論文 弾性波法に基づく鋼板接着補強した RC 床版内部の損傷評価手法に 関する解析的検討

石田 卓也*1・鎌田 敏郎*2・内田 慎哉*3・澤田 友治*4

要旨:本研究では、鋼板とコンクリートの付着が良好な条件下においてコンクリート部分に損傷として曲げ ひび割れが生じている場合を想定し、衝撃弾性波法による計測を三次元衝撃応答解析によりシミュレートす ることで、損傷評価に有効な弾性波特性を明らかにすることを目的とした。その結果、本研究で提案した波 形エネルギー積算勾配は、コンクリート部分の損傷であるひび割れの有無を把握する上では有効な指標にな り得ることが明らかとなった。

キーワード: RC 床版,鋼板接着工法,損傷,ひび割れ,弾性波法,波形エネルギー積算勾配

1. はじめに

鋼板接着工法は、RC 床版の下面側に鋼板をエポキシ 樹脂接着剤で接着して一体化するものである ^{1) ,2)}。鋼板 接着工法により補強された RC 床版を**写真-1** に示す。 鋼板接着工法により補強した RC 床版は,鋼板で床版下 面が覆われていることから,桁下からの目視点検では床 版内部の損傷を把握することができない。

このような背景から、鋼板接着した RC 床版内部の健全性を把握するための非破壊試験方法がいくつか提案されている。例えば、鋼板の剥離を評価対象とした、打音法³⁾ やサーモグラフィー法がある。また、床版全体の剛性を把握するための衝撃振動試験⁴⁾ もある。しかしながら、いずれの手法においても、RC 床版のコンクリート部分に生じる損傷を把握することは困難である。

そこで本研究では、鋼板とコンクリートの付着が良好な条件下においてコンクリート部分に損傷として曲げひび割れが生じている場合を想定し50,60,衝撃弾性波法による計測を三次元衝撃応答解析によりシミュレートすることで、損傷評価に有効な弾性波特性を明らかにすることを目的とした。

2. 基本モデルにおける弾性波挙動の把握

2.1 解析概要

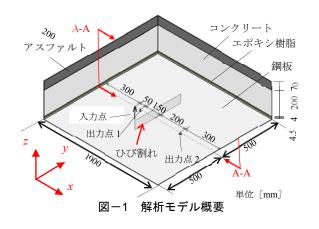
(1) 解析モデル

鋼板接着した RC 床版を模擬した解析モデルを図-1 に示す。モデル寸法は、長さ 1000mm×幅 1000mm×高さ 278.5mm であり 8 節点ソリッド要素とした。各構成材料のモデル厚さは、鋼板 4.5mm, エポキシ樹脂 4mm, コンクリート 200mm, アスファルト 70mm とした。本研究では、鋼板接着補強した RC 床版におけるコンクリート部

分の損傷を曲げひび割れと想定し、これを模擬するため、高さ 70mm、長さ 400mm、幅 1mm の版状の空隙部(要素無し)を図-2 に示す位置に設けた(以降、ひび割れモデル)。ひび割れは入力点から 200mm の位置に設けた。比較のため、ひび割れが無いモデル(以降、健全モデル)も併せて作成した。なお、健全モデルでは、鋼板とエポキシ樹脂、エポキシ樹脂とコンクリートとを繋ぐ各節点



写真-1 鋼板接着されたRC床



^{*1} 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

^{*2} 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

^{*3} 立命館大学 理工学環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)

^{*4} 阪神高速技術(株) 技術部 調査点検課 (非会員)

は、全て結合した。一方、ひび割れモデルでは、これらに加えて、曲げひび割れとエポキシ樹脂とを繋ぐ各節点も結合した。要素は8節点ソリッド要素であり、要素の寸法は入力される弾性波の波長を考慮して10mmに設定した。各材料の物性値は表-1に示すとおりである。また、減衰は拡散減衰が支配的であり、解析時間も短いことから他の減衰は無視し、物性には設定していない。

(2) 弾性波の入力および出力

衝撃弾性波法による計測において、弾性波の入力に使用する鋼球の直径が 19.2mm と想定し、衝撃力の入力関数を \mathbf{Z} に示すように設定した。荷重の継続時間 : T_c は、Sansalone らの研究成果 7 を参考に、次式から求めた

$$T_c = 0.0043 \ D \tag{1}$$

ここに、D: 鋼球直径 (m) である。したがって、鋼球直

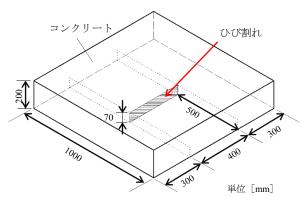
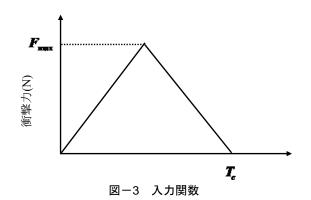


図-2 コンクリート部材内部のひび割れ配置

表-1 解析モデルの物性値

	密度 (t/m³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
アスファルト	2.35	6	0.35
コンクリート	2.3	30	0.2
エポキシ樹脂	1.2	1.5	0.34
鋼板	7.85	200	0.3

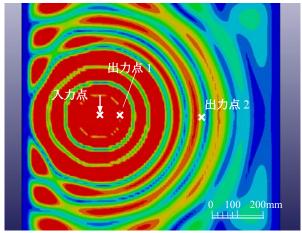


径 19.2mm の荷重継続時間は 82.6µs となる。

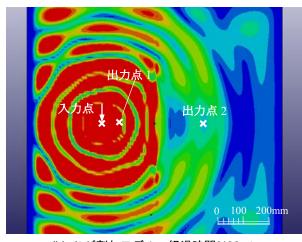
一方, 最大荷重: F_{max}(N)は, 次式⁸⁾により算出した。

$$F_{\text{max}} = \frac{m\sqrt{2gH}}{0.637 T_c} \tag{2}$$

ここで、m: 鋼球質量(kg)、g: 重力加速度(m/s^2)、H: 鋼球の落下高さ(m)である。解析では、鋼球の落下高さを 100mm に設定し、 F_{max} (=774N)を算出した。荷重の入力位置は、図-1 に示す鋼板表面のひび割れ位置から 200mm の 1 節点(入力点)とした。出力位



(a) 健全モデル 経過時間(400µs)



(b) ひび割れモデル 経過時間(400µs)

図-4 三次元衝撃応答解析により得られた 鋼板表面における弾性波伝搬状況

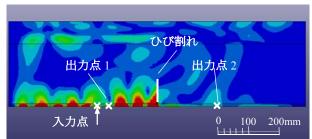


図-5 三次元衝撃応答解析により得られた 床版断面内における弾性波伝搬状況

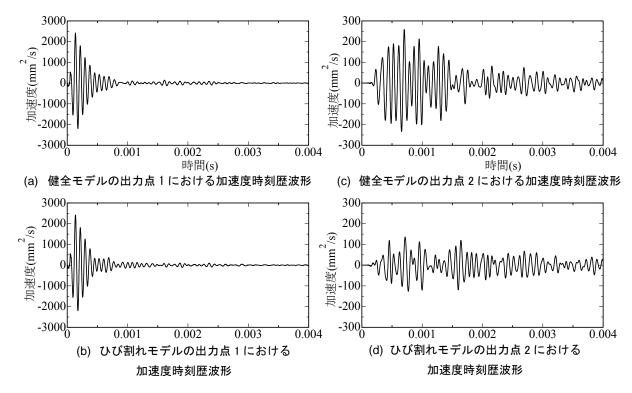


図-6 三次元衝撃応答解析により得られた加速度時刻歴波形

置は,入力位置よりひび割れがある側へ向かって 50mm (出力点 1)および 400mm (出力点 2)の 2 節点とした。出力点おける波形は,加速度センサでの受信を想定して,鉛直方向上向き(図-1 に示す z 軸正方向)の加速度とした。なお,解析の時間間隔はクーラン条件より $0.5\mu s$,波形の出力間隔は $1\mu s$,出力点数は 4000 点とした。

2.2 解析結果および考察

弾性波の伝搬状況を把握するため, 衝撃荷重を入力し た時刻から 400µs 経過後の,鋼板表面の各節点における 加速度成分の分布を図-4に示す。健全モデル(図-4(a) 参照)では、荷重の入力点から同心円状に波動が伝搬し ている様子が確認できる。これに対して, ひび割れモデ ル(図-4 (b))では、健全モデルでの伝搬挙動とは明らか に異なり, モデル中央に設けたひび割れによって波動の 伝搬が妨げられている(弾性波がひび割れを回折して伝 搬)ことがわかる。ここで、図-5に、ひび割れモデル の中央断面(図-1中のA-A断面)における弾性波の伝 搬状況を示す。図より, 弾性波は鋼板とエポキシ樹脂の 部分も伝搬しており、かつ鋼板表面から高さ 40mm 程度 まで波動の伝搬を確認できる。以上より、健全モデルの 場合では鋼板表面から高さ 40mm 程度の領域を弾性波が 伝搬し, ひび割れモデルでは伝搬領域は同じものの, ひ び割れ部において弾性波の反射、およびひび割れを迂回

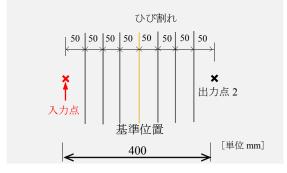


図-7 ひび割れ位置概要

して伝搬する弾性波が存在すると考えられる。このこと は、鋼板表面に設置したセンサによって内部の損傷状態 を把握できる可能性を示唆するものである。

続いて、各モデルの出力点1および2で得られた加速度の時刻歴波形を図-6にそれぞれ示す。出力点1での波形(図-6(a),(b))に着目すると、ひび割れの有無に関わらず、振幅や周期が概ね同じであることがわかる。これに対して、出力点2(図-6(c),(d))では、両モデルを比較すると、周期はほぼ同じであるものの、0.002s以前の時間帯において振幅が異なる傾向を示した。したがって、この時間帯の振幅値を定量的に評価することで、鋼板接着補強したRC床版のコンクリート部分における損傷(曲げひび割れ)を把握できると考えられる。

3 損傷状態の違いが弾性波特性に与える影響

前章では、損傷として高さ70mmの曲げひび割れを想定して、弾性波の伝搬挙動を視覚的に明らかにした。本章では、曲げひび割れの高さおよび曲げひび割れの位置にバリエーションを設けて、これらの違いが弾性波特性に与える影響を明らかにすることとした。また、弾性波特性としては、前章の解析にて明らかとなった「波形の0.002s 以前の時間帯における振幅の差異」を定量的に把握するための評価指標を提案する。

3.1 解析概要

(1) 解析モデル

ひび割れの高さおよびひび割れの位置の検討を行う ため、解析モデルをそれぞれの検討ケースで複数作成し た。以下にその詳細を、検討ケースごとに概説する。

ひび割れの高さに関する検討ケースでは、高さを 0mm (ひび割れ無し) から 200mm (コンクリート部分を貫通するひび割れ) まで 20mm 刻みで変化させ、計 11 種類の高さを設定した。長さ、幅およびひび割れ位置については、2章に示す寸法と同じである。

ひび割れの位置の検討ケースでは、図-2 に示すひび割れ位置を基準として、図-7 に示すように、衝撃荷重の入力点から 50mm 刻みで、基準位置を含めて 7 種類の位置にひび割れを設定した。曲げひび割れを模擬した空隙部の高さは 100mm、長さは 400mm、幅は 1mm としている。入力点から出力点へ向かう方向を正とした。

なお、上記いずれの検討ケースにおいても、鋼板、エポキシ樹脂、コンクリート、およびアスファルト部分の寸法は図-1に示す値であり、各材料の物性値は表-1のとおりである。

(2) 弾性波の入力および出力

弾性波の入力および出力位置は図-1 に示すとおりであり、入力および出力方法は 2.1.(2)と同じである。

3.2 解析結果および考察

(1) ひび割れの高さ

出力点 2 における, ひび割れ高さ 0, 100, 200mm の場合の加速度時刻歴波形を図-8 にそれぞれ示す。図-6 と同様, 0.002s 以前の時間帯において, 振幅が異なる傾向を示した。具体的には, ひび割れの高さが大きくなると波の減衰も大きくなり, その結果, 振幅が小さくなった。ここで, 実構造物でより少ない計測手順で, 上記の時間帯の振幅値を数値化する方法を考える。具体的には, 以下の 2 つの条件を満足するものとした。

I:鋼板に貼り付ける加速度センサの数は1つとする。 II:鋼球打撃の強さによって評価指標が変動しない。 これらを満足する評価指標として,次式を用いる⁹⁾。

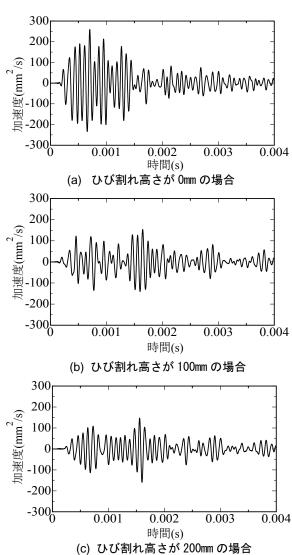
$$E_{\text{int.}}(T) = \frac{\sum_{t=1}^{T} \{y(t)\}^2}{\sum_{t=1}^{4000} \{y(t)\}^2}$$
(3)

ここで、 $E_{int.}(t)$: 波形エネルギー積算値、y(t): 時刻 t における時刻歴波形の振幅値である。

図-8 に示すひび割れの高さが 0mm および 100mm の 波形に対して、式(3)より計算した波形エネルギー積算値 を図-9 にそれぞれ示す。図より、ひび割れの高さが 100mm の場合は、ひび割れの高さが 0mm に比べて、波形エネルギー積算値の前半部分の立ち上がりが遅れ、傾きが低下していることが確認できる。そこで、この傾きの違いを数値化するため、次式に示す波形エネルギー積算勾配: Eintgrad(t)を定義する。

$$E_{\text{int.grad.}} = \frac{E_{\text{int.}}(t_{0.8})}{t_{0.8} - t_0} \tag{4}$$

ここで, to.8: 波形エネルギー積算値が 0.8 となる時刻 (図



-9 中の B 点), t_0 : 波形エネルギー積算値が立ち上がる時刻(図-9 中の A 点), $E_{int}(t_{0.8})$: 波形エネルギー積算値(=0.8, 図-9 中の C 点)である。なお,B 点におけるサンプリング数は,ひび割れの有無に関わらず,0.002s 以内となる。また, t_0 は,前田らの既往の研究 t_0 を参考にして,次式に示す赤池情報量規準(Akaike Information Criteria, AIC)が最小を示す値とした。

$$AIC_k = (k-1)\log\sigma_F^2 + (n-k+1)\log\sigma_{Fs}^2$$
 (5)

ここで、 $k:1\sim n$ 、n:波形のサンプリング数、 $\sigma_F:i=1$

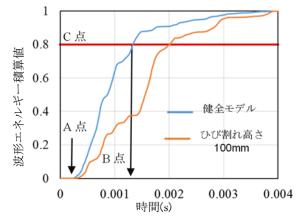


図-9 各時刻における波形エネルギー積算値

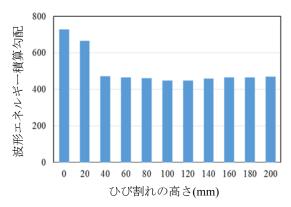


図-10 ひび割れ高さの変化による波形エネルギ 一積算勾配の変化

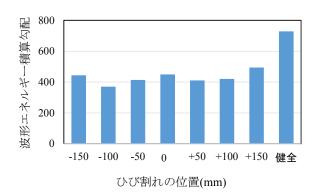


図-11 ひび割れ位置の変化による波形エネルギ 一積算勾配の変化

 $\sim k-1$ に対する分散, $\sigma_{Fs}: i=k\sim n$ に対する分散,i: 波形の振幅値($i=1\sim n$)である。

図-10 に、ひび割れの高さ 0~200mm の場合の波形エネルギー積算勾配を示す。図より、ひび割れの高さが40mm までは波形エネルギー積算勾配は減少する傾向を示すものの、40mm 以降は一定の値となった。

(2) ひび割れの位置

ひび割れ位置が-150, -100, -50, 0, +50, +100, +150mm の場合(図-7 参照, ただし, ひび割れ高さは 100mm) に, 出力点2で得られた加速度時刻歴波形に対して式(3) ~(5)により求めた波形エネルギー積算勾配の結果を図 -11 に示す。図より、すべての場合において波形エネル ギー積算勾配は500を下回っており、ひび割れの無い場 合での値である 730 (図-10 に示すひび割れの高さ 0mm) よりも小さい。ただし、ひび割れの位置+150mmの値は、 ひび割れの位置 0mm での値よりも若干ではあるが大き くなった。これを参考にすれば、ひび割れの高さ 20mm の場合は、ひび割れの位置によっては図-10に示す値よ り大きくなり、ひび割れの高さ 0mm の値を上回る可能 性がある。以上のことから, 本研究で提案した波形エネ ルギー積算勾配は、高さが 40mm 以上のひび割れの有無 を把握する上では、有効な指標になり得ることが明らか となった。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 鋼板接着した RC 床版の鋼板表面から衝撃により入力した弾性波は、鋼板とエポキシ樹脂の部分も含めて、RC 床版下面側の表層領域を主に伝搬することが明らかとなった。
- (2) 出力波形における前半部分の振幅は、今回設定した 損傷であるひび割れの影響により減衰することがわ かった。
- (3) 本研究で提案した波形エネルギー積算勾配は、衝撃 力の大きさにより変動する値ではなく、ひび割れの 有無を把握する上では有効な指標になり得ることを 明らかにした。

今後は、鋼板接着補強した RC 床版供試体を対象として、評価指標の有効性を検証する予定である。また、実際の構造物では、接着した鋼板が水分の浸入により発錆し剥離する場合や、鋼板を接着する際に付着が十分ではなくエポキシ樹脂と鋼板の界面が早期に剥離する場合などがある。このような鋼板が剥離している条件下においては、鋼板を定着しているアンカーボルトから弾性波を入力・受信し、本研究で提案した評価指標により、内部損傷を把握できると考えている。

参考文献

- 道路橋床版 設計・施工と維持管理,松井繋之,森 北出版,pp238,2007.10
- 2) 前川敬彦, 久利良夫, 佐々木一則, 飛ヶ谷明人, 青木康素: 鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する 検討, 第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2012.6
- 3) 磯光夫,久保田和徳,橘吉宏,歌川紀之,中島章典: 鋼板で覆われた床版の打音法による非破壊検査に 関する研究,土木学会論文集 F4, Vol.69, No.2, pp.140-155,2013
- 4) 関口幹夫,國府勝郎,青木孝憲:衝撃荷重によるた わみを用いた鋼板接着補強RC床版の輪荷重走行疲 労損傷の評価,土木学会第60回年次学術講演論文 集,2005
- 5) 新名勉, 佐々木一則, 久利良夫: 鋼板接着 RC 床版

- の疲労劣化過程の分析, 阪神高速道路第 43 回技術研究発表会論文集, 2007
- 6) 佐野正,山下幸生,松井繁之,堀川都志雄,久利良夫,新名勉:浮きを有する鋼板接着補強RC床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価,土木学会論文集A1,Vol.67,No.1,pp.27-38,2011
- 7) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166, 1997.
- 8) 白鳥雅也, 桧貝 勇, 岡村雄樹: 軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.679-684, 1992
- 9) スペクトル解析, 日野幹雄, 朝倉書店, pp.238, 2010
- 10) 前田直樹: 地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価, 地震 第2集 第38巻, pp365-379, 1985