

## 論 文

## [1061] 高流動コンクリートの配合と流動性に関する一考察

正会員○名和 豊春（秩父セメント中央研究所研究部）

正会員 江口 仁（秩父セメント中央研究所研究部）

正会員 大久保正弘（秩父セメント中央研究所研究部）

正会員 深谷 泰文（秩父セメント中央研究所研究部）

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化・高層化が進む中、コンクリートにも耐久性の改善や過密配筋下での良好な充填性が要求され、さらに建設作業者の不足によるコンクリート打設の省力化が重要な課題となってきた。このような背景から、流動性および分離抵抗性に優れ、振動締固めをせずに型枠に打設できるコンクリート（以下高流動コンクリートと呼ぶ）の開発が図られている。高流動コンクリートの基本概念は岡村ら[1]によって提案され、その配合設計に関する研究が最近活発に行われている[2-5]。しかし、これらの高流動コンクリートの配合理論については未だ確立されておらず、その原因としてはコンクリートの流動機構が十分解明されていないことが挙げられる。

本研究は、このような背景の下に高流動コンクリートの流動機構を解明することを目的として、まず可視化モデルによる流動機構の検討を行い、次に高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートを対象にコンクリートの流動性に及ぼす配合要因の影響を検討したものである。

## 2. 可視化モデルによる流動機構に関する予備的実験

岡村ら[1]は、高流動コンクリートの実現には材料分離抵抗性の増大が重要であるとしている。また、流動途上の材料分離は、粗骨材とモルタルの比重差だけでなく、粗骨材同士の衝突や接触摩擦により大きく助長されることを示し、材料分離を抑制するためにはモルタルあるいはペーストの粘性を増加させることが有効としている。ここでは、粘性の効果を検討するため、モデルペーストとしてJIS Z 8809の粘度標準液を用い、骨材に相馬砂（2.5~1.2mm 36%, 1.2~0.6mm 64%）を用いた時のモデルモルタルが図-1に示すガラスロート中を流下する様子を調べた。なお、骨材/溶液比は1.0とした。

図-2に溶液の粘度とモデルモルタルの流下率（流下した量の重量百分率）の関係を示す。図より粘度が0.3~0.5Pa·sの範囲では、モデルモルタルは骨材と溶液が一体となって流動し、流下率は100%となるのが認められた。また、粘度がこれよりも低くても高くても流下率は急激に減少し、モルタルを流動させる粘度には適正な範囲が存在することが判明した。なお、目視観察より閉塞したモデルモルタルの性状は粘度により異なることが認められた。すなわち、粘度が0.3Pa·s以下と小さい場合には、溶液と骨材が分離し、溶液のみが流下し骨材がブリッジを形成し閉塞した。他方、

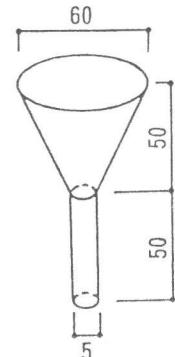


図-1 ガラスロートの形状(単位:mm)

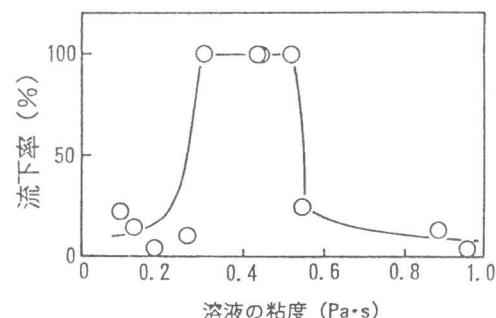


図-2 モルタルコンクリートの流動特性に及ぼす溶液粘度の影響

粘度が0.5Pa·s以上と大きい場合には、骨材と溶液は一体で流れるものの溶液自体の流動性が小さいため骨材の移動も少なく、その結果モデルモルタル全体の流動性が低下し最終的には骨材がかみ合い閉塞するのが認められた。

以上の結果より、高流動コンクリートを得るためには、ペーストまたはモルタルの粘度をコンクリートの分離や流動性の著しい低下を生じさせない適正な範囲以内としなければならないことが示唆された。このため、次に実際のコンクリート中のペーストまたはモルタルの粘度に着目しながら各配合要因の影響の検討を行うことにした。

### 3. 実験概要

#### 3. 1 実験範囲

配合要因として(i)水セメント比、(ii)スラグ粉末度および(iii)単位粗骨材量を取り上げ、これらの要因がコンクリートの充填性に及ぼす影響について検討した。各要因の水準およびコンクリートの配合を表-1に示す。

#### 3. 2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントに粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を70%添加した3種類の混合セメントを用いた。表-2に使用したセメントおよびスラグの化学成分と粉末度を示す。

細骨材は茨城県鹿島産の陸砂と埼玉県金沢産砂砂の7:3混合砂(比重2.62, FM2.67)を、粗骨材

は埼玉県両神産の2005碎石(比重2.70, FM6.59)を用いた。混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用し、添加量は結合材(セメント+スラグ)に対し1.0wt%とした。

#### 3. 3 セメントペーストおよびコンクリートの混練方法

セメントペーストは、公称5ℓのホバート型ミキサーを用い、全材料を投入後、低速(141rpm)で3分間練りませた。コンクリートは、公称50ℓの強制型ミキサーを用い、セメントおよび骨材を投入し10秒空練り後、水と混和剤を投入し90秒練りませた。練り上がり温度はペースト、コンクリートともに20±2°Cとした。

#### 3. 4 実験方法

(1) フレッシュコンクリートの性状：練り上がり後、直ちにスランプフローと空気量を測定した。同時に、2.5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルの流動曲線を回転粘度計(外筒φ36mm, 内筒φ16mm)により測定した。粘度計の測定は20±2°Cで行ない、流動曲線は外筒を300rpmまで100rpm/minで上昇・下降させて測定し、2サイクル目の上昇曲線より見掛け粘度を求めた。

(2) セメントペーストの流動性：回転粘度計(外筒φ22mm, 内筒φ20mm)を用い、(1)の方法に準じて流動曲線を測定し、見掛け粘度を求めた。

(3) コンクリートの充填性：武居ら[5]が提案した装置に準じた型枠を用いて過密配筋下のコンクリートの充填性を評価した。図-3に試験装置の概略を示す。測定は、実際のコンクリート打設により近づけるため、鉛直部へのコンクリートの流し込みはすばやく行い、仕切り板の引き上げも一気

表-1 コンクリートの配合

シリーズ NO.	W/C (%)	スラグ比 (cm <sup>2</sup> /g)	単位粗 骨材量 (ℓ/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	単位量(Kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
I	27.9	6080	320	50.9	149	535		
	29.0				152	525		
	30.2				156	516	868	864
	32.5				162	498		
	35.1				168	479		
	40.0				179	448		
II	30.2	4320 6080 8430	335	49.2	152	504	848	905
III	30.2	4320 6080 8430	302 335 370	53.0 49.2 45.3	160	530	891	815
					152	504	848	905
					144	477	802	999

表-2 セメントおよびスラグの化学成分と粉末度

種類	化 学 成 分 (%)						ブレーン値 (cm <sup>2</sup> /g)		
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>			
普通セメント	63.8	22.4	5.1	3.0	1.7	2.0	0.32	0.53	3310
スラグ1	43.4	33.5	13.4	0.3	6.1	0.6	0.22	0.31	4320
スラグ2	43.5	33.6	13.5	0.3	6.1	0.5	0.21	0.39	6080
スラグ3	42.4	34.5	14.9	0.4	5.6	tr.	0.19	0.27	8430

とした。充填性の評価は、流动後の端部のコンクリートの充填高さ $H_0$ (cm)と、流动したコンクリート量を流动時間で除した充填速度 $q$ (l/sec)の2つの指標により行った。なお、コンクリートの投入量は21lであり、計算上の最大充填高さは17.5cmであった。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4. 1 各配合要因がコンクリートの充填性に及ぼす影響

###### (1) 水セメント比の影響

図-4に単位セメントペースト量を329l/m<sup>3</sup>とし、水セメント比W/Cを28~40%に変化させた時のコンクリートの充填高さ及び充填速度を示す。充填高さおよび充填速度はそれぞれW/Cが30.2%および32.5%の時に最大値を示し、29~35%の範囲ではモルタルと粗骨材の分離は認められなかった。

なお、W/Cが28%の場合にはコンクリートの混練度合は不十分で、ペーストの変形性が著しく低下しコンクリートは流动しない結果となった。一方、W/Cが40%の場合には、モルタルと粗骨材が分離し鉄筋と鉄筋の間に粗骨材のアーチ部が形成されコンクリートの充填高さおよび充填速度ともに減少するのが認められた。図-4にはコンクリートのスランプフローも合わせて示してあるが、良好な充填性を示した時のスランプフローは65~72cmの範囲であり、既報の結果[4]とほぼ一致した。

###### (2) スラグ微粉末の粉末度の影響

図-5に配合を一定としスラグの粉末度のみを変化させたコンクリートの充填性状を示す。充填高さは粉末度が6080cm<sup>2</sup>/gの時最大となり、充填速度は粉末度と共に増大する結果となった。なお、コンクリートのスランプフローは粉末度が増大すると減少したが、コンクリートのハンドリング性状は逆に粉末度が増すほど良好となった。

###### (3) 単位粗骨材量の影響

図-6に、モルタル部分の配合を一定とし、単位粗骨材量 $V_g$ を302~370l/m<sup>3</sup>に変化させた場合のコンクリートの充填性状を示す。図より、充填高さおよび充填速度とともに単位粗骨材量が増加すると減少する傾向が認められた。また、図-4の結果と考え合わせると、本実験で用いたコンクリートでは、単位粗骨材量は320l/m<sup>3</sup>以下で良好な充填性が得られる結果となつた。

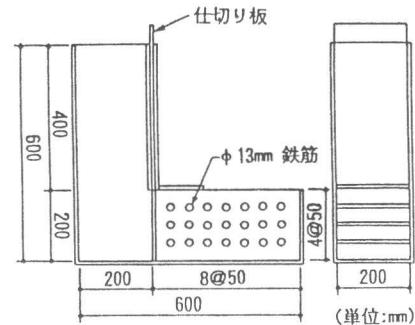


図-3 充填性試験装置

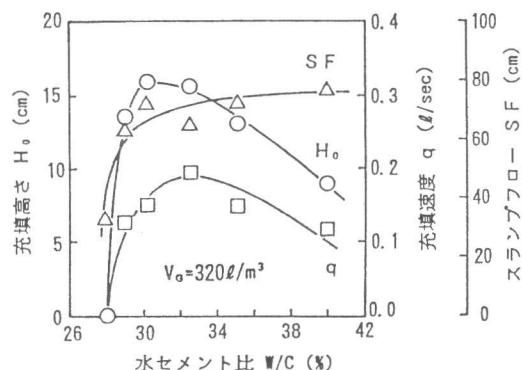


図-4 コンクリートの充填性に及ぼす  
水セメント比の影響

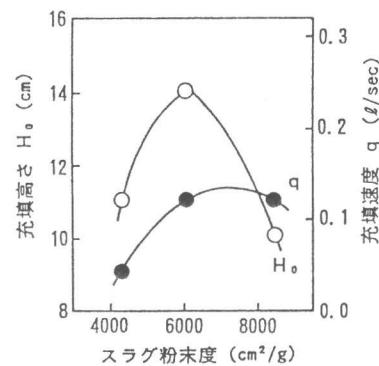


図-5 コンクリートの充填性に及ぼす  
スラグ粉末度の影響

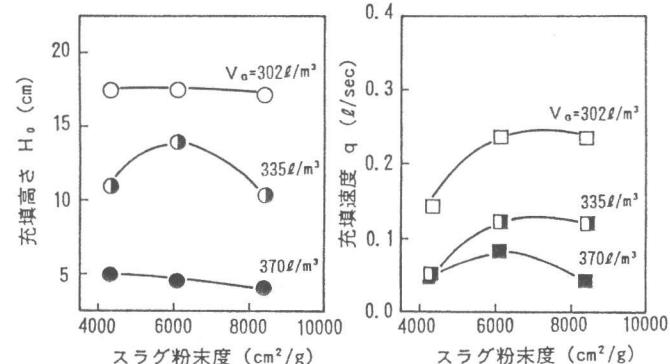


図-6 コンクリートの充填性に及ぼす  
単位粗骨材量 $V_g$ の影響

## 4. 2 コンクリートの充填性と

### ペースト・モルタルの粘度の関係

KennedyやPowersら[6]は、コンクリートをセメントペーストと骨材の2相とし、骨材表面のセメントペーストの膜厚と流動性がコンクリートの流動性を支配するとしている。ここでは、高流動コンクリートの流動機構を解明するため、まずペーストの粘度とコンクリートの充填性の関係について検討した。

セメントペーストの流動曲線の一例として、水セメント比を変えた場合を図-7に示す。図より、流動曲線はダイラタンシー性状を示し明確な降伏値および塑性粘度を示さないことから、ペーストの流動性をせん断速度 $\gamma$ での見掛け粘度により評価することにした。なお、本実験の範囲ではペーストの流動曲線は見掛け粘度が同じならばほぼ同じ形を示した。

図-8,9に、コンクリートの充填速度とペーストの見掛け粘度の関係を示す。これより、コンクリートの充填性はペーストの粘度で大きく変化し、モデルモルタルで見いだされたような粘度の適性範囲が実際のコンクリートでも存在するが認められた。しかし、ペーストの粘度が約0.9Pa·sと高粘度域でのコンクリートの充填速度は、図-8の水セメント比W/C=28%の場合ではゼロなのに対し、図-9のスラグ粉末度が8430cm<sup>2</sup>/gの場合では単位粗骨材量V<sub>g</sub>の減少とともに増大することからペーストの粘度のみではコンクリートの充填性に及ぼすW/Cやスラグ粉末度の影響を説明し得ないことが分かる。一方、菊川[7]によれば、スランプ12cm以上のコンクリートは粗骨材とモルタルとから成る高濃度サスペンションと見なした方が良いことが示されている。このため、次にモルタルの粘度とコンクリートの充填性の関係について検討した。

図-8,9に示したペーストの粘度が約0.9Pa·sと同じである2つのコンクリートよりウエットスクリーニングしたモルタルの流動曲線を図-10に示す。両者の砂/ペースト比は同じであるにもかかわらず、W/C=28%、スラグ粉末度6080cm<sup>2</sup>/gのモルタルの粘度は、W/C=30%、スラグ粉末度8430cm<sup>2</sup>/gのモルタルに比べ著しく大きい結果となった。なお、W/C=28%と粉体量が多い場合にはコンクリートが不均一で混練が不十分なのが目視で認められた。著者らは、前報[8]でモルタルの流動性は混練が不十分な場合には

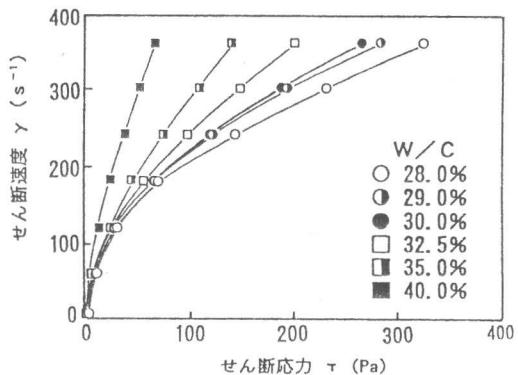


図-7 セメントペーストの流動曲線  
(水セメント比の影響)

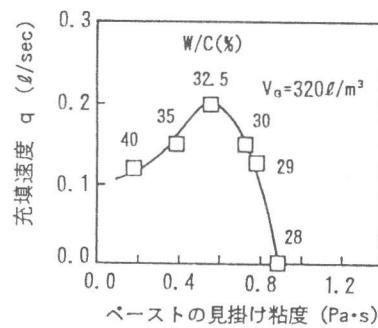


図-8 ペーストの見掛け粘度と  
コンクリートの充填性の関係  
(水セメント比の影響)

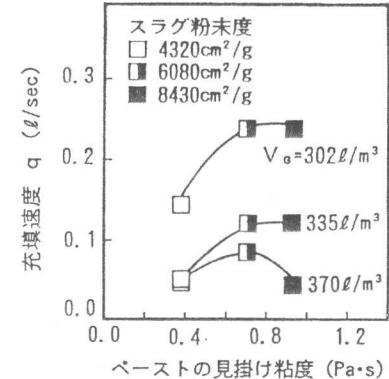


図-9 ペーストの見掛け粘度と  
コンクリートの充填性の関係  
(単位粗骨材量V<sub>g</sub>の影響)

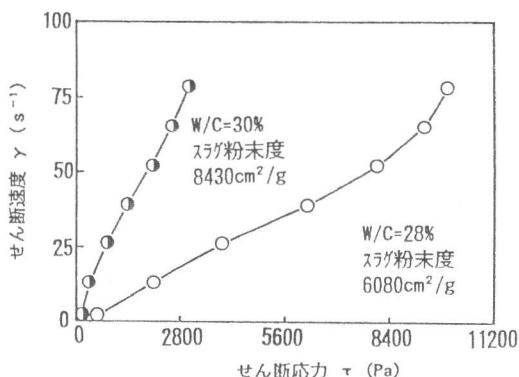


図-10 モルタルの流動曲線

低下することを指摘しており、モルタルの粘度の相違が高流動コンクリートの流動性に大きく影響することが分かる。

図-11にコンクリートの充填速度とウェットスクリーニングしたモルタルのせん断速度 $78\text{ s}^{-1}$ での見掛け粘度の関係を示す。図より、充填性の良好な単位粗骨材量が $320\ell/\text{m}^3$ 以下の時にはモルタル粘度と充填速度の関係が同一曲線で示された。なお、充填高さも同様な傾向を示し、W/Cやスラグ粉末度等の配合要因の変動による充填性の相違はモルタルの粘度と密接に関連していることが分かる。したがって、前述の練りまぜの効果も考慮すると、本実験で取り扱った低水セメント比の高流動コンクリートの充填性はモルタルの流動性から検討することが望ましいものと判断される。

#### 4. 3 高流動コンクリートの流動機構に関する考察

コンクリートの充填性試験の目視観察から、充填性が良好な場合には粗骨材とモルタルとが一体となって流動しているのが認められた。また、前節で述べたように高流動コンクリートの充填性はモルタルの粘度と密接に関連していることが示唆された。このため、ここではフレッシュコンクリートを粗骨材とモルタルの2相の『混合流れ』と見なし、この観点からコンクリートの充填性の検討を行った。

このような混合流れにおいて、比重の異なる粗骨材とモルタルとが一体として流動するためには、比重差による慣性力の影響を非常に小さくすることが必要条件となる。このことは、この混合流れが[慣性力]/[粘性力]の比が小さい『粘性流動』であることを意味する。いま、粗骨材と粗骨材の間にモルタル相が十分に存在し粗骨材同志の相互作用が無視できると仮定すると、混合流れはモルタルの一様流れ(密度 $\rho$ 、粘度 $\eta$ )中を粗骨材(半径 $a$ )が流動している粘性流動に近似できるものと考えられる。この時、流動速度がモルタルと異なる粗骨材は、 $F = 6\pi a \rho \Delta U (\Delta U : \text{速度差})$  の抵抗を受ける[9]。したがって、図-11においてモルタルの粘度が増すのに伴いコンクリートの充填性が良好になるのは、粗骨材が粘性抵抗を受け流動するため混合流れが一様となったためと説明される。

一方、モルタルの粘度が小さくなるのに伴い慣性力の効果が現れ粗骨材とモルタルの流動速度は同じとならず、さらに粗骨材周辺のモルタル相の流れにおけるReynolds数( $= 2a \rho \Delta U / \eta$ )が大きくなり粗骨材の下流側に渦が生じ、モルタル相の流れが乱れることが予想される。橋本ら[10]は、管内流動でコンクリートが閉塞状態に近づくとモルタル相と粗骨材粒子に相対速度が発生し、粗骨材粒子とその周辺のモルタル相が微小振動するため粗骨材がアーチ面を形成し閉塞が生じることを見いだしている。本実験でも、W/C=40%とモルタルの粘度が低いコンクリートでは粗骨材がアーチ面を形成しているのが認められた。したがって、図-11においてモルタルの粘度が小さくなるとコンクリートの充填速度が低下するのは、慣性力によるモルタルと粗骨材の流動速度の相違およびモルタルの流れの乱れにより粗骨材同志の衝突が生じ、その結果として粗骨材がかみ合い、アーチを形成するためと推論される。また、モルタルの粘度が過剰に大きくなるとモルタル自体の変形性が乏しくなる。その結果、コンクリートの充填性が低下することが予想され、図-11の結果と良く一致する。

しかし、図-11に示すようにモルタル粘度が適性範囲でも、単位粗骨材量が増すとコンクリートの充填速度は低下した。ところで、粗骨材とモルタルが一体となって流動する場合には粗骨材間の隙間に存在するモルタルはコンクリートの流動性に関与せず、粗骨材表面に付着したモルタルが流動性を

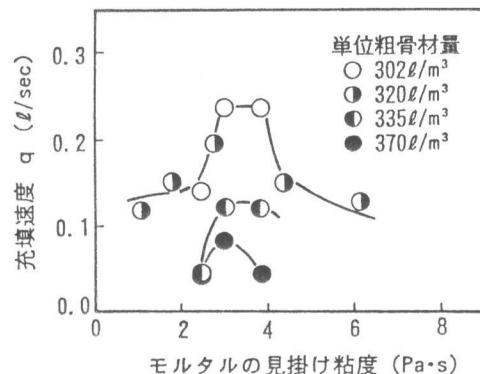


図-11 モルタルの見掛け粘度とコンクリートの充填性の関係

支配することになる。この場合には、コンクリートの流動性は粗骨材表面のモルタル膜厚に大きく依存することが予想される。表-3に粗骨材を球と仮定して求めた各コンクリートのモルタル

表-3 モルタル膜厚の計算結果

シリーズ No.	モルタル量 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	粗骨材量 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	粗骨材の 実績率(%)	余剰モルタル 量 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	粗骨材の表 面積(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	モルタル 膜厚(mm)
I	0.680	0.320	58.4	0.4521	198.0	2.28
	0.698	0.302		0.4829	186.8	2.59
II, III	0.665	0.335		0.4264	207.2	2.06
	0.630	0.370		0.3664	228.9	1.60

膜厚を示す。図-11の結果と考え合わせると、コンクリートの充填速度が小さくなるモルタル膜厚は2.28mm未満であった。この時の粗骨材表面間距離は4.56mmとなり、細骨材の平均粒径の0.6mmの約8倍であった。小沢ら[11]は、骨材の平均粒径の10倍以下の狭い間隙をモルタルが通過する場合には少ない骨材量でも閉塞が生じることを示している。これより、モルタルの粘度が適当でも単位粗骨材量が増し粗骨材間の距離が十分に保てない場合は、粗骨材表面近傍のモルタル層中の細骨材が閉塞し図-11に示すようにコンクリートの充填速度が低下するものと推論される。

以上の結果より、高流動コンクリートの流動性はコンクリート中のモルタルの粘度および粗骨材表面のモルタル膜厚と密接に関係しており、この両者の最適範囲を満足した時にはじめて良好な充填性が得られるものと判断された。

## 5. 結論

高流動コンクリートの流動性に及ぼす配合要因の影響を、モルタルの粘度および膜厚の変化という観点から考察し、高流動コンクリートに『粘性流動』の考え方を適用することにより、その流動機構について一つの解釈を与えることができた。なお、本実験の結果は、高流動コンクリートを得るためのコンクリートの配合は、モルタルの粘度および膜厚が適切な範囲であれば広い範囲で組み合わせを選択できることを示唆しており、著者らは低水セメント比で高い流動性を示す1成分系のセメントによる高流動コンクリートの開発を試みている。

## 【参考文献】

- 岡村 甫, 國島正彦, 前川宏一, 小沢一雅:ハイパフォーマンスコンクリートへの挑戦, 土木施工, Vol. 30, No. 10, pp. 27-33, 1989; 小沢一雅, 前川宏一, 岡村 甫:ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 699-704, 1989
- 竹下治之, 佐原晴也, 横田季彦:締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 143-153, 1990
- 中島良光, 梶田秀幸, 三浦信一, 牧野英久:二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 173-178, 1991
- 新藤竹文, 松岡康訓, S. Tangtermsirikul, 坂本 淳:超流動コンクリートの基礎物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 179-184, 1991
- 武居俊二, 芹口孝己, 金井雅人:高流動化コンクリートの充填性に及ぼす微粉末の影響, 第45回セメント技術大会講演集, pp. 110-115, 1991
- Powers, T. C. : The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc., 1968
- 菊川浩治:モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究, 土木学会論文集, No. 414, pp. 109-118, 1990
- 江口 仁, 名和豊春, 大久保正弘:モルタルの流動性および強度性状に及ぼす混練時間の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 149-154, 1991
- 巽 友正, 新物理シリーズ21 流体力学, 培風館, 1982
- 橋本親典, 堀口和弘, 丸山久一, 清水啓二:テーパ管を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ計測システム, 土木学会論文集, No. 402, pp. 61-70, 1989
- 小沢一雅, 山田浩司, TANGTERMSIRIKUL Somnuk, 前川宏一:狭い間隙を通過するモルタルの閉塞に及ぼす砂の粒度の影響, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 554-555, 1987