

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―

畔柳 昌己^{*1}, 高橋 広幸^{*1}, 上東 泰^{*1}, 安藤 直文^{*2}, 篠 文明^{*3}

Improvement of the Noise and Subsonic Vibration Problem in the Steel Girder Bridge with Concrete Deck (KARIYA Viaduct)

Masami KUROYANAGI^{*1}, Hiroyuki TAKAHASHI^{*1}, Yasushi KAMIHIGASHI^{*1},
Naofumi ANDO^{*2} and Fumiaki SHINO^{*3}

要旨： 刈谷高架橋では、大型車が伸縮装置部を通過する際に生じる突出音と、上部工振動を起因とする低周波空気振動が周辺環境に悪影響を与えていた。突出音対策としてコンクリート床版の増厚と鋼主桁の桁端部のコンクリート巻立てを実施し、剛性を増大することで振動を抑制した。低周波空気振動に対しては、新しく開発した制振動装置であるセンターダンパーと、これまで道路橋に適用事例の少なかった TMD を適用した。これらは、振動計測や FEM 解析によって最適仕様を決定し、目標の環境改善効果を得ることができた。

キーワード： 鋼橋, 環境対策, 突出音, 低周波空気振動, センターダンパー, TMD

1. はじめに

現在の東名・名神高速道路が抱える渋滞解消、ネットワーク化などの課題への対策とし、第二東名・名神高速道路の整備が進められている。このうち、愛知県内は伊勢湾岸自動車道として整備され、通過地域が平坦な農地と市街地であるためほとんどが高架構造で供用された。農地部は PC 橋、市街地の道路・河川等交差部は鋼橋で、高速走行性を確保するために橋長 500m クラスの多径間連続構造となっている。

本稿では橋梁を起因とした突出音、低周波空気振動対策を行った刈谷高架橋と上郷工高架橋の施工事例について報告する（写真-1、図-1）。

刈谷高架橋、上郷高架橋は豊田東 JCT～豊田南 IC に位置する。上部工構造は床版にプレキャスト PC 床版を用いた鋼多径間連続非合成構造である。15m 程度の幅員に対し 3 主桁のいわゆる少数主桁構造である（表-1）。このような形式は経済性、構



写真-1 全景

表-1 構造概要

構造形式	刈谷高架橋 (3径間連続鋼桁) 上郷高架橋 (7径間連続鋼桁)
橋長	刈谷上り 167.15m 刈谷下り 132.0m 上郷上り 422.5m 上郷下り 422.5m
有効幅員	上り線 14.52m, 下り線 14.64m
その他	平面線形: R=4000m~∞ 鋼重: 0.25tf/m ² 下部工: RC橋脚, 杭基礎

表-2 工事概要

工事名	第二東名高速道路刈谷高架橋環境対策工事
工期	2006年9月15日～2007年3月14日
内容	床版下面増厚工 鋼桁ウェブコンクリート巻立て工 センターダンパー工, TMD 工

*1 中日本高速道路(株)

*2 三井住友建設(株)

*3 八千代エンジニアリング(株)

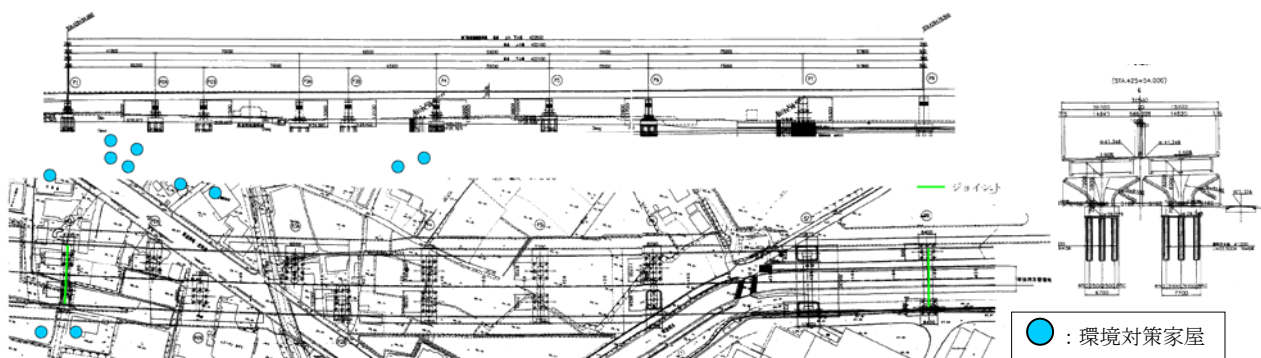


図-1 全体図（上郷高架橋）

造性に優れるものの、コンクリート橋に比べて剛性のはるかに小さいため自動車荷重の影響を受けやすく、騒音・振動などの周辺環境問題が生じることがある。本橋でも平成16年の開通直後から騒音・振動による周辺住民の生活環境悪化が問題となっていた。

本工事は、事前の騒音振動調査やシミュレーションで、騒音振動の発生源は伸縮装置を大型車が通過する際の突出音と、主桁の低周波振動と推測し、対策を実施したものである（表-2）。

2. 騒音、振動抑制効果

2.1 突出音の状況

着工前に実施した騒音振動計測の結果、突出音については、大型のフィンガー型伸縮装置の凹凸面を大型車が通過する際の衝撃は床版に瞬時に伝播しており、伸縮装置通過後0.5秒間に50～80Hzの主桁振動が発生していることが分かった。突出音の発生イメージを図-2示す。

主桁は大型車のバネ下振動と連成されて高次振動が励起し、鋼板の減衰が小さいため1～2秒にわたり振動していた。振動加速度レベルは伸縮装置近傍(測点 VW1)で104dBである。ある程度離れた車両定常走行レベルと見なされる範囲(測点 VW4)では97dBに低下しエネルギーレベルは1/3となる（図-3）。

突出音対策として、①ノージョイント化や伸縮装置部の平坦性の確保 ②ゴム沓の鉛直剛性を増す補強 ③桁遊間部を防吸音シートで覆うなどの漏音対策 ④鋼部材へ制振材貼付け ⑤床版、主桁の増厚 ⑥遮音壁の設置などを検討した。このうち

①～④は課題が多く実効性が乏しいと考え、⑤による低減と⑥による遮断によって確実な対策効果を期待した。

本工事では、伸縮装置近傍の PC 床版下面を増厚し、鋼主桁にコンクリートを巻立てることで部材の剛性を高め、衝撃力、励起振動によるたわみ振動を抑制する工法を実施した。伸縮装置近傍の振動が、一般部の床版振動と同等となることを期待するものである。

2.2 低周波空気振動の状況

伸縮装置の段差による衝撃によって、約3Hzの大型車のバネ上振動が加振されていると考えられる。一方、主桁の固有振動にも3Hz成分の卓越モ

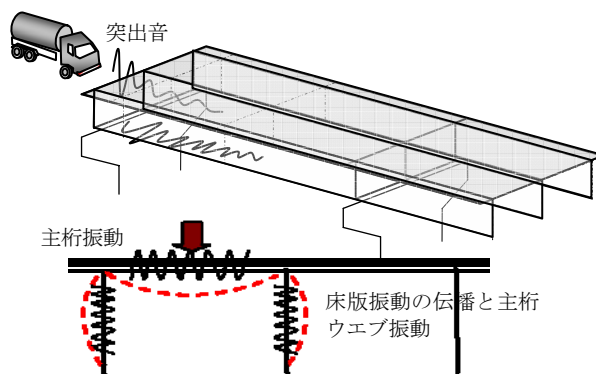


図-2 突出音の発生イメージ

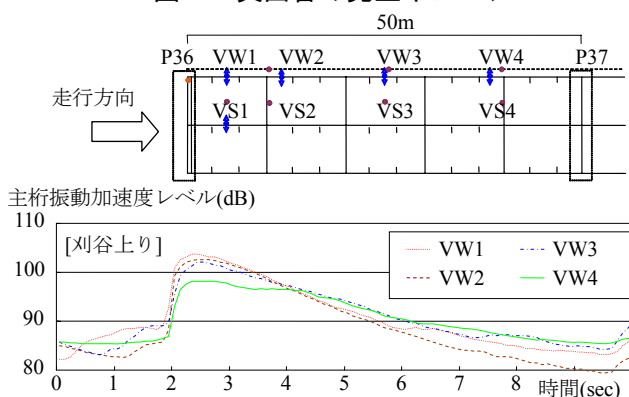


図-3 主桁振動加速度レベル波形

ードがあり、両者の連成により上部工振動は増大し、低周波空気振動が生じているものと予測した(図-4)。計測結果からも、大型車振動、主桁振動、低周波空気振動のモードは3Hz程度で一致した超低周波振動が得られた(図-5)。

低周波振動は、周波数が100Hz以下のものと定義され、特に20Hz以下は超低周波とされる。人には非感聴音であるが、近隣家屋の窓ガラスや建具を振動させる物的影響や、睡眠不足やいらいら圧迫感などの心理的影響、頭痛耳鳴りなどの生理的影響を生じる。また、直進性、透過性が高いため、遮音壁などの防漏音対策では効果が低い。

したがって、対策として上部工振動を直接制御することが有効と考え、センターダンパーとTMD(Tuned mass damper)による制振を実施した。

2.3 増厚・巻立てによる突出音対策

支間6m、厚さ270mmのPC床版には230mmの増厚を行った。また、鋼主桁は板厚20mm程度、桁高3050mmで比較的面外剛性の低い構造であるが、コンクリートの打設性やウェブの補強リブの寸法を考慮し200mmの巻立てを行った。これらの対策により部材の変形が抑制され、床版や鋼主

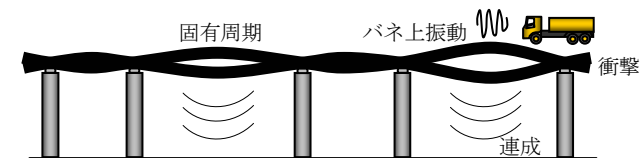


図-4 低周波空気振動発生イメージ

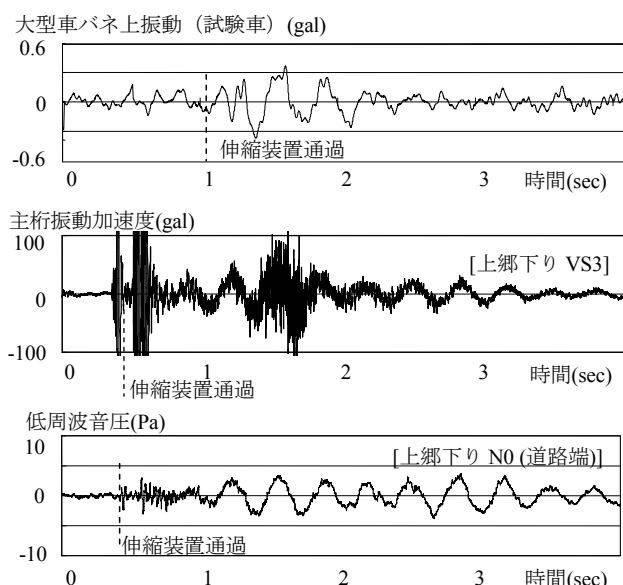


図-5 大型車振動、主桁振動、低周波空気振動

桁の固有振動数は2倍程度となる。

単純には発生騒音の音圧エネルギーは部材振動加速度に比例することから、部材剛性の増大による変形量の減少から音圧低減効果を試算すると、対策により10dB程度の騒音減少が期待できる。ただし、全長にわたって対策を施した場合である。

本橋では重量増加による上下部工の負担増加から対策長は桁端から10mが限界であった。図-6は橋軸方向に無限に連続した点音源からの放射音に距離減衰を考慮し、合成した試算結果であり、伸縮装置近傍の苦情対象家屋付近で3dB程度の騒音抑制効果が期待できた。

対策の結果、増厚・巻き立て範囲内ではほぼ全周波数帯で床版、主桁の振動加速度が大きく減少し、増厚、巻立ての効果が顕著であった(図-7)。騒音は、構造物から近接した測定点では周波数によっては音圧が増加した結果が得られた。測定点での音圧レベルは対策前で200Hz付近がピークであった。対策後は可聴音が少し高音域に移行し、200~400Hz付近が0~5dB程度増加した。また、伸縮装置通過時に発生する30Hz帯の低周波には低減の効果が伺えたが、低周波はがたつきを起こす建具等の共振が問題となるため、卓越する3Hz帯の対策を講じない中での効果の検証はできなかった(図-8)。

増厚・巻立て範囲は鋼ウェブの振動特性がコン

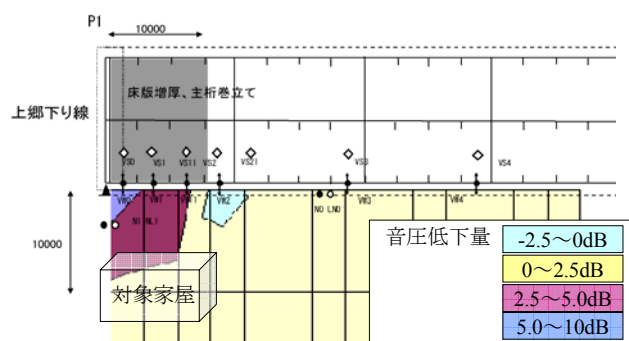


図-6 騒音抑制効果(平面図)

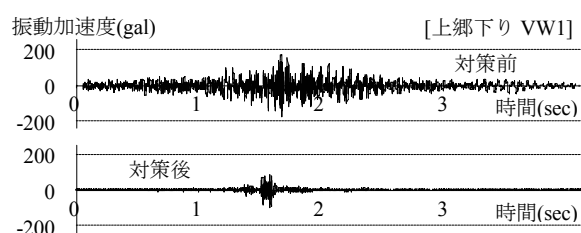


図-7 突出音対策前後の主桁振動加速度比較

クリーン床版と似たものに変化したことから、活荷重による床版振動が大きく減少したと評価でき、対策厚さについては妥当と考える。しかし、結果として受音点では上部工全体からの音を集めるので、今回のように受音点が構造物から離れている場合に大きな騒音抑制効果が得られなかった。

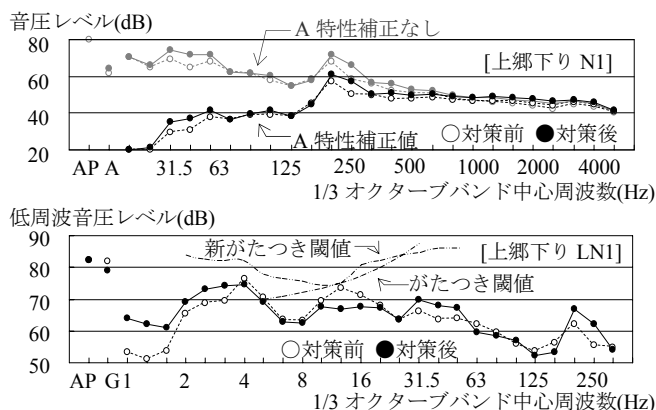


図-8 突出音対策前後の騒音レベル比較

A 特性：人の聴感を考慮した音圧補正
 がたつき閾値¹⁾：建具などががたつき始める音圧レベル
 新がたつき閾値²⁾：アルミサッシなどを対象としたもの

2.4 センターダンパーによる低周波空気振動対策

上郷高架橋について、低周波空気振動が発生している P1～2, P4～5, P5～6 径間は路下制限を受

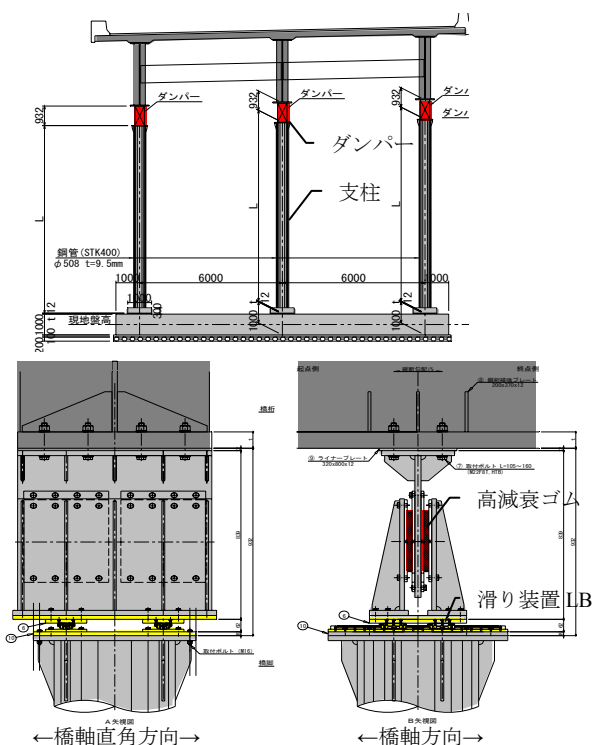


図-9 センターダンパー詳細図

けないため、ここにセンターダンパーを設けて振動抑制を行った。センターダンパーは、支間中央に3基設置し、鋼桁と支柱に取り付けた鉛直プレート間に高減衰ゴムダンパーを配置し、ゴムのせん断ひずみによる履歴減衰によるエネルギー吸収を図る。微小な活荷重振動に対して安定して減衰性能を発揮できるよう高減衰ゴムは薄肉化 ($t=20\text{mm}$) した。さらに、上部工の常時伸縮に対処できるよう、LB (直動転がり支承免震装置) を応用した滑り装置を備えた (図-9, 写真-2)。

事前に平面骨組みモデルによる加速度応答解析によってセンターダンパーの効果を検討した結果、鋼桁の 3Hz 程度の振動は、応答加速度が 1/6 程度に減少することが分かった。

センターダンパーによって、2.5～4Hz の振動モードに対して大幅な振動加速度の低減と減衰効果が得られた。幅広い低周波音領域で音圧を 10dB 程度低減でき、がたつき閾値内に収めることができた (図-10)。

センターダンパーは橋梁上部工の振動対策として従来にない新しい形式であり、構造が簡単で、



写真-2 センターダンパー

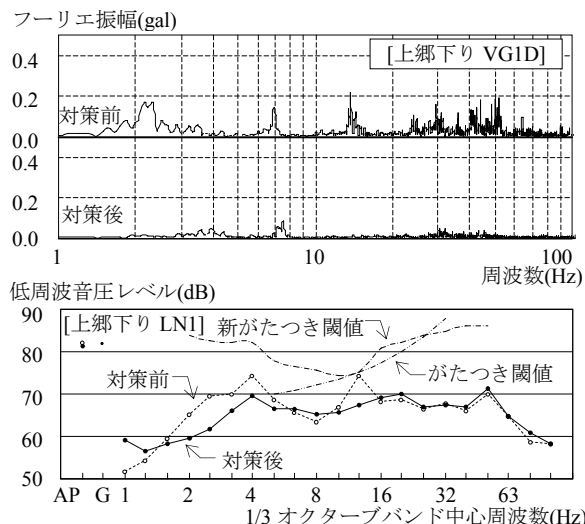


図-10 センターダンパーによる振動抑制効果

振動抑制効果に優れているため、路下の制限がない場合の有力工法と考えられる。

2.5 TMDによる低周波空気振動対策

刈谷高架橋は県、市道と交差しており路下空間が利用できないため、鋼桁内空間に設置できるTMDを適用した。TMDはマス、バネ、ダンパーからなり、構造物の固有振動に同調させることにより、それぞれに発生する振動が打ち消し合うものである（図-11、写真-3）。

過去のTMDの適用事例では、マス重量は制振総重量の1%程度が多く、効果的な制振効果も報告されている。本工事ではこれらを目安に付加重量を設定し、3Hz程度の振動が効果的に抑制できるよう計画した。上部工の固有値解析および現地振動計測より、上り線は低周波振動に明確に影響を与える2つの卓越振動モード（2.5Hz、3.2Hz）が現れていた。一方、支間割の変則な下り線は3つの卓越モード（2Hz、3Hz、5Hz）が現れており、幅広い周波数帯への対応が求められた。

これらを踏まえ、上り線には比較的重いマスを少数設置することで、単一の卓越振動に対する抑制効果の高いA社製を、下り線には比較的軽量なマスを多数設置することで、複数の卓越振動に対する抑制効果があるB社製を適用した。

3次元FEMモデルによる調和応答解析によって効果を検討した結果、TMDを設置することで上部工の応答加速度は1/2以下になり、6dB程度の低

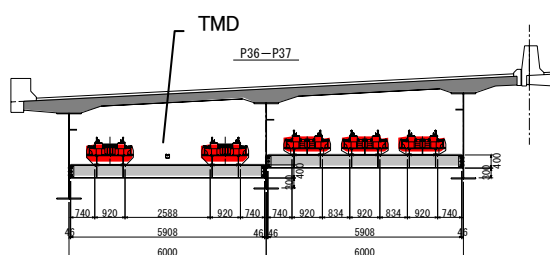


図-11 TMD配置



写真-3 TMD

周波振動抑制効果が期待された。

対策の結果、TMDの振動特性を構造物の卓越振動に同調させることができ、機器の特性どおりに上部工振動を抑制することができ、振動加速度の半減と大きな振動減衰効果が得られた。受音点における対策効果として、卓越する低周波音圧を5～8dB程度低減でき、がたつき閾値内に収めることができた（図-12）。

3. 施工

3.1 床版下面増厚工

全体工期は半年間であった。まず、既設床版の下面の床版支間6m、橋軸方向10mの範囲を厚さ230mmのコンクリート増厚を行った。増厚部は輪荷重による繰り返し荷重の影響を受けることや剥落防止性能を考慮して補強筋を配置し、鋼繊維混入超速硬モルタルを用いて乾式吹き付け工法により3層に分け施工した。

増厚部分の品質は既設床版との付着性能に大きく影響を受けるため、実施工前に実大モデルの施工性確認試験を実施した。下地処理としてのブラスト工は研掃材にアルミナを用い、投射密度を75kg/m²とすれば十分な付着強度(1.5N/mm²)³⁾が確保できることが分かった。また、アンカー施工によるPC床版へ影響がないことなどを確認した。

増厚部の施工はバキュームブラスト工法による既設床版の下地処理、アンカー施工、補強筋組み立て、吹き付け工の順序で行った。吹き付け工は

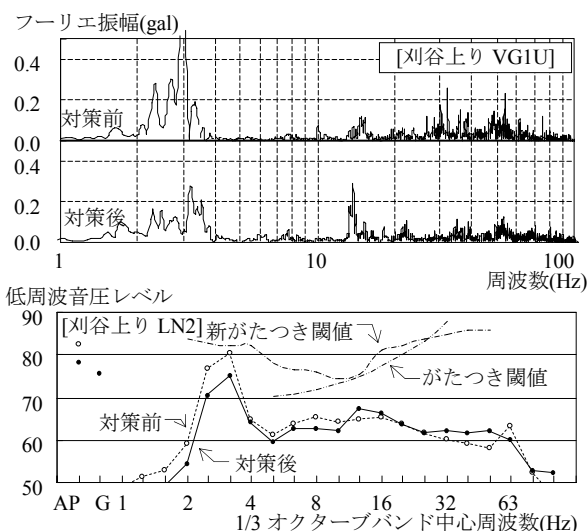


図-12 TMDによる振動抑制効果

1 層目 100mm と 2 層目 110mm で基層を形成し、表層の仕上げ吹き付け 20mm では鋼繊維が表面に突出しないように配慮した。

3.2 鋼桁ウェブコンクリート巻立て工

巻立て後は、鋼製ウェブと巻立てコンクリートの剛比に応じてそれぞれに荷重が分配される。したがって、両者の接合面にはスタッドジベルを配置して一体性を確保し、巻立てコンクリート内には補強筋を配置した。

巻立ては高さ 2.6m、厚さ 200mm を橋軸方向 10m の範囲に実施した。コンクリートの付着性を確保するためにサンダーケレンで鋼桁塗装を除去、下地処理とした。その後スタッドジベルを溶殖し補強筋を組み立てた。型枠は鋼桁上フランジ下 150mm の位置まで組み立て、ここよりポンプ打設を行った。上フランジ直下は脱型後に無収縮モルタルを注入した。鋼桁塗装にスタッドジベル溶殖熱の悪影響はなかった（写真-4）。

3.3 センターダンパー工

フーチングの施工、支柱鋼管（ $\phi 500\text{mm}$ ）の建込み後、センターダンパー本体を取付け、全体の高さを調整した後、支柱基部の無収縮モルタルを打設した（写真-5）。

3.4 TMD工

一般に TMD の架設は施工クリアランスや重量（最大 4.5tf/基）の関係から、現地搬入後一旦分解したものを設置位置で再度組み立てる方法をとるため、1 基当たり 2 日程度の施工日数が標準である。

一方、本橋では交差道路の規制縮小、渋滞緩和と作業の効率化を図るため、分解せず一括架設する方法を採用した。TMD は工場で組み立て、性能検査を行い現地に搬入した。大型フォークリフトで鋼桁直下に搬入、ウインチで引込み、あらかじめ

め鋼主桁間に設けた受梁に据え付けた。交差道路上の 11 基の架設は 2 日間で完了し、道路規制は県、市道それぞれ 1 日であった（写真-6）。

4. まとめ

①床版増厚・桁端巻立ては既設床版、主桁に対して極力影響を与えないように施工を行うことができた。効果として伸縮装置部に車両が通過する際の衝撃に対する振動は抑制された。しかし、対策範囲が桁端部に限定されたことから、橋梁全体から発生する音の影響により対象家屋への効果は少なかったが、遮音壁による遮蔽対策を同時に行うことで効果を得ることができた。

なお、刈谷高架橋において桁端部の横桁と床版の付着切れが本対策工で改善され、大幅な振動加速度の低減効果が見られた。これは NEXCO で実施されている橋梁端部の剛性強化の効果が高いことを表している。

②センターダンパーと TMD は期待通りの振動抑制効果が得られた。センターダンパーは広範囲の周波数帯に効果があるものの桁下の制限があり、TMD は卓越する周波数帯に対して有効ではあるが桁下の制限が無い。両者とも有効な振動対策として使い分けられると考えられる。

参考文献

- 1) 環境庁、低周波音の測定方法に関するマニュアル、平成 12 年 10 月
- 2) 落合ほか、低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて、騒音制御、Vol.26、No.2(2002) pp.120-128
- 3) 日本道路公団：コンクリート構造物の断面修復工法施工マニュアル(案)、平成 15 年 3 月



写真-4 増厚、巻立て全景



写真-5 センターダンパー全景



写真-6 TMD全景