

論文 骨材製造時に発生する微粉末のダムコンクリートへの適用に関する研究

河井 徹^{★1}・長瀧重義^{★2}・佐野 真^{★3}・垂水直樹^{★4}

要旨：細骨材の製造工程で生じる微粉末を有効利用する目的でその微粉末をダム用の有スランプコンクリートに適用する研究を実施した。配合は中庸熱ポルトランドセメントを用いフライアッシュ置換率が 30%、普通ポルトランドセメントを用いフライアッシュ置換率が 60%の2種類とした。微粉末は混入した容積分だけ細骨材と置換した。その置換量の増加に伴いワーカビリティーの低下が認められたが、微粉末の置換量が 200kg/m³までの範囲で、細骨材率の変更あるいは高性能 AE 減水剤の添加により、所定のワーカビリティーを有する配合が可能であることを明らかにした。

キーワード：微粉末、有スランプコンクリート、沈下度、細骨材率、高性能 AE 減水剤

1. はじめに

コンクリートダムの施工現場において、細骨材の製造工程で多量の微粉末が発生する。そのため、環境問題、経済性等の面から微粉末副産物の有効利用が急務となっており、既にRCD用コンクリートにはその微粉末が有効利用されている¹⁾。このような状況に鑑み、本研究は、ダム施工の現場で湿式製砂設備から発生した微粉末のうち前処理沈殿池において沈殿する比較的粗い粒子の微粉末をダムの内部コンクリートの材料として利用することを目的とし、配合の検討を行ったものである。

ダムの内部コンクリートとしてフライアッシュ置換率を 30%と 60%の2種類の有スランプコンクリートに対して、微粉末を最大 200kg/m³まで細骨材と置換し、所定のワーカビリティーを得る方策を検討した。

本論文では、これらの一連の実験のうち、フレッシュコンクリートの実験結果について得られた知見を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

使用材料の仕様を表-1に、2種類のダム用有スランプコンクリートの基本配合を表-2に示す。基本配合とは微粉末を置換しない配合の意味である。

A配合は通常のダム用有スランプコンクリートとして使用されている配合であり、セメントは中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュ置換率は 30%とした。B配合は、フライアッシュを高含有したダムコンクリート²⁾の成果を基に、フライアッシュ置換率を 60%とし、スランプの

表-1 使用材料の仕様

普通ポルトランドセメント	$\rho=3.16 \text{ g/cm}^3$, 比表面積3,280 cm^2/g	
中庸熱ポルトランドセメント	$\rho=3.22 \text{ g/cm}^3$, 比表面積3,420 cm^2/g	
フライアッシュ JIS II種相当品	強熱減量 1.0%, 比表面積3,850 cm^2/g	
細骨材 安山岩砕砂	$\rho=2.64 \text{ g/cm}^3$, 吸水率 2.62%, FM2.53	
粗骨材 安山岩碎石	$\rho=2.62 \text{ g/cm}^3$, 吸水率 2.47%, FM7.99	
混和剤	AE減水剤	柱状カルボキ酸とグリニル酸の混合 遅延形
	AE剤	特殊非イオン界面活性剤
	高性能 AE減水剤	SPS SPR

* 1 清水建設 (株) 土木本部技術第一部副部長 工博 (正会員)

* 2 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

* 3 清水建設 (株) 東北支店 工事長 (正会員)

* 4 清水建設 (株) 土木本部技術第三部課長

表-2 基本配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ Sl (cm)	沈下度 Ts (秒)	空気量 (%)	W/F		細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					C+F (%)	F/C+F (%)		W	C	F	S	G
A	80	3	20	3.5	83.6	30	26	125	105	45	540	1524
B	80	2	20	3.5	56.8	60	24	119	84	126	484	1522

粗骨材Gの粒度分布は、質量比 (80-60):(60-40):(40-20):(20-10):(10-5) = 13 : 27 : 30 : 19 : 11 に調整

目標を 2cm とした。セメントはフライアッシュのポゾラン反応を期待するため Ca(OH)₂ 生成量の多い普通ポルトランドセメントとした。水結合材比は、材齢 91 日における配合強度を 12N/mm² と設定して、予備試験の結果から定めた。

微粉末は、原石が花崗岩で粒度分布が図-1 に示す 2 種類の微粉末を質量比 1 : 1 で混合して使用した。その混合した微粉末の粒度を粗粒率で表示すると 0.49 となり、質量割合で約 78% を占める 150μm 以下の粒子のみのプレーン比表面積は 770cm²/g である。従って、この微粉末は細骨材よりは細かく、コンクリート用石灰石微粉末³⁾ より粗い粒子である。微粉末の置換量は 100kg/m³ および 200kg/m³ として、微粉末と同容積分だけ細骨材量を減少させた。混和剤は全て JIS A 6204 に適合するものを用いた。AE 減水剤は全ての配合において質量で結合材量の 0.2% を用いた。

3.2 試験方法

コンクリートの練混ぜは容量 0.1m³ の水平二軸式強制練りミキサを使用し、個体材料のみ投入後 10 秒間から練りし、混和剤を混入した水を投入後 60 秒間 (高性能 AE 減水剤を添加した配合の場合は 90 秒間) 練り混ぜた。練混ぜ直後の試料を 40mm のふるいにてウェットスクリーニングし、JIS A 1101 スランプ試験、JIS A 1128 空気量試験、JSCE F 501 振動台式コンシステンシー試験およびモルタル上昇試験を行った。振動台式コンシステンシー試験は試料を容器に入れた状態で振動数が 1500vpm の場合に振幅が上下方向 0.8±0.03mm、水平方向 0.3±0.05mm になるよう調整し、沈下度 Ts 秒と表示した。モルタル上昇試験は振動機による締固めの容易さを試験する

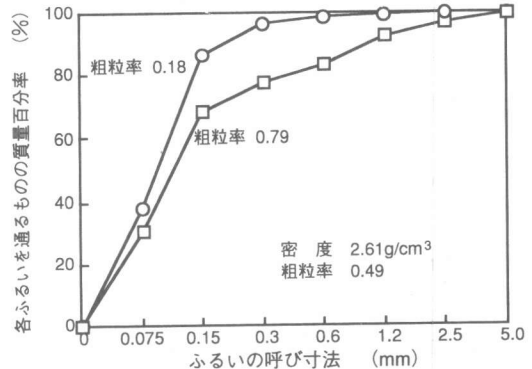


図-1 微粉末の粒度分布

ものであり、試料を単位容積質量試験用の 0.01m³ の容器に φ31.5mm の棒形振動機を鉛直に立て込み、試料を二層で各層 35 回ずつ突き棒で突き固めた後、振動機を動かしてからコンクリート表面にモルタルが浮き上がるまでの時間を Tm 秒と表示した。これらの試験は、練混ぜ後 2 時間まで行い、経時変化を調べた。ブリーディング率の試験は JIS A 1123 に準じて行った。

4. 実験結果と考察

4.1 基本配合の決定

表-1 に示す基本配合は、水結合材比を一定にし、単位水量 (単位結合材量) と細骨材率をパラメータとして所定のワーカビリティが得られる範囲で単位水量が最小となるように決めた。

図-2 に、W = 125kg/m³、C + F = 150kg/m³ の場合の A 配合の細骨材率と諸特性値との関係を示す。細骨材率が 23% の場合は材料分離が生じており、各特性値の結果から、26% が最適細骨材率と判断した。

図-3 に、W = 119kg/m³、C + F = 210kg/m³

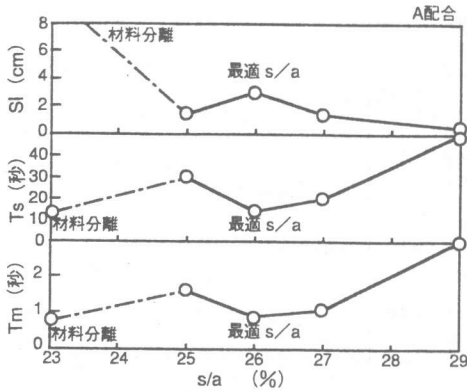


図-2 細骨材率と諸特性値との関係

の場合のB配合の細骨材率と特性値との関係を示す。各特性値の結果から24%が最適細骨材率であると判断した。なお、本研究で対象とするような配合においては、細骨材率のみを変化させて沈下度が下に凸を示す値が最適細骨材率を示すことが報告されている⁴⁾ので、本研究では、その方法を採用することにした。

4.2 微粉末の置換の影響

A, B配合の基本配合に微粉末を 200kg/m^3 まで細骨材と置換した場合の置換量と諸特性値との関係を図-4に示す。A配合, B配合とも、微粉末の置換量 S_d の増加に伴ってスランプは減少し、沈下度とモルタル上昇時間は増加している。この理由は、 0.15mm 以下の微粒分が細骨材に占める割合は $S_d=100\text{kg/m}^3$ の場合約23%, $S_d=200\text{kg/m}^3$ の場合約38%となり、微粒分が過多となり、コンクリートのワーカビリティが低下したと考えられる。以下に、A, B配合別に $S_d=100\text{kg/m}^3$ および $S_d=200\text{kg/m}^3$ の場合の配合の検討を行う。なお、微粉末を細骨材の一部と置換した場合の細骨材率は、微粉末も細骨材の一部と見なして計算を行った。

4.3 A配合への微粉末の適用

図-5に $S_d=100\text{kg/m}^3$ の場合の細骨材率と諸特性値との関係を示す。基本配合と同一の細骨材率である26%から細骨材率が減少するとワーカビリティが良好になり、25%が最適細骨材率であると判断した。

図-6に $S_d=200\text{kg/m}^3$ の場合の細骨材率と諸

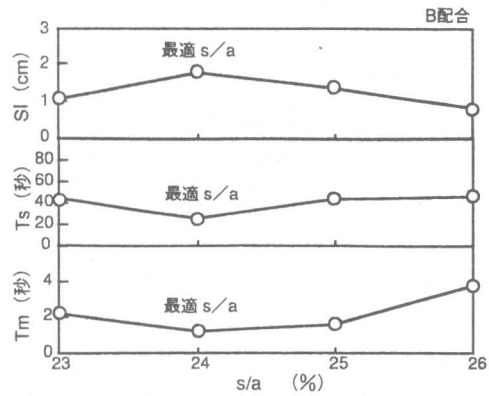


図-3 細骨材率と諸特性値との関係

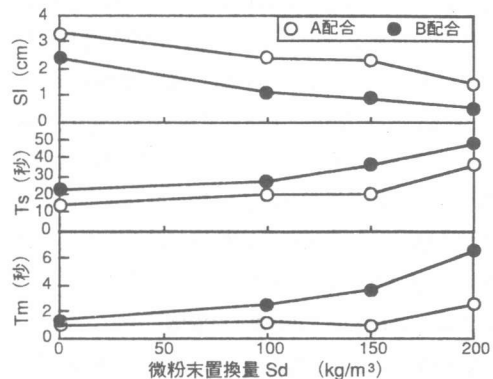


図-4 微粉末置換量と諸特性値との関係

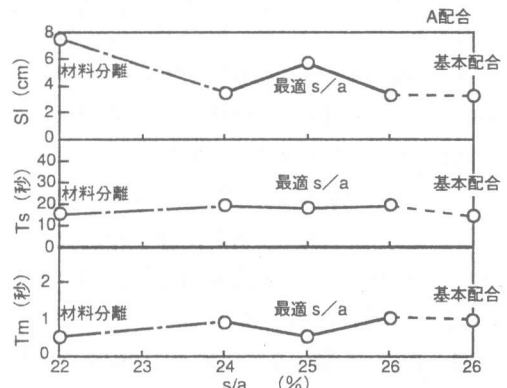


図-5 微粉末置換量 100kg/m^3 の場合の諸特性値

特性値との関係を示す。細骨材率が26%の場合、基本配合と比較してワーカビリティは低下するが、細骨材率が26%から小さくすると徐々に回復し、細骨材率が22%の場合に基本配合とほぼ同一のワーカビリティが得られた。なお、細骨材率が20%の場合には材料分離が生じているので、

最適細骨材率は明確には得られなかった。

以上の結果より、A配合の場合は、 $S_d = 200\text{kg/m}^3$ までの範囲では、細骨材率を変更することで基本配合とほぼ同様のワーカビリティが得られることが明らかとなった。

なお、微粉末を仮に細骨材と見なした場合、 $S_d = 100\text{kg/m}^3$ の場合の細骨材の粗粒率は 2.23、 $S_d = 200\text{kg/m}^3$ の場合の粗粒率は 1.84 となる。細骨材の粗粒率が 2.53 であるので、粗粒率の変化は、それぞれ、0.30 および 0.69 である。これらの値に土木学会コンクリート標準示方書の配合修正方法における、細骨材の粗粒率の変化に対する細骨材率の修正値を適用してみると、最適細骨材率は $S_d = 100\text{kg/m}^3$ の場合 24.5%、 $S_d = 200\text{kg/m}^3$ の場合 22.7% となり、実験結果と近似した値となる。このことから、A配合を用いた場合には、微粉末を細骨材と見なせば、一般のコンクリート用の配合修正方法における粗粒率と細骨材率との関係を適用できる可能性があると言える。

4. 4 B配合への微粉末の適用

図-7に、 $S_d = 100\text{kg/m}^3$ と $S_d = 200\text{kg/m}^3$ の場合の細骨材率と諸特性値との関係を示す。本実験の範囲では、細骨材率を変化させても基本配合のワーカビリティは得られていない。この結果から細骨材率を変化させるだけでは基本配合と同程度のワーカビリティは得られないと判断し、高性能 AE 減水剤の併用を試みることにした。なお、細骨材率は図-7の結果から 23% とし、ワーカビリティの低下が大きい $S_d = 200\text{kg/m}^3$ の場合を先に検討した。高性能 AE 減水剤は、標準形 SPS と遅延形 SPR を用いた。

図-8 および図-9に、それぞれ SPS および SPR の添加率を変えた場合の特性値の経時変化を示す。目視観察および試料のハンドリング状況から、B配合はA配合と比較して塑性粘度が高いと判断された。そのため、スランプが 5 cm 程度以上の場合に、A配合では材料分離の傾向が見え始めるのに対して、B配合では材料分離の傾向は認められていない。また、A配合では粗骨材の噛み合いが生じて沈下度およびモルタル上昇時間が

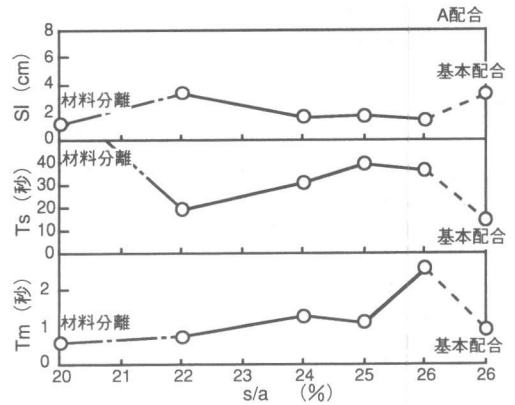


図-6 微粉末置換量 200kg/m^3 の場合の諸特性値

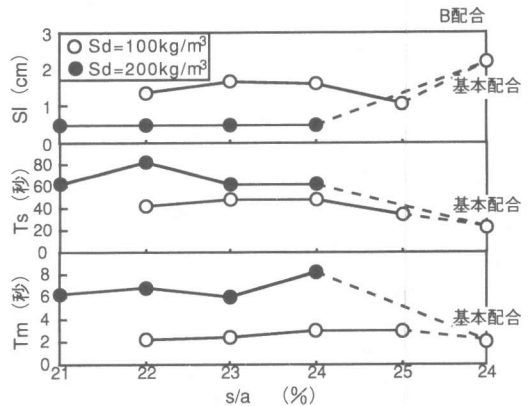


図-7 微粉末で置換した場合の諸特性値

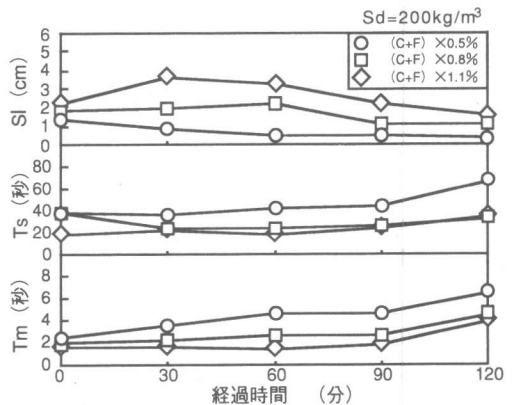


図-8 SPS を併用した場合の諸特性値

長くなる場合が多いのに対して、B配合ではコンクリートの塑性粘度が高くなり沈下度およびモルタル上昇時間が長くなる傾向が認められた。このため、スランプが当初設定した表-2に示す目標値である 2cm より多少大きい値である 4 cm 程

度になっても、施工上は何の問題もなく良好なワーカビリティが得られるものと考えられた。

図-8 および図-9 の結果から、良好なワーカビリティおよびその保持性能が得られるのは、SPS の添加率は 0.8% から 1.1% の範囲、SPR の添加率は 0.8% の場合であると判断される。

ここで、主な配合のブリーディング試験結果を表-3 に示す。A 配合の場合は、微粉末の置換量の増加に伴いブリーディング率が多少増加している。B 配合の場合は、微粉末の置換量の増加に伴い、ブリーディング率は大幅に増加している。後者の理由は、高性能 AE 減水剤の使用、特に遅延形の使用により凝結の遅延に伴ってブリーディング率が増加したものと考えられる。例えば、B 配合で SPR の添加率が 0.8% の場合は、8 時間以上経過してもブリーディングの発生が続いており、その率も多いため実施工では使用不可能である。このように、高性能 AE 減水剤の選定に関しては、ブリーディング率の考慮も重要な検討項目であると言える。

表-3 ブリーディング率試験結果

微粉末置換量 (kg/m ³)		0	100	200
A 配合	—	1.70	1.89	2.21
	—	1.18	—	—
B 配合	SPS (0.8%)	—	—	2.78
	SPS (1.1%)	—	—	4.27
	SPR (0.5%)	—	2.71	—
	SPR (0.8%)	—	—	8.44*

* 510 分でも終了せず。

図-10 に、Sd=100kg/m³ の場合、SPR の添加率 0.5% および 0.7% の場合の特性値の経時変化を示す。添加率が 0.5% の場合は、ワーカビリティ、その経時変化およびブリーディング率から適切な配合であると判断できる。

以上、B 配合においては、微粉末置換量が 200kg/m³ までは、高性能 AE 減水剤の種類の設定と添加率の設定が適切であれば、所定の性能を有する配合が可能であると考察できる。

4.5 各特性値間の関連

A, B 配合の基本配合および Sd=200kg/m³

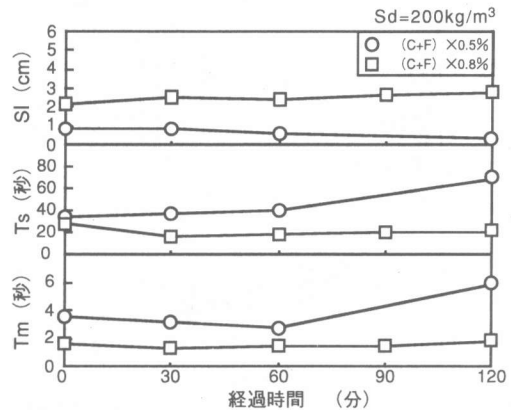


図-9 SPR を併用した場合の諸特性値

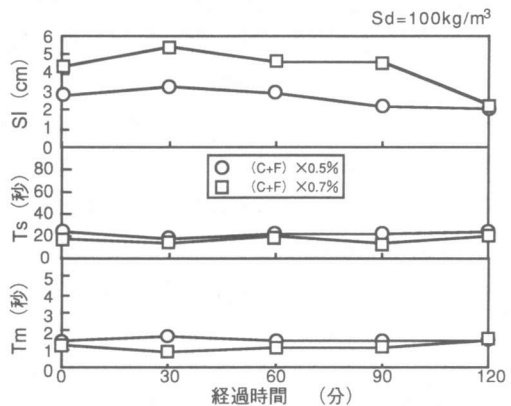


図-10 SPR を併用した場合の諸特性値

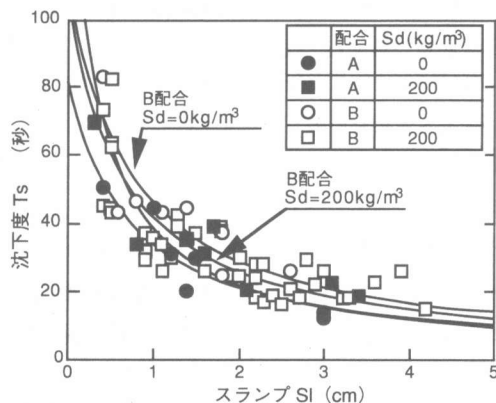


図-11 スランプと沈下度との関係

の 4 配合のデータを用いて、各特性値間の関係について検討を行う。図-11 にスランプと沈下度との関係を示す。スランプと沈下度とは一般に相関が無い⁵⁾との報告もあるが、本実験の範囲では両者は比較的良好な相関を示している。配合間の

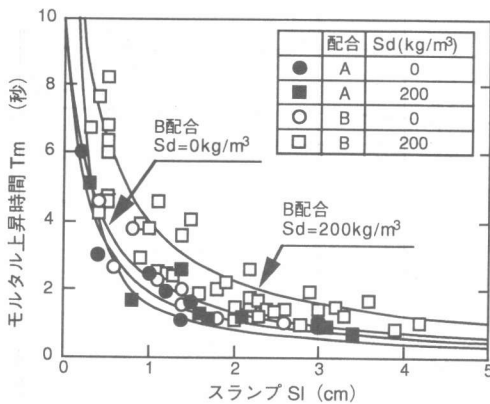


図-12 スランプとモルタル上昇時間との関係

差を見ると、同一の沈下度の場合にB配合の方がスランプがやや大きくなる傾向にある。図-12にスランプとモルタル上昇時間との関係を示す。データにばらつきは認められるものの全体的には両者には良い相関が認められる。配合間の差を見ると、同一のモルタル上昇時間の場合にB配合、特に微粉末を置換した場合にスランプが大きくなっている。ここで、対象とした4つの配合のコンクリートから粗骨材を除いたモルタルを新たに練り混ぜて、K漏斗の流下時間から見かけの塑性粘度を測定⁶⁾した。その結果、B配合はA配合の約2.5倍以上、また微粉末を置換した場合には約1.5倍以上に増加するとの結果が得られ、前述の目視観察の結果と一致している。

以上より、フライアッシュ高含有の配合あるいは微粉末を用いた配合は、沈下度やモルタル上昇時間を同一にした場合にスランプが大きくなる傾向にあり、前述したようにスランプが多少大きくても塑性粘度が高いために材料分離が生じにくいと言える。従って、塑性粘度の高い配合の検討に当たっては、スランプが多少大きい方が実施工面でのワーカビリティが良いとも考えられるので、配合検討においては、スランプのみで無く、振動締固めによる性質を評価する試験方法も必要になるものと考えられる。

5. 結論

本実験の範囲で、以下のことが結論として得られた。

- (1) 中庸熟ポルトランドセメントを用い、フライアッシュ置換率30%の配合においては、微粉末の置換率が 200kg/m^3 までの範囲では、細骨材率を小さくすることで、所定のワーカビリティを有する配合が可能である。また、微粉末を細骨材と見なした場合の配合修正方法における、細骨材率と粗粒率との関係は一般のコンクリートの場合の値を適用できる可能性がある。
- (2) 普通ポルトランドセメントを用い、フライアッシュの置換率60%の配合において、微粉末の置換率が 200kg/m^3 までの範囲では、適切な高性能AE減水剤の添加により、所定のワーカビリティを有する配合が可能である。
- (3) フライアッシュ高含有の配合および微粉末を用いた配合のようにコンクリートの塑性粘度が高くなる配合においては、スランプの他に振動締固めによる性質を評価する試験方法も必要になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高樋堅太郎：RCD用コンクリートにおける骨材微粒材料の利用に関する研究、京都大学学位論文、1996.8
- 2) 永野修美、鍵本広之、佐藤道生：フライアッシュ置換率を60%まで高めたダムコンクリート、電力土木、No.282、pp.77-81、1999.7
- 3) 日本コンクリート工学協会、石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告書・論文集、1998.5
- 4) 山本泰彦：(論文)コンクリートのワーカビリティおよび強度におよぼす粗骨材粒の特質、コンクリートジャーナル、Vol.7、No.11、pp.11-21、1969
- 5) 岩崎訓明：コンクリートの特性、コンクリートセミナー1、p.30、共立出版(株)、1975
- 6) 河井 徹：高流動コンクリートの配合設計に関する実験的研究、東京工業大学学位論文、1996.8