）間隙通過試験を行い、導出した理論式の検証を行った。

4.2 間隙通過試験

(1) 使用材料

本研究では、高流動コンクリートをモルタルと粗骨材の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、モルタルには水道水に増粘剤（アルキルアリルスルホン酸塩、密度： 1.08g/cm^3 ）を混和したものを、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： 1.35g/cm^3 ）を用いた。

(2) 実験方法および実験条件

モデルコンクリートを図-6に示すモデル型枠のA槽に充満させた状態からゲートを開放し、間隙を通過して流動が停止するまでの水平流動部の様子をビデオカメラおよびネットワークカメラで撮影した。圧力損失 ΔP は流動停止後のA槽とB槽の表面高さの差を測定し、式(11)から算出した。実験因子はコンクリート中の粗骨材の絶対容積割合である粗骨材体積濃度 X_v (%)と、間隙幅 L (mm)およびモルタルの塑性粘度 η (Pa·s)とし、 X_v は26, 30, 32, 34(%)の4水準、 L は22, 24, 26, 30(mm)の4水準、モルタルの塑性粘度 η は、増粘剤添加率を10, 15, 20(%)と変化させ、 $\eta=3.5, 4.0, 6.0$ (Pa·s)の

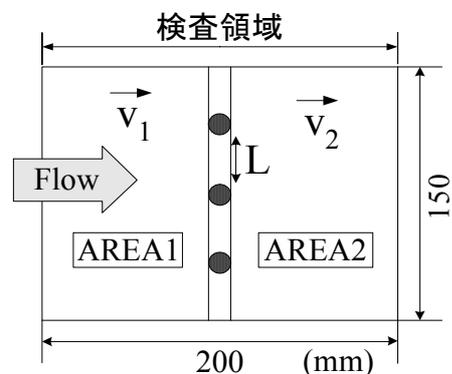


図-7 検査領域

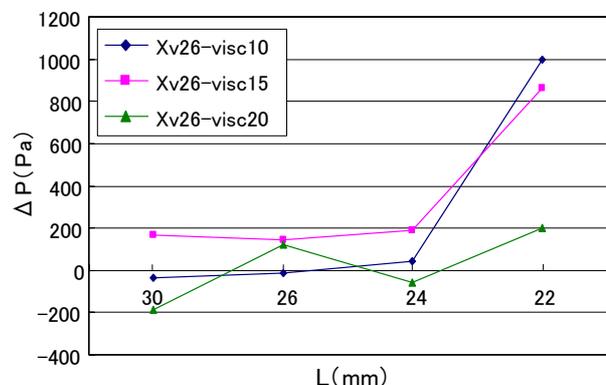


図-8 間隙幅 L と圧力損失 ΔP の関係 ($X_v=26\%$)

3水準とし、 L にあわせて障害径を変化させた。

検査領域は、図-7におけるモデル型枠の水平流動部をとり、壁面摩擦や形状摩擦を排除し、間隙部による圧力損失のみを評価するため、無鉄筋条件の圧力損失を全測定値から減じた。

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (11)$$

ここに ρ : コンクリートの密度 (g/cm^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

Δh : 表面高さ損失 (mm)

(3) 圧力損失の評価

モデルコンクリート間隙通過試験結果の一例として $X_v=26\%$ における間隔 L と圧力損失 ΔP の関係を図-8に示す。実験結果より、間隙条件が厳しくなるほど圧力損失が大きくなる結果となり、その他の配合条件(X_v , 増粘剤添加率)においても同様の結果となった。これは、間隙通過の条件が厳しくなるほど、間隙部でコンクリートが流動圧の一部を支持し、損失高さが大きくなるものと考えられる。また、モルタルの粘性が高くなるほど圧力損失が小さくなる傾向を得た。 X_v が同じ場合は骨材間のモルタル量は等しいはずであるので、モルタルの粘性が高いことで、骨材間での接触や摩擦が妨げられ、固体粒子間摩擦メカニズムに影響を与えていると考えられる。

(4) 流動解析

a) 粗骨材平均速度の算出

図-9のように検査領域を短冊状に区間分割する。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PIV (Particle Image Velocimetry) による流動解析ソフトで測定した。測定範囲は撮影した映像の30秒間であり、1秒毎の流動速度を測定し、平均した。

b) 間隙部での粗骨材体積濃度の算定

濃縮部粗骨材体積濃度 X_v' (%)は、間隙部における局所的な粗骨材体積濃度を示すものであり、濃縮の程度が大きいかほど大きくなるものと考えられる。 X_v' は流動停止直前の静止画像から次のように推定した。

まず、AREA1およびAREA2における静止画像を図-10のように二値化し、粗骨材(図中:白)の占める粗骨材面積割合を画像解析ソフトにて測定した。ここで、流動の垂直方向の粗骨材量がほぼ等しいこと、および壁面付近の光量の不足から、二値化領域は便宜上、障害間とした。

AREA1およびAREA2における粗骨材面積割合をそれぞれ S_1 , S_2 (%)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たため(50mm)、コンクリートの流動を二次元で考え、二値化によ

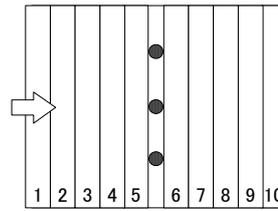


図-9 区間分割

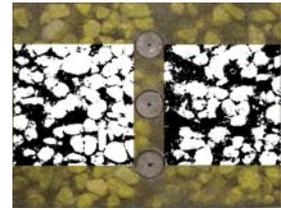


図-10 検査領域の二値化

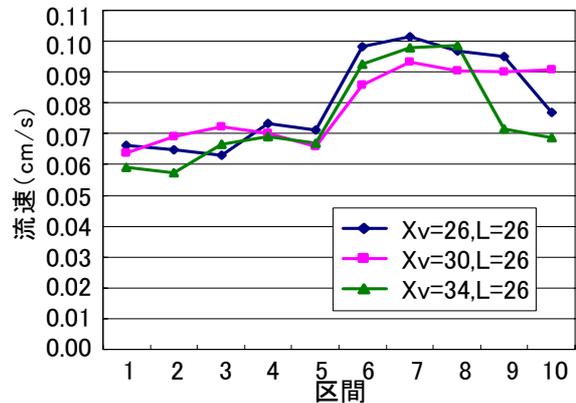


図-11 各 X_v の粗骨材速度の測定値($L=26\text{mm}$)

る間隙前後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、間隙部における粗骨材体積濃度増分 ΔX_v (%)は式(12)で表される。以上から、濃縮部粗骨材体積濃度 X_v' は、式(13)のように X_v (配合時)と ΔX_v (増分)の和とした。

$$\Delta X_v = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} X_v \quad (12)$$

ここに ΔX_v : 粗骨材体積濃度増分 (%)

X_v : 配合時の粗骨材体積濃度 (%)

S_1 : AREA1の粗骨材面積割合 (%)

S_2 : AREA2の粗骨材面積割合 (%)

$$X_v' = X_v + \Delta X_v$$

$$= \frac{2S_1}{S_1 + S_2} X_v \quad (13)$$

ここに X_v' : 濃縮部粗骨材体積濃度 (%)

4.3 解析結果および理論の検証

図-11にモデルコンクリート間隙通過試験における各 X_v の粗骨材速度の測定値($L=26\text{mm}$)を示す。図より、間隙通過前領域の粗骨材の平均流速は間隙通過後の流速よりも小さい結果となった。

これは、粗骨材が間隙部を迂回するため回転運動を起こすことで流動が停滞し、停止している骨材

が多いため、平均値が小さくなったと考えられる。流速は理論値より大きな値を示したが、定性的な傾向は一致した。したがって、これは前章の理論による計算値(図-4)および構築したメカニズムモデル(1)の妥当性を示すものと考えられる。

次に、配合条件の X_v における間隙幅 L と ΔX_v の関係を図-12に示す。図より、間隙条件が厳しくなるほど濃縮することが分かる。また、前章で求めた各区間の X_v の計算値(図-5)により求めた濃縮後の X_v' の理論値と、実験と式(13)により得られた X_v' の実験値との関係を図-13に示す。これより、理論値は実験値よりも小さいものの、おおむね近い値をとった。したがって、これは前章で構築した、メカニズムモデル(2)の妥当性を示すものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、高流動コンクリートの圧力損失メカニズムの解明を目的として、間隙部における粗骨材流の停滞現象および粗骨材の濃縮現象を理論的に求めることを試み、実験による検証を行った。

その結果、コンクリートを混相流体力学による固気二相流の概念を用いて、構築した圧力損失メカニズムについて理論式の導出を行った結果、完全なオーダーの一致とはならなかったが、定性的な傾向が一致する結果となり、粗骨材の停滞・濃縮現象を再現できる可能性が見出された。

参考文献

1) 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

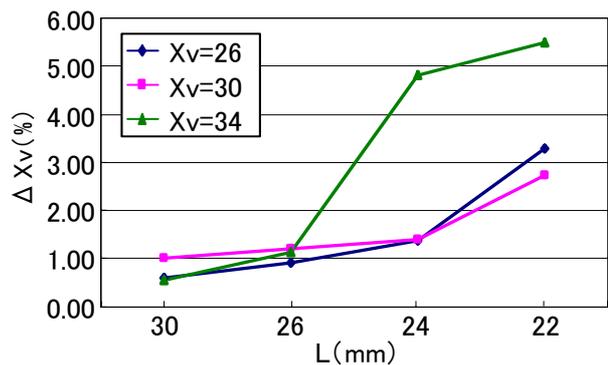


図-12 間隙幅 L と ΔX_v の関係

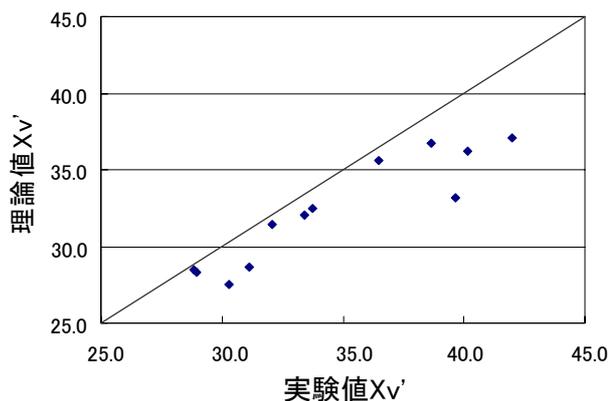


図-13 濃縮後の X_v' の理論値・実験値の関係

- 2) 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
- 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士論文，2004
- 4) 呉相均ほか：可視化モデルによる高流動コンクリートの間隙通過性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，vol.19，No.1，pp.37-42，1997
- 5) 日本流体力学会：混相流体の力学，朝倉書店，pp.164-170