

論文 ポーラスコンクリートの実施工における強度管理方法に関する基礎的研究

坂本 英輔*1・三島 直生*2・畑中 重光*3

要旨: 本報では、管理用円柱供試体(φ100×200mm)を用いた、ポーラスコンクリートの実施工における圧縮強度および曲げ強度の管理方法の可能性について実験的に検討した。その結果、同一空隙率における管理用円柱供試体とコア供試体の圧縮強度は概ね等しいとみなせることから、実施工現場での空隙率を計測できれば、管理用円柱供試体の圧縮強度と空隙率の関係式から、実構造物のポーラスコンクリートの圧縮強度を推定できる可能性が示唆された。また、曲げ強度は、推定圧縮強度の1/3~1/10程度になることが分かり、設計時に参考とし得る、ポーラスコンクリートにおける圧縮強度と曲げ強度の関係が明らかになった。

キーワード: ポーラスコンクリート, 強度管理, 空隙率, 圧縮強度, 曲げ強度, 骨材粒径, 水セメント比

1. はじめに

ポーラスコンクリート(以下、POCと略記する)は、粗骨材と粗骨材を連結させるためのセメントペーストやモルタルによって構成されるオコシ状のコンクリートである。その内部には連続した空隙を有しており、透水性、保水性および揚水性が高いコンクリートである^{1),2)}など。POCは、空隙によって得られるさまざまな性能を活用することで、環境負荷の低減や生物との共存が可能な社会基盤材料であり、道路舗装、河川護岸、法面保護などに幅広く用いられている。

POCは、通常のコンクリートと比較して施工方法によってその品質が変化しやすいといわれている^{3),4)}。POCの圧縮強度を管理する場合、現時点では実構造物からコア供試体を採用して管理するのが妥当であるが⁵⁾、硬化後のコア抜き作業が煩雑、構造物に傷をつけるなどの問題がある。また、道路舗装では、POCの曲げ強度が要求性能として示される場合が少なくないが、実構造物から角柱供試体を採用することは容易ではない。

そこで本研究では、管理用円柱供試体(φ100×200mm)を用いた、POCの実施工における圧縮強度および曲げ強度の管理方法の可能性について実験的に検討する。具体的には、POCの圧縮強度(管理用円柱供試体)および曲げ強度(角柱供試体)に及ぼす水セメント比および骨材粒径の影響を検討する。また、圧縮強度については、管理用円柱供試体とコア供試体の違いについて検討し、曲げ強度については、圧縮強度と曲げ強度の関係を検討する。

2. 実験概要

2.1 要因と実験水準

*1 広島工業大学 工学部建築工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻教授 工博(正会員)

表-1 要因と実験水準

要因	実験水準
W/C(%)	20, 25, 30
設計空隙率(%)	15, 25, 35
骨材粒径	5号砕石(粒径:13~20mm), 6号砕石(粒径:5~13mm), 7号砕石(粒径:2.5~5mm)

表-2 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16 g/cm ³
骨材(砕石)	5号 粒径:13~20mm, 表乾密度:2.72 g/cm ³ , 吸水率:0.63%, 実積率:59.1%
	6号 粒径:5~13mm, 表乾密度:2.70 g/cm ³ , 吸水率:1.14%, 実積率:57.9%
	7号 粒径:2.5~5mm, 表乾密度:2.68 g/cm ³ , 吸水率:1.16%, 実積率:57.2%
混和剤(SP)	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

表-1に本実験の要因と実験水準を示す。要因は、水セメント比、設計空隙率および骨材粒径とし、各要因の実験水準は、一般的なPOCを網羅できるよう設定した。

2.2 使用材料および調査表

表-2に使用材料を示す。骨材の密度および吸水率試験はJIS A 1110に、骨材の実積率試験はJIS A 1104にそれぞれ準拠して行った。それらの結果をもとに、表-3に示すPOCの調査表を作成した。高性能AE減水剤の添加率は、目標フロー値170±10mmになるように事前に行った予備実験から決めた。

2.3 供試体の作製方法

POCの練混ぜには揺動攪拌式ミキサを用いたペース

表-3 調合表

W/C (%)	設計空隙率 (%)	5号碎石				SP (%)	6号碎石				SP (%)	7号碎石			
		単位量 (kg/m ³)			W		単位量 (kg/m ³)			W		単位量 (kg/m ³)			W
		W	C	G			C	G	C			G			
20	15	100	502	1606	0.65	105	525	1564	0.65	108	538	1532	0.65		
	25	62	309			66	332			69	344				
	35	23	115			28	138			30	151				
25	15	115	458	1606	0.37	120	479	1564	0.37	123	490	1532	0.37		
	25	70	282			76	302			78	314				
	35	26	105			31	126			34	137				
30	15	126	421	1606	0	132	440	1564	0	135	451	1532	0		
	25	78	259			83	278			36	288				
	35	29	96			35	116			38	126				

[註]W/C:水セメント比, W:水, C:セメント, G:粗骨材, SP:高性能AE減水剤

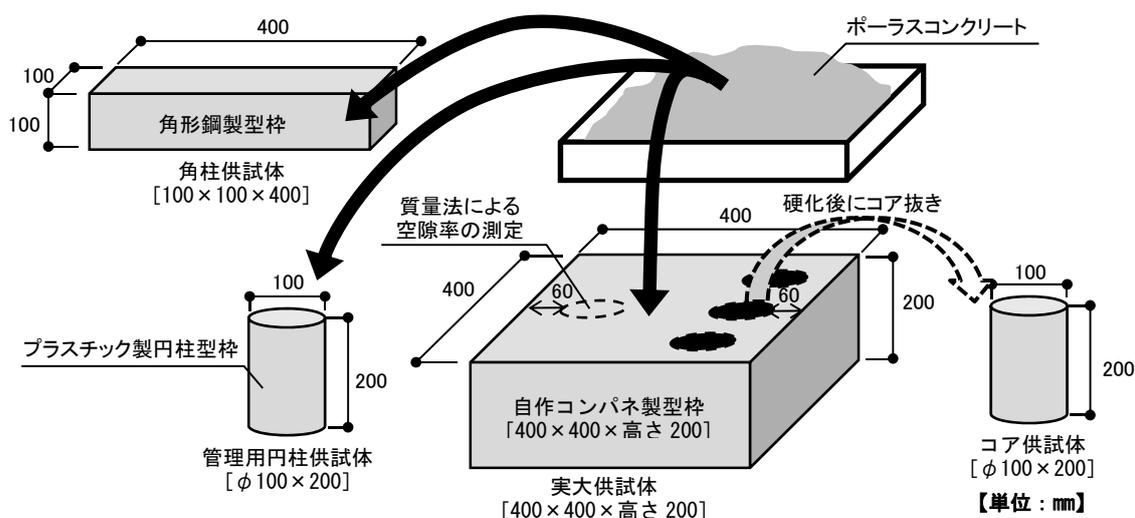


図-1 供試体の概要

ト先練り方式とした。その手順は、まず、セメントおよび練混ぜ水（高性能 AE 減水剤を含む）を投入し、30秒間練り混ぜた後にかき落としを行い、3分間練り混ぜた。次に、骨材を投入し、2分間練混ぜた後に練り舟に排出した。

作製した供試体は、管理用円柱供試体（各水準3体）、角柱供試体（各水準3体）および実大供試体（各水準1体）とし、型枠はそれぞれ、φ100×200mmのプラスチック製円柱型枠、100×100×400mmの角形鋼製型枠および400×400×高さ200mmの自作コンパネ製型枠を用いた（図-1参照）。練り上がったPOCは、型枠形状および空隙率によって変化させた表-4に示す締固め方法で打ち込み、仕上げは、いずれの供試体もコテ仕上げのみとした。締固め方法は、事前に予備実験を実施し、目標フロー値、設計空隙率、骨材粒径、締固め方法を要因としてφ100×200mmの円柱供試体を作製し、供試体の底面および側面の目視観察と質量法による空隙率測定を行い、それらの結果を総合的に判断して決定した。なお、各水セメント比におけるセメントペーストの圧縮強度および曲げ強度を得るため、φ50×100mmの円柱供試体および40×40×160mmの角柱供試体も作製した。

表-4 締固め方法

型枠種類	設計空隙率	締固め
管理用円柱供試体	15, 25%	2層各層突き棒40回・木槌+壁打ちパイププレート6s
	35%	2層各層突き棒10回・木槌
角柱供試体	15, 25%	1層突き棒40回・木槌+壁打ちパイププレート20s
	35%	1層突き棒40回・木槌+壁打ちパイププレート6s
実大供試体	15, 25%	2層各層突き棒80回・木槌+壁打ちパイププレート40s
	35%	2層各層突き棒80回・木槌+壁打ちパイププレート20s

空隙率の管理方法は、調合表から計算される単位体積質量による管理とした。管理用円柱供試体および角柱供試体の空隙率は、JCI ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）による質量法¹⁾とした。実大供試体については、φ108×195mmの塩ビ管（1本）をあらかじめ型枠内に設置しておき、実大試験体の締固めの際、塩ビ管内のPOCについても同様な締固めを行った。打ち込み終了後、塩ビ管内部のPOCを掻き出して質量を計測し、質量法により空隙率を算出した。掻き出したPOC試料は、質量計測後、塩ビ管を抜き取った穴に再度充填した。なお、水セメント比20および25%の供試体については、容積法¹⁾による空隙率測定も実施した。

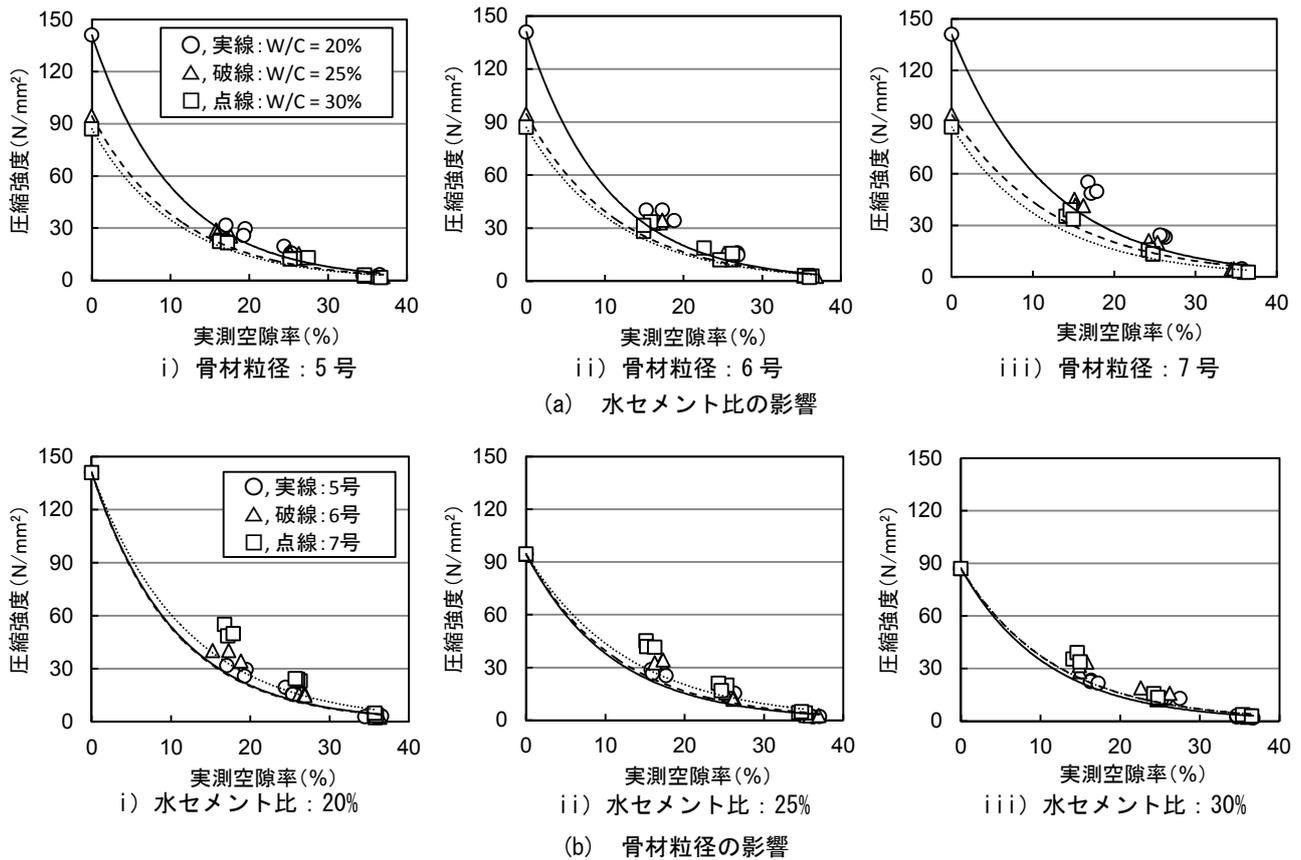


図-2 管理用円柱供試体の圧縮強度と実測空隙率（質量法）の関係

2.4 養生方法と強度試験

POCの打込み後、全ての供試体を材齢2日で脱型し、材齢3週まで水中養生とした。その後、全ての供試体を養生水槽から取り出し、材齢3週から4週までの間、20℃の気中養生とした。実大供試体においては、気中養生期間中に、空隙率測定の影響が少ないと思われる位置からコア（以下、コア供試体）を3体ずつ採取した。なお、水セメント比および骨材粒径に関わらず、設計空隙率35%については、コア採取中にコアが破壊され、供試体を採取できなかった。

圧縮強度試験を行う管理用円柱供試体およびコア供試体は、材齢3～4週の間、両端面を硫黄でキャッピングした。セメントペーストの円柱供試体については、打込み面のみを研磨した。圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠して材齢28日で実施した。

曲げ強度試験（3等分点荷重）を行う角柱供試体は、材齢3～4週の間、支点2カ所と荷重点2カ所をセメントキャッピングした。曲げ強度試験は、JIS A 1106に準拠して材齢28日で実施した。セメントペーストの曲げ強度試験は、2等分点荷重とし、材齢28日で実施した。なお、セメントペーストの曲げ強度試験は、治具に不具合があったため再実験を行った。再実験の際、φ50×100mmの円柱供試体も作製して圧縮強度試験を行い、1回目と2回目の圧縮強度の比を用いて、再実験の曲げ強度を補正

表-5 管理用円柱供試体の近似曲線

W/C (%)	骨材粒径	セメントペーストの圧縮強度 (N/mm ²)	実験定数 B	決定係数 R ²
		A		
20	5	141.0	0.096	0.93
	6		0.097	0.91
	7		0.084	0.86
25	5	94.5	0.091	0.88
	6		0.087	0.90
	7		0.077	0.88
30	5	87.0	0.092	0.90
	6		0.087	0.90
	7		0.085	0.93

したものをもセメントペーストの曲げ強度とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

(1) 管理用円柱供試体

図-2に管理用円柱供試体の圧縮強度と実測空隙率の関係を示す。実測空隙率0%の値はセメントペーストの圧縮強度を示しており、W/C=20%では141.0 N/mm²、W/C=25%では94.5 N/mm²、W/C=30%では87.0 N/mm²であった。図中の近似曲線は、式(1)の指数関数によって近似⁹⁾したものである。表-5に管理用円柱供試体の近似曲線の一覧を示す。

$$F_c = A \cdot e^{-Bx} \quad (1)$$

ここに、 F_c : POC の圧縮強度 (N/mm²), A : セメントペーストの圧縮強度 (N/mm²), B : 実験定数, x : 空隙率 (%)

図-2 (a) によれば、同一空隙率における POC の圧縮強度は、骨材粒径によらず、水セメント比が小さいほど、大きくなっている。この傾向は、既往の研究^{7), 8)}などと同様の結果となった。また、図-2 (b) によれば、同一空隙率における POC の圧縮強度は、水セメント比によらず、骨材粒径が小さいほど、大きくなっている。既往の研究によれば、骨材粒径が POC の圧縮強度に及ぼす影響については統一した結論は得られていないが、本実験の傾向は、振動締固めを行わない場合⁹⁾と同様の結果となった。本実験では振動締固めを行っているため、既往の研究結果と矛盾している。この理由は、比較的フロー値が小さく、かつ振動締固めの時間が短かったため、振動締固めによって生じるセメントペーストの垂れによる骨材結合部の強化⁸⁾が起きにくかったためと考えられる。なお、破壊後の供試体の目視観察からは、骨材結合部の強化がほとんど起きていないことを確認している。

(2) 管理用円柱供試体とコア供試体の関係

図-3 に、実大供試体における質量法と容積法による実測空隙率の関係を示す。質量法による実測空隙率は塩ビ管内部の POC を用いて算出し、容積法によるそれはコア供試体を用いて算出したものである。なお、前述した理由により、設計空隙率 35% のプロットはない。図によれば、質量法による実測空隙率は、容積法によるそれより最大で 10% 程度大きくなっている。この原因は、あらかじめ設置した塩ビ管が干渉し、塩ビ管内部の試料を十分に締め固めることができなかつたためと考えられる。そのため、管理用円柱供試体とコア供試体の関係においては、容積法による実測空隙を用いて議論する。

図-4 に、水セメント比 20% の場合の、管理用円柱供試体およびコア供試体の圧縮強度と実測空隙率の関係を示す。なお、水セメント比 25% の 7 号粒径において、管理用円柱供試体の容積法による実測空隙率に異常値があ

ったため、ここでは水セメント比 20% の結果について考察する。図によれば、同一空隙率におけるコア供試体の圧縮強度は、骨材粒径によらず、管理用円柱供試体のそれと概ね等しい。このことから、実施工現場での空隙率を計測できれば、管理用円柱供試体の圧縮強度と空隙率の関係式から、実構造物のポーラスコンクリートの圧縮強度を推定できる可能性がある。実施工現場での POC の空隙率を測定する方法として、今回は、実大供試体のサイズの関係で採用しなかつたが、施工直後にある区画の試料を採取し、質量法により空隙率を測定する方法が実際行われている。

3.2 曲げ強度

(1) 角柱供試体

図-5 に角柱供試体の曲げ強度と実測空隙率の関係を示す。図によれば、空隙率が大きくなるほど、曲げ強度は線形的に小さくなる傾向がみられる。既往の研究²⁾によれば、圧縮強度と同様に、曲げ強度も実測空隙率 0% の値をセメントペーストの曲げ強度として指数関数により近似できると述べられている。しかし本研究では、全体的にセメントペーストの曲げ強度が小さく、実験値をうまく近似することができなかつたため、セメントペー

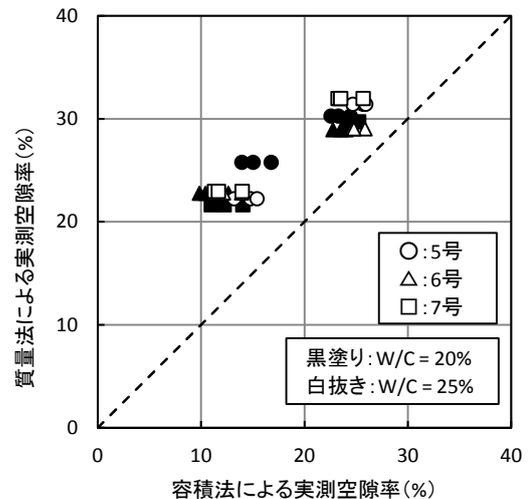


図-3 実大供試体における質量法と容積法による実測空隙率の関係

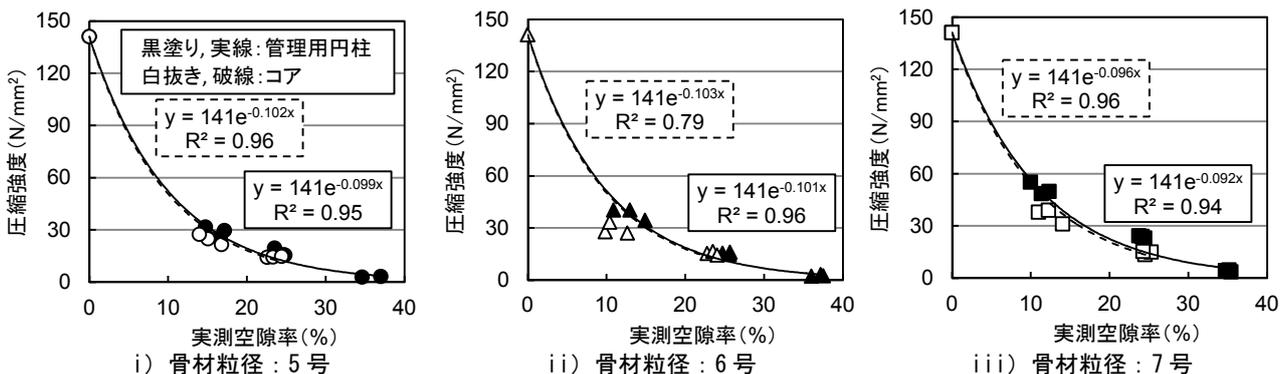


図-4 管理用円柱供試体およびコア供試体の圧縮強度と実測空隙率 (容積法) の関係 (W/C : 20%)

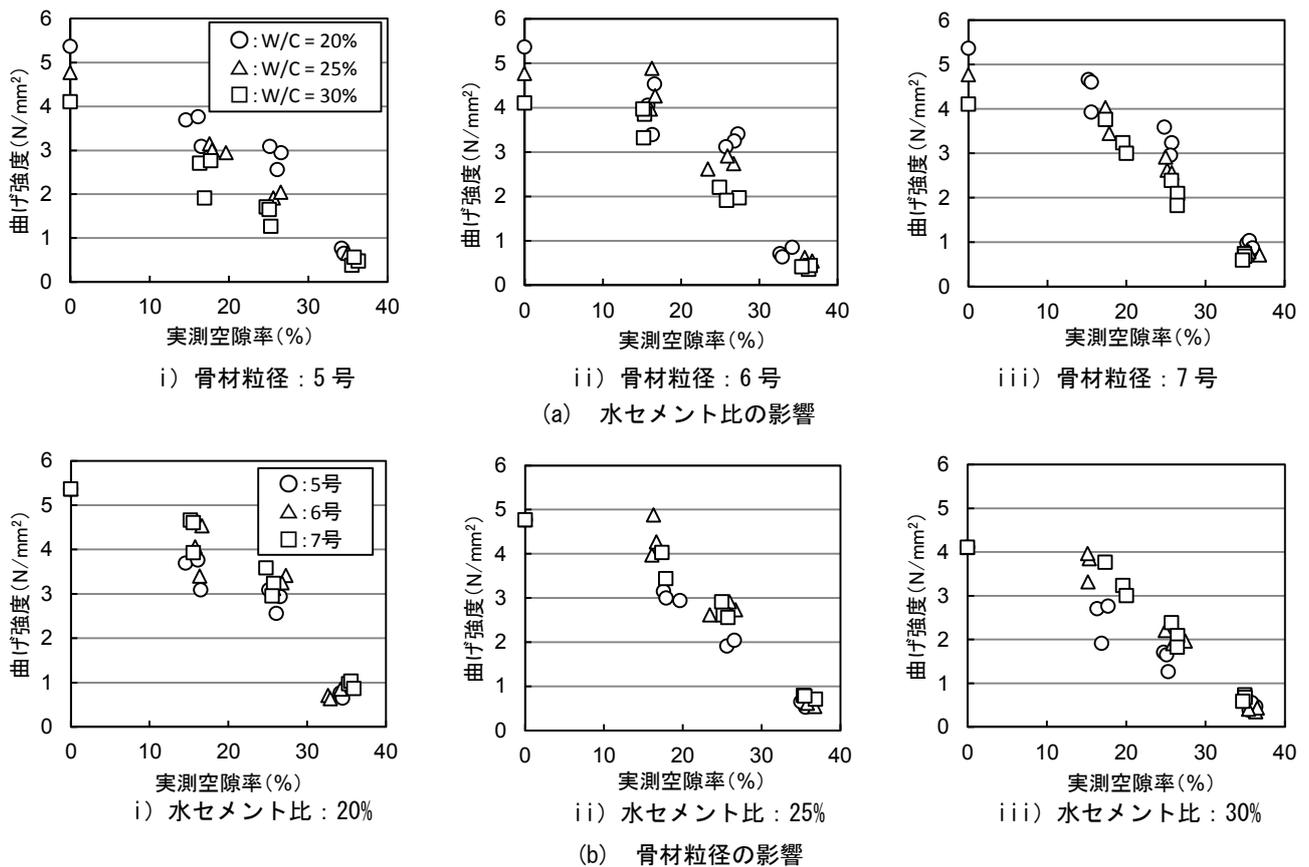


図-5 角柱供試体の曲げ強度と実測空隙率（質量法）の関係

ストの曲げ強度（W/C=20%では5.36 N/mm²，W/C=25%では4.77 N/mm²，W/C=30%では4.11 N/mm²）を示すにとどめる。セメントペーストの曲げ強度が小さくなった理由は、全供試体とも材齢3週以降は気中養生としたため、特に小さな角柱供試体（40×40×160mm）では表面の乾燥によって生じる引張応力の影響が大きかったためと考えられる。

図-5(a)を全体的にみれば、同一空隙率におけるPOCの曲げ強度は、概ね、水セメント比が小さいほど、大きくなっている。また、図-5(b)を全体的にみれば、同一空隙率におけるPOCの曲げ強度は、概ね、骨材粒径が小さいほど、若干であるが大きくなっている。この傾向は、既往の研究²⁾と同様の結果となった。

(2) 圧縮強度と曲げ強度の関係

管理用円柱供試体と角柱供試体は、同一調合のPOCであるが、実測空隙率が異なるため、各水準の圧縮強度と曲げ強度を直接比較することはできない。そこで、角柱供試体の実測空隙率を、管理用円柱供試体の圧縮強度の近似曲線（表-5参照）に代入して求めた圧縮強度を推定圧縮強度と定義し、推定圧縮強度と曲げ強度の関係を考察する。

図-6に曲げ強度と推定圧縮強度の関係を示す。図によれば、曲げ強度と推定圧縮強度の関係は、既往の研究¹⁰⁾で述べられているように、累乗関数で近似できること

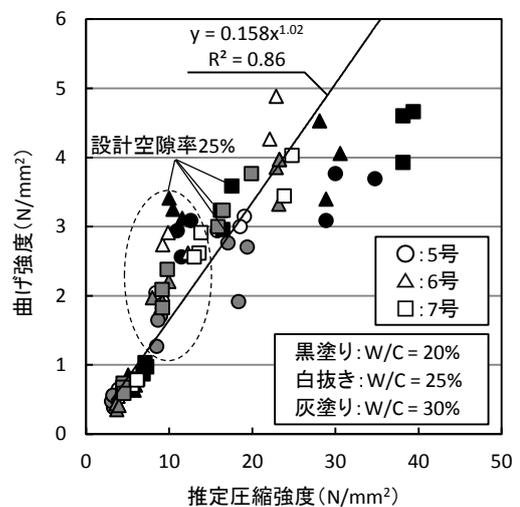


図-6 曲げ強度と推定圧縮強度の関係

が分かる。

図-7に推定圧縮強度に対する曲げ強度の比（＝曲げ強度/推定圧縮強度）を示す。図によれば、推定圧縮強度に対する曲げ強度の比は、水セメント比および骨材粒径によらず、空隙率25%程度で最大の値となった。これは、図-6に示す近似曲線における原点を通る傾き（＝推定圧縮強度に対する曲げ強度の比）の最大値を超えるような領域に、設計空隙率25%のデータが集中しているためと考えられる。また、圧縮強度に対する曲げ強度の比は、0.10～0.35（1/3～1/10）の範囲となった。コンクリート

の曲げ強度は、圧縮強度の 1/5~1/8 程度¹¹⁾とされているが、POC の曲げ強度は、推定圧縮強度の 1/3~1/10 程度になることが分かり、設計時に参考とし得る、POC における圧縮強度と曲げ強度のおおよその関係が分かった。

4. 結論

本研究では、管理用円柱供試体を用いた、POC の実施工における圧縮強度および曲げ強度の管理方法の可能性について実験的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 同一空隙率における POC の圧縮強度は、水セメント比が小さいほど、または骨材粒径が小さいほど、大きくなる。
- (2) 同一空隙率における管理用円柱供試体とコア供試体の圧縮強度は概ね等しいとみなせることから、実施現場での空隙率を計測できれば、管理用円柱供試体の圧縮強度と空隙率の関係式から、実構造物の POC の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (3) 同一空隙率における POC の曲げ強度は、概ね、水セメント比が小さいほど、または骨材粒径が小さいほど、大きくなる。
- (4) 曲げ強度と推定圧縮強度の関係は、累乗関数で近似できる。
- (5) POC の曲げ強度は、推定圧縮強度の 1/3~1/10 程度になることが分かり、POC における圧縮強度と曲げ強度のおおよその関係が分かった。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会中国支部ポーラスコンクリート委員会の共同実験の一環として行われた。

本研究を進めるにあたり、松尾拓哉君、花田晃典君、廣井隆行君、竹林光一君(いずれも広島工業大学卒業生)のご助力を得た。本研究費の一部は、2014 年度日本コンクリート工学会中部支部ポーラスコンクリート委員会助成費(研究担当責任者:平岩陸准教授・名城大学)によった。また、広島地区生コンクリート協同組合共同試験所からは角形鋼製型枠、株式会社フローリックからは高性能 AE 減水剤、太平洋セメント株式会社からはセメント、株式会社みどりからは骨材をそれぞれ提供して頂いた。ここに付記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.6
- 2) Hatanaka, S., Mishima, N., Maegawa, A. and Sakamoto, E.: Fundamental Study on Properties of Small Particle Size Porous Concrete, Journal of Advanced Concrete

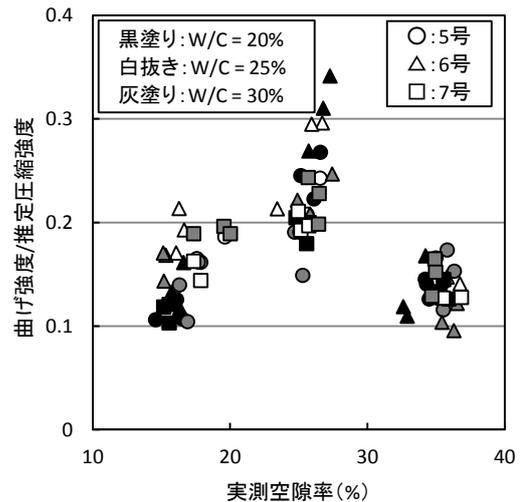


図-7 推定圧縮強度に対する曲げ強度の比

Technology, Vol.12, pp.24-33, Jan. 2014

- 3) 森鼻泰大, 中川武志, 三島直生, 畑中重光: 実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率および諸特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1481-1485, 2011.7
- 4) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成にむけて, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.30-37, 2011.4
- 5) 森鼻泰大, 中川武志, 三島直生, 畑中重光: 実施工におけるポーラスコンクリートの品質管理に関する一考察, 日本建築学会東海支部研究報告書, 第 49 号, pp.33-36, 2011.2
- 6) 湯浅幸久, 畑中重光, 三島直生, 前川明弘, 宮本高秀: ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号, pp.37-44, 2002.2
- 7) 玉井元治: 連続空隙を有する固化体の透水性, セメント技術年報, 第 42 巻, pp.591-594, 1988.12
- 8) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 594 号, pp.17-23, 2005.8
- 9) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之: ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.31-37, 2004.11
- 10) 梶尾聡, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆: 舗装用ポーラスコンクリートにおける空隙率と強度に関する研究, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, pp.84-85, 2012.5
- 11) 小野博宣ほか: 建築材料—その選択から施工まで—: 理工図書, pp.74-75, 2001.4