

論文 電磁波波形を用いたコンクリート中の塩分量推定評価手法に関する一考察

野嶋 潤一郎*1・内田 真未*2・新井 淳一*1・溝渕 利明*3

要旨: 本研究は、電磁波による塩化物イオン量の推定評価手法として、マクスウェルの波動方程式から導かれる減衰方程式を基に、電磁波反射波形の減衰に影響すると考えられる要因を影響係数として、塩化物イオン量の変化に直接影響すると考えられる導電率との関係式を導き出し、実構造物での塩化物イオン量の分析結果と比較検討を行った。その結果、本提案式を用いて、使用材料、配合条件、環境条件、供用年数等が異なる6ヶ所の実構造物に適用した結果、本研究で提案した推定式はコンクリート表面から鉄筋位置までのかぶり部分の平均塩化物イオン量を推定することができる可能性を見出した。

キーワード: 電磁波, 塩化物イオン量, 導電率, 非破壊試験, 比誘電率, 振幅値, 波動方程式, 電界, 磁界

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化には種々の要因があり、そのひとつに塩害がある。塩害は、海砂等の塩分を含んだ材料の使用によってコンクリート中に塩化物イオンが混入する場合、海に隣接する地域での飛来塩分によってコンクリート表面からの浸透による場合、寒冷地での融雪剤の散布によって浸透する場合などがある。塩害の場合、鉄筋が腐食膨張して鉄筋に沿ったひび割れが生じるまで鉄筋コンクリート構造物の表面には変状が見られず、早期に塩害による被害を評価するためには、構造物からコアを採取して深さ方向に一定間隔でスライスした試験体の化学分析を行い、鉄筋近傍でのその時点での塩化物イオン量を把握するとともに、深さ方向の分布から鉄筋近傍で鉄筋が腐食開始する時期を推定するための予測を行う必要がある。ただし、コアの採取は局所的ではあるが、構造物に弱点部を生じさせる原因となる場合がある。また、予測解析の場合中性化や凍結融解による表面劣化などの複合劣化を生じるような場合には、評価が難しい場合がある。

一方、鉄筋コンクリート構造物の劣化状況等を把握するために、構造物に損傷を与えることなく、同一部位の時間経過に伴う劣化状況を推定することが可能な非破壊検査法が多用されている。非破壊検査法には、検査対象の調査項目の内容によって、使用機器や試験方法が異なってくる。コンクリート構造物内の塩化物イオン量を非破壊試験によって把握することが可能になれば、塩害による被害を早期に発見することが可能となり、その対策を講じることも早期にできることとなる。

筆者らは、コンクリート中に塩化ナトリウムのような電解質が存在している場合、塩化物イオン量の違いによ

って鉄筋からの電磁波の反射波形の減衰に差異がみられることに着目し、電磁波による鉄筋コンクリートの塩化物イオン量推定に関して研究を行ってきた¹⁾²⁾。ただし、電磁波の反射波形の減衰は、塩化物イオン量の変化だけでなく、セメントの種類等の使用材料、コンクリート内の温度・湿度、かぶり、コンクリート表面の粗度等多くの要因によって変化する。

ここでは、電磁波による塩化物イオン量の推定評価手法として、マクスウェルの波動方程式から導かれる減衰方程式を基に、上述した反射波形の減衰に影響すると考えられる要因を影響係数として、塩化物イオン量の変化に直接影響すると考えられる導電率との関係式を導き出し、実構造物での塩化物イオン量の分析結果と比較検討を行った。

2. 電磁波を用いた鉄筋コンクリート中の塩化物イオン量の推定式の算定

x 方向に偏波をもつ平面波が z 方向に伝搬しているとき、コンクリートのような誘電性媒質の場合（比誘電率が4~12、周波数が1GHz程度とした場合）、電磁波を通す媒質が導電電流と変位電流の比で示される $\sigma/\omega\epsilon$ の大きさが1よりも小さくなることから、電界の減衰を示す式のうち減衰定数 α および位相定数 β は式(1)で一般に近似される^{3)~5)}。

$$\alpha \cong \left(\frac{\sigma}{2}\right)\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad \beta \cong \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1)$$

電磁波における電界の大きさ $|E|$ は、式(2)の減衰方程式で示され、 z 方向に電磁波が進むにつれて、元の電界の大きさ $|E_0|$ は指数関数的に減少することとなり、この減衰定数 α が大きいほど、短い伝搬距離で波は減衰すること

*1 法政大学 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 博士課程 (正会員)

*2 法政大学 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 修士課程 (学生会員)

*3 法政大学 デザイン工学部 教授 博士(工学) (正会員)

となる。

$$|E| = |E_0| \exp(-\alpha z) = |E_0| \exp\left(-\sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{z}{2}\right) \quad (2)$$

式(2)において、コンクリートの「透磁率 μ 」は電界が一定であることから変化しないので、コンクリートを媒質とした場合の電磁波減衰特性は、導電率 σ 、誘電率 ϵ および距離 z の変化によって定まることとなる。

これまでの研究において、式(2)に示した $|E|$ と塩分濃度を変化させた水溶液における電磁波レーダとの出力値との間には高い相関関係のあることを確認している⁸⁾。そこで、式(2)を基に電磁波レーダからの出力値である振幅値と上記に示した電磁波減衰特性値である導電率、誘電率および距離との関係を式(3)に示す。ただし、誘電率および透磁率は、比誘電率 $\epsilon_r = \epsilon / (8.85 \times 10^{-12})$ 、比透磁率 $\mu_r = \mu / (4\pi \times 10^{-7})$ で表すこととする。

$$|A_w| = \zeta \cdot \delta_c \cdot |A_0| \exp\{-189 \cdot \xi_i \cdot \kappa_w \cdot \sigma_{ca} \cdot (\epsilon_r)^{-0.5} \cdot z\} \quad (3)$$

ここで、 $|A_w|$ は電磁波レーダの出力振幅値、 ζ は電磁波の透過および反射に伴う減衰係数、 δ_c はセメントの種類の影響係数、 $|A_0|$ は個々の電磁波レーダ固有の入力振幅値、 ξ_i はコンクリート温度より定まる導電率補正係数、 κ_w はコンクリート相対湿度より定まる導電率補正係数、 σ_{ca} はコンクリートの導電率(S/m)、 ϵ_r はコンクリートの比誘電率、 z は損失媒質中の伝搬距離(m)である。

式(3)において、比誘電率は真水が $80.2 \pm 0.05(20^\circ\text{C})$ であるのに対して、海水は81程度であるといわれており、水溶液中の塩分濃度に対してほとんど変化しないことになる。したがって、コンクリート中の塩化物イオン量の変化に伴う電磁波レーダの出力振幅値は、式(3)におけるコンクリートの導電率とコンクリートのかぶりから求まることとなる。

したがって、調査対象部位のコンクリートの温度・湿度、比誘電率、かぶりおよび電磁波レーダからの出力振幅値から、式(4)を用いてコンクリートの導電率を推定することができることとなる。

$$\sigma_{ca} = \frac{10^3}{2\sqrt{\epsilon_r} \cdot c} \cdot \eta \cdot \ln\left(\frac{|A_w|}{\zeta \cdot \delta_c \cdot |A_0|}\right), \quad \eta = \frac{1}{189 \cdot \xi_i \cdot \kappa_w} \quad (4)$$

ここで、 c はかぶり(mm)である。

式(4)から算定したコンクリートの導電率と塩化物イオン量との関係を求めることによって、調査対象部位の塩化物イオン量を推定することが可能となる。

3. コンクリートの導電率算定における各影響因子

コンクリートの導電率を算定するためには、式(4)における各係数を定める必要がある。以下に、室内試験およびその結果から算定した各要因の係数について述べる。なお、これら各要因の相互作用は、式(3)より各因子は

表-1 供試体の使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメントB種、密度：3.04 g/cm ³
細骨材	S	大井川水系陸砂、密度：2.59 g/cm ³
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩砕石、Gmax：20 mm、密度：2.66 g/cm ³
AE剤	—	変形ロジン酸化合物系イオン活性剤、密度：1.02~1.06 g/cm ³
AE減衰剤	—	リグニンスルホン酸化合物、密度：1.23~1.27 g/cm ³

表-2 供試体の配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE剤 (ml/c)	AE減水剤 (C×%)
			W	C	S	G		
12	4.5	43	160	320	769	1045	0.005	250

すべて電磁波レーダの出力振幅値 $|A_w|$ に作用するものであり、実験結果においても大きな相互作用は確認されなかった。

3.1 実験の方法・供試体の諸元

実験は、供試体を作成して各影響因子（セメント種、温度、相対湿度）を変化させて、埋設したD16の鉄筋反射波を測定した。なお、変化させる影響因子以外は、かぶり70mm、温度20°C、相対湿度60%RHを基準として実験を実施した。使用した供試体の諸元として、材料を表-1に、配合を表-2に示す。

3.2 電磁波の振幅値に影響を及ぼす係数

実構造物においては、作業効率や汎用性を考慮した場合、ハンディタイプの電磁波レーダを用いることが多く、本検討でも市販の電磁波レーダを用いている。その場合、電磁波は出力アンテナより一旦空气中に放射する方式となり、その後空气中から他の媒質（コンクリート）に入射し、異なる媒質（鉄筋）との境界面で反射し、一部が透過することとなる。ここでは、空气中からコンクリートに対して垂直に入射する場合の境界面での電磁波の透過率と鉄筋からの反射率とを考慮した合成透過散乱係数を設定することとした。

空气中とコンクリートとの境界面での電磁波の透過率（入射と反射）は、次式から求められる⁴⁾。

$$\hat{T} = \left\{ z_0 \left(\frac{(\epsilon_r)^{-0.5} - 1}{(\epsilon_r)^{-0.5} + 1} \right) + 1 \right\}^2 \quad (5)$$

ここで、 z_0 は波動インピーダンス(=377Ω)である。

一方、鉄筋からの反射に関しては、かぶりの異なるコンクリート供試体を用いて、電磁波測定を行い、かぶり70mmでの振幅値を基準とした場合の各かぶりの減衰比率を求めた。かぶりと減衰比率との関係を図-1に示すとともに、回帰式を以下に示す。

$$\lambda = -2.7 \times 10^{-3} c + 1.18 \quad (6)$$

電磁波の透過および反射に伴う減衰係数は、式(7)および式(6)の両者の影響を考慮し、さらにコンクリート表面の粗度を考慮した以下に示す式で表すこととした。

$$\dot{T} = \left\{ z_0 \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) + 1 \right\}^2 (-2.7 \times 10^{-3} c + 1.18) \cdot \nu \quad (7)$$

ここで、 ν はコンクリート表面の粗度を表す係数とし、実構造物でコンクリート表面を目視し、写真-1 に示すどの状態に合致するかを判定し、それぞれ室内試験の結果を元に出力振幅値を低減することとした。

セメントの種類の違いによる影響係数は、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種について、あらかじめ塩化物イオン量を 1.2kg/m^3 混入したコンクリート供試体を用いて電磁波測定を行った結果から求めた。その結果、図-2 に示すように普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種はかぶりが変化しても、振幅値（レーダの出力比であり無次元）の値がほぼ同様な値を示したのに対して、フライアッシュセメントB種はその他のセメントに比べて約20%大きい値を示した。これは、フライアッシュの吸着作用により、コンクリート細孔溶液中の各種イオン量を減少させ、導電率が低下したためではないかと思われる。図-2 の試験結果を元に、フライアッシュセメントを用いたコンクリートに対しては、出力振幅値を0.8倍することとした。

3.3 コンクリート温度より定まる導電率補正係数

コンクリート温度の影響については、かぶりの異なる供試体について養生温度を $5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ まで変化させ、電磁波測定を行い、 20°C 養生のかぶり70mmの測定結果を基準として補正係数を算定した。コンクリート温度と補正係数との関係を図-3 に示す。図-3 から、補正係数はかぶりに関係なく養生温度の変化のみに依存していることから、以下に示す式で温度補正を算定することとした。

$$\xi_t = 1.04 \times 10^{-2} T + 0.774 \quad (8)$$

ここで、 T はコンクリート温度 ($^\circ\text{C}$) である。

3.4 コンクリート相対湿度より定まる導電率補正係数

コンクリートの相対湿度の影響については、水セメント比の異なる供試体に高分子湿度センサを図-4 に示すとお埋込み、水中養生後相対湿度 $60\%RH$ の恒温室において電磁波測定を行い、相対湿度 $60\%RH$ における振幅値を基準として補正係数を算定した。コンクリートの湿度と補正係数との関係を図-5 に示す。図-5 から、補正係数は水セメント比による差異がなく、相対湿度の変化のみに依存していることから、以下に示す式で湿度補正を算定することとした。

$$\kappa_w = 7.18 \times 10^{-4} \times RH^2 - 7.95 \times 10^{-2} \times RH + 3.19 \quad (9)$$

ここで、 RH は相対湿度 ($\%RH$, $60 \leq RH \leq 90$) である。

4. コンクリートの導電率と塩化物イオン量との関係

4.1 室内試験からの推定

コンクリートの導電率の推定式である式(4)および式

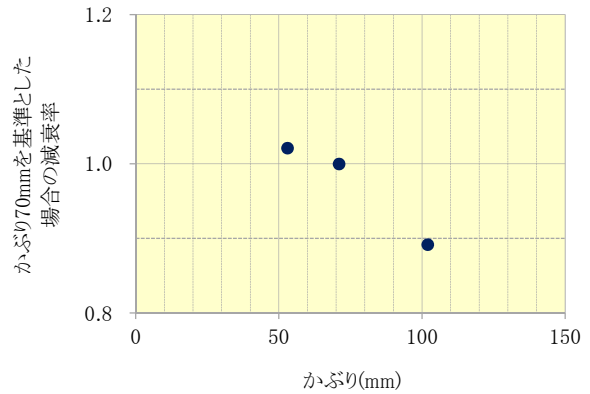


図-1 かぶりと振幅値の減衰率との関係

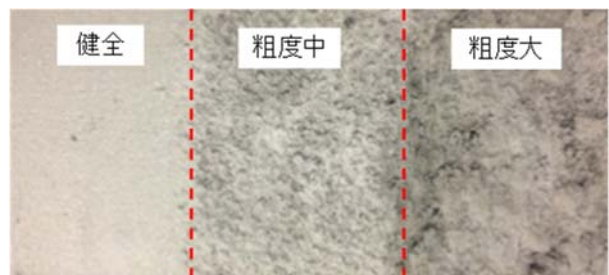


写真-1 コンクリート表面の粗度状態

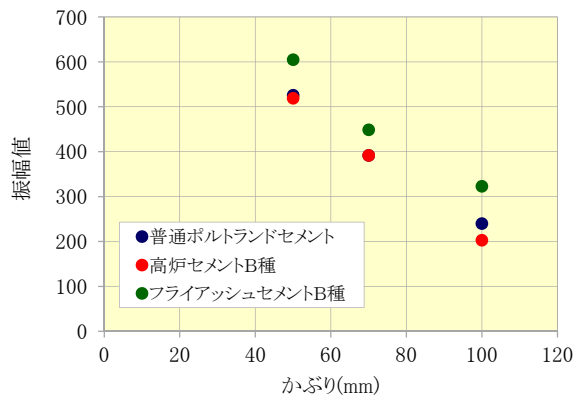


図-2 セメント種別ごとのかぶりと振幅値との関係

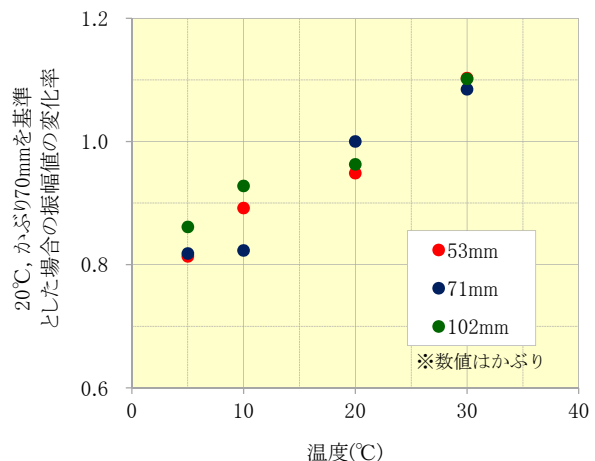


図-3 コンクリート温度と振幅値の変化率との関係

(5)～式(9)までの各補正係数を用いて、**図-6**に示す塩化物イオン量を $0\text{kg/m}^3 \sim 5.93\text{kg/m}^3$ 練混ぜたコンクリート供試体において、コンクリートの導電率を推定し、塩化物イオン量との比較を行った。コンクリート供試体は、高炉セメントB種を用い、水セメント比を50%とした。また、電磁波レーダは**表-3**に示す仕様の機器を用いて、測定モードを「距離測定」(湿度実験は「時間測定」)、かぶり分解能を-2浅モードに設定して、 20°C 、60%RHの恒温恒湿室で測定を行った。推定したコンクリートの導電率と塩化物イオン量との関係を**図-7**に示す。**図-7**から、塩化物イオン量が 0kg/m^3 におけるコンクリートの導電率の推定値が 0.08S/m であり、既往の研究における値とほぼ同様の値となった⁹⁾。また、コンクリートの導電率にばらつきはあるものの、コンクリートの導電率の増加に伴い塩化物イオン量が増加する結果となり、相関係数は 0.843 で比較的高い相関関係となった。コンクリートの導電率と塩化物イオン量 W_{cl} との関係式を以下に示す。

$$W_{cl} = 114.1 \sigma_c - 8.38 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (10)$$

4.2 フィールド調査からの推定

筆者らは、2010年から**表-4**に示す6ヶ所の発電所において、電磁波による塩分量推定を行ってきており、これまで60箇所以上からコア採取を行うとともに、採取箇所周囲の電磁波測定を行っている。調査対象部位は、栈橋を中心にスラブ上面や側面での計測およびコア採取を行っている。一例として栈橋上面での電磁波の測定範囲とコア採取位置を**図-8**に示す。供用年数は、ほとんどが10年以上経過したものであり、50年以上経過したものについても調査を行っている。セメント種類としては、早強ポルトランドセメントを使用している部位もあるが、調査対象とした部位のほとんどが普通ポルトランドセメントもしくはフライアッシュセメントであった。水セメント比については、明確となっていない部位もあるが、45%～60%であった。

上記の条件を元に、式(4)～式(9)を用いてコンクリートの導電率を算定した。ただし、コンクリート温度は調査場所の調査した日の外気温とし、湿度に関してはコンクリート内部での乾燥は少ないと仮定し、90%RHとした。推定したコンクリートの導電率と採取したコアの塩分量の化学分析結果(全塩分量)とを比較した結果を**図-9**に示す。ただし、化学分析結果は全塩分量であり、一方コンクリートの導電率は、細孔溶液内のイオンに対する推定値であることから、既往の研究⁷⁾を参考に、全塩分量を可溶性塩分量に換算した値で比較した。

図-9から、室内試験の場合と同様に、ばらつきはあるもののコンクリートの導電率の増加に伴い塩化物イオン量が増加する結果となり、相関係数は 0.790 であった。

コンクリートの導電率と塩化物イオン量 W_{cl} との関係式を以下に示す。

$$W_{cl} = 67.5 \sigma_c - 1.88 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (11)$$

式(13)から、調査箇所の環境条件と電磁波による測定結果を用いて、コンクリートのかぶり部分の平均塩化物イオン量を非破壊で推定する可能性を見出すことができたといえる。

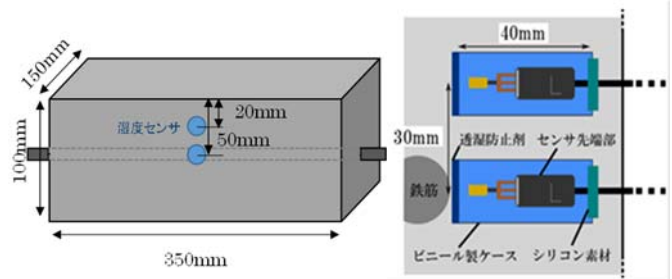


図-4 コンクリート供試体の概要(湿度実験)

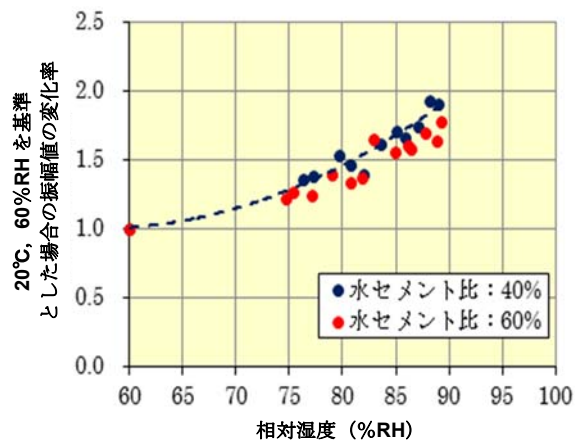


図-5 コンクリートの湿度と振幅値の変化率との関係

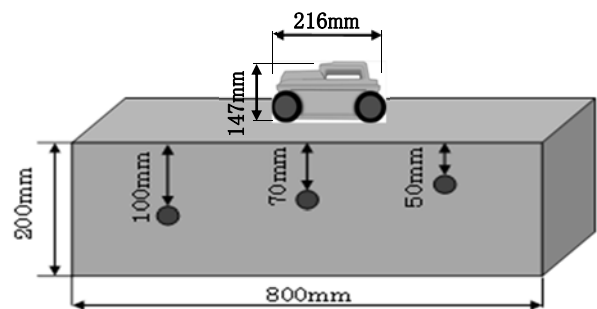


図-6 コンクリート供試体の概要(湿度実験以外)

表-3 電磁波レーダ諸元

項目	諸元
周波数	1GHz
測定モード	時間測定, 距離測定
かぶり厚さ	5～300mm
かぶり分解能	浅: 約 1mm, 深: 約 2mm

表-4 フィールド調査の概要

現場名 (所在地)	部材名	部材形式	竣工年	セメント種	水セメント 比	調査年										
						2010	2011	2012	2013	2014						
火力発電所 (沖縄)	護岸A	壁状	1974	N	-	○(24.1, 85)	○(27.5, 67)	○(28.7, 66)	-	-						
	護岸B		1984	N	53.7	○(24.1, 85)	○(27.5, 67)	○(28.7, 66)	-	-						
	棧橋スラブ、脚柱	スラブ上面、壁状	1986	FA	55	○(24.1, 85)	○(27.5, 67)	○(28.5, 66)	○(28.5, 75)	○(26.8, 92)						
水力発電所 (沖縄)	放水口	壁状	1996	N	60	-	○(27.8, 75)	○(28.5, 66)	-	-						
	地下発電所	壁状				-	○(34.0, 70)	○(32.0, 77)	○(34.0, 70)	-	-					
火力発電所 (神奈川)	スラブ	スラブ上面	1998	FB	45	○(19.5, 62)	○(15.6, 41)	○(19.1, 55)	○(14.2, 33)	○(21.7, 68)						
	北棧橋	スラブ上面 壁状	1966	H	-	○(19.5, 62)	○(15.6, 41)	-	○(14.2, 33)	-						
火力発電所 (長崎)	物揚場	スラブ上面	1978	FA	53	-	-	○(28.8, 63)	○(26.5, 57)	○(27.5, 67)						
	棧橋	スラブ上面				-	-	-	-	-	-	-				
事業所 (福岡)	新スラブ	スラブ上面	2010	FC	-	-	-	-	○(23.2, 68)	-						
	新護岸	壁状														
	旧スラブ	スラブ上面	1959								-	-	-	-	○(23.2, 68)	-
	旧護岸	壁状														
火力発電所 (広島)	物揚場	スラブ上面	1960	-	-	-	-	-	-	○(29.7, 78)						

※()内数値は、調査前日の(温度℃, 相対湿度%RH)

ただし、フィールド調査におけるコンクリートの導電率は、室内試験で推定した同一塩化物イオン量に比べて全体的に小さくなる結果となった。この原因としては、室内試験に用いた供試体は、あらかじめ塩化物を混入し一様となっているのに対して、フィールド調査で対象としたコンクリートは外来塩分の浸透によって塩化物イオン量が様に分布していないこと、フィールド調査での対象コンクリートのほとんどが数十年経過したものであり、中性化やコンクリート表面からの溶脱などが生じており、数年しか経過していない室内試験供試体に比べて細孔空隙の分布が異なっていることなどが影響しているのではないかとと思われる。

また、図-10および図-11に、調査箇所での調査実施1ヶ月前からの温度、相対湿度データを元を実施した、温度ならびに湿気移動解析結果を示す。なお、コンクリートの熱物性は、マスコンクリートのひび割れ制御指針2008の一般的な値の範囲から設定して解析を行った。図-10および図-11より、コンクリート温度はコンクリート表面温度とコンクリート内部温度にほとんど差異はなく、コンクリートの影響係数として外気温を用いても導電率の推定結果にそれほど影響を及ぼさないものの、コンクリートの湿度は表面部において急変しており、今回の推定のように90%RH一定としたことも導電率の推定に影響を与えたのではないかとと思われる。

さらに、コンクリートの表面の粗度を写真-2に示す調査箇所で採取したコアの表面と写真-1の模擬的な粗度と比較して ν の値を定めたが、定量的な評価をしていないため、この点も影響したのではないかとと思われる。

今回、フィールド調査で実施した電磁波測定から得られた振幅値を元に、室内供試体で確認されたセメント種、コンクリート内の温度・湿度、かぶり、コンクリート表面の粗度を考慮して導電率ならびに塩化物イオン量を推定した。フィールドでの導電率推定における不確定要因は、いくつかあると思われることから、今後さらにデー

タの蓄積を行うとともに、影響すると思われる要因を式(4)で評価できるように、さらに改善していく必要がある。

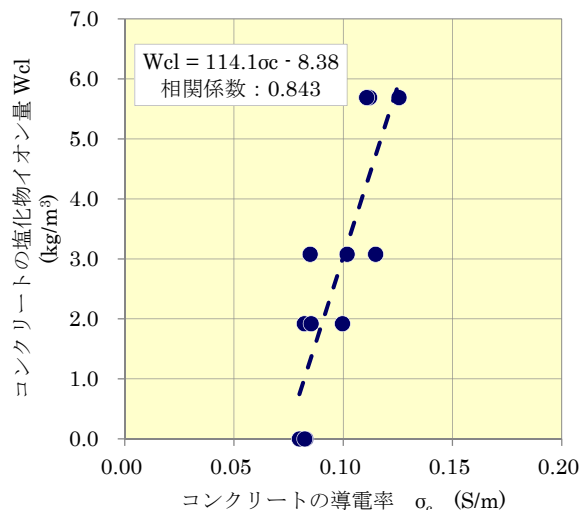


図-7 コンクリートの導電率と塩化物イオン量との関係(室内試験)

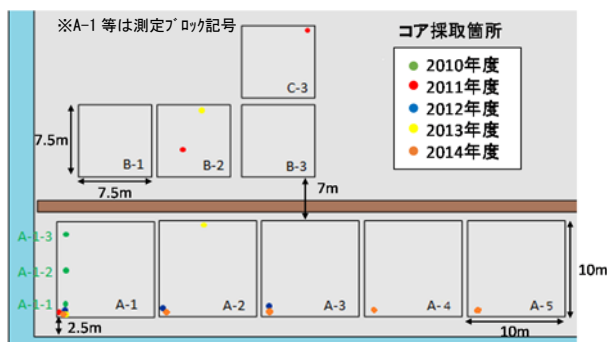


図-8 フィールド調査箇所とコア採取箇所の一例(棧橋上面(神奈川))

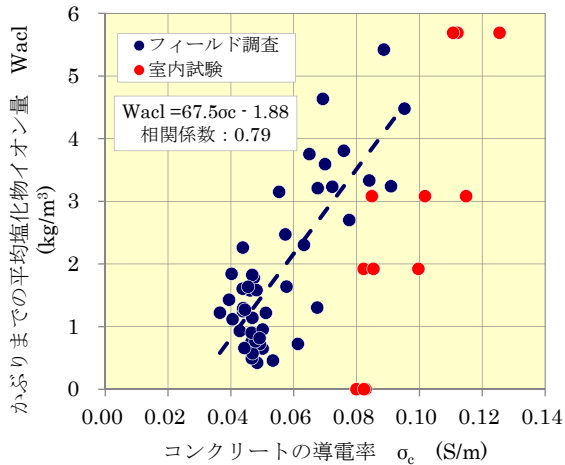


図-9 コンクリートの導電率と塩化物イオン量の関係 (フィールド調査)

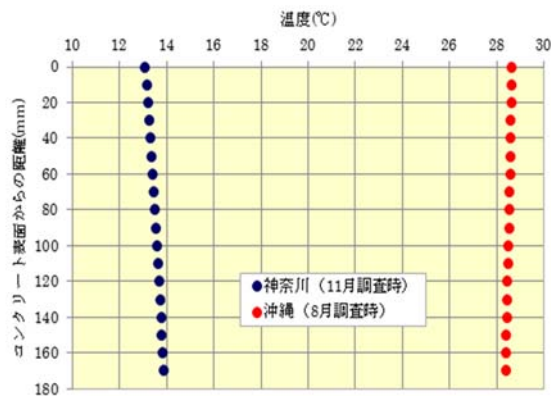


図-10 調査箇所でのコンクリート温度分布解析結果例

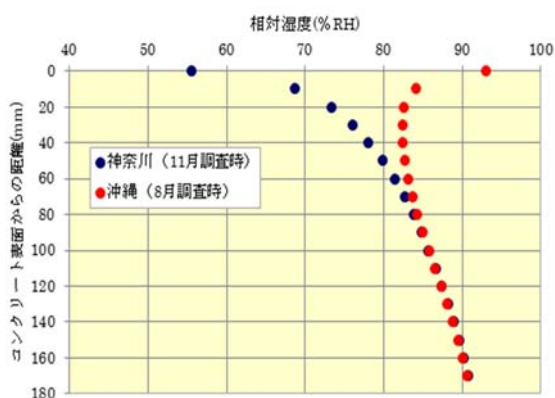
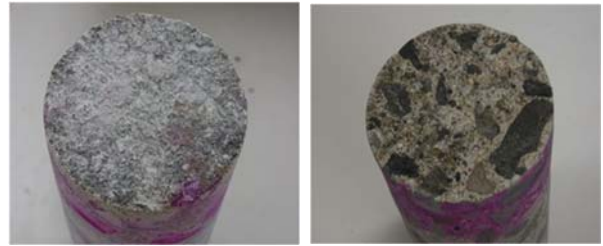


図-11 調査箇所でのコンクリート湿度分布解析結果例

5. まとめ

本研究は、マクスウェルの波動方程式から導かれる減衰方程式を基に作成したコンクリートの導電率とコンクリートのかぶり部分の塩化物イオン量との関係について検討を行い、塩化物イオン量の推定に影響を及ぼす要因



(スラブ天端, 粗度中) (スラブ天端, 粗度大)
写真-2 実構造物でのコンクリート表面状態の例 (採取したコンクリートコアの表面)

に影響係数として取り込んだ推定式を提案した。本提案式を用いて、使用材料、配合条件、環境条件、供用年数等が異なる6ヶ所の実構造物に適用し、塩化物イオン量と比較検討した。その結果、本研究で提案した推定式からかぶり部分の平均塩化物イオン量推定の可能性を見出すことができた。

今後は、電磁波によるコンクリートの塩化物イオン量の推定精度向上を図るとともに、鉄筋位置での塩化物イオン量推定評価法についても検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 溝渕利明, 新井淳一, 須田久美子, 斎藤健一: 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する一考察, 第24回コンクリート工学講演会, No.1, pp.1509-1514, 2002.6
- 2) 野嶋潤一郎, 池田大樹, 内田真未, 溝渕利明: 電磁波による塩化物イオン量推定手法を用いた塩害の劣化進行予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1741-1746, 2013.7
- 3) 伊藤繁夫, 岩崎久雄, 岡田敏美, 長谷川弘治: 基礎からの電磁波工学, 日新出版, pp.1-55, 2008.
- 4) 倉田豊: 電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書, pp.44-46, pp.113-115, 1989.
- 5) Arthur v. H: Dielectric Materials and Applications, Artech House Publishers, 1954.7
- 6) 岩井亮佑, 松永真由美, 松永利明: コンクリート壁表面に施された円形凸起が電波伝播に与える影響の検討, 映像情報メディア学会技術報告, 2014.
- 7) 横関康祐: コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する研究, 東京工業大学学位論文, pp.144-146, 2004.