

# 論文 ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性

小倉 信樹\*1・峰村 修\*2・阿部 隆英\*3・中原 大磯\*4

**要旨:** 本報告は車道用舗装機能および緑化機能を同時に併せ持つ空隙率 25%のポーラスコンクリートを比較的交通量の少ない寒冷地におけるダム貯水池の管理用道路として適用した場合の凍結融解抵抗性について実験・検討したものである。実験の結果、目標とする曲げ強度 3.0N/mm<sup>2</sup>および透水係数 1.0×10<sup>-2</sup>cm/sec 以上を満足し、また、比較的高い凍結融解抵抗性を有していることから、交通量の少ない寒冷地の道路として十分に適用出来ると考えられる。

**キーワード:** 透水性舗装, 排水性舗装, ポーラスコンクリート, 中庸熟ポルトランドセメント, 凍結融解抵抗性

## 1. はじめに

透水性および排水性舗装は、雨天時の車両走行安全性および地下水の涵養促進が期待できることから、その需要が急速に高まっている。これら高機能舗装は排水性アスファルトが一般的であるが、種々の耐久性能が期待されるポーラスコンクリートでの透水性および排水性舗装が注目されている<sup>1)2)</sup>。しかし、この種の舗装を寒冷地において適用した場合、冬季に繰返しの凍結融解作用を受けることになるため、このような環境下での凍害が危惧されている。

本報告は、凍結融解作用を受ける寒冷地で比較的交通量の少ないダム貯水池の管理用車道として施工されたポーラスコンクリート舗装を対象に、冠水後の同環境下における凍結融解抵抗性を実験的に検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 ポーラスコンクリートの物性の目標値

ポーラスコンクリートの物性目標値を表-1に示す。対象とした舗装は新潟県奥三面ダム貯水池の管理用道路で、車両通行はダム工事終了

後は年数回程度（舗装の設計に用いる交通量の区分：L交通）である。ポーラスコンクリート舗装を用いる目的としては、①雨天時および冠水後における舗装路面のすべり抵抗の向上、②ダム工事終了後、景観性を考慮した路面緑化を求められた<sup>3)</sup>。

既往の文献<sup>4)</sup>から、ポーラスコンクリートを緑化用途に使用する場合、単粒度碎石 S-5 1種（5-1.2mm）を用いた場合は困難であるが、単粒度碎石 S-13 1種（13-5mm）以上であれば可能であることが確認されている。また、目標空

表-1 ポーラスコンクリートの物性目標値

項目	目標値
空隙率 <sup>注(1)</sup>	25%±5%
曲げ強度 <sup>注(2)</sup>	3.0N/mm <sup>2</sup>
透水係数 <sup>注(3)</sup>	1.0×10 <sup>-2</sup> cm/sec 以上

注(1)：JIS A 1116 に準拠し、測定。

注(2)：JIS A 1106 に準拠し、材齢 91 日で測定。

注(3)：インターロッキングブロック舗装設計施工要領「透水性試験」<sup>5)</sup>に準拠し、測定。

\*1 太平洋セメント(株)研究本部佐倉研究所コンクリート技術グループ（正会員）

\*2 新潟県三面川開発事務所ダム課主任

\*3 鹿島・青木・本間特定共同企業体奥三面ダム工事事務所工事課長代理

\*4 日本道路(株)技術本部技術研究所第二研究室副主任研究員

隙率が 25%であることから、良好な緑化が可能となる粗骨材の最大寸法は 20mm 以上であることが分かっている。よって、本施工では S-20 1種（以下、S-20：20-13mm）を用いることとした。

ポーラスコンクリートの曲げ強度と空隙率の関係は既往の研究の成果<sup>1)2)</sup>より、概ね以下の関係式で示される。

$$\text{曲げ強度}(N/mm^2) = -\frac{1}{4}\text{空隙率}(\%) + 10 \quad (1)$$

目標空隙率が 25%であることから、推定曲げ強度は約 3.8N/mm<sup>2</sup>と考えられる。これにバラツキ等を考慮してポーラスコンクリートの設計曲げ基準強度を検討したが、割り増し係数を 1.2 程度みて 3.0N/mm<sup>2</sup>と考えた。セメントコンクリート舗装要綱<sup>6)</sup>に規定されているコンクリート版の設計基準曲げ強度は 4.5N/mm<sup>2</sup>となっている。Westergaard の式<sup>7)</sup>に基づいて断面構造の設計を行った結果、L 交通における版厚 15cm に相当する自由縁部応力と曲げ強度 4.5N/mm<sup>2</sup>の比とほぼ同等となる版厚が、20cm であることが確認された。なお、現場がダム工事現場であるという事情から中庸熱ポルトランドセメントを使用し、設計基準強度の試験材齢を 91 日とした。透水係数は排水性アスファルトの基準値である 1.0×10<sup>-2</sup>cm/sec 以上とした。

## 2.2 使用材料とコンクリートの配合

基本とするコンクリートおよび比較用コンクリートの使用材料およびコンクリートの配合を表-2 および表-3 に示す。

基本とするコンクリートは、本施工で用いた配合のコンクリートで、中庸熱ポルトランドセ

メントを用いて目標空隙率を 25%とした（以下、M25）。比較用コンクリートは、同一配合で空隙率を 20%（以下、M20）および 30%（以下、M30）に調整したコンクリート、目標空隙率 25% で配合条件が同一で使用するセメントを中庸熱から普通ポルトランドセメントとしたコンクリート（以下、N25）である。

配合条件はこれまでの研究により<sup>8)</sup>、粉体/砂質量比（P/S）は強度が良好となる 2.0、水/粉体質量比（W/P）はフレッシュモルタルの粗骨材へのコーティング性状が良好となる 19% とした。また、モルタル粗骨材体積比（m/g）は粗骨材に S-20 を使用した場合に空隙率を確保しやすく、目標曲げ強度を満足する 37.5% とした。なお、無機質系特殊混和材（RM-S）<sup>1)</sup> は内割置換であり、粉体に含まれる。

表-2 使用材料

使用材料			密度 g/cm <sup>3</sup>
セメント (C)	中庸熱ポルトランドセメント	T 社製	3.20
	普通ポルトランドセメント	T 社製	3.16
混和材	RM-S	T 社製	2.83
細骨材 (S)	細目砂 F.M.1.79	新潟県 中条町産	表乾
			2.57
			絶乾
粗骨材 (G)	S-20 実積率 59.0%	新潟県 朝日村産	2.54
			2.62
			絶乾
水 (W)	水道水	-	2.58
			1.00

表-3 コンクリートの配合

配合名	配合条件			配合 <sup>注</sup> 空隙率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	W/P	m/g	P/S		W	C	RM-S	S	G
M25	19%	37.5%	2.0	25%	56	243	50	146	1426
M20				20%	59	259	53	156	1521
M30				30%	52	227	47	137	1331
N25				25%	55	241	50	146	1426

注：配合空隙率とは配合における目標空隙率である。

### 2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-1に示す。ポーラスコンクリートのフレッシュ時の締固め性を評価する方法として、沈下法<sup>9)</sup>による空隙指標値を測定した。空隙指標値は、 $\phi 10 \times 20(\text{cm})$ 試験器に一定量(2.6kg)のポーラスコンクリートを投入し、4kgの重りを載せて振動テーブル(出力200W、振幅2.0mm)を用いて120秒間振動を加えた時の空隙率である。空隙指標値は既往の実験から実施工に用いられる高締固めフィニッシャにより締固められた舗装版の空隙率とほぼ同等であることが確認されている<sup>9)</sup>。

凍結融解試験および曲げ強度試験用供試体はポーラスコンクリートの示方配合(空隙率0%)から単位容積質量を算出し、所定の空隙率となる試料(4000 $\text{cm}^3$ 分)を計り10 $\times$ 10 $\times$ 40(cm)型枠に詰め、振動タンバにより所定の供試体寸法(配合空隙率)となるまで締固める方法で作製した。その際、締固めた時間も測定した。供試体は成形翌日に脱型し、所定材齢まで水中養生(20 $\pm$ 2 $^{\circ}\text{C}$ )を行った。

曲げ強度試験は各配合3本とし、JIS A 1106に準拠し、材齢7日、28日、91日、182日および364日で行った。透水係数測定試験はインターロッキングブロック舗装設計施工要領「透水性試験」<sup>9)</sup>を参考とし、曲げ強度試験体の試験片にて行った。また、実際の施工現場の暴露養生管理供試体(以下、M25G)についても同様に行った。

凍結融解試験はJSCE-G501で規定されている水中における凍結融解の急速繰返しが一般的である。既往の研究では、ポーラスコンクリートの水中での相対動弾性係数は、試験後の僅か数サイクルで値が大きく低下しており、凍結融解抵抗性はかなり低い結果となった。これは骨

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引張破壊が生じるためと考えられる<sup>9)</sup>。

実際の管理用道路の施工現場を想定すると、この試験方法が現場の状況を的確に捉えているとは言い難い。すなわち、舗装は表層からのみ凍結することから、本実験では実際の環境条件を考慮して、容器一面から冷却・加温する一面凍結融解試験を行うこととした<sup>9)10)</sup>。一面凍結融解試験用容器を図-2に示す。本実験では、水の体積膨張により容器底面から圧力が掛からないよう、容器底面側を水面と仮定し冷却・加温を行い、供試体はコンクリート打込み面を下に設置した。

一面凍結融解試験用容器は恒温恒湿槽内に上中下の3段に置いて行った。槽内における容器の温度変化を図-3に示す。本実験では、槽内の温度を容器内で凍結・融解が十分に繰返されるよう-40 $^{\circ}\text{C}$ (13.5h)~40 $^{\circ}\text{C}$ (9.5h)まで変化させた。サイクルタイムは23時間/回とし、サイクル数は200回とした。測定結果から、容器

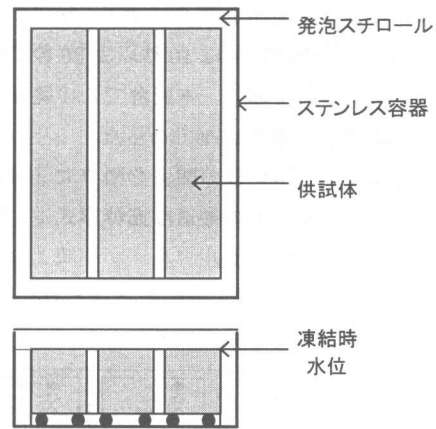


図-2 一面凍結融解試験用容器

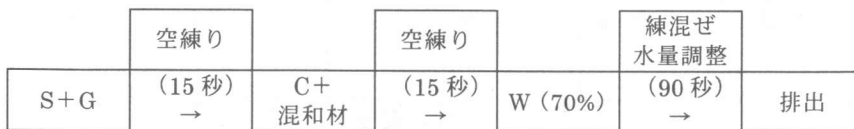


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

内の温度変化は凍結・融解が十分に繰り返されていることが確認された。

### 3. 実験結果

沈下法による空隙指標値の結果を表-4に示す。空隙指標値は、目標空隙率 25%±5%の範囲を満足していた。本実験で使用したコンクリートは実際に施工に使用したコンクリートの空隙指標値とほぼ同等であり、施工で用いたコンクリートと同等なコンシステンシーを有していたと言える。

ポーラスコンクリートの曲げ強度試験結果を図-4および図-5に示す。試験の結果、中庸熟セメントを使用したコンクリートは長期に渡り強度発現があった。また、初期材齢においても普通セメントの場合とほぼ同様の伸びを示しており、これは高空隙による表面積の拡大により水和反応が促進されたものと考えられる。普通セメントを用いた場合、材齢 91日以降強度増加が殆ど見られなかった。

試験体作製時の締固め時間と材齢 91日における曲げ強度の関係を図-6に示す。既往の研究では適切な締固め時間は 10秒以上 30秒以内であると考えられており、本配合でこの範囲を満足した配合空隙率は 25%であった。

連続空隙率と透水係数の関係を図-7に示す。ポーラスコンクリートの最適な充填形式は、固相（粗骨材）と液相（モルタル）が連続となっており、かつ気相（空隙）も連続となる funicular の第 1 領域と考えられている<sup>11)</sup>。

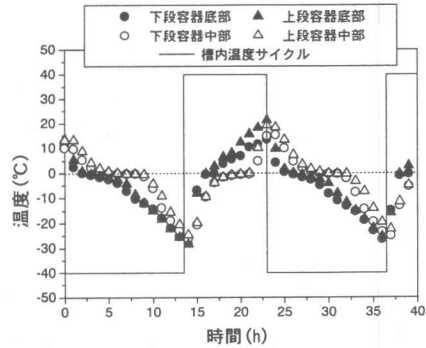


図-3 容器内温度変化

表-4 空隙指標値測定結果

配合名	空隙指標値
M25	22.6%
M20	
M30	
N25	22.6%
M25 (現場)	22.5%

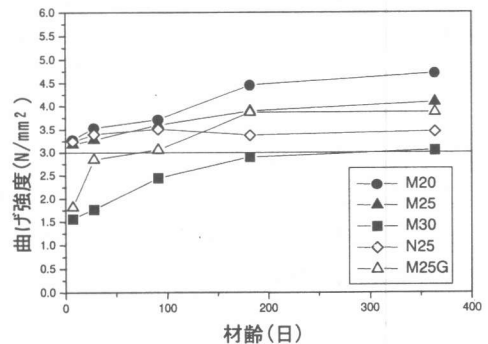


図-5 曲げ強度結果

M：中庸熟標準養生、N：普通標準養生、MG：中庸熟現場養生

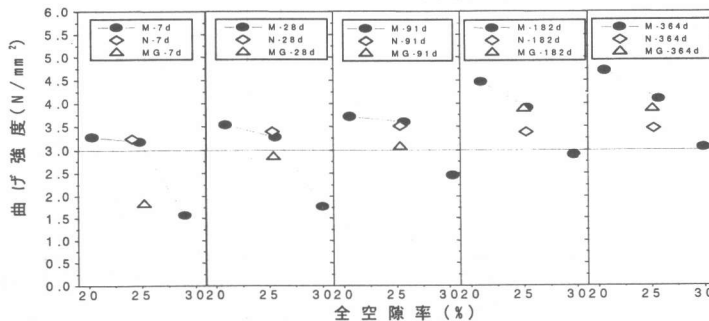


図-4 全空隙率と曲げ強度の関係

M25 に比べて、M30 は強度が劣り、M20 は透水性が低下した。本実験では同一配合のコンクリートで、締固め時間を変えることによって配合空隙率を変えており、空隙率はポーラスコンクリートの透水性および強度に密接に関係していると考えられる。

各サイクルの相対動弾性係数を図-8 に示す。M30 において 200 サイクルにおける相対動弾性係数が 60% 以下になった。また、式(2)により求めた耐久性指数（以下、DF）を表-5 に示す。本試験では試験条件が厳しくなっているため、全ての水準で DF が 80% 以下となった。空隙率が大きくなると、凍結融解抵抗性が低下する傾向があり、空隙率 30% において急激に低下する結果であった。

$$DF \text{ (耐久性指数)} = \frac{P \times N}{M} \quad (2)$$

ここに

$P$  : 相対動弾性係数

$N$  : 相対動弾性係数が 60% になるサイクルまたは 300 サイクルのいずれか小さなもの

$M$  : 200 サイクル

各サイクルの質量減少率を図-9 に示す。ポーラスコンクリートの水中凍結水中融解試験や気中凍結水中融解試験では供試体内部における破壊のため質量変化が少ない結果が得られるが、一面凍結融解試験では表層部が凍結融解作用を受けるため、スケーリングやポップアウトにより質量減少率が徐々に大きくなる傾向が見られた。また、試験終了後の質量減少率は空隙の影響を受けず、いずれのコンクリートについても約 1.4% であった。

#### 4. まとめ

車道用および緑化を目的としたポーラスコンクリートを比較的交通量の少ない寒冷地におけるダム貯水池の管理用道路として適用した場合

表-5 耐久性指数

配合名	サイクル数 (相対動弾性係数)	耐久性指数
M20	200 回 (77.3%)	77.3
M25	200 回 (73.3%)	73.3
M30	168 回 (58.8%)	49.4

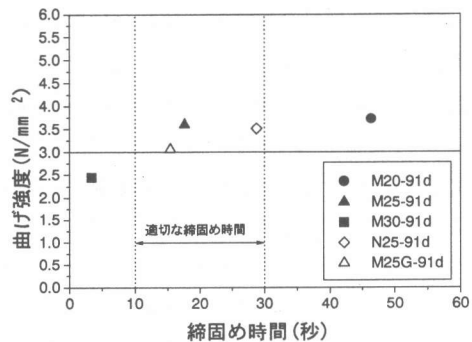


図-6 締固め時間と曲げ強度の関係

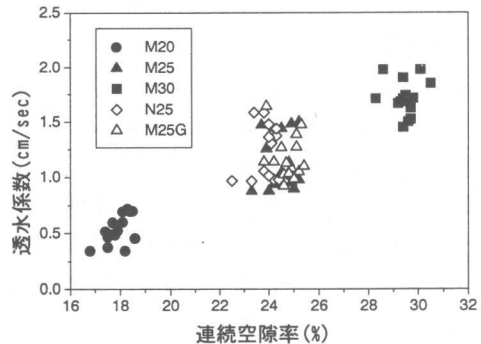


図-7 連続空隙率と透水係数の関係

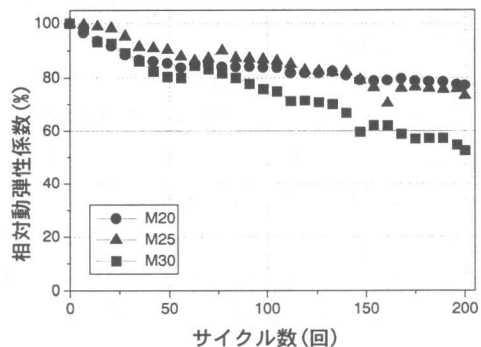


図-8 相対動弾性係数

の凍結融解抵抗性について実験的に検討した。

本試験に使用したポーラスコンクリートは、空隙率 20%~25%であれば、材齢 91 日において目標とした曲げ強度 3.0N/mm<sup>2</sup> および透水係数 10<sup>-2</sup>cm/sec 以上を十分に確保することができた。また、式(1)は目標とする空隙率から曲げ強度を算出するのに有効であった。

一面凍結融解試験は、JSCE-G501 に規定する供試体の中心温度 -18℃~5℃ の変化に比べ、供試体全体が 24 時間以内に凍結と融解を繰返せるよう恒温恒湿槽内の温度条件を -40℃~40℃ に設定して行った。その試験の結果、表層部で凍結融解によるスケーリングやポップアウトが起こり、質量減少率が通常より大きい 1.4% であった。空隙率 25%以下であれば比較的高い凍結融解抵抗性を有すると考えられる。また、空隙率が大きくなると、凍結融解抵抗性は低下していく傾向が見られた。

#### 参考文献

- 1) 田中敏嗣, 富田六郎, 橋本修治, 野田悦郎: 車道用透水性舗装コンクリートの開発, 舗装, 32-11, pp13-17, 1997.11
- 2) 野田悦郎, 中原大磯, 遠藤桂, 孔永健: 高耐久性低騒音舗装を目指したポーラスコンクリート舗装の実用化に関する研究, 道路建設, 11/8, pp57-63, 1999.8
- 3) 中原大磯, 峰村修, 阿部隆英: ダム管理用道路でのポーラスコンクリート舗装施工例, 第 23 回日本道路会議一般論文集, (C), pp300-301, 1999.10
- 4) 松川徹 他: 連続空隙を有する緑化コンクリートの配合と空隙に関する研究, 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, 1995
- 5) インタ-ロッキング ブロック協会, インタ-ロッキング ブロック舗装研究委員会: インタ-ロッキング ブロック舗装設計施工要領, pp76-79, 1987.10
- 6) (社)日本道路協会: セメントコンクリート舗

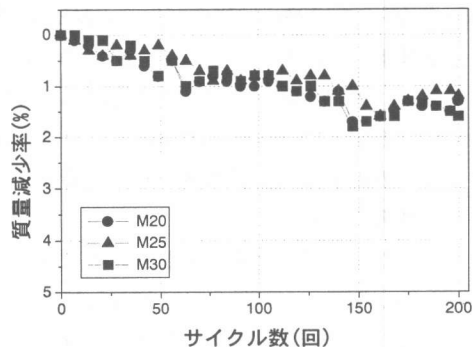


図-9 質量減少率

装要綱, (社)日本道路協会, p15, 1984.2

- 7) 松野三郎, 養王田栄一, 三浦裕二, 飯島尚: 道路舗装の設計, (株)山海堂, p235, 1974.12
- 8) 峰村修, 阿部隆英, 梶尾聡, 中原大磯: 高空隙な車道用ポーラスコンクリートの配合に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp495-500, 1999
- 9) 片平博, 河野広隆: ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性, 土木技術資料, 41-11, pp69-71, 1999
- 10) 橘大介, 今井実, 武川芳広, 高木史人: 透水性コンクリートの耐凍害性, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp386-387, 1996.9
- 11) 吉森和人, 藤原浩巳, 伊藤修一, 岡本享久, 下山善秀: ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp650-655, 1995.12