

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	橋梁に起因する振動・低周波音の特性及び制御に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	岩吹啓史
Author(English)	Hiroshi Iwabuki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11015号, 授与年月日:2018年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐々木 栄一,廣瀬 壮一,岩波 光保,竹村 次朗,千々和 伸浩,小林 裕介
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11015号, Conferred date:2018/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

橋梁に起因する振動・低周波音の特性及び制御に関する研究

東京工業大学

岩吹 啓史

目次

第1章 序論

1-1	背景	1
1-2	本研究の目的	4
1-3	既往の研究	5
1-4	本研究の構成	9

第2章 車両走行に伴う実橋梁の振動および低周波音の分析

2-1	はじめに	26
2-2	実験概要	27
2-2-1	対象橋梁	27
2-2-2	試験車	27
2-2-3	測定項目	28
2-2-4	実験条件	28
2-3	対象橋梁の振動特性	28
2-4	試験車の振動特性	29
2-5	伝播経路における周波数特性	30
2-5-1	時刻歴波形	30
2-5-2	周波数特性	31
2-6	実験結果および考察	31
2-6-1	主桁たわみ	32
2-6-2	主桁振動加速度	32

2-6-3	橋台振動加速度	33
2-6-4	低周波音圧レベル	34
2-7	数量化理論 I 類を用いた実験分析結果	34
2-7-1	分析結果	35
2-7-2	低周波音圧レベルと振動加速度レベルの違い	36
2-8	まとめ	36

第3章 振動の発生要因と伝搬経路に関する検討

3-1	はじめに	69
3-2	研究対象の沿線状況と環境振動状況	70
3-3	対象橋梁	70
3-4	振動測定実験	71
3-4-1	過去の振動レベル測定	71
3-4-2	振動測定の方法	71
3-4-3	振動測定の結果	74
3-5	橋梁振動の要因分析	76
3-5-1	路面性状調査結果	76
3-5-2	部分的な舗装補修工事の影響	77
3-5-3	床版調査結果	77
3-5-4	数値解析による考察	77
3-6	まとめ	78

第4章 環境対策工としての TMD の設置効果

4-1	はじめに	100
4-2	供用中路線に設置された TMD の効果検証	101
4-2-1	実験対象橋梁の概要	101
4-2-2	TMD の仕様	101
4-2-3	測定対象項目の選定	101
4-2-4	測定結果	102
4-3	TMD 制振効果の数値シミュレーション	103
4-4	TMD の有用性と課題	104
4-5	まとめ	104

第5章 減衰量を電磁制御する発電型 TMD の提案と適用性

5-1	はじめに	117
5-2	発電型 TMD の概要	118
5-2-1	電気回路内の抵抗 R による制御	118
5-2-2	発電特性および機械特性の検証実験	119
5-3	数値シミュレーションによる検討	120
5-3-1	数値シミュレーションモデルの概要	121
5-3-2	目的に合わせた抵抗値の設定の検討	122
5-4	実験の対象橋梁	124
5-4-1	実験対象橋梁の概要	124
5-4-2	実験対象橋梁の振動特性	124

5-5	供用中高速道路橋を用いた実大橋梁実験	125
5-5-1	実験概要	126
5-5-2	実験結果および考察	126
5-6	まとめ	128

第6章 結論

6-1	本研究の結論	153
6-2	今後の課題	156

第 1 章

序論

1-1 背景

高速道路事業は、1957年（昭和32年）10月に国土開発縦貫自動車道建設法の規定に基づき小牧～西宮間において日本道路公団に対して施工命令が出され、名神高速道路の建設が始められたことが始まりである。以後、日本の高度経済成長とともに高速道路の建設・維持管理が進められてきたが、その間に様々な環境問題に直面し対応を行ってきた。

道路事業において環境問題が顕在化し始めたのは、1970年頃からである。東京都新宿区牛込柳町で自動車から排出される鉛の影響で沿道住民の多数の方が鉛中毒と診断された報道¹⁾や、東京都杉並区の高校で体育授業中の生徒が突然目の痛みや頭痛等を訴えて倒れ40数人が病院へ運ばれた光化学スモッグ事件¹⁾等が挙げられる。この頃から、国内では公害問題およびこれらの訴訟と法制度の整備が続き、高速道路事業では、地域住民の実力行使を伴う建設反対運動や、工事実施認可取消し要求訴訟、既供用路線での抜本的対策を求める住民等の抗議行動等に直面し、環境問題に対し取り組んできた。現在では、自動車技術の進歩によりNO_xの排出量は非常に小さくなっている。環境省が平成30年3月に報道発表した大気汚染物質ごとの環境濃度の推移を図1-1-1に示す。

大気汚染と同様に環境問題として顕在化したのが、騒音、振動および低周波音である。

騒音では、大気汚染の問題同様に1970年頃から道路交通騒音の低減への社会の要求が盛んになった。供用中高速道路では、性能、景観および維持管理の視点から構造を統一した遮音壁「日本道路公団統一型遮音壁」が開発され²⁾設置が行われた。これに並行して、新設高速道路では騒音レベルを予測する研究が行われた。日本音響学会より、1975年に道路交通騒音予測式の最初のモデル「ASJ Model 1975^{3),4)}」が発表され、以後は法令改正、道路構造物の特殊箇所および道路構造の反映や、最新のデータを取り入れた予測精度の向上などにより改定が行われている。

振動では、公害が大きな社会問題として取り上げられたことを受けて、日本道路公団では1973年頃から全国の高速道路沿線の実態調査を行い^{5),6)}、交通振動の地盤振動の特性について研究が開始された⁷⁾。近年では、振動の環境問題は振動規制法に基づく要請基準を超えることは少ないが、構造物境や橋梁ジョイント部から発生する突発的な振動など、新規供用路線や供用年数が経過した路線に関わらず苦情の発生する場合がある。

低周波音では、大気、騒音と同様に 1970 年頃から、高速道路沿線住民から「家屋のガラス窓や障子がガタガタと振動する」といった苦情が寄せられたのが始まりである⁸⁾。当時は低周波音についての研究、知見は十分でなく、実態や発生メカニズム等が把握されていなかったことから、「ガタガタと振動する」との苦情内容から地盤振動によるものと考えられることがあった。環境問題において振動は振動加速度[m/s²]から算出される振動レベル[dB]で評価される。高速道路に起因する振動の伝播媒体である地盤の振動測定結果より家屋の振動レベルが小さく、高速道路に起因する振動の影響が小さい場合は、高速道路に起因する低周波音の問題であることが考えられる。低周波音は音であることから伝播媒体である大気中の低周波音圧[Pa]から算出される低周波音圧レベル[dB]で評価される。高速道路に起因する低周波音の測定結果より低周波音圧レベルが大きい場合では、振動問題ではなく低周波音問題として原因究明と対策工開発に取り組んできている。具体的な対策として、鋼鈹桁の桁間隔の短縮や桁高の増高、端横桁の剛性増加、床版厚の増加など、橋梁の剛性を高める措置や、伸縮装置の設置位置および形式について検討が行われてきた⁹⁾。近年では、ダンパや支柱の設置など、橋梁を制振する技術で対応が行われることがある¹⁰⁾。

近年、土木技術や自動車技術など産業全体の技術力向上により環境問題の解決に資する対策が行われているものの、騒音、振動および低周波音は苦情の発生が継続している。図 1-1-2 から図 1-1-4 は、環境省が公表している平成 28 年度の全国の地方公共団体が受理した騒音、振動および低周波音の苦情件数の推移である。騒音および振動は、平成 10 年までは減少傾向にあったものの、その後数年間は増加し、以降微増微減を繰り返している。低周波音の苦情においては、平成 12 年に大幅に増加し、以後増加傾向が続いている。

法整備は、騒音規制法で自動車騒音の規制^{11),12)}、振動規制法で道路交通振動の規制^{11),13)}が施行され、騒音はエネルギー的に等価した等価騒音レベル (L_{eq})、振動は 80% レンジの上端値 (L_{10}) で環境基準又は要請限度が定められている。しかし近年の高速道路沿道における騒音および振動に関する苦情は瞬間的・突発的な騒音および振動によるものが多く、これらについては法で定められた基準値はない。また、低周波音については法で定められた基準値がなく、環境省が参照値を公表している¹⁴⁾に留まっている。これら法で定められた基準値のない環境問題の対策に苦慮し、これが道路事業者の課題となっている。

このような状況下で、道路事業者が抱える近年の環境問題のうち、その多くを占める問題が橋梁に起因する騒音、振動および低周波音の発生である。これら環境問題の発生および伝播状況の模式図を図 1-1-5 に示す。騒音は、車両走行に伴う走行音や構

造物透過音および伸縮装置部およびその下部からの突発音などが挙げられる。振動は、上部構造から橋脚、基礎および地盤を介して家屋に伝播することが挙げられる。低周波音は、上部構造の床版、桁、遮音壁等平板構造を有する部材の振動が大気中に放出され家屋に伝播することが挙げられる。

環境対策は、騒音源・振動源・低周波音源などの発生源対策、伝播経路対策、受音点・受振点対策の3つに大別される。土木分野では基本的に発生源対策と伝播経路対策を行う。発生源は大型車両、舗装路面の凹凸、何らかの変状等による構造物特性が挙げられる。伝播経路には橋脚・橋台や地盤などの構造物、大気が挙げられる。騒音、振動および低周波音が発生源から伝播経路により家屋に伝播すると、環境問題として苦情が生じることがある。よって、発生源および伝播経路を特定し効果的な対策工を立案することが、環境問題を解決する重要な検討項目となる。

次に、具体的な環境対策の手法を図 1-1-6 に示す。音を大気振動と考えると、地盤振動とともに周波数領域で考えることができる。大気振動は、総務省¹⁵⁾や環境省¹⁶⁾では、100Hz 以上を騒音、100Hz 以下を低周波音としている。その低周波音の中でも、人の耳では聞くことができないとされている 20Hz 以下を超低周波音としている。地盤振動は、JIS 規格 (JIS1510) により振動に関する環境の評価は定格で 80Hz 以下としている。環境問題が生じた際、発生源から伝播経路を介し苦情宅で問題となる周波数帯域を特定することが必要となる。この周波数帯域により、対策は大きく二つに分けられる。ここで重要となるのが振動の減衰効果である。距離減衰や回折減衰等の減衰は、高い周波数ほど大きく、低い周波数ほど小さいことから、100Hz 以上の騒音対策には減衰効果が見込める伝播経路対策、100Hz 以下の低周波音や振動対策には減衰効果が小さいことから発生源対策とすることが、費用対効果の大きい効率的な対策工を検討することができる。伝播経路対策には、遮音壁や裏面吸音板、騒音吸収装置など既に一般的な対策が施され普及している。一方、発生源対策は、橋梁上部構造の剛性をあげること、舗装を平滑化すること、などが挙げられるが、対象となる周波数帯域をターゲットとし橋梁振動および低周波音を低減させる環境対策工として、Tuned Mass Damper (TMD)^{17)~19)}や Impact Mass Damper (IMD)^{10),20)}を高速道路で設置している事例がある。これらは高速道路の環境問題対策として今後施工が検討されていることから、本研究で着目した。TMD とは、マス、ばね、ダンパで構成される装置で、車両が橋梁上を走行する際に発生する振動の固有周期に対しばねで支持されているマスを同調させることで、これら装置の反力により橋梁の振動を減衰させるものである。この TMD を運動量保存の法則を用いて応用したものが IMD である。IMD とは、マスと床版の接触により、橋梁上を走行する車両の運動量が床版を介してマスの運動

量に交換されることで床版の運動量の低減を図る装置である。TMD と IMD を写真 1-1-1 に、IMD の原理を図 1-1-7 に示す。TMD や IMD は、橋梁振動の減衰を高める制振装置で、それぞれ振動一次モードの数 Hz 帯域や振動二次モードの十数 Hz 帯域の対策で使われており、環境問題の原因となる周波数帯域の減衰効果を高める設計が行われている。環境問題対策の手法を図 1-1-8 に示す。しかしこれらの装置は、一度設置されるとメンテナンスを行うことが少なく、減衰効果の継続を確認する維持管理が必要となる。さらに、橋梁は供用年数が経過すると振動数および減衰定数が変化すること²¹⁾や、コンクリート構造物の空隙発生に伴い固有振動数が変化すること²²⁾、路面の凹凸が大型車両の振動を増幅し車両と橋梁の連成振動を生じさせ周期性路面により振動特性が変化すること²³⁾などが報告されている。これらのことから、橋梁の固有振動数や減衰量の変化が懸念され、環境対策工である TMD や IMD の対象周波数および減衰量の調整が必要と考えられるが、既設の TMD や IMD に搭載されているオイルダンパを用いた減衰装置は減衰量の調整をオイル粘性で行うため、オイル交換が必要となり費用および労力のコスト面で課題がある。

以上のことから、本研究では、橋梁の加振源となる大型車両および橋梁振動の特性と発生する低周波音を分析し、振動の発生要因および伝播経路を検討するとともに、環境対策工の一つである TMD に着目し橋梁振動制振および低周波音低減についてその設置効果を確認する。その一方で、TMD の設定が容易に変更できずメンテナンスが困難である課題があることから、これらの解決のため、TMD の減衰装置に着目し減衰量を容易に電磁制御するとともにメンテナンスの省力化を期待できる対策工としてオイルダンパを電磁減衰装置に置き換えた発電型 TMD を提案する。さらに、供用中の高速道路橋において従来型の TMD または発電型 TMD を稼働させた状態での交通振動実験を行い、発電型 TMD の橋梁振動および低周波音の低減・抑制効果を分析し、環境対策工としての発電型 TMD の適用性について検証する。

1-2 本研究の目的

本研究は、近年の環境問題として生じることの多い橋梁に起因する振動・低周波音について、発生源となる橋梁や大型車両の振動特性および伝播経路を考慮した振動伝播特性を把握するとともに、環境対策工の一つである TMD (Tuned Mass Damper) に着目し、その減衰装置をオイルダンパから電磁減衰装置に置き換えた発電型 TMD を

提案することで、発生源の振動特性変化への対応および減衰量の容易な電磁制御を可能とする環境対策工の高度化を目的とし、以下について検討を行う。

- (1) 車両走行に伴う大型車両および実橋梁の振動特性と発生する低周波音の分析
- (2) 振動の発生要因と伝播経路に関する検討
- (3) 環境対策工としての TMD の設置効果
- (4) 減衰量を電磁制御する発電型 TMD の提案と適用性

1-3 既往の研究

ここでは、本研究を実施の上で参考にした既往研究について整理し、本研究の位置付けについて示す。

(1) 大型車両および橋梁の振動特性に関する研究

橋梁振動および低周波音の発生要因として、(a)大型車両の振動特性、(b)舗装路面の凹凸、(c)過積載車両の影響、(d)走行車両の複合的な挙動、(e)走行位置が挙げられる。

(a)大型車両の振動特性は、橋梁振動に影響を及ぼし、連成振動を発生させていることを示す研究が報告されている。亀田ら²⁴⁾は、橋梁を電気・油圧サーボ方式の起振機（最大加振力 3tonf）に正弦波で加振する実験を行い、3軸の長距離トラックおよびダンプトラックを橋梁上に停車させた状態と車両が無い状態を比較した結果、車両が無い状態では橋梁全体が同位相で振動する 1 次モードの大きなピークがあるのに対し、車両を載せた状態ではこのピークが 2 つに分かれ、共振曲線の振幅は車両が無い状態よりも低下していることから、車両が動的連成により制振効果を及ぼしていることを報告している。さらに、実車には様々な動的機構が存在し、連成系の振動は載荷車両から複雑な影響を受けることがわかったと結論付けている。この実車の動的機構を考慮し、リーフ式サスペンションを有する大型車両の後輪ばね上振動（3Hz 付近）と橋梁のたわみ 1 次振動（3Hz 付近）との連成振動を対象とした研究^{17)~19)}や、大型車両の後輪ばね下振動（10-20Hz 付近）と 10-20Hz 付近の橋梁のたわみ 1 次振動²⁵⁾またはたわみ 2 次振動²⁰⁾との連成振動を対象とした研究が報告されている。また、大型車両のサスペンションの要因として、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下国総研）は大型車両の車種およびサスペンションの違いによる振動特性が橋梁振動に影響を及ぼすことを報告^{26)~28)}している。

(b)舗装路面の凹凸は、室井ら²⁹⁾が3軸トラックおよび6軸セミトレーラを用いた走行実験により路面凹凸と車両のばね上振動との連成振動が生じ大きく加振することを示しており、広井ら²³⁾が波長の長い路面凹凸が原因となり3Hz付近の大型車両のばね上振動が大きく励起し橋梁振動との連成により運転者および積載物に与える影響の対策に関して報告している。いずれも(a)で大型車両の振動特性が橋梁振動に影響を与え、連成振動を発生していることと同様に、舗装路面の凹凸も橋梁振動に影響を与え、連成振動を発生していることを示している。

(c)過積載車両の影響は、橋梁の疲労が重大な損傷となる鋼橋で重要視されている³⁰⁾⁻³⁵⁾。近年の研究事例として、大型車両の通行特性および主桁の大型車両による疲労損傷度を確認したこと³⁴⁾や、重量車両特性を把握するためのWeigh-in-Motionを含む光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムで5年間にわたる長期継続的モニタリングを実施し、曜日や車線により傾向が異なるものの、10tf以上の重量車両は夜間に増加する傾向があることを明らかにしたこと³⁵⁾が示されている。これらのことから、過積載車両は橋梁振動に寄与し、その大きさは走行時間帯で変化することが考えられる。

(d)走行車両の複合的な挙動は、比較的重量の小さい走行車両でも大きな振動が生じることを報告した事例³⁶⁾があることから、走行車両の総重量だけでなく、走行車両のばね剛性を含めた複合的な挙動に影響を及ぼすものと考えられる。

(e)走行位置は、都市内における高架橋でよく採用されているT型橋脚では、大型車両の走行位置による上部構造への偏載荷により、T型橋脚のロッキング振動が大きく卓越し、沿道周辺に伝播していることを報告した事例³⁷⁾が示されている。

このように、個々の振動発生要因が振動苦情として影響していることを報告している研究はあるが、これらの要因を同一条件下で比較検討し個々の振動発生要因に対する寄与の評価が示されていないことから、本研究では、大型車両の車軸数、サスペンション種別、走行速度、走行位置、積載の有無および路面段差の有無といった橋梁振動に及ぼす発生要因が、橋梁振動および低周波音の発生にどの程度寄与しているか明らかにすることを目的として、国総研試験走行路内の橋梁上に大型車両を走行させることで、一般車両の走行などによる影響を排除した状態で橋梁を加振する実大橋梁振動実験を行った。

(2) 橋梁振動の発生要因と伝播経路に関する研究

道路交通振動においては、橋梁上部工の振動測定と解析の結果を比較した研究が多く行われている。たとえば、蘇迪ら³⁸⁾は、4軸25tf試験車両の単独走行時での振動

測定結果から、床版の連続化が橋梁振動の加速度応答や応力に効果的であることや、解析から応答応力に差が生じる原因について述べている。発生した振動問題の解決を目指し費用対効果の高い対策を検討するためには、振動の原因と橋梁から家屋までの振動伝播を明らかにすることが不可欠である。徳永ら³⁹⁾は、道路交通振動問題は家屋床における振動レベルおよび家屋の振動増幅が大きく寄与していることから、発生源対策や伝搬経路対策として、高架道路沿道で測定した水平方向振動地盤加速度を家屋地盤に入力し3階床面に相当する質点の応答加速度を算出する解析を行っている。解析の妥当性の検証については、当該家屋と固有振動数がほぼ同等である3階建モデルハウスで起振機試験での検証にとどまっており、供用中の高架道路から発生するランダム加振や橋梁・地盤の伝播経路を考慮した検証がなされていない。

一方で、鉄道振動において、廣瀬ら⁴⁰⁾および斎藤ら⁴¹⁾は、対策工選定に重要である解析手法について、三次元境界要素法よりも計算効率を高めた2.5D-3D高速多重極境界要素結合解法を提案し、その有用性を示すとともに防振溝による振動低減効果を確認している。佐野ら⁴²⁾は、鉄道走行時における木造2階建アパート床の固有振動把握のためのモーダル解析を行っている。モーダル解析の実験は、建物内部の床面をインパクトハンマーで加振する方法としている。

北村ら^{43),44)}は、不規則に変動する振動の評価指標として、ある設定したレベルを超過する暴露時間（あるいは時間率）が実情に合っているのではないかとする立場に立った不規則振動論におけるレベル超過問題の適用を試み、多車線で多車種の車両が通過する沿道で実測した振動速度波形に、非定常部の存在を考慮したレベル超過問題を適用した。

振動の伝播経路対策として、石井ら⁴⁵⁾は、地盤振動の距離減衰の特性および地中壁施工前後での平面的な伝播特性の変化について起振機実験を行い考察している。距離減衰は、10Hz以下では振源付近では実体波が主体であり減衰が大きいですが、一定距離以上離れると表面波が卓越するため緩やかな減衰になり、15Hz以上では10Hzと同様の傾向が見られるものの振源から離れると一定間隔で波打ちしながら減衰する現象を確認している。地中壁施工後は、総じて振動低減効果が見られるものの、15Hz以上では壁背面において波打つような防振効果の山と谷が繰り返し発生していることを示した。また、室内試験では地盤材料を用いた模型実験が行われてきたが、EPS（Expanded Poly-Styrol）ブロックを模擬地盤材料として用いた振動遮断に関する実験^{46),47)}が実施されており、鍋島ら⁴⁸⁾はEPS模擬地盤を用いて鋼管列による振動遮断実験を行っている。振動加速度の振幅比で評価した結果、100Hz以上では周波数が高くなるほど減衰比が小さくなり遮断効果が高いものの、50Hzでは減衰は見られず遮断

効果は低い結果であったと述べている。中谷ら⁴⁹⁾は、スクラップタイヤを用いた新たな地中振動遮断壁を提案し実フィールドに埋設して加振実験を実施したところ、振動低減効果が得られる周波数範囲は重錘加振で40~60Hz、重機加振で45~75Hzであることを示している。

以上のことから、橋梁振動の発生源および伝播経路は振動数が主たる因子となっており、環境問題として振動対策を行う場合、対象周波数が大きい場合は減衰効果を期待した伝播経路対策が有効であるが、対象周波数が小さい場合は伝播経路での制御が困難であり、発生源の対策を行うことが有効と考えられる。

(3) 橋梁振動の制振を目的とした TMD の研究

橋梁に起因する振動・低周波音における発生源対策の一つに、対象となる周波数帯域をターゲットとし橋梁振動を低減させる TMD (Tuned Mass Damper) がある。TMD は 1909 年にドイツ人の Hermann Frahm によって考案され、その後開発が進められてきた⁵⁰⁾。土木分野では 1980 年頃から取り入れられ、橋梁の振動抑制について研究が行われている^{51)~57)}。例えば、阿部ら^{55),56)}は多数個の同調質量ダンパがもつ固有振動数で対象構造物の固有振動数のまわりのあるバンド幅に分布させる MTMD (Multiple Tuned Mass Damper) を用いた設計手法、吉中ら⁵⁷⁾は複数モードを制御する分散型 TMD の提案など、対象周波数に幅を持たせた設計が提案されている。一方、近年では環境対策工として TMD の検討が行われるようになり^{58)~60)}、村井ら¹⁷⁾は TMD が低周波音の抑制に結びついていることを実橋実験で示した。TMD は一般的に数 Hz 帯域の橋梁振動対策として用いられる一方、建具のがたつきなどの問題が発生する十数 Hz 帯域の対策として、長船らは運動量交換型の衝撃吸収ダンパである IMD^{10),20)}を提案している。IMD は、装置の構成は TMD と概ね同じであるが、床版とマスとを接触させ、そのインパクト効果により橋梁上を走行する車両の運動量が床版を介してマスの運動量に交換することで床版振動を低減させる。さらには、高速道路において、環境対策工として TMD や IMD が活用されている事例が長船²⁰⁾や深田⁶¹⁾によって紹介されている。しかし、TMD や IMD は一度設置されるとメンテナンスを行うことが少なく、減衰効果の確認および設定の調整が困難であること、橋梁の固有振動数や減衰量の変化に対する調整が必要であるが、オイルダンパを用いた減衰装置は減衰量の調整をオイル粘性で行うためオイル交換が必要となり、費用および労力のコスト面がかかるなどの課題がある。

(4) 発電型 TMD の提案に寄与する研究

(3)で述べた課題より、TMD の減衰装置に着目した。一般的な TMD の減衰装置はオイルダンパで構成されるが、竹谷ら^{62),63)}は、TMD のオイルダンパを電磁減衰装置に置き換えオイルダンパの減衰の役割を電気回路の抵抗値で制御する二質点同調質量系発電デバイス (Tuned Mass Generator : TMG) を提案している。これは、橋梁の制振効果よりも発電効率の向上を目的としたデバイスで、マス質量は 100kg 程度で構成されている。TMG の研究では、発電に有利な設置構成と設計を行い、解析、室内実験および実橋実験によりこれらの有用性を示している。発電効果を期待する条件下では、同調質量ダンパは単質点よりも二質点の方が有利であることは Tang and Zuo⁶⁴⁾ も示している。

一方で、高速道路橋に設置されている TMD は単質点の同調質量ダンパが多く、竹谷らや Tang and Zuo が示した二質点の発電デバイスをマス質量 1,500kg クラスの単質点 TMD に展開するとともに、橋梁振動エネルギーの吸収量を増大させるため TMD の設計方法^{55),56),65)-68)}を応用することが望まれる。さらに、竹谷ら⁶²⁾は減衰比の調整によって制振と発電のバランスを目的に合わせて設計できることを示しているが、橋梁制振を目的とした TMD での検証は行われていないことから、橋梁制振を目的とした電磁減衰装置を有する TMD の実証が望まれる。

1-4 本研究の構成

本研究は、図 1-1-9 に示すとおり全 6 章で構成されている。以下に、各章の内容について概説する。

第 1 章「序論」では、本研究の背景、目的、既往の研究および本論文の構成について述べている。近年、高速道路沿線では、橋梁に起因する振動・低周波音が環境問題として生じている。本研究では、この環境問題解決のため、発生源となる橋梁や大型車両の振動特性および伝播経路を考慮した振動伝播特性を把握するとともに、環境対策工の一つである TMD (Tuned Mass Damper) に着目し、減衰装置をオイルダンパから電磁減衰装置に置き換えた発電型 TMD を提案し環境対策工を高度化することが目的である。

第 2 章「車両走行に伴う実橋梁の振動および低周波音の分析」では、橋梁に起因する振動・低周波音の発生源の振動特性を把握するため、橋梁上を走行する大型車両の車軸数、サスペンション種別、走行速度、走行位置、積載の有無および路面段差の有

無等の発生要因に着目し、橋梁各部材の応力、変位、振動加速度および低周波音圧レベルを測定する実大橋梁による振動実験を実施し、測定データを考察するとともに数理化理論を用いて橋梁振動および低周波音に対する発生要因の寄与度を分析する。

第3章「振動の発生要因と伝搬経路に関する検討」では、供用後年月が経過している高速道路橋において生じている橋梁に起因する振動問題について、発生源および伝播経路のメカニズムを究明するため、効率的に橋梁の振動モードを算出する方法としてレーザドップラ速度計 (LDV) を用いた非同時多点測定を提案し実施するとともに、橋梁、家屋およびその間の地点における振動加速度の同期測定および数値解析を行い、発生要因および伝播経路を分析する。

第4章「環境対策工としての TMD の設置効果」では、橋梁に起因する低周波音低減を目的として供用中高速道路橋に設置される TMD の効果を検証するため、道路交通振動を与えた状態で数値解析を実施するとともに、振動加速度および低周波音圧レベルを測定し、比較検証を行っている。また、橋梁の固有振動数や減衰量が変化する可能性が示されている既往研究に基づいて、TMD の課題を示している。

第5章「減衰量を電磁制御する発電型 TMD の提案と適用性」では、TMD の減衰装置をオイルダンパから電磁減衰装置に置き換え、その電気抵抗値を変化させることで容易に減衰量を調整できる発電型 TMD を提案し、橋梁振動の制振効果および低周波音低減効果を検証することを目的として、供用中実大橋梁による道路交通振動実験を行い環境対策工としての発電型 TMD の適用性について検証している。

第6章「結論」では、本研究の結論を示すとともに、今後の課題について述べている。

参考文献【第 1 章】

- 1) 厚生省：昭和 45 年度公害白書，1971.5.
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3193736/www.env.go.jp/policy/hakusyo/hakusyo.php3?kid=146>
- 2) 田村幸久：新しい遮音壁の提案，高速道路と自動車 vol18，pp.25-30，1975.
- 3) 石井聖光：道路交通騒音予測計算方法に関する研究（その 1）－実用的な計算式について－，日本音響学会誌，vol.31，No.8，pp.507-517，1975.
- 4) 池谷和夫：数学モデルと評価量について－道路交通騒音予測計算方法に関する研究（その 2）－，日本音響学会誌，vol.31，No.9，pp.559-565，1975.
- 5) 北村豊：高速道路における交通振動の実態，日本道路公団試験所報告，昭和 49 年度，pp.298-304，1975.
- 6) 北村豊：道路交通振動に関する実態調査報告，日本道路公団試験所報告，昭和 50 年度，pp.305-312，1976.
- 7) 北村豊：自動車走行による地盤振動特性に関する研究，昭和 49 年度，pp.305-314，1975.
- 8) 北村豊，山田次男：低周波空気振動問題について，日本道路公団試験所報告，昭和 50 年度，pp.324-344，1976.
- 9) 山田伸志：高速道路橋から発生する低周波音の発生メカニズムとその対策，環境技術 vol.10，No.8，pp.672-675，1981.
- 10) 長船寿一，山本稔：高速道路橋の騒音・振動対策，橋梁と基礎 2011 年 11 月号，2011.
- 11) 環境基本法：第二章 環境の保全に関する基本的施策，第三節 環境基準，第十六条
- 12) 騒音規制法：第四章 自動車騒音に係る許容限度等（許容限度），第十六条
- 13) 振動規制法：第四章 道路交通振動に係る要請（測定に基づく要請），第十六条
- 14) 環境省：低周波音問題対応の手引書，2004.6.

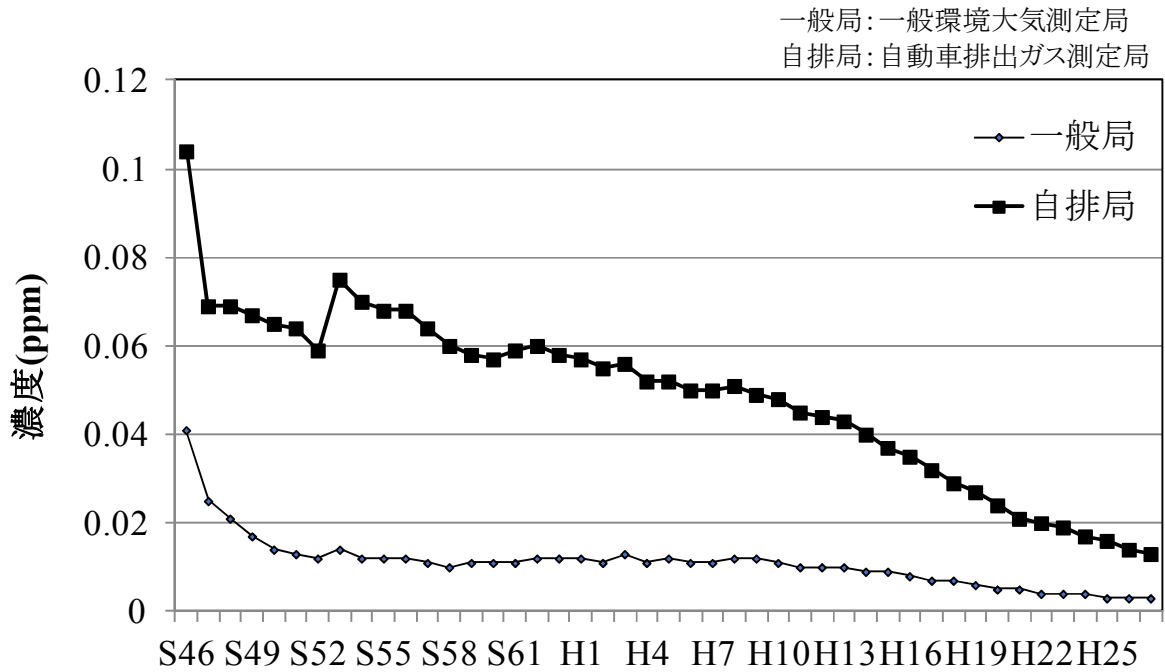
- 15) 総務省：清瀬・新座低周波騒音被害等調停申請事件に係る報道発表資料，2003.3.
- 16) 環境省：よくわかる低周波音，2007.2.
- 17) 村井逸朗，佐野千裕，佐藤弘史，葛西俊二，橘義規：TMDによる橋梁振動および低周波音抑制効果に関する実橋実験，橋梁振動コロキウム'01 論文集，pp.141-146，2001.10.
- 18) 佐々木栄一，關真二郎，山田均，勝地弘，石川裕治，葛西俊二：同時多点計測による橋梁に起因する低周波騒音の実態分析と対策効果の検証，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，I-106，2007.9.
- 19) 畔柳昌己，高橋広幸，上東泰，安藤直文，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.
- 20) 長船寿一，中村俊一，水野恵一郎，加藤久雄，植田友孝：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.
- 21) 松田 浩，伊藤幸広，出水 享，牧野高平：インフラ構造物の維持管理における光計測技術の応用－DICMによる全視野ひずみ計測とLDVによる振動計測－，コンクリート工学 Vol. 50，2012.
- 22) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三，熊坂和宏：局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出，土木学会論文集，V-53，2011.
- 23) 広井智，深田幸史，樺山好幸，室井智文，岡田裕行：高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法，舗装工学論文集，第14巻，pp.179-187，2009.12.
- 24) 亀田弘行，室野剛隆，南荘淳，佐々木伸幸：橋梁一車両連成系による道路橋の地震応答特性，土木学会論文集 No.626，I-48，pp.93-106，1999.7.
- 25) S. Fukada: Infrasound and Vibration of Short Span Bridge due to Running Vehicle, Proceedings of Inter-noise 2006, (on CD-ROM) No.078, 2006.12.
- 26) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（I），国総研資料第179号，2004

- 27) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（Ⅱ），国総研資料第 180 号，2004
- 28) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（Ⅲ），国総研資料第 358 号，2006
- 29) 室井智文，薄井王尚，樫山好幸，深田宰史，梶川康男，幸田信則：伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.54A，pp.171-180，2008.3.
- 30) 三木千壽，舘石和雄，杉本一郎：道路橋の疲労照査のための活荷重に関する一考察，土木学会論文集 1991(432)，pp.63-68，1991.
- 31) 佐藤剛士，細木藍，渡辺一弘：ヘテロコア光ファイバ荷重センサによる通過物体の重量検知に関する研究，自動制御連合講演会講演論文集 54(0)，339-339，2011.
- 32) 松田哲夫，松田泰治，今村壮宏，坂田裕彦，宇野裕恵，松田宏，打越丈将：既設吊橋に適用するケーブル併用制震すべりシステムの研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）70(4)，pp.469-486，2014.
- 33) 杉町敏之，須田義大，阿部朋明，鈴木彰一，牧野浩志，鯉淵正裕，杉浦孝明：車両の固有振動数を用いた車両重量推定に関する基礎検討，生産研究 67(2)，pp.149-151，2015.
- 34) 三木千壽，水ノ上俊雄，小林裕介：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発，土木学会論文集 No.686，pp.31-40，2001.
- 35) 三木千壽，佐々木栄一，石川裕治，古東佑介，齋藤一成：光ファイバセンサシステムを用いた都市高速道路橋の長期継続モニタリング，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）71(3)，pp.416-428，2015.
- 36) 小塩達也，森田俊樹，深田宰史，山田健太郎，梶川康男：自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング，構造工学論文集，Vol.50A，pp.395-402，2004.3.
- 37) 薄井王尚，梶川康男，深田宰史：2 箱桁橋における橋脚のロッキング振動に着目した地盤振動対策，構造工学論文集，Vol.51A，pp.459-469，2005.3.
- 38) 蘇迪，三輪陽彦，藤野陽三，長山智則：首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析，構造工学論文集，Vol.59A，2013.

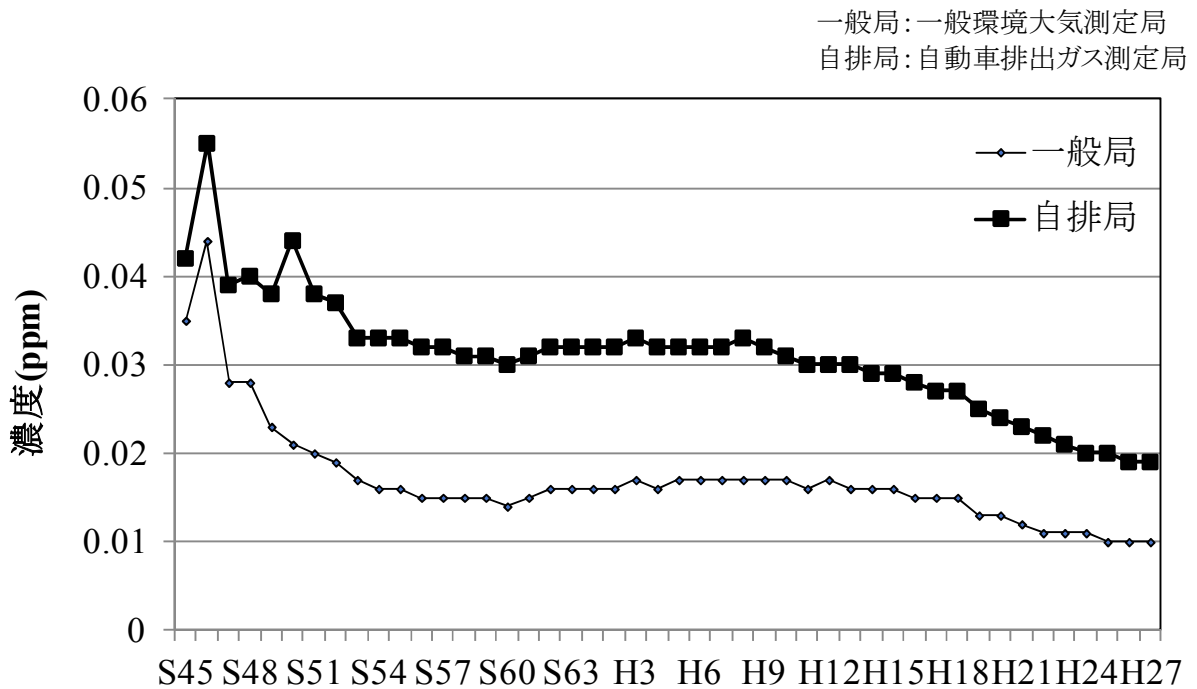
- 39) 徳永法夫, 西村昂, 谷口与史也, 宮原哲: 3階建家屋における道路交通振動に対する防振対策の研究, 土木計画学研究・論文集 No.16, 1999.
- 40) 廣瀬壮一, 斎藤隆泰, 土戸研一: 三次元高速多重極境界要素法を用いた環境振動の解析, 地盤工学研究発表会 発表講演集 JGS39(0), pp.1889-1890, 2004.
- 41) 斎藤隆泰, 土戸研一, 廣瀬壮一: 列車走行に伴う環境振動解析のための 2.5-D・3-D 高速多重極境界要素・結合解法の開発, 応用力学論文集 vol.7, pp.255-262, 2004.
- 42) 佐野泰之, 伊積康彦, 横島潤紀, 富田隆太, 石橋 敏久, 平松和嗣, 成瀬治興, 後藤 剛史: 木造家屋床面の振動モード解析, 日本建築学会技術報告集 第15巻 第29号, 2009.
- 43) 北村泰寿, 水野正英: 道路交通による地盤振動への不規則振動論の適用, 土木学会論文報告集, 第256号, pp.1-9, 1976.
- 44) 北村泰寿, 金好昭彦: 確率過程レベル超過問題の道路交通振動への応用, 土木学会論文報告集, 第287号, pp.23-31, 1979.
- 45) 石井啓稔, 吉岡修, 舟橋秀麿, 川村淳一, 平川泰行, 伊藤康宏: 起振機実験による地中壁施工前後の地盤振動伝播特性, 第39回地盤工学研究発表会, pp.2057-2058, 2004.
- 46) 早川清, 前川, 漆畑, 可児幸彦: 模型 PC 壁体を用いた振動遮断効果に関する実験, 土木学会関西支部年次講演会概要集, III-34, 2000.
- 47) 早川清, 橋本, 可児幸彦: PC 壁体の振動対策事例および遮断のメカニズムに関する実験的考察, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.349-3556, 2002.
- 48) 鍋島康之, 早川清, 可児幸彦: EPS 模擬地盤における鋼管列の振動低減効果, 第38回地盤工学研究発表会, pp.981-982, 2003.
- 49) 中谷郁夫, 早川清, 樫本孝彦, 西村忠典: スクラップタイヤを用いた地中振動遮断壁の提案とその振動低減効果の評価, 土木学会論文集 G 64(1), pp.46-61, 2008.
- 50) 浅見敏彦, 細川故延: 主系の減衰を考慮した動吸振器の設計式について (第2報, 定点理論に基づく設計法), 日本機械学会論文集 C 編 vol.61, No.583, pp.915-921, 1995.

- 51) 高橋龍夫, 倉西茂: 動吸振器による可撓性構造物の振動抑制について, 土木学会論文報告集 1981(308), pp.15-24, 1981.
- 52) 白井正明, 石野和成, 池内皎隆: ステップ加振法と部分構造合成法による橋りょう用動吸振器の効果予測, 日本機械学会論文集 C 編 50(452), pp.737-743, 1984.
- 53) 延藤遵, 藤野陽三, 伊藤学: 橋桁の連成フラッターに対する T. M. D. の制振効果について, 土木学会論文集 1988(398), pp.413-416, 1988.
- 54) 梶川康男: 動吸振器による高架橋の振動軽減対策, 構造工学論文集 35A, pp.585-595, 1989.
- 55) 阿部雅人, 藤野陽三: マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の基本的特性, 土木学会論文集, No.465/ I -23, pp.87-96, 1993.
- 56) 阿部雅人, 藤野陽三: マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の性能評価式, 土木学会論文集, No.465/ I -23, pp.97-106, 1993.
- 57) 吉中進, 川口健一: 大スパン建築構造における複数モード制御のための MMD 法に基づく分散型 TMD に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp.123-130, 2004.
- 58) 井上隆二, 完山利行, 浅野幸一郎: 高架橋交通振動を受ける建物の防振対策への動吸振器の適用に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集. D, 環境工学 1991, pp.337-338, 1991.
- 59) 大熊勝寿, 鈴木有, 安井讓, 此上典文, 吉田治: 高速道路橋車両走行に起因する建物振動の TMD 制振: その 1 建物及び TMD 制振装置の概要, 日本建築学会学術講演梗概集. D, 環境工学 1994, pp.1875-1876, 1994.
- 60) 此上典文, 鈴木有, 安井讓, 吉田治: 高速道路橋車両走行に起因する建物振動の TMD 制振: その 2 制振効果の評価手法と結果, 日本建築学会学術講演梗概集 D, 環境工学 1994, pp.1877-1878, 1994.
- 61) 深田幸史: 車両走行により発生する橋梁の振動・低周波音に対する対策技術, 騒音制御, Vol.40, No.2, pp.61-64, 2016.
- 62) 竹谷晃一, 佐々木栄一: 橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの構造形式と設計に関する検討, 土木学会論文集 A1, vol71, No.2, pp.267-276, 2015.

- 63) 竹谷晃一, 佐々木栄一, 岩吹啓史, 長船寿一, 洞宏一, 名児耶武 : 橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの開発と実橋梁への適用, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.2, pp.290-301, 2016.
- 64) Tang, X. and Zuo, L. : Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems, Journal of Sound and Vibration, Vol.330, pp.5199-5209, 2011.
- 65) Lee, C. L., Chen, Y. T., Chung, L. L. and Wang, Y. : Optimal design theories and applications of tuned mass dampers, Engineering Structures, Vol.28, pp.43-53, 2006.
- 66) 堀内博, 藤沢伸光, 津村直宜 : TMD の設計における実用算定式, 構造工学論文集, Vol. 37A, No.2, p.781-788, 1991.
- 67) 吉住文太, 佐野健一, 井上浩男 : 少数個 TMD の最適ロバスト設計, 構造工学論文集, Vol. 48A, No. 1, pp.329-338, 2002.
- 68) 潘公宇, 安田正志 : 多重動吸振器のロバスト最適設計方法, 日本機械学会論文集, Vol.71C, No.712, pp.3430-3436, 2005.

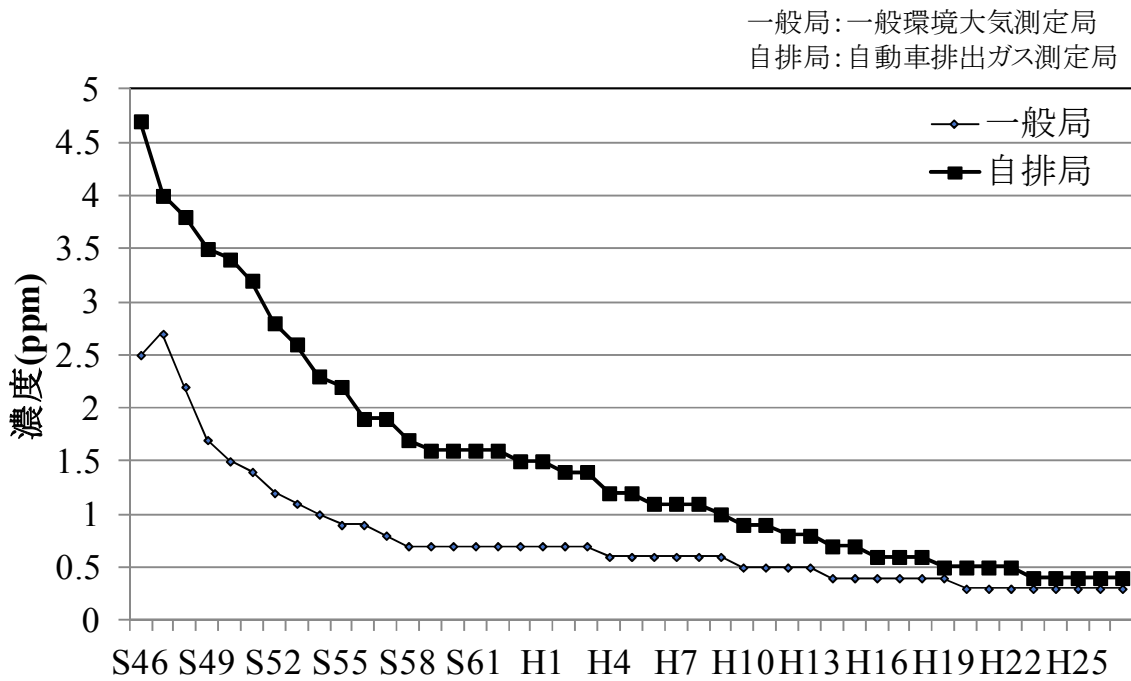


(a) 一酸化窒素 NO

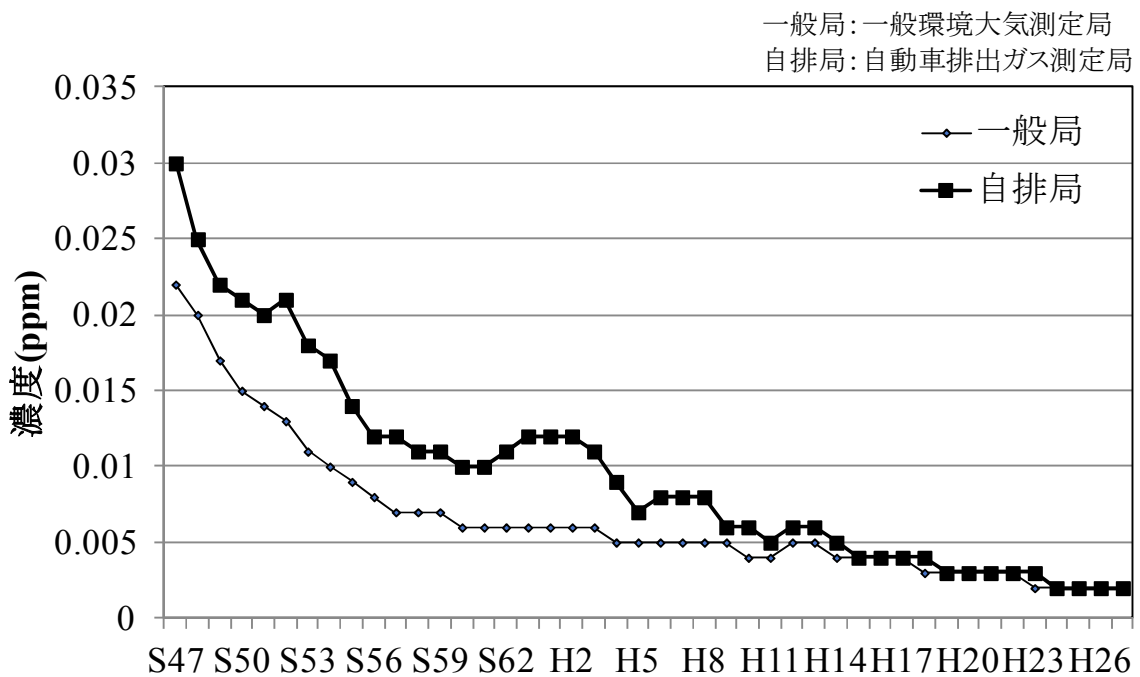


(b) 二酸化窒素 NO₂

図1-1-1 大気汚染物質ごとの環境濃度 (平成28年度) 環境省

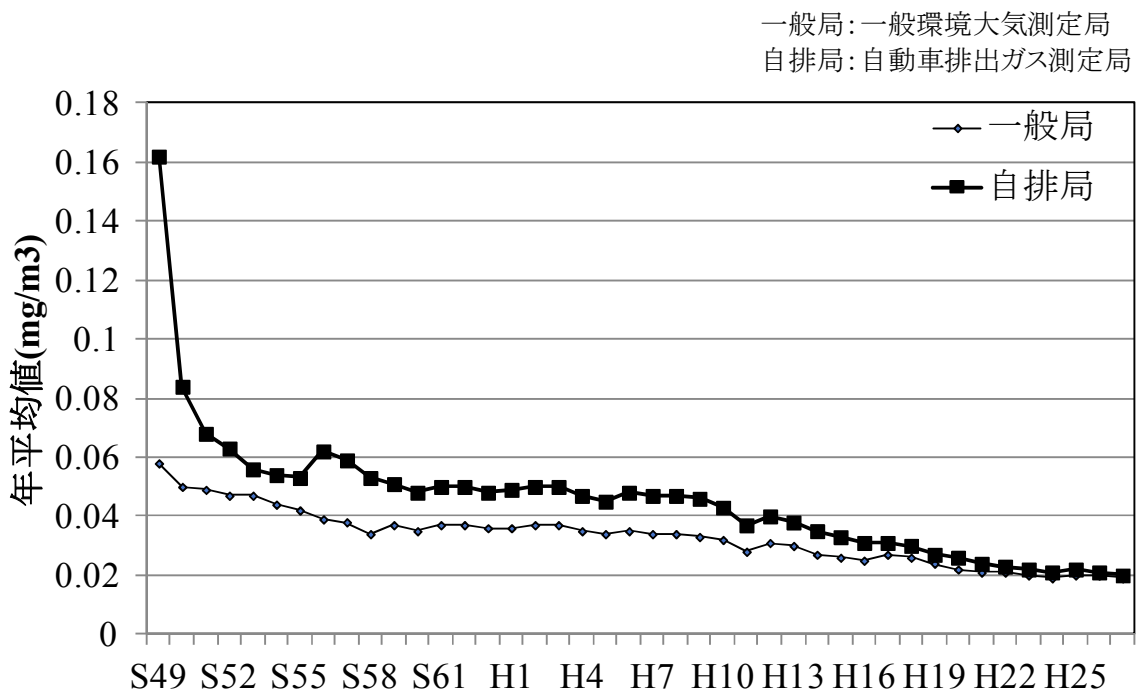


(c) 一酸化炭素 CO



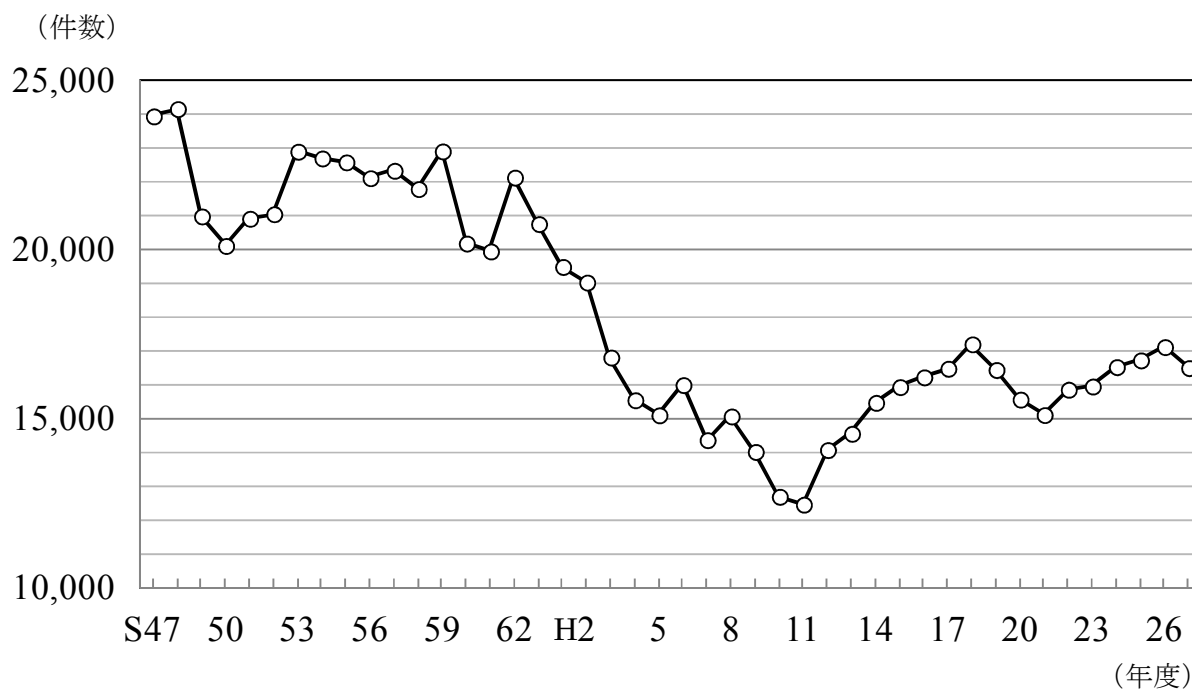
(d) 二酸化硫黄 SO₂

図1-1-1 大気汚染物質ごとの環境濃度 (平成28年度) 環境省 (つづき)



(e) 浮遊粒子状物質 SPM

図1-1-1 大気汚染物質ごとの環境濃度（平成28年度）環境省（つづき）

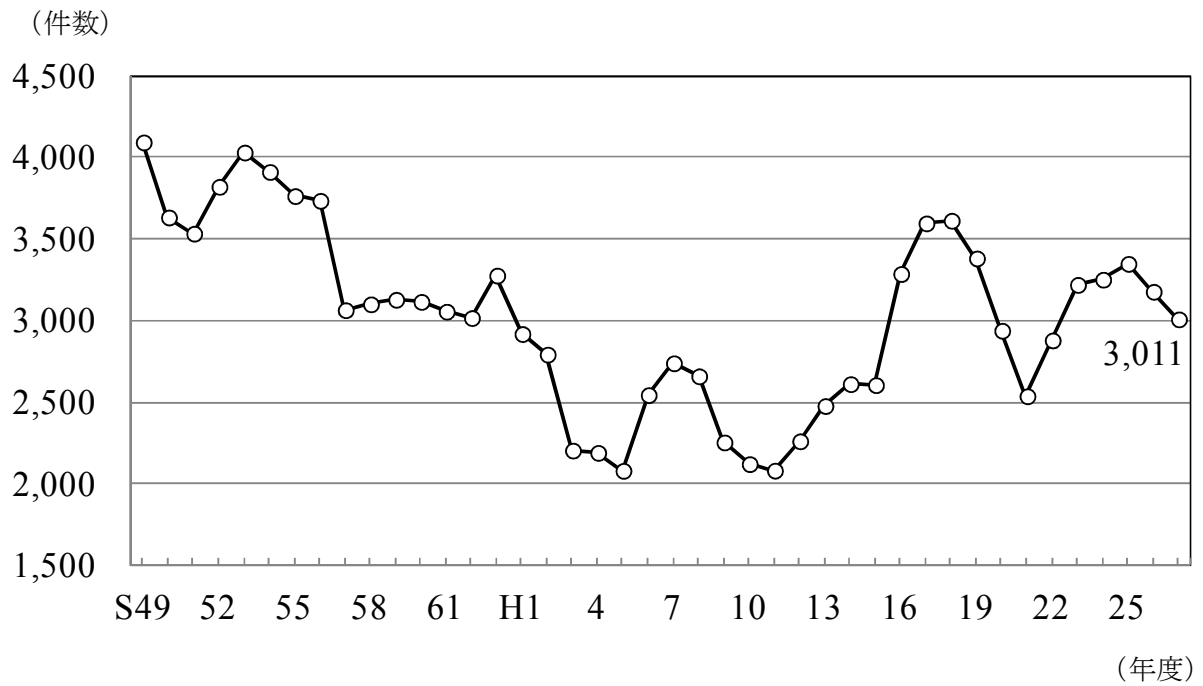


(a) 騒音苦情件数の推移

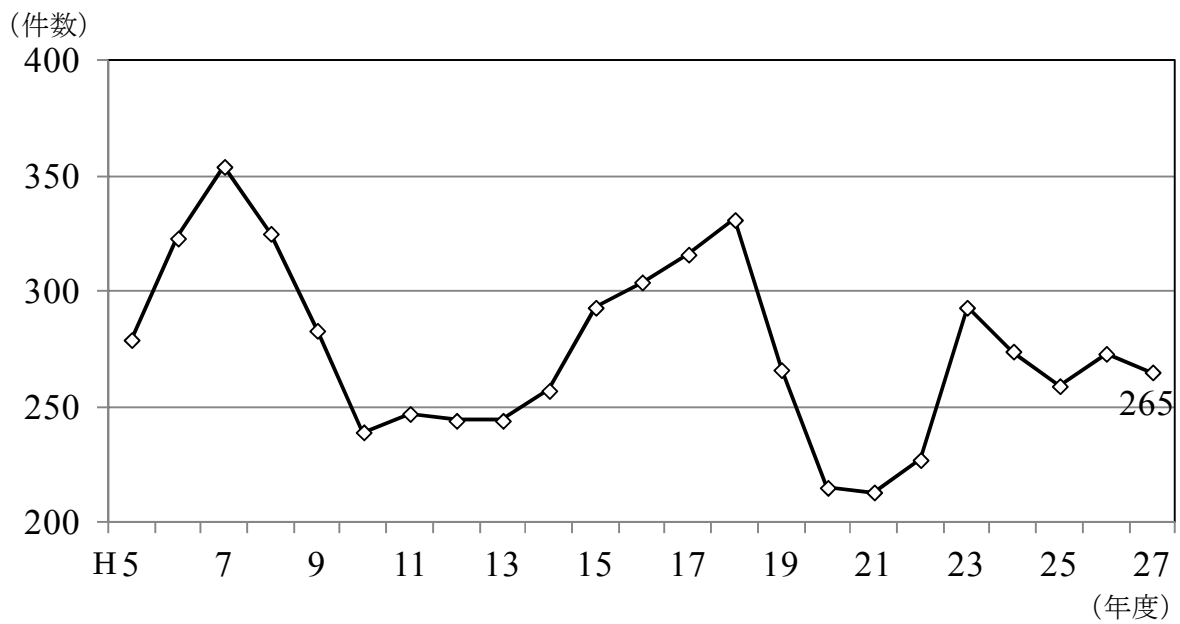


(b) うち自動車騒音の苦情件数の推移

図1-1-2 全国の地方公共団体が受理した騒音苦情件数の推移（平成28年度）環境省



(a) 振動苦情件数の推移



(b) うち道路交通の振動苦情件数の推移

図1-1-3 全国の地方公共団体が受理した振動苦情件数の推移（平成28年度）環境省

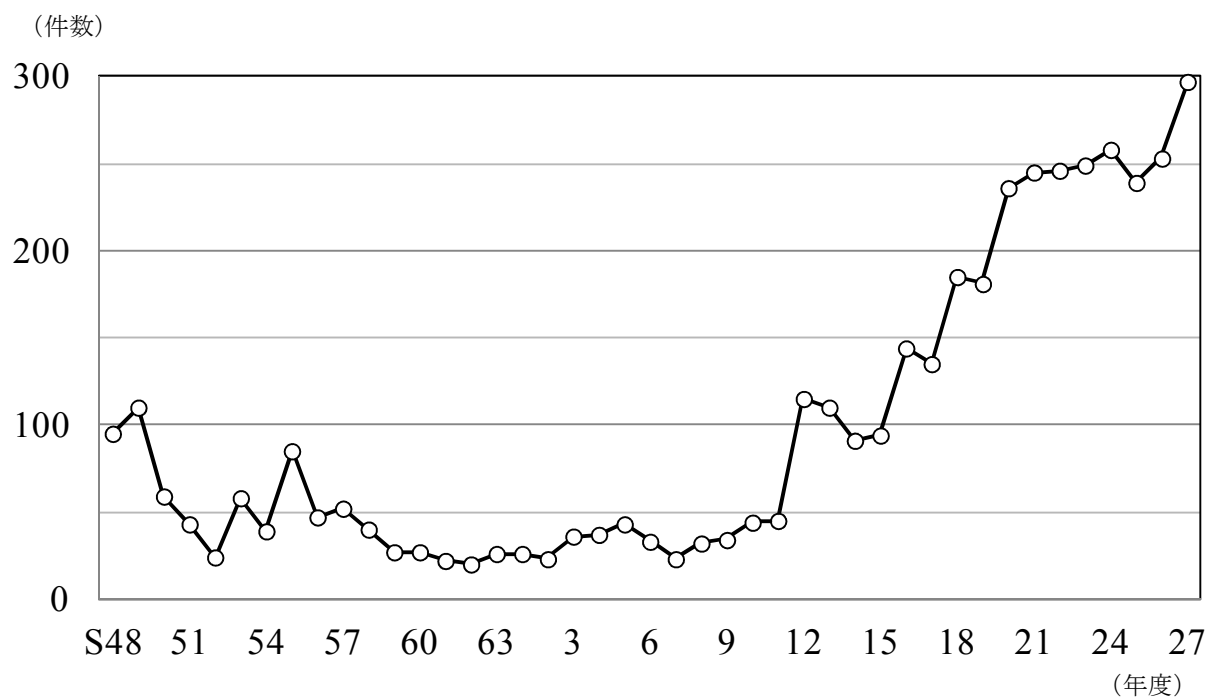


図1-1-4 全国の地方公共団体が受理した低周波音苦情件数の推移（平成28年度）
環境省

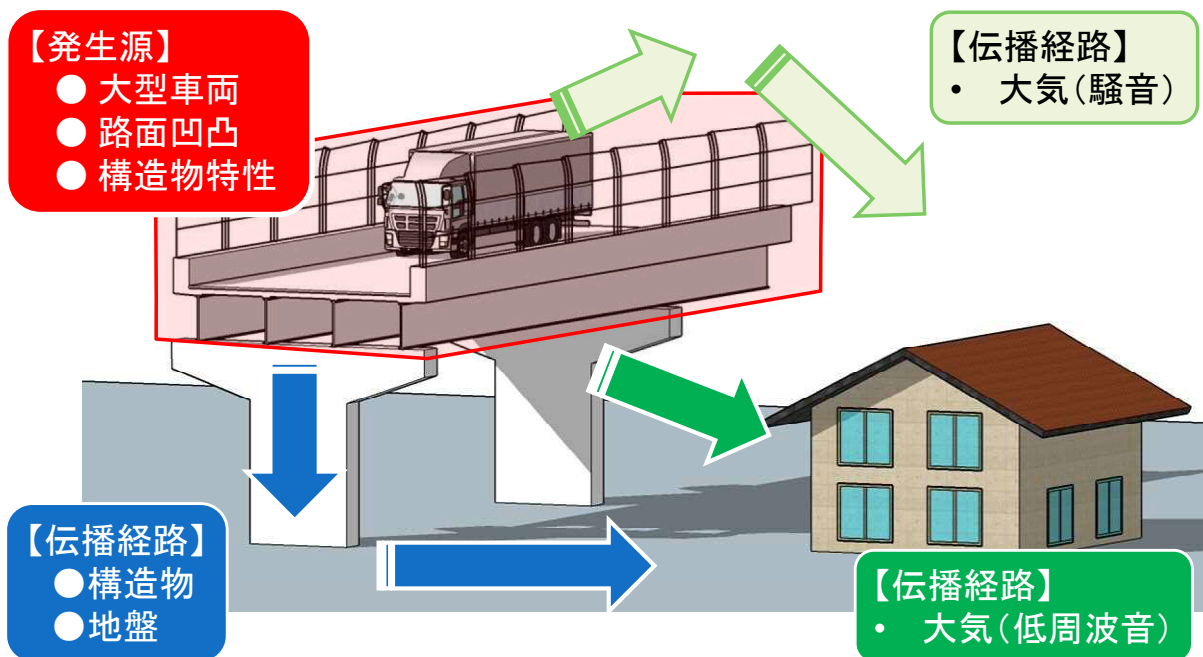


図1-1-5 騒音，振動及び低周波音の発生及び伝播状況

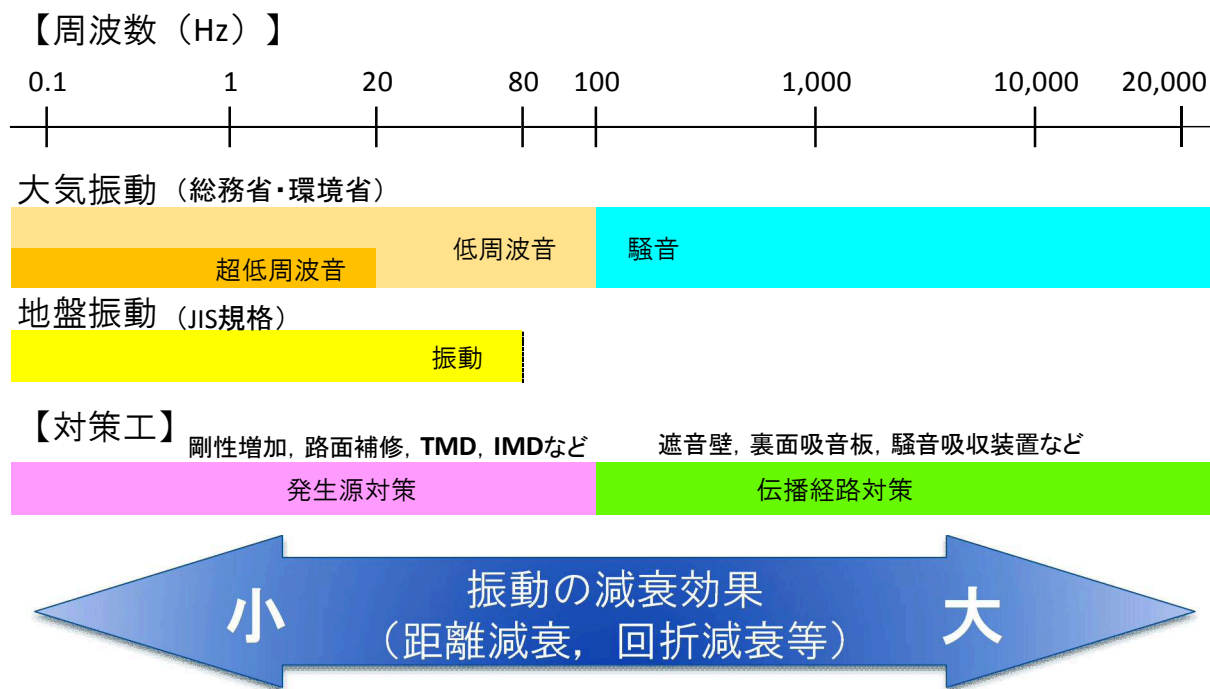


図1-1-6 環境対策の手法

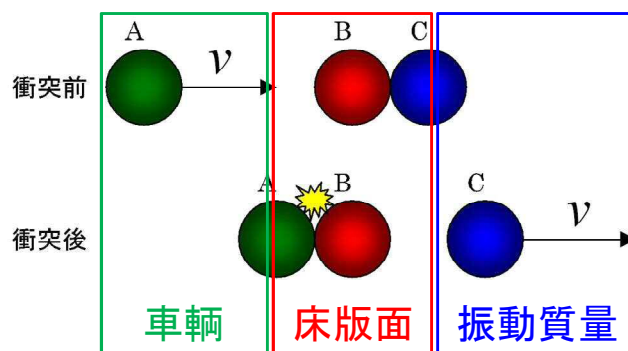


(a) Tuned Mass Damper (TMD)

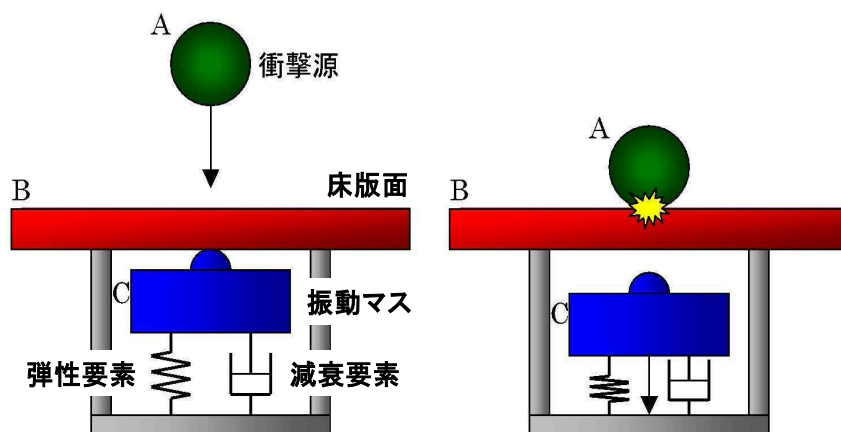


(b) Impact Mass Damper (IMD)

写真1-1-1 Tuned Mass Damper と Impact Mass Damper



(a) 運動量保存の法則を用いたイメージ



(b) IMDのモデル図

図1-1-7 IMDの原理

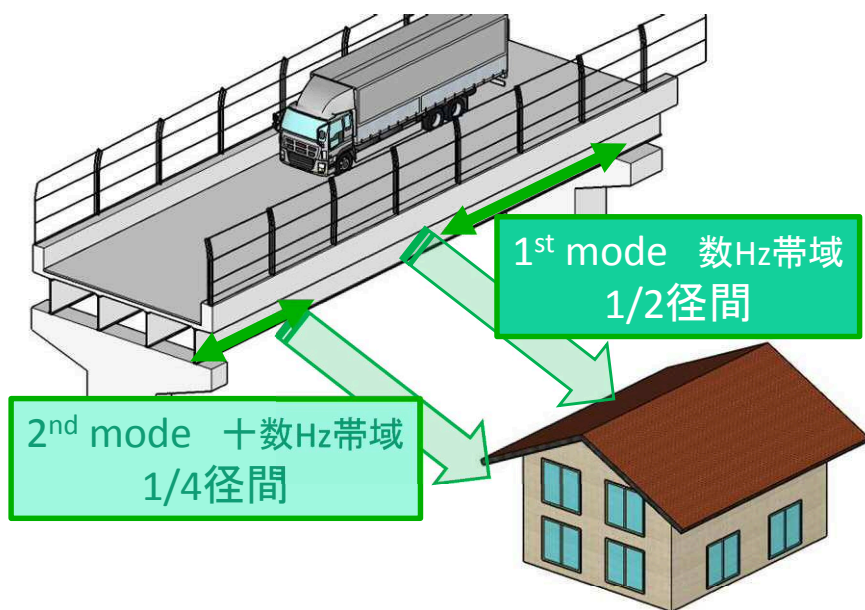


図1-1-8 環境問題対策の手法

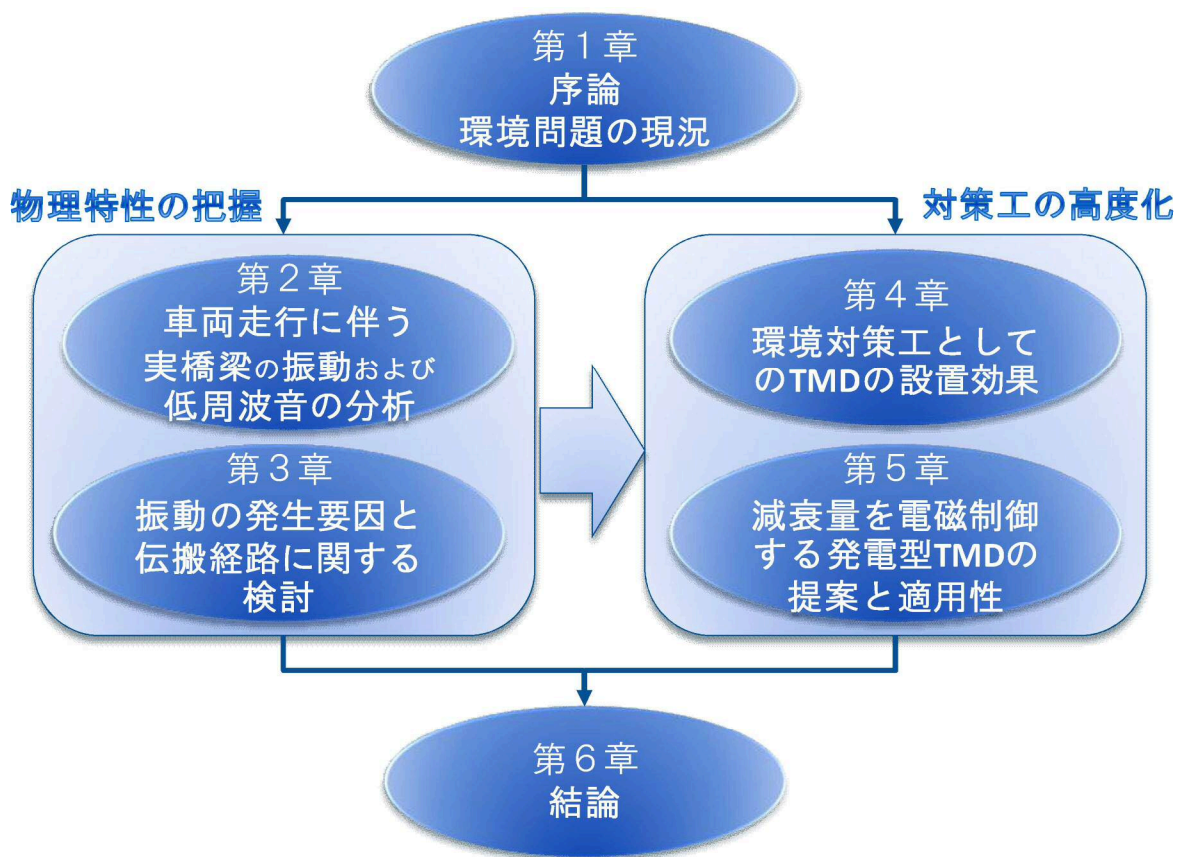


図1-1-9 研究のフロー

第 2 章

車両走行に伴う実橋梁の振動及び低周波音の分析

2-1 はじめに

高速道路の高架橋沿線で、橋梁振動に起因する環境振動（地盤振動などの車両走行に伴い、橋梁周辺環境に及ぼす振動をここでは環境振動と定義する）や低周波音の環境問題が発生することがある。この問題を解決するためには、橋梁振動および低周波音の発生要因と振動伝播過程を明らかにし、対策工を検討する必要がある^{1),2)}。橋梁振動および低周波音の発生要因としては、大型車両の振動特性、舗装路面の凹凸などが挙げられ、これまでも様々な事例研究が報告されている。例えば、リーフ式サスペンションを有する大型車両の後輪ばね上振動(3Hz付近)と橋梁のたわみ1次振動(3Hz付近)との連成振動を対象とした研究^{3)~5)}、大型車両の後輪ばね下振動(10-20Hz付近)と10-20Hz付近の橋梁のたわみ1次振動⁶⁾またはたわみ2次振動⁷⁾との連成振動を対象とした研究、路面凹凸の周期性により路面凹凸と大型車両のばね上振動との連成振動が生じ、車両が橋梁を大きく加振した事例を扱った研究⁸⁾⁹⁾などがある。また、大型車両のサスペンションの要因として、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下国総研）は大型車両の車種およびサスペンションの違いによる振動特性が橋梁振動に影響を及ぼすことを報告^{10)~12)}している。大型車両と橋梁の連成振動以外にも、過積載車両による橋梁振動および低周波音発生の影響はよく知られている¹³⁾が、比較的重量の小さい走行車両でも大きな振動が生じることを報告した事例¹⁴⁾があることから、走行車両の総重量だけでなく、走行車両のばね剛性を含めた複合的な挙動に相関があるものと考えられる。さらに、走行位置における発生要因として、都市内における高架橋でよく採用されているT型橋脚では、大型車両の走行位置による上部構造への偏載荷により、T型橋脚のロッキング振動が大きく卓越し、沿道周辺に伝播していることを報告した事例研究¹⁵⁾がある。

このように、個々の振動発生要因が振動苦情として影響していることを報告している研究はあるが、同一条件下で比較検討し個々の振動発生要因に対する寄与の評価が示されていない。

そこで本研究では、大型車両の車軸数、サスペンション種別、走行速度、走行位置、積載の有無および路面段差の有無といった橋梁振動に及ぼす発生要因が、橋梁振動および低周波音の発生にどの程度寄与しているか明らかにすることを目的として、国総研試験走行路内の橋梁上に大型車両を走行させることで、一般車両の走行などによる影響を排除した状態で橋梁を加振する実大橋梁振動実験を行う。そして、橋梁振動に及ぼす影響要因を実験結果から周波数特性、数値解析および数量化理論を用いて分析し、その寄与について明らかにする。

2-2 実験概要

大型車両の車軸数，サスペンション種別，走行速度，走行位置，積載の有無および路面段差の有無といった橋梁振動に及ぼす発生要因が，橋梁振動および低周波音の発生にどの程度寄与するのかを調べるため，国総研試験走行路内の試験橋梁において，大型車両を一定速度で走行させたときの橋梁の振動，変位，ひずみおよび低周波音を測定する車両走行実験を行った。

2-2-1 対象橋梁

本研究で用いた対象橋梁は，支間長 30.0m，全幅員 9.7m の鋼 4 主桁桁橋である。高速道路の橋梁種別は多種多様であるが，**図 2-2-1** に示すように，鋼 4 主桁桁橋は，PC 橋，RC 橋および鋼橋がほぼ同数であり，鋼橋は全橋種の 1/3 超を占め，また主桁本数では 4 本主桁が最も多く，高速道路で多く見られる橋梁形式である。一般図を**図 2-2-2** に示す。A1（車両進入側）が鋼製支承，A2 が弾性支承となっている。A1 の支承下にロードセルが設置されており，橋梁上に載荷される荷重を測定することができる。実験時は試験走行路において，他の車両の走行等が全く無い状態で行った。

2-2-2 試験車

本研究では，橋梁振動に及ぼす発生要因として大型車両の車軸数，サスペンション種別，走行速度，走行位置，積載の有無および路面段差の有無を検討項目とする。このうち，車両構造に寄与するものは車軸数とサスペンション種別である。車軸数は 3 軸（前 1 軸，後 2 軸）と 4 軸（前 2 軸，後 2 軸）のタイプ，サスペンションはリーフ式とエア式のタイプ，計 4 種類のタイプの大型車両を試験車とした。**図 2-2-3** は，一般的なある高速道路路線において計測された大型車両の走行車種別割合を示したものである。3 軸車両と 4 軸車両の走行割合が高いことから，本実験の試験車は高速道路で走行台数の多い大型車両であるといえる。サスペンションの違いの影響については，ばね上振動数が 3Hz 付近に卓越するリーフ式サスペンション車のほか，近年では標準装備される傾向にあるエア式サスペンション車を選定した。**図 2-2-4** に各試験車の一般図を，**表 2-2-1** に各試験車の寸法を示す。なお，道路法に基づく車両制限令により大きさや重量等が定められており，メーカーによらず概ね同構造となっている。

2-2-3 測定項目

本研究における測点配置を図 2-2-6 に示す。測定項目は、橋台、主桁、床版の振動加速度、主桁の変位量、支点反力、支承部の変位量および低周波音圧レベルとした。これらの計測項目は全て時刻を同期させ、サンプリング周波数 300Hz で収録した。測定機器の主な諸元を表 2-2-2 に示す。

2-2-4 実験条件

本研究は、試験車の車軸数、サスペンション種別、走行速度、走行位置、積載の有無および路面段差の有無を設定条件とした。試験車の走行速度は 5, 40, 60, 80km/h の 4 ケースとした。通常、5km/h での走行は振動が問題になることはないと考えられるが、衝撃を含まない準静的な特性を把握することを目的として実施した。

幅員方向の走行位置については、橋梁幅員のほぼ中央を走行するパターン（中央走行）と進行方向に対して左側に偏心した位置を走行するパターン（偏心走行）の 2 ケースを実施した（図 2-2-5）。前者は橋梁のたわみ振動が、後者はねじり振動が卓越しやすい走行ケースを想定した。積載重量は、車両総重量が 245kN となるように調整した積載有りのケースと、空荷状態の積載無しのケースで実施した。なお、走行速度 80km/h かつ偏心走行かつ積載有りの走行ケースは、試験走行路の平面線形が厳しく安全上の問題があるため実施しなかった。路面段差の有無は、クロロプレンゴム製のゴムマット（硬度 90 度、道路方向長さ 1m）を伸縮継手上に設置することで考慮した。段差高さ（ゴムマット厚）は高速道路の補修目標値を参考にして 10mm とした。設置位置は、ゴムマットを乗り上げた車輪が床版上に落ちるように調整した。試験車走行ケースを表 2-2-3 に示す。

2-3 対象橋梁の振動特性

対象橋梁と試験車の共振による影響を考慮して実験結果を分析するため、それぞれの固有振動数、減衰定数（減衰比）および振動モードを求めた。

対象橋梁の固有振動数、減衰定数および振動モード形状を把握するため、試験車が橋梁上から走り去った後の自由振動状態における主桁の振動加速度から、ERA（Eigen-value Realization Algorithm）¹⁶⁾により対象橋梁の基本振動特性を算出した。図 2-3-1 にたわみとねじれそれぞれの振動 1 次モードと振動 2 次モードを示す。振動 1

次モードはたわみが 3.3Hz, ねじれが 4.7Hz, 振動 2 次モードはたわみが 12.1Hz, ねじれが 13.2Hz であった.

2-4 試験車の振動特性

試験車の固有振動数および減衰比を把握するため, 試験車を停止させ, 荷台に起振器を設置しスイープ加振させた状態で試験車のサスペンション上部および下部の振動加速度を測定する実験を行った. モーダル解析により固有振動数を同定したが, 低次モードでは減衰比を同定できなかつたため正弦波加振後の振動減衰により減衰比を求めた. 結果を表 2-4-1 に, 振動モードを図 2-4-1 に示す. 試験車の固有振動数は, サスペンション上部である後輪上の荷台部振動 (以下, ばね上振動) の卓越が 3Hz 付近にあり, 図 2-3-1 に示したたわみ振動 1 次モードと近接している. また, リーフ式およびエア式サスペンション下部である前輪および後輪下の車軸振動 (以下, ばね下振動) の卓越が 10~16Hz 付近に共通してみられ, これはたわみ振動 2 次モードおよびねじれ振動 2 次モードと近接している. このことから, 30m 支間を有する対象橋梁では車両と橋梁の各振動次数間で連成振動が生じる原因があることが分かる. また, 大型車両のばね下振動数領域の 10~20Hz 付近の橋梁振動が低周波音となって周辺環境に影響を及ぼした事例が報告^{7) 17)}されており, たわみ 1 次振動だけでなくたわみ 2 次振動についても把握しておく必要がある.

次に, 試験車の走行状態での固有振動数のうち卓越する周波数を確認するため, 試験車を時速 40km, 60km および 80km で走行させた状態でサスペンション上部および下部の振動加速度を測定する走行実験を行った. 3 軸車両の結果を図 2-4-2 に, 4 軸車両の結果を図 2-4-3 に示す. 併せて, 走行車両の直下に位置し, 車両の影響を直接受ける G2 桁の支点反力を測定した. 3 軸車両の結果を図 2-4-4 に, 4 軸車両の結果を図 2-4-5 に示す. サスペンションは, 3 軸および 4 軸ともにリーフとエアで卓越周波数に大きな違いは見られないものの, 支点反力の時刻歴波形からリーフの方が 3Hz の寄与が高く減衰の小さい傾向が見られる. これは, 橋梁のたわみ振動 1 次モードの固有振動数とリーフ車のばね上振動の卓越周波数が一致していることから, 橋梁と走行車両が共振し自由振動と共振しているためと考えられる. 積載の有無は, サスペンションの上部と下部で特性が異なり, 積載があると上部の卓越周波数が小さくなり, 下部の卓越周波数は大きくなる. これは, サスペンション種別や車軸数によらず, いずれの場合も同様の傾向が見られる. ここで, 大型車両のモデルを図 2-4-6 に, サスペンションの上部と下部の 2 質点モデルを図 2-4-7 に示す. 固有振動数は式(2.1)で算出され, 質量が大きくなると固有振動数は小さくなることから, サスペンション上部

は式(2.1)と一致している。一方、サスペンション下部は、タイヤをバネ、車軸よりも上部の車体をマスとしたバネマスモデルとなり、走行時は熱膨張でタイヤの空気圧が上昇しタイヤバネが硬くなること、走行中はタイヤ回転による遠心力が発生しタイヤバネが硬くなることから、マスよりもバネ定数の寄与が大きくなり卓越周波数が大きくなるものと考えられる。

以上のことから、サスペンション上部の卓越周波数は3Hz前後、サスペンション下部の卓越周波数は十数Hz帯域で固有振動が見られるが、積載状態により卓越周波数が変化することが考えられる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

ここで、積載状態により卓越周波数が変化することについて数値解析を用いて検証を行った。使用したソフトは、車両-構造物の動的相互作用を考慮した移動荷重を伴う時刻歴動的応答解析プログラム(DALIA)で構造計算を行い、部材の速度応答を境界条件として音場の時刻歴応答計算を逐次時間積分で行い着目位置における音圧を計算する低周波音予測システム^{18),19)}を用いた。走行条件は、3軸リーフ式サスペンション車で時速80kmにて中央走行させるものとする。解析条件を表2-4-2に、車両モデルを図2-4-6および図2-4-7に、入力パラメータを表2-4-3に示す。解析結果を図2-4-8で時刻歴波形を、図2-4-9で周波数特性を示す。時刻歴波形から音圧は積載の有無により大きな差は見られないが、周波数特性から積載有りは積載無しに比べて3Hzの卓越が大きいことがわかる。よって、積載状態により卓越周波数が変化することが解析結果からも示された。

2-5 伝播経路における周波数特性

振動伝播過程の媒体として、環境振動の場合は橋梁の上部・下部構造、基礎構造および地盤、低周波音の場合は大気などが考えられるが、橋梁振動を伝播させる媒体の周波数特性が明らかになっていない。そこで、3軸車両、中央走行、積載有り、走行速度80km/h、段差無しの走行ケースについて、G2桁L/2点および橋台における振動加速度について時刻歴波形とその周波数特性を比較検討した。

2-5-1 時刻歴波形

図2-5-1にG2桁における各測点の時刻歴波形を示す。1.4~1.7秒付近で走行車両が橋梁上に差し掛かり、2.8秒~3.1秒付近で走行車両が橋梁上を走行し終えるよう時

刻を整合させた。主桁振動は試験車が橋梁を退去した後も振動し続けるが、橋台振動は橋梁に差し掛かるジョイント付近に振動の振幅が卓越しその直後に減衰している。ただし、橋梁上を走行し終えるジョイント付近でも振幅が見られることから、試験車の走行による橋梁上部構造の振動は主桁および支承を介し橋台に伝播していることが分かる。橋台振動は橋軸方向と鉛直方向の値が大きく、橋軸直角方向の値は小さい。低周波音圧レベルは主桁振動と同様の傾向が見られ、低周波音圧レベルの応答振幅は、リーフ式サスペンション車と比べエア式サスペンション車は低減が大きい。

2-5-2 周波数特性

図 2-5-2 に G2 桁における各測点の周波数特性を示す。

まず橋梁振動について、主桁振動は、エア式サスペンション車と比べリーフ式サスペンション車は 3Hz 付近にあるたわみ 1 次振動の大きな卓越が見られる。他の周波数帯では小さな卓越が見られるものの、サスペンション種別に差は見られない。橋台振動は、主桁に見られる 3Hz 付近の卓越はかなり小さい。なお、30Hz 以上にも車両の衝撃的な加振による大きな卓越振動が見られるが、人体の振動感覚特性に基づいた測定値である振動レベルに換算する際には、振動加速度に対する相対レスポンスが小さくなることから、これらの振動の影響はない。

次に低周波音圧レベルは、3Hz 付近のたわみ 1 次振動のみ卓越が見られ、その卓越はリーフ式サスペンション車の方が大きく、主桁振動と傾向が同様であることから、低周波音は主桁から橋台を介さず大気中を伝播していることが分かる。

2-6 実験結果および考察

ここでは、実験結果から得られたデータを用いて試験車走行時の橋梁振動および低周波音の発生特性を明らかにするため、試験車の車軸数とサスペンション種別の違いによる 4 種類のタイプ、走行速度の 4 ケース、走行位置の 2 ケースおよび積載有無の 2 ケース毎に、主桁たわみ、主桁振動加速度、橋台振動加速度、低周波音圧レベルについて整理し、得られた知見を以下に述べる。

2-6-1 主桁たわみ

実験で得られた主桁の変位に対し、静的なたわみ（5km/h 走行時）に対するたわみの増幅率を図 2-6-1 に示す。左側は偏心走行時に振幅が最も大きかった G4 主桁での応答、右側は中央走行時の G2 主桁の応答を示している。走行速度とたわみの関係は、車種によって大きく異なり、リーフ式サスペンション車は速度の上昇にともなって変位が大きくなる傾向が見られる。一方、エア式サスペンション車ではこのような速度依存は見られず、ほぼ一定の振幅が見られる。

リーフ式サスペンション車の増幅率は最大 1.7 に対し、エア式サスペンション車の増幅率は 1.1 程度である。速度に対する影響をみると試験車の走行位置によって若干傾向が異なっており、同一速度に対する増幅率は全体的に偏心走行時に比べて中央走行時の方が大きく、特に 40km/h の低速域においてこの傾向が顕著であった。たわみの増幅は、主桁の振動に起因するものであるが、速度に対する増幅率の関係が走行位置によって異なることは、たわみ振動とねじり振動に対する影響が試験車の走行位置と走行速度によって異なるためと考えられる。

2-6-2 主桁振動加速度

ここでは、計測で得られた主桁の振動加速度について述べる。主桁振動加速度の振幅と走行速度の関係を図 2-6-2 および図 2-6-3 に示す。主桁の振動加速度は、走行ケースにより最大振幅の発生する主桁が異なったため、各断面（L/4 断面、L/2 断面、3L/4 断面）において最大振幅値を示した G1～G4 主桁のうち 1 つの桁を抽出した。

主桁振動加速度の振幅は、いずれの断面においても、またいずれの車種においても速度の上昇により振幅が大きくなる傾向を示した。なお、主桁振動のピークは A1 橋台および A2 橋台上のジョイント通過時であり、試験車の衝撃的な成分の影響が支配的である。しかし、低周波音の応答波形では低い周波数成分の影響が明らかに大きいことから、周波数スペクトルを参考にばね上に起因する成分とばね下に起因する成分を抽出して速度との関係を確認した。

図 2-6-4 および図 2-6-5 はばね上振動に起因すると考えられる 2～5Hz の周波数成分に着目した主桁振動加速度振幅の分布を示した結果である。振幅を断面ごとで比較すると、いずれのケースにおいても L/4 断面および 3L/4 断面に比べて L/2 点が多い。これは、当該周波数の振動が 1 次モードであり、支間中央部の振幅が大きくなるためである。速度別の比較を行うと速度の上昇に伴い振幅が大きくなる傾向が見られるが、その傾向はリーフ式サスペンション車とエア式サスペンション車で大きく異なって

おり、エア式サスペンション車は速度による振幅の変動がほとんどみられない。これは、エア式サスペンション車はばね上振動の固有振動数が 3Hz よりも低い周波数領域にあり、上部構造の振動数とは大幅に異なるため振動伝達率が小さくなったためであると考えられる。なお、図 2-6-4 に示した段差無し、積載有りにおける 4 軸リーフ式サスペンション車のみ 80km/h の振幅が 60km/h 時よりも小さくなっている。この原因は明らかではないが、走行する試験車の位置が橋梁の応答を抑えるような位置あるいは応答を助長するような位置となる条件すなわち走行速度に影響することが理由として考えられる。

次に、ばね下振動成分に近いと考えられる 10~20Hz の成分に着目して中央走行時および偏心走行時に分けてそれぞれ図 2-6-6 および図 2-6-7 に示す。断面別の振幅は L/2 点よりも L/4 点および 3L/4 断面の方が大きい。これは、当該周波数が 2 次モードの振動であり、その振動モード形状の影響を大きく受けていることが想定される。走行速度別に比較すると積載無しのケースでは全体的に速度の上昇に伴って振幅は大きくなる傾向を示すが、積載有りのケースでは必ずしもこのような傾向にはならず、特に段差ありのケースでは 40km/h よりも 60km/h 走行時のほうが小さい傾向にある。また、積載有りの 60km/h 走行時では、3 軸または 4 軸のエア式サスペンション車の方が大きいケースが見られ、必ずしもリーフ式サスペンション車が大きいとは限らないことが明らかになった。

2-6-3 橋台振動加速度

ここでは、計測で得られた橋台の振動加速度について述べる。橋台上の振動は地盤振動との対応を図るため、振動加速度応答を振動レベルに換算した。周波数領域でのフィルター特性を平坦とした VAL 値と、振動方向別に体感補正をかけた VL 値を算出した。図 2-6-8 は、振動レベルの分布を示すグラフの一例として、3 軸リーフ式サスペンション車と 3 軸エア式サスペンション車における測定結果を示したものである。橋台上の振動は鉛直方向と橋軸方向が同程度の大きさであり、橋軸直角方向は小さい。この傾向は、車両の走行位置が異なっても変わらない。体感補正をかけた VL 値で評価すると、水平方向（橋軸および橋軸直角方向）に比べて鉛直方向が明らかに大きく、ばね下振動領域（10-20Hz）の体感補正特性の差異が大きく寄与していると考えられる。振動の分布についてはサスペンション種別による顕著な違いはみられなかった。サスペンション種別を比較すると、振動はエア式サスペンション車よりもリーフ式サスペンション車の方が若干大きい傾向にある。走行位置は、鉛直方向は偏心走行の影響を受け、走行位置の直下である G3 桁および G4 桁の振動レベルが中央走行時より

も大きく、その傾向は走行速度が低くなるにつれて顕著である。水平方向（橋軸方向および橋軸直角方向）は偏心走行および中央走行共に同じ挙動を示しており、橋軸方向は G2 桁および G3 桁、橋軸直角方向は G1 桁および G4 桁の値が大きい。

2-6-4 低周波音圧レベル

ここでは、計測で得られた低周波音圧レベルについて述べる。走行速度と低周波音圧レベルの関係を図 2-6-9 に示す。全体的な傾向として速度の上昇に伴い低周波音圧レベルが大きくなる傾向を示す。段差の有無や走行位置による顕著な差異はみられない。車種別に比較するとエア式サスペンション車に比べてリーフ式サスペンション車のレベルが 10dB 以上高い傾向にあるが、3 軸車と 4 軸車による差は段差有および積載有のケースに少し差が生じるもののほとんど差が見られない。このことから、低周波音の発生には車軸数の寄与は小さく、サスペンション種別の寄与が高いことが分かる。

以上のように、一部例外は見られるものの、主桁たわみ、主桁振動加速度、橋台振動加速度および低周波音圧レベルの各最大値と走行速度との関係は、試験車の走行速度増加に伴い各最大値が増大する結果となった。また、試験車の車軸数の影響が小さく、主桁変位ではサスペンション種別の影響が大きいことが明らかになった。さらに、走行位置による違いとしては、励起する振動の違いにより中央走行と偏心走行では異なる特性が得られた。

2-7 数量化理論 I 類を用いた実験分析結果

本研究の実験のうち試験車の走行速度 40km/h, 60km/h, 80km/h の走行ケースは、各パラメータを変化させ計 75 回走行させて各測点を測定した。橋梁および低周波音の発生は、試験車の構造や走行条件など多くの要因が複雑に寄与していることが考えられることから、効率的に多くの要因の寄与度を分析する手法として、数量化理論 I 類²⁰⁾を用いた分析を行った。

A1 橋台上 (G1 桁～G4 桁) の振動加速度のデータおよび低周波音圧レベルのデータを外的基準とし、車両構造 (車軸数, サスペンション種別), 走行位置 (中央, 偏心), 車両重量 (積載有り, 積載無し), 走行速度 (40km/h, 60km/h, 80km/h) および段差 (有, 無) をアイテムおよびカテゴリーとする。これらの要因がどの程度橋梁振動に影響を与えているか、分析を行った。

本研究では、上記条件の実験における実測値に対し予測値を算出した。アイテムの範囲がアイテムの目的変数への影響度を表す。それぞれのカテゴリーがどの程度目的変数に影響を与えているかを示すものがカテゴリスコアである。アイテム内の最大のカテゴリスコアから最小のカテゴリスコアをひいたものがアイテムの範囲になり、この範囲が大きいほど影響度が高いといえる。

式 (2.2) の係数 $a1_1$ などはカテゴリスコアを、 $X1_1$ などはアイテム (0 または 1) を示す。

$$\text{目的変数} = a1_1 \cdot X1_1 + a1_2 \cdot X1_2 + \dots + a6_2 \cdot X6_2 + \text{定数項 (全体平均)} \quad (2.2)$$

偏相関係数はあるアイテムにおいて他のアイテムの影響を取り除いた相関係数を示している。重相関係数は実測値と予測値の相関係数を表し、決定係数は重相関係数の二乗で表される。

2-7-1 分析結果

表 2-7-1～表 2-7-3 に A1 橋台部における振動加速度レベルの橋軸、橋軸直角、鉛直方向の結果を示す。それぞれ G1 桁から G4 桁の測点を示している。偏相関係数が 0.7 以上の高い項目について着色した。振動加速度レベルの予測値としては、積載有無、走行速度および走行位置の寄与が大きいことを示している。走行速度 60, 80km/h においては、全体平均に対してプラス側へ 1～3dB の寄与が見られる。しかし、車両構造の違いは、振動加速度レベルの予測値への寄与は大きくないことが分かる。

表 2-7-2 に低周波音圧レベルの結果を示す。a) で支間 1/2 点および 1/4 点の FLAT 特性、b) で支間 1/2 点および 1/4 点の G 特性を示している。振動加速度レベル同様に、偏相関係数が 0.7 以上と高い項目を着色した。FLAT 特性は、サスペンション種別が最も偏相関係数が高く、次いで走行速度が高いことがわかった。また、車両構造の車軸数は、低周波音圧レベルの予測値への寄与は大きくないが、リーフ式サスペンション車は低周波音レベルの予測値へ 7dB(FLAT 特性)程度の大きな寄与を示す一方で、エア式サスペンション車は全体平均に対して-7dB(FLAT 特性)程度の小さいことが分かる。また、試験車の走行速度が 60km/h および 80km/h になると、低周波音レベルの予測値へそれぞれ 0.4dB および 3.6dB 程度寄与している。しかし、試験車の走行位置や積載荷重の寄与は低い結果となった。G 特性は、主桁のたわみ振動 1 次モードである 3Hz 付近の成分が低減されるため、全体的に偏相関係数が小さくなっていることが

分かる。これにより、車両構造よりも走行速度による寄与が高いことを示している。試験車の走行位置や積載荷重の寄与はFLAT特性同様に低いことを示している。

2-7-2 低周波音圧レベルと振動加速度レベルの違い

低周波音圧レベルと振動加速度レベルの予測値へは、試験車の走行速度の寄与がともに大きいことが明らかとなったが、車種、積載荷重および走行位置については、両方のレベル予測値へ必ずしも大きく寄与するとは限らない結果が得られた。これは、振動加速度は走行車両の外力が剛体（舗装、コンクリート、鋼材等）を介して直接測定されるのに対し、低周波音圧レベルは走行車両から外力として入力された橋梁振動が弾性体である大気（空気）を伝播して測定される。よって、橋台の振動加速度は走行位置や積載荷重などにより橋台のロッキング特性に影響することに対し、低周波音圧レベルは主桁振動やサスペンションの種類など構造物がもつ固有振動の影響が大きいと考えられる。これらについて、数値解析等を用いて検証することが今後の課題である。

2-8 まとめ

本研究では、試験車の構造や走行条件により橋梁振動と低周波音の発生に与える影響因子を同一条件下にて比較検討するため、高速道路において橋梁数の多い支間長30mの鋼4主単純桁である実大橋梁で、高速道路で走行台数の多い構造の試験車の走行に伴う振動実験を行った。結果、以下の内容が明らかになった。

- 1) リーフ式サスペンション車のばね上振動の卓越は3Hz付近にあり、たわみ振動1次モードと近接していた。また、リーフ式およびエア式サスペンション車のばね下振動の卓越は10~20Hz付近にあり、たわみ振動2次モードおよびねじれ振動2次モードと近接していたことから、30m支間を有する対象橋梁では車両と橋梁の各振動次数間で連成振動が生じる原因がある。また、サスペンション上部の固有振動数は3Hz前後、サスペンション下部の固有振動数は十数Hz帯域で固有振動が見られるが、積載状態により固有振動数が変化することが考えられる。
- 2) 伝播経路の時刻歴波形および周波数特性から、橋梁上部構造の振動は主桁および支承を介し橋台に伝播し、橋軸および鉛直方向の振動が大きかった。低周波音は橋台を介さず主桁から大気中を伝播し、たわみ振動1次振動の影響が大きかった。

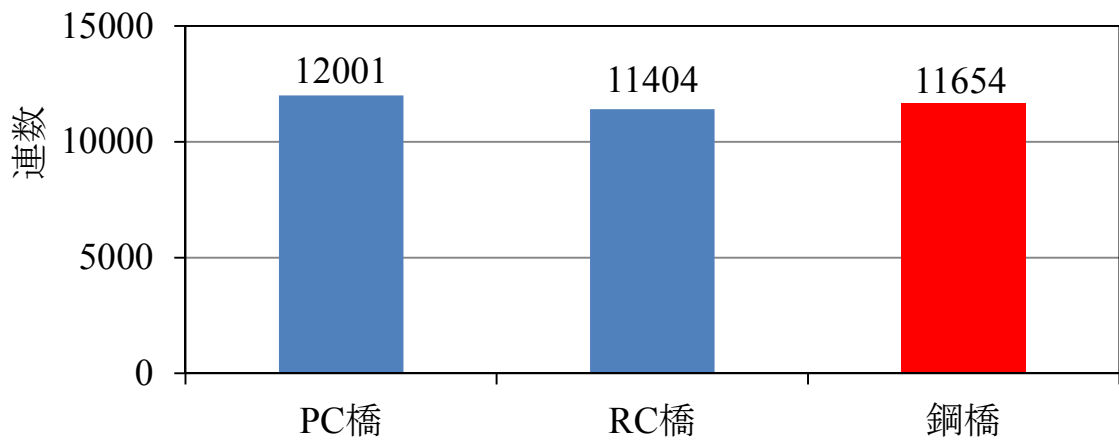
- 3) 橋台上の振動は、鉛直方向と橋軸方向が同程度の大きさであり、橋軸直角方向は小さく、この傾向は、車両の走行位置が異なっても変わらなかった。また、体感補正をかけたVL値で評価すると、水平方向（橋軸および橋軸直角方向）に比べて鉛直方向が大きく、ばね下振動領域（10-20Hz）の体感補正特性の差異が大きく寄与していると考えられる。
- 4) 橋梁振動やたわみは、全体的な傾向として走行速度の上昇に伴い振幅が大きいく。また、エア式サスペンション車はリーフ式サスペンション車よりも振幅が小さく、試験車の構造の寄与が高い。
- 5) 低周波音は、全体的な傾向として走行速度の上昇に伴い低周波音圧レベルが大きくなる傾向を示す。エア式サスペンション車に比べてリーフ式サスペンション車の音圧レベルが高い傾向にある。段差の有無による顕著な差異はみられない。
- 6) 数量化理論 I 類による分析を行った結果、橋梁振動の予測値は、走行位置、積載有無および走行速度の寄与度が高く、一方で低周波音の予測値は、サスペンション種別および走行速度の寄与度が高いことを定量的に示した。

車両と橋梁の連成振動により、3Hz や 10~20Hz の周波数帯域において橋梁振動や低周波音が大きく発生する可能性がある一方で、これらの発生に寄与する影響因子である試験車の構造や積載の有無が固有振動数を変化させることから、橋梁振動制振対策および低周波音の低減対策において留意すべき事項と考えられる。

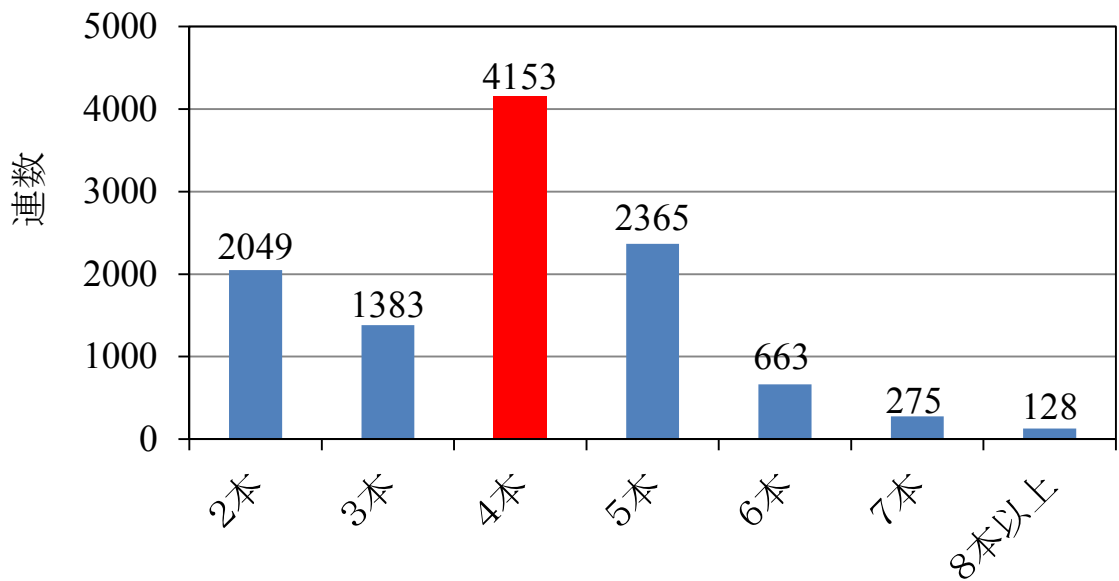
参考文献【第2章】

- 1) 総務省公害等調整委員会事務局，振動に関わる苦情への対応
- 2) 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.
- 3) 村井逸朗，佐野千裕，佐藤弘史，葛西俊二，橘義規：TMDによる橋梁振動および低周波音抑制効果に関する実橋実験，橋梁振動コロキウム'01 論文集，pp.141-146，2001.10.
- 4) 佐々木栄一，關真二郎，山田均，勝地弘，石川裕治，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62回年次学術講演会講演概要集，I-106，2007.9.
- 5) 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.
- 6) S. Fukada: Infrasound and Vibration of Short Span Bridge due to Running Vehicle, Proceedings of Inter-noise 2006, (on CD-ROM) No.078, 2006.12.
- 7) 長船寿一，中村俊一，水野恵一郎，加藤久雄，植田友孝：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.
- 8) 室井智文，薄井王尚，樺山好幸，深田幸史，梶川康男，幸田信則：伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両とPC桁橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.54A，pp.171-180，2008.3.
- 9) 広井智，深田幸史，樺山好幸，室井智文，岡田裕行：高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法，舗装工学論文集，第14巻，pp.179-187，2009.12.
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（I），国総研資料第179号，2004
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（II），国総研資料第180号，2004

- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所，大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究（Ⅲ），国総研資料第 358 号，2006
- 13) 徳永法夫，西村昂，日野泰雄：高架道路における交通振動と苦情要因に関する研究，橋梁と基礎，Vol.32，No.3，pp.51-56，1998.3.
- 14) 小塩達也，森田俊樹，深田宰史，山田健太郎，梶川康男：自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング，構造工学論文集，Vol.50A，pp.395-402，2004.3.
- 15) 薄井王尚，梶川康男，深田宰史：2 箱桁橋における橋脚のロッキング振動に着目した地盤振動対策，構造工学論文集，Vol.51A，pp.459-469，2005.3.
- 16) J. N. Juang and R. S. Pappa: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.
- 17) 大竹省吾，中村一史，長船寿一，岩吹啓史，鳥部智之，平栗昌明：橋梁振動に伴う低周波音の発生部位とその要因に関する研究，応用力学シンポジウム，2016.5
- 18) 岩吹啓史，長船寿一，志村正幸，上明戸昇：道路橋から発生する低周波音に係る 3 次元有限要素法解析の試み，土木学会第 68 回年次学術講演会，I -310，2013.
- 19) Hiroshi Iwabuki, Toshikazu Osafune, Masayuki Shimura, Noboru Kamiakito, Atsushi Aoki, Masato Kobayashi and Hisashi Niwa : Numerical simulation for low frequency sound emitted from viaduct of the road by the vehicle load, internoise2013, Paper955, 2013.
- 20) 林知己夫，数量化理論とデータ処理，朝倉書店，1982.

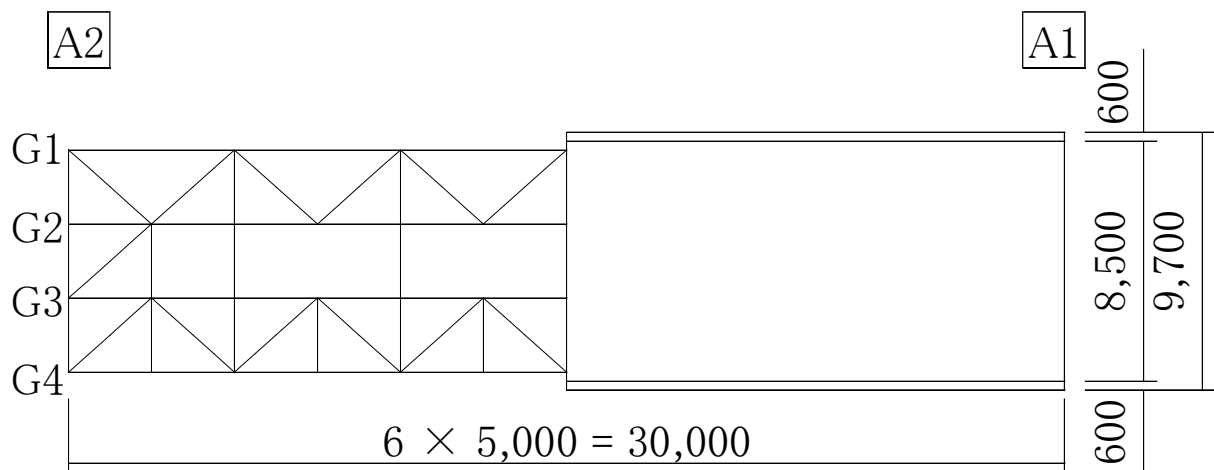


(a) 橋種種別

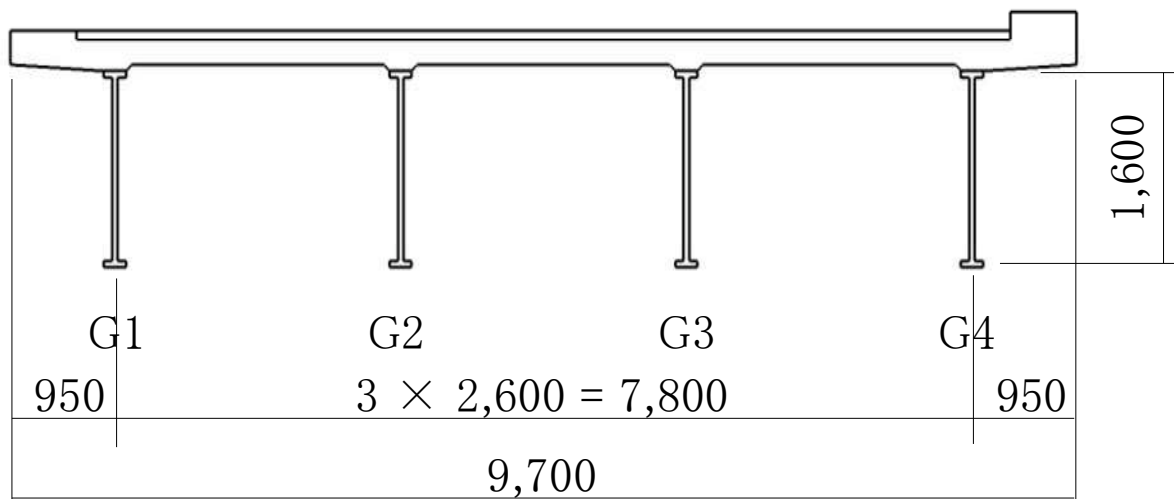


(b) 鋼橋の主桁本数

図2-2-1 高速道路における橋梁種別数 (2016年時点)



(a) 平面图



(b) 断面图

图 2-2-2 一般图

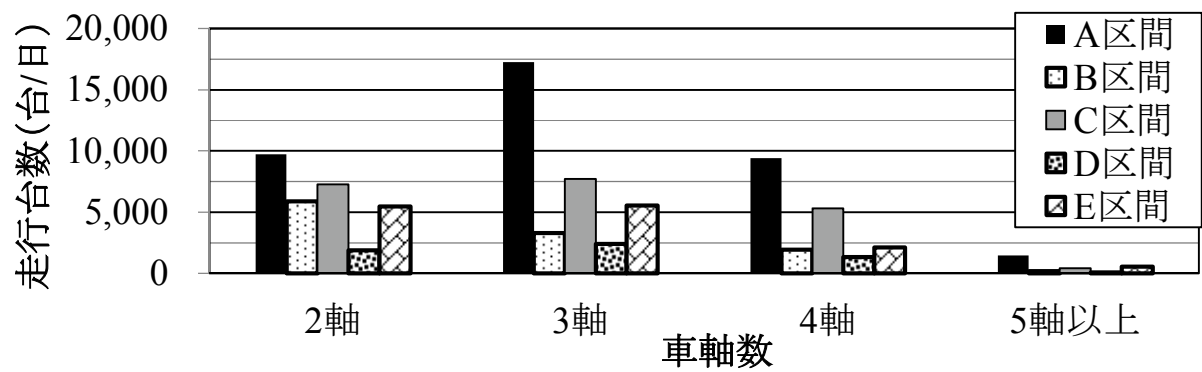
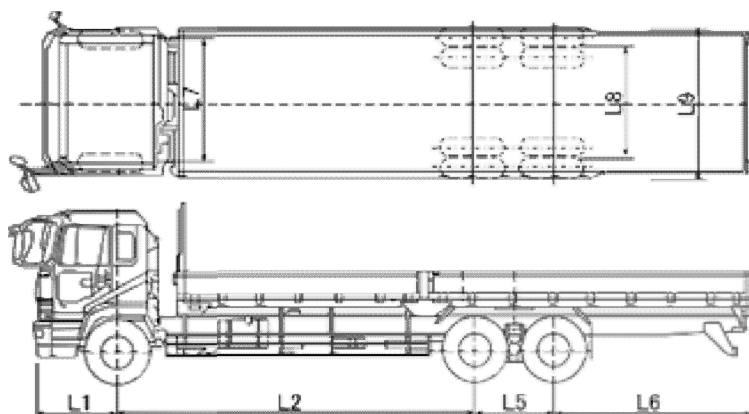
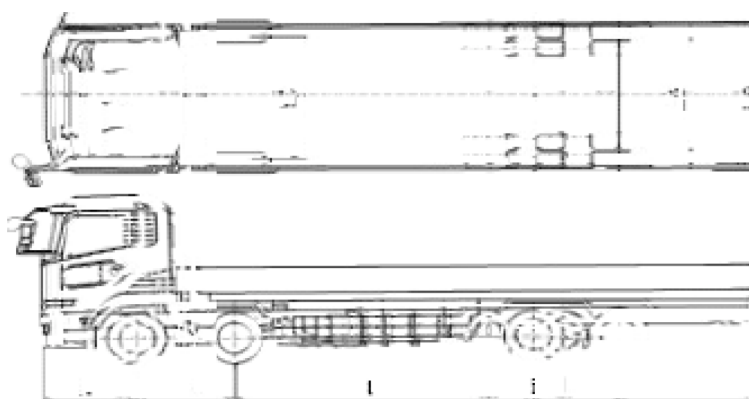


図 2-2-3 大型車両の走行車種別割合



(a) 3 軸車両



(b) 4 軸車両

図 2-2-4 試験車の一般図

表 2-2-1 試験車の寸法

		3軸リーフ	3軸エア	4軸リーフ	4軸エア
フロントオーバーハング	L1	1,400	1,400	1,400	1,400
	L2	5,825	5,885		
軸距	L3			1,910	1,910
	L4			4,290	4,230
	L5	1,320	1,350	1,200	1,320
リアオーバーハング	L6	3,390	3,305	3,130	3,070
輪距(前)	L7	2,040	2,040	2,085	2,090
輪距(後)	L8	1,840	1,840	1,860	1,860
全幅	L9	2,490	2,490	2,490	2,490

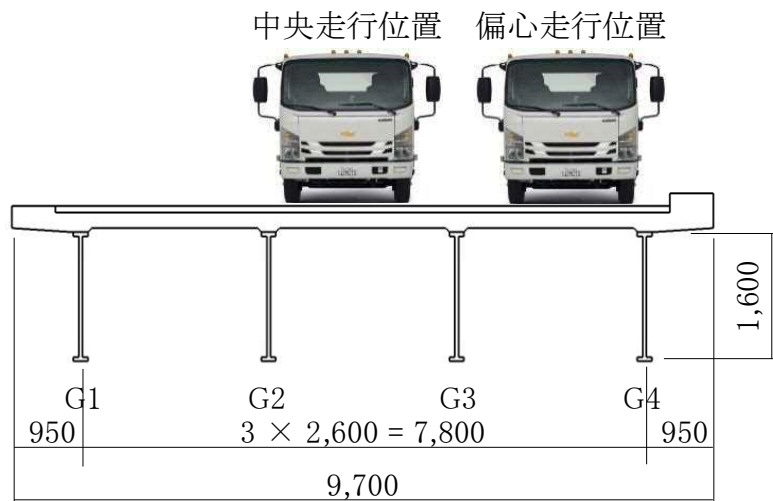
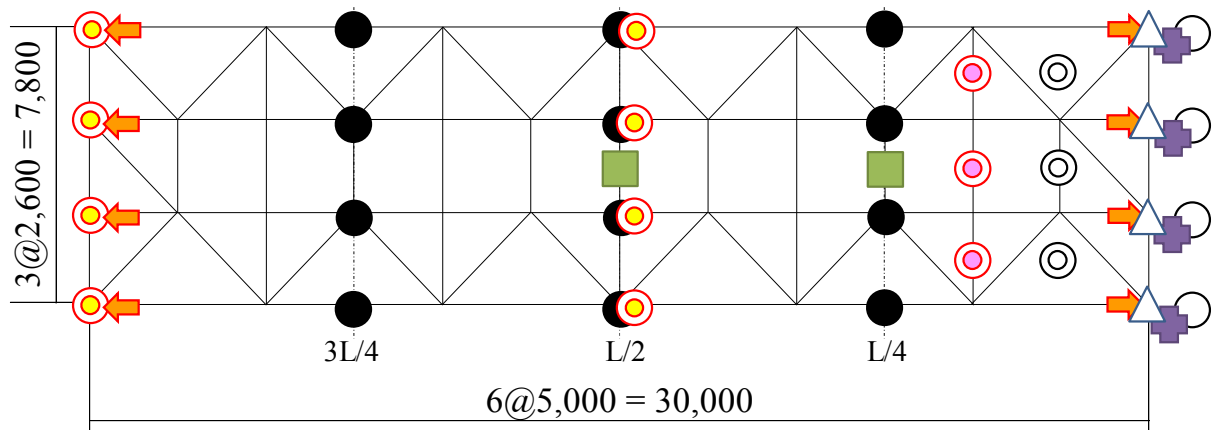


図 2-2-5 試験車の走行位置



	測点数	ch数
○ : 加速度計(橋台上)(3方向)	4	12
● : 加速度計(下フランジ上面)(1方向:鉛直)	12	12
◎ : 加速度計(床版下)(1方向:鉛直)	3	3
△ : ひずみ(垂直補剛材)(鉛直方向)	4	4
■ : 低周波音レベル計(主桁下1m)	2	2
➡ : 変位計(支承部)	8	8
◎ (with arrow) : 変位計(主桁)	8	8
◎ (with arrow) : 変位計(床版)	3	3
⊕ : 荷重計(支承部反力)	4	4
計	48	56

図 2-2-6 測定点配置図

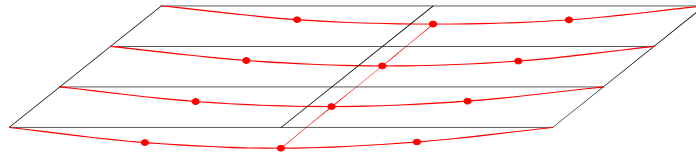
表 2-2-2 測定機器の主な諸元

	測定範囲	周波数範囲
加速度計(橋台)(3方向)	30~120dB	1~80Hz
低周波音レベル計	120dB以下	1~500Hz
	測定範囲	感度
加速度計(主桁)(1方向)	±5G	1V/G
加速度計(床版)(1方向)	0.5mV/V	50×10 ⁻⁶ /m/s ²
変位計	6.25mV/V±0.1%	500×10 ⁻⁶ /mm
	容量	定格出力
荷重計(支承部反力)	1MN	1.5mV/V
	ゲージ率	ゲージ抵抗
ひずみ(垂直補剛材)	約2.1	120Ω

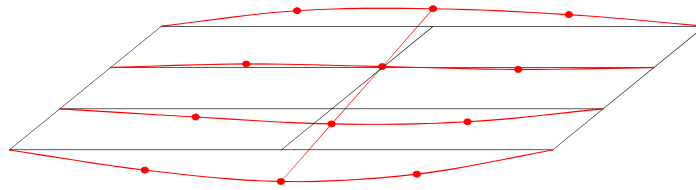
表 2-2-3 走行ケース

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
走行位置	中央	○	○	○	○			
	偏心					○	○	○
走行速度	80km/h		○				○	
	60km/h				○			
	40km/h			○				○
	5km/h	○				○		
段差	無し	○	○	○	○	○	○	○
	有り							

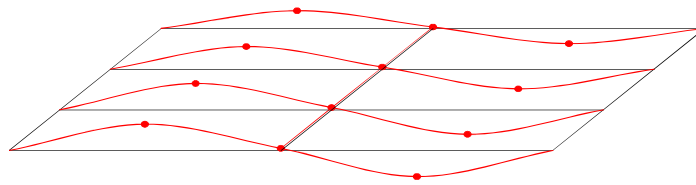
		ケース8	ケース9	ケース10	ケース11	ケース12	ケース13	ケース14
走行位置	中央		○	○	○			
	偏心	○				○	○	○
走行速度	80km/h		○			○		
	60km/h	○			○			○
	40km/h			○			○	
	5km/h							
段差	無し	○						
	有り		○	○	○	○	○	○



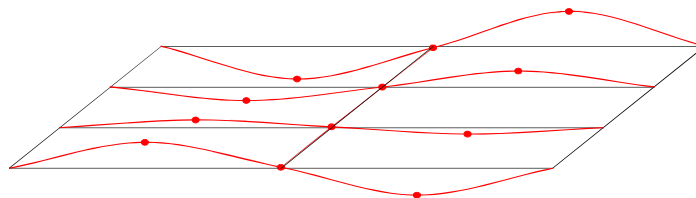
(a) たわみ振動1次モード (3.3Hz, 減衰定数0.023)



(b) ねじれ振動1次モード (4.7Hz, 減衰定数0.016)



(c) たわみ振動2次モード (12.1Hz, 減衰定数0.022)



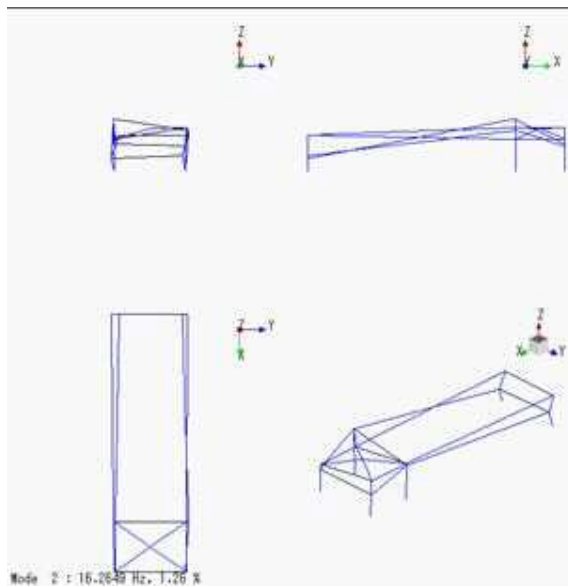
(d) ねじれ振動2次モード (13.2Hz, 減衰定数 0.022)

図 2-3-1 対象橋梁の振動特性

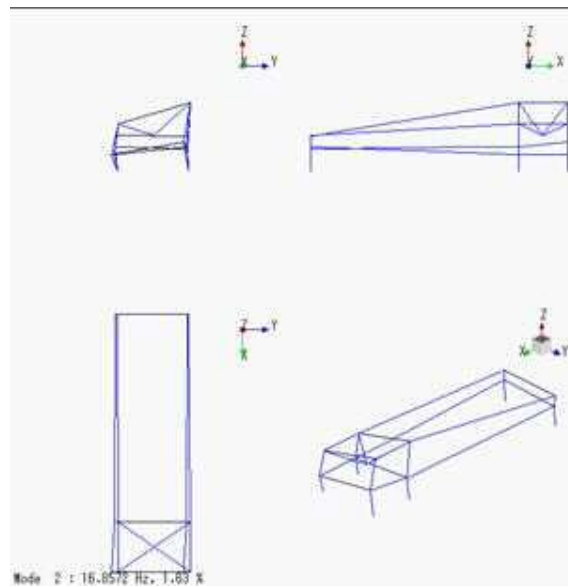
表 2-4-1 試験車両の振動特性

解析方法		3軸リーフ		3軸エア	
		固有振動数	減衰比	固有振動数	減衰比
		Hz	—	Hz	—
正弦波加振	ばね上	3.4	0.011	2.0	0.156
	ばね下	10.9	0.051	10.8	0.041
		16.2	0.133	16.7	0.030
モーダル解析	ばね下	10.9	0.007	10.9	0.005
		16.3	0.013	12.6	0.033
		18.1	0.009	16.9	0.016
		20.8	0.005		

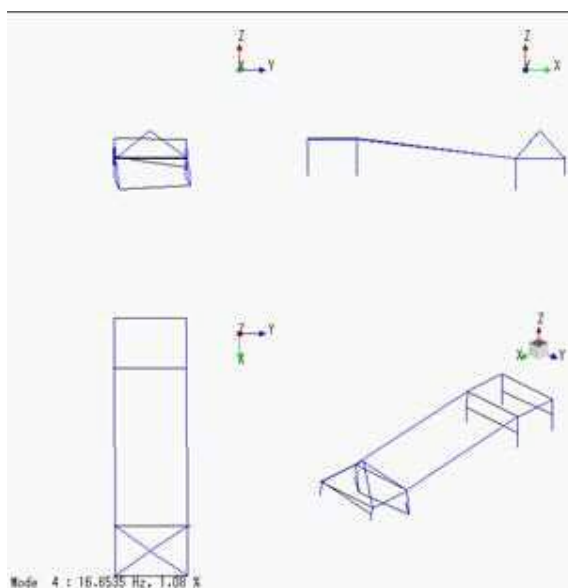
解析方法		4軸リーフ		4軸エア	
		固有振動数	減衰比	固有振動数	減衰比
		Hz	—	Hz	—
正弦波加振	ばね上	3.3	0.014	2.4	0.169
	ばね下	11.2	0.072	10.5	0.055
モーダル解析	ばね下	10.9	0.023	10.7	0.009
		11.6	0.013	13.6	0.011
		13.2	0.008	16.6	0.008
		16.7	0.011	18.3	0.008
		18.7	0.015		
		19.9	0.010		



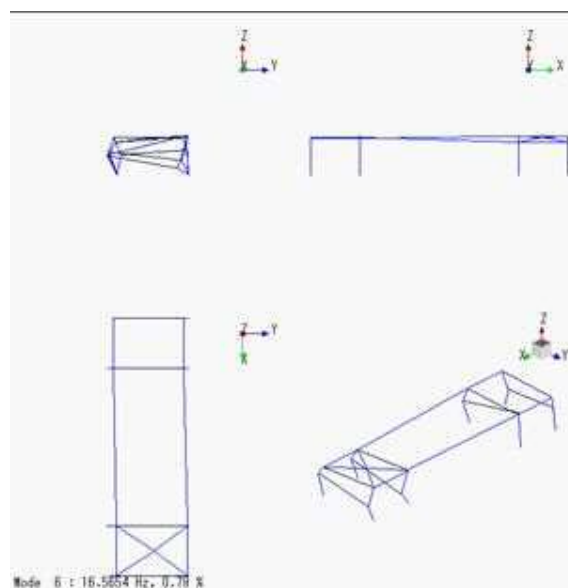
a) 3 軸リーフ 16.3Hz



b) 3 軸エア 16.9Hz

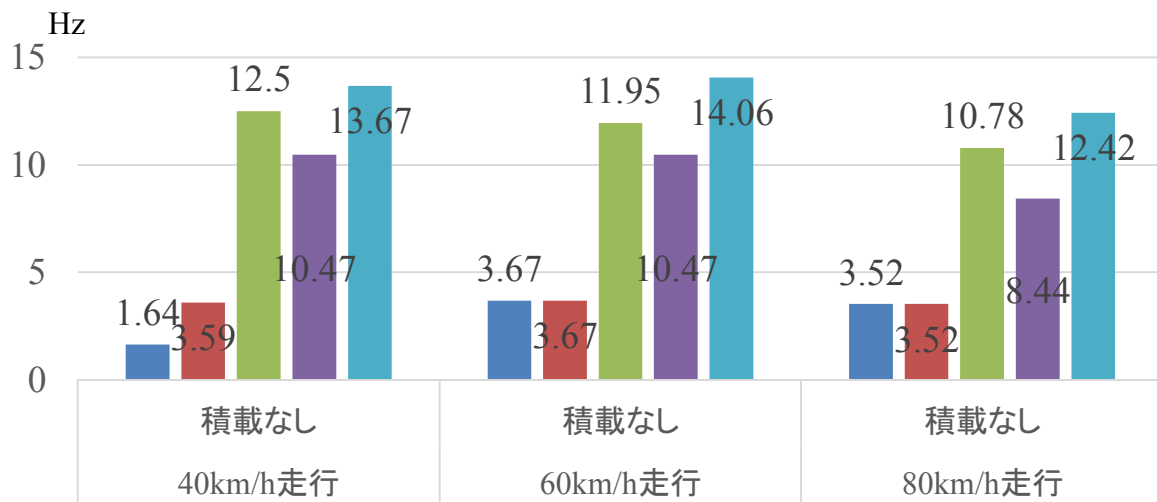


c) 4 軸リーフ 16.7Hz



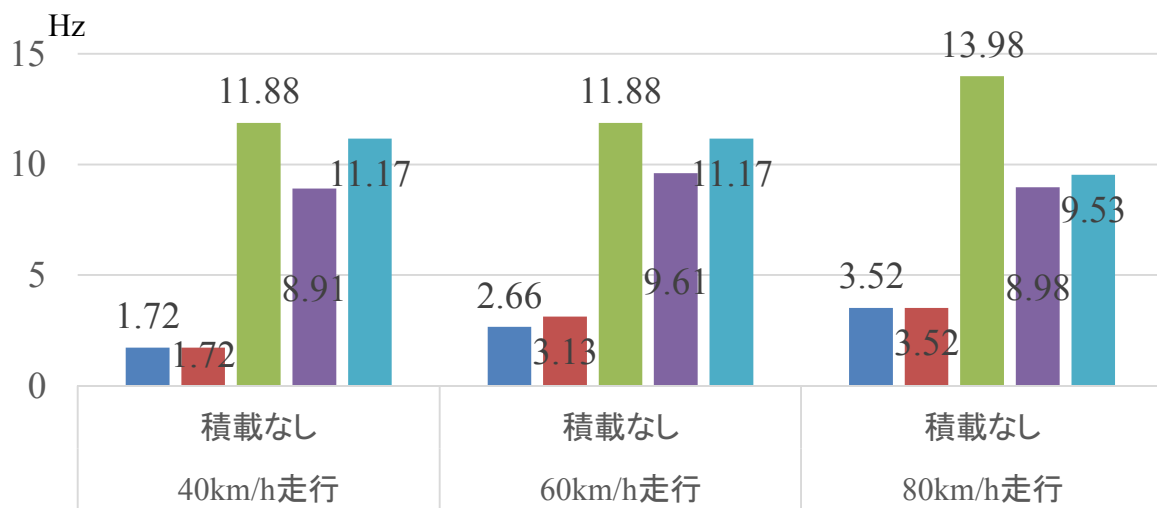
d) 4 軸エア 16.6Hz

図 2-4-1 試験車の振動モード（正弦波加振・モーダル解析共に見られる 16Hz 付近）



■ 前バネ上 ■ 後バネ上 ■ 前バネ下 ■ 後前バネ下 ■ 後後バネ下

(a) リーフ車



■ 前バネ上 ■ 後バネ上 ■ 前バネ下 ■ 後前バネ下 ■ 後後バネ下

(b) エア車

図 2-4-2 試験車両の走行状態での卓越周波数 (3 軸車両)

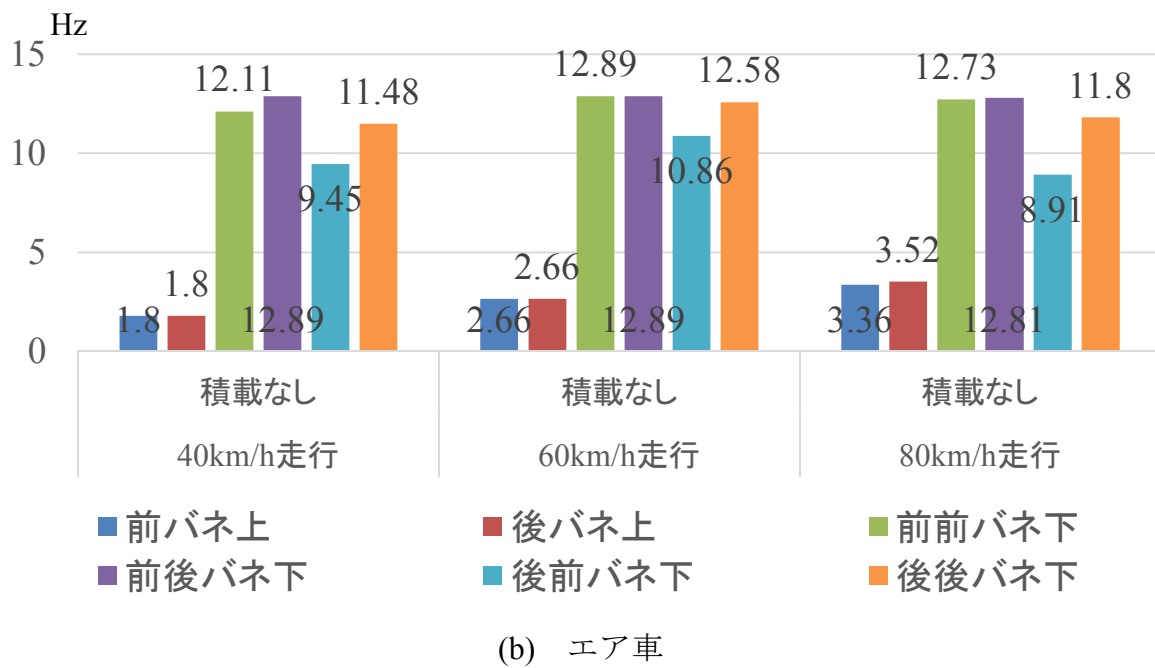
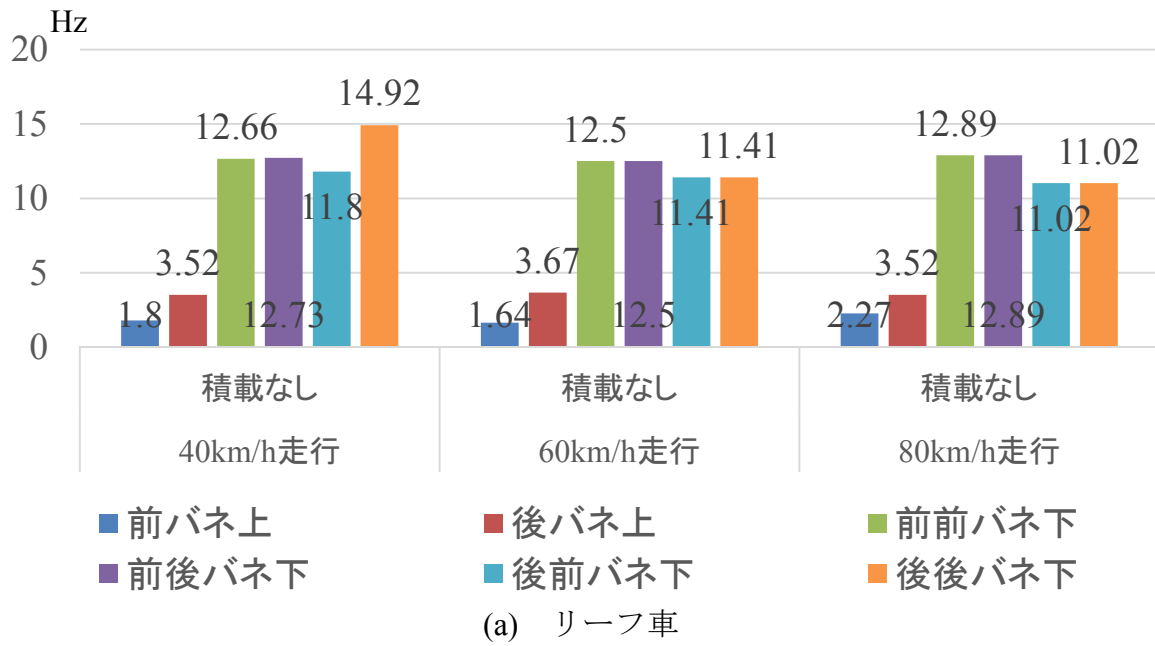


図 2-4-3 試験車両の走行状態での卓越周波数 (4 軸車両)

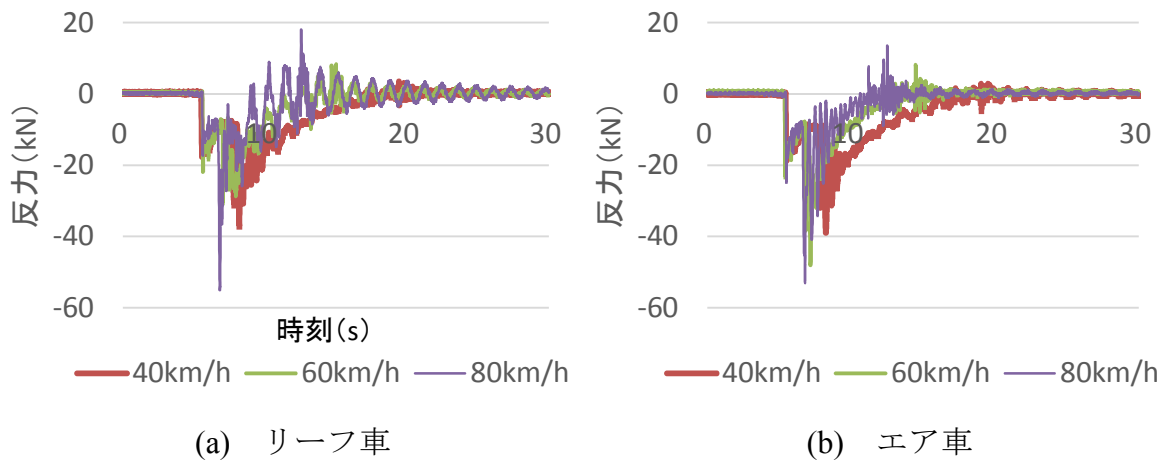


図 2-4-4 試験車両走行時の G2 桁支点反力の時刻歴波形 (3 軸車両)

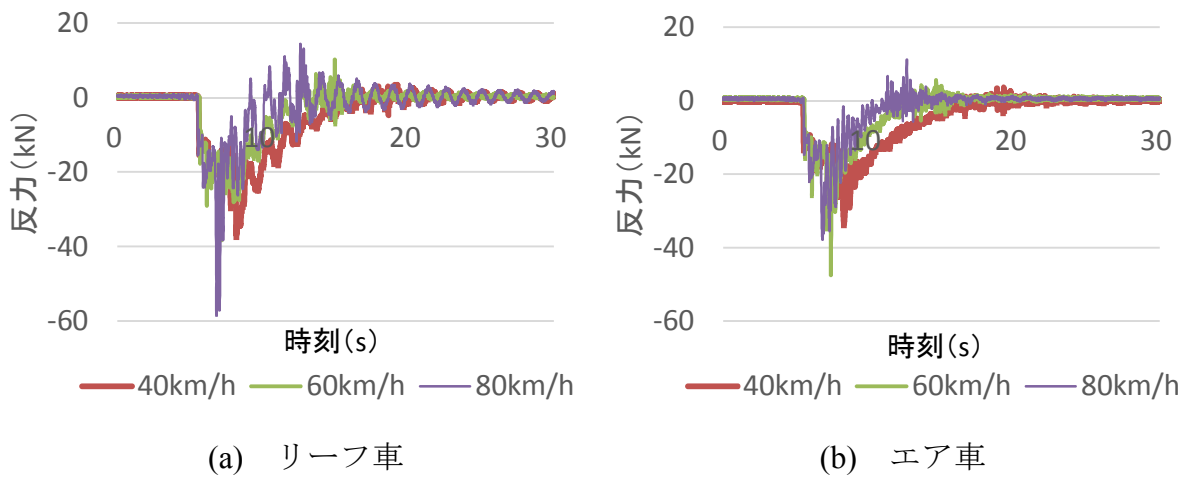
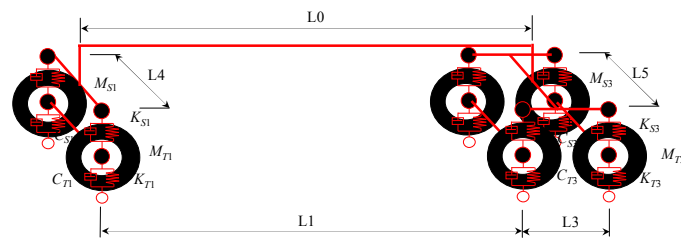
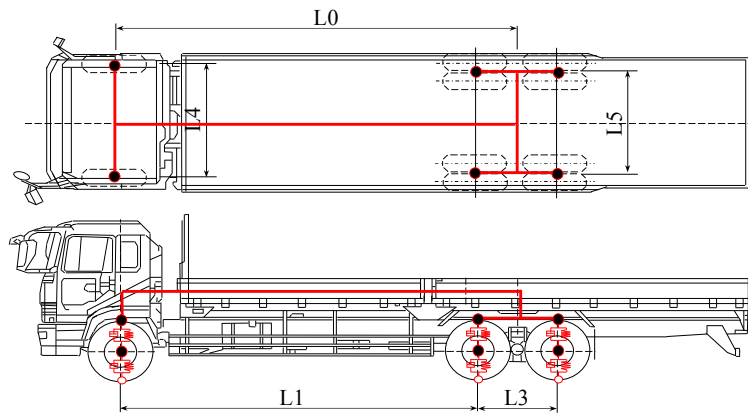
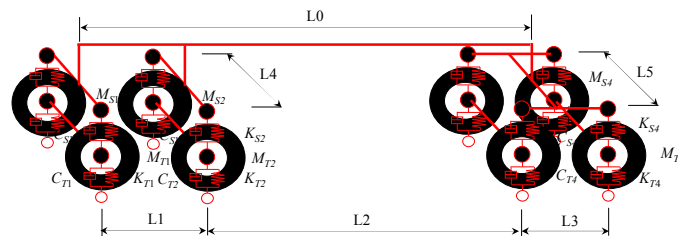
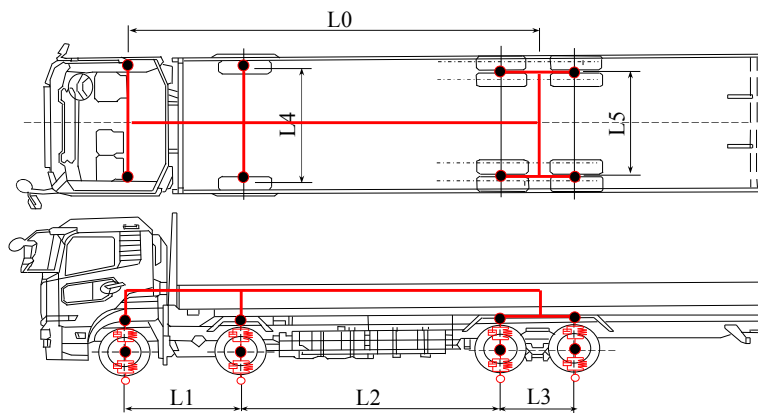


図 2-4-5 試験車両走行時の G2 桁支点反力の時刻歴波形 (4 軸車両)



(a) 3 軸車両



(b) 4 軸車両

図 2-4-6 大型車両モデル

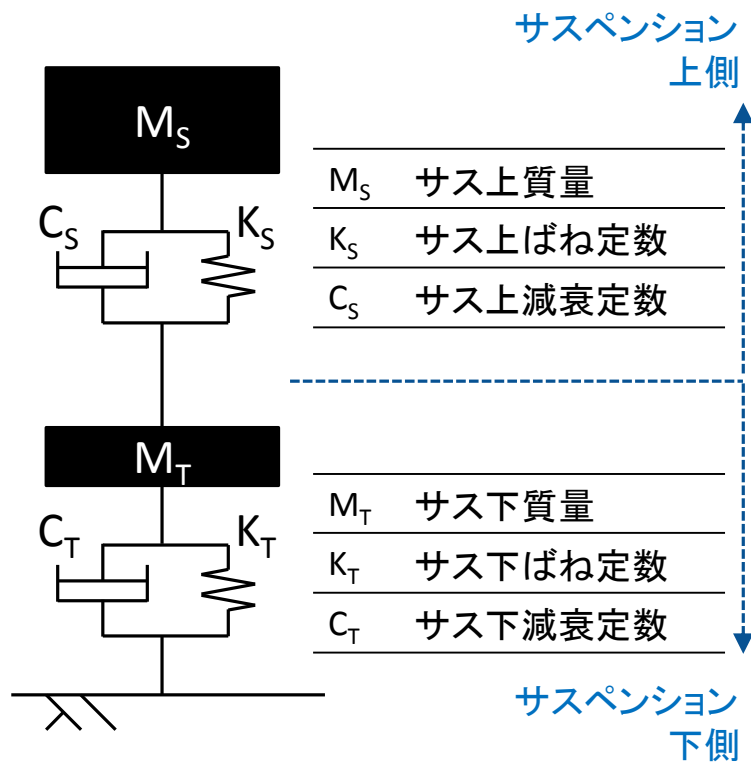


図 2-4-7 2 質点モデル

表 2-4-2 解析条件

ばね	2 自由度間ばね
ビーム	材端ばねビーム
板曲げ	Mindlin・ライスナー8点板厚要素
ソリッド	8点1次立体要素
ダンパ	2 自由度間ダンパ
節点数	2,488

表 2-4-3 入力パラメータ

前前輪	積載無	積載有	後前輪	積載無	積載有	後後輪	積載無	積載有
M _{S1}	1.6155	2.7100	M _{S2}	2.4918	4.1800	M _{S3}	2.3964	4.0200
K _{S1}	1,131.3	1,131.3	K _{S2}	2,883.8	2,883.8	K _{S3}	3,059.1	3,059.1
C _{S1}	3.92	3.92	C _{S2}	7.84	7.84	C _{S3}	6.86	6.86
M _{T1}	0.37	0.37	M _{T2}	0.58	0.58	M _{T3}	0.38	0.38
K _{T1}	1,901.2	1,901.2	K _{T2}	1,945.6	1,945.6	K _{T3}	1,822.4	1,822.4
C _{T1}	29.4	29.4	C _{T2}	29.4	29.4	C _{T3}	29.4	29.4

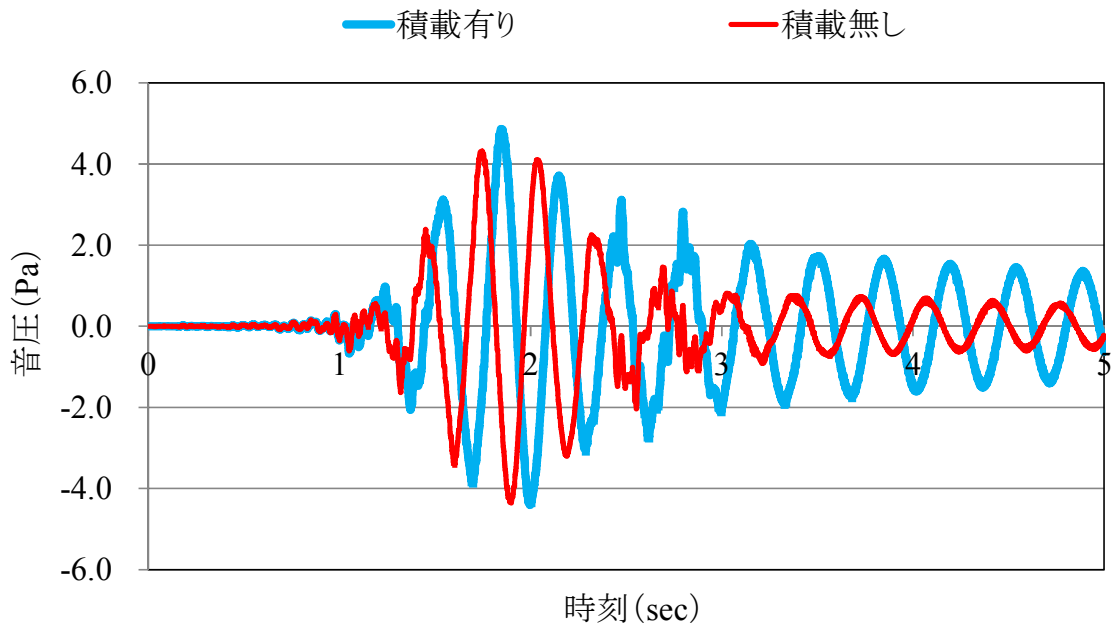


図 2-4-8 解析結果 (時刻歴波形)

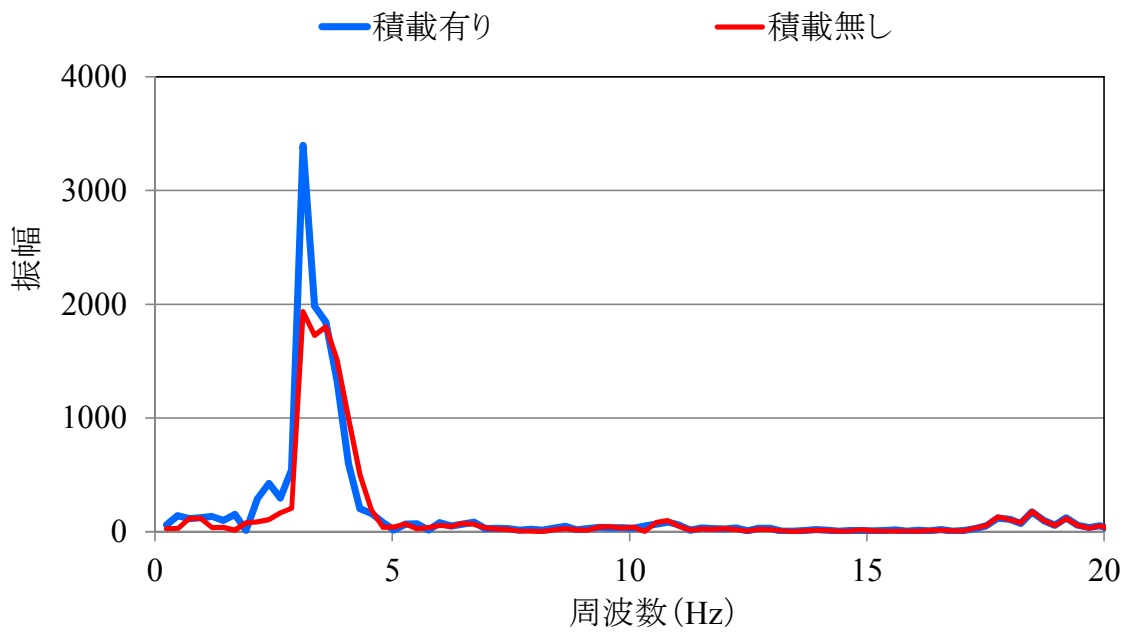


図 2-4-9 解析結果 (周波数特性)

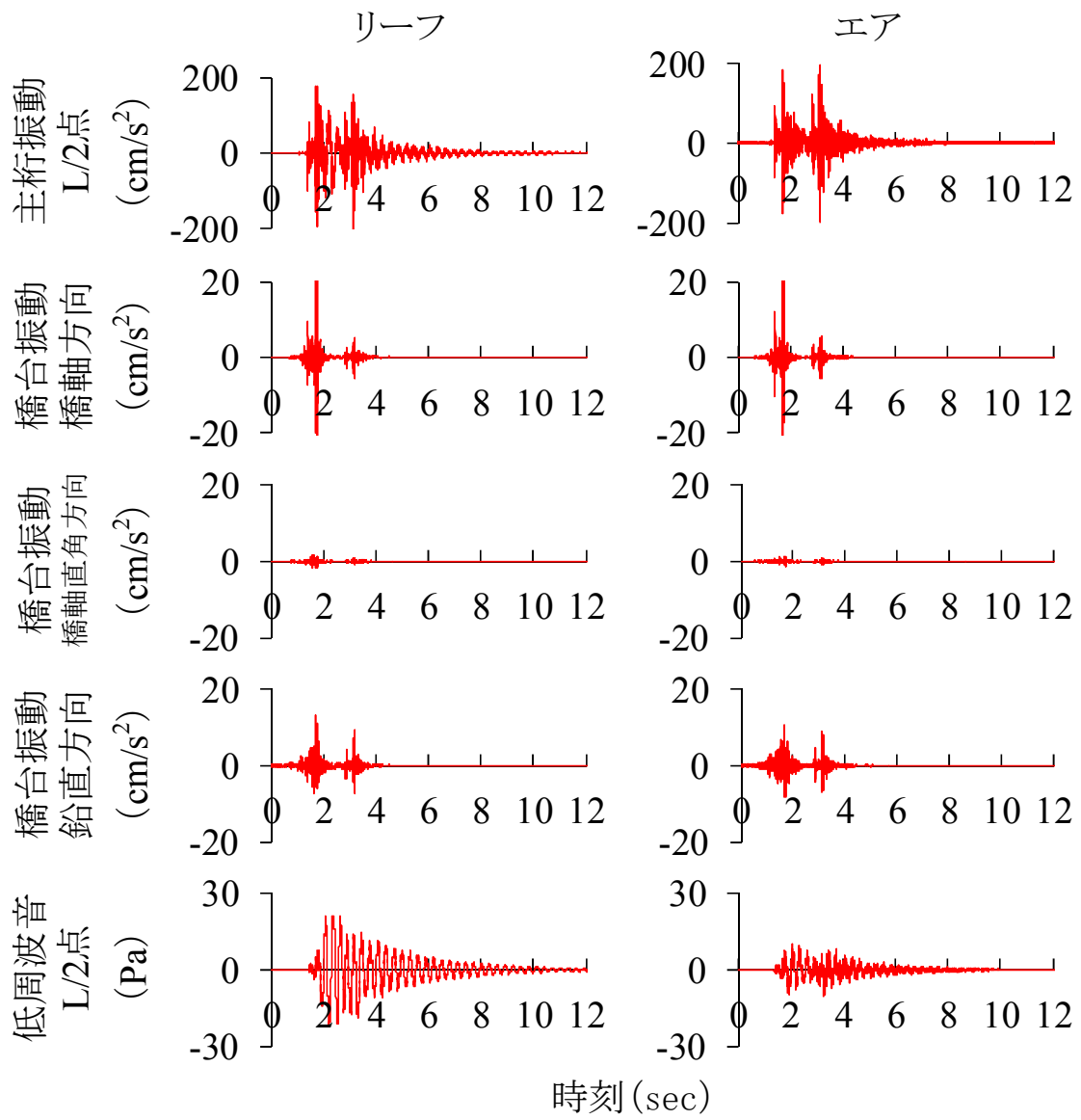


図2-5-1 時刻歴波形

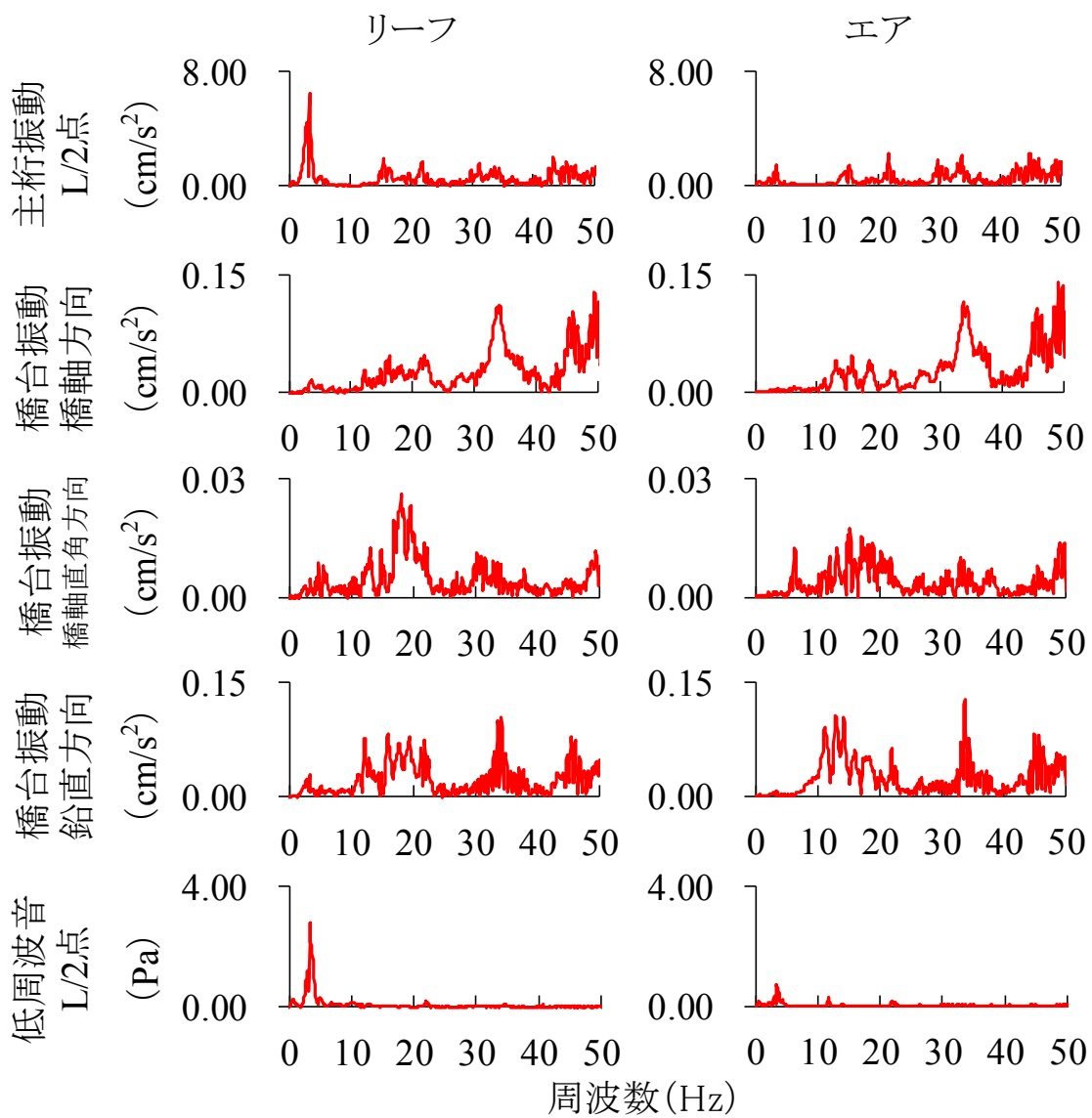


図2-5-2 周波数特性

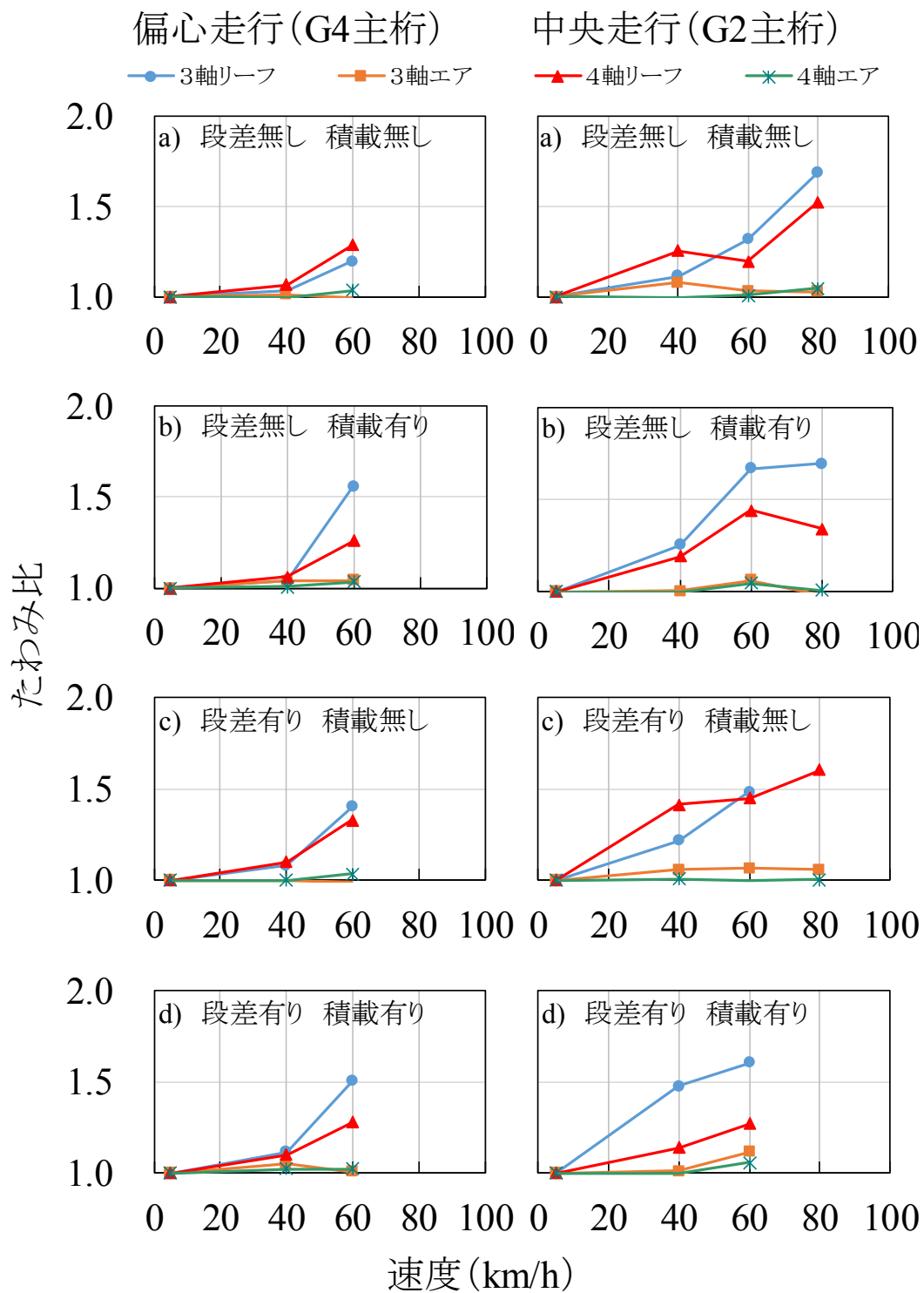


図 2-6-1 主桁たわみ増幅率

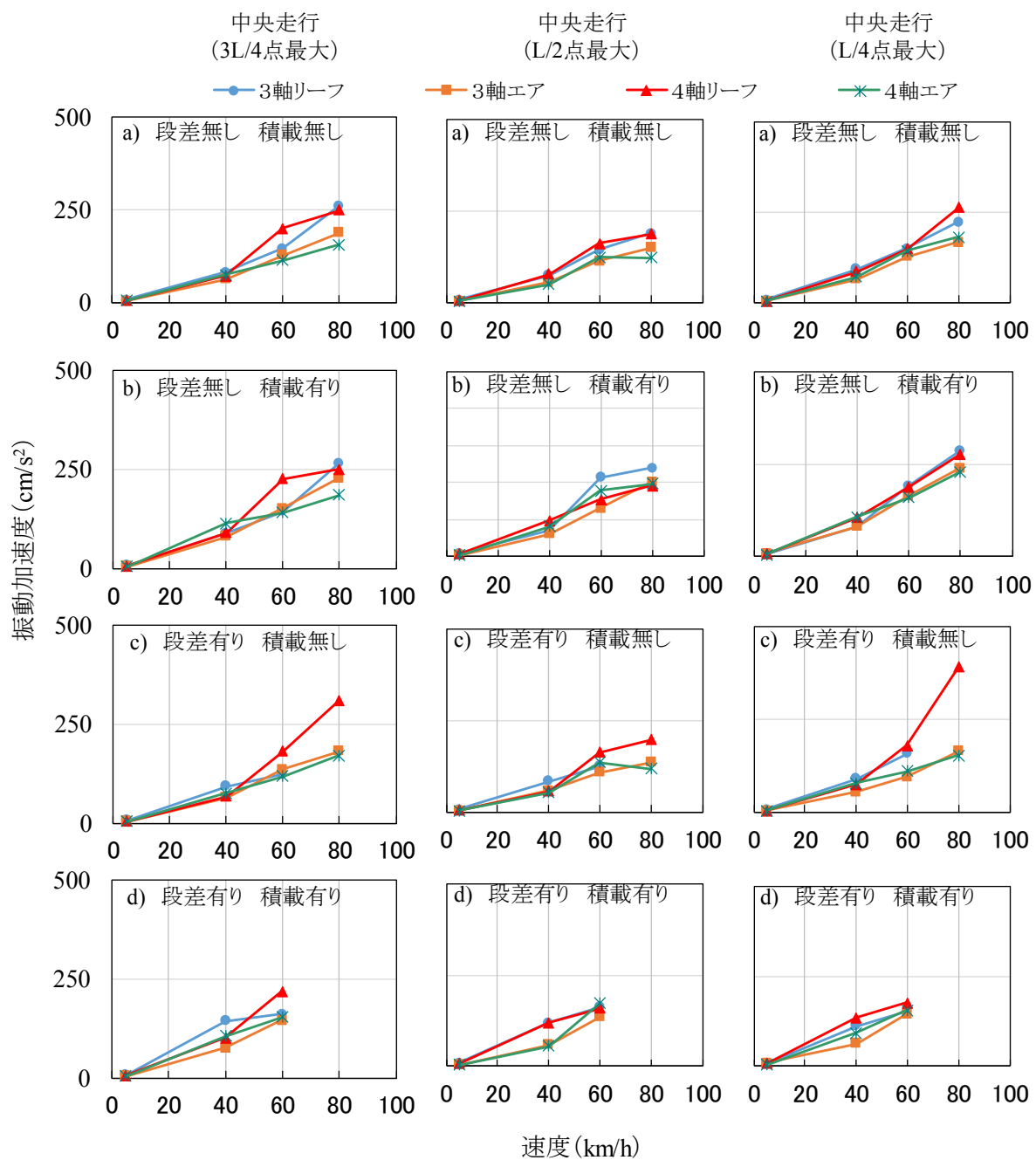


図 2-6-2 走行速度と主桁振動加速度 (中央走行時, AP)

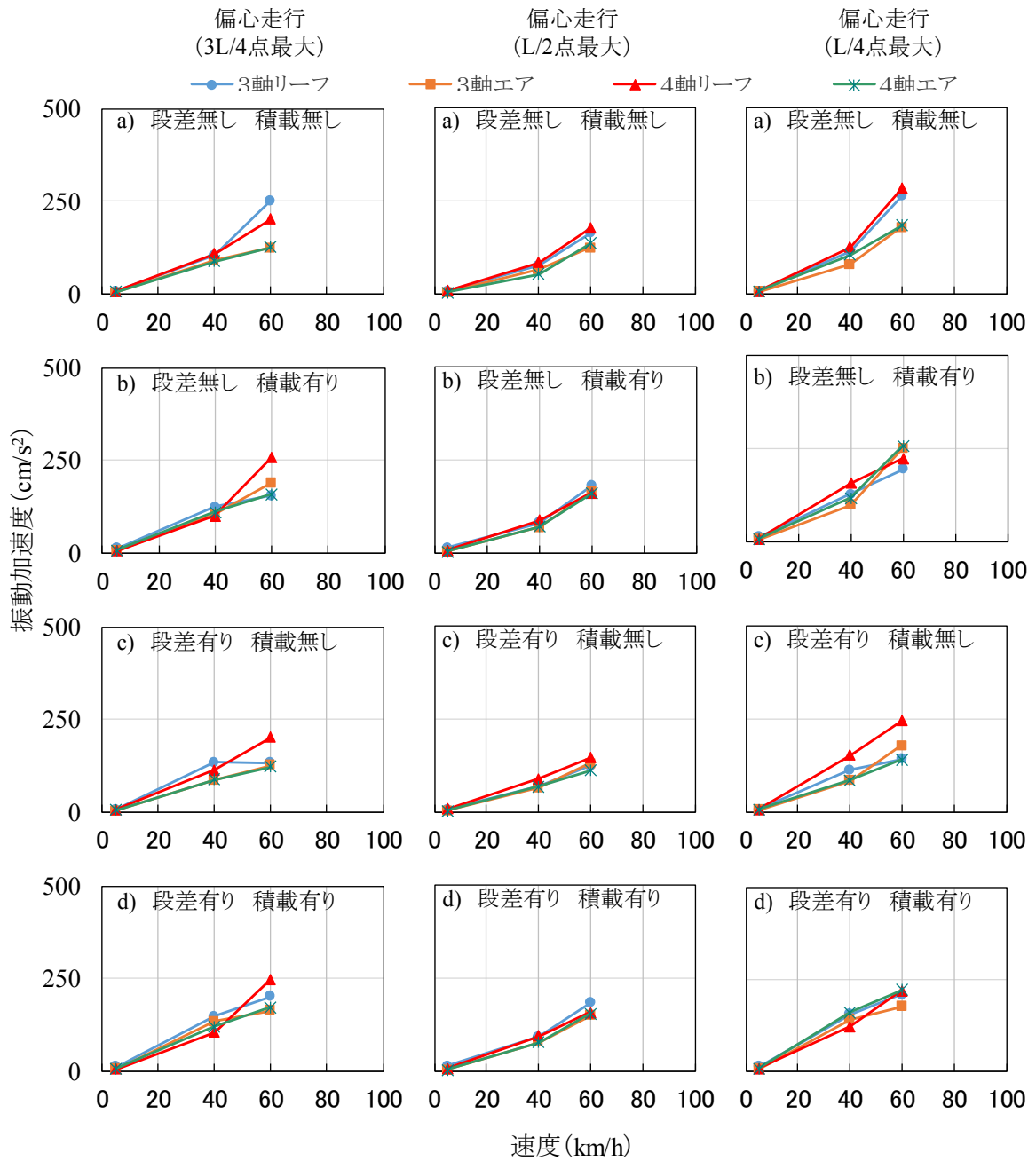


図2-6-3 走行速度と主桁振動加速度（偏心走行時，AP）

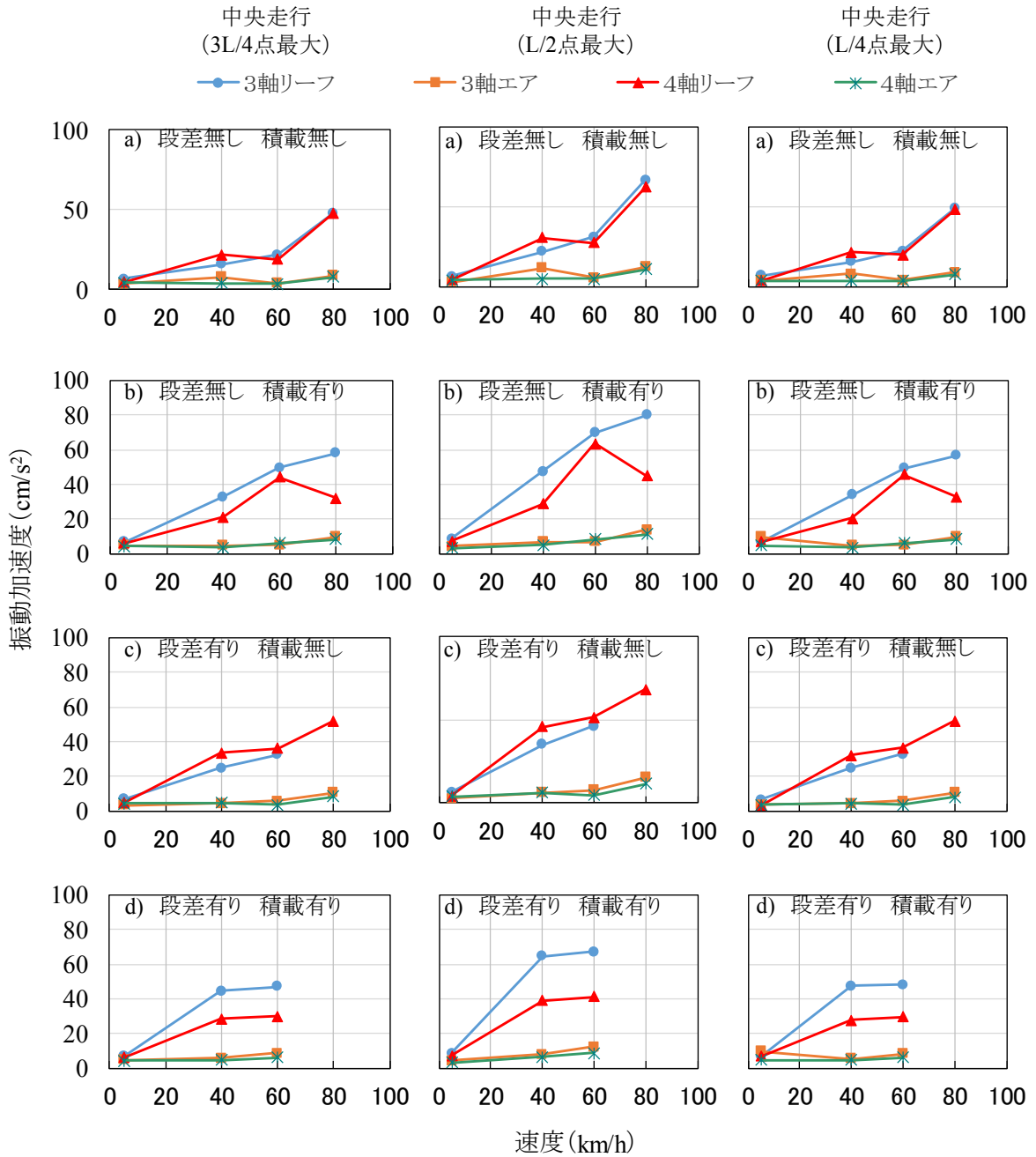


図2-6-4 走行速度と主桁振動加速度 (中央走行時, 2~5Hz)

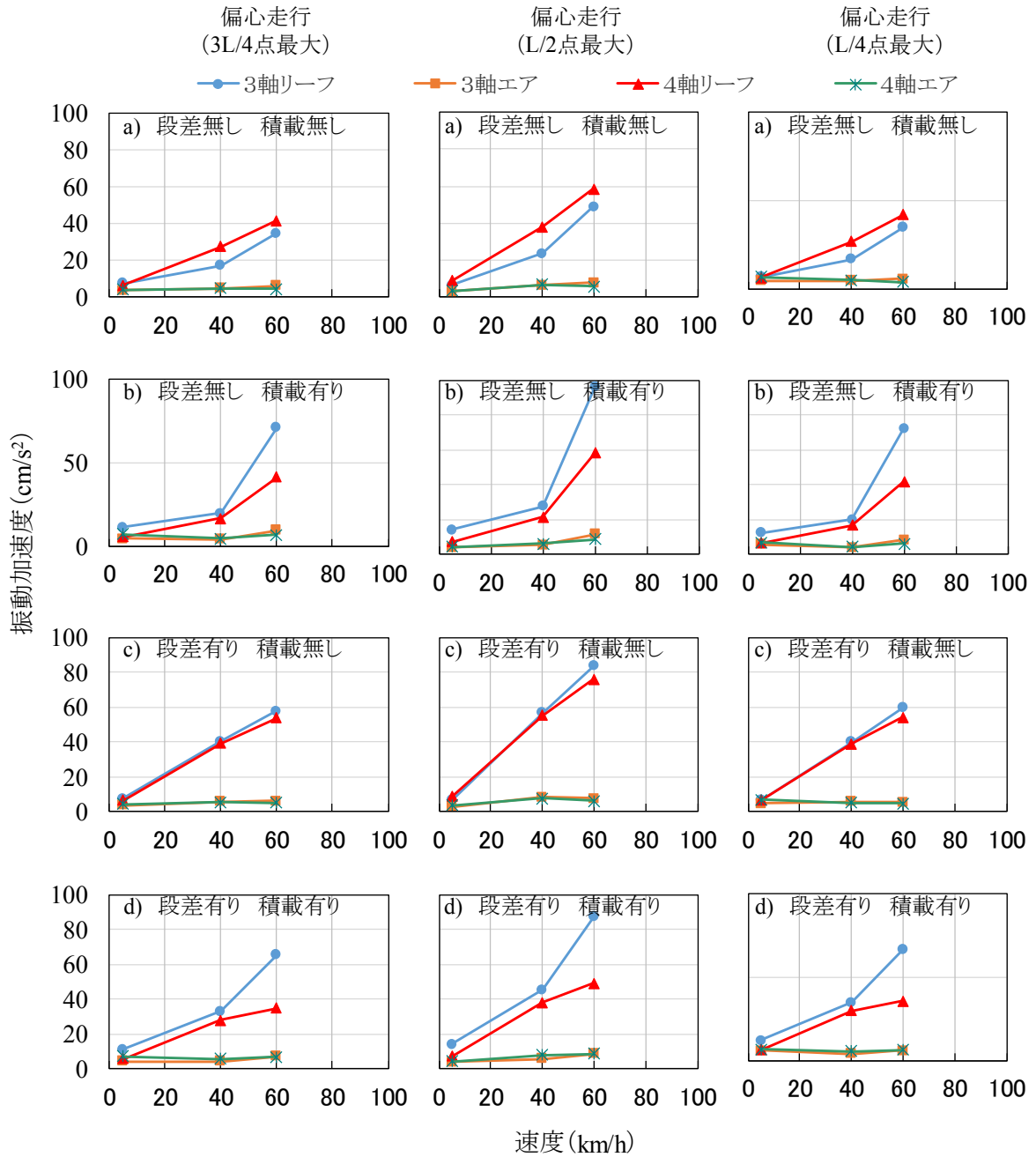


図 2-6-5 走行速度と主桁振動加速度（偏心走行時，2～5Hz）

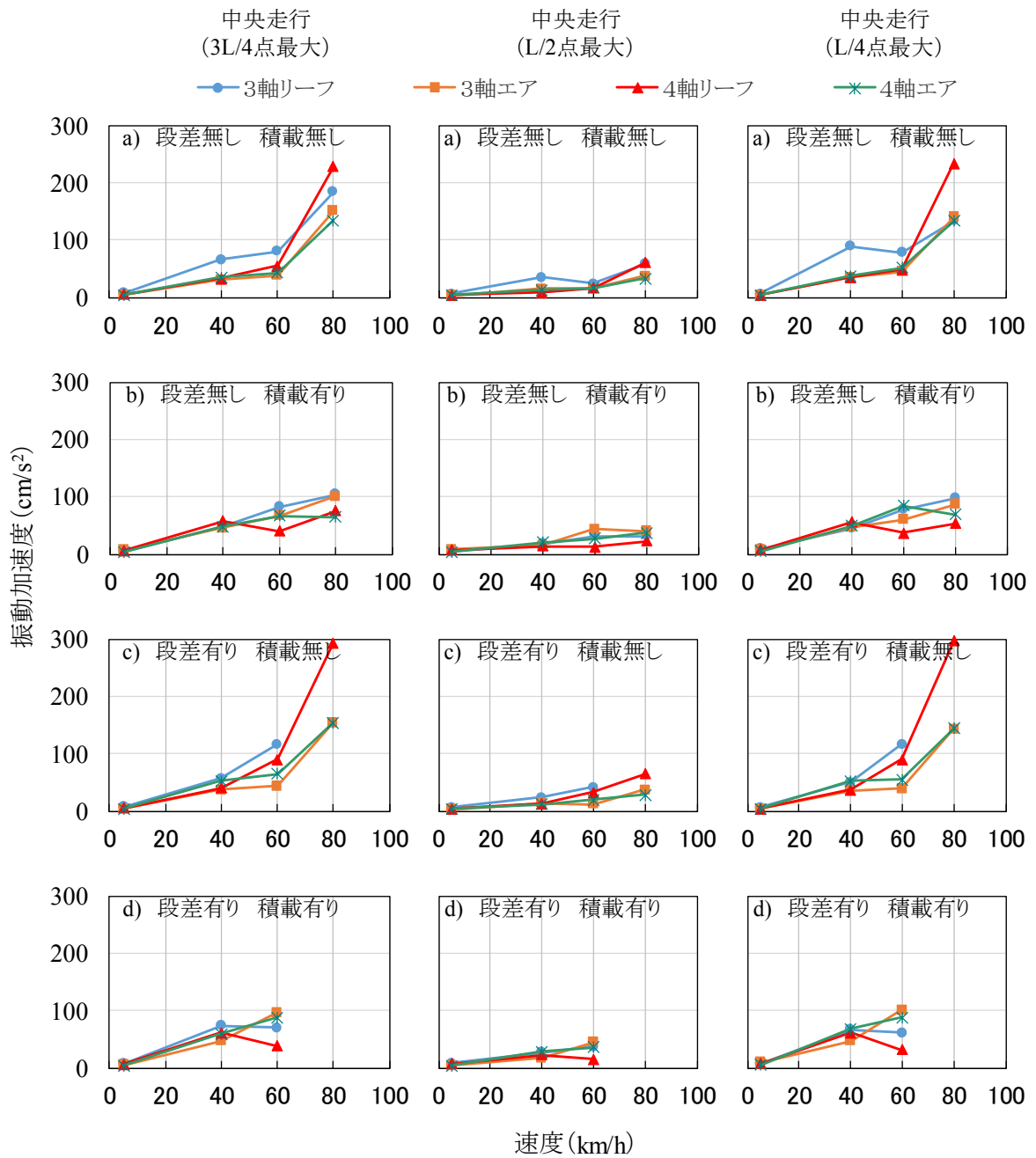


図2-6-6 走行速度と主桁振動加速度（中央走行時，10~20Hz）

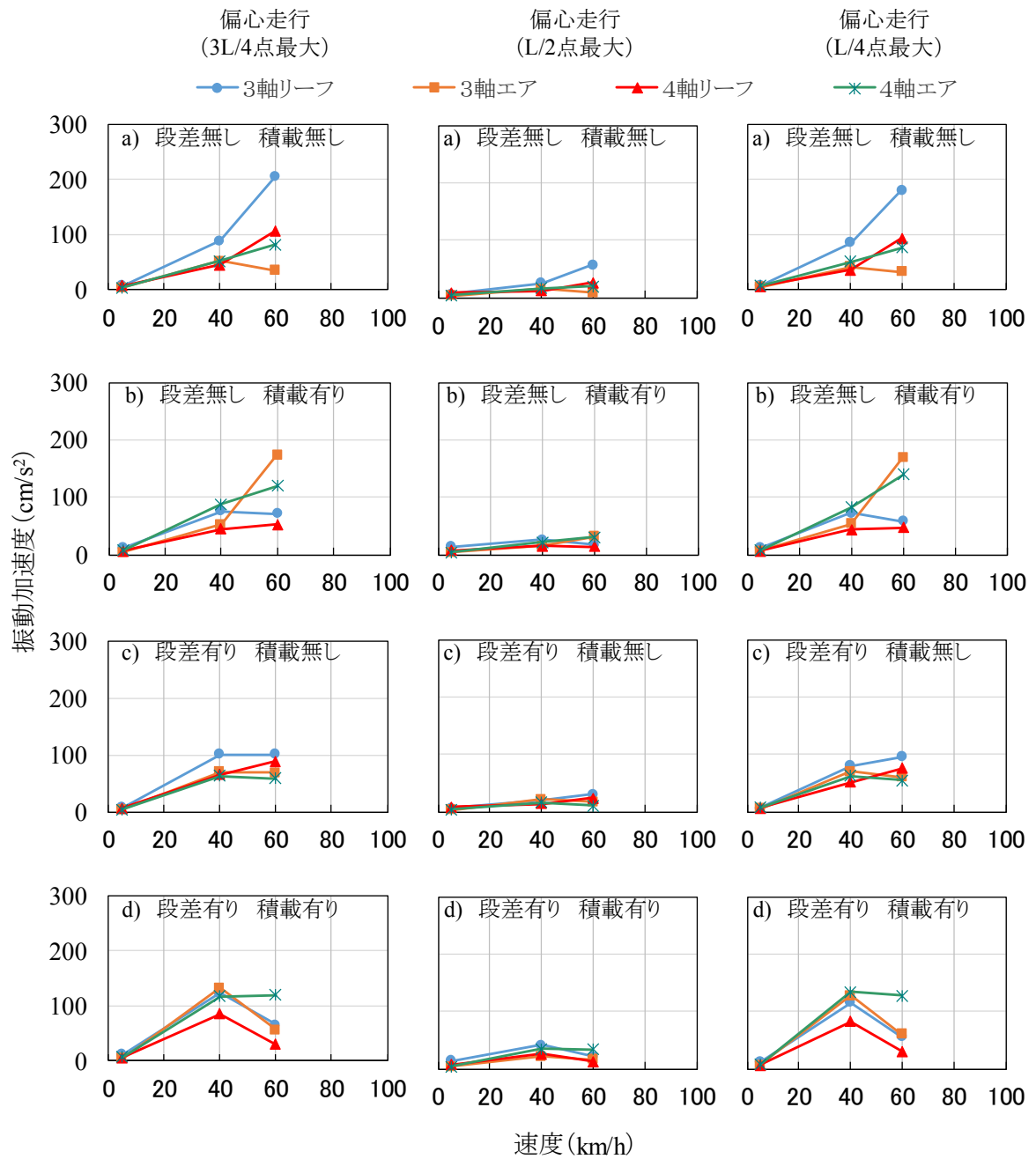
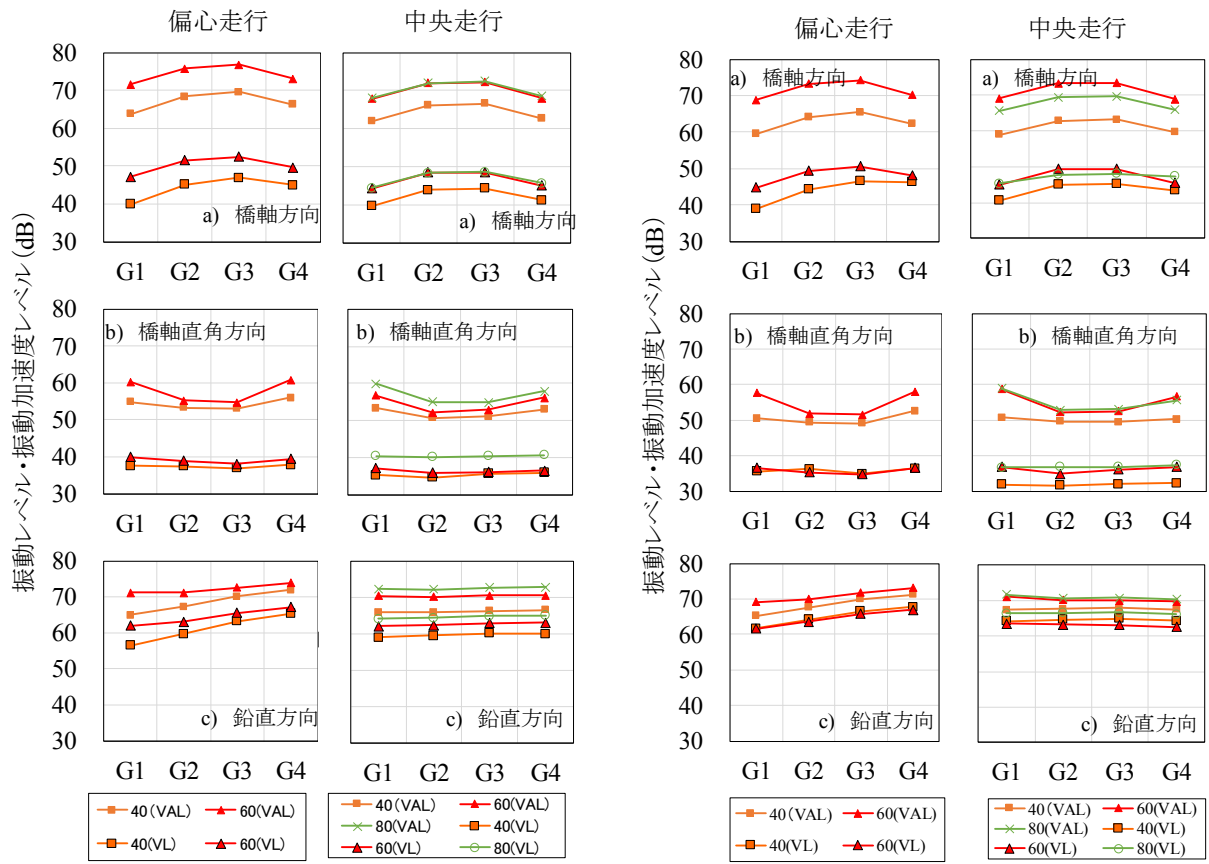


図2-6-7 走行速度と主桁振動加速度 (偏心走行時, 10~20Hz)



(a) 3軸リーフ式サスペンション車

(b) 3軸エア式サスペンション車

図 2-6-8 橋台振動の分布

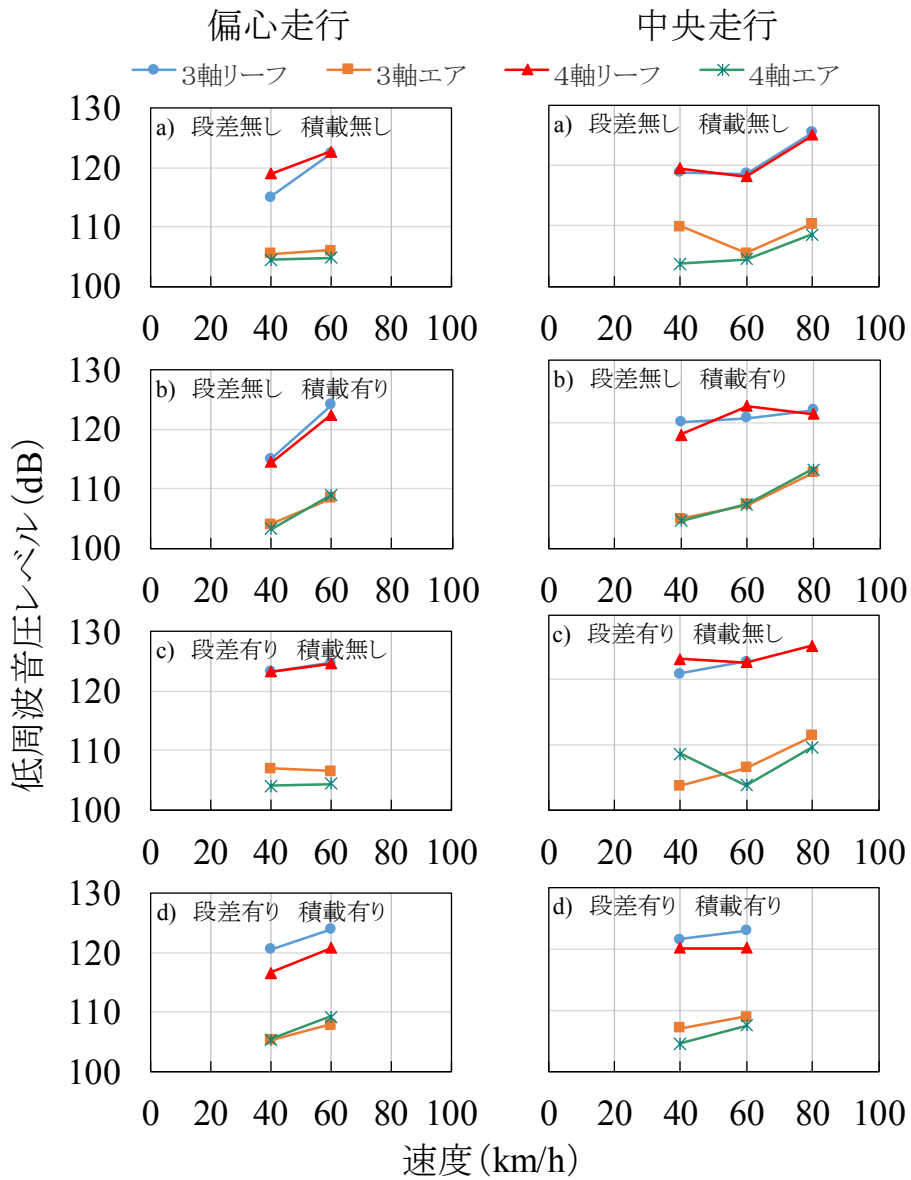


図 2-6-9 走行速度と低周波音圧レベルの関係

表2-7-1 振動加速度レベル（橋軸方向）

振動加速度レベル （橋軸方向）			G1		G2		G3		G4	
			X		X		X		X	
			カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数
X1	1	3軸	-0.063	0.049	-0.109	0.080	-0.123	0.093	-0.018	0.014
	2	4軸	0.061		0.106		0.120		0.017	
X2	1	リーフ	0.712	0.487	0.647	0.432	0.634	0.434	0.562	0.415
	2	エア	-0.693		-0.630		-0.617		-0.547	
X3	1	中央走行	-0.253	0.225	-0.279	0.234	-0.649	0.498	-0.990	0.683
	2	偏心走行	0.340		0.374		0.872		1.330	
X4	1	積載無し	-1.969	0.852	-1.909	0.830	-1.821	0.824	-1.843	0.845
	2	積載有り	2.133		2.068		1.972		1.996	
X5	1	40km/h	-4.032		-3.953		-3.897		-3.708	
	2	60km/h	3.005	0.939	2.961	0.930	2.879	0.932	2.724	0.934
	3	80km/h	2.989		2.885		2.962		2.861	
X6	1	段差なし	0.675	0.496	0.732	0.505	0.770	0.534	0.743	0.546
	2	段差あり	-0.771		-0.836		-0.880		-0.850	
定数項			66.436		70.614		71.167		67.256	
重相関係数			0.957		0.950		0.951		0.955	
決定係数			0.915		0.903		0.904		0.912	

表2-7-2 振動加速度レベル（橋軸直角方向）

振動加速度レベル （橋軸直角方向）			G1		G2		G3		G4	
			Y		Y		Y		Y	
			カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数
X1	1	3軸	0.400	0.347	0.569	0.474	0.579	0.492	0.238	0.233
	2	4軸	-0.390		-0.554		-0.563		-0.232	
X2	1	リーフ	0.564	0.463	0.422	0.371	0.389	0.356	0.534	0.474
	2	エア	-0.550		-0.411		-0.379		-0.520	
X3	1	中央走行	-0.172	0.179	-0.584	0.530	-0.290	0.307	-1.011	0.762
	2	偏心走行	0.231		0.785		0.389		1.358	
X4	1	積載無し	-1.661	0.850	-1.446	0.821	-1.286	0.797	-1.375	0.825
	2	積載有り	1.800		1.566		1.393		1.489	
X5	1	40km/h	-3.095		-1.714		-1.834		-2.993	
	2	60km/h	1.705	0.930	0.651	0.839	0.848	0.853	1.914	0.934
	3	80km/h	4.044		3.093		2.868		3.139	
X6	1	段差なし	0.433	0.396	0.017	0.017	-0.156	0.162	0.294	0.305
	2	段差あり	-0.495		-0.019		0.179		-0.336	
定数項			56.659		52.776		52.736		56.096	
重相関係数			0.952		0.908		0.906		0.953	
決定係数			0.906		0.824		0.821		0.908	

表2-7-3 振動加速度レベル（鉛直方向）

振動加速度レベル (鉛直方向)			G1		G2		G3		G4	
			Z		Z		Z		Z	
			カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数
X1	1	3軸	0.278	0.273	0.378	0.352	0.382	0.322	0.326	0.258
	2	4軸	-0.271		-0.368		-0.372		-0.317	
X2	1	リーフ	-0.156	0.157	-0.288	0.275	-0.268	0.232	-0.158	0.128
	2	エア	0.152		0.280		0.261		0.154	
X3	1	中央走行	0.644	0.604	-0.153	0.172	-1.029	0.723	-1.819	0.862
	2	偏心走行	-0.866		0.205		1.383		2.445	
X4	1	積載無し	-0.959	0.718	-0.829	0.655	-0.794	0.596	-0.756	0.546
	2	積載有り	1.039		0.898	0.860	0.819			
X5	1	40km/h	-2.742	0.926	-2.247	0.891	-2.054	0.852	-1.989	0.825
	2	60km/h	1.637		1.287		1.081		1.008	
	3	80km/h	3.216		2.794		2.831		2.854	
X6	1	段差なし	0.268	0.283	0.018	0.020	-0.079	0.076	-0.055	0.048
	2	段差あり	-0.306		-0.021		0.091		0.062	
定数項			68.815		69.246		70.344		70.898	
重相関係数			0.947		0.909		0.889		0.906	
決定係数			0.898		0.826		0.790		0.821	

表 2-7-4 走行速度と低周波音圧レベルの関係

低周波音圧レベル			1/2L		1/4L		1/2L		1/4L	
			FLAT		FLAT		G		G	
			カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数	カテゴリー スコア	偏相関 係数
X1	1	3軸	0.375	0.186	0.372	0.193	0.376	0.180	0.306	0.151
	2	4軸	-0.365		-0.362		-0.366		-0.298	
X2	1	リーフ	7.404	0.966	7.056	0.966	2.797	0.807	1.828	0.674
	2	エア	-7.209		-6.870		-2.723		-1.780	
X3	1	中央走行	0.016	0.009	0.005	0.003	0.076	0.042	-0.162	0.090
	2	偏心走行	-0.021		-0.006		-0.102		0.217	
X4	1	積載無し	0.004	0.002	-0.068	0.037	0.073	0.038	0.095	0.050
	2	積載有り	-0.005		0.073		-0.080		-0.103	
X5	1	40km/h	-1.663	0.654	-1.808	0.701	-1.980	0.674	-2.035	0.711
	2	60km/h	0.413		0.442		0.780		0.606	
	3	80km/h	3.636		3.971		3.491		4.155	
X6	1	段差なし	-0.637	0.327	-0.708	0.372	-0.366	0.189	-0.529	0.272
	2	段差あり	0.728		0.809		0.419		0.605	
定数項			113.846001		112.80845		106.134415		106.263837	
重相関係数			0.968		0.968		0.856		0.809	
決定係数			0.936		0.937		0.733		0.654	

第 3 章

振動の発生要因と伝搬経路に関する検討

3-1 はじめに

高速道路事業では、1956年に日本道路公団が設立され、高速道路の建設および維持管理を行っているが、典型7公害をはじめとした公害問題に取り組んできている^{1),2)}。現在、国土交通省が定めた高規格幹線道路網の約7割が完成し、高速道路事業はその事業主体が建設から維持管理に移りつつある。これに加え、道路事業のほか自動車産業などの技術革新により、環境問題の内容に変化が生じてきており、近年では騒音（低周波音を含む）および振動の問題が高い比率を占めている。本章では、振動問題について取り上げる。環境省によると³⁾、全国の自治体に寄せられた平成28年度の振動に係る苦情の件数は3,011件で、うち道路は265件であった。図3-1-1に示す。前年度からは減少傾向にあるものの、依然として振動の苦情が生じている。

高速道路の沿道住民からも、橋梁の振動問題を寄せられることがある。既存の橋梁振動対策は、橋梁はダンパーの制振装置等による対策^{4),5)}、地盤は地中連続壁等による対策⁶⁾など、施工規模が大きい対策となる傾向があり、費用対効果の高い対策の選定に苦慮している。道路交通振動においては、橋梁上部工の振動測定と解析の結果を比較した研究が多く行われている。たとえば、蘇迪ら⁷⁾は、4軸25tf試験車両の単独走行時での振動測定結果から、床版の連続化が加速度応答や応力に効果的であることや、解析から応答応力に差が生じる原因について述べている。発生した振動問題の解決を目指し費用対効果の高い対策を検討するためには、振動の原因と橋梁から家屋までの振動伝播を明らかにすることが不可欠である。徳永ら⁸⁾は、道路交通振動問題は家屋床における振動レベルおよび家屋の振動増幅が大きく寄与していることから、発生源対策や伝搬経路対策として、高架道路沿道で測定した水平方向振動地盤加速度を家屋地盤に入力し3階床面に相当する質点の応答加速度を算出する解析を行っている。解析の妥当性の検証については、当該家屋と固有振動数がほぼ同等である3階建モデルハウスで起振機試験での検証に留まっており、供用中の高架道路から発生するランダム加振や橋梁・地盤の伝播経路を考慮した検証がなされていない。佐野ら⁹⁾は、鉄道走行時における木造2階建アパート床の固有振動把握のためのモーダル解析を行っている。モーダル解析の実験は、建物内部の床面をインパクトハンマーで加振する方法に留まっている。

本研究は、環境問題における物理特性を把握するため、第2章で述べた発生源に対し第3章は伝播経路について取り上げる。環境問題となる振動の原因と伝播経路を究明することを目的とし、沿道家屋から振動の苦情が発生している供用中の高速道路橋において、レーザドップラ速度計（LDV）等を用いて振動加速度の非同時多点測定を行い、この測定結果と沿道家屋の振動加速度測定結果の周波数特性を分析する。これらの結果を踏まえ、振動原因が橋梁の路面凹凸や床版損傷である可能性について検討を行う。なお、低周波音は、第2章より橋梁の主桁振動により大気中に放出されてい

ることを示しており、橋梁振動が原因と考えられる。伝播経路は、高速道路沿線家屋で生じる低周波音問題では伝播媒体が大気のみであり経路が明確である。以上のことから、低周波音に関しては橋梁振動を把握することで原因と伝播経路を把握することが可能であることから、本章では家屋振動を研究対象とする。

3-2 研究対象の沿線状況と環境振動状況

本研究の対象である沿線状況を図 3-2-1 に示す。丘陵地の谷間を通過する高速道路に架設された高架橋で、周辺には新旧複数の戸建て住宅が点在しており、住宅の近隣には環境振動の原因となり得る交通量の多い道路や大型車両が頻繁に出入りするような事業所などは無い。対象高速道路橋は、1973 (S48) 年に供用を開始し老朽化が進んでいることから、上部構造の大規模な改修が計画されている。このサイトでは、供用開始後からこれまでに環境振動に係る問題は発生していなかったが、2013 (H25) 年 8 月以降、複数の住民より戸建て住宅の振動に係る苦情が発生した。その内容は、「ここ数年、高速道路の橋梁上を通過する大型車両が家屋付近を走行する際、地面より突き上げるような振動を感じるようになった。」というものである。

以上のとおり、苦情の内容と周辺環境の状況を鑑みると、高速道路橋から発生した振動が伝播し何らかの原因により感知しやすい状況となり、供用開始から数十年経った後に、苦情発生に繋がったものと考えられる。

3-3 対象橋梁

研究の対象とする橋梁の平面図、一般図、断面図および地質状況図を図 3-3-1 から図 3-3-4 に示す。対象橋梁の上部構造形式は、1970 年代の高速道路建設において広く採用された鋼 4 主鈹桁橋であり、3 径間非合成連続桁と 2 径間非合成連続桁の 2 連から構成された全長 156m の橋梁である。下部工構造は、A1 橋台、A2 橋台ともに箱式橋台で、どちらも丘陵地の斜面中腹に位置する。一方、P1 橋脚～P4 橋脚は、全て張り出し式橋脚で、地面から橋脚天端までの高さは約 5m～14m である。なお、上部工および下部工は、上下線それぞれ独立した構造である。支承は、A1 橋台、A2 橋台が鋼製支承（固定）、P1 橋脚～P4 橋脚はゴム支承（可動）である。この橋梁は、南東に約 2km 離れた河川により形成された氾濫原と丘陵地の境に位置する。そのため地質状況に示すとおり、地表より約 10m の深さまで堅固な砂礫層を構成し、これにより対象橋梁の基礎は、杭を必要としない直接基礎構造を採用している。

対象橋梁はこれまでに補強工事が実施されている。1995 (H7) 年に活荷重 25t 対策として床版改良工事（当初の床版厚 210mm の上面を 10mm 切削し、その上を超速硬 SF コンクリートにより 50mm 増厚する）、1998 (H10) 年に耐震補強工事、苦情が発

生じた 2013 (H25) 年以降は、舗装路面の凹凸を修繕する舗装改良工事とジョイント部に生じた段差の修正工事を繰り返し実施している。

3-4 振動測定実験

本実験では、研究対象の沿線で振動の苦情が発生していることから、原因究明を行うことを目的とし物理量である振動加速度を基準化した振動加速度レベルおよびその振動加速度の実効値に対し振動感覚補正を行った振動レベル¹⁰⁾を用いた環境振動測定と、発生源である橋梁の振動加速度を測定し効率的に橋梁振動特性を分析することを可能とする LDV を用いた非同時多点測定を行った。これは、苦情を呈している住民は下から突き上げるような振動であると証言していることから、建具のガタツキ等が生じやすい低周波音が原因とは考えがたいためである。以下にその方法と結果を示す。

3-4-1 過去の振動レベル測定

研究対象の沿線では過去に環境振動測定が行われている。測定時期は、苦情発生後である 2014 (H26) 年に対策工として実施したジョイント部段差修正工事の前後である。この測定結果では、高速道路の敷地と民地の境界上地面における振動レベルは、夜間において要請限度より 5dB 低い結果が示されている。また、ジョイント部段差修正工事による環境振動の低減効果は 1dB 程度であった。環境振動の原因は、時刻歴波形分析により大型車両が下り線 P2 橋脚上のジョイント部を通過する際の衝撃振動であり、1/3 オクターブバンド中心周波数における 10Hz および 12.5Hz で卓越していると結論付けている。

これらの結果を踏まえ、本研究では、環境振動を励起する橋梁振動の発生部位を特定することとした。

3-4-2 振動測定の方法

本研究では、苦情原因となる振動を特定する環境振動測定と、発生源の振動特性を把握する LDV を用いた非同時多点測定を行った。

(a) 環境振動測定

本研究で実施した環境振動測定は、橋梁各部位の振動および家屋振動でおこなった。本測定では、住民の協力が得られたことから、家屋内の振動測定を併せて行った。さらに、橋梁上を走行する一般車両の車種および走行形態および P2 橋脚と P3 橋脚間の

高架下を交差している一般道の走行車両を把握するため、橋梁上に 2 台、P2 橋脚の敷地境界付近に 1 台、計 3 台の CCD カメラを設置し観測を行った。これら、本線走行車両の状況、橋梁振動、および家屋振動を同時刻で収録する同期測定を行った。橋梁上部工の測定点は既往の調査結果で下り線側 P2 橋脚上のジョイントから生じる大型車両走行の衝撃振動が原因と示されていたことから、P2 橋脚上の車両が乗り入れる側、すなわち交通流下流側に位置する 2 径間連続橋の G2 主桁下フランジ上面に配置した (FL1)。これは、P2 ジョイント部の段差により車両が上下に振動し、車両の荷重がタイヤを介し乗り入れ側の橋梁上に加わり、橋梁上部工の振動を励起するものと考えたためである。また、橋梁上部工で発生した振動から振動苦情となっている家屋振動への伝搬経路を検討するため、P2 橋脚の天端 (P1)、P2 橋脚直近の地盤上 (G1) および敷地境界から 35m 離れた地面上に測定点 (G2) を設けた。さらに、敷地境界より 75m 離れた地点に位置する振動苦情の対象家屋では、1 階から 3 階への家屋振動の伝播経路を検討するため、1 階コンクリート基礎部 (G3)、2 階の居住部の床面 (2F) および 3 階の寝室部の床面 (3F) に測定点を配置した。なお、この家屋の 1 階は駐車場であり、H 形鋼の柱はあるものの筋交いや壁材などは施工されていない構造である。これらの測定点は、各部位と家屋振動の水平方向 (橋軸方向: Y, 橋軸直角方向: X) および鉛直方向 (Z) の振動を測定した。測定機器の系統図を図 3-4-1 に、測定点の配置図を図 3-4-2 に示す。

本測定では、測定点に振動レベル計 (リオン製 VM-53 : 6 台, VM-51 : 1 台) を設置し、延長ケーブルにてデータ記録装置 (リオン製 DA-21 : 2 台 (同期ケーブルで接続)) に接続した。振動レベル計は、計量法ならびに JIS C 1510 : 1995 に適合した振動レベル計を用いた。また、トリガー信号受信機として使用したトランシーバーの信号入力を併せて DA-21 に収録した。測定は橋梁振動の分析を行うため振動加速度で行い、家屋振動の評価は人体の振動感覚特性を補正することとした。本研究では、家屋振動を励起する橋梁部振動を特定する必要があるためである。振動測定のサンプリング周波数は、トリガー信号の音声信号を認識することから 2.56KHz とした。本研究は、対象橋梁は供用中の路線であり一般走行車両を対象に測定することから、3 台の CCD カメラを設置し観測を行った。この映像データは、振動と映像の同時記録が可能な記録装置 (TEAC 製 AQ-VU) を用いて、映像と同時に橋梁振動 (FL1) および家屋振動 (G3, 3F) を振動レベル計より分岐し AQ-VU に収録した。さらに、トリガー信号受信機として使用したトランシーバーの信号入力を AQ-VU で収録し、DA-21 との同期を行った。測定は、平日の 13 時から 15 時の間、10 分間連続測定を複数回実施した。これは、家屋内振動の調査は昼間にしてほしいとの住民要望に応えたためである。また、各測定点に配置した振動レベル計は X, Y, Z の三成分の測定が可能であるが、使用したデータ記録装置の ch 数の制限のため、X, Y, Z それぞれ 1 成分ごとの測定とし、複数回行うことで 3 成分の測定を実施した。

(b) 非同時多点測定

対策工を検討するためには、環境振動問題の要因を特定しこの要因を橋梁振動から低減する必要がある。よって、橋梁振動の大きい部位の特定や、橋梁の振動モードを分析できる測定を、レーザドップラ速度計 (LDV) を用いて行った。

橋梁上部工振動が原因の環境振動を低減する目的とし対策工を検討するうえで、橋梁上部工の振動モードを把握することが重要である。そのためには、橋梁上部工に複数の測定点を設け同時計測 (同時多点測定) を行う必要がある。これら同時多点測定は、高所における危険な作業と、多大な労力並びに費用が必要となる。そこで、これらの課題を克服する測定手法として、LDV を用いた振動測定¹²⁾⁻¹⁴⁾を用いた。本研究では、複数台 LDV を接続し非同時多点測定を採用することとした。

LDV を複数台使用する測定方法を図 3-4-3 に示す。本研究で使用した LDV 測定システムは、LDV カメラ 2 台が標準的なシステムであるが、本研究では 2 つのシステムを用いて測定し、これらのシステムの同期を取るために、空きチャンネルにトランシーバーでトリガー信号を入力した。一般的な同時多点測定は、図 3-4-4 の左側に示すとおり、複数のセンサーを測定点に設置し同時に測定を行う。そのため、橋梁上など高所においてセンサーの取り付けや配線の作業が伴い危険であると共に、センサー数に応じたデータ記録装置が必要である。一方、LDV を使用する非同時多点測定は、図 3-4-3 のように地上に設置した LDV により測定が可能であることと、図 3-4-4 の右側に示すように 1 台の LDV を基準点 (Fix) として固定し、他方の LDV で測定点を移動 (Move) させながら測定を行い、橋梁全体を測定する。つまり、全ての測定点を同時に測定するのではなく、基準点を基に他の測定点との相関を計算することで橋梁の振動モードを算出する。

LDV を使用する非同時多点測定では、基準点と移動点の振動波形を同時に収録し、FFT により 2 点間の伝達関数を求める。伝達関数から 2 点間の振幅比と位相差を算出し、振幅比と位相差から各測定点の振動を基準化することで、振動モードを分析する方法である。フローを図 3-4-5 に示す。LDV により測定された波形は Wave ファイルとして記録し、これらのデータを分析器および分析ソフトウェアを用いて数値化する。また、伝達関数分析では、データの同時性が重要であるため、測定時に収録したトランシーバーなどによるトリガー信号を目印に同期処理を行う。次に、各測定点の振動波形について FFT 分析を行い、周波数ごとの振幅と位相を求め、これらを基準点との伝達関数を計算する。最終的には、着目周波数について伝達関数を用いて振動モードを作成する。

前項までで述べた手法を用いて、本研究で実施した LDV 非同時測定における対象橋梁の測定点配置図を図 3-4-6 に示す。測定点は、橋軸直角方向は主桁間中央部と張出床版の 5 測定点、橋軸方向は径間 1/4 毎に 16 側線、合計 80 測定点とした。測定はサンプリング周波数 500Hz とし、1 回の測定は 120 秒間とした。また、測定は、一般車両の自由走行時の加振状態で行った。

一方、FFT 分析において、分析周波数範囲はサンプリング周波数 (F(Hz)) で、周波数分解能は分析時間長 (T(sec)) で決定される。本件では $F=256\text{Hz}$ 、 $T=4(\text{sec})$ とし、 $0\sim 128\text{Hz}$ の範囲を 0.25Hz の分解能で分析を行った。また、窓関数は矩形窓、オーバーラップは 0% とした。分析データ長は 100sec とし、 25 個の分析値を平均化した。

3-4-3 振動測定の結果

苦情原因となる振動を特定する環境振動測定と、発生源の振動特性を把握する LDV を用いた非同時多点測定の結果を以下に示す。

(a) 振動レベル測定

家屋振動と橋梁振動との関係を明らかにするため、 10 分間測定データを時刻歴で比較した。橋梁上部工の測定点 FL1 (青色線) と家屋 3F の測定点 3F (赤色線) における鉛直方向 (Z) の振動加速度の時刻歴波形を図 3-4-7 に示す。振動加速度は AP (オールパス) とし、周波数分析を行わず直接二乗平均値 (実効値) を求めレベル化して表示した値とした。家屋振動のピークと振動のピークが出現する時刻が概ね一致していることから、家屋振動と橋梁振動は相関が高いことを示している。なお、振動のピークが一致しない時刻があるが、これは測定箇所とは反対側である上り線を走行する大型車両の影響と考えられる。

橋梁上部工から家屋振動に至る振動の距離減衰を把握するため、各測定点での振動レベルを表したグラフを図 3-4-8 に示す。家屋地盤 (G2) は、苦情が発生している家屋とは異なる家屋の地盤であり、高速道路と民地との敷地境界から 35m 離れた地点に位置する。これは、苦情が発生している家屋より高速道路側に 40m ほど近い測定点である。この G2 地点では、橋脚直近地盤上 G1 地点の振動レベル約 50dB から大きく距離による減衰がみられ約 35dB となっている。この値は、道路交通振動の要請限度 65dB (昼間) と比較し約 30dB 低く、一般的には振動問題が起こりがたい程度の地盤振動である。一方、振動の苦情が発生している家屋の基礎では約 40dB と地盤振動よりも大きい値を示している。さらに家屋 3F では 50dB 弱であり、家屋の構造特性により振動レベルが大きく増幅していることが分かる。また、X、Y、Z の 3 成分の値を比較すると、鉛直成分である Z 方向のレベルが高く、これは、下から突き上げるような振動との苦情内容と一致する。

橋梁振動と家屋振動の相関が高い周波数を特定するため、各測定点における鉛直方向振動の $1/3$ オクターブバンド中心周波数毎の加速度レベル分析結果を図 3-4-9 に示す。卓越周波数は 3.15Hz 帯域付近 12.5 と Hz 帯域付近に現れている。ここで、 3.15Hz 帯域は橋梁側の測定点である橋梁上部工 (FL1) や橋脚天端 (P1) および橋脚付近の地盤上 (G1) の測定点で大きく卓越しており、家屋側の測定点である家屋地盤および

家屋内の各測定点には現れていない。これに対し、12.5Hz 帯域は橋梁側の測定点および家屋側の測定点共に卓越が見られる。従って、家屋振動に寄与する橋梁振動は12.5Hz 帯域の振動と考えられる。また、12.5Hz 帯域の振動を対象家屋の基礎（P1）と家屋3階を比較すると約12dB 大きい値となっている。これは、前項で示した振動レベルの距離減衰と同様で、対象家屋の基礎部（P1）や地盤振動（G2）では小さな値が建物の構造特性により増幅していると考えられる。次に、家屋振動における水平成分および鉛直成分の周波数特性を図3-4-10に示す。対象家屋3階における1/3 オクターブバンド中心周波数毎の加速度レベルを水平成分と鉛直成分に分けた周波数特性を示す。青色の帯状の線は定常的な振動に対する人の振動感覚閾値の目安¹⁾を示している。鉛直成分の12.5Hz 帯域が最も大きい値であり、これは苦情を申し立てている住民の下から突き上げるような振動と言う証言と一致する。また、鉛直成分12.5Hz 帯域の振動加速度レベルは振動感覚閾値の目安と同レベルであり、振動に敏感な人であれば対象家屋の振動を知覚するものと考えられる。以上の結果より、対象家屋の振動に寄与する橋梁振動は、12.5Hz 帯域の鉛直振動と考えられる。

本研究では、橋梁振動を発生させる走行車両と家屋振動を特定するため、2 台の CCD カメラを用いて橋梁上を走行する車両と各測定点の振動を同時に測定した。その一例として、大型車両が走行車線と追越車線を並走したケースの写真および P2 橋脚の天端（P1）、P2 橋脚直近の地盤上（G1）および家屋振動（3F）における振動加速度レベルの時刻歴波形を図3-4-11に示す。このケースは、対象車両群の前後に走行している車両がなく、また高架下交差道路に走行車両がないことから、他車両による振動の影響が少ないケースである。青線の位置は、車両が P2 橋脚上を通過した時刻を示している。橋脚天端では走行車両が P2 橋脚を通過した直後に振幅が最大となっているが、家屋 3F ではその前後に振幅が大きくなっている。そこで、橋梁床版と家屋 3F における振動加速度の時刻歴波形を、走行車両が P2 ジョイントを通過する前後 5 秒間で切り出したグラフを図3-4-12に示す。上段は1Hz から80Hz までの全周波数帯域（AP）、下段は1/3 オクターブバンドの12.5Hz 帯域を抽出した。走行車両が P2 ジョイントを通過した時刻（59.5 秒付近）を一点鎖線で示す。

P1 測定点の波形（最上段）を見ると、P2 ジョイントを前輪および後輪が通過した際、大きな振幅が現れている。一方、P2 ジョイントを通過する手前の時間帯には現れていない。これは、P1 の測定点が P2 ジョイントを境に、車両群の走行に対し下流側の二径間連続橋側に設置されていることより、P2 ジョイント通過時の段差により車軸からの車両群の荷重が鉛直方向に伝わり、橋梁振動を励起したものと考えられる。これに対し、3F 測定点では、車両群が P2 ジョイント通過以前の時間帯から大きな振幅が現れている。これにより、対象家屋の振動は、車両群が P2 ジョイントを通過する際に生じる衝撃的な振動が原因ではなく、P2 ジョイント手前通過時に車両群の上下運動が橋梁上部工の振動を励起し、対象家屋振動に影響していることを示唆してい

る。12Hz 帯域の図でも同様な傾向が現れている。したがって、対象家屋振動には、上流側の 3 径間連続橋の上部工振動が影響しているものと考えられる

(b) 振動加速度測定

研究対象橋梁である 3 径間連続区間（下り線）の測定結果について述べる。FFT 分析による、全ての測定点の振動スペクトルを図 3-4-13 に示す。対象橋梁で卓越する周波数は 3.75Hz で、このほか 3Hz, 4.25Hz, 11.5Hz でも周波数の卓越が見られる。このうち、最も卓越が見られる周波数である 3.75Hz と、家屋振動で卓越する 12.5Hz 帯域に含まれている 11.5Hz の振動モードを図 3-4-14 に示す。対象家屋に近い P2～P3 間に着目すると、3.75Hz で大きく振動しており、橋軸方向のたわみ振動と橋軸直角方向のたわみ振動が同時に存在する複雑な挙動を示している。一方、11.5Hz の振動モードは橋軸直角方向のたわみ振動であり、床版全体が大きく振動している様子がわかる。これは、一般的に大型車両のばね下振動が 10～15Hz であることから、11.5Hz は路面の平坦性の低下による大型車両のばね下振動による加振が考えられる。

3-5 橋梁振動の要因分析

振動レベル計および LDV を用いた測定結果から、P2 橋脚上にあるジョイントを走行車両が通過する際の振動の影響ではなく、下り線の A2 橋台から P2 橋脚にかけて大型車両が通過する際の橋梁の橋軸直角方向における振動一次モードで見られる 12.5Hz 帯域の鉛直方向成分が、橋梁下部工および地盤を介して家屋に伝播している可能性が高いことがわかった。しかし、高速道路供用開始から 50 年近く経過している中、ここ数年振動を感じるようになったとの住民の話から、振動が大きくなった、あるいは振動数に変化が生じた、等の要因が考えられる。当該地域では、ここ数年で宅地造成等による地盤改変や大きな地震等がなかったことから、橋梁構造の変化について着目した。路面の凹凸を評価する路面性状調査結果および部分的な舗装補修工事の影響、舗装面を支える床版の状況調査結果を分析し、以下に結果を示す。

3-5-1 路面性状調査結果

NEXCO で実施している路面性状調査結果について分析を行った。図 3-5-1 に IRI (International Roughness Index) を、図 3-5-2 にわだち掘れを示す。IRI とは、1986 年世界銀行より提案された舗装の平坦性（乗り心地）を客観的に評価する尺度である。IRI の結果より、振動源と考えられる下り線の P2 橋脚から A2 橋台にかけて、管理基準値 (3.5mm/m) は下回っているものの、走行車線および追越車線共に他の地点よりも値が大きいことがわかった。わだち掘れは、下り線の走行車線および追越車線にお

ける舗装補修工事直後の値（H25）とその3年後（H28）の値を比較した。共に経年変化による数値の増加が見られるものの、特に走行車線については値が5倍から10倍程度に急増していることが分かった。

3-5-2 部分的な舗装補修工事の影響

当該区間は、舗装路面のひび割れや排水不良によって舗装表面が劣化するポットホールが発生している。図3-5-3に示す。ポットホールのような損傷は部分的に補修を行うことが一般的であるが、小規模な施工であることから最大粒径13mmの骨材を用いたアスファルト混合物で表層40mmの施工を行うには既設路面との高さ調整が困難であり、僅かながら段差が生じることがある。これにより、大型車両の走行により橋梁が加振されることが考えられる。また、大型車両はサスペンション下の卓越振動が十数Hzであることから、橋軸直角方向の振動一次モードおよび家屋振動で見られる12.5Hz帯域の振動と共振する可能性がある。

3-5-3 床版調査結果

当該区間は、舗装補修工事を繰り返し行っているにも関わらずポットホールが発生し、IRIおよびわだち掘れの測定結果が良好でなく舗装が損傷しやすい状況であることから、舗装を支持するコンクリート床版の損傷が考えられたため舗装路面を切削し床版面を直接打音して調査を行った。調査状況を図3-5-4に示す。この結果、床版面のクラックや床版内部に空洞と考えられる損傷が確認された。当該橋梁は車両大型化対策として床版上面増厚工事を行っており、長年の供用により増厚コンクリートと既設コンクリートの境界部が乖離したものと考えられる。構造物は空隙があると振動数が変化すること¹⁵⁾や、補強工事による剛性変化に伴い振動数が変化すること¹⁶⁾が知られており、当該箇所は床版の剛性が低下し家屋振動と共振しやすい振動数に変化した可能性が考えられる。

3-5-4 数値解析による考察

本研究の対象サイトで得られた橋梁の経年変化による固有振動数の変化が一般性を持つ現象であるか検証するため、一例として図2-2-1で示すとおり高速道路橋における多くの橋梁種別を占める鋼4主鈹桁橋（単純桁、支間長30m、幅員9.7m、床版厚290mm）において、床版損傷を模擬した有限要素法による数値解析を行った。計算は、「2-4 試験車の振動特性」で用いた低周波音予測システムのうち、車両-構造物の動的相互作用を考慮した移動荷重を伴う時刻歴動的応答解析プログラム（DALIA）

を用いた。要素種別を表 3-5-1 に、解析条件を表 3-5-2 に、橋梁モデルを図 3-5-5 に示す。車両の走行条件は、重量 25t の車両が橋梁幅員中央部を時速 80km で走行することとした。床版損傷の模擬は 2 段階に分けて仮想した。まず仮想①として、コンクリート床版厚 290mm のうち増厚部分 40mm が既設コンクリートとの付着切れを起こしたことを想定し、床版厚を 250mm にすることで断面二次モーメントを変化させた。この時、床版重量を変更しないようコンクリートの単位体積重量を調整した。次に仮想②として、床版の剛性が低下することを想定し、西村ら¹⁷⁾や前島ら¹⁸⁾の研究を参考としヤング係数を 2.5×10^7 kN/m² から 2.5×10^6 kN/m² に変更した。支間 1/2 の幅員中央部における床版の振動加速度の計算結果から求めた周波数特性を図 3-5-6 に示す。仮想①より、断面二次モーメントは固有振動数変化の寄与が小さいが、仮想②のヤング係数の変化は固有振動数変化の寄与が大きく、特に 12Hz から 16Hz において卓越が大きくなる結果となった。

以上のことを踏まえ、本研究の対象サイトにおける橋梁から対象家屋への振動要因および伝播経路の考察を模式図で図 3-5-7 に示す。対象家屋の振動は、最も近い橋脚上にあるジョイントからの振動は寄与が小さく、コンクリート床版の経年変化による剛性の低下等で橋梁振動と家屋振動が共振しやすい振動数 (12.5Hz) に変化したことおよび舗装が損傷し不陸等が発生することで大型車両の走行振動を加振していることの寄与が大きいと考えられる。

3-6 まとめ

本研究では、橋梁振動と家屋振動の因果関係を把握するため橋梁振動と家屋振動の同期測定を行い、伝播経路の把握と原因について分析した。結果、以下の内容について確認した。

- 1) 道路交通による橋梁振動は、上部構造から下部構造および地盤と伝播するにつれて小さくなるが、家屋の構造特性により大きくなることもあり、その傾向は鉛直方向で大きく見られる。
- 2) 家屋に最も近い連続高架橋の橋脚はジョイントを有しており、家屋に伝播する振動はジョイント部の段差が起因していると考えられたが、上部構造および家屋の振動分析結果から、大型車両がジョイント部手前の3径間連続部を走行する際に家屋振動が大きくなっていることが分かった。

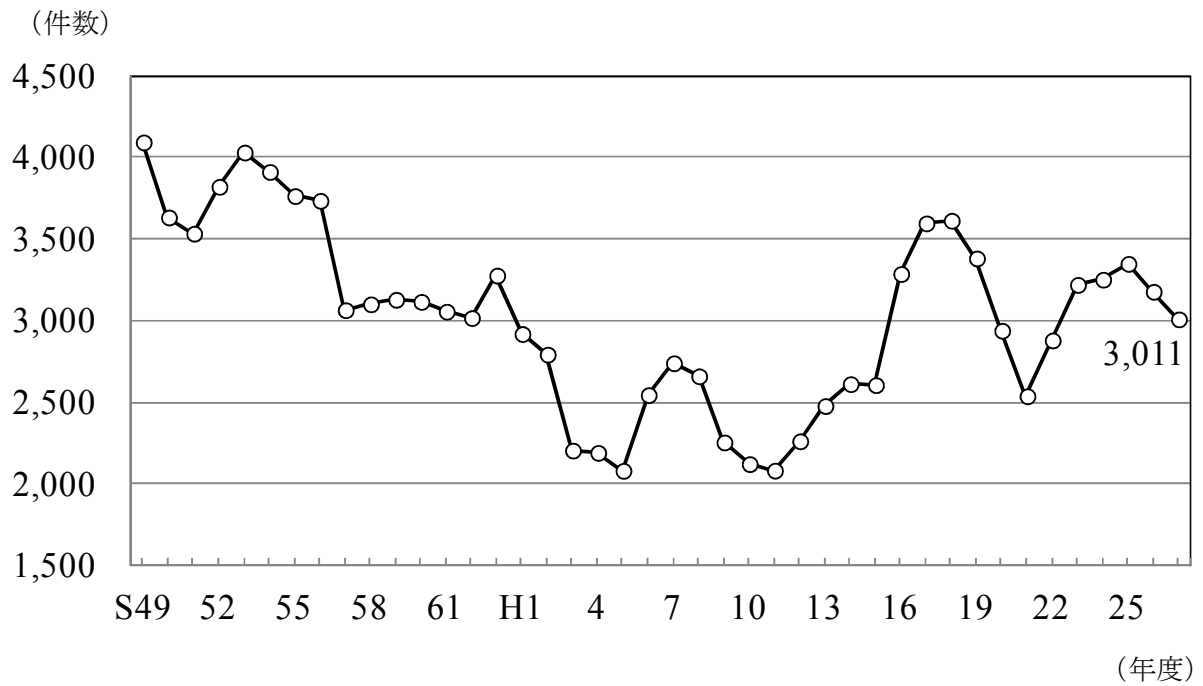
- 3) 橋梁上部構造，下部構造および地盤の周波数特性における卓越と，家屋の周波数特性における卓越に一致する周波数帯域が見られ，特に鉛直成分にその傾向が見られた。
- 4) LDVを用いて橋梁振動を測定し振動モードを算出した結果，橋軸直角方向のたわみ振動一次モードの周波数帯域に含まれる振動数であった。
- 5) 本研究サイトの家屋振動は，実験結果から，供用開始から50年近く経過し，路面の平坦性低下による大型車両のばね下振動や上部構造の経年変化による橋軸直角方向の合成低下が要因となり，家屋振動が増幅しやすい周波数帯域の振動が発生しやすくなったことが要因と考えられ，これらについて数値解析により確認した。

今回の研究対象の沿線では，橋梁に起因する振動の伝播経路について研究を行った。得られた結果から，社会資本が直面する構造物の老朽化問題が，その構造に対する安全性の問題以外にも，環境問題に発展する可能性があることを示唆した。さらに，橋梁は経年変化により固有振動数が変化する可能性を示しており，これは第2章で示したように低周波音は橋梁振動から直接大気に伝播していることから，振動だけでなく低周波音についても同様の結果が推測される。これらのことから，環境問題対策では橋梁振動のモニタリングや設定条件を容易に変更できる環境対策工が望まれる。

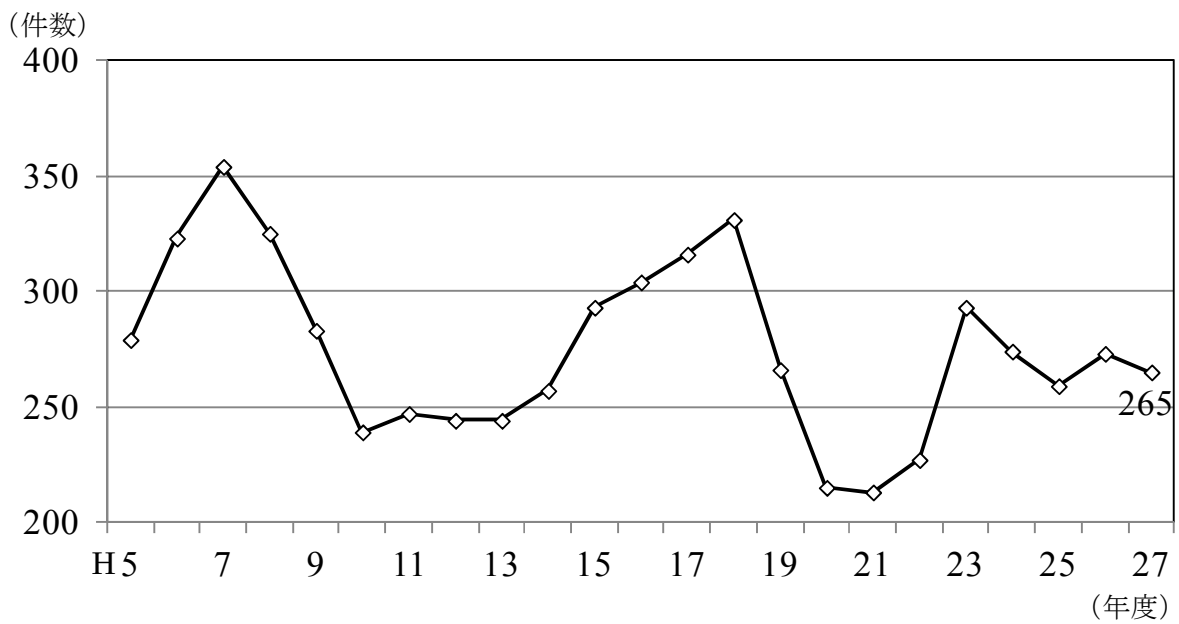
参考文献【第3章】

- 1) 中村眞：高速道路の環境対策史，土木学会第64回年次学術講演会，2009.
- 2) 長船寿一，山本稔：高速道路橋の騒音・振動対策，橋梁と基礎 2011年11月号，2011.
- 3) 環境省：平成28年度振動規制法施行状況調査結果，2015.
- 4) 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，2010.
- 5) 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 A，Vol. 55A，2009.
- 6) 徳永法夫，森尾敏，家村浩和，西村昂：EPS 地中防振壁の交通振動低減効果に関する研究，土木学会論文集 Vol. 1999，No. 638，1999.
- 7) 蘇迪，三輪陽彦，藤野陽三，長山智則：首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析，構造工学論文集，Vol.59A，2013.
- 8) 徳永法夫，西村昂，谷口与史也，宮原哲：3階建家屋における道路交通振動に対する防振対策の研究，土木計画学研究・論文集 No.16，1999.
- 9) 佐野泰之，伊積康彦，横島潤紀，富田隆太，石橋 敏久，平松和嗣，成瀬治興，後藤 剛史：木造家屋床面の振動モード解析，日本建築学会技術報告集 第15巻 第29号，2009.
- 10) 日本工業規格：JIS C 1510 振動レベル計，1995.
- 11) 日本騒音制御工学会：外部振動源による建物振動の評価に係る参考資料，2014.
- 12) 上半文昭，目黒公郎：鉄道構造物の振動診断を目的とした非接触微動測定法の開発，土木学会地震工学論文集，2003
- 13) 森田千尋，出水亨，松田浩，岩吹啓史，木本啓介：遠隔非接触振動計測装置を用いた橋梁の振動計測に関する研究，実験力学 vol.16，No.3，pp.243-249，2016.
- 14) 岩吹啓史：非接触振動測定による橋梁振動対策の一検討，土木学会第71回年次学術講演会，2016.

- 15) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和宏: 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集 V-53, 2011.
- 16) 松田 浩, 伊藤幸広, 出水 享, 牧野高平: インフラ構造物の維持管理における光計測技術の応用—DICM による全視野ひずみ計測と LDV による振動計測—, コンクリート工学 Vol. 50, 2012.
- 17) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学会論文集, 1987(380), pp.355-364, 1987.
- 18) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, vol.72, No.2, pp. 126-145, 2016.



(a) 振動苦情件数の推移



(b) うち道路交通の振動苦情件数の推移

図3-1-1 全国の地方公共団体が受理した振動苦情件数の推移（平成28年度）環境省³⁾



図 3-2-1 研究対象の沿線状況

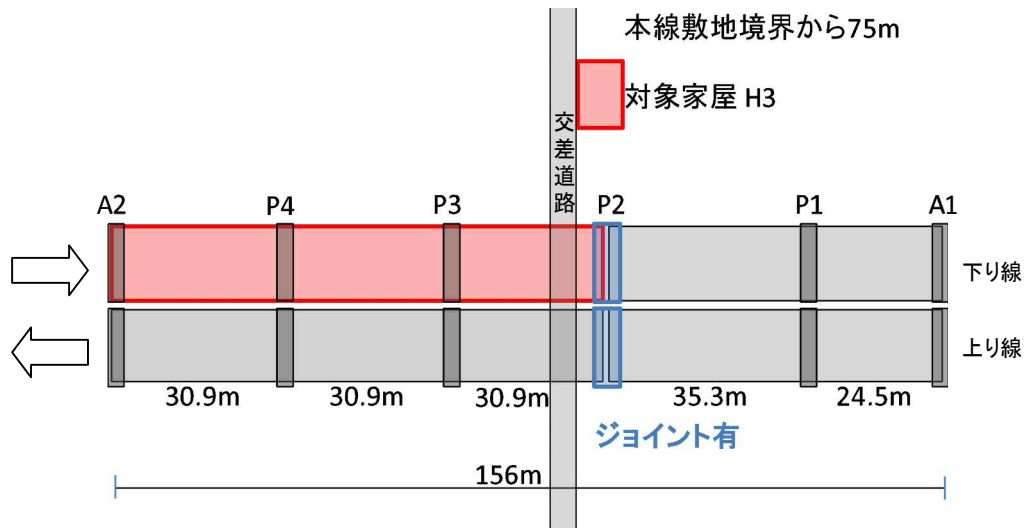


図 3-3-1 平面図

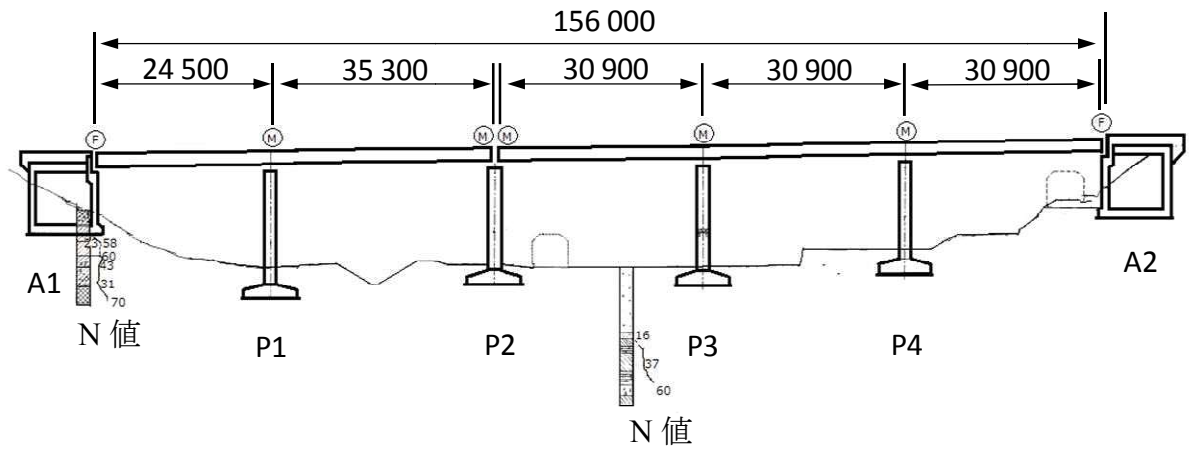


図 3-3-2 一般図

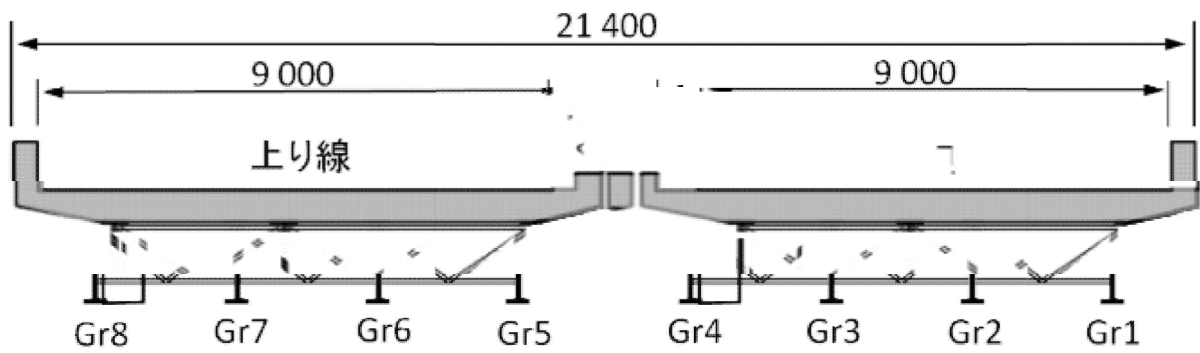


図 3-3-3 断面図

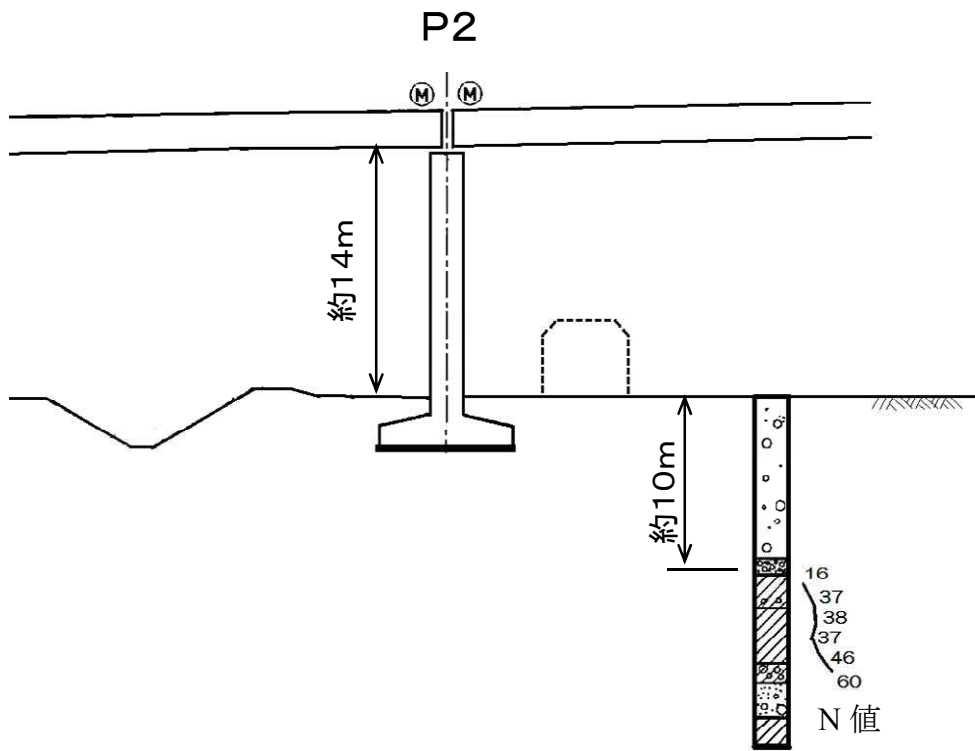


圖 3-3-4 地質狀況

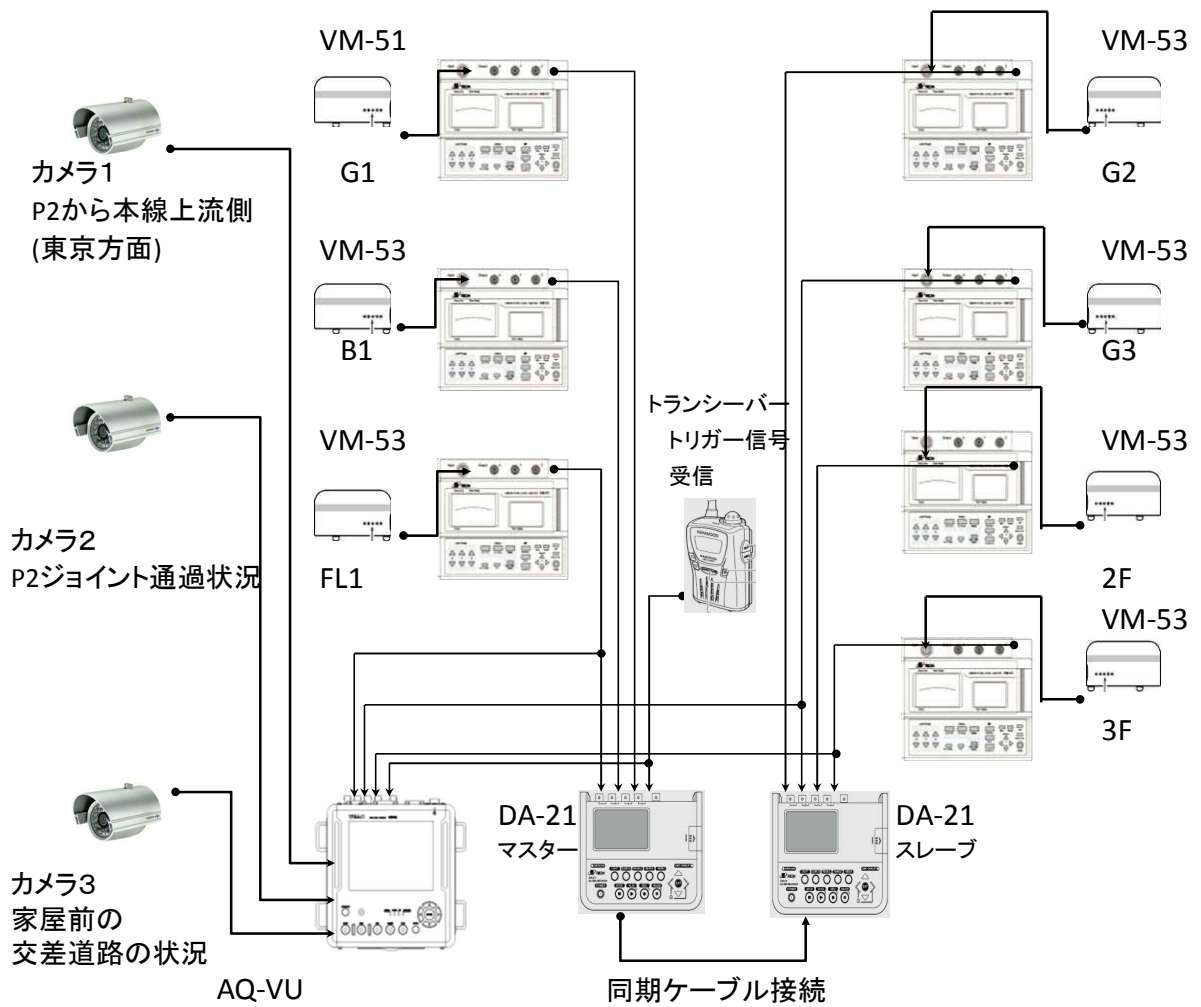


図 3-4-1 測定機器系統図

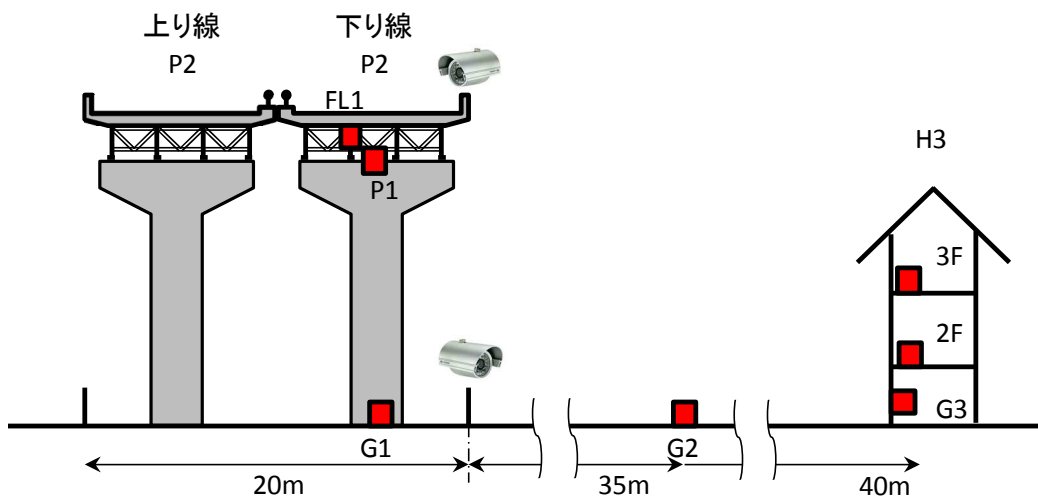


図 3-4-2 測定点配置図

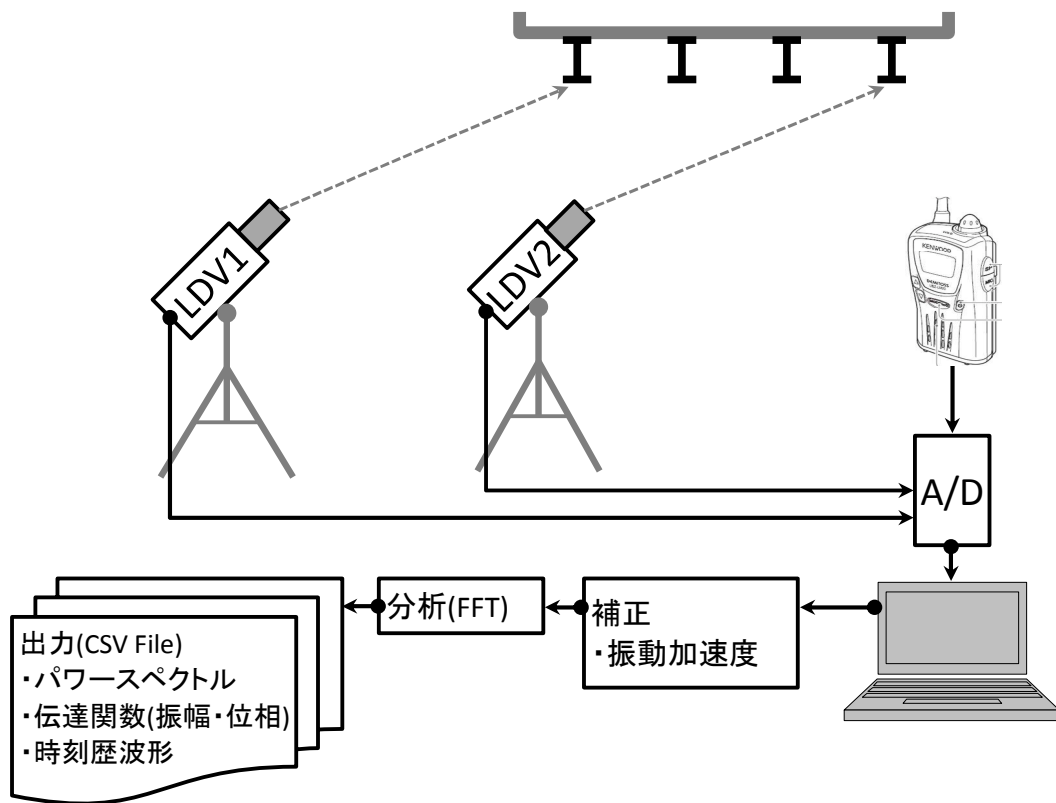


図 3-4-3 LDV 測定及び分析概念図

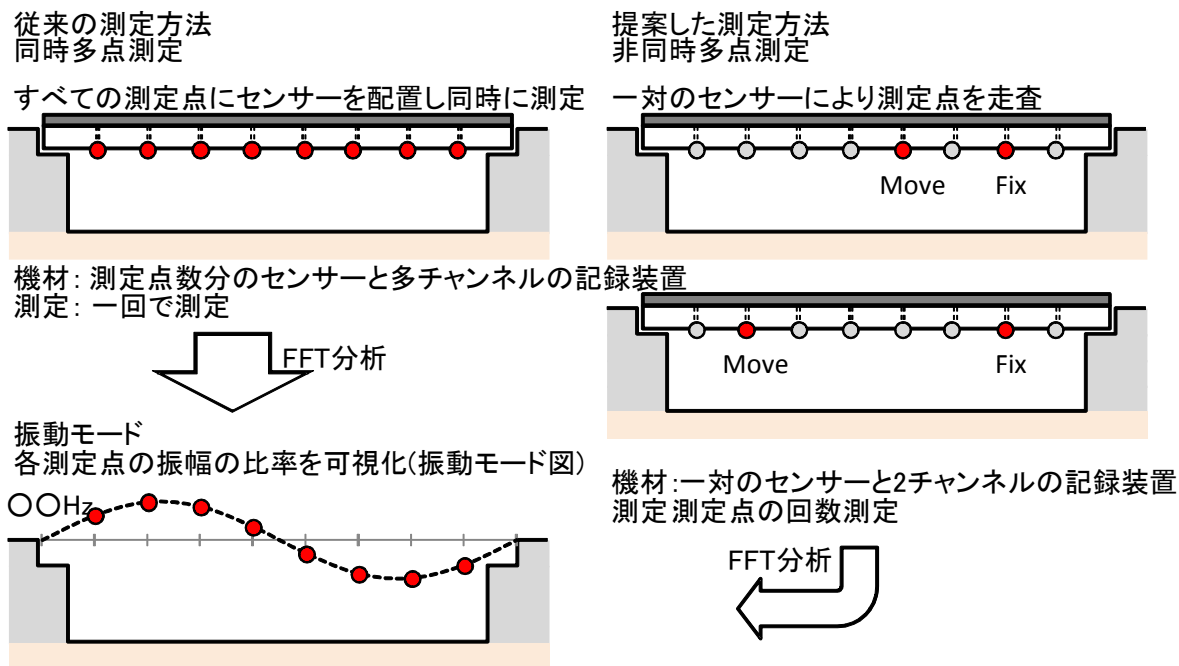


図 3-4-4 同時多点測定と非同時多点測定概念図

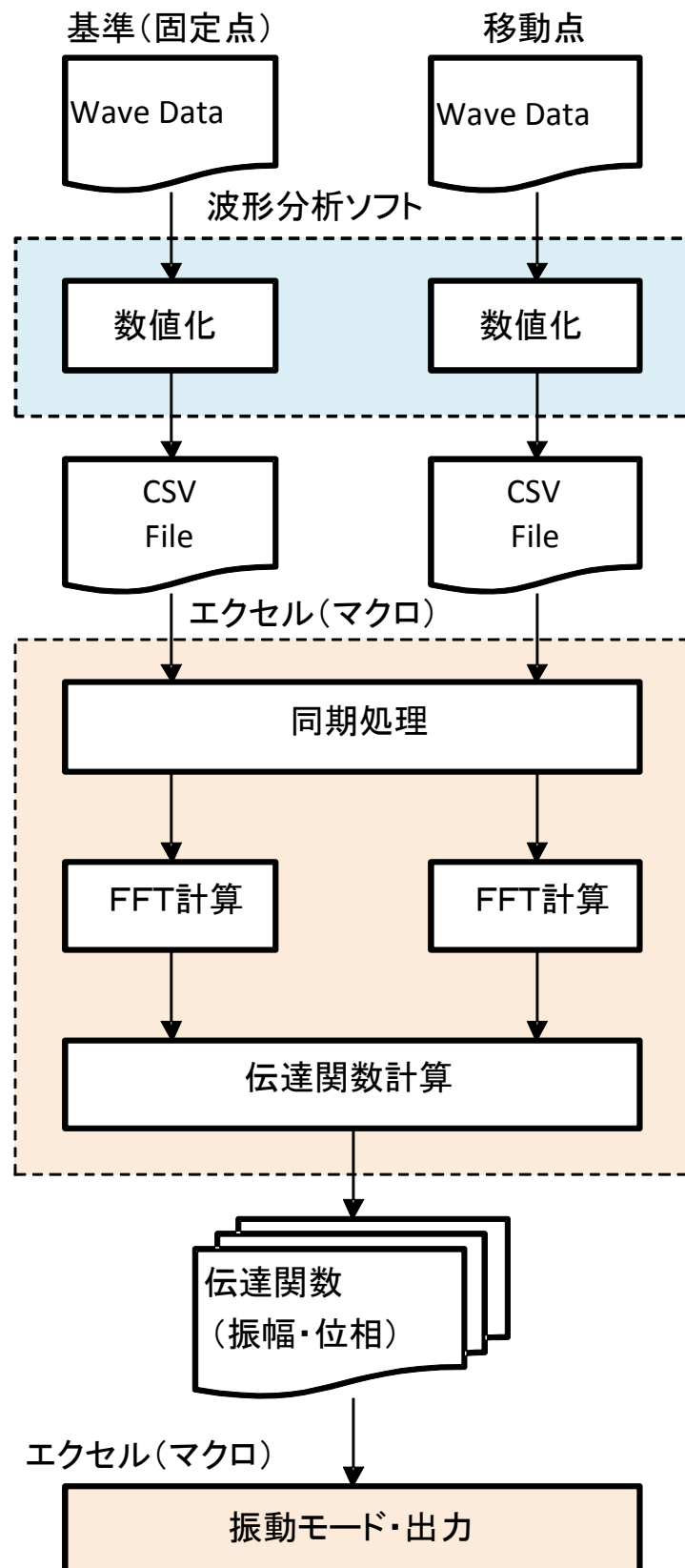


図 3-4-5 LDV 非同時多点測定分析フロー

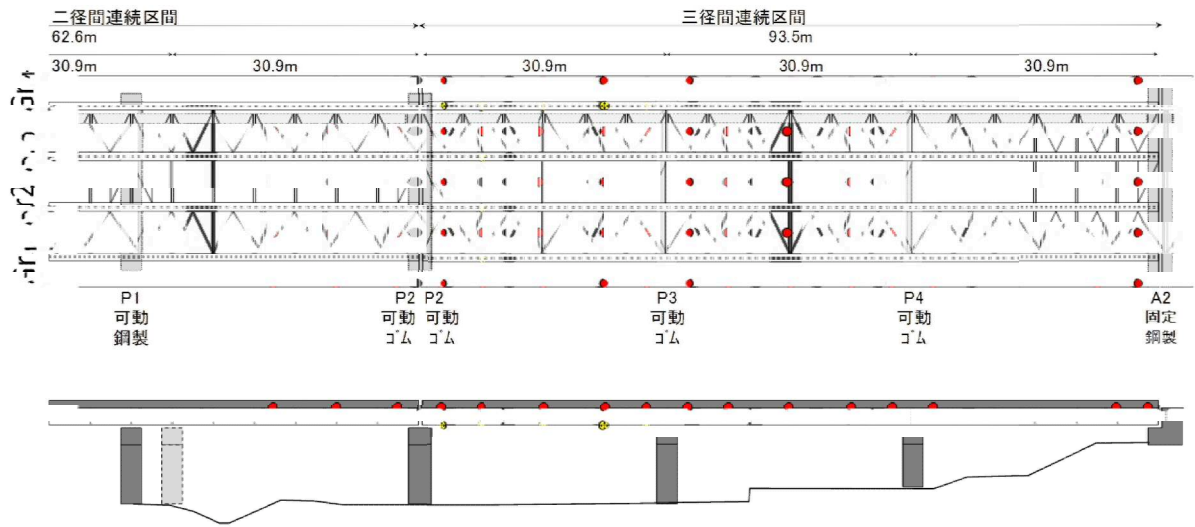


図 3-4-6 橋梁測定点配置図

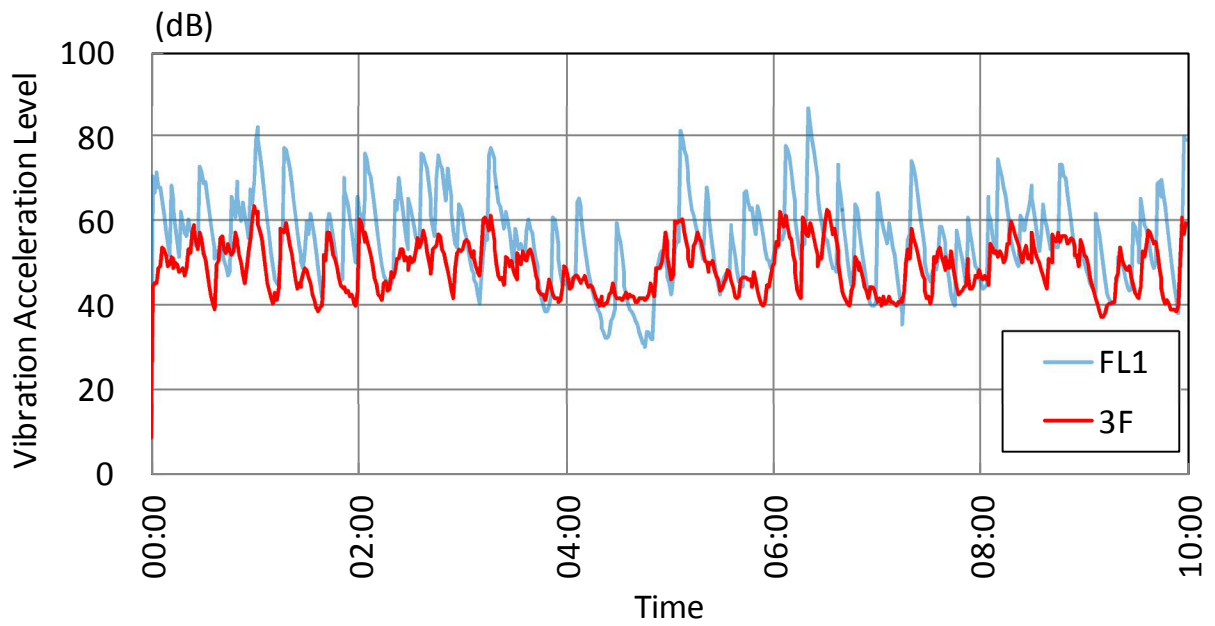


図 3-4-7 振動加速度の時刻歴波形

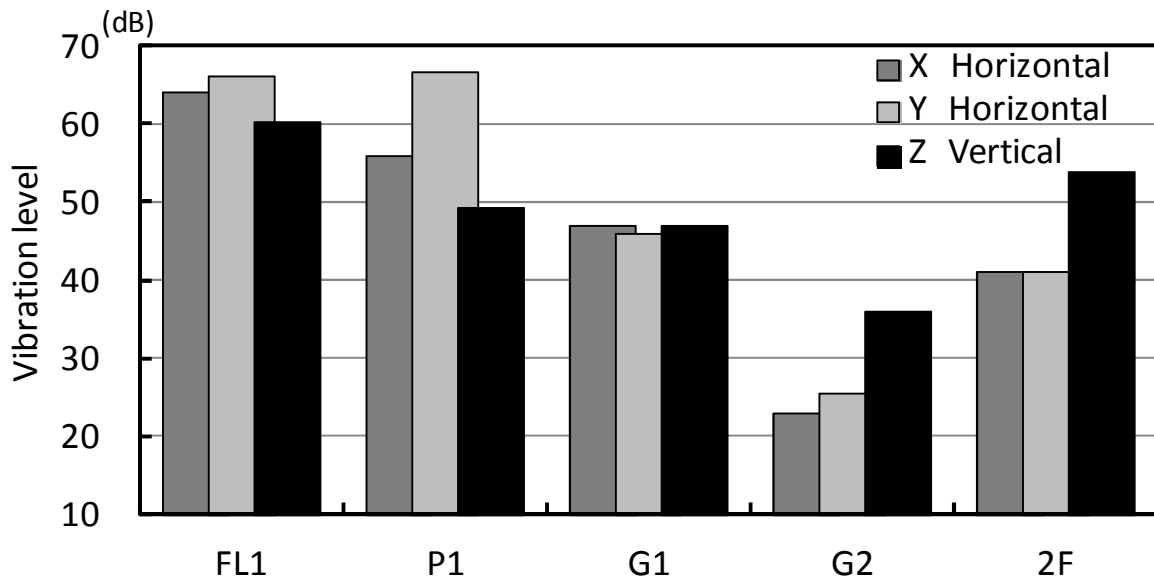


図 3-4-8 振動レベルの距離減衰

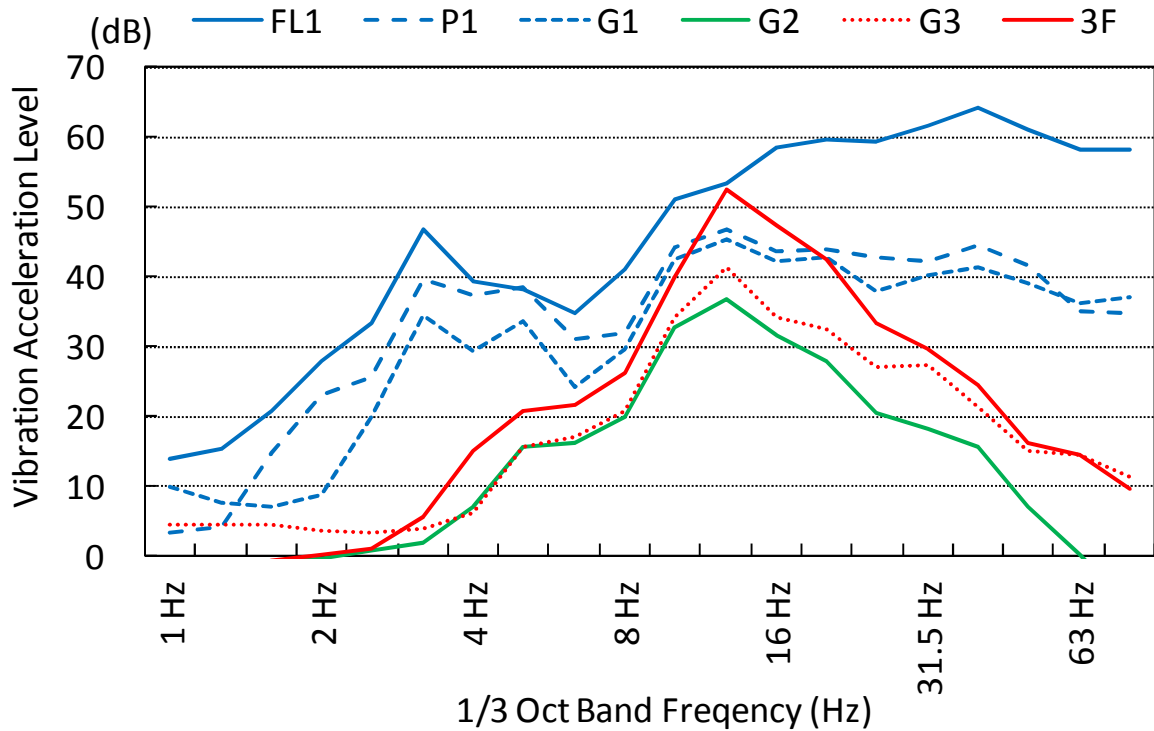
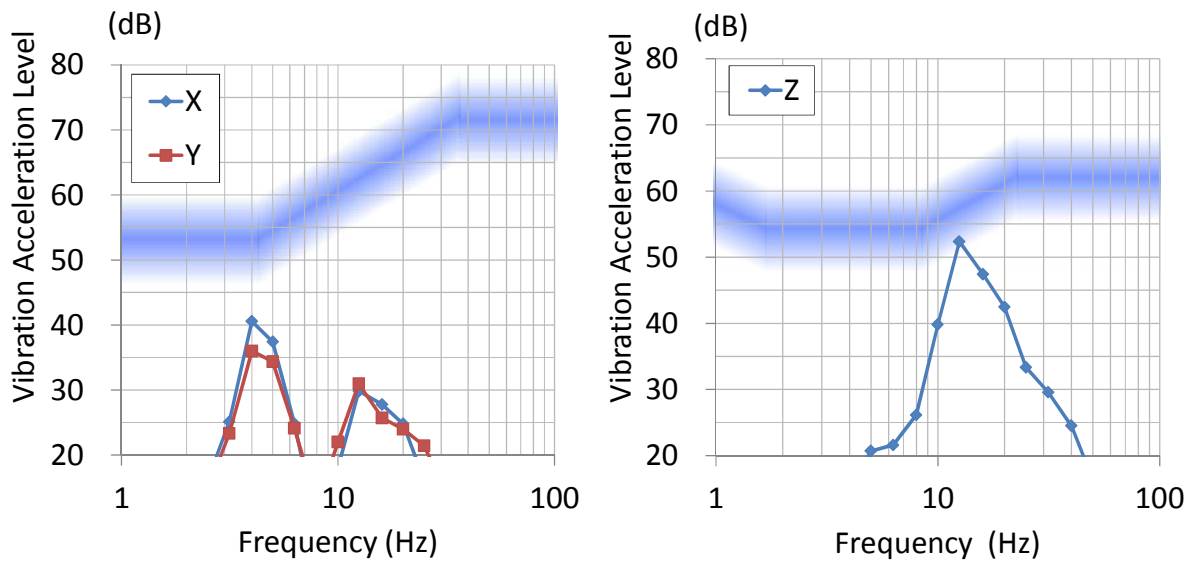


図 3-4-9 振動加速度の周波数分析 (鉛直方向)



※ 青帯線は定常的な振動に対する人の振動知覚閾の目安

図 3-4-10 家屋振動の水平及び鉛直成分の周波数特性

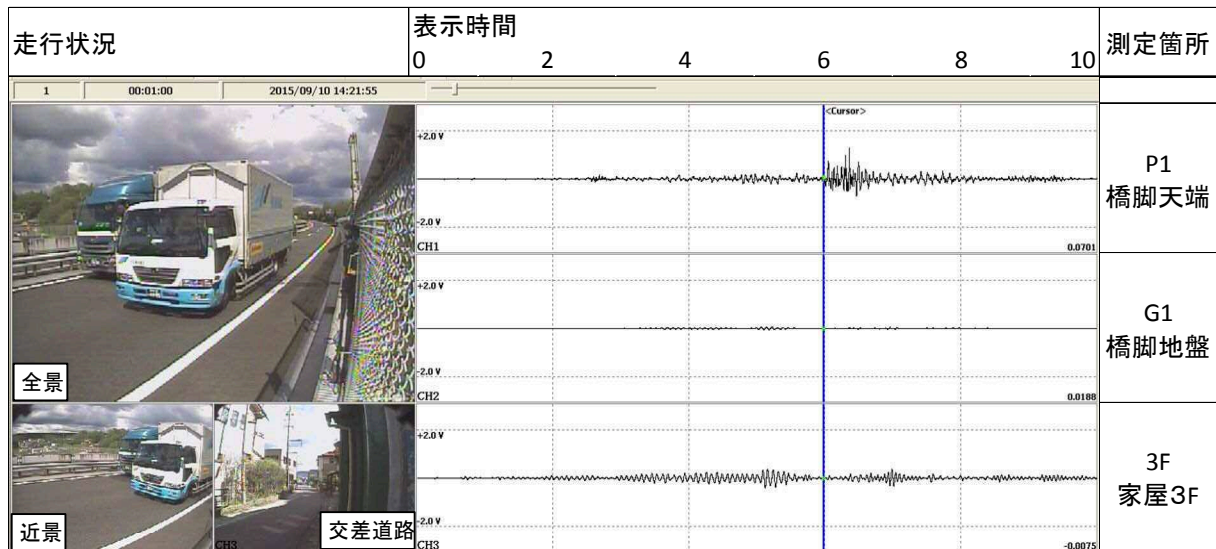


図 3-4-11 走行車両（大型車並走）

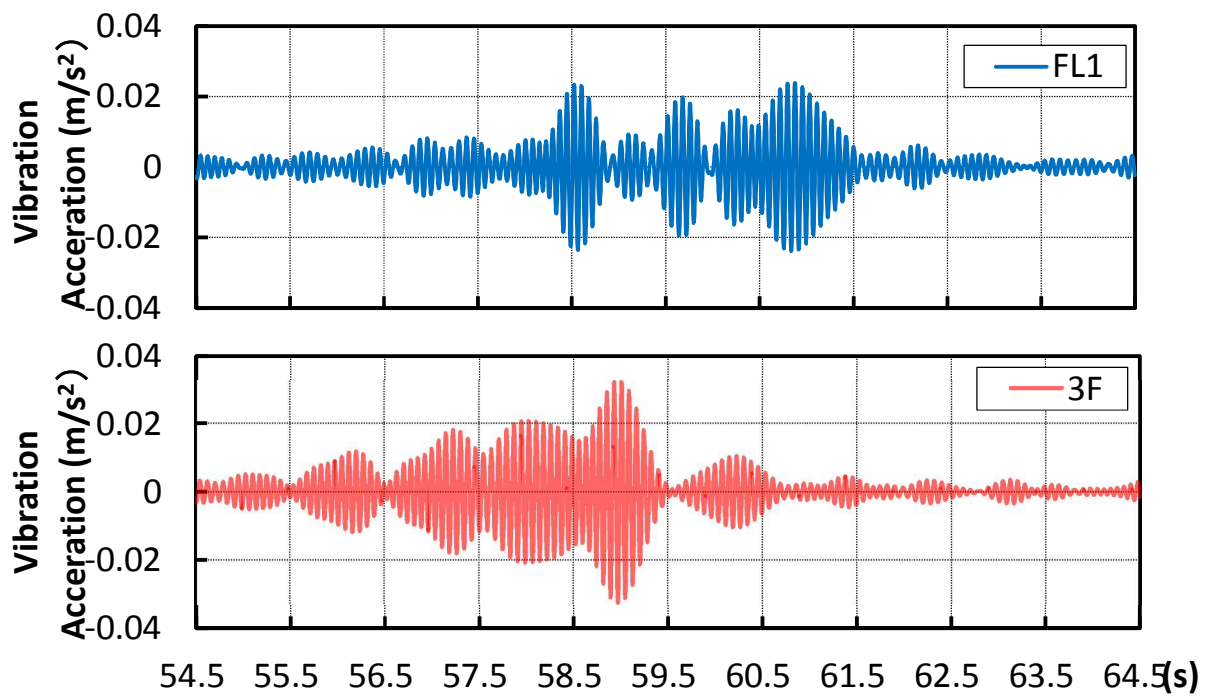
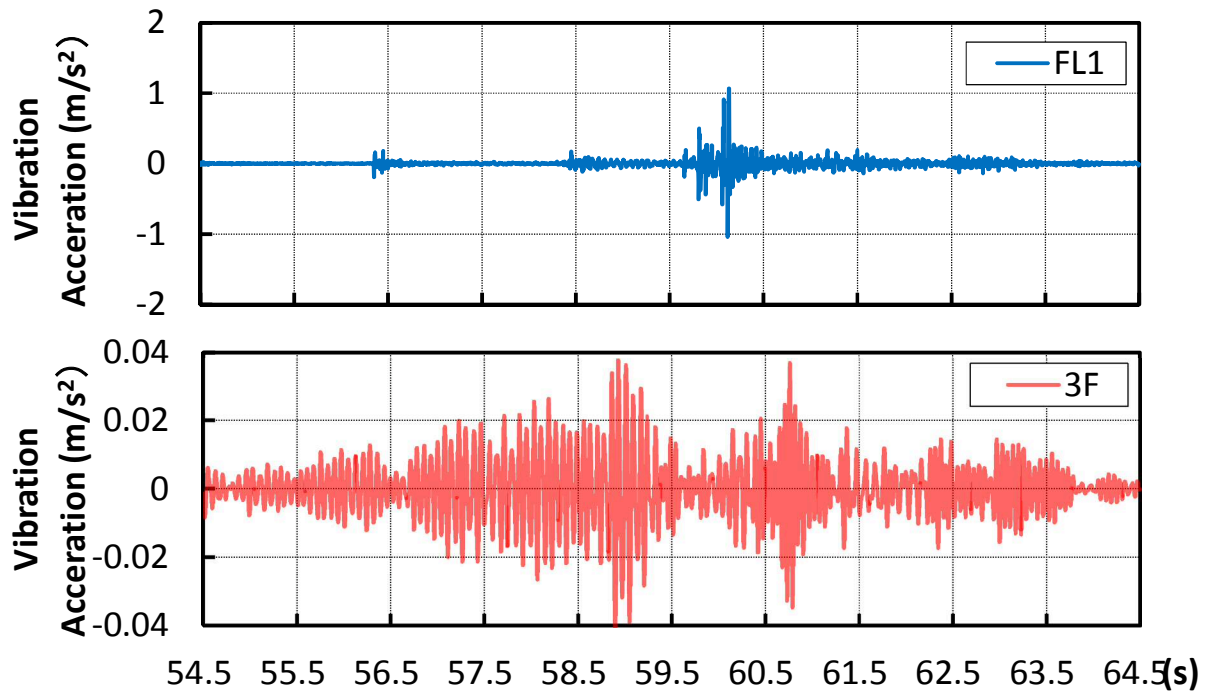


図 3-4-12 P2 ジョイント通過前後の時刻歴波形

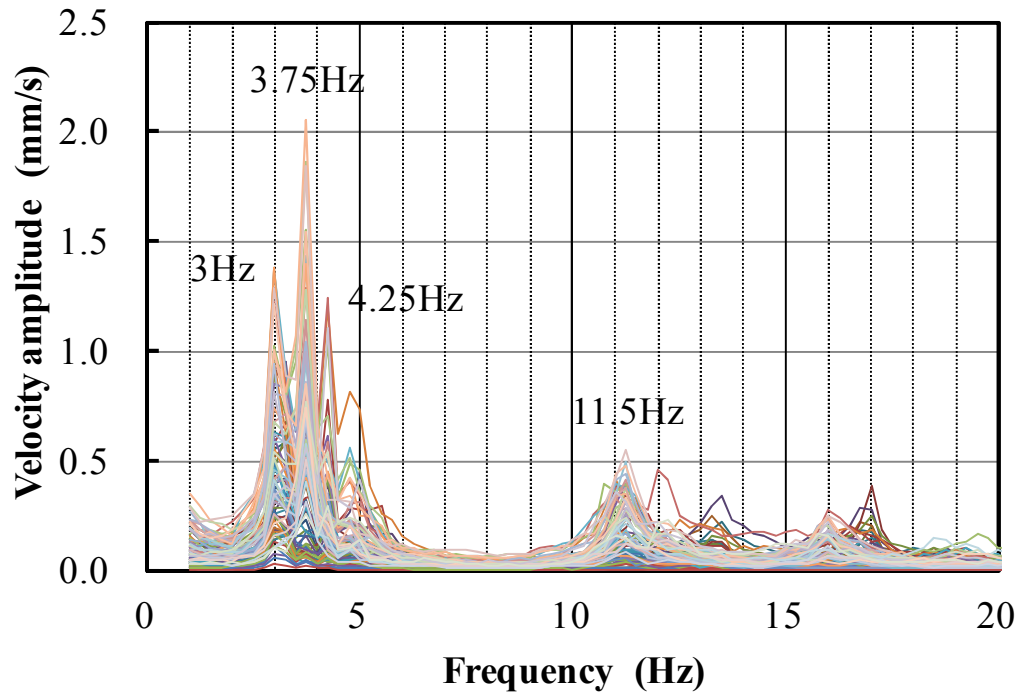


図 3-4-13 橋梁振動のスペクトル分析結果

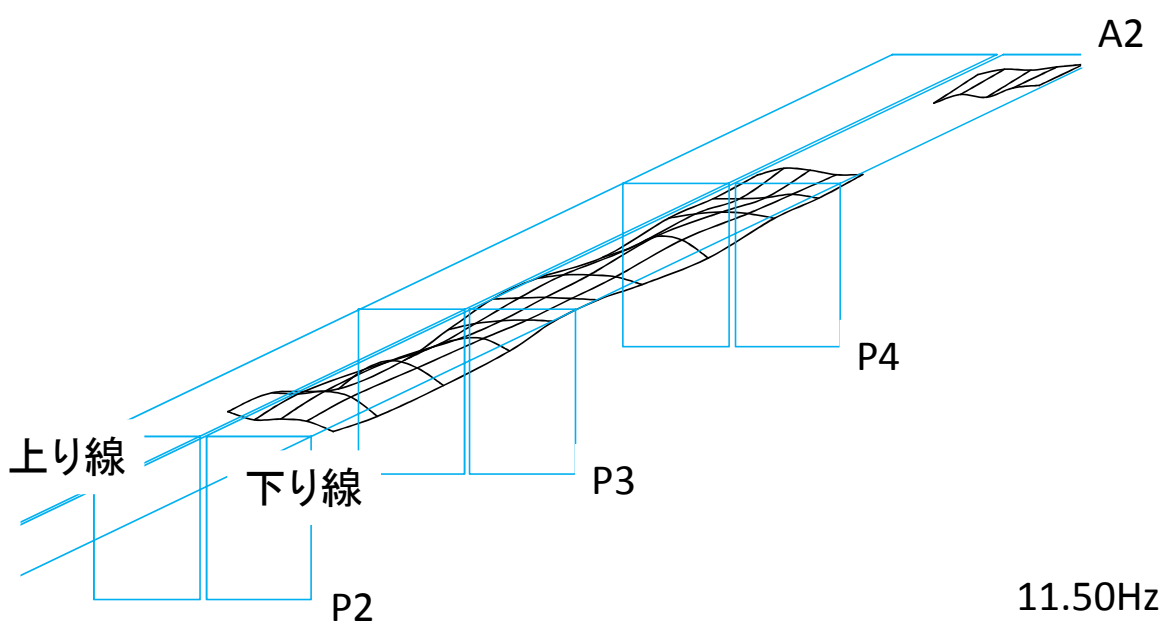
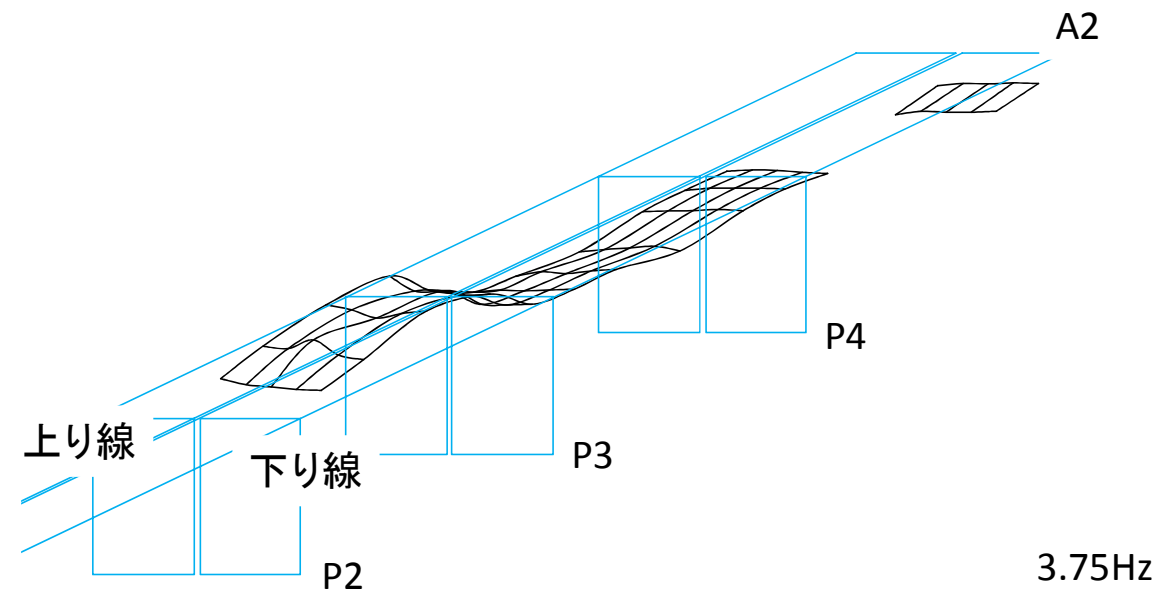


図 3-4-14 振動モード測定結果

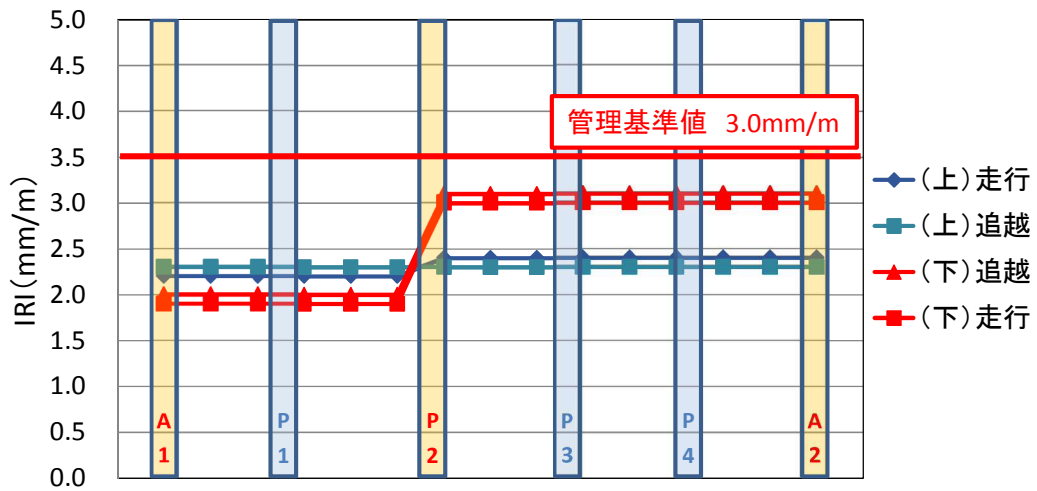


図 3-5-1 IRI 測定結果

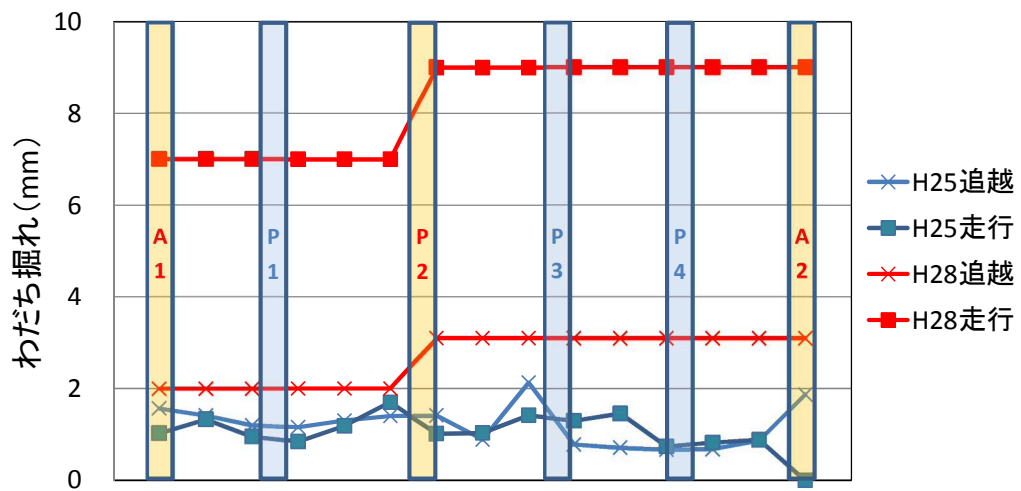


図 3-5-2 下り線わだち掘れ測定結果



図 3-5-3 ポットホール及び部分的な舗装補修工事

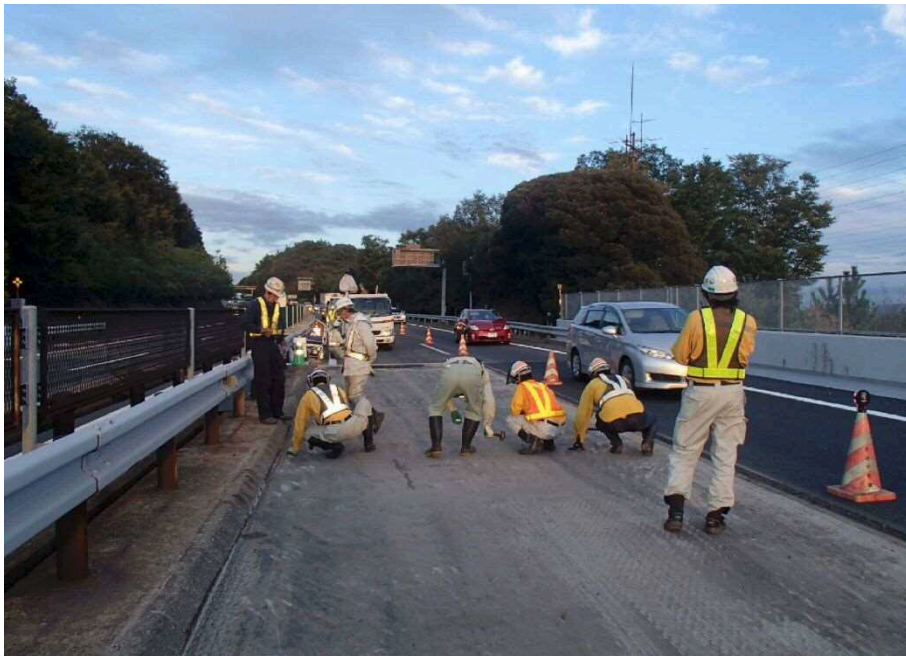


図 3-5-4 コンクリート床版調査状況

表 3-5-1 要素種別

バネ	2 自由度間バネ
ビーム	材端バネビーム
板曲げ	ミンドリン・ライスナー8 点厚板要素
ソリッド	8 点 1 次立体要素
ダンパ	2 自由度間ダンパ
節点数	2,488

表 3-5-2 解析条件

現状	・車両重量 25t の車両を 80km/h で幅員中央部を走行
床版損傷 仮想①	・床版厚を 290mm から 250mm に変更 ・コンクリートの単位体積重量を 24kN/m^3 から 27.84kN/m^3 に変更
床版損傷 仮想②	・ヤング係数を $2.5 \times 10^{-7}\text{kN/m}^2$ から $2.5 \times 10^{-6}\text{kN/m}^2$ に変更

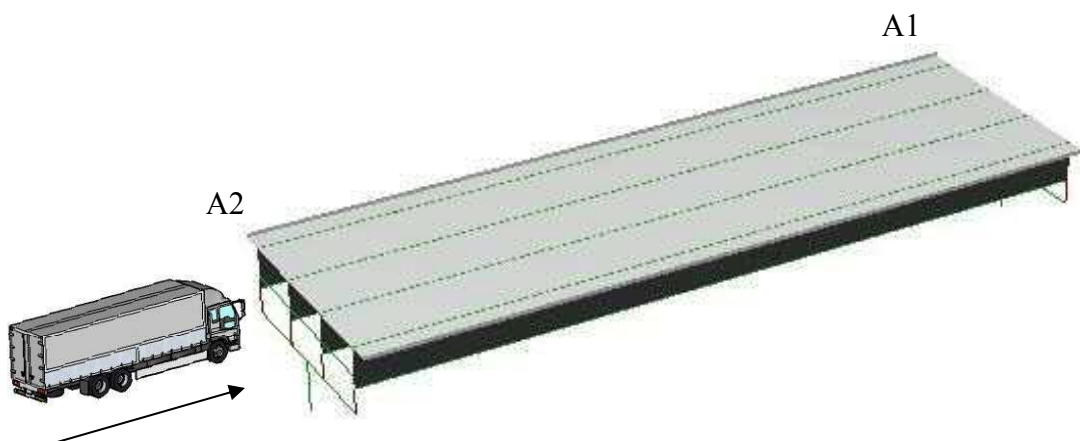


図 3-5-5 橋梁モデル

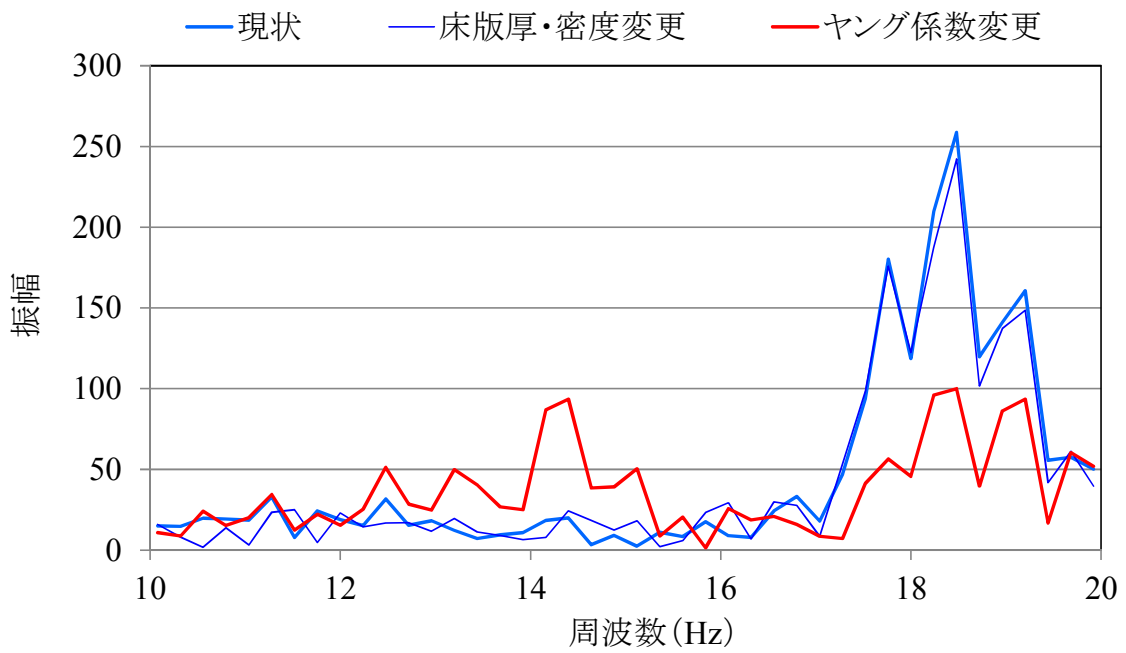
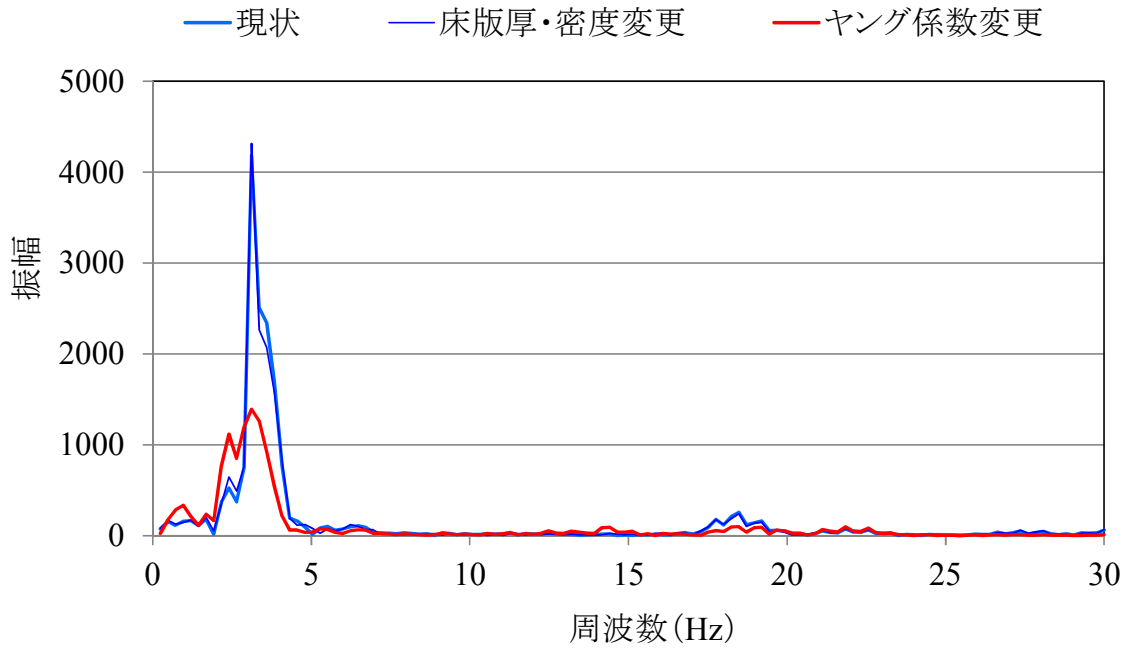


図 3-5-6 解析結果（周波数特性）

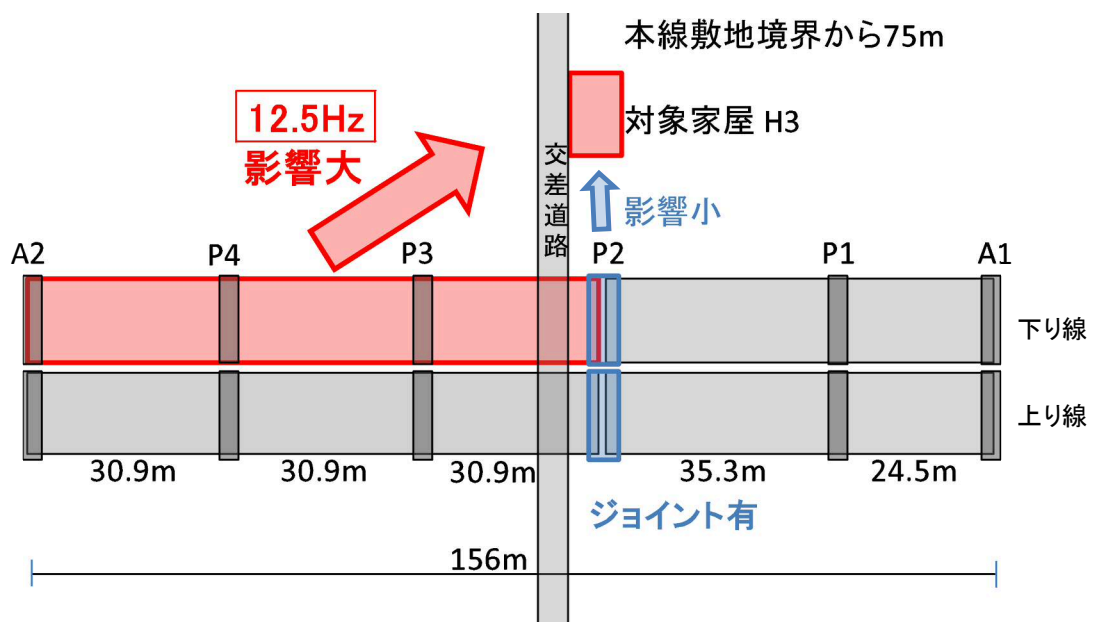


図 3-5-7 伝播経路の把握と原因（概念図）

第 4 章

環境対策工としての TMD の設置効果

4-1 はじめに

近年、高速道路沿線における環境問題は橋梁に起因する騒音・振動・低周波音の問題が多く、その対策工法として、苦情の原因となる振動数が 100Hz 以上の場合は減衰効果が期待できる伝播経路対策が有効であるが、100Hz 以下は減衰効果が期待できないことから騒音源・振動源の対策が有効であることは図 1-1-6 を用いて第 1 章で述べたとおりである。そこで本研究では、100Hz 以下の振動および低周波音の発生に対する環境対策工は確立された手法が少ない中、対策工の一つである TMD に着目した。

TMD とは、マス、ばね、ダンパで構成される装置で、車両が橋梁上を走行する際に発生する振動の固有周期に対しばねで支持されているマスを同調させることで、これら装置の反力により橋梁の振動を減衰させるものである。

今日では、TMD は橋梁振動および低周波音の低減対策として施工され、研究および施工事例が報告されている。村井ら¹⁾は、最大幅員約 21m、支間長 40~50m の 4 径間連続鋼床版鋼箱桁橋において、対象周波数 2.8Hz および 3.3Hz、振動重量 1.5tf、減衰定数 5% の TMD4 基を支間中央部の箱桁内に設置し、試験車あるいは一般車を走行させ、TMD および橋梁の振動加速度、低周波音を測定する実験を行っている。TMD は隣接する振動モードを増幅させることから、複数モード制振への対応として対象周波数の異なる複数の TMD を設置し効果を確認している。この実験橋梁においては上部工の死荷重に余裕があり TMD を複数台設置可能であったと考えられるが、一般的には 1.5tf の TMD を複数台設置することは困難であることが想定される。畔柳ら²⁾は、3 径間連続鋼 3 主桁桁橋において、センターダンパと TMD について比較しており、センターダンパは広範囲の周波数帯域に効果があるものの設置条件として桁下空間の制限がある一方、TMD は卓越周波数帯に対して有効であるが桁下空間の制限がなく、振動対策として使い分けることができることを報告している。佐々木ら³⁾は、2 径間連続トラス橋において、3Hz 付近の振動制御に効果的であるが、12Hz 付近の振動対策は別途対策が必要と課題を示している。このように、振動加速度の測定により橋梁の制振効果を確認する研究および報告事例がある一方で、解析による制振効果について研究が行われている。米田^{4),5)}は、歩道橋の減衰特性に対し、歩道橋上の静止者による TMD 効果が認められることを複素固有値解析により示している。大竹ら⁶⁾は、車両振動の実測値を用いて苦情原因となる周波数帯の外力の作用を概ね再現し、汎用プログラムが利用できる比較的取り扱いが容易な解析方法を提案し、TMD の橋梁制振効果を示している。しかしこれらの解析は橋梁振動に留まっており、橋梁振動が発生する低周波音について解析されておらず、その低減効果は明らかにされていない。

本章では、低周波音問題の環境対策工として高速道路橋に設置されている TMD の低周波音低減効果について検証することを目的とし、数値解析によるシミュレーションと道路交通振動による実橋測定を行い低周波音圧レベルについて分析する。

4-2 供用中路線に設置された TMD の効果検証

ここでは、環境対策工として高速道路橋に設置された TMD について、橋梁の制振効果と低周波音の低減効果を確認することを目的とし、TMD の稼働状態と非稼働状態における橋梁の主桁振動加速度と橋梁下の低周波音の音圧を測定した実験結果について述べる。

4-2-1 実験対象橋梁の概要

実験対象橋梁は、TMDが設置されており、構造がシンプルな単純桁の鋼4主桁橋（L=35m）で行った。上部構造は補強が行われており、主桁間に1本ずつ計3本の補強縦桁が設置されている。橋梁一般図を図4-2-1に示す。周辺地域は家屋が立ち並んでおり、騒音対策として高さ約4mの遮音壁および主桁下に裏面吸音板が設置されている。これら環境対策工を図4-2-2に示す。

4-2-2 TMD の仕様

実験対象橋梁の沿線では、橋梁振動に起因する低周波音の環境問題が発生しており、この対策として各主桁間に1基ずつ計3基のTMDが支間中央部に設置されている。このTMDは橋梁の振動一次モード対策として設計されており、その諸元、設置位置図および詳細図を表4-2-1、図4-2-3および図4-2-4に示す。

4-2-3 測定対象項目の選定

TMDが設置された状態での橋梁の振動特性を把握するため、振動加速度および低周波音圧レベルの測定を行った。測点配置図を図4-2-5に示す。振動加速度は、周波数特性の分析および振動一次および二次モードの把握のため、補強桁の径間端部2箇所、径間中央部1箇所、径間1/4部2箇所の計5箇所で圧電型の振動レベル計（リオン製VM-53）を用いて振動加速度を測定した。低周波音圧レベルは、振動一次モード対策の効果を確認するため、裏面吸音板の上部1.2mの高さで径間中央部1箇所に低周波音レベル計

(リオン製 NL-62) を用いて測定した。一般的に低周波音圧レベルの測定は地上（高さ1.2m）で実施されるが，本実験は上り線の橋梁振動特性のみを評価するため，下り線の影響が想定される地上ではなく上り線の裏面吸音板上とした。これらの測定は，振動加速度および低周波音圧レベルを同時にデータレコーダ（リオン製 DA-21）にサンプリング周波数256Hzにて収録した。測定は，(a) TMD3基を全て稼働の状態と(b) TMD3基を全て非稼働の状態で行った。

4-2-4 測定結果

ここでは，TMDによる橋梁振動の制振効果と低周波音の低減効果について検証するため，実験の測定結果を(a) TMD3基を全て稼働の状態と(b) TMD3基を全て非稼働の状態について整理する。

まず，補強桁における振動加速度の時刻歴波形を図4-2-6および図4-2-7に示す。図4-2-6は，(a) TMD3基を全て稼働の状態で測点2および3の振動加速度を，図4-2-7は(b) TMD3基を全て非稼働の状態で測点2および3の振動加速度を示しており，それぞれ上段に120秒間の波形を，下段に振動がピークとなる時刻近傍1秒間の波形を示している。橋梁上を走行する車両の交通量がTMDの稼働時および非稼働時で異なるため，橋梁への入力条件が異なることから一概に比較はできないものの，振動加速度のピーク値は概ね同じ値を示しており，TMDによる低減効果は見られない。一方で，1秒間の時刻歴波形から，振動加速度のピーク値となる直後の波形では，TMD稼働状態では振動の収束が早く見られるものの，TMD非稼働状態では振動の収束があまり見られず振動が継続していることが確認できる。このことから，TMDは橋梁への衝撃荷重に対しては制振効果が見られないものの，橋梁の自由振動に対する減衰の低減効果が期待できると考えられる。

次に，振動加速度のFFT分析を行う。分析周波数範囲はサンプリング周波数を256Hz，分析時間長を4secとし，0～128Hzの範囲を周波数分解能0.25Hzで分析を行った。また，窓関数は矩形窓，オーバーラップは0%とした。分析データ長は100secとし，25個の分析値を平均化した。図4-2-8で(a) TMD3基を全て稼働の状態を，図4-2-9で(b) TMD3基を全て非稼働の状態を示す。非稼働状態では3Hz付近で卓越が見られるが，稼働状態では3Hzのピークが低減しており，TMDによる制振効果が見られる。一方で，非稼働状態は卓越周波数付近が尖った形状を呈しているが，稼働状態は卓越周波数付近のピークがなだらかになる反面，ピーク前後の周波数帯域で盛り上がる形状を呈していることがわかる。これは，TMDの特性として，対象周波数のピークを低減することができる一方，そのエネルギーを全てTMDで吸収することができないため，他の周波数帯域にエネルギーが分散されていることがわかる。

さらに、低周波音のFFT分析を行う。振動加速度と同様に、分析周波数範囲はサンプリング周波数を256Hz、分析時間長を4secとし、0～128Hzの範囲を周波数分解能0.25Hzで分析を行った。また、窓関数は矩形窓、オーバーラップは0%とした。分析データ長は100secとし、25個の分析値を平均化した。支間中央部における低周波音圧の周波数特性を図4-2-10に示す。振動加速度と同様に、非稼動状態では3Hz付近で卓越が見られるが、稼動状態では3Hzのピークが低減しており、TMDによる制振効果が見られる一方で、卓越周波数付近のピークがなだらかになりピーク前後の周波数帯域で盛り上がる形状を呈しており、ピークを低減する対象周波数の周辺周波数帯域にエネルギーが分散されていることがわかる。

4-3 TMD 制振効果の数値シミュレーション

ここでは、TMD の低周波音低減効果を検証することを目的として、数値シミュレーションによる検討を行った。対象橋梁は低周波音問題が多く発生する鋼鈹桁橋とし、一例として「3-5-4 数値解析による考察」と同じ鋼4主鈹桁橋（単純桁、支間長30m、幅員9.7m、床版厚290mm）とする。計算は、「2-4 試験車の振動特性」で用いた低周波音予測システムを用い、要素種別および解析条件は「3-5-4 数値解析による考察」と同様とし表3-5-1 および表3-5-2 のとおりである。車両の走行条件は、重量25tの車両が橋梁幅員中央部を時速80kmで走行することとする。TMDのパラメータは、設置されているTMDの諸元を用いた。対象周波数は3Hzとし、質量、バネ定数、減衰係数は表4-3-1のとおりとする。TMDのモデルは既往研究⁷⁾を参考とし、図4-3-1に示す。TMDは、横桁中央の節点およびその直上の床版の節点に設置し、付加質量を与え、鉛直方向並進自由度としその他の自由度は拘束する条件とする。TMDと床版および横桁の接続された節点間は、これら自由度を弾性（バネ）と粘性（ダンパ）を1個ずつ並列に連結した線形フォークトモデルによって結合する。この条件下によりDALIAで車両走行による橋梁の振動伝播を計算し、時刻歴応答速度を音場の非定常境界条件として、ALFAで低周波音の伝播計算を行う。低周波音の評価地点は、橋梁支間中央部かつ幅員中央部の床版下3mの位置とする。

計算結果から得られる時刻歴波形を図4-3-2に、周波数特性を図4-3-3に示す。図4-3-2より、車両が橋梁に進入し衝撃荷重が載荷される約1.6秒～2.5秒間では、TMDによる効果は見られないが、2.5秒後以降に見られる橋梁の自由振動ではTMDの減衰低減効果が見られる。図4-3-3より、TMDの対象周波数である3Hzでは、TMD設置前に見られる3Hzの卓越が見られなくなり、約7dBの低減効果を示している。一方、対象周波数では低減効果が高いものの、対象周波数前後の周波数帯域では値が大きくなる領域が見られる。これは、橋梁振動から発生する低周波音のエネルギーをTMD

が全て吸収するのではなく，エネルギー保存の法則より TMD の対象周波数で低減されたエネルギーが他の周波数帯域に配分されたと考えられる。

以上のことから，TMD は対象周波数における減衰を高め，周波数の卓越を下げる効果がある一方で，周辺周波数帯域に卓越を分散させることが示された。

4-4 TMD の有用性と課題

本研究の数値シミュレーションおよび実験の結果から，TMD は橋梁への衝撃荷重に対して制振効果はないものの橋梁の自由振動に対して減衰を低減させる効果があり，その自由振動を対象周波数とした場合，卓越する周波数を低減させることができる効果が認められる一方で，卓越周波数の前後の周波数帯域にエネルギーが分散されることが明らかになった。これは，環境問題の原因である対象周波数の卓越を低減できる一方で，新たな周波数の卓越が環境問題を再発生させる要因と成りかねない。さらに，第2章で橋梁の加振源となる橋梁上を走行する大型車両は，サスペンション種別，積載有無などの走行形態により卓越周波数が異なること，第3章で橋梁の経年変化により橋梁の固有振動が変化する可能性があることを示している上，現実的な課題として TMD の稼動状態を確認することおよび TMD の設定を確認することが行われ難い状況にあることから，TMD の設定を容易に変更することを可能にするなど，システムの高度化が望まれる。

4-5 まとめ

本研究では，数値シミュレーションおよび実橋実験より TMD の橋梁制振効果および低周波音低減効果を検証し，さらに TMD の有用性と課題について検討した。結果，以下の内容が明らかになった。

- 1) TMDは，橋梁への衝撃荷重により発生する橋梁振動および低周波音の低減効果は少ないが，橋梁の自由振動により発生する橋梁振動および低周波音の低減効果が確認できた。
- 2) TMDは，橋梁振動の制振および低周波音の低減とともに，対象周波数のピークを低減することが明らかになったが，この低減されたエネルギーがピーク前後の周波数帯域に分散されることが確認された。
- 3) 大型車両は種別や走行形態により卓越周波数が異なること，橋梁の経年変化により橋梁の固有振動が変化する可能性があることのほか，TMDの稼動状態を確認することおよびTMDの設定を確認することが行われ難い状況にあることから，TMDの設定を容易に変更できる環境対策工が望まれる。

TMDは橋梁の自由振動を減衰させる効果が高い装置である。TMDの設定を変更することは減衰量を調整することであること、TMDの設定変更が対象周波数とその周辺の周波数帯域の卓越に寄与することから、TMDの減衰装置を改良することが本章で述べた課題の解決につながると考えられる。

参考文献【第4章】

- 1) 村井逸朗, 佐野千裕, 佐藤弘史, 葛西俊二, 橘義規: TMDによる橋梁振動および低周波音抑制効果に関する実橋実験, 橋梁振動コロキウム'01 論文集, pp.141-146, 2001.10.
- 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) 佐々木栄一, 關真二郎, 山田均, 勝地弘, 石川裕治, 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62回年次学術講演会講演概要集, I-106, 2007.9.
- 4) 米田昌弘: 歩道橋の構造減衰特性に及ぼす静止者の TMD 効果, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.3, pp.435-443, 2014.
- 5) 米田昌弘: 静止者の TMD 効果を考慮した歩道橋モデルの複素固有値解析結果と実測値の対比, 構造工学論文集 Vol.62A, pp.193-203, 2016.
- 6) 大竹省吾, 中村一史, 長船寿一, 岩吹啓史, 鳥部智之, 平栗昌明: 道路橋の交通振動の疑似応答解析を用いた応答加速度の推定方法に関する研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, pp.I_707-I_718, 2016.
- 7) 奥田浩文, 蔭山満, 勝俣英雄: 振子と倒立振子を併用した TMD の開発, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, 構造 II, 振動, 原子カプラント 2010, pp.83-84, 2010.
- 8) 特許機器株式会社:
http://www.tokkyokiki.co.jp/pdf_new/tokkyokiki_catalog_54%20md.pdf

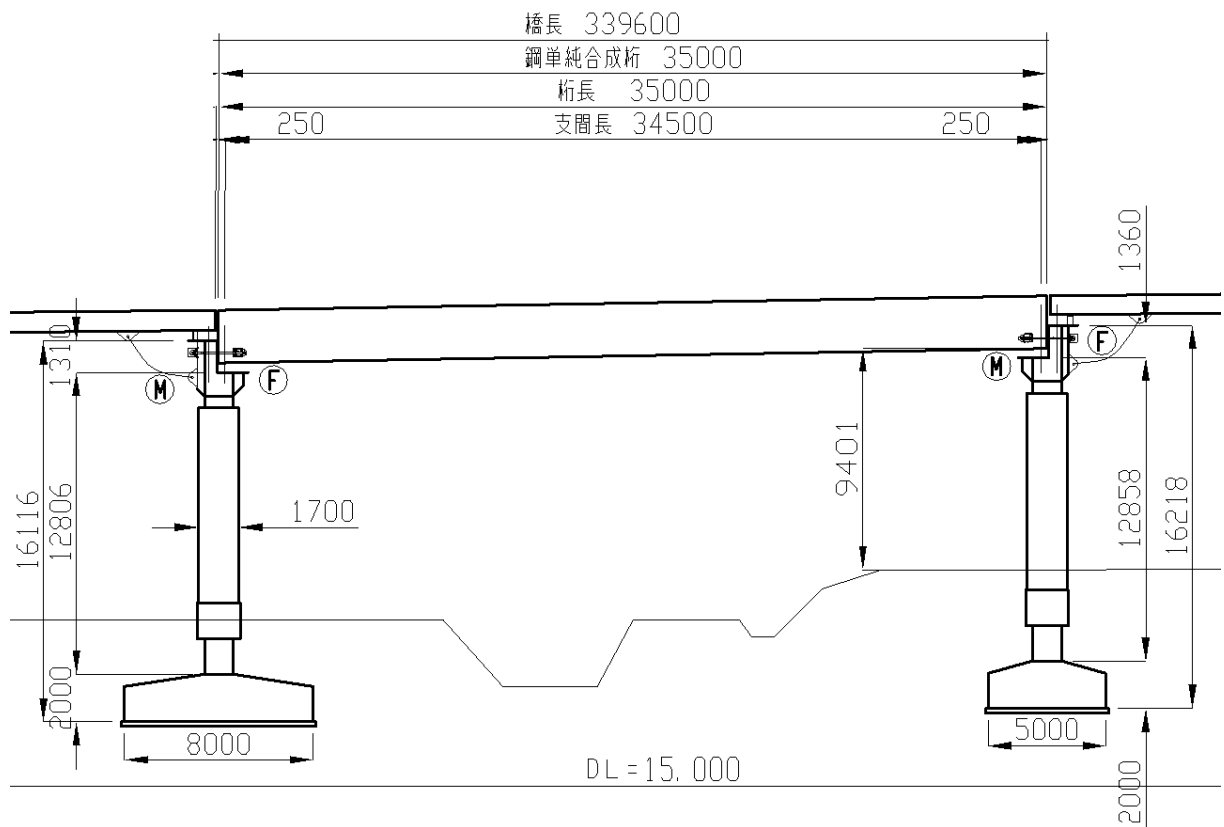


図4-2-1 橋梁一般図

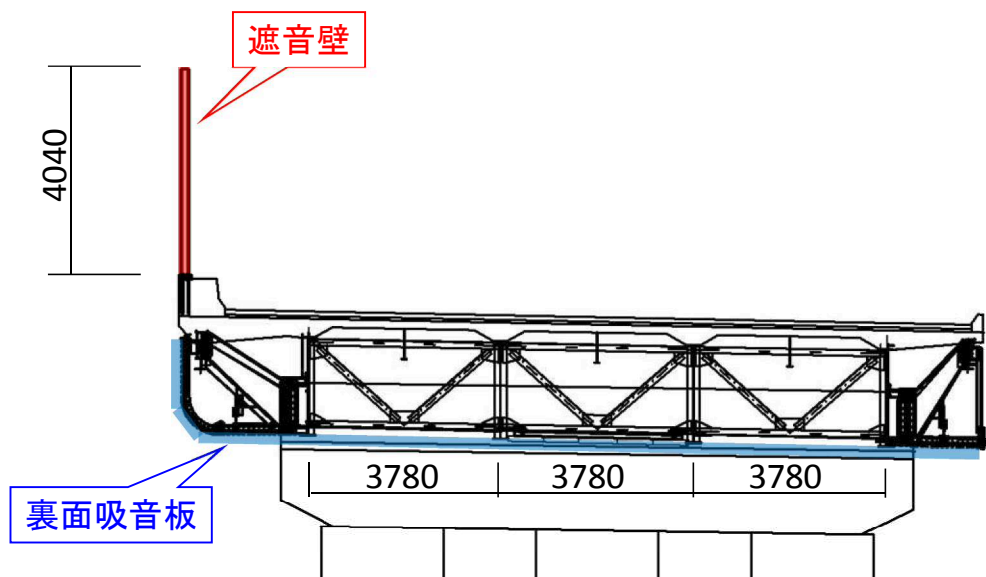


図4-2-2 環境対策工（遮音壁及び裏面吸音板）

表 4-2-1 TMD 諸元

質量 (1 基あたり)	1,500 kg
固有振動数	3.45 Hz
減衰比	4.2 %

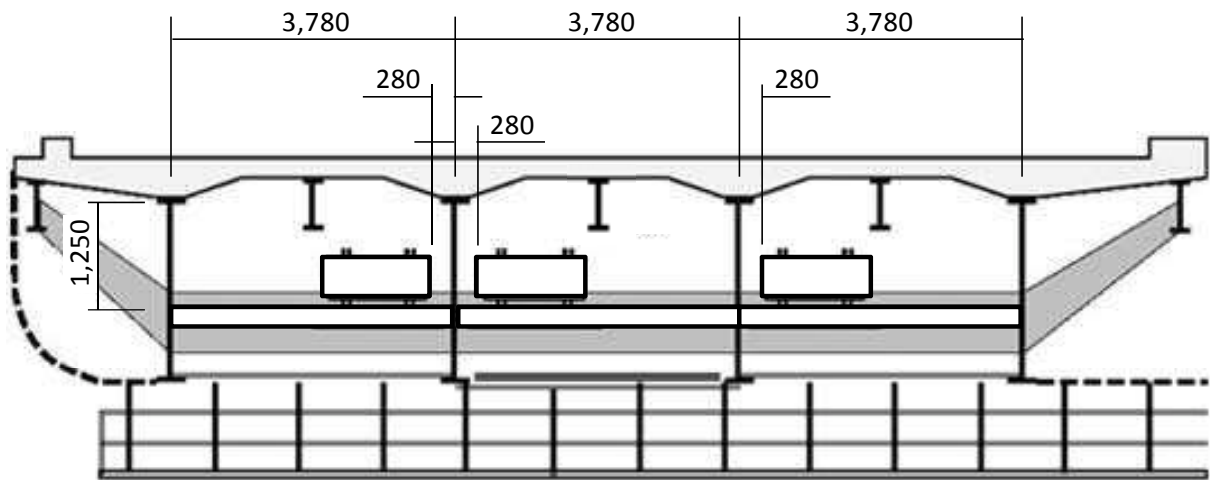


図4-2-3 TMD設置位置図

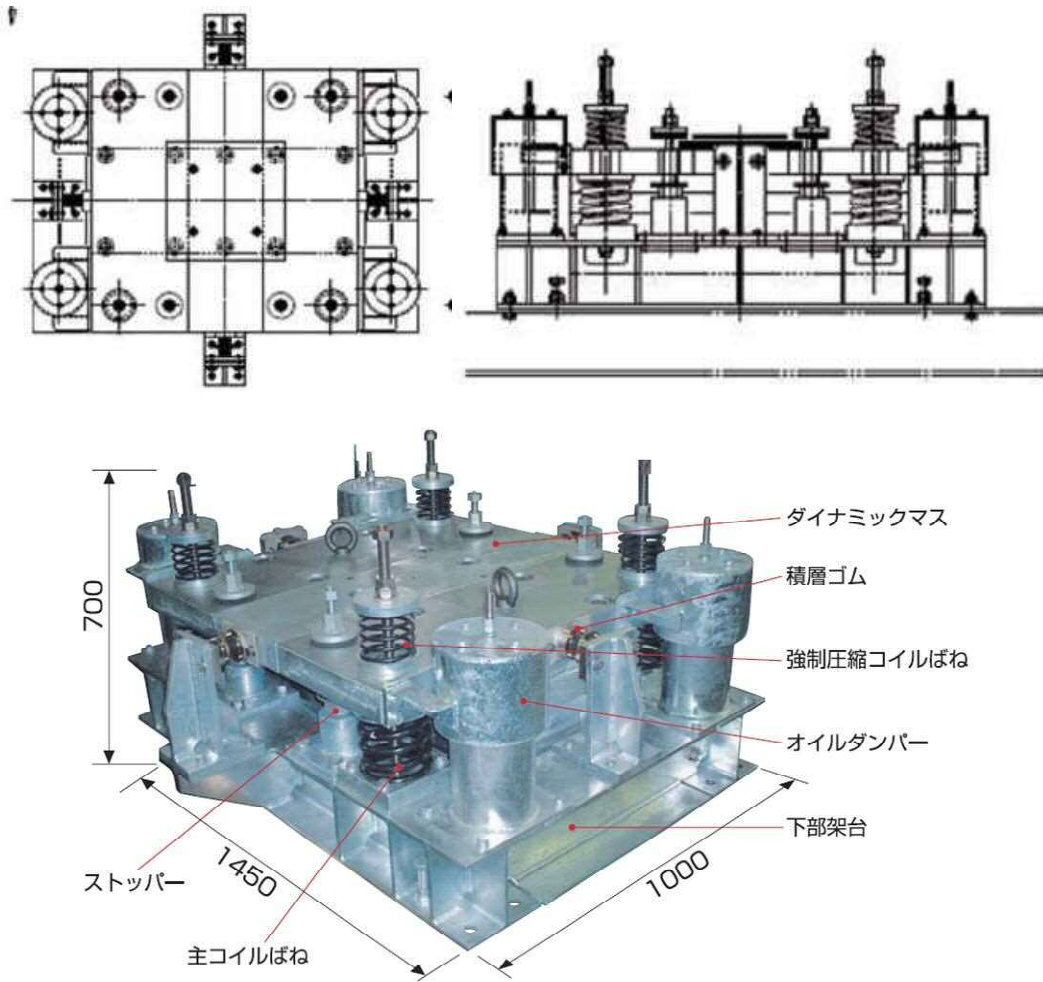


図4-2-4 設置されているTMDの形状及び寸法⁸⁾

← 車両進行方向

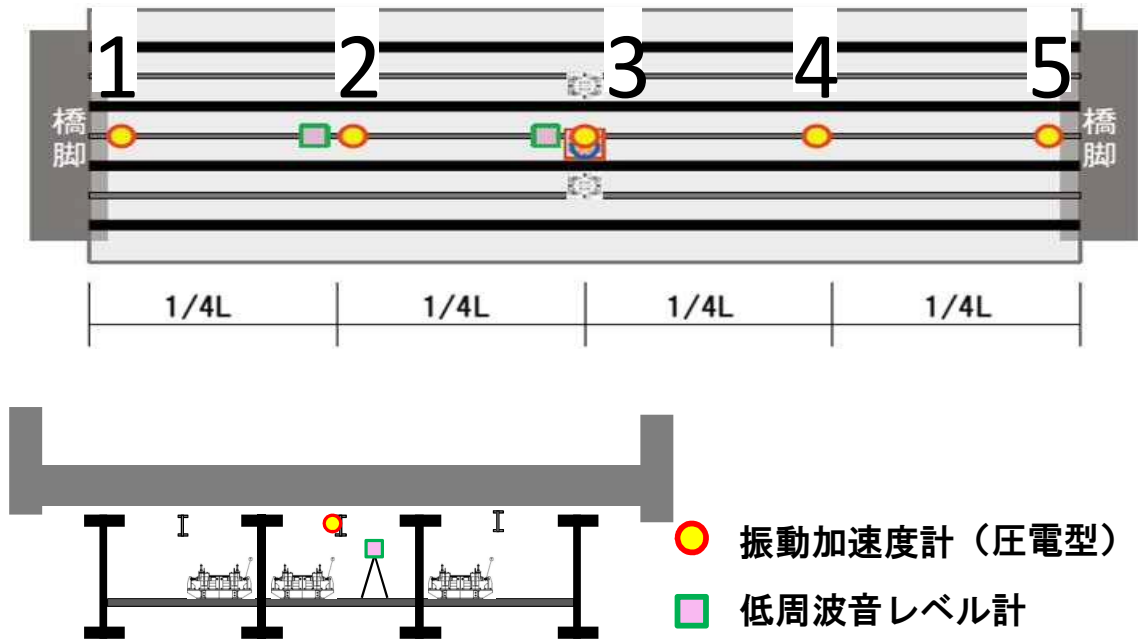
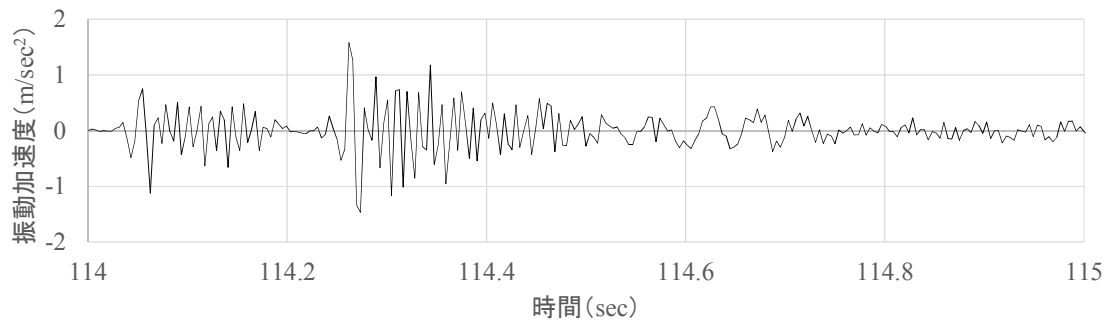
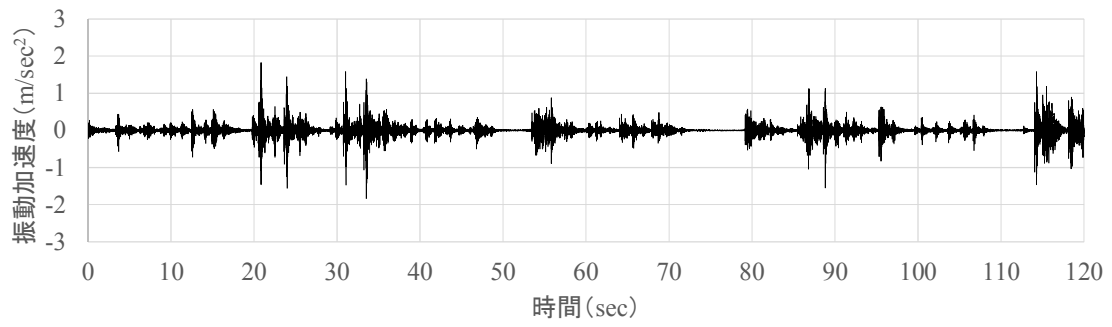
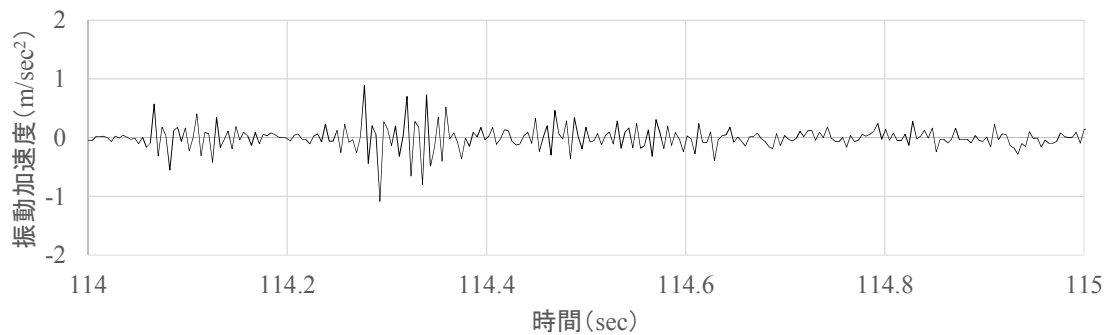
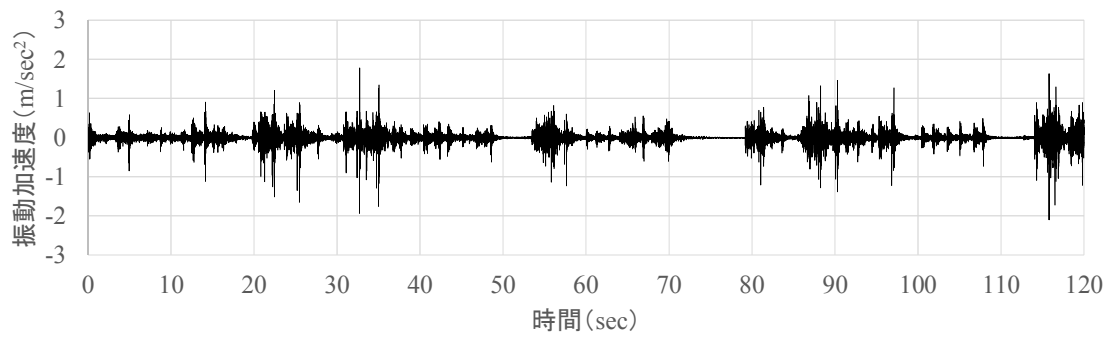


図4-2-5 測点配置図

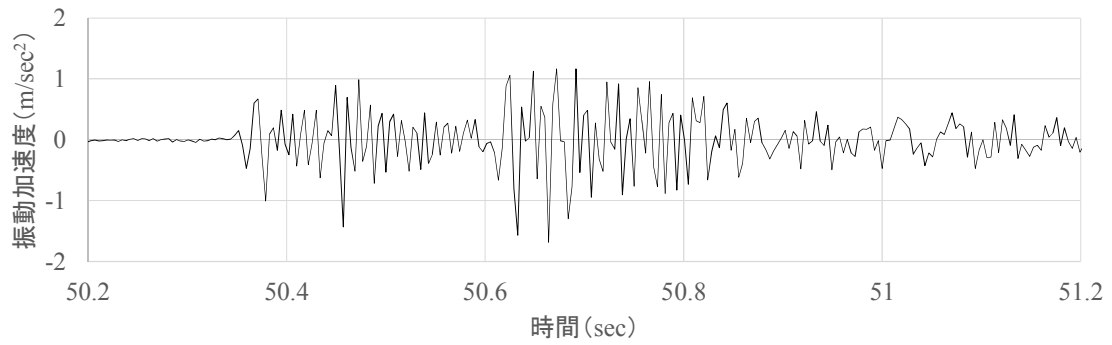
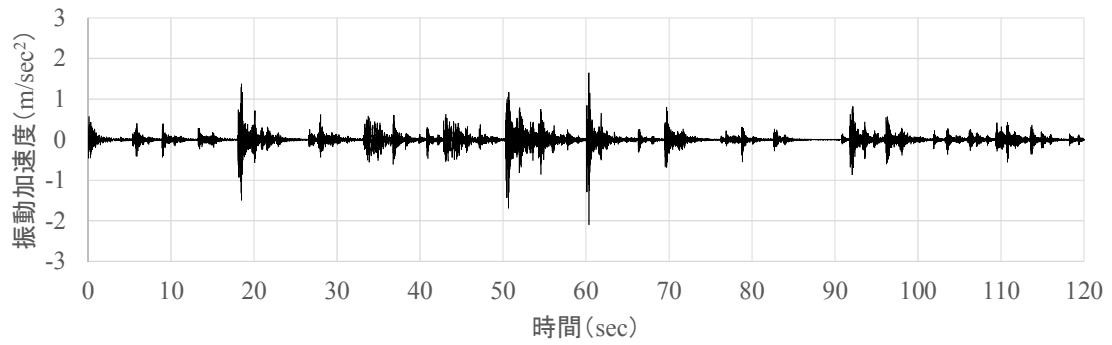


(1)測点2

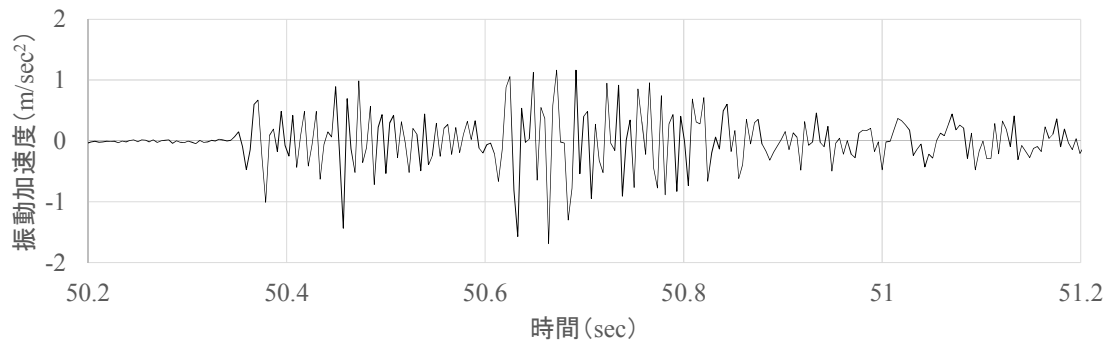
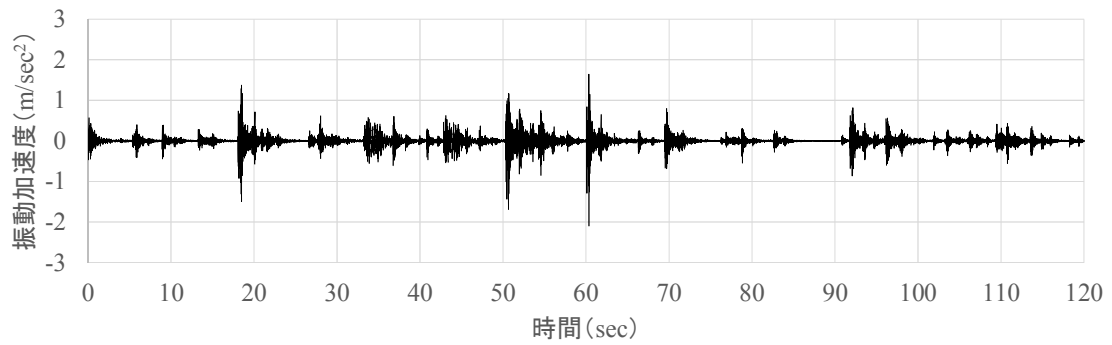


(2)測点3

図4-2-6 (a)TMD3基全て稼動状態の時刻歴波形



(1)測点2



(2)測点3

図4-2-7 (b) TMD3基全て非稼働状態の時刻歴波形

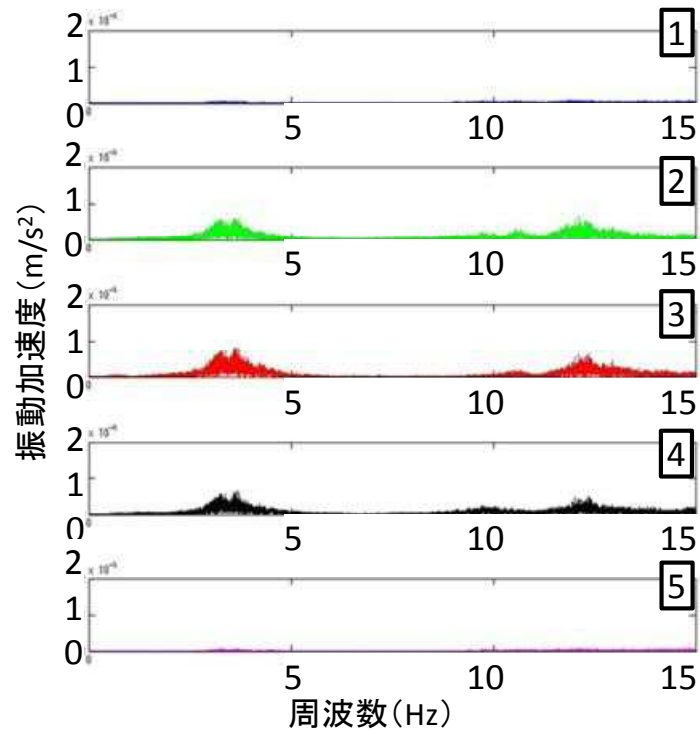


図4-2-8 各測点の周波数特性 (TMD全稼働)

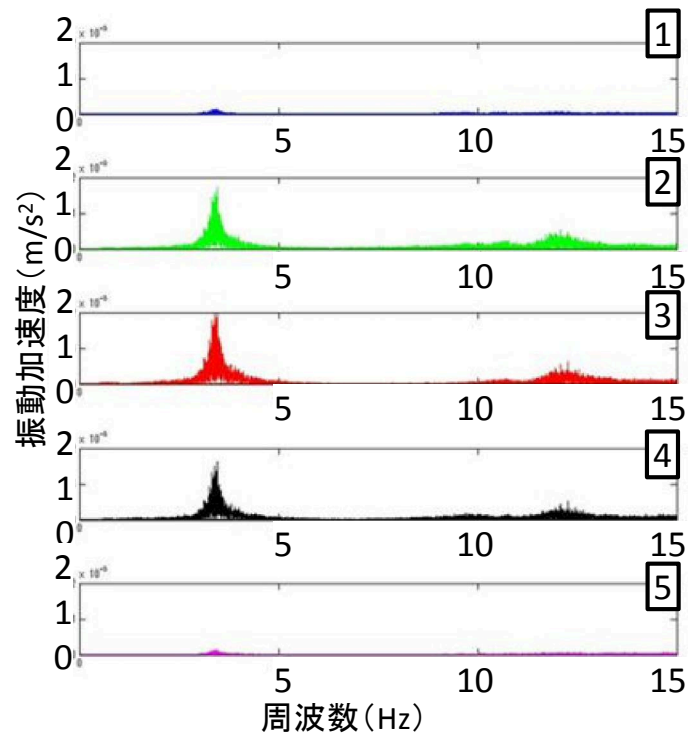


図4-2-9 各測点の周波数特性 (TMD全非稼働)

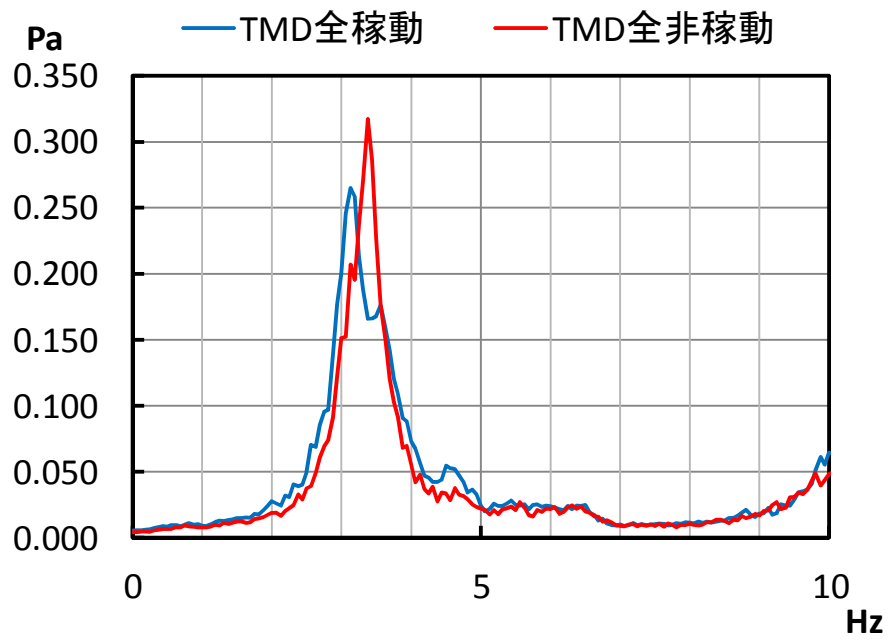


図4-2-10 支間中央部における低周波音圧の周波数特性

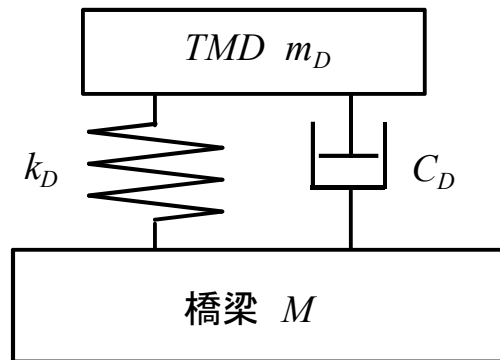


図4-3-1 TMDのモデル

表4-3-1 TMDの諸定数

TMD質量	1,500kg
バネ定数	$k_D = (\lambda_{OPT} \cdot \omega_S)^2 \cdot m_D$
最適固有振動数比	$\lambda_{OPT} = \frac{1}{1 + \mu}$
減衰定数	$c_D = 2 \cdot m_D \cdot \omega_D \cdot \xi_{OPT}$
円固有振動数	$\omega_D = \sqrt{\frac{k_D}{m_D}}$
最適減衰比	$\xi_{OPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}}$

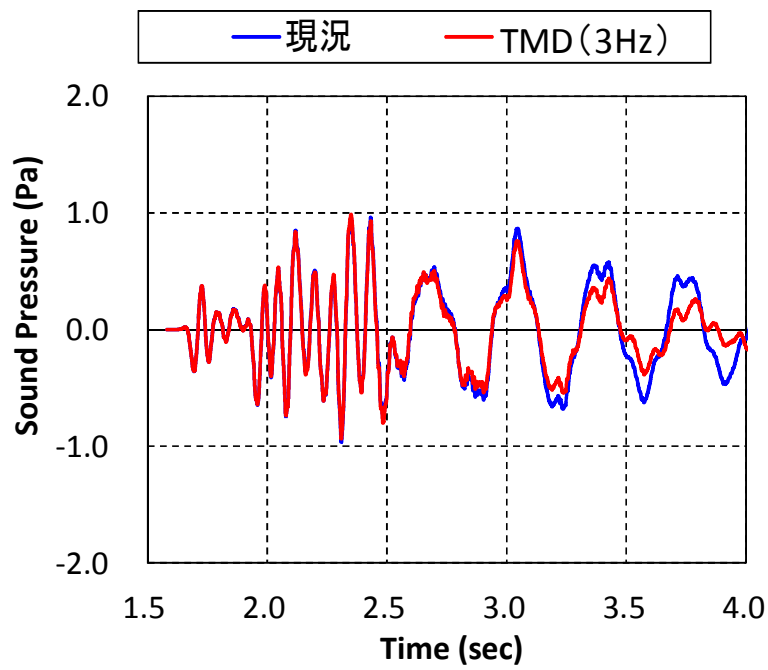


図4-3-2 時刻歴波形

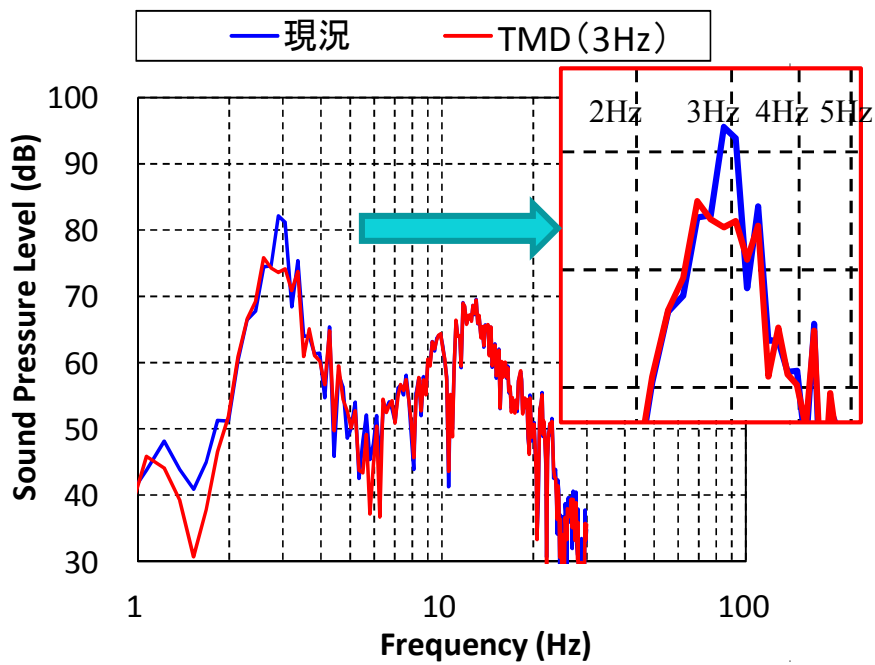


図4-3-3 周波数特性

第 5 章

減衰量を電磁制御する発電型 TMD の提案と適用性

5-1 はじめに

高速道路の沿道で生じる環境問題において、近年ではその原因が橋梁から放出される低周波音である事例がみられ、原因究明および対策検討が行われている。徳永ら¹⁾は、道路橋から発生する低周波音の実態調査から周波数特性を分析し、橋梁の鉛直振動一次モードは支間長の逆数と高い相関があることを示している。河田ら²⁾は、境界要素法を用いた低周波音を理論解析により、実音場に近い音場特性を再現し対策効果を確認している。道路橋における低周波音対策は、例えば長船ら³⁾や深田⁴⁾によって検討事例が示されている。

低周波音対策技術の一つに、TMD(Tuned Mass Damper)やIMD(Impact Mass Damper)がある。振動を制御したい橋梁に付加重量(Mass)をダンパ(Damper)およびバネを介して橋梁に取り付け、マスの質量やダンパおよびバネの剛性を調整することで固有振動および減衰を最適に調整(Tuned)し橋梁の振動を抑えるシステムである。橋梁振動や低周波音発生の低減に効果があることが既往研究で実証されており⁵⁾、各地の高速道路橋で設置され稼働している。しかし、TMDは設置直後以降に稼働状況の確認が行われていないことに課題がある。既往研究では、橋梁は供用年数が経過すると振動数および減衰定数が変化すること⁶⁾や、コンクリート構造物の空隙発生に伴い固有振動数が変化すること⁷⁾、路面の凹凸が大型車両の振動を増幅し車両と橋梁の連成振動を生じさせ周期性路面により振動特性が変化すること⁸⁾などが報告されており、供用年数が経過し舗装路面や床版等が経年変化することで橋梁の固有振動数や減衰定数が変化することが懸念されるため、TMDの対象周波数や減衰比の設定を調整する必要がある。よって、TMDの調整が容易に行えること、さらには対象周波数や減衰量などをモニタリングするシステムの構築が望まれる。

TMDを用いた振動制御の最適化手法は数多く提案されており、例えば、阿部ら⁹⁾¹⁰⁾は多数個の同調質量ダンパがもつ固有振動数で対象構造物の固有振動数のまわりのあるバンド幅に分布させるMTMD(Multiple Tuned Mass Damper)を用いた設計手法、吉中ら¹¹⁾は複数モードを制御する分散型TMDの提案など、対象周波数に幅を持たせた設計が提案されている。第2章、第3章で述べたように発生源の固有振動数が変化する可能性があることからTMDの対象周波数に幅を持たせることは重要である一方で、道路橋に多く設置されている単質点TMD^{3),5)}に適用することが困難である。

そこで、筆者らはTMDの減衰比の調整に着目した。この手法として、筆者らが考案したTMDのオイルダンパを電磁減衰装置に置き換えオイルダンパの減衰の役割を電気回路の抵抗値で制御する二質点同調質量系発電デバイス(Tuned Mass Generator: TMG)¹²⁾の活用が挙げられる。TMGはパラメータ変更を容易に行うことができ、電磁減衰装置の電気抵抗値を変更することで制振制御あるいは振動発電を目的とした設計が可能である。参考文献12)の研究は発電を目的としており、二質点系かつ主マ

ス 104kg・副マス 12kg の質量を有する TMG の設計および実証実験を行っているが、オイルダンパから電磁減衰装置への置き換え作業が容易であることから、橋梁振動の制御を目的とし高速道路橋に多く設置されている単質点系かつマス質量 1,500kg クラスの TMD への応用が期待できる。

本研究では、環境問題対策として供用中の高速道路橋に設置されている質量比約 1% の単質点 TMD において、オイルダンパを電磁減衰装置に置き換えた発電型 TMD を用いて、橋梁振動制振効果および低周波音低減効果と発電量を把握することを目的とした供用中実大橋梁による道路交通振動実験を行う。実験に先立ち、(a) ピーク振動低減を重視した場合、(b) 吸収エネルギーを重視した場合、(c) 発電エネルギーを重視した場合の各タイプを設計して最適な電気抵抗値を算出した。実験では交通量が異なる 3 タイプの測定データを比較するため、橋梁振動の寄与が高い大型車交通量を基準化することで橋梁振動制振効果および低周波音低減効果を分析する。これらより、発電型 TMD の電磁減衰装置を提案することにより、橋梁振動の制振を目的とした場合のパラメータを明らかにし、橋梁振動および低周波音の低減効果を実橋実験にて実証する。

5-2 発電型 TMD の概要

単質点系発電型 TMD と橋梁の解析モデルを、既往研究 15) を参考に図 5-2-1 に示す。バネ定数 K のバネと減衰定数 C_M のダンパで支持された橋梁の等価質量 M があり、この等価質量 M に、バネ、電磁減衰装置および 1 つの質量で構成された単質点同調質量系発電デバイスを付加したモデルである。質量 M に調和外力 $F(t)=F_0\sin(\omega t)$ が作用した時、質量 M の変位を $X(t)$ 、発電型 TMD の質量 m_1 の変位を $x_1(t)$ とする。 m_1 の M に対する質量比 μ_1 は 1% である。電磁減衰装置による減衰力 $F_d(t)$ は電磁減衰装置内部の構造と接続した電気回路によって性質が変わるため、電磁減衰装置は電気回路を含めて設計した。

5-2-1 電気回路内の抵抗 R による制御

TMD のオイルダンパと同様に電磁減衰装置が減衰制御を行うことが可能か検証するため、電気回路内の抵抗について検討を行った。

図 5-2-2 に電磁減衰装置の等価回路と抵抗 R を有する発電型 TMD の電気回路を示す。電磁減衰装置の起電力 $E(t)$ は、ファラデーの電磁誘導の法則より磁界の変化速度 $d\phi/dt$ を次のように表せる。

$$E(t) \propto \frac{d\phi}{dt} \quad (5.1)$$

また、磁界変化と可動部の速度変化 dx/dt が比例関係とすると、誘導起電力は次のように表せる。

$$E(t) = -k_{emf} \frac{dx}{dt} \quad (5.2)$$

k_{emf} は速度に対する起電力の比を表す数値で誘導起電力係数 [V.s/m] とすると、**図5-2-2**の電磁減衰装置の等価回路の方程式および電磁減衰装置による減衰力 $Fe(t)$ は次のように表せる。

$$E(t) = (R + r)I(t) + L \frac{dI(t)}{dx} \quad (5.3)$$

$$F_e(t) = k_{emf} I(t) \quad (5.4)$$

発電電力 $W(t)$ と損失電力 $W_{loss}(t)$ は次のようになる。

$$W(t) = RI^2(t), \quad W_{loss}(t) = rI^2(t) \quad (5.5)$$

電磁減衰装置の発電による減衰力と損失電力による減衰力の等価減衰係数 c_{eh} と c_{el} は次式で表される。

$$c_{eh} = \frac{k_{emf}^2}{r} \frac{R_r}{(1 + R_r)^2}, \quad c_{el} = \frac{k_{emf}^2}{r} \frac{1}{(1 + R_r)^2} \quad (5.6)$$

ここで、 $R_r = R/r$ は抵抗比である。よって、電磁減衰装置の等価減衰係数 c_e は c_{eh} と c_{el} の和で表すことができる。

$$c_e = c_{eh} + c_{el} \quad (5.7)$$

以上のことから、電磁減衰装置による減衰力 $Fe(t)$ および発電電力 $W(t)$ は、電磁減衰装置の発電による等価減衰係数 c_{eh} に寄与することから明らかとなった。よって、電磁減衰装置内の抵抗 R を変化させることで、発電型 TMD の減衰効果（制振効果）を制御できることおよび発電電力を制御できることが示された。

5-2-2 発電特性および機械特性の検証実験

実橋実験に使用する電磁減衰装置の発電特性および機械的特性は、既往研究13) を参考とした。既往研究では振動台を用いた室内実験を行っている。実験システムの諸元を**表5-2-1**に示す。加振装置としてMTS810を用いた。**図5-2-3**に示すように電磁減衰装置はMTS810のフレームに専用治具で固定されており、シャフト部分はひずみ式ロードセルを挟んで振動台に固定している。振動台はMTS810のコントローラによって制御し、MTS810から出力される振動台の変位 [mm]、ひずみ式ロードセルから出力さ

れる荷重 [N], 電磁減衰装置の起電力 [V]をNR-600シリーズのNR-HV04ユニットで計測している. ロガーの設定条件を表5-2-2に示す.

この実験より算出される電磁減衰装置の起電力係数-変位の関係について, 電磁減衰装置の可動子の変位時刻歴, 可動子の変位を周波数領域で微分することで求めた速度の時刻歴, 電磁減衰装置の発電電圧の時刻歴から, 電磁減衰装置の起電力係数 k_{emf} を算出した結果を図5-2-4に示す. 図5-2-4の縦軸は起電力係数 k_{emf} , 横軸は電磁減衰装置上向きを正としたときの可動子の位置を表している. 赤線は可動子が下方向へ動くときの起電力係数, 青線は可動子が上方向へ動くときの起電力係数を表している. 赤線と青線がわずかにずれるのは, 電磁減衰装置のヒステリシス特性の影響と考えられる. ヒステリシス特性の影響は数Hz程度の低い振動数帯では小さいため, 本研究ではこの影響は数値解析で考慮しないこととした. 以上のことから, 起電力係数 k_{emf} と可動子位置 x [mm]の関係は, 実験で得られた図5-2-4に示す起電力係数を用いて行った.

次に, この実験より得られる可動子を動作させた時に可動子が受ける反力と可動子位置の関係から, 可動子変位が描く軌跡の上側と下側の差の半分が動摩擦力と考えられることから, 算出した動摩擦力と可動子位置の関係を図5-2-5に示す. 図5-2-5に示すように, 可動子が中立位置付近で最も摩擦抵抗が大きく, 中立位置から離れるにしたがって摩擦抵抗が小さくなる. 中立位置付近では可動子の磁石と固定子のヨーク間の遠心方向引力が最も強く, 軸受部分に発生する摩擦が大きくなる影響と考えられる. 振動発電で主に想定される振幅域である ± 10 mm範囲の平均の動摩擦力は約6 Nである. 図5-2-5で示した動摩擦力の影響を差し引くと磁気ばねによる反力が得られる. 図5-2-6に磁気ばねによる反力と可動子位置の関係を示す. 可動子が ± 2 mmの範囲で磁気ばねは正ばねの挙動を示し, ± 2 mm \sim ± 8 mmの範囲で負ばねというように正ばねと負ばねを交互に繰り返す複雑な特性とすることで, 磁気ばねによる最大反力の絶対値を小さくしていることを示している. これにより, 磁気ばねが発電型TMDの振動数のチューニングに与える影響が相対的に小さくなることが示された.

5-3 数値シミュレーションによる検討

実験対象橋梁に設置されたTMDに設置する電磁減衰装置について, 振動制御特性と発電特性を把握するため, 電気回路の抵抗値について検討した. 本研究では, 制振効果と発電量を制御することを検証するため, 橋梁の振動加速度の周波数スペクトルのピークを最小限に抑える(a)ピーク振動低減重視型, 電磁減衰装置の減衰作用によって吸収する振動エネルギーを最大限に引き出す(b)吸収エネルギー重視型, 電磁減衰装置による発電エネルギーを最大限に引き出す(c)発電エネルギー重視型の3タイプについて検討し, 最適な電気抵抗値 R を算出した.

5-3-1 数値シミュレーションモデルの概要

数値シミュレーションモデルを図5-3-1に示す。橋梁の対象振動数は実験対象橋梁の一次の振動モード特性を考慮し、 $f=3.4$ Hzとした。対象振動モードの橋梁の有効質量は $M=205000$ kgである。橋梁のモード減衰比は振動振幅による依存性があるが、実橋梁に発生する交通荷重により励起される振動のうち代表的と考えられる50 ~ 100 gal程度の振動時の自由減衰波形より式(5.8)にて算出した $\zeta=3.0\%$ としている。1500 kgタイプ発電型TMDの質量は調整マスの質量を加味すると $m_1=1560$ kgであり、固有振動数は $f_1=3.45$ Hzである。ばねマスによる機械的な減衰比は自由減衰振動波形より式(5.8)にて算出した $\zeta_1=2.0\%$ として数値シミュレーションを行った。電磁減衰装置は設置可能な最大数である4台としている。電磁減衰装置の起電力係数 k_{emf} 、磁気ばね特性 F_g は実験より得られた非線形特性を用いる(図5-2-4, 図5-2-6)。電磁減衰装置の内部抵抗は $r=10.3$ Ω である。電磁減衰装置に生じる摩擦抵抗や、電磁減衰装置をTMDへの組み付けするときの軸ずれ等による摩擦は発電型TMDの減衰特性に影響するため、電気抵抗値のチューニングにも影響を与えられられるが、発電型TMDの全体の摩擦抵抗 σ_g を実験で計測することは困難である。そこで本研究では、発電型TMDの全体の摩擦抵抗 σ_g を想定される範囲で3パターン考慮し、それぞれのパターンで目的に合わせた抵抗値の設定を検討した。検討した発電型TMDの全体の摩擦抵抗 σ_g は10 N, 30 N, 50 Nである。

$$\xi = \frac{C_M}{2\sqrt{MK}}, \quad \xi_1 = \frac{C_1}{2\sqrt{m_1 k_1}} \quad (5.8)$$

$$\text{橋梁減衰エネルギー} = \int C_M \dot{X}^2 dt \quad (5.9)$$

$$\text{吸収エネルギー} = \int \left\{ \sigma_g |\dot{x}_1 - \dot{X}| + (c_1 + 4 \cdot c_e)(\dot{x}_1 - \dot{X})^2 \right\} dt \quad (5.10)$$

$$\text{発電エネルギー} = R(r+R)^{-1} \int 4 \cdot c_e (\dot{x}_1 - \dot{X})^2 dt \quad (5.11)$$

ここで、電磁減衰装置の発電による減衰作用を表す発電減衰係数 c_e は以下の式で与えられる。

$$c_e(x) = \frac{k_{emf}^2(x)}{r+R} \quad (5.12)$$

以上より、数値シミュレーションに必要なパラメータを表5-3-1にまとめる。

はじめに、摩擦抵抗と電気回路の抵抗値 R が橋梁振動に与える影響を分析するため、**図 5-3-1** に示した橋梁-発電型 TMD のモデルに自動車交通による等価加振力を与える。等価加振力は橋梁の振動加速度実測データから田口ら¹⁶⁾が提案した手法を用いて算出した。本解析では**図 5-3-2** の赤枠で示す 4 時間分の等価加振力を用いており、そのときの橋梁加速度のパワースペクトル密度を**図 5-3-3** に示す。黒線 (Original) は通常の TMD が稼働状態のときを示している。**図 5-3-3** は 3 つの摩擦抵抗毎のシミュレーション結果であり、それぞれ電気抵抗を変化させた時にスペクトルがどのように変化するかを示している。黒線が粘性ダンパを使用した従来の TMD を設置した状態において実際に実験対象橋梁で計測された加速度データから算出したパワースペクトル密度である。電気抵抗が大きいほど、電磁減衰装置の発電による減衰作用が大きくなる。発電型 TMD の合計摩擦減衰力が 10 N の場合、120 Ω あたりがスペクトルのピーク高さが最も低くなる抵抗値であることがわかる。一方、発電型 TMD の合計摩擦減衰力が 30 N の時は 400 Ω あたりでスペクトルのピーク高さが最も低くなる。発電型 TMD の合計摩擦減衰力が 50 N の場合だと摩擦による減衰作用が支配的となり、抵抗値が 400 Ω でもスペクトルのピークが最小とならない可能性がある。

5-3-2 目的に合わせた抵抗値の設定の検討

次に、電気回路の抵抗値が橋梁の振動や発電エネルギーに与える影響を分析するため、3 タイプの設計目的であるピーク振動、吸収エネルギー、発電エネルギーと抵抗値の関係を調べる。交通荷重による加振力 (19 時間) を発電型 TMD に設置した橋梁のシミュレーションモデル (**図 5-3-1**) に与え、電気抵抗を 0~1000 Ω の範囲で変化させた時の (a) 橋梁加速度のパワースペクトル密度の最大ピーク値、式(5.10)より算出する (b) 発電型 TMD の電磁減衰装置と摩擦減衰で吸収した振動エネルギー、式(5.11)より算出する (c) 発電エネルギーを数値解析結果からそれぞれ算出した結果を**図 5-3-4**~**図 5-3-6** に示す。**図 5-3-4** は摩擦抵抗が 10 N の時、**図 5-3-5** は摩擦抵抗が 30 N の時、**図 5-3-6** は摩擦抵抗が 50 N の時をそれぞれ示している。

摩擦抵抗が 10 N の時、橋梁の振動制御に着目した場合、橋梁加速度のパワースペクトル密度の最大値が最小となる電気抵抗は 80 Ω である。また、発電エネルギーが最大となるのは電気抵抗が 70 Ω である。このことから、摩擦抵抗が小さい時 (10 N 相当)、実験対象橋梁を対象とした本研究の事例では、振動制御を目的とした場合と発電を目的とした場合で電気抵抗の最適値が近い結果となった。一方、発電型 TMD が吸収するエネルギーに着目する場合、電気抵抗が 200 Ω 付近で最大となり、電気抵抗が 200 Ω 以上ではほとんど吸収できるエネルギー量が変化しないことがわかる。

摩擦抵抗が 30 N の時、橋梁の振動制御に着目した場合、橋梁加速度のパワースペクトル密度の最大値が最小となる電気抵抗は 140 Ω である。また、発電エネルギーが最大となるのは電気抵抗が 70 Ω である。このことから、摩擦抵抗が 30 N 相当のときは振動制御を目的とした場合と発電を目的とした場合で電気抵抗の最適値が異なる結果となった。一方、発電型 TMD が吸収するエネルギーに着目する場合、電気抵抗が 400 Ω 付近で最大となり、400 Ω 以上は吸収エネルギー量がほとんど変化しないことがわかる。

摩擦抵抗が 50 N の時、橋梁の振動制御に着目した場合、橋梁加速度のパワースペクトル密度の最大値が最小となる電気抵抗は 500 Ω 付近であり、500Ω 以上でもパワースペクトル密度の最大値はほとんど変化しない。一方、発電エネルギーが最大となるのは電気抵抗が 70 Ω である。また、0~1000 Ω の範囲では発電型 TMD が吸収するエネルギーを最大にする最適な電気抵抗は存在せず、300 Ω 以上で吸収エネルギーがほとんど変化しない。これは、摩擦抵抗が大きく支配的であり、電気抵抗によるチューニングが発電型 TMD に与える影響が相対的に小さくなるためと考えられる。

摩擦抵抗毎のシミュレーション結果を表 5-3-1 にまとめる。各チューニング目的に対して最適な抵抗値に設定した時の橋梁加速度のスペクトル密度の最大値、発電型 TMD の吸収エネルギー量、発電エネルギー量である。振動制御を目的として、(a) ピーク振動低減を重視した場合、発電型 TMD の摩擦力が大きい時は電気抵抗を高く設定することでピーク振動を最小化できる。振動制御を目的として、(b) 吸収エネルギーを重視した場合も、発電型 TMD の摩擦力が大きい時は電気抵抗を高く設定することで吸収エネルギーを最大化できるが、摩擦力が 50 N 程度の場合は摩擦力の影響が支配的であり、抵抗値が 400 Ω 以上で吸収エネルギー量はほとんど変わらない。一方、発電を目的として(c) 発電エネルギーを重視した場合、最適な電気抵抗は 1500 kg タイプ発電型 TMD の摩擦力に依存せず、70 Ω であることがわかる。

本実験は、周辺地域への影響を最低限に留めることを考慮し、用いる電磁減衰装置は 2 台とし残り 2 台はオイルダンパで行う。実験に用いる電磁減衰装置 A と電磁減衰装置 B の中心付近の摩擦力がそれぞれ 6 N と 20 N とばらつきがあるものの相対的に小さかったため、この 2 つの電磁減衰装置を用いることとした。したがって、電磁減衰装置 A と電磁減衰装置 B を取り付けたときの 1500 kg タイプ発電型 TMD の合計の摩擦力は組付けの芯ずれ等の影響を考慮すると 30 N 程度であると考えられる。電磁減衰装置 4 台を用いた数値シミュレーション結果に基づく最適電気抵抗 R_4^* と、電磁減衰装置 2 台としたときに同等の発電減衰が得られる最適な電気抵抗 R_2^* の関係は次式より導くことができ、式(5.13)のように示される。

$$R_2^* = (R_4^* - r) / 2 \quad (5.13)$$

すなわち，(a) ピーク振動レベル低減を目的とした場合，(b) 吸収エネルギーを目的とした場合，(c) 発電を目的とした場合，それぞれの最適抵抗値は電磁減衰装置 2 台を組付けたときの合計摩擦抵抗を 30 N 程度を考慮して，(a) ピーク振動低減重視：100 Ω ，(b) 吸収エネルギー重視：200 Ω ，(c) 発電エネルギー重視：30 Ω と設定した。

5-4 実験の対象橋梁

供用中の高速道橋に設置され稼動している TMD について，オイルダンパを電磁減衰装置に置き換えた発電型 TMD の設計を行い，その制振効果および発電量制御の検証を行うため，一般車両走行による橋梁を加振した状態で実験を行うことを目的として，対象橋梁を選定した。

5-4-1 実験対象橋梁の概要

実験対象橋梁は，TMD が設置されており，構造がシンプルな単純桁の鋼 4 主鈎桁橋 (L=35m) で行った。上部構造は補強が行われており，主鈎間に 1 本ずつ計 3 本の補強縦桁が設置されている。橋梁一般図を図 5-4-1 に示す。周辺地域は家屋が立ち並んでおり，騒音対策として高さ約 4m の遮音壁および主鈎下に裏面吸音板が設置されている。これら環境対策工を図 5-4-2 に示す。また，実験対象橋梁沿道で橋梁振動に起因する低周波音の環境問題が発生しており，この対策として各主鈎間に 1 基ずつ計 3 基の TMD が設置されている。この TMD は橋梁の振動一次モード対策として設計されており，その諸元，設置位置図および詳細図を表 5-4-1，図 5-4-3 および図 5-4-4 に示す。実験対象橋梁は，上り線および下り線共に同形式かつ同様の TMD が同数設置されているが，実験は交通量を計測するトラフィックカウンタが近くに設置されている上り線で行った。

5-4-2 実験対象橋梁の振動特性

まず，TMD が設置された状態での橋梁の振動特性を把握するため，振動加速度および低周波音圧レベルの測定を行った。測点配置図を図 5-4-5 に示す。振動加速度は，周波数特性の分析および振動モードの作成のため，主鈎の径間端部 2 箇所，径間中央部 1 箇所，径間 1/4 部 2 箇所の計 5 箇所で圧電型の振動レベル計（リオン製 VM-53）を用いて振動加速度を測定した。低周波音圧レベルは，裏面吸音板の上部 1.2m の高さで径間中央部 1 箇所に低周波音圧レベル計（リオン製 NL-62）を用いて測定した。

一般的に低周波音圧レベルの測定は地上（高さ 1.2m）で実施されるが、本実験は上り線の振動特性のみを評価するため、下り線の影響が想定される地上ではなく上り線の裏面吸音板上とした。これらの測定は、振動加速度および低周波音圧レベルを同時にデータレコーダ（リオン製 DA-21）にサンプリング周波数 256Hz にて収録した。測定は、TMD3 基を(a)全て稼働の状態と(b)全て非稼働の状態で行った。

主桁の 1/2 径間部における振動加速度の FFT 分析結果および卓越周波数の振動モード図を図 5-4-6 および図 5-4-7 に示す。図 5-4-6 は、サンプリング周波数を 256Hz、分析時間長を 4sec、窓関数は矩形窓とし、0~128Hz の範囲を周波数分解能 0.25Hz で分析を行った。図 5-4-7 は、サンプリング周波数を 256Hz、分析時間長を 16sec、窓関数は矩形窓とし、0~128Hz の範囲を周波数分解能 0.0625Hz で分析を行った。周波数特性から 3.5Hz 付近および 19Hz 付近に卓越が見られる。これは振動モード図からそれぞれ橋軸方向の振動一次モードおよび振動二次モードであることがわかる。また、TMD の対象固有振動数 3.5Hz 付近を見ると、TMD を稼働させることで振動一次モードの卓越を低減していることを確認した。振動加速度の最大値は、約 1/2 となっている。1/2 径間部の振動加速度と低周波音圧レベルの時刻歴波形を図 5-4-8 示す。振幅量に違いは見られるものの波形の形状が概ね同じであることから、橋梁振動が大気に伝播し低周波音を放出していることがわかる。

5-5 供用中高速道路橋を用いた実大橋梁実験

5-5-1 実験概要

実験は、供用中高速道路橋における数値シミュレーション設計の有用性を検証することを目的に実施した。実験対象橋梁は周辺に家屋が立ち並び環境問題が生じていることから、周辺地域への影響を最低限に留めることを考慮し、TMD3 基のうち橋軸直角方向の中心部にある TMD1 基を発電型 TMD とした。実験対象 TMD を図 5-5-1 に示す。オイルダンパと置き換える電磁減衰装置は設計で用いた 2 基とし、図 5-5-2 に示すとおり対角線上に配置した。数値シミュレーションの結果から得られた 3 種類の電気抵抗値を設定しやすくするため、電気抵抗は可変抵抗器を用いた。測定は、発電型 TMD の減衰量を把握するため、発電型 TMD マス上部の中央部 1 箇所に振動加速度計を、発電型 TMD マスと設置架台横桁との変位を計測する変位計を設置した。減衰量測定図を図 5-5-3 に示す。橋梁振動の制振効果と低周波音の低減効果を把握するため、図 5-4-5 に示す振動加速度計と低周波音レベル計を設置した。

5-5-2 実験結果および考察

実験は、3種類の電気抵抗値をそれぞれ1週間ずつ設置し、橋梁およびTMDの振動加速度、低周波音および発電量を測定した。測定結果をもとに、減衰量を算出し、橋梁振動制振効果および低周波音低減効果についてオイルダンパと電磁減衰装置の比較および数値シミュレーション結果の有用性を分析した。

a) 減衰量

減衰比 ζ_A を確認するための自由振動波形は、交通外乱により橋梁を介してTMDの振動質量が振動後、収束する際の波形を用いた。図5-5-3に示す発電型TMDマスに設置した振動加速度計を用いて計測を行った。解析は振動質量に設置した振動加速度計データより自由振動開始加速度の安定している個所を抽出し、式(5.14)を用いて自由振動波形の確認を行った。

$$\zeta_A = \frac{1}{\sqrt{\left\{ \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right)} \right\}^2 + 1}} \quad (5.14)$$

本測定については振動質量の自由振動開始加速度を200cm/s²と定めた。減衰比 ζ_A の算出方法は、加速度と同時に計測された変位の自由振動波形から解析開始の時間より4~5波長の値を抽出し算出を行った。3つの波形よりそれぞれの減衰比を算出し、その平均値を減衰比として評価した。自由振動波形を用いた減衰比 ζ_A の算出例を図5-5-4および表5-5-1に示す。

b) 制振効果

発電型TMDの橋梁振動制振効果および低周波音低減効果を検証するため、TMDのオイルダンパ部を(a)オイルダンパ、(b)電気回路抵抗値30Ω、(c)電気回路抵抗値100Ω、(d)電気回路抵抗値200Ωに設定し稼働した状態で、橋梁の振動特性を把握するための振動加速度と低周波音の測定をそれぞれ行った。測定点は図5-4-5に示す1/2径間部において、振動加速度計は補強縦桁下フランジ上、低周波音レベル計は裏面吸音板上とした。測定時間は、それぞれの実験期間中で大型車交通量の多い10分間を抽出した。

測定した振動加速度の周波数特性を図5-5-5に示す。TMDの対象固有振動数3.5Hz付近を見ると、30Ωでは制振効果が見られずパワースペクトル値の卓越が見られるが、オイルダンパは制振効果によりパワースペクトル値の卓越が低減しており、100Ωと

200 Ω も同様に制振効果が見られる。しかしながら、それぞれの測定日時が異なるため同一交通条件ではなく外力が異なるため、パワースペクトル値を比較し評価することができない。そこで、TMDの対象固有振動数外である10Hzから30Hzでのパワースペクトル値の総和をそれぞれ算出し、測定時間中の大型車交通量と比較した結果を表5-5-2に、その相関関係を図5-5-6に示す。パワースペクトル値の総和と大型車交通量は高い相関を示していることから、大型車交通量の平均値に対する比を乗じて交通条件を基準化した。TMDの対象固有振動数付近の3.25Hzから3.5Hzでのパワースペクトル値を同様に算出し、10Hzから30Hzでのパワースペクトル値の総和との比を用いて発電型TMDの制振効果を評価した。求めた結果を表5-5-3、図5-5-7および図5-5-8に示す。発電を目的とした30 Ω では制振効果が小さいため10Hz~30Hzのパワースペクトル比が大きいが、ピーク振動レベル低減を目的とした100 Ω では制振効果がオイルダンパと同等であり、吸収エネルギーを目的とした200 Ω もオイルダンパや100 Ω には劣るものの制振効果が見られる。

振動加速度と同様に、低周波音について分析を行った。測定した振動加速度の周波数特性を図5-5-9に、10Hzから30Hzでのパワースペクトル値の総和をそれぞれ算出し、測定時間中の大型車交通量と比較した結果を表5-5-4に、その相関関係を図5-5-10に示し、3.25Hzから3.5Hzでのパワースペクトル値を同様に算出し、10Hzから30Hzでのパワースペクトル値の総和との比を用いて発電型TMDの制振効果を評価した。求めた結果を表5-5-5、図5-5-11および図5-5-12に示す。パワースペクトル値の総和と大型車交通量の相関が振動加速度ほど高くないものの、図5-4-8で示すように振動加速度と低周波音は時刻歴波形の形状が概ね同じであり橋梁振動が大気に伝播し低周波音を放出していることから、振動加速度と同様の傾向が見られ、ピーク振動レベル低減を目的とした100 Ω では低周波音の低減効果はオイルダンパと同等であった。

以上より、制振効果は概ね数値シミュレーション結果と一致することから、発電型TMDは通常のTMDと同様に設計を行うことが可能であることが示された。

c) 発電量

電気回路抵抗値30 Ω，100 Ω，200 Ω それぞれの実験期間中に発電した電気量を表5-5-6および図5-5-9に示す。各抵抗の設定による発電量を比較するため、大型車交通量と橋梁の振動エネルギーの相関性に着目し、大型車交通量に対する発電エネルギーを用いる。1時間当たりの発電エネルギーを1時間当たりの大型車交通量で割ることで、大型車1台当たりの時間平均の発電エネルギーを算出し、単位発電エネルギー[μWh/car]と定義する。各抵抗の単位発電エネルギーの計測期間の平均値を表5-5-6および図5-5-13に示す。それぞれの抵抗毎の単位発電エネルギーを比較すると、発電を目的とした30 Ω の設定抵抗で単位発電エネルギーが最大となっていることがわかる。

このことから、抵抗値の設定によって発電エネルギーが調整できることを実際の橋梁における発電実験から示すとともに、数値シミュレーションによる発電型TMDの抵抗値設計の有用性を明らかにした。

5-6 まとめ

本研究では、環境問題対策として供用中の高速道路橋に設置し稼働している TMD において、電磁減衰装置を有する発電型 TMD の提案を行い、橋梁振動の制振効果、低周波音の低減効果および電磁減衰装置の発電量を把握するため、供用中実大橋梁による道路交通振動実験を行った。結果、以下の結論を得た。

- 1) オイルダンパを電磁減衰装置に置き換える発電型TMDを提案し、道路交通振動を用いた実大橋梁実験により、オイルダンパを減衰装置としたTMDと、ピーク振動低減を重視した電磁減衰装置を用いた発電型TMDで橋梁振動制振効果および低周波音低減効果が同等であることから、発電型TMDの実用化が可能であることを示した。
- 2) 電磁減衰装置の電気抵抗値を変化させることで、TMDの対象周波数付近における橋梁振動および低周波音の卓越の調整が可能であることを示した。
- 3) 実大橋梁実験より発電型TMDの橋梁振動制振効果は概ね数値シミュレーション結果と一致したこと、低周波音も低減効果が見られたことから、一般的なTMDと同様、道路橋用の制振対策装置および低周波音低減対策装置として設計を行うことが可能であることを示した。

環境対策として設置されている橋梁制振用 TMD において、オイルダンパを電磁減衰装置に変更することで電磁制御により橋梁振動制振効果および低周波音低減効果の調整を容易に行うことができる。このことから、大型車交通量の多い時間帯や環境問題が発生しやすい時間帯を考慮し、時間帯に応じて橋梁振動制振・低周波音低減目的や発電目的などに設定を変更することが可能である。環境対策工である TMD に環境発電を付加することで、TMD の対象周波数や減衰量などをモニタリングするシステムの電源供給や、橋梁の長寿命化において有効とされるヘルスマニタリングの電源供給を確保できる装置になり得る可能性があることなど、TMD の更なる高度化が期待できると考えられる。

参考文献【第5章】

- 1) 徳永法夫, 福島昭則, 西村昂: 高架道路から発生する低周波音の音響特性に関する考察, 土木計画学研究・論文集, No.17, 2000.
- 2) 河田直樹, 川谷充郎: 境界要素法による道路橋交通振動に起因する低周波音の理論解析, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.702-712, 2006.
- 3) 長船寿一, 山本稔: 高速道路橋の騒音・振動対策, 橋梁と基礎 2011年11月号, 2011.
- 4) 深田幸史: 車両走行により発生する橋梁の振動・低周波音に対する対策技術, 騒音制御, Vol.40, No.2, pp.61-64, 2016.
- 5) 村井逸郎: TMD による橋梁振動および低周波音抑制効果に関する実橋実験, 橋梁振動コロキウム'01 論文集, 2001.
- 6) 三上 修一, 高木 善之, 山崎 智之, 坪田 豊, 大島俊之: 供用から7年経過した橋梁の振動特性の変化に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol62, pp.61-62, 2005.
- 7) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和宏: 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集, V-53, No.690, pp.121-132, 2001.
- 8) 深田幸史, 室井智文, 樺山好幸, 梶川康男: 路面補修前後の長期モニタリングから評価した周期性路面の橋梁に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, pp.121-136, 2011.
- 9) 阿部雅人, 藤野陽三: マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の基本的特性, 土木学会論文集, No.465/ I -23, pp.87-96, 1993.
- 10) 阿部雅人, 藤野陽三: マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の性能評価式, 土木学会論文集, No.465/ I -23, pp.97-106, 1993.
- 11) 吉中進, 川口健一: 大スパン建築構造における複数モード制御のための MMD 法に基づく分散型 TMD に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp.123-130, 2004.

- 12) 竹谷晃一，佐々木栄一，岩吹啓史，長船寿一，洞宏一，名児耶武：橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの開発と実橋梁への適用，土木学会論文集 A1，Vol.72，No.2，pp.290-301，2016.
- 13) K.Takeya：Design and Development of Vibration Energy Harvesters using Tuned-Mass Systems for Bridge Structures，東京工業大学学位論文，2017.
- 14) 特許機器株式会社：
http://www.tokkyokiki.co.jp/pdf_new/tokkyokiki_catalog_54%20md.pdf
- 15) 竹谷晃一，佐々木栄一：橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの構造形式と設計に関する検討，土木学会論文集 A1，vol71，No.2，pp.267-276，2015.
- 16) 田口典夫，花里利一，池田能夫，石田理永：道路交通振動の加振力特性，地盤環境振動の予測手法に関する研究 その2，日本建築学会環境系論文集，Vol.73，No.633，pp.1241-1247，2008.

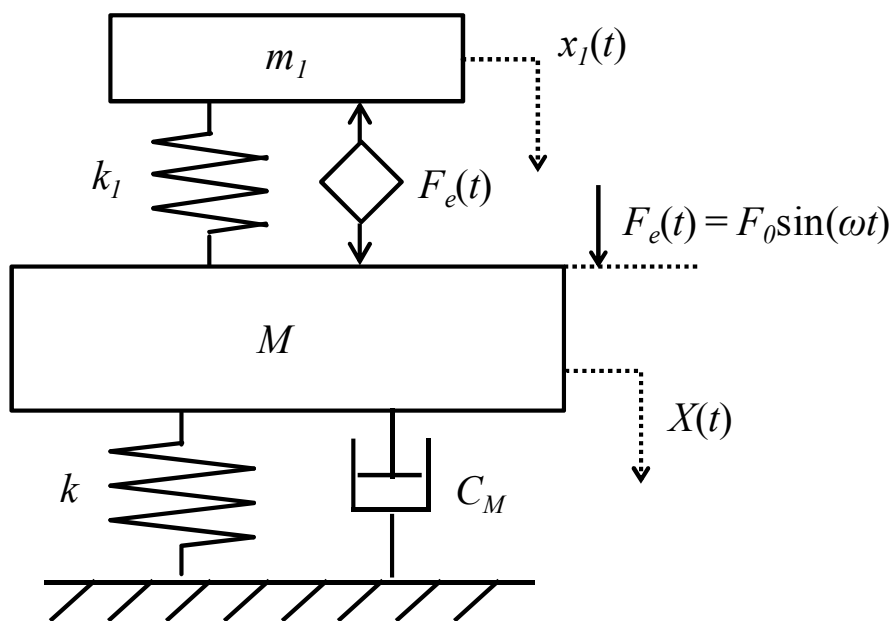


図5-2-1 単質点同調質量系発電デバイスと橋梁の解析モデル

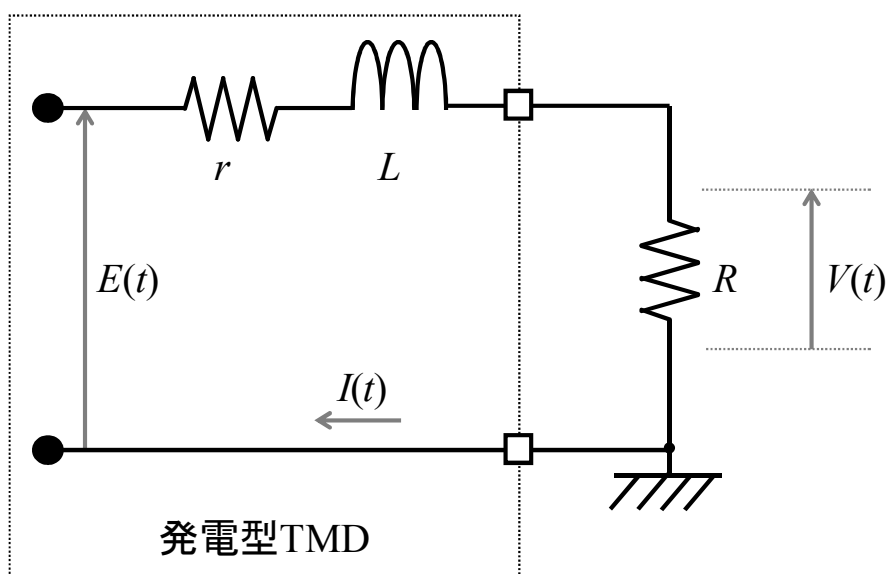


図5-2-2 電磁減衰装置を有する発電型TMDの電気回路

表5-2-1 電磁減衰装置の電磁気特性実験概略

加振装置	Transcend	MTS810
データロガー	KEYENCE	NR-600 HV04 ユニット
データ収録用 PC	Panasonic	Let's note CF-SX3
ひずみ式ロードセル	(株) 東京測器	TCLZ-5KNA
動ひずみ計	(株) 東京測器	DPM-711B



図5-2-3 加振装置への電磁減衰装置の設置図

表5-2-2 NR-600 HV04ロガーの設定条件と分解能

設定条件	
サンプリングレート	1000 Hz
AD 分解能	14 bit
計測データ	計測分解能
可動子変位 [mm]	6.10 μm
可動子に作用する荷重 [N]	15.3 mN
発生起電力 [V]	1.22 mV

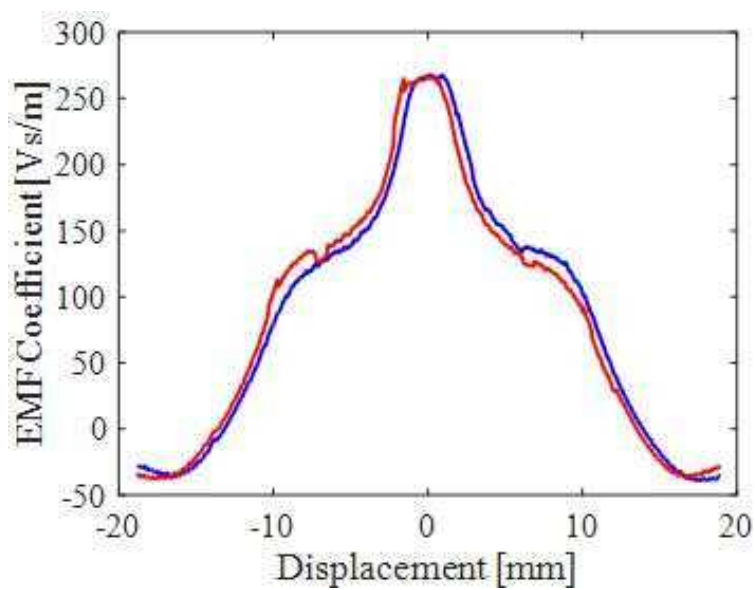


図5-2-4 電磁減衰装置の起電力係数と可動子位置の関係¹³⁾

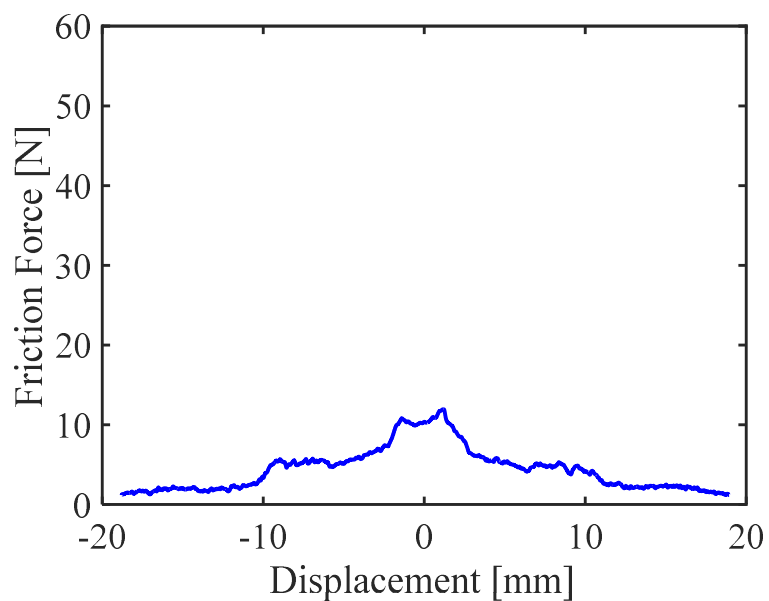


図5-2-5 電磁減衰装置の動摩擦力と可動子位置の関係

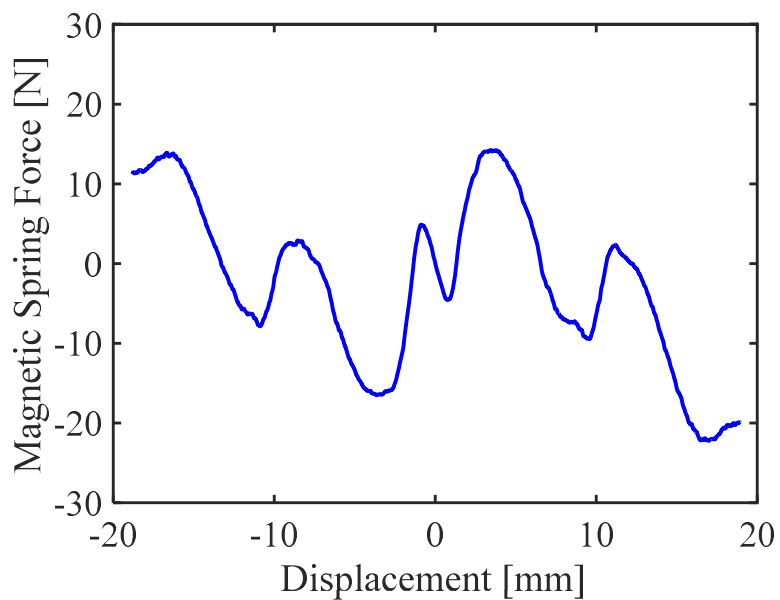


図5-2-6 電磁減衰装置の磁気ばねと可動子位置の関係

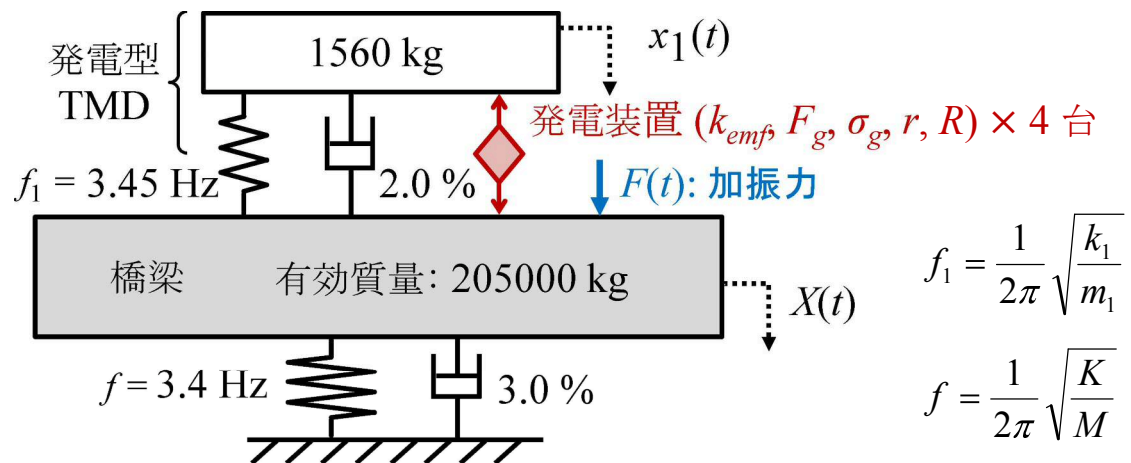


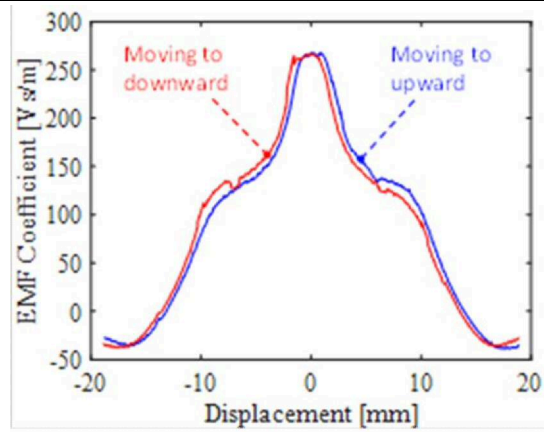
図 5-3-1 発電型 TMD を設置した橋梁のシミュレーションモデル

表 5-3-1 数値シミュレーションに必要なパラメータ

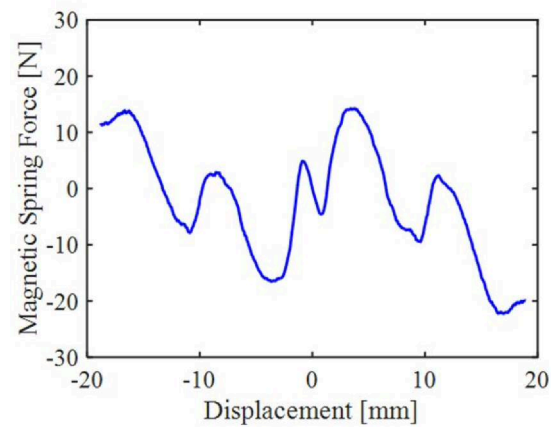
橋梁			発電型 TMD		
f	3.40	Hz	f_1	3.45	Hz
M	205,000	kg	m_1	1,560	kg
ζ	3.0	%	ζ_1	2.0	%

電気抵抗値 R の算出

起電力係数
 k_{emf}



磁気ばね特性
 F_g



内部抵抗 r 10.3 Ω

摩擦抵抗 σ_g 10N, 30N, 50N

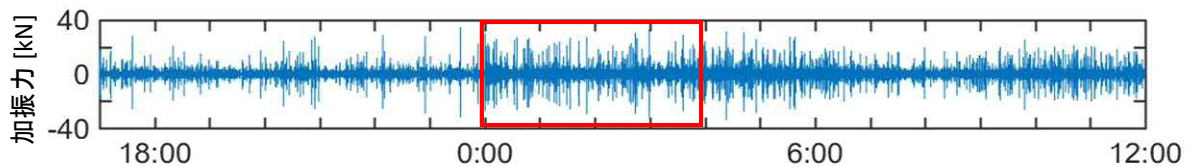
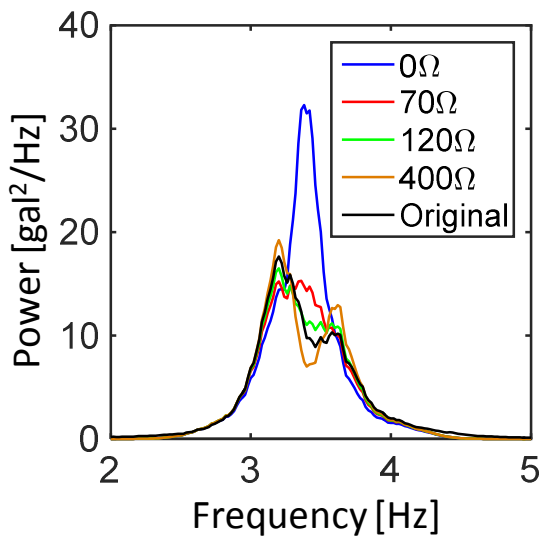
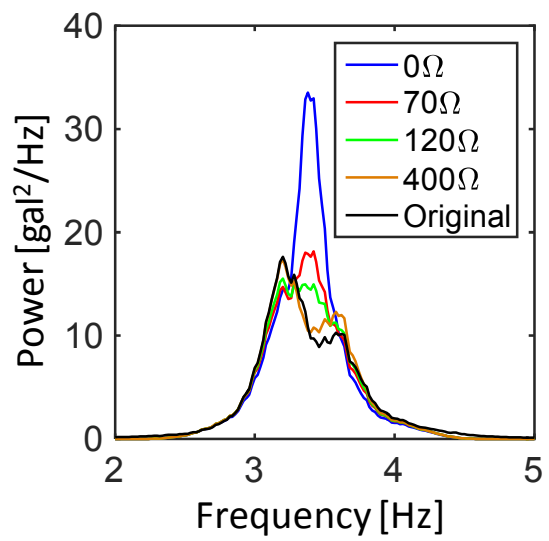


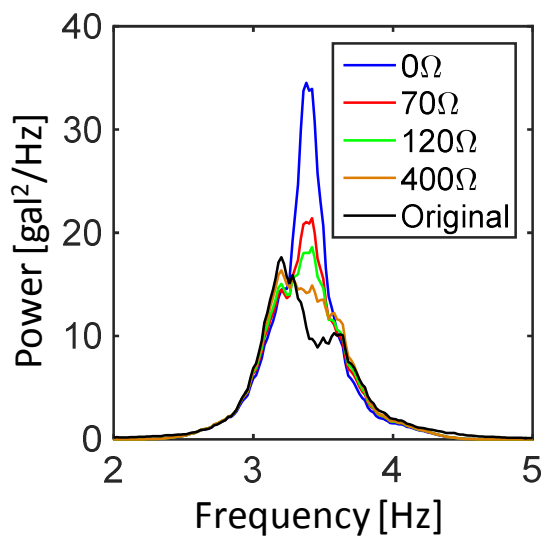
図 5-3-2 交通荷重による加振力 (18 時間)
(赤枠内は数値シミュレーションに利用した加振力)



(a)発電型 TMD の合計摩擦抵抗が 10 N のとき



(b)発電型 TMD の合計摩擦抵抗が 30 N のとき



(c)発電型 TMD の合計摩擦抵抗が 50 N のとき

図 5-3-3 発電型 TMD を橋梁に設置した時の橋梁加速度のスペクトル密度関数と設定抵抗値

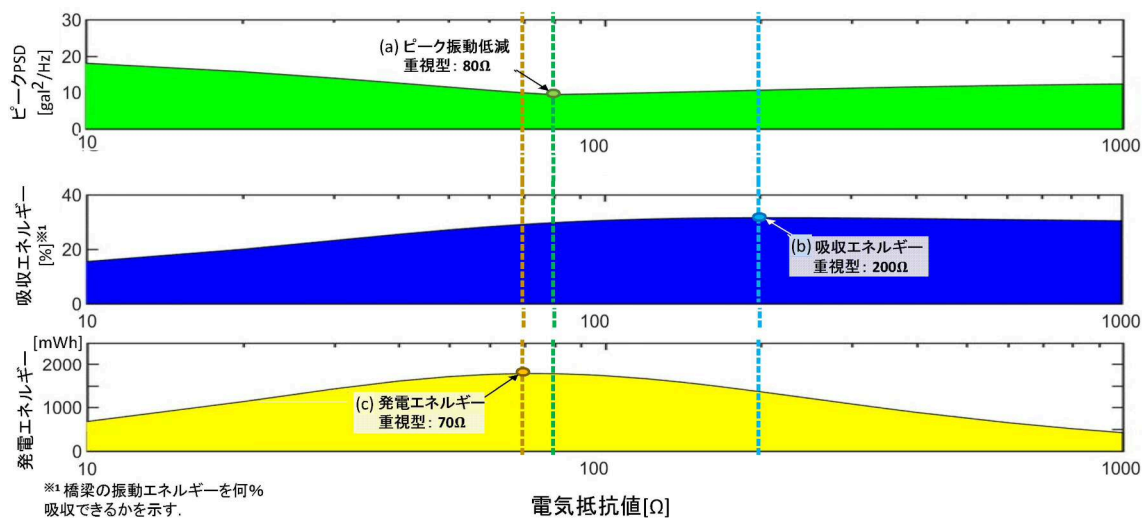


図 5-3-4 橋梁加速度のパワースペクトル密度関数の最大値，吸収エネルギー及び発電エネルギー結果（合計摩擦抵抗 10 N）

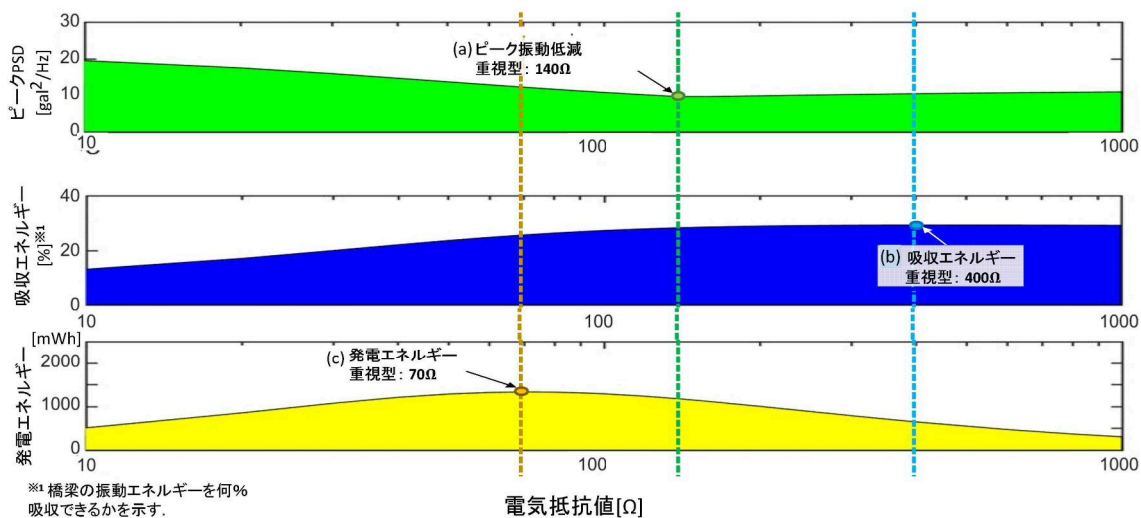


図 5-3-5 橋梁加速度のパワースペクトル密度関数の最大値，吸収エネルギー及び発電エネルギー結果（合計摩擦抵抗 30 N）

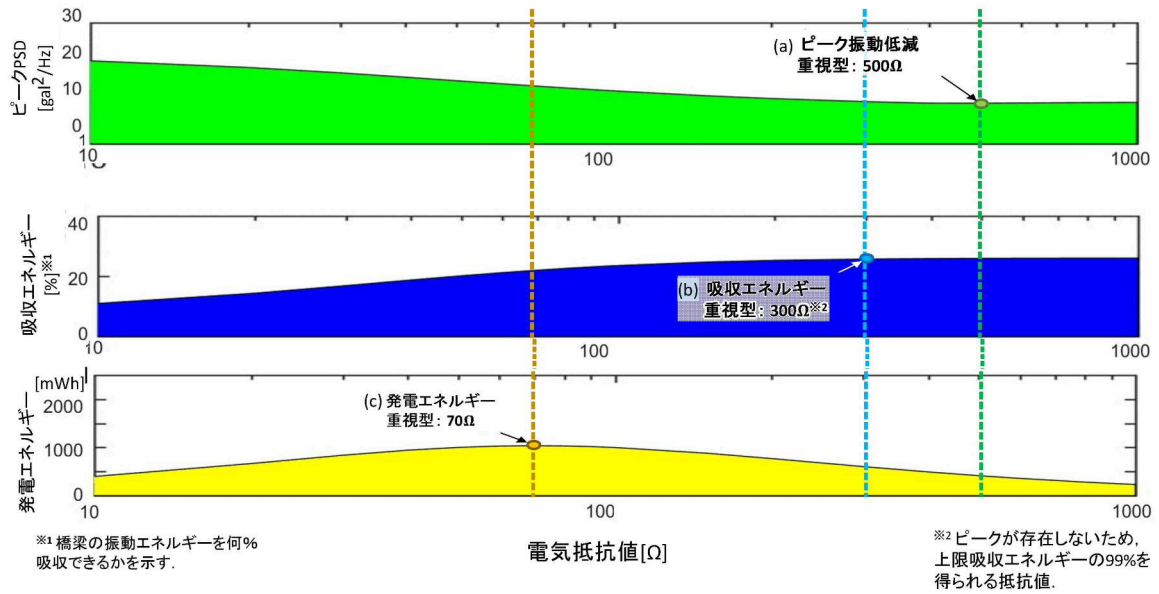


図 5-3-6 橋梁加速度のパワースペクトル密度関数の最大値，吸収エネルギー及び発電エネルギー結果（合計摩擦抵抗 50 N）

表 5-3-1 発電型 TMD の発電エネルギー，橋梁加速度のパワースペクトル密度関数の最大値及び吸収エネルギーのまとめ

発電型TMDの摩擦力	(a)ピーク振動低減重視			(b)吸収エネルギー重視			(c)発電エネルギー重視		
	10N	30N	50N	10N	30N	50N	10N	30N	50N
最適電気抵抗値	80Ω	140Ω	500Ω	200Ω	400Ω	300Ω	70Ω	70Ω	70Ω
ピーク振動レベル[gal ² /Hz]	9.42	9.65	10.04	10.63	10.44	10.46	9.89	12.24	14.36
吸収エネルギー[%]	29.77	28.24	25.95	31.60	29.23	25.71	29.14	25.60	22.02
発電エネルギー[mWh]	1775	1172	415	1361	645	602	1778	1330	1036

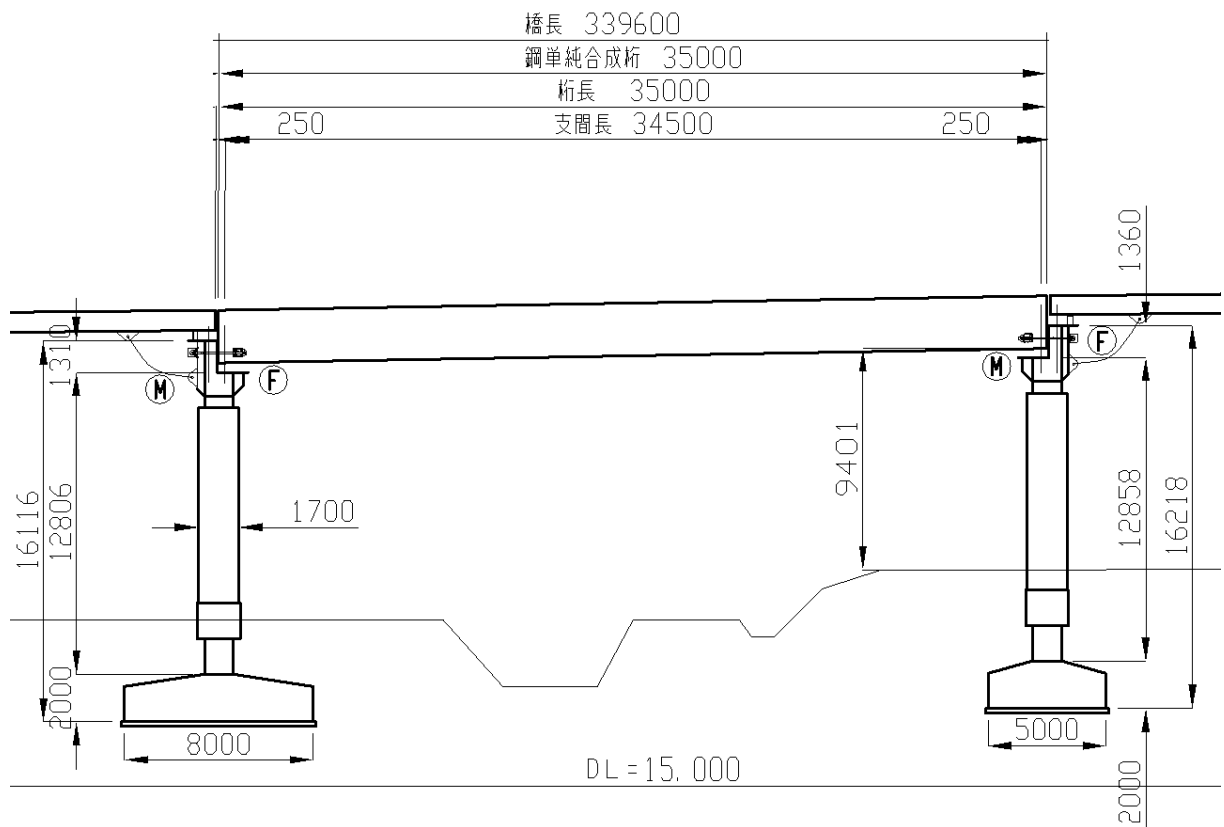


図5-4-1 橋梁一般図

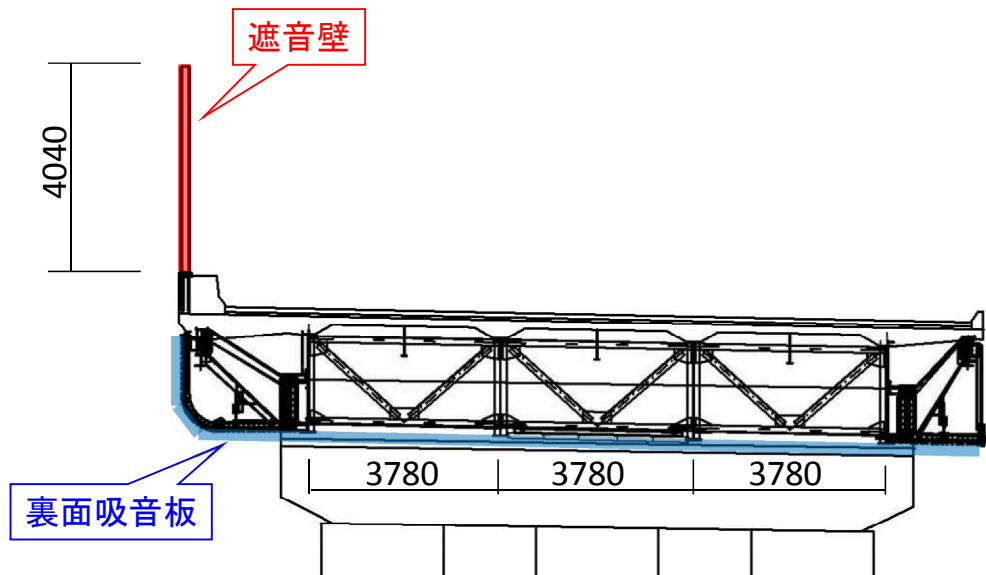


図5-4-2 環境対策工（遮音壁及び裏面吸音板）

表 5-4-1 TMD 諸元

質量（1基あたり）	1,500 kg
固有振動数	3.45 Hz
減衰比	4.2 %

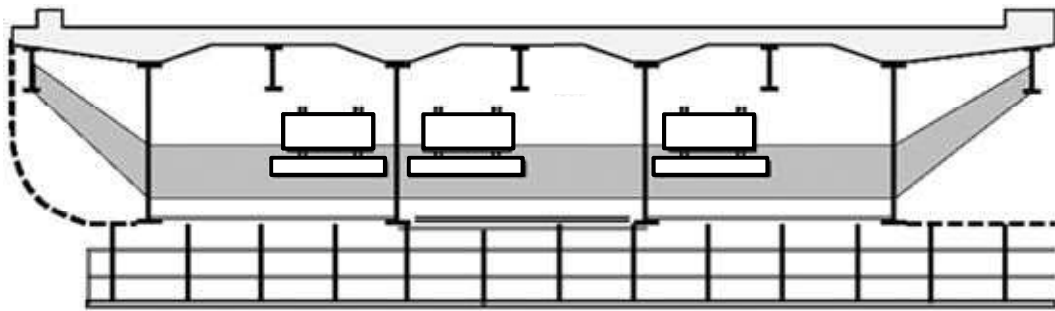


図5-4-3 TMD設置位置図

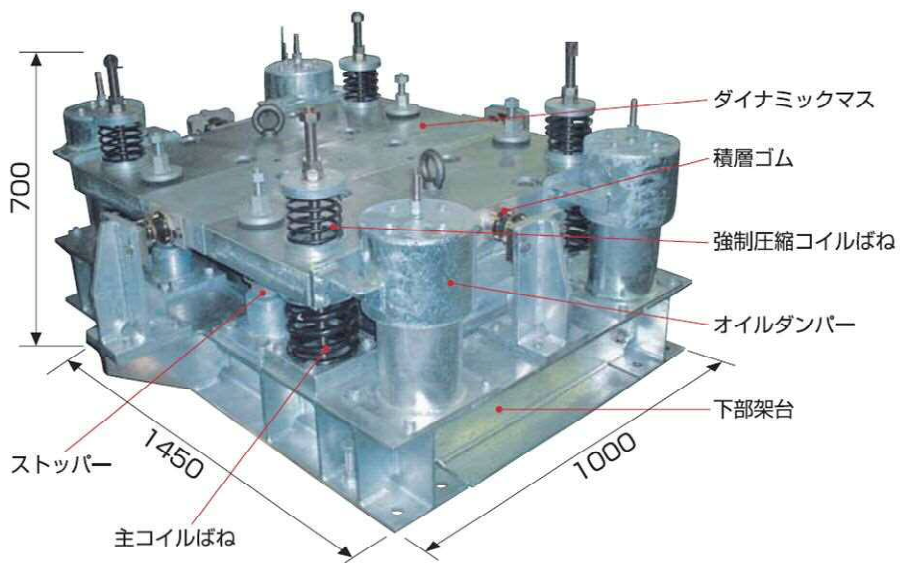
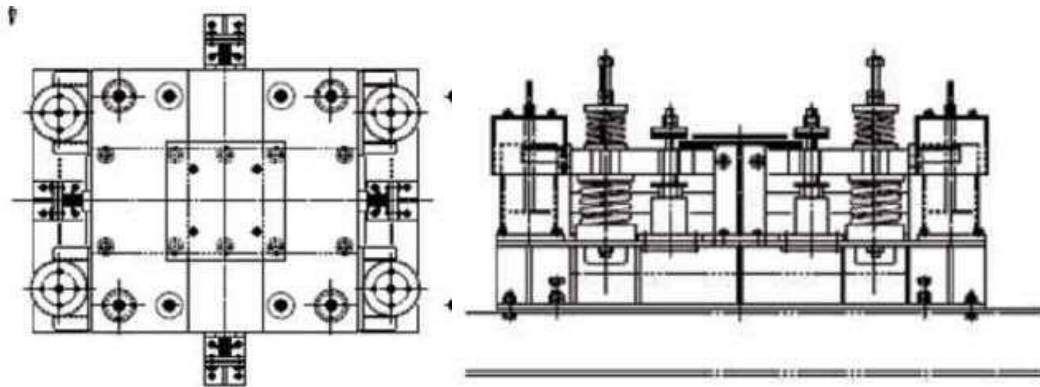


図5-4-4 設置されているTMDの形状及び寸法¹⁴⁾

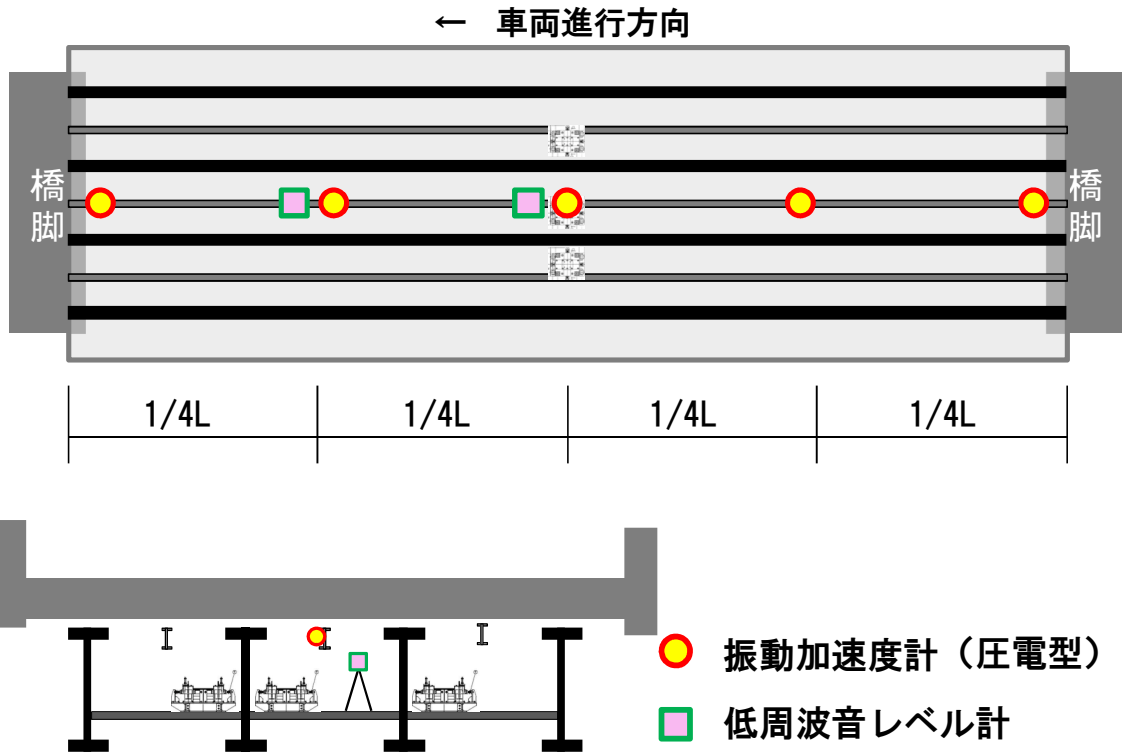


図5-4-5 測点配置図

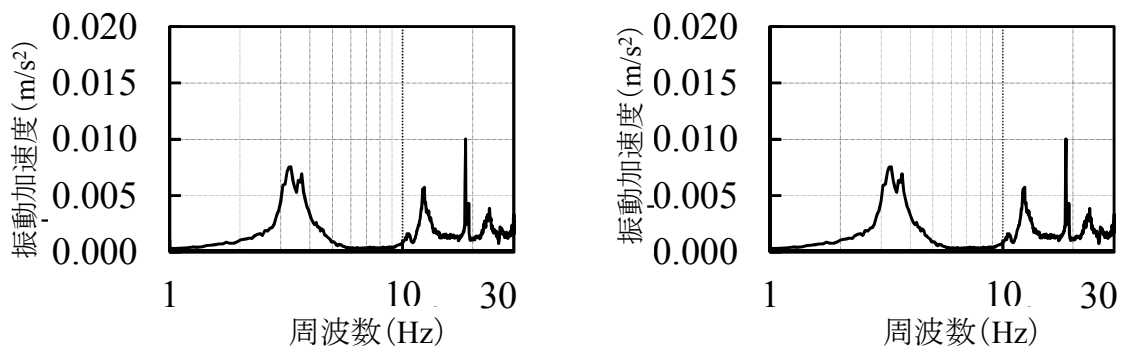


図5-4-6 主桁振動加速度 (1/2径間部) の周波数特性

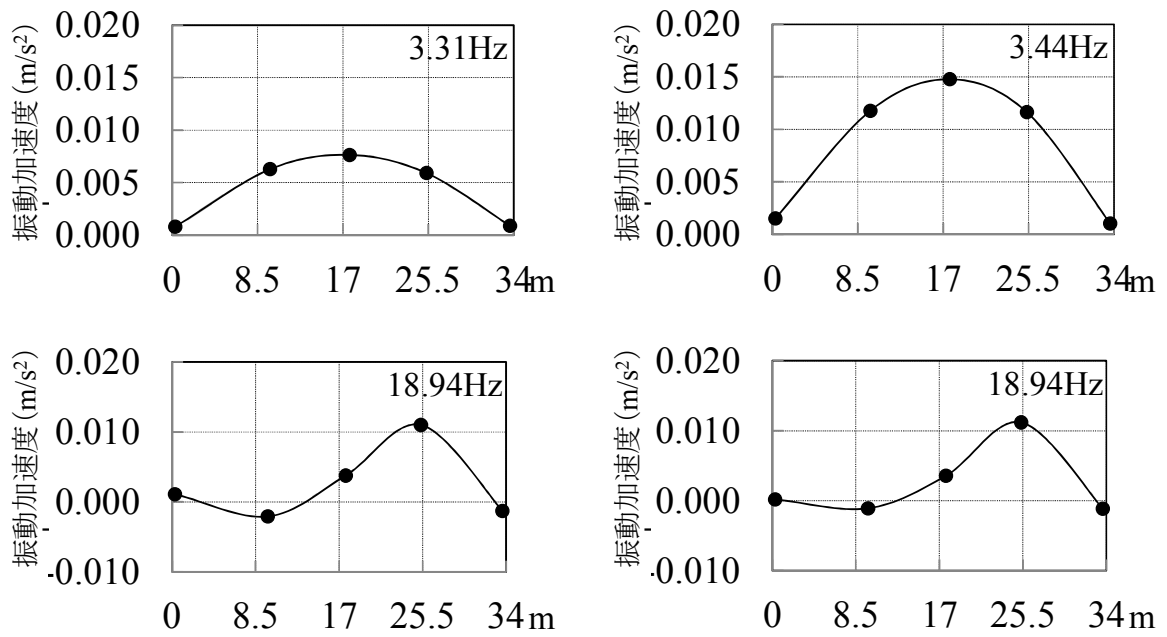


図5-4-7 振動モード図

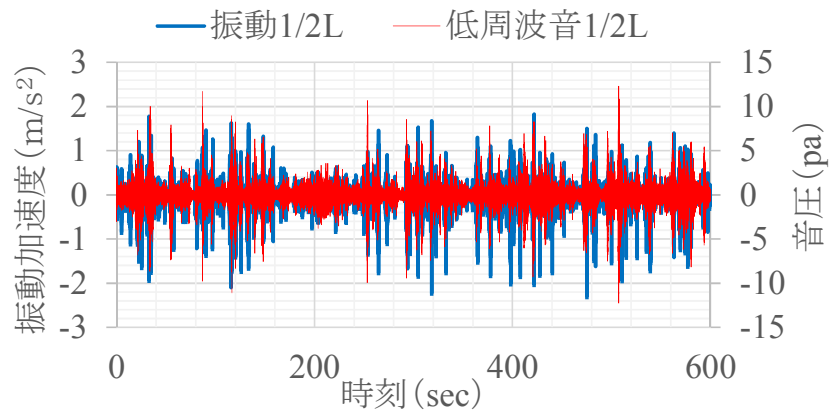


図5-4-8 振動加速度と低周波音圧レベルの時刻歴波形

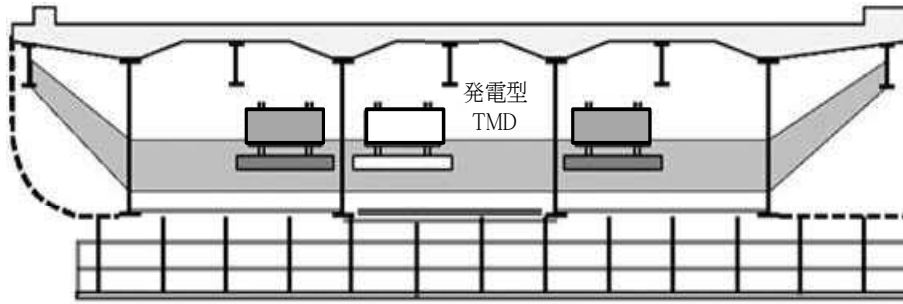


図 5-5-1 実験対象 TMD

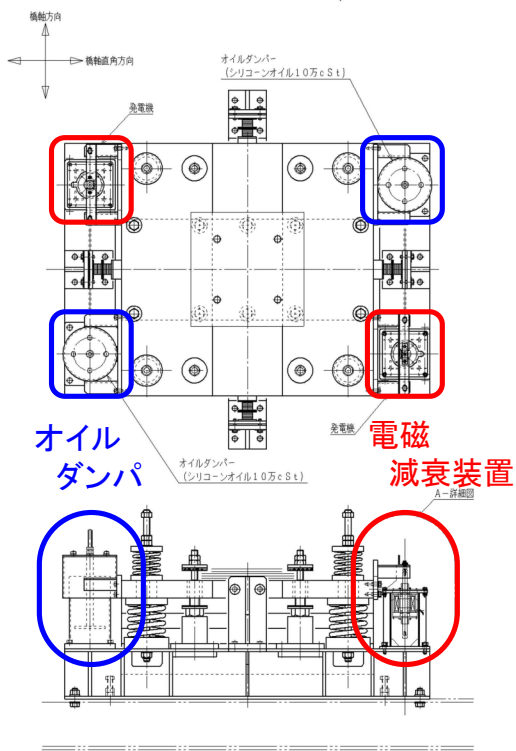


図 5-5-2 発電型 TMD (左) と電磁減衰装置 (右)

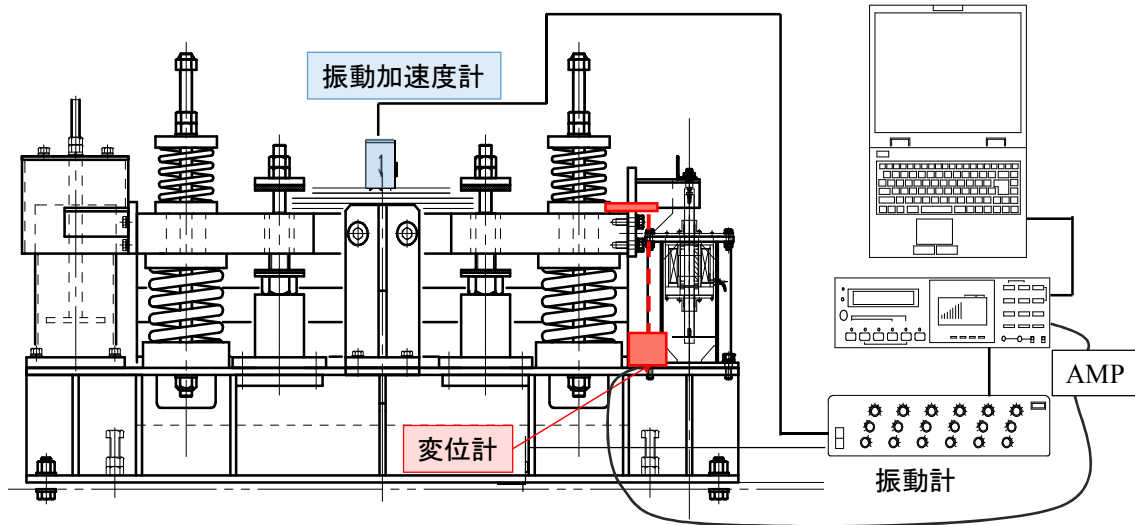


図 5-5-3 減衰量測定図

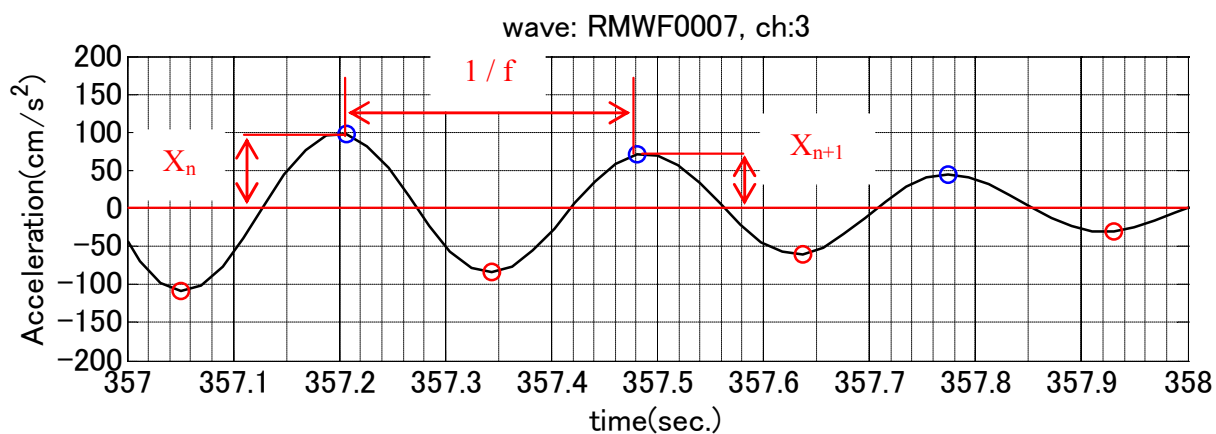


図 5-5-4 自由振動波形を用いた減衰比算出例

表 5-5-1 減衰比算出結果

回数	(1) 30 Ω	(2) 100 Ω	(3) 200 Ω
1	6.87 %	5.27 %	5.04 %
2	6.58 %	5.30 %	4.88 %
3	6.60 %	5.96 %	4.83 %
平均	6.68 %	5.51 %	4.92 %

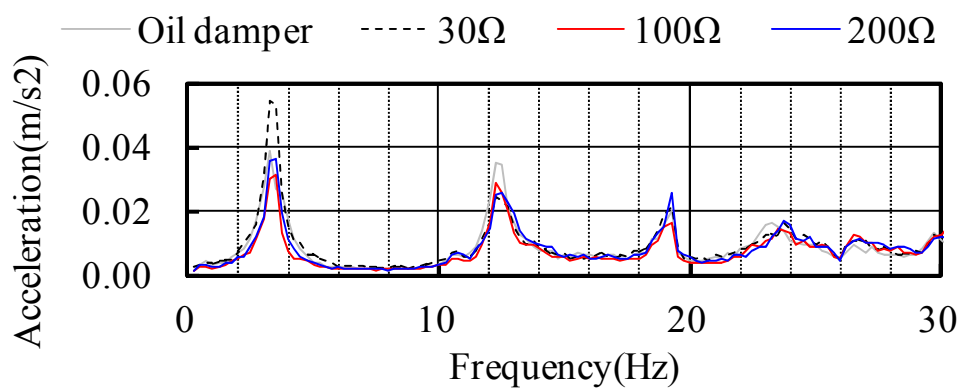


図 5-5-5 振動加速度の周波数特性

表 5-5-2 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和と大型車交通量

	Oil damper	30Ω	100Ω	200Ω
Power Spectrum (m/s ²)	0.754	0.761	0.685	0.750
Heavy Vehicle (cars)	278	288	247	282

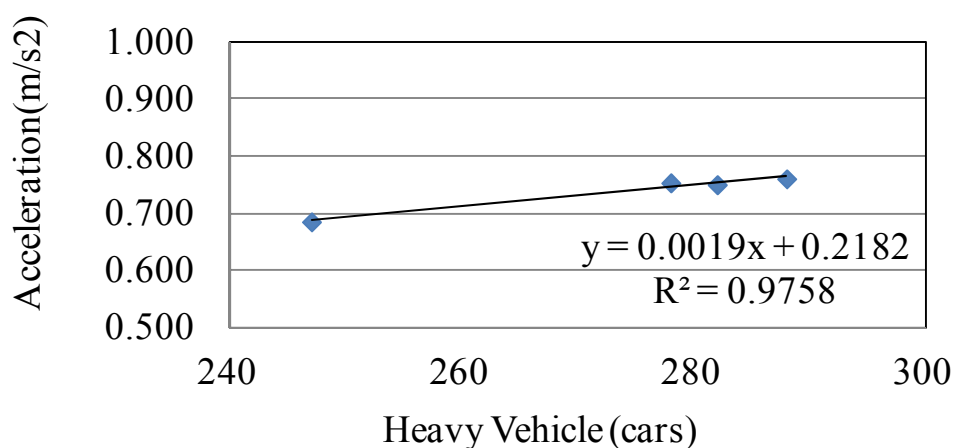


図 5-5-6 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和と大型車交通量の相関関係

表 5-5-3 3.25~3.5Hz と 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和比

	Oil damper	30 Ω	100 Ω	200 Ω
(1) 3.25-3.5 Hz	0.066	0.108	0.062	0.072
(2) 10-30 Hz	0.754	0.761	0.685	0.750
(3) Ratio	1.016	1.052	0.902	1.030
(1) / (2) × (3)	0.089	0.149	0.082	0.099

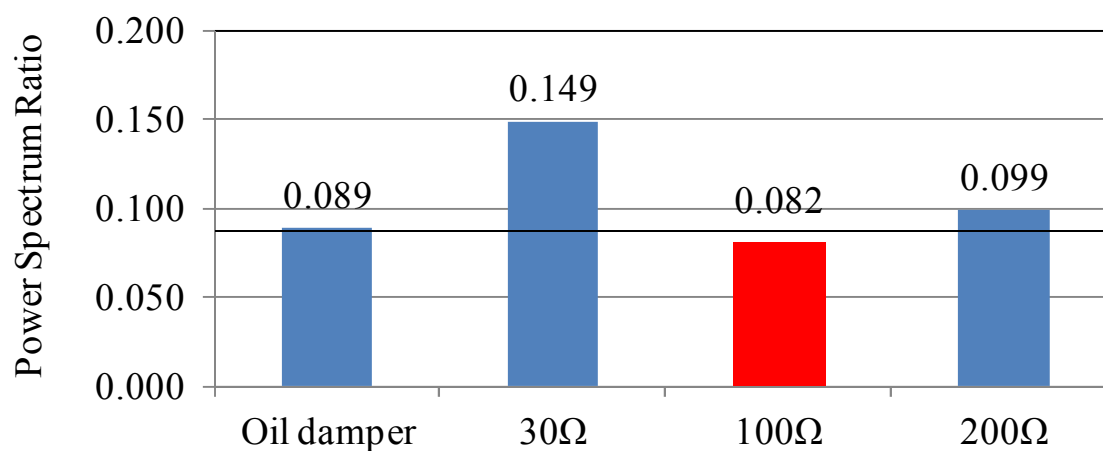


図 5-5-7 TMD 対象固有振動数付近のパワースペクトル比

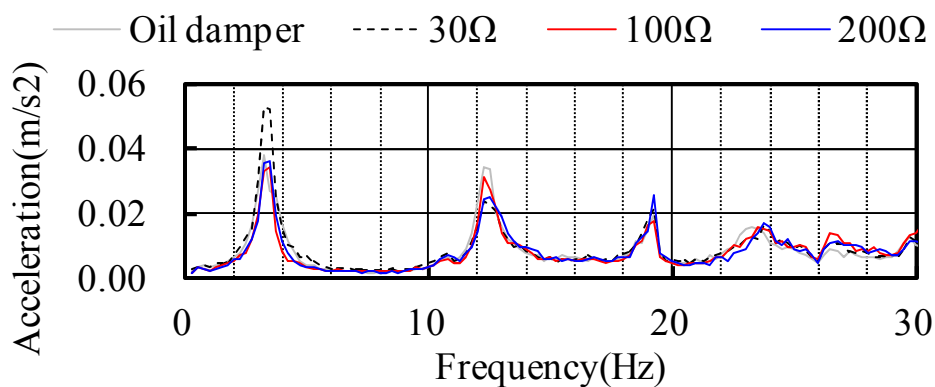


図 5-5-8 大型車交通量で基準化した振動加速度の周波数特性

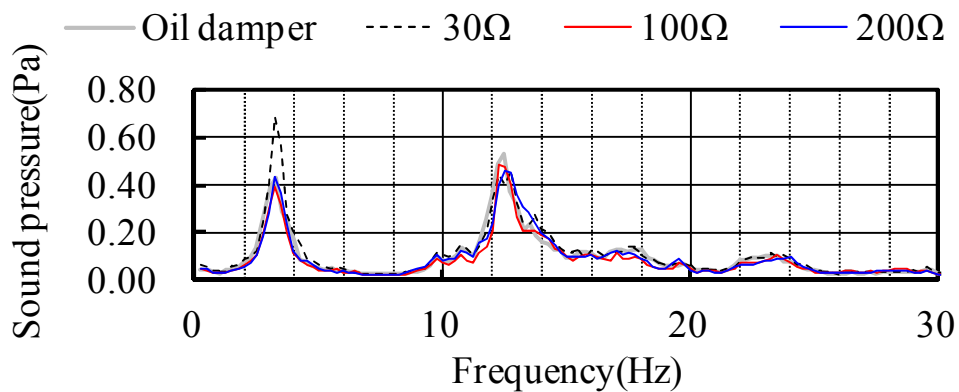


図 5-5-9 低周波音の周波数特性

表 5-5-4 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和と大型車交通量

	Oil damper	30Ω	100Ω	200Ω
Power Spectrum (Pa)	0.099	0.110	0.087	0.094
Heavy Vehicle (cars)	278	288	247	282

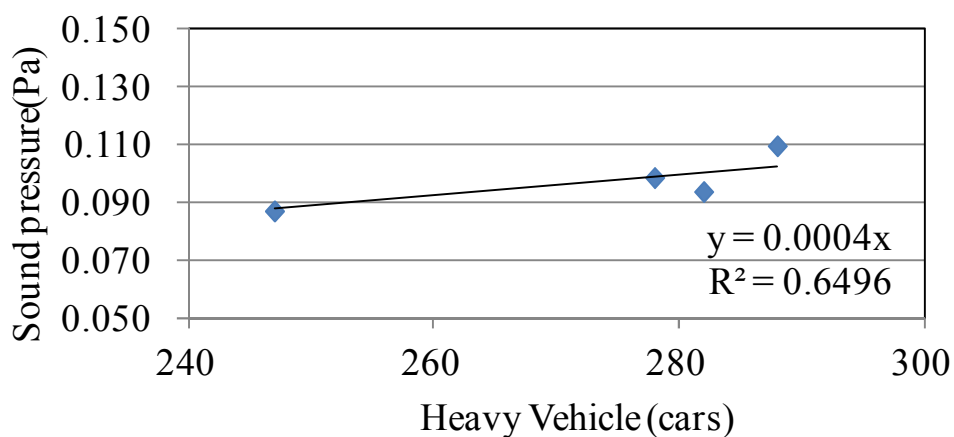


図 5-5-10 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和と大型車交通量の相関関係

表 5-5-5 3.25~3.5Hz と 10Hz~30Hz のパワースペクトル値総和比

	Oil damper	30Ω	100Ω	200Ω
(1) 3.25-3.5 Hz	0.720	1.254	0.712	0.802
(2) 10-30 Hz	8.304	8.728	7.383	7.961
(3) Ratio	1.016	1.052	0.902	1.030
(1)/(2)×(3)	0.088	0.151	0.087	0.104

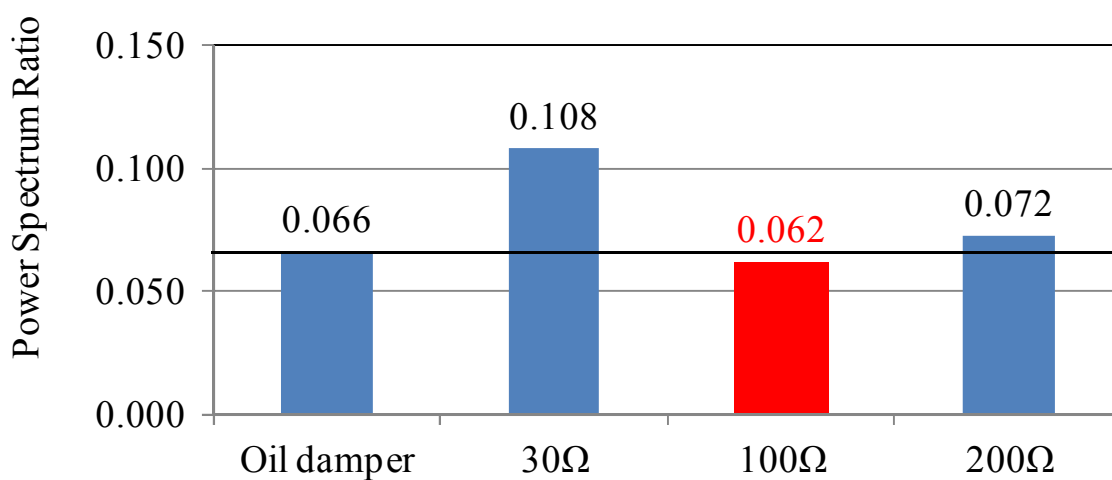


図 5-5-11 TMD 対象固有振動数付近のパワースペクトル比

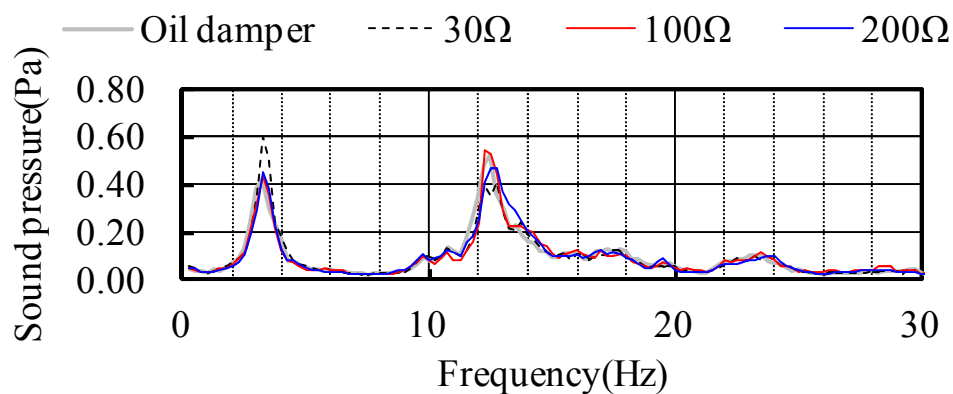
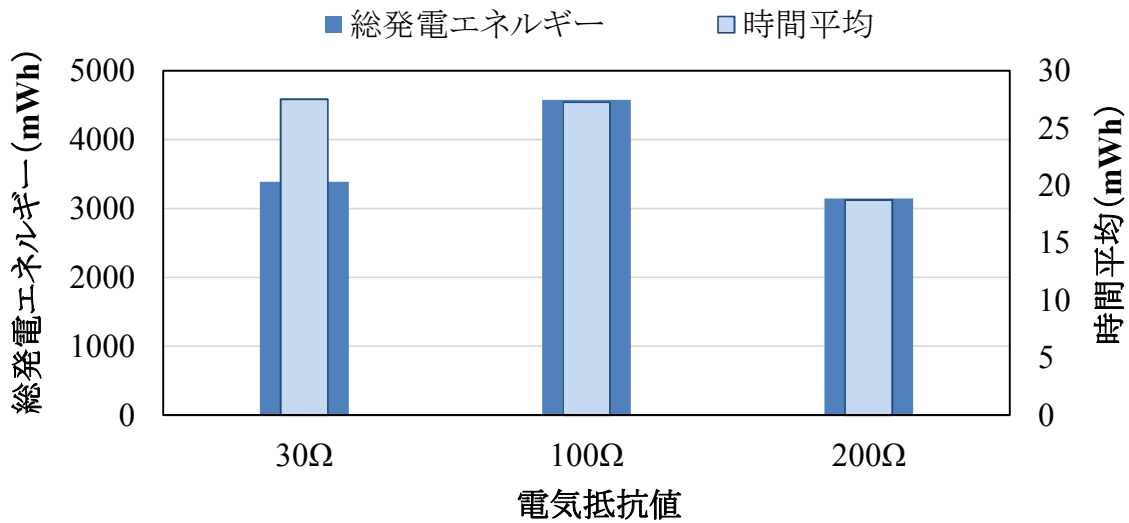


図 5-5-12 大型車交通量で基準化した低周波音の周波数特性

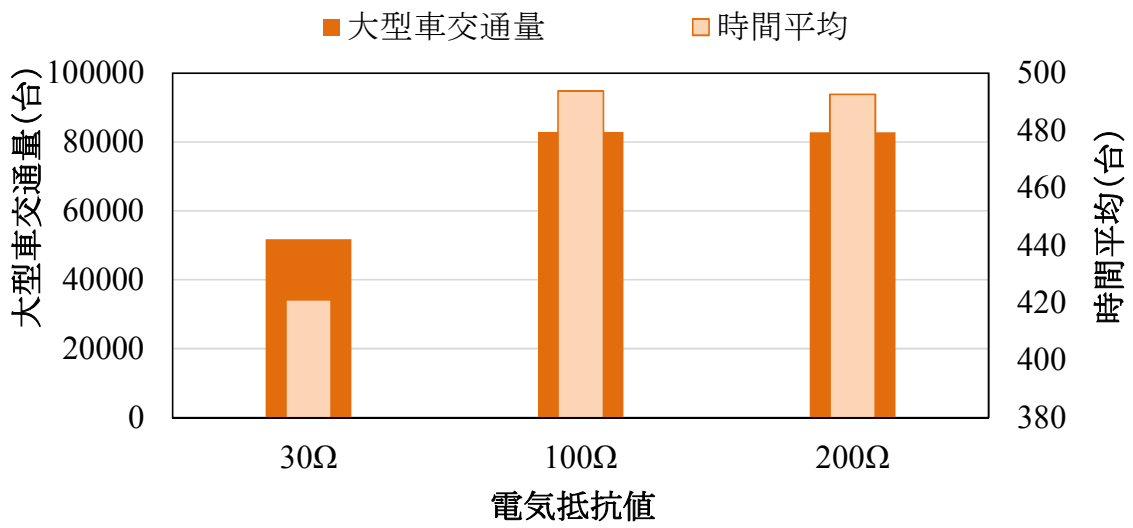
表 5-5-6 抵抗値別 (30, 100, 200 Ω) の発電量

		30 Ω	100 Ω	200 Ω
発電量	総発電エネルギー(mWh)	3384.03	4574.53	3147.71
	時間平均(mWh)	27.51	27.23	18.74
大型車 交通量	総交通量(cars)	51779	82959	82753
	時間平均(cars/h)	421.0	493.8	492.6
(大型車 1 台当たりの) 単位発電エネルギー (合計) (μWh/cars)		59.9	53.7	35.7

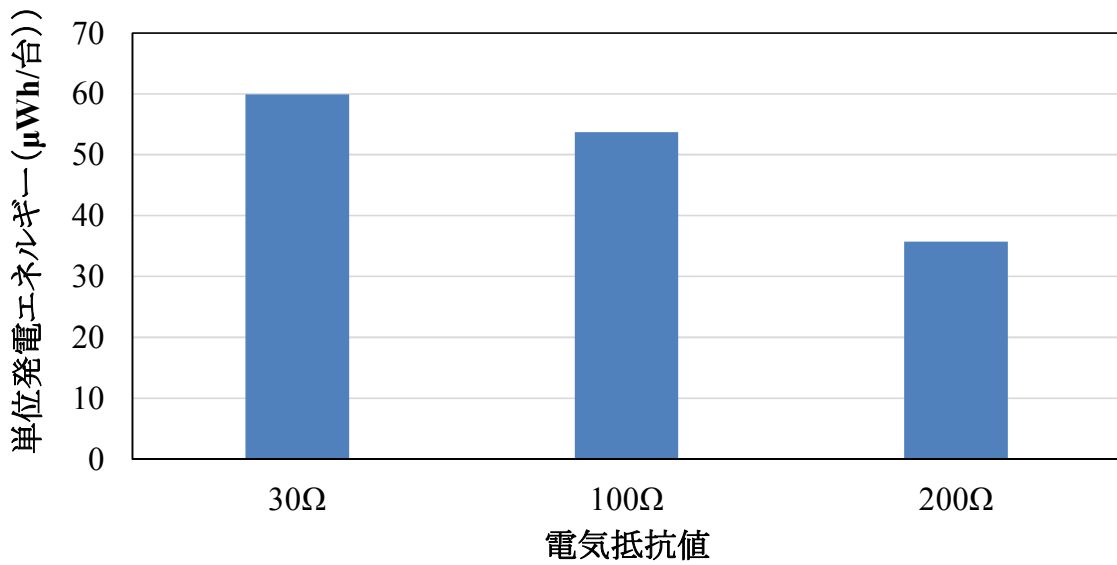


(a) 総発電エネルギー (mWh)

図 5-5-13 抵抗値別 (30, 100, 200 Ω) の発電量



(b) 大型車交通量 (台)



(c) 大型車 1 台あたりの発電エネルギー

図 5-5-13 抵抗値別 (30, 100, 200 Ω) の発電量 (つづき)

第 6 章

結論

6-1 本研究の結論

高速道路を取り巻く環境問題において、近年では橋梁に起因する振動および低周波音の問題が顕在化している。道路交通騒音、道路交通振動は、エネルギー平均や時間率レベルによる基準が法令で定められている一方で、瞬時的・突発的な振動や低周波音は法令で定められた基準がなく、環境問題対策に苦慮している。本研究では、これらの環境問題における発生源の振動特性および伝播経路を考慮した振動伝播特性を把握するとともに、環境対策工の一つである TMD に着目し、減衰装置をオイルダンパから電磁減衰装置に置き換え、その電気抵抗値を変化させることで容易に減衰量を調整できる発電型 TMD を提案した。さらに、橋梁振動の制振効果及び低周波音低減効果を検証することを目的として、供用中実大橋梁による道路交通振動実験を行い環境対策工としての発電型 TMD の適用性について検証を行った。ここで、その結論を改めて以下のとおりまとめる。

第 2 章「車両走行に伴う実橋梁の振動及び低周波音の分析」では、高速道路で多く走行する 3 軸および 4 軸の大型車両について、車両構造や走行条件により橋梁振動と低周波音の発生に与える影響因子を同一条件下にて比較検討するため、高速道路において橋梁数の多い支間長 30m の単純桁である実大橋梁で、高速道路で走行台数の多い構造の試験車の走行に伴う振動実験を行った。その結果、以下の内容が明らかになった。

- 1) リーフ式サスペンション車のばね上振動の卓越は 3Hz 付近にあり、たわみ振動 1 次モードと近接していた。また、リーフ式およびエア式サスペンション車のばね下振動の卓越は 10~20Hz 付近にあり、たわみ振動 2 次モードおよびねじれ振動 2 次モードと近接していたことから、30m 支間を有する対象橋梁では車両と橋梁の各振動次数間で連成振動が生じる原因がある。また、サスペンション上部の固有振動数は 3Hz 前後、サスペンション下部の固有振動数は十数 Hz 帯域で固有振動が見られるが、積載状態により固有振動数が変化することが考えられる。
- 2) 伝播経路の時刻歴波形及び周波数特性から、橋梁上部構造の振動は主桁及び支承を介し橋台に伝播し、橋軸および鉛直方向の振動が大きかった。低周波音は橋台を介さず主桁から大気中を伝播し、たわみ振動 1 次振動の影響が大きかった。
- 3) 橋台上の振動は、鉛直方向と橋軸方向が同程度の大きさであり、橋軸直角方向は小さく、この傾向は、車両の走行位置が異なっても変わらなかった。また、体感補正をかけた VL 値で評価すると、水平方向（橋軸および橋軸直角方向）に

比べて鉛直方向が大きく、ばね下振動領域（10-20Hz）の体感補正特性の差異が大きく寄与していると考えられる。

- 4) 橋梁振動やたわみは、全体的な傾向として走行速度の上昇に伴い振幅が大きい。また、エア式サスペンション車はリーフ式サスペンション車よりも振幅が小さく、試験車の構造の寄与が高い。
- 5) 低周波音は、全体的な傾向として走行速度の上昇に伴い低周波音圧レベルが大きくなる傾向を示す。エア式サスペンション車に比べてリーフ式サスペンション車の音圧レベルが高い傾向にある。段差の有無による顕著な差異はみられない。
- 6) 数量化理論 I 類による分析を行った結果、橋梁振動の予測値は、走行位置、積載有無及び走行速度の寄与度が高く、一方で低周波音の予測値は、サスペンション種別及び走行速度の寄与度が高いことを定量的に示した。

本章では、車両と橋梁の連成振動により、3Hz や 10~20Hz の周波数帯域において橋梁振動や低周波音が大きく発生する可能性がある一方で、これらの発生に寄与する影響因子である試験車の構造や積載の有無が固有振動数を変化させることから、橋梁振動制振対策および低周波音の低減対策において留意すべき事項と考えられることを示した。

第 3 章「振動の発生要因と伝搬経路に関する検討」では、供用後年月が経過した高速道路橋沿線で発生した振動問題について取り上げ、橋梁振動と家屋振動の因果関係を把握するための LDV を用いた橋梁振動と家屋振動の同期測定を行い、伝播経路の把握と原因について分析を行った。その結果、以下の内容について確認した。

- 1) 道路交通による橋梁振動は、上部構造から下部構造及び地盤と伝播するにつれて小さくなるが、家屋の構造特性により大きくなることもあり、その傾向は鉛直方向で大きく見られる。
- 2) 家屋に最も近い連続高架橋の橋脚はジョイントを有しており、家屋に伝播する振動はジョイント部の段差が起因していると考えられたが、上部構造及び家屋の振動分析結果から、大型車両がジョイント部手前の3径間連続部を走行する際に家屋振動が大きくなっていることが分かった。
- 3) 橋梁上部構造、下部構造および地盤の周波数特性における卓越と、家屋の周波数特性における卓越に一致する周波数帯域が見られ、特に鉛直成分にその傾向が見られた。

- 4) LDVを用いて橋梁振動を測定し振動モードを算出した結果、橋軸直角方向のたわみ振動一次モードの周波数帯域に含まれる振動数であった。
- 5) 本研究サイトの家屋振動は、実験結果から、供用開始から50年近く経過し、路面の平坦性低下による大型車両のばね下振動や上部構造の経年変化による橋軸直角方向の合成低下が要因となり、家屋振動が増幅しやすい周波数帯域の振動が発生しやすくなったことが要因と考えられ、これらについて数値解析により確認した。

本章では、今回の研究対象の沿線では、橋梁に起因する振動の伝播経路について研究を行った。得られた結果から、社会資本が直面する構造物の老朽化問題が、その構造に対する安全性の問題以外にも、環境問題に発展する可能性があることを示唆した。さらに、橋梁は経年変化により固有振動数が変化する可能性を示しており、これは第2章で示したように低周波音は橋梁振動から直接大気に伝播していることから、振動だけでなく低周波音についても同様の結果が推測される。これらのことから、環境問題対策では橋梁振動のモニタリングや設定条件を容易に変更できる環境対策工が望まれることを示した。

第4章「環境対策工としてのTMDの設置効果」では、数値シミュレーションおよび実橋実験よりTMDの橋梁制振効果および低周波音低減効果を検証し、さらにTMDの有用性と課題について検討した。結果、以下の内容が明らかになった。

- 1) TMDは、橋梁への衝撃荷重により発生する橋梁振動および低周波音の低減効果は少ないが、橋梁の自由振動により発生する橋梁振動および低周波音の低減効果が確認できた。
- 2) TMDは、橋梁振動の制振および低周波音の低減とともに、対象周波数のピークを低減することが明らかになったが、この低減されたエネルギーがピーク前後の周波数帯域に分散されることが確認された。
- 3) 大型車両は種別や走行形態により卓越周波数が異なること、橋梁の経年変化により橋梁の固有振動が変化する可能性があることのほか、TMDの稼動状態を確認することおよびTMDの設定を確認することが行われ難い状況にあることから、TMDの設定を容易に変更できる環境対策工が望まれる。

本章では、TMDは橋梁の自由振動を減衰させる効果が大きい装置であることから、TMDの設定変更は減衰量の調整でありTMDの設定変更が対象周波数とその周辺の周波数帯域の卓越に寄与することと考え、TMDの減衰装置を改良することが本章で述べた課題の解決につながることを示した。

第5章「減衰量を電磁制御する発電型 TMD の提案と適用性」では、環境問題対策として供用中の高速道路橋に設置し稼働している TMD において、オイルダンパを電磁減衰装置に置き換える発電型 TMD の提案を行い、橋梁振動の制振効果、低周波音の低減効果および電磁減衰装置の発電量を把握するため、供用中実大橋梁による道路交通振動実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) オイルダンパを電磁減衰装置に置き換える発電型 TMD を提案し、道路交通振動を用いた実大橋梁実験により、オイルダンパを減衰装置とした TMD と、ピーク振動低減を重視した電磁減衰装置を用いた発電型 TMD で橋梁振動制振効果及び低周波音低減効果が同等であることから、発電型 TMD の実用化が可能であることを示した。
- 2) 電磁減衰装置の電気抵抗値を変化させることで、TMD の対象周波数付近における橋梁振動および低周波音の卓越の調整が可能であることを示した。
- 3) 実大橋梁実験より発電型 TMD の橋梁振動制振効果は概ね数値シミュレーション結果と一致したこと、低周波音も低減効果が見られたことから、一般的な TMD と同様、道路橋用の制振対策装置及び低周波音低減対策として設計を行うことが可能であることを示した。

本章では、発電型 TMD が道路橋用の制振対策装置及び低周波音低減対策装置として実用化が可能であることを明らかにした。

6-2 今後の課題

以上、本研究は、環境対策として設置されている橋梁制振用 TMD において、オイルダンパを電磁減衰装置に変更することで、電磁制御により橋梁振動制振効果及び低周波音低減効果の調整を容易に行うことができる発電型 TMD を提案した。この発電型 TMD は、橋梁振動制振および低周波音低減の対策だけでなく、発電が可能であり、高度化された環境対策工といえる。

本研究から考えられる実用化に向けた課題として、屋外使用環境に耐えられるシステムとすることが挙げられる。本研究では第5章の実大橋梁実験は冬期に実施し、問題は生じなかったものの、外気温の低下や結露対策を検討する必要があると考えられる。屋外環境で安定したシステムの稼働が必要であると考えられる。

一方、本研究で得られた発電型 TMD のメリットは多い。減衰量は電磁減衰装置の電気抵抗値を変更することで容易に行えることから、たとえば、大型車交通量の多い時間帯や環境問題が発生しやすい時間帯を考慮し、その時間帯に応じて橋梁振動制振あるいは低周波音低減目的または発電目的などに設定を変更することが可能である。さらには、発電型 TMD に蓄電装置を付加することで安定した電源供給が可能となり、例えば、今後開発が期待される、TMD の対象周波数や減衰量などをモニタリングし異常値を検知した際に管理部署へ通報する自己診断システムの電源や、橋梁の長寿命化において有効とされるヘルスマニタリングの電源を確保できる装置になり得る可能性があることなど、TMD の更なる高度化が期待できると考えられる。

以上のことから、課題を解決することで、本研究の成果が今後の環境対策工あるいはヘルスマニタリング等の分野において活用されることを期待する。

謝 辞

本論文は、中日本高速道路株式会社及び株式会社高速道路総合技術研究所に所属し、ならびに東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻の社会人博士課程に在籍し実施してきた研究の成果をまとめたものです。その中では、非常に多くの方々からご指導、ご助言、ご援助を賜りました。

まず、主査の佐々木栄一准教授，副査の廣瀬壮一教授，岩波光保教授，竹村次朗准教授，千々和伸浩准教授，小林裕介特定准教授に，厚く御礼申し上げます。

佐々木栄一准教授には，研究の方向付けからまとめるに至るまで，非常に多くのご指導，ご助言を賜りました。特に，本論文の構成について最後まで悩みましたが，研究の内容を一つ一つ詳細に整理しストーリーを構成することで論旨を伝わりやすく組み立てる重要性について，細部にわたり親切丁寧かつ的確なご指導を賜りました。このことが，本論文執筆において最も重要であったと感じています。今後の研究あるいは業務において，意識して実践していきたいと考えております。また，社会人である著者を気遣って下さり，部署異動に伴う業務と研究のバランス，家庭との両立など，常に温かい心配りを賜り，時間の都合をつけてご指導頂いたことに大変感謝しております。心より深く感謝し御礼申し上げます。

さらに，副査の廣瀬壮一教授，岩波光保教授，竹村次朗准教授，千々和伸浩准教授，小林裕介特定准教授には，橋梁に起因する振動・低周波音など研究に関することのほか，研究者及び専門家として事象を深く掘り下げ検証する姿勢など，多くの貴重なご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

中日本高速道路株式会社の長船寿一氏には，著者がこのような研究を行うことができる機会を与えて頂き，研究全体を通じて本論文のご指導，ご助言を賜りました。また，研究期間中は常にお気遣いを頂きました。ここに深く感謝し御礼申し上げます。

本研究の遂行には，日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会の委員の皆様，度々貴重なご指導，ご助言を賜りました。特に，主査の株式会社建設環境研究所志村正幸博士，幹事の愛知工業大学佐野泰之教授，橋梁 WG 主査の金沢大学深田宰史教授，委員の埼玉大学松本泰尚教授，株式会社フジエンジニアリング濱博和博士，株式会社建設環境研究所上明戸昇博士，株式会社構造計画研究所矢部明人博士，株式会社ベネック振動音響研究所林健太郎氏には，橋梁実大実験の計画からデータ分析に渡り，多くの議論をさせて頂き，多大なるご協力とご指導，ご助言を賜りました。皆様に深く感謝し御礼申し上げます。

株式会社建設環境研究所志村正幸博士，上明戸昇博士，株式会社構造計画研究所矢部明人博士には，実験データの理論的な裏付けを行う解析業務において，多くのご指導，貴重なご意見を賜りました。ここに深く感謝し御礼申し上げます。

長崎大学の松田浩教授，宮崎大学の森田千尋教授，長崎大学の出水享博士には，レーザドップラ速度計を用いた測定や分析にご指導，ご協力，貴重なご意見を多く頂きました．ここに深く感謝し御礼申し上げます．

元佐々木研究室の竹谷晃一博士（山梨大学助教），元特許機器株式会社の山方啓司氏，比山義朗氏，特許機器株式会社長谷川毅氏には，発電型 TMD の設計，解析，製作及び実験に多大なるご援助を頂くとともに，貴重な議論を通じて研究上重要なことを多く気づかせて頂きました．心から御礼申し上げます．

株式会社高速道路総合技術研究所交通環境研究部環境研究室及び中日本高速道路株式会社八王子支社環境・技術管理部環境・技術チームの皆様には，本論文の研究遂行にご理解，ご援助を頂き，いつも温かく支えて頂きました．また，元株式会社高速道路総合技術研究所環境研究担当部長の中崎邦夫氏，環境研究室配属の中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社の安田英明氏，株式会社 ITL の椛澤吉広氏には，本論文執筆全体に渡りデータ整理や校正にご協力を賜りました．ここに感謝し御礼申し上げます．

佐々木研究室の方々には，様々なご指導，ご助言，ご援助を頂き，心を支えて頂きました．小林裕介特定准教授，田村洋助教，菅沼久忠博士，田辺篤史博士には，本論文に関係する様々な知見を賜り，研究遂行上重要なことを多く気づかせて頂きました．ここに深く感謝いたします．また，博士過程の学生として共に過ごした竹谷晃一博士，阿久津絢子博士，Dung Cao Vu 博士，Natdanai Sinsamutpadung 博士を始め，研究室に在籍した学生及び秘書の皆様には，多くのご援助を賜りました．社会人学生の著者を研究室に温かく受け入れて頂いたこと，大変感謝しております．心から御礼申し上げます．

最後に，いつも遠くから気遣ってくれている父，母，妹，著者を支えて下さった義母，そして著者をいつも心温かく励まし支え続けてくれた妻の正美と娘の美結菜に心より深く感謝いたします．

2018 年 12 月

岩吹 啓史