

論文 コンクリートの諸要因および含有塩分量が鉄筋腐食に与える影響

片山 真^{*1}・鷺見 高典^{*2}・梅原 秀哲^{*3}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリートの潜在的な欠陥になることがある水セメント比、かぶりおよび含有塩分量が異なる供試体を作製し、凍結防止剤と雨水を模擬した塩水と水道水の散布を繰り返し、コンクリート中の鉄筋の自然電位を測定するとともに、鉄筋の腐食面積を計測し、コンクリートの諸要因と含有塩分量が鉄筋腐食と自然電位の関係に与える影響について考察した。その結果、塩水の散布や含有塩分量は自然電位の測定に影響を与え、コンクリートの諸要因によっては、材齢 1 年程度で自然電位が -450mVvsCSE 程度よりも卑になると、腐食面積率が 5%以上となる傾向が得られた。

キーワード：凍結防止剤、配合、かぶり、含有塩分量、自然電位、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、海水の飛沫や飛来塩などによりコンクリート中の鉄筋が腐食し、ひび割れの発生、かぶり部分のはく離・はく落などの変状が多数報告されている。海からの飛来塩の影響を受けない内陸部のコンクリート構造物でも、冬期路面管理のために散布される塩化物系の凍結防止剤が、鉄筋腐食を招く劣化要因として懸念されている¹⁾。これら塩害は、通常、変状が認められた時点で既に多くの塩化物イオンがコンクリート中に浸透しており、ひび割れやはく落部から酸素や水分が鉄筋に供給されやすくなり、鉄筋腐食の進行が加速される特徴がある。また、塩害により劣化が進行したコンクリート構造物を修繕するには、多大な費用を必要とするとともに、構造物の使用の制限など地域社会に悪影響をもたらす。このため、塩害が疑われる構造物を早期に発見し、鉄筋腐食が進行する前に予防維持管理することが、恒久的に構造物を活用するためには重要である。

コンクリート中の鉄筋腐食を診断する方法として、電気化学的方法のひとつである自然電位法が広く用いられている。これは、調査時点での鉄筋腐食の可能性について診断するもので、構造物内で鉄筋腐食の可能性が高い箇所を見つけ出すために用いられており、鉄筋腐食によりかぶり部分にひび割れが発生するまでの、初期の段階での診断に有効である²⁾とされている。

このようなことから、本研究では道路管理者が冬期路面管理のために散布する凍結防止剤による鉄筋腐食の影響に着目し、コンクリート構造物の潜在的な欠陥になることがある水セメント比、かぶり、塩化ナトリウムの混入量がそれぞれ異なる供試体を作製し、塩害を招く一因の凍結防止剤を模擬した塩水と、雨水を模擬した水道水（以下「水」という）の散布を繰り返した場合の鉄筋腐

食の進行を観察するために自然電位を測定した。また、観察を開始して 1 年程度経過した時点で鉄筋を取り出して腐食面積を求め、コンクリートの諸要因および塩化ナトリウムの浸透が鉄筋腐食と自然電位の関係に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験に使用した供試体

実験に用いた供試体の寸法は、供試体の作製、散水および自然電位の測定を考慮し、図-1 に示すように $15\times 15\times 40\text{cm}$ の角柱とし、成型面に付着したグリスの影響を排除するため、打設面を測定面とした。平成 8 年制定のコンクリート標準示方書施工編³⁾より使用されるコンクリートの W/C は 55%であることからこれを標準とし、比較のために 45%および 65%を選定した。これらの W/C によるコンクリートの配合を表-1 に示す。また、供試体の配合に用いた材料について表-2 に示す。

鉄筋のかぶりは道路橋示方書IV下部構造編⁴⁾の柱・壁の鉄筋のかぶりを参考に 4cm、7cm およびこれよりもかぶりが少ない場合として 2cm の 3 タイプとした。また、

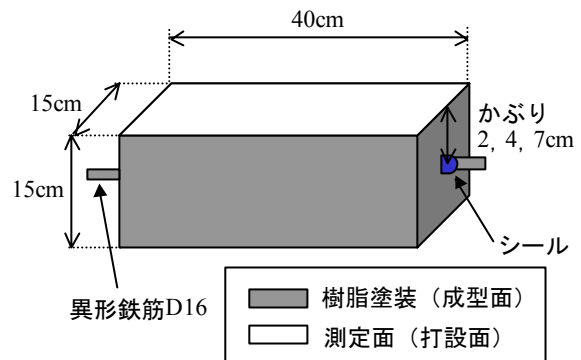


図-1 供試体の寸法

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻 (正会員)

*2 名古屋高速道路公社 保全施設部 保全課 工修 (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 教授 Ph.D. (正会員)

コンクリートに塩化物イオンが混入あるいは浸透した状態をつくるために、練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入した。塩化ナトリウムの混入量は、コンクリート中の鋼材に腐食が発生する塩化物イオン濃度は 1.2kg/m^3 であり、鋼材位置で 2.5 kg/m^3 程度以上であれば補修を行うのが望ましい⁵⁾と示されていることから、 1.2kg/m^3 、 2.5kg/m^3 および 0 kg/m^3 の3タイプとした。これらの W/C、かぶりおよび塩化ナトリウム混入量の3種類の要因を組み合わせ、計 27 種類の供試体を作製した。鉄筋はコンクリート高欄や床版に標準的に使用される D16 の異形鉄筋とした。これら供試体作製時の細目を表-3 に示す。

これらの供試体は、実構造物のおかれている状況を想定し、塩水および水の散布とともに乾湿を繰り返させるために屋外に静置した。また、塩水と水を散布せず、屋内に静置して乾湿の影響を与えない供試体として、W/C が 55%、かぶりが 4cm および塩化ナトリウムの混入量が上記の3タイプの3種類の供試体を更に作製し、乾湿を繰り返す供試体との比較を行なうものとした。

供試体の表面は、塩化物イオンや水の浸入経路を一方からとするため、塩水および水の散布開始前（養生終了後 3 週間経過時）に、かぶりを想定する面以外と突出している鉄筋にはアクリル樹脂系の塗料で塗装するとともに、自然電位を測定するために突出させた鉄筋とコンクリートの境目の部分には、塩化物イオンや水の浸入を防ぐためにシリコン系の樹脂でシールを施した。

供試体を識別するために、W/C、かぶり、練混ぜ時の塩化ナトリウム混入量の順に「-」でつなぎ表記するものとした。例えば、55-4-1.2 の供試体は、W/C が 55%、かぶりが 4cm、練混ぜ時の塩化ナトリウム混入量が 1.2 kg/m^3 であることを示す。

2.2 養生方法および塩水と水の散布方法

供試体は、打設して 24 時間程度経過時に脱型し、14 日間の封緘養生を行った。その後、雨水がかからない屋外に静置し、自然電位および鉄筋腐食に与える凍結防止剤および雨水による乾湿の繰返しの影響を明らかにするために、凍結防止剤を模擬した塩水および雨水の代替とした水を散布した。また、比較のために屋内に 55-4-0、55-4-1.2 および 55-4-2.5 の供試体を静置し、塩水および水は散布しないものとした。塩水および水の散布期間を表-4 に示す。

まず、塩水は養生終了後 1 ヶ月経過時から 4 ヶ月間、週 1 回 20%濃度の塩水を 0.1 リットル/m^2 、計 16 回散布した。これは、塩化ナトリウム溶液を凍結防止剤に使用する場合には、大きな氷点降下が得られるほぼ飽和状態の 20%濃度として使用することが多く、名古屋高速道路の冬期路面の維持管理ではこれを 0.1 リットル/m^2 散布しており、散布期間が原則として 12 月 1 日～3 月 20 日

表-1 供試体の配合

W/C (%)	セメント (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	混和剤 (g/m^3)
45	367	165	773	1008	73
55	300	165	797	1039	60
65	254	165	814	1061	51

表-2 供試体の作製に使用した材料

使用材料	規格
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	山砂（瀬戸産）
粗骨材	砕砂（瀬戸産）
混和剤	A E 減水剤
塩化物	塩化ナトリウム
練混ぜ水	水
鉄筋	D16（SD295）

表-3 供試体の細目

分類	塩水・水の散布（屋外静置）	散布なし（屋内静置）
W/C (%)	45, 55, 65	55
かぶり (cm)	2, 4, 7	4
塩化ナトリウム (kg/m^3)	0, 1.2, 2.5	
鉄筋	D16	

表-4 塩水および水の散布期間

養生終了後(日)		0	100	200	300	400
屋外静置	塩水					
	水					
室内静置	塩水	散布なし				
	水	散布なし				

あり、1999 年から 2004 年の年間平均散布回数が 15 回程度であったことからこのように散布するものとした。

次に、水を養生終了後 1 ヶ月経過時から実験終了時まで週 2 回、 4.1 リットル/m^2 散布した。これは、あまり多量に散水しても過剰に供試体を洗浄するだけと考え、凍結防止剤が散布される期間において、1999 年から 2004 年に気象庁が観測した名古屋市の降水量と降雨回数を参考とし、この期間の 12 月における観測値から決定した。

2.3 自然電位の測定方法

自然電位の測定は、JSCE-E601-2000「コンクリート構造物における自然電位測定方法」を準用して実施した。JSCE-E601-2000 では自然電位の測定は、10～30cm 間隔で測定することを推奨していることから、図-2 に示すように供試体端部より 10cm 間隔に配筋位置の直上で 1 供試体につき 3 箇所自然電位を測定した。そして、この値の最小値を当該供試体の自然電位とした。測定用の照合電極には、広く使用されている銅—硫酸銅電極(以

下「CSE」という。)を用いた。また、照合電極の先端はスポンジを取り付けて測定を行った。

測定時に、コンクリートの水分率が5.5%以上であれば飽和状態と見なすことができ、測定された自然電位を補正する必要がない⁶⁾と報告されている。このことから、測定時には予め室内で供試体を湿潤させ、乾燥を防ぐとともに水分率が5.5%以上確保するためにウェスで湿布し、24時間程度経過後、供試体の温度を測定し、温度補正を行った水分計で水分率が5.5～8.0%であることを確認した上で自然電位の測定を実施した。供試体の水分率の測定には高周波容量式水分計を、温度の測定には接触式の静止表面用熱電対センサーと温度計を用いた。

測定手順は、まず、リード線を接続させる鉄筋の腐食防止のための塗装や汚れをパワーツールによって取り除く。そして、鉄筋と電位差計との電氣的導通をとるために、図-2に示すように供試体から突出している鉄筋にリード線を接続し、照合電極を所定の位置に押し当て、電位の表示が安定し、5秒以上一定して表示された電位を当該位置の自然電位とした。

測定時期と間隔は、材齢初期の時点では鉄筋の自然電位が安定しないことから⁷⁾、封緘養生後2週経過時と4週間経過時に測定を行って、自然電位が貴から卑に転じたことを確認した。その後は1ヶ月間隔で5回測定し、6ヶ月目以降は2ヶ月間隔で測定した。

測定結果は、表-5に示すASTM C 876(Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)の値を適用して鉄筋の腐食状態の評価を行った。

2.4 腐食面積率の測定

コンクリートの諸要因が鉄筋の自然電位に与える影響と鉄筋腐食の関係を調べるため、塩水と水の散布開始から1年経過した時点で、供試体中の鉄筋を取り出し、腐食面積率を計測した。この計測を実施した供試体の諸元を表-6に示す。測定はJCI-SC1「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)」を準用し、腐食箇所をビニルシートに写しとり、この面積をプランメーターにより測定し、評価対象面積で除して腐食面積率を求めた。プランメーターでの測定は評価対象面積1箇所に対して3回測定し、この平均値を用いた。

3. 測定結果および考察

3.1 自然電位の測定結果

自然電位の測定結果を図-4(a)～(c)に示す。塩水と水を散布していない場合は、初期の塩化ナトリウム混入量が異なっても全ての供試体で概ね電位の変化は同様の傾向にあり、養生終了後2週間目で-250mVvsCSE程度で、4週間目に-150mVvsCSE、その後、200日目まで

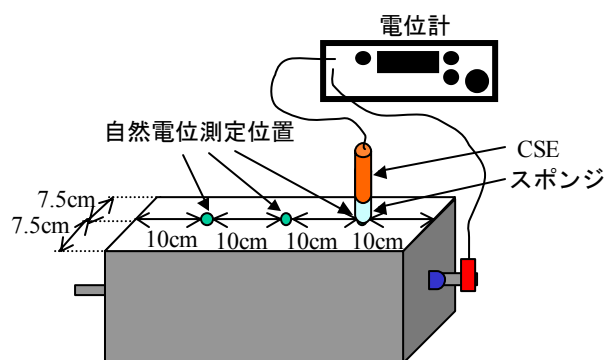


図-2 自然電位の測定状況

表-5 ASTM C 876による鉄筋腐食推定基準

自然電位 (E)	鉄筋腐食の可能性
$-200\text{mV} < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$	不確定
$E \leq -350\text{mV}$	90%以上の確率で腐食あり (銅/硫酸銅照合電極基準)

表-6 腐食面積率の測定水準

分類	塩水・水の散布 (屋外静置)
W/C (%)	45, 55, 65
かぶり (cm)	2, 4, 7
塩化ナトリウム (kg/m^3)	0, 1.2, 2.5

は-300mVvsCSE程度と卑に転じ、260日目以降は-200mVvsCSEよりも大きな値を示した。

封緘養生後に電位が一旦貴を示してから卑に転じるのは既往の文献で報告されている現象と同様の傾向⁸⁾であり、鉄筋の表面で生じている不動態化の影響によりアノード反応が抑制されて腐食電流が微量になる⁷⁾ことが原因であると考えられる。封緘養生後4週間目まではいずれの供試体も塩水と水は散布していない。この時、塩化ナトリウム混入量が多くなるにしたがい、W/Cおよびかぶりの条件によっては自然電位が卑な値を示し、示す範囲が大きく異なっている。このように、初期の段階から自然電位の測定は塩化ナトリウム混入量の影響を受けているものと思われる。

また、塩水および水を散布しない室内に静置した場合は、コンクリート打設後200日前後の期間は塩化ナトリウム混入量が 0kg/m^3 の場合でも図-4(a)に示すように-300mVvsCSE前後を示しており、鉄筋表面において不動態化や分極等の反応が生じて電位が不安定な状態にあるものと思われる。すなわち、封緘養生後200日前後の期間は鉄筋の自然電位を測定しても酸化第二鉄等が目視で確認できるほどの鉄筋腐食が進行しているか否か評価するのは難しいものと思われる。また、当初から塩化物イ

オンが多量に混入していると ASTM C 876 に基づいて評価を行った場合に腐食の可能性があることを示すこともあり、場合によっては自然電位法の適用および評価の方法を検討する必要がある。

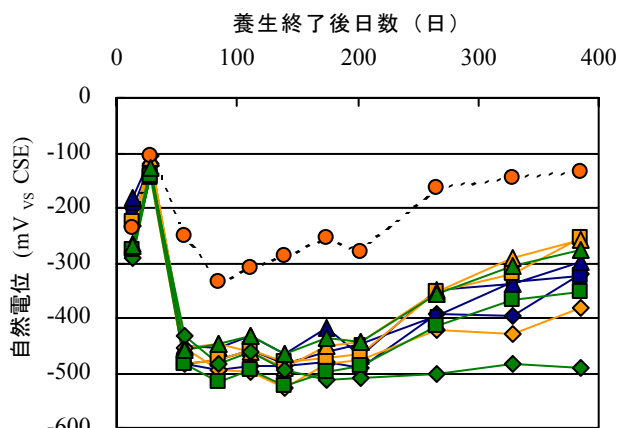
塩水と水を散布した場合は、いずれの供試体も図－4 (a)、(b)および(c)の示すように、これらを散布しない場合と同様に2週間目から200日目前後までの自然電位が養生終了後4週間で電位が一旦貴になり、その後卑に転じ、200日目前後まで不安定であるという傾向を示している。しかしながら、散布開始後から200日目前後までは、散布しない場合と同一 W/C およびかぶりの供試体が示す自然電位が、塩化ナトリウム混入量 0kg/m^3 のとき 200mV 程度、 1.2kg/m^3 および 2.5kg/m^3 のとき 100mV 程度低い。今回の実験では鉄筋の表面で進行している化学反応について把握できないが、この電位の差は塩水と水の散布による影響であると考えられる。200日目以降は、これらを散布していない場合と同様に、徐々に貴な電位に転じる傾向があり、385日目には、W/C が大きく、かぶりが薄い場合に -500mVvsCSE 前後、また、W/C が小さくかぶりが厚い場合には -300mVvsCSE 程度、供試体の種類によっては塩水と水を散布していない場合と同程度の電位へと推移している。この時、かぶりが厚い場合は塩水散布による影響が軽減されるものと考えられ、塩水散布が自然電位に与える影響は大きいと思われる。また、65-2-0、65-2-1.2 および 65-2-2.5 のようにかぶりが薄くなると電位の上がり方が緩やかになる傾向があり、塩水散布の影響が軽減された後も鉄筋腐食が進んでいるのではないと思われる。このことより、自然電位が塩化ナトリウムの影響を受けるとしても、W/C およびかぶりがこの影響を左右する、すなわち、鉄筋腐食の進行を防ぐ要因であることを示すものと思われる。

3.2 腐食面積率の測定結果

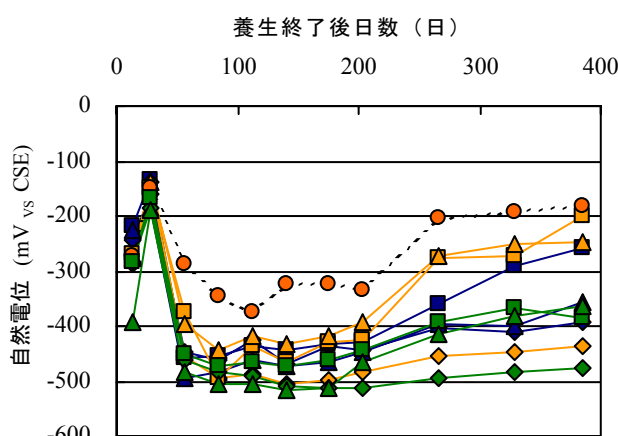
作製した供試体から385日目に鉄筋を取り出し、腐食面積の計測を行った。写真－1～写真－3に、W/C および塩化ナトリウム混入量のすべてのタイプに対してかぶりが2cmの供試体から取り出した鉄筋の腐食状態を示す。W/C および塩化ナトリウム混入量が増すと腐食面積が増えるとともに、腐食状態が激しくなる傾向がわかる。

図－5に、各種供試体と鉄筋の腐食面積率あるいは自然電位の関係を、図－6には各種供試体の鉄筋の腐食面積率と自然電位の関係を示す。腐食面積率と自然電位の関係に影響を与える要因を示すために、腐食面積率の計測結果が0%のものは「その他」として表示した。

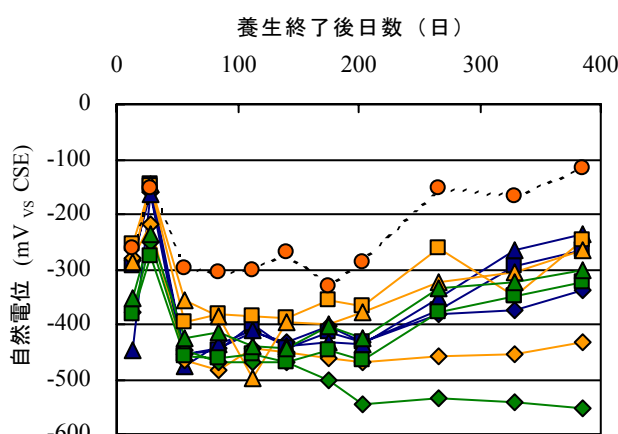
図－5および図－6に示される自然電位を測定したのは385日目で、塩水の散布を終えてから255日経過しており、自然電位が貴に変化しつつあることから塩水の影響が軽減されているものと思われる。



(a) 塩化ナトリウム混入量 0kg/m^3



(b) 塩化ナトリウム混入量 1.2kg/m^3



(c) 塩化ナトリウム混入量 2.5kg/m^3

凡 例		塩水・水散布			散布なし
		45%	55%	65%	
かぶり	2cm	◆	◇	◇	—
	4cm	■	□	■	—
	7cm	▲	△	▲	—

図－4 自然電位の測定結果

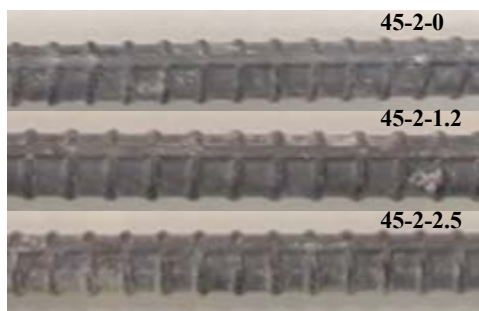


写真-1 腐食状況 (W/C=45%)

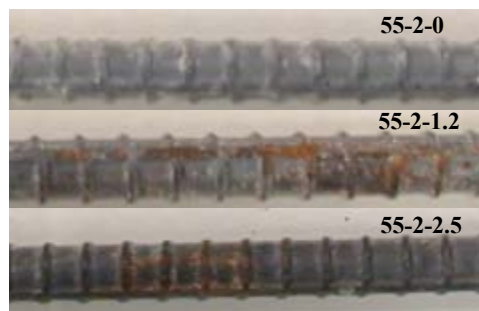


写真-2 腐食状況 (W/C=55%)

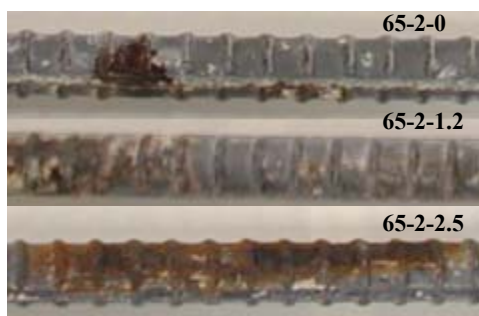
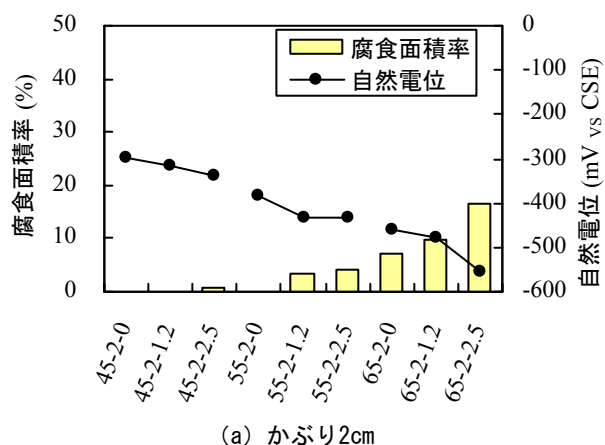


写真-3 腐食状況 (W/C=65%)

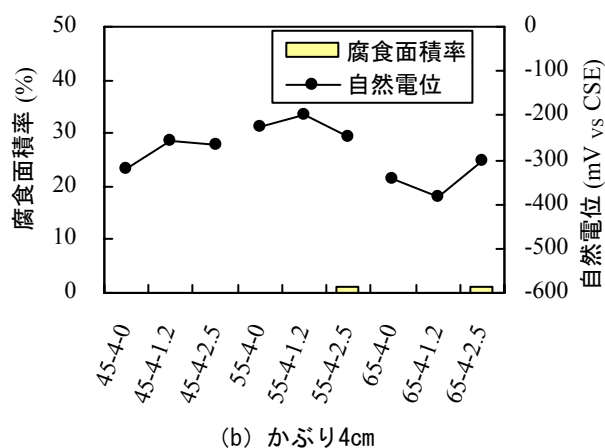
図-5 (a)ではW/Cが大きく、塩化ナトリウム混入量が増えるにしたがい自然電位が卑な値を示すとともに、腐食面積率が大きくなる傾向が示されている。

自然電位の経時変化では、コンクリートの諸要因や塩化ナトリウム混入量よりも塩水散布を繰り返すことにより自然電位の測定に影響を与えるものと思われたが、かぶり2cmの場合には腐食面積率の測定からはW/Cが大きく、塩化ナトリウム混入量が増えるほど鉄筋腐食の可能性が高くなるものと考えられる。図-5 (b), (c)では図-5 (a)とは異なり、自然電位は-400~-200mVvsCSEで塩化ナトリウム混入量が2.5kg/m³の場合に腐食が確認されているものもあるが、図からは腐食の傾向は見られない。

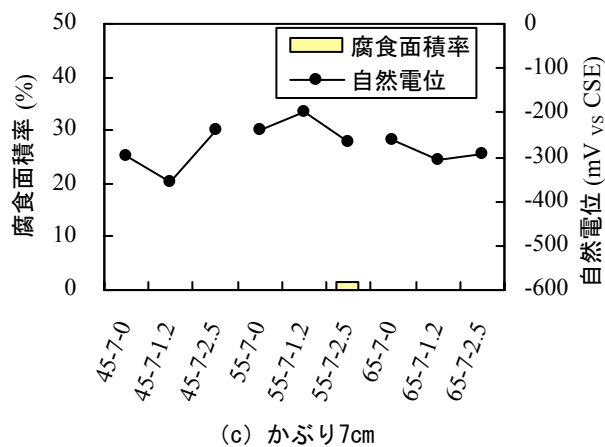
図-6からは自然電位が-200~-400mVvsCSEの範囲では腐食面積と自然電位との関係は把握しにくい、腐食面積率は自然電位の値がASTM C 876に示される鉄筋腐食が不確定の-350~-200mVvsCSEの範囲の-250mVvsCSEより卑になると鉄筋腐食が確認されはじ



(a) かぶり2cm



(b) かぶり4cm



(c) かぶり7cm

図-5 腐食面積率と自然電位の測定結果

め、このときの腐食面積率は5%以下にとどまっている。-400mVvsCSE以下になると電位が低くなるにつれて腐食面積率が増加し、式(1)に近似する直線的な関係を示し、-450mVvsCSEより卑では5%以上の腐食面積率を示している。また、W/Cが大きく、塩化ナトリウム混入量が増え、なおかつかぶりが薄いほど腐食面積率が大きくなる傾向が示された。

$$E = -9.0 A_{\text{corr}} - 397.8 \quad (1)$$

ここに、

E : 自然電位 (mVvsCSE)

A_{corr} : 鉄筋の腐食面積率 (%)

かぶり 2cm の場合にはコンクリート表面電位と鉄筋表面電位との差はほとんどない⁹⁾とされており、今回の実験結果においてもかぶり 2cm の場合には鉄筋腐食と自然電位の関係が示されたものと思われる。しかしながら、自然電位分布とコンクリートの比抵抗分布を合わせて測定することによって、鉄筋腐食量の概略値を把握することができる¹⁰⁾とされており、かぶりが薄い場合については実験結果を蓄積していく必要がある。

これらの結果より、塩水と水の散布を繰り返した場合には、W/C が大きくて塩化ナトリウム混入量が多く、かつかぶりが薄いほど、鉄筋腐食が進行しやすく、W/C およびかぶりが鉄筋腐食を防ぐ要因であるものと考えられる。また、自然電位が-400mVvsCSE を境に腐食が進行する可能性が高くなり、-450mVvsCSE 程度より卑な値を示した場合は腐食面積率が 5%以上であるものと思われる。

しかしながら、自然電位の測定時期や材齢により、鉄筋の腐食量と自然電位の関係が異なる可能性があるものと推測でき、これを評価するには、塩水の散布を受けるような構造物のおかれている環境、塩化物イオン含有量、コンクリート比抵抗等から総合的に判断する必要があるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの諸要因の異なる供試体を作製して冬期路面管理のために散布される凍結防止剤を模擬した塩水を散布するとともに、雨水を模擬した水の散布を繰り返しつつ鉄筋の自然電位の経時変化を観察し、鉄筋の腐食面積率を測定することから、コンクリートの諸要因および塩水と水の散布が、材齢 1 年程度で鉄筋腐食と自然電位に与える影響について考察を行い、以下のような結果を得た。

- (1) 塩水と水を散布することにより自然電位の測定に与える影響は、塩化ナトリウム混入量 1.2kg/m^3 および 2.5kg/m^3 のとき -100mVvsCSE 程度、塩化ナトリウム混入量 0kg/m^3 のとき -200mVvsCSE 程度である。
- (2) 自然電位の測定は塩水や塩化ナトリウム混入量の影響を受け、かぶりが薄く、W/C が大きくなるとこの傾向が強くなる。
- (3) W/C が大きくて塩化ナトリウム混入量が多く、かつかぶりが薄いほど鉄筋腐食の可能性および腐食面積が大きくなる傾向にある。
- (4) 塩水および水が散布され、塩化ナトリウム混入量が多い場合でも、鉄筋の腐食面積率が 5%以上であれば自然電位から腐食の可否が判断でき、この場合には -450mVvsCSE より卑な値となる。

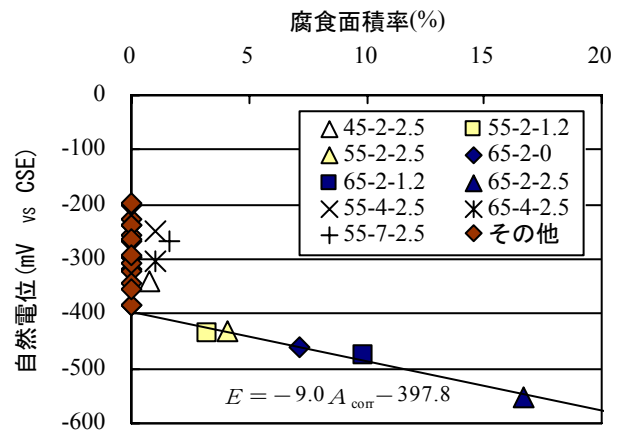


図-6 腐食面積率と自然電位の関係

参考文献

- 1) 小尾稔：塩害環境下におけるコンクリート構造物の維持管理，北海道開発土木研究所月報，No.630，pp.46-48，2005
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'03 [基礎編]，p.162，2003.1
- 3) (社)土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，(社)土木学会，pp.58-60，1996.3
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説，(社)日本道路協会，pp.176-177，1996.3
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書，pp.66-67，1989.5
- 6) 佐々木孝彦，飯島亨，立松英信：自然電位による鉄筋腐食判定に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.801-806，1996
- 7) 枝広英俊，十代田知三，竹内昌彦，山本祐基子：自然電位法によるコンクリート中の鉄筋の腐食評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.311-316，1998
- 8) 鈴木計夫，大野義照，二宮一，田村博：電気化学的測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究，セメント技術年報 42，pp.387-390，1988，No.1，1988
- 9) 小山理恵，矢島哲司，魚本健人，星野富夫：自然電位を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.13-22，1996.11
- 10) 武若耕司，小林一輔：自然電位法の非破壊的鉄筋腐食検査手法への実用化について，コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集，pp.79-84，1988.5