

論文

[1019] 超高強度コンクリートのワーカビリティ評価手法に関する研究

正会員○寺西 浩司（前田建設工業技術研究所）

正会員 谷川 恭雄（名古屋大学建築学科）

正会員 森 博嗣（名古屋大学建築学科）

正会員 江口 清（前田建設工業技術研究所）

1. まえがき

近年、多様化するRC建築物のニーズに応え、高強度、超高強度、高流動性コンクリートなど様々な新しいコンクリートが開発され、実用に供されつつある。しかし、これらのコンクリートの流動性状は通常のコンクリートとは大きく異なるため、従来の経験的な試験方法であるスランプ試験によってはその性状を正確に評価することが困難であり、コンクリートの施工性能を管理するための新しい指標が必要となりつつある。一方、コンクリートをビンガムモデルと見なし、その流動性を降伏値と塑性粘度という2つのレオロジー定数で表現することを試みた研究が数多く報告されているが〔1〕、回転粘度計、球引上げ粘度計、平行プラストメータなど、レオロジー定数を直接測定する試験方法は、装置や測定条件が複雑な上、コンクリートを対象とする場合には精度の点で問題がある。

本研究では、上記の新しいコンクリートを含めた軟練りコンクリートの流動性を合理的かつ包括的に評価できる測定手法の確立を目的として、コンクリートが粗い鉄筋の網を透過する際の速度から降伏値と粘性に関係する2つの定数を求め、その流動性を評価する簡易な機構の試験方法を提案し、主としてシリカフェームを混入した低水セメント比のコンクリートについて、その適用性を検討した。

2. 実験概要

実験で使用したコンクリートの実験条件および調合表を、それぞれ表-1および表-2に示す。実験は水結合材比（WCシリーズ）、単位水量（Wシリーズ）、スランプ（SLシリーズ）および練上りからの経過時間（TIシリーズ）を主要因として4シリーズ、計51調合のコンクリートを用いて実施した。SL-HとSL-O以外の調合はシリカフェームを単位セメント量の15%内割で混入した超高強度コンクリートで、圧縮強度は $f_c=900\sim1300\text{kgf/cm}^2$ 程度を目標とした。WCシリーズでは単位水量を 150kg/m^3 の一定とし、水結合材比を17～30%の範囲で変化させており、Wシリーズでは水結合材比を25, 21および19%の3水準とし、単位水量を $135\sim195\text{kg/m}^3$ の範囲で 15kg/m^3 おきに变化させ

表-1 実験条件

実験要因	調合名	水結合材比(%)	単位水量(kg/m^3)	スランプ(cm)	経過時間(min)
水結合材比 (WC)	WC-I	25, 23, 21, 19	150	24 $\pm$ 1	
	WC-II	30, 25, 21, 19, 17			
単位水量 (W)	W-25	25	195, 180, 165, 150, 135	24 $\pm$ 1	
	W-21	21			
	W-19	19			
スランプ (SL)	SL-U	21	150	26, 24, 22, 19	
	SL-H	40	165	24, 22, 19, 15	
	SL-O	50	180	24, 23, 21, 19, 14	
経時変化 (TI)	TI-25	25	150	26*	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
	TI-21	21		25*	

*練上り時のスランプ値を示す。

ている。また、両シリーズともスランプ値は $24.0\pm1.0\text{cm}$ とした。SLシリーズではSL-Uが超高強度($f_c=1100\text{kgf/cm}^2$ 程度)、SL-Hが高強度($f_c=600\text{kgf/cm}^2$ 程度)、SL-Oが低強度($f_c=300\text{kgf/cm}^2$ 程度)とした。

cm²程度), SL-0が普通強度 (fc=400kgf/cm²程度) のコンクリートを想定しており、スランプ値を14~26cmの範囲で変化させた。T Iシリーズでは水結合材比を25および21%の2水準, 単位水量を150 kg/m³の一定とした。なお、スランプは高性能A E減水剤の添加量により調整し、SL-HおよびSL-0以外の調合で

は単位粗骨材量をかさ容積 (0.55m³/m³ 一定) により決定した。コンクリート用材料には、普通ポルトランドセメント, 大井川産川砂, 秩父産砕石 (最大寸法20mm) を用い、シリカフュームは平均粒径0.1μm程度の粉末状のものを使用した。コンクリートの混練には水平二軸強制練りミキサー (容積100ℓ) を使用し、材料投入後3分間空練りし、混練水を加えた後に5分間本練りを行った。T Iシリーズについては練上がり後コンクリートを可傾式ミキサーに移し、2 rpm で回転したまま15分おきに90分まで各種の測定を行った。

図-1に試作した流動性試験装置を示す。本装置は、コンクリート投入容器 (容積約15ℓ), 5φの鉄筋の網 (以下、メッシュという) およびコンクリート受皿で構成され、それぞれ引張型ロードセル (最大20kgf) によって3点支持されており、重量を経時的に測定できるような機構になっている。メッシュの間隔は粗骨材最大寸法とのバランスを考え50mmピッチとした。投入容器下部のフタを開けコンクリートが流下し始めた時点から、投入容器, メッシュ, 受皿上それぞれの重量を変化がなくなるまで60~120秒間程度測定した。また、比較のために、スランプ試験によるスランプ値とスランプフロー値, Lフロー試験によるLフロー値, Lスランプ値, Lフロー速度 (流動開始から流動停止までの平均フロー速度) を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 測定値の理論的背景

本試験によれば、各容器内のコンクリート重量の時間変化曲線として、一般に図-2に示すような測定結果が得られる。メッシュ上のコンクリート重量W_Mの最大時以降の曲線は次式によ

表-2 調合表

series	W/C*	W	C	S	G	CSF	HAE	series	W/C*	W	C	S	G	CSF	HAE
WC-I-25	25	150	510	811	859	90	3.5	W-19-195	19	195	872	460	716	154	4.0
WC-I-23	23	150	554	765	859	98	3.5	W-19-180	19	180	805	504	784	142	4.0
WC-I-21	21	150	607	711	859	107	3.6	W-19-165	19	165	738	547	852	130	4.0
WC-I-19	19	150	671	645	859	118	4.0	W-19-150	19	150	671	591	920	118	4.5
WC-II-30	30	150	425	934	835	75	2.5	W-19-135	19	135	604	634	988	107	6.0
WC-II-25	25	150	510	846	835	90	2.8	SL-U-26	21	150	607	716	859	107	5.0
WC-II-21	21	150	607	745	835	107	3.4	SL-U-24	21	150	607	716	859	107	3.5
WC-II-19	19	150	671	678	835	118	4.2	SL-U-22	21	150	607	716	859	107	3.0
WC-II-17	17	150	750	596	835	132	6.0	SL-U-19	21	150	607	716	859	107	2.5
W-25-195	25	195	663	547	852	117	2.0	SL-H-24	40	165	412	981	843	-	1.8
W-25-180	25	180	612	584	909	108	2.2	SL-H-22	40	165	412	981	843	-	1.2
W-25-165	25	165	561	621	967	99	2.8	SL-H-19	40	165	412	981	843	-	1.0
W-25-150	25	150	510	658	1024	90	3.0	SL-H-15	40	165	412	981	843	-	0.8
W-25-135	25	135	459	695	1082	81	3.5	SL-O-24	50	180	360	902	929	-	1.0
W-21-195	21	195	789	409	859	139	2.8	SL-O-23	50	180	360	902	929	-	0.6
W-21-180	21	180	729	511	859	129	2.8	SL-O-21	50	180	360	902	929	-	0.4
W-21-165	21	165	668	614	859	118	3.2	SL-O-19	50	180	360	902	929	-	0.3
W-21-150	21	150	607	716	859	107	3.6	SL-O-14	50	180	360	902	929	-	0.1
W-21-135	21	135	546	819	859	96	4.2	TI-25	25	150	510	817	859	90	3.0
								TI-21	21	150	607	716	859	107	3.6

W/C*: 水結合材比 (%)

W, C, S, G: (kg/m³)

CSF: シリカフューム混入量 (kg/m³)

HAE: 高性能A E減水剤添加量 (%)

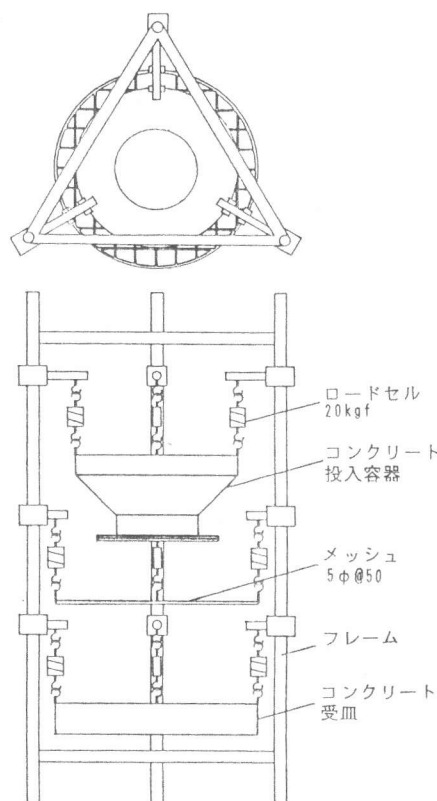


図-1 流動性試験装置

て近似できる（相関係数の平均 $R=0.96$ ）。

$$W_H = a e^{bt} + c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W_H : メッシュ上のコンクリート重量 (kg)

t : 流動時間 (sec)

a, b, c : 実験定数 ($a < 0, -1 < b < 0, c > 0$)

ここで、図-3 に示すように、総重量 W のコンクリートのうち、メッシュ上の透過面積 A にコンクリートが W_H 載っており、単位時間当たり ΔW_L だけメッシュの下に透過している状態を考える。 W_H は式(1)で表され、また、 $W_L = W - W_H$ であるから ΔW_L は以下ようになる。

$$\Delta W_L = dW_L / dt = -a b e^{bt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)(2)を整理すると、 W_H と W_L の関係は、次式のように表現でき、図-4 に示すような線形の関係がなりたつことが分かる。

$$W_H = T_y + I \Delta W_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $T_y = c$, $I = -1/b$

一方、ビンガムモデルの構成則は、一般に次式の表現となる[2]。

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 τ : セン断応力

$\dot{\gamma}$: ひずみ速度

τ_y : 降伏値

η : 塑性粘度

メッシュの透過面積が一定であると仮定すると、透過断面に働くせん断力は自重 W_H に、また、ひずみ速度は透過重量 ΔW_L に線形比例すると考えられる。つまり、 $\tau = \alpha W_H$, $\dot{\gamma} = \beta \Delta W_L$ であり、式(4)より

$$\alpha W_H = \tau_y + \eta \beta \Delta W_L \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 α, β は実験定数

となり、式(3)との比較により、 $T_y = \tau_y / \alpha$, $I = \eta \beta / \alpha$ が得られる。このように T_y, I はそれぞれ降伏値と塑性粘度に関係が深い係数であり、 W_H および ΔW_L の1回の時間変化の測定から、 T_y および I の両者を決定できる点が本試験方法の特徴である。以下、本試験より得られた T_y および I (表-3 参照) を降伏値および粘性と呼び、考察に用いる。

3.2 スランプおよびL型フローとの比較

図-5 および図-6 は、それぞれスランプ値およびスランプフロー値と降伏値 T_y の関係を示したものである。降伏値 T_y は、コンクリートの流動停止時の形状に影響する要因であり、スランプ、L型フロー等の変形測定値は主として T_y により支配される。同図によると、 T_y とスランプ値の間には2次の相関が認められ、スランプフロー値については1次の相関が認められる。

図-7 に T_y, I と L フロー値、図-8 に T_y, I と L フロー速度の関係を示す。これらの図は、L フロー値および L フロー速度を目的変数、 T_y, I を説明変数とし、全試料について2次の重回

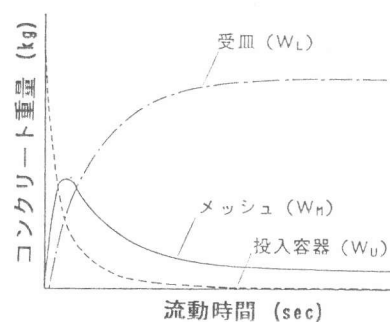


図-2 各容器中のコンクリート重量の時間変化曲線

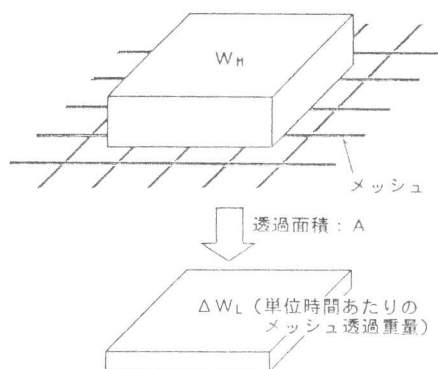


図-3 解析の概念

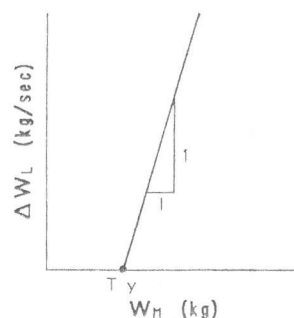


図-4 ΔW_L と W_H の関係

帰により求めた曲面である。Lフロー値は、スランプ値と同様に粘性Iにかかわらず、降伏値 T_y のみに支配される。また、Lフロー速度は、逆に主としてIに支配される。

SLシリーズについて、スランプ値と T_y およびIの関係を図-9に示す。また、図-10は各シリーズの T_y とIの関係を示したものである。SL-U, SL-H,

表-3 実験結果

series	T_y	I	SI	S-fl	L-SI	L-fl	L-v	series	T_y	I	SI	S-fl	L-SI	L-fl	L-v
WC-I-25	2.49	2.08	24.8	47.9	33.0	54.0	1.29	SL-U-22	5.98	2.48	21.9	36.0	30.0	35.0	1.91
WC-I-23	3.20	2.72	22.8	42.4	31.5	40.0	1.42	SL-U-19	19.83	1.27	18.7	27.0	25.5	18.0	1.74
WC-I-21	0.43	2.66	23.8	46.9	33.0	50.0	1.09	SL-H-24	2.76	2.34	24.2	62.0	35.0	65.0	1.06
WC-I-19	7.36	3.22	23.2	40.3	32.5	43.0	1.12	SL-H-22	10.44	1.60	22.0	35.1	25.5	22.0	1.95
WC-II-30	5.33	1.79	23.2	42.4	31.0	38.0	2.13	SL-H-19	20.95	1.04	19.2	28.5	19.0	15.0	2.03
WC-II-25	1.80	1.97	24.6	47.7	32.0	57.0	1.53	SL-H-15	24.58	0.61	15.0	24.4	16.5	11.5	2.14
WC-II-21	0.72	2.33	25.0	55.9	33.5	65.0	0.89	SL-O-24	5.64	0.91	23.2	43.7	30.5	39.0	3.46
WC-II-19	4.74	3.57	24.7	47.2	32.5	55.0	0.81	SL-O-23	10.75	0.58	22.6	41.8	32.0	36.0	3.13
WC-II-17	11.80	2.57	24.0	40.8	28.5	30.0	0.71	SL-O-21	14.09	0.66	20.7	34.3	27.5	25.0	2.87
W-25-195	0.87	0.40	23.3	44.5	32.0	42.5	3.28	SL-O-19	17.85	0.55	19.0	30.7	23.5	17.0	2.56
W-25-180	0.03	0.40	23.9	50.7	33.5	54.0	2.60	SL-O-14	24.38	0.90	14.3	22.5	15.5	12.0	2.14
W-25-165	0.28	1.29	23.8	59.1	34.0	65.0	1.44	TI-25-0	0.33	1.46	25.5	55.1	34.0	62.0	1.37
W-25-150	0.91	1.23	23.3	54.1	34.0	69.0	1.14	TI-25-15	1.14	2.22	24.4	50.4	32.0	55.0	1.38
W-25-135	-0.47	0.59	24.2	60.0	33.5	61.5	0.63	TI-25-30	3.81	2.11	23.7	45.6	31.0	52.0	1.19
W-21-195	2.21	2.12	24.3	45.0	31.0	44.5	2.06	TI-25-45	2.67	2.96	23.6	46.0	30.5	44.0	1.20
W-21-180	0.87	2.12	24.5	44.1	30.0	49.0	1.90	TI-25-60	5.19	2.63	22.8	42.4	27.0	30.0	1.04
W-21-165	1.10	2.13	24.0	43.9	31.5	45.0	1.77	TI-25-75	7.69	2.59	20.7	34.3	19.0	17.0	0.55
W-21-150	2.12	3.03	24.5	46.6	32.0	49.0	1.29	TI-25-90	5.55	2.35	19.9	31.8	11.5	14.0	0.87
W-21-135	5.05	4.44	24.6	47.2	30.5	41.0	0.93	TI-21-0	0.18	1.51	25.2	52.9	34.0	70.0	0.94
W-19-195	0.42	2.71	23.8	42.2	31.0	43.5	1.13	TI-21-15	2.69	4.57	24.6	48.6	33.0	60.0	0.77
W-19-180	0.22	2.69	24.4	45.4	32.5	50.0	1.07	TI-21-30	2.58	3.85	25.0	55.3	32.0	58.0	0.65
W-19-165	3.93	3.19	23.8	41.0	33.0	50.0	1.17	TI-21-45	3.34	4.20	24.0	50.9	30.0	40.0	0.43
W-19-150	10.55	3.66	23.2	40.8	32.0	49.0	1.18	TI-21-60	3.57	3.91	23.6	47.7	19.5	24.0	0.22
W-19-135	16.60	1.32	23.4	42.8	32.5	47.5	0.74	TI-21-75	4.31	4.41	23.2	42.1	17.5	29.0	0.33
SL-U-26	0.48	3.18	26.3	57.5	33.5	62.0	0.69	TI-21-90	4.79	6.21	21.2	40.8	15.0	25.0	0.28
SL-U-24	2.90	3.07	23.8	42.8	31.5	41.0	1.27								

T_y :降伏値(kg) I:粘性(sec) SI:スランプ値(cm) L-fl:Lフロー値(cm) L-v:Lフロー速度(cm/sec)

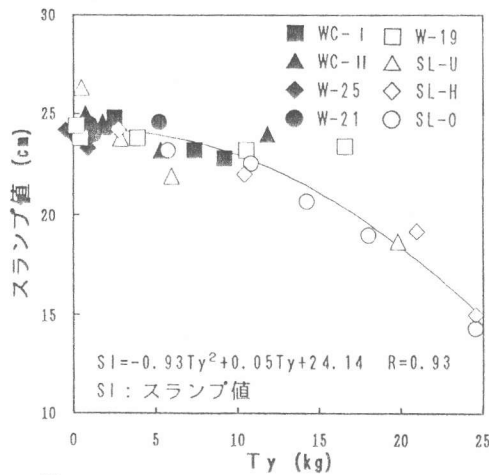


図-5 スランプ値と降伏値 T_y の関係

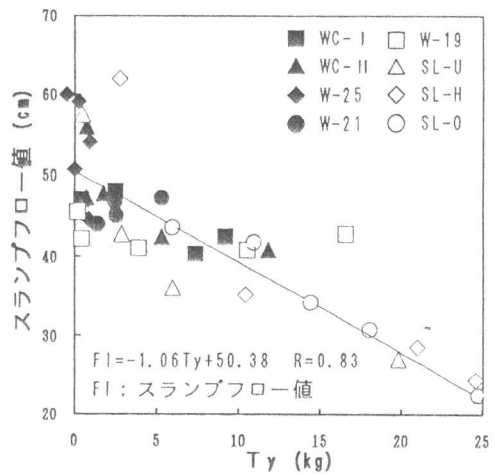


図-6 スランプフロー値と降伏値 T_y の関係

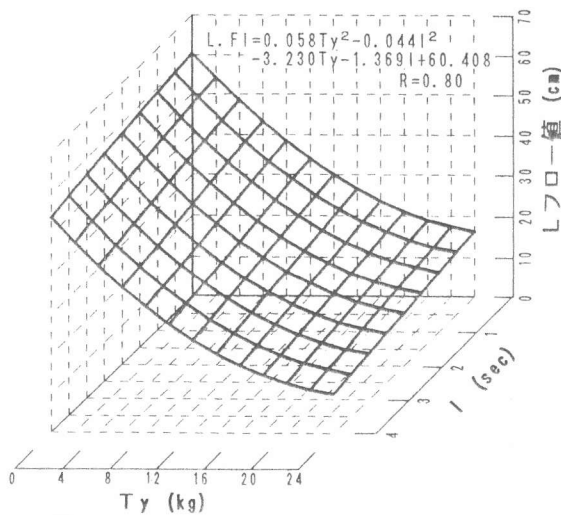


図-7 Lフロー値に与える降伏値 T_y および粘性Iの影響

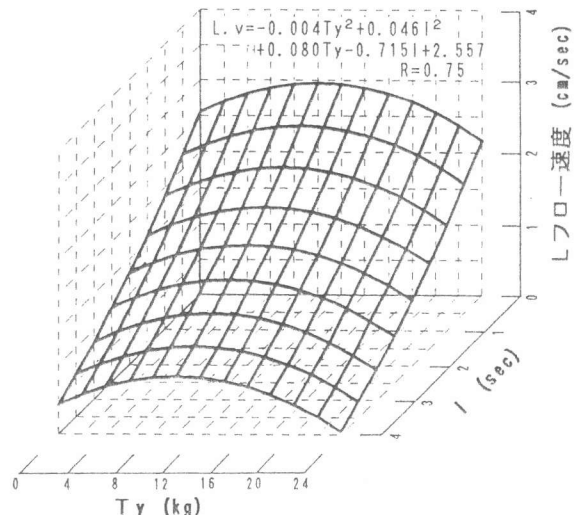


図-8 Lフロー速度に与える降伏値 T_y および粘性Iの影響

SL-0はそれぞれ超高強度、高強度、普通コンクリートを想定したフレッシュコンクリートである。降伏値 T_y についてはシリーズに関係なくスランブ値に対してほぼ一定の値になっているのに対して、粘性 I については高強度になるほど値が大きくなり、スランブ値の増加にともなって差が大きくなっている。SL-0（普通コンクリート）では、スランブ値にかかわらず粘性 I はほぼ一定であり、この種のコンクリートの流動性は、スランブ値のみで比較しても支障がない。

3.3 降伏値および粘性の経時変化

図-11に TI シリーズより得られた練上がり後の T_y および I の経時変化に関する実験結果を示す。また、図-12は、 T_y と I の関係を示したものである。 T_y は時間の経過とともに徐々に大きくなっていくものの変化は少ない。 $TI-25$ ($W/(C+SF)=25\%$)では、練上がり直後と75~90分において粘性 I が大きくなっており、一般的な高強度コンクリートの経時変化特性をよく表している。この種のコンクリートでは T_y より I の増加傾向が顕著にみとめられる。

3.4 降伏値および粘性に及ぼす調合の影響

図-13に W シリーズにより得られた単位水量と T_y および I の関係を示す。また、図-14に WC シリーズにより得られた水結合材比と T_y および I の関係を示す。これらの図より明らかなように、単位水量、水結合材比が小さくなるほど T_y が大きくなる傾向がある。同一スランブ値であるにもかかわらず T_y が変化するのは、練

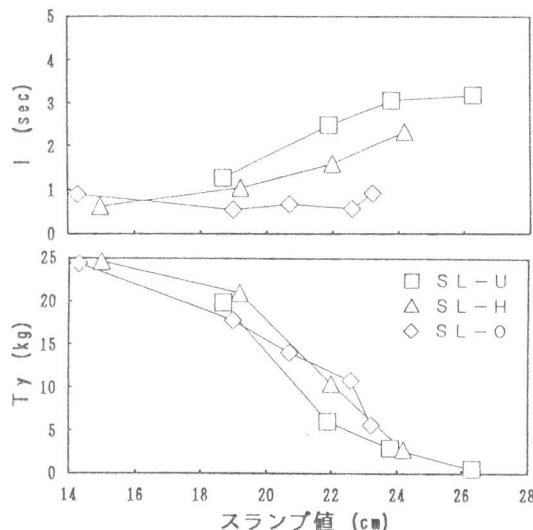


図-9 降伏値 T_y および粘性 I とスランブ値の関係

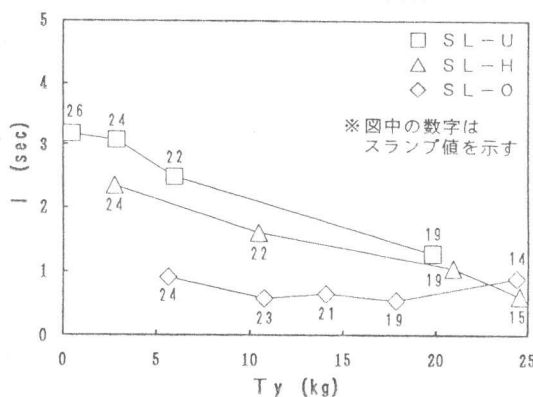


図-10 スランブ値による降伏値 T_y および粘性 I の変化

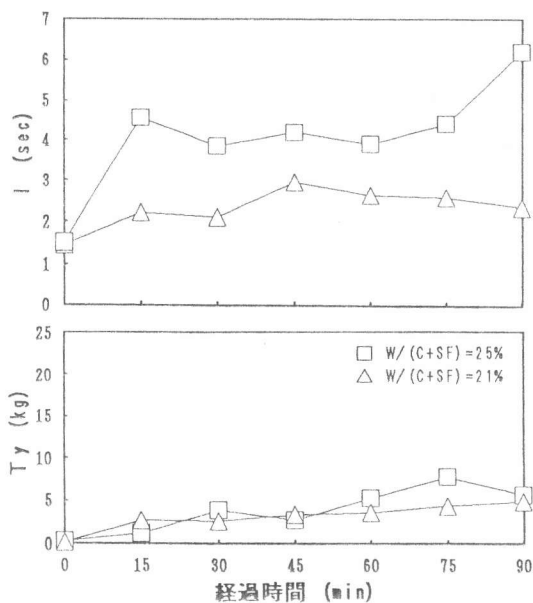


図-11 降伏値 T_y および粘性 I と経過時間の関係

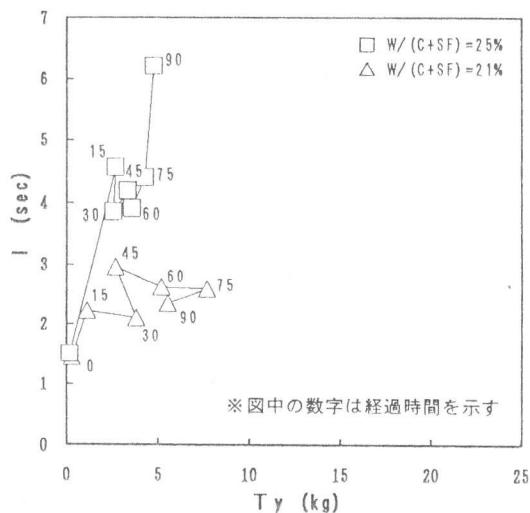


図-12 降伏値 T_y および粘性 I の経時変化

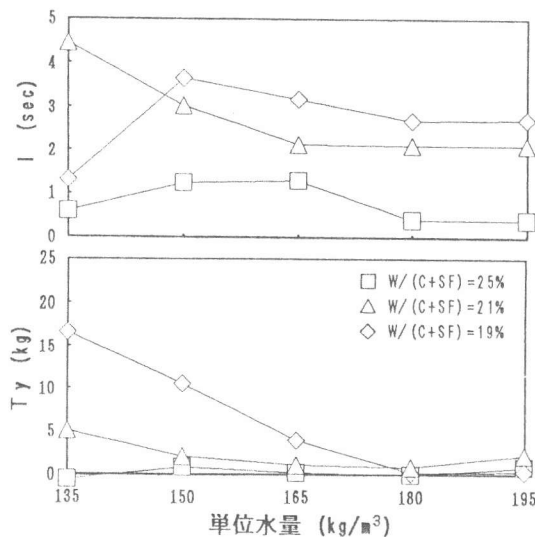


図-13 降伏値 T_y および粘性 I と単位水量の関係

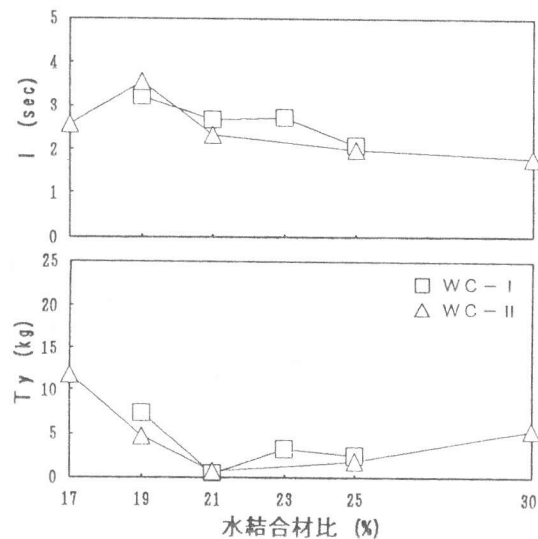


図-14 降伏値 T_y および粘性 I と水結合材比の関係

混ぜの限界に近い調合で、マトリックスモルタルが他の物質に付着する力が増加し、鉄筋間の透過に対する抵抗が増すためではないかと考えられる。一方、 I については、単位水量にはあまり影響を受けず、水結合材比が小さくなるにつれて大きくなる傾向がみられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートが鉄筋の網を透過する速度を測定する試験方法を試行し、主に低水セメント比コンクリートの流動性の測定を行った。本実験によって得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 本試験方法は、降伏値と粘性に関する性質を比較的簡便に数値化することができ、コンクリートの流動性状の試験方法として十分な実用性がある。
- 2) スランプ、L型フロー等の変形測定値は、降伏値 T_y によってほぼ説明することができ、粘性 I の影響は小さい。したがって、この種の試験だけでは新しいコンクリートの流動性の正確な評価は期待できない。
- 3) 粘性は高強度コンクリートになるほど大きくなり、また、練混ぜの限界に近い低水結合材比の範囲では、鉄筋間を透過する際の抵抗性が通常のものとは異なることが予測される。
- 4) 高強度コンクリートは練上がり後、時間が経つにつれて粘性 I が増大するが、降伏値 T_y の増加率は比較的小さい。

今後、試験装置の簡易化と測定精度の改善を図るとともに、振動時の性状、分離抵抗性、充填性等についても検討する予定である。

本研究を行うにあたって、名古屋大学大学院生、渡辺健治氏に御協力を頂いた。ここに付記して感謝の意を表する。

〔参考文献〕

- [1] 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，Vol. 6, No. 378, pp. 21-33, 1987. 2
- [2] 村田二郎・岡田清：フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ，山海堂，1981