

遠心成形高強度コンクリートの力学特性に及ぼす 微細空隙の影響に関する研究

STUDY ON THE INFLUENCE OF MICROPORES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE BY CENTRIFUGAL COMPACTION

菅 一雅*, 梶田佳寛**

Kazumasa SUGA and Yoshihiro MASUDA

In this research, the changes of micropores and the mechanical properties of concrete with mix proportions at water cementitious material ratios between 17% to 33% after centrifugal compaction were compared with those during vibrating compaction to investigate the influence of centrifugal compaction on concrete in such a high strength region.

The measurement of micropores was performed by two kinds of methods: air void measurement by linear traverse method and the pore size distribution method. In a mix proportion with water cementitious material ratio between 17% and 23%, the compressive strength and Young's modulus tended to increase in case of centrifugal compaction compared to vibrating compaction. The difference in the condition of micropores of these test specimens in centrifugal compaction and vibrating compaction did not exist in pore size distributions of 0.003 to 30 microns, but the air voids in case of centrifugal compaction tended to be lesser. It was concluded, therefore, that in high strength concrete with water cementitious material ratio between 17% and 23%, air voids between 30 and 1000 microns decreased due to the influence of centrifugal compaction and the strength increased.

Keywords: high strength concrete, centrifugal compaction, compressive strength, Young's modulus, pore size distribution, air-void
高強度コンクリート, 遠心成形, 圧縮強度, ヤング係数, 細孔径分布, 気泡

1. はじめに

近年の既製コンクリート杭工法における高支持力工法のめざましい技術開発の影響を受け、既製コンクリート杭は必然的により強度の高いコンクリートが使用されるようになってきている。現在ではコンクリートの設計強度が $85\text{N/mm}^2 \sim 105\text{N/mm}^2$ の高強度既製コンクリート杭が使用されており、年間約 300 万 t 製造されている。さらに、最近では 120N/mm^2 級の既製コンクリート杭¹⁾も開発され、より高強度化されつつある。

現在の遠心成形既製コンクリート杭を製造する方法としては主にポンプ打設とバケット打設の2種類が採用されている。前者はスランプ 5~18cm 程度の流動性のよい軟練りコンクリートが使用され、後者はスランプ 0~1cm 程度の超硬練りコンクリートが使用されている。しかし、超高強度領域の調合では高流動化することによりポンプ打設が可能となるが、このようなペーストの多い調合では遠心成形によるペーストと粗骨材の材料分離が顕著となり、さらに製造コスト増加にも影響を及ぼす。既往の研究^{2),3)}では、遠心成形で内面に分離したペーストを削り取ると圧縮強度が 5~10% 増加することや骨材分離しすぎると圧縮強度が低下することが報告されている。そのため、超高強度領域の遠心成形コンクリートを製造する上では、ペーストの少ない硬練りコンクリートを採用することが品質上あるいは製造コストの面でも有効な製造方法となる。このこ

とから、筆者らは単位水量をより低減した調合での遠心成形性や材料分離抑制効果に関する研究について既に報告^{4),5)}してきた。

しかし、現場施工で使用される $W/B=30\%$ 以下の高強度コンクリートに関する研究は多く報告されているが、遠心成形高強度コンクリートについての研究報告は少ない。その少ない研究報告もポンプ打設するようなスランプ 5~18cm の軟練りコンクリートを使用した研究であり、本論文が対象としている単位水量の少ない超硬練り高強度コンクリートの遠心成形に関する研究はされていない。

本報告は、遠心成形時の材料分離を抑制した超硬練り高強度コンクリートの遠心成形効果を確認することを目的として、振動成形と比較して力学特性や細孔容積、気泡の変化を把握し、力学特性と微細空隙量との関係について分析したものである。

2. 実験概要

2.1 試験項目

試験項目を表 1 に示す。

試験 I では各成形前の各種コンクリートのフレッシュ時におけるスランプ、空気量、単位容積質量の測定と遠心成形時に発生したスラッジ量の測定を行った。

試験 II では各種コンクリートの常圧蒸気養生後の材齢 7 日における遠心成形試験体と振動成形試験体の圧縮強度、ヤング係数、単

* 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.

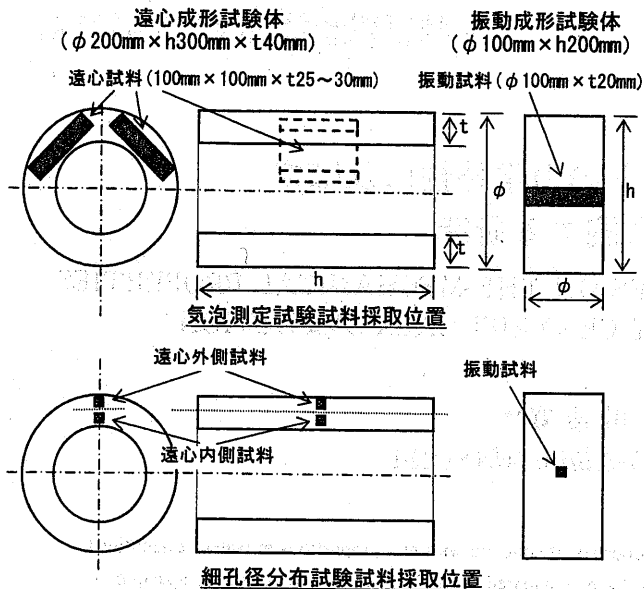


図1 試料採取位置

位容積質量の測定を表1に示す試験方法で行い、水結合材比や成形条件による各種力学特性に及ぼす影響について比較検討した。

試験Ⅲでは内部空隙の変化を把握するため、ASTMのリニアトラバース法による30~1000μmの範囲の気泡と水銀圧入式ポロシメータによる0.003~30μmの範囲の細孔容積を測定した。

気泡測定は、材齢7日においてトラバース長(測定距離全長)が2100mm以上になるように気泡径を測定し、ASTMに準拠して気泡径の合計長と測定トラバース長の関係から、単位モルタル量あたりの空気量を算出した。また、細孔容積は、材齢7日において水銀圧入式ポロシメータにより測定した。

各試験に供する試料は図1に示す位置で採取した。

気泡測定の試料は、遠心成形試験体については図1に示すように100mm×100mm×t25~30mmの試験片を2枚切断し、その両面を測定することにより、外側と内側の気泡状態を比較検討した。また、振動成形試験体については、高さ方向中央部を厚さ20mmに輪切りしてその両面を測定した。

細孔容積測定の試料は、遠心成形試験体の厚さ方向を2分してその中心部から、また振動成形試験体については中心部を切断して採取した。そして、試験片をアセトン浸漬後風乾し、粗骨材を取り除いた約5mm角に砕き、凍結乾燥後測定を行った。

2.2 使用材料および調合・練り混ぜ・成形・養生条件

実験に用いた高強度コンクリートの使用材料および調合条件を表2、表3に示す。

単位水量は、それぞれの調合における遠心成形可能な範囲で少ない単位水量に設定した。

シリカフェーム(以下Si材)は、水結合材比(以下W/B)=17%、23%に使用し、W/B=23%ではSi材の影響を比較するため、Si材を使用しない調合も検討した。また、既往の研究報告のようなスラッジを排出する従来調合としてW/B=33%も検討した。

高性能減水剤は2種類使用し、それぞれの高性能減水剤の性能に合わせて、W/B=23%以下にはポリカルボン酸系高性能減水剤(以

表1 試験項目

試験Ⅰ	フレッシュコンクリート試験	スランブ: JIS A 1101に準拠 空気量: JIS A 1128に準拠し、3層振動台による締め 単位容積質量: JIS A 1128に準拠 スラッジ量: 型枠を90°回転させ、自然落下により採取
試験Ⅱ	硬化物性試験	圧縮強度: 遠心 JIS A 1136, 振動 JIS A 1108に準拠 ヤング係数: JIS A 1149に準拠 単位容積質量: 材齢7日質量を形状寸法容積で除した値
試験Ⅲ	空隙構造分析試験	細孔容積(細孔直径0.003~30μm): 水銀圧入式ポロシメータによる 気泡(気泡直径30~1000μm): ASTMのリニアトラバース法による

表2 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 エトシグ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3 調合条件

調合No.	調合1 W/B17+Si	調合2 W/B23+Si	調合3 W/B23	調合4 W/B33
水結合材比 W/B (%)	17	23		33
細骨材率 s/a (%)		44		
単位水量 W(kg/m ³)		110		140
E材置換率 (B×%)		10		
Si材置換率 (B×%)	10			0
混和剤添加率 (B×%)	P剤1.2	P剤0.8		N剤2.2

表4 練り混ぜ, 成形条件, 養生条件

練り混ぜ	空練り30s → 本練り	調合1 240s	調合2~4 180s
成形条件	遠心成形	初速 1G 420s → 中速(1) 6G 120s → 中速(2) 10G 60s → 高速 30G 120s	
	振動成形	4G 振動台: 2層打ち	調合1 各層120s 調合2~4 各層60s
養生条件	前置き 30°C 3h → 上昇 10°C/h 4h → 高温 70°C 7h → 材齢7日まで 20°C 60RH		

下P剤)を使用し、W/B=33%にはナフタリン系高性能減水剤(以下N剤)を使用した。添加率としては、遠心成形可能な範囲の添加率とし、W/B=23%のP剤の添加率を0.8%とし、W/B=17%の添加率を1.2%とした。また、W/B=33%のN剤の添加率2.2%とした。

練り混ぜ条件, 成形条件, 養生条件を表4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、骨材表面に光沢のあるペーストが付着するまでの時間とした。その結果、W/B=17%については練り混ぜ時間が長くなった。

遠心成形条件は、既往の研究報告⁹⁾を参考に高強度コンクリートにおける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。中速については、最適な遠心成形とするため段階的に遠心力を上げ、6G、10Gを設定した。また、高速については、遠心成形による製造に一般的に用いられている遠心力30Gとし、遠心時間を120秒と設定した。

振動成形条件は、振動台を使用して2層に分けてコンクリートを投入し、それぞれコンクリート上面にペーストが浮かんでくるまで振動を行った。

養生条件は、最高温度で70℃の常圧蒸気養生とし、養生後脱型し、材齢7日まで20℃60RHの室内に保存した。

3. フレッシュコンクリート試験 (試験 I)

フレッシュ時に行った試験結果を表5に示す。

いずれの調合もスランプは0~0.5cmであった。

空気量は、振動成形試験体と同じ振動条件で3層に充填したコンクリートで測定した。その空気量は、W/B=17~23%の場合は2.3~2.6%を示し、W/B=33%の場合は1.0%と振動成形で脱泡されて他の調合に比べ少なくなった。

単位容積質量は空気量測定後の測定容器で測定し、2.46~2.47t/m³でほぼ同じ値になった。

遠心成形時に発生するスラッジは、Si材を混入している調合1および調合2では発生せず、調合3でコンクリート重量比0.9%発生し、調合4は重量比2.4%で最も多くスラッジを発生した。既往の論文⁷⁾では、遠心成形するポール、パイル、ヒューム管で発生するスラッジはコンクリート重量の3~5%と紹介されており、今回選定した調合の発生スラッジ量はそれに比べ少ない傾向を示した。

4. 硬化物性試験 (試験 II)

4.1 単位容積質量試験結果

各調合および各成形条件の材齢7日における単位容積質量試験結果を表6に示す。

単位容積質量は、振動成形に比べ遠心成形した場合が大きくなる傾向を示し、W/B=17%~23%で差が大きく、W/B=33%では差が小さくなった。このように、W/B=17%~23%の調合の場合は振動成形では遠心成形状態までには至らず、空隙が多くなり単位容積質量が小さくなる傾向を示した。

空気量を考慮しない調合表から算出した単位容積質量を基準に求めた各成形条件の充填率は、遠心成形試験体はいずれの調合も99.6~100%とほぼ調合表からの単位容積質量と同じ値を示し、遠心成形により密実になっていることが判った。一方、振動成形の充填率は、W/B=17%~23%が97.6~98.0%、W/B=33%は99.6%となり、W/B=17%~23%の調合は遠心成形に比べ1.6~2.4%の空隙が多くなる結果を示した。

4.2 圧縮強度試験結果

各調合および各成形条件の材齢7日における圧縮強度試験結果を図2に示す。

表5 フレッシュ試験結果

調合種類		調合1 W/B17+Si	調合2 W/B23+Si	調合3 W/B23	調合4 W/B33
スランプ (cm)		0.0	0.0	0.0	0.5
振動成形	空気量 (%)	2.3	2.5	2.6	1.0
	単位容積質量 (t/m ³)	2.47	2.46	2.47	2.46
スラッジ発生量	容積比 (m ³ /m ³)	0.0	0.0	0.016	0.041
	重量比 (%)	0.0	0.0	0.9	2.4

表6 硬化後の単位容積質量試験結果

調合種類		調合1 W/B17+Si	調合2 W/B23+Si	調合3 W/B23	調合4 W/B33
単位	調合 γ_d	2.53	2.51	2.52	2.47
容積質量 (t/m ³)	遠心成形 γ_c	2.52	2.51	2.51	2.47
	振動成形 γ_b	2.48	2.45	2.46	2.46
充填率 (%)	$(\gamma_c/\gamma_d) \times 100$	99.6	100	99.6	100
	$(\gamma_b/\gamma_d) \times 100$	98.0	97.6	97.6	99.6

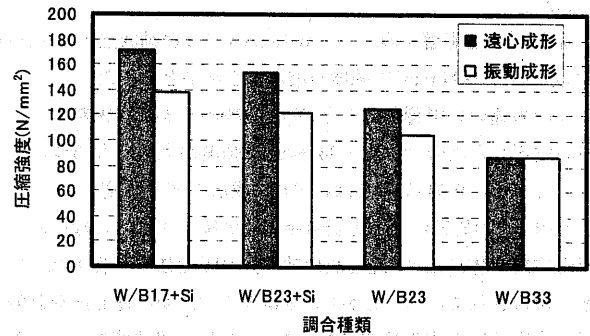


図2 圧縮強度試験結果 (材齢7日)

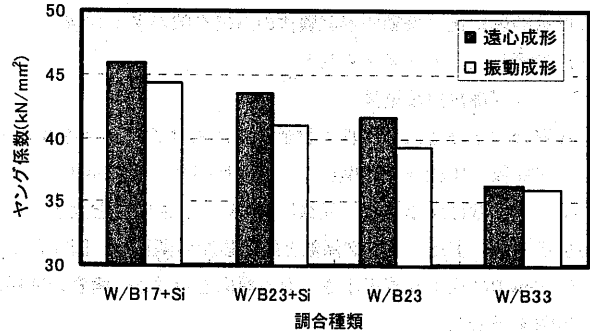


図3 ヤング係数試験結果 (材齢7日)

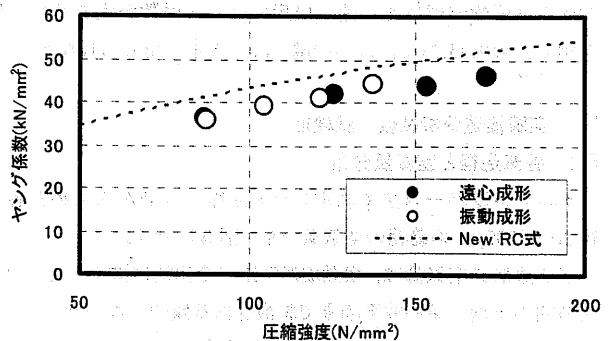


図4 ヤング係数と圧縮強度の関係

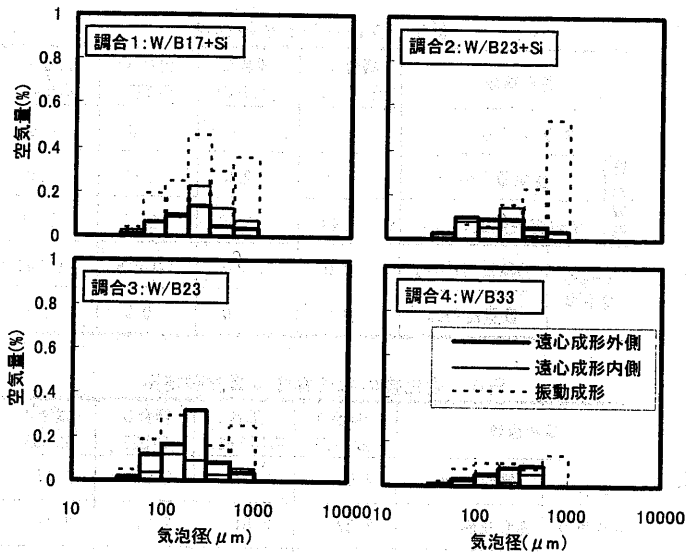


図5 各気泡径の空気量 (30~1000 μm)

圧縮強度は W/B が小さくなるほど大きくなる傾向を示し、W/B=17%の調合における遠心成形試験体は 172 N/mm²の圧縮強度が得られた。

Si 材による影響をみると、W/B=23%では振動成形で 17N/mm²、遠心成形で 28 N/mm²の強度が増加する結果となった。

成形の違いの影響をみると、W/B=17%~23%では振動成形に比べ遠心成形した場合は、21~34 N/mm²強度が大きくなる傾向を示した。しかし、W/B=33%ではいずれの成形も同じ強度となった。

土田ら⁹⁾の研究によると調合条件は明確にされていないが振動成形円柱試験体に比べ、遠心成形試験体の圧縮強度が若干低くなる事が報告されている。しかし、本研究では、逆に遠心成形試験体の圧縮強度が増加する傾向になった。これは、超硬練りであることや高粘性調合であるため、振動成形では厳しい成形条件となり、遠心成形試験体に比べ振動成形試験体の内部空隙が多く残留し、圧縮強度に影響したものと考えられる。

4.3 ヤング係数試験結果

各調合および各成形条件の材齢 7 日におけるヤング係数の結果、ヤング係数と圧縮強度の関係をそれぞれ図 3~4 に示す。

ヤング係数は圧縮強度と同様に W/B が小さいほど大きくなる傾向を示した。また、ヤング係数と圧縮強度の関係は、図 4 に示すように New RC 式より若干小さくなる傾向を示すが、両者の関係はよい相関を示した。

成形の違いによる影響をみると、圧縮強度と同様に W/B=17%~23%では振動成形に比べ遠心成形のヤング係数が大きくなる傾向を示し、W/B=33%では成形の違いによる差は認められなかった。

5. 空隙構造分析試験 (試験Ⅲ)

5.1 各気泡径と空気量分布

リニアトラバース法で測定した気泡径の合計から求めた各気泡径 30~1000μm の範囲の空気量分布を図 5 に示す。

遠心成形の空気量は、振動成形に比べ全体的に減少しており、測定範囲の気泡が遠心成形効果で脱泡される傾向となった。

W/B の違いをみると、W/B=33%の場合は振動成形においてす

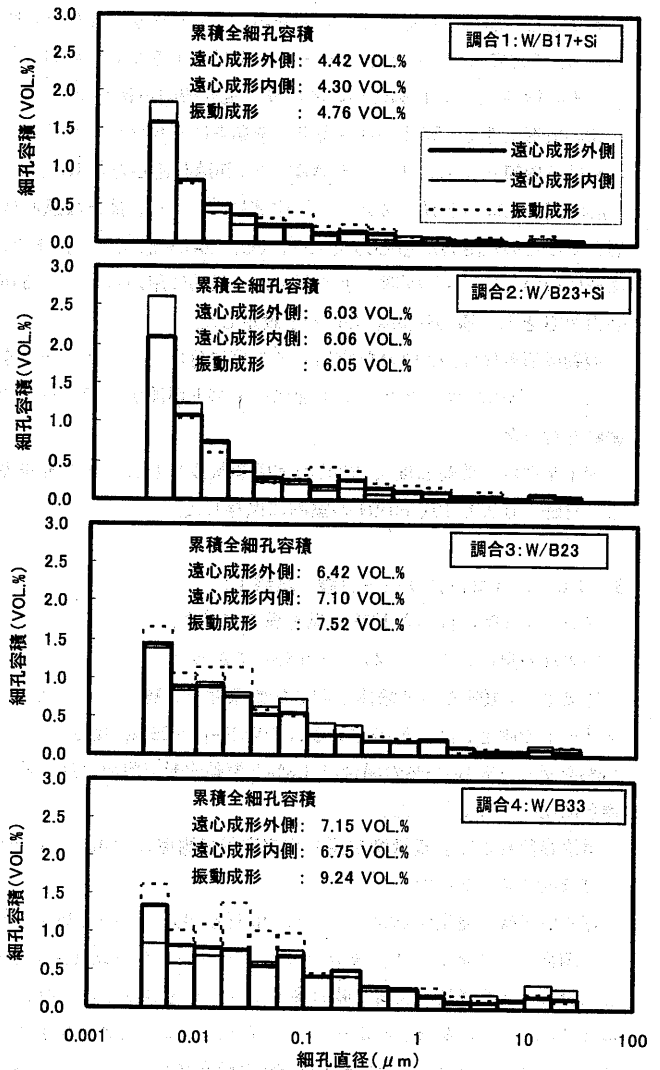


図6 細孔容積分布 (0.003~30 μm)

に脱泡され遠心成形、振動成形とも空気量が少なくなり、フレッシュ時の空気量と同様な結果となった。一方、W/B=23%以下では遠心成形効果で空気量が大きく減少する傾向を示した。

小澤らの研究⁹⁾では、遠心成形と振動成形した圧縮強度 100N/mm²程度の外殻 PCa 部材のコア試験体を比較し、細孔直径 100~360μm の細孔容積の減少が多いことを報告しており、本試験で測定した気泡径 30~1000μm の気泡の減少と同様な傾向を示す結果となった。

各調合における各成形の空気量の変化は硬化後の単位容積質量と同様な結果を示しており、気泡の減少が単位容積質量に影響していることを示す結果となった。このように、W/B=23%以下のように粘性が高く、硬練りの調合においても、遠心成形の成形能力が大きいため、振動成形では脱泡できない気泡も減少させ、緻密化できることが判った。

5.2 各細孔直径の細孔容積の関係

細孔直径 0.003~30μm の細孔容積分布を図 6 に示す。

成形条件の違いをみると W/B=17~23%については遠心成形、振動成形の差は認められないが、W/B=33%については振動成形した場合に比べ、遠心成形の場合の細孔容積が減少する傾向を示した。

既往の研究^{9)~11)}でも 100N/mm²を越えるような高強度領域では

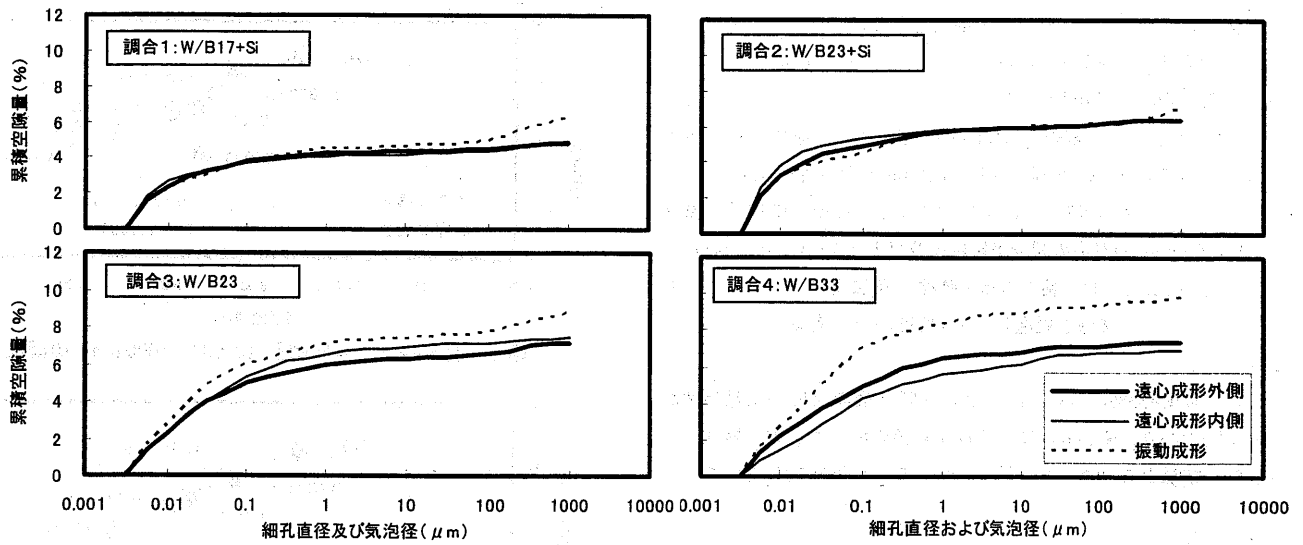


図7 累積空隙量 (0.003~1000 μm)

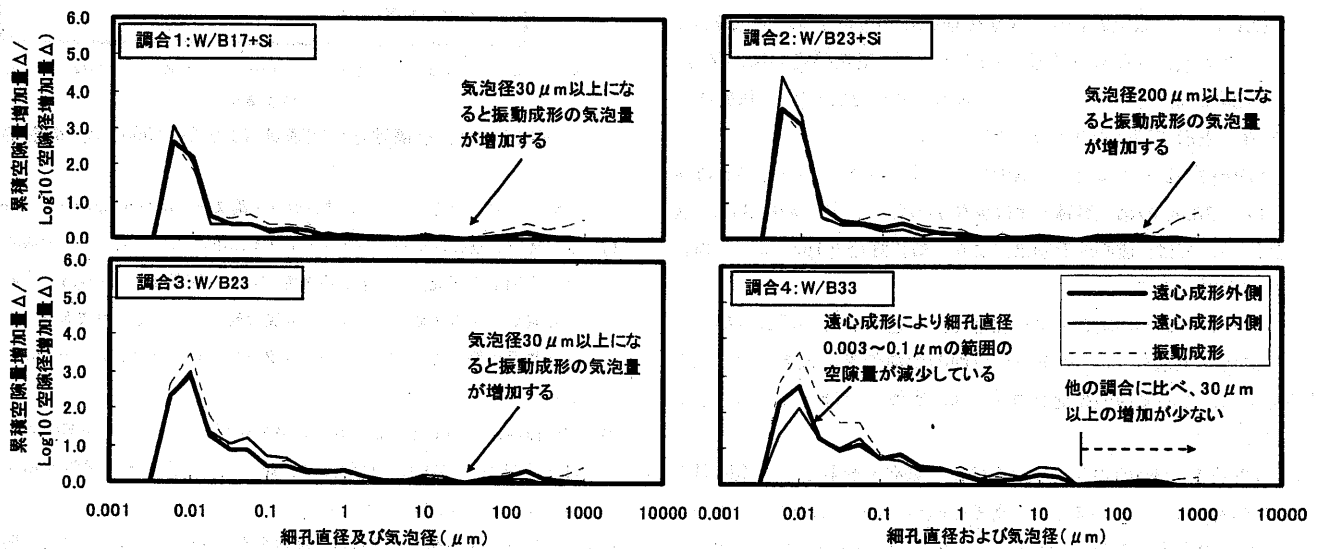


図8 累積空隙量の増加変化量 (累積空隙量増加量 Δ / Log_{10} (空隙径の増加量 Δ))

遠心成形による細孔容積の変化は少なく、 100N/mm^2 以下の割合では遠心成形により細孔容積は減少することが報告されている。本研究も同様な結果となっており、 100N/mm^2 以上の超高強度領域では遠心成形の影響による細孔容積の変化は少なくなることが判った。

また、遠心成形の内側と外側による細孔容積の差については、既往の研究³⁾でも顕著な差は発生しないことが報告されており、今回の試験結果も同様に差が小さい結果となった。

割合構成による影響をみると、振動成形したものは Si 材を使用したり W/B を小さくするほど全細孔容積が減少する傾向を示し、既往の研究¹²⁾と同様な試験結果となった。しかし、Si 材を使用していない W/B=23%と 33%の遠心成形した場合の細孔容積の差は小さくなった。これは、W/B=33%の場合はスラッジの発生も多く、遠心成形による余剰水排出などにより $0.003\sim 0.1\mu\text{m}$ の微細空隙が減少して密実となり、このような結果になったものと推測される。

5.3 各空隙径と累加空隙量の関係

気泡から求めた空気量と細孔から求めた細孔容積を空隙量として細孔直径 $0.003\mu\text{m}$ から累積したものを図7、累加空隙量の増加変

化量を図8に示す。

いずれの割合においても細孔直径が $1\mu\text{m}$ 以上になると空隙量の増加が少なくなった。また、W/B=17, 23%の場合、振動成形したものは気泡測定範囲の気泡径 $30\mu\text{m}$ 以上になると、気泡の増加の影響で若干空隙量が増加する傾向を示した。一方、W/B=33%の場合、遠心成形したものは細孔直径 $0.003\mu\text{m}$ から空隙量が少なくなる傾向を示し、振動成形したものは気泡径 $30\mu\text{m}$ 以上の累積空隙量の増加が他の割合に比べ小さくなる傾向を示した。

5.4 全空隙量と強度物性の関係

既往の研究^{13),14)}では、ペースト、モルタルの圧縮強度と全細孔容積は高い相関があることを報告している。しかし、今回の試験結果では W/B=23%以下の細孔容積は振動成形も遠心成形も同様な値となり、圧縮強度と細孔容積では高い相関を示していない。そこで、図9, 10 に示すように、気泡による空気量も加算した全空隙量で圧縮強度、ヤング係数との関係を検討した。

遠心成形した W/B=17~23%のデータについては、全空隙量と圧縮強度、ヤング係数は高い相関を示し、全空隙量と圧縮強度、ヤン

グ係数と関係は1式、2式に示す結果となった。

$$F = 250.53 - 16.171 \times Vm \quad \dots \dots \dots 1式$$

$$E = 53.746 - 1.5708 \times Vm \quad \dots \dots \dots 2式$$

F: コンクリート圧縮強度 (N/mm²), E: ヤング係数 (kN/mm²)

Vm: モルタル中の空隙径 0.003~1000μm の全空隙量 (%)

このように、W/B=23%以下の遠心成形による強度増加は、気泡径 30~1000μm の気泡の減少が影響を及ぼしていることが判った。そして、遠心成形では、粘性の高い硬練り高強度コンクリートでもコンクリート中の気泡を脱泡し、力学特性向上に有効であることが確認できた。

一方、W/B=33%については、遠心成形と振動成形の圧縮強度が同様な値であり、遠心成形による細孔容積の減少が、力学特性に寄与しない結果となった。この関係については今後検討していきたい。

6. 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) W/B=17~23%の調査では、振動成形に比べ遠心成形の圧縮強度、ヤング係数、単位容積質量とも増加した。圧縮強度の増加量は、21~34N/mm²であった。しかし、W/B=33%の調査では、振動成形と遠心成形で同様な値となった。
- 2) W/B=17~23%の調査での振動成形と遠心成形における細孔直径 0.003~30μm の細孔容積の差は少なかった。一方、W/B=33%の調査については、遠心成形効果により、細孔直径 0.1μm 以下の細孔容積が減少した。
- 3) W/B=17~23%の調査の気泡測定では、遠心成形の場合は振動成形に比べ気泡径 30~1000μm の気泡の脱泡効果が大きくなる傾向を示し、この気泡の脱泡が力学特性に影響を及ぼしていることが判った。
- 4) W/B=17~23%の調査における細孔と気泡を合計した全空隙量と力学特性はよい相関を示し、高強度領域での遠心成形による力学特性への影響を評価するためには、気泡径 1000μm までの微細空隙の変化を考慮する必要があることが判った。

謝辞

本研究の実施に際し、石川一真氏 (ジャパンパイル) およびジャパンパイル製造(株)、(株)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) 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
- 2) 杉木六郎: 鉄筋コンクリートポールおよびくい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, No.88, pp.29-49, 1962.12
- 3) 松嶋信行, 大西利勝, 米田俊一: 遠心力成形を行う超高強度コンクリートくいの製造条件に関する研究, 宇部三菱セメント研究報告, No.6, pp.66-72, 2005
- 4) 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や各種物性に及ぼす調査構成の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.543-544, 2005.9
- 5) 菅一雅, 榊田佳寛: 高強度コンクリートの遠心成形性に及ぼす調査の

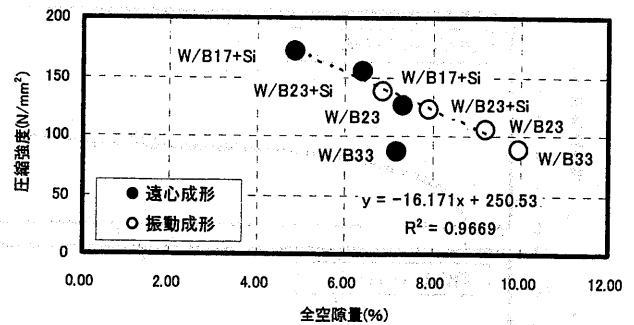


図9 圧縮強度と全空隙量 (0.003~1000μm) の関係

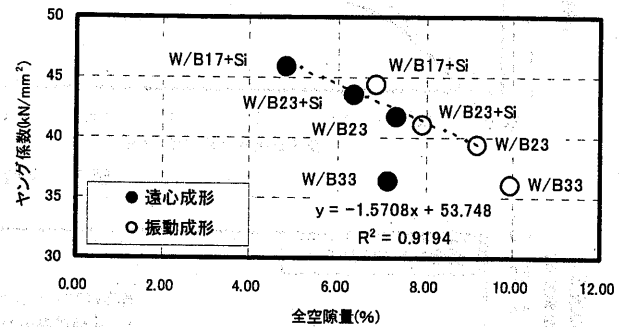


図10 ヤング係数と全空隙量 (0.003~1000μm) の関係

影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.29-34, 2006.8

- 6) 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, No.71・別冊4-2, pp.1-15, 1960.11
- 7) 大森淑孝, 新沼文敏: スラッジレス混和剤を用いた遠心力成形コンクリート製品の製造方法, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.630-635, 1991
- 8) 土田伸治, 丸山武彦, 松原範幸: 高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体の形状および製法の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.18, No.1, pp.513-518, 1996
- 9) 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集, Vol.23, No.2, pp.1081-1086, 2001
- 10) 丸山武彦, 土田伸治, 河野清: シリカフェームコンクリートの諸性質に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.105-110, 1990
- 11) 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
- 12) 添田政司, 江本幸雄, 辰本朋子, 大和竹史: コンクリートの諸性質に及ぼすシリカフェームの影響, コンクリート工学年次論文集報告書, Vol.7, No.1, pp.205-208, 1985.6
- 13) 陣内 浩, 榊田佳寛, 早川光敬: 初期に高温履歴を受ける低熱ポルトランドセメント・高強度用結合材を用いた高強度結合材ペーストの強度発現性状と微細構造, 日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.7-13, 2003.6
- 14) 河上浩司, 西本好克, 榊田佳寛: 低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを併用した結合材モルタルの圧縮強度と内部組織に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.599, pp.1-7, 2006.1

(2006年4月10日原稿受理, 2006年9月12日採用決定)