

論文 遠距離測定に向けたサブテラヘルツ波による内部欠陥検出の基礎的検討

有田 剛士*1・田中 章夫*2・西脇 智哉*3

要旨：建築物の劣化や損傷により構造上安全が確保されていない場合や環境的要因によって近づくことが困難である建築物が存在する。そういった建築物の調査には遠距離測定が必要なため、サブテラヘルツ波を用いて測定を行った。透過法・反射法ともに測定距離による減衰がみられ、照射範囲は大きくなり電磁波の拡散が確認された。また、測定角度によって検出強度が異なり角度による影響は大きいことが確認された。コンクリート厚さと含水率によって検出強度が増減し、含水率が4.3%程度から検出が困難になった。ひび割れ幅の検出では、1 mm程度から検出可能であり、3 mmを超えると強度の変動が小さくなった。

キーワード：サブテラヘルツ波、遠距離測定、非破壊検査、測定角度、照射範囲、含水状態、試験体厚さ

1. はじめに

耐久性や経済性に優れており、構造材料として使われている鉄筋コンクリート構造物は、20世紀に世界で実用化され始めた。日本では1923年に起きた関東大震災を境に広く使用されるようになった。1955年に高度経済成長期を迎え、1964年には東京オリンピックが開催され、こういった背景をもとに建設された多くの建築物は耐用年数とされる50年を経過し老朽化が進行している。鉄筋コンクリート構造物の限界状態は、かぶりコンクリートが中性化し、鉄筋位置まで中性化が到達した時とされている。また、近年多発している地震や台風をはじめ、自然災害による建築物の損傷・破壊は少なくない。例として、福島原子力発電所のように自然災害によって建築物が損傷したことで、施設機能が人体に悪影響をもたらす可能性もある。このように、損傷・破壊が生じ構造面で安全性が不足している建築物や環境的要因によって建築物に近づけない場合がある。そのような建築物においては、目視調査や電磁波レーダー法、超音波検査法など近距離測定による接触式での劣化調査は困難であり、非接触かつ遠距離からの非破壊検査での手法が必要となる。

遠距離からの測定方法は、赤外線調査法²⁾が主に使用されているが、調査には太陽光が必要条件となり、温度変化の高低差や時間、測定角度などを考慮することが必要となり、気候条件や周辺環境の影響を受けるため調査日時が限られる²⁾³⁾。また、コンクリートのかぶりが増すと浮きの検出が困難であり、ひび割れ検出や含水状態による劣化促進環境の評価までは可能ではない。構造面・環境面から安全性が確保されていない建築物での近距離測定が困難である状況でも、建築物の含水状態や表面にみえないひび割れをはじめとする内部欠損を評価する遠距離からの調査方法が必要となる。

そこで本研究では、鉄筋探査に用いられる電磁波レーダーや気象用レーダーで利用されているサブテラヘルツ波⁴⁾の低周波側領域(8.5~12.5 GHz)を用いて、透過法・反射法で計測を行った。コンクリートの含水状態、表面に見えないひび割れを遠距離から把握するため、サブテラヘルツ波に及ぼす測定距離や測定角度、照射範囲の影響、また、コンクリートの厚さ・含水状態・ひび割れ幅による影響について基礎的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 光学系装置概要

図-1, 2に光学系装置の透過法と反射法の概要図を示す。サブテラヘルツ波光学系装置の測定方法は、透過法と反射法の2つの方法がある。実構造物の計測を考慮すると、透過法は構造物を中心として発振器と検波器を設置するため、位置合わせが困難である。そのため本実験ではハーフミラーを用いた反射法での計測⁴⁾を主として行った。

透過法⁵⁾は、図-2(左側)に示される通り信号発振器から発振されたサブテラヘルツ波を信号増幅器(AMP, 出力可変型, 最大出力1 W)によって増幅させ、ホーンアンテナ(発振器)から照射し、テフロンレンズ、測定物、テフロンレンズ、検波器の順に伝達される。

反射法は図-2(右側)に示される通りホーンアンテナ(発振器)から発振されたサブテラヘルツ波がテフロンレンズ、ハーフミラーを通過し測定物で反射後、ハーフミラー、テフロンレンズ、検波器の順に伝播する。テフロンレンズはサブテラヘルツ波を平行ビームに変換し、もしくは、平行ビームを集光させる役目を持つ。構成上ハーフミラーは入射波を透過させ、反射波は反射させ角度を変える役割を担う。

*1 日本工業大学大学院工学研究科 建築デザイン学専攻 (学生会員)

*2 日本工業大学 建築学部 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

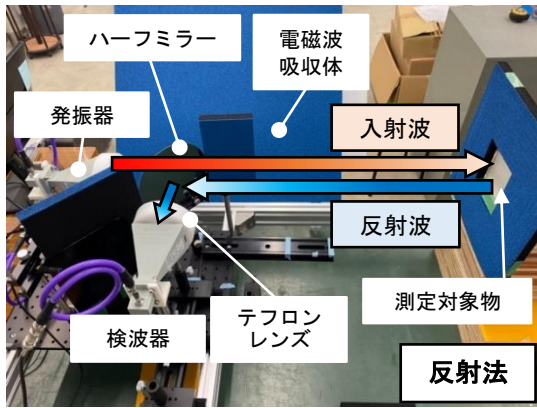


図-1 光学系測定装置（反射法）

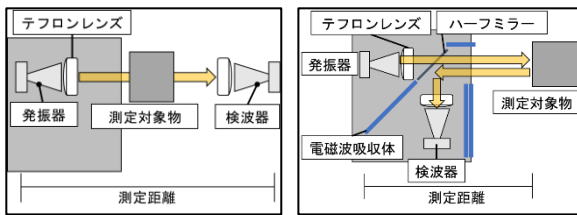


図-2 光学系装置（左：透過法，右：反射法）

2.2 光学系測定装置の測定条件による影響

(1) 測定距離による減衰効果の検討

電磁波は一般的に、大気中の水分や空気の密度によって減衰するため、測定対象物までの距離が遠のくほど検出強度が小さくなるとされる。そのため、サブテラヘルツ波の発振出力（AMP）を測定距離によって調整する必要がある。そこでサブテラヘルツ波の電磁波特性を理解するため、透過法と反射法によって測定距離による減衰効果の計測を行った。測定周波数は 8.5～12.5 GHz とし 0.5 GHz 間隔とした。また、透過法は測定距離 610～3000 mm を 10 mm 間隔で、反射法は測定距離 420～650 mm を 5 mm 間隔、650 mm～1000 mm を 10 mm 間隔、1000～3000 mm を 500 mm 間隔として計測した。

検波器の性能上、センサーの受信可能な強度限界が 2000mV 程度であることに加え、測定条件によって強度限界を超える高い検出強度が得られる可能性もある。また、測定距離が遠のくにつれ検出強度が減衰するため、各測定距離において強度変化が確認できるように出力を調整する必要がある。そのため、透過法・反射法ともに測定距離 420 mm で検出強度 1000 mV が得られるように出力を 18.5 dBm でサブテラヘルツ波を発振させた。また、電磁波は一般的に距離に応じて拡散するため、対数軸による評価が望ましい。このことから、電力増減や光ファイバーなどで用いられる単位（dBm）に式(1)によって変換した。

$$\text{dBm} = 20 \log(\text{検出強度}) - 20 \log(230) \quad (1)$$

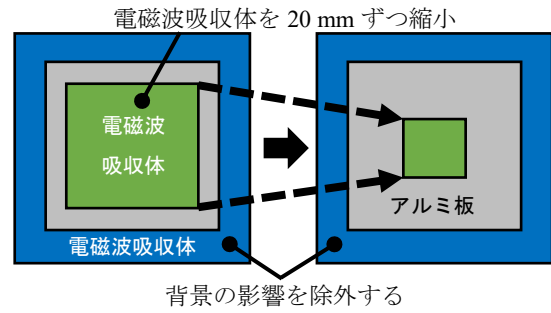


図-3 測定範囲の測定方法

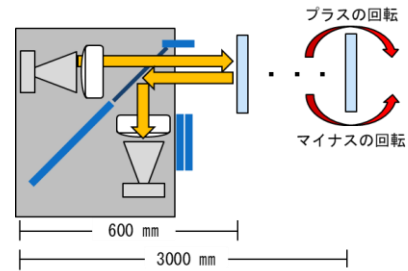


図-4 角度による影響の計測模式図

(2) 照射範囲の検討

電磁波は一般的に距離とともに拡散する。テフロンレンズで平行ビームに偏光させても例外ではない。そのため、距離に応じた照射範囲の検討を行った。図-3 に照射範囲の測定模式図を示す。測定距離は 600～2400 mm とし、周波数は 8.5～12.5 GHz とした。測定対象物は、電磁波損失が小さく、板厚精度が±0.05 mm 以下の A5052 系アルミニウム板（300×300 mm）とした。図に示す青色と緑色は、ウレタンフォームを基材とし、0.6～50 GHz に対し吸収性能を有する電磁波吸収体である。青色の吸収体は、発散した電磁波が室内環境により反射し、計測結果へ与える影響を除去することを目的とした。緑色の吸収体は照射範囲の検討をするため、アルミ板前面に設置し、吸収体を 20 mm ずつ狭め強度の減衰から照射範囲の検討を行った。このとき、吸収体の最小サイズは 100×100 mm とした。また、反射率を式(2)によって求めた。

$$\text{反射率}(\%) = \frac{\text{吸収体を設置時の検出強度}}{\text{各距離のアルミ板の検出強度}} \quad (2)$$

(3) 測定角度による影響

実構造物の計測を行うに当たり、測定対象物の立地条件をはじめ測定環境によって、その多くは真正面から計測できない。そのため、アルミ板によって測定対象物を模擬し、対象物との角度による影響を計測した。図-4 に角度による影響の計測模式図を示す。アルミ板角度を時計回りにプラス回転、反時計回りにマイナス回転として各方向に 1° ずつ回転させ計測した。測定距離は 600～

表-1 試験体の調合計画

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
50	49	172	344	851	912

表-2 試験体水準

試験体厚さ	10, 30, 50, 100 (mm)
含水状態	絶乾(0.4%), 気乾(2.0%) 湿潤(4.3%), 飽水(7.3%)



図-5 ひび割れ模式図

2400 mm とし、600 mm 間隔で計測を行った。また、反射率を式(3)によって算出した。

$$\text{反射率 (\%)} = \frac{\text{角度変更後の検出強度}}{\text{各距離の角度 } 0^\circ \text{ の検出強度}} \quad (3)$$

2.3 コンクリートの品質状態による影響

2.3.1 試験体概要

表-1 に計画調合、表-2 に試験体水準を示す。使用材料は、水 (W) は上水道水、セメント (C) は普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³)、細骨材 (S) は大井川水系陸砂(表乾密度 2.58 g/cm³)、粗骨材 (G) は青梅産硬質砂岩砕石 1505(表乾密度 2.65 g/cm³) を使用した。試験体は水セメント比 50% の普通コンクリートとし、形状は 100×100×100 mm とした。打設後、材齢 28 日まで水中養生を行い、その後、コンクリートカッターを用いて試験体厚さを 10, 30, 50, 100 mm になるように切断した。切断後、含水状態を調整するため、全試験体を 50 °C 環境下で 2 週間の乾燥を行い絶乾状態と定義した。その後、気乾状態は乾燥後の試験体を室温 20 °C、湿度 60 % の恒温室内で管理し、湿潤状態は乾燥後の試験体を温度 20 °C、湿度 100 % のデシケータの中で管理し、飽水状態は 20 °C 水中で管理し衡量にした。なお、表-2 に示す含水率は、サブテラヘルツ波測定時の含水率を示す。

2.3.2 コンクリート厚さ・含水状態による影響

試験体厚さは 10, 30, 50, 100 mm の 100×100 mm の試験体とした。測定周波数は、8.5~12.5 GHz とし 0.1 GHz

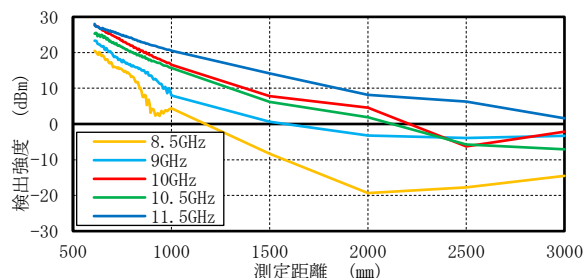


図-6 透過法の距離減衰

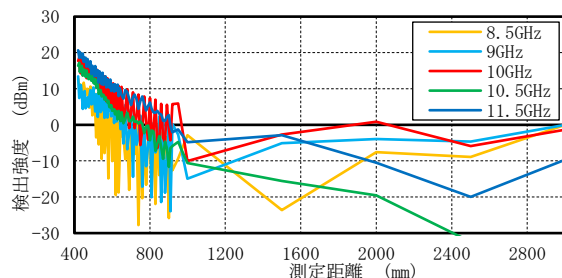


図-7 反射法の距離減衰

間隔で透過法と反射法で計測を行った。また、試験体の含水状態は、絶乾・気乾・湿潤・飽水状態とし、透過法と反射法で計測を行った。

2.3.3 ひび割れ幅の検出

実構造物の表面にみえない内部のひび割れを検出する際、どの程度のひび割れ幅が検出可能か検討を行った。図-5 にひび割れを模擬した試験体模式図を示す。試験体は絶乾状態とし、形状は 100×100×100 mm を 10, 30, 50 mm の位置で切断した。図-5 左図は正面図、右図は切断位置の平面図である。図-5 左図の試験体上部と試験体下部の隙間(切断位置)に、図-5 右図のように小片のスチレンボードを四隅に挟みひび割れを模擬した。実構造物のひび割れは、骨材などで凹凸があり電磁波の散乱が予測される。ひび割れの影響について基礎的な理解を得るため、ひび割れ断面が平滑な状態で検討を行った。ひび割れ幅は 1, 3, 5 mm とし、スチレンボードの厚みを変化させ調整した。周波数は 8.5~12.5 GHz を 0.1 GHz 間隔とし、反射法による計測を行った。

3. 実験結果・考察

3.1 測定距離による減衰効果の検討

図-6, 7 に透過法、反射法の距離減衰を示す。透過法・反射法ともに、距離が遠のくにつれて強度が減衰することが確認された。また、反射法では、検出強度が大きく振幅しながら減衰していくことが確認された。これは入射波と反射波が干渉したことに由来するものと推測される。また、いくつかの周波数で、測定距離 600 mm 程度まで出力の 18.5 dBm よりも大きい強度が検出された。これは、連続波を発振させているため、入射波と反射波が

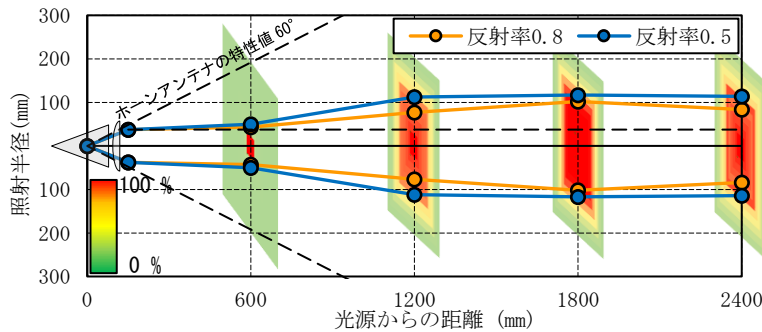


図-8 照射範囲の検討

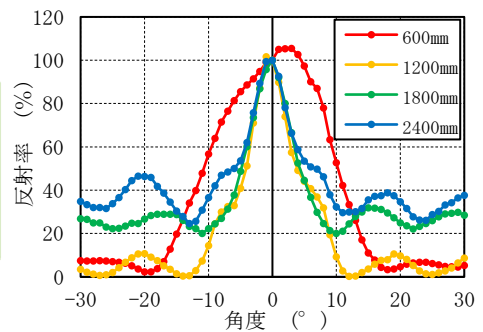


図-9 測定角度による影響

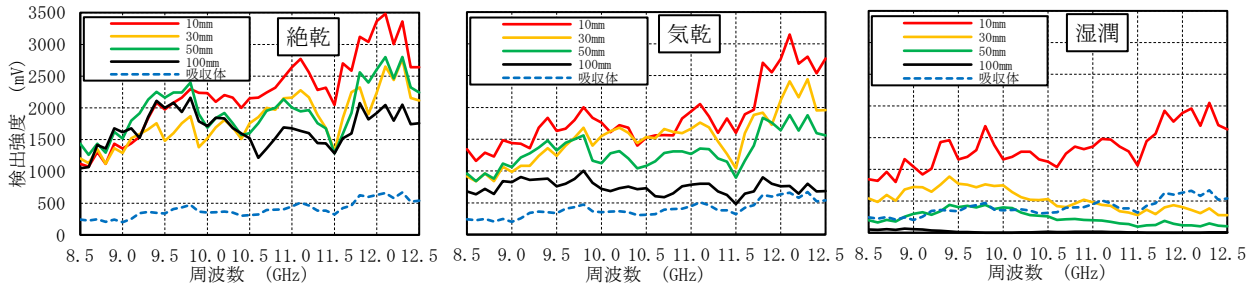


図-10 透過法におけるコンクリート厚さの影響

干渉したことによって、18.5 dBm よりも大きい強度が検出されたと推測される。

3.2 照射範囲の検討

図-8 に測定距離による照射範囲を示す。図-8 の左下に式(2)で求めた反射率のスケールバーを示す。反射率が高ければ赤色を示しアルミ板を検出、低いと緑色を示し吸収体を検出していることを意味する。測定距離が600 mm の場合は、100×100 mm の範囲で高い反射率が得られたことから、テフロンレンズによって概ね平行ビームになっていることが確認できた。測定距離が1200 mm 以上離れた場合では、照射範囲が徐々に広がることが確認されサブテラヘルツ波の拡散が認められた。

また、本測定距離では、約200×200 mm の範囲程度で拡散が収まることが確認された。本調査方法を現場で用いる際、実構造物をさらに遠距離から計測すると予測される。そのため、さらに測定距離が遠い場合は拡散が予測されるため、さらなる照射範囲の検討が必要である。

3.3 測定角度による影響

図-9 に測定角度による影響を示す。プラス回転とマイナス回転が0°を基準に概ね対称の反射率が得られた。測定距離600 mm は、1200 mm や2400 mm と比較すると1°あたりの変化は緩やかではあるものの角度による反射率の低下が認められた。1200 mm 以降は1°あたりの変化が反射率に与える影響は顕著であり、反射率の低下が大きいことが確認された。

本研究では、コンクリート内部に発生した劣化を検出することが目的である。測定角度によってサブテラヘルツ波が斜め入射することで、検知精度が低下することが

予測される。また、ひび割れ界面で反射したサブテラヘルツ波の評価を行う時、サブテラヘルツ波が斜めに入射することで、見掛け上ひび割れ幅を大きく捉える可能性がある。また、本実験で測定角度1°のずれによる反射率の低下は、無視できないため、角度の許容範囲の検討や補正方法の検討が今後の検討課題である。

3.4 コンクリート厚さの影響

図-10 に透過法におけるコンクリート厚さの影響を示す。図に示す点線は、電磁波吸収体の反射を示し、コンクリートの品質評価の検出限界の目安として考える。全ての含水状態ともに、試験体厚さが増すと強度の低下が確認された。絶乾状態では、厚さ10~100 mm の検出強度の差が小さく、100 mm でも電磁波吸収体の強度に比べ高い強度が検出されたことから、100 mm 以上の厚さにおいても計測可能と考えられる。気乾状態では、絶乾状態と比べると強度が低くなっているものの厚さ100 mm 以上の試験体も検出可能と考える。湿潤状態は厚さ50 mm 未満で検出可能と考える。

図-11 に反射法におけるコンクリート厚さの影響を示す。図に示す点線はアルミ板の計測結果を示す。サブテラヘルツ波はアルミ板で強く反射するため、測定環境の基準となる。このため、アルミ板の強度をコンクリートの品質評価の指標として検討した。絶乾・気乾状態では、コンクリートの厚さが増すにつれ検出強度が一貫して下がることはなく、厚さによる強度の増減が確認された。これは、試験体厚さが薄いと入射波が透過して検出強度が小さくなり、厚さが増すと試験体内部で反射して検出強度が大きくなったと推測される。

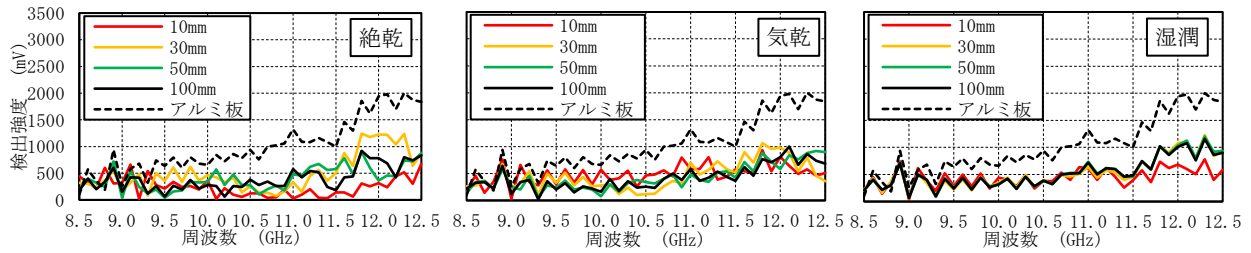


図-11 反射法におけるコンクリート厚さの影響

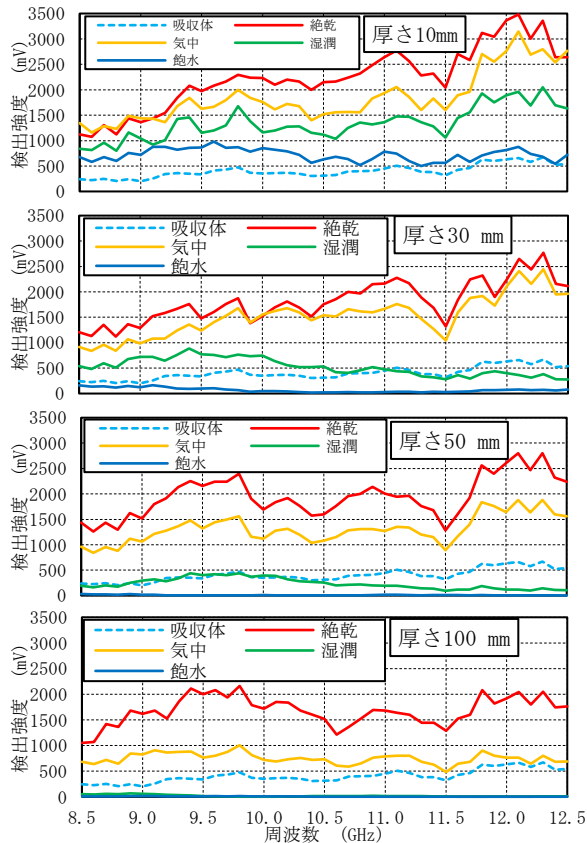


図-12 透過法の含水率による影響

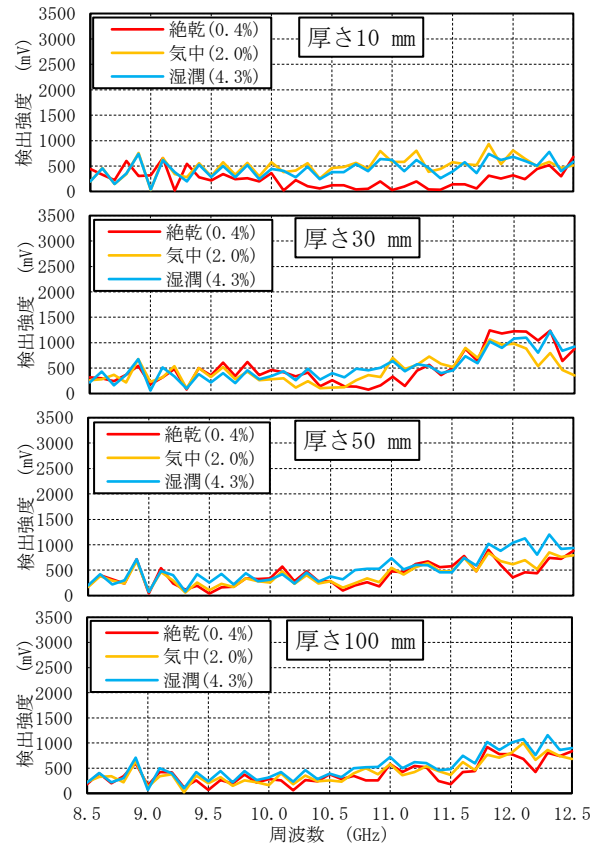


図-13 反射法の含水状態による影響

湿潤状態では、多くの周波数で試験体厚さによらず類似した検出強度が得られた。しかし、試験体厚さ 10 mm では、11.5 GHz 以降の高い周波数で低い検出強度が得られた。これは含水量が少なく、サブテラヘルツ波に影響を及ぼさなかったと考える。これらのことから、含水率 4.3% を超える湿潤状態では、コンクリートの品質評価は困難であると考えられる。

3.5 コンクリートの含水状態による影響

図-12 に透過法におけるコンクリートの含水状態による影響を示す。図に示す吸収体は全て同じ測定結果を示し、検出可能かの判断基準の一つとする。どの試験体厚さも試験体内の水分量が増すことによって、検出強度が小さくなることが確認された。含水状態によって検出可能な試験体厚さが異なり、水分による吸収が大きいことが確認できた。また、本実験において、試験体厚さと含水状態によって検出強度が低下することが確認された。

しかし、実構造物では厚さや含水状態は未知であり、厚さと含水状態のどちらの影響が支配的であるか検討をする必要がある。

図-13 に試験体厚さ 10～100 mm の反射法における含水状態の影響を示す。透過法のような含水状態の上昇に伴う検出強度の低下は認められなかった。厚さ 10 mm では、絶乾状態で検出強度に違いが認められた。また、厚さ 10, 100 mm を比較すると、高い周波数で厚さが増すと検出強度が高くなる傾向が確認された。試験体厚さが薄い場合は、入射波が透過し反射量が小さい。また、厚さが増すと含水量が増加するため、試験体表面で強く反射したと推測する。

図 6～13 に示される結果から推察されるように、周波数によって検出強度は異なり、試験体厚さ・含水状態の影響度は異なる。そのため、調査対象の劣化項目に適した周波数を選定して計測を行う必要があると考える。

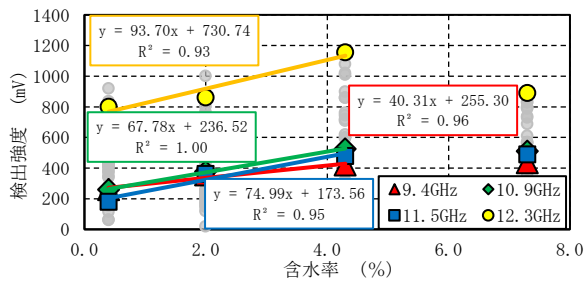


図-14 抽出した周波数の含水率と検出強度の関係

そこで、絶乾・気乾・湿潤状態の試験体厚さ 100 mm の結果を用いて、反射法における含水率と検出強度の決定係数が 1.0 に近い周波数 (9.4, 10.9, 11.5, 12.3 GHz) を抽出した。図-14 に抽出した周波数の含水率と検出強度の関係を示す。抽出した周波数において、含水率が上昇するとともに検出強度が増加する一定の関係性が認められた。飽水状態 (含水率 7.3%) を除くと、含水率による検出強度の変化量が一直線上に乗るような関係が認められた。このことから、本計測系による含水率の検出限界は 4.3%前後であると推測される。本来、サブテラヘルツ波は水に強い吸収性能を示すことから、含水率が高くなるにつれ検出強度が小さくなる予測される。本実験の透過法では、含水率の上昇に伴い検出強度の低下が確認された。これは一般的な電磁波特性同様の結果である。しかし、反射法では予測に反し、含水率の上昇に伴い検出強度の増加傾向が確認された。そのため、コンクリート中の水の考え方に関しさらなる検討が必要である。

3.6 ひび割れ幅の検出

図-15 に絶乾状態の試験体におけるひび割れ幅による検出強度の違いを示す。試験体厚さ 30, 50 mm ともにひび割れ幅の大きさによって検出強度が異なることが確認できた。また、ひび割れ幅の大きさによって強度の違いが得られるが、ひび割れ幅 3, 5 mm の検出強度が近い値であった。これは、ひび割れ幅が薄い場合は界面として捉えることができず、ひび割れ幅が増すと空隙を界面として捉えひび割れを検出したと推測する。

4. まとめ

サブテラヘルツ波を用いた非破壊検査手法の確立にむけ計測を行った。光学系装置の測定条件、コンクリートの厚さ・含水状態が及ぼす影響について検討を行い、本実験より得られた知見を以下に示す。

- 1) 透過法, 反射法ともに測定距離による検出強度の減衰が確認された。
- 2) 反射法では、干渉の影響と推測されるが測定距離の変化に対し大きな振幅を示す結果が得られた。
- 3) 測定距離によってサブテラヘルツ波の照射範囲が異なり、距離が遠のくにつれて拡散が見受けられた。

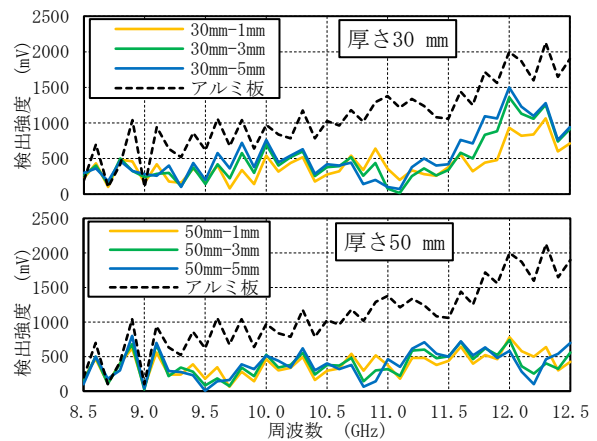


図-15 ひび割れ幅による影響

- 4) 測定角度によって検出強度が大きく変動するため、測定角度が与える影響は大きいことが確認された。
- 5) コンクリートの厚さと含水状態によって検出強度の変化が確認された。特に水による影響は大きいことが確認された。
- 6) ひび割れ幅によって検出強度が増減し、ひび割れ幅が増すと変化量が小さくなることが確認された。

謝辞

本研究は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JP JA 21 P 21458909 の助成を受け行ったものである。また本研究の実施にあたり芝浦工業大学建築学部の濱崎仁教授、同デザイン工学部の田邊匡生教授に多大なる助力を頂いた。ここに記し深謝する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016.7.
- 2) 縦山好幸・小野聖久：長寿命化を目指すコンクリート構造物の維持管理一点検，調査，補修補強，モニタリング，コンクリート工学，Vol.40, No.5, pp.103-111, 2002.5
- 3) 佐治嘉一・小野定・浅野慎一：赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物表層部の変状調査—赤外線カメラを導入した橋梁点検—，土木施工 44 巻 2 号，pp.1-8, 2003.2
- 4) 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.
- 5) 清水耕史，西脇智哉，Riccardo Maddalena，田邊匡生：テラヘルツ透過計測および吸水試験による繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 1, pp.1276-1281, 2020