C213 フレッシュコンクリートの流動性評価に関する可視化

徳島大 橋本親典 清水建設(株) 浦野真次[○] 群馬大 辻 幸和

Visualization of Fresh Concrete Flowing in Consistency Test

Chikanori HASHIMOTO*, Shinji URANO** and Yukikazu TSUJI***

The highly flowable concrete, is one of the high performance concrete, is able to place into the form without vibration. We investigated experimentally vertical flow behavior of the concrete in both the V funnel test apparatus and U-filling ability test apparatus by visualization technique. We also investigated horizontal flow behavior of highly flowable concrete in two types of slab forms, setting lattice steel bars and vertical steel bars. Based on the results, the average maximum shear strain rates of concrete in the consistency test apparatuses were under 10.0/s, and the average maximum shear strain rates of concrete in slabs were under 1.0/s.

1. はじめに

近年、建設構造物に最も多く用いられている建設材料の1つであるコンクリートの製造技術において、締固め作業を必要としない"高流動コンクリート"が注目されている。建設作業者の不足・高齢化や、公共事業費のトータルコストの縮小化等の解決策となる技術であり、21世紀の高性能コンクリートの1つとして大きな期待がかけられている。

この高流動コンクリートの製造・施工に関わる技術の問題点の1つとして、従来のコンクリートの流動性評価に用いられてきたスランプ試験では、高流動コンクリートの流動性を十分に評価できないことが挙げられる。配合だけでなく、躯体形状や配筋条件などの施工条件が異なった場合の流動性の評価には流動中のコンクリートの挙動が非常に重要であることから、現在では、スランプフロー試験、V漏斗試験およびU型充填試験など、新しい評価試験方法が提案されている¹⁾。しかしながら、これらの新しい試験装置内を流動するコンクリートの力学的挙動は明確に理解されておらず、また、実際の現場で型枠内を流動する高流動コンクリートの挙動との関連性も明らかにされていない。

本研究は、コンクリートの流動状態を直接観察・記録できる可視化実験手法²⁾を適用することにより、V漏斗試験およびU型充填試験装置内と、任意の配筋型枠内を流れる高流動コンクリートの可視化を行い、流動挙動をひずみ速度という特性で定量的に評価し、これらの流動性評価試験の物理的意義を明確にするための知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 モデル高流動コンクリート

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20mmおよび10mm(比重は共に1.66)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(水溶性メチルセルロース)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。コンクリートの流動を追跡するトレーサ粒子は、発泡スチロール粒子(平均粒径2.5mm, 比重0.02)を用い、モデルフレッシュコンクリートに適量混入した。

モデル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流動性によって決定した。 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の3種類とした。モデルモルタルの流動性は、高分子の添加量を2.5~3.5g/lと変化させ、増粘剤添加量を0および2.0g/lの2種類とすることにより調整した。

2.2 実験方法

V漏斗試験およびU型充填試験装置内と、任意の配筋型枠内を流れる高流動コンクリートの挙動を比較するため、実

* The University of Tokushima, 2-1, Minami-jyosanjima, Tokushima, 770

** Shimizu Co., 4-17, Etchujima 3-Chome, Koto-ku, Tokyo, 135

*** Gunma University, 1-5-1, Tenjincho, Kiryu, Gunma, 375

Fig.1 V funnel test and U-filling ability test apparatus

験を2シリーズに分けて行った。実験シリーズ1では、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検討した。本実験で用いた実験装置は、Fig.1に示すように、透明なアクリル板により実際に使用されているものの1/1の縮尺で作製したものである。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、同時に検査領域を撮影した。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、D13鉄筋を3本用いる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、検査領域を撮影した。

実験シリーズ2では、鉄筋を配置したスラブ状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、水平な二次元平面内のモデルコンクリートの挙動を検討するため、Fig.2に示すようにスラブ状モデル型枠内に格子状の鉄筋を底面と水平に配置したものと、Fig.3に示すように鉛直に配置したものについて実験を行った。鉄筋間隔は、格子状の場合50mmおよび100mmとし、鉛直の場合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。型枠は、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。型枠の一角から投入する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。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150×200mm部分を選択し、これを検査領域とした。

2.3 画像処理方法

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い、検査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）を取得した。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'）を取得した。この移動前と移動後の四角形領域の経過時間とともに変形していく状態について、四角形領域全体の平均的な変形性状を定量化するため、ひずみロゼット法を用いて算出したひずみ速度により評価を行った。算定したひずみ速度成分は、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 $\dot{\epsilon}_2$ である。

4. 実験結果および考察

4.1 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

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Table 1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。Fig.4およびFig.5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

Fig.2 Schematic representation of slab form setting lattice steel bars

Fig.3 Schematic representation of slab form setting vertical steel bars

Table 1 Results of V funnel test and U-filling ability test

Items		V_g/V_m		
		0.4	0.5	0.6
V funnel test	Flow time (s)	4.1	6.1	12.0
U-filling ability test	Filling time (s)	5.7	53.1	72.2
	Filling height (mm)	342	336	298

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 により発生する最大せん断ひずみ速度の平均値が変化し、経過時間に伴う分布状況が異なる状況となり、最大で10.0/s程度の最大せん断ひずみ速度が発生した。Fig.5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 $\dot{\epsilon}_2$ の平均値も、 V_g/V_m により変化した。各ひずみ速度の V_g/V_m による相違は、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特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）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、Fig.6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、やはり最大で10.0/s程度の最大せん断ひずみ速度が発生した。 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、変形特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。

4.2 スラブ状型枠内の水平方向の流動実験

Fig.7～Fig.10に、鉄筋の配置方法および配合を変化させた場合の各スラブ状型枠内における最大せん断ひずみ速度について、経過時間を0～5秒、5～10秒、10～15秒、15～20秒、20～30秒の間隔毎の平均値を示す。Fig.7は、鉄筋を格子状に配置したケースについて、増粘剤添加量を2.0g/l、 V_g/V_m 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ものである。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る。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せず、発生する最大せん断ひずみ速度は0.4/s程度以下である。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。Fig.8は、鉄筋を格子状に配置したケースについて、増粘剤添加量を2.0g/l、鉄筋間隔を50および100mmとし、 V_g/V_m 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。 V_g/V_m を変化させた場合、流動初期の値のみが変化する。これは、配筋条件が同一の場合、 V_g/V_m によって変化するコンクリートの変形特性が、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が流動の先端部分であるためと考えられる。

Fig.4 Average maximum shear strain rates of V funnel test

Fig.5 Average principal strain rates of V funnel test

Fig.6 Average maximum shear strain rates of U-filling ability test

鉄筋を鉛直に配置したケースである Fig.9 および Fig.10 では、 V_g/V_m および配筋条件によって最大せん断ひずみ速度の分布状況が若干異なるものの、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。

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、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は概ね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。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、スラブ状型枠内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 $10.0/s$ 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。V 漏斗試験および U 型充填試験において発生した $10.0/s$ 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、せん断ひずみ速度に関して実際の流動より厳しい条件（危険側）での評価となり、流動性評価試験方法として適していると考えられる。

5. 結論

本研究では、V 漏斗試験および U 型充填試験装置内と、任意の配筋型枠内を流れる高流動コンクリートの流動状況に関して可視化を行い、ひずみ速度による定量的評価を試みた。その結果、V 漏斗試験および U 型充填試験装置内では、平均で $10.0/s$ 程度以下の非常に大きなせん断ひずみ速度が発生し、一方、任意の配筋型枠内では、水平方向の流動に関して平均で $1.0/s$ 以下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。

参考文献

- 1) 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, (1996), pp.1-39.
- 2) 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, (1988), pp.119-127.

Fig.7 Average maximum shear strain rates of slab form setting lattice steel bars (Effect of space of bars)

Fig.8 Average maximum shear strain rates of slab form setting lattice steel bars (Effect of V_g/V_m)

Fig.9 Average maximum shear strain rates of slab form setting vertical steel bars ($V_g/V_m=0.4$)

Fig.10 Average maximum shear strain rates of slab form setting vertical steel bars ($V_g/V_m=0.5$)