

# 論文 フライアッシュを用いたポーラスコンクリートの諸特性

横井克則<sup>\*1</sup>・天羽和夫<sup>\*2</sup>・河野 清<sup>\*3</sup>

**要旨：**本研究は、ポーラスコンクリートの結合材にフライアッシュを使用した場合の圧縮強度や応力-ひずみ曲線などの強度特性や、硫酸塩に対する抵抗性について報告した。また、実河川中に沈設させた一部供試体について、生息した水生昆虫の種類およびその数を調査し、生物との対応について検討を行った。その結果、ポーラスコンクリートの空隙率とフライアッシュの代替率を適正に選定すれば、ポーラスコンクリートの品質改善とフライアッシュの有効利用ができ、また、ポーラスコンクリートは、河川の生物環境育成材料に適していることが示された。

**キーワード：**ポーラスコンクリート、フライアッシュ、強度特性、対生物性

## 1. はじめに

地球環境問題が深刻化する中で、コンクリート分野においても構造的な性能だけでなく、生態系との調和あるいは共生を図る機能を有するコンクリートや、地球環境への負荷を低減できるコンクリートに関する研究開発が求められるようになっている[1]。その一つに、限定した粒度の骨材を用いて作られるポーラスコンクリートは、表面が凸凹で内部に連続空隙構造を持つことから、生物との対応が可能になるといわれている[2]。しかし、ポーラスコンクリートに関する研究は普通コンクリートを対象とした研究に比べて少なく、物性についても明らかにされていない部分が残されている。また、資源の少ない我が国にとって、省資源、省エネルギーの観点から、石炭灰の有効利用に関する技術開発は極めて重要な研究課題の一つである。

そこで本研究では、ポーラスコンクリートの空隙率やフライアッシュの代替率を変化させた場合における圧縮強度や応力-ひずみ曲線などの力学的特性や、ポーラスコンクリートを魚礁や海水の水質浄化工[3]に用いる場合を想定して、硫酸塩に対する抵抗性について調査した。また、実河川中に沈設させた一部供試体について、水生昆虫の種類およびその数を調査し、生物との対応についての検討も行った。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料とコンクリートの配合

使用材料には、普通ポルトランドセメント（比重=3.15、比表面積3230cm<sup>2</sup>/g）、骨材には徳島県阿波郡市場町産の硬質砂岩碎石（粒径=5～10mm、比重=2.53）と一部供試体に吉野川産の川砂（比重=2.55、F.M.=2.80）を

表-1 フライアッシュの化学成分 (%)

主 成 分				副 成 分		アルカリ
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
3.36	55.8	24.8	4.81	1.61	0.38	0.9

\* 1 高知工業高等専門学校助手 土木工学科、工修（正会員）

\* 2 阿南工業高等専門学校助教授 建設システム工学科（正会員）

\* 3 徳島大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

用いた。また、混和材として、表-1に化学成分を示すフライアッシュ（比重=2.22）を使用した。

ポーラスコンクリートの配合条件は、表-2に示すように、水結合材比を26%の一定とし、コンクリートの空隙率を15~25%に変化させた。

## 2.2 実験方法

コンクリートの練り混ぜは、容量50Lのパン型強制練りミキサーを用いて、図-1に示すように、分割練り混ぜ法により150秒間行った。練り混ぜ後、直ちにコンクリートをφ10×20cmの円柱型枠に一層で打ち込み、振動台（振動数4000rpm、公称振幅1.0mm）で40秒間振動締固めを行った。空隙率は、ポーラスコンクリートの空隙率試験方法に準じ[1]、重量法により求めた。

供試体は翌日脱型を行い、恒温室内の水槽で20±2°Cの水中養生を行い、材令7、28、91日および1年における圧縮強度、応力-ひずみ曲線、静弾性係数、および動弾性係数の測定を行った。また、硫酸塩抵抗性試験は、材令7日までに水中養生した供試体を10%硫酸マグネシウム溶液に浸漬して、動弾性係数の測定と圧縮強度を求めた。なお、圧縮強度試験は、円柱供試体の上下面にイオウキャッピングを施した後に行った。

## 3. 実験結果の検討および考察

### 3.1 強度特性

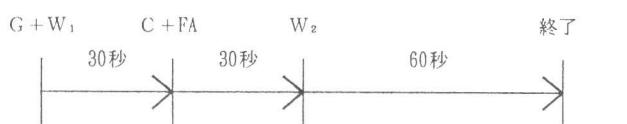
ポーラスコンクリートの品質改善と産業副産物の有効利用を図るために、フライアッシュをセメントの一部として代替使用し、その強度特性を調査した。

#### (1) 圧縮強度

コンクリートの種類と圧縮強度との関係を図-2および図-3に示す。フライアッシュの有無にかかわらず、いずれのポーラスコンクリートも空隙率が大きくなると強度は小さくなり、また、普通コンクリート(OC)およびフライアッシュコンクリート(F20)に比べて材齢にともなう強度増加も小さくなっている。

表-2 コンクリートの配合条件

コンクリートの種類（総称）	供試体	W/C (%)	フライアッシュの代替率(%)	目標空隙率(%)
普通コンクリート(OC)	OC	60	0	3±1
ポーラスコンクリート(P)	P15	26	0	15±1
	P20			20±1
	P25			25±1
フライアッシュコンクリート(F20)	F20	60	20	3±1
フライアッシュ・ ポーラスコンクリート(PF)	P15F20	26	20	15±1
	P20F10		10	20±1
	P20F20		20	20±1
	P20F30		30	20±1
	P25F20		20	25±1



G:骨材、C:セメント、FA:フライアッシュ、W<sub>1</sub>:1次水、W<sub>2</sub>:2次水

図-1 練り混ぜ方法

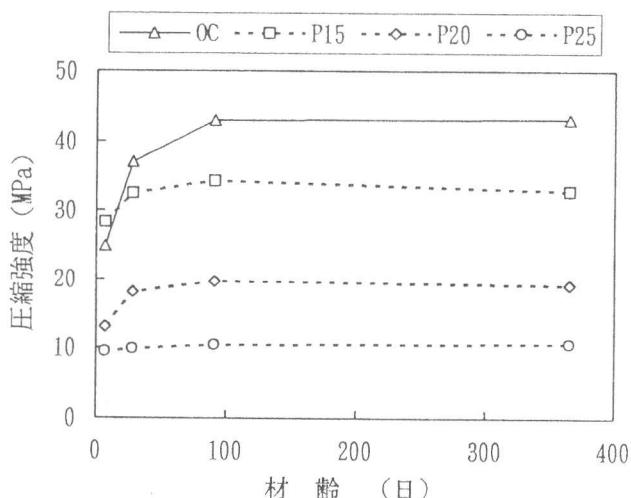


図-2 圧縮強度 (OC, P)

いる。これは、ポーラスコンクリートは連続空隙を有するため、水と接触するセメントペーストの面積が大きくなり、早期に強度発現が発生するといわれている[4]。フライアッシュの影響としては、空隙率が20%以上の場合には、フライアッシュを用いたポーラスコンクリートの91日圧縮強度は、普通セメントを用いたものとほぼ同じ値となっており、代替率30%のものについては材齢に伴う強度増加も大きくなっている。したがって、水和反応の遅いフライアッシュをポーラスコンクリートに利用すれば、強度発現が比較的早くなる[4]ことや、普通コンクリートよりも単位セメント量が多くなるポーラスコンクリートではセメントの節約が可能になることなど、有効的な面が多いと考えられる。

ポーラスコンクリートは空隙率が大きく、一般に用いられているセメント水比によって強度との関係を表すことができない。このため、河野ら[5]は、ポーラスコンクリートの配合と強度との関係にTalbotのセメント空隙率を適用している。そこで、一例としてフライアッシュを20%混入した供試体の強度と結合材空隙比（結合材の絶対容積  $b$  と連続空隙量  $v$  と水の容積  $w$  の合計 ( $v + w$ ) との比  $b / (v + w)$ ）との関係は、図-4に示すようにかなり高い相関で線形関係が得られ、フライアッシュを用いたポーラスコンクリートにも空隙説の適用が可能と考えられる。

## (2) 応力-ひずみ曲線

ポーラスコンクリートを構造用材料として用いるためには、応力-ひずみ曲線も必要とされるが、これに関する報告はきわめて少ない。そこで、圧縮強度試験時において、コンプレッソメータを用いて縦ひずみを測定し、図-5に示すように応力-ひずみ関係を調べた。

図から見られるように、普通コンクリートに比べてポーラスコンクリートの方が最大応

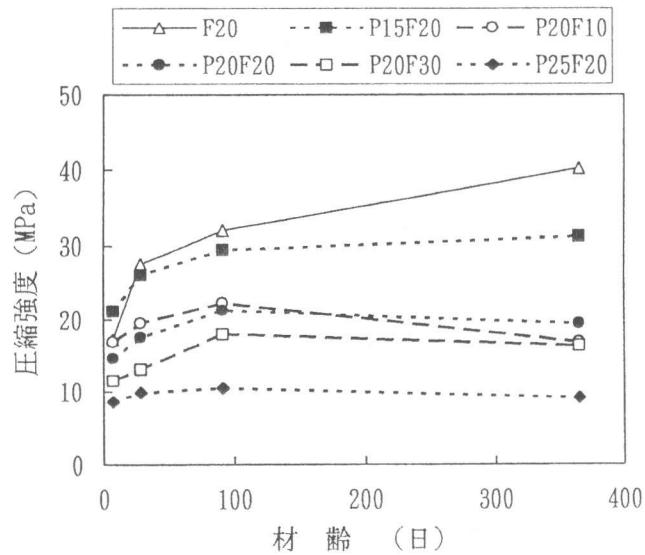


図-3 圧縮強度 (F20, PF)

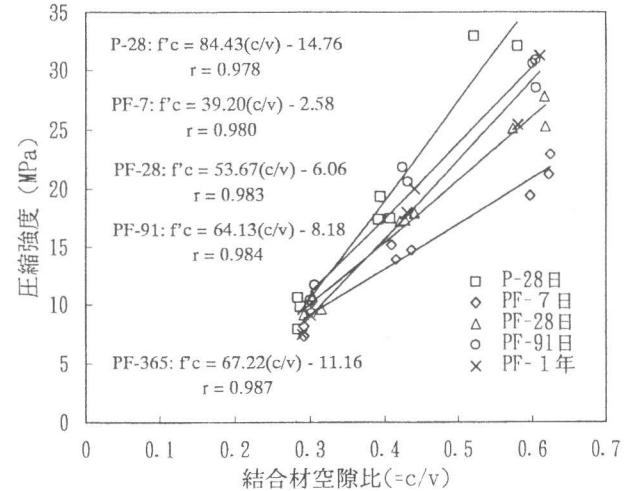


図-4 圧縮強度と結合材空隙比との関係

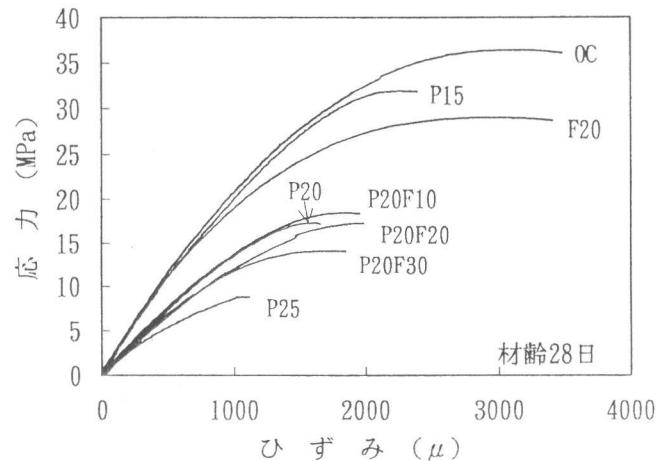


図-5 応力-ひずみ曲線

力時のひずみ量はかなり小さくなり、また空隙率が大きくなるほどこのひずみ量は小さくなることがわかった。しかし、フライアッシュの代替率がこのひずみの値におよぼす影響は小さかった。なお、ポーラスコンクリートの応力-ひずみ曲線はバラツキが大きく、測定方法など、今後さらに詳しい検討が必要と思われる。

### (3) 静弾性係数

静弾性係数は、土木学会基準（JSCE-1988）[6]の規定に従って応力-ひずみ曲線から求めた。静弾性係数と圧縮強度との関係を図-6に示し、累乗式で近似を行った。

ポーラスコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度と同じであれば普通コンクリートと大差ない値となっている。また、圧縮強度が増加するのにともない、静弾性係数も大きくなる傾向にあり、圧縮強度との関係は比較的相関の高い累乗式で表すことができている。

### (4) 動弾性係数

動弾性係数は、JIS A 1127の規定に従い、ヤング率測定器を使用して1次共鳴振動数を求める方法で測定し、その結果を図-7に示す。

動弾性係数も静弾性係数と同様に相関の高い累乗式で示すことができるが、同一圧縮強度における動弾性係数の値は、普通コンクリートに比べてポーラスコンクリートのものが小さくなっている。これは、岡田ら[7]の報告にもあるように、普通コンクリートとポーラスコンクリートとの比重の違いの影響であると考えられる。なお、静弾性係数および動弾性係数に対するフライアッシュ混入による影響はあまり見られなかった。

## 3. 2 耐硫酸塩抵抗性試験

海水中には硫酸マグネシウムや硫酸カルシウムなどが含まれており、一般に、コンクリートは海水中でこれらの硫酸塩によって、セメント組成化合物の一つであるアルミニ酸3カルシウム ( $\text{C}_3\text{A}$ ) と反応してエトリンガイトを形成し、コンクリートは崩壊するといわ

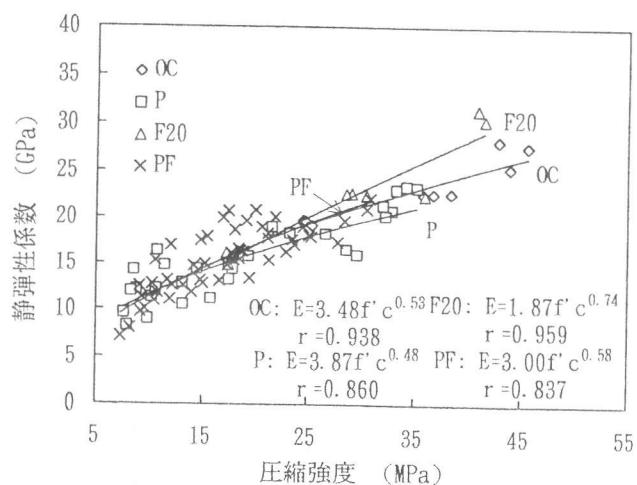


図-6 圧縮強度と静弾性係数との関係

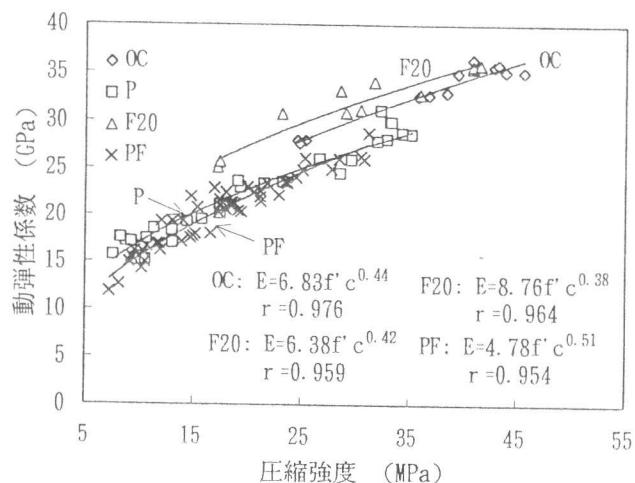


図-7 圧縮強度と動弾性係数との関係

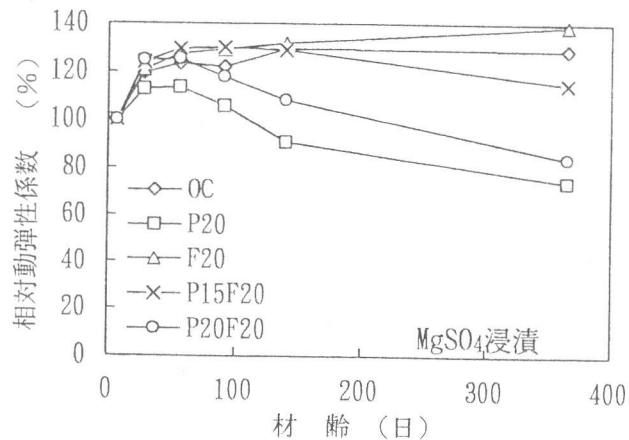


図-8 10%  $\text{MgSO}_4$ 溶液浸漬による相対動弾性係数

れている。特に、ポーラスコンクリートは連続空隙を有しているため、コンクリートの内部まで浸透溶液が浸入し、普通コンクリートに比べて劣化傾向は早くなることが考えられる。そこで、10%硫酸マグネシウム溶液に浸漬し、共鳴振動数から求めた相対動弾性係数（=各材齢における動弾性係数／水中養生7日における動弾性係数）によって、各コンクリートの硫酸塩抵抗性を調査したのが図-8である。

硫酸マグネシウム溶液に浸漬した場合は、材齢とともに相対弾性係数の値は空隙率の増加とともに低下しており、またフライアッシュを混入した方が低下の程度は小さくなっている。

次に、浸漬材齢91日および1年の圧縮強度試験の結果を浸漬直前の水中養生材齢7日の圧縮強度と共に図-9に示す。浸漬材齢91日においては、空隙率が大きくなると圧縮強度が明らかに低下する傾向があり、特にフライアッシュを混入していない空隙率25%のポーラスコンクリートでは、浸漬開始前の7日強度より低下している。また、浸漬材齢1年における強度の低下は、フライアッシュの有無にかかわらず大きく、浸漬途中で破壊した供試体もあった。

### 3.3 水生昆虫の種類と数

ポーラスコンクリートの供試体を高知県四万十川源流付近の流水中に沈設し、1年後の11月に、供試体表面と内部から生息している水生昆虫の出現種数と個体数（供試体3個の合計）を調べた。

水生昆虫の種類については、写真-1に見られるようにトビゲラ目、ヒゲナガカワトビケラやシマトビゲラの幼虫が主に観察され、他には、カゲロウ目、カワゲラ目などの幼虫も生息していることが認められた。これらの水生昆虫は、清澄な水域にしか生息できない昆虫であった。次に、コンクリートの種類による水生昆虫の出現種数と個体数は、表-3からわかるように、普通コンクリートのものに比較してポーラスコンクリートの供試体のものは大幅に増加しており、また、ポーラスコンクリートの中で

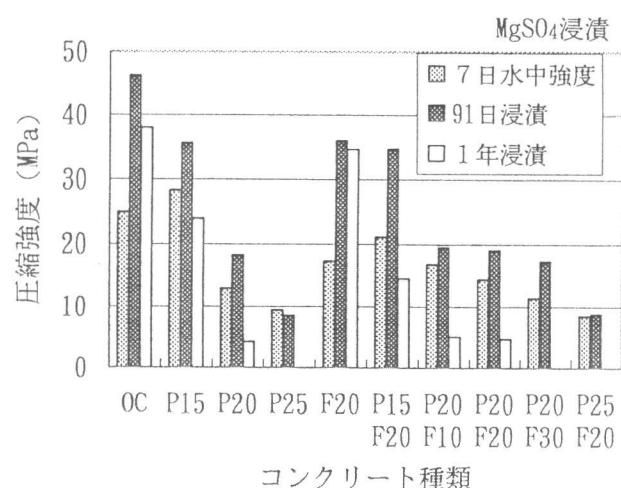


図-9 10%MgSO<sub>4</sub>溶液浸漬による圧縮強度

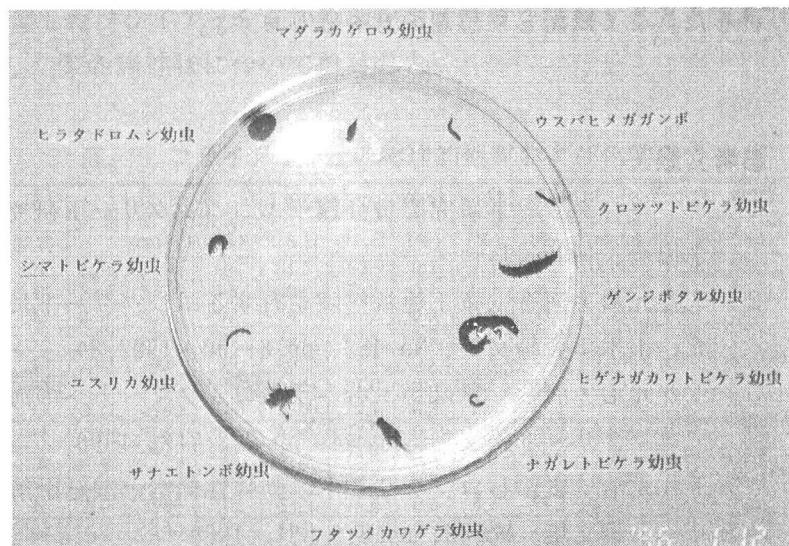


写真-1 水生昆虫の種類

表-3 水生昆虫の出現種数と個体数

コンクリートの種類	出現種数	個体数
OC	4	13
P20	9	96
P20F20	8	103

はフライアッシュを用いたものも用いないものも出現種数、個体数ともに大差のない値となっている。

以上のことから、普通コンクリートよりポーラスコンクリートが生物環境育成材料としての効果が期待できる。なお、水生昆虫の生息状況は季節によって遷移することから、今後も調査を予定している。

#### 4.まとめ

本研究では、フライアッシュを混入したポーラスコンクリートの諸性質について検討を行った。研究結果を要約すると、本実験の範囲内では以下のようない結果が得られた。

- (1) フライアッシュを用いたポーラスコンクリートの圧縮強度は、普通セメントのものと大差なかった。しかし、長期材齢でも強度増加は小さかった。
- (2) 圧縮強度と静弾性係数および動弾性係数との関係は、比較的精度の良い累乗式で表せた。
- (3) ポーラスコンクリートの硫酸塩に対する抵抗性は、フライアッシュの有無に関係なく、空隙率が大きくなるほど小さくなることがわかった。
- (4) ポーラスコンクリートは、生物環境育成材料に適していることが認められた。また、フライアッシュの有無は、水生昆虫の種類、個体数とも大差なかった。

#### 謝 辞

実験は、徳島大学コンクリート研究室卒研生（現：五洋建設㈱）佐野常幸氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) エココンクリート研究委員会編：エココンクリート研究委員会報告集、日本コンクリート工学会、1995.11
- 2) 玉井元治・河合一章：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、pp.81-90、1992.8
- 3) 玉井元治・河合一章ほか：ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.44、pp.708-713、1990
- 4) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性、セメント・コンクリート論文集、No.43、pp.376-381、1989
- 5) 河野清、天羽和夫ほか：魚礁用超硬練りコンクリートに対する配合条件の影響、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.446-451、1992
- 6) 土木学会編：コンクリート標準示方書（平成6年版）基準編、土木学会、pp.412-414、1994
- 7) 岡田清・六車熙編：改訂新版コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.465-466、1981