論文 ポーラスコンクリートの凍結融解における吸水特性とスケーリング 劣化に関する検討

中村 拓郎^{*1}·堀口 敬^{*2}·志村 和紀^{*3}·石井 剛^{*4}

要旨:凍結融解作用におけるポーラスコンクリートの吸水特性とスケーリング劣化について RILEM CIF/CDF 試験による検討を行った。ポーラスコンクリートは RILEM CIF/CDF 試験の特徴である供試体下面からの一面 吸水によって,供試体高さや全空隙率の増加に伴って吸水量が多くなることが確認された。相対動弾性係数 に顕著な低下が確認されなかった供試体でも,粗骨材が剥落する様な激しいスケーリングが発生した場合は 強度低下が認められる場合があり,スケーリング抵抗性の検討も重要であると考えられる。また,ポーラス コンクリートにおいても AE 剤による空気連行はスケーリング抵抗性を高めることが明らかとなった。 キーワード:ポーラスコンクリート,凍結融解, RILEM CIF/CDF 試験,吸水量,スケーリング

1. はじめに

ポーラスコンクリートは全体積の20%から30%を占め る連続した粗大空隙を持つ特殊なコンクリートである。 土木工学の分野では、透排水機能、吸音機能、騒音低減 効果から舗装材料¹⁾として、植生を含む自然・生態系の 保全、景観性の向上効果から河川護岸材料²⁾として利用 されている。建築工学の分野では、屋上緑化をはじめと する都市部におけるヒートアイランド現象の緩和を目 的とした研究³⁾も行われている。多様化する社会資本の 整備に対し、このように多機能な材料であるポーラスコ ンクリートに対する期待は大きい。

ポーラスコンクリートはその性能から水際での利用 価値が高く、寒冷地での凍害が危惧されながらも、耐凍 害性を評価する試験方法,評価基準は明確に定められて いない。粗大空隙内に飽水された水が氷結する様な環境 では、ポーラスコンクリートの耐凍害性の評価は低いも のの, それ以外の環境であれば, 比較的高い耐凍害性を 保有しうる⁴⁾と報告されている。これまでのポーラスコ ンクリートの耐凍害性の評価は主として相対動性係数 の変化によるものであり、スケーリング劣化の面から検 討した研究は少ない。一般的なコンクリートではモルタ ル部が全体積の 50%程度であることに対し、全空隙率 20%程度のポーラスコンクリートではモルタル部が 25% 程度と非常に少ない。この少ないモルタル部にポーラス コンクリートの強度や耐久性は大きく依存している。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 劣化形態であるとされ、スケーリング量と残存強度の関 係は必ずしも明確ではない。ポーラスコンクリートの場 合,前述した理由からスケーリングによるモルタル部の 減少はその強度や耐久性に大きく影響する可能性が高 い。本研究では、ポーラスコンクリートの凍結融解にお ける吸水特性とスケーリングによる強度低下への影響 を検討するため、相対動弾性係数の変化、スケーリング 量,吸水量の測定の測定を含む凍結融解試験である RILEM 提案の CIF/CDF 試験 ^{5.6)}を行った。また、AE 剤 の添加がポーラスコンクリートの耐凍害性におけるス ケーリング抵抗性に与える影響も併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

(1) 材料と配合

本研究で作製したポーラスコンクリートの配合を表 -1,表-2に示す。粗骨材最大粒径等を調整した PSC, PS6, PS7, AE 剤によってセメントペーストの連行空気 量を 0%(Non-AE)から 6%まで調整した PA0, PA4, PA6, 計 6 種類のポーラスコンクリートを作製した。目標全空 隙率を 20%と一定とし,W/C は PS シリーズでは 24%, PA シリーズでは 30%とした。使用材料として,セメン ト(C)は普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)とし, 細骨材(S),粗骨材(G6 および G7),および混和剤につい ては表-3に示す。

(2) 供試体寸法と作製方法

本研究では作製した供試体寸法は以下の3種類とした。 150×150×75mmのTYPE-A, 100×120×590mmの敷設 ブロックから切り出した 120~150×100×120mmの TYPE-B, インターロッキングブロック型で 100×200× 60mmのTYPE-C とした。ただし, PSC は 490×490×

*1 北海道大学大学院 工学研究科環境工学専攻 博士課程 (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 工博 (正会員) *4 (株) 旭ダンケ (正会員)

	目標	W/C	Unit content (kg/m ³)					斗	作	
	主主原平 (%)	(%)	W	С	S	G6	G7	SP	法	製
PSC					115	1167	388		Α	
PS6	20	24	80	340	106	1503	-	3.4	В	(f)
PS7					172	-	1431		С	

表-1 骨材を調整したポーラスコンクリートの配合

表-2 空気量を調整したポーラスコンクリートの配合

	目標	目標	W/C	Unit content (kg/m ³)			(cc/m^3)	寸	作	
	至×1里 (%)	主至原率 (%)	(%)	W	С	S	G6	AE	法	製
PA0	0							0		
PA4	4	20	30	120	370	-	1543	137	Α	(s)
PA6	6							192		(p)

*[供試体寸法] A : 150×150×75mm B : 120~150×100×120mm C : 100×200×60mm

**[作製方法] (f): コンクリート工場で作製 (s): 分割練混ぜ (p): 単純練混ぜ

60mmの平板から切り出したために高さは 60mm である。

PS シリーズは、凍結融解における吸水特性とスケーリ ングによる強度への影響の検討を行うものでコンクリ ート製品工場にて作製した(f)。また、PA シリーズは、空 気連行によるスケーリング抵抗性への影響を検討する もので、ペースト部の性状を変化させるために2種類の 練混ぜ方法を採用した。高速モルタルミキサーによって 90 秒間ペーストを先練し、続いて強制二軸ミキサーによ って粗骨材とともに180 秒の練混ぜを行った分割練混ぜ (s)、強制二軸ミキサーのみを使用し、骨材、セメントを 90 秒練混ぜた後、水と混和剤を投入し180 秒の練混ぜを 行った単純練混ぜ(p)とし、両方とも締固めは加圧式振動 締固め機を用いた。

2.2 物性試験

ポーラスコンクリートの全空隙率,フレッシュ時の連 行空気量および圧縮強度は JCI による「ポーラスコンク リートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告 書」に記載された試験(案)⁷⁾準じて測定した。なお,PS6 および PS7 の TYPE-B の圧縮強度試験はコア採取した *φ* 100×100mm の供試体にて行い,TYPE-C の曲げ強度は インターロッキングブロックの試験方法である JIS A 5371 に準拠して行った。

2.3 凍結融解試験

凍結融解試験は RILEM 提案の CIF/CDF 試験に準じて 行った。全空隙率測定後,20℃の恒温室において21日 以上の気中養生の後,7日間の前吸水工程を経て,凍結 融解工程を行った。凍結融解1サイクルは+20±0.5℃か ら-10℃/hrの勾配で-20±0.5℃まで降下させ,-20±0.5℃ で3時間保持し,その後,+10℃/hrの勾配で+20±0.5℃ まで融解させ,+20±0.5℃で1時間保持させるものとし た。本研究では56サイクルをもって凍結融解試験の終 了とした。前吸水工程および凍結融解工程では図-1に 表-3 使用材料

記号	種類	材料名	記号	備考
PSC PS6 PS7	細骨材	川砂	S	密度 2.63 g/cm ³ 吸水率 2.00
	如温井	砕石 (13-5mm)	G6	密度 2.65g/cm ³ 吸水率 1.64
	租币的	砕石 (5-2.5mm)	G7	密度 2.63g/cm ³ 吸水率 1.94
	混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エー テル系
PA0 PA4 PA6	粗骨材	砕石 (13-5mm)	G6	密度 2.68 g/cm ³ 吸水率 2.34
	混和剤 AE 剤		AE	特殊アニオン界面活 性剤



示すように,試験面である供試体下面からの一面吸水と なるように供試体を設置し,側面からの吸水を防ぐため に供試体側面をブチルゴムとアルミテープにより防水 加工を施した。10mmのスペーサーを使用し,試験液に 供試体が5mm浸漬するように設置した。試験液にはCIF 試験では蒸留水を使用し,CDF試験では3%の塩化ナト リウム水溶液を使用した。供試体数は原則5体とし,相 対動弾性係数,スケーリング量,吸水量を測定した。相 対動弾性係数は式(1)によって超音波伝搬時間から算出 した⁵⁾。

$R_n = (t_{cs}/t_n)^2$ (1) ここで、 R_n は相対動弾性係数、 t_{cs} は凍結融解開始前の超 音波伝搬時間、 t_n は n サイクルに測定された超音波伝搬 時間である。また、測定の際にスケーリング片を採取し、 106℃で乾燥させた後、重量を 1mg 単位で測定し、単位 面積当たりに換算したものをスケーリング量とした。ポ ーラスコンクリートの試験面は不均一であり、試験液と 接する表面積は大きくなるが、供試体毎にこの表面積を 正確に把握することは困難であり、本研究では、試験面 寸法によって単位面積とした。また、吸水量は以下の式 (2)によって求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 物性試験結果

本研究で作製したポーラスコンクリートの全空隙率, セメントペースト中の空気量および圧縮強度、曲げ強度 を表-4 に示す。PS6 と PS7 において同一配合であるに もかかわらず TYPE-B と TYPE-C では全空隙率が異なり, TYPE-C の供試体の方が大きい全空隙率を示している。 これは TYPE-B は切り出した供試体であり, TYPE-C は インターロッキングブロック型枠で、型枠との接触面積 が大きかったためと考えられる。ポーラスコンクリート において,練混ぜ方法がポーラスコンクリートのフレッ シュ性状に大きく影響するという報告⁸⁾があることから、 PA のシリーズでは同配合にて 2 種類の練混ぜ方法を採 用している。表-4 によれば、どちらの練混ぜ方法にお いても AE 剤添加量の増加とともにフレッシュ時の空気 量が増加していることが確認できる。また、分割練混ぜ の供試体(s)よりも単純練混ぜの供試体(p)の方が AE 剤に よる空気量が多くなり, それにともない全空隙率も大き くなっていることを確認した。本研究の範囲内では単純

表-4 空隙および強度試験結果

/	全空隙率(%)	圧縮強度	曲げ強度	
供訊件*	[空気量(%)]**	(N/mm^2)	(N/mm^2)	
PSC	16.9	-	5.50	
PS6(B)	18.9	31.7	4.55	
PS6(C)	22.4	-	5.72	
PS7(B)	22.1	27.6	4.59	
PS7(C)	26.3	-	4.91	
PA0(s)	25.6 [3.0]	16.7	-	
PA0(p)	24.1 [2.8]	21.9	-	
PA4(s)	20.2 [4.5]	17.4	-	
PA4(p)	25.4 [4.7]	18.4	-	
PA6(s)	23.2 [5.0]	16.9	-	
PA6(p)	25.1 [5.8]	21.1	-	
* # = + + + +	のカー ー 由は ま 1	0 の一社社 しん	を割ませる記日	

* 供試体名のカッコ内は**表-1,2**の寸法と作製方法の記号 ** フレッシュ状態でのペースト中の空気量

練混ぜ方法の供試体(p)の方が圧縮強度も高くなっていることがわかる。

3.2 凍結融解試験結果

(1) 試験液および供試体の温度変化

本研究では、RILEM CIF 試験における試験液,供試体 内部の温度の変化を測定した。熱電対は図-2 に示す様 に、温度測定用供試体(φ100×100mm)の試験面(供試体 下端)から25,50,75mmの高さにおける供試体中央部の モルタルペースト中に埋設した。ポーラスコンクリート (PS6 と同配合)の測定結果,比較用として一般的なコン クリート(W/C55%のAEコンクリート)の測定結果を図-3 に示す。これによると降温工程における試験液の温度 が-4℃の付近で一時上昇していることから、試験液の凍 結点が-4℃付近にあるものと推察される。また、ポーラ スコンクリートとAEコンクリートでは最高温度、最低 温度に違いは認められないが、ポーラスコンクリートの 温度勾配がやや急であり、これはペーストの厚さが薄い ことによるものであると考えられる。最低温度は-18℃付 近であり、JIS A 1148 にある凍結融解試験の最低温度と



類似していた。ポーラスコンクリートの RILEM 試験で は,試験液の浸漬部では JIS A 1148の水中凍結融解試験 である A 法,供試体上部では気中凍結水中融解試験であ る B 法に類似する様な温度範囲での凍結融解作用を受け るものと考えられる。

(2) 凍結融解における吸水量

RILEM CIF/CDF 試験の測定項目の特徴として吸水量 の把握がある。PS6, PS7の凍結融解0サイクル時点の吸 水量を基準とし, 前吸水工程と凍結融解工程を含めた吸 水量の変化と試験日数の関係について供試体高さ 60mm を図-4 に、120mm を図-5 に示す。なお、本研究の範 囲内では CIF 試験と CDF 試験の吸水量の変化において 顕著な差が確認されなかったため、本節では CDF 試験に おける結果を示している。これによると全体的な傾向と して, 前吸水1日で定常状態となり, 凍結融解開始とと もに再び吸水量が増加していることがわかる。前川らに よると、ポーラスコンクリートの揚水率は浸漬24時間(1 日)で9割以上,浸漬144時間(7日)で後にほぼ一定とな り、粗骨材径の小さい供試体ほど揚水量が大きいとされ ており⁹⁾,本研究における前吸水行程でも同様の傾向が 確認された。また、凍結融解工程では M.J Setzer が提案 している凍結融解によってコンクリートがポンプの様 に水を吸収する Micro Ice Lens Pump 効果¹⁰⁾と考えられる 吸水量(以下:凍結吸水量)の増加が確認された。凍結吸 水量は PS6 の方が大きくなり、コンクリートカッターに よる切断面からも確認された様に, 粗骨材周辺のペース ト膜厚の増加に伴い、凍結吸水可能な毛細管空隙量が増 加したためと考えられる。凍結融解 56 サイクルまでの 総吸水量と全空隙率の平均値の関係を図-6 に示す。こ れによると、供試体高さが 60mm の PSC, PS6(C), PS7(C) では全空隙率が大きいものほど吸水量が大きくなり、供 試体高さが 60mm から 120mm になることで吸水量が 1.5 倍程度増加していることがわかる。吸水量と全空隙率の 関係は使用している粗骨材寸法が異なるため、その関係 性は明確ではないものの、供試体高さの増加による吸水 量の増加は凍結吸水によるペースト中の毛細管空隙へ のさらなる吸水であると考えられる。また、凍結融解工 程中に供試体上端が湿潤状態であることが目視下で確 認されたことからも供試体上部においても湿潤状態で 凍結融解作用を受けていることが確認された。

(3) 超音波による相対動性係数

凍結融解 56 サイクルまでの超音波伝搬時間から求め た相対動弾性係数の最低値を図-7 に示す。超音波伝搬 時間は試験面に対して平行に供試体中央部を測定して おり,相対動弾性係数はいずれも 5%程度の低下であっ た。CIF 試験と CDF 試験での試験液の違いによる明確な 差も認められなかった。ポーラスコンクリートの相対動



PS6(B) PS7(B) PS6(C)PS7(C)

図-7 相対動弾性係数の最低値



60

PSC

弾性係数の低下と内部劣化の関係は明らかにされては いないものの,このことから供試体内部における劣化は 軽微であったと考えられる。

(4) スケーリング量

凍結融解 56 サイクルまでの総スケーリング量の平均 値を図-8 に示す。すべての供試体において試験液を塩 化ナトリウム水溶液とすることでスケーリング量が増 加していることがわかる。著者らは、一般的なコンクリ ートが塩分環境下で凍結融解作用を受けた場合、スケー リング劣化が激しくなり、AE コンクリートの CDF 試験 では CIF 試験に比ベスケーリング量が 3.5 倍(W/C45%) から 20 倍(W/C65%)ほども大きくなることを報告してい る¹¹⁾。ポーラスコンクリートは一般的なコンクリートに 比べ表面積が大きく,スケーリング量はさらに増加する ことが予測されたが、本研究での試験液の違いによるス ケーリング量の増加量は 1.5 倍(PS6(B))から 6 倍(PSC)程 度であった。ポーラスコンクリートは低水セメント比の コンクリートであり塩分環境下でのスケーリング劣化 には高い耐凍害性あるものと考えられる。また, TYPE-B は TYPE-C に比ベスケーリング量が大きいが、 TYPE-B の供試体は強度が小さいこと(表-4)や前述したように 吸水量が多かったこと、試験面におけるタレが TYPE-C に比べ大きかったことが影響したものと考えられる。次 に CDF 試験における供試体高さ 60mm の供試体毎のス ケーリング量と全空隙率の関係を図-9 に示す。全体的 な傾向として PSC, PS6(C), PS7(C)で全空隙率の増加と ともにスケーリング量が減少していることが確認でき るが、粗骨材の違いによって連続空隙寸法などの空隙構 造が異なるため, 全空隙率とスケーリング量の関係性は 同一粒径の粗骨材を使用したポーラスコンクリートに おいて今後さらなる検討が必要であると考える。

本研究では凍結融解 56 サイクル終了後に TYPE-B の 供試体で圧縮強度試験を, TYPE-C の供試体で曲げ強度 試験を行った。材齢 28 日に測定した曲げ強度, 圧縮強 度を基準とした曲げ強度比, 圧縮強度比とスケーリング 量の関係を図-10に示す。これによると、スケーリング 量が大きいものほど強度比が低下する傾向が確認でき る。本研究の範囲内では、スケーリング量 600g/m²以上 の供試体において粗骨材の剥落が確認された。スケーリ ング量 600g/m²とはポーラスコンクリートの CIF/CDF 試 験における試験液浸漬部のモルタル量のおよそ20%に相 当する量である。粗骨材の剥離が発生したスケーリング 量 600g/m² 以上の供試体では圧縮強度,曲げ強度ともに 強度比が 70-80%まで低下した。ただし、スケーリング量 300g/m² 程度で強度比が低いものも認められるが、これ らは基準とした供試体に比べ全空隙率が大きかったこ とも影響していると考えられる。前述したように一般的



図-8 試験終了時までのスケーリング量(平均値)





図-9 スケーリング量と全空隙率の関係









なコンクリートにおけるモルタル部は全体積の約50%で あることに対し、ポーラスコンクリートの場合は20%と 少量である。ポーラスコンクリートの場合、スケーリン グによるモルタル部の減少がその強度や耐久性に大き く影響することから、ポーラスコンクリートの耐凍害性 を検討する上で、スケーリング抵抗性の検討も必要であ ると考えられる。

(5) 空気量の影響

CIF 試験によって測定されたスケーリング量と連行空 気量の関係を図-11 に示す。一般的なコンクリートでは AE 剤による空気連行でスケーリング抵抗性も高まり, ポーラスコンクリートの場合も同様に空気量の増加に 伴い,スケーリング量が減少することがわかる。本研究 での単純練混ぜによって作製した供試体の空気量が多 く,スケーリング量が小さいことが確認された。ポーラ スコンクリートにおける AE 剤による空気連行は,耐凍 害性を改善するという報告¹²⁾と,耐凍害性を低下させる ¹³⁾という異なった報告がされているが,これらはいずれ も相対動弾性係数における評価である。本研究ではスケ ーリング抵抗性に着目し,ポーラスコンクリートにおけ る空気連行がスケーリング抵抗性を高める効果がある ことを確認した。

4. 結論

本研究では RILEM CIF/CDF 試験によるポーラスコン クリートの吸水特性とスケーリング劣化について検討 した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) RILEM CIF/CDF 試験での供試体の最低温度は-18℃ (供試体下部)から-15℃(供試体上部)であり,試験液に 浸漬している箇所以外にも凍結融解作用を受けてい ることが明らかとなった。
- (2) 全空隙率や供試体高さが増加することによって吸水量が増加し、前吸水行程では7号砕石、凍結融解行程では6号砕石の供試体の吸水量が大きいことが確認された。
- (3) 凍結融解 56 サイクルでは相対動弾性係数の低下は CIF 法と CDF 法ともに 5%程度の低下が確認され, 試 験液の違いによる影響は認められなかった。
- (4) CIF 試験に比べ CDF 試験でのスケーリング量は 1.5 倍から 6 倍程度の増加であり、ポーラスコンクリートは塩分環境下でのスケーリング抵抗性に優れていると考えられる。
- (5) スケーリング量が多い供試体ほど凍結融解試験後の 強度低下が大きくなり、ポーラスコンクリートの耐 凍害性を検討する上でスケーリング抵抗性の検討も 重要である。
- (6) ポーラスコンクリートにおいても、一般的なコンク

リートと同様に AE 剤による空気連行はスケーリン グ量を減少させる効果が確認された。

参考文献

- 社団法人セメント協会 普及部門 編:ポーラスコン クリート舗装データ集, pp. 1-11, 2005
- 水辺のコンクリート性能調査研究小委員会 編:水辺のコンクリート性能調査研究報告書,第6章 施工事例, pp. 1-31, 2006
- 3) 唐沢明彦, 土田保:建築物の熱環境に及ぼす軽量ポ ーラスコンクリート屋上緑化システムの効果,日本 緑化工学会誌, Vol.27, No.1, pp.205-208, 2001
- 4) 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
- M. J. Setzer : CIF Test Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test Refarence method and alternative method A and B, Materials and Structures, Vol. 34, pp. 515-525, 2001
- 6) M. J. Setzer, G. Fagerlund and D. J. Janssen : CDF Test
 Test method for the freeze-thaw resistance of concrete
 tests with sodium chloride solution (CDF), Materials and Structures, Vol. 29, pp. 523-528, 1996
- 7) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関す る研究委員会 編:ポーラスコンクリートの設計・ 施工法の確立に関する研究委員会報告書 ポーラス コンクリートの評価と試験方法, pp. 176-193, 2003
- 8) 湯浅幸久ほか:ポーラスコンクリートの製造方法に 関する基礎的研究,コンクリート工学, Vol.21, No.1, pp. 235-240, 1999
- 9) 前川明弘ほか:小粒径ポーラスコンクリートの基礎 的特性に関する実験的研究,セメントコンクリート 論文集, No.60, pp. 264-270, 2006
- 10) Max J. Setzer : MODELING AND TESTING THE FREEZE-THAW ATTACK BY MICRO-ICE-LENS MODEL AND CDF/CIF-TEST, Proceedings pro048 Advances in Concrete Through Science and Engineering, 2004
- 中村拓郎ほか: CIF 試験及び CDF 試験によるコンク リートの凍結融解抵抗性の評価,コンクリートの凍 結融解抵抗性の評価方法委員会報告会報告書・論文 集, pp. 305-310, 2008
- 12) V.M.Malhotora : No-Fines Concrete-Its Properties and Applications, ACI JOURNAL, pp. 628-644, Nov. 1976
- 小尾稔,田口史雄:耐凍害性を有するポーラスコン クリートの配合の検討,北海道開発土木研究所月報, No.612, 2004.5