

論文 L型フロー試験のフロー値とフロー時間による高流動コンクリートの品質評価

松田 敦夫*¹・東 邦和*¹・廣中 哲也*²

要旨：試料の流動可能距離が 100cmであるL型フロー試験により高流動コンクリートの品質評価を行った。フロー値は流動性を、フロー30cmあるいは50cmの通過時間を計測したフロー時間はコンクリートの流動性が大きくなるにつれて短くなることから分離抵抗性を評価できる。また、最終フロー時間は高流動コンクリートが最良に近い状態で最大値をとるため、フロー値と組み合わせて図化すればピークを示す。この値を基準にしてフロー値は15cmの範囲、最終フロー時間はその6割以上を品質管理範囲とした。

キーワード：高流動コンクリート、コンシステンシー、L型フロー試験、品質管理

1. はじめに

締固めをしなくても型枠内に密に充填する高流動コンクリートは技術者の関心が大きく、すでに数多くの施工例がある。同時に、通常のコンクリートとフレッシュ時の特性が大きく異なるため、多くの研究機関で品質管理のためのコンシステンシー試験方法が工夫されている。

本論文では、高強度コンクリートの評価のために考案されたL型フロー試験装置を高流動用にサイズを変更し、そのフロー値とフロー時間を用いて行った品質評価方法について報告する。

2. 試験方法とコンクリートの配合

L型フロー試験は、粘性が高くスランプのみにより施工性の良否を判定できない設計基準強度400kgf/cm²以上の高強度コンクリートの品質管理のために考案された[1]。試験が簡便であり、Lスランプ値とLフロー速度でコンクリートのレオロジー定数が推定できる[2]という理由から研究が進められている。Lスランプ値は降伏値と線形関係にあること[2]、コンクリート流出部近傍の初速度は塑性粘度と相関が大きく精度も高いこと[3]が示され、最近では降伏値を他の手法で求めれば初速度から塑性粘度の推定が可能である[4]と報告されている。

しかし、高強度用に設定されたL型フロー試験装置はコンクリートの流動部が短く、スランプフロー値が60cmを越えるような高流動コンクリートで試験した場合、コンクリートの先端は装置の限界点まで到達してしまい[5]、L型フロー値を用いて流動性を判定できない。そこで、今回はこの点を考慮して、図1に示すように流動部を100cmとした装置を製作した。流動部には5cm毎にフロー時間計測用の主線、1cm毎にフロー値読み取り用の副線を記した。100cmとした理由は図2の例のようにスランプフロー値が75cmを越え、分離

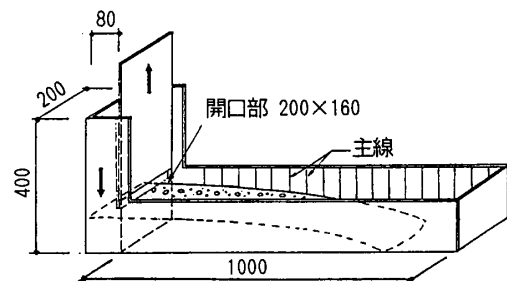


図1 L型フロー試験装置の寸法

*1 (株)奥村組技術研究所構造研究室主任研究員(正会員)

*2 (株)奥村組技術研究所構造研究室研究員(正会員)

表1 配合と使用材料（良好な場合の配合のみを表示）

記号	水粉体比 W/P %	細骨材率 s/a %	単位量 (kg/m³)				減水剤 添加率 SP/P %	増粘剤 添加率 VA/W %	主たる使用材料と備考 粉体 (比重、比表面積) 骨材 (比重、FM)
			水	粉体	細骨材	粗骨材			
A ^{9*}	40	50	175	^{1*} 438	^{2*} 813	^{3*} 838	^{4*} 2.5	^{5*} 0.20	^{1*} 普通ポルトランドセメント:フライアッシュ=7:3、普通ポルトランドセメント (3.16, 3270)、フライアッシュ (2.27, 3460)
B	30	47	160	^{1*} 533	^{2*} 743	^{3*} 861	^{4*} 4.0	^{5*} 0.05	^{2*} 川砂 (2.58, 2.45) ^{3*} 砕石 (2.66, 6.87, max20mm)
C	50	50	185	^{1*} 370	^{2*} 836	^{3*} 857	^{4*} 2.5	^{5*} 0.35	^{4*} トリアシ系、 ^{5*} セルロース系
D	40	50	170	^{6*} 426	^{2*} 846	^{3*} 872	^{4*} 2.5	^{5*} 0.15	^{6*} 普通ポルトランドセメント:フライアッシュ:スラグ微粉=3:3:4 スラグ微粉 (2.91, 8500)
E	36	48.5	175	^{7*} 486	^{2*} 784	^{3*} 851	^{8*} 2.6	--	^{7*} 普通ポルトランドセメント:砕石粉=6:4 (8:2~4:6で試験) ^{8*} 利加ホ酸系 ^{9*} 実機混練3か所含む、SP, VAのみ同一

傾向がはっきりしたコンクリートでL型フロー値が100cmに到達するようになるからである。

この装置を用いた高流動コンクリートの試験では次の2項目を計測した。

- ①コンクリートが停止した時の流出口から先端までの距離：L型フロー値L_f (cm)
- ②仕切り板を引き上げた瞬間から30, 40, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80cmの主線を先端が通過する時間：30cm通過時ならば30cm L型フロー時間L_{t30}、最後の主線通過時を最終L型フロー時間L_{tE} (秒)

フロー時間の測定には主線通過時のラップを8個以上記憶できるストップウォッチを用い、1/100秒を四捨五入して1/10秒で表した。仕切り板を素早く引き抜けること、コンクリートの先端が主線を通過する瞬間が判断しやすいことから、測定者による誤差はどの主線においても0.2秒程度であった。（録画した試験を複数の測定者で計測した）

試験に用いた配合と材料の一覧を表1に示す。主になる配合は普通ポルトランドセメントの30%をフライアッシュで置換した水粉体比40%のA配合である。比較のために水粉体比と使用材料を変えた場合、実機の場合の結果を加えた。

3. スランブフロー試験との関係

図2に表1のA配合で高性能減水剤添加量を増加していった場合のスランブフロー値S_fとL型フロー値L_fの変化を示す。添加量が増すにつれて流動性が高まっていくが、S_fの場合は試料が平面的に広がっていくことにより、容積の制限で70cmを越えると感度が鈍くなる。それに比べてL_fは70~85cmの材料分離のない良好な状態から、90cmを越えて分離傾向の大きい状態まで値が変動している。図3に配合種類等を区別しないS_fとL_fの関係を示す。直線で近似すると

$$L_f = 1.720 \times S_f - 32.261 \quad (r^2=0.8468)$$

の関係となり、このデータでは1.7倍の計測範囲があることになる。

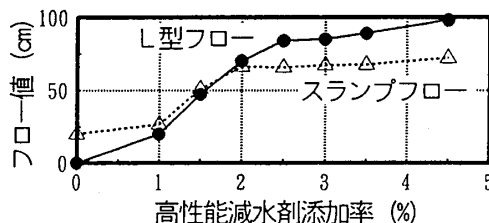


図2 高性能減水剤量によるフロー値の変化

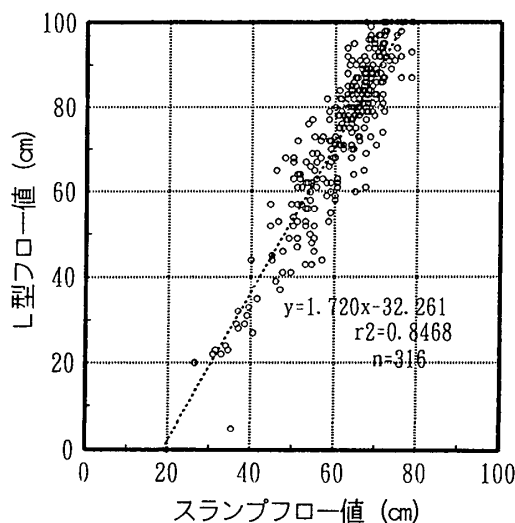


図3 L型フロー値とスランブフロー値の関係

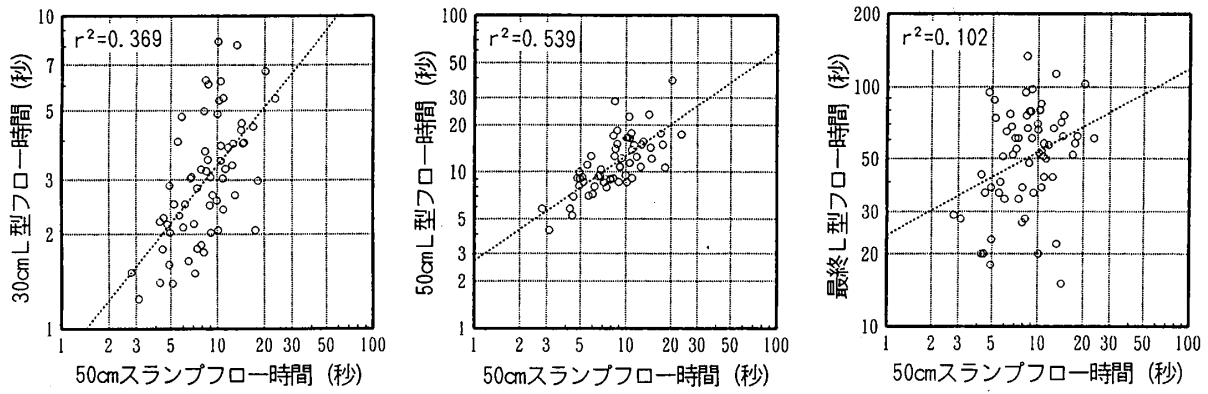


図4 L型フロー時間とスランプフロー時間の関係

次に50cmスランプフロー時間 St_{50} とL型フロー時間 Lt_{30} 、 Lt_{50} 、 Lt_E の関係を図4に示す。文献[5]によれば、50cmスランプフロー速度はL型フロー速度の初期(5~10cm)よりも停止までの平均速度との相関が高いとされる。図4の結果では、 St_{50} と Lt_{30} 、 Lt_{50} 、 Lt_E はそれほど相関が高くないが、図中の相関係数によれば、 St_{50} は Lt_{30} 、 Lt_E よりも Lt_{50} に比較的近いようである。

4. L型フロー試験の経過曲線

一回の試験でコンクリートの先端が各主線を通じた時間と位置の関係を経過曲線と定義し、図5に示す。1)は表2のA調合でL型フロー値が80cm程度になるベース配合に単位水量比-5、+5、+15%を練り混ぜ水から増減したもの、2)はA、B、C配合で、L型フロー値 L_f を70~80cmに調整したものである。㊸は測定値をそのまま線形で表現した場合、㊹は測定値を L_f と最終L型フロー時間 Lt_E で正規化した場合、㊺は㊹のフロー時間比を対数表示した場合である。

経過曲線は、指数関数 $y=ae^{bx}$ で極めて精度良く近似できること、正規化した経過曲線では低水粉体比の場合、速度変化が少なく(図の上側)、付加水でフロー値を変動させた場合曲線の形

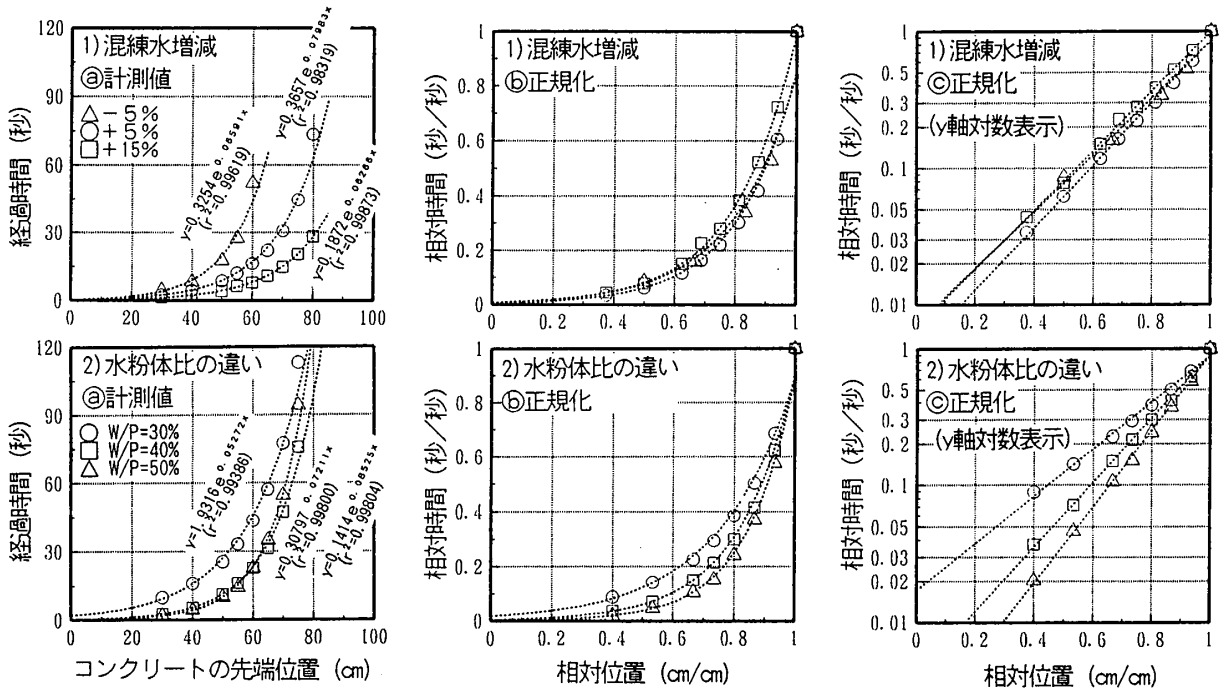


図5 L型フロー経過曲線

状がほぼ同じになることがわかる。

このことは図6の模式図に示すように、たとえば〔流動性不足〕〔良好〕〔分離気味〕の高流動コンクリートの流動速度を比較する場合、同じ計測点aにおける速度は適切ではなく、経過曲線を正規化した相対位置b点、すなわち元に戻し、〔流動性不足〕の場合は流出口に近い位置c点、〔分離気味〕の場合は停止に近い位置d点がふさわしい。a点でなくa・c・dを比べればそれぞれの速度の違いは小さいことになる。

また、同じ測定点aでは「水粉体比が小さい」〔良好〕なコンクリートより「水粉体比が大きい」〔流動性不足〕のコンクリートの方が流動速度（接線勾配の逆数）は小さいが、後者は流出口に近いc点の速度で比較すべきであり、速度の大小が逆になる場合があると考えられる（接線勾配①>②>③）。これは塑性粘度と水粉体比の大小の関係に定性的に一致する。

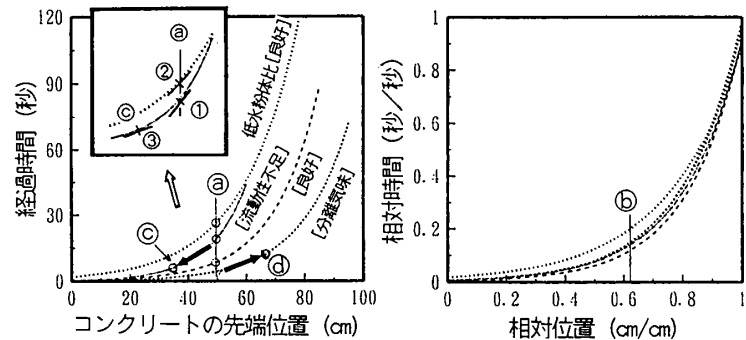


図6 経過曲線上の速度比較

5. L型フロー時間の相互関係

図7にA配合の場合のL型フロー時間 Lt_{30} 、 Lt_{50} 、 Lt_E の相互関係を示す。 Lt_{30} と Lt_{50} では比較的相关が大きいが、 Lt_{30} と Lt_E ほとんど相関はない。これは Lt_{30} と Lt_{50} の値の大きい部分を含めて、前章に示した相対位置の差が大きいと考えられる。

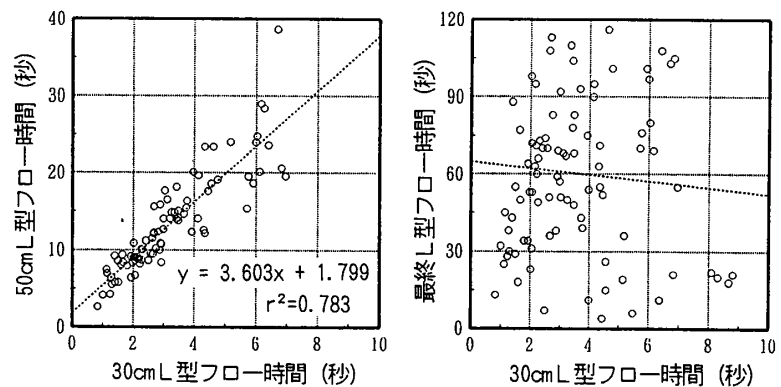


図7 30cm, 50cm, 最終L型フロー時間の相互関係

6. 品質管理試験としての利用

L型フロー試験を高流動コンクリートの品質管理として利用するために、製造や打設時に生じると考えられるパラメータの変動で測定値がどう動くかを検討した。ここではA配合で、1)骨材表面水の変動を考慮した練混ぜ水の増減、2)高性能減水剤添加率、3)増粘剤添加率、4)経時変化についてL型フロー値 L_f と30cm、50cm、最終のL型フロー時間 Lt_{30} 、 Lt_{50} 、 Lt_E の関係を図8に示す。

Lt_{30} と Lt_{50} は L_f が大きくなるにしたがい4ケースとも小さくなっている。A配合の場合は図7で Lt_{30} と Lt_{50} の測定値が約1:4の比率であることから、図8のようにY軸を設定すれば、各パラメータによる Lt_{30} と Lt_{50} の変動はほぼ同じになる。1)の+15%、2)の4.5%、3)の0%、4)の混練直後の試料は目視で分離傾向が認められたもので、 Lt_{30} が1.0~1.5秒、 Lt_{50} が4~10秒が分離の目安となる。分離の判定に利用する場合には Lt_{30} と Lt_{50} のどちらでも問題はないが、管理値の範囲を特定するには絶対量の大きさから Lt_{50} を用いた方が実用的であろう。

一方、 Lt_E はフロー値が変化していく過程の一点でピークを示している。このピークを過ぎて

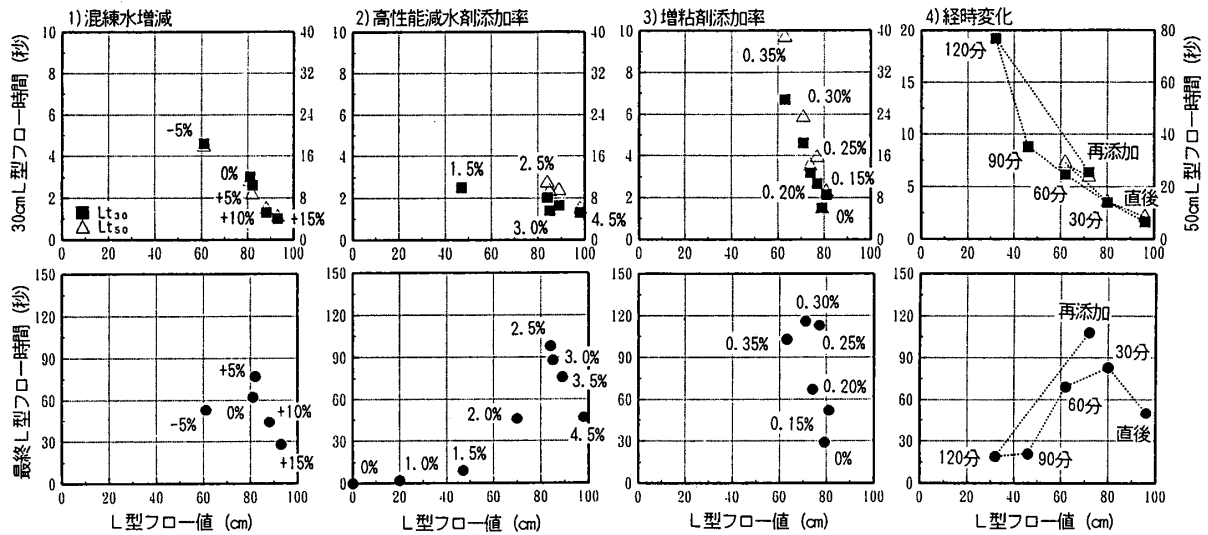


図8 パラメータの変動によるL型フロー時間とL型フロー値の関係

フロー値が大きくなると平均流動速度が大きくなり、材料分離の危険性が増加することから、このピークは高流動コンクリートの管理目標として目安になる点と考えられる。Lt_Eは、降伏値と関連が大きいとされるL型スランプ値、塑性粘度と関連が大きいとされる初期L型フロー速度と異なり、コンクリートのレオロジー定数と密接な関連は少ないが、一つの配合について数バッチの試験練りを行って [Lf-Lt_E] 曲線を作成すれば、ピークが視覚的に判断できる。図9に表1の配合の [Lf-Lt_E] 曲線を示す。配合によって流動性、分離抵抗性の性能に差があり、ピークの位置が異なる。このピークを中心にすれば使用する高流動コンクリートにあった管理領域を設定することができる。レオロジー定数との関係からはLt₅₀を分離抵抗性の指標として用いること

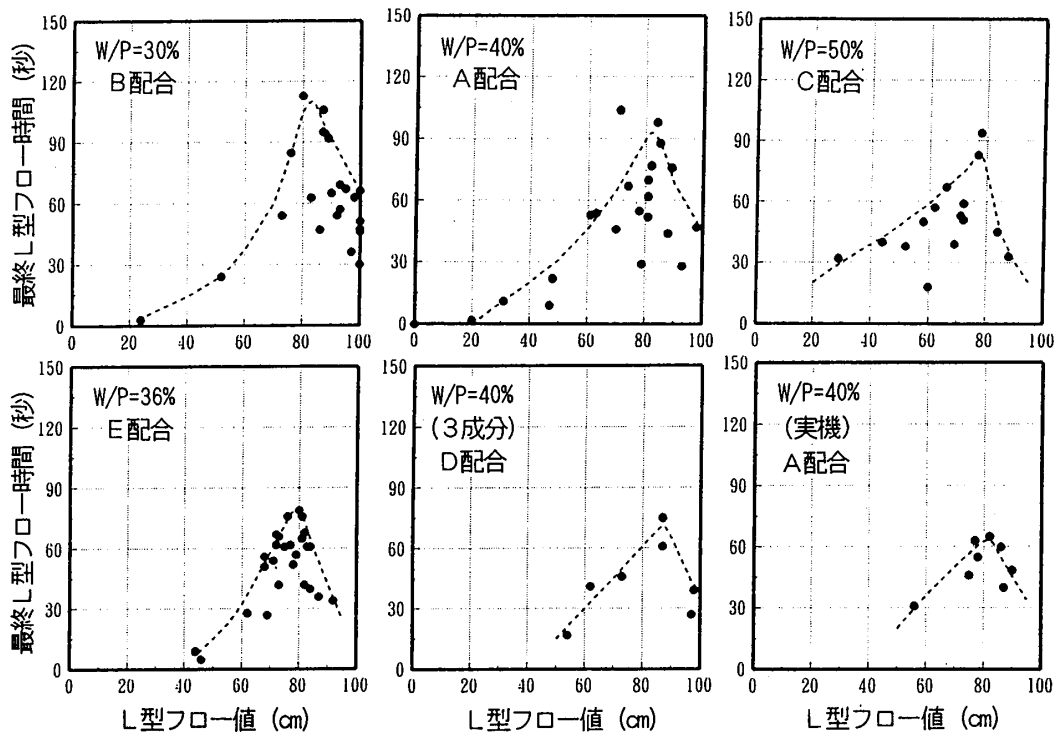


図9 配合による [L型フロー値-最終L型フロー時間] 曲線

義は明らかであるが、現場における管理には [Lf-Lt_E] 曲線から次のような客観的な範囲を設定することが実用的であると考えられる。

流動性の指標：L型フロー値Lf → ピークを示すLfを中心として15cm

分離抵抗性の指標：最終L型フロー時間Lt_E → ピークを示すLt_E の60%以上

Lfの「15cm」はスランプフロー値で管理範囲とされる10cmを図3の関係から、またLt_Eの「60%」は図8で目視で分離傾向を示すコンクリートが良好のものの50%以下であることから定めた。ただし、学会等で分離を判断する客観的な試験方法が提案された時点で管理範囲は再検討する予定である。なお、対象とする構造物の鉄筋のあきやかぶりが大きいときは、Lfの小さい側だけに管理範囲を広げることが有効である。

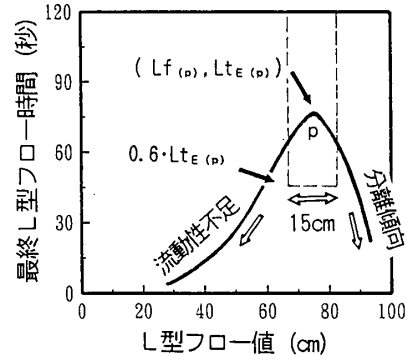


図10 L型フロー試験による管理領域

7. まとめ

高流動コンクリートのL型フロー試験のフロー値とフロー時間の関係から以下の結論を得た。

- 1) L型フロー試験とスランプフロー試験から得られるフロー値とフロー時間は本質的に同じであるが、計測値の範囲はL型フロー値の方が1.7倍大きく、分離傾向のコンクリートに対し感度が良い。
- 2) L型フローの経過曲線は指数関数で極めて精度よく近似できる。
- 3) L型フロー速度は装置上の同じ位置を比較するのではなく、フロー値で正規化した位置で比較するべきである。これにより塑性粘度とフロー速度の相関が高くなる。
- 4) 50cm程度までのフロー時間はコンクリートの流動性が伸びるに従い減少するため、分離抵抗性の判定に利用できる。一方、最終フロー時間は流動性を大きくしていくとフロー値80cm付近でピークをとる。
- 5) このフロー値と最終フロー時間のピークを示す値を基準にして、それぞれの範囲を設定すれば、高流動コンクリートの品質管理に利用することが可能である。

さらに、L型フローは現場で試験する場合スランプフロー試験に比べて、装置を水平に設置しやすい、1名で実施できる、測定者の主観に左右されにくい、という長所がある。

参考文献

- 1) 米澤敏男ほか：高強度コンクリートの品質管理を目的としたL型フロー試験法に関する研究 日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.263-264、1988.10
- 2) 谷川恭雄ほか：L型フロー試験による高強度コンクリートの流動性評価（①：粘塑性有限要素法によるシミュレーション）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.253-254、1989.10
- 3) 谷川恭雄ほか：高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No1、pp.275-280、1990.6
- 4) 谷川恭雄ほか：高流動コンクリートのL型フロー試験による流動性評価法に関する研究、セメントコンクリート論文集No48、pp.208-213、1994
- 5) 松田敦夫ほか：高流動コンクリートの各種コンシステンシー評価試験方法に関する研究（③：Lフロー試験）日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.483-484、1994.9