

# 論文 コンクリート中の塩化物量が電磁波レーダの波形に及ぼす影響

福山 智子\*1・金田 尚志\*2・金光 俊徳\*3・佐藤 文彦\*4

**要旨：**電磁波レーダ法で鉄筋コンクリートを探査した際、塩化物量が増加すると電磁波が減衰して鉄筋からの反射波振幅値が小さくなる現象が報告されている。塩化物を含む屋外暴露試験体の探査を行ったところ、同様な傾向を示し、塩化物量最大の 10kg/m<sup>3</sup> 試験体で B モード画像の鉄筋像が特に不鮮明になった。しかし、コンクリートに鉄筋腐食によるひび割れが生じており、像が不鮮明になった原因がひび割れによるものか塩化物量が多いためか判断ができなかった。腐食の有無による信号の変化を確認するため、塩化物量が異なるモルタル試験体に鉄とステンレスの丸棒を埋設して測定を実施した。同時に電気化学的測定も実施した。

**キーワード：**電磁波レーダ, 塩化物量, 比誘電率, 含水率, 電気化学的測定

## 1. はじめに

電磁波レーダ法によるコンクリート中の塩化物量推定に関する研究事例は多く<sup>例えば, 1), 2), 3)</sup>, 塩化物の影響による鉄筋からの反射波振幅値の変化が報告されている。

含有塩化物量の異なる鉄筋コンクリート屋外暴露試験体の電磁波レーダ調査を実施したところ、過去の研究事例と同様な傾向が確認され、コンクリート中の塩化物量のスクリーニング調査への適用可能性が示された。

当該の屋外暴露試験体は約 10 年間暴露されており、塩化物量の多い試験体は鉄筋周辺にコンクリートひび割れが生じていた。ひび割れの存在が電磁波レーダの波形に影響した可能性も考えられるため、新たに試験体を作製し、ひび割れの無い状態で塩化物が電磁波レーダの波形に及ぼす影響を確認することにした。

## 2. 屋外暴露試験体の実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1 に検討パラメータ、表-2 にコンクリートの配調合を示す。調査対象試験体は、製作時に 0~10 kg/m<sup>3</sup> の塩化物を混入し、D13 異形鉄筋をかぶり 30 mm に 4 本埋め込み屋外に約 10 年間暴露したものである (2014 年春製作・暴露開始, 2024 年 1 月調査)。28 日圧縮強度は 28.0 N/mm<sup>2</sup> (試験体 C10) ~35.3 N/mm<sup>2</sup> (試験体 C0) である。

写真-1 に試験体の配置状況と測定状況を示す。試験体寸法は幅 510 mm×長さ 4000 mm×厚さ 200 mm であり、D13 異形鉄筋 4 本がかぶり 30 mm の深さで全長にわたり間隔 100 mm で配筋されている。全試験体を連続して同一測定条件で横断的に測定して比較できるように、塩化物量が少ない試験体から多い試験体の順に並べた。

塩化物量 0~5 kg/m<sup>3</sup> の試験体には目視の範囲でひび割れが発生していなかったが、C7 (7 kg/m<sup>3</sup>) の試験体は 4

本中 2 本、C10 (10 kg/m<sup>3</sup>) の試験体は 4 本全部の鉄筋からかぶりが最も薄い面まで貫通ひび割れが発生していた。

### 2.2 電磁波レーダ測定概要

測定に用いた電磁波レーダ装置は、日本国内で市販されている 3 種類の装置を用いた (表-3)。装置手配の都合上、屋外暴露試験体は 2 種類、後述の室内試験の試験体は 3 種類で測定を実施した。

表-1 検討パラメータ (屋外暴露試験体)

対象	検討項目	仕様
コンクリート	塩化物量[kg/m <sup>3</sup> ]	0, 1, 3, 5, 7, 10
電磁波レーダ	装置メーカー	G 社製, P 社製

表-2 コンクリートの配調合 (屋外暴露試験体)

	W/C [%]	[kg/m <sup>3</sup> ]						SL	Air [%]	F	
		W	C	S1+S2	G	Ad	Cl <sup>-</sup>				NaCl
C0											
C1											
C3	54.5	155	285	529 +353	1000	2.85	0	0.00	70	3.5	35.3
C5							3	4.95	90	3.1	34.4
C7							5	8.24	100	3.5	30.8
C10							7	11.54	65	3.5	31.1
							10	16.48	65	4.5	28.0

C: 普通ポルトランドセメント, S1: 川砂, S2: 山砂, G: 川砂利, Ad: 減水剤, NaCl: 塩化ナトリウム試薬 1 級, SL: スラップ [mm], F: 28 日強度 [N/mm<sup>2</sup>]

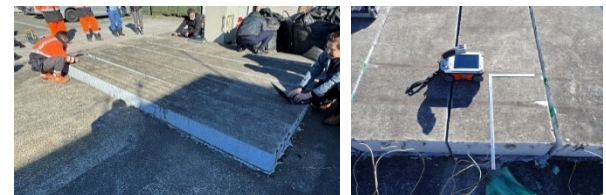


写真-1 試験体の配置状況と測定状況 (屋外暴露)

表-3 電磁波レーダ装置一覧

	G 社製	N 社製	P 社製
中心周波数 [MHz]	2700	2100	2400
最大深度 [mm]	600	450	700
比誘電率の設定	2.0-20.0	2.0-20.0	2.0-20.0

\*1 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科教授 博士(工学) (正会員)

\*2 日鉄テクノロジー 技術本部 技術総括部 博士(工学) (正会員)

\*3 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 博士(工学) (正会員)

\*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京 土木技術部 (正会員)

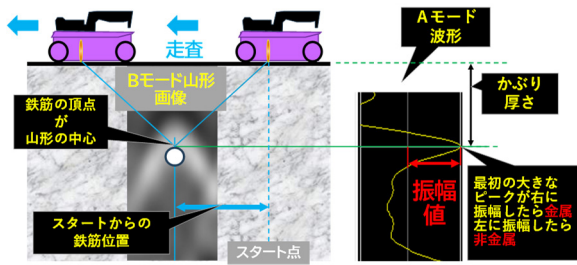


図-1 電磁波レーダ波形の概念文献6)を参照して作図

### 2.3 電磁波レーダ測定結果

図-1に電磁波レーダ波形の概念を示す。ここで、Aモード波形は受信器に得られる受信信号波形そのもの<sup>4)</sup>、Bモード画像は受信電磁波の時空間的強度分布を示した濃淡画像<sup>5)</sup>を意味する。Bモード画像の山形の中心が鉄筋の頂点を表している。

図-2にG社製とP社製で測定した際のBモード画像(白黒)を示す。鉄筋が4本埋設されているため、試験体ごとに4つの山を確認できる。塩化物量が増加するにつれて全体的にAモードの振幅値が小さくなったため、Bモードの鉄筋像が不明瞭になる傾向が確認できる。また、鉄筋深さ(Bモード画像の山のピーク:緑の横線)は概ね30mmと一定である。比誘電率が異なれば検出される鉄筋の深さが変化するので、各試験体のかぶりコンクリートの比誘電率にほとんど差が無いと判断した。

### 3. 室内試験の実験概要

2.3節に示す屋外暴露試験体の結果から、塩化物量が多い試験体ほど、鉄筋位置におけるAモード振幅値が小さくBモード画像が不鮮明となった。塩化物量が増加すると振幅値が低くなることは既往研究<sup>1),2),3)</sup>においても報告され、この現象そのものは既知である。しかし、試験体ごとにコンクリートの比誘電率が異なるのであれば推定されるかぶり厚さに違いが出ると予想されるが、すべての試験体においてほぼ同じであった。

塩化物量 5kg/m<sup>3</sup>以下の試験体は表面観察からもコンクリートにひび割れを確認できないのに対し、Bモード画像が不鮮明なC7とC10にはひび割れと鉄筋腐食が生じていたため、ひび割れと鉄筋腐食の影響を除いて純粋に塩化物量の影響を検討するため室内試験を行った。

#### 3.1 試験体概要

表-4に検討パラメータ、表-5にモルタルの配調合を示す。粗骨材の影響を無くすためにモルタル試験体とし、塩化物量を0~30 kg/m<sup>3</sup>とした。

打設時にブリージングが発生すると試験体内の塩化物量分布にばらつきが生じるため、既往研究を参考に、ブリージング対策として石灰石微粉を骨材に置換して配調合を作成し、実際の使用材料の密度と試し練りにより最終調整をした。粉体をプレドライミックスした後、塩化ナトリウムを混入した練混ぜ水で混練した。

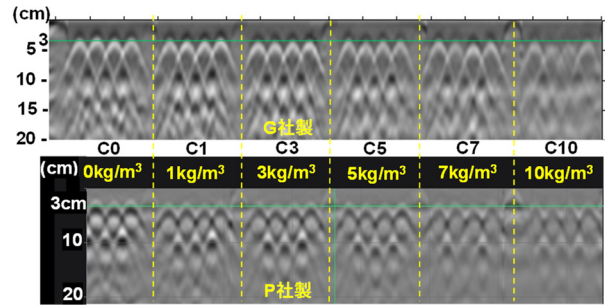


図-2 屋外暴露試験体のBモード画像(白黒)上:G社製,下:P社製(左から順にC0→C10)

表-4 検討パラメータ(室内試験)

対象	検討項目	仕様
モルタル	塩化物量 [kg/m <sup>3</sup> ]	0, 1.2, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30
	かぶり厚さ [mm]	20, 30
鋼材	発錆の有無	磨き丸鋼, ステンレス丸鋼
電磁波レーダ	装置メーカー	G社製, N社製, P社製

表-5 モルタルの配調合(室内試験)

	W/C [%]	[kg/m <sup>3</sup> ]						SL	Air [%]	F
		W	C	S	L	Cl <sup>-</sup>	NaCl			
M0	40	280	700	1075	250	0	0	173	4.5	45.7
M1.2						1.2	2	177	5.5	42.3
M2.5						2.5	4	179	3.9	39.9
M5						5	8	171	3.4	41.2
M10						10	17	180	3.2	39.8
M15						15	25	188	3.4	35.4
M20						20	33	200	3.1	38.9
M30						30	50	210	2.4	37.5

C:セメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>), S:細骨材(密度2.65g/cm<sup>3</sup>), L:石灰石微粉(密度2.7g/cm<sup>3</sup>, プレーン値5000), SL:スランプロワー [mm], F:28日強度(3体の平均, M-20のみ変動係数が0.1以上であったため2体の平均としている) [N/mm<sup>2</sup>]

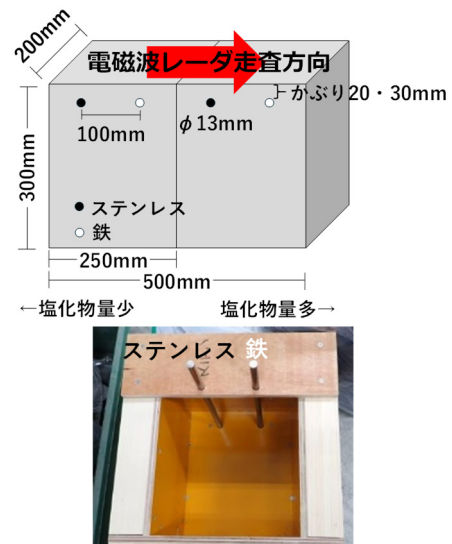


図-3 試験体の形状と型枠外観(室内試験)

表-6 測定時の環境条件と測定項目(室内試験)

材齢	測定項目				
	含水状態	電磁波レーダ	自然電位	分極抵抗	電気抵抗
4週	○	G社製, N社製	○	○	○
6週	○	P社製	-	○鉄のみ	○鉄のみ

図-3は試験体の形状と型枠外観を示したものである。試験体寸法は奥行200mm×幅250mm、高さ300mmとし鋼材はφ13mm×長さ300mm(電気化学的測定用のケ

ケーブル接続のため試験体の奥行きより長くした)である。

鋼材腐食の有無による差を確認するために1体につき写真左側にステンレス丸鋼 (SUS304:以降, ステンレスとする), 右側に磨き丸鋼 (以降, 鉄とする) を各1本, 鋼材間距離 100 mm, かぶり厚さ 20 mm と 30 mm で配筋した。ブリージング対策のため打設面は試験体側面 (鋼材が突出している側) とし, 翌日に脱型して 20°C, 88%RH 恒温室内で気中養生した。

### 3.2 測定概要

表-6 に測定項目を示す。装置手配とスケジュールの都合上, 電磁波レーダと電気化学的測定は材齢 4 週と 6 週で実施した。

#### (1) 試験体の含水状態の確認

塩化ナトリウムを練混ぜ水に混入して打設を実施した場合, 水や乾燥が進行していない段階では, 塩化物量の増加に伴って含水率が高くなる。含水率は電磁波レーダ測定時の比誘電率に影響することから, 市販の高周波容量式コンクリート・モルタル水分計で測定するとともに質量変化を測定した。

#### (2) 電磁波レーダによる測定

屋外暴露試験体と同様に同一条件で全試験体を比較するため, 写真-2 のように同一かぶり厚さの試験体を並べて, 塩化物量の少ない方から多い方に測定した。装置の種類が異なるため, 測定時の初期設定を比誘電率 8, 深度設定 300 mm 程度とした。また, 電磁波レーダは電源を入れた直後から内部の温度が一定になるまでは振幅値の変動が大きいという経験則から, 電源投入して 20 分以上経過した後に 3 回測定して平均値をとることとした。

#### (3) 電気化学的測定

鋼材の腐食推定, 腐食抵抗率, 試験体表面近傍のモルタルの電気抵抗を測定するために鋼材の自然電位と分極抵抗, モルタル抵抗の測定を実施した。測定方式は, 装置の手配ならびに測定技術者のスケジュールの都合上, 2 つの異なる方式で実施した。4 週の測定がコンクリート表面に設置したプローブから鋼材に 2 周波数の微弱な電流を流す方法 (写真-3 左), 6 週がコンクリート表面にアルミテープを貼付して鋼材全長へ周波数を連続的に変化させて微弱な電流を流す方法 (写真-3 右) である。6 週の測定方式は周波数を連続的に変化させるため, 1 回の測定に時間を要することから, 時間の制約上 4 週と比較して測定項目を減らしている。

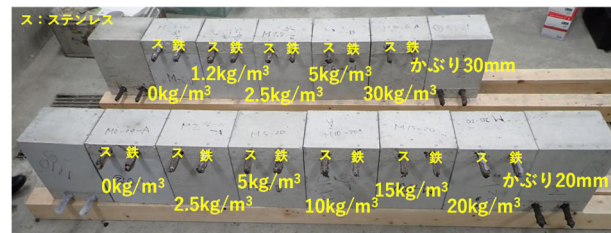
### 3.3 室内試験の測定結果

#### (1) 試験体の含水状態の変化

図-4 に試験体の含水状態の時系列変化を示す。市販の高周波容量式コンクリート・モルタル水分計の測定結果 (図-4 上) は, 装置の測定レンジ (モルタルの場合: 0-15 %) 外で%表示とすることができなかつたため, ダ

イレクト値としている。試験体の塩化物量が増加するとカウント値 (高周波容量に相応して水分が多いほど大きな値を示す) が増加することが確認できる。ただし, この測定方式では単純に水分量が多いためにカウント値が増加しているのか, 塩化物量の増加に伴う導電率の上昇も影響しているかについての議論が必要と考える。

今回の養生条件 (恒温養生室内での保管) では, 試験体質量の変化は小さいが, 塩化物量が多いほど質量減少率 (4 週の質量に対する減少率) が小さくなり (図-4 下), 乾燥が進行しにくいことがわかる。特に塩化物量 30 kg/m<sup>3</sup> の試験体質量は 4 週から変化していない (はかりの最小表示: 10 g)。



上: かぶり 30mm (左から C0, C.1.2, C2.5, C5, C30)  
下: かぶり 20mm (C0, C2.5, C5, c10, C15, C20)



G社製 N社製 P社製  
写真-2 試験体の配置と測定状況 (室内試験)

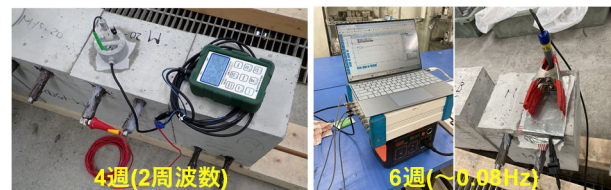


写真-3 電気化学的測定状況

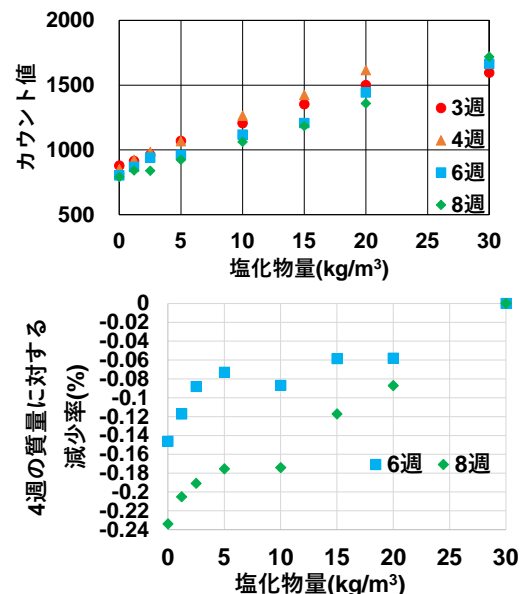


図-4 試験体の含水状態の時系列変化

(2) 電磁波レーダ測定結果

図-5 に3種類の装置で測定した際の各試験体のBモード画像(白黒)を、図-6にAモード波形(比誘電率の設定:8)を示す。なお、鉄とステンレスの振幅波形はほぼ同じであったため、鉄のみを示している。

装置により画像の見え方が異なるが、塩化物量が増加するとAモードの振幅値が小さくなるためBモード画像の色が薄くなることが確認できる。

また、Bモードで塩化物量が増加すると鋼材の位置が深く推定されている。Aモードで塩化物量が増えると鋼材からの反射波振幅値が小さくピークの位置が深くなっており、比誘電率が高くなっていることを示唆している。2章の屋外暴露試験体では約10年経過しているため、試験体ごとの比誘電率の差が小さく、概ね鋼材の深さ推定は同じであったが、室内試験体は材齢4週と6週の比較的若い材齢における測定であったため、含水量の差が影響していると考えられる。

ここで、P社製のかぶり20mmのみ、塩化物量増加に伴いピーク位置が浅くなっている。気中からコンクリートに入射する際の乱反射が浅いかぶり領域の反射波と重

なって影響を及ぼすとも考えられるが、表面近傍の信号処理のロジックは装置メーカー独自のブラックボックス的な面もあり原因を明確にはできなかった。また、かぶり20mmよりも30mmの反射波振幅値が大きいのは、電磁波レーダ下面に内蔵されているアンテナのフォーカス深さがより深い位置に設定されているためと考えられる。

図-7に塩化物量0kg/m<sup>3</sup>の振幅値を1とした場合の振幅比(比誘電率の設定:8)、図-8に比誘電率の設定を8とした場合のAモード波形のピークから読み取った各鋼材の深さの変化を示す。また、図-9に実際のかぶり厚さ20mmと30mmに合致するようにモルタルの比誘電率を算出したものを示す。なお、以降の凡例はステンレスをS、数値はかぶり厚さ(mm)として示す。G社製では塩化物量10kg/m<sup>3</sup>以上の比誘電率は20以上となり、仕様範囲外で算出できなかったため、グラフでは20としている。P社製のかぶり20mmはピーク位置が浅くなる関係で塩化物量が増加すると比誘電率が小さくなった。

図-7~図-9から、塩化物量が増加すると鋼材からの反射波振幅値が小さく、モルタルの比誘電率が高くなり、鋼材の位置が深い結果が得られた。

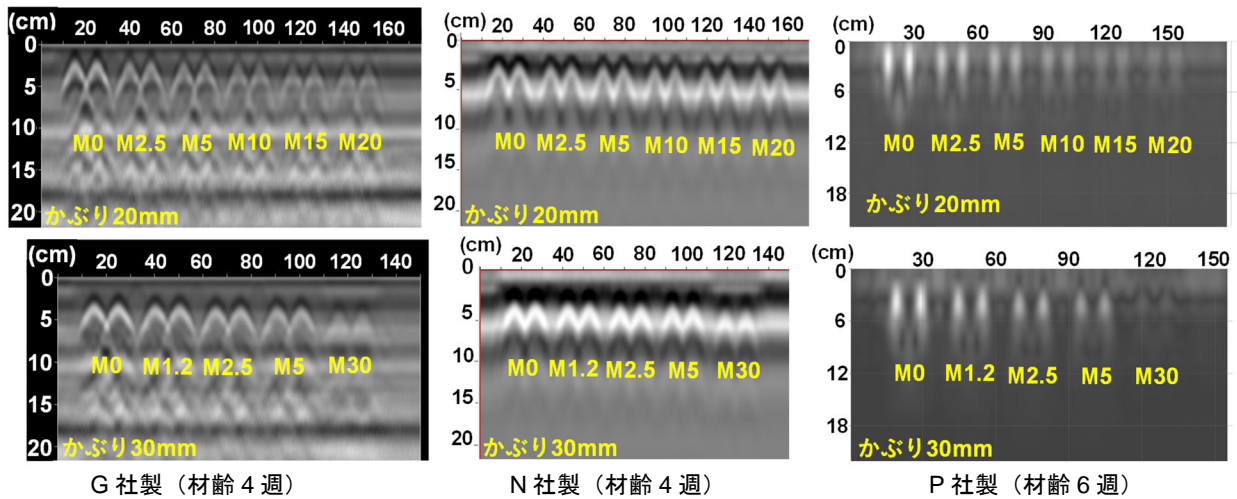


図-5 室内試験体のBモード画像(白黒)

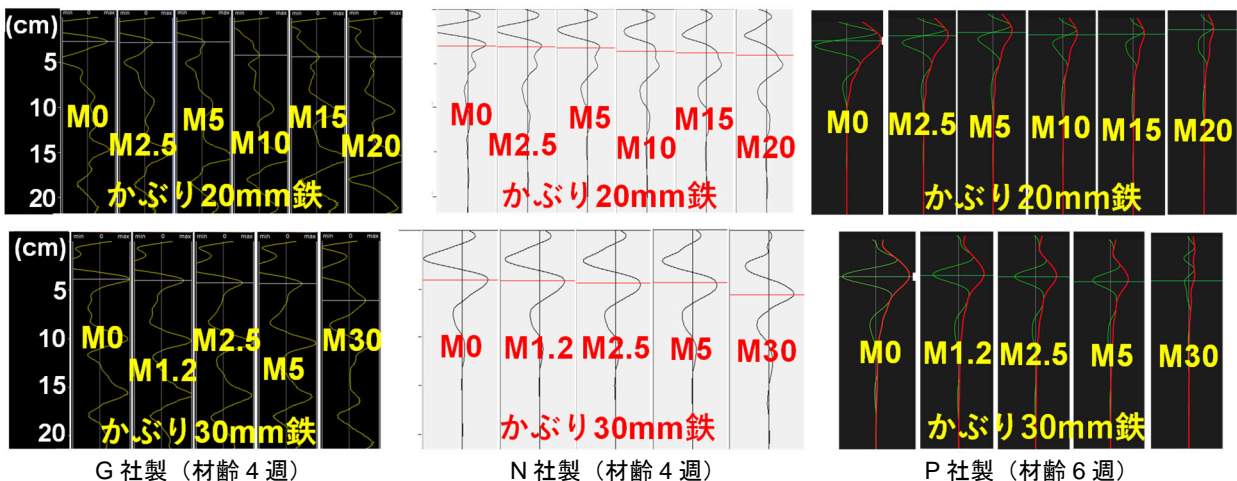
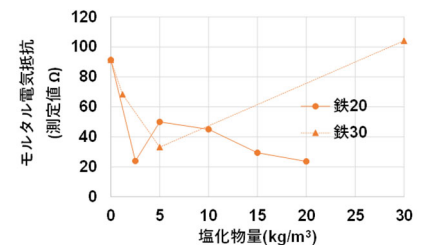
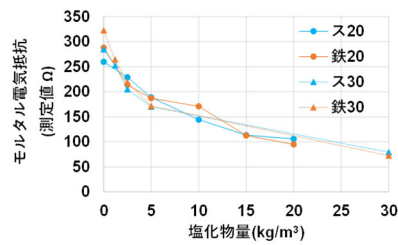
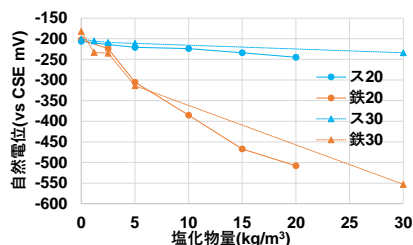
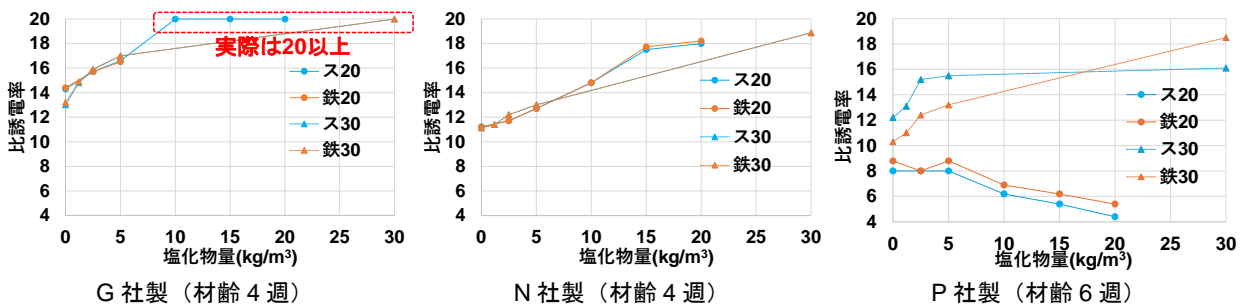
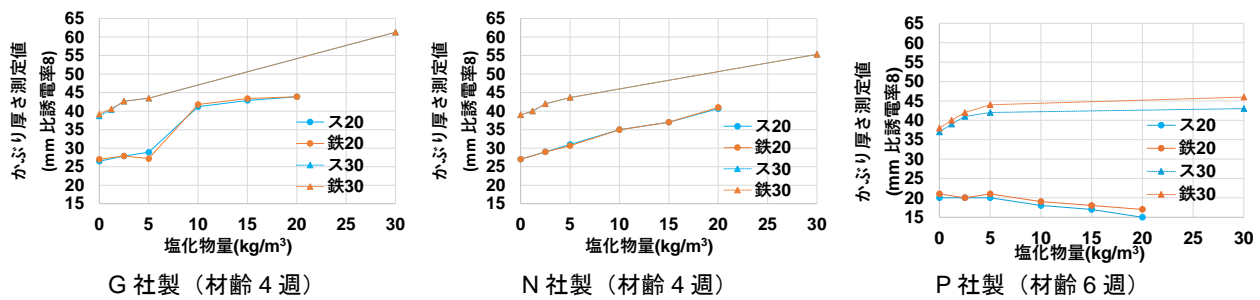
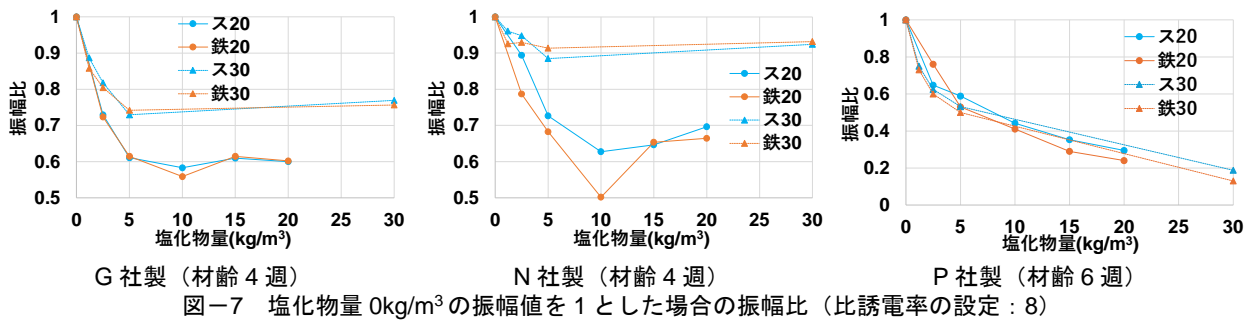


図-6 室内試験体のAモード波形(比誘電率の設定:8)



### (3) 電気化学的測定結果

モルタルの電気抵抗と鋼材の分極抵抗測定は2種類の方式で実施した。1つ目(4週の測定)は2周波数を用いて高周波数(400Hz)でモルタルの電気抵抗,低周波数(0.1 Hz)で鋼材の分極抵抗を測定する手法,2つ目(6週の測定)は高周波数(100 Hz)でモルタルの電気抵抗,低周波数は0.08 Hzまで連続的に測定した後,それよりも低周波数側はカーブフィッティングで算出して低周波数の測定値とする手法である。1つ目の手法は直径60mmの円形ステンレス対極,2つ目は試験体上面に幅100mm×長さ200mmのアルミテープを貼付して電極とした。

両方式とも試験体表面に対極を設置して内部の鋼材に電流を印加し,低周波数で測定した総抵抗と高周波数

で測定したモルタル抵抗の差分を鋼材の分極抵抗とした。なお,4週は鉄とステンレスの両方,6週は時間を要する測定方式のため,時間の制約上,鉄のみを測定した。

図-10に自然電位の測定結果を示す。塩化物量が増加すると鉄の自然電位は卑の傾向を示すが,ステンレスの自然電位は鉄と比較すると低下率が小さい。ステンレスは腐食しておらず,鉄は塩化物量10 kg/m<sup>3</sup>以上の試験体が腐食していると推定される。なお,30 kg/m<sup>3</sup>は磨き丸鋼とモルタルの境界における錆汁を目視で確認している。

図-11~図-12にモルタルの電気抵抗を示す。4週と6週では採用している周波数と対極の形状が異なるため,数値を直接比較することはできないが,塩化物量が増加するとモルタルの電気抵抗が低下していることがわかる。

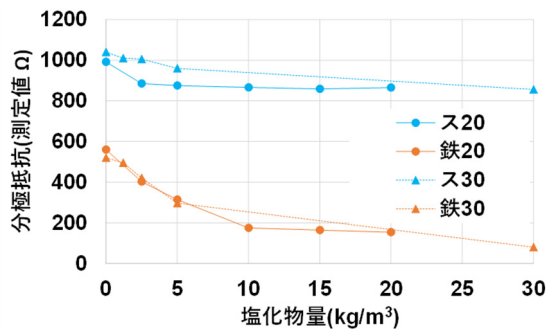


図-13 鋼材の分極抵抗測定値  
(0.1 Hz 材齢 4 週測定)

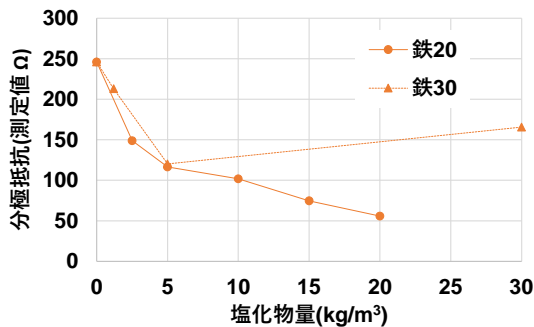


図-14 鋼材の分極抵抗測定値  
(~0.08Hz 材齢 6 週測定)

これは、コンクリート・モルタル水分計の測定結果と同じ傾向となっている。6 週の塩化物量 30 kg/m³ の値が高いのは、対極と試験体上面の接触不良の可能性がある。

図-13～図-14 に両手法で測定した鋼材の分極抵抗を示す。塩化物量が増加すると鉄の分極抵抗は低下していくものの、ステンレスの分極抵抗の低下は小さい。4 週と比較して 6 週の測定値が小さくなっているが、4 週の測定方式は対極寸法が小さいため鋼材に測定電流が流れる範囲が限定されるのに対して、6 週の測定方式は鋼材全長にわたり測定電流が流れるため、電流が流れる面積が大きくなり、抵抗値が小さくなるためである。

以上の自然電位と鋼材の分極抵抗の測定結果から、ステンレスの高い腐食抵抗性が確認できる。

#### 4. まとめ

電磁波レーダの測定結果は既往の研究結果と同様に塩化物量の増加に伴う鋼材からの反射波振幅値の減少を確認することができた。3 種の装置を用いて測定を行ったところ、中心周波数やフォーカス深さの違いにより波形の差はあるものの、概ね測定値の傾向は同じであった。

当初の目的は、塩化物量のみ影響が電磁波レーダ波

形に及ぼす影響を確認することであったが、室内試験体については、材齢 4 週と 6 週の測定となり、試験体間の含水状態の差が大きく、比誘電率の差も波形に影響した。今後、水和と乾燥が進行し、試験体間の比誘電率の差が小さくなった後に測定する必要がある。

電気化学的測定の結果は、塩化物量に応じた傾向を示している。鉄と比較してステンレスの高い腐食抵抗性が確認できた。塩化物量が高い試験体の鉄は腐食の傾向を示しているが、材齢が経過していないことと、養生条件から断面欠損は生じていないと考えられる。

今後も継続して電磁波レーダと電気化学的測定を実施して測定値の変化を確認していきたい。

#### 謝辞

本研究は JCI-TC234A 構造性能に主眼を置いた鋼材腐食性状の診断・推定手法研究委員会の活動の一環として実施した。屋外暴露試験体の測定のを提供していただいた高速道路総合技術研究所の山下恭敬委員，施工技術総合研究所（現 LiT 株式会社）の渡邊晋也氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 野嶋潤一郎，内田真未，新井淳一，溝渕利明：電磁波を用いたコンクリート中の塩化物イオン量推定技術の精度向上に関する基礎研究，土木学会論文集 E2，Vol.72，No.2，pp.109-125，2016.5
- 2) 溝渕利明：電磁波を用いた塩化物イオン量推定法の実構造物への適用，コンクリート工学，Vol.53，No.5，pp.468-473，2015.5
- 3) 胡桃澤清文，名和豊春：電磁波レーダによるコンクリート中の塩分量推定の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1871-1876，2006
- 4) 駒崎友晴，渡辺一，河村志朗：電磁波レーダを用いた高精度の鉄筋のかぶり・腐食の測定方法について，全地連「技術 e-フォーラム 2009」松江，No.2009-217，2009  
<https://www.zenchiren.or.jp/e-Forum/2009/117.pdf>
- 5) 田中正吾：電磁波レーダを用いた先端的非破壊検査技術，計測と制御，Vol.47，No.5，pp.437-444，2008.5
- 6) 日本無線株式会社：「ハンディサーチ NJJ-200」カタログ