

論文 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

土田 伸治*¹、丸山 武彦*²、松原 範幸*³

要旨：本研究は、遠心製品の製造に使用するコンクリートの管理供試体の圧縮強度に及ぼす要因として、供試体の製法による相違および形状の影響について考察した。実験は圧縮強度が40～200N/mm²の範囲とし、遠心供試体、これと同一形状の振動締固め供試体、および円柱供試体であり、これらと実物大遠心製品のコア抜き供試体(円柱形)を比較検討した。

その結果、遠心時にスラッジが発生しないコンクリートの圧縮強度は、供試体の製法の相違については影響が少なく、形状による影響が大きいことが分かり、遠心製品のコンクリート強度管理用供試体として、振動締固めした円柱供試体で十分可能であるとの結論に至った。

キーワード：高強度コンクリート、遠心力成形、スラッジレス、形状の影響、製法の相違

1. はじめに

JIS製品である遠心力高強度プレストレストコンクリート杭(以下、PHC杭)および遠心力プレストレストコンクリートボール(以下、PCボール)のコンクリートの設計基準強度は、それぞれ80N/mm²以上および50N/mm²以上であり、比較的高強度のコンクリートが日常的に生産されている。この遠心力締固めにより製造されているPHC杭およびPCボールのコンクリートの圧縮強度管理は、製品と同様の成形方法による遠心供試体(JIS A 1136)で行うようにそれぞれのJISに定められている。これは、遠心供試体による強度管理を推進した当時の報文¹⁾によると、製品と同様に遠心成形時に水分を多く含んだスラッジが発生して水結合材比が低下し、遠心力締固めの効果が発揮されるため等としている。しかし、遠心供試体によるコンクリートの強度管理は、遠心製品中のコンクリートの強度を直接示すものではなく、これを通常の円柱供試体(JIS A 1132)で代用できれば、品質管理業務の合理化(遠心供試体では型枠や遠心機が特殊で重量物であり各作業に時間を要し重労働であることや、円柱供試体では圧縮試験等の自動化が可能であることなど)が可能となるが、遠心供試体と円柱供試体および遠心製品中のコンクリートとの強度の関連が十分には把握されていないことなど、データの蓄積が不足していると考えられるために実施に至っていない。

一方、近年では遠心力成形におけるスラッジの発生を防止する混和剤が開発実用化されていることや、コンクリート強度が160N/mm²を超える遠心成形した超高強度シリカフェームコンクリート(比較的高粘性のコンクリートとなり遠心成形してもスラッジが発生しない)が実用化されていることなど、遠心製品に使用するコンクリート自体も従来と比べて変化している。

本実験は主としてスラッジ防止剤およびシリカフェームを使用した40～200N/mm²の高強度コンクリートを用いて、遠心供試体、円筒供試体(形状寸法は遠心供試体と同じで振動締固め)、円柱供試体、およびφ600mmの実物大遠心製品からのコア抜き供試体(形状寸法は円柱供試体と同じ)の強度の相違を検討し、遠心製品のコンクリート強度およびその管理方法について考察した。

*1 日本コンクリート工業㈱研究所研究員 (正会員)

*2 日本コンクリート工業㈱研究所長、工博 (正会員)

*3 日本コンクリート工業㈱常務取締役

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験は幅広い配合を対象としたため、表1のように細・粗骨材は各5種類、スラッジ防止剤は3種類、混和材は4種類とし、普通ポルトランドセメント、およびナフタリン系の高性能減水剤を使用した。また、遠心供試体強度で $120\text{N}/\text{mm}^2$ を超える配合にはシリカフュームを用いた。

2. 2 実験計画

①実験1：遠心供試体強度で $50\sim 180\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲とし、コンクリート強度に及ばず要因として、スラッジ発生の有無による相違、供試体の成形方法の相違（遠心・振動）、形状の相違（円柱・円筒）をとりあげ表2に示す遠心供試体、円柱供試体、および円筒供試体の3種類について比較を行った。なお、実験は20配合（内、スラッジレス10配合）とし、50データ（内、スラッジレス31データ）を得た。

但し、スラッジレス配合は、スラッジ防止剤を用いたコンクリート、およびシリカフュームを用いた超高強度コンクリートでスラッジが発生しないことを確認した配合であり、スラッジが発生する配合は、スラッジ防止剤やシリカフュームを用いていない、工場で

実生産に使用している配合を参考に試験練りし確認した配合とした。

②実験2：遠心供試体強度で $60\sim 160\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲とし、コンクリート強度に及ばず要因は実験1と同様にスラッジ発生の有無による相違、供試体の成形方法の相違（遠心・振動）、形状の相違（円柱・円筒）としたが、供試体は遠心供試体、円柱供試体およびコア抜き供試体（ $\phi 600\text{mm}$ の実物大の遠心製品からコア抜きした供試体）の3種類とした。なお、実験は実験1で使用した配合から9配合（内、スラッジレス6配合）を選定し、養生方法として蒸気養生およびオートクレープ養生を施した65データ（内、スラッジレス50データ）を得た。

③実験3：スラッジ防止剤を使用したPHC杭およびPCボールの遠心製品の現行実強度レベルである遠心供試体強度で $70\sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲とし、遠心供試体と円柱供試体の強度の相違を確認するために81データを得た。

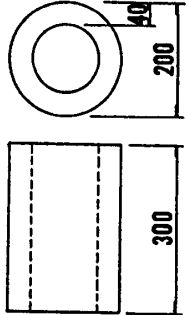
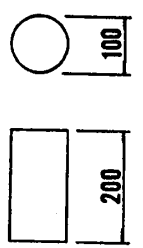
2. 3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、容積 100ℓ および 250ℓ の強制練りミキサを用い、セメント、スラッジ防止剤、混和材、細・粗骨材を投入して1分間練り、水および減水剤を投入して1～5分間練り混ぜた。

表1. 実験に使用した使用材料の組み合わせ

使用材料		実験1	実験2	実験3
細骨材	岩瀬産硬質砂岩砕砂	○	○	○
	旧鬼怒川河川敷砂	○		
	鬼怒川河川敷砂	○		
	旧内部川河川敷砂			○
	土山産硬質砂岩砕砂			○
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩砕石	○	○	○
	旧鬼怒川河川敷玉砕石	○		
	鬼怒川河川敷玉砕石	○		
	粟野産硬質砂岩砕石	○		
	旧内部川河川敷玉砕石			○
混和材	珪石粉	○		○
	高炉スラグ微粉末	○		
	高強度用混和材	○	○	○
	シリカフューム	○	○	○
スラッジ防止材	アクリル系	○	○	○
	アルミノケイ酸塩系			○
	シリカフューム	○	○	○

表2. 供試体形状寸法および製法

供試体名称	遠心供試体 JIS A 1136	円筒供試体	円柱供試体 JIS A 1132	コア抜き 供試体
締固め方法	遠心締固め	振動締固め	振動締固め	遠心締固め
形状寸法 (mm)				

供試体は、3実験とも円柱供試体および遠心供試体については各3本製作し、実験1では円筒供試体を3本、実験2ではコア抜き供試体を3本製作して1組のデータ（1組のデータは1バッチ内のコンクリートとし、養生等の条件は共通）とした。コア抜き供試体は、遠心製品の実物大として $\phi 600 \times 600 \text{mm}$ （壁厚120mm程度）の無筋コンクリートを遠心成形し、円筒断面の外面から55mmの点を中心として直径 $\phi 100 \text{mm}$ のコアを抜き、それを仕上がり高さが200mmになるようにカットして両面研磨した。遠心条件はコア抜き中心位置と遠心供試体の壁厚中心位置が同じ遠心重力が作用するように設定した。振動打設コンクリートは、JIS A 1132に準じて内部振動機（ $\phi 23 \text{mm}$ 、振動数12,500v.p.m、振幅0.6mm）を用いて、円柱供試体は2層に分けて詰め、円筒供試体は3層に分けて詰めた。締固め時間は、コンクリートの状態により異なり、巻き込み空気がほぼ抜けた状態を確認するまで加振した。

養生方法は、配合および目標強度に応じて蒸気養生およびオートクレープ養生とした。

3. 実験結果および考察

本実験のコンクリートの圧縮強度の範囲は表3のようであった。

図1は実験1の円柱供試体と遠心供試体の強度の関係を示す。スラッジが発生したコンクリートの円柱供試体と遠心供試体との強度の関係（回帰直線）では、既往の報告^{1) 2)}とほぼ同様な結果であった。遠心供試体のスラッジ発生の有無により強度差は、スラッジが発生した方が幾分高い強度を示しているがその差は顕著でなく、この傾向は図2でも同様の結果となった。

（回帰直線）では、既往の報告^{1) 2)}とほぼ同様な結果であった。遠心供試体のスラッジ発生の有無により強度差は、スラッジが発生した方が幾分高い強度を示しているがその差は顕著でなく、この傾向は図2でも同様の結果となった。

図2は実験1において供試体の形状寸法を同等（ $\phi 20 \times 30 \text{cm}$ の中空円筒形）にした遠心供試体と振動締固め円筒供試体の強度の関係図である。スラッジレスの遠心供試体強度と円筒供試体強度の関係は回帰直線から判断出来るようにほぼ等しい強度となっている。これは、遠心時にスラッジが発生しないために見かけの水結合材比が変わらないこと、供試体の気泡量（遠心供試体の気泡量は円筒供試体に比べ非常に少ない）と遠心分離（遠心供試体では遠

表3. 各供試体の強度範囲 (N/mm^2)

	実験1	実験2	実験3
遠心供試体	50.8~174.5	59.2~154.8	68.4~94.9
円柱供試体	48.8~207.0	41.4~180.0	69.0~103.3
円筒供試体	50.3~150.2	—	—
コア抜き	—	44.3~193.0	—

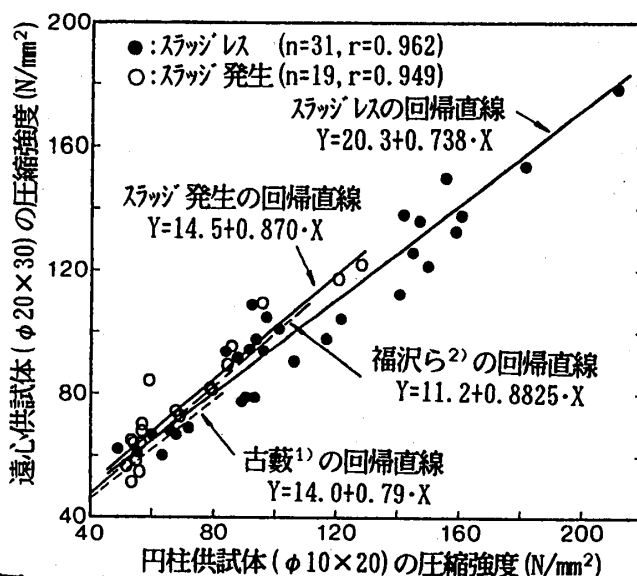


図1. 円柱供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係(実験1)

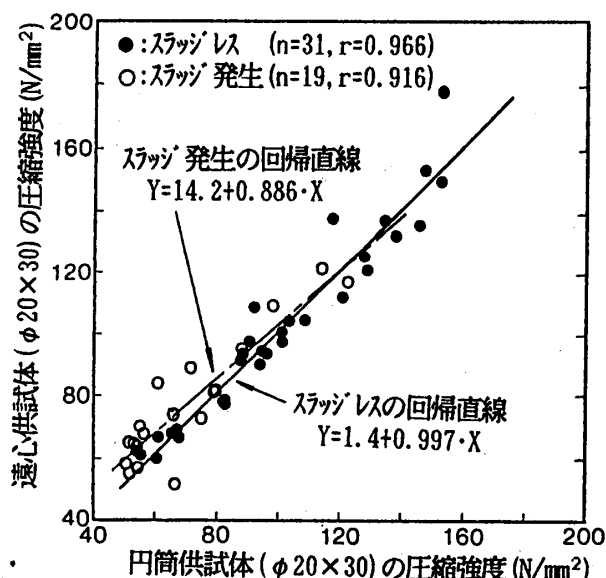


図2. 円筒供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係(実験1)

心力によりコンクリート層とモルタル層に分離する) が相殺されたことが考えられる。従って、スラッジの発生しないコンクリートでは、円筒供試体の成形方法(遠心・振動)による強度差はほとんどないと考えられる。

図3は実験1において成形方法を同一の振動締固めとし、形状が異なる円柱供試体(φ10×20cm)と円筒供試体(φ20×30cm)の強度の関係を示す。コンクリート強度が高くなるほど円柱供試体の方が強度が高くなっている。これは、同じ成形方法であることから形状の相違によるものと考えられる。すなわち、高強度になるほど円筒供試体の強度は円柱供試体に比較して小さく表れ、80 N/mm²周辺の強度は3%程度小さく、150 N/mm²では13%程度小さくなる。

図4は図1を骨材の種類別に分けた図を示す。使用骨材の種類に対する円柱供試体と遠心供試体の強度比較への影響は、既往の報告¹⁾²⁾と同様な結果となった。本実験の強度範囲である40～200 N/mm²の強度間では、使用骨材の種類が円柱供試体と遠心供試体の強度差に及ぼす影響はないと考えられる。

図5は実験2の円柱供試体と遠心供試体の強度の関係を示す。実験1の図1と比較すると、スラッジの発生の有無に対応するそれぞれの回帰直線はほぼ等しいものと考えられ、特に、スラッジレスコンクリートにおいては非常に近い結果となった。これは、スラッジレスコンクリートの相関係数が実験1では $r=0.962$ 、実験2では $r=0.967$ であり、スラッジが発生したコンクリートの場合の $r=0.949$ 、 $r=0.870$ と比較して相関が高く、バラツキが少ないコンクリートであったため再現性が高くなったものと考えられる。非常に高い相

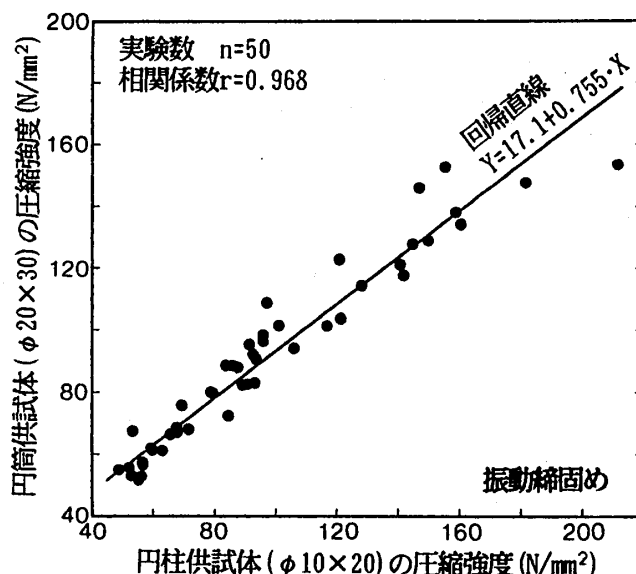


図3. 円柱供試体と円筒供試体の圧縮強度の関係(実験1)

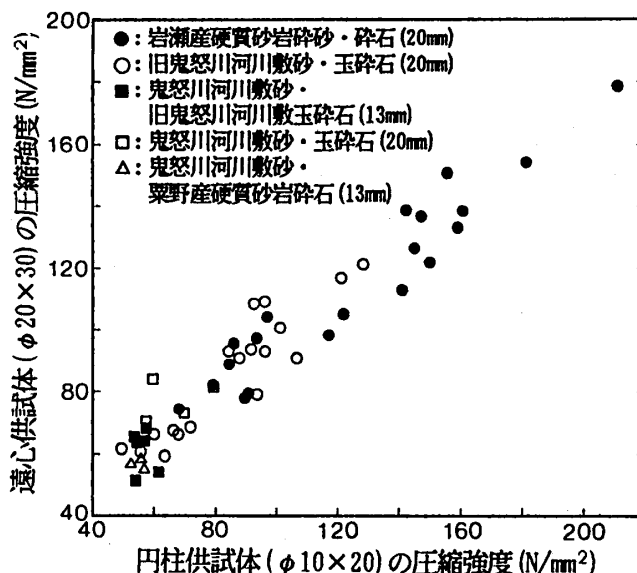


図4. 骨材の相違による円柱供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係(実験1)

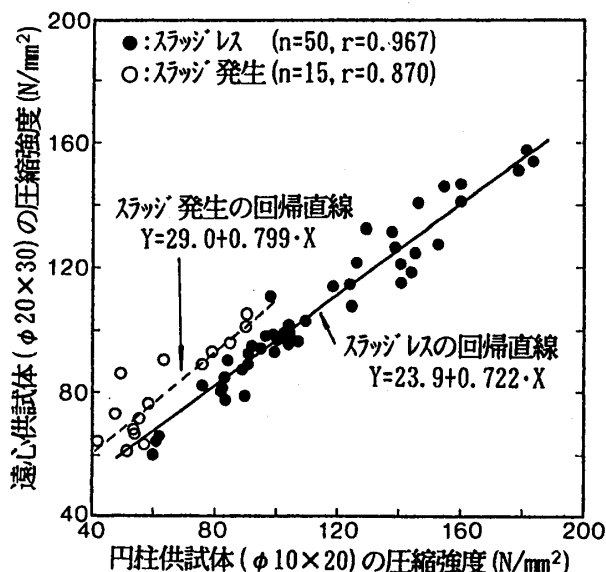


図5. 円柱供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係(実験2)

関があることから、従来の遠心供試体の代わりに円柱供試体で強度管理が行えることを示していると考えられる。

図6は実験2において供試体の形状寸法を同一にした、振動締固めの円柱供試体と遠心製品のコア抜き供試体の強度の関係である。スラッジレスコンクリートの場合は、円柱供試体とコア抜き供試体の強度の関係は回帰直線から判断出来るようにほぼ等しい強度となっている。すなわち、スラッジレスコンクリートの円柱供試体による圧縮強度は遠心成形コンクリート製品中のコンクリートの品質を図7に示す遠心供試体の場合より直接的に表すと考えられる。これは、実験1(図2)の遠心供試体と円筒供試体との強度の関係と同様に、遠心成形時にスラッジが発生しないために見かけの水結合材比が変わらないこと等によるものと考えられる。また、スラッジが発生したコンクリートでは、遠心成形したコア抜き供試体の強度が幾分高い傾向を示しているが、これは、遠心時にスラッジが発生して水結合材比が低下したためと考えられる。

図7は実験2における遠心供試体(φ20×30cm)と遠心製品のコア抜き供試体(φ10×20cm)の強度の関係である。スラッジの発生の有無に関わらずコンクリート強度が高くなるほどコア抜き供試体の強度が高くなっている。これは、実験1(図3)において同一の振動締固めで形状の相違を確認したものと同様に、図7は締固め条件を遠心成形とした場合の形状の相違を示し、同様の傾向が表れている。

図8に示す実験1～3のスラッジが発生しないコンクリートの円柱供試体と遠心供試体の強度の関係は、両者の相関係数が $r=0.966$ と高く、直線関

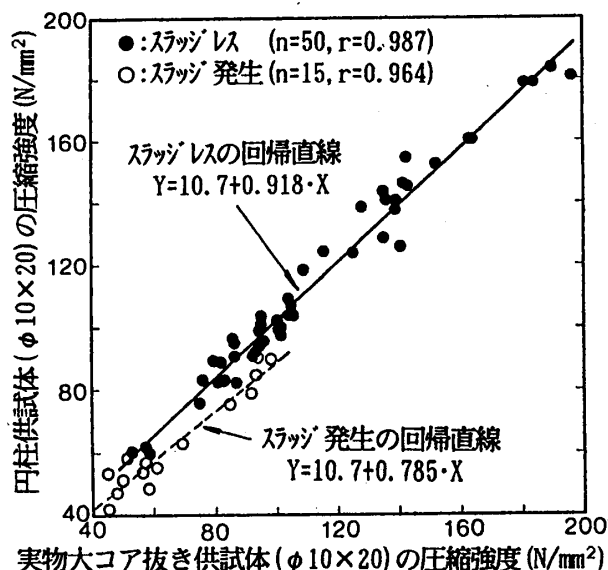


図6. コア抜き供試体と円柱供試体の圧縮強度の関係(実験2)

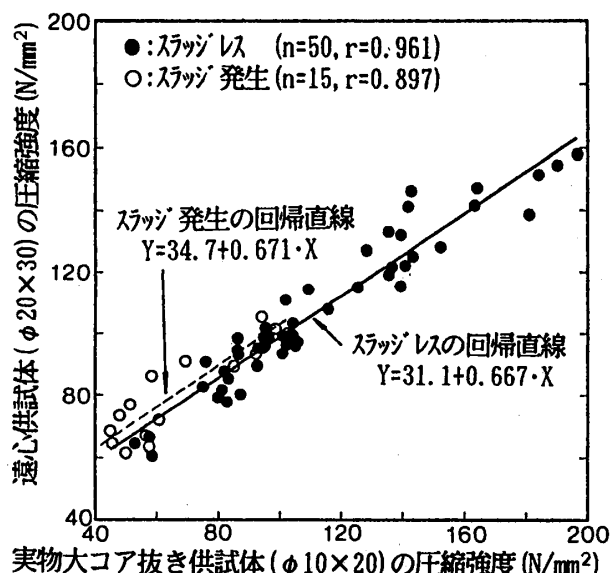


図7. コア抜き供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係(実験2)

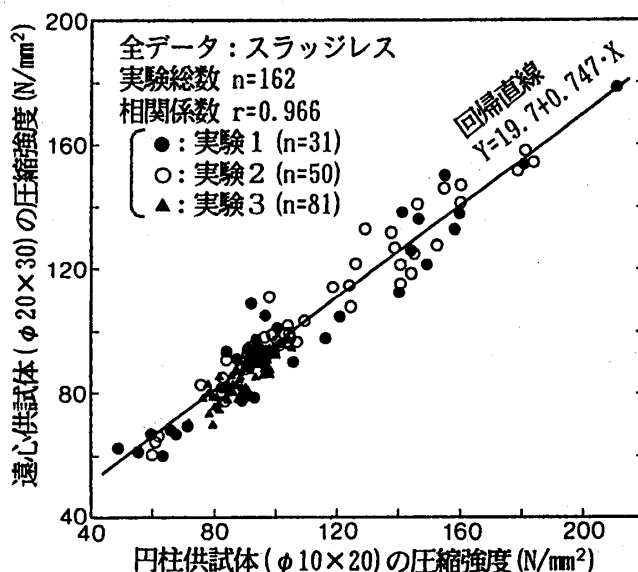


図8. スラッジレスコンクリートについての3実験による円柱供試体と遠心供試体の圧縮強度の関係

係にあることが分かる。この回帰直線の式は円柱供試体強度をX、遠心供試体強度をYとして、

「 $Y = 19.7 + 0.747 \cdot X$ 」……[1] となる。また、図1、図5、図8の相関係数および回帰直線がそれぞれ非常に近い結果となったことから、スラッジレスコンクリートの強度の再現性はスラッジが発生するコンクリートに比べて高いものと考えられる。また、本実験では使用材料、配合および養生方法を変化させた実験であったが、遠心供試体と円柱供試体との強度関係の直線性に及ぼす影響は少ないものと考えられ、既往の報告^{1) 2)}とほぼ同様な結果であった。

以上の実験結果から、スラッジレスコンクリートの遠心製品のコンクリート強度は、振動打設した円柱供試体強度が実物大遠心製品のコア抜き供試体強度にほぼ等しいことから、円柱供試体強度で推定できるものと考えられる。また、スラッジレスコンクリートの遠心製品の品質管理は、従来より行われている遠心供試体を用いた品質管理の代わりに、一般のコンクリートの品質管理に採用されて、管理試験業務の省力化も期待できる円柱供試体を用いて品質管理できることが分かった。しかし、PHC杭およびPCボールのような製品は従来より遠心供試体で行われてきているので、今までのデータと比較する場合は回帰式[1]を用いて推定することが可能である。

4. まとめ

以上の実験をまとめると以下になる。

- ①スラッジが発生するコンクリートの(遠心供試体強度/円柱供試体強度)の比はスラッジレスコンクリートの(遠心供試体強度/円柱供試体強度)の比より幾分高くなるがその差は顕著でない。
- ②スラッジレスコンクリートはスラッジが発生するコンクリートに比べ、各供試体間の強度の相関性が高い結果となった。
- ③使用した骨材の種類が円柱供試体と遠心供試体の強度の相関性に与える影響は少ない。また、スラッジレスコンクリートでは、骨材を含めた使用材料、配合および養生の相違が強度の相関性に与える影響は少ない。
- ④スラッジレスコンクリートの供試体の形状寸法を同等の中空円筒形とした遠心供試体と振動締固めした供試体の強度はほぼ等しい。また、供試体の形状を円柱($\phi 10 \times 20\text{cm}$)としたコア抜き供試体と振動締固めした円柱供試体の強度はほぼ等しいことから、スラッジレスコンクリートの供試体の成形方法による強度差は少ない。
- ⑤スラッジレスコンクリートの供試体の成形方法を振動締固めとし、形状寸法が異なる円柱供試体と円筒供試体の強度を比べるとコンクリート強度が高くなるほど円柱供試体の強度が高くなる。同様に、供試体を遠心締固めしたコア抜き円柱供試体と遠心供試体の強度の比較では、コンクリート強度が高くなるほどコア抜き円柱供試体の強度が高くなる。これらのことから、形状の影響による強度差は存在する。

以上の結果、スラッジレス遠心製品の圧縮強度の管理は、従来の遠心供試体の代わりに円柱供試体($\phi 10 \times 20\text{cm}$)の強度で行える。また、製品本体中のコンクリート強度も円柱供試体強度で推定できることが分かった。

今後は、遠心力成形を用いたPCパイルやPCボール等のコンクリートの品質管理用供試体として、遠心製品中のコンクリートの強度が推定でき、品質管理作業が容易な円柱供試体が採用されるように、更に必要なデータを蓄積していくつもりである。

【参考文献】

- [1] 古藪：遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法について、セメント・コンクリート、No262、1968.12
- [2] 福沢他：ヒューム管における管体コンクリートの圧縮強度管理用供試体の選定方法、JCI大会、1987.6