

論文 充てん試験装置の形状が高流動コンクリートの自己充てん性能に与える影響

西川隆之*1・橋本親典*2・吉岡靖司*3・浦野真次*4

要旨：土木学会の高流動コンクリートの設計施工指針では、高流動コンクリートの自己充てん性能は、充てん試験装置を用いた間隙通過試験方法によって評価することができるが、充てん試験装置の形状が、U型とボックス型の2種類が併記されており、形状の違いが自己充てん性能に与える影響については明記されていない。本研究では、充てん試験装置底部に形成されるせん断面が充てん性能に及ぼす影響について、種々の配合の高流動コンクリートを用いて実験的検討を行い、可視化実験によって流動性状の違いをせん断ひずみ速度により定量化した。さらに、粘塑性空間要素法を用いた動的2次元解析結果と比較した。
キーワード：高流動コンクリート、間隙通過試験方法、可視化実験、せん断ひずみ速度

1. はじめに

高流動コンクリートの性能は、構造物の形状、寸法、配筋などの構造条件や施工時の運搬方法、打込み方法、仕上げや養生の方法などの施工条件を考慮して、構造物または部材に要求される性能や工事に期待される要件を満足するように適切に設定する必要がある。そのために、配合設計された高流動コンクリートが設定された性能を満足していることを適切な方法により照査しなければならない¹⁾。

土木学会の高流動コンクリートの設計施工指針では、高流動コンクリートの自己充てん性能は、充てん試験装置を用いた間隙通過試験方法によって評価できるとされている。しかしながら、本試験方法では、充てん試験装置の形状が、U型とボックス型の2種類が併記されており、形状の違いが自己充てん性能に与える影響については明記されていない。

著者らは、可視化実験によって充てん試験装置底部に形成されるせん断面(図-1)の有無を確認し、このせん断面が充てん性能に及ぼす影響に

ついて、可視化モデルを用いて検討してきた²⁾。本研究では、2種類の形状の違いが装置内の流動性状に与える影響について、種々の配合の高流動コンクリートを用いて実験的検討を行い、可視化実験によって流動性状の違いをせん断ひずみ速度により定量化する。また、粘塑性空間要素法を用いた動的2次元解析により、両者の流動性状の違いを明らかにする。

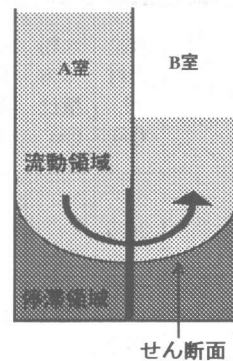


図-1 せん断面の発生²⁾

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

*3 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*4 清水建設(株) 技術研究所建設技術部 工修(正会員)

2. コンクリート試料による実験

2.1 使用材料および配合

使用材料は普通ポルトランドセメント，早強ポルトランドセメント，粗骨材（比重 2.64），細骨材（比重 2.63），2 種類のフライアッシュ，高性能 AE 減水剤，空気量調整剤及び硬化促進剤を使用した。

表-1，表-2 に使用材料の詳細，表-3 に示方配合を示す。なお，示方配合番号 1～10 は，目標 V 漏斗流下時間が 8 秒以下の低粘性粉体系であり，11～16 までは目標 V 漏斗流下時間が 20 秒以上の高粘性粉体系である。

表-1 示方配合番号 1～10(低粘性粉体系)

までの使用材料の詳細	
材料	仕様
セメント	早強ポルトランドセメント (比重 3.14)
細骨材	比重 2.63, 粗粒率 3.04
粗骨材	比重 2.64, 最大寸法 20mm
混和材	フライアッシュ (比重 2.20, 比表面積 3500cm ² /g)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
その他の混和剤	硝酸カルシウム (比重 1.43)

表-2 示方配合番号 11～16(高粘性粉体系)

までの使用材料の詳細	
材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.15)
細骨材	比重 2.63, 粗粒率 3.04
粗骨材	比重 2.64, 最大寸法 20mm
混和材	フライアッシュ (比重 2.26, 比表面積 4410cm ² /g)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 ¹⁾
	ナフタリン系高性能 AE 減水剤 ²⁾
	アミノ酸系高性能 AE 減水剤 ³⁾

2.2 試験用器具

今回の実験で用いた，U型とボックス型充てん試験装置は，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ものである。形状寸法を図-2 に示す A 室と B 室の 2 室の容器から構成される。充てん試験装置の中央部には，図-2 に示す異形棒鋼を柵状に配置した流動障害を有する。流動障害は R1 と R2 の 2 種類が用意されているが，本実験では，一般に用いられることの多い R2 とする。装置の中央部には溝を設け，開閉できる仕切ゲートを差し込むことによって A 室と B 室に仕切った構造である。

表-3 配合表

示方配合番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	自己充てん性のランク	水結合材比 (%)	水粉体容積比 (%)	空気量 (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)						
							水 W	セメント C	混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
												高性能 AE 減水剤	その他の混和剤
1	20	2	34.5	92.1	4.5	0.318	175	298	209	712	841	7.1	0
2													5.07
3													15.22
4													25.37
5													0
6													4.89
7			35.8	92.1	4.5	0.318	175	239	251	713	841	6.9	14.98
8													24.47
9													0
10													4.72
11			31.7	92.1	5.0	0.311	175	401	211	635	821	6.6	6.42 ¹⁾
12													40.1 ²⁾
13													28.1 ³⁾
14													6.02 ¹⁾
15													24.1 ²⁾
16													18.1 ³⁾

表中における 1), 2), 3)は表-2 における 1), 2), 3)に対応する。

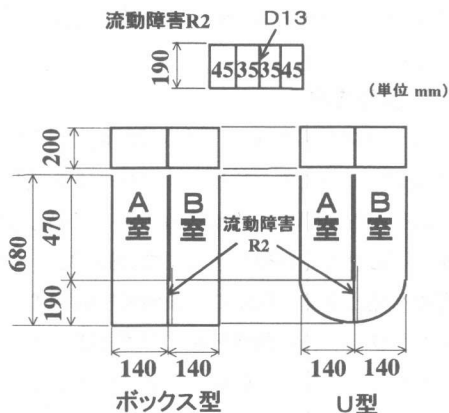


図-2 試験装置

2.3 試験方法

ボックス型及びU型充てん試験装置それぞれのA室の上端まで高流動コンクリートを流し込み、仕切ゲートを開き、流動障害を通過しながらB室への充てんが停止するまでの時間と、充てん高さを測定する。

2.4 実験結果および考察

まず、表-4には、今回の実験のすべての配合における高流動コンクリートのフレッシュ時の物性値を示し、図-4は、すべての配合におけるU型充てん高さ、ボックス型充てん高さとの関係を示したものである。ここで注意しなければなら

ない点がある。ボックス型の場合A室の上端まで試料を充てんし、仕切ゲートを開くと、A室とB室の底面から試料までの高さは一致すれば、その高さが底面から340mmとなる。

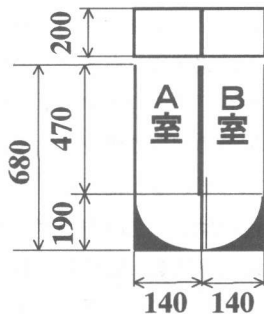


図-3 補正面積

しかし、U型の場合、図-3に示した黒色に塗った部分の容積だけがボックス型よりも少ないゆえに、結果的にこの部分の容積だけがボックス型の場合よりも増え、高さに換算すると、A、B室ともに15mm高くなる。つまりU型の場合、A、B室で同じ高さになるのであれば、底面から340+15mmの位置である。したがって、同一試料を用いてU型とボックス型の充てん高さを比較する場合、U型の実際の充てん高さからこの補正値を引いた値と、実際のボックス型の実験値とを比較しないと、正確に両者を比較したことにはならない。

図-4に示した直線は、U型とボックス型の充てん高さを比較するための目安として引いた直線

表-4 試験結果

示方配合番号	スランプフロー(mm)	500mm到達時間(sec)	フロー静止時間(sec)	V漏斗流下時間(sec)	U型充てん高さ(mm)	U型充てん静止時間(sec)	ボックス型充てん高さ(mm)	ボックス型充てん静止時間(sec)
1	596	7.09	10.25	7.54	340	14.73	315	15.72
2	621	4.63	23.72	6.40	372	18.61	339	19.16
3	651	2.22	23.72	4.85	361	41.12	342	7.98
4	621	2.23	23.72	4.62	351	11.79	328	10.67
5	651	3.03	20.46	5.28	360	15.12	340	13.15
6	626	2.85	19.31	6.16	350	16.29	335	16.10
7	591	3.49	11.96	6.60	355	17.22	328	20.11
8	621	2.52	10.32	5.06	345	16.86	332	23.25
9	661	2.32	19.31	5.16	351	17.09	335	21.10
10	741	2.31	24.15	8.00	375	15.89	345	15.86
11	675	3.92	26.71	18.9	353	15.29	340	16.17
12	680	12.97	70.30	25.93	360	28.50	348	29.47
13	680	7.63	46.49	22.90	335	71.31	330	48.35
14	655	4.00	23.03	23.16	346	20.45	336	20.89
15	665	15.81	29.12	31.22	351	36.23	342	41.63
16	660	9.54	50.24	24.14	330	58.33	321	49.44

であり、実線は補正前、点線は補正後である。補正前は実線よりもすべての点が右下に存在することからU型の方がすべての低粘性粉体系、高粘性粉体系の配合でボックス型より大きい充てん高さになっている。補正後においても、低粘性粉体系の配合は、U型の方がボックス型より大きい充てん高さになっている。しかし、高粘性粉体系の配合においては、U型とボックス型の充てん高さの差は、低粘性粉体系の場合と比べると小さい。

よって、低粘性粉体系の配合では、U型の方がボックス型よりも充てん高さが大きくなる。これは、せん断面の有無による充てん性状の違いによるものと思われる。本研究では、可視化実験と解析により、この流動性状の違いを明らかにする。

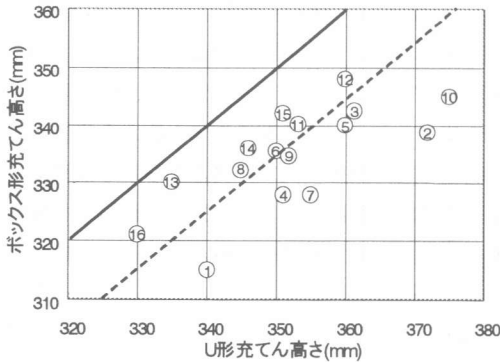


図-4 ボックス型充てん高さとう型充てん高さの関係

3. 可視化実験

3.1 使用材料および配合条件

充てん試験装置内を流れる高流動コンクリートの可視化を行うにあたり、高流動コンクリートの可視化モデルを用いた。モデルコンクリートは、高吸水性高分子樹脂水溶液（比重 1.0）をモデルモルタルとし、人工軽量粗骨材（粗骨材の最大寸法 20mm，比重 1.59，FM6.29）をモデル粗骨材とした固液 2 相系モデルである。モデルコンクリートの配合は、高吸水性高分子樹脂の添加量 2.8g/リットル一定とし、モデルコンクリートのコンシステンシーを大きく変化させるために、粗骨材濃度（粗骨材とモルタルの容積比として V_g/V_m で称す）を 0.4, 0.5, および 0.6 の 3 配合とした。

モデルモルタルのコンシステンシーは、ミニ

スランプフローと K 漏斗流下時間によって調整した。

3.2 試験方法

ボックス型及びU型充てん試験装置それぞれのA室の上端までモデルコンクリートを流し込み、仕切ゲートを開き、流動障害 R2 を通過しながら B 室への充てんが停止するまでの時間と、充てん高さを測定する。同時に、流動障害前後のモデルコンクリートの流動状況をビデオ撮影する。なお、モデルコンクリートには、流動性状を定量化するためのトレーサ粒子として平均粒径 1mm 程度の発泡スチロール粒子を混入した。

3.3 画像処理方法

実際のフレッシュコンクリートの流れは 3 次元の流れであるが、本研究では 2 次元平面問題として扱う。図-5 に示した検査領域内における座標位置が明確に観察される 4 つのトレーサ粒子群の時刻 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最大せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{max}$ により評価を行った。最大せん断ひずみ速度とは、モールのひずみ速度円の半径と定義し、フレッシュコンクリートの可視化モデルの経過時間に対する相対距離の変化量を意味する。流動速度が大きくても相対距離

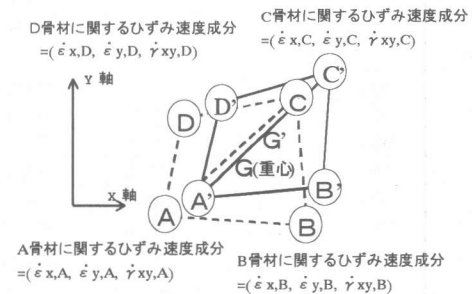


図-5 着目トレーサ粒子群と四角形領域の関係

が変化しない場合は零であり、流動速度には必ずしも依存しない物理量である。

3.4 実験結果および考察

図-6は、U型充てん試験装置とボックス型充てん試験装置による間隙通過試験における最大せん断ひずみ速度の経時変化を示す。

V_g/V_m が 0.4 では、U型とボックス型ともに最大せん断ひずみ速度の経時変化はほぼ同じである。 V_g/V_m が 0.5 では、ボックス型の方がU型よりも大きな最大せん断ひずみ速度を発生している。 V_g/V_m が 0.6 では、ボックス型の場合、せん断面の発生によりモデルコンクリート自体が材料分離し、一様な流動状態でなかったために、観測したトレーサ粒子群がコンクリートの挙動を反映していなく、著しく小さいひずみ速度しか発生していない。実際には V_g/V_m が 0.4, 0.5 と同じ程度の 10/s 以上の大きいひずみ速度が発生しているものと思われる。一方、U型では、せん断面が発生していないため材料分離をせず、スムーズに流動し、 V_g/V_m が 0.5 の場合と同じレベルの 8/s 以下の最大せん断ひずみ速度である。

U型では粗骨材濃度の違いが、最大せん断ひずみ速度に顕著な影響を与え、粗骨材濃度が 0.5 程

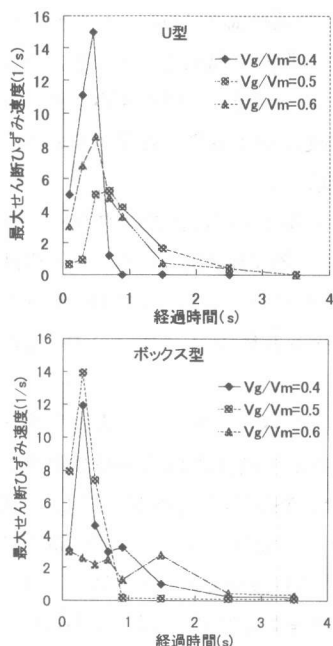


図-6 最大せん断ひずみ速度と経過時間の関係

度以上ではあまり大きなひずみ速度を発生しなくなり、緩やかな経時変化を示す。これに対し、ボックス型では粗骨材濃度に関わらず、高い最大せん断ひずみ速度が常に発生し、急激な経時変化を示す。

4. 解析の概要

4.1 解析手法

名古屋大学の谷川・森らによって開発された粘塑性空間要素法（以下 VDEM 法）のプログラムを用いた。VDEM 法は、取り扱う空間を要素分割し、この空間に流入し、流動する粘塑性材料の挙動を時間前進で計算する解析手法である。本手法の説明は参考文献の 3) に記述されているので本論文では省略する。

4.2 解析条件

解析は、実物大スケールで流動を再現する。本実験では高流動コンクリートの性能の照査に用いられるボックス型、U型の充てん試験装置を想定したものである。解析入力データとしては、せん断粘性、降伏値であり、要素数は 1160、節点数は 630、体積弾性係数 $4000(\text{N/m}^2)$ 、体積粘性 $0.0(\text{N/m}^2 \cdot \text{s})$ 、密度 $2.4(\text{N/m}^3)$ は一定としている。

4.3 解析結果および考察

この解析におけるボックス型とU型のコンクリートの入力データは、降伏値 $10(\text{N/m}^2)$ 、せん断粘性 $30(\text{N/m}^2 \cdot \text{s})$ とした。しかし、解析におけるU型の底面の形状が、実際のU型充てん試験装置の底面のようになめらかな曲線になるように再現できればよいが、解析におけるU型の底面の形状はいびつな形状になる。U型充てん試験装置内を充てんするコンクリートの流動状況は、実際のU型とは違って厳しくなることが予想される。そのため、底面にあらかじめ解析に用いるコンクリートとは別に、降伏値 $1.0(\text{N/m}^2)$ 、せん断粘性 $1.0(\text{N/m}^2 \cdot \text{s})$ の粘性の非常に小さいコンクリートの層を設けることによって、いびつな底面上を流動するコンクリートの抵抗を小さくし、実際のU型充てん試験装置内のコンクリートの流動状況に近いものとした。

図-7は、0.3秒後における、解析で求められ

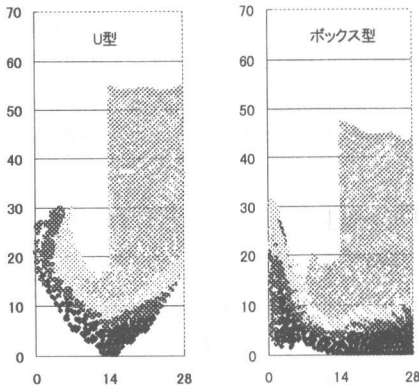


図-7 解析結果

るボックス型充てん試験装置およびU型充てん試験装置による、間隙通過試験における高流動コンクリートの流動状況の一例である。ここで、あらかじめ試験する前の段階でコンクリートを4層に色分けし、試験装置内のコンクリートの流動状況を分かりやすくした。この結果U型では、4層全てが一様に流動し、また、ボックス型では底面の黒色の層が余り流動せず、停滞している部分も見られせん断面が発生している様子が分かる。解析でも可視化実験と同様にU型ではせん断面の発生は見られず、またボックス型ではせん断面の発生が見られ、よって、両者の容器形状の違いが充てん性に与える影響としては、せん断面を有するボックス型装置による充てん性評価の方が、U型装置による充てん性評価より厳しい充てん性試験となることが予想される。

図-8は、動的2次元解析によって得られたU型およびボックス型のせん断ひずみ速度の経時変化を示す。

ボックス型の場合、流動開始直後0.5秒付近でピーク値12/s程度のせん断ひずみ速度が発生し急激に低下する。U型の場合のピーク値は、可視化実験の場合ほどはボックス型とU型に差はないがそのピーク値10/s程度で、そのあと緩やかに小さくなる。すなわち、可視化実験と同様にボックス型充てん試験装置を用いた間隙通過試験の方が、U型充てん試験装置を用いた場合よりも、流動中にコンクリートに与えるせん断ひずみ速度のレベルが大きく、厳しい流動状態を再現している。

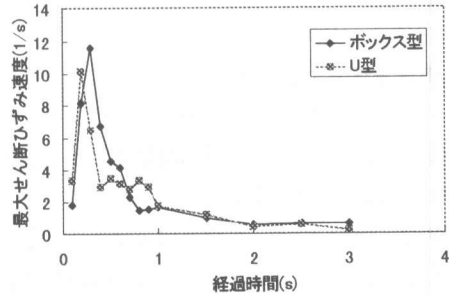


図-8 最大せん断ひずみ速度と経過時間の関係

5. 結論

(1)コンクリート実験のまとめ

低粘性粉体系の配合では、ボックス型よりU型充てん試験装置の方が充てん高さが大きくなることが明らかになった。

(2)可視化実験のまとめ

U型では粗骨材濃度の違いが、最大せん断ひずみ速度に顕著な影響を与え、緩やかな経時変化を示すが、ボックス型では粗骨材濃度に関わらず、高い最大せん断ひずみ速度が常に発生し、急激な経時変化を示す。

(3)解析結果

可視化実験と同様にボックス型充てん試験装置を用いた間隙通過試験の方が、U型充てん試験装置を用いた間隙通過試験の方よりも、流動中にコンクリートに与えるせん断ひずみ速度のレベルが大きく、厳しい流動状態を再現している。

【参考文献】

- 1) 土木学会編：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試験、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, 1966.12
- 2) 浦野他：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
- 3) 谷川・森・渡辺・寺西：空間要素法によるコンクリートの打設シミュレーション、コンクリート工学年次論文報告書, Vol.14, No.1, pp.415-420,1992.