

床版下面増厚工法による橋梁長寿命化対策の 施工とその効果検証方法について

柳 咲貴¹・平野 康匡²

¹ 近畿地方整備局 大和川河川事務所 調査課（〒583-0001 大阪府藤井寺市市北3丁目8番33号）

² 近畿地方整備局 京都国道事務所 管理第二課（〒600-8234 京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808）

国道1号にかかる宇治川大橋は供用後50年以上が経過し、大型車両も多く通行する交通量の多い橋梁で、2016年度に長寿命化対策として床版下面増厚工法を部分的に実施している。今回、長寿命化対策の効果を検証するにあたり通行規制を行う事が困難な状況から、載荷試験を必要としない簡易計測による効果の検証手法の検討を行い、固有周波数と固有モード比により剛性変化倍率を確認する補強効果検証の2手法を選定し検討を進めているところである。今後、補強工事が完了次第、計測・解析を進め、それぞれの手法による効果検証の適用性を実証する予定である。

キーワード 橋梁長寿命化、補強効果検証、交通規制不要、映像によるたわみ計測

1 背景・目的

(1) 背景

今後、わが国では建設後50年を超える橋梁が増加し、長寿命化を進めるために補修・補強を実施する橋梁が増える。今後さまざまな補強工法の効果および推移を確認することで、長寿命化計画の見直しを行い、計画的に橋梁の維持管理を進める事が重要となる。

これまでの橋梁の補強効果確認手法としては、橋梁にひずみ計を設置し、交通規制を実施して載荷試験を行い、その結果から耐荷力を評価する方法が主に実施されてきた。

これらの手法ではひずみ計の設置にあたって高所作業車や橋梁点検車等を必要とし、載荷試験のためには交通規制を行う必要があるため、交通量の多い路線の橋梁では実施困難である。

今回、床版増厚工法を実施した宇治川大橋は国道1号を構成する橋梁で交通量が多く、交通規制が困難であるため、交通規制を必要としない手法による補強効果検証を検討・実施する。

(2) 目的

センサーの設置が橋梁点検車等を使用せず簡単に行へ、載荷試験を必要としない簡易な計測で補強効果の検証が可能な「固有周波数による効果検証」、「固有モード比による効果検証」の2つの手法を実施し、検出可能範囲、作業の効率性および

コストを比較し、それぞれの適用条件の実証を行う。

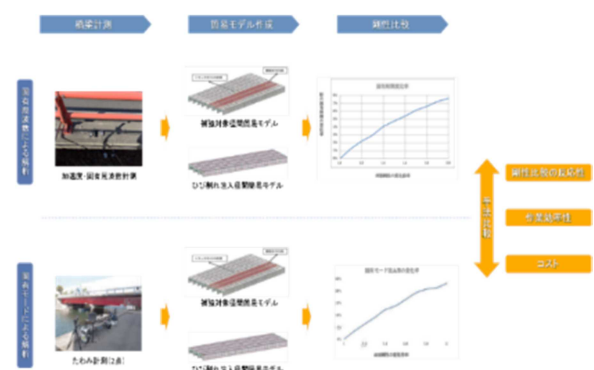


図1 補強効果検証イメージ

2 対象橋梁

[橋梁名] 宇治川大橋

[架設年次] 1965年（52歳）

[路線名] 国道1号

[所在地]

自：京都市伏見区横大路千両松

至：京都市伏見区向島大黒

[橋長] 546.58m

[径間数] 15径間



写真1 宇治川大橋

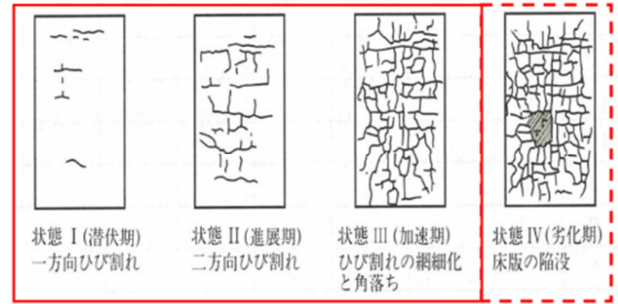


図3 床版の下面のひびわれと劣化状況¹⁾

[対象径間]

- ・補強径間（以下、対象径間） : P14-A2
- ・未補強径間（以下、比較径間） : P11-P12

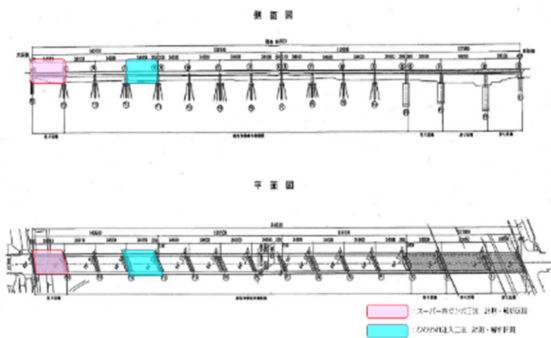


図2 検証対象径間

3 床版下面増厚工法

架設後 50 年以上を経過した宇治川大橋において、床版下面増厚工法の施工を実施することにより、床版の長寿命化を図るものである。

(1) 概要

宇治川大橋で実施する床版下面増厚工法のスーパーホゼン式工法は、経年劣化等による耐久性及び耐荷力性能が不足した橋梁の床版長寿命化対策工法の一つで、交通規制をせずに施工できる。既設床版コンクリート下面に網鉄筋をテーパ付き T 型アンカーで圧着固定し、床版の振動・衝撃を緩和する。さらに、ポリマーセメントモルタル吹付増厚後に低圧でエポキシ注入を行うことにより、既設床版と完全一体化させる下面増厚工法である。

道路橋床版における本工法の適用範囲は、図 3 に示した状態Ⅰ～Ⅲを原則としているが、状態Ⅳを含む橋梁でも床版を部分打ち換えした後に対策を実施した実績がある。

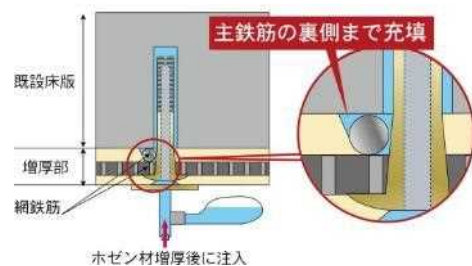
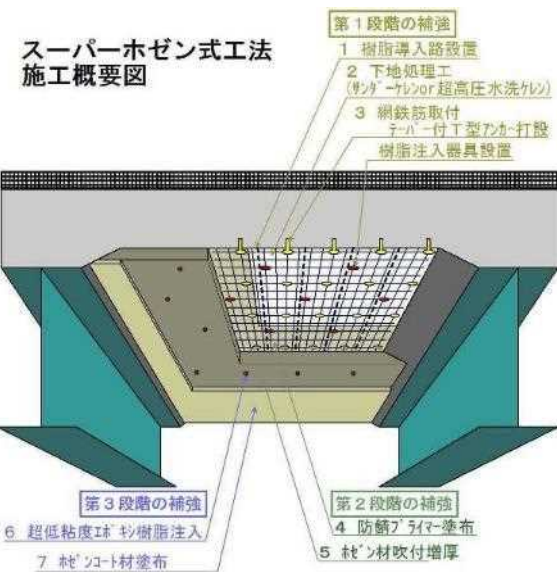


図4 スーパーホゼン式工法²⁾

(2) 期待される効果

- ① 耐久性向上による長寿命化対策効果が大きい。
- ② 補修と同時に補強効果も得られる。
- ③ 対策実施後も目視点検による変状の確認が可能であり、維持管理費が安価に抑えられる。

(3) 宇治川大橋での施工内容

床版補強工（スーパーホゼン式工法） 181.5 m²



写真2 宇治川大橋施工前後写真

(4) 工期

2016年9月～2017年7月

4 補強効果検証手法

(1) 解析手法検討

効果検証手法の検討に当たっては、載荷試験を伴うひずみ計測による耐荷力調査があるが、載荷試験を必要としない剛性変化倍率解析手法の「固有周波数による解析」と「固有モード比による解析」があり、どちらも比較的簡易な計測が可能であることから2手法の比較検証を行う事とした。

表1 検証手法の比較

手法	解析結果	計測項目	センサー設置工事	載荷試験	今回実施
1 耐荷力調査	応力	ひずみ	要	要	-
2 固有周波数による剛性変化倍率解析	剛性変化率	加速度	不要	不要	○
3 固有モード比による剛性変化倍率解析	剛性変化率	たわみ	不要	不要	○

① 固有周波数による効果検証

構造物は質量と剛性などにより、固有周波数を持っており、剛性が変化した場合、固有周波数も変化する。

このことを利用し、FEMモデルを作成し、剛性の変化に伴う固有周波数の変化の関係性を解析により求め、対象径間と比較径間の固有周波数を計測・解析し、補強による剛性の変化を推定する。

② 固有モード比による効果検証

補強の位置や範囲大小によって、固有周波数では剛性の変化を検知できない場合がある。

構造物の剛性変化に対して、固有周波数より固有モード比の方が敏感である。

この構造特性を利用して、FEMモデルを作成し、剛性の変化に伴う固有モード比の変化の関係性を解析により求め、対象径間と比較径間の固有モード比を計測・解析し、補強による剛性の変化を推定する。

図5に固有モード比による補強効果確認手法のプロセスを示す。

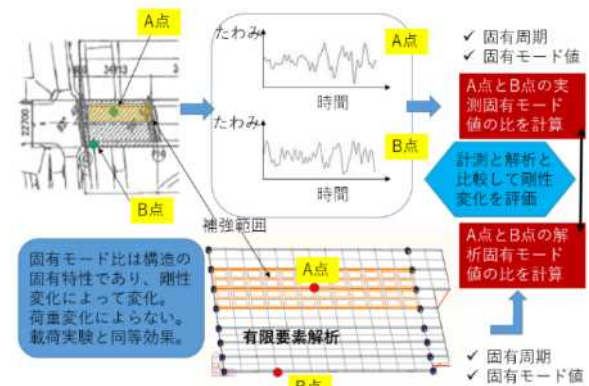


図5 固有モード比による補強効果確認手法

(2) 解析手順

固有周波数、固有モード比それぞれの解析は以下の流れで実施する。

本検証の検討時点において、補強工事が開始されており、事前計測が行えない状態であったため、本検証では未補強径間（比較径間）を計測・解析することにより補強前計測・解析の代替とし、検証を実施する事とした。

- ① 簡易計測手法により対象径間と比較径間の加速度、たわみを計測する。

- ② 図面より対象径間及び比較径間のFEMモデルを作成する。

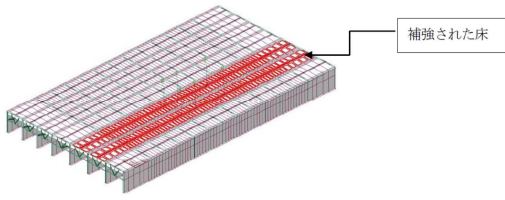


図6 FEMモデルイメージ

- ③ ②にて作成したFEMモデルを①にて計測されたデータを元に逆解析・調整を行い、現況のFEMモデルを作成する。

- ④ ③にて作成したFEMモデルを用いて、床版の剛性変化倍率と桁の固有周波数変化率、固有モード比変化率それぞれの関係曲線（以下、補強効果確認曲線とする）を作成する。

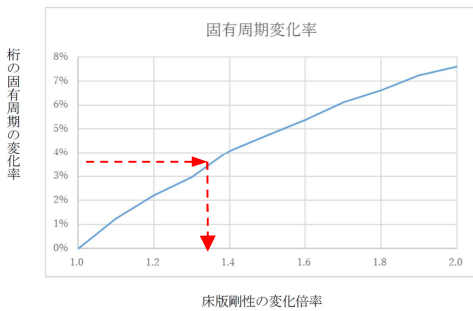


図7 固有周波数による補強効果確認曲線イメージ

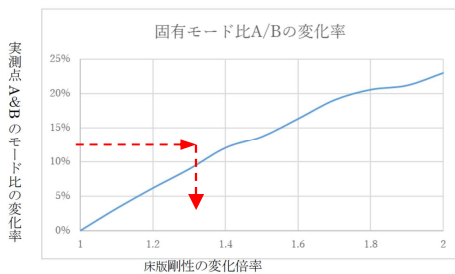


図8 固有モード比による補強効果確認曲線イメージ

- ⑤ 加速度計の計測結果により橋梁の固有周波数を算出する。また対象径間と比較径間の変位時刻歴を計測して、その変位時刻歴からそれぞれの径間の固有モード比を算出する。

- ⑥ 固有周波数、固有モード比それぞれの、比較径間に対する対象径間の変化率（対象/比較）を補強効果確認曲線と対照して、対象径間の比較径間に対する相対的な剛性変化倍率を確認する。

(3) 計測手法

それぞれの解析に必要な計測は、以下の2点を念頭に計測方法の選定を行った。

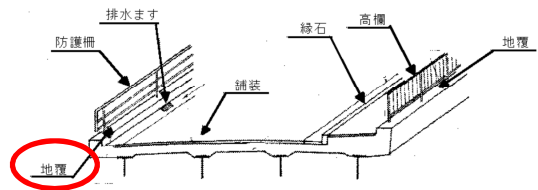
- ・高所作業車等によるセンサーの設置工事を必要とせず、簡易に実施できる
- ・交通規制を行わず設置・計測可能である

a) 【加速度計測】：固有周波数による効果検証

加速度計測は、主桁と床版と地覆が構造的に一体とみなせることから、センサーの設置が容易な地覆部かつ交通荷重に対する変位量の大きい径間中央付近で実施する。

(図9³⁾参照)

計測は加速度が最大値となる、大型車両が計測位置付近を通過するタイミングを見計らって開始し、1分間を連続して10回計測する。



※ 径間方向の設置位置(下記部材のどこに設置するか)については、径間中央付近とする。

設置部材	精度	簡便性 ^{※1}	備考
主桁	◎	×	・提案手法にとって理想的な計測位置 ・計測される振動=主桁の振動であり、環境要因ノイズの心配がない ・橋梁の下からクレーン車などを用いて設置する必要があり、コストが嵩む
床版/舗装	-	△	・主桁と構造的に一体とみなせるか疑問が残る ・主桁の真上に設置したいが、可能かどうかは橋梁による ・工法等による違いも生じることが考えられるので、個別対応となる可能性が高い ・主桁と同一構造物でないため、環境要因ノイズが載る ・環境要因ノイズが主桁の固有周期と一致もしくは近い値の場合、主桁の固有周期とノイズの切り分けが出来ず本手法が適用できない
地覆	-	○	・同上 ・床版/舗装に比べ、主桁と構造的に一体とみなせる可能性が高い ・主桁からの張り出しに起因する振動がノイズとして載る

※1 主に現場での設置容易性に着目して定性的に評価

図9 センサー設置部検討

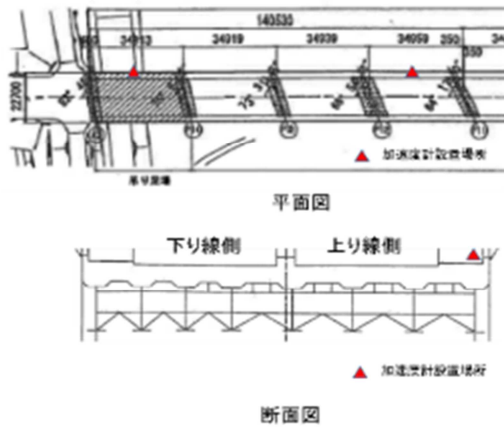


図10 センサー設置予定位置



写真3 センサー設置イメージ

表2 加速度計測内容

使用センサー	IMV(株) HM-0013
サンプリング周期	100Hz
計測時間	60秒
計測回数	10回
計測開始のタイミング	大型車通過タイミング

b) 【たわみ計測】：固有モード比による効果検証

固有モード比による効果検証のためには、通常の交通荷重による対象径間及び比較径間のそれぞれで2箇所なたわみ時刻歴を同期計測する必要がある。

本検証では載荷試験を必要とせずカメラによる2箇所なたわみ時刻歴を同期計測できる

「映像によるたわみ計測」の計測手法の検討を行った。

映像によるたわみ計測手法としては、光学振動解析技術とサンプリングモアレ法によるたわみ計測の比較検討を行い、サンプリングモアレ法によるたわみ計測を実施する事とした。

表3 画像解析によるたわみ計測手法比較

	サンプリングモアレ法	光学振動解析
計測手法	測面に計測用ターゲットを貼り、遠方より計測用カメラにて撮影し、撮影画像を解析してたわみ量を算出	遠方より計測用カメラにて撮影し、撮影映像より計測面の微小な動き(振動)を高遠かつ高精度に検出・解析を行い、たわみ量を算出
メーカー	共和電業	NEC
検出精度	40 μ m~400 μ m程度 (ターゲットのピッチサイズ40mmの場合の参考値)	100 μ m程度 (10mの距離より正対して計測した場合の参考値)
ターゲット有無	必要	不要 (ただし、計測面の状況によっては計測が難しいものあり)
サンプリング周期	~200Hz	~200Hz
同期計測	1台のカメラあたり16点の同期計測可能、最大3台のカメラでの同期計測可能	開発中

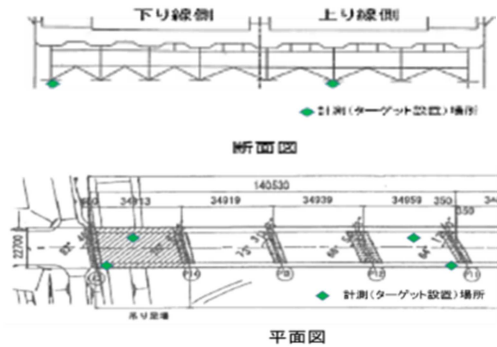


図11 たわみ計測予定位置



写真4 サンプリングモアレ計測イメージ

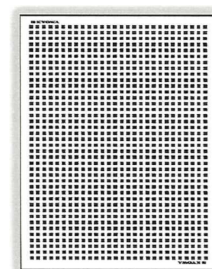


図 12 計測ターゲット

5 結論

(1) 補強効果確認手法の適用検討

本検証の計測および計測結果による解析はこれからであるが、FEMモデルを作成して解析を行っている段階で、以下の傾向が見えてきた。

両手法とも通行規制を伴う載荷試験が必要なく、非常に簡易かつ経済性のよい特徴を持っている。

固有周波数による効果検証は比較的構造が単純で、剛性変化の大きいものを捕らえる事が可能であるため、単純桁の橋梁かつ補強範囲が大きい場合などに適用できると思われる。

固有モード比による効果検証は、固有周波数による効果検証と比べて複雑な構造にも対応でき、より小さな剛性変化を捕らえる事が可能である。このため、連続桁橋などの構造的に複雑な橋梁形式にも対応可能であり、補強範囲が小さく剛性変化が比較的小さい条件でも適用できると思われる。

表 4 に固有周波数による効果検証と固有モード比による効果検証の特長と適用範囲を示し、図 12 と図 13 に本検証における宇治川大橋のFEMモデルと固有モードの解析イメージを示している。

表 4 補強効果確認手法の特長と適用範囲

確認手法	確認可能な剛性変化範囲	構造形式の適用性	計測条件の要求
固有周波数による効果検証	大	単純桁	
固有モード比による効果検証	中～大	単純桁、連続桁、その他形式	2点以上のたわみ同期計測

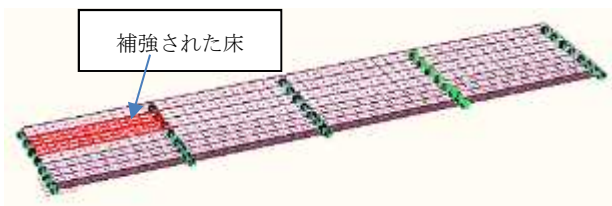


図 13 宇治川大橋FEMモデル

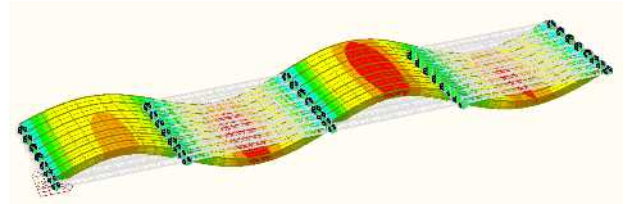


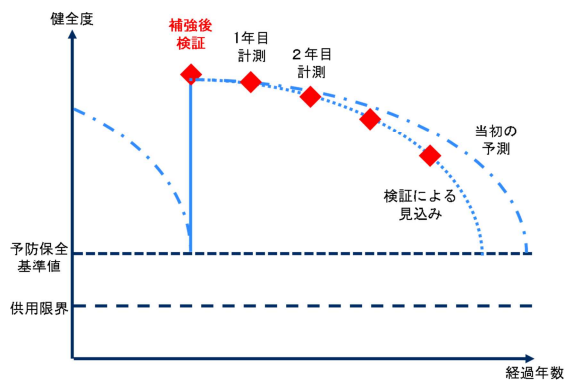
図 14 固有モードの解析イメージ

(2) 今後の展開

本検証が完了することにより、補強後の初期状態の剛性を明らかにでき、毎年計測・検証を実施することで、橋梁構造の劣化進行状況を確認できるようになる。

今後、長期的に計測のデータを蓄積し、橋梁の健全度や損傷発生との関係性を明らかにしていくことで、橋梁現状評価の指標として補修計画の見直しに活用できるものと考えている。

図 15 劣化状況確認イメージ



参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書維持管理編
- 2) 日本建設保全協会：スーパーホゼン式工法設計施工マニュアル
- 3) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領(図9路上図を参照)