

高強度コンクリートの遠心成形性に及ぼす調合の影響に関する研究

STUDY ON THE INFLUENCE OF MIX PROPORTION OF HIGH STRENGTH CONCRETE ON SEGREGATION DURING CENTRIFUGAL COMPACTION

菅 一雅*, 梶田佳寛**

Kazumasa SUGA and Yoshihiro MASUDA

The study on the influence of mix proportion of high strength concrete on the segregation of coarse aggregate and sludge formed during centrifugal compaction is reported here. First, the influence of mix proportion conditions, such as the type of superplasticizer and silica fume used and the water cementitious material ratio, on the rheological characteristics of high strength concrete paste was studied. Next, experiments were conducted on sludge generated while mixing various kinds of materials during the centrifugal compaction of high strength concrete. The results of the experiments showed that the plastic viscosity of paste increases as the water cementitious material ratio decreases. Moreover, the dewatering effect decreases, and sludge does not form easily. It was verified by measuring the quantity of sludge generated and by analyzing the cut surface of the centrifugal compaction test specimens that the smaller the quantity of high strength concrete paste, the more effective is the generation of sludge and the segregation of coarse aggregate.

Keywords : high strength concrete, centrifugal compaction, paste, sludge, segregation

高強度コンクリート, 遠心成形, ペースト, スラッジ, 材料分離

1. はじめに

コンクリートの遠心成形技術に関する研究^{1)~6)}は、昭和20年~40年代にかけて多く行われ、その当時にほぼ現在の遠心成形に関する技術が確立されている。遠心成形は、遠心力によりコンクリート中の空隙や余剰水を排出することにより、コンクリートの水セメント比を低減させ、強度増加や密実なコンクリートを製造する技術として電信柱、下水道管、既製コンクリート杭などに利用されてきた。最近では高層住宅柱部材での外殻PCa^{7),8)}にも採用されている。

遠心成形技術は、1つの効果として写真-1に示すような単位水量の少ない硬練りコンクリートを用いても、強制的に遠心成形し密実なコンクリート成形を可能にできる。このように、必要最低限の単位水量とすることにより、単位セメント量も少なくでき高耐久性を有する高強度コンクリート部材を経済的に製造することが可能である。

現在でも遠心成形技術を利用して年間約300万tの既製コンクリート杭が製造されている。しかし、既製コンクリート杭工法の高支持力化に伴い、より強度の高いコンクリートが必要となっており、現在では85N/mm²~105N/mm²の高強度既製コンクリート杭が使用されている。また、最近では120N/mm²級の既製コンクリート杭⁹⁾も開発され、より高強度化されつつある。そのため、水セメント比をより低減した富調合なコンクリートが必要となっている。

従来の遠心成形技術では遠心力作用により、コンクリート中の余剰水やセメント、骨材微粒子を含んだスラッジを発生させ、水・結合材比の低減や密実化効果により強度増加を期待してきた。しかし、最近における研究¹⁰⁾では、高強度コンクリートにおける遠心成形時の脱水効果も小さくなることが報告されている。このことから、高強度コンクリートを遠心成形する場合は、コンクリート自体の粘性が高くなるため、遠心成形時のコンクリートに作用する効果も違うことが予想される。ところが、既往の研究報告では水セメント比の範囲が30~50%のコンクリートであり、さらに水セメント比を低減した高強度領域での調合が遠心成形に及ぼす影響に関する研究報告はほとんどなく、製造会社のノウハウとして内部データにされているのが現状である。

筆者らは、既にこのような高強度コンクリートを遠心成形した場合のスラッジ発生や成形可否がペーストのレオロジー特性や単位水量による影響を受けることについて報告^{11), 12)}してきている。

本研究は、このような高強度コンクリートの調合が遠心成形に及ぼす影響について把握することを目的として、水結合材比の影響によるペーストおよびモルタルのレオロジー特性の変化や単位水量の影響によるコンクリート中のペースト量の変化が遠心成形のスラッジの発生量や骨材分離性状などに及ぼす影響について把握する実験を行った。

* ジャパンパイル(株)技術開発部

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Dept. of Technical Development, Japan Pile Corporation
Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Utsunomiya Univ.,
Dr. Eng.

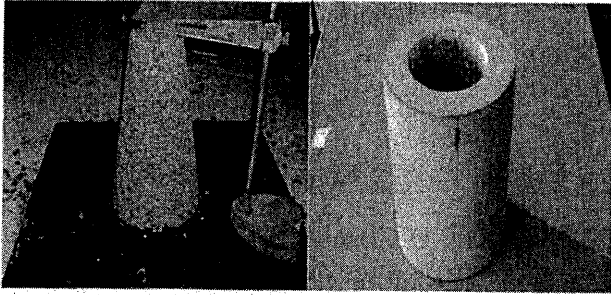


写真-1 遠心成形前、遠心成形後コンクリート状態

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査・練り混ぜ・遠心成形条件

実験に用いた高強度コンクリートの使用材料および調査条件を表-1、表-2に示す。

シリカフェーム（以下Si材）は、水結合材比（以下W/B）=23%以下の高強度領域に使用した。また、高性能減水剤は2種類使用し、それぞれの性能に合わせて、W/B=20%以上にナフタリン系高性能減水剤（以下N剤）を使用し、W/B=23%以下にポリカルボン酸系高性能減水剤（以下P剤）を使用した。なお、混和剤の標準添加率の設定は、製造会社の推奨する添加率でW/B=23%における同等の練り混ぜ状態・時間となる添加率とした。そして、N剤の標準添加率を2.2%、P剤の標準添加率を0.8%と設定し、各種混和材や単位水量の影響を把握するため、各調査とも標準添加率を固定して試験を行った。ただし、W/B=17%については、P剤添加率0.8%で遠心成形ができないため、添加率1.2%、1.6%についても試験を行った。

練り混ぜ条件および遠心成形条件を表-3に示す。

練り混ぜ時間は、目視によって十分均一に練り混ぜられたと判断できる時間とし、ペーストでは表面に光沢がみえる状態になるまで、またコンクリートについては、骨材表面に光沢のあるペーストが付着するまでとした。そのため、W/Bが小さくなるほど長い練り混ぜ時間になった。

試験体φ200×h300×t40(mm)を成形する遠心成形条件は、既往の研究報告^{2),13)}を参考に高強度コンクリートでの硬練りコンクリートを考慮して、初速の遠心力を1Gとし、遠心時間を420秒と長く設定した。また、中速の遠心力は最適な遠心成形とするため6G、10Gと段階的に上げ、高速の遠心力は、遠心成形による製造で一般的に用いられている30Gとし、遠心時間を120秒と設定した。

2.2 試験項目

試験項目を表-4に示す。

試験Iでは遠心成形に用いたコンクリートを構成するペーストについて材料・調査を変化させた時のレオロジー特性を把握するため、B型粘度計を用いて各種材料・調査におけるペーストの塑性粘度と降伏値を測定した。

試験IIでは各種調査コンクリートの遠心成形時に発生するスラッジ量を測定し、コンクリートを構成するペーストのレオロジー特性やペースト量との関係を検討した。

試験IIIでは各種調査コンクリートから発生したスラッジを調査推定分析し、コンクリートを構成するペーストのレオロジー特性と遠心力による脱水効果との関係について検討を行った。

試験IVでは遠心成形時におけるモルタル中の粗骨材の沈降性状

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント:密度3.14(g/cm ³),比表面積4500(cm ² /g)	
粗骨材	安山岩系砕石:表乾密度2.62(g/cm ³),粗粒率6.32	
細骨材	安山岩系砕砂:表乾密度2.64(g/cm ³),粗粒率2.66	
混和材	E材	エリカイト系高強度混和材:密度2.90(g/cm ³),比表面積3580(cm ² /g)
	Si材	シリカフェーム:密度2.20(g/cm ³),比表面積200000(cm ² /g)
混和剤	N剤	ナフタリン系高性能減水剤
	P剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤

表-2 調査条件

水結合材比W/B(%)	17, 20, 23, 28, 33, 38			
細骨材率s/a(%)	44			
単位水量W(kg/m ³)	110, 120, 130, 140, 150			
混和材置換率(B×%)	0, 5, 10, 20, 30			
混和剤添加率(B×%)	N剤	2.2	P剤	0.8, 1.2, 1.6

表-3 練り混ぜ、遠心成形条件

練り混ぜ	ペースト:低速60s~300s→かき落とし→高速180s~300s コンクリート:空練り30s→本練り180s~500s
遠心成形	初速1G 420s→中速6G 120s→中速10G 60s→高速30G 120s

表-4 試験項目

試験I	遠心成形コンクリートを構成するペーストのレオロジー特性測定試験
試験II	遠心成形コンクリートのスラッジ量測定試験
試験III	遠心成形コンクリートのスラッジの調査分析試験
試験IV	遠心成形時の粗骨材沈降および分離状況確認試験

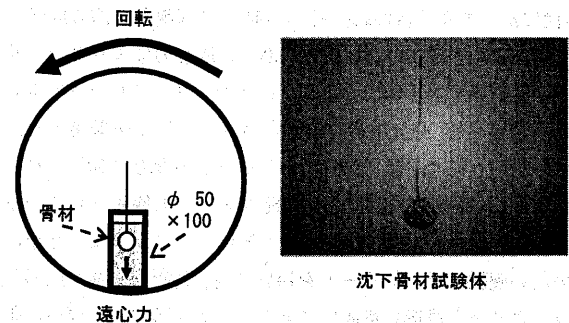


図-1 遠心成形簡易レオロジー試験概要

を把握するため、モルタルのレオロジー特性について確認することを試みた。しかし、ペーストのレオロジー特性はB型粘度計により評価できたが、遠心成形するコンクリートを構成する調査のモルタルについては、B型粘度計では測定中数値が安定せず、うまくレオロジー特性を評価できないことが判った。そこで、遠心成形時のペーストやモルタル中の粗骨材の沈降量から、ペーストやモルタルのレオロジー特性を簡易に評価する方法を考案した。

試験方法は、図-1に示すようなφ50×100(mm)の容器内にペーストまたはモルタルを入れ、各遠心力条件における粗骨材（平均粒径約16mm, 5.1g）の沈降量を測定した。試験時開始には、ペース

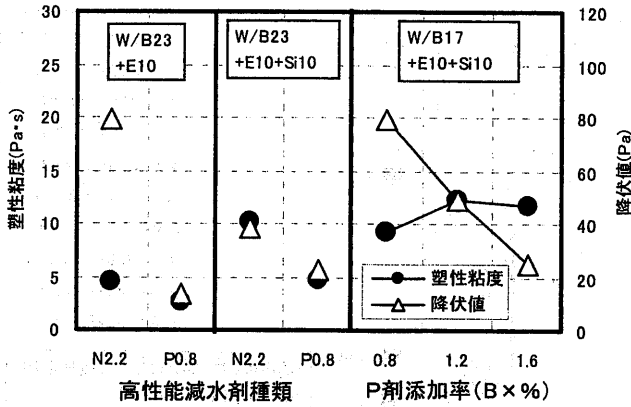


図-2 高性能減水剤の種類、添加率の影響

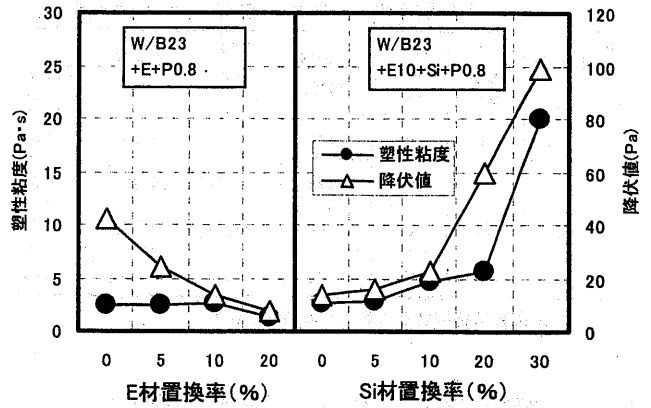


図-3 E材, Si材の置換率の影響

トまたはモルタル中に粗骨材がほぼ埋め込まれた状態とし、遠心力作用後の沈降量の測定は、粗骨材に取り付けられたステンレス線により行った。そして、簡易試験での粗骨材沈降量で得られたモルタルのレオロジー特性と遠心成形したコンクリート試験体切断面の粗骨材分離状態との関係について検討を行った。

3. コンクリートを構成するペーストのレオロジー特性 (試験 I)

3.1 高性能減水剤の種類の影響

高性能減水剤の種類および添加率とペーストのレオロジー特性の関係を図-2に示す。

N剤とP剤を標準添加量用いた W/B=23%の同一材料・調合でのペーストのレオロジー特性値は、P剤を使用した場合の方が塑性粘度、降伏値とも小さくなる傾向を示した。

また、W/B=17%におけるP剤の添加量の違いによる影響では、塑性粘度はあまり変化しないが、降伏値は添加量の増加に伴って小さくなる傾向を示した。

3.2 混和材の種類による影響

高強度混和材 (以下E材) と Si 材の置換率とペーストのレオロジー特性との関係を図-3に示す。E材の置換率による影響をみると、E材の置換率が大きくなるほど降伏値は小さくなるが、塑性粘度は変化しない傾向を示した。これは、E材の比表面積が早強ポルトランドセメント (以下セメント) より小さいことによる影響と推測される。

Si 材の置換率による影響をみると、Si 材の置換率が大きくなるほど塑性粘度、降伏値とも増加する傾向を示している。また、ペースト状態になるまでの練り混ぜ時間も置換率が增大するほど長くなる傾向を示した。このように、Si 材はセメントよりかなり比表面積が大きいいため、置換率によるペーストのレオロジー特性値に及ぼす影響が大きい傾向を示した。

3.3 水結合材比およびシリカフェームの影響

遠心成形が可能であったコンクリートを構成するペースト (W/B=17~38%) の塑性粘度と降伏値の関係を図-4に示す。

Si 材の使用やN剤、P剤の使用の影響はあるが、全体の傾向としては、W/Bが小さくなるほど塑性粘度、降伏値とも大きくなる傾向を示している。特に、図中左下のW/B=28%以上の塑性粘度、降伏値の増加率に比べ、W/B=23%以下の高強度領域では、W/Bの変化

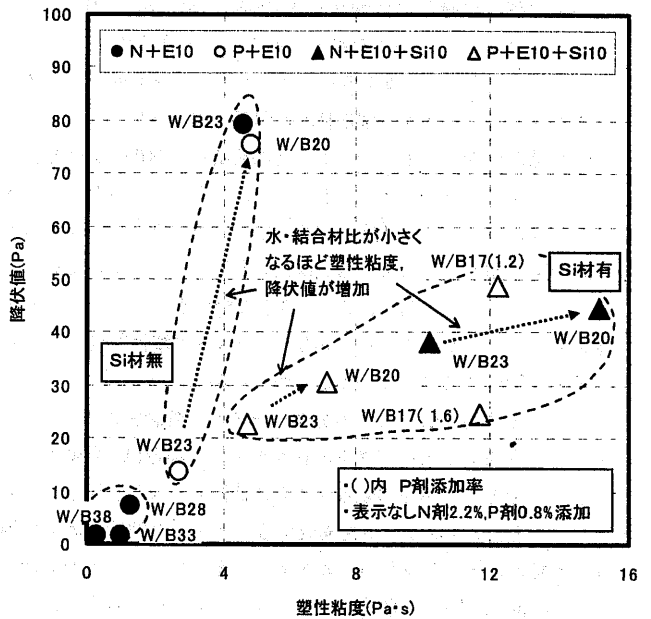


図-4 各種調合ペーストの塑性粘度と降伏値の関係

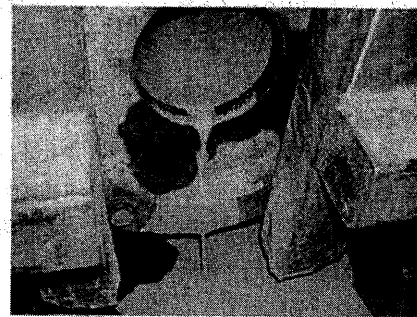


写真-2 スラッジの発生状況

に対する塑性粘度、降伏値の増加率が大きくなっている。

また、W/B=23%以下でSi材を使用した場合としない場合とでは、塑性粘度、降伏値の増加傾向が違い、Si材を使用しない場合の方が塑性粘度の増加に伴う降伏値の増加が大きい傾向となっている。

ペーストのレオロジー特性はスラッジの発生や成形性状に影響を及ぼす¹²⁾が、このように、ペーストのレオロジー特性が把握できれば、スラッジの発生や成形性状についても調整することが可能であると考える。

表-5 各種調合のレオロジー特性とスラッジ発生量

調合NO.	W/B %	E材置換率%	Si材置換率%	混和剤種類	塑性粘度 Pa·s	降伏値 Pa	スラッジ発生量 m ³ /m ³
1	23	10	0	N剤	4.611	79.043	0.028
2	23	10	10	N剤	10.224	38.206	0.0
3	23	10	0	P剤	2.6154	13.589	0.048
4	23	10	10	P剤	4.7446	22.559	0.003

*スラッジ発生量は各調合とも W=130 の場合を表す

4. 遠心成形コンクリートのスラッジ測定試験 (試験II)

4.1 ペーストの塑性粘度とスラッジ発生量の関係

遠心成形時に分離した余剰水や骨材微粒分を含んだ分離ペーストが写真-2のように型枠を傾斜することにより流出するものをスラッジとし、その発生量を測定した。スラッジ発生量とコンクリートを構成するペーストの塑性粘度の関係を図-5に示す。

単位水量が増加してもペーストの塑性粘度が 7.0(Pa·s)付近以上では、スラッジが発生しなくなることが認められた。また、表-5に示すように、ペーストの塑性粘度が大きくなるほどスラッジ発生量も減少する傾向となっている。既往の研究^{11), 12)}においてもコンクリートのレオロジー特性により、遠心成形状態やスラッジの発生も評価できることが報告されており、ペーストの塑性粘度もスラッジの発生に影響を及ぼしていることが明らかになった。

図-6に示す遠心成形による分離ペーストの概念図のように、コンクリートを構成するペーストの粘性が小さい場合は、余剰水も多く発生して分離ペーストの粘性がさらに低減し、スラッジとして発生する。一方、コンクリートを構成するペーストの粘性が大きい場合は、余剰水の発生も少ないため内面に分離したペーストの粘性も大きく、内面に付着した状態となり、スラッジとして発生しにくくなることが考えられる。

4.2 コンクリート中のペースト量とスラッジ発生量の関係

ペースト量とスラッジ発生量の関係を図-7に示す。

Si材を使用していない調合では、ペースト量が増加するほどスラッジの発生量も増加する傾向を示した。一方、Si材を使用している調合では、ペーストの粘性が高くなり、ペースト量が増加してもスラッジの発生が少ない、しかし、調合 W/B23+E+Si+P0.8 の場合は、スラッジが発生し始めると、Si材を使用していない同様なペースト量の調合同量程度のスラッジが発生した。

このような粘性の高いスラッジが発生した場合、スラッジ処理時間が長く、かつ遠心成形後の内面の凹凸が多くなり、製造上の問題点が発生する。スラッジの発生を抑制する対策として、筆者らは単位水量の低減が有効であることを報告^{11), 12)}している。今回の試験でも、ペースト量が 0.27(m³/m³)以下ではスラッジの発生もほとんど発生しなくなり、高強度コンクリートを遠心成形する場合は、成形可能な範囲で単位水量をより低減することが有効であると考えられる。

5. 遠心成形コンクリートのスラッジの調合分析試験 (試験III)

N剤を使用した W/B=23~38%とP剤を使用した W/B=20%のコンクリートについて遠心成形後発生したスラッジを採取し、調合分析

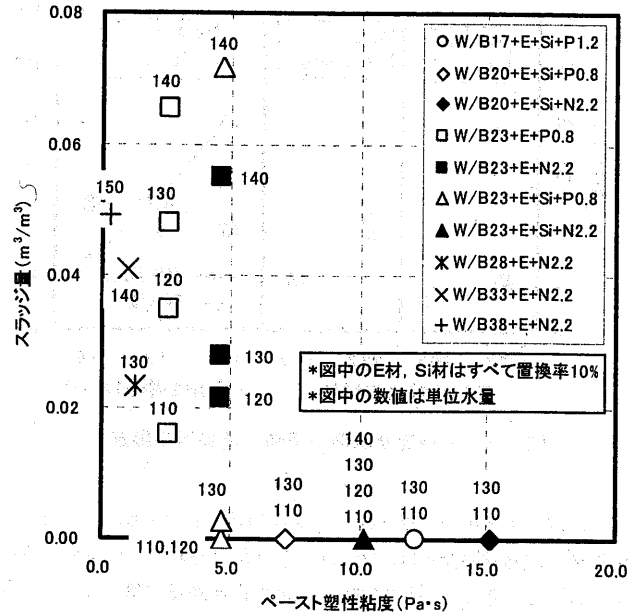


図-5 ペーストの塑性粘度とスラッジ発生量との関係

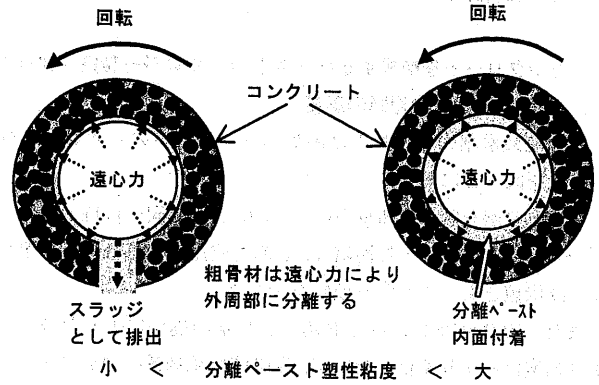


図-6 分離ペーストの塑性粘度とスラッジ発生有無の概念図

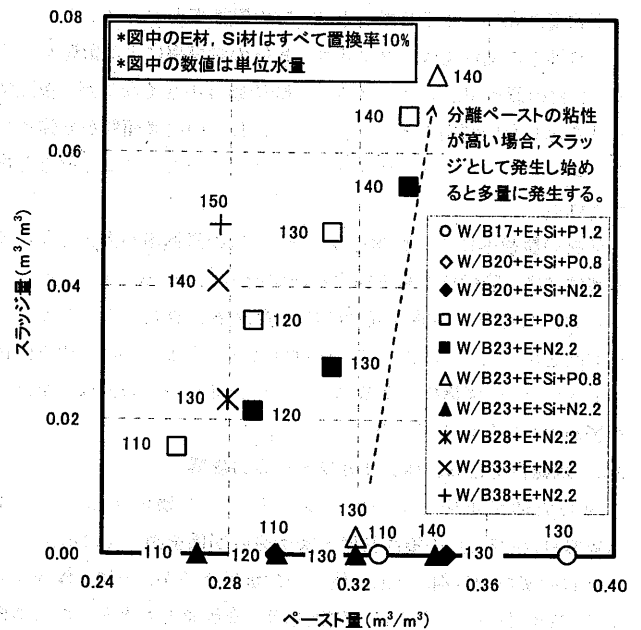


図-7 ペースト量とスラッジ発生量の関係

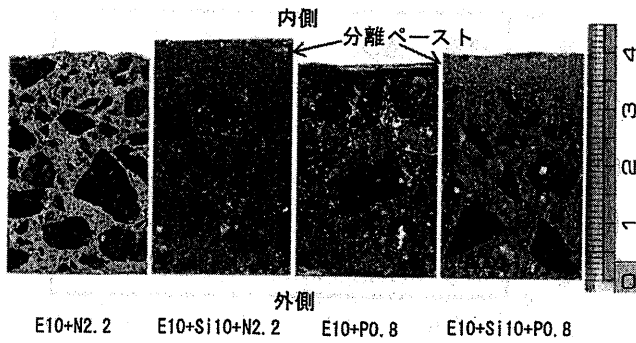


写真-3 各調合の遠心成形状態 (W/B=23%, W=130)

を行った。調合分析で得られたスラッジ W/B と調合 W/B およびコンクリートを構成するペーストの塑性粘度の関係を図-8に示す。

調合時の W/B が 28%以上では、遠心成形の脱水作用により、スラッジの W/B が大きくなる傾向を示した。一方、調合時の W/B が 23%以下になるとスラッジの W/B はほぼ調合時の W/B と同様な値となり、遠心成形による脱水作用が少なくなる傾向を示した。

一方、コンクリートを構成するペーストの塑性粘度は、W/B=23%以下になると塑性粘度が急激に増加している。このように、高強度化によりペーストの粘性が増加すると、遠心成形による脱水作用が少なくなることが判った。

6. 遠心成形時の粗骨材の沈降および分離状況確認試験 (試験IV)

6.1 粗骨材分離に及ぼすシリカフェームの影響

遠心成形時における骨材分離は、遠心力の大きさや作用時間、モルタルのレオロジー特性に影響を受け、図-9に示すように骨材が外側に分離し、内側にペースト、モルタル層を形成する。そこで、ペーストやモルタルのレオロジー特性が粗骨材分離にどのような影響を及ぼすのか、前述した簡易的なレオロジー試験により、各種遠心成形条件で粗骨材の分離性状を確認した。

図-10 に遠心成形時の各遠心条件における簡易的なレオロジー試験での粗骨材の沈降量を示す。

Si 材を使用したペーストは使用していないペーストよりの沈降量が少なくなる傾向を示すが、同じペーストに容積率 43%で砂を混入したモルタルにおいては、Si 材を使用した方の沈降量が多くなる傾向を示した。このことから、Si 材を使用したモルタルの塑性粘度は小さくなることが予想される。

W/B=23%のコンクリートで Si 材を使用した調合と使用していない調合の断面の比較を写真-3に示す。

同一 W/B であっても調合が違うと、ペーストの塑性粘度が低い調合はスラッジが発生し、スラッジの発生量が多いものほど厚みが減少する傾向を示している。

また、Si 材を使用した方の粗骨材の分離が大きくなる傾向となっている。この傾向はモルタルについての簡易レオロジー試験で得られた結果と一致する結果となった。

6.2 単位水量による骨材分離の影響

単位水量を 110~140 (kg/m³) に変化させて遠心成形した場合の切断面における粒径 5mm 以上の粗骨材の分布状況を図-11に、また同一 W/B において Si 材の使用の有無の場合における厚み方向

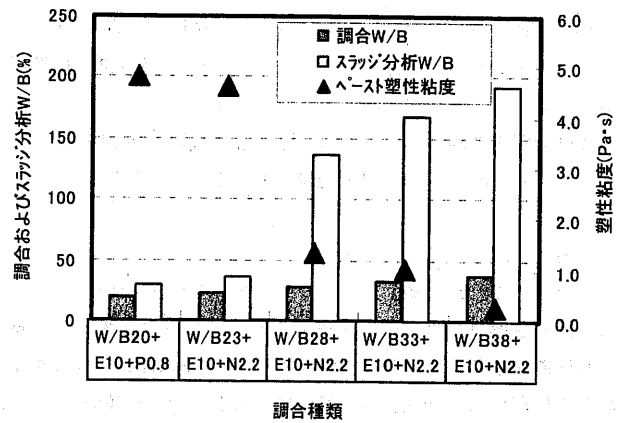


図-8 調合 W/B, スラッジ分析 W/B, ペースト塑性粘度の関係

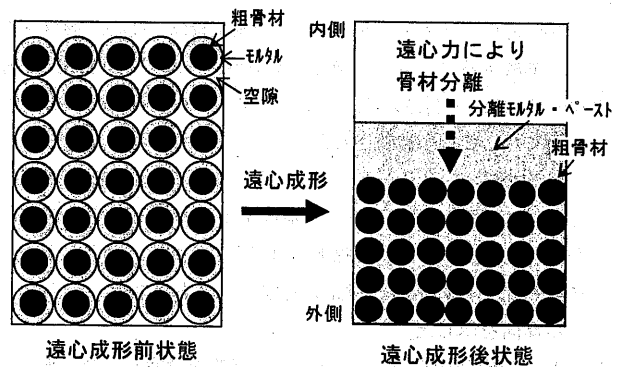


図-9 遠心成形による骨材分離概念図

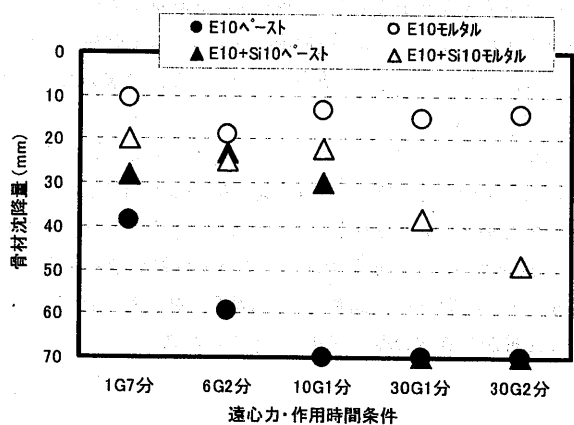


図-10 各遠心条件と骨材沈降量の関係 (W/B=23+P0.8)

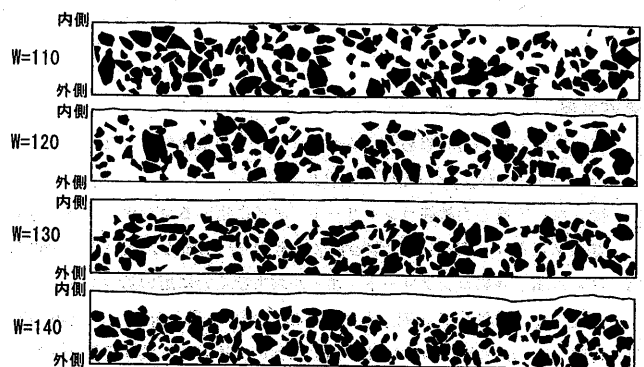


図-11 各単位水量の粗骨材分離状況 (W/B=23+E10+Si10+N2.2)

10mm 間隔で粗骨材面積を測定した面積率を図-12~13 に示す。

この試験結果から、単位水量が多いほど分離して内側の骨材が少なくなる傾向を示し Si 材を使用した調合の方が外周部の粗骨材面積率が大きく、粗骨材分離が大きくなる傾向を示した。

骨材分離を抑制する対策としては、単位水量を低減することにより、ペースト量が減少し、骨材分離が抑制されることを確認できた。

7. おわりに

本研究で得られた知見は、以下のようにまとめられる。

- 1) 遠心成形コンクリートを構成するペーストのレオロジー特性の高性能減水剤の影響としては、ナフタリン系に比べポリカルボン酸系を使用すると塑性粘度、降伏値とも小さくなる傾向を示した。また、シリカフュームを用いると塑性粘度が高く、降伏値が小さくなる傾向を示した。
- 2) 遠心成形コンクリートのスラッジ発生量は、遠心成形コンクリートを構成するペーストの塑性粘度が小さいほど多く発生し、塑性粘度が 7.0(Pa・s)付近以上となると、スラッジの発生がほとんど発生しなくなることが確認された。
- 3) 遠心成形コンクリートで発生したスラッジは、W/B=23%以下になると遠心成形コンクリートを構成するペーストの塑性粘度が高くなって、遠心成形による脱水作用が小さくなり、ほとんど調合の水結合材比に近い水結合材比の分離ペーストがスラッジとして発生する傾向を示した。
- 4) 遠心成形時の簡易的なレオロジー試験を考案し、同一水結合材比でのシリカフュームを使用した調合のモルタルの塑性粘度が使用しないモルタルより小さくなり、粗骨材の沈降量が大きくなることを確認できた。そして、遠心成形後のコンクリート試験体切断面においても、シリカフュームを使用した場合の骨材分離が大きくなる傾向を示した。
- 5) 遠心成形するコンクリートのペースト量が少なくなるほどスラッジの発生が少なくなり、ペースト量が 0.27(m³/m³)以下ではスラッジの発生もかなり抑制されることが判った。また、スラッジが発生しない場合はペースト量が少なくなるほど骨材分離が小さくなる傾向を示し、成形可能な範囲で単位水量を低減することが、スラッジの発生抑制や骨材分離に有効であることが判った。

謝辞

本研究の実施に際し、石川一真氏（ジャパンパイル）および㈱ジオトップ関係者の方々の御協力をいただいた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉木六郎：遠心力締固めによるコンクリートの試験報告，セメントコンクリート No.58, pp.16-20, 1951.12
- 2) 綾 亀一：遠心力鉄筋コンクリート クイに用いるコンクリートの遠心締固めに関する研究，土木学会論文集第 71 号・別冊 4-2, pp.1-15, 1960.11
- 3) 杉木六郎：鉄筋コンクリート・ボールおよびクイに用いるコンクリートの施工方法に関する研究，土木学会論文集第 88 号, pp.29-49, 1962.12
- 4) 岡田 清，小林和夫，岡村為信：遠心力締固め効果に関する要因実験，セメントコンクリート No.261, pp.281-287, 1968.11

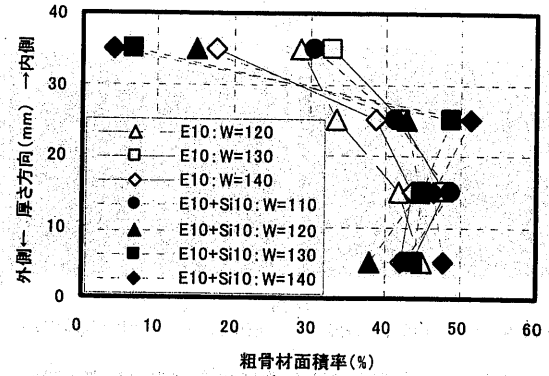


図-12 遠心成形厚さ方向と粗骨材面積率の関係 (W/B=23+N2. 2)

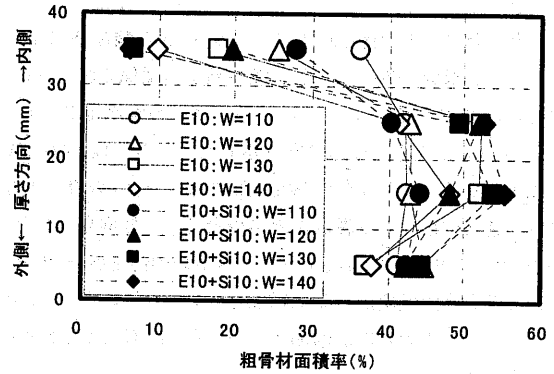


図-13 遠心成形厚さ方向と粗骨材面積率の関係 (W/B=23+P0. 8)

- 5) H.Stamenkovic (福澤公夫訳)：遠心力締固めコンクリートの分離，コンクリートジャーナル Vol.8, No.9, pp.11-16, 1970.9
- 6) 西林新蔵，吉岡保彦，千代憲司，西川勝彦：遠心締め固め効果に関する研究，セメント技術年報，Vol.21, pp.415-419, 1971
- 7) 小澤貴史，西田 朗，黒瀬行信：高強度遠心成形 PCa 型枠の品質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.23, No.2, pp.1081-1086, 2001
- 8) 河野政典，岡 靖弘：遠心成形外殻プレキャストコンクリートの耐凍害性に関する実験的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.1143-1144, 2005.9
- 9) 尾崎公則：遠心成形した超高強度コンクリートの物性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.367-368, 2005.9
- 10) 菅原高志，榊田佳寛，中村成春，齊藤直：遠心成形した高強度コンクリートの耐硫酸性に関する実験，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.23, No.2, pp.463-468, 2001.6
- 11) 菅 一雅，榊田佳寛，小椋仁志：高強度コンクリートの遠心成形に及ぼす単位水量低減の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.481-482, 2004.8.
- 12) 菅 一雅，榊田佳寛，小椋仁志：遠心成形する高強度コンクリートの成形性及各種物性に及ぼす調合の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.543-544, 2005.9.
- 13) 福澤公夫，沼尾達弥，川名信政，清田章二：遠心締固めコンクリートの特性に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.331-336, 1998.6
- 14) 下山善秀，高田英二：遠心成形のレオロジーに関する研究，セメント技術年報，Vol.40, pp.202-205, 1986
- 15) 下山善秀，富田六郎，茂庭孝司：遠心成形における分離性状に関する研究，セメント技術年報，Vol.42, pp.188-191, 1988.

(2005年12月8日原稿受理，2006年4月7日採用決定)