

論文 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

音野 琢也*1・国枝 稔*2・古川 浩司*3・六郷 恵哲*4

要旨：本研究では，低品質再生骨材をポーラスコンクリートの骨材として利用するため，粒径の異なる低品質再生骨材を用いたポーラスコンクリートをそれぞれ作製し，その力学特性についての確認を行った。ポーラスコンクリートの強度は，吸水率や密度の大きさと表される再生骨材中のモルタル量の影響を大きく受けることを示した。また，ポーラスコンクリートの静弾性係数を計測する手法について検討し，問題点などを抽出するとともに，ポーラスコンクリート特有のひび割れ発生についての考察を行った。

キーワード：ポーラスコンクリート，低品質再生骨材，力学特性，静弾性係数

1. はじめに

連続空隙を有するポーラスコンクリートは，透水材料，吸音材料，植生基盤，水質浄化材料，生物のすみかなどへ適用されており，今後さらに幅広く利用される可能性を秘めている。力学的な特性が普通コンクリートのそれに比べて劣るため，力学特性を改善する研究が精力的に行われている^{1),2),3)}。一方，強度重視型の利用法と，空隙重視の利用法に区分するなど，要求性能を明確にしたうえで適用することにより，利用の拡大を図る試みがなされている⁴⁾。透水性，排水性舗装など，構造部材として用いられる例も増加しており，適切に力学特性を把握することが重要となっている。さらに，性能規定型の設計法への移行に伴い，各性能を評価するための指標やそのための試験方法を整備する必要がある。ポーラスコンクリートの弾性係数についても，力学性能を要求される部材への適用が増加するにつれその必要性が増すと考えられるが，そのための試験方法について十分に検討されていないのが現状である。

環境負荷低減を目的とし，再生骨材の利用法に関する研究が数多くなされている。再生骨材に付着するモルタルの除去により，骨材として

の利用の可能性が広がる反面，それに要するエネルギーやコストが増加することも良く知られている。従って，粗割りしたコンクリート塊をさらに細かく破碎して得られる破碎コンクリートを，路盤材としてだけでなく幅広く利用することが望ましい。

本研究では，コンクリート製品工場から排出される破碎コンクリート（以後，低品質再生骨材と呼ぶ）を利用したポーラスコンクリートを作製し，その基礎物性について検討した。特に，再生骨材の粒径がポーラスコンクリートの力学特性に及ぼす影響について，普通骨材と比較検討を行った。さらに，ポーラスコンクリートの静弾性係数の算定方法についての検討を行うにあたり，ポーラスコンクリート特有のひび割れの発生状況と算定される弾性係数の関係に着目した考察を行った。

2. 実験概要

2.1 骨材の種類と特性

本研究では，圧縮強度が 40 - 50MPa 程度，粗骨材の最大寸法が 20mm の原コンクリートを粗割りし，さらにジョークラッシャーにて破碎を行った低品質再生骨材（以後，再生骨材と呼ぶ）

*1 岐阜大学 工学部土木工学科（正会員）

*2 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工博（正会員）

*3 岐阜大学大学院 工学研究科博士後期課程生産開発システム工学専攻 工修（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

表 - 1 使用骨材の特性

骨材の種類	骨材粒径 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	吸水率 (%)
碎石(大)	10 - 15	2.62	61.2	1.44
碎石(小)	5 - 10	2.60	60.5	1.49
再生(大)	10 - 15	2.44	58.2	5.90
再生(小)	5 - 10	2.31	58.8	7.94

表 - 2 ポーラスコンクリートの示方配合

配合名	骨材粒径 (mm)	目標空隙率 (%)	W/C (%)	P/G (%)	単位量 (kg/m ³)		
					水	セメント*	骨材
碎石(大)	10 - 15	20	30	30	89	296	1603
碎石(小)	5 - 10				88	292	1573
再生(大)	10 - 15				84	281	1420
再生(小)	5 - 10				85	284	1405

*普通ポルトランドセメント

を使用した。本処理において排出される骨材を 20kg 採取し、ふるい分け試験を行った際の粒度分布を図 - 1 に示す。この図より、10mm ふるいに留まる再生骨材が最も多く、2.5mm 以下の再生骨材（微粒分も含む）も多く発生していることが分かる。ここでは、排出量の多い 10mm ならびに 5mm のふるいに留まる骨材を 10 - 15mm、5 - 10mm の 2 種類に分類した骨材（それぞれ再生骨材（大）、再生骨材（小）と呼ぶ）を対象とした。各骨材の特性を表 - 1 に示す。再生骨材（大）ならびに再生骨材（小）の表乾密度はそれぞれ 2.44g/cm³、2.31g/cm³ であり、吸水率は 5.90%、7.94%であった。密度が小さく、吸水率が大ききことは、原骨材周りに付着したモルタルやモルタル塊の混入を示しており、再生骨材（小）では、特にその量が多いことが分かる。

また、比較のために普通骨材を使用したポーラスコンクリートも作製した。表 - 1 に示すように、揖斐川産の玉碎石を使用し、再生骨材と同様の範囲内に収まるよう粒度調整を行ったものを使用した。表 - 2 にポーラスコンクリートの示方配合を示す。前述の骨材（再生、碎石）はいずれも表乾状態に調整して使用した。

圧縮強度、割裂引張強度ならびに曲げ強度を測定するために、φ 100 × 200 mm、φ 150 × 150

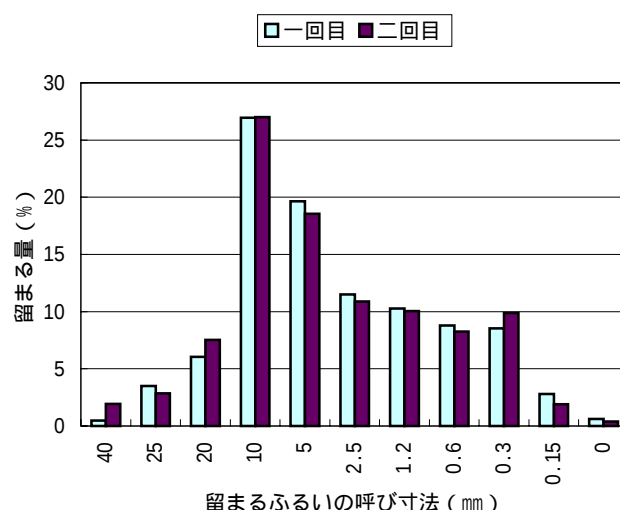


図 - 1 破碎コンクリートの粒度分布

mmおよび 100 × 100 × 400 mmの供試体を各 4 体ずつ作製した。試料は各供試体について 2 層に分けて型枠に詰め、各層ごとに突き棒（突き部分が 35 × 35 mm）による突固めを行った。φ 100 × 200 mmの供試体については各層 25 回、φ 150 × 150 mmの供試体については各層 50 回、100 × 100 × 400 mmの供試体については各層 100 回の突固めを行った。打設後 2 日で脱型し、その後水中養生（20 ）を行った。すべての載荷試験は、材齢 28 日で行った。なお、圧縮強度供試体は、空隙率を測定した後、セメントペーストを用いて両端面にキャッピングを行った。

2.2 静弾性係数の測定法

普通コンクリートの静弾性係数の測定には、

コンプレッソメータを使用した方法やひずみゲージを使用した方法などが用いられる⁵⁾。ポラスコンクリート供試体の表面には骨材寸法に依存した凹凸が存在し、通常のコンプレッソメータの装着が難しいことが容易に想像できる。本研究では、載荷試験の2日前に、φ100×200mmの円柱供試体の相対する側面にセメントペースト（水セメント比30%）を塗りつけ、硬化後に表面を平滑処理した後、ひずみゲージ（ゲージ長さ30mm）を貼付して供試体表面のひずみを計測した。今回用いた骨材の寸法は、5 - 10mmならびに10 - 15mmの範囲内であること、ならびにセメントペースト塗布面の平滑仕上げをできる限り容易にするため、30mmのひずみゲージを使用した。各供試体において、コンプレッソメータによるひずみの計測も行った。

なお比較のため、平均圧縮強度32.7MPaの普通コンクリート（供試体本数：4本）を対象とした計測も同様に行った。各計測データをもとに、弾性係数を算定する際には、いずれも式(1)を用いた。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \quad (1)$$

E_c ：静弾性係数

S_1 ：最大荷重の1/3に相当する応力（MPa）

S_2 ：ひずみ 50×10^{-6} のときの応力（MPa）

ε_1 ：応力 S_1 によって生じるひずみ

2.3 空隙率の測定

空隙率の測定は、φ100×200mmの円柱供試体を使用し、「ポラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」の容積法⁶⁾に準じて行った。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

再生骨材ならびに砕石を用いたポラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度をそれぞれ表-3ならびに図-2, 3, 4に示す。いずれの強度についても、再生骨材を用いたポラスコンクリートの強度は、砕石を用いたポラスコンクリートのそれに比べて小さくなっ

表-3 強度試験結果（平均値）

骨材の種類	空隙率 (%)	強度 (MPa)		
		圧縮	引張	曲げ
砕石（大）	32.5	9.11	1.26	1.83
砕石（小）	26.5	11.4	1.59	2.34
再生（大）	30.1	7.22	0.91	1.44
再生（小）	31.2	4.65	0.79	1.44

た。特に、再生骨材（小）を用いた場合の圧縮強度が著しく低下した。しかし、試験後の圧縮供試体の目視観察においては、骨材の種類の違いによる明確な差は認められなかった。

曲げ強度用供試体、割裂引張強度用供試体の破断面の目視観察結果より、再生骨材を用いたポラスコンクリートの場合には、ほとんどの再生骨材（モルタル部）が破断している傾向にあった。そのため、空隙率が同程度であるにもかかわらず、付着モルタル量が少なく原コンクリートの粗骨材が多く含まれる再生骨材（大）を用いたポラスコンクリートの強度の方が、再生骨材（小）を用いたポラスコンクリートのそれに比べて大きくなる傾向にあった。

各強度のばらつきに関しては、圧縮強度に関しては、骨材の種類の違いによって明確な差は認められなかった。一方、引張強度や曲げ強度など、1本のひび割れに支配されて破壊する試験結果においては、再生骨材を使用した場合の方が、砕石を使用した場合にくらべてばらつきが小さい傾向にあった。

3.2 空隙率と圧縮強度の関係

再生骨材ならびに砕石を用いたポラスコンクリートの空隙率を表-3に示す。得られた空隙率のそれぞれの平均値は26.5 - 32.5%の範囲にあり、目標空隙率を大幅に上回った。これは、締固めの程度が目標より小さかったことによるものと考えられるが、詳細な原因は不明である。

図-5に圧縮強度と空隙率の関係を示す。砕石を用いた場合には、空隙率が大きくなるほど圧縮強度が低下し、骨材寸法が異なる場合においても、圧縮強度と空隙率の関係は同様であった。一方、再生骨材を用いた場合にも、空隙率

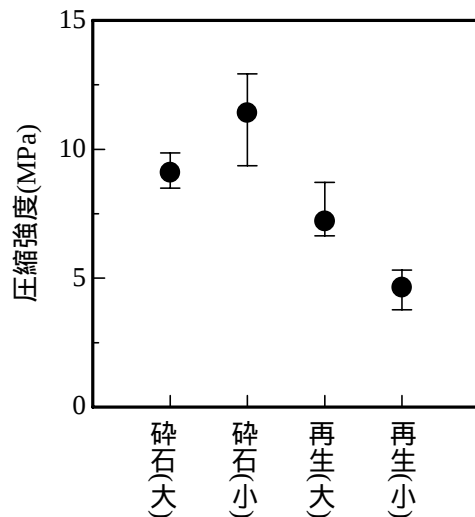


図 - 2 圧縮強度

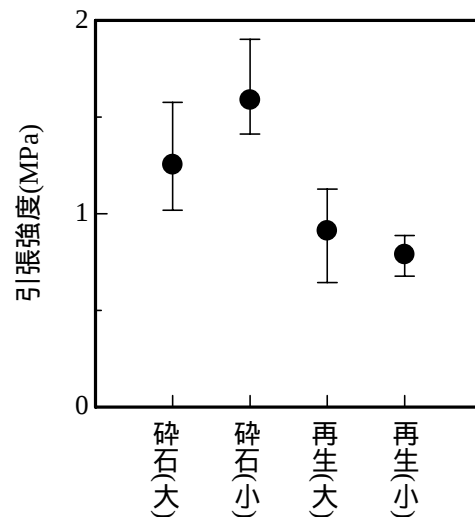


図 - 3 引張強度

が大きいほど、圧縮強度は低下する傾向が伺える。ただし、各空隙率において、再生骨材（大）を用いた場合の強度が再生骨材（小）を用いた場合のそれより小さくなることはなく、骨材粒径の違いによって異なる圧縮強度と空隙率の関係にある可能性が示された。この理由としては、再生骨材（大）は原コンクリートの粗骨材の寸法と同程度であり、見た目にも原コンクリートの粗骨材（モルタル付着）が大部分を占めていることから、骨材の強度が確保されているものとする。比較的低処理である低品質骨材であっても、再生骨材の強度に依存したポーラスコンクリートの強度低下を抑制することが可能であり、例えば、原コンクリートの粗骨材寸法と同程度の再生骨材の使用が目安となる可能性が示された。

3.3 静弾性係数の計測

コンプレッソメータならびにひずみゲージを使用して計測した応力 - ひずみ関係を図 - 6 に、それらを用いて算定した各ポーラスコンクリートの静弾性係数を、比較用普通コンクリートの静弾性係数とともに表 - 4 ならびに図 - 7 に示す。計測方法の違いによらず、再生骨材を用いたポーラスコンクリートの静弾性係数は、砕石を用いたポーラスコンクリートのそれよりも小さくなった。この理由は、再生骨材に付着したモルタルならびにモルタル塊の混入によるもの

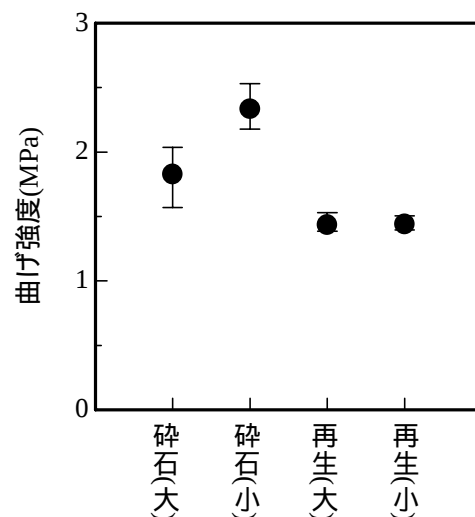


図 - 4 曲げ強度

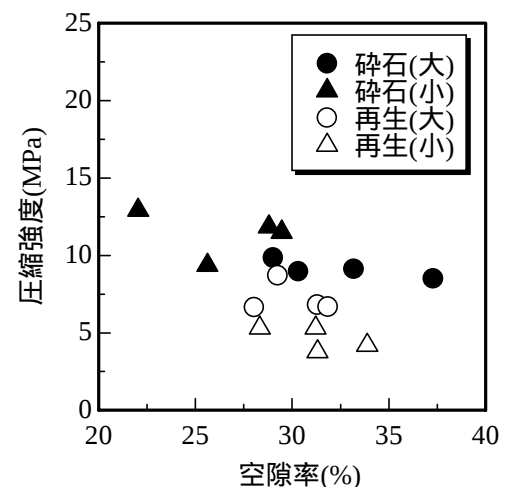
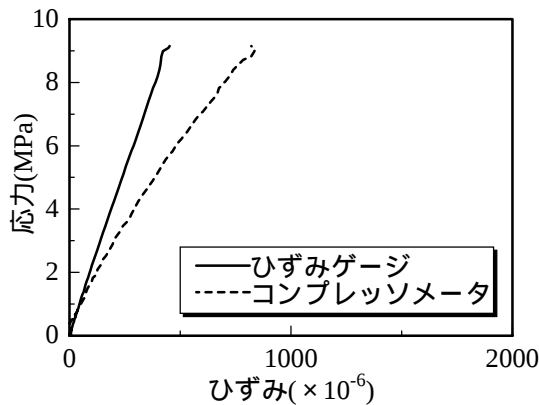


図 - 5 圧縮強度と空隙率の関係

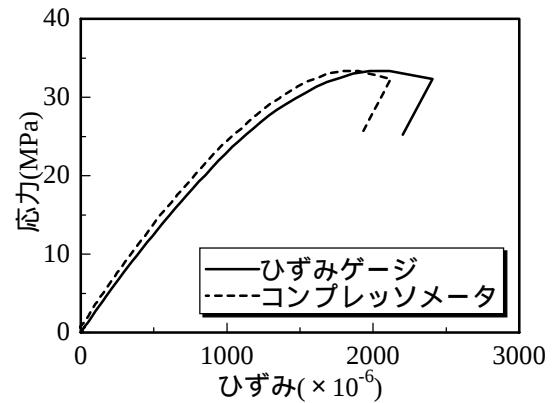
表 - 4 静弾性係数（平均値）

コンクリートの種類	骨材の種類	静弾性係数（GPa）					
		最大荷重の 1/3 の応力を使用			最大荷重の 1/5 の応力を使用		
		コンプレッソメータ A_1	ひずみゲージ B_1	B_1/A_1	コンプレッソメータ A_2	ひずみゲージ B_2	B_2/A_2
ポーラスコンクリート	砕石(大)	13.2	18.7	1.42	15.5	18.3	1.18
	砕石(小)	19.0	21.4	1.13	18.8	19.2	1.02
	再生(大)	10.6	16.4	1.55	11.2	16.5	1.47
	再生(小)	7.04	10.1	1.43	7.67	9.67	1.26
普通コンクリート*	-	26.7	25.8	0.97	-	-	-

*静弾性係数測定時の比較用



(a) 砕石(大)ポーラスコンクリート



(b) 普通コンクリート

図 - 6 圧縮試験における応力 - ひずみ関係

と考えられる。

普通コンクリートについては、計測方法の違いによらず、ほぼ同程度の静弾性係数が得られた。一方、ポーラスコンクリートに関しては、コンプレッソメータを用いて算定した静弾性係数に対する、ひずみゲージを用いて算定した静弾性係数は、1.5 倍程度であった（表 - 4 参照）。骨材の寸法に対して 3 倍程度の長さのひずみゲージを使用したか、局所的なひずみを計測したこと、ならびにセメントペーストにより局所的に補強されていることの影響が考えられる。

さらに、普通コンクリートでは弾性域と考えられている最大荷重の 1/3 以下の領域において、ポーラスコンクリートのひび割れ性状に依存した剛性低下が生じている可能性が考えられる。そこで、式(1)にて用いる応力（ S_1 ）を「最大荷重の 1/5 に相当する応力」として再計算した結果を表 - 4 に示す。これによると、コンプレッソメータによる静弾性係数の値が大きくなり、

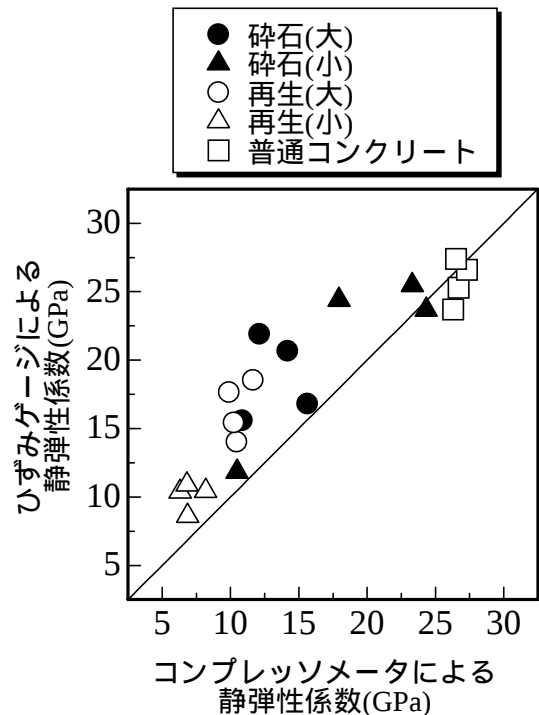


図 - 7 静弾性係数の測定結果(1/3 応力)

ひずみゲージによるそれとの比 (B_2/A_2) が小さくなった。ポーラスコンクリートの圧縮試験では、初期段階からひび割れが発生するなど、ポーラスコンクリート特有の破壊が生じている可能性が示しているものと考えられる。

今後は、ポーラスコンクリート特有のひび割れ発生メカニズムを考慮し、弾性係数を適切に評価する手法の確立にむけて、適切なゲージ長さに関する検討や、表面に塗布する材料の種類の違いによる影響の検討、ならびにデータの充実が必要である。

4. おわりに

本研究では、粒径の異なる低品質再生骨材ならびに砕石を使用したポーラスコンクリートを作製し、その力学特性について検討するとともに、ポーラスコンクリートの静弾性係数を計測する方法について基礎的な検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの各種強度は、砕石を用いたポーラスコンクリートのそれらより小さくなる傾向にあった。特に、再生骨材（小）を用いた場合に、圧縮強度が著しく低下することが明らかとなった。
- (2) 同一の空隙率においては、再生骨材（大）を用いた場合の強度が再生骨材（小）を用いた場合のそれより小さくなることはなく、骨材粒径の違いによって異なる圧縮強度と空隙の関係にある可能性が示された。この理由としては、再生骨材（大）は原コンクリートの粗骨材の寸法と同程度であり、原コンクリートの粗骨材が多量に含まれていることによるものと考えられる。
- (3) ひずみゲージを用いて算定した静弾性係数は、コンプレッソメータを用いて算定したそれに比べて、およそ 1.5 倍程度であった。そこで、最大荷重の 1/5 に相当

する応力を用いて再計算した結果、コンプレッソメータによる静弾性係数の値が大きくなるケースもあった。ポーラスコンクリートの圧縮試験では、かなり初期段階からひび割れが発生するなど、ポーラスコンクリート特有の破壊が生じている可能性が示された。

謝辞

本研究は、「岐阜県研究開発財団 RSP 事業可能性試験テーマ、課題名：リサイクル材を用いたポーラスコンクリート版の開発」の一部として実施した。また、本研究で用いた再生骨材は、丸栄コンクリート工業(株)からご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 玉井元治，杉野守，芦田馨：連続空隙を有するポーラスコンクリートを用いた緑化に関する研究，コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.37-42，1993
- 2) 山崎竹博，出光隆，日比野誠：セメントおよびポリマー結合材を用いた NFC の植生材料への適用に関する研究，自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.123-128，1995
- 3) 吉森和人ほか：ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究，第 49 回セメント技術大会講演集，pp.768-773，1995
- 4) 先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，山海堂，2001
- 5) 土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書[基準編]，pp.443-445，1996
- 6) 日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書，1995