

# 論文 高流動コンクリートの中型壁型枠内打設に関する研究

寺田謙一<sup>\*1</sup>・森博嗣<sup>\*2</sup>・黒川善幸<sup>\*3</sup>・北大路洋<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、レオロジー的な立場から、壁型枠内打設時の高流動コンクリートの流動性について実験的な検討を行った。また、粘塑性空間要素法による解析を行い、高流動コンクリートのワーカビリティの予測の可能性について考察した。その結果、試料のみかけのレオロジー定数を打設時の条件によって適切に設定することにより、解析によるワーカビリティの予測が可能であることを確認した。

キーワード：降伏値、塑性粘度、鉄筋比、流動勾配、壁型枠、粘塑性空間要素法

## 1. はじめに

近年、バイブレータ等を使用せずに型枠内へ打設することが可能な各種の高流動コンクリートが実用化されつつある。建築施工の省力化をはかる上で、この種のコンクリートの使用は非常に有効であるが、実施工においては未経験のことも多く、材料分離等、新たな課題も指摘されている。これは、フレッシュコンクリートの性能評価方法が十分に確立されていないためであり、施工性の予測に各種のコンシステンシー試験結果が直接結びついていないことに起因している。このような発展途上のコンクリート工事の実状を踏まえ、フレッシュコンクリートのレオロジーに関する研究が盛んに進められ、また一方では、数多くの評価試験方法が提案されている。しかし、各種の試験結果のレオロジー的意味や実施工時における作業性との関連についての系統的な報告はまだ少ない[1]。そこで、本研究では、より実用的な施工設計法の確立を目的として、比較的大規模の条件に近い中型壁型枠を用いた打設実験および粘塑性空間要素法[2]を用いた動的2次元解析を行い、高流動コンクリートの性状および配筋条件が充填挙動に与える影響について基礎的な検討を行った。

## 2. 実験の概要

本実験では、高流動コンクリートの充填挙動に及ぼす配筋量の影響を調べるために、配筋条件の異なる3種類の中型壁型枠のそれぞれに、6種類のコンクリートを打ち込み、配筋量と試料の性状の違いによる流動勾配の変化を調べた。

### 2.1 中型壁型枠

中型壁型枠の概要を図-1に示す。型枠は柱および壁を模擬したもので、型枠の寸法はすべて同一である。配筋は無筋、現実的に考えられる標準的な配筋および過密配筋とした。壁の代表的な鉛直断面の鉄筋比 $P_t$ [3]は、標準配筋で $P_t=0.48\%$ 、過密配筋で $P_t=0.79\%$ である。型枠の片面はアクリル製とし、流動状況をVTRで撮影した。試料が型枠の壁部底面の中間点Aに達した時、壁端部Bに達した時、壁端部下面より300mmの位置Cまで上昇した時の流動勾配、および、流動が停止した位置Dの流動勾配を測定し、それぞれ $Gr_A$ 、 $Gr_B$ 、 $Gr_C$ 、 $Gr_D$ とした。

*1 錢高組	技術本部技術研究所	工修(正会員)
*2 名古屋大学助教授	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	工修(正会員)

## 2.2 試料

試料の調合表を表-1に示す。No.1, 2および5については、低発熱ポルトランドセメント(比重  $\rho=3.24$ )とポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤を用いた。細骨材には砕砂(比重  $\rho=2.65$ )と山砂(比重  $\rho=2.59$ )を容積比 6 : 4 で混合したものを使用し、粗骨材には硬質砂岩碎石(比重  $\rho=2.66$ )と石灰石碎石(比重  $\rho=2.68$ )を容積比 7 : 3 で混合したものを使用した。No.3および4では、普通ポルトランドセメント( $\rho=3.16$ )と分離低減型高性能AE減水剤を使用した。細骨材に砕砂と山砂を容積比 5 : 5 で混合したものを使用し、粗骨材には石灰石碎石のみを用いた。また、No.3は、同様な調合で2度実験を行った。

## 2.3 打設方法

No.1および2については、トラックアジテータのシュートにより型枠の柱部上端か

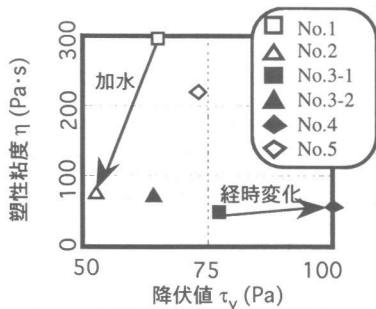


図-2 試料のレオロジー性質

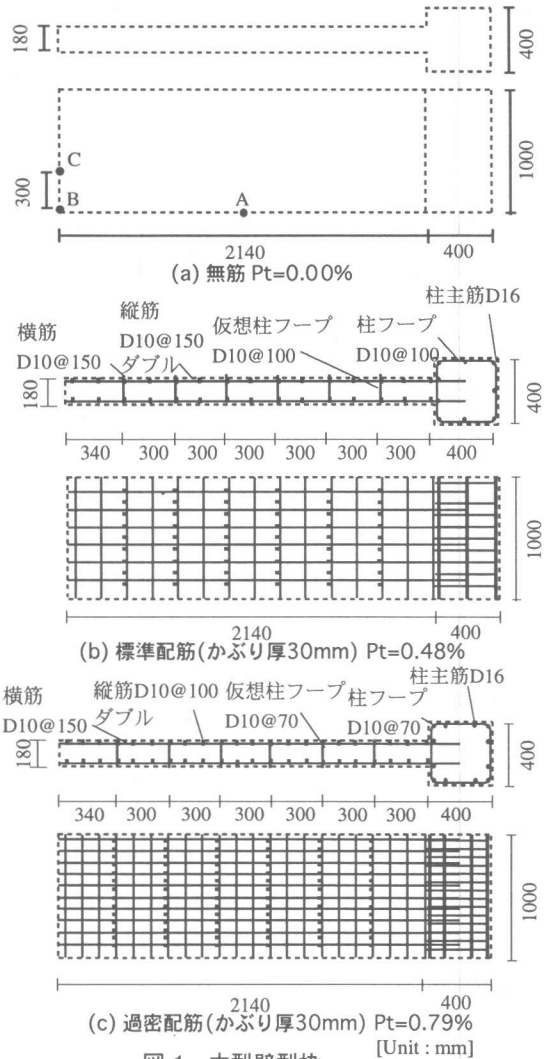


図-1 中型壁型枠

表-1 試料の調合表およびコンシステンシー試験結果

No.	W/B	Vg/Ga	W	C	SF	S	G	HAE/B	Air	Sf	Lt0-5	Lt5-10	$\tau_y$	$\eta$
1	0.28	0.53	165	572	18	827	841	0.0245	1.8	675×660	0.250	0.490	65.1	297.4
2	No. 1に加水 20kg/m <sup>3</sup>								3.2	755×740	0.100	0.130	51.9	79.9
3-1	0.50	0.52	180	360	-	878	874	0.0270	5.8	615×610	0.186	0.080	77.3	47.9
3-2	0.50	0.52	180	360	-	878	874	0.0270	5.9	680×660	0.080	0.120	64.6	72.9
4	No. 3-1の経時変化60分後								5.8	545×530	0.234	0.105	100.4	61.0
5	0.29	0.53	165	569	-	816	876	0.0200	2.8	630×640	0.390	0.380	72.0	229.0

### [Notes]

W/B : Water-Binder ratio, B=C+SF (kg/m<sup>3</sup>),

Vg : Volume fraction of coarse aggregate, Ga : Solid volume fraction of coarse aggregate, W : Water (kg/m<sup>3</sup>),

C : Cement (kg/m<sup>3</sup>), SF : Silica fume (kg/m<sup>3</sup>), S : Fine aggregate (kg/m<sup>3</sup>), G : Coarse aggregate (kg/m<sup>3</sup>),

HAE : High-range water reducing AE agent (kg/m<sup>3</sup>), Air : Air content (%), Sf : Slump-flow value(mm),

Lt0-5, Lt5-10 : L-flow time from 0cm to 5cm and from 5cm to 10cm (s),

$\tau_y$  : Estimated yield value (Pa),  $\eta$  : Estimated plastic viscosity (Pa · s).

ら試料を直接打設し、他の試料はコンクリートポンプ車を用いて打設した。加振、たたき、つつきなどは一切行っていない。

### 3. 実験結果およびその考察

#### 3.1 充填状況

各コンクリートの試験結果を前掲の表-1に示す。表中の、降伏値  $\tau_y$  は黒川らの推定式[4]を、塑性粘度  $\eta$  は黒川らの推定式[5]を用いて推定した値である。図-2に試料のレオロジー性質を示す。No.2は、No.1に加水したことによって塑性粘度の低下が著しいが、降伏値は塑性粘度ほどは低下していない。No.4は、No.3-1の経時変化後のものであり降伏値が増加している。

中型壁型枠への打設実験の結果を表-2に、また打設状況の一例として、No.3-1およびNo.4の打設状況の変化を図-3に実線で示す(図中には後述の解析結果が併示されている)。表-2および図-3より、配筋量の違いによって流動勾配  $Gr$  が大きく変化することがわかり、鉄筋量の増加がみかけのビンガム定数を増大させ、自己充填性が低下することを示している。

#### 3.2 充填量の影響

流動勾配  $Gr$  は、おおむね充填の進行とともに小さくなる。打設中の流動勾配  $Gr$  に影響を及ぼす因子としては、型枠および鉄筋とフレッシュコンクリート間の付着力の影響とフレッシュコンクリートのひずみ速度が考えられる。コンクリートの充填量が増加すると、流動している部分のコンクリートと型枠および鉄筋の接触面積がコンクリートの総重量に対して相対的に小さくなり、このため、充填中のコンクリート全体に対する付着力の影響が小さくなることと、同様に打設の進行とともに流動するコンクリートのひずみ速度が低下し、塑性粘度  $\eta$  の影響が小さくなり、流動勾配  $Gr$  が減少するものと考えられる。また、打設中のある時点から、打設したコンクリートが既打設のコンクリートの上面を流動する傾向が観察される。その場合、流動しているコンクリートだけを見ると勾配が大きくなっており、これは、前述のように相対的な付着力や、塑性粘度の影響が大きいためと考えられる。

#### 3.3 鉄筋比の影響

図-4に、流動勾配  $Gr$  と鉄筋比  $Pt$  の関係を示す。同図より明らかなように、おおむね鉄筋比  $Pt$  の増加にともなって流動勾配は増加する。アジテータ車より直接打設されたNo.1および2は、打設速度が一定ではなく、流動勾配がばらついている。コンクリートポンプ車より打設された試料では、比較的ばらつきの少ない結果が得られている。井上らの報告[3]によれば、流動勾配は鉄筋比だけでなく、かぶり厚さや鉄筋間のあき間隔にも左右されるが、今回の実験ではそれらの影響は検討していない。

#### 3.4 流動勾配とレオロジー性質の関係

図-5に、流動勾配  $Gr$  と降伏値  $\tau_y$  および塑性粘度  $\eta$  の関係を示す。同図では打設速度が一定で

表-2 打設実験結果

No.	Pt	Gr <sub>A</sub>	Gr <sub>B</sub>	Gr <sub>C</sub>	Gr <sub>D</sub>
1	0.00	0.262	0.159	0.065	0.042
	0.48	0.299	0.318	0.220	0.047
	0.79	0.523	0.318	0.168	0.121
2	0.00	0.224	0.112	0.042	0.019
	0.48	0.243	0.159	0.075	0.028
	0.79	0.290	0.196	0.093	0.023
3-1	0.00	0.206	0.168	0.112	0.047
	0.48	0.168	0.168	0.131	0.107
	0.79	0.280	0.280	0.206	0.136
3-2	0.00	0.150	0.121	0.028	0.037
	0.48	0.150	0.131	0.075	0.051
4	0.00	0.112	0.056	0.079	0.079
	0.48	0.271	0.262	0.229	0.280
	0.79	0.467	×	×	0.577
5	0.00	0.243	0.182	0.121	0.070

[Notes] Pt : Reinforcement ratio (%),  
Gr : Gradient of top surface

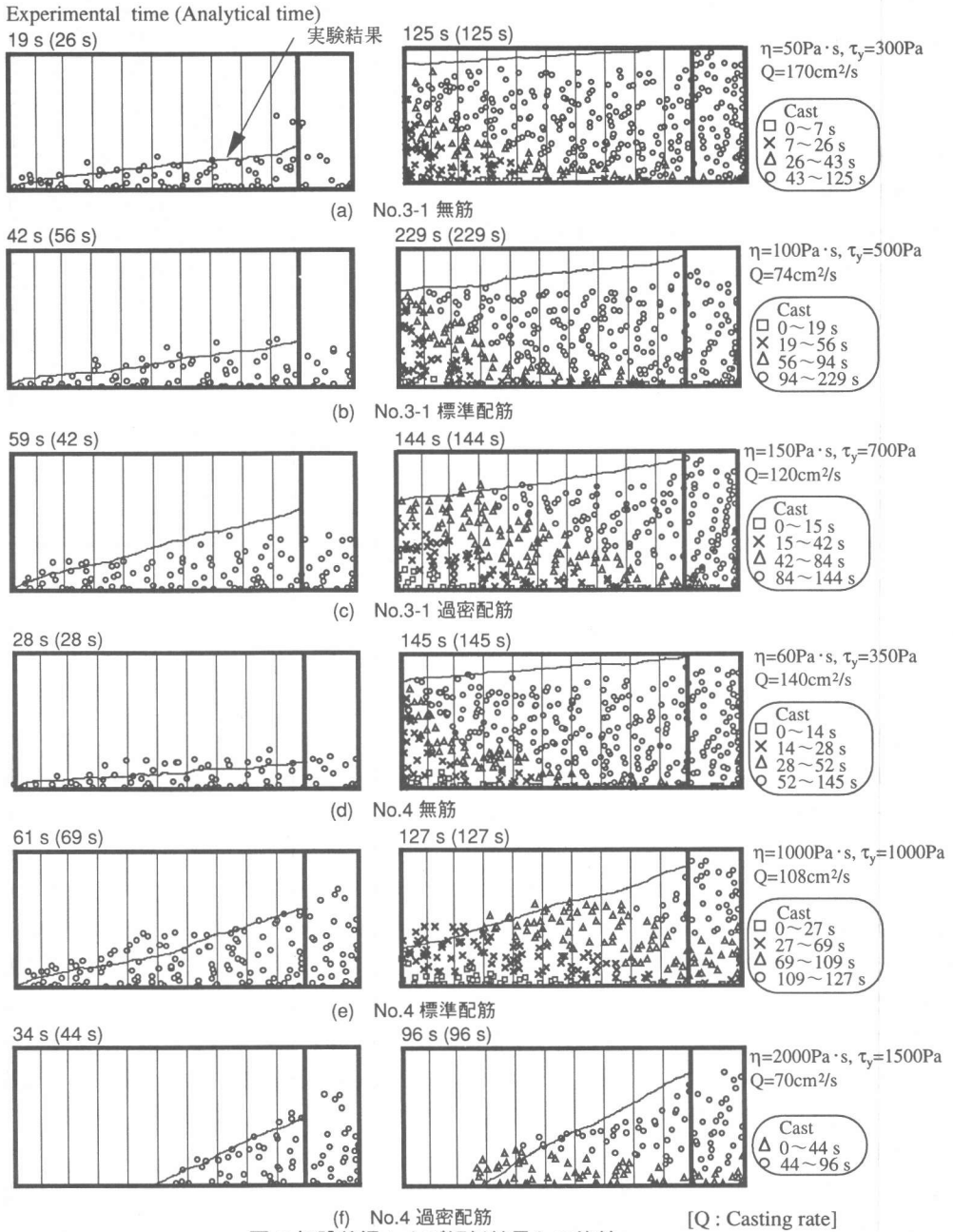


図-3 打設状況および解析結果との比較

はないNo.1および2のデータを除いた。流動停止後の勾配  $Gr_b$  は、降伏値の増加とともに増加する傾向を示すが、打設途中の流動勾配  $Gr_b$  と降伏値  $\tau_y$  の関係に顕著な傾向は見られない。また、鉄筋比  $Pt$  が大きくなるほど、降伏値  $\tau_y$  が流動勾配  $Gr_b$  に及ぼす影響は大きくなる。

流動勾配は、試料の降伏値、塑性粘度、打設速度および配筋条件などの影響を受けるものと考えられるが、今回の実験ではこれらの影響要因の相互作用に関しては明らかにできなかった。

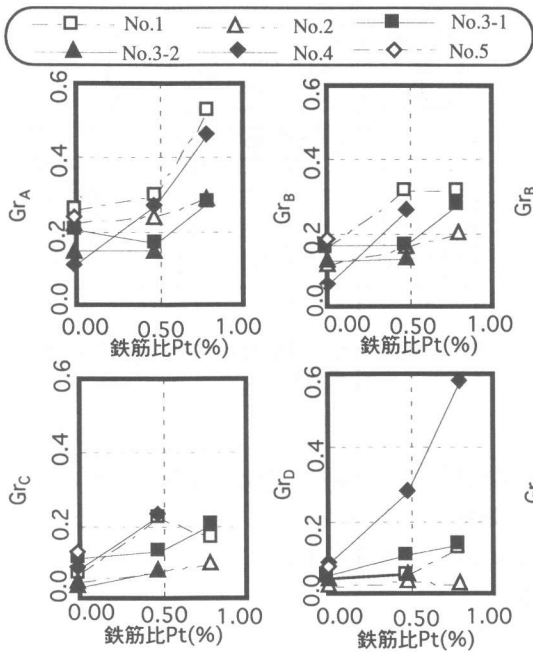


図-4 流動勾配 Gr と鉄筋比 Pt の関係

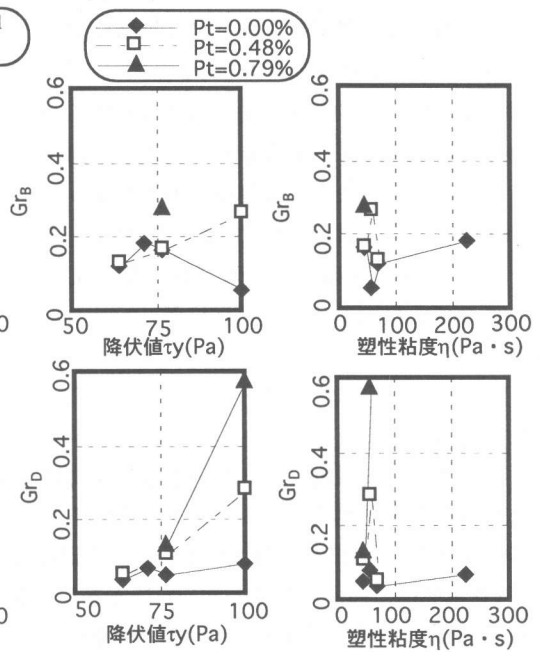


図-5 流動勾配 Gr と降伏値  $\tau_y$  および塑性粘度  $\eta$  の関係(打設速度一定)

#### 4. 中型壁型枠内への充填シミュレーション

##### 4.1 解析の概要

粘塑性空間要素法を用いて、本実験のシミュレーションを行った。解析に用いた空間要素分割を図-6に示す。打設は右上の要素から行い、自由落下打設を想定した。また、型枠面上に10mmの薄い要素を設け、境界面におけるすべり挙動を考慮した。

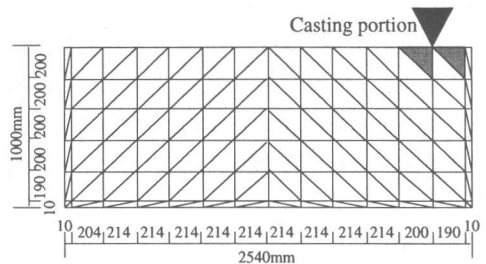


図-6 中型壁型枠の空間要素分割

解析に用いた入力値を表-3に示す。今回の解析では、表-1に示したビンガム定数  $\tau_y$ ,  $\eta$  の推定値を数倍し、配筋条件を材料定数に反映させたみかけの値を用いて、配筋型枠への打設をシミュレートした[3]。

##### 4.2 解析結果

図-3に、解析結果と実験結果の比較を示す。両者は時間、形態についてはほぼ一致しており、解析は実験をほぼ忠実にシミュレートしている。ただし、最終的な打込み高さは、解析の方が若干小さい。これは、入力値として用いた体積弾性係数が実際より小さかったためと考えられる。

解析における打設終了時の形態を見ると、無筋の(a), (d)のように、解析の入力値のみかけの塑性粘度および降伏値が小さい場合は、後から打設されたコンクリートが既に打設されている部分を押し出し、壁面に沿って上昇する流動形態が観察される。一方、過密配筋の(f)のように、みかけの塑性粘度および降伏値が大きい場合は、既に打設されている上を後から打設されたコンク

表-3 解析の入力値

No.	Pt	$\eta$	$\tau_y$	Kv
3-1	0.00	50	300	40
	0.48	100	500	
	0.79	150	700	
4	0.00	60	350	40
	0.48	1000	1000	
	0.79	2000	1500	

[Notes]

$\eta$  : Apparent plastic viscosity (Pa · s)

$\tau_y$  : Apparent yield value (Pa)

Kv : Bulk modulus of concrete (MPa)

リートが流動し、最終的に内部では層状に充填されることが解析結果からわかる。

図-7に、図-3(a)の状態における偏差ひずみ速度の2次不変量の平方根の分布を示す。同図中では、コンクリートの表層部分の偏差ひずみ速度が大きく、これは後から打設されたコンクリートが上面を流動している状態を示している。この他、打設部分および型枠面に沿った部分のひずみ速度が大きくなっている。

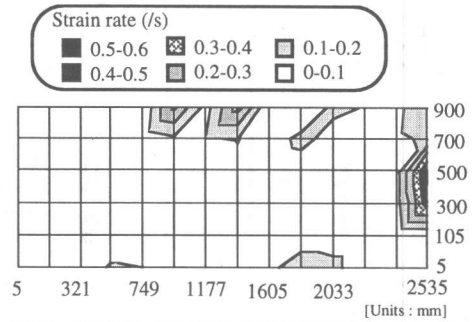


図-7 偏差ひずみ速度の2次不変量の平方根  $\sqrt{\varepsilon_{J_2}}$  の分布

## 5. まとめ

本研究では、高流動コンクリートの型枠内における充填状況を調べるため、中型壁型枠を用いた打設実験および解析を行った。本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 流動勾配は、鉄筋比の増大とともに顕著に増加する傾向を示す。
- 2) 流動勾配は、降伏値の増大とともに大きくなる。
- 3) みかけのビンガム定数は、配筋量の増加によって顕著に増加する。
- 4) みかけのビンガム定数を入力値とする型枠内充填のシミュレーションが可能である。

## [謝辞]

本研究の実施に際して、谷川恭雄教授(名古屋大学)のご指導を賜った。また、銭高組(株)、竹本油脂(株)、日本シーカ(株)、作田雄一君・牧野敏明君・山中守人君(名古屋大学大学院生)のご協力を得た。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)によった。付記して謝意を表する。

## [引用文献]

- [1] 谷川恭雄ほか：高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法(その1～12)，日本建築学会学術講演梗概集(北海道)，A-1，pp.183-206，1995.8
- [2] Tanigawa, Y., Mori, H. and Watanabe, K.: Flow Simulation of Fresh Concrete by Viscoplastic Divided Space Element Method, Proc. of the 33rd Japan Congress on Materials Research, pp.227-233, 1990.3
- [3] 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
- [4] 黒川善幸, 谷川恭雄, 森博嗣, 小村理恵：フレッシュコンクリートのスランプ試験およびスランプフロー試験に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 437-442, 1994.6
- [5] 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