

論文 寒冷地に施工されたポーラスコンクリートの耐凍害性

中村 拓郎*¹・堀口 敬*²・志村 和紀*³

要旨: 寒冷地で3年から10年程度供用された3種類のポーラスコンクリート(以下: POC)を対象に基礎的性質と耐凍害性に関する調査を実施した。数年間の供用では, POCの劣化形態は主にスケーリング劣化であり, 超音波伝播速度や強度に顕著な低下は認められず, すべり抵抗性や浸透水量を確保できることも確認された。また, 供用された POC では, 再現 POC に比べて凍結融解作用による吸水量が増加すること, 供用年数が長いほどスケーリング抵抗性が低下することが明らかになった。このため, 供用期間中の耐凍害性の低下を考慮した POC の耐凍害性評価手法の検討が必要であることを示した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 寒冷地, 凍害, スケーリング抵抗性, 基礎的性質

1. はじめに

ポーラスコンクリート(以下: POC)は全体積の10%から30%を占める粗大空隙構造を保有するコンクリートである。土木・建築・環境工学などの幅広い分野において, この空隙構造を生かした環境負荷低減型材料としての利用法が期待されている。

その多孔質な構造から, POCは寒冷地において厳しい凍害を受けることが危惧されている。粗大空隙が常時飽水され, 凍結時に排水性が失われる JIS A 1148 A 法のような凍結融解試験では, 少ない凍結融解サイクル数で POC は崩壊に至る¹⁾ものの, それ以外の条件では AE コンクリートと同程度の耐凍害性を保有することが報告されている²⁾。しかしながら, POCの耐凍害性を評価するための試験方法および評価基準に関する規格は存在しないのが現状である。寒冷地に施工された POC における凍害劣化や基礎的性質の変化に関する調査例^{3),4)}は少なく, 寒冷地での POC の適切な利用のためには長期的な耐凍害性の検証が求められる。

また, POC では粗大空隙による強度低下を補うために, 水セメント比は小さく設計される。水セメント比が40%以下のコンクリートでは乾湿繰返しや屋外暴露後に耐凍害性が低下する場合があることが報告されており⁵⁾, POC は低水セメント比のコンクリートの一種であることから, 供用された POC でも同様に耐凍害性が低下するのを確認する必要がある。

本研究では, 寒冷地で供用された POC の基礎的性質や耐凍害性の変化を確認することを目的として, 寒冷地に施工された3種類の POC を対象にした現場試験, 物性試験および凍結融解試験を実施した。

2. 調査概要

2.1 施工環境および配合と使用材料

寒冷地において道路舗装と河川護岸に使用されている3種類の POC を調査対象とした(表-1)。これらの POC はいずれも凍害危険度⁶⁾が「4」とされる地域に施工されており, 厳しい凍害を受けることが予想される。

1つめの調査対象は, 北海道 A 市に歩道として施工された透水性舗装用 POC 製インターロッキングブロックである。粗大空隙が常時飽水されている環境ではないものの, 夏期にはブロック内の温度が最大で50°Cまで上昇することが確認され, 厳しい乾湿繰返し作用を受けているものと考えられる。施工から3冬経過した時点で回収した POC ブロックを供試体(I7)とした。

2つめの調査対象は, 北海道 N 川に植生・生態系の保護を目的として施工された河川護岸用 POC ブロックである。この POC ブロックは, 雨期には水位が上昇してブロックを越流するなど, 常に水分の供給がある環境に施工されている。施工から4冬経過した時点でコアボーリングによって採取した試料を供試体(R6)とした。

3つめの調査対象は, 1つめの調査対象と同市内に歩

表-1 調査対象のポーラスコンクリート

調査 No.	供試体記号	用途	施工年.月	調査期間	凍害危険度 ⁶⁾	設計空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)**						
								W	C	S	G6	G7	T	SP
1	I7	道路舗装	2007.1	~2009.6	4	20	24	80	340	172	-	1431	-	3.4
2	R6	河川護岸	2001.10	~2005.5	4			99	413	-	1550	-	8.1	3.1
3	P7	道路舗装	1996~1998	2008.6*	4			83	352	88	-	1550	-	3.4

*この年度のみ調査を実施 **W: 水, C: セメント, S: 砂, G6とG7: 碎石, TとSP: 混和剤

*1 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員 博(工) (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科 准教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科 助教 博(工) (正会員)

道として施工された POC 平板である。この POC 平板は国道に面して施工されているため、冬期には融氷剤が散布されていた可能性があり、より厳しい凍結融解作用を受けてきたと考えられる。この POC 平板をコンクリートカッターで切り出したものを供試体(P7)とした。

また、供用された POC と比較するために、調査対象とした POC と同配合の再現 POC を作製した。これらは設計空隙率を 20%、水セメント比を 24%とした。使用材料には、水(W)、セメント(C)には普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³)を用いて、砂(S)、碎石(G6 または G7)、混和剤(T および SP)は表-2 に示すように調査対象の POC に即したものをを用いた。

2.2 試験方法

各調査において実施した試験を表-3 に、各試験に用いた供試体の寸法を表-4 にまとめた。各調査に共通した試験概要を以下に示す。

(1) 現場試験

まず、施工箇所における劣化状態を目視によって確認した。I7 と R6 では施工直後から継続して超音波伝播速度の測定による非破壊試験を実施した。また、I7 では浸透水量とすべり抵抗値も測定した。浸透水量は JIPEA-TM-11 “インターロッキングブロック舗装の浸透水量の試験方法” に従い、すべり抵抗値は JIPEA-TM-6 “インターロッキングブロックのすべり抵抗試験—ポータブルスキッドレジスタンステスターによる—” に従って測定した。

(2) 物性試験

全空隙率は、ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)の容積法によって測定した。強度試験は供試体の形状に合わせて R6 では圧縮強度試験を、I7 および P7 では曲げ強度試験を行った。圧縮強度は硫黄キャッピングによって端面処理をした後に JIS A 1108 “コンクリートの圧縮強度試験方法” に、曲げ強度試験は JIS A 5371 “プレキャスト無筋コンクリート製品”のインターロッキングブロックの試験方法に準拠して実施した。

(3) 凍結融解試験方法

凍結融解試験には RILEM CIF/CDF 法⁷⁾を用いた。試験前の養生条件は、再現 POC では、脱型後 7 日間の水中養生(+20°C)の後、恒温室において 21 日間の気中養生(+20°C)とし、供用された POC では、超音波洗浄後に恒温室において質量が一定になるまで気中養生とした。前吸水行程および凍結融解行程における吸水は試験面である供試体下面からの一面吸水とした。側面からの吸水を防ぐために供試体側面にブチルゴムとアルミテープで防水処理を行った。養生後に+20°C で 7 日間の前吸水行程を経て、凍結融解行程を実施した。凍結融解の条件は、最高温度(+20±0.5°C)から 4 時間で最低温度

表-2 使用材料

供試体種類	記号	材料	備考
I7	S	川砂	密度 : 2.65 g/cm ³ 吸水率 : 2.00 %
	G7	単粒度碎石 7号	粒径 : 2.5-5 mm 密度 : 2.65 g/cm ³ 吸水率 : 2.00 %
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体
R6	G6	単粒度碎石 6号	粒径 : 5-13 mm 密度 : 2.78 g/cm ³
	T	増粘剤	ポリアクリルアミド系混和剤
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
P7	S	川砂	密度 : 2.69 g/cm ³ 吸水率 : 1.83 %
	G7	単粒度碎石 7号	粒径 : 2.5-5 mm 密度 : 2.72 g/cm ³ 吸水率 : 1.02 %
	SP	AE 減水剤	ポリオキシエチレン アルキルフェノール エーテル 硫酸エステル

表-3 実施した試験と供試体種類

供試体種類	数年間供用された POC							再現 POC		
	現場試験				室内試験			空隙試験	強度試験*	凍結融解試験**
	外観観察	非破壊試験	浸透水量試験	すべり抵抗試験	空隙試験	強度試験*	凍結融解試験**			
I7	●	●	●	●	●	△	○	●	△	◎
R6	●	●	-	-	●	□	◎	●	□	◎
P7	●	-	-	-	●	△	◎	●	△	◎

* 圧縮強度試験 : □, 曲げ強度試験 : △

** CIF 法のみ実施 : ○, CIF 法と CDF 法を実施 : ◎

表-4 実施した試験と供試体種類

供試体種類	物性試験 (mm)	凍結融解試験	
		試験面 (mm)	高さ (mm)
I7, I7-R*	100×200×60	100×200	60
R6	φ 100×200	φ 100	75
R6-R*	φ 100×200	150×150	75
P7, P7-R*	100×200×60	100×200	60

* 供試体記号の末尾に-R が付記されているものは再現 POC

(-20±0.5°C)まで冷却して 3 時間保持し、4 時間で最高温度まで加熱して 1 時間保持させ、1 日 2 サイクルとし、凍結融解 56 サイクルまで測定した。試験液には CIF 法では蒸留水、CDF 法では 3%の塩化ナトリウム水溶液を用いた。測定項目は相対動弾性係数、スケーリング量、吸水量とした。

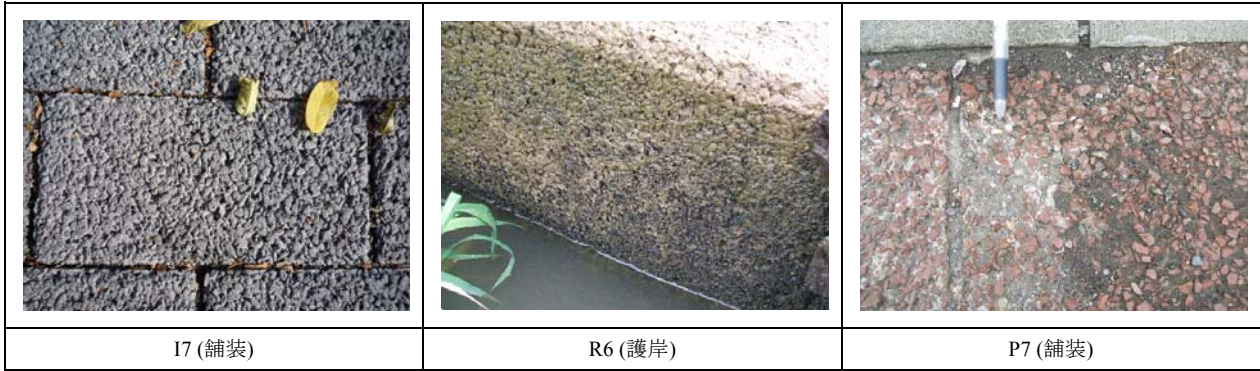


図-1 寒冷地で数年間供用されたポーラスコンクリートの劣化状態

3. 調査結果と考察

3.1 外観による劣化状態の評価

寒冷地で数年間供用された POC の劣化状態を図-1 に示す。歩道として施工後3冬経過した I7 では、目視下での劣化は認められなかった。河川護岸である R6 では、水に接している部分に軽微なスケーリング劣化が認められたものの、粗骨材の剥落やひび割れなどの構造的な損傷は認められなかった。施工後10年以上経過した P7 では、激しいスケーリング劣化が認められ、巨視的なひび割れが発生している個所も確認された。

3.2 実環境での供用が基礎的性質に及ぼす影響

(1) 超音波伝播速度比および空隙率と強度の変化

外観に顕著な劣化が認められなかった舗装用 POC の I7 と河川護岸 POC の R6 では図-2 に示すように、施工後の経過日数にもなった超音波伝播速度比の低下は認められなかった。

次に、再現 POC と供用された POC の空隙試験と強度試験の結果を表-4 に、強度比と施工後の経過年数の関係を図-3 に示す。I7 では超音波伝播速度比と同様に強度低下は認められなかった。R6 では強度比が 86% となっているが、超音波伝播速度比に低下が認められなかったことや再現 POC よりも空隙率の大きいことを考慮すると実際の強度低下はより軽微であると考えられる。施工後10年経過した P7 では、再現 POC よりも全空隙率が少ないにもかかわらず曲げ強度は小さく、強度比で 79% となっており、供用期間中の強度低下が認められた。ただし、JIS A 5371 において透水性平板の曲げ強度は 3.0N/mm^2 以上とされていることから、過酷な環境で10年程度供用された状態でも十分な曲げ強度を保持していたことが確認された。なお、供用された POC の超音波伝播速度比や強度の経年変化には、湿潤条件に晒された時のカルシウム分の溶脱や乾湿繰返しなど、凍結融解作用以外の影響もあると考えられる。

(2) 浸透水量の変化

施工現場で測定された浸透水量は図-4 に示すように経過日数にもなって低下していることが確認され

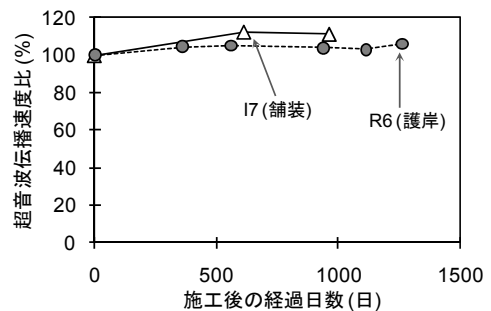


図-2 供用期間における超音波伝播速度比の変化

表-4 空隙および強度試験結果

供試体種類	再現 POC (材齢 28 日)		供用された POC	
	全空隙率 (%)	強度 (N/mm ²)	全空隙率 (%)	強度 (N/mm ²)
I7	26.3	5.40*	26.1	5.66*
R6	20.4	21.4**	21.6	18.3**
P7	23.3	5.03*	19.1	3.95*

*: 曲げ強度, **: 圧縮強度

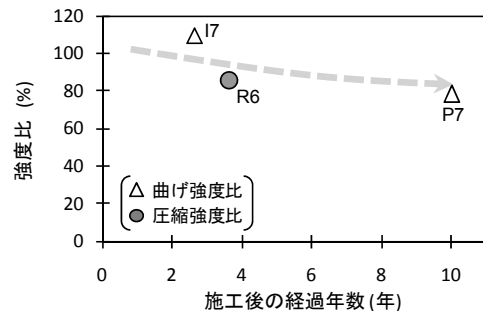


図-3 強度比と供用年数の関係

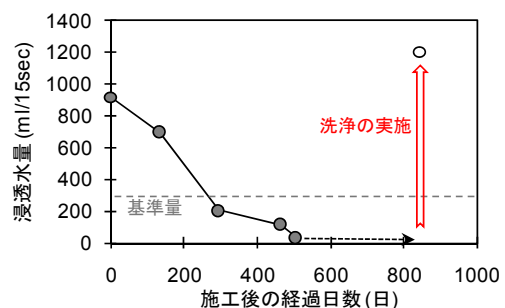


図-4 供用期間における浸透水量の変化

た。約 300 日経過した時点での浸透水量は、日本道路協会の舗装性能評価法にある基準量 300ml/15sec を下回り、約 500 日経過した時点では初期値に対して大きく低下していた。これはインターロッキングブロックの施工時に目地材として使用される砂や供用期間における砂ぼりによる目詰まりが原因と考えられる。しかしながら、2009 年 5 月(約 800 日経過)の調査において高速洗浄機を用いて洗い流しを実施した結果、浸透水量を 1200ml/15sec と大幅に回復させており、管理方法の工夫で透水性を維持できることが明らかになった。

(3) すべり抵抗値の変化

施工現場で測定されたすべり抵抗値(BPN)と施工後の経過日数の関係を図-5に示す。施工から約 500 日経過した 2008 年 6 月では調査対象付近のアスファルト路面、コンクリート縁石も測定して参考値とした。POC は粗大空隙のために表面が平坦ではなく試験装置のスライダー部分との接触面積が小さいことから、一般的なコンクリートやアスファルトと比べると BPN は小さいことが確認された。また、調査対象とした POC では施工後の経過日数にともなって BPN の減少傾向が認められるが、測定した POC では浸透水量が低下していたことから排水性が失われており、測定時に散水した水の影響が大きかったと考えられる。インターロッキングブロック舗装設計施工要領の合格判定値は歩行者系道路では 40BPN 以上とされており、2 冬経過した後も BPN は判定値を満たしていることが確認された。

3.3 実環境での供用が耐凍害性に及ぼす影響

(1) 相対動弾性係数に及ぼす影響

凍結融解試験における相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を図-6に示す。まず、試験液を蒸留水とした CIF 法の結果を検討する。それぞれの再現 POC では相対動弾性係数の低下は認められなかった。供用された POC では、施工後 10 年程度経過した P7 のみに相対動弾性係数の緩やかな低下が確認された。次に、試験液を塩化ナトリウム水溶液とした CDF 法の結果を検討する。I7 の再現 POC では相対動弾性係数の低下が認められず、P7 の再現 POC では凍結融解 48 サイクルで相対動弾性係数の低下が始まっている。供用された POC において、I7 は再現 POC と同様の挙動を示し、R6 と P7 では相対動弾性係数の急激な低下が認められた。R6 では凍結融解 40 サイクル、P7 では凍結融解 12 サイクル程度で供試体が崩壊している。このように、試験液が塩化ナトリウム水溶液である場合や、施工後の供用年数が長いほど凍結融解作用による相対動弾性係数の低下が大きくなることが明らかになった。

(2) スケーリング量に及ぼす影響

凍結融解試験におけるスケーリング量と凍結融解サ

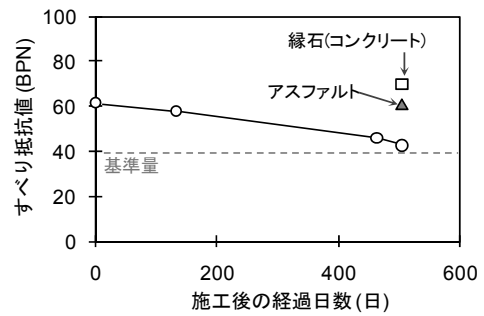


図-5 供用期間におけるすべり抵抗値の変化

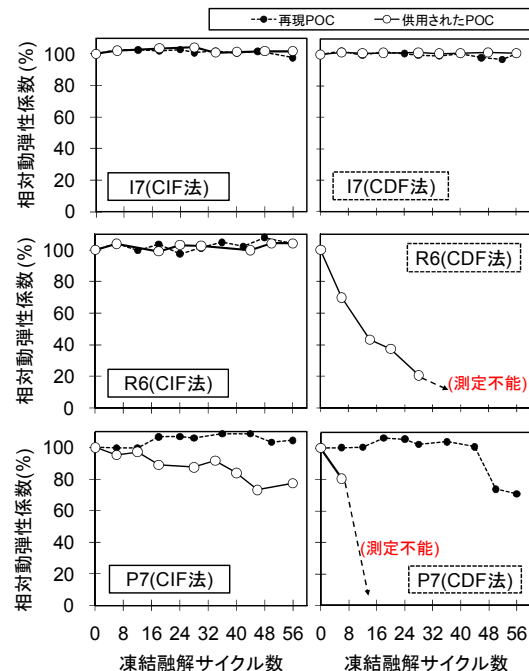


図-6 相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係

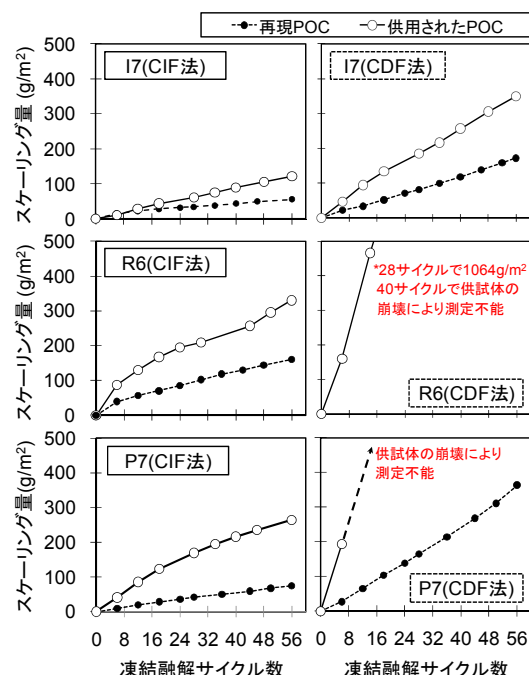


図-7 スケーリング量と凍結融解サイクル数の関係

イクル数の関係を図-7に示す。全体的な傾向として、供用された POC では、再現 POC に比べてスケーリング量が増加していることがわかる。I7 と R6 では相対動弾性係数の挙動が再現 POC と同様であったにも関わらず、スケーリング量は増加している。このことから、寒冷地での供用期間中に POC のスケーリング抵抗性が低下していることが明らかになった。

また、R6 と I7 の CDF 法では、砕石が剥落するような激しいスケーリングの発生とともに相対動弾性係数の低下が認められた。一般的なコンクリートでは、内部劣化の指標である相対動弾性係数と表面劣化の指標であるスケーリングは別の劣化形態とされている。しかしながら、POC の強度や耐久性はセメントペーストやモルタル部に大きく依存しているため、スケーリングによるモルタル部の損傷や減少が相対動弾性係数の低下に影響したと考えられる。

次に、再現 POC を基準とした試験終了時のスケーリング量の増加比と施工後の経過年数の関係を図-8に示す。なお、P7 の CDF 法の結果は凍結融解 56 サイクル前に供試体が崩壊したために凍結融解 6 サイクルのスケーリング量を用いた。これによると施工後の経過年数が長いほどスケーリング量の増加比が大きくなり、試験液を塩化ナトリウム水溶液とした CDF 法ではより明確になっていることがわかる。このため、施工後に耐凍害性を維持するためには、設計時のスケーリング抵抗性を高めおくことが重要であると考えられる。

(3) 吸水量に及ぼす影響

7 日間の前吸水行程を含めた試験日数と吸水量の関係を図-9に示す。吸水挙動の特徴として、前吸水行程後の凍結融解開始とともに吸水量が再び増加していることがわかる。一般的なコンクリートにおいて Setzer⁸⁾は、凍結融解作用を受けたコンクリートがポンプの様に働き、融解時に外部から吸水するポンプ効果を提案している。粗大空隙を保有する POC においても凍結融解作用による吸水(以下：凍結吸水)が認められた。また、スケーリング量の大きい供試体では、凍結融解行程において吸水量の減少が認められる。これは激しいスケーリングによって吸水可能なセメントペーストまたはモルタルが失われたことに起因すると考えられる。

次に、スケーリング量と凍結吸水量の関係を図-10に示す。ここでは供試体高さが異なる R6 と供試体が崩壊した供用された POC の P7 は検討対象外とした。これによると CIF 法と CDF 法の両方で凍結吸水量が大きいほどスケーリング量が大きくなる傾向が認められ、POC の凍結融解挙動における凍結吸水量はスケーリング抵抗性に関連することが確認された。また、施工後 3 年経過した I7 では、再現 POC に比べて凍結吸水量とスケー

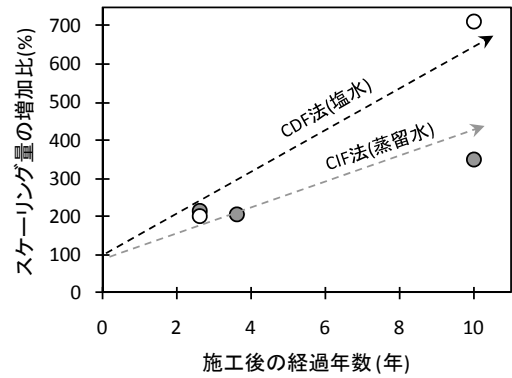


図-8 スケーリング増加率と供用年数の関係

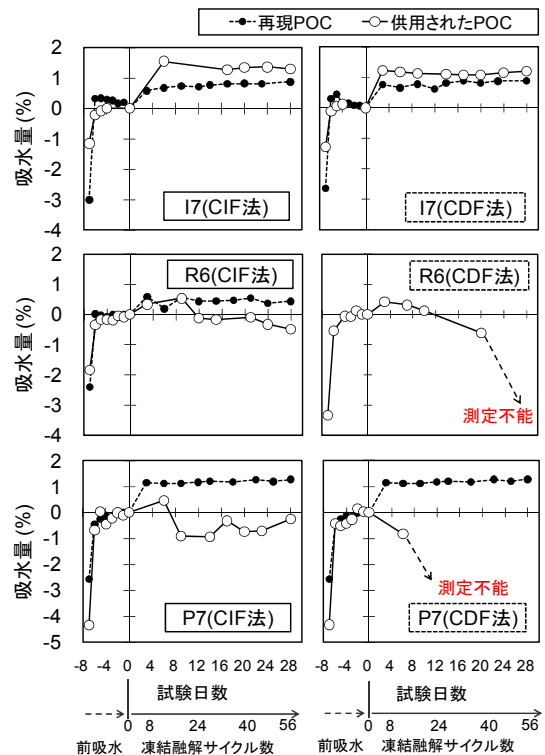


図-9 吸水量と試験日数の関係

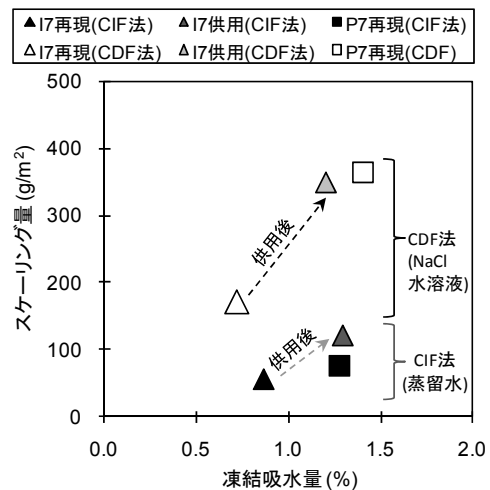


図-10 スケーリング量と凍結吸水量の関係

リング量が CIF 法で約 1.4 倍、CDF 法で約 2 倍に増加していることが確認された。このように、寒冷地で供用された POC では、凍結融解作用にともなう吸水量が増加し、スケーリング抵抗性が低下したと考えられる。

(4) 耐凍害性評価に関する今後の課題

一般的なコンクリートにおいて、青野ら⁹⁾は乾燥にともなう C-S-H の変化によって空隙構造が変化して耐凍害性を低下させることを、濱ら¹⁰⁾は乾湿繰返し後のコンクリートでは骨材界面と気泡をつなぐひび割れが発生し、吸水率が上昇することで耐凍害性が低下することを指摘している。また、POC は乾湿繰返しによって物性が低下することも報告されている¹¹⁾。

本研究では、これらの劣化機構についての詳細な検討は行っていないが、寒冷地で供用された POC では耐凍害性が低下していることが確認された。著者ら¹²⁾は、POC には相対動弾性係数や強度の低下と関連するスケーリング量の基準値があることを報告しており、寒冷地で供用された POC のスケーリング抵抗性の低下は POC の凍害劣化に関して重大な問題となりうる。このため、POC の耐凍害性を評価するためには、実環境における乾燥や乾湿繰返しなどの影響を考慮した耐凍害性の検討も必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では寒冷地で数年間供用された POC における基本的性質および耐凍害性の変化について検討した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 厳しい凍害が予想される寒冷地において数年間供用された POC の凍害劣化形態は、主にスケーリングによる損傷であることが確認された。
- (2) 寒冷地において数年間供用された POC では、超音波伝播速度や強度に顕著な低下は認められず、すべり抵抗性や浸透水量も確保できることが確認された。
- (3) 寒冷地で供用された POC は、再現 POC に比べて凍結融解作用による吸水量が増加し、供用年数が長いほどスケーリング抵抗性が低下していることが明らかになった。
- (4) POC の耐凍害性を評価するためには、供用期間中の耐凍害性の低下を考慮した耐凍害性評価手法の検討も必要である。

謝辞：株式会社旭ダンケの石井剛氏には現場調査および再現 POC の作製、多くのご助言、ご協力を頂きました。北海道ポラコン株式会社の山田茂氏、共和コンクリート

株式会社の水戸唯則氏には再現 POC の作製にご協力頂きました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉森和人ほか：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，Vol. 49，pp. 650-655，1995
- 2) 中村拓郎，堀口敬，志村和紀：ポーラスコンクリート河川護岸の耐凍害性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 2，pp.313-318，2007
- 3) 唐沢明彦，土田保：実環境下におけるポーラスコンクリート河川護岸の凍結融解耐久性の評価，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集，V-592，pp. 1181-1182，2003
- 4) 社団法人セメント協会 舗装技術専門委員会：供用 5 年を経過した車道用ポーラスコンクリート舗装，セメント・コンクリート，No. 736，pp. 7-13，2008.6
- 5) 米田恭子，千歩修，長谷川拓哉：既往の凍結融解試験データに基づくコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾湿繰返し・暴露の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，pp. 951-956，2008
- 6) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技法堂出版，pp. 79-80，1988
- 7) M. J. Setzer, et al.: Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test – Reference method and alternative methods A and B, Material and Structures, Vol.37, pp. 743-753, 2004
- 8) M. J. Setzer: Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, pp. 193-201, 2001
- 9) 青野義道ほか：乾燥による硬化セメントペーストのナノ構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.2，pp.21-34，2008
- 10) 浜幸雄ほか：コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾湿ひび割れの影響－CIF 試験による評価－，日本建築学会北海道支部研究報告集，No. 76，pp. 5-8，2003
- 11) 片平博，河野広隆：ポーラスコンクリートの乾湿繰返しに対する耐久性の検討，第 55 回セメント技術大会講演要旨，pp. 308-309，2001
- 12) 中村拓郎ほか：ポーラスコンクリートの凍害劣化に及ぼすスケーリング抵抗性の影響，コンクリート工学論文集，Vol. 21，No. 1，pp. 63-72，2010