

床版上面増厚工法による沿道環境改善対策

Environmental vibration measures by reinforcing method with overlaid concrete

阿川清隆*, 折口昌史**, 梶川康男***, 深田幸史****, 浜博和*****, 樺山好幸*****
Kiyotaka Agawa, Masafumi Orikuchi, Yoshiyuki Momiyama, Yasuo Kajikawa, Saiji Fukada, Hirokazu Hama

*西日本高速道路(株), 技術部 橋梁担当専門役, (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20 堂島アバンザ 19F)

**西日本高速道路(株), 茨木管理事務所改良担当課長, (〒567-0036 大阪府茨木市上穂積 4-10-1)

*** 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒921-1192 石川県金沢市角間町)

**** 博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒921-1192 石川県金沢市角間町)

***** (株)フジエンジニアリング, 調査設計部, (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

***** 博(工), 西日本高速道路エンジニアリング関西(株), (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-26)

A ground vibration problem was occurred in the object bridge. The vibration tests were carried out in order to investigate the cause of the vibration problem. As the results of the examination, it was clarified that it is necessary to repair the deck of the bridge. Then, the countermeasure work by reinforcing method with overlaid concrete was executed. This study evaluated the validity of the measure to compare the measured data of before and after measure. From the comparison, it was confirmed the effect of vibration reduction by the measure and the new road roughness.

Key Words: Environmental vibration, Reinforcing method with overlaid concrete

キーワード: 環境振動対策, 上面増厚補強

1. はじめに

我が国における高速道路は、名神高速道路栗東～尼崎間の供用が最も早く、昭和38年の供用開始から約48年が経過している。西日本高速道路株式会社が管理する橋梁に着目すると、10年後には供用後30年以上経過したものが全供用路線延長の39%程度を占めることになる。橋梁の変状・損傷等は、橋齢とともに進行するため、老齢化した橋梁を安全、安心して使用していくためには適切な維持管理が欠かせない。同時に、沿道環境の保全が大きなテーマになっている。特に都市内に建設された高架橋は、都市の発展に伴い住宅が近接していることが多く、従前より騒音、振動、低周波音といった問題の原因となる事例が見受けられる。これは橋梁の老齢化や当時の設計が現在のニーズと一致していないことも一因ではないかと考えられる。

振動や低周波音問題に関しては、様々な低周波音対策^{1)~4)}や付加減衰機構による振動低減対策^{5)~6)}、支承の構造変更による振動低減対策⁷⁾などについて研究が行われてきた。しかし、低周波音や振動の発生・伝播メカニズムが複雑であるため抜本的な対策が確立されておらず、沿道住民は厳しい住環境にさらされ、道路管理者は寄せら

れる振動苦情に苦慮しているのが実態である。このような地盤振動の問題を抱える地域において、主として環境改善を目的とした橋梁の床版上面増厚補強工事^{8)~9)}を実施しており、本稿はその施工と効果の概要を報告するものである。

2. 橋梁概要

対象橋梁は、都市内にある高架橋であり、供用後およそ48年が経過している。橋梁の周辺は住宅や事務所ビルが集中しており、近隣住民から騒音や振動に対する改善要求が出されている地区である。橋梁の上部構造は5径間連続のRC中空床版橋で、連続桁の端部は4本の柱を有する立体ラーメン橋台、中間橋脚はロッカーピアで構成されている。基礎構造のうち立体ラーメン橋台はケーソン、ロッカーピアは3列の杭基礎となっている(図-2)。当該橋梁においては、平成11年～13年にかけて耐震補強工事が実施されている。耐震補強は主として立体ラーメン橋台部を対象に実施しており、柱部の補強とともに、支承の交換、水平ダンパーを設置して免震化している。また、平成9年より順次、壁高欄補強の上、遮音壁を設置(高さ5m)しており、当該区間では平成14年に

すべて完了している。また、一部橋台においては伸縮装置を撤去して、床版上面を連続化する簡易連結を、平成11年～13年にかけて実施している。なお、今回の研究で対象としたA7橋台ならびにA8橋台はいずれも床版連結されている箇所である。

当該地域の地盤は、表層2.5m程度までは埋土層を含めた沖積層であるが、それ以深は砂礫層が主体の段丘堆積層が分布している。P24橋脚位置における深度約7mまでのN値は10～30程度である（図-1）。

3. 振動原因の究明

3.1 事前計測

当該地区では従来から振動苦情が発生していたが、平成14年に耐震補強および床版連結が完了した時点においても苦情が解消されなかったため、原因究明ならびに現況把握を目的とした調査を実施した。調査は、家屋脇の地盤上ならびに振動源と考えられる橋梁にも測点を配置して測定を行った（図-2）。地盤振動の測定は振動レベル計（RION製VM-53）、主版振動加速度はサーボ型加速度計（ミットヨ製V-401B）、たわみ変位と支承変位はひずみ変換式高感度変位計（東京測器研究所製CDP-25B）を使用した。データの収録はA/D（アナログ/デジタル）変換してパーソナルコンピュータの外部記憶

装置に記録した。なお、サンプリング周波数は200Hzとし、100Hzのアンチエイリアシングフィルターを使用した。

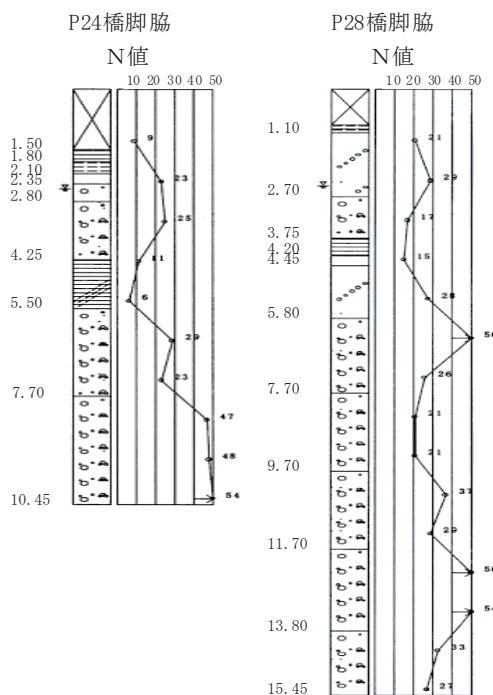


図-1 土質調査結果（平成15年実施）

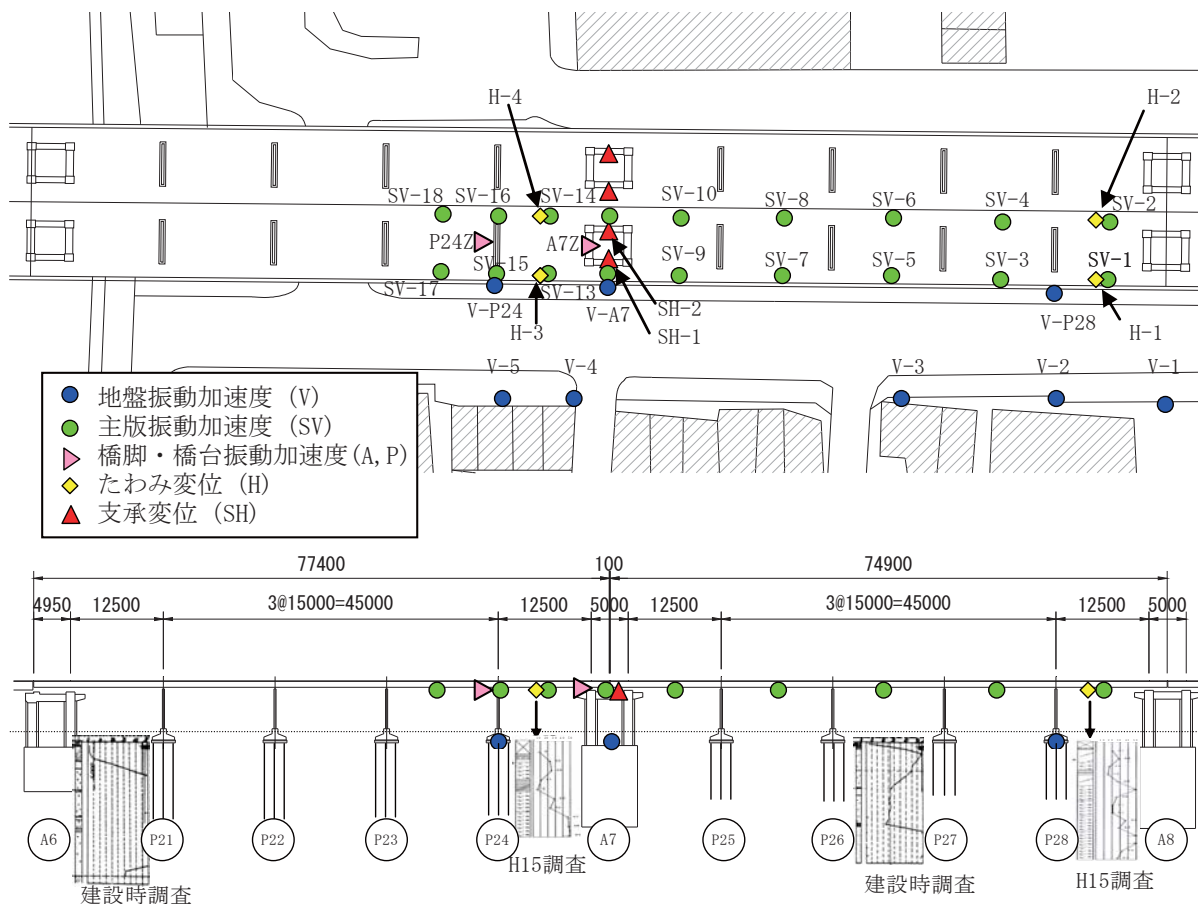


図-2 対象橋梁の一般図（単位：mm）

測定は通常走行している一般大型車ならびに総重量を196kNに調整した3軸ダンプトラック(試験車)による走行実験を行った。

(1) 振動レベルの状況

官民境界地盤上における振動レベルの大きさを L_{10} 値で評価したところ、46~47dB(いずれも夜間の平均値)の範囲で分布していた。これは、振動規制法で定める要請限度 60dB を大きく下回っている。一方、外乱の影響が比較的小さいと考えられる午前2時~6時の間で発生したピークレベルの発生頻度を計数したところ、一般的に体感閾値といわれる 55dB を超える振動が V-4 測点で 100 回以上、V-5 測点でも 80 回程度発生していることが確認された。

(2) 構造物の振動挙動と振動伝搬のメカニズム

実験では地盤振動と同時に橋梁上部構造のたわみ変位と振動加速度の測定を行った。図-3 に試験車走行時の代表測点の応答波形を示す。図中の支承変位 (SH-2) は、A7 橋台のゴム支承に着目して橋台と上部構造の相対変位を計測したもので、最大たわみ発生時点に概ね橋台直上を車両が通過している。各測点の応答波形をみると、車両が A7 直上を通過した直後に、上部構造に振動が生じ始めて、ロッカーピアである P24 橋脚から橋脚脇地盤、周辺家屋脇地盤そして家屋内へほとんど時間差無く伝

播していることがわかる。一方、A7 橋台上ならびに A7 橋台脇地盤における振動は小さく、周辺地盤へ与えるような振動は伝播していない。

次に図-3 の応答波形の周波数分析結果を図-4 に示す。主版振動 (SV-14) は 11Hz 前後の周波数で優勢な卓越が認められる。周辺地盤においても卓越する周波数は主版振動とほぼ同じで、主版に発生した振動がそのまま伝播している。なお、橋台上 (A7Z) および橋台脇地盤上 (V-A7) で発生している振動も卓越周波数は概ね同じであるが、振幅がロッカー橋脚脇 (V-P24) と比べて明らかに小さい。

(3) 基礎杭の健全性調査

振動測定の結果、立体ラーメン橋台脇に比べてロッカー橋脚脇の振動が極めて大きいことが確認された。この原因として、長期間の供用により、基礎杭やフーチングに損傷が生じている可能性が考えられた。このようなことから、対象橋梁のうち P24 ならびに P28 橋脚において橋脚脇を掘削して基礎の状態を確認および衝撃弾性波による非破壊調査を行い杭基礎の健全度調査を実施した(図-5)。また、あわせて P24 と P28 のロッカー橋脚脇でボーリング調査を実施した(図-1)。この結果、杭の状況は健全であり、フーチング下面の沈下などの異常は認められなかった(写真-1)。また、衝撃弾性波の計測結果より杭体に折損等の重大な損傷はないものと判断され、

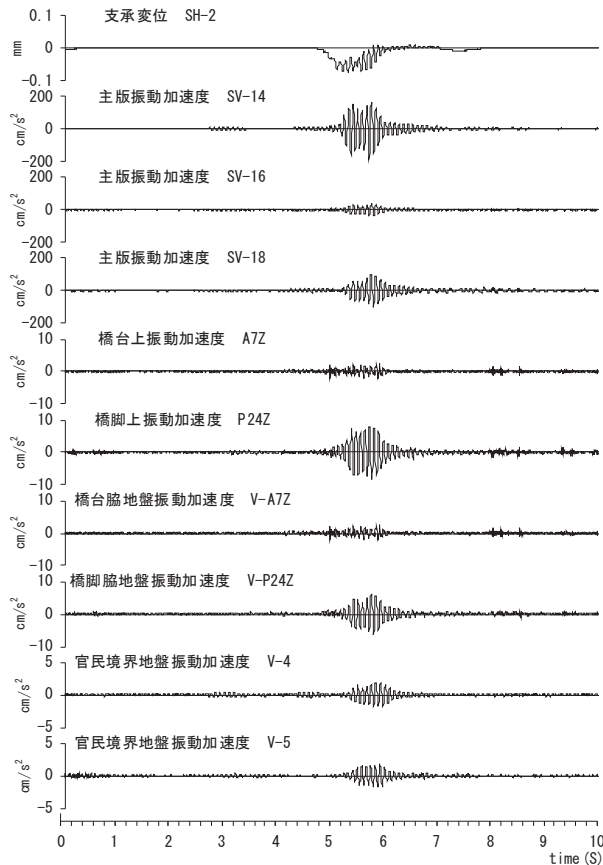


図-3 応答波形例

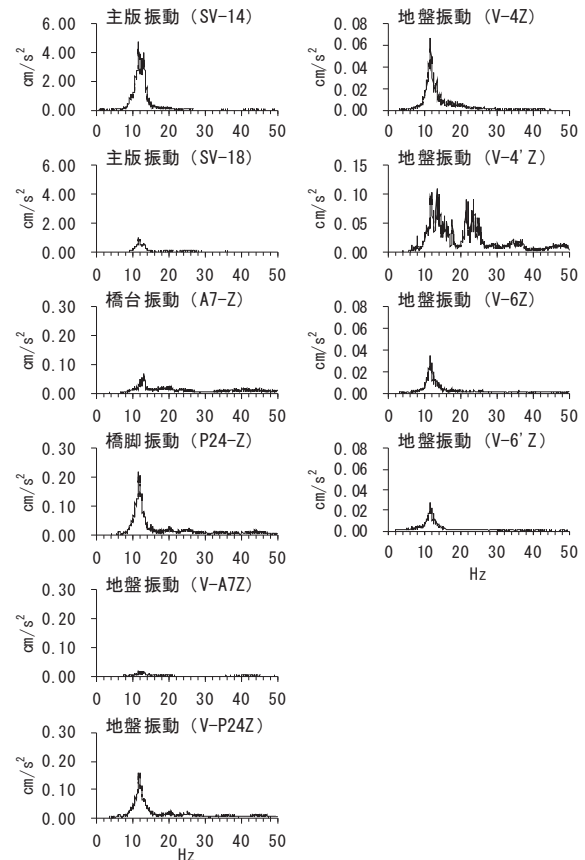


図-4 周波数分析結果

杭長も概ね図面の通りであった。したがって、下部構造よりも下には振動の原因となる損傷や変状はないと判断した。



写真-1 ロッカー橋脚基礎杭の状況

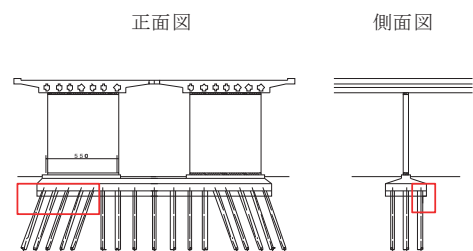


図-5 ロッカー橋脚基礎杭調査箇所

4. 対策工法

4.1 振動対策の選定

事前調査の結果から、当該橋梁周辺の地盤振動の主たる原因は、大型車が走行するときの主版の振動であり、これがロッカー橋脚を介して地盤に伝播していることが明らかとなった。そこで、振動対策の基本的な方針としては上部構造の制振を基本として、①床版上面増厚＋舗装平滑化、②上部構造に対する各種ダンパーの設置、③主版の連続化、④上部構造と下部構造の一体化を想定し、これらの中から最適なものをシミュレーション解析により求めた。当該橋梁は、短支間の径間が連続する構造であるため、振動に対して影響の大きいロッカー橋脚が連続して数多く存在する。このため、振動の予測にあたっては複数の橋脚からの影響を同時に評価する必要があるため、3連のモデル（図-6）を作成し、移動荷重列に

よる応答解析を実施した。なお、応答解析にあたっては、上部構造の剛性や支承部のバネ剛性などについては当該橋梁で実施した試験車による走行実験データに基づいて決定した。

以上のシミュレーション解析の結果、床版上面を増厚補強し、さらに路面の平坦性を向上させることが振動低減に対して効果が大きいことがわかった。

4.2 床版上面増厚工法の概要

床版上面増厚工法（以下「上面増厚」）は、既存の床版の上面に補強コンクリートを打設して、押抜きせん断耐力の向上を期待するものである。当該橋梁では、ロッカー橋脚である中間支点上の負曲げ応力度の低減も期待しており、増厚コンクリート中に鉄筋（橋軸方向 D22 ctc 125, 直角方向 D19 ctc 125）を配置している。このため、増厚コンクリート厚さは鉄筋かぶり厚が確保できる 10cm としている（図-7）。なお、既設床版の上側 1cm は劣化している可能性があるため切削して 10cm 増厚するため正確には 9cm の増厚となる。上面増厚工事における鉄筋の配置とコンクリートの打設状況を写真-2 に示す。

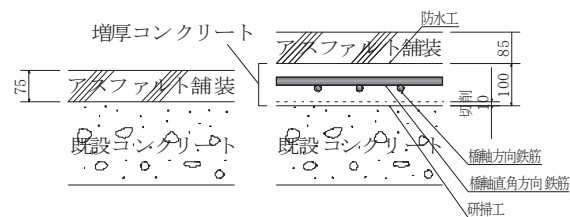


図-7 上面増厚工法の概念図



写真-2 床版上面増厚施工状況

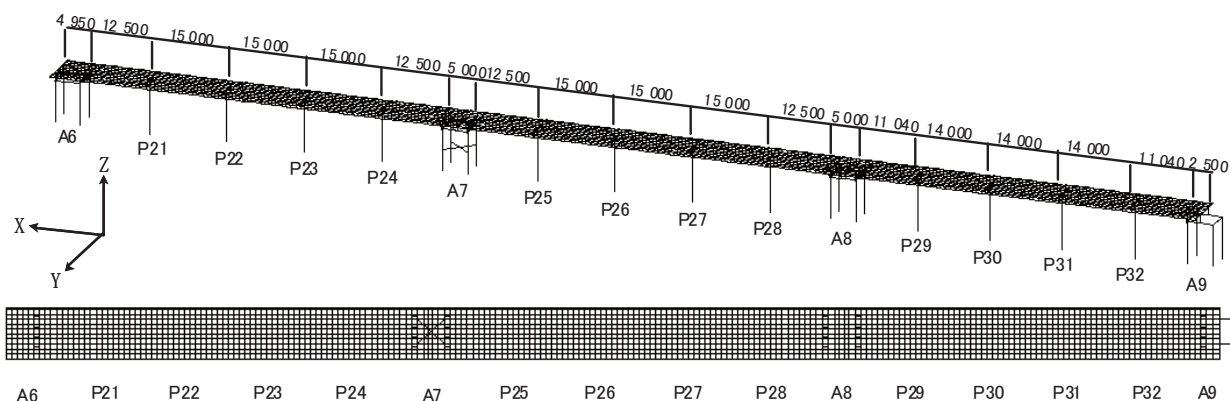


図-6 シミュレーション解析モデル

5. 対策効果確認実験

5.1 主版剛性の変化

試験車走行時の静的な主版たわみの変化を図-9に示す。なお、主版たわみ波形には橋梁または車両のバネ振動による動的な成分が含まれていた。このため、2Hzのローパスフィルターにより動的成分を除いた静的なたわみ量により評価し

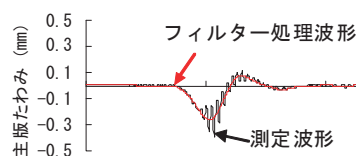


図-8 たわみ波形

た(図-8)。主版たわみを車線別に比較すると走行車線側よりも追越車線側が大きい。これは、走行車線側は壁高欄ならびに張出床版下面が補強されているのに対し、追越車線側は地覆が付いているのみで、付加剛性の影響が異なることと、路肩幅員の違いにより車両の走行位置が若干右に寄っているためであると考えられた。この傾向は増厚前後で変化はないが、いずれの車線を走行した場合もたわみ量は30%程度小さくなっていることが確認された。このことは、床版増厚により上部構造の曲げ剛性が向上したことを示しており、静的な解析結果を概ね反映した結果である。

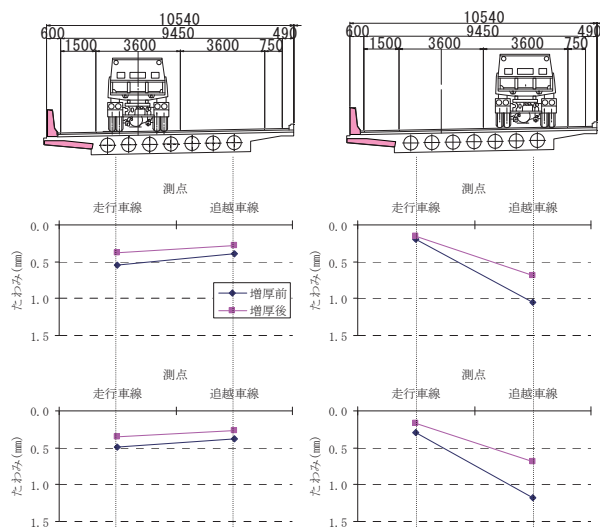


図-9 試験車載荷時のたわみの変化

5.2 主版振動加速度的分布

主版の振動は主版の固有振動と加振する車両の振動特性による影響を受けるため、必ずしも重量や速度に比例しない。このため、試験車通過時の振動振幅が必ずしも大きくなるわけではないため、一般車に着目して前後比較を行った。これは対策前後ともに地盤振動が大きくなるケースに着目して各径間の振動加速度最大値を求めた結果である。図-10に示したように、上部構造の振動は20~200cm/s²に分布しており、径間によって大きく異なっている。特に橋台を乗り越えた直後の径間の振幅

が大きく、この傾向はA7橋台において顕著である。その振幅は上面増厚後に大幅に小さくなっていることが確認された。

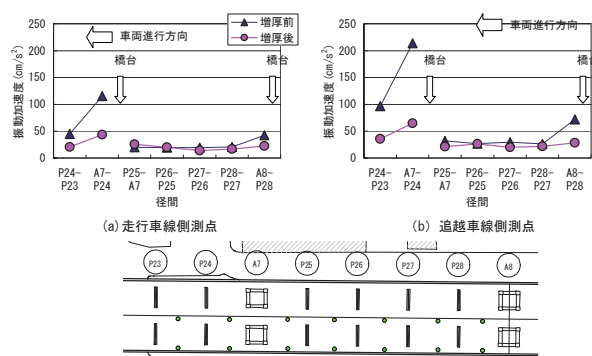


図-10 主版振動の低減効果

5.3 主版振動特性の変化

図-11は主版振動のフーリエ変換(以下「FFT」)による周波数分析結果を示したものである。上部構造の卓越周波数は、径間によってわずかに異なるが、概ね11~12Hzで一定である。上面増厚前後の変化をみると、卓越周波数は全体に若干高い方向へ変化している傾向にあるが、大きな変化はしていないといえる。なお、上面増厚によって剛性が向上することにより、周波数は高い方向へ変化するが、逆に上面増厚による死荷重増加は周波数が低くなる方向へ作用するため、両者が相殺された結果、卓越周波数そのものに顕著な変化がみられなかったものとする。なお、固有値解析においてもほぼ同様の結果が得られている。

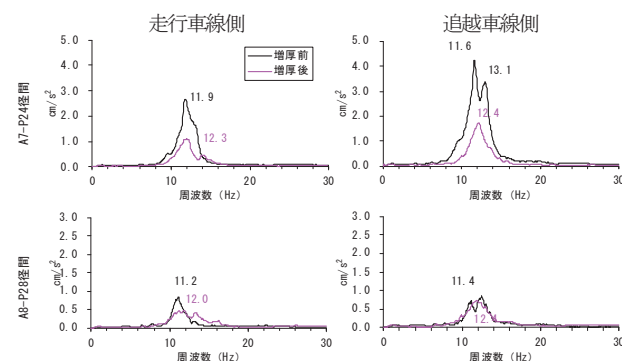


図-11 主版振動の周波数分析結果

5.4 上部構造振動モードの変化

上部構造の振動モードを固有値解析と実測値で比較した結果を図-12に示す。当該橋梁は複数径間が連続する形式を有しているため、複数の振動モードが存在し、周波数によってその形状が異なったものとなる。当該橋梁の周辺の地盤振動は12.5Hzの成分が卓越するため、この周波数に対する橋梁の振動モードを求めた結果、図-12に示すように橋台に隣接した径間の振動が大きくなる傾向が確認され、ロッカー橋脚を挟んで前後の径間が

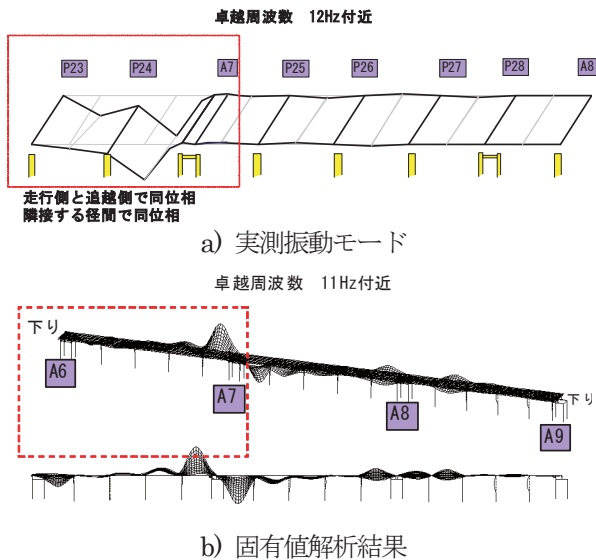


図-12 振動モードの解析結果

同じ位相を示すモードであることが確認された。これは解析によってもその存在が確認されており、地盤振動に対してはこのモードの振動が影響しているといえ、その傾向は増厚後においても変化していないことが確認された。

5.5 路面平坦性

橋梁の振動や周辺地盤振動に対しては舗装路面の凹凸状態の影響が大きいことが指摘されている。当該橋梁

区間では、前述したように対策前の状態においてすでに床版の簡易的な連結がされており、舗装は比較的平坦であったと考えられる。しかし、本工事では舗装を撤去して新たに舗装を施工しているため、路面凹凸の状態が変化することが想定されたため、舗装の平坦性について確認を行なった。舗装の平坦性は試験車に加速度センサーを取り付けて橋梁上を一定速度で走行させて、このときのバネ振動の応答を計測して増厚前後で比較して評価した。図-13 は試験車におけるバネ振動の測定箇所を示したもので、図-15 はその測定結果の一例を示したものである。車両バネ振動の測定結果から、上面増厚する前はA7橋台部のほか振幅が大きくなっている箇所が複数箇所で見られる。A7橋台部では上面増厚前の測定よ

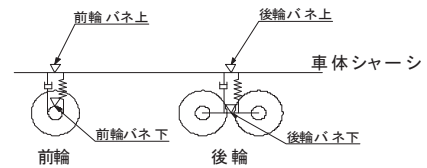


図-13 車両バネ振動の測定状況



写真-3 上面増厚前の損傷状況（増厚前）

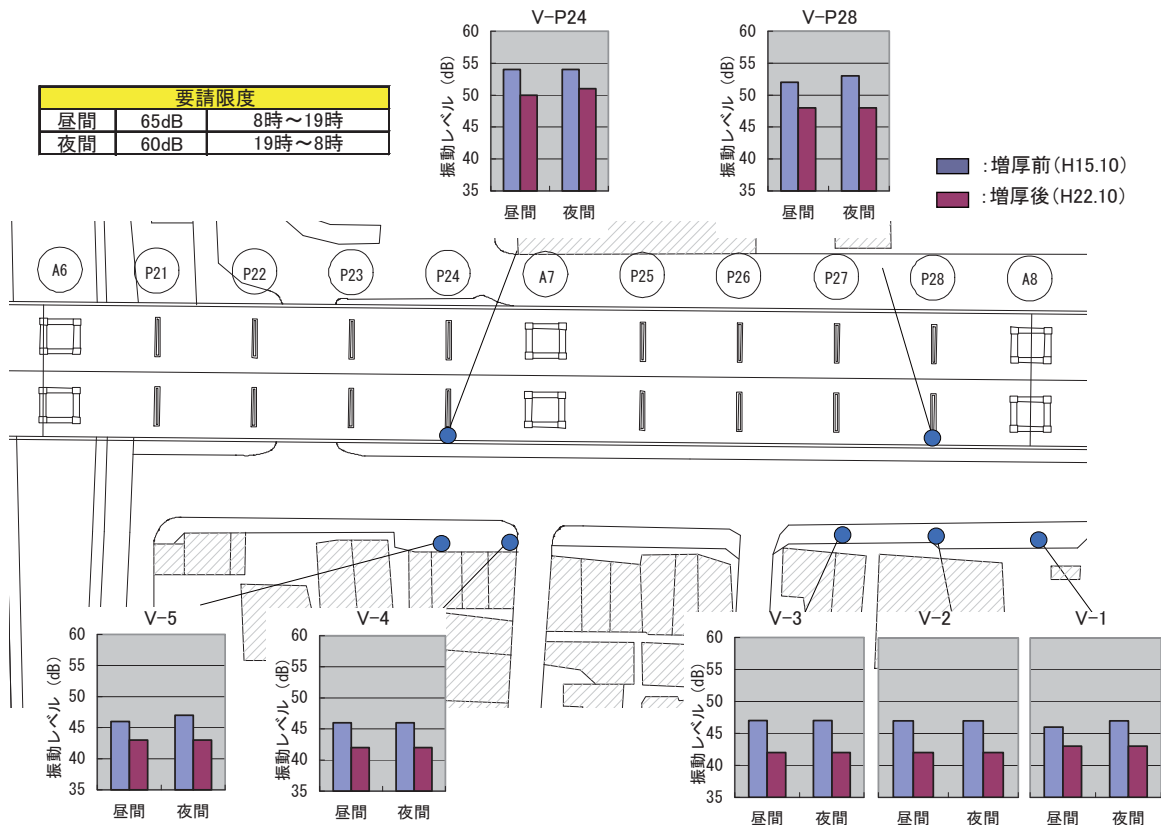


図-14 振動レベルの分布

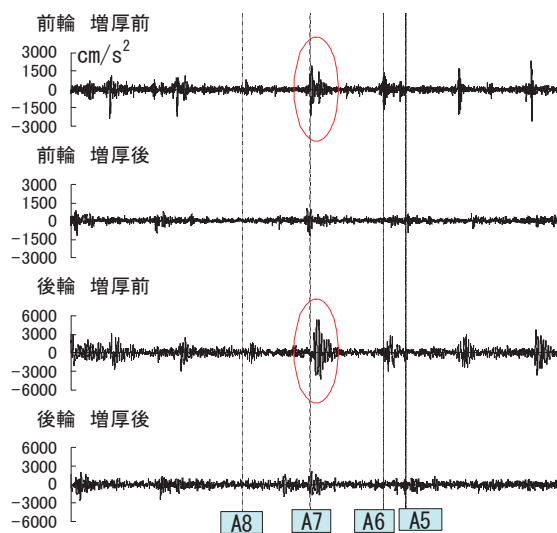


図-15 バネ下振動の分布と前後比較

り以前に簡易連結されており、ジョイントは撤去されていたが簡易連結部には局部的に側方流動が生じている箇所があった（写真-3 左）。また、ジョイント部以外の場所でも、ボイドの浮き上がり等に起因すると考えられる床版上面の損傷が認められ（写真-3 右）、これらの損傷を原因とする舗装のポットホールが頻発していた。このような、舗装の流動によるわだちや床版上面の損傷が振動原因となっていた可能性が高い。

5.6 地盤振動の低減効果

橋梁周辺の地盤振動の大きさの変化を L_{10} で評価した結果、全般的に低減傾向を示しており、3～5dBの低減効果が確認された（図-14）。

6. まとめ

振動問題が生じている RC 中空床版橋において、床版上面増厚による補強工事を実施した。工法の採用については、事前の振動実験ならびにこれに基づくシミュレーション解析を行い振動低減効果の予測を行った。さらに工事完了後には確認のための調査を実施した。一連の改良工事で確認された知見を以下に示す。

- ・対策を行う前の官民境界地盤上の振動レベルを L_{10} で評価すると 45～46dB と要請限度(60dB)を下回っており、振動の評価結果と振動苦情の関係が必ずしも対応していない。
- ・事前調査の結果、周辺地盤上振動と上部構造振動の周波数ならびに発生時刻が一致しており、地盤振動は上部構造の振動の影響を強く受けていることが確認された。
- ・地盤振動はジョイントのある立体ラーメン橋台（基礎はケーソン）ではなく、隣接するロッカーピア（基礎は CCP）から伝播している。ただし、ロッカー橋脚の基礎に振動の原因となる損傷はなく、これは当該

構造のもつ特異な現象であると考ええる。

- ・床版上面増厚補強では、床版の上面側 10mm を切削し、鉄筋を配置して 100mm 増厚している。これによる剛性向上によりたわみ量は 70%程度に低減されると想定されたが、実測でも同程度のたわみ低減が確認された。
- ・上面増厚により主版の卓越周波数に著しい変化はみられなかったが、振動加速度振幅は大きく低減した。これにより周辺の地盤振動も 3～5dB の低減が確認された。
- ・地盤振動の低減の原因として、主版の剛性増加に加えて、路面平坦性改善効果の影響が大きいと考える。現在のところ、振動低減に対するそれぞれの寄与率は明確でなく、今後それぞれの影響程度を明確にしていくなが必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 生田目尚美, 金哲佑, 畑中彰秀, 川谷充郎: ノージョイント化による鋼トラス橋の振動低減効果の検討, 鋼構造論文集, 第 16 巻, 第 62 号, pp.1-10, 2009.6.
- 2) 畔柳昌己, 高橋広幸, 上東泰, 安藤直文, 篠文明: 鋼桁橋のコンクリート床版から発生する騒音・低周波振動問題への対策—第二東名高速道路 刈谷高架橋環境対策工事—, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.369-374, 2009.10.
- 3) S. Fukada, Y. Kajikawa, M. Sugimoto, H. Hama and T. Matsuda: Characteristics of vibration and low frequency noise radiated from the highway bridge and countermeasure, Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, (on CD-ROM) ENV11-001-IP, 2007.9.
- 4) H. Hama, S. Fukada, M. Sugimoto, H. Ishida and M. Yamada: Characteristics of infrasound radiated from the continuous short spans bridge due to running trucks, Proceedings of Low Frequency 2008, pp.27-34, 2008.10.
- 5) 深田幸史, 吉村登志雄, 岡田徹, 薄井王尚, 浜博和, 岸隆: 高架橋周辺の環境振動問題に対する桁端ダンパーの適用, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.329-342, 2009.3.
- 6) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田知孝: 道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.237-250, 2010.3.
- 7) 浜博和, 深田幸史, 梶川康男, 松田哲夫, 宮本雅章: RC 中空床版高架橋の周辺で生じた環境振動に対する低減対策, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.252-261, 2011.3.

- 8) 浜博和, 西山晶造, 西岡昌樹, 深田宰史, 松田哲夫, 杵本正信: 都市内高速における床版上面増厚による環境対策工事, 橋梁と基礎, Vol.42, No.6, pp.43-48, 2008.6.
- 9) 西岡昌樹, 織田広治, 西山晶造, 松田哲夫, 長岡誠一, 浜博和: 周辺環境に考慮した超早強コンクリートによる RC 中空床版の上面増厚工法, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.151-156, 2008.4.