

論文 ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響

湯浅 幸久^{*1}・畑中 重光^{*2}・三島 直生^{*3}・村尾 健^{*4}

要旨：ポーラスコンクリートの本来持つ機能を活かすには、連続した空隙を確保し、同時に必要とされる強度を持つことが重要とされる。本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係に影響を及ぼすと考えられる結合材強度の違いについて実験的に検討を行った。その結果、結合材強度は圧縮強度と空隙率の関係を決定づける要因の一つであることがわかった。また、圧縮強度と空隙率の関係は指数関数で近似することができることを示し、結合材強度および全空隙率または連続空隙率からポーラスコンクリートの圧縮強度を推定する式を提案した。

キーワード：ポーラスコンクリート、圧縮強度、空隙率、結合材強度

1. はじめに

環境負荷低減型コンクリートの一種であるポーラスコンクリートの研究が本格化して十数年になる。これまでにポーラスコンクリートの物性や適用性に関する様々な研究が行われてきた¹⁾。ポーラスコンクリートが本来持つべき透水性、吸音性等の機能を十分に活かすためには、それぞれの使用目的に合った空隙率を確保しつつ必要とされる強度を確保することが重要となる²⁾。

しかし、強度をはじめとする諸性状に対する影響要因の整理が進んでいないため、適切な施工条件が体系的に整理されるには至っていないのが現状である。このため、強度をはじめとする各種性能が、安定しないまま使用されているという事実もあり、製造技術の信頼性の確保が基本的かつ重要課題として残されている。

これに対して本研究では、ポーラスコンクリートの製造・施工条件の確立を目指した取り組みの一つとして、ポーラスコンクリートの設計上不可欠となる圧縮強度推定式の整備を試みている。

本報では、提案したポーラスコンクリートの

圧縮強度－空隙率関係曲線に及ぼす結合材強度の影響について検討を行った。

2. 既往の研究と本研究の関係

これまでに、ポーラスコンクリートの強度を支配する要因として、空隙率³⁾、水セメント比²⁾、骨材粒径⁴⁾、締固め方法⁵⁾、結合材強度⁶⁾などの影響に関する基礎的な研究結果が報告されている。表-1にポーラスコンクリートの圧縮強度の影響要因に関する既往の研究結果を示す。

筆者らは既に、同一強度の結合材を用いて振動締固めにより適切に施工されたポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係が一般の脆性多孔材料に用いられているような指数関数で近似されることを示した⁷⁾。図-1は、ポーラスコンクリートの強度性能に与える諸要因の影響を概念的を示したものである⁷⁾。同図は、ポーラスコンクリートの強度性能を向上させるためには、フロー値の最適化とペーストの高強度化が重要であり、締固めの程度およびペースト量の多少によっては圧縮強度と空隙率の関係は変化しないことを示している。

*1 三重県科学技術振興センター 工業研究部 博士(工学) (正会員)

*2 三重大学工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 三重大学工学部建築学科助手 博士(工学) (正会員)

*4 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 (正会員)

表-1 ポーラスコンクリート圧縮強度に影響を及ぼす要因

要因	影響	文献番号
空隙率	空隙率が大きいほど圧縮強度は小さくなる。	3) 他
結合材強度 (水セメント比)	結合材強度が大きいほど圧縮強度が大きくなる。	2)
骨材粒径	均一な粒径の場合、粒径が小さくなるほど圧縮強度は大きくなるが、これは結合材の膜厚が関係していると考えられる。	4)
骨材強度	骨材破壊が発生する範囲において圧縮強度-空隙率関係は低強度側へシフトする。	5), 8)
施工方法	振動締固めを行った場合に、同一空隙率における圧縮強度は大きくなる傾向がある。	6)

さらに、ポーラスコンクリートに対する再生骨材の適用性に関する研究からは、上記の圧縮強度と空隙率の関係に、粗骨材強度が影響していることを明らかにした。図-2 に、粗骨材として碎石と低強度再生骨材を用いた場合のポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係を示す⁸⁾。同図からは、再生骨材の破壊が発生する領域において、圧縮強度と空隙率の関係曲線が低強度側へシフトする傾向がわかる。この他に、粗骨材形状の違いによる実積率の変化は、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係にはほとんど影響せず、同一曲線上を推移することを報告した⁸⁾。

本報では、既報^{7), 8)}と同一な材料および製造方法を用いて、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす結合材強度の影響について検討を行う。

3. 実験概要

3.1 実験の要因と水準

表-2 に実験の要因と水準を示す。結合材強度の違いの影響を把握するため、結合材の圧縮強度を 4 水準〔目標圧縮強度：30, 70, 110, 140 (N/mm²)〕とした。また、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係を得るため、各結合材強度ごとにそれぞれ目標空隙率を 15, 20, 25, 30, 35%の 5 水準に設定したポーラスコンクリートを製造した。

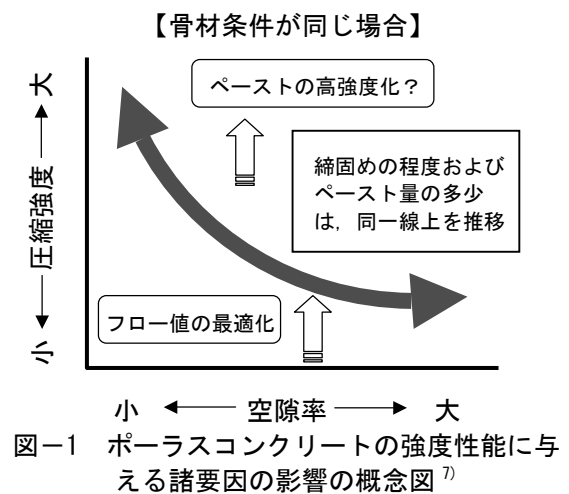


図-1 ポーラスコンクリートの強度性能に与える諸要因の影響の概念図⁷⁾

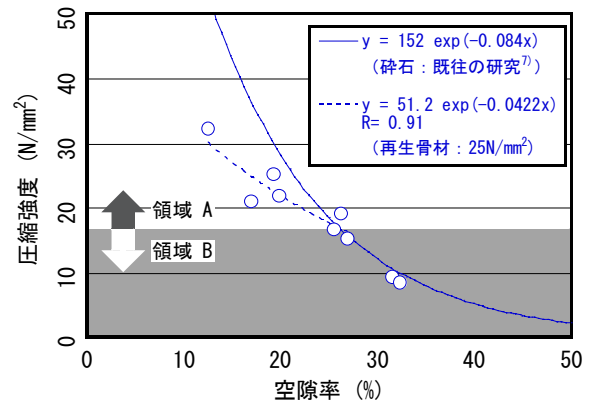


図-2 圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす粗骨材強度の影響⁸⁾
(原コンクリート強度：25 N/mm²)

3.2 使用材料

使用した材料の種類と特性値を表-3 に示す。セメントには、比表面積等の物理特性が安定して供給されるセメント協会製研究用セメントを使用し、セメント粒子を十分に分散させて、安定した結合材ペーストの流動性を得るために、

ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を混和剤として使用した。混和材には、結合材強度を下げることを目的としてフライアッシュ I 種を使用した。粗骨材には単粒度砕石 6 号を使用した。

3.3 結合材の調合

結合材の高強度化は、通常水セメント比を下げることにより可能となるが、結合状態の最適化を図るためにはペーストをある程度流動化させ、かつ Funicular の第 1 領域²⁾を確保する必要がある。そこで、ここでは上記の条件を満たすために、高性能 AE 減水剤添加率を変化させてフロー値を 190 ± 10 とした。

図-3 に各水準の結合材の圧縮強度と材齢の関係を示す。基礎実験として水セメント比 22.5%の結合材の材齢 1 日から 1 日毎の結合材強度を測定したところ、70, 110, 140 N/mm^2 の 3 水準の結合材がそれぞれ材齢 2, 7, 28 日の時点で得られた。また、目標強度 30 N/mm^2 の結合材を作製するために水結合材比を 30%に上げ、フライアッシュをセメントの 50%置換して材齢 1 日から 1 日ごとの結合材強度を測定し、材齢 4 日で目標強度を得た。ここで、結合材の圧縮強度の測定には $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を用いた。

3.4 ポーラスコンクリートの製造および試験

練混ぜには揺動攪拌型ミキサを使用し、ペースト先練り方式を採用した。練混ぜ方法は、セメントおよび混和材を投入後 50rpm で 30 秒間空練りし、水を投入後 50rpm で 30 秒間(高性能 AE 減水剤は事前に練混ぜ水中に混合して使用する)、その後 200rpm で 240 秒間練り混ぜた。ここで、所定のフロー値が得られたことを確認した後、粗骨材を投入し、さらに 200rpm で 90 秒間練り混ぜた⁷⁾。

練り上がったコンクリートは $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱型枠に 3 層に分けて、各層突き棒で 15 回突いて打ち込み、最後に表面振動機により起振力 1225N、振動エネルギー⁹⁾は $90\text{N} \cdot \text{m/m}^2$ (締固め時間: 10s) で締固めを行った。圧縮試験用の円柱供試体は、材齢 1 日でキャッピングを行い、材齢 2 日で脱型し、各材齢まで水中養生を行い、圧縮強度試

表-2 実験の因子と水準

要因	水準
フロー値	190 ± 10
結合材強度 (N/mm^2)	30, 70, 110, 140
空隙率 (%)	15, 20, 25, 30, 35

[注] いずれも目標値を示す。

表-3 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
セメント	研究用セメント (普通ポルトランド) 密度: 3.17g/cm^3 比表面積: $3150\text{cm}^2/\text{g}$
粗骨材	単粒度砕石 6 号 (5~13mm: 榊田川産) 表乾密度: 2.70g/cm^3 実積率: 57.4%
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
混和材	フライアッシュ I 種

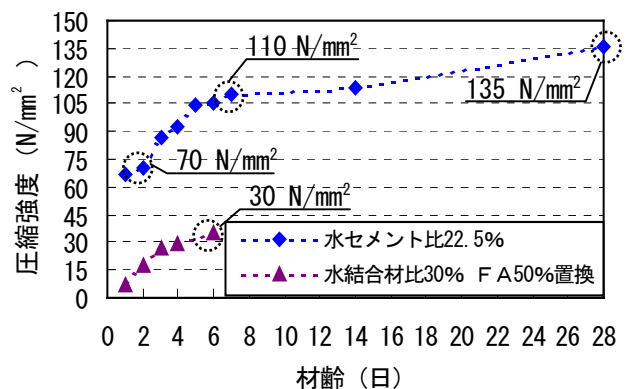


図-3 結合材強度と材齢の関係

験に供した。空隙率試験用の試験体は、材齢 2 日で脱型し、材齢 7 日まで水中養生した。

測定項目は圧縮強度および空隙率で、圧縮強度の測定は、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮試験方法) に、空隙率の測定は、「ポーラスコンクリートの空隙率試験法 (案) 容積法」¹⁾にそれぞれ準じた。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度と全空隙率の関係

図-4 に圧縮強度と全空隙率の関係を示す。同図中には、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体で測定した結合材の圧縮強度を空隙率 0%として示した。図中の近似曲線は結合材の圧縮強度も含めて近似した。

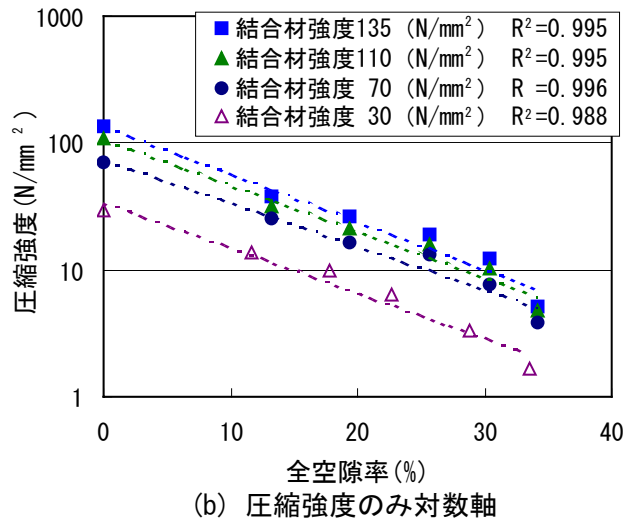
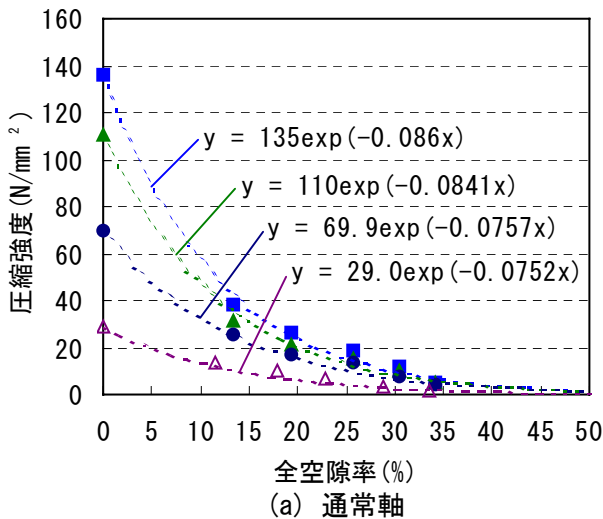


図-4 圧縮強度と全空隙率の関係

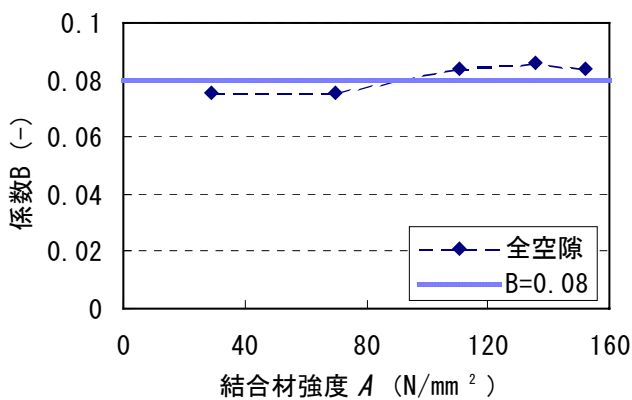


図-5 結合材強度 A と係数 B の関係

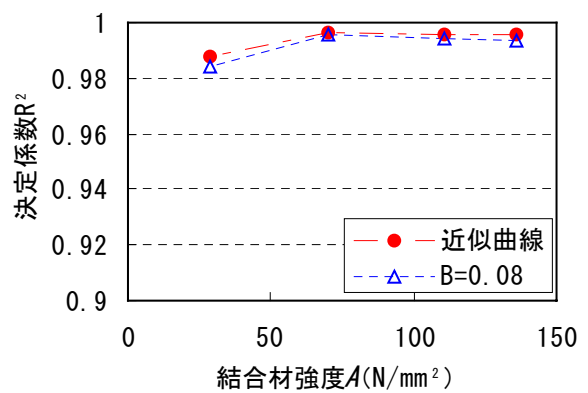


図-6 結合材強度 A と決定係数 R² の関係

同図から、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は結合材強度の影響を受け、各空隙率におけるポーラスコンクリートの圧縮強度は結合材強度が大きいものほど大きくなることが明らかである。また、結合材強度ごとに指数関数近似できる傾向は既往の研究結果⁷⁾と同様であった。

ここで、本実験で得られた近似式で使用する変数および係数を式(1)のように定義する。

$$F_{POC} = Ae^{-BP_{POC}} \quad (1)$$

ここに、 F_{POC} ：ポーラスコンクリートの圧縮強度(N/mm²),
 A ：結合材の圧縮強度(N/mm²),
 B ：実験定数,
 P_{POC} ：ポーラスコンクリートの空隙率(%)

図-5 に結合材強度 A と図-4 中に示した各近

似式の係数 B の関係を示す。同図には既往の研究⁷⁾のデータも併示する。同図から係数 B の値は結合材強度 A によらず 0.08 に近い値をとる。以上の結果から、6号砕石を用いて振動締固めによって施工したポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係は、おおよそ式(2)で表すことができるといえる。

$$F_{POC} = Ae^{-0.08P_{POC}} \quad (2)$$

図-6 に式(2)の曲線を用いた場合の決定係数 R² と結合材強度 A との関係を示す。同図には、図-4 に示す近似曲線の決定係数 R² も併示する。同図からは、近似曲線の相関は非常に高く B=0.08 と置いてもほとんど R² は低下しないことがわかる。

ここで、本実験で用いた粗骨材の実積率は 57.4% で、所定の締固めを行った場合には設計空隙率 42.6% のとき結合材量が 0 となり、式(2)中

の $F_{POC}=0$ となるはずである。式(2)の計算値は $F_{POC} \neq 0$ となるが、本提案式は設計空隙率 0~35%を対象範囲とし、それ以上は実用上必要無いと考えて無視している。

4.2 圧縮強度と連続空隙率の関係

図-7 に全空隙率と連続空隙率の関係を示す。同図から、連続空隙率は全空隙率よりも低い空隙率へ 5%程度の幅で平行にシフトする傾向がある。このことから、圧縮強度と全空隙率の間に成り立った関係と同じ様に圧縮強度と連続空隙率の間にも関係が成り立つと考えられる。

図-8 に結合材強度 A と圧縮強度と連続空隙率の関係について近似した式(1)の係数 B の関係を示す。同図から係数 B の値は結合材強度 A によらず 0.10 に近い値をとる。

図-9 に圧縮強度と連続空隙率の関係を示す。なお、図中には、式(1)の A に結合材強度を、 B

に 0.10 を代入して得られる曲線を併示してある。同図(b)には、図-6 と同様に直接データを近似した場合の決定係数 R^2 も示す。同図によれば、十分に良好な相関が得られていることがわかる。従って、圧縮強度と連続空隙率の関係は、圧縮強度と全空隙率の関係と同様の形式の式(3)で表すことができる。

$$F_{POC} = Ae^{-0.10P_{POC}} \quad (3)$$

5. 本提案式の適用条件および概念

表-4 に本提案式の適用条件を、図-10 にポーラスコンクリートの強度性能に与える諸要因の影響の概念図を示す。施工方法および使用材料の違いは試験結果に影響を与えるので注意が必要である。また、円柱型枠に打ち込まれた場合とコア抜きにより採取された場合でも圧縮強度と空隙率の関係は変化する可能性がある。

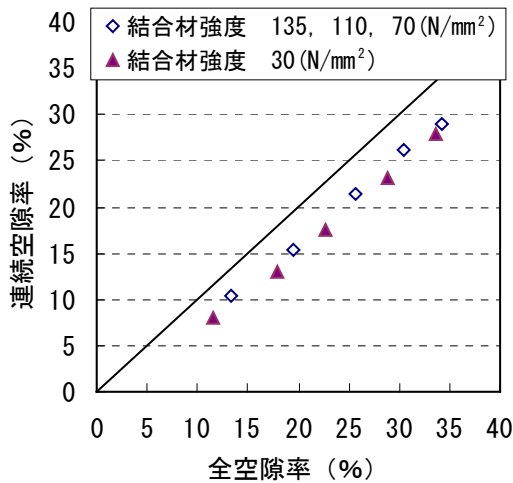


図-7 全空隙率と連続空隙率の関係

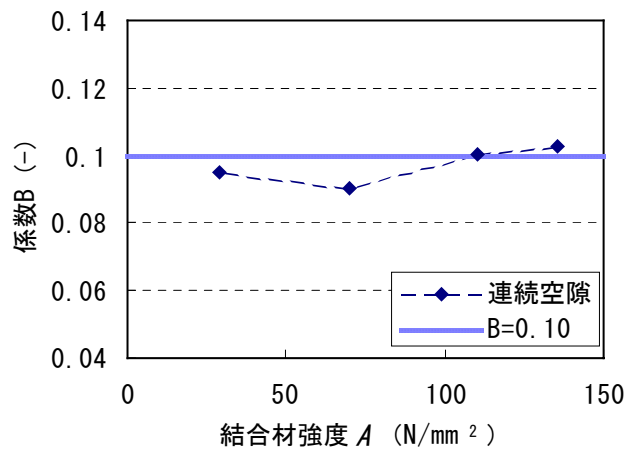
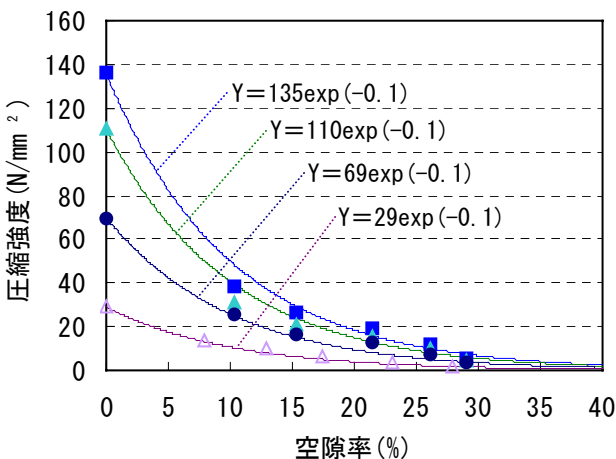
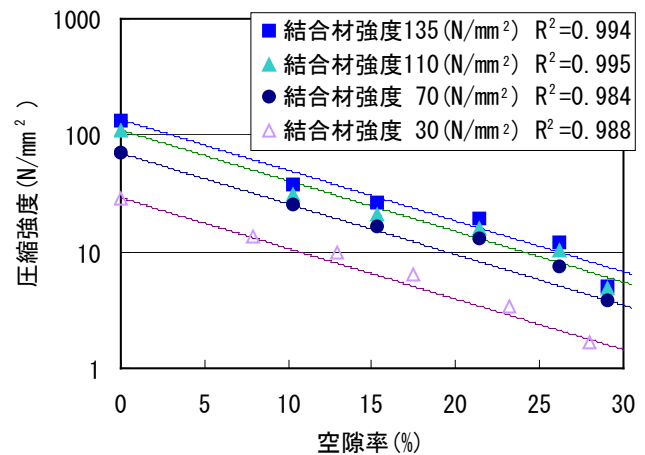


図-8 結合材強度 A と係数 B の関係



(a) 通常軸



(b) 圧縮強度のみ対数

図-9 圧縮強度と連続空隙率の関係

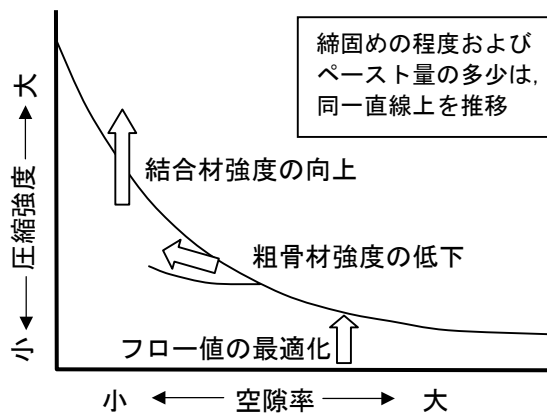


図-10 ポーラスコンクリートの強度性能に与える諸要因の影響の概念図
(図-1に加筆・修正)

6. まとめ

本報では、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす結合材強度の影響について検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 本実験の範囲では、同一空隙率におけるポーラスコンクリートの圧縮強度は結合材強度が大きいほど大きい値となる。
- 2) ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は、結合材強度および空隙率をパラメータとした指数関数で近似することができる。
- 3) 本実験の範囲では、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は以下の式で近似できる。

$$F_{POC} = Ae^{-BP_{POC}}$$

ここに、 F_{POC} ：ポーラスコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 A ：結合材の圧縮強度(N/mm²)、 B ：実験定数(全空隙率の場合：0.08、連続空隙率の場合：0.1)、 P_{POC} ：ポーラスコンクリートの空隙率(%)

〔謝辞〕

本研究費の一部は平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)並びに三重大学萌芽重点経費(いずれも研究代表者畑中重光)によった。本実験に際しては三重県科学技術振興センターのご助力を得た。付記して謝意を表する。

表-4 式(2)～(3)の適用条件

項目	内容
練混ぜ	揺動攪拌型ミキサを使用
供試体形状	φ10cm×20cmの円柱供試体(コア供試体ではない)
締固め	表面振動機を使用
粗骨材	単粒度6号砕石(骨材破壊が先行しない強度のもの)
結合材強度	φ5×10cmの円柱供試体で測定したもの

参考文献

- 1) エココンクリート研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会, 1995.11
- 2) 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, 1998.12
- 3) 水口裕之, 宮島崇, 服部眞門, 宮川恒夫：連続空隙を持つポーラスコンクリートの水質浄化機能に及ぼす空隙寸法および空隙率の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1045-1050, 1997.6
- 4) 中澤隆雄, ZOUAGHIA, 今井富士夫：ポーラスコンクリートの配合が透水性および強度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.382-387, 1996.2
- 5) 湯浅幸久, 宮本高秀, 別府智子, 畑中重光：ポーラスコンクリートに用いるセメントペーストの性状に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第39号, pp.117-120, 2001.2
- 6) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宣之：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.139-114, 2001.6
- 7) 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, No.552, pp.37-44, 2002.2
- 8) 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, No.570, pp.31-36, 2003.8
- 9) 超硬練り研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会, pp.155-162, 1998.11