

論文 コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす表面改質材および被覆材の影響

鈴木 好幸*1・谷本 文由*2・新 大軌*3・濱 幸雄*4

要旨: 本研究では、表面改質材および被覆材を施工したコンクリート供試体に対し凍結融解試験を行い、その吸水性と凍結融解抵抗性について比較検討した。凍結融解試験は JIS A 1148 法, RILEM CDF 試験および CIF 試験により行い, JIS A 法では, 表面改質材の表層の緻密化は凍結融解抵抗性に大きな効果が表れないことが確認された。CIF 試験では, すべての試験体で凍害劣化は見られず, 表面改質材および被覆材による吸水抑制効果が確認された。凍結融解抵抗性の評価は表面改質材による凍結融解抵抗性向上効果はほとんど期待できず, 劣化(剥離)を促進させるものもあった。

キーワード: 表面改質材, 表面被覆材, 凍結融解, 相対動弾性係数, スケーリング

1. はじめに

近年, 環境保護, 財政面での制約等から建築ストックの有効かつ長期的な活用が求められ, 現存する建築物について劣化診断や維持補修技術に関する新技術が盛んに開発されてきている。コンクリートの劣化には中性化, アルカリ骨材反応といったコンクリートの有する潜在的な性質に起因するものから, 塩害, 凍害, 酸性劣化といった過酷な環境によるものなど様々なものがあり, 劣化対策にはまず適切な調査, 施工管理が求められるが, 適切な施工を行ってもコンクリートには潜在的な劣化要因が常に存在し, 酸やアルカリによる浸食性に劣るため, 従来から混和材料の使用, 表面被覆工法もコンクリート構造物の耐久性確保の観点から有効とされている。

近年これらの方法に加え, セメント系材料の再水和などによりコンクリート自体が内部から修復する自己修復コンクリートの開発や, 既設構造物へ適用可能で施工が容易且つ比較的安価である表面改質材がコンクリート構造物の補修および劣化抑制対策として注目されている。中でもケイ酸質系の表面改質材は, コンクリート表面の組織を緻密化することにより, 塩害や凍害防止, 中性化抑制など総合的な劣化対策を行える材料として期待されており, ひび割れ抑制, 止水性に関しては, 劣

化抑制効果が報告されている^{1) 2)}。しかし, 表面改質技術へのニーズに対し, ケイ酸質系の表面改質材の反応メカニズムには未だ不明な点が多く, また分類, 性能, 効果の評価方法などの基準は十分に整備されているとはいえないのが現状である。

また北海道などの寒冷地では, 凍結融解の繰り返しに対する劣化対策が求められており, 表面改質材および被覆材は凍害劣化抑制への効果が期待されている³⁾。本研究では, 表面改質材および被覆材を施工したコンクリート供試体を用いた凍結融解試験を行い, その凍害劣化抑制効果を比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験水準

使用したコンクリートは水セメント比 55%の non-AE コンクリートおよび一般に凍害抑制に有効とされている⁴⁾低水セメント比で空気を連行した水粉体比 31%の高流動コンクリートを比較用として用いた。使用材料は普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³), フライアッシュ(密度 2.25 g/cm³ 原町火力発電所産 JIS II 種品), 陸砂(表乾密度 2.62 g/cm³, 吸水率 1.42%), 砕石(表乾密度 2.64 g/cm³, 吸水率 0.69%) および化学混和剤とした。

表-1 コンクリートの調査表

試験体記号	W/C (%)	FA/P (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率 (C×%)				
					W	C	FA	S	G	減水剤	高性能AE減水剤	AE剤	抑泡剤 T1	抑泡剤 T2
N	55	—	55	49.0	175	318	—	930	975	0.25	—	—	0.1	—
H	—	30	31	48.2	165	369	158	755	818	—	0.77	0.011	—	0.3

*1 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻 (正会員)

*2 J F E ミネラル(株) 環境プロジェクト部 (正会員)

*3 室蘭工業大学 工学研究科くらし環境系領域 助教 博士(工学) (正会員)

*4 室蘭工業大学 工学研究科くらし環境系領域 准教授 博士(工学) (正会員)

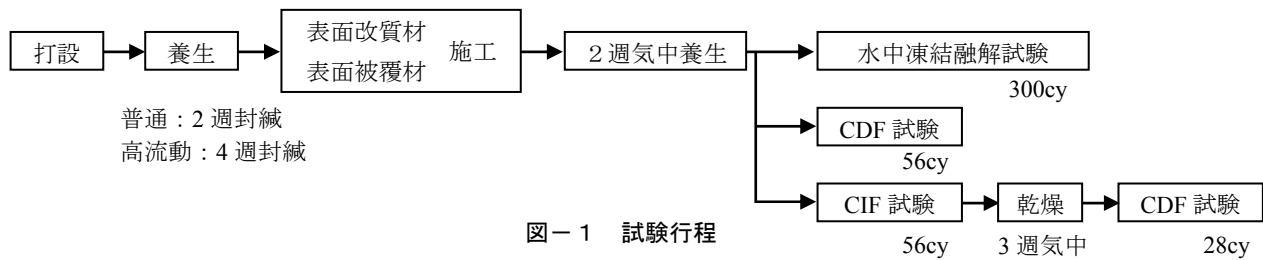


図-1 試験行程

表-2 コンクリートの練り上がり性状

試験体記号	スランブ (cm)	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	充填高さ (mm)
N	11.0	—	1.0	21.1	—
H	—	655	5.5	21.5	312.0

表-3 表面改質材および被覆材の種類

試験体記号	コンクリートの種類	主成分	塗布量	
表面改質材	N	普通	—	
	H	高流動	—	
	A	普通	ケイ酸ナトリウム系改質材	2.4g
	B		ケイ酸ナトリウム系, ケイ酸カリウム系改質材	2.0g
	C		ケイ酸リチウム系改質材	1.6g
	D		ケイ酸ナトリウム系改質材	2.0g
	E		ケイ酸質系, シラン系改質材	2.0g
	F		シラン系改質材	2.0g
被覆材	X	普通	エポキシ系被覆材	—
	Y		ウレタン系被覆材	—
	Z		エポキシ系, アクリル系, 高分子エマルジョン被覆材	—

表-1にコンクリートの調査表を、表-2に練り上がり性状を示す。また、普通コンクリートNを下地として表-3に示す6種類の表面改質材および3種類の被覆材を施工し、表面改質材および被覆材を施工していないコンクリートを比較用として用いた。各表面改質材の塗布量および塗布方法は、それぞれのメーカーの仕様に従った。表-3中に塗布量を参考として示す。また、塗布方法はいずれの場合も2回塗りである。

2.2 実験方法

凍結融解試験は水中凍結融解試験 (JIS A 1148 の A 法, 以下 JIS A 法と呼ぶ), 一面凍結融解試験 (RILEM CIF 試験および RILEM CDF 試験) により行った⁵⁾。

JIS A 法は 7.5×7.5×40cm の角柱試験体を使用し、表面改質材および被覆材を試験体全面に施工した。凍結融解抵抗性の検討は JIS A 1148 に準拠して行い、30 サイクル毎に質量変化および一次共鳴振動数の測定を行った。

一面凍結融解試験 (RILEM CIF 試験および RILEM CDF 試験) は RILEM に規定されており、限界飽水度による凍害を評価するものである。本試験ではφ10×20cm の試験体を作成し、それをコンクリートカッターで切断して作成されたφ10×10mm の試験体の切断面に表面改質材

および被覆材を施工したものを使用した。試験体側面をプチルゴム付のアルミテープでシールし、20°C60%RH の恒温室中で7日間下面吸水を行い、その後、凍結融解試験装置で最高温度+20°Cを1時間保持、最低温度-20°Cを3時間保持、温度勾配±10K/hrで1日2サイクルの下面吸水状態での一面凍結融解試験を56サイクル繰り返して行った。本試験では CIF 試験56サイクル終了時後に引き続き CDF 試験28サイクルを実施した。RILEM CIF 試験は吸水に真水を用いるのに対し、CDF 試験は3%の塩化ナトリウム溶液を用いることが特徴であり、道路で使用される凍結防止剤による塩害と凍害の複合劣化の評価などに用いられる。

測定項目はコンクリートからの剥離量、質量変化、一次共鳴振動数とした。

養生および表面改質材および被覆材の施工、凍結融解試験の行程を図-1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 水中凍結融解試験 (JIS A 法)

JIS A 法における相対動弾性係数の変化について、表面改質材を施工した供試体を比較したものを図-2に、表面被覆材を施工したものを図-3にそれぞれ示す。供試体質量の減少率について、表面改質材を施工した供試体を比較したものを図-4に、表面被覆材を施工したものを図-5にそれぞれ示す。比較用の普通コンクリートおよび表面改質材を施工したものは60~90サイクルで動弾性係数の低下が見られ、表面改質材を施工したものが表面改質材を施工していない普通コンクリートに比べ劣化が促進されているものもあった。なお、相対動弾性係数が測定不能となった後の120~150サイクルでの大幅な質量減少は試験体の崩壊を意味している。一方、被覆材を施工したものは150サイクル程度で劣化しており凍結融解抵抗性向上の効果が認められる。また、ベースコンクリートおよび表面改質材の場合と異なり、劣化の進行に伴う吸水による質量の増加が確認された。また、水セメント比を低下させている高流動コンクリートは300サイクルの試験終了時においても健全であった。

JIS A 法は試験体全面から常に水の供給と凍結融解を受けるもので、実環境に比べると過度に厳しい条件であり、表層だけを緻密化することを期待する表面改質材の

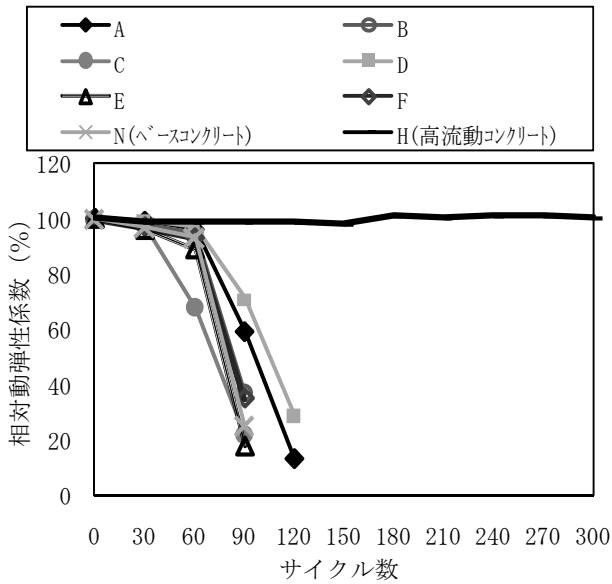


図-2 相対動弾性係数の変化 (表面改質材)

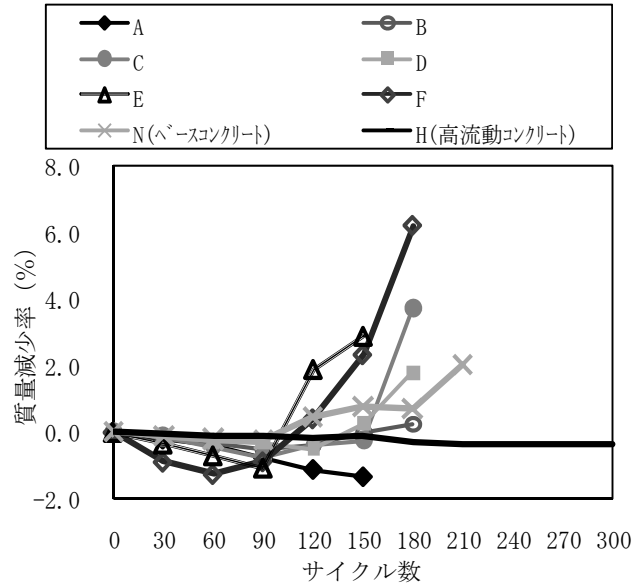


図-4 質量減少率 (表面改質材)

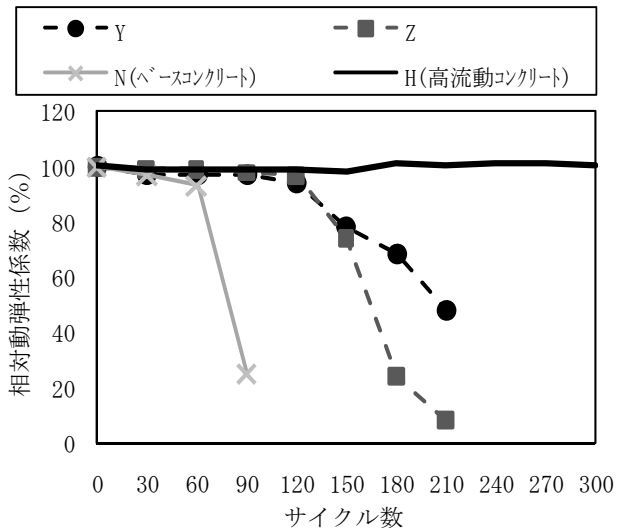


図-3 相対動弾性係数の変化 (表面被覆材)

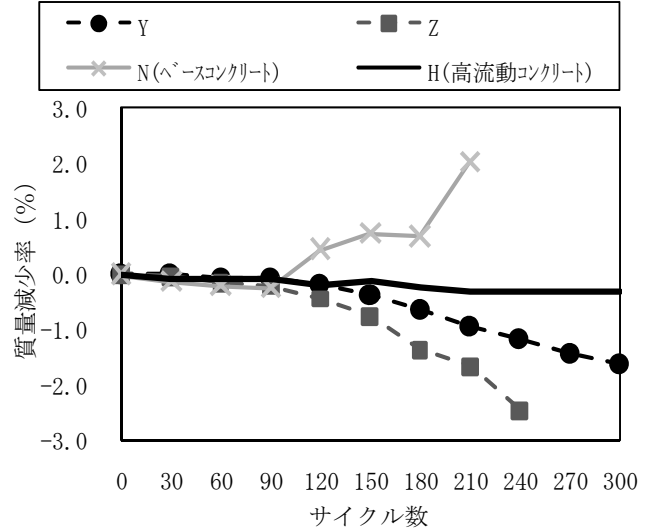


図-5 質量減少率 (表面被覆材)

効果および種類の差が明確に表れなかった。このことは、今回の高流動コンクリートのような一般的な凍結融解抵抗性向上のための対策である空気連行や低水セメント比化と比べると、表面改質材による表層の緻密化はその主成分の違いによらず大きな効果が期待できないことを示唆するものである。

3.2 RILEM CDF 試験

図-6 に CDF 試験における剥離量の変化を示す。CDF 試験のみを 56 サイクル行った結果では、表面改質材の種類によって剥離量に大きな差が見られる。ベースコンクリートと比べて、表面改質材 B, E は剥離量が 2.5 倍程度に増加し、C で同程度、A, D, F では剥離量が半分以下に低減させる結果となった。また、高流動コンクリートでは剥離はほとんど見られなかった。

塩分との複合劣化を評価するための CDF 試験では、表

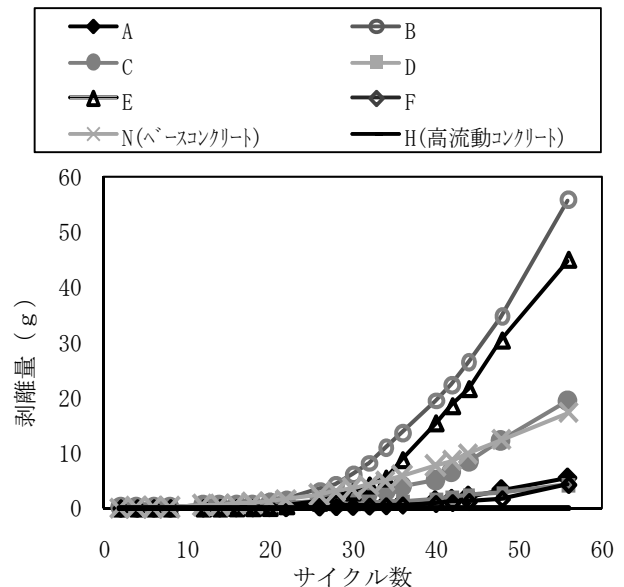


図-6 CDF 試験結果 (剥離量)

面改質材の種類によるスケーリング抵抗性の差が明確に表れた。スケーリング抵抗性は、塩分の影響による浸透圧と凍結融解作用時のポンピングによる吸水量の増大と関係が高く、表面改質材の主成分や改質メカニズムの詳細については不明な点も多いが、ケイ酸ナトリウム系改質材 (A, D)、シラン系改質材 (F) が比較的良好な結果になっている。

3.3 RILEM CIF&CDF 試験

図-7に CIF&CDF 試験中の吸水率の変化を示す。なお、凍結融解作用時の吸水挙動は JIS A 法では把握できないものである。CIF 試験中はいずれの表面改質材および被覆材もベースコンクリートよりも吸水率が低くなっており、表面改質による吸水の抑制効果が確認された。しかし、一度乾燥させた後の CDF 試験では凍結融解中のポンピングによる吸水が顕著であり、表面改質材 B, C, F の吸水率がベースコンクリートを上回る結果となった。一方、被覆材および高流動コンクリートの吸水率は CIF 試験、CDF 試験の両期間を通じて低く保たれていた。

図-8に CIF&CDF 試験での相対動弾性係数の変化を示す。CIF 試験ではいずれの供試体でも相対動弾性係数の低下は見られなかった。また CDF 試験においても凍結融解 22 サイクルまではすべての試験体で相対動弾性係数の低下は見られなかったが、試験終了時の 28 サイクル目で吸水率が高くなった B, F で相対動弾性係数が 80%程度まで低下した。しかし、同様に吸水率の高くなった C では相対動弾性係数の低下は見られなかった。

CIF 試験は JIS A 法に比べると厳しくない条件であるが、常時水と接した状態で凍結融解作用を受けるもので実環境での構造物においては十分に厳しい条件であるといえる。しかし、CIF 試験結果ではすべての試験体で内部劣化の指標である相対動弾性係数の低下は見られなかった。

図-9に CIF&CDF 試験での剥離量の変化を示す。表面被覆材および高流動コンクリートでは、CIF 試験と CDF 試験による吸水率に差は見られず、剥離もほとんど発生しなかった。一方、表面改質材を施工したコンクリートは CIF 試験ではいずれの供試体でもほとんど剥離が見られなかったが、CDF 試験開始直後から C, B, F、ベースコンクリートの順に著しい剥離が見られた。これらの試験体は図-7に示した CDF 試験(凍結融解中)の吸

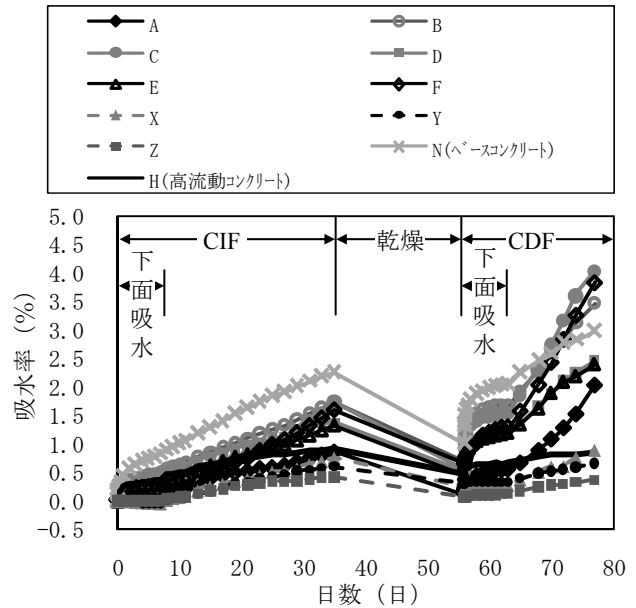


図-7 CIF&CDF 試験結果 (吸水率)

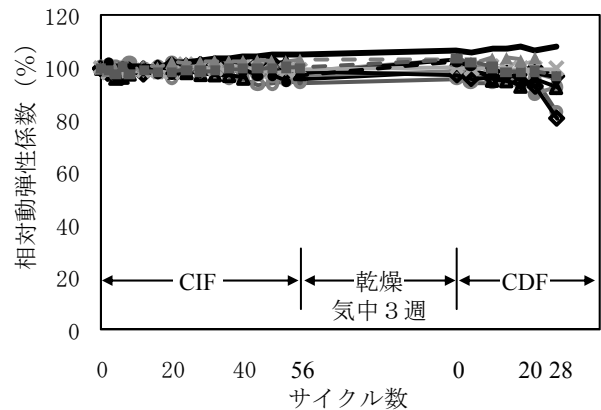


図-8 CIF&CDF 試験結果 (相対動弾性係数)

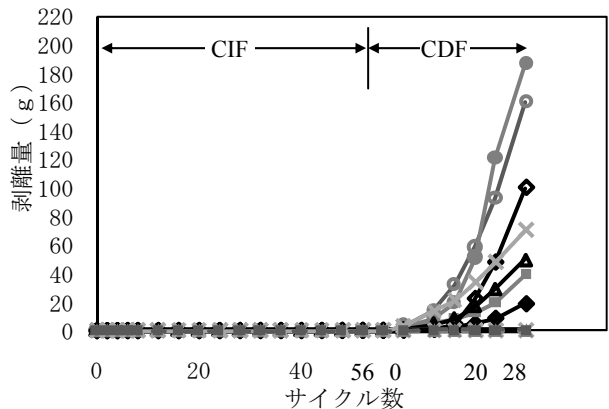


図-9 CIF&CDF 試験結果 (剥離量)

表-3 表面改質材および被覆材による凍結融解抵抗性向上効果の評価

試験方法	評価項目	A	B	C	D	E	F	X	Y	Z	H
JIS A法	相対動弾性係数	△	×	×	△	△	×	—	○	○	◎
CIF法	吸水率・相対動弾性係数	△	△	△	△	△	△	○	○	○	○
CDF法	剥離量	○	×	×	○	×	○	—	—	—	◎
CIF+CDF法	剥離量	△	×	×	△	△	×	◎	◎	◎	◎
	総合評価	△	×	×	△	△	×	○	○	○	◎

(note) ×: 効果なし or 劣化促進 △: 同等 ○: 効果あり ◎: きわめて良好 (ベースコンクリートとの比較)

水率の多いものであった。下面吸水時でベースコンクリートに比べ吸水が抑制され、表層を緻密化させたと思われる表面改質材において、一部剥離を促進させているものがあることは、表面改質材による緻密化がごく表層のみの場合、吸水を抑える効果は期待できるが、過剰な水圧が作用するような厳しい環境下では結果的に水分がコンクリート内に圧入されるため、緻密な表層が下層の凍結水圧の影響を受けやすくなりスケーリングが促進すると考えられる⁶⁾。また、図-6で示したCDF試験の結果と比べても剥離量は著しく増加しており、塩水が作用する以前の真水での凍結融解や乾燥の影響でスケーリングが起りやすくなることが示唆される。

ここで行った水中凍結融解試験、CDF試験およびCIF試験による凍結融解試験の総合的評価結果を表-3に示す。

4. まとめ

本研究の、表面改質材および被覆材を施工したコンクリート供試体に対し凍結融解試験を行い、その吸水性と凍結融解抵抗性について比較検討した結果を以下に要約する。

- (1) JIS A 法では空気連行や低水セメント比化と比べると、表面改質材の表層の緻密化はその主成分の違いによらず凍結融解抵抗性に大きな効果が期待できないということが確認された。
- (2) CIF試験時では、すべての試験体で凍害劣化は見られなかったが、表面改質材および表面被覆材による吸水抑制効果を確認した。
- (3) CDF試験では、塩分が作用する凍結融解では表面改質材による凍結融解抵抗性向上効果はほとんど期待できず、劣化（剥離）を促進させるものもあった。原因としては、表面改質材による表層の緻密化が、ごく表層のみの改質であるためと考えられる。

- (4) CIF試験後に行ったCDF試験では、塩水が作用する以前の真水での凍結融解や乾燥の影響でスケーリングが起りやすくなることを確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり、東北電力（株）・成田健氏、小沢慎一郎氏、室蘭工業大学生・谷野勇介氏の協力を得た。記して、誠意を表わす。

参考文献

- 1) 審良善和ほか：表面改質材を用いたコンクリート構造物の劣化抑制に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.26，No.1，pp.1719-1724，2004
- 2) 坂ノ上宏ほか：浸透性防水剤の止水性能確認実験，建築学会学術講演会梗概集，pp.209-210，1998
- 3) 日本コンクリート工学協会 北海道支部：ケイ酸質系含浸材の現状，コンクリートのひび割れ修復技術の現状と課題—コンクリートのひび割れ修復に関する研究委員会成果報告書—，pp.68-122，2007.7
- 4) Powers：T.C.The air requirement frost-resistant concrete.Proceedings of the Highway Research Board，29，pp.184-211，1949
- 5) RILEM TC 176-IDC，Setzer，M.J，et al：Final Recommendation of RILEM TC 176-IDC 'Internal Damage of Concrete due to frost action' Test methods of frost resistance of concrete :CIF-Test(Capillary suction，internal damage and freeze thaw fest)-Reference method and alternative methods A and B Materials and Structures，37，pp743-753，2004
- 6) 日本コンクリート工学協会：塩化物によるスケーリング促進のメカニズム，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会 報告書，pp.143-155，2008.8 同封

