

論文 フレッシュコンクリートのビンガム定数に与える粗骨材容積比の影響に関する解析的研究

黒川善幸^{*1}・谷川恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・西之園一樹^{*4}

要旨：フレッシュコンクリートは、固体相と液体相で構成される二相系材料であるという特殊性から、そのレオロジー特性を定量的に把握することが難しい。本研究では、粗骨材容積比がフレッシュコンクリート全体としてのレオロジー性状に与える影響を調べるため、二相材料を対象とする数値解析手法である粘塑性サスペンション要素法を用いて、スランプ試験およびLフロー試験の2種類のコンシステンシー試験時の流動シミュレーションを行った。また、その結果から、粗骨材容積比と、コンクリート全体系のビンガム定数の関係について考察した。

キーワード：フレッシュコンクリート、粗骨材容積比、固液二相系、ビンガム定数、流動解析

1. まえがき

従来、運搬性や構造的一体性、造形の自由度の高さなどから、コンクリートの施工は現場打設を中心として行われてきた。しかし、その施工条件は建設現場ごと、打設部位ごとに異なり、コンクリートの施工性を確実に評価する合理的な管理方法が模索されている。そのために、フレッシュコンクリートの性状をレオロジー的な側面から把握しようとする研究も盛んに行われており、これらのアプローチは、コンクリート工事における「施工設計法」を確立する上で重要なステップとなる[1]。

一方、フレッシュコンクリートは粗骨材とマトリックスモルタルからなる二相材料と考えることができるが、粗骨材の混入条件によってその性状は多様に変化することや、フレッシュコンクリートの物性の測定には、通常のレオロジー試験装置が適用できないなどの問題がある。

本研究の目的は、粗骨材がコンクリートのレオロジー的性質に与える影響を明らかにすることにある。本報では、フレッシュコンクリート中の粗骨材量が、代表的なコンシステンシー試験であるスランプ試験およびLフロー試験による測定値に与える影響を調べるため、二相材料を対象とする数値解析手法である粘塑性サスペンション要素法 (VSEM) を用いた流動シミュレーションを行うとともに、比較実験を行った。また、解析結果より、粗骨材混入がコンクリート全体系のビンガム定数に与える影響について検討した。

2. 粘塑性サスペンション要素法による解析

2.1 解析の概要

粗骨材容積比がフレッシュコンクリート全体系のレオロジー性状に与える影響を調べるため、VSEMを用いて、スランプ試験およびLフ

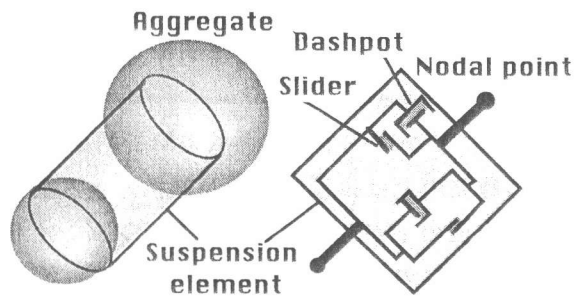


図-1 サスペンション要素

*1 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻、工修 (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 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)
 *4 竹中工務店、 工修

表-1 主な入力パラメータ

	Diameter of coarse aggregate d (mm)	Volume fraction of coarse aggregate V_g	Density of gravel ρ_g (kg/m ³)	Density of mortar ρ_m (kg/m ³)	Yield value of mortar τ_{ym} (Pa)	Plastic viscosity of mortar η_m (Pa·s)
Slump test	30	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5	2600	2200	50, 100, 150, 200, 250, 300	10
L-flow test					50	10, 20, 30, 40, 50, 60

ロー試験時のフレッシュコンクリートの挙動について、3次元流動シミュレーションを行った。VSEMで用いた解析モデルを図-1に示す。

解析に用いた主な入力パラメータを表-1に示す。通常の粗骨材の実積率が60%前後であることから、粗骨材容積比 V_g は0.5を上限として0.1刻みで変化させた。また、スランプ試験およびLフロー試験が、それぞれ試料の降伏値および塑性粘度をよく検出することから[2, 3]、マトリックスモルタルの降伏値 τ_{ym} および塑性粘度 η_m を変化させて計算を行った。

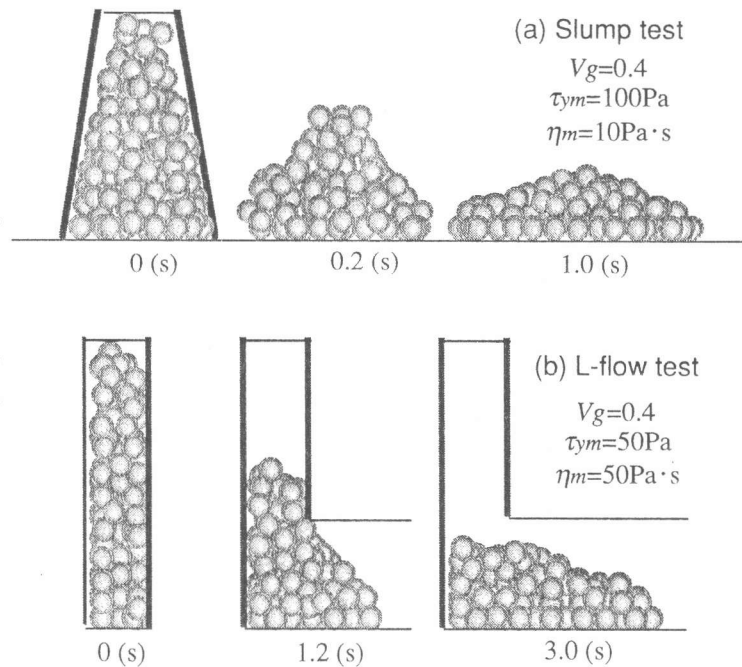


図-2 解析結果の一例

2.2 解析結果とその考察

図-2に、粗骨材容積比 V_g が0.4の場合における、スランプ試験およびLフロー試験時の流動解析結果の一例を示す。3次元解析を行ったため、計算量の限界から今回の解析では粗骨材径を30mmとしたが、解析結果は実現象を良く表しているといえる。図-3は、スランピング曲線の解析結果の一例である。マトリックスモルタルのビンガム定数が一定であっても、粗骨材容積比 V_g が増加することによりスランプ値 SI が小さくなることがわかる。また、マトリックスモルタルの降伏値 τ_{ym} が大きい場合には、 V_g の増加にともなう SI の減少量が大きくなっているが、 $V_g = 0.1$ の場合は、 τ_{ym} によらず SI はほぼ一定であり、 V_g が大きくなるにつれて SI が τ_{ym} に敏感に反応することがわかる。

図-4は、Lフローイング曲線の解析結果の一例である。フレッシュコンクリートのように実際の流動の範囲内では体積の増減が無視できる試料の場合、図-5に示すように、Lフロー試験時における試料上面の下がり量であるLスランピング値 l_s と試料の流出距離であるLフローイング値 l_f の関係は、試料のレオロジー性状によらず、流出部の試料充填率 R_f によって定まるほぼ一定の経路をたどる[2]。しかしながら、VSEMでは骨材を表す節点間にサスペンション要素が構成されて力が伝達されると仮定しているため、粗骨材容積比 V_g が非常に小さい試料の解析結果は、要素数が少なくなり、体積の減少による誤差が特に大きくなった。これは、Lフロー試験では側面・底面の拘束が大きく、流出量が抑えられたためと考えられる。そこで、図-4では、試料充填率 R_f が実験より得られた0.65となるように解析結果を補正している。図-4によれば、スランピング曲線と同様、ビン

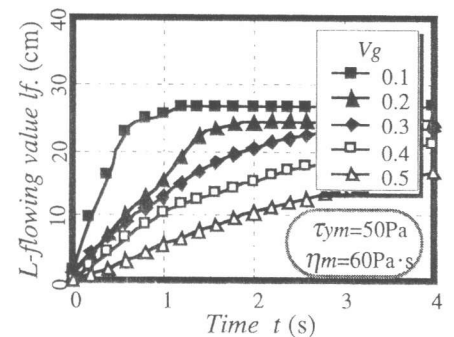
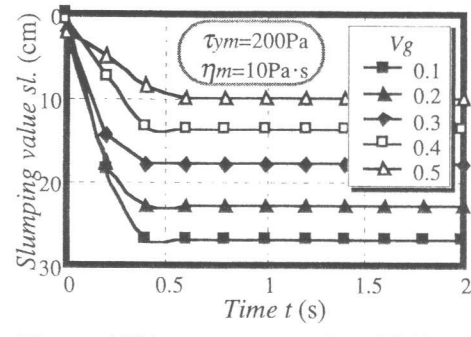
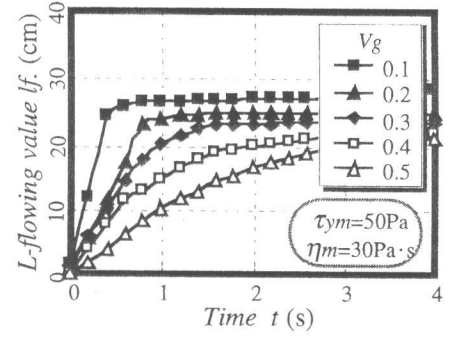
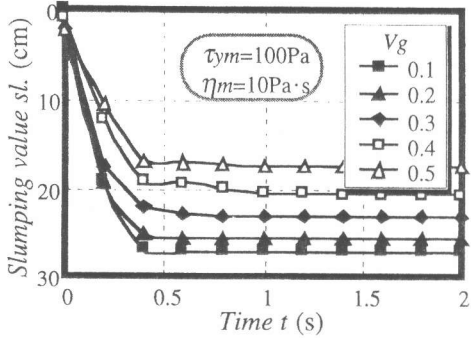
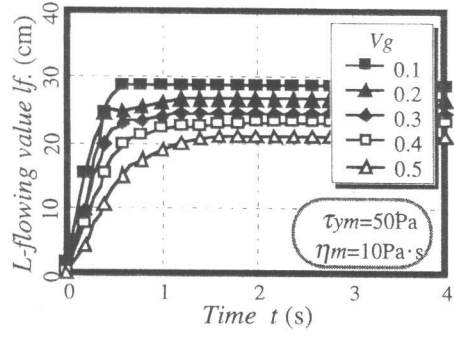
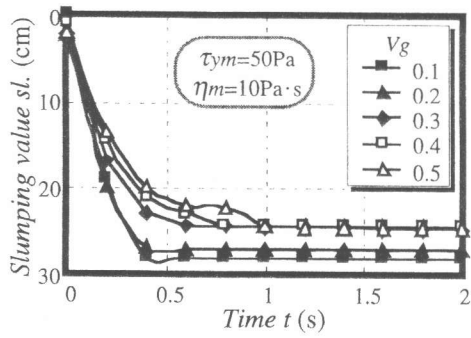
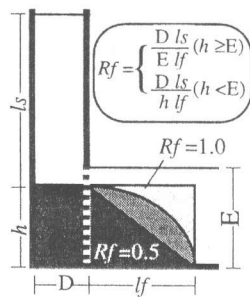


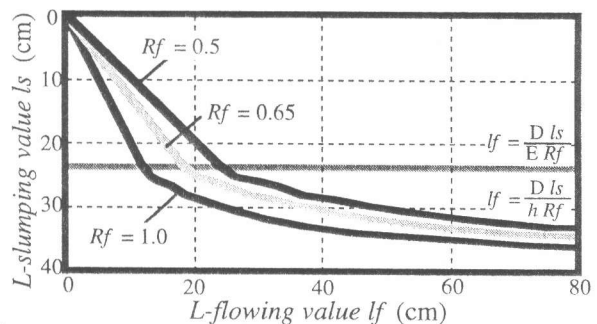
図-3 解析によるスランピング曲線

図-4 解析によるLフローイング曲線

ガム定数が一定のマトリックスモルタルに対し、 V_g が大きくなるにつれて最終Lフロー値 l_f が小さくなる。また、一定のLフローイング値に到達するのに要する時間は、 V_g が大きくなるにつれて顕著に増加していることがわかる。



(a) 試料充填率 R_f の定義



(b) $l_s - l_f$ 曲線に与える R_f の影響

図-5 Lフロー試験時の試料充填率 R_f

VSEMでは、節点となる粗骨材を完全球形と仮定していることと、今回の解析では粗骨材の粗粒率の影響を除去するために粒径を一定としていることから、比較実験では模擬粗骨材として密度 $\rho = 2460 \text{ kg/m}^3$ 、直径 $d = 24 \text{ mm}$ のガラス玉を用いた。図-6は、スランピング曲線およびLフローイング曲線の解析結果と実験結果を比較したものである。図中に示した実験結果のマトリックスモルタルのビンガム定数は、モルタルのみを用いて行ったスランプ試験およびLフロー試験の測定値から、後述のビンガム定数推定式(3, 4)を用いて算出した値である。解析結果は、それぞれマトリックス

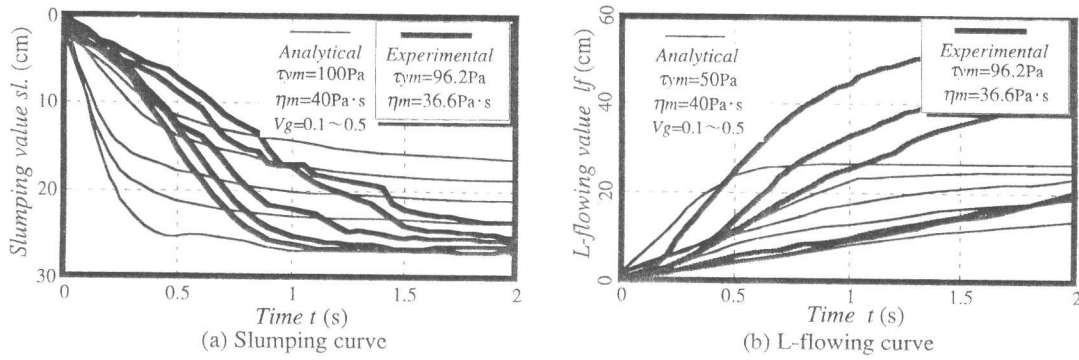


図-6 解析結果と実験結果の比較

モルタルの降伏値 τ_{ym} および塑性粘度 η_m の最も近いものを併示した。最終的なスランプ値 sl および L フロー値 lf は、いずれも実験値よりも解析値の方が小さくなるが、粗骨材量の変化に対する傾向は一致している。また、前述のように本解析手法は、粗骨材量が小さい範囲では誤差が大きいことも明らかである。

3. 固液二相系材料のレオロジー

フレッシュコンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材によって構成される二相材料と考える場合、粗骨材容積比がその実積率以下という条件下においては、粗骨材の間隙を満たすだけのマトリックスモルタルが存在する。したがって、モルタル部は内部応力がそれ自体の降伏値 τ_{ym} 以下に収束するまで変形・流動する。内部応力に変化がなければ、フレッシュコンクリート全体系の降伏値は、理論的にはマトリックスモルタルの降伏値 τ_{ym} によって決まり、粗骨材の有無には左右されない。しかしながら、実際には、変形・流動が進行するにつれて粗骨材間距離が非常に小さくなり、粗骨材の接触による摩擦やロッキングが生じるため、マトリックスモルタルが負担する応力が低下して、フレッシュコンクリート全体系としての降伏値がみかけ上増加することが考えられる。

一方、塑性粘度については、図-7に示すように、粗骨材が存在することにより、一定の応力が作用しても変位 δ およびひずみ γ は異なる。粗骨材容積比 V_g のコンクリートでは、単位長さに占める粗骨材の距離の割合は V_g の3乗根に比例することや、塑性粘度がひずみ速度の逆数に比例することなどから、粗骨材容積比の増加、すなわちマトリックスモルタルの相対的な体積の減少によって、フレッシュコンクリート全体としての変形量が小さくなることにともなう塑性粘度の増加量 $\eta(V_g)$ は、式(1)のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 \delta_m &= L\theta, & \delta_c &= L'\theta = (1 - \sqrt[3]{V_g})L\theta, \\
 \dot{\gamma}_m &= \dot{\theta}, & \dot{\gamma}_c &= (1 - \sqrt[3]{V_g})\dot{\theta}, & \dot{\gamma} &\propto 1/\eta, \\
 \eta(V_g) &= \eta_m \sqrt[3]{V_g} / (1 - \sqrt[3]{V_g})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

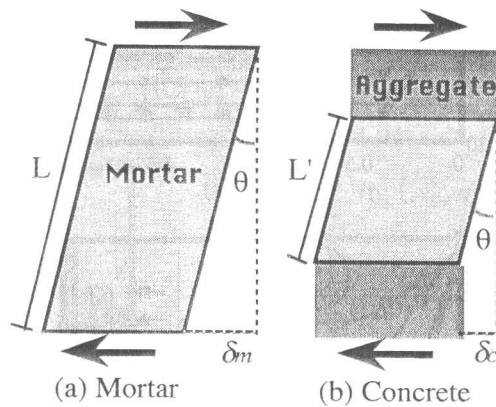


図-7 コンクリートとモルタルの変形量の差

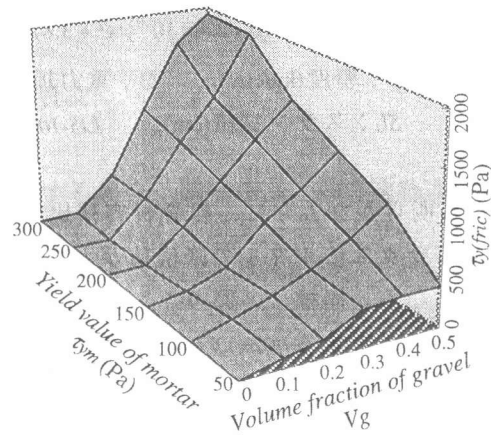
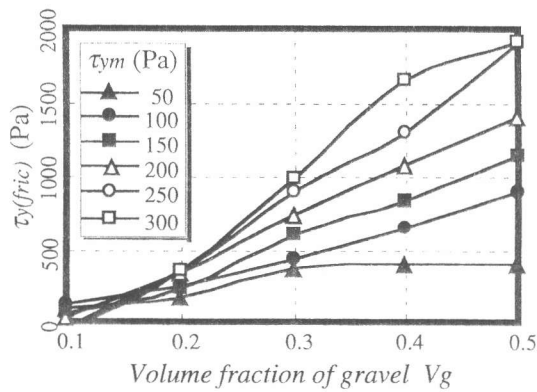


図-8 粗骨材の接触にともなう降伏値の増加量

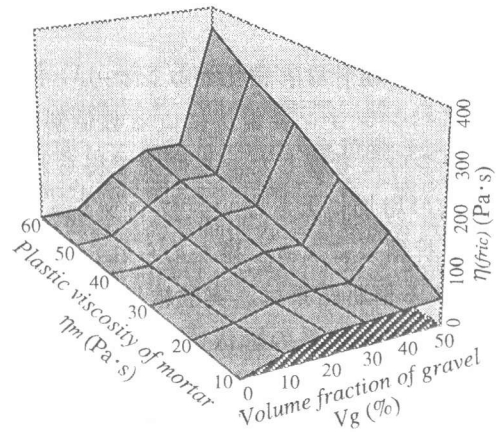
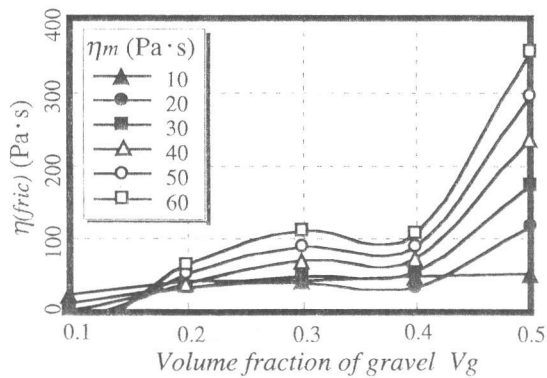


図-9 粗骨材の接触にともなう塑性粘度の増加量

降伏値と同様に、塑性粘度の場合も粗骨材間の摩擦やロッキングによって応力が低下するために生じるひずみ速度の減少によって、コンクリート全体系の粘性の増加が生じる。以上のことを総合して、マトリックスモルタルとコンクリート全体系のビンガム定数 τ_{yc} , η_c を、ここでは式(2)のような形で分解する。

$$\tau_{yc} = \tau_{ym} + \tau_y(frict),$$

$$\eta_c = \eta_m + \eta(Vg) + \eta(frict)$$

(2)

ここに、 $\tau_y(frict)$ ：粗骨材の接触による降伏値の増加量(Pa),

$\eta(Vg)$ ：粗骨材の容積比増加による塑性粘度の増加量(Pa·s),

$\eta(frict)$ ：粗骨材の接触による塑性粘度の増加量(Pa·s)

図-8は、スランプ試験の解析結果をもとに、降伏値推定式(3)[3]によって推定されたコンクリート全体系の降伏値 τ_{yc} から、入力値として用いたマトリックスモルタルの降伏値 τ_{ym} を引いた値 $\tau_y(frict)$ と粗骨材容積比 Vg との関係を示したものである。また、図-9は、Lフロー試験の解析結果をもとに、塑性粘度推定式(4)[4]によって推定されたコンクリート全体系の塑性粘度 η_c から、入力値として用いたマトリックスモルタルの塑性粘度 η_m および前述の粗骨材体積による塑性粘度の増加分 $\eta(Vg)$ を引いた値 $\eta(frict)$ と Vg との関係を示したものである。

$$\tau_y = 7 \rho G (30 - Sl.) / 1200 \sqrt{3} \quad (3)$$

$$\eta = Lt_{5-10} \left\{ (8.3 \times 10^{-5} / \rho - 2.4 \times 10^{-8}) \tau_y^2 + 3.8 / \rho - 5.0 \times 10^{-5} \right\} \quad (4)$$

ここに、 ρ ：密度(kg/cm³), G ：重力加速度(=9.8m/s²),

$Sl.$ ：スランブ値(cm), Lt_{5-10} ： lf が5cm～10cm間の流動時間(s)

図-8から明らかなように、粗骨材容積比 V_g の増加にともない、 $\tau_y(fric)$ はほぼ線形に増加する。一方、マトリックスモルタルの降伏値が大きい場合の方が、同一の粗骨材量に対する $\tau_y(fric)$ の増加傾向が顕著となる。同様に、図-9によれば、マトリックスモルタルの粘性が大きくなるにつれて、粗骨材容積比 V_g に対する $\eta(fric)$ の変化が敏感となることがわかる。また、 $V_g=0.4$ 以上で $\eta(fric)$ が極端に大きくなることから、球形の同一径骨材を用いた場合を対象とした本解析の範囲においては、 V_g の値が0.4以上でロッキングによる粘性の増加が現れていると考えることができる。

4. まとめ

本研究では、粗骨材容積比がコンクリート全体系のレオロジー性状に与える影響を調べるため、粘塑性サスペンション要素法による数値解析を行い、その結果から、二相系材料のみかけのビンガム定数について考察した。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 粗骨材量の増加にともない、フレッシュコンクリートの変形量が小さくなることが、実験結果および解析結果によって確かめられた。
- 2) VSEMによる解析結果は、実験結果と傾向は一致するものの、最終的な変形は小さくなる。
- 3) コンクリート全体系の降伏値は、マトリックスモルタル自体の降伏値および粗骨材間の摩擦による降伏値の増加分の和として、また、塑性粘度は、モルタル自体の塑性粘度と粗骨材容積比の増加にともなう塑性粘度の増加分、および粗骨材間の摩擦やロッキングによる塑性粘度の増加分の和として表現することが可能である。

【謝辞】

本研究費の一部は、平成7年度文部省科学研究費補助金・総合研究(A)(研究代表者：友澤史紀・東京大学教授)および試験研究(B)によった。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- [1] 谷川恭雄・森博嗣：コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして、セメント・コンクリート、No. 501, pp. 11-20, 1988. 11
- [2] 西之園一樹・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：動的粘塑性有限要素法によるLフロー試験のシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、A, pp. 517-518, 1994. 9
- [3] 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対するレオロジー的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 462, pp. 1-10, 1994. 8
- [4] 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, 1995. 8