

サブテラヘルツ波を用いたコンクリートの力学性能低下の 評価手法の開発に関する基礎的研究

DEVELOPMENT OF EVALUATION METHOD FOR MECHANICAL PROPERTIES OF DETERIORATED CONCRETE USING SUB-TERAHERTZ WAVES

原 星海
Shoumi HARA

Sub-terahertz waves, which features with unique characteristics of both light straightness and electromagnetic wave transmission, were proposed as a measurement method of deteriorated mechanical performance of concrete. As a fundamental study, the measurable depth with different frequencies and the influence of aggregate in concrete was experimentally investigated. The proposed method was applied on the concrete specimens with deteriorated mechanical performance. As the results, a correlation of the measured reflectivity with both deteriorated compressive strength and Young's modulus was confirmed.

Keywords : Terahertz wave, non-destructive test, rapid freeze-thaw test, compressive strength, Young's modulus

サブテラヘルツ波, 非破壊検査, 急速凍結融解試験, 圧縮強度, ヤング係数

1. はじめに

近年、環境志向の高まりなど、鉄筋コンクリート (RC) 建築物の長寿命化や、適切な調査・診断と維持管理の重要性が指摘されている。RC 構造物に対する非破壊・微破壊検査法は数多く提案されており¹⁾²⁾、たとえばサーモグラフィによる仕上げ材の剥離調査やレーザによる鉄筋探査など、電磁波や光学系の調査方法も確立されたものがある。原子力発電所の管理区域などに代表される、容易に近接作業ができない状況で適用可能とするためには、非接触・非破壊で実行可能な検査手法が必要だが、十分な整備が行われていない。特に、コンクリートの圧縮強度などの力学特性についての情報を非接触で得る試験方法は確立されていない。

そこで本研究では、コンクリートを透過する特性を有するサブテラヘルツ波を用いた、非接触・非破壊での構造物の検査手法を提案することを目的に検討を行う。ここでは、特に力学性能が低下したコンクリート材料を対象として、サブテラヘルツ波による計測の有効性を確認するための実験検討を行う。

2. サブテラヘルツ波による測定

2.1 テラヘルツ波・サブテラヘルツ波

図1に、テラヘルツ波およびサブテラヘルツ波の帯域を示す。テラヘルツ波は周波数が概ね 0.3~10 THz (真空中の波長では 0.3 μm ~1 mm) の電磁波を指す。エネルギーが比較的小さく人体に安全で

ありながら、コンクリートを含む非極性物質に対する透過性が高いという特徴を持つ。一方で、水に代表される極性物質に対する吸収性が高い。また、サブテラヘルツ波 (ミリ波) とは、周波数が概ね 0.03~0.3 THz (真空中の波長では 1~10 mm) とテラヘルツ波よりも周波数が低い電磁波であり、テラヘルツ波と類似の性質を持つ。テラヘルツ波よりも周波数が低いため、コンクリートなどへの透過性がより高い。コンクリート材料を対象とした既往研究には、テラヘルツ波によるコンクリート内部欠陥の検出の可能性を示した研究³⁾⁴⁾や、コンクリートの含水率や塩化物イオン濃度の影響を観測する研究⁴⁾⁵⁾などが挙げられる。

2.2 測定系

本実験で用いた測定系の概要を図2に示す。照射したテラヘルツ波が試験体から戻る反射波を計測する測定系を用いた。サブテラヘルツ波の光源として、周波数を 18~52 GHz の範囲で可変な GUNN ダイオードを採用した。ここで、図中に示すアパーチャーとは、空間分解能を向上させるための治具である。試験体の直前に設置することにより試験体表面に集光しない光をカットし、焦点の合う光のみを取り出すことができる、ここでは直径 8 mm の物を使用した。各測定点では、これらの直径内の範囲の代表値が測定されると考えられる。測定データは試験体の反射強度からノイズ (試験体を置かない場合の反射強度) を引いた値を金属板の反射強度で除した反射率で評価した。

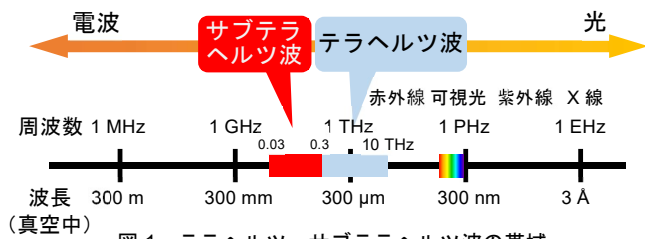


図1 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の帯域

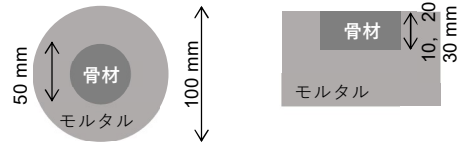


図3 骨材を埋め込んだ試験体

表1 調合表

	W/C	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
板状試験体	0.55	168	306	790	1053	1.38
円柱試験体	0.65	168	258	819	1119	2.58
	0.55	168	305	803	1193	3.05
キューブ試験体	0.5	172	344	851	912	1.032

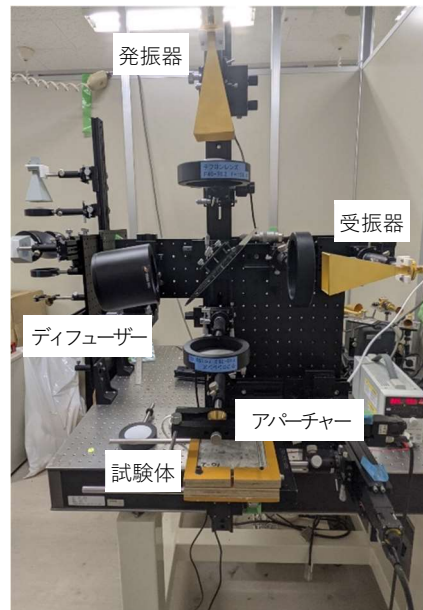


図2 サブテラヘルツ反射計測装置

3. 実験概要

ここでは、本研究で実施した測定のうち、以下に示す3つの測定について示す。第一に、可変光源により得られる異なる周波数による、コンクリートの測定可能な深さの情報を得ることを目的に、試験体裏面に貼り付けたアルミテープの測定を行った。第二に、コンクリート中の骨材の影響を確認するため、骨材・モルタルの透過性能の違いと、骨材を埋め込んだモルタル試験体の測定を行った。これらの基礎検討の結果を元に、力学性能を低下させた試験体の測定を行って、性能低下の評価が可能であることを確認した。このとき、力学性能を段階的に低下させることを目的に、液体窒素を用いた急速凍結融解試験を実施した。

3.1 使用材料と試験体

セメントとして普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³、比表面積 3140 cm²）および早強ポルトランドセメント（密度 3.14 g/cm³、比表面積 4570 cm²/g）を、細骨材として砕砂（表乾密度 2.66 g/cm³）および陸砂（表乾密度 2.62 g/cm³）の混合砂を、粗骨材として砕石（表乾密度 2.68 g/cm³、最大寸法 20 mm）を、混和剤として AE 減水剤（密度 1.05 g/cm³）を使用した。表 1 に用いた各種の調合を示す。ここで、板状試験体は異なる周波数による測定可能な深さの検討に、円柱試験体とキューブ試験体は急速凍結融解試験により力学特性を低下させる試験体に用いた。

板状試験体は、幅および高さが 100 mm、長さが 10 mm、20 mm、30 mm の直方体形状として作製した。急速凍結融解試験により力学特性を低下させる試験体には、直径が 50 mm、高さが 100 mm の円柱試験体と、幅・高さ・長さがいずれも 100 mm のキューブ試験体を作製した。キューブ試験体は、100 mm×100 mm×500 mm の直方体形状からコンクリートカッターにより切り出して得たものである。円柱供試体のフレッシュ性状としては、空気量 2.5%、スランプ 10 cm（水セメント比 65%）、および、空気量 2.0%、スランプ 9.5 cm（水セメント比 55%）であった。急速凍結融解試験によって損傷が容易

に導入できるよう、空気量は一般的なコンクリートよりも低い値を目標とした。また、急速凍結融解試験は材齢 2 週間で開始した。キューブ試験体については、空気量 4.4%、スランプ 19.5 cm であった。材齢 28 日までの水中養生を行い、十分な強度発現が見られた後に急速凍結融解試験を実施した。

骨材の影響を確認する試験には、岩石からコアドリルで切り出した直径 50 mm の円柱形状の岩石を試験体とした。このとき、厚さを実験パラメータとして、10 mm、20 mm、30 mm、50 mm に切断した。また、骨材を埋め込んだ試験体の作製には、板状試験体の調合から粗骨材を抜いたモルタルを使用した。岩石を埋め込んだ試験体は、図 3 に示すように、片面の中央部分に厚さ 10 mm、20 mm、30 mm の円柱状岩石を埋設したものである。

3.2 測定概要

以下のサブテラヘルツ計測では、試験体は測定の前に 105 °C で 24 時間乾燥を施した、絶乾状態でやっている。

3.2.1 周波数と測定可能な深さの検討

可変光源により、各周波数の測定可能な深さを検討するために、アルミテープを、試験体裏面に貼り付けた測定を行った。試験体厚は 10、20、30 mm 厚さの試験体にて測定した。

3.2.2 粗骨材の影響

骨材の影響を調べるために、骨材とモルタルの円柱試験体に対して透過計測を行った。なお、透過計測は、図 2 の受振器を、発振器から見て試験体を挟んで正対するように設置して行った。また、図 3 に説明した骨材（岩石）を埋設したモルタル試験体については、骨材が測定面として露出するように設置し、反射計測を行った。

3.2.3 力学性能を低下させたコンクリートの測定

液体窒素を用いた急速凍結融解試験により力学特性を低下させた試験体の測定を行った。一般的な凍結融解試験として用いられる JIS A 1148 (A 法) では、1 サイクルあたり約 4 時間を要する。また、普通強度コンクリートの場合には、Non-AE であっても劣化が顕在化

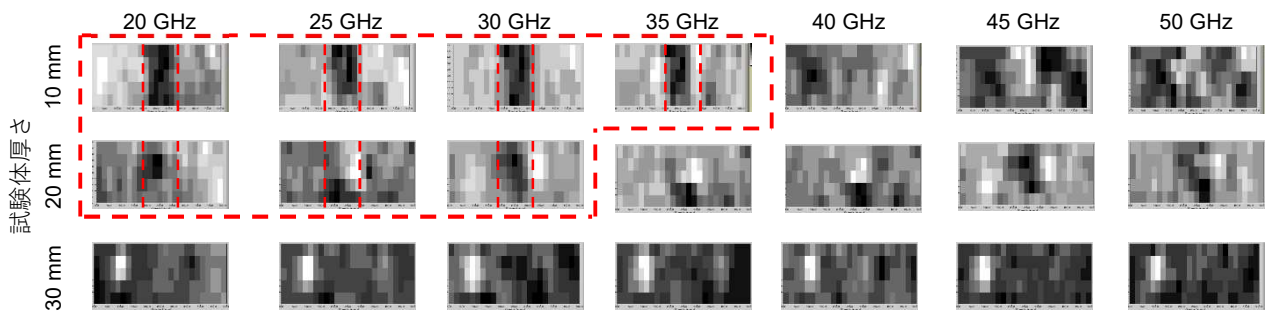


図4 周波数および試験体厚さをパラメータとしたイメージングデータ

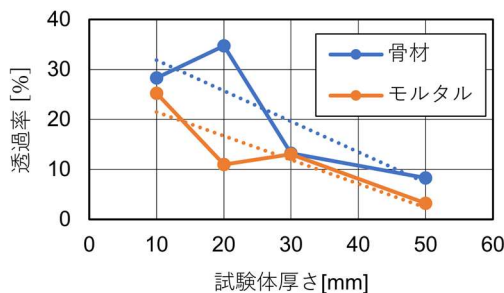


図5 20GHz~50GHzの透過率の平均値と試験体深さの関係

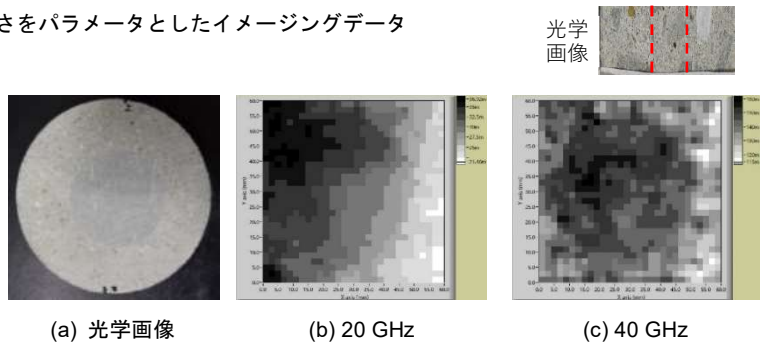


図6 骨材埋設試験体の測定結果（骨材厚さ 10 mm）

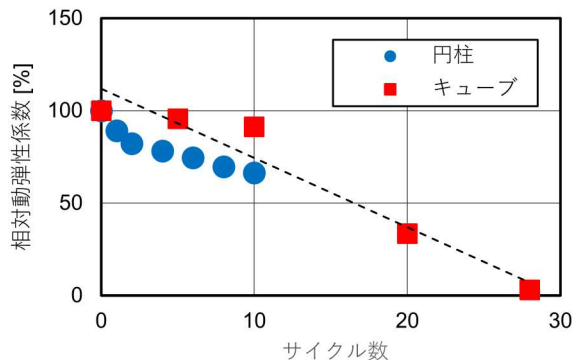


図7 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

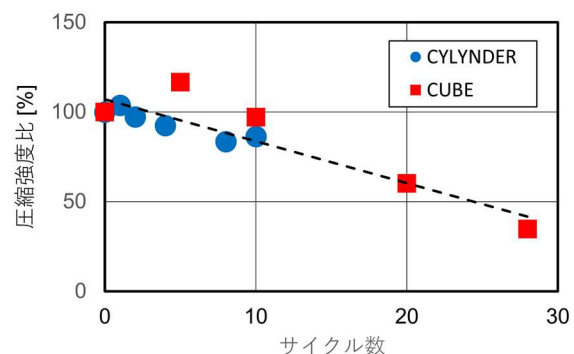


図8 凍結融解サイクル数と圧縮強度比の関係

するまで100サイクル以上を与える必要があることも珍しくない。また、一般的に用いられているAEコンクリートの場合には、300サイクルを経ても相対動弾性係数（耐久性指数）が90%以上を維持することもあり、求める性能低下を得るためには膨大な時間を要することが考えられる。そのため、ここでは急速凍結融解試験⁹⁾を採用した。この方法は、1サイクルが数分以内程度で終了し、AE剤を使用したコンクリートの場合であっても10サイクル程度の適用で相対動弾性係数を60%程度まで減少させることができた事例もある。すなわち、短期間で目的の損傷を与えられると考えられるため、本実験で採用することとした。

円柱試験体を用いる場合には、液体窒素を十分溜めた断熱容器内に、十分な含水状態の試験体を投入し、5分間液体窒素中に浸漬した。その後、液体窒素から取り出して直ちに40℃の温水中に7分間浸漬させて、1サイクルとした。キューブ試験体の場合には、同様に十分な含水状態の試験体を、液体窒素中に投入して2分間浸漬させた。その後、液体窒素から取り出して直ちに40℃の温水中に5分間浸漬させ、さらにその後8分間空中に静置して1サイクルとした。

円柱試験体のサブテラヘルツ測定は、1, 2, 4, 6, 8, 10サイクルで実施した。キューブ試験体のサブテラヘルツ測定は、別個の試験体で初期状態（0サイクル）と、5, 10, 20, 28, 30サイクルの後で実施した。凍結融解試験の上記のサイクルでは、相対動弾性係数を測定した。加えて、凍結融解試験後の試験体に対して圧縮試験を行った。

4. 結果と考察

4.1 各周波数で測定可能な深さ

図4に、周波数および試験体厚さをパラメータとしたイメージングデータ（測定結果）の一覧を示す。10 mm厚さの試験体では、周波数が20~35 GHzの場合にアルミテープの検出が可能であった。また、20 mm厚さの試験体では、20~30 GHzまでの周波数でアルミテープが検出され、高い周波数帯では検出が困難であった。さらに、試験体厚さが30 mmの場合では、いずれの周波数でもアルミテープを検出できなかった。

4.2 骨材の測定

図5は、各周波数の同一試験体に対する透過率の平均値をまとめ、

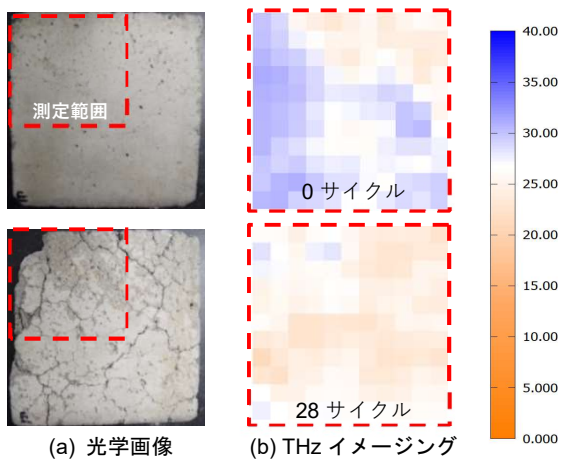


図9 凍結融解試験前後の試験体

試験体厚さごとにプロットしたものである。モルタルと骨材を比較すると、骨材の透過率が高いことが確認できる。また、試験体厚さが10mmの場合は、サブテラヘルツ波は骨材とモルタルとの差が生じないほど透過した。試験体厚さが30mm以上の場合には透過率が大きく減少し、骨材とモルタルの透過率の差が小さい。試験体厚さが20mmの場合は、特異的に骨材とモルタルの透過率に大きな差が生じ、特定の条件では測定結果に影響が生じることが示唆される。

続いて、骨材を埋設試験体の反射計測で得られるイメージングデータを図6に示す。これらの図から、骨材部分ではモルタル部分よりも高い反射率であること、また、周波数が大きい場合に骨材を高い解像度で表示できることが確認できる。このとき、埋設骨材の厚さによる見え方の違いはほとんどなく、骨材が表層に見える状態では、表面の露出部分の影響が大きいと考えられる。

4.3 力学性能を低下させたコンクリートの測定

図7に急速凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を、図8に急速凍結融解サイクルと圧縮強度比の関係を示す。なお、圧縮強度比は、初期状態(0サイクル)の圧縮強度を100%として算出している。これらの図から確認できるように、円柱試験体・キューブ試験体のいずれもサイクル数に従って段階的な損傷を与えて、圧縮強度比を減少させることができる。図9には、急速凍結融解試験前後のキューブ試験体の写真とイメージングデータを示す。損傷の進展に伴って、反射率が減少している傾向が確認できる。図10に、円柱試験体から得られたサブテラヘルツ反射率比と力学特性(圧縮強度およびヤング係数)の変化率の関係を示す。サブテラヘルツ反射率比、および、力学特性の変化率のいずれも、初期状態(0サイクル)で得られた値を100%として算出している。圧縮強度とヤング係数のいずれも損傷が生じたことにより低下しており、これに対応してサブテラヘルツ反射率も低下している。圧縮強度比と比較して、ヤング係数比は損傷の初期段階から低下の幅が大きい。これは、微細なひび割れが存在する場合に変形が生じ易くなるためであり、ひび割れ発生メカニズムが高温加熱のようにまったく異なる場合でも同様の現象が見られる⁷⁾。サブテラヘルツ反射率についても、ひび割れの存在によりコンクリート試験体内部での屈折や減衰が生じることで、計測される値が減少したものと考えられる。

以上の結果から、サブテラヘルツ反射率比を計測することにより、圧縮強度比・ヤング係数比の力学特性の変化率を推定可能であると

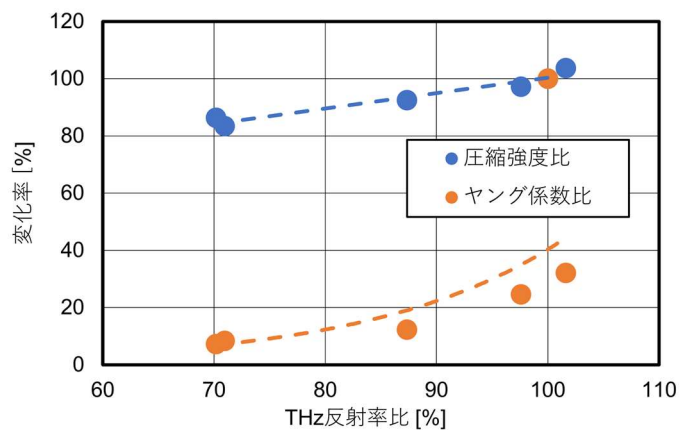


図10 THz 反射率比と力学特性の関係 (円柱試験体)

示唆される。また、紙幅の関係でグラフを割愛しているが、サブテラヘルツ反射率比とかさ密度変化率にも相関が確認された。かさ密度の変化はひび割れにより生じると考えられ、サブテラヘルツ反射率によりひび割れの存在を確認できると示唆される。

5. 結論

テラヘルツ反射波を用いた非破壊検査手法として、力学特性の低下したコンクリート材料の計測への適用性を確認した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 周波数により測定可能な深さに違いがあることを確認した。
- 2) 骨材とモルタルの材質により、また、特定の骨材の寸法や計測面への露出の有無でも測定結果が異なることを確認した。
- 3) 圧縮強度比・ヤング係数比などの力学性能の低下を、サブテラヘルツ反射率の低下として計測できることが示唆された。
- 4) かさ密度の低下として表れるひび割れについて、サブテラヘルツ反射率により計測できることが示唆された。

参考文献

- 1) Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. Struct., Vol. 25, pp. 358-365, 1992.
- 2) コンクリート委員会・規準関連小委員会, 土木学会規準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G 582-2018)」の制定, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 74, No. 4(2018) 256-259
- 3) Dash, J. et al.: Non-Destructive Inspection of Internal Defects in Concrete Using Continuous Wave 2D Terahertz Imaging System, 2013 38th Inter-national Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Sep. 2013.
- 4) Tripathi, S.R. et al.: Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), Corros. Sci., Vol. 62, pp. 5-10, Sep. 2012.
- 5) Tanabe, T.; Kanai, T.; Kuroo, K.; Nishiwaki, T.; Oyama, Y: Non-Contact Terahertz Inspection of Water Content in Concrete of Infrastructure Buildings, World J. Eng. Tech., Vol. 6, No.2, pp. 275-281, May. 2018.
- 6) 橋本紳一郎, 橋本親典, 渡辺健, 上田隆雄, 液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案, コンクリート工学年次論文集. Vol. 27, No. 1 (2005) 757-762.
- 7) 一瀬賢一, 高温下におけるコンクリートの力学性状, コンクリート工学. Vol. 45, No. 9 (2007) 83-86.