

論文 凍害と塩害の複合劣化がスケーリングと鉄筋腐食に与える影響

加藤 善史*¹・鹿野 裕*²・小林 孝一*³ 六郷 恵哲*⁴

要旨：凍害と塩害の複合劣化がスケーリングと鉄筋腐食に与える影響を調査するために、かぶり厚さを変化させるとともに、塩分濃度を変化させた NaCl と CaCl₂ 水溶液を用いて、緩速凍結融解試験を行った。また、ひび割れの影響についても調査した。その結果、スケーリング量はかぶり 20mm において最大であり、ひび割れの有無による影響は確認されなかった。また、NaCl 1%溶液を用いた場合にスケーリング量が最大であり、NaCl の方が CaCl₂ よりスケーリングは顕著であったが、鉄筋腐食はかぶり 30mm、試験水 CaCl₂ 3%で最も多く、スケーリングとは異なる結果となった。

キーワード：複合劣化、スケーリング、鉄筋腐食、かぶり、塩分濃度

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物の劣化要因として挙げられる塩害・凍害等は、それぞれ単独の劣化として多くの研究が行われている。しかし、複合劣化については劣化因子が相互に影響を及ぼしあい、複合的に進行していくため、その複雑なメカニズムは十分に明らかになっていないのが現状である。構造物を適切に維持管理していく上ではそれらの RC 構造物の劣化度を正確に推定し、適切な補修を施す必要がある。

凍結の危険性が高い山間寒冷地などにおいて凍結防止剤の散布によって凍害及び塩害の複合劣化が数多く確認されている。これまで凍害に塩分が複合して作用した場合にはスケーリング劣化が顕著になり、コンクリート内部への塩分浸透量が増大することが知られている¹⁾。しかし、凍害と塩害の複合劣化がコンクリート内部の鉄筋に与える影響については明らかにされていない。

そこで本研究では、RC の平板供試体のかぶりを変化させて緩速凍結融解試験を行い、スケーリング劣化がコンクリート内部の鉄筋の腐食に与える影響について検討した。また、凍結防止剤として多く用いられている塩化ナトリウム(以下 NaCl)と塩化カルシウム(以下 CaCl₂)を用いることにより、凍結防止剤の種類がスケーリング劣化に与える影響と、同時にコンクリート内部の鉄筋に与える影響について検討した。また、RC 構造物においてはひび割れの発生が許容されていることから、このひ

び割れを起点として塩分の浸透、氷圧による劣化の加速が懸念されるため、供試体にひび割れを導入して、その影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。粗骨材の表乾密度は 2.61g/cm³であり、細骨材の表乾密度は 2.59g/cm³ともに岐阜県揖斐川産である。粗骨材の最大寸法は 15mm とした。AE 減水剤、AE 剤を使用し、エントレインドエアを混入し、空気量を 4.5%一定とした。

2.2 供試体概要

(1) 形状

供試体形状を図-1に示す。上面のかぶりを 10, 20, 30mm と変化させ、下面のかぶりを 20mm に固定し、鉄筋 D10 を 2 本配置した。

(2) はり部材の作製

まず、D10 鉄筋 2 本の両端にネジ節鉄筋 D25 を溶接したものを用いて、断面 40/50/60mm×100mm、全長 1800mm のはり部材を作製し、湿布養生を 2 週間行った。

(3) ひび割れの導入

はり部材へのひび割れ導入方法を図-2に示す。はり部材両端のネジ節鉄筋 D25 にカプラーを用いて、ネジ節鉄筋 (D25) を継ぎ足した。鋼製の反力板とセンターホ

表-1 示方配合

W/C	単位量(kg/m ³)					
	W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
55	180	327	810	920	0.8175	1.962

※Ad₁は AE 減水剤、Ad₂は AE 剤

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博 (工) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

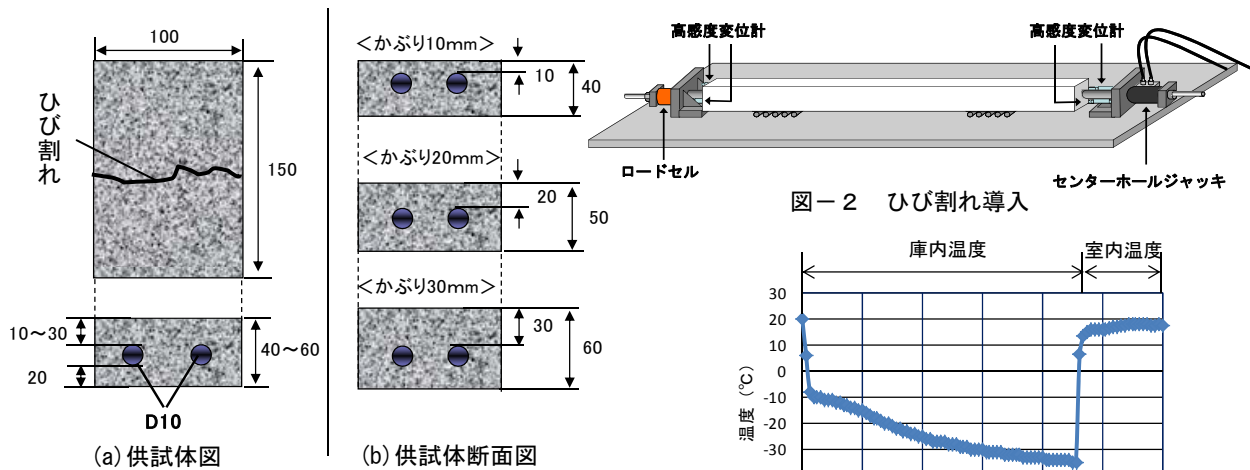


図-1 供試体形状 (単位: mm)

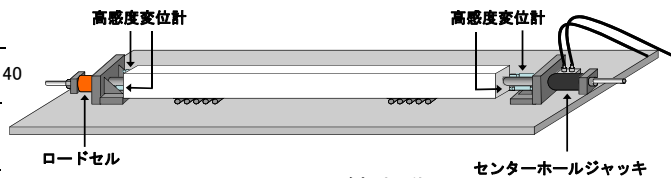


図-2 ひび割れ導入

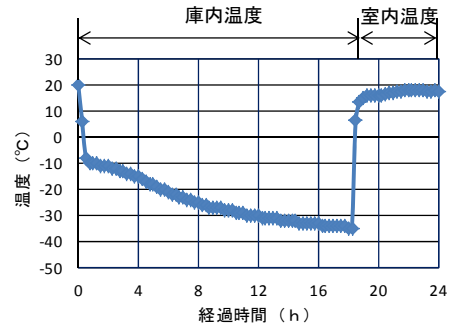


図-3 雰囲気温度の履歴

表-2 供試体一覧
(a) かぶりの違う供試体 (b) 試験水の違う供試体

ひび割れ	かぶり (mm)	試験水	本数	ひび割れ	かぶり (mm)	試験水	本数
あり	10	NaCl(3%)	3	あり	20	NaCl(1%)	3
	20					NaCl(3%)	
	30					NaCl(10%)	
なし	10					CaCl ₂ (1%)	
	20					CaCl ₂ (3%)	
	30					CaCl ₂ (10%)	
						H ₂ O	

表-3 目視レイティングの等級

評価値	表面の状況
0	スケールなし
1	表面の僅かなスケール
2	僅かなスケール
3	一部の大きなスケール
4	顕著なスケール
5	全面にわたって大きなスケール

ールジャッキを用いて一軸引張荷重を行った。かぶりの残留ひび割れ幅が 0.4mm に達するまで、またひび割れが全断面に貫通するまで引張荷重を行った。ひび割れ幅はマイクロスコプを用いて計測した。

(4) 供試体の切り出し

はり部材からコンクリートカッターでひび割れ位置にあわせて長さ 150mm の寸法の供試体を切り出した。なお、比較用にひび割れを導入しないはり部材からも供試体を切り出した。

(5) 供試体のシーリングおよび土手の作製

供試体の一面のみを凍結融解作用面および塩化物イオン浸透面とするため、供試体上面以外の 5 面をシリコン樹脂でシーリングし、上面に試験水を張れるように、シリコン樹脂で土手を作製した。

2.3 緩速凍結融解試験

前節の供試体を用い、凍結融解試験は ASTM C 672 に準拠して行った。凍結過程は供試体温度 20°C ~ -20°C で 17 時間、融解過程は -20°C ~ 20°C で 7 時間とし、24 時間を 1 サイクルとした。1 サイクルの雰囲気温度の履歴を図-3 に示す。試験は冷凍庫から供試体を出し入れすることにより凍結融解を繰り返し、50 サイクルで試験終了とした。

本試験を行った供試体の一覧を表-2 に示す。かぶりを 10mm, 20mm, 30mm と変化させた供試体では、ひび割れの有無にかかわらず、試験水に NaCl 3% 水溶液を使

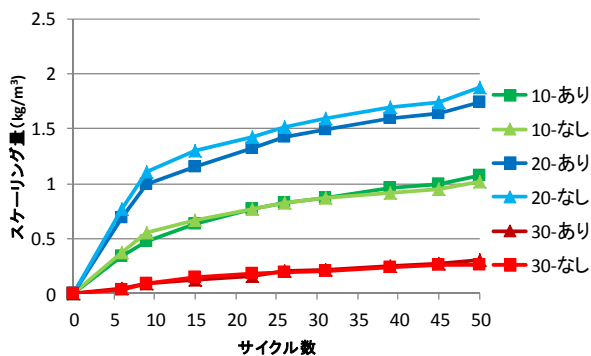
用した。また、凍結防止剤の種類を変化させた供試体では、NaCl 1%, 3%, 10% 水溶液および CaCl₂ 1%, 3%, 10% 水溶液と比較用に水道水 (以下 H₂O) の合計 7 種類を使用した。供試体の面積あたりの剥離量と目視レイティングでの評価を行った。供試体の剥離量の計測は剥離片を凍結融解 5 サイクルごとに採取し、105°C の炉乾燥を行った後、質量を計測した。また、目視レイティングは ASTM C 672 に標準化されている 6 段階で評価した。目視レイティングの等級を表-3 に示す。供試体 3 体の評価値を平均することで本論文は評価を行っている。

2.4 硝酸銀発色試験

凍結融解試験終了後、供試体内部の塩分浸透状況を確認するため、供試体を鉄筋の配筋方向に割裂させた。その後、硝酸銀水溶液 (0.1mol/l) を霧吹きで割裂面に噴霧し、供試体上面からの塩分浸透深さを計測した。本研究ではひび割れを導入しており、ひび割れ部への塩分浸透が容易なため、ひび割れ部近傍を除く領域で塩分浸透深さを計測した。塩分浸透深さはスケールを用いて供試体上面から計測し、表面劣化が著しいものは供試体下面からの計測値から換算した。また、ひび割れを導入した供試体においては、ひび割れからの鉄筋軸方向に沿った水平方向への塩分浸透深さも同時に計測した。

2.5 腐食面積率算出方法

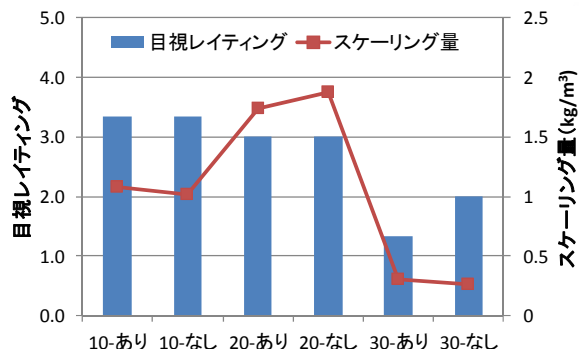
硝酸銀発色試験後の供試体から鉄筋をはつり出した。鉄筋の腐食面積率を算出するため、鉄筋の腐食部分を



供試体名称：＜例＞20－あり

(かぶり：20 mm ひび割れ：あり)

図－4 かぶりの違いによるスケーリング量



図－5 かぶりの違いによる50サイクル時のスケーリング量と目視レイティング

OHP フィルムでトレースし、プランメーターを用いて鉄筋の腐食面積を計測し、鉄筋の表面積の割合から腐食面積率を算出した。鉄筋の腐食面積率 C (%) の算出式を式 (1) に示す。

$$C(\%) = \frac{\text{腐食鉄筋表面積}}{\text{鉄筋表面積}} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

3.1 緩速凍結融解試験

(1) 供試体厚さの違いによる影響

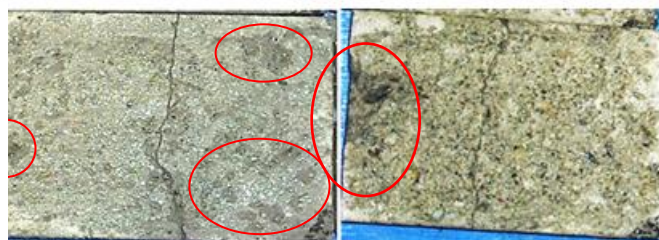
供試体厚さの違いがスケーリング量に与える影響について、図－4 に示す。供試体厚さの違いにより供試体のスケーリング量に明確な違いが確認でき、かぶり $20\text{mm} > 10\text{mm} > 30\text{mm}$ という関係を示した。かぶり 20mm の供試体に対するかぶり 30mm と 10mm の供試体のスケーリング量は、ひび割れありのもので 82% 、 38% 減少し、ひび割れのないもので 86% 、 46% 減少となった。これらの供試体は配合、空気量は同一であり、試験水はすべて $\text{NaCl } 3\%$ であるためスケーリング量の差異は供試体の上面かぶりおよび厚さの違いによるものである。供試体厚さの違いにより、コンクリート内部の細孔空隙中で溶液の凍結速度が異なり、それに伴い塩分濃度差による浸透圧の大きさと、水が凍結しその膨張分の水の移動に伴



(a) 0 サイクル時の
20mm－ひびあり供試体

(b) 50 サイクル時の
20mm－ひびあり供試体

写真－1 ひび割れ部の拡大



(a) 30mm－ひびあり供試体

(b) 10mm－ひびあり供試体

写真－2 50 サイクル終了時のかぶり 30 mm と 10 mm の違い

う水圧の大きさに差異が生じ、影響を及ぼしたと推測される²⁾。また凍結過程から融解過程への移行時の急激な温度変化によるコンクリートと鉄筋の熱伝導の差が影響を与えるとも考えられる。しかし本研究では、供試体温度の測定を行っていないため、供試体内に熱電対を設置し、供試体内部の温度を測定することにより、供試体内の温度変化、温度勾配、最低温度等の影響を検討することが必要であると考えられる。

また、ひび割れの有無によるスケーリング量の違いは本試験では確認できなかった。ただし、ひび割れがあるものについては、ひび割れ部の角がとれ丸みをおびるスケーリングがみられ、ひび割れ開口部が拡大しており(写真－1 参照)、ひび割れが劣化の進行に影響を与えるのは明らかであった。

50 サイクル終了時の目視レイティングとスケーリング量の関係を図－5 に示す。目視レイティングにおいてもスケーリング量と同様の傾向が見られた。すなわちスケーリング量が最小であったかぶり 30mm の供試体はレイティング $1\sim 2$ を示し、かぶり 10mm 、 20mm の供試体では $3\sim 4$ の値を示した。かぶり 10mm の供試体は一部で大きな剥離が見られる供試体があったために、レイティング平均値が見かけ上大きくなっている。スケーリング劣化の過程を観察すると、 30mm の供試体は部分的にス

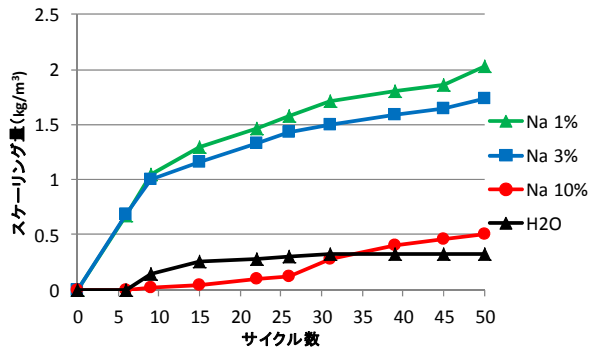


図-6 試験水の違いによるスケーリング量

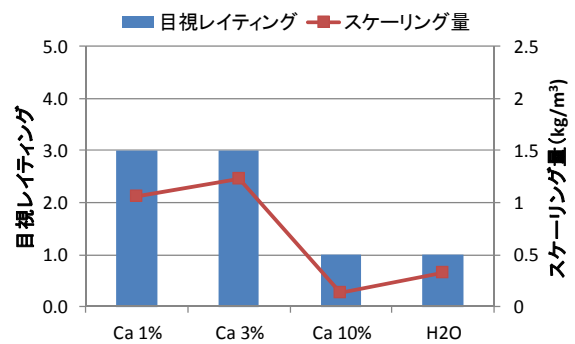
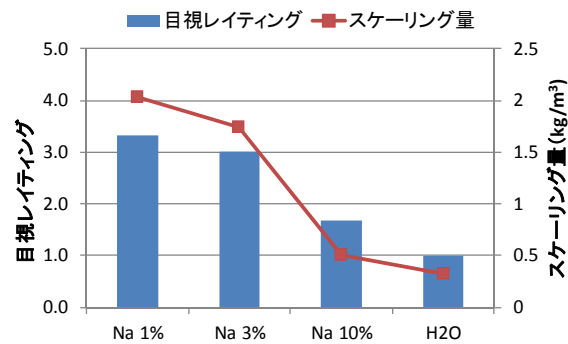
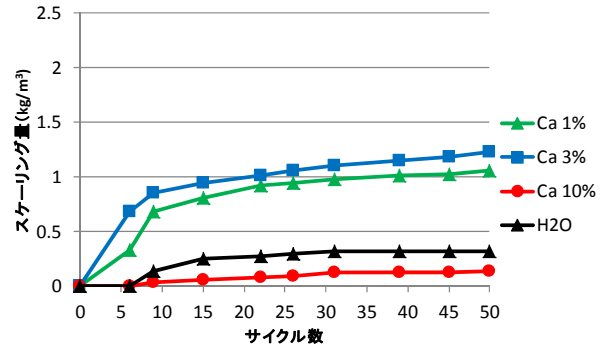


図-7 試験水の違いによる 50 サイクル時のスケーリング量と目視レイトィング



(a) CaCl_2 10%



(b) H_2O

写真-3 50 サイクル時の CaCl_2 10%と H_2O の違い



(a) 5 サイクル時



(b) 25 サイクル時



(c) 50 サイクル時

写真-4 NaCl 10%のスケーリング過程

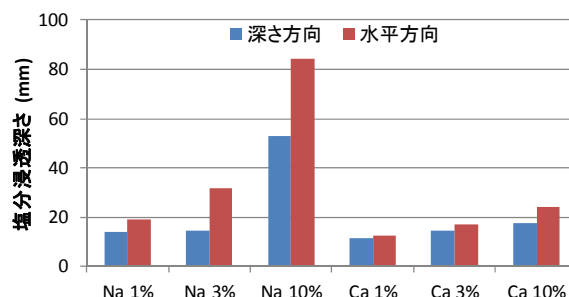
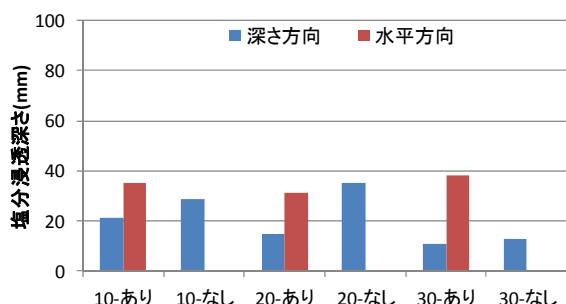
ケーリングが発生し、一部粗骨材が露出するまで劣化しているのに対し、10mm, 30mm の供試体は全面的にスケーリングが発生、粗骨材が露出し、かぶりの一部に剥離が生じるまで達している (写真-2参照)。

(2) 試験水の違いによる影響

供試体の試験水の違いがスケーリング量に与える影響について図-6に示す。塩化物溶液の濃度がスケーリングに与える影響は NaCl 水溶液を試験水に使用した場合、濃度 $1\% > 3\% > 10\% > 0\%$ (H_2O) という関係を示した。 CaCl_2 水溶液を試験水に使用した場合、濃度 $3\% >$

$1\% > 0\%$ (H_2O) $> 10\%$ という関係を示した。これらは既往の研究³⁾で示される傾向と同様であり、このように塩化物溶液の濃度によりスケーリング量が異なるのは、濃度の違いが氷点降下に与える影響やセメント水和物中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などに化学的变化が生じるためと考えられている⁴⁾。また、濃度が1%, 3%の時にスケーリング量が大きくなるのは、塩分濃度が2~4%の時に水圧と浸透圧のコンビネーションが最も不利な内圧を生じるためであると考えられている²⁾。

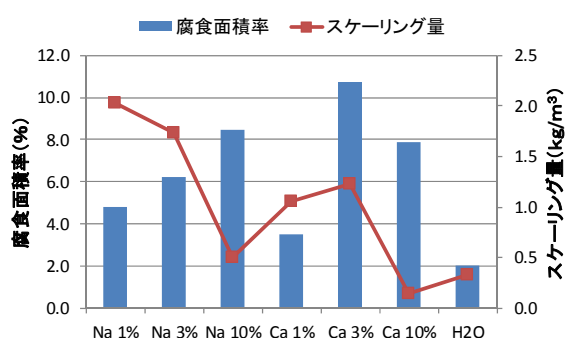
50 サイクル終了時の目視レイトィングとスケーリング量



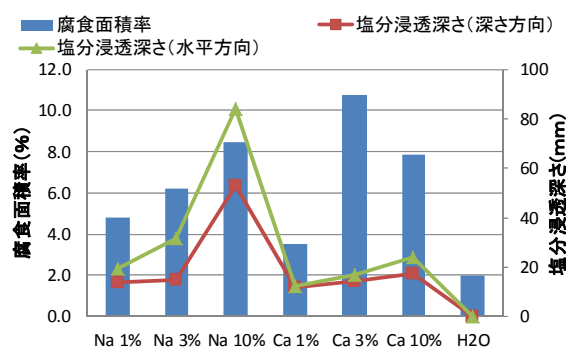
図－8 塩分浸透状況

表－4 鉄筋表面の腐食面積率

供試体名	平均腐食面積 (cm ²)	腐食面積率 (%)	供試体名	平均腐食面積 (cm ²)	腐食面積率 (%)
10-あり	3.5	7.7	Na 1%	2.2	4.8
10-なし	0.2	0.4	Na 3%	2.8	6.2
20-あり	2.8	6.2	Na 10%	3.8	8.5
20-なし	0.7	1.6	Ca 1%	1.6	3.5
30-あり	4.5	10.0	Ca 3%	4.8	10.7
30-なし	0.5	1.0	Ca 10%	3.6	7.9
			H ₂ O	0.9	2.0



図－9 腐食面積率とスケール量の関係



図－10 腐食面積率と塩分浸透状況の関係

の関係を図－7に示す。目視レイティングとスケール量にはよい相関がある。塩分濃度の高い、NaCl 10%およびCaCl₂ 10%とH₂Oは同等の評価1となっているが、スケール状況としてH₂Oではごく表層のみが剥離しているのに対し、高濃度のNaClおよびCaCl₂は深さ方向に剥離が進展している(写真－3)。NaCl 10%は25サイクル以後からスケール量が増加し、H₂Oより大きなスケールが生じた。NaCl 10%のスケール過程を写真－4に示す。NaCl 10%では、剥離する面積は小さいが深さ方向にスケールが進行していくため、最終的にH₂Oよりスケール量が増加した。そのため、CaCl₂ 10%においても、長期間の凍結融解試験を行った場合、H₂Oより大きなスケール量を示す可能性もあると推測される。

3.2 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験の結果を図－8に示す。試験水にH₂Oを用いた供試体は塩分浸透が確認されなかったため、この図から除外している。水平方向への塩分浸透は鉄筋近

傍で顕著であった。また、すべての供試体で塩分浸透深さは水平方向>深さ方向であった。本研究ではひび割れ導入に引張荷重を行っているため、荷重時にひび割れ近傍で鉄筋とコンクリートとの付着が破壊され、鉄筋に沿って塩分が浸透しやすくなったと考えられる。この時、ひび割れ導入の際、ひび割れ幅が同程度になるように引張荷重を行っているため、付着破壊状況は同程度と考え、供試体ごとの差はないものとする。

供試体厚さによる塩分浸透の違いをみると、深さ方向の塩分浸透深さは、かぶり10mm>20mm>30mmとなり、供試体厚さが大きくなると塩分は浸透しにくくなるが、これは前節でも述べたように供試体厚さが凍結速度に影響を与えたためであると考えられる。一方、水平方向の塩分浸透は、供試体厚さの影響を受けなかった。また、ひび割れのない供試体の方が、深さ方向の塩分浸透深さが大きかった。これはひび割れがある場合、試験水はひび割れ部に容易に浸透してしまい、供試体上面に滞留している試験水の量が少なくなるため、ひび割れ部以外の

領域にはあまり浸透しない。ひび割れがない場合、コンクリート表面全体から徐々に浸透していくため、ひび割れがない供試体の方がひび割れのある供試体より深さ方向の塩分浸透が増加したと考える。

試験水の種類による塩分浸透深さの違いをみると、深さ方向の塩分浸透深さは濃度が高くなるにつれ増加し、水平方向の塩分浸透深さも同様であった。また、同濃度で比較するとNaCl水溶液の方がCaCl₂水溶液より水平方向の浸透力が高いことがわかる。特にNaCl 10%についてはすべての供試体でひび割れ近傍以外の領域においても、上面から下面まで塩分が浸透する結果となった。

3.3 腐食面積率

鉄筋表面の腐食面積率を表-4に示す。供試体厚さによる腐食面積率の違いをみると、ひび割れのない供試体は供試体厚さに関わらず、半数の供試体で鉄筋の腐食は見られなかった。しかし、腐食が生じている供試体もあり、前節の塩分浸透深さの結果から塩分が鉄筋位置に到達していることから、今後腐食が進展すると考えられるため、長期間の凍結融解試験により検討することが必要と考える。

ひび割れのある供試体の腐食面積率はかぶり 30mm>10mm>20mm という関係を示し、3.1 節のスケーリング量とは逆の結果となった。図-8によれば、塩分の水平方向への浸透は供試体厚さの影響を受けていない。また、鉄筋腐食が進展するには水と酸素が必要であるため、凍結融解過程のうち融解状態にある時に腐食が進展すると考えられる。そのため、凍結過程で供試体厚さの違いによる凍結速度が影響するスケーリング量とは逆に、供試体厚さの違いが融解状態にある時間の長さに影響し、このような結果になったと考えられる。

試験水による腐食面積率の違いをみると、CaCl₂ 3%>NaCl 10%>CaCl₂ 10%>NaCl 3%>NaCl 1%>CaCl₂ 1%>H₂O という関係を示した。3.1 節のスケーリング量と 3.2 節の塩分浸透状況の関係をそれぞれ比較すると NaCl 水溶液と CaCl₂ 水溶液ともに、低濃度の場合スケーリング量は多いが、塩分浸透および鉄筋の腐食面積は小さい。逆に高濃度の場合スケーリング量は少ないが、塩分浸透および鉄筋の腐食面積率は大きいことがわかる（図-9、10参照）。しかし、CaCl₂ 3%溶液については他の供試体と異なり著しく腐食面積が大きいので、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では凍害と塩害の複合劣化がかぶり表面のス

ケーリングとコンクリート内部の鉄筋の腐食に与える影響について検討した。かぶりの異なる供試体と試験水の種類が異なる供試体を用い、ASTM C 672 に準拠した緩速凍結融解試験を行った。その後、供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀発色試験を行った。続いて、鉄筋のはつり出しを行い、鉄筋の腐食面積の算出を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 供試体厚さの異なる供試体の緩速凍結融解試験において、スケーリング量はかぶり 20mm>10mm>30mm という関係を示し、ひび割れの有無の影響は確認されなかった。
- (2) 緩速凍結融解試験において、スケーリング量はNaCl水溶液において濃度 1%>3%>10%>0% (H₂O) という関係を示し、CaCl₂水溶液において濃度 3%>1%>0% (H₂O) >10%という関係を示した。
- (3) 深さ方向の塩分浸透は、供試体厚さが小さくなるほど、浸透しやすくなるが、水平方向の塩分浸透は殆ど変らなかった。
- (4) NaCl 水溶液、CaCl₂ 水溶液ともに濃度が高くなるほど深さ方向および水平方向に塩分がよく浸透した。
- (5) 鉄筋の腐食面積率はかぶり 30mm>10mm>20mm という関係を示し、スケーリング量と逆の関係を示した。試験水の種類と濃度別については、CaCl₂ 3%で最大となった。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (A)22246059、代表者：宮川豊章）の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹田宣典，十河茂幸：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.427-432，2001
- 2) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会 報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，pp.25-32，1999
- 3) 月永洋一，庄谷征美，笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎研究，コンクリート工学論文集，第8号，第1巻，pp.121-133，1997
- 4) 藤井卓，藤田嘉夫：硬化セメントペーストのスケーリング劣化に及ぼす塩化物の影響，土木学会論文集，第360号，pp.129-138，1985