

# 論文 時間反転法を利用したコンクリート構造物の損傷検出に関する基礎的検討

古川 愛子\*1・清野 純史\*2・五十嵐 晃\*3・児島 啓太\*4

**要旨:**本研究では, kHz レベルの周波数帯でコンクリート構造物を加振し時間反転法を利用することにより, 健全時における計測データを利用せず損傷時の計測データだけから損傷を検出できるかどうか検討を行った。時間反転法では, 構造物に与える入力波と時間反転法を利用して得る再現波の比較によって損傷の有無を検出する。有限要素法に基づいた定式化により, 時間反転法によって得られる再現波の特性が損傷がある場合にどのような性質を有するか考察を行い, 損傷検出法の検討を行った。単純なコンクリート塊を対象とした数値解析により, 損傷がある時と無い時とで再現波の形状に差が生じ損傷を検出できる可能性を確認した。

**キーワード:** 損傷検出, コンクリート構造物, 時間反転

## 1. はじめに

近年, コンクリート構造物からのコンクリート片の落下など, 社会資本の劣化が問題となっており, 剥落等による重大な被害を防ぐため, 定期的な点検が実施されている。コンクリートの非破壊試験としては, 様々な手法が研究・提案されているが, 弾性波を利用するものとしては, 超音波探傷, AE 法, 打音法等がある<sup>1),2)</sup>。

この中でも打音法<sup>3)</sup>は, 検査員がハンマーで構造物を打撃し, その打音を聞きとって健全状態を診断するものである。計測作業が簡便で効率も良いという利点を持ち, 広範囲に用いられている。しかし, その反面, 診断結果が点検員の経験や熟練度に依存している現状にある。そのため, 点検員の熟練度に頼ることなく, 打音を計測し, 音響を数値的に分析することによって健全度を評価しようとする試みもなされている<sup>4)</sup>。

超音波探傷検査は, 損傷に対して感度の高い数 20kHz ~ MHz の周波数帯の波動伝播を利用するものであり, 計測データの時刻歴波形から損傷部における反射波の存在を特定すること等によって, 損傷検出がなされている。高い周波数を扱うため, 応答の時刻歴波形の解釈が比較的容易である反面, 波長が非常に短いため一度に診断できるエリアが非常に狭い領域となり, 構造物全体の健全度を即座に診断することは難しい。

一方の打音法では人間の可聴周波数である主に 20kHz 程度以下の弾性波を扱うことになる。このような周波数帯の音波や振動を計測し, 損傷検出を試みる場合, 構造物の固有振動などの振動特性の影響が表れるため, 波形が非常に複雑となる。したがって, 目視によって計測波形から損傷部における反射波の影響を抽出して損傷位

置を特定することは容易ではない。損傷がない健全状態における打音や振動の波形との比較によって, 損傷を検出する試みもなされているが, 健全状態のデータがない場合には適用不可能である<sup>5)</sup>。

以上のことから, 本研究では, 打音法のようなキロヘルツレベルの比較的低い周波数帯の振動特性を利用することによって点検の効率化を図り, かつ健全状態の計測データがない場合でも適用可能で, さらに波形の解釈が容易な損傷検出手法について検討する。

このような周波数帯の波形を利用する損傷検出手法の例として, 鋼板などの平板状の構造物の点検において, 薄板中を伝わる Lamb 波の波動伝播を利用して損傷の検出を試みる研究がなされている<sup>6)</sup>。Lamb 波は超音波等に比べると振動数が低いため損傷に対する感度は劣るが, 減衰が小さく長距離伝播し易いため一度に広いエリアの点検が期待できるなどのメリットがある。しかし, Lamb 波は多くのモードを有し, かつ各モードそれぞれに分散性があることから, 計測波形の解釈が困難であるというデメリットを有する。このデメリットを解決するため, 時間反転不変の原理を利用することによって, 波形の解釈を容易にする試みがなされている<sup>6)</sup>。

Lamb 波の時間反転を利用した損傷検出手法の概要は次の通りである。平板上のある点 (A 点とする) において, 瞬間的な衝撃波 (Tone Burst) を与え (入力波とする), その応答を別の点 (B 点とする) で計測する。B 点における応答波形を, 音声を後ろから前へと逆再生するように時間反転したものを外力として B 点に再入力し, A 点において計測された応答波形を再度時間反転させたものの (再現波とする) を得る。そして, 入力波と再現波の

\*1 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 教授 博(工) (非会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 Ph.D (非会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 修士課程 (非会員)

形状の一致度から損傷を検出できるというものである。実測の際は、圧電及び逆圧電効果を有しアクチュエータにもセンサにもなる圧電素子が利用されている。Lamb波のように分散性を有する場合、A点における入力によって励起された様々なモードのうち、伝播速度の速い成分から先にB点に到着し、それが時間反転されてB点で再入力される際は、到着時間の速さに応じて後れて再入力されることになる。伝播速度が速い成分は後れて再入力されても他の成分に追いつき、A点に到着した際は全ての成分が同時に到着するため、再現波と入力波の形状が一致するというものである。構造物に応力-ひずみ関係に非線形性を有する損傷があり、非線形応答を示す場合には（以降、非線形性を有する損傷と呼ぶ）、この原理が成立しないため、再現波と入力波の形状は一致しない。したがって、再現波と入力波の形状の一致度から非線形性を有する損傷を検出することが可能であるというものである。非線形性を有する損傷の例としては、亀裂が閉じるときと開くときとで復元力が異なるような損傷が挙げられる。空洞などの非線形性を有しない損傷の場合は適用範囲外とされており、また実現象では減衰が存在するが、減衰が有る場合にも再現波と入力波の形状は一致しないとされており、適用対象範囲が限られている。本研究では、減衰があり、かつ線形の損傷を有する場合を対象とし、有限要素法の定式化を利用して上述の再現波の性質を検討する。損傷がある場合の再現波の性質について分析することにより、再現波と入力波の比較から損傷を検出する可能性を検討する。単純なコンクリート塊に内部欠陥（空洞）が生じた場合を想定し、数値解析によって損傷検出が可能であるか検証も行う。

## 2. 損傷同定手法

### 2.1 構造パラメータ

損傷前の全体質量  $\mathbf{M}$ 、減衰  $\mathbf{C}$ 、剛性  $\mathbf{K}$  マトリクスは各要素の要素質量、減衰、剛性マトリクスの総和として、次式により表される。

$$\mathbf{M} = \sum_{e=1}^n \mathbf{M}^e \quad \mathbf{C} = \sum_{e=1}^n \mathbf{C}^e \quad \mathbf{K} = \sum_{e=1}^n \mathbf{K}^e \quad (1)$$

ここで、 $n$  は要素の総数を、 $\mathbf{M}^e$ 、 $\mathbf{C}^e$ 、 $\mathbf{K}^e$  ( $e=1, \dots, n$ ) は全体質量、減衰、剛性マトリクスに対する  $e$  番要素の要素質量、減衰、剛性マトリクスの寄与分であり、拘束自由度を除去したものである。空隙を含まない様な構造物を想定している。本研究では、切り欠けや空洞のような損傷を想定し、数値解析上は要素を取り除くことによって表現することとし、損傷要素の集合を  $\mathbf{D}$  とする。これにより、損傷後の全体マトリクス  $\mathbf{M}_D$ 、 $\mathbf{C}_D$ 、 $\mathbf{K}_D$  は次式となる。

$$\mathbf{M}_D = \mathbf{M} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{M}^e \quad \mathbf{C}_D = \mathbf{C} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{C}^e \quad \mathbf{K}_D = \mathbf{K} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{K}^e \quad (2)$$

### 2.2 構造物の応答

#### (1) 損傷のない構造物の応答

損傷前の周波数領域における運動方程式は、

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (3)$$

である。 $\mathbf{X}(\omega)$  と  $\mathbf{F}(\omega)$  はそれぞれ、変位と外力のフーリエ変換、 $\omega$  は円振動数である。変位  $\mathbf{X}(\omega)$  は次式の通り与えられる。

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{H}(\omega)$  は伝達関数である。

$$\mathbf{H}(\omega) = (-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \quad (5)$$

#### (2) 損傷を有する構造物の応答

損傷により変位が  $\delta \mathbf{X}(\omega)$  変動すると仮定すると、損傷後の運動方程式は次式のようになる。

$$(-\omega^2 (\mathbf{M} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{M}^e) + i\omega (\mathbf{C} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{C}^e) + (\mathbf{K} - \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{K}^e)) (\mathbf{X}(\omega) + \delta \mathbf{X}(\omega)) = \mathbf{F}(\omega) \quad (6)$$

式(3)を式(6)に代入し整理すると、変位の変動  $\delta \mathbf{X}(\omega)$  に関する方程式となる。

$$[-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}] \delta \mathbf{X}(\omega) = \sum_{e \in \mathbf{D}} [-\omega^2 \mathbf{M}^e + i\omega \mathbf{C}^e + \mathbf{K}^e] \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (7)$$

式(7)を応答の増分  $\delta \mathbf{X}(\omega)$  について解くと、

$$\delta \mathbf{X}(\omega) = \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{H}(\omega) \mathbf{S}^e(\omega) \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (8)$$

となる。ここに、

$$\mathbf{S}^e(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M}^e + i\omega \mathbf{C}^e + \mathbf{K}^e \quad (9)$$

である。従って損傷後の応答は次のようになる。

$$\tilde{\mathbf{X}}(\omega) = \mathbf{X}(\omega) + \delta \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) + \sum_{e \in \mathbf{D}} \mathbf{H}(\omega) \mathbf{S}^e(\omega) \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (10)$$

### 2.3 時間反転を利用した再現波について

A 点に外力  $U_{in}^A(\omega)$  を加え、B 点でその応答  $U_{resp}^B(\omega)$  を計測すると仮定する（図-1）。

$$U_{resp}^B(\omega) = H_{ba}(\omega) U_{in}^A(\omega) + \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{bj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ia}(\omega) U_{in}^A(\omega) \quad (11)$$

ここに、損傷要素の要素行列が属する自由度番号の集合を  $\mathbf{D}_n$  とする。上式の右辺第1項は損傷のない場合の応答に一致し、第2項は損傷がある場合に存在する項である。過渡応答の場合、第1項はA点からB点への直達波、第2項は損傷部を通過してB点へ到達する波であると考えられる。

次に、B点での応答  $U_{resp}^B(\omega)$  を時間反転させたものを、B点に外力として入力する。ここで、継続時間が  $T$  の時刻歴波形  $u(t)$  を時間反転させた波形  $u^r(t)$  は、

$$u^r(t) = u(T-t) \quad (12)$$

で表されるとする。\$u^r(t)\$のフーリエ変換 \$U^r(\omega)\$は、

$$\begin{aligned}
 U^r(\omega) &= \int_0^T u^r(t) \exp(-i\omega t) dt \\
 &= \int_0^T u(T-t) \exp(-i\omega t) dt \\
 &= -\int_T^0 u(\tau) \exp(-i\omega(T-\tau)) d\tau \quad (13) \\
 &= \exp(-i\omega T) \int_0^T u(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau \\
 &= U(-\omega) = U^*(\omega)
 \end{aligned}$$

となり、時間反転は周波数領域において複素共役をとることに相当することがわかる。ここに、\$\tau = T-t\$の変数変換を用いており、上付きの\*は複素共役を意味する。以上より、B点における時間反転入力は次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 U_{in}^B(\omega) &= U_{resp}^{*B}(\omega) \\
 &= H_{ba}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega) + \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{bj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ia}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega) \quad (14)
 \end{aligned}$$

A点での応答は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 U_{resp}^A(\omega) &= H_{ab}(\omega) U_{in}^{*B}(\omega) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ib}(\omega) U_{in}^{*B}(\omega) \quad (15)
 \end{aligned}$$

式(14)を代入して展開すると、

$$\begin{aligned}
 U_{resp}^A(\omega) &= H_{ab}(\omega) H_{ba}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{ab}(\omega) H_{bj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ia}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ib}(\omega) H_{ba}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega) \quad (16) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ib}(\omega) \\
 &\times \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{bj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ia}^*(\omega) U_{in}^{*A}(\omega)
 \end{aligned}$$

となる。次に、A点での応答 \$U\_{resp}^A(\omega)\$ を時間反転させたものをA点における再現波 \$U\_{rec}^A(\omega)\$ と定義する。

$$\begin{aligned}
 U_{rec}^A(\omega) &= U_{resp}^{*A}(\omega) \\
 &= H_{ab}^*(\omega) H_{ba}(\omega) U_{in}^A(\omega) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{ab}^*(\omega) H_{bj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ia}(\omega) U_{in}^A(\omega) \quad (17) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ib}^*(\omega) H_{ba}(\omega) U_{in}^A(\omega) \\
 &+ \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ib}^*(\omega) \\
 &\times \sum_{e \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{bj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ia}(\omega) U_{in}^A(\omega)
 \end{aligned}$$

過渡応答の場合、この式の右辺第1項は、A点→B点→A点という伝播経路を通る波、右辺第2項は、A点→B点→損傷部→A点という伝播経路を通る波、右辺第3項は、A点→損傷部→B点→A点という伝播経路を通る波、右辺第4項は、A点→損傷部→B点→損傷部→A点という伝播経路を通る波である (図-2)。

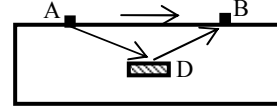


図-1 起振点 A・計測点 B・損傷部 D の位置関係

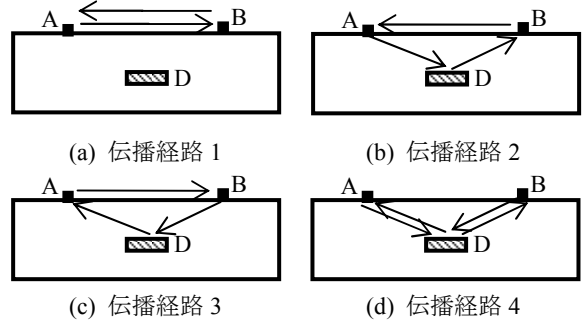


図-2 再現波を構成する4成分の伝播経路

ここで、式(17)の各成分を考察するために、以下のことを考える。入力信号 \$U(\omega)\$ を伝達関数が \$S(\omega)\$ のフィルタに通し、\$S(\omega)U(\omega)\$ を得て、さらにこれを伝達関数が \$R(\omega)\$ のフィルタに通し、出力信号 \$V(\omega)\$ を得るとする。以上のことは次式で表される。

$$V(\omega) = R(\omega)S(\omega)U(\omega) \quad (18)$$

次に、入力信号と出力信号の相関を最大とすることを考える。このことを、次式に示すクロススペクトルの周波数軸上の積分値の振幅を最大化することによって表わすとする。

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} V(\omega) U^*(\omega) d\omega \right|^2 \quad (19)$$

これは、次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{-\infty}^{\infty} V(\omega) U^*(\omega) d\omega \right|^2 &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega) S(\omega) U(\omega) U^*(\omega) d\omega \right|^2 \quad (20) \\
 &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \{R(\omega) U^*(\omega)\} \{S(\omega) U(\omega)\} d\omega \right|^2
 \end{aligned}$$

Schwarzの不等式より、

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \{R(\omega) U^*(\omega)\} \{S(\omega) U(\omega)\} d\omega \right|^2 & \quad (21) \\
 \leq \int_{-\infty}^{\infty} |R(\omega) U^*(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega) U(\omega)|^2 d\omega
 \end{aligned}$$

となる。Schwarzの不等式において左辺が最大となるのは、

$$R(\omega) U^*(\omega) = (S(\omega) U(\omega))^* = S^*(\omega) U^*(\omega) \quad (22)$$

の場合である。以上から、

$$R(\omega) = S^*(\omega) \quad (23)$$

となる。即ち、入力信号と出力信号の相関が最大となるには、最初に通す伝達関数が \$S(\omega)\$ のフィルタのスペクトルの複素共役のスペクトル特性を有するフィルタを通したときとなる。

式(17)の第1項を見てみると、相反定理より  $H_{ab}^*(\omega)$  は  $H_{ba}(\omega)$  の複素共役であるため、第1項は入力波  $U_{in}^A(\omega)$  との類似した波形で損傷に関わらず一定となることわかる。損傷がない場合は、第2項以降が存在しないため、再現波は入力波とスケールが異なるものの波形形状は良く似たものになると考えられる。

式(17)の第4項は損傷が有る場合に存在する成分である。第1項と同様に考え、 $\sum_{e \in \mathbf{D}_i} \sum_{j \in \mathbf{D}_i} H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e} H_{ib}^*(\omega)$  は  $\sum_{e \in \mathbf{D}_i} \sum_{j \in \mathbf{D}_i} H_{bj}(\omega) S_{ji}^e H_{ia}(\omega)$  の複素共役であるので、入力波  $U_{in}^A(\omega)$  と類似した波形となることわかる。

式(17)の第2項と第3項はこの通りではない。第2項の  $H_{ab}^*(\omega) H_{bj}(\omega) S_{ji}^e H_{ia}(\omega) U_{in}^A(\omega)$  において、 $H_{ia}(\omega)$  と  $H_{bj}(\omega)$  は構造物の伝達関数の成分であり、 $H_{ab}^*(\omega)$  は伝達関数の成分の複素共役である。応答の位相は入力位相より遅れることから、 $H_{ia}(\omega)$  と  $H_{bj}(\omega)$  で位相が遅れ、 $H_{ab}^*(\omega)$  で位相が進むことになる。 $H_{ia}(\omega)$  と  $H_{bj}(\omega)$  では、A点→損傷部(D点)→B点と進み、 $H_{ab}^*(\omega)$  ではB点→A点と進むことより、第2項は入力波  $U_{in}^A(\omega)$  に比べ以下の位相が遅れることになると考えられ、ここではその位相の遅れを  $\Delta t$  とする。

第2項は損傷毎の総和であるので、損傷の数だけ損傷の位置に応じた位相の遅れが生じると考えられる。同様の考え方より、第3項の  $H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e} H_{ib}^*(\omega) H_{ba}(\omega) U_{in}^A(\omega)$  は  $\Delta t$  だけ位相が進むことになると考えられる。したがって、損傷毎に同じ時間だけ第2項では位相が遅れ、第3項では位相が進むことになる。

以上は変位応答を利用した場合の定式化であるが、加速度応答を用いた場合は周波数応答関数に  $\omega^2$  が掛かるだけの違いであり、同様の議論が成立する。

#### 2.4 時間反転を利用した損傷検出

以上より、損傷がない場合の再現波の時刻歴波形は、入力波とスケールが異なるものの波形形状の相関は高いことわかる。一方、損傷がある場合の再現波の時刻歴波形は、入力波に対して位相の遅れ・進みを有する第2項と第3項の成分を有する。したがって、入力波と再現波を重ねて図示した際に、入力波に対して同じだけ位相のずれた2つの成分が存在するかを調べることで、損傷の有無を判断出来ると考えられる。入力波としては、時間軸において局在した波形を利用すると、第2項および第3項の存在を見つけ易くて良いと考えられる。

図-3に、損傷が1箇所有る場合にRicker waveletを入力した場合の再現波のイメージ図を示す。再現波では、入力波において振幅が局在する時刻において、式(17)の第1

項と第4項に相当する成分があり、左側に第2項、右側に第3項に相当する成分がある。この左右の成分が複数あれば、その数だけ損傷があると考える。

以上は、境界における反射波の影響が無視出来る場合の議論である。構造物の境界によって反射される波形についても、損傷によって反射される波形と同様に位相のずれが生じると考えられる。したがって、予め設計図などから境界の位置を把握し、境界によって生じる位相ずれ成分を特定しておくことよいと考えられる。

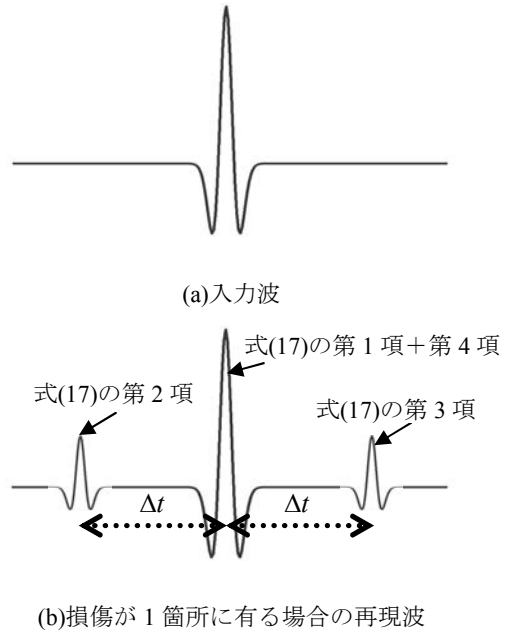


図-3 入力波と損傷が1箇所有る場合の再現波

### 3. 数値解析による検証

#### 3.1 解析モデル

解析モデルは、図-4に示す幅600mm×奥行き600mm×高さ300mmのコンクリートとし、一辺1mmの立方体のソリッド要素でモデル化した。境界条件は、底面の4隅を固定とした。座標軸を図-4に示すように設定した。A点は  $x=250\text{mm}$ ,  $y=150\text{mm}$ ,  $z=300\text{mm}$  に、B点は  $x=350\text{mm}$ ,  $y=150\text{mm}$ ,  $z=300\text{mm}$  に設定した。物性値は、単位体積重量が  $23\text{kN/m}^3$ 、弾性係数が  $2.5 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、ポアソン比を0.3とした。

#### 3.2 損傷モデル

2通りの損傷モデルを想定した。損傷モデル1は損傷箇所が1箇所、ABの中点の下100mmの位置 ( $x=300\text{mm}$ ,  $y=300\text{mm}$ ,  $z=100\text{mm}$ ) に一辺10mmの空洞があると仮定した。損傷モデル2も損傷箇所が1箇所、 $x=250\text{mm}$ ,  $y=250\text{mm}$ ,  $z=100\text{mm}$ の位置に一辺10mmの空洞があると仮定した。損傷モデル3は、損傷箇所が2か所で、損傷モデル1と2の損傷があるモデルである。各損傷モデルの概要を図-5に示す。

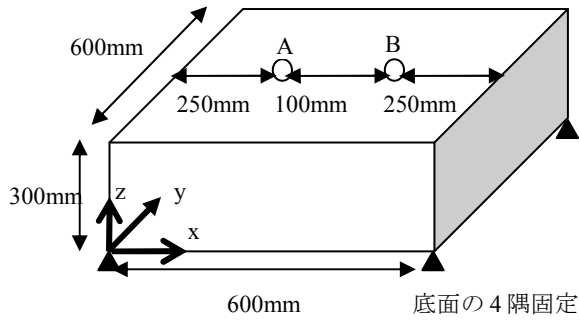
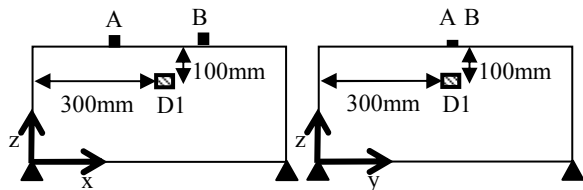
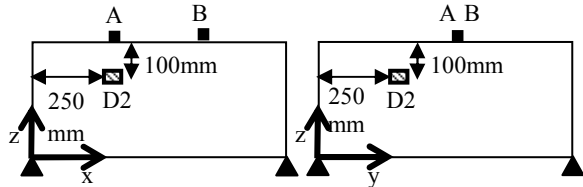


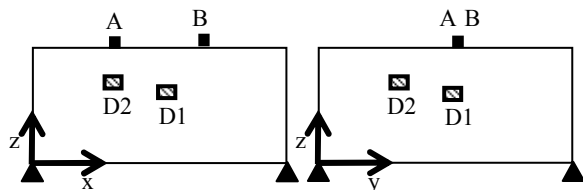
図-4 解析モデル



(a) 損傷モデル1



(b) 損傷モデル2



(c) 損傷モデル3

図-5 損傷モデル

### 3.3 入力波

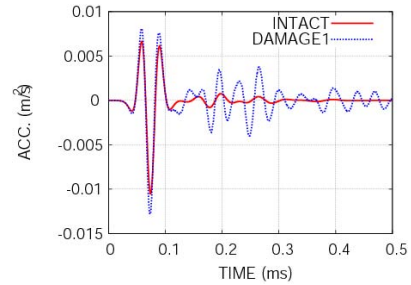
Aの鉛直方向に、次式で表されるRicker Wavelet で表される外力を与えた。ここに、 $f_c$  は中心周波数である。

$$f(t) = (1.0 - 2(\pi \cdot f_c \cdot (t - 1.25/f_c))^2) \times \exp(-(\pi \cdot f_c \cdot (t - 1.25/f_c))^2) \quad (24)$$

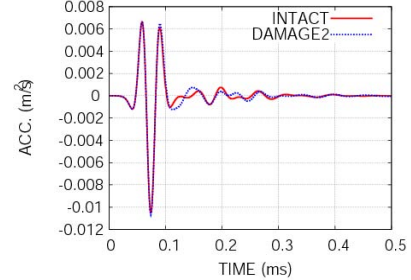
本研究では20kHzを仮定した。振幅の大きさは重要ではないため、入力の最大値を1Nとした。

B点において鉛直方向の加速度応答 ( $m/s^2$ ) を求め、これを時間反転したものをB点の鉛直方向に外力(N)として入力し、A点において鉛直方向の加速度応答( $m/s^2$ )を得て、さらにこれを時間反転して再現波を得るとする。

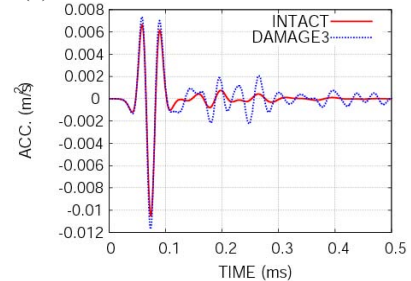
計算時間間隔は、 $1.0 \times 10^{-7}(s)$ とした。また、構造物の減衰は、剛性比例型減衰と仮定し、外力の中心周波数20kHzにおける減衰定数を1%に設定した。



(a) 健全モデルと損傷モデル1の比較



(b)健全モデルと損傷モデル2の比較



(c) 健全モデルと損傷モデル3の比較  
図-6 B点の応答

### 3.4 解析結果

#### (1)B点の加速度応答

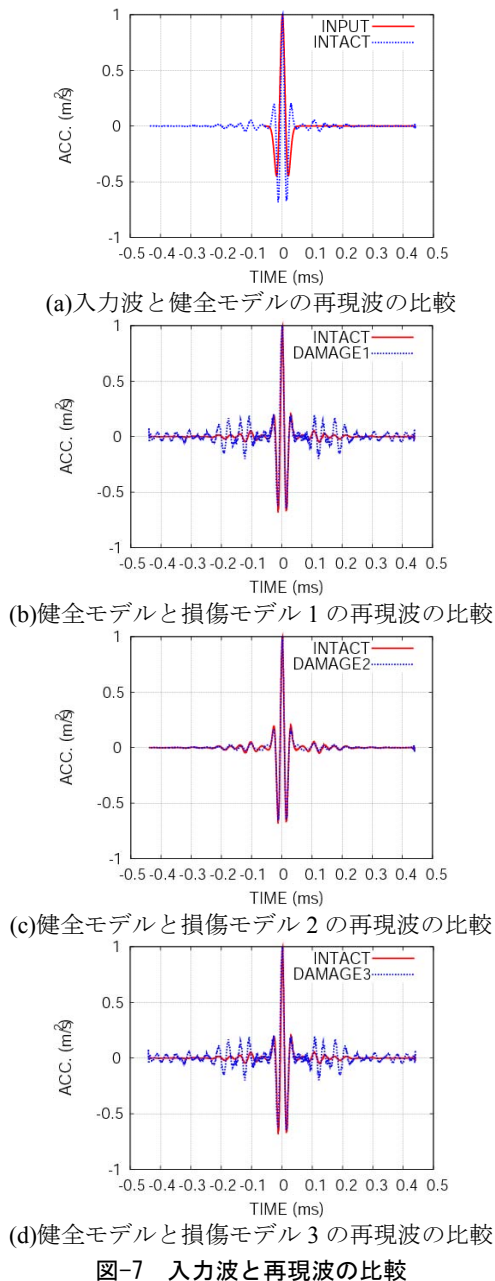
A点の鉛直方向に入力波を与えた際のB点における鉛直方向の加速度応答を図-6に示す。図-6(a)(b)(c)は健全時と損傷モデル1,2,3の結果を比較したものである。過渡応答を対象とし、境界による反射波の表れない時間領域の応答を取り出すものとする。いずれも約0.06msに直達波が観察できる。ABの中心の真下に損傷D1がある損傷モデル1では、損傷部で反射したと思われる波形が約0.18msに表れているが、約0.18ms付近の波形だけから損傷を疑うのは困難であると考えられる。損傷モデル2では健全モデルと波形がほとんど同じであるのは損傷D2がABの間にないためであると考えられる。損傷モデル3は損傷D2の損傷の影響が小さく損傷モデル1と結果が似ている。

#### (2)入力波と再現波の比較

図-7(a)に入力波と健全モデルの再現波の比較を示す。完全に一致しているわけではないが、大きな振幅が3つ存在することと、波形が局所的に存在する時間はほぼ一致している。なお、Ricker Waveletの中心が0msの位置にくるように、また最大振幅が1になるよう調整している。0秒のほかにも振幅の小さい正側のピークが2箇所で見られる。この理由は、Ricker Waveletが周波数軸上におい

て20kHzを中心としてあるバンド幅を持って存在するため、入力波と再現波が完全に一致しないためであると考えられる。減衰が存在することも、一致度を低下させていると考えられる。図-7(b)(c)(d)に、健全モデルと損傷モデル1,2,3の再現波の比較を示す。損傷モデル1(図-7(b))では、約±0.1~0.2msの振幅がやや大きくなっており、損傷D1の影響が表れている。損傷モデル2(図-7(c))の再現波は健全時とほぼ同じであり、このケースでは損傷D2の存在を確認できない。損傷モデル3(図-7(d))の結果は損傷モデル1とほぼ同じであり、損傷D2は確認できず損傷D1の影響のみ確認できる。

以上のことから、AB間に損傷が存在する場合は損傷の存在を確認できることが確認できた。図示は省略するが、損傷D2がAB間にくるようにA点とB点の位置を移動させることによって、損傷D2の存在を確認できる



ことを確認している。また、損傷モデル1の図-7(b)で約±0.1~0.2msにやや大きな振幅が見られるが、このような振幅が表れる時刻は、A点とB点の距離を近づけるほど原点から遠ざかり、原点付近の振幅の大きな成分と分離し易くなる傾向が確認できた。しかし、A点とB点を近づけ過ぎると密な計測が必要となるため、ある程度離すことで計測効率が良くなると考えられる。また、図-7(b)の約±0.1~0.2msに見られるやや大きな振幅は、損傷D1の位置が深くなるほど原点から遠ざかり、この情報を参考に損傷位置の大凡の推定が可能になると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、時間反転法を利用することにより、健全時における計測データを用いず、損傷時の計測データだけから損傷を検出する手法について検討を行った。有限要素法に基づいた定式化により、時間反転法によって得られる再現波が、損傷がない場合には入力波と類似した形状になることを確認した。損傷がある場合には、位相のずれる成分が有ることを確認した。単純なコンクリート塊を対象とした数値解析により、損傷検出法の有効性の検証を行い、損傷がある時と無い時とで再現波の形状に差が生じ、損傷を検出できる可能性を確認した。解析上、均質なコンクリートを仮定したが、不均質な場合の再現波の性質については今後の検討課題である。本研究では手法の基礎的な検討を目的として、単純なコンクリート塊の内部欠陥を想定したが、今後は表面に生じるひび割れなど現実的な事例を対象に検討を行いたい。

#### 参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004.
- 2) 土木研究所・日本鋼構造物診断技術境界：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版，2003.
- 3) 魚本健人，伊東良浩：打音法によるコンクリートの非破壊検査，コンクリート工学論文集，Vol.7, pp.143-152, 1996.1.
- 4) 園田佳巨，中山歩，三好茜，吉田直紹：回転式打音法の打音特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.65, No.2, pp.514-522, 2009.6.
- 5) 古川愛子，梶田幸秀，小野達也，大塚久哲，高振動数で起振可能なアクチュエータを利用したRC構造物のひび割れ発生検知の可能性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.943-948, 2011.6.
- 6) H.W. Park, H. Sohn, K.H. Law, C.R. Farrar: Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate, Journal of Sound and Vibration, Vol. 302, pp.50-66, 2007.