

論文 コンクリートのスケーリング抵抗性改善に対する電着工法の有効性

大谷 俊介^{*1}・外門 正直^{*2}

要旨：凍結防止剤の散布と凍結融解作用によってスケーリング劣化が生じたコンクリートの劣化進行の予防や補修対策として電着工法を使用した場合の有効性を検討した。実験では、凍結防止剤として多く使われている塩化ナトリウムや塩化カルシウムを含む外部溶液で通電した場合のスケーリングの抑制効果は無通電のものと比較して評価した。その結果、塩化カルシウムを含む外部溶液で通電した場合にはスケーリングを大きく抑制できることが分かった。また、その要因として水酸化カルシウムによるコンクリート表層部分の緻密化が影響していることが考えられた。

キーワード：電着工法，凍結防止剤，スケーリング抵抗性，X線回折，細孔径分布

1. はじめに

冬季に散布される凍結防止剤と凍結融解作用によって、沿道のコンクリートではスケーリングなどの劣化が顕在化している。スケーリング劣化はコンクリート中に存在する塩化物によって助長される¹⁾ため、塩化ナトリウムや塩化カルシウムなどの塩化物を含む凍結防止剤を使用する場合には常にスケーリングが生じる危険性がある。本研究では、このような劣化に対する予防や補修対策として電着工法の有効性を検討している。電着工法は、コンクリートを海水などの電解質溶液中で通電することで電着物を析出させ、コンクリートのひび割れ閉塞やコンクリート表層部の緻密化が図れるほか、脱塩の効果も期待できる²⁾。また、一般的に海水中のコンクリート補修に適用される電着工法を陸上のコンクリートへ適用し、その有効性も実証されている³⁾。

本実験では、凍結防止剤を散布したあとの融雪水が電解質溶液であることに着目し、凍結防止剤を含む外部溶液を使用して電着工法を行うことによるコンクリートのスケーリングの抑制効果は無通電のものと比較して評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は鶴巣大平産の山砂（密度：2.54 g/cm³）を粗骨材は高館産砕石（密度：2.69 g/cm³）を使用した。鉄筋はSD295A D10を使用した。コンクリートの配合を表-1に示した。

2.2 供試体

7×10×20cmの角柱供試体とφ10×7cmの円柱供試体とし、図-1に示すように組み合わせた鉄筋をかぶり4cmになるように配置した。打設後24hで脱型して材齢7日まで水中養生（20℃±3℃）を行い、その後、材齢28日まで気中養生（20±2℃，65±5%RH）を行った。養生終了の2日前に試験面（型枠底面側）の1面を除く全ての面を塩化ビニル樹脂でシールした。また、通電する供試体は、後述する12サイクルの凍結融解試験後にリード線を鉄筋にハンダ付けした。

2.3 通電及び浸漬方法

通電する場合は、塩化ビニル製の容器にチタンメッシュ陽極材を敷き、陽極材から1cm離れた位置に供試体を配置した。外部溶液は試験面（底面）から約1cmの高さまで入れた（図-1参照）。通電は直流安定化電源を使用して、陽極材を陽

*1 東北工業大学大学院 土木工学専攻（正会員）

*2 東北工業大学 建設システム工学科教授 工博（正会員）

極に、鉄筋を陰極に接続して行った。無通電で浸漬する場合も供試体試験面から約 1cm の高さまで外部溶液で満たした。なお、いずれの場合も外部溶液を 7 日おきに新しいものと交換した。

2.4 通電のための外部溶液濃度の決定

通電時に使用する外部溶液濃度は、仙台管区における 1990 年 12 月～2005 年 3 月までの 16 年分の気象データをもとに降水量と予想される凍結防止剤の散布量から決定した。凍結防止剤の散布量は、気温が 2℃以下で降水量が観測された場合に 30g/m² 散布すること、1 回の散布による溶氷持続時間は 2 時間と仮定して算定した。その結果、毎年 1 月と 2 月に凍結防止剤が多く散布されることが予想されたため、過去 16 年の 1 月と 2 月の降水量と予想された凍結防止剤散布量から外部溶液濃度を 3.8%とした。

2.5 凍結融解試験

養生終了後に全ての供試体の試験面を NaCl 3%wt 水溶液に 5mm まで浸漬して 7 日間の毛管吸水を行った。その後、通電に先立ち 12 サイクルの凍結融解試験を行った。凍結融解試験は供試体の試験面を NaCl 3%wt 水溶液に 5mm まで浸漬させた状態で -20℃の冷凍庫で 7 h、+20℃の乾燥機で 5 h を 1 サイクルとして行った。

2.6 測定項目

(1) スケーリング抵抗性に関する実験

12 サイクルの凍結融解を予め行った後の角柱供試体を使って通電および浸漬を開始した。通電する場合の外部溶液は、凍結防止剤として用いられる塩化ナトリウム(以下 N とする)と塩化カルシウム(C)および比較のため電着効果が良好な塩化マグネシウム²⁾(M)のほか、塩化ナトリウムと塩化マグネシウム(NM)、塩化カルシウムと塩化マグネシウム(CM)を質量比で 1 : 1 に混合した計 5 種類の水溶液とした。また、比較のため無通電で浸漬する供試体は蒸留水(W)に浸漬させた。通電時の電流密度は試験面に対して 0.5A/m² と 1.0A/m² の 2 種類とし、通電および浸漬する期間は 14 日間と 28 日間の 2 種類とした。通電および浸漬後に 2.5 と同様の方法で 28 サイ

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	A E
15	4.0±1.0	50	37	178	356	629	1135	0.125

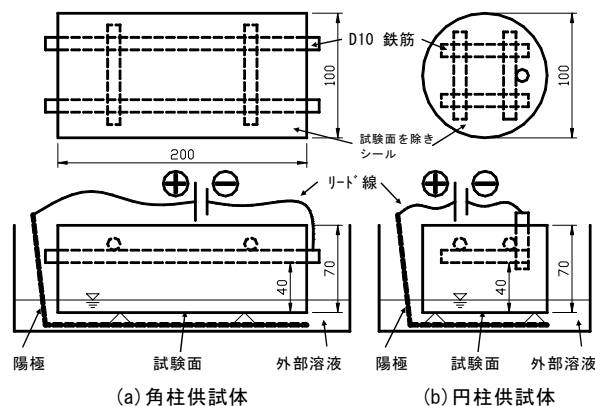


図-1 コンクリート供試体の通電状況

クルの凍結融解を行い、凍結融解 4, 14, 28 サイクル後に採取したスケーリング片を 105±5℃の乾燥機で 24 h 乾燥させてから質量を測定した。なお、スケーリング片には通電により析出した電着物も含まれていたため乾燥後に目視により確認できる電着物を取り除いてから質量の測定を行った。なお、スケーリング片の細孔中にも電着物が含まれることが考えられたが、ごく少量であると考え、補正は行わなかった。

(2) X線回折による分析

12 サイクルの凍結融解後に 28 日間の通電および浸漬を行った円柱供試体の表層部分から試料を採取した。試料はモルタル部分を粉砕後に真空乾燥(20℃, 24h)したものとした。供試体は N および C の外部溶液で 1.0A/m² の電流密度で通電した 2 種類と無通電で W に浸漬したものの計 3 種類とした。

(3) 細孔径分布の測定

12 サイクルの凍結融解後に 28 日間の通電および浸漬した円柱供試体を使用して測定を行った。供試体は N および C の外部溶液で 1.0A/m² の電流密度で通電した 2 種類と無通電で W に浸漬したものの計 3 種類とした。通電および浸漬後に供試体表面部分(表面から 5mm まで)から試験

片を採取して、アセトン浸漬、真空脱気を行い水銀圧入式ポロシメーターにより細孔径分布を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 外部溶液と通電期間の違いによるスケーリング量の変化

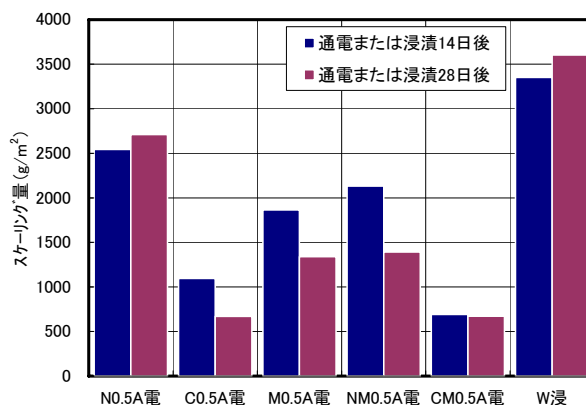
通電および浸漬後に28サイクルの凍結融解を行った供試体の累積スケーリング量を図-2に示した。(a)は $0.5A/m^2$ の電流密度で、(b)は $1.0A/m^2$ の電流密度で通電した場合を無通電の場合と比較したものである。

通電および浸漬を行う前に行った12サイクルの凍結融解によるスケーリング量は、各供試体ともわずか $10g/m^2$ 程度であったが、その後の外部溶液中での通電および浸漬期間のあいだに多くの水分をコンクリート中に取り込み凍害劣化速度が速くなったことが考えられる。しかし、通電を行ったいずれの場合においても、無通電のものよりスケーリング量が少なくなり劣化速度が抑制されたことが分かる。とくに、外部溶液に $CaCl_2$ を含む場合のC電とCM電は、電着効果が高いと考えられたM電よりも良好な結果となった。また、C電、M電、CM電は通電を14日間行った場合よりも28日間行った場合にスケーリング量が減少する傾向にあった。スケーリングが最も抑制された28日間通電したC1.0A電は無通電で28日間浸漬したW浸に比べ82%のスケーリング量を低減できた。

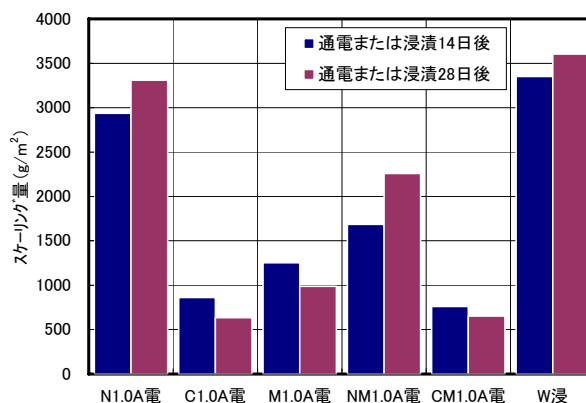
一方、外部溶液にNaClを含む場合のN電とNM電のスケーリングの抑制効果は小さく、28日間通電したN1.0A電と無通電で28日間浸漬したW浸のスケーリング量の違いはわずか8%であった。また、 $0.5A/m^2$ の電流密度で通電したNM電を除き通電期間が長くなるほどスケーリング量が増加した

3.2 電流密度の違いによるスケーリング抵抗性の変化

通電した供試体のうちN電、C電の通電期間および電流密度の違いによるスケーリング量の



(a) $0.5A/m^2$ の電流密度で通電した場合



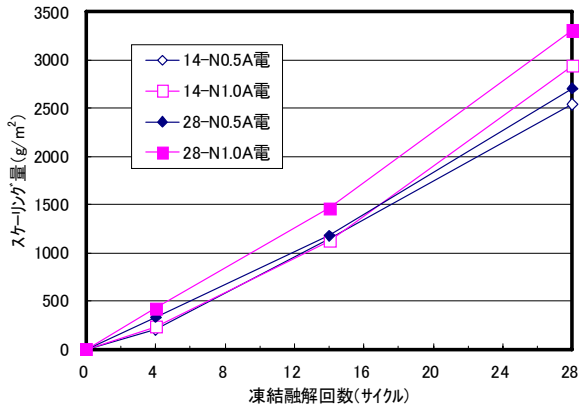
(b) $1.0A/m^2$ の電流密度で通電した場合

※ 両図のW浸は同じ値を示したものである。
通電した供試体を「電」、浸漬(無通電)を「浸」とした。

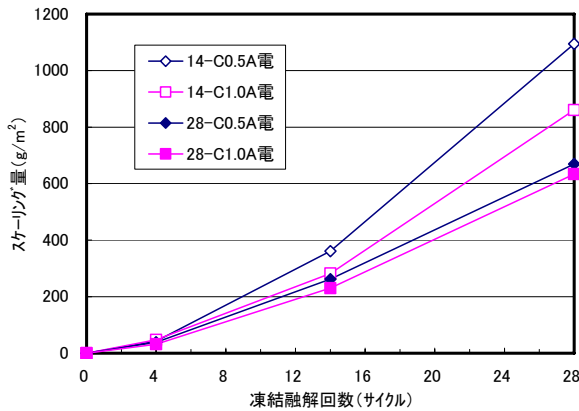
図-2 通電及び浸漬後の供試体のスケーリング量

変化を図-3に示した。

(a)に示したN電はいずれも28サイクルの凍結融解を通してスケーリング量がほぼ直線的に増加しており、低い電流密度で短期間の通電を行った供試体ほどスケーリング量が少なくなった。(b)に示したC電はいずれも4サイクル目まではスケーリング量がほぼ同量であったが、14日間の通電を行った供試体は4サイクル目以降にスケーリング量が大きく増加する結果となった。しかし、28日間の通電を行った供試体は4サイクル目以降のスケーリング量に急激な増加はなく、 $0.5A/m^2$ と $1.0A/m^2$ のいずれの電流密度で通電した場合でもスケーリング量はほぼ同量であった。これらN電とC電のスケーリング抵抗性の差異についての考察は後述する。



(a) 外部溶液に N を使用した場合 (N 電)



(b) 外部溶液に C を使用した場合 (C 電)

※ 凡例の数値は通電期間と電流密度を示したものである。

図-3 通電後の供試体のスケーリング量の変化

なお、スケーリング抵抗性が良好であった C を使用して 28 日間の通電を行う場合には、 $0.5A/m^2$ と $1.0A/m^2$ のいずれの電流密度でもスケーリングの抑制効果は同程度であると考えられた。しかし、高い電流密度ほどコンクリート中の塩化物イオンの脱塩効率が高くなる⁴⁾ことから、脱塩処理も期待する場合には $1.0A/m^2$ の電流密度での通電が望ましいと考えられる。

3.3 通電後の供試体試験面の観察

各外部溶液で 28 日間、 $1.0A/m^2$ の電流密度で通電した供試体試験面の観察結果を表-2 にまとめた。

外部溶液の違いにより通電後の供試体試験面はそれぞれ異なる外観を示した。N で通電した場合は、電着物の析出はみられず、逆に通電前に比べて表面が化学的な侵食を受けたような骨

表-2 通電後の供試体試験面の状況

	通電後の供試体表面の状況	通電後の供試体の全景写真	供試体表面の顕微鏡写真 (×20)
28-N1.0A電	電着物による被覆はみられず、微細なひび割れや骨材の露出が目立つ。		
28-C1.0A電	白色の電着物がごくわずかにみられる程度であったが、その他の部分でも薄くコーティングがされていた。ひび割れはみられなかった。		
28-M1.0A電	白色の電着物により全体的に被覆されていたが、電着物がない部分では微細なひび割れが多くみられた。		
28-NM1.0A電	白色の電着物により試験面の半分程度が被覆されていた。電着物のない部分では、微細なひび割れや骨材の露出が多くみられた。		
28-CM1.0A電	白色の電着物により全体的に被覆されており、電着物がない部分でも薄くコーティングがされていた。ひび割れはみられなかった。		

材の露出がみられた。また、表面には微細なひび割れもみられた。C で通電した場合は、電着物による表面の被覆はごくわずかであったが、電着物の析出がない部分でも薄くコーティングがされており、ひび割れもみられなかった。M で通電した場合は、ほぼ全面的に白色の電着物で試験面が被覆された。しかし、電着物の被覆がない部分では微細なひび割れが多くみられた。NM で通電した場合は、白色の電着物で試験面の半分程度が被覆されていたが、電着物による被覆がない部分では N と同様に骨材の露出や微細なひび割れがみられた。CM で通電した場合は、M で通電した場合と同様に試験面のほぼ全面が電着物によって被覆された。また、電着物の被覆がない部分でも C で通電した場合と同様に薄くコーティングがされており、ひび割れもみられなかった。なお、無通電の供試体試験面には、上述したようなひび割れは観測されなかった。

これらの通電後の供試体試験面の外観と図-2(b)に示した通電後の供試体のスケーリング量との関係から、通電後に微細なひび割れが見られなかったC電とCM電がスケーリングの抑制効果が高くなるという関係が見いだせるが、Cを含む外部溶液で通電した場合に限って微細なひび割れが見られなかった要因の特定については引き続き検討したい。

スケーリングの劣化形態の観察より、N電は凍結融解回数とともに試験面の全面において徐々にスケーリングが進行した。これは無通電のW浸と同様な劣化形態であったが、その他の通電後の供試体はコンクリート表面間近にある粗骨材とモルタルとの遷移帯から剥離するような劣化形態を示した。このような劣化がみられた部分は表面から粗骨材までの距離がとくに短く、電着物の析出も少ないところであった。

3.4 コンクリート表層部分のX線回折による成分分析

1.0A/m²の電流密度において28日間通電したN電とC電、無通電で28日間浸漬したW浸の供試体表層部分のX線回折結果を図-4に示した。

28-W浸ではCa(OH)₂のピーク強度が小さく、やや大きなNa₂Oのピーク強度が確認された。これは、浸漬を開始する前に行ったNaCl水溶液での毛管吸水(浸漬)と12サイクルの凍結融解によりCa(OH)₂が溶出したためと考えられるが、Na₂Oが生成した過程については定かではない。一方、28-N1.0A電はCa(OH)₂のピーク強度は小さいままであったが、Na₂Oが大きなピーク強度で確認された。また、28-C1.0A電でははっきりとしたCa(OH)₂のピーク強度が確認された。電着物は外部溶液中の陽イオンと、カソード反応などによって生じる水酸化物イオンとの反応により生成される⁵⁾と考えられており、Nを外部溶液として通電した場合には、無通電の場合とは別にNa₂Oがコンクリート中に電着物として生成し、Cを外部溶液として通電した場合にはCa(OH)₂が電着物として生成したことが考えられる。それらの反応式を下記に示す。

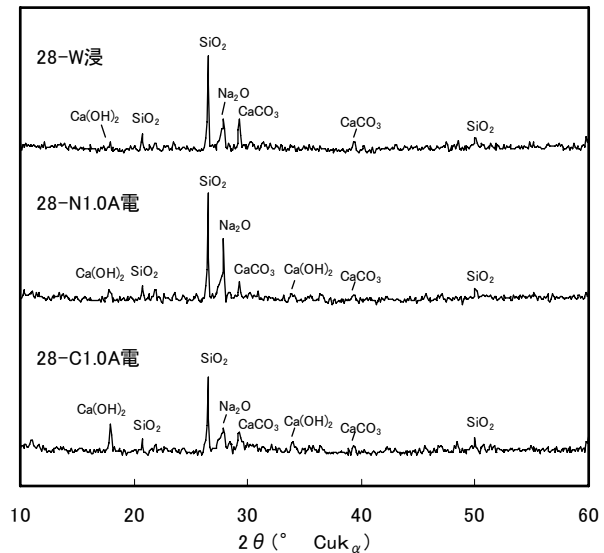
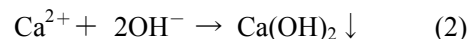
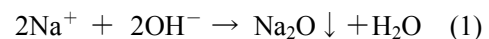


図-4 通電及び浸漬後の供試体表層部分のX線回折結果



また、(1)式より、Nを外部溶液として通電した場合にはNa₂Oとともに水が生成されるが、(2)式より、Cを外部溶液として通電した場合には水は生成されない。さらに、通電時にはカソード反応によってコンクリート内部の水が分解されることから、C電は通電による含水率の低下で凍害を受けにくくなることが考えられる。

3.5 コンクリート表層部分の細孔径分布

1.0A/m²の電流密度で28日間通電したN電およびC電、28日間無通電で浸漬したW浸の供試体表層部分の細孔径分布を図-5に示した。

28-N1.0A電および28-C1.0A電のいずれも28-W浸に比べて、細孔容積がほとんどの細孔径において小さくなった。これは、通電することでコンクリートの細孔が電着物によって充填されたためと考えられ、先に述べたように外観では電着物による被覆がなかったNやCで通電した場合においても、コンクリートの内部では電着物の析出によって緻密になったことを示している。また、細孔容積が小さくなることは細孔内にある凍結可能な水が減少することでもあるため、本実験で通電した供試体のスケーリングの抑制には細孔容積の減少が大きく影響したも

のと考えられる。しかし、Nで通電した28-N1.0A電は、Cで通電した28-C1.0A電と同等に細孔容積が小さくなったにもかかわらずスケーリングの抑制効果が小さかった。この現象を考察すると、Cで通電した場合には電着物として水に難溶である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が析出するのに対して、Nで通電した場合には水と反応しやすい Na_2O が析出することが考えられた。この Na_2O は水と反応することで NaOH として外部溶液に溶出され、この現象により Na_2O によって充填されていた細孔は再度大きな容積をもつことになったと考えられる。さらに、通電後の供試体表層部分が侵食された外観がみられたのは、この溶出した NaOH の高いアルカリ性が影響したことも考えられる。とくに、Nを含む外部溶液で長期間通電した場合や高い電流密度で通電した場合には、 NaOH の生成量が多くなりスケーリングの抑制効果が低下したものと考えられる。

4. まとめ

凍結防止剤を含む外部溶液を使用して電着工法を行うことによるスケーリング抑制効果の検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) CaCl_2 を含む外部溶液で通電した場合にはスケーリングを大きく抑制でき、28日間通電した場合には無通電のものに比べ最大で82%のスケーリングを低減できた。この要因に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出によって表層部分が緻密になったことが考えられた。
- (2) NaCl を含む外部溶液で通電した場合にはスケーリングの抑制効果が小さく、これは水に溶けやすい Na_2O の析出と表層部分が侵食されたことが要因であると考えられた。

なお、スケーリングの抑制効果が良好であった CaCl_2 を含む外部溶液で通電した場合でも、コンクリート表面への電着物の析出はわずかであった。そのため、従来の電着工法の使用用途である電着物によるひび割れ閉塞効果を期待する場合には水に不溶性の電着物が析出する外部溶液を混合することが有効であると考えられるが、

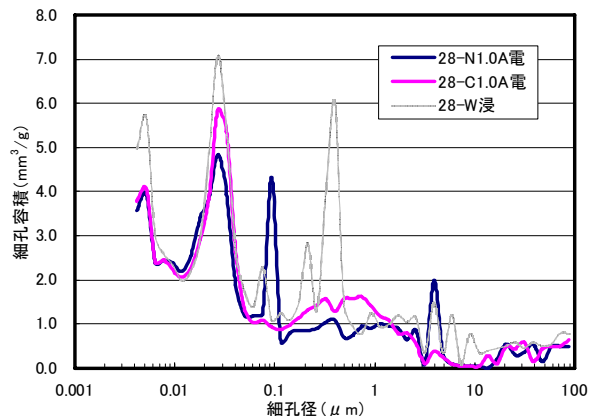


図-5 通電及び浸漬後の供試体表層部分の細孔径分布

電着物によりコンクリートの美観が損なわれることも考慮する必要があると考えられる。

謝辞

細孔径分布を測定するにあたり東北電力株式会社研究開発センター電源技術グループの皆様にご多大なるご協力を頂きました。付記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)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，pp.24-31，1999.11
- 2) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107，pp.184-185，2005.11
- 3) 西田孝弘ほか：既存陸上鉄筋コンクリート部材を用いた電着工法のひび割れ補修に対する適用性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1443-1448，2002.7
- 4) 長滝重義ほか：コンクリート中のイオンの通電泳動に関する研究，土木学会論文集，No.520，V-28，pp.77-86，1995.8
- 5) 大即信明ほか：陸上鉄筋コンクリートのひび割れ補修に対する電着機構の解明と最適な電着条件の選定，材料，Vol.51，No.5，pp.573-580，2002.5