

論文 壁状型枠におけるフレッシュコンクリートの鉄筋まわりの流動に関する可視化

小山広光*¹・橋本親典*²・浦野真次*³・辻幸和*⁴

要旨：フレッシュコンクリートは、充填時に鉄筋間を通過するところで骨材のアーチングや材料分離などが起きやすくなる。本研究は、壁状型枠内を流動する鉛直方向平面におけるフレッシュコンクリートの鉄筋まわりの流動を、可視化モデルで再現し、それぞれの流動において、骨材の流跡線から鉄筋まわりの流動について考察し、最大せん断ひずみ速度を用いて定量化した。実験結果を基に、すでに実験したスラブ状型枠内を流動する水平方向平面における鉄筋まわりの流動との比較検討を行ったところ、壁型枠内の流動はスラブ型枠内の流動に比べひずみ速度が平均で2～3倍程度であることが明らかになった。

キーワード：ひずみ速度、ひずみロゼット法、可視化実験、流動性状

1. はじめに

高流動コンクリートのように自己充填性が高いコンクリートは、自重で生じる圧力勾配により流動する。一方、自己充填性が低くスランプの小さいコンクリートにおいても、パイプレータなどを用いて外部より流動化のための振動エネルギーを与えることにより、流動性を確保する。いずれの場合においても、型枠内にコンクリートが打ち込まれる際には、鉄筋を通過するところで骨材のアーチングや材料分離などが起きやすくなり、施工上の問題点となる。

「施工設計」の概念に基づく流動解析手法を構築するに当たり、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に評価することが必要である。そのためには、流動のメカニズムに関する情報が必要不可欠であるが、現在までに鉄筋まわりのフレッシュコンクリートの挙動に関して定量的に把握した研究^{1) 2)}は少なく、有効な情報は不十分である。

本研究は、流動状態を直接観察できる可視化実験手法を用いることにより、壁状型枠を用い

て、壁面に沿った平面において、鉄筋まわりのフレッシュコンクリートの流動性状を「ひずみ速度」という特性で定量的に評価することを試みた。本実験では、鉛直方向の二次元平面内におけるフレッシュコンクリートの流動（以下、鉛直平面流動と称す）の変形性状の定量化を試み、既に著者らが行ったスラブ型枠内における水平方向の二次元平面内における流動（以下、水平平面流動と称す）の実験結果³⁾との比較検討を行うことにより、鉄筋まわりでのフレッシュコンクリートの流動性状を考察する。まず、可視化モデルコンクリート中に存在する粗骨材の流跡線を表しそれぞれの流跡を検討した。その後、骨材粒子群の相対距離の変化にひずみロゼット法を応用し、経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度や主ひずみ速度の分布状況を求めることにより、流動を定量化した。

2. 実験概要

2.1 モデルコンクリート

モデルコンクリートは固液2相系モデルとし、

* 1 石川島建材工業(株) 技術本部 技術研究所 工修 (正会員)

* 2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

* 3 清水建設(株) 技術研究所 建設技術開発部 工修 (正会員)

* 4 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

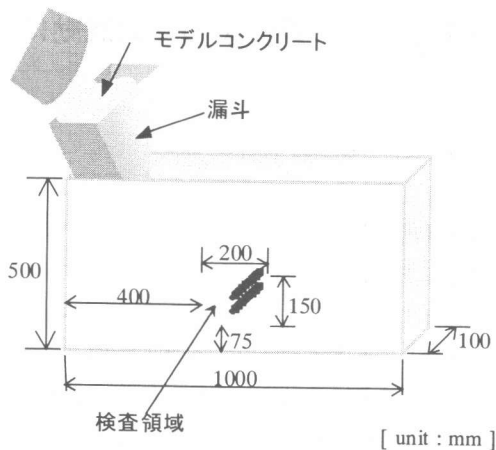


図-1 実験方法

モデル粗骨材として人工軽量骨材（最大寸法 10mm，表乾比重 1.66，粗粒率 6.3，実積率 65.6%）を用いた。モデルモルタルとして高吸水性高分子樹脂（デンブンとアクリル酸ソーダの高分子共重合体，以下，高分子と称す）を水に添加した無色透明の粘性流体（比重 1.0）を用いた。また，モデルモルタルの粘性を変化させるために増粘剤（セルロース系）を使用した。モデルモルタルの配合は高分子を 2.5g/l 添加，増粘剤を無添加の場合と 2.0g/l 添加の場合の 2 種類とした。モデルモルタルの粘性は，増粘剤無添加の場合，ミニスランプフローが約 28cm，K 漏斗流下時間が約 1.6s となるように，増粘剤 2.0g/l 添加の場合，ミニスランプフローが約 29cm，K 漏斗流下時間が約 2.0s となるように，それぞれ試料について管理した。モデルコンクリートのモデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比（以下， V_g/V_m と称す）は 0.4，0.5，0.6 の 3 種類とした。また，モデルコンクリートにはコンクリートの流動を追跡するトレーサ粒子として発泡スチロール粒子（平均粒径 2.5mm，比重 0.02）を適量混入した。

2.2 実験方法

図-1 に示すアクリル板の壁状型枠に，型枠の端部からモデルコンクリートを図に示すような漏斗で投入した。投入量と投入時間は，実施工の打込み速度を想定して $48\text{m}^3/\text{h}$ の 1/2 モデ

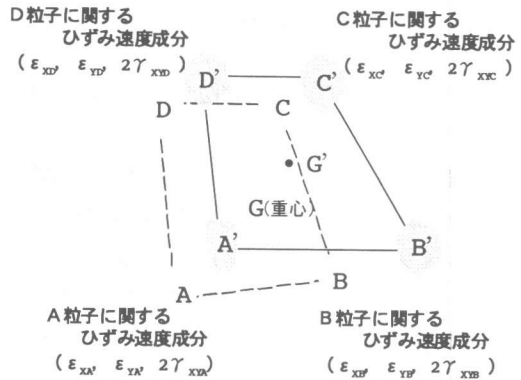


図-2 骨材粒子群とひずみ速度成分

ルとし，投入量 40l，投入時間 24s とした。（ $40\text{l}/24\text{s}=6\text{m}^3/\text{h}$ ，長さスケールで 1/2 より $6\text{m}^3/\text{h} \times 2^3=48\text{m}^3/\text{h}$ ）。型枠側面部よりビデオカメラで側面を撮影し，撮影箇所は定常的に流動している部分を選択して，これを検査領域とした。撮影時間はトレーサ粒子が静止するまでとした。

検査領域は，図-1 に示す位置に設置する。検査領域の横にビデオカメラを設置し，モデルコンクリートの流動性状を，トレーサ粒子が静止するまで撮影した。本研究では，投入位置付近においては若干不安定な流動状態ではあるが，検査領域内ではほぼ定常的に流動する状態を再現していると考えた。

また，この検査領域の中央に D16 鉄筋を図のように 2 本配置した。鉄筋間隔は，粗骨材の最大寸法が 10mm であることから，土木学会規準に従い最小鉄筋間隔を $L=4/3\text{cm}$ とし， $2L=8/3\text{cm}$ ， $3L=4\text{cm}$ および比較として単鉄筋の場合の計 4 段階に変化させた。

2.3 流跡線

本研究では，まず，モデルコンクリート中の骨材の動きを流跡線に表して，その流動を検討した。検査領域内では，流動方向を X 軸として，それに対して垂直に Y 軸を設定する。ある時刻において，検査領域内に明確に観察される骨材粒子を，1 秒毎にその座標位置を取得し，経過時間における骨材の動きを表した。

2. 4 ひずみ速度

次に、モデルコンクリートの流動について細かく検討するため、それぞれの場合についてひずみ速度を求めた。流跡線の場合と同様に、検査領域内においてX軸、Y軸を設定する。図-2に示すように検査領域内にその座標位置が明確に観察される4つの骨材粒子群の時刻 t における座標位置(A, B, C, D)を取得する。その粒子群を追跡し、0.03秒毎あるいは粒子群が少なくとも粒子の直径以上の距離を移動した時点で、時刻 $t + \Delta t$ における粒子群の座標位置(A', B', C', D')を取得する。なお、検査領域に対し、奥行きの影響が関与すると考えられるが、本実験ではコンクリートの広がりやを2次元平面としてとらえ、奥行き方向の挙動は無視した。

ひずみ速度の算出には、ひずみロゼット法を用いる。粒子群で囲まれる四角形領域のひずみ速度は、四角形の各頂点ごとにひずみロゼット法を適用し、ひずみ成分を求めた。その算定式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_I &= \dot{\varepsilon}_X \cos^2 \theta_I + \dot{\varepsilon}_Y \sin^2 \theta_I + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_I \cdot \cos \theta_I \\ \dot{\varepsilon}_{II} &= \dot{\varepsilon}_X \cos^2 \theta_{II} + \dot{\varepsilon}_Y \sin^2 \theta_{II} + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_{II} \cdot \cos \theta_{II} \\ \dot{\varepsilon}_{III} &= \dot{\varepsilon}_X \cos^2 \theta_{III} + \dot{\varepsilon}_Y \sin^2 \theta_{III} + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_{III} \cdot \cos \theta_{III} \\ (\theta \text{ は各直線がX軸となす角度とする})\end{aligned}$$

..... (1)

例えば、粒子Aに着目すると、まずここを原点として直線AB、AC、ADをひずみ速度の3方向の軸として考え、これらの軸に関して縦ひずみ速度($\dot{\varepsilon}_{IA}$, $\dot{\varepsilon}_{IIA}$, $\dot{\varepsilon}_{IIIA}$)を求める。縦ひずみ速度は、各時刻における2点の粒子間距離(AB, AC, AD)の時間的变化を意味する。そして、式(1)を用いてひずみ速度成分($\dot{\varepsilon}_X$, $\dot{\varepsilon}_Y$, $2\dot{\gamma}_{XY}$)を求める。粒子の頂点A, B, C, Dから得られる各ひずみ速度成分の平均値を、骨材群領域全体の平均的な変形特性を定量化する物理量と見なし、各ひずみ速度の平均値($\dot{\varepsilon}_{X\text{ave}}$, $\dot{\varepsilon}_{Y\text{ave}}$, $2\dot{\gamma}_{XY\text{ave}}$)を、四角形の重心位

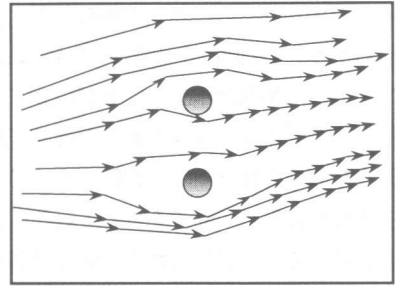


図-3 骨材の流跡線
($V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加の場合)

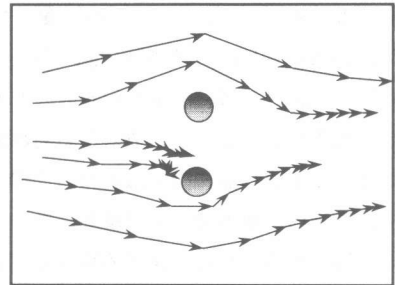


図-4 骨材の流跡線
($V_g/V_m=0.6$ ・増粘剤無添加の場合)

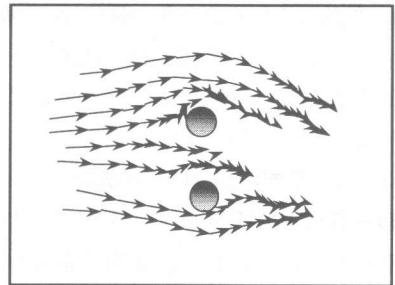


図-5 骨材の流跡線
(水平平面流動・ $V_g/V_m=0.4$
・増粘剤 2.0g/l の場合)

置Gでのひずみ速度成分を表すものとした。この3つのひずみ速度成分から、最大せん断ひずみ速度 $2\dot{\gamma}_{\max}$ と最大・最小主ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_1$ ・ $\dot{\varepsilon}_2$ を求める。

3. 実験結果および考察

3. 1 流跡線

いずれの配合においても、モデルコンクリート中の骨材は、鉄筋間を流動するかまたはその

直前で停止し、それ以外は鉄筋の上下へ膨らんで流動する。 $V_g/V_m=0.4$ および $V_g/V_m=0.6$ について、増粘剤無添加・鉄筋間隔 2 L の場合におけるモデルコンクリート中の骨材の流跡線をとったものを図-3 および図-4 に示す。矢印は 1 秒間の骨材の動きを表している。 V_g/V_m が大きくなると、骨材は鉄筋の間で閉塞しやすくなり、骨材の手前に停滞している骨材が増える。すると、後から流動してきた骨材は、鉄筋のまわりを大きく膨らんで流動する。

図-5 は水平平面流動の場合で、図-3 と同様に、 $V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤 2.0g/l・鉄筋間隔 2 L の場合における骨材の流跡線を表したものである。水平平面流動の場合では左右対称の流跡になるが、鉛直平面流動では重力の影響があるので、上下の流跡は対照的にはならない。鉄筋の下を通過する骨材は、比較的鉄筋に近い所まで流跡に変化はなく、鉄筋のまわりを小さく膨らんで流動する。一方、鉄筋の上を通過する骨材は、鉄筋に遠いところから流跡線に変化が見られ、鉄筋のまわりを大きく膨らんで流動する。このように上下で異なる骨材の流動より、鉛直平面流動では、水平面流動より変形の大きい流動ではないかと考えられる。

3. 2 ひずみ速度の発生状況

図-6 に投入開始からの経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度 $2\dot{\gamma}_{\max}$ の発生状況の一例を示す。いずれの試料においても、経過時間 15 秒付近でピークに達する。その後、最大せん断ひずみ速度は次第に減少して、零に漸近する。ピーク付近ではいくつか大きい値が見られるが、ほとんどは 2.0/s 以下のひずみ速度であった。

モデルコンクリートの投入開始からの経過時間に伴う最大および最小主ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$) の発生状況の一例を図-7 に示す。分布状況は最大せん断ひずみ速度と同様に、投入開始 15 秒付近でピークに達し、投入終了後は零に漸近する。最大主ひずみ速度はほとんどが正の値、最小主ひずみ速度はほとんどが負の値となり、ひずみ速度が零の時間軸に対して、最大主ひず

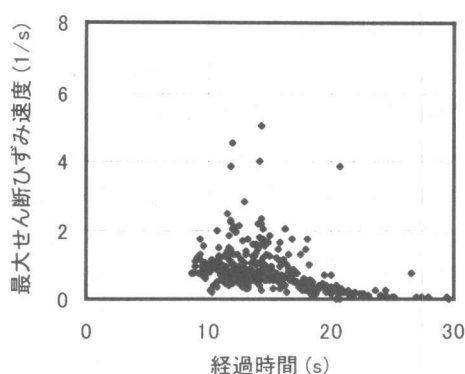


図-6 最大せん断ひずみ速度発生状況
($V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加・鉄筋間隔 L の場合)

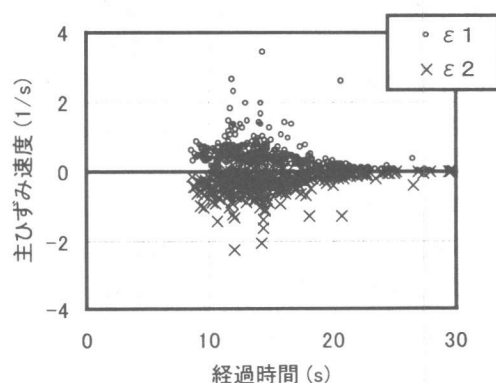


図-7 主ひずみ速度発生状況
($V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加・鉄筋間隔 L の場合)

み速度の方が最小主ひずみ速度に比べ若干絶対値の大きい分布であった。

得られたひずみ速度の発生状況から、経過時間を投入開始から 10 秒、10 秒から 15 秒、15 秒から 20 秒、20 秒以降の間隔毎に平均値を求め、経過時間に伴うひずみ速度の変化を検討する。鉄筋間隔が L の場合における最大せん断ひずみ速度および主ひずみ速度の平均値の時間変化をそれぞれ図-8 および図-9 に示す。

最大せん断ひずみ速度は、 $V_g/V_m=0.4$ で増粘剤を添加した場合は他の配合のものに比べ小さく、ピーク値付近の平均が 0.7/s となる。それ以外の V_g/V_m では、増粘剤の添加の有無による影響はあまりみられず、ピーク値付近の平均が 0.9~1.1/s となった(図-8)。最大・最小主ひずみ速度も最大せん断ひずみ速度同様、

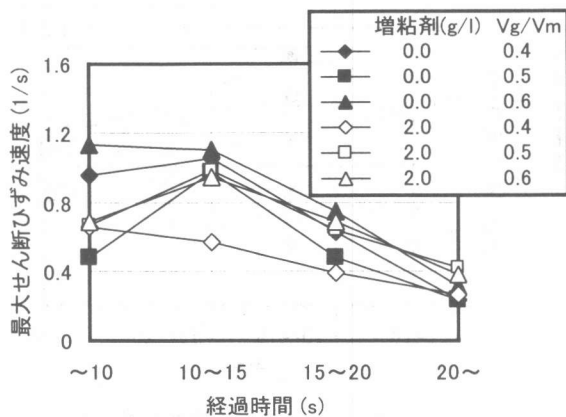


図-8 最大せん断ひずみ速度の平均値
(鉄筋間隔Lの場合)

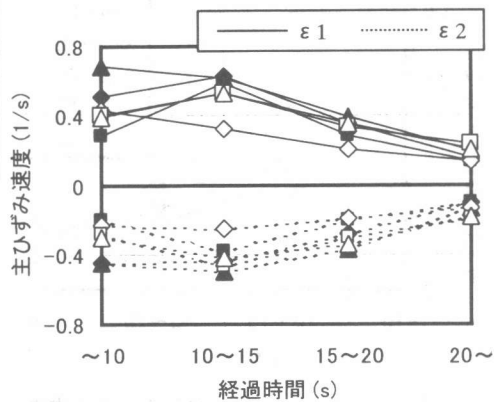


図-9 主ひずみ速度の平均値
(鉄筋間隔Lの場合)

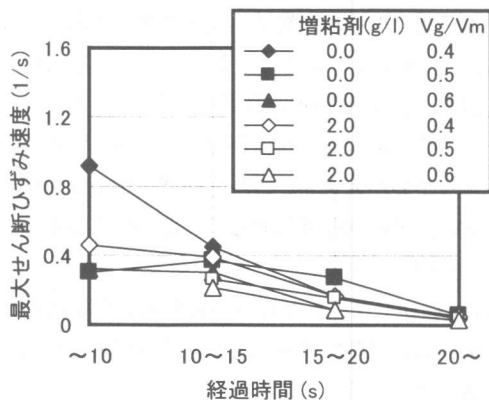


図-10 最大せん断ひずみ速度の平均値
(水平平面流動・鉄筋間隔Lの場合)

$V_g/V_m=0.4$ で増粘剤を添加した場合は他の配合のものに比べ小さく、それ以外の V_g/V_m では増粘剤の添加の有無による影響はあまりみられなかった。 $V_g/V_m=0.4$ で増粘剤を添加した場合の、最大主ひずみ速度のピーク値付近の平均は $0.4/s$ 、最小主ひずみ速度のピーク値付近の平均は $-0.2/s$ となり、それ以外の V_g/V_m ではピーク値付近の平均が、最大主ひずみ速度は $0.5 \sim 0.7/s$ 、最小主ひずみ速度は $-0.4 \sim -0.5/s$ となった(図-9)。 V_g/V_m が小さい配合では、増粘剤を添加した粘性の高いモルタルの方が発生するひずみ速度が小さくなると考えられる。また、最大主ひずみ速度が最小主ひずみ速度よ

りも絶対値が大きいことが分かる。これは、モデルコンクリートに引張ひずみの方が圧縮ひずみより大きく発生していることを示している。重力の影響により、鉛直方向流動ではコンクリートには圧縮力より引張力の方がかかると考えられる。

図-10 は、水平平面流動の場合で図-8 と同様に、鉄筋間隔がLの場合におけるモデルコンクリートにおける最大せん断ひずみ速度の平均値の時間変化を示したものである。 $V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加の場合は若干大きいひずみ速度が発生するが、他の配合で比較すると、今回の実験で行った鉛直平面流動で発生するひずみ速度は水平平面流動の2～3倍程度の大きさを持つことが分かる。

$V_g/V_m=0.4$ 、増粘剤無添加の配合のモデルコンクリートにおける最大せん断ひずみ速度、および主ひずみ速度の平均値の時間変化をそれぞれ図-11 および図-12 に示す。図-11 より、最も間隔の狭い鉄筋間隔Lの場合は、他の鉄筋間隔の場合に比べ最大せん断ひずみ速度は大きい値を示している。他の鉄筋間隔の場合でも、鉄筋なしの場合より大きい値を示している。従って、鉄筋が配置されることにより、発生するひずみ速度が大きくなったといえる。鉄筋間隔2L、3Lでは、単鉄筋の場合と同程度の大き

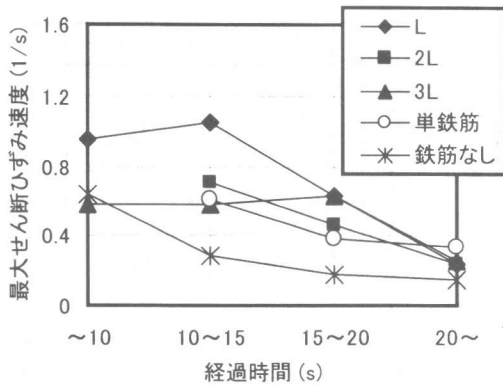


図-11 最大せん断ひずみ速度の平均値
($V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加の場合)

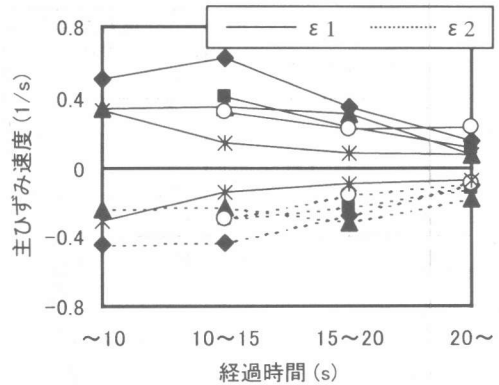


図-12 主ひずみ速度の平均値
($V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤無添加の場合)

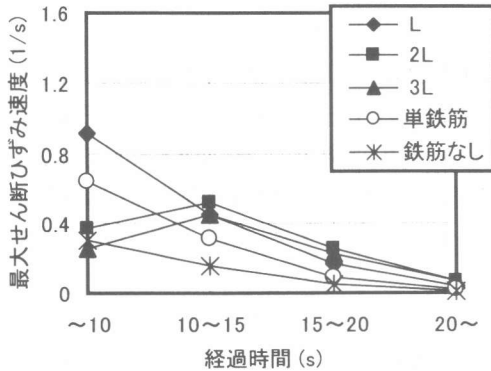


図-13 最大せん断ひずみ速度の平均値
(水平平面流動・ $V_g/V_m=0.4$
・増粘剤無添加の場合)

さのひずみ速度である。これは、ある間隔以上になると、両方の鉄筋による影響を受ける領域が少なくなるので、鉄筋が1本の場合と同様になり、単鉄筋とほぼ同じレベルのひずみ速度になると考えられる。本研究から考察すると、Lと2Lの間にその境があると思われる。図-12より、主ひずみ速度からも、最大せん断ひずみ速度と同様の事がいえる。

図-13は、水平平面流動の場合で、図-11と同様の $V_g/V_m=0.4$ ・増粘剤なしの場合における、モデルコンクリートにおける最大せん断ひずみ速度の平均値の時間変化を示したものである。鉄筋間隔の大きさによるひずみ速度への影響は、鉛直平面の方が大きいことがいえる。

4. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) フレッシュコンクリートの鉛直方向平面の流動は、水平方向平面の流動に比べ、およそ2～3倍のひずみ速度が発生し、鉄筋間隔による影響が大きい。また、 V_g/V_m が小さい場合は、増粘剤を添加すると、発生するひずみ速度は減少する。
- (2) フレッシュコンクリートの鉛直方向平面の流動は、引張ひずみの方が圧縮ひずみより大きく発生する。

参考文献

- 1) 浦野真次・橋本親典・辻幸和・杉山隆文：可視化実験手法による高流動コンクリートの流動性評価に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 585/V-38, pp. 163-174, 1998. 2
- 2) 小山広光・橋本親典・辻幸和・杉山隆文：型枠内を流動するフレッシュコンクリートのせん断ひずみ速度分布，コンクリート工学年次論文報告，vol. 20, No. 2, pp. 295-300, 1998
- 3) 小山広光・橋本親典・辻幸和・杉山隆文：高流動コンクリートの鉄筋通過性に関する可視化，第52回土木学会年次学術講演会講演概要集，V-417, pp. 834-835, 1997. 9