

論文 再生骨材を使用したオートクレーブ処理ポーラスコンクリートの強度性状

友竹 博一*1・田中 義人*2・山戸 博晃*3・鳥居 和之*4

要旨：再生骨材を使用したオートクレーブ処理フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度，弾性係数，透水係数および水酸化カルシウムの生成量を良質な硅石骨材を使用した場合と比較検討した。その結果，再生骨材を使用したオートクレーブ処理フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの圧縮強度および弾性係数は，再生骨材自身の物理的性質の影響を受け，硅石骨材を使用した場合よりも多少小さくなった。しかし，同一の連続空隙率における透水係数は，硅石骨材を使用した場合と同程度であり，水酸化カルシウムの生成量は硅石骨材の場合と同様にゼロにすることができた。

キーワード：ポーラスコンクリート，再生骨材，フライアッシュ，オートクレーブ処理

1. はじめに

循環型社会形成推進基本法をはじめとして，建設リサイクル法など関連6法が平成13年5月に成立し，建設廃材のリサイクル利用の研究が活発に進められている。また，解体コンクリートから製造された再生骨材については，JISの前段階である標準情報(TRA 0006)が公開された。

ポーラスコンクリートは，水質浄化などの環境負荷低減および緑化などの生物対応の面で環境に優しいコンクリートとして，実用化が進んでいる^{1),2)}。しかし，水環境下や緑化に適用した場合は，ポーラスコンクリートから溶出する高アルカリの水酸化カルシウムが生物の生息を阻害する可能性があることから，水酸化カルシウムの生成量を低減する必要がある³⁾。一方，ポーラスコンクリートの目標強度は最大でも20 N/mm²程度であるので，再生骨材などの低品質骨材も生物共生型ポーラスコンクリート用骨材としては有効に活用できるものと考えられる。

本研究は，再生骨材をリサイクル利用するとともに，水酸化カルシウムの溶出量を大きく低減する目的で，フライアッシュを40%添加したオートクレーブ処理ポーラスコンクリートの力学的諸性質を良質な硅石骨材使用の場合と実験的に比較検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に使用した2種類の骨材の物理的性質を表-1に，フライアッシュの物理的性質および化学成分を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16,粉末度:3300cm²/g)を，練混ぜ水は水道水を，混和剤はナフタリン系高性能減水剤を使用した。また，ポーラスコンクリートの設計空隙率は25%とし，ポーラスコンクリート硬化体の強度発現性と水酸化カルシウムの生成量の実験結果⁴⁾を参考として，フライアッシュの重量置換率を40%とした。ポーラスコンクリートの配合を表-3に示す。

*1 株式会社ホクコン 設計技術部 研究開発室長 (正会員)

*2 株式会社ホクコン 環境事業本部 ビオシステム事業所長 (正会員)

*3 金沢大学技術官 工学部土木建設工学科

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表 - 1 骨材の物理的性質

種別	記号	骨材径 (mm)	密度	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	吸水率すりへり減量 (%)	B S 破砕値 (%)
再生骨材	RA	10~20	2.45	5.6	1.30	30.6	22.3
珪石骨材	NA	10~20	2.62	1.1	1.56	15.0	16.3

表 - 2 フライアッシュの物理的性質および化学成分

種別	記号	分類	密度	ブレン比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)				
					Ig.Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
分級細粉*	FA・A	種	2.38	5500	3.0	57.0	27.7	6.1	5.5
原粉	FA・B	種	2.17	3890	4.1	62.5	23.2	4.1	1.5

* 石炭専焼火力発電所 (H 電力N火力発電所, 海外炭使用) の石炭灰原粉を分級したものの。

表 - 3 ポーラスコンクリートの配合

骨材の種別	粉体の種別	記号	設計空隙率 (%)	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	粗骨材 G	フライアッシュ FA	混和剤 Ad
再生骨材	普通ポルトランドセメント単味	RA・OPC	25	25	80	318	1396	-	0.954
	フライアッシュ分級細粉 40% 置換	RA・FA・A	25	25	74	178	1396	119	1.485
	フライアッシュ原粉 40% 置換	RA・FA・B	25	25	74	172	1396	115	2.296
珪石骨材	普通ポルトランドセメント単味	NA・OPC	25	25	66	265	1560	-	0.795
	フライアッシュ分級細粉 40% 置換	NA・FA・A	25	25	62	148	1560	99	1.235
	フライアッシュ原粉 40% 置換	NA・FA・B	25	25	60	144	1560	96	4.800

2.2 試験体の作製方法および試験項目

(1) 試験体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜは、容量 50 リットルのパン型強制練りミキサを使用した。試験体の成形には、テーブル型振動機と表面振動機を使用して、10×20cm の円柱試験体を 3 層に分けて充填して作製した。

(2) 試験体の養生条件

オートクレーブ養生のものは、蒸気養生 (最高温度 65 で 3 時間保持) 後に、オートクレーブ養生 (最高温度 180、10 気圧で 4 時間保持) を実施し、その後は所定材齢まで 20 の水中養生を行った。一方、標準養生のものは、蒸気養生 (最高温度 65 で 3 時間保持) を実施後、オ

ートクレーブ養生と同様に所定材齢まで 20 の水中養生を行なった。

(3) 試験項目

試験項目は、圧縮強度、静弾性係数 (コンプレッソメータ使用)、超音波パルス伝播速度、動弾性係数、連続空隙率⁵⁾、透水係数⁵⁾および水酸化カルシウムの生成量とした。

圧縮強度試験の際には、ポーラスコンクリート試験体の両端に硫黄キャッピングを施した。水酸化カルシウムの生成量の測定には、圧縮強度試験後の試験体のセメントペースト部分をアセトンに浸漬して水和反応を停止させた粉末試料を用いて、DSC (示差走査熱量分析) で検量線を作成して定量分析を実施した。また、圧縮試

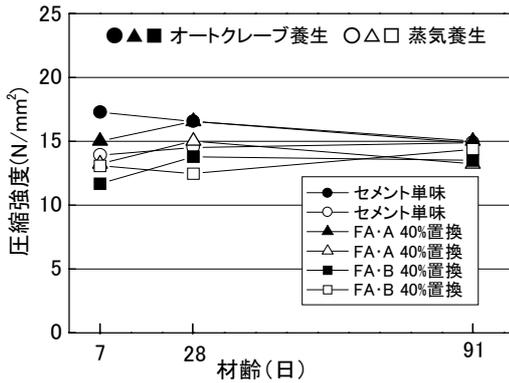


図 - 1 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と材齢の関係

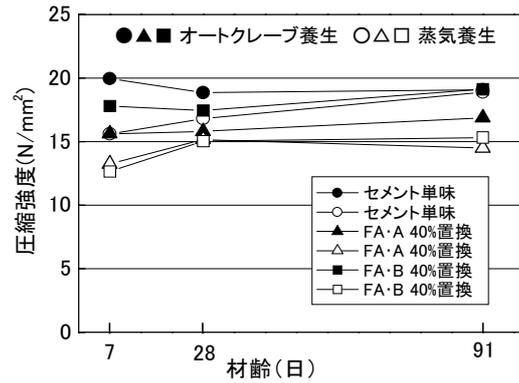


図 - 2 珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と材齢の関係

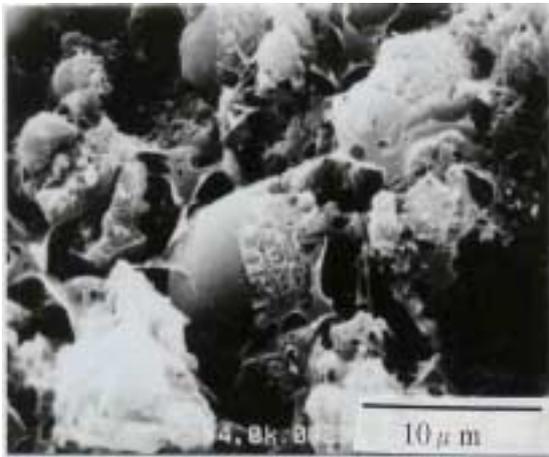


写真 - 1 フライアッシュ粒子の表面に生成したポゾラン反応生成物 (FA・B40%置換, 28日材齢)

験後の破断面より採取した試料を使用して、SEM-EDXAにより硬化体組織の観察を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 ポーラスコンクリートの圧縮強度

再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図 - 1 および図 - 2 示す。再生骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメント単味、フライアッシュ分級細粉および原粉の置換率 40%の配合において、またオートクレーブ養生と蒸気養生において、天然珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度より、1~2割程度小さくなり、材齢 91 日に

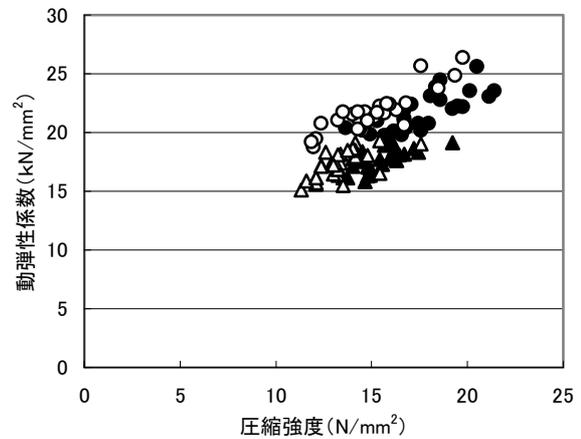


図 - 3 再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と動弾性係数との関係

における圧縮強度の最大値は 15N/mm^2 となった。

珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度では、フライアッシュ原粉の置換率 40%配合のオートクレーブ養生において、材齢の経過に伴う若干の強度増加が認められ、材齢 91 日で普通ポルトランドセメント単味と同程度の 18N/mm^2 の値となった。フライアッシュ原粉は、フライアッシュ分級細粉より比表面積は小さいが、化学成分におけるシリカ分が 62.5%と多いことから、オートクレーブ養生時の水熱反応によりポゾラン反応が促進され、フライアッシュのガラス相が活発に反応した結果、11 トバモライトゲル ($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$) などの結晶度の高い水和生成物が多く生成されたことによるものと

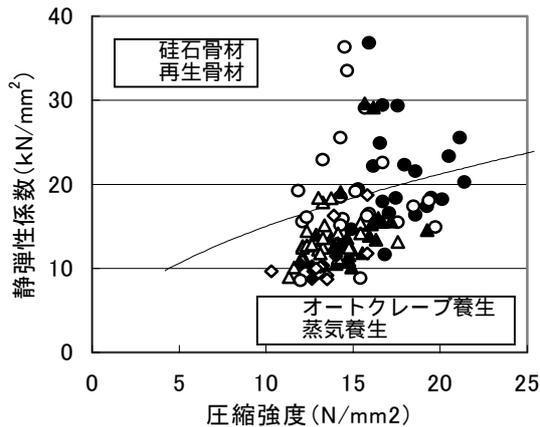


図 - 4 再生骨材およびシリカ骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

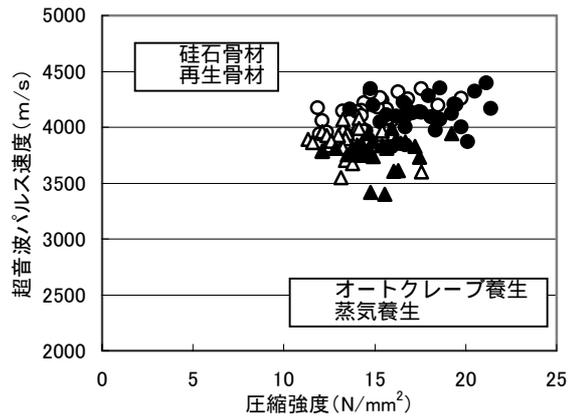


図 - 5 再生骨材およびシリカ骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と超音波パルス伝播速度との関係

推測された⁶⁾。オートクレーブ処理したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの SEM 像を写真 - 1 に示す。フライアッシュの粒子表面には箔状または繊維状の水和生成物 (CSH) が多数生成しており、緻密な硬化体組織が形成されているのが観察された。

再生骨材を使用したポーラスコンクリートの材齢 91 日の圧縮強度では、フライアッシュ原粉の置換率 40%と普通ポルトランドセメント単味の配合のオートクレーブ養生においては強度増加がほとんど認められず、配合および養生条件には関係なく 13~15N/mm²程度の値になった。これは、再生骨材の原骨材表面にセメントモルタルが付着しており、原骨材の界面組織が内部欠陥となったことや、フライアッシュのポゾラン反応により生成された 11 トバモライトゲルなどの結晶度の高い水和生成物が強度発現にあまり貢献しなかったことにより、ポーラスコンクリートの強度増加が頭打ちになったものと推測された。

3.2 ポーラスコンクリートの動弾性係数および静弾性係数

図 - 3 に再生骨材およびシリカ骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と動弾性係数の関係を示す。ポーラスコンクリートの圧縮強

度と動弾性係数との間には直線的な関係が存在し、再生骨材およびシリカ骨材ともに圧縮強度に比例して動弾性係数が増加する傾向が認められた。再生骨材を使用したポーラスコンクリートの動弾性係数は、配合および養生条件に関係なくシリカ骨材を使用したポーラスコンクリートの動弾性係数より同一圧縮強度において 1~2 割程度小さくなった。また、蒸気養生のものと比較して、オートクレーブ養生のものは同一の圧縮強度に対する動弾性係数が若干小さくなる傾向があった。オートクレーブ養生のように高温高圧下に打設直後のコンクリートが置かれると、骨材とセメントペーストの熱伝導率の相違によりコンクリートに微細なひび割れを発生することが指摘されている⁷⁾。このことを確認するために、蛍光塗料を含む樹脂を含浸した試験体の研磨面を蛍光顕微鏡にて観察したが、蒸気養生およびオートクレーブ養生ともに骨材の種類に関係なく養生に起因する微細なひび割れの発生は認められなかった。

図 - 4 に再生骨材およびシリカ骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の曲線は、ACI の式 ($E = 42.7 \times 1.5 \times f'c^{1/2}$, E: 静弾性係数, γ : コンクリートの比重、 $f'c$: コンクリートの圧縮強度 N/mm²) であり、普通コンクリートの代

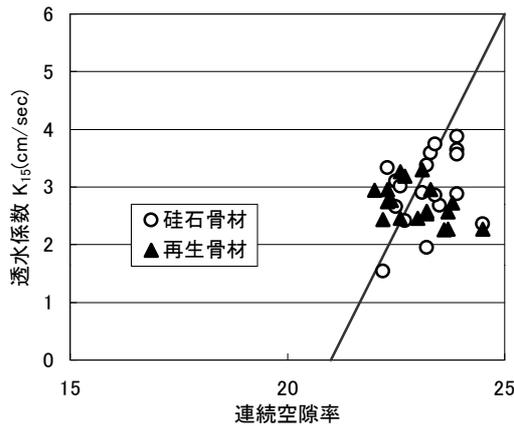


図 - 6 再生骨材及び珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの透水係数と連続空隙率の関係

表的な値を示している。ポーラスコンクリートの静弾性係数は通常の普通コンクリートよりもばらつきが大きくなるとともに、付着モルタル分を含む再生骨材を用いた試験体は珪石を使用したものと比較して静弾性係数の値がかなり低下した。すなわち、再生骨材を使用したポーラスコンクリートの静弾性係数は、動弾性係数の場合よりもさらに減少し、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの静弾性係数より同一圧縮強度において3～4割程度小さくなった。

3.3 ポーラスコンクリートの超音波パルス伝播速度

図 - 5 に再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と超音波パルス伝播速度の関係を示す。再生骨材を使用したポーラスコンクリートの超音波パルス伝播速度は、3500～4000m/sec程度であり、連続的な空隙を有するにも拘らず、通常の普通コンクリートと同程度であった。しかし、配合および養生条件に関係なく、再生骨材に付着したモルタル分の影響で珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの超音波パルス伝播速度より同一圧縮強度において1～2割程度小さくなった。全体的な傾向として、ポーラスコンクリートでは、圧縮強度に対する超音波パルス伝播速度の変化が小さく、ばらつきの範囲も大きくなる傾向にあり、

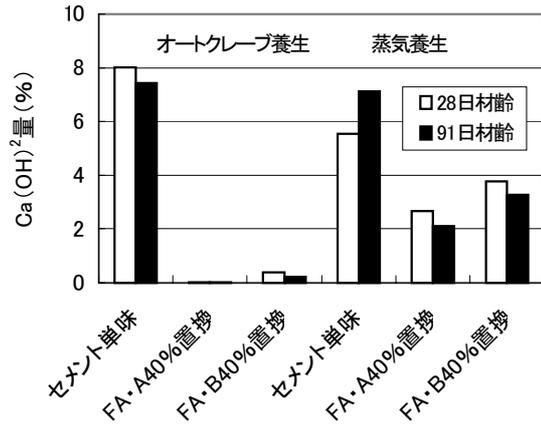


図 - 7 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量

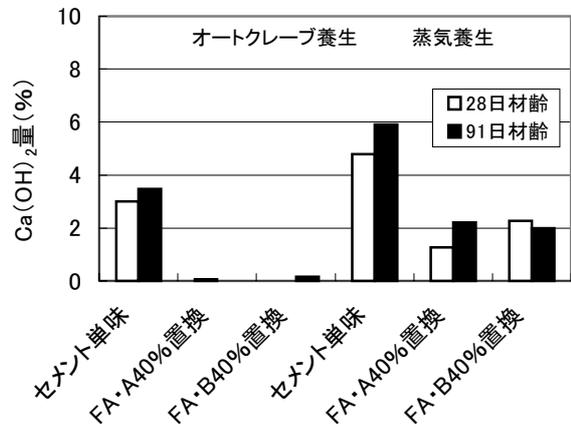


図 - 8 珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量

ポーラスコンクリートの品質管理に超音波パルス伝播速度を適用するのは困難と考えられた。

3.4 ポーラスコンクリートの透水係数

図 - 6 に再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの透水係数と連続空隙率の関係を示す。ポーラスコンクリートの連続空隙率は22～25%の範囲にあり、再生骨材および珪石骨材ともに設計空隙率25%に対して測定値が若干低下した。また、再生骨材を使用したポーラスコンクリートの同一連続空隙率における透水係数は、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの場合と同程度であるが、再生骨材の付着モルタル分の影響を受け透水係数と連

続空隙率との関係が不明確なものとなった。

3.5 ポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量

再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量を図-7および図-8に示す。再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量は、フライアッシュ分級細紛および原粉の置換率40%の配合において、普通ポルトランドセメント単味の配合と比較して大きく減少しており、さらにオートクレーブ養生のものは、フライアッシュのポゾラン反応の過程で硬化体中の水酸化カルシウムが完全に消費されたため、ほぼゼロとなった。また、普通ポルトランドセメント単味の配合では、オートクレーブ養生および蒸気養生において、再生骨材を使用したポーラスコンクリートの方が珪石骨材を使用したポーラスコンクリートよりも水酸化カルシウムの生成量が多くなった。これは再生骨材中のモルタル分に含まれる水酸化カルシウムの影響によるものと推察された。

4. 結論

再生骨材および珪石骨材を使用したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの力学的諸性質について比較検討した。本研究により得られた主要な結果をまとめると、次のようである。(1) 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度は、オートクレーブ養生および蒸気養生ともに、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートよりも1~2割程度小さくなった。同様に、再生骨材を使用したポーラスコンクリートの超音波パルス伝播速度も、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートよりも同一圧縮強度に対して1~2割程度小さくなった。(2) 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの動弾性係数は、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートより同一圧縮強度において1~2割程度小さくなった。また、再生骨材を使用

したポーラスコンクリートの静弾性係数は、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートより同一圧縮強度において3~4割程度小さくなった。

(3) 再生骨材を使用したポーラスコンクリートの同一連続空隙率における透水係数は、珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの場合と同程度となったが、連続空隙率に対するばらつきの範囲は増大した。

(4) 再生骨材および珪石骨材を使用したポーラスコンクリートの水酸化カルシウムの生成量は、オートクレーブ処理したフライアッシュ分級細紛および原粉の置換率40%の配合にてほぼゼロになった。

参考文献

- 1) 玉井元治ほか：連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究，土木学会論文集，No.452/ -20，pp.81-90，1992.
- 2) 田中光徳ほか：多孔質コンクリートを用いた河川浄化に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.52，pp.772-777，1998
- 3) 天羽和夫：海洋生物対応型エココンクリートの実施例，コンクリート工学，Vol.36，No.3，pp.39-41，1998
- 4) 澤崎晴彦ほか：フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの強度性状と暴露性状，セメントコンクリート論文集，No.53，pp.483-488，1999
- 5) エココンクリート研究委員会報告書，ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)，ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)，日本コンクリート工学協会，pp.54-58，1995
- 6) 長滝重義ほか：高温養生下におけるフライアッシュコンクリートの力学特性，土木学会論文集，No.390，pp.189-197，1988
- 7) 大塚浩司ほか：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響，土木学会論文集，No.585，pp.97-111，1998