

論文 ポーラスコンクリートの水質浄化機能に及ぼす空隙特性、 高炉スラグおよびゼオライトの影響

坂井 忍*1・水口 裕之*2・上月 康則*3・村上 仁士*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材として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、ポーラスコンクリートの水質浄化機能を左右する生物の付着性能に及ぼす空隙特性ならびに高炉スラグ微粉末、人工ゼオライトの混入の影響について窒素、リンの除去率を用いて調べたものである。また、圧縮強度に及ぼすこれらの影響についても調査した。

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

1. はじめに

湖沼や貯水池等の閉鎖性水域において、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。

これを解決する方法の一つとして、栄養塩の流入を防ぐとともに水質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¹⁾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²⁾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³⁾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⁴⁾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。林ら⁵⁾は混和材として高炉スラグおよびゼオライトをポーラスコンクリートに混入することによって、強度や浄化機能を向上させることができ、高炉スラグ混入率50%、ゼオライト混入率20%の配合が適当であると報告している。

そこで、本研究では、淡水を対象とした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、空隙特性が水質浄化機能に及ぼす生物の付着に及ぼす影響、高炉スラグおよび人工ゼオライトをポーラスコンクリートに混入し、これらが浄化機能に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、密度3.16 g/cm³、28日圧縮強さ

*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 工学研究科エコシステム工学専攻 工博

*4 徳島大学大学院教授 工学研究科エコシステム工学専攻 工博

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	骨材粒径 (mm)	空隙率 (%)	高炉スラグ混入率 (%)	ゼオライト混入率 (%)	水 (kg)	セメント (kg)	高炉スラグ (kg)	ゼオライト (kg)	粗骨材 (kg)
25	5~13	20	0	0	95	382	0	0	1530
		25	0	0	69	293	0	0	
		30	50	20	76	91	61	151	
	13~20	20	0	0	94	401	0	0	1469
		25	0	0	73	312	0	0	
		30	0	0	53	224	0	0	

61.2N/mm²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 g/cm³、比表面積7,910cm²/gおよびSiO₂33.9%のものを、ゼオライトは密度2.20 g/cm³、比表面積10,000cm²/gおよびSiO₂39.0%のFe型人工ゼオライトを使用した。

(3) 骨材

粗骨材は、密度2.64 g/cm³、吸水率0.73%の徳島県旧那賀川河川敷産玉砕石を使用した。なお骨材寸法は、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1.5%とした。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。水粉体比は25%の一定とし、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7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り、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2.5kg、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 強度試験

圧縮強度試験は、10×10×10cmの立方供試体に打設方向に対して直角方向に側面から载荷して行った。

2.5 淡水浄化室内実験

供試体は、材齢14日から徳島大学工学部内にある池に、約3か月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個を一組として設置した。

水質浄化試験用の水は全リン濃度0.4mg/l、全窒素濃度2.0mg/lの一定とした人工汚水⁵⁾を使用し、水路内の滞留時間を24時間、掛流しとした。

日照条件は、屋外の状況と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3日間隔でポーラスコンクリートの水質浄化能が小さくなるまで全リン、全窒素およびDOを測定した。なお、淡水

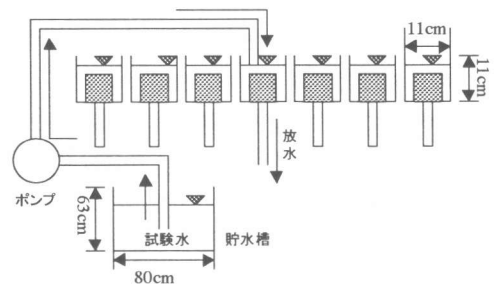


図-1 室内実験用水路

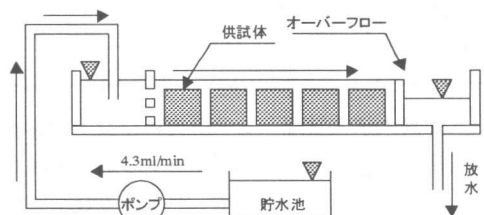


図-2 1水路分（側面図）

浄化室内実験は、室温を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保った恒温室内で行った。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-3、図-4に示す。供試体の実測空隙率は理論値の最大 $\pm 1.5\%$ となっているので、以下の考察では理論空隙率を用いて行った。図によると、空隙率が大きくなるほど、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ている。

また、図-3、図-4に示すように、人工ゼオライトおよび高炉スラグ微粉末を混入することによって、同一空隙率、同一粗骨材粒径において7日、28日強度とも未混入のものより大きい。

3.2 空隙率および粗骨材粒径が生物付着に及ぼす影響

生物付着量の指標としては、DO消費量を用いた。各水路にポーラスコンクリートを浸漬した初日のDO (7.1mg/l)と各経過日数におけるDOの差がDO消費量であり、DO消費量が多いほど生物付着が多いと判断した。経過日数14日目のDO消費量を図-5に示す。5~13mm、13~20mmともに、空隙率の大きいものほどDO消費量が大きく、生物膜の発達空隙率の大きさに比例している。空隙率別で比較すると、粒径5~13mmの方が13~20mmよりDO消費量が大きい。

この理由として、ポーラスコンクリートの表面積と関係があるのではないかと考え、粗骨材を粒径別に球と仮定し、平均粒径を用いて理論総表面積を求めた結果を表-2に示す。粒径5~13mmは粒径13~20mmに比べると総表面積約2倍程度となっている。そこで、ポーラスコンクリート内部も含め、表面積全てに生物膜が付着すると考えると、粒径5~13mmは粒径13~20mmの約2倍の生物膜が付着することになり、DO消費量が大きくなったと考えられ、図-5の粒径13~20mmに比べ粒径5~13mmが大きい値になる傾向とほぼ一致している。

3.3 経過日数と全リン濃度との関係

図-6に粒径5~13mm、図-7に粒径13~

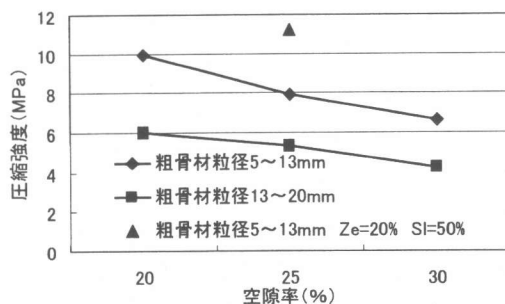


図-3 圧縮強度試験結果 (材齢 7 日)

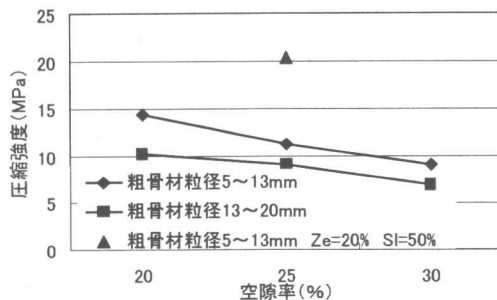


図-4 圧縮強度試験結果 (材齢 28 日)

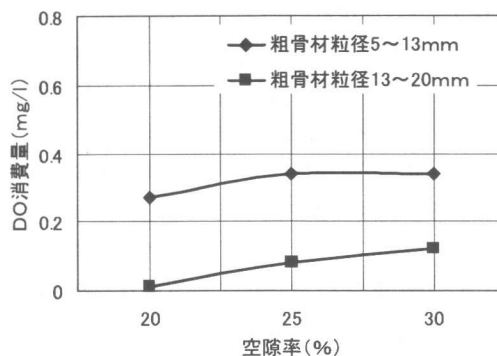


図-5 空隙率と DO 消費量 (経過日数 14 日)

表-2 ポーラスコンクリートの理論総表面積 (10×10×10cmの供試体の場合)

空隙率	粗骨材粒径	
	5~13mm	13~20mm
20%	1586cm ²	833cm ²
25%	2024cm ²	1089cm ²
30%	2436cm ²	1341cm ²

20mmの経過日数における全リン濃度の変化を示す。図-6、図-7によると、全体的には空隙率の違いにかかわらず全リン濃度は3日目までは徐々に低下しているが、3日目から7日目にかけて全リン濃度は急激に低下し、粒径5~13mmで空隙率30%の水路では 0.04mg/l まで低下してい

る。経過日数11日目以降は全リン濃度が再び初期値の0.40mg/lとなっている場合がある。これは、高濃度のリンを含む人工汚水を絶えず流し続けたため、短時間で除去能力が限界に達したのではないかと考えられる。つまり、水中には微生物のえさとなるリンが多量に存在するため、ポーラスコンクリートに付着している生物膜が発達しすぎて、水中のDOは小さくなる。それにより、微生物は活動できなくなり、リンの濃度が低下しなくなったと考えられる。したがって、本実験においては、20日前後で除去能力が限界に達したが、エアレーション等を行ない、DOを高めることによって、生物の活性を維持させることができれば、リンの濃度を低下させる能力を維持させることが可能であると思われる。

また、人工ゼオライト混入率20%、高炉スラグ混入率50%のポーラスコンクリートは全リン濃度が経過日数14日目で0.04mg/lまで低下し、24日を過ぎてもおお初期値の約0.4mg/lとなっていない。これは、ポーラスコンクリートにゼオライトと高炉スラグを混入すると、これらの吸着効果によって、全リンに対して高い除去率を示し、その効果を維持するのに有効であると考えられる。

3.4 空隙率および粗骨材粒径と全リン除去量との関係

全リン除去率が0%になった時点での全リン除去量の合計を総全リン除去量とし、図-8に示す。これによると粒径13~20mmで空隙率30%の総全リン除去量は空隙率20%の総全リン除去量の約3.6倍となっている。しかし、粒径5~13mmにおいては、空隙率25%が最も多い総全リン除去量を示している。したがって、粒径13~20mmでは空隙率が大きくなるほど全リン濃度は大きく低下しているが、粒径5~13mmでは異なる傾向となっており、全リンの除去において空隙率の違いによる明確な傾向は得られていない。粗骨材粒径別に全リン除去量の変化を考えると、粒径5~13mmの方が粒径13~20mmよりも総全リン除去量が多い結果となっ

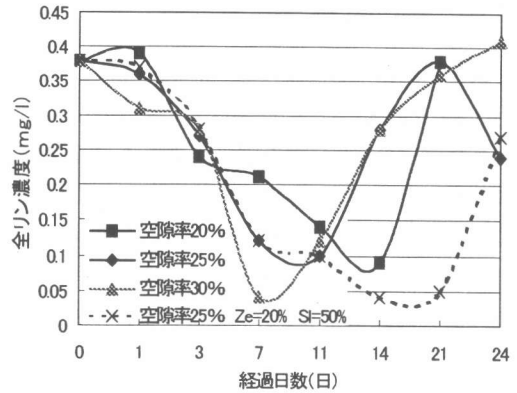


図-6 経過日数による全リン濃度の変化
(粗骨材粒径 5~13mm)

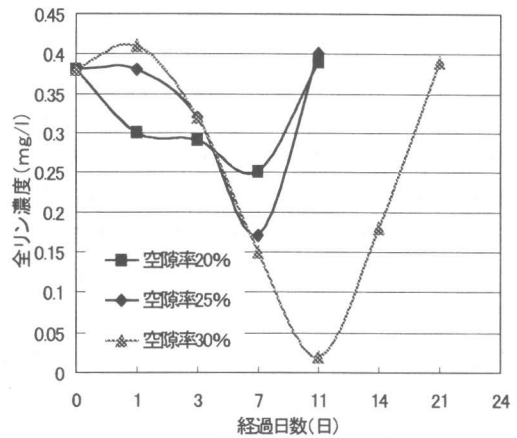


図-7 経過日数による全リン濃度の変化
(粗骨材粒径 13~20mm)

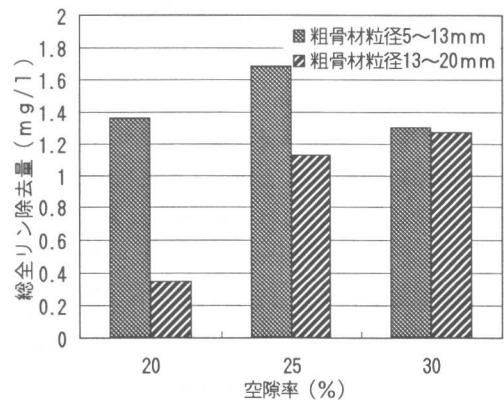


図-8 空隙率と総全リン除去量

ている。

したがって、3.2 で述べた DO 消費量の場合と同様に、全リン除去能力は生物付着による影響が強いと考えられ、粒径 5~13mm は生物付着量が多いので、全リンに対して高い除去能力を示していると考えられる。

3.5 経過日数と全窒素除去量との関係

図-9 に粒径 5~13mm、図-10 に粒径 13~20mm の経過日数における全窒素濃度の変化について示す。図-9、図-10 によると、全体的には空隙率の違いにかかわらず全窒素濃度は経過日数 7 日目までは徐々に低下しており、経過日数 7 日目から 11 日目では全窒素濃度が安定している。そして、11 日目以降においては再び初期値の 2.0mg/l となっている水路がある。これは、高濃度の窒素を含む人工汚水を絶えず流し続けたため、3.3 の結果と同様に DO が不足することとなり、生物膜の活性がほとんど無くなって、短期間で除去能が限界に達したと考えられる。したがって、エアレーション等を行ない、DO を適当な値に維持してやれば、全窒素の除去を継続して行うことも可能と考えられる

また、人工ゼオライト混入率 20%、高炉スラグ混入率 50% のポーラスコンクリートでは、全リンの場合とは異なり、全窒素濃度は経過日数 3 日目まで上がり、11 日目で約 0.7mg/l まで低下し、14 日目以降は他の配合と同様の傾向を示している。これは、池に浸漬している間にゼオライトやスラグに吸着されていた窒素が流れにより離散したために初期濃度が上昇したのではないかとと思われる。しかし、11 日目で全窒素濃度は他の配合に比べて約 1/2 程度となっており、高い除去率を示していると考えられる。

3.6 空隙率および粗骨材粒径による全窒素除去量との関係

全窒素除去率が 0% になった時点での全窒素除去量の合計を総全窒素除去量とし、図-11 に示す。これによると、粒径 13~20mm で空隙率 30% の総全窒素除去量は、空隙率 20% のものの総全窒素除去量の約 1.8 倍となっている。しか

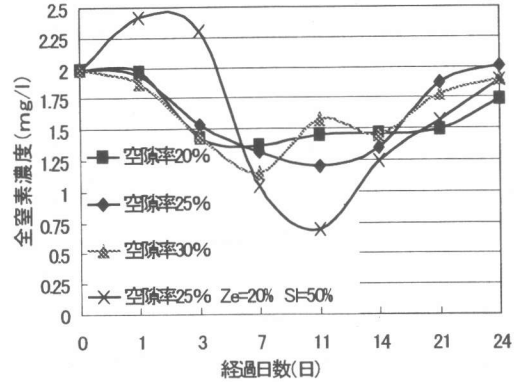


図-9 経過日数による全窒素濃度の変化
(粗骨材粒径 5~13mm)

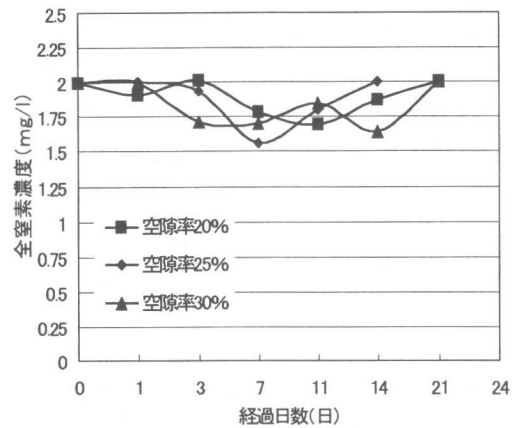


図-10 経過日数による全窒素濃度の変化
(粗骨材粒径 13~20mm)

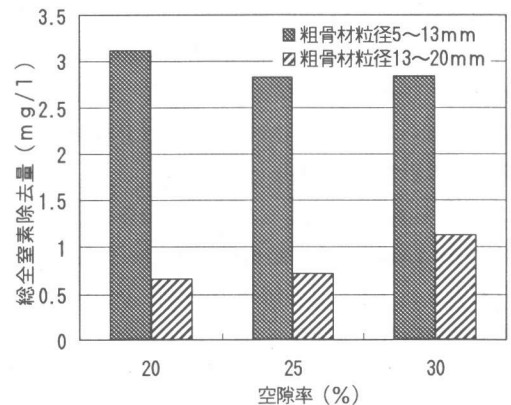


図-11 空隙率と総全窒素除去量

し、粒径 5~13mm においては、空隙率による総全窒素除去量はほぼ同じ値であり、明確な違いが現れていない。したがって、全窒素も全リンの結果と同様に、粒径 13~20mm では空隙率が大きくなるほど全窒素濃度の低下が大きくなっているが、粒径 5~13mm では異なる結果となっており、全窒素の除去においても空隙率の違いによる明確な差は得られていない。

粗骨材粒径別に全窒素除去量の変化を考えると、粒径 5~13mm の方が 13~20mm よりも約 3 倍程度総全窒素除去量が多い結果となっている。

したがって、全リン除去量の場合と同様に、全窒素除去能力も生物付着による影響が強いと考えられ、粒径 5~13mm は生物付着量が多く、全窒素に対して高い除去能力を示していると考えられる。

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) 空隙率が大きいほど、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強度は低下する。

(2) ポーラスコンクリートに人工ゼオライトおよび高炉スラグ微粉末を適量混入することによって、初期強度および長期での強度ともに向上させることができる。

(3) 粗骨材粒径 5~13mm は粗骨材粒径 13~20mm よりも DO 消費量が大きく、生物付着量は粗骨材粒径 5~13mm の方が多い。

(4) 全リン除去量は、生物付着量の多い粗骨材粒径 5~13mm の方が粗骨材粒径 13~20mm よりも大きい。また、空隙率の違いによる全リン除去量の影響は少なかった。

(5) 全窒素除去量も、生物付着量の多い粗骨材粒径 5~13mm の方が粗骨材粒径 13~20mm よりも大きい。また、空隙率の違いによる全窒素除去量の影響は少なかった。

(6) ポーラスコンクリートに人工ゼオライトおよび高炉スラグ微粉末を混入することによって、全リンに対して高い除去能力が得られ、その効

果を維持するのに有効である。全窒素に対しては混入による影響が見られていない。

(7) 全リンおよび全窒素の除去能力は汚水中の DO が低下するとポーラスコンクリートに付着している生物膜の活性が低下することによってほとんどなくなると考えられる。しかし、汚水中の DO を大きくしてやれば、浄化能は維持される可能性があると考えられる。

なお、本研究は科学研究補助金課題番号 12450179 (研究代表者: 水口裕之) および 105809 (研究代表者: 村上仁士) 国際学術研究-大学間協力研究によって行ったことを付記する。

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) 林正浩, 水口裕之, 上月康則, 宮川恒夫: ポーラスコンクリートの水質浄化に及ぼす高炉スラグおよびゼオライトの効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.253-258, 1999
- 6) 新西成男, 中澤隆雄, 張日紅, 今井富士夫: ポーラスコンクリートの水質浄化特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.247-2252, 1999