

論文 サブテラヘルツ波を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に対する非破壊・非接触型評価手法の検討

疋島 宗哉*1・濱崎 仁*2・荒川 璃音*3・田邊 匡生*4

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリート構造物の非破壊検査への適用が期待されるサブテラヘルツ波を用いて、コンクリート内部の鉄筋の可視化、および鉄筋腐食状況の評価を行うことを目的として評価手法の検討を行った。実験では、グレードの異なる鉄筋を埋設した試験体について、10 GHzの電磁波による反射波の測定、および測定された反射強度の比較を行った。その結果、かぶり厚さ10 mmのコンクリート試験体において内部鉄筋の検出が可能であること、内部鉄筋の腐食の進行状況の定性的な評価が可能であることが確認された。
キーワード: サブテラヘルツ波, 反射強度, 直接反射型測定系, 非破壊, 非接触, 鉄筋腐食

1. 研究の背景と目的

RC 構造物の主な劣化としてコンクリート内部の鉄筋腐食が挙げられるが、その非破壊的な評価手法はいまだ十分な精度を有しているとは言えない状況にある。また、歴史的な構造物や供用中の構造物の診断では、非破壊であるとともに、非接触による評価であることが求められる場合も多い。

著者らは、鉄筋腐食の状況を非破壊かつ非接触で評価する方法の一つとしてサブテラヘルツ波を適用した評価方法を検討している。

本論文では、サブテラヘルツ波を活用した非破壊かつ非接触でのコンクリート内部の鉄筋腐食状況の評価手法を確立するための検討として、腐食グレードの異なる鉄筋埋設試験体を対象とした、サブテラヘルツ波による反射波による評価を行った結果について報告する。

2. 概説

2.1 テラヘルツ波・サブテラヘルツ波とは

テラヘルツ波とは周波数帯約0.1~10 THz、波長30 μm~3 mmの電磁波である。コンクリートなどの非極性物質に対する透過性と水などの極性物質に対する吸収性が高く、金属に対しては高い反射率を有する。また、鉄筋表面の腐食生成物には吸収もしくは散乱される。これらの特徴を利用することでコンクリート内部の鉄筋腐食状況の評価が可能であると考えられている。また、サブテラヘルツ波とは、一般的には周波数0.03~0.3 THz程度の電磁波であり、テラヘルツ波と類似の特徴を持ちながら、コンクリートなどに対してはより大きい透過能を持つ。

原ら¹⁾は、裏面にアルミテープを貼ったコンクリート試験体についてサブテラヘルツ波による反射波測定を行い、厚さ30 mmの試験体背面のアルミテープの有無

が検出可能であることを確認している。

本研究では、かぶり厚さ50 mm程度までのコンクリート内部の鉄筋腐食状況の評価を行うことを目標としていることから、既往の研究¹⁾によるサブテラヘルツ波の透過性を考慮し、周波数7.5~15 GHz、波長にしておよそ20~40 mmの電磁波を含めた範囲をサブテラヘルツ波として適用することとした。

2.2 測定系

電磁波の反射波の測定に用いられる測定系の概要を図-1、図-2に示す。以下では、図-1の測定系をハーフミラー型測定系、図-2の測定系を直接反射型測定系と呼ぶ。

発振器から照射された電磁波は、テフロンレンズにより波長程度にまで集光されて測定面で反射される。このとき、この波長程度の範囲内における反射強度の平均値が、その箇所における試験体の反射強度として測定される。また、測定を行う際、試験体は自動ステージに設置する。この自動ステージがX、Y、Zの3方向に駆動することで、任意の測定範囲、測定ピッチ、測定距離での反射波の測定が可能となる。

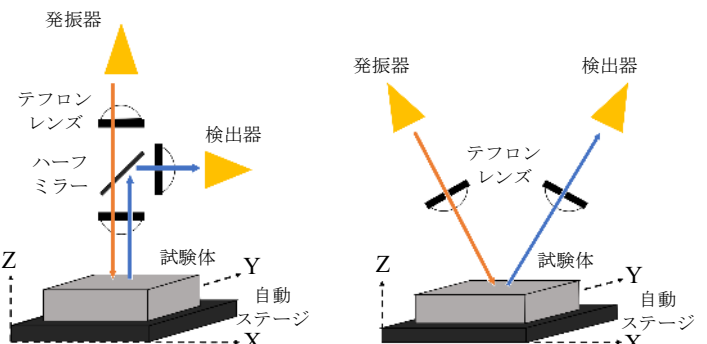


図-1 ハーフミラー型測定系 図-2 直接反射型測定系

*1 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 芝浦工業大学 建築学部建築学科

*4 芝浦工業大学 デザイン工学部デザイン工学科 教授 博士(工学)

本研究においては、3.2.2 測定系の選定で後述する検討の結果、コンクリート内部の鉄筋の測定により適していると考えられる直接反射型測定系を選定した。

電磁波には、その進行方向に対して垂直方向に波のように振動する電場が存在するが、この電場が入射面に対して垂直に振動する電磁波を *p* 偏光、水平に振動する電磁波を *s* 偏光という。選定した直接反射型測定系では、入射面に対して電磁波が斜めに入射されるため、偏光方向を考慮する必要がある。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

試験体の使用材料と品質を表-1 に、調合を表-2 に、作成した試験体の形状および寸法を図-3 に示す。調合条件は、水セメント比 55%，目標スランプ 18±1.0 cm，目標空気量 4.5±0.5% とし、塩化物イオン量は NaCl 10% 水溶液を用いて調整した。また、試験体は打込み後 2 日後に脱型し、その後 20℃ の気中養生とした。

試験体の要因と水準を表-3 に示す。鉄筋は長さ 180 mm，φ13 mm のみがき棒鋼を使用した。鉄筋腐食は腐食なし，グレード 1，グレード 2 の 3 水準とした。腐食グレードの異なる試験体の作製においては、塩化物イオン量なしの試験体では電食試験を行い、塩化物イオンを含有する試験体は乾湿繰り返し試験を行っている。また、腐食グレード 1 では腐食減少率 1% 程度，腐食グレード 2 では腐食減少率 3% 程度を想定している。

ここで、塩化物イオン量 0 kg/m³ のかぶり厚さ 30 mm 試験体において電食試験の予備実験を行った結果について、積算電流値と質量減少率の関係を図-4 に示す。図中の点線は近似直線を示す。また、電食試験終了後に、試験体のかぶり面の任意の 3 点においてひび割れ幅を測定した。その結果、質量減少率が 0.26% の場合には 0.04 mm 以下の微細なひび割れが、質量減少率が 2.62% の場合には平均 0.25 mm 程度のひび割れが確認された。

以上の予備実験の結果を基に、ひび割れ幅 0.10～0.15 mm 到達時点をグレード 1 とし、電食試験ではその 2 倍の積算電流値、もしくは、ひび割れ幅 0.3 mm をグレード 2 とした。乾湿繰り返し試験ではグレード 1 到達時の 2 倍のサイクル、もしくは、ひび割れ幅 0.3 mm をグレード 2 とした。

3.2 実験方法

3.2.1 実験の構成

本研究では、以下の 3 つの実験を実施した。はじめに、図-1、図-2 のうち、コンクリート内部の鉄筋の測定により適している測定系を選定するために、50 mm 厚さのコンクリート試験体と金属板に対して、測定距離を変化させた際の反射強度の測定を行った。次に、鉄筋の腐

表-1 使用材料と品質

使用材料		品質	
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3270cm ² /g	
水 (W)	水道水		
細骨材 (S)	静岡県大井川水系産陸砂	表乾密度:2.54g/cm ³ , 吸水率:1.89%	
粗骨材 (G)	東京都青梅産硬質砂岩碎石	表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.65%	
化学混和剤	Ad.1	AE 減水剤	リグニンスルホン酸系標準形(I種)
	Ad.2	空気量調整剤	アルキルエーテル系標準形(I種)

表-2 試験体の調合

塩化物イオン量 [kg/m ³]	単位量 [kg/m ³]				混和剤 (C×%)	
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	Ad.1	Ad.2
0					1.0	0.0045
1.2	168	306	857	951	1.1	0.0045
2.5					1.2	0.0050

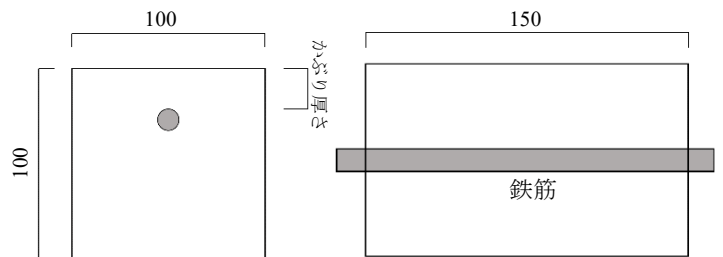


図-3 試験体の形状と寸法 [mm]

表-3 試験体の要因と水準

要因	水準
かぶり厚さ [mm]	10, 30
塩化物イオン量 [kg/m ³]	0, 1.2, 2.5
腐食程度	なし, グレード 1, グレード 2

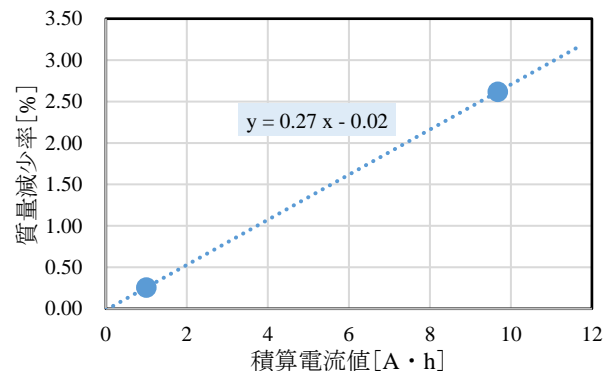


図-4 電食試験における積算電流値と質量減少率の関係

食要因である水分と塩分による測定への影響について検討を行うために、含水状態、および、塩化物イオン量の

異なるコンクリート試験体について測定を行った。その後、図-3 に示した鉄筋コンクリート試験体により、コンクリート内部の鉄筋の可視化および腐食状況の評価のための測定を行った。

3.2.2 測定系の選定

図-1、図-2 に示した各測定系において、50 mm 厚さのコンクリート試験体と金属板について、Z 方向に 1 mm ピッチで移動させて、各 Z 値(移動距離)につき 4 点の反射波測定を行い、それらの平均値を算出した。また、本測定に用いたコンクリート試験体は、著者らの先行研究²⁾において作製したものである。

使用した周波数は、7.5~15 GHz の範囲内で十分な強度が得られる 3 周波数とし、ハーフミラー型測定系では 8.7 GHz、10.1 GHz、13 GHz、直接反射型測定系では 7.5 GHz、10 GHz、15 GHz とした。

3.2.3 塩化物イオン量および含水状態の影響

埋設鉄筋の影響を受けないように、かぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体のかぶり面の反対側の面において反射強度の測定を行った。測定周波数は 7.5 GHz、10 GHz、15 GHz の 3 周波数として、測定範囲は試験体中央部の 50mm×50 mm、測定ピッチは 2 mm とした。塩化物イオン量の水準は 0、1.2、2.5 kg/m³、含水状態は絶乾状態、気中乾燥状態(含水率 2.1~2.5%)とした。

3.2.4 内部鉄筋の可視化および腐食状況の評価

10 GHz による内部鉄筋の検出可能深さを確認するために、10 mm、30 mm 厚さのコンクリート試験体の背面にアルミテープを貼り付けて反射波測定を行った。測定範囲は、X、Y 方向においては試験体中央部の 60×60 mm、測定ピッチは 3 mm とした。また、本測定に用いたコンクリート試験体は、著者らの先行研究²⁾にて作製したものである。

次に、塩化物イオンを含まない腐食なし、グレード 1、グレード 2 のかぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体において反射波測定を行った。測定範囲は、X、Y 方向においては試験体中央部の 60×60 mm、測定ピッチは 3 mm として、Z 方向については測定ピッチ 5 mm で計 7 点とした。このとき、試験体表面の高さが測定系の焦点と一致する場合は Z=0 とした。

4. 実験結果および考察

4.1 測定系の選定

ハーフミラー型測定系によるコンクリート試験体および金属板の測定結果を図-5 に、直接反射型測定系による測定結果を図-6 に示す。

ハーフミラー型測定系では、いくつかの Z 値において、コンクリートと金属板の反射強度の大小関係が逆転しているが、直接反射型測定系では、すべての Z 値において、

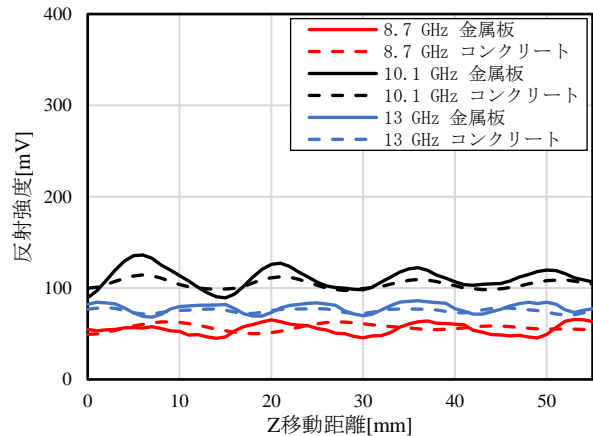


図-5 ハーフミラー型測定系 測定結果

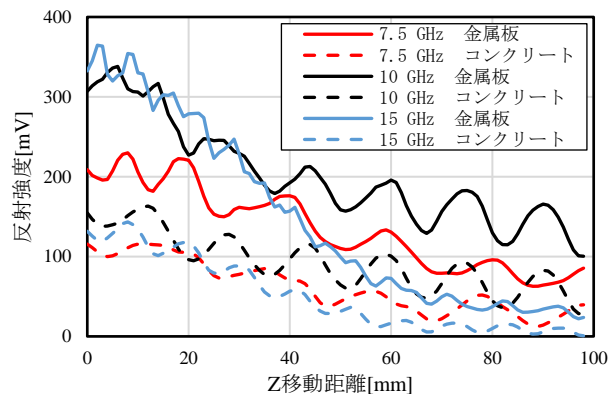


図-6 直接反射型測定系 測定結果

コンクリートと比較して金属板の反射強度が大きくなっていることが確認される。これは、ハーフミラー型測定系では入射波と反射波の経路が一部同じであることから、その同一経路箇所では入射波と反射波により干渉が起こるためであると考えられる。また、ハーフミラー型測定系では、ハーフミラーによる減衰が生じるため、直接反射型測定系と比較して、反射強度のダイナミックレンジが小さくなることも確認できた。

以上のことから、コンクリート内部の鉄筋腐食状況の評価を行うには、直接反射型測定系が適していると考えられる。

4.2 塩化物イオン量および含水状態の影響

s 偏光によるかぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体のかぶり面の反対側の面の測定結果を図-7 に、p 偏光による測定結果を図-8 に示す。異なる周波数同士での比較を行うため、測定した試験体の反射強度を金属板の反射強度で除して反射率を算出した。また、使用した金属板は 3.2.2 測定系の選定で使用した金属板であり、3.2.3 塩化物イオン量および含水状態の影響で示したものと同一な測定条件で反射強度の測定を行った。図-7、図-8 は、各水準における 625 点における反射率の平均値を折れ線グラフにしたものである。

s 偏光による測定では、絶乾状態の場合、10 GHz では、

塩化物イオン量による反射率の変動がおよそ3%以内におさまっているが、7.5 GHz、15 GHzでは塩化物イオン量により反射率が大きく変化することが確認できる。一方、気中乾燥状態では、すべての周波数において塩化物イオン量による反射率の変動がおよそ3%以内におさまっており、塩化物イオン量による反射波測定への影響が小さいことが確認できる。

p 偏光による測定では、絶乾状態の場合では、塩化物イオン量の増加に伴い、7.5 GHzでは反射率が緩やかに増加し、10 GHzでは反射率が増加、15 GHzでは反射率が低下しており、周波数ごとに異なる傾向であることが確認できる。気中乾燥状態においては、すべての周波数において、塩化物イオン量 1.2 kg/m³ のとき反射率が最も低くなることを確認できる。

以上のことから、塩化物イオン量による反射波測定への影響を明らかにすることは現状では困難であるが、塩化物イオン量の変化に対する反射率への影響が小さいことから、コンクリート試験体内部の鉄筋の可視化においては、測定対象のコンクリートが気中乾燥状態であり、かつ、 s 偏光による測定が適していると考えられる。

4.3 内部鉄筋の可視化

厚さ 10 mm、30 mm のコンクリート試験体について、背面にアルミテープを貼り付けた場合と試験体のみの場合において反射波の測定を行い、それらの反射強度の差分をとった結果を図-9 に示す。図中の白い点線は、背面のアルミテープの箇所を示したものである。

厚さ 10 mm の場合には、アルミテープ箇所の範囲内で大きい差分反射強度が得られており、厚さ 30 mm の場合においてもアルミテープ箇所の範囲内において一部分ではあるものの大きい差分反射強度が得られることが確認できた。

これらのことから、本測定系における 10 GHz による測定では、30 mm 程度が内部鉄筋の検出が可能な範囲であると考えられる。検出範囲については、発振器に高出力アンプを組み合わせ、試験体に入射される電磁波の強度を大きくすることなどにより、より深い位置にある内部鉄筋の検出が可能になると考えられる。

次に、腐食なしのかぶり厚さ 10 mm コンクリート試験体について $Z=0$ におけるかぶり面の測定結果を図-10 に、かぶり面の反対側の面の測定結果を図-11 に示す。どちらの場合においても、同様な横縞状の強度のムラが生じていることが画像から確認できる。かぶり面の反対側の面による反射波測定においては、内部鉄筋の影響を受けていないと考えられるため、この両者に共通する強度のムラは、内部鉄筋ではなくコンクリート試験体の表面反射により生じる測定系固有のものであると考えられる。そこで、表面反射の影響を除去するために、かぶり

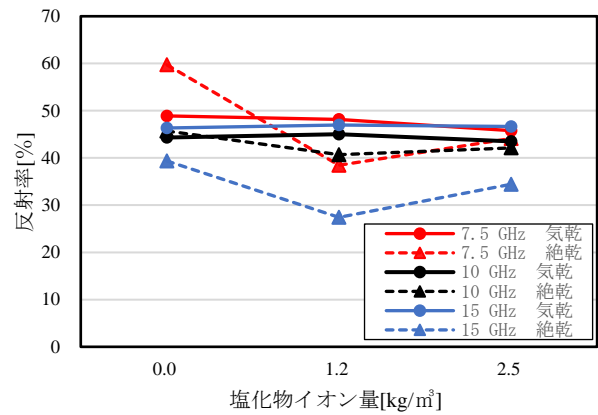


図-7 s 偏光による測定結果

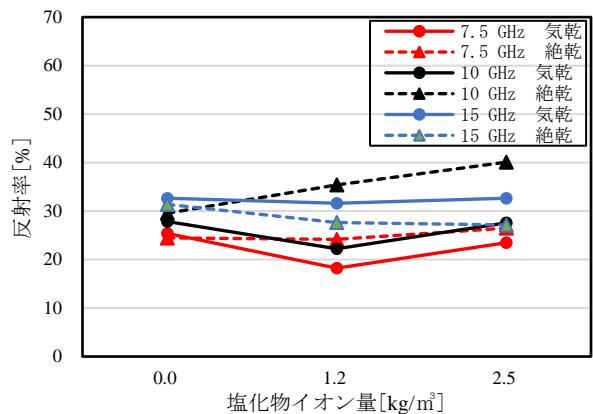


図-8 p 偏光による測定結果

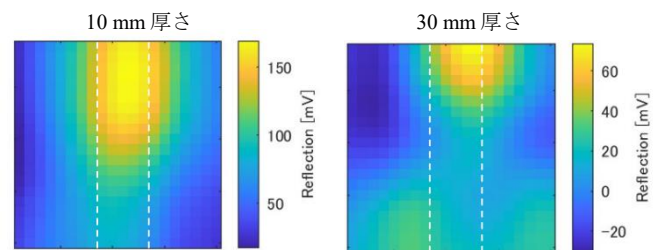


図-9 背面アルミテープの測定結果

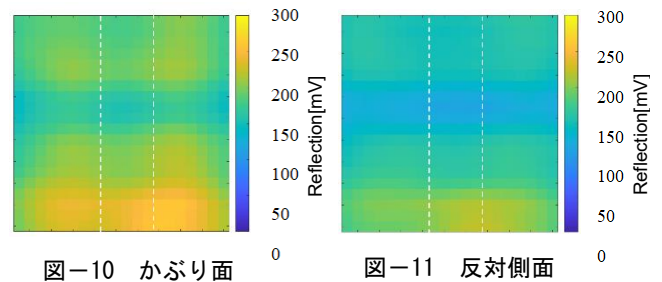


図-10 かぶり面

図-11 反対側面

面とその反対側の面について測定を行い、それらの差分をとることとした。実構造物の調査では、鉄筋の影響を受けない位置での測定によって、表面反射の影響を除去することが考えられる。

腐食なしのかぶり厚さ 10 mm コンクリート試験体について、差分処理後の測定結果を図-12 に示す。図中の白い点線は、内部の鉄筋の位置を示したものである。 $Z=10$ の場合において、内部鉄筋と同様の範囲内で、差分反射強度が大きくなっていることが確認できる。ただ

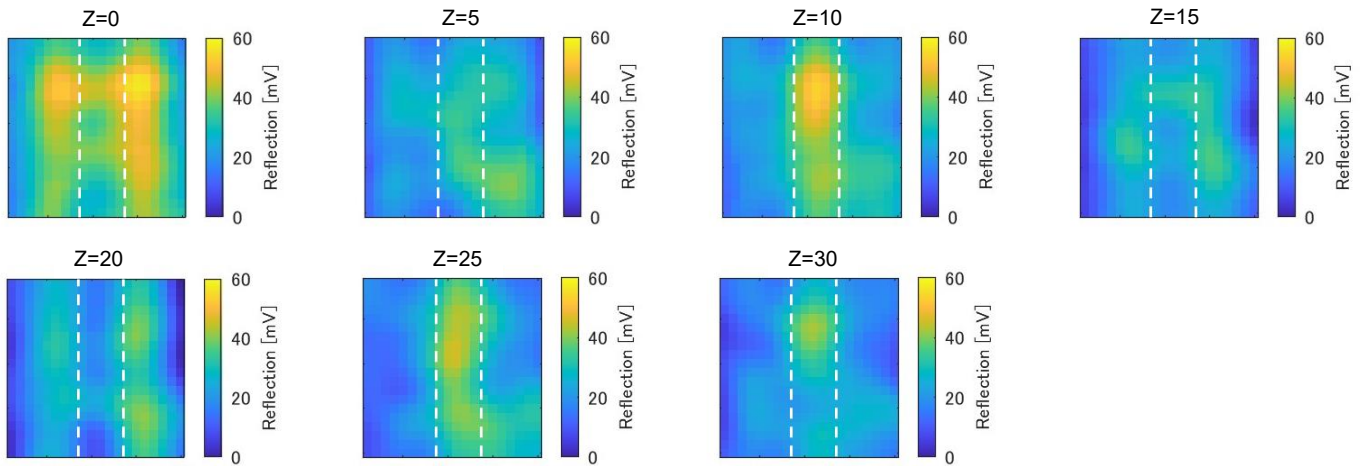


図-12 腐食なし かぶり厚さ 10mm 試験体 差分処理後

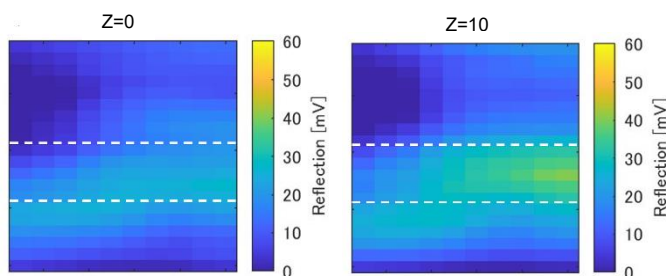


図-13 試験体のみ回転させた場合の測定結果

し、 $Z=0$ では、内部鉄筋の両脇部分の差分反射強度がより大きくなっているなど、 $Z=10$ 以外の高さでは、差分反射強度の高い位置が鉄筋のある場所と異なる結果となった。 $Z=10$ の場合でのみ、差分反射強度の大きい範囲と内部鉄筋の範囲が一致する結果となったのは、試験体のかぶり厚さが 10 mm であるため、 $Z=10$ の場合に測定機器の焦点と鉄筋の表面位置が一致するためであると考えられる。

また、図-12 の場合から試験体のみを 90° 回転させて、同一試験体における $Z=0$ と $Z=10$ の場合について同様の測定を行った結果を図-13 に示す。 $Z=0, 10$ のどちらの場合においても、内部鉄筋の範囲内で差分反射強度が大きくなっていることが確認できる。また、その傾向は $Z=10$ の場合により顕著になっている。この理由としては、前述したように、 $Z=10$ の場合に測定機器の焦点と鉄筋の表面位置が一致するためであると考えられる。

また、図-12 と図-13 を比較した場合、図-12 では前述したように、 $Z=0$ の場合に内部鉄筋の両脇部分の差分反射強度がより大きくなっているのに対して、図-13 における $Z=0$ の場合では内部鉄筋の範囲とその付近で差分反射強度が大きくなっていることが確認できる。このように、 $Z=0$ の場合で両者の傾向が異なる理由としては、発振器から照射される電磁波はその波長程度の幅をもっていること、偏光方向に対して内部鉄筋が直交方向にある場合と平行にある場合とで鉄筋による反射の起こり方

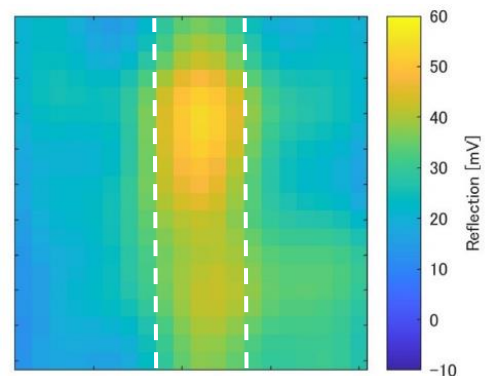


図-14 腐食なし 測定結果

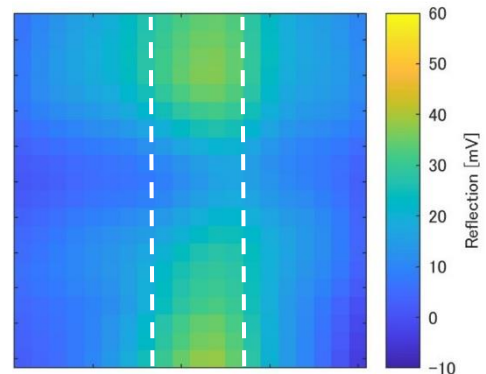


図-15 腐食グレード1 測定結果

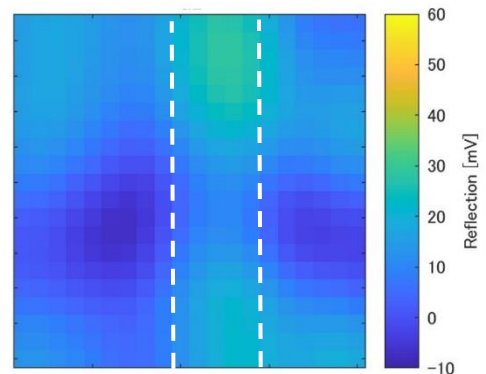


図-16 腐食グレード2 測定結果

が異なるためであると推測される。

ただし、 $Z=10$ の場合においては、内部鉄筋の向きにかかわらず鉄筋と同様の範囲内で差分反射強度が大きくなることが確認できることから、10 GHz による測定では、かぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体について、 $Z=10$ の場合に内部鉄筋を検出できていると考えられる。

4.4 鉄筋の腐食状況の評価

鉄筋腐食による影響については、4.3 内部鉄筋の可視化により内部鉄筋を検出できていると考えられる $Z=10$ の場合の結果を用いて比較、検討する。 $Z=10$ の場合における腐食なしの測定結果を図-14に、腐食グレード1の測定結果を図-15に、腐食グレード2の測定結果を図-16に示す。すべての腐食グレードにおいて、内部鉄筋範囲内の全体を見た場合には、コンクリート箇所と比較して大きな差分反射強度が得られていることが確認できる。また、腐食が進行するに伴い、差分反射強度が小さくなることも確認できる。テラヘルツ波は、鉄筋表面の腐食生成物により吸収もしくは散乱されることで反射率が低下することが知られている。これにより、差分反射強度が小さくなっていると考えられる。

また、各腐食グレードの測定結果において、白枠線で示した内部鉄筋の範囲内とコンクリート箇所のそれぞれにおける反射強度の平均値を算出した結果を図-17に示す。腐食が進行するに伴い、内部鉄筋範囲内とコンクリート箇所の両方で差分反射強度の平均値が小さくなるのがこの図からも確認できる。内部鉄筋範囲内のみでなく、コンクリート箇所においても腐食の進行に伴う強度の低下が確認された理由としては、試験体内部の骨材により鉄筋からの反射波が散乱していることや、照射される電磁波はその波長程度の幅をもっているために、鉄筋範囲内付近のコンクリート箇所においても鉄筋による反射を含んでいる、すなわち、コンクリート箇所の測定においても内部鉄筋の腐食グレードの違いによる影響を含んでいる場合があるためであると考えられる。

また、内部鉄筋の範囲内とコンクリート箇所の差分反射強度の平均値の差に着目すると、腐食の進行に伴い、両者の差が小さくなることが確認できる。これも、鉄筋表面の腐食生成物により電磁波が吸収もしくは散乱されることで、内部鉄筋による反射強度が低下するためであると考えられる。

以上のことから、10 GHz により、腐食グレードの異なるかぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体について測定を行うことで、内部鉄筋の腐食の進行状況を定性的に評価することが可能であることが確認できた。

今後は、他の周波数による測定や、かぶり厚さや塩化物イオン量、鉄筋の促進試験方法などの条件が異なる試験体についても測定を行い、データを蓄積することで内部鉄筋の腐食状況の定量的な評価手法について検討する。

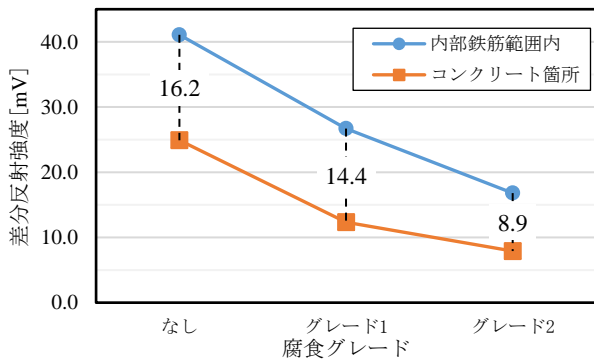


図-17 各範囲における平均値

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 気中乾燥状態における s 偏光による測定では、塩化物イオン量による反射波測定への影響が小さいことが確認できた。このことから、コンクリート内部の鉄筋の可視化においては、対象が気中乾燥状態かつ、 s 偏光による測定が適していると考えられる。
- 2) 10 GHz による測定では、かぶり厚さ 10 mm のコンクリート試験体について、測定系の焦点と鉄筋の表面位置が一致する場合 ($Z=10$) で、内部鉄筋の範囲内全体を見た場合に差分反射強度が大きくなることが確認できた。このことから、10 GHz によりかぶり厚さ 10 mm の内部鉄筋を検出できていると考えられる。
- 3) 10 GHz による反射波の測定を行うことで、内部鉄筋の腐食の進行状況を定性的に評価することが可能であることが確認できた。

謝辞

本研究は、国土交通省住宅生産技術イノベーション促進事業「サブテラヘルツ波を適用した鉄筋コンクリート造集合住宅の予防保全システムの開発」の検討の一環として実施したものである。本研究の実施にあたり東北大学大学院工学研究科西脇智哉准教授、日本工業大学建築学部田中章夫助教、(株)コンステック佐藤大輔氏に多大なる助力をいただいた。記して、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 原星海, 清水耕史, 西脇智哉, 田中章夫: サブテラヘルツ反射波を用いた非破壊検査手法の開発に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1408-1413, 2022.7.
- 2) 疋島宗哉, 濱崎仁, 田邊匡生, 西脇智哉, 田中章夫, 佐藤大輔, 清水耕史, 原星海, 藤井翔: サブテラヘルツ波によるコンクリート内部の鉄筋腐食の非破壊・非接触型推定手法に関する研究 (その1 含水率, 塩化物イオン量, 鋼板の腐食による影響についての評価), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.395-396, 2022.9.