

# 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

浦野真次<sup>1</sup>・橋本親典<sup>2</sup>・辻 幸和<sup>3</sup>・杉山隆文<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>2</sup>正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D. 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

任意の配筋型枠内での高流動コンクリートの変形性状や鉄筋通過性状を定量的に評価することを目的として、可視化実験手法を用いて流動状況を観察し、流動挙動をせん断ひずみ速度の経過時間に伴う分布状況の違いにより定量化を行った。その結果、スラブ状の型枠内での二次元平面内および鉛直鉄筋の周りを水平に流動する高流動コンクリートでは、鉄筋間隔やモルタルと粗骨材の容積比等に関らず、平均で1.0/s以下のレベルのせん断ひずみ速度が発生し、V漏斗試験やU型充填試験装置内では平均で10/s以下のレベルのせん断ひずみ速度が発生していることを明らかにした。

**Key Words:** *highly flowable concrete, visualization technique, strain rate, ability to pass between bars, consistency test*

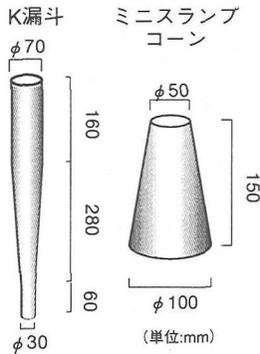
## 1. はじめに

締め固め作業を必要としない高流動コンクリートは、任意の配筋型枠内において、型枠内を落下した後、自重で生じる圧力勾配により流動し、鉄筋等の障害物を避けながら三次元的に方向を変化させて、型枠内に充填される。このときの充填性は、高流動コンクリートの流動性だけでなく、鉄筋間や狭隘断面などの間隙通過性に大きな影響を受ける。間隙通過に伴う流動速度の低下および間隙部分での閉塞現象のメカニズムを解明することは、配合だけでなく躯体形状や配筋条件など、施工条件が異なった場合の高流動コンクリートの自己充填性を定量的に評価するために非常に重要である。しかし、配筋型枠内での高流動コンクリートの挙動に関して、間隙通過性状などのメカニズムを力学的挙動として捉え、定量的に把握した研究は少なく<sup>1), 2), 3)</sup>、「施工設計」の概念に基づく流動解析<sup>4)</sup>に対する有効な情報が十分に得られているとは言い難い。

本研究は、流動状態を直接観察・記録できる可視化実験手法<sup>5)</sup>を適用することにより、任意の配筋型枠内での高流動コンクリートの変形性状や鉄筋通過

性状を“ひずみ速度”<sup>6)</sup>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、まず、配筋に対して水平方向の流動が比較的卓越するスラブ状の型枠内での二次元平面内の高流動コンクリートの変形性状について検討した。次に、鉛直に配筋された鉄筋通過時の流動について実験を行い、鉛直鉄筋の周りを水平に流動する高流動コンクリートの変形性状について検討した。それぞれの実験に対して、可視化モデルコンクリート中に存在する着目トレーサ粒子群あるいは粗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、各種要因がひずみ速度に及ぼす影響について考察を行った。

また、現在、高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法として、V漏斗試験やU型充填試験など、多くの試験方法が提案されている<sup>7)</sup>。しかし、これらの試験装置内での流動性状については明確に理解されておらず、自己充填性との関連も力学的挙動という観点においては明確ではない。そこで、V漏斗試験装置およびU型充填試験装置内を流動する高流動コンクリートのひずみ速度についても



図一 K漏斗・ミニスランプコーンの形状寸法

各種要因が及ぼす影響について検討を行い、各水平方向の流動との相違について考察を行った。

## 2. モデル高流動コンクリートの選定

### (1) モデル高流動コンクリートの使用材料

高流動コンクリートの可視化モデルとして、モルタル相と粗骨材粒子群からなる固液2相系混相流体を用いた。モデル粗骨材は、人工軽量粗骨材であり、最大粗骨材寸法が10mm（比重1.66，F.M.6.30，実積率65.6%）および20mm（比重1.66，F.M.6.57，実積率63.9%）の2種類を使用した。モデルモルタルは、高吸水性高分子樹脂（以下、高分子と称す）および増粘剤（メチルセルロース系）を水に添加して得られる無色透明な粘性流体（比重1.0）を用いた。本モデルモルタルは、著者らが提案してきたこれまでのモデルモルタルとは増粘剤を添加している点において異なる。これは、従来は高分子の添加量の調整によってのみモルタルの流動性を決定してきたが、高流動コンクリートのモデルの作製には、主として粘性の調整が重要であると考えたためである。

### (2) モデルモルタルの性状

増粘剤の添加の有無によるモデルモルタルの性状の相違を明らかにするため、図一に示すように実モルタルにおいて適用されているK漏斗およびミニスランプフロー<sup>8)</sup>によりモデルモルタルの性状の測定を試みた。高分子の添加量を2.5，2.8，3.0，3.5g/lの4種類に、また増粘剤の添加量を0.0および2.0g/lの2種類に変化させた場合の各試験結果を、表一に示す。

増粘剤が無添加の場合、高分子の添加量が増加するに伴い、ミニスランプフローは小さくなり、K漏斗流下時間は増加した。一方、高分子の添加量が一定の場合、増粘剤の添加量が増加した場合、ミニスランプフローは若干大きくなるかもしくは同程度で

表一 モデルモルタルの性状

高分子添加量 (g/l)	増粘剤添加量 (g/l)	K漏斗流下時間 (sec)	ミニスランプフロー (cm)
2.5	0	1.5	26.0
	2.0	1.8	29.0
2.8	0	2.7	24.0
	2.0	3.9	25.0
3.0	0	3.2	21.8
	2.0	6.9	23.0
3.5	0	12.9	19.5
	2.0	39.6	20.0

あるが、K漏斗流下時間は増加している。本モルタルモデルをピンガム流体と仮定した場合、ミニスランプフローは主として降伏値に関連し、K漏斗流下時間は主として塑性粘度に関連するものと考えられることから、高分子の添加量の調節のみでは、降伏値および塑性粘度が同時に変化してしまう。しかし、増粘剤を添加することにより、降伏値をほぼ一定として塑性粘度を変化させることが可能となったと考えられる。なお、増粘剤を添加することにより、ミニスランプフローの値が若干増加するのは、増粘剤水溶液に高分子を添加したため、高分子の吸水性がわずかに低下したためと考えられる。

### (3) モデル高流動コンクリートの配合選定

モデル高流動コンクリートの配合は、モデル粗骨材とモデルモルタルの容積比（以下、 $V_g/V_m$ と称す）およびモデルモルタルの性状の組合せによって決定した。 $V_g/V_m$ は、実施工において適用された高流動コンクリートの配合例を基に、0.4，0.5，0.6（粗骨材体積濃度では28.6%，33.1%および37.5%）の3種類とした。モデルモルタルおよび最大粗骨材寸法は、モデルの縮尺等の実験条件を考慮して決定した。増粘剤を添加したことによる本モデルコンクリートのモルタル相と粗骨材粒子群との静的な材料分離抵抗性は、目視観察の結果、増粘剤を添加していない場合<sup>5)</sup>と同程度以上有していることが確認された。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。

## 3. 実験概要

### (1) 試験方法

任意の配筋型枠内での高流動コンクリートの変形性状および鉄筋通過時の粗骨材の挙動を定量的に評価するため、実験を2シリーズに分けて行った。実験シリーズ1では、スラブ型枠内のように水平方

向の流動が卓越する場合について、配置した鉄筋に対して水平な二次元平面内のモデルコンクリートの挙動を可視化し、鉄筋の有無や鉄筋間隔による影響の検討を行った。実験シリーズ2では、鉛直鉄筋の周りを水平に流動する高流動コンクリートについて、鉄筋間隔などが鉄筋通過時の閉塞現象を含めたモデル粗骨材の流動挙動に及ぼす影響について検討を行った。

#### a) スラブ状型枠内の水平方向流動実験

実験シリーズ1は、コンクリートの物性、鉄筋の有無および鉄筋間隔を実験要因とし、コンクリート全体の変形性状を検討するため、モデルコンクリート中のトレーサ粒子群の相対距離の変化から得るひずみ速度について検討した。

高流動コンクリートのモデルは、高分子の添加量を2.5g/lと一定とし、増粘剤添加量を0.0および2.0g/lの2種類、 $V_g/V_m$ は0.4, 0.5, 0.6の3種類として製造した。モデル粗骨材は最大寸法10mmのものをを用いた。スラブ状モデル型枠は、図-2に示すように、透明なアクリル板により作製し、型枠下部より底面を透視できるものとした。鉄筋は、型枠内にD6の鉄筋を底面から30mmの位置に鉄筋間隔50mmおよび100mmで格子状に配置した。

型枠の一角から、モデルコンクリートをバケツにより投入した。モデルコンクリートの投入量と投入時間は、実施工における打込み速度を想定し、 $48\text{m}^3/\text{h}$ の1/2モデルとし、投入量25l、投入時間15秒とした。本研究では現場における投入状態を模擬するため、投入した箇所においては若干不安定な流動状況であっても、検査領域において投入方向から対角方向へほぼ定常的にフローする状態を再現することを目標とした。型枠下部より底面を撮影し、撮影箇所は、投入箇所の対角方向の型枠側面の影響の少ない $150 \times 200\text{mm}$ 部分を選択し、これを検査領域とした。撮影時間は、トレーサ粒子が停止する程度までとし、試験は、同一条件の撮影を2回行った。また、比較のためモデルモルタルのみの場合についても実験を行った。

#### b) 鉛直鉄筋周りの水平方向の流動実験

実験シリーズ2は、シリーズ1と同様に、コンクリートの物性および鉄筋間隔を実験要因とし、骨材と鉄筋の関係を明確にするため、粗骨材群の運動を追跡し、その相対距離の変化から得るひずみ速度について検討した。

高流動コンクリートのモデルはシリーズ1と同一の配合である。本実験装置は、図-3に示すように、シリーズ1と同一のスラブ状型枠であり、D16鉄筋を所定の位置に2本設置したものである。鉄筋間隔

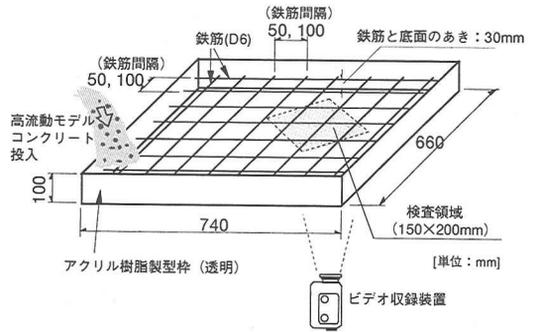


図-2 水平方向実験用スラブ状モデル型枠

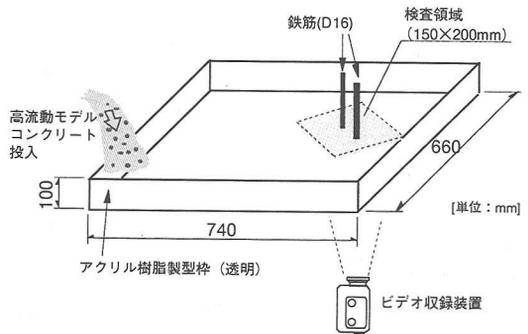


図-3 鉛直鉄筋周り流動実験用モデル型枠

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 $L=4/3 \times 10\text{mm}$ とし、 $2L=8/3 \times 10\text{mm}$ ,  $3L=4 \times 10\text{mm}$ および比較として単鉄筋の計4段階に変化させた。モデルコンクリートの投入方法や撮影方法は、シリーズ1と同様である。ただし、検査領域に関しては、図-4に示すように、鉄筋通過前の領域と鉄筋通過後の領域に分割した。

#### (2) 画像処理方法

画像処理方法は、シリーズ1、シリーズ2共に同一である。可視化領域内にX軸、Y軸を設定し、図-5に示すように領域内にその座標位置が明確に観察される4つのトレーサあるいは粗骨材粒子群（以下、単にトレーサ粒子群という）の時刻 $t$ における座標位置(A, B, C, D)を取得する。そのトレーサ粒子群を追跡し、トレーサ粒子群が少なくとも粒子直径以上の距離を流動した時点で、時刻 $t+\Delta t$ における座標位置(A', B', C', D')を取得する。基本的にトレーサ粒子は計測領域内全体から無作為かつ平均的に選択し、計測領域外に流動するまで、あるいはそれが確認できなくなるまで追跡する。なお、取得データの個数は、検査領域の広さおよび手投入による若干のばらつきを考慮し、1ケースにつき50個以上とした。

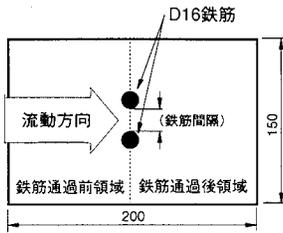


図-4 鉛直鉄筋周りの検査領域

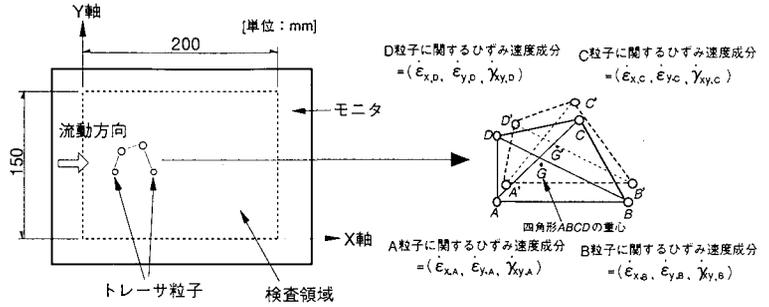


図-5 トレーサ粒子群と各ひずみ速度成分

### (3) ひずみ速度の定義

実際のフレッシュコンクリートの流れは三次元の流れであるが、本研究では二次元平面問題として扱う。図-5に示した4つのトレーサ粒子群(A, B, C, D)で囲まれる四角形領域が、経過時間とともに変形していく状態を、「ひずみ速度」という物理量で表現することとした。したがって、従来の材料力学で用いられているある位置における微小な変形量とした「ひずみ」とは異なる。

ひずみ速度は、ひずみロゼット法を用いて算出する。トレーサ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、ひずみ速度成分を求める。例えば、トレーサAに着目すると、ここを原点として直線AB, AC, ADをひずみロゼット法の三方向の軸と考え、三方向の軸に関して縦ひずみ速度 $(\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3)$ を求める。縦ひずみ速度は、各経過時刻における2点のトレーサ粒子間距離(AB, AC, AD)の時間的変化を意味し、縦ひずみ速度を求める際の流動経過時間間隔は、相前後する四角形の相対位置を大きく変化しない程度の微小時間間隔とする。よって各頂点における三方向の軸に関する角度の変化はないものとし、3直線の長さが変化すると考える。次にこの縦ひずみ速度成分を全体座標系に関するひずみ速度成分 $(\dot{\epsilon}_{x,A}, \dot{\epsilon}_{y,A}, \dot{\gamma}_{xy,A})$ に変換する。その算定式を以下に示す。(θは各直線がX軸となす角度とする。)

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \dot{\epsilon}_x \cos^2 \theta_1 + \dot{\epsilon}_y \sin^2 \theta_1 + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \\ \dot{\epsilon}_2 &= \dot{\epsilon}_x \cos^2 \theta_2 + \dot{\epsilon}_y \sin^2 \theta_2 + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2 \\ \dot{\epsilon}_3 &= \dot{\epsilon}_x \cos^2 \theta_3 + \dot{\epsilon}_y \sin^2 \theta_3 + \dot{\gamma}_{xy} \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (1)$$

他のトレーサ粒子B, C, Dについても同様に各トレーサ粒子を原点として三方向の軸に関する縦ひずみ速度ならびに全体座標系に関するひずみ速度成分を算出する。トレーサの頂点A, B, C, Dから得られる各ひずみ速度成分の平均値 $(\dot{\epsilon}_{x,ave}, \dot{\epsilon}_{y,ave}, \dot{\gamma}_{xy,ave})$ を、

四角形領域全体の平均的な変形性状を定量化する物理量とみなす。したがって、各ひずみ速度成分の平均値は、四角形の重心位置でのひずみ速度成分を表わすものとした。重心位置での3つのひずみ速度成分から、最大せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{max}$ 、最大主ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ および最小主ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_2$ を算定する<sup>6)</sup>。

## 4. 実験結果および考察

### (1) スラブ状型枠内の水平方向の流動実験

実験における目視観察によると、型枠内に投入された試料が充填される際の流動速度は、鉄筋がないものから鉄筋間隔を100mm, 50mmと小さくするに従って低下し、配筋によって生ずる流動速度の低下現象はモデルコンクリートの場合でも実コンクリートと同様であった。また、モデルモルタルよりもモデルコンクリートの方が流動速度の低下が著しかった。モデルコンクリートにおいて、試料の流動停止後は、モルタル相あるいは粗骨材粒子群の過大な分離は観察されなかった。

図-6および図-7に、モデルモルタルおよび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せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{max}$ の発生状況の一例を示す。計測領域への試料の到達時間の相違からピークに達する時間は若干異なるものの、いずれの試料においても、経過時間10秒間以内でピークに達する。経過時間10秒以内程度の流動は、流動する試料の先端位置付近が検査領域を通過する時間であった。ピーク後、最大せん断ひずみ速度は急激に減少し、試料投入終了である15秒以降は、非常に小さいレベルの最大せん断ひずみ速度となり、零に漸近する。モデルモルタルのみの比較的流動しやすい試料でも、図-6に示すように鉄筋間隔が比較的密になった場合には鉄筋に対し水平方向の流動も影響を受け、最大せん断ひずみ速度のピーク値は小さくなる傾向となった。また、モデルコンクリートでは、増粘剤を添加

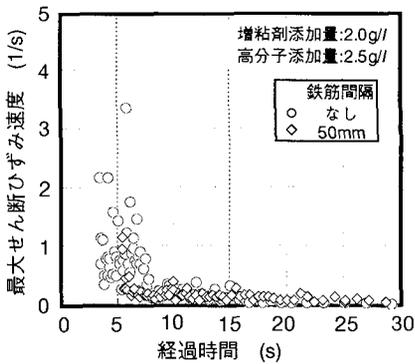


図-6 最大せん断ひずみ速度発生状況 (モデルモルタル)

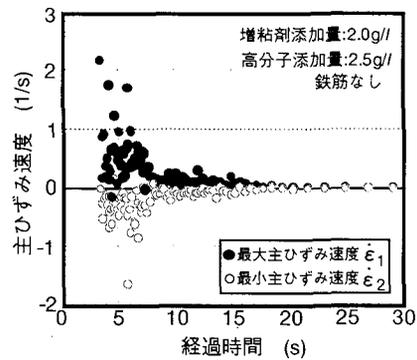


図-8 主ひずみ速度発生状況 (モデルモルタル)

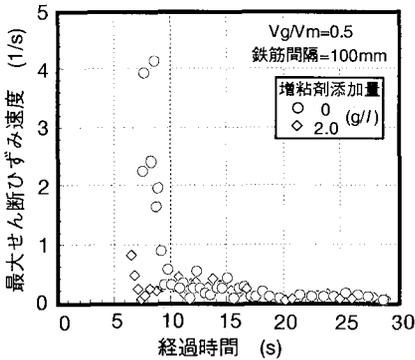


図-7 最大せん断ひずみ速度発生状況 (モデルコンクリート)

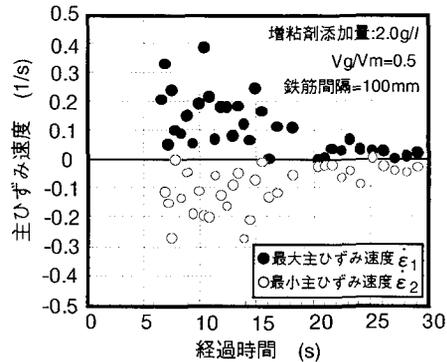


図-9 主ひずみ速度発生状況 (モデルコンクリート)

することにより、最大せん断ひずみ速度のピーク値は、図-7に示すように大きく低下した。

モデルモルタルおよび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-8および図-9に示す。いずれの試料においても、最大主ひずみ速度はほとんどが正の値となり、最小主ひずみ速度はほとんどが負の値となった。これは、モデルコンクリート中のトレーサ粒子群で囲まれる四角形領域に引張ひずみと圧縮ひずみが発生しているものと考えられる。また、最大および最小主ひずみ速度は、最大せん断ひずみ速度と同様な経過時間でピークに達し、同時刻における分布状況は同様である。試料投入終了である15秒以降は、最大せん断ひずみ速度と同様に主ひずみ速度も非常に小さくなり、零に漸近する。

得られた最大せん断ひずみ速度の発生状況から、経過時間を0～5秒、5～10秒、10～15秒、15～20秒、20～30秒の間隔毎に平均値を求め、各種要因が経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度の変化に及ぼす影響を検討する。

図-10には、増粘剤添加量を2.0g/l、 $Vg/Vm$ を0.5とし、鉄筋間隔を変化させた場合のモデルコンクリートの最大せん断ひずみ速度の平均値の時間的変化を示した。鉄筋が挿入され、密になるに従って、自重による応力伝達を減少させ、投入開始後からのコンクリートの順調な水平方向の広がりを妨げ、流動の先端の検査領域への到達が遅くなるため、鉄筋間隔50mmにおいて初期の最大せん断ひずみ速度を得られていない。しかし、計測領域に到達したモデルコンクリートの最大せん断ひずみ速度はいずれの配筋条件でも大きく変化しない。これは、配筋条件が異なった場合、コンクリートの流動速度は変化するが、変形速度には影響を及ぼさないためと推測される。

$Vg/Vm$ を0.5、鉄筋間隔を50および100mmとし、増粘剤の添加量を変化させたモデルコンクリートの最大せん断ひずみ速度の平均値の時間的変化を、図-11に示す。ピーク値を示す時刻の最大せん断ひずみ速度の平均値は、増粘剤を添加することにより減少し、変形速度が低下することが確認された。しかし、その後の経過時間内では本実験の増粘剤の添

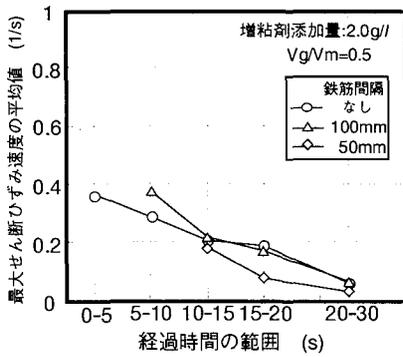


図-10 最大せん断ひずみ速度の平均値 (鉄筋の影響)

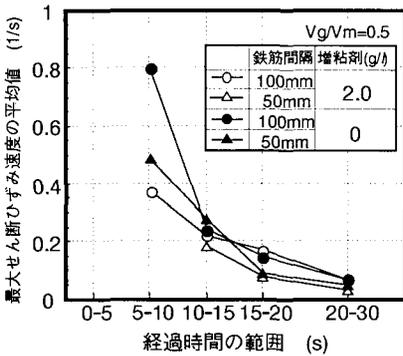


図-11 最大せん断ひずみ速度の平均値 (増粘剤の影響)

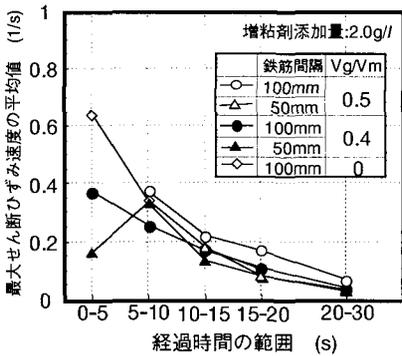


図-12 最大せん断ひずみ速度の平均値 ( $Vg/Vm$ の影響)

加量の範囲ではその影響はほとんど認められない。

図-12は、増粘剤添加量を2.0g/l、鉄筋間隔を50および100mmとし、 $Vg/Vm$ を変化させたモデルコンクリートの最大せん断ひずみ速度の平均値の時間的変化を示したものである。 $Vg/Vm$ を大きくした場合、増粘剤の添加の場合と同様に、ピーク値を示す時刻の最大せん断ひずみ速度の平均値は減少し、その後の経過時間内では、 $Vg/Vm$ の影響はほとんど認

められない。したがって、配筋条件が同一の場合、増粘剤の添加や $Vg/Vm$ によって変化するコンクリートあるいはモルタルの変形特性が、型枠内の水平方向の流動状況に大きく影響するのは、自重の影響が大きい部分か流動の先端部分であると考えられる。

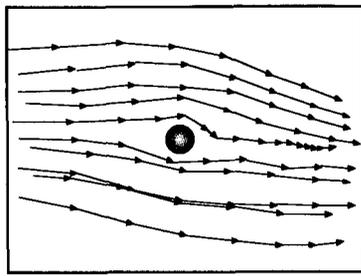
以上のことから、高流動コンクリートのような自重によって流動するコンクリートでは、常に大きな自重を受ける箇所や流動の先端部分を除き、定常的に流れる水平方向の流動に関して、配筋条件やコンクリートの物性により流動速度は大きく変化するが、発生するせん断ひずみ速度すなわち変形速度は同程度であると考えられる。このとき、発生するせん断ひずみ速度の平均は、ピーク値付近で1.0/s以下、定常的な流動部分で、0.4/s以下であった。

## (2)鉛直鉄筋周りの水平方向の流動実験

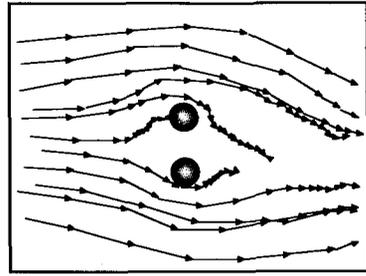
本実験では、鉄筋間隔などの条件によっては鉄筋近傍においてモルタル相と粗骨材粒子との材料分離が起こるため、トレーサ粒子によるコンクリート全体の変形特性ではなく、モデル粗骨材粒子群の運動を追跡し、その相対距離の変化から得るひずみ速度について検討することとした。

図-3に示した検査領域を通過するモデルコンクリート中の骨材粒子について、 $Vg/Vm$ が0.4、増粘剤無添加の場合の0.1秒間隔で追跡した流跡線を図-13に示す。単鉄筋の場合は、骨材が鉄筋を回避し、一旦は鉄筋の両側に流動が膨らむものの、任意骨材の流速の急激な減少は認められない。一方、鉄筋間隔がLの場合、2本の鉄筋間を通過しようとした骨材は急速に減速し停止していることがわかる。また、2本の鉄筋の両側のごく近傍を通過する骨材も鉄筋の後部に回り込むような流動となり、急速に減速している。鉄筋からの距離が遠くなるにしたがって流速の減少は小さくなる。鉄筋間隔が2Lになると、2本の鉄筋間を通過する骨材が出現する。しかし、通過した骨材および2本の鉄筋の両側のごく近傍を通過する骨材は鉄筋間隔Lと同様、流速の減少が大きい。鉄筋間隔3Lの場合も単鉄筋の場合と比較して鉄筋通過後の流速の減少が認められる。これは、鉄筋によって自重の影響が減少するとともに、鉄筋近傍の骨材が鉄筋の後ろに回り込むとする際、せん断力を受けるとともに骨材自身も回転を起こして流速が減少するためと考えられる。

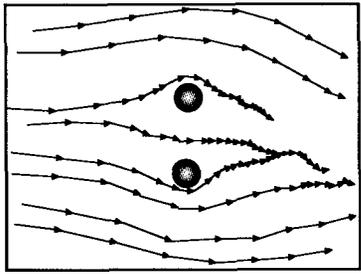
モデルコンクリートの投入開始からの経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{max}$ の発生状況は、実験シリーズ1と同様に経過時間10秒程度でピークに達し、ピーク後、最大せん断ひずみ速度は減少し、試料投入終了である15秒以降は、非常に小さいレベル



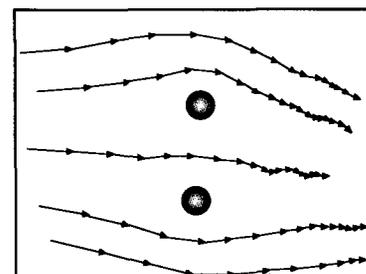
(単鉄筋)



(鉄筋間隔=L)



(鉄筋間隔=2L)



(鉄筋間隔=3L)

図-13 各鉄筋間隔における粗骨材粒子の流跡線 ( $V_g/V_m=0.4$ , 増粘剤なし)

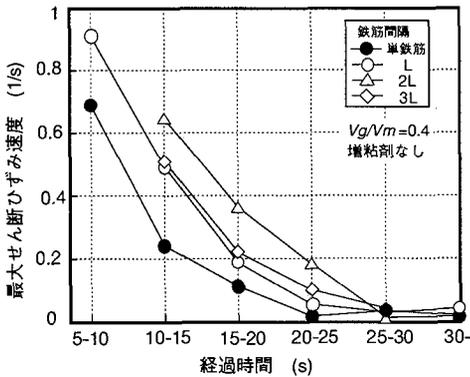


図-14 各鉄筋間隔における最大せん断ひずみ速度 ( $V_g/V_m=0.4$ , 増粘剤なし)

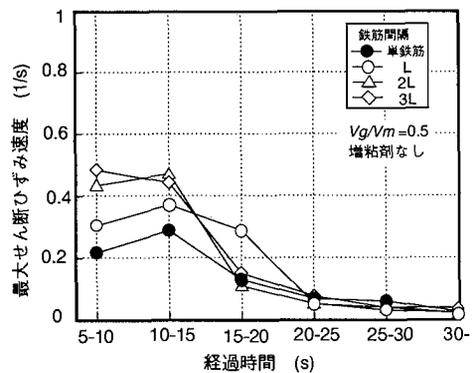


図-15 各鉄筋間隔における最大せん断ひずみ速度 ( $V_g/V_m=0.5$ , 増粘剤なし)

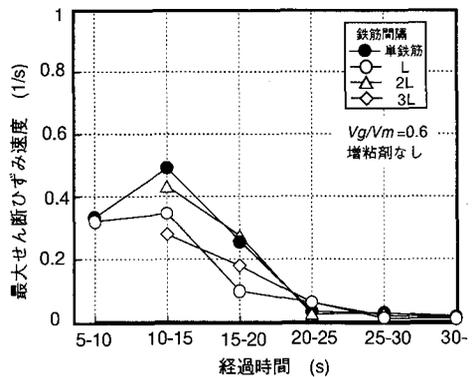


図-16 各鉄筋間隔における最大せん断ひずみ速度 ( $V_g/V_m=0.6$ , 増粘剤なし)

の最大せん断ひずみ速度となり、零に漸近した。得られた最大せん断ひずみ速度の発生状況から、経過時間を5～10秒、10～15秒、15～20秒、20～25秒、25～30秒、30秒～の間隔毎に、鉄筋通過前領域における経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度の平均値を求め、図-14～図-16に示す。各図は、 $V_g/V_m$ がそれぞれ0.4、0.5、0.6の場合であり、すべて増粘剤なしの条件である。 $V_g/V_m$ に関らず、最大せん断ひずみ速度の平均値はすべて1.0/s以下であり、投入開始から経過時間5秒から15秒程度の間でピークを示し、20秒程度以降は零に漸近した。図-14に示す $V_g/V_m=0.4$ の場合、同一経過時間における

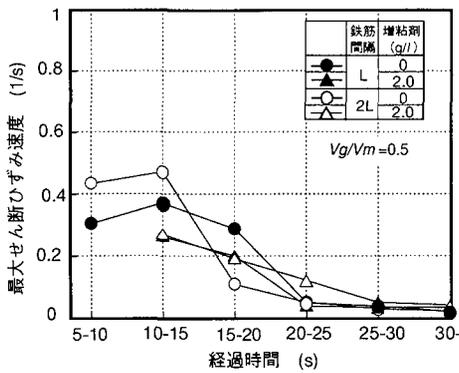


図-17 最大せん断ひずみ速度に及ぼす増粘剤の影響 ( $Vg/Vm=0.5$ )

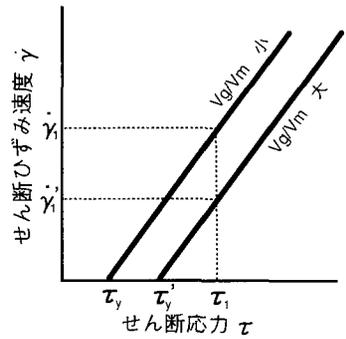


図-18 粗骨材容積比の相違によるコンシステンシー曲線の変化

最も小さな最大せん断ひずみ速度は単鉄筋であり、鉄筋間隔2Lが最も大きく、鉄筋間隔L, 3Lは同程度となった。一方、図-15および図-16に示す  $Vg/Vm=0.5$  および  $0.6$  の場合、鉄筋間隔による差が比較的小さくなり、最も大きな最大せん断ひずみ速度となる鉄筋間隔の条件はそれぞれ異なる結果となった。各図における同一の配筋条件の場合を比較すると、単鉄筋の場合を除き  $Vg/Vm$  が大きいほどピーク値付近の最大せん断ひずみ速度が小さくなる傾向を示した。図-17は、 $Vg/Vm=0.5$ 、鉄筋間隔がLおよび2Lの場合において、増粘剤の添加の有無による最大せん断ひずみ速度の経時変化を示したものである。投入開始から15秒程度までは、増粘剤を添加していない配合の方が大きなせん断ひずみ速度を示した。また、増粘剤を添加した場合、鉄筋間隔が変化しても発生するせん断ひずみ速度のレベルは同程度となった。この他、図は割愛したが、鉄筋通過後領域では、鉄筋通過前と比較して、鉄筋間隔や  $Vg/Vm$ 、増粘剤の有無の影響による差はほとんど認められず、ピークも  $0.4/s$  以下のレベルであった。これらの実験結果は、以下のように説明できる。

最大せん断ひずみ速度が最も大きくなるのは、コンクリートが大きくせん断変形を受け、かつ流速が大きい場合である。これに対し、粗骨材のアーチングや粗骨材とモルタル相の材料分離が頻繁に起こる状況においては、粗骨材の運動が拘束され、限られた領域内では大きなせん断ひずみ速度が発生しにくい状況にあるといえる。したがって、本実験のように自重のみで流動する場合、鉄筋間隔が小さくなるに従って、粗骨材のアーチングや粗骨材とモルタル相の材料分離が発生しやすく、せん断ひずみ速度が小さくなったと考えられる。逆に、単鉄筋の場合や鉄筋間隔が十分に大きな場合は、せん断変形が局所的となり、鉄筋通過前領域における平均的なせん断

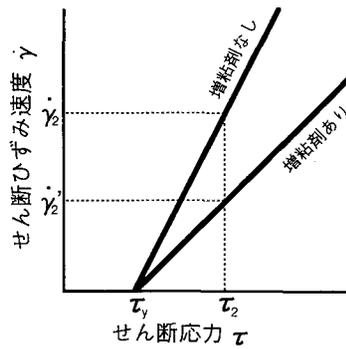


図-19 増粘剤の添加の有無によるコンシステンシー曲線の変化

ひずみ速度が大きくなるものと考えられる。以上の理由から、鉄筋間隔2Lの場合に大きなせん断ひずみ速度が発生したものと考えられる。

また、コンクリートの配合に関しては、モデルコンクリートをビンガム流体と考え、コンシステンシー曲線上の任意の点におけるせん断応力一ひずみ速度状態を取り扱うことによって説明できる。図-18は、増粘剤添加率を一定として、 $Vg/Vm$  を変化させた場合の概念的なコンシステンシー曲線を示す。モルタルの品質が一定の場合、 $Vg/Vm$  を変化させると降伏値が変化する ( $\tau_y$  および  $\tau'_y$ ) と考えられる。一定の鉄筋間隔の条件では、コンクリートの自重による同程度のせん断応力  $\tau_1$  が作用するため、降伏値が小さい  $Vg/Vm$  小の方が大きなせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_1$  を発生することになる。また、 $Vg/Vm$  を一定として増粘剤を添加した場合、モルタルに関するK漏斗およびミニスランプフローの試験結果から、降伏値をほとんど変化させずに塑性粘度のみが変化し、図-19に示すようなコンシステンシー曲線となるものと考えられる。先程と同様に、一定の鉄筋間隔の

条件でコンクリートの自重による同程度のせん断応力  $\tau_c$  が作用するため、塑性粘度が小さい増粘剤なしの方が大きなせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_c$  が発生すると考えられる。以上の考察は、流動中一定のせん断応力が作用すると仮定した場合に成り立つものである。しかし、実際には流動速度が変化し、必ずしも一定とはならない場合もある。流動速度と発生するせん断応力との関係については、今後の検討課題である。

### 5. V漏斗およびU型充填試験装置の流動挙動に関する検討

本章は、前章までに得られた結果と高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法として提案されているV漏斗試験やU型充填試験内での鉛直方向の流動挙動を比較し、自己充填性との関連を検討するものである。

モデル高流動コンクリートの基本配合は、実際のコンクリートのコンシステンシー試験結果より、V漏斗流下時間10秒、U型充填時間20秒を目標に、高分子の添加量をV漏斗試験のとき3.5g/l、U型充填試験2.8g/lとして調節し、 $V_g/V_m$ は0.4、0.5、0.6の3種類として製造した。モデル粗骨材は最大寸法20mmのものを用いた。透明なアクリル板により作製したV漏斗試験およびU型充填試験装置のモデルの形状・寸法を図-20に示す。V漏斗試験は、漏斗上端までコンクリートを満たし、吐出口の底蓋を開き、モデルコンクリートが全量流出するまでの時間を測定し、同時に図に示す可視化領域を撮影した。U型充填試験は、A室にコンクリートを上端まで流し込み、仕切りゲートを開き、流動障害を通過しながらB室への充填が停止するまでの時間と充填高さを測定し、同時に図に示す可視化領域を撮影した。U型充填試験装置の障害条件は、比較的用いられることの多いD13鉄筋を3本用いるS1とした。U型充填試験では、最大せん断ひずみ速度の分布を可視化領域内でA室（鉄筋通過前）とB室（鉄筋通過後）に分割して取得した。

$V_g/V_m$ を変化させた場合のV漏斗試験およびU型充填試験の試験結果を表-2に示す。 $V_g/V_m$ が大きくなるに従って、V漏斗流下時間およびU型充填時間は増加し、U型充填高さは若干小さくなった。この傾向は、実際のコンクリートの試験結果と概ね同様である。図-21および図-22に、それぞれV漏斗試験における最大せん断ひずみ速度および主ひずみ速度の0.5秒間隔ごとの平均値の経時変化を示す。 $V_g/V_m$ が大きくなるに従い、発生する最大せん断ひ

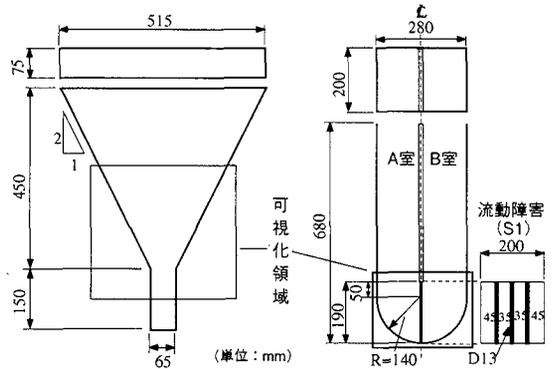


図-20 V漏斗試験・U型充填試験の形状寸法

表-2 各コンシステンシー試験結果

測定項目		$V_g/V_m$		
		0.4	0.5	0.6
V漏斗試験	流下時間(s)	4.1	6.1	12.0
	充填時間(s)	5.7	53.1	72.2
U型充填試験	充填高さ(mm)	342	336	298

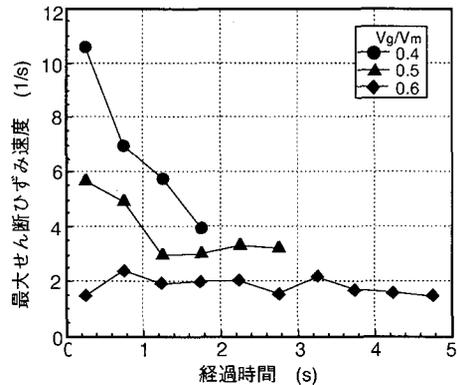


図-21 V漏斗試験の最大せん断ひずみ速度

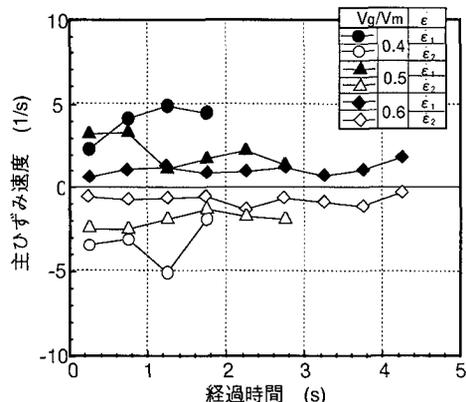


図-22 V漏斗試験の主ひずみ速度

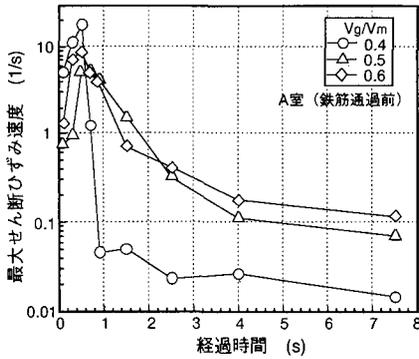


図-23 U型充填試験の  
最大せん断ひずみ速度 (A室)

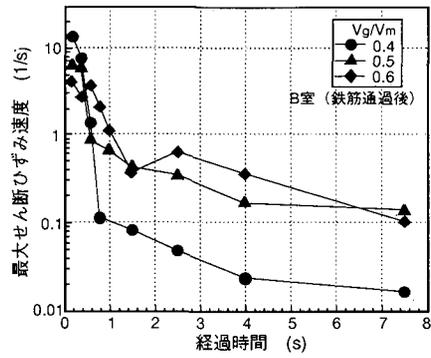


図-24 U型充填試験の  
最大せん断ひずみ速度 (B室)

ずみ速度の平均値は減少し、経過時間に伴う分布状況が異なる状況となった。図-22に示す最大主ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ および最小主ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_2$ の平均値は $V_g/V_m$ が大きくなるに従い、その絶対値は減少した。ここで、 $V_g/V_m$ に関らず最大主ひずみ速度は正、最小主ひずみ速度は負となることから、V漏斗試験装置内を流動する任意領域のモデルコンクリートに圧縮ひずみと引張ひずみが発生していることを意味している。これは、スラブ型枠内を流動するコンクリートと同じ傾向であり、V漏斗試験装置内を流動するコンクリートとスラブ型枠を流動するコンクリートの変形状が等しいことを示している。

各ひずみ速度の相違は、コンクリートの変形速度が異なることを示しており、結果としてV漏斗流下時間が変化していると考えられる。したがって、V漏斗試験では、 $V_g/V_m$ の違いによってコンクリートの変形性が異なった場合に、発生する最大せん断ひずみ速度の大きさが変化する試験であるといえる。

U型充填試験における、A室(鉄筋通過前)およびB室(鉄筋通過後)において発生した最大せん断ひずみ速度の0.5秒間隔ごとの平均値の経時変化を対数軸で表し、それぞれ図-23および図-24に示す。U型充填試験では、 $V_g/V_m$ に関らず経過時間に伴い急激に減少し零に収束する傾向となり、A室(鉄筋通過前)およびB室(鉄筋通過後)においても大きな変化は認められない。 $V_g/V_m$ により充填時間が異なるため同時刻での最大せん断ひずみ速度のレベルの大きさは異なるが、V漏斗試験と比較しても非常に小さい最大せん断ひずみ速度での変化である。すなわち、変形性が異なるコンクリートであるにも関わらず、U型充填試験では鉛直方向に関する2次元挙動において発生する最大せん断ひずみ速度の大きさはほとんど変化しないといえる。なお、鉄筋通過に関する実験シリーズ2において観察され、テーパー管内においてもその発生が指摘されている粗骨材の

アーチング<sup>10)</sup>や粗骨材とモルタル相の材料分離現象は、今回のV漏斗試験およびU型充填試験での実験条件では認められなかった。

## 6. コンシステンシー試験と水平方向の流動中に発生するせん断ひずみ速度の関係

V漏斗試験およびU型充填試験で得られた最大せん断ひずみ速度のレベルは、実験シリーズ1およびシリーズ2において得られたせん断ひずみ速度のレベルと比較して最大で10倍程度と非常に大きく、ピーク値付近の平均は10/s程度以下である。これは、コンシステンシー試験では、流動の断面が大きく変化し、せん断変形が水平方向の鉄筋近傍のように局所的でなく全体的に一樣であること、流動方向が鉛直方向であることなどによるものと考えられる。また、上記の考察は、図-25に示すフレッシュコンクリートのコンシステンシー曲線上のせん断応力 $\tau$ -ひずみ速度の関係を用いて説明することができる。V漏斗試験やU型充填試験において発生するせん断ひずみ速度のレベルを $\dot{\gamma}_1$ とすると、これに対応するせん断応力は $\tau_1$ となる。一方、配筋に対して水平方向の流動が比較的卓越するスラブ状型枠内を流動する高流動コンクリートに発生するせん断ひずみ速度のレベルは $\dot{\gamma}_0$ となり、これに対応するせん断応力は $\tau_0$ となる。したがって実際に型枠内での流動は、 $(0,0) \rightarrow (\tau_1, \dot{\gamma}_1) \rightarrow (\tau_0, \dot{\gamma}_0)$ までの領域であるのに対し、コンシステンシー評価試験内のコンクリートは、 $(0,0) \rightarrow (\tau_1, \dot{\gamma}_1) \rightarrow (\tau_0, \dot{\gamma}_0) \rightarrow (\tau_1, \dot{\gamma}_1)$ までの領域であり、先の $(\tau_0, \dot{\gamma}_0)$ 以上の変形領域である。すなわち、コンシステンシー試験では、スラブ状型枠内を水平に流動するコンクリートよりも10倍( $\dot{\gamma}_1/\dot{\gamma}_0 \approx \tau_1/\tau_0$ )程度以下のせん断応力を発生させて変形状を評価する試験方法であると言える。

V漏斗試験およびU型充填試験において発生した

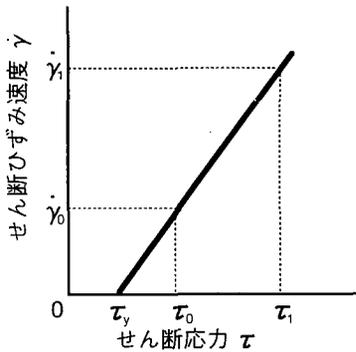


図-25 流動中のフレッシュコンクリートのせん断応力—せん断ひずみ速度の関係

10/s程度のせん断ひずみ速度のレベルは、壁状部材のように鉛直方向の流動が卓越し、コンクリートに自重のみが作用する場合においても同程度あるいはそれ以下であることが推測される。このため、V漏斗試験およびU型充填試験は、実際の型枠内での流動より強制的に大きなせん断ひずみ速度を与えて厳しい条件（安全側）で変形状を評価しており、コンシステンシー評価試験方法として適していると考えられる。今後は、壁状部材について、同様の評価を行い、本考察の妥当性を検討する予定である。

## 7. 結論

本研究は、可視化実験手法を用い、任意の配筋型枠内での高流動コンクリートの変形状および鉄筋通過性状などの流動挙動を、ひずみ速度の経過時間に伴う分布状況により定量的に評価した。本研究の結果、得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 配筋したスラブ状型枠の水平方向の流動は、投入開始直後あるいは流動する試料の先端位置付近で最大せん断ひずみ速度がピークに達し、ピーク後急激に減少し、零に漸近する。
- (2) 高流動コンクリートのように自重によって流動するコンクリートでは、常に大きな自重を受ける箇所や流動の先端部分を除き、定常的に流れる水平方向の流動に関して、配筋条件やコンクリートの物性により流動速度は大きく変化するが、発生するせん断ひずみ速度すなわち変形速度は同程度であり、このとき発生するせん断ひずみ速度の平均は、ピーク値付近で1.0/s以下、定常的な流動部分で、0.4/s以下のレベルである。
- (3) 鉛直鉄筋周りの水平方向の流動において発生する最大せん断ひずみ速度は、配筋したスラブ状型枠の水平方向の流動と同様に投入開始直後あるいは

流動する試料の先端位置付近でピークに達し、ピーク後減少し零に漸近する。

(4) 鉛直鉄筋周りの流動における最大せん断ひずみ速度は、平均で1.0/s以下のレベルであり、ピークの大きさは、鉄筋間隔、 $V_g/V_m$ および増粘剤の添加の影響を受ける。また、最大せん断ひずみ速度のピークが最も大きくなる鉄筋間隔の条件が存在する。同一の鉄筋間隔の条件の下では、 $V_g/V_m$ が小さく、増粘剤を添加していないもののほうが最大せん断ひずみ速度が大きくなる。

(5) V漏斗試験では、 $V_g/V_m$ の違いによってコンクリートの変形性が異なった場合に、発生する最大せん断ひずみ速度の大きさが変化するのに対し、U型充填試験では鉛直方向に関する2次元挙動において発生する最大せん断ひずみ速度の大きさはほとんど変化しない。

(6) V漏斗試験およびU型充填試験装置内では、スラブ状型枠内や鉛直鉄筋周りの水平方向と比較して非常に大きな最大せん断ひずみ速度が発生し、平均で10/s以下程度である。

今後は、壁状部材のように鉛直方向の流動が卓越する場合についても同様の検討を行い、また、流動解析によって得られるせん断ひずみ速度と本実験で得られたせん断ひずみ速度のレベルの相違点についても検討する予定である。

謝辞：本研究の実施に際しては、群馬大学工学部に在学中であった加古慎氏、高見貴之氏、小山広光氏および相澤健夫氏に実験にご協力を頂きました。また、論文の執筆に際し、徳島大学工学部水口裕之教授には貴重なご意見を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤原浩巳，長瀧重義，大即信明，堂園昭人：高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究，土木学会論文告集，No.550/V-33，pp.23-32，1996.11.
- 2) 森博嗣，黒川善幸，寺西浩司，荒井正直：フレッシュコンクリートの鉄筋通過挙動に関する可視化モデル実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.569-574，1995.
- 3) 野口貴文，友澤史紀，呉相均：高流動コンクリートの間隙通過性に関するレオロジー的考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.23-28，1995.
- 4) 森博嗣，谷川恭雄：フレッシュコンクリートの流動解析技術の現状，コンクリート工学，Vol.32，No.12，pp.30-40，1994.12.
- 5) 橋本親典，丸山久一，清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化実験手法，コ

- ンクリート工学, Vol.17, No.2, pp.119-127, 1988.
- 6) 橋本親典, 本間宏記, 丸山久一, 清水敬二: 変形管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能の評価方法, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.91-100, 1991.8.
  - 7) 土木学会: 1. 高流動コンクリートの性能評価方法および各種高流動コンクリートの評価結果, 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ Vol.15, pp.1-39, 1996.12.
  - 8) 河井徹, 橋田浩: 高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.125-130, 1994.
  - 9) 伊藤孔一, 小澤一雅: 実構造物を模擬したモデル装置による締固め不要コンクリートの充填性評価, 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.23-30, 1993.5.
  - 10) Ozawa, K., Nanayakkara, A. and Maekawa, K.: Evaluation of Aggregate Particle Motion in Liquid-Solid Flows of Model Concrete, *Proc. of JSCE*, No.408/V-11, pp.187-193, 1989.8.
- (1997.6.4 受付)

## EVALUATION OF FLOW OF HIGHLY FLOWABLE CONCRETE BY VISUALIZATION TECHNIQUE

Shinji URANO, Chikanori HASHIMOTO, Yukikazu TSUJI and Takafumi SUGIYAMA

Laboratory experiment were conducted to investigate horizontal flow behavior of highly flowable concrete in two types of slab forms, setting lattice steel bars and vertical steel bars by visualization technique. We also investigated vertical flow behavior in both the V-funnel test apparatus and U-filling ability test apparatus.

It was found that the average maximum shear strain rates of concrete in slabs were under 1.0/s, and the average maximum shear strain rates of concrete in the consistency test apparatuses were under 10/s.