

テラヘルツ反射波による繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性能の評価方法に関する研究

ライフサイクル工学分野
原 星海

繊維補強セメント系複合材料 自己治癒 ひび割れ
テラヘルツ波 反射波

1. 研究の背景と目的

コンクリートをはじめとするセメント系複合材料に見られる自己治癒は、構造物の耐久性を向上させるものとして注目されている。一方で、自己治癒コンクリートは未だに実構造物に対して広く実用化されているとはいえない。自己治癒材料の実用化には、さらなる材料開発の一方、自己治癒性能の統一的な評価方法を確立することも重要である。

このことから、本研究ではテラヘルツ波を利用した自己治癒性能評価方法について検討を行う。テラヘルツ波は、周波数が0.1~10 THz程度の電磁波であり、電波の透過性と光波の反応性の中間的な性質を持つため、水などの極性分子への吸収が大きい。このことを利用して、ひび割れや欠陥の可視化など非破壊検査に用いられている。ここで扱うセメント系複合材料 (FRCC) の自己治癒性能についても、透過波を用いて評価した検討例¹⁾がある。しかし、透過波を用いる場合は透過厚さなどによる限界がある。ここで、自己治癒性能の評価を考えると、劣化因子の侵入口である表層付近のひび割れの閉塞を評価できればよく、反射波による測定も適用可能と考えられる。また、実構造物の調査を想定すると、例えば壁面など薄い部材でも10 cm以上の厚さがあり、透過計測は容易でない。加えて、反射波であれば発振器と受振器を対象物の同一面に設置しての計測が可能である。さらに、テラヘルツ波照射装置の小型化がより進み、例えば遠隔操作のロボット等に搭載されれば、人工知能によるひび割れの自動検出・修復・評価などと組み合わせにより、高度な自動修復システムも想定できる (図1)。このような場合にも、反射波による測定が望ましい。

以上を踏まえ、本研究ではテラヘルツ反射波によるセメント系複合材料 (FRCC) の自己治癒能力評価の可能性について検討する。

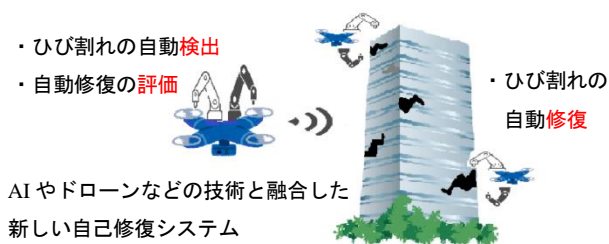


図1 人工知能による構造物の自己治癒・修復の想定図

2. 実験概要

2.1 試験体作製

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント (C、密度 3.16 g/cm³)、細骨材は珪砂 6号 (S、密度 2.6 g/cm³、平均粒径 212 μm)、繊維は PVA (繊維径 40 μm、繊維長 12 mm、密度 1.3 g/cm³、引張強度 1560 MPa) を使用した。混和材のシリカフューム (SF、密度 2.2 g/cm³、平均粒径 0.15 μm) を加えるシリーズを SF、加えないシリーズを CO とし、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱試験体を各 10 本ずつ作製した。調合を表 1 に示す。なお、B は結合材、W は水を表す。

テラヘルツ波による測定には、ひび割れを与えた上で CO の調合の円柱試験体から切り出した厚さ 5 mm の円盤を用いた。さらに、ひび割れではなくコンクリートカッターで半分に分断したスリット試験体も準備した。このスリット試験体には、自己治癒による析出物質を模した充填材 (水:セメント:炭酸カルシウム=2:1:1) を適用した。

表1 PVA 混入試験体の調合表 (PVA を除き Wt.%)

	B		S/B	W/B	PVA (Vol.%)
	C	SF			
CO	100	—	40	40	2
SF	90	10			

2.2 テラヘルツ波照射試験

テラヘルツ波照射試験では、透過測定と反射測定をそれぞれを行い、図2の概念図に示した装置を用いた。

まず、スリット試験体を対象として、充填材の有無をパラメータに透過波測定と反射波測定を行った。試験体は5日間 60°Cで乾燥処理を行い、試験の有効性を確認した。

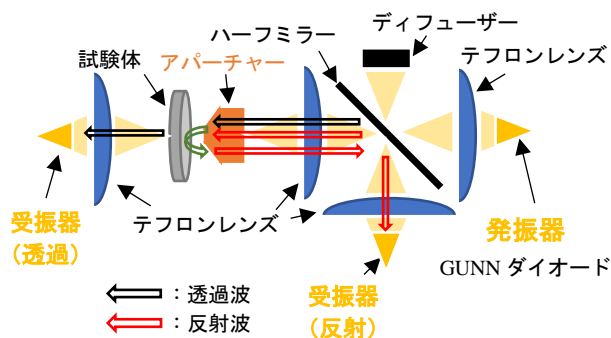
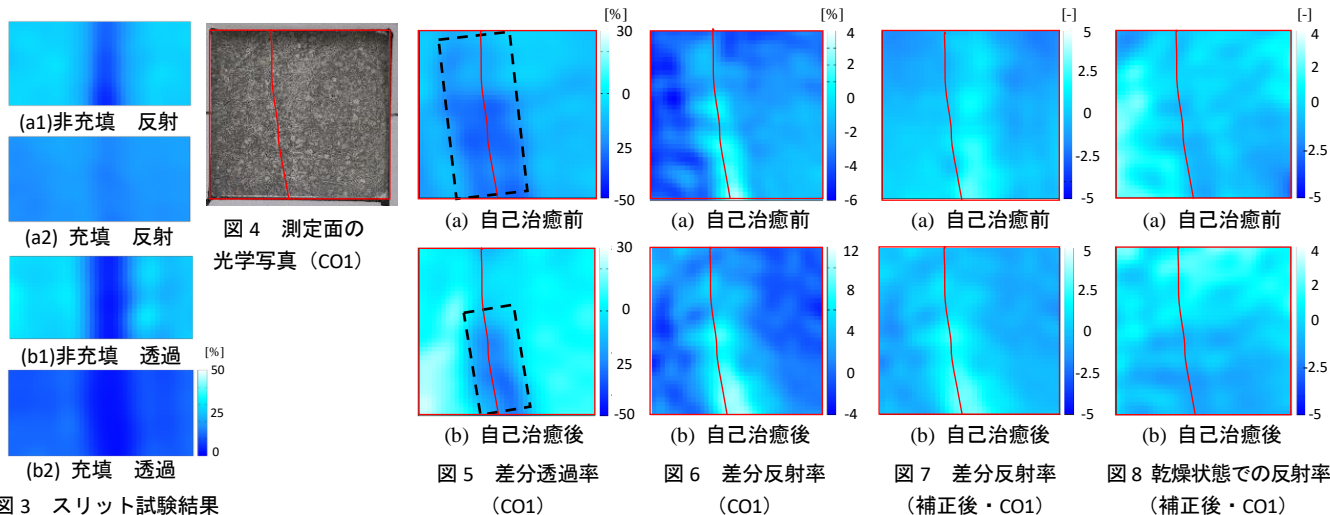


図2 テラヘルツ照射試験装置の概念図



CO と SF での測定では、材齢 28 日で開口変位が約 0.3 mm となるように割裂引張試験によりひび割れを与えた試験体を用いた。その後、厚さ約 5 mm の円盤状に切断し、乾燥処理を行った。テラヘルツ波の透過・反射波による測定は、乾燥状態と含水状態（ひび割れに 0.3 mL の水を滴下）の 2 水準で行った。この 2 状態の差分からひび割れと吸水範囲を可視化する。この測定を行った後、円盤試験体を水中で 28 日間再養生して自己治癒させ、再び同様のテラヘルツ波の照射試験を行った。試験体は各シリーズ 2 枚ずつ用いた。

3. 結果と考察

3.1 スリット試験

スリット試験の結果を図 3 に示す。ここでは、透過・反射いずれの場合も、計測した値を基準値で除した差分透過率、差分反射率[%]として表示している。透過計測では試験体を置かず測定した値を、反射計測では全反射するアルミ板を置いて測定した値を基準値に用いた。図 3 の結果から、透過波と同様に反射波でもスリット（ひび割れ）の検出が可能であることが確認できた。また、スリット試験体と充填試験体を比較すると、充填試験体ではスリット部分と周囲との差が小さくなっており、反射波による自己治癒の観測・評価が可能であることが確認できる。

3.2.2 自己治癒の観測

図 5 に差分透過率、図 6 に差分反射率の測定結果の一例を示す。図 5 から、自己治癒によるひび割れの閉塞が生じていることが確認できる。なお、図 5 の破線はひび割れの影響範囲と見られるか所の範囲の一例である。図 6 からはひび割れの状態がやや変化したことが確認できるが、透過波と同様の傾向がみられているか判断が難しい。ここで、図 6 で用いたレンジに着目すると、透過計測より値の範囲が狭い。すなわち、反射測定では試験体の微小な傾きなど、小さな測定誤差が相対的に大きな影響を持つと考えられる。図 6 に示した試験体の場合、例えば自己治癒前であれば右から左に下がるような勾配を持っており、勾配を打ち消す補正

を行い、さらに（式 1）によって、全体のデータの平均値（ \bar{X} ）・標準偏差（ σ ）から標準化することで、適切なレンジを与えることができる。その結果を図 7 に示す。

$$Y_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (\text{式 1})$$

しかし差分反射率を自己治癒前後で比べても、自己治癒を明確に評価できなかった。含水率が大きいほど表面の反射率は高くなるが²⁾、透過率は小さくなる。今回の試験体は厚さが 5 mm で、入射面とその逆側の面での反射が卓越する。含水状態では入射面での反射強度は上がる一方、反対の面からの反射強度は下がり、全体の収支が一定にならないためこのような結果になったのだと考える。

そこで、先述の補正を施した乾燥状態のみの反射率を図 8 に示す。ひび割れの線上だけを見ても、全体を見てもひび割れの範囲が狭くなっていることが確認できる。ここではひび割れの影響だけによる比較ができており、図のように自己治癒を観測できる傾向をつかむことができた。

4. まとめ

スリット試験によりテラヘルツ反射波による自己治癒の評価が可能であることが確認された。またひび割れのテラヘルツ反射計測によっても、乾燥状態のひび割れに対する照射によって自己治癒が観測できることも分かった。

今後の課題としては、試験体厚さや含水率の変更や、パルス波測定による屈折率の調査により、含水状態が反射波に与える影響を調べることで、より高精度化が期待できる。

【参考文献】

- 1) 清水耕史他：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
- 2) Tadao Tanabe, Tomoya Kanai, Kenta Kuroo, Tomoya Nishiwaki and Yutaka Oyama : Non-Contact Terahertz Inspection of Water Content in Concrete of Infrastructure Buildings, World Journal of Engineering and Technology, Vol.6,pp. 275-281, 2018