

テラヘルツ反射波を用いたコンクリート構造物の耐久性評価のための基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY FOR DURABILITY EVALUATION OF CONCRETE STRUCTURES USING TERAHERTZ REFLECTION WAVES

清水 耕史
Koshi SHIMIZU

A fundamental study on the application of terahertz waves, which are expected to be used as a new electromagnetic wave field, as a non-destructive inspection method was conducted. In this study, the effect of aggregate presence on the measurement, the detection of aluminum tape simulating embedded steel bars, the detection of slits simulating cracks, and the measurement of concrete with degraded mechanical performance was investigated. As a result, basic information such as determination of the measurement conditions for concrete, development of the analysis method for the measurement data, and understanding of the frequency characteristics was accumulated.

Keywords : Terahertz wave, non-destructive test, internal inspection, crack, rebar, degraded strength

テラヘルツ波, 非破壊検査, 内部探査, ひび割れ, 鉄筋, 強度低下

1. はじめに

近年, 社会資本であるコンクリート構造物の老朽化が急速に進行していることや, スクラップアンドビルドから資源循環型社会への転換が求められていることを受けて, コンクリート構造物の適切な維持管理への関心が高まっている。そのため, 鉄筋コンクリート構造物を対象とした非破壊・微破壊試験方法が数多く提案されている(たとえば^{1),2)}。また, 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, 電磁波などの光学系を利用した調査方法も確立されたものがある。この一方で, 原子力発電所の管理区域などに代表される, 容易に人が近づいて作業できない状況下でも適用可能とするためには, 非接触・遠隔の非破壊検査手法が必要であるが, 未だ十分に整備されていない。特に, 仕上げ材の裏側にあるひび割れや, かぶりコンクリートの奥にある鉄筋の状態などは, 目視やデジタルカメラなどの光学画像で情報を得ることも困難である。このような情報を非接触で得るための試験方法は確立されていない。

そこで, コンクリートや仕上げ材を透過可能な特性を有するテラヘルツ波を用いた, 非接触・非破壊での鉄筋コンクリート構造物の検査手法の開発のために基礎的検討を実施することを本研究の目的とする。ここでは, ひび割れや鉄筋を模擬した試験体と力学性能を低下させた試験体を対象とした, 実験室レベルでの基礎的検討を行った結果について報告する。

2. テラヘルツ波による測定

2.1 テラヘルツ波とは

図1に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0.1~10 THzの電磁波を指す。エネルギーが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。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⁾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⁾などがある。

2.2 測定系

測定系の概要を図2に示す。実構造物への適用を考えると, 測定対象の両側に発信・受信装置を設置する必要のある透過波よりも, 片側に設置できる反射波による計測が望ましい。そのためここでは, 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。テラヘルツ波の光源には30, 50 GHzのGUNNダイオードを使用した。ここで, 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, 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。30 GHzでは直径8 mm, 50 GHzでは直径6 mmのアパーチャーを使用した。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。測定範囲は試験体中央の50 mm×50 mm, 測定ピッチは2 mmとした。測定ピッチについては, 事前の検討からこれ以上小さくしても得られる検出結果が変化しないことを確認している。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。

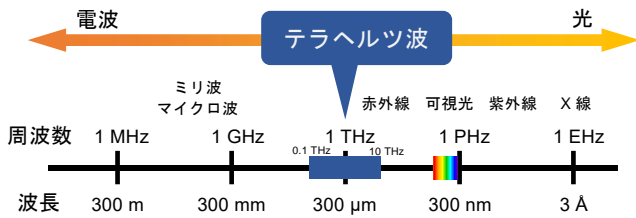


図1 テラヘルツの帯域

表1 試験体の配(調)合

	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
コンクリート	168	306	790	1053	1.38
モルタル	301	547	1368		
セメントペースト	635	1154			

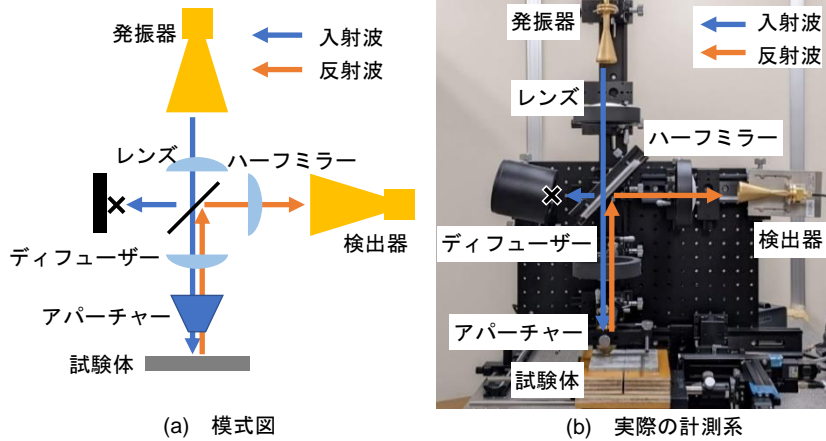


図2 測定系の概要

表2 実験水準

試験項目	測定パラメータ	変数
アルミテープ	試験体厚さ [mm]	5, 10, 20, 30, 50
	アルミテープ幅 [mm]	10
	測定周波数 [GHz]	30, 50
スリット	試験体厚さ [mm]	10, 20, 30
	スリット幅 [mm]	0, 1, 2, 3, 5
	スリット上面の設置物	なし, モルタル 5 mm
	測定周波数 [GHz]	30, 50
加熱	加熱温度 [°C]	300, 600, 900
	試験体厚さ [mm]	10, 20, 30, 50, 70
	測定周波数 [GHz]	30, 50

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4つの測定について示す。第一に、骨材の有無がテラヘルツ波での測定に及ぼす影響を明らかにするために、コンクリート・モルタル・セメントペーストについて測定した。第二に、埋設鉄筋を模擬し、試験体裏面にアルミテープを貼った試験体について測定した。第三に、ひび割れを模擬したスリットを導入した試験体について測定した。最後に、加熱により力学性能を低下させた試験体について測定した。

3.1 使用材料と調合

セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³, 比表面積 3140 cm²), 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), 粗骨材として砕石(表乾密度 2.68 g/cm³, 最大寸法 20 mm), 混和剤として AE 減水剤(密度 1.05 g/cm³)を使用した。コンクリート・モルタル・セメントペーストの調合を表1に示す。水セメント比は全て 55%とした。コンクリートの練り混ぜには強制2軸ミキサー(容量 60 L)を用いた。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2分練り、最後に粗骨材を入れて1分練り混ぜた。スランブは 14 cm, 練り混ぜ時の温度は 16.3°C, 空気量は 4.9%であった。モルタル・セメントペーストの練り混ぜにはオムニミキサー(容量 5 L)を用いた。モルタルは空練り1分の後水を入れて3分練り混ぜた。練り混ぜ時のスランブフローは 240 cm, 空気量は 7.4%であった。セメントペーストは30分毎に練り返しを行い、ブリーディングがなくなった後に打設した。

試験体は直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱試験体と幅・高さ 100 mm, 長さ 400 mm の梁型試験体を作製した。試験体は打設後1日で脱型し材齢 28 日まで水中養生した。その後湿式コンクリートカッターにより所定の厚さに切断し, 60°C・3日間の条件で乾燥させた後測定を行った。

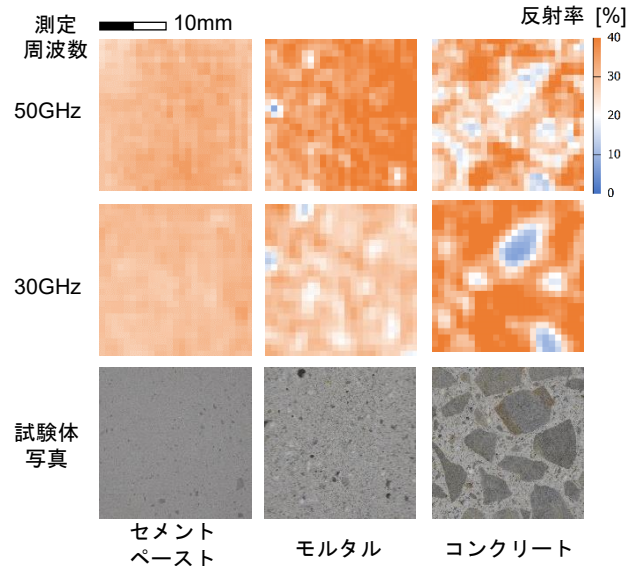


図3 材料の違いが測定画像に及ぼす影響

3.2 測定概要

実験水準を表2に示す。骨材の有無として厚さ 5 mm のコンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した。厚さを 5 mm としたのは、試験体裏面での反射を加味することで、骨材による反射率の違いを明確に評価するためである。

次に、埋設鉄筋を模擬したアルミテープを、試験体裏面に貼り付けた測定を行った。裏面のアルミテープを検出可能な試験体厚さを検討するため、5, 10, 20, 30, 50 mm 厚さの試験体にて測定した。

第三に、コンクリートにひび割れを模擬したスリットを導入した試験体を測定した。検出可能なスリット幅を検討するため、スリット幅を 0~5 mm まで変化させて測定した。加えて、仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルをスリット上部に配置して測定した。

最後に、加熱によって力学性能を低下させた試験体の測定を行った。加熱は内外温度差による温度応力が生じないように、昇温・降

温速度を 0.3 °C/min とした。300, 600, 900 °C の 3 水準で加熱し、最高温度を 24 時間保持後に降温させた。測定は加熱前後で実施した。加えて、加熱後の試験体に対して圧縮試験を行った。載荷速度は毎秒 0.2 N/mm² とし、3 体の平均値として圧縮強度を算出した。

4. 結果と考察

4.1 骨材の有無が測定結果に及ぼす影響

コンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した結果を図 3 に示す。モルタル・セメントペーストは反射率が場所によってほぼ変化せず、均質な材料であることが画像からも確認できた。モルタル 30 GHz の画像左上の反射率の低い箇所は表面の空隙である。

コンクリートはモルタル・セメントペーストと比較すると反射率の低い領域が点在している。これは粗骨材によるものであり、モルタル部と比較して粗骨材で反射率が低下することが確認できた。このことから、モルタル部と比較して、粗骨材の方がテラヘルツ波の透過性が大きいと考えられる。

4.2 アルミテープの測定

アルミテープの測定結果の一部を図 4 (a) に示す。30 GHz では厚さ 10 mm で、点線で示すアルミテープの範囲に反射率の低い青色の範囲が一部確認できた。これは、上述したように骨材部とモルタル部で反射率が異なるためと考えられる。厚さ 10 mm より厚い場合は、アルミテープを貼った範囲と他の範囲で差が確認できなかった。

次に、アルミテープの有無による差分反射率で示した結果を図 4 (b) に示す。ここで、差分反射率とは、アルミテープを貼った場合の反射率からアルミテープなしの場合の反射率を引いた値である。差分を取ることで、アルミテープの有無による変化のみを抽出した評価が可能となる。これを見ると、点線で示すアルミテープ幅とその周囲で差分反射率の絶対値が大きい範囲が検出できていることが分かる。アルミテープ幅の他の範囲ではどの厚さにおいても、差分反射率が 0 に近い値となっており、差分反射率とすることでアルミテープ以外の影響を排除できていることが分かる。アルミテープの検出が可能な試験体厚さについては、30 mm 厚さのコンクリート裏面のアルミテープが 30, 50 GHz の両方で検出できていることが分かる。これは、アルミテープを貼った画像単独では判別できなかった厚さである。試験体厚さ 50 mm では、いずれの周波数でも検出ができなかった。2 つの周波数の違いを見ると、同じ試験体厚さでは 30 GHz の方が差分反射率の絶対値が大きく、明確に検出できた。一方で、50 GHz では差分反射率の絶対値が大きい範囲が点線で示すアルミテープ幅と同程度の幅で検出できた。このことから、周波数が低いほど高い透過性能が得られ、周波数が高いほど分解能が向上すると考えられる。

4.3 スリットの測定

図 5 (a) に、スリット測定の測定結果と、測定範囲の試験体写真を示す。スリット幅が大きいほど、中央の反射率の低い幅が広くなる

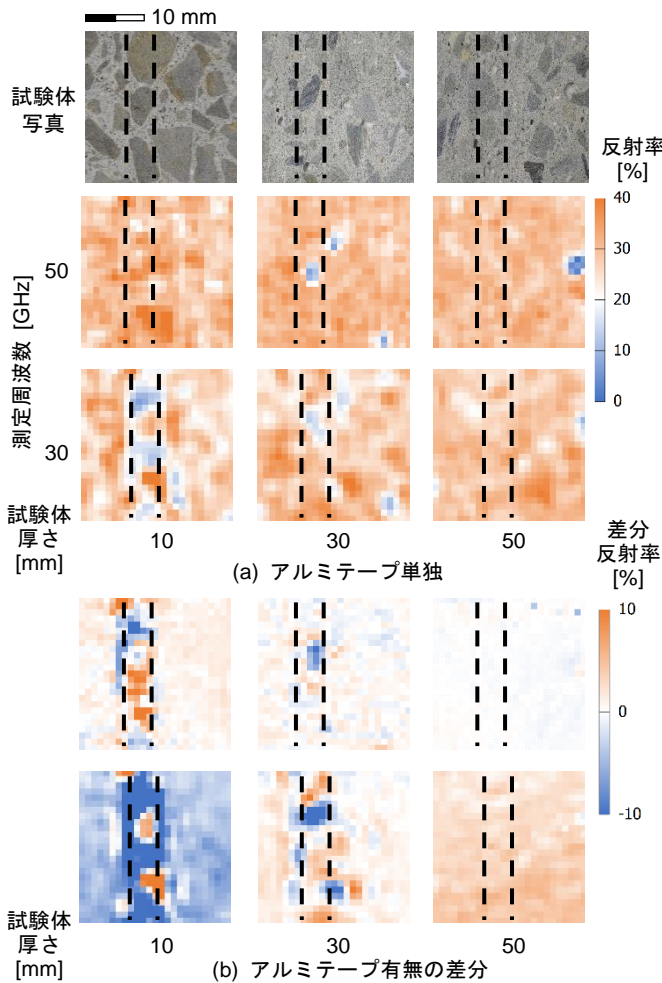


図 4 コンクリート裏面のアルミテープの検出

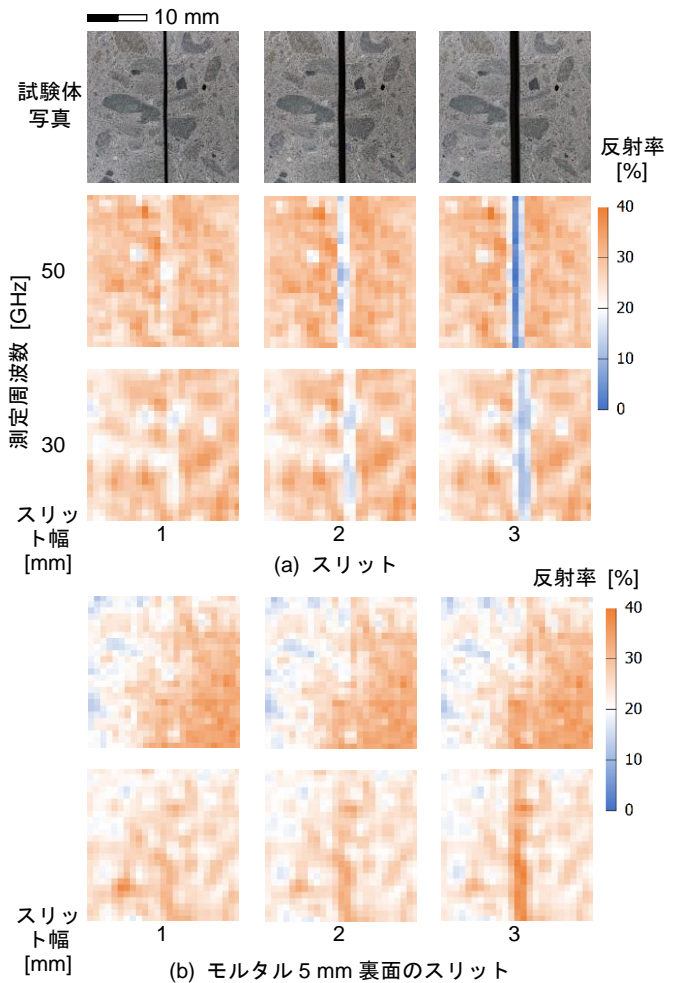


図 5 スリットの検出 (試験体厚さ 30 mm)

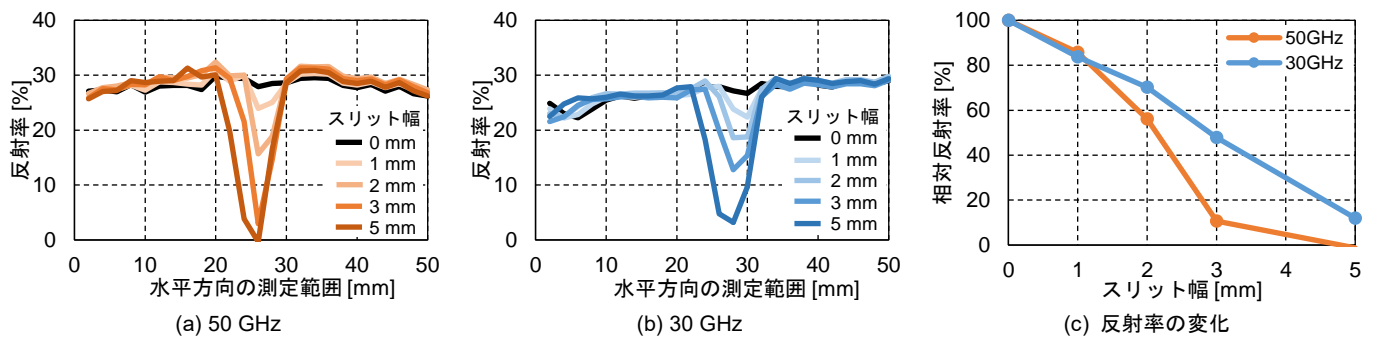


図6 スリット部の反射率変化（試験体厚さ 30 mm）

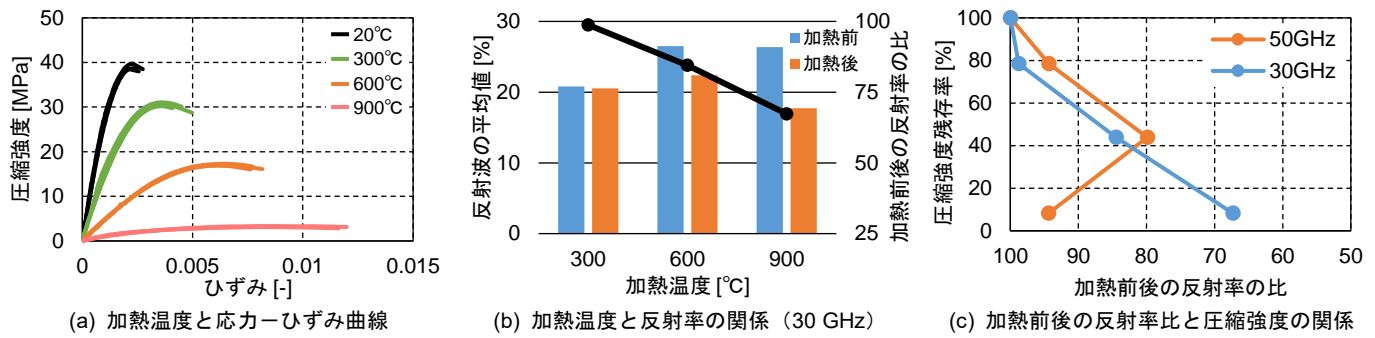


図7 加熱による性能低下（試験体厚さ 30 mm）

ことが、いずれの周波数でも確認できた。スリット幅 1 mm の場合は、スリット部の反射率は他の領域とほとんど変化がない。この一方で、スリット幅 2 mm 以上では、いずれの周波数でも明確にスリットを検出できた。また、図 5 (b)に厚さ 5 mm のモルタル裏面のスリットを測定した結果を示す。周波数 50 GHz ではスリット幅の変化を検出できていないが、30 GHz ではスリットを反射率が高い範囲として検出できた。

次の図 6 に、スリット幅の変化による反射率の変化を示す。スリット挿入による測定画像鉛直方向の変化は確認されなかったため、鉛直方向 25 点の平均値と比較を行った。図から、スリット幅が大きくなるほど、スリット部分の反射率が低下する傾向が確認できる。図 6 (c)に、スリット部分の反射率の推移を、スリット幅 0 mm を 100 とした相対値で示す。この図から、50 GHz では 30 GHz よりも反射率の低下が顕著である。このことから、50 GHz の方がより微細なスリットについても検出が可能であると考えられる。

4.4 加熱により力学性能を低下させた試験体の測定

次の図 7 (a)に各加熱水準の応力-ひずみ曲線を、(b)に周波数 30 GHz の加熱温度と反射率の関係を示す。加熱温度が大きくなるほど圧縮強度は低下する傾向にあり、加熱前後の反射率平均値の比も同様の傾向にある。図 7 (c)に加熱前後の反射率比と圧縮強度残存率の関係を示す。周波数 30 GHz では 2 割程度の強度低下は検出できていないが、それ以上の強度低下については、加熱前後の反射率比の低下として検出できている。このことから、テラヘルツ反射波による測定から力学性能の低下を検出できる可能性が示された。

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、コンクリート材料に対し各種の測定を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 骨材の有無が測定画像に及ぼす影響を調査し、骨材とモルタル

部で反射率が異なることを確認した。

- 2) 試験体裏面のアルミテープは、差分反射率による評価とすることで試験体厚さ 30 mm の裏面まで検出が可能であった。
- 3) ひび割れを模擬したスリットの測定では、2 mm 以上のスリットについて検出が可能であった。また、周波数 50 GHz の方が 30 GHz と比較して微細なスリットの検出が可能である一方で、30 GHz では仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタル裏面のスリットも検出可能であった。
- 4) 加熱により力学性能を低下させた測定では、性能低下前後の反射率の比によって、圧縮強度の低下を評価できる可能性を示した。周波数 30 GHz において、より明確な相関を得た。

以上のように、本研究によりコンクリートを対象としたテラヘルツ反射波測定について、測定条件の決定、測定データの分析手法の開発、周波数特性の把握など基礎的な情報の蓄積を行った。

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, pp. 256-259, 2018.
- 3) 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, 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.