

# 論文 表面波の減衰特性に基づくコンクリートのひび割れ深さ推定に関する実験的検討

水島 龍輝\*1・内田 慎哉\*2・兵動 太一\*3

**要旨：**本研究では、加速度センサのマルチチャンネル化による表面波計測に着目し、深さの異なる人工ひび割れを有するコンクリート供試体を対象に、直径の異なる 3 種類の鋼球を使用して波長の異なる表面波を入力し、その減衰特性とひび割れ深さとの関係を実験的に把握するとともに、表面波の波長の違いがひび割れ深さの推定精度に与える影響について検討した。また、提案したひび割れ深さ推定式を用いて、同じ人工ひび割れの再評価を行い、推定式の妥当性も検証した。その結果、推定するひび割れ深さの最大値に対して 1.7 倍程度の波長を有する表面波を入力することで、精度良くひび割れ深さを推定できることを明らかにした。

**キーワード：**ひび割れ深さ、非破壊試験、衝撃弾性波法、磁歪、表面波、減衰特性、波長

## 1. はじめに

著者らは、加速度センサを複数使用（マルチチャンネル化）することで、表面波の伝搬特性を適確に把握し、この技術を用いて、これまでに、ダムの打継評価<sup>1)</sup>や PC 構造物の現有応力の評価<sup>2)</sup>を行う研究を行ってきた。また、このマルチチャンネル化技術に着目し、コンクリートのひび割れ深さを推定する方法について、解析による検討<sup>3)</sup>も行っている。表面波を利用したひび割れ深さの推定は、蔡ら<sup>4)</sup>、奥出ら<sup>5)</sup>、呉ら<sup>6)</sup>および齋藤ら<sup>7)</sup>も提案している。具体的には、文献 4, 5, 6 では、2ch の加速度センサを用いてひび割れ深さを推定している。これに対して文献 7 では、マルチチャンネル化技術によるひび割れ推定手法を提案しているものの、鋼球直径の違いがひび割れ深さの推定精度に与える影響については検討の余地が残されていた。また、提案手法の推定精度についても十分に議論されていないのが実状であった。

以上を踏まえて、著者らがこれまでに実施してきたマルチチャンネル化（8ch）技術による表面波計測<sup>1), 2), 3)</sup>に着目し、深さの異なる複数の人工ひび割れを有するコンクリート供試体を対象に、直径の異なる 3 種類の鋼球を使用して波長の異なる表面波を入力し、表面波の減衰特性とひび割れ深さとの関係を実験的に把握するとともに、表面波の波長の違いがひび割れ深さの推定精度に与える影響について検討した。また、実験により確立したひび割れ深さ推定式を用いて、同じ人工ひび割れの再評価を行い、推定式の妥当性も検証した。さらに、磁歪により一定の力で打撃することが可能な弾性波入力装置を製作し、この装置によるひび割れ深さの推定も試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

写真-1 に、供試体の概要を示す。供試体寸法は、長さ 850mm×幅 200mm×高さ 300mm である。人工ひび割れは、コンクリートを打設する前に、型枠の長さ方向（供試体の長さ方向）中央位置において、厚さ 5mm の発泡スチロールを設置することにより模擬した。人工ひび割れの深さは、50, 75, 100 および 150mm の 4 ケースに設定した。いずれも、コンクリート硬化後に、発泡スチロールは除去している。また、比較のため、人工ひび割れを有しない健全な供試体（健全供試体）も併せて作製した。したがって、供試体は全部で 5 体となる。

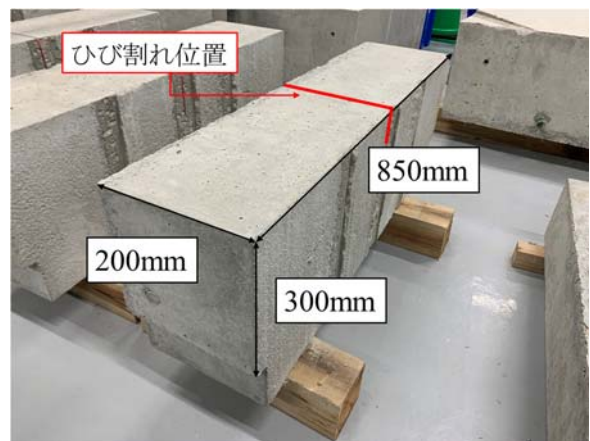


写真-1 供試体の概要

コンクリートは、生コン工場で製造した呼び強度：21 を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm<sup>3</sup>）、水：地下水、

\*1 富山県立大学大学院 工学研究科環境・社会基盤工学専攻（学生会員）

\*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士（工学）（正会員）

\*3 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科講師 博士（工学）（非会員）

細骨材：庄川水系陸砂（表乾密度：2.59g/cm<sup>3</sup>，粗粒率：2.70），粗骨材：庄川水系陸砂利（表乾密度：2.61g/cm<sup>3</sup>，実積率：63.0%），混和剤：AE 減水剤標準型I種である。表-1 にコンクリートの配（調）合を示す。なお、フレッシュコンクリートの性状は，スランプ 18.0cm，空気量 4.5%である。別途作成した円柱供試体で，材齢 28 日に JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験を実施した結果，圧縮強度は 26.7N/mm<sup>2</sup>であった。

## 2.2 計測方法

写真-2 に，鋼球により弾性波を入力した場合の計測状況を示す。ひび割れ中心から 25mm 離れた位置に，ch.4 および ch.5 の加速度センサをそれぞれ配置した。また，その位置から供試体の長手方向に対して，50mm 間隔で ch.1～ch.3 および ch.6～ch.8 の加速度センサを 6 個それぞれ設置した。したがって，使用した加速度センサは計 8 個であり，貼付けにはエチレン-酢酸ビニル共重合樹脂が主成分の接着剤を使用した。なお，健全供試体においても同様に加速度センサを配置した。

弾性波の入力には，写真-3 に示す直径 6.4mm，9.6mm および 19.1mm の 3 種類の鋼球を使用した。弾性波の入力位置は，写真-2 に示す ch.1 から 25mm 離れた箇所とした。また，加速度センサの貼付け状態による加速度センサの感度の変動を低減することを目的に，ch.8 から 25mm 離れた位置においても鋼球打撃による弾性波入力を行った。なお，低減するための具体的な計算方法は，3.1 で説明する。弾性波の受信には，周波数応答(±3dB)が 0.2～20000Hz の加速度センサを使用した。受信した信号は，サンプリング時間間隔 1μs，サンプリング数 20000 個，測定時間長 20ms でデジタル化した後，波形収集装置で記録した。

## 3. 表面波の減衰特性によるひび割れ深さの推定

ここでは，ひび割れ深さ推定式を求めるにあたり，表面波の減衰特性を把握することにした。具体的には，まず，健全供試体を対象に，表面波の位相速度を算出した。さらに，その結果に基づき表面波の波長を求めた。続いて，人工ひび割れを有する供試体に対して，表面波の減衰特性を把握し，ひび割れ深さ推定式を提案した。最後に，ひび割れ深さと表面波の波長との関係について，考察を加えた。以下に，その詳細を説明する。

### 3.1 表面波の位相速度

健全供試体を対象に，鋼球直径 19.1mm を用いて ch.1 側から弾性波を入力した際に得られた時刻歴波形の例を，図-1 に示す。この図に示す時刻歴波形は，式(1)に示す多項式適合法（2・3 次式）により，50000Hz のローパスフィルターをかけたものである。

表-1 コンクリートの配（調）合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	A
61.5	46.8	171	278	845	966	2.780

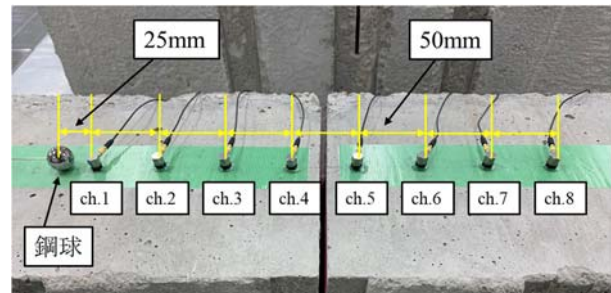


写真-2 計測状況

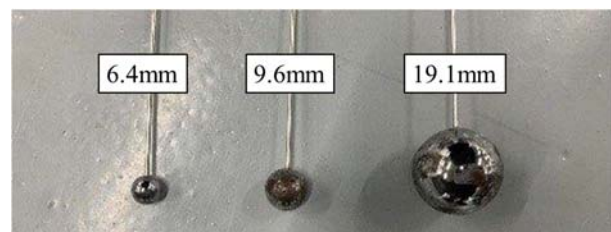


写真-3 弾性波の入力に使用した鋼球

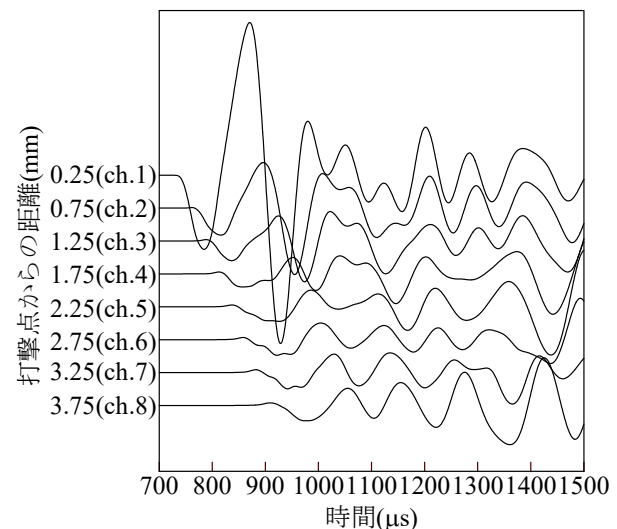


図-1 健全供試体における時刻歴波形  
(鋼球直径 19.1mm)

$$f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ここで， $f$ ：ローパスフィルターの周波数 (Hz)， $N$ ：平滑化点数 (点[=20 点])， $\Delta t$ ：サンプリング時間間隔 (s) である。図-1 より，打撃点からセンサまでの距離が長くなるにしたがって，信号成分が小さくなっていくことが

わかる。特に、センサで信号を検出した直後の1周期分の波形、すなわち表面波の成分については、極端に減衰していることが確認できる。本研究では、この表面波成分に着目して、健全供試体での表面波の位相速度を算出することにした。具体的には、表面波成分の振幅が最大となる時刻を縦軸、打撃点から各加速度センサまでの距離を横軸にプロットした走時曲線(図-2)を算出した。ただし、図に示す縦軸の伝搬時間を算出するにあたり、2.2で概説したとおり、加速度センサの貼付け状態による信号振幅の変動を考慮し、各加速度センサで得られた伝搬時間は、ch.1およびch.8から25mm離れた2箇所所で測定した伝搬時間を平均することにより求めた。図-2に示す走時曲線は鋼球直径19.1mmの場合であり、直線回帰式および決定係数も併せて示している。走時曲線の傾き(回帰直線式の傾き)の逆数(図-2中の1/a)を表面波の位相速度と仮定し、鋼球直径ごとに表面波の位相速度をそれぞれ算出した。その結果を表-2に示す。なお、表に示す表面波の位相速度は、いずれの場合も、3回の測定で得られた結果の平均値である。表より、鋼球直径6.4mmおよび9.6mmの場合は概ね同じ位相速度ではあるが、鋼球直径19.1mmのそれは極端に小さな値となった。このような結果になった理由は現時点で不明のため、今後は、弾性波動解析を活用して考察を深める予定である。

### 3.2 表面波の波長

図-3に、図-1に示すch.1の時刻歴波形のみを切り出したものを示す。図から明らかなおとおり、表面波の成分(センサで信号を検出した直後の1周期分の波形)は明確に判別できるものの、表面波到達以降は供試体の底板から反射した波などが混在することにより、波形が乱れていることがわかる。そこで、本研究では、表面波の波長を算出するにあたり、著者らの既往研究<sup>3)</sup>に基づき、まず、図-3に示す時刻歴波形から表面波の1.5周期程度の波形のみを抽出し、表面波以降の時刻の振幅値をすべて0とすることにした。このようにして求めた波形を図-4に示す。得られた波形に対して高速フーリエ変換(FFT)を行い、図-5に示す周波数スペクトルを得た。周波数スペクトル上の卓越周波数を表面波の周波数 $f$ と定義し、次式から表面波の波長 $\lambda$ を算出した。

$$\lambda = \frac{C_R}{f} \quad (2)$$

ここで、 $C_R$ :表面波の位相速度(表-2参照)である。表-3に、鋼球直径ごとに求めた表面波の波長(3回の測定の平均値)を示す。表より、鋼球直径が大きくなると表面波の周波数が小さくなり、その結果、表面波の波長が大きくなっていることが確認できる。

### 3.3 表面波の減衰特性

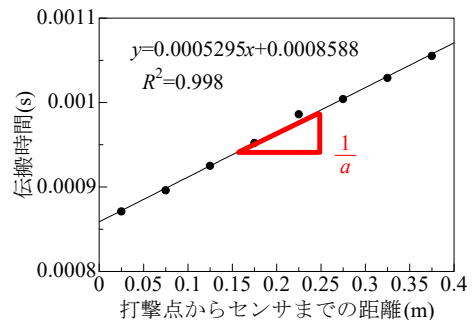


図-2 健全供試体における走時曲線  
(鋼球直径 19.1mm)

表-2 鋼球直径と表面波の位相速度との関係

鋼球直径 $D$ (mm)	表面波の位相速度 $C_R$ (m/s)
6.4	1945
9.6	1950
19.1	1765

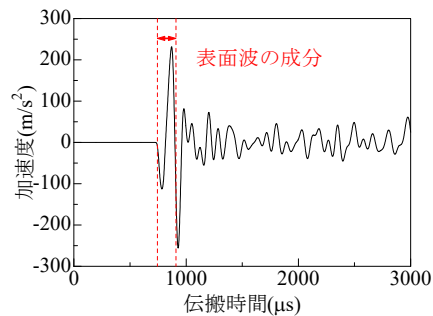


図-3 時刻歴波形(図-1に示すch.1と同じ)

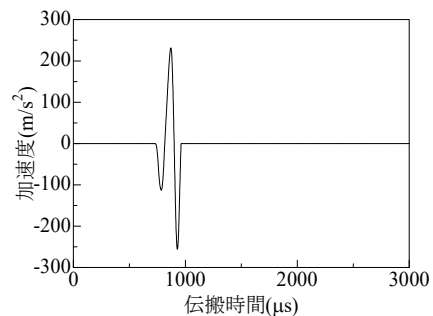


図-4 表面波を切り出し後続の0を加えた波形

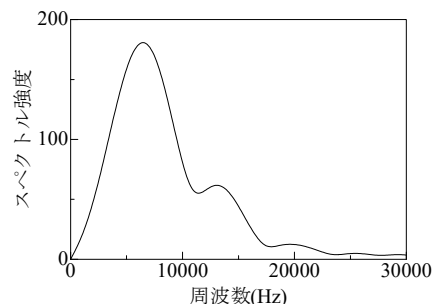


図-5 表面波の周波数スペクトル

表-3 鋼球直径と表面波の波長との関係

鋼球直径 $D$ (mm)	表面波の周波数 $f$ (Hz)	表面波の波長 $\lambda$ (mm)
6.4	11943	163
9.6	10722	182
19.1	6856	258

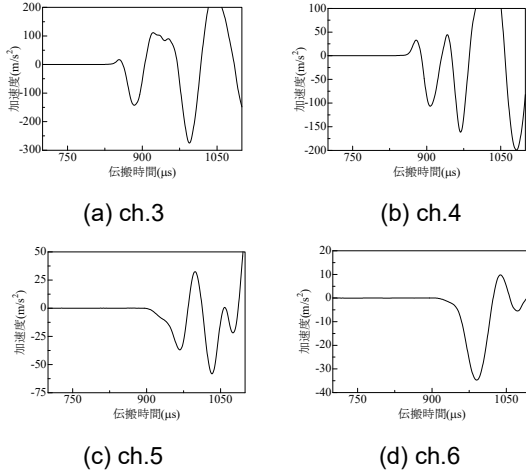


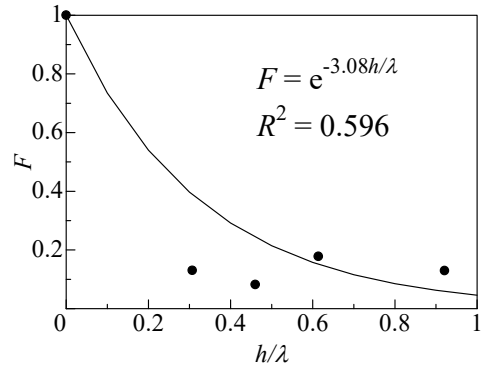
図-6 人工ひび割れ（深さ 150mm）を有する供試体における時刻歴波形（鋼球直径 19.1mm）

人工ひび割れを有する供試体を対象に、鋼球直径ごとに、表面波の減衰特性を把握した。図-6 に、ひび割れ深さ 150mm を対象に、鋼球直径 19.1mm を用いて左端から弾性波を入力した際に得られたひび割れ前後の計 4 個の加速度センサ (ch.3~ch.6) で受信した時刻歴波形をそれぞれ示す。表面波の波形部分を判読しやすくするため、図の縦軸（加速度）を拡大して示している。図-1 に示す健全供試体と同様、弾性波の入力位置からの距離が大きくなると表面波の減衰も大きくなり、特に、ひび割れ前後 (ch.4 および ch.5) での減衰が顕著であることがわかる。時刻歴波形から、著者らの既往研究<sup>3)</sup>に基づき、以下に示す手順で振幅減衰  $F$  を算出した。すなわち、まず、ひび割れ前後の加速度センサ (ch.3~ch.6) の時刻歴波形に対して、3.2 で説明した方法により表面波成分を切り出し、FFT を用いて卓越周波数、すなわち表面波の周波数を ch ごとに計算した。続いて、鋼球直径ごとに、次式から振幅減衰  $F$  を算出した。

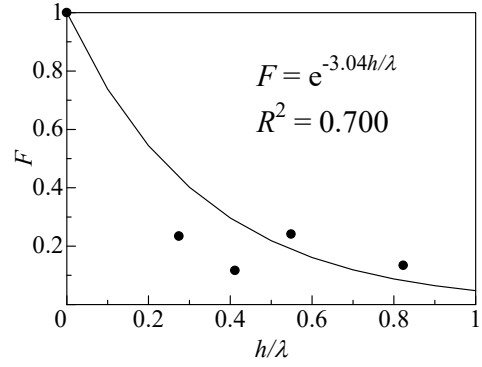
$$F = \frac{A_5 + A_6}{A_3 + A_4} \quad (3)$$

ここで、 $A_3$  : ch.3 の卓越周波数のスペクトル強度、 $A_4$  : ch.4 の卓越周波数のスペクトル強度、 $A_5$  : ch.5 の卓越周波数のスペクトル強度、 $A_6$  : ch.6 の卓越周波数のスペクトル強度である。

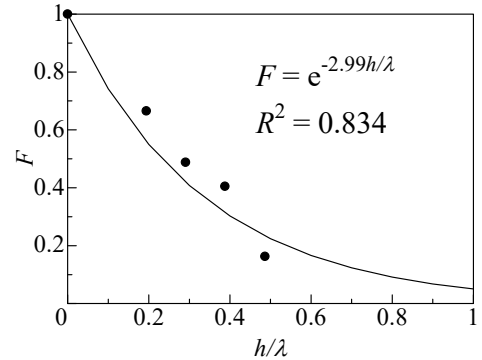
図-7 に、振幅減衰  $F$  と人工ひび割れ深さ/表面波の波



(a) 鋼球直径 6.4mm



(b) 鋼球直径 9.6mm



(c) 鋼球直径 19.1mm

図-7  $F$  と  $h/\lambda$  との関係（鋼球）

長の比 ( $h/\lambda$ ) との関係を示す。鋼球直径ごとにそれぞれ示す。図中の近似曲線は、 $h/\lambda = 0$  のときに  $F = 1$  を通る指数関数で近似したものである。図より、鋼球直径 19.1mm を使用した場合の相関係数が最も高い結果となった。このような結果になった理由については、3.4 で説明する。

図に示す近似曲線から、ひび割れ深さ  $h$  は、波長  $\lambda$  と振幅減衰  $F$  から求めることができる。

$$h = -a \cdot \lambda \cdot \ln F \quad (4)$$

ここで、 $a$  : 定数である。定数  $a$  は、相関係数が最も高い鋼球直径 19.1mm の場合で、0.33 となった。この定数は、研究者により、すなわち表面波の計測方法および振幅減衰の計算方法により異なる値になっている。蔡ら<sup>4)</sup>は 2ch で測定した時刻歴波形から表面波の平均速度と重心周波数を算出し、 $a$  は 0.381~0.398 になるとしている。また、呉ら<sup>5)</sup>は 2ch で測定した時刻歴波形の振幅を利用して、

0.7429 を提案している。一方、斎藤ら<sup>7)</sup>は 4ch の加速度センサを用いて、本研究と同様の方法で振幅減衰を算出し、 $a=0.4$  を得ている。これに対して著者ら<sup>3)</sup>は、FDTD 法による解析を利用して、4ch の出力およびここで示した減衰特性の計算方法から 0.412 を得ており、斎藤らの研究結果<sup>7)</sup>と概ね同じ値となった。これら 4 つの研究は、いずれも人工ひび割れが対象あるいはそれを模擬した解析モデルが対象である。また、振幅減衰は、導出過程から明らかとなっており、コンクリートの材質の影響よりも、ひび割れ部を表面波が伝搬したことによる減衰の影響の方がより顕著になって現れる。このことから推察すると、表面波を適切に抽出できれば、本来、概ね同じ定数になると考えられる。一般的に、地盤などを対象とした物理探査における表面波測定<sup>8)</sup>では、加速度センサを数十個程度設置して、最も確からしい表面波成分の検出を行っている。したがって、著者らは、測定そのものは煩雑になるが、コンクリート分野でも地盤分野同様に、複数の加速度センサを使用して計測することが有用であると考えている。したがって、今後は、本実験条件を FDTD 法により再現し、実験で得られた定数  $a=0.33$  の妥当性を詳細に検証する予定である。

### 3.4 ひび割れ深さと表面波の波長との関係

図-7 より、鋼球直径が 19.1mm の相関が最も良いことが確認できた。これは、供試体を伝搬する表面波の波長の違いによるものと考えられる。物理探査<sup>8)</sup>の分野では、表面波が影響を受ける深さ（探査深度）は、経験則として、表層を伝搬している表面波の波長の 0.3 倍程度と言われている。すなわち、ある深さに存在する対象物を表面波で検知したい場合、その 3 倍程度の波長を伝搬させる必要がある。本実験では、鋼球直径 19.1mm を使用した場合、推定したい最大の人工ひび割れの深さ（150mm）に対して、1.7 倍程度の波長（表-3 より 258mm）を入力していることになる（表面波の波長に対する最大の人工ひび割れ深さは約 0.6 倍）。実験において直径の大きい鋼球を使用すれば、経験則 3 倍に近づく可能性はあるものの、供試体の高さが有限であるため、物理探査の分野とは異なる結果になると考えている。これを検証するため、今後は、FDTD 法による弾性波動解析を用いて、供試体の高さが表面波の波長、すなわち探査震度と与える影響について検討する。

### 4. ひび割れ深さ推定式の検証

ここでは、相関が最も高い鋼球直径 19.1mm を使用した場合に得られたひび割れ深さ推定式の妥当性を検証する。式(5)が鋼球直径 19.1mm の場合の推定式である。

$$h = -0.33 \cdot \lambda \cdot \ln F \quad (5)$$

検証手順としては、2.1 に示す 4 体の人工ひび割れ供試

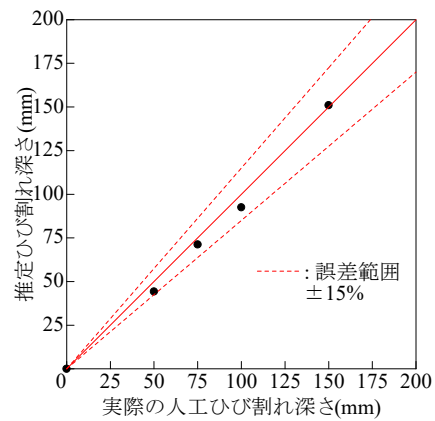


図-8 人工ひび割れ深さの推定結果

体に対して、2.2 の計測（鋼球直径 19.1mm を使用）を再度行い、3.1~3.3 の計算方法により振幅減衰  $F$  を求め、式(5)に代入することにより、ひび割れ深さを求めた。なお、表面波の位相速度および波長は、表-2 および表-3 に示す鋼球直径 19.1mm の値をそれぞれ使用した。得られた結果を図-8 に示す。図より、全ての人工ひび割れに対して、誤差 15% の範囲内でひび割れ深さを推定できていることがわかる。これは、蔡ら<sup>4)</sup>が提案している手法（2ch 計測）の推定精度（30%）よりも高い。このことから、3.3 で述べたとおり、表面波を抽出するには多くの加速度センサを使用（マルチチャンネル化）して表面波成分を適切に抽出することが重要であり、これがひび割れ深さの推定精度に影響を与えていると考えている。

### 5. 弾性波入力装置によるひび割れ深さ推定の適用可能性

実際の現場でより簡便に計測することを想定して、磁歪により一定の力で打撃することが可能な弾性波入力装置<sup>9)</sup>を製作し、この装置によるひび割れ深さの推定も試みた。写真-4 に、製作した弾性波入力装置の概要を示す。この装置には、写真-5 に示す電磁ハンマが内蔵されており、直径 15mm の打撃体を 1s 間隔かつ一定の打撃力でコンクリートを打撃できる。計測方法および振幅減衰の計算方法は、鋼球の場合と概ね同じである。実験を行った結果、表面波の位相速度  $C_R$  は 1521m/s、表面波の周波数  $f$  は 5737Hz、表面波の波長  $\lambda$  は 265mm となっ



写真-4 弾性波入力装置の概要

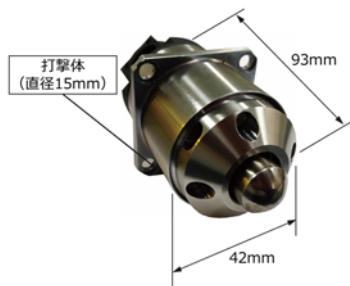


写真-5 電磁ハンマの概要

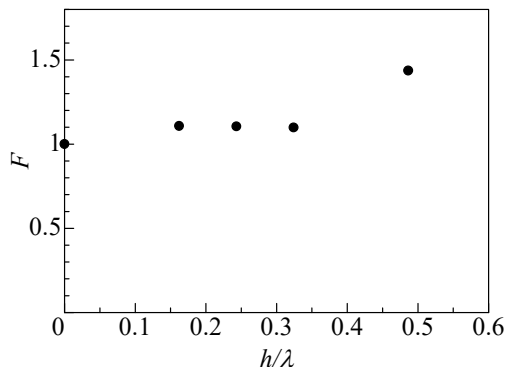


図-9  $F$  と  $h/\lambda$  との関係（弾性波入力装置）

た。これは、表-2 および表-3 に示す鋼球の結果と比較して、明らかに異常な値を示している。また、図-9 に、振幅減衰  $F$  と人工ひび割れ深さ/表面波の波長の比 ( $h/\lambda$ ) との関係を示す。図-7 と比較して、明らかに無相関の結果になった。打撃による弾性波入力を簡便に行うことを目的に、磁歪現象を利用した弾性波入力装置を作製したものの、既往研究のコンクリート内部欠陥の検出方法<sup>9)</sup>とは異なり、ひび割れ深さを推定するのは困難であった。今後は、この理由を明らかにした上で、弾性波入力装置の改良を行う予定である。

## 6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) コンクリート中を伝搬する表面波はひび割れによって著しく減衰する。加速度センサを複数設置（マルチチャンネル化）して計測を行うことにより、表面波の減衰などの伝搬特性を適切に把握できる。
- (2) 表面波の減衰特性とひび割れ深さ/波長の比との関係で相関が高くなるケースは、推定するひび割れ深さの最大値に対して、1.7 倍程度の波長を有する鋼球（直径 19.1mm）を使用した場合であった。
- (3) 鋼球（直径 19.1mm）を使用した場合に、ひび割れ深さ推定式を算出し、人工ひび割れ深さの再評価を行った結果、実際のひび割れ深さに対して 15%の誤差範囲内で推定できることを明らかにした。
- (4) 磁歪現象を利用して弾性波入力装置を製作し、ひび割れ深さの推定を試みたが、鋼球打撃の場合とは異

なり、適用にあたっては多くの課題があることがわかった。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）22K04272）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 河川・水防災技術分野 技術研究開発テーマ一覧 平成 30 年度採択テーマ：  
<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/kasenmizubousai/the.me.html>（閲覧日：2023 年 1 月 10 日）
- 2) 例えば、山本紗衣，内田慎哉，藤井壮太：マルチチャンネル衝撃弾性波法により測定した縦波速度・表面波位相速度と PC 箱桁橋に作用する合成曲げ応力との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1324-1329，2022
- 3) 青沼拓朗，内田慎哉，高橋朋暉：表面波の減衰特性に基づくコンクリートのひび割れ深さの推定に関する解析的検討，令和 3 年度土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会，第 V 部門，V-317，2021
- 4) 蔡華堅，桃木昌平，塩谷智基：Rayleigh 波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 9 巻，pp.25-30，2009
- 5) 奥出信博，橋本勝文，山本貴士，塩谷智基：Rayleigh 波の振幅分布関数を利用したコンクリートのひび割れ深さ評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 20 巻，pp.179-184，2020
- 6) 呉佳暉，堤知明，江川顕一郎：表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術，コンクリート構造物の非破壊検査への期待シンポジウム論文集，pp.243-252，2003
- 7) 斎藤秀樹，鶴原敬久，京谷孝史，曾根好徳，小川淳：表面波によるトンネル覆工コンクリートひび割れ診断法の基礎的検討，物理探査学会第 129 回学術講演会論文集，pp.47-50，2013
- 8) 例えば，物理探査学会，物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル 2008—，pp.91-109，2008
- 9) 野崎峻，内田慎哉，松橋貴次，栗原陽一，神田利之：電磁ハンマと磁歪センサを搭載したユニットを 3 台連結した平地走行ロボットによる RC 床版内部の欠陥検出方法，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 17 巻，pp.665-668，2017