

# 報告 パワーアンプを組み込んだサブテラヘルツ非破壊検査装置を用いた コンクリート内部の鋼材探査技術に関する基礎的検討

國生 梨花\*1・倉品 吏玖\*1・西脇 智哉\*2・田邊 匡生\*3

**要旨:** 効率的な調査・診断と維持管理のためにサブテラヘルツ波を用いた非破壊検査手法が注目を集めている。コンクリートの内部探査の深度向上のためにパワーアンプを導入した。アンプの性能を確認し、正常に測定可能であることを確認した後、コンクリート内部の鋼材を測定した。アンプを使用せずに探査可能であったかぶり厚さ 10, 20 mm では探知が容易になり、探知が困難であったかぶり厚さ 30, 40 mm についてもアンプを使用することによって探知が可能になった。

**キーワード:** サブテラヘルツ波, 非破壊検査, 内部探査, かぶり厚さ, 鋼材, 発振強度

## 1. はじめに

近年, 社会資本ストックの急速な老朽化と建設業就業者の高齢化に伴い, 建築物の維持管理における人手不足が深刻化している。そこで適切で効率的な調査・診断と維持管理の重要性が指摘されている。鉄筋コンクリート構造物を対象とした非破壊・微破壊検査手法は多く存在している<sup>1)2)</sup>。その中でも, 従来の手法で存在した接触測定による検査範囲の制限を克服するために, 非接触による検査を可能とする手法の開発<sup>3)</sup>が盛んに行われている。

このような非破壊検査手法の一つとして, サブテラヘルツ波の利用が注目されている。サブテラヘルツ波とは電波と光波の中間領域に属する電磁波であり, 透過性と直進性を兼ね備えている。そのため, 非破壊かつ非接触での検査手法について研究が進められている。

既往の研究としてサブテラヘルツ反射波を用いたイメージング技術がある<sup>4)</sup>。小林らの検討では, コンクリートのひび割れを模擬したスリットや, コンクリート内部の鋼材探査に成功している<sup>5)</sup>。しかし, かぶり厚さが 20 mm までの探知となっており, 実構造物と同等のかぶり厚さの条件で検知するのは難しいという課題がある。

そこで本研究では, パワーアンプを用いてサブテラヘルツ波の発振強度を増幅し, かぶり厚さの大きいコンクリート内部の鋼材を探査することを目標とし, パワーアンプを導入した測定系によるコンクリートへの透過性および鋼材探査に関する検討を行った。

が 30 μm~1 mm (真空中) の電磁波を指す。テラヘルツ波は電波と光波の中間領域に属し, 電波に見られる透過性と光波に見られる直進性を有する。よって, コンクリートを含む非極性物質に対する透過性が高く, 直進性ゆえにレンズやミラーを用いた集光や反射等による操作が容易である。

サブテラヘルツ波とは, 周波数が約 0.03~0.3 THz, 波長が 1~10 mm (真空中) の電磁波を指す。その特性はテラヘルツ波と同様のものであるが, サブテラヘルツ波はより高い透過性能を有する。サブテラヘルツ波はその高い透過性から, コンクリートを透過して内部の様子を可視化する技術への応用が進められている。小山らのコンクリート内の拡散水分の可視化の研究<sup>6)</sup>や, Dash らのコンクリート内部のひび割れや空隙を検出する研究<sup>7)</sup>などがあげられ, コンクリートの内部性状の複合的な評価への利用可能性が期待されている。本研究ではコンクリートへの透過性能を考慮し, サブテラヘルツ波を採用した。

## 2.2 パワーアンプを用いた測定系

本研究で用いるパワーアンプ (以下, アンプ) とは, 発振器からの発振強度を向上させるものである。表-1 にアンプの基本情報を示す。今回用いたアンプは固体電力増幅器 (SSPA) の一つであり, 直流安定化電源によって駆動する。通倍器とアンテナの間に導入して使用した。

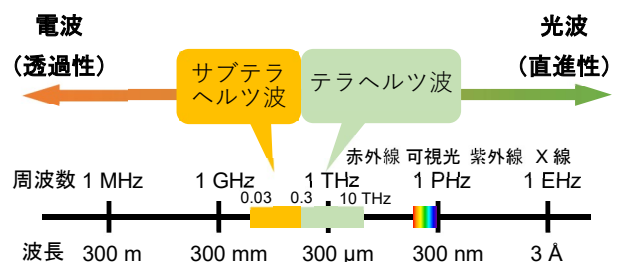


図-1 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域

## 2. サブテラヘルツ波による測定

### 2.1 サブテラヘルツ波について

図-1 に, テラヘルツ波・サブテラヘルツ波の帯域を示す。テラヘルツ波とは, 周波数が約 0.3~10 THz, 波長

\*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 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)

内部鋼材の腐食検出に関する既往検討<sup>8)</sup>において、かぶり厚さ 20 mm 以下では、その反射率から内部鋼材の腐食の検出が可能であった。しかし、実構造物に近いかぶり厚さ 30 mm 以上の内部鋼材では、試験体へ照射した電磁波の大部分がコンクリート中で散乱・吸収され、検出が困難であった。また、この検討では、内部鋼材の腐食の検出には約 0.7 V の反射強度が必要としている。そこで透過後の強度を確保するための手段として、照射するサブテラヘルツ波の出力強度を増幅し、かぶり厚さの大きい鋼板からの反射波を検出する検討を行った。既往の研究からかぶり厚さ 30 mm の内部鋼材の反射強度は約 0.5 V であったため、要素の検出に必要な増幅の程度は 1.4 倍以上であると考えられる。

サブテラヘルツ波の光源には 18~52 GHz まで発振可能な GUNN ダイオードを使用し、テフロンレンズを用いてサブテラヘルツ波を照射し、試験体を透過または反射

した波が検出器に集光するよう試験体、レンズ、発振・検出器の距離や角度を調整した。この際、発振器と検出器を向かい合わせに配置したものを透過型測定系(図-2)、発振器と検出器を斜めに配置し、試験体で反射させたサブテラヘルツ波を取得するように配置したものを反射型測定系(図-3)とした。

本研究では 30~50 GHz を 0.2 GHz ごとに連続的に変化させ測定を行った。検出器で取得したサブテラヘルツ波は電圧値により検出され、これを本研究における検出強度 [V] とした。また、測定結果は周波数ごとの検出強度をグラフ上にプロットして示した。

### 3. 実験概要

#### 3.1 測定概要

本論文では、アンプの性能を確認するための基礎試験と実構造物に近い内部に鋼材を含む試験体を対象として鋼材の有無を判別する内部探査試験を行った。

基礎試験では、発振の安定性、距離減衰、コンクリートへの透過性能の観点で測定した。発振の安定性は、アンプを接続しても発振が不安定にならずに測定が正しく行えることを意味する。発振・検出器を向かい合わせる形で配置し、同条件で複数回測定することで測定間に生じる差異がどの程度生じるかを確認した。距離減衰は、測定を遠隔化する際に重要となる性質である。発振・検出器側の平凸レンズ同士の間隔を測定距離として、測定距離の変化によりサブテラヘルツ波の検出強度がどのように変化するかを確認した。コンクリートへの透過性能は、コンクリート内部の劣化性状を確認する上で基盤となる性質である。厚さの異なるコンクリート試験体を測定することで、コンクリートの厚さに対し、どの程度の透過性能を有するかを検討した。

内部探査試験では鋼板を埋設したコンクリート試験体を作製し、内部鋼材の検出を行った。かぶり厚さの異なる、内部に鋼板を含む試験体(以下、内部鋼材試験体)を作製し、鋼板の有無とかぶり厚さを変化させて測定し、アンプの利用に伴う探査性能の向上を検討した。

なお、各測定において使用する測定系は基礎試験では透過型測定系、内部探査試験では反射型測定系をそれぞれ採用した。

#### 3.2 使用材料と配(調)合

セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3140 cm<sup>2</sup>/g), 細骨材として砕砂(表乾密

表-1 アンプカタログデータ

Parameter	Typ.	Units
Frequency Range	30-47	GHz
Gain	50	dB
3dB Compression Point(P3dB)	31.5	dBm

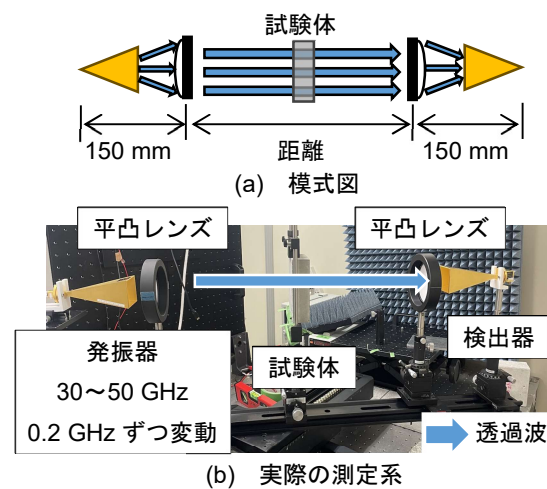


図-2 透過型測定系

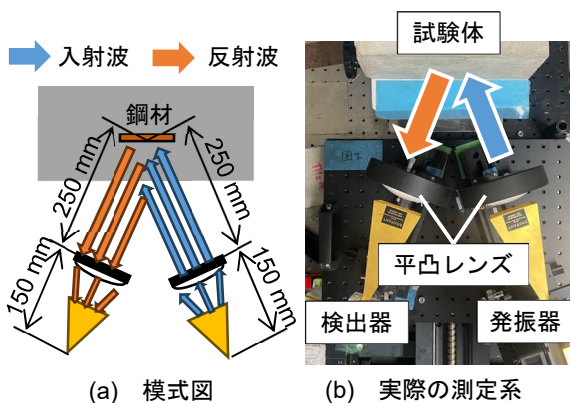


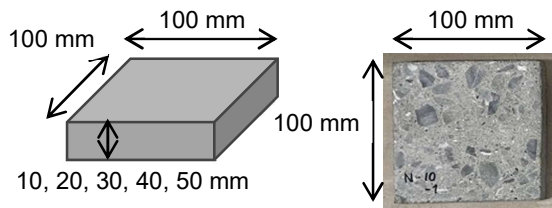
図-3 反射型測定系

表-2 使用したコンクリートの配(調)合 (kg/m<sup>3</sup>)

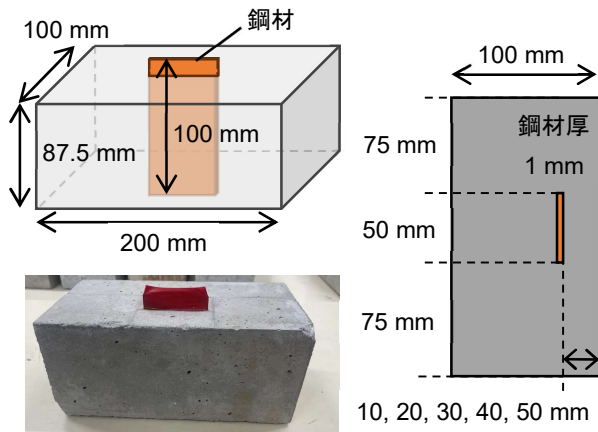
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
180	340	810	954	1.7

度  $2.66 \text{ g/cm}^3$  および陸砂（表乾密度  $2.62 \text{ g/cm}^3$ ），粗骨材として碎石（表乾密度  $2.68 \text{ g/cm}^3$ ，最大寸法  $20 \text{ mm}$ ），混和剤として AE 減水剤（密度  $1.05 \text{ g/cm}^3$ ）を使用した。また，試験体に埋め込む鋼材として縦  $50 \text{ mm}$ ，横  $100 \text{ mm}$ ，厚さ  $1 \text{ mm}$  の SPCC 相当の鋼板を使用した。

コンクリートの配（調）合を表-2 に示す。水セメント比はすべて  $53\%$  とした。細骨材とセメントを投入し空練りを  $1$  分行った後，水・減水剤を入れて  $1$  分練り，最後に粗骨材を入れて  $1$  分練り混ぜた。スランプは  $20.5 \text{ cm}$ ，



(a) コンクリート試験体の概要



(b) 内部鋼材試験体の概要

図-4 試験体概要

表-3 実験水準

試験項目	測定パラメータ	変数
共通	アンプの有無	有，無
	周波数 [GHz]	30~50 0.2 GHz ごと
発振の安定性	測定距離 [cm]	150
	測定回数 [回]	15
距離減衰	測定距離 [cm]	130~300 10 cm ごと
コンクリート透過性能	試験体厚さ [mm]	10, 20, 30 40, 50
	測定距離 [cm]	50
鋼材探査試験	鋼材厚さ [mm]	1
	かぶり厚さ [mm]	10, 20, 30 40, 50
	測定距離 [cm]	鋼材面から 25

練り混ぜ時の温度は  $15.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ，空気量は  $2.9 \%$  であった。練り混ぜには螺旋アーム式強制二軸練りミキサ（容量  $60 \text{ L}$ ）を用いた。

試験体概要を図-4 に示す。基礎試験に用いるコンクリート試験体として，幅  $100 \text{ mm}$ ，高さ  $100 \text{ mm}$ ，長さ  $400 \text{ mm}$  の梁試験体を打ち込み後  $1$  日で脱型し，材齢  $7$  日まで水中養生した後，湿式コンクリートカッターにより厚さを  $10, 20, 30, 40, 50 \text{ mm}$  に切断した。その後  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  の恒温室で気中養生を行った。内部鋼材試験体として，幅  $100 \text{ mm}$ ，高さ  $87.5 \text{ mm}$ ，長さ  $400 \text{ mm}$ ，内部に鋼材を配置した梁型試験体を打ち込み後  $1$  日で脱型し，材齢  $14$  日まで水中養生した後， $90 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 24$  時間の条件で乾燥させ，以降は恒温室にて気中養生を行った。

湿式コンクリートカッターにより幅  $100 \text{ mm}$ ，高さ  $87.5 \text{ mm}$ ，長さ  $200 \text{ mm}$  に切断した後， $90 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 24$  時間の条件で乾燥させ，測定を行った。

### 3.3 測定項目

実験水準を次の表-3 に示す。

はじめにアンプの性能確認として試験体を置かずに発振の安定性と距離減衰について測定を行った。次に異なる厚さのコンクリート試験体を用いてコンクリートの透過性能の評価を行った。

また，内部鋼材試験体の測定を行った。かぶり厚さを変化させながら鋼材がある箇所とコンクリートのみの箇所を測定した。加えてアンプを用いない状態でも測定を同様に行った。測定距離はかぶり厚さによらず，鋼材を基準にレンズまでを  $25 \text{ cm}$  とした。

## 4. 結果と考察

### 4.1 発振の安定性

表-4 に検出強度の変動率およびその変動幅を示す。図-2(a)において試験体を設置しない状態で  $15$  回測定を行い，得られた  $15$  回分の  $30 \sim 50 \text{ GHz}$  の周波数域全体の検出強度の平均値を求めた。これを基準値として各測定で得られた  $1$  回分の検出強度の平均値を除することで，平均からの変動率を求めた。この時，基準よりも増加した場合を+とし，最も増加したものを最大変動率，最も減少したものを最小変動率とした。また，これら  $2$  つの変動率の差を変動幅とした。アンプを用いた場合の変動幅は  $2.1 \%$ ，アンプを用いない場合の変動幅は  $1.5 \%$  となり，アンプにより変動は  $0.6 \%$  増加してはいるものの，そ

表-4 測定の変動率と変動幅 (%)

	アンプ有り	アンプ無し
最大変動率	+1.2	+0.76
最小変動率	-0.9	-0.74
変動幅	2.1	1.5

の変動は小さいため、発振は安定していると考えられる。

また、アンプの有無による基準値の強度の比較によりアンプの増幅は約 2.7 倍であることを確認した。これにより、かぶり厚さ 30 mm において内部鋼材の検出が可能であると考えられる。

#### 4.2 距離減衰

図-5 に、距離減衰に関する測定結果を示す。また、図-6 はこの結果からアンプを用いた場合の中で周波数を抜粋して距離-強度グラフに表したものである。

130~300 cm にかけて測定距離が大きくなるほど検出強度は減少した。アンプを用いることで 300 cm においても既往の研究で要素の検出が可能であった発振強度と同等の強度を得ていることから、アンプの接続によって、遠方から検査が可能になると考えられる。

#### 4.3 コンクリートに対する透過性能の検討

透過性能に関する測定結果を図-7 に示す。なお、本項目では検出強度を透過強度 [V] と表現し、測定結果は、アンプ非接続時には「測定距離」、アンプ接続時には「測定距離(amp)」と記載している。透過強度が 0.1 V 以下の場合にはノイズを検出していると判断し、透過していないと判断した。アンプを接続していない状態では、厚さ 10, 20, 30 mm では、透過が行えていたが、厚さ 40, 50 mm の結果では、透過はしていなかった。一方、アンプを接続した場合にはすべての厚さで透過強度の向上が見られ、

厚さ 50 mm でも透過強度は 0.2 V 程度を検出しており、透過していることを確認した。アンプによるコンクリートへの透過性能の向上で、既往の検討では、測定が困難であったかぶり厚さ 30 mm 以上を対象にした測定が可能になった。

次に周波数ごとのコンクリートの透過性能について確認した。コンクリートの透過強度は、厚さが増加するにつれて減少していく傾向があった。図-8 は特定の周波数 (44 GHz 付近) を抜粋して透過強度とコンクリート厚さの関係を示した結果である。このグラフから読み取れるように、コンクリートの透過強度は、コンクリート厚さによって対数的に減少すると考えられる。

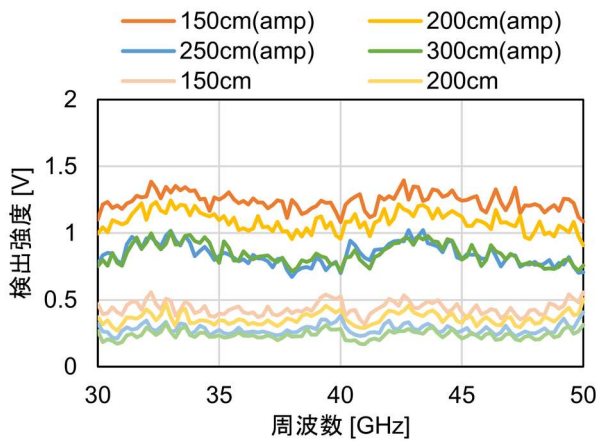


図-5 距離変化による検出強度

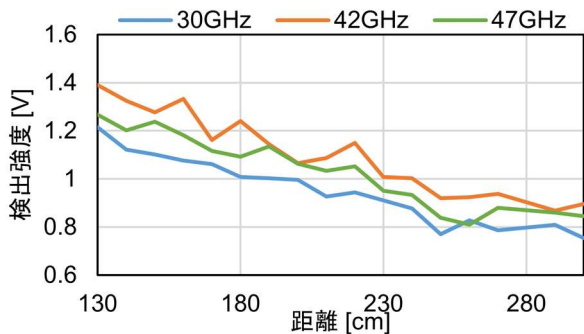
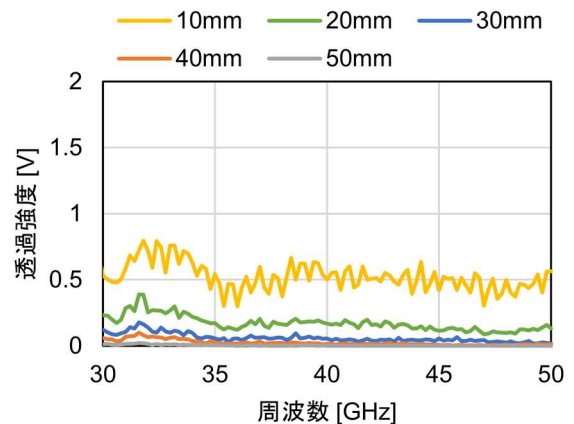
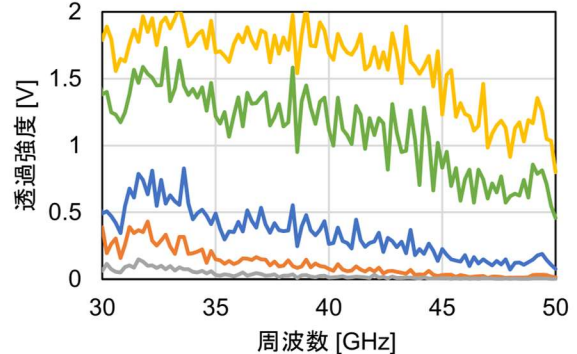


図-6 特定周波数の距離減衰



(a) アンプ非接続時



(b) アンプ接続時

図-7 コンクリート試験体透過

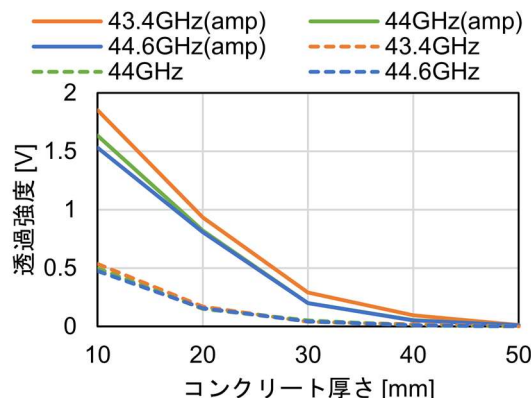


図-8 透過試験：強度-厚さグラフ

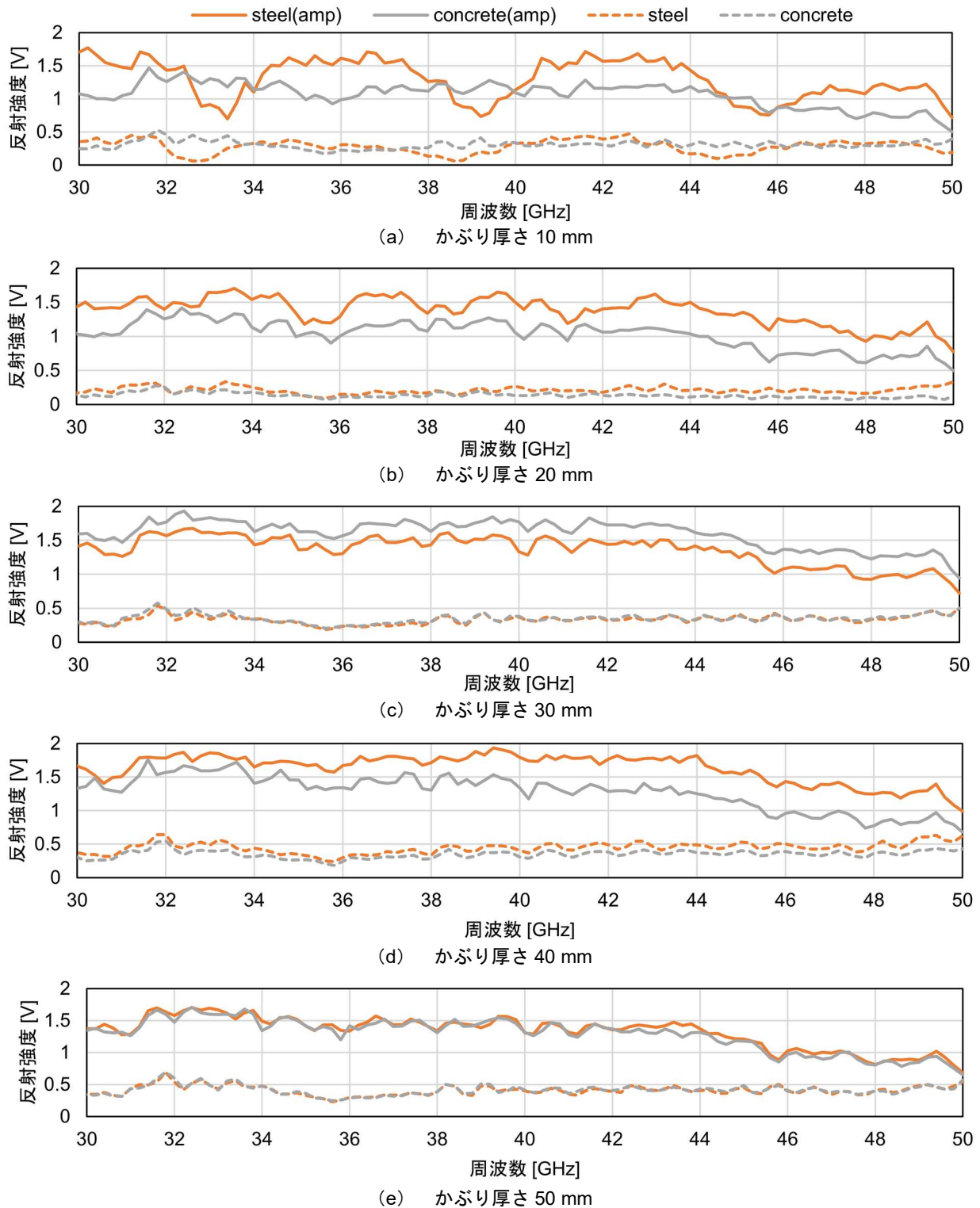


図-9 内部鋼材試験体測定結果

#### 4.4 内部鋼材試験体の測定

次に内部鋼材試験体の結果を図-9に示す。本項目では検出強度を反射強度 [V] と表現している。

かぶり厚さが 10, 20mm では、アンプを用いない測定でも内部に鋼材を含む測定において反射強度が増加する傾向があったため、鋼材の有無を探知することが可能である。これは鋼板によって反射面が増えるためである。

一方、アンプを用いることによってコンクリートのみの位置と内部鋼材位置の反射強度の差が大きくなり、鋼材の探知が容易になった。

かぶり厚さ 30, 40 mm における測定では、アンプを用いない状態では、鋼材の有無による反射強度の差を確認できなかった。一方、アンプを用いた状態では、鋼材の有無による反射強度の差を確認した。これはアンプを用

いることで内部の鋼板の反射波を検出できていることを意味する。アンプの接続により、これまで探査が困難であったかぶり厚さ 30, 40 mm を対象としたコンクリート内部の鋼板の探知が可能になった。

かぶり厚さ 50 mm においては、アンプの有無にかかわらず鋼材の有無による反射強度の差は見られなかった。アンプを用いることで従来では確認できなかったかぶり厚さ 30, 40 mm で強度の差を確認することができたため、発振の強度をさらに上げることにより本研究でまだ確認できていないかぶり厚さ 50 mm についても探査が可能であると考えられる。

かぶり厚さ 10, 20, 40 mm の結果で、内部鋼材位置ではコンクリートのみの位置よりも強度が大きくなった。これはコンクリート内部に透過している入射波が鋼材の表面で反射し、反射波の総量が増えるためだと考えることができる。しかし、かぶり厚さ 30 mm では、鋼材部分の反射強度がコンクリートのみの反射強度を下回っている。この傾向は複数の試験体で確認されたため、かぶり厚さ 30 mm における特徴であると考えられる。この理由については明確ではなく、今後の検討とする。

基礎試験の透過性能検討と比較し、内部探査試験におけるコンクリートの透過損失は大きいように見える。しかし、透過性能検討の測定においても試験体の表面反射による影響があると考えられる。そのため、内部探査試験に基礎試験の透過性能を直接当てはめることは困難である。今後反射率を用いて厳密な透過性能の検討を行っていく必要がある。

## 5. 結論

サブテラヘルツ波を用いたコンクリート内部の探査深度向上に向け、アンプを導入した。アンプの性能を確認し、かぶり部分を模擬したコンクリート試験体と実構造物を模擬した内部鋼材試験体を対象として、反射のスペクトル測定を実施した。以下に、本実験の範囲で得られた知見を示す。

- 1) アンプ接続時の発振の安定性を確認し、約 2.7 倍に発振強度が増進されていることを確認した。
- 2) 距離をパラメータとして透過測定を行い、距離減衰の程度を確認した。これより、遠方からの測定の可能性を示した。
- 3) かぶり厚さ 10~40 mm において、内部鋼材の有無による反射強度の差を確認し、内部の鋼材の検出が可能であることを示した。かぶり厚さ 30, 40 mm で鋼材検出が可能であったことから、アンプを用いることによる透過性能の向上を確認した。
- 4) かぶり厚さ 30 mm では、鋼材があることで反射強度が減少することを確認した。

本研究では、探査深度の向上の観点から検出難易度の低い鋼板を用いた。今後、アンプの透過性能や距離減衰の定量化を行い、鉄筋の検出や鋼材の腐食の検出などの検討を重ねることで実構造物への活用が期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、東北大学と東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニーとの共同研究「福島第一原子力発電所廃炉に資する研究・開発」において実施されたものである。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、日本工業大学建築学部の田中章夫准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) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, Vol. 2002, No. 704, pp. 65-79, 2002
- 2) 西田敬, 大下英吉: 電磁波レーダによる電磁波強度に着目した鉄筋径の推定手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1819-1824, 2013
- 3) 荒巻智, 野村倫一, 小谷洋平: 鉄道コンクリート橋の維持管理技術の変遷と今後の展望, コンクリート工学, Vol. 58, No. 5, pp. 111-116, 2020
- 4) T, Tanabe, "Construction of a Gigahertz Measurement System and Application of Non-destructive Testing Inside Reinforced Concrete," Tetsu-to-Hagane, 110(12), 912-917, 2024
- 5) 小林知大, 原星海, 西脇智哉, 田中章夫: サブテラヘルツカメラを利用した反射波による鉄筋コンクリート内部の可視化技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1438-1443, 2023
- 6) Y. Oyama, "Sub-terahertz imaging of defects in building blocks," NDT&E international, Vol. 42, No. 1, pp. 28-33, 2009
- 7) Dash, J. et al.: Non-Destructive Inspection of Internal Defects in Concrete Using Continuous Wave 2D Terahertz Imaging System, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2013
- 8) 倉品吏玖, 小林知大, 西脇智哉, 田中章夫: サブテラヘルツ反射波を用いたスペクトル測定による鋼材腐食の検出手法開発に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 1, pp. 1663-1668, 2024