

論文 ポーラスコンクリートの塩分供給下での耐凍害性

中村 拓郎*1・堀口 敬*2・服部 健作*3・石井 剛*4

要旨: 塩分供給下における複合劣化を考慮した条件のもとでポーラスコンクリートの耐凍害性を検討するため、RILEM CIF/CDF 試験において試験液を純水/塩化ナトリウム水溶液とした凍結融解試験を行い、一般的なコンクリートとの比較を行った。また、凍結融解作用の有無による強度への影響を検討するため、凍結融解試験終了後の供試体にて実強度試験を行った。その結果、ポーラスコンクリートは一般的なコンクリートに比べ塩分供給下での表面劣化に対する耐凍害性が高いことを確認した。一方で、内部劣化が軽微と評価されたにも関わらず、一部の供試体で強度低下が認められた。

キーワード: ポーラスコンクリート, 凍害, RILEM CIF/CDF 試験, 強度試験

1. はじめに

高度化・多様化する社会資本の整備に対し、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。舗装材料としての排水・透水機能, 吸音機能, 騒音の低減効果, 河川護岸材料としての自然・生態系の保全, 景観性の向上効果が期待され, その施工実績も年々増加しつつある。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, 寒冷地で使用する場合は凍害の影響を受けるものと考えられる。ポーラスコンクリートの耐凍害性は, その特徴である空隙構造の影響から凍結融解試験方法によっては, 耐凍害性に対する評価も異なり, JIS A 1148 A 法のような連続空隙内の水が氷結する様なポーラスコンクリートにとって厳しい環境下では耐凍害性の評価は低いものの, その他の場合では比較的高い耐凍害性を保有しようと報告されている¹⁾²⁾。本研究では, 多様化するポーラスコンクリートの利用拡大に際し, より詳細な耐凍害性の検討として, 純水を使用した RILEM 提案の CIF 試験に加え, 塩分供給環境を想定した耐凍害性の検討を行うために試験液に塩化ナトリウム水溶液を用いた RILEM 提案の CDF 試験を行った。塩分供給下で凍結融解作用を受ける際にスケール量が増加するなどコンクリートの劣化が顕著になることは既往の研究によって確認されており³⁾, 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塩分供給下での凍害への影響がどの程度であるのか確認する必要がある。

また, 一般的なコンクリートに関する耐凍害性の評価方法のひとつとして一次共鳴振動数の測定や超音波伝搬速度の測定がある。これらの非破壊試験によるポーラスコンクリートへの適用性は明確にされていないところが多く, 現在は, 一般的なコンクリートの基準を利用して耐久性の評価が行われることが多い。本研究では, 凍結

融解作用の有無が実際の強度にどの程度影響するのかを検討するため, 凍結融解試験後の供試体, 凍結融解試験と同様の吸水条件にて吸水のみを行った吸水試験後の供試体において直接強度試験を行い, 超音波伝播速度の測定による非破壊試験との適応性も併せて検討する。

2. 実験概要

2.1 材料及び配合, 供試体寸法

本研究で作製したポーラスコンクリートの配合を表-1に示す。W/Cを23.5%, 設計空隙率を20%とし, 粗骨材寸法の異なる2種類のポーラスコンクリートを作製した。材料は, 普通ポルトランドセメント(密度3.16 g/cm³), 細骨材は川砂(密度2.59 g/cm³), 粗骨材に6号砕石(密度2.63 g/cm³)及び7号砕石(密度2.62 g/cm³), 混和剤に高性能 AE 減水剤を使用した。凍結融解試験用の供試体として120~150×100×110 mm とインターロッキングブロックタイプの100×200×60 mm を作製した。

また, 比較用として表-2に示すような一般的な普通コンクリートも同時に作製した。材料は, 普通ポルトランドセメント(密度3.16 g/cm³), 細骨材は丘砂(密度2.66 g/cm³), 粗骨材に砕石(密度2.70 g/cm³), 混和剤に AE 減水剤を使用し, 供試体寸法は RILEM 基準に準じた150×150×75 mm とした。

2.2 試験項目

(1) 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⁴⁾。恒温室において気中養生を行った後, 7 日間の前吸水行程を経て凍結融解試験を行った。凍結融解1サイクルは+20±0.5°Cから-10°C/時の勾配で-20±0.5°Cまで降下させ, -20±0.5°Cで3時間保持し, その後+10°C/時の勾配で+20±0.5°Cまで融解させ, +20±0.5°Cで1時間保

*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 (財) 北海道コンクリート技術センター (正会員)

*4 (株) 旭ダンケ (正会員)

表-1 ポーラスコンクリートの配合

	設計空隙率 (%)	実測空隙率 (%)	W/C (%)	(kg/m ³)					
				W	C	S	G6	G7	混和剤
PG6	20	18.2	23.5	80	340	106	1,503	-	3.4
PG7	20	19.7	23.5	80	340	172	-	1,431	3.4

表-2 比較用の普通コンクリートの配合

	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	(kg/m ³)				
				W	C	S	G	混和剤
N45	5.5	45	40.9	150	334	758	1,115	0.835
N55	4.3	55	43.7	146	266	835	1,102	0.665
N65	4.5	65	45.3	148	228	879	1,085	0.570

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。

前吸水及び試験中の吸水は図-1に示すように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、供試体側面はブチルゴムとアルミテープにより防水加工を行った。試験液としてCIF試験は純水（蒸留水）を使用し、CDF試験は3%濃度の塩化ナトリウム水溶液を使用した。

凍結融解試験の劣化評価方法は、表面劣化をスケールリング量によって評価し、内部劣化をRILEM CIF/CDF試験基準である表-3に従って相対超音波伝播速度比の変化によって評価した。ただし、本研究ではポーラスコンクリートも普通コンクリートの基準である表-3に従って評価するものとした。

(2) 吸水試験

吸水試験は凍結融解試験と同様に供試体下面からの一面吸水で行い、凍結融解試験と同期間において質量の測定を行った。試験液はCIF試験と同様に純水を使用した。使用する供試体は普通コンクリートの場合は、凍結融解試験用のものと同様の供試体を使用し、ポーラスコンクリートはインターロッキングブロックタイプを使用した。

(3) 強度試験

本研究では、凍結融解作用の有無が実際の強度にどの程度影響するのかを検討するため、凍結融解試験後、吸水試験後において強度試験を行った。供試体の種類によって寸法形状が異なる点を考慮し、供試体の形状に合わせた強度試験を行った。普通コンクリートの強度試験としてJIS A 1113の「コンクリートの引張試験方法」に準じて、細長片を用いた割裂引張試験を行った。割裂引張強度の算出方法及び試験のモデル図を図-2に示す⁵⁾。120~150×100×110 mmのポーラスコンクリートはJIS A 1114にある「コンクリートからの角柱供試体の採取方法及び強度試験方法」にて行った。インターロッキングブロックタイプの供試体はJIS A 5371にある「インターロッキングブロックの曲げ強度試験」にて行った。

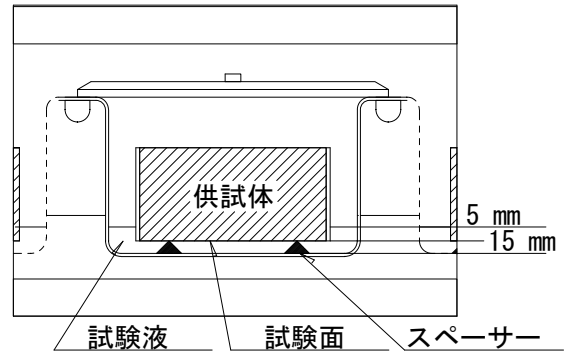
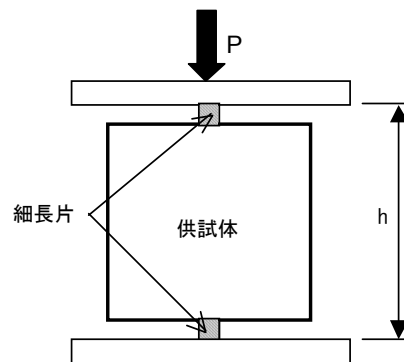


図-1 RILEM試験装置

表-3 内部劣化評価の基準

損傷程度	軽微	中程度	激しい
初期値に対する超音波伝播速度比	95%以上	95%~80%	80%~60%



$$\sigma_t = [2P / \pi hl] [c / (1 + mk)]$$

σ_t : 引張強度(N/mm²)

P : 最大荷重(N)

h : 細長片間の供試体の長さ(mm)

l : 供試体の長さ(mm)

c : 供試体の断面形および細長片の幅に関する理論的応力係数

m : 実験的応力分布係数(=3.75)

k : 細長片の幅と供試体の高さとの比

図-2 細長片を使った割裂引張試験

3. 実験結果

3.1 凍結融解試験結果

(1) 表面剥離量

凍結融解試験終了となる 56 サイクルまでの総スケーリング量を図-3に、普通コンクリートの中で最も劣化が進行した N65 の CIF 試験, CDF 試験前後の試験面と PG6(6号砕石ポーラスコンクリート), PG7(7号砕石ポーラスコンクリート)における CDF 試験前後の試験面の写真を図-4に示す。

純水を使用した CIF 試験において、普通コンクリートで W/C が最も大きい N65 はスケーリング量が最も大きく 230 g/m² 程度であり、これを除く普通コンクリート、ポーラスコンクリートともにスケーリング量は 150 g/m² 程度で同程度あり少量である。ポーラスコンクリートにおいて粗骨材径の違いによる影響は確認されなかった。試験液に塩化ナトリウム水溶液を使用した CDF 試験において、N65, N55 では CIF 試験の場合と比較するとおおよそ 20 から 30 倍にも増加しており、普通コンクリートでは試験液に塩化ナトリウム水溶液を用いることでスケーリング量が大幅に増加することを確認した。凍結融解試験前後の表面をみると CIF 試験においては表面の空隙部を中心にスケーリングが発生しており、CDF 試験では試験面全面でペースト部が大量に剥離し、内部の粗骨材が剥き出しになるほどで、CIF 試験と比べて激しい表面劣化が確認できる。N45 では CDF 試験において CIF 試験よりもスケーリング量が 3~4 倍程度に増加してはいるものの、他に比べて増加率は少なく水セメント比が塩分供給下での凍結融解作用による表面劣化に対する耐久性に大きく影響していることがわかる。

一方、ポーラスコンクリートの場合では、PG6, PG7 のどちらの供試体においても CDF 試験で CIF 試験のスケーリング量より若干多くなるものの、普通コンクリートにみられる様な顕著な表面劣化の発生は確認されなかった。凍結融解試験前後の写真(図-4)からも、普通コンクリートのような激しいスケーリングは確認されず、ポーラスコンクリート独自の余剰ペースト部であるタレの部分の剥離によって表面が洗われたような状態になると同時に、粗骨材周辺のペースト部に若干の剥離を確認できる程度であった。PG7 においては供試体端部より粗骨材の剥離が確認されたものもあり、総スケーリング量が PG6 に比べ若干大きくなったが、いずれも少量であり、表面劣化は軽微であることを確認した。PG6 においては、粗骨材の剥離は確認されず、骨材周辺のペースト部の剥離のみであった。

このことから普通コンクリートでは塩分供給下では激しい凍結融解作用を受け、激しい表面劣化に繋がるものの、ポーラスコンクリートではペースト部の W/C が低

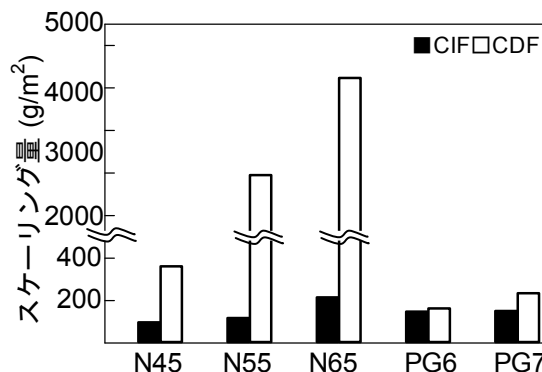


図-3 56 サイクル終了時のスケーリング総量

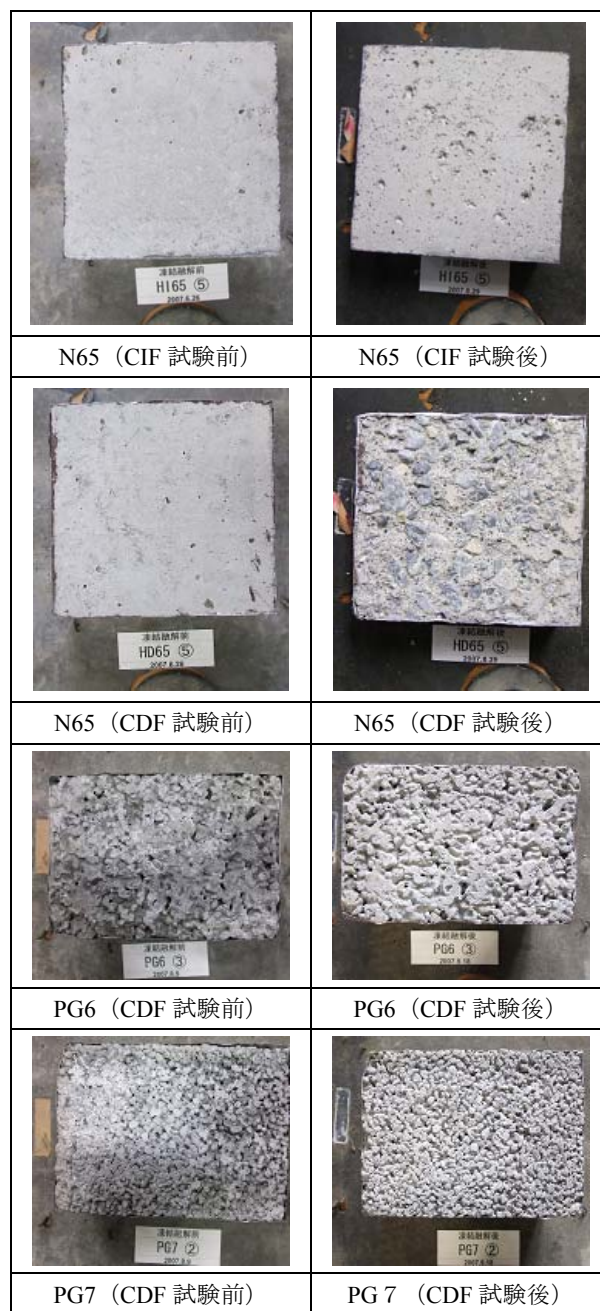


図-4 凍結融解試験前後の試験面

いことが要因となり、塩分供給下での凍結融解作用による表面劣化に対して比較的高い耐凍害性を有するものと考えられる。

(2) 超音波伝播速度の変化

凍結融解試験における相対超音波伝播速度比の推移として普通コンクリートの場合を図-5に、ポーラスコンクリートの場合を図-6に示す。

CIF 試験, CDF 試験の両試験方法において、すべての供試体で超音波伝播速度の顕著な低下は確認されなかった。普通コンクリート N45, N55, N65 において若干の低下がみられるものの、相対超音波伝播速度比が最も低下したのもでも 95%以上の値であり、RILEM CIF/CDF 試験の基準に照らし合わせてもすべての供試体で内部劣化は軽微であると評価された。ポーラスコンクリートにおいて CIF 試験, CDF 試験ともに相対超音波伝播速度比がおよそ 100%の値となっており、初期値からの顕著な変化は認められない。また、試験液に純水を使用した CIF 試験の場合と、塩化ナトリウム水溶液を使用した CDF 試験の場合による違いも確認されなかった。これらの試験結果から、塩分供給下で凍結融解作用を受けた場合、スケーリング量が大きく増加する激しい表面劣化が起こる一方で、供試体内部における劣化の進行は緩やかであるものと考えられる。

(3) 単位吸水量の変化

凍結融解試験開始前の7日間の前吸水行程を含めた凍結融解行程中の単位吸水量の推移として普通コンクリート N45, N65 の場合を図-7に、ポーラスコンクリート PG6, PG7 の場合を図-8に示す。

普通コンクリートの場合、前吸水における7日目まで単位吸水量が増加し、凍結融解開始とともに単位吸水量が大きく増加し、その後も増加していくことを確認した。これは、凍結融解の繰り返し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 Formation 効果⁶⁾であると考えられる。また、CDF 試験における N65 では 18 サイクル (16 日) 以降に単位吸水量が大きく低下していく様子がわかる。これはスケーリング量が大きく増加するのとほぼ同時期であり、試験面での激しい劣化が生じ、ペースト部が多量のスケーリングによって減少したことが原因となり単位吸水量が減少したと考えられる。表面劣化が軽微である N45, N65 の CIF 試験結果では単位吸水量の低下は確認されなかった。

一方、ポーラスコンクリートの場合、前吸水行程では、吸水1日目, 2日目で単位吸水量がほぼ一定となる。普通コンクリートと同様に凍結融解開始とともに単位吸水量が急激に増加するものの凍結融解6サイクルから12サイクルの間に単位吸水量の決定値となり、その後はほぼ一定であることを確認した。これは CIF 試験, CDF 試

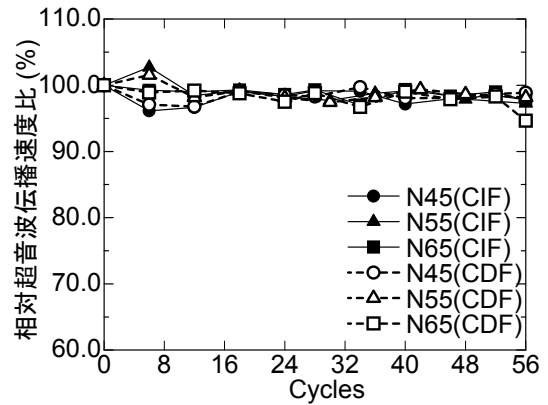


図-5 相対超音波伝播速度比の変化(普通コンクリート)

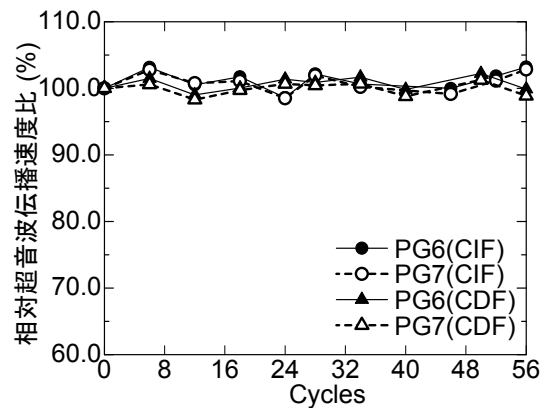


図-6 相対超音波伝播速度比の変化 (ポーラスコンクリート)

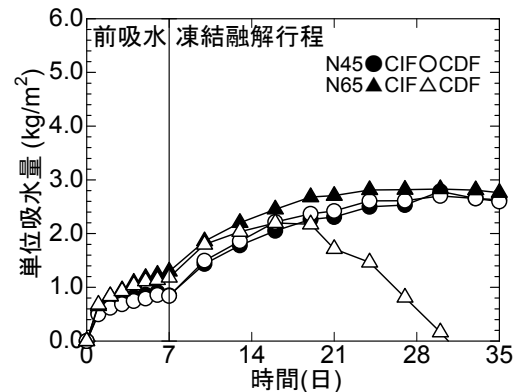


図-7 凍結融解中の単位吸水量の推移 (普通コンクリート)

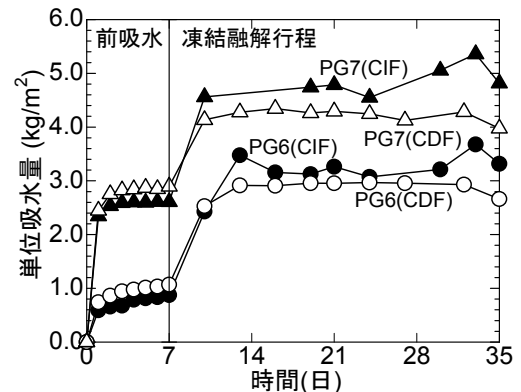


図-8 凍結融解中の単位吸水量の推移 (ポーラスコンクリート)

験ともに同様の挙動である。ポーラスコンクリートは普通コンクリートに比べ早期に吸水の決定量に達しており、水セメント比が 23.5%と低くセメントペースト部が緻密であること、吸水可能なペースト膜圧が普通コンクリートに比べ少ないことが影響しているものと考えられる。

3.2 吸水試験

普通コンクリート N45, N65, インターロッキングブロックタイプのポーラスコンクリート PG6, PG7 において凍結融解試験開始前の 7 日間の前吸水行程を含めた凍結融解試験と同期間の単位吸水量の推移を図-9 に示す。

普通コンクリート N45, N65 においては、前述したように凍結融解作用を受けた供試体では単位吸水量が急激に増加していくのに対し、吸水試験のみの供試体では、前吸水 7 日目以降の増加は緩やかである。ポーラスコンクリート PG6 および PG7 は初日の単位吸水量が急激に増加し、その後は緩やかに増加している。また、ポーラスコンクリートは普通コンクリートに比べ単位吸水量が大きくなる傾向を確認した。これは試験液に浸漬しているペースト部における吸水の他に連続空隙内に吸着した水分の影響でもありと考えられる。表-1 に示した実測空隙率をみると PG7 の方が空隙率が大きく、空隙率が大きい供試体ほど吸水初日の単位吸水量が大きく、空隙率の小さい供試体の方が初日から 7 日目までの吸水率の勾配が大きくなる傾向があることを確認した。

3.3 強度試験

(1) 普通コンクリートの割裂引張強度試験

普通コンクリート N45, N55, N65 の吸水試験後、CIF 試験、CDF 試験終了時の割裂引張強度を図-10 に示す。これによると、凍結融解作用を受けた供試体では最大で 5% 程度の強度低下があることが確認できる。前述の図-5 において相対超音波伝播速度比が 95% 程度まで低下している供試体もあることから、供試体内部で軽微な劣化があり強度低下に繋がったものと考えられる。この関係から普通コンクリートにおいて超音波速度の測定による非破壊試験による耐久性の評価は適応性があることが分かる。また、スケーリング量にみる表面劣化のように、塩化ナトリウム水溶液を試験液とした CDF 試験の場合に劣化が顕著になるという現象は確認されなかった。このことから、塩化ナトリウム水溶液によって凍結融解作用が厳しくなるのは試験液と接する面であり、内部劣化の進行への影響は少ないものと考えられる。

(2) ポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果および曲げ強度試験結果

ポーラスコンクリート PG6, PG7 の吸水試験後、CIF 試験後、CDF 試験後の圧縮強度を図-11 に、インターロッキングタイプの PG6, PG7 における吸水試験後、CDF 試験後の曲げ強度を図-12 に示す。

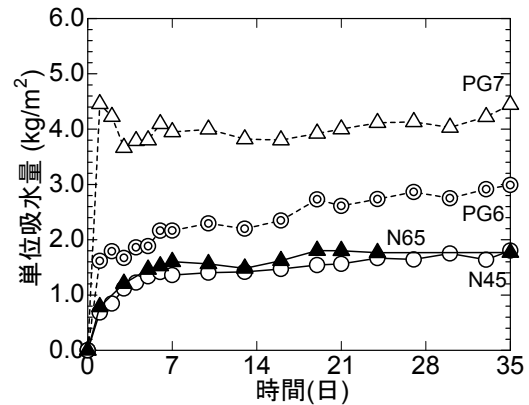


図-9 単位吸水量の推移 (普通コンクリート)

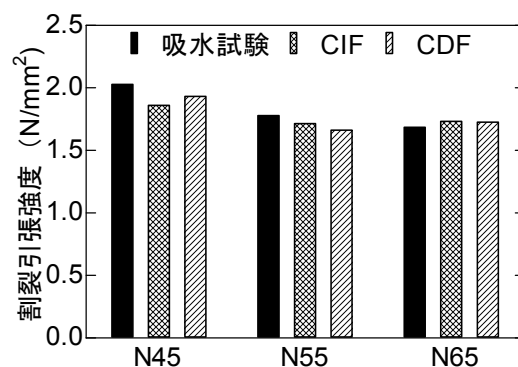


図-10 凍結融解試験後の割裂引張強度比

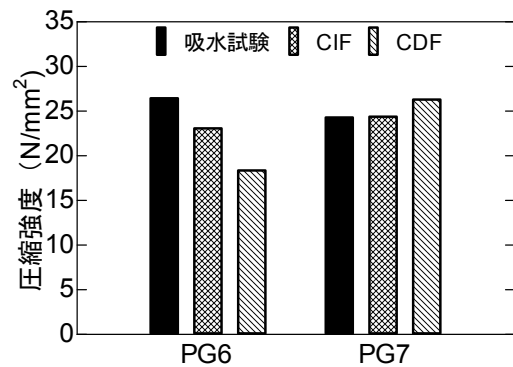


図-11 ポーラスコンクリートの圧縮強度

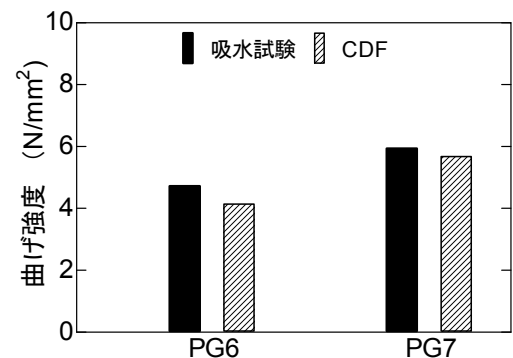


図-12 ポーラスコンクリートの曲げ強度

これによると7号砕石を使用したPG7では吸水試験終了時、CIF試験終了時、CDF試験終了時ではほぼ同程度の圧縮強度であることがわかる。一方、6号砕石を使用したPG6においては吸水試験終了時、CIF試験終了時、CDF試験終了時の順に低い圧縮強度を示している。曲げ強度においても圧縮強度試験の結果と同様にPG7では凍結融解の有無による強度への影響は確認されなかったものの、PG6においては若干の強度低下が確認された。ポーラスコンクリートの強度は空隙率に依存するところが大きく、供試体ごとの空隙率のばらつきもあるため一概に強度が低下したと言うことは難しい。本研究におけるPG6のみで強度低下が起きた要因としては、PG7に比べ、粗骨材の径が大きく、ペースト部の劣化による強度への影響が大きかったものと考えられる。

本研究における凍結融解試験において前述の図-6に示したようにポーラスコンクリートでは超音波伝播速度比の低下はなく、相対値でおおよそ100%であった。PG7においては超音波伝播速度比による評価と同様に、明確な強度低下は確認されなかった。PG6では超音波伝播速度の相対値の低下は確認されなかったものの、CIF試験、CDF試験終了時には圧縮強度が低下していることを確認した。ポーラスコンクリートは特殊な内部構造を有しており、表面の平坦性も低いことから適切な非破壊試験も確立しておらず、強度自体のばらつきも大きい材料である。今回の実験結果において凍結融解試験後の直接的な強度試験では強度低下が認められたものもあり、この傾向は非破壊試験では把握できなかったものである。ポーラスコンクリートの非破壊試験による内部劣化の合理的な推定方法は今後の大きな課題であると考えられる。

4. 結論

本研究において得られた成果をまとめると以下のようになる。

- (1) RILEM CIF/CDF 試験におけるスケーリング量の測定から普通コンクリートにおいて、塩分供給環境下では表面で激しい凍結融解作用を受け、激しい劣化が起きることを確認した。W/C が大きく影響し、W/C が 45%の供試体では表面劣化に対して比較的高い耐凍害性を保有させることが可能である。
- (2) ポーラスコンクリートの場合は、CIF 試験、CDF 試験ともに表面劣化は同程度で軽微であり、塩分供給環境下において普通コンクリートに比べスケーリングに対する高い耐凍害性を持つことを確認した。
- (3) 普通コンクリート、ポーラスコンクリートともに凍結融解試験における相対超音波伝播速度比の顕著

な低下はなく、RILEM CIF/CDF 基準に照らし合わせると内部劣化は軽微であると評価された。本研究の範囲内ではCIF試験、CDF試験における差異はなく、内部劣化に対しては塩分供給の影響が少ないことを確認した。

- (4) 普通コンクリートでは前吸水7日目まで単位吸水量が増加し、凍結融解開始とともに単位吸水量が大きく増加することを確認した。また、表面劣化が激しい供試体では、スケーリング量が大きくなると同時に単位吸水量が減少することを確認した。
- (5) ポーラスコンクリートは吸水1日目、2日目が単位吸水量の決定値となり、凍結融解開始とともに単位吸水量が増加するものの普通コンクリートに比べ早期に単位吸水量がほぼ一定となることを確認した。
- (6) 普通コンクリートでは相対超音波伝播速度比が凍結融解試験終了時に約5%ほど低下しており、試験終了時の割裂引張強度も凍結融解を受けていない供試体に比べ若干低下しており、非破壊試験による強度推定が可能であることを確認した。
- (7) ポーラスコンクリートの場合、相対超音波伝播速度に低下は確認されなかったが、凍結融解試験終了時に強度試験を行った結果、PG6にて圧縮強度、曲げ強度が吸水試験のみの供試体よりも低い値を示した。PG7では非破壊試験及び直接強度試験において強度低下は確認されなかった。

参考文献

- 1) 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, No612号, 2004.5
- 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, pp313-318, 2007
- 3) 中村拓郎, 堀口敬, 石井剛, 服部健作: 「ポーラスコンクリート舗装における塩分供給下での耐凍害性」, 平成19年度全国大会 第62回年次学術講演会講演概要集, pp773-774, 2007
- 4) RILEM Recommendation TC176-IDC: Material and Structures, Vol.34, pp515-525, 2001
- 5) 土木学会: 土木工学ハンドブック, pp642-647, 1964
- 6) Max J. Setzer: Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, 193-201, 2001