

論文 モルタルおよびコンクリートの小型壁型枠内打設に関する研究

井上和政*1・谷川恭雄*2・森 博嗣*3・作田雄一*4

要旨：高流動コンクリートの型枠内における流動挙動を把握することを目的として、塑性粘度および降伏値、型枠条件を実験要因とした小型壁型枠内打設実験と粘塑性空間要素法によるシミュレーションを行い、試験結果を基に、流動形態を表すパラメータとして流動勾配や流動速度等について検討した。その結果、流動勾配は、型枠の厚さ、鉄筋の有無、降伏値等の影響を大きく受けるが、塑性粘度の影響は小さいことが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート、流動勾配、降伏値、塑性粘度、粘塑性空間要素法

1. はじめに

無振動打設を前提とした高流動コンクリートの打設では、型枠内の充填状況を予測する必要がある。しかしながら、各種条件下の型枠内に打設する際の流動形態や、流動勾配または安息角と材料性質との関係は、必ずしも明確ではない。そこで、本研究では、高流動コンクリートを各種条件下の型枠内に打設したときの流動形態を予測する解析手法を確立するために、流動勾配、流動速度などの情報を、みかけのビンガム定数（塑性粘度および降伏値）[1]により定量的に表現し、その影響要因について定量的な検討を行った。また、粘塑性空間要素法[2]を用いたシミュレーションを行い、実験結果と比較した。

2. 実験の概要

2.1 小型壁型枠

実験に用いた型枠および配筋は、図-1に示すように、壁厚80mmの無筋型枠8A、壁厚80mmの配筋型枠8B、壁厚40mmの無筋型枠4Aの3種類である。壁の前面は透明アクリル板、その他は合板で作成した。型枠8Bでは、模擬鉄筋として、壁厚80mmの中心に $\phi 2\text{mm}@28\text{mm}$ の金網を配置した。本実験

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（比重=3.16）
細骨材	川砂（比重=2.60）
粗骨材	碎石（比重=2.60、実積率=62.3%、粒径=5~10mm）

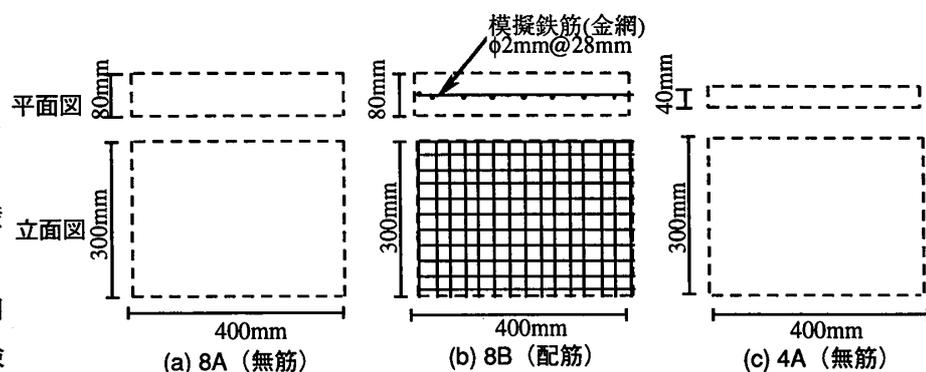


図-1 小型型枠および配筋

- *1 (株) 竹中工務店 技術研究所、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 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修（正会員）

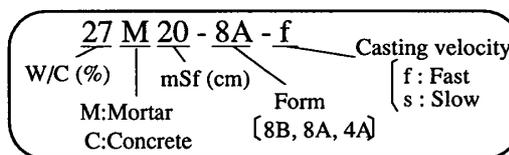
表-2 調合表

	W/C	S/C	mSf	W	C	S	G	HAE/C(%)
Mortar	0.27	1.0	20, 28, 36	278	1030	1029	-	1.25, 1.90, 2.41
	0.33	1.4	20, 28, 36	279	843	1181	-	0.82, 1.10, 1.30
	0.43	2.0	20, 28, 36	284	659	1320	-	0.60, 0.90, 0.98
Concrete	0.27	1.0	28	199	736	736	741	3.40
	0.33	1.4	20, 28, 36	199	603	845	741	0.98, 1.30, 2.00
	0.43	2.0	20, 28	203	471	944	741	1.10, 1.40

[Notes] W/C: Water-cement ratio, S/C: Sand-cement ratio, mSf: Designed mini slump-flow value (cm), W: Water (kg/m³), C: Cement (kg/m³), S: Fine aggregate (kg/m³), G: Coarse aggregate (kg/m³), HAE: High - range water reducing AE agent.

では実施工に用いられる壁型枠の1/2~1/5程度のスシリーズ名

ケールを想定しているが、この配筋は比較的密な条件といえる。



2.2 使用材料および調合

実験に用いた材料を表-1に示す。粗骨材には、粒径5~10mmの碎石を使用した。これは、小型型枠の壁厚が実大規模の約1/2に相当するためである。

モルタルおよびコンクリートの調合を表-2に示す。試料は、9種類のモルタルおよび6種類のコンクリートの合計15種類である。試料の性状は、塑性粘度 η と降伏値 τ_y の2つのパラメータをそれぞれ3水準に変化させた。塑性粘度 η は、水セメント比W/Cを27, 33, 43%、砂セメント比S/Cを1.0, 1.4, 2.0とすることで変化させ、降伏値 τ_y は、ミニスランプフロー値mSfを20, 28, 36cmになるように、ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤を内割りで添加して調整した。コンクリートの調合は、このモルタルの調合に粗骨材を外割りで285 lit./m³混入し、所定の目標ミニスランプフロー値mSfになるように高性能AE減水剤の添加量HAE/Cで調整した。

2.3 実験方法

モルタルおよびコンクリートは、1軸強制練りミキサーで約15分間練り混ぜた後、ミニスランプフロー試験 [3] およびミニLフロー試験 [4] に供した。次に、底に開口部のある容器に試料を詰め、上面から圧力を加えながら、型枠の端部から試料を連続的に打設した。壁厚あたりの打設速度Qは、f: 速く打設する場合、 $Q=1500 \sim 5500 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、s: 遅く打設する場合、 $Q=500 \sim 1500 \text{ mm}^2/\text{s}$ の2水準とした。測定

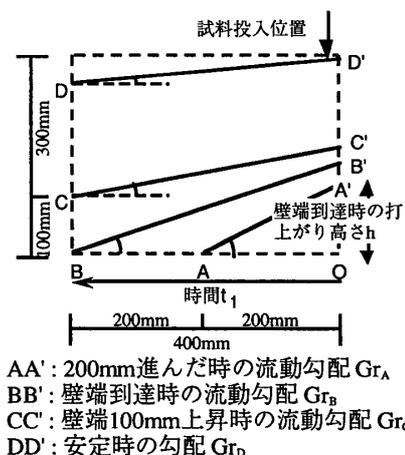


図-2 測定値の概要

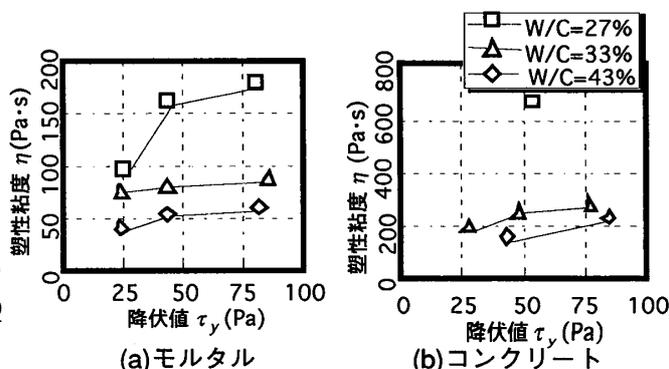


図-3 コンシステンシー試験による塑性粘度 η と降伏値 τ_y の推定値

値の概要を図-2に示す。

3. 実験結果とその考察

3.1 コンシステンシー試験結果

9種類の実験用モルタルおよび6種類のコンクリートについて行ったミニランプフロー試験およびミニLフロー試験の結果から推定したビンガム定数を図-3に示す。降伏値 τ_y に関しては、小村らによる推定式 [5] を、塑性粘度 η に関しては、西之園らによる推定式 [6] を用いた。

3.2 小型壁型枠内の流動状況

本実験によれば、ミニランプフロー値 mSf が大きくなるにしたがってB点到達時間 t_b は小さくなり、OB間の平均速度は大きくなった。一般に、高流動コンクリートの安定時の勾配 Gr_D は約0.1と報告されているが [7]、この条件を満たしているものは、ミニランプフロー値 $mSf=36cm$ の試料と、 $mSf=28cm$ のうち水セメント比 $W/C=43\%$ の試料のみであった。 $W/C=33\%$ のモルタルおよびコンクリートの流動状況の一例を図-4に示す。

3.3 型枠および配筋の影響

流動勾配 Gr に与える型枠および配筋の影響の一例を図-5に示す。いずれの水セメント比

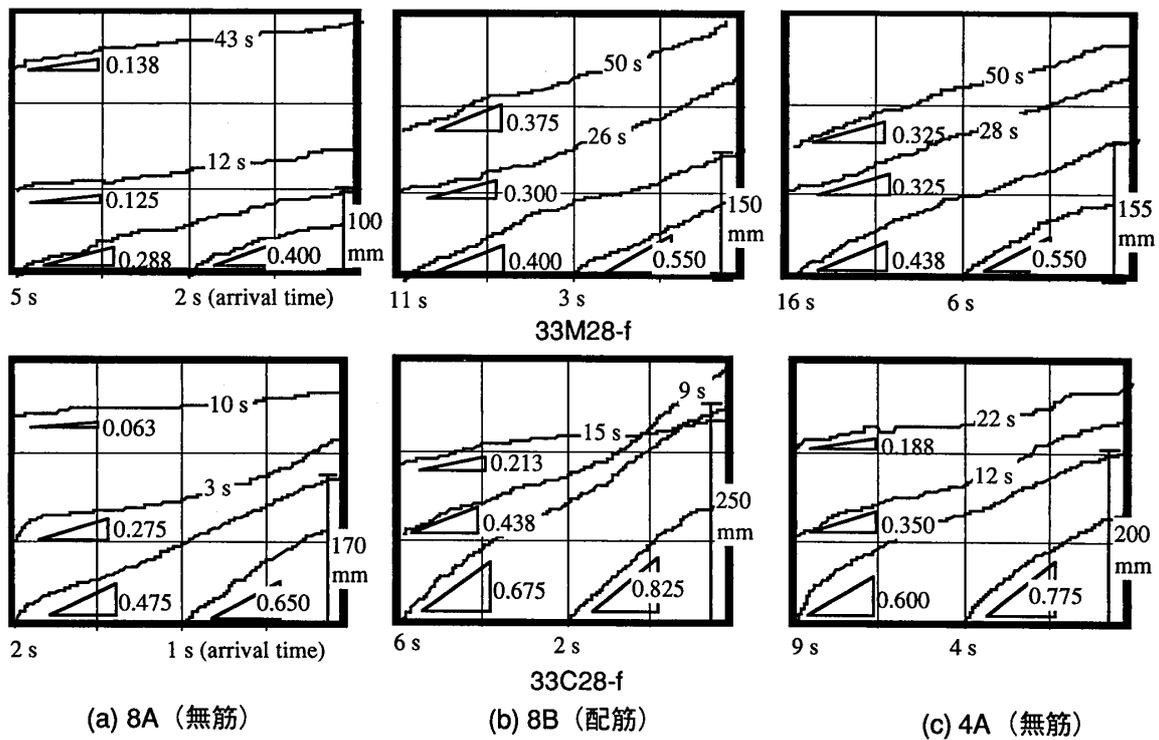


図-4 流動状況の一例

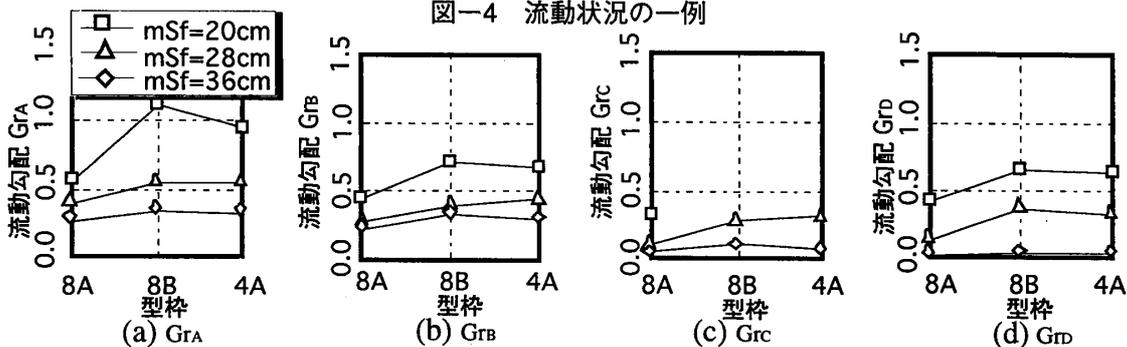


図-5 流動勾配 Gr に与える型枠および配筋の影響 (33M-fの場合)

W/C の試料においても、壁厚 80mm の配筋型枠 8B の流動勾配 Gr は、壁厚 40mm の無筋型枠 4A とほぼ同じ値となっており、今回使用した、 $\phi 2\text{mm}@28\text{mm}$ の密なシングル配筋は、壁厚を半分にすることと同様の効果があることがわかる。

3.4 降伏値 τ_y の影響

流動勾配 Gr に与える降伏値 τ_y の影響の一例を図-6に示す。いずれの水セメント比 W/C の試料においても、降伏値 τ_y の増加にともなって流動勾配 Gr は増加し、この傾向は、いずれの到達点 A, B, C, D における流動勾配 G_{rA} , G_{rB} , G_{rC} , G_{rD} でも同様であった。同じ水セメント比 W/C=33% のモルタルとコンクリート（紙数の都合上、図は示していないが）では、試料の流動時の勾配 G_{rA} , G_{rB} , G_{rC} に差があるが、試料が停止した時の勾配 G_{rD} では差がなく、降伏値 τ_y のみに支配されている。また、壁厚80mmの配筋型枠 8B と壁厚40mmの無筋型枠 4A は、流動勾配 Gr に与える降伏値 τ_y の影響が大きい。

3.5 塑性粘度 η の影響

流動勾配 Gr に与える塑性粘度 η の影響の一例を図-7に示す。いずれの到達点 A, B, C, D での流動勾配 G_{rA} , G_{rB} , G_{rC} , G_{rD} も、塑性粘度 η の影響は非常に小さい。他の型枠においても同様の結果であり、この程度の打設速度では、流動勾配は塑性粘度の影響をあまり受けない。

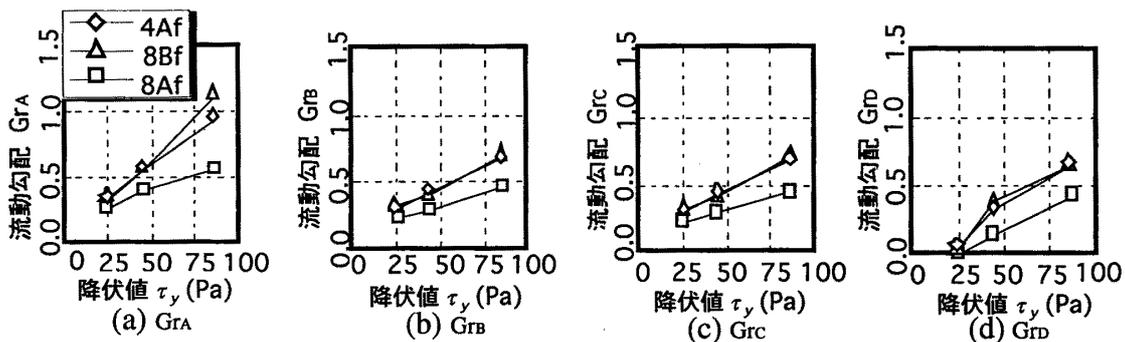


図-6 流動勾配Grに与える降伏値 τ_y の影響 (33M-fの場合)

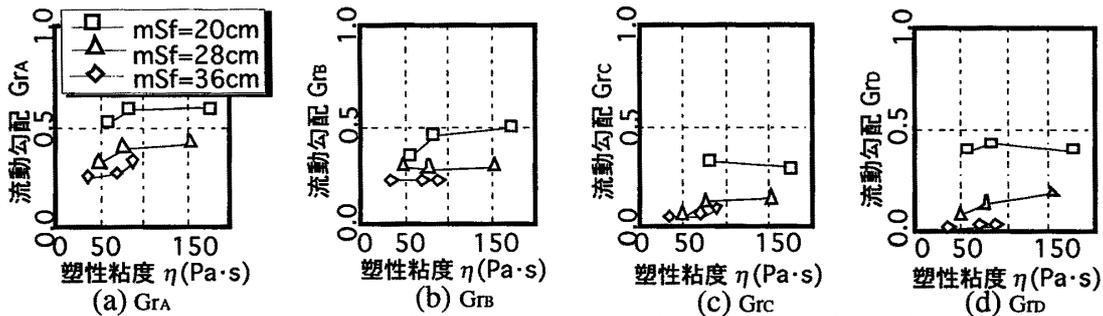


図-7 流動勾配Grに与える塑性粘度 η の影響 (モルタル (8A-f) の場合)

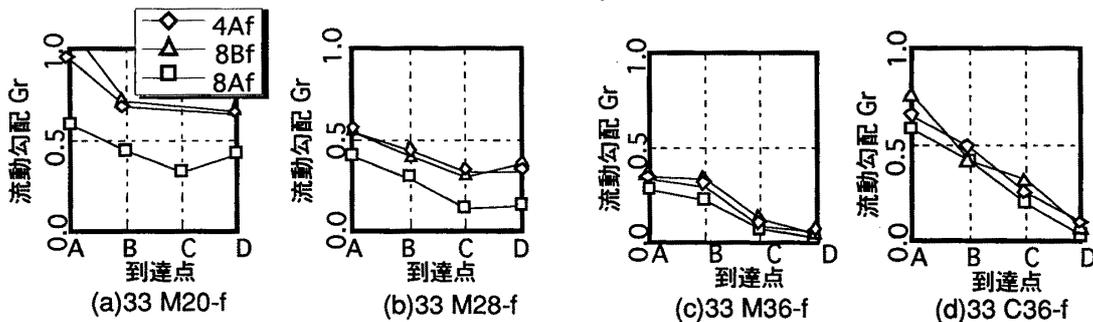


図-8 流動勾配Grの時刻変化

3.6 流動勾配 Gr の時刻変化

流動勾配 Gr の時刻変化の一例を図-8に示す。流動勾配 Gr は充填量の増加とともに徐々に小さくなる。ミニスランプフロー値 mSf が小さいモルタルは、到達点 A における流動勾配 Gr_A が特に大きくなる傾向がある。水セメント比 W/C とミニスランプフロー値 mSf の等しいモルタルとコンクリートを比較すると、試料が流動している時の勾配 Gr_A, Gr_B, Gr_C はコンクリートの方が大きく、これは、粗骨材の混入によるみかけの粘性の増加として説明できる。

4. 小型壁型枠内への打設シミュレーション

前述の実験を粘塑性空間要素法 [2]によりシミュレートし、入力値のビンガム定数の入力値を変化させた場合の解析結果と実験結果を比較した。

4.1 解析条件

解析に用いた空間要素の分割を図-10に、入力値を表-4に示す。解析に用いたビンガム定数は、実験結果より推定した値を基に設定した。打設は、図-10中の黒塗要素で示すように右上の要素から行い、圧力を加えず自由落下によるものとした。

4.2 解析結果および考察

図-11は、解析結果と実験結果を比較したものの一例であり、図中のマーカーおよび実線は、それぞれ解析および実験の結果である。打設終了時を示した図-11(d)中には、打設順にマーカーを区別して示した。実験と解析では、時間的に若干の違いがみられるが、これは、実験時の打設速度の変化が大きかったためである。しかし、流動・充填の形態については両者はほぼ等しく、十分な精度でシミュレートしていると判断できる。

図-12に、シリーズ43M36-8A-fの22秒後における偏差ひずみ速度の2次不変量の平方根 $\sqrt{J_2}$

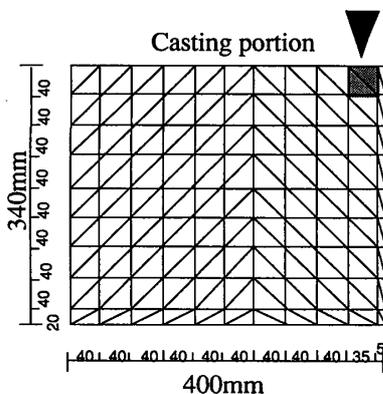


図-10 小型壁型枠の空間要素分割

表-4 解析の入力値

Series	η	τ_y	Q	K_V
27M20-8A-f	180	80	0.0025×2	40
27M28-8A-f	160	50		
27M36-8A-f	90	30		
33M20-8A-f	90	90	0.0025×2	40
33M28-8A-f	80	50		
33M36-8A-f	70	30		
43M36-8A-f	60	80	0.0025×2	40
43M28-8A-f	50	50		
43M20-8A-f	40	30		

[Notes] τ_y : Yield value of concrete (Pa), K_V : Bulk modulus of concrete (MPa), Q : Casting rate (m²/s), η : Plastic viscosity of concrete (Pa·s),

Experimental (Analytical) time



33 M20-8A-f

図-11 小型壁型枠内打設シミュレーションの一例

の分布を示す。型枠底面付近の流動は停滞し、自由表面近傍のコンクリートが流動している様子が明らかであり、この流動形態は実験でも観察された。

5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- 1) 流動勾配は、壁の厚さ、鉄筋の有無の影響を大きく受ける。今回の実験では、壁厚80mmの配筋型枠 8B と壁厚40mmの無筋型枠 4A の場合がほぼ同様の結果を示した。
- 2) 最終的な流動勾配は、降伏値の影響を大きく受けるが、塑性粘度の影響は小さい。
- 3) 試料の種類や打設方法が異なっても、降伏値が同じであれば、最終的な流動勾配は、ほぼ一定となる。
- 4) 配筋の有無によって、みかけのビンガム定数は顕著に異なる。
- 5) みかけのビンガム定数を入力値として、配筋型枠内の充填シミュレーションが可能である。

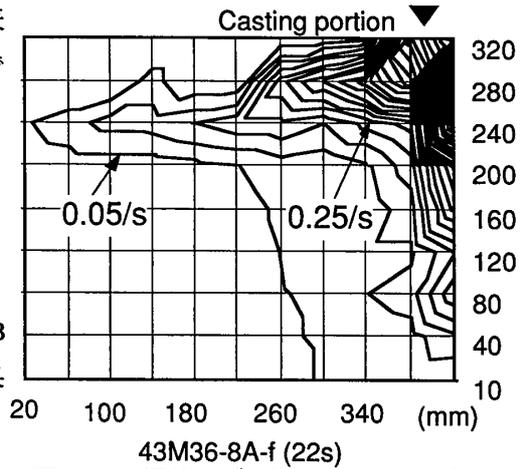


図-12 偏差ひずみ速度の2次不変量

の平方根 $\sqrt{sJ_2}$ の分布

[謝辞]本研究費の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金・基盤研究 (A) (研究代表者：友澤史紀・東京大学教授) および同・基盤研究 (A)、同・奨励研究 (A) ならびに平成8年度竹中育英会建築研究助成金によった。また、本実験に際し、牧野敏明君 (名古屋大学大学院生)、土井伸司君 (名古屋大学学生) の助力を得た。さらに、本解析に際し、黒川善幸先生 (名古屋大学助手)、北大路洋君 (名古屋大学大学院生)、山中守人君 (名古屋大学大学院生) の助力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 井上和政・和泉意登志・弦田康平・三浦義雅：配筋量が異なる壁部材での高流動コンクリートの見かけのレオロジー定数に関する研究，フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.85-90，1996.4
- [2] 谷川恭雄・森博嗣・中村正行・渡辺健治：型枠内へのコンクリート打設に関する粘塑性空間要素法解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.245-246，1989.10
- [3] 蔡英・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・小村理恵・西之園一樹：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関する研究 (その2：各種要因の影響に関する考察)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，A，pp.521-522，1994.9
- [4] 西之園一樹：動的粘塑性解析手法によるコンシステンシー試験のシミュレーション，名古屋大学大学院工学研究科修士論文，1996.3
- [5] 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集，No.462，pp.1-10，1994.8
- [6] 黒川善幸・谷川恭雄・森博嗣・西之園一樹：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.453-458，1996.7
- [7] 小久保正美・蓮尾孝一・芝池達司・西本好克・中島健治・吉田敏之・田中斉・浦野英男，高流動コンクリートの実大施工実験 (その5：流動勾配)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，A-1，pp.327-328，1995.8