

# 論文 ポーラスコンクリートの水質浄化機能に及ぼす高炉スラグおよびゼオライトの効果

林 正浩\*1・水口 裕之\*2・上月 康則\*3・宮川 恒夫\*4

**要旨:** 表面積が大きく多孔質で連続空隙を持つポーラスコンクリートは、多様な生物の生息場として適した特性を持っており、この特性を利用して水質浄化への適用が検討されている。本研究は、より高い浄化機能を持ったポーラスコンクリートを開発するため、高炉スラグ微粉末および人工ゼオライトの混入率が窒素、リンの除去率および圧縮強度に及ぼす影響について調査・検討したものであり、これらの混入によって浄化機能、圧縮強度ともに高くなることが得られた。

**キーワード:** 水質浄化ポーラスコンクリート、高炉スラグ微粉末、人工ゼオライト、空隙率

## 1. はじめに

近年、湖沼や貯水池等の閉鎖性水域において、水の富栄養化現象が問題となっている。これは、各種排水などによって栄養塩の流入が増大したことや、湖沼や貯水池での水際人工構造物の建設増加による自然湖岸の消滅やそれによって引き起こされる生態系の破壊が主な原因と考えられる。

これらを解決する方法の一つとして、浄化機能を持つ人工材料を用いて、閉鎖性水域における水質浄化を行うことが考えられ、多様な生物が生息できるポーラスコンクリートの利用が検討されている。

玉井ら<sup>1)</sup>は実海洋においてポーラスコンクリートの生物付着実験を行い、普通コンクリートが3か月～数か月後から生物が付着するのに対して、ポーラスコンクリートは1か月程度で付着することを報告している。また、水口ら<sup>2)</sup>はポーラスコンクリートの空隙率と空隙寸法を変化させ、実海洋における生物付着実験から空隙率の大きい方が水質浄化に適していると述べている。さらに前川ら<sup>3)</sup>は鉄イオン交換ゼオライト(Fe型ゼオライト)はリン酸イオンを吸着する能力があることを指摘

し、伊藤ら<sup>4)</sup>は高炉スラグ散布によって沿岸海域においてリンを除去することができたと報告している。

ここで本研究では、より高い水質浄化機能を持ったポーラスコンクリートを開発するため、高炉スラグ微粉末およびFe型人工ゼオライトをポーラスコンクリートに混入し、これらが主として浄化機能に及ぼす影響について検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) セメント

セメントは、密度  $3.15 \text{ g/cm}^3$ 、28 日圧縮強さ  $40.3 \text{ N/mm}^2$  の普通ポルトランドセメントを使用した。

#### (2) 混和材

高炉スラグは、密度  $2.91 \text{ g/cm}^3$ 、比表面積  $7,910 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{SiO}_2$  33.9%のものを、ゼオライトは密度  $2.56 \text{ g/cm}^3$ 、比表面積  $10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{SiO}_2$  39.0%のFe型人工ゼオライトのものを使用した。

#### (3) 骨材

粗骨材は、密度  $2.64 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率 0.73%の

\*1 徳島大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*3 徳島大学大学院助教授 工学研究科 工博 エコシステム工学専攻

\*4 クボタ建設(株)工事本部技術部副部長

表-1 コンクリートの配合要因およびその組合せ

水粉体比(%)		25													
粗骨材粒径(mm)		5~13								13~20					
空隙率(%)		20	25						30	20	25			30	
ゼオライト混入率(%)		0	0	10	20	30	40	50	70	0	0	0	10	20	0
高炉スラグ 混入率 (%)	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	25		○			○	○	○							
	50	○	○	○	○					○	○	○	○	○	○
	70	○	○							○	○	○			○

注) ○印は実験したものの。

徳島県旧那賀川河川敷産玉砕石を使用した。なお粗骨材寸法は、5~13mm および 13~20mm の2種類とし、表乾状態で用いた。

(4) 混和剤

混和剤としてはナフタリン系の高性能 AE 減水剤を使用した。使用量はセメント質量に対して 2.5%とした。

2.2 コンクリートの配合要因およびその組合せ

使用したコンクリートの配合要因とその組合せを表-1 に示す。ここで、水粉体比は 25% の一定で、高炉スラグおよびゼオライトの混入率は、セメント質量に対して内割りとし、合計 34 種の配合とした。

2.3 供試体の作製

10×10×10cm の立方供試体は、木製型枠を用いて作製し、所定の空隙率とするため、供試体 1 体当たりの質量を理論的に求め、各供試体ごとに所定量を計りとって、ほぼ等しい 2 層に分けて詰めた。締固めは、端面直径 50mm、落下質量 2.5 kg、落下高さ 30cm の土の締固め用ランマーの底部に 9.6×10cm で厚さが 1cm の鋼板を溶接したものを用いて各層 25 回落下させて行った。

また、材齢 1 日で脱型し、材齢 14 日まで標準養生を行った。

2.4 淡水浄化室内実験

供試体は、材齢 14 日から自然水系に 3 か月間浸漬し生物を付着させたものを図-1 および図-2 のように内寸法 11×11×60cm の浄化水路に各条件ごと 5 個を 1 列に設置した。

水質浄化試験用の水は、徳島大学工学部構内の池

の水を使用し、20 ml/min の流量で循環させた。日照条件は、屋外の状況に近づけるために蛍光灯を用いて約 6,000 ルクス の光を 12 時間ごとに点灯、消灯を繰り返した。この条件で浸漬後 5 日目、10 日目、15 日目、30 日目、90 日目の計 5 回試験水の全リン、全窒素を測定した。

なお、試験水は蒸発によって減少したため、試験水量が一定となるように適宜補充し、補充した試験水中の全リンおよび全窒素量は差し引いて測定値とした。また、淡水浄化室内実験は、室温を 20±2℃ に保った恒温室内で行った。

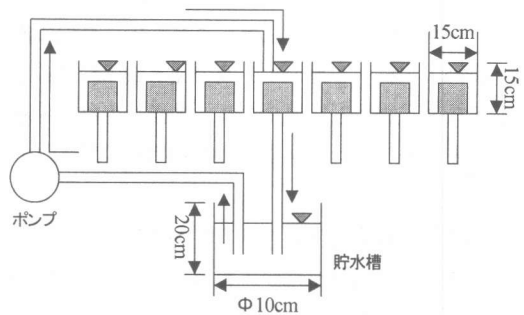


図-1 室内実験用浄化水路

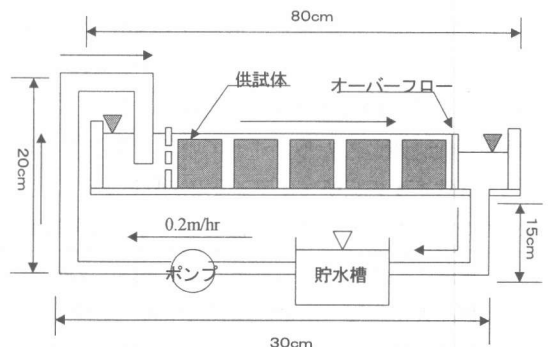


図-2 1水路分(側面図)

## 2.5 透水係数の測定

水質浄化機能と透水係数および空隙率の関係を調べるため、JCI のポーラスコンクリートの透水試験方法(案)<sup>9)</sup>に基づき、立方供試体用透水試験装置を作成し、材齢 14 日および自然水系に 3 か月浸漬し生物を付着させた後の透水係数を測定した。

## 2.6 強度試験

圧縮強度は、10×10×10cm の立方供試体の打設方向の直角方向に載荷して求めた。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 経過日数と全リン除去率との関係

全リン除去率の経過日数による変化の一例を図-3に示す。この傾向は他の配合の場合も同様となっている。ここで全リン除去率は図-3に見られるように、いずれの配合のものも同様の傾向を示しており、全リン除去率は 10 日目までは日数とともに増加しているが、30 日目ではいったん低下し、90 日目では除去率が再び大きくなっている。これは、浄化実験開始前に自然水系に浸漬して付着させた生物層が、水流により剥離したためと考えられ、30 日後から再付着あるいは生物層が増殖したためと推測できるが、このメカニズムについては今後の検討課題としたい。

### 3.2 混和材混入率と全リン除去率との関係

混和材混入率と全リン除去率との関係の一例として、最も除去率の大きかった浄化実験開始後 10 日の結果を図-4に示す。図-4に示されているように高炉スラグおよびゼオライトを混入したものの全リン除去率は、未混入のものに比べて 1.6 から 2 倍程度大きくなり、68~92%の範囲の除去率となっている。

また、ゼオライト混入率 0%で、高炉スラグを混入すると全リン除去率は 66~77%程度となっている。しかし、高炉スラグを混入しても全リン除去率の差は 10%以下と小さい。

高炉スラグ混入率 0%で、ゼオライトを混入すると全リン除去率は 72~90%程度となっており、全リン除去にはゼオライトが有効であることが示

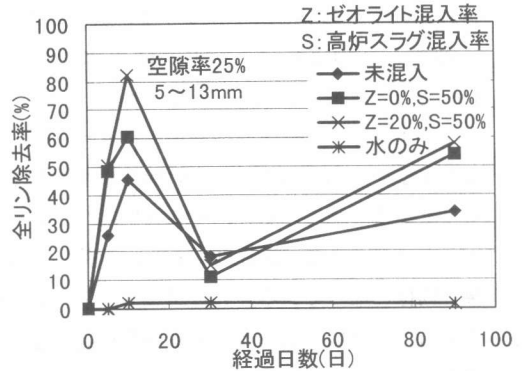


図-3 経過日数による全リン除去率の変化

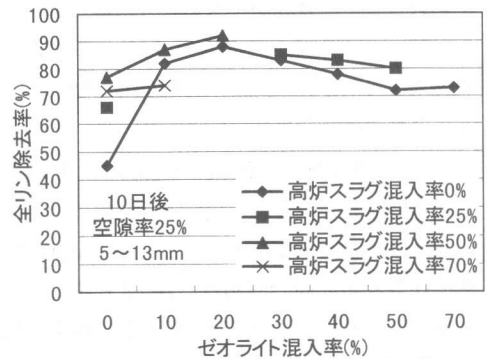


図-4 混和材混入率と全リン除去率

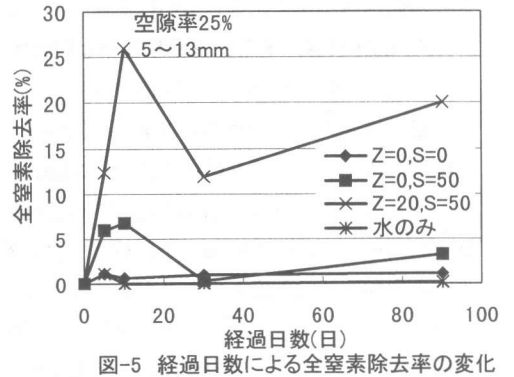


図-5 経過日数による全窒素除去率の変化

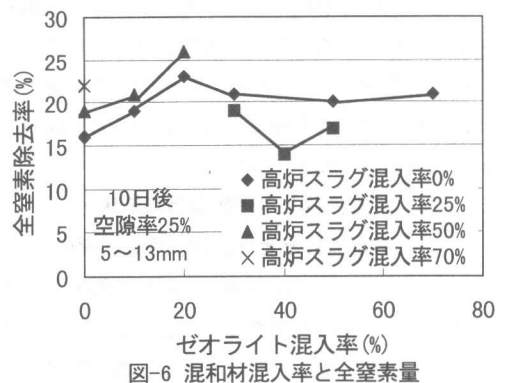


図-6 混和材混入率と全窒素量

されている。しかし、ゼオライトの混入率を 10～70%と増加させても全リン除去率の違いは 18%となっており、大きい差とはなっていない。

このように、高炉スラグ微粉末やゼオライトを混入することによって全リンの除去率を大きくすることが得られているが、その効果は、高炉スラグとゼオライトでは同程度であり、伊藤ら<sup>4)</sup>の結果と同様になっている。したがって、全リンを除去するためには、高炉スラグ微粉末を混入し、更にゼオライトを混入することによって、より除去率を大きくすることができる。今回の実験の範囲からは、ゼオライトの混入率 20%、高炉スラグの混入率 50%のとき全リン除去率は 92%と、全リン除去に最も効果的な配合となっている。

### 3.3 経過日数と全窒素除去率との関係

全窒素除去率の経過日数による変化の一例を図-5に示す。図-3に示したように、全リン除去率の経時変化と同じである。10日目までの全窒素除去率は増加しているが 30日目の除去率は減少して 90日目には除去率は再び増加している。この傾向は他の配合の場合も同様となっている。

### 3.4 混和材混入率と全窒素除去率との関係

最も大きな除去率を示した経過日数 10日における混和材混入率と全窒素除去率との関係の一例を図-6に示す。全窒素除去率は全リン除去率に比べ小さく、高炉スラグ混入率を 70%と増加させても高炉スラグ混入率 0%と比較して全窒素除去率の増加は 5%程度と大きくない。しかし、更にゼオライトを混入すると、混入率によって除去率は異なっているが、最大 10%程度大きくなっており、両者を混入することによって全窒素除去率を大きくすることができる。今回の結果では、高炉スラグ混入率 50%でゼオライトの混入率を 20%としたとき全窒素除去率は 26%となって最も効果的な配合となっている。

### 3.5 透水係数と浄化機能との関係

#### (1) 透水係数と全リン除去率との関係

空隙率と全リン除去率との関係を図-7に示す。ただし、この結果は混和材を混入しないポーラスコンクリートによるものである。図-7に示され

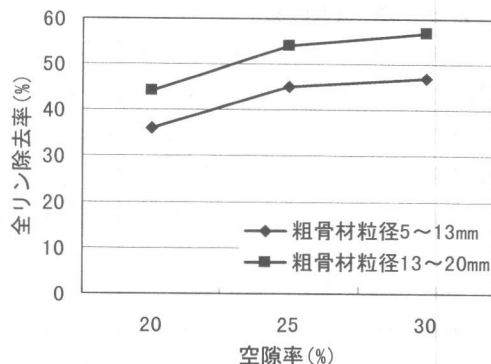


図-7 空隙率と全リン除去率

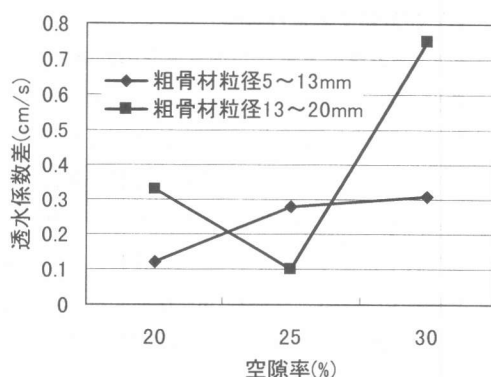


図-8 生物附着前後の透水係数の差

ているように、空隙率が大きいほど全リン除去率が大きい。また、同一空隙率においては粗骨材粒径は大きい方が全リン除去率が大きい。これは、ポーラスコンクリートに付着している生物膜量が多いためと考えられる。ポーラスコンクリート内部の生物膜を直接測定するのは困難であるため、生物膜量の一指標として図-8に示すようにポーラスコンクリートに生物を付着させる前後の透水係数を比較してみる。ただし、ゴミなどによる目詰まりの影響で若干の誤差を生じる。図-8に見られるように、明確な傾向とは言い難いが、空隙率が大きくなるほど透水係数の差も大きくなっていく傾向だと思われる。また、粗骨材粒径の大きい方が透水係数の差も大きくなっており、全リン除去率と同様の傾向を示しており、生物膜量によって除去率が左右されていると思われる。

### 3.6 混和材混入率と圧縮強度との関係

#### (1) 空隙率および粗骨材粒径と圧縮強度

空隙率と圧縮強度の関係を図-9に示す。これによると、空隙率が大きくなるほど、また同一空隙率においては粗骨材粒径が大きい方が圧縮強度が小さくなっており、既往の研究成果<sup>6)</sup>と同様の傾向を示している。

#### (2) ゼオライトの混入率と圧縮強度との関係

ゼオライトの混入率のみを変えた場合の圧縮強度との関係の一例を図-10に示す。図-10に見られるように、ゼオライト混入率30%までは圧縮強度が増加し、それ以降は圧縮強度が減少している。この傾向は、材齢7日、28日とも同様の傾向となっている。

したがって、混和材としてポーラスコンクリートに人工ゼオライトを混入すると、ゼオライトの混入率30%までは圧縮強度が増進するが、それ以上では強度低下し、強度の面からは不利になることが示されている。

#### (3) 高炉スラグの混入率と圧縮強度との関係

高炉スラグのみの混入率と圧縮強度との関係の一例を図-11に示す。図-11に示されているように、高炉スラグの混入率が50%までは材齢7日、28日とも圧縮強度は増加し、それ以降は小さくなっており、強度の面からは高炉スラグは50%までが有効であることが得られている。なお、前述したように全リンおよび全窒素除去率も高炉スラグ混入率50%で最も高くなっており、高い水質浄化機能を得ることと、強度面との両者を満足できることが示されている。

#### (4) 高炉スラグ微粉末およびゼオライト混入率と圧縮強度との関係

高炉スラグ微粉末および人工ゼオライトの両者を混入した場合の圧縮強度との関係の一例を図-12に示す。図-12に示されているように、全般的にはゼオライトの混入率が0%および20~30%付近で他の場合よりもやや高い値を示しており、ゼオライトの混入率が30%を越えると圧縮強度が減少している。また、高炉スラグの混入率の違いによる影響は、ゼオライトよりも小さく、

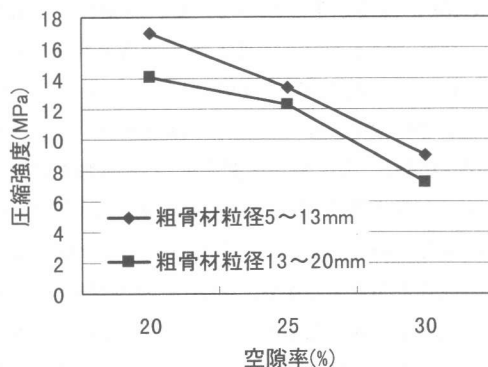


図-9 空隙率と圧縮強度(材齢28日)

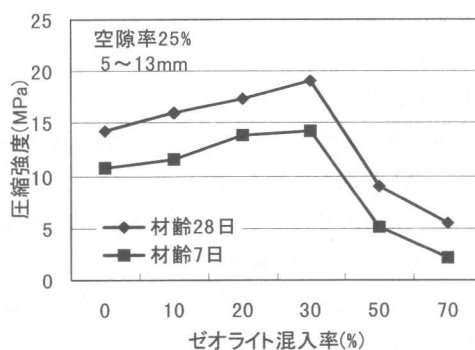


図-10 ゼオライト混入率と圧縮強度

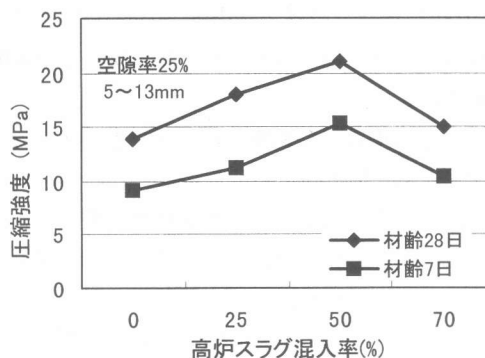


図-11 高炉スラグ混入率と圧縮強度

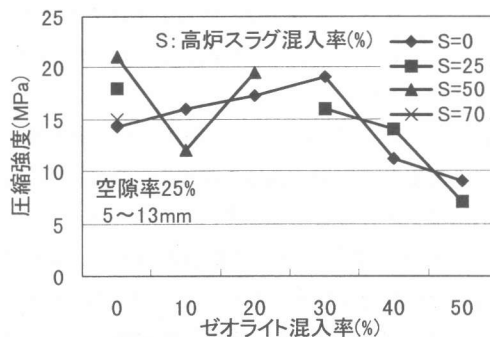


図-12 混和材混入率と圧縮強度

5 MPa 程度以下となっている。圧縮強度が最大となっているのは、ゼオライト混入率が 0%で、高炉スラグ混入率が 50%であり、それよりわずかに小さい強度となっているのはゼオライト混入率が 20%で、高炉スラグ混入率が 50%およびゼオライト混入率が 30%で、高炉スラグ混入率が 0%の場合である。しかし、ゼオライトと高炉スラグの両者を混入する場合、セメントに置換するため混入率が大きくなると、粒度が小さくなり、所要の水粉体比やフロー値を得るための高性能 AE 減水剤の使用量が増加し、実用的でなくなることが考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 全リン除去には Fe 型人工ゼオライトの混入がより効果的でありゼオライトの混入率 20%、高炉スラグ混入率 50%のとき全リン除去率は 92%となっており、全リン除去に最も効果的な配合となった。
- (2) 全窒素除去率は全リン除去率に比べかなり小さいが、ゼオライト混入率 20%、高炉スラグ混入率 50%のとき全窒素除去率は 26%と最大値を示した。
- (3) 空隙率および粗骨材粒径は大きいほど全リン除去率が大きくなった。
- (4) 空隙率が大きいほど圧縮強度が減少する。また、同一空隙率においては、粗骨材粒径が大きくなるほど圧縮強度は小さくなった。
- (5) ポーラスコンクリートに Fe 型人工ゼオライトを混入すると混入率 30%までは圧縮強度が増進した。また、高炉スラグ微粉末を混入すると、混入率 50%までは圧縮強度が混入率の増加とともに増大した。
- (6) 鉄型人工ゼオライトと高炉スラグ微粉末の両者を混入する場合には圧縮強度が最も高くなる適切な組み合わせとなる混入率があった。
- (7) 以上の結果から、浄化機能が高く、圧縮強度が他の配合より高い配合としては、ゼオライト混入率 20%、高炉スラグ混入率 50%のときであ

る。

#### 参考文献

- 1) 玉井元治, 河合章, 来田秀雄, 矢持進, 西脇祐二, 小林忠司: 自然海水に沈漬したポーラスコンクリートへの生物付着と水質浄化, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状将来展望に関するシンポジウム論文報告集, pp.83-90, 1995.11
- 2) 水口裕之, 村上仁士, 伊藤禎彦, 入倉雅人: 水質浄化機能材料としてのポーラスコンクリートに関する研究, 土木学会四国支部第 1 回技術研究発表会講演概要集, pp.420-421, 1995.2
- 3) 前川昭, 松川進, 後藤義昭, 川島宗継: 鉄イオン交換ゼオライトによるリン酸イオンの吸着とその再生方法, 第 30 回日本水環境学会年会予稿集, pp.161, 1996.11
- 4) 伊藤一明, 正藤英司, 西島渉, 岡田光正: 鉄鋼スラグ散布による沿岸海域でのリン除去の基礎的研究, 水環境学会誌, pp.83-89, 1996
- 5) 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書, 日本コンクリート工学協会, 1995.11
- 6) 水口裕之, 宮島崇, 服部眞門, 宮川恒夫: 連続空隙をも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, pp.1045-1051, 1995.11