

光音響法によるひび割れを有するコンクリート表面の弾性波可視化

愛媛大学

学生会員 ○朝日快佳, 大河内健人

愛媛大学

正会員 丸山泰蔵, 中畑和之

電力中央研究所

非会員 永井政貴, 林 山

1. はじめに

目視検査では、コンクリートのひび割れを検出できるが、その深さを推定することは困難である。その場合は、弾性波法¹⁾などの非破壊検査が適用されている。弾性波法は、一般に送信用と受信用の探触子をひび割れを跨いで設置し、ひび割れの深部(端部)で回折した弾性波の伝搬時間からひび割れ深さを推定している。コンクリート表面に多くのひび割れがある場合、すべてのひび割れに対して弾性波検査するのは時間を要する。

そこで、予め、ひび割れの浅深をスクリーニングできれば便利である。本研究では、弾性表面波から、ひび割れ深さを識別するための基礎検討を行うことを目的とする。ここでは、光音響法を用いて材料表面の多点で得られる弾性波の時刻歴応答(以下、Wavefield data²⁾と呼ぶ)を可視化する。ここでは、モルタル表面にひび割れを模した深さの異なるスリットを作成し、表面波がモルタル表面を伝搬する様子を可視化することで、伝搬挙動とスリット深さの関係について調査した。

2. 光音響法

光音響法は、短パルスのレーザ光を照射したときの熱弾性効果によって、固体中に応力波を発生させ、これを超音波プローブで受信して映像化するものである⁴⁾。光音響法を用いて Wavefield データを可視化するシステムの概要を図-1 に示す。まず、光源 (Litron 社, Nano L90-100) からパルスレーザを供試体表面に照射する。レーザ光の波長は 532nm で、パルス幅は 4ns で

ある。ここでは、中心周波数 200kHz の超音波探触子 ($\phi=20\text{mm}$) を供試体の側面に固定し、レーザの照射点を平行移動させながらラスタ走査 (x - y 方向) を行う。超音波探触子で検出された信号は、弾性波の相反性を利用すれば、超音波探触子から発生した弾性波であると見なすことができる。各点でレーザ照射することで発生した弾性波の波形を保存しておき、同時刻の信号の振幅を x - y 面にプロットすることで、表面を伝搬する弾性波の可視化が可能となる。

3. 光音響法による表面波の可視化結果

本研究は基礎検討であるので、モルタルを供試体として検討した。モルタル供試体の概要を図-2(a) に示す。供試体のサイズは $200\text{mm} \times 250\text{mm} \times 100\text{mm}$ であり、水セメント比を 50%, 骨材の最大粒径を 5mm として作成した。ここでは、表面ひび割れを模したスリットを作成した。スリット幅を 5mm とし、スリット深さ D を 5mm と 15mm の 2 種類で検討する。弾性波を受信するために、ジャパンプローブ社製の中心周波数が 200kHz の垂直探触子を図-2 の位置に置いた。プローブの直径は 25mm である。可視化範囲は図-2(b) に示すようにスリットを中心として $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ とし、探触子はスリットから 55mm の距離をおいて設置した。可視化範囲がレーザ照射範囲であり、可視化する面と超音波探触子の設置面は同じである。

光音響法を用いて波動伝搬を可視化した様子を図-3 に示す。図-3(a) は、 $D=5\text{mm}$ に対する Wavefield の可視

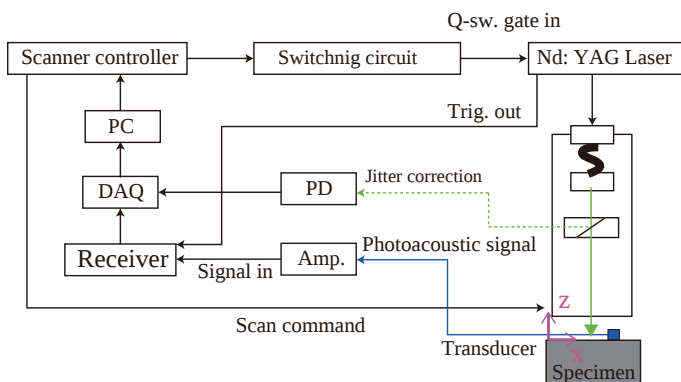


図-1 光音響法を用いた弾性波の可視化システムの概要

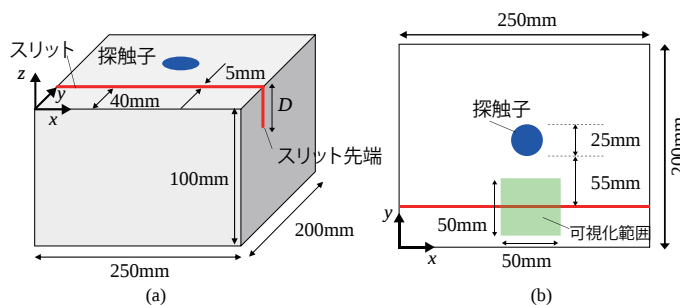


図-2 (a) モルタル供試体 (スリット幅 5mm, スリット深さ D) と (b) 可視化範囲。

Key Words: 光音響法, 弾性波伝搬, 可視化, Wavefield data, 数値解析

〒790 - 8577 愛媛県松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科理工学専攻

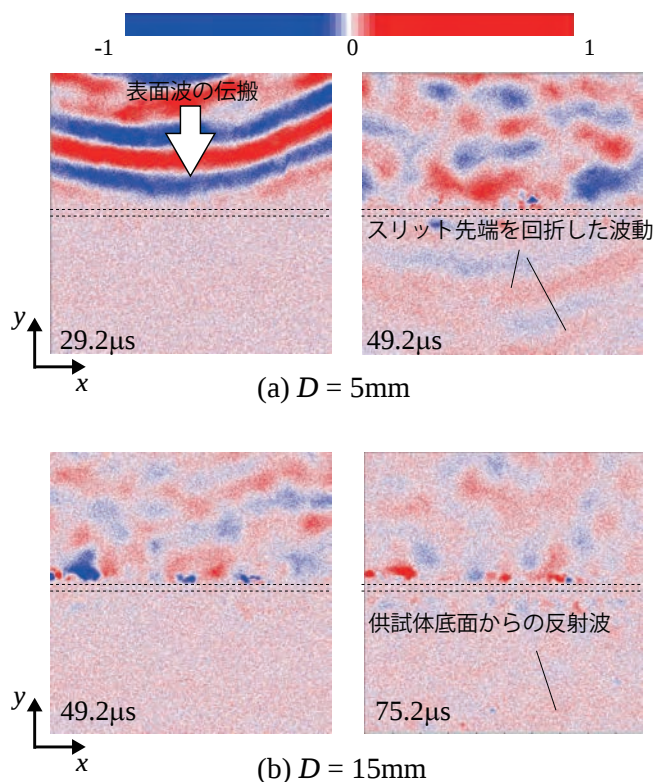


図-3 (a) $D=5\text{mm}$ のときの Wavefield データの可視化.
(b) $D=15\text{mm}$ のときの Wavefield データの可視化.

化であり、レーザー照射後 $t=29.2\mu\text{s}$ のときに表面波がスリットに到達しているのがわかる。その後、 $t=49.2\mu\text{s}$ のときにスリットの先端を回り込んで表面に現れた波動が確認できる。一方、図-3(b) に示す $D=15\text{mm}$ の場合は、スリット先端を回り込んだ波動の観察が困難となっている。図-3(b) の $t=75.2\mu\text{s}$ にて、スリットよりも先の部分で、わずかに振幅が観察できるが、これは供試体底面からの反射波である。次節で数値解析を用いて説明する。

4. シミュレーションによる内部の可視化結果

モルタルは均質体 (縦波音速を 3700 m/s 、横波音速を 2000 m/s 、密度: 2700 kg/m^3) と仮定し、動弾性有限積分法⁵⁾(EFIT) を用いて波動伝搬シミュレーションを行う。ここでは、計測実験で使用した $D=15\text{mm}$ のスリットをモデル化した。中心周波数 200kHz の入射波を作成し、この時間プロファイルをモデル表面の探触子部分に垂直応力として与えた。EFIT による計算結果を図-4 に示す。ここでは、 $20\mu\text{s}$ おきに変位を出力したものを示している。計算過程で得られた最大の変位で割り算し、最大値を 1 として正規化したものをプロットしている。 $t=20\mu\text{s}$ では、真下方向に縦波が、水平方向に表面波が観察されており、 $t=40\mu\text{s}$ で 2 つのパケットの表面波が見える。この 2 つは、プローブの

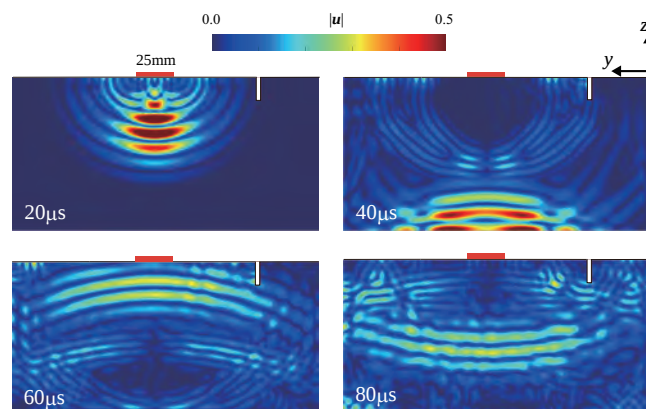


図-4 EFIT を用いたモルタル内部の弾性波の可視化シミュレーション

左右端からそれぞれ発生した成分である。表面波はスリットでほとんど反射していることがわかる。時間が経過し、 $t=80\mu\text{s}$ では、スリットより右側の材料の表面部に波動成分が現れる。これは、スリットを回り込んだ波動ではなく、モルタル底面から反射した縦波が表面に現れたものであることがわかる。すなわち、図-3(b) の $t=75.2\mu\text{s}$ で観察された振幅は、スリット先端を回り込んだ波動ではなく、底面からの反射波成分であることがわかる。

5. 考察

表面波に対する理論研究³⁾ によって、表面波はそのエネルギーの大部分が表面下の一波長以内の深さに留まることが示されている。本実験では中心周波数 200kHz のプローブを用いたため、モルタル中を伝搬する表面波の音速から、その波長はおよそ 10mm となる。ここでは、スリット深さが波長よりも小さいときに、スリット先端を回り込む表面波が確認できたため、理論とほぼ整合する結果となった。今後は、非均質体 (コンクリート供試体) について、探触子の周波数や探触子径を変えながら詳細な検討を行ってきたい。

参考文献

- 1) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定精度の向上, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.355-360, 2000.
- 2) T.T. Michaels, J.E. Michaels, M. Ruzzene: Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields, *Ultrasonics*, Vol.51, pp.452-466, 2011.
- 3) J.D. Achenbach: *Wave Propagation in Elastic Solids*, Elsevier Science Publishing, 1973.
- 4) S. Yashiro, J. Takatsubo, H. Miyauchi, N. Toyama: A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan, *NDT & E International*, Vol.41, pp.137-144, 2008.
- 5) P. Fellingner, R. Marklein, K.J. Langenberg and S. Klaholz: Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT -elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, Vol.21, pp.47-66, 1995.