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版の補修評価に関する調査・研究

開米浩久¹·古野昌吾¹·塩谷智基²·奥出信弘³

(株)新日本コンサルタント 本社(〒931-0857 富山県富山市奥田新町1番23号)
²京都大学大学院工学研究科 特定教授(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S16)
³京都大学大学院工学研究科 特任助教(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S16)

補修施工後の品質,補修効果の評価方法については,現状では明確に規定された指針類は示 されていない.補修効果の評価方法は,補修の目的に応じて評価指標が異なることから,体系 的に整理されておらず,目的に応じた補修評価手法が求められている.これまで,補修材の充 填度の評価,躯体の一体性を目的としたひびわれ充填工法や断面修復工法では,弾性波を使用 した手法が主として適用・検討されてきた.本稿では,これまでの検討されてきた手法の中で, 弾性波の速度分布を可視化する手法が,ひびわれが生じている鉄筋コンクリート床版の補修評 価手法としての適用性が高いことを供用中の実証フィールドを活用し,構造物の維持管理に資 する新たな補修評価手法としての有用性を検証した.

Key Words: コンクリート補修工, ひびわれ補修評価手法, 弾性波速度, AEトモグラ フィ法, 荷重載荷試験, 非線形有限要素解析

1. はじめに

鉄筋コンクリートにおいて適用したひびわれ補修 効果の評価手法として弾性波速度の可視化技術を適 用し,①補修効果,②補修材種類による補修効果の 違い,③弾性波速度の可視化技術が耐荷力,健全度 との紐付きが可能であるかについて,その適正を確 認することを目的とした実証を行うものである.

調査・研究の概要を図1に示す.富山市より フィールド提供を受けた3径間非合成鈑桁橋のRC床 版を対象とした.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AEトモグラフィ法がある.

2. 弾性波を用いた速度構造解析手法

本検証においては、AEトモグラフィ法を摘要した. 弾性波トモグラフィ法は発信源の位置と発信時刻の 推定を要しないため、位置評定に起因する誤差は生 じないが、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.AEトモグラフィ法は、発生源の位置と発信時 刻の情報を必要としない手法であり、利用するのは 各受信点への弾性波の到達時間差のみである.将来 的には雨滴や交通荷重のみで速度構造を把握できる 可能性が有り、実用面での期待が大きい.AEトモグ ラフィ法の解析手順を図2に示す.





3. 効果検証フィールド

(1) フィールド概要

調査範囲は八尾大橋の第3径間のRC床版3パネル を対象とした(図4). AEト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4 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 | | | |
| | 中性化深さ試験(コア表面法・はつり法) | | | |
| 指作两甲细烷 | 塩分含有量試験 | | | |
| 頂協安囚冗姪 | 残存膨張量試験(JCI-DD2法) | | | |
| | 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 | | | |
| コンクリート状 | はつり調査 | | | |
| 態・内部損傷把 | 圧縮強度試験 | | | |
| 握静弾性試験 | | | | |

(2) 現状劣化状況

図5に床版下面の損傷状況を示す.0.10~0.20mm のひびわれが生じている状況である.要因確認試験 より,塩化物イオン量は1.2kg/m³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.圧縮強度,静弾 性係数試験は健全に近い部分で実施するため,標準 値範囲内にあり,補修前後で値の回復はみられない.



(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.注入材は、 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適用されるエポキシ樹脂注入材 3種(床版⑥)の他、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 されるエポキシ樹脂注入材(床版⑧⑨)を適用した.





IPH工法(床版⑧⑨) ボンドシリンダ-工法(床版⑥) (4) 弾性波速度分布取得方法

図6にAEト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.



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AEト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7~9).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, AEトモグラフィ法による解析を行った結果,



図7 床版⑧補修前



図8 床版9補修前



図9 床版⑥補修前 表3 P波速度と品質の一指標

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

AEト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, 平均速度をほぼ合致させることが出来た(図10).

解析では128個の要素全てにおいて速度が算出される.補修前の速度分布について,既往研究におけるWhitehust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,著しい損傷を示していると考えられる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10~12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 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.



(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、AEト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.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 13)、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.



(4) 補修前後によるコンクリートの耐荷力評価

載荷試験により、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により,弾性波 速度の可視化技術により,耐荷性能等の健全性と紐 づけが可能であるかについて,その適正を確認した.



図14 ひずみ計の設置位置





変位計の設置状況 ひずみ計の設置状況 表5 補修前後の床版中央変位およびひずみ

| | | 補修前 | | | 補修後 | | |
|----|-----|-------------|-------------|----------|-------------|-----------------|---------|
| 床版 | 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 | 20 µ | 0.52mm | 80 µ | 11μ |
| | 8 | 0.54mm | 95 µ | 12μ | 0.46mm | 61μ | 7μ |
| | 9 | 0.5 lmm | 80 µ | 5 μ | 0.37mm | 60 μ | 4μ |
| | | | | | | | |

| えて しこうにん つ所行 加木 二 不成し | | | | | | | |
|-----------------------|----------------|------------|------------|---------|-----------------|-----------|--|
| 解析番号 | ASR (3000µ) | 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 | 95 µ | 12 µ | |
| 1 | × | × | × | 0.26 mm | 40 μ | 4 μ | |
| 2 | × | 0 | × | 0.33 mm | 63 µ | 9μ | |
| 3 | 0 | × | × | 1.03 mm | 76 µ | 273μ | |
| 4 | 0 | 0 | × | 1.18 mm | 136µ | 270μ | |
| 5 | × | × | 0 | 0.27 mm | 41 µ | 5 μ | |
| 6 | × | 0 | 0 | 0.35 mm | 68μ | 11μ | |
| 7 | 0 | × | 0 | _ | | — | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | _ | _ | _ | |

実測値の結果より、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およ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荷力とのリンケージ

解析による耐荷力評価との差について,改善が必要となったため,AEトモグラフィ法の解析結果と載荷試験の実測値について関連性があるか確認した.

AEト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14に示す.床版⑥⑧ ⑨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16 速度とたわみの関係

5. まとめ

AEトモグラフィ法による解析,耐荷力評価結果よ り、補修により改善傾向は示すものの,健全な状態 まで回復されないと評価される.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も,解析結果 は補修状況を捉えており,補修評価手法として実装 可能と考える.耐荷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.