

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

Prevention measure for the environmental vibration occurring near the RC hollow slab highway bridge

浜博和*, 深田宰史**, 梶川康男***, 松田哲夫****, 宮本雅章*****

Hirokazu Hama, Saiji Fukada, Yasuo Kajikawa, Tetsuo Matsuda and Masaaki Miyamoto

*株式会社 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), 金沢大学准教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

***工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (同上)

****前 西日本高速道路株式会社, 技術部 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

*****西日本高速道路株式会社, 関西支社吹田管理事務所 (〒567-0043 大阪府茨木市大字小坪井 527-12)

Environmental vibration caused by the ground vibration and the infrasound transmitted from the highway bridge occurred at the houses near the RC hollow slab highway bridge. Examinations were carried out to investigate the vibration characteristics of the bridge due to running trucks. According to the results of the examinations, it is clear that the bridge vibration generated by the deformation of the elastic shoes was transmitted to the houses near the highway bridge as ground vibration and infrasound. Therefore, the elastic shoes were removed and the abutment was changed to the rigid frame structure as a prevention measure. The validity of the prevention measure was confirmed by comparing the monitoring data before and after the prevention measure.

Key Words : Environmental vibration, Vibration characteristics, Vibration level

キーワード : 環境振動, 振動特性, 振動レベル

1. まえがき

平成21年度末現在, 西日本高速道路株式会社の管理する路線延長は3,360kmであり, このうち約17%は橋梁区間が占めている。土地有効活用の観点から今後も益々橋梁の占める割合が多くなると考えられる。また, 都市化の進行に伴い, 高速道路の直近まで住居が建設されている例が多く見られるようになった。そのため, 橋梁を振動源とする騒音, 振動および低周波音等の環境振動問題¹⁾が顕在化し, これが周辺環境へ与える影響は必ずしも小さいとはいえず, 橋梁と周辺住民との共存が解決すべき重要な課題となっている。

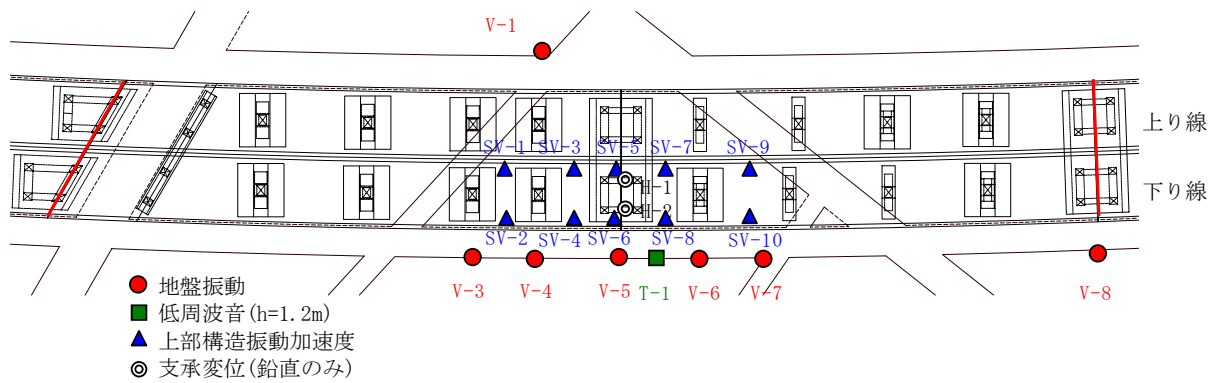
騒音問題に関しては, 平成5年に公害対策基本法が廃止されるとともに, 現在の環境基本法が制定され, その後, 環境基準値が従来よりも厳しい方向に見直された。これにより, 車両単体での対策はもとより, 都市計画段階での対応やロードプライシングなどの対応とともに, 道路構造物側での対応として高機能舗装の導入や遮音壁の嵩上げなどが精力的に行われている。これらの対策が奏功して騒音問題

については, 全国的にみても改善傾向にある。

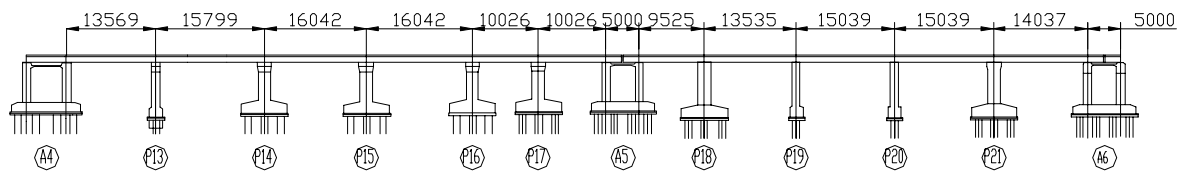
しかしながらその一方で, 交通量の増大, 車両の大型化や橋梁の老齢化²⁾により顕在化しつつあるのが地盤振動や低周波音による問題である。

これまで車両振動と橋梁振動の共振に起因する振動苦情に対する対策として, 様々な低周波音対策³⁾⁻⁶⁾や付加減衰機構による振動低減対策⁷⁾⁻⁸⁾などについて研究が行われてきた。これらの振動問題には, 橋梁構造, 路面の平坦性および橋梁立地環境など様々な要因が影響するため, 画一的な対策工法が確立されていないのが実情である。

本論文では, 地盤振動や低周波音苦情が発生していたRC中空床版構造を有する高架橋を対象として, 振動調査を行い, 当該橋梁固有の特殊な振動モードが, 苦情の原因であることを明らかにした。これに対する振動対策として上下部構造を一体化するラーメン化工法を提案し, 車両走行シミュレーション解析により振動低減効果を予測した。また, 対策前中後の振動測定の結果から, 振動改善効果を確認し, ラーメン化工法の妥当性を検証した。



(a) 平面図



(b) 側面図 (下り線)

図-1 対象橋梁の一般図と測点配置図 (単位: mm)

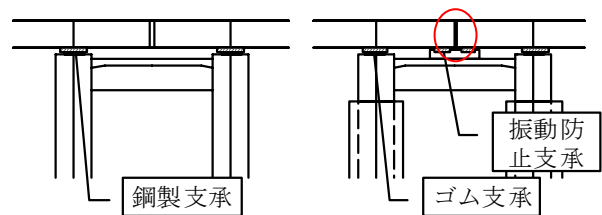
2. 対象橋梁

本研究で対象とする橋梁を図-1に示す。対象橋梁は、都市内に位置する高架橋であり、上部構造形式はRC中空床版橋、下部構造のうち中間支点はピン構造を有するRC橋脚、径間端部は4本の柱を有する立体ラーメン橋台(写真-1参照)である。各径間の支間長は9.5~16.04mで、A6橋台からA5橋台までの橋長は約72m、A5橋台からA4橋台までは約84mである。当該橋梁はこのようなRC中空床版橋が連続する区間である。

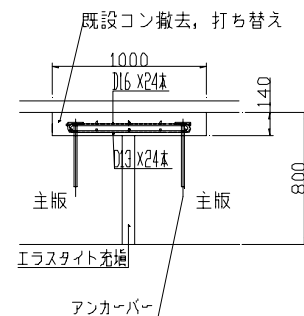


写真-1 立体ラーメン A5 橋台 (ラーメン化後)

対象橋梁における立体ラーメン橋台上の支承構造は、建設時(1963年)には図-2(a)に示すように柱直上に支承が設置され、橋台の中心まではカンチレバー構造となっていた。しかし、振動が大きかったことから、初期の段階において図-2(b)に示すように張り出し先端部に振動防止支承が追加された。また、柱直上の支承は、当初、鋼製線支承であったが、耐震補強工事により積層ゴム支承に変更された。



(a) 建設当時(1963年) (b) 振動防止支承設置時



(c) 簡易床版連結構造 ((b)の丸部分)

図-2 立体ラーメン橋台上の支承構造図

さらに、平成7年の兵庫県南部地震により、下り線側のA5橋台の柱にせん断破壊が生じたため、RC巻き立てによる補強を行っている。また、中間橋脚についても一部増杭して橋脚の耐震補強を行っている。

対象橋梁の周辺環境においては、震災以前にはほとんど苦情はなく、震災後も局所的な苦情が生じている程度であった。しかし、平成12年頃から振動苦情が顕在化するようになった。最初は、遮音壁を3mから5mに嵩上げするための改築工事に伴うも

のであった。これは、左路肩を車線規制し、通行帯を全体的に右側に移動させたことが原因と考えられる。しかし、車線規制を解除した後も苦情は沈静化しなかった。その要因として、遮音壁の改築による死荷重の変化が影響している可能性も考えられるが、改築前の測定データがないため詳細は不明である。さらに、遮音壁の改築で騒音が小さくなり、マスキング効果が薄れたことが原因となって振動を感じ易くなった可能性も考えられる。

このような状況に対する振動対策として、伸縮装置を撤去して、床版の一部を連続化する簡易床版連結（図-2(c)参照）を行っている。同時に、前後のジョイントから一括して舗装を舗装しており、顕著な舗装の凹凸はなかったものと考えられるが、苦情の沈静化には至らなかった。

このため、上部構造の振動挙動と地盤振動ならびに低周波音の詳細な調査を実施し、振動発生源と伝播経路を特定して対策工法の検討を行うことにした。

3. 振動原因の究明

3.1 振動測定

対象橋梁における振動の発生原因を究明するため、橋梁周辺地盤の加速度（振動レベル）、低周波音とあわせて橋梁のたわみおよび加速度を計測して、地盤振動発生時の上部構造と周辺地盤の振動挙動を把握した。図-1(a)に測点配置図を示す。なお、地盤振動については、苦情が集中している下り線側に測点を集中して配置した。

振動調査の結果によると、大型車両が走行車線を走行してA5橋台直上を通過した時、図-3に示すようにA5橋台直近の官民境界地盤（測点：V-5）において、加速度のピークが発生し、そのときの上部構造の振動モードは、A5橋台が腹になる振動モードが卓越していることを確認した。

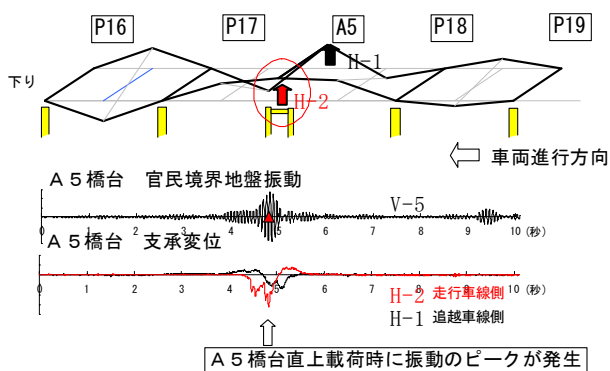


図-3 走行車線通過時の振動波形と振動モード

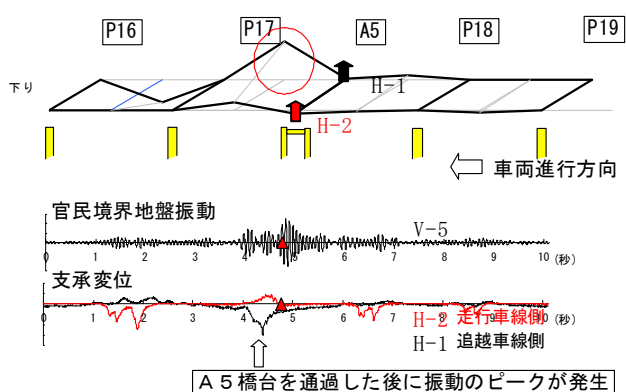


図-4 追越車線通過時の振動波形と振動モード

一般的には、支点部は振動の節となり、大きな振動は生じないはずであるが、支点部が腹となる振動モードが卓越していた。これは、橋台上の支承を鋼製支承からゴム支承に変更したことによるゴム支承の弾性変形が主要因と考えられる。これに加えて遮音壁の設置により走行車線側の死荷重反力に不均衡が生じていたことも要因として考えられる。なお、支点部が腹となる振動モードは必ずしも全ての大型車が走行車線を通過した時に発生したのではなく、車両のばね下振動数が当該モードの振動数に近接したケースで発生していたものと考えられる。

次に、大型車が追越車線を走行した場合、図-4に示すように、車両がA5橋台を通過して隣接径間上を走行している時、A5橋台直近の官民境界地盤において、加速度のピークが発生していた。これは、主としてA5～P17径間のたわみ振動モードであることを確認した。

地盤振動のピークレベル（ L_{max} ）が55dBを超える有感振動を対象として、発生原因の分類をした結果、約90%が走行車線を通過した時に発生したものであった。したがって、橋台上で発生する図-3に示す上部構造の振動が地盤振動に対して影響を与えていることを確認した。

3.2 固有振動解析

対象橋梁において卓越していた振動モードを解析からも確認するために固有振動解析を行った。解析モデル全体図を図-5に、詳細図を図-6に示す。本研究では、対象とするA5橋台を中心にして前後のA4橋台～A6橋台間、計11径間をモデル化した。

上部構造の中空床版部は梁要素に分割して格子状にモデル化した。また、走行車線側の張り出し床版下面のみ増厚補強を行っており、それらも剛性に考慮している。壁高欄および地覆は、剛性と重量を梁要素として考慮した。また、舗装は、重量のみ考慮している。

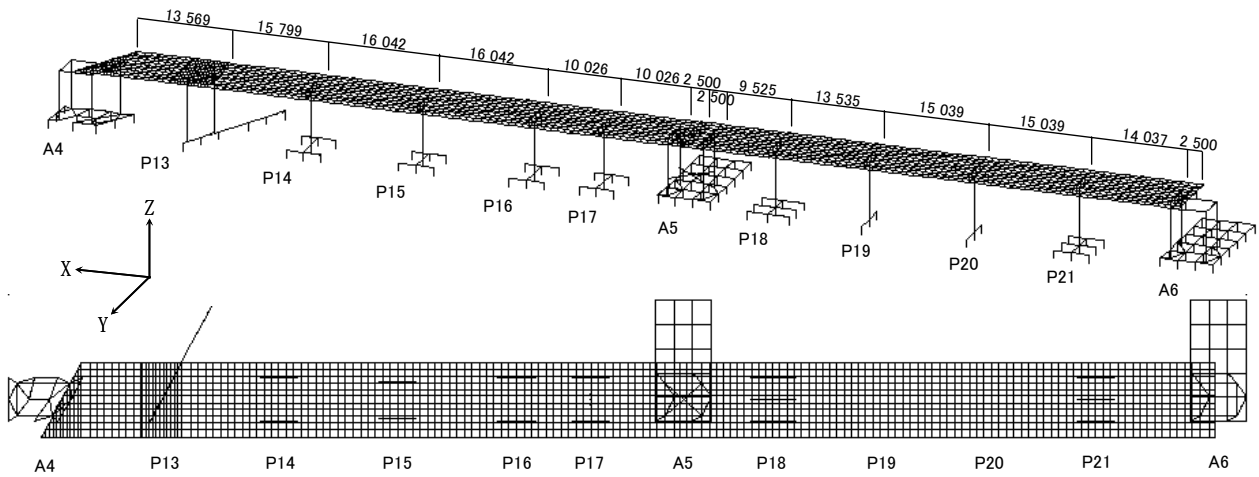


図-5 解析モデルの全体図 (単位 : mm)

メナーゼヒンジを有する RC 橋脚と上部構造との接合部は、微小振動を取り扱っていることを考慮して、本解析では剛結としてモデル化した。また、基礎においては、フーチング下端を固定して扱った。

ゴム支承および振動防止支承においては支承部で計測した変位波形をもとにしてばね要素にモデル化した。解析に用いた支承のばね定数を表-1に示す。

表-1 支承のばね定数

		ゴム支承	振動防止支承
橋軸	kN/m	7.22×10^4	5.23×10^4
橋軸直角	kN/m	7.22×10^4	5.23×10^4
鉛直	kN/m	1.14×10^6	7.30×10^5
橋軸まわり	kNm/rad	1.26×10^4	1.94×10^3
橋軸直角まわり	kNm/rad	1.61×10^3	1.94×10^3
鉛直まわり	kNm/rad	9.86×10^1	4.19×10^1

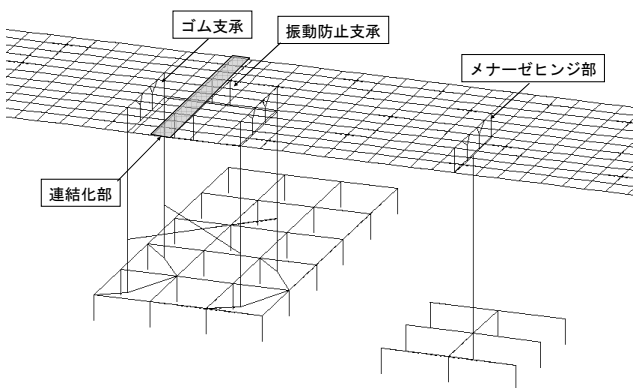
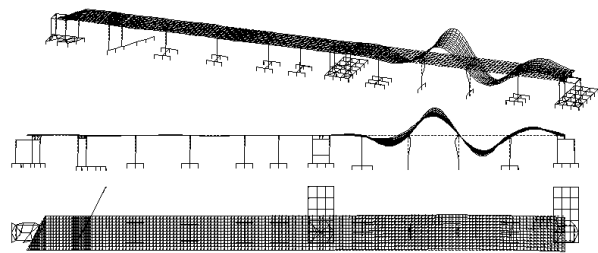


図-6 解析モデルの詳細図

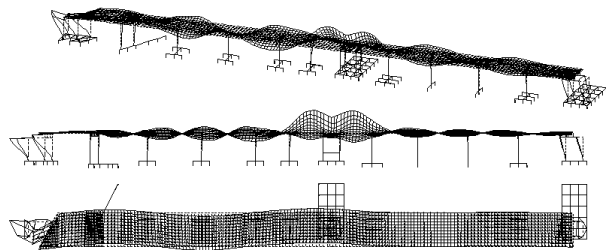
この解析モデルを用いた固有振動解析の結果のうち、主な振動モード図を図-7に、実測の振動数との比較を表-2に示す。

対策前における実測での最低次たわみ振動モー

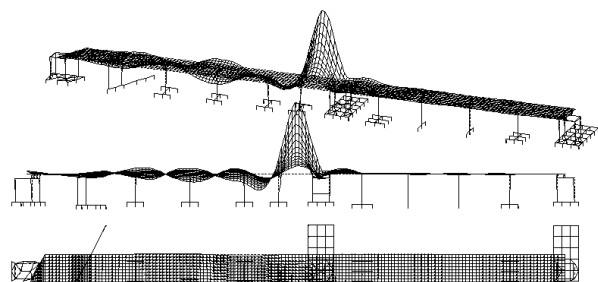
ドは 7.5Hz に卓越が見られた。これに対して、解析では 7.76Hz (図-7(a)) となっており、概ね一致することを確認した。



(a) 最低次たわみ振動モード (7.76Hz)



(b) 走行車線通過時の振動モード (13.80Hz)



(c) 追越車線通過時の振動モード (15.60Hz)

図-7 解析モデルの全体図

表-2 振動数の比較 (単位:Hz)

振動モード	実測	解析
最低次たわみ振動	7.5	7.76 (図-7(a))
走行車線通過時の振動モード	13~15 (図-3)	13.80 (図-7(b))
追越車線通過時の振動モード	14~15 (図-4)	15.60 (図-7(c))

当該地域の地盤振動として最も影響が大きいと考えられる A5 橋台上の支承部が腹となる振動モード (図-3) の振動数は 13~15Hz であり、実測値では通過する車両によって若干変動していた。それに対して、解析値では 13.80Hz (図-7(b)) が得られており、モード形状も一致する傾向を示した。

さらに、追越車線を通過した時に卓越する振動モード (図-4) の振動数は、実測値 14~15Hz に対して解析値では 15.60Hz (図-7(c)) となっており、モード形状が一致した。全体的に解析値の方が大きい理由として、地盤条件を固定にしたことが理由として挙げられる。

なお、実測において、大型車両が走行車線を通過した場合と追越車線を通過した場合で卓越する振動モードが異なった理由として、走行車線側と追越車線側のモード振幅の相違が挙げられる。その要因として、走行車線側 (民地側) のみ、壁高欄の補強や遮音壁の改築を行っていることや、これに伴う張り出し床版の下面増厚補強により、走行車線側と追越車線側で主版の曲げ剛性や支承反力の不均衡が生じたことが考えられる。

4. 振動低減対策

4.1 ラーメン化工法

振動対策は、①振動源対策、②伝播経路上対策、③受振点対策に大別できる。当該地区においては、構造物と対象家屋の間に対策が可能な用地が確保できなかったこと、また振動苦情家屋が複数件あり個別の対応が困難であったことから、原則として①振動源対策⁹⁾を検討した。

そこで、振動対策として、当該地域の地盤振動として最も影響が大きいと考えられる A5 橋台上の支承部が腹となる振動を抑制する方法を検討することにした。具体的には、ゴム支承を鋼製支承 (BP-B 支承) や機能分離支承に交換することを考えたが、供用中の支承の交換は施工が極めて困難であると判断された。このため、上部構造と下部構造の間にモルタルを充填し、支承の弾性変形による振動を抑制することにした。また、気温の変動等によって、

充填したモルタル部から上側の上部構造が浮き上がることを防止するため、図-8 に示したコンクリート製のブラケットを介して上部構造と下部構造を PC 鋼棒で緊張して一体化させるラーメン化工法を採用することにした。これにより、鉛直ならびに水平方向への変位が拘束されるが、当該橋梁は床版連結されている関係で、当該橋台付近が温度伸縮の中心になるため、気温変動による水平方向の変位はほとんど生じないことを確認している。また、地震による水平力は立体ラーメン橋台以外の橋脚で負担する構造となっており、ラーメン化による耐震性能への影響はほとんどないと考えられる。

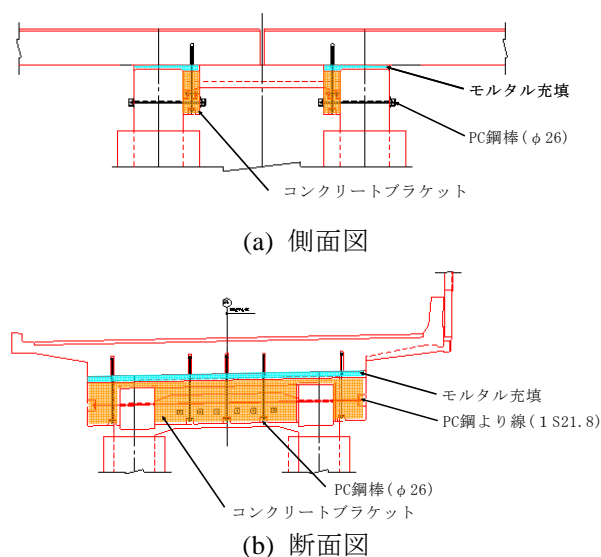


図-8 振動対策 (ラーメン化工法)

4.2 舗装改良工事

ラーメン化の施工が完了した後、舗装の平坦性を向上させることを目的として、上下線ともに当該区間の舗装打ち替えを実施した。あわせてジョイントの交換 (簡易鋼製ジョイント) を実施している。なお、段差を極力小さくするため、ジョイントは舗装切削前に撤去し、遊間上も連続的に舗装した後に新たに設置した。また、A6 についても前後の平坦性を確保するため、A6 よりも約 10m 延長して舗装を行った。

5 対策効果の予測

5.1 ラーメン化後の振動特性

上部構造と下部構造を一体化させたラーメン構造にした時の解析モデル上での固有振動特性を調べた。その結果、最低次の振動モードは図-9 に示したように振動モード形状に大きな変化は見られなかったが、A5 橋台部での支点の拘束により固有振動数が 7.76Hz (図-7(a)) から 7.81Hz と若干高くなった。

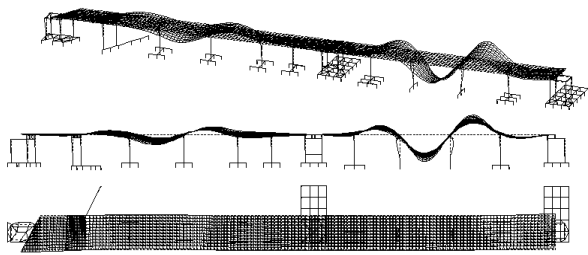
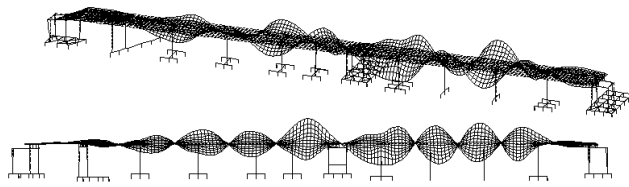
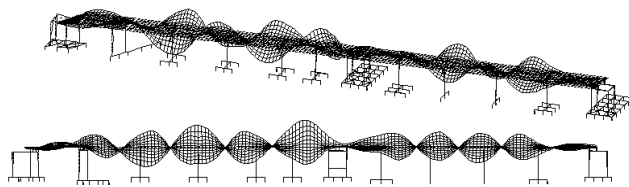


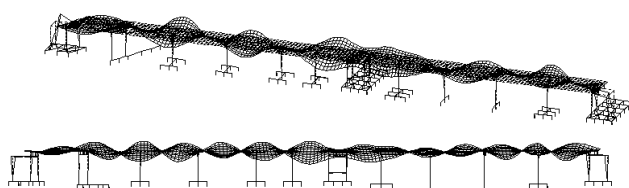
図-9 ラーメン化後の最低次振動 (7.81Hz)



(a) 15.60Hz

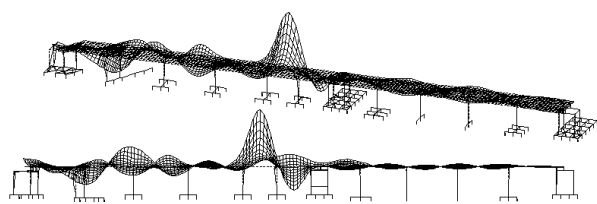


(b) 15.74Hz

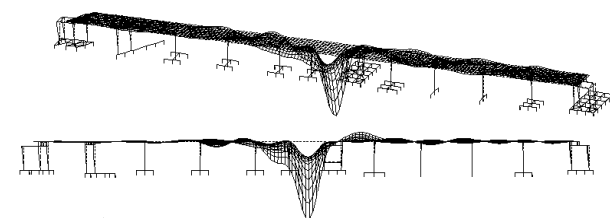


(c) 15.85Hz

図-10 ラーメン化後のたわみ振動(15Hz 付近)



(a) 17.99Hz



(b) 19.42Hz

図-11 ラーメン化後の振動モード(17-19Hz 付近)

対策前において地盤振動への影響が大きかった走行車線通過時に卓越していた支承部を腹とする振動モード(図-7(b))は、ラーメン化後において、対応する振動モードが発現しなくなった。しかし、その代わりに図-10 に示すような振動数の近接した新たな振動モードが出現するようになった。

一方、追越車線通過時に卓越していた、振動モードについては、対策前の 15.60Hz(図-7(c))に対して、ラーメン化後では類似した振動モードが2つ存在し、図-11 に示したとおり 17.99Hz および 19.42Hz が出現していた。いずれも対策前に比べて明らかに固有振動数は高くなっていった。

5.2 車両走行シミュレーション

ラーメン化対策に伴う振動低減がどの程度見込めるのかを車両走行シミュレーションにより予測することにした。

車両走行シミュレーションでは、Newmark β 法(時間間隔 0.01sec, $\beta=1/4$)による直接積分法を用いて各測点の応答値を算出した。また、シミュレーションに用いた車両モデルを図-12 に示す。

車両モデルは、一般の大型車両によるばね下振動(Type1:14Hz, Type2:16Hz)の違いを考慮して2種類作成した。その諸元を表-3 に示す。

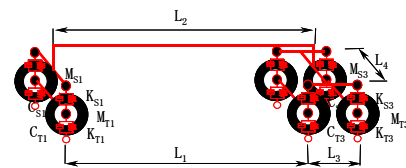


図-12 車両モデル

表-3 車両モデルの諸元

項目	記号	単位	Type1	Type2
車両総重量		kN	196.0	196.0
前輪				
ばね上質量	M_{S1}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec}^2)$	2.175	2.175
ばね上ばね定数	K_{S1}	kN/m	343.0	343.0
ばね上減衰係数	C_{S1}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$	2.940	2.940
ばね下質量	M_{T1}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec}^2)$	0.325	0.325
ばね下ばね定数	K_{T1}	kN/m	1470.0	1470.0
ばね下減衰係数	C_{T1}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$	0.098	0.098
後輪前軸・後輪後軸				
ばね上質量	M_{S2}, M_{S3}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec}^2)$	2.970	3.120
ばね上ばね定数	K_{S2}, K_{S3}	kN/m	1960.0	1960.0
ばね上減衰係数	C_{S2}, C_{S3}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$	14.70	13.72
ばね下質量	M_{T2}, M_{T3}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec}^2)$	0.780	0.630
ばね下ばね定数	K_{T2}, K_{T3}	kN/m	3920.0	3920.0
ばね下減衰係数	C_{T2}, C_{T3}	$\text{kN}/(\text{m}/\text{sec})$	0.098	0.098
前輪-後輪前軸間	L_1	m	3.200	3.200
前輪-後輪中心間	L_2	m	3.850	3.850
後輪後軸間	L_3	m	1.300	1.300
左右車輪間	L_4	m	2.000	2.000

車両走行シミュレーションに用いる路面凹凸データは、当該区間においてラーメン化工事以前に行われていた舗装改良工事の際に3mプロフィールメー

タにより計測した路面凹凸を用いた。解析に用いた路面凹凸波形(追越車線, 走行車線の左右車輪位置)を図-13に示す。計測した路面凹凸は基準梁(3m)で計測しているため, 凹凸周期によっては実際の路面凹凸を現していない場合があるため, 計測した路面凹凸を実際の路面凹凸に近似変換¹⁰⁾した。

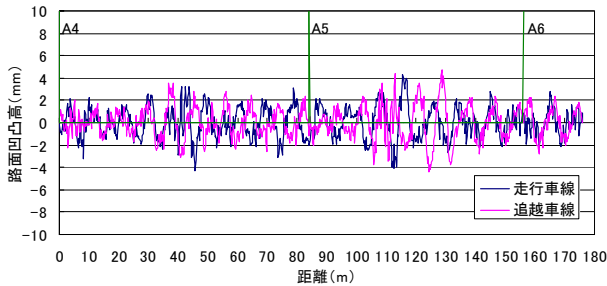


図-13 路面凹凸波形

解析で仮定した減衰については, 対策前後における解析モデルのひずみエネルギー比を算出して各要素の等価減衰定数を用いてひずみエネルギー比減衰を算出した。実測における加速度波形および変位波形から得られた減衰波形を参考にして, 本解析における等価減衰定数として, 上部構造(中空床版)3%, 下部構造4%, 支承4%を仮定した。さらに, ひずみエネルギー比減衰により算出したモード減衰定数と固有振動数から任意の2組を用いて Rayleigh 減衰を仮定した。対策前後の解析モデルに用いた Rayleigh 減衰 ($C = \alpha K + \eta M$) パラメータを表-4に示す。

表-4 Rayleigh 減衰パラメータ

減衰パラメータ	対策前	ラーメン化後
α	3.60×10^{-4}	3.61×10^{-4}
η	2.33	2.35

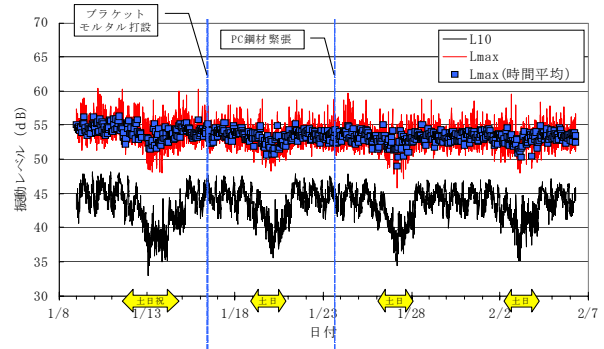
車両走行シミュレーションにより得られた各橋脚および橋台下端に作用する反力を用いて地盤応答解析を行い, 着目点(A5橋台直下およびA5橋台直近の官民境界)における振動レベルの低減量を予測することにした。そこで, 地盤を半無限弾性体と仮定し, 着目点における各橋脚および橋台底面に働く反力を周波数領域に変換し, Lamb¹¹⁾の解析解から得られる周波数応答関数を掛け合わせ, 時間領域に戻した後, JIS C1510に示される鉛直方向の体感補正を行った振動レベルを算出した¹²⁾。

以上の解析から, A5橋台直下において, Type1車両モデルで4dB, Type2車両モデルで3dB程度の低減が見込め, A5橋台脇の官民境界においては, Type1車両モデルで4dB, Type2車両モデルで2dB程度の低減が見込める結果を得た。

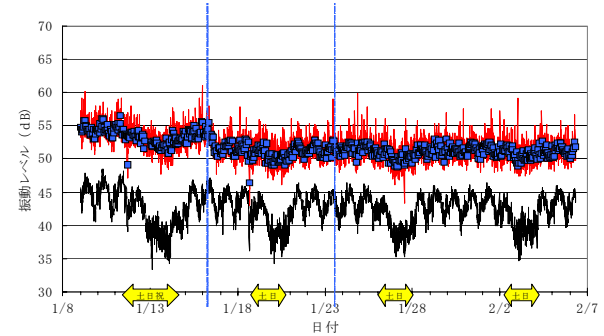
6. 実測による対策工の効果確認

6.1 施工時のモニタリング結果

ラーメン化の施工時において, 対象としたA5橋台脇の地盤上で振動レベルのモニタリングを実施した。そのときに得られた地盤上の振動レベルにおける L_{10} 値, L_{max} 値および L_{max} 値の時間平均(上り線と下り線)を図-14に示す。



(a) A5橋台脇(上り線側)



(b) A5橋台脇(下り線側)

図-14 施工中における振動レベル

施工の手順としてはブラケットと主版の間にモルタルを打設し, 硬化後にPC鋼材の緊張を行っている。振動レベルの変化は, 特に下り線において顕著であり, モルタルの硬化直後から L_{max} 値が2~3dB低減していることがわかる。これは, 上部構造と下部構造の間にモルタルを打設して, 上部構造と下部構造を一体化させたラーメン構造にすることにより, 対策前に生じていた支承部の鉛直変位が生じなくなったことが主な要因であると考えられる。

一方, PC鋼材の緊張による振動レベルの顕著な変化は見られなかった。PC鋼材の緊張は, 気温の変動等によって, 充填したモルタル部から上側の上部構造が浮き上がることを防止するために行ったものであり, 微小振動範囲ではすでに一体化していたためと考えられる。そのため, 緊張時には顕著な振動レベルの変化が見られなかったと考えられる。

6.2 低周波音における周波数特性の変化

ラーメン化の対策前後における低周波音の周波数特性の変化をみるために、1/3オクターブバンド周波数分析を行った。その結果を図-15に示す。

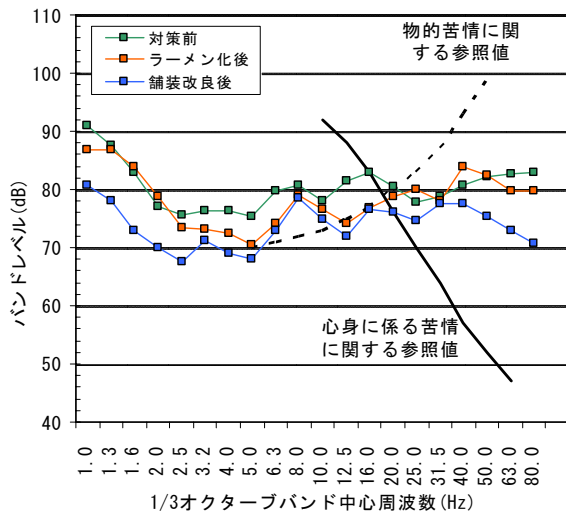


図-15 対策前後における低周波音のレベル変化

対策前においては、6.3~8Hz および 12.5~16Hz において卓越がみられる。6.3~8Hz は、対象橋梁における最低次の振動モードによるもの、12.5~16Hz は図-3 (または図-7 (b)) に示した振動モードに起因したものであると考えられ、これらの周波数成分で物的苦情に関する参照値¹³⁾を超過している。これに対してラーメン化により 6.3Hz および 12.5~16Hz の振動成分は6~8dB程度低減した。特に、12.5~16Hz の振動成分は大きく低減した。

6.3 応答波形による比較

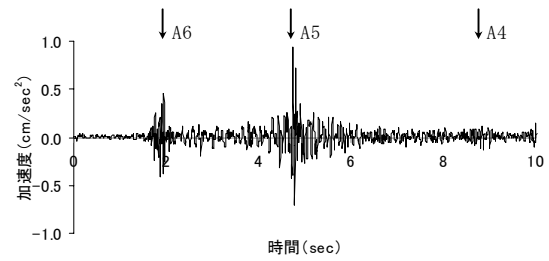
196kN ダンプトラックによる試験車が、当該区間を走行したときの官民境界地盤 (測点 V-5) の加速度波形とそのスペクトルを対策前後で比較して図-16に示した。なお、対策後の測定は、舗装改良後に実施しており、ラーメン化による効果と舗装改良による効果が含まれた結果となっている。

対策前の加速度波形を見ると A6, A5, A4 それぞれの橋台を通過した時のピークが各測点で認められる。特に A5 橋台を通過した時の加速度振幅が最も大きいことがわかる。

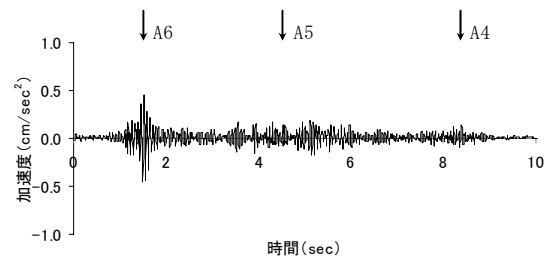
対策後の加速度波形をみると、対策前と同様に各橋台を通過した時のピークは見られるが、対策前で最も振幅が大きかった A5 橋台を通過した時の加速度振幅はかなり小さくなっている。

加速度波形のスペクトルを見ると、対策前に卓越していた 13~15Hz の振動が、対策後には 15Hz 以上に高くなっており、人体の感覚特性から考えると、より感じにくい方向に変化しているといえる。この

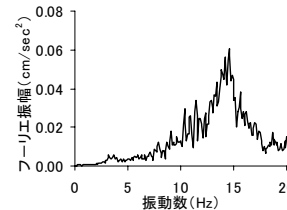
ことは、対策前において固有振動解析で得られた図-7(b)の振動モードが、ラーメン化後に発生しなくなり、より高い振動数へと移行したことを裏付けている。



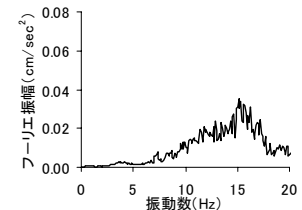
(a) 対策前



(b) 対策後 (ラーメン化+舗装改良)



(c) 対策前



(d) 対策後

図-16 対策前後の応答波形とスペクトルの変化

6.4 L₁₀ 値による評価

対策前、ラーメン化およびラーメン化後に行った舗装改良後の各段階において、A5 橋台周辺の官民境界地盤で評価した L₁₀ 値を比較したものを図-17に示す。

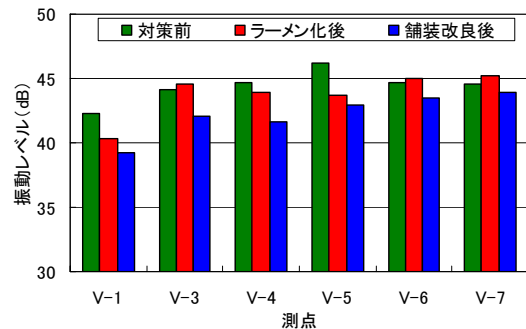


図-17 L₁₀ 値による評価

各段階別に比較すると、全体としては舗装改良による振動低減量が大きい傾向にあるが、下り線のA5橋台に近接したV-5測点および上り線のV-1測点ではラーメン化後の振動低減量が大きく、ラーメン化による振動低減効果は橋台周辺部に顕著に現れているといえる。対策前から舗装改良後までの変化をみると、 L_{10} では1~3dB程度の低減が認められる結果となった。なお、V-3、V-6、V-7の測点では、対策前に比べてラーメン化後の方が大きくなっているが、その差は0.3~0.6dBといずれも1dB未満であり、測定誤差等を考えると有意な変化であるとはいえない。

当該地域は都市計画上、第一種住居地域に区分されており、振動規制法による要請限度値は L_{10} 値に対して夜間60dB（昼間65dB）¹⁴⁾である。この要請限度値の観点から見ると、上下線ともに対策前において、 L_{10} 値はこの要請限度値を満足する結果となっており、必ずしも L_{10} 値による評価が苦情実態を適切に反映したものでないと考えられる。

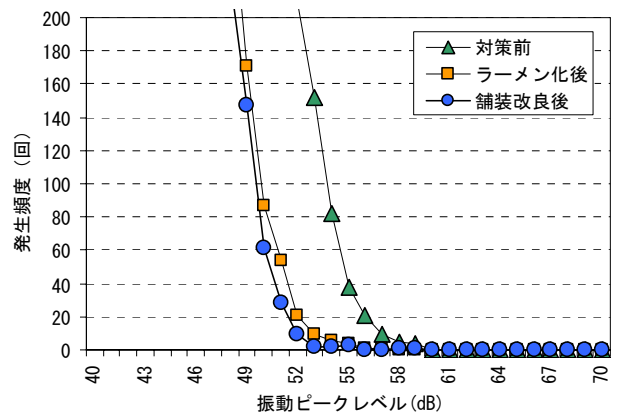
6.5 地盤振動のピーク発生頻度による評価

前節より L_{10} 評価は苦情実態を必ずしも適切に反映したものでなかったことから、著者らは道路交通振動による苦情の発生は振動のピーク(L_{max})値による影響が大きいと考えた。恒常的な苦情の場合、 L_{max} 値の大きさとその発生頻度が重要と考え、図-18に示したとおり、振動レベルの L_{max} 値の発生頻度から苦情実態および対策工法の効果を検討した。

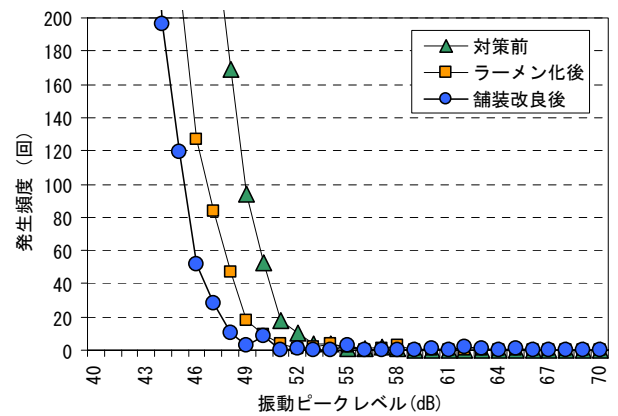
下り線側のV-5測点に着目すると、対策前に対してラーメン化後は明らかに高いレベルの発生頻度が低減していることがわかる。一方、上り線側のV-1測点については、ラーメン化後に低減し、さらに舗装改良によって低減していることがわかる。

体感閾値を55dB、家屋による増幅を5dBと仮定した場合、地盤上で50dBを超える振動が家屋内で体感振動になると考えられる。V-5測点では、夜間（午後10時~翌日午前6時までの間）の計測中において、体感振動を超えた回数が対策前837回、ラーメン化後96回、舗装改良後46回であった。また、V-1測点では、対策前41回、ラーメン化後17回、舗装改良後9回となっていた。

特に苦情が多かったV-5測点側の発生頻度が対策前では非常に多いことが明らかとなった。また、ラーメン化後にはそれらの発生回数が大幅に低減したことが確認された。これは、対策後に伺った近隣住民の回答からわかるように、「下から突き上げるような振動の発生がかなり減った」と評価されたことから裏付けられている。



(a) 下り線側の官民境界 (測点: V-5)



(b) 上り線側の官民境界 (測点: V-1)

図-18 L_{max} 値の発生頻度の変化

7. まとめ

本論文では、RC中空床版橋を有する高架橋の周辺で生じた環境振動による苦情に対して、振動調査を行い、その原因を究明した。さらに、その対策を施したことによる効果について検証した。

本論文において得られた知見は以下の通りである。

- (1) 大型車両が走行車線を通過した時に当該地域の地盤振動として最も影響を与えていた振動モードは、A5橋台上の支承部が腹となる振動モード(13~15Hz)であった。さらに、追越車線を通過した時に卓越した振動モードは、A5~P17径間のたわみ振動モード(14~15Hz)であった。
- (2) 対象橋梁における振動対策として、上部構造と下部構造の間にモルタルを充填し、コンクリート製のブラケットを介して上部構造と下部構造をPC鋼棒で緊張することで一体化させるラーメン化工法を採用した。
- (3) ラーメン化施工時に計測した振動モニタリングから、上部構造と下部構造の間に充填したモルタルの硬化直後から L_{max} 値が2~3dB低減した。これは、対策前に生じていた支承部の鉛直変位が生じなくなったためと考えられる。

- (4) 振動対策工別に振動レベルの変化を測点全体と比較すると、舗装改良による振動低減が大きい傾向にあるが、下り線の A5 橋台付近ではラーメン化後の振動低減が大きく、ラーメン化による低減効果は橋台周辺部に顕著に現れていた。
- (5) 解析および実測において、橋台部分の上部構造と下部構造をラーメン化することで、支承部を腹とする振動モードを抑制でき、卓越振動数が若干高い方に変化していた。さらに、振動レベルも低減していることが確認された。
- (6) 振動レベル L_{10} 値は行政で定める要請限度値を満足していたが、 L_{max} 値で評価すると体感閾値 (55dB または 50dB) を超える振動の発生が確認された。振動レベルの L_{max} 値とその発生頻度から、対策前では発生頻度が非常に多いことが明らかとなった。また、その発生頻度から対策の効果を確認した結果、それぞれの測点において、対策前に比べて、ラーメン化後および舗装改良後に体感閾値を超える振動はほとんど発生しなくなった。
- (7) 交通振動の評価値として用いられている L_{10} 値で評価した場合、苦情実態を必ずしも適切に反映しているとはいえず、体感閾値を考慮した L_{max} の発生頻度で評価することにより、より実態に即した結果が得られることがわかった。

8. あとがき

都市内にある高架橋は、交通・物流を支える重要な構造物であることはいうまでもないが、一方でこれらの高架橋は周辺家屋に対して騒音や振動といった影響を与えていることも否定できない。特に、橋梁を原因とする振動は、一般にその発生原因やメカニズムが複雑であり、画一的な振動防止対策が確立されていないのが現状である。本論文のケースは特殊な例であり、必ずしも一般化することはできないが、他の橋梁において発生している地盤振動問題でも支承反力の不均衡が原因となっている可能性は否定できない。本論文が今後、同様の振動問題が生じた際の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) H.Hama, S. Fukada, K. Usui, Y. Kajikawa, T. Matsuda: Infrasound and Ground Vibration Transmitted from Highway Bridge Using Moving Trucks, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, (on CD-ROM), 2010.8.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 深田宰史, 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.
- 8) 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.
- 9) 杵本正信: 橋梁交通振動の加振源対策, 橋梁交通振動に関するコロキウム論文集 PART A, pp.109-119, 1995.
- 10) 讃岐康博, 梶川康男, 深田宰史, 杵本正信: プロフィールメータでの測定路面から実路面への近似法の提案, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.399-410, 2001.3.
- 11) 北村泰寿, 桜井春輔: 剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法, 土木学会論文報告集, 第 290 号, pp.43-52, 1979.
- 12) 梶川康男, 新開正英, 讃岐康博, 村田幸一: 都市内 PC 高架橋の環境振動軽減対策とアセスメント手法の適用, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.691-700, 1995.
- 13) 環境省環境管理局大気生活環境室: 低周波音問題対応の手引書, 2004.6.
(<http://www.env.go.jp/air/teishuha/tebiki/04.pdf>)
- 14) 辻靖三, 足立義雄, 大西博文, 桐越信: 新版 道路環境, 山海堂, 2002.6.

(2010年9月16日受付)