

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

Study on impact absorbing momentum exchanging damper for suppression of road bridge vibration

長船寿一*, 中村俊一**, 水野恵一郎***, 加藤久雄****, 植田知孝*****

Toshikazu Osafune, Shunichi Nakamura, Keiichiro Mizuno, Hisao Kato, Tomotaka Ueta

* 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

** Ph.D. 東海大学教授, 工学部土木学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

*** 工博, 特許機器株式会社 (〒101-0031 東京都千代田区東神田 2-5-15)

**** 特許機器株式会社 (〒101-0031 東京都千代田区東神田 2-5-15)

***** 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒160-0004 東京都渋谷区本町 3-12-1)

It was found from field measurements on the road bridge that the vibration occurred when a large lorry passed the expansion joints. The dominant frequency was 13.3Hz and lasted for about 1.5 sec. There were observed other peaks at 40Hz and 80Hz. A new type of damper, the impact absorbing momentum exchanging damper, has been proposed to suppress the vibration occurred at the expansion joints. Parametric studies were conducted using a model consisting of the damper and the concrete deck which was impacted by free-fall weights. The model tests show that the new damper is feasible and effective in reducing the vibration amplitude.

キーワード: 運動量交換型衝撃吸収ダンパー, 橋梁振動, 音響特性

Momentum exchanging damper Bridge vibration Sound characteristics

1. はじめに

近年, 道路橋を取り巻く問題として, 大型車交通量の増加, 車輦の重量化, 橋梁の長支間化などにより, 橋梁本体が受ける損傷問題のほか, 周辺生活環境に与える騒音・振動などの環境問題が重要視されている. その一因として, 橋梁振動が周辺環境に低周波音として放射され, 問題となっている事例が見受けられる¹⁾. これら低周波音の発生の原因となっている橋梁振動は, 大型車輦が道路橋の伸縮継手部 (以下「ジョイント」という.) を通過する際に発生する 10Hz から 40Hz 付近の衝撃的な振動と, 車輦が支間を通過する際に発生する 2Hz から 8Hz 付近に周波数成分をもつ支間通過に伴う振動に大別される. 前者は走行する大型車輦の車軸系の振動周波数帯, 後者は車体系の振動周波数帯にあり, 走行する車輦の振動と密接な関係にあることが報告されている²⁾. 一方, 沿道住民からの苦情発生に伴い橋梁振動対策を実施するにあたり, 大型車輦の支間走行中に発生する橋梁振動に対しては, 同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper; 以下「TMD」という) や桁端ダンパーなどの対策工があり, 現地への施工と共に振動低減効果が報告されている^{3) 4)}.

また, 歩道橋の制振対策として TLD (Tuned Liquid Damper) が有効であったとの報告もある⁵⁾. しかし, 支間通過に伴う 2Hz から 8Hz 付近の橋梁振動の対策が施され, これらの周波数帯の橋梁振動が解消されたにも拘わらず, 建具のがたつきなどの問題が解決されていない事例がある. これは, TMD などの対策工では解消できない大型車輦がジョイント部を通過する際に発生する 10Hz から 20Hz 付近の振動が原因で建具のがたつきが残り, 問題解決に至っていないためである. しかし, この様な問題が残されているにも拘わらず 10Hz から 20Hz 付近の振動対策に的を絞った研究は, あまり報告されていない. そこで, 筆者らは大型車輦がジョイント付近を走行する際に発生する 10Hz から 20Hz 付近の振動問題を解決すべく対策工の開発を目的として研究を進めている.

本稿では, 低周波音の卓越周波数が 4Hz 付近と 13Hz 付近に表れる高速道路橋において, 大型車輦走行時の橋梁振動及び低周波音の調査を実施し, 調査対象橋梁の振動特性と低周波音の関係を明らかにする. つぎに, 建築における集合住宅などでフローリング床の衝撃振動問題対策として研究開発が進められている, 運動量交換型衝撃吸収ダンパー⁶⁾を道路橋振動対策として適用すべく

行ったモデル実験について報告する。このモデル実験では、対象橋梁の床版を模擬し、部分的に切出した供試体を備えた実験装置を製作する。この実験装置にダンパーを構成する弾性要素、減衰要素、ダンパマスなどの各構成要素の仕様を自在に変更可能なダンパーを設置し、床版振動の抑制効果を実験により明らかにする。

2. 橋梁振動調査

2.1 調査橋梁概要

調査対象橋梁の横断面図を図-1 に、一般図を図-2 に、橋梁諸元を表-1 に示す。本橋は、建設当時は上下線分離構造の 8 径間鋼単純合成鈹桁で施工された橋梁である。しかし、供用後の交通量の増加や車輛の大型化に伴い、補強縦桁増設、3 車線化に伴う拡幅工事、B 活荷重対策としての支承のゴム沓化、活荷重及び後荷重に対するモーメントの平準化を目指した主桁及び床版の連続化、断面剛性の向上を図るため中央分離帯側主桁の箱桁化など様々な補強が施された橋梁である⁷⁾。

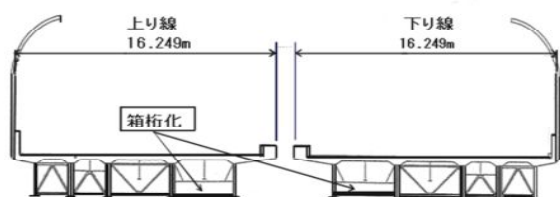


図-1 対象橋梁の横断面図

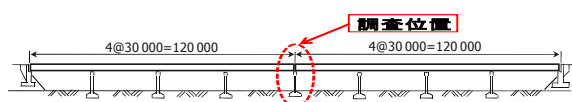


図-2 橋梁一般図

表-1 橋梁諸元

項 目	内 容
路線名	高速自動車道 第一東海自動車道
形 式	4 径間連続合成鈹桁×2 連
橋 長	240m
支間長	30.0m×4 径間×2 連
幅 員	16.2m
床版厚	260mm (330mm 新設部)

2.2 事前調査

本調査の実施に先立ち、実施すべき調査項目、測定点の位置及び調査方法等を検討するために、事前調査を行

った。事前調査では、過去の知見より車輛がジョイント部通過時にジャンプするものと仮定し、ジャンプした車輛のタイヤが着地すると想定される地点（ジョイント部から 10m 程度の範囲）の第一走行車線における床版下面に振動ピックアップを 4 点設置（図-3 参照）し測定を行った。分析は、周波数特性および加速度波形とした。また、橋軸方向の位置の違いによる振動特性を確認するため、ジョイントから最も離れた支間 1/2 測定点を移動させながら表-2 に示す 4 つの CASE について調査を行った。また、調査は自由走行を行っている一般車輛を対象とし、車輛の走行車線を確認するため、CCD カメラを設置し、ビデオ撮影によるモニタリングを行った。測定は、CASE 毎に 10 分間データと大型車単独走行時の 5 データの計測を行った。

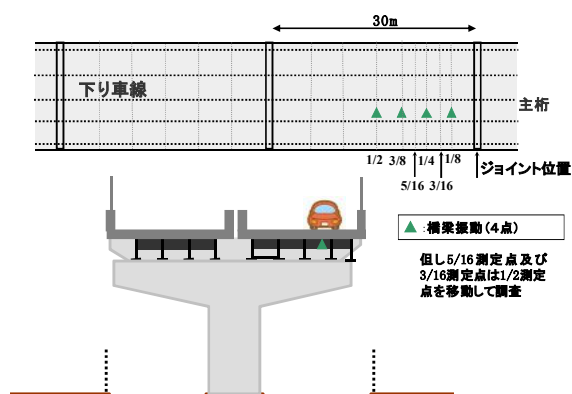


図-3 事前調査の測定点配置図

表-2 測定点の配置 CASE

CASE	測定点
CASE1	支間長 1/8・1/4・3/8・1/2 点での測定
CASE2	支間長 1/8・1/4・3/8・5/16 点での測定
CASE3	支間長 1/8・1/4・3/8・3/16 点での測定
CASE4	支間長 1/8・1/4・3/8・ジョイント近傍点での測定

ジョイント部からの距離 1/8 : 3.75m、1/4 : 7.5m、3/8 : 11.5m、1/2 : 15m、5/16 : 9.4m、3/16 : 5.6m、ジョイント近傍点 : 1.0m

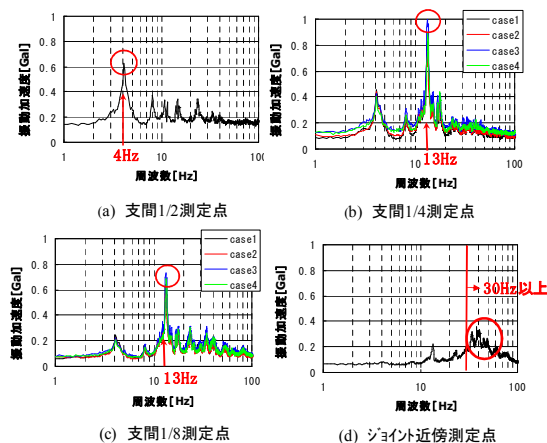


図-4 床版振動加速度スペクトル

10 分間連続測定データの鉛直成分について FFT 分析を行った。(a) 支間 1/2 測定点, (b) 支間 1/4 測定点, (c) 支間 1/8 測定点, (d) ジョイント近傍測定点における床版振動加速度スペクトルを図-4 に示す。これらの分析結果より, 支間 1/4 測定点で最も振動加速度が大きい結果となり, ピーク周波数は 13Hz であった。また, 支間中央にあたる支間 1/2 測定点では 4Hz が卓越している。この 4Hz のピークは, 支間 1/2 測定点からジョイントに近づくにつれ振動加速度が小さくなる傾向となっている。一方, ジョイント近傍の測定点では, 30Hz から 50Hz 付近の周波数帯にピークが表れている。この結果は, 測定点の支間位置により振動しやすいモードが有り, その影響が卓越周波数としてあらわれていると考えられる。

次に, 分析時間 10 秒間の単独走行車両の FFT 分析結果を図-5 の(a)に, 周波数毎にフィルタリングを行った床版の振動加速度波形を(b), (c), (d)に示す。

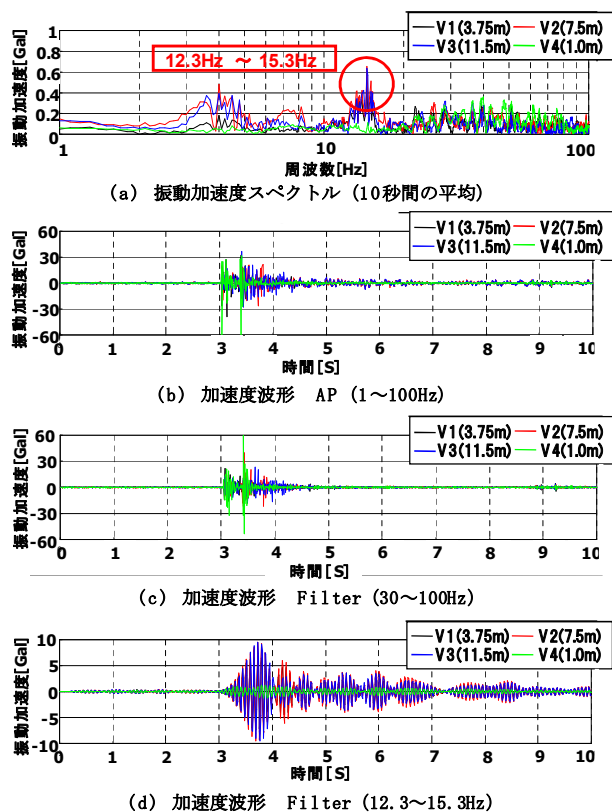


図-5 単独車走行時のスペクトルと波形分析

(b) 加速度波形 AP (1~100Hz) を見ると, 時間 3 秒付近にパルス的な信号が表れている, これは, 車両がジョイントを通過した際の衝撃振動である。この加速度波形 AP (1~100Hz) と波形が似ているのは (c) 加速度波形 Filter (30~100Hz) の結果である。また, (a) 振動加速度スペクトル分析結果に表れている卓越周波数 12.3~15.3Hz を波形分析した (d) 加速度波形 Filter (12.3~15.3Hz) から, これらの周波数帯の振動加速度は, 車両がジョイントを通過後, 徐々に大きくなっている事がわかる。これは, ジョイントを通過する際生じる衝撃的な信号とは波形が異なる

ことから, 車両の支間走行に伴う振動と考えられる。

以上の結果より本調査における測定点は, 車両がジョイント通過時に発生する振動特性の把握としてジョイント近傍, 支間 1/8 地点に加え, より詳細な振動状況を把握するため支間 1/16 地点に測定点を配置することとした。また, 支間通過時の振動特性を把握するために測定点を支間 3/16 地点, 1/4 地点, 5/16 地点に配置した。

2.3 本調査

本調査では, 事前調査の結果を基に, 図-6 に示す測定点を配置した。床版振動は, 鉛直方向の測定, 主桁ウェブ振動は, 水平方向の測定とし, 調査は各測定点を同期させ, 大型車の単独走行時及び車群走行時の走行形態別調査と 10 分間の連続調査を行った。併せてジョイント直下及び敷地境界における低周波音と橋脚付近及び敷地境界における地盤振動の調査を行った。また, 車両の走行状態を確認するため, 橋梁の壁高欄部に CCD カメラを設置し撮影した。

分析は, 各測定点の FFT によるスペクトル分析及び加速度波形分析を行った。

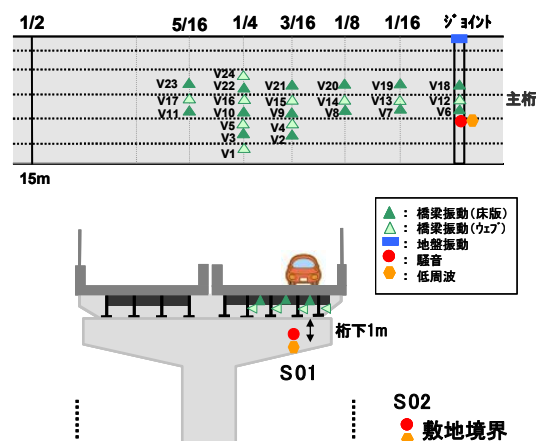


図-6 本調査の測定点配置図

(1) 平均的な橋梁振動

平均的な橋梁振動の特性を把握する目的で, 10 分間連続測定データの分析を行った。その一例として FFT 分析によるスペクトルを図-7 に示す。分析結果は, 事前調査とほぼ同様な傾向を示し, (a) 支間 1/4 測定点における床版加速度スペクトルは, 13.3Hz で卓越し, (b) ジョイント近傍スペクトルでは, 30Hz から 50Hz 付近の加速度成分が卓越している。(c) 低周波音のスペクトル分析結果においては, 桁下 1m の S01 測定点及び敷地境界の S02 測定点ともに, 4.0Hz がピークとなっており, 続いて 13.3Hz で音圧が高い値を示している。一方 (d) の地盤振動スペクトルでは, 低周波音の傾向とは異なり, 13.3Hz にピークが表れ, 続いて 40Hz, 70Hz 及び 4.0Hz が同程度の振動加速度となっている。

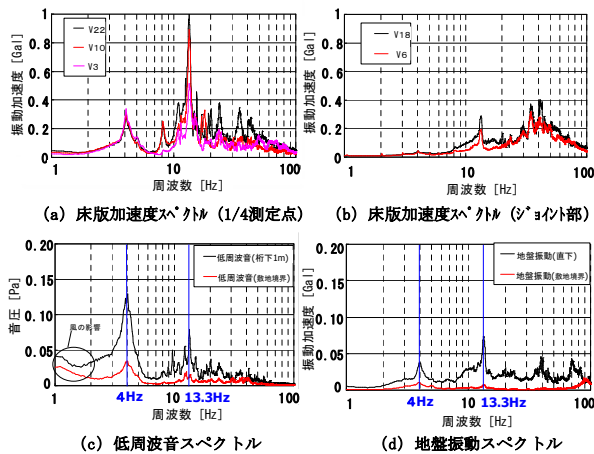


図-7 10分間の平均的なFFT分析

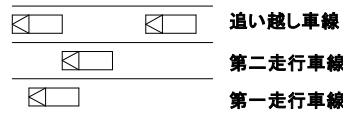
(2) 大型車の単独走行と車群走行

走行形態が単独走行時と車群走行時の違いによる橋梁振動の特性を把握するために、大型車単独走行時 11 データと車群走行時 7 データを測定した。

これらのデータのうち、単独走行時及び第一走行車線を 1 台、第二走行車線を 1 台、追越し車線を 2 台の車輛が走行 (図-8 参照) した際の車群走行時データを分析した結果を図-9 に示す。

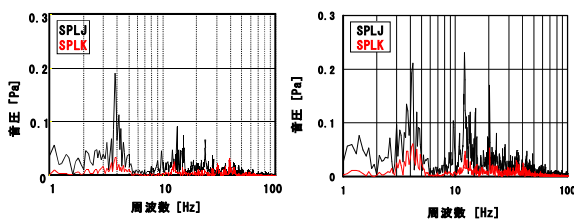


(a) 車群走行写真



(b) 車群走行車線

図-8 車群の走行形態



(a) 単独走行時

(b) 車群走行時

図-9 走行形態別の低周波音スペクトル

これらは、桁下 1 m 地点 (SPLJ) と敷地境界地点 (SPLK) における低周波音のスペクトルである。単独走行時の周波数では 4Hz 付近で卓越しているが 13.3Hz 付近の音圧は小さい。一方、車群走行時では、13.3Hz 前後に複数の卓越周波数が表れており、また音圧も 4Hz と同等の大きさとなっている。

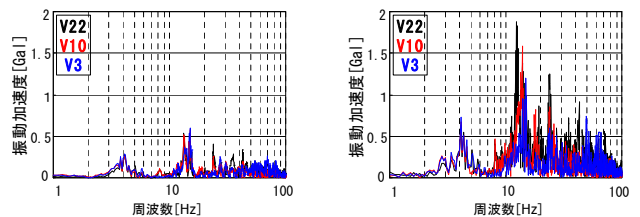
次に、事前調査において、床版の振動加速度が卓越し

ていた支間 1/4 測定点における走行形態別の分析結果を図-10 に示す。

床版の振動加速度 (a) 単独走行時スペクトルと (b) 車群走行時のスペクトルでは、双方ともに 13.3Hz 付近の成分が卓越している。

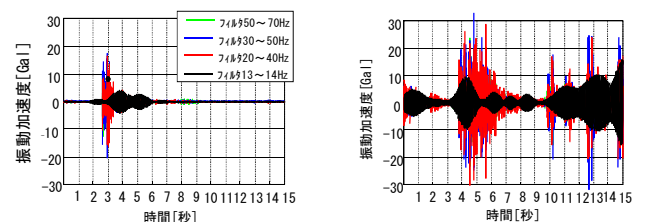
これは、前出の低周波音の卓越周波数と同様であり、測定点の支間位置により振動しやすいモードがあり、その影響が床版加速度及び低周波音における 13.3Hz 付近の成分が卓越する一因と成っているものと考えられる。

一方、走行形態別の加速度波形 (図-10 (c) 及び (d)) では、単独車走行時の Filter 20Hz~40Hz の振動加速度及び Filter 30Hz~50Hz の振動加速度がジョイント通過後に衝撃的な波形となっているが、比較的短時間で減衰している。これに対し、車群走行時の同周波数帯の Filter 波形では、複数の大型車が走行していることから、先頭車両がジョイント通過後しばらくの間、振動加速度が大きな時間帯が続いている。また、13Hz~14Hz フィルタ波形では、単独車走行時、車群走行時共にジョイント通過の後、徐々に振動加速度が増加する傾向にある。なお、調査対象車群とは別の通行車輛による影響を排除するため (b) 車群走行時スペクトル及び (d) 車群走行時波形において、2.5 秒から 9.5 秒の時間帯で分析を行った。



(a) 単独車走行時スペクトル

(b) 車群走行時スペクトル



(c) 単独車走行時加速度波形

(d) 車群走行時加速度波形

図-10 走行形態別の支間 1/4 測定点分析結果

(3) 振動モード形状

車輛の走行に伴う調査対象橋梁の振動形態を確認するために、本調査と同時に測定した振動データ (測定点の配置は図-11 参照) を使用し、振動モード図を作成した。分析は 30 分間の加算平均処理データより各点の伝達関数 (基準点 V01) を出力したうえでモード図を作成し、支間 1/2 測定点と支間 1/4 測定点の傾向について確認した。鉛直曲げ 1 次モードを図-12 に、鉛直曲げ 2 次モードを図-13 に示す。なお、図中の※で示した測定点では調査を行っていないため、分析にあたっては測定点 V16 のデータを使用した。

それぞれの固有モードによると、支間 1/2 測定点は振動数 4.0Hz のモードで振動しやすい腹の地点であり、また振動数 13.3Hz のモードでは振動しづらい節の地点にあたることを確認できる。また、支間 1/4 測定点は振動数 13.3Hz のモードでは振動しやすい腹の地点であるが、振動数 4.0Hz のモードでは比較的振動しづらい地点にあたることを確認できる。

以上の結果より、調査対象橋梁で卓越振動数となっている 4.0Hz は、橋梁本体の鉛直曲げ 1 次モード、13.3Hz の卓越振動数は鉛直曲げ 2 次モードによるものと考えられる。

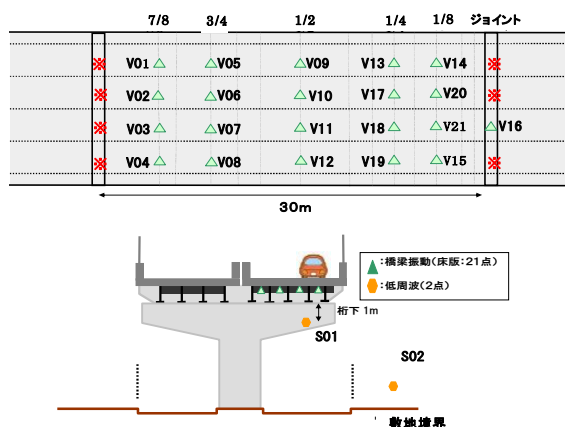


図-11 振動モード測定点配置図

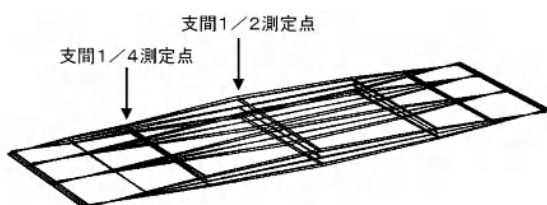


図-12 鉛直曲げ 1 次モード (4.0Hz)

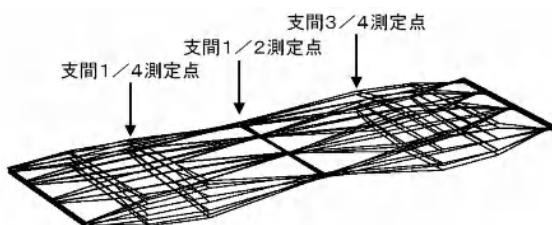


図-13 鉛直曲げ 2 次モード (13.3Hz)

(4) ウェーブレット分析結果

大型車単独走行時の時間経過（支間走行位置）と振動加速度及び低周波音の大きさと周波数の関係を見るた

めに、ウェーブレット解析を行った結果を図-14 に示す。図の中で縦に引いた線は、(f) ジョイント直下床版振動波形において大型車輛の前輪と後輪がジョイントを通過したと想定される時刻に合わせて引いたものである。

モード分析により鉛直曲げ 2 次モードと推察した 13.3Hz 付近の周波数に着目する。(e) ジョイント直下低周波音における周波数 13.3Hz 付近では、約 0.6 秒周期で音圧レベルの高い領域が表れている。また、レベルの高い領域は、大型車輛の後輪が通過後、徐々に高くなる傾向を示している。一方、橋梁上部工の測定点の分析結果で、低周波音の 13.3Hz の周波数と傾向が類似しているのは、(c) 支間 1/4 測定点及び(b) 支間 1/8 測定点の床版の振動加速度レベルである。大型車の後輪が通過した時刻から振動加速度レベルが高い状態が始まり、周期的にレベルの高低を繰り返しながら約 1.5 秒以上続いている。この状況から、13.3Hz の振動加速度は、大型車がジョイントを通過するときの衝撃により発生し、その後、走行位置により振動しやすいモードの腹の位置を車輛が通過しているときにレベルが高くなっているものと考えられる。また、(a) ジョイント直下床版振動加速度レベルや(d) 支間 1/4 測定点主桁 Web 振動加速度レベルにおいて周波数 13.3Hz に高いレベルの領域は表れていない。

次に 40Hz 付近の周波数帯について考察する。(e) ジョイント直下低周波音では、大型車輛の前輪がジョイントを通過後に発生しており、レベルの高低を周期的に繰り返し約 2 秒間継続している。一方、40Hz 付近の各測定点の床版振動加速度は、大型車の前輪及び後輪通過直後に高い領域が出現している。しかし、低周波音とは異なり、短時間でレベルが減衰する傾向となっており、(b) 支間 1/8 測定点及び(c) 支間 1/4 測定点床版振動加速度では約 1 秒間で減衰し、(a) ジョイント直下床版振動加速度では更に短時間で急激に減衰している。これに対し、(d) 支間 1/4 測定点主桁 Web 振動加速度の 40Hz 付近の周波数帯は、大型車の前輪がジョイントを通過後約 2 秒間レベルが高い領域が続いており、低周波音の減衰傾向と類似している。したがって、40Hz の低周波音は橋梁主桁 Web の振動により卓越しているものと考えられる。

次に、調査対象橋梁の鉛直曲げ 1 次モードの周波数 4.0Hz について考察する。(e) ジョイント直下低周波音では、分析時間帯全般にわたりレベルが高い領域が表れており、これにより 4.0Hz は、大型車輛の支間走行に伴う低周波音と考えられる。一方(a) ジョイント直下床版から(d) 支間 1/4 主桁 Web までいずれの測定点でも、4.0Hz 付近の周波数帯でのレベルが高い領域は表れていない。

また、(d) 支間 1/4 主桁 Web の振動加速度では、80Hz 以上の周波数帯にもレベルの高い領域があり、特に大型車輛の後輪がジョイント通過後に高いレベルとなっている。

以上の結果より、調査対象橋梁において、周波数 13.3Hz 付近の振動加速度は、大型車輛がジョイントを通

過する際の衝撃が起因となり発生し、その後、走行位置により振動しやすいモードの腹の位置を車輛が通過しているときにレベルが高くなっているものと考えられる。また、車輛がジョイント通過時に発生している40Hz付近の低周波音は、主桁 Web の振動からの寄与が高いものと考えられる。

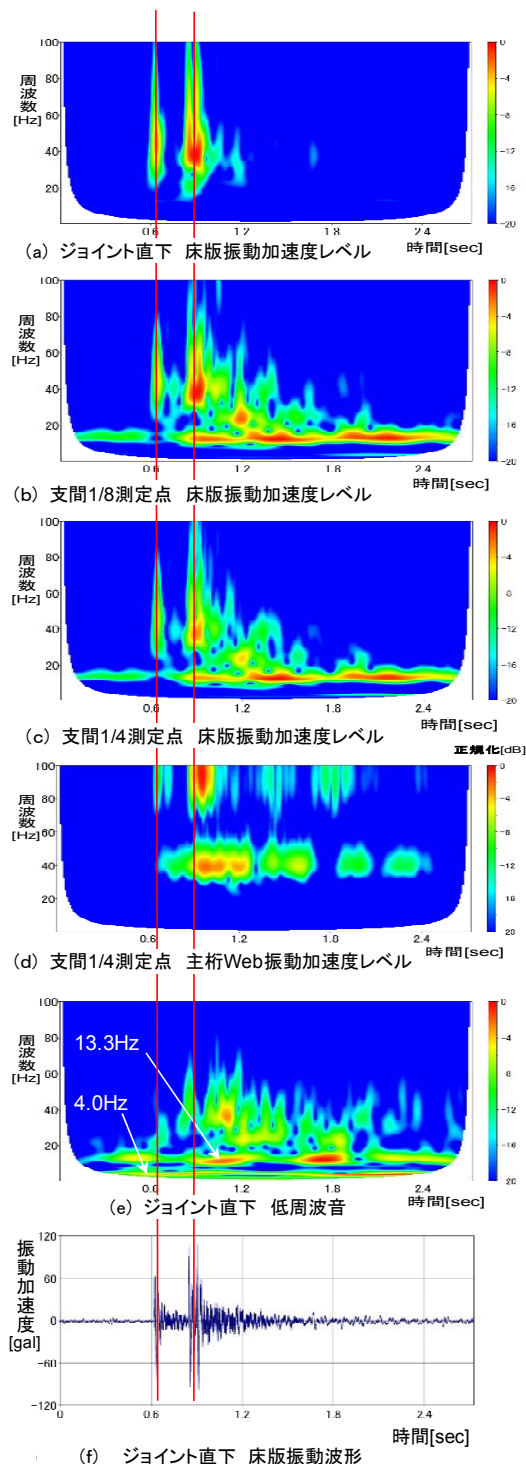


図-14 ウェーブレット分析結果

3. 運動量交換型衝撃吸収ダンパーの基本原則

運動量交換型衝撃吸収ダンパー（以下「衝撃吸収ダン

パー」という。）の基本原則を簡単な事例を用いて説明する。まず図-15 に示すように、同一直線上に位置する3つの同じ質量の剛球 A, B, C を仮定する。ここで、2つの剛球 B 及び C は接しながら静止している。そこへ剛球 A が剛球 B 側から速度 v で衝突する。このとき、それぞれの剛球の質量は同じであるため、直接衝撃を受ける剛球 B は静止し、それに接する剛球 C が速度 v で運動を開始する。これは、剛球 A が持つ運動量が剛球 B を介して剛球 C に交換される玉突き現象として一般的に知られている。この原則を応用したものが衝撃吸収ダンパーである。剛球 A, B, C をそれぞれ衝撃源である車輛、橋梁床版、ダンパーの振動マスに置き換えたモデルを図-16 に示す。実際の道路橋上で発生している現象では、衝撃源、橋梁床版、振動マスそれぞれの質量は異なり、また、衝撃源と振動マスは必ずしも一直線上に位置するとは限らない。そのため完全に橋梁床版の動きを止めることは難しいが、橋梁振動を低減する可能性はあるものと考え

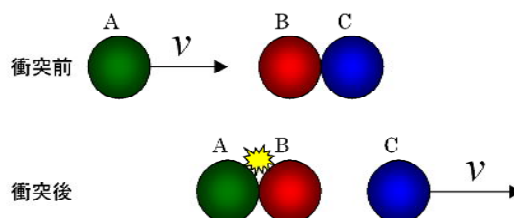


図-15 剛球の運動量交換

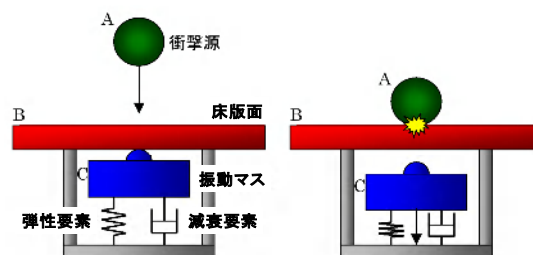


図-16 運動量交換型衝撃吸収ダンパーの原理

4. モデル実験

4.1 モデル実験の目的

衝撃吸収ダンパーが、道路橋振動対策として実用化された事例は、まだ無い。そのため、実橋規模のダンパーの設計・製作に必要な知見は、皆無と言っても過言ではない。そこで筆者らは、道路橋の振動対策工の開発を目的とし、衝撃吸収ダンパーの設計・製作に必要な、ダンパーを構成する各要素の特性を把握するために、モデル

実験を実施した。

4.2 モデル実験の概要

衝撃吸収ダンパーのモデル実験で使用した実験装置及び床版供試体は、図-17 に示すように、橋梁床版の部分的な切出しモデルで、縦横の寸法は、1300mm×1300mm、厚さは240mmのコンクリート床版をH-400-200-8-13の2主桁で支える構造とした。この時の床版及び主桁の質量は1,370kgである。実験は、油圧ポンプユニットで上方に持ち上げた錘（落下質量）を落下させ、床版を加振したときの床版と衝撃吸収ダンパーの加速度応答（鉛直方向）を計測した。さらに、レーザー変位計を用い、床版下面変位（鉛直方向）の計測を行った。なお、実験に使用する床版の固有振動数は、今後ダンパー試作機を取り付けて振動低減効果の確認実験を行う予定である調査対象橋梁の鉛直2次曲げモードの固有振動数13.3Hzに出来るだけ近づくように調整した。調整は、主桁下フランジと架台の間に適度なばね定数を持つ、調整用コイルばねを挿入し、13.75Hzの固有振動数で実験を行った。

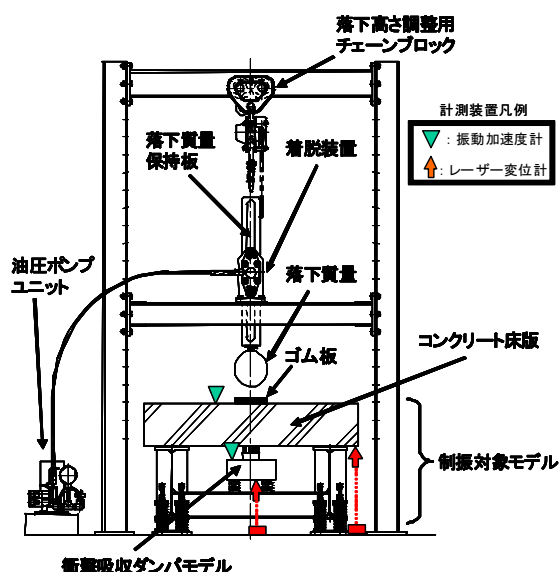


図-17 モデル実験装置概要図

なお、実験にあたり、落下する錘による床版の2度打ちを防止する装置を取り入れた。その仕組みは、通常はバネで錘の軸を挟み支えており、油圧スイッチがオンになるとバネが圧縮し、挟んでいる軸が解放され、自重により錘が落下することにより床版は加振される。その反発で錘が跳ね返ったタイミングで、タイマーを使用した自動油圧オフ装置により、バネが圧縮から元の状態に復帰し、錘の軸を挟み、錘が再び落下することを阻止する錘の着脱措置を製作して実験を行った。

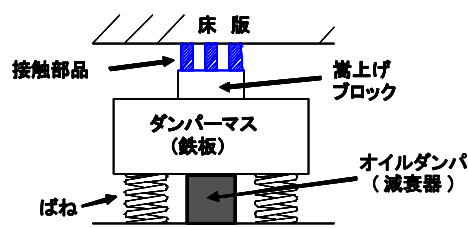
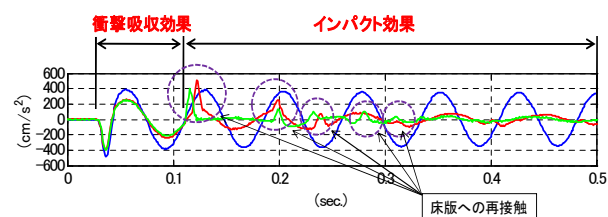


図-18 衝撃吸収ダンパーモデル部拡大図

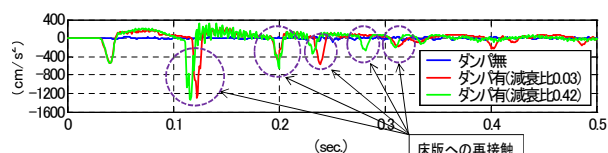
5. 実験結果

5.1 効果確認実験

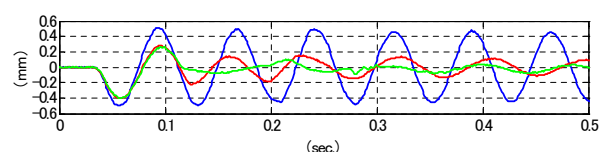
衝撃吸収ダンパーの振動抑制効果を把握するための実験を行った。実験は、過去の文献を参考とし、ジョイント部で段差が生じた橋梁における振動実験データを基に、床版における振動加速度が約400galと成るよう錘の質量と落下高さの調整を行った。その結果、錘の質量は20kg、落下高さは117mmで行うこととした。衝撃吸収ダンパーの構成要素は、質量326kg（質量比：0.24）、固有振動数3.8Hz、減衰比0.03と0.42の2種類とした。また、床版に入力された運動量が衝撃吸収ダンパーに効率よく伝わるように、床版とダンパーの間に、MCナイロンブッシュ（樹脂材料）4個で構成された接触部品（図-18、20参照）を挿入し、やや床版に押さえ付けた状態（嵩上げブロックとダンパーマスの間に0.5mm厚のスペーサーを挿入）となるように設置した。図-19に、衝撃吸収ダンパーの真上の位置に錘を落下させたときの床版とマスダンパーの振動加速度及び床版下面の鉛直変位の過渡応答を示す。



(a) 床版振動加速度波形



(b) 衝撃吸収ダンパ振動加速度波形



(c) 床版変位波形

図-19 効果確認実験結果

図中の(a)は床版の振動加速度を計測した時刻歴波形である。同様に(b)は衝撃吸収ダンパーの振動加速度、(c)は床版下面の変位(鉛直方向)の時刻歴波形である。それぞれの図で、青色で描かれた波形は、衝撃吸収ダンパーを設置していないときの波形である。また、赤色は、減衰比 0.03 に設定したダンパーの波形、緑色は減衰比 0.42 に設定したダンパーの波形である。

ここで、(b)衝撃吸収ダンパー振動加速度波形に着目する。第一波のピークは、錘の落下に伴い床版に加わった衝撃荷重によるエネルギーが、運動量として衝撃吸収ダンパーに伝わった際の波形である。このエネルギー交換により、ダンパーは床版から下方に動く、その運動エネルギーは、減衰器の作用により消散し、ダンパーは停止した後、再びゆっくりと床版に接触する。この再接触のときの衝撃が第二波のピーク(図中の波線円内の波形)となっており、ダンパーにおける最大振動加速度となっている。この、床版への再接触に伴う衝撃が反力となり、再びダンパーは床版から離れるが減衰器によるエネルギー消散後、床版に再び接触している。この一連の運動を数度繰り返し、徐々にピーク値は減衰していく。

衝撃吸収ダンパーの目的は、衝撃荷重が入力された際の初期波形の振幅を抑制することにある(以下「衝撃吸収効果」という)。図(a)の床版振動加速度波形に着目すると、ダンパーを設置していないときの波形と比較し、減衰比 0.03 波形及び 0.4 の波形ともに、同様な傾向を示し、第一波で約 20%の抑制、第二波で約 40%、第三波では約 50%振幅を抑制しており、衝撃吸収ダンパーによる床版振動の抑制効果が表れている。一方、(b) 衝撃吸収ダンパー振動加速度波形において、最大値を示したときの、(a)床版振動加速度波形は、ダンパーを設置していないときの振幅を上まわっており、加速度が増加していることがわかる。しかし、再接触した後、再び接触する迄の間に、振幅が急激に減衰しており、ダンパーが床版に再接触することによる振動抑制効果(以下「インパクト効果」という)が表れることがわかった。また、それらの効果には、TMD 原理による振動抑制効果も加わっているものと思われる。

(c)床版変位波形では、衝撃吸収ダンパーの床版への再接触に伴う変位量の増加はみられず、衝撃吸収効果及びインパクト効果ともに良好となっていることがわかる。

5.2 ダンパー構成要素のパラメータ・スタディ

衝撃吸収ダンパーは、様々な要素により構成されている。ダンパーによる橋梁振動抑制効果が、最大限に発揮される装置を設計・製作するために、ダンパー構成要素の値を基本条件から変化させたパラメータ・スタディ(表-3 参照)を実施し、床版振動の抑制効果の確認を行った。その結果の一例を以下に示す。なお、本パラメー

タ・スタディに用いた加振力は、床版における振動加速度が 300gal となるように調整した結果、質量 7kg の錘を高さ 117mm から落下させることとした。

表-3 パラメータ・スタディ項目

項 目	基本条件	比較対象
1. ダンパマス	質量大 326kg	質量小 163Kg
2. 床版接触部隙間	+1.2mm +0.5mm	0 ±0mm -0.1mm
3. ばね(固有値)	軟(低) 3. 8Hz	硬(高) 5. 5Hz
4. 減衰(オイル粘度)	粘性小 3万Cst※×2	粘性大 3万Cst※×2+5万Cst※×2
5. 床版接触部材質	中軟 MCナイロン	軟 ウレタン 硬 金属(S45C)
6. 衝撃入力の大さき	大 300Gal	小 70Gal
7. ダンパ設置位置	衝撃中心直下	偏心位置
8. 衝撃入力形態	単独入力	連続入力

※Cst : センチ・ストークス (動粘度の単位)

(1) ダンパーマス

ダンパーマス 326kg (質量比 0.24) の基本条件と、質量比 0.12 のダンパーマス 163kg の場合について比較実験を行った結果を図-21 に示す。ここで、床版の絶対変位を考察する。衝撃吸収効果として第一波から第三波までの変位量を平均すると、326kg のダンパーマスの場合、ダンパーを設置していないときと比べ約 30%の抑制に対し、質量が軽い 163kg のダンパーマスは約 25%の抑制にとどまっている。一方インパクト効果を比較すると、ダンパーマス質量 326kg の方が早く減衰する傾向を示している。以上の結果より、ダンパーマスの質量は、重い方が変位の抑制効果が大きい結果となった。しかし、衝撃吸収ダンパーの実橋への設置を考えると、ダンパーマスが大きくなることによる、橋梁本体の補強が必要となる可能性がある。そのため床版と衝撃吸収ダンパーのマス比の決定は、振動抑制効果と補強の必要性の双方を考慮しながら、慎重に決定する必要がある。

(2) 床版と接触部の間隔

錘が床版に落下し伝わった運動量を、衝撃吸収ダンパーに効率的に伝えるうえで、床版と接触部品の接触条件が重要と考えられる。床版と接触部品の隙間を変え実験を行った。その結果を図-22 に示す。

図中の凡例を説明すると、床版と接触部品の間隔が、ちょうど隙間がない状態を±0mm と表記した。また、床版と接触部品の間に隙間が生じている状態をマイナス(－)とし、逆に床版と接触部品の隙間が無く、適度に押さえ付けられた状態をプラス(＋)で表した。なお、プラスの場合、符号の後に付した数値は、接触部品の嵩上げブロックと衝撃吸収ダンパーの間に差し込んだスペーサーの厚さである。

衝撃吸収効果を確認するため第一波から第三波までの

平均変位量で比較する。+1.2mm 及び +0.5mm の設定条件のとき、変位量が約 25%抑制されており、最も効果が高い。続いて±0mm が約 20%の抑制、-0.1mm は約 5%の効果にとどまっている。

次に、インパクト効果を比較すると、最も減衰効果が高いのは+0.5mm で、続いて±0mm となっている。一方、-0.1mm 及び+1.2mm のインパクト効果は小さく、ほとんど減衰していない。この現象は、ダンパーマスの絶対加速度の時刻歴波形により説明が出来る。-0.1mm のダンパーマス絶対加速度波形（赤色の波形）には、一般的に衝撃吸収ダンパーが衝撃の入力により床版から離れ、再度床版に接触する際に生じる衝撃的な波形が表れていない。これは、床版接触部の隙間により床版から衝撃吸収ダンパーに運動量が十分に伝達されていないものと考えられる。また、+1.2mm のダンパーマス絶対加速度の波形では、衝撃入力直後、数度にわたりインパクト効果が表れているが、その後は床版上絶対加速度波形と同位相となっており、床版と一体となって振動することにより、インパクト効果が十分に発揮されていないものと考えられる。以上の結果より、床版接触部の隙間は適度な押さえ付けが必要であるが、押さえ付けすぎるとインパクト効果が表れない。そのため、今後、押さえ付け力の管理は、慎重を期する必要があることがわかった。

(3) ダンパーマスの固有振動数

基本条件のダンパーマス固有振動数 3.8Hz と衝撃吸収ダンパーのばねを堅く設定し、固有振動数 5.5Hz とした場合の比較を行った（図-23 参照）。衝撃吸収効果を、第一波から第三波までの変位量の平均値で比較すると、双方ともに約 20%の抑制効果となっており、顕著な違いは表れていない。一方、インパクト効果を比較すると、固有振動数 5.5Hz の方の減衰が若干早い傾向となっている。

以上の結果より、本実験において固有振動数の違いによる振動抑制効果には、大きな差は表れなかった。

(4) 減衰（オイル粘度）

基本条件のダンパー減衰比は 0.2（低減衰比）で、比較的減衰比が低い値である。減衰比の違いによる、振動低減効果を把握するため、高減衰比 0.42 による実験を行った。低減衰比の減衰器には、粘度 3 万 C St のオイルダンパーを 2 台使用している。これに対し、高減衰比の実験では、粘度 3 万 C St のオイルダンパー 2 台に粘度 5 万 C St のオイルダンパー 2 台を加え実験を行った。減衰比の違いによる実験結果を図-24 に示す。

第一波から第三波までの衝撃吸収効果を比較すると、低減衰比である粘度小（3 万 C St×2）は、ダンパーを設置していないときに対し、変位を約 40%抑制している。これに対し、粘度大（3 万 C St×2+5 万 C St）は約 50%で、高い変位抑制効果となっている。

一方、インパクト効果について双方の減衰を比較する

と、粘度大の方が高い減衰効果を示している。

(5) 床版接触部品の材質

床版接触部品の材質の違いによる、衝撃吸収ダンパーの効果を確認した。接触部の材質は、硬さ別に、中程度の硬さ（中軟）として MC ナイロン、硬い材質として金属（S45C）、また、軟らかい材質としてウレタン樹脂を使用して実験を行った。なお、嵩上げブロックを含めた各床版接触部品の質量は MC ナイロンが 5.04kg、金属が 5.08kg、ウレタン樹脂が 5.01kg である。最も重い金属及び嵩上げブロックの質量はダンパーマスの質量 326kg に対し 1.6%、質量 163kg に対して 3.1%であり、実験への影響は少ないものと考えた。実験結果を図-25 に示す。変位の抑制効果を比較すると、衝撃吸収効果では、金属の約 45%、MC ナイロンの約 30%、ウレタン樹脂の約 11%の順で効果が表れた。

一方、インパクト効果について考察すると、材質が硬い金属の床版上絶対加速度（図(c)硬（金属 S45C）の上段）に着目する。第四波及び第六波の波形において、ダンパーを設置していない場合の振幅を上回っており加速度は増加している。これは、同図中段のダンパーマス絶対加速度に表れているとおり、金属という硬い材質のため、ダンパーによる床版再接触時の衝撃が大きく、この影響が床版上の加速度の増加に繋がっているものと考えられる。また、インパクト効果では、ウレタン樹脂が最も変位の減衰が高い傾向を示している、したがって、インパクト効果に関しては、軟らかい材質の方が有効と考えられる。

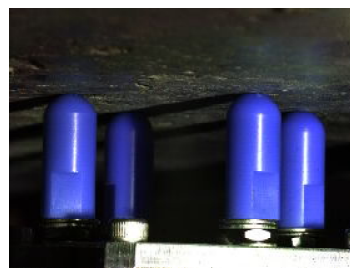
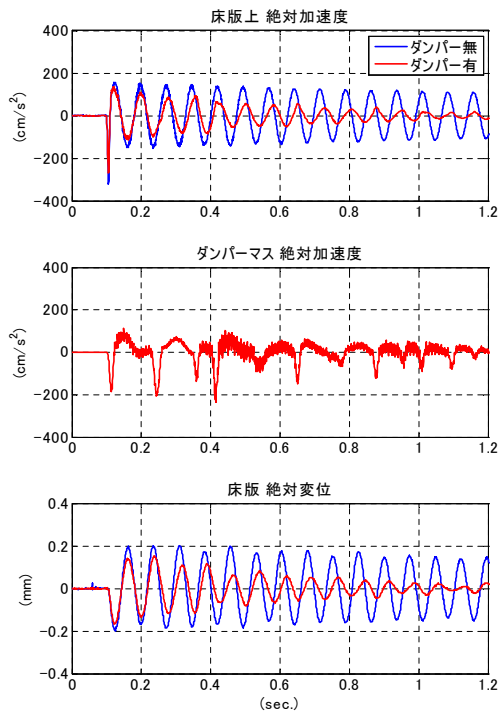


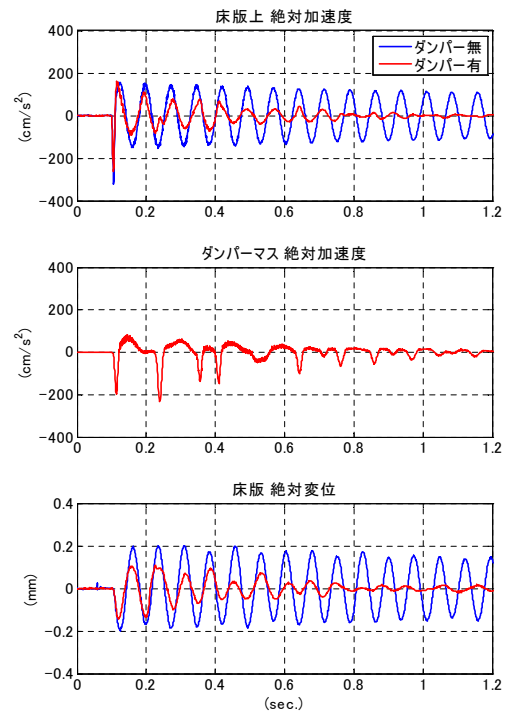
図-20 MC ナイロンプッシャー写真

(6) 衝撃入力大きさ

錘の落下による床版への衝撃入力の違いによる比較を行った。基本条件の入力 300gal と入力小さい 70gal の実験結果を図-26 に示す。衝撃吸収効果は、入力 70gal で変位抑制効果は約 35%となっているのに対し、300gal では約 20%と効果が小さい。しかし、入力小さい 70gal の場合インパクト効果がほとんど表れていない、これは、図中段のダンパーマス絶対加速度が示すとおり、ダンパーが床版に再接触するときに表れる加速度の衝撃的な波形が出現していない。そのため、入力初期の段階では衝撃抑制効果が表れるものの、その後、ダンパーは床版から離れず、床版と一体となって振動する事によるものと考えられる。

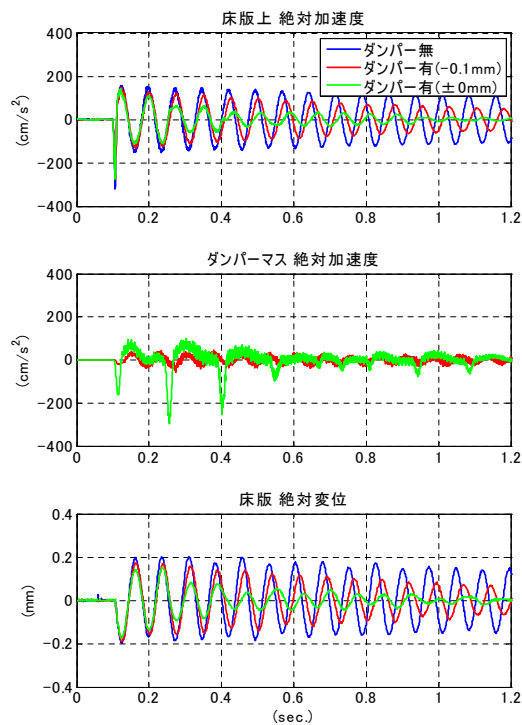


質量小(163kg)

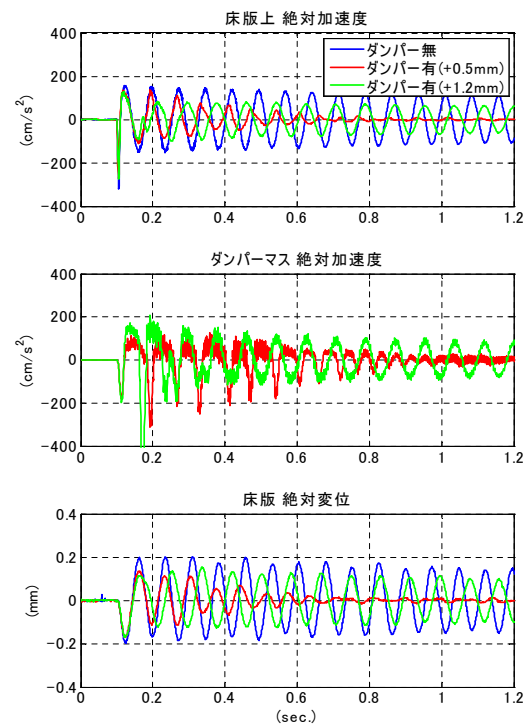


質量大(326kg)

図-21 ダンパースの質量の違いによる比較



(a) 隙間 -0.1mm/±0mm



(b) 隙間 +0.5mm/+1.2mm

図-22 床版接触部間隔の違いによる比較

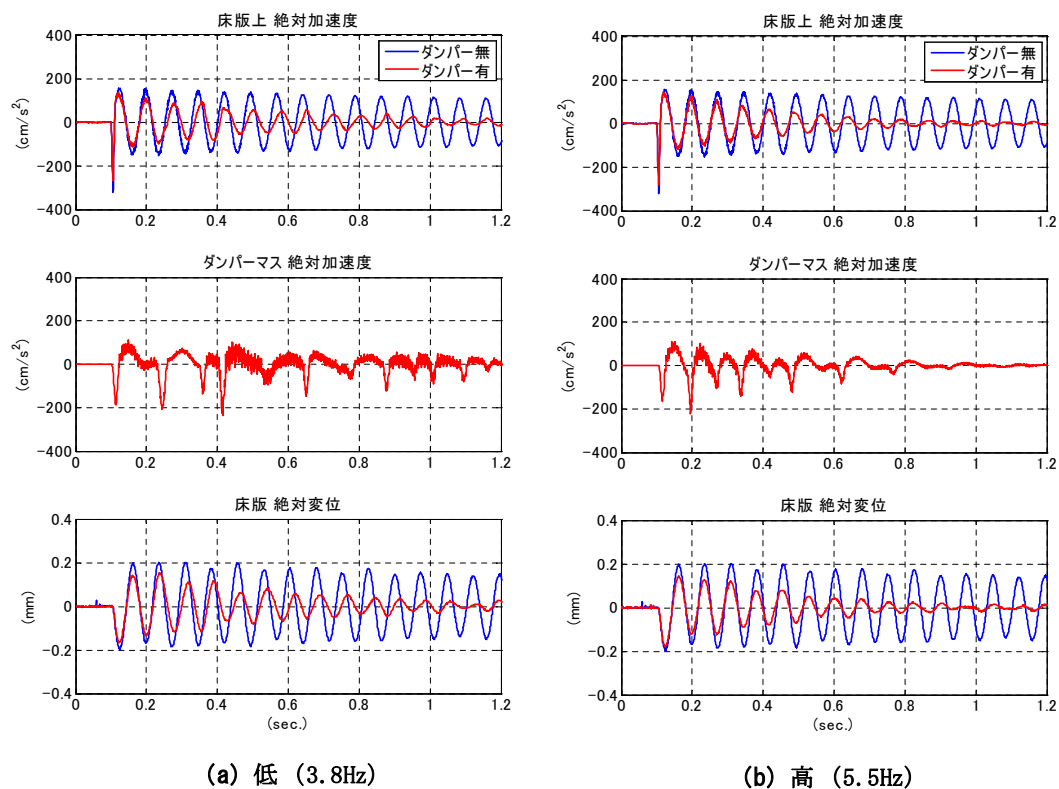


図-23 ダンパマス固有振動数の違いによる比較

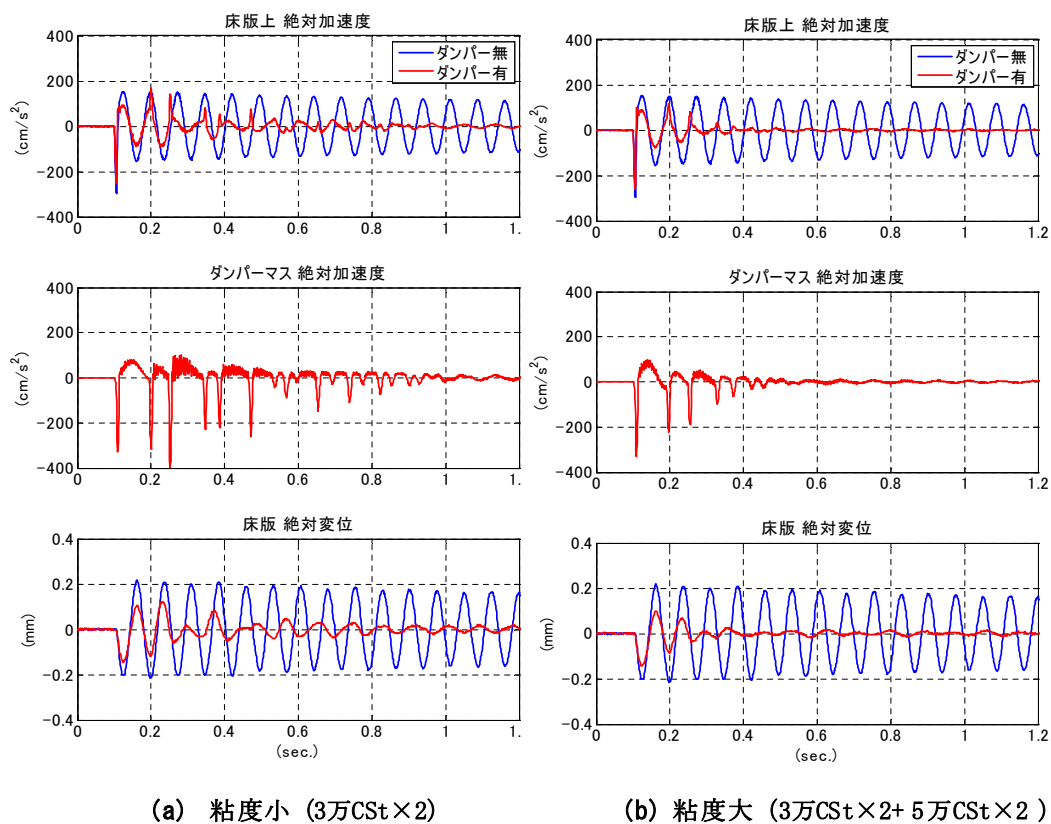


図-24 減衰（オイル粘度）の違いによる比較

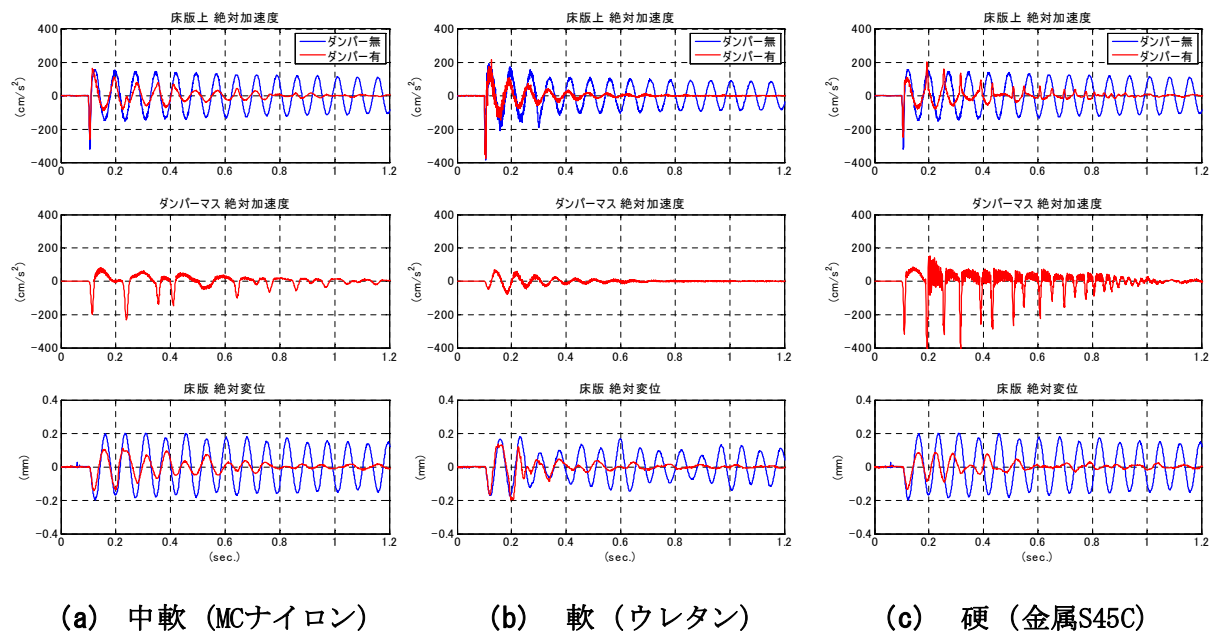


図-25 床版接触部品の材質の違いによる比較

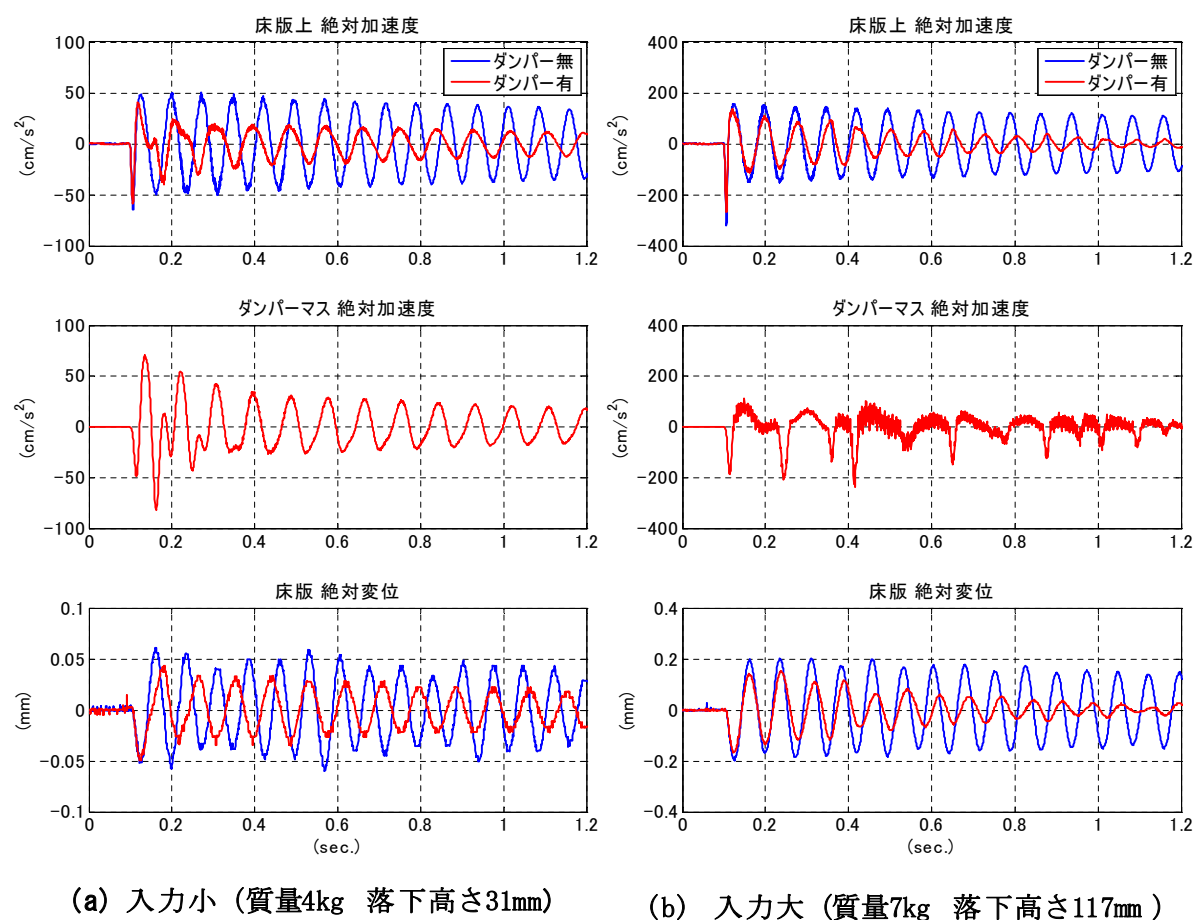


図-26 衝撃入力の違いによる比較

6. まとめ

本研究では、環境問題としての橋梁振動対策工の開発を目的として、供用中の高速道路橋において振動及び低周波音の詳細調査を実施した。また、詳細調査の結果をもとに橋梁振動対策工として、運動量交換型衝撃吸収ダンパーの開発に必要な各構成要素の知見を得るために、モデル実験を実施した。

本研究により得られた知見は、以下のとおりである。

6.1 橋梁調査による知見

- (1) 10 分間連続測定データの周波数分析を行った結果、調査橋梁において、最大の振動加速度は支間の 1/4 測定点で発生しており、そのときの卓越振動数は、13.3Hz である。また、支間 1/2 測定点では、4.0Hz が卓越しており、測定点がジョイント方向に、近づくにつれ 4.0Hz の振動加速度は、小さくなる傾向を示す、またジョイント近傍の測定点では、30Hz 付近の周波数にピークが表れている。
- (2) 10 分間連続測定データの FFT 分析を行った結果、調査橋梁における低周波音の卓越周波数は、4.0Hz である。
- (3) 調査橋梁における単独車走行時の低周波音の卓越周波数は、4.0Hz であるが、車群走行時には測定点の支間位置により振動しやすいモードがあり 13.3Hz 付近の周波数でも、4.0Hz の音圧レベルと同等の音圧レベルとなる場合がある。
- (4) 調査橋梁における支間 1/4 測定点の床版振動の加速度スペクトルでは、単独走行時、車群走行時ともに 13.3Hz が卓越周波数となっている。
- (5) 振動モード分析結果により周波数 4.0Hz は、調査対象橋梁の鉛直曲げ 1 次モード、13.3Hz は鉛直曲げ 2 次モードである。
- (6) ウェーブレット分析結果より、調査対象橋梁において、周波数 13.3Hz 付近の橋梁振動は、大型車輛がジョイントを通過する際の衝撃が起因となり発生し、その後、走行位置により振動しやすいモードの腹の位置を車輛が通過しているときにレベルが高くなっていると考えられる。また、車輛がジョイント通過時に発生している 40Hz 付近の低周波音は、主桁 Web の振動からの寄与が高いものと考えられる。

6.2 モデル実験による知見

- (1) 衝撃吸収ダンパーによる振動抑制効果は、加振直後の初期波形の振幅を抑制する衝撃吸収効果と、衝撃吸収ダンパーの床版への再接触に伴い、振動の

減衰を促進するインパクト効果がある。

- (2) ダンパーマスの質量の違いによる実験結果から、変位の抑制効果は質量が大きい方が高い。
- (3) 床版接触部は、適度な力で床版に押さえ付けた方が、変位の抑制効果は大きい。しかし、押さえ付け力が大きすぎると、インパクト効果が低下する。
- (4) ダンパーマスの固有振動数が高い 5.5Hz と低い 3.8Hz を比較した結果、変位の抑制効果には大きな差が表れない。
- (5) ダンパーマスの減衰比の違いによる比較では、衝撃吸収効果、インパクト効果共に高減衰比 0.42 の方が低減衰比 0.2 よりも変位の抑制効果が大きい。
- (6) 床版接触部の材質の違いによる振動抑制効果を比較すると、衝撃吸収効果は金属、MC ナイロン、ウレタン樹脂の順で効果が大きい。一方、インパクト効果では、衝撃吸収効果とは逆に、軟らかい材質の方が変位の抑制効果が大きい。
- (7) 床版における振動加速度が 70gal と加振力が小さい場合、衝撃吸収効果は表れるものの、ダンパーは床版から離れず一体となり振動し、インパクト効果が表れない。

今後の課題

モデル実験では時間の制約上、きめ細かなダンパー構成要素のパラメータ・スタディは実施できなかった。そこで、本研究の成果を活用し、シミュレーションの実施などにより検討時間の短縮を図り各構成要素の最適値を決定する必要がある。また、今後計画している、実橋における効果確認実験に向け、実橋の床版に対する衝撃吸収ダンパーの重量比と一基あたりのマス重量、対策目的とする周波数別のダンパー設置位置、橋梁への取り付け方法など、具体的な課題を解決する必要がある。

謝辞

本研究において、運動量交換型衝撃吸収ダンパーの理論について指導を頂いた京都大学機械工学科教授松久寛氏に感謝の意を表します。また、橋梁調査・分析及びモデル実験にご協力頂くとともに貴重なご意見を頂いた安田正志氏を始めとする特許機器株式会社の皆様方、石渡俊吾氏を始めとする(株)オリエンタルコンサルティングの皆様方に謝意を表します。

参考文献

- 1) 池田光次、衛藤繁美、永井淳一、安藤亮介、大林正和：鋼鉄桁橋の振動対策工法-中国道一後川橋延長床版工事、EXTEC、(財)高速道路技術センター、第 49 号 Vol.13, No.1, pp35-37, 1999.6.
- 2) 五郎丸英博：橋の振動と発生低周波音、騒音制御、

Vol.122, No.5, pp270-277, 1998

- 3) 佐々木栄一, 關真二郎, 山田均, 勝地弘, 石川祐治, 葛西俊二:同時多点計測による橋梁に起因する低周波騒音の実態分析と対策効果の検証, 土木学会第60回年次学術講演会, pp. 211-212, 2007.9
- 4) 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バンパーの適用, 構造工学論文集, Vol.55, pp, pp.329-342, 2009.3.
- 5) Nakamura, S. and Fujino, Y.: Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge, Structural Engineering International, Journal of IABSE, pp.295-300, Vol.12, No.4, 2002.11.
- 6) 松久寛, 朴正圭, 門馬雅高, 潘公宇, 安田正志:床の運動量交換型衝撃吸収ダンパーによる重量衝撃緩和, 日本機械学会 (No.03-2)VS Tech 2003 振動・音響技術シンポジウム講演論文集, 2003.6, pp.223-226
- 7) 岩井正光, 高橋亘, 山田豊, 鈴木松雄:鋼桁の連続化・箱桁化に伴う補強効果確認試験(坪の内高架橋), 宮地技報, No.13, pp.94-103

(2009年9月24日受付)