

# 供試体の高さ/直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

## INFLUENCE OF HEIGHT/DIAMETER RATIO OF SPECIMEN ON COMPRESSIVE STRENGTH OF POROUS CONCRETE

中川 武志\*<sup>1</sup>, 畑中 重光\*<sup>2</sup>, 三島 直生\*<sup>3</sup>

Takeshi NAKAGAWA, Shigemitsu HATANAKA and Naoki MISHIMA

Compressive strength of concrete is usually corrected to predict so called true uniaxial compressive strength when the value is measured with specimens having height/diameter ( $h/d$ ) of less than 2.0. As long as porous concrete is concerned, however, sufficient data is not obtained so far for the correction of the compressive strength. In the present study, a series of experiments was conducted to clarify the degree of influence of  $h/d$  ratio. As a result, it has been made clear that almost the same correction formula can be used for porous concrete as normal concrete. The proposed formula can be used also for core specimens from porous concrete structures to predict the relationships between the compressive strength and  $h/d$  of a specimen, as well as standard cylindrical specimens cast in molds.

**Keywords :** Porous concrete, Compressive stress, Height/Diameter ratio, Specimen, Core specimen

ポーラスコンクリート, 圧縮強度, 高さ/直径比, 供試体, コア供試体

### 1. はじめに

ポーラスコンクリートは、透水性、保水性、熱緩和特性など、環境にかかわる性能に対する期待が大きく、土木分野に加え、建物周囲の歩道、駐車場等への適用が進みつつある。ただし、比較的新しい技術であり、実施工時の品質管理のための評価指標や評価方法が整っていないとは言えないなど、検討すべき課題も少なくない。例えば、荷重外力の加わる部位に使用した場合、内部空隙の性状だけでなく、材料としての強度および耐久性も重要な評価指標となる。

ポーラスコンクリートの強度指標としては、これまで多くの研究で標準円柱供試体の圧縮強度が用いられているが、施工後の実部材内部の強度との関係が必ずしも明らかにされていない。また、ポーラスコンクリートの場合、実施工ではスラブ状に成型されることが多いため、実部材から採取できるコア供試体は、高さ  $h$  と直径  $d$  の比（以下  $h/d$  比）が 2.0 を下回ることも少なくない。

普通コンクリートの圧縮強度試験を行う場合、その供試体寸法は JIS A 1132 に定められており、標準的な円柱形状では供試体の高さ  $h$  が直径  $d$  の 2.0 倍程度であることとされている。また、供試体の  $h/d$  比が 2.0 から 5% 以上ずれる場合には、 $h/d$  比による影響を除くため、補正を行って標準供試体の値を推定することが求められる。

普通コンクリートについては、図 1 に示すような、供試体の  $h/d$  比の影響に関する既往の研究<sup>1)</sup>に基づき、JIS A 1107 に圧縮強度の補正係数が示されている。最近では、高強度コンクリートなど、より広範囲なコンクリートについての実験結果も報告されている<sup>2)5)</sup>。

しかし、ポーラスコンクリートにおいては、適用すべき補正係数が未だ提示されていないため、現状では、普通コンクリートの補正係数を使わざるを得ないが、その妥当性については不明である。

本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度の評価方法を確立するための一環として、圧縮強度に及ぼす供試体の  $h/d$  比の影響に関する一連の実験を行い、圧縮強度の補正係数について検討した。また、円柱型枠を使用した供試体とコア供試体の圧縮強度との違い<sup>6)8)</sup>についても検討した。

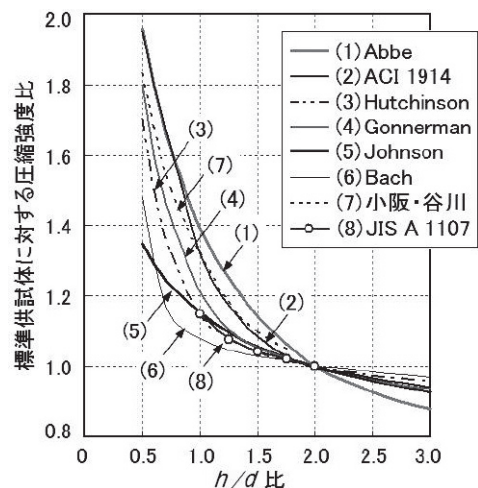


図 1 普通コンクリートにおける圧縮強度比と供試体の  $h/d$  比の関係<sup>1)</sup>

\*<sup>1</sup> (株)川島工業 専務取締役・博士(工学)  
 \*<sup>2</sup> 三重大学工学部建築学科 教授・工博  
 \*<sup>3</sup> 三重大学工学部建築学科 助教・博士(工学)

Exec. Dir., Kawashima Industry, Dr. Eng.  
 Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.  
 Assoc. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表 1 実験の要因と水準

要 因	水 準	
空隙率 (%)	15, 20, 30	(3水準)
高さ/直径比 $h/d^*$	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0	(6水準)
水セメント比 (%)	25, 30, 45	(3水準)

[注] \*: 円柱供試体の直径は100mmで一定。

表 2 ポーラスコンクリートの調合

設計空隙率 (%)	水セメント比 (%)	質 量				
		セメント ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	石灰粉 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	混和剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	砕石 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
15	30	449	-	134	0.39	1558
	25	400	-	99	1.39	1558
20	30	368	-	110	0.32	1558
	45	245	105	110	-	1558
30	30	206	-	61.5	0.18	1558

[注] 砕石は、6号(粒径5~13mm)を使用

表 3 使用材料

種 類	特 性
セメント	普通ポルトランドセメント 密度:3.15 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、比表面積:3150 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
骨 材	単粒度砕石6号 粒度範囲:5-13mm 表乾密度:2.72 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、実積率:57.3(%)、 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
混和剤	密度:1.05-1.09 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
混和材	石粉(石灰石微粉末) 密度:2.70 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、比表面積:4000 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

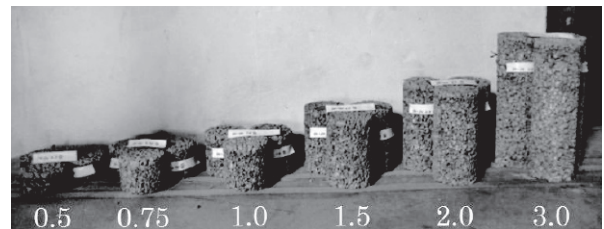


写真 1 作成した円柱供試体(数値は  $h/d$  比を示す)

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験の要因と水準

$h/d$  比の異なる円柱型枠を使用してポーラスコンクリート円柱供試体を作成し、硬化した後に、空隙率試験および圧縮強度試験を行った。

表 1 に実験の要因と水準を示す。空隙率を 3 水準、 $h/d$  比は 6 水準(供試体の直径は、100mm で一定)、水セメント比は 3 水準に変化させた。

実験に用いた調合表を表 2 に、使用した材料の諸元を表 3 に示す。砕石は建築外構、歩道等に使用されることが多い 6 号砕石(骨材粒径 5~13mm)とした。水セメント比 45% の場合には、所定のペーストのフロー値(190 程度)が得られるよう、石灰石微粉末を混和した。

### 2.2 供試体

ポーラスコンクリートの練混ぜは、一軸パン型ミキサ(容量 100L)を使用して、ペースト先練り方式とした。型枠には  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱型枠を用い、 $h/d=3$  の場合には、2 つの型枠を接続して使用した。打設は、所定の  $h/d$  比および設計空隙率に近づけるため、調合表から計算した質量を、 $h/d$  比に応じて、適宜突き棒による締固めを行いながら、表面振動機( $\phi 95\text{mm}$ 、電源 220V、60Hz、0.47A、3120/min、150W)を使用して、10 秒間締め固めた。脱型後は、材齢 27 日まで水中養生を行い、28 日目に圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験に際しては、供試体の両端に、硫黄キャッピングを行った。同一条件の供試体は、各 3 個作成した。写真 1 に、作成した円柱供試体(キャッピング前)を示す。

なお、供試体は円柱供試体を基本とするが、一部の条件(W/C=30%、空隙率 20%)において、現場打設したポーラスコンクリートからコア供試体采取了。

現場打設のポーラスコンクリートの練混ぜは、円柱供試体の作成と同時に、打設時の締固めには、プレートランマ(プレートサイズ 280×300mm、周波数 1.5Hz、起振力 4.9kN)を使用した。コアは、材齢 14 日目に採取し、端面を研磨し、空隙率を測定した後、

圧縮強度試験前に硫黄キャッピングを行った。コア供試体の直径は 93mm、 $h/d$  比の目標値は 0.75~2.25 の範囲である。

### 2.3 実験方法

粗骨材の密度、実積率の測定については、JIS A 1110(粗骨材の密度および吸水率試験方法)および JIS A 1104(骨材の単位体積質量および実積率試験方法)に準拠して行った。

練混ぜ時には、ペーストのフロー値<sup>9)</sup>を測定するとともに、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の供試体を 3 個ずつ作成し、圧縮試験を行った。

空隙率は、日本コンクリート工学学会の規準(案)<sup>10)</sup>に示された質量法により、全空隙率を測定した。

圧縮強度試験は、打設後 28~29 日に実施し、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準拠して行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 考察の手順

本報では、供試体の  $h/d$  比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を明らかにし、 $h/d=2$  の標準供試体の圧縮強度を推定するための補正係数を提示する。そのため、以下の手順で実験結果を考察する。

- 1) 圧縮強度、空隙率、供試体の  $h/d$  比の関係を整理し、その結果に基づき、空隙率ごとの圧縮強度- $h/d$  比関係を求める。
- 2) 上記の圧縮強度- $h/d$  比関係が、結合材強度(水セメント比)によってどの程度異なるのかを調べる。
- 3) 得られた圧縮強度- $h/d$  比関係から、標準供試体の圧縮強度を推定するための補正係数を求める。

### 3.2 圧縮強度と空隙率および供試体の $h/d$ 比の関係

図 2 に、水セメント比 30%における圧縮強度と質量法による全空隙率の関係を示す。なお、この段階では、供試体の  $h/d$  比による補正は行っていない。データは供試体全数から不適切と考えられるものを除いて示している。図中の近似曲線は、 $h/d$  比を考慮した結合

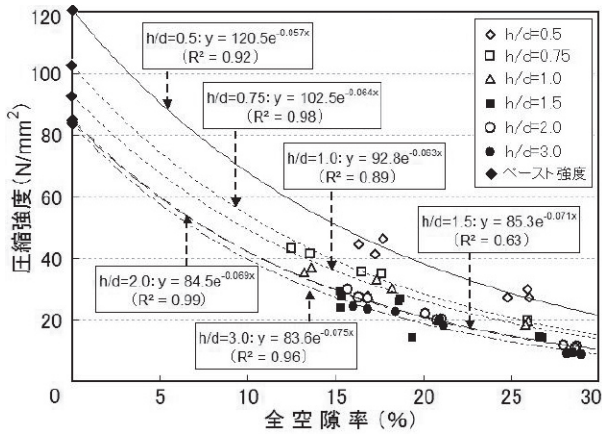


図2 圧縮強度と空隙率の関係(W/C=30%)

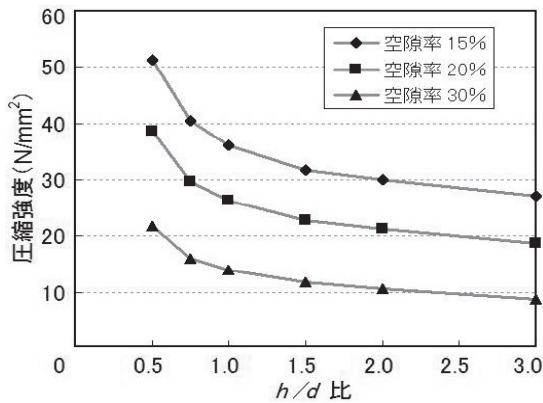


図3 圧縮強度比とh/d比の関係(W/C=30%)

材強度の値をy軸切片とした以下の指数関数<sup>1)</sup>で表したものである。なお、ペーストの圧縮強度については、野口らによる高強度コンクリートにおける補正データの研究<sup>3)</sup>を参考にして強度の補正を行っている。

$$y = a e^{-bx} \quad (1)$$

ここに、y: 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 x: 空隙率 (%)  
 a: 結合材強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 b: 実験定数

同図によれば、供試体の空隙率の実測値は設計空隙率からずれていることが多いが、h/d比ごとの近似曲線の形状はほぼ同じとみることができる。またh/d比が小さくなるほど、近似曲線が上方ヘシフトしていることがわかる。

### 3.3 圧縮強度比と供試体のh/d比の関係

空隙率一定の条件で、圧縮強度と供試体のh/d比との関係を検討するため、図2中に示した近似式を用いて空隙率の3水準(15%, 20%, 30%)における圧縮強度を算出し、圧縮強度とh/d比の関係を求めた。

図3によれば、h/d比が小さくなるにつれて、圧縮強度が増大する傾向が明瞭に表われている。これは、圧縮強度試験の際、供試体

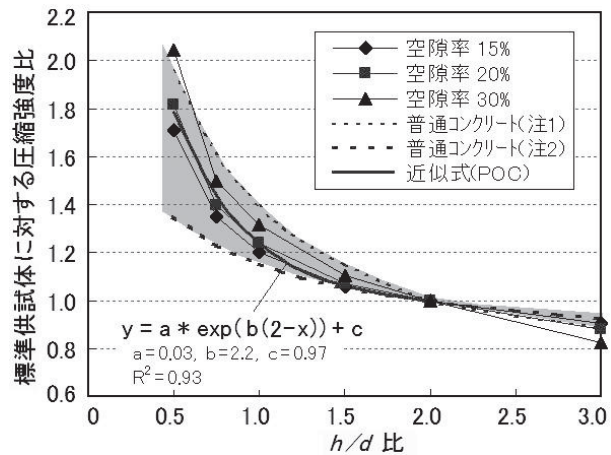


図4 標準供試体に対する圧縮強度比とh/d比の関係(W/C=30%)  
 [(注1): 図1中の(1), (注2): 図1中の(5)]

と載荷板との間に摩擦(以下、端面摩擦)が存在し、供試体の載荷軸と直交する方向の膨張に対して拘束力が働いたためであり、このメカニズムは普通コンクリートとほぼ同じと考えられる。

図4は、図3の結果に基づき、h/d=2.0の標準供試体の圧縮強度とh/d比との関係を示したものである。なお、図中には普通コンクリートに対する既往の関係式による範囲も併示してある。図4によれば、ポーラスコンクリートでは、空隙率が大きくなると圧縮強度比が若干大きくなる傾向がみられる。ただし、その影響の程度は、さほど大きいものではないと判断し、本実験の範囲(空隙率が15%~30%)のデータを、図4中に示した平均的な曲線(近似式)で表すこととした。すなわち、

$$y = a \exp \{ b(2-x) \} + c \quad (2)$$

ここに、y: 標準供試体に対する圧縮強度比

x: 供試体のh/d比

a,b,c: 定数, a=0.03, b=2.2, c=0.97

なお、cは、h/d=2.0において、圧縮強度比1.0とするための調整項であり、c=1-aである。

### 3.4 結合材強度の影響

図5は、図3と同様に、水セメント比の3水準(25%, 30%, 45%)における空隙率と圧縮強度の関係の近似式を用いて、空隙率20%における圧縮強度を算出し、圧縮強度とh/d比の関係を示したものである。図によれば、いずれの水セメント比においても、データはおおむね一つの曲線上に乗っており、近似式は図4におけるW/C=30%の近似式とほぼ一致した。すなわち、W/C=25~45%に関しては、圧縮強度比に対する水セメント比の影響は小さいとみてよいと考えられる。

すべての実験結果について、式(2)を用いて、h/d=2.0の場合の圧縮強度を推定し、各水セメント比のペースト強度で正規化して求めた圧縮強度比と全空隙率の関係を図6に示す。図によれば、いずれの水セメント比においても、実験結果はおおむね一つの曲線上に乗っているとみることができる。すなわち、圧縮強度比-空隙率関係



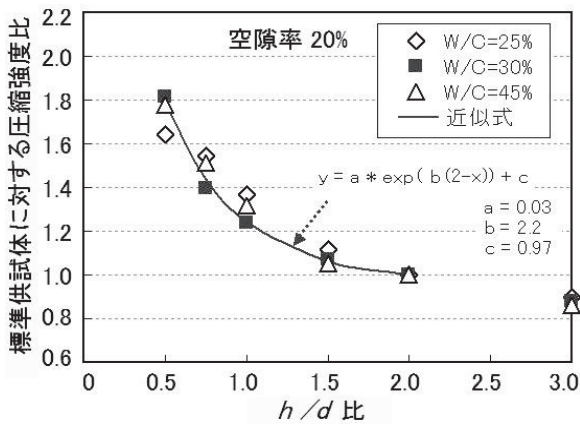


図5 圧縮強度比と  $h/d$  比の関係(水セメント比の影響)

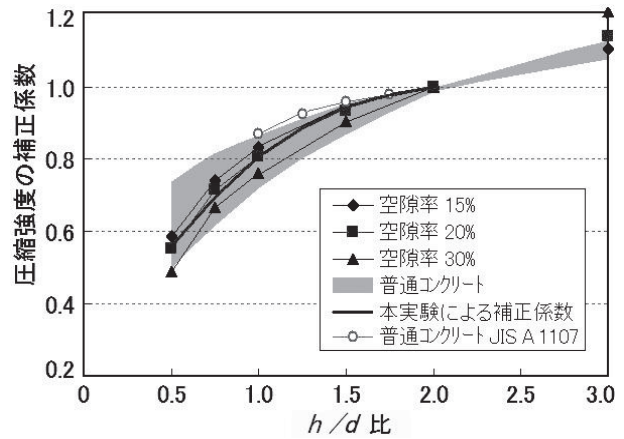


図7 圧縮強度の補正係数と  $h/d$  比の関係

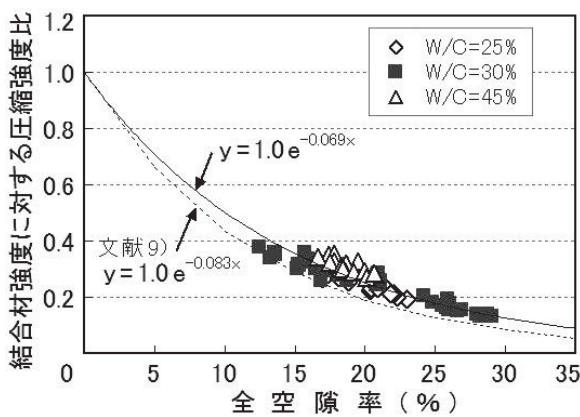


図6 圧縮強度比と全空隙率の関係(水セメント比の影響)<sup>9)</sup>

表4 ポーラスコンクリートの圧縮強度補正係数 (JIS A 1107 との比較)

高さ/直径比 $h/d$	普通コンクリートの補正係数(JIS A 1107)※	ポーラスコンクリートの補正係数(本実験)
0.50	-	0.56
0.75	-	0.69
1.00	0.87	0.81
1.25	0.93	0.89
1.50	0.96	0.94
1.75	0.98	0.98
2.00	1.00	1.00

※ 表中に示す補正係数は、補正後の値が  $40\text{N}/\text{mm}^2$  以下のコンクリートに適用する。また、 $h/d$  がこの表に表す値の間にある場合、補正係数は補間して求める。

からみても、 $W/C=25\sim 45\%$  に関しては、圧縮強度比に対する結合材強度の影響は小さいとみてよいと考えられる。

### 3.5 供試体の $h/d$ 比に関する圧縮強度補正係数の推定

図4のデータに基づいて求めたポーラスコンクリートの圧縮強度の補正係数と  $h/d$  比の関係を図7に示す。補正係数は式(2)で得られる値の逆数として得られる。したがって、供試体の  $h/d$  比が0.5から2.0の範囲の圧縮強度補正係数は、式(3)により得ることができる。

$$n = 1 / [a \exp \{b(2-x)\} + c] \quad (3)$$

ここに、 $n$ : 圧縮強度補正係数

$x$ : 供試体の  $h/d$  比 ( $0.5 \leq h/d \leq 2.0$ )

$a, b, c$ : 実験定数,  $a = 0.03, b = 2.2, c = 0.97$

この式によれば、圧縮強度補正係数は、表4に示すように、 $h/d = 1.5$  において0.94程度、 $h/d = 1.0$  において0.81程度となり、JIS A 1107の値と比較するとやや小さい。

今回の実験の範囲では、水セメント比( $W/C=25\sim 45\%$ )および空隙率(15%~30%)の影響は比較的小さく、圧縮強度に対する供試体の  $h/d$  比の影響は、上述の式により推定できると考えられる。ただし、上記の要因以外に、空隙率の分布、骨材粒径<sup>11)</sup>等も圧縮強度と  $h/d$  比の関係に影響することが考えられるため、今後、確認することが望ましい。

### 3.6 円柱供試体とコア供試体の比較

以上で示したデータは、型枠に打ち込んだ円柱供試体による結果であるが、コア供試体の圧縮強度についても供試体の  $h/d$  比の影響を整理した。図8に、コア供試体(6号砕石、振動締固め、設計空隙率20%、水セメント比30%)から得られた圧縮強度と供試体の  $h/d$  比の関係を示す。コア供試体の圧縮強度は、供試体全数の結果である。なお、折れ線は、円柱供試体に対して得られた式(2)に、ペースト強度( $87.2\text{N}/\text{mm}^2$ )を入力して算出した値である。

コア供試体と円柱供試体のデータとを比較すると、ほぼ同様の傾向が見られる。なお、コア供試体の結果は、圧縮強度-空隙率の関係についての近似曲線を求め、空隙率20%における圧縮強度を推定したものである。

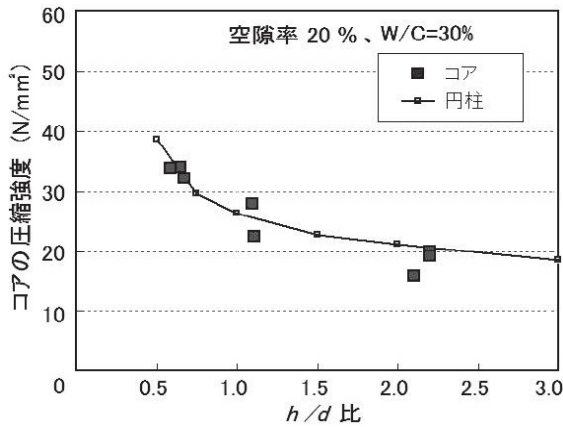


図8 コア供試体における圧縮強度と  $h/d$  比の関係  
(折れ線は円柱供試体)

#### 4. まとめ

ポーラスコンクリートの圧縮強度に対する供試体の高さ／直径比( $h/d$ 比)の影響に関する実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) ポーラスコンクリートについても普通コンクリートの場合と同様に、供試体の  $h/d$  比が小さくなると、得られる圧縮強度が上昇し、その傾向は普通コンクリートとほぼ同様であった。
- 2) 本実験の結果、供試体の  $h/d$  比の影響に関する圧縮強度の補正係数は、 $h/d=0.5\sim 2.0$  の範囲において、式(3)により求めることができる。なお、式(3)の適用範囲は、 $W/C=25\sim 45\%$ 、空隙率  $15\sim 30\%$  である。式(3)によれば、圧縮強度の補正係数は、 $h/d = 1.5$  において 0.94 程度、 $h/d=1.0$  において 0.81 程度であり、JIS A 1107 に示された補正係数より若干小さい。
- 3) 供試体の  $h/d$  比の影響は、円柱供試体とコア供試体でほぼ同じ式を用いて補正することができると考えられる。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度日本学術振興会科学研究補助金・基盤研究(B)(研究代表者:畑中重光)によった。また、実験に際して、森鼻泰大君(三重大学大学院工学部建築学科)、福田一真君(三重大学卒業生)にご協力いただいた。付記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 谷川恭雄ほか:改訂版 建築材料—その選択から施工まで, pp.63-98, 理工図書, 1989.
- 2) 赤萩満, 阿部道彦ほか: コンクリートコアの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ/直径比の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.769-770, 2008.9
- 3) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp.19-28, 1995.7
- 4) 奥野すみれ, 江口清: 小径コアによる低強度コンクリートの圧縮強度の推定に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.773-774, 2008.9
- 5) 鈴木澄江, 伊藤康司, 鹿毛忠継, 瀬古繁喜: 高強度コンクリートのコア供試体における高さ直径比が圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.397-402, 2009.
- 6) 平岩陸, 田中清人, 谷川恭雄, 森博嗣: ポーラスコンクリートの調査設計法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.121-126, 2001.
- 7) 越健, 島崎馨, 国枝稔, 六郷恵哲: ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.249-264, 1999.
- 8) 大谷俊浩, 村上聖ほか: ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.298-303, 2002.
- 9) 湯浅幸久, 別府智子, 宮本高秀, 畑中重光: セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締め固め性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.133-138, 2001.7
- 10) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会: 同報告書, 日本コンクリート工学協会, 2003.
- 11) 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の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.594, pp.17-23, 2005.8 など

(2009年10月27日原稿受理, 2010年1月8日採用決定)