

傾斜フロー試験器によるコンクリートの施工性評価

梶田 秀幸*1・榎田 佳寛*2・笹倉 博行*3

An Evaluation on The Workability of Fresh Concrete by Using The Inclined Flow Test Apparatus

Hideyuki KAJITA, Yoshihiro MASUDA, Hiroyuki SASAKURA

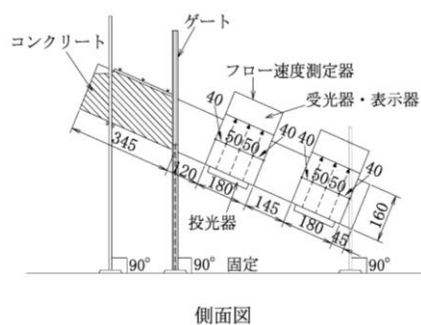


図-1 改良した傾斜フロー試験器の概要

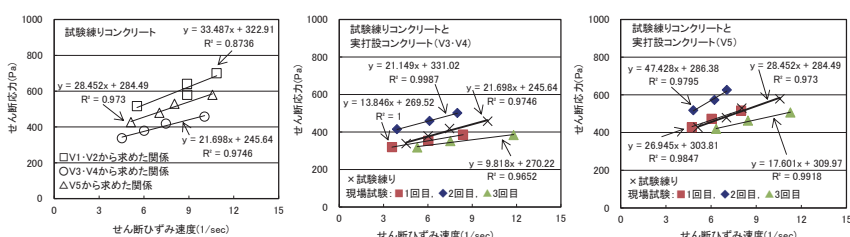


図-2 試験練りと実打設コンクリートにおける見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

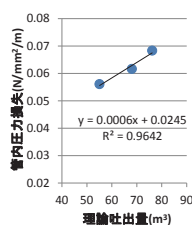


図-3 理論吐出量と管内圧力損失の関係

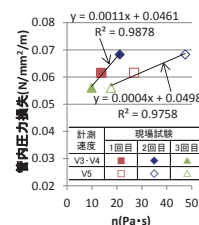


図-4 見掛けの塑性粘度と管内圧力損失の関係

研究の目的

コンクリートの施工性を評価・管理する上で、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に把握することが重要である。フレッシュコンクリートの流動性状を表すモデルとしては、一般的にはビンガム流体モデルが採用されており、降伏値および塑性粘度という2つのレオロジー定数により評価される。そこで、コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を直接的に求めるための試験方法について検討した。

技術の説明

L型フロー試験器を参考に高流動コンクリートだけでなく通常の軟練りコンクリートにも適用できるような傾斜角度が可変の傾斜フロー試験器を考案し、この試験器を用いて傾斜角度に応じコンクリートを流動させて流動先端速度を計測することにより、コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を直接的に求めることができる。

主な結論

- 試験方法については、試験器の終端付近における流動先端速度を計測する方が、ゲート近傍での計測よりも測定誤差の小さいデータが得られることがわかった。
- 試験器の終端付近で流動先端速度を計測して得られた見掛けの降伏値はスランプフロー値と、見掛けの塑性粘度は水セメント比との間に高い相関がみられた。
- 高強度コンクリートを実打設する現場において、傾斜フロー試験を試験適用した結果、見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係を見ると、現場で測定した結果は、試験練りで測定した結果を中心として上下にばらつく関係となった。
- 現場で測定した管内圧力損失と見掛けの塑性粘度との間には高い相関がみられ、傾斜フロー試験の結果から得られる見掛けの塑性粘度はコンクリートの粘性を評価できる可能性が示唆された。

*1 本店 技術研究所 材料研究室
*3 (株) ニューテック

*2 日本大学 理工学部建築学科

傾斜フロー試験器によるコンクリートの施工性評価

梶 田 秀 幸*¹ 梶 田 佳 寛*²
 笹 倉 博 行*³

要 旨

コンクリートの施工性を評価・管理する上で、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に把握することが重要である。フレッシュコンクリートの流動性状を表すモデルとしては、一般的にはビンガム流体モデルが採用されており、降伏値および塑性粘度という2つのレオロジー定数により評価される。そこで、L型フロー試験器を参考にして、高流動コンクリートだけでなく通常の軟練りコンクリートにも適用できるような傾斜角度が可変の傾斜フロー試験器を考案し、コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を直接的に求めるための試験方法について検討した。

その結果、傾斜フロー試験器を用いて精度よくコンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を測定する方法を構築することができた。また、見掛けの降伏値によりフレッシュコンクリートの流動性を評価することができ、さらには、見掛けの塑性粘度によりスランプ試験やスランプフロー試験では評価が難しいフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性が示唆された。

キーワード 施工性／流動性／粘性／降伏値／塑性粘度／傾斜角度／流動速度

目 次

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. はじめに | 3. 傾斜フロー試験器によるコンクリートの |
| 2. 傾斜フロー試験器によるコンクリートの | 施工性評価 |
| 施工性評価に関する検討 | 4. まとめ |

AN EVALUATION ON THE WORKABILITY OF FRESH CONCRETE BY USING THE INCLINED FLOW TEST APPARATUS

Hideyuki KAJITA Yoshihiro MASUDA
 Hiroyuki SASAKURA

Synopsis:

When evaluating and trying to control the workability of concrete, it is important to quantify the flow behavior of fresh concrete. It is common practice to use a Bingham fluid model to express the flow behavior of fresh concrete and evaluate it in terms of two rheological constants, namely, yield value and plastic viscosity. On the basis of the L-shaped flow test apparatus widely used in Japan, a variable-angle inclined flow test apparatus usable for not only highly flowable concrete but also conventional high-slump concrete was devised, and a study was conducted to develop test methods for directly determining the apparent yield value and plastic viscosity of concrete.

As a result, test methods for accurately measuring the apparent yield value and plastic viscosity of concrete by using the inclined flow test apparatus have been developed. This study showed that as in slump tests and slump flow tests, the fluidity of fresh concrete can be evaluated by looking at the apparent yield value. This study also suggested the possibility that the apparent plastic viscosity can be used to evaluate the viscosity of fresh concrete, which is difficult to evaluate in slump tests and slump flow tests.

* 1 本店 技術研究所 材料研究室
 * 3 (株) ニューテック

* 2 日本大学 理工学部建築学科

1. はじめに

コンクリートの施工性を評価・管理する上において、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に把握することが重要である。フレッシュコンクリートの流動性状を表すモデルとして、一般的にはビンガム流体モデルが採用されており、降伏値および塑性粘度という 2 つのレオロジー定数によって評価される^{1)~4)}。

フレッシュコンクリートの降伏値および塑性粘度を直接求めようとするレオロジー試験としては、回転粘度計、球引上げ粘度計、せん断ボックス試験などがある⁴⁾。しかし、回転粘度計は、フレッシュコンクリートを試料とした場合、円筒表面で試料が滑ることや、骨材粒子の運動により層流分布が乱されるなどの問題が生じ、流動性の高いモルタルやペーストでの適用に限られている⁴⁾。球引上げ粘度計では、測定時に球の表面で層流を形成させる必要があるため、粗骨材を含まない高流動のモルタルやペーストに適用することが一般的である⁴⁾。また、回転粘度計に羽根をつけた回転翼型粘度計やせん断ボックスによる試験は、フレッシュコンクリートとしてのレオロジー一定数の試験方法ではあるが、せん断面が発生した後はモルタルマトリクスのレオロジー一定数を計測していることになり、フレッシュコンクリートにせん断面が発生する時点がばらつくことから、コンクリートとしてのレオロジー一定数の測定は困難である⁵⁾。

実際の工事では、フレッシュコンクリートの流動性や変形特性は、JIS A 1101（コンクリートのスランプ試験方法）または JIS A 1150（コンクリートのスランプフロー試験方法）によって試験されることが多く、スランプやスランプフローの値は主として降伏値に対し、JIS A 1150における 50cm フロー到達時間は主として塑性粘度に対し関係すると考えられている⁶⁾。特に、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどの粘性を評価するには L 型フロー試験が有効とされている⁴⁾。しかしながら、これらの試験はフレッシュコンクリートの降伏値および塑性粘度を直接求められるものではない。

そこで、L 型フロー試験器を参考にして、高流動コンクリートだけでなく通常の軟練りコンクリートにも適用できるような傾斜角度が可変の傾斜フロー試験器を考案し、この試験器を用いて傾斜角度に応じてコンクリートを流動させ、その流動先端速度を計測することによって、コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を直接的に求めることとした^{5,7)}。

本稿では、この傾斜フロー試験器によりコンクリートの施工性を評価する方法について検討した結果と、傾斜フロー試験器による測定を実際の施工現場で試験適用し施工性の評価が可能であることを確認した結果について述べる。

2. 傾斜フロー試験器によるコンクリートの施工性評価に関する検討

既往の傾斜フロー試験器による測定結果^{5,7)}をみると、得られた結果のばらつきは必ずしも小さいとは言えず、降伏値が負の値になる場合や塑性粘度が極端に高い値になる場合があり、安定した結果を得るための測定方法が必要と考えられる。

そこで、測定結果を安定させ精度を向上させることを目的に、新たに測定するポイントを増やし、安定した流動速度のデータが得られるような測定方法について検討した。

2.1 傾斜フロー試験の概要

2.1.1 傾斜フロー試験器と測定方法の概要

傾斜フロー試験器は、図-1 に示すように、傾斜角度をつけて設置した直方体の箱の端部にコンクリートを充填した後、ゲートを引き上げてコンクリートを流動させ、傾斜の途中に設置した非接触型のセンサーで流動速度を計測する装置である。流動速度は、コンクリートの流動の先端が 3 つの点を通る時間を計測して、各々の 2 点間を通る平均速度を求め、さらにその平均値を求めて流動先端速度とする。また、速度センサーを通過する時の、コンクリート流の傾斜面からの垂直高さ（以下、流動高さと略記する）は、センサー付近にあらかじめ設置したスケールにて目視により測定する。傾斜角度は 1°～36°の可変であり、ゲートは各々の傾斜角度ごとに鉛直になるように取り付けられている。

2.1.2 見掛けの降伏値および塑性粘度の算定方法

傾斜フロー試験において、フレッシュコンクリートに作用する見掛けのせん断応力 τ (Pa) は[1]式で求め、見掛けのせん断ひずみ速度 (1/sec) は流動先端速度 (m/sec) を流動高さ (m) で除して求めた。ここでは、せん断ひずみ速度を求めるための流動高さについては、各傾斜角度で測定した流動高さの平均値を採用した。

傾斜角度の違いによって得られた見掛けのせん断ひずみ速度と見掛けのせん断応力の関係は線形の関係となる。これを直線回帰すると、回帰直線の切片は見掛けのせん断ひずみ速度が 0 であることから降伏値に相当するものと考えられるため、これを見掛けの降伏値（以下、 τ_y と略記）とした。一方、回帰直線の傾きは見掛けのせん断ひずみ速度に対する見掛けのせん断応力の変化であることから塑性粘度に相当するものと考えられるため、これを見掛けの塑性粘度（以下、 η と略記）とした。なお、コンクリートの流動中におけるすべり摩擦抵抗の影響は小さい⁴⁾ため無視している。

$$\tau = W \times h \times g \times \sin \theta \quad [1]$$

ここに、 W ：単位容積質量 (kg/m³)

h ：速度センサーを通過する時のコンクリート流の傾斜面からの高さ (m)

g ：重力加速度 (9.807m/sec²)

θ ：傾斜角度

2.2 実験概要

2.2.1 コンクリートの使用材料および調合

表-1 に、コンクリートの使用材料を示す。また、表-2 に、コンクリートの調合を示す。

本実験では、測定対象を通常の強度域から高強度域のコンクリートとしており、通常の強度域のコンクリートとして調合管理強度 36N/mm² 程度の調合である水セメント比 45%・スランプ 21cm の調合、高強度域のコンクリートとして調合管理強度 48N/mm² 程度の調合である水セメント比 36%・スランプフロー55cm の調合、また調合管理強度 60N/mm² 程度の調合である水セメント比 30%・スランプフロー60cm の調合とした。

2.2.2 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートは、1 バッチ 40ℓ を二軸強制練りミキサ（容量 55ℓ）により 90～120 秒間練り混ぜた後、ミキサから排出して試験に供した。なお、水セメント比 36%と 30%の調合は、5 分間静置した後、ミキサから排出した。

2.2.3 測定項目および方法

表-3 にフレッシュコンクリート試験の項目および方法を示す。なお、傾斜フロー試験は、通常、非接触型センサーによって第 1・第 2 センサー間の速度（以下、V1 と略記）および第 2・第 3 センサー間の速度（以下、V2 と略記）を計測するが、より流下した時点での速度を把握するために、ゲートから終端までの時間および第 3 センサーから終端までの時間を、ストップウォッチにて手動で計測し、それぞれの区間の平均速度（以下、前者を Va、後者を Vb と略記する）を求めた。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 フレッシュコンクリート試験の結果

表-4 に、フレッシュコンクリート試験の結果を示す。また、表-5 に、傾斜フロー試験における流動先端速度の計測結果を示す。これまでは、傾斜フロー試験における流動先端速度は V1 と V2 の平均速度（以下、V1・V2 と略記）であるが、表-5 には V1、V2 だけでなく、Va、Vb も含めてそれぞれの流動先端速度を示した。

コンクリートのスランプおよびスランプフローともに、いずれの試料においても目標値の範囲内の値が得られた。また空気量も、T36-88 がやや大きいものの、いずれの試料も目標値の範囲内であり、良好なフレッシュ状態のコンクリートが試料として採取できたものと言える。傾斜フロー試験の流動先端速度については、ほとんどの試料において、傾斜角度が大きくなる程、流動先端速度は速くなっており、逆転現象はみられなかった。本試験では、試料量を 2 水準設定したが、T45 では試料量 8820cc、5000cc とともに同じ傾斜角度で計測できたものの、T36 と T30 では傾斜角度が小さい場合

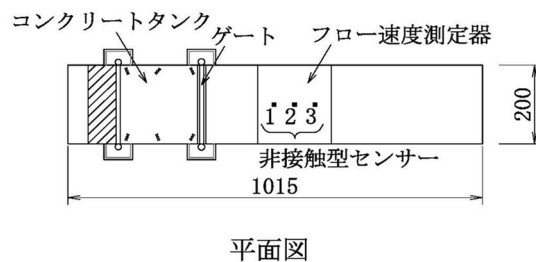
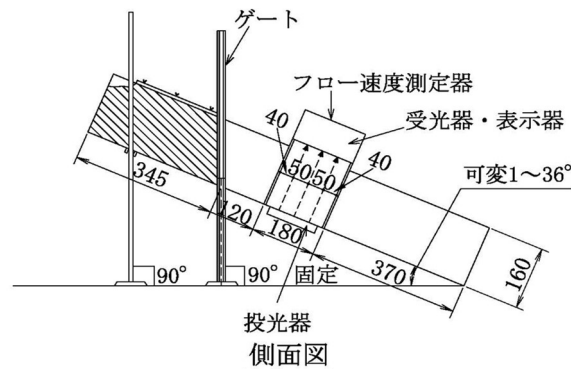


図-1 傾斜フロー試験器の概要

表-1 使用材料

練混ぜ水 (W)	上水道水
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³
細骨材 (S)	千葉県富津市産 山砂 (S1)
(S1 と S2 の混合比は、質量比で 50:50)	表乾密度:2.57g/cm ³ 粗粒率:2.05
粗骨材 (G)	栃木県佐野市産 砕砂 (S2) 表乾密度:2.67g/cm ³
混和剤 (Ad)	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系

表-2 コンクリートの調合*

調合 No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C× %)	目標SL または 目標SF (cm)	目標 空気 量 (%)
			W	C	S		G				
					S1	S2					
T45	45	49.8	175	389	428	428	891	0.90	21±2.0	4.5 ±1.5	
T36	36	47.3	175	486	388	388	891	1.05	55±5.0		
T30	30	44.6	175	583	348	348	891	1.15	60±5.0		

*記号説明 W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W・C・S・G・Ad: 表-1参照, SL: スランプ, SF: スランプフロー

表-3 フレッシュコンクリート試験の項目および方法

試験項目	試験内容
スランプ	JISA 1101により測定した。
スランプフロー	JISA 1150により測定した。
空気量	JISA 1128により測定した。
均一性	目視により判断した。
練上がり温度	JISA 1156により測定した。
傾斜フロー試験	傾斜フロー試験器により、下記の速度と、第3センサー付近の流動高さを測定した。 試料量は8820ccおよび5000ccとした。 ・V1 (第1・第2センサー間の速度) ・V2 (第2・第3センサー間の速度) ・Va (ゲート～終端の平均速度) ・Vb (第3センサー～終端の平均速度)

に試料量 8820cc の傾斜角度で試料量 5000cc の正確な計測はできず、傾斜角度を大きくしなければ試料が終端まで流動していかなかった。そのため、試料量 5000cc の流動先端速度は、試料量 8820cc の流動先端速度に比べると、全体的に遅い結果となった。

2.3.2 見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

図-2 に、傾斜フロー試験の結果から得られた見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を示す。また、図中にせん断ひずみ速度とせん断応力の直線回帰式および決定係数を示す。いずれの試料においても、せん断ひずみ速度とせん断応力の直線関係は高い相関を示しており、ほとんどの試料において決定係数が 0.9 以上となった。2.2 節で述べたように、回帰直線の切片が τ_y 、傾きが η であり、それを整理したものを表-6 に示す。

τ_y については、スランプフロー値が大きくなる程、軟らかくなるため小さくなり、 η については、水セメント比が小さくなる程、セメント量が増大して粘性が高くなるため大きくなっており、レオロジー的な観点⁶⁾からの矛盾はない。試料量の違いについては、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係にやや差がみられ、回帰直線もやや異なる式となっている。また、T30-88 の結果に着目すると、V1・V2 から求めた τ_y が負の値となっており、レオロジー的な観点からの矛盾が生じている。Va, Vb を含めて τ_y をみると、V1・V2, Va, Vb の順に、徐々に大きい値へ変化している。これは、他の試料においても同

表-4 フレッシュコンクリート試験の結果*

試料 No.	W/C (%)	試料量 (cc)	SL (cm)	SF (cm)	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
T45-88	45	8820	22.0	38.0	2330	4.4	18
T45-50		5000	22.0	38.5	2324	4.5	17
T36-88	36	8820	—	52.5	2312	5.9	20
T36-50		5000	—	50.5	2353	4.3	19
T30-88	30	8820	—	64.0	2356	4.8	20
T30-50		5000	—	57.5	2342	5.1	19

*記号説明 試料No.: 水セメント比(W/C)－試料量,
SL: スランプ, SF: スランプフロー

表-5 コンクリートの傾斜フローによる流動先端速度

試料 No.	試料量 (cc)	角度 (°)	流動先端速度(m/sec)*				平均流動高さ (m)
			V1	V2	Va	Vb	
			0.185	0.235	0.335	0.465	
T45-88	8820	23	0.467	0.431	0.327	0.281	0.045
		26	0.625	0.641	0.438	0.471	
		29	0.714	0.746	0.578	0.651	
		32	0.793	0.847	0.720	0.774	
T45-50	5000	23	0.314	0.187	0.154	0.113	0.030
		26	0.393	0.349	0.233	0.188	
		29	0.387	0.316	0.270	0.232	
		32	0.480	0.520	0.447	0.477	
T36-88	8820	14	0.216	0.147	0.129	0.099	0.047
		18	0.290	0.233	0.177	0.144	
		23	0.384	0.337	0.252	0.211	
		29	0.515	0.458	0.429	0.488	
T36-50	5000	20	0.224	0.164	0.153	0.121	0.032
		23	0.256	0.241	0.180	0.147	
		26	0.303	0.259	0.221	0.177	
		29	0.403	0.362	0.278	0.234	
T30-88	8820	14	0.185	0.155	0.126	0.098	0.048
		18	0.250	0.195	0.178	0.146	
		23	0.306	0.219	0.220	0.203	
		29	0.324	0.335	0.271	0.273	
T30-50	5000	20	0.195	0.151	0.128	0.099	0.036
		23	0.224	0.159	0.136	0.108	
		26	0.257	0.228	0.185	0.156	
		29	0.284	0.247	0.199	0.162	

*: V1, V2, Va, Vb の下段の数字はゲートからの距離 (m)

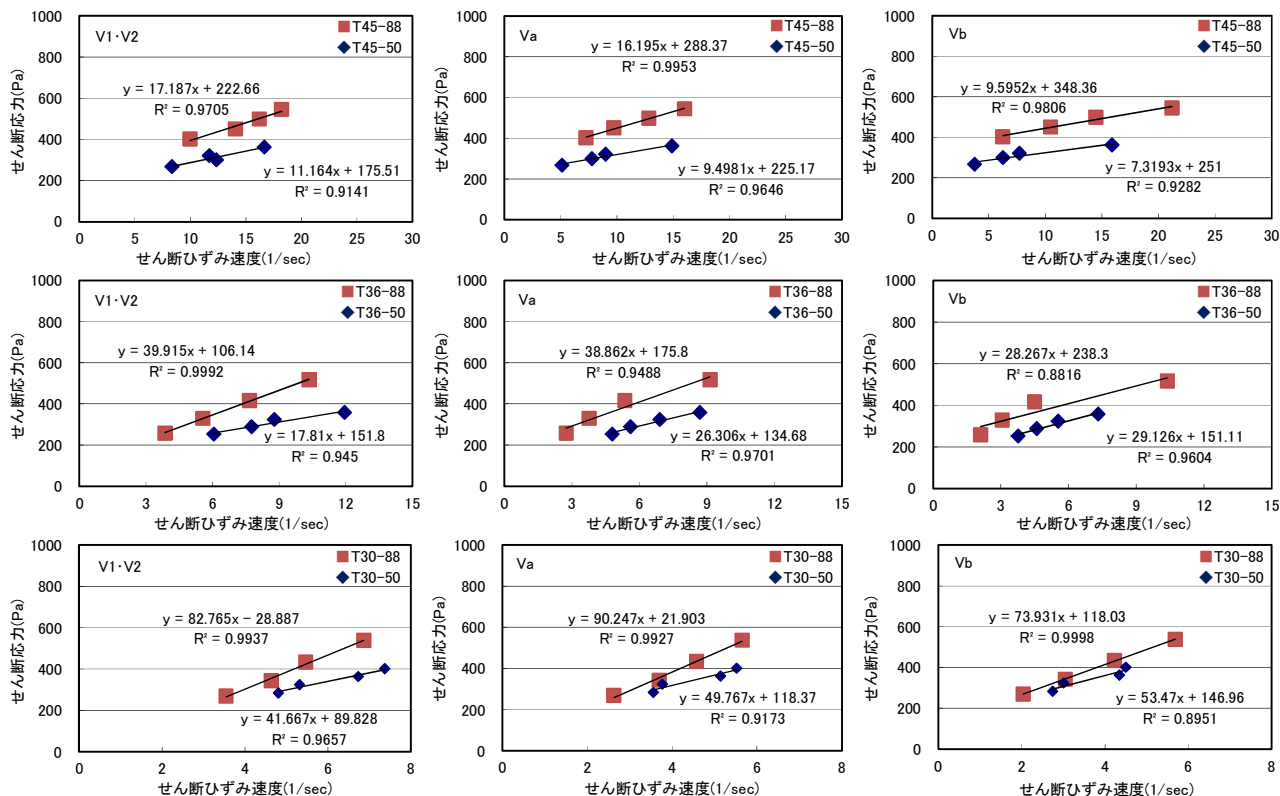


図-2 見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

様の傾向がみられる。一方、 η については、 $V1 \cdot V2$, Va , Vb から求めた値に大きな差はみられない。

2.3.3 測定ポイントと流動先端速度の関係

図-3 に、ゲートから各測定ポイント (Va および Vb は測定区間の中間点を測定ポイントとした) までの距離と測定ポイントにおける流動先端速度との関係を示す。

大半の試料において、 $V1$ が最も速く、 $V2$ から Va , Vb にかけて徐々に流動先端速度は小さくなる傾向にあり、 Va と Vb で概ね同じ速度に収斂していくようにみられる。このことから、傾斜フローによるコンクリートの流動先端速度が徐々に一定の速度に近づくと仮定し、その一定となる速度を求めるために、測定結果から[2]式のように指数近似するとして Vr (終端速度) を推定した。

$$V = p \times e^{-qx} + Vr \quad [2]$$

ここに、 x : ゲートから測定ポイントまでの距離 (cm)

Vr : 終端速度 (cm/sec)

p, q : 実験定数

表-7 に、 Vr の推定結果を示す。また図-4 に、[2]式の推定曲線を示す。いずれも高い相関を示して Vr を推定できたが、T36-88 の傾斜角度 29° の Vr は、同一試料内の他の傾斜角度と比較すると大きい。これは、 Vb の値が Va よりも大きいためであるが、 Va および Vb はいずれも手動による計測結果から求めたものであることから、測定誤差が生じたことに起因すると考えられる。また、表-7 の () 内の値 (図-4 の点線で示している曲線) のように、同一試料内の他の傾斜角度と比べると逆転現象が生じている推定結果があった。これは、いずれも試料量 5000cc の試料であり、流動先端速度が全体的に遅かったために傾斜角度の違いによる速度の差が小さくなり、逆転現象が生じたものと考えられる。

2.3.4 Vr より求めたレオロジー定数

図-5 に、 Vr から求めた見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を、表-7 に、 Vr から求めた τ_y および η を示す。なお、流動先端速度と傾斜角度の関係において逆転現象を示した表-7 の () 内の Vr は採用していない。

図-5 に示す Vr から求めた見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係をみると、図-2 に示す $V1 \cdot V2$ に比べて、一部の試料 (T36-88, T30-88) を除き決定係数は高くなっている。また、 Va や Vb も、 $V1 \cdot V2$ よりも高い決定係数となっている試料の方が多い。これは、 $V1 \cdot V2$ の測定ポイントがゲートに近いので、一定の速度になりきっていない時に測定していることが主な原因と推測される。 Vr よりも $V1 \cdot V2$ の方が高い決定係数となっている試料 T36-88 は、2.3.3 項で述べたように、傾斜角度 29° の試料で Vb が Va よりも大きい結果となっているためである。一方の T30-88 は、 $V1 \cdot V2$ の方が Vr や Va よりも決定係数はやや大きい、見掛けの降伏値が負の値

表-6 傾斜フロー試験で得られたレオロジー定数

試料 No.	試料量 (cc)	$V1 \cdot V2$		Va		Vb	
		τ_y (Pa)	η (Pa·s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)
T45-88	8820	223	17.2	288	16.2	348	9.6
T45-50	5000	176	11.2	225	9.5	251	7.32
T36-88	8820	106	39.9	176	38.9	238	28.3
T36-50	5000	152	17.8	135	26.3	151	29.1
T30-88	8820	-28.9	82.8	21.9	90.2	118	73.9
T30-50	5000	89.8	41.7	118	49.8	147	53.5

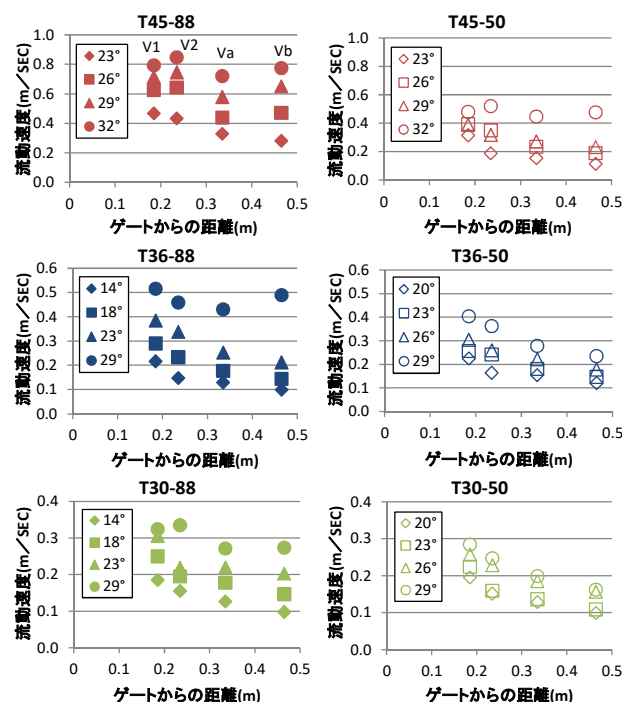


図-3 測定ポイントと流動先端速度の関係

表-7 Vr の推定結果と Vr より求めたレオロジー定数

試料 No.	試料量 (cc)	角度 ($^\circ$)	Vr (m/sec)	平均流動高さ (m)	レオロジー定数	
					τ_y (Pa)	η (Pa·s)
T45-88	8820	23	0.204	0.045	338	11.9
		26	0.416			
		29	0.608			
		32	0.737			
T45-50	5000	23	(0.126)	0.030	278	5.58
		26	0.122			
		29	0.225			
		32	0.456			
T36-88	8820	14	0.107	0.047	249	28.5
		18	0.130			
		23	0.168			
		29	0.460			
T36-50	5000	20	(0.128)	0.032	242	19.0
		23	0.063			
		26	0.138			
		29	0.177			
T30-88	8820	14	0.074	0.048	137	72.3
		18	0.149			
		23	0.211			
		29	0.244			
T30-50	5000	20	0.093	0.036	57.6	86.2
		23	0.113			
		26	0.126			
		29	(0.124)			

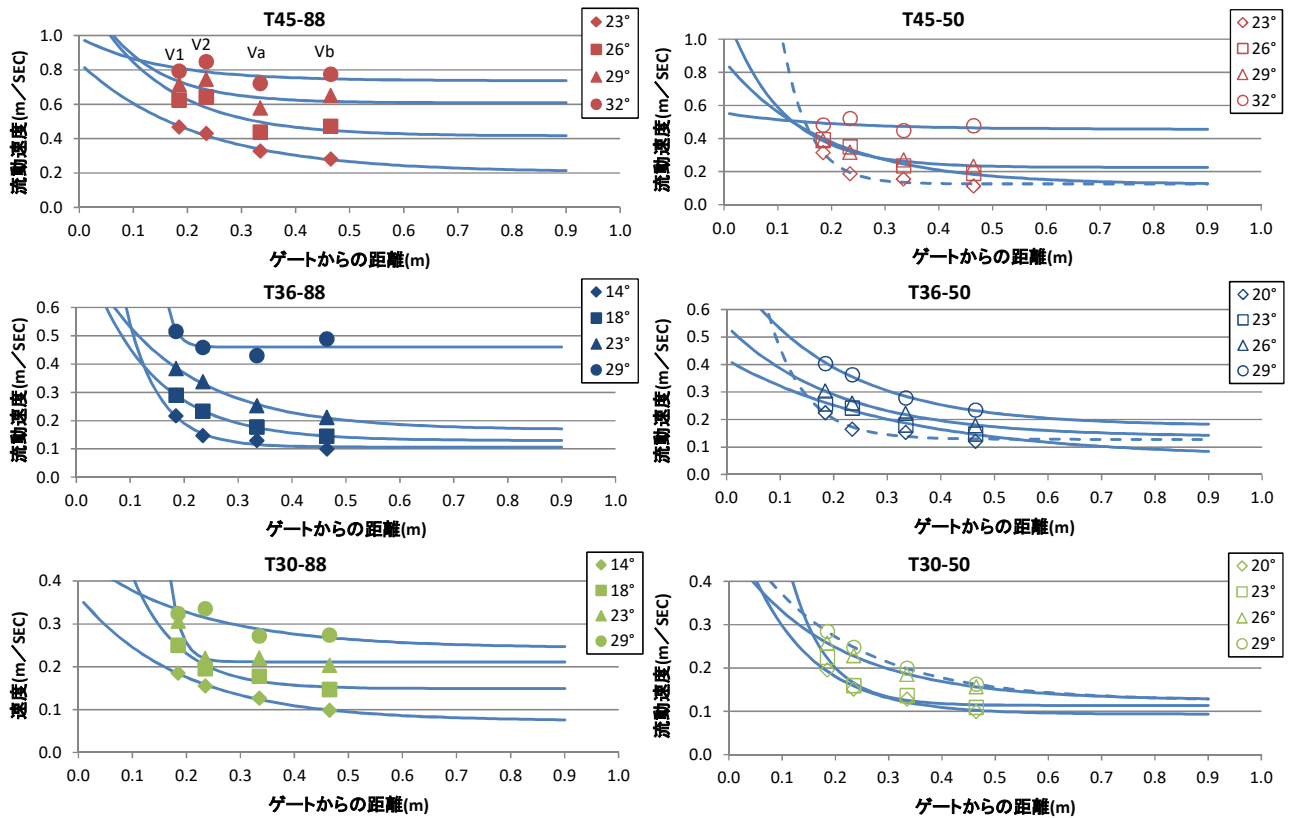


図-4 測定ポイントと流動先端速度の関係

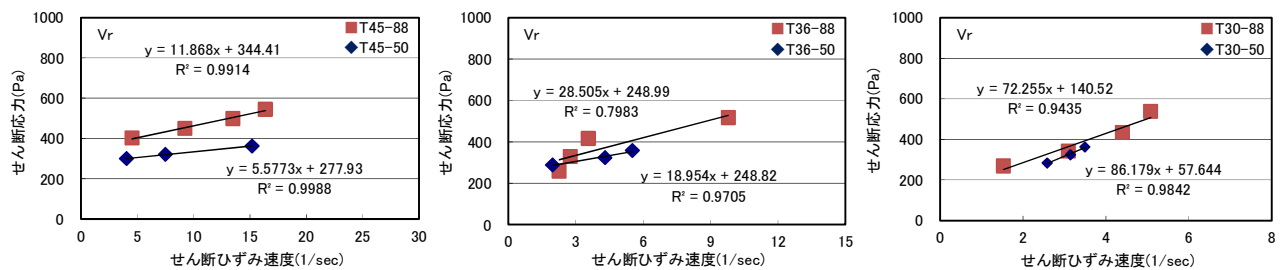


図-5 V_r から求めた見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

となっている。これらのことから、本試験では試験器の終端付近における流動先端速度を計測する方が、より正確な τ_y および η を求めることができる可能性が示唆された。なお、試料量の違いによるレオロジー定数への影響はみられないが、試料量が少ない場合は傾斜角度の差を大きく、すなわち、各傾斜角度における流動先端速度の差を大きくしないと、2.3.3 項で述べた逆転現象が生じ、求めるレオロジー定数の誤差が大きくなってしまう可能性があると考えられる。

図-6 に、コンクリートの調合・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係を示す。スランプフロー値は τ_y との間に相関がみられた。また、水セメント比は η との間に高い相関がみられた。この中で、T30 の調合は、他の調合と比べて試料量の違いによる差が大きい。全体的にみると、T30-50 が他の試料と比較して傾向が異なる。これは、T30-50 は、各傾斜角度における流動先端速度の差が十分に大きくないことから、求めたレオロジー定数の

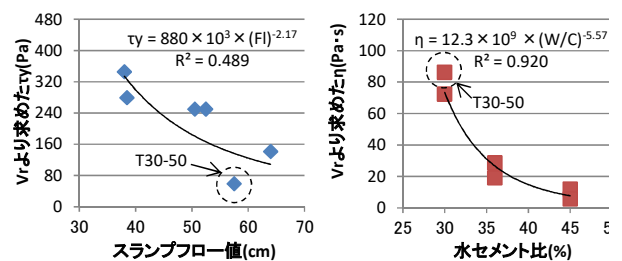


図-6 コンクリートの調合・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係

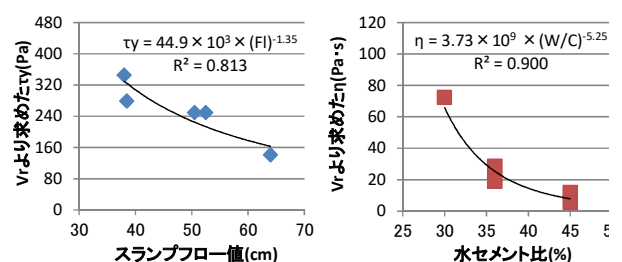


図-7 T30-50 を除いたコンクリートの調合・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係

推定誤差が大きくなったものと推察される。そこで、T30-50を除き、コンクリートの調合・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係を再整理した結果、図-7に示す通りとなった。スランプフロー値と τ_y の関係も高い相関が認められ、既往の結果^{5,7)}と同様、もしくはそれ以上の高い相関関係であることが確認された。一般的に、スランプフロー値はフレッシュコンクリートの流動性と相関があり⁶⁾、水セメント比はセメント量の大小につながるためフレッシュコンクリートの粘性との相関があると考えられることから、 τ_y はフレッシュコンクリートの流動性を、 η はフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性があると推察される。

2.4 2章のまとめ

既往の傾斜フロー試験器の測定により得られる測定結果^{5,7)}を安定させることを目的に、新たに測定ポイントを増やし、安定した流動速度のデータが得られるような測定方法について検討した。その結果、本実験の範囲では、試験器の終端付近における流動先端速度を計測することによって、より正確な見掛けの降伏値および塑性粘度を求めることができる可能性が示唆された。この測定方法により得られた見掛けの降伏値および塑性粘度は、コンクリートのスランプフローや水セメント比と相関がみられ、既往の結果^{5,7)}と同様、もしくはそれ以上の高い相関関係であることが確認された。このことから、見掛けの降伏値はフレッシュコンクリートの流動性を、見掛けの塑性粘度はフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性があると推察される。

今回の測定では、ゲート近くの流動速度はセンサーにより正確に計測した結果であるが、試験器の終端付近は手動により計測した結果であるため誤差が比較的大きいと考えられる。次章では、試験器の終端近くにおいて非接触型のセンサーによる計測を行い、より安定した流下時の流動先端速度を精度よく計測して同様の検討を行うとともに、手動計測による測定方法についても検討して、本試験の測定方法を構築する。

3. 傾斜フロー試験器によるコンクリートの施工性評価

前章において、既往の傾斜フロー試験器の測定により得られる測定結果^{5,7)}を安定させることを目的に、新たに測定ポイントを増やして、安定した流動速度のデータが得られるような測定方法について検討した。その結果、試験器の終端付近における流動先端速度を計測することによって、より正確な見掛けの降伏値および塑性粘度を求めることができる可能性が示唆された。

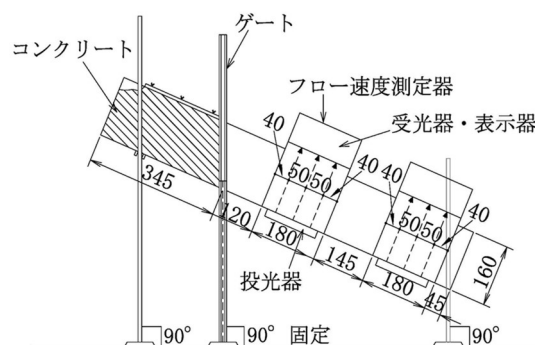
そこで、傾斜フロー試験器の終端付近に流動先端速度を計測するセンサーを増設して流動速度データを取得し、従来のゲート近傍に設置したセンサーによる流動速度の

データと比較して測定誤差の小さいデータが得られるか検証した。また、その結果に基づいて傾斜フロー試験の測定方法を設定し、高強度コンクリートを打設する施工現場において、コンクリート受入れ検査時に傾斜フロー試験を試験的に適用した。さらには、フレッシュコンクリートの施工性、特にスランプやスランプフローの試験結果では評価が難しいと言われている粘性について評価することが可能であるか確認した。

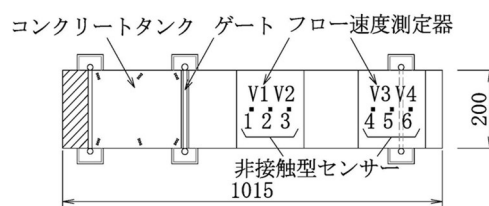
3.1 改良した傾斜フロー試験の概要

3.1.1 改良した傾斜フロー試験器と測定方法の概要

図-8に、改良した傾斜フロー試験器を示す。傾斜角度をつけて設置した直方体の箱の端部にフレッシュコンクリートを充填した後、ゲートを引き上げてコンクリートを流下させ、傾斜の途中に設置した非接触型のセンサーで流動先端速度を計測する装置である。前章では、ゲートの近傍にあるセンサー（第1～第3センサー）で流動速度を計測していたが、安定した流動状態時の速度を計測する目的で試験器の終端付近にセンサー（第4～第6センサー）を増設した。流動速度は、コンクリートの流動先端が3つの点を通る時間を測定して、各々の2点間を通過する平均速度を求め、さらにその平均値を求めて流動先端速度とする。また、速度センサーを通過する時の流動高さは、第1および第4センサー付近にあらかじめ設置したスケールで目視により測定する。傾斜角度は $1^\circ \sim 36^\circ$ の可変であり、ゲートは各々の傾斜角度ごとに鉛直になるよう取り付けられている。



側面図



平面図

図-8 改良した傾斜フロー試験器の概要

3.1.2 改良した傾斜フロー試験器による見掛けの降伏値および塑性粘度の算定方法

改良した傾斜フロー試験器による見掛けの降伏値および塑性粘度の算定方法は、前章の 2.1.2 項で説明した通りである。ただし、せん断ひずみ速度を求めるための流動高さについては、さらに精度を上げるために、平均値ではなく各傾斜角度における流動高さをそのまま採用した。

3.2 改良した傾斜フロー試験方法の検証

3.2.1 実験概要

(1) コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの使用材料は、表-1 に示す材料と同じである。表-8 に、検証実験コンクリートの調査を示す。

(2) コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは、2.2.2 項と同じ方法とした。

(3) 測定項目および方法

表-9 に、フレッシュコンクリート試験の項目および方法を示す。傾斜フロー試験については、これまで非接触型センサーによって第 1・第 2 センサー間の速度（以下、V1 と略記）および第 2・第 3 センサー間の速度（以下、V2 と略記）を計測していたが、より流下した地点での速度を把握するために、第 4・第 5 センサー間の速度（以下、V3 と略記）および第 5・第 6 センサー間の速度（以下、V4 と略記）を計測した。また、今後の現場における測定を視野に入れた簡便な測定方法として、ゲートから終端までの時間をストップウォッチにて手動で計測して平均の速度（以下、V5 と略記する）を求める方法についても測定した。さらに、既往の結果⁵⁾では試料量により見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係に差がみられたため、試料量は 8820cc と 5000cc の 2 水準で確認した。

3.2.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリート試験の結果

表-10 に、フレッシュコンクリート試験の結果を示す。また、表-11 に、傾斜フロー試験における流動先端速度と流動高さの測定結果を示す。コンクリートのスランプおよびスランプフローともに、いずれの試料においても目標値の範囲内の値が得られた。また空気量も、いずれも目標値の範囲内であり、良好なフレッシュ状態のコンクリートが試料として採取できたと言える。傾斜フロー試験の流動先端速度については、V3・V4 および V5 は、すべての試料において傾斜角度が大きくなるほど流動先端速度は速くなり、それらの関係が逆転する現象はみられず測定誤差の小さいデータが得られた。しかし、V1・V2 は、2 つの試料（試料 No.36-88 の 18°-23°、No.36-50 の 26°-29°）において逆転現象がみられた。これは、V1・V2 の計測位置がゲートに近いため、

表-8 検証実験コンクリートの調査*

調査 No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C×%)	目標SL または 目標SF (cm)	目標 空気量 (%)
			W	C	S		G				
					SI	S2					
45	45	49.8	175	389	428	428	891	1.05	21±1.5	4.5 ±1.0	
36	36	47.3	175	486	388	388	891	1.15	60±5.0		
30	30	44.6	175	583	348	348	891	1.15	60±5.0		

*記号説明 W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，W・C・S・G・

Ad：表-1参照，SL：スランプ，SF：スランプフロー

表-9 フレッシュコンクリート試験の項目および方法

試験項目	試験方法
スランプ	JISA 1101により測定した。
スランプフロー	JISA 1150により測定した。
空気量	JISA 1128により測定した。
単位容積質量	JISA 1116により測定した。
均一性	目視により判断した。
練上がり温度	JISA 1156により測定した。
傾斜フロー試験	傾斜フロー試験器により下記の速度と第1および第4センサー付近の流動高さを測定。 試料量は8820ccおよび5000cc。 ・V1（第1・第2センサー間の速度） ・V2（第2・第3センサー間の速度） ・V3（第4・第5センサー間の速度） ・V4（第5・第6センサー間の速度） ・V5（ゲート～終端の平均速度）

表-10 検証実験のフレッシュコンクリート試験結果*

試料 No.	W/C (%)	試料量 (cc)	SL (cm)	SF (cm)	単位容積 質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
45-88	45	8820	22.5	41.0	2326	4.0	23
45-50		5000	22.5	41.0	2309	5.0	23
36-88	36	8820	—	63.0	2344	4.0	23
36-50		5000	—	59.0	2354	4.0	23
30-88	30	8820	—	61.5	2349	4.5	24
30-50		5000	—	59.0	2362	4.5	24

*記号説明 試料No.：水セメント比(W/C)－試料量，SL：スランプ，SF：スランプフロー

表-11 検証実験におけるコンクリートの傾斜フローによる流動先端速度と流動高さ

試料 No.	角度 (°)	流動先端速度(m/sec)					流動高さ(m)*		
		V1	V2	V3	V4	V5	V1・V2	V3・V4	V5
45-88	23	0.396	0.314	0.125	0.109	0.192	0.050	0.040	0.045
	26	0.694	0.617	0.420	0.364	0.532	0.045	0.035	0.040
	29	0.649	0.684	0.641	0.581	0.593	0.045	0.035	0.040
	32	0.793	0.843	0.925	0.909	0.728	0.045	0.040	0.043
45-50	23	0.357	0.257	0.120	0.111	0.186	0.045	0.035	0.040
	26	0.450	0.431	0.218	0.199	0.302	0.045	0.030	0.038
	29	0.537	0.462	0.261	0.273	0.379	0.045	0.035	0.040
	32	0.574	0.588	0.588	0.595	0.528	0.035	0.020	0.028
36-88	14	0.299	0.295	0.157	0.125	0.186	0.060	0.050	0.055
	18	0.409	0.370	0.205	0.207	0.253	0.055	0.045	0.050
	23	0.381	0.352	0.233	0.233	0.289	0.060	0.045	0.053
	29	0.641	0.561	0.431	0.354	0.456	0.055	0.045	0.050
36-50	20	0.228	0.192	0.110	0.115	0.136	0.050	0.035	0.043
	23	0.338	0.274	0.152	0.142	0.214	0.050	0.035	0.043
	26	0.434	0.480	0.194	0.177	0.295	0.050	0.040	0.045
	29	0.427	0.404	0.209	0.228	0.302	0.050	0.035	0.043
30-88	14	0.178	0.144	0.087	0.077	0.123	0.070	0.055	0.063
	18	0.235	0.202	0.131	0.110	0.159	0.070	0.050	0.060
	23	0.250	0.200	0.154	0.135	0.191	0.060	0.050	0.055
	29	0.287	0.312	0.212	0.192	0.245	0.070	0.050	0.060
30-50	20	0.146	0.118	0.055	0.067	0.092	0.050	0.035	0.043
	23	0.146	0.143	0.087	0.094	0.121	0.050	0.035	0.043
	26	0.186	0.167	0.099	0.083	0.145	0.055	0.035	0.045
	29	0.248	0.240	0.118	0.124	0.182	0.050	0.035	0.043

*V1・V2:第1センサー付近，V3・V4:第4センサー付近，V5:V1・V2とV3・V4の平均値

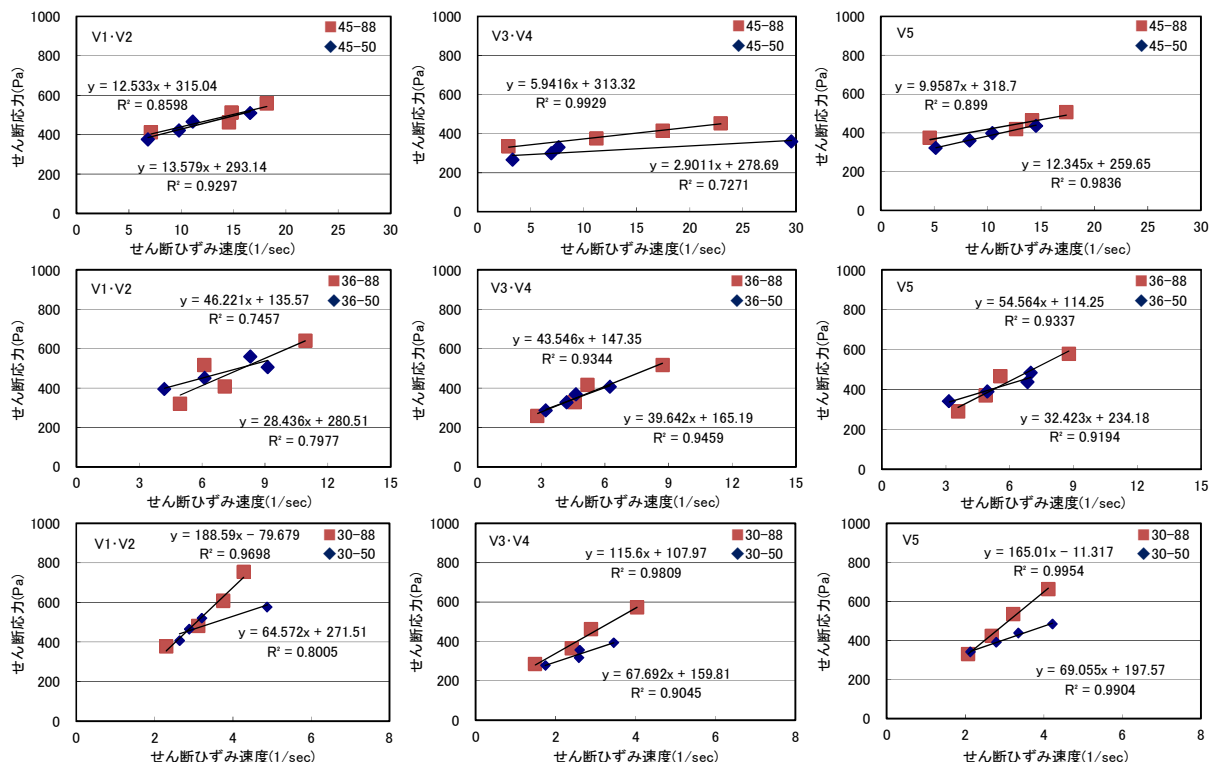


図-9 検証実験におけるコンクリートの見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

一定の速度になりきっていない時に測定していることが主な原因と推測される。

(2) 見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

図-9 に、傾斜フロー試験結果から得られた流動先端速度を流動高さで除して求めた見掛けのせん断ひずみ速度と、見掛けのせん断応力との関係を示す。また、図中に見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の直線回帰式および決定係数を示す。いずれの試料においても、見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との直線関係は高い相関性を示しており、多くの試料において決定係数は 0.9 以上となった。この中で決定係数が 0.9 を下回った試料は、V1・V2 で計測した試料に多く、水セメント比 30% の割合については見掛けの降伏値に相当する回帰直線の切片が負の値となった。これは、上述したように、V1・V2 の計測位置がゲートに近い場合、特に粘性が高い試料の場合は引き上げられるゲートの影響を受け、一定の速度になりきっていない時に V1・V2 の計測がなされていることが主たる原因と推測される。ただし、V3・V4 で計測した試料においても、試料 No.45-50 のように決定係数の低いものがある。これは、32°における流動高さが 20mm と非常に低く、せん断ひずみ速度を測るには誤差が大きくなったものと推察される。この場合は、試料量を多くするなどの対策が必要と考えられる。V5 により計測した結果については、試料 No.30-88 では回帰直線の切片が負の値となったが、全般に決定係数は 0.9 以上であり、測定誤差の小さいデータが得られた。試料量の影響については、既往の結果⁵⁾では V1・V2 の計測で試料量により

見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係に差がみられたが、本実験の範囲では、V1・V2 の計測でも水セメント比 45% のコンクリートでは差がみられなかった。一方、V3・V4 または V5 によって計測した場合、水セメント比 30% における計測では差がみられたものの、それ以外は大きな差がみられなかった。

(3) 見掛けの降伏値と塑性粘度

2.1.2 項で述べたように、図-9 に示す回帰直線の切片が τ_y 、傾きが η であり、それを整理して一覧表にしたものを表-12 に示す。また、図-10 に、コンクリートの調査・性質と、V1・V2、V3・V4 および V5 の計測結果から得られた $\tau_y \cdot \eta$ との関係を示す。2 章において V_r から求めた $\tau_y \cdot \eta$ との関係と同様に、 τ_y はスランプフロー値と、 η は水セメント比との間に相関がみられた。これは、2.3.4 項で述べたように、 τ_y はフレッシュコンクリートの流動性を、 η はフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性があると考えられる。ただし、V1・V2 の計測結果から得られた τ_y はスランプフロー値と相関が低い結果となり、安定した流動先端速度のデータが得られなかったことによるものと考えられる。一方で、V3・V4 の計測結果から得られた $\tau_y \cdot \eta$ はスランプフロー値と水セメント比との相関が高い結果となった。また、V5 の計測結果から得られた $\tau_y \cdot \eta$ もスランプフロー値と水セメント比との相関が高い結果となり、簡便な測定方法ではあるが概略値を把握するには適用可能な測定方法と考えられる。

3.2.3 検証実験のまとめ

以上の検証実験の結果から、傾斜フロー試験器の終端付近における流動先端速度（V3・V4）を計測する方が、従来のゲート近傍における計測（V1・V2）よりも、測定誤差の小さいデータが得られることがわかった。また、試験器の終端付近で流動先端速度を計測して得られた、見掛けの降伏値はスランブフロー値と、見掛けの塑性粘度は水セメント比との間に高い相関がみられた。これは、2章で述べたように、見掛けの降伏値はフレッシュコンクリートの流動性を、見掛けの塑性粘度はフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性があることを示唆している。しかしながら、試験器終端付近の計測はコンクリートタンクから離れているため、試料量や傾斜角度、コンクリートの降伏値によっては、流動時の高さが不十分となって誤差が大きくなる場合がある。また、コンクリートの流下が途中で止まって計測自体ができなくなる場合もあるので、現場に適用する際は事前に試験練りを行い確認する必要がある。なお、V5による簡便な計測も、適用可能と判断できる結果であった。特に、現場における試験では迅速性が求められるため、有効な測定方法と考えられる。

3.3 改良した傾斜フロー試験の現場適用

3.3.1 実打設コンクリートの概要

(1) コンクリートの使用材料および調査

実打設したコンクリートは、設計基準強度が 42N/mm² の高強度コンクリートであり、セメントに中庸熱ポルトランドセメントを使用し、水セメント比が 41.8%の調査である。表-13 にコンクリートの使用材料、表-14 にコンクリートの調査を示す。なお、試験練りコンクリートの使用材料および調査も同様である。

(2) コンクリートの練混ぜ方法

試験練りコンクリートは、1 パッチ 40ℓ を二軸強制練りミキサ（容量 60ℓ）により 90 秒間練り混ぜた後、5 分間静置してミキサから排出し試験に供した。

実打設したコンクリートは、1 パッチ 2.25m³ および 2.00m³ を二軸強制練りミキサ（容量 3.25m³）によって 45 秒間練り混ぜた後、計 4.25m³ をトラックアジテータに積み込み、現場へ運搬した。運搬時間は 30～40 分である。

3.3.2 適用現場の概要

傾斜フロー試験を試験的に適用した現場は、東京都内の鉄筋コンクリート造集合住宅の工事であり、地中梁のコンクリートを打設する際に試験適用した。打設時期は 9 月であり、打設中の外気温は 24～28℃であった。

3.3.3 測定項目および方法

(1) 試験練りの測定項目

表-9 に示すフレッシュコンクリート試験を実施した。

表-12 検証実験におけるコンクリートの傾斜フロー試験から求めた見掛けの降伏値および塑性粘度

試料 No.	V1・V2		V3・V4		V5	
	τ _y (Pa)	η (Pa・s)	τ _y (Pa)	η (Pa・s)	τ _y (Pa)	η (Pa・s)
45-88	315	12.5	313	5.94	319	9.96
45-50	293	13.6	279	2.90	260	12.3
36-88	136	46.2	147	43.5	114	54.6
36-50	281	28.4	165	39.6	234	32.4
30-88	-79.7	189	108	116	-11.3	165
30-50	272	64.6	160	67.7	198	69.1

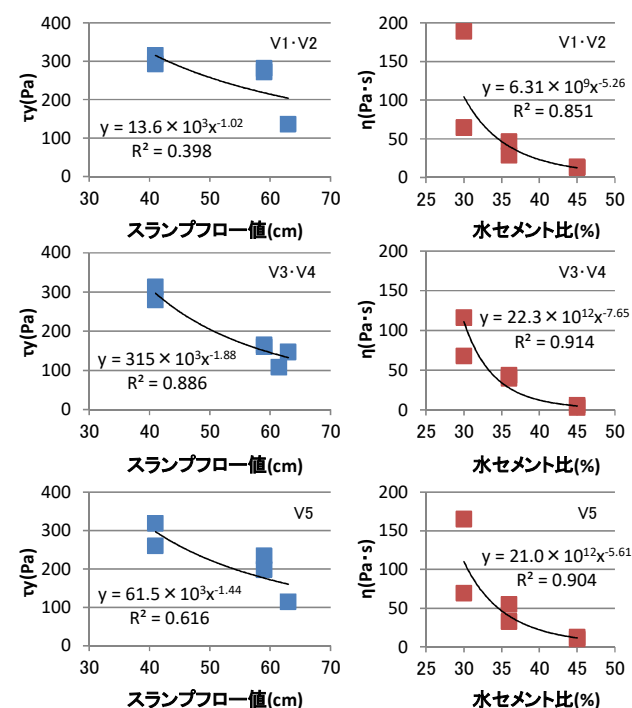


図-10 検証実験におけるコンクリートの調査・性質と見掛けの降伏値・塑性粘度の関係

表-13 実打設コンクリートの使用材料

練混ぜ水 (W)	上水道水
セメント (C)	中庸熱ポルトランドセメント 密度:3.21g/cm ³
細骨材 (S)	千葉県富津市産 山砂 表乾密度:2.61g/cm ³ 粗粒率:2.60
粗骨材 (G)	高知県吾川郡産 石灰岩砕石 表乾密度:2.70g/cm ³ 粒形判定実積率:61.0%
混和剤 (Ad)	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系

表-14 実打設コンクリートの調査*

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)	SL (cm)	Air (%)
			W	C	S	G			
42	41.8	46.7	175	419	809	956	1.05	21	3.0

*記号説明 Fc:設計基準強度, W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, W・C・S・G・Ad:表-13参照, SL:スランブ, Air:空気量

表-15 コンクリートポンプの仕様

ポンプ形式	ピストン式コンクリートポンプ
最大吐出量	100m ³ /hr.
最大吐出圧力	5.6MPa
吐出シリンダサイズ	Φ205×1650mm

試験練りでは、事前にフレッシュコンクリートの状態を確認し、現場で実施する傾斜フロー試験方法を設定するために、流動先端速度は V1・V2, V3・V4, V5 について、傾斜角度は 23°, 26°, 29°, 32° の 4 水準について計測した。なお、試料量は当初 5000cc とする予定であったが、検証実験の結果を踏まえ 6500cc に増量した。

(2) 現場適用の測定項目

表-9 に示すフレッシュコンクリート試験を実施した。現場では、コンクリート受入れ検査を 3 回実施するため、その検査にあわせて傾斜フロー試験を実施した。ただし、傾斜フロー試験は現場での測定であることから、迅速性を考慮して流動先端速度のセンサーによる計測は 1 箇所として (V5 は計測)、傾斜角度は 3 水準とした。また、傾斜フロー試験より得られる見掛けの塑性粘度との関係を確認するため、管内圧力損失を測定した。具体的には、傾斜フロー試験を実施したコンクリートが圧送されている水平配管 (4B 管) の直管部分 (長さ 6m) の管内圧力を計測し、その結果から管内圧力損失を算定した。表-15 に、コンクリートポンプの仕様を示す。

3.3.4 測定結果と考察

表-16 に、フレッシュコンクリート試験の結果を示す。また、表-17 に、傾斜フロー試験における流動先端速度と流動高さの測定結果を、図-11 に、傾斜フロー試験から得られた見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係を、表-18 に、傾斜フロー試験から得られた τ_y および η の一覧を示す。さらに、圧送配管内の圧力計測の結果から得られた管内圧力損失について、図-12 に理論吐出量との関係を、図-13 に η との関係を示す。

(1) 試験練りの結果

コンクリートのスランプおよび空気量ともに管理値である 21±2cm および 3.0±1.5% を満足しており、良好なフレッシュ状態のコンクリートが得られた。傾斜フロー試験の流動先端速度については、V1・V2, V3・V4 および V5 は、すべての試料において傾斜角度が大きくなるほど流動先端速度は速くなり、逆転現象はみられ

ず測定誤差の小さいデータが得られた。見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係については、V1・V2 の決定係数がやや低く 0.9 を下回ったが、V3・V4 と V5 は 0.9 以上となり、検証実験と同様の結果となった。このことから、現場適用の傾斜フロー試験については、流動先端速度の計測は V3・V4 および V5 とすることとした。また、傾斜角度については、23°における試料の流動速度が終端近くで遅くなったことから、現場での計測は傾斜角度 23°を除く 26°, 29°, 32°について計測することとした。

(2) 現場適用の結果

いずれのコンクリートの受入れ検査においても、スランプ、空気量およびコンクリート温度は、管理値である 21±2cm, 3.0±1.5% および 35℃以下を満足し、試験

表-16 実打設コンクリートのフレッシュコンクリート試験結果

試料 No.	測定場所	測定場所温度(℃) /湿度(%)	試料量 (cc)	SL (cm)	SF (cm)	単位容積質量 (kg/m³)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
L	試験室	21 / 60		21.0	37.5	2395	2.4	23
S-1	現場	24 / —	6500	21.0	35.0	2375	2.6	30
S-2	ヤード	24 / —		22.5	41.0	2411	1.7	31
S-3		27 / —		21.5	38.0	2363	3.7	32

*記号説明 試料No.: 測定場所 (試験室: L, 現場: S) - 測定回数 (現場のみ), SL: スランプ, SF: スランプフロー

表-17 実打設コンクリートの傾斜フローによる流動先端速度と流動高さ

試料 No.	角度 (°)	流動先端速度(m/sec)*1					流動高さ(m)*2		
		V1	V2	V3	V4	V5	V1・V2	V3・V4	V5
L	23	0.308	0.312	0.159	0.158	0.233	0.056	0.035	0.046
	26	0.476	0.520	0.215	0.230	0.327	0.056	0.037	0.047
	29	0.537	0.476	0.268	0.255	0.370	0.057	0.035	0.046
	32	0.641	0.575	0.442	0.362	0.508	0.056	0.040	0.048
S-1	26			—	0.125	0.198	0.050	0.035	0.043
	29			—	0.181	0.253	0.055	0.030	0.043
	32			0.260	0.243	0.335	0.055	0.030	0.043
S-2	26			0.157	0.156	0.241	0.055	0.040	0.048
	29			0.271	0.218	0.312	0.065	0.040	0.053
	32			0.320	0.320	0.353	0.060	0.040	0.050
S-3	26			0.176	0.154	0.262	0.050	0.030	0.040
	29			0.257	0.213	0.349	0.045	0.035	0.040
	32			0.384	0.354	0.465	0.050	0.030	0.040

*1 —: 異常値を検出

*2 V1・V2: 第1センサー付近, V3・V4: 第4センサー付近, V5: V1・V2とV3・V4の平均値

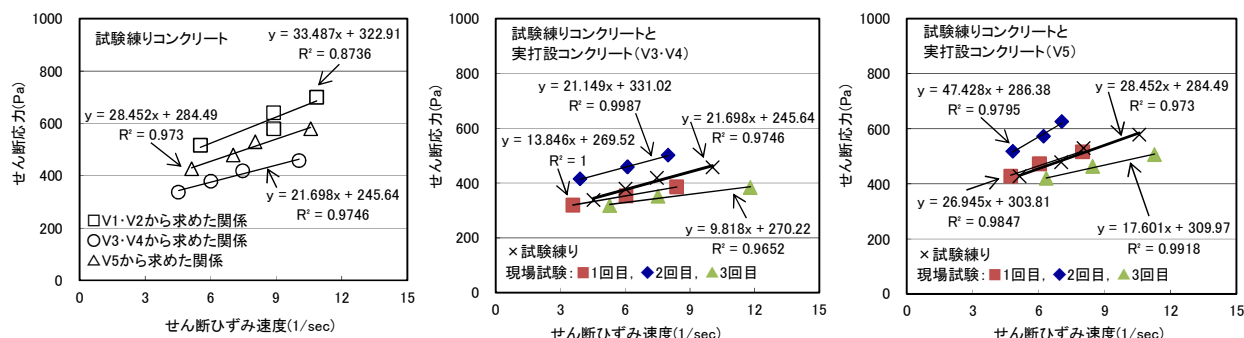


図-11 試験練りと実打設コンクリートにおける見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

練りのコンクリートと同様、良好なフレッシュ状態のコンクリートが得られた。傾斜フロー試験の流動先端速度については、V3・V4 および V5 とともに、すべての試料において傾斜角度が大きくなるほど流動先端速度は速くなり、逆転現象はみられずに測定誤差の小さいデータが得られた。見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係については、V3・V4 および V5 とともに決定係数が 0.9 以上の高い相関を示し、試験練りコンクリートとの関係は実打設コンクリートの 3 回の結果が試験練りコンクリートを中心に上下にばらつく関係となった。スランプ値やスランプフロー値の結果は、いずれのコンクリートとも大きな差がなく τ_y も大きな差はみられないが、目視および手動でコンクリートをかき混ぜた感覚による粘性には差があり η との相関がみられた。これは、後述するが η と管内圧力損失との関係からも同様の傾向がみられた。これらのことから、スランプ試験やスランプフロー試験では評価が難しいコンクリートの粘性を、傾斜フロー試験によって評価できる可能性が示唆された。

管内圧力損失については、図-12 および図-13 に示すように、理論吐出量および η との間に高い相関がみられた。管内圧力損失は吐出量やコンクリートの粘性との相関が高いといわれている⁹⁾ことから、傾斜フロー試験の結果から得られる η は、コンクリートの粘性を評価できる可能性があると考えられる。

3.4 3章のまとめ

以上の結果から、傾斜フロー試験の測定方法については、試験器の終端付近における流動先端速度を計測する方が、従来のゲート近傍における計測よりも測定誤差の小さいデータが得られることがわかった。しかしながら、試験器終端付近の計測はコンクリートタンクから離れていることから、試料量や傾斜角度、コンクリートの降伏値によっては、流動高さが不十分となって誤差が大きくなる場合があり、加えて、コンクリートの流下が途中で止まってしまい計測自体ができなくなる場合もあるので、現場に適用する際は事前に試験練りを行い確認する必要がある。なお、ゲートから終端までの平均速度を手動で計測する簡便な方法も、適用可能と判断できる。特に、現場における試験では迅速性が求められるため、有効な測定方法と考えられる。

また、高強度コンクリートを実打設する現場において、コンクリート受入れ検査時に傾斜フロー試験を試験的に適用した結果、見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係をみると、現場で測定した結果は、試験練りで測定した結果を中心として上下にばらつく関係となった。さらには、現場において管内圧力損失を測定した結果、スランプ試験やスランプフロー試験では評価が難しいフレッシュコンクリートの粘性について評価できる可能性が示唆された。

表-18 試験練りと実打設コンクリートの傾斜フロー試験から求めた見掛けの降伏値および塑性粘度

試料 No.	V1・V2		V3・V4		V5	
	τ_y (Pa)	η (Pa·s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)	τ_y (Pa)	η (Pa·s)
L	323	33.5	246	21.7	285	28.5
S-1	—	—	270	13.8	304	26.9
S-2	—	—	331	21.1	286	47.4
S-3	—	—	270	9.82	310	17.6

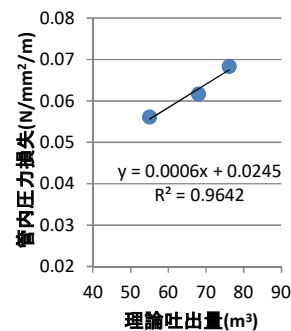


図-12 理論吐出量と管内圧力損失の関係

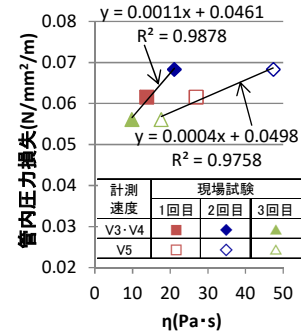


図-13 見掛けの塑性粘度と管内圧力損失の関係

4. まとめ

コンクリートの施工性を評価・管理する上において、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に把握することが重要である。フレッシュコンクリートの流動性状を表すモデルとして、一般的にはビンガム流体モデルが採用されており、降伏値および塑性粘度という 2 つのレオロジー定数によって評価される。そこで、L 型フロー試験器を参考にして、高流動コンクリートだけでなく通常の軟練りコンクリートにも適用できるような傾斜角度が可変の傾斜フロー試験器を考案し、傾斜角度に応じてコンクリートを流動させ、その流動先端速度を計測することにより、コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を直接的に求めることとした。

以下に、この傾斜フロー試験器によりコンクリートの施工性を評価する方法について、通常の強度域から高強度域のコンクリートを対象に実施した試験練り、および実際の現場に適用した結果から得られた知見を示す。

- 1) 測定方法については、試験器の終端付近における流動先端速度を計測する方が、ゲート近傍での計測よりも測定誤差の小さいデータが得られることがわかった。
- 2) 試験器終端付近の計測はコンクリートタンクから離れていることから、試料量や傾斜角度、コンクリートの降伏値によっては、流動高さが不十分となり誤差が大きくなる場合がある。
- 3) 試料量が十分でないと、コンクリートの流下が途中で止まり計測自体ができなくなる場合がある。

- 4) 現場に適用する際は事前に試験練りを行い，試料量や傾斜角度，流動高さなどを確認する必要がある。
- 5) ゲートから終端までの平均速度を手動で計測する簡便な測定方法も適用可能と判断される。特に，現場での試験では迅速性が求められるため，有効な測定方法と考えられる。
- 6) 試験器の終端付近で流動先端速度を計測して得られた見掛けの降伏値はスランブフロー値と，見掛けの塑性粘度は水セメント比との間に高い相関がみられた。
- 7) 高強度コンクリートを実打設する現場において，傾斜フロー試験を試験適用した結果，見掛けのせん断ひずみ速度とせん断応力との関係を見ると，現場で測定した結果は，試験練りで測定した結果を中心として上下にばらつく関係となった。
- 8) 現場で測定した結果，スランブ値やスランブフロー値はいずれのコンクリートも大きな差がなく見掛けの降伏値も大きな差はみられないが，目視および手動でコンクリートをかき混ぜた感覚による粘性には差があり見掛けの塑性粘度との相関がみられた。
- 9) 現場で測定した管内圧力損失と見掛けの塑性粘度との間には高い相関がみられ，傾斜フロー試験の結果から得られる見掛けの塑性粘度はコンクリートの粘性を評価できる可能性があると考えられる。

以上より，傾斜フロー試験器を用いて精度よくコンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度を測定する方法を構築することができた。また，見掛けの降伏値によりスランブ試験やスランブフロー試験と同様にフレッシュコンクリートの流動性を評価することができ，さらには，見掛けの塑性粘度によりスランブ試験やスランブフロー試験では評価が難しいフレッシュコンクリートの粘性を評価できる可能性が示唆された。

今後は，更なる傾斜フロー試験データの蓄積を図り，スランブ試験やスランブフロー試験の結果と比較してフレッシュコンクリートの流動性の許容範囲を設定す

るとともに，現場における合理的な試験方法の確立を目指す。また，傾斜フロー試験から得られる見掛けの塑性粘度がフレッシュコンクリートの粘性を定量評価できるか，実大規模の圧送実験を行って検証していく予定である。

参考文献

- 1) 岸谷孝一ほか：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定，日本建築学会論文報告集，Vol.305，pp.1-8，1981.7
- 2) 呉相均ほか：円柱回転型レオメータによるビンガム体のレオロジー特性評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.337-342，1998.6
- 3) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートのレオロジー定数簡易推定法に関する一考察，日本建築学会東海支部研究報告，Vol.30，pp.1-4，1992.2
- 4) 谷川恭雄監修：フレッシュコンクリートの流動特性とその予測，セメントジャーナル社，pp.9-21,41-42，2004.9
- 5) 笹倉博行ほか：フレッシュコンクリートの傾斜フロー試験器によるレオロジー定数に及ぼす調合の影響，日本建築学会技術報告集，第 19 巻，第 42 号，pp.387-392，2013.6
- 6) 日本コンクリート工学協会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.8-12，1998.12
- 7) 笹倉博行ほか：傾斜フロー試験器によるフレッシュコンクリートの流動性評価に関する実験，日本建築学会技術報告集，第 18 巻，第 36 号，pp.11-14，2012.2
- 8) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，pp.70-74，1996.4
- 9) 和美廣喜ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.466，pp.11-20，1994.12