

論文 再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす締固め方法の影響

黒田 萌^{*1}・畑中 重光^{*2}・三島 直生^{*3}・前川 明弘^{*4}

要旨: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす締固め方法および骨材種類の影響を確認するための実験を行った。その結果、締固め方法や骨材種類によって骨材の角欠けの発生量は異なるものの、本実験の範囲では、締固め方法はポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係には明確な影響を及ぼさないという結果が得られた。また、骨材粒子の配列を斜方格子と仮定して骨材強度を考慮したポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係を推定する手法を試みた。

キーワード: ポーラスコンクリート, 再生骨材, 圧縮強度, 締固め方法, 角欠け

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、一般に構造耐力を期待して用いられることが少ないため、鉄筋コンクリート構造物の解体時に排出される再生骨材（図表中では、再生と記す）の利用先として有望であり、既に一部でポーラスコンクリートに再生骨材を利用するための研究が進められている¹⁾。

筆者らは、ポーラスコンクリートに再生骨材を利用するための研究を進めており、前報²⁾で再生骨材の混入率を変化させたポーラスコンクリートを作製し、その圧縮強度-空隙率関係を比較した。その結果から、ポーラスコンクリートを作製する際の締固め時に加える圧力および加速度といったエネルギーの違いが、骨材の角欠け量に影響を与えており、骨材の角欠けが圧縮強度に影響を及ぼすという仮説をたてた（図-1）。

本研究では、まず締固め方法によって発生する骨材の角欠け量の違いを確認し（実験Ⅰ）、次に骨材の角欠けが圧縮強度に及ぼす影響を確認するための実験（実験Ⅱ）を行った。さらに、実験結果に基づいて再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係曲線の推

定手法に関する検討を行った。

2. 締固め方法による角欠け量の確認（実験Ⅰ）

2.1 実験概要

角欠けの発生の有無を目視によって確認できるように塗装した骨材のみを、φ100×200（mm）の円柱型枠に投入し締固めを行い、締固めによる角欠けの発生量を測定する実験を行った。

実験の要因と水準および使用材料を表-1 および表-2 に示す。再生骨材は、目標強度を 20N/mm² として製造した原コンクリートを破砕処理し、ふるいにより所定の粒径に分級して作製した。

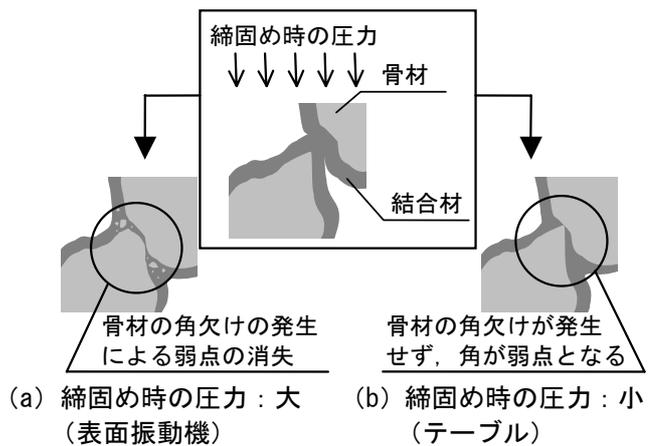


図-1 締固めによる骨材接点の状況の変化（予想）

*1 竹本油脂（株）（正会員）

*2 三重大学大学院 工学研究科教授 工博（正会員）

*3 三重大学大学院 工学研究科助教 博士(工学)（正会員）

*4 三重県科学技術振興センター（正会員）

砕石および再生骨材は赤色のラッカー塗料で表面を塗装した。骨材を円柱型枠に投入し、表面振動機（図表中では、表面と記す）およびテーブルバイブレータ（図表中では、テーブルと記す）で10秒間締固めを行った。テーブルバイブレータで締固めを行う際には、試料上部に所定の質量の重りを乗せた。重りの質量は、既往の研究³⁾に準じた4kg、表面振動機と同程度の質量である12kg、試験装置の最大質量である15kgとした。

締固めを行った後、写真-1で示すような角欠けが発生した骨材の重量を測定した。角欠けが発生した骨材とは、10mm²程度以上骨材の着色部が欠損しているものと定義した。

2.2 実験結果

各条件における角欠けの発生率を、図-2に示す。図-2より、全ての骨材において表面振動機の場合に角欠けの発生率が高いということが確認された。これは、表面振動機の方が骨材に与えるエネルギーが大きいためと考えられる。振動の影響が及ぶ範囲は、表面振動機は上層付近、テーブルバイブレータは全層と考えられる⁴⁾た

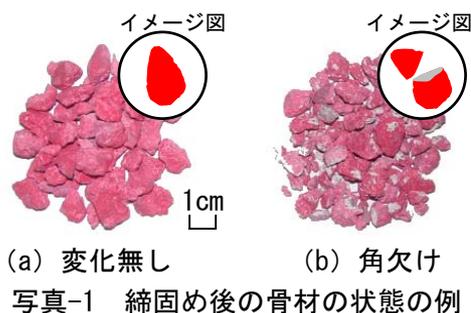
表-1 要因と水準（実験Ⅰ）

要因		水準
骨材	種類	砕石, 再生骨材
	粒径 (mm)	5-10, 10-13
締固め方法		表面振動機, テーブルバイブレータ (4, 12, 15kg)

表-2 使用材料（実験Ⅰ）

骨材種類	粒径 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	原コン強度* (N/mm ²)
砕石	5-10	2.4	55.1	—
	10-13	2.5	55.7	—
再生	5-10	2.2	59.1	21
	10-13	2.2	60.7	21

* : 材齢 28 日における原コンクリート強度



め、実際の影響範囲のみを考えると、角欠けの発生率の差はさらに大きいと考えられる。

また、砕石と再生骨材を比べると、再生骨材の方が角欠け量は多い傾向であった。この原因としては、再生骨材は低強度なモルタル分が付着しており、この部分が破壊しているためだと考えられる。

実験Ⅰでは結合材を用いず粗骨材だけで検討を行っているが、実際のポーラスコンクリートの場合にも同様の傾向が見られると考えられる。

3. 締固め方法が異なるポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係（実験Ⅱ）

実験Ⅰによって、締固め方法により骨材の角欠けの発生率が異なることが確認された。実験Ⅱでは、骨材の角欠けが圧縮強度-空隙率関係に及ぼす影響を検討する。

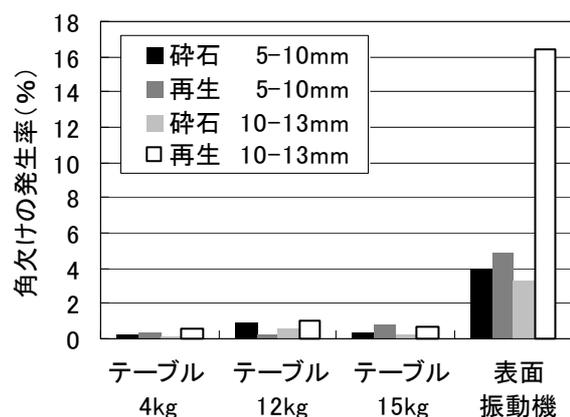


図-2 角欠けの発生率

表-3 要因と水準（実験Ⅱ）

要因	水準
骨材種類	砕石, 再生骨材
目標空隙率 (%)	10, 20, 30
締固め方法	表面振動機, テーブルバイブレータ (12kg)

表-4 使用材料（実験Ⅱ）

種類	特性
セメント	密度 : 3.16 (g/cm ³)
砕石 6号	表乾密度 : 2.56 (g/cm ³)
	実積率 : 56.7 (%)
再生骨材	表乾密度 : 2.40 (g/cm ³)
	実積率 : 58.5 (%)
	吸水率 : 5.73 (%)
	原コン強度* : 23.3 (N/mm ²)

* : 材齢 28 日における原コンクリート強度

3.1 実験概要

実験の要因と水準および使用材料を表-3 および表-4 に示す。再生骨材の製造方法は実験 I と同じである。ポーラスコンクリートの調合表を表-5 に示す。結合材の水セメント比は 25%、結合材の目標フロー値は 190mm で一定とした。ポーラスコンクリートの設計空隙率は、試練りによりあらかじめ締固め方法ごとの設計空隙率と実測空隙率の差を確認して、表-5 に示す目標空隙率が得られるように定めた。

ポーラスコンクリートの練混ぜは、ペースト先練りとし、ペーストフロー値が設定フロー値であることを確認した後、骨材を投入した。高さを約 10cm 延長した円柱型枠 ($\phi 100\text{mm}$) に設計空隙率分の質量の試料を投入し、表面振動機とテーブルバイブレータを用い、それぞれ 10 秒間締固めを行った。テーブルバイブレータで締固めを行う際には、試料上部に 12kg の重りを乗せた。供試体は、材齢 2 日で脱型を行い、その後、水中養生を行った。

表面振動機による締固めを行った場合には、上下層で空隙率に差が生じる⁵⁾ため、角欠けの発生量も上下層で異なると考え、各水準につき 7 本作製した円柱供試体 [$\phi 100 \times 200$ (mm)] のうち 4 本を上下 2 層に切断して各試験に供した。

空隙率は水中養生期間に測定した。上下層に切断する供試体は、コンクリートカッターによって上下層に 2 分割し、上下層の空隙率をそれぞれ測定した。その後、セメントペーストを用

いてキャッピングし、材齢 28 日で圧縮強度を測定した。

3.2 実験結果および考察

(a) 圧縮強度-空隙率関係

実験の結果から得られたポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係を図-3 に示す。ただし、図-3 (a) は上下層に切断して測定したもの ($h/d \div 1$) で、図-3 (b) は切断していないもの ($h/d \div 2$) の測定結果である。また、図-3 (b) には既往の研究結果⁶⁾から得られた推定式も併示した。推定式における結合材強度には、実験によって得られた結合材強度 (132N/mm^2) を用いた。

図-3 より、圧縮強度-空隙率関係は締固め方法および圧縮強度の測定位置によらず、骨材種類ごとに一本の曲線で近似できることが明らかとなった。また、締固め時に発生すると考えられる骨材の角欠けの影響は、明確には確認されなかった。

また、碎石を用いたポーラスコンクリートよりも再生骨材を用いたポーラスコンクリートの方が、同じ空隙率において圧縮強度が低くなる傾向があり、その差は高空隙率になるほど小さくなっている。これは、既往の研究¹⁾と同様の傾向で、高空隙率の供試体では結合材量が少ないため結合材部分の破壊が先行し、骨材強度の影響を受けにくいためだと考えられる。

(b) 空隙率の分布

図-4 に、上下層の空隙率の分布を示す。同じ

表-5 ポーラスコンクリートの調合

骨材種類	締固め方法	目標空隙率 (%)	設計空隙率 (%)	W/C (%)	質量 (kg/m ³)				SP/C (%)	
					W	C	G	再生骨材 (mm)		
								5-10		10-13
碎石	表面振動機・テーブルバイブレータ	10	5	25	169.3	677.3	1530.9	0	0	0.48
		20	12		138.4	553.5				0.48
		30	25		80.9	323.6				0.47
再生骨材	表面振動機	10	10	25	139.3	557.1	0	638.2	765.8	0.46
		20	20		95.1	380.2				
		30	30		50.8	203.4				
	テーブルバイブレータ	10	5		161.4	645.5				0.45
		20	12		130.4	521.7				
		30	25		72.9	291.8				

注) 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

供試体の上層と下層では空隙率が異なり、その差は表面振動機による締固めを行ったものの方が大きい。この原因の1つとして、骨材に角欠けが生じることで骨材の実積率が上がった⁵⁾ことが考えられる。

図-5には、全層 ($h/d \div 2$) で測定した圧縮強度と上層および下層 ($h/d \div 1$) で測定した圧縮強度の関係を、各水準における平均として締固め方法を区別せずに示す。ここで、分割した供試体の分割前の空隙率と、分割していない供試体の空隙率の差は最大でも3.6%であった。また、供試体高さの違いによる圧縮強度への影響については考慮していない (JIS A 1107 に準じた補正係数は最低で0.89)。図-5より、全層の圧縮強度は下層の圧縮強度と同程度となっていることがわかる。このことから、締固め方法により上下層の空隙率に分布が生じると考えられる円柱試験体で圧縮強度を測定する場合、測定される圧

縮強度は、供試体の最高空隙率部分の空隙率に依存している⁴⁾と言える。

4. 骨材強度を考慮した格子モデルによる圧縮強度-空隙率関係の推定

これまでに、ポーラスコンクリートの各種特性を議論する際に幾何学的な格子モデルを用いた研究がいくつか報告されている^{たとえば7)}。

筆者らは既往の研究⁸⁾において、ポーラスコンクリートの幾何学モデルとして、斜方格子に配列された理想球 (半径: r) を骨材と仮定し、その周りに結合材 (結合材厚さ: t) が被覆しているという単純な幾何学モデルを提示した。ここでは、圧縮力と直交方向の最小有効断面での圧縮破壊のみを考慮することにより、簡易に圧縮強度-空隙率関係が推定できることを報告している。なお、骨材配列パターンとして斜方格子 [図-6 (a)] を選定した主な理由は、実積率

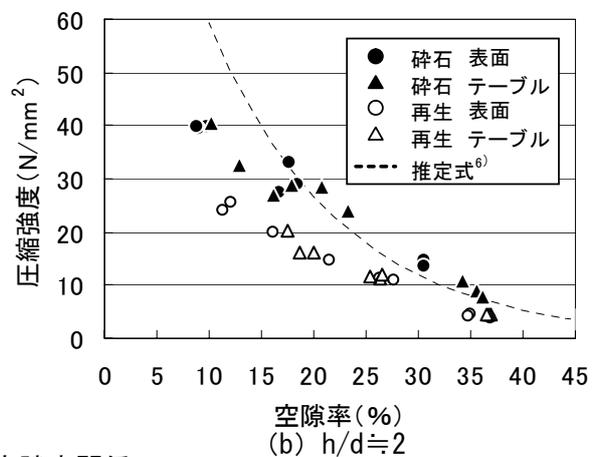
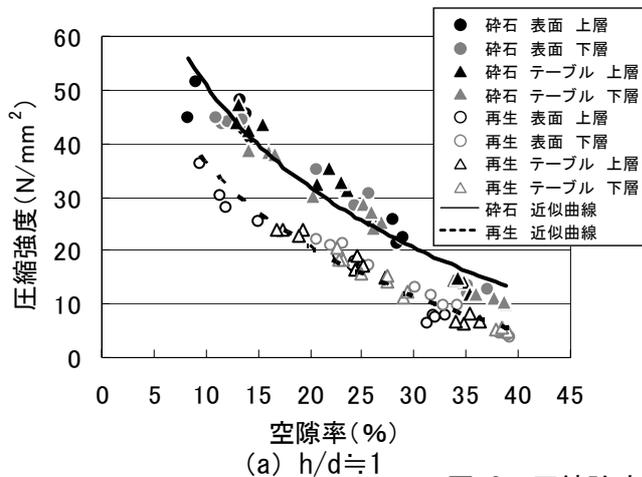


図-3 圧縮強度-空隙率関係

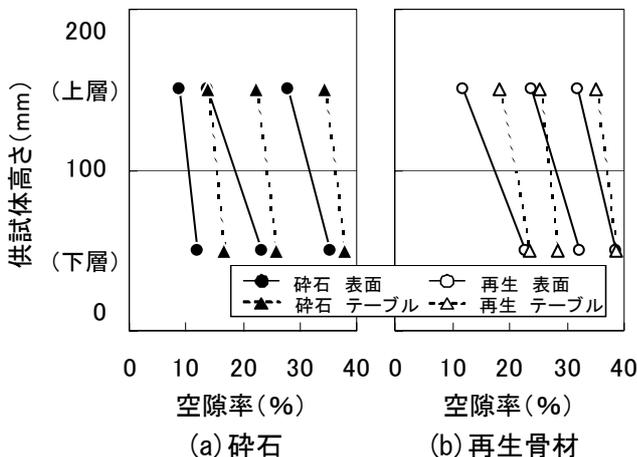


図-4 上下層の空隙率の分布

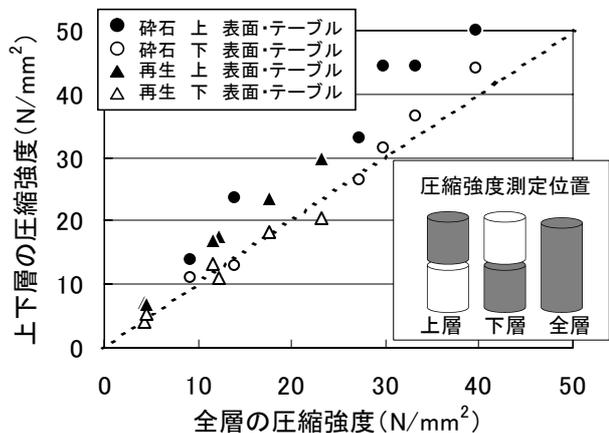


図-5 上下層と全層の圧縮強度比較

が理想球のそれと近くなる⁹⁾からである。

本節では、上記の幾何学モデルに結合材および骨材強度の影響を考慮し、ポーラスコンクリートの圧縮強度を推定することを試みた。

4.1 骨材強度の影響を考慮したモデル

図-6 (b) に示すように、単位格子の断面は、格子上面からの高さ x により異なる。まず、第1ステップとして単純に、強度に複合則が成り立つと仮定する。すなわち、 x の位置における断面の骨材面積比と結合材面積比に、各材料強度（骨材強度： $F_A=15\text{N/mm}^2$ ，結合材強度： $F_B=120\text{N/mm}^2$ ）をそれぞれ乗じて加えたものを、その断面の圧縮強度 [$F(x)$] と仮定した。この時、各材料の応力-ひずみ関係は、図-6 (c) の様に仮定したことになる。

また、単位格子全体における圧縮強度 (F) には、基本的に、各断面の圧縮強度 [$F(x)$] の最小値を用いるものとする。

この場合、圧縮強度は式 (1) および式 (2) で求められ、それらの計算結果は図-7 のようになる。

$$F(x) = \frac{S_A(x)F_A + S_B(x)F_B}{2\sqrt{3}r^2} \quad (1)$$

$$F = \text{MIN}\{F(x)\} \quad (2)$$

ここに、 $S_A(x)$ ：断面 x での骨材面積 (mm^2)

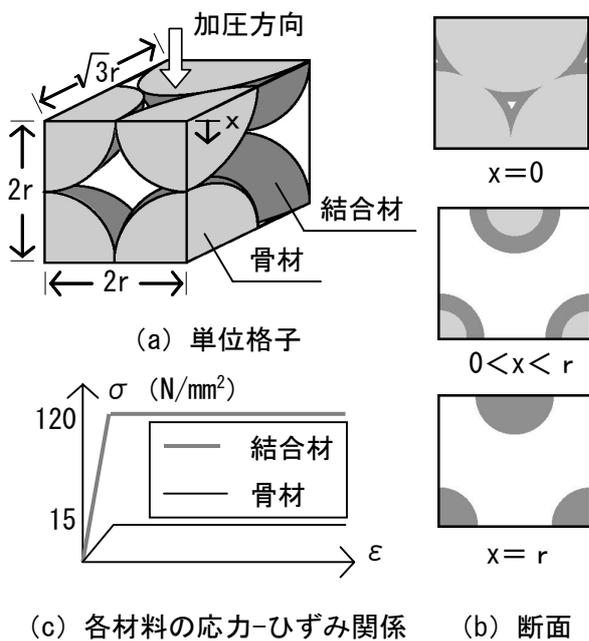


図-6 斜方格子

$S_B(x)$ ：断面 x での結合材面積 (mm^2)

F_A ：骨材強度 (N/mm^2)

F_B ：結合材強度 (N/mm^2)

$F(x)$ ：断面 x の圧縮強度 (N/mm^2)

F ：単位格子の圧縮強度 (N/mm^2)

r ：球の半径 (mm)

図-7 には $x=0$ および $x=r$ の計算値しか表示していないが、これは $0 < x < r$ において $F(x) > F(0)$ または $F(x) > F(r)$ であったためである。

図-7 より、圧縮強度が最小となる断面 x は空隙率と骨材強度によって変化することが示された。また、各材料の強度の違いを考慮することで、低空隙率側では骨材破壊、高空隙率側では結合材破壊という骨材強度を考慮した複雑なポーラスコンクリートの破壊形態を、比較的簡便なモデル化により表現することができる可能性がある。

ただし、ここで仮定した骨材および結合材の材料特性は、図-6 (c) に示すように実際のものとは一部異なる。また、本報告は、骨材の配列

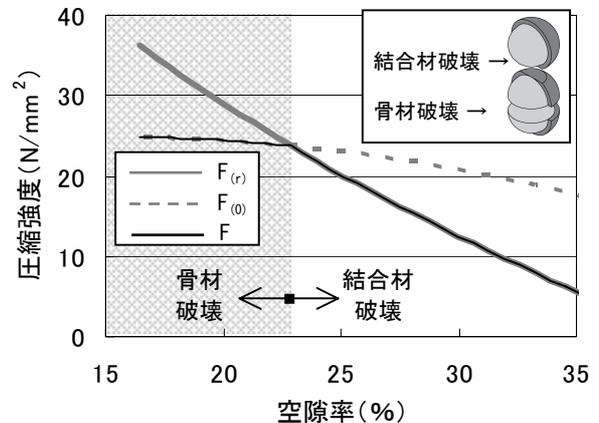


図-7 圧縮強度-空隙率関係

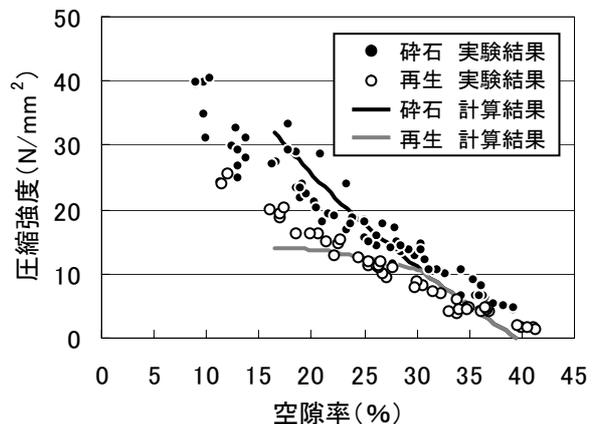


図-8 実験値と計算値の比較

という幾何学形状だけから決まる圧縮力と直交方向の最小有効断面積とポーラスコンクリートの圧縮強度との相関関係について検討した段階であり、現実の破壊メカニズム（破壊モード）を再現したより汎用性のあるモデル化については今後の検討課題となる。

4.2 実験結果との比較

上記モデルによる計算結果と実験結果 [文献2)の結果も含む]を比較したものを図-8に示す。なお、ここでは、各材料強度の影響を考慮するため、骨材強度 (F_A) および結合材強度 (F_B) にそれぞれ係数 α , β を乗じることとした。図-8の計算結果は、 $\alpha=0.2$, $\beta=0.8$ とし、碎石の強度は結合材と同じ⁶⁾ 132N/mm^2 , 再生骨材の強度は原コンクリート強度である 23N/mm^2 と仮定したものである。この計算例のように、骨材強度および結合材強度に、ある影響係数を乗じることによって、比較的単純な斜方格子モデルにより、ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係を表現・推定できる可能性が示唆されたといえる。

5. まとめ

本実験の結果から、以下の知見が得られた。

- 1) ポーラスコンクリートの締固め時には粗骨材の角欠けが発生し、その角欠け量は締固め方法および骨材強度によって異なる。
- 2) 角欠けは空隙率には影響するが、圧縮強度-空隙率関係には影響せず、圧縮強度-空隙率関係は骨材強度ごとにほぼ一本の曲線で近似できる。
- 3) 骨材強度の異なるポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係を、単純な斜方格子モデルを用いて推定できる可能性を示した。

[謝辞]

本実験に際し、(株)大栄工業および三重大学工学部建築学科畑中研究室の諸氏のご助力を得た。また、本研究費の一部は、平成18,19年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤B(2)(研究代表者:畑中重光)および財団法人トステム

建材産業振興財団助成金(代表:黒田萌)によった。付記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 畑中重光, 湯浅幸久, 三島直生: 再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第570号, pp.31-36, 2003.8
- 2) 黒田萌, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす再生骨材混入率の影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集(関東), pp.1015-1016, 2006
- 3) 梶尾聡, 鶴沢正美, 森下重和: ポーラスモルタルの配合と特性に関する研究, 第59回セメント技術大会講演要旨, pp.220-221, 2005
- 4) 前川明弘, 山本晃, 三島直生, 畑中重光: 小粒径ポーラスコンクリートの各種特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, No.28, pp.1397-1402, 2006
- 5) 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
- 6) 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
- 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42, pp.591-594, S.63
- 8) 前川明弘, 黒田萌, 湯浅幸久, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に関する実験とそのモデル化, 東海支部研究報告集, 第45号, pp.73-76, 2007.2
- 9) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宣之, 平居孝之: 理想球形骨材によるポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度理論に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第586号, pp.7-13, 2004.12