

論文 各種要因がコンクリートのスランプへ及ぼす影響

芦澤 良一^{*1}・坂井 吾郎^{*2}・新藤 竹文^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨：近年、コンクリートへの加水対策等により現場での単位水量測定を義務付けるケースが増加している。このような状況において、高品質かつ高耐久なコンクリート構造物を構築する上で、材料条件、環境条件および構造・施工条件に適した仕様の設定と配合設計を行うことが求められている。このためには、使用材料や環境条件の変動に伴うスランプのばらつきや運搬等によるスランプの経時変化を定量的に把握し、配合設計へ反映させることが必要である。ここでは、各種要因がスランプの変化へ及ぼす影響について実験的に検討し、その結果を考慮して配合設計に関する提言を行ったものである。

キーワード：スランプ、ばらつき、単位水量、表面水率、粒度、温度、初期欠陥

1. はじめに

これまで土木構造物において高品質かつ高耐久なコンクリート構造物を構築するためには、施工が可能な範囲でできるだけ単位水量の少ない硬練りのコンクリートを適用することが基本とされてきており、仕様として8~12cmのスランプが指定される場合が多い。

一方で、良質な骨材資源の枯渇や、近年の耐震基準見直しなどによる配筋や内部鋼材の過密化や形状の複雑化、ポンプ施工の普及や作業員の技能低下など、コンクリート施工に関わる状況は、材料面、構造面、施工環境面において大きく変化している。

こうした状況の中、コンクリートへの加水が大きな社会問題となり、この対策として現場での単位水量の測定を義務付けるケースが増えている。しかしながら、検査方法が十分に確立されていないこともあり、検査時間の増加などから、かえってコールドジョイントやジャンカなどの初期欠陥発生を助長する可能性があることも指摘されている。

著者らは、今後、高品質かつ高耐久なコンク

リート構造物を構築するためには、材料条件、構造条件、施工環境条件に適した仕様の設定と配合設計が必要であると考えており、そのためには、コンクリートの製造から打込みに至るまでの各段階における各種要因による品質の変化を定量的に把握することと、構造物の条件とコンクリートの施工性能の関係を明らかにし、条件に応じたコンクリートの性能規定と配合設計が行えるようにすることが重要であると考え、検討を行っている¹⁾。

本論では、こうした取組みの第1段階として、全国のレディーミクストコンクリート工場における同一条件のコンクリートに関する調査の結果、各種の要因がコンクリートのスランプのばらつきに及ぼす影響について定量的に把握することを目的に行った実験的検討の結果を示すとともに、それを基に実施工を想定したスランプの変化について考察した結果および配合設計への反映に向けた提言について述べる。

2. 全国の工場における配合調査

コンクリートのスランプは、製造する際の使

*1 鹿島建設(株) 技術研究所材料・LCEグループ研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ主任研究員 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室チームリーダー兼主席研究員 工博 (正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所材料・LCEグループチーフ兼上席研究員 工博 (正会員)

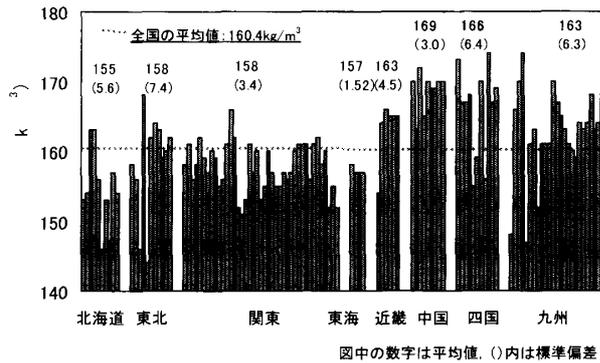


図-1 各地域における単位水量

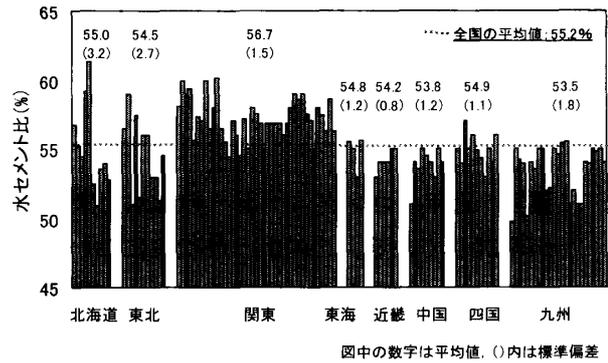


図-2 各地域における水セメント比

用材料や環境条件，ミキサ等の設備条件などによって異なることが知られており，このため目標とするコンクリートの仕様が同一であっても，これらの条件が異なれば配合には相応の違いが生じるものと考えられる。そこで，全国のレディミクストコンクリート工場（131工場）において，同一条件のコンクリート配合（24.8-20N）について調査を行い²⁾，全国的な配合の差異を把握することを試みた。

図-1に地域ごとの単位水量，図-2に水セメント比，図-3に細骨材率の調査結果を示す。図中には地域毎の平均値および標準偏差を示した。

単位水量については，最も少ない工場で144kg/m³，最も多い工場で174kg/m³と今回調査した範囲では最大30kg/m³の差異がある結果であった。また，地域ごとの平均値の差も大きく，北海道地域の155kg/m³に対して中国地域は169kg/m³であり，全国的に見ても東日本地域で少なく，近畿以西の西日本地域で多くなる傾向が認められる。さらに，サンプル数に差異があるため明確には言えないものの，いずれの地域においても同一地域内での標準偏差は概ね5kg/m³前後となっており，比較的大きいことが明らかとなった。

水セメント比については，最も大きい工場で61.3%，最も小さい工場で49.8%と最大11.5%の差異がある結果であり，全国的な傾向としては西日本地域で小さくなることが認められる。また，図中には示していないが，このような単位水量と水セメント比の違いから，単位セメント

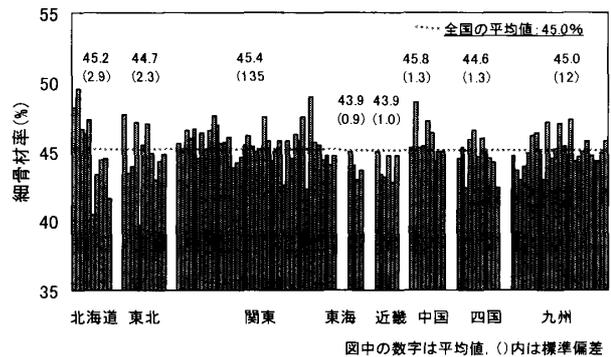


図-3 各地域における水セメント比

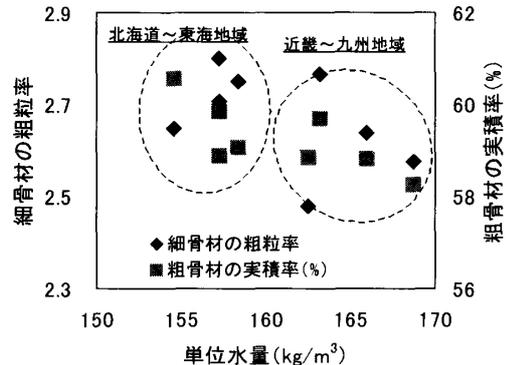


図-4 単位水量と細骨材の粗粒率および粗骨材の実積率の関係

量は最も少ない工場で254kg/m³，最も多い工場334kg/m³と最大80kg/m³の差異がある結果となっている。

細骨材率については，最も大きい工場で49.5%，最も小さい工場で39.6%と最大9.9%の差異がある結果であったが，全国的には概ね45%前後となっており，明確な傾向は認められなかった。

このような結果であることは，先にも述べた通り，様々な要因が考えられるが，その主要因としては，西日本地域において単位水量が多い傾向が認められることや同一の目標強度を得る

表-1 使用材料

項目	記号	材料	適用
水	W	上水道水	—
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16(g/cm ³), プレーン:3290(cm ² /g)
細骨材	S ₁	山砂(細目)	密度:2.64(g/cm ³), F.M.:2.34, 吸水率:1.23(%)
	S ₂	山砂(粗目)	密度:2.60(g/cm ³), F.M.:3.47, 吸水率:1.03(%)
粗骨材	G ₁	5号砕石	密度:2.65(g/cm ³), F.M.:7.04, 吸水率:0.47(%)
	G ₂	6号砕石	密度:2.65(g/cm ³), F.M.:6.35, 吸水率:0.49(%)
混和剤	AE	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	Ad	AE助剤	アルキルアシルスルホン化合物系

表-2 実験要因と水準

実験要因	基準条件	水準
細骨材の表面水率	0%	±0.5% ±1.0%
細骨材の粗粒率	2.78	2.38 3.18
粗骨材の実積率	60%	59% 61%
コンクリート温度	20°C	10°C 30°C

表-3 配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				AE (C×%)	SP (C×%)
					W	C	S ^{*1}	G ^{*2}		
配合1	55	44.5	8±1.0	4.5±1.0	157	285	829	1041	0.25	—
配合2	40	46.0	15±1.0		155	388	819	969	—	0.8

*1 S₁:S₂=6.5:3.5, *2 G₁:G₂=4.0:6.0

ための水セメント比が小さくなっていることを考えると、一般に言われているように骨材事情を反映した結果であると推察される。図-4は、今回の調査結果について各地域における単位水量の平均値と細骨材粗粒率および粗骨材実積率の平均値の関係を示したものであるが、細骨材粗粒率の小さいものほど、また、粗骨材実積率の小さいものほど単位水量が大きくなる傾向が認められ、こうした骨材が西日本地域で多く使われていることを示すものと考えられる。

以上のように、同一仕様のコンクリートであっても諸条件によって単位水量や単位セメント量などの配合は大きく異なっており、スランブの小さい硬練りのコンクリートがすなわち良質なコンクリートであるとは言えない状況にあるのが実状である。単位水量や単位セメント量にこれほどの違いがあれば、材料分離抵抗性や経時変化、ポンプ圧送性などのワーカビリティと、乾燥収縮などの耐久性能が異なることは想像に難くない。また、使用材料の品質変動によるスランブのばらつきの程度などにも違いが生じることは明らかである。したがって、高品質・高耐久なコンクリート構造物を構築するためには、元々の単位水量が少なくできる地域・工場では、無理に硬練りのコンクリートを用いるのではな

く、施工性を確保できるような1ランク上のスランブを採用する、また、単位水量が多い地域・工場では、高性能AE減水剤を使用して単位水量を減じつつ施工性を確保するなどの対応が必要であるものと考えられる。

3. 各種要因によるスランブのばらつきに関する実験

3.1 実験概要

同一の製造環境によって練り混ぜられたコンクリートであっても、セメントの製造ロット差や骨材の粒度や粒形の変動によってスランブは変化し、ばらつきを生じ、このようなスランブの変化は、今後、構造・施工条件に適したコンクリートの配合設計を行う上で無視できない事象であると考えられる。

各種要因によるスランブの変化は、コンクリート標準示方書³⁾に示されている配合修正方法からある程度把握できる。この配合修正方法は國分らの実験による多くの系統的なデータを基に構築されたものである⁴⁾。残念ながら、基本となったデータが残されていないこと、スランブ8cm程度のコンクリートを対象とし、当時存在しなかった高性能AE減水剤を使用した配合は当然ながら適用範囲に無いことから、各種要因の変

動がスランプに及ぼす影響と、それによるスランプのばらつきを定量的に把握することを目的として実験を行った。

表-1 および 2 に、それぞれ使用材料および実験要因を示す。実験要因は、レディーミクストコンクリート工場においてスランプへ及ぼす影響が大きいと考えられる、細骨材表面水率の設定誤差、細骨材粗粒率、粗骨材実積率およびコンクリート温度とした。

コンクリートの配合を表-3 に示す。配合は、一般的な土木構造物に対応する AE 減水剤を使用したコンクリートを想定した配合 1 と、橋梁上部工などに適用される高性能 AE 減水剤を使用した高強度でスランプの大きいコンクリートを想定した配合 2 とした。各配合は、表-2 中に示した基準条件において、スランプが 8cm (配合 1) および 15cm (配合 2) となるように、試験練りによって定めたものである。なお、各種要因を変化させてコンクリートを練混ぜた場合、スランプと同時に空気量も変化するが、ここでは、スランプの影響のみを抽出するため、空気量は $4.5 \pm 1.0\%$ の範囲で一定となるように AE 助剤で調整した。

3.2 細骨材の表面水率設定誤差による影響

図-5 に細骨材の表面水率設定誤差を ± 0.5 , $\pm 1.0\%$ とした場合のスランプを示す。なお、本実験における表面水率設定誤差は、各水準相当分の単位水量の増減によって変化させており、細骨材量については増減させていない。また、表面水率 $\pm 1.0\%$ の設定誤差は、配合 1 では単位水量 $\pm 10\text{kg/m}^3$, 配合 2 では単位水量 $\pm 8\text{kg/m}^3$ の増減に相当する。

本実験の範囲においては、表面水率 $\pm 0.5\%$ の誤差に対するスランプの変化は、配合 1 で $\pm 2.2\text{cm}$ 程度、配合 2 で $\pm 2.6\text{cm}$ 程度であり、両配合でスランプの品質管理上の許容範囲の限界値まで変化する結果であった。

3.3 骨材の品質変動の影響

(1) 細骨材粗粒率の変動による影響

図-6 に細骨材粗粒率の変動を 2.78 ± 0.4 とし

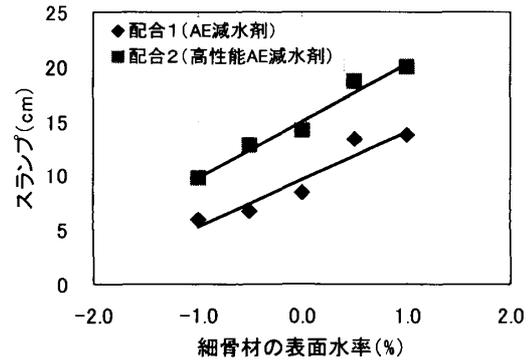


図-5 細骨材の表面水率とスランプの関係

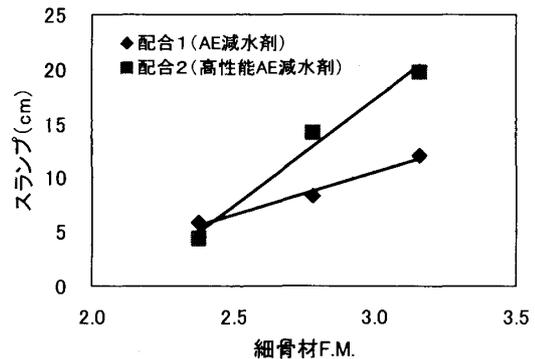


図-6 細骨材の粗粒率とスランプの関係

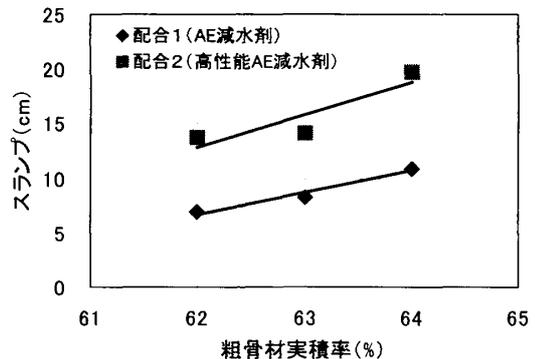


図-7 粗骨材の粗粒率とスランプの関係

た場合のスランプを示す。

これより、従来の知見⁵⁾通り、細骨材粗粒率が大きいほどスランプは大きくなる傾向を示し、細骨材粗粒率 ± 0.2 の変動に対するスランプの変化は、配合 1 では $\pm 1.6\text{cm}$ 程度、配合 2 では $\pm 4.0\text{cm}$ 程度であった。また、細骨材の粗粒率の変化に対するスランプの変化は、配合 2 の方が配合 1 よりも大きくなり、配合の違いによりスランプの変化の程度が異なることが確認された。これは、水セメント比の低い配合 2 では高性能 AE 減水剤を用いてスランプを大きくしており、配合 1 よりもコンクリート中の自由水量が少な

いと考えられ、粗粒率の変化に伴う拘束水量の変化がより顕著にスランブの変化に対して影響を及ぼすためであると考えられる。

(2) 粗骨材実積率の変動による影響

図-7に粗骨材実積率の変動を $63 \pm 1\%$ とした場合のスランブを示す。これより、粗骨材実積率が大きいほどスランブは大きくなる傾向を示し、粗骨材の実積率 $\pm 1\%$ の変動に対するスランブの変化は、配合1では $\pm 1.0\text{cm}$ 程度、配合2では $\pm 1.5\text{cm}$ 程度であった。

3.4 コンクリート温度の影響

図-8にコンクリート温度が $20 \pm 10^\circ\text{C}$ に変化した場合のスランブを示す。コンクリート温度とスランブの関係は、従来の知見⁶⁾通り、温度が高くなるほどスランブは小さくなる結果となった。本実験の範囲では、コンクリート温度 $\pm 5^\circ\text{C}$ の変化に対するスランブの変化は、配合1では $\pm 1.0\text{cm}$ 程度、配合2では $\pm 1.7\text{cm}$ 程度変動し、高性能AE減水剤を使用した配合2の方が配合1よりもコンクリート温度の変化に対するスランブの変化は大きくなった。

以上の実験結果を整理すると、全体的な傾向としては、各種要因に対するスランブの変化は、配合1よりも配合2のほうが大きくなり、高性能AE減水剤を使用したコンクリートは使用材料や環境条件等の変動に対して鋭敏に反応するといった一般的な知見と同様の傾向を示した。

小沢らによる既往の研究^{7) 8)}では、スランブ 8cm 程度のコンクリートを対象とし、使用材料の品質変動に対するスランブのばらつきに関して、種々の示方書に基づいた検討がなされている。それによれば、スランブの変化は、細骨材表面水率 1% の変動に対して約 5cm 、細骨材粗粒率 0.2 の変化に対して約 1.5cm および粗骨材実積率 1% の変動に対して $0.9 \sim 1.4\text{cm}$ であることが示されている。これらの結果やコンクリート標準示方書に示される配合修正方法から算出されるスランブの変化は、本実験において目標スランブ 8cm とした配合1の試験結果とほぼ同様の値を示しており、本実験結果は妥当なものであ

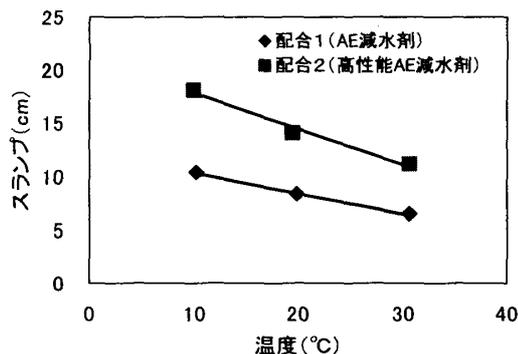


図-8 コンクリート温度とスランブの関係

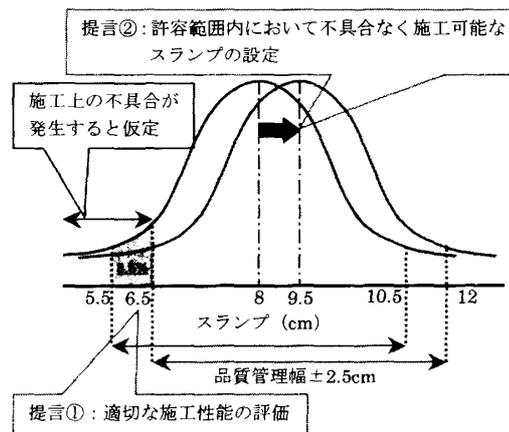


図-9 配合設計に関する提言

ると考えられる。

4. 配合設計に関する提言

設計スランブが 8cm のコンクリートの場合、品質管理上 $\pm 2.5\text{cm}$ の差が認められており、同一の品質を有するコンクリートとして取り扱われている。しかしながら、スランブ 5.5cm と 10.5cm ではコンクリートの施工性能が大きく異なることは明らかであり、施工条件によってはスランブが 8cm で施工可能であっても、 5.5cm では施工が困難となる場合が生じる。例えば、図-9に示すようにスランブが 6.5cm 以下では施工上の不具合が生じるとした施工条件を想定し、スランブのばらつきが $3\sigma = \pm 2.5\text{cm}$ の正規分布であると仮定すると、スランブが品質管理の許容範囲内であっても、 3.5% 程度の確率で不具合を生じることとなる。したがって、コンクリートの施工性能を適切に評価した上で、図に示すようにスランブの許容範囲内において不具合なく施工できるようなスランブを設定し、配合選定を

行うことが必要と考えられる。

また、JIS A 5308 においてスランプの許容範囲は、8~18cm のコンクリートについては一律±2.5cm とされているが、種々の要因に起因するコンクリート製造時のスランプのばらつきを考慮すると、これについても一考の余地があるものと考えられる。今回の実験では、表面水率 0.5% の設定誤差だけでも、スランプの増減は±2.5cm 程度である結果となっている。このことから、スランプの品質管理上の許容差±2.5cm は、表面水率設定誤差の許容範囲としては妥当であると言えるが、実際のコンクリートの製造では、さらに前章で実験結果を示したようにその他の要因によるばらつきが加わる。例えば、今回の実験結果と前掲した小沢らの研究におけるセメントおよび混和剤の品質変動を参考に、細骨材粗粒率の変動が±0.1、粗骨材実積率の変動が±0.5%、打設日のコンクリート温度差が 3℃、セメント粉末度の変動が±300cm²/g、さらに混和剤の品質変動が生じると仮定すれば、骨材の表面水率の設定誤差がない状態であってもスランプには最大で±3.7cm 程度のばらつきが生じることとなる。

一方、現状のコンクリートの製造システムでは骨材の表面水率の補正のみしか考慮されておらず、これらの要因によるばらつきも表面水率の設定誤差として補正せざるを得ないのが実状であると考えられる。仮にこれらのばらつきを表面水率の設定のみによって±2.5cm の範囲に収まるようにするとすれば、細骨材の表面水率を最大で±0.6%程度調整する必要がある。表-1 に示した配合 1 の場合で試算すると、これは単位水量にして 5kg/m³ 増減させることと同義であり、W/C は 2%程度変化することとなるため、耐久性や材料分離抵抗性が配合設計において本来意図したものは異なってしまう。

このような事象を回避するためには、ばらつきの原因となる材料の品質変動を減じることが重要であり、そのための努力も行われているが、実際にこのようなばらつきを抑えることは困難

である。したがって、各種要因によって生じるばらつきの程度を十分に把握し、運搬および施工時における経時変化を考慮した上で適切なスランプの許容範囲を設定すること、そしてそれに応じた配合選定を行うことが必要であると考えられる。こうした取組みの実施によって、高品質かつ高耐久なコンクリート構造物の構築が可能となると考えられる。

5. まとめ

本論では、構造・施工条件に適した配合設計を行うための第一段階として、各種要因がスランプへ及ぼす影響について実験的検討を行った。これより、細骨材表面水率、細骨材粗粒率、粗骨材実積率およびコンクリート温度の変動によるスランプの変化を定量的に把握した。また、この結果を基に実施工を想定したスランプ変化を考慮し、配合設計に関して提言した。

今後、異なる使用材料を用いて評価を行うと共に、運搬や施工時におけるスランプの変化に関して定量的に把握することが課題となる。

参考文献

- 1) 新藤竹文, 坂田昇, 前川宏一: 初期欠陥を未然に防ぐコンクリート施工性能評価技術について, コンクリート工学 2005 年 2 月号
- 2) 溝淵利明, 村山八洲雄, 須田久美子, 永田茂, 増川淳二: 材料・配合の地域特性がコンクリート構造物の劣化に及ぼす影響に関する研究, 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム, pp.29-36, 2001.5
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書施工編 2002 年度版, p.378, 2002
- 4) 土木学会: 土木工学ハンドブック, 技報堂出版, p.182,
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点 04, 2004
- 6) 岡田清, 六車熙編: コンクリート・ハンドブック, 朝倉書店, 1981
- 7) 小沢一雅, 岡村甫: 材料の変動および計量誤差がコンクリート品質に及ぼす影響, コンクリート製造システムに関するシンポジウム論文集, pp.75-79, 1992.5
- 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの製造システム研究委員会報告書, 1992.3