

論文 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

梶田 秀幸^{*1}・梶田 佳寛^{*2}・笹倉 博行^{*3}・伊達 信之^{*4}

要旨：通常の強度域から高強度域のコンクリートを対象に、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を安定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。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り、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。この測定方法によって得られた見掛けの降伏値および塑性粘度は、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。

キーワード：施工性、ビンガム流体、降伏値、塑性粘度、傾斜角度、流動速度

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は重要である。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、ビンガム流体モデルが一般的に用いられており、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ックスのレオロジー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定数の測定は困難である⁵⁾。

実際の工事においては、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）により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ためには、L型フロー試験が有効とされている⁴⁾。しかし、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。

筆者らは、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てコンクリートを流下させ、その流動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た^{5,7)}。しかしながら、測定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望まれる。

そこで、通常の強度域から高強度域のコンクリートを対象に、既往の傾斜フロー試験器の測定^{5,7)}により得られる測定結果を安定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。なお、傾斜フロー試験器は、当初、垂直のコンクリート試料タンクを有していたが、それを斜面に沿ったものとした。その際に、コンクリート試料の量は当初の量と同じ8820ccとしたが、流動開始時の高さを低くして、すぐに安定した流れ（ほぼ一定の流動高さ）になるように、試料の量を5000ccと少なくした場合についても検討した。

2. 傾斜フロー試験の概要

2.1 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

*1 前田建設工業（株） 技術研究所 材料研究室 室長 （正会員）

*2 日本大学 理工学部建築学科 特任教授 工博 （正会員）

*3 （株）ニューテック 代表取締役社長 博士（工学） （正会員）

*4 （株）ニューテック 技術第二部 （正会員）

-1208-

3.3 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V3、後者をV4と略記する）を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 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。通常、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）を求めるが、表－5にはV1～V4の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、C36-88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とと言える。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、C45では、試料量8820cc、5000ccともに同じ傾斜角度で計測できたものの、C36とC30では、傾斜角度が小さい場合、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。

4.2 流動先端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流動先端速度とせん断応力の関係を示す。また、図中に流動先端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、流動先端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⁾から矛盾はない。また、V1・V2の τ_y と η は、既往の結果^{5,7)}と比較し、ほぼ同様の値となっている。試料量の違いについては、流動先端速度とせん断応力の関係に大きな差はみられず、回帰直線も類似の式となっている。しかし、C30-88のV1・V2は、 τ_y が負の値となっており、レオロジー的な観点からは矛盾が生じている。さらに、V3やV4の τ_y をみると、負の値から正の値へと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様の傾向がみられる。 η は、顕著ではないものの、V3やV4ではV1・V2に比べ小さい値となっている試料が多い。

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 (℃)
C45-88	45	8820	22.0	38.0	2330	4.4	18
C45-50		5000	22.0	38.5	2324	4.5	17
C36-88	36	8820	—	52.5	2312	5.9	20
C36-50		5000	—	50.5	2353	4.3	19
C30-88	30	8820	—	64.0	2356	4.8	20
C30-50		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	V3	V4	
			0.185	0.235	0.335	0.465	
C45-88	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	
C45-50	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	
C36-88	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	
C36-50	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	
C30-88	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	
C30-50	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～V4の下段の数字はゲートからの距離(m)

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・V2		V3		V4	
		τ_y (Pa)	η (Pa・s/m)	τ_y (Pa)	η (Pa・s/m)	τ_y (Pa)	η (Pa・s/m)
C45-88	8820	218	375	288	360	348	213
C45-50	5000	176	372	225	317	251	244
C36-88	8820	106	849	176	827	238	601
C36-50	5000	152	557	135	822	151	910
C30-88	8820	-29	1724	22	1880	118	1540
C30-50	5000	90	1157	118	1382	147	1485

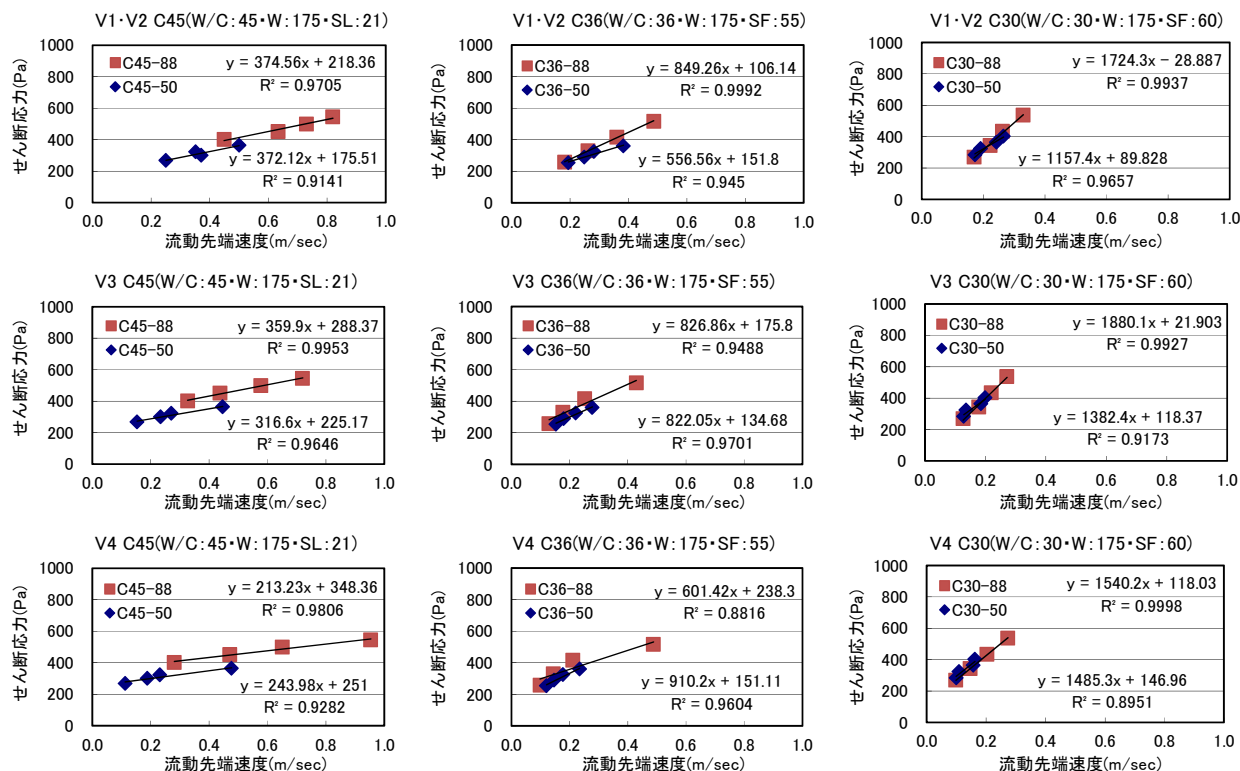


図-2 コンクリートの流動先端速度とせん断応力の関係

4.3 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（V3 および V4 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 V4 にかけて徐々に流動先端速度は小さくなる傾向にあり、V3 と V4 では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て、その一定となる速度を求めるため、測定結果から(2)式のように指数近似するとして V_r （終端速度）を推定した。

$$V = p \times e^{-qx} + V_r \quad (2)$$

ここに、 x : ゲートから測定ポイントまでの距離 (cm)

V_r : 終端速度 (cm/sec)

p, q : 実験定数

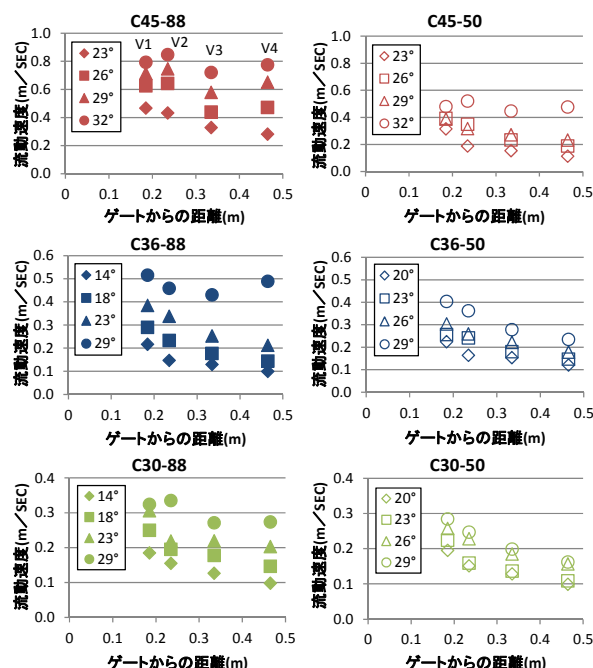


図-3 測定ポイントと流動先端速度の関係

表-7 に、 V_r 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 V_r を推定できたが、C36-88 の傾斜角度 29° の V_r 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、V4 の値が V3 よりも大きいためであるが、V3 および V4 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ことから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。

4.4 Vr より求めたレオロジー定数

図-5 に、Vr の流動先端速度とせん断応力の関係を、表-7 に、Vr より求めた 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 の流動先端速度とせん断応力の関係をみると、図-2 に示す V1・V2 に比べて一部の試料(C36-88, C30-88)を除き決定係数は高くなっている。また、V3 や V4 も、V1・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・V2 の測定ポイントがゲートに近いため、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・V2 の方が高い決定係数となっている試料 C36-88 は、前節で述べたように、傾斜角度 29° の試料で V4 が V3 よりも大きい結果となっているためである。一方の C30-88 は、V1・V2 の方が Vr や V3 よりも決定係数はやや大きい、

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 (°)	Vr (m/sec)	平均流動高さ (m)	レオロジー定数	
					τ_y (Pa)	η (Pa·s/m)
C45-88	8820	23	0.204	0.045	344	264
		26	0.416			
		29	0.608			
		32	0.737			
C45-50	5000	23	(0.126)	0.030	278	186
		26	0.122			
		29	0.225			
		32	0.456			
C36-88	8820	14	0.107	0.047	249	607
		18	0.130			
		23	0.168			
		29	0.460			
C36-50	5000	20	(0.128)	0.032	249	592
		23	0.063			
		26	0.138			
		29	0.177			
C30-88	8820	14	0.074	0.048	141	1505
		18	0.149			
		23	0.211			
		29	0.244			
C30-50	5000	20	0.093	0.036	58	2394
		23	0.113			
		26	0.126			
		29	(0.124)			

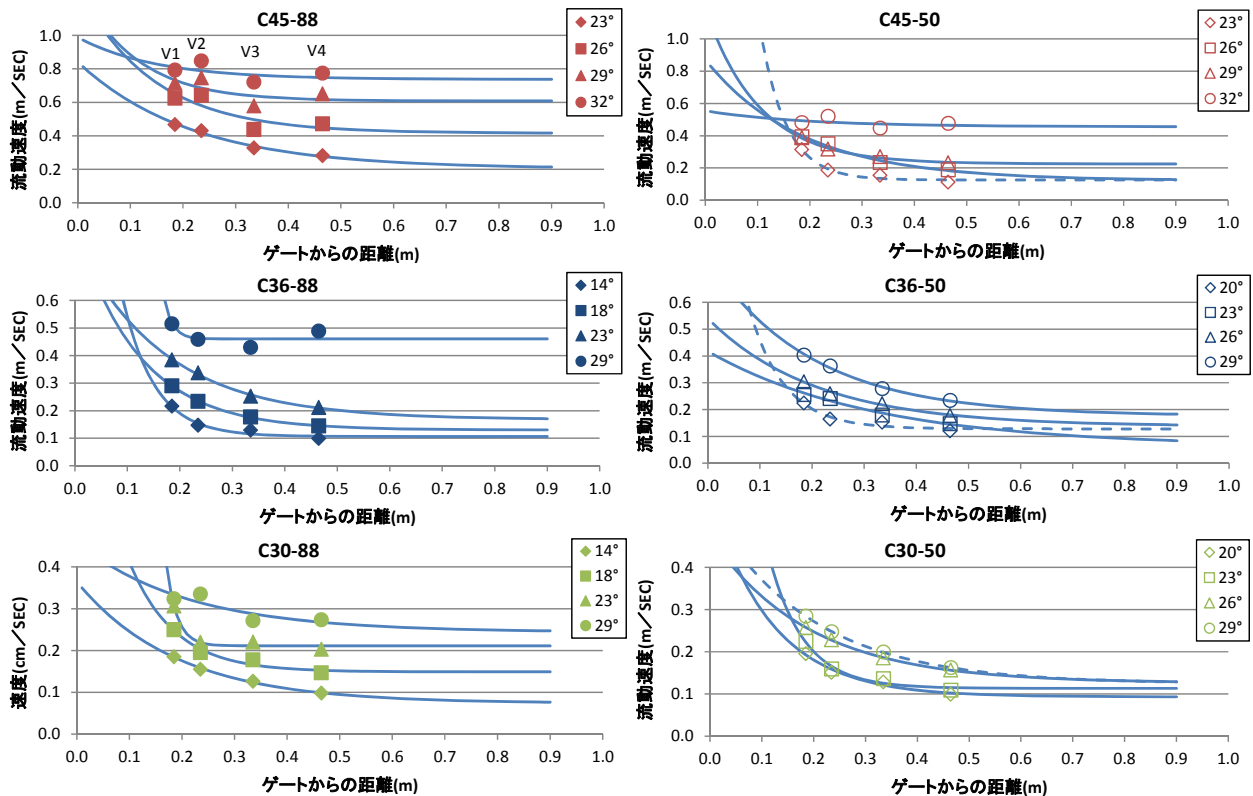


図-4 測定ポイントと流動先端速度の関係

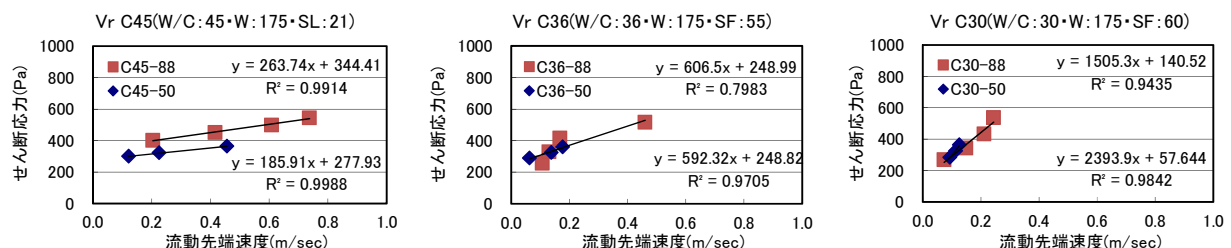


図-5 Vr の流動先端速度とせん断応力の関係

見掛けの降伏値が負の値となっている。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、前節で述べた逆転現象が生じ、求めるレオロジー定数の誤差は大きくなってしまふ可能性があると考えられる。

図-6に、コンクリートの調査・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、水セメント比は η との間に相関がみられた。しかし、C30の調査は、他の調査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、C30-50が他の試料と比べて傾向が異なる。これは、C30-50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ため、求めたレオロジー定数の推定誤差が大きくなったものと推察される。そこで、C30-50を除き、コンクリートの調査・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。

5. 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。なお、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。今後は、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、本試験の新しい測定方法を構築したい。

また、本試験の可能性として、同一の試験器を用い、コンクリートだけでなく、コンクリートを構成するマトリクスであるモルタルおよびセメントペーストの見掛けの降伏値および塑性粘度を求めることもできると考えら

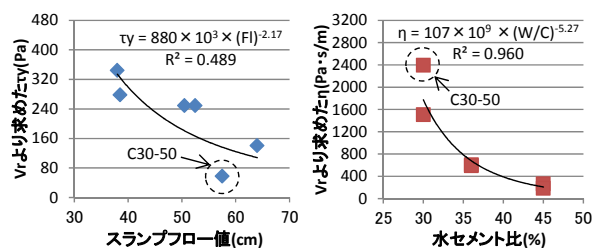


図-6 コンクリートの調査・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係

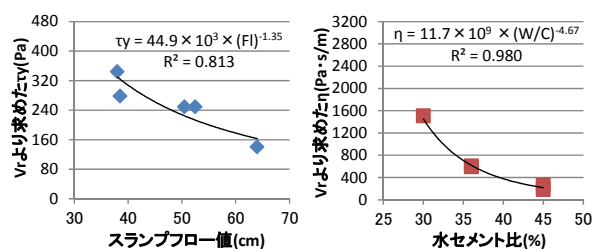


図-7 C30-50を除いたコンクリートの調査・性質と V_r より求めたレオロジー定数の関係

れる。さらには、水のような流体についても、同様の試験器および測定方法によって、見掛けの降伏値および塑性粘度を求めることができると想定される。コンクリートの新しい測定方法の構築と併せて、今後の課題である。

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：円柱旋回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査の影響，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