

論文 電着工法によるモルタルの耐凍害性向上に関する研究

大谷 俊介^{*1}・外門 正直^{*2}

要旨：凍害と塩害による複合劣化が生じたコンクリートの補修を目的として電着工法を施したモルタル供試体の耐凍害性を検討した。実験では、外部溶液濃度と日数を変化させて通電を行った。その結果、通電を行った供試体は無通電のものより耐久性指数とスケーリング抵抗性が向上する傾向があり、外部溶液濃度を変化させることで供試体の耐凍害性が異なることが分かった。その要因として通電後の供試体の細孔径分布の変化や含水率の低下、塩分浸透の抑制が影響していることが考えられたが、通電による吸水率の低下と引張強度の向上に対する効果は見出せなかった。

キーワード：電着工法，溶液濃度，通電日数，耐久性指数，スケーリング率

1. はじめに

寒冷地域におけるコンクリートは、内部の水分が凍結と融解を繰り返すことで組織の破壊や表面剥離といった凍害劣化が生じる。また、凍結防止剤の浸透と凍結融解が複合して作用する場合にはスケーリングが顕著となり、凍結防止剤中の塩化物イオンがコンクリートに浸透することで鉄筋腐食の原因にもなっている。このようなスケーリングと鉄筋腐食の複合劣化が生じた場合には補修が大掛かりとなるものが多く、数多く存在するコンクリート構造物の延命のためには劣化が顕在化する前に軽微な補修により改善を図ることが望ましいと考える。

そこで本研究では、コンクリートの凍害と塩害の複合劣化を補修、予防することを目的として、主にコンクリート表面の被覆に用いられる電着工法の有効性を検討した。電着工法は、コンクリート中に浸透した塩化物イオンを除去もしくは低減させる効果も期待でき、塩害等により不動態が破壊された鉄筋を再不動態化させることも報告されている¹⁾。そのため、電着工法は塩害に対して有効であると考え、本実験では電着工法を施した供試体の耐凍害性についての検討を行った。

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。細骨材は鶴巣太平産の山砂（密度：2.56 g/cm³，吸水率：2.16%）を使用した。鉄筋はSD295A D10 を使用した。モルタルの配合はW/C=0.5，S/C=2.25とした。

2.2 供試体

4cm×4cm×8cm のモルタル角柱供試体とφ5cm×10cm のモルタル円柱供試体とし、供試体上面から2cm 突き出すように中央にそれぞれ長さ10cmと12cmのD10の鉄筋を配置した。打設後2日で脱型して材齢28日まで水中養生(20°C±3°C)を行った。養生後に鉄筋の端部にリード線をハンダ付けして供試体の上下面と鉄筋部分を塩化ビニル樹脂でシールした。その後、恒温恒湿室(20°C、60%RH)にて2日間の静置を行った。

2.3 通電方法

通電方法を図-1に示した。塩化ビニル製の容器を使用し、陽極材はチタンメッシュを組み合わせ作製した。供試体を陽極材の中央に設置して、供試体が全浸するまで外部溶液を満たした。外部溶液は電着効果が高いMgCl₂水溶液²⁾を使用した。直流安定化電源の陽極を陽極材（チ

*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)

タンメッシュ)に、供試体の鉄筋を直流安定化電源の陰極に接続して通電を行った。

2.4 通電, 浸漬条件

通電および浸漬は下記の条件により行った。

表-1 に供試体の分類表を示した。

(1) MgCl₂水溶液での通電

外部溶液の濃度をMgCl₂ 0.1, 0.5, 1.0mol/lの3種類として、それぞれ7, 14, 28日間の通電を行った。電流密度は供試体表面積に対して1.0A/m²とした。

(2) MgCl₂水溶液及びイオン交換水での浸漬

通電したのと同じ濃度のMgCl₂水溶液とイオン交換水に7, 14, 28日間浸漬した。浸漬方法は通電した場合と同様に塩化ビニル製の容器に入れ供試体が全浸するまで液体で満たした。

2.5 測定項目

本研究の実験フローを図-2 に示した。

(1) 凍結融解試験

通電, 浸漬後の供試体をコンクリートの凍結融解試験方法 (JIS A 1148:2001) に準じて試験を行った。ゴム製容器1本には供試体を12本ずつ入れ, 凍結融解30サイクル毎にたわみ振動の一次共鳴振動数を測定した。なお, 30サイクル毎にゴム製容器内の供試体の位置を置き換えた。また, 一次共鳴振動数の測定は供試体の相対動弾性係数が60%以下になった時点で終了した。相対動弾性係数, 耐久性指数の計算は JIS A 1148:2001 に準じて行った。

(2) スケーリング試験

供試体の打設時に型枠側面となる1面を試験対象面としてNaCl 3%wt水溶液に5mm浸漬させて凍結融解を繰り返した。試験方法はRILEMのCDF法を準用し, 28サイクルまで凍結融解を行った。スケーリングに対する抵抗性を評価するため, 電着物による供試体表面への析出状況とスケーリング状況の観測から電着物被覆率とスケーリング率を求めた。電着物被覆率は通電7日おきと凍結融解4サイクルおきに, スケーリング率は凍結融解4サイクルおきにトレースして測定した。電着物被覆率は供試体1面に対す

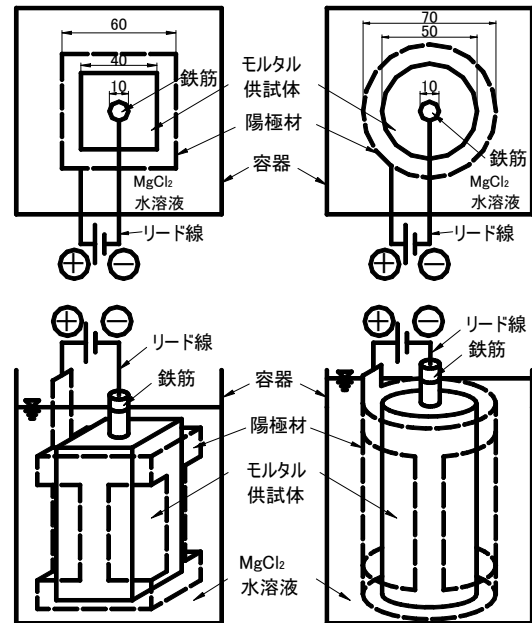


図-1 通電方法

表-1 供試体の分類表

通電日数 (日) による分類			溶液濃度 (mol/l) による分類			通電, 浸漬による分類	
7	14	28	0.1M	0.5M	1.0M	通電	浸漬
						電	浸

※イオン交換水に浸漬した供試体はW浸とした。

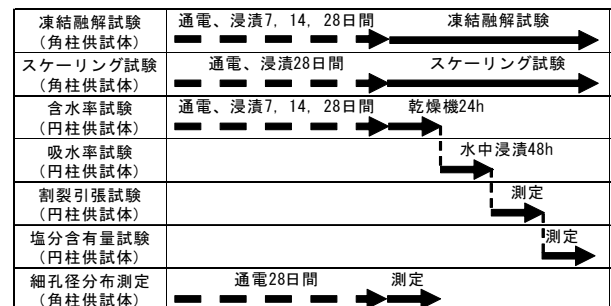


図-2 実験フロー

る電着物が析出した面積を, スケーリング率は供試体1面に対するスケーリングした面積をそれぞれ百分率で表した。なお, 両式の供試体1面とは同一面である。

(3) 含水率及び吸水率の測定

通電後の供試体表面の電着物をへらで削り凹凸をなくした後に105±5℃の乾燥機で24時間乾燥させ含水率を求めた。なお, 削り取った電着物も乾燥させ含水率を求めた。吸水率は, 乾燥後の供試体を20±5℃の水中に48時間浸漬し求めた。

(4) 引張強度

吸水率測定後の供試体を割裂引張強度試験により引張強度を求めた。

(5) 塩分含有量の測定

引張試験後の供試体の表面から約 5mm の位置から約 15mm のところまで直径 2.5mm のドリルにより数箇所削孔し 5g の試料を採取した。採取した試料を 40g の蒸留水で攪拌しろ過した液体を電量適定法により塩分含有量を測定した。

(6) 細孔径分布の測定

通電 28 日後の供試体の表面部分（表面から 0.5cm まで）をカッターにより切断しアセトン浸漬、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 耐久性指数と通電、浸漬日数の関係

溶液濃度を変化させて通電、浸漬した供試体の耐久性指数と通電日数の関係を図-3 に示した。

通電 7 日間の供試体は浸漬のみ行ったものと比べ耐久性指数が高くなり、通電 14 日間ではさらに耐久性指数が増加した。また、通電 7 日間および 14 日間の供試体は溶液濃度の違いにより耐久性指数に大きな違いはみられなかったが、通電 28 日間の供試体の耐久性指数は溶液濃度により大きく違いが生じた。0.1M電は通電 14 日間のものに比べて大きく増加したが、0.5M電がわずかに減少し、1.0M電にいたっては大きく減少した。これより、 $1.0A/m^2$ の電流密度で通電する場合、溶液濃度が高いものほど通電 14 日目以降の耐久性指数が低下する傾向を示し、逆に濃度が低いものほど通電日数とともに耐久性指数が増加する傾向があることが考えられた。しかし、通電 28 日間の 0.1M電が最も大きな耐久性指数となったことから、今後は溶液濃度を $0.1mol/l$ よりさらに低くして通電した場合の耐凍害性についても検討する必要があるものと思われる。

3.2 通電及び浸漬供試体のスケーリング性状

通電期間とスケーリング試験期間の電着物被覆率の変化を図-4 に示した。通電中の電着物に

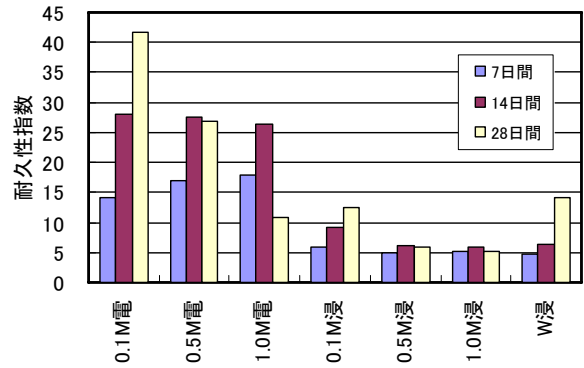


図-3 通電、浸漬日数と耐久性指数の関係

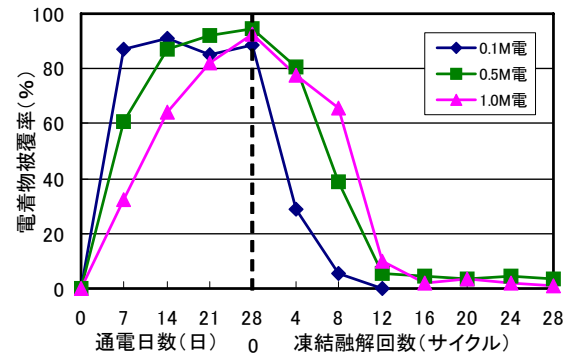


図-4 電着物被覆率の変化

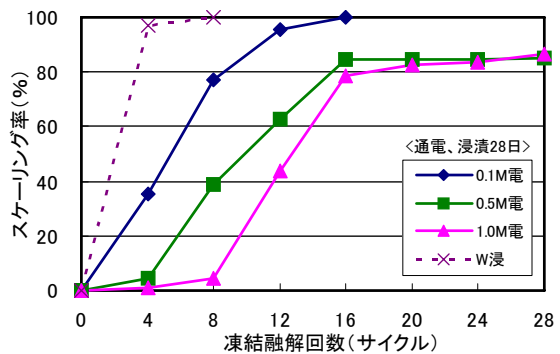


図-5 スケーリング率の変化

よる被覆の早さは溶液濃度により違いがあり、溶液濃度が低いものほど早期に高い電着物被覆率となった。また、凍結融解中では溶液濃度が高いものほど電着物被覆率の低下が抑制される傾向にあり、0.5M電と1.0M電の電着物は28サイクル後にもわずかに残っていた。このことから、ある濃度以上の溶液で通電した場合に電着物の耐凍害性が高くなることが考えられる。

通電および浸漬 28 日後のモルタル供試体表面のスケーリング率を図-5 に示した。通電した供試体はイオン交換水に浸漬のみ行った供試体よ

りもスケーリング率の増加が抑制された。これより、通電によりスケーリング抵抗性が向上したことが分かる。また、スケーリング抵抗性が高くなった 0.5M 電と 1.0M 電の電着物は、図-4 に示したように凍結融解作用により剥がれ落ちにくいと思われるものであった。そのため、供試体表面に被覆されている電着物が凍結融解作用で剥がれ落ちにくいものほど供試体のスケーリング抵抗性が向上することが考えられる。

3.3 耐久性指数とスケーリング抵抗性の関係

図-3 および図-5 より、通電 28 日間の供試体を溶液濃度別に比較した場合、高い濃度の溶液で通電することで供試体の耐久性指数は小さくなったが、スケーリング抵抗性は良好となった。また、低い濃度の溶液で通電することで耐久性指数は大きくなったが、スケーリング抵抗性が低くなる傾向にあった。そこで、通電 28 日後の 0.1M 電と 1.0M 電の供試体表層部の細孔径分布の変化を図-6 に示した。溶液濃度が高い 1.0M 電が低い 0.1M 電に比べ細孔が細くなり、より緻密化されたことがわかる。これより、高い濃度の溶液で通電した供試体のスケーリング抵抗性が良好となったのは、表層部の緻密化が主な要因であることが考えられる。しかし、一般的に表層部が緻密になることで耐久性指数が向上することが考えられる。そのため、通電 28 日の 1.0M 電の耐久性指数が低下する要因については通電により負の作用があったことが考えられる。今後も検討していくことで明らかにしたい。

3.4 通電による供試体の性質変化

通電した供試体の耐久性指数およびスケーリング抵抗性が浸漬のみ行った供試体に比べ向上したのは、通電による供試体内部の水分量の減少、通電による供試体強度の向上、通電による塩分浸透の抑制の主に 3 つの要因が考えられる。そのため、通電、浸漬後の供試体の含水率、吸水率、引張強度、塩分含有量を測定した。

(1) 含水率及び吸水率の変化

コンクリートの凍害劣化は内部の水分が凍結することにより生じることから、凍結する恐れ

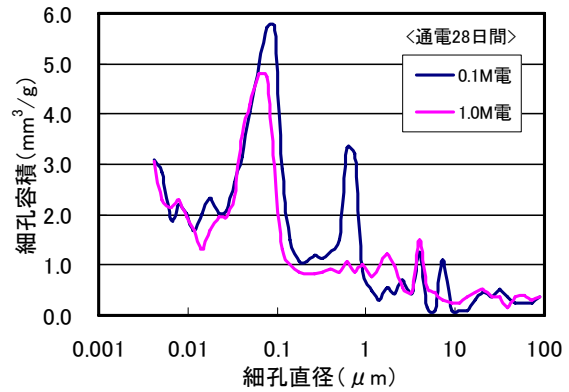


図-6 通電後の細孔径分布の変化

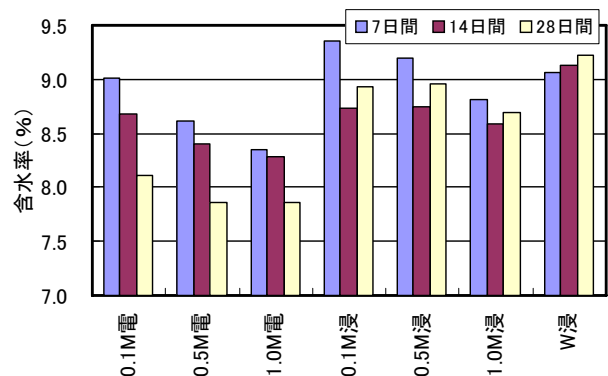


図-7 通電、浸漬後の含水率

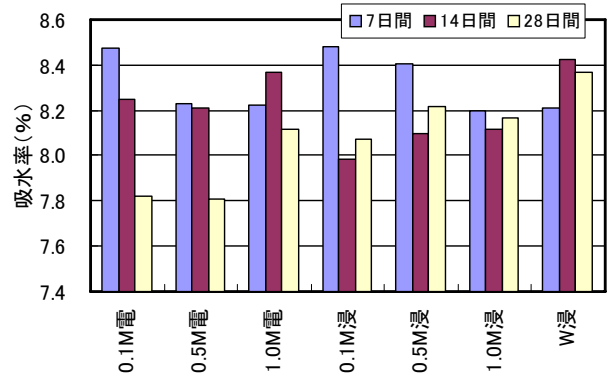


図-8 通電、浸漬後の吸水率

のある水分を低減させることは劣化予防に対して有効である。そこで、図-7 に通電、浸漬後の供試体の含水率を、図-8 に通電、浸漬後の供試体の吸水率を示した。

通電した供試体は、浸漬したものに比べ含水率が低下したことがわかる (図-7)。これは、通電により供試体内部の水が電気化学的に分離されたためと考えられ、溶液濃度が高いものほど、通電期間が長くなるほど低下する傾向があった。しかし、通電 28 日の 0.1M 電と 0.5M 電の吸水率

が低下したほかは、通電による吸水率の低下は小さかった(図-8)。細孔径分布の変化を示した図-6より通電28日間で1.0M電は0.1M電に比べ緻密になった。そのため、1.0M電の吸水率が最も小さくなるものと思われたが、浸漬した供試体に比べても同程度の吸水率であった。供試体表面の凹凸をなくすために削り取った電着物の含水率は0.1M電が8.2%、0.5M電が8.8%、1.0M電が64.8%であり、1.0M電の電着物だけが高度な保水性があった。そのため、1.0M電の吸水率が大きかったのは供試体表面を被覆している電着物が影響したことも考えられる。

(2) 引張強度の変化による影響

凍結水による膨張圧がコンクリートの引張強度より大きくなることで損傷が生じる。そのため、コンクリートの引張強度が大きなものほど耐凍害性が高くなることが考えられる。そこで、通電、浸漬後の供試体の引張強度を測定し結果を図-9に示した。なお、本実験での測定値は、内部鉄筋および通電による鉄筋とモルタルの付着力変化³⁾の影響等については考慮していない。

本実験での引張強度の測定値はばらつきがあり、通電、浸漬した供試体ともに日数と強度の関係に一貫性はみられなかった。しかし、通電した供試体は浸漬したものに比べて引張強度が小さくなる傾向があった。電着工法の強度に関する既往の研究⁴⁾では、 $MgCl_2$ 0.1mol/lでの24時間の通電で無通電のものより曲げ強度を増加させる効果があることが示されていたが、本実験では通電による強度増進の効果は見出せなかった。

(3) 塩分含有量の変化による影響

コンクリート中に塩分を含有することで内部鉄筋の腐食ばかりでなく、凍害劣化を助長する。しかし、電着工法で使用される外部溶液は塩分を含むものが多く、本実験で使用した $MgCl_2$ 水溶液も塩分を含んでいる。そのため、通電、浸漬後の供試体の塩分含有量を測定し結果を図-10に示した。

通電したいずれの供試体も、 $MgCl_2$ 水溶液に浸

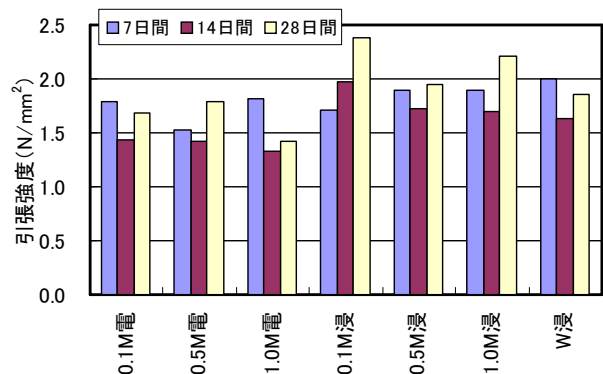


図-9 通電、浸漬後の引張強度

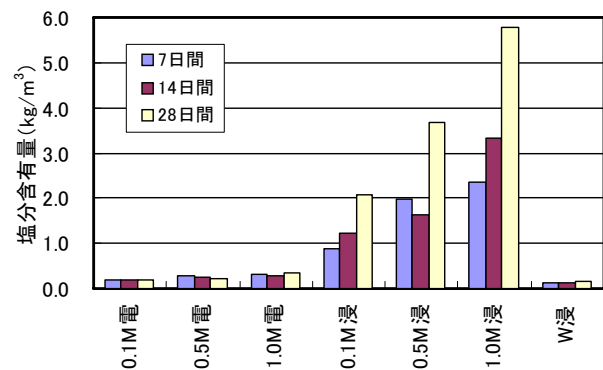


図-10 通電、浸漬後の塩分含有量

漬した供試体に比べ塩分の浸透を大きく抑制しており、その塩分含有量はイオン交換水に浸漬したW浸と同程度であった。また、浸漬した供試体は浸漬日数とともに塩分含有量が増加する傾向にあったが、通電した供試体はほとんど変化しなかった。これは、通電開始当初から塩分の浸透を抑制したためと考えられる。なお、本実験では塩分含有量の測定前にイオン交換水に48時間浸漬したために測定値が小さくなったことが考えられるが、 $MgCl_2$ 1.0mol/l程度までの溶液濃度では鉄筋の腐食限界値⁵⁾1.2kg/m³以下の塩分含有量になるものと考えられる。

3.5 電着効果と耐凍害性の関係

通電した供試体が浸漬した供試体に比べ耐凍害性が向上した要因として、本実験では含水率の低下および塩分浸透の抑制が主に関連していることが考えられた。そこで、耐久性指数と含水率および塩分含有量の関係をそれぞれ図-11、図-12に示した。

耐久性指数と含水率の関係は、ばらつきがあるものの概ね含水率が小さい供試体ほど耐久性

指数が大きくなる傾向を示した(図-11)。また、W 浸(グラフでは×で表示)を除き塩分含有量が小さいものほど耐久性指数が高くなる傾向を示した(図-12)。これらから、通電した供試体が浸漬した供試体より耐久性指数が向上する要因として含水率の低下や塩分含有量の抑制等が影響したためと考えられる。しかし、電着工法は表面被覆効果により水密性が高くなるとされているが、本実験では通電した供試体の吸水率が大きく低下することはなかった。この原因は、析出した電着物の保水性による影響のほかにも、高温で乾燥させたために供試体にマイクロクラックが発生し吸水率およびその後実施した引張強度試験に影響を及ぼしたことなども考えられる。そのため、今後は試験の方法も含めさらに検討していきたいと考える。

4. まとめ

本研究では、W/C=0.5, S/C=2.25 のモルタル供試体をMgCl₂水溶液中で通電し、溶液濃度および通電日数を変化させた場合の耐凍害性について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 通電した供試体は浸漬したものより耐久性指数が高くなり、スケーリング抵抗性が向上する傾向にあった。
- (2) 通電 28 日間の供試体を比較した場合、高い濃度の溶液で通電した供試体はスケーリング抵抗性が高くなったが、耐久性指数が小さくなった。また、低い濃度の溶液で通電した供試体はスケーリング抵抗性が小さくなったが、耐久性指数が高くなった。
- (3) 高い濃度の溶液で通電した供試体ほどスケーリング抵抗性が向上した要因として細孔が細かくなったことが考えられた。
- (4) 通電した供試体が浸漬したものより耐凍害性が向上した要因として、通電による供試体の含水率の低下と塩分浸透の抑制が関連することが考えられた。しかし、本実験では通電による供試体の吸水率低下と引張強度向上に対する効果は見出せなかった。

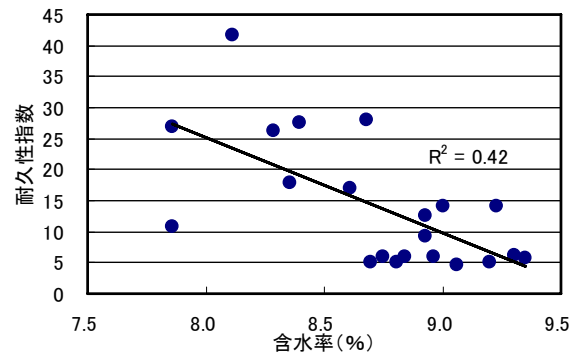


図-11 耐久性指数と含水率の関係

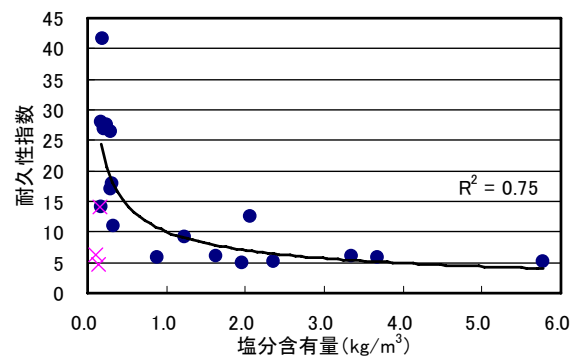


図-12 耐久性指数と塩分含有量の関係

謝辞

本研究を行うにあたりご指導いただきました東北電力株式会社の大高昌彦様、宮城工業高等専門学校伊藤憲雄様、森弘則様に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 大即信明ほか: 鉄筋コンクリートに対する電着工法の有効性に関する実験的検討, コンクリート工学論文集, 第11巻第1号, pp. 85-92, 2000. 1
- 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, 2005
- 3) 上田隆雄ほか: デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響, 土木学会論文集, No. 550, V-33, pp. 53-62, 1996. 11
- 4) 平山周一ほか: 通電による鉄筋コンクリートのひび割れ閉塞のフィジタビリティ・スタディ, 土木学会第52回年次学術講演会, pp. 332~333, 1996. 9
- 5) 土木学会: 平成11年版 コンクリート標準示方書 耐久性照査型 施工編, 2001