

論文 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

渡邊 暢^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}・石崎 康暖^{*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もある。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、モデル高流動コンクリートを用いた可視化実験により検証した。

キーワード：高流動コンクリート, 多層配筋構造, 圧力損失, 可視化モデル

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：高流動コンクリート)は締固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。

これまで流動障害が鉄筋一段の単層配筋構造について、モデル高流動コンクリートの可視化実験¹⁾を行い、仮想細管モデル²⁾を用いた分析や混相流体力学の概念を用いた圧力損失メカニズムの分析³⁾を進め、理論的に解明してきた。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、多層配筋通過時の高流動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³⁾の応用が可能かを解明することを目的として、モデル高流動コンクリートの可視化実験を行った。

2. モデル高流動コンクリート可視化実験

2.1 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)を用い、多層配筋時における間隙通過試験を行った。本実験では第一段階として流動障害が鉄筋二段の二層配筋構造の実験を行った。

2.2 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,0打フロー値を241mmに調整したものを用い,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: 1.31g/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-1に示すモデル型

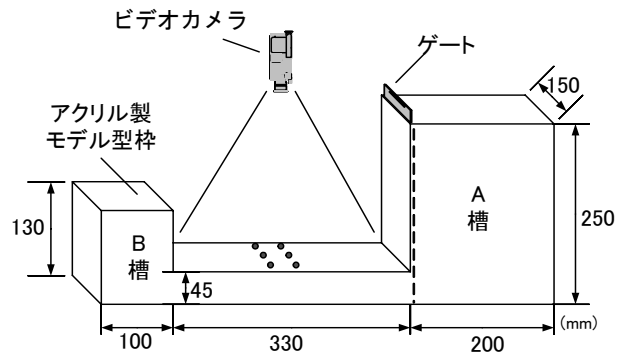


図-1 モデル型枠

*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)

*4 宇都宮大学 工学部建設学科 建設工学コース

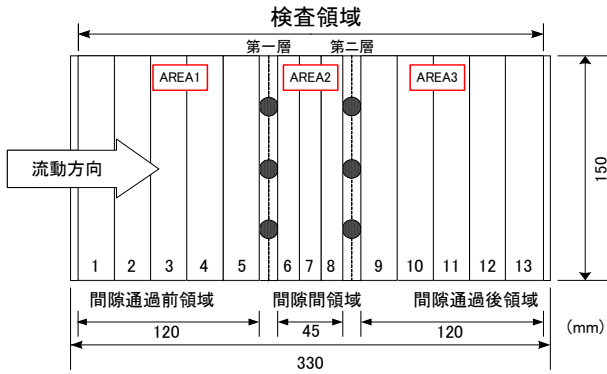


図-2 検査領域

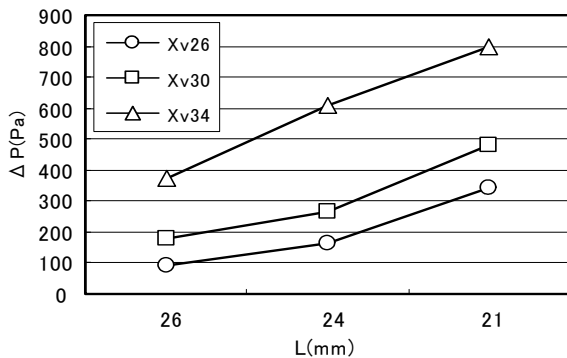


図-3 間隙幅Lと圧力損失ΔPの関係(二層配筋)

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で撮影した。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)とし、 X_v は26, 30, 34(%)の3水準、 L は既往の研究³⁾より傾向がみられると判断した21, 24, 26(mm)の3水準とし、 L にあわせ障害径を22, 18, 15(mm)と変化させた。モルタルの塑性粘度 η は、増粘剤添加率を一定にすることにより一定とし、流動方向の鉄筋間隔は最大粗骨材寸法の3倍の45mmに設定した。

(3) 圧力損失の評価

圧力損失 ΔP は流動停止後のA槽とB槽の自由表面高さの差を測定し、式(1)から算出した。検査領域は、図-2における型枠の水平流動部とし、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、無鉄筋条件で同様に試験し、測定した圧力損失を全測定値から減じた。

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (1)$$

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)

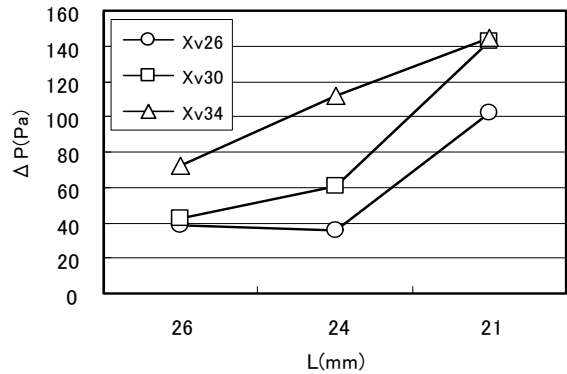


図-4 間隙幅Lと圧力損失ΔPの関係(単層配筋)

Δh : 表面高さ損失 (mm)

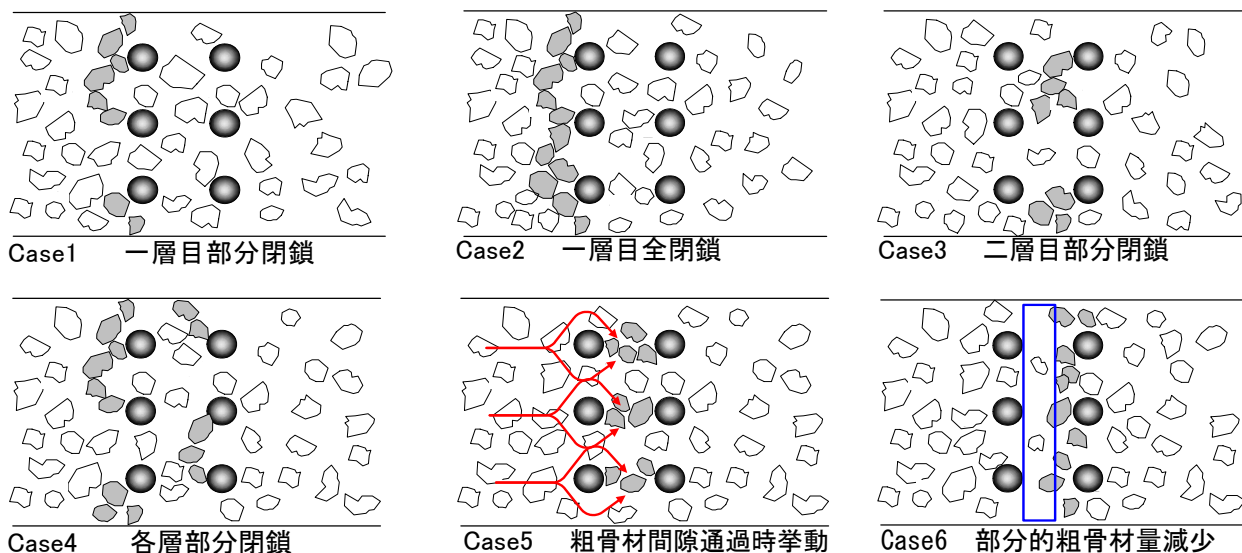
モデルコンクリート間隙通過試験結果として間隙 L と圧力損失 ΔP の関係を図-3に示す。これより、間隙条件が厳しくなるほど、あるいは粗骨材体積濃度 X_v が大きくなるほど圧力損失が大きくなる傾向となり、単層配筋構造時と同様であった³⁾。したがって、間隙通過の条件が厳しくなるほど、間隙部でコンクリートが流動圧の一部を支持し、損失高さが大きくなるものと考えられる。

(4) 単層配筋構造との比較

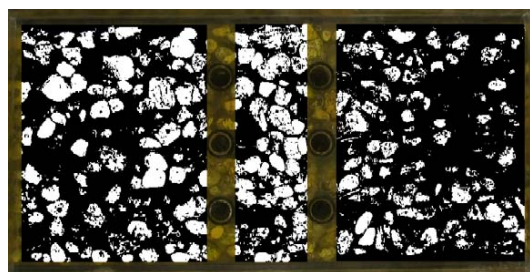
同様のモデルコンクリートを用いた単層配筋流動試験を行った結果より間隙 L と圧力損失 ΔP の関係を図-4に示す。単層配筋と二層配筋ともに L の狭小化、 X_v の増大に伴い ΔP が増大するという傾向は類似していることが図-3、図-4よりわかる。しかし、圧力損失 ΔP は単層に比べて二層の値は2~5倍の値となった。これは、一層目通過時の速度損失や圧力損失により、二層目通過時の速度損失や圧力損失が増大したため、単純に ΔP が2倍の値にならないと考えられる。

(5) コンクリート流動挙動

これまでに行った単層配筋構造における実験では、流動障害鉄筋部の前後で粗骨材体積濃度 X_v は減少することが確認されている(以下この現象を濃縮と記す)。また、粗骨材体積濃度 X_v が小さいほど、圧力損失は小さく流動しやすいことがわかっている³⁾。これより、多層配筋構造では、一層目を通過することができれば、二層目以降は容易に通過できると予測し、間隙部が閉塞するアーチング現象は二層目以降出来ないと予測し



図－5 流動時粗骨材の挙動



図－6 検査領域の二値化

た。しかしながら、実際の現象は図－5 Case1～4に示す通りとなった。予測では、Case1 および 2に示した一層目のみ閉塞が起これると考えたが、実際、流動試験を行うと Case3 および 4 に示す通り二層目にも部分閉塞が見られた。

多層配筋では図－5 Case5 に示すように、前後の鉄筋間に粗骨材が一時的に堆積するという挙動を示した。これは、間隙部を通過後のモデルコンクリートが扇状に流動し、鉄筋を巻き込むように流れる現象がみられたため、単層配筋構造であれば、巻き込んだ後一体となって流れたのものが、二層配筋構造では二層目の鉄筋に止められることで起きた現象である。これが二層目に部分閉塞が起きる原因と言える。

当然、間隙条件が狭いほど、粗骨材体積濃度 X_v が大きいほど閉塞が起これやすい傾向はみられ、二層配筋構造では Case1～4 のいずれかの状態となるが、明確な傾向は見られなかった。また、流動試験条件が厳しくなるにつれて Case6 のよう

に一層目通過直後は粗骨材が希薄になり、二層目の直前で粗骨材が濃縮する現象がみられた。

また、閉塞部の決壊や粗骨材同士の接触により、コンクリート流は断続的な流動をみせた。この現象は単層配筋構造時の流動でも同様にみられた³⁾。以上より流動状態挙動は単層配筋構造と異なるものと言える。

3. 可視化実験結果の数値的分析

3.1 目的

流動挙動を目視のみでなく、数値的に捉えるため、撮影した映像を元に分析を行った。本研究では粗骨材平均速度および粗骨材体積濃度の増分を求めた。

3.2 分析方法

(1) 粗骨材平均速度の算出

図－2のように検査領域を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は粗骨材最大寸法の15mm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PIV (Particle Image Velocimetry) による流動分析ソフトで測定した。測定範囲は撮影した映像の60秒間であり、0.1秒毎の流動速度を測定し、平均した。これから比較する値を抽出した。

(2) 間隙通過後の粗骨材体積濃度の算定

間隙通過後粗骨材体積濃度 $X_v'_{n}$ (%)は、間隙を

通過した後の各々のAREAにおける粗骨材体積濃度を示すものであり、濃縮の程度が大きいほど大きくなるものと考えられる。 Xv' 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, AREA2およびAREA3における静止画像を図-6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分析ソフトにて測定した。ここで、流動の鉛直方向の粗骨材量がほぼ等しいこととした。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し、二値化による分析領域の粗骨材面積割合が実際の Xv と等しいとした。

これから、間隙通過後(流動試験終了後)の粗骨材体積濃度 Xv' は式(2)で表される。

$$Xv'_n = \frac{S_n(A_1 + A_2 + A_3)}{A_1S_1 + A_2S_2 + A_3S_3} Xv \quad (2)$$

ここに $n=1,2,3$ とする。

Xv'_n : 流動試験終了後粗骨材体積濃度 (%)

Xv : 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 (%)

S_1, S_2, S_3 : AREA1,2,3の粗骨材面積割合 (%)

また、単層配筋構造試験において障害上流側に濃縮現象が起こることが明らかとなっている。多層配筋においても同様にAREA3における流動後粗骨材体積濃度 Xv'_3 (%)が希薄になっていると考えられる。そこで、間隙部前の領域(AREA1,2)と通過後の領域(AREA3)の差をそれぞれ $\Delta Xv1$, $\Delta Xv2$ とし、各間隙部前の濃縮(粗骨材体積濃度増分)として式(3), (4)で表される。

$$\Delta Xv1 = Xv'_1 - Xv'_3 \quad (3)$$

$$\Delta Xv2 = Xv'_2 - Xv'_3 \quad (4)$$

3.2 分析結果および考察

(1) 粗骨材の平均流速

モデルコンクリート間隙通過試験における各 Xv の粗骨材速度の測定値を次のようにまとめた。

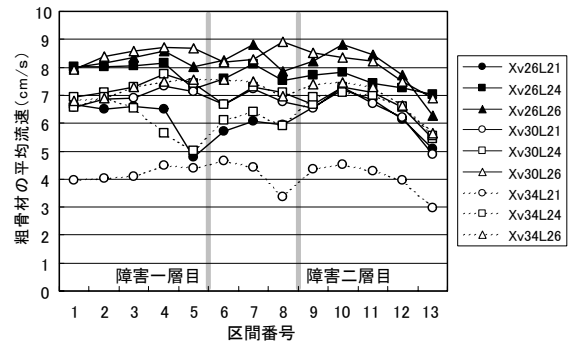


図-7 粗骨材流速(流動開始～30 s)

各区間にモデルコンクリートが流入開始から30秒間の平均値(図-7)、モデルコンクリートの流動先端が障害の第一層目到達時から第二層到達後1秒の間(区間1～5:図-8)、流動先端が障害の第二層到達時からB槽到達後1秒までの間(区間1～8:図-9)、流動先端がB槽到達後5秒間(全区間:図-10)、流動先端がB槽到達後5秒から20秒(全区間:図-11)。

モデルコンクリートを使用し、 Xv および L を変化させ、流動障害が鉄筋二段の二層配筋構造の実験を行ったが、その流動パターンは様々であり、条件ごとの一定傾向は見られなかった。

濃縮現象のパターンとして以下のものが挙げられる。ここで、骨材の流動速度が低下したものは濃縮が起きていると考えられる。

- A) AREA1において濃縮現象が起こり、閉塞が生じたとき、流動方向のAREA2では粗骨材の流動が滞り減速し濃縮が起こる。
- B) 図-5 Case5に示す挙動が原因でAREA2にて濃縮が生じ、閉塞が発生し、上流側のAREA1において流動速度が低下する。これによりAREA1の濃縮を引き起こす。
- C) AREA1における濃縮が極めて大きいとき、モルタルの先流れ現象が起き、AREA2以降の粗骨材体積濃度が希薄になることによりAREA2では、濃縮が起きにくくなる。

先述のとおり、一層目を通過することができれば、二層目以降は容易に通過できるとした予測に反し、二層目前において高い濃縮現象が多々見られた。また、C)の現象については単層と同様の現

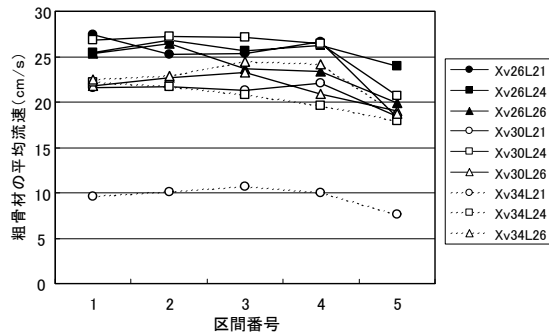


図-8 粗骨材流速（第一層～第二層）

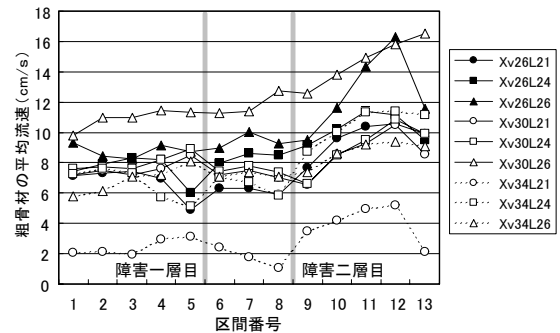


図-10 粗骨材流速（B槽～5s）

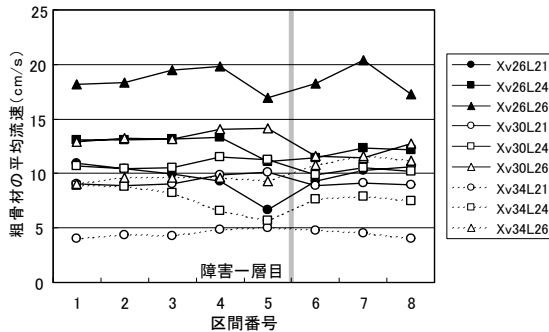


図-9 粗骨材流速（第二層～B槽）

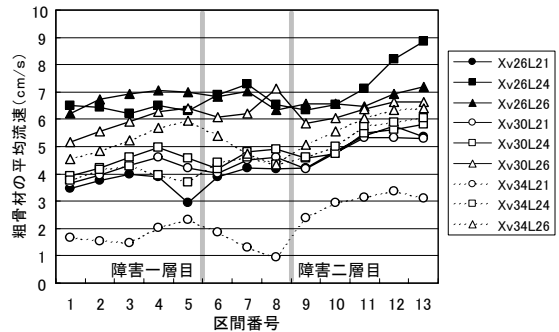


図-11 粗骨材流速（B槽5s～20s）

象であり、予測通りと言える。しかし、二層目以降での粗骨材量減少が大きく、実施工では避けるべき現象と考えられる。粗骨材流速は、図-7～11より傾向をみると粗骨材体積濃度 X_v が34%においては他条件と比較して流速が遅い傾向が見られるが、26%および30%では顕著な差は見られなかった。これよりある一定の粗骨材体積濃度 X_v を超えると流速が著しく減少すると考えられる。またこれに対して、間隙幅 L は狭まると流速が遅くなる傾向が顕著に見られた。

次に各間隙通過時の粗骨材流速についてみると、一層目通過時(図-8)は間隙部前で減速していることがわかる。これはすべての条件で見られ、コンクリート流が鉄筋と接触することで全体流速が低下し、粗骨材が停滞している。二層目通過時(図-9)においては粗骨材体積濃度 X_v によって傾向が分かれた。 $X_v=26\%$ では、間隙部前で減速し、通過後流速が上昇する傾向が見られる。 $X_v=30\%$ では、間隙部前で増速し、通過後減速する傾向が見られる。 $X_v=34\%$ では、 $L=21\text{mm}$ では流速が低いためか通過時に大きな変化は見られない。 $L=24\text{mm}$ および 26mm は通過後に増速する傾向が見られる。これはモルタルが先流れするこ

とにより速度が増していると考えられる。B槽到達時(図-10)においては、AREA1,2の流速は二層目通過時と大きな変化は見られない。AREA3においては全体的に増速する傾向が見られた。これは一層目、二層目で粗骨材の濃縮が生じ、二層目通過後の粗骨材濃度が希薄になったためと考えられる。観測領域充填後(図-11)は、B槽通過時と比べると速度が安定してきてはいるものの傾向としては同様の結果といえる。流動全体の結果(図-7)としては、 $X_v=26\%$ は、間隙部前での減速、通過後の加速が見られた。 $X_v=30\%$ では、間隙部前での減速は見られず、通過後に減速する傾向が見られた。 $X_v=34\%$ では二層目の間隙部前での減速が共通して見られたが、一層目に関しては同様の傾向は見られなかった。

(2) 粗骨材体積濃度増分

次に、配合条件の X_v における間隙幅 L と ΔX_{v1} 、間隙幅 L と ΔX_{v2} の関係をそれぞれ図-12、図-13に示す。また、 ΔX_{v1} と ΔX_{v2} を各間隙条件および粗骨材体積濃度別に表したものを図-14に示す。

間隙幅と ΔX_{v1} および ΔX_{v2} の関係について見てみると、濃縮は ΔX_{v2} の方が大きくなる傾向が

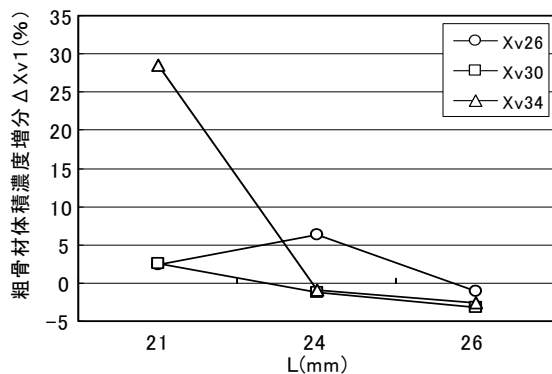


図-12 間隙幅Lと $\Delta Xv1$ の関係

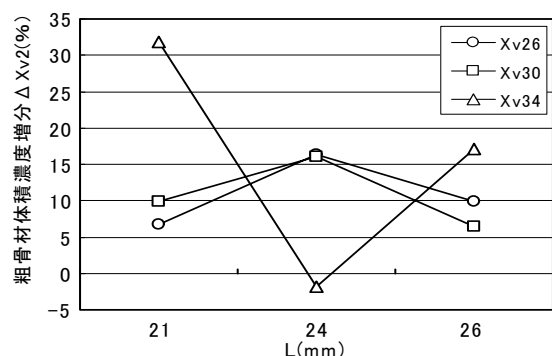


図-13 間隙幅Lと $\Delta Xv2$ の関係

ある。ただし、計測範囲の違いによる差も考えられるため、単純な濃縮の比較はできないが、間隙通過に対する影響は $\Delta Xv2$ の方が大きいと考えた。また、間隙幅の大きい $L=26\text{mm}$ では一層目を通しやすいため、濃縮量が小さくなり $\Delta Xv1$ は負の値を示した。また、粗骨材が通過しやすいと、当然AREA3での粗骨材体積濃度は大きくなり、 $\Delta Xv1$ は負となり易くなる。ただし、負の値をとったとしても、障害上流側に濃縮現象がみられるものがあつた。

4. 結論

本研究では、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³⁾の応用が可能かを解明することを目的として、モデル高流動コンクリートの可視化実験を行い、間隙部における粗骨材流の挙動の把握を試みた。

可視化実験の結果、圧力損失は間隙幅と粗骨材体積濃度による傾向が、単層配筋と二層配筋は類似していると言える。単層配筋構造では見られなかった多層配筋構造特有と考えられる挙動が確

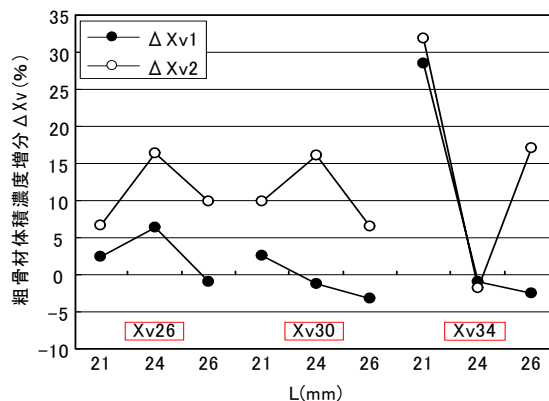


図-14 $\Delta Xv1$ と $\Delta Xv2$ の比較

認された。また、当初の予測に反し、二層目にも部分閉塞が発生するなど、様々なパターンの挙動がランダムに起こった。よって、単層配筋構造の理論を単純に多層配筋構造に応用することは難しいと考えられる。

また、本研究では粘性を一定とし、流動障害の前後間隔は固定して実験を行った。今後は、これらの条件を種々に変化させ、様々な実現象の把握し、新たな理論の構築が必要だと考えられる。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)18560447により行われたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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集，Vol.28，No.1，pp1139-1144，2006