

論文 粘塑性空間要素法を用いた高流動コンクリートの コンシステンシー試験の流動シミュレーション

森 博嗣*1・谷川 恭雄*2・黒川 善幸*3・岡崎 浩徳*4

要旨：対象となる空間を要素メッシュに分割し，材料の変形をマーカと呼ばれる仮想指標の座標移動によって表現する粘塑性空間要素法(VDEM)を用いて，高流動コンクリートの各種コンシステンシー試験の解析を行った。既往の研究データとの比較も行い，VDEMを用いてこの種のシミュレーションが可能であることを示すとともに，各種コンシステンシー試験値が持つ物理的意義をレオロジー定数を用いて整理した。

キーワード：レオロジー，高流動コンクリート，粘塑性空間要素法，コンシステンシー試験

1. はじめに

自己充填機能を持つ高流動コンクリートの広範な材料性質を把握してワーカビリティを適切に予測する技術を確立することが急務となっている。筆者らは，フレッシュコンクリートの材料性質をビンガム定数で定量化し，これを入力データとした各種の流動シミュレーション手法をこの種のコンクリートに適用してきたが，連続体モデルを用いた通常FEM解析では，試料の大変形にともなって精度が低下することがわかった^{1,2)}。高流動コンクリートのように，スランプフロー値が50cmを超えるような降伏値の低い試料の解析では特に問題となる。

そこで本研究では，対象となる空間を要素メッシュに分割し，材料の変形をマーカと呼ばれる仮想指標の座標移動によって表現する粘塑性空間要素法(VDEM)³⁾を用いて，高流動コンクリートの各種コンシステンシー試験の解析を行った。結果を既往の研究データと比較し，VDEMを用いてこの種のシミュレーションが可能であることを示すとともに，各試験値が持つ物理的意義について解析的に検討する。

2. 解析の概要

2.1 解析手法

本研究で用いたVDEM³⁾は，粘塑性変形を考慮した動的解析手法の一つであり，既に壁型枠内への打設シミュレーションなどに適用されている。材料の変形をマーカと呼ばれる仮想指標の座標移動によって表現することから，大変形に追従できること，障害物による試料の分離・合流が容易に表現できること，などに主な特徴がある。

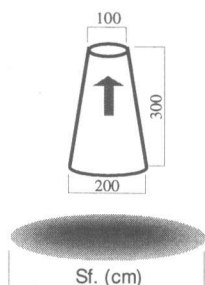
2.2 解析条件

Fig.1に，本解析で対象とした6種類のコンシステンシー試験装置の形状と測定項目を示す。

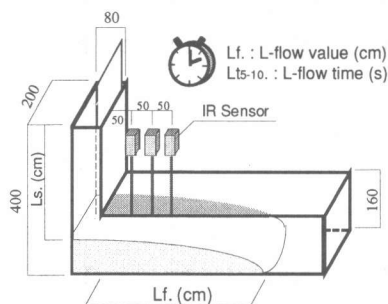
解析に用いた要素分割をFig.2に示す。境界条件を単純化するため，試験器と試料との境界は固定(完全付着)とした。また，境界面近傍で要素分割を細かくしたうえで，その境界層に，低減したビンガム定数(Table 1参照)を与えることにより，すべり挙動を擬似的に考慮している。

スランプフロー試験とOロート流下試験は，軸対称の3次元解析を，また，Lフロー試験，

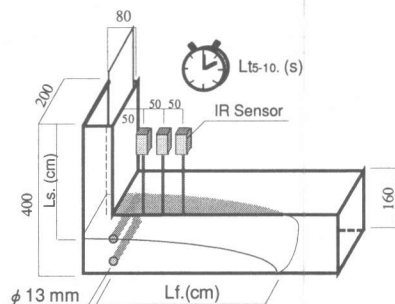
*1 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *3 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)
 *4 名古屋大学大学院生 工学研究科建築学専攻



Sf. : Slumpflow value (cm)
(a) Slumpflow test (S)



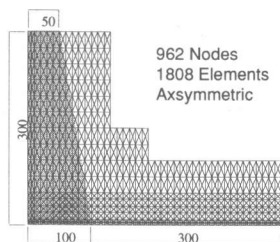
(b) L-flow test (L)



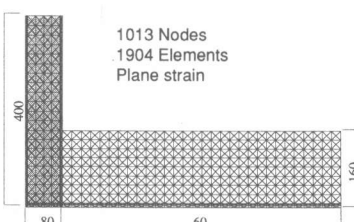
(c) L-flow test with Steel bar (LW)

Fig.1 Shape of Consistency Tests

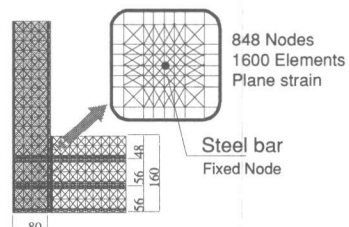
[mm]



(a) Slumpflow test (S)



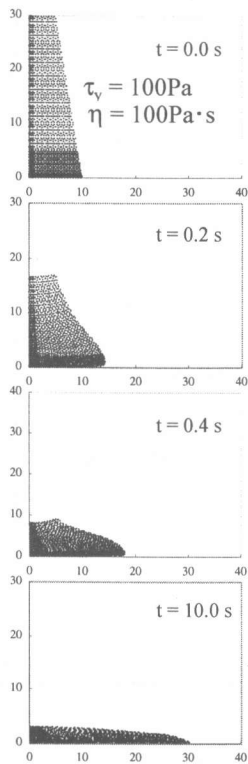
(b) L-flow test (L)



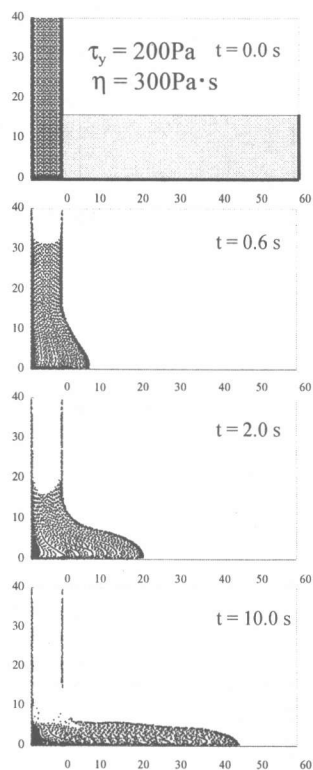
(c) L-flow test with Steel bar (LW)

Fig.2 Finite Element Idealization

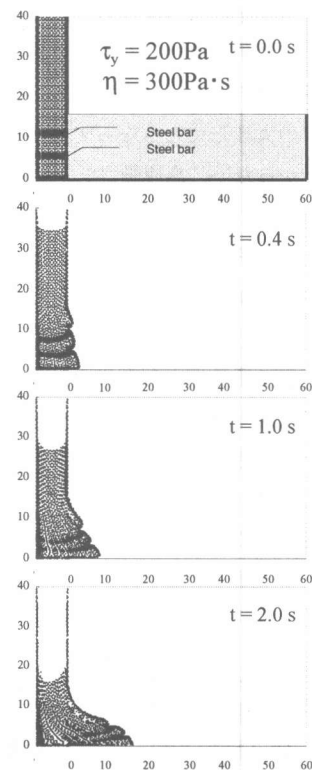
[mm]



(a) Slumpflow test (S)



(b) L-flow test (L)



(c) L-flow test with Steel bar (LW)

Fig.3 Examples of Flow Behavior

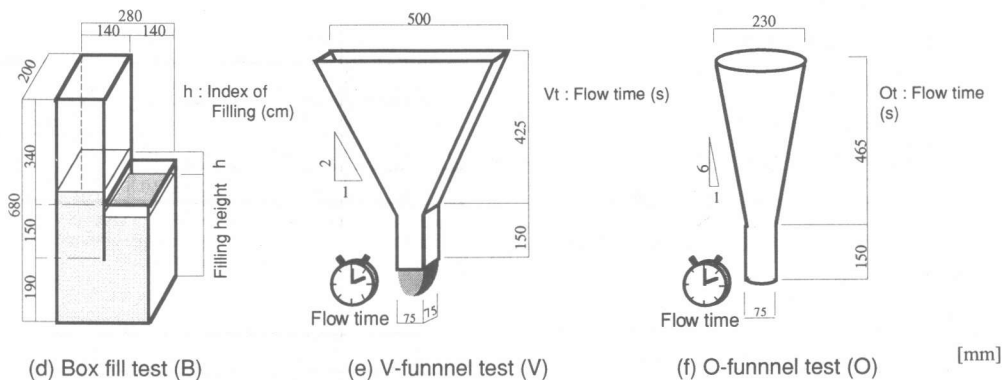


Fig.1 Shape of Consistency Tests

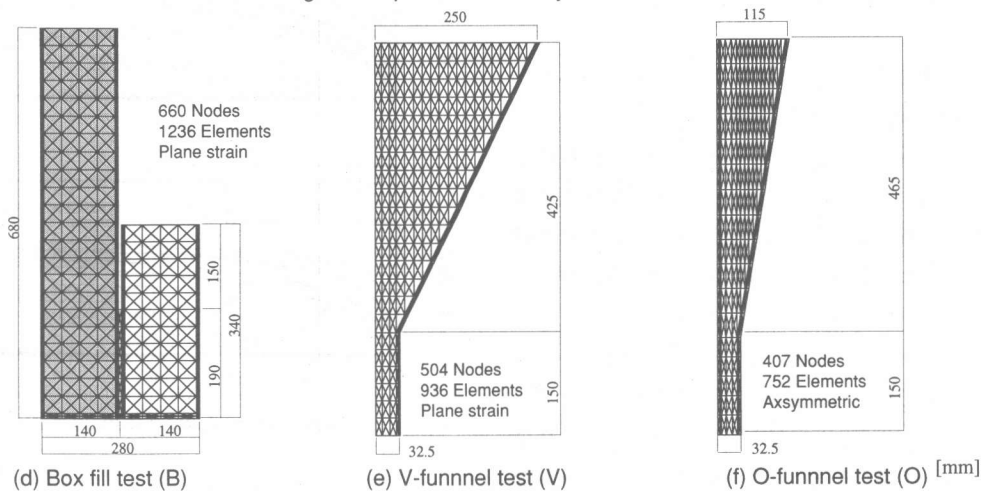


Fig.2 Finite Element Idealization

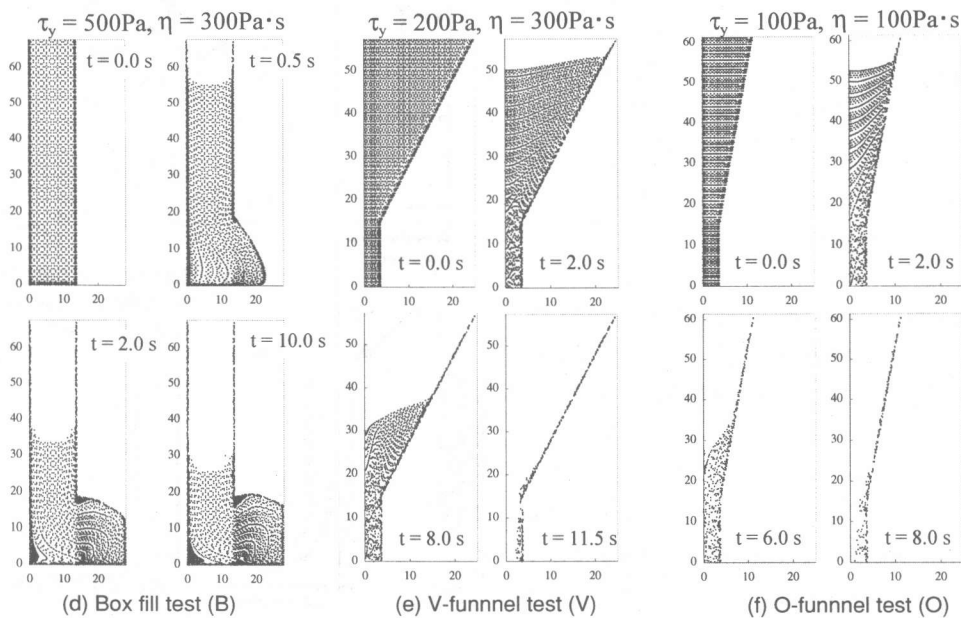


Fig.3 Examples of Flow Behavior

ボックス充填試験およびVロート試験は、平面ひずみ問題として2次元解析を行った。

2.3 解析の入力値

Table 1に解析の入力値を示す。スランプフロー試験の解析結果が実験結果⁴⁾と一致するように、すべり要素の降伏値、塑性粘度を決定した。ただし、ボックス試験は、試料が試験器で周囲を囲まれており変形しにくく、また、粗骨材などのかみ合いによる内部摩擦抵抗が大きくなるため、降伏値を他の解析例と比べて若干大きい目の値として設定した。

3. 解析結果および考察

3.1 スランプフロー試験

Fig.3(a)に流動状況の一例を示す。試料の変形が大きくなったときも、実際の試験結果と類似した形状が得られている。また、試料の流動をマーカで表現しているため、自由表面が比較的滑らかになるのが特徴である。

Fig.4に、スランプフローイング曲線、すなわち変形途中の試料の広がりであるスランプフローイング値sf.と時間tの関係を示す。降伏値が小さい場合の方が塑性粘度の影響が大きくなる。同図中には、小村らの理論式⁷⁾で形状パラメータ α を0.8とした場合の曲線を併記した。

Fig.5に、スランプフロー値とビンガム定数の関係を示す。降伏値、塑性粘度がともに減少すると、スランプフロー値はビンガム定数の変化に敏感となる。

3.2 Lフロー試験

(a) 標準Lフロー試験

Fig.3(b)に流動状況の一例を示す。試料の流動が進んだ後の変形もよくシミュレートできている。Fig.6に、Lフロー試験時の流動を可視化した一例を示す。橋本らによる可視化実験の結果⁵⁾と比較するため、試料中の9点のマークについて、試験開始時から流動停止時までの流跡を示した。試験器左下の隅角部では試料がほとんど流動していないことがわかる。また、左側のマークは、水平方向にほとんど移動しない。ス

Table 1 Input of Analysis

Series	τ_y	τ_{ys}	η	η_s
S, L, LW, V, O	50, 100	$\tau_y / 5$	100	$\eta / 5$
	200	$\tau_y / 10$	300,	$\eta / 10$
B	400, 500, 600	$\tau_y / 10$	500	

[Notes] τ_y : Yield value of material (Pa), η : Plastic viscosity of material (Pa·s), τ_{ys} : Yield value of slipping element (Pa), η_s : Plastic viscosity of slipping element (Pa·s)

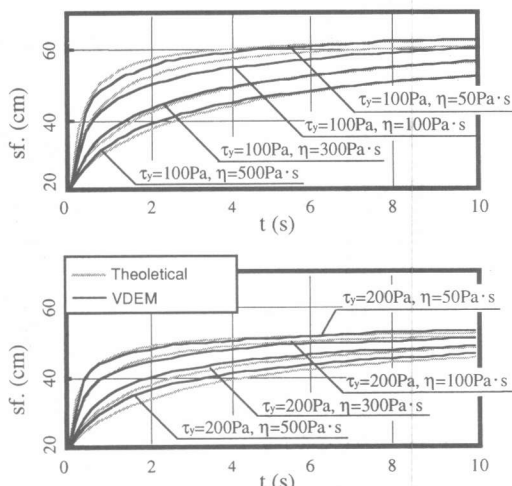


Fig.4 Slumpflowing Curve (sf.-t)

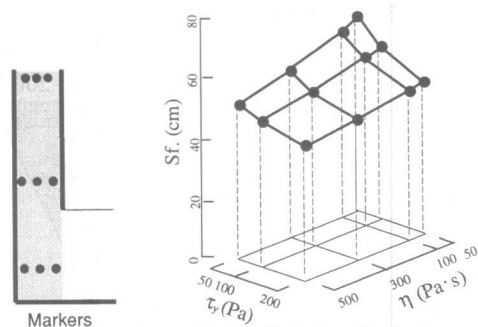


Fig.5 Relationship between Slumpflow Value and Bingham's Constants

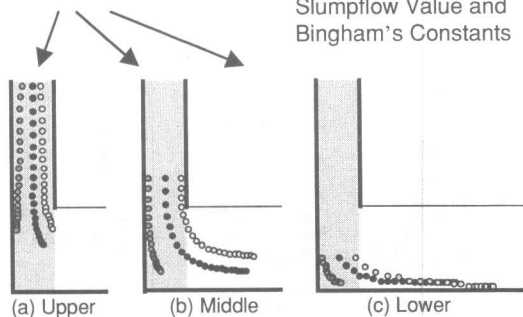


Fig.6 Example of Visualization of L-flow Test

ランプ試験と同様、これらの結果は、橋本らの可視化実験結果とよく一致している。

Fig.7に、試料の先端が開口部より5cmから10cmの間を通過するのに要する時間 Lt_{5-10} と塑性粘度 η の関係を示す(図中のL)。 Lt_{5-10} は降伏値の影響をほとんど受けず、塑性粘度とほぼ線形の関係にあることがわかる。

(b) 配筋を施したLフロー試験

Fig.3(c)に流動状況の一例を示す。鉄筋に当たり試料が分岐したのち、再び合流する様子がよく再現されている。

Fig.7に、 Lt_{5-10} と塑性粘度 η の関係を示す(図中のLW)。鉄筋の影響により、標準Lフロー試験(L)に比べて Lt_{5-10} は大きくなり、鉄筋によってみかけ上の塑性粘度が増加することを示している。特に、粘性が大きな試料においてその傾向が顕著となる。

3.3 ボックス充填試験

Fig.3(d)に流動状況の一例を示す。

Fig.8に充填値 h と降伏値 τ_y の関係を示す。充填値とは、コンクリート上面の高差である。充填値は、塑性粘度の影響はあまり受けず、降伏値によって決まる評価指標であると考えられる。

3.4 ロート流下試験

Fig.3(e), (f)に流動状況の一例を示す。

Fig.9に、OロートおよびVロートの流下時間 Vt , Ot と塑性粘度 η の関係をそれぞれ示す。流下時間は、塑性粘度と相関があるが、降伏値の影響はあまり受けない。これは、既往の実験結果⁴⁾と一致している。

既往の研究⁶⁾では、粗骨材とモルタルの分離がなく均質なまま試料が流出する場合、OロートとVロートの流下時間はあまり変わらないと報告されている。Fig.9に示すように、本解析によるVロートとOロートの流下時間が大きく異なる結果となった原因として、Vロートは平面ひずみ解析を行っているため、側壁の影響が考慮されていない点が考えられる。

3.5 実験結果との比較

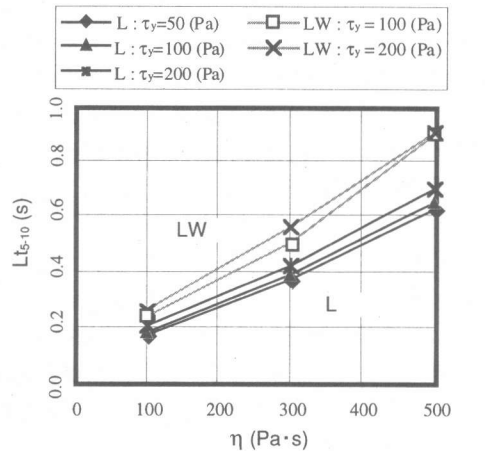


Fig.7 Relationship between L-flow Time Lt_{5-10} and Plastic Viscosity η

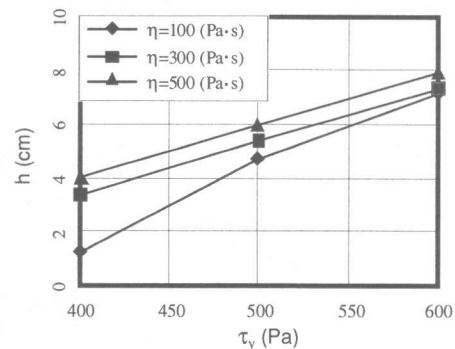


Fig.8 Relationship between Index of Filling h and Yield Stress τ_y

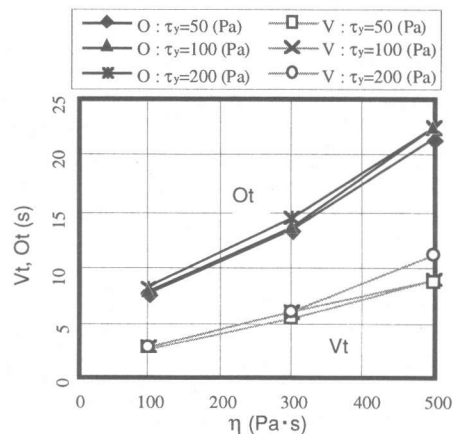


Fig.9 Relationship between Flow Time Vt , Ot and Plastic Viscosity η

Fig.10に、流動開始から20s後のLフローインデックス値 I_f とスランプフロー値 S_f の関係を示す。また、筆者らが過去に得た実験結果⁷⁾の範囲を併示する。同図によれば、おおむね、解析は実現

象をシミュレートできているといえる。今回の解析では、Lフロー試験は20sまでしか出力しておらず、最終的なIfはこれよりも大きな値になり、図の解析結果は実験結果よりも上にシフトする。Lフロー試験が2次元解析であり、側壁の影響が考慮されていないことが原因と考えられる。

Fig.11に、OロートおよびVロートの流下時間Vt、OtとLフロー時間Lt₅₋₁₀の関係を示す。また、図中には筆者らが過去に得た実験結果⁷⁾の範囲を併示した。Vロートの解析結果が実験結果より小さくなっているのは、側壁の影響を考慮していないためである。

以上より、2次元解析を行う場合には、側壁の影響を考慮したみかけのビンガム定数を入力値として用いる必要があることがわかる。

4. まとめ

本研究では、粘塑性空間要素法を用いて高流動コンクリートのコンシステンシー試験がシミュレートできることを示した。

Table 2に、本解析から得た各試験値とレオロジー定数の関係を整理して示す。試験値と評価項目が正の相関を示すものを↑で、負の相関を示すものを↓で示し、その影響が大きいものほど矢印の本数を増して表現した。

【参考文献】

- 1) 小村理恵・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.462，pp.1-10，1994.8.
- 2) 西之園一樹・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：Lフロー試験時の粘塑性体の流動シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），A-1，pp.465-466，1997.8.
- 3) 渡辺健治・寺西浩司・森博嗣・谷川恭雄：型枠内およびパイプ内におけるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション，日本建築学会構造系論文報告集，No.451，pp.1-7，1993.9.
- 4) 河井徹・橋田浩：高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.125-130，1994.6.
- 5) 佐藤良一・若林正憲・橋本親典・辻幸和：超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験の可視化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.189-194，1994.6.

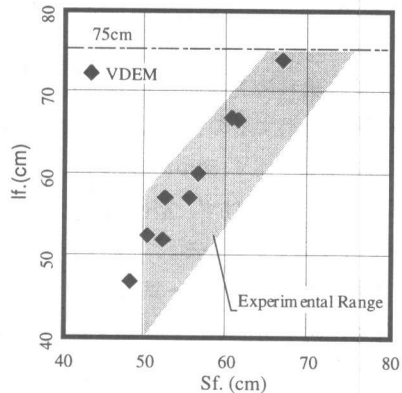


Fig.10 Relationship between L-flowing Value If and Slumpflow Value Sf.

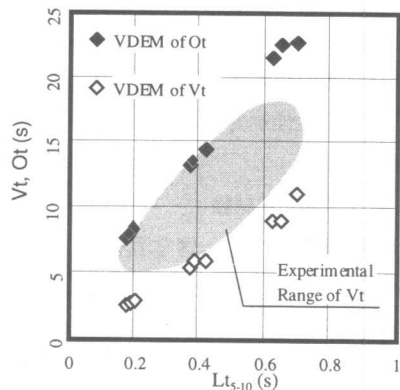


Fig.11 Relationship between Flow Time Vt, Ot and L-flow Time Lt₅₋₁₀

Table 2 Relationship between Measured Value of Consistency Tests and Bingham's Constants

Consistency Test	Measured Value	Bingham's Constants	
		τ_y (Pa)	η (Pa·s)
Slumpflow Test	Sf. (cm)	↓↓↓	↓↓
L-flow Test	Lf. (cm)	↓↓↓	↓↓
	Lt ₅₋₁₀ (s)	↑	↑↑↑
Box fill Test	h (cm)	↑↑↑	↑↑
V-funnel Test	Vt (s)	↑	↑↑↑
O-funnel Test	Ot (s)	↑	↑↑↑

- 6) 三浦律彦・近松竜一・十河茂幸：ロート流下試験法による超流動コンクリートの品質判定に関する一考察，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.9-16，1993.5.
- 7) 谷川恭雄ほか：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（その1～その13），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A，pp.479-503，1994.9.