

反射波の伝搬時間推定と指向性合成によるケーソンの非破壊診断*

安倍 正人^{*1} 藤岡 豊太^{*1} 永田 仁史^{*1}

【要旨】 我々は既に、弾性体（コンクリート）表面上に振動センサを取り付け、インパルスハンマで同じ表面を打撃したとき、表面波に対する振動センサの応答波形が、ハンマの波形と指数関数的に減衰する正弦波で表現できるインパルスレスポンスの畳み込みで近似できることを、欠陥がないと考えられるダムにおける実験で明らかにした。そして、このインパルスレスポンスを表す五つのパラメータの一つが、打撃時刻から表面波がセンサに到達するまでの伝搬時間を表すことを明らかにした。また、有限差分時間領域（FDTD）法を用いたシミュレーションにより、表面波だけでなく、P 波や S 波の反射波に対する振動センサの応答波形も、ハンマの波形と指数関数的に減衰する正弦波で表現できるインパルスレスポンスの畳み込みで表すことができ、このインパルスレスポンスを表す五つのパラメータの一つから、打撃時刻から表面波あるいは反射波がセンサに到達するまでの伝搬時間を推定することができることを明らかにした。更に砂を充填する前のケーソンを用いた実験で、FDTD 法で得られた結果の妥当性を検証した。境界においては伝搬する波の一部が P 波から S 波、S 波から P 波へとモード変換することが知られており、欠陥があると多数の反射波が生じる。本論文では、複数のセンサを用いた指向性合成により不要な反射波は抑制し、欠陥からの反射波は残す方法を述べ、仙台港と八戸港での実験で得られた複数のデータを元に解析を行った結果、ケーソンに穴が開き中詰め砂が流出すると、上蓋の下に空気層ができ、上蓋の下面からの反射波は確実に検出できることを明らかにしている。この上蓋の下面からの反射波の有無で欠陥の有無が判定できる。そして、指向性合成により得られたピークの位置から欠陥の存在位置の絞り込みが可能になることを述べている。

キーワード ケーソン, FDTD, 加速度計, インパルスハンマ, 指向性合成, 非破壊診断

Caisson, FDTD, Accelerometer, Impulse hammer, Beamforming, Nondestructive technique

1. はじめに

防波堤に用いられるケーソンは、図-1 に示すように、コストの点から外壁はコンクリート製だが、内側は砂が充填され、水が入らないように上蓋と呼ばれるコンクリートの蓋が設けられる。また、波の力を分散させ、ケーソンに大きな力がかからないようにケーソンの外海側には消波ブロックが設置される。しかし、嵐などのように波が非常に強い場合、消波ブロックがケーソンの外壁に強くぶつかり、外壁に穴が開く場合がある。このとき、ケーソン内部に充填された砂が流出してしまうため、ケーソンが軽くなり、波の力でケーソンが動いたり、場合によっては転倒する恐れがある。そのため、ケーソンに穴があるかどうか、そして穴がある

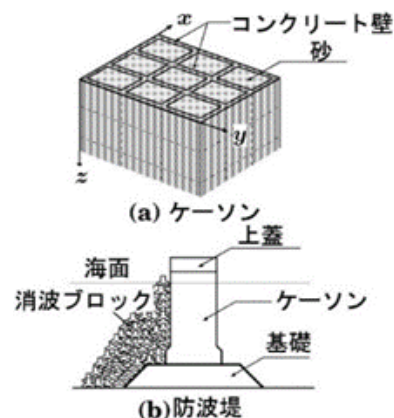


図-1 防波堤の概要

(a) 砂が充填されたケーソン, (b) 防波堤として構成されたケーソン

場合、修復のために穴の位置を計測する必要がある。しかし、穴の位置を潜水して調べることは危険を伴うため、ケーソンの上部から非破壊検査する手法の開発が望まれている。

非破壊検査の手法としては、超音波を用いる方法がよく用いられているが、ケーソンの寸法が 10 m~20 m と大きいため、超音波は減衰が大きく使用できない [1]。また、電磁波を用いる方法 [2] やマイクロ波を用いる

* Nondestructive inspection of caisson by estimating propagation delay of reflected wave and by using beamforming technique, by Masato Abe, Toyota Fujioka and Yoshifumi Nagata.

^{*1} 岩手大学理工学部

(問合先: 安倍正人 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工学部 e-mail: abe@cis.iwate-u.ac.jp)
(2020 年 5 月 25 日受付, 2020 年 8 月 20 日採録決定)

[doi:10.20697/jasj.77.1.16]

方法 [3] もケーソンのように形状が大きく、欠陥の位置が深部にある場合で、透過波が使えないときは適用できないと思われる。

我々は衝撃弾性波法 [4] をケーソンにおける欠損の有無と、欠損がある場合にはその位置を推定する問題に適用した。この手法は杭のインティグリティ試験 [5, 6] を改良、発展させた技術と考えることができる。杭のインティグリティ試験とは、杭頭を打撃し、杭頭に設置したセンサで杭の先端からの反射波あるいは、もし存在すれば途中にある欠陥からの反射波を受信し、それら反射波の伝搬時間を計測する。そして、計測した伝搬時間から、音速を考慮して杭長あるいは欠陥までの距離を推定する方法である。ここで、杭の場合は 1 次元音場と見なすことができ、また表面波は無視することができるため、複数の反射波が重なり合うことはないと考えてよい。一方、ケーソンの場合は、3 次元音場と考えなければならず、また実体波である縦波 (P 波) や横波 (S 波) だけでなく、表面波も考慮する必要があるため、複数の反射波が互いに重なり合う可能性が高い。よって、ケーソンの診断の場合は、互いに重なり合った反射波を分離し、それぞれの反射波の伝搬距離を推定する技術が必要である。

初めに欠陥がなく、反射波と表面波が時間的に十分に分離できるほど巨大なコンクリート構造体として四十四田ダムを選定し、実験を行った。その結果、インパルスハンマでダムの表面を打撃すると、印加された力波形はインパルスであるにもかかわらず、打撃点近くに設置した加速度計の出力はインパルスではなく、ハンマの波形と指数関数的に減衰する正弦波で表現できるインパルスレスポンスの畳み込みで近似できることを実験的に明らかにした [7]。

また、このインパルスレスポンスを表す五つのパラメータの一つが、打撃時刻から表面波がセンサに到達するまでの伝搬時間を表すことを明らかにした [8]。

続いて、我々は有限差分時間領域 (FDTD) 法 [9] を用いたシミュレーションにより、表面波だけでなく、P 波や S 波の反射波に対する振動センサの応答波形も、ハンマの波形と指数関数的に減衰する正弦波で表現できるインパルスレスポンスの畳み込みで表すことができ、このインパルスレスポンスを表す五つのパラメータの一つから、打撃時刻から表面波あるいは反射波がセンサに到達するまでの伝搬時間を推定することができることを明らかにし、更に砂を充填する前のケーソンを用いた実験で、FDTD 法で得られた結果の妥当性を検証した [10]。なお、残りの四つのパラメータは、振幅、減衰率、共振周波数、位相である。

本報では、ケーソンの上面に直線状に配置されたセン

サアレイを用いた指向性合成により、欠陥の有無と位置を推定する方法を述べ、更にシミュレーションと幾つかの実験によりその有効性を検証した結果を報告する。

2. FDTD 法によるケーソンにおける反射波

2.1 解析条件

本章では、FDTD 法によりケーソンの各部からの打撃に対する反射波について検討する。解析のパラメータは、表-1 に示すように文献 [11] を参考に決定した。

2.2 上蓋の影響

図-2 は、解析に用いたコンクリート構造体の形状

表-1 離散間隔及び媒質定数

空間離散間隔	$\Delta d = 0.05$ [m]
時間ステップ間隔	$\Delta T = 5.0$ [μ s]
空気 密度	$\rho_a = 1.025$ [kg/m]
体積弾性率	$\kappa_a = 0.140$ [MPa]
コンクリート	
密度	$\rho_c = 2,000.0$ [kg/m]
ラメ定数	$\lambda_c = 7,300.0$ [MPa]
	$\mu_c = 8,600.0$ [MPa]
縦波速度	$c_P = 3,600.0$ [m/s]
横波速度	$c_S = 2,073.0$ [m/s]

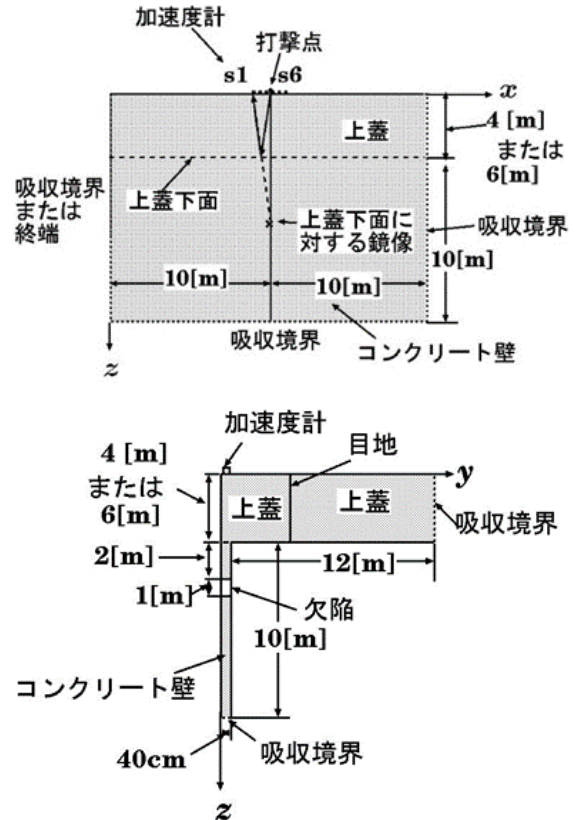


図-2 上蓋の影響を調査するために用いたコンクリート構造体及び上蓋上面を打撃したときの打撃点に対応する鏡像と上蓋下面からの反射波の伝搬経路 (上：正面図、下：側面の断面図)

で、実際のケーソンを単純化したものである。また、太点線で示された吸収境界は PML 法 [12] を用いて実現した。

図-2 において、加速度計 (s1~s6) は上蓋の表面 (xy 平面) に 40 cm 間隔に設置され、その中央部を打撃する。

ここで打撃力 $f(t)$ は

$$f(t) = \begin{cases} 1 - \cos(8000\pi t), & 0 \leq t \leq \frac{1}{4000} [\text{s}] \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (1)$$

で与えた。また、上蓋の厚さは 4 m と 6 m の 2 種類を調査した。なお、この節では、図-2 において、欠陥と目地はないものとして解析している。

上蓋の上面を打撃すると、図-2 において、上蓋の下面からの反射波は、上蓋の下面に対し、打撃点と対称な位置 (鏡像位置) からの直接波と見なすことができ、伝搬距離 l は

$$l = \sqrt{4d^2 + r^2} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 d は上蓋の厚さで、 r は打撃点と加速度計の間隔である。伝搬遅延は式 (2) の伝搬距離を音速で除すことにより計算できる。

打撃により、上蓋表面を伝わる表面波、及びコンクリート内部を伝わる縦波 (P 波) と横波 (S 波) が生じる。加速度計を打撃点の近くに設置した場合、 $d \gg r$ が成り立つので、上蓋の厚さが 4 m の場合、下面からの反射波は、P 波の場合は $4\text{ m} \cdot 2 / c_P = 2.3\text{ ms}$ 、S 波の場合は $4\text{ m} \cdot 2 / c_S = 3.9\text{ ms}$ 付近に現れることが予想され、上蓋の厚さが 6 m の場合、下面からの反射波は、P 波の場合は $6\text{ m} \cdot 2 / c_P = 3.4\text{ ms}$ 、S 波の場合は $6\text{ m} \cdot 2 / c_S = 5.8\text{ ms}$ 付近に現れることが予想される。

図-3 に上蓋の厚さが 4 m で、欠陥及び目地がないときの打撃波形及び打撃点から 1 m 離れた加速度計 s1 の波形を示す。なお、両者ともカットオフ周波数 3 kHz のローパスフィルタを通した後の波形である。

図-3 の打撃波形及び加速度波形において、打撃時刻は $t = 0$ であるが、 $t < 0$ においても小さな振幅の振動が観測される。これは、非常に急峻なカットオフ特性を持つローパスフィルタを周波数領域でかけたことが原因である。

図-3 の加速度波形において、0~1.5 ms の部分に大きな振動が観測される。これは、表面波である。また、2.3 ms 付近と 4.5 ms 付近に小さな振動が観測される。これらは図-2 に示すケーソンの形状から分かるように、それぞれ上蓋下面からの反射波と、その反射波が更に上蓋上面で反射し、それが再度上蓋下面で反射し

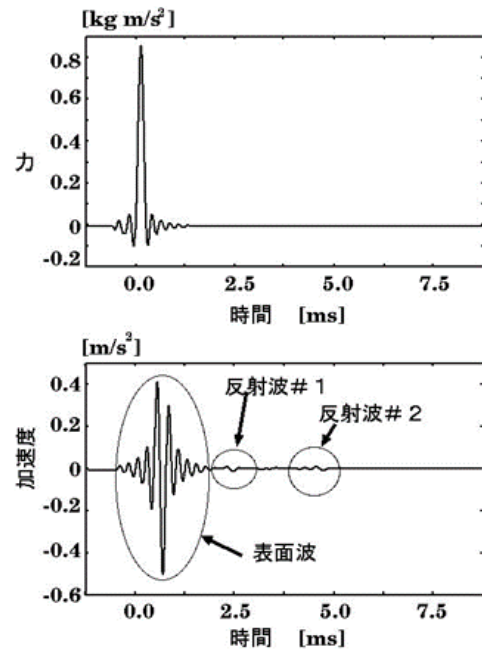


図-3 欠陥及び目地がない、厚さ 4 m の上蓋上面を打撃したときの打撃波形 (上図) と打撃点から 1 m 離れた位置の加速度計 s1 の波形 (下図)

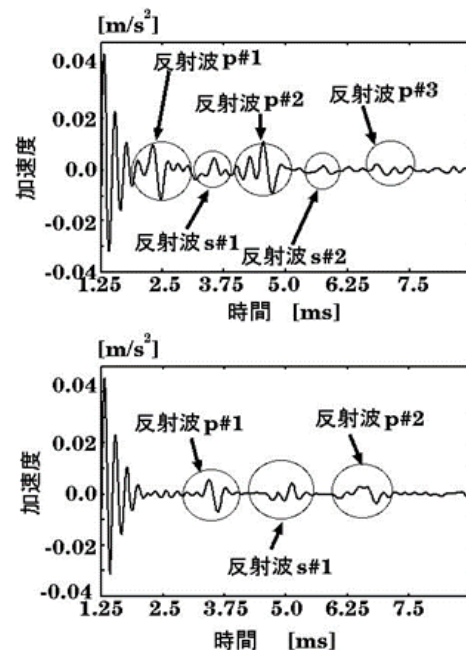


図-4 欠陥及び目地がない、上蓋上面を打撃したときの加速度波形 (上図: 上蓋の厚さ 4 m, 下図: 上蓋の厚さ 6 m)

て戻ってきた 2 重反射波と考えられる。

上蓋の影響を詳細に調べるために、図-4 に示すように $t \geq 1.25\text{ ms}$ の振動を調べた。

図-4 の上図は上蓋の厚さが 4 m のときの結果で、反射波が 2.5 ms 付近、3.3 ms 付近、4.5 ms 付近、5.5 ms 付近、及び 7 ms 付近に現れている。ここで、2.5 ms 付近の反射波 p#1 は、P 波の音速と上蓋の厚さ (4 m) から予想される上蓋の下面からの P 波の反射波に対応し、4.5 ms 及び 7 ms 付近の反射波 p#2 及び反射波 p#3

表-2 欠陥や目地がないとき、上蓋の厚さが 6 m のときの波形から推定された伝搬遅延と形状から予想された伝搬遅延

観測される振動	観測振動波形から提案法で推定した伝搬遅延	形状と音速から予想した伝搬遅延
0～2 ms の振動	0.23 ms 0.26 ms	表面波
3.5 ms 付近の振動	3.3 ms	上蓋下面からの P 波の反射波 3.4 ms
5.0 ms 付近の振動	4.4 ms 4.9 ms	上蓋下面までは P 波で、下面で S 波にモード変換した反射波 4.7 ms
6.5 ms 付近の振動	5.9 ms 6.2 ms 6.6 ms	上蓋下面からの P 波の 2 回目の反射波 6.7 ms

はそれぞれ上蓋の下面からの 2 回目及び 3 回目の P 波の反射波に対応する。一方、3.3 ms 及び 5.5 ms 付近の反射波は、S 波の音速と上蓋の厚さから予想される上蓋の下面からの反射波の伝搬遅延よりかなり早く現れている。この原因を FDTD 法によるシミュレーションで詳細に調査した結果、打撃により生じた P 波が上蓋の下面に到達し、その場所で反射したときにモード変換により P 波の一部が S 波になり、その S 波が加速度計に到達したものであることが分かった。これは例えば文献 [13] に示してある説明及び結果と一致する。

一方、表-1 に示した音速と図-2 に示した反射の伝搬経路から、図-4 の下図に示した反射波は、表-2 のように解釈できる。

以上のことから、FDTD 法によるシミュレーション波形を提案手法 [10] で解析すると、上蓋下面からの反射波が確かに観測され、解析結果の伝搬遅延と構造体の形状から想定された伝搬遅延が一致することが確かめられた。また、境界において、伝搬してきた P 波の一部は P 波として反射すると共に、S 波にモード変換し、S 波として反射することも確かめられた。

2.3 左端が完全反射境界の場合

図-2 の正面図の左端が吸収層ではなく、空気層、すなわち完全反射する境界の場合を検討する。なお、図-2 の下図（側面の断面図）において、欠陥と目地はない場合について解析している。

図-5 に 6 個の加速度計（図-2 左端から s1～s6）の波形を示す。

図-5 において、上蓋下面からの反射波である 2.3 ms 及び 4.5 ms 付近の振動はすべての加速度波形に現れ、形状は同じである。これは、図-4 の同じ部分に対応する。一方、左端からの反射波は、左端から近い s1 では

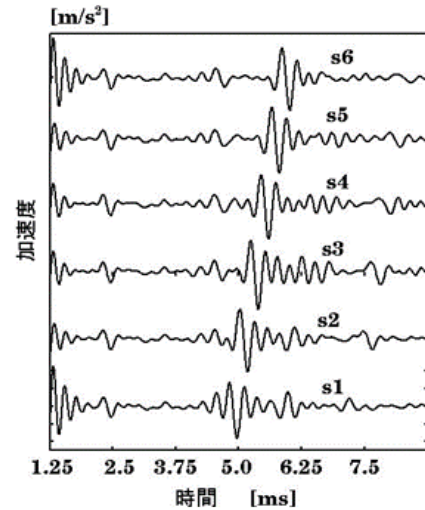


図-5 左端が完全反射境界のとき、厚さ 4 m の上蓋上面を打撃したときの 6 個の加速度計（センサ）の波形

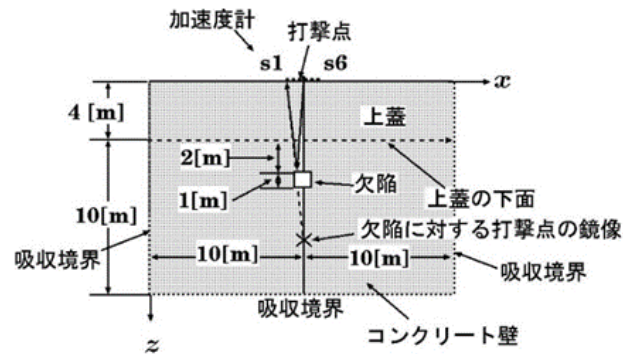


図-6 側壁に欠陥のあるコンクリート構造体（上蓋の厚さ：4 m）

4.5 ms 付近に現れ、左端から遠ざかるに従って遅くなり、s6 では 6 ms 付近に現れることも分かる。また、上蓋の左端からの反射波は上蓋下面からの反射波の振幅より数倍大きいことが分かる。

2.4 ケーソン側壁に欠陥（穴）がある場合

図-6 に示すように、ケーソン側壁の上蓋下面から 2 m で打撃点の真下に 1 m 角の欠陥（欠陥）がある場合を検討する。なお、側面の断面図は図-2 の上図と同じである。ただし、欠陥はあるものの、目地はなく、左端が吸収境界である場合について解析している。

目地がなく、左端が吸収境界である場合に、厚さ 4 m の上蓋を打撃したときの 6 個の加速度計の波形を図-7 に示す。図-7 のすべてのセンサ出力において、欠陥位置から予想される 6～7 ms 付近に、欠陥がない場合（図-4）に比べて大きな振動が現れる。これが欠陥からの反射波である。

2.5 上蓋に目地がある場合

ケーソンを製作する際、図-8 に示すように、上蓋に完全反射境界であると考えられる目地が作られる場合がある。図-8 において、完全反射境界である目地から

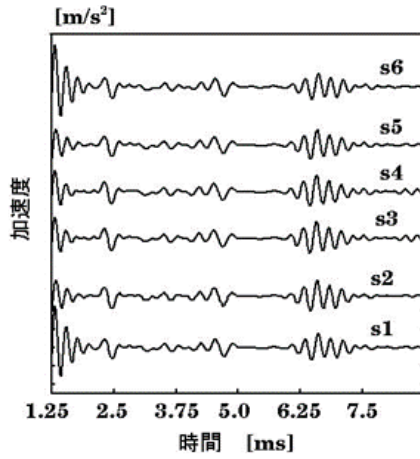


図-7 目地がないときに、厚さ 4 m の上蓋底面から 2 m 下に 1 m 角の欠損（欠陥）がある場合の 6 個の加速度計（センサ）の出力

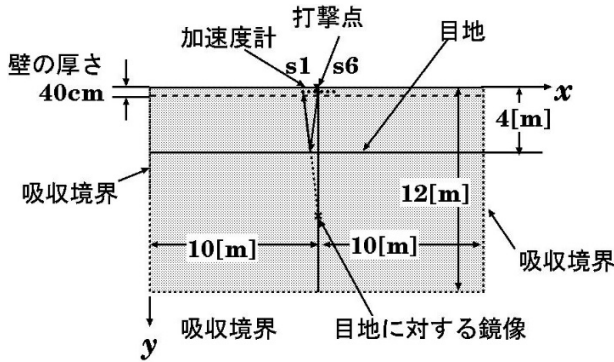


図-8 上蓋に目地のあるコンクリート構造体の上面図

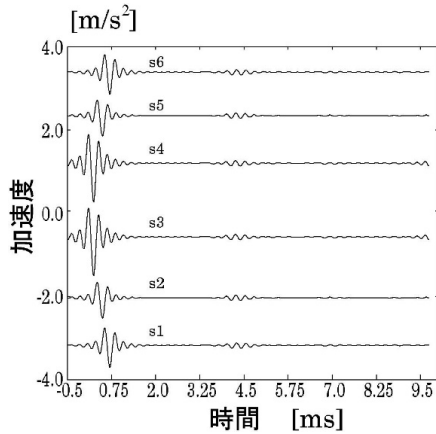


図-9 上蓋（厚さ：6 m）に目地があるときの 6 個の加速度計（センサ）の出力

の反射波は、目地に対し、打撃点と対称な位置（鏡像位置）からの表面波の直接波と見なすことができ、伝搬距離はすべてのセンサに対してほぼ等しくなる。

目地があるときの 6 個のセンサ出力を図-9 に示す。図-9 において、打撃点は s3 と s4 の中間なので、打撃点に近い s3 と s4 に一番早く表面波の直接波が到達し、打撃点から離れるにつれて表面波の直接波の到達は遅れている。一方、すべてのセンサにおいて反射波がほ

ぼ同じ場所（4～5 ms 付近）に観測される。これが目地からの反射波である。なお、図-4 上図と図-9 を比較すると、図-9 では 2.5 ms 付近にあるべき上蓋底面からの P 波の反射波が見られないが、これは縦軸の縮尺が異なるためであり、実際には反射波が存在する。また、目地からの反射波の振幅は底面からの P 波の反射波の振幅の 10 倍程度とかなり大きい。

3. 指向性合成による欠陥位置の推定

検査対象が単純な構造を持つ場合、検査対象の表面を打撃し、打撃点の近くに設置した加速度計の出力の共振周波数から欠陥までの深さを検査する手法が提案されている [14] が、ケーソンのように複雑な構造を持つ場合、共振周波数で診断することは困難である。そこで、指向性合成による診断を行う。

FDTD 法によるシミュレーションにより、2.2 節に示したように、上蓋上面を打撃すると打撃点近傍に設置した加速度計の出力には上蓋下面からの反射波が観測できる。また、複数の加速度計を x 軸方向に並べると、図-5 に示すように、 x 軸方向にある境界からの反射波に対しては大きな伝搬遅延時間差が生じるのに対し、図-7 に示すように、 z 軸方向にある欠陥からの反射波、及び y 軸方向にある目地に対する反射波に対しては伝搬遅延時間差がほとんど生じない。欠陥位置はこの伝搬遅延時間差を用いた指向性合成により推定する。

図-6 における xz 平面において、打撃点 $H(x_h, z_h)$ 、 m 番目のセンサ位置 $s_m(x_m, z_m)$ 、真の欠陥位置 $S(x_s, z_s)$ 、及び仮想欠陥位置 $K(x_k, z_k)$ を考えると、推定すべき値である真の伝搬遅延時間 τ_{Sm} は

$$\tau_{Sm} = \left\{ \sqrt{(x_h - x_s)^2 + (z_h - z_s)^2} + \sqrt{(x_m - x_s)^2 + (z_m - z_s)^2} \right\} / c_P \quad (3)$$

で表すことができ、この時刻に反射波が現れる。なお、本研究では深さ方向（ z 軸方向）にある欠陥を検出することが目的なので、P 波の音速 c_P を用いる。一方、仮想欠陥位置は欠陥があると予想される位置で、その存在範囲はケーソンの寸法より若干広い範囲に設定される。仮想欠陥位置をその範囲にある、ある 1 点に設定し、その位置で反射すると仮定したとき、仮想欠陥からの反射波の伝搬遅延時間 τ_{Km} は

$$\tau_{Km} = \left\{ \sqrt{(x_h - x_k)^2 + (z_h - z_k)^2} + \sqrt{(x_m - x_k)^2 + (z_m - z_k)^2} \right\} / c_P \quad (4)$$

で表すことができる。ここで、 m 番目のセンサ出力 $x_m(n)$ を時間補正する。

$$y_m(n) = x_m \left(n - \frac{\tau_{Sm}}{\Delta T} + \frac{\tau_{Km}}{\Delta T} \right) \quad (5)$$

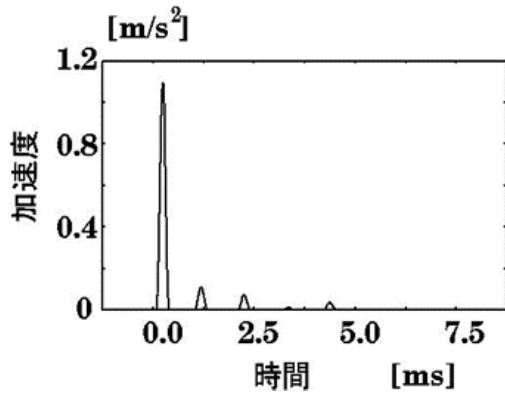


図-10 欠陥や目地がないとき、厚さ 4 m の上蓋底面から 2 m 下に 1 m 角の欠損（欠陥）がある場合のセンサ s1 出力に対応する反射波の和 $\sum P_l(n)$ （横軸：伝搬時間、縦軸：加速度）

ここで、 n は時間インデックス、 ΔT はサンプリング周期で、実際の時間は $t = n\Delta T$ である。もしも真の欠陥位置が仮想欠陥位置に等しいときは時間補正したセンサ出力 $y_m(n)$ のピーク位置はすべてのセンサについて重なり、平均しても小さくならない。一方、両者が異なるときは、平均すると小さくなる。仮想欠陥位置を欠陥が存在すると予想される範囲で波長より十分短い間隔（例えば 5 cm 間隔）でスキャンする。このとき欠陥位置は、スキャンした範囲で、時間補正したセンサ出力の平均が大きくなった仮想欠陥の位置と推定される。しかし、時間補正したセンサ出力の平均は図-5 に示すように、4.8～5.7 ms のように広い範囲で重なる可能性があり、誤検出率が増える。そこで、この範囲を狭めることを考える。すなわち、 l 番目の反射波あるいは表面波に対して五つのパラメータを提案手法 [10] により推定し、それを元に反射位置 $P_l(n)$

$$P_l(n) = \alpha_l f\left(n - \frac{\tau_l}{\Delta T}\right) \quad (6)$$

を計算する [10]。図-4 に対応する $\sum P_l(n)$ の結果を図-9 に示す。ここで、 α_l は l 番目の反射波の振幅、 τ_l は l 番目の反射波の伝搬時間で、それらは文献 [10] に示した五つのパラメータのうちの二つである。また、 $f(n)$ は図-3 上図に示す打撃波形である。この操作は 1 種の逆フィルタ操作である。すなわち、図-3 下図のセンサ出力のような波形が入ったとき、図-3 上図の波形を返す操作である。

図-10 において、ピークに幅があるのは、用いた周波数範囲が 0～3 kHz となっているからである。3 kHz の波の周期は 0.33 ms であるため、伝搬時間の推定誤差は 0.33 ms 程度となる。また、例えば二つの波がこの誤差内に近接して入射すると、この二つの波が分離できず、一つの波として推定されてしまう可能性がある。

図-10 において、0 ms 付近のピークは図-4 における

0～1.5 ms に現れている表面波に対応し、1.25 ms 付近のピークはこの表面波が広い周波数分布を持つために生じる疑似ピーク [10] に対応する。また、2.3 ms、及び 4.4 ms 付近のピークはそれぞれ上蓋下面からの反射波の P 波、及び 2 回目の反射波の P 波に対応する。また、3.4 ms 付近のピークは、打撃により生じた P 波が上蓋の下面に到達し、その場所で反射したときにモード変換により P 波の一部が S 波になり、その S 波が加速度計に到達したものである。

式 (6) の $\sum P_l(n)$ を 6 個の加速度計出力に対して行い、その平均を求めると、欠陥や目地以外ではピークの位置が重なる確率は低くなり、誤検出率が減る。なお、ピークの振幅ではなく、ピークの有無が重要なので、4 章以降では、ピークがあれば 1、なければ 0 とし、6 個のセンサ出力のうち、4 個以上のセンサ出力中にピークが共通に現れた位置を図示している。

4. 仙台港 06 番函ケーソンを用いた実験

4.1 実験条件

仙台港で実験を行った。センサは(株)小野測器のプリアンプ内蔵型加速度検出器 NP-3120 で、 z 方向にのみ感度を持つ 1 軸センサである。このセンサを 6 個用い、2 液混合型エポキシ樹脂接着剤を用いてケーソンの上蓋上面に接着した。インパルスハンマは同じく(株)小野測器の GK-3100 モデル 086M36A（エクステンダなし、先端のチップはプラスチック製のもの）を用いた。このとき、打撃力は約 10 kN までフラットな周波数特性を持つ。

実験データは、加速度計の出力とインパルスハンマの出力をサンプリング周波数 24 kHz でコンピュータに取り込んだ後、カットオフ周波数 5 kHz のローパスフィルタを周波数領域でかけてから解析を行った。

センサは側壁から y 方向に 0.2 m 離れた位置（側壁の厚さの 1/2）で、 x 方向においては、0.6 m 置きに 6 個のセンサを図-11 に示すように設置し、センサ s3 と s4 の中間を打撃した。図-11 は欠陥の正面図（図-2 の上の図（ x - z 面）に相当）で潜水士によるケーソン室内から港外側をみたポンチ絵である。図において、剥離箇所は完全に穴が開いている場所で形状は直径が約 1.0 m のほぼ円である。一方、クラック箇所はコンクリートが薄くなっている場所で、 z 方向が約 1.8 m、 x 方向は約 2.3 m のほぼ楕円形である。

ケーソン内部に充填された砂（中詰め砂）は消波ブロックが開けた穴（剥離箇所）から流出する。流出後の中詰め砂の上蓋上面からの深さの平均値は 6 m であった。

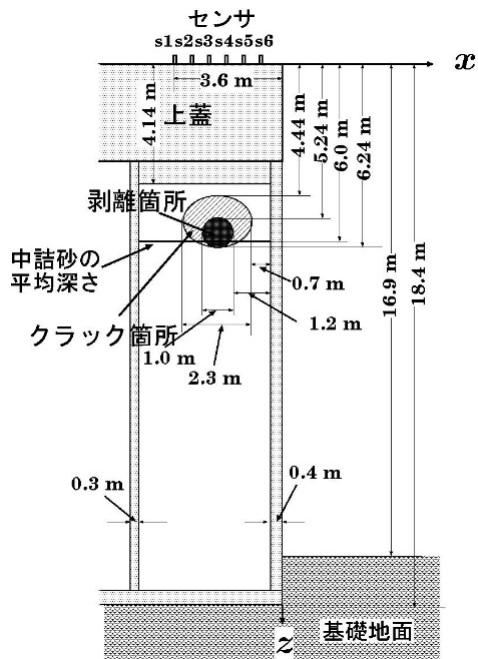


図-11 仙台港 06 番函のセンサ配置と欠陥の状況

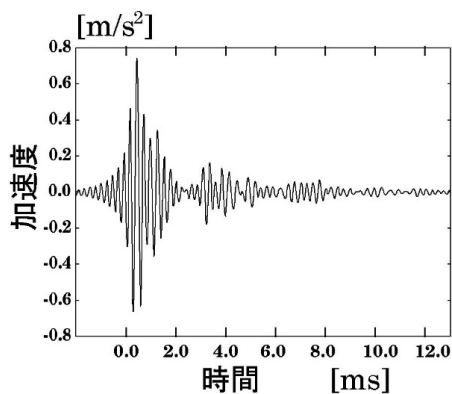


図-12 仙台港 06 番函のセンサ s1 の出力

4.2 解 析

図-12 にセンサ s1 の出力を示す。図-3 の上図のような打撃が入力されたとき、センサ波形は図-3 下図になることから、図-12 のセンサ波形を考えると、0～2 ms の波形は二つの波（それぞれの伝搬時間は約 0.5 ms と 1 ms）の和であると分かる。同様にして、直接波あるいは反射波の伝搬時間は、目視ではおおよそ 0.5 ms, 1 ms, 2.5 ms, 3.0 ms, 4.0 ms, 5.0 ms, 6.0 ms, 7.0 ms, 8.0 ms, 9.0 ms, 10.0 ms, 11.0 ms, 12.0 ms である。

欠陥は打撃点の鉛直下方（ z 方向）にあると考えられるので、仮想欠陥位置は打撃点の鉛直下方の位置にあるとして調査を行えばよい。ここで、2 章に示したように、鉛直下方（ z 方向）にある欠陥や y 方向の境界からの反射波はすべてのセンサにおいて、ほぼ同じ時刻に到来するが、 x 方向の境界からの反射波は同じ時刻には到来しない。今回の実験では 6 個のセンサのうち、4 個以上のセンサで共通に観測される伝搬遅

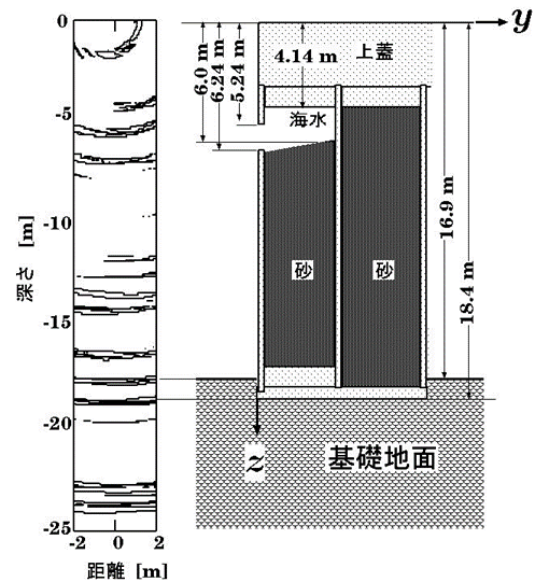


図-13 仙台港 06 番函の解析結果

延時間を文献 [10] に示した方法で計測した。計測された伝搬時間は 0.76 ms, 2.28 ms, 3.0 ms, 3.76 ms, 6.36 ms, 6.8 ms, 7.34 ms, 7.72 ms, 8.86 ms, 9.6 ms, 10.2 ms, 10.7 ms, 12.4 ms, 12.9 ms である。我々が開発した音速推定法 [15] により推定された P 波, S 波及び表面波の音速はそれぞれ 3,677 m/s, 2,111 m/s, 1,811 m/s であり、欠陥からの反射波をすべて P 波と考えて推定するので、上記の伝搬時間に対応する距離（深さ）は、図-13 に示すようにそれぞれ 1.4 m, 4.2 m, 5.5 m, 6.9 m, 11.7 m, 12.5 m, 13.5 m, 14.2 m, 16.3 m, 17.7 m, 18.7 m, 19.7 m, 22.8 m, 23.7 m となる。

ここで、ケーソンに穴が開き、中詰め砂が流出すると、上蓋の下に空気層ができ、2 章におけるシミュレーションで示したように上蓋の下面からの反射波は確実に検出できる。また、ケーソンの形状から、6 個のセンサに同時刻に到来する可能性のある反射波のうち、一番早く到達するのは上蓋下面からの P 波の反射波である。仙台港 06 番函の場合、推定された深さ 4.2 m は上蓋の下面の深さ 4.14 m にほぼ一致する。よって、このケーソンには欠陥のため、中詰め砂の漏出があると判断できる。次に他の位置に現れたピークの原因を検討する。

上蓋の厚さは 4.14 m で上蓋には欠陥があるとは考えられないので、深さ 1.4 m に現れるピークは推定誤差である。この原因は疑似ピーク [10] が重なったためである。

ケーソンの形状と設置方法から、基礎地面（16.9 m）と底面（18.4 m）の位置で反射が起こると考えられる。解析で得られた 16.3 m, 18.7 m の値はこれらにほぼ正しく対応している。また、19.7 m, 22.8 m, 及び 23.7 ms

のピークはケーソンの底面より深いところなので、検討する必要はない。

5.5 m の深さ (伝搬時間 3.0 ms) にあるピークは深さ 5.24 m の位置にある剥離箇所の上端にほぼ一致する。しかし一方、打撃により P 波が伝搬し、深さ 4.14 m の位置にある上蓋下面で S 波として反射すると、伝搬時間は $4.14/3677 + 4.14/2111 = 3.08 \text{ ms}$ とほぼ同じになり、この場合は剥離箇所を検出できなかったことになる。よって、5.5 m の深さにあるピークが生じた原因は特定できない。

3.76 ms の伝搬時間に対応する 6.9 m の深さにあるピークを考える。このピークは深さ 6.9 m の位置に実際に反射点 (欠陥) がある可能性がある。しかし一方、この伝搬時間は、打撃により S 波が伝搬し、深さ 4.14 m の位置にある上蓋下面で S 波として反射した場合の伝搬時間 $4.14/2111 * 2 = 3.92 \text{ ms}$ とほぼ同じになる。実際は、潜水による調査でこの位置には欠陥がないと分かっている。よって、6.9 m の深さにあるピークは上蓋下面からの反射波であると考えられる。

6.36 ms の伝搬時間に対応する 11.7 m の深さにあるピークを考える。このピークは深さ 11.7 m の位置に実際に存在する欠陥である可能性がある。しかし一方、この伝搬時間は、打撃により S 波が伝搬し、深さ 4.14 m の位置にある上蓋下面で S 波で反射し、上蓋上面で P 波で反射し、上蓋下面で再度 P 波で反射した場合の伝搬時間 $(4.14/3677 + 4.14/2111) * 2 = 6.16 \text{ ms}$ に近い値となる。実際は、潜水による調査でこの位置には欠陥がないと分かっている。よって、6.36 ms の伝搬時間に対応する 11.7 m の深さにあるピークは上蓋の上面と下面との間の 2 重反射と考えられる。

6.8 ms の伝搬時間に対応する 12.5 m の深さにあるピークを考える。このピークは深さ 12.5 m の位置に実際に存在する欠陥である可能性がある。しかし一方、この伝搬時間は、打撃により S 波が伝搬し、深さ 4.14 m の位置にある上蓋下面で S 波で反射し、上蓋上面で S 波で反射し、上蓋下面で P 波で反射する場合の伝搬時間 $4.14/3677 + 4.14/2111 * 3 = 7.0 \text{ ms}$ に近い値となる。実際は、潜水による調査でこの位置には欠陥がないと分かっている。よって、6.8 ms の伝搬時間に対応する 12.5 m の深さにあるピークは上蓋の上面と下面との間の 2 重反射と考えられる。

7.34 ms の伝搬時間に対応する 13.5 m の深さにあるピークを考える。このピークは深さ 13.5 m の位置に実際に存在する欠陥である可能性がある。しかし一方、この伝搬時間は、上述した 2 重反射に対応する伝搬時間 7.0 ms に近い値である。実際は、潜水による調査でこの位置には欠陥がないと分かっている。よっ

て、7.34 ms の伝搬時間に対応する 13.5 m の深さにあるピークは上蓋の上面と下面との間の 2 重反射と考えられる。

7.72 ms の伝搬時間に対応する 14.2 m の深さにあるピークを考える。このピークは深さ 14.2 m の位置に実際に存在する欠陥である可能性がある。しかし一方、この伝搬時間は、打撃により S 波が伝搬し、深さ 4.14 m の位置にある上蓋下面で S 波で反射し、上蓋上面で S 波で反射し、上蓋下面で S 波で反射する場合の伝搬時間 $4.14/2111 * 4 = 7.84 \text{ ms}$ に近い値となる。実際は、潜水による調査でこの位置には欠陥がないと分かっている。よって、7.72 ms の伝搬時間に対応する 14.2 m の深さにあるピークは上蓋の上面と下面との間の 2 重反射と考えられる。

以上、仙台港 06 番函においては、ケーソンの形状から波動が反射すると考えられる基礎地面と底面の位置以外に反射波を表すピークが多数観測されるが、解析により推定された伝搬遅延を用いて求めた反射波を表すピークの位置は、ケーソンの形状と潜水により計測された欠陥の位置から予想されるピークの位置と矛盾なく一致することが確認された。ただし、伝搬遅延を用いて反射波伝搬時間を推定し、そこから欠陥の位置を推定する場合、複数の解釈が成り立つので、実際に潜水による調査をしない限り一意には求めることができない。しかし、中詰め砂が流出した場合に容易に検出できると予想される上蓋下面からの反射波は確実に検出されるので、ケーソンにおける欠陥の有無は判断できる。

5. 八戸港 09 番函右ケーソンを用いた実験

5.1 実験条件

センサの設置面は風化が進み 2 cm~3 cm 程度の凸凹があるが、用いる信号の周波数が 3 kHz 以下と低いいため、解析上問題はない。このケーソンは欠陥のない健全なケーソンであるが、y 方向にある目地からの反射波が各加速度計出力の共通の位置に観測される。ここで、目地材は厚さ 10 mm のエラストイトである。

センサは側壁から y 方向に 0.2 m 離れた位置 (側壁の厚さの 1/2) で、x 方向においては、0.4 m 置きに 6 個のセンサを設置し、センサ s3 と s4 の中間を打撃した。なお、センサが設置してある側壁と目地の間隔は 4.2 m である。

5.2 解析

この解析においても、6 個のセンサのうち、4 個以上のセンサで共通に観測される伝搬遅延時間を推定する。解析の結果、推定された伝搬時間は 1.72 ms, 2.82 ms, 3.62 ms, 4.15 ms, 7.50 ms, 8.0 ms, 8.93 ms, 9.85 ms, 10.3 ms, 12.1 ms, 12.3 ms である。

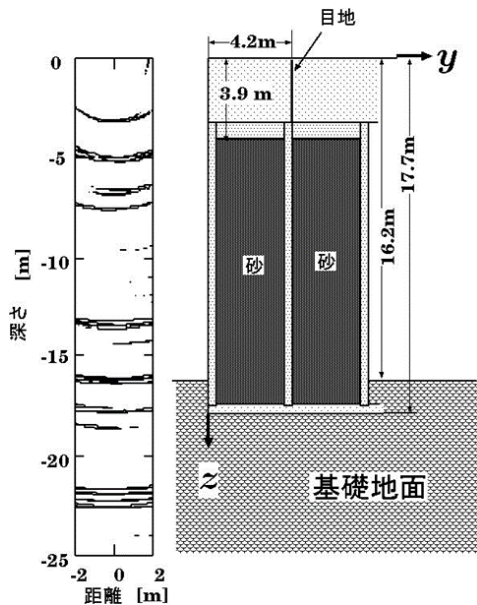


図-14 八戸港 09 番函右の断面図 (右図) とその解析結果 (左図)

我々が開発した音速推定法により推定された P 波, S 波及び表面波の音速はそれぞれ 3,615 m/s, 2,294 m/s, 1,960 m/s であり, 反射波をすべて P 波と考えて推定するので, 上記の伝搬時間に対応する距離 (深さ) は, 図-14 に示すように, それぞれ 3.1 m, 5.1 m, 6.55 m, 7.5 m, 13.6 m, 14.5 m, 16.2 m, 17.8 m, 18.6 m, 21.9 m, 22.3 m となる。

ここで, ケーソンに穴が開き, 中詰め砂が流出すると, 上蓋の下に空気層ができ, 上蓋の下面 (深さ 3.9 m) からの反射波は確実に検出できる。しかし, 推定された深さには上蓋の下面に相当するものがない。よって, このケーソンは正常であると判断できる。

伝搬時間 1.72 ms に対応する深さ 3.1 m に現れるピークは上蓋の厚さより浅いところにあるので, 4 章と同じように疑似ピークと考えられ, 無視できる。

解析で得られた 16.2 m, 17.8 m の値は, ケーソンの形状から基礎地面 (16.2 m) と底面 (17.7 m) からの反射波と考えられる。18.6 m, 21.6 m 及び 22.3 m のピークはケーソンの底面より深いところなので, 検討する必要はない。

5.1 m の位置 (伝搬時間 2.82 ms) にあるピークは, z 方向にある欠陥ではなく, y 方向にある目地からの反射波が原因である。すなわち, 波動が P 波で目地まで伝搬し, 目地でモード変換して S 波で反射してセンサに到達すると, 伝搬時間は $4/3.615 + 4/2.294 = 2.85$ ms となる。

6.55 m の位置 (伝搬時間 3.62 ms) にあるピークも, z 方向にある欠陥ではなく, y 方向にある目地からの反射波が原因である。すなわち, 波動が S 波で目地ま

で伝搬し, S 波で反射し, 更に, y 軸方向の境界で反射して S 波のままセンサに到達すると, 伝搬時間は $4.2/2.294 \times 2 = 3.66$ ms となる。

7.5 m の位置 (伝搬時間 4.15 ms) にあるピークも, z 方向にある欠陥ではなく, y 方向にある目地からの反射波が原因である。すなわち, 表面波で目地まで伝搬し, 表面波で反射し, 更に y 軸方向の境界でモード変換して S 波でセンサに到達すると, 伝搬時間は $8.2/1960 + 0.2/2.294 = 4.27$ ms と 4.15 ms に近い値である。

13.6 m の位置 (伝搬時間 7.5 ms) にあるピークも, z 方向にある欠陥ではなく, y 方向にある目地からの反射波が原因である。すなわち, 波動が表面波で目地まで伝搬し, モード変換して S 波で反射し, 更に y 軸方向の境界で S 波のまま反射して, 目地に伝搬し, 再び目地で S 波のまま反射してセンサに到達 (2 重反射) すると, 伝搬時間は $4/1960 + 12.4/2.294 = 7.45$ ms と 7.5 ms に近い値である。

14.5 m の位置 (伝搬時間 8.0 ms) にあるピークも, z 方向にある欠陥ではなく, y 方向にある目地からの反射波が原因である。すなわち, 波動が表面波で目地まで伝搬し, そのまま表面波で反射し, 更に y 軸方向の境界で表面波のまま反射して, 目地に伝搬し, 再び目地で表面波のまま反射してセンサに到達 (2 重反射) すると, 伝搬時間は $15.6/1960 = 7.96$ ms と 8.0 ms に近い値である。

以上の検討から, 図に見られるすべてのピークはケーソンの基礎地面, 底面, 及び目地によるものと見なすことができる。ところで仙台港 06 番函のように目地はなくても施工上は全く問題ない。よって, より確実な判定のためには, 目地を作らない施工を行うことが必要である

6. 八戸港 14 番函左修理前ケーソンを用いた実験

6.1 実験条件

図-15 は修理前の八戸港 14 番函左のセンサ配置及び欠陥の状況を示す正面図 (2 章, 図-2 の上の図 (x - z 面) に相当) である。センサは側壁から y 方向に 0.2 m 離れた位置 (側壁の厚さの 1/2) で, x 方向においては, 0.2 m おきに 6 個のセンサを図-15 に示すように設置し, センサ s3 と s4 の中間を打撃した。図において, 剥離箇所は完全に穴が開いている場所で形状は z 方向が約 1.5 m, x 方向は約 1.2 m の楕円形である。ケーソン内部に充填された砂 (中詰め砂) は消波ブロックが開けた穴 (剥離箇所) から流出する。流出後の中詰め砂の上蓋上面からの深さの平均は 9.3 m であった。

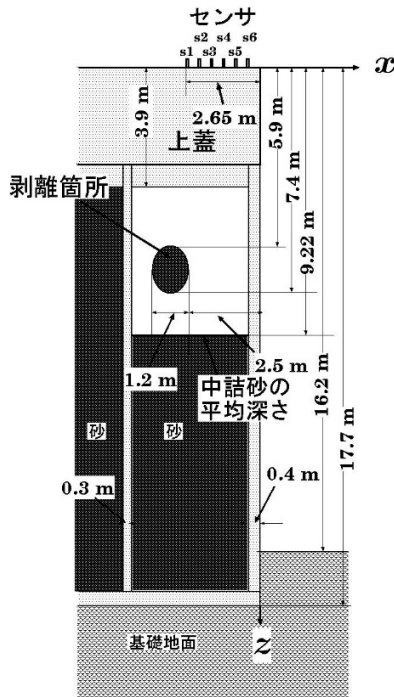


図-15 八戸港 14 番函左の欠陥の状況

6.2 解 析

この解析においても、6 個のセンサのうち、4 個以上のセンサで共通に観測される伝搬遅延時間を推定する。解析の結果、推定された伝搬時間は 0.61 ms, 1.36 ms, 2.3 ms, 2.9 ms, 3.62 ms, 4.87 ms, 5.5 ms, 6.36 ms, 6.80 ms, 7.58 ms, 8.82 ms, 9.51 ms, 9.98 ms, 11.73 ms, 12.1 ms, 12.4 ms, 13.2 ms, 13.7 ms である。この実験では、センサ間隔を 20 cm としたために我々が開発した音速推定法 [15] では誤差が大きすぎて音速の推定ができなかった。そこで、音速は同じときに製造された八戸 09 番函と同じと考え、P 波、S 波及び表面波の音速はそれぞれ 3,615 m/s, 2,294 m/s, 1,960 m/s とした。反射波をすべて P 波と考えて推定するので、上記の伝搬時間に対応する距離（深さ）は、図-16 に示すように、それぞれ 1.1 m, 2.45 m, 4.15 m, 5.25 m, 6.55 m, 8.8 m, 9.95 m, 11.5 m, 12.3 m, 13.7 m, 16.0 m, 17.2 m, 18.1 m, 21.2 m, 21.8 m, 22.4 m, 23.9 m, 24.8 m となる。

ここで、ケーソンに穴が開き、中詰め砂が流出すると、上蓋の下に空気層ができ、上蓋の下面からの反射波は確実に検出できる。八戸港 14 番函左修理前のケーソンの場合、推定された深さ 4.15 m（伝搬時間 2.30 ms）はちょうど上蓋の下面（深さ 3.90 m, 伝搬時間 2.16 ms）付近にある。よって、このケーソンには欠陥のため、中詰め砂の漏出があると判断できる。

上蓋の厚さは 3.9 m で上蓋には欠陥があるとは考えられないので、深さ 1.1 m と 2.45 m に現れるピークは

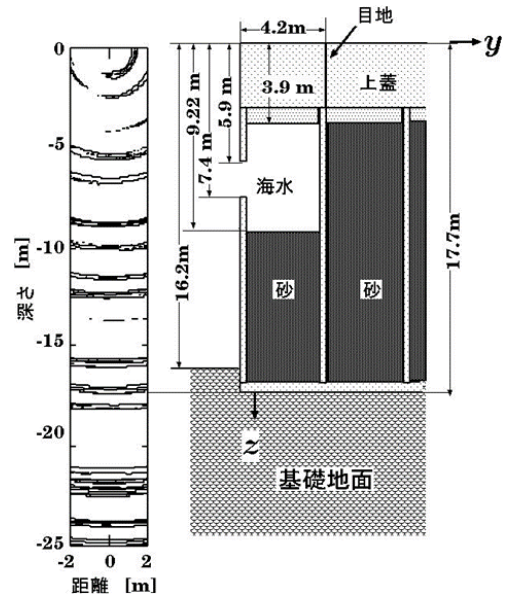


図-16 八戸港 14 番函左修復前の断面図（右図）とその解析結果（左図）

推定誤差である。この原因は第 2 章で述べたように、疑似ピークが重なったためである。

解析で得られた 16.0 m, 17.2 m の値はケーソンの形状から想定される基礎地面（16.2 m）と底面（17.7 m）に対応する。また、18.1 m 以上深いところのピークはケーソンの底面より深いところなので、検討する必要はない。

次に、目地の反射について考える。目地の配置は 5 章で解析した八戸 09 番函右と同じなので、2.85 ms, 3.03 ms, 3.49 ms, 3.66 ms, 3.78 ms, 3.96 ms, 4.27 ms, 7.45 ms, 7.62 ms 付近に目地からの反射波が予想される。そのため、解析で推定された伝搬時間のうち、原因が未解明で残っている伝搬遅延は 4.87 ms, 5.5 ms, 6.36 ms, 6.80 ms である。

4.87 ms の伝搬時間に対応する 8.8 m の深さにあるピークを考える。この深さは中詰め砂の位置（深さ 9.22 m, 伝搬時間 5.10 ms）に近い。実際、潜水による調査でこの位置は中詰め砂の位置と分かっている。

5.5 ms の伝搬時間に対応する 9.95 m の深さにあるピークを考える。実際に潜水による調査でこの位置には欠陥（反射点）がないことが分かっている。打撃により S 波が伝搬し、深さ 3.9 m の位置にある上蓋下面で S 波のまま反射し、上蓋上面でモード変換して P 波として反射し、再度上蓋下面で P 波で反射してセンサに到達すると、その伝搬時間は $(3.9/3677 + 3.9/2111) \times 2 = 5.56$ ms となる。よって、5.5 ms の位置のピークは上蓋上面と下面の間の 2 重反射である。

6.36 ms の伝搬時間に対応する 11.5 m の深さにあるピークを考える。実際に潜水による調査でこの位置に

は反射点がないことが分かっている。打撃により S 波が伝搬し、深さ 3.9 m の位置にある上蓋下面で S 波で反射し、上蓋上面で S 波として反射し、上蓋下面でモード変換して P 波で反射してセンサに到達すると、その伝搬時間は $3.9/3677 + 3.9/2292 * 3 = 6.18 \text{ ms}$ と 6.36 ms に近い値である。よって、 6.36 ms の位置のピークは上蓋上面と下面の間の 2 重反射である。

6.80 ms の伝搬時間に対応する 12.3 m の深さにあるピークを考える。実際に潜水による調査でこの位置には反射点がないことが分かっている。打撃により S 波が伝搬し、深さ 3.9 m の位置にある上蓋下面で S 波で反射し、上蓋上面で S 波として反射し、上蓋下面 S 波として反射し、上蓋上面でモード変換して S 波で反射してセンサに到達すると、その伝搬時間は $3.9/2292 * 4 = 6.81 \text{ ms}$ となる。よって、 6.80 ms の位置のピークは上蓋上面と下面の間の 2 重反射である。

7. 八戸港 14 番函左修理後ケーソンを用いた実験

7.1 実験条件

図-17 は砂の代わりにコンクリートを詰めることにより穴を修理した後の八戸港 14 番函左の断面図（右図）とその解析結果（左図）である。ここで、センサの配置及び打撃点は修理前の八戸港 14 番函左の配置と同じである。修理後は目地がなくなったものの、欠陥部分には凹みが存在する。ここで、各センサ波形を見たところ、砂の代わりにコンクリートを詰めると、砂が詰めてある場合と比べて、五つのパラメータの一つである減衰率 [10] が小さいため、凹みや底面及び他の境界からの反射波の振幅が数倍大きく、かつ長く尾を引くように観測された。そして、この現象は FDTD 法によるシミュレーションでも観測された。その結果、欠陥（凹み）や底面からの反射波と他の境界からの反射波が互いに十分に減衰する前に混合してしまい、反射波の分離を正しく行うことができなかった。

7.2 解析

この解析においても、6 個のセンサのうち、4 個以上のセンサで共通に観測される伝搬遅延時間を推定する。解析の結果、推定された伝搬時間は 1.3 ms , 1.63 ms , 3.76 ms , 4.7 ms , 5.48 ms , 6.61 ms , 7.58 ms , 7.94 ms , 9.98 ms , 12.1 ms , 12.6 ms , 13.1 ms である。この実験では、センサ間隔を 20 cm としたために我々が開発した音速推定法 [15] では誤差が大きすぎて音速の推定ができなかった。上蓋上面から 9.22 m の深さまで砂の代わりにコンクリートが詰まっているので、音速はより速い可能性があるが、解析では、音速は同じときに作られた八戸 09 番函と同じと考え、P 波、S 波

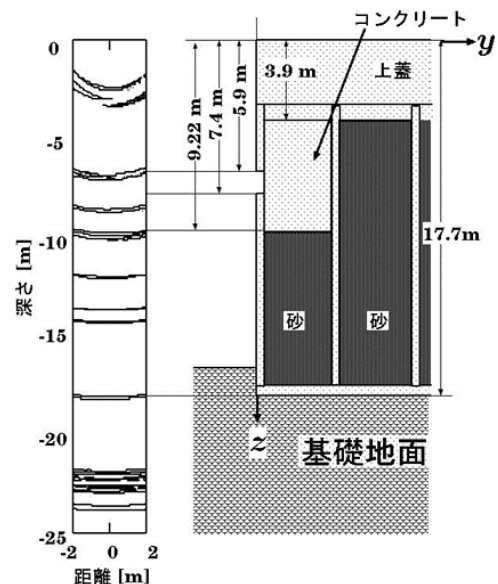


図-17 八戸港 14 番函左修復後の解析結果

及び表面波の音速はそれぞれ $3,615 \text{ m/s}$, $2,294 \text{ m/s}$, $1,960 \text{ m/s}$ とした。反射波をすべて P 波と考えて推定するので、上記の伝搬時間に対応する距離（深さ）は、図-17 に示すように、それぞれ 2.35 m , 2.95 m , 6.8 m , 8.5 m , 9.9 m , 12.0 m , 13.7 m , 14.4 m , 18.1 m , 21.9 m , 22.9 m , 23.8 m となる。

ここで、八戸港 14 番函左修理後のケーソンの場合、上蓋の下面（深さ 3.90 m 、伝搬時間 2.16 ms ）付近にはピークがない。よって、このケーソンには欠陥がないと判断できる。しかし前述したように、砂の代わりにコンクリートを詰めると、欠陥（凹み）や底面からの反射波の検出精度が劣化する。

上蓋の厚さは 3.9 m で上蓋には欠陥があるとは考えられないので、深さ 2.35 m と 2.95 m に現れるピークに対応する 1.3 ms と 1.63 ms は無視できる。この原因は 2 章で述べたように疑似ピーク [10] が重なったためである。

ケーソンの形状から底面（ 17.7 m ）からの反射波が予想される。解析で得られた 18.1 m の値はこれにほぼ正しく対応している。また、 18.1 m 以上深いところのピークはケーソンの底面より深いところなので、検討する必要はない。また、修理後は目地がないので、目地の反射も考慮しない。

6.8 m の位置のピークは 7.4 m の位置の凹みの下端の可能性があり、 8.5 m の位置のピークは中詰め砂の上端の可能性はある。しかし、その他の位置に現れたピークの原因は不明である。これは前述したように、砂の代わりにコンクリートを詰めたため、振動の減衰率が小さくなったため、反射波の重なりが大きくなり、反射波の分離が困難になったことが原因である。しか

し、実際には、砂の代わりにコンクリートを詰めたことにより欠陥の可能性はないので検査する必要がない。

8. ま と め

我々が既に開発した、弾性体中を伝搬する波の伝搬遅延を推定する方法と、複数のセンサ（加速度計）の出力を用いた指向性合成により、欠陥の有無と、欠陥があればその位置を推定する方法を検討した。その結果、ケーソンに穴が開き、中詰め砂が流出すると、上蓋の下に空気層ができ、上蓋の下面からの反射波は確実に検出できるため、欠陥の有無を推定することができ、更に欠陥位置の絞り込みが可能であることを確かめた。更に、砂の代わりにコンクリートが詰まっていると、振動の減衰率が減少するため反射波の重なりが大きくなり、反射波の分離が困難になることが分かった。

文 献

- [1] 明石外世樹, “コンクリートの非破壊試験に関する研究,” 土木学会論文集, No. 390, pp. 1–22 (1988).
- [2] 田中正吾, 山田 実, “信号伝播モデルに基づく電磁波レーダによるコンクリート構造物の非破壊検査,” 計測自動制御学会論文集, 39, 432–440 (2003).
- [3] 鈴木 務, “耐久性診断と非破壊検査方法—マイクロ波—,” コンクリート工学, 26(7), pp. 117–119 (1988).
- [4] 星野幸弘, 山田和夫, 中井裕司, “衝撃弾性波を適用した PC 床板のグラウト充填性評価に関する基礎的研究,” コンクリート工学年次論文報告集, 17(1), pp. 1175–1180 (1995).
- [5] 勝二理智, 藤森健史, “弾性波探査試験に基づく杭健全性の合理的評価法,” 日本建築学会構造系論文集, 81(720), pp. 271–280 (2016).
- [6] 塚田幸広, 市村靖光, “インテグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法,” 土木学会論文集, No. 603, pp. 139–146 (1998).
- [7] M. Abe, T. Fujioka and Y. Nagata, “Location of a defect in a concrete block by a non-destructive technique,” *Acoust. Sci. & Tech.*, 23, 308–312 (2002).
- [8] T. Murakami, T. Fujioka, Y. Nagata and M. Abe, “Nondestructive technique for estimating crack positions in a concrete structure by subtraction of the surface-wave component,” *Acoust. Sci. & Tech.*, 28, 310–318 (2007).
- [9] 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人, “インパルスハンマを用いた非破壊診断のための時間領域有限差分法によるケーソンの衝撃弾性波解析,” 音響学会誌, 71, No.2, 53–64 (2015).
- [10] M. Abe, T. Fujioka and Y. Nagata, “Estimating

the propagation delay of a direct or reflected wave in a large concrete caisson by impact with an impulse hammer,” *Acoust. Sci. & Tech.*, 38, 87–98 (2017).

- [11] A. Bouhadjera and C. Bouzrira, “Simulation of *in-situ* concrete conditions using a novel ultrasonic technique,” *Proc. 16th World Conf. Non-destructive Testing*, Montreal, Canada, 30 Aug–3 Sept. (2004).
- [12] J. P. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *J. Comput. Phys.*, 114, 185–200 (1994).
- [13] 古村一郎, 古川 敬, 鎌田 徹, 南 安彦, “超音波探傷を支援するシミュレーション解析技術の活用事例,” 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, 4, 10–16 (2008).
- [14] M. Sansalone and N. J. Carino, “Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact echo methods,” *ACI Mater. J.*, 86, 175–184 (1989).
- [15] 藤岡豊太, 永田仁史, 安倍正人, “遺伝的アルゴリズムを用いた弾性体の密度及び弾性率の推定手法と波動伝搬シミュレーションへの適用,” 信学論, J102-A, 272–283 (2019).



安倍 正人

昭和 56 年 東北大学大学院電気及び通信工学専攻博士後期課程修了。工博。昭和 58 年 東北大学 助手。平成元年 東北大学 助教授。平成 8 年 岩手大学 教授 工学部。平成 30 年 岩手大学 名誉教授。音響信号処理の研究に従事。電子情報通信学会, 日本音響学会会員。



藤岡 豊太

平成 4 年秋田大・鉾山・電気工学科卒。平成 6 年同大学院修士課程了。平成 9 年 東北大学大学院電気・通信工学専攻博士後期課程了。平成 9 年岩手大学工学部助手。平成 19 年同助教。構造体非破壊検査, 能動騒音制御に関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本音響学会, 情報処理学会, 非破壊検査協会会員。



永田 仁史

平 2 東北大学大学院情報工学専攻博士課程了。工博。同年(株)東芝入社, 研究開発センター勤務。平 6 同社関西研究所。平 9 岩手大学工学部講師, 平 13 同助教授, 平 19 同准教授。平 27 同理工学部教授。音声認識, 音声音響信号処理の研究に従事。電子情報通信学会, 日本音響学会, 情報処理学会会員。