

論文 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

中村 拓郎^{*1}・堀口 敬^{*2}・志村 和紀^{*3}

要旨:近自然型工法による河川護岸の材料としてポーラスコンクリートが注目されているが、施工歴が浅く耐久性に関する研究及び長期的な調査報告例が少ない。本研究ではポーラスコンクリートの耐凍害性を把握する目的で寒冷地に施工されたポーラスコンクリート河川護岸ブロックに対し調査を行うとともに、同配合の供試体による各種凍結融解試験を行った。これらの結果より同護岸ブロックは顕著な劣化もなく耐凍害性を保持していることを確認した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 凍害, RILEM CIF, JIS A1148, 超音波伝播速度

1. はじめに

環境問題が深刻化する中で、ポーラスコンクリートを利用した河川護岸等の近自然型工法が期待されている。ポーラスコンクリートは自然・生態系の保全、景観性の向上を含めた多機能な材料として注目されており、その施工実績は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が、施工年数・実績の浅さからその劣化状態及び調査報告例は少ない。それゆえ室内試験に加え、構造物の劣化に関する追跡調査を併せた耐凍害性の研究が必要であると考え。

これまでのポーラスコンクリートに関する耐凍害性の評価は、一般的なコンクリートと同様に主として JIS A-1148 A 法(水中凍結水中融解試験)によって行われてきた。それによるとポーラスコンクリートは少ない凍結融解サイクルで破壊に至ることから、一般的なコンクリートに比べ耐凍害性が低いと危惧されている。このことはポーラスコンクリートの構造的特徴である連続空隙内が常時飽水される環境において、連続空隙内の水が凍結し、その膨張圧が生じることによるものと考えられている。しかし、実際の凍結融解作用を受ける環境を考慮した場合、こ

のような厳しい条件ばかりとは限らない。ポーラスコンクリートの耐凍害性の評価には、設置される環境に合わせた評価方法が必要であるとも提案¹⁾されており、凍害の影響因子についても試験方法によって異なる結果を得たことも報告されている²⁾³⁾。RILEM では吸水条件、凍結融解サイクル等が JIS とは異なる試験方法を提案している。本研究では RILEM による凍結融解試験とともに JIS の凍結融解試験を実施し、ポーラスコンクリートの耐凍害性の評価について検討する。また、実際に施工されたポーラスコンクリート河川護岸ブロックの耐凍害性を把握することを目的として、5 年間にわたって行った現地調査及びコア採取した供試体の室内試験結果からも、ポーラスコンクリートの耐凍害性について併せて検討する。

2. 試験概要

2.1 材料及び配合

本研究で作製したコンクリートの配合を表 1、表 2 に示す。本研究ではポーラスコンクリートに加え、比較のために普通コンクリートも併せて作製した。ポーラスコンクリートは W/C を 24%、設計空隙率を 20% とし、普通ポルトランドセメント(密度 3.16kg/m³)、粗骨材に沙

*1 北海道大学大学院 工学研究科 工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科助教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科助手 工博 (正会員)

表-1 ポーラコンクリートの配合

	空隙率 (%)	W/C (%)	(kg/m ³)					f ₂₈ (N/mm ²)
			W	C	G	増粘材	AE 剤	
NRA	20	24	99	413	1550	8.3	3.1	21.4

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)				f ₂₈ (N/mm ²)
				W	C	S	G	
NC	1.5	50	45	165	330	869	1089	49.5
NCAE	5	50	45	175	350	806	1011	36.9

流川産 6 号砕石(密度 2.78kg/m³), 増粘剤(密度 3.00kg/m³), 高性能 AE 減水剤(密度 1.05kg/m³)を用いた。普通コンクリートは W/C, s/a を一定とし, 普通ポルトランドセメント, 細骨材および粗骨材は鶴川産川砂(密度 2.70kg/m³), 砕石(密度 2.77kg/m³), 混和剤は AE 剤を用いた。

2.2 凍結融解試験

(1)RILEM CIF 試験⁴⁾

打設後, 湿布養生(24 時間), 水中養生(13 日間), 恒温恒湿養生(14 日間), 前吸水(7 日間)を経て 56 サイクルの凍結融解試験を行う。凍結融解 1 サイクルは +20±0.5℃ から -10℃/時の勾配で -20±0.5℃まで降下させ, -20±0.5℃で 3 時間保持し, その後+10℃/時の勾配で+20±0.5℃まで融解させ, +20±0.5℃で 1 時間保持させるものとする。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で行う。

凍結融解試験の劣化評価は表面劣化を表面剥離量(スケーリング量)にて評価し, 内部劣化を相対超音波伝播速度比の変化によって表-3 に従って評価する。

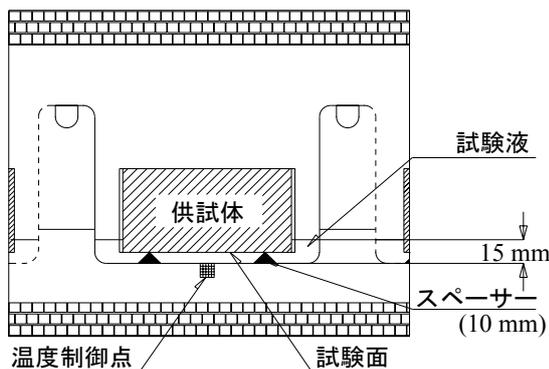


図-1 RILEM 試験装置

(2)JIS A1148 凍結融解試験(A 法・B 法)⁵⁾

打設後, 湿布養生(24 時間), 材齢 28 日まで水中養生を行い, 凍結融解試験を行う。凍結融解 1 サイクルは+5±2℃から-18±2℃に降下させ, 一定時間後-18±2℃から+5±2℃に融解させる。1 サイクルを 3 時間以上 4 時間以内で行い, 300 サイクル終了時, または供試体の破壊による測定不能時に試験を終了とする。

A 法の条件は, 凍結・融解行程において常に 3mm 厚の水で全面を覆われていることとし, B 法の条件は, 凍結行程は気中, 融解行程を水中で行う。凍結融解試験の温度サイクルは A 法, B 法ともに同様であり, 凍結融解試験における劣化評価は相対動弾性係数の推移により評価する。

2.3 ポーラスコンクリートの劣化調査

2000 年に北海道石狩川水系に植生, 生態系保護を目的とした河川護岸用ポーラスコンクリートブロックが施工された。同護岸ブロックにて施工後 5 年間にわたり超音波伝播時間を測定し, 超音波伝播速度を算出することによって内部劣化の評価を行うとともに, 目視による表面劣化の調査を行った。なお同護岸ブロックのポーラスコンクリートの配合は表-1 と同様のものである。同護岸ブロック断面図と測定箇所を図-2 に示す。TYPE A は河川中央部に, TYPE B は河川側面に施工されている。測定時の河川水面は, 測定ブロックの上端より約 15cm~30cm 低

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 相対超音波 伝播速度比	95% 以上	95% ~80%	80% ~60%

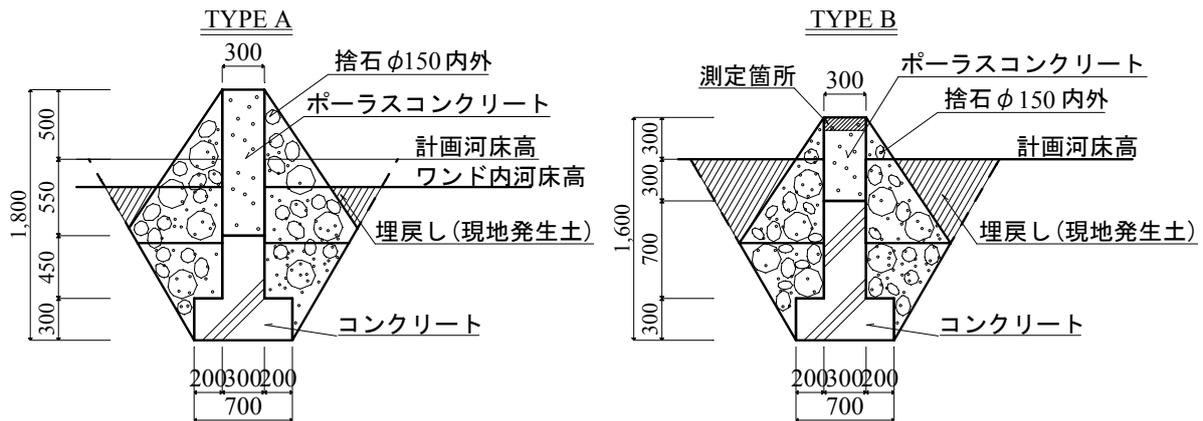


図-2 水制工断面図と測定箇所

い位置にあり、対象ブロックの上端部を測定器の発振子と受振子で挟み込み、超音波伝播時間の測定を行った。

また、2005年6月に同護岸ブロックよりコアボーリングによって供試体を採取した。これに対し、圧縮強度及び空隙率試験、耐凍害性の調査を目的として RILEM CIF 試験を行い、同ポーラスコンクリート河川護岸ブロックにおける劣化状態の把握及び評価を行った。

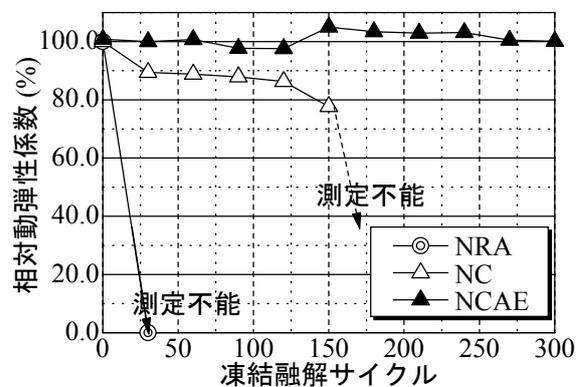


図-3 JIS(A)における結果

3 実験結果と考察

3.1 JIS A1148 A 法の結果と考察

JISの凍結融解試験における相対動弾性係数の変化について A 法の結果を図-3に示す。これによると NCAE(AE 普通コンクリート)は 300 サイクルで相対動弾性係数がほぼ 100%であったのに対し、NC(Non-AE 普通コンクリート)は 150 サイクル以降測定不能になっており、AE 剤の効果が認められる。NRA(ポーラスコンクリート)においては 30 サイクルに満たない程度の少ない凍結融解サイクルで急速に測定不能に至ることがわかる。また、NRA の A 法での測定不能時には図-4にあるように供試体中央部より割れてしまうような破壊形状も示している。

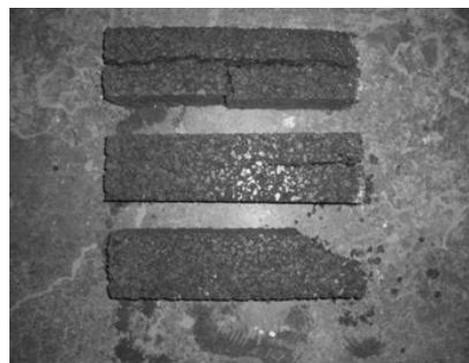


図-4 A 法後の供試体の写真

3.2 JIS A1148 B 法の結果と考察

JISの凍結融解試験における相対動弾性係数の変化について B 法の結果を図-5に示す。B 法では劣化挙動が A 法とは異なっており NRA は A 法に見られるような急激な動弾性係数の低下は

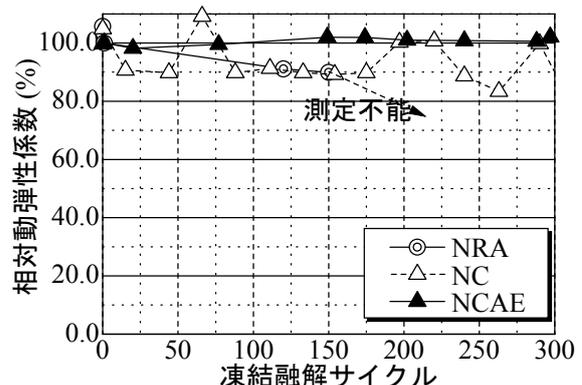


図-5 JIS(B)における結果

認められず、90%程度まで低下した時点、150 サイクル以降で供試体の角が欠けて測定不能に至っている。

3.3 RILEM CIF 試験の結果と考察

凍結融解試験過程の相対超音波伝播速度比の推移を図-6に、試験終了時の総スケーリング量を図-7に示す。NCAEはAE剤による空気連行の効果によりNon-AEコンクリートのNCに比べ相対超音波伝播速度比の低下も無く、スケーリング量も少なくなっている。また、ポーラスコンクリートであるNRAはスケーリング量がAEコンクリートより若干多くなるものの、内部劣化の指標となる相対超音波伝播速度比の低下はみられず、AEコンクリートとほぼ同程度の結果となった。

これまでポーラスコンクリートの耐凍害性は一般的なコンクリートより大きく劣るものと考えられてきた。しかし、RILEM CIF試験の結果は前述したJISによる試験とは異なる結果を示している。また、JISの試験結果にみるような供試体の破壊による測定不能には至らなかった。このことから、試験方法によってポーラスコンクリートはAEコンクリートとほぼ同程度の比較的高い耐凍害性を保持すると評価できることがわかる。

3.4 ポーラスコンクリート河川護岸ブロックの非破壊試験結果と考察

施工後5年後までの相対超音波伝播速度比の推移を図-8に示す。図中のNoは測定ブロック名であり、測定は図-2のTYPE Bの河川側面部に施工されたブロックを測定したものである。これによると測定ブロックによって多少のばらつきはあるものの、相対超音波伝播速度比に大きな変化は無い。大きく低下したのもでも95%程度であり、これを考慮した上で表-3に示した劣化基準に照らし合わせると内部劣化の程度は軽微から中程度と評価することができ、顕著な内部劣化は起きていないと判断できる。

また、目視による凍害損傷度の評価としては、水に接している部分は少量の摩耗が見られるも

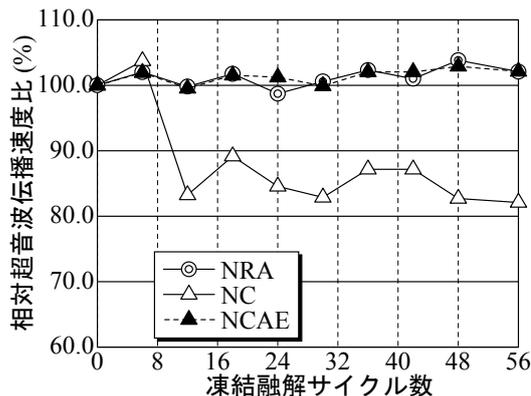


図-6 相対超音波伝播速度比の推移

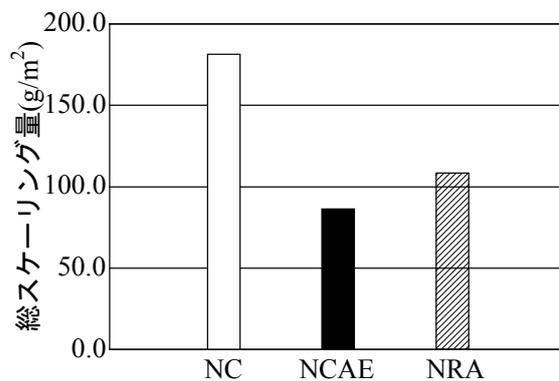


図-7 総スケーリング量

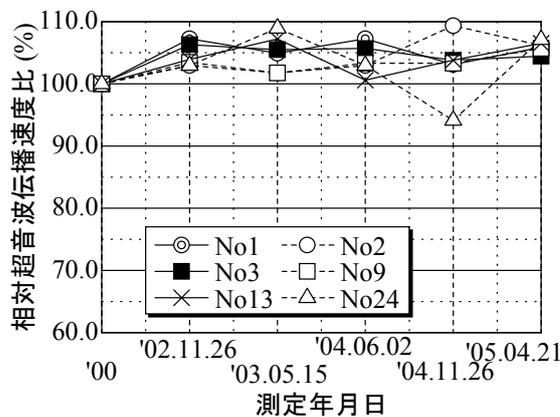


図-8 相対超音波伝播速度比の推移

の、躯体が欠ける等の構造的な破壊というような顕著な劣化は確認できず、構造上の問題もなく耐凍害性を保持しているものと考えられる。

3.5 コア供試体による試験結果と考察

現場ポーラスコンクリートの設計値、2006年製作供試体、及びコア供試体における空隙率、圧縮強度を表-4に示す。圧縮強度及び空隙率

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に記載されている各試験(案)⁶⁾に準じて測定した。

これによると、5 年後にコア採取した供試体の圧縮強度は設計値、再作製したものに比べ、圧縮強度が若干低い値を示しているが、全空隙率の影響であり、劣化による強度低下ではないと判断している。コア供試体において全空隙率に比べ連続空隙率が小さく測定された理由としては、連続空隙内に砂・泥等が多量に混入し、目詰まりのような症状を起こし、実際の連続空隙率よりも低い値となったものと考えている。

また、施工後の 5 年間で凍害によって内部劣化が進行していれば、供試体の耐凍害性も低下し、室内試験においても早期劣化を示すと考え、同コア供試体に対して RILEM CIF 試験を行った。

TYPE A より採取したものを B3, TYPE B より採取したものを B5 とし、試験中の相対超音波伝播速度比の推移を図-9 に示す。これによると凍結融解サイクルの進行における相対超音波伝播速度比はおおむね横ばいに推移し、最も低下した場合でも 90%以上を維持しており、凍結融解試験終了時にはすべての供試体においてほぼ 100%程度であった。表-3 の基準に照らし合わせた場合、最も低下した値を考慮しても内部劣化は軽微であると判断できる。また、コア採取したものと、再製作したものとの違いは確認できず耐凍害性を保持しているものと考えられる。

凍結融解試験の総スケーリング量を図-10 に示す。これによると、再作製したものに比べ、コア採取したものはスケーリング量が多くなる傾向にあった。しかし、試験終了時に試験面は顕著な表面劣化がなく、凍結融解サイクル中に連続空隙よりモルタル片の剥離量と同程度以上の砂・泥等の排出を目視にて確認している。正確なスケーリング量は測定できなかったが、実際のコア供試体のスケーリング量は測定値に比べかなり少ないものと考えられる。

図-11 に凍結融解中の吸水量を示す。これによると、再製作したものは前吸水開始後 24 時

表-4 空隙率及び圧縮強度

	全空隙率 (%)	連続空隙率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
設計値	21.0	20.0	19.0 (σ_{14})
NRC (2006 年製作)	20.4	19.6	21.4 (σ_{28})
コア供試体	21.6	10.9	18.3

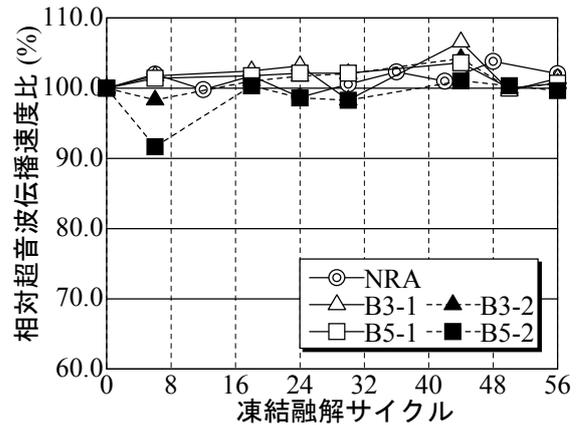


図-9 相対超音波伝播速度比の推移

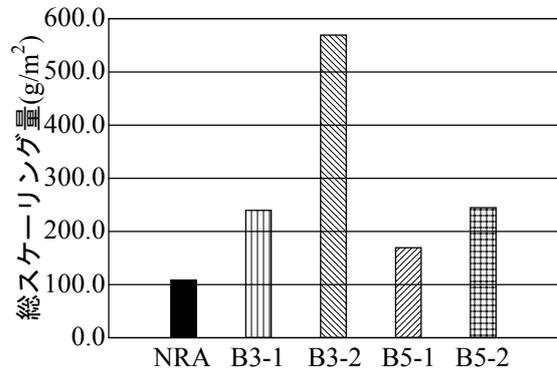


図-10 試験後の総スケーリング量

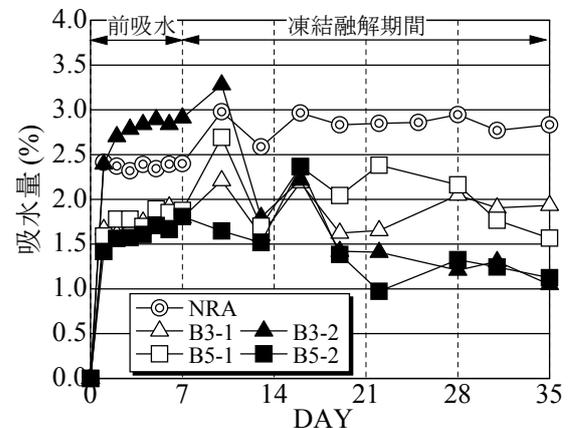


図-11 吸水量の推移

間の吸水量が多く、その後、横ばいとなり、凍結融解開始後、また吸水が始まり質量が増加している。この傾向は CIF 試験における吸水の特徴である。これに対し、コア供試体は 24 時間の吸水量が決定吸水量となることは同様であるが、その後、ばらつきはあるものの吸水量が減少しているのがわかる。これは、凍結融解開始前に連続空隙内部、供試体表面に付着した砂・泥等が吸水し、凍結融解開始とともにそれらが流出・剥離したことに依存しているものと考えられる。つまりコンクリートよりも吸水効率の良いものが目詰まりしていたことが原因であると考えられる。特に河川中央部に設置されたブロックより採取した B3-2 ではこの現象がより顕著に現れている。このことから、前述したスケーリング量は、モルタル片の剥離とともに流出した大量の砂・泥等の影響が大きく、実際のスケーリング量はより少ないものと考えられる。

前述した同護岸ブロックでの非破壊試験結果も踏まえると、同護岸ブロックは凍害による損傷は軽微であり、施工時の性能を維持しているものと判断することができ、比較的高い耐凍害性を保持しているものと考えられる。

4 まとめ

本研究により得られた成果を以下のようにまとめる。

- (1) JIS 試験においてポーラスコンクリートは早いサイクル数で測定不能となり耐凍害性が低く評価されてしまうことを確認した。特に A 法（水中凍結水中融解試験）ではその傾向が顕著である。
- (2) RILEM CIF 試験において本研究で作製したポーラスコンクリートは AE コンクリートと同程度の耐凍害性を有すると評価できることを確認した。
- (3) 施工後 5 年間暴露されたポーラスコンクリートブロックでは相対超音波伝播速度比の低下は見られず、内部劣化の程度は軽微から中程度であることを確認した。

- (4) 目視による護岸ブロックの劣化状況は摩耗損傷を主とした軽微なスケーリングであり、構造的に異常をきたすような顕著な劣化は見られなかった。
- (5) コア採取した供試体では圧縮強度・全空隙率の低下は認められなかったが、連続空隙内に過度の目詰まりが確認された。
- (6) コア採取した供試体における凍結融解試験結果では、相対超音波伝播速度比において顕著な劣化は見られず、施工時の耐凍害性を保持しているものと判断された。
- (7) ポーラスコンクリートは一概に耐凍害性が低いというわけではなく、施工環境によっては比較的高い耐凍害性を保有すると考えられる。

謝辞

本研究における JIS A1148 A 法は北海道工業大学 佐々木勝男 講師に、B 法は八戸高専 菅原隆教授にお願いし御指導を頂きました。ここに厚く感謝する次第です。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート技術シリーズ、水辺のコンクリート構造物—コンクリートによる豊かな水辺環境の創造、pp36-38, 2002
- 2) 中村拓郎・堀口 敬・志村和紀：ポーラスコンクリートの耐凍害性における連行空気の影響、土木学会北海道支部、年次技術研究発表会、CD-ROM, vol.62, 2006.2
- 3) 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
- 4) RILEM Recommendation TC176-IDC, Material and Structures, Vol.34, pp515-525, 2001
- 5) コンクリートの凍結融解試験方法 A1148, 日本工業規格, 2001
- 6) 社団法人日本コンクリート工学協会, 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, pp176-193, 2003