

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会 第Ⅱ期委員名簿（五十音順）

委員長
委員

梶川 康男	金沢大学 工学部土木建設工学科 教授
東 泰宏	北海道開発コンサルタント 橋梁部 主任技師
池田 彦彦	橋長大 長大橋一部
岩本 政巳	名古屋工業大学 工学部社会開発工学科
鳥野 清	九州共立大学 工学部土木工学科 教授
海野 武幸	橋タイヨウエンジニア 長野支店
遠藤 和夫	横浜ゴム 工業資材事業部土木資材販売部
大島 俊之	北見工業大学 工学部土木開発工学科 教授
緒方 紀夫	日本道路公団 試験研究所橋梁研究室 室長
岡林 隆敏	長崎大学 工学部社会開発工学科 助教授
岡村 美好	山梨大学 工学部土木環境工学科 助手
小原 弘之	飛島建設 技術本部技術研究所環境研究室
※○加藤 雅史	九州東海大学 工学部土木工学科 教授
○川谷 充郎	大阪大学 工学部土木工学科 助教授
神澤 福男	橋建設技術研究所 東京支社道路交通本部技術4部
小林 裕輔	橋宮地鐵工所 先行技術研究室
小林 義和	橋ニチゾウテック 技術本部第1技術部第1技術課 課長
今野 久志	建設省土木研究所 構造研究室
佐々木 伸幸	三菱重工 橋島研究所鉄構土木研究室
芝野 亘浩	橋建設企画コンサルタント 東京事務所構造設計部
松本 正信	橋フジエンジニアリング 調査設計部 部長
曾我 明	三井造船 橋鉄構建設事業部千葉鉄構工場製造部橋梁鉄構設計課 主任
田中 信治	中部復建 橋設計第一部 係長
角本 周	オリエンタル建設 橋技術部
津村 直宜	NKK 基盤技術研究所都市工学研究部耐風構造研究室
戸松 征夫	西松建設 橋技術研究所環境研究課 課長
富本 信	橋春本鐵工所 技術本部本店設計部設計一課 主任技師
中島 章典	宇都宮大学 工学部建設学科建設工学コース 助教授
長嶋 文雄	東京都立大学 工学部土木工学科 助教授
夏秋 義広	片山ストラテック 橋梁設計部 部長
羽田野 英明	中日本建設コンサルタント 橋設計本部
○林川 俊郎	北海道大学 工学部土木工学科 助教授
藤澤 利彦	瀧上工業 橋営業本部橋梁技術室 課長
○本田 秀行	金沢工業大学 工学部土木工学科 教授
○前田 研一	東京都立大学 工学部土木工学科 助教授
松倉 孝夫	阪神高速道路公団 保全施設部 調査役
松本 信之	(財)鉄道総合技術研究所 構造研究室 主任研究員
宮崎 正男	住友重機械工業 橋梁鉄構事業部技術室 課長
宮本 裕	岩手大学 工学部建設環境工学科 教授
山田 靖則	高田機工 橋設計部設計課 課長
米田 昌弘	川田工業 橋技術本部振動研究室 室長
若林 登	首都高速道路公団 工務部設計技術課

注) ○印は幹事, ※印は連絡幹事兼務

目 次

第 I 編 橋梁交通振動の動的応答解析と設計への適用

1. まえがき	1
2. 橋梁の構造モデル	2
2. 1 橋梁の構造モデルの変遷	
2. 2 最近の橋梁構造モデルの例	
3. 橋梁の解析モデルと固有値解析	6
3. 1 解析モデル	
3. 2 固有値解析	
4. 車面特性とモデル化	9
4. 1 道路	
4. 2 鉄道	
5. 路面の凹凸性状とモデル	13
5. 1 路面凹凸	
5. 2 伸縮継手部凹凸	
6. 動的応答解析法	16
6. 1 動的応答解析	
6. 2 数値積分法	
7. 不規則振動論	19
7. 1 不規則振動解析の目的	
7. 2 不規則振動解析の問題点	
7. 3 不規則振動解析の手法	
7. 4 交通荷重による道路橋の振動制御	
8. 解析法の実用化における問題点	21
8. 1 路面凹凸とタイヤの接地長	
8. 2 走行車面のモデル化	
8. 3 車両の初期条件	
9. 実測値との比較による検証	24
10. 設計への適用に関する動向	25
10. 1 動的設計係数 (衝撃係数)	
10. 2 限界状態設計法への取り組み	
11. あとがき	31
参考文献	32

第Ⅱ編 橋梁環境振動の現状と課題

1. 概要	39
2. 低周波音の計測方法と評価	40
2. 1 低周波音の一般的概念について	
2. 2 低周波音の基本的性質について	
2. 3 低周波音の発生と伝搬について	
2. 4 低周波音の測定	
2. 5 低周波音の評価方法	
2. 6 実測事例	
参考文献	
3. 橋梁上部工振動および支点反力変動の軽減法	50
3. 1 外力および支点反力特性	
3. 2 既設橋における軽減対策	
3. 3 軽減対策の現状と展望	
参考文献	
4. 橋梁下部工から地盤を伝播する振動の計測とモデル化	60
4. 1 概説	
4. 2 振動の計測法	
4. 3 モデル化と解析法	
4. 4 地盤振動の特徴	
4. 5 地盤振動軽減対策法	
4. 6 計測およびモデル化事例の把握	
4. 7 問題点と今後の活動に向けて	
参考文献	
5. 振動感覚および振動使用性の評価	67
5. 1 振動の心理的影響	
5. 2 振動感覚の評価	
5. 3 歩道橋の振動使用性	
5. 4 道路橋の振動使用性	
5. 5 問題点および今後の課題	
参考文献	

第Ⅲ編 橋梁の損傷と健全度

1. 概説	75
2. 損傷事例	76
2. 1 床版	
2. 2 主桁、縦桁、横桁、垂直材	
2. 3 二次部材	
2. 4 支承部、桁端部	
2. 5 伸縮装置	
2. 6 付属設備	
3. 健全度点検のための振動測定法	86
3. 1 たわみの測定	
3. 2 部材負担力の測定	
3. 3 ホットスポット応力の測定	
3. 4 地盤振動の測定	
3. 5 空気振動の測定	
4. 疲労損傷の評価	97
4. 1 まえがき	
4. 2 疲労照査の流れ	
4. 3 鋼橋の疲労損傷に及ぼす振動の影響の評価例	
5. 補修・補強実施事例	101
5. 1 部材の補修補強	
5. 2 構造の変更	
5. 3 ノージョイント化	
5. 4 TMD	
参考文献	112

付録 橋梁交通振動研究小委員会 (第1回～第13回)の議事録	113
-----------------------------------	-----

第 I 編 橋梁交通振動の動的応答解析 と設計への適用

1. まえがき	1
2. 橋梁の構造モデル	2
2. 1 橋梁の構造モデルの変遷	
2. 2 最近の橋梁構造モデルの例	
3. 橋梁の解析モデルと固有値解析	6
3. 1 解析モデル	
3. 2 固有値解析	
4. 車両特性とモデル化	9
4. 1 道路	
4. 2 鉄道	
5. 路面の凹凸性状とモデル	13
5. 1 路面凹凸	
5. 2 伸縮継手部凹凸	
6. 動的応答解析法	16
6. 1 動的応答解析	
6. 2 数値積分法	
7. 不規則振動論	19
7. 1 不規則振動解析の目的	
7. 2 不規則振動解析の問題点	
7. 3 不規則振動解析の手法	
7. 4 交通荷重による道路橋の振動制御	
8. 解析法の実用化における問題点	21
8. 1 路面凹凸とタイヤの接地長	
8. 2 走行車両のモデル化	
8. 3 車両の初期条件	
9. 実測値との比較による検証	24
10. 設計への適用に関する動向	25
10. 1 動的設計係数 (衝撃係数)	
10. 2 限界状態設計法への取り組み	
11. あとがき	31
参考文献	32

序

近年、橋梁ならびにそれに関連する分野において、種々の振動問題に対処することが多くなりつつある。ところが、橋梁は地震、風などによっても振動するが、その機能である交通荷重の通過によっても振動する。それぞれの動的外力によって振動の仕方は異なってくるが、交通荷重によって橋梁が振動する問題は古くから行われているが、最近、それらの問題を設計、使用性、機能性などの面で検討する際に、さらに、制振、防振の検討が重要な位置を占めるようになってきている。このような背景のもとに、橋梁における交通振動研究の現状と将来展望を把握し、公表することを目的として、平成4年、土木学会構造工学委員会に橋梁交通振動研究小委員会が設置された。

同小委員会は、交通振動などを対象とした振動問題の事例やその軽減方法に関する実験ならびに理論的研究など最新情報について委員のみなならず委員以外の方々からも話題提供していただき、意見交換を図ってきた。また、同時に、テーマ別の担当グループを決め、それぞれの振動に関する文献調査や事例研究を行ってきた。今回の報告書も個々の作業グループの活動の一部をまとめたものである。

さて、交通荷重による橋梁振動の問題は多岐にわたるが、本委員会では3つのグループに分かれ、テーマ別に作業を行った。3つのテーマはつぎの通りである。

- (Ⅰ) 橋梁交通振動の動的応答解析と設計への適用
- (Ⅱ) 橋梁環境振動の現状と課題
- (Ⅲ) 橋梁の損傷と健全度

これらのテーマは、それぞれ従来から研究が進んでいる内容であったり、新しく始まったばかりのテーマでもあるので、必ずしも、統一のとれた形でまとめるにはないが、現状と展望を示した形となっている。

最後に、今回の本報告書が交通荷重による橋梁振動関係に携わる研究者、実務者への情報提供となり、橋梁交通振動に関する調査研究の今後の発展に寄与することを念願するものである。また、小委員会の開催をはじめ、本報告書の作成にあたりご尽力戴いた土木学会事務局、特に、黛 巖氏、橋梁交通振動研究小委員会各委員、小委員会において話題を提供していただいた方々、さらには、事例調査に御協力していただいた方々に対し敬意と謝意を表する次第である。

1994年4月

土木学会構造工学委員会
橋梁交通振動研究小委員会
委員長 梶 川 康 男

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会 第Ⅰ期委員名簿（五十音順）

委員長
委員

梶川 康男	金沢大学 工学部土木建設工学科 教授
東 泰宏	北海道開発コンサルタント㈱ 橋梁部 主任技師
岩 津守昭	阪神高速道路公団 保全施設部 調査役
海 野武幸	㈱タイヨーエンジニア 長野支店
遠 藤和夫	横浜ゴム㈱ MB販売本部土木市场部商品開発グループ
大 島俊之	北見工業大学 工学部土木開発工学科 教授
岡 林隆敏	長崎大学 工学部社会開発工学科 助教授
岡 村美好	山梨大学 工学部土木環境工学科 助手
河 西龍彦	㈱宮地鐵工所 設計部設計第二課
○加 藤雅史	九州東海大学 工学部土木工学科 助教授
※○川 谷充郎	大阪大学 工学部土木工学科 助教授
久 保雅邦	㈱綜合技術コンサルタント 技術開発部 課長（1992. 8. 28 逝去）
木 暮 深	首都高速道路公団 工務部設計技術課
五 瀬伸吾	㈱建設技術研究所 東京支社技術第4部 課長
小 林義和	㈱ニチゾウテック エンジニアリング部第1課 主任部員
佐々木 伸幸	三菱重工㈱ 広島研究所鉄構土木研究室
佐 藤弘史	建設省土木研究所 構造研究室 室長（1992. 9 から）
塩 田正純	飛島建設㈱ 技術本部エンジニアリング部 部長
芝 野亘浩	㈱建設企画コンサルタント 東京事務所構造設計部
松 本正信	㈱フジエンジニアリング 調査設計部 部長
杉 山俊幸	山梨大学 工学部土木環境工学科 助教授
曾 我 明	三井造船㈱ 鉄構土木事業部鉄構技術部千葉設計課
田 所洋一	㈱長大 札幌事務所
谷 岸 淳一	日本ハイブリッド工業㈱ 技術部 次長
津 村直宜	NKK 応用技術研究所耐風構造研究室
戸 松征夫	西松建設㈱ 技術研究所環境研究課 課長
中 島章典	宇都宮大学 工学部建設学科建設工学コース 助教授
夏 秋義広	片山ストラテック㈱ 橋梁技術開発室 課長
○林 川俊郎	北海道大学 工学部土木工学科 助教授
藤 澤利彦	瀧上工業㈱ 設計建設部橋梁設計課 係長
○本 田秀行	金沢工業大学 工学部土木工学科 助教授
○前 田 研一	東京都立大学 工学部土木工学科 助教授
松 田 哲夫	日本道路公団 試験所構造試験室 室長
松 本 信之	(財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室 主任研究員
宮 崎 正男	住友重機械工業㈱ 橋梁鉄構事業部技術室 課長
宮 本 裕	岩手大学 工学部建設環境工学科 教授
山 田 靖則	高田機工㈱ 設計部設計課 課長
横 山 功一	建設省土木研究所 構造研究室 室長（1992. 9 まで）
米 田 昌弘	川田工業㈱ 技術本部振動研究室 室長

注) ○印は幹事, ※印は連絡幹事兼務

所属および役職は, 研究小委員会開始時あるいは参加時。

1. まえがき

本報告書の第1編は、土木学会構造工学委員会橋梁交通振動研究小委員会：「動的設計係数・橋梁交通振動解析」の活動報告として、「橋梁交通振動の動的応答解析と設計への適用」に関してまとめたものである。

橋梁交通振動とは、道路橋では自動車走行、鉄道橋では列車走行、新交通システム橋ではモノレール車等の走行など交通車両によって橋梁に生じる振動を言う。走行車両による橋梁の動的応答解析を行う場合、荷重の作用点が時刻歴に移動する点や、荷重の走行面として不規則な路面凹凸あるいはレール面凹凸が媒する点が風や地震による動的解析と異なる最大の特徴である。このような橋梁振動の現象を厳密に解析する場合、車両-橋梁の非定常性の強い連成振動が問題となり、解析を一層複雑にしている。

走行車両による橋梁振動の解析において、初期の研究は主に列車走行による鉄道橋の動的影響評価として、衝撃係数の検討を中心としたものであった。その後、近年のモータリゼーションによって、道路橋において、自動車の大型化や交通量の増大、橋梁の長大化にともなって、道路橋振動の研究が進められるようになった。道路橋に関する当初の多くの研究では、鉄道橋の動的影響評価を踏襲して、動的増幅率や衝撃係数の検討が中心に行われてきた。

これら多くの研究者によって提示された有用な知見の基盤と大型コンピュータの発達により、車両、路面凹凸、橋梁の解析モデルや、確定的解析法、不規則振動論に基づく解析法、あるいは数値積分法や有限要素法などの数値計算法などが大きく進歩した。同時に、橋梁交通振動の問題も衝撃係数の検討以外に、橋梁の使用性、低周波音や騒音および地盤振動など橋梁振動が周辺環境に及ぼす環境交通振動、疲労強度、振動制御などの問題に多角化されて研究が行われるようになってきた。

橋梁の長大化にともなって、各種形式の橋梁が多く建設されるようになってきた。また、橋梁の構造も、架設地点での土地の制約を受けることが多くなった。同時に、交通量の増加と車両の大型化、あるいは鉄道列車の高速化などにより、橋梁は極めて厳しい交通荷重を繰り返し受ける環境になっている。橋梁交通振動の研究は、従来の衝撃係数の検討に加えて、上述のような多岐に渡る様々な問題を検討することが必要になってきた。

このような時期に、各委員が文献調査を行った結果に基づき、橋梁交通振動の動的応答解析に関する橋梁、車両、路面の解析モデル、動的応答解析法、解析上の問題点、実測値との比較、設計への適用とその動向などについて、歴史的変遷、現状とその問題点、今後の課題や展望などの観点から考察を加え、問題の本質を見いだすことは工学的に有意義なことであり、今後の橋梁交通振動の発展に寄与するものと思われる。

(本田秀行、前田研一)

2. 橋梁の構造モデル

2. 1 橋梁構造モデルの変遷

橋梁交通振動にかかわる種々の問題を動的応答解析法を用いて説明しようとする研究が数多く行われている。これらの研究においては、どのような橋梁を対象とし、またそれをモデル化しているかを、以下では、わが国の過去30年の土木学会論文報告集、土木学会論文集、構造工学論文集などに発表された研究をもとに調べる。

車両橋梁系振動問題を解析的に取り扱った初期の研究としては、1963年に発表された平井の研究¹⁾および大地の研究⁹⁹⁾がある。平井は車両走行を受ける橋梁振動問題の新しい解析方法の開発を主眼としてその解析結果を示し、大地はスパン10~30mの鉄道橋を対象として、連行移動荷重に対する解析方法と結果および実験結果との比較を示している。これらの研究では、橋梁構造としては単純桁をはりにモデル化し、理論的に固有振動モードを求めて走行車両の影響を考慮した動的応答解析を行っている。この後、山田・小堀の研究⁴⁾をはじめ、直線桁を取り扱った研究が最も多い。

表-2.1は、ここで調査対象とした研究論文で取り扱っている橋梁構造モデルを直線桁・曲線桁・板・床版・格子構造、アーチ・斜張橋、吊橋という構造物、年代別に分類した結果を示している。表中に示される(R)は鉄道橋、(P)は歩道橋を対象とした研究であり、その他はすべて道路橋を対象とした研究である。また、表中の(M)は有限要素法などのマトリックス構造解析法を利用していることを示している。

この表から、ほとんどの研究は道路橋の直線桁を対象としており、しかもそのほとんどは上部構造のみをはり部材として取り扱っている。この理由は、この橋梁構造が最も基本的であり、また、モーダルアナリシス法が利用しやすい種々の解析方法の展開などに都合がよいからであると思われる。一方、鉄道橋を対象とした研究としても、松浦¹⁹⁾、¹⁰²⁾が東海道新幹線における複鉄筋コンクリート単純桁の振動問題に端を発して、単軸およびボギー形式の質点系車両と単純桁の相互作用を表す運動方程式を導き基本的な応答性状を検討しているが、これらの研究も直線桁を対象としている。

これらの研究の中で、梶川・大嶋⁴¹⁾は環境振動問題を検討する目的から、高架道路橋を対象としてはじめて橋脚および地盤ばねを考慮した上下部構造を取り扱っている。また、川谷・小松⁴⁸⁾は車両の偏心走行の影響を検討する目的で、上部構造の曲げ振動の他にねじり振動の影響をも考慮した直線桁構造を対象としている。さらに近年、前田・米田¹⁰⁸⁾、梶川・沖野⁶⁵⁾、⁶⁶⁾は実際の連続高架橋の車両走行による振動問題を忠実に追跡する目的で、これを立体骨組構造としてモデル化し、橋脚や地盤の影響も含めてかなり実構造に近い形で動的応答解析を実施している。

一方、小松・中井¹⁾は一連の研究¹⁰⁾、¹²⁾において曲線桁橋を対象とし、これを曲がりばりにモデル化し、ラグランジェの運動方程式を利用して基礎微分方程式を導き、走行車両による振動問題に及ぼす曲げとねじりの連成振動の影響を種々検討している。

走行荷重を受ける板の問題として、平井²⁾、³⁾は移動荷重を受ける直交異方性板および格子構造の振動問題を、理論的に求められる振動モード用いてモーダルアナリシス法により検討している。これに対して、水澤・梶田³⁶⁾は斜スラブを直交異方性板にモデル化し、走行車両による動的応答性状における長方形スラブとの差異をマトリックス法を用いて検討している。足立・岡村³⁷⁾は、低周波域の振動問題を明らかにする目的から床版と床組を組み合わせた独自の立体的動的解析モデルを開発し、床組を含む合成桁橋、PC・T桁橋、トラス橋の走行車両による動的応答解析を実施している。また、松村・梶川⁵⁹⁾は橋脚の影響を含む広幅員連続鉄桁橋を計算容量などを考慮して、連続格子構造にモデル化して車両走行による動的応答性状を検討している。さらに、岡林・竹下⁷⁶⁾は道路橋の幅員方向の応答の変動を解明する目的から、鉄桁橋の床組を直交異方性板としてモデル化した解析を行っている。

アーチ橋の走行車両による振動問題を取り扱ったものとしては、小堀・梶川の研究¹⁶⁾、¹⁸⁾がある。この研

究はランガー桁橋を対象とし、理論的に固有振動モードを求め、ラグランジェの運動方程式を利用して基礎式を導き、車両走行による応答解析を行っている。これ以後、同様の解析手法を用いたランガー桁橋の動的応答解析は数多く行われている。また、同年の前田・林らの研究¹⁷⁾は2ヒンジ放物線アーチおよび3径間斜張橋を平面骨組にモデル化し、おもに構造の幾何学的非線形性の影響を検討する目的で橋梁上を鉄道車両が走行する場合の問題を取り扱っている。この研究においてはじめて斜張橋が取り扱われており、主桁の他にタワ一、橋脚およびケーブとも考慮した構造のモデル化が行われている。一方、小松・川谷²³⁾は3径間斜張橋を平面骨組の離散質量系にモデル化し、車両走行による応答解析を行い、おもに動的増幅率などを検討している。さらに、藤掛・大野⁴⁶⁾は上路式2ヒンジアーチ橋を対象とし、やはり理論的に固有振動モードを求め、ラグランジェの運動方程式を利用して基礎式を導き、高速で走行する鉄道車両がアーチ橋の動的応答性状に及ぼす影響を検討している。梶川・織田⁷⁶⁾は上路式2ヒンジアーチ橋を対象とし、アーチリブ、補剛桁、横桁、垂直材を立体骨組に、コンクリート床版を2次元薄板にというほぼ実際の構造のモデル化を行い、走行車両による橋梁の疲労損傷問題を解明する目的で3次元動的応答解析を行っている。涌井・松本⁹⁴⁾、¹⁰⁴⁾は1車両23自由度を有する新幹線車両モデルと3次元有限要素法でモデル化した構造物の動的相互作用問題を解析する手法を提案し、マルチケーブルタイプのP C斜張橋上をその車両モデルが走行する場合の衝撃係数や列車の走行性の問題を検討している。

吊橋の走行車両による振動問題を取り扱った研究は比較的早期に実施されている。平井・伊藤⁷⁾、¹⁰⁰⁾は吊橋を線形撓度理論によりモデル化し、固有振動モードを求めて鉄道車両走行による吊橋の種々の振動問題を明らかにする目的で動的応答解析を行っている。涌井¹⁰³⁾および松本・藤沢³³⁾は本州四国連絡橋などを対象として、長大吊橋の鉄道橋への適用性を検討する目的から鉄道車両の走行性を検討している。また、林川⁴⁰⁾は連続吊橋の基礎微分方程式をハミルトンの原理から導き、走行車両を受ける連続吊橋の動的応答解析法の開発とせん断変形および回転慣性が連続吊橋の動的応答性状に及ぼす影響を検討する目的で、集中荷重が移動する場合の応答解析を行っている。また、鳥野・成富⁵⁸⁾はP C吊橋という珍しい形式の橋梁の振動性状を把握する目的で、これを平面骨組にモデル化し車両走行による動的応答問題を解析している。

コンピュータの発達によるマトリックス構造解析の進歩とともに、単純な直線桁から平面構造、板構造、立体構造モデルへと展開している様子が伺える。しかし近年においても、直線桁をはり構造としてモデル化した研究が多い。これは車両モデル、路面凹凸の考慮、新しい解析手法の開発など、橋梁構造モデル以外の部分に着目していることによるものである。今後は、橋梁詳細部および橋梁周辺部のモデル化がより厳密に行われ、実交通荷重による応答を正確に評価するための3次元動的応答解析法がさらに発展していくものと思われる。

表-2.1 車両橋梁系振動問題の動的応答解析に用いられた橋梁構造の分類

	直線桁・曲線桁	板・床組・格子	アーチ・斜張橋	吊橋
1963	平井 ¹⁾ 大地 ⁹⁹⁾	平井 ^{2),3)}		
1965	山田・小堀 ⁴⁾			平井・伊藤(R) ¹⁰⁰⁾
1966				
1967	山田・小堀 ⁶⁾			伊藤(R) ⁷⁾
1968				八十島・伊藤ら(R) ⁹⁾
1969				
1970	小松・中井 ^{10),11)}			
1971	小松・中井ら ¹²⁾			
1972	松本・佐藤ら(P) ¹³⁾			
1975	中井・事口 ¹⁴⁾			
1976	星谷・中根 ¹⁵⁾ 松浦(R) ¹⁹⁾		小堀・梶川 ^{16),18)} 前田・林ら(R,M) ¹⁷⁾	
1977	吉村・彦坂ら ²⁰⁾ 梶川・小堀(P) ²¹⁾			
1978	成田・桂樹ら ⁹⁵⁾ 松浦 ¹⁰²⁾		小松・川谷(M) ²³⁾	涌井 ¹⁰³⁾
1979	梶川・小堀(P) ²⁴⁾ 藤野・伊藤ら ²⁵⁾ 岡林 ²⁶⁾ 彦坂・吉村ら ²⁷⁾			
1980	梶川 ³⁰⁾		岡林・中井ら ²⁸⁾ 本田・小堀 ²⁹⁾	
1981	本田・小堀 ²⁹⁾			
1982	梶川(P) ³⁵⁾	水澤・梶田ら(M) ³⁶⁾		松本・藤沢 ³³⁾
1983	本田・小堀ら ³⁸⁾ 岡林・山口 ³⁹⁾	足立・岡村ら ³⁷⁾		林川 ⁴⁰⁾
1984	梶川・大嶋 ⁴¹⁾ 本田・小堀ら ^{42),56)}			
1985	吉田・梶川ら ⁴³⁾ 大島・能町ら ⁴⁴⁾			
1986	丸山・斉藤ら ⁴⁵⁾ 本田・小堀 ⁴⁷⁾ 横山・井上 ⁹⁷⁾	白木・松保ら ⁵⁷⁾	藤掛・大野ら(R,M) ⁴⁶⁾ 烏野・成富ら(M) ⁵⁸⁾	
1987	川谷・小菅ら ⁶¹⁾ 本田・小堀 ⁶²⁾ 前田・米田ら ¹⁰⁸⁾	松村・梶川ら(M) ⁵⁹⁾	内谷・彦坂ら(M) ⁶⁰⁾	
1988	川谷・小松ら ^{48),51)} 川谷・嶋田 ^{50),64)} 岡林・山手ら ⁶⁸⁾			
1989	梶川・沖野ら(M) ^{65),66)} 川谷・嶋田ら ⁶⁷⁾ 岡林 ⁷⁰⁾			
1990	岩瀬・平島(M) ⁵²⁾ 横山・井上 ⁵³⁾		川谷・本田(M) ⁷²⁾	
1991	五郎丸・白石ら(M) ⁵⁴⁾ 深沢・杉山ら ⁷⁴⁾	岡林・竹下ら(M) ⁷⁵⁾	川谷・難波ら(M) ⁷³⁾ 梶川・織田ら(M) ⁷⁶⁾	
1992	中島・津村(M) ⁷⁷⁾ 川谷・米島ら ⁷⁸⁾ 横山・井上ら(M) ⁹⁸⁾		岡林・竹下ら(M) ⁷⁹⁾	
1993	比江島・藤野 ⁵⁵⁾ 川谷・西山 ⁸²⁾ 鈴木・加藤(P) ⁸³⁾	岡林・竹下(M) ⁸¹⁾	涌井・松本(M) ¹⁰⁴⁾ 曾我部・金森ら(M) ⁹⁴⁾	

2. 2 最近の橋梁構造モデルの例

前節でも述べたようにコンピュータの発達によるマトリックス構造解析の進歩とともに、橋梁交通振動問題を解析するために、対象とする橋梁をより実構造に近い形でモデル化することが行われるようになってきている。図-2.1 は連続高架橋の車両走行による振動問題を解析するために梶川・沖野ら⁶⁶⁾が採用したモデルである。上部構造は複数の主桁と横桁からなる格子構造とし、橋脚部は骨組構造、フーチングと基礎杭および地盤は等価なばねにモデル化している。これらのモデルを用いて交通振動が周辺へ及ぼす環境振動問題を検討している。

図-2.2 は新幹線車両による長大橋の振動問題を解析するために、涌井・松本ら¹⁰⁴⁾が採用したマルチケープルタイプのPC斜張橋モデルである。新幹線列車の複線走行を想定して、2本柱形式の1主塔による2面吊り構造であり、主塔および主塔を有限要素のはり要素で、ケーブルをトラス要素でモデル化し列車が高速で走行する場合の橋梁各部材の動的応答および列車の乗心地と走行性などを検討している。

(中島章典・松本信之)

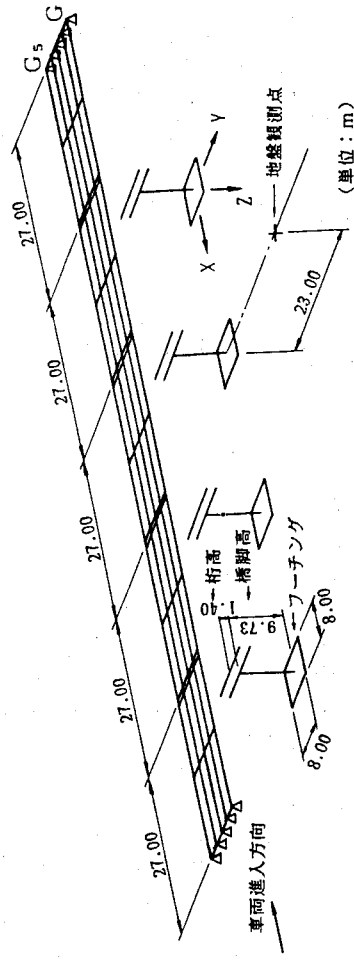


図-2.1 環境振動問題解析用連続高架橋モデル

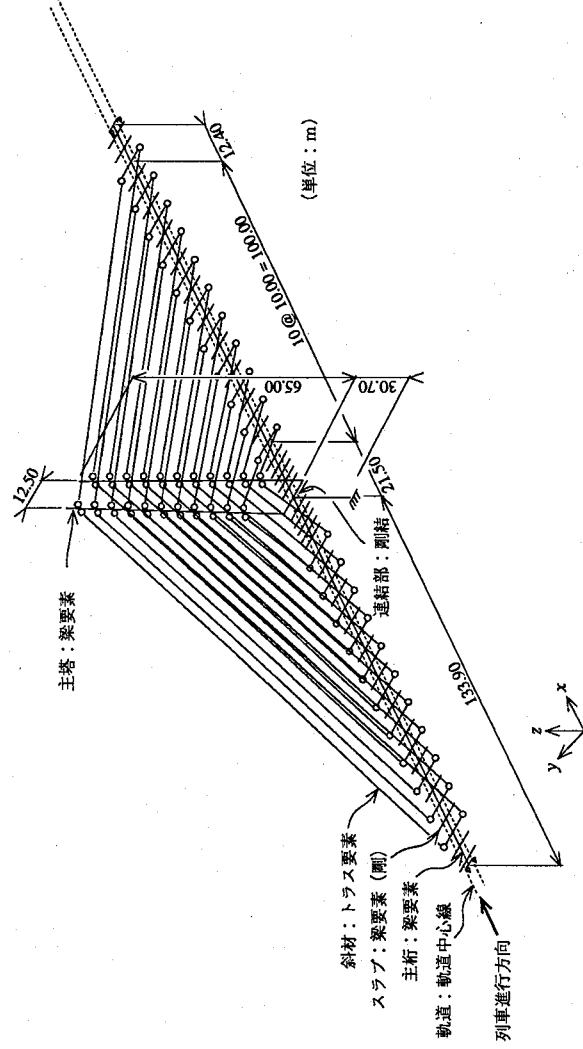


図-2.2 列車走行性解析用PC斜張橋モデル

3. 橋梁の解析モデルと固有値解析

3.1 解析モデル

動的問題に対する解析モデルは、質量や剛性をモデル化する方法によって分布質量系と離散質量系に大きく分類することができる。橋梁交通振動問題においても、橋梁の規模や構造形式に応じて分布質量系あるいは離散質量系によるモデル化が行われる。

このうち、分布質量系による橋梁の交通振動解析は、小規模で単純な境界条件の構造に対しては解析が容易であり解析結果の精度も良いことから、当初から現在に至るまで多くの解析で用いられている。それらの多くは、直線桁橋や長方形板を対象とした梁理論や板理論を適用した解析であるが、初期には、線形撓度理論を用いた吊橋の応答解析⁷⁾も行われた。斜角形平板のような境界条件が複雑な橋梁に対しては、格子桁によるモデル化が行われ、両端単純支持された並列主桁を持つ斜角格子桁橋の固有振動数および振動モードを求める結合法の提案³⁾や、直格子斜桁橋を直交異方性平行四辺形板理論でモデル化して差分法を用いた固有振動解析⁵⁾が行われた。曲線桁橋については、小松・中井¹⁰⁾が曲げとねじりの連成振動を考慮した動的応答の基礎微分方程式を誘導し、固有振動解析および走行車両による応答解析を行った。また、近年では、直線桁橋や長方形板について、偏心走行の影響を明らかにするために梁理論による曲げねじり連成振動を考慮した解析⁴⁸⁾や、せん断変形を考慮するためにTimoshenko梁理論を適用した吊橋の解析⁴⁰⁾やMindlinの平板理論を用いた矩形板の解析⁸⁴⁾などが行われており、より厳密な解析が試みられている。

一方、離散質量系による解析は、コンピュータの発達と有限要素法の進歩によって現在の解析の主流となり、大規模で部材数が多く複雑な境界条件の橋梁に対して用いられている。橋梁は、梁あるいは棒部材を主たる構成要素とすることから骨組構造にモデル化されマトリクス骨組解析として扱われることが多く、連統体の有限要素法によって解析を行った研究は比較的少ない³⁶⁾。固有振動解析では、1969年に、会田⁸⁾によって直線トラスおよび曲線トラスの立体的な解析が行われており、振動方程式の次数が大きくなると固有値および固有ベクトルの算出が容易ではなくなることから系全体の自由度を低減した解析が試みられている。走行車両による応答解析は、1976年に前田・林ら¹⁷⁾によってアーチ橋および斜張橋に対して有限要素法による幾何学的非線形性を考慮した動的応答解析が報告されたのを皮切りに、小松・川谷²³⁾によって構造形式の異なる斜張橋の走行車両による動的応答解析が行われ、それまでの分布質量系によるモデル化では解析が困難な構造形式に対しても解析が行われるようになった。

また、解析技術の向上により複雑な構造形式の橋梁が架設されるようになると三次元立体構造物としての解析が要求されてきた。このような三次元立体構造物の解析には、S字形曲線斜張橋を多質点系の立体モデルに置き換えた応答解析⁸⁶⁾、アーチ橋を有限要素法を用いて床版の剛性も考慮した立体骨組に離散化した解析⁸⁷⁾、左右の床版張り出し長が異なり、かつ、線形に平面曲線を有する非対称方丈ラーメン橋を立体ラーメン構造でモデル化した解析⁹⁰⁾などを挙げることができる。さらに、都市部における道路橋の高架化にともなう地盤振動が社会問題化してくると、上部工の振動だけでなく下部工や基礎杭、地盤までも考慮した橋梁に対する三次元的な振動解析も行われるようになった。このような問題に対しては、高架橋を有限要素法で離散化した立体骨組構造として、上部構造を格子構造、橋脚を梁部材と柱部材のT型骨組、フーチングと基礎杭および地盤は等価なバネ要素で置き換えたモデルを適用し、周辺地盤も含んだ高架橋のスウェー振動とロッピング振動の連成振動を考慮した解析⁶⁶⁾が行われている。その他、橋脚下端の支持条件、主桁の回転中心位置、上部構造の支承位置、対象とする1径間に隣接する前後の橋梁の境界条件としての影響を考慮した解析⁹²⁾も行われている。

マトリクス骨組解析における構造物の離散化方法は有限要素法に代表されるが、その他の離散化手法を用いた解析には、伝達マトリクス法による多径間連続桁の応答解析⁵²⁾、有限帯板法による直交異方性板の応答解析⁷⁵⁾、境界要素法による吊橋の固有振動解析⁸⁹⁾、剛体-バネモデルを用いた剛性桁止めめの水平伝達力

の動的応答解析⁹⁹⁾などがある。

コンピュータの高速化・大容量化および有限要素法の進歩にともなって、橋梁の解析モデルは大きく変化し、より自由度の大きい離散化モデルによる3次元解析が行われるようになってきている。また、橋梁の長大化・高架化、走行車両の高速化・大型化によって、設計衝撃係数や動的増幅率だけでなく疲労問題や騒音・振動などの環境問題も検討されるようになり、橋梁本体だけでなく周辺地盤や隣接する前後の橋梁による影響も考慮した解析モデルなど、さらに厳密なモデルによる解析が行われていくものと考えられる。

3.2 固有値解析

コンピュータが出現する以前は、固有値問題の解析方法は手計算が中心であり、解析解を求めることが一つの課題であった。しかし、コンピュータの登場によって、最も基本的な方法としてガウスの消去法を用いた固有値問題の数値解析が行われ始め、マトリクス代数の導入とコンピュータの高性能化にともなって、大次元の問題を高速かつ効率的に解くために様々な手法が考え出され、改良が加えられてきた。そして、コンピュータの大型化・高速化と有限要素法に代表される数値解析方法の発展とがあいまって、対象とする系の自由度は一層大きなものとなり、固有値問題もさらに大次元なものとなっている。最近では、汎用大型計算機からスーパーコンピュータへの移行にともなって、スーパーコンピュータの特長であるベクトル計算機能を生かした計算手法やプログラムの開発も行われている。

以下に、固有値問題の解析方法を直接法、行列式法、変換法、および反復法の4つに大別し、それらの代表的な手法とその特徴を述べる^{109), 110)}。

(1) 直接法

行列式 $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$ を展開して代数行列式とし、直接これを解いて固有値を求める方法である。この係数の求め方で種々の方法があり、代表的な方法として、ダニエレフスキー法、フレーム法などが挙げられる。直接法は、得られた係数の誤差が小さくても、代数方程式を解くときにその誤差が拡大されて数値的に不安定になりやすく、特に高次の代数方程式を解くことが困難であることから、最近ではほとんど用いられない。

(2) 行列式法

直接法のように行列式 $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$ を展開せずに、直接行列式から固有値を求める方法で、スツルム法、グブタ法、行列式探索法などがある。スツルム法はバイセクション法とも呼ばれ、実対称行列について行列式の値を求めずに主小行列式の符号を調べ、これにスツルムの定理と二分法を利用して固有値を求める方法であり、スツルム法を一般の実対称行列に拡張した方法がグブタ法である。これらの方法は任意の次数の固有値を必要なだけ求めることができる長所があり、一般固有値問題にも適用できるが実対称行列に限られる。行列式探索法は、固有行列式の値から固有方程式の根である固有値を求める方法をいい、これにスツルムの定理や加速割線反復法を併用した方法も、グブタ法と同様にバンド幅のせいまい帯行列に対してはかなり大きな問題にも適用できる。

(3) 変換法

変換法は、与えられた行列を相似変換により簡単な形の行列に変換して固有値問題を解く方法であり、ヤコビ法、一般化ヤコビ法、ハウスホルダー法、QR法などがある。このうち、ヤコビ法は古典的な標準固有値問題の解法の一つで、小次元の実対称行列のすべての固有値と固有ベクトルを求める方法である。また、このヤコビ法を一般化固有値問題に拡張したのが一般化ヤコビ法である。ハウスホルダー法は対称行列を三重対角行列に変換して固有値を求めやすくする方法で、変換された行列の固有値はQR法やスツルム法によって求めることができる。QR法は特異でない非対称な行列の固有値を求める方法で、小次元の実または複素行列の標準固有値問題についてすべての固有値を求めるのに適した方法である。

(4) 反復法

反復法は、ベクトルを行列に繰り返し掛けて固有ベクトルに収束させ、同時に固有値を求める方法である。この方法は、実または複素行列の標準および一般固有値問題に適用でき、零要素の多い（スパースな）行列に有効な方法で、逆反復法（逆べき乗法）、サブスパース法などがこれに含まれる。逆反復法は中規模な問題について最小固有値に対応する固有ベクトルを求めるのに適した方法であり、計算手順が簡単である。サブスパース法は実対称行列について複数個の固有値と固有値ベクトルを同時に求める方法で、大次元のスパースな実対称行列に適した解法である。

橋梁交通振動解析においては、通常、一般固有値問題としての解析が行われているが、固有値問題の次元数や行列式の特性等を考慮して、適切な解析方法を選択する必要がある。

(岡村美好)

4. 車両特性とモデル化

4.1 道路

道路橋上を通過する車両は大型トラック、トレーラ、中型トラック、バス、乗用車等のほかクレーン車、消防車等の特殊車両がある。これらのうち橋梁振動に大きな影響を与えるのは車両総重量の大きい大型トラック、大型トレーラであり、道路橋示方書(H2.2)ではT-20あるいはTT-43荷重として規定されていた。しかし、平成5年11月25日付の道路構造令の改正によって設計自動車荷重は25tとされ、道路橋示方書も改訂された。これにより以前のT-20やTT-43は廃止された。この改正では設計自動車荷重が車両総重量の実勢を反映したものにただけであり、道路橋示方書に規定していない車両の動的特性は変わっていないと考えられている。

車両は車体、車軸、タイヤおよび車体と車軸を結合する懸架ばねから構成される。タイヤはその機能面から空気ばねとも考えられ、主にこのばねと懸架

ばねによって走行車両はそれ自身が振動し、さらに走行面の凹凸(路面凹凸)によりこの振動はより複雑に増幅される。走行車両による橋梁の振動解析では、懸架ばねによって支えられる車体や積載物等のばね上質量、懸架ばね、車軸、タイヤ等のばね下質量の振動、ばね上ばね下振動が一般には考慮され、「橋梁振動の計測と解析」¹¹⁴⁾によればそれぞれ6種類の振動に分類されている。

車両のモデル化に必要な基本的諸元は上記文献114)によれば表-4.1のようであり、車両を2次元モデルとする場合、表中のばね上部の慣性モーメント J_R 、 J_Y およびばね下部の慣性モーメントが省略されることが多い。また、懸架部の板間摩擦力も一般には省略される。

道路橋の走行車両による動的応答解析は、当初、衝撃係数の問題として行われることが多かった。このため、車両のモデルは車両1台が路面と1接点を持ち、ばね上振動をモデル化した1自由度、あるいは、ばね上・ばね下振動をモデル化した2自由度モデルが一般的であった。これは応答解析が主には橋梁上部構造の全体振動に着目し、橋梁支間に比較して車両の前後軸間の距離が短いため、軸間距離の影響は小さいとする考え方に基づいていたためといえる。しかし、近年の橋梁振動問題は、衝撃係数にみられる橋梁上部構造の振動だけでなく、上部構造の振動に起因すると考えられる下部構造や地盤振動も対象とするようになり、短支間橋梁や桁端部、伸縮装置部の段差による動的応答解析の事例も多くなった。このため、解析における車両モデルも、実際の車両の動的特性に近いモデルが必要とされ、車両の応答をできるだけ実際のものに近似させる2次元の多自由度モデルや3次元モデルも開発され使用されている。

車両のモデル化は、橋梁規模や対象とする物理量によって検討され、行われるべきものである。たとえば、車両長に比べ橋梁支間がかなり大きい場合の支間中央部のたわみや加速度等ではタイヤのばねを省略した車両モデルで十分であるが、床組や床版等、路面凹凸の影響が大きいと思われる部位ではタイヤのばねは省略できなく、また、タンデム軸の影響も見逃せないであろう。そのため、各研究者において各種の車両モデルが開発・使用されてきている。車両モデルの分類は多くの場合、モデルの持つ自由度によって行われていたが、ここでは、車両モデルのモデル次元と車両と構造物の接点の数によって、これまでに用いられたモデルの諸元について分類する。

表-4.1 車両モデルの基本的諸元

モデル各部	モデルの定義
ばね上部	・ばね上質量:m_s ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$) ・回転慣性モーメント:$J_s$, J_y ($\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)
懸架系部	・トラニオン質量:m ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$) ・ばね定数:$k_s$ (kgf/m) ・板間摩擦力(クローロン摩擦力):F (kgf) ・減衰係数:C_s ($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}$)
ばね下部	・ばね下質量:m_r ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$) ・回転慣性モーメント:$J_w$, J_y, J_z ($\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)
タイヤ部	・ばね定数:k_r (kgf/m) ・減衰定数:C_r ($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}$)
長さ関係 (m)	・車軸間距離 ・ばね上質量重心の位置 ・後輪2軸トラニオン重心の位置 ・ばね下質量重心の位置 ・タイヤの接地長 ・その他

(1) 2 次元モデル

1) 1 車両 1 接点モデル

車両が構造物と一点で接するとしたモデルで初期のシミュレーションに用いられていた。現在でも簡易計算や車両に比較して構造物が大きい場合に用いられている。

a) 1 自由度系

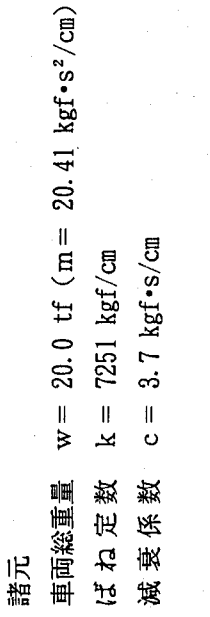


図-4.1 1 自由度系モデル

b) 2 自由度系

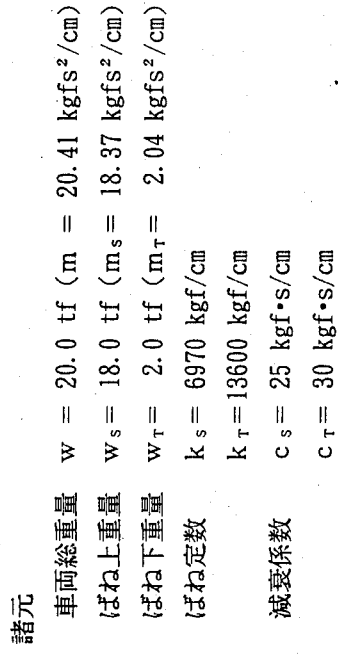


図-4.2 2 自由度系モデル (1 接点)

2) 1 車両 2 接点モデル

前軸、後軸のタイヤがそれぞれ構造物と接するとしたモデルで、道路橋示方書の旧 T 荷重に諸元をあわせることでよく使用されている。

a) 2 自由度系

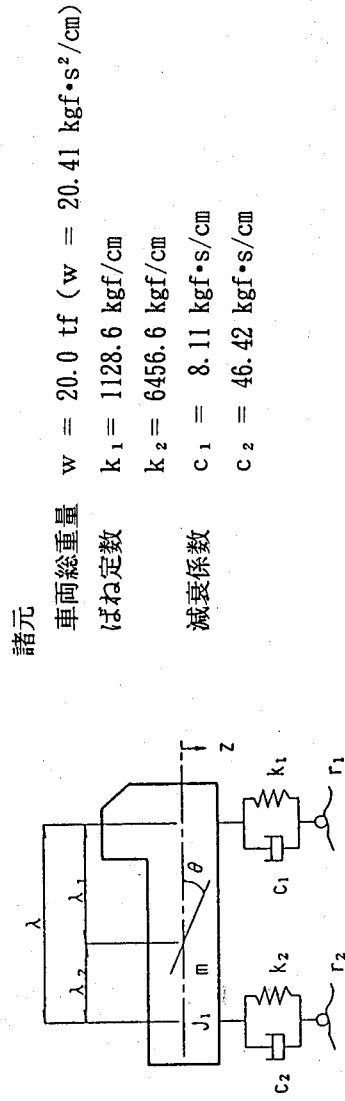


図-4.3 2 自由度系モデル (2 接点)

b) 4 自由度系

諸元

車両総重量 $W = 20.0 \text{ tf}$ ($m = 20.41 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

ばね上重量 $W_S = 18.0 \text{ tf}$ ($m_S = 18.37 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

ばね下重量 $W_{TF} = 0.4 \text{ tf}$ ($m_{TF} = 0.41 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

$W_{TR} = 1.6 \text{ tf}$ ($m_{TR} = 1.63 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

ばね定数 $k_{SF} = 1200 \text{ kgf/cm}$

$k_{SR} = 4800 \text{ kgf/cm}$

$k_{TF} = 2400 \text{ kgf/cm}$

$k_{TR} = 9600 \text{ kgf/cm}$

減衰係数 $C_{SF} = 5 \text{ kgf}\cdot\text{S/cm}$

$C_{SR} = 20 \text{ kgf}\cdot\text{S/cm}$

$C_{TF} = 6 \text{ kgf}\cdot\text{S/cm}$

$C_{TR} = 24 \text{ kgf}\cdot\text{S/cm}$

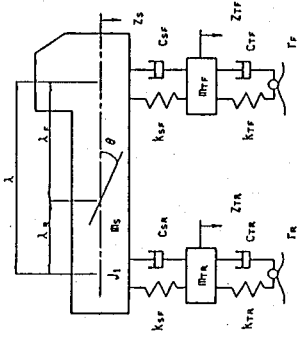


図-4.4 4 自由度系モデル

3) 1 車両 3 接点モデル

旧 T 荷重のモデルとなる車両は現実にはほとんど存在しないため、実際の大型車両に多い、後軸がタンデム軸となる車両をモデル化したもので、以下に示す懸架ばねのみを考慮した 2 自由度系のほかにタイヤばねとトラニオン質量等を考慮した 6 自由度系モデルが考えられている。

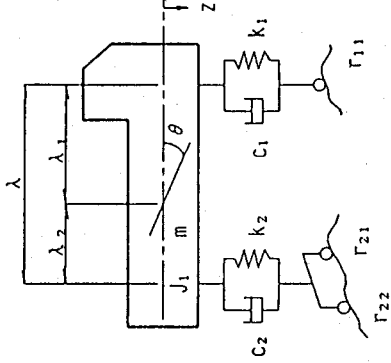
a) 2 自由度系

諸元

車両総重量 $W = 20.0 \text{ tf}$ ($m = 20.41 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)

慣性モーメント $J_1 = 50.94 \text{ tf}\cdot\text{m}^2$ ($J_1 = 519796 \text{ kgf}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$)

減衰定数 $h = 0.03$



注) 慣性モーメントは、軸間距離 3.99m, 前後軸重分配比 1:4 として算出した。ばね定数も 1:4 に分配したので、回転に関する固有振動数も 3.0Hz となる。

図-4.5 2 自由度系モデル (3 接点)

(2) 3 次元モデル

車両の左右輪を考慮し、実際の車両をほぼ忠実にモデル化しようとしている。現在使用中あるいは開発中のモデルは前 1 軸、後タンデム軸の車両モデルであり、懸架ばね、タイヤばねを考慮して 8 自由度や 11 自由度のモデルが考えられている。モデル各部の諸元に関するデータ不足もあり、橋梁の振動解析への適用は少ないようであるが、設計自動車荷重の改訂に伴い、データの蓄積と定量的評価が望まれる。

以上、現在各研究者によって用いられている車両モデルを概観したが、設計自動車荷重が改訂され、走行荷重による応答解析においては、研究結果と設計規準を対比するためにも、対象事象ごとの車両モデルや諸元の統一が必要ではないかと思われる。
(山田靖則)

4. 2 鉄道

鉄道車両は、その用途または構造に基づいていくつかの分類方法があるが、機能面からみると大きく機関車、旅客車、貨車の3種に分けられ、機関車はさらに蒸気機関車、電気機関車、ディーゼル機関車に、旅客車は客車、電車、気動車に、貨車は有がい貨車、タンク貨車、ホッパ貨車に分けられる。また、車体支持機構面からみると、車輪（輪軸）と車体とが、いくつかのバネの介して直接結ばれる二軸車と、台車を介して結ばれるボギー車面に分けることができる。一般にボギー車面という場合、一車面に二台車が接続されているものを指し、一つの台車が二車両間に位置するものを連接車面という。電気・ディーゼル機関車および旅客車は、ほとんどがボギー車面であるが、貨車の一部に二軸車がみられる。

いずれにしても鉄道車両の振動には、おおそ車体が剛体として起こる振動と、弾性体として起こる振動とがある。鉄道車両は比較的剛であることより、動的応答解析においては車体・台車・輪軸などを剛体として取扱うことが多いが、軽量車面などを対象とする場合には、車体を弾性体として取扱う必要がある。

車面振動の主な要因とその振動数をみてみると、上下振動では、レール表面の凹凸、レール継目、レールの沈下、レールの高低狂いなどにより誘起され、振動数は3～5 Hzが主である。また、左右動については主として軌道の通り狂い、平面性狂いなどによって励振される強制蛇行動と自励的な蛇行動があり、後者は車体と輪軸が一体となって振動するものと、車体はほとんど静止して輪軸あるいは台車が激しく振動するものがある。振動数で見ると0.8～2 Hzが主である。

車面運動解析における鉄道車両のモデル化の方法は、一般に車体・台車・輪軸をそれぞれ剛体質点として扱い、それらの間を支持バネ・ダンパで結合して車体を構成する方法を用いている。しかし、解析の目的に応じて一車面全体ではなく、車両の半分のみを考慮する半車体モデルや台車・輪軸または台車のみモデルを用いることも多い。また、車両の左右振動を解析するためには車輪・レール間の接触力（クリープ力）などの非線形力を適切に考慮する必要がある。

構造物との動的相互作用解析の対象として鉄道車両を取扱い、系統的にまとめた最初の研究は松浦¹⁰²⁾による研究で、ここでは桁のたわみ形状を直交関数で与え、単軸（1自由度モデル）および図1に示すボギー形式（6自由度モデル）の質点系車両との相互作用を表す運動方程式を導き、主に単純支持の桁についての数値解析により動的応答を支配する因子を明らかにしているが、いずれも二次元の車両と構造物を取扱ったもので上下振動のみを対象としている。

また、最近では涌井ら¹⁰⁴⁾により図2に示す新幹線ボギー車面をモデルとした1車面23自由度を有するバネ・マス・ダンパによる三次元の結合構造を用いた車両モデルと三次元有限要素法でモデル化した構造物モデルとの動的相互作用を解析する手法が提案されている。ここでは車両の蛇行動運動に影響の大きい車輪・レール間に生じるクリープ力とフランジ衝突現象に關しても解析で考慮されるようにしている。

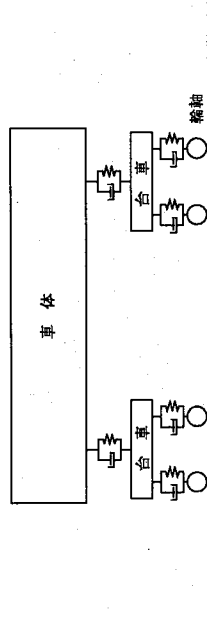


図-4.6 6自由度車両モデル（平面モデル）

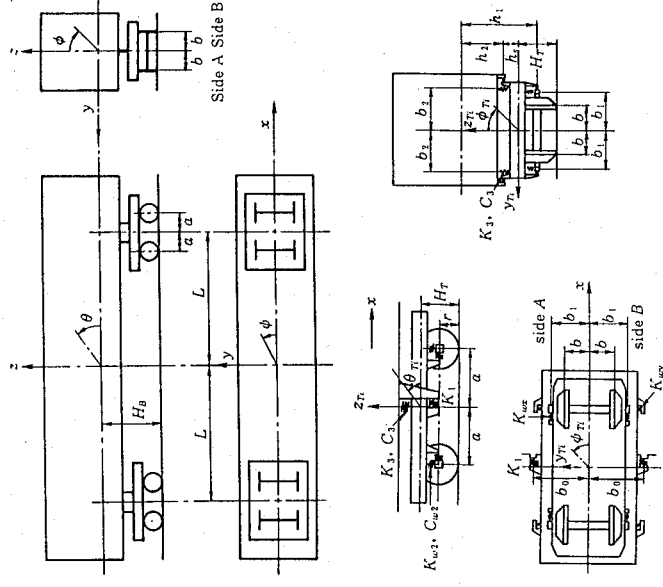


図-4.7 23自由度車両モデル（立体モデル）

（松本信之）

5. 路面の凹凸性状とモデル

走行車両による道路橋の動的応答を解析する場合、車両一橋梁の振動系モデルが解析の対象となる。路面凹凸がない橋梁上を車両が走行しても車両の慣性力によって橋梁は車両一橋梁系の非定常性の連成振動を呈するが、不規則な路面凹凸がある場合、路面凹凸によって励起された車両振動が不規則な動的荷重として橋梁に作用する。このように、走行車両のような移動荷重と路面凹凸が橋梁交通振動の解析上の大きな特徴となっている。

橋梁交通振動に影響を及ぼす路面は、縦断方向部の路面凹凸（以下路面凹凸）と伸縮継手部凹凸に大別される。また、路面に関する両者の凹凸を車両に入力する場合、実測された凹凸データを用いる直接的方法と凹凸モデルを利用する間接的な方法がある。本文では、後者の間接的な方法について以下に記述する。

5.1 路面凹凸

橋梁交通振動の解析において、衝撃係数や動的増幅率などの荷重強度に関する当初の研究では、路面凹凸の必要性が認識されていたものの、凹凸性状のデータ不足や評価法、解析モデルが整備されていなかったことから、解析に考慮されていなかった。

解析上、わが国で道路橋の振動問題に初めて路面凹凸を考慮したのは、山田・小堀¹⁾による研究である。この研究で用いられた路面凹凸は、河合・森崎¹⁰⁾によって名神高速道路路完成直後の野州川橋下り線で測定された路面凹凸を不規則振動論によって算出されて路面凹凸パワースペクトル密度 $S_r(\Omega)$ を指数関数の近似式 $S_r(\Omega) = 0.001 \Omega^{-1.792}$ としたものである。この河合・森崎¹⁰⁾によって測定された路面凹凸のパワースペクトル密度は、高速道路の完成直後をもって、路面状態が「極良」の性状を示している。その後、路面凹凸を考慮した走行車両による橋梁の動的応答解析が研究されるようになり、道路橋の動的応答に路面凹凸の性状は大きく影響を及ぼすことが認識¹¹⁾されるようになってきた。しかし、橋梁の縦断勾配も同時に測定できるような簡便な路面凹凸の測定法やデータの不足などから、河合・森崎¹⁰⁾が測定した路面凹凸パワースペクトル密度は、「極良」の路面状態を示しているが、多くの研究者にその後も使用されてきた。

路面舗装上の凹凸は一見滑らかに見える。しかし、実際の路面凹凸には、橋梁の縦断勾配を含む長波長の凹凸、路面の摩耗状態によっては橋梁の格間長や対傾構間隔に相当する凹凸、さらには舗装の骨材などによる短波長の凹凸など様々な凹凸成分が含まれている。したがって、路面性状を考えるならば、路面の凹凸（振幅）値は不規則であり、その凹凸波長も不規則である。このような凹凸の周波数と振幅強度に関して不規則な路面凹凸は、通常、ある基準値まわりに分布している性状を示していることから、路面性状を確率過程と考えた場合、その基準値の平均値を0とする定常ランダム・ガウス過程と仮定される場合が一般的である。そして、路面凹凸の性状評価は、測定された路面凹凸のデータを不規則振動論を用いたスペクトル解析からパワースペクトル密度で評価する方法が確立され、以後、この考え方が踏襲されている。

1980年以後、路面凹凸のデータ不足から道路橋の路面性状に関する実態調査が行われるようになった。本田ら¹²⁾は、実地調査を基に、路面凹凸の周波数とその振幅強度に関する情報を得るために路面凹凸のパワースペクトル密度 $S_r(\Omega)$ で評価し、次式に示す指数関数に近似できることを検証した。

$$S_r(\Omega) = a / \Omega^n \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、 Ω は路面の凹凸周波数であり、凹凸波長 $\lambda = 1/\Omega$ の関係にある。また、 a は路面の平坦性を表す平滑度パラメータ、そして n は周波数によるパワーの分布を示す指数であり、上式の指数関数に近似した場合のスペクトル密度の勾配を表している。

式(5.1)において、 Ω が0に近づくとき、 $S_r(\Omega)$ は無限大に発散する。そこで、路面周波数にある上限値と下限値を Ω_U 、 Ω_L としたとき、この $S_r(\Omega)$ が発散しないように以下に示す3種類の路面凹凸パワースペクトル密度のモデルが一般的に考えられている。また、式(5.2)～(5.4)の3式を示したのが図-5.1である。

(1) Ω_u と Ω_L の範囲を単純な指数関数とするスペクトルモデル。

$$S_r(\Omega) = a / \Omega^n, \quad \Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_u \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

(2) Cut-off frequency Ω_c を導入するスペクトルモデル。

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} a / \Omega_c^n, & \Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_c \\ a / \Omega^n, & \Omega_c \leq \Omega \leq \Omega_u \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここに、 Ω_c は $S_r(\Omega)$ が発散しないように Ω_c 以下のスペクトルを平坦とする変数である。

(3) 分布形状パラメータ β を導入するスペクトルモデル。

$$S_r(\Omega) = a / (\Omega^n + \beta^n), \quad \Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_u \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ここに、 β は $S_r(\Omega)$ が発散しないためのスペクトルの分布形状を考慮した変数である。

式(5.2)～式(5.4)において、 Ω_L は一般に対象とする橋梁の支間長や橋長を考慮して決められる。 Ω_u は車両タイヤの接地長を考えた、例えば $\Omega_u = 5 \text{ c/m}$ ($\lambda = 20 \text{ cm}$) や $\Omega = 1 \text{ c/m}$ 以上の高周波数成分が橋梁応答に及ぼす影響は小さいものとして、 $\Omega_u = 1 \text{ c/m}$ ($\lambda = 1 \text{ m}$) とする場合もある。

スペクトルの特性値である a と n は実測調査で得られた値が多く用いられる。従来の多くの研究では、昭和40年に報告された名神高速道路の調査で得た $a = 0.001 \text{ cm}^2 / (\text{m/c})^{1.071}$ が用いられてきた。この値は「極良」の路面状態と判断できる²²⁾。ことから、この値を用いた解析では橋梁の動的応答を過小評価する場合もある。 n については、高速道路と一般国道などで異なるようであり、平均値的には2前後の値となるが、式(5.4)では解析上 $n = 2$ に限定する場合と n を任意の値とする場合がある。

Ω_c と β は実態調査で得たスペクトルから推定する必要がある。その調査結果²²⁾として、 Ω_c は $0.05 \sim 0.1 \text{ c/m}$ の範囲にあり、 $\Omega_c = 0.05 \text{ c/m}$ が一般的に用いられている。 β については、 $\beta = 0.05 \text{ c/m}$ や $\beta = 0.02 \text{ c/m}$ 、または $0 < \beta < 0.01 \text{ c/m}$ の範囲内で β が橋梁の動的応答に影響を及ぼさないとして $\beta = 0.05 \text{ c/m}$ が用いられることもある。

以上の路面凹凸のモデルは、橋梁の縦断方向部の路面に対するものである。これは、走行車面による橋梁振動を解析する場合、車両の走行ラインとなることから、縦断方向部の路面凹凸が大きく影響を及ぼすと考えてのことである。しかし、実際の路面凹凸には、車両走行の摩擦による橋軸直角方向のわずかな掘れもある。このわずかな掘れは、前述の路面凹凸のような平均値0の定常ランダム・ガウス過程と見なし得ない性状を呈している。路面舗装の打ち直し検査などでわずかな掘れの測定は多く実施されているが、その凹凸性状に関する実態調査に基づく凹凸特性の定量的評価やモデル化は行われていないのが現状である。

走行車面による橋梁振動の解析で、3次元とする橋梁のモデル化と同様、車面も3次元モデル化が行われるようになってきた。路面性状の評価に関する現状では、本田ら²³⁾によると、(1) センターラインから0.5 mと2.0 mの測定位置では凹凸周波数に関して路面性状の相関が弱く、3次元車面モデルを考えた場合、左右の車輪に入力する路面凹凸を独立に取り扱ってよい、(2) a と n 値は無相関で、路面凹凸のモデル化のときは両者の値を互いに独立に取り扱ってよい、など車両のモデル化を簡便にする知見が指摘されている。しかし、3次元の車両モデル、車両の走行性、路線変更による走行安全性などを考えて厳密に解析を行う場合、縦断方向部の凹凸にわずかな掘れの凹凸を加えた3次元の路面凹凸のモデル化が、今後、必要になるものと考えられる。

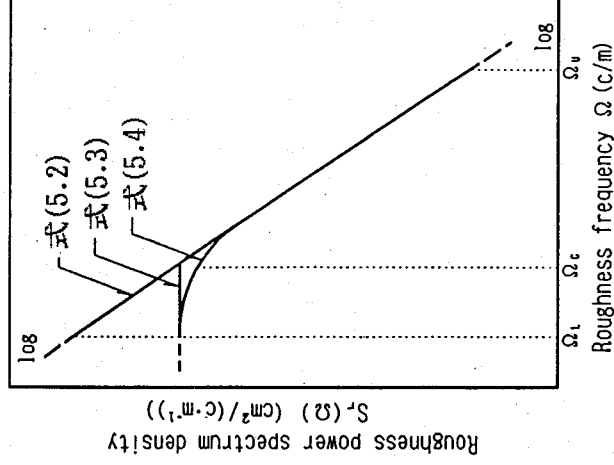


図-5.1 路面凹凸のスペクトルモデル

5. 2 伸縮継手部凹凸

道路橋の伸縮継手部を走行する車両に過大な衝撃力が生じることがある。これは、継手部凹凸（段差）に起因する局所的で瞬間的な現象であり、騒音、低周波音、地盤振動など問題となる道路橋の環境交通振動の主な原因の一つとなっている。

伸縮継手部凹凸は、道路部、継手、橋梁部と路面構成部材の異質材料による剛性の相違と衝撃力に起因する路面の摩擦や破損などによって継手箇所前後に局所的な段差と凹凸形状が生じる特徴を呈している。一般的に伸縮継手部凹凸は、前節の路面凹凸と異なり、平均値が0でない極めて非定常性の強い凹凸性状と考ええた方が妥当であり、その凹凸の最大値と凹凸形状が走行車両の動的応答に大きく影響を及ぼす⁸²⁾と考えられる。

伸縮継手部凹凸は橋梁の路面凹凸の一部であるが、凹凸性状、車両や橋梁に生じる動的応答の相違から、路面を考慮した橋梁振動の解析では、両者の凹凸を別々に考えるのが一般的である。解析上、伸縮継手部凹凸を考慮したのは、走行車両の初期値問題からである。これは、伸縮継手部を通過した瞬間の車両はね下質量に生じる鉛直速度を解析の事前に算出するものである。その継手部凹凸は、簡便な下に凸の矩形型が考えられている。この解析法は以後あまり進展はなく、橋梁振動を解析する時、実際に近い伸縮継手部凹凸上を車両が同時に走行するような直接的な解析法が主流となっている。

伸縮継手部凹凸は、本田ら⁸⁴⁾ による実態調査などによって測定データが整備されつつあり、凹凸性状の評価も検討されている。しかし、その多くの測定が凹凸の最大値を対象にしているため、前節の路面凹凸で記述したような各種のモデル化に対する検討は少ない。したがって、現在考えられている伸縮継手部の凹凸モデルを以下に述べる。

(1) 凹凸形状モデル

伸縮継手部の凹凸モデルの位置と対象区間を考慮の上、継手自体あるいは継手部凹凸を局所的な突起物として、比較的簡単な突起形状や $\sin$ 関数などのような凹凸形状に仮定する方法である。凹凸の深さ（高さ）や対象区間長は、実測値を参考にして決められる。

(2) 非定常確率過程モデル

伸縮継手部凹凸を非定常確率過程としたモデル化の方法である。この非定常確率過程は、次式の定常確率過程の関数 $z_r(x)$ と非定常過程の分散を表す確定関数 $g(x)$ の積で仮定⁸⁵⁾ される。

$$z_r(x) = g(x) \cdot z_r(x) \dots\dots\dots (5.5)$$

ここに、 $z_r(x)$ は伸縮継手部凹凸のサンプル関数である。その場合、分散を示す継手部凹凸のパワースペクトル密度 $S_r(\Omega) = 2\alpha S_0/(\Omega^2 + \alpha^2)$ で表す。なお、継手部凹凸に関する S_0 を決定する実態調査が実施されていないため、 S_0 はサンプル関数としてシミュレーションした $z_r(x)$ の標準偏差と最大凹凸値の平均値との関数関係から求められる。

伸縮継手部凹凸のモデル化については、凹凸形状モデル法は簡便で有効な方法として一般的多く用いられている。しかし、橋梁振動の解析法の進展にともない、路面凹凸の場合と同様、伸縮継手部凹凸も前述の非定常確率過程モデル法のように非定常凹凸モデルとして解析式に直接組み込み得るようなスペクトル密度の定量的な特性評価とモデル化が望まれている。

以上、路面凹凸と伸縮継手部凹凸のモデルについて述べたが、有用性の高い凹凸モデル化の確立にはデータの整備が必要である。本田ら⁸⁶⁾ は測定凹凸データを基に、凹凸性状評価に関する数値データベースを作成しており、このようなデータベースとデータの整備によって、今後、凹凸モデルを確立していく必要がある。

(本田秀行)

6. 動的応答解析法

6. 1 動的応答解析

動的応答解析法には、直接積分法とモーダル法がある¹¹⁴⁾。直接積分法は精度の高い解析法であるが、質点数の多い構造物では演算時間が長くなりすぎる。それに対して、モーダル法は、事前に計算した固有振動数と固有モードを用いる方法であり、演算時間が短いため現在ではこの方法を用いた研究報告が多い。

道路橋交通振動は、車両の移動による動的効果、伸縮継手部の凹凸及び路面凹凸のような不確定要因による不規則な振動である。この不規則な振動を解析するのに、確率論を用いた不規則振動論に基づく解析法と、時系列の応答量を求める確定的なシミュレーション法に大別される。また、不規則振動論の一部であるが、特に確率量としての振動感覚を求めるため応答の実効値を用いる二乗平均応答解析が行われる場合もある。それらの概要を以下に示す。

(1) 不規則振動論

定常確率過程でモデル化した路面凹凸上を車両が走行する場合、橋梁の振動特性が時間的に変化する。この結果、橋梁の応答の分散が時間的に変化するることになり、このような時間的に分散（確率分布）が変化する応答を非定常応答という。非定常応答解析手法には、グリーン関数による解法、スペクトル表示法とグリーン関数法の混合法、スペクトル表示法による解法、確率微分方程式による解法が提案されている。それに対して、車両が移動する効果を無視し定常状態の橋梁応答を考える場合には、応答の分散は時間に依存しない。この解析を定常応答解析という。この解析では、古典的なスペクトル表示法が一般に用いられている。数値計算例によると、橋梁の振動数と車両の振動数が接近する支間 $L = 40$ m の場合、非定常応答の最大応答が定常応答のレベルを超えるが、 $L = 60$ m になると非定常応答の最大応答より定常応答のレベルが大きくなる。一般的に、定常応答は非定常応答の最大値の良い推定値であると言われる。

(2) シミュレーション法

シミュレーションとは、「あるシステムの動きや性質などを、コンピューターを利用して分析し予測すること。コンピューターを用いる模擬実験」¹¹¹⁾として一般に理解されている。従って、コンピューター・シミュレーションはコンピューターの発達にともなって進歩し、橋梁分野でも活発に行われるようになった。移動荷重による橋梁の動的応答解析として、1965年に山田・小堀⁴⁾がシミュレーション法を先駆けとして用い、その後1970年代に入るとシミュレーション法を用いた動的応答解析に関する論文が数多く発表されるようになってきた。この解析法は、次節に述べる数値積分法の開発による所が大きい。

コンピューター・シミュレーションの利点としては、物理現象の種々のパラメーターを変化させて検討を行うパラメトリック解析ができることおよび良好な動特性を持つ構造物を設計する際に構造変更を効率よく行うことができることである¹¹⁵⁾。従って、現在のスーパーコンピューターが、将来パソコン程度の使いやすい物にまでなってくれば、一般橋梁の動的設計も容易に実施されるようになるという。

(3) 二乗平均応答解析

橋梁振動の応答の二乗平均値を求める解法である。これには、道路橋の振動が歩行者に及ぼす影響を知ることが求められることもある。各振動モードにおける応答速度の実効値（二乗平均値の平方根）を求めることにより振動感覚に基づく橋梁の使用性を考えようとする解析である¹⁶⁾。

この解析法は、橋梁の動的応答に関する一解析法としてその後に発展している。例えば、道路橋を大型車が走行する場合、車両と橋梁の連成非定常ランダム振動の問題として扱い、ランダム過程のサンプル関数の時間領域でのフーリエ級数展開を利用して、任意時刻の非定常二乗平均値を求める手法も提案されている²⁰⁾。

(藤澤利彦)

6. 2 数値積分法

振動体の動的応答解析において、運動方程式を解析的に解くことは非常に困難であり、応答を忠実に求めようとすれば、デジタル計算機を使用して直接数値積分法によって解析することになる。数値積分法には種々の手法が考えられるが、主なものあげると次のようである。

① Duhamel 積分の数値積分

この方法は 1 自由度線形振動系において、作用する不規則な外力が時間の関数として表わされることが起きる場合、または、不規則な外力が A-D 変換されて離散データ (パルス列) 化されて与えられる場合の応答解析に適用することができる。計算が確定的に進む上に、誤差が蓄積する可能性が少ないという利点があるが、しかし、解析に計算時間がかかりすぎるという欠点がある。

② 等加速度法

運動方程式の数値積分の過程において、「微小時間 Δt 秒内の応答加速度は一定である」として、次々と計算ステップを進めて行く方法で、 t_n における変位、速度、加速度、が求まればこれを用いることにより次のステップ t_{n+1} における値が確定的に定まる。この方法は繰り返し計算を要しないから、計算時間はいかからないという利点はあるが、誤差の補正ができないのでステップが進むにつれて誤差が蓄積して、ついには突然発散してしまうことがあるという欠点がある。

③ 線形加速度法

運動方程式の数値積分の過程において、「微小時間 Δt 秒内の応答加速度は直線的に変化する」として計算を進めて行く方法である。 t_n における変位、速度、加速度が求まったあと次のステップ t_{n+1} における値を求めるときに、第一回目の加速度の近似値を

$$a^{(1)}_{n+1} = 2 a_n - a_{n-1} \quad \text{あるいは} \quad a^{(1)}_{n+1} = a_n$$

として、変位、速度を求め、これを運動方程式に代入して応答加速度 a_{n+1} を求める。この a_{n+1} と最初に仮定した $a^{(1)}_{n+1}$ を比較して所定の誤差の範囲に入っていれば計算は終了したステップへ進む。収束しないときは第二回目の近似値として、 $a^{(2)}_{n+1} = a_{n+1}$ として同様に計算する。このように運動方程式を満たすように新しく決まった値を次の近似値として所定の誤差の範囲に入るまで同様な計算を繰り返す。

この方法は誤差が少なく収束性は優れているが、計算ステップごとに繰り返し計算が必要になるので計算時間がやや大くなる。

④ ニューマーク (Newmark) の β 法

この方法は現在、最も一般的に用いられている方法であり、イリノイ大学のニューマークが地震応答の数値計算のために電子計算機用に開発したものである。運動方程式の数値積分の過程において、各ステップごとに誤差の判定をし、誤差が大きいたときは加速度の修正を行って、誤差がある範囲内にとどまるように逐次近似をした後、次のステップに進むというものであり、上記の線形加速度法もこの方法の一つである。

t_{n+1} における応答加速度を $a^{(1)}_{n+1} = a_n$ とすると、変位 x_{n+1} 、速度 v_{n+1} は次式で与えられる。

$$x_{n+1} = x_n + v_n \Delta t + (1/2 - \beta) a_n \Delta t^2 + \beta a_{n+1} \Delta t^2$$

$$v_{n+1} = v_n + (1 - \gamma) a_n \Delta t + \gamma a_{n+1} \Delta t$$

ここで、 γ は普通 $1/2$ をとる。 β の値は数値積分の安定性に影響し、積分時間間隔 Δt において仮定する加速度の変化によって決められる。一般には直線変化として $\beta = 1/6$ をとる。また、積分時間間隔 Δt は考慮した最高次振動モードに対する固有周期の $1/5 \sim 1/6$ とし、収束精度は $1/1000$ 以下で積分することが多い。

この方法は適用範囲が広く、線形、非線形振動系、多自由度振動系を問わずに使用できる。

⑤ ルング・クッタ (Runge-Kutta) 法

この方法は微分方程式の数値積分法として古くから知られてきた方法で、1 階の常微分方程式の解法として開発されたものである。2 階以上の微分方程式においては 1 階の微分方程式に分解し、その連立方程式として解析することができる。

⑥ ルング・クッタ・ギル (Runge-Kutta-Gill) 法

この方法はギルによって提案されたもので、ルング・クッタの方法を電子計算機用に改良して、計算機のメモリーが少なくてすむようにした方法である。未知数の多い場合に利用すると威力を発揮するよう改良したものである。

⑦ ウィルソン (Wilson) の θ 法

この方法はウィルソンによって提案されたもので、線形加速度法を修正して時間増分の値に無関係に数値解析の解の安定を図るようにしたものである。通常の線形加速度法においては、高次モードが動的応答に及ぼす影響の大小にかかわらずなく、構造系に含まれている最小の振動周期に比べて、短い時間増分を使わないと結果が発散して不安定になってしまう場合がある。このような系の動的応答解析に対して、いくつかの無条件安定な逐次積分法が使われているが、中でも最も簡単でしかも優れた方法の 1 つがこの方法であるといわれている。

この方法では拡張した計算区間

$$\tau = \theta \Delta t \quad \text{ここに} \quad \theta > 1.37$$

に対して、加速度が線形的に変化すると仮定する。計算方法は標準の線形加速度法において、拡張した時間ステップ τ に対して加速度増分 ΔA_0 を求め、通常の時間ステップ Δt に対にする加速度増分 Δa_0 は内挿によって求める。 $\theta = 1$ とすれば普通の線形加速度法と同じとなる。 $\theta > 1.37$ とするとこの方法の威力が発揮され無条件に安定な解をえることができるといわれている。

(海野武幸)

7. 不規則振動論

7. 1 不規則振動解析の目的

走行車両による道路橋の振動は、橋梁設計において衝撃係数により評価されてきた。そのために、これまでに多くの理論的、実験的研究¹⁾⁶⁾がなされてきた。

道路橋振動の主要な原因は、車両の移動に伴う動的効果、伸縮継ぎ手部の凹凸および路面凹凸等に励起された車両の接地力である。さらに、実際の道路橋では様々な不確定要因により、橋梁は再現性のない不規則な振動をする。すなわち、車両重量、車両の振動特性、車両台数、車間距離等が変動する。しかし、これらの特性を考慮して解析を実行することは困難である。そこで、橋梁振動の最も基本的な特徴を示す、路面凹凸に起因する振動に関する解析手法が研究され、いくつか新しい不規則応答解析の手法が提案された。

道路橋振動の初期の研究は、主に衝撃係数を算定⁹⁾することにあったが、疲労強度¹¹⁾⁷⁾にも関心が持たれていた。さらに、信頼性設計の視点から、動的効果¹¹⁾⁸⁾に関心が持たれた。近年、構造強度だけでなく、歩行者の振動感覚^{10), 21)}や周辺地盤の振動⁴¹⁾等、道路環境の視点から橋梁振動が注目されている。設計や環境の許容値の評価基準の指標には、道路橋振動を取り巻く様々な不確定要因のばらつきを平均した量を用いられる。この算定を確定的な手法に基づくモンテカルロシミュレーションで実行すると、膨大な計算量が必要になる。このような、シミュレーションによる計算量の増大を回避し、応答の確率特性を直接推定することが、不規則振動解析の目的である。

7. 2 不規則振動解析の問題点

本文では、不規則振動解析を、これまで最も研究が進んでいる不規則路面凹凸による橋梁の振動に限定して説明する。路面凹凸は複雑な形状をしており、さらに、異なる橋梁では違った路面形状になる。そこで、これらを、定常確率過程でモデル化することが行われている。路面凹凸を、定常確率過程でモデル化すると、橋梁の応答は線形系の不規則応答解析の問題になる。しかし、不規則路面凹凸上を走行する車両の不規則応答解析は、通常の線形の地震応答解析などと異なり、応答解析において次のような困難な問題を持っている。

- 1) 橋梁と車両が振動モードを介して連成する。
- 2) 車両の進入時における、車両振動の初期条件による橋梁振動の非定常性。
- 3) 車両が移動することによる橋梁振動の非定常性。

モード解析法に基づき、多自由度系を1自由度系のデュハメル積分に分解する解析では、1)の問題を解くのは困難である。また、2)は車両が橋梁に進入する初期条件が不規則になる問題であり、比較的簡単に解くことができる。しかし、3)は橋梁-車両系の係数が時変係数になる問題であり、新しい解析法を開発する必要がある。

7. 3 不規則応答解析の手法

不規則応答解析の手法は、車両の移動の時間的変化を無視した①定常応答解析と、これを厳密に評価した②非定常応答解析に分けることができる。

(1) 定常応答解析

不規則応答解析が橋梁振動に適用された初期の解析⁶⁾では、路面凹凸による車両の接地力を橋梁の固定点に作用させると仮定したモデルが提案された。この解法は、路面凹凸のパワースペクトル密度と橋梁-車両系の周波数伝達関数から応答のパワースペクトル密度を求め、ウィナー・キンチンの定理より応答の分散を得ようとするものである。その後、同じ問題を共分散方程式法²⁰⁾を用いて、簡単に解析できる手法が提案された。定常応答解析は厳密な解析ではないが、非定常最大応答を推定する解法として有効であることが分かっている。

(2) 非定常応答解析

非定常応答解析は、いくつか異なる解法が提案されている。これらは、次のように分類することができる。

1) グリーン関数法^{16), 20), 27)} 非定常応答解析は、通常時間領域においてグリーン関数 (デュハメルの積分) を用いて実行される。しかし、橋梁-車両系では時変係数と連成項のために、従来の多自由度系の解析法が適用できない。これらを改良した解法が提案されている。

2) スペクトル展開法⁵¹⁾ 路面凹凸は、単位長さ当たりの凹凸数 Ω の n 乗に逆比例していることが実験的に明らかにされている。スペクトル展開法は、古典的な定常解析理論を非定常解析に拡張した理論である。橋梁振動の問題において、この手法を改良した理論が提案されている。これは、路面凹凸のパワースペクトル密度の形を自由に選択できる利点がある。

3) 共分散方程式法^{26), 28), 39)} グリーン関数法およびスペクトル展開法は、古典的な不規則振動解析を橋梁振動の問題に拡張したものである。確率微分方程式の理論によれば、応答の分散の時間的変化を、共分散方程式と呼べられる微分方程式で表現することができる。この解法によれば、非定常応答解析が確定論の解析と同様に、微分方程式の数値解法の問題として処理できる。さらに、定常応答解析は連立方程式の解法により処理できることになる。

不規則応答解析では、応答量、例えば、変位、曲げモーメントおよびせん断力の主に分散を求めることになる。時刻歴応答解析と比較して、大局的な応答の性状を把握するのに適している。また、応答の変動を表現する指標である分散が得られるので、強度設計や環境における基準を決める場合に必要になる量である。

7. 4 交通荷重による道路橋の振動制御

ここでは、走行車両による振動制御の研究について紹介する。都市高速道路高架橋の振動は、地盤に伝播し振動障害発生させている。このような、高架橋の振動制御として、1) 構造物の振動特性を変化させる、静力学的な対応、2) 動吸振器による受動的な振動制御、3) 橋梁に制御力を外から加えるアクティブな振動制御がある。理論的研究、実験的研究さらに試験的施工が実施されている。

(1) 連続化工法とノージョイント化¹¹⁹⁾

高速道路高架橋は単純桁橋が連続して架設されている場合が多い。これらの桁橋を連結して連続化し、振動数の低次化や有効質量の増加による橋梁振動の低減を図り、さらに、伸縮継ぎ無くし、車両の振動エネルギーの進入を遮断する工法が研究された。この成果に基づいて、連続化工法の施工が実施され、その効果が報告されている。

(2) 動吸振器による制御

はりのような構造物に対して、動吸振器が有効であることが知られている。多主桁の高次振動を考慮した構造物に、動吸振器を設置した場合の制振効果がシミュレーションにより確認⁶⁶⁾された。さらに、動吸振器を実橋に試験施工した実験^{120), 121)}により、その効果が検討された。走行車両による橋梁の振動に対して動吸振器を設置した場合、古典的な動吸振器の設計法では、最適な動吸振器のパラメータが決定できない。これは、橋梁振動が非定常振動不規則振動になることと、見かけ上橋梁の振動数が車両走行の影響で時間的に変化するためである。不規則振動論に基づく最適問題として、動吸振器を設計する理論が提案されている。

3) アクティブ振動制御

道路橋のアクティブ振動制御の問題に対して、現代制御理論を適用した研究^{122), 123), 124)}が行われている。この研究では、様々な現代制御理論の適用が試みられているが、車両のモデルが集中荷重であるとか、減衰のない質量-ばね系であるとか、理想化した車両モデルが用いられている。アクティブ制御が道路橋振動に実施された例¹²⁵⁾がある。この事例では、チンドンで橋脚の剛性を制御するもので、古典的な制御理論によるフィードバック制御を実施したものである。さらに、実際に、車両を走行させる橋梁模型を製作し、フィードバック制御による実験¹²⁶⁾が行われている。

道路橋の振動制御は、道路環境問題において重要な課題であり、これまで振動制御の視点から見た場合、多くの理論的、実験的成果を出してきた。

(岡林隆敏)

8. 解析法の実用化における問題点

走行車面による振動やその解析は、当初、橋梁の衝撃係数の評価に関するものが主流^{3,6)}であったが、最近では走行車面による振動問題も多様化し^{6,9)}、また、一般利用者の質的向上に対する要求とも相まって、実務設計においてもこの種の問題に取り組む機会が増加しつつある。

走行車面による種々の振動問題を検討する際、まず第一に、走行車面によって対象とした橋梁がどの程度振動するのかを事前に把握しなければならない。すなわち、既設構造物の振動制御対策案についての検討や設計段階にある構造物の振動問題についての検討では、動的応答解析を実施して走行車面による動的応答量を推定する必要がある。ここに、動的応答解析には、事前に計算した固有振動数と固有振動モードを用いるモード解析法および直接解法である直接積分法の2つがあるが、橋梁重量に比べ走行車面の重量が小さいこともあり、通常、前者のモード解析法を用いることが多い。

さて、モード解析法による動的応答解析についてはすでに幾つもの文献^{11,14)}で詳述されているが、路面凹凸やタイヤの接地長ならびに走行車面のモデル化等の取扱いについて、各研究者間で必ずしも統一が図られているとは言えず、一般の実務設計者にとって走行車面による動的応答解析を難解なものにしている一要因ともなっている。そこで、以下では、走行車面による動的応答解析を実務設計に適用する際の問題点について簡単に述べることにする。

8.1 路面凹凸とタイヤの接地長

動的応答解析をより厳密に実施するためには、路面凹凸の影響を考慮しなければならない。従来の動的応答解析では路面凹凸の実測値やシミュレーションで得られたサンプリング波形を用いているが、走行車面による動的応答解析のさらなる普及にあたっては、地震応答解析におけるエルセントロ波形に対応するような標準化路面凹凸の提示が急務の課題であると思われる。

一方、走行車面による動的応答解析では、路面凹凸の影響を緩和するため、タイヤの接地長による影響を考慮することもしばしば行われている。タイヤの接地長を考慮したことによる影響は、路面の空間周波数が 1.0 cycle/m 付近から現れるが^{1,6)}、このことは、たとえば車面の走行速度が $40\text{ km/h}=11.11\text{ m/s}$ なる場合、車面に入力される $11.11\text{ m/s} \times 1.0\text{ cycle/m}=11.11\text{ Hz}$ 以上の周波数成分の寄与が変化することに対応する。したがって、低次モードが支配的な衝撃係数を算出するような動的応答解析ではタイヤの接地長による影響はきわめて小さいものの、橋梁本体の高次振動や局部振動の固有振動数が $10\sim 15\text{ Hz}$ 付近にあり、車面が 40 km/h 程度以上で走行する場合の疲労に着目した動的応答解析ではタイヤ接地長の差異によって解析値が幾分変化する場合があることに留意しておく必要がある。

8.2 走行車面のモデル化

走行車面のモデル化としては、図-8.1、図-8.2に示す2自由度系や4自由度系モデル等が採用されている。

実務計算にあたってはより簡便な車面モデルの使用が望まれるが、橋梁モデルや路面凹凸が同一の場合でも採用する車面モデルによって動的応答値が大きく変化する場合があるのでここに例示することとする。

対象とした橋梁は図-8.3に示す3径間連続桁橋である。本橋梁上を表-8.1、表-8.2に示す諸元をそれぞれ有する2自由度系と4自由度系車面がそれぞれ 40 km/h なる速度で走行した場合の動的応答を計算すると図-8.4、図-8.5に示す結果が得られる。ここに、動的応答解析にあたってはモード解析法を適用し、10次までの固有振動数($f_1=2.819\text{ Hz} \sim f_{10}=27.768\text{ Hz}$)と固有振動モードを使用するものとしている。この際、固有振動モードの構造対数減衰率 δ はすべてのモードで $\delta=0.75/\sqrt{40.2}=0.118$ なる値を、また、路面凹凸については平滑度パラメータ a が $a=1 \times 10^{-3}$ 、周波数によるパワーの分布を示す指数 m が $n=2$ なるもとでシミュレートした同一の波形を使用している。図-8.4、図-8.5より、車面モデルを除く他の解析条件が同一でも、動的解析結果が大きく変化していることが理解できよう。この主たる要因としては車面の振動数の相違(2自由度系モデルの振動数は1次が 2.131 Hz 、2次が 13.731 Hz であるのに対し、4自由度系モデルの振動数は1次が

2.346Hz, 2 次が3.168Hz, 3 次が11.632Hz, 4 次が15.481Hz) を挙げることができる。したがって, 実務計算にあたっては, 採用した車面モデルの振動特性の明示がきわめて重要であり, 実務設計者の利用の便からは標準化車面の提示もきわめて急務の課題と思われる。

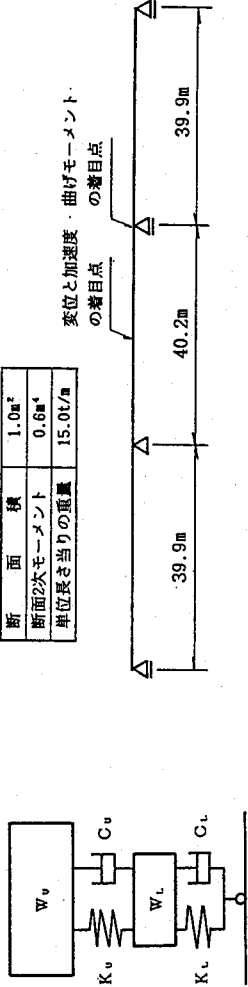


図-8.1 2自由度系車面

図-8.3 対象とした橋梁

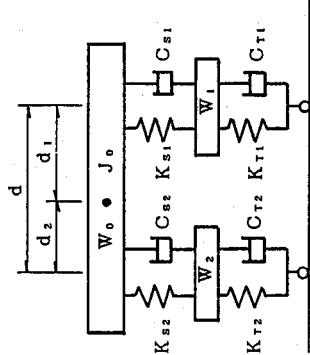


図-8.2 4自由度系車面

表-8.2 4自由度系車面の構造諸元

総重量 20 t	ばね上部	$W_0=17.0$ t
	ばね下部部	$W_1=0.7$ t
	ばね下部部	$W_2=2.3$ t
ばね上部慣性モーメント		$J_0=4.082$ t·m ²
車軸間隔	d	d=3.85m
	d ₁	d ₁ =2.84 m
	d ₂	d ₂ =1.01 m
ばね定数	前軸懸架部	$K_{s1}=500$ t/m
	後軸懸架部	$K_{s2}=1200$ t/m
	前軸タイヤ部	$K_{r1}=220$ t/m
	後軸タイヤ部	$K_{r2}=880$ t/m
減衰係数	前軸懸架部	$C_{s1}=1.7$ t·s/m
	後軸懸架部	$C_{s2}=14.0$ t·s/m
	前軸タイヤ部	$C_{r1}=0.2$ t·s/m
	後軸タイヤ部	$C_{r2}=0.7$ t·s/m

表-8.1 2自由度系車面の構造諸元

総重量 20 t	ばね上部	$W_0=18.0$ t
	ばね下部	$W_1=2.0$ t
ばね定数	懸架部	$K_u=500$ t/m
	タイヤ部	$K_L=1000$ t/m
減衰係数	懸架部	$C_u=2.5$ t·s/m
	タイヤ部	$C_L=3.0$ t·s/m

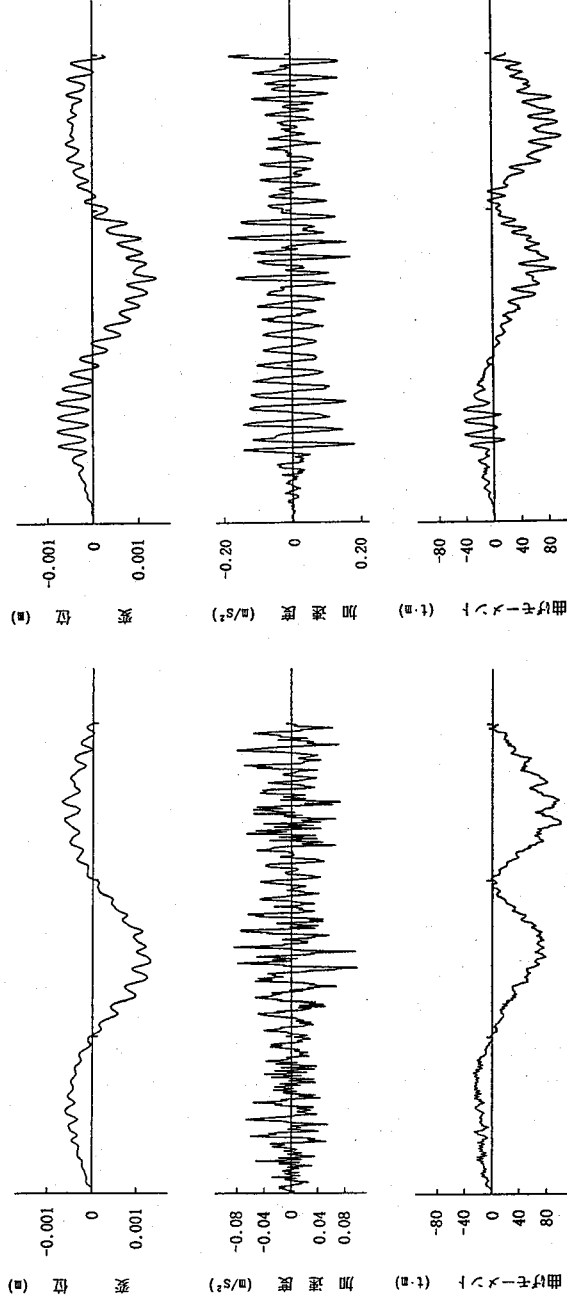


図-8.4 2自由度系車面による動的応答解析結果
(40km/h, タイヤの接地長=20.0cm)

図-8.5 4自由度系車面による動的応答解析結果
(40km/h, タイヤの接地長=20.0cm)

8.3 車面の初期条件

実務計算にあたっては、その他、種々の留意すべき問題も存在する。そのまず第一が、数値積分する際の初期条件に関する問題である。すなわち、車両が進入する直前の橋梁は静止時であると仮定しても差し支えないが、進入直前の車面の初期条件が不明であり、これを決定する必要がある。対象とした橋梁の全長が比較的長い場合には、動的応答の最大値に及ぼす車両初期条件の影響は小さいとして、車両に関するすべての初期条件をゼロにすることも考えられる。事実、橋梁の衝撃係数はこのような条件で計算している場合が多いようである。これに対し、橋梁の使用性等を検討する場合には、車両が伸縮継手部を通過する際の影響を考え、必要も出てこよう。これには、伸縮継手部による衝撃を路面凹凸の瞬間的な突起によるものと考えて車両ばね下部の鉛直速度を初期条件として与える方法やアプローチランニングによって車両の初期条件を設定する方法が考案されているが、実務技術者の利用の便からはやはり標準化された車両初期条件の提示が望まれる。

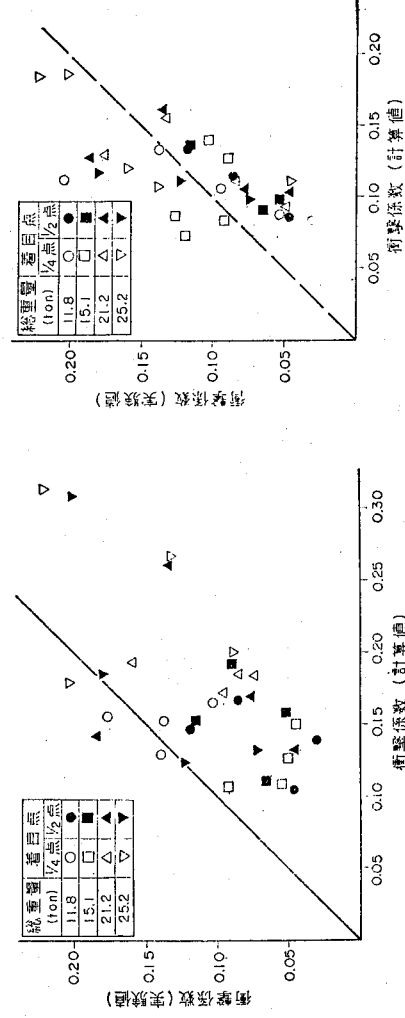
以上に述べたように、動的応答解析の実用化にあたっては、標準化された解析条件や諸元の提示が不可欠であると思われる。連行車両のモデル化に関する標準化や信頼性の高い走行車両による地盤振動の解析法の提示なども含め、この方面における今後の研究を期待する次第である。

(米田昌弘)

9. 実測値との比較による検証

橋梁に車両を走行させて振動を測定することは古くから行われており、特に長大橋梁の振動実験において車両走行試験が実施された例は多数報告されている。しかしながら、これらの多くは車両通過後の自由振動から固有振動特性を測定したり、主桁の静たわみと動たわみの比から衝撃係数を実測することに主眼が置かれており、測定結果を動的応答解析と比較した例はあまり多くない。

実測値と解析値を比較する試みは、おおむね小松、川谷による斜張橋の衝撃係数の研究に始まるものと思われる²³⁾。ここでは、橋長440 (100+240+100) m の斜張橋に20tfトラックを時速40kmで1台単独および3台連行走行させた時のひずみ記録から動的増幅率を算定し、同一条件で計算した解析値と比較している。これに続いて、成田らは支間長70.2m の単純トラス橋において実験を行ない、桁の変位応答 (加速度記録を数値積分したもの) から衝撃係数を求めて解析値と比較している⁹⁶⁾。成田らの研究の特徴は、道路橋の衝撃係数が路面平坦性によって変動することに着目した点であり、実験では路面凹凸波形を実測してこれを応答解析に用いている。また、車両走行試験では車両総重量や走行速度を変化させているほか、車両の振動も測定している。比較の結果は図-9.1に示す通りであり、車両モデルについての知見が得られている。



車両モデルA (1軸構造)

車両モデルB (2軸構造)

図-9.1 文献96における実験値と計算値の比較

衝撃係数の測定は、その後、川谷らや横山らによっても行なわれているが^{48), 97)}、実路面凹凸を用いた解析、走行速度をパラメータとした比較、車両モデルの検討など、実測値と解析値の比較方法についてはおおむね成田らの研究手法が踏襲されている。このように解析値と実測値との比較は、衝撃係数の研究におけるものが主となっているが、実測データにばらつきが大きいだけでなく、衝撃係数の力学的な意味が曖昧で、その定義も研究者によって異なるといったような問題もあって、実測値との比較で解析手法にどの程度の妥当性があるかを客観的に判断するのはかなり難しいというのが現状である。動的応答解析法の検証という本来の主旨からは、解析手法の優劣をさらに明確化する比較方法の検討が重要と考えられる。

一方、近年、橋梁の交通振動が環境問題として取り上げられるようになって、動的応答解析法を環境アセスメント手法として位置づけて、その妥当性を検討するために実測値と解析値を比較する試みも行なわれ始めた。梶川らは、高架橋の振動軽減対策として動吸振器を設置した際に、高架橋周辺の地盤振動レベルをシミュレーション予測するとともに、走行試験を行なって地盤振動レベルを実測している⁶⁵⁾。また五郎丸らは、単純桁橋から発生する低周波空気振動の音圧レベルについて、解析値と実測値の比較を行っている⁵⁴⁾。環境アセスメント手法としての動的応答解析は、今後さらにニーズが高まると考えられるが、まだ精度的に改善の余地があることが指摘されており、実測値との比較を積み重ねることにより実用的に十分な予測精度をもつ解析手法の開発が期待されることである。

(津村直宜)

10. 設計への適用に関する動向

10.1 動的設計係数（衝撃係数）

車両が道路橋を走行したとき、同じ荷重が静的に作用するより橋梁のたわみや応力が大きくなることは周知の事実である。その応答の動的影響は、鉄道橋の慣習から、総て”衝撃”として包括され、設計活荷重を割り増しする、実質的な荷重係数としての衝撃係数をもってその動的影響を設計の中に考慮されている。

動的影響は、一般的に静的応答値に対する動的応答値の比とした動的増幅率で評価され、それが設計係数として衝撃係数となっている。しかし、橋梁の設計法が許容応力度設計法から部材の限界状態を念頭において限界状態設計法に移行しつつある現在、衝撃係数も一つの安全係数として論議がなされているが、衝撃係数を算定する基になる動的増幅率それ自体の定義法についての検討は意外に少ない。また、衝撃係数は、部材の強度設計において、活荷重による最大応力に対する動的効果として表されている。このことから、衝撃係数を検討するには、本来、応力ないし曲げモーメント応答を基にした動的増幅率で評価することが好ましい。しかし、研究の当初はたわみ応答に基づいて解析される場合が多かった。

現行規定の衝撃係数に対して、わが国では当初から研究が行われてきた。たとえば、単純桁橋に関する山田・小堀⁹⁾が、単純曲線桁橋に関する中井・事口¹⁴⁾が、多径間連続桁橋に関して本田・小堀・山田¹⁸⁾や川谷・嶋田²⁰⁾などが合理的な設計衝撃係数についての提案を行っている。これらの提案値は、衝撃係数の最大値を0.4とした場合、短支間橋梁では現行の道示規定である衝撃係数値より大きく、支間長の増加と共に現行値より小さい共通の傾向が示されている。また、長大橋梁としての斜張橋に関する衝撃係数の検討²³⁾や衝撃係数の確率論的評価も行われるようになってきた。解析対象としてきたこれら多くの橋梁は、鋼橋梁が主で、コンクリート橋梁に対する検討例は少ない。

道路橋の衝撃係数に関する最近の顕著な動向としては、カナダ・オンタリオ州の基準に採用された Dynamic Load Allowance（動荷重増幅率）であろう。その動荷重増幅率は、「走行路面の不規則性に対する車両の応答を含み、走行車両と橋梁の相互作用の動的および振動効果に等価な静荷重で、道路活荷重の一部として表される。」と定義されている。この規定で特に注目すべき点は、従来の支間長に変わり、横軸に橋梁の1次曲げ固有振動数を採り入れたことである。この規定は、総重量が8トン車が単独あるいは2台連行走行した時の橋梁の動的影響に関する実態調査を基に設定されたものである。2.5~4.5 Hz で特に高い値を示しているのは、大型車両の持つばね上部の固有振動数を考慮した理由である。そのため、大型車の有している固有振動数域では橋梁との共振現象を考え、かなり高い値が採用されている。このオンタリオ州の基準に準拠した衝撃係数がスイスでも調査結果を基に検討されている。一方、最近、ドイツでもアウトバンに架かる道路橋をモデル橋として走行車両による動的応答解析を行い、衝撃係数が検討されている。その結果では、最大値が1.65で、90 mまでを複数の直線で評価し、90 m以上の長支間長橋梁では衝撃係数を考えない。基本的には、ドイツの現行規定（DIN 1072、1985）と同様であるが、解析結果はその規定よりかなり大きな値となっている。

鉄道橋の衝撃係数については、わが国では吊橋に関して伊藤⁷⁾が、高速列車を考慮した単純桁橋に関して松浦¹⁹⁾など多くの研究者によって古くから研究されてきた。これらの研究で得た知見を基に、最近、在来線や新幹線の高速化などに対する鉄道橋の衝撃係数の検討が行われてきた。その結果として、1992年鉄道橋の設計衝撃係数の規定が改訂された。この新規定の算定式は、鋼・合成橋梁の場合¹¹⁸⁾、最大値が0.7とし、また在来線新幹線かの係数や列車の最高速度を考慮した基本的には橋梁対象支間長の関数となっている。しかし、この簡便な算定式を誘導する段階において、速度パラメータの中に、載荷時の橋桁の基本曲げ固有振動数が考慮されており、オンタリオ州の基準に近いような新規定となっている。また、コンクリート橋梁の場合¹¹⁹⁾、新規定の算定式には速度パラメータや橋梁対象部材の基本曲げ固有振動数が変数として組み込まれていると共に、限界状態設計法に適用する規定となっている。

モノレールや新交通システムの橋梁に対する衝撃係数も検討^{*)}されており、そのような橋梁に対する合理的な衝撃係数の規定が整備されつつある。

設計用値としての衝撃係数は、荷重規定、載荷法、それに強度や安全性などを含め同時に論議されるべきものであり、ただ単に、橋梁の動的応答から一概に決まるものではない。しかし、新設計法を取り入れたアメリカでも衝撃係数の規定は従来の算定式をそのまま踏襲しており、また強度の安全性照査を行う以前に衝撃を含む荷重係数が任意に決められるなど、単独に評価される場合が多い。

わが国の場合、確率論的適用に供するデータが不足している現状では、安全性照査法のレベルⅠの準確率論的な方法で発表されている提案式を合理的に取り入れていく方向が実用的と思われると同時に、平成5年11月25日付けの設計自動車荷重改訂によって道路橋の衝撃係数に関する研究も新たな課題として検討が必要になってきた。

(本田秀行)

10. 2 限界状態設計法への取り組み

本節では、鋼構造物設計指針（土木学会編）、道路橋示方書（日本道路協会編）、コンクリート標準示方書（土木学会編）、および、鉄道構造物等設計標準（鉄道総合技術研究所編）を対象に、我が国における限界状態設計法の現状と将来を概観し、橋梁交通振動の分野における研究成果が本設計法にどのような形で反映し得るかという点について検討を加える。なお、ここでは、同じ動的問題の一つである地震の影響の取り扱い方にも言及し、比較して考察の対象とする。

（1）鋼構造物設計指針（土木学会編一昭和62年11月版）

鋼構造物設計指針は、鋼橋に適用し得る我が国最初の限界状態設計法に基づく設計基準であり、本設計法の定着を第一の目的として、検討すべき限界状態を明確にし、従来の許容応力度設計法による設計手続きを限界状態設計法の書式に断面力表示で書き改めたものである。したがって、許容応力度と安全率を分離して、断面力の断面耐力に対する比に安全率 γ を乗じた値が1.0を超えないことを確かめることにより終局限界状態での照査を行うものと規定し、安全率 γ の値が例示されているが、許容応力度設計法に基づく当時の鋼道路橋示方書（道路協会編一昭和55年2月版）および国鉄建造物設計標準（土木学会編一昭和58年4月版）における安全率そのものである。その他、使用限界状態、および、疲労限界状態での照査が規定されている。

使用限界状態における照査では、振動に対する照査について、従来の基準におけるたわみ制限を限界状態設計法の書式に書き改めた照査式によるものとし、それ以外の形で照査する場合には適宜適切な形で照査するものと規定されている。さらに、この適切な形の照査の例として、横断歩道橋の場合には、歩行者が2Hzの強制周期力を橋に与えると見なして、主桁のたわみ振動の固有振動数が2Hz前後にならないように配慮すると共に、2Hzの強制周期力による橋の最大加速度が0.1g（gは重力加速度）以下となるように設計することが望ましいとされていることが解説されている。

疲労限界状態での照査の照査では、必要に応じて適宜適切な形で照査を行うものと規定され、死荷重、列車荷重、衝撃および遠心荷重のみによる応力度に対して検算する前掲の国鉄建造物設計標準の規定を準用した応力表示の照査式が解説に例示されている。

（2）道路橋示方書（日本道路協会編一平成2年2月版）

道路示方書が現在も許容応力度設計法を基本としていることは周知のことであるが、「Ⅱ. 鋼橋編」の総則に規定された活荷重（衝撃を含まない）に対するたわみの許容値については、車両の安全な走行の保償や、通行者に与える不快感の排除も目的としていることが解説されており、上述の鋼構造物設計指針で準用されたことからわかるように使用限界状態での照査の一つとも考えられる。

また、「Ⅲ. コンクリート橋編」には、設計計算に関する一般事項として終局荷重用時の荷重組み合わせが、主荷重である死荷重、活荷重＋衝撃、および、従荷重である地震の影響に荷重係数 α 、 β を乗じて規定され、これらによる作用曲げモーメントが部材断面の破壊抵抗曲げモーメントを超えないように設計することを定めている。

さらに、「Ⅴ. 耐震設計編」には、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査（保耐法）が規定されており、震度法における値を大きく上回る設計水平震度を用い、弾塑性応答を考慮した等価水平震度によって、大地震の影響による水平力が許容塑性率を満足する断面保有水平耐力を超えないように設計することが定められている。この規定は、明らかに、終局限界状態での照査に対応するものである。

このように、道路橋示方書においても、一部には限界状態設計法の考え方が既に取り入れられているが、全面的にこの考え方に置き換えられる時期は未だ明確にされていない。

（3）コンクリート標準示方書（土木学会編一平成3年9月版）

コンクリート標準示方書「設計編」は、昭和61年版からほぼ全面的に限界状態設計法が取り入れられて現

在に至っており、終局限界状態、使用限界状態、および、疲労限界状態に対する検討が規定されているが、鉄筋コンクリートおよび無筋コンクリート構造物については従来の許容応力度設計法による規定も併記されている。

死荷重等の永久荷重の他、各種の変動荷重および偶発荷重が規定され、変動荷重として活荷重は当然含まれているが、衝撃は除かれている。ただし、限界状態設計法における荷重の特性値は設計耐用年数を上回る再現期間における荷重の最大、最小値を一般には意味し、解説には、道路橋および鉄道橋のように活荷重について規格値のある場合にはこれに荷重修正係数 ρ_1 を乗じて特性値とするとされていることから、衝撃を考慮する余地は残されている。

地震の影響については偶発荷重として規定され、上述の道路橋示方書「V. 耐震設計編」のように設計震度の異なる2種類の地震を対象とはせず、大地震のみを想定した設計水平震度を用い、設計想定地震時における構造物の限界状態による補正係数により設計震度を低減できることが定められている。ただし、規定された設計水平震度は、中規模程度の地震に対応する従来のものを大きく上回る値ではない。

終局限界状態に対する検討では、断面力表示の照査式を与えて、考慮すべき荷重の組み合わせ、および、それぞれの荷重の特性値に乘じて設計荷重を設定するための荷重係数 γ_1 を定め、設計荷重による断面力に構造解析係数 γ_2 を乘じて得られる設計断面力の設計断面耐力に対する比に構造物係数 γ_3 を乗じた値が、1.0以下であることを確かめることにより照査するものと規定されている。なお、地震の影響については、終局限界状態の照査におけるものとは別に、耐震に関する検討項目が改めて規定されている。

使用限界状態に対する検討では、変位・変形、および、振動に対する検討が規定され、変位・変形に対する検討に関して、車両走行の安全性や快適性、構造物の使用上の不快感の回避などが目的の一部として解説されている。また、変位・変形の許容値は、一般に通常の使用限界状態に対して設定されるが、必要に応じて地震等の異常時の限界状態に対して設定することもあるとしている。

振動に対する検討については、変動荷重による振動を対象として規定され、コンクリート構造物で振動が問題になることはまれであるが、変動荷重作用時の周期と部材の固有周期が近接するような場合には共振を起し、構造物の使用上不快感を抱かせたり、構造物にひびわれを発生させたりすることがあり、このような場合には、部材の断面寸法を変更するなどして固有周期を変えるなどの対策を講ずるのがよいと解説されている。

疲労限界状態に対する検討では、終局限界状態におけるものと同じ書式ではあるが応力表示により照査式を与え、簡便な方法として材料の疲労強度をもとに疲労に対する安全性の検討を行う照査式を用いることを原則とする一方、部材断面の疲労耐力に対する本来の照査を断面力表示の照査式により行ってもよいことが規定されている。このような簡便な方法は、梁の曲げやせん断に対しては断面の疲労耐力と材料の疲労強度とはほぼ比例関係にあることから定められたものである。また、設計変動応力度あるいは変動断面力は、変動荷重の特性値に荷重係数 γ_1 を乗じた設計変動荷重による応力度あるいは断面力に構造解析係数 γ_2 を乗じて求められ、これに対する等価繰返し回数の作用として不規則な変動応力度あるいは断面力を置き換えてもよいと規定されている。

(4) 鉄道構造物等設計標準（鉄道総合技術研究所編—平成4年10月版）

鉄道構造物等設計標準は、国鉄の民営化を契機として、運輸省、鉄道総合技術研究所の主導により、大学、公団、および、JRを含む私鉄、公・私営地下鉄の関係者など官・学・産界の共同によりまとめられたもので、全面的に限界状態設計法の考え方が取り入れられ、「鋼・合成構造物（第1編 鋼鉄道橋、第2編 鋼とコンクリートの合成鉄道橋）」と「コンクリート構造物」とに分冊されている。

衝撃は変動荷重の一つとして列車荷重とともに規定され、その特性値は列車荷重の特性値に衝撃係数を乗じて与えられるものと定められている。設計衝撃係数としては、スパンのみならず最高速度にも依存し、鋼・

合成構造物とコンクリート構造物とで異なる算定式が規定されている。また、地震の影響については、鋼・合成構造物では、震度法、修正震度法を基本としており、従来と同様のものが規定されている。これに対して、コンクリート構造物では、道路橋示方書「V. 耐震設計編」の地震時保有水平耐力法におけるものと同じ標準値を用い、大地震を設計想定地震として鋼・合成構造物における値を大きく上回る設計水平震度が規定され、設計許容塑性率別の補正係数が導入されている。また、列車荷重により作用する水平方向の慣性力を計算するために、列車荷重の特性値に乘ぜられる設計震度も、コンクリート構造物の場合には別に定められている。

終局限界状態の照査は、鋼・合成構造物では、多少書式が異なるものの上述のコンクリート標準示方書とほぼ同様に行われ、衝撃に対する荷重係数 γ_1 は列車荷重の特性値に対するものと同じ値を用いることが定められている。また、偶発荷重である地震の影響および衝突荷重に対する照査を行う場合にも列車荷重の特性値が定められているが、衝撃は加算しないものと規定されている。さらに、構造解析係数 γ_2 の値を1.0より大きく取って行われる死荷重、列車荷重および衝撃による橋桁の浮き上がりに対する照査や、列車走行の安全性を確保するために行われる地震時の変位に対する照査も、終局限界状態の照査の一つとして規定されている。

コンクリート構造物では、コンクリート標準示方書と同一の書式で照査され、偶発荷重として地震の影響を考える場合、列車荷重は従たる変動荷重としてよく、衝撃および遠心荷重は考慮しなくてよいと規定されている。なお、ここでは、耐震に関する検討として、大地震時の耐震性能の検討、および、中程度の規模の地震を想定した設計水平震度による地震時の列車走行安全性の検討が、終局限界状態の照査とは別に定められている。

使用限界状態の照査は、鋼・合成構造物では、構造物または部材の過度の振動、変位、変形による使用困難を回避し、列車の走行性、乗り心地を確保するために行うものと解説し、橋桁のたわみの照査において対象とする荷重として列車荷重の特性値のみが規定され、衝撃は加算しないものと定められている。ここでは、主桁、横桁のたわみおよび左右レール位置でのたわみ差の照査が規定され、スパン・連数・最高速度別に定められた各々の限度値に対する安全性を終局限界状態の照査におけるものと同じ書式の照査式で確かめることが定められている。なお、解説には、たわみの限度値を定めるために適用された動的応答計算のモデルが示され、走行性（軸重減少率）および乗り心地の両面から検討されたことなども付記されている。

コンクリート構造物では、応力度、ひび割れ、変位・変形等に関する使用限界状態が設定されており、構造物および部材の設計衝撃係数は、平均的な値として終局限界状態に対するものの $3/4$ としてよいと定められている。耐久性に関するひび割れの検討においては、列車荷重、衝撃および遠心荷重の特性値を、該等線区の特性と構造物の設置箇所による列車荷重の持続性、頻度等を考慮して定めてよいことも解説されている。また、列車荷重による変位・変形量の検討は、スパン・連数・最高速度別に定められた制限値以下とするのを原則とし、変動荷重として、一般に、列車荷重および遠心荷重を考慮、衝撃は必要に応じて考慮すればよいと規定されており、衝撃を考慮するのがよい例として、低剛性桁や新幹線橋梁等で速度パラメータ α が従来よりも大きくなる場合などを解説で挙げている。なお、解説には、鋼・合成構造物の場合と同様に、たわみの制限値を定めるために適用された動的応答計算のモデルなども付記されている。

疲労限界状態の照査は、鋼・合成構造物では、死荷重、列車荷重、衝撃および遠心荷重を考慮するのを原則とし、この場合の列車荷重の特性値は終局限界状態の照査に用いられる値と同じにすることが規定されている。これらの荷重の特性値に荷重係数 γ_1 を乗じて得られる設計荷重を組み合わせて、それによる最大作用応力範囲を求め、終局および使用限界状態におけるものと同じ書式ではあるが応力表示の照査式により、疲労限としての応力範囲に対する安全性の照査を行うものと規定している。さらに、この照査式が満足されない場合の規定として、実応力比に対応して導入された構造解析係数 γ_2 の値を1.0より小さく取り、繰返

し数の影響を考慮して疲労許容応力範囲に対する安全性を照査するための照査式が同一の書式により応力表示で定められている。この照査の場合、最大作用応力範囲の算定式における係数 f_1 , f_2 のうち、繰返し数を考慮した係数 f_1 については、衝撃は平均的なものを考え、従来どおり設計で用いられる衝撃係数の $3/4$ として求めたものが解説表に示されている。

コンクリート構造物では、繰返し引張応力を受ける鋼材の破断について検討するのを一般とし、列車荷重により生じる疲労の検討を行う場合、変動荷重として、一般に、列車荷重、衝撃および遠心荷重を考慮することが規定され、設計衝撃係数は、使用限界状態の照査と同様に、平均的な値として終局限界状態に対するものの $3/4$ としてよいと定められている。照査の要領、書式はコンクリート標準示方書と同一であり、終局限界状態におけるものと同じ書式ではあるが応力表示による照査式を用いて、材料の疲労強度をもとに疲労に対する安全性の検討を行う簡便な方法による照査を原則とする一方、部材断面の疲労耐力に対する本来の照査を断面力表示の照査式により行ってもよいことが規定されている。設計変動断面力に関する等価繰返し回数の作用に置き換えて行われる列車荷重により生じる疲労に対する安全性の検討に関する規定では、この簡便な方法による検討手順が解説されている。

(5) 今後の取り組み方について

現在、平成7年度を目標に鋼構造物設計指針の改訂作業が開始され、コンクリート構造物との書式の統一、および、海外における限界状態設計法に基づく設計基準との整合性を図りながら作業が進められているが、活荷重の特性値に衝撃係数を乗じたものを衝撃の特性値とし、それに荷重係数 γ_1 を乗じて設計荷重とする考え方は、本設計法においてほぼ定着した考え方であり、衝撃係数の位置付けには従来の許容応力度設計法におけるものと基本的に変化が見られない。

したがって、限界状態設計法への適用に対象を特に絞った研究の必要性は、今までにも指摘されているように余りないようである。ただし、使用および疲労限界状態の照査における衝撃係数の低減や、本来動的な問題を含んでいるにもかかわらず衝撃を除いた荷重によって静的計算により行われる使用限界状態の照査、および、繰返し数および静的計算値の実応力に対する比率を考慮した疲労限界状態の照査における構造解析係数 γ_2 の取り方など、今後、検討を加えて行くべき課題が多少は残されているものと考えられる。

しかしながら、使用限界状態として、新たな限界状態を設定でき、動的な解析を伴う適切な照査式を誘導する必要性が明らかになれば、道は大きく開かれるものと思われる。本研究小委員会で最終的な目標としている橋梁交通振動に関する設計指針あるいは設計便覧において、この問題が取り上げられ、少なくともその端緒が得られることを期待したい。

以上、筆者の限界状態設計法に対する乏しい知識の中で、橋梁交通振動の分野における研究成果の本設計法における係わり方について現状と将来の展望を試みた。結果的に、余り内容のないものに終わってしまった観があるが、今後の研究において何らかの参考になれば幸いである。

(前田 研一)

11. あとがき

本編では、「橋梁交通振動の動的応答解析と設計への応用」と題して、橋梁・車両・路面のモデル化、固有用解析法、動的応答解析法、および、不規則振動論などの歴史・現状・将来を記述し、実測値との対比による検証や解析法の実用化における問題点、さらには、限界状態設計法への取り組みを含む設計への適用に関する動向について言及した。

2年間に渡る調査活動の中間報告書として取りまとめたものであり、各章の項目を決定するのみで内容については執筆分担者の裁量に一任したこと、および、執筆期間・紙面数の制約などから、これまでの成果の集大成と言える域には到底達していないが、対象とした研究分野を概観するには十分な内容が含まれていると思われる。そのような目的で本編をご利用いただければ幸いである。

本編を担当したワーキンググループの成果として、土木学会論文報告集・同論文集について1963年以降の55編、および、構造工学論文集について1984年以降の28編を、それぞれ対象分野に関する文献として検索し、ここでは省略したが、A4版2頁の共通なフォーマットで文献抄録を作成している。また、年次講演会講演概要集について、1965年以降の146編の文献リストを作成している。本編の執筆に役立てたことはもちろんであるが、今後、これらを論文のコピーとともにファイルし、必要に応じ閲覧できる場を提供することを検討中である。

その他の学協会誌・論文集、各種の技術誌、研究所報告、公団・各社技報、および、海外文献についても、文献検索を行って文献リストを作成しているが、対象論文がほとんど無かった場合や、入手が困難あるいは量が膨大などの理由で断片的な検索を余儀なくされた場合もあって、公表に値するものには現状ではなっていない。

なお、本章に引き続き本編の最後に掲載された参考文献の欄に、土木学会論文報告集・同論文集、および、構造工学論文集については検索された上述の全編を、年次講演会講演概要集、その他の学協会誌・論文集、各種の技術誌、研究所報告、公団・各社技報、および、海外文献については本文で引用されたもののみを、それぞれ記載しておいたので参考になされたい。

(本田 秀行・前田 研一)

参考文献

土木学会論文集および土木学会論文報告集

- 1) 平井一男：種々の移動荷重をうけるはり構造の基礎方程式とその応用，土木学会論文集，No.90，pp.29～36，1963年2月。
- 2) 平井一男：移動荷重をうける相対2辺単純支持，他の2辺自由なる直交性異方板の振動性状について，土木学会論文集，No.92，pp.1～8，1963年4月。
- 3) 平井一男：結合法による格子構造の動的解析，土木学会論文集，No.101，pp.25～33，1964年4月。
- 4) 山田善一・小堀為雄：ランダム自動車荷重列による道路橋の衝撃に関する研究，土木学会論文集，No.119，pp.1～9，1965年7月。
- 5) 成岡昌夫・大村裕・中川建治・山口富雄：直格子斜桁橋の固有振動数に関する研究，土木学会論文集，No.139，pp.1～8，1967年3月。
- 6) 山田善一・小堀為雄：活荷重に対する道路橋の動的応答－衝撃係数－に関する考察，土木学会論文集，No.148，pp.40～51，1967年12月。
- 7) 伊藤学：走行荷重に対する吊橋の動的応答と衝撃，土木学会論文集，No.149，pp.1～17，1968年1月。
- 8) 会田忠義：トラスけたの自由振動の立体的解析，土木学会論文報告集，No.163，pp.1～13，1969年3月。
- 9) Yoshinosuke YASOSHIMA, Manabu ITO and Takashi NISHIOKA: Some problem of suspension bridges under running of railway vehicles (鉄道車両の走行における吊橋の諸問題)，土木学会論文集，No.167，pp.47～52，1969年7月。
- 10) 小松定夫・中井博：曲線桁橋の動的応答に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.174，pp.41～55，1970年2月。
- 11) 小松定夫・中井博：アナログ計算機による曲線桁橋の動的応答解析，土木学会論文報告集，No.178，pp.11～26，1970年6月。
- 12) 小松定夫・中井博・事口寿男：曲線桁橋の自動車による動的応答と衝撃係数に関する研究，土木学会論文報告集，No.192，pp.55～68，1971年8月。
- 13) 松本嘉司・佐藤秀一・西岡隆・塩尻弘雄：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究，土木学会論文報告集，No.205，pp.63～70，1972年9月。
- 14) Hiroshi NAKAI and Hisao KOTOGUCHI: Dynamic response of horizontally curved girder bridges under random traffic flows (ランダム交通荷重による曲線桁橋の動的応答)，土木学会論文報告集，No.244，pp.117～128，1975年12月。
- 15) 星谷勝・中根健一：橋の振動による心理的反応の理論解析，土木学会論文報告集，No.246，pp.1～8，1976年2月。
- 16) 小堀為雄，梶川康男：単一動荷重に対する道路橋の振動感覚，土木学会論文報告集，No.248，pp.11～23，1976年4月。
- 17) 前田幸雄，林正，前田研一：幾何学的非線形を考慮した平面骨組構造物の動的応答計算法，土木学会論文報告集，No.249，pp.71～80，1976年5月。
- 18) 小堀為雄，梶川康男：振動感覚を評価するためのアーチ橋の動的応答スペクトル，土木学会論文報告集，No.251，pp.127～130，1976年7月。
- 19) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No.256，pp.35～47，1976年12月。
- 20) 吉村虎蔵，彦坂照，内谷保：単一走行車両による道路橋の非定常ランダム応答の解析，土木学会論文報告集，No.258，pp.35～44，1977年2月。

- 21) 梶川康男, 小堀為雄: 動的応答から見た歩道橋の使用性に関する確率論的考察, 土木学会論文報告集, No.266, pp.51~61, 1977年10月.
- 22) 國田恵一郎, 堀川都志雄: 道路橋床板の輪荷重直下の応力の算定について, 土木学会論文報告集, No.273, pp.15~22, 1978年5月.
- 23) 小松定夫, 川谷充郎: 斜張橋の自動車走行による動的応答と衝撃係数に関する研究, 土木学会論文報告集, No.275, pp.13~28, 1978年7月.
- 24) 梶川康男, 小堀為雄: 振動感覚を考慮した歩道橋の確率論的設計, 土木学会論文報告集, No.285, pp.29~36, 1979年5月.
- 25) 藤野陽三, 伊藤学, 遠藤元一: シミュレーションに基づく道路橋設計活荷重の評価, 土木学会論文報告集, No.286, pp.1~13, 1979年6月.
- 26) 岡林隆敏: 単一走行車両による道路橋の二乗平均応答解析, 土木学会論文報告集, No.286, pp.15~27, 1979年6月.
- 27) 彦坂照, 吉村虎蔵, 内谷保: 連行自動車荷重による単純桁橋の非定常ランダム応答と衝撃係数, 土木学会論文報告集, No.290, pp.31~41, 1979年10月.
- 28) 岡林隆敏, 中井一彦, 谷龍修道: 高次振動を考慮した道路橋の単一走行車両による非定常r.m.s.応答, 土木学会論文報告集, No.296, pp.13~24, 1980年4月.
- 29) 本田秀行・小堀為雄: 実験計画法によるローゼ桁橋の振動軽減法評価, 土木学会論文報告集, No.301, pp.37~46, 1980.9.
- 30) 梶川康男: 振動感覚を考慮した道路橋の使用性解析に関する考察, 土木学会論文報告集, No.304, pp.47~58, 1980.12.
- 31) 本田秀行・小堀為雄: 走行自動車による3径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数, 土木学会論文報告集, No.313, pp.13~22, 1981年9月.
- 32) 本田秀行・城戸隆良・梶川康男・小堀為雄: 道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査, 土木学会論文報告集, No.315, pp.149~155, 1981年11月.
- 33) 松本嘉司, 藤沢伸光: 風を受けて振動する吊橋上の2軸車両の走行性, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.123~135, 1982年1月.
- 34) 本田秀行・梶川康男・小堀為雄: 道路橋の伸縮装置部の凹凸性状, 土木学会論文報告集, No.324, pp.173~176, 1982年8月.
- 35) 梶川康男: 振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察, 土木学会論文報告集, No.325, pp.23~33, 1982年9月.
- 36) 水澤宣作・梶田建夫・成岡昌夫: 走行車両による斜スラブの動力学性状について, 土木学会論文報告集, No.326, pp.167~170, 1982年10月.
- 37) 足立義雄・岡村宏一・島田巧: 道路橋床版の低周波域における振動性状について, 土木学会論文報告集, No.330, pp.37~48, 1983年2月.
- 38) 本田秀行・小堀為雄・山田善一: 多径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数に関する考察, 土木学会論文報告集, No.331, pp.65~73, 1983年3月.
- 39) 岡林隆敏・山口実浩: 連行車両による道路橋の二乗平均応答解析, 土木学会論文報告集, No.334, pp.1~11, 1983年6月.
- 40) Toshiro. HAYASHIKAWA: Effects of Shear Deformation and Rotary Inertia on Suspension Bridge Response under Moving Loads (車両走行による吊橋の動的応答におけるせん断変形と回転慣性の影響), 土木学会論文報告集, No.335, pp.183~193, 1983年7月.
- 41) 梶川康男・大嶋信太郎: 周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法, 土木学会論文報告集, No.341, pp.79~86, 1984年1月.

- 42) 本田秀行・小堀為雄・山田善一：道路鋼桁橋の走行荷重による動的影響評価，土木学会論文集，No. 350/I-2, pp.359~362, 1984年10月。
- 43) 吉田博・梶川康男・長谷川宏：繰り返し走行荷重による鋼製はりのダイナミック・シェイクダウンについて，土木学会論文集，No.356/I-3, pp.361~368, 1985年4月。
- 44) 大島俊之・能町純雄・月田良博・三上修一：はり理論による低周波空気振動の放射音圧レベルの解析，土木学会論文集，No.356/I-3, pp.527~536, 1985年4月。
- 45) 丸山収・斎藤悦郎・星谷勝：移動荷重—はり系の動特性推定，土木学会論文集，No.368/I-5, pp.283~292, 1986年4月。
- 46) 藤掛一典・大野友則・西岡隆：走行質量の影響を考慮したアーチ橋の動的応答，土木学会論文集，No. 374/I-6, pp.389~398, 1986年10月。
- 47) 本田秀行・小堀為雄：路面性状が走行荷重による道路橋の動的応答に与える影響，土木学会論文集，No.374/I-6, pp.615~618, 1986年10月。
- 48) 川谷充郎・小松定夫・佐々木 孝：走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答特性に関する研究，土木学会論文集，No.392/I-9, pp.351~358, 1988年4月。
- 49) 本田秀行・小堀為雄：道路橋の橋面凹凸性状に関する数値データベースの作成，土木学会論文集，No. 398/I-10, pp.385~394, 1988年10月。
- 50) 川谷充郎・嶋田玲志：桁橋の自動車走行による不規則振動と衝撃係数，土木学会論文集，No.398/I-10, pp.303~309, 1988年10月。
- 51) M. KAWATANI and S. KOMATSU: NONSTATIONARY RANDOM RESPONSE OF HIGHWAY BRIDGES UNDER A SERIES OF MOVING, Proc. of JSCE, No.398/I-10, pp.81~88, October, 1988.
- 52) 岩瀬敏昭・平島健一：Transfer-Matrix 法による移動荷重を受けた連続はりの動的応答解析，土木学会論文集，No.422, pp.265-274, 1990年10月。
- 53) 横山功一・井上純三：自動車走行モードと道路橋の衝撃係数，土木学会論文集，No.422, pp.391-394, 1990年10月。
- 54) 五郎丸英博・白石捷夫・原公・小森武：単一走行車両による単純桁橋の低周波空気振動の解析，土木学会論文集，No.427, pp.133-142, 1991年3月。
- 55) 比江島慎二・藤野陽三：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減，土木学会論文集，No.465, pp. 107~116, 1993年10月。

構造工学論文集

- 56) 本田秀行・小堀為雄・山田善一：走行荷重に対する道路鋼桁橋の動的影響評価，第30回構造工学シンポジウム，Vol.30, pp.257-264, 1984年2月。
- 57) 白木渡・松保重之・高岡宜善：シミュレーション手法による道路橋床版の信頼性解析，構造工学論文集，Vol.32A, pp.571-581, 1986年3月。
- 58) 烏野清・成富勝・日笠山徹巳・小坪清真：上路式PC吊橋の道特性とその改善，構造工学論文集，Vol.32A, pp.691-698, 1986年3月。
- 59) 松村駿一郎・梶川康男・山内幸裕・酒井 徹・中平進夫：広幅員多径間連続桁橋に対する振動照査について，構造工学論文集，Vol.33A, pp.495-502, 1987年3月。
- 60) 内容保・彦坂照・大塚久哲：主桁支持方式の異なる長大斜張橋の走行車両による動的増幅率特性，構造工学論文集，Vol.33A, pp.467-474, 1987年3月。
- 61) 川谷充郎・小菅朗・嶋田玲志・小松定夫：路面不整の統計学的特性と道路橋の衝撃係数，構造工学論文集，Vol.33A, pp.459-466, 1987年3月。

- 62) 本田秀行・小堀為雄：道路橋の伸縮装置部に生じる走行自動車の衝撃力特性と路面性状の影響，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 451-458，1987年3月。
- 63) 岡林隆敏・山手弘之・藤野陽三：不規則交通流による道路応答の非正規過程による解析，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 713-720，1988年3月。
- 64) 川谷充郎・嶋田玲志：桁橋の構造諸元実態調査と走行荷重による不規則振動，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 721-730，1988年3月。
- 65) 梶川康男・沖野真・宇藤滋・松浦康夫・伊関治郎：動吸振器による高架橋の振動軽減対策，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 585-595，1989年3月。
- 66) 梶川康男・沖野真・吉川実・校本正信：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 597-605，1989年3月。
- 67) 川谷充郎・嶋田玲志・田辺裕之：桁橋の走行車両による不規則振動に基づく衝撃係数の評価法，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 741-748，1989年3月。
- 68) 横山功一・井上純三・永原隆：道路橋床版の衝撃係数に関する実験，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 749-757，1989年3月。
- 69) 横山功一・井上純三・永原隆：路面段差部に作用する自動車衝撃荷重の特性，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 757-764，1989年3月。
- 70) 岡林隆敏：走行車両の不確定な特性を考慮した道路橋の不規則振動解析，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 765-774，1989年3月。
- 71) 川谷充郎・大倉一郎・山田靖則・福本啓士・難波宗行：自動車走行による床版および橋梁各部の動的応答実験，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 679-684，1990年3月。
- 72) 川谷充郎・本田義人：斜張橋の走行荷重下の動的応答と衝撃係数について，Vol. 36A，pp. 697-704，1990年3月。
- 73) 川谷充郎・難波宗行・大松正松・亀井正博・中出：斜張橋の走行荷重下による動的応答実験と理論解析，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 937-944，1991年3月。
- 74) 深沢泰晴・杉山俊幸・中原和彦・水上浩之：車両走行時の道路橋から放射される低周波音の基本特性，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 937-944，1991年3月。
- 75) 岡林隆敏・竹下波・小西保則：単一車両走行によるプレートガーダー橋の不規則応答解析，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 965-972，1991年3月。
- 76) 梶川康男・織田一郎・校本正信：走行車両による鋼アーチ橋の疲労損傷照査に対する動的立体解析の適用，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 1089-1096，1991年3月。
- 77) 中島章典・津村直宜：車両・橋梁系振動問題のためのシミュレーション法についての一考察，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 781-788，1992年3月。
- 78) 川谷充郎・米島幹雄・小松定夫：道路橋の自動車走行による不規則振動解析に基づく路面平坦度維持管理基準の評価法，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 789-795，1992年3月。
- 79) 岡林隆敏・竹下波・岩見章博：交通荷重による補剛アーチ橋の振動制御のための動吸振器の最適設計，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 805-813，1992年3月。
- 80) 横山功一・澤田憲文・岩津守昭・澤登善誠・右近大道・伊関治郎：動吸振器による道路橋の交通荷重の軽減効果について，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 815-823，1992年3月。
- 81) 岡林隆敏・竹下波：単一車両が走行するプレートガーダー橋の動吸振器の最適設計，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 671-680，1993年3月。
- 82) 川谷充郎・西山誠治：路面凹凸を考慮した道路橋の走行荷重による動的応答解析，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 733-740，1993年3月。
- 83) 鈴木森晶・加藤雅史：歩道橋の減衰特性と歩行時振動振幅の検討，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 811-818，1993年3月。

土木学会年次学術講演会

- 84) 小林治俊, 國田恵一郎, 寒川美樹: 走行荷重による矩形板の動的性状に及ぼすせん断変形の影響, 土木学会第38回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.65~66, 1983年9月.
- 85) 岡林隆敏・山野長弘: 伸縮継手部を通過する単一走行車両による道路橋振動の評価、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集、I-257、pp.513~514、1985年9月.
- 86) 利守尚久, 吉川博, 桜井順: S字形曲線斜張橋の走行車両による応答解析と走行実験, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.745~755, 1987年9月.
- 87) 織田一郎, 梶川康男: 動的応答解析における橋梁のモデル形式の選定について, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.834~835, 1988年10月.
- 88) 織田一郎, 梶川康男: 走行荷重による道路橋の疲労シミュレーション解析について, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.422~423, 1989年10月.
- 89) 安部勝, 岩崎正二, 宮本裕, 出戸秀明: 境界要素法による吊橋の固有振動解析, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.634~635, 1989年10月.
- 90) 林川俊郎, 角田与史雄, 富樫篤英: 方丈ラーメン橋の固有振動解析とモデル化について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.744~745, 1990年9月.
- 91) 松波幹太, 中島章彦, 阿部英彦: 走行荷重による合成桁止めめの水平伝達せん断力の動的応答解析, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.338~339, 1991年9月.
- 92) 小塚幹夫, 横山功一, 澤田憲文, 金子学: 高架橋の交通振動解析における境界条件の影響に関する検討, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.876~877, 1991年9月.
- 93) 佐藤安弘・千島美智男: モノレール及び新交通システムの橋梁の衝撃係数について、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-458、pp.1090~1091、1992年9月.
- 94) 曾我部正道, 金森真, 涌井一, 松本信之: 高速鉄道用PC斜張橋の衝撃係数・列車走行性解析, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第1部, I-285, pp.718~719, 1993.10.

その他

- 95) 成田信之・桂樹正隆・江本勝: 路面凹凸を考慮した橋梁の衝撃係数, 土木技術資料, Vol.20, No.3, pp.27~32, 1978年3月.
- 96) 成田信之・桂樹正隆・江本勝: 衝撃係数の再検討に関する実橋実験, 土木技術資料, Vol.22, No.5, pp.21~27, 1980年5月.
- 97) 横山功一・井上純三・藤城隆・永原隆: 道路橋の衝撃係数に関する実橋実験とシミュレーション解析, 土木技術資料, Vol.28, No.5, pp.15~20, 1986年5月.
- 98) 横山功一・井上純三・澤田憲文・伊関英彦・金子学: 高架橋の交通振動解析に関する報告書, 土木研究所資料, Vol.3078, pp.1~45, 1992年3月.
- 99) 大地羊三: 鉄道橋の衝撃係数, 鉄道研究報告, No.370, 1963.10.
- 100) 平井敦, 伊藤学: 長径間鉄道吊橋の活荷重による変形と衝撃, 1966年.
- 101) 岡田勝也: 橋梁の動的応答を考慮した新幹線鉄筋コンクリートスラブの合理的断面, 鉄道技術研究報告, No.853, 1977年3月.
- 102) 松浦章夫: 高速鉄道における橋桁の動的応答に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1074, 1978年3月.
- 103) 涌井一: 新幹線車両の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度, 鉄道技術研究報告, No.1086, 1978.7.
- 104) 涌井一・松本信之・田辺誠: 鉄道車両と構造物の動的相互作用解析法に関する研究—力学モデルと実用解析法—, 鉄道総研報告, Vol.7, No.4, pp.9~18, 1993年4月.
- 105) 小西一郎・竹村勝之: 走行荷重による道路橋の疲労寿命推定に関する確率統計的研究, 第18回構造・橋梁工学研究発表会, Vol.18, pp.93-100, 1971年12月.

- 106) 米田昌弘・宮地真一：走行車両による橋梁構造物の動的応答解析におけるタイヤ接地長の影響，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，Vol.16，pp.221～226，1992年7月．
- 107) 河合平夫・森崎健二：自動車走行路面の性質と振動乗心地への関連性、三菱重工技報、Vol.2、No.2、pp.20～27、1965.2.
- 108) 前田研一・米田昌弘・西土隆幸・磯光夫：車両走行による立体骨組構造物の動的応答解析法と留意点，川田技報，Vol.6，pp.115～119，1987年1月．

書籍類

- 109) 林正・浜田正則：新体系土木工学1，数値計算法，技報堂，1983年．
- 110) 戸川準人：有限要素法による振動解析，サイエンス社，1987年．
- 111) 神原武志・佐々木直幸・内藤正美・洲上信子：コンピュータ物理の世界，講談社出版(ブルーバックス)，1991年
- 112) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物，丸善，pp.32～37，1992年10月．
- 113) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、コンクリート構造物、丸善、pp.27～31、1992年10月．
- 114) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993年10月．
- 115) 安田仁彦：モード解析と動的設計，コロナ社出版，1993年11月

追加分

- 116) T.Hung, :Vibration of Bridges, Shock and Vibration Digest, Vol8, No.3, pp.61～76, 1976.
- 117) M.Shinozuka. and T.kobori:Ratigue Analysis of Highway Bridge, Proc. of JSCE, No.208, pp.137～148, 1972-2.
- 118) 土木学会編：構造物の安全性・信頼性，土木学会，pp.86～100，1976年10月
- 119) 久保雅邦、梶川康男、岩津守昭、関本宏：既設の小規模鋼単純桁の連結化による交通振動軽減対策工法の開発—鋼桁の連続化ジョイントレス工法—，土木学会振動制御コロキウム講演論文集，PART B，pp.15～22，1991年7月．
- 120) 讃岐康博，梶川康男，岩津守昭，林秀，井関治郎：動吸振器の制振動効果に関する現地実験，土木学会振動制御コロキウム講演論文集，PART B，pp.89～96，1991年7月．
- 121) 澤田憲文，横山功一，金子学，澤登善誠，岩津守昭，右近大道，井関治郎：動吸振器（TMD）による道路橋交通振動の軽減効果について，土木学会振動制御コロキウム講演論文集，PART B，pp.105～112，1991年7月．
- 122) M.Abdel-Roman and H.H.E. Leipholz:Active Control of Flexible Structures, ASCE, J. of the Structural Division, Vol.104, No.ST8, pp.1251～1266, 1978-7.
- 123) M.Abdel-Roman and H.H.E.Leipholz:Structural Control by Pole Assignment Method, ASCE, J. of the Engineering Mechanics Division, Vol.104, No.EM5, pp.1159～1175, 1978-9.
- 124) M.Abdel-Roman, V.H.Quintana and H.H.E.Leipholz:Optimal Control of Civil Engineering Structures, ASCE, J. of the Engineering Mechanics Division, Vol.106, No.EM1, pp.57～73, 1980-2.
- 125) 矢作枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集第365号／I-3，pp.435～444，1985年4月．
- 126) 川谷充郎、西山誠治、森淳彦：道路橋の振動制御に対する制振装置の開発，土木学会振動制御コロキウム講演論文集 PART B，pp.197～204，1991年7月．

第Ⅱ編 橋梁環境振動の現状と課題

1. 概要	39
2. 低周波音の計測方法と評価	40
2. 1 低周波音の一般的概念について	
2. 2 低周波音の基本的性質について	
2. 3 低周波音の発生と伝搬について	
2. 4 低周波音の測定	
2. 5 低周波音の評価方法	
2. 6 実測事例	
3. 橋梁上部工振動および支点反力変動の軽減法	50
3. 1 外力および支点反力特性	
3. 2 既設橋における軽減対策	
3. 3 軽減対策の現状と展望	
4. 橋梁下部工から地盤を伝播する振動の計測とモデル化	60
4. 1 概説	
4. 2 振動の計測法	
4. 3 モデル化と解析法	
4. 4 地盤振動の特徴	
4. 5 地盤振動軽減対策法	
4. 6 計測およびモデル化事例の把握	
4. 7 問題点と今後の活動に向けて	
5. 振動感覚および振動使用性の評価	67
5. 1 振動の心理的影響	
5. 2 振動感覚の評価	
5. 3 歩道橋の振動使用性	
5. 4 道路橋の振動使用性	
5. 5 問題点および今後の課題	
参考文献	

第1章 概要

橋梁上を車両が走行することにより、橋梁上部工に振動が発生する。この振動は橋梁を通行する車両や人々に不都合な影響を及ぼすことがある。また、この上部工の振動は、空気振動として周辺に直接伝播するとともに下部工を通して地盤に入り周辺に伝播し、環境振動として周辺の構造物や人々に様々な影響を及ぼす可能性もある。このような種々の影響に対して、その程度に応じて振動を軽減する方法や橋梁の振動使用性を検討することも必要となる。

ここでは、このような問題を橋梁環境振動の対象範囲として扱っているが、まだまだ研究途上の分野であり、実務においても手探り状態の部分も多い。そこで本編では、このような橋梁環境振動に関する研究ならびに実橋梁における現状を整理してまとめるとともに、今後の検討課題について述べている。次章以下においては、橋梁環境振動を次の4項目に分類し、下記のような内容について記載している。

- ① 低周波音の計測方法と評価
- ② 橋梁上部工振動および支点反力変動の軽減法
- ③ 橋梁下部工から地盤を伝播する振動の計測とモデル化
- ④ 振動感覚および振動使用性の評価

①は、橋梁上部工の振動が空気振動として周辺に伝播する低周波音の問題を扱っている。まず低周波音の一般的概念、基本的性質ならびにその発生と伝播について示し、次に低周波音の測定および評価方法の現状を実測事例とともに述べている。

②については、まず橋梁上部工振動の発生機構ならびにその振動特性について示し、次に上部工振動および支点反力の各種軽減対策の現状とともにその展望を述べている。

③は、特に高架橋について②の上部工振動が下部工を通して地盤に伝播する問題を扱っている。この振動の計測法、数値解析法を示すとともに地盤振動の特徴ならびに地盤振動軽減対策法を示し、事例や今後の課題についても述べている。

④は、上部工の振動が橋梁を通行する人に及ぼす影響の問題を扱っている。まず振動が人体に及ぼす心理的影響や振動感覚の評価について示し、次に歩行者による歩道橋の振動使用性と走行車両による道路橋の振動使用性の現状について示し、今後の課題を述べている。

(加藤雅史)

第2章 低周波音の計測方法と評価

2-1 低周波音の一般的概念について

(1) 低周波音の歴史的動向^{1) 2)}

歴史的に低周波音をみると、バリの国際会議（1973年）で0.1～20Hzの範囲を超低周波音として定義し、またデンマークで行われた会議（1980年）では、1～100Hzの周波数を低周波音と呼んでいる。これに対し日本では、環境庁が1976年から調査研究を進め、1984年に「低周波空気振動調査報告書－低周波空気振動の実態と影響」をまとめ、100Hz程度まで含めたものを低周波空気振動としている。

(2) 低周波音と超低周波音について¹⁾

音の基本的な性質は、音圧レベル(dB;デシベル)と周波数(Hz;ヘルツ)により決まり、この周波数とは空気中の粒子が1秒間に振動する回数である。一般的に人間は20～20kHzの音を聴くことができるとされており、これを可聴音と呼んでいる。しかし、実際には20Hzの音を感知することもあるし、15kHz以上の音を殆ど感知しない場合もある。このように人間の音を感知する周波数領域を明確にする事は難しいが、日本や海外において、低周波音と超低周波音とを区別する考え方は、概ね図2-1のようである。100Hz以下の可聴音を含む音を低周波音、20Hz以下の音を超低周波音としているようである。但し低い周波数はせいぜい1Hz程度までとするのが一般的である。

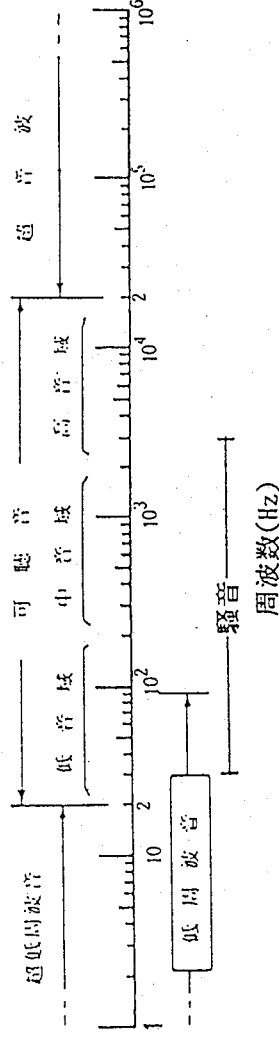


図2-1 低周波音の考え方

(3) 低周波音及び超低周波音の発生源³⁾

低周波音及び超低周波音の発生源としては、工場施設のコンプレッサーやボイラー、交通機関の橋梁、建設作業の発破工事等様々なものがある。これらの発生源を主な発生周波数別に分類すると、図2-2となる。コンプレッサー等はシリンダー内における空氣の圧縮・膨張を繰り返すことにより低周波音を発生させ、その発生周波数は数10Hz程度である。また、橋梁やダムの放水、発破作業等は20Hz以下の超低周波音を主に発生させる。

橋梁によるこの発生原因は、主に構造物の共鳴のためと言われているが、その他に道路に設置されている防音塀が、加振され超低周波音を発生させる場合もある。人間が超低周波音を感知するのは、その音圧レベルが大きい場合であり、通常は窓ガラス・建具などをたたかせる二次的な発生音により感知することの方が殆どである。

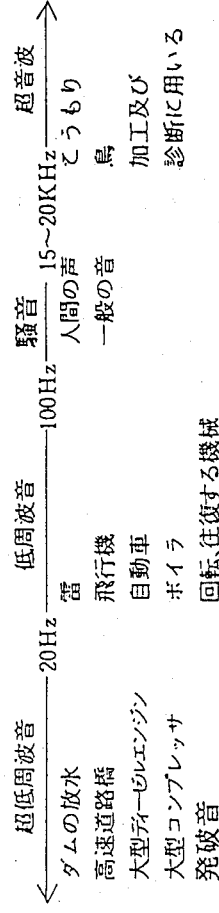


図2-2 発生源とその発生周波数

2-2 低周波音の基本的性質について

(1) 低周波音の物理的性質

可聴音であろうと低周波音であろうと、音は空気中を伝搬する疎密波である。従って可聴音と全く同じ定義で、低周波音も、周波数 (Hz)、音の強さ (W/m^2)、音圧レベル (dB) を表している。しかし、可聴音と大きく異なるのは、その波長である。常温における音の伝搬速度は $340\text{m}/\text{s}$ であり、周波数と波長の関係が表 2-1 となる。可聴音の場合、その波長の範囲は数 cm ~ 10m 程度である。しかし、低周波音の場合、最低でも 3m となり、 5Hz に至っては 68m にもなり、可聴音に比べ非常に波長が長くなる。空気中を音が伝搬する場合、その伝搬過程に異なる媒質があると、ホイヘンスの原理で説明されるように音は反射、屈折、回折を起こす。これらのうち回折に関して騒音の場合、上記したように波長が短いため、回折に伴い音が減衰する (回折減衰)。しかし、騒音に比べて波長の長い低周波音の場合、この回折減衰があまりみられなくなり、結果的に伝搬過程において低周波音が減衰しにくくなる。このことが、低周波音の影響を遠距離でも受ける原因の一つとなる。

(2) 低周波音の表示方法⁴⁾ ~ ⁸⁾

音圧の単位はパスカル (Pa) である。人間が感じる音圧の範囲は、非常に幅が広く、聴力の正常な若者で 2×10^{-5} (Pa) から 20 (Pa) である。1 気圧が 10^5 (Pa) であるのに比較すると、音の圧力変動は極めて微小な圧力変動であることが分かる。この微小な音圧変動をパスカルのままですと、桁数の大きな値となり日常扱いにくくなる。この様な微小な感覚の変化を、それに対応する刺激の変化で表すには、フェヒナーの法則があり、この 2 つの関係から、 2×10^{-5} (Pa) を基準量とした、音圧の対数表示により音圧レベルを定義し、単位をデシベル (dB) としている。低周波音においても音圧レベルの範囲は、ほぼ可聴音と同じ 0dB ~ 120dB 程度である。

橋梁から発生する低周波音の音圧レベルは、その構造により異なるが、これまでの研究調査では橋梁直下で 90 から 100dB のものが多いようである。

また、騒音の場合は、各周波数に対する音圧レベルに、人間の耳の感覚に合せた A 特性の周波数荷重特性によって表示している。一方、低周波音の場合は、『2-5. 低周波音の評価方法』で示すように、音圧に対する感覚をどの様に人間の感覚に対応させるかについて様々な研究がなされており、周波数荷重特性が提案されているのが現状であり、橋梁から発生する低周波音の実態を検討する場合は、周波数荷重特性を付けないで平坦な特性で表示している。

2-3 低周波音の発生と伝搬について⁹⁾ ~ ¹⁵⁾

低周波音は、自然現象によって発生する場合と社会の生産活動によって発生する場合に分類されよう。表 2-2 は、低周波音の発生源とその発生現象を示したものである。

(1) 低周波音の発生メカニズム

一般に低周波音の発生メカニズムは、騒音や振動のそれと同様に考えて差し支えないものである。その発生メカニズムは、物が爆発したり、燃焼したりすることによって、直接、空気中に低周波成分の音が発生したりする。また、空気の圧縮や膨張の繰り返しにより直接、空気中に低周波成分の音が発生することもある。あるいは、空洞の気柱や構造物との共振・共鳴によって、低周波成分が増幅され放射される場合もある。

(2) 橋梁低周波音の発生メカニズム

多くの場合、高速道路に架かっているスチール橋梁等のジョイント部を大型車が通過した際に、その橋梁自体が振動して図 2-3 に示すように橋梁全体から直接、空気中に低周波成分の音が放射されたりする。ジョイント部の加振だけでなく、橋梁のスパン長さによる共振によっても低周波成分の音が放射されたりする。

表 2-1 周波数とその波長例

周波数 (Hz)	波長 (m)	備考
1k	0.34	騒音
500	0.68	
100	3.4	低周波音
20	17.0	
10	34.0	超低周波音
5	68.0	

この時の周波数は、橋梁のスパン長さによって異なるが、おおよそ4～5Hz前後の一次固有振動数になっている。

(3) 低周波音の距離減衰

可聴音成分をもつ、いわゆる騒音の距離減衰は、音源の大きさによって異なるが、例えば、点音源の場合には、距離が倍になる毎に6dB減衰することが知られている。一般には図2-4のように距離による項と空気等の吸収を加味した、いわゆる超過減衰の項との和になる。特に、周波数が高周波成分になるにつれて距離減衰の勾配が大きくなっていくことも知られている。また、可聴音成分を含む低周波音の距離減衰は、騒音と同様な傾向となるが、長距離へ伝搬することが知られている。中には数キロオーダーの伝搬によって問題を起こした例もある。

(4) 橋梁低周波音の距離減衰

(3)で述べたように、いわゆる騒音と同様に点音源では倍距離6dBの減衰であるが、超過減衰を期待できにくいので、倍距離6dBにはほぼ近くなる。図2-5は、橋梁の床版から発生した低周波音の距離減衰を示したものである。低周波成分域では、倍距離6dBの傾向になっていないが、高周波成分域では、ほぼ倍距離6dBの傾向になっている。また、走行床版の上面と裏面の干渉や共振などにより、発生源近くでは、周波数と共に複雑な距離減衰を示している。

表2-2 低周波音の発生源とその発生現象

項目	発 生 源	発 生 源 に よ る 現 象
自然現象	大気の乱れ、海の波 地震、磁気嵐、雷	大気の揺動によるもので、1～3 Hzを主成分とする極めて微小な音圧である。
機 械	エンジン ボイラ コンプレッサ 加熱炉 ポンプ 振動ふるい コンベヤ 破砕機	往復動機構で、低速大形のものが多い。例えば、コンプレッサの吸入口側からは、意外に大きな空気の圧力変動が発生する。
自 動 車	エンジン	エンジンの状態をアイドリングにしたときに発生しやすい。
鉄 道	トンネル	列車がトンネルに突入することによって生じた圧縮波が、トンネル内を伝わりトンネル出口に到達すると、外部にパルス状の圧力波（超低周波音）が放射される。これが、トンネルの出口でドカーンという音とともに発生する。
航 空 機	ソニックブーム エンジン	超音速機が音速の壁を破るときに生じる衝撃波のうち、N波が低周波域に主成分を持つ。
船	エアークラッシュ エンジン	ディーゼルエンジンによる空気の圧力変動により10～20 Hz付近のものが多い。
そ の 他	爆発・発破 ダム放流 橋梁	発破などによる圧力波は、10 Hz付近の低周波成分が多い。

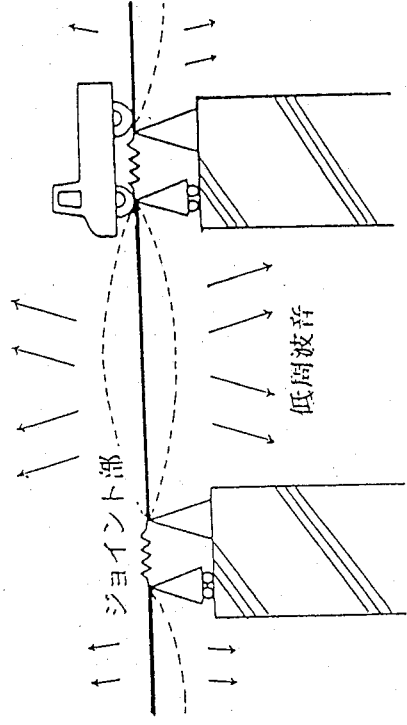


図2-3 橋梁低周波音の発生メカニズム

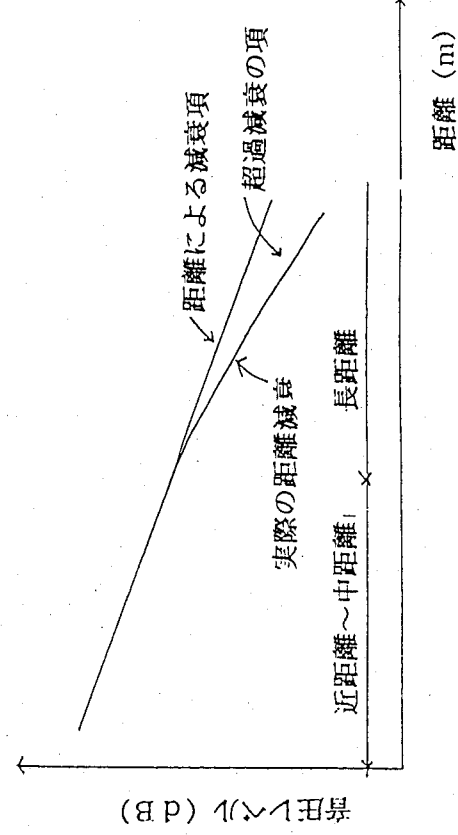


図2-4 距離減衰の定性的な傾向

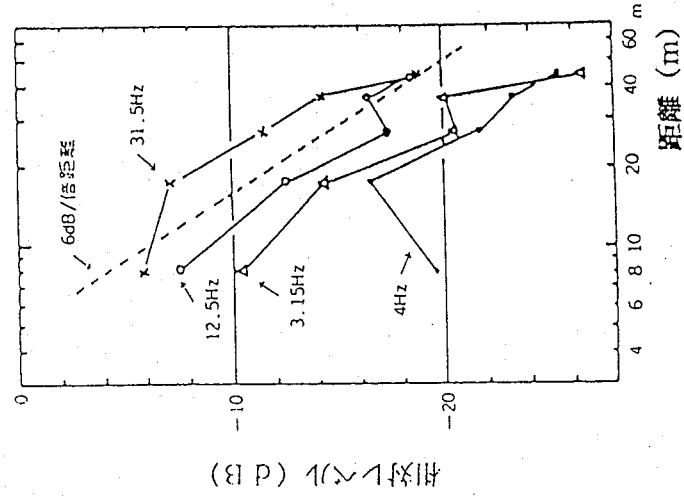


図2-5 橋梁低周波音の距離減衰

2-4 低周波音の測定^{16)~19)}

低周波音の測定は、専用の低周波音マイクホンをを用いるのが一般的である。周波数特性としては2~500 Hzの圧電素子を用いたマイクホンである。また、模型実験や騒音との比較を必要とする場合には、可聴域から低周波領域までの特性をもった精密騒音計を用いることがある (B&K社 2209精密騒音計等)。こうした機器は、一般に0.2~20000Hzの平坦特性を持ったコンデンサ型マイクホンが用いられている。

現在、橋梁の現地測定に用いられているのは、低周波音マイクホンと振動レベル計を組み合わせたシステムで図2-6に示すような特性をもっている。また、マイクホンの周波数特性を利用して低周波音レベル計の音響校正にピストンホン (周波数250Hz) を用いることが可能である。

計測結果の処理は、解析に必要な周波数帯域 (たとえば 2~50Hz) のフィルタを通して、騒音計のslowと同じ動特性を用いて低周波音の音圧レベルを求める。マイクホンの設置は騒音計と同じ方法でよいが、特に風が強く当たると、高圧送電線の下などの強電界内での測定は避ける必要がある。橋梁本体に取り付ける場合と、地盤からパイプ等を用いてマイクホンを立ち上げる方法とは、その測定結果に有意な差がないことから橋梁の桁等にマイクホンを取り付けても問題がないと報告されている。^{16), 17)}

低周波空気振動は交通量や風に影響を受けるが、特に風の影響として平均風速 1.5~2.0m/sec以上^{16), 17)}になると音圧レベルに大きな影響を与えるため、測定にあたっては常に専用の風防スクリーンを用い、また風速を測定して風速の大きい時刻の測定値は評価値から外すことが肝要である¹⁸⁾。なお、低周波空気振動の評

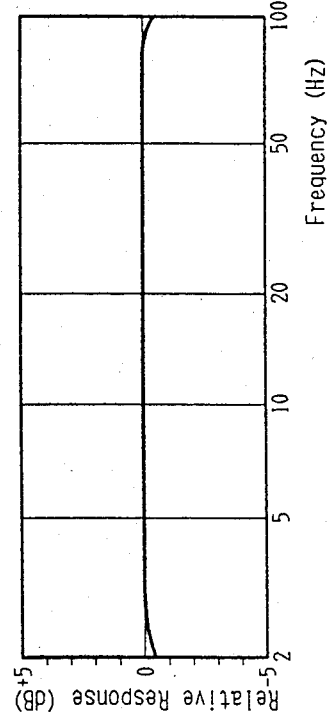


図2-6 低周波マイクホンの周波数特性 (MV-03, VM-14B)

価方法についての規定や測定方法の規定はなく¹⁹⁾、他橋における多くの実測値との比較や振動レベルとの比較を行い、発生メカニズムの解析や処置方法の検討を行うのがよい。

現在用いられる測定・分析システムは、図2-7に示すシステムが一般的であり、振動レベルの評価システムとほぼ同様である。

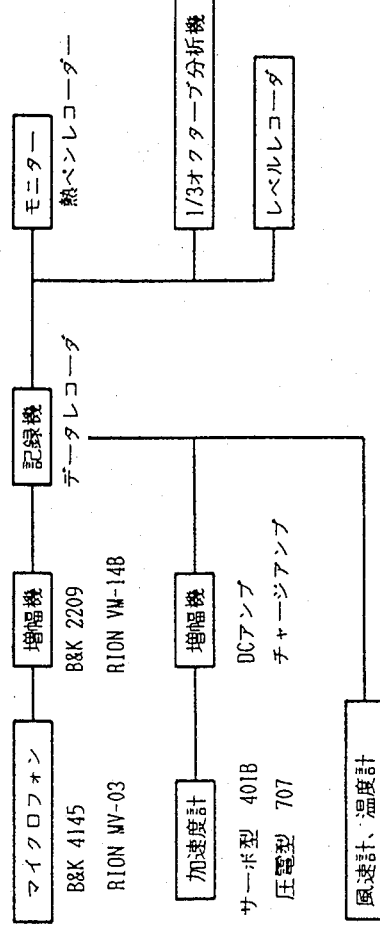


図2-7 低周波音の測定・分析システム

低周波マイクロホンで測定した信号を、増幅器（騒音計や振動計）に取り付けられた指示計（メーター；0.63secの時定数を持ったもの；レベルレコーダのSLOW特性）に示される値を低周波音レベルとしている。しかし、ほとんどの測定では信号の記録を必要としているためレベルレコーダや磁気テープ等の記録としており、測定目的によってはFFT分析や1/3オクターブ分析で卓越する周波数帯を分析し、橋梁の振動分析結果と照査する手法がとられている。

2-5 低周波音の評価方法^{20)~27)}

(1) 現状について

可聴音域における騒音に関しては騒音レベル、全身振動を考慮した環境振動に関しては振動加速度レベル（振動感覚補正済み）が、それぞれ計測結果の評価値として設定されており、これらに関する計測器は、日本工業規格によって標準化され、計測及び評価体系は若干問題を含みながらも整備されている。一方、低周波音に関しては、計測方法が規格化に至っておらず、例えば、周波数分析に関しては、1/3オクターブバンドやFFT等による表示あるいは計測の周波数範囲に関しても20Hz、50Hz、100Hzを上限とする低周波音圧レベルで表示するなど、計測者によって異なるため計測値の質や共通性がそこなわれている。このことから、低周波音を評価することを目的として、それらに関する研究者から各種の周波数範囲及び周波数荷重特性が提案され始めている。

(2) 評価方法について

低周波音の影響に関しては、① 人体への影響：最小可聴値、心理的影響、生理的影響、睡眠への影響等の研究そして② 構造物への影響：窓ガラス、建具等、家具類等の研究が行われてきている。このような観点から周波数範囲における周波数補正を行う荷重特性の設定と共に低周波音圧レベル計の指示動特性が重要となり、その時定数の設定に関する検討が必要である。各研究者によって、提案された荷重特性について紹介する。1) 心理的影響に関するもの：① L S L (Low Frequency Weighted Sound Pressure Level) は、Leve、時田らによって提案された。この特徴は、低周波音に特有である振動感、圧迫感を考慮した特性となっている。実験室実験により評価されたもので、50Hzをピークとして低音域は-12dB/oct、高音域では-18dB/octの減衰特性となっている。② L F 1 (Low Frequency 1) は、犬飼らによって提案された。実験室の心理実験に基づいて、低周波音と可聴音域の騒音が複合された時の評価方法を示している。この特徴は、高音域ではA特性に近く、20Hz以下では、次に示すG1特性にほぼ近似している。③ G1特性は、ISO/DP7196で提案されているものである。これは、感覚いき値に基づいた特性で、10Hzを0dBとして20Hzにピークを持ち、低音域側は-12dB/oct、高音域側は-24dB/octの減衰特性となっている。そして、ISO/DIS7196.2でG特性として再提案された。④ L S P L (Low Sound Pressure Level) は、超低周波音 (20Hz以下) 領域の音圧レベルを対象としており、20Hz以上の周波数では、-24dB/octの減衰特性となっている。⑤ L F N R (Low Frequency Noise Rating) 曲線は、Brunner&Leventhalにより、低周波音成分の優先する可聴音の評価に適用するものとして提案された。これは、NR曲線を100Hz以下にしたものと同じである。2) 生理的影響に関するもの：① G2特性は、ISO/DP7196でG1特性と共に提案された。Isingの生理的影響に関する暴露実験に基づいているといわれ、20Hz以下が、G1特性より減衰勾配が-6dB/octの穏やかな特性となっている。3) 構造物への影響に関するもの：低周波音での苦情のほとんどは、「建具：窓がうす、家具類、調度品類等のがたつき」による物的なものであることから、実験室実験によって求めた「建具のがたつき値」と比較して物的影響の評価を試みている。これらは、定常的な低周波音に対するものの目安であり、発破のような衝撃音に関しては、定常的な低周波音より10dB余り高いレベルで「建具のがたつき値」となる実験結果となっているとの報告もある。図2-8、9は低周波音に対する周波数荷重補正を示したものである。図2-10は、建具がたつきに関する実験結果を示したものである。

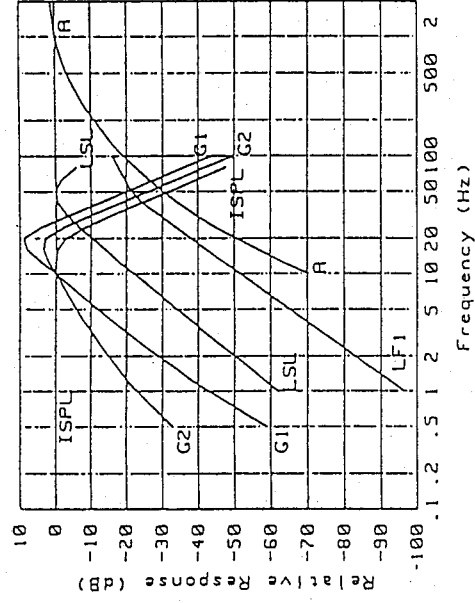


図2-8 低周波音に対する荷重特性

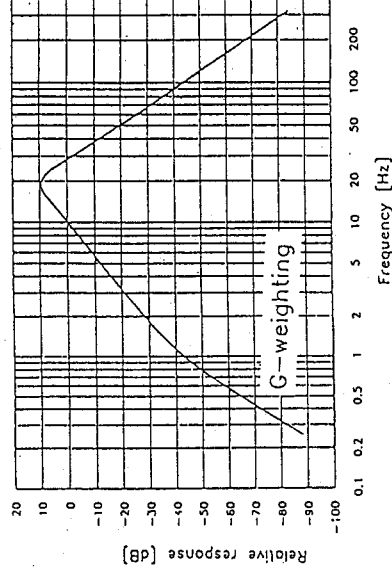


図2-9 低周波音に対する周波数G荷重

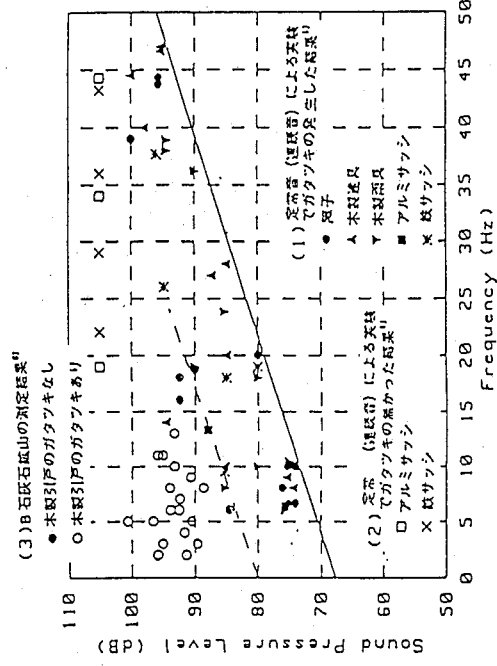


図2-10 建具等の低周波による「ガタツキ」の発生に関する実験結果

(3) 今後の課題

国際的には、ISOが活発に研究・討議を繰り返しているが、我が国では、評価方法のみならず計測方法も確立されていない。このことから(社)日本騒音制御工学会低周波音分科会では、4、5年前から検討し始め、「低周波音及び超低周波音測定方法(案)」が取りまとめられ、方向性が明確になりつつある。

2-6 实测事例

実橋の計測事例としては数多く認められるが、多くの測定例が裁判などの影響から公表されておらず、十分な資料がないのが現状である。低周波音の苦情が発生する橋梁としては一般にトラス橋と鋼床版橋が多いといわれている。トラス橋はその構造上床版が振動し易く、また、一般に支間も長く渓谷などに架設されるために橋梁全体がたわみやすく低周波音が発生しやすい。また、鋼床版橋はコンクリート床版に比べて軽量であり、弾性に富んでおり振動しやすいためである。低周波空気振動の発生は橋梁振動の発生と深く関係しており、その発生要因の多くが構造部材の振動であるため、対応にはいずれの場合でも決定策がないのが実状である。この他の要因としては橋梁周辺の地形によって大きく異なる。これは空気中を伝播する際の低周波空気振動は非常に長い波長 ($\lambda = 50 \sim 300 \text{m}$) であるためである。入りくんだ谷間などでは空気振動が共鳴し、橋梁から数百メートルも離れた家屋に被害に及ぶことがある。これらの事を考慮して低周波空気振動の測定事例を以下に示す。

現在の我国では、低周波音とは1~100Hzの空気振動を称しており高架道路橋では主桁の曲げ振動による空気振動(1~7Hz程度)と、伸縮継手部や防音壁等の振動による空気振動(10~50Hz程度)が主なものである。

高速道路における低周波空気振動の音圧レベルは、橋梁の床版直下 (1m) で 100dB 前後 (ピーク値)、高架道路境界より約 15m 離れると 80~85dB (ピーク値) となっている。しかし、家屋の入りくんだ場所や谷間等の低周波空気振動が共鳴しやすい場所では、高架橋から 20m 程度離れていても 100dB 前後と言われている。また、家屋の中では部屋の大きさによって増幅されることがあり、低周波空気振動の苦情の大半が窓ガラスや建具の振動音である二次音によるものである。

①トラス橋の低周波音測定

高架橋での低周波音による苦情が多い橋種としてトラス橋があげられる。その一例として図2-1-1に示すような鋼単純トラス上路橋で鋼製伸縮継手を有している。試験車の重量と速度を変化させて測定が行われており、重量、速度とも音圧レベルとは明確な相関は見られない結果を示している²⁰⁾。

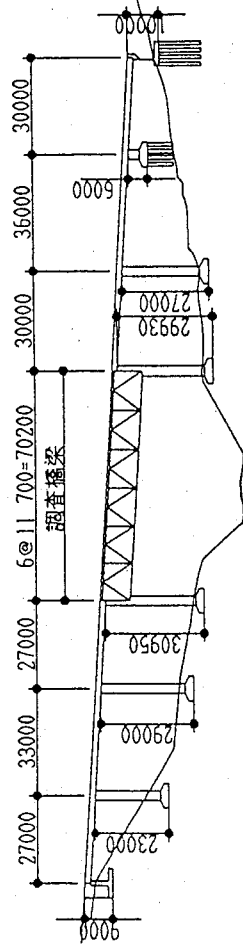
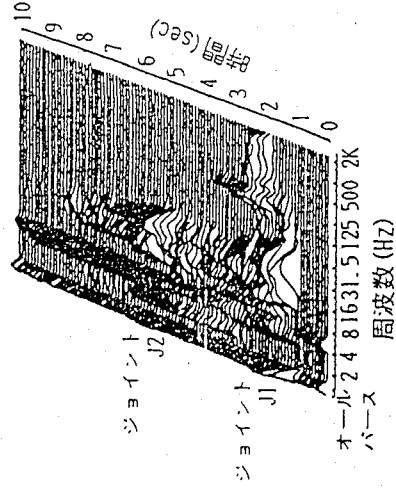


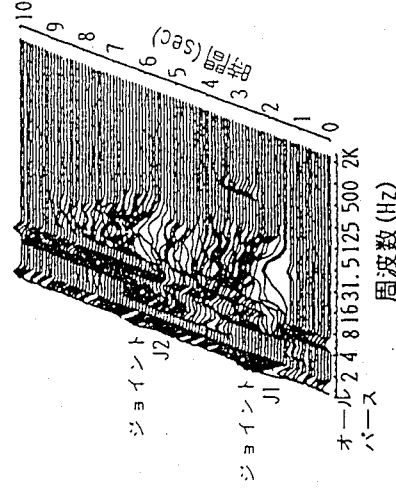
図2-11 対象トラス橋

図2-12に示すランニングスペクトル図は、橋梁振動とその直下における低周波空気振動との時間経過を示すもので、両者相互の相関が非常に高いことを示している。上路トラス橋の床版が車両の通過により一種の板振動を生じ、低周波音に変換されるものと考えられる。トラス橋における低周波空気振動は、図2-12に見られるような伸縮継手部通過時の衝撃的なものと、橋梁走行中に橋梁全体から定性的に発生するものとに分けられる。

ここでの試験では、伸縮継手部通過時が31.5Hz、支間通過時が3.15Hzの成分が卓越している。一方、地上部で測定されているものは必ずしも橋梁の振動とは対応しておらず、より複雑な影響が加わっているものとみなされる。



橋脚振動のランニングスペクトル



低周波振動のランニングスペクトル

図 2-1-2 周波数分析結果 (25.2tf, 70km/h)

②対策方法の具体例

高速道路橋における低周波音の対策は非常に困難であり、明確な効果を得られた実施例はほとんどないと思われる。

しかしながら、発生メカニズムは橋梁振動の発生のことから、上部構造の曲げ振動に起因する低周波音と車両が伸縮装置を通過する時に発生する低周波音の対応に着目できる。

上部構造の曲げ振動に起因するものについては、その低減に桁の剛性を増す手法しかないが、伸縮装置の近傍から発生するものについては種々の試みがなされている。その一つには、端部横桁の剛性を増加させるために端横桁をコンクリートで巻き上げる方法、また、低周波の発生音源である端部床版コンクリートを増し厚する方法等が実施されている。また、最近では単純桁を弾性支承を用いて連続化し、伸縮装置を無くすることで橋脚通過時の低周波音の低減が計られている。

(遠藤和夫・塩田正純・杵本正信)

参考文献

- 1) 通商産業省立地公害局、低周波音調査委員会編集：「低周波音防止技術解説書」(社)産業公害防止協会
- 2) 井清武弘：「低周波音について」環境と測定技術、NO.11, Vol.18, 1991
- 3) 山田伸志：「超低周波音と低周波音」環境技術研究会
- 4) 日本音響学会編：「聴覚と音響心理」コロナ社
- 5) 斎木三郎、戸毛秀幸：「高速道路における低周波音の実態とその対策」公害と対策、vol.14, No.2, 1978
- 6) 山田伸志：「高速道路から発生する低周波音」騒音制御、vol.8, No.3, 1984
- 7) 日本騒音制御工学会・技術部会：「技術レポート第11号、低周波音及び超低周波音測定法」1991, 4
- 8) 「超低周波音の現状とその対策」；パナ教育シテシテ資料、1986, 6
- 9) 通商産業省立地公害局監修：「新訂・公害防止対策要説〔騒音・振動編〕」(社)産業公害防止協会
- 10) 山田伸志 他：「超低周波音と低周波音」環境技術研究会
- 11) 日本騒音制御工学会・技術部会：「技術レポート第11号低周波音及び超低周波音測定法」1991-4
- 12) 日本騒音制御工学会・技術部会：「技術レポート第7号低周波音の測定と評価について」1987-7

- 1 3) (社) 日本環境測定分析協会：「低周波音測定上の問題点とその測定例」昭和59年5月
- 1 4) (財) 電力中央研究所：「低周波音の発生と影響」電力中央研究所研究調査資料No. 279005-1980.3
- 1 5) (社) 日本機械学会：「超低周波音の発生と対策に関する調査研究分科会成果報告書」昭和61年10月
- 1 6) 足立義雄：橋梁の振動性状が低周波域の空気振動に及ぼす影響に関する研究，土木研究所報告，pp. 1~61, No. 164-1, 1984年11月.
- 1 7) 阪神高速道路公団：INFRA SOUND報告書，1978年9月.
- 1 8) 低周波音及び超低周波音測定法：日本騒音制御工学会・技術部会，技術レポート 第11号，April, 1991.
- 1 9) 低周波音防止技術解説書：通商産業省立地公害局低周波音調査委員会 編集，1984年1月.
- 2 0) 通商産業省立地公害局、低周波音調査委員会編集：「低周波音防止技術解説書」(社)産業公害防止協会
- 2 1) 通商産業省立地公害局監修：「新訂・公害防止対策要説[騒音・振動編]」(社)産業公害防止協会
- 2 2) 日本騒音制御工学会・技術部会：「技術レポート第7号低周波音の測定と評価について」1987-7
- 2 3) 山田伸志 他：「超低周波音と低周波音」環境技術研究会
- 2 4) 井清武弘：「低周波音について」環境と測定技術、NO. 11, Vol. 18, 1991
- 2 5) 井清武弘 他：「資源環境技術総合研究所報告8号 発破音の計測及び伝搬予測・制御・評価に関する研究」工業技術院 資源環境技術総合研究所
- 2 6) 落合博明：「低周波音の評価」騒音制御 Vol. 17, No. 6, 1993-12
- 2 7) 塩田正純：「低周波音の現状とその動向」(社)土木学会構造工学委員会橋梁交通振動研究小委員会
- 2 8) 足立義男：橋梁と低周波空気振動，騒音制御，Vol. 4, No. 4, pp. 28~32, 980年.

第3章 橋梁上部工振動および支点反力変動の軽減法

3-1 外力および支点反力特性

3-1-1 概説

本章のテーマは橋梁交通振動の制御である。近年、土木建築分野においても、構造物の振動制御に関心が持たれるようになってきた。ただ、そこでは、長大橋梁や高層ビルにおいて生起確率の比較的小さい地震あるいは強風に対する動的応答の軽減を目的としてきた。ここで対象とする高架桁橋の交通振動は、多くの都市で毎日繰り返されている現象でありながら、その制振の恒常的な実績は未だに無い。ただし、この「制振」は、いわゆるパッシブ方式の動吸振器（TMD）やアクティブ方式などの機械的な制振装置によるものを云っている。現に交通振動が問題となっている箇所では、本章で以下に述べられているように、伸縮継手部の段差を取り除く手法など、可能な限りの対策が施されている。

さて、本章のタイトルに「支点反力変動」が含まれている点について説明しておく。橋梁交通振動の制御を扱う場合、橋梁本体の振動を止めればよいだけでなく、周辺地盤や建物の振動も問題になることが多い。上部工振動からこの周辺への振動伝播に関わる物理量として、支点反力変動に着目するわけである^{1), 2)}。3-2節以下において支点反力変動に言及していないのでここで概略の説明を行う。橋梁交通振動制御との関連において、支点反力変動を初めて取り扱った文献^{1), 2)}では、粘性ダンパーを橋桁端部付近に取り付ける桁端ダンパーについて数値シミュレーションによる検討が行われ、支点反力の動的成分に関しては、桁の振動に比べて良好な制振効果は得られなかったとしている。この原因として、桁を制振すると、車両振動が増大することを指摘した。また一方、ハイブリッド制振の模型実験において支点反力変動を測定した結果、桁変位同程度の制振効果があったとの報告もされている³⁾。このように支点反力変動が着目される状況で、現地走行実験において動的反力を測定し、交通振動の評価パラメータとしての可能性について検討されている⁴⁾。

本章では、終わりに今後の課題の節を設けていないので、ここで若干触れておく。前述のように、桁橋の交通振動に対する動力学的な制振の実績が未だにないのは、何故だろうか。それは、交通振動の外力が、20gあるいはそれ以上の車両が振動して作用しているため、それに正面から打ち克つにはかなり大きな力を要することが大きな要因と考えられる。それでも、交通振動に対するアクティブ制振などの動力学的な手法の研究はまだ緒に付いたばかりであり、理論的及び実験的な研究の進展が待たれる。

3-1-2 振動の発生機構

(1) 橋梁の振動特性

橋梁の振動特性は上部工形式や下部工形式、あるいは上部工の橋種の相違によって大幅に異なる。一般に、上部構造として橋梁の振動特性を捉えたとき、車両が路面の不整や伸縮部の段差を通過する際に、床版に衝撃力が加わり、20～40 Hz 程度の比較的高次の振動数で床版が振動する。端横桁や二次部材の振動としては10～15 Hz 程度のものが観測されている。

車両の走行に伴う主桁の変形や大型車両量のバネ上振動と主桁の鉛直たわみ1次振動とが共振し、2～4 Hz の比較的低い振動数で主桁が振動する。これらの変形や振動は橋脚や柱を通じて下部工に伝播され、地盤振動を励起したり直接空气中に低周波振動として放出される。

(2) 車両構造と振動特性

橋梁振動の発生原因としての車両の振動は、主として路面の不整によるばね上振動とばね下振動のほか、エンジンやタイヤあるいは車両の弾性変形に伴う振動等が考えられる。このうち橋梁の鉛直方向振動にもっとも関係するばね上振動は、車両構造から単体振動であり、大型車両では1～4 Hz 程度とされている。この振動数は車種によって変化し、大型バスでは低く大型トラックでは高い。ばね下振動は一般に10～20 Hz 程度といわれている。

(3) 走行モード

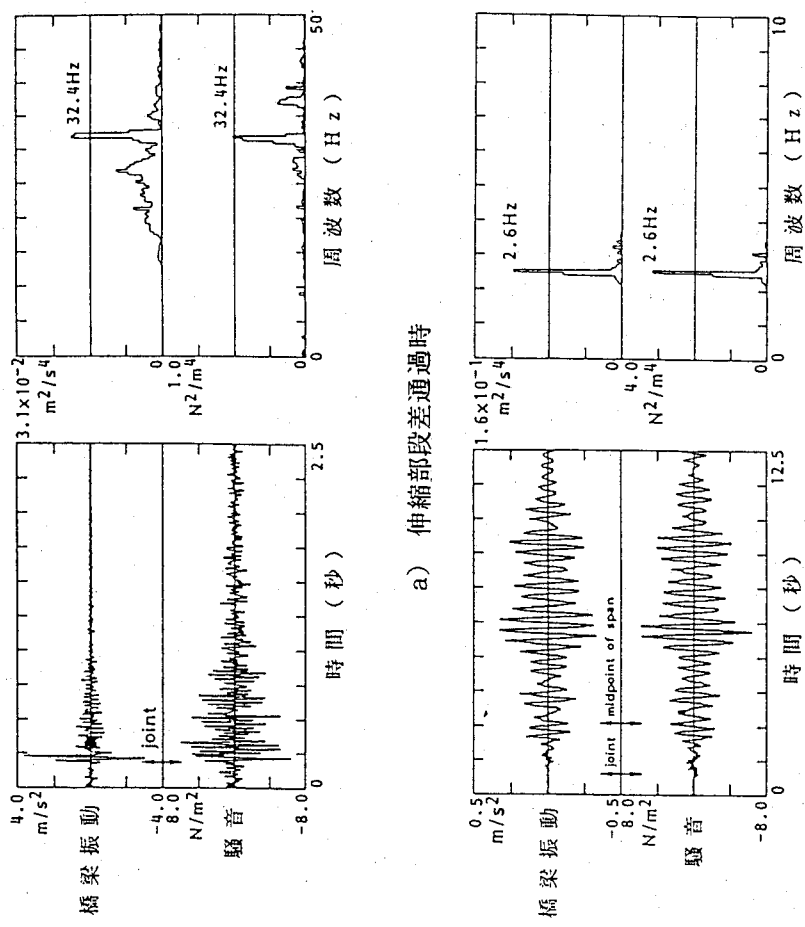
起振源としての重車両では、一般にその車両重量の増加、走行速度の増加と共に振動は増加する傾向にあるが、橋梁の上部工造形式や下部構造形式と、あるいは地盤の特性によって変化する事が認められている。また、連行の形態や車頭間隔については橋種は無論のこと支間長や構造減衰の大小によっても、その影響の度合いは異なってくる。

また、1車線当り交通量と大型車混入率とから求まる等価交通量の増大により、振動のレベルも大きくなるが、交通量の増加につれて大型車によって L_{10} の値が決定される割合が増してくる。さらに交通量が増えてくると L_{10} の決定に寄与しない大型車が増えてくることも知られている。

(4) 路面、構造、地盤

路面の影響因子のうち最も大きなものは伸縮部の段差である。シミュレーション

ンでは20 mm の段差で振動レベルに10 dB 際度の差が生じているという報告もある。

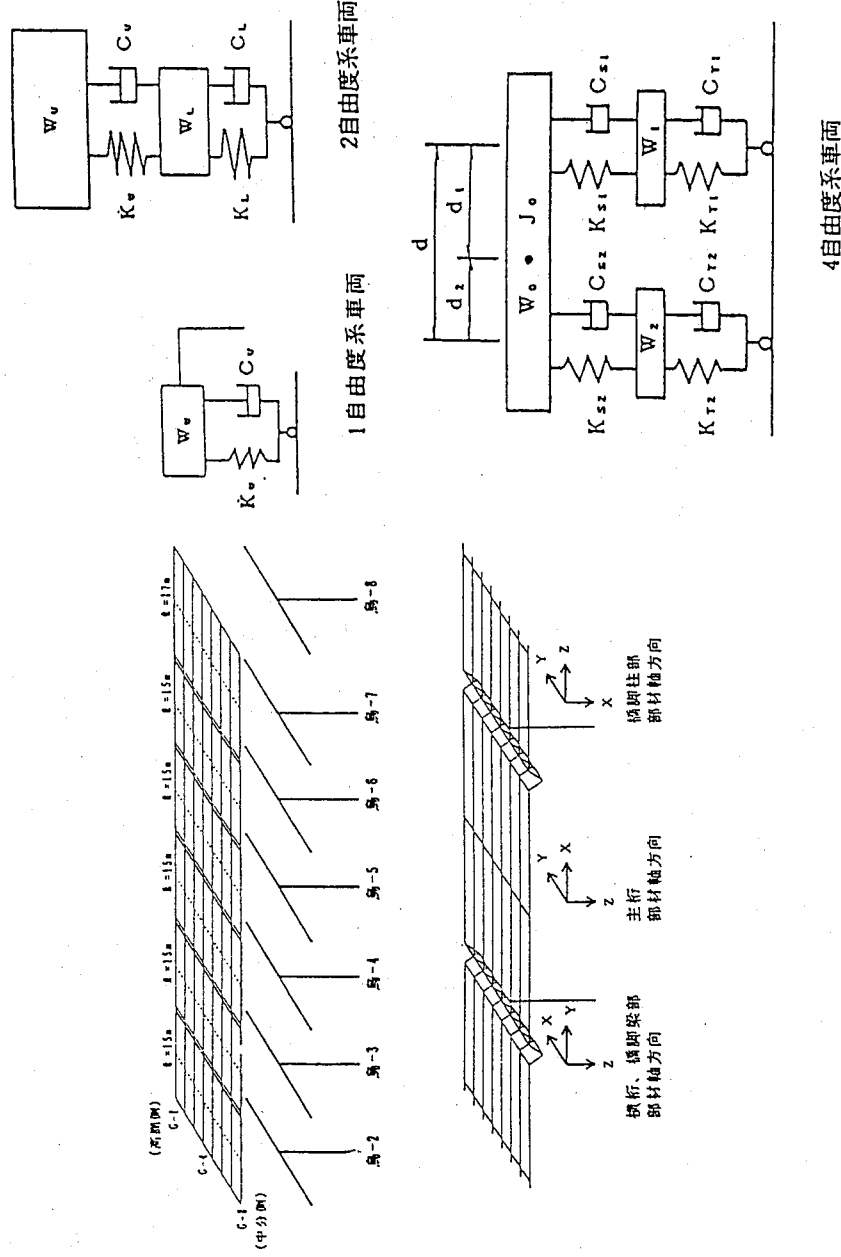


図一1 重車両走行時の橋梁の振動・騒音⁵⁾ 6)

構造条件としては阪神公団が実施した影響因子の振動に対する寄与率を求めた結果から、伸縮継手、橋脚形式、梁剛度、全体重量、フーチングの土被り厚などが振動発生に対して大きく影響していることが示されている。

(5) モデル化

動的応答解析に使用されるモデル橋では、格子桁モデルに実測路面凹凸を考慮したものが用いられている。一方、車両モデルでは、ばね上振動としての車体部と、ばね下振動としての車両の懸架部に区分し、2自由度から6自由度までのモデル化が図られている。



図一 2 実橋のモデル化と解析モデル⁸⁾

3-1-3 上部工の振動特性

(1) 低次振動の発生

車両が支間中央を走行する際に、ばね上振動と桁の1次固有振動数とが共振して1~4 Hzの比較的低い振動数で振動が励起される。これを低次振動と呼ぶ。橋梁における固有振動数特性は、構造形式、支間長、剛性、および支持条件等によって異なる。構造形式をパラメータとして、振動数と支間長との関係を示したものが図一3である。また支間長 l と振動数 f の関係を表一1に示す。図一3からは形式別にA, Bに属する30~80 mクラスの橋梁の固有振動数が、車両のばね上振動のそれとほぼ一致し、1、5~4 Hzの範囲に広く分布していることが見て取れよう。これら橋梁は当然のことながら、車両との共振による桁1次振動の振幅増大が予想される。これに対して、ランガー桁やアーチ系橋では逆対称モードが卓越している。

(2) 高次振動の発生

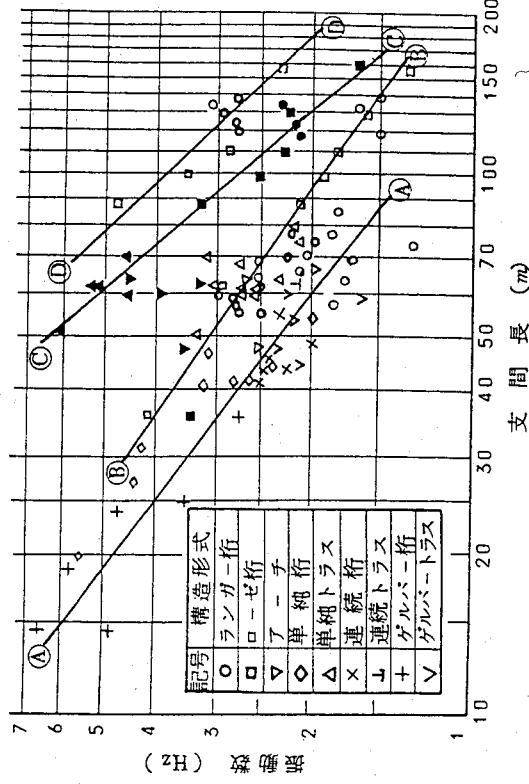
車両が伸縮継手等の段差を通過する際に、バネ下振動が床版振動を誘起し10～20 Hz程度の比較的高次の振動が発生する。これを高次振動と呼ぶ。これは、ばね下部と床版の共振により発生した振動と判断される。床版には鉄筋コンクリート床版と鋼床版といった形式の相違があり、各々の振動特性は異なる。また床版上には、アスファルト等の舗装が施されるが、その構成、交通量、床版構造によって路面状態は大幅に異なり、床版の振動特性を一律に説明することは不可能である。

床版自体の振動測定データも少なく、床版には低次振動と高次振動が共に卓越していることが分かる。また橋脚には床版の固有振動数20 Hz程度とさらに高次の振動が卓越しているが、より高次の振動は端横桁部の横構や部材の振動が混入しているものと考えられる。

表一2は阪神公団が試験車による高架道路走行時の地盤振動の測定結果をもとに、影響因子の振動に対する寄与率を求めたものである。振動発生に対する要因（影響度からは、高架橋自体の構造条件（要因）が振動レベルの大きさの決定に重要な位置を占めていることが明かである。これら要因解析結果は、振動軽減対策の検討にひとつの目安を与えてくれる。

図一4には橋脚上で測定されたランニングスベクトルを示す。図は単純桁の連続区間であり、車両走行時の伝搬振動をあらわす。結果より、橋脚には3 Hz程度

の低周波数領域と20～80 Hzの高振動数域とが見られる。3 Hzの振動は主桁の振動と考えられるが、20～80 Hzの振動が直上走行時に生じている。直上走行時以外では20～30 Hzが卓越する。



図一3 支間長と振動数¹⁰⁾

表一1 構造形式別近似曲線¹⁰⁾

記号	橋の種類	振動特性	近似式
㉔	単純桁, 連続桁, ゲルバー桁, 連続トラス, ゲルバートラス	対称1次	$f = 49.1 L^{-0.779}$
	ランガー桁, ローゼン, アーチ橋	逆対称1次	
㉕	単純トラス, ランガー桁, ローゼン, ニールセン型ローゼン, アーチ橋	対称1次	$f = 49.3 L^{-0.705}$
	単純トラス, トラスドラ	逆対称1次	
㉖	ランガー桁	逆対称2次	$f = 57.1 L^{-1.16}$
	ランガー桁, ニールセン型ローゼン	対称2次	
㉗	ランガー桁	対称2次	$f = 65.2 L^{-1.12}$

ードの固有振動数を高める。④コンクリート橋脚の頭部にゴムを挿入し、上部からの振動を吸収する。などがあり¹⁴⁾、それなりに効果が認められている。

(3) 伸縮装置・支承への対策

伸縮装置への対策としては、主桁連結によるノージョイント化対策があげられる^{17) 23)}。主桁端部の上下フランジと腹板を連結し、活荷重に対して連続桁とするものである。この場合、中間支点上の曲げモーメント低減のため鋼製支承をゴム支承に取り替えることもある。支承への対策としては、鋼製支承からゴム沓への取り替えが一般的であるが、ハイブリッド形式の鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の使用により、固有周期の調節と振動の減衰が期待できるとした、研究も報告されている²⁴⁾。

(4) 振動制御(パッシブ・コントロール、アクティブ・コントロール)¹⁹⁾

振動制御による振動軽減対策は、大きくパッシブコントロールとアクティブコントロールに分けられる。前者はTMDを桁に取り付け、主振動系との連成により振動軽減を図るものである。高速道路のランプ橋に設置した試験結果が次のように報告されている²⁰⁾。TMDの仕様は重錘1 t/基、固有振動数2.64Hz、減衰定数16%で全8基設置し曲げ1次、ねじり1次を対象としている。全8基のTMDのうち中桁の4基を曲げ振動、外桁の4基をねじり振動に対して作動させ走行試験を行ったところ、TMD固定時にくらべ制振効果が認められた、としている。その他、粘性ダンパーを桁端部に取付けた(桁端ダンパー)方式について制振効果を検討されたものもある。これによると、主桁の制振に対してTMD方式よりも効果があるという解析結果が報告されている²⁵⁾。一方、アクティブコントロールによる軽減対策は、構造物にアクチュエーターを取り付け、振動性状に合わせた制振エネルギーを供給しようというものである。門型ラーメン橋脚に設置された例があり^{14) 21)}、効果については明らかにされていないが測定結果によると、振動が低減しているのかわかる。機械の耐久性や費用の問題が課題となろう。また、ハイブリッド型制振装置(アクティブマスダンパー)の確認実験を行った研究報告もある²²⁾。制御力はACサーボモーターと制振質量で、加速度センサーによりこれらの制振質量を制御している。自由振動による実験では、対数減衰率が0.06から0.30に変化し、高い制振効果が得られたとしている。

3-2-2 高次振動対策

(1) 桁端部への対策

この対策法には、端対傾構RC巻き立てや、床版端部増厚等がある。桁端部の振動低減のため、端対傾構をコンクリートで包んで、厚さ60 cmの横桁とし、床版端部も3 mにわたり、厚さ23 cmから53 cmに増厚した事例がある。また、桁端部の床組の補強などもある。これは、I断面の端横桁を箱断面にしたり、縦桁の桁高をあげたりするものである。いずれも、ジョイント音や低周波音が低減したという効果が報告されている。

(2) 床版周りへの対策

床版への対策としては、増厚し、端部の打ち下ろし部の範囲を広げる方法が一般的であり、1) 桁端部への対策と一緒に行われることが多い。

(3) 横桁への対策

端横桁のSRC化、桁高のアップ、剛性の増大、が主であるが、横桁の増設も行われている。いずれも、桁端部への対策と平行して行われることが多い。

(4) 伸縮装置・支承への対策

床版、舗装に目地を設けないで連続化するノージョイント化工法が一般的である^{15) 16)}。このうち、埋設ジョイントによる対策法が効果を上げている。ノージョイント化の適用条件として次の事項があげられる。

- ①支間長、構造形式がほぼ等しい単純桁が続くこと。②直線区間で、主桁腹板の方向が一致すること。
- ③下部構造がほぼ等しいこと。支承への対策として、端横桁に中間沓を増設し、既設沓と中間沓にゴムプレートを挿入した事例があるが軽減効果は見られなかったようである。

(5) 制振材による対策

制振材による対策には、制振鋼板等の複合材料を構造物に貼り付けて行う方法と、制振材料のみを直接貼り付ける方法がある。前者の制振鋼板は、樹脂系の材料を2枚の鋼板でサンドイッチ状にはさんだ3層構造を取り、振動時に特徴があり、振動時の曲げ変形で樹脂層にせん断ひずみが生ずることによって、大きい振動エネルギーの吸収効果が得られるものである。この場合、樹脂は、せん断変形することおよびエネルギーの損失率が大いことが必要である。後者の制振材料の例としては、鉄道橋の振動軽減対策の研究において、ゴム・アスファルト系制振材を鋼板面にエポキシ樹脂接着剤で貼り付けたものがあり、腹板の振動加速度を制振材施工前後で比較したところ約15dBの低減があったと報告されている²⁶⁾。

3-3 軽減対策の現状と展望

3-3-1 既往対策の改善

(1) 車両構造の改善

高架橋の振動を励起する原因として、走行する車両によるものが多い。このうちでも特に大型車両走行に起因するものが多いといわれており、これらの車両のばね振動数は、一般に3～5Hz付近にあり、高架橋上部構造の曲げ基本振動数に近い振動数であることが判明している。このことから、走行する車両のばね上振動数を変化させることで、構造物との共振を避けることができれば、車両-高架橋の連成振動を低減することが可能である。しかし、ばね定数を低くすることは、乗り心地対策や積み荷対策と方向が一致しているため、自動車の操縦性、安定性や安全性との兼ね合いで限界近くまでばね定数を柔かくしているのが現状である²⁷⁾。また、発生する振動は車両の積載重量にも大きく影響されるため、過積載車両の規制強化、振動騒音の発生にくいタイヤの開発を行うことで改善を期待することが可能である。

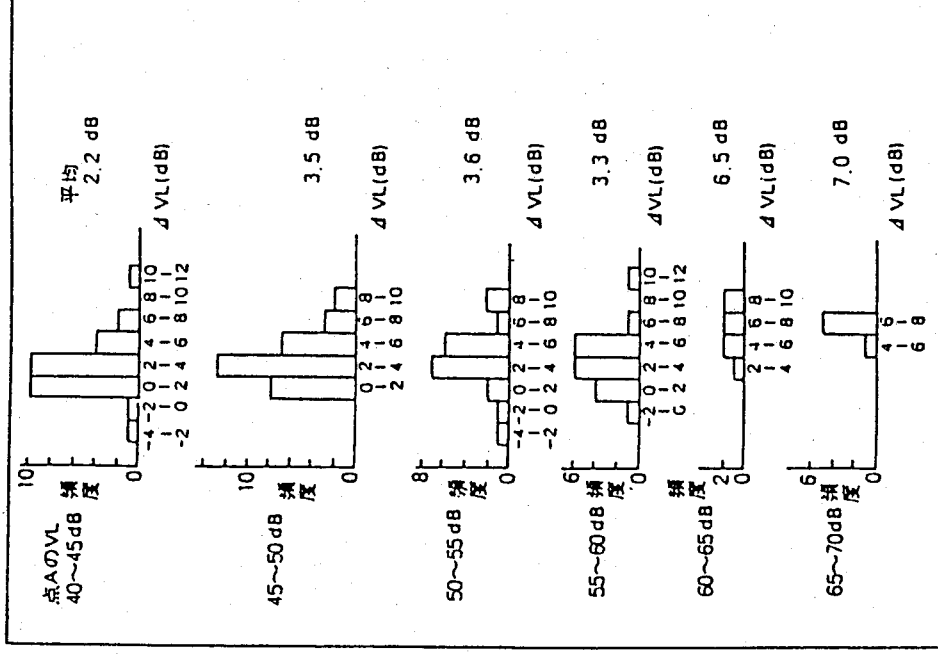
(2) 交通規制

交通規制による軽減対策としては、速度制限、積載制限、大型車規制および通行区分指定などが有効と考えられる。例えば、通行規制のうち、走行車線を最外側車線から1つ内側に変更すると、距離減衰効果により振動レベルは、図-5に示すように道路端における振動レベルが60dB以下においては2～3.5dB、60dB以上においては6.5～7dB程度軽減される²⁸⁾。

(3) 路面の改良

- ・路面平坦性の改善：実測例によれば、路面の平坦性の改善による効果は図-6に示すようによりおおよそ4dB/mmであり、段差がなくても波状凹凸があるために振動レベルが高い場合は補修工事の実施により路面の平坦性を改善することで、大きな振動レベルの低減が可能である²⁹⁾。
- ・段差の改善：路面に段差がある場合の振動レベルの増加は著しく、単一車が走行速度60km/hで段差を通過する場合、9mm段差で14dB、18mm段差で19dB、36mm段差で24dBの増加となる²⁹⁾。したがって、亀裂による段差や地下埋設物上の補修路面の段差あるいは道路横断地下構造物取付部の段差等を極力平坦化することにより衝撃力を軽減することが有効な対策となる。
- ・舗装構造の改善：上層路盤厚の増加による車両振動の緩和あるいは舗装厚、路盤剛性の増加による舗装の変形抑制により振動レベルの発生を軽減することができる。しかし、その効果は振動源条件、地盤条件により異なり、現在のところ必ずしも有効な軽減対策とはいえない。ただし、路面の平坦性を維持するためには路盤、路床の剛性を高めることが有効となる。

(岩津守昭・川谷充郎・今野久志・田所洋一・宮崎正男)



注：ΔVL = (車両が第1車線（外側）を走行した時のVL)
 - (車両が第2車線（内側）を走行した時のVL)

図-5 走行車線によるVLの差

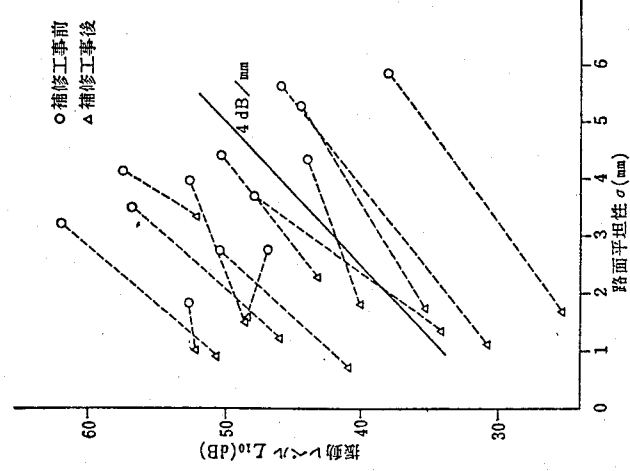


図-6 路面の平坦性改善による効果

参考文献)

- 1) 比江島慎二・藤野陽三：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減，土木学会論文集，第465号／I-23，pp.107-116，1993.4.
- 2) 比江島慎二・藤野陽三：粘性ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減に関する2、3のシミュレーション，第2回振動制御コロキウム PART B 講演論文集，pp. 159-166，1993.8
- 3) 川谷充郎：交通振動制御の可能性－Ⅲ．アクティブコントロール，その他－，第2回振動制御コロキウム PART A 構造物の振動制御(2)，pp.203-210，1993.8
- 4) 山田靖則・川谷充郎：実橋における動的反力の測定と橋梁の交通振動評価パラメータに関する考察，構造工学論文集，Vol.40A，pp.-，1994.3.
- 5) 鋼橋技術研究会：鋼橋防音設計のてびき，1991.3
- 6) 五郎丸・白石・原・小森：中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定，土木学論文集，No.403/IV-10，1989.3
- 7) 杉本：走行車両により発生する振動の特徴と対策の動向－高架道路橋の振動，第2回振動制御コロキウム，PART A，1993.8
- 8) 日本橋梁建設協会：高架道路の交通振動対策，1993.3，防振部会
- 9) 小堀・梶川：道路橋（鋼橋）の振動測定法とその特性，道路，1974.7
- 10) 日本橋梁建設協会：高架道路橋の交通振動問題とその対策，1985.3
- 11) 加藤・島田：実橋実測振動特性の統計解析，土木学会論文報告集，第311号，1974.3
- 12) 南荘：高架橋の振動性状に関する実験的検証，阪神高速道路公団技報第2号，1982
- 13) 梶川・吉川・杵本：高架橋への防振対策と周辺地盤上での防振効果について，土木学会第41回年次講演集
1982.12.1983.1
- 14) 上前・高橋・徳良・飯島：橋梁振動の制振装置開発に関する基礎的研究（上）、（下），橋梁と基礎，1982.12.1983.1
- 15) 加藤・吉田・富田：既設高架橋（鋼桁部）のノージョイント化試験施工，第15回日本道路会議論文集
- 16) 富田・加藤・吉川・瀬川：既設高架橋（鋼桁部）のノージョイント化手法，土木学会第38回年次学術講演集 昭和58.9
- 17) 久保・山田・伊関・松浦：土木学会第43回年次講演集
- 18) 梶川・沖野・吉川・杵本：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果，構造工学論文集 Vol.35A，1989.3
- 19) 横山・澤田・岩津・澤登・右近・伊関：動吸振器による道路橋の交通振動の軽減効果について，構造工学論文集 Vol.38A，1992.3
- 20) 梶川・沖野・宇藤・松浦・伊関：動吸振器による高架橋の振動軽減対策，構造工学論文集 Vol.35A，1989.3
- 21) 矢作・吉田：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集 第356号/I-3，1985.4
- 22) 川谷・森：道路橋の交通振動に対する制振装置の開発：振動制御コロキウム PART.B 1991.7
- 23) 狩生・大塚・小林：『首都高速7号小松川線の全面交通止め補修工事』－ノージョイント化工事－橋梁と基礎 1992.8
- 24) 伊関・川島・小坂：鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）の動的特性試験，土木学会第43回年次講演集 昭和63年10月
- 25) 比江島・藤野：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減，土木学会論文集 No.465/I-23 1993.4
- 26) (社)日本鉄道施設協会：鉄道－騒音－対策の研究，昭和52年2月

27) 環境庁：道路交通振動防止技術マニュアル

28) 建設省：道路交通振動の対策に関する研究，第31回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集，1977

29) 建設省：道路交通振動の対策に関する研究，第32回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集，1978

第4章 橋梁下部工から地盤を伝播する振動の計測とモデル化

4-1 概説

「高架橋が振動するとなぜ家屋が揺れるのか?」。振動伝播のメカニズムは大筋で明らかになっている¹⁾。最近では、長大橋梁などの計画や市街地を通過する高架橋の建設に伴い、交通荷重によるさまざまな影響を検討する必要性が増大している。橋梁からの振動伝播もその1つであり、交通要因や路面性状、あるいは橋梁の下部構造や地盤特性などの要因によって大きく姿を変える。地盤特性が絡むために、振動の計測法、モデル化や解析法も複雑となる。

本章では橋梁下部工から地盤に伝播する振動につき、その計測法およびモデル化と解析法の要点を事例に基づいてまとめる。また、地盤振動の特性、振動軽減対策法や事例の把握について記している。

4-2 振動の計測法

高架橋から地盤に伝播する振動は、理論上半球面形状で伝播する²⁾。こうした地盤の振動計測は3次元に広がる状況の把握が必要である。しかし、通常は道路中心線と直行する測線に沿った面外断面での測定が主に実施される。また、地中での測定は困難なことが多く、一般には地表面だけの測定がなされることが多い。もし、技術的にも経済的にも可能であれば、高架橋から地盤への振動の伝播経路を考慮して、基礎の近傍および杭の周辺における地中での振動計測も実施するのが望ましい。

環境に関する振動測定は、地表面のみでの計測で、通常振動レベル計を用いて地盤の加速度値を計測し、増幅器内の電気回路での処理によって振動レベル値の表示を行っている。構造物と地盤の振動を取り扱う場合には、地盤の振動は振動の大きさが構造物のそれに比べて比較的小さく、発生する加速度値が小さいため増幅器の感度を大きくする必要がある。そこで速度計を用いれば比較的人力信号が大きく計測することが出来る、雑音などの影響を受けにくいので良く用いられる。また、地震動の地中での増幅度を検討する場合などに、しばしば地盤の常時微動を測定することがある。常時微動は大都會ではその振幅が20~30 μm であり、数秒から0.5秒の周期になることが多い。したがって、これらの測定にはできるだけ周期の長い振動計(動電型振動計など)をもちいねばならない。一方、地中の振動を計測するにはボーリング孔(100mm程度)を利用して地中地震計(加速度計か速度計を入れた防水防圧のケース)を挿入して、計測方向が分かるようにして地中に固定し測定すればよい。

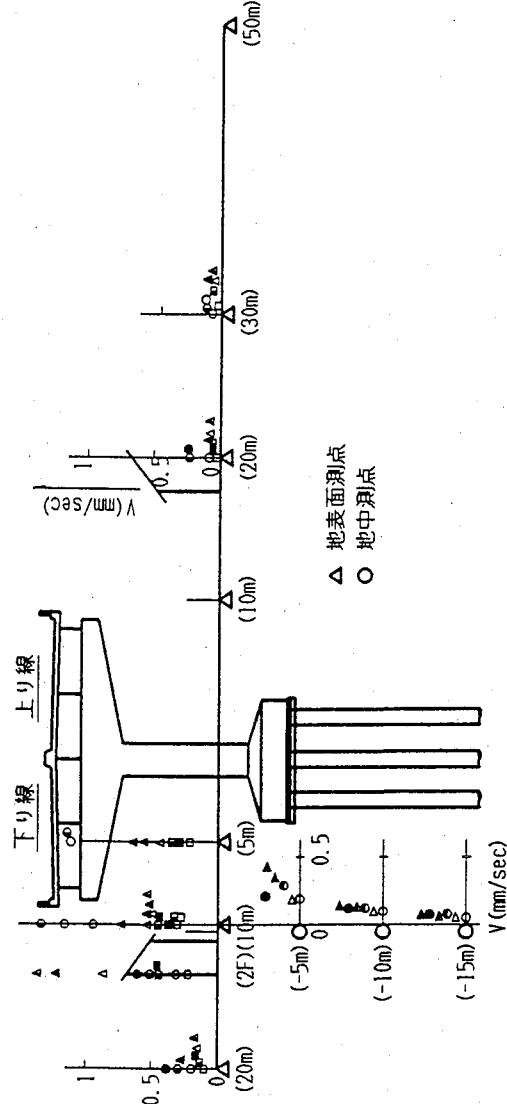


図4-1 測定位置断面図

振動を計測する位置は、一般的には図4-1に示すように地盤への入力源になる基礎フーチングの直上もしくは近傍地中、橋脚から10m, 20m, 30m, 50m 離れた地表面およびその位置での地中となる。軟弱な地盤では100m以上にも伝播することがあり、必要に応じて測点を設けるのがよい。過去の事例では、地中の測定深度は、図4-1に示すように橋脚の位置や10m地点では杭頭から5~10mの深さまで考慮すれば十分なようである。地盤を伝播する振動は表面波といわれていることから³⁾、構造物から離れた測点では、地表面だけの測点で十分といえる。また、橋脚からの振動は面外方向断面のみならず面内平面にも伝播している。地盤の振動は幾本かの橋脚から伝播してくる振動が重なり合って形成されるものであり、このためにも計測時には走行する車両の通過位置を明確にし、伝播速度による時間差を考慮して計測することが望ましい。また、地盤の振動レベル等の予測にはそれぞれの橋脚から伝播する振動の合成を考慮しなければならぬ⁴⁾。

4-3 モデル化と解析法

構造物の耐風安定性や耐震問題での研究は従来から多く報告されているが、交通振動や人間の感覚を扱った問題を体型づけた研究は少ないようである。しかしながら、振動苦情に対処せざるを得ない都市高速道路等では種々の難問題を検討するためにも、移動する車両と高架構造物から地盤を含めた振動伝播過程をシミュレートできるモデル化が必要になっている^{5), 6)}。

橋梁と移動車両の振動応答を、モード解析によって求める手法は1980年代始めから研究されている^{7)~14)}。しかし、計算機の性能や容量の制約から単純なモデルでの検討しかできなかったようである。現在では計算機の演算速度や記憶容量の飛躍的な発展によって、移動荷重と構造物（上部構造と下部構造）から地盤のモデル化が進められ、高架橋での実際の測定値とはほぼ同値が得られるまでになっている¹⁵⁾。車両のモデル化は現在4自由度の車両幅を考慮しないモデルが多く用いられている。将来は車両モデルも3次元立体モデルが用いられるかもしれないが、現在のところ車両幅を考慮しなくても満足される結果を得られているようである。

一方、構造物は上部構造と下部構造に分けられるが、実際には地盤を含めた振動系がお互いに連成しあっていることから、全てを一体化したモデルでのシミュレーションを行わねばならない。しかし、現実にはまだ計算機の速度と容量ともに十分な結果を得られないのが実状である。構造物のモデル化は3次元立体FEMモデルによる場合が多く、車両-上部構造-下部構造のモデル化により下部構造基礎の応答を求めることができる。この応答値を立体FEMモデル化した地盤の入力として応答計算を行うこともある。このときの入力是一般にフーチングモデルの上下方向の加振が多いが、実測から推察されるフーチングおよび杭の挙動

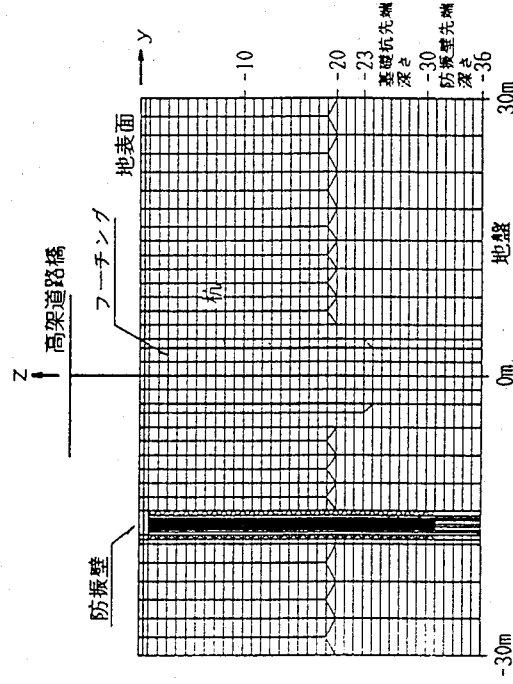


図4-2 地盤断面のFEMモデルの例

はロッキングやスウェーの性状を示すことから、これらの挙動を計算の入力としなければならない。しかし、計算は非常に煩雑であり、全方向同時入力を処理する事は現在の状況下では困難である。図4-2に地盤断面におけるモデル化の一例を示す。

一方、より簡潔な処理方法として、地盤を均一な単層として取り扱い、入力方法を工夫する事で地表面の振動を比較的よくシミュレートする手法がある。この方法は入力となる基礎の上下振動やロッキング振動などの振動性状を明瞭に表現するために、図4-3に示すように基礎底面を細分化して入力源とし地質状況から地盤の横波伝播速度とせん断弾性係数を求め、これから伝達関数を求め、着目位置での振動応答を求めている。これらの応答値に振動感覚に用いられる時定数(0.63sec)を用いた実効応答レベルを求めることができる。この値に振動感覚レベルの補正値を加味し、時系列の応答値とした振動レベルを求めることが可能である。ここでは橋軸方向に対して面外平面での振動伝播を思考できるが、現実には先記のように地盤で

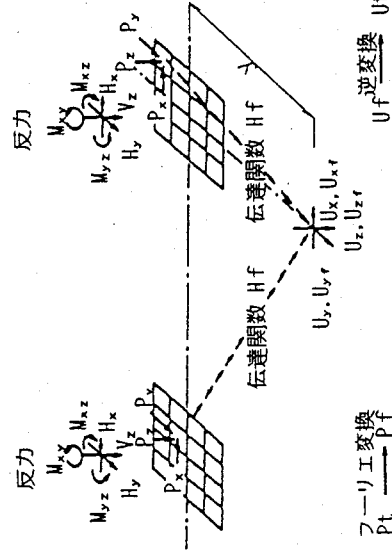


図4-3 伝達関数を用いた地盤の応答モデル

は幾つかの加振源となる橋脚があるので、影響するこれらの橋脚からの伝播する振動レベルの合成を行う必要がある。したがって、FEMでモデル化した場合には計算が大型化し煩雑なためと、振動レベルとして対数表示された表現を用いていることのために、精度の高いシミュレートは要求されることが多いのが実状である。

4-4 地盤振動の特徴

(1) 距離減衰

振動源から発生する振動は、地盤へ伝達され、距離が隔たると共に減衰してゆく。地面を伝わる振動は、理論上では、縦波と横波は $1/r^2$ (r: 距離) に表面波は $1/\sqrt{r}$ に比例して、その振幅が減衰する。このため、距離の隔たったところでは縦波および横波の減衰が急激であり、表面波が目立ってくる。

建設省では「建設省所管道路事業環境影響評価技術指針」¹⁶⁾において、次の距離減衰式を用いている。

$$VL = VL_0 - \beta \frac{\log_{10} (r/r_0)}{\log_{10} 2} \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、VL: 振源より距離 r (m) の地点の振動レベル (L₁₀)、

VL₀: 振源より距離 r₀ (m) (予測基準点) の振動レベル (L₁₀)、

β: 倍距離に対する振動レベルの減少量 (dB)。

この式に付随して、道路構造別に予測基準点の位置およびβの値が定められている¹⁶⁾。

実際には、地盤振動の減衰は、土質、地層、地下水、振動数、振動方向などにより影響を受ける。また、地盤の地層構成により重複反射や共振を生じたり、暗振動によって振動が指数関数的に減衰しない傾向を示すことになる。平面道路を夜間に走行する大型ダンプの振動実験では、伝播方向や振動数によって距離減衰特性が異なった結果になっている¹⁷⁾。

なお、種々の波形解析手法の利用による地盤応答の同定や伝播波動の特定などが、機械振動による地盤応答の解析や常時微動解析において精力的に行われている¹⁷⁾。これらの知見を交通振動問題に利用して、地盤振動の伝播性状を参考にすることが有効となるだろう。

(2) 振動数帯域

交通振動による地盤振動の波長は普通、数m～数10mといわれている¹⁸⁾。その振動数を予測する場合には、対象とする地盤の固有振動数で代表させることが多い。地盤の固有振動数は土質や地層の条件により異なるが、建築基準法施工令に用いられている地盤種別と、平均的な固有振動数を表4-1に示す。平面道路を走行する大型ダンプの振動実験の結果では、道路から離れた位置における低周波数域で実体波が、また5Hzを越える高周波数域でレリー波の影響が大きくなる¹⁷⁾。なお、平面道路の路肩ではドップラー効果に似た振動数の移行が求められると共に、車両荷重と表層地盤の振動特性が反映されたスベクトル特性を有している¹⁷⁾。

表4-1 地盤種別と固有振動数

分類	内容	固有振動数 (Hz)
第1種	岩盤, 硬質砂れき層, その他主として第3紀以前の地層によって構成されているもの	約4.5～
第2種	砂れき層, 砂まじり硬質粘土層, その他主として洪積中の硬質な地層によって構成されているもの	2～7
第3種	第1種, 第2種および第4種以外の地盤	1.4～3
第4種	厚さが30m以上の軟弱な沖積層から成るもの, および埋立後30年を経過していない埋立地	～1.7

4-5 地盤振動軽減対策法

交通振動に対する地盤振動対策は、これまで振動源対策と受振点対策の間にあって、効果の現われにくい対策法とみられていた。この原因には、実地盤で波動の伝播特性を把握することが容易でないこと、対策効果を定量的に評価することが困難なことや、投資コストの割に対策効果が上がらなかったことなどが挙げられる。しかし、地中防振壁を始めとした伝播経路における振動対策は、その対策工事の必要とされる区間が比較的短くて済むような場合には、有効な対策として期待されている¹⁸⁾。そこで、対策法のコスト面や施工上で検討すべき点などの問題を含め、土質条件に則した技術および予測精度を向上することが必要となる。交通振動の伝播経路での対策として、現実性のあるものには次が挙げられる¹⁹⁾。

- ① 地中防振壁の設置
- ② 軟弱地盤の改良
- ③ 環境施設帯の設置

(1) 地中防振壁の設置

地中防振壁による対策は、道路から周辺へ伝播する振動を地盤中に設けた壁や空溝により低減させようとするものであり、模型試験、現地試験等が数多く行われている。これまでの報告からも、かなりのことが判っている。一般に、数値シミュレーションでは空溝や軟らかい(波動インピーダンスの小さい材料の)壁が波動の反射性能に優れていることが導かれる。また、よく配慮された実物大試験では、基本的な振動遮断性能を確認することはできるものの、壁から離れるに従って遮断性能は低下する傾向が顕著に現れる¹⁾。空溝や軟らかい壁とは異なり、剛性の高い平板ブロックを埋設して振動を遮断する方法も提案されている²⁰⁾。

地中防振壁を交通振動の現場に適用するには、施工上の問題点が多くあり、実用化に至っているとは言いがたい。すなわち、深度の深い溝の経済的な施工方法の開発、発泡スチロールのような軟らかい材料を用いた場合の土圧による圧壊に対する対処および長期的な耐久性、地下水の侵入による材料の変化、地中埋設管の処理、地震時の安全性などの問題が残されている¹⁸⁾。さらに、振動軽減対策が必要とされる区間で、実際に地中壁の効果を発揮できるかどうかを定量的に評価して実行に移すためには、かなりのリスクを伴うのが

現状である。

(2) 軟弱地盤の改良

地盤改良工法は、地盤の卓越振動数を高くすることにより振動を軽減させるものであり、軟弱地盤における振動軽減対策として有効である。沢田・谷口²¹⁾による有限要素法解析によれば地盤改良の幅よりも深さの方が振動軽減に対する影響が大きいという結果が得られている¹⁸⁾。しかし、地盤改良の施工例は多いとみられるものの振動測定の実報告例は数少ないため、たとえ工法が定性的に振動軽減効果を期待されるものであっても、その効果を量的に推定することは困難なことが多い。

(3) 環境施設帯の設置

環境施設帯は道路と民地の間に設けられる空間として、交通振動の影響が距離減衰して軽減する効果を期待される。効果の程度は路端での発生レベルおよび地盤特性によって異なり、軟弱地盤では振動数が低いために、軽減効果が小さくなる傾向がみられる¹⁸⁾。

4-6 計測およびモデル化事例の把握

交通振動における地盤振動の評価方法は、一般には実測データから得られた回帰分析など、実験的にもとめられた予測式により行われているが、個々の橋梁における具体的な防振効果の予測などの必要性からシミュレーション手法が行われるようになった。これらの中で、地盤をモデル化して解析的に扱い、実測データなどと比較した事例は、大別すると次の2通りがある。

①地盤を有限な範囲でモデル化し、有限要素法、薄層要素法を用いる方法

②地盤を半無限弾性体とした理論解を用いる方法

前者の代表的な事例として、文献21)、17)が挙げられる。

文献21)では地盤を有限要素法でモデル化し、地表面鉛直正弦波載荷に対する地盤の応答解析を行っている。まず、モデル化の妥当性を解析解と比較しチェックした後、地盤改良のケーススタディを行い、軟弱地盤における地盤改良による振動低減効果を検討している。

文献17)では車両走行時の地盤振動の実測と解析を行い、その特性を考察している。

実測は、道路に大型ダンブカーを走行させ、車両および周辺地盤の振動を計測し波動的な見地から分析を行っている。対応する解析では、道路に直交する2次元断面の成層地盤について薄層要素法モデルを作成し、走行荷重に対するシミュレーションを行い、図4-4に示すような結果を得、解析結果は概ね実測記録の振動性状を表すことができたとしている。

後者の代表的な事例の一つとして、

文献22)が挙げられる。文献22)では6径間PC単純高架橋を対象とし、対象橋梁の試験車走行時における上部工・地盤振動の実測値と解析値を比較している。解析においては地盤は以下のように取り扱われている。

橋梁のモデル化にあたって、橋脚下端のフーチング部と地盤との接点を、3成分のパネモデルに置換し、モード解析法により車両走行に対する上部工の応答と下部工の部材力を求める。次に地盤の応答解析は、地盤を半無限弾性体とした理論解で伝達関数を求め、各橋脚からの応答を重ね合わせることによって地盤振動を求めている。実測および解析は、防振対策(路面改良とノージョイント化+桁連結の併用工法)施工前後でなされており、地盤振動に関し表4-2および表4-3に示す結果が得られている。なお、表中の地盤

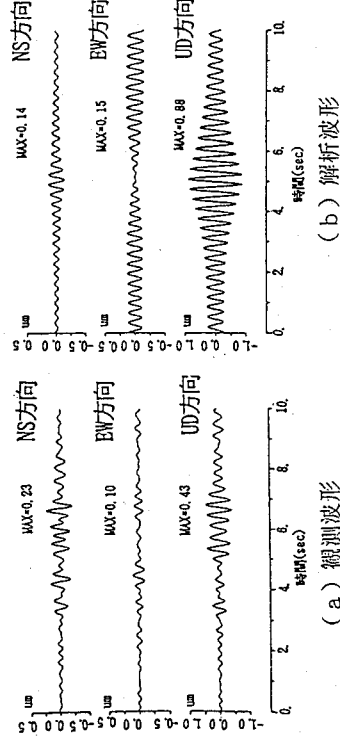


図4-4 観測波形と薄層法により得られた変位応答波形との比較

測点は橋脚端部から橋軸直角方向の距離である。両者の比較を通じ、全体的にシミュレーション手法の妥当性が検証できたとされている。

表 4-2 地盤振動レベルの比較

測 点	現況モデル		実測値
	X	dB	
振 動	地盤 11 m	41.97	36
	Y	47.08	47
	Z	54.06	53
レ ベ ル	X	43.44	42
	Y	48.13	43
	Z	46.88	49

表 4-3 地盤振動レベルの低減効果の比較

		低 減 効 果	
		3次元解析	実 測
橋軸方向	11 m	-2.6	-0.8
	30 m	-1.8	-5.3
橋軸直角方向	11 m	-14.8	-1.9
	30 m	-4.4	-5.4
鉛直方向	11 m	-9.7	-5.7
	30 m	-9.5	-8.7

4-7 問題点と今後の活動に向けて

振動実験や振動測定技術が進歩し、実験・実測の結果から多くの情報が蓄積されると同時に、解析的な検討結果が実験的に検証できるようになった²³⁾。しかし、膨大な解析結果の中から、問題の本質を的確に見出すことができないまま検討が終わってしまうことも少なくない。技法に溺れて、問題の本質を見失うという傾向がないとはいえない²³⁾。

橋梁から周辺への振動伝播問題は、計測事例やモデル化の技法は徐々に増えていくもの、地盤条件の複雑さが絡むためであるか、問題の本質が明らかになっていないと言いたいがたい。振動性状把握のための実用的なモデル化や対策の研究が必要であり、複雑な現象の中から問題の本質を振り分けたための技術開発が重要である。

(佐々木伸幸・秋本正信・戸松征夫)

参考文献

- 1) 梶川康男・上中勝・服部幸雄：高架橋の振動制御と橋梁環境問題，振動制御コロキウム，PART B，土木学会構造工学会委員会振動制御小委員会，pp.1-7，1991.
- 2) RICHARD D.WOODS：SCREENING OF SURFACE WAVES IN SOILS,A.M.ASCE,JOURNAL OF THE SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS DIVISION, pp.951-979, 1968.JULY.
- 3) F.E.RICHART,Jr・J.R.HALL,Jr・R.D.WOODS：VIBRATION OF SOILS AND FOUNDATIONS, KAJIMA INSTITUTE PUBLISHING Co.,Ltd, 1975.
- 4) 梶川康男・吉川実・秋本正信：走行荷重による高架道路橋の動的応答解析について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，第I部，pp.495-496，1984年10月.
- 5) 梶川康男・大嶋信太郎：周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析手法，土木学会論文報告集第341号，pp.70-86，1984年1月.
- 6) 川谷充郎：道路橋の走行荷重による不規則振動と衝撃係数に関する研究，大阪大学提出学位論文，1987年12月.
- 7) 小堀為雄：応用土木振動学，森北出版，1974年.
- 8) 小松定夫・川谷充郎：斜張橋の自動車走行による動的応答と衝撃係数に関する研究，土木学会論文報告集，No.275，pp.13-28，1978年7月.

- 9) 成田信之・桂樹正隆・江本勝：路面凹凸を考慮した橋梁の衝撃係数，土木技術資料，Vol.20，No.3，pp.133-138，1978年7月。
- 10) 本田秀行・小堀為雄：走行自動車による3径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数，土木学会論文報告集，No.313，pp.13-22，1981年9月。
- 11) H.Nakai and H.Kotoguchi：Dynamic Response of Horizontally Curved Girder Bridges under Random Traffic Flows, Proc. of JSCE, No.244, pp.117-128, 1975年。
- 12) 山田善一・小堀為雄：活荷重に対する道路橋の動的応答-衝撃係数-に関する考察，土木学会論文集，No.148，pp.1-9，1965年7月。
- 13) 岡林隆敏：単一走行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文報告集，No.286，pp.15-27，1979年6月。
- 14) 彦坂熙・吉村虎蔵・内谷保：連行自動車荷重による単純桁橋の非定常ランダム応答と衝撃係数，土木学会論文報告集，No.290，pp.31-41，1979年10月。
- 15) 梶川康男・沖野真・吉川実・杵本正信：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果，土木学会構造工学論文集，Vol.35A，pp.597-605，1989年3月。
- 16) 建設省：建設省所管道路事業環境影響評価技術指針，1985。
- 17) 福和伸夫・西阪理永・浅野三男・多賀直恒・寺村彰：自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究-実測記録の分析と薄層法によるシミュレーション解析-，構造工学論文集，Vol.38B，pp.95-104，1993。
- 18) 澤田憲文：交通振動振動軽減対策-構造物の振動制御，振動制御コロキウム，PART A，土木学会構造工学委員会振動制御小委員会，pp.31-32，1991。
- 19) 倉西茂・坂井藤一・横山功一：制振Q & A，振動制御コロキウム，PART A，土木学会構造工学委員会振動制御小委員会，pp.96，1991。
- 20) 竹宮宏和・将建群・中島浩・成瀬龍一郎・細谷多慶：埋設ブロック(WIB)による地盤-杭基礎系の地表面振動の考察，地震工学研究発表会，Vol.22，pp.827-830，1993。
- 21) 沢田健吉・谷口栄一：2次元有限要素法による地盤を伝播する振動の解析，土木技術資料，Vol.13，1978。
- 22) 梶川康男・下村真弘・讃岐康博：PC単純高架橋の防振対策に関するシミュレーション解析，土木学会第47回年次学術講演概要集，I-156，pp.488~489，1992年9月。
- 23) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析-まえがき，技報堂出版，1993。

第5章 振動感覚および振動使用性の評価

5-1 振動の心理的影響

(1) 全身振動が人体に及ぼす影響

振動が人体に及ぼす影響は、生理学的影響と心理学的影響に大別される。生理学的影響の評価については、人体の振動による生理的反応が複雑であるため、現在まだ困難である。一方、振動の心理学的応答については、多岐に渡る研究により信頼できる結果が得られている。振動感覚は、騒音における聴覚とは異なり、分布感覚器官系による知覚である。特に、全身振動では、周波数により異なる部位に共振が起こり、この共振部位で直接感知される。例えば振動台を用いた加振実験によると、2Hzまでは身体が全体として動いている感じを受け、6~8Hzでは内臓の共振が見られ、10~15Hzでは知覚は人体の上部に移り、20Hz以上では頭部で感じ、30Hzを過ぎると尻や腰に限定され、100Hz以上では接触している皮膚だけで振動を感じる。さらに、振動はベクトル量であるため、スカラー量である音圧とは異なり、振動方向にも影響を受ける。全身振動に対する、快、不快などの心理的評価に関しては、振動数、振幅（あるいは速度、加速度）、波形、作用時間、作用方向、姿勢など多くの因子を考慮する必要があるため、これまで様々な観点から検討が成されている。

(2) 既往の研究¹⁾

Weberによると、刺激(物理量)と感覚(心理量)は線形関係ではなく、刺激(S)とその増分(dS)との比が一定であることが実験により明らかにされている。従って、感覚の増加量(dR)は、dS/Sに比例するものと考えられる。この関係は常用対数を用いれば、 $R = K \log_e (S/S_0)$ と表される。ここに、 S_0 は感覚を生じない点($R=0$)での刺激値、 K は比例定数である。この式は、Fechnerの法則と呼ばれるものである。Stevensは、感覚量は刺激量の n 乗に比例するとした経験式 $R = K S^n$ を提案した。ここに、 n は様相特性指数(実験で求められる定数)である。Fechnerの対数法則とStevensの n 乗法則は、計量心理学における代表的な関係式であり、心理的評価の必要な様々な分野で用いられている。

ReiherとMeisterは、振動感覚に関して初めて大規模な実験を行い、立位、横臥位状態で垂直、水平振動を与え、「感じない」から「大いに不快」までの6段階について、図5-1に示す感覚曲線を得ている。このMeisterの感覚曲線は、全身振動に対する感覚基準として広く用いられている。

Janewayは、既往の研究(主にMeisterの実験)を参照して、自動車の乗り心地限界を検討、提案している。Janewayの研究は、アメリカや日本などで自動車の乗り心地を判定するのに用いられている。また、国鉄技術研究所では、Janewayの乗り心地限界と実測結果を参照して、乗り心地係数が提案されている。

HelbergとSperlingは、鉄道車両の乗り心地を対象に、座位で1~12Hzの垂直・水平振動実験を行い、評価基準として乗り心地係数を提案している。

Zellerは、等価単位Palを導入し、等価曲線を提案している。等価単位Palは1Hzを基準として、等しいと思われる振幅を結んだものであり、各Palの大きさによる被害の影響程度が与えられている。また、同様な等価単位Termが、Postlethwaiteによって提案されている。

Dieckmanは、振動感覚を表す指標として、K値を提案している。このK値は、振動数と加速度の関数として与えられ、作業への影響度や知覚の程度と結び付けられており、VDI(ドイツ工業規格)に採用されている。

Coermannは、VDI基準を参考に、正弦振動に対する等K値曲線を提案している。等K値は、住居と作業に及ぼす影響および知覚程度に關し9段階の分類基準で評価を与えるものであり、ISO基準の基礎的データに用いられたものである。

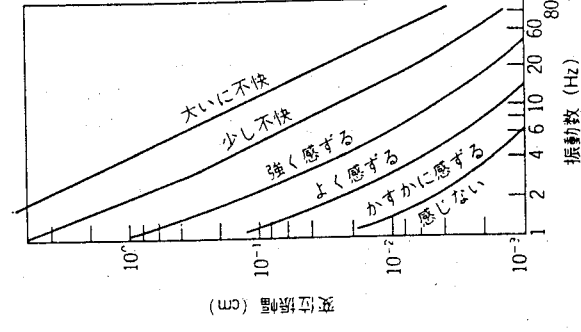


図 5-1 Meisterの感覚曲線

三輪・米川は、立位と座位で0.5~300Hzの広範な垂直、水平振動に対する実験を行い、20Hzの正弦振動を基準として他の周波数の正弦振動を感覚的に基準振動と等値させた等感度曲線（図5-2参照）を求めている。図5-2の縦軸は振動加速度レベルVAL(L_{va}とも称される)であり、次式で示される。

$$VAL(dB) = 20 \log_{10} (a/a_0) \quad (5.1)$$

ここに、a：振動加速度、 $a_0 = 10^{-6} \text{ m/sec}^2$ ：基準加速度である。図中、20Hzの縦軸に沿って振動の大きさのレベルVGLが示されている。同一のVGLの曲線上では、周波数によらず、心理反応が一定であると考えられるものである。この考え方は、騒音に対するphone、振動の等価単位Pal, Term, K値などと同様である。

小堀・梶川は、橋梁振動の評価を対象に、歩行中の被験者に対する振動感覚実験を行い、振動刺激として振動速度の実効値を用いた以下の式を提案している。

$$VGL(dB) = 20 \log_{10} (S/S_0) \quad (5.2)$$

ここに、 $S = \sigma_v$ ：振動速度の実効値、 $S_0 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ：振動速度の実効値の基準値。

(3)振動の大きさの尺度²⁾

VGLなどで表される振動の大きさのレベルは、距離尺度であるので和の法則が成立しない。しかしながら、実際の適用に際しては周波数分析などの結果を加算する必要があるため、変換関数である比率尺度を求めておく必要がある。

三輪・米川は、Garnerの比率修正法に基づいて、振動の大きさの尺度VGを、40VGLを1VGと置いて次のように定めている。VGは、音の場合の「音の大きさ」Soneに相当するものである。

$$\begin{aligned} VGL \leq 40dB ; \log_{10} VG &= 0.03(VGL - 40) \\ VGL > 40dB ; \log_{10} VG &= 0.023(VGL - 40) \end{aligned} \quad (5.3)$$

小堀・梶川は、式(5.2)で表される歩行位でのVGLに対して、マグニチュード推定法およびGarnerの比率修正法により以下の関係式を提案している。

$$\begin{aligned} VGL \leq 40dB ; \log_{10} VG &= 0.05(VGL - 40) \\ VGL > 40dB ; \log_{10} VG &= 0.03(VGL - 40) \end{aligned} \quad (5.4)$$

(4)複合正弦振動およびランダム振動²⁾

実際の振動は、複合正弦振動あるいはランダム振動と考えられる場合が多い。VG値は、同一周波数の振動間では単純に加算できるが、異なった振動数間（特に隣接振動数間）では単純加算は過大評価となる。聴覚の場合も同様の現象が見られ、種々の荷重加算法が考案されている。

三輪・米川は、Stevensの荷重加算法を用い、次式を提案している。

$$VG_T = VG_{max} + 0.3 \{ (\sum VG_i) - VG_{max} \} \quad (5.5)$$

ここに、 VG_{max} はVG_i中の最大値であり、0.3は振動感覚実験から求められた値である。すなわち、VG_{max}以外の値は全体に対して30%しか寄与していないことを示している。

小堀・梶川は、橋梁振動のように比較的狭い振動数範囲での振動感覚に対しては、感覚量ではなく刺激の段

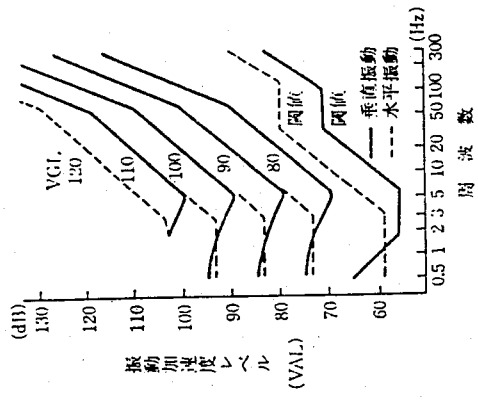


図5-2 三輪の等感度曲線

階で処理するのが妥当であるとしている。ここでは、Dieckmannの提案したK値での処理方法にならない、複数の振動数成分がある場合には、それぞれの振動刺激の2乗和の平方根 $S_r = \sqrt{(\sum \sigma v_i)^2}$ を用いれば実験値と良く一致することを見出している。

5-2 振動感覚の評価

(1)各国における振動評価指針^{*)}

全身振動に対する影響評価の研究は各国で行われており、国際的には ISO/TC108の活動によって明らかとなりつつある。各国における振動評価指針を表5-1に示す。

表5-1 各国における振動評価指針

評価指針	年	周波数(Hz)	概要
ISO2631/1-1985	1985	1~80	全身振動暴露評価指針(作業効率、健康、快適性の確保)
ISO2631/2-1989	1989	1~8	建物振動(連続、断続、衝撃振動による全身振動)
ISO2631/3-1985	1985	0.63~0.1	乗り心地評価(Z軸鉛直振動による全身振動)
ISO6897-1984	1984	0.063~1	海洋構造物、超高層建築物(長周期、水平振動のみ)
ISO/DP4866	1982~	幅広い	建物振動(振動影響、測定方法と評価)
BSI	1983	1~80	イギリス国家標準規格(ANSIとほぼ同じ)
ANSI	1963	1~80	アメリカ国家標準規格(ISO2631/2とほぼ同じ)
VDI-2057	1983	1~100	Meisterによる改良案(5段階評価)
振動規制法	1976	1~90	振動公害規制基準(工場振動、建設作業振動、道路交通振動)
床振動	1984~	2~63	住宅性能評価(外部振動源による床振動)

(2)ISOの振動暴露基準^{*)}

ISO2631/1の評価指針は、人体の全身に伝搬する周波数範囲1~80Hzの振動を対象とし、その全身振動暴露に対する許容限界を示したものである。人体の振動応答を考慮するための要因としては、振動の強さ、周波数、振動方向、継続時間を取り上げられており、振動方向ごとに評価指針が示されている。座標系は人体軸に設定されており、加速度の大きさと暴露時間から快適性限界、疲労・能力限界、耐久性限界が定められている。図5-3に疲労・能力限界曲線を示す。快適性限界曲線は図5-3の加速度を1/3.15倍(-10dB)して得られ、耐久性限界曲線は2倍(+6dB)すればよい。

(3)我国の振動公害規制基準^{*)}

わが国では、1976年にISO2631/1に準拠して振動規制法が法制化された。規制基準は工場振動、建設作業振動、道路交通振動に対し、それぞれ規定されている。表5-2に道路交通振動に対する要請基準を示す。測定単位は、鉛直振動の振動レベル(dB)を用いる。

この振動レベルとは、実際の振動量を図5-3の曲線により感覚補正を行い、加速度振幅を対数倍率表示したもので、その測定には一般に補正回路を有した振動レベル計(JIS C 1510)を用いる。

表5-2 道路交通振動要請基準

	昼間	夜間
第1種区域(住宅地域)	65dB	60dB
第2種区域(商工業地域)	70dB	65dB

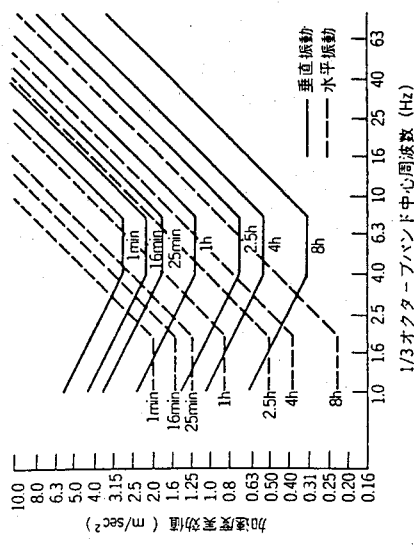


図5-3 ISO振動暴露基準

5-3 歩道橋の振動使用性

(1) 歩道橋における振動使用性問題

歩道橋は道路橋に比べその設計活荷重が小さいために、スレンダーな振動しやすい構造物となることが多い。このため歩行者の歩調と橋の固有振動数とが近い場合には比較的容易に振動が発生し、歩行者に対し不快感を与えるような場合がある。また近年は、より大規模かつスレンダーな構造物の橋が施工される例が増加しており、歩行による共振状態がさらに懸念される状態となっている。立体横断施設技術基準⁹⁾では、快適な使用状態を保つために「活荷重による主桁の最大たわみは原則として支間の1/600以下。また活荷重による主桁の振動は利用者に不快感を与えてはならない」と定めており、さらに基準の解説および歩道橋の建設省標準設計の解説書⁷⁾には「主桁のたわみ振動の固有振動数は1.5~2.3Hzの範囲を避ける」と明記されている。しかし支間40~50mの桁形式の歩道橋を経済的な桁高で設計すると、1次固有振動数は2Hz前後の値となることが多く、その対応に苦慮することとなる。反面ある程度規模の大きい歩道橋では、人の歩行による共振では揺れを感じにくいことも経験的に判明してきた。そこでその後は人間の感じる振動の大きさから歩道橋の使用性を論じる動きが現れ、単純に橋の固有振動数を規制するのではなく、橋の一定の使用性のレベルを定め、このレベルを保つために必要な橋の動的応答量を確保するという照査方法が提案されている。しかしながら、シンボリックな形式で複雑な構造の場合は、固有振動数を算出すること自体、設計者に強い負担を求めるものとなる。また、動的な問題は静的な応力やたわみの問題とは異なり、必ずしも予想通りの振動数や動的応答量が得られるものでもない。そこで近年は固有振動数にとられないで共振状態における振動速度の実効値を算出できる簡易計算式も提案されている。以下では上記の基準制定後の動きについて述べる。

(2) 既往の研究^{9) 17)}

昭和54年に制定された基準の「たわみ制限の強化」は、固有振動数の下限を従来よりも約2割高める結果となり歩行者への影響から考えるとかなりの効果を認めることができるが、支間長が大きくなるとこの制限を守ることが難しくなる。また「振動の照査の義務付け」は、この種の問題を扱う上での大きな進歩ではあったが、その照査方法はまだ確立されておらず早急に簡便でかつ充分な精度と根拠を持つ方法の開発が望まれた。

梶川ら⁹⁾は、歩道橋の振動が歩行者へ及ぼす影響を考えた設計を行う際の有効な検討方法となる非使用確率の精解値の求め方や使用性指標の検討を行い、さらに梶川¹⁰⁾は、動的応答量(振動量)の求め方としてモード解析法による歩道橋の照査法を提案した。これは単独の歩行者による動的応答値を用いて群集載荷状態をも確率的に照査できる手法であり、図5-4に示すように歩道橋の建設される地域の特性(表5-3)によって単独載荷状態・群集載荷状態・単独走行状態の必要な照査を実施すればよい。この照査方法は実橋における振動使用性において現在でもよく引用されている。

その他の研究としては長支間歩道橋の最小重量設計を行い基準の振動数制約に検討を加えた報告¹¹⁾、支点条件によって個有値解析の結果求める固有振動数がかなり異なる

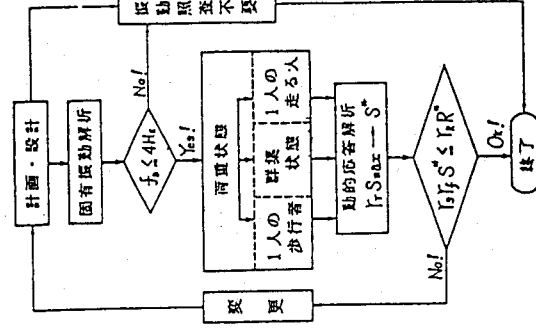


図5-4 振動照査のフローチャート

表5-3 建設地点による荷重条件

(●は照査の必要性を示す)

建設目的・地点	増加歩行	増加歩行	増加歩行
公園内記念歩道橋	●	●	●
都市内交通制約歩道橋	●	●	●
都市内河川遊歩道橋	●	●	●
その他の歩道橋	●	●	●

ことを指摘した報告^{12) 13)}、この場合の固有振動数の実用算定式の提案¹⁴⁾ などがある。田中・加藤らは一連の研究^{15) 16) 17)}で、固有振動数の解析時のモデル化と実測値との比較検討、支間40m以上の歩道橋の実振動特性の検討などを行った結果、基準にとらわれない歩道橋の振動使用性簡易照査式を提案している。

(3) 歩行者の特性

歩道橋を設計する場合の活荷重すなわち歩行者荷重は、あくまで静的な荷重として 350 kg/m^2 の群衆荷重を考慮しているが、振動解析を実施する上ではこの動的成分が問題となる。小堀らの実測結果¹⁸⁾によれば歩行者の平均歩調は約2歩/秒(図5-5)、平均歩行速度は1.43m/sec、人体が床面に与える衝撃力Fは、人体を腰部への集中系として扱いその慣性力が一応の近似を与えるものと考えて、その波形を三角関数で近似した下式を提案している。

$$F(t) = W \cdot A \cos(\omega t + \phi) / g \dots\dots\dots (5.6)$$

ここにW：体重(kg)，A：腰部加速度の振幅(cm/sec²)，

ω ：歩調(約2Hz)， ϕ ：初期位相，g：重力加速度。

(4) 歩道橋の振動限度¹⁹⁾

系列カタゴリ法と呼ばれる精神物理学の実験によれば、「感ずる」や「歩きにくい」の感覚が生じはじめの振動刺激(振動速度)は表5-4に示すようになる。歩道橋の場合最も頻繁に生ずる荷重載荷状態として1人の歩行者が通過する際の振動を考え、その振動を歩行者本人が感じないようにするには、式(5.4)に示す振動の大きさ(VG)を0.3以下にするのが望ましく、そのためには刺激(応答速度の実効値)を0.42cm/sec以下にする必要がある。

(5) たわみ制限と振動使用性指標¹⁰⁾

歩道橋の使用性のレベルから、逆に活荷重による最大たわみの許容値を求めることも可能である。表5-5は梶川¹⁰⁾が試算した結果である。基準で定めている活荷重たわみの制限値($\alpha_D=400$ or 600)は、橋梁形式によって多少異なるが5~10%程度の使用性レベルに対応していることが判る。なおこれはBS5400においてもほぼ同様な結果になっている。ただし結果的に同じであったとしても将来の限界状態設計法への移行を念頭におくと、最終的な振動使用性指標はたわみ制限よりも、より直接的な振動制限の方が望ましい。

表5-5 各橋梁形式におけるたわみ比制限値と振動基準値

橋梁形式	K	γ	たわみ比制限値 α_D			振動基準値 R^{**} (cm/s)	
			$R^{**}=1.2 \text{ cm/s}$	1.55 cm/s	1.7 cm/s	$\alpha_D=400$	$\alpha_D=600$
単 純 桁	1.0	1.57	723	560	510	2.17	1.45
等2径間連続桁	0.71	1.60	524	405	370	1.57	1.05
等3径間連続桁	0.58	1.63	436	337	308	1.31	0.87
3径間連続桁 (前後間比0.8)	0.76	1.64	574	445	405	1.72	1.15
3径間連続桁 (前後間比0.6)	0.85	1.69	662	513	467	1.99	1.32

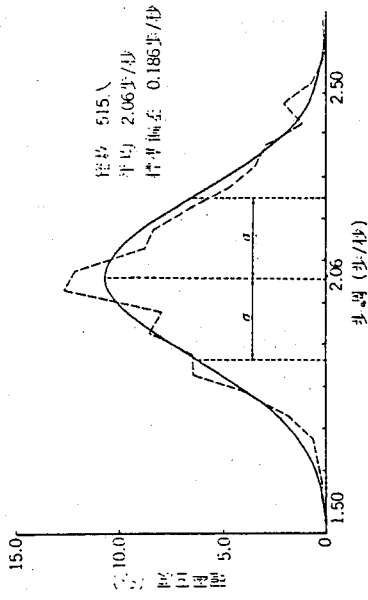


図5-5 一般街路における歩行者の歩調分布

表5-4 各カタゴリの生ずる下限刺激量

カタゴリの内容	振動速度(実効値cm/sec)
少し感じた	0.42
おおいに感じた	0.85
少し歩きにくい	1.7
おおいに歩きにくい	2.7

5-4 道路橋の振動使用性

(1) 道路橋における振動使用性問題

道路橋における振動使用性の問題は、①走行車両の走行安定性および乗り心地、②道路橋を渡る歩行者の振動感覚、の2つに大別される。一般の道路橋において振動が過大で走行安定性や車両の乗り心地が問題となることはあまり考えられないが、中支間以上の吊橋や斜張橋で風などによる振動が大きくなれば問題であろうし、鉄道併用橋では列車の脱線の危険性の生じるであろう。一方、車両の走行によって起こる道路橋の振動が大きくなると、そこを渡る歩行者に不安感や不快感を与えることが考えられる。これは橋梁が高強度な材料の使用によって軽量化とたわみやすくなっていることとともに交通量の増大と車両の大型化によって、大きな振動が頻繁に発生しやすくなっており、ますます重要な問題となってきた。

道路橋の設計法が限界状態設計法に移行しようとしている現在、これまでは研究も比較的少なく二次的な扱いを受けてきた使用限界としての振動使用性の検討は重要な課題であると言えよう。以下では、振動使用性として上記②の歩行者の振動感覚を取り上げて述べる。

(2) 既往の研究^{8), 19), 20)}

Oehlerは、単純桁、連続桁、ゲルバー桁の3形式橋梁(15橋34支間)においてトレーラ車の走行試験を行い、振動測定結果を5-1で述べたJanewayの乗り心地限界を用いて評価した。しかし、この研究には乗り心地評価を目的とした限界を適用した点に問題が残る。

Road Research Laboratoryでは、橋梁上において振動感覚実験を行い、歩行者が立った場合に振動を感じ始める限界は最大速度で約0.6cm/secであり、歩いた場合は約1.5cm/secであることを得ている。また、同じ大きさに感じられる等感覚は振動速度に依存し、しかも歩いた場合には振動を感じにくくなるとしている。1967年のBritish Standardでは、補足事項であるが「20tf車の通過に伴って生ずる振動の最大加速度をA(in/sec²)とし、最大変位をD(in)とするとき、その積を5以下とするのがよい」との振動制限項目を設けている。この条件は最大振動速度を5 in/sec以下にすることとほぼ同じである。

WrightとWalkerは多主桁橋における主桁のたわみやすさが横分配や床版のモーメントに及ぼす影響について考え、たわみやすさと人間の反応との関係について考察している。そして、限界加速度として100in/sec²(約0.25G)を挙げ、計算手法を提案している。

小堀・梶川は、多くの道路橋で大型車通行時の振動測定を行うとともに、実橋の振動と交通流との同時測定によって複数の大型車が載荷した時の振動性状も把握している。また、動的応答計算を用いて橋梁の使用性を確率論的に解析し、歩行者の振動感覚の立場からの振動使用性を応答速度の2乗平均値によって評価する方法を提案している。

星谷らは、振動による心理的な反応を定量的に設計条件として取り入れた橋梁を設計するために考慮されるパラメータを検討するために、文献2)の尺度(5-1の式(5.4))を用いて感度解析を行っている。その結果、パラメータは曲げ剛性、荷重重量、走行速度、車両の到着率、橋梁の減衰定数の順であるとしている。

(3) 走行車両による動的応答

走行車両による橋梁の動的応答については、以前より動的増幅率(衝撃係数)の検討を対象として実橋での測定や数値解析手法の研究が行われてきた。また、最近では橋梁部材の疲労強度や橋梁周辺の振動問題などを目的としても研究が行われている。歩行者の振動感覚の立場からの測定や解析は少ないが、計測方法や数値解析手法は基本的に同一であり、その方法は文献21)に詳しく示されているのでここでは省略する。

(4) 振動使用性の評価

歩行者の振動感覚の立場からの振動使用性については、わが国では研究が少なく、現行の道路橋示方書には振動使用性に関する規定は無い。提案されている評価手法は、以下の梶川²⁰⁾の方法が唯一と言えよう。

- ・提案されている簡単に動的応答値を得るための応答スペクトル図より求められる、10tf車による橋梁の応答速度の2乗平均値が0.1 cm²/sec²以下であれば使用性に問題はない。

• 10tf車に対する応答速度の2乗平均値が $0.1 \sim 0.7 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ においては、非使用性確率を求めて確率論的な検討が必要である。

• 10tf車に対する応答速度の2乗平均値が $0.7 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 以上では確率論的な検討に加えて、単一走行車両に対する動的応答計算も必要となる。

一方、カナダのオンタリオ州では、道路橋の限界状態設計法による基準を制定するために研究が進められた。1983年制定のオンタリオ州道路橋設計基準²²⁾では、限界状態照査基準の使用限界状態の項に道路橋の振動についての規定が定められている。この設計基準では動的応答を求めて評価するのではなく、道路橋の1次曲げ固有振動数に応じた静的たわみ制限を歩行者の予想利用頻度ごとに図5-6のように規定する方法を採用している。ここでの静的たわみは、1車線の走行車線の中央に置いた1台の5車軸トラック（全重量 700kN）による歩道の中央（歩道がなければ防護柵前面）の活荷重たわみである。

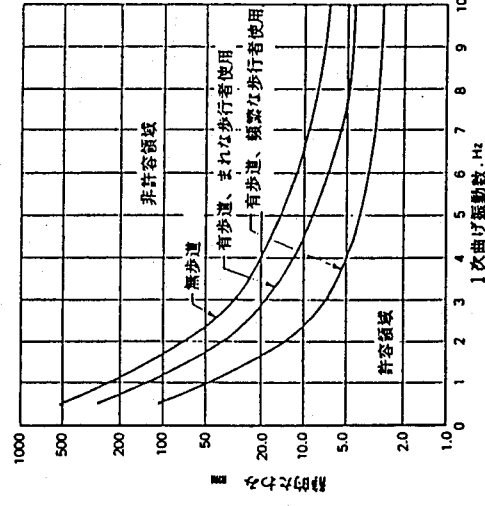


図5-6 使用性に対するたわみ制限

5-5 問題点および今後の課題

(1) 振動の心理的影響

振動の心理的影響を評価するためには、振動の大きさを正しく表現できる評価尺度が要求される。この場合、Fechner の対数法則あるいは Stevens の n 乗法則の定数を求めることと刺激 S として変位振幅、速度、加速度のいずれを用いるかが問題となる。また、Fechner の対数法則の基本となる Weber の法則は、一般に限られた範囲でのみ成立するため、無条件には適用できない。したがって、橋梁交通振動の心理的評価に対する統一的な評価尺度を求めるために、人間の反応に関する部分でのより一層の研究が望まれる。

(2) 振動感覚の評価

ISO 基準は乗り物の乗員、乗客の乗り心地を対象として提案されているため、交通車両による橋梁の振動使用性の判定にそのまま適用するには問題がある。また、振動規制法は振動公害という住民の振動に対する認知程度を対象としており、JIS C 1510に定められた補正回路を有する振動計が振動感覚補正を行った公害用振動レベル計と称されているが、乗り心地評価基準である ISO の振動暴露基準に基づいたものであるため、振動使用性という観点からは正しくない。橋梁交通振動による振動感覚の統一的評価基準の策定が望まれるところである。

(3) 歩道橋の振動使用性

振動感覚の中で最も敏感に影響を及ぼすものは有感反応である。さらに、振動公害のように振動を感じることが不快あるいは苦痛につながるような場合は継続時間が重要となる。従って、橋梁振動に対する反応として、どのような不満の問題にするかということにも関連し、振動使用性の評価には解決することの難しい問題が多く含まれている。また、振動感覚の許容確率や、荷重状態の捉え方もまだ確立されたものではない。固有振動数や減衰定数の予測の正確さや、使用性と経済性との関連などとも併せて更なる検討が望まれる。

今後建設される歩道橋はより大型化するとともに、デザイン面を優先して構造性のある程度犠牲にした設計を強いられる場合もあろう。それに伴い、振動感覚問題を含めて様々な問題が生じてくるものと思われる。このため、歩道橋用の簡便で有効な TMD などの制振装置を開発する必要もあろう。

(4) 道路橋の振動使用性

現在、道路橋の設計法は許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつある。限界状態を考えた設計においては、使用限界状態としての振動使用性が重要な項目となることは明かである。また、道路橋におい

ても、そこを通行する歩行者に不快感や不安感を与えるような振動が発生することは、あってはならないことである。しかしながら、わが国では道路橋の歩行者に対する振動使用性の研究は少なく、さらなる研究が望まれるとともに、振動使用性の問題を設計法に如何に取り入れるかの検討が急務であると言えよう。

(河西龍彦・加藤雅史・夏秋義広)

参考文献

- 1) 梶川・岡田・小堀：振動と人間 I. 振動の人体への影響(上), 橋梁と基礎, Vol.13, No.6, pp.36-42, 1979.
- 2) 小堀・梶川：橋梁振動の人間工学的評価法, 土木学会論文報告集, 第230号, pp.23-31, 1974.
- 3) 塩田：振動による不快感, 環境保健入門「からだの科学増刊号」, 日本評論社, pp.78-83, 1989.
- 4) 三輪：全身振動の評価法 (ISO/TC108/DIS2631を中心として), 日本音響学会誌, Vol.29, No.4, pp.252-258, 1973.
- 5) 梶川・岡田・小堀：振動と人間 I. 振動の人体への影響(下), 橋梁と基礎, Vol.13, No.7, pp.44-46, 1979.
- 6) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, 丸善, 1979.
- 7) 建設省制定：土木構造物標準設計第5巻・解説書(立体横断施設), 全日本建設技術協会, 1985.
- 8) 梶川・小堀・岡田：振動と人間 II. 橋梁振動の評価(上), 橋梁と基礎, Vol.13, No.8, pp.37-41, 1979.
- 9) 梶川：振動感覚を考慮した歩道橋の確率論的設計, 土木学会論文報告集, 第285号, pp.29-36, 1979.
- 10) 梶川：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査に関する考察, 土木学会論文報告集, 第325号, pp.23-33, 1982.
- 11) Sugimoto, H., Kajikawa, Y. and Vanderpraats, G.: On Minimum Weight Design of Pedestrian Bridge Taking Vibration Serviceability into Consideration, Proc. of JSCE No.386/I-8, pp.105-113, 1987.
- 12) 林川・渡辺・及川・井上：CS橋の積雪時における現場振動実験, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集 I, pp.644-645, 1989.
- 13) 田中・加藤・鈴木：河川歩道橋の設計と実測に基づく振動特性の検討, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.929-936, 1991.
- 14) 米田・宮地：桁橋の鉛直なわみ基本固有振動数を推定するための実用算定式について, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.765-772, 1992.
- 15) 田中・加藤：歩道橋の固有振動数の測定と解析による検討, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.671-678, 1990.
- 16) 田中・加藤・鈴木：支間40mを超える歩道橋の実振動特性, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.773-780, 1992.
- 17) 田中・加藤：設計時における歩道橋の振動使用性照査法, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.77-84, 1993.
- 18) 小堀・梶川・城戸：振動感覚を考慮した歩道橋の設計, 橋梁と基礎, Vol.8, No.12, pp.23-29, 1974.
- 19) 小堀・梶川：道路橋の振動とその振動感覚, 土木学会論文報告集, No.222, pp.15-23, 1974.
- 20) 梶川：振動感覚を考慮した道路橋の使用性解析に関する考察, 土木学会論文報告集, No.304, pp.47-58, 1980.
- 21) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.
- 22) 九州橋梁・構造工学会：カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準1983年版(共通編・鋼橋編), pp.65-67, 1985.

第Ⅲ編 橋梁の損傷と健全度

1. 概説	75
2. 損傷事例	76
2. 1 床版	
2. 2 主桁、縦桁、横桁、垂直材	
2. 3 二次部材	
2. 4 支承部、桁端部	
2. 5 伸縮装置	
2. 6 付属設備	
3. 健全度点検のための振動測定法	86
3. 1 たわみの測定	
3. 2 部材負担力の測定	
3. 3 ホットスポット応力の測定	
3. 4 地盤振動の測定	
3. 5 空気振動の測定	
4. 疲労損傷の評価	97
4. 1 まえがき	
4. 2 疲労照査の流れ	
4. 3 鋼橋の疲労損傷に及ぼす振動の影響の評価例	
5. 補修・補強実施事例	101
5. 1 部材の補修補強	
5. 2 構造の変更	
5. 3 ノージョイント化	
5. 4 TMD	
参考文献	112

1. 概説

橋梁は常に動的な外力を受け、長い期間自然環境の中にあり、場合によっては半永久的に供用する役目をもつ構造物である。橋梁に常に作用する動的外力としては、自動車や列車による時間的に変動する活荷重が中心である。したがって、疲労損傷は鋼橋の供用開始後に想定される限界状態の中で重要な破壊形態の一つと考えられる。

従来、わが国では疲労損傷は鉄道橋だけの問題と考えられてきた。鉄道橋は設計荷重に近い大きな列車が高い頻度で通る可能性が高いため、初期の設計示方書においても、疲労を考慮した条項が設けられていた。一方、道路橋については従来、設計荷重に相当するよう大きな荷重に達することはきわめて稀であると考え、疲労の影響は実用上、小さいものとして無視してきた。しかし、近年かなりの道路橋においても疲労損傷が発生しているとの事例報告がなされている。最近の橋梁構造物の大型化、溶接構造の主流化、高張力鋼の使用といった鋼橋の設計、製作面での進展、またその上を通過する車両の大型化、重量化や交通量の飛躍的な増加を考えると、道路橋の疲労損傷は今後ともますます増加するものと考えられる。したがって、疲労損傷の予知を目的とした道路橋の健全度評価や補修・補強の技術対策を確立することが必要とされている。

以上のことから、第2章では道路橋の床版、主桁、二次部材、支承、付属設備等の損傷事例について紹介されている。道路橋の疲労損傷の原因としては、応力集中、溶接欠陥、二次応力、面外変形等の力学的な劣化や、腐食環境下での化学的な劣化現象があり、種々の要因が複合されている場合が多い。ここでは交通車両による振動が主たる原因とは考えられないが、多少なりとも間接的に関与していると思われる損傷事例を取り上げている。次に、第3章では道路橋の健全度を評価するために、部材の変形や応力の測定方法、道路橋周辺部の環境振動の測定方法について紹介し、その測定における留意事項について述べられている。第4章では疲労安全性の照査を行う上での基本的な考え方、照査の方法が示されている。さらに、走行荷重による振動が疲労損傷に与える影響について検討した実施例が紹介されている。最後に、第5章では設計時の条件より機能を向上させるために、あるいは種々の条件下で損傷が生じた場合に、構造形式の変更や部材の補修とともに補強した実施例について紹介されている。また、支承部で発生する振動や騒音、漏水等の問題を解決するために、単純桁の連続化、既設橋のノージョイント化、さらに、振動軽減対策の一つとしてTMDを設置した事例について示されている。

2. 損傷事例

2. 1 床版

(1) 鋼床版

a) 横リブ溶接部

横リブとデッキプレート溶接部(図-1)、縦リブと横リブの交差部(図-2)上を車輪が通過する事により横リブが面外変形を受け、すみ肉溶接部にクラックが発生した。

b) デッキプレート溶接部

鉛直スティフナーとデッキプレート溶接部の直上を車輪が通過する事によりデッキプレートが面外変形を受け溶接部にクラックが発生した(図-3)。

c) 張出し部

張出し部に設置されている排水桝取付部およびその周辺の縦リブに錆が発生した(図-4)。

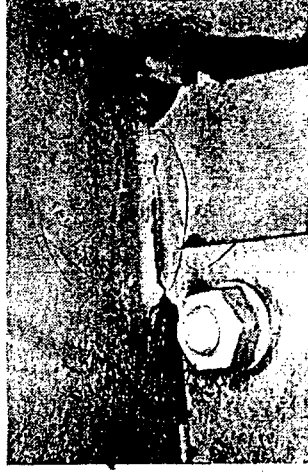
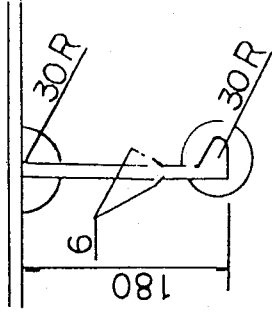


図-1 横リブとデッキプレート溶接部^{1), 2)}

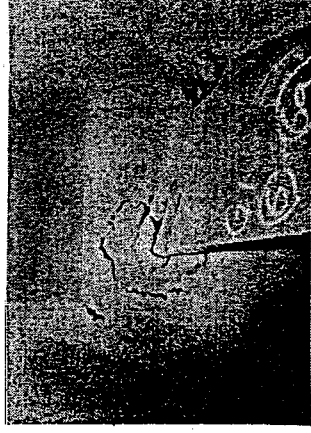
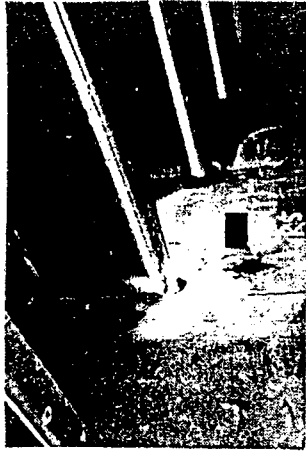


図-2 縦リブと横リブの交差部²⁾

図-3 デッキプレート溶接部²⁾

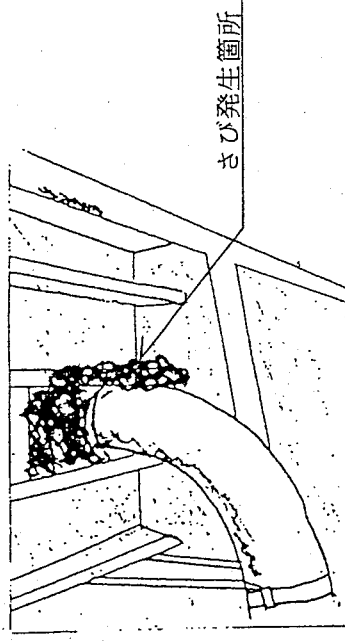


図-4 鋼床版排水桝取付部のさび³⁾

(2) RC床版

a) 連続版

RC床版の損傷の多くは、引張縁に生じたひびわれの進行にともなうものである。

ひびわれは図-5に示すように①1方向ひびわれ発生→②縦横2方向ひびわれ発生→③ひびわれの発達、細網化→ひびわれ貫通→角落ち・ひびわれのスリット化→④コンクリートの抜け落ちの順に進行していく。

1方向ひびわれは、一般に主鉄筋方向（橋軸直角方向）に発生するが支持桁の不等沈下が原因のひとつになると桁直角方向の曲げモーメントが作用して主桁方向にひびわれが発生するケースもある。

b) 床版端部

端対傾構と床版端部打ち下ろし区間が貫通ひびわれにより剥離し遊離石灰が流出した例である（図-6）。

- ①一方向ひびわれの発生 ②二方向ひびわれの発生 ③二方向ひびわれの発達細網化、漏水や遊離石灰の発生 ④漏水の増加、泥水、錆汁の浸出を経て抜け落ち

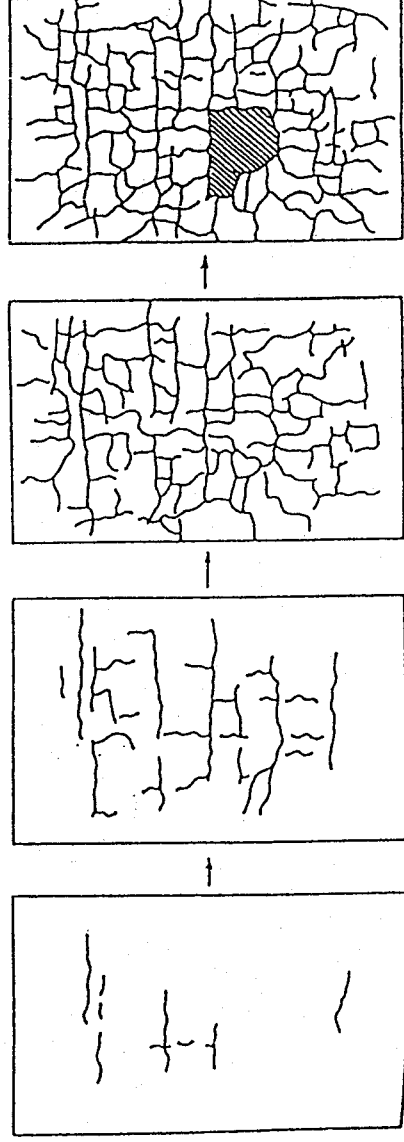


図-5 ひびわれの変化（模式図）⁴⁾

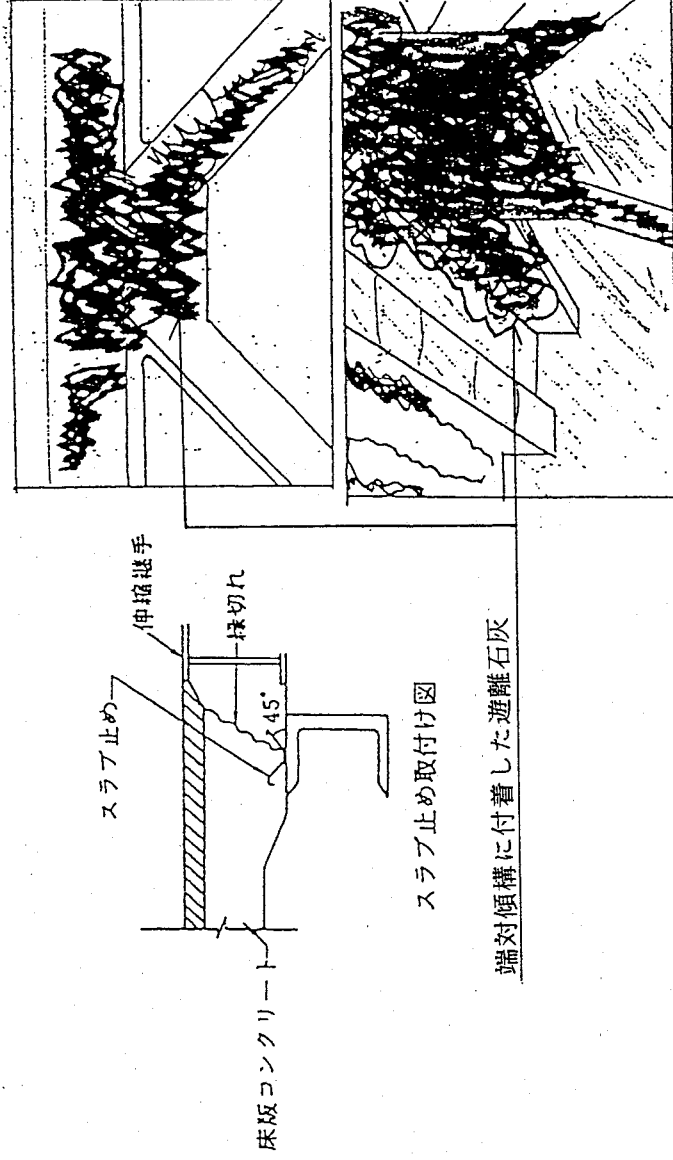


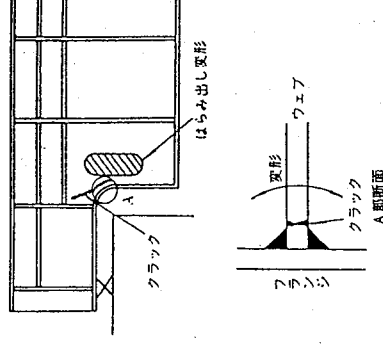
図-6 床版端部の損傷状況³⁾

は垂直補剛材の端部とフランジの間のわずかなギャップ部分において疲労亀裂が発生するものである。これは、そのギャップ部分で面外変形が生じること起因した亀裂である。

④桁端部切欠き部⁶⁾

図-110に示すような桁端の切欠き部に疲労亀裂が発生する場合がある。

これは、切欠き部の応力集中により、ウェブの局部座屈による面外変形が生じることがその発生要因と考えられる。



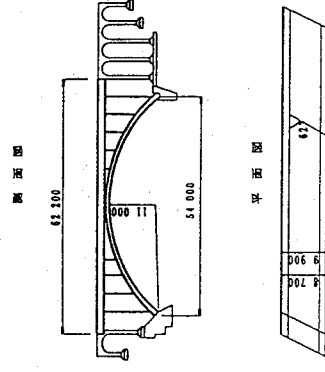
(2) 縦桁

①縦桁端部（横桁取り合い部）⁷⁾

図-110 I桁端部の切欠き部に発生クラック（事例K）

アーチスパン54mのRC床版鋼2ヒンジアーチ橋である蟬丸橋（図-111）では供用後25年で図-112に示すように、縦桁端部に疲労クラックが発生している。

この損傷要因として文献⁷⁾では斜角による面外振動モードのよ
うな動的要素を挙げており、補強時にはこの振動特性の改善を図る
ためにアーチ横構、対傾構、斜材を追加し、効果があつたことが報
告されている。



(3) 垂直材

①垂直材端部⁷⁾

この部位の疲労クラックも蟬丸橋で生じており、その局所的な応
力状態により生じたものである。状況を図-113に示す。

図-111 蟬丸橋構造一般図

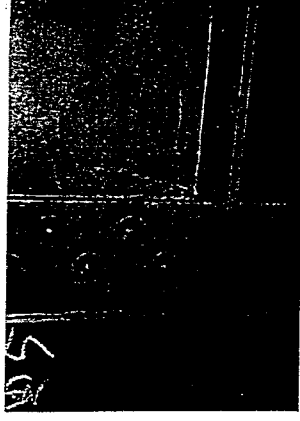


図-112 縦桁端部クラック

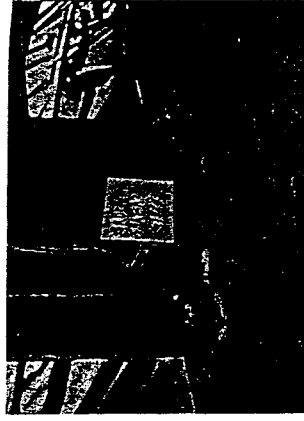


図-113 垂直材下端クラック

2. 3 二次部材

鋼道路橋の疲労損傷が目立つようになってきたのは最近のことである。これは、経済の発展とともに交通量の増加、大型車の増加の他に、高度成長期に急激に道路整備の進んだ部分の橋梁が補修の必要な時期に入ってきたことによるものであるが、他に経済性の追求の為に軽量化、高張力鋼の採用等を行なった為にたわみや歪み構造になってきたことも見逃せない。これは、疲労損傷の多くが主桁ではなく、主桁間を結ぶ二次部材に発生していることからもうかがえる。以下に、板桁橋の二次部材である対傾構及び横構の損傷事例について述べる。

(1) 対傾構

対傾構は主桁間のたわみ差を少なくし、荷重を主桁間で分配することを目的に設けられる。対傾構の一般的な構造は図-14、図-15のようなものである。図-14の対傾構に生じている損傷のうち一般的なのは対傾構取付部の上端部に生じる疲労亀裂である。亀裂の状況を図-16に示す。各亀裂の特徴は以下のとおりである。

A 型；垂直補剛材上端部のうち、垂直補剛材前面回し溶接部の止端部から生じる亀裂で、最も多く見られる形態である。

AR型；A型が止端部から生じるのに対し、AR型は同じ回し溶接部のすみ肉溶接のルート部から発生、進展していると考えられ、ビードの表面に現れる亀裂である。

B 型；垂直補剛材のスカラップ側の回し溶接部止端から生じる亀裂である。

AB型；垂直補剛材と主桁上フランジとの溶接部全幅を貫通した状態の亀裂である。

C 型；垂直補剛材と主桁ウェブの溶接部のうち、スカラップの下端部から生じた亀裂で、進展の方向は溶接ビードに沿うもの、途中から垂直補剛材あるいはウェブに至るものがあり、これらが複合共存することもある。

D 型；主桁のウェブと上フランジ間のくび溶接部に生じる亀裂で、AB型やC型の亀裂と共存するケースが多い。

E 型；対傾構上支材の上フランジ端部と垂直補剛材の間で、ガセットプレートに生じる亀裂である。

F 型；リベット孔を横切る形で垂直補剛材に生じる亀裂である。

S 型；スカラップ端部から、垂直補剛材に生じる亀裂である。

図-15の対傾構に生じる損傷も一般的なのは対傾構上端部の疲労亀裂である。亀裂の状況を図-17、図-18に示す。各亀裂の特徴は以下のとおりである。

A 型；垂直補剛材の上端部及びウェブギャップ板の上端部の溶接部に生じる亀裂で最も多く見られる形態である。

B 型；垂直補剛材、ウェブギャップ板の上端部から発生した亀裂で、進展方向は溶接ビードに沿うもの、途中から垂直補剛材、ウェブギャップ板の方向に進みがある。

C 型；主桁フランジとウェブのすみ肉溶接に沿った亀裂及びスカラップ下端のすみ肉溶接から発生しウェブ方向に向かった亀裂であり、A型亀裂が貫通した場合に多い。

(2) 横構

横構は橋梁全体の横方向剛性を増すために設けられるものである。横構の損傷例は対傾構に比べると少なく、損傷の程度も小さい。横構の損傷は、図-19のように主桁ウェブに取り付くガセットの溶接部に生じる。また、損傷の発生しているものには横構の組み方に特徴がある。通常の横構の組み方は図-20のとおりであるが、損傷の生じている橋梁の横構は図-21、図-22のような場合に生じている。これは、図-20の場合には、主桁のたわみあるいは主桁間のたわみ差により生じる横構の変位がねじり剛性の低い主桁の変位により逃がせるため横構には大きな応力は生じない。しかし、図-21、図-22の場合には、横構

の節点に対傾構があるため主桁のねじり変形で横構の変位を逃がすことができず横構には大きな応力が発生するからである。

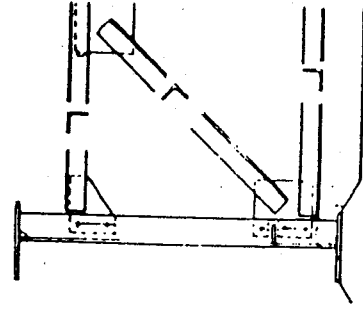


図-14 トラス型対傾構

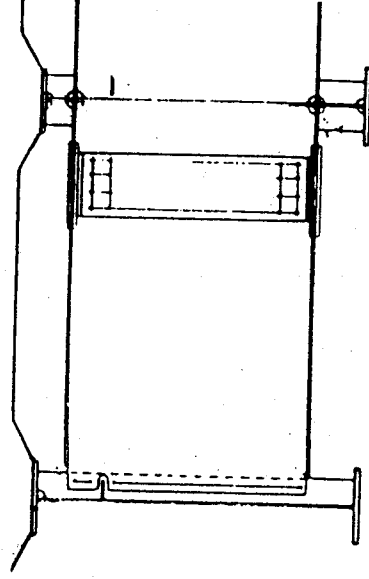


図-15 フルウェブ型対傾構

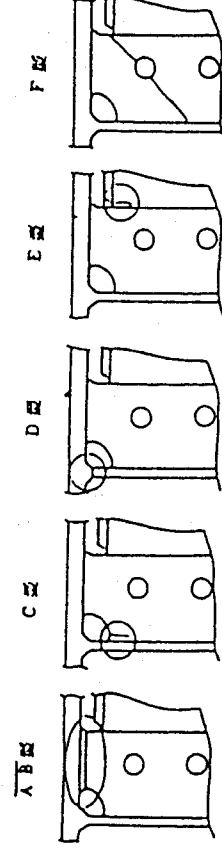
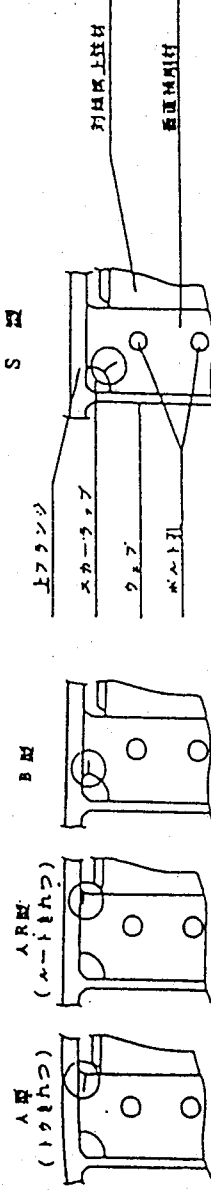


図-16 亀裂の種類と名称 (その1)

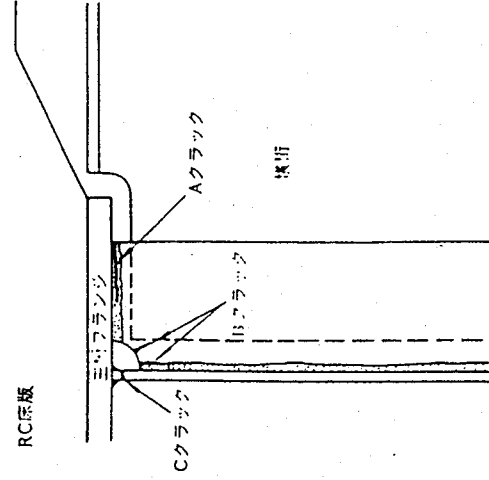


図-17 亀裂の種類と名称 (その2)

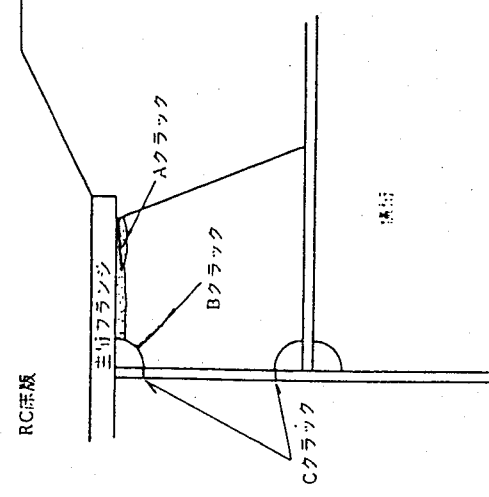


図-18 亀裂の種類と名称 (その3)

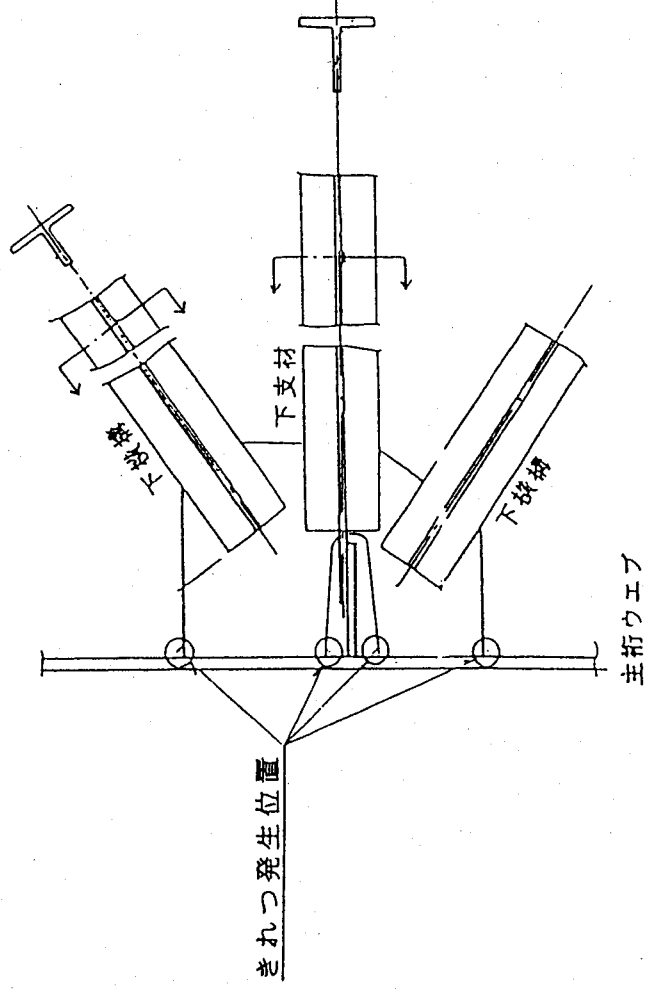


図-19 横構の損傷

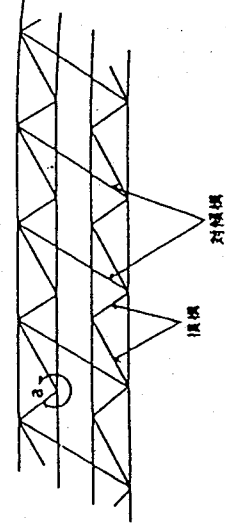


図-20 標準的な横構配置

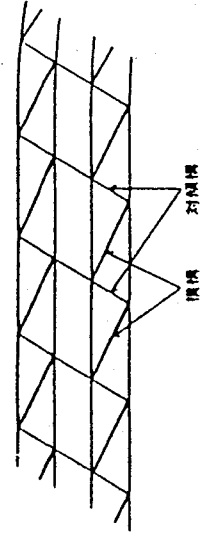


図-21 損傷のある横構配置 (その1)

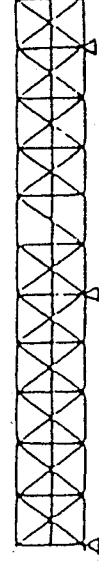


図-22 損傷のある横構配置 (その2)

2. 4 支承部、桁端部

(1) 支承部⁹⁾

設計時の配慮不足や施工不良等が原因で支承の変状をきたし、それが桁の損傷につながることもある。図-23に、その損傷例を示す。損傷は疲労によるもので、下フランジとソールプレートと腹板直下のすみ肉溶接ビード止端部付近から発生しており、ひどいものは下フランジを破断し、腹板にまで亀裂が進展しているものもある。このような損傷は支承板支承を中心に多数報告されている。

その原因は支承の機能喪失により、剛度の急変するソールプレート端部で局部的な応力集中が起こったためと考えられる。今後の対策方法としては、①、②に示すような応力の流れを円滑にする方法が考えられる。

①支点近傍の下フランジを計算値で決まった板厚より大きくする。

②ソールプレートの前面部にテーパーをつける。

(2) 桁端部¹⁰⁾

都市内の高架橋などでは、建築限界等の理由から桁端部を切り欠き構造としたり、架け違い構造としたりする場合がある。これらの箇所では主桁断面が急変するため、応力集中が起こりやすい。

従来の切り欠き部の構造詳細では下フランジを円弧状としたものも多く、図-24に示すようなRのコーナープレートと腹板の溶接ビード止端部付近から疲労亀裂の発生が報告されている。現在では、切り欠き量や円弧半径等によって切り欠き部の応力集中率が大きく左右されるような図-24のような構造は避け、図-25に示す割り込みフランジと補剛材を用いた構造詳細とし、応力集中を考慮した設計方法をとっている。

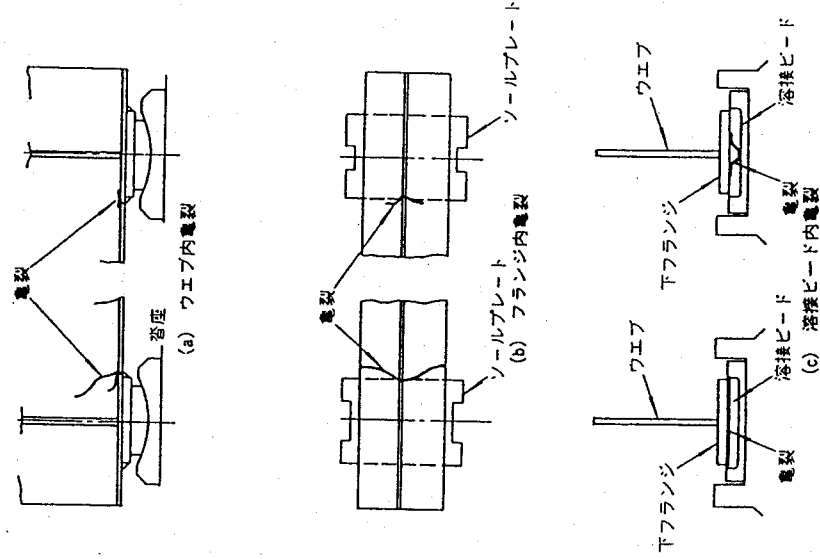


図-23

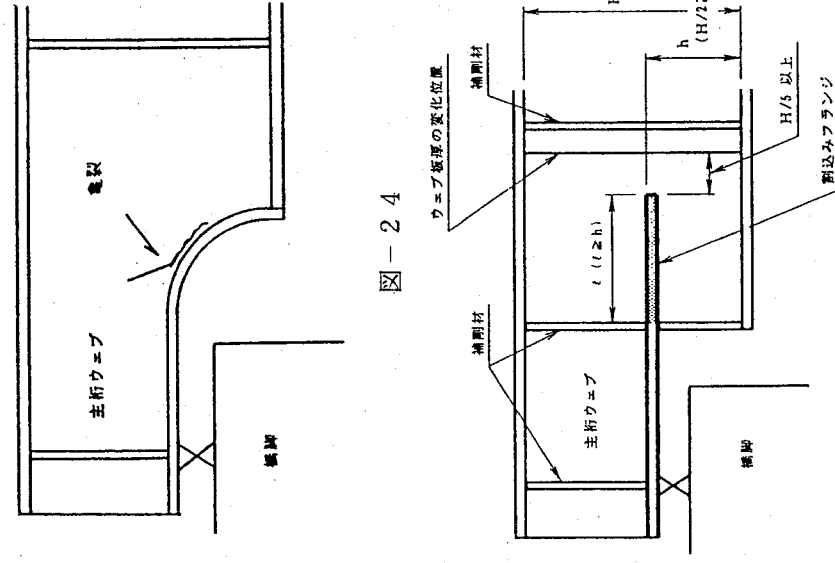


図-24

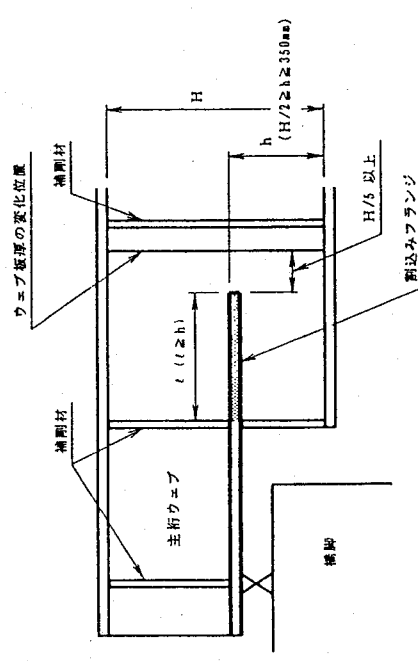


図-25

2. 5 伸縮装置

伸縮装置は、けた端での温度変化による伸縮や活荷重作用時のたわみによる回転変位に対して平坦性を確保し、自動車の走行に支障をきたさないために設置するものである。伸縮装置の形式は、めくら目地形式、突合せ形式、荷重支持形式、鋼フィンガー形式等がある。

路面に設置する伸縮装置は、自動車の走行による繰返し荷重を直接受けるため、橋梁構造の中で最も損傷しやすい箇所である。

伸縮装置の損傷原因は、多くの悪条件が組合わさって現れることが多く、これらの原因を厳密に究明することは困難である。損傷原因を列挙すると次のものが考えられる。

- ① 設計原因による損傷
 - ・ 床版端部の剛度不足
 - ・ 伸縮装置本体の剛度不足
 - ・ 伸縮装置の形式選定の誤り
- ② 施工要因による損傷
 - ・ 床版遊間の施工誤差
 - ・ 後打ちコンクリートの施工不良
 - ・ 伸縮装置の設置不良
- ③ 外的要因による損傷
 - ・ 輪荷重の増大化
 - ・ 繰返し荷重の頻度の増加
 - ・ 床版の劣化
 - ・ 伸縮装置前後の路面の凹凸

以上のなかで、一般的に損傷原因と考えられているのは、後打ちコンクリートと舗装との間の段差部での走行車両による衝撃である。一方、交通振動が原因と考えられる損傷は少ない。その中で交通振動が原因と考えられる損傷としては、めくら目地の損傷があげられる。これは、桁間に挟まれていたエラストイトが交通振動により脱落し、舗装面を支持するものがなくなり舗装にひびわれなどの損傷が生じたものである。

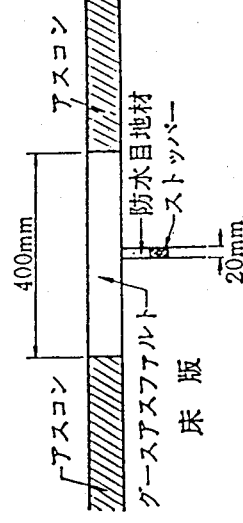


図-26 めくら目地構造例

2. 6 付属設備

(1) 排水施設

a) 排水管相互の継手部の損傷

排水管相互の継手がはずれた事例がある。これは、排水管継手部のラップ長が不足していたため、桁の振動等により排水管がはずれたものと考えられる（図-27）。

b) 排水管取付け金具のはずれ

排水管取付け金具がはずれた事例がある。これは、排水管取付け金具のボルトの締め付けが不十分であったため、排水管の温度変化、桁の振動等でゆるんだものと考えられる（図-28）。

(2) 標識

a) 道路情報板用門型標識柱のアンカーボルトの折損

標識は、中央分離帯上あるいは主桁より張り出したブラケット上に支柱用アンカーボルトにより取り付けられているが、標識柱基礎の設置位置を誤ったことにより損傷事例が発生している。

例えば、伸縮装置上に設置された標識において、この支柱用アンカーボルトが切断された事例がある。これは、支柱のベースプレートで桁の伸縮、回転、振動等の設計値以上の動きを吸収できなかったためと考えられる（図-29）。

また、標識柱の基礎が本線と出口ランプが分岐するノーズの縦目地を跨いで設置された箇所では、アンカーボルトがゆるむという事例が発生している（図-30）。

b) L形テーパーポール標識柱の損傷

標識柱のベースプレートから約40cm上に照明配線用開口部があり、この断面変化より破断した事例がある。これは、管内面の腐食が進んでいたことに加え、自動車荷重による振動、風荷重の繰り返しによる疲労のため開口部から割れが発生し、進行して倒壊したものと考えられる（図-31）。

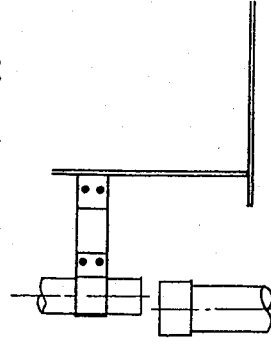


図-27 排水管継手のはずれ

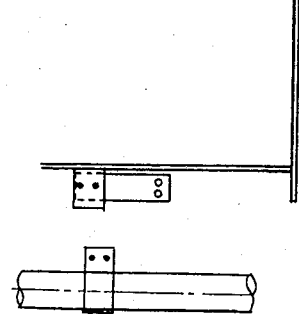


図-28 排水管取付け金具のはずれ

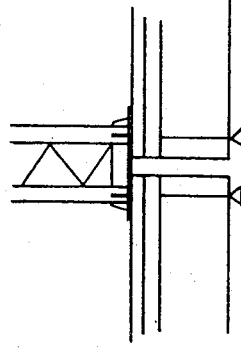


図-29 伸縮装置上の標識柱設置状況

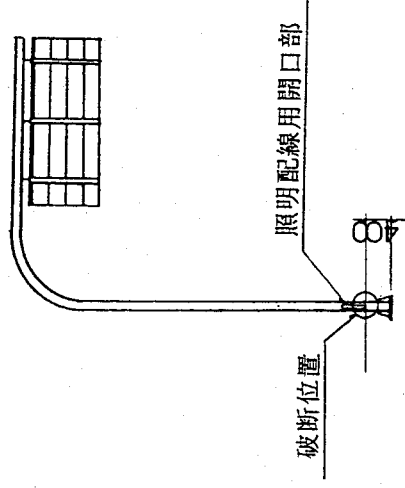


図-30 縦目地上的の標識柱設置状況

図-31 L形テーパーポール標識柱の損傷位置

3. 健全度点検のための振動計測法

橋梁の“健全度”に関しては、これまでに明確な定義は定着していない。したがって一般に医学分野との対応から“健全な橋”あるいは“橋の健全性”などと比較的抽象的な表現が用いられてきた。ここでは健全な橋の条件として、

①強度の面で構造各部が充分な安全性を有している。(強度的健全度)

②有害な振動が発生しない。

活荷重による振動、低周波、地盤振動、騒音など

③周辺環境に適合している。

景観、土木地理的(文化的、素材的)、デザイン性

交通流への対応(線形、幅員)、機能性

と定義し、本報告では振動計測に関連する①と②について取り上げている。¹¹⁾

一般に、橋梁の老朽化や損傷が、橋体の振動特性に与える影響は小さい。特に固有振動数 f の変化については $f \propto (EI)^{1/2}$ の関係があるので、剛性 EI の変化は $(1/2)$ 乗のオーダーでしか振動数の変化に寄与しない。また、たわみ δ の変化については $\delta \propto (EI)^{-1}$ の関係があるので、固有振動数の変化に比較すれば変化はあらわれやすい。

また、減衰の変化が固有振動数の変化に寄与する程度は、例えば一自由度系では

$$\omega_d = \omega(1 - \text{hr}^2)^{1/2}$$

ただし ω_d : 減衰固有円振動数、 ω : 固有円振動数、 hr : 減衰定数

の関係があるが、減衰定数 hr の値は一般に0.1以下であるので、 ω に及ぼす影響は小さい。しかし、減衰定数 hr はそれ自身の値については精度良く測定することができれば、損傷を検出する指標になり得る。一般に構造部材の損傷が大きくなると減衰が大きくなる。

このような状況からこれまでの研究では、橋梁の建設直後に固有振動数や減衰定数を測定してこれを“初期値”とし、その後の経年的な変化を計測することによって橋体の変化を把握する方法や、建設直後の計測結果が現存しない場合には、当該する時点における振動パラメーターの標準値(健全な状態)を何らかの方法で設定し、その標準値からの“ずれ”を橋体の損傷度として評価する方法などが用いられている。

3. 1 たわみの測定

(1) 目的

車両の走行安定性と走行者の乗り心地の評価、および構造の健全性の検討の指標を得る。

(2) 測定内容

- ①主桁、主構の支間中央のたわみ
- ②横構と縦桁との取付け点のたわみ
- ③斜角桁の主桁端部での隣合う桁におけるたわみ差
- ④ゲルバー部の吊り桁、定着桁相互の相対たわみ角

(3) 測定方法

- ①ひずみゲージ式リング型たわみ計
- ②レーザ変位計

(4) 評価

道路橋の健全度をたわみ測定結果から評価する手法はまだ確立されていない。一般には、車両の走行安定性、乗り心地の面からの機能的評価と、橋梁全体及び各部分の異常なたわみを検出するなど、橋梁各部の物理的健全度に関する評価に分類される。道路橋の場合、路面凹凸、走行車両と橋梁との連成振動の影響

響により動的挙動が鉄道橋に比べて複雑であり、車両の走行性に関連したたわみの限界値を決定することは困難である。一方、物理的健全診断のためのたわみ評価としては、設計時に許容したたわみを指標として判断することは可能である。以下には鉄道橋に対する評価手法について述べる。

①列車の走行性に対するたわみの限界値

1) 主桁のたわみ限界値

在来線	スパン L (m)	0<L<50		L>50
	プレートガーダー	L/800		L/700
	トラス	L/1000		
新幹線	スパン L (m)	0<L<40	40<L<50	50<L<100
	2連以上連続する場合	L/1800	L/2000	L/2500
	単連の場合	L/1600		

2) 横桁の縦桁取り付け点におけるたわみ限界値(mm)

	端横桁	中間横桁
在 来 線	4	5
新 幹 線	2	3

3) 斜角桁の主桁端部における左右レール位置でのたわみ差の限界値

	たわみ差
在 来 線	3 mm
新 幹 線	2 mm

以上の限界値は走行車両列がある程度想定されるために可能となっているが、道路橋の場合は想定が難しい。

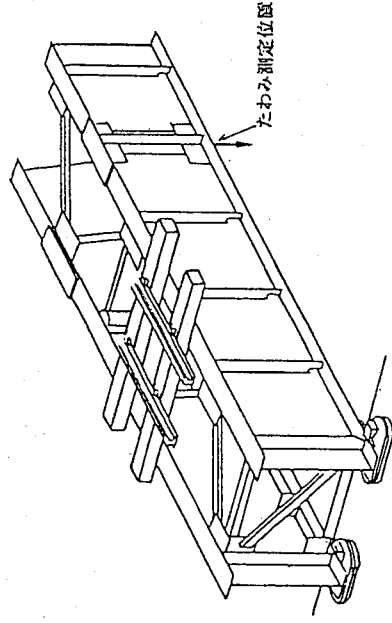
②桁の物理的健全度に対する評価

たわみの測定による橋梁の力学的健全度の評価手法として設計時のたわみに対する現行状態でのたわみの評価による手法が考えられている。設計荷重を載荷したときに発生すると想定されるたわみを換算たわみとするとこの換算たわみは次式で表される。

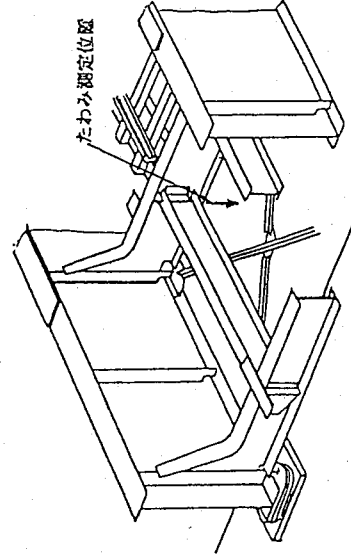
$$\text{換算たわみ} = \frac{(\text{設計活荷重による曲げモーメントの計算値})}{(\text{特定車両の実軸重による曲げモーメントの計算値})} \times (\text{特定車両による実測たわみ})$$

この換算たわみは、たわみ量から桁の健全度を判定する一つの目安として、実荷重を用いて設計時のたわみを想定し、それと設計時の計算たわみを比較することにより評価するための指標である。上式で右辺の分数の部分をたわみの換算倍率と呼んでいる。

(1) 主桁スパン中央部たわみ



(2) 横桁の縦桁取付け点のたわみ



(3) 斜角桁の主桁端部の左右レール位置でのたわみ差

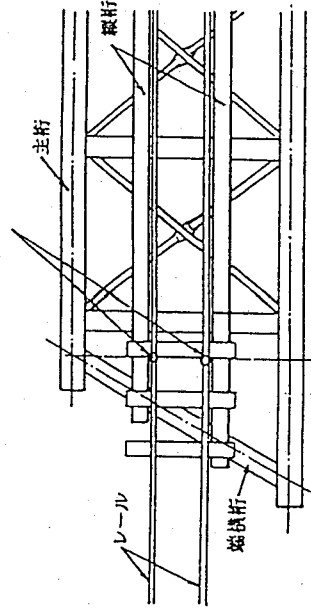


図-3.2 桁のたわみの測定位置図

3. 2 部材負担力の測定

(1) 目的

周知のように床版から導入される交通荷重の効果は、床組・主桁・主構・支点を経由して地盤に伝達される。したがってこの応力の流れを通じて橋梁の健全度を考える場合、構造各部がその力学的役割に応じた適切に応力を負担するとともに床版に集中している荷重が応力集中することなく広く分散されていることが望ましい。したがって部材負担力の測定により橋梁の健全度を診断する目的は構造各部の活荷重による応力の分担度が設計で想定した応力の分担と比較して適切か否かを評価することにある。またこのような部材負担力の測定解析を通じて異常な負担力を発見できれば橋体の損傷箇所の推定や異常な変状の発見につながるものである。

(2) 測定内容

- ① 骨組構造の部材軸力の測定
- ② 鋼製橋脚の部材負担力の測定

図33にはJRの鋼製橋脚の加速度計設置位置の例を示している。

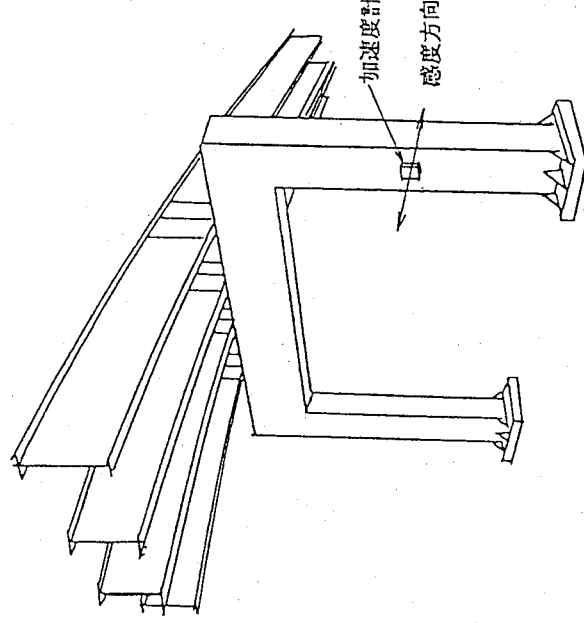


図-33 鋼製橋脚の加速度計設置位置

この図のように必要な方向に加速度計や歪ゲージを貼付して動的な挙動を解析し、部材力の負担状況を診断することができる。

JRでは、鋼橋脚の軸圧縮力Pを固有振動数の実測から推定する方法として次式を用いている。

$$P = \frac{\Phi E I}{\psi \ell^2} - \frac{4 w \pi \ell^2 f_n^2}{\psi}$$

ただし、P = 軸圧縮力P

f_n = n 次の固有振動数

ℓ = 柱の高さ

E I = 曲げ剛性

w = 単位長さ当たり重量

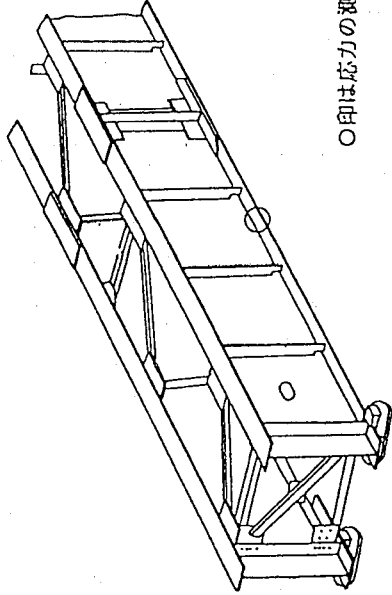
また、両端支持条件と Φ および Ψ の値は表 - 1 で与えられている。

表 - 1 両端支持条件と Φ および Ψ の値

支持条件	両端支持		1 端支持、他端固定		両端固定	
	Ψ	Φ	Ψ	Φ	Ψ	Φ
1 次振動	9. 869	97. 409	11. 513	237. 72	12. 302	500. 56
2 次振動	39. 478	1558. 50	46. 299	2496. 40	77. 476	3803. 50

③ 鋼桁各部の部材力測定

以下には J R で用いている桁の耐力診断評価のために用いる歪ゲージによる測定箇所を例を図 - 3 4 ~ 図 - 3 6 に示す。



○印は応力の測定箇所

図 - 3 4 支間 2 0 m 以下の上路プレートガーダーの主桁下フランジ測定箇所

○印は応力の測定箇所

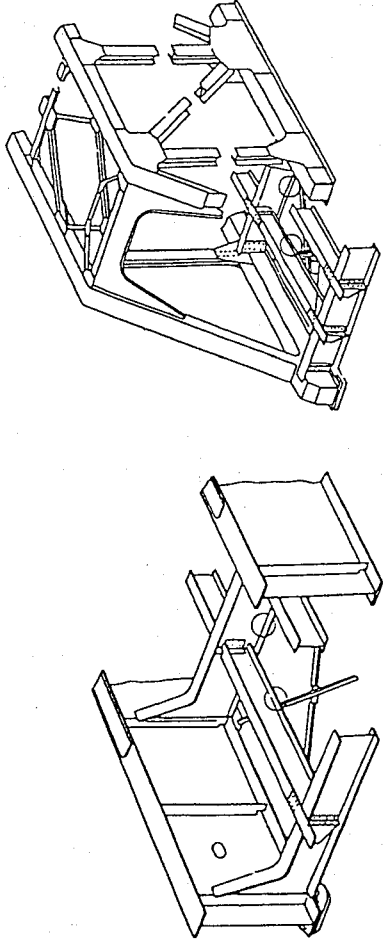


図 - 3 5 トラスおよび下路プレートガーダーの床組の下フランジ測定箇所

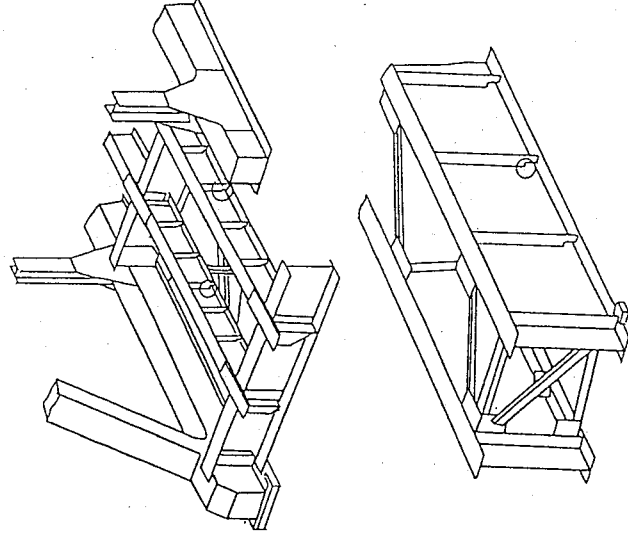
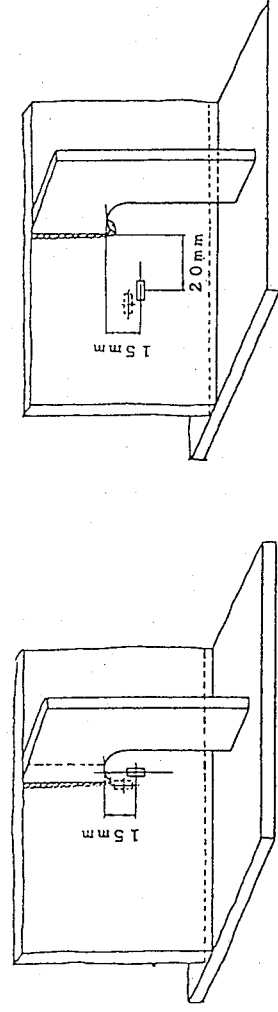


図-36 トラス縦桁および上路プレートガーダー主桁腹板の補剛材下端部
また、応力の計算方法としては、面内応力および面外曲げ応力について

$$\text{面内応力} = \frac{(\text{腹板表面の応力}) + (\text{腹板裏面の応力})}{2}$$

$$\text{面外曲げ応力} = \frac{(\text{腹板表面の応力}) - (\text{腹板裏面の応力})}{2}$$

の関係があるので、図-37 (a)、(b) のように歪ゲージの貼り付け位置を決めている。



(a) 鉛直方向

(b) 水平方向

図-37 面内応力および面外曲げ応力の測定
また主応力とせん断応力の測定方法として図-38の歪ゲージ位置を決めている。

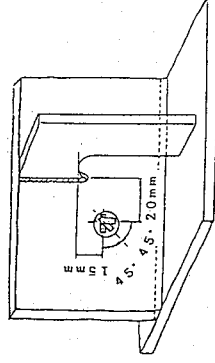
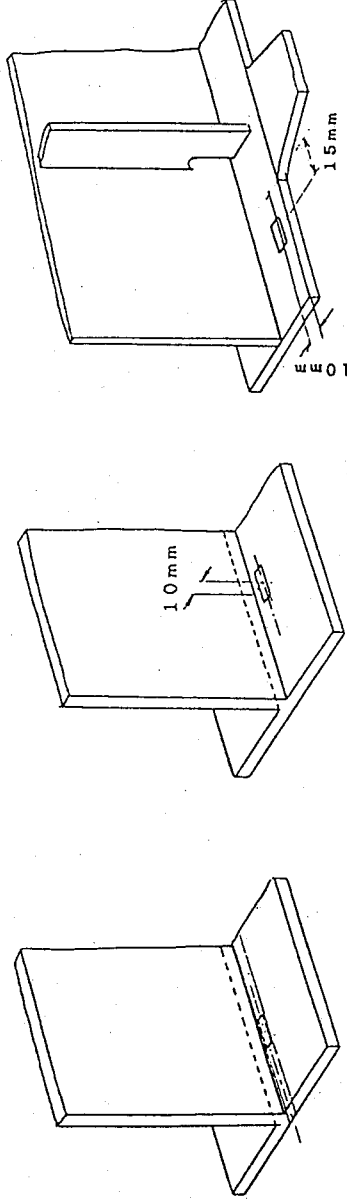


図-38 主応力およびせん断応力の測定

下フランジの測定位置は図-39のようになっている。

下フランジ下面中心で測定。不可能な場合は図のロ)の位置でも良い。



(a) 下面の場合

(b) 上面の場合

(c) ガゼットのフレット部

図-39 主桁、縦桁、および横桁の下フランジ応力の測定

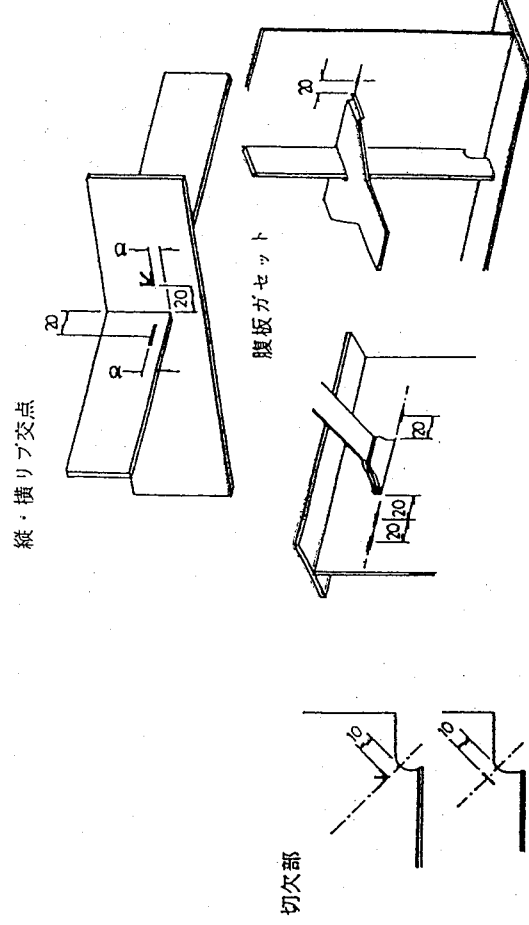


図-40 その他の応力測定位置

(3) 測定方法

① 加速度計

② ひずみゲージ

(4) 評価

① 固有振動数の測定による部材負担力の測定

ケープルなどの可撓性部材や、二次部材および鋼製橋脚のように活荷重の走行によって、微振動が発生しやすい構造について活荷重通過後の、自由振動時の固有振動数を加速度計を使用して測定し、計算によって部材負担力を推定できる。

② 固有振動モードと振動形の比較

構造部材の一部に大きな損傷が発生すると、活荷重走行時の振動形に設計では想定していない振動モ

ードがあらわれる。また、実際の設計ではピン結合として計算した格点部がセツトに亀裂が発生した場合には建設初期の振動モードから大きく変化することとなる。したがって、これらの振動モードの変化を通常の活荷重の走行状態が計測監視することができれば、部材負担力の変化を診断できることとなる。

③振動波形の減衰性を把握

既述のように橋梁が老朽化すれば、一般に減衰性が増加する。したがって、活荷重走行後の減衰自由振動の測定から橋体の減衰特性の経年的変化を解析できれば、橋梁の健全度評価の一つの指標とすることができ。

④動的応力の設計値との比較

一般に構造部材に生じる動的倍率を考慮した設計応力は活荷重を満載した状態に対して計算されており、実際に大型トラックが満載することは稀であるから、実際に作用している応力は設計応力の、7割～8割程度と言われている。しかし、いづれにしても橋梁の健全度診断の観点からは橋梁各部の実働応力を測定しておくことは重要であり、使用材料の許容応力に比較して、どの程度の比率になっているかを評価しておくことが必要である。

J Rでは実際に作用する最大応力 σ に対して現存する構造部材の保有耐力（保守限応力） σ_m が、いくらになっっているかを橋梁診断システムの指標としている。即ち、現有応力比率（SR）として

$$SR = \sigma_m / \sigma$$

ただし、 σ_m = 保守限応力

σ = 列車が当該線区の許容最高速度で、入線した際に発生する最大応力
(残存断面で計算する)

を定義し、保守の基準（目安）としている。

3. 3 ホットスポット応力の測定

(1) 目的

図-4 1 に示すような溶接止端部や亀裂近傍の局所応力分布を参照して、疲労に関する診断評価をすることができれば、実働応力に基づいて判定できるため有効である。しかし、一般に局所応力の急激に変化する分布を正確に測定することは困難であると共に、溶接形状やその止端形状などの微細な変化による応力の流れの変化を考慮に入れることは繁雑となるので図-4 1 のようにそれらを無視したホットスポット応力を求めて疲労評価に用いることとなっている。

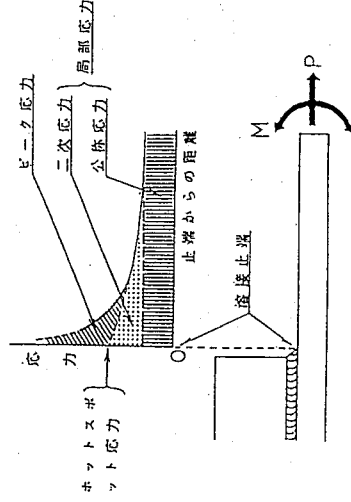


図-4 1 溶接止端部の応力

(2) 測定内容

- ①腹板ガセツト部
- ②縦リブと横リブの交差部

③支点切欠き部

④補剛材下端

⑤トラス格点ガセット部

(3) 測定方法

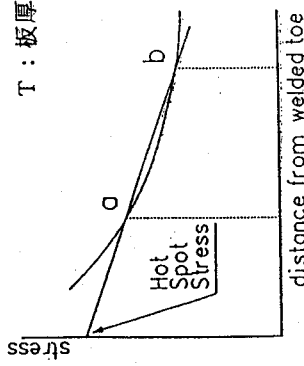
①ひずみゲージによる公称応力

②ひずみゲージによるホットスポット応力

③曲げひずみゲージまたは2枚ゲージによる曲げ応力

(4) 評価

これまでに提案された主なホットスポット応力の評価方法としては、JSSCの図-42のような計算法¹³⁾及びJRの図-43のような方法¹²⁾などがある。



	a 点	b 点
A 法	0.5T	1.0T
B 法	0.5T	1.5T
C 法	0.4T	2.0T
D 法	1.0T	3.0T
E 法	4.0mm	10.0mm
F 法	$1.57\sqrt{T}^3$	$4.9\sqrt{T}^3$

図-42 これまでに提案された主なホットスポット応力外挿点

算定に用いた板厚 (単位: mm)

スパン	ブランジ	既 設
L ≤ 20m	15~25	9~12
L > 20m	25 < t は別途	

ゲージ貼付位置 (単位: mm)

取手名	応力名	公 称 応 力	T 法
腹板ガセット (1=12)	公 称 応 力		$t=30$
	ホットスポット応力	$a=10$	$b=50$
底 本 欠 け	公 称 応 力		$t=50$
	ホットスポット応力	$a=10$	$b=50$
桁 腹 切 欠 き	公 称 応 力		$t=30$
(1=25)	ホットスポット応力	$a=10$	$b=30$
横リブ・横リブ交点	公 称 応 力		$t=30$
(1=13~15)	ホットスポット応力	$a=10$	$b=30$
フランジガセット (1=25)	公 称 応 力		$t=50$
	ホットスポット応力	$a=10$	$b=50$
横 腹 材 下 端	公 称 応 力		$t=30$
(1=12)	ホットスポット応力	$a=10$	$b=30$
トラス格点 切欠きガセット (1=25)	公 称 応 力		$t=50$
	ホットスポット応力	$a=10$	$b=50$

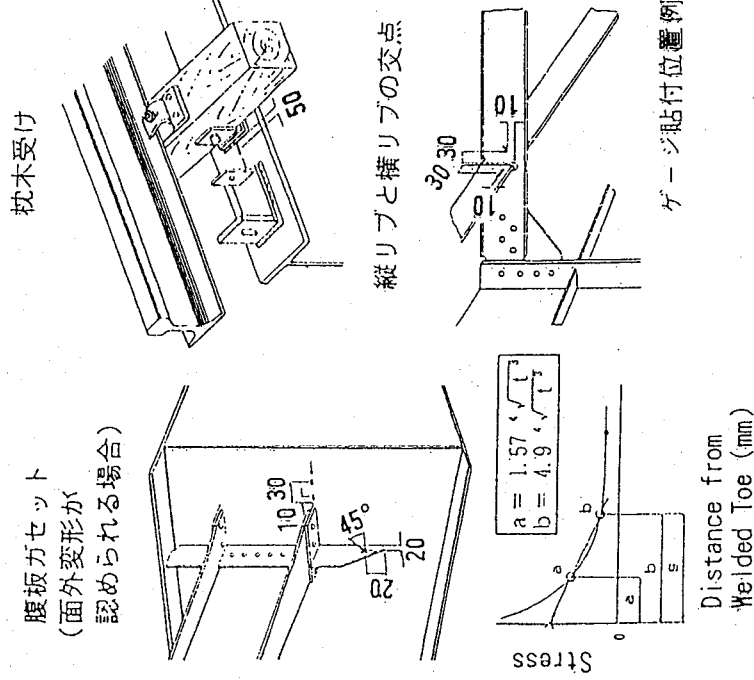


図-43 スポット応力 (JR)

3. 4 地盤振動の測定

(1) 目的

交通荷重による橋梁及びその下部工の振動が、周辺地盤に有害な地盤振動を発生させていないかどうかを検討する。

(2) 測定内容

- ①橋梁直下の地盤振動
- ②距離減衰の測定

なお必要に応じて橋梁及び下部工の振動を同時に測定して卓越振動などの解析を行う。

(3) 測定方法

- ①加速度計
- ②振動計

(4) 評価

振動規則法施行規則（昭和51年総理府令第58号）において道路交通振動の要請限度は表-2のように定められた。¹⁴⁾

表-2 道路交通振動の要請限度

時間の区分		昼 間	夜 間
区域の区分			
第1種区域		65デシベル	60デシベル
第2種区域		70デシベル	65デシベル

ただし、都道府県知事、道路管理者及び都道府県公安委員会の三者が協議して必要であればさらに表-2の値から5dB小さい値を設定できている。

第一種区域

良好な住居の環境を保全するため、特に静穏の保持を必要とする区域及び住居の用に供されているため、静穏の保持を必要とする区域。

第二種区域

住居の用に併せて商業、工業等の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を保全するため振動の発生を防止する必要がある区域及び主として工業等の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を悪化させないため、著しい振動の発生を防止する必要がある区域。

時間区分としては北海道から九州に至るわが国の生活時間の相違、並びに騒音規制の時間区分を勘案して、昼間は午前5～8時から午後7～10時まで、夜間は午後7～10時から午前5～8時までとし、都道府県知事が地域の実状にあった時間帯を設定できるようになっている。したがって、橋梁の健康度診断の観点からは表-2の地盤振動が橋梁基礎から発生していないかどうかを判定することが評価基準となっている。

3. 5 空気振動の測定

(1) 目的

車両走行のより発生する橋梁の腹板の面外振動により放射音、支点近傍からの可聴音、および橋体自身の振動による低周波空気振動が発生するので、有害なレベルに達していないかどうかを判定する。

(2) 測定内容

- ①橋梁近傍の音圧分布
- ②距離減衰の測定

また必要に応じて橋体自身の振動を測定し、周波数分析を行う。

(3) 測定方法

- ①マイクログフォン
- ②低周波マイクログフォン
- (4) 評価基準

低周波空気振動を分類すれば図-4-4のようになる。線ABは低周波空気振動の最小可聴限界であり、線CDは窓等のガタつきはじめる最小レベルである。AB、CDの線は20 Hz付近で交差し、これらの線によって次の(1)～(4)の4つの領域に分類される。領域(1)は低周波空気振動公害として特別問題が生じない範囲である。領域(2)は人体の生理的反応が発生しやすい範囲で圧迫感を受けたような感じとなる。領域(3)は低周波空気振動そのものは知覚されないが、窓等の建具がガタガタ鳴るなど、間接的に知覚され、聞こえない音なのに苦情が出る範囲である。領域(4)は低周波空気振動公害として被害の大きくなる範囲である。この範囲では人体の骨格や循環器、呼吸器系統の共振振動数に近いものが多くあり人体への影響が特に大きい。

橋梁の健全度診断の項目としてのこの低周波空気振動の問題は環境基準や人体への影響が確立された規定となっていないので、図-4-4の分類はおおよその目安である。また摩擦音など橋体から発生する可聴騒音の評価としては環境庁の騒音規定を満足しなければならぬことは当然であるが、健全度診断の観点からは早急な音源の究明をはかり、所要の対策を処置するための解析が必要である。そのためには指向性のあるマイクログフォンを用いて測定することが有効である。

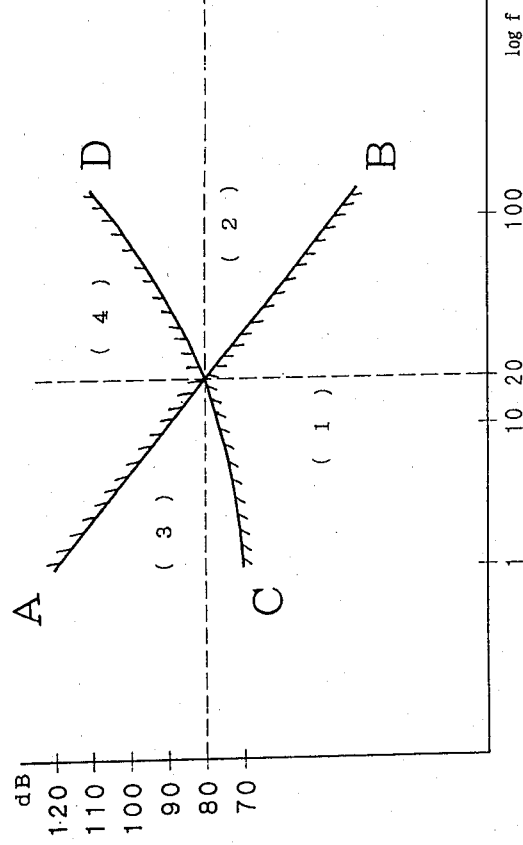


図-4-4 低周波空気振動被害の分類

4. 疲労損傷の評価

4. 1 まえがき

主要幹線道路にある道路橋は、通行する車両の大型化と台数の増加により、非常に過酷な荷重を受けていると言われて、自動車荷重の影響を直接受ける部材では高応力振幅の繰り返しを受けることとなり、疲労破損の問題が持ち上がっている。一方、疲労に関するデータ収集¹⁶⁾と疲労亀裂進展寿命についての研究も進み、その具体的な評価方法¹⁶⁾⁻¹⁸⁾が提案され、しかも、構造物に対する解析手法の発展や計測機器の発達に伴って、実際の道路橋についてその疲労照査が可能となってきた。

ここでは、疲労損傷の評価の概要とその例を紹介する。

4. 2 疲労照査の流れ

疲労安全性の照査を行う場合、他の安全性の照査と同様、着目する部材に作用する荷重と作用応力、ならびにその抵抗強度について考えなければならぬ。その照査の流れを図-4.5に示した。

(1) 疲労設計指針の基本的考え方

鋼構造物の疲労設計指針は、例えば、国鉄建造物設計標準解説、鋼構造協会疲労設計指針、BS5400、欧州鋼構造協会連合(ECCS)疲労設計指針、ASTMなどは、いずれも対象とする構造物によく用いられる継手の設計S-N線図を与えている。これらは最近の疲労に関する研究の進展に応じて、おおよそ以下のような考え方で疲労設計指針が構成されている。

- a) 溶接継手の疲労の照査に用いる応力は、応力範囲である。これは、実構造物では溶接による残留応力や架設時の拘束応力などが存在するため、応力比の効果が見られなくなる実験事実に基づいている。
- b) 変動応力のカウンタ方法は、一般にレインフロー法(雨垂れ法)が用いられ、応力範囲が最も大きな影響を与えると考える。
- c) 対象とする鋼材は、構造用高張力鋼まで含めるが、疲労強度は鋼材の種類によらず一定とすることが多い。また、継手の等級分類を行い、等級に応じた設計S-N線図を与えている。
- d) 溶接継手の設計S-N線図の傾きを一般に $m=3$ とする。これは、破壊力学の手法を用いた疲労寿命解析との整合性も考えて決められたものである。せん断応力に対しては、 $m=5$ をとる。
- e) 変動する荷重に対する疲労の設計では、次式の損傷度を用いるマイナー則を用いることが多い。

$$D = \sum (n_i / N_i)$$

これは、あるレベルの応力範囲 σ_{ri} が n_i 回作用したときに生じる疲労損傷度 D_i を、 σ_{ri} が作用したときの継手の疲労寿命 N_i との比 $D_i = n_i / N_i$ で与え、変動荷重が生じるときの応力範囲毎の和が1になったとき疲労損傷が生じると考えるものである。このとき、 N_i は、継手のS-N線図から決まる。最近では、疲労限以下の応力範囲も考慮してこの部分のS-N線図の傾きを $m' = m + 2$ と仮定する考え方もある。

(2) 応力履歴の解析

橋梁に発生する応力は、疲労試験で用いられているような定振幅応力ではなく、不規則に変動することが多い。そのため、不規則な応力からそれと等価な応力範囲およびその繰り返し数を求める必要がある。その代表的な応力カウンタ法の一つとしてレインフロー法(雨垂れ法)を説明しておく。

この方法は、図-4.6のように、縦軸に時間を、横軸に応力(または、ひずみ)をとり、山と谷を連ねた図形とし、それを多重の屋根とみなし、その上を付け根から流れ始めて、ついに軒先まで達した雨滴が、下にある屋根に落ち、流れて続けていく様子をモデルとしており、遠藤の発案(昭和43年)である。この方法について、図-4.6を例に具体的にその手順を説明する¹⁶⁾。この方法では、上の方の流れを優先させ、つぎの条件によって流れは止まるものとし、雨滴の水平移動量を応力範囲、1回の雨滴の流れを1/2回の繰り返しと数える。

条件1)一後に続く屋根の付け根がその雨滴のスタート位置よりも深い場合

条件2)一他の流れによってすでに濡れた屋根あるいは軒先の場合

①屋根の付け根 a をスタートした雨滴は軒先 b から下の屋根に落ち、軒先 d に達して、地面に落下する。
(水平移動量 $a - d$ を応力範囲 σ_1)

②屋根の付け根 b をスタートした雨滴は軒先 c から落ちるが、付け根 d が付け根 b よりも深い位置にあるので (条件1)、途中で止まる。(水平移動量 $b - c$ を応力範囲 σ_2)

③屋根の付け根 c をスタートした雨滴は、軒先 b からの雨滴 l によりすでに濡れているので (条件2)、軒先 b の下で止まる。(水平移動量 $c - b$ を応力範囲 σ_3)

④屋根の付け根 d をスタートした雨滴は軒先 e から下の屋根に落ち、さらに軒先 i に達して落下し、k に達する。(水平移動量 $d - k$ を応力範囲 σ_4)

⑤屋根の付け根 e をスタートした雨滴は軒先 f から下の屋根に落ち、さらに軒先 h に達して落下する。
(水平移動量 $e - h$ を応力範囲 σ_5)

⑥、⑦、⑧、⑨、⑩を繰り返す。

このような雨滴の流れから、①-④、②-④、⑤-⑧、⑥-⑦、⑨-⑩がそれぞれ対応する往復振幅であることがわかる。したがって、それぞれの一回の雨滴の流れを 1/2 回とカウントすれば繰り返し回数を求めることができる。

(3) S-N 線図

対象としている継手についての S-N 線図を、それぞれの疲労設計指針^{1,8)}の継手分類などから最も適当と思われるものを選択する。ただし、橋梁では、部材によつてはその寿命中に設計 S-N 線図で考えられて以上 (例えば 108 回以上) の繰り返し数を受けることがある。交通量の極めて多い道路橋での実測例でもこのことがみられ、また、動的な成分が強い場合なども繰り返し数は非常に大きくなる。このような長寿命域での実験データの蓄積は非常に少なく、設計 S-N 線図の妥当性の検証ができていない。

4. 3 鋼橋の疲労損傷に及ぼす振動の影響の評価例

走行荷重による疲労損傷に及ぼす振動の影響については、以前からその必要性は議論されてきたものの実際には、実験的にも解析的にも難しいとされてきた。ところが、最近の実験手法や解析手法の発達、動的影響を含めた道路橋の立体的挙動を把握することを可能²⁰⁾にしており、応力の動的成分による繰り返し疲労損傷に及ぼしている影響を求めるとともに、その評価方法について検討を行った²¹⁾。

(1) 疲労損傷への振動の影響についての考え方

応力波形が不規則に変化する場合の疲労損傷を考えると、最近ではレインフロー (貯水池) 法などによって応力範囲やその頻度を求めることができる。図-34 を例として考えると、振動の影響としてつぎのことが予想される。

①高次の振動に関係する微小応力波形 σ_1 の場合、非常に多くの繰り返し回数となるが、影響度を示す損傷度 n_1/N_1 分母の N_1 が Casel の場合でも非常に大きくなり、振動の影響は比較的小さい。

②低次の振動に関係するような応力波形 σ_1 の場合、S-N 線図の形にもよるが振動振幅も比較的大きく振動の影響が現れる可能性がある。

③大型車の交通量とそれらの同時載荷確率が問題となるが、ほぼ静的な応力波形 σ_s には必ず動的成分が加わり、実際には応力範囲は σ_D となる。S-N 線図の勾配が $m=3$ であることを考えるとこの動的増分の影響は大きくなることが予想される。

ところが、これらの影響の定量化はあまり行われていない、その一つとして文献19)では、動的な応力を含めた全応力 σ_{SD} ならびに静的な応力 σ_s に対して求めた損傷度を、全疲労損傷度 D_{SD} 、静的疲労損傷度 D_s と定義し、その比 D_{SD}/D_s を動的疲労係数 D_F を提案し、検討している。

(2) 荷重列モデルによる振動の影響度の解析

ここでは、モンテカルロ法によって大型車（最大積載時の総重量が10トン以上）の車種・車頭時間間隔・車両重量などを決め、平均的な自動車荷重列サンプルを1時間分（2車線で3200台/時、モデル橋での交通量は77000台/日であるのでその時間平均交通量、大型車混入率26%）作成して解析を行った²⁰⁾。

この荷重列サンプルがモデルの上路アーチ橋（蟬丸橋）上を走行した場合の動的応答解析を行い、応力履歴の計算をした。その一例として垂直材の応力頻度を図-48に示した。この垂直材端部に対するS-N線図としてECCS71¹⁸⁾を適用することとするが、図-47におけるS-N線図の形がCase1とCase3によって疲労損傷度や動的疲労係数にどのように影響するかを求め、図-49に示した。この結果によると損傷度には適用したS-N線図によって20-30%の差が現れているが、動的疲労係数にはほとんど現れていない。

(3) 実測ひずみ波形処理による振動の影響度²⁰⁾

ここでモデルとした上路アーチ橋（蟬丸橋）では、実態把握のために補強前に載荷試験や実交通による調査が実施されている。そこで、実交通によって生じた1時間分の実測応力をそのまま頻度解析した場合と5Hzと1Hzのローパスフィルターを通してから頻度解析した場合での頻度分布の差を観察し、疲労損傷度に基づき動的波形成分の影響の程度を求めた。図-50にその頻度分布とS-N線図の違いも含めて1時間分の損傷度を示した。1Hzのローパスフィルターを通してした場合には、本橋の卓越振動数を考えるとほとんど動的成分はなく、静的な荷重載荷に近い状態を示している。したがって、All passと5Hzのlowpassのときの損傷度を比較すると大きく異なっており、(1)で述べた①-③の振動の影響が明確に現れており、これらに対する配慮が重要であることを示唆している。

今後、疲労照査に用いる荷重およびその載荷方法など損傷の評価について、さらに検討するとともに、さまざまな橋梁についても疲労損傷と振動の影響を考察する必要がある。

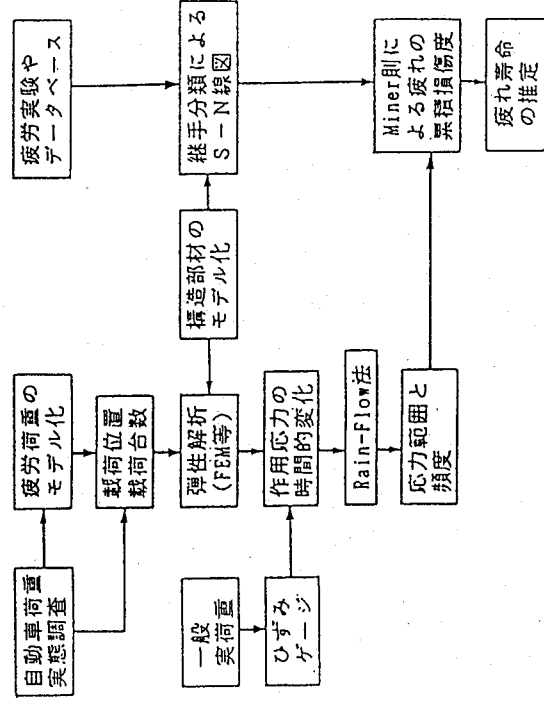


図-45 疲労照査の流れ

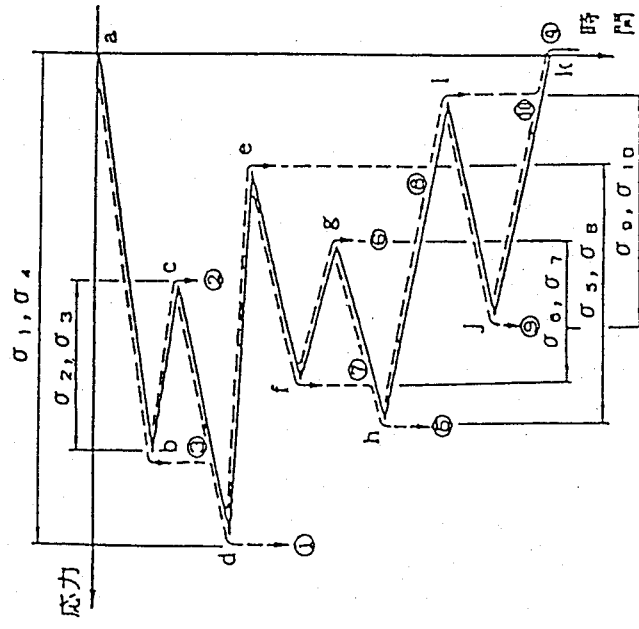


図-46 レインフロー法の手順

5. 補修・補強実施事例

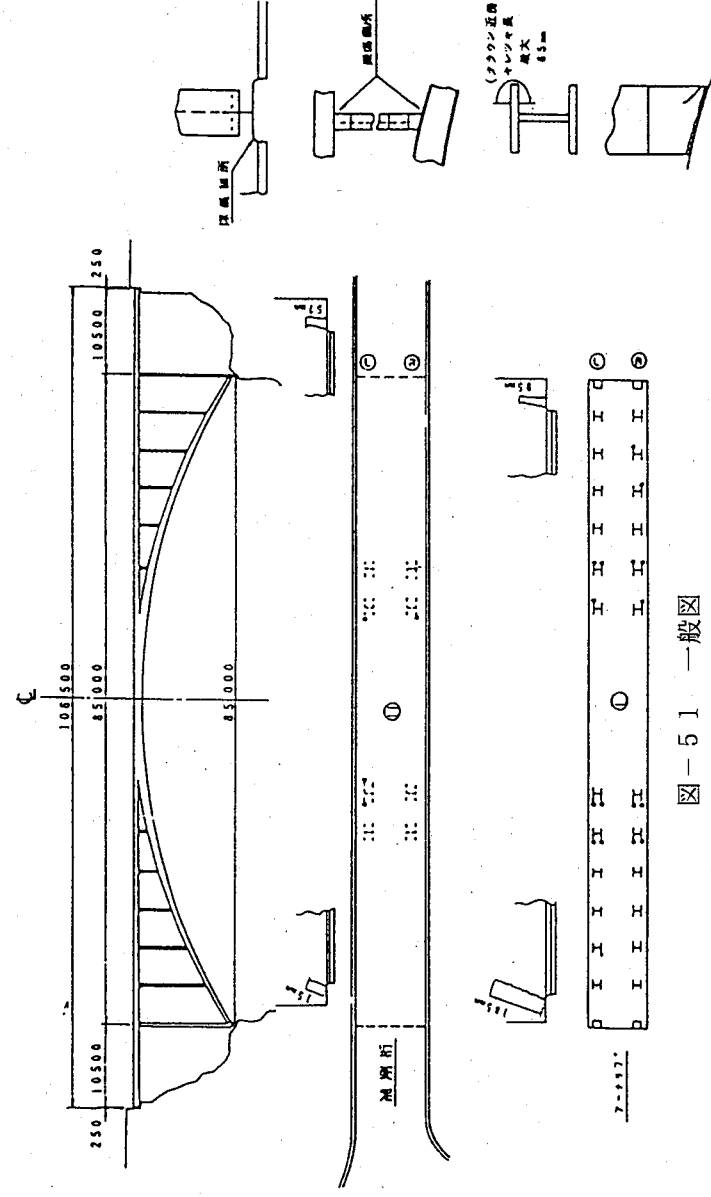
5. 1 部材の補修補強

近年、疲労による道路橋の損傷例が多数報告されている。これらの損傷の補修・補強を行うためには、断面の補修・補強や細部構造の改善のみならず、原因そのものを除去あるいは軽減する事が必要である。これらを検討して補修・補強された事例を2種類の橋梁型式について紹介する。

図-51は損傷の発見された橋梁の一般図である。本橋は、鋼2ヒンジアーチ橋で、補剛桁の両端は可動であり端部には曲線部を有している。損傷は図-52のように端支柱上補剛桁腹板および中間支点ガセット部にクラックが生じていた。この損傷原因を調査するために構造調査、解析、静的載荷試験、走行試験を行った。

その結果、端支点上補剛桁の損傷は、補剛桁の下フランジを切り欠いたことによる隅角部の応力集中と端支柱部の補剛桁の面外変形を拘束できない横構の組み方の不備が原因と考えられた。また、中間支柱部の損傷は、橋軸方向の方向の変位による支柱上下端の拘束モーメントによるものと考えられた。

端支点上補剛桁の補強は、損傷発生原因、施工性を考慮し図-53のように行った。また、面外変形を拘束するためには図-54のように横構を追加した。



一般 151

圖 52-1 損傷位置

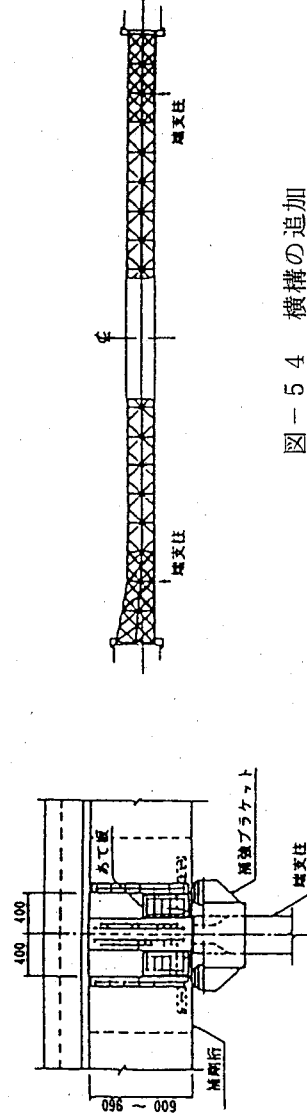


図-54 横構の追加

図-5-3 端支点上補剛桁の補強

中間支柱部の損傷対策としての補剛桁の橋軸方向変位抑制方法については、スパンドレルブレースドアーチ橋への変更案を含む案が検討されたが、経済性、施工性、美観上などから補剛桁両端に橋軸方向の弾性支承を設置する案が選定された。この弾性支承はゴム支承と粘性せん断ストッパー（温度変化による補剛桁の伸縮量は吸収できる）とからなり、橋台コンクリートに引張応力が作用しないように常時は戻しバネにより接触状態を保持し、動荷重用時にゴム支承は圧縮側のみに働く構造となっている（図-55）。対策案の選定に際して、実橋にゴム支承を仮設して橋軸方向を弾性拘束することによって、補剛桁、アーチリブの各行試験を行い調査した。この結果、補剛桁の両端を弾性拘束した場合の効果について、静的載荷試験、走の橋軸方向変位およびそれらの相対変位を60～80%に低減でき、中間支柱に作用する曲げ応力も最大50%程度まで減少させることができ、端部拘束の効果は十分にあることがわかった。

次に、3径連続鋼床版箱桁橋で箱桁のダイヤフラムや鋼床版に疲労クラックが発生し、補強した例を紹介する。橋梁の構造は図-56のとおりである。疲労クラックは次のような箇所が発生していた。

- ①ダイヤフラムのコーナー部の上横リブフランジ部及びフランジとウェブのすみ肉溶接部
- ②分配横桁の上端コーナー部
- ③ブラケットの下フランジと主桁ウェブの溶接部
- ④中間横リブと主桁垂直補剛材とのまわし溶接部
- ⑤鋼床版の縦リブと横リブ交差部のすみ肉溶接部

損傷原因を究明するために各部の応力測定を行った結果、横方向の剛性の不足が損傷の原因の一つであることが推察された。そこで、横方向の剛性を上げるために図-57、図-58のようなトラス組を行った。

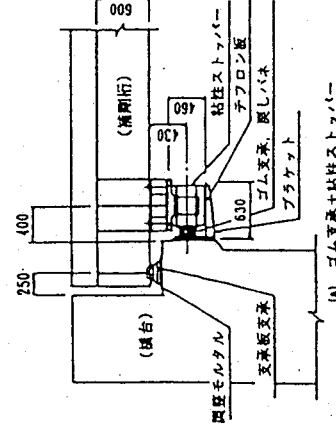


図-55 端部弾性支承

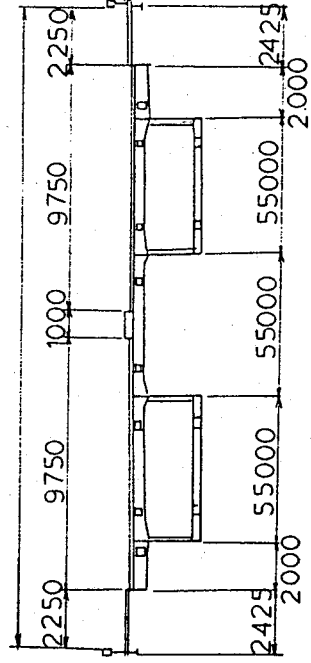
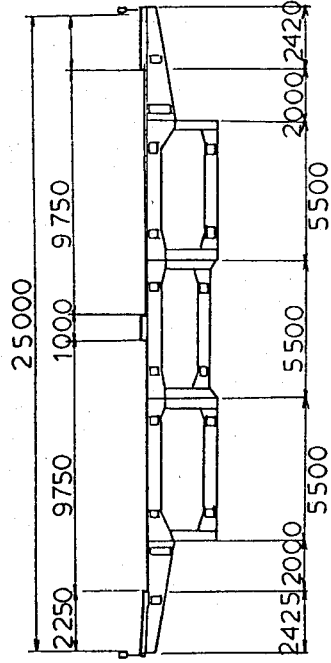
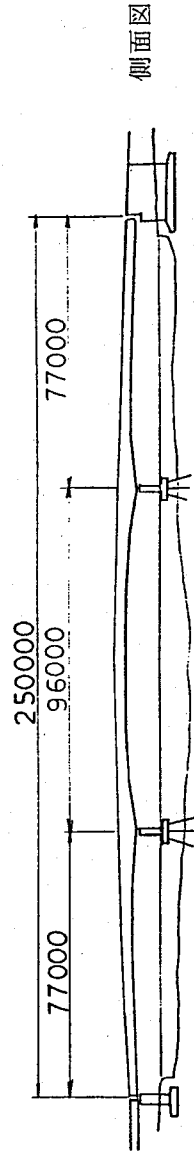


図-56 一般図

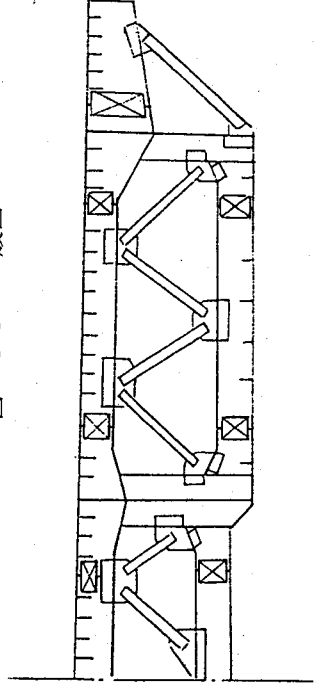


図-57 ダイヤフラムの補強

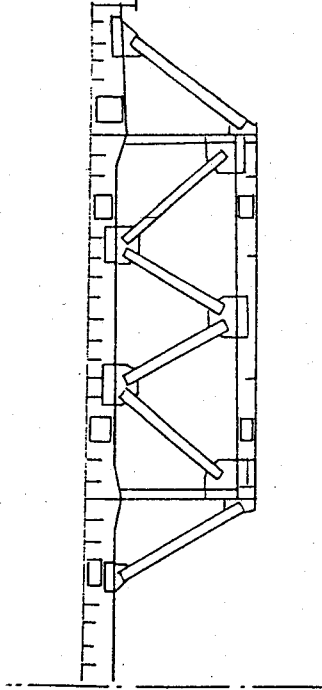


図-58 中間横リブの補強

5. 2 構造の変更

構造変更の例として、上路式鋼2ヒンジアーチ橋をスパンドレルブレースードアーチ橋に変更されたものを紹介する。本橋は、図-59に示すように支間52mのアーチ橋であるが、斜角が 62° ときつく、2本のアーチリブが同一平面になく、かつ対傾構を有していない構造であった。供用後10年ごろからコンクリート床版の損傷が目立ち始め補修、補強を繰り返していたが、鋼材へも損傷が広がってきたため抜本的な対策が取られるに至ったものである。

損傷要因を究明すべく、現橋の挙動把握を行った。その結果、次のようなことが明かになった。

(1) 試験車走行試験

①面側の補剛桁の変位の位相は逆位相であり、床組は平面内でひし形のせん断変形が生じている。

②アーチクラウン部の変位は橋軸直方向よりも橋軸直角方向が大きい。

(2) 振動試験結果

①卓越して発生している振動モードは図-60に示すように斜角の影響を大きく受け、面内の逆対称一次と面外の対称一次が合成したモード(3.05Hz)と面内の対称一次と面外の逆対称一次が合成したモード(4.76Hz)でどちらも複雑に振動している。

この挙動調査および橋構造の調査から、本橋の損傷の発生原因は、重交通荷重のもとで、 62° の斜角を有し対傾構がないなどの特有な構造形から生じる面内面外の複雑な挙動が、構造的に弱い床版・部材取付部の疲労損傷となって現れたものと考えられた。

補強対策は、橋全体の剛性を高めることが必要であるため、表-3のような案が検討された。その結果スパンドレルブレースードアーチ案が採用された。改良は、耐久性が期待できるアーチリブ以外のすべての部材を取り替えるとともに図-61に示すように斜材、対傾構、下横構を追加した。さらに、床版はアーチリブの負担軽減、ねじりに対する変形追従性から鋼床版に変更した。

補強効果を確認するために改良の前後で、変位、応力、振動性状を比較した。図-62は、改良前後ではほぼ同じ位置にある垂直部材の応力を比較したものであるが、改良により応力度が $10\sim15\%$ に低減した。改良前の損傷の原因と考えられていた振動モードは、図-63のようにになり、改良前に見られた逆対称一次(4.8Hz)が対称一次(4.8Hz)に変化した。改良前は床組とアーチリブが別々の動きをしていたものが改良後では橋梁全体が橋軸直角方向に振動するモードに変わった。さらに、面内の振動モードにおいても改良前の対称一次(4.4Hz)が逆対称一次(5.3Hz)といったアーチ本来の振動モードに変化した。この他変位量も大幅に減少し、補強の効果を確認した。

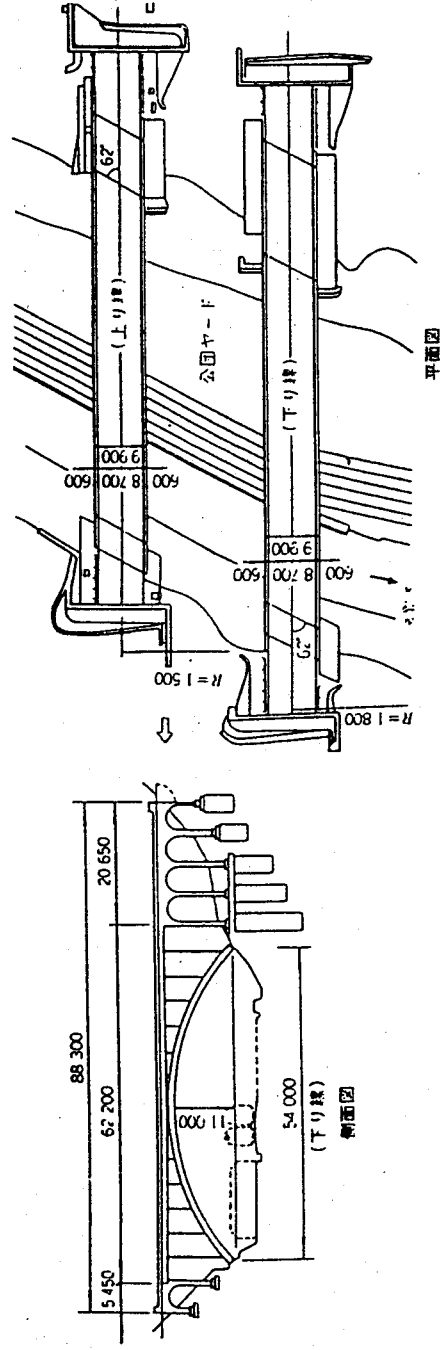


図-59 一般図

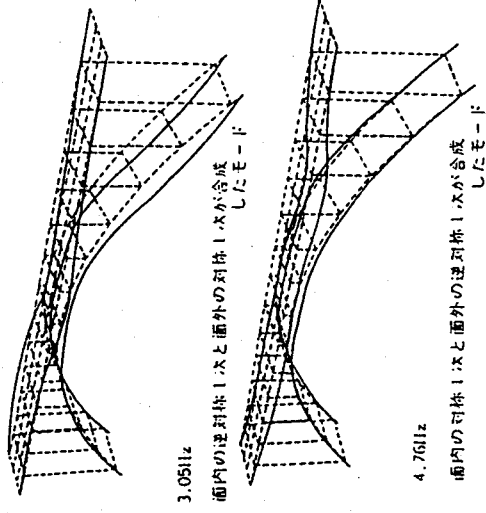
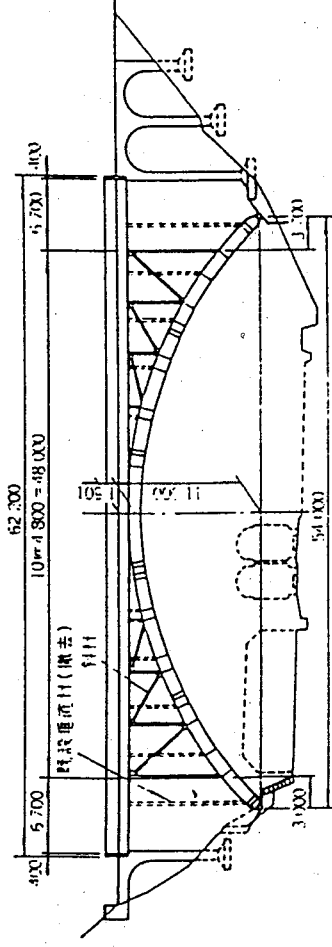


図-60 改良前の振動モード
表-3 構造形式の比較

構造形式	構造内容	考案
タイドアーチ案		タイを入れて水平変位を抑えるとともに、トラス構造にして全体剛度を高める工法である。 (問題点) ○多くの補強部材を取り付けるため、スパンドレールプレースドアーチと同様に、現場部材に対する加工度が高い。 ○タイ取り付け部の応力集中に対する補強が必要。 ○京阪線近辺の架設機の設置問題があり、有効な位置にタイを取り付けにくい。
斜張ケーブル案		斜張ケーブルでアーチを補強して、全体剛度を高める工法である。 (問題点) ○自重がそれほど重くないため、剛性を高めるに十分なプレストレスの導入がしにくい。 ○ケーブルアンカーを急斜面に設置することになり、施工性、信頼性に不安がある。 ○アーチのケーブル定着部は、アーチ部材の補強が必要である。 ○全体構造の一体化には、別の配慮が必要である。 ○住宅の移転、用地取得が必要である。
門形ラーメン付ボルト案		現場の両側に鋼筋部材を架設し、荷重を分担することにより、全体剛性を高める工法である。 部材を、床版強け工事の取組術として使用できる。 (問題点) ○車道と橋脚を必要とする必要がある。 ○現場と橋脚の形状モードの相違による、新たな問題が生じる。 ○全体構造の一体化には、別の配慮が必要である。 ○住宅の移転、用地取得が必要である。
パイプ・ボックス・アーチ案		現場の耐荷力はそれほど不足ないとし、川底の底図を主に全体構造が一体化されないことと考えて、アーチ面の斜けと対称構造を設け、全体構造の一体化を図った工法である。 全体剛性を高めることにし、床版の断げ応力度を軽減することができる。 パイプ・ボックスにより、さらに剛性を高める方法もある。 (問題点) ○多くの補強部材を取り付けるため、ボルト用孔明けや、現場溶接等、他の案に比べて現場部材に対する加工度が高い。



側面図
図-61 改良した構造

5. 3 ノージョイント化

橋梁の伸縮継手は、車両の走行時の不快な衝撃、衝撃による橋体への悪影響、振動や騒音による環境問題、伸縮継手の破損及び継手部からの漏水による橋梁本体の腐食等さまざまな問題が生じている。このことから、新設の橋梁においては、できるだけ伸縮装置を減らすために連続桁を多用している。既設橋では、伸縮装置の改良と単純桁を連続化するという二つの方向で伸縮装置部で発生する問題を解決しようとしている。ここでは、橋体を連続化しようとしている事例を紹介する。

既設橋のノージョイント化を図るためには、次ぎのような条件が必要である。

- ① 線形が直線区間でお互いの主桁同士が一致し、偏心が極めて少ないこと。
- ② 橋種、支間長、構造形式が概ね等しいこと。
- ③ 下部工の型式、構造、寸法が概ね等しいこと。
- ④ 地質的に一様な地盤が連続していること。

このような条件のもとで連続化された事例を橋種別に紹介する。

(1) 鋼単純桁橋の連結

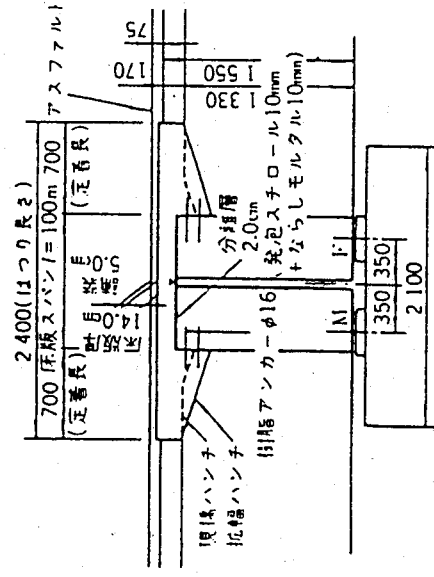
連結部の構造は、図-6-4に示すように完全連結と部分連結がある。完全連結が好ましいことはいうまでもないが、もともと単純桁として設計されたものを連続桁の中間支点とするためにはかなりの補強が必要であり、供用下の橋梁では採用が困難な場合が多い。図-6-5の例-1は支間30～35mの橋梁に用いられるものであるが、床版だけを連続させる構造としている。例-2は支間18.5mの単純合成H鋼桁橋であるが、これは支間長が短いためウエブのシェアープレートと床版の鉄筋により完全連結される構造としている。支点は、どちらも鋼製支承をダンパー支承またはゴム支承に置き換えることにより反力分散構造としている。

(2) PC桁橋の連結

PC桁橋の連結方法も図-6-6のように2種類あるが、いずれも構造系はピン結合であり、設計時と逆の応力を発生させることは避けられている。図-6-6の例-1の方法は、支間が大きい場合に用いられている。例-2の方法は小支間の場合に用いられている。この方法は施工は簡単であるが、床版を連結していないために、ジョイントを完全に無くすることはできない。ただし、小支間であるために桁のたわみ量は小さく、通常は伸縮量がほとんど生じないので伸縮装置の耐久性は増す。支承の取扱いには鋼橋の場合と同様である。

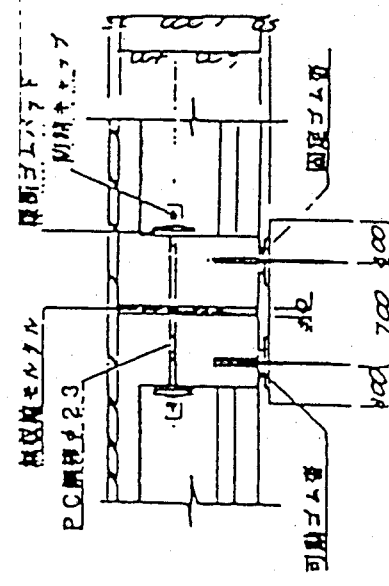
(3) RC中空床版橋の連結

高架橋の概要は図-6-7のとおりである。連結部の構造は図-6-8のとおり簡単なものである。この橋梁ではたわみによる桁端の変位は小さいので、曲げモーメントによる影響はあまり考えなくても良いが、温度変化による軸力の検討が必要である。連結部のセツト時期を5°C程度の時と考えると軸力を算定すると、温度上昇時に約60tの圧縮力、温度降下時に約10tの引っ張り力となった。この軸力は地震時に固定支承、固定橋脚に働く力より小さいので問題はない。上部工については、この程度の軸力は問題無い。連結部においては、温度上昇時には圧縮力であるので問題ないが、温度降下時には引っ張り力が働くことになるので鉄筋でとらせることにした。



(例-1)

図-66 PC桁橋の例



(例-2)

図 66 PC 桁橋の例

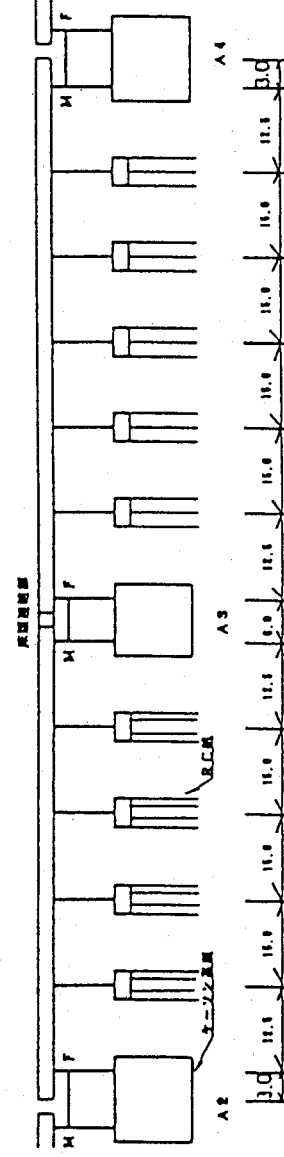


図-67 高架橋の概要

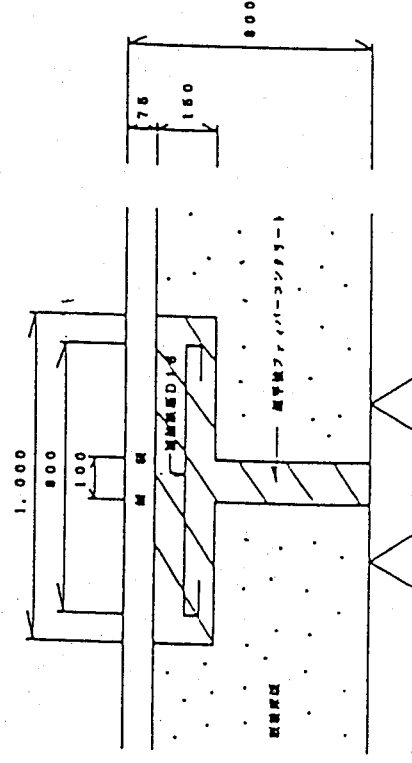


図-68 連結部の構造

5. 4 TMD

高架橋にTMDを設置して振動軽減の効果を測定した例を紹介する。対象橋梁は図-69に示すような支間40.4mの単純支持高架橋であり、事前調査として大型ダンブトラック(20tf車)による走行試験を実施しており、次のような結果を得た。

- 1) 固有振動数 上部構造の曲げ1次振動として2.8 Hz
- 2) 減衰定数 車両通過後の自由振動波形から0.019~0.039、ハーフパワー法によって0.029となっている。
- 3) 変位振幅 大型ダンブトラック(20tf車)の走行によって生じる静たわみ約3mm、動的全振幅として0.75~1.1mmとなった。

TMDの設計にあたっては軽減効果予測のシミュレーションを実施した。図-70、図-71にはTMDの予測効果に関する結果をみかけの減衰定数と変位応答倍率としてそれぞれ示している。

ここでRは主振動系との質量比($R = M/M_0$)、 β は固有振動比($\beta = f/f_0$)である。実際に用いられたばね機構は図-72、図-73のようなもので、U字形薄板を積層状に重ねたものである。最終的には総質量8t(1t8基)、減衰定数0.16のTMDを支間中央に用いている。

図-69 梅田ランプ橋の一般図

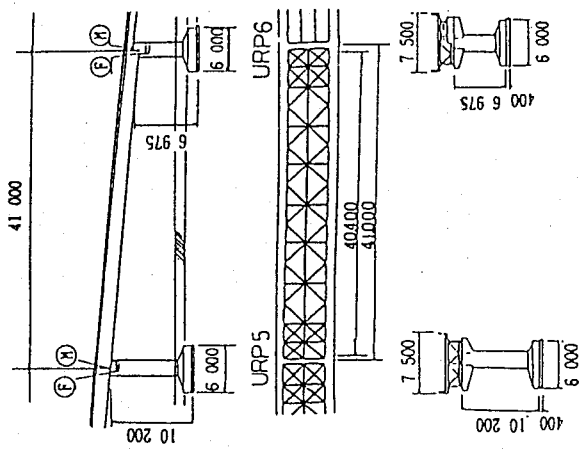


図-70 TMDの重量・減衰定数と見かけの減衰定数

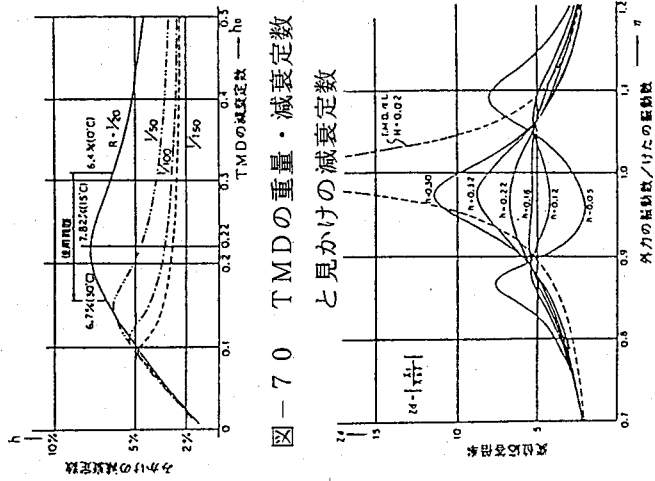


図-71 TMDの周波数応答
($R=1/20$, $\beta=0.95$)

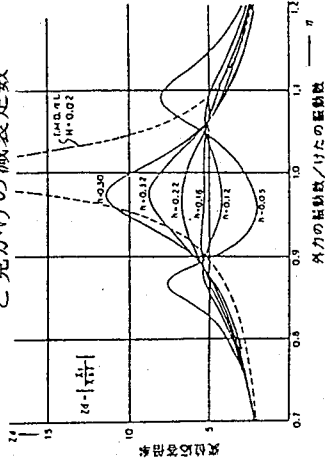


図-72 改良した実橋用
TMDの構造図

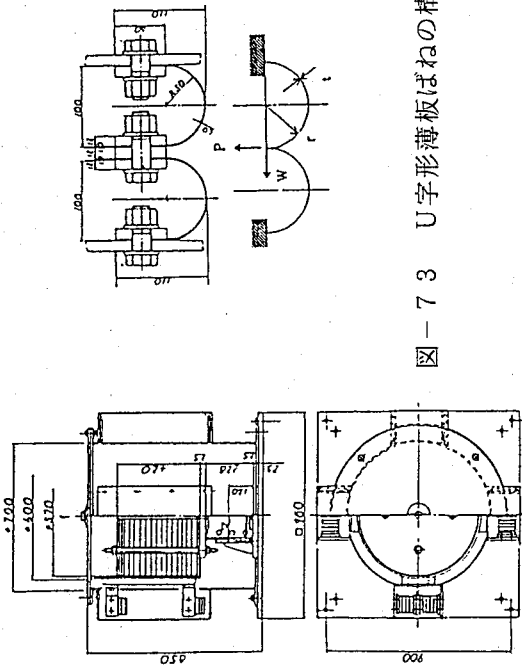
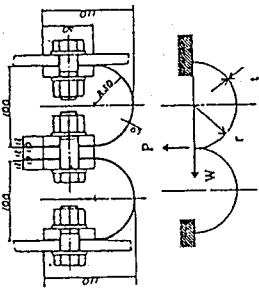


図-73 U字形薄板ばねの構造



走行試験による振動軽減効果を図-74と図-75に示している。図-74は大型ダンブトラック(20tf)を走行させる時、TMDの作動程度を3つの異なる状態(A:全基無作動、B:4基のみ作動、C:8基全部作動)に変えて変化を調べたものである。BとCの効果は似ているとともにAとは大きく異なっ

おり、その作動効果が見られる。

つぎにTMDの逆効果として、ねじり振動を励起することになったので、図-75は4基を曲げ振動用、他の4基をねじり振動用に調整しながら同様の結果を求めたものである。これにより主要な振動モードに対して大きな効果が得られていることがわかる。

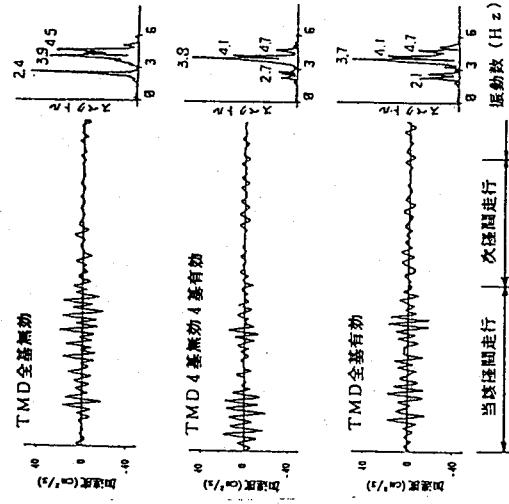


図-74 車両走行時の加速度波形とスペクトル(その1)

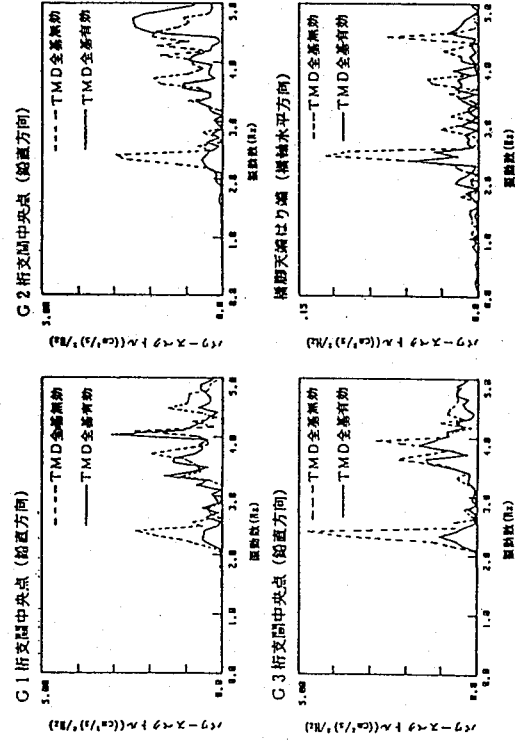


図-75 車両走行時の加速度波形とスペクトル(その2)

〔参考文献〕

- 1) 鈴木徹：一般国道23号級港新橋の補修・補強対策に付いて，第18回日本道路会議論文，p. 1028-1029
- 2) 土木学会：鋼床版の疲労，1990. 9.
- 3) 阪神高速道路管理技術センター：道路橋のメンテナンス，1993. 3
- 4) 日本道路公団：維持修繕要領（橋梁編），1988. 5
- 5) John W. Fisher, 三木千寿：米国の溶接橋梁に生じた疲労被害例，橋梁と基礎，pp18-24, 1982. 10
- 6) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修補強，橋梁と基礎，pp19-23, 1983. 8
- 7) 杵本正信，島田静雄，加藤雅史，福島公：振動特性によるアーチ橋の損傷要因分析と補強構造の検討，土木学会論文集，No. 482/I-16, p127-135, 1991. 7
- 8) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領，第1部，鋼構造物，1990. 6
- 9) 中島，青山，坂元，小林，須藤，曾我：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷（上），橋梁と基礎，Vol. 25, No. 5, (1991), p. 27
- 10) 阪神高速道路公団：維持管理と耐久性を考慮した鋼構造物の計画・設計・施工上の留意点，(1992), p16
- 11) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版，1993
- 12) 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説（鋼構造物）、付属資料：鋼構造物測定・解析の手引き（鋼鉄道橋），1987
- 13) 日本鋼構造物協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版，1993
- 14) 環境庁大気保全局特殊公害課：道路交通振動防止技術マニュアル、ぎょうせい，1980
- 15) 坂巻和男・山田健太郎：疲れ試験データベースの作成とその利用、土木学会論文集、第356号、p. 547-553, 1985.
- 16) 遠藤達雄・井上 肇：レインフロー法の考え方とその応用――疲労の累積被害評価法――、日本造船学会誌、第706号、p. 204-213, 1988.
- 17) BS5400: Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10, Code of Practice for Fatigue, 1980.
- 18) EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK: ECCS Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, 1985. (訳：鋼構造物の疲労設計指針、日本鋼構造協会，1987.)
- 19) 梶川康男・織田一郎・杵本正信：走行荷重による鋼アーチ橋の疲労損傷照査に対する動的立体解析の適用、構造工学論文集、Vol. 37A, p. 1089-1096, 1991.
- 20) 梶川康男・鈴木雅也・西星匡博：走行荷重による橋の疲労損傷に及ぼす振動の影響について、土木学会第46回年次学術講演会概要集、I-413, p. 864-865, 1991.
- 21) 末松忠司 他 寿橋の補修 橋梁と基礎，74-10, p159-162
- 22) 福島 公 他 名神高速道路鋼アーチ橋の改良計画 橋梁と基礎，89-10, p23-29
- 23) 村松竹司 他 名神高速道路蟬丸橋の架替え工事 土木技術，46-5, p49-59
- 24) 中島 拓 伸縮装置 橋梁と基礎，86-8, p61-80
- 25) 梶川、沖野、宇藤、松浦、伊関：動吸振器による高架橋の振動軽減対策、構造工学論文集，Vol. 35A, 1989.

付録 橋梁交通振動研究小委員会
(第1回－第13回)の議事録

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第1回）

日時：平成4年1月29日 13:30～16:40

場所：土木学会土木図書館会議室

出席者：梶川委員長、海野、遠藤、岡村、河西、加藤、川谷、久保、小暮、五瀬（代理：易鋒）、小林、佐々木、芝野、松本、曾我、田所、谷岸、津村、戸松、夏秋、中島、林川、藤澤、本田、前田、松田（代理：大串）、宮本、山田、横山、米田、黛（事務局） 以上31名

配布資料：

I. 委員会（第1回）

- 1-1A 土木学会構造工学委員会橋梁交通振動研究小委員会委員名簿
 - 1-1B 土木学会構造工学委員会橋梁交通振動研究小委員会委員名簿（住所録）
 - 1-1C 土木学会構造工学委員会「橋梁交通振動」研究小委員会趣意書
 - 1-1D 土木学会構造工学委員会小委員会一覧（平成4年1月21日現在）
 - 1-1E 「橋梁交通振動研究小委員会」の設置に至る経過説明
- #### II. 講演資料（話題提供）
- 1-2A 「交通荷重による橋梁振動問題の現状」
 - 1-2B 高架橋の振動制御と橋梁環境問題（振動制御コロキウム講演論文集 1991.7）
 - 1-2C 歩道橋の振動と使用性設計（振動制御コロキウム講演論文集 1991.7）
 - 1-2D 走行荷重による鋼アーチ橋の疲労損傷照査に対する動的立体解析の適用（構造工学論文集 Vol.37A, 1991.3）
 - 1-2E 道路橋の衝撃係数に関する一考察（第1回橋梁振動コロキウム講演概要 1987）

議 事：

1. 委員長の挨拶

梶川委員長より挨拶があり、これから2年間にわたる委員会活動への協力要請があった。

2. 幹事の選出

委員会活動を円滑に行うために幹事の推薦があり、加藤、川谷、林川、本田、前田の5委員が幹事として認められた。司会と議事録は幹事が担当し、第一回委員会の司会は川谷幹事、議事録は林川幹事が行うことになった。

3. 経過説明

加藤委員より、配布資料1-1Eに基づき「橋梁交通振動研究小委員会」の設置に至る現在までの経過について説明があった。

4. 委員の自己紹介と研究活動について

各委員より簡単な自己紹介があり、研究小委員会の研究・調査活動に関するいくつかの提案があった。

5. 話題提供

配布資料1-2A～1-2Eを参照し、梶川委員長より「交通荷重による橋梁振動問題の現状」と題して、衝撃係数の算定、歩道橋の使用性、高架橋の制振及び環境問題、疲労損傷の照査等について話題提供があり、今後の検討事項に対する意見交換が行われた。

6. 活動方針

1) 2ヶ月に1度位の頻度で、委員会を開催することにした。構造工学関係のシンポジウムあるいは研究発表会等の機会をとらえて、その前後に委員会の開催を考える。

4月2～3日 第38回構造工学シンポジウム

7月28～30日 第16回構造工学における数値解析法シンポジウム

9月28～30日 土木学会全国大会、於：東北大学

2) 本委員及び他の関係領域の方からも、毎回2名、各40～50分程度の話題提供を行うこととした。

7. 次回の開催予定

次回は4月3日（金）で、場所、時間は川谷幹事に一任することにした。また、次回の話題提供者は衝撃係数関係の話題を本田委員に、実橋の振動計測関係の話題を松本委員にお願いすることにした。

8. 委員長・幹事より追加事項

1) 次の2名が委員に追加された。

宮崎正男 住友重機械工業（株）橋梁鉄構事業部技術室課長

（財）鉄道総合技術研究所（依頼中）

2) 話題提供者は、講演内容をA4判4枚程度（年次学術講演会概要集原稿の書式）にまとめ、各委員に当日配布することとし、同時に小委員会の報告書の原稿となるように記録にとどめる。

9. その他

委員会終了後、第一回委員会ということで懇親会が開催された。

以 上

日 時：平成4年4月3日（金）16:30～19:30

場 所：東京大学生産技術研究所第5部輪講室

出席者：梶川委員長，東，岩津，遠藤，大島，岡村，加藤，川谷，五瀬，佐々木（中出），塩田，
秋本，曾我，田所，谷岸，津村，戸松，中島，夏秋，林川，藤澤，本田，前田，
松田（村山），松本，宮崎（小西），宮本，山田，米田，以上29名。括弧内は代理。

配布資料：2-1 議事次第，委員名簿・委員連絡先住所録（1992.2.25付）

2-2 道路橋の衝撃係数の動向と一考察（本田秀行委員）

2-3 蟬丸橋の損傷事例と改築検討（秋本正信委員）

議 事（司会：加藤雅史委員）

1. 第1回小委員会議事録確認（林川俊郎委員）

若干の字句修正の上，承認された。

2. 新任委員の紹介

松本信之委員（財）鉄道総合技術研究所 構造研究室 主任研究員

宮崎正男委員 住友重機械工業㈱ 橋梁鉄構事業部技術室 課長

新任委員と前回欠席委員の自己紹介と本小委員会に対する抱負が述べられた。

なお，名簿・連絡先住所の訂正・変更について，川谷委員への連絡要請があった。

3. 話題提供および活動に関するアンケートの趣旨説明と依頼（川谷充郎委員）

委員長・幹事からの提案として，話題提供のテーマ発掘ならびに今後の具体的な活動項目の調整のためのアンケートについて補足説明があり，回答の依頼がなされた。特に，活動テーマについては，ワーキンググループ分けする場合には希望調査の意味をもつことが確認された。

4. 話題提供

（1）道路橋の衝撃係数の動向と一考察：本田秀行委員（金沢工業大学）

資料2-2に基づき，走行自動車の動的影響を評価する動的増幅率は，設計時の衝撃係数に反映されているとの認識のもとに，動的増幅率の定義・算出法，各国の衝撃係数の規定，道路橋の衝撃係数に関する最近の動向（橋梁のスパン長ではなく1次固有振動数により衝撃係数を評価：カナダ，オントリオ州およびスイス，スパン長が長くなれば衝撃係数を0とする：ドイツ），衝撃係数の準確率論的評価，設計に動的影響を反映するに当たっての問題点について話題提供があった。主な質疑応答は次の通り。

①図-3～5のように横軸に固有振動数をとる場合，どのように振動数を評価するのか（車両台数が少ないと，支承が動かず橋梁の固有振動数が異なる）。図-6の固有振動数は実測値に基づいているので $f = 100/L$ は現実的な評価になろう。

②衝撃係数の他に動的外力の評価をすべき。制振を考えると，外力評価の明確でないことが問題。

③環境振動や疲労の問題において，動的影響をどのように考慮するのか。それらの本質が不明確なまま，衝撃係数でカバーしようとするのは，活荷重の評価を変えていることにもなる。すなわち，走行自動車の動的影響の評価は活荷重の規定に関連する。

(2) 蟬丸橋の損傷事例と改築検討：杵本正信委員（フジエンジニアリング）

資料2-3に基づき、斜角62°を有する上路式2ヒンジ鋼アーチ形式の蟬丸橋において、その構造特性のゆえに、過酷な交通荷重により、垂直材と縦桁などの疲労亀裂および床版損傷が多数発生し、固有値解析による補強効果の確認に基づき、改築された事例の話題提供があった。さらに、資料以外の話題として、そのような疲労損傷を、交通荷重の実態調査に基づいたシミュレーションを用いて、応力頻度解析により予測できること、ならびに動的挙動を動的疲労係数により評価できることが示された。また、PC桁橋の周辺の地盤振動の大きい箇所で、各種対策の中から、端横桁の間にコンクリートを充填し（桁連結）、ジョイントの除去（ノージョイント化）と路面改良により、振動レベルが大幅に下がった防振例も、シミュレーションにより予測できることが示された。これらに対する主な質疑応答は次の通り。

- ① 蟬丸橋の損傷例に関して、面内対称1次と面外対称1次が卓越しても、アーチと床版が同じように動けば鉛直材に過大な応力は出ないが、ここでは斜角62°を有するため移動荷重により過大な応力が出る。
- ② 環境振動軽減策の内、路面凹凸高を小さくすることも効果があるが、路面凹凸の周波数も動的応答に関係する。ただし、路面改良において周波数は考慮されていない。
- ③ ノージョイント化は地震時の検討から120m～130mが限界になり、PC桁橋の例ではスパン長15mより8～9連をつなぎ、防振効果が顕著にでた。スパン長30m位になると3～4連しかつなげず、防振効果があまり現れない。そのような場合も3～4連の連結を繰り返せば防振効果が期待できる。
- ④ 桁連結をせずにノージョイント化をすれば地震時の制約を受けないが、その部分の耐久性が極端に悪くなる。
- ⑤ 桁連結において、連続桁化により振動モードを変えることまでは考えていない。

5. 次回以降の開催予定

第3回 6月3日（水）14:30～ 於：建設省土木研究所

話題提供は横山功一委員および土木研究所の他の研究室の方にして頂く。

実験施設の見学（約1時間）を含む。

当日の宿泊希望がとられた（次回委員会案内でも宿泊希望を確認予定）。

第4回 7月30日（木）午後 於：土木学会土木図書館会議室（案）

第16回構造工学における数値解析法シンポジウム（7月28日～30日）

第5回 10月1日（木） 於：仙台近郊

土木学会全国大会（9月28日～30日）

6. 委員長の挨拶

今後、具体的な活動に向けて準備を進めることが確認された。

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第3回）

日 時：平成4年6月3日（水）15:45～17:40

場 所：建設省土木研究所 研究本部6F 629会議室

出席者：梶川委員長，東，海野，遠藤，大島，河西（永山），加藤，川谷，五瀬（易），小林，佐々木，塩田，芝野，枚本，曾我（酒井），田所，津村，戸松，中島，夏秋，林川，藤澤，本田，前田，松田（村山），松本（曾我部），宮崎，山田，横山，米田
＜以上30名。括弧内は代理＞

委員以外に，話題提供者として西川和廣，明嵐政司氏，更に土木研究所研究員数名

配布資料：3-1 議事次第，委員名簿・委員連絡先住所録（1992.4.28付）

3-2 話題提供および活動に関するアンケート集計結果

3-3-A 交通車両による道路橋の損傷について（西川氏）

3-3-B 活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策（ 〃 ）

3-3-C 道路橋における疲労問題と補修・補強（ 〃 ）

3-4-A 衝撃係数&交通振動（横山委員）

3-4-B 動吸振器による道路橋の交通振動の軽減効果について（ 〃 ）

3-4-C 高架橋の交通振動解析に関する報告書（ 〃 ）

見 学（14:30～15:30）

小委員会に先だって，下記の土木研究所実験施設を見学した。

- ・試験走路（実大トンネル実験施設，試験橋梁などを含む）：道路研究室
- ・大型風洞施設：構造研究室
- ・振動台：振動研究室

議 事（司会：本田秀行委員）

1. 第2回小委員会議事録の確認（川谷充郎委員）

原案どうり承認された。

なお，配布資料3-1の名簿・連絡先住所に変更がある場合には，川谷委員への連絡要請があった。

2. 話題提供

（1）自動車走行による橋梁の損傷：西川和廣氏（土木研究所橋梁研究室長）

配布資料3-3-A, 3-3-Bに基づき，道路橋の損傷について OHPの図や実例の写真などを含め詳しく説明があった。その他，過積載車両の実測結果の紹介があり，3軸ダンプトラックで最大 75tonというものもあり，実際にはかなりの過積載車両が走っており問題であることの説明があった。また，収集データから示方書のたわみ制限がゆるい時の橋梁に疲労クラックが多く発生していることが示された。さらに交通量とR/C床版の損傷

の関係を整理中のデータも紹介された。主な質疑応答は次の通りである。

①実例として紹介された箱桁の疲労クラックは振動によると見るのかどうか。

振動とは少し違う。両方のウェブの相対変位の問題であろう。剛性を大きくする方法であるが、十分に横につないで1つの版のようにすれば、このような設計に乗らないような損傷はクリアできるのではないかと思われる。

②たわみ制限のゆるい時の損傷はどのようなものか。

横桁や対傾構の接続部がやはり多い。たわみの制限がゆるいと同じ活荷重に対してたわみが大きく相対変位も大きくなる。

③床版と横桁のつなぎの結合度と損傷の関係はどうか。

床版の厚さは損傷と関係するが、結合度がどうかというオーダーではないのではないかと思います。あまり局部で見ても現物を再現できないのではないか。

(2) 低周波空気振動と固体音の問題：明嵐政司氏（土木研究所交通環境研究室主任研究員）

低周波空気振動全般に関する話題提供が、環境庁から出ている資料などでなされた。研究室では、低周波のレベルも外国で取り扱っているのに比べれば小さいので、現在はあまり扱っていない。騒音関係の対策として遮音壁があるが、低周波では回折減衰も透過損失もあまりきかない。橋梁との関係でみると鋼桁とPC桁ではPC桁の方がはるかに小さい。鋼桁では主桁の固有振動数も大きな影響があるかもしれない。

現在、橋梁の関係の騒音として検討しているのは、車両がジョイント部を通過した時や桁部で車両がはずんだ時の固体音である。高架橋周辺の苦情が多い。対策の1つとして桁の支承部付近をコンクリートで巻立てるのも有効である。

主な質疑応答は次の通りである。

①以前、低周波の人体への影響がはっきりしないので土木の分野では環境基準のようなものが確定できないということであったが、現在ではどうか。

環境庁で出されたような資料で、ほとんど問題ないということとで研究室ではほとんど扱っていない。

②日本騒音制御工学会で低周波の測定法についてJIS化の動きがあるが、橋梁も残っているうちの1つである。土木の方でも進めてほしい。

ご意見は参考にさせていただきます。

(3) 衝撃係数&交通振動：横山功一委員（土木研究所構造研究室長）

主として配布資料3-4-Aに基づき、車両と道路構造との動的相互作用、段差による動荷重、交通振動、衝撃係数、橋梁設計への反映などについての構造研究室としての取り組みについて説明があった。主な質疑応答は次の通りである。

①資料3-4-AのL荷重のモデル化の説明で対象橋梁のスパンや渋滞回数はどういうことか。スパンは3種類変えている。渋滞回数は1日600回の渋滞パターンがあるとして計算している。詳しくは橋梁研究室から土木研究所資料（第2539号）が出ているのでそれを参照していただきたい。

②限界状態設計法における衝撃係数についてどのようなように考えているか。

荷重と衝撃係数は同時進行で検討して行って、後でまとめればよいと考えている。動的な影響を考えると、動的な面だけしか考えないのはまずいのではないかと思う。

3. 小委員会の活動方法（川谷充郎委員）

前回の小委員会でアンケートをお願いした結果をまとめた配布資料3-2 について説明がなされた。具体的な活動方法は、幹事の方で整理検討して、次回の小委員会で案を提案したい。

4. 次回以降の開催予定

第4回 10月 7日 14:00～ 於：土木学会図書館会議室

話題提供はアンケート結果を参考にして近日中に決定し、開催通知にご案内する。

第5回 10月 1日（木）午前中 於：仙台近郊

前日の土木学会全国大会最終日の夕方に会場へ移動して、夜には橋梁振動研究会と合同で懇親会を行い宿泊する予定である。

次回の小委員会開催通知に出欠の用紙を同封する予定である。

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録 (第4回)

日時：平成4年7月30日 (木) 14:00～17:00

場所：土木学会土木図書館会議室

出席者：梶川委員長、東、海野、遠藤、岡林、岡村、河西、加藤、川谷、五瀬 (易)、小林、

佐々木 (中出)、塩田、芝野、枚本、曾我、田所、中島、夏秋、藤澤、本田、前田、

松田 (村山)、松本、宮崎、山田、横山、米田、事務局：黛

以上30名、括弧内は代理。

配布資料：4-1 議事次第、活動に関するアンケート (再度) のお願い・アンケート回答用紙を含む。

4-2 鋼単純桁の連結化ジョイントレス工法

4-3 首都高速道路公団 662工区高架橋の振動特性

議事 (司会：前田研一委員)

1. 第3回小委員会議事録の確認 (加藤雅史委員)

2. 話題提供 (2) の②項で、橋梁だけが残っているを橋梁も残っている内の一つであるに一部修正後、原案通り承認された。

2. 話題提供

(1) 鋼単純桁の連結化ジョイントレス工法：山田靖則委員 (高田機工)

配布資料 4-2に基づき、連結化ジョイントレス工法の目的、概要に続き、桁連結化の評価、各案による連結部と弾性支承の最適設計、連結部の実物大試験とFEM解析などの説明があった。桁連結化に伴う結合条件と連結部支点のばね定数が走行車両による動的応答の解析結果を基にその最適値が検討されていることが示された。そして、実際の施工において、計測結果が公表されていないが、振動レベルの低下が認められ連結化の効果があつたことも示された。この工法をより効果的にするために、連続した数箇所での連結化、連結材のコンパクト化、曲線桁への適用など、今後の課題が指摘された。さらに、本工法の調査・実測などの工事記録がビデオで紹介された。主な質疑応答は次の通りである。

①この工法は、路面の平坦化効果と伸縮継手部での角折れ緩和の効果をどのような比率で考えているのか。また、なぜ桁連結を考えるのか。

両者の効果の比率を数式的に表すのは困難である。

角折れ緩和よりも継手部舗装の耐久性の向上を図り、連続桁化による桁質量効果と継手部を無くすることによる路面の連続化・平坦化によって継手部に生じる走行車両の衝撃や騒音など環境交通振動の低減を図ることを目的としている。

②舗装の連続化はどのようにしているのか。

伸縮継手を取った上に、鉄板、マス詰めコンクリート、防水シート、舗装を行っている。

③弾性支承を用いても構造としては中間的な連続化になっているので、絶対値は小さいが負の曲げモーメントが生じ、連結部の舗装などにクラックが生じないか。

対象とした桁は合成桁であるので、床版の一部に引張力が作用してクラックが生じる可能性はある。

④弾性支承の鉛直ばね特性はどうかになっているのか。

弾性支承として鉛プラグ入りゴム支承を用いているが、鉛直方向のヒンデリシス曲線は線形と見なしてよい。

(2) 8 径間連続ラーメン高架橋の車両走行実験と常時微動観測：宮崎正男委員（住友重機械工業）

配布資料 4-3 に基づき、8 径間連続曲線立体ラーメン鋼床版箱桁橋の動的特性を把握する調査事例が説明された。また、2 径間連続鋼床版箱桁斜張橋の振動実験として、特に乗用車を利用した車両走行試験や常時微動試験の方法、計測データを基に橋梁の動的特性評価について OHP で報告された。主な質疑応答は以下の通りである。

①図-24の動的たわみ増幅率は車速が大きくなってあまり変化しないが、図-16では車速の影響が大きくなっているのはなぜか。

図-16では RMS 値で、図-24は最大値で算定しているためである。

これに関連して、RMS 値と最大値との評価基準としての対応について議論され、ここでは、ある計測区間内での最大値を取っているが、非定常性の強い現象の場合、RMS 値と最大値は直接対応しないことが確認された。

②常時微動測定の目的とノイズ対策はどうか。

比較的簡単に固有振動数や減衰定数が推定できることから、動的特性の把握と他の試験方法で行った動的特性値の裏付けを得る目的で行っている。また、ノイズ対策としては、デジタル・バンドパス・フィルタを用い、スペクトルの分解を AR 法で解析している。

③対数減衰率の値 0.05 は少し大きいのではないか。また、ハーフパワー法の信頼性についてはどうか。

調査対象の橋梁は支間長が 220 m 程の斜張橋であり、応答振幅によっても変動はあるが、0.05 ぐらいの値になるものと思われる。また、信頼性については、スペクトルの分解能に影響されるが、例えばケーブール単体の場合、減衰自由振動波形とハーフパワー法での値を比較すると、2 桁は信用できる。

3. 活動方法

川谷幹事から配布資料 4-1 に基づいて、幹事会における具体的な活動方法についての検討の概要が説明され、4 項目の活動テーマが提案された。それらの 4 項目について、資料提供のできるテーマ、および興味のあるテーマに関するアンケートの依頼がなされた。

振動制御に関する検討事項については、振動制御小委員会との関連から、活動テーマの (2) 橋梁環境振動に含める旨を委員長より補足説明があった。

活荷重評価に関する質疑において、その主体は、活動テーマの内の (1) 動的設計係数で検討を行うが、活荷重評価は各活動テーマに共通性があることから、各活動テーマにおいても関係する事項において検討を進める。

なお、活動テーマの (1) 動的設計係数の内、③疲労係数の評価を疲労の評価にするよう委員長より要請があった。

4. 次回以降の開催予定

第 5 回委員会 10 月 1 日 (木) 9 時～12 時 秋保温泉・秋保グラウンドホテルにおいて

中島委員より、すでに通知済みの懇親会と委員会の出欠連絡がまだの委員は至急中島委員まで連絡の程、要請があった。

第 6 回委員会 11 月下旬から 12 月始めにかけての予定。次回の委員会で決める。

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第5回）

日時：平成4年10月1日(木) 9:00～12:00

場所：秋保グランドホテル会議室

出席者：梶川委員長、遠藤、大島、河西、加藤、川谷、五瀬(易)、小林、佐々木、芝野、萩本、田所、戸松、津村、中島、夏秋、林川、藤澤、本田、前田、松田、松本、山田、米田
以上24名、括弧内は代理。(なお、今回は、第12回橋梁振動研究会とのジョイントで開催され、委員の他に12名の参加があった。)

配布資料：5-1 議事次第、委員名簿・連絡先住所録(1992.8.27版)、Colloquium Proposal

5-2 活動に関するアンケート(再度、1992.7.30)集計結果

5-3 振動制御小委員会4班『交通振動の制御は可能か?』(仮題)の活動方針(案)について

5-4 橋梁の診断・点検評価のための振動測定および解析

議事(司会：林川俊郎委員)

1. 冒頭に梶川康男委員長から、久保雅邦委員逝去の訃報があり、全員で黙祷を捧げた後、議事を開始。
2. 第4回小委員会議事録の確認(本田秀行委員)

修正意見はなく、原案どおり承認された。

3. 小委員会活動方針(川谷充郎委員)

配布資料5-2に基づいて、アンケートの集計結果の報告があり、

①活動テーマ(1)動的設計係数と(4)橋梁交通振動解析への希望者が少なく、内容的にも関連する事項が多く含まれていることから、グループ討議を合同で行いたい。

②次回小委員会までに、各テーマの連絡幹事により関係の委員に連絡を取り、具体的な内容や方針に関する意見を交換して、活動方針案を取りまとめる。

③次回小委員会では、これらの活動方針案を審議するとともに、後半には、各テーマのグループに別れて検討する。

等の提案がなされた。これに対し、各テーマに重複した委員が多く見られ調整の必要があること、また、その結果によっては特定のテーマに委員が偏る可能性もあり、次回小委員会で最終決定すべきではないかとの意見が出された。

本意見に基づいて、委員長・幹事団で調整し、その結果を各テーマの連絡幹事から関係の委員に打診し了解を得た後に、次回小委員会において承認を受けるものと決定された。

4. Colloquium Proposal(川谷充郎委員)

配布資料5-1に基づいて説明があり、Structural Serviceability of Bridges(Serviceability Limit State of Bridges)と題したコロキウムについて、橋梁交通振動に関するものを含め鋼・コンクリート橋併せて13テーマを掲げ、資料に示した様に目的や展望を明記してIABSE技術委員会に大阪大学・福本晴士教授[WGⅡ(鋼構造・合成構造・木構造)委員長]によって提案された事が報告された。さらに、その結果、コロキウムではなく、4年に一度開催されるI A

BSE・Congressの1テーマとして取り上げる方針が採択された事が報告され、詳細が分かりしだいに本小委員会において紹介されることとなった。

5. 振動制御小委員会4班からの人選依頼（津村直宜委員）

配布資料5-3に基づいて説明があり、一般技術者にも分かるように事例を中心に交通・環境振動の制御の現状について、『交通振動の制御は可能か』（仮題）という命題で論文、レビューペーパー等を作成し、それを基にオーガナイズセッションを行う活動方針が紹介され、7テーマのうち「自動車から発生する振動の特徴」の担当者の人選を本小委員会に依頼された旨報告された。これについては、川谷充郎委員に一任することが決定された。

6. 次回（第6回）小委員会、および、次回（第13回）研究会の開催予定（川谷充郎委員）

「第6回橋梁交通振動研究小委員会」 11月18日（水） 於：土木学会会議室
活動方針に関する審議に時間を取りたく、話題提供については1編にしたいとの提案があり、了承された。また、次回より、橋梁振動研究会の各会員にも案内状を送付し、オブザーバー委員として参加していただいていたとの提案があり、これについても了承された。

「第13回橋梁振動研究会」

平成5年度土木学会全国大会（9月8、9、10日 於：九州産業大学）後の9月11日（土）に橋梁交通振動研究小委員会と合同で開催を予定、詳細は後日との報告がなされた。

7. 話題提供

（1）橋梁の診断・点検評価のための振動測定および解析：大島俊之委員

配布資料5-4に基づき、原因別に見た供用年数と疲労損傷の発見数のグラフがまず示され、継手部、切欠きコーナ部、ソールプレート、鋼床版などにおける応力集中や2次応力による損傷事例、および、損傷継手部の改善実験の結果などが写真を用いて説明された。次に、余寿命・健全性の定量的評価に関して、必要な事項と問題点が示され、疲労試験などの各種試験や実橋測定、変形・応力解析の診断業務における位置付け、破壊力学の意義、および、定量的評価法の現状、診断・点検評価の全般的な問題点が指摘された。さらに、委員会活動への提案として、実働応力／設計応力データ、局部実働応力の測定と計測法のガイドライン、および、振動パラメータの新設時、供用後、補修後における変化追跡事例などの収集が提案された。主な質疑応答は次の通りである。

①損傷原因の中に振動によるものという分類があるが、橋梁交通に伴う疲労損傷はすべて動的作用を伴うものであり、分類として適切であるかどうかの指摘がなされた。本分類はアーチの吊り材の振動によるものなどに対応しているのではないかとコメントもあったが、いずれにしても、橋梁交通振動の立場から、損傷原因の分類を見直すべきではないかとの意見が出された。その場合、面外変形と面内変形との連成などについても配慮すべきであるとの意見も出された。

②実働応力の測定において、動的成分のみの計測が可能であるかとの質問があった。これに対し、熟練測定者の委員からコメントがあり、分析は十分可能であるが、あまり行っていないとの説明があった。

③鋼橋の2次部材設計の問題点や新設橋へのフィードバックの必要性について示されたが、全体剛性の低下に対する配慮が必要ではないかとの指摘があった。

④実働局部応力の測定の難易度、JR基準にあるような測定位置の妥当性について質問があった。これに対しては、今回示したのは一応のサンプルであり、今後検討して行くべき課題であると考えた。

（2）高架橋の交通振動レベルの評価：津村直宜委員

主に作業性の面から、拡張時の溶接に発生する欠陥との相関性を検討することを目的として、単純鉚桁・三径間連続箱桁橋の供用中の振動測定を行った結果についての報告がなされた。24時間測定を行い、10分毎の最大値(gal)を2重指数確率紙にプロットし、各測定点における再現期間に対応する最大加速度の期待値を求めることにより検討を加えた結果、実測値は最大180gal程度でスペクトルのピークは乱れがちであったこと、および、伸縮継手付近のように衝撃で決まるような箇所では確率紙のプロット結果に直線性(方向性)が見られたことなどが報告された。また、断面変形(変位)の動的測定の結果からは、局部振動は、腹板の(面外)板振動以外は顕著でなかったことも紹介された。主な質疑応答は次の通りである。

- ①確率紙に乗るということは、不確定な衝撃が顕著であるからかとの質問があった。これに対して、そのような傾向は否定できないが、データの提供方法として確率紙は有効な手段の1つとなり得るものであるとの説明があった。
- ②溶接欠陥の要因としては静的な応力成分の方が支配的であるとの文献があるとの指摘に対しては、てぶれの問題もあり、過去に振動台で検討した例もあることが説明された。また、パネ下の12~13Hzに近い振動が問題であるという点についても、てぶれによるものか、応力によるものか分らないのではとの指摘があった。
- ③通行状態の質問があり、一日4万台、車種は10分ではほぼ一様になっていたことが回答された。ただし、交通量的に、特に車速の点からは、定常とは言えない時間帯があったこと、また、通行止めによる走行試験は実施しなかったことも付け加えられた。
- ④腹板の振動変位についての質問があり、リアルタイムのスペクトルは乱れがなく、測定は困難ではなかったこと、および、鉚桁で0.1mmの変位(桁高2m程度)、場所はいわゆるパネルの中央であり、ウェブギャップ振動ではないことが説明された。

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第6回）

日時：平成4年11月18日（水） 13:30～17:30

場所：土木学会土木図書館会議室

出席者：梶川委員長、東、海野（土屋）、遠藤、大島、岡林、河西、加藤、川谷、五瀬（関）、小林、

佐々木、佐藤（澤田）、松本、曾我、田所（大野）、津村、戸松、中島、夏秋、林川、藤澤、本田、

前田、宮崎、宮本（出戸）、山田、米田、事務局・黛 以上29名、括弧内は代理。

なお、橋梁振動研究会から2名（伊関、川添）のオブザーバ参加があった。

配布資料：

- 6-1 議事次第、委員名簿、連絡先住所録(1992.11.18 現在)、活動テーマ分担
- 6-2 鋼橋の実橋振動実験について（話題提供者：佐々木伸幸）
- 6-3 活動方針案・動的設計係数（連絡幹事：本田）
- 6-4 活動方針案・橋梁交通振動解析（連絡幹事：前田）
- 6-5 活動方針案・橋梁環境振動（連絡幹事：加藤・川谷）
- 6-6 活動方針案・橋梁健全度診断（連絡幹事：林川）
- 6-7 鋼構造年次論文報告集発刊（論文募集）および鋼構造シンポジウム新規開催

議事（司会：川谷充郎委員）

1. 梶川委員長より、活動テーマを分担し具体的な作業に入りたいとの挨拶があった。また、川谷幹事より委託研究小委員会について説明があり、適切な課題であれば委託を受けることができるとの報告があった。配布資料6-7に基づき、前田委員より日本鋼構造協会の論文募集の説明があった。

2. 第5回小委員会議事録の確認（前田研一委員）

①修正意見はなく、原案通り承認された。

②話題提供者にはA4判・全国大会概要集の書式要領で、今後レジメを提出してもらうように勧告することが再確認された。

③今回より、橋梁振動研究会の方々にも本小委員会の開催通知を行ったとの報告があった。

3. 委員の抹消と交代

①久保雅邦委員の逝去にともない、委員の抹消が報告された。

②横山功一委員から佐藤弘史氏（建設省土木研究所）への委員交代の説明があり承認された。

4. 話題提供

鋼橋の実橋振動実験について：佐々木伸幸委員（三菱重工業）

配布資料6-2に基づき、耐震設計の観点から振動実験を行った高速道路高架橋の事例2件、耐震設計の面から鋼箱桁橋の減衰特性に着目した現場振動測定例3件が説明された。

まず、旧梅田ランプにおいて、交通渋滞時に着目した現場振動測定例3件が説明について説明があり、車両には2つのローリングの固有周期があり、その1つが橋梁の固有振動数1.6Hzと共振状態にあることが分かり、車両のモデル化の重要性が指摘された。また、橋脚単独の振動実験結果から、地盤のばね定数は道路橋示方書による算定値よりも2.5～3.5倍大きい値であったことが示された。次に、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を採用した4径間連続高架橋の実測例が示され、油圧シヤッキを用いた強制変位により得られた減衰自由振動波形から、橋軸方向振動モードにおける免震支承の振幅および速度依存性があることが指摘された。また、前述と同様に測定された橋脚のばね定数は3～5倍と大きい値であった。

沖縄県の泊大橋の振動実験では、桁振幅の増大にともない、対数減衰率 δ が0.03~0.2程度まで増加し、固有振動数はやや低下する傾向が認められた。この対数減衰率の振幅依存性は支承部の摩擦によって説明できるとの指摘があった。次に、広島県の海田大橋の実測例では、顕著な振幅依存性は認められなかった。この理由としては固定および可動支承の配置の仕方、橋脚高によるとの説明があった。ただし、減衰定数は測定した時間によりバラツキがあり、温度による依存性が有りそうだとの説明があった。最後に、関西国際空港連絡橋（鋼箱桁橋）の振動実験結果が示され、舗装なしの架設時ににおける対数減衰率 δ が約一桁異なるなどの指摘があり、完成時にTMDの調整とも合わせて再実験するとの説明があった。主な質疑応答は次の通りである。

①温度が上がると対数減衰率 δ が大きくなる例もあるのかと言う質問があり、あまり実測された例がないとの説明であった。また、本四公団の大島大橋（吊橋）では温度依存性が認められたという報告例があるという意見が出された。

②泊大橋の沓の水平移動量の計測波形に、振動波形と思われない波形があるとの質問に対して、可動沓はピポット・ローラー沓を用いており、桁振動が小さいことから不規則な波形となったのだらうとの説明があった。

③車両のモデル化で、運転者台のところはどのようなものか、また、橋梁振動にも影響を与えるものであるのかとの質問があり、車両のピッチングについてはデータが多くあるが、水平およびローリングについては数少なく、ブラック・ボックスになっている。また、今回はキャンビンと橋梁の固有振動数が同じであった(1.6Hz)ので大きな影響があったが、橋梁が1.0Hz位ならばあまり影響はでないとの説明であった。

④地盤の位相差入力の影響についてはどうかとの質問があり、境界条件の取り扱い方が難しいとの説明があった。

⑤泊大橋の固有振動解析で、可動支承部のモデル化について質問があり、初期の傾斜部よりばね定数を算定したとの説明があった。

⑥海田大橋の共振曲線で振動数の低い方と高い方とではピークの立ち上がり方が違うとの質問があり、このような傾向は梅田ランプ、正蓮寺川橋梁の実測例でも見られるとの意見が出たが、起振機の特性なのか、軟化特性（非線形）なのかよく分からないとの返答であった。

5. 活動内容

川谷幹事から配布資料6-1に基づいて、各活動テーマを積極的に推進するための委員の調整について説明があり、資料の通り各テーマの担当委員が決定された。その後、各グループの連絡幹事から活動方針について説明があり、以下のような質疑応答があった。

①動的設計係数（配布資料6-3：本田連絡幹事）

各国の設計係数の実態調査を主体的に行い、動的問題における限界状態（終局限界、使用限界）の明確化について検討を行うとの説明があった。

・鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会終局強度設計分科会（西野主査）での活動として、衝撃係数は部分安全係数として取り扱われず、動的荷重を評価するための確率変数として従来通りの取り扱い方をされるのではないかと言う意見が出された。詳しくは、土木学会論文集（1992.7月号）の委員会報告が参考になる。

・対象橋梁として、歩道橋には使用レベルでの限界状態の基準がある。しかし、道路橋ではスパンが短いときには衝撃係数が終局状態に影響するだろうが、スパンが長くなると終局状態にはあまり影響がないだろうとの意見があった。

②橋梁交通振動解析（配布資料6-4：前田連絡幹事）

車両・構造物のモデル化、および解析理論、数値計算法、解析プログラムの調査を行い、橋梁交通振動解析のガイドライン的なものを目指すとの説明があった。

・構造物のモデル化は可能と思われるが、車両のモデル化には情報源が少ないとの意見があった。
・モード次数に応じた減衰定数の取り扱い方が分かるようにしてほしいとの意見があった。

③橋梁環境振動（配布資料6-5：加藤連絡幹事）

検討すべきテーマが多岐に渡っていることから、各テーマ毎にサブ幹事と委員を決め、各項目毎の連絡を密にするとの提案があった。また、振動制御小委員会との関係上、例えば振動の軽減法と言うような表現の工夫をするとの説明があった。

・振動制御コロキウムが来年8月3日、4日に行われ、本小委員会からも積極的に協力するとの紹介があった。

・鉄道橋についても環境振動の調査をするのかとの質問があり、今後の検討課題とするとの説明があった。

④橋梁健全度診断（配布資料6-6：林川連絡幹事）

損傷事例の文献調査、資料収集を行い、振動による損傷事例の抽出を行う。実働外力のデータ調査、できれば振動計測法のガイドライン作成を目指すとの説明があった。

・振動測定が疲労損傷に使えるのかどうかとの質問があり、橋梁振動に関するコロキウム（1989年8月）の資料があるとの意見があった。

・橋梁完成後の振動測定を行い、経年変化を見るような検討を加えてほしいとの意見があった。各活動テーマの中で、文献調査が多くあるため、重複を避けるような体裁と整合性を取るような方法を検討してほしいと幹事への要請があった。また、2年間の活動内容のまとめとして、コロキウムの開催を予定しており、各グループはこれから約1年位を目安にして活動テーマをまとめることが確認された。さらに、次回の委員会において各活動テーマの検討内容を報告することとした。その後、各グループに分かれ、討議がなされた。

6. 次回（以降）小委員会の開催予定

第7回委員会 1月27日(水) 13:30～ 於：土木学会会議室

第8回委員会 構造工学シンポジウムの前日である 4月14日(水)に見学会と委員会を予定。

なお、話題提供者については、後日、幹事の方で検討することとした。

以 上

日 時 : 平成5年1月27日 (水) 13:30~17:00

場 所 : 土木学会土木図書館会議室

出席者 : 梶川委員長, 東, 海野, 遠藤, 岡村, 河西, 加藤, 川谷, 五瀬(神澤), 佐々木, 塩田(小原), 芝野, 杵本, 戸松, 中島, 林川, 藤澤, 本田, 前田, 松田(栗崎), 松本, 宮崎, 宮本(出戸), 山田, 米田, 事務局・黛, 以上27名。括弧内は代理。

橋梁振動研究会からオブザーバ参加3名(金子, 中村, 能登)。

配布資料 :

7-1 鉄道建造物設計標準〔コンクリート構造物〕(案)の要旨,

鉄道建造物設計標準〔鋼・合成構造物〕の要旨,

鉄道建造物設計標準解説(土構造物)(案)の要旨,

鉄道総研報告, Vol.5, Nos.9-11, 1991.9-11 (松本信之委員)

7-2 土木構造物等の設計に関する技術基準の体系,

鉄道建造物等設計標準・同解説〔コンクリート構造物〕より2章 設計の基本 の内

2.5 安全係数 まで (同上)

7-3 鉄道建造物等設計標準・同解説〔コンクリート構造物〕より

3章 荷重 の内, 主要荷重の説明部分および, 3.5 設計荷重の組合せ,

7章 使用限界状態に関する検討 の内, 7.4 変位・変形に対する検討,

8章 疲労限界状態に関する検討,

付属資料1 設計荷重とその組合せに関する基本的考え方,

付属資料3 コンクリート鉄道橋の設計衝撃係数 (同上)

7-4 鉄道建造物等設計標準・同解説〔鋼・合成構造物〕より

3章 荷重 の内, 3.5 衝撃 まで,

6章 安全係数と荷重の組合せ,

8章 使用限界状態の照査,

9章 疲労限界状態の照査,

付属資料1 鉄道橋の衝撃-関連条項 第1編 3.5「衝撃」-,

付属資料8 たわみ限度値の検討-関連条項 第1編 8.1「たわみの照査」-,

付属資料10 鋼鉄道橋で用いる主な継手のS-N線図-関連条項 第1編

9.2「繰返し数の影響を考慮した疲労の照査式」- (同上)

7-5 WG(1)-1.2 動的設計係数および橋梁交通振動解析・文献調査要領(案) (連絡幹事: 前田)

7-6 同上 文献リスト(案) (連絡幹事: 本田)

7-7 活動テーマ「橋梁環境振動」の状況 (連絡幹事: 加藤・川谷)

7-8 活動テーマ「橋梁健全度診断」について (連絡幹事: 林川)

7-9 橋梁交通振動研究小委員会 活動のまとめに向けて(案) (連絡幹事: 川谷)

議 事 (司会: 加藤雅史幹事)

1. 梶川康男委員長より, 開会にあたり挨拶があった。

2. 第6回小委員会議事録の確認 (林川俊郎幹事)

原案通り承認された。

3. 話題提供

鉄道構造物設計標準の概要：松本信之委員（鉄道総合技術研究所）

配布資料7-1～4に基づき、平成4年10月に刊行された鉄道建造物等設計標準・同解説について、主に本研究小委員会に関連する事項の説明があった。すなわち、設計耐用期間、安全係数、設計荷重、荷重の組合せと荷重係数、衝撃係数、使用限界状態（たわみの照査）、疲労の照査などに関する項目である。設計耐用期間について、コンクリート構造では、安全性に関して100年として設計想定地震の規模などを決め、耐久性に関して50年（メンテナンスフリー）から100年（維持管理のもと）としてひび割れ制限に関わるかぶり厚および水セメント比を決めている。鋼構造では、在来線で機能面から60年、新幹線で疲労を考慮して70年としている。

主な質疑応答は次の通り。

- ① 鋼・合成構造物において、疲労限界状態に関して繰返し数の影響を考慮した疲労の照査の場合、構造解析係数が0.85であり（資料7-4, p.92）、設計断面力を小さくしてよいのかとの質問に対して、その解説は同資料pp.163-164にあり、実測応力度が計算応力度より小さいことを反映して係数値を定めたとのこと。
- ② 鋼・合成構造物において、使用限界状態の照査に係わるたわみ制限を乗り心地と輪重減少の両面から検討しているが（資料7-4, pp.149-153）、Janewayの乗り心地係数のオリジナルにおいて1 Hz以下の範囲では規定していないがとの質問に対して、鉄道構造物では1 Hz以下も考慮して、同資料p.473に示すようにすり付けて規定したとのこと。それに関連して、一般的な鉄道車両の固有振動数はいくらかとの質問に対して、基本的に1 Hz程度とのこと。さらに、瀬戸大橋のような長大橋梁で車両と固有振動数が近い場合、風による橋梁の渦励振中に車両が走行すると、輪重減少率の制限値0.25を越えるのではとの質問に対して、確かに長大橋梁においてそのような場合の輪重減少率の制限値は厳しいが、本四の瀬戸大橋では列車走行安全性に関わる脱線係数も含めて検討されているとのこと。

4. 活動経過

各テーマ毎に連絡幹事より、配布資料に基づき活動経過が報告され、意見交換された。

(1) 動的設計係数および橋梁交通振動解析（配布資料7-5, 6, 連絡幹事：前田・本田）

文献調査要領について、調査方針・方法および調査対象と分担(案)について説明された。調査対象として、土木学会年次学術講演会講演概要集の類は省くとのこと。また、文献リストの書式案(A4判1枚/件)が示され、今後必要に応じて修正しつつ調査を進めるとのこと。

・ 海外の文献は、調査対象のその他学協会に含める。

・ 実験のみの論文、例えば車両走行実験が解析対象として興味深いものもあるが、橋梁交通振動解析に関わる今回の調査では理論解析のみを対象とし、次の段階でそれらも対象としたい。

・ 機械学会などにおける車両の力学モデルを扱っている論文は対象外とする。

(2) 橋梁環境振動（配布資料7-7, 連絡幹事：加藤・川谷）

前回の報告のように、検討項目毎にサブ幹事と委員を決め、文献調査を行っている。各項目毎に調査方法が異なり、項目によっては網羅的な調査に至っていない場合もある。

(3) 橋梁健全度診断（配布資料7-8, 連絡幹事：林川）

検討項目毎にサブ幹事と委員を決め、損傷事例および補修・補強実施例の収集、ならびに診断への振動の適用性に関わる振動測定法のガイドライン作成の作業を行っている。疲労損傷に関しては、他の委員会でも扱っているので当面はペンディングとする。

・ 地震による損傷に関して、地震時被害の診断手法は参考になる。また、地震後の補修による

I
振動特性の変化について検討を要する。

- ・資料7-8、項目〔2〕の説明中“実働応力の実測例”とは、交通荷重下の作用応力の意ではなく、診断に使われた実応力例の意である。
- ・損傷事例の対象は公表されたもののみではなく、委員会内資料として未公開データの活用にも努力する。これは損傷事例だけではなく、低周波音などにも関係する。他の委員会では委員長名で利用の許可を求めたところ、橋名を出さない条件で利用できた。
- ・文献調査および事例収集について、既刊の調査資料を利用して、その中から交通振動関係を調査するのが効率的。

5. 活動のまとめに向けて（連絡幹事：川谷）

2年間の研究小委員会活動のまとめ方について、配布資料7-9に基づき川谷幹事より説明があり、意見交換された。

- ・土木学会論文集に委員会報告を投稿する。これも活動成果の会員への還元として良い。

6. 次回の開催予定

第8回 4月14日（水）10:30頃～ 於：大阪

午前より、阪神高速道路の現地見学を行い、午後に委員会開催。

話題提供：未定

第39回構造工学シンポジウム（4月15日～16日）

新浜寺大橋振動実験見学会

根本委員より、阪神高速道路湾岸線の新浜寺大橋（ニールセンローゼ橋、支間長254m：我国最長）において、3月20日頃から振動実験を行う際に際して、見学会の紹介があった。

その後、3月18日（木）の見学会が案内され、委員会より14名が参加した。

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第8回）

日 時：平成5年4月14日（水） 15:50～18:00

場 所：大阪市街地開発協会議室（大阪駅前第1ビルB1）

出席者：梶川委員長、東、岩津、遠藤、大島、岡村、河西、加藤、川谷、小林、佐々木、佐藤（今野）、
塩田、芝野、松本、曾我、田所、戸松、中島、林川、藤澤、本田、前田、松本、宮本、山田
以上26名、括弧内は代理。

なお、橋梁振動研究会から2名（山本、牧口）のオブザーバ参加があった。

配布資料：

- 8-1 設計活荷重の変更および今後の方針（話題提供者：岩津守昭委員）
- 8-2 既設構造物の耐力の検討（阪神高速道路管理技術センター、鋼橋の耐久性に関する調査研究委員会）
- 8-3 最近の橋梁技術（土木研究所における最近の橋梁に関する話題）
- 8-4 WG(1)-1,2 動的設計係数および橋梁交通振動解析・文献調査要領（連絡幹事：前田・本田）
- 8-5 活動テーマ「橋梁健全度診断」について（連絡幹事：林川）
- 8-6 4th International Conference on Short and Medium Span Bridges (SMSB IV)

議事（司会：本田秀行幹事）

- 1. 梶川委員長より、開会にあたり挨拶があった。
- 2. 第7回小委員会議事録の確認（川谷充郎幹事）

修正意見はなく、原案通り承認された。

3. 話題提供

設計活荷重の変更および今後の方針：岩津守昭委員（阪神高速道路公団）

配布資料8-1～3に基づき、設計活荷重の変更内容、今後の方針、問題点について説明があり、次に既設構造物の耐力および最近の橋梁技術に関する話題提供があった。まず、車両の大型化、多利用および物流の高度化にともない、車両重量や車両高さの改正・見直しが日本道路協会橋梁委員会の中で検討されている。新活荷重の条件としては、25tの3台連行荷重、従来の1,2等橋の区分廃止、現行の設計活荷重（TT-43も含む）を下回らない、諸外国の基準を満足することが考えられている。新活荷重はH5.4に遡って建設省通達が出され、H5.12までに全国主要道路に15t+25t+15tの通行を可能とし、11次5計内に25t+25t+25tを自由走行させるとのことである。しかし、新設計活荷重の導入には準備期間が短いことにより、新設および既設橋梁の設計・施工にいくつかの問題点があることが指摘された。

次に、既設橋梁の安全性の確保および維持管理の実施の面から、活荷重および死荷重の増加が許容応力度や疲労安全性に及ぼす影響、耐力の評価手法について説明があった。最後に、高齢化社会に備え、設計・施工・管理等の合理化、省力化、FRPケープルの適用、海峡横断道路プロジェクト構想、合成構造、複合橋の紹介があった。主な質疑応答は次の通りである。

①設計活荷重の変更について、25t車の寸法は従来と同じなのかとの質問があり、幅3.5m（阪神公団は3.25m）をレーン幅に載荷し、分布荷重にならず、T-荷重の扱い方はそのままとのこと。

②短期間の活荷重変更により、專業メーカー等には混乱はないだろうかとの質問に対して、阪神公団関係は割合スムーズに行われており、一部の公団では設計がストップしているとの意見が出された。また、振動に関する問題点として、今後疲労が重要になってくるだろうとの意見が出された。

③配布資料8-1は阪神公団の説明資料と考えて良いかとの質問があり、資料は阪神公団の考え方をまとめたものであるとのこと。さらに、新活荷重のことを大学等の授業で公表しても良いかとの質問に対して、出典を伏せて教えることは可とのことであった。

4. 活動経過

各テーマ毎に連絡幹事より、活動経過が報告され意見交換が行われた。

(1)動的設計係数および橋梁交通振動解析（配布資料8-4、連絡幹事：前田・本田）

文献調査要領に関して説明があり、前回の文献リスト（案）を改定したこと、さらに調査対象と分担者に変更があることが報告された。第8回研究小委員会までに総計90編の文献がリストアップされているとのこと。

(2)橋梁健全度診断（配布資料8-5、連絡幹事：林川）

文献調査のため、文献リスト（案）について説明があり、今後必要に応じて修正しつつ損傷事例の文献・資料の収集を行うとのこと。

(3)橋梁環境振動（連絡幹事：加藤・川谷）

検討項目毎に、文献のリストアップは進んでいるが、まともはこれからであるとのこと。

・文献調査には重複しているところもあり、どの様な形でまとめるのか、また研究小委員会の2年間のまとめをどの様にするのかとの質問があり、幹事から委員会のまとめとしては各活動テーマ毎に約20ページの報告書（レジメ）を作成し、委員会の成果とすると説明があった。さらに、活動成果を広く土木会員に知らせるために、例えば土木学会（図書館）で報告書をテキストにして委員会活動報告会を来年夏ごろ開催することも考えられる。文献調査は報告書作成のための資料と考えているとの説明があった。また、2年間の活動実績に基づき、本年9月末までに継続申請を出すことが決められた。

5. 中小支間橋梁に関する国際会議（配布資料8-6、SMSB IV）

標記国際会議が1994年8月8～11日カナダで開催（土木学会3月号、P94参照）され、テーマの内容、アブストラクトについて川谷幹事から説明があった。本小委員会と近い内容もあり、今後の情報源とも成り得るので、委員個人レベルで参加・発表が望まれるとのことであった。

その後、各WGグループに分かれ作業内容が打ち合わされた。

6. 次回（以降）小委員会の開催予定

第9回委員会 5月26日（水） 13:30～ 於：土木学会会議室

第10回委員会 7月23日（金） 13:30～ 於：土木学会会議室（第17回構造工学における数値解析法シンポジウム最終日）

第11回委員会 9月11日（土） 午前中 於：福岡（場所未定、土木学会全国大会翌日）

・なお、第9回、10回小委員会は2年間のまとめの作業を優先し、話題提供者がないこともある得る。また、例年全国大会時に行われている橋梁振動研究会のお世話は岡林・加藤委員にお願いすることになった。

阪神高速道路公団の見学会

岩津委員および枕本委員の案内により以下の見学会が行われた。

日 時：平成5年4月14日（水） 10:20～15:30

内 容：1)阪神高速道路公団大阪堺線P-430；桁連結による防振工事の事例見学

2)新浜寺大橋（未供用）；架設方法および振動実験の内容説明

3)阪神高速道路湾岸線；港大橋、南港水路橋、大和川橋梁、正蓮寺川橋梁、天保山大橋、此花大橋、川中島JCT、助松JCTをバス内より見学

4)阪神高速道路大阪管理部；交通管制システムの概要説明を受け、交通管制室を見学

参加者：26名

以 上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第9回）

日 時：平成5年5月26日（木）13:39～17:00

場 所：土木学会土木図書館会議室

出席者：梶川委員長、東、遠藤（小野）、大島、岡林、岡村、加藤、川谷、五瀬（神澤）、小林、

佐藤（今野）、塩田、秋本、曾我、田所、津村、戸松、夏秋、林川、藤澤、本田、前田、

松田（栗崎）、松本、宮崎、宮本、米田、事務局：黛、以上28名、括弧内は代理。

なお、橋梁振動研究会から1名（山本）のオブザーバ参加があった。

配布資料：

9-1 橋梁交通振動研究小委員会経過・構造工学運営小委員会提出資料（川谷幹事）

9-2 低周波音の現状とその動向（話題提供者：塩田正純委員）

議事（司会：前田研一幹事）

1. 梶川委員長より開会の挨拶があった。

2. 第8回小委員会議事録の確認（林川俊郎幹事）

3. 「橋梁振動の計測と解析（仮称）」の講習会について、大島委員から概略説明があった。

4. 配布資料9-1に基づき、川谷幹事から構造工学運営小委員会に対する本小委員会の活動経過報告の説明があった。

5. 話題提供

低周波音の現状とその動向：塩田正純委員（飛島建設（株））

配布資料9-2に基づき、低周波音の現状、計測、評価、国内外の動向や問題点などの話題提供があった。低周波音の現状については、苦情件数の推移、低周波音の定義と現状の説明があった。苦情件数では、環境庁の最新のデータに基づく発生源と年度の苦情件数が示され、工場・事業場に比べて建設作業や道路交通が少ないこと、規制区域以外からの苦情があること、苦情件数が1974年や1980年に比べて少なくなっている。低周波音の定義では、発生源などにより未だ明確な定義は行われていないが、最近、周波数別に現象を評価するような低周波音（Low Frequency Noise：1～100 Hz）や超低周波音（Infrasound：0.1～20 Hz）が多く使用されている。低周波音の現状では、自動車、道路、橋梁の低周波音のスペクトル特性、超低周波音の発生源と発生現象、発生要因と防止対策が示され、周波数5 Hz付近の音圧レベル85dBあたりの木造建具のがたつきを防止する対策が必要であるなどの指摘があった。

低周波音の計測については、大型トラックが高速高架橋を走行した場合の測定例に基づき、測定法と波形分析が示された。計測法としては、例えば橋梁伸縮継手部での大型車両による衝撃音、発破や砲弾による衝撃音のような発生源となる衝撃音エネルギーの大きさによって測定方法が異なっており、また測定方法によっては的確にその現象を把握できないなど、標準化された測定方法の確立には現在至っていない。

低周波音の評価については、一般的な評価法、物理的評価と人的評価についての説明があった。一般的な評価では、影響（物理的、生理的、心理的）、測定（周波数重み特性や分析時間など）、対策（吸音、遮音、伝搬）の観点を総合した評価法が必要となるが、定量的な評価方法や予測手法に問題点も多く残っている現状では、地域住民の日常生活に著しい影響を及ぼさないことを評価目標として、そのための適切な対策を講ずるものとしている。

最後に低周波問題の国内と国際動向として、低周波音および超低周波音の評価に用いる周波数補正特性の INCE/JAPAN-1991 と ISO/DIS7196 に基づく ISO/DIS7176、2-1992 の最新の情報と考え方などの説明があった。INCE/JAPAN-1991 においては、LSL、LF1、G1、G2、ISPL の各周波数補正特性に対する研究成果に基づく特徴や考え方が詳細に示された。ISO/DIS7196 では G1 と G2 の周波数補正特性が示され、また ISO/DIS7196、2-1992 では G 周波数補正特性として 20Hz 付近をピーク点とする一つの基準レスポンス曲線で評価が行われつつあることが紹介され、今後各種の計測法や評価法も国際的に整合されていくようなことなどが指摘された。主な質疑応答は次の通りである。

(1) 低周波音の周波数と生理的現象の関係についての最近の動向はどうかの質問に対して、日大の町田先生、通産省の大飼首席研究官らが最近研究を活発に行っている。生理的影響については、現象としての因果関係が医学的に認められるようになってきたが、変動部分に対して、ピーク値や L_{90} 値など評価値が未だ確立されていないとの返答があった。

なお、町田先生と犬飼氏の研究文献は、遠藤委員の所に整備されている。

(2) 家屋がたつく現象と生理的影響とを同じ図面で表す成果はあるのかの質問に対して、山梨大学での研究成果としてはあるが、発生源が衝撃音か定常音かなどによって評価が分かれるとの返答があった。

(3) 橋梁交通振動に関する低周波音の計測評価において、測定法、周波数補正特性、測定点の有効でかつ適切な方法はあるのかの質問に対して、評価法については確立された方法がないため、現状での各種の評価方法を紹介したが、評価法の確立に向けて動いている状況である。また、適切な Weighting に対しては、道路交通の行政面での使用方法とも関係しており、現状では多くのデータの測定・蓄積と分析に基づき橋梁交通振動の低周波音問題に有効な方法を関係者が構築して行かざるを得ない。測定の官民境界については、道路交通の行政面として環境騒音は定まっているが、環境振動では定まっていないので、当面、関係部署で決まっている方法で測定を行い、その場合、可能であれば、振動、騒音、低周波音を同時に測定を行うことが必要であるなどの返答があった。

6. 活動経過

各テーマ毎に連絡幹事から活動経過が報告され、意見交換が行われた。

(1) 動的設計係数および橋梁交通振動解析 (連絡幹事：前田・本田)

約 100 編の論文文献以外に、土木学会の年次講演会概要集 (25 年分) を 5 年毎ごとに文献調査、文献リストの書式変更作業を次回の委員会までを目標に作業を行っている。

(2) 橋梁健全度診断 (連絡幹事：林川)

文献調査の分担者を増やして多くの文献を収集しており、健全度診断の内容に適合しているかどうかの度合いを 5 段階評価をして作業を行っている。

(3) 橋梁環境振動 (連絡幹事：加藤・川谷)

文献調査の作業を各自が進めており、サブテーマごとの文献収集や 2 年間の取りまとめ案に向けて文献抄録の作成や討議等の作業を行っている。

7. 委員の提案として、学会の事務局に本委員会の配布資料をファイレリングしたら、欠席委員に対して配布資料を郵送しなくても有効に活用できるとの提案があった。事務局の黛氏から、学会システムとして欠席委員には従来通り配布資料を郵送すること、3 年間文の資料のファイレリングは可能であることの説明があった。なお、この件については、学会事務局と幹事で前向きに検討していく。

8. 委員の交代

松田哲夫委員から緒方紀夫氏 (日本道路公団試験研究所) への委員交代の説明があり承認された。

その後、各 WG グループに分かれ作業内容が打ち合わされた。

9. 次回 (以降) 小委員会の開催予定

第 10 回委員会 7 月 23 日 (金) 13:30～ 於：土木学会会議室

第 11 回委員会 9 月 11 日 (土) 午前中 於：福岡 (場所未定、土木学会全国大会翌日)

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第10回）

日 時：平成5年7月23日（金）13：30～17：00

場 所：土木学会図書館会議室

出席者：梶川委員長，東，海野，遠藤，緒方，岡林，大島，神澤，川谷，河西（代 篠田），小林，佐々木（代 古田），佐藤（代 今野），塩田（代 小原），芝野，秋本，曾我，田所，戸松，津村，中島，夏秋，林川，藤澤，前田，山田，事務局 黛 以上28名，括弧内は代理。

配布資料：10-1 委員名簿・連絡先住所録(1993. 6. 23現在)

10-2 話題提供資料「鋼 I 桁橋支承部の疲労亀裂損傷解析」

10-3 WG(1)-1, 2 文献調査要領

10-4 活動テーマ「橋梁環境振動」のレジメ目次案

10-5 「橋梁振動の計測と解析」講習会のご案内

10-6 第11回橋梁交通振動研究小委員会のご案内

議事（司会：林川俊郎幹事）

1. 冒頭に梶川康男委員長より挨拶があった後，議事を開始。

2. 第9回小委員会議事録の確認。

修正意見はなく，原案どおり承認された。

3. 委員名簿・連絡先住所録の確認と委員交替，および，新委員の挨拶と自己紹介。

前回の小委員会で了承され，松田哲夫委員と交替した緒方紀夫委員（日本道路公団試験研究所）より挨拶と自己紹介があった。また，今回新たに，五瀬伸吾委員から神澤福男委員（建設技術研究所）への交替が提案され，了承されるとともに，神澤委員より挨拶と自己紹介があった。

4. 話題提供

「鋼 I 桁橋支承部の疲労亀裂損傷について」：曾我 明委員

配布資料10-2に基づき，鋼 I 桁橋支承部（ソールプレートと下フランジとの溶接部）に発生した疲労亀裂損傷の原因究明と補修・補強方法の決定を目的として，亀裂の詳細調査，実橋載荷試験，静的・動的（疲労）試験，疲労寿命解析などを実施した成果について，話題提供が行われた。本研究の結果，1）亀裂損傷の主原因は支承（咨）の回転機能の喪失による局部的な応力集中である。2）ソールプレートと下フランジの溶接部には降伏点レベルの引張り残留応力が存在し，これに，外力による高頻度の繰り返し圧縮応力が重なり，早期に亀裂が発生した。3）この疲労損傷部の補修・補強では，応力集中を緩和する補強および溶接ビードのサイズ，仕上げ，さらにスカラップ，材片端部など応力の不連続につながる構造詳細の回避が肝要である。などのことが解ったとの報告がなされた。

主な質疑応答は次の通りである。

①亀裂は支承部のみに発生したのか，また， G_2 桁に集中しているようだがその理由はとの質問があり，支承部のみであったこと，および，追い越し車線であったことが影響しているかもしれない

いことなどが回答された。

②沓は取り替えが望ましく、交通止めをなくとも行えたのではとの意見が出されたが、今回は総合的に判断して沓の修理に留めたとの説明があった。また、これに関連して、モリブデンの注入口、注入方法、注入量測定法などについても質問があった。

③交通量の増加を考慮した大型車数の換算による余寿命の算定日数が細かすぎるとはいかないかの指摘があった。

④新橋製作時に対処すべき点は何かとの質問に対し、下向き溶接とすることや、側面隅肉溶接のみにすること、ボルト構造にすることなどが考えられるが、製作工数や既製の沓との取り合いのこともあり、今後とも検討して行くべき課題であるとされた。

5. 「WG (1) - 1, 2 動的設計係数・橋梁振動解析」の活動状況について (前田研一幹事)

配布資料10-3に基づいて、文献検索はほぼ終了したことを受け、文献抄録 (土木学会論文集、構造工学論文集を中心に約70編)、および、文献目録 (土木学会年講演集を中心に約140編) を一太郎ソフトで作成するための作業分担を策定したことが説明された。また、文献抄録は、レジメの目次、内容をイメージしながら、フォーマットの最終案を今回のWGで決定することも報告された。なお、海外文献については、WGで別途協議することとされた。

6. 「WG (2) 橋梁環境振動」の活動状況について (川谷充郎幹事)

配布資料10-4に基づいて、詳細な目次案が説明されるところにも、各項目のサブ幹事である遠藤委員、戸松委員、夏秋委員より補足説明がなされた。問題はレジメのボリュームであり、総計20頁くらいであれば、断片的な記述となることは明らかであり、検討の余地が残されているとの指摘があった。この問題については、各WG共通の問題であり、記述内容の濃淡をどの程度にするかについて早急に整合させる必要があるとされた。

7. 「WG (3) 橋梁損傷・健全度診断」の活動状況について (林川俊郎幹事)

前回までで、文献検索をほぼ終了したが、振動要因による損傷として明確に区分することが容易でないことが説明された。これについては、疑わしきは罰するということを原則に対処することとし、現在、各損傷を箇所別にまとめるか、あるいは、橋梁別にするかを検討中であるとの報告がなされた。

8. 小委員会の成果品について (川谷充郎幹事)

当面、各WG当たり20頁程度のレジメの原案を12月を目標に作成することとし、その使い道や、報告会の開催、および、委員会報告としての論文集への投稿などについて鋭意検討していくことが提案され、了承された。なお、報告会の開催については、会告の関係もあり、より早期の対応が必要であることも付け加えられた。

また、梶川委員長より、レジメの特色、目玉となるものを部分的にせよ前面に出す事を考える必要があり、それを考え始める時期に来ていてのではないかと発言があった。これに対して、今後、各WGにおいて、目次案を策定して行く中で意見を交換して行くことが申合わされた。

9. 「橋梁振動の計測と解析」講習会の参加依頼と第12回小委員会開催の予告 (川谷充郎幹事)

配布資料10-5に基づき、橋梁振動研究会編「橋梁振動の計測と解析」(技報堂出版)の発刊とそれに関する講習会(10月28日、29日 於:野口英世記念会館)の開催について説明があり、各委員に対し講習会参加の依頼が行われた。

また、各委員の便宜を考え、当講習会の前日である10月27日に次々回の第12回小委員会を土木学会図書館会議室で開催することが予告、提案され、了承された。

10. 次回(第11回)小委員会、および、次回(第13回)研究会の開催予定 (川谷充郎幹事)

配布資料10-6に基づいて、「第11回橋梁交通振動研究小委員会」および「第13回橋梁振動研究会」を合同で、平成5年度土木学会全国大会（9月8，9，10日 於：九州産業大学）後の9月11日（土）9：00～12：00にホテル・ステーションプラザに於いて開催するとの説明がなされた。また、これに先立ち、前夜の10日（金）18：30～20：30に福岡ガーデンパレスに於いて懇親会を開催についても案内がなされた。

これに対し、委員会活動に関する実質的な討議の時間を確保し、レジメの目次案についての全体審議を行って欲しいとの提案があり、日程上、次々回（第12回）にはレジメの素案の審議を始める必要があることから、目次案の事前審議が不可欠であるとして了承された。なお、時間の配分、配置については、幹事団に一任された。

以上

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録 (第 1 1 回)

日 時：平成 5 年 9 月 11 日 (木) 9:00～12:00

場 所：ホテルステーションプラザ (博多)

出席者：梶川委員長、遠藤、大島、岡林、河西、加藤、川谷、神澤、小林、佐々木、芝野、
教本、津村、戸松、中島、夏秋、林川、藤澤、本田、松本 (曾我部)、宮崎、宮本、
山田、米田、以上 24 名、括弧内は代理。(なお、今回は、第 13 回橋梁振動研究会との
ジョイントで開催され、委員の他に 15 名の参加があった。)

配布資料：

11-1 話題提供資料「新浜寺大橋の振動実験」(話題提供者：西星匡博氏)

11-2 WG(3)活動テーマ「橋梁健全度」のレジメ目次案について (林川俊郎連絡幹事)

議事 (司会：川谷充郎幹事)

1. 冒頭に梶川委員長より挨拶があった後、議事を開始。

2. 話題提供

(1) PC 斜張橋の振動特性：鳥野 清 氏 (九州共立大学)

a) 吹上浜サンセット橋について上下部工の構造特性が示された後、起振機による振動実験、風によるケーブル振動の測定、固有値解析の内容が説明された。まず、振動測定では、季節風 (約 16～17 m/s) によるケーブル振動の最大加速度は 2827 gal (C-2 測点) が測定された。このケーブル振動の卓越振動数は、橋梁の固有振動数の 13～15 次振動に対応している。また、風雨 (約 12 m/s) によるケーブルのレインバイブレーションでは、317 gal (C-4 測点) の最大加速度が測定された。このレインバイブレーションの卓越振動数は、橋梁の 3～4 次固有振動数に対応している。その後、レインバイブレーションの制振対策として、粘性せん断型ダンパーがケーブルに設置された。PC 斜張橋は減衰が小さいため、起振機加振で精度の良い共振曲線を得るためにはピーク振動数の近傍で加振周波数のピッチを小さくする必要があり、本実験では 0.01 Hz ピッチで行った。減衰定数を算定する場合、この共振曲線からハーフパワー法で求める方法もあるが、減衰自由振動の良い波形があれば、その波形を用いて減衰定数を求めた方が精度的に良い値が得られるとの指摘があった。なお、減衰定数の振幅依存性については、現在検討中である。主桁を加振したときケーブルも振動するが、そのようなケーブルの減衰定数は、ケーブル自体の加振による値より多少大きい値を示す。

次いで、解析では、基礎条件として基礎頭部に地盤ばねを考慮した場合 (CASE1) と鋼管矢板井筒基礎を多質点系に置換し地盤ばねを考慮した場合 (CASE2) の両解析ケースによる固有振動数と実験値の比較が説明された。CASE2 での固有振動数は各振動次数とも実験値と良く一致しており、比較的深い基礎は多質点系に置換して上部工と一体として解析する必要がある。また、1 次振動 (面内と面外 1 次モード) と 2 次振動 (面外 2 次モード) が両 CASE で 2 倍程違う。これは、基礎と上部工とが連成する振動モードであり、そのような連成モードでは、解析上の条件の違いによって大きな差異が現れる。地震による動的応答解析では、大きな地震力として桜島地震のスペクトルを入力とされているため、主桁とタワー部でかなり大きな変位が計算された。

吹上浜サンセット橋の実験状況がビデオで放映され、起振機加振による主桁の鉛直や水平方向の振動が示された。特に、季節風による高周波のケーブル振動と低周波のレインバイブレーションの振動性状の相違が視覚的に示された。なお、同型式のこしき島大明神橋の振動実験風景のビデオも放映された。

b) 南田原 1 号橋について、まず逆 Y 型タワー、セパレート式二室箱桁断面の主桁、マルチタイプのケーブル、杭基礎と直接基礎、橋脚上に支承がないフロアディングタイプ、両橋合が滑り支承など構造的な特徴が示された後、振動実験と解析の内容が説明された。架設系における実験値 (常時微動測定) と解析値の固有振動数が比較された。また、CASE1 の基礎固定、CASE2 の杭とワーチング部に地盤ばねを考慮した解析が行われ、面外方向で CASE1 の値は実験値と差異が大きい、CASE2 の方は面内と面外方向とも良く実験値と一致している。完成系での実験値 (起振機加振：0.1～2 Hz) と解析値の固有振動数が比較された。解析では、地盤ばねを考慮した CASE1 と、タワーと主桁の間、の橋軸直角方向の変位を自由とした CASE2 の両ケースを考えた。この CASE2 は、設計ではその変位が拘束されているが、実際にはコンクリートの乾燥収縮により 2～3 mm 程の隙間が生じており、橋軸直角方向の振動モードが解析と実測では異なってくるためのモデルである。CASE2 は全体的に実験値と良く一致している。橋軸方向の固有振動数は、加振力が小さくて実験値が得られなかった。

一般的に、本橋はフロアディングタイプであるため、主桁とタワーの固有振動モードが分離する特徴があり、実験値と解析値とが良く一致する。減衰定数は、実験が未舗装時での値であるが、約

0.4～1%と通常のコンクリート橋梁に比べて小さい傾向がある。

質疑応答は以下の通り。①地盤ばねの方向性はどうかに対して、水平、鉛直、ねじれ方向に、地盤層ごとに節点を設けて入れている。②レインパイレーション時では主桁の振動を感じるかに対して、主桁の揺れはわずかに感ずる。③降雨時での測定法はどうしているのかに対して、ライトパイン車の中に計測装置を入れている。④吹上浜サンセット橋で面内と面外方向1次振動は別々の振動モードの中に入られる。⑤南田原1号橋の橋軸方向加振についてはどうかに対して、ジャッキの引張したものである。⑥南田原1号橋の橋軸方向変位の解放を実施したが、ジャッキにより主桁は2mm程引き力を100tfで鋼棒切断による橋軸方向変位の解放に戻らなかった。⑦起振機によるPC橋の加振限度についてはどこまでかに対して、基本的に振動数と変位で異なる。一事例として、60年経たPC橋で200gal程で加振した経験はあるがクラック発生まで至らなかった。一般的に、周波数が高い場合には200gal程、変位は10cm程。しかし、大振幅になると支承における境界条件が異なってくるので注意を要する。

(2) 新浜寺大橋の振動実験：西星匡博氏（(株)フジエンジニアリング）

わが国最長のバスケットハント型ニールセンローゼ桁橋である新浜寺大橋の振動実験と解析内容が説明された。まず、設計仮定値の検証、完成時の安全性・走行性の検証、維持管理用初期値収集の目的と振動実験の流れが示された後、実験内容、各計測センサーや計測システムなどが詳細に解説された。

振動実験では、起振機実験（起振機2台、2Hzまでの10次振動）、試験車走行実験（20tfダンプトラック車1～4台）、常時微動測定が行われ、各実験方法による固有振動数、振動モード、減衰定数などの動的特性値が比較検討された。車両走行実験で得た固有振動数は、起振機加振で得た値より大きい傾向が示された。これは、試験車両のばね上振動の影響と思われる。面内（橋軸・鉛直）振動モードより面外振動モードの方が低い振動数で多く出現しており、面内剛性に対して面外剛性が比較的小さいように思われる。減衰定数については、振幅依存性が認められ、また下弦材（対数減衰率で面内・面外：0.054～0.099）の方がアーチ部材（面外：0.007～0.009）より相対的に減衰が大きい。これは下弦材（床組）の2次部材によるクローンやヒステリシス減衰がアーチ部材より優勢に影響を及ぼしているものと思われる。本橋の減衰性は、支間長や固有振動数などの関係で他の既設橋梁の測定値とはほぼ同様な範囲内にある傾向を示している。

解析では、床組剛性の評価で4つのモデル化が行われ、解析モデルによる固有振動数と振動モードが実測値と比較検討された。その結果、床組を下弦材、板要素とした鋼床版、縦桁、高欄・中央分離帯（断面2次モーメントを50%考慮）としたモデル-3が実測値と良く対応している。また、各部材の1時間あたりの疲労損傷度を検討した解析内容も説明された。

最後に、新浜寺大橋の架設状況、実験内容などがビデオで紹介された。特に、固有振動数や振動モードに対する事前の解析値と実験値とをアニメによる比較を測定現場で行った事例が示され、両者の振動特性の比較によって、起振機の加振計画、各次振動モードの確認などに有効であったことが指摘された。

質疑応答は、以下の通り。①固有値解析における各解析モデルと振動特性の関係についてはどうかに対して、床組剛性（下弦材、鋼床版、縦桁、高欄、中央分離帯）に関して4つの解析モデルを考えて実測値との比較検討を行っており、モデル-3が実測値と良く対応している。高欄や中央分離帯を全断面有効としたモデル-4は最も大きい値を示し、これらの部材は全体動的特性に100%寄与していないようだ。下弦材、鋼床版ラテラルのみ考慮したモデル-1は、実測値と異なり面内対称1次モードが2次振動に出現するなど、床組の剛性評価が小さいようである。②吊材のケーブルは解析に考慮されているのかに対して、固有値解析のモデルでは考慮されている。

3. 第10回小委員会議事録の確認（林川俊郎幹事）

修正意見はなく、原案通り承認された。

4. 活動状況

WG(1)については本田連絡幹事からの報告と、WG(3)では配布資料11-2についての報告が林川連絡幹事からあった。また、川谷幹事から、各WGの目次案に沿って粗原稿を次回の委員会(10/27)までに提出して欲しいこと、委員会報告書の取扱いについては委員長と幹事で協議することが説明された。なお、委員会終了後、各WGごとに30分程の分団会議が行われた。

5. 本委員会の継続に関して

9月末迄に継続の手続きを行うこと、また委員の交代や新委員などについては委員長と川谷幹事まで通知して欲しいことなどが川谷幹事から説明があった。

6. 次回の第12回小委員会は、10月27日（水）13:30～、土木学会会議室にて開催。

以上

日時: 平成5年10月27日 (水) 13:30~17:00

場所: 土木学会土木図書館会議室

出席者: 東, 海野, 遠藤, 大島, 緒方, 岡村, 河西, 加藤, 川谷, 小林(畑中), 佐々木, 佐藤(今野), 塩田, 芝野, 田所, 津村, 戸松, 中島, 夏秋, 林川, 藤澤, 本田, 前田, 宮崎, 宮本, 山田, 米田, 以上28名。括弧内は代理。

橋梁振動研究会からオオブザーバ参加6名(岩本, 鳥野, 角本, 能登, 藤野, 松井)。

配布資料:

12-1 話題提供「斜張橋の振動-実験・実測・予測」に関わる資料(藤野陽三)

ケーブル・はりモデルを用いた斜張橋の内部共振に関する実験と解析, 土木学会論文集,

No. 432/I-16, pp. 109-118, 1991. 7.

Active Control of Cable and Cable-Structure System, Proc. 1st International Conf. on Motion and Vibration Control, pp. 170-175, Yokohama, Sept. 1992.

ケーブルの線形・非線形内部共振に着目した斜張橋の動特性と対風応答,

土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, I-246, 1992. 9.

木製斜張橋(用倉大橋)の振動実験,

土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, I-302, 1993. 9.

Keeping Cables Calm, Civil Engineering, ASCE, pp. 56-58, Oct. 1993.

Galloping of Tower-Like Structure with Two Closely-Spaced Natural Frequencies,

J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 32, pp. 189-198, 1989.

12-2 橋梁交通振動研究小委員会継続のお願い(構造工学委員長宛, 1993. 10. 13付)

12-3-1 WG(1)-1, 2: 「動的設計係数, 橋梁交通振動解析」のレジメ目次(案)について

12-3-2 同上, 文献リストのフォーマット

12-3-3 土木学会論文掲載の委員会報告の例「建設技術の研究開発と計算力学の役割」

議事(司会: 加藤雅史幹事)

1. 第11回小委員会議事録の確認(林川俊郎幹事)

原案通り承認された。

2. 話題提供 斜張橋の振動-実験・実測・予測: 藤野陽三氏(東京大学)

3. 本研究小委員会の継続について(川谷充郎幹事)

資料12-2に基づき, 本研究小委員会の継続申請がなされ, 10月13日開催の構造工学運営小委員会で審議され, 同日の構造工学委員会で継続設置が承認された旨の報告。

4. 活動経過

WG(1): 本田幹事より資料12-3-1, 2に基づき, レジメ目次案が説明された。

前田幹事より資料12-3-3の例の委員会報告を論文集にWGでも投稿したいとのこととて, 小委員会の中で分かれて投稿することの是非が議論された。

WG(2): 川谷幹事より, 第10回小委員会提出の目次に沿って原稿約1/3出来。

WG(3): 林川幹事より, 第11回小委員会提出の目次に沿って原稿約1/4出来。

なお, 委員会終了後, 各WGごとに約1時間の分団会議が行われた。

5. 次回の開催予定 第13回 1994年1月12日(水) 13:30~17:00 於: 土木学会会議室

6. その他 平成6年度土木学会全国大会の日程: 9月15~17日(木, 金, 土)

土木学会構造工学委員会 橋梁交通振動研究小委員会議事録（第13回）

日 時：平成6年1月12日（水）13:30～17:00

場 所：土木学会会議室

出席者：梶川委員長、東、遠藤、緒方、岡村、河西、加藤、神澤、川谷、小林、佐々木、佐藤（今野）、塩田、芝野、枚本、曾我、田所（池田）、津村、戸松、中島、夏秋、林川、藤澤、本田、宮崎、松本、山田、米田、事務局・黛、以上29名。括弧内は代理
橋梁振動研究会よりオブザーバー参加3名（岩本、田中、角本）

配布資料：＜資料番号なし＞・議事次第、第12回議事録

- ・尾川大橋パンフレット
- ・分団討議用のレジメ原稿

議 事（司会：本田秀行幹事）

1. 第12回小委員会議事録の確認（川谷充郎幹事）

原案どうり承認された。ただし、話題提供の概要が抜けているため、それを加えたものが改めて配布される予定である。

2. 話題提供 「交通荷重による橋梁振動の問題点と展望」：梶川康男委員長（金沢大学）

交通荷重による橋梁振動問題について、①道路橋振動と設計荷重、②道路橋振動と疲労、③高架橋と環境振動、④歩道橋と振動使用性、の4項目を中心として、数多くのスライドとOHPにより話題提供がなされた。

今後への対応として、高強度化・軽量化してきたコンクリート橋の振動、建設が増えてきた木橋の設計荷重（衝撃係数）、橋梁の疲労に対する振動の制御、環境振動に対する振動の制御、歩道橋（吊床版橋など）の振動使用性と振動制御、などがあり、特に、25 ton 荷重に対する対応、既存橋梁の改良に際して振動の面からの対応、などが検討すべき課題であることが指摘された。

3. 活動経過

2年間の活動のまとめとしてのレジメ原稿について、各WGの連絡幹事より状況報告が行われた。次回の研究小委員会をまとめた報告書（内部資料）の報告会とするため、各WGごとに完成原稿を取りまとめ、3月15日までに梶川委員長に提出することとなった。

委員会終了後、原稿のチェックや作成スケジュールについて、各テーマ毎の分団討議が約1時間行われた。

4. 次回の開催予定

第14回研究小委員会 4月8日（金）13:00～17:00 於：土木学会会議室

この第14回から研究小委員会の2期目に入るが、この委員会の場を1期目の活動成果をまとめた報告書の報告会とする。

以上

