

Keywords | コンクリート補修工、ひびわれ補修評価手法、弾性波速度、AETモグラフィ法、加重荷試験、非線形有限要素解析

# 弾性波速度の可視化技術を活用した鉄筋コンクリート床板の補修評価に関する調査・研究

**高橋 幸太郎**  
 インフラマネジメント事業本部 社会基盤部  
 構造技術グループ 主任  
 技術士補 (建築部門)、道路橋点検士  
 k.takahashi@shinnihon-cst.co.jp

**古野 昌吾**  
 インフラマネジメント事業本部 社会基盤部  
 構造技術グループ 課長  
 技術士 (建築部門)、RCCM (鋼構造及びコンクリート)  
 furuno@shinnihon-cst.co.jp

## 1 はじめに

鉄筋コンクリートの劣化状況及び補修効果を把握するため、弾性波速度の可視化技術を適用し、①補修効果評価手法としての有用性、②弾性波速度可視化技術の耐荷力、健全度とのリンケージの可能性について、その適正を確認することを目的とした実証を実施し、一定の効果を確認したので、実証調査概要とその効果について報告する。

## 2 弾性波を用いた速度構造解析手法

調査・研究の概要は図1に示す通りである。弾性波速度の可視化技術は、既知座標から弾性波を発信し、各センサまでの走時により対象領域の速度分布を求める弾性波トモグラフィ法と、未知座標において発生した弾性波の発信時刻と位置を推定するとともに対象領域の速度分布を求めるAETモグラフィ法がある。

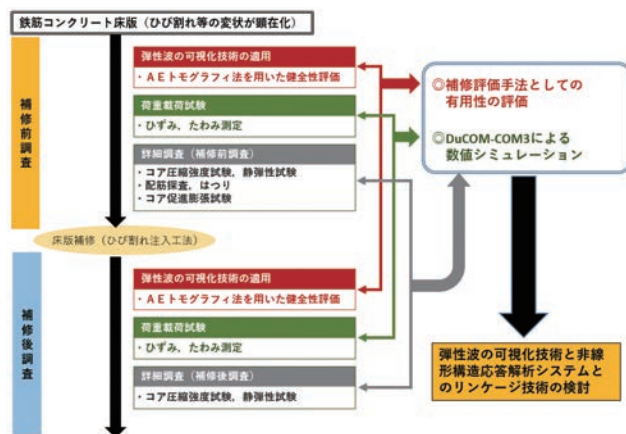


図-1 調査研究概要

弾性波トモグラフィ法は土木構造物にみられる規模の大きい構造物を対象とする場合、多くのセンサを必要とするため、規制時間が長くなる等、作業効率の面で課題がある。このため今回の解析では、作業効率に優れたAETモグラフィ法を採用することとした。

将来的には雨滴や交通荷重が発する振動を計測することで速度構造を把握できる可能性があり、実用面での効果が期待されるためである。

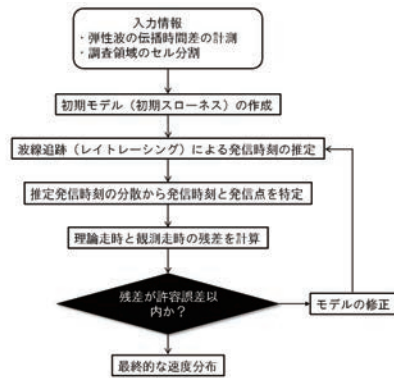


図-2 AETモグラフィ法の流れ

## 3 調査の概要

### (1) フィールド

今回の実証は、富山市よりフィールド提供を受けた八尾大橋(3径間非合成鉄橋)のRC床版を対象とし、調査範囲は第3径間のRC床版3パネルを対象とした(図3)。AETモグラフィ法調査の他、床版コンクリートの劣化・変状の状況を把握することを目的として、表1に示す試験項目を実施した。

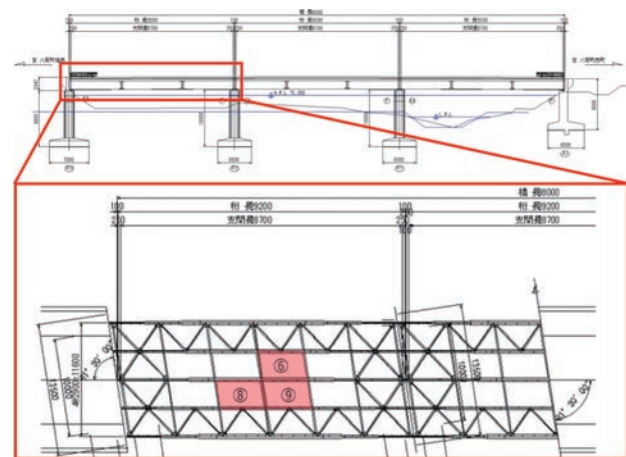


図-3 調査範囲

表1 調査試験項目

調査目的	調査項目
損傷状況把握	外観目視調査
損傷要因把握	中性化深さ試験 (コア表面法・はつり法)
	塩分含有量試験
	残存膨張量試験 (JCHD2法)
コンクリート状態・内部損傷把握	ゲルステイン法によるアルカリシリカゲルの簡易判定試験
	はつり調査
	圧縮強度試験
	静弾性試験

### (2) 現状劣化状況

図4は床版下面の損傷状況で0.10~0.20mmのひびわれが生じている状況をプロットしたものである。損傷要因確認試験より、塩化物イオン量は1.2kg/m<sup>3</sup>を下回り、残存膨張量は潜在的に有害と判定される膨張率0.05%を下回る。中性化深さは最大45mmで、内部鋼材のかぶり厚は橋軸方向が54mm、橋軸直角方向が31mmであり、橋軸直角方向鉄筋に腐食が生じていることから、中性化による内部鋼材腐食が想定される。

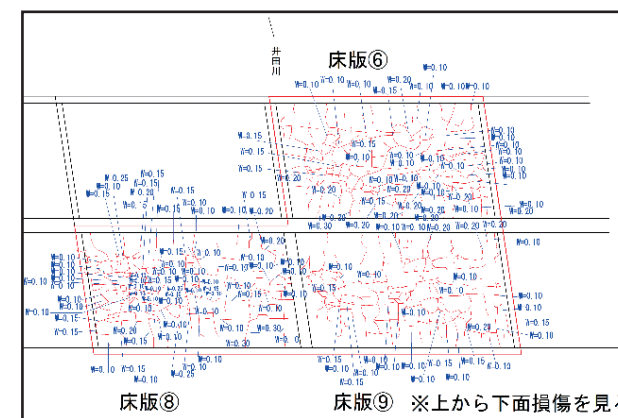


図-4 床版下面損傷状況

### (3) 床版補修工

確認された損傷は、ひびわれが主であることから、補修対策工はひびわれ補修工を適用した。注入工法は、エア抜きにより微細ひびわれまで注入材を充填し、コンクリートの一体化が可能となるA工法(床版⑧⑨)と土木補修用の補修材として進展性ひびわれが生じている場合に、一般的に使用されるB工法(床版⑥)を適用した。

表2 補修工法の概要

対象床版	床版⑧,⑨	床版⑥
工法	A工法	B工法
概要	コンクリート表面を削削・シールし、エア抜きを伴いながら低圧注入する。低粘度、かつ長時間をかけて注入するための緻密な空路まで注入が期待できる。	ひび割れ表面をシールし、専用注入台座と注入器でエポキシ樹脂を低圧注入。樹脂を押し込む注入であるため緻密な空路への侵入が不十分可能性がある。
充填材	エポキシ樹脂系 規格粘度: 100~1000 mPa·s 実測粘度: 430 mPa·s (23±2°C)	エポキシ樹脂系 規格粘度: 100~1000 mPa·s 実測粘度: 580 mPa·s (23±2°C)
加圧方式	スプリング加圧方式 →エア抜き機能を有し スプリングの反発力により低圧注入	ゴムバンド方式 →注入器に備えたゴムの復元力により加圧
加圧力	0.06±0.01N/cm <sup>2</sup> ~0.02N/cm <sup>2</sup>	0.1N/cm <sup>2</sup> ~0.3N/cm <sup>2</sup>

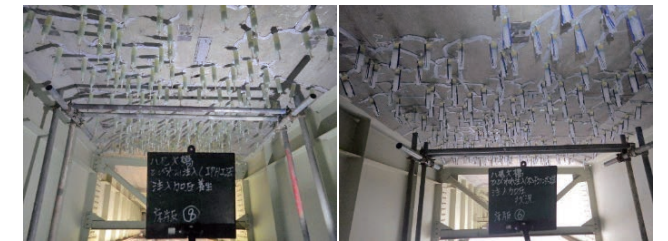


写真1 A工法(床版⑧⑨)

写真2 B工法(床版⑥)

### (4) 弾性波速度分布取得方法

図5にAETモグラフィ法の解析モデルを示す。補修材による比較を行うため、主桁・横桁で囲まれる3床版について3.6m×1.9mの範囲を設定する。橋軸方向に16、同直角方向を8分割し、計128個の要素に区分する。センサは床版下面に橋軸方向5箇所、同直角方向3箇所の計15個設置する。解析に必要となる弾性波は、直径5mmの鋼球をアスファルト面に1打撃/2秒程度の頻度で、約12分間打撃する。センサは床版下面に設置が制限されるため、二次元平面画像として補修前後の速度分布を確認する。

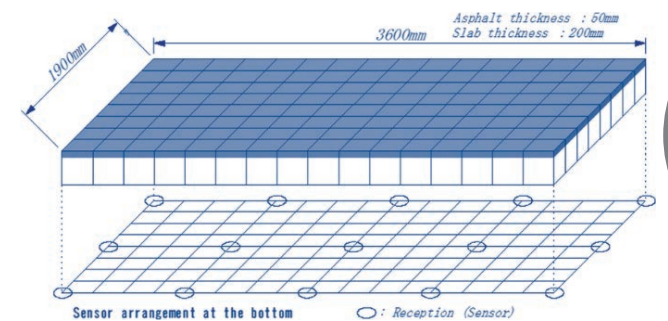


図-5 AETモグラフィ法の解析モデル



写真3 センサ



写真4 弾性波励起

## 4 弾性波速度分布によるひび割れ補修評価

### (1) 補修前弾性波速度分布

以下にAETモグラフィ法による補修前の速度分布を示す。弾性波を検出するセンサの全てが床版下面の同一面に配置する必要があり、Z軸方向(床版厚方向)に関しては、精度を確保できないことから、二次元の平面画像として速度分布を確認することとした(図6~8)。本結果は、各要素で得られた速度を要素の中心値として扱い、最小曲率法による補完



処理後、二次元画像として示した。また床版⑧を対象に、AETモグラフィ法の妥当性確認のため、補修後に弾性波トモグラフィ法による解析を行った結果、AETモグラフィ法の平均速度が3578m/sに対し、弾性波トモグラフィ法の平均速度は3602m/sとなり、平均速度が概ね合致した(図9)。

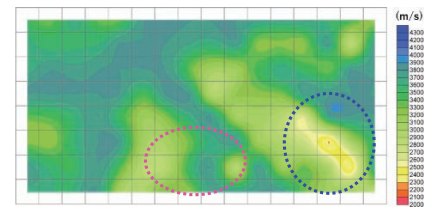


図-6 床版⑧補修前

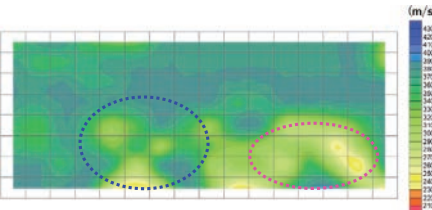


図-7 床版⑨補修前

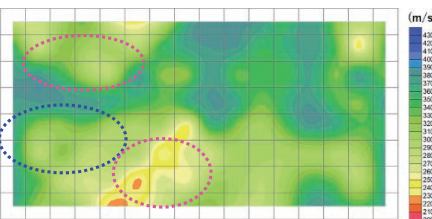


図-8 床版⑥

以下の低速度領域の分布が確認されたことから、コンクリートにAE剤由来の独立気泡が多く存在する場合や、アルカリシリカ反応のような骨材周辺における微細ひびわれが独立して存在するような場合には、注入後も速度が健全レベルに達するまでの回復は示さない可能性が考えられる。

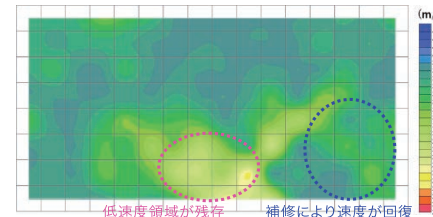


図-9 床版⑧補修後

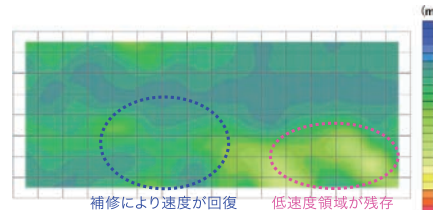


図-10 床版⑨補修後

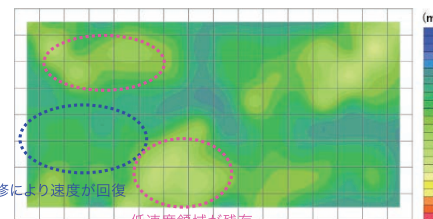


図-11 床版⑥補修後

P波速度 Vp [m/s]	Quality
>4570	Excellent
3660 - 4570	Fine
3050 - 3660	Acceptable
2130 - 3050	Un-acceptable
<2130	Poor

表3 P波速度と品質の指標

解析では128個の全要素の速度が算出される。補修前の速度分布を既往研究におけるWhitehurstの指標(表3)により着色すると、各床版とも2300~2600m/sの低速度分布域が確認され、床版⑧については、著しい損傷があると考えられる2000m/sの低速度分布を示す箇所があることを示した。

(2) 補修後弾性波速度分布

図9~11にひびわれ補修後の速度分布を示す。いずれの床版においても補修後は、速度領域が全体的に速い速度側にシフトしている様子が見受けられる。注入材の充填効果により、弾性波の迂回や分散要因が排除された結果、見かけの速度が向上したものと推察される。各床版間において速度構造の回復程度に大きな差異は見受けられず、注入材による補修効果の差は生じなかった。補修後において、3000m/s

(3) 速度分布によるひびわれ補修効果

いずれの床版においても速度の回復傾向がみられ、補修により一定の改善がなされたと判断できる。また、AETモグラフィ法から得られる速度分布が、コンクリート床版における注入材の充填状況を把握するための一指標となり得る可能性が示唆された。一方、各床版の補修前後における全要素の速度の平均値を比較すると、速度上昇率は数%程度であることから(図12)、低速度領域が残存している可能性が考えられ、少なくとも完全に健全な状態になったとはいえない。

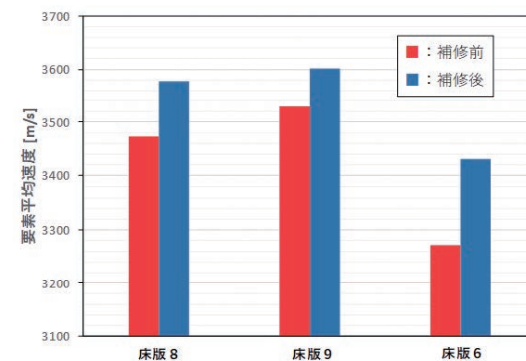


図-12 要素平均速度の比較

(4) 補修前後によるコンクリートの耐力評価

荷重試験により、たわみやひずみ等の挙動変化について実測値を確認し、構造力学的挙動と材料物性による微視的挙動を考慮できる非線形有限要素解析(材料-構造応答連生解析システム(DuCOM-COM3)、東京大学コンクリート研究室開発)による床版挙動の数値シミュレーションを実施した。

実測値と解析値とを対比し解析の再現性を確認するとともに、弾性波速度の可視化技術による解析結果との関連性について検証することで、弾性波速度の可視化技術による耐力性能等の健全性とリンケージが可能であるかについて、その適正を確認した。

表4 車両の土砂積載後重量

	空荷時 [kg]	土砂重量 [kg]	積載後総重量 [kg]
事前調査	11,270	8,340	19,610
事後調査	11,330	8,410	19,740

表5 補修前後の床版中央変位およびひずみ

床版	補修前			補修後		
	変位	橋軸直交ひずみ	軸ひずみ	変位	橋軸直交ひずみ	軸ひずみ
6	0.70mm	110μ	20μ	0.52mm	80μ	11μ
8	0.54mm	95μ	12μ	0.46mm	61μ	7μ
9	0.5mm	80μ	5μ	0.37mm	60μ	4μ

表6 DuCOMによる解析結果: 床版⑧

解析番号	ASR (3000)	曲げひび割れ	過去の輪荷重	変位	軸直交ひずみ	軸ひずみ
実験値				0.54 mm	95μ	12μ
1	×	×	×	0.26 mm	40μ	4μ
2	×	○	×	0.33 mm	63μ	9μ
3	○	×	×	1.03 mm	76μ	273μ
4	○	○	×	1.18 mm	136μ	270μ
5	×	×	○	0.27 mm	41μ	5μ
6	×	○	○	0.35 mm	68μ	11μ
7	○	×	○	—	—	—
8	○	○	○	—	—	—

実測値より、3床版において補修工により変位ならびにひずみの回復がみられ、一定の改善がなされたが、解析結果から評価すると、解析番号1の値で示される健全な状態に改善されていない。解析結果による健全な状態は、床版中央の変位が0.26mmであるが、実測値は0.54mmと倍の差が生じる。また曲げひびわれや、過去の輪荷重に拠る影響を考慮しても解析結果では2割程度の変位増加しかならないことから、ASRの影響等、床版の内部損傷により床版剛性が低下している可能性がある。実験値と解析値との差の解消に向け、上記影響を考慮した材料モデル及び解析モデルの設定が課題である。

(5) 弾性波の伝播速度と耐力とのリンケージ

前述の通り、解析による耐力評価には材料モデル及び解析モデルに課題が残るため、AETモグラフィ法

の解析結果と荷重試験の実測値について関連性があるか確認した。

AETモグラフィ法で得られる平均速度と床版の中央変位(実測値)との関係を図13に示す。床版⑥⑧⑨につて、補修前後の値を示したものであるが、その相関係数は0.95と良好な値が得られた。

トモグラフィ法の解析で床版の平均速度を把握し、たわみ関係性から床版の剛性を推測ができれば、剛性に基づいた健全性の指標を得る可能性が有る。

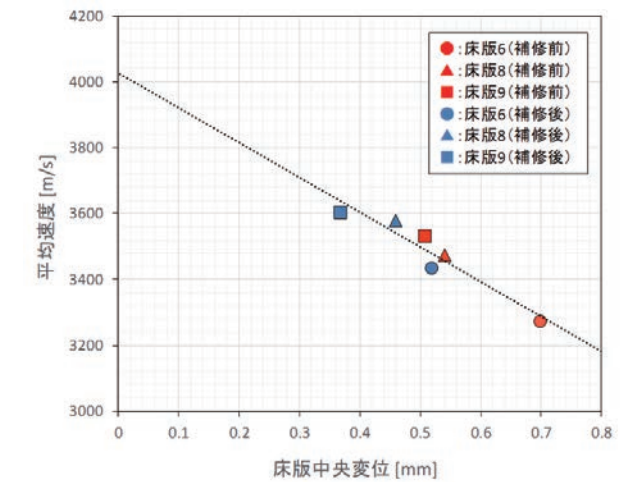


図13 床版中央変位と平均速度との関係

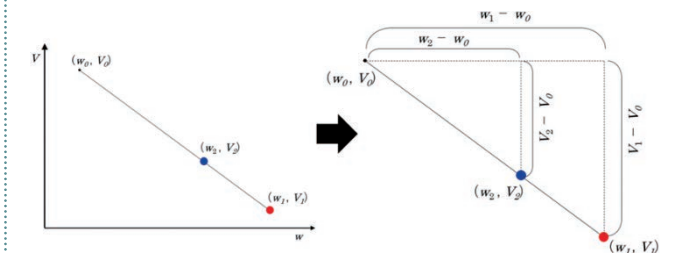


図14 速度とたわみの関係

5 まとめ

AETモグラフィ法による解析、耐力評価結果より、補修後の採取コアでは未充填箇所が確認されたことから、今回の解析結果は補修状況を適切に捉えており、補修評価手法として実装可能と評価できる。耐力評価手法としてのリンケージは未だ解決すべき課題は多いが、床版の平均速度とたわみ実測値との関係性が確認された。詳細調査で予め解析、たわみ実測値を確認しておき、AEによるモニタリングを実施すれば、煩雑な計算を要さず、対象床版の剛性により健全性を推定できる可能性が示唆される。

\*参考文献:

1) 麻上久史、塩谷智基、橋本勝文、茅野茂:実RC床版を対象とした加速度計によるAE計測システムの開発、非破壊検査協会、第21回AE総合コンファレンス論文集、PP.25-28、2017。