

橋梁交通振動と環境対策の現状

梶川 康男*

1. はじめに

快適な都市環境のために寄与すべき交通施設構造物の走行車両による振動が、周辺家屋に伝わり、住民に影響を及ぼしていることがある。このような影響は早急に実態を調査し、適切な対策を施すことによって、快適な環境に戻す努力が必要である。

2. 振動苦情の実態

都市内高速道路沿道の苦情処理を整理し、苦情内容について統計処理したものを図-1に示す。これらの苦情内容から苦情原因と考えられる要因について考察すると次のようになる。まず、図-1(a)に振動苦情が発生している家屋の構造を示す。振動苦情は、日本の平均的な家屋構造である木造2階建て家屋で多く発生している。木造家屋において苦情が多いのは、橋梁の振動に起因する地盤振動の卓越振動と家屋の固有振動との共振による増幅現象も一因と考えられる。木造家屋の固有振動数は、新築で3~6 Hz、古い家屋では経年的に変化する傾向を示すがおおむね2~4 Hz付近に分布している。また、建物の2階で苦情が多いのは、居室や寝室が多いことも要因であるが、家屋内での共

振現象が大きな要因と考えられる。

つぎに、図-1(b)では、振動苦情の時間帯について示している。振動をもっとも感じる時間帯は明け方とうとうとしているときで、睡眠を妨害されることへの不満が苦情となって表面化している。また、そのときの苦情内容を図-1(c)に示す。振動数で考察してみると、「地震のようにグラッと感じる」という振動は、周波数帯が低く、しかも水平振動が原因と推察される。「音を伴って感じる」、「窓などがピリピリ鳴る音で感じる」という振動は、ジョイント部など路面の不陸を車両が通過した時に、車両のばね下に起因した10~20 Hzの衝撃的な振動が発生し、橋梁から空气中を伝播することにより、窓の固有振動(10~50 Hz)との共振現象が影響して生じるものである。

3. PC桁における横桁連結工法による振動対策

都市内高速道路は、社会、経済の発展に寄与する重要な交通網として、多くの交通量を24時間支え続けている。しかし、時々高速道路の高架橋区域で大型車両との連成振動が、沿道家屋に伝播することにより、環境振動問題を引き起こすことがある。

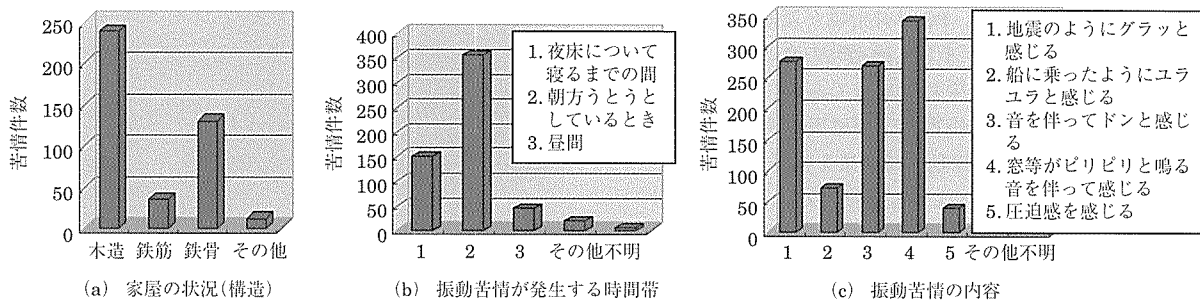


図-1 振動苦情の実態



* Yasuo KAJIKAWA

金沢大学大学院
自然科学研究科 教授



写真-1 対象とした高架橋

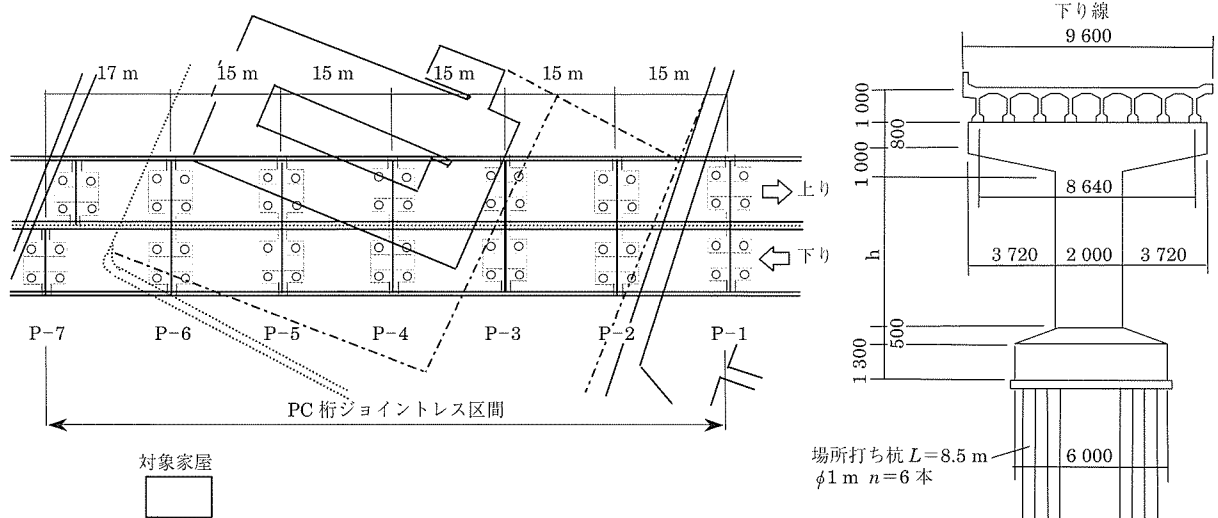


図 - 2 対象橋梁

表 - 1 対象橋梁の構造諸元

上部構造	プレテンション PC 単純桁橋
橋長	13 ~ 19 m (標準 15 m)
支間長	14.97 m (標準)
総幅員	9.6 m (下り線) 9.98 m (上り線)
車線数	上下各 2 車線
設計荷重	T - 20, L - 20
主桁本数	8 本 (13 ~ 17 m 区間)
舗装	アスファルト舗装 (t = 75 mm 厚)
下部構造	RCT 型単柱橋脚
基礎構造	場所打ちコンクリート杭
杭本数	φ 1.0 m × 6 本 (L = 8.5 m)

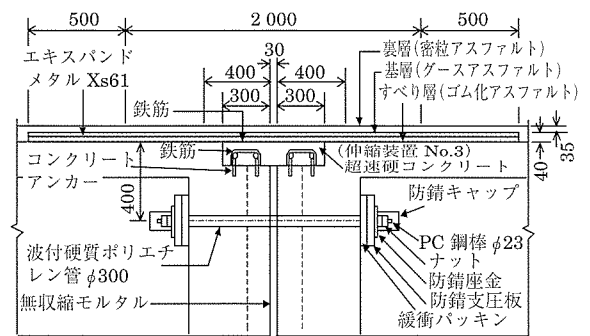


図 - 3 横桁連結工法の概要図

(1) 対象橋梁

ここで対象とした地域は、PC 単純桁橋が連続する高架構造形式を有し、「車両のジョイント通過時の音とともに振動を感じる」という苦情が発生した地域である。この環境振動問題に対処すべく、現況把握および原因究明調査を行った。そして、対策工事後の振動低減効果を実測で確認した。対象橋梁は、写真 - 1 に示すように標準スパン 15 m を有するプレテンション PC 単純桁橋が連続する高架橋である。対象橋梁の一般図を図 - 2 に、構造諸元を表 - 1 に示した。

(2) PC 桁における横桁連結工法

PC 桁横桁連結工法は、図 - 3 と写真 - 2 に示すように既設の伸縮継手を撤去し、隣接する既設 PC 桁の端横桁間に無収縮モルタルを充填し、端横桁どうしを横桁連結用 PC 鋼棒で締め付けて連結させることで舗装の連続化を実現するものである。なお、PC 鋼棒定着部に緩衝ゴムを設けることによって桁端の回転変形を拘束せず、活荷重に対しては単純桁、温度変化および地震時に対しては連結桁の挙動をさせるものである。鋼 I 桁橋のジョイントレス工法⁴⁾とは異なり、既設の支承がゴム沓であるため積層型の免震支承への交換は行っていない。今回、PC 桁ジョイントレス工事を実施した橋梁は、支間長約 15 m のプレテンション PC 単純桁が連続する高架橋であり、上・下線ともにそれぞれ 6 径間分を連結している。

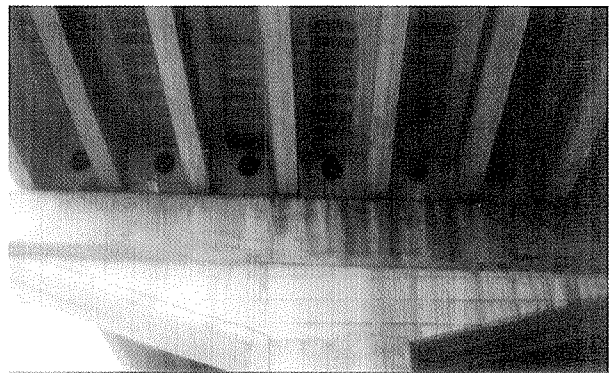


写真 - 2 橋脚上での端横桁連結部

(3) 上部構造と下部構造への振動低減効果

桁の連結に伴う上部構造と下部構造の挙動変化のうち、主桁のたわみと T 型橋脚の横梁先端部の鉛直変位について工事前後の実測値を比較した結果、主桁のたわみは連結後 70 % 程度に低減されており、上部構造の曲げ剛性を 40 % 程度増加させたことに相当している。また、上部構造の挙動が連結化により抑制されたことに伴い、T 型橋脚の横梁先端の鉛直変位も 80 % 程度に低減されている。

一方、上部構造の動的挙動として主桁の加速度に着目した結果によれば、平均加速度は連結後 65 % 程度に低減され

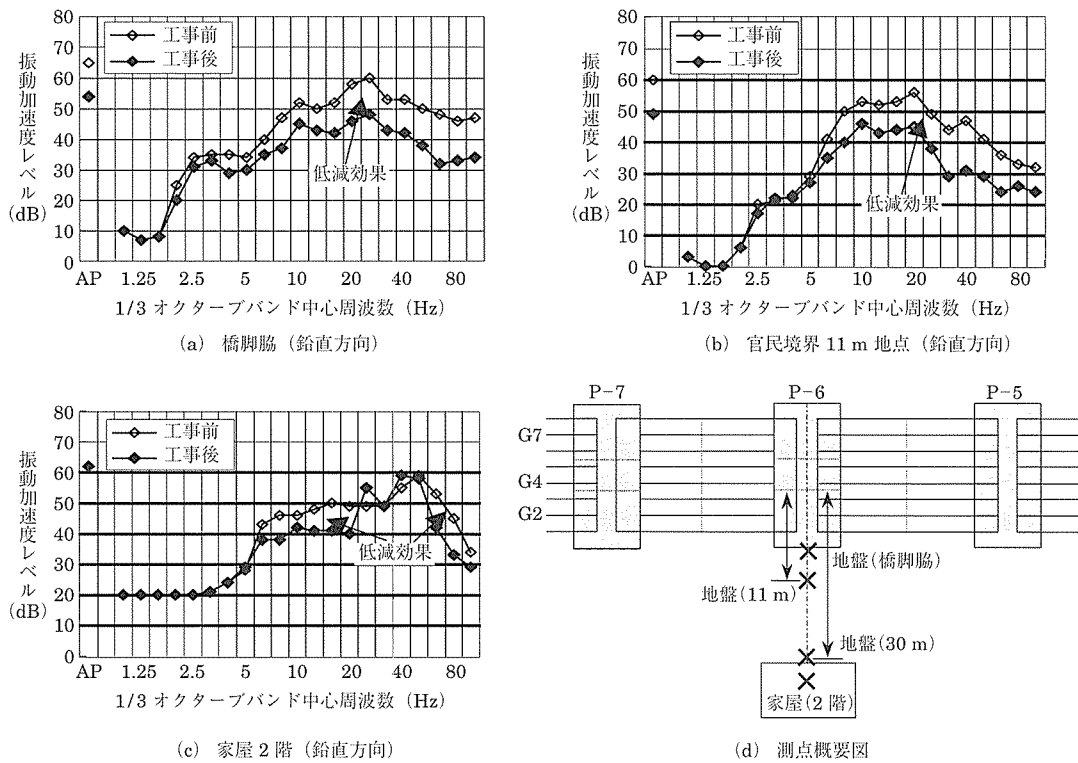


図 - 4 地盤と家屋での振動レベルの変化

表 - 2 対策工事前後の比較 (単位: dB)

方向	場所	対策工事前	対策工事後	低減効果
橋軸方向	11 m 地点	35.4	34.6	0.8
	30 m 地点	41.1	35.8	5.3
橋軸直角方向	11 m 地点	42.7	40.8	1.9
	30 m 地点	44.5	39.1	5.4
鉛直方向	11 m 地点	53.3	46.6	6.7
	30 m 地点	50.1	41.4	8.7

ている。また、周波数分析結果によれば、連結後の卓越振動数は7%程度大きな値となっており、桁連結化の効果は、15%程度の上部構造の曲げ剛性増をもたらしたことになる。

(4) 近傍地盤への振動低減効果

対象橋梁近傍の地盤での振動低減効果を検討した。図-4に各測点における工事前後の振動加速度レベルを比較した。この周波数スペクトルの分析結果によると、PC桁ジョイントレス工事により、5 Hz以上の全周波数帯にわたってレベル低下が認められる。これは、ジョイントレス化と桁連結化によって、路面-車両-上部構造物-下部構造物-地盤-家屋の全体系の加振原因と振動伝達をうまく低減させることに成功したためといえよう。ただし、家屋内の振動は地盤振動に比べ20~50 Hzの周波数帯であまり低減していない。しかし、付近住民の反応は、ノージョイント化により「ドン・ドン…」というジョイント通過時の音がほとんど除去されたことの効果は心理的に大きく作用し、おおむね好評である。ジョイントレス工法に伴う地盤振動の低減効果を表-2に示した。

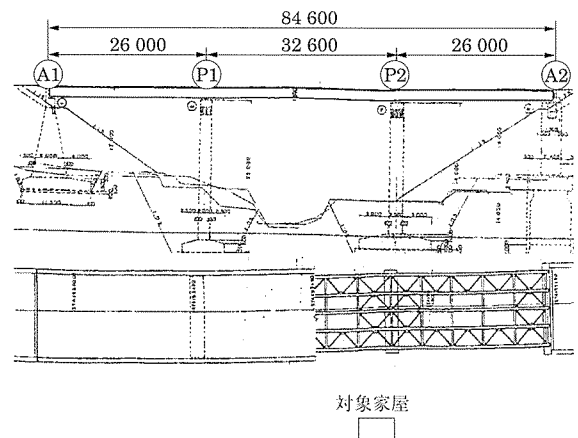


図 - 5 対象橋梁

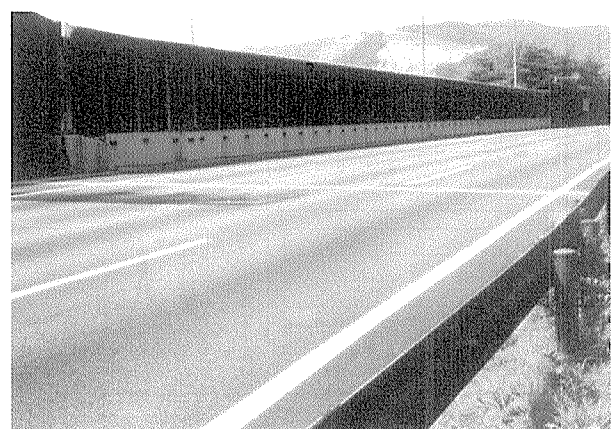


写真 - 3 対象橋梁のA2橋台上のジョイント

4. 鋼桁橋における延長床版工法による振動対策

種々の車両が任意に走行する道路橋に起因する地盤振動や空気振動は、その発生機構や伝播機構が複雑で、苦情原因を特定することが困難な場合が多い。ここでは、恒常的に発生する振動問題に対して苦情原因となっている振動を特定し、その対策方法として延長床版工法を適用した例を述べることにする。

(1) 対象橋梁

当該地域は、市街地から数十キロ離れた谷地形で、下流側に住宅街が広がる閑静な地域である。対象橋梁(図-5、写真-3参照)は、小さな谷合に架かる26m+32.6m+26mの支間長を有する3径間連続非合成鋼桁橋である。下部構造はすべて直接基礎で、支持地盤は堅固といえる。過去における振動対策として、両橋台上支承の反力分散支承への交換、端横桁のコンクリート巻立て補強、伸縮継手や舗装の段差修正等が繰り返し実施されている。しかし、対策が行なわれた直後は苦情がおさまるもののしばらくすると再発することが多かった橋梁である。

(2) アンケート調査

苦情発生地域を対象に、周辺住民の方々から振動に関するアンケート調査を行い、苦情内容や苦情源の概要を把握した。要因を分析した結果、苦情は、明け方下り方面の大型車通過時に、「ドンという音とともに振動や窓のがたつきを感じる」という回答がもっとも多く、ジョイント通過時

に発生する衝撃的な振動が原因と推測した。

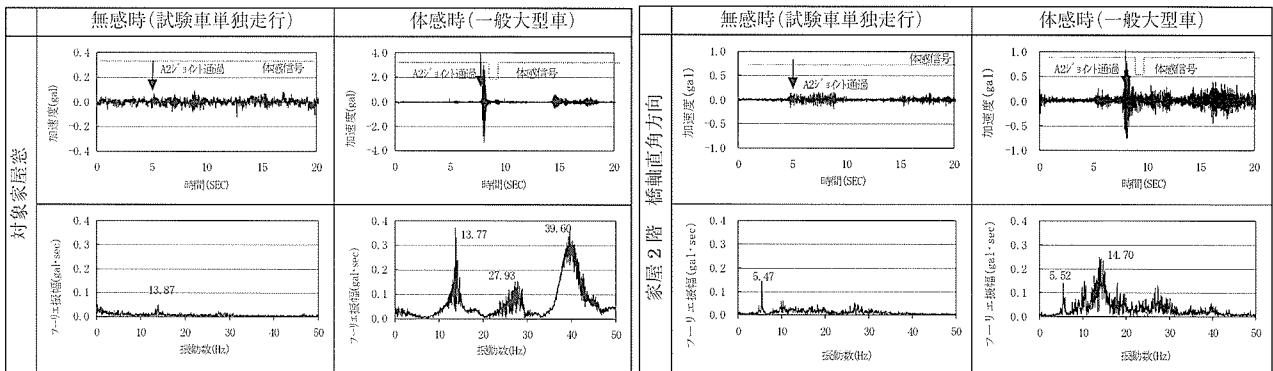
(3) 原因究明調査

アンケート結果を基に、簡易測定として、上り、下りの進入側、退出側の各ジョイント近傍の振動測定と、苦情発生家屋での窓の振動測定を行い、苦情現象と車両通過位置との因果関係を把握した。その結果、下り線の進入側ジョイント(以下A2ジョイントという)周辺が発生源であると推定した。

つぎに、ジョイントに着目した簡易調査結果から、A2ジョイント周辺および苦情発生家屋に着目した詳細調査を実施し、苦情原因の究明を行った。詳細調査は、苦情頻度の高い夜間から明け方にかけて行い、試験車(大型ダンプトラック 総重196kN)ならびに一般大型車を対象とした走行実験を実施した。調査内容は、上下部構造物、周辺地盤、木造2階建て家屋内および2階窓における振動と空気振動などを計測できるように、加速度計の測点を多数設けた。橋梁への加振力となる試験車両のばね上振動、ばね下振動も測定し、橋梁振動への影響を調べた。

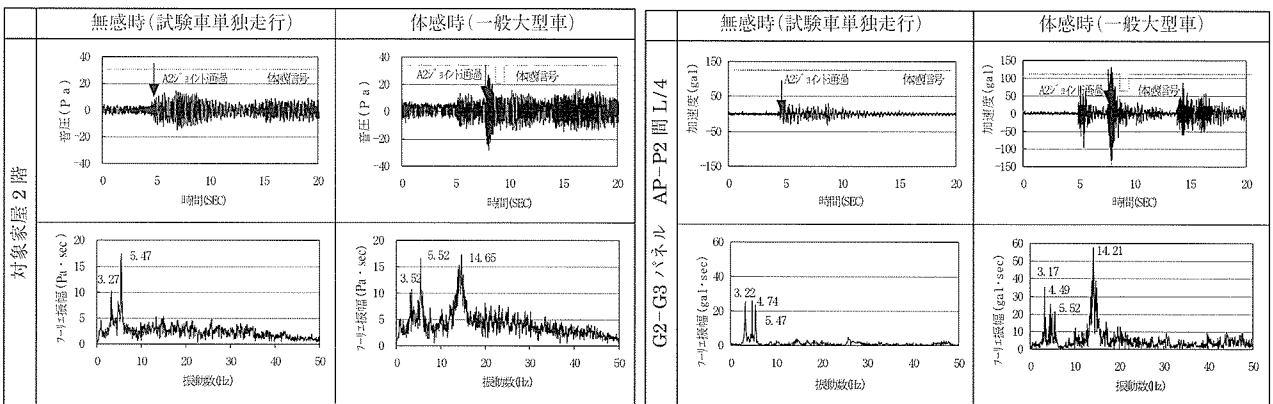
(4) 苦情原因となる振動の特定

苦情原因となる振動を特定するためには、窓のがたつき現象が生じたケース(体感時)と生じないケース(無感時)の各測点の振動データを、時間領域と周波数領域の両面から分析比較することにした。まず、試験車走行時では用意した試験車の固有振動が異なり、窓のがたつきは確認できなかった。しかし、一般大型車走行時には、窓のがたつき



(a) 対象家屋2階の窓の振動特性

(b) 対象家屋2階の振動特性



(c) 対象家屋2階の空気振動特性

(d) 床版G2-G3パネル側間1/4の振動特性

図-6 対象家屋と対象橋梁床版の振動特性

を頻繁に確認した。時間領域での分析比較から、この窓のがたつきはA2ジョイント部を通過した直後に発生することがわかった。前述した時間領域、周波数領域での分析結果を体感時と無感時で比較したものを図-6に示す。図-6(a)によると対象家屋2階の窓の基本固有振動数は13.8 Hzで、がたつきが生じた時(体感時)には基本振動の2倍、3倍の振動も卓越するのが特徴的である。対象家屋2階における橋軸直角方向水平動および空気振動特性の体感時と無感時の違いを比較し、図-6(b)、(c)にそれぞれ示した。体感時の時刻歴加速度波形によると、車両のA2ジョイント通過直後に、家屋内振動ならびに空気振動に衝撃的な成分が卓越し、体感信号のパルス波形が記録されているのがわかる。また、家屋内振動、空気振動の周波数スペクトルによると、体感時と無感時では3.2 Hz、5.5 Hz付近のフーリエ振幅に差異は認められず、14.5 Hz付近の卓越の有無が体感の有無と対応している。このため、振動数14.5 Hz付近の振動が苦情の主たる要因といえる。

体感時と無感時では橋梁上部構造の振動特性にどのような違いがあるのか、床版の側径間1/4点を代表例とした時刻歴加速度波形ならびに周波数スペクトルを比較して図-6(d)に示した。床版においては、体感時、無感時も3.2 Hz、4.7 Hz、5.5 Hz付近に上部構造固有のたわみ振動が卓越している(図-7参照)。しかし、体感時には、14.2~14.7 Hz付近の振動が優勢に卓越している。この振動数は、家屋内での体感時に卓越する振動の周波数帯と一致していることから、上部構造の振動のうち振動数14.2~14.7 Hz付近の振動が発生源であることを確認した。

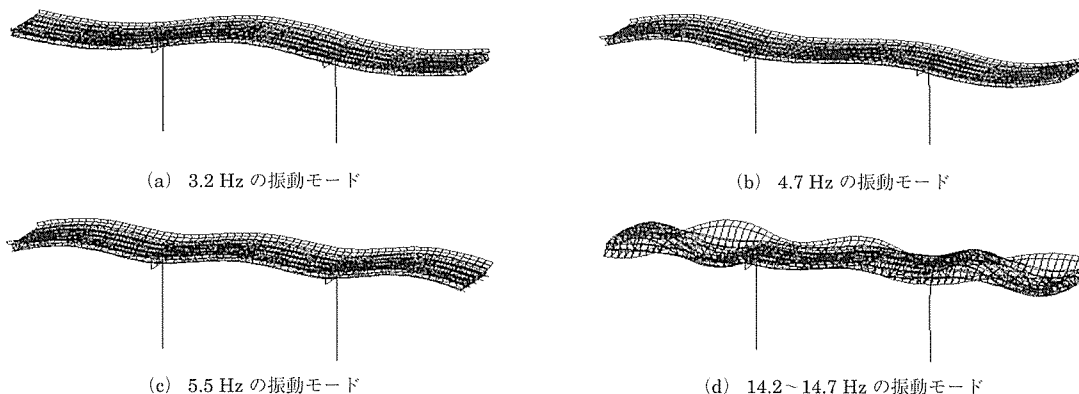


図-7 実測振動に対応すると考えられる振動モード図

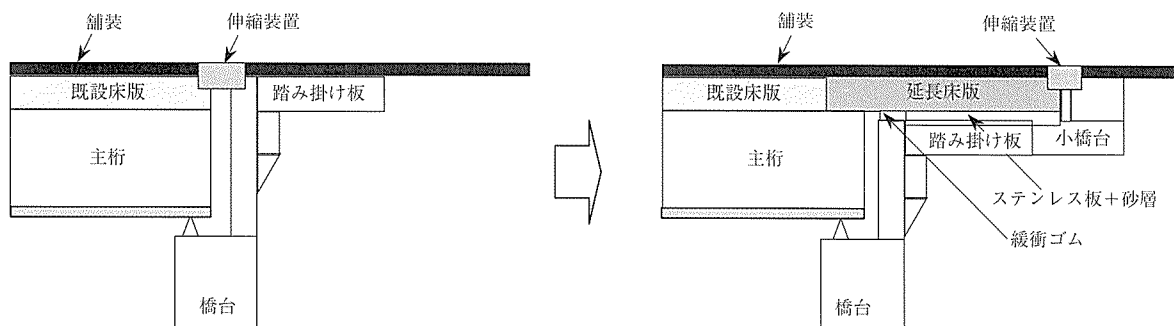


図-8 延長床版工法の概要図

(5) 窓をがたつかせるメカニズム

体感時における窓、家屋内の地盤振動、空気振動、および上部構造の振動特性から、窓をがたつかせるメカニズムを次のように推定した。

- ① A2ジョイント通過時に大型車のバネ下振動が励起される。
- ② バネ下振動数が14.5 Hz付近と近接する場合に、共振により前述した14.5 Hz付近の側径間を中心とする局部振動が誘発される。
- ③ この局部振動が、地盤振動や空気振動として、地盤や空気というべつべつの媒体を介して対象家屋に伝播する。
- ④ 窓の固有振動数が伝播してきた14.5 Hz付近の地盤振動や空気振動と近接すると共振して窓のがたつく。

このように、窓のがたつきは、「大型車のばね下振動」「上部構造の局部振動」「窓の固有振動」の各振動数が近接したときの共振現象が主な要因である。したがって、かならずしもすべての大型車通過時やすべての家屋の窓でがたつきが起きるわけではなく、ときどき、共振したときに生ずるものと考えられた。

(6) 延長床版工法

延長床版工法は、図-8に示すように、盛り土区間に挟まれた橋梁を対象とした振動対策工法で、橋梁の既設RC床版を延長し、ジョイントを盛り土区間に移設することによって、ジョイント通過時の衝撃振動やばね上、ばね下振動による強制振動を橋梁に入力させないようにするものである。対策の対象とする振動は、橋梁の高次あるいは局部

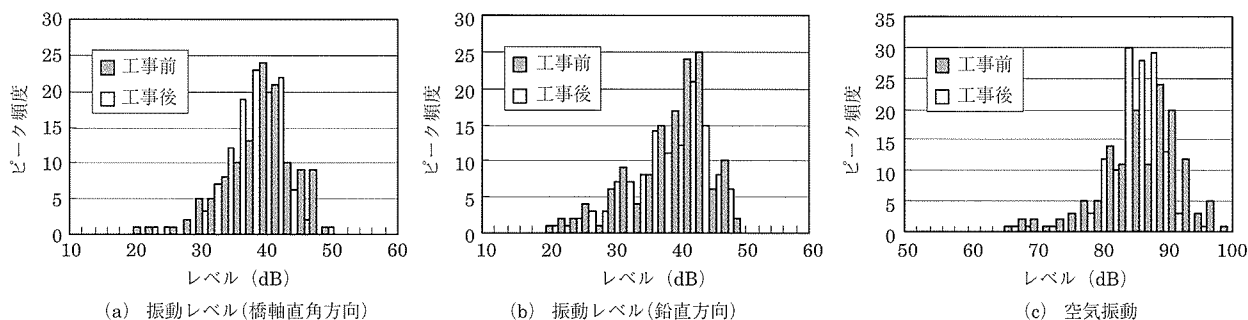


図-9 官民境界における対策工事前後の比較

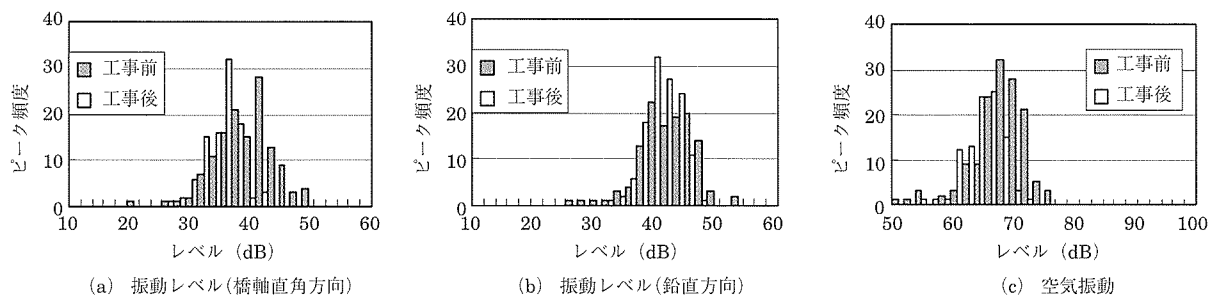


図-10 対象家屋における対策工事前後の比較

モードの振動(10~20 Hz)と衝撃振動(50 Hz以上)で、窓のがたつきなど空気振動の対策としても有効である。

(7) 対策効果

延長床版工法による振動低減効果を検討するために、官民境界(図-9)と対象家屋(図-10)における振動レベルと空気振動のピーク値を対策工事前後に比較した。ここに示したデータは、10 Hz以下の低次振動による影響を取り除いた振動成分をレベル換算して10分間のピーク発生頻度として求めた一例である。工事前には家屋内での窓のがたつき現象の発生は頻繁であったのに対して、工事後はほとんどなくなった。これは、空気振動のピーク値が小さくなったことから認められ、振動レベルについても、家屋内における橋軸直角方向、鉛直方向のピーク値は明らかに下がっている。

5. あとがき

走行自動車による橋梁振動が原因と思われる環境振動対策としてPC橋の例と鋼橋の例を示した。このような実施例は多く、ここで挙げた橋梁はほんの一例である。しかし、共通する結果は、路面の凸凹を減らす、とくに伸縮継手部付近の平坦性が大きく影響すること、である。それにより、自動車の衝撃的振動が減り、橋梁振動への入力が減ること

によって、周辺環境への影響も減少することになる。したがって、橋梁の走行路面の平坦性を長持ちさせるための橋梁構造が求められています。このことが、橋梁環境振動の研究を約20年間、地道にやってきた結論である。

構造物はやはり、美しく、まわりの人から好かれるものでありたいと願っています。そうして、あげましょう。

参考文献

- 1) 梶川康男, 大嶋信太郎: 周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一考察, 土木学会報告論文集, 第341号, pp. 79-86, 1984.
- 2) 梶川康男, 沖野真, 吉川実, 秋本正信: 高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 597-605, 1989.
- 3) 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.
- 4) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 吉川実, 薄井王尚: 弾性支承と桁連結構造を用いた既設高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 747-756, 1997.
- 5) 讃岐康博, 梶川康男, 深田宰史, 秋本正信: 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 399-410, 2001.

【2003年9月1日受付】