

論文

[1026] 高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究

正会員 ○ 米 澤 敏 男 (竹中工務店技術研究所)  
 正会員 和 泉 意 登 志 ( 同 上 )  
 正会員 三 井 健 郎 ( 同 上 )  
 正会員 奥 野 享 (竹中工務店 東京本店)

1. はじめに

設計基準強度が400~600Kg/cm<sup>2</sup>あるいはそれを上回る高強度コンクリートは、従来、主にプレキャストコンクリートに使用されてきたが、近年、高層ないしは超高層住宅を中心に、このような高強度コンクリートが、場所打ちコンクリートにも多く使用されるようになった。高性能減水剤を使用したこの種の高強度コンクリートは、水セメント比が小さいために、通常のコンクリートに比べて粘性が極めて高い。そのため、充てん性や圧送性等の施工性をスランプのみによって判定するのが困難である。すなわち、高強度コンクリートの施工性は、降伏値を代表する指標であるスランプとともに粘性をも考慮して判断する必要が生じている。L型フロー試験法は、コンクリートの粘性と降伏値に関連した二つの指標をコンクリートプラントや施工現場でスランプ試験と同様簡便に測定することを目的に筆者らが考案した試験法である。この研究は、高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートのワーカビリティをL型フロー試験法により調べ、高強度コンクリートのワーカビリティとL型フロー試験法の性質に関して考察を行ったものである。

2. L型フロー試験法

この試験法は、図-1に示す形状と寸法を有するL型の函体の鉛直部にコンクリートを充てんした後、鉛直部と水平部の境界に設置された鉛直の仕切り板を引き上げてコンクリートを水平部に流動させた時の水平移動距離 $L_f$  (L型フロー値と呼ぶ)、流動が停止するまでの時間 $T$ 、および鉛直部のコンクリートの沈下量 $L_s$  (L型スランプ値と呼ぶ)を測定するものである。 $L_s$ と $L_f$ は、各々従来のスランプ試験のスランプ

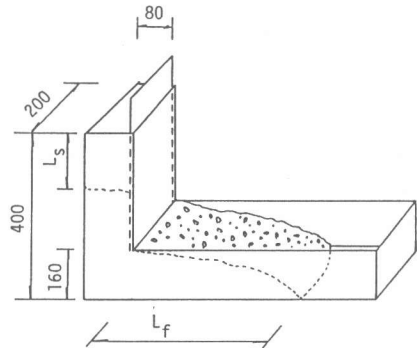


図-1 L型フロー試験器

値とフロー値に対応するものであり、フレッシュコンクリートの降伏値を代表する指標である。また $L_f/T$ は、平均フロー速度 (L型フロー速度と呼ぶ)を示すものであり、粘性を反映する指標である。ところで、流動性の高いコンクリートは、流体としては、ビンガム流体で近似できることが知られているが、せん断応力を $\tau$ 、降伏値を $\tau_y$ 、粘性係数を $\eta$ 、せん断歪を $\gamma$ とすると、このコンクリートの構成式は、式(1)で表示される。この式を変数分離して時間0からTの間で積分すると、式(2)が得られる。式(2)のFは、時間0からTの間のせん断歪量である。

$$\tau - \tau_y = \eta \cdot d\gamma / dt \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\left\{ \int_0^T \tau \cdot dt \right\} / T - \tau_y = \eta \cdot F / T \quad \text{-----} \quad (2)$$

式(2)は、降伏値 (スランプ) の等しい二つのコンクリートが (例えば自重によって) 変形する時、作用したせん断応力の時間0からTの間の平均値 (式(2)の左辺第一項) が二つのコンクリートで等しければ、式(2)の左辺は等しくなり、平均的な変形速度 (F/T) の違いが、粘性係数の違

いを反映することを概念的に示している。L型フロー速度から、粘性を推定しようとするのも、この考え方に基づいており、既報〔1〕のように、水セメント比の大小によるコンクリートの粘性の差異をL型フロー速度によって検出できるのは、上記の仮定がおおよそ成立するためであると考えられる。図-2に、粘性とフロー速度の関係を模式的に示す。

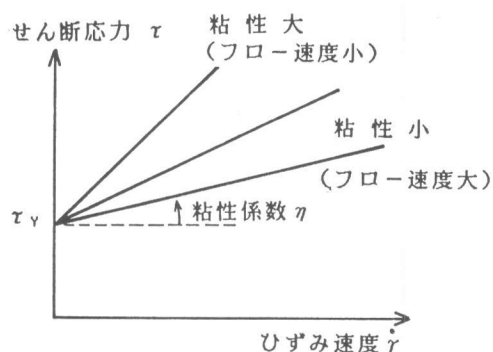


図-2 粘性とL型フロー速度の関係の概念図

### 3. 実験

#### 3.1 概要

4種類の高性能AE減水剤を用いた水セメント比30~40%の高強度コンクリートのスランプ、単位水量および練り上り温度を変化させ、練り混ぜ直後から60分までのワーカビリティの変化をスランプ試験法とL型フロー試験法により測定し、高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートのワーカビリティを調べた。

#### 3.2 因子と水準およびその組合せ

実験因子と水準を表-1に示す。因子1~6のうち「5.高性能AE減水剤」と「6.練り混ぜ後の時間」は、全ての組み合わせを掛け合わせて実験を行っているが、因子1~4は、表-2に示す組み合わせで実験を行った。

#### 3.3 使用材料

セメントとしては、三菱鉱業セメント製普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材としては、木更津産山砂（比重2.62，吸水率1.38%，FM2.67）を、粗骨材としては、鳥形山産石灰岩碎石（比重2.70，吸水率0.22%，FM6.57）を使用した。混和剤としては高性能AE減水剤A，B，C，Dの4種と空気量調整用の補助AE剤を使用した。このうち高性能AE減水剤AとDは、ナフタリンスルホン酸塩系高分子化合物であり、BとCは、オキシカルボン酸塩等の高分子化合物である。

#### 3.4 コンクリートの調（配）合

表-3にコンクリートの調（配）合を示す。スランプ(18, 21, 24cm)は

表-1 実験因子と水準

因子	水準
1.水セメント比(%)	30, 35, 40
2.スランプ (cm)	18, 21, 24
3.単位水量 (Kg/m <sup>3</sup> )	160, 165, 170
4.練り上り温度(°C)	10, 20, 30
5.高性能AE減水剤	A, B, C, D
6.練り混ぜ後の時間(分)	0, 20, 40, 60

表-2 因子と水準の組み合わせ（因子1~4）

W/C (%)	水量 (Kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)								
		18			21			24		
		温度(°C)			温度(°C)			温度(°C)		
		10	20	30	10	20	30	10	20	30
30	160						○			
	165		○		○	○	○		○	
	170					○				
35	160					○				
	165	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170					○				
40	160					○				
	165		○		○	○	○		○	
	170					○				

表-3 コンクリートの調（配）合

水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
30	4.0	32.8	160	534	538	1145
		31.7	165	550	512	1145
		30.6	170	567	486	1145
		37.9	160	458	629	1115
35		36.1	165	472	606	1115
		35.6	170	486	580	1115
40		40.6	160	400	710	1080
		39.8	165	413	686	1080
	39.0	170	425	666	1080	

高性能AE減水剤の添加量により調整した。コンクリートの練り上り温度を変えた時も高性能AE減水剤の添加量によりスランプを調整した。

### 3. 5 実験方法

強制練りパン型ミキサ（容量100ℓ）に全材料を同時に投入し、90秒間攪拌してコンクリートを製造した。コンクリート練り上り直後、20分、40分および60分経過時にスランプ試験とL型フロー試験を行った。この間、コンクリートはミキサー中に静置し試験直前に15秒攪拌した後、試料を採取した。

## 4. 実験結果と考案

### 4. 1 L型フロー試験法で測定した粘性

図-3にL型フロー速度と水セメント比の関係に及ぼす単位水量の影響を示す。いずれの混和剤を用いた場合も水セメント比が小さくなるに従いL型フロー速度が小さくなる、すなわち粘性が大きくなる傾向を明確に示すが、この傾向に及ぼす単位水量の影響は、混和剤により相異なる。混和剤AとDの場合は、単位水量が変わってもL型フロー速度と水セメント比の関係は変化しないが、BとCの場合、単位水量が少なくなるとL型フロー速度が小さくなる傾向を示す。

図-4にL型フロー速度と水セメント比の関係に及ぼすスランプ（混和剤添加量により調整）の影響を示す。図-3同様、水セメント比が小さくなるとL型フロー速度は小さくなり粘性が強くなる傾向を示すが、この傾向に及ぼすスランプの影響は、やはり混和剤によって異なる。混和剤AとDでは、L型フロー速度と水セメント比の関係は、スランプが変わってもあまり変化しないが、混和剤BとDではスランプが大きくなるとL型フロー速度が小さくなる傾向が観察される。

図-5は、図-3と4に示したデータをL型フロー速度と混和剤添加量の関係で整理したものである。混和剤AとDの場合、水セメント比の違いによりL型フロー速度、すなわち粘性の違いを示すが、同じ水セメント比では、混和剤の添加量が増加してもL型フロー速度は、ほとんど変わらない。これに対して、混和剤BとDでは混和剤の添加量が増加するとL型フロー速度が低下し粘性が高くなる傾向が見られる。すなわち、混和剤添加量を増して降伏値を小さくした時、粘性が大きくなる傾向

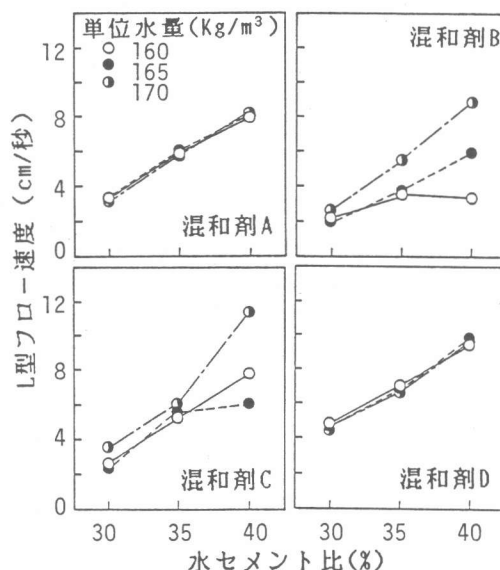


図-3 L型フロー速度と水セメント比の関係：単位水量の影響（スランプ=21cm，温度=20°C，練り上り直後）

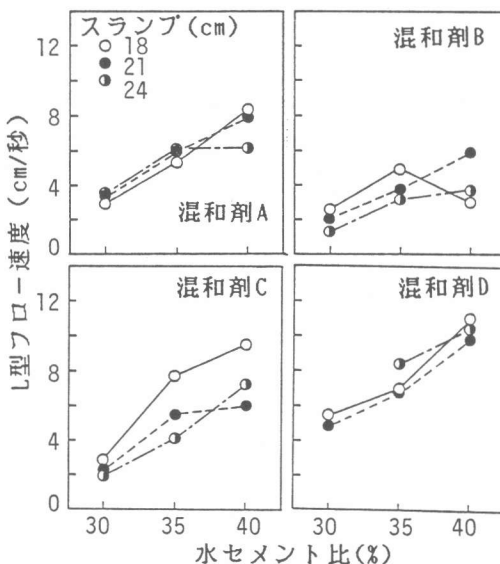


図-4 L型フロー速度と水セメント比の関係：スランプの影響（単位水量=165Kg/m³，温度=20°C，練り上り直後）

を示すことになる。図-3に示したL型フロー速度と水セメント比の関係に及ぼす単位水量の影響と図-4に示したスランプの影響が、混和剤A、DとB、Cとで異なる傾向を示したのは、図-5に示す混和剤添加量のL型フロー速度への影響度が混和剤によって異なるためと考えられる。すなわち、同一スランプで単位水量が少ない場合と同一単位水量でスランプが大きい場合のいずれにおいても混和剤の添加量が多くなりB、Cのグループではその結果、粘性が増大したものと考えられる。混和剤AとDのグループは、ナフタリンスルホン酸塩系であり、B、Cのグループはそうでないものであるというような化学成分の差が、高強度コンクリートの粘性の特性に影響していると考えられるが、どのような成分の影響が卓越しているのかは、この実験の範囲では明らかではない。

図-6は、L型フロー速度と水セメント比の関係に及ぼすコンクリート温度の影響を示したものである。混和剤A、Dではこの関係は、温度にあまり影響されないが、B、Cでは、温度が低い程L型フロー速度が小さくなる傾向が認められる。同じスランプを出すのに温度が低くなると混和剤の添加量が増加する傾向にあったが、混和剤B、Cの場合、これが粘性にも影響したのではないかと考えられる。

図-7は、水セメント比30%と40%の場合について、L型フロー速度の経時変化を示したものであるが、練り混ぜ後の時間が経過してもL型フロー速度すなわち粘性は、あまり変化しないようである。

#### 4. 2 L型フロー試験法で測定した降伏値

スランプ試験のスランプ値のような降伏値に対応する指標は、L型フロー試験では、L型スランプ値またはL型フロー値によって測定される。図-8にL型スランプ値の経時変化を示す。混和剤A、Bは、経時的なL型スランプ値の低下は小さいが、Cは水セメント比35%、40%の場合に、Dは全体的に比較的大きなL型スランプ値の低下を示した。先に述べたように、粘性という点では、混和剤A、DおよびB、Cで各々類似した特性を示したが、L型スランプ値の経時変化では、A、Bが小さな変化をC、Dが比較的大きな変化を示す。このことは高性能AE減水剤においてスランプのような降伏値を経時的に保持するメカニズムと粘性を増大させるメカニズムとが全く別のものであることを示

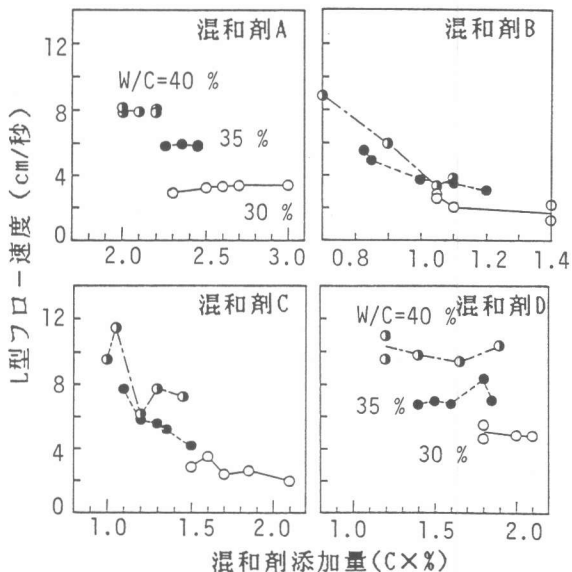


図-5 L型フロー速度と混和剤添加量の関係 (温度=20°C, 練り上り直後)

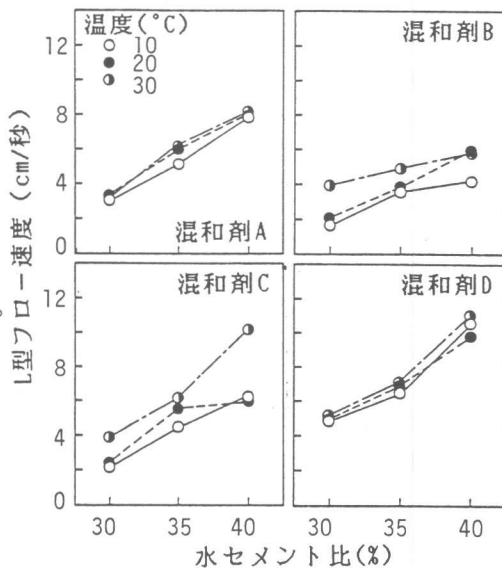


図-6 L型フロー速度と水セメント比の関係：温度の影響 (単位水量=165kg/m<sup>3</sup>, スランプ=21cm, 練り上り直後)

している。

### 5. L型フロー試験法の性質と適用限界

図-9は、L型フロー試験法によるL型スランブ値とスランブ試験によるスランブ値とを比較したものである。基本的には両者の間に直線的な対応関係がある。図から明らかなようにスランブ値約12cmでL型スランブ値は0となる。したがってL型フロー試験法は、12cmを下回るスランブのコンクリートには適用できない。水平部にコンクリートを流動させてL型フロー速度を測定するという目的からすれば、L型フロー試験法は、スランブ15cm程度以上のコンクリートのワーカビリティの試験に適していると考えられる。

図-10は、スランブ値とフロー値の関係をL型フロー試験法とスランブ試験法で比較したものである。スランブ値のある所までは、スランブ値の変化に応じてフロー値も直線的に増加するが、スランブ値がそれよりも大きくなると、フロー値は大きく変化してもスランブ値はあまり変わらない領域の存在を示す点でL型フロー試験法もスランブ試験法も共通している。ただしスランブ値とフロー値と同様に増加する領域は、L型フロー試験法のほうが、やや高スランブ域まで広がっており、スランブ試験法に比べてL型フロー試験法のほうが、高スランブ域における感度がやや高いと言えるかもしれない。

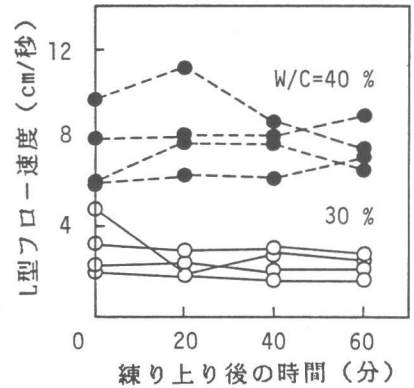


図-7 L型フロー速度の経時変化

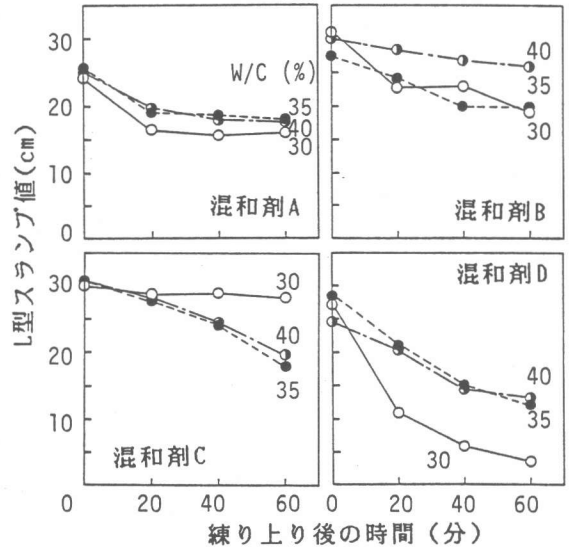


図-8 L型スランブ値の経時変化 (単位水量=165Kg/m<sup>3</sup>, 温度=20°C, 練り上りスランブ=21cm)

### 6. L型フロー試験法の高強度コンクリートの品質管理への利用

従来、コンクリートの品質管理においてスランブ試験は重要な役割をはたしてきた。すなわち、スランブ試験は単にワーカビリティに関連する品質をチェックしているのみならず、スランブ値が単位水量の変動に反応するために、スランブ試験は、硬化後のコンクリートの品質に関しても打設前の概略のチェック機能を果たしてきた。しかし、高性能減水剤を用いた高強度コンクリートでは、スランブは高性能減水剤の添加量や練り混ぜ後の時間に影響される所が大きくスランブ値によるコンクリートの品質の変動の把握は困難である。これに対して、

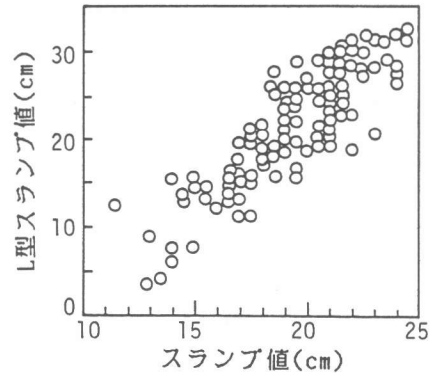


図-9 L型スランブ値とスランブ値の関係

図-4, 5に示したようにL型フロー速度は、水セメント比によって変化する。すなわち、谷川ら〔2〕によって既に指摘されているように水セメント比の変化によって粘性が変化する。したがって、粘性の変化をL型フロー速度の変化で管理すれば、水セメント比の管理が概略行えることになる。これは、スランプ試験に代わる高強度コンクリートの品質管理手法として有望である。図-3, 4, 6に示したように、混和剤A, Dの場合は、L型フロー速度は水セメント比によって定まり、単位水量、スランプ、コンクリート温度に影響されないため、L型フロー速度による水セメント比の管理が可能であると考えられる。これに対し、混和剤B, Cの場合には、同じ水セメント比でもL型フロー速度は混和剤の添加量に影響されるため、L型フロー速度により推定される水セメント比は精度が低く、L型フロー試験法による品質管理は、難しいのではないかと考えられる。このように、L型フロー速度すなわち粘性による水セメント比測定法のコンクリートの品質管理への適用性は使用する混和剤によって異ると言えよう。

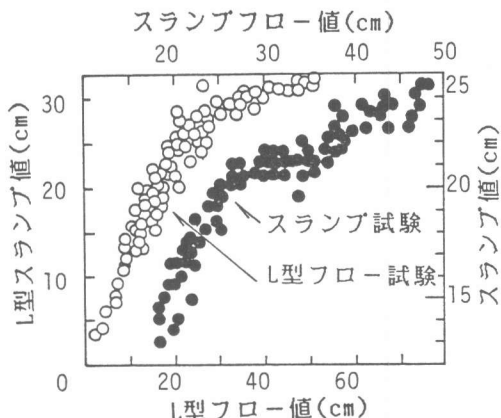


図-10 L型フロー試験法とスランプ試験法のスランプ値とフロー値の関係の比較

## 7. 結 論

高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートのワーカビリティとL型フロー試験法に関して、本研究により以下の結論が得られた。

- (1) 粘性を表す指標であるL型フロー速度は、水セメント比の変化に敏感に反応し水セメント比が小さく粘性が高い程小さい値を示す。
- (2) 高性能AE減水剤には添加量を増して降伏値を低下させてもコンクリートの粘性は変化しないものと添加量を増して降伏値を低下させると粘性が増大するものの二つのタイプがある。
- (3) 上記特性のためにあるタイプの混和剤では、L型フロー速度と水セメント比の関係は、単位水量、スランプ、温度に影響されないが、別のタイプの混和剤ではこれらの因子に影響される。
- (4) 高性能AE減水剤においてスランプのような降伏値を保持するメカニズムと粘性を増大させるメカニズムとは全く別のものである。
- (5) L型フロー試験法は、スランプ値15cm程度以上の比較的流動性の高いコンクリートのワーカビリティ測定に適している。
- (6) L型フロー試験法は高強度コンクリートの品質管理に利用できL型フロー速度により水セメント比の概略の管理が行えると考えられるが、添加量がL型フロー速度に影響するタイプの混和剤を使用する場合には、このような管理が難しくなると考えられる。

〔謝辞〕 L型フロー試験法に関し三重大学教授谷川恭雄先生と同助手森博嗣先生にいろいろ御教示をいただきました。紙面を借りて厚く御礼いたします。

- 〔参考文献〕 1) 米澤, 嵩, 和泉, 三井, 奥野: 建築学会大会, PP263-264, 1988  
 2) 谷川, 森, 福島: 建築学会大会, PP485-486, 1985