

ポーラスコンクリートの圧縮強度推定式の構築に関する研究

STUDY ON AN EQUATION FOR PREDICTING COMPRESSIVE STRENGTH OF POROUS CONCRETE

大谷 俊浩*, 村上 聖**, 佐藤 嘉昭***, 三井 宜之****, 平居 孝之*****
Toshihiro OTANI, Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiaki SATO,
Yoshiyuki MITSUI and Takayuki HIRAI

The object of this paper is to propose an equation for predicting compressive strength of porous concrete. The factors influencing mainly the compressive strength of porous concrete were picked out. The proposed equation was constituted with the following three factors; void ratio, water cement ratio and oven-dry density of coarse aggregate. It is found that the 28-day compressive strength of porous concrete can be estimated by using the proposed equation. However, the influence of the type of cement was not clarified because its limited data.

Keywords: Porous Concrete, Equation for Predicting Strength, Compressive Strength, Coarse Aggregate Strength, Binding Strength

ポーラスコンクリート, 強度推定式, 圧縮強度, 骨材強度, 結合強さ

1. はじめに

ポーラスコンクリートは内部に連続した空隙を多量に有するコンクリートである。その形状特性から、通気や透水が可能であり、近年地球環境問題がクローズアップされるなか、環境負荷低減や環境共生が可能なエココンクリート¹⁾として注目され、多くの研究成果が報告されている²⁾。しかしながら、ポーラスコンクリートの圧縮強度特性一つをとりあげてみても、十分な検討がなされているとは言えないのが現状である。今後、ポーラスコンクリートの利用を拡大していくためには、要求された性能を保証できるような調合設計法の確立が必要であり、そのためには強度理論体系を確立する必要がある。

ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に影響を及ぼす影響要因と関連因子は表1のように整理される。筆者らはこれまでの研究により、空隙率については、多くの研究報告で報告されているように、空隙率が高くなるほど圧縮強度は低下し、その関係はある指数関数で近似できることを明らかとしている³⁾。また、振動締固めおよび骨材粒径の影響については、硬質砂岩砕石を用いた実験より、振動締固めは結合材の分布状態に大きく影響し、それが圧縮強度に影響を及ぼすこと、

表1 圧縮強度の影響要因と関連因子

影響要因	関連因子
空隙率	(調合), 壁効果
結合強さ	水セメント比, セメント種類, 養生方法, 材齢
骨材強度	骨材種類
骨材粒径	骨材種類
締固めの程度	締固めの方法・時間

また、骨材粒径の違いはポーラスコンクリート作製時の壁効果の影響により骨材の実積率の変化を招き、圧縮強度の変化はその影響によるものであり、骨材粒径が直接的に圧縮強度に影響を及ぼすものではないことを明らかとしている³⁾。さらに、結合強さに関しては、理想球形骨材を使用した実験により圧縮強度はセメント水比の増加とともに直線的に増加することなどを明らかとした⁴⁾。

一方、ポーラスコンクリートは、あまり高い強度を必要せず、近年の天然骨材採取規制に伴い再生骨材などの低品質骨材の用途として注目されている。ポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響は、良質な天然骨材を使用すれば問題ないが、骨材はポーラスコンクリート

* 大分大学工学部福祉環境工学科 助手・工修

** 熊本大学大学院自然科学研究科 助教授・工博

*** 大分大学工学部福祉環境工学科 教授・工博

**** 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

***** 日本文理大学工学部建築デザイン学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng. Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Environmental Science, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Designs, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.

ト容積の55%程度(かさ容積ではほぼ100%)を占め、そのような低品質の骨材を使用した場合、強度特性に影響を及ぼすことは容易に想像できることである。しかしながら、骨材強度の影響について検討を行った報告は少なく⁵⁾ 十分な評価に至っていないのが現状である。

そこで、本研究では骨材強度がポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響を検討し、圧縮強度の影響要因を整理することで調査設計法の確立に必要な汎用的な強度推定式の構築を行うこととした。

2. 実験方法

2.1 実験概要

ポーラスコンクリートのマトリックスは、粗骨材を最密充填するように形成されているため、作用する荷重は、骨材の接点を介して伝達される。ポーラスコンクリートの圧縮破壊形態には村尾ら⁶⁾が指摘しているように、結合材の破壊、結合材と骨材界面の破壊、および骨材破壊の3種類が存在し、骨材破壊が支配的破壊形態である場合、骨材強度の影響を受けるが、その他が支配的要因となる場合、骨材強度の影響は小さくなることが予想される。したがって、骨材強度がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を調べるうえで破壊形態の影響を考慮する必要がある。支配的破壊形態を決定する条件として、結合強さと骨材強度が大きく関わっている。上述のように、力は骨材の接点を介して伝達されるため、力の作用線と骨材配列の方向が同一でない限り、骨材接点はせん断力を受ける。骨材接点部分は結合材により拘束されていることから、接点部分の結合材のせん断破壊と骨材の圧縮割裂破壊の大小により、その接点部分の破壊形態が決定される。また、接点部分の結合の強さは、結合材自体の強度と量により変化する。そこで、骨材強度として骨材種類を変化させ、結合強さとしては、結合材自体の強度による影響は既報の研究⁴⁾で明らかにしていることから、今回は、結合材量の影響を明確にすることを含め、結合材量を変化させた供試体を作製し、骨材強度がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

2.2 使用材料および割合

表2に使用材料を示す。セメントは高炉セメントB種を使用した。粗骨材は、硬質砂岩砕石骨材、再生骨材、高炉徐冷スラグ骨材および人工軽量骨材の強度の異なる4種類を使用した。今回、実験に使用した再生骨材は、モルタル分が多く残っているため6%を超える高い吸水率を示しているが、TR A 0006に規定される再生粗骨材の品質(吸水率7%以下)を満足するものである。また、高炉徐冷スラグ骨材は、多孔質であるため吸水率が比較的高くなっており、JIS A 5011によればL区分に相当する。

表3に割合を示す。結合材は細骨材を使用せず、セメントペーストとした。セメントペーストの水セメント比を25%で一定とし、目標空隙率を表に示すように段階的に変化させた割合とした。また、セメントペーストのフロー値は、高性能AE減水剤の添加量を調整することで200±10mmに調整した。なお、人工軽量骨材を使用したものについては、供試体用型枠を使用して求めた骨材の実積率を使用して、割合を決定した。

2.3 供試体作製

人工軽量骨材以外の骨材を使用したものの練混ぜは、容量100リッ

表2 使用材料

セメント	高炉セメントB種：密度 3.04 g/cm ³	
粗骨材	硬質砂岩砕石5号： 表乾密度 2.64 g/cm ³ 絶乾密度 2.62 g/cm ³ 吸水率 1.02 % 粒径 13~20 mm 実積率 55.9 %	再生骨材： 表乾密度 2.43 g/cm ³ 絶乾密度 2.24 g/cm ³ 吸水率 6.24 % 粒径 5~20 mm 実積率 56.8 %
	高炉徐冷スラグ骨材： 表乾密度 2.47 g/cm ³ 絶乾密度 2.36 g/cm ³ 吸水率 4.47 % 粒径 5~25 mm 実積率 51.6 %	人工軽量骨材： 絶乾密度 0.85 g/cm ³ 吸水率 4.00 % 粒径 10 mm 以上 実積率 54.7 %
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	

表3 割合

骨材種類	水セメント比 (%)	目標空隙率 (%)
硬質砂岩砕石5号	25	5, 10, 15, 20, 25
再生		0, 10, 15, 20, 25
高炉徐冷スラグ		0, 10, 15, 20, 25
人工軽量		(5, 10, 11, 20, 22, 30) *

*：供試体用型枠(φ10×20cm)にて算出した骨材実積率を使用

トルの強制2軸ミキサを使用し、セメントと骨材の空練りを行った後、水および混和剤を投入して攪拌し、コンクリートを作製した。人工軽量骨材を使用したものは、強制2軸ミキサによる混練は骨材の破壊を生じやすいため、混練には容量30リットルのオムニミキサを使用し、セメントペーストを先練りした後、骨材を投入して攪拌し、コンクリートを作製した。練り上げたコンクリートはφ10×20cmに投入し、締固めは振動によって結合材の分布状態に偏りが生じた場合、強度特性に影響を及ぼすため³⁾、その影響を排除することを目的に、突き棒および木づちでセメントペーストに垂れが生じないように注意しながら十分に突き固めた。

作製した供試体は、材齢1日で脱型して20℃水中養生を行い、コンクリートが充分硬化した後、空隙率の測定を行った。空隙率の測定は、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの物性試験方法(案)¹⁾に準拠して容積法で行った。空隙率の測定後は再び20℃水中養生を継続し、材齢28日で圧縮強度試験に供した。

3. 実験結果および考察

表4に実験結果データを平均値で示す。また、図1に圧縮強度と空隙率の関係を示す。図より、使用する骨材の種類により同一空隙率における圧縮強度に差が生じており、高強度になるほど差が大きくなる傾向にある。全体的にみて人工軽量骨材、再生骨材、高炉徐冷スラグ骨材、硬質砂岩砕石の順に圧縮強度が低くなっていることがわかる。このように強度差を生じた原因として、空隙率が小さい、すなわち結合材量が多いほど、骨材接点の結合強さが高くなるために、骨材強度が相対的に小さくなり、骨材の割裂破壊が増加することで、骨材強度の影響が明確化してきたものと考えられる。したがって、上記の順に骨材強度が小さいものと推察される。

4. 強度推定式の構築

4.1 圧縮強度推定式の基本構成

強度推定式は、簡便で、かつ材料データにより推定できるものが望ましい。そこで、影響係数を空隙率、骨材強度および結合強さの3つとし、図2に示す硬質砂岩砕石を使用した既報の実験データの圧縮強度と空隙率の関係の回帰結果³⁾を参考に強度推定式の構成を次式のように仮定した。

$$F_c = \alpha \cdot \beta \cdot e^{-0.06V_a} \quad (1)$$

ここに、 F_c : 圧縮強度 (N/mm²)

α, β : 骨材強度, 結合強さの影響係数

V_a : 空隙率 (%)

4.2 骨材強度指標値

ポーラスコンクリートに使用する骨材の強度の指標値として考えられるものに密度, 吸水率, 破砕値, 修正破砕率が挙げられる。一般に、密度が大きいほど、吸水率が小さいほど骨材強度が強くなる傾向にあることは周知の事実である。破砕値は、BS 812 破砕試験により求めた値である。破砕試験は鋼製の円筒容器に最密充填となるように充填した試料に所定の荷重を載荷し、2.5mmふるいを通過するように破砕された試料の割合を求めるものである。したがって、破砕試験はポーラスコンクリートの骨材配列に近い状態で行われており、得られる値は骨材強度の指標値として利用できると考えられる。また、石井が提案している修正破砕率⁷⁾は、破砕試験と同様の試験において破砕前後の骨材の粒度曲線の差を求めたものであり、同様に指標値として利用できると考えられる。

本実験に使用した骨材の各強度指標値を表5に示す。

4.3 骨材強度の影響係数

式(1)の骨材強度の影響係数 α を決定するために、表4に示すデータの骨材種類ごとに式(1)の結合強さの影響係数 β を1とした場合の回帰分析を行うことで各骨材の影響係数を算出し、表5に示す骨材の各強度指標値との相関性について検討した。算出した影響係数を表6に示す。表中には既報³⁾で使用した他産地の硬質砂岩砕石の影響係数についても示している。また、図3に骨材強度の影響係数 α と各指標値の関係を示す。図より、骨材の絶対密度が最も高い相関性を示していることがわかる。表乾密度も高い相関性を示しており、かつ一般的に利用されているが、絶対密度は吸水率の影響を受けず、密度が小さいわりに吸水率が小さな人工軽量骨材のような骨材を含めて取り扱うことを考えれば、表乾密度より適していると考えられる。そのため、絶対密度を骨材強度の指標値として採用することとした。骨材強度の影響係数 α は次式で与えられる。

$$\alpha = 12.6e^{0.61D_d} \quad (2)$$

ここに、 D_d : 骨材の絶対密度 (g/cm³)

表4 実験結果平均データ

骨材種類	目標空隙率 (%)	空隙率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
硬質砂岩砕石	5	17.5	26.9
	10	21.1	20.8
	15	27.0	14.2
	20	24.2	15.7
	25	30.6	10.2
再生	0	6.8	32.7
	10	15.7	18.0
	15	19.8	13.4
	20	23.5	13.4
	25	28.9	8.1
高炉徐冷スラグ	0	14.7	24.8
	10	20.4	15.3
	15	23.2	14.4
	20	29.9	9.5
	25	30.2	8.7
人工軽量	5	2.0	17.1
	10	8.5	11.6
	11	11.3	11.7
	20	21.7	9.8
	22	19.0	5.7
	30	29.4	3.3

注) 供試体数; 人工軽量以外は各6体, 人工軽量は各3体

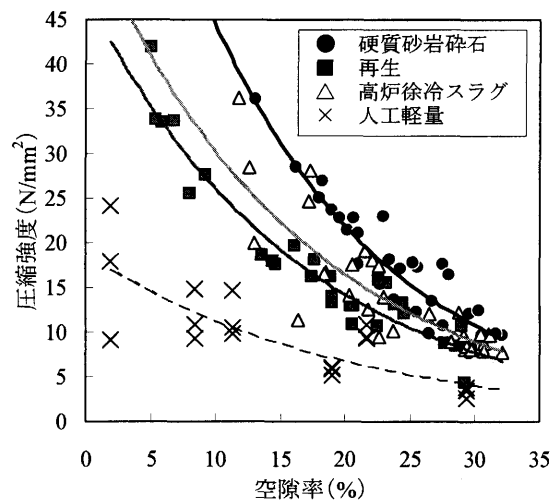


図1 圧縮強度と空隙率の関係

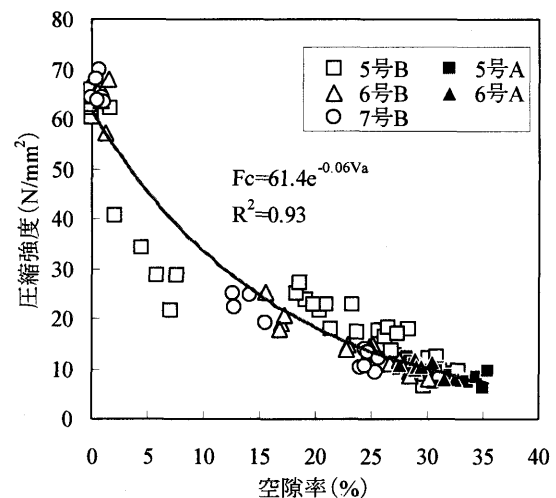


図2 硬質砂岩砕石を用いた圧縮強度と空隙率の関係³⁾

表5 骨材の各強度指標値

	硬質砂岩 砕石5号	再生	高炉徐冷 スラグ	人工軽量
表乾密度 (g/cm ³)	2.64	2.43	2.47	0.88
絶乾密度 (g/cm ³)	2.62	2.24	2.36	0.85
吸水率 (%)	1.02	6.24	4.47	4.00
400kN 破砕値	14	24	33	40
400kN 修正破砕率	40	25	46	32

4.4 結合強さの影響係数

結合強さに影響を及ぼす因子としては表1に示すように、水セメント比、セメント種類、養生方法および材齢が挙げられる。今回の強度推定式は標準養生材齢28日を想定しており、養生方法および材齢による影響は考慮しないものとする。水セメント比の影響については、既報⁴⁾の理想球形骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果より図4に示すように、圧縮強度とセメント水比の関係は線形関係で表されることが明らかとなった。この実験では、アルミナボールとガラスビーズの2種類の理想球形骨材を使用した。圧縮強度試験の結果、両骨材とも骨材の割裂破壊は認められなかったことから、骨材強度の影響が含まれない水セメント比による結合自体の強度の影響を正確に表すものと考えられる。ただし、結合材と骨材の付着破壊が生じる場合に関しては、骨材の表面性状が密接に関与しているが、前節の骨材種類を替えた実験において、その影響も含め、骨材の絶乾密度で評価できたことから、ここでは付着破壊については考慮しなくてもよいものと考えられる。水セメント比が25%の圧縮強度に対する強度比とした場合の水セメント比による結合材の影響係数βは次式で与えられる。

$$\beta = k(0.48(C/W) - 0.87) \quad (3)$$

ここに、k:セメント種類による影響係数

C/W:セメント水比

式(1)、(2)、(3)よりポーラスコンクリートの圧縮強度推定式は次式となる。

$$F_c = 12.6k(0.48(C/W) - 0.87)e^{0.61Dd - 0.06Va} \quad (4)$$

セメント種類による影響係数について検討するために、ポーラスコンクリートの圧縮強度について検討された文献のうち骨材の絶乾密度が示されたもの(表乾密度および吸水率が示されたものは両値から算出)についてデータを収集し、強度推定値と実測データの比較を行った。収集した文献数は12件^{5), 8~18)}、データ数は159個であり、本実験および既報³⁾の実験データ178個と合わせ計337個について検

表6 各骨材の影響係数α

砕石5号	再生	高炉スラグ	人工軽量	砕石5号A*	砕石6号B*	砕石6号A*	砕石7号B*
69.6	47.2	54.5	21.2	57.3	59.3	59.6	56.0

*既報の使用骨材データ³⁾

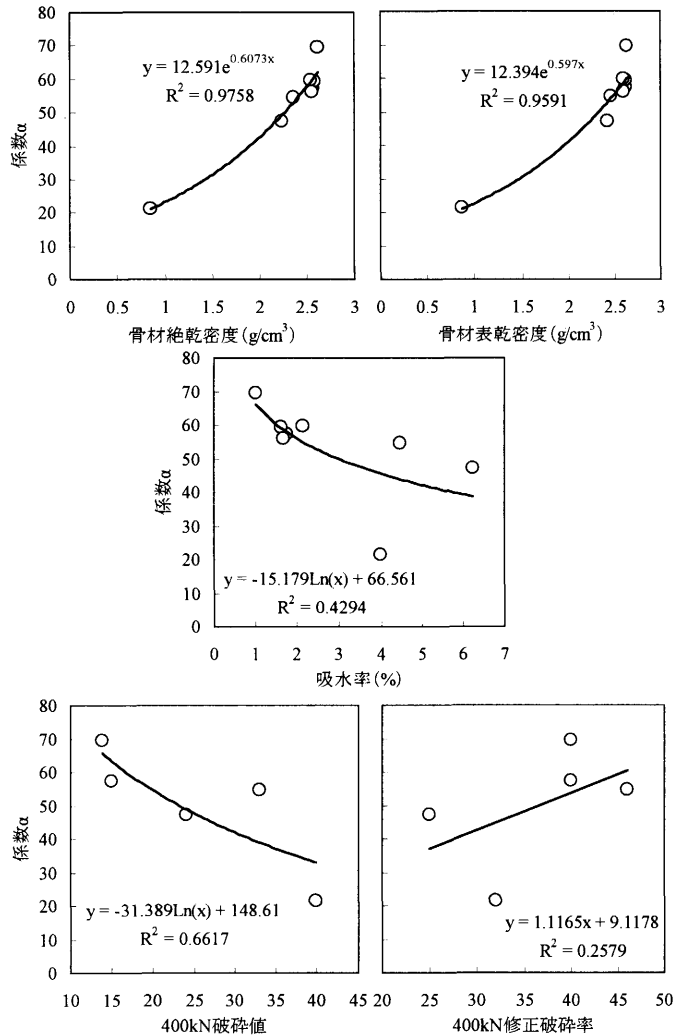


図3 骨材強度の影響係数αと各指標値の関係

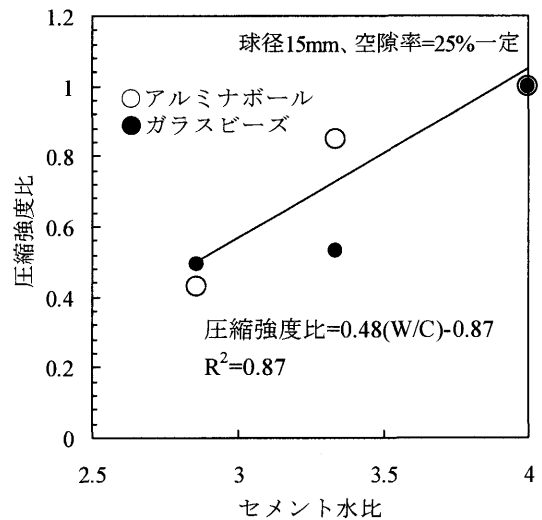


図4 圧縮強度比とセメント水比の関係⁴⁾

討した。収集したデータには混和材として高炉スラグ微粉末やシリカフュームが混入されたデータが存在した。文献^{12), 14), 15)}ではシリカフュームまたはシリカ系微粉末が10~15%程度混入され、文献¹¹⁾では普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームが質量比で45:45:10の比率で混合されている。これらのデータを用いて推定した結果、シリカフュームを混入した場合は水粉体比より水セメント比、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混入した場合は、シリカフュームを除いたセメントと高炉スラグ微粉末による水粉体比で推定した方が良い結果を示すことがわかった。これは、ポーラスコンクリート用混和材として、高炉スラグはその潜在水硬性によりコンクリートの強度発現に寄与するが、シリカフューム混入による結合材の緻密化は、明確な強度増加効果を示さないことを示唆している。したがって、シリカフュームを混入したものは水セメント比を使用し、文献¹¹⁾のデータについては、セメントと高炉スラグ微粉末を合わせて高炉セメントB種として取り扱い、同様に水セメント比で推定した。

図5に推定式で推定した圧縮強度と実測した圧縮強度の関係を示す。図より、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用したものについては推定式による推定値と実測値と良く対応しているが、高炉セメントC種を使用したものは全体的に推定値が高くなっていることがわかる。表7は各セメントの推定値と実測値の差である残差の平均を示したものであるが、高炉セメントC種が3N/mm²以上の差を生じており、現時点ではデータ数が少ないため明確な数値を決定するに至らないが、高炉セメントC種についてはある補正係数を乗じる必要があるように思われる。このように、高炉セメントC種を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度推定値を高く算出した原因は、JIS R 5211の高炉セメントの品質において、A, B種に比べC種の材齢28日圧縮強さが2.5N/mm²小さく規定されていること、高炉スラグを混入したコンクリートに関する既往の研究¹⁹⁾で、高炉スラグのセメント置換率が50%より多くなると材齢28日圧縮強度が低下することを示していることからわかるように、高炉スラグ置換率が60~70%と高い高炉セメントC種の材齢28日圧縮強度が他のセメントを用いた場合と比較して小さいためであると考えられる。その他のセメントについては、セメント種類の違いによる影響は誤差としてみなせる範囲であり、特に補正係数を乗じる必要はないと思われる。

4.5 圧縮強度推定式の適用性の検討

本推定式の適用性を検討するため、上記収集データに対してセメント種類による影響係数 k を1として推定した圧縮強度と実測値を比較検討した。図6に骨材種類ごとに圧縮強度推定値と実測値の関係を示す。図より、骨材種類の違いによる推定のずれは確認できず、人工軽量骨材から天然骨材まで幅広い範囲で適用可能であると考えられる。また、図中には全実測値を各推定値で除した値の平均値と、その平均値の変動係数を示すが、平均値が0.99、変動係数が5.47%と十分な精度を有していることがわかる。

図7は推定値から実測値の差である残差を求めたものであるが、全体的な傾向として高強度ほど残差がマイナス側に大きくなり、本推定式は圧縮強度を低く見積もる傾向にあることがわかる。

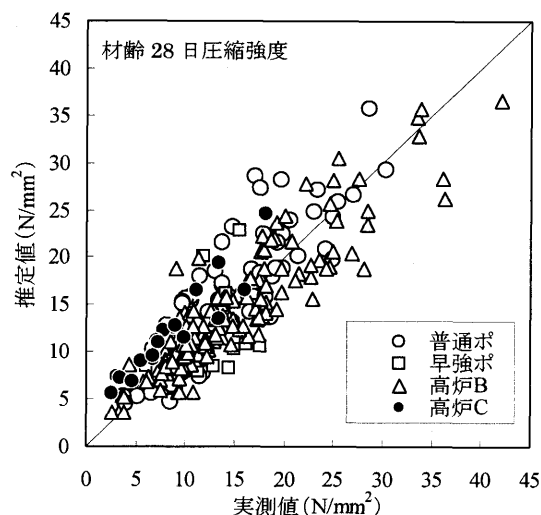


図5 セメント種類による影響

表7 残差の平均値 (単位: N/mm²)

普通ポルトランド	早強ポルトランド	高炉B種	高炉C種
1.52	-0.75	-0.64	3.42

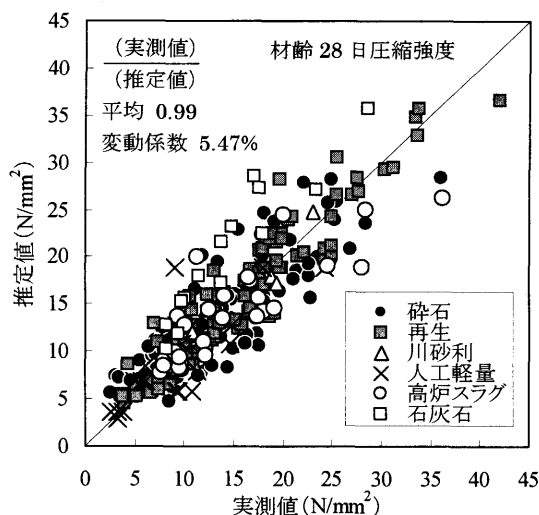


図6 推定式による推定結果 (骨材種類別)

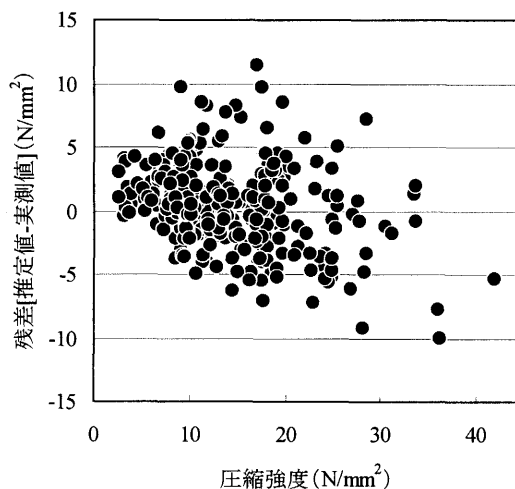


図7 推定式による推定の傾向

5. まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの骨材強度の違いが圧縮強度特性に及ぼす影響について実験的検討を行うとともに、圧縮強度の影響要因を整理し、圧縮強度推定式の構築を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 骨材強度がポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響は、骨材の絶乾密度を用いることでその影響係数を精度良く求めることができることが明らかとなった。
- 2) ポーラスコンクリートの標準養生材齢 28 日における供試体の圧縮強度を推定する汎用的な式として、下記に示すような空隙率、骨材絶乾密度および水セメント比を係数として組み込んだ式を提案した。

$$F_c = 12.6k(0.48(C/W) - 0.87)e^{0.61Dd - 0.06Va}$$

ここに、 F_c : 圧縮強度 (N/mm²)

k : セメント種類による影響係数 (普通, 早強ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種については、 $k=1$)

C/W : セメント水比

Dd : 骨材の絶乾密度 (g/cm³)

V_a : 空隙率 (%)

- 3) 提案した圧縮強度推定式は、高強度になると推定値を小さく算出する傾向にあるが、全実測値を各推定値で除した値の平均値と、その平均値の変動係数を示すが、平均値が 0.99、変動係数が 5.47% と十分な精度を有している。
- 4) 混和材が添加されたものに対して、シリカフェームを混入したものは水セメント比を、高炉スラグ微粉末を混入したものは水粉体比を使用することで推定が可能である。しかしながら、フライアッシュなどのその他の混和材については、現在有効な実験データが存在せず、今後データを収集し、適用性について検討する必要がある。
- 5) 本推定式は標準養生された供試体の材齢 28 日圧縮強度を推定するものであり、現場封緘養生を行った供試体や実施工された構造体の圧縮強度の推定には現時点では対応していない。この点についても今後、検討する必要がある。
- 6) 高炉セメント C 種を用いた場合、推定値を大きく見積もる傾向にあり、セメント強度の補正係数を掛ける必要があると考えられる。今後、より多くのポーラスコンクリートの圧縮強度試験データを収集し、推定式の精度および信頼性の向上を図るとともに、セメント種類による影響係数を決定したい。

【謝辞】

本実験に使用した高炉徐冷スラグ骨材は (株) 製鉄鉱業大分に提供して頂いた。また、本実験を行うにあたり、大分大学工学部福祉環境工学科建築コース清原千鶴助手、遠矢義秋技官ならびに材料施工研究室のみなさんにご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) エココンクリート委員会：委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.19-28, 1996.6
- 2) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2003.5
- 3) 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—締固め程度および砕石粒径が結合材の分布状態と圧縮強度特性に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.31-38, 2004.11
- 4) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之：理想球形骨材を用いた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実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.7-13, 2004.12
- 5) 例えば 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研究, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.31-36, 2003.8
- 6) 村尾 健, 湯浅幸久, 三島直生, 畑中重光：砕石並びに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, 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.71-76, 2002.5
- 7) 石井武美：粒子破砕の表示尺度のもつ物理的意義, 土質工学会論文報告集, Vol.29, No.4, pp.155-164, 1989.12
- 8) 伊藤雄輔, 国枝稔, 古川浩司, 六郷恵哲：ポーラスコンクリート複合版の力学挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1143-1148, 2002.6
- 9) 音野琢也, 国枝稔, 古川浩司, 六郷恵哲：低品質再生骨材を用いたポーラスコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1149-1154, 2002.6
- 10) 石黒拓, 湯浅幸久, 畑中重光：再生骨材を使用したポーラスコンクリートに及ぼす骨材品質の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1225-1230, 2000.6
- 11) 黒田保, 井上正一, 吉野公, 田中秀一：再生骨材の緑化コンクリートへの適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.181-186, 1999.6
- 12) 小椋伸司, 国枝稔, 栗原哲彦, 六郷恵哲：ポーラスコンクリートの強度改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.499-504, 1997.6
- 13) 柳橋邦生, 米澤敏男, 佐久間護, 池尾陽作：緑化コンクリートに関する研究および施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.1, pp.871-876, 1994.6
- 14) 張日紅, 中澤隆雄, 新西成男：ポーラスコンクリートの空隙率が圧縮強度と応力-ひずみ関係に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.864-869, 1997.12
- 15) 金丸和光, 川島満成, 張日紅, 金丸和夫：ポーラスコンクリートの圧縮強度試験方法に関する一考察, セメント技術大会講演要旨, No.54, pp.322-323, 2000.5
- 16) 佐藤健司, 長岡誠一, 増岡臣一：コンクリート廃材を用いたポーラスコンクリートの開発, 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.71-76, 2003.5
- 17) 梶尾聡, 水口裕之, 片平博：ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性に関する研究, 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.139-142, 2003.5
- 18) 村尾健, 湯浅幸久, 三島直生, 畑中重光：砕石並びに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, 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.71-76, 2002.5
- 19) 例えば 依田彰彦, 横室隆：微粉碎した高炉スラグを混和材として用いたモルタル・コンクリートの強度, セメント技術年報, 42, pp.92-95, 1988.12

(2004年9月9日原稿受理, 2004年12月27日採用決定)