

◆ 報 文 ◆

ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性

片平 博* 河野広隆**

1. はじめに

「自然を生かした川づくり」を目指した河川整備事業の推進が求められているが、この実現には治水面での安全性が高く、かつ豊かで多様な動植物の生息・生育の可能な低コストの護岸工法の確立が急務である。

ポーラスコンクリート(写真-1)は単一粒径の粗骨材にセメントペーストをからめた「オコシ」状のコンクリートであり、比較的高い強度を有し、また空隙部に植生基盤材を充填することで緑化や微小生物の生息が可能となる。このため河川護岸への適応に期待が高まっている。ポーラスコンクリートは、これまでの研究結果から 25%以上の

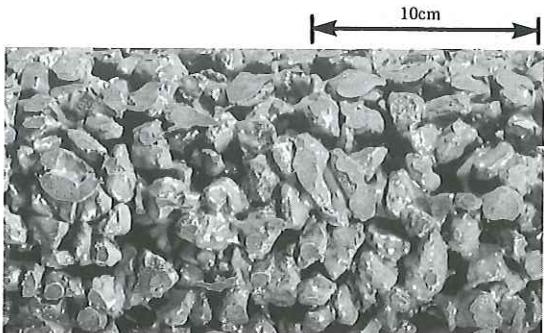


写真-1 ポーラスコンクリート

空隙率を確保することで緑化が可能であること、圧縮強度は 10N/mm^2 程度は確保できることが分かっている¹⁾。しかしながらその一方で、水中での凍結融解に対する耐久性は極めて低いことが報告されている²⁾。

凍結融解試験は JSCE-G501 で規定されている水中での凍結融解試験法が一般的である。この試験法をポーラスコンクリートに適用すると、ポーラスコンクリートは空隙が大きいために、空隙中の水が凍結する際の氷結圧にコンクリートが耐えられず引張破壊が発生すると考えられる。しかしながら、この試験方法が必ずしも実際の河川護岸の状況を的確に捉えているとは言い難い。すなわち、水面から水深数十 cm にわたって凍結するような河川はよほど厳寒地を除いて日本では稀であろう。また水面から上部では浸透水はポーラスコンクリートの空隙を貫通するため、上記のような氷結圧による破壊が生じる可能性はかなり低い。

このため、本研究では実際の環境条件を考慮した種々の凍結融解試験を実施し、ポーラスコンクリートの護岸材料としての凍結融解耐久性について検討した。また、骨材に再生骨材を使用した場合の影響についても室内試験により検討したものである。

表-1 試験ケース

実験 グループ	ケース名	W/C (%)	粗骨材の種類	空隙率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
					水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤*
I	ケース 1 (基本配合)	25	4号碎石	25	76	305	1,532	—	3.355
	ケース 2 (W/C=30%)	30	"	"	84	280	1,532	—	0.700
	ケース 3 (W/C=35%)	35	"	"	91	260	1,532	—	—
	ケース 4 (5号碎石)	25	5号碎石	"	74	296	1,545	—	3.256
	ケース 5 (6号碎石)	"	6号碎石	"	72	287	1,557	—	3.157
	ケース 6 (空隙率 20%)	"	4号碎石	20	84	335	1,501	115	3.685
	ケース 7 (空隙率 15%)	"	"	15	91	365	1,469	229	4.015
II	ケース 8 (再生4号)	25	再生骨材4号	25	87	347	1,316	—	3.817
	ケース 9 (再生5号)	"	再生骨材5号	"	86	342	1,352	—	3.762
	ケース 10 (再生6号)	"	再生骨材6号	"	83	330	1,354	—	3.630

* 混和剤：ケース 2, 3以外は高性能 AE 減水剤、ケース 2 は AE 減水剤

表-2 材料物性

セメント	高炉セメント、密度 3.04g/cm^3 、比表面積 $3,760\text{cm}^2/\text{g}$	
細骨材	大井川産河床砂、粒径 $0\text{--}5\text{mm}$ 、密度 2.60g/cm^3 、吸水率 1.06%	
粗骨材	4号碎石	笠間産硬質砂岩、粒径 $20\text{--}30\text{mm}$ 、密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.43%
	5号碎石	笠間産硬質砂岩、粒径 $13\text{--}20\text{mm}$ 、密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.46%
	6号碎石	笠間産硬質砂岩、粒径 $5\text{--}13\text{mm}$ 、密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.68%
	再生骨材4号	粒径 $20\text{--}30\text{mm}$ 、密度 2.40g/cm^3 、吸水率 5.29%
	再生骨材5号	粒径 $13\text{--}20\text{mm}$ 、密度 2.45g/cm^3 、吸水率 4.43%
	再生骨材6号	粒径 $5\text{--}13\text{mm}$ 、密度 2.42g/cm^3 、吸水率 5.27%
混和剤	高性能AE減水剤、ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体	
	AE減水剤、リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体	

2. 研究の目的

本研究の目的は次の項目を確認することである。

- (1) ポーラスコンクリートの強度特性
- (2) ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性
- (3) ポーラスコンクリートに再生骨材を使用した場合の影響

3. 試験方法

3.1 配合条件

ポーラスコンクリートの配合は表-1に示す10ケースを設定した。表中のケース1から7はグループIとして堅硬な骨材を使用し、水セメント比、骨材の粒径および空隙率をそれぞれ変化させた条件とし、ケース8,9,10はグループIIとして骨材に再生骨材を使用した条件とした。試験に使用した材料の物性は表-2のとおりである。

3.2 試験条件

(1) 強度試験

圧縮試験と引張試験を実施した。

圧縮試験用供試体は $\phi 15 \times 30\text{cm}$ とし、上下面是セメントペーストによりキャッピングを施した。供試体本数は各配合ごとに5本とし、圧縮強度試験はJIS A 1108に従って実施した。

引張試験用供試体は $\phi 15 \times 20\text{cm}$ とした。供試体本数は各配合ごとに3本とし、引張試験(割裂試験)はJIS A 1113に従って実施した。

試験材齢はいずれも14日とし、それまでは 20°C の水中養生(標準養生)とした。

(2) 凍結融解試験

「はじめに」で述べたように、今回の実験では実際の河川護岸の環境条件を考慮し、以下の3通りの試験を試みた。

α. 水中凍結融解試験：ゴム容器内に水を入れ、水中において凍結融解を繰り返す、コンクリートの材料試験として最も一般的なものである。河川護岸での条件としては河川水面から下部の水中全体が凍結融解を繰り返す過酷な条件である。

β. 気中凍結融解試験：ゴム容器内に水を入れず、空気中で凍結融解を繰り返す条件である。河川護岸としては水面から上の部分を対象とした条件である。

γ. 部分水中凍結融解試験：供試体の一部(厚さ $4\text{--}5\text{cm}$ の範囲)が水中で凍結融解を繰り返す条件。実際の河川護岸では水面から数cmの水深まで凍結融解が生じる状態を模した条件である。

各試験の概要および条件を図-2および表-3に示す。

供試体本数は各配合ごとに3本とし、14日の標準養生後に試験を開始した。凍結融解の繰り返し回数はJSCE-G501に準拠し300回とした。

試験中は動弾性係数と損失質量(γ は動弾性係数の測定が困難であり、損失質量のみ)を測定し、動弾性係数からは相対動弾性係数(試験前の動弾性係数に対する比率)を算出した。

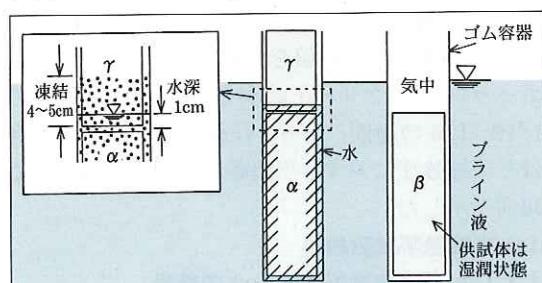


図-1 凍結溶解試験の方法

表-3 凍結融解試験方法

	サイクル時間		温度範囲 (°C)	供試体寸法 (cm)	測定項目		備考
	凍結	融解			動弾性	質量	
α. 水中凍結融解	3h	3h	-18 ~ +4	10×10×40	○	○	
β. 気中凍結融解	2.5h	1.5h	-18 ~ +4	10×10×40	○	○	供試体は湿潤状態
γ. 部分水中凍結融解	3h	3h	-18 ~ +4	10×10×15		○	水中凍結範囲は4~5cm

なおβ、γの供試体は、試験開始前および各計測時に水に一度浸し、湿潤状態を保持することとした。実際には試験槽の中はブライン液で満たされており、湿度が高いことから供試体が乾燥することはなかった。

4. グループIの実験結果

グループIとして堅硬な骨材を使用し、水セメント比、空隙率、および骨材寸法をそれぞれ変化させたケース1からケース7の実験結果について述べる。

4.1 強度試験結果

4.1.1 圧縮強度試験結果

圧縮試験結果の中からキャッピングの不良による異常値を棄却し、試験結果を整理したものを作図-2に示す。

水セメント比を変化させたケース1, 2, 3の比較では、一般的のコンクリートと同様に水セメント比が小さくなるほど圧縮強度は増加する傾向を示し、水セメント比25%の配合では10N/mm²以上の圧縮強度が確保できることを確認した。

空隙率を変化させたケース1, 6, 7の比較では、空隙率5%の減少に対して圧縮強度は4N/mm²程度増加していく傾向を示した。

骨材寸法を変えたケース1, 4, 5の比較では、4号砕石を用いた強度に比較して、5号、6号砕石を用いた強度のほうがやや高めに出る傾向を示した。

4.1.2 引張強度試験結果

引張強度試験の結果も圧縮強度試験結果と概ね同一の傾向を示した。図-3は各ケースの圧縮強度と引張強度の平均値を比較したものであるが、ポーラスコンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10~1/6の範囲にあり、圧縮強度が小さい配合ほど圧縮強度に対する引張強度の割合は高くなる傾向を示した。

4.2 凍結融解試験結果

4.2.1 水中凍結融解試験(α)の結果

相対動弾性係数の結果を図-4に示す。全ケー

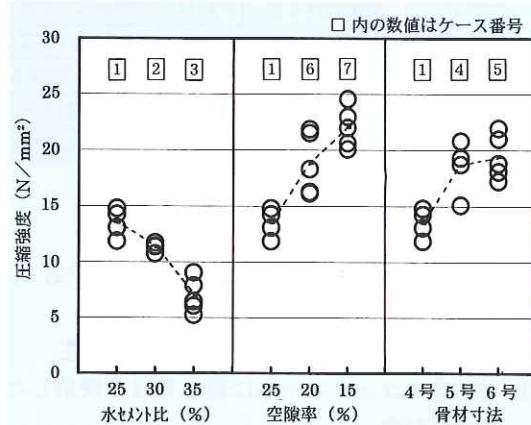


図-2 圧縮強度試験結果

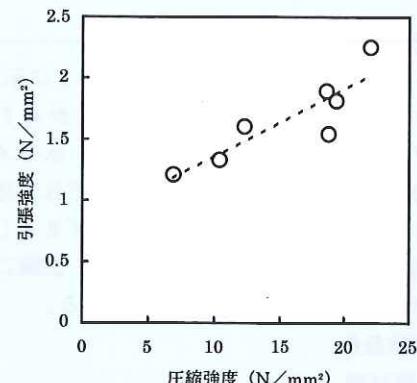


図-3 圧縮強度と引張強度の関係

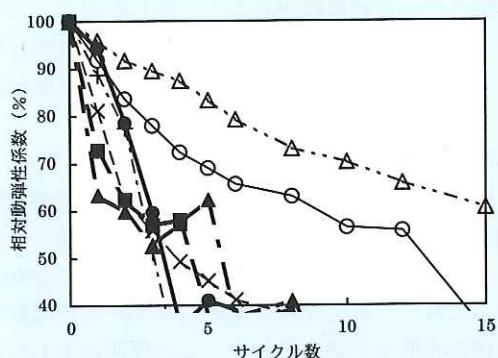
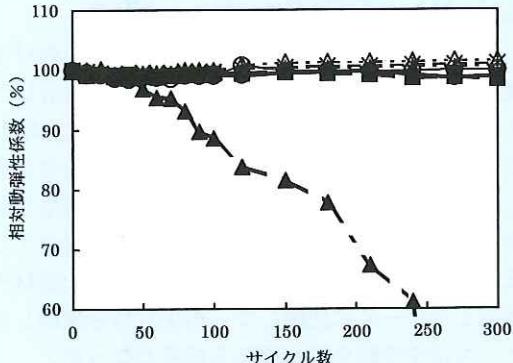
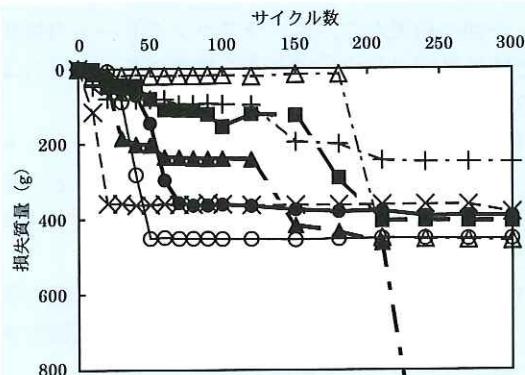
スとも試験開始後のわずか数サイクルで値が大きく低下しており、水中での凍結融解耐久性はかなり低い結果となった。この原因は骨材間の粗大な空隙中の水が凍結する際の膨張圧によってコンクリートに引張破壊が生じるためと考えられる。

4.2.2 気中凍結融解試験(β)の結果

相対動弾性係数の結果を図-5に示す。水セメント比が35% (最も貧配合) のケースでは相対動弾性係数が除々に低下していく傾向を示したが、それ以外の配合では動弾性係数の低下はまったく見られなかった。このことから、水面から上部の位置ではかなり高い凍結融解耐久性を備えていると考えられる。

凡例(図4,5,6共通)

- ケース 1. 基本配合
- ケース 2. W/C=30%
- ▲ ケース 3. W/C=35%
- ケース 4. 5号砕石
- △ ケース 5. 6号砕石
- × ケース 6. 空隙率 20%
- + ケース 7. 空隙率 15%

図-4 水中凍結融解試験 α の結果 (グループI)図-5 気中凍結融解試験 β の結果 (グループI)図-6 部分水中凍結融解試験 γ の結果 (グループI)

4.2.3 部分水中凍結融解試験 (γ) の結果

損失質量の結果を図-6に示す。この試験では水中凍結する部分のコンクリート質量は概ね600~800gであるが、その部分が凍結融解を繰り返すごとに徐々に崩壊していく様子がうかがえる。ただし6号砕石を使用したケースでは180サイクルまで崩壊が発生しておらず、骨材寸法の小さい配合であれば比較的高い耐久性を示すものと考えられる。

5. グループIIの実験結果

グループIIとして骨材に再生骨材を使用したケース8, 9, 10の実験結果について述べる。

5.1 強度試験結果

圧縮強度の試験結果を図-7に示す。図には再生骨材を使用したケースの他に堅硬な骨材を使用したケース1, 4, 5の結果も合わせて示したが、再生骨材を使用した場合の圧縮強度は堅硬な骨材を使用した場合の概ね8割程度の強度となった。

強度が低下した原因としては次のように考えられる。再生骨材は堅硬な骨材とそれに付着する旧モルタル部によって構成されている。この旧モルタル部は破碎再生時の衝撃による微小クラック等の弱点を含むものである。ポーラスコンクリートの強度は骨材が堅硬な場合には主にペーストの強度によって決まるが、再生骨材を使用すると、再生骨材中の強度的な弱点を介在する旧モルタル部とペーストとの界面に破壊が発生し、圧縮強度が低下するものと考えられる。

引張強度試験結果についても同様の傾向であった。

5.2 凍結融解試験結果

5.2.1 水中凍結融解試験 (α) の結果

相対動弾性係数の結果を図-8に示す。堅硬な骨

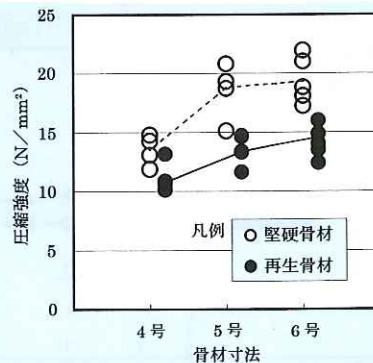
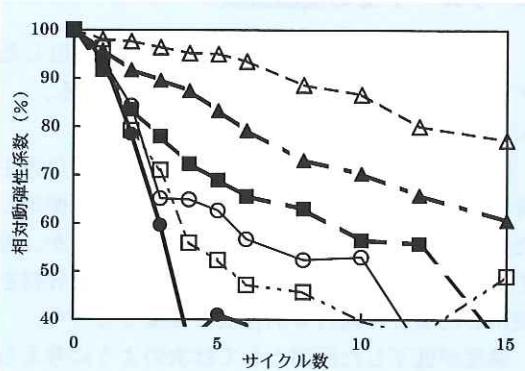
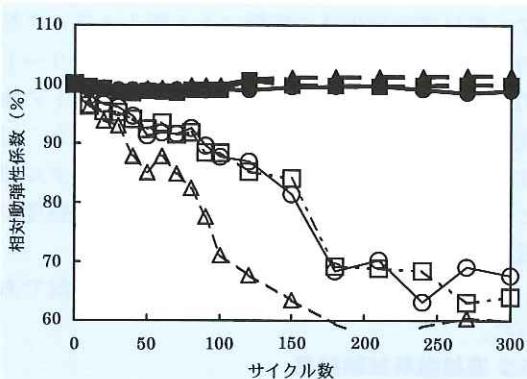
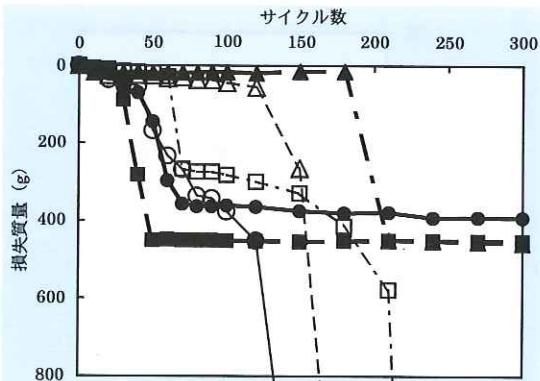


図-7 再生骨材を用いたケースの圧縮強度

凡例(図-8,9,10共通)

- ケース 1. 4号碎石
- ケース 4. 5号碎石
- ▲ ケース 5. 6号碎石
- ケース 8. 再生骨材 4号
- ケース 9. 再生骨材 5号
- △ ケース 10. 再生骨材 6号

図-8 水中凍結融解試験 α の結果 (グループ II)図-9 気中凍結融解試験 β の結果 (グループ II)図-10 部分水中凍結融解試験 γ の結果 (グループ II)

材を使用したケースと同様に、再生骨材を使用したケースも動弾性係数は数サイクルで大きく低下する結果となった。

図のなかで、再生骨材 6 号を使用したケース 10 の動弾性係数の低下割合が比較的小さい。この理由としては、再生骨材では、骨材の実積率が堅硬な骨材に比較してやや小さく、ポーラスコンクリートとしての空隙率を揃えるために、ペースト量をやや増やしており、このペースト量の違いが影響している可能性がある。しかしながら、わずか 25 サイクルで相対動弾性係数は 60% を割っており、他のケースと同様に耐久性はかなり低いといえる。

5.2.2 気中凍結融解試験 (β) の結果

相対動弾性係数の結果を図-9 に示す。堅硬な骨材を使用したケースでは、実験終了の 300 サイクルまで、動弾性係数の低下はほとんど生じなかったのに対し、再生骨材を使用したケースでは動弾性係数の低下が認められた。この原因は 5.1 項で述べた理由と同様、再生骨材中の旧モルタル部分の欠陥が影響しているものと考えられる。

5.2.3 部分水中凍結融解試験 (γ) の結果

損失質量の結果を図-10 に示す。堅硬な骨材を使用したケースと同様に、再生骨材を使用したケースも凍結融解を繰り返すごとに除々に崩壊していく様子がうかがえる。堅硬な 6 号碎石を使用したケースでは 180 サイクルまで崩壊が発生しなかったが、再生骨材 6 号のケースでは崩壊が生じなかったのは 100 サイクルまでで、堅硬な骨材を使用したケースに比較して、再生骨材を使用したケースはやや耐久性が落ちる結果となった。

6. まとめ

今回の結果から、ポーラスコンクリートの強度と凍結融解に対する耐久性を整理すると以下のようになる。

- (1) 圧縮強度は配合によって異なり、水セメント比が小さいほど、また空隙率が小さいほど、圧縮強度は高くなる傾向を示す。また骨材寸法によっても強度が変化する傾向がある。
- (2) 水セメント比 25%、空隙率 25% で堅硬な骨材を使用すれば、 10N/mm^2 以上の圧縮強度を確保できることを確認した。
- (3) ポーラスコンクリートの引張強度は圧縮強

度の1/10~1/6の範囲であった。

- (4) 水面下数十cmの範囲で凍結融解が繰り返される条件に対しては、ポーラスコンクリートの耐久性は低いと考えられる。
- (5) 適切な配合を行ったポーラスコンクリートの気中での凍結融解に対する耐久性は高いと考えられる。
- (6) 水際部のような部分的な水中凍結融解に対しては、堅硬で骨材粒径の小さな骨材を使用することで比較的高い耐久性を得ることが可能と考えられる。
- (7) 再生骨材を材料としたポーラスコンクリートの強度および凍結融解耐久性は硬堅な骨材を使用した場合に比較して低下することを確認した。

7. 今後の課題

以上、ポーラスコンクリートの強度と凍結融解耐久性に対する実験を行い、その基本的な物性を確認した。また、再生骨材を使用した場合の物性についても確認した。

今後は、より実際の供用条件に近づけるため、緑化充填剤を施したポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性を明らかにするとともに、凍結温度や凍結速度がポーラスコンクリートの耐久性に与える影響について研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 吉森和人、上野雅之、岡本享久、山下善秀：ポーラスコンクリートへの植栽技術、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996.
- 2) 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, 1989.

片平 博*



建設省土木研究所
材料施工部
コンクリート研究室
研究員
Hiroshi KATAHIRA

河野広隆**



同 コンクリート研究室長
Hirotaka KAWANO