

論文 連続空隙を持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

水口裕之^{*1}・宮島 崇^{*2}・服部眞門^{*3}・宮川恒夫^{*4}

要旨: コンクリート構造物に自然浄化機能を持たせることの可能性を検討するため、多孔質で連続空隙を持つポーラスコンクリートを対象とし、その空隙率、空隙寸法を変え、水質の浄化機能、力学的性質について調査した。浄化機能としては、D O(溶存酸素)、窒素およびリン除去率を指標とした。

その結果、空隙率20~30%、骨材粒径5~20mmを用いたポーラスコンクリートは、力学特性および水質浄化機能性から、水質浄化機能を持った水辺構造物の構造主体材料あるいは構造副材料として使用できる可能性があることが得られた。

キーワード: ポーラスコンクリート、水質浄化機能、空隙特性、D O、窒素除去率

1. はじめに

自然水域には、水質を一定の状態に保とうとする自浄作用と呼ばれる機能がある。しかし、近年、湖沼や貯水池など閉鎖性水域での自浄作用機能が低下し、富栄養化が進行し、その解決が望まれている。

富栄養化の主な原因は、栄養塩である窒素およびリンであり、窒素は、分解・酸化作用を受けて硝酸となり、藻類や水生植物等に摂取され水中から除去され、嫌気状況下では脱脱窒作用によって窒素ガスとなって大気中に離散する。リンは、藻類や水生植物などに摂取され水中から除去される。これらの自浄作用は水中微生物および河床等への付着生物によって行われる。しかし、栄養塩が含まれる各種排水量の飛躍的増大や、湖沼や貯水池での水際構造物の増加による生態系の破壊や変化によって、富栄養化が非常に速くなっている場合がある。

一方、人々の生命や財産を守り、生活環境を維持発展させていくためには、水辺における建設構造物は必要なものである。したがって、構造物は、自然との調和に配慮し、生物と共生できるものとすることが一つの解決法と考えられ、その対応策として、生物と共生できる建設材料や構造物の開発が考えられる。連続空隙を持つポーラスコンクリートは、その空隙に微生物などの生物が棲息でき、自浄作用を持つものと考えられ、いくつかの研究が成されているが[1~5]、不明な点も多く残されており、今後の検討が必要である。

そこで、連続空隙を持つポーラスコンクリートを対象とし、その空隙特性に着目し、空隙寸法および空隙率を変え、これらが水質浄化機能に及ぼす影響を調べ、効果的な空隙特性について検討した。また、主な力学的性質についても調査し、ポーラスコンクリートの水質浄化機能を持った水際構造物への適用の可能性について若干の考察を行った。

*1 徳島大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*2 徳島県徳島土木事務所河川砂防課

*3 クボタ建設(株)中国支店支店長

*4 クボタ建設(株)技術研究所開発課課長

2. 実験の概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは比重3.15、ブレーン値 $3,220\text{cm}^2/\text{g}$ の普通ポルトランドセメントを使用した。混和材には、比重2.35、平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 、比表面積 $16.0\text{m}^2/\text{g}$ 、シリカ分88.7%のシリカフュームを用いた。混和剤としては、高性能AE減水剤を、セメント質量に対してメーカー推奨値の2.5%使用した。

粗骨材としては、比重2.63、吸水率1.20%の徳島県那賀川産玉碎石を使用し、5~13、7~15および13~20mmの3種にふるい分け、実績率が5~13mmと7~15mmで60.1%、13~20mmで59.7%となるものを表乾状態にして使用した。

コンクリートの配合は表-1に示すものを用いた。シリカフュームの混合比は結合材の内割りで20%、水結合材比は25%の一定とした。

表-1 ポーラスコンクリートコンクリートの配合

配合記号	骨材粒径 (mm)	空隙率 (%)	SF/(C+S F) (%)	W/(C+SF) (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	SF	G	SP
A0513-V20	5~13	20	20	25	84	270	68	1580	8.45
A0513-V25		25			63	202	51	1580	6.32
A0513-V30		30			42	134	34	1580	4.20
A0715-V20		20			84	270	68	1580	8.45
A0715-V25		25			63	202	51	1580	6.32
A0715-V30		30			42	134	34	1580	4.20
A1320-V20	7~15	20	25	25	86	276	69	1570	8.62
A1320-V25		25			65	208	52	1570	6.49
A1320-V30		30			44	140	35	1570	4.37

2. 2 コンクリートの練混ぜ、供試体の作製、養生および物性試験

コンクリートの練混ぜには、容量50%の強制水平2軸ミキサを使用し粗骨材と結合材を入れ30秒間練り混ぜ、水と高性能AE減水剤を加えてさらに90秒間で練り混ぜた。

圧縮強度用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱とし、各材齢用に各5体、曲げ強度用供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ のはりとし、各材齢用に各3体作製した。乾湿繰返し用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ で各3体とした。淡水浄化室内実験用供試体は、材齢28日で曲げ試験後のはり切片を約 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の立方体に切断したものを用い、各5体とした。

なお、コンクリートの締固めは、型枠容量分のコンクリートを計量して、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体では、ほぼ相等しい3層に分けて、各層25回突き、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体では、ほぼ等しい2層で、各層をJIS A 1210に規定されている土の締固め用ランマーの底面に $9.6 \times 10\text{cm}$ で厚さが1cmの鋼版を溶接したものを用いて、各層4か所、各位置で5回落下させて行った。

供試体の養生は、24時間 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室に置き、脱型後、所定の材齢の1日前まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中養生とし、その後は、室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度60%の室内で24時間乾燥養生とした。

各供試体は、試験の直前に重量法を用い空隙率を測定し、その後強度試験等を行った。

乾湿繰返し試験は、28日養生の後、乾燥時間6時間、湿潤時間6時間の計12時間を1サイクルとして行い、乾燥温度は 65°C とし、浸漬液は人工海水アクリマリンを通常の2倍の濃度で使用し、所定のサイクルで、縦振動による動弾性係数の測定を行った。

2. 3 淡水浄化室内実験

淡水浄化室内実験は、骨材粒径5~13mm、13~20mmで空隙率20、25、30%の計6種の供試体を用いて行った。施工後短期間での供用を想定し、材齢28日からあらかじめ本学部構内の池に2週間

ほど浸漬し、生物を付着させたものを、図-1に示す $11 \times 11 \times 60\text{cm}$ の水路部分と約15畳のタンクからなる浄化水路(合計約20畳)に1列にならべて浸漬した。試験水は、前述と同じ池の水を使用し、それぞれ浸漬後15、30および45日目で、リン、窒素およびDO(溶存酸素)を計測した。また、浸漬後の水温およびpHを定期的に測定した。

実験装置は、図-1に示す流水中に供試体を設置したもので、蛍光灯を用いて約6000ルクスの光を12時間毎に点灯および消灯を行った。試験水の水温は17°C前後に保つようにした。なお、流量は、滞留時間を約3時間として20ml/minとした。

また、試験開始時の試験水のリンは0.105mg/l、窒素は0.701mg/l、DOは8.90mg/lであった。

リンおよび窒素の測定は、日本水道協会の上水試験方法[6]に従い、紫外可視分光光度計を用いて、リンはペルオキソ二硫酸カリウム分解法(高圧加熱法)、窒素は紫外線吸光光度法によって行った。DOの測定は、水路のほぼ中心部から採取した試料水を用いて行った。なお、試験開始時の試験水のリンは0.11mg/l、窒素は0.70mg/l、DOは8.90mg/l、pH 8.4であった。

3. 実験結果および考察

ポーラスコンクリートの空隙率は、目標とした公称空隙率と重量法で求めた硬化コンクリートの実測空隙率との差が、2例を除いて1~2%以内となっており、実測空隙率の測定精度を考慮すると、公称空隙率で検討してもよいと考えられ、以下では公称空隙率を用いることとした。なお、これらの空隙は測定方法から判断して連続空隙と考えられる。

3. 1 材齢と圧縮強度との関係

セメントペーストの品質を一定とし、空隙率および骨材粒径を変えた場合の材齢と圧縮強度との関係の一例を、図-2に示す。図に示されているように、材齢とともに圧縮強度は増加している。なお、材齢28日から91日への強度増加は10%以下となっている。他の骨材粒径の場合もほぼ同様の傾向となっており、材齢90月まで材齢とともにかなりの強度増進があるとしたSidwellら[7]の結果と異なっており、今後の検討が必要である。

3. 2 空隙特性と圧縮強度との関係

図-3に見られるように、圧縮強度は、空隙率が増加すると低下している。また、同じ空隙率

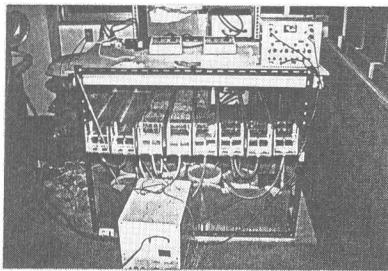


図-1 室内水質浄化実験装置

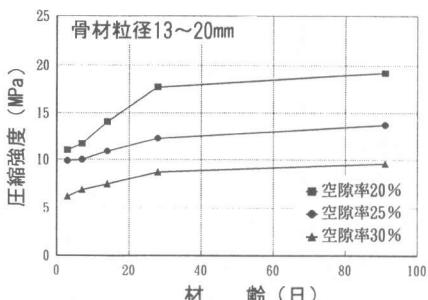


図-2 材齢と圧縮強度との関係

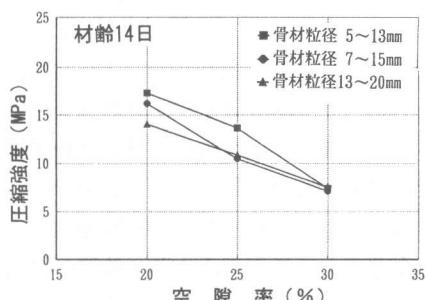


図-3 空隙率と圧縮強度との関係

では、粒径 5～13mm のものが、粒径 7～13mm、13～20mm のものより小さく、その差は最大で 4 MPa となっており、同じ空隙量では、空隙の大きさが大きい方が強度は小さくなっている。他の材齢でも、この傾向はほぼ同様であり、既往の結果[8]と同じ傾向となっている。

一方、圧縮強度の大きさは、図-2 および 3 に見られるように、空隙率 30～20% の範囲で、材齢 14 日で 7～16 MPa、材齢 28 日で 7.5～23 MPa となっており、圧縮強度面からは、構造物の形式にもよるが、構造主体材料あるいは構造副材料として使用できる可能性が考えられる。

3.3 空隙特性と曲げ強度との関係

空隙特性と曲げ強度との関係は、図-4 に見られるように、圧縮強度の場合と同様の傾向となっており、空隙率が大きくなると強度は小さくなっている。なお、骨材粒径の違いの影響は少なく、ほぼ同じ強度となっている。この傾向は、他の材齢においても同様である。

曲げ強度は、材齢 28 日で 1.1～2.2 MPa の範囲にあり、圧縮強度に対する強度比は、1/7～1/11 の範囲となり、圧縮強度が大きいほどこの比は小さくなっている。普通のコンクリートよりも強度比が小さい場合の結果が得られており、従来の結果とは異なっており、今後更にデータの収集が望まれる。

3.4 乾湿繰り返しと動弾性係数との関係

乾湿繰り返しのサイクル数と動弾性係数の関係の一例を図-5 に示す。図に見られるように、骨材粒径が 7～15 mm の場合には、空隙率が大きい方が、繰り返しによる動弾性係数の低下が大きい。しかし、骨材粒径が 5～13 mm の場合は、空隙率が異なっても 100 サイクル程度までは、繰り返しによって動弾性係数は低下せず、増大している。なお、粒径 13～20 mm の場合は、空隙率 30% のもののみが繰り返し回数とともに、低下している。したがって、空隙率と空隙寸法とを適切に組合せることによって、繰り返しに対する抵抗性は、大きくすることができる可能性も考えられる。なお、実構造物での耐久性を正確に評価するには、さらに詳しい検討が必要と考えられる。

3.5 空隙率および骨材粒径が生物膜発達に及ぼす影響

生物膜の発達特性の指標として、DO 消費量を用いて間接的に検討した。ポーラスコンクリートを入れていない浄化水路の DO 値を規準として、それから各水路の DO 値を差し引いたものを DO 消費量とし、この大小より生物膜の発達を評価した。結果の一例を図-6 に示す。15 日経過後の DO 消費量は、粒径別に比較すると粒径 5～13 mm においては、空隙率の大きいものほど DO 消費量が大きく、生物膜の発達が空隙率の大きさに比例している。しかし、粒径 13～20 mm では、空

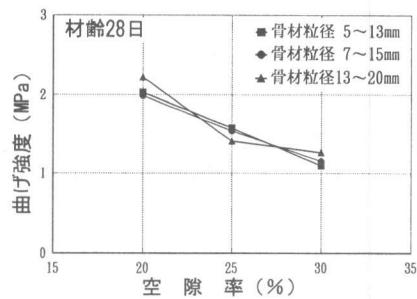


図-4 空隙率と曲げ強度との関係

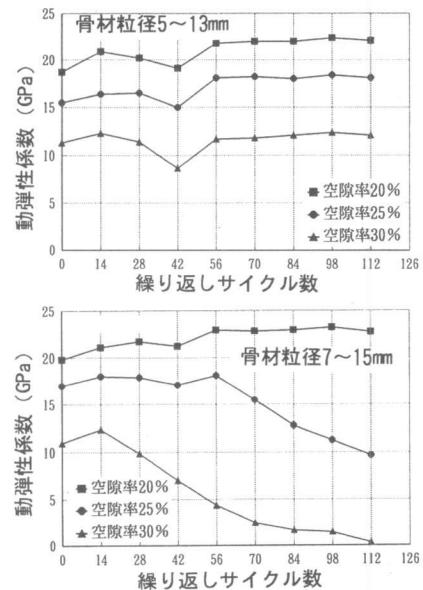


図-5 乾湿繰り返しサイクル数と動弾性係数との関係

隙率が大きくなるにつれ、DO消費量が低下し粒径5~13mmの場合と逆の傾向を示している。なお、DO消費量は最高でも0.45mg/lと小さい値となり、生物膜量は少ない。30日経過後のDO消費量は、15日に比べ粒径5~13mm、空隙率20%のもの、粒径13~20mm、空隙率25%のものおよび粒径13~20mm、空隙率30%のものでは大きくなり、その大きさも粒径13~20mm、空隙率30%で1.0mg/lを越えており、生物膜の経時に伴う発達が伺える。しかし、粒径5~13mm、空隙率25%などでは、15日のときよりDO消費量が減少しており、生物膜の後退がみられる。45日でのDO消費量は、全体的に低下しており、粒径5~13mm、空隙率20%のもののみ若干の増加している。浸漬後40日頃に水温が一時的に15°C以下となり、平均の17°Cに対して低くなっている。また、試験水のpHは、配合の種類によって異なるが、試験開始後5日頃にpH10.5程度となり、経過とともに減少し、45日後では、pH10から9.5程度となっている。したがって、これらによつて、生物膜の発達が低下、あるいは死滅したためとも考えられる。

しかし、粒径の違いは、DO消費量に影響しており、粒径5~13mmに比べて、空隙径の大きい粒径13~20mmが生物膜の発達が良好となっている。

3. 6 空隙率および骨材粒径が栄養塩除去に及ぼす影響

リンおよび窒素の経時変化の一例を、図-7に示す。図に見られるように15日でリンの濃度は、急激に低下している。これは全配合とも同じ結果となっている。特に、粒径5~13mmで空隙率20%および30%のものでは、富栄養湖の境界線である0.02mg/lの値を下回っており、有効性が示されている。しかし、30日および45日においては、再び増加し、試験開始時のほぼ初期値までになっている。この原因については、試験水のpHの上昇による菌類の死滅等がその理由とも考えられるが、今後の検討課題としたい。なお、リンに関しては、十分な除去能力がないとの結果[9]もあり、他の除去方法を検討する必要性も想定される。

窒素に関しては、リンの場合と逆に、15日で試験開始時より若干増加している場合もあるが、その後は、低下し、初期値よりは小さくなつておらず、効果があるといえる。

図-8は、浸漬30日でのリンおよび窒素の配合別の除去率を示す。窒素の場合は、1例を除くと、配合が違っても大きくは異ならず、ほぼ同じ程度の能力を持っているといえる。しかし、リンについては、図-7でも見られるように、配合によって、大きく異なっている。

このように、浸漬後30日のリンの除去率は、粒径5~13mmで空隙率25%のものが最も高くなっているが、空隙特性による一定の傾向は得られておらず、流速、その他の影響も考えられ、除去

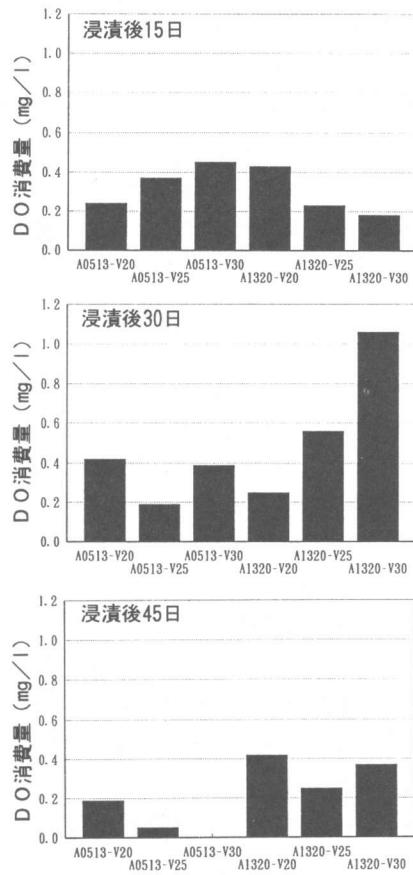


図-6 配合別DO消費量

メカニズムからの検討が必要である。一方、窒素の除去率は、配合条件による違いではなく、50%程度が可能であり、効果があるといえる。

なお、今回の実験では、容量の小さい閉鎖水路としたため、pHが浸漬後45日で9.5~10程度までとなっており、また、一定値になっていないので、浸漬期間を長くすると、アルカリ度の減少とともに今後の浄化機能の向上も期待される。

5.まとめ

以上の結果をまとめると以下のようである。

- (1) 空隙率20~30%、骨材粒径5~20mmを用いたポーラスコンクリートは、圧縮強度は材齢28日で7.5~23MPaとなった。
- (2) ポーラスコンクリートの内部を含めた表面には、生物膜が発達し、栄養塩を除去する能力を持ち、水質浄化機能が得られた。
- (3) 以上(1)(2)から、ポーラスコンクリートは水質浄化機能を持った水辺構造物の構造主体材料あるいは構造副材料として使用できる可能性が考えられる。
- (4) しかし、どのような空隙特性を持ったポーラスコンクリートが力学的、浄化機能的に適当であるかについては、使用する条件に応じて変える必要が予想され、浄化作用のメカニズムを取り入れた検討が必要である。

謝 辞

本研究を行うに当たり、貴重なご意見をいただき、さらには、測定にも多大のご協力いただきました徳島大学村上仁士教授ならびに京都大学大学院伊藤禎彦助教授に深く感謝致します。

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書、日本コンクリート工学協会、1995
- [2] 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と将来展望に関するシンポジウム論文報告集、pp. 83~90、1995
- [3] 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
- [4] 金子文夫、橋本宏治：ポーラスコンクリートを利用した生物的水質浄化方法、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、pp. 67~70、1995
- [5] 伊藤昌昭、近藤義春、石丸寛、金子文夫：多孔質コンクリートを用いた水質直接浄化実験、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、pp. 77~82、1995
- [6] 日本水道協会編：上水試験方法、1993年版
- [7] Malhotra, V. M.: No-Fines Concrete-Its Properties and Application, ACI Journal, Vol. 73, pp. 636, 1976
- [8] 水口裕之、天羽和夫、服部眞門、宮川恒夫：ポーラスコンクリートの配合要因と強度との関係、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、pp. 31~38、1995
- [9] プライベートコミュニケーション

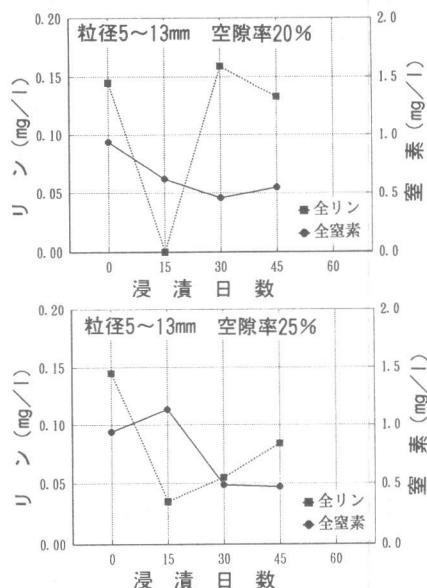


図-7 浸漬日数とリンおよび窒素の変化

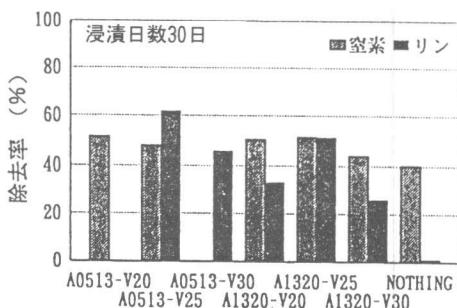


図-8 配合別リンおよび窒素の除去率