

論文 遠心成形した高強度コンクリート製品の基本性状に関する研究

船本 憲治^{*1}・藤 祐介^{*2}・古賀 智博^{*2}・井上 嘉雄^{*3}

要旨: 近年, 遠心成形される高強度プレストレストコンクリート杭は更なる高強度化が進み, 設計基準強度が 100N/mm^2 を超えるコンクリートが使用されつつある。そこで, 本論文は, 遠心成形後, 常圧蒸気養生を行い, その後, オートクレーブ養生した高強度コンクリート製品に関して, その遠心成形性及び強度発現特性を検討した。その結果, 本研究の範囲内では, 設計基準強度 105N/mm^2 程度までの調合であれば, 綺麗な同心円形成が可能であり, また, オートクレーブ養生後の圧縮強度は, 遠心成形時のスラッジ発生状況と関連付けることにより, 強度発現特性を把握できることが明らかになった。

キーワード: 遠心成形, 高強度, コンクリート製品, スラッジ, 水セメント比, 圧縮強度

1. はじめに

近年, 遠心成形される高強度プレストレストコンクリート杭は更なる高強度化が進み, 設計基準強度が 100N/mm^2 を超えるコンクリートが使用されつつある¹⁾。

しかし, 遠心成形時におけるスラッジ発生状況が高強度コンクリートの物性に及ぼす影響に関する報告は非常に少ないのが現状である²⁾。

そこで, 本論文は, 遠心成形後, 常圧蒸気養生を行い, その後, オートクレーブ (以下 AC と略記) 養生した高強度コンクリート製品に関して, その遠心成形性及び強度発現特性を検討したものである。

2. コンクリート製品製造時の遠心成形の影響

ポール及びパイル等のコンクリート製品は, 遠心力で締固めるため, 密度の大きいコンクリート材料がポールやパイルの外側に分布することになり, 密度の小さい水が搾り出され, 図-1に示すように, 外側から内側に向かってコンクリート層, モルタル層, ペースト層が形成される³⁾。

文献4)では, コンクリートポール製造における遠心力締固めにより, 密度の小さい水が搾り出さ

れ, 製品の 水セメント比 は 45% から 34.5% へと 10% 程度小さくなるようになっており, 遠心成形によるコンクリートからの水の搾り出しがコンクリートの性状に大きく影響を及ぼしている。

3. 実験概要

遠心成形により密度の小さい水が搾り出される状況下におけるコンクリートの強度発現性状を把握するためには, 遠心成形前の 水セメント比 だけでは把握が難しく, 遠心成形時の発生スラッジの性状を検討する必要がある。

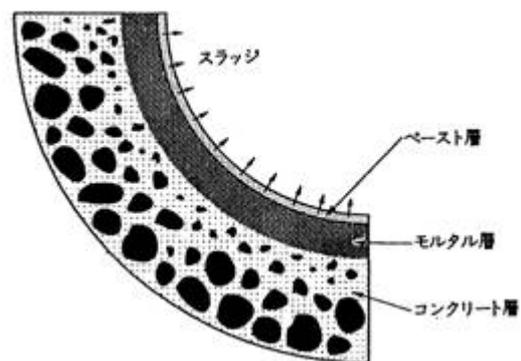


図-1 遠心成形後の製品断面状況³⁾

*1 九州高圧コンクリート工業 (株) 技術部次長 博士 (工学) (正会員)

*2 九州高圧コンクリート工業 (株) 技術部

*3 九州高圧コンクリート工業 (株) 技術部副長

そこで、今回は、まず、①水セメント比を変化させた調合での遠心成形性及び強度発現性を確認する実験（実験1）を行い、次に、②水セメント比を一定とし単位水量を変化させた調合において、スラッジ発生状況及び強度発現性状を確認し、それらに関連づける実験（実験2）を実施した。

4. 使用材料

実験に使用した材料の性状を表-1に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ・比表面積 $3750\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。

細骨材は、細砂 S1（絶乾密度 2.60g/cm^3 ・吸水率 0.6% ・粗粒率 1.40 ）と砕砂 S2（絶乾密度 2.81g/cm^3 ・吸水率 0.2% ・粒形判定実積率 56.3% ・粗粒率 4.04 ）を質量比 $6:4$ で混合使用した。粗骨材は、碎石 2005（絶乾密度 2.86g/cm^3 ・吸水率 0.3% ・粒形判定実積率 59.2% ・粗粒率 6.79 ）を使用した。

混和剤は、ナフタリン系高性能減水剤（M-N）又はポリカルボン酸系高性能減水剤（M-P）を用いた。

5. 練混ぜ及び遠心成形条件

練混ぜ及び遠心成形条件を表-2に示す。

練混ぜには、50ℓ強制二軸ミキサを用い、練混ぜ時間は、セメントと細骨材で20秒、次に、水と混和剤を加えて20秒、最後に、粗骨材を加えて180秒とした。

遠心成形条件は、遠心力を初速 2G:60秒→中速 9G:120秒→中速 15G:120秒→高速 34G:120秒で一定とした。なお、遠心成形供試体（ $\phi 200 \times H300\text{mm}$ ・肉厚 40mm ）は、各調合毎に2体作成し、圧縮強度の算出に際しては、遠心成形後の供試体の外径及び肉厚を8箇所測定し、その平均値から供試体断面積を求めて算出した。

6. 養生条件

遠心成形後の供試体養生条件を表-2に示す。

遠心成形後の供試体の養生条件は、まず、初期養生を行い、次に、AC養生を行った。

表-1 使用材料

普通ポルトランドセメント		密度 3.15g/cm^3 ，比表面積 $3750\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	細砂 (S1)	絶乾密度 2.60g/cm^3 ，吸水率 0.6% ，粗粒率 1.40
	砕砂 (S2)	絶乾密度 2.81g/cm^3 ，吸水率 0.2% ，粒形判定実積率 56.3% ，粗粒率 4.04
粗骨材	碎石 2005	絶乾密度 2.86g/cm^3 ，吸水率 0.3% ，粒形判定実積率 59.2% ，粗粒率 6.79
混和剤	M-N	ナフタリン系高性能減水剤
	M-P	ポリカルボン酸系高性能減水剤

表-2 練混ぜ・遠心成形・養生条件

練混ぜ	セメント+細骨材:20秒 → +水+混和剤:20秒 → +粗骨材:180秒
遠心成形	2G:60秒→9G:120秒→15G:120秒→34G:120秒
初期養生	前置2h→昇温2h→保持4h（最高温度 65°C ） →自然除冷
AC養生	初期蒸気養生→昇圧3h →保持3h（最高温度 183°C ・10気圧）→降圧3h

初期養生は、早期型枠脱型を目的とした養生であり、前置時間を2時間とし、その後、昇温を2時間で行い、最高温度 65°C を4時間保持した後、自然除冷を行った。一方、AC養生は、昇圧を3時間で行い、最高温度 183°C ・10気圧を3時間保持し、その後、降圧を3時間で行った。

7. 水セメント比を変化させた実験（実験1）

7.1 コンクリートの調合

水セメント比（W/C）を変化させた場合のコンクリートの調合を表-3に示す。

本検討では、設計基準強度が 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートを対象としており、W/Cの水準は29, 26, 23%の3水準とした。

単位水量は、W/Cが小さくなるに伴いコンクリートの粘性が増加することが予想され、W/C=29, 26, 23%毎に事前の試し練りより各々150, 155, 160kg/m^3 とした。一方、細骨材率（s/a）は、単位粗骨材量がほぼ一定になるように W/C=29, 26, 23%毎に各々40, 37, 33%とした。

なお、混和剤は、W/C=29, 26%ではナフタリン系高性能減水剤（M-N）を使用し、W/C=26, 23%ではポリカルボン酸系高性能減水剤（M-P）を使用

し、目標スランプが 15~20cm 程度となるように調整した。ただし、NO.4 に関しては、今回、M-P 使用量を増加させても流動性改善効果があり得られず、M-P 使用量はセメントの 1%とし、低スランプでの遠心成形性を確認することとした。

7.2 実験結果

(1) フレッシュ性状

水セメント比 (W/C) を変化させた場合のコンクリートのフレッシュ性状及び供試体の遠心成形状況を表-3 及び写真-1 に示す。

NO.1 (W/C=29%) は、単位セメント量が従来のポール及びパイル製品よりも多く、多少粘性が大きかった。しかし、遠心成形後は、外側から内側に向かってコンクリート層、モルタル層、ペースト層が形成され、綺麗な同心円上の製品となり良好な仕上がりであった。

NO.2 (W/C=26%) は、粘性が大きく、内壁部にペースト分が多く存在し若干垂れが生じ、遠心成形後も綺麗な同心円とはならなかった。これは、今回、スランプが 20cm と他のケースに比べて大きかったのも一因と考えられる。

NO.3 (W/C=26%) は、粘性が大きく、遠心成形後の内壁にはペースト分が多く存在したが、遠心成形状態は比較的良好であった。

NO.4 (W/C=23%) は、粘性がさらに大きく、内壁部には NO.2, 3 よりペースト分が多く存在し垂れも生じていたが、遠心成形後は綺麗な同心円が形成されていた。これは、前述の理由により、スランプが 11.5cm と小さかったのも一因と考えられる。



NO.1 (W/C=29%)

NO.2 (W/C=26%)



NO.3 (W/C=26%)

NO.4 (W/C=23%)

写真-1 遠心成形後の供試体状況 (実験 1)

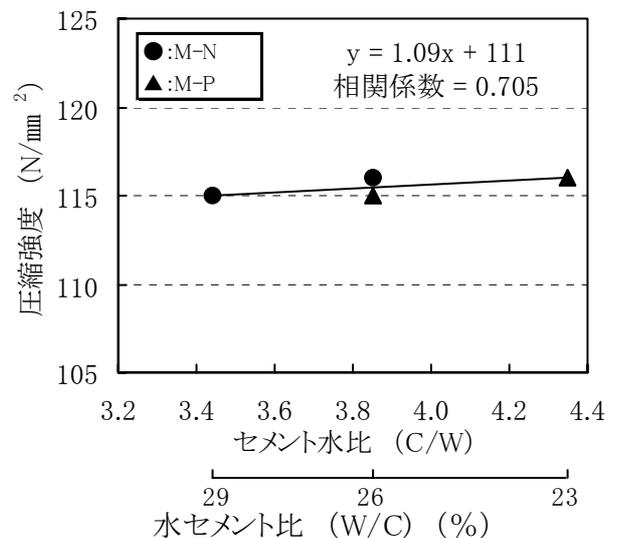


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係 (実験 1)

表-3 コンクリートの調合及び試験結果 (実験 1)

NO	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤 (C×%)		スランプ (cm)	遠心成形状況	圧縮強度 (N/mm²)
			W	C	S1	S2	G	M-N	M-P			
1	29	40	150	517	415	299	1144	1.7	—	16.0	良好	115
2	26	37	155	596	367	264	1147	2.7	—	20.0	多少垂れ発生、内側にペースト多	116
3	26	37	155	596	367	264	1147	—	2.0	15.0	比較的良好、内側にペースト多	115
4	23	33	160	696	309	223	1147	—	1.0	11.5	垂れ発生、内側にペースト多大	116

(2) 圧縮強度

セメント水比と AC 養生後の圧縮強度の関係を図-2に示す。

圧縮強度は、通常のコンクリートと同様に、セメント水比が大きくなると大きくなる傾向にはあるが、W/C=23~29%の範囲では 115~116N/mm² とほとんど差がなく、両者の相関関係はあまり見られなかった。これは、前述のように、遠心成形によるコンクリートからの水の搾り出しがコンクリートの強度発現に大きく影響を及ぼしたことが原因と考えられる。

8. 水セメント比を一定とし単位水量を変化させた実験(実験2)

8.1 コンクリートの調合

水セメント比(W/C)を一定とし単位水量を変化させた場合のコンクリートの調合を表-4に示す。

前述の「7. 水セメント比を変化させた実験(実験1)」により、W/C=23~29%の範囲の強度特性はW/Cにあまり関係しない結果が得られ、設計基準強度 105N/mm²程度を目標とした調合では、遠心成形が一番良好な W/C=29%の調合が製品製造上他の調合より望ましいことが確認できた。

そこで、本検討では、高強度におけるコンクリートの粘性をなるべく低減できる W/CとしてW/C=29%を採用し、単位水量をW=150, 155, 160kg/m³の3水準で変化させた。なお、本検討では、工場内のコンクリートの運搬は現状のポンプ圧送を前提としており、目標スランプが18

±1.5cm となるように混和剤使用量を調整した。

また、本検討では、各調合における発生スラッジの性状を確認し、その時のスラッジとコンクリート強度の関連を明らかにすることを目的にしており、比較用として、現在、設計基準強度 85N/mm²で出荷されているコンクリートパイル製品の調合に関しても同様の測定を行った。

8.2 実験結果

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状及び供試体の遠心成形状況を表-4及び写真-2に示す。

NO.1, NO.2, NO.3 のいずれも、単位セメント量が従来のポール及びパイル製品(NO.4)よりも多く、多少粘性が大きかった。しかし、遠

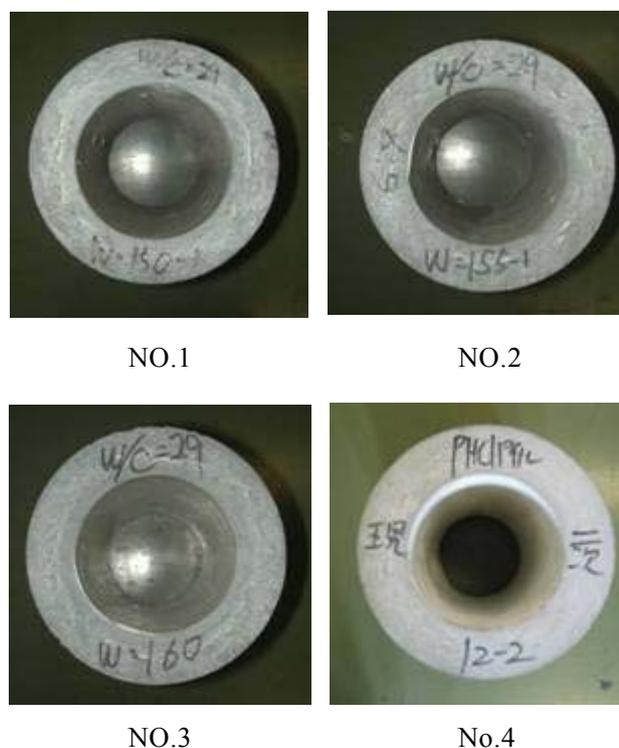


写真-2 遠心成形後の供試体状況(実験2)

表-4 コンクリートの調合及び試験結果(実験2)

NO	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%) M=N	スランプ°(cm)	スラッジ重量(g/個)	スラッジ密度(g/cm ³)	修正W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)
			W	C	S1	S2	G						
1	29.0	40.0	150	517	415	299	1144	1.7	18.5	461	1.45	22.8	114
2			155	534	409	294	1124	1.5	18.5	497	1.41	22.0	116
3			160	552	402	290	1107	1.3	16.5	473	1.45	23.1	108
4*	31.8	42.5	140	440	464	330	1144	1.7	10.0	354	1.37	25.4	95

* 設計基準強度85N/mm²(コンクリートパイル製品の調合)

心成形により内壁部の垂れは発生しておらず、いずれも綺麗な同心円上の製品となり良好な仕上がりであった。

(2) 単位水量と圧縮強度の関係

同一水セメント比 (W/C=29%) における単位水量と AC 養生後の圧縮強度の関係を図-3 に示す。

単位水量 (W=150, 155, 160kg/m³) と圧縮強度の関係は見出せなく、W=155kg/m³ の場合の強度が最大になっているが、これは、W=155kg/m³ の場合が、遠心成形によるコンクリートからの水の搾り出し効果が一番大きかったのではないかと推察される。

(3) スラッジ性状

遠心成形によるコンクリートからの水の搾り出し性状を把握するために、各調合毎に、遠心成形時の発生スラッジの全重量及び 200cc 当りの重量を測定し、各調合毎のスラッジ濃度を算出し、表-4 及び図-4 に示す。

NO.1~3 の 1 供試体当りの発生スラッジ量は、461~497g/個と従来製品 (NO.4) の 354g/個に比べて大きい値となった。これは、NO.1~3 が NO.4 より単位水量・単位セメント量ともかなり多くなっていることが原因と考えられる。

また、NO.1~3 のスラッジ密度も、1.41~1.45g/cm³ と NO.4 の 1.37g/cm³ に比べて大きい値となっており、これは水セメント比の違いによるものと考えられる。

一方、NO.1~3 の中では、NO.2 の発生スラッジ量が一番多く、かつ、密度が一番小さくなっていた。このことは、NO.2 の場合が、遠心成形による水の搾り出し効果が大きく、その結果、図-3 に示したとおり圧縮強度が NO.1~3 の中で最大になったものと考えられる。

なお、今回、NO.2 の調合において水の搾り出し効果が最大になった原因は明らかではないが、セメント・細骨材・粗骨材の全体系としての粒度分布や遠心成形時の遠心力の大きさなどが複雑に絡み合った結果と考えられ、今後の検討課題であると思われる。

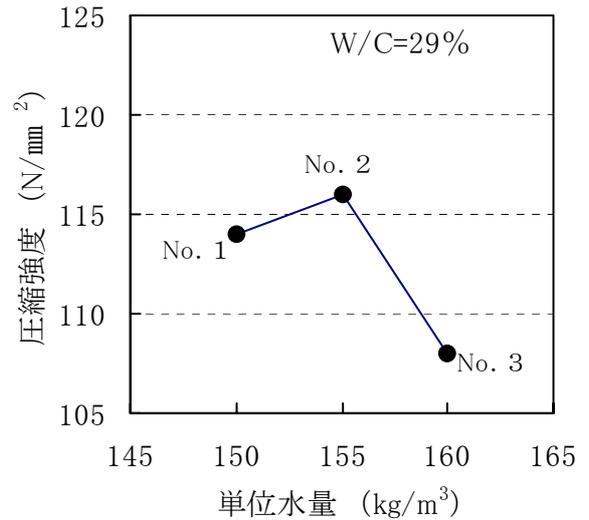


図-3 単位水量と圧縮強度の関係 (実験 2)

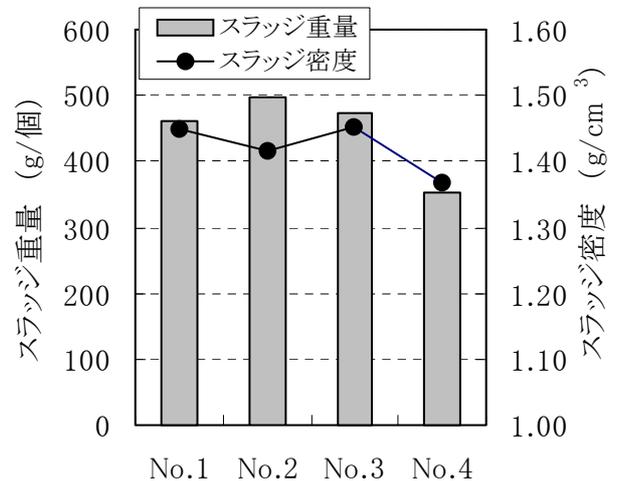


図-4 各調合毎のスラッジ重量及び密度 (実験 2)

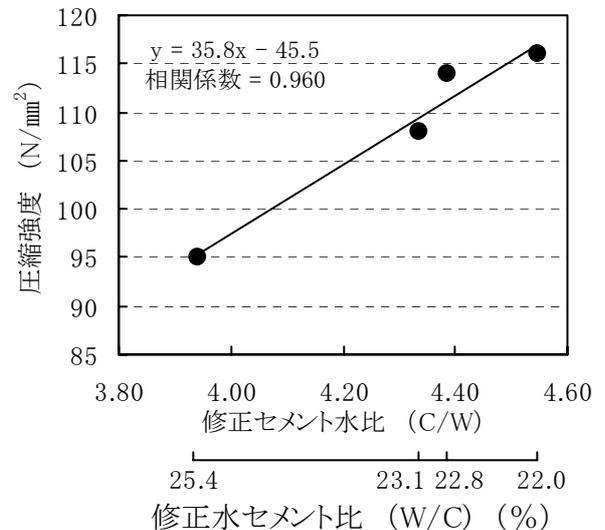


図-5 修正セメント水比と圧縮強度の関係 (実験 2)

(4) 修正セメント水比と圧縮強度の関係

修正セメント水比の算出に関しては、まず、遠心成形により発生するスラッジの重量及び密度を算出することにより、スラッジ中に含まれる水及びセメントの重量を算出した。次に、遠心成形前のコンクリート調合における単位水量及び単位セメント量から、上記算出されたスラッジ中の水及びセメントの重量を差し引き、修正セメント水比を求めた。

上記手法により求めた修正水セメント比の値を表-4に示すが、各調合とも6~7%水セメント比が低下している。この結果は、文献4)の7~9%より多少小さかったが、これは、本検討の修正前の水セメント比が29.0~31.8%と、文献4)の水セメント比40~46%より小さかったことによるものでないかと考えられる。

図-5に遠心成形後の修正セメント水比とAC養生後の圧縮強度の関係を示す。

遠心成形後の修正セメント水比と圧縮強度の関係は、供試体の内外での材料構成比が異なるにもかかわらず、直線式で良い相関(相関係数0.960)が得られた。従って、遠心成形後にAC養生を行ったコンクリート製品の圧縮強度は、スラッジ発生状況と関連付けることにより、強度発現特性を把握できることが明らかになった。

9. まとめ

遠心成形後、蒸気養生を行い、その後、AC養生を行った高強度コンクリート製品に関して、本研究の範囲内では、以下のことが明らかになった。

- (1) コンクリート製品の高強度化が進み、水セメント比が小さくなると、コンクリートの粘性が大きくなり、遠心成形後の内壁にはペースト分が多く存在し、若干垂れが生じる場合もあるが、設計基準強度 105N/mm^2 程度までの調合であれば、綺麗な同心円形成が可能である。
- (2) 遠心成形により発生したスラッジ成分を成形前のコンクリート調合から差引いた修正セメ

ント水比とAC養生後の圧縮強度の関係は、直線式で良い相関が得られた。従って、遠心成形後にAC養生を行ったコンクリート製品の圧縮強度は、スラッジ発生状況と関連付けることにより、強度発現特性を把握できる。

謝辞

本実験の実施に関して、花王(株)峯下政一氏、三京化成(株)井上和治氏の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

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，日本建築学会学術講演梗概集(近畿)，pp.367-368，2005.9
- 2) 菅一雅ほか：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合構成の影響，日本建築学会学術講演梗概集(近畿)，pp.543-544，2005.9
- 3) 下山善秀ほか：遠心力締固め製品製造時のスラッジ防止剤および低減剤の現状，コンクリート工学，pp.16-22，Vol.34，No.5，1996.5
- 4) 鉄道電化協会：コンクリートポールハンドブック，pp.64-67，S33