

(126) 細骨材により流動性を高めたコンクリートのPC製品への適用について

川田建設(株) 開発部 正会員 ○北野 勇一  
 川田建設(株) フレキャスト事業部 津浦 敏春  
 川田建設(株) 開発部 正会員 野田 行衛

1. はじめに

PC製品の製造において、増粘系および粉体系の高流動コンクリートを用いる場合、多量の減水剤や水和反応性の低い微粉末を使用するため初期硬化時間や強度発現の遅れが考えられ、ごく早期の緊張作業を行う時には問題となる。また、これらの方法は、高価な材料の使用や現有設備の変更を伴うため経済的にも不利となる。そこで、粘性の高い早強コンクリートの特性を利用し、減水作用の高い混和剤の使用と細骨材の微粒分量・粒度およびその配合のみを調整することにより、流動性の高い早強性コンクリートの製造を試みた。さらに、その中で最も適切な高流動コンクリートの配合を1つ選定し、フレッシュおよび硬化後のコンクリート性状をPC試験桁に適用することにより確認した。

2. 細骨材により流動性を高めたコンクリートの配合

2-1 高流動コンクリートにおける本配合の位置づけ

図-1に設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>、スランブ12cm、最大粗骨材寸法20mmのコンクリート配合(以下、基礎配合とする)に関し、減水剤の多添加により流動化させた場合の減水剤添加量とスランブフローの関係を示す。これより、早強セメント(HP)を用いれば、粗骨材分離によってモルタルが先行流動(以下、分離とする)し始める時のフロー値が大きく、普通セメント(NP)よりもモルタル自体の粘性が高いと言える。しかし、ともに高流動コンクリートと称される範囲のフロー値(55~70cm)に達した段階では分離を起こすか、減水効果の限界を越えてフロー値が頭打ちになる現象が見られた。よって、無振動打設に必要な高流動性を確保しつつ分離を起こさないコンクリートを製造するためには、配合の根本的な変更が必要である。従来の高流動コンクリートは、普通セメント等の単位粉体量を500kg/m<sup>3</sup>前後として最低限の粘性を確保した上で、分離低減を目的とした増粘剤の使用(以後、増粘系とする)やペーストの流動性を改善する微粉末のセメントとの置換(以後、粉体系とする)を行い、さらに高流動域までフローを延ばすため減水剤を多添加する方法がとられた。これに対し、早強セメントを用いたコンクリートは、普通セメントよりもより簡易的な配合変更で高流動域のフロー値まで延ばせると考えられ、表-1のよ

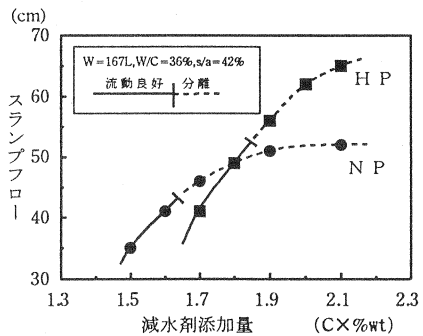


図-1 基礎配合への減水剤多添加によるスランブ挙動

表-1 各種コンクリートの配合

配合名称	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					減水剤 (C+BS) × %wt		増粘剤 (kg/m <sup>3</sup> )	
		W 水	C セメント	BS 微粉末	S 細骨材	G 粗骨材	通常	高性能	吸着型	非吸着型
基礎配合	42.0	167	464	0	689	987	1.40	(0.90)	—	—
本配合	52.3	—	—	0	858	811	—	1.60~	—	—
粉体系	50.0	—	—	92	797	—	—	1.40~	—	—
増粘系	51.2	—	—	43	819	—	—	2.10~	0.35	—
(非吸着型)	—	150	—	—	—	—	—	1.30~	—	17.0

うに基礎配合の細骨材率の上増しと減水剤を高性能のものに変更(以下、本配合とする)し、流動化を試みた。実験では、単位水量および水セメント比を基礎配合と同一とし、早強セメントを用いた粉体系・増粘系の高流動コンクリートの試し練りを行い、図-2のような高性能減水剤の添加量とスランプフローの関係が得られた。

これより、本配合は粉体系と増粘系の間隔的な配合であると言える。また、最近、セメント粒子に対し非吸着型の増粘剤が開発され、これを用いれば粉体系に近い添加量で高流動コンクリートとなり得る。一方、現在の増粘系高流動コンクリートは増粘剤と減水剤がかなり相殺するため、減水剤を多く必要とする。

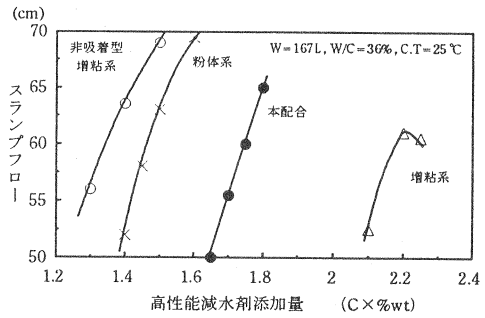


図-2 早強セメントを用いた高流動コンクリートの高性能減水剤添加量とスランプフローの関係

### 2-2 モルタル流動における細骨材微粒分の影響

モルタルの流動性はセメントの種類と細骨材の量によって決まると考えられる。文献1)によれば、ペーストのフロー面積比( $\Gamma_p$ )と水粉体容積比( $V_w/V_p$ )には式(1)の関係があり、さらに自由水粉体容積比( $V_{wf}/V_p$ )と水粉体容積比の関係は式(2)のように表される。ここで、 $E_p$ はセメントの変形係数、 $\beta_p$ は拘束水比を表す。また、ペーストのフロー面積比は、フロー値( $F_p$ )とフローコーンの底面内径( $F_0$ )を用いて式(3)より求めることができる。これらの式により、早強セメントを用いたペーストの流動性を調べるものとする。図-3は、水粉体容積比とペーストフロー面積比の実験結果であり、使用粉体は表-2の3種類である。ペーストおよびモルタルのフロー試験は、JIS R 5201に規定されているミキサを用い、粉体と1次水(標準軟度の1.1倍)を低速回転で1分間、かき落とし、2次水(+細骨材)を投入して低速回転で1分間、かき落とし、高速回転で1分間の攪拌を行った。練り上がった試料をJIS R 5201に規定されるフローコーンに詰め、鉛直に引き上げた後のペーストおよびモルタルの広がり測定した。

$$V_w/V_p = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad \text{---- (1)}$$

$$V_{wf}/V_p = V_w/V_p - \beta_p \quad \text{---- (2)}$$

$$\Gamma_p = (F_p^2 - F_0^2) / F_0^2 \quad \text{--- (3)}$$

これより、拘束水比 $\beta_p$ は、普通セメントよりも早強セメントの方が高く、コンクリートとしての流動性を持たせるには、単位水量を低下させる減水剤がより多く必要となることがわかる。また、高炉スラグなどの微粉末が混入されている場合、少ない余剰水の存在で流動性が急激に改善することができると考えられる。ちなみに、早強セメントにおける拘束水の温度による影響は、25°Cから15°Cに下がると拘束水比も約5%低下し、表-1の基礎配合コンクリートを想定すると、単位水量が8L程度余剰すると思われる。

表-2 使用粉体

粉体種類	記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
普通ポルトランドセメント	N P	3.15	3230
早強ポルトランドセメント	H P	3.13	4480
高炉スラグ微粉末	B S	2.89	6120

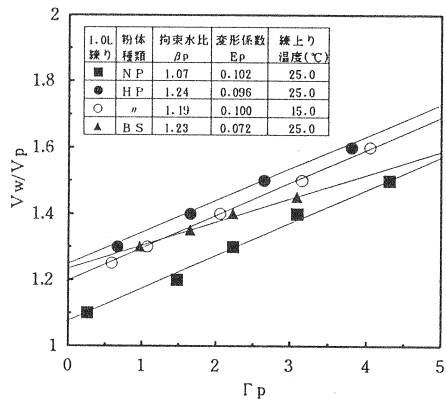


図-3 水粉体容積比とペーストフロー面積比の関係

モルタルの流動性は、細骨材の変形係数 ( $E_{sc}$ ) と拘束水比 ( $\beta_{sc}$ ) により影響を受ける。文献1)によれば、モルタルのフロー面積比 ( $\Gamma_m$ ) と自由水粉体容積比 ( $V_{wf}/V_p$ ) は式(4)の関係がある。さらに、自由水容積 ( $V_{wf}$ ) は、粉体と細骨材 (容積:  $V_{sc}$ ) が拘束する水量を除いたもので、式(5)のように表され、これらの式により細骨材微粒分量の影響を調べることができる。

$$V_{wf}/V_p = (E_p + E_{sc}) \Gamma_m \quad \text{----- (4)}$$

$$V_{wf} = V_w - \beta_p \cdot V_p - \beta_{sc} \cdot V_{sc} \quad \text{--- (5)}$$

ここで、式(4)と式(5)の細骨材の  $E_{sc}$  と  $\beta_{sc}$  を求めるために実験を行った。実験に使用した細骨材は、0.15mmのふるいを通する細骨材の分量 (本文では、微粒分量とする) が3%程度の川砂 S4 と微粒分量が土木学会で定めている標準粒度<sup>2)</sup> の上限値に近い陸砂 S1 であり、その粒度曲線を図-4に示す。

モルタル中の細骨材容積比と変形係数の関係を図-5, 6に示す。これより、細骨材容積比0.45以上の範囲における細骨材の拘束水比は普通・早強セメントとも等しくなること、および、川砂 S4 を用いた早強セメントモルタルは細骨材容積がかなり小さい段階から変形係数は大きくなり、流動性に欠けることがわかった。これに対し、微粒分量が多く含まれる陸砂 S1 を用いれば変形係数が改善され、ある種細骨材微粒分量が粉体の役割を果たし、流動性を高めるようになると考えられる。これらより、早強セメントコンクリートでは、微粒分を含めた細骨材容積がモルタル容積に占める割合が約50%の場合に最良な流動性となり、基礎配合にこの数値を代入すると細骨材率で約50%、単位粗骨材容積で約325Lの配合に相当することがわかった。また、細骨材容積比が0.5を越えると変形係数は急激に増大し流動性が悪くなるため、細骨材により流動性を高める限界はこの細骨材量の前後にあると考えられる。

### 2-3 単位粗骨材量の選定

単位粗骨材容積の選定は、細骨材を微粒分量の多い陸砂 S1 に、減水剤を高性能のものに変更した上で、基礎配合中の粗骨材容積を325L前後に設定して行った。これを図-7に示す。これより、単位粗骨材容積が300L以下の配合では流動性が急減し、逆に335Lを越えると分離を起こさないコンクリートの製造が不可能となることがわかった。また、この範囲をモルタル中の細骨材容積比として表すと0.49~0.52となり、表-1の本配合では、単位粗骨材容積を305Lに設定した。

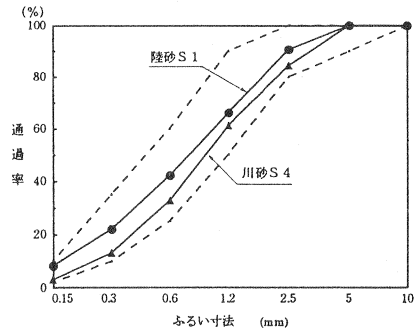


図-4 微粒分量の異なる細骨材粒度曲線

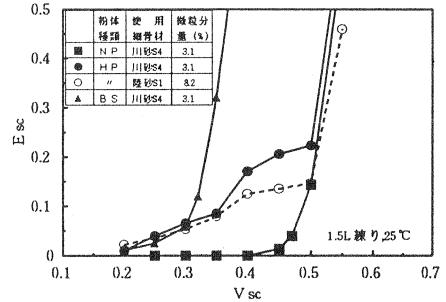


図-5 モルタル中の細骨材容積比と変形係数の関係

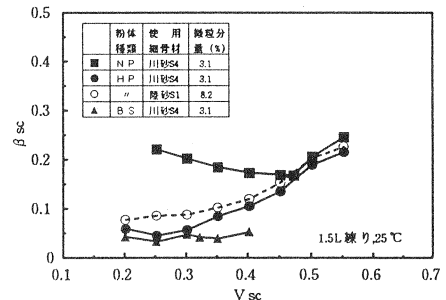


図-6 モルタル中の細骨材容積比と拘束水比の関係

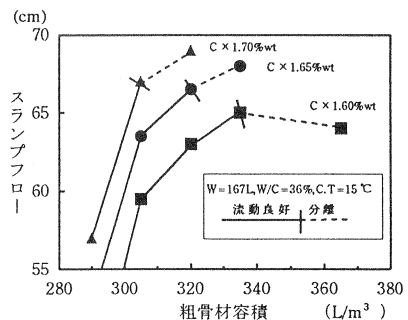


図-7 高性能減水剤添加量を変化させたときの単位粗骨材量とスランプフローの関係

### 2-4 細骨材粗粒率の選定

本配合における細骨材粗粒率の選定は、Vロート試験によって行った。使用した細骨材は、表-3に示すように微粒分量の違う2種類を3段階の粗粒率に粒度調整したものとした。これを用い、スランプフロー値を60~65cmに調整した本配合コンクリートを試験練りし、図-8の結果を得た。なお、練上り温度は拘束水量が多くなる夏場想定<sup>25</sup>°Cに設定した。また、細骨材の微粒分量と粗粒率を変化させたおのおのについて、高性能減水剤添加量を変化させた場合のスランプフローとの関係を調べ、これを図-9に示す。これより、図-8において、川砂S4は粗骨材の分離が明確に認められ、S5およびS6に関しては気泡の分離があった。一般的にVロート流下時間が10~20秒の範囲で充填性が良好であると言われ、微粒分量が少ない細骨材を用いると材料不分離性や充填性が良好となる粗粒率は存在しにくいと思われる。一方、微粒分量が多い細骨材を用いれば高流動コンクリートとしての材料不分離性や充填性を有する粗粒率の範囲があり、さらに、粗粒率を下げれば充填性が鈍感に改善されることが確認できた。また、図-9より、高流動域において分離を起こさない配合としては、ある程度減水剤の添加量が多めでなければならず、細骨材がある種増粘剤の働きを有していると考えられる。以上より、細骨材の微粒分量・粒度およびその配合のみを調整することにより流動性を高めた早強性コンクリートの配合は可能であり、例えば、単位水量167L、水セメント比36%のコンクリート配合において、微粒分量約8%、粗粒率2.8以下の細骨材を用いた場合、モルタル中の細骨材容積比を49~52%とすることで高流動コンクリートの製造が可能となる。

## 3. PC桁への適用およびコンクリート特性

### 3-1 PC桁への適用

本配合コンクリートを用い図-10に示すPC試験桁試験桁への無振動打設を行い、フレッシュ時から硬化後の長期的なコンクリート特性を基礎配合のものと比較し、検討した。図-11は、フレッシュ性状の経時変化を示す。これより、スランプフローが65cmから60cmに低下するまでの時間は約60分であり、本配合では練り終わりから1時間経過しても無振動打設が可能であると考えられる。また、スランプおよび空気量の経時変化についても、基礎配合と比べ、その低下量が鈍化した。

表-3 使用細骨材

種別	記号	微粒分量 (%)	実積率 (%)	粗粒率 F.M
陸砂	S 1	8.2	63.7	2.72
	S 2	9.0	61.9	2.47
	S 3	7.5	64.1	2.91
川砂	S 4	3.1	66.1	3.06
	S 5	3.7	63.9	2.69
	S 6	4.3	63.2	2.49

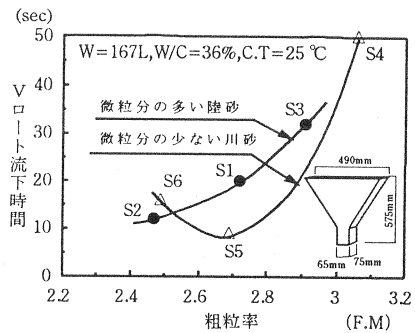


図-8 微粒分量の違いによる粗粒率とVロート流下時間の関係

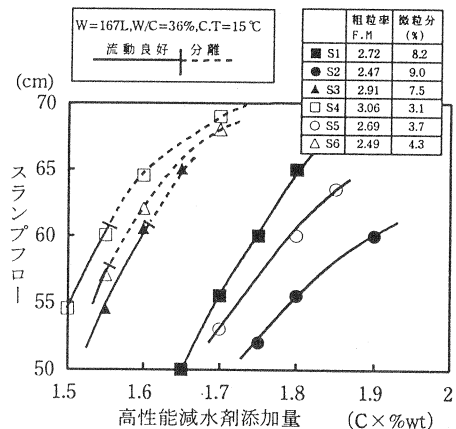


図-9 細骨材微粒分量と粗粒率を変化させたときの高性能減水剤添加量とスランプフローの関係

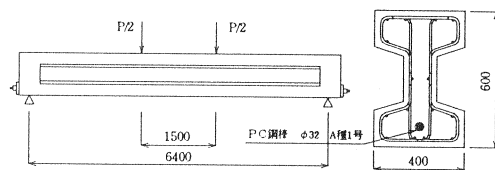


図-10 PC試験桁

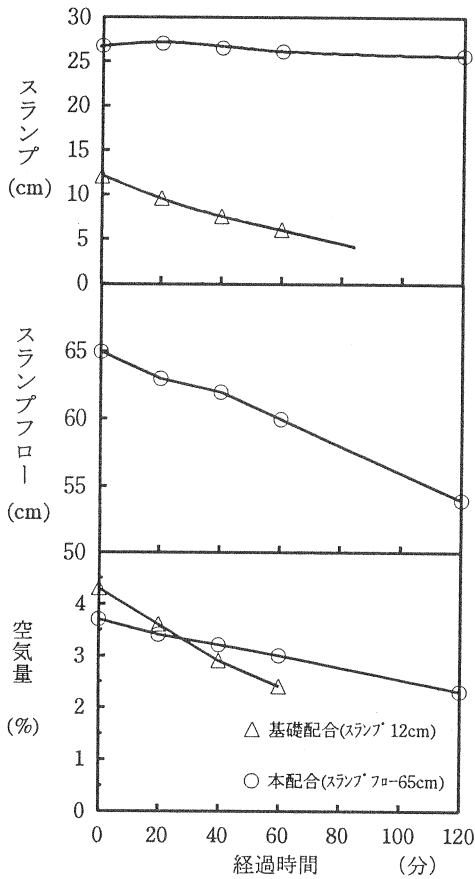


図-11 スラングフローおよび空気量の経時変化

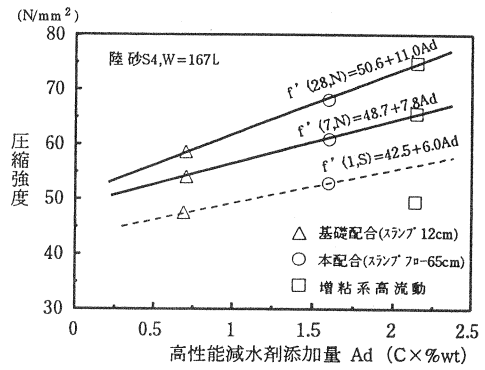


図-12 高性能減水剤添加量による圧縮強度特性

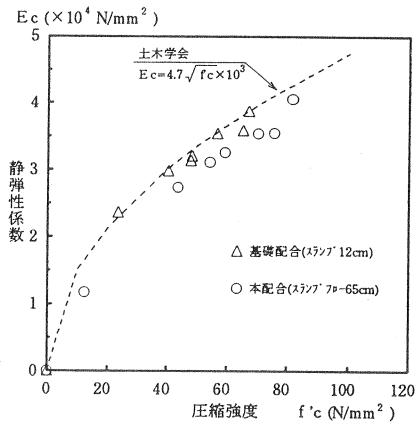


図-13 圧縮強度と静弾性係数の関係

### 3-2 圧縮強度

本配合コンクリートは、PC製品への適用を前提としているため、打設後1日で設計基準の60%強度を確保しなければならない。その確認として、表-1の基礎配合コンクリート、本配合および増粘系の高流動コンクリートについて材齢1日(蒸気養生)、7日・28日(標準養生)における圧縮強度試験を行った。ここでは、高性能減水剤添加量を指標とし、図-12に示す結果を得た。これより、相対的に基礎配合よりも添加量の多い本配合のコンクリート圧縮強度発現はよく、高性能減水剤の添加量と圧縮強度には線形の関係があることが認められた。よって、本配合の高流動コンクリートは、いずれも基礎配合のコンクリート強度を上回っており、打設後1日で設計基準強度の60%を確保することが可能である。

### 3-3 静弾性係数

本配合コンクリートの静弾性係数は、基礎配合よりも細骨材率が高い配合となっているため、弾性係数が多少小さくなり、モルタルと一般のコンクリート弾性係数の中間的な値となるものと考えられる。図-13に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これより、基礎配合においてはほぼ土木学会の推定式<sup>2)</sup>を満足したが、本配合においては任意圧縮強度に対する静弾性係数が約1割低下する結果となった。結果から推定される実験式は以下のものである。

$$E_c = 4.2 \times 10^3 \times (f_c)^{0.5} \quad \text{--- (6)}$$

### 3-4 クリープ・収縮性状

クリープ試験は自重とプレストレスのみがかかるPC試験桁を用い、収縮試験はJIS A 1132に規定されている曲げ強度試験のための供試体を用いて行った。また、これらの計測には、コンクリート硬化時より測定できる埋込型ひずみ計を用い、これを断面の図心位置に設置した。その試験結果を図-14に示す。

これより、クリープ係数は、土木学会の予測式<sup>3)</sup>によるものより長期的には小さくなり、さらに本配合コンクリート桁は基礎配合のクリープ係数より下回る傾向を示した。一方、収縮ひずみは、基礎配合および本配合ともに土木学会の予測量<sup>3)</sup>に漸近する結果となった。

### 3-5 PC試験桁の曲げ性能

打設後1年経過したPC試験桁について単純2点曲げ載荷試験を行い、図-15に示すような支間中央での荷重-たわみ曲線を得た。これより、試験時の静弾性係数を用いて算定したたわみの予測値<sup>3)</sup>と試験値とがほぼ一致し、本配合を用いて無振動打設したPC桁は、長期的にも良好な曲げ性能を有することが確認できた。

## 4. まとめ

今回の実験から、次のことが結論付けられる。

- ①増粘剤や微粉末を用いることなく、微粒分量の多い細骨材の利用により高流動コンクリートの製造が可能である。
- ②これらのコンクリートを用いたPC構造物は、長期的に十分な耐力を有する。

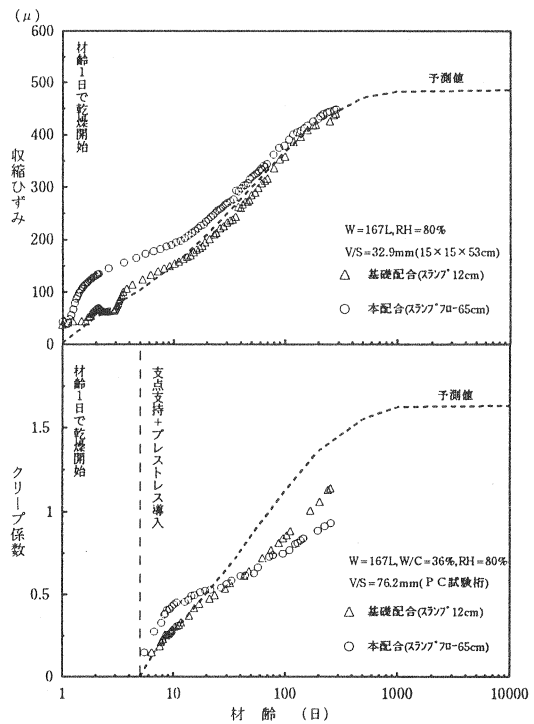


図-14 クリープ・収縮性状

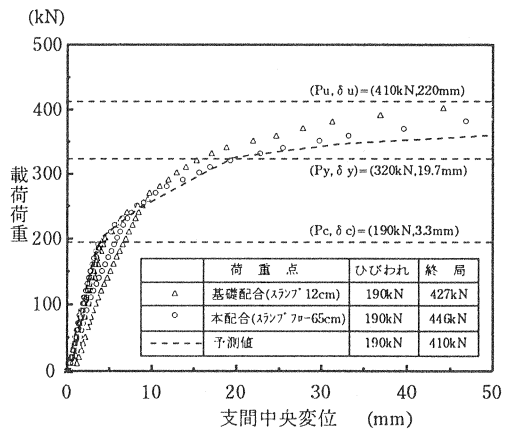


図-15 PC試験桁の荷重-変位曲線

### 《参考文献》

- [1] 山口昇三・枝松良展・岡村甫：モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、pp83-88, Vol.16, No.1, 1994
- [2] 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書 [施工編], 1996.3
- [3] 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 1996.3