

振動・騒音に配慮した鋼橋の  
使用性能評価に関する検討小委員会  
報告書

2011年9月21日(水), 22(木)  
土木学会講堂

土木学会 鋼構造委員会  
振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

土木学会 鋼構造委員会  
振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

(50音順, 敬称略, 2011年9月現在)

委員長	深田 宰史	金沢大学
幹事長	横川 英彰	オイレス工業 株式会社
委員	薄井 王尚	株式会社 フジエンジニアリング
委員	小幡 卓司	大阪府立工業高等専門学校
委員	金 哲佑	京都大学
連絡幹事	酒井 修平	中日本高速道路 株式会社
委員	塩田 正純	芝浦工業大学
委員	杉山 俊幸	山梨大学
委員	高田 基樹	三井造船鉄構工事 株式会社
委員	生田目 尚美	株式会社 ニチゾウテック
委員	二木 太郎	オイレス工業 株式会社
委員	浜 博和	株式会社 フジエンジニアリング
委員	原田 政彦	大日本コンサルタント 株式会社
委員	松本 泰尚	埼玉大学

## 目 次

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	
1.2 本報告書の構成	
第 2 章 活動内容	3
第 3 章 振動・騒音問題に対する測定方法（浜）	17
3.1 はじめに	
3.2 測定計画	
3.3 ヒアリング調査	
3.4 環境振動調査	
3.5 構造物挙動測定	
3.6 体感調査	
3.7 交通調査	
3.8 路面平坦性	
第 4 章 高架橋周辺において発生した環境振動問題の要因分析（深田）	38
4.1 はじめに	
4.2 各振動系の特性	
4.3 環境振動に及ぼす影響要因	
4.4 おわりに	
第 5 章 振動・騒音問題に対する対策方法（浜，高田，二木，横川，深田）	46
5.1 はじめに	
5.2 対策工の分類	
5.3 発生源対策	
5.4 伝播経路上対策	
5.5 受振点対策	
第 6 章 振動解析を用いた環境振動アセスメント（金，深田）	61
6.1 はじめに	
6.2 環境振動アセスメントの手順	
6.3 解析モデル	
6.4 静的解析による剛性の確認	
6.5 固有振動解析	
6.6 減衰特性	
6.7 車両走行による車両-橋梁系の応答解析	

6.8 地盤応答解析

6.9 低周波音解析

第7章 振動・騒音問題に対する評価方法（松本） 76

7.1 はじめに

7.2 環境基準・規制基準・要請限度

7.3 評価量

7.4 振動・騒音問題対応のための評価

7.5 おわりに

第8章 計画・設計，維持管理において配慮すべき点（酒井，原田） 81

8.1 はじめに

8.2 橋梁形式

8.3 床版

8.4 延長床版

8.5 ジョイントレス

8.6 支承

8.7 ジョイント構造

8.8 路面管理

括弧内 執筆者

# 1. 序論

深田宰史

振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会 小委員長

## 1.1 はじめに

大型車両が橋梁上を走行したときに橋梁から発生する振動・騒音に関する問題は、交通量、橋梁形式、立地条件等の様々な要因が複雑に絡み合い、解決を困難にしている。対策方法として、すべての問題に対して同じ方法を用いることはできず、現況の要因を分析し、コストや施工方法等の制約条件を考慮し、様々な検討を行うことによって最も効果のある対策方法を採用することが理想的であると考えられる。

しかしながら、これまでに行われた既設橋梁に対する振動・騒音対策において、様々なデータが蓄積されているにも拘らず、実際には諸事情により公表されないことが多く、別の事例に活かされず、同じ失敗を繰り返すこともある。また、十分な現況の要因分析や対策方法の検討を行わずに対策の施工を行っている現状も見受けられる。

このような状況に対して、これまでの「鋼橋の振動・騒音に関する環境負荷低減工法の評価検討小委員会（小委員長：杉山俊幸 山梨大学教授）」の活動成果を踏まえ、既設橋梁において振動・騒音問題が生じていた要因を分析し、それらをまとめることによって、有用な傾向を見出すことができ、さらに、それらの情報を提供することが重要であると考えた。

また、それらのデータをもとに、新設橋梁に対しては計画・設計段階において、既設橋梁に対しては供用期間において発生が懸念される振動・騒音を予測し、快適な橋梁周辺環境を提供できる使用性能を有した、橋梁の計画・設計および維持管理に活用できるような情報をまとめることが重要だと考えた。さらに、それらのデータを提供することが今後の振動・騒音問題に対する予防になるものと考えられる。

本小委員会では、性能設計へと移行しつつある状況において、振動や騒音問題を生じにくい新設橋梁を建設するための計画・設計段階で配慮すべき点を、また、供用中に振動や騒音問題を生じさせないための維持管理段階で配慮すべき点をまとめることにした。そのような項目が、将来的には使用性能に対する照査項目として活用さ

れるものと考えている。

本小委員会は、平成20年10月に活動を開始し、総勢14名で活動を実施してきた。鋼構造委員会により、1年間の活動延長を認めて頂き、3年間の活動期間でまとめた成果を本報告書としてまとめた。

また今回は、本報告会と同時に橋梁振動コロキウム2011を開催することにより、一般の参加者からの橋梁振動や維持管理に関連した研究情報の交流や討論を行い、お互いの計測技術や解析技術の向上を図ることにした。

最後に、本小委員会の活動を御支援下さった皆様方に深く感謝申し上げると同時に、本報告書が振動や騒音で苦しんでおられる方々のお役に立てられ、1人でも多くの方々が快適な生活を送られることを願っている。

## 1.2 本報告書の構成

本報告書は、全8章から構成され、測定からはじまり解析、評価までまとめている。以下に、各章の概要について紹介する。

第2章では、3年間の活動報告として、第1回から第11回までの議事録をまとめた。

第3章では、振動・騒音問題に対する測定方法について、測定計画に基づき、ヒアリング調査、環境振動調査、構造物挙動測定、体感調査、交通調査について詳述するとともに、路面凹凸の計測についても記載している。

第4章では、高架橋周辺において発生した振動・騒音および低周波音などの環境振動問題に対する要因の分析を行った。人体、車両および橋梁等の各振動系の振動数領域が近いことを示し、環境振動に及ぼす影響要因について事例を基にして分析している。

第5章では、振動・騒音問題に対する対策方法として、対策方法の分類をまとめるとともに、発生源対策、伝播経路上対策および受振点対策に分けて、それぞれの対策方法について事例を紹介している。

第6章では、振動解析を用いた環境振動アセスメントとして、環境振動アセスメントの手順を示し、それに基づいて、解析モデルの作成方法や静的解析、固有振動解析、車両走行による動的応答解析、地盤応答解析および

低周波音解析について詳述している。

第7章では、振動・騒音問題に対する評価方法として、振動・騒音および低周波音における現在の評価方法について紹介するとともに、今後の振動や低周波音の評価方法について提言している。

第8章では、計画・設計、維持管理において配慮すべき点として、橋梁形式、床版、延長床版、ジョイントレス、支承、ジョイント構造、路面管理に分けて、それぞれまとめている。

## 2. 活動内容

本小委員会の活動内容として、各回で行われた話題提供を中心に、審議事項を以下に紹介する。

### 第1回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成20年10月10日（金） 14：00～17：00

場 所：土木学会D会議室

#### 協議事項

##### 1. 委員会趣旨説明

委員長から、「振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会」における趣旨説明があった。要旨を以下にまとめる。

- ・前小委員会の活動成果を踏まえ、既設橋梁に対する振動・騒音対策の事例から問題を生じやすい橋梁の要因分析を行いたい。
- ・新設橋梁に対しては計画・設計段階において、また既設橋梁に対しては供用期間において発生が懸念される振動・騒音を予測し、快適な橋梁周辺環境を提供できる使用性能を有した橋梁の計画・設計および維持管理に活用できるような情報をまとめる。具体的には、新設橋梁に対しては振動や騒音問題を生じにくい新設橋梁を建設するための計画・設計・施工上の、既設橋梁に対しては供用中に振動や騒音問題を生じさせないための維持管理上の“使用性能項目（評価項目）”を構築し、それらを技術資料として刊行する。

##### 2. 委員の自己紹介

各委員から自己紹介と同時に各委員が考えた今後進めるべき活動内容（案）について述べられた。各委員の活動内容（案）の要旨は以下のとおりである。

###### <横川幹事長>

- ・設計時に振動騒音を予測するための手法を検討する。
- ・制御デバイスを採用する選択手法を検討する。
- ・実際に問題が起きている橋梁を見学して使用性能評価を検討する。

###### <薄井委員>

- ・統一された性能評価方法（設計照査方法、試験方法）の整備
- ・使用限界状態での定められた定量・定性評価方法の整備
- ・騒音・振動問題の要因分析（発生箇所、構造要因）の整理

###### <生田目委員>

- ・新たな評価手法の提案

###### <塩田委員>

- ・振動評価の再検討
- ・アセスメント評価手法の再検討

###### <松本委員>

- ・振動・騒音問題のデータベース化
- ・性能評価ガイドラインの提案（測定・予測・評価の各方法と手順の提案）

###### <高田委員>

- ・振動・騒音問題を生じにくい構造・生じやすい構造を分析する。

###### <原田委員>

- ・既設橋梁に対して、効果的な対策工法の調査（本音で評価）

- ・既設橋梁に対して、振動・騒音問題が生じた場合の対応マニュアルの整備（測定法など）
- ・新設橋梁に対して、振動・騒音問題を生じやすい立地条件を整理
- ・新設橋梁に対して、計画段階における振動・騒音の検討を必要とする条件の整理
- ・新設橋梁に対して、計画段階における振動・騒音の予測・評価方法の提案
- ・新設橋梁に対して、計画段階における振動・騒音対策工法の提案

#### <金委員>

- ・鋼橋の振動・騒音問題に関する要因分析
- ・鋼橋の振動・騒音問題に関する管理規準，評価基準

#### <小幡委員>

- ・低周期地盤振動発生メカニズムの解明
- ・モニタリングシステムの整備

#### <杉山委員>

- ・動的解析結果と実測結果の整合について

### 3. 今後の活動の進め方について

委員長から資料 1-1 および 1-2 に基づき、今後の活動内容（案）について説明があった。要旨は以下のとおりである。

- ①都市高速道路の管理者から、振動・騒音問題が生じている橋梁を対象とした調査を行う。
- ②統計処理により、振動・騒音問題を生じやすい橋梁形式，立地条件等の要因分析を行う。
- ③設計者が振動・騒音に関する使用性能評価をどのように行うのか検討する。  
（回帰式，予測式等を用いて橋梁直下での物理的尺度（指標）の提案）
- ④振動・騒音問題を起こしにくく，使用性能を満足できる橋梁の構造設計を検討する。

- ・①，②については，現在，手元に数例の事例はあるが，今後さらに事例を得られる可能性は低い。よって，今後の活動内容からは外すことにしたい。
- ・③に関して資料 1-2 に基づき，鋼構造物設計指針に記載されている使用限界状態の照査方法について説明があった。さらに，「6.5.3 動的解析を行う照査」部分について，振動・騒音に関して使用限界状態の照査（評価）を行いとの説明があった。
- ・具体的な手順として，車両および橋梁モデルの提案を行い，動的解析を行うことで，その評価を行いたい。これには，解析プログラムおよびシミュレーション例を添付する予定。
- ・対象は，鋼，PC，RC を対象とした道路橋とし，歩道橋（構造工学委員会 歩道橋設計ガイドラインに関する研究小委員会にて検討中）および鉄道橋は含めない。

これに基づき，委員会内で活発な意見交換が行われ，概ね，以下の方針で進めていくことになった。

- ・車両 1 台（ユニットパターン）（必要に応じて連行車両モデルも作成）が走行した時の橋脚下端または橋梁上での加速度（または速度）の評価を行い，制限値（参照値）を提案したい。この値は，受振点または受音点での評価値から様々な条件のもとで逆算した値とする（次回以降に薄井委員が方針を提案する予定）。
- ・当面は，振動問題に着手し，低周波音，騒音は順次行う予定とする。

## 第 2 回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成 20 年 12 月 5 日（金） 14：00～17：20

場 所：（株）フジエンジニアリング 会議室

### 協議事項

#### 1. 話題提供

原田委員から，資料 2-2-1 に基づき，車両走行による交通振動シミュレーションにより官民境界での地盤



振動に与える支承条件，路面凹凸高および段差量の影響について検討した事例を公表された．具体的な評価方法としては，橋脚下端の振動レベルを交通振動シミュレーションにより算出し，予測式を用いて基準点から予測地点までの振動レベルを算出している．

また，資料 2-2-2 に基づき，橋梁上を走行する大型車両により，側道を通行する歩行者が受ける振動使用性について検討した事例を公表された．具体的な評価方法としては，歩道部での速度応答の実効値を交通振動シミュレーションにより算出し，これまで提案されている振動限度値と比較することにより評価している．

以上の話題提供に対して，次のような質疑が行われた．

- ・ どの車両，どの路面凹凸を使うかによって得られる結果が異なるのではないかと？
- ・ 資料 2-2-1 のような検討を新設時に行うことはめったにない．
- ・ 振動規制法の要請限度値は統計処理を行った  $L_{10}$  値であり，車両 1 台走行の結果と比較できるのか？
- ・ dB 値の比較を比率で評価していることに対して，別の比較方法がよいのではないかと？

## 2. 今後の小委員会活動について

薄井委員から資料 2-3-1～資料 2-3-4 に基づき，車両が 1 台走行したとき（または複数台）の橋脚下端における加速度応答の限度値に関する評価方法を提案された．具体的には，受振点での要請限度値から予測式を用いて逆算することにより，橋脚下端付近の限度値を算出する．ここで予測式は（社）日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会が作成した INCE/J RTV-MODEL2003 を用いる．橋脚下端での評価値は，振動加速度レベルとし，橋脚下端での  $1/n$  オクターブバンドレベルで評価することを提案された．今後の方向性として，各オクターブバンドレベルでのレベル値に対する許容値（限度値）を算出することになる．

以上の提案に対して，次のような質疑が行われた．

- ・ 不規則振動であるため，車両 1 台走行の評価でよいのか？
- ・ 橋梁側の応答値を算出する方法としてプログラムの公開よりも簡易算定式の方がよいのではないかと？
- ・ 提案された評価方法は設計段階のどこで使われるのか？需要があるのか？
- ・ ライフサイクルコストに関連して振動による性能評価を経済性評価に盛り込めないのか？
- ・ 提案された評価方法において高架橋における前後橋脚の影響はないのか？
- ・ 共振の影響はどのように評価するのか？

なお，本小委員会においては，人間の感覚に対する新たな規制基準などを検討し，さらに受振点までの新たな振動伝播予測式の構築は行わないことを確認した．

今後の方針として，引き続き薄井委員に提案した評価方法に基づき，具体的な数値を入力して，計測事例との比較を行って頂くことになった．

また，橋梁側の応答値の評価方法として，次回までに簡易式の方針を検討することになった．具体的には，様々な橋梁（支間，単純連続等パラメータとして扱う）を原田委員（支承は横川幹事長）に設計頂き，委員長または金委員の解析プログラムを用いて簡易式の検討を行う予定である．

## 第 3 回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成 21 年 2 月 20 日（金） 14：00～17：00

場 所：土木学会 D 会議室

### 協議事項

#### 1. 話題提供

##### ① 高架橋周辺の環境振動問題に対する桁端ダンパーの適用

深田委員長から「高架橋周辺の環境振動問題に対する桁端ダンパーの適用」と題して話題提供があった．概要は次の通りである．対象橋梁周辺の家屋では，橋梁の低次振動と家屋振動との連成が原因であることが明らかとなった．そこで，桁端ダンパーを上下線の 1 径間に試験施工することになった．解析面からのアプ

ローチとして、車両走行シミュレーションを行い、高架橋に桁端ダンパーを設置したことにより、振動低減が解析上でどの程度あるのか、また、橋脚下端の支持条件（地盤条件）の違いにより、振動低減がどの程度異なるのか検討した。さらに、実橋では1径間に桁端ダンパーを試験的に設置したが、解析上で3径間に設置した場合、振動低減がどの程度異なるのか、その違いについても検討した。

## ② 耐震解析用汎用ソフトの解析結果と構造データを利用した車両-橋梁の連成解析

横川幹事長から「耐震解析用汎用ソフトの解析結果と構造データを利用した車両-橋梁の連成解析」と題して話題提供があった。耐震解析を行っている汎用ソフトから固有値および固有ベクトルを算出し、それらの橋梁データと車両データを用いてエクセル上のVisual Basicによりモーダル解析を行う解析手法について具体的に実演をしながら説明された。

## 2. 今後の小委員会活動について

- ・今後の小委員会活動として、資料 3-1 より、薄井委員から提案された方法（受音点での要請限度値から予測式を用いて逆算することで橋脚下端付近の限度値を算出する方法）を進めていくことについて再度確認した。
- ・前回の小委員会で議論された簡易予測式の作成について、下部構造および路面の扱いについて様々な議論が行われたが、結果的にどのように解析を行うのか結論がでないまま保留事項となった。今後、詳細を検討する予定である。
- ・金委員から、振動・騒音対策のコストについて調べてはどうかとの提案があった。それをまとめることにより、ライフサイクルコストを考えるうえで、最初から振動・騒音対策のコストをイニシャルコストとして付加させてもよいのではとの意見があった。酒井委員など具体的に業務に関わっている委員にヒヤリングする方向で検討する。
- ・振動・騒音に配慮した設計の提案という観点から、インテグラル化についてまとめたい旨の提案が深田委員長からあった。具体的なコストとインテグラル化による効果についてまとめる方針である。
- ・簡易式の作成としてシミュレーションを行うのではなく、対策効果の根拠づくりとしてシミュレーションを活用すべきとの意見があった。
- ・今後、維持管理に関して、振動・騒音に配慮した維持管理の提案および振動・騒音評価のための測定方法の提案についてもまとめることを確認した。

## 第4回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成 21 年 5 月 22 日（金） 14：00～17：00

場 所：オイレス工業（株）会議室

### 協議事項

#### 1. 話題提供

##### ① インテグラル橋の概要と振動使用性について

振動・騒音に配慮した構造設計の提案という観点から、インテグラル橋の概要と振動使用性について銭高組 秋山氏にご講演頂いた。講演概要を以下に列挙する。

- ・インテグラル橋（上下部一体構造）の利点は、伸縮装置、支承、落橋防止装置（支間が大きい場合）を省略でき、コストを低減できる上、維持管理費も削減できる。また、高次不静定となるため、耐震性能も向上する。
- ・ジョイントレスであるため、振動低減に寄与すると考えられる。
- ・英国および米国（一部の州）では、インテグラル橋を構造形式の選定における第一候補として挙げるようになっている。
- ・欧州では、冬期における橋台部の塩害対策としてインテグラル橋を採用している。
- ・主桁上での速度の実効値は、単純桁橋、単純桁橋+延長床版（3, 6, 10m）、セミインテグラル橋、インテグラル橋の順になっている。この順番は、車両進入時の衝撃力による影響であり、単純桁橋+延長床版（10m）、

セミインテグラル橋およびインテグラル橋など、ジョイントを橋梁の背面に移動させることは、車両進入時の衝撃力の伝播を緩和させることができるため、有効である。また、単純桁橋+延長床版（10m）、セミインテグラル橋およびインテグラル橋では、大きな差はない。この差が構造の全体剛性の差を示している。

- ・コストの比較ではセミインテグラル橋、単純桁橋+延長床版、単純桁橋、インテグラル橋の順で安価になるであろう。

## ② 鋼箱桁高架橋の低周波音の計測および解析の検討

金委員から、鋼箱桁高架橋の低周波音の計測および解析の検討と題して話題提供があった。概要は以下の通りである。

- ・鋼箱桁橋から発生する低周波音と主桁の加速度を実橋にて計測した。また、等価音圧レベルを用いて実測と解析で比較を行った。
- ・計測結果から径間ごとの振動特性と低周波音特性との相関が見られた。
- ・加速度および低周波音の応答値は、通行パターンによる影響を大きく受ける。
- ・振動対策として、TMDを複数設置する案を用いて解析した。

## 2. 今後の小委員会活動について

- ・今後の小委員会活動として、薄井委員から提案された方法（受音点での要請限度値から予測式を用いて逆算することで橋脚下端付近の限度値を算出する方法）を進めていくことについて再度確認した。
- ・1台の車両が橋梁上を走行したときの橋梁から発生する低周波音について解析上で再現できるのか検証する必要がある。検証できた段階で低周波音についても解析上での予測を地盤振動と並行して行いたい。
- ・振動・騒音対策について、これまでキールダンパーについてご講演頂いたので、次は主桁中央を下から支持する橋桁制振装置対策（住友ゴムグループ、SRIハイブリッド(株)）について扱いたい。そこで、次回の話題提供の候補としたい。

## 第5回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成21年8月31日（月） 14:00～17:20

場 所：土木学会C会議室

### 協議事項

#### 1. 話題提供

##### ① 上郷高架橋および刈谷高架橋に対する振動・騒音対策

上郷高架橋および刈谷高架橋において行われた、振動・騒音対策についてNEXCO中日本 畔柳氏と八千代エンジニアリング 篠氏にご講演頂いた。講演概要を以下に列挙する。

- ・当該地域での主な苦情内容は、低周波音（ジョイント音、スパン音）、地盤振動であった。特に低周波音は3Hz付近の物的苦情によるものである。
- ・振動・騒音対策として床版下面増厚、桁端巻立て、TMD・MMD、センターダンパー、桁下の支点まわりでの遮音壁の設置を行った。
- ・桁端巻立てについては、主桁巻立て(100mm)、RC増厚(230mm)を支点から10m区間行っており、効果があった。また、床版と端横桁との隙間は一体化するべきである。
- ・刈谷高架橋の前後径間はPC構造であり、ジョイント音がしない。刈谷高架橋は、鋼橋ゆえにジョイント音がする？車両の衝撃力に耐えられる付加質量が必要である。ジョイント付近のみコンクリート構造にしてはどうか？
- ・対象とする振動数がいくつあるのか？それに対する質量比が十分か検討のうえ、TMD、MMDの使い分けが必要である。構造物の固有振動数と加振振動数が近い場合、TMDの効果がありそう。
- ・センターダンパーは、2～3mm程度の主桁変位を制御するため油圧ではなくゴムを採用した。設置には主桁を多少上げ越している。地盤振動としての新たな発生源となりえるが、今回の場合では、周りの民家への影響はない。主桁振動を低減させるためには大きな効果があった。

## ② 振動・騒音に配慮した維持管理の提案

薄井委員から、振動・騒音に配慮した維持管理として話題提供があった。概要は以下の通りである。

- ・ 振動・騒音に配慮した維持管理項目として路面凹凸、段差が必要である。路面凹凸では、路面凹凸周期、凹凸の振幅、位置、わだちの形状や深さ。段差については段差量、位置が項目として必要。車両における加速度応答や分力を用いた管理でもよいのではないか。
- ・ 路面凹凸の評価方法として IRI や ISO があるが、IRI は評価長や解析手法が人により違いがみられる。また、段差付近の評価についてはさらなる検討が必要である。
- ・ 伸縮装置の破損、支承挙動の不全、舗装のポットホールなど何らかの劣化により振動・騒音問題が発生しているため、構造物の点検項目についても整理するべきである。例えば、どの部材の劣化によりどんな苦情が生じ、どのような補修が必要になるかなど。

## 第 6 回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成 21 年 12 月 22 日（火） 14：00～17：00

場 所：土木学会 C 会議室

### 報告事項

- ・ 鋼構造委員会に代理出席した原田委員から、“報告書をまとめるのか”との質問に対して、“まとめる予定である”と回答した旨の報告があった。
- ・ 連絡幹事の酒井委員から、土木学会委員会支援ツールサイトについての説明があった。これを用いることにより、報告書や会議資料を委員会内で閲覧できるとの報告があった。ID およびパスワードについては、後日、横川幹事長より各委員に連絡することになった。

### 協議事項

#### 1. 話題提供

##### ① ノージョイント化による鋼トラス橋の振動低減効果の検討

生田目委員より、“ノージョイント化による鋼トラス橋の振動低減効果の検討”と題して話題提供があった。講演概要を以下に列挙する。

- ・ 対象橋梁の周辺家屋から低周波音によるものと思われる物的苦情があった。受信側の卓越周波数は 12Hz, 18Hz であったが、特に 11Hz が大きく卓越していた。
- ・ 苦情原因は、伸縮継手部の段差を通過したときに、車両のばね下振動が加振され、その加振に伴って床組における 12Hz 付近の振動が励起して伝播することであった。横桁間隔が 10m 前後のトラス橋やアーチ橋では、この 10Hz 付近の床組振動が低周波音の苦情原因になっているケースが多い。
- ・ 対策方法としてヘキサロック工法 (<http://www.japacon.co.jp/sitemap.html>) によるノージョイント化が採用された。他にも延長床版工法が考えられたが、アプローチ部がトンネル区間になるため採用されなかった。

##### ② オイレス工業で行われた公開試験について

二木委員から、オイレス工業で行われた公開試験についての話題提供があった。TMD や MMD の仕組みについて動画により解説された。また、現在、MMD を設置している川崎高架橋についての作動状況について動画により紹介された。

#### 2. 今後の小委員会活動について

資料 6-4 に基づき、今後の小委員会活動について議論した。その結果、以下のような方針で活動することになった。

- ・ 解析的な制限値（参照値）の提案は、時間的に難しいため、今回は行わないことになった。
- ・ 振動や騒音に影響を与える要因（どんな苦情が生じ、どのような対策が行われたかも含めて）について、

文献からまとめる。原案を委員長が作成し、各委員がそれに加筆していく。また、その資料をもとにして設計上および維持管理上、どのような使用性能を評価することが望ましいのか検討する。

- ・ 振動試験により得られた実測データに対する評価方法について提案する（試験方法についても提案する）。
- ・ どのような解析を行えば事前に橋梁の応答を把握できるのか、その解析方法についての説明する（手法の整理）。事例として、ジョイントを延長床版化したらどのように応答が変化するか？床版厚や桁剛性を増すことによりどの程度応答が変化するかなどの解析事例を紹介する。

## 第7回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成22年5月28日（火） 13:00～17:00

場 所：日本建築学会 建築会館

### 協議事項

今回の小委員会は、「木質系住宅の振動障害の現状と問題に関するシンポジウム」への参加に振り替えたため、以下、シンポジウムの要約を記す。

#### 1. 環境振動評価の現状 （松本委員）

- ・ 国内外の環境振動に対する評価方法、規制法の説明。
- ・ 国内と海外では評価方法に差がある。
- ・ なお、現在国内で用いられている主な環境振動評価方法としては、振動規制法（1976）、建築物の振動に関する居住性能評価指針（2004）があり、国際的にはISO2631-2（2003）等がある。

#### 2. 木質系住宅の振動特性 （秋田県立大学 中村教授）

- ・ 木造住宅の計測結果に関する説明。
- ・ 水平方向の固有振動数としては、平屋10Hz、2階建て5Hz、3階建て3Hzであった。
- ・ 建設作業現場付近では加速度レベルはそれほど大きくない、鉛直方向の振動が卓越。
- ・ 鉛直方向の振動は、構造に関係なく、そのまま伝わるという説明があった。
- ・ 新幹線軌道付近では加速度が大きく、周波数帯も広い。
- ・ 道路交通による影響は1次モードだけではなく、2次モード付近（20Hz付近）にも卓越している。

#### 3. 木質系住宅の振動計測 （ベネック振動音響研究所 佐野氏）

- ・ 木質系住宅と軽量鉄骨住宅を用い、振動計測を行った結果が示された。
- ・ 床上での計測においては、床部材の質量が軽量であるため、人の体重により振動レベルが異なる場合がある。
- ・ 畳の上では計測が困難であるが、畳を除去した状況では計測結果が異なったことより、畳を設置した状況での計測が必要。
- ・ 木材は非線形材料であり、さらに、木材間の結合条件により剛性が変わるため、加振振幅により、卓越振動数が変化する。

#### 4. 木質系住宅の振動計測結果から見た環境振動評価 （芝浦工業大学 塩田委員）

- ・ 環境振動評価方法についての紹介。
- ・ 建築や土木、地質の分野で土質の内部減衰係数 $\alpha$ は、それぞれ異なって評価されているが（洪積層地盤、第1種地盤、N値10～30、 $\alpha$ 0.05～0.01は同様の意味である）、統合していくことができないか。
- ・ 近年は環境振動問題で住民側勝訴の事例が出てきており、住民側の判断がされていく可能性がある。
- ・ 各地の環境振動問題が発生している箇所の振動レベルが提示された。
- ・ 構造物には種々の違いがあるが（S造RC造、層数、床面積等）、住宅振動のレベルに対する人間の応答レベルの関係を明らかにして、その影響を評価できるようにすることが重要。
- ・ 一般性のある振動計測方法を提案することが重要。

質疑応答の中で、深田委員長から以下の質問があった。

その内容は以下の通りである。

Q：橋梁の振動に対する家屋側の閾値はどのように設定するべきか？

→ある値に限定するのではなく、性能評価指針のように周波数の関数でレベルごとに分けて示せばよいのではないか。

## 第8回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成22年7月29日（木） 14：00～17：00

場 所：京都大学 桂キャンパス Cクラスター C1棟315会議室

### 協議事項

#### 1. 話題提供

濱委員から、「振動対策の提案について」と題して話題提供があった。概要は以下の通りである。

- ・発生源対策として、路面補修、延長床版、制振装置、床版の上面増厚を行った事例について説明があった。
- ・受振点対策として、家屋側のサッシのガタツキを止める簡易な対策方法について説明があった。
- ・家屋側での振動評価方法の提案があった。定量評価として苦情に対応した評価を行うため $L_{10}$ ではなく $L_{max}$ で行う。振動苦情を訴えている住人の立会いのもと、振動を体感する場所で、該当する振動を確認してもらう。1/3オクターブバンドによる定性評価を行う（ $L_{10}$ 、 $L_{max}$ による評価では該当する振動数以外の卓越振動の影響が大きかった場合、誤って評価されてしまう場合がある）。さらに、1日における振動の体感頻度（対策前後）を算出する。アンケートによる評価は住民参加型として当該地域の理解が得やすい。

#### 2. 報告書の作成について

今後の活動として、来年8月までに報告書を作成する必要がある。内容は以下の通り。

- ① 振動・騒音問題が生じた橋梁を対象とした文献調査から振動・騒音問題を生じやすい要因分析を行う（各委員）。その要因分析をもとにして計画・設計において配慮すべきことを提案する（原田委員）。さらに、供用段階において、維持管理上、配慮すべきことを提案する（各委員）。
- ② 測定方法の提案として、振動・騒音問題が生じた際の測定方法を提案する（濱委員）。
- ③ 対策案としてのメニューを紹介する（濱委員）。
- ④ 評価方法として、以下の内容を提案する（深田委員長）。

「定量評価として苦情に対応した評価を行うため $L_{10}$ ではなく $L_{max}$ で行う。振動苦情を訴えている住人の立会いのもと、振動を体感する場所で、該当する振動を確認してもらう。1/3オクターブバンドによる定性評価を行う（ $L_{10}$ 、 $L_{max}$ による評価では該当する振動数以外の卓越振動の影響が大きかった場合、誤って評価されてしまう場合がある）。さらに、1日における振動の体感頻度（対策前後）を算出する。アンケートによる評価は住民参加型として当該地域の理解が得やすい。」

そこで、次回までに上記①を各委員1件、持ち寄ることになった。内容は、公表されている論文を用いてもよい。書式は全国大会の書式を使う（名前、所属部分はとる）。ページ数は2ページ以上とする。

## 第9回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成22年10月12日（火） 14：00～17：00

場 所：土木学会 講堂

### 協議事項

#### 1. 話題提供

話題提供として、各委員が持ち寄った事例に対して議論した。各委員の事例は以下の通りである。

- 深田委員長（資料 9-1）
  - 橋梁振動の測定を行なったところ、橋脚上で観測された加速度スペクトルが 3Hz 前後と、10Hz～20Hz で卓越している。
  - 対象家屋で計測された加速度スペクトルは、10Hz～20Hz で卓越、また音圧については、3Hz 程度でのスペクトルの卓越があった。
  - 音圧を 1/3 オクターブバンドレベルで見ても、3Hz 前後、10Hz～20Hz 前後での卓越があり、がたつき曲線との比較でも、大きく閾値を越えている。
  - 当該橋梁の 3Hz 前後の振動は、車両のばね上振動との共振、10Hz～20Hz 前後は車両のばね下振動との共振が考えられる。
  - 固有値解析を行なったところ、径間ごと同位相の振動モード形状を持つ振動があり、これが概ね 3-4Hz 程度であることから、低周波音として対象家屋に影響している可能性がある。
  - 家屋振動の振動レベルの卓越が 10Hz～20Hz となっており、橋脚下端で測定した加速度レベルと比較しても整合する。
  - 低周波音対策として、連続桁および単純桁の連続した高架橋の場合、3-4Hz 付近に同位相の振動モードが存在しないこと、2 次振動モード系が 10Hz～20Hz のばね下振動数領域に存在しないことが挙げられる。
- 濱委員（資料 9-2）
  - 実務上対応されている調査方法で、全体フロー、ヒアリング調査、予備調査、現地測定、データの分析などの方法について解説された。
  - 原因究明の手法として、ヒアリング調査が重要であり、郵送方式での反応から地域住民の問題意識が見て取れるとのことであった。
  - データの評価方法については  $L_{10}$  では評価できない（ $L_{10}$  という言葉を聞いただけで住民が怒り出す）ということであり、 $L_{max}$  や、その他の方法で評価する必要がある。
  - 低周波音は法律などで評価基準が無いので、道路環境研究所などから出ている値に基づき評価を行なっている。評価値として  $L_{p1/3oct}$  を求めていることが多い。
  - 騒音要因としては、走行音、マウラージョイントからの騒音、支点からの異音、ウェブからの放射音が挙げられる。対策としては、高機能舗装化、遮音壁の設置および嵩上げ、ジョイントの交換、裏面吸音板の設置などが挙げられる。
- 松本委員（資料 9-3）
  - 資料収集は、Jstage や土木学会のアーカイブから調査した。
  - 調査した論文の中で、この委員会の関係者のものを取り除くと、殆ど地盤振動となった。
  - この資料に基づく議論で、前委員会でメンバーであった竹宮教授の WIM であったり、空溝を用いたものであったりと、地盤振動でもある程度の対策がなされているが、効果的なものが少ないということであった。
  - この論文における振動要因が何であるのか？問題となっている周波数帯は何であるのか？を分析する必要がある。
  - 地盤振動に対する対策方法として、周波数帯との関係をもとにした対策メニューとしてこれらの対策方法を利用するとよい。
- 高田委員（資料 9-4）
  - 主桁のウェブから放射される振動に対する制振方法に関する報告であった。比較的成本が高いことなど欠点はあるが、制振効果はあるということであった。
  - デバイスによる質量付加と減衰層によるエネルギー吸収の両方から制振効果が得られる。
  - 実施事例についての説明があり、最初に伸縮装置の改良を行なってもなお、振動が生ずる場合、施工された例が多いとのこと。実績として、マウラーやマゲバーなどの伸縮により車両通過に伴う衝撃が大きい鋼床版箱桁形式での採用が多い。
  - 本制振方法と類似のマグダンパーを用いた工法で、桁の曲げ振動などの全体振動も低減できた事例があったので、このデバイスもその可能性がある。

・質量付加による効果を期待されたものにコンクリート巻き立てがあるが、コンクリートを巻き立てた場合、メンテナンスが困難である。

- ・ 二木委員（資料 9-5）
  - ・ 桁の 2 次モード（12.5Hz～15.0Hz）に着目した TMD を設置した。設置場所は、家屋側の音圧波形との関係から一番影響を及ぼしている 1 径間のみである。
  - ・ デバイスの説明と、実橋に適用された写真、簡単な計測結果に対する知見について説明があった。
  - ・ 高次振動モードに対する TMD の設置例が少なく、この例から TMD に対する考え方の見直しもあるのではないかとのことであった。
  - ・ 設置された場所は、前委員会（杉山委員長）で視察した場所でもあるので、もう一度行って、体感することも必要ではないかという意見もでた。
- ・ 横川幹事長（資料 9-6）

この資料は一種カタログ的な資料であるが、対策に対するメニューとして用いることが可能であるということであった。

原田委員から、本委員会の報告書について意見があった。

○これらの資料を系統的にまとめるのは難しい。それらのまとめ方について、何か考えられないだろうか。まとめ方の例として以下のようなまとめ方が考えられる。

○問題となる周波数帯でまとめてはどうか？

○橋梁形式ごと：例えば、支間長・桁の形式・地盤条件・路面条件などでまとめてはどうか？

○既設に対する対策か、新設する上での設計条件として取り入れるかで分ける。

まとめ方については継続的に審議することになった。

深田委員長が委員各位に参考文献リストの論文を配布することとなった。

また、ゴム支承については、横川幹事長がさらに調査を行なうことになった。

## 第 10 回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会

日 時：平成 22 年 12 月 14 日（火） 14：00～17：00

場 所：オイレス工業 会議室

### 協議事項

#### 1. 活動報告書について

これまでの議論をもとにして以下のような内容でまとめる提案があった。

- ①文献や事例調査からの要因分析をもとにして計画・設計、維持管理において配慮すべきことを提案する。
- ②振動解析によるアセスメント手法などを提案する。
- ③測定方法の提案として、振動・騒音問題が生じた際の測定方法を提案する。
- ④対策案としてのメニューを紹介する。
- ⑤振動・騒音問題に対する評価方法を提案する。

以下①～⑥について議論した結果をまとめる。

- ①文献や事例調査からの要因分析をもとにして計画・設計、維持管理において配慮すべきことを提案する。
  - ・ 計画・設計段階、供用段階にこだわらず、まずは事象ごとに分担する。
  - ・ 要因分析をもとにして大枠を決め、執筆を分担する。
  - ・ 内容は 2～4 ページ内でまとめる。
  - ・ 次回までに深田が提案できる要因区分をもう少し増やした上で、分担を再度決める。



- ・騒音に関する事項については、情報収集を行なうこととなった。

現段階では以下の分担とした。

#### <車両通行などの常時における支承挙動について>

弾性支承が振動問題となった例や連続桁端部を機能分離（鋼製）支承に変更した例も入れる。

--- 担当：横川幹事長，二木委員

#### <制振装置の選定について>

振動問題などが生じた際の制振装置の選定方法についてまとめる。

--- 担当：横川幹事長，二木委員

#### <Web から放射される音について>

これまでの室内実験や制振事例をもとにまとめる。

--- 担当：高田委員

#### <ジョイント位置の選定およびジョイントの選定について>

ジョイント位置の選定上配慮している点をまとめる。また、ジョイント機能や騒音に対する特性などをまとめる。杉山委員会の報告書2章や報告会 ppt ファイルをもとにしてまとめる。

--- 担当：酒井委員

#### <長波長，短波長の路面凹凸について>

路面凹凸が振動問題の原因になった事例とその評価方法をまとめる。 --- 担当：深田

#### <交通荷重について>

BWIM などから算出された交通荷重からの要因をまとめる。 --- 担当：深田

#### <コンクリート巻き立てについて>

端横桁や主桁の巻き立てによる対策の効果などをまとめる。畔柳さんの講演や論文をもとにコンクリート桁と鋼橋との掛け違い部で生じる振動についてまとめる。衝撃振動には有効との知見あり。ユーロコード？ AASHTO？では Web 振動から板厚が決まっている？

--- 担当：原田委員

#### ②振動解析によるアセスメント手法などを提案する。

振動解析を用いたアセスメントが必要な場合に標準的な解析方法をまとめる。

--- 担当：金委員，深田

#### ③測定方法の提案として、振動・騒音問題が生じた際の測定方法を提案する。

第8回および第9回で演委員に報告頂いた内容でまとめる。 --- 担当：演委員

#### ④対策案としてのメニューを紹介する。

第8回で演委員に報告頂いた内容でまとめる。 --- 担当：演委員

杉山委員会での報告書2章をもとにして書く。

#### ⑤振動・騒音問題に対する評価方法を提案する。

道路交通振動測定マニュアル（案）報告書（委員長：国松直 様）をもとにして、これまで委員会にて議論した内容を盛り込んでまとめる。 --- 担当：松本委員，塩田委員

## 第 11 回 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会 議事録（案）

日 時：平成 23 年 8 月 8 日（月） 14：00～16：00

場 所：大日本コンサルタント 大阪支社 会議室

### 協議事項

#### 1. コロキウム報告書について

○報告書部分の書式について説明があった。以下のようにする。

→表題と名前をつけるだけで、キーワードはつけない。

・報告書は、現在深田委員長がとりまとめを行っている。

→8 章については、現在未完であり、なるべく早くまとめるようにする。

○委員長より報告書内での確認事項があった

・8 章について

→図一表などで文字化けなどがあるのは修正する。

→床版連結は、地震時は連続。活荷重時は単純桁としている。（床版は地震力を伝える）

→連続桁の端部支承はどの方向に影響があるのか（鉛直たわみかせん断変形なのか）？

→2 次モードの影響とは、桁の 2 次モードか、床版の 2 次モードか？（昔の文献に合わせる）

・濱委員執筆部分（3 章について）

→MEM 解析は削除する。

→トラフィックカウンターの設置距離について（濱委員 確認）

→RD 法はそのまま載せることにする。

→加速度レベルについて訂正があった。

・5 章について

→埋設ジョイントは、支承は取り替えない。床版連結は支承を交換する。

→アクティブダンパーは首都高の事例がある。

→MMD についての記述を一部修正した。

→端部をゴム支承から機能分離支承にした例を調べる。阪高の基準？

（多径間連続橋梁の端部支承の処理について）

→コンクリート巻き立ての数値解析部分は本報告書では掲載しない。

・4 章について

→家屋の固有振動数が分かるものはないか・・・？（深田委員長）

→家屋（作り方により）固有振動数が分かる文献があれば欲しい。

→モジュラー型ジョイントは・・・ビーム型または支持型（ビーム式）と記載するのか？

・6 章, 7 章については執筆者に直接確認する。

#### 2. コロキウム開催に関する報告事項

○テキスト代は金沢大のベンチャー企業に依頼した（150 部）。

○アルバイトとして学生を 6 名程度、金沢大学から連れて行く予定である。

○基調講演は、金沢大学 梶川先生 北見工大 大島先生が初日午前中に行う。

（コロキウム開始 10:00～は既公表であり変更しない）

#### 3. プログラム編成

○プログラム編成は以下のように決定した

1日目 総合司会 小幡委員（大阪高専）（深田委員長から要請）

セッション1(9/21 13:30-14:45)

モニタリング センサー

(論文番号) 6 11 12 14 18

(座長：濱委員)

セッション2(9/21 14:55-16:10)

損傷・健全度評価

(論文番号)1 4 10 13 16

(座長：原田委員)

セッション3 (9/21 16:20-17:35)

損傷・健全度評価/振動・減衰特性1

(論文番号)23 7 8 9 15

(座長：深田委員長)

セッション4(9/22 9:00-10:30)

振動・減衰特性2/環境振動

(論文番号)19 21 22 24 29 5

(座長：高田委員)

セッション5(9/22 10:45-12:15)

環境振動

(論文番号)3 17 20 25 27 28

(座長：横川幹事長)

セッション開催にあたり、注意事項など

○タイムキーパーは アルバイトの学生にお願いする。

○発表用データは、休憩の間にPCに入れることにする。

○PCは学会所有のものをを用いる。

委員会報告（司会：薄井委員）

1から2章は委員会の活動報告なので省略。

3章 計測方法（濱委員）

4章 要因分析（深田委員長）

5章 対策（二木委員）

6章 アセスメント（金委員→深田委員長）

7章 評価（松本委員）

8章 配慮すべき点（酒井委員）

各章15分、質問は最後に時間が余ったとき or メールで個別に対応することとした。

#### 4. 懇親会に関する報告

○現在、参加者は23名（論文提出者集計）。委員各位には出席のお願いがあった。

○受付は金沢大学の学生がやることとなった。

## 5. コロキウム論文集制作に関する報告

- 報告書の締め切りは8月26日金曜日までに原稿を送付する。
- 論文は8月10日に引渡す予定である。CDのロゴはデザイナーに“橋梁振動研究会”のデザインをアレンジしていただいている。
- 26日までに深田委員長からpdfファイルが、各委員に送付されるので、内容等をざっとチェックする。

## 6. 参加者募集に関するお願い

- コロキウムの参加者募集を、各委員からもお願いする。

## 7. その他

- ・本小委員会会合は今回で終了となる旨の報告があり、ご参加頂いた方々に感謝の言葉が委員長からあった。

### 3. 振動・騒音問題に対する測定方法

浜博和\*

\*株式会社 フジエンジニアリング，調査設計部（〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28）

#### 3.1 はじめに

本章では、振動、騒音問題が生じた場合の測定方法について述べる。なお、振動・騒音は通常の場合、近隣住民からの苦情という形で具現化するが、必ずしもその原因が特定されているわけではない。したがって、その原因が騒音なのか振動なのかあるいは低周波音なのか明確でない場合があり、必要に応じて「振動測定」「低周波音測定」「騒音測定」を使い分け、これらを組み合わせて実施する必要がある。また、現象の原因を究明することが必要な場合には、発生源である橋梁側での測定を同時に実施する必要もある。

#### 3.2 測定計画

橋梁から発生する振動や騒音に対して調査を実施する場合、いくつかの目的が考えられる。たとえば、振動苦情があった場合に客観的に数値を評価して、その妥当性を検証する場合や振動原因を特定して対策工を立案する場合などである。したがって、測定計画の立案にあたっては、その目的に応じた内容とすることが求められる。

調査に求められる目的とそれに対する調査方法として概ね表-3.2.1に示す方法が考えられ、必要に応じて組み合わせることでよい。いずれにしても、測定計画が適切でないと必要なデータが得られないことや、不要なデータを収集してしまうなどがあり得るため、調査の目的を明確にし、それに対する測定計画が重要である。

表-3.2.1 測定の目的と調査方法の概要

目的	調査方法
現況の把握	ヒアリング調査
客観的指標の把握	環境振動測定
問題となる現象の特定	体感調査
振動原因の把握	構造物の挙動調査 路面調査 交通量・活荷重調査

一般的な調査の流れとしては、ヒアリング、調査の計画立案、現地調査の実施、測定結果の分析・評価、原因

の検討、対策工の検討の順に進む。なお、最初に実施するヒアリング調査の時点である程度詳細な内容まで聞き取ることで、調査範囲を絞ることができる場合がある。

ヒアリングの後、現地調査の計画を立案することになるが、一般に、橋梁を原因とする振動問題は、対象が広範で現象が複雑であるため、多数の測点を設けて大規模な測定になり、測定費用も高額になる。このような場合、簡易的な予備調査を行うことでスクリーニングを行い、調査範囲を絞ることも効果的である。

現地調査にあたって道路や河川の占有が必要な場合は、交通管理者や道路管理者、河川管理者との協議、許可を

平成 年 月 日

聞き取り調査データシート

- 1 対象家屋  
 氏名 \_\_\_\_\_  
 住所 \_\_\_\_\_
- 2 現象の確認  
 ①騒音 ②床面振動 ③サッシ等のがたつき ④身体的影響 ⑤その他 ( )
- 3 現象の発生頻度
  - 3.1 共通
    - (1) 発生頻度 ①常時感じる ②毎日感じる ③時々感じる ④その他
    - (2) 発生時期(いつごろから) ①昭和・平成 年ごろから ②きっかり
    - (3) 曜日の特性 ① 曜日に大きい ②特になし
    - (4) 時間帯 ① 時頃大きい ②特になし
    - (5) 身体への影響  
 ①目がさめる ②仕事や勉強に集中できない ③耳鳴り、頭痛 ④気分が悪くなる  
 ⑤その他 ( )
  - 3.2 騒音
    - (1) 音の種類 ①走行音(シャー、ゴー) ②衝撃音(ドン、ゴーン)  
 ③軋み音(ギンギシ、ミシミシ) ④その他 ( )
    - (2) 場所による違い ① 階が大きい ②特になし
  - 3.3 振動
    - (1) 振動の種類 ①連続的 ②1～2秒の振動を断片的に ③瞬間的、衝撃的振動 ④その他
    - (2) 振動の大きさ ①強く ②はっきり ③わずかに ④なんとなく ⑤その他
    - (3) 振動方向 ①上下方向 ②水平方向 ③上下と水平 ④方向はわからない
    - (4) 振動の種類 ①ゆらゆらゆっくり ②ぶるぶる細かく ③下からの突き上げ ④その他
    - (5) 場所による違い ① 階が大きい ②特になし
  - 3.4 サッシのがたつき
    - (1) がたつきの種類 ①窓や戸ががたつく ②家具のがたつき ③その他
    - (2) がたつきの種類 ①パタンと大きく ②びりびり細かく ③その他
    - (3) 場所による違い ① 階が大きい ②特になし
    - (4) 特になし ①特になし ②特になし ③特になし ④特になし
- 4 その他  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

図-3.3.1 ヒアリングシートの例

受ける必要がある。また、測定時に電源が必要な場合、住宅街では発電機の使用は困難であるので、予め電源を確保するか、あるいはバッテリーで稼働するシステムを構築しておく必要がある。

### 3.3 ヒアリング調査

ヒアリング調査は、沿道住民等に直接聞き取ることでその現象の概要を把握するもので、場合によってはその範囲も知ることができる。ヒアリングで聞き取る内容としては、①条件（年齢、性別、建物の構造、築年数、持家借家の別等）、②問題となる現象の内容（床面の振動なのか、建具や家具のがたつきなのか、音なのか）、③現象による影響（睡眠妨害、心理的障害、生理的障害）、④発生頻度（発生時間帯等を把握）、⑤発生箇所などが考えられる。ヒアリングの際には、図-3.3.1に示したヒアリングシートを用意して、記入してもらうか、または聞き取りながら記入するとよい。

実施方法は電話で聞き取る方法、訪問して聞き取る方法、ポストに投函してして郵送してもらう方法等がある。対象家屋が少ない場合は、訪問して聞き取ることが最も望ましいが、現象の範囲を把握することが目的である場合は、ポスト投函の方が経済的に有利である。ただし、過去に実施した調査の実績では、回収率は20～30%程度であった。なお、このようなアンケートを行うことは、必要以上に騒音や振動の問題を認識させてしまう可能性は否定できないが、大規模な環境対策事業を行う場合等その事業の必要性を認識してもらうことで理解が得やすい場合もある。

以上に示したヒアリングの結果を参考に、測定範囲、測点の配置、測定時間等の調査計画を立案するとよい。

### 3.4 環境振動調査

環境振動調査は、主として振動や騒音等の物理的な現象を客観的に数値で評価するためのもので、ここでは騒音や低周波音も含めて環境振動測定という。環境振動のうち地盤振動の測定は、振動規制法が制定されるまでは国として統一した基準や方法は定められておらず、地方自治体が条例で独自に基準や測定方法を定めていた。このため、自治体間で測定値の比較ができない状態であった。昭和51年に国の法律として振動規制法が制定され、工場・事業場や特定建設作業、道路交通振動に対する測定方法ならびに、それぞれに対する規制基準等が設定された。その後、昭和56年に振動規制法による測定方法を考慮してJIS Z 8735が制定され、以後の振動測定の基本となっている。

同様に、騒音の測定は騒音規制法あるいはJIS Z 8731に準拠して行うのが一般的である。なお、騒音に対する基準値としては騒音規制法で定められている基準等（要

請限度）のほか、「人の健康の保護及び生活環境の保全のうへで維持されることが望ましい基準」として環境基本法に基づいた環境基準値が設定されている。

低周波音については、現在のところ法的な根拠に基づく基準値等は設定されていないが、平成12年に環境省から「低周波音の測定に関するマニュアル」ならびに「評価指針」が示されている。

いずれの測定結果も単位はdBで評価するが、騒音と地盤振動では測定する物理量が異なるため直接比較することはできない。

#### 3.4.1 測定機器

##### (1) 振動レベル計

環境振動評価を目的とした地盤振動測定には、JIS C 1510に準拠した振動レベル計を使用するのが一般的である。振動レベル計は、圧電型の加速度センサーを応用したもので、ひとつのセンサーで鉛直方向の他に水平2成分の測定が可能である。

振動レベルは、測定した振動加速度に対して振動方向に応じた体感補正を行い、対数尺度で表したものであり、式(3.4.1)により表される。また、体感補正を行わずに対数尺度で表したものを「振動加速度レベル」といい、「振動レベル」とは区別している。

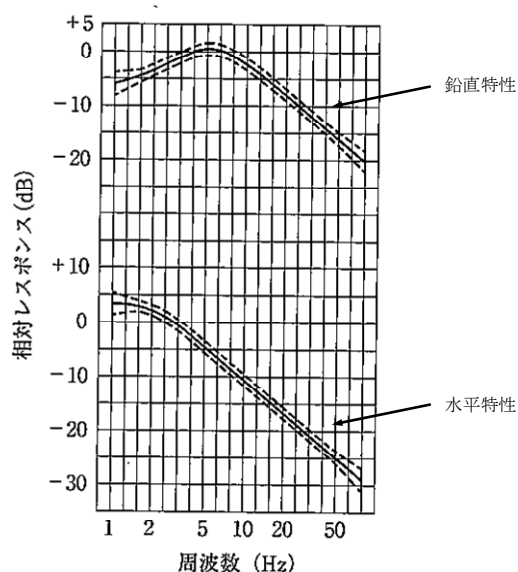


図-3.4.1 振動特性の基準レスポンスと許容差

$$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (3.4.1)$$

ここに、 $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ である。

##### (2) 騒音計

測定にはJIS C 1509に準拠した騒音計を使用するのが一般的である。騒音計は、音波による微弱な圧力変化を

を電気信号に変換し、人体の聴感にあわせた周波数補正 (A 特性, 図-3.4.2 参照) を施した後, その実効値を「騒音レベル」として指示計またはデジタル表示部に指示または表示されるものである. なお, 聴感補正を行わない測定値は「音圧レベル」といい, 騒音レベルとは区別されている. 圧力の音圧レベルへの換算は式 (3.4.2) を用いる.

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (3.4.2)$$

ここに,  $P_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$  である.

騒音計は, 計量法で普通級と精密級に分類されているが, 通常の騒音測定で使用するものは普通級である. 騒音計に用いられるマイクロホンは, 無指向性の圧力形で, その形式にはコンデンサ (静電) 型, セラミック (圧電) 型, ダイナミック (導電) 型があるが, 現在はコンデンサ型が主流である. なお, 騒音計は特定計量器であり, 取引上または証明上の測定に用いる場合は, 国の指定機関による検定を受けた騒音計を使用する必要があるが, 実験や研究に用いる騒音計に検定の義務はない.

近年の騒音計は, 測定結果を演算する処理機能を内蔵し, 処理結果をメモリに記録できるものや大容量のメモリーカードを内蔵し, レベルの瞬時値を連続的に記録できる機種もある.

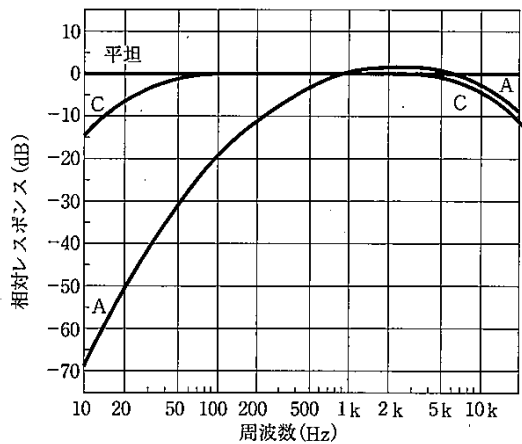


図-3.4.2 騒音計による周波数補正特性

### (3) 低周波音レベル計

現在のところ低周波音レベルを測定する機器に対する JIS 規定は制定されていないが, 測定する物理量は騒音と同じ圧力変化である. ただし, 低周波音として取り扱う周波数範囲が 100Hz 程度までと低いことから, マイクロホンにセラミック型を使用しているものが多い.

音圧レベルへの換算は騒音と同じ式 (3.4.2) で行うが, 人体感覚特性を評価するための周波数特性として ISO-7196 で規定されている G 特性 (図-3.4.3 参照) を

用いて評価することがある.

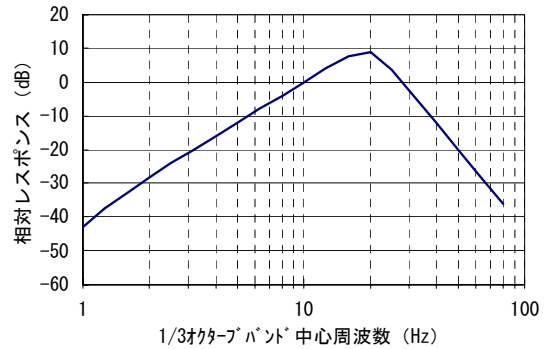


図-3.4.3 低周波音の周波数補正特性 (G 特性)

### (4) レベルレコーダー

振動, 騒音, 低周波音レベルを連続的にアナログで連続的に記録する場合, レベルレコーダーを使用する. レベルレコーダーの仕様については JIS C 1512 で規定されている. レベルレコーダーの記録範囲は, 100mm の用紙幅で 50dB の等間隔目盛になっているものが一般的であるが, 近年では複数点同時に記録できる機種もある. なお, 前述したとおり, 近年では騒音計のメモリーカードに測定記録を残すことが多く, 原因究明が必要な測定の場合, 測定値とイベント情報を同時に記録できるため, 大変便利である.

### (5) 記録器

測定の目的により, 騒音の周波数分析を要する場合, 騒音計の出力信号を録音することがある. 記録器としては, 従来はアナログ方式のテープレコーダ (周波数範囲が 50~8kHz, ダイナミックレンジが 45dB 以上) を用いていたが, 近年では DAT (Digital Audio Tape) を用いており, 周波数範囲は 20~20kHz, ダイナミックレンジも 80dB 以上の性能が得られる.

### (6) 周波数分析器

周波数分析は, 目的によって, オクターブバンドレベル周波数分析と FFT 分析が使い分けられている. 前者は主に定比幅のバンドパスフィルタ (1/1, 1/3, 1/N オクターブバンド) を使用し, 主に感覚量評価を中心とした周波数分析に使用される. 分析に使用するオクターブバンド周波数分析器は実時間分析器ともいわれ, JIS C 1513 で規定されている. 実時間分析器は, 通常各バンドレベルフィルタの出力 (バンドレベル) がデジタル化されたものしか得られないため, レベルレコーダーのようなバンドレベルの時間変動を知ることができない. バンドレベルの時間変動が必要な場合は, 分析器のメモリ機能を使用する. 近年ではパソコン上で実時間分析ができる機種もある. 一方, FFT は高速フーリエ変換により周波数

分析を行うもので、主として物理的な評価を行う場合に使用するものである。分析器としてFFTアナライザのような専用器もあるが、近年では、測定値をデジタル化してパソコンで処理することが多い。

### 3.4.2 測定方法

測定方法ならびに測定時の留意事項は、測定項目によって異なるため、地盤振動、騒音、低周波音に分けて概説する。

#### (1) 地盤振動

##### a) 測点配置

測点の配置は、測定の目的に応じて適切な箇所を選定することが重要である。法的な基準値（要請限度や環境基準）に対する評価が目的である場合には官民境界の地盤上での測定が原則である。また、振動問題の現象確認や原因特定が必要な場合には現象が発生している箇所や場合によっては発生源近傍で測定することが必要である。

##### b) ピックアップの設置方法

ピックアップは、その設置方法によっては誤差を生じることがあるので、以下のような注意が必要である。

- ① 緩衝物がなく、十分に締固め等が行われている強固な場所
- ② 傾斜および凹凸がない水平面を確保できる場所
- ③ 温度、電気、磁気、風などの外因条件の影響を受けない場所

なお、測定の対象となる現象のある時とない時の指示値の差が10dB未満の場合は、暗振動の影響を補正する必要がある。また、指示値の差が3dB未満の場合は正確な測定ができないことから設置場所の変更を検討する必要がある。

また、家屋内で測定を行う場合には、畳やカーペットの有無、床組の状態、荷重の状態等によって応答が変化することがあるため、建物の構造等を検討したうえで慎重にセンサーの設置箇所を決定する必要がある。

##### c) 測定方法

測定の方法は、目的によって、①統計処理結果のみを記録する方法、②時系列のレベル波形を記録する方法、③レベルに換算する前の加速度応答を記録する方法等がある。

①の方法であれば、測定後のデータ処理はほとんど必要ないが、時刻歴の変化を詳細に知ることはできない。②の方法では、データ処理の段階で統計分析や波形観察による評価が必要となるが、振動の時間的な変動を観察することができるため、より詳細な分析が可能である。さらに③の方法の場合、加速度応答をレベルに換算した上でデータの分析を行う必要があり、最も煩雑な作業が必要であるが、周波数分析などさらに詳細な解析が可能と

なる。いずれの測定においても、測定時に体感補正の有無を選択できるので目的に応じて設定するとよい。なお、①②の方法では、データの分析段階で体感補正を変更できないので、その設定については測定時に十分に注意する必要がある。

測定値をレベルレコーダーに記録する場合、測定前には校正信号により、機器の感度を調整する必要がある。また、レベルレコーダーのペンの動特性は時定数0.63秒に設定する。測定時には、日時ならびに測定レンジ、測定方向、紙送りの速度、気象条件、通過車両の種類その他測定結果に影響を与えるような事象があった場合にそれらを記入する。

##### d) データの整理

JISでは振動レベルの評価を次のように行うことを定めている。

- ① 測定器の指示値が変動せず、または変動が少ない場合はその指示値とする。
- ② 測定器の指示値が周期的または間欠的に変動する場合には、その変動ごとの指示値の最大値を10個以上平均した値とする。
- ③ 測定器の指示値が不規則かつ大幅に変動する場合には5秒間隔ごと100個、またはこれに準ずる間隔、個数の測定値の80パーセントレンジの上端の値とする。

道路交通振動の場合は、このうち③が該当する。法的な基準値に対する振動レベルは、通常5秒間隔ごと100個のデータから80パーセントレンジ上端値( $L_{10}$ 値)で評価するため、振動規制法に定められている基準値も $L_{10}$ 値が比較対象となる。しかし、環境省の調査によれば、近年振動苦情が発生している箇所における $L_{10}$ 値が基準値を下回っている事例が多く報告されており、必ずしも $L_{10}$ 値が振動の状態を適切に評価していない現状を示唆している。このようなことから、データ整理にあたっては、 $L_{10}$ だけではなく $L_{max}$ (最大値)の大きさやその発生頻度に着目した整理も必要であると考えられる。

##### e) 測定上の留意点(家屋の振動増幅<sup>1)</sup>)

地盤振動は、地盤から家屋に伝播する仮定でその振幅が大きくなる可能性があることが知られている。図-3.4.4は、我が国の平均的な家屋構造である木造家屋の板の間と地表面との振動の関係を環境庁(当時)のデータを示したものである。-10(減衰)~+15(増幅)に分布しているが、累積度数が50%を示すのは、ほぼ+5dBである。

同様に、図-3.4.5に示したコンクリート造家屋の振動も含めた場合のデータをみると、床面加速度は最大5倍に達する例もみられるが、平均的には5dB(1.8倍)程度を考えればよいとしている。

以上のように、家屋内での振動は地表よりも大きくなるのが一般的であり、特に水平方向には振動の増幅が



大きいことがある。このような家屋による振動増幅特性は家屋の構造、階高、地盤の状況、加振周波数等によって大きく異なるため、家屋内での測定に対しては十分に注意する必要がある。

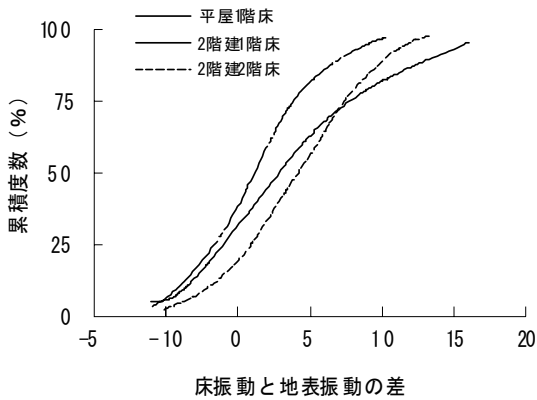


図-3.4.4 木造家屋の板間と地表振動の関係

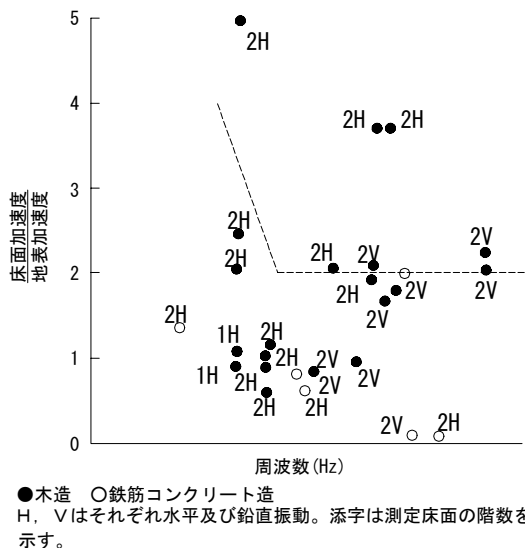


図-3.4.5 木造、コンクリート造家屋の振動増幅量

#### f) 測定上の留意点 (距離伝播特性<sup>2) 3) 4)</sup>

振動源から入力した振動は、波動となって一様な性質の地盤を伝わっていく過程で、その距離とともに徐々に小さくなりやがて消滅する。これを距離減衰という。距離減衰は、幾何減衰(伝播する距離にしたがって波面の表面積が大きくなり単位面積当たりのエネルギーが減少するもので、球面状に拡散する場合は距離の2乗に逆比例する)と内部減衰(地盤粒子の動きによる減衰)で説明される。実際の距離減衰の実測事例では、振動源に極めて近い場所を除くと、概ね数十mまでの範囲では距離の2乗に逆比例、すなわち幾何減衰の影響が大きく、50m程度を超えると急激に減少することが多いといわれている。しかし、地盤が一様でない場合は必ずしも一定の距離減衰を示さないことがある。例えば、強固な地盤上で表層が軟弱地盤で構成される地盤の場合、橋梁の基礎構造によっては、地表と地中の地層境界面の加速度振幅比

が交互に入れ替わり、単純な距離減衰を示さないことがある。この結果、振動源の近傍よりも遠方の振動レベルが大きくなる現象や、50mをはるかに超えた遠方でその影響が観察されるケースもある。このようなことから、測定にあたっては、距離減衰特性を評価できるような測点配置が望まれる。

## (2) 騒音

### a) 測点配置

環境基準あるいは要制限度に対する満足度の評価を行う場合、個別の住居等が影響を受ける騒音レベルによることを基本とし、道路に接して住居等が立地している場合には、道路端(交差点部を除く)に測点を配置する。道路から距離をおいて住居等が立地している場合には、住居等に到達する騒音レベルを測定できる箇所を対象とする。旧環境基準においては、地上1.2~1.5mでの測定を原則としていたが、新基準の適用についてはこれにとられず、個々の住居等の存在する階で測定することが適当であると考えられる。また、騒音問題の現象確認や原因特定が必要な場合には、その発生源近傍で測定することが重要である。

### b) マイクロホンの設置方法

騒音測定で使用するマイクロホンは無指向性である。無指向性マイクロホンはあらゆる方向からの音圧に対して等しい感度を持つマイクロホンであるが数千Hz以上の高い周波数になると指向性を持つので注意が必要である。マイクロホンは三脚等を用いて所定の高さに設置するが、地上高が高い箇所への設置にあたっては伸縮性のアルミポール(旗竿)等を利用するとよい。マイクロホンに風が当たると雑音が発生するため、これを防止するために防風スクリーンを設置するが、これにより周波数レスポンスが変化することがないように、必ず製造業者が指定する防風スクリーンを使用する。

マイクロホンは、反射音の影響を避けるため地表面から1.2m以上の高さとし、建物の壁から1~2m程度離して設置する。屋内で測定する場合には、壁などの反射面から1m以上、床面から1.2m以上離し、騒音の影響を受けている窓から約1.5m離れた位置にマイクロホンを設置する。

### c) 測定方法

騒音の測定方法は、原則としてJIS Z 8731に準拠して行う。なお、平成10年に「騒音に係る環境基準について」が告示(環境庁告示第64号)され、それより以前の基準とは異なっている。新たな環境基準に適合した測定方法が、平成11年に環境庁から「騒音に係る環境基準の評価マニュアル」を参考にするとよい。

測定値をレベルレコーダーに記録する場合の注意点は振動レベルと同様であるが、自動車騒音を測定する場合

のペンの動特性は時定数 0.1 秒 (FAST) に設定する。

#### d) データの整理

騒音規制法では、対象となる騒音の時間的変動によって次のように算出することとしている。

- ① 定常騒音：騒音の変動幅が 5dB 以下の場合、指示値の変動の平均を読み取る。
- ② 間欠騒音：騒音計の指示値が周期的または間欠的に変動し、その指示値の最大値が概ね一定の場合には、その変動ごとの指示値の最大値の平均値とする。
- ③ 変動騒音：騒音計の指示値が不規則かつ大幅に変動する場合には測定値の 90 パーセントレンジの上端の値とする。
- ④ 等価騒音レベル：環境基準値や要請限度に対する測定の場合、評価値は等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  とする。時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの時間  $T(\text{sec})$  における等価騒音レベル  $L_{Aeq,T}$  は、次式により算出されるが、通常の場合積算・平均形騒音計により算出される。

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right\} \quad (3.4.3)$$

ここに、

$P_A(t)$  : 対象とする騒音の瞬間  $A$  特性音圧 ( $Pa$ )

$P_0$  : 基準音圧 ( $20\mu Pa$ )

#### (3) 低周波音

低周波音の物理的な現象としては、騒音と同じ空気の圧力の変動が伝播したものである。ただし、騒音の周波数範囲が可聴域(20~20000Hz)を対象としているのに対し、低周波音は 100Hz 以下の周波数の低い音波のことをいう。国際的には 1~20Hz を超低周波音、20~20000Hz を可聴音というが、低周波音として厳密な定義はなされていないのが現状である。

#### a) 測点配置

低周波音による影響として、人体に対する生理的、心理的なものと、建具やサッシ等のがたつき等に代表される物理的なものがあげられる。人体に対する生理的、心理的な影響としては、直接的に低周波音を知覚して不快に感じたり、圧迫感・振動感を与えたり、また睡眠に影響を及ぼすことがあるとされる。このような現象は主として居住する空間で発現するものであるため、測定は屋内で行うことが望ましい。一方、外壁のサッシ等のがたつきが問題になる場合には、屋外で低周波音の影響をうけていると考えられる場所を対象に測点を配置するとよい。低周波音の発生源あるいは発生原因の検討が必要な場合には、推定される発生源近傍ならびに距離減衰を確認するための測点を設けることが望ましい。

#### b) マイクロホンの設置方法

マイクロホンの設置方法は概ね騒音の場合と同じであるが、低周波音が長距離を伝播する際には、地表面や気象による影響を受けやすい。特に大型の構造物や谷間のような地形では思わぬ場所からの反射の影響を受けたり、定在波が生じたりするため、そのような影響がないか確認が必要である。また、低周波音は風の影響を受けやすく、低周波音のレベルが低いほど、また周波数が低いほどその影響は大きくなる。このため、測定時には騒音測定よりも大型(直径 20cm 程度)の防風スクリーンを使用するが、原則として風のある日の測定は避けたほうがよい。

#### c) 測定方法

低周波音の測定は、騒音の場合とほぼ同じであるが、低周波音による影響は周波数によって大きく異なったものとなることから、実時間周波数分析器を用いるかデータレコーダに音圧波形を記録して、持ち帰って周波数分析を行うことが望ましい。

#### d) データの整理

低周波音に関しては、評価方法や明確な基準は設けられていないが、平成 12 年 10 月に環境省から「低周波音の測定方法に関するマニュアル」が公表されており、これを参考にするとよい。データ整理の方法は、低周波音レベル計の指示値の変動に応じて次のように評価することが示されている。この場合、測定の目的に応じて周波数補正 (G 特性) を行うとよい。

- ① 音圧レベルの変動幅が一定又は変動幅の少ない場合は、10 秒間から 1 分間程度の G 特性音圧レベルのパワー平均  $L_{p,G}$  を求める。
- ② 音圧レベルが (5dB を越えて) 変動する場合は、指示値が大きくなるときに注目して、それらの最大 G 特性音圧レベル  $L_{p,Gmax}$  を適当な回数 (5 回から 10 回程度) 測定し、それらのパワー平均 G 特性音圧レベル  $L_{p,Gmax}$  を求める。

以上の手順で求めた低周波音レベルが G 特性で 92dB 以上であれば、20Hz 以下の超低周波音による苦情の可能性が考えられる。

また、周波数分析器を使用して 1/3 オクターブバンド音圧レベルを求める場合については以下のように求めるるとよい。

- ① 音圧レベルの変動幅が一定又は変動幅の少ない場合は、10 秒間から 1 分間程度のパワー平均 1/3 オクターブバンド音圧レベル  $L_{p,1/3oct}$  を求める。
- ② 音圧レベルが (5dB を越えて) 変動する場合は、指示値が大きくなるときに注目して、それらの最大 1/3 オクターブバンド音圧レベル  $L_{p1/3oct,max}$  を適当な回数 (5 回から 10 回程度) 測定し、それらの

パワー平均 1/3 オクターブバンド音圧レベル  $L_{p1/3oct,max}$  を求める。

以上の手順で求めた低周波音の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを図-3.4.6 に示した参照値と比較し、参照値以上であれば低周波音による苦情の可能性が考えられる。

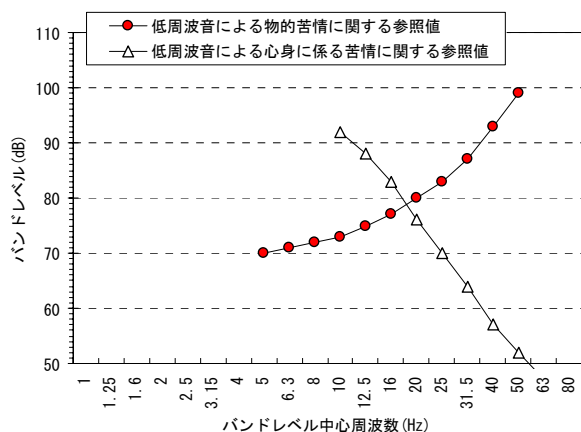


図-3.4.6 低周波音による苦情に関する参照値

物的苦情に関しては建物の屋外における測定値が、また、心身に係る苦情に関しては問題が生じている位置(一般的には屋内)における測定値が対象となる。

なお、図-3.4.6 に示した参照値は固定された発生源からの低周波音によると思われる苦情に対応するためのもので、交通機関等の移動発生源とそれに伴い発生する現象及び発破・爆発等の衝撃性の発生源から発生する低周波音には適用しないとされている。しかし、橋梁から発生する低周波音は、橋梁固有の振動モードに起因することが多く、その発生源はあまり移動しないと考えるため参考にはできると考えられる。ただし、その適用に当たっては十分な検討が必要である。

### 3.5 構造物挙動測定

橋梁振動を原因とする騒音、振動問題の検討や対策を講じる必要がある場合などには、その発生源である橋梁の挙動特性を明確にすることが必要である。ここでは、これまでに振動の発生源を特定する、あるいは対策工検討にあたって必要であった事項を列挙し、その調査方法を概説する。なお、必ずしもこれらの調査をすべて行う必要はなく、必要に応じて選択すればよい。

#### 3.5.1 たわみ測定

橋梁のたわみは死荷重によっても生じるが、ここでは橋梁振動の原因となる現象を取り扱うため、基本的には活荷重によるたわみを対象としている。たわみは、床版や壁高欄あるいは舗装といった付加剛性も含めた橋梁全体の剛性を評価するための指標として基本的な指標となりうるものである。このため、既知荷重に対するたわみ

の実測値を用いて、数値解析モデルの妥当性を評価することも多い。

#### (1) 測点配置

たわみ測定は、たわみ変位が最も大きくなる支間中央断面を対象とすることが基本で、影響線を確認するために 1L/4 点にも測点を設けることがある。また、幅員方向のたわみ分布は荷重載荷点が最も大きく、載荷点から離れるにしたがって小さくなる。これは横桁による荷重分配によって、たわみの分布が異なることから、幅員方向にも複数の測点を設けることが望ましい。

#### (2) 測定原理

たわみの測定原理については、これまで様々な方法が提案され、実用化している。それぞれ下記に示すような長所と短所があり、測定の目的に応じて選定するとよい。

##### a) ポールやピアノ線を用いる方法

測定対象箇所からポールやピアノ線を吊り下げて、その先端に測定器を取付け、地表面との相対変位を測定する方法である。測定器を取り付けた状態で初期値を計測し、活荷重の載荷による変化量を目視または電氣的に計測するものである。電氣的な計測の方法としてはひずみゲージを利用したものや差動トランスを利用したものがある。測定精度は使用する機器にもよるが、高感度のもので使用することで、数  $\mu\text{m}$  オーダーでの精度が確保でき、数 Hz から十数 Hz の振動にも対応が可能である。また、測定に使用する機器は、いずれも汎用的なものであり、測定費用は比較的安価である。短所としては、橋梁下面の用地が使用できることや桁から地表面までの距離があまり高くないことが条件となる。また、風が強い場合、ワイヤーやポールが振動し、測定値に影響する場合があるので、留意する必要がある。

##### b) レーザー光線を利用した方法

レーザーを用いた方法にもいくつかの方式がある。地表面にレーザー変位計を設置し、主桁下フランジなどまでの距離を直接計測する方法である。測定精度は比較的高く、桁に取り付けなくても計測が可能であるため作業性は良好である。ただし、センサーから桁までの距離は数 m 程度が限界である。また、桁下空間を利用できない場合は適用できない。

レーザーを利用した方法でも、水平方向に照射したレーザーで鉛直方向や橋軸直角方向の変位を計測する方法もある。これは、測定対象箇所に階段状の特殊なターゲットを、レーザー変位計を不動点である橋脚の天端等に設置し、たわみによって発生するレーザー変位計とターゲットの間の微少な水平距離の変化を、鉛直あるいは橋軸直角方向の変位に換算するものである。この方法では、対象とする箇所にターゲットを設置する必要があるが、

ターゲットには電源や信号のための配線が不要であり、作業性は比較的良好である。また、桁下空間が河川や道路のような場合でも測定が可能である。この方法による測定誤差は0.5mm程度で1秒間に10回程度の測定が可能である。

さらに、レーザーレベルを応用したたわみの測定器もある。これは、橋脚等の不動点に回転式のレーザー発振器を、測定対象箇所にレーザー変位計を設置し、回転するレーザー光が変位計にあたる位置を自動で読み取るものである。この場合、回転レーザーをひとつ取り付けておけば、レーザーが当たる位置であれば複数個のセンサーを取り付けて同時に測定することができる。ただし、レーザー変位計まで電源ケーブルと信号ケーブルを配線する必要があり、作業性がやや劣る。この方法による測定誤差は0.5mm程度で、最大1秒間に10回程度の測定が可能である。

レーザー光を利用した測定はいずれの方法も測定機器が高価で、測定費用は比較的高額となる。

#### c) 光センサーを利用した方法

光の強さに応じた信号を発生する光センサーを応用した変位計で、白黒に塗り分けたターゲットの画像をカメラの望遠レンズで写し、画像の明暗を面積比率として検出して、水平方向、鉛直方向の変動を計測するものである。使用するレンズにより容量の調整が可能で、2000mm望遠レンズを使用すれば200～300mの視間でも1mm程度の誤差で測定が可能である。

また、同様な原理でCCD（個体映像素子）を用いた測定システムもある。これは、対象箇所にLEDの発光体を設置し、その映像をCCDに投射して、発光体の位置を検出するものである。

光センサーを利用したシステムはいずれも、装置が高額であることや、周囲の環境にや望遠レンズの設置方法により精度が左右されることや、望遠レンズの倍率やピントの調整によって感度も変わることから、現地におけるキャリブレーションが必要で、作業性が若干劣る。

#### d) 連通管式変位計を使用する方法

不動点である橋脚上に基準となる水面を維持するための基準水槽を、そして測定点に変位計を設置し、両者をホースで連結し水を満たす。基準水槽の水面は常に一定となるような構造として、基準水槽と変位計の水頭差を電氣的に計測することで変位を得るものである。この方法は、測定器の設置が比較的困難であることや、短時間で発生する応答を計測できないため、活荷重によるたわみ測定に用いられる事例は少ない。

#### e) レベル測量による方法

活荷重によるたわみの影響を受けない箇所にレベルまたはトランシットを設置して、着目する点のレベルを測

量する方法である。最も安価であるが、動的な現象に対応できないこと、道路面での作業が必要であることなどが欠点としてあげられる。測定精度は視準距離にもよるが、数mm程度であり、長大橋の静的載荷試験の際に用いられることがある。

#### (3) 測定方法

測定の方法としては、動的測定と静的測定に大別できる。動的測定は、走行する車両を対象として連続的に測定するもので、静的測定は橋梁上に車両が載荷していない状態で初期値を計測し、所定の位置に車両を停止させたときの変化量を計測する方法である。前者の動的測定では一般的に交通規制が不要であり、一般車両を対象とした測定のほか、重量を調整した試験車を走行させることも可能である。一般車両を対象とした測定方法としては、応力頻度測定要領（案）に準拠した72時間の連続測定や24時間の連続測定が行われることが多い。一般に、動的測定ではアンブやデータレコーダが必要で、測定システムが大掛かりであったが、近年ではパソコンとシグナルコンディショナーを組み合わせることで比較的簡易に測定ができるようになってきている。測定の結果は、応答波形を連続的に残すことが一般的であるが、簡易測定の場合にはヒストグラムレコーダで振幅頻度の結果だけを記録する場合もある。この場合は、頻度の分析結果しか残らず詳細な分析ができないことから、可能なかぎり応答波形を記録することが望ましい。

静的載荷試験は、試験車を用いるケースがほとんどで、試験車両としてはダンプトラック、ラフテレーンクレーン、トラッククレーン、トレーラーなど目的や構造物の規模に応じた試験車を使用するとよい。目的にもよるが、試験車の重量は総重量だけではなく、軸重も計測しておくことが望ましい。トラックスケールで軸重が計測できない場合には、可搬式の軸重計も広く普及しており、これらを利用するとよい。

#### (4) 測定時の留意点

たわみ測定を行う際に必要な留意点を以下に列挙する。

##### a) 容量

容量の検討は、たわみ計測を行う場合に検討すべき最も基本的な項目である。発生するたわみ量が測定器の容量を超える場合には、たわみの最大値が得られないだけでなく、測定器の破壊にもつながることがある。一方、発生するたわみ量に対して容量が大き過ぎる測定器を使用した場合は、S/Nが悪くなることから測定精度が低下する。このようなことから、たわみ測定の際には予め発生するたわみ量を検討した上で、使用する測定器を決めるのがよい。

## b) 周波数

測定器にはそれぞれ応答周波数があり、被測定物の挙動がそれを上回る場合には、変位計の応答が構造物の応答に追従できず、正確な測定ができない。このため、測定対象構造物の振動特性を把握したうえで測定器を決める必要がある。

## c) 振動

橋梁のたわみ測定を動的に行う場合、車両の振動あるいは橋梁振動の影響が混入することがある。このような振動の影響を含むたわみは、静的なたわみ量とは異なったものとなることから、測定の目的によっては図-8に示したように周波数フィルター等を利用して振動成分を除いて評価する必要がある。図-3.5.1の例は、鋼鈹桁支間中央部におけるたわみの波形に振動成分が混入した例を示しているが、振動成分よりも低い周波数のローパスフィルターによって、その影響を除いたものである。

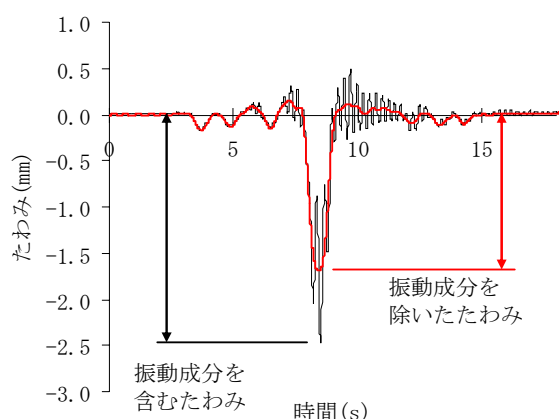


図-3.5.1 たわみ波形に混入した振動成分

## 3.5.2 構造物振動測定

構造物振動測定は、地盤振動や低周波音、騒音などの発生源や発生メカニズムを把握すること、また構造物側での対策工を検討するための基礎資料を収集する目的として行うものである。構造物の振動で得られるデータは、測定の目的によっても大きく異なるが、基本的なものとして、固有振動数、振動モード、減衰性能などが挙げられる。

## (1) 測定原理

振動の測定器には、測定原理や構造により多種多様なものがあり、機種によって測定できる容量や周波数の範囲が異なるため、測定条件に応じて最適なものを選択する必要がある。表-3.5.1に振動測定に用いられるセンサーの種類と特徴を示した。測定機器を選定する際に留意しなければならない点として、①振動測定器が被測定物の振動特性に影響を与えてはいけない、②温度や湿度といった測定環境に対して安定でなければならない、③測定器が構造的、電氣的に堅牢でなければならない、などが挙げられる。

## (2) 測点配置

測点の配置は、大きな応答が得られる振動の腹に設置することが基本である。このため、振動特性が明確でない橋梁形式での測定を行う場合には、予め固有値解析を行い、振動モードを把握しておくことが望ましい。複数径間が連続する橋梁では、図-3.5.2 a)～図-3.5.2 c)に示したように隣接径間との連成振動が問題となることがある。また、たわみ振動だけではなく、図-3.5.2 e)に示したようにねじれ振動が問題となるケースや、特に広幅員の橋梁では橋軸直角方向の振動が問題となるケースもある。さらに、低次の振動モードだけではなく、図-3.5.2 f)に示したように比較的高次の振動モードが問題となることもあり、問題となる振動のモードを特定するために測点の配置は入念な検討が必要である。

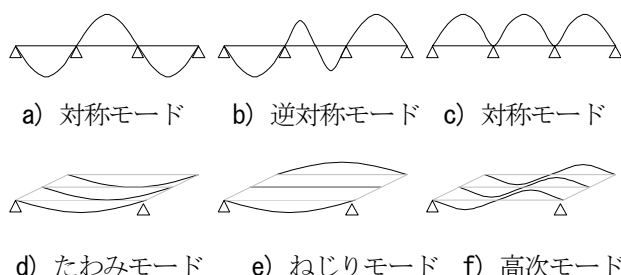


図-3.5.2 主桁たわみ振動モードの代表例

表-3.5.1 振動測定センサーの種類

測定原理	周波数範囲	長所	短所
ひずみゲージ	DC～50Hz程度	安価，DCから応答	応答周波数の上限低い
差動トランス	DC～50Hz程度	高精度	温度の影響を受け易い
導電形	1～60Hz程度	高精度	高価，大型，取り扱い難
サーボ型	DC～500Hz程度	高精度，DCから応答	高価
圧電型	数Hz～数千Hz	小型軽量，応答周波数広い	低周波の応答小さい
光素子	0～500Hz程度	非接触で計測可	高価，取り扱い難
静電容量	数Hz～数千Hz	応答周波数広い	高価
MEMS	DC～数千Hz	小型軽量応答周波数広い	若干精度に劣る



### (3) 測定方法

橋梁を対象とした振動の計測にあたっては、常時微動による特別な加振を行わないで測定する方法と、強制的に外力を与えてその応答を測定する方法がある。常時微動は、風や波などの自然界のエネルギーや遠方の交通振動などが橋梁を振動させるもので、特別な加振装置が不要であるため、最も手軽に測定ができる。特に長大橋のように固有振動数が低い橋梁の場合、一般的な計測方法の一つとなっている。しかし、この方法は応答振幅が小さいため、測定には高感度のセンサーが不要であることや、橋梁固有の振動が発現しやすいため、交通振動とは大きく異なった振動特性を示すことがある。一方、強制加振による振動測定の方法としては、人力加振法、ロープで緊張力を与え、これを切断するときの復元力を利用した方法、ジャッキで載荷した状態から急速に荷重を解放することによる方法、衝撃加振機による方法、起振機による方法などが考案されている。しかし、前述したとおり交通振動による橋梁振動を取り扱う場合、走行する大型車両のバネ振動の影響を強く受けるため、大型車両による走行実験を行うことが望ましい。このとき、たわみの測定と同様に、試験車両を走行させて定量的な測定を行うことも有効である。ただし、橋梁振動は車両のバネ振動との共振が問題となることがある。この場合、必ずしも車両の総重量や走行速度の増大に対して振動の応答が比例して大きくなるとは限らない。つまり、わずかな車両の条件の違いによって、応答が大きく異なることがあるので、注意が必要である。図-3.5.3は、RC中空床版橋におけるたわみと主桁振動加速度の測定例を示したものであるが、波形に現れた静的なたわみの大きさはいずれも同程度あるのに対して、振動加速度の応答は大きく異なっている。このように、振動や低周波音が問題となる場合の橋梁の振動測定は、このような共振現象が生じることがあり、その発生頻度は橋梁の構造や車両の特性といった条件によって異なる。とくに発生頻度が少ない場合には、短時間の計測ではこのような現象を捉えることができないことがある。このため、実際に家屋側で問題となる現象が発生し、これを計測で的確に捉えていることを確認しておく必要がある。

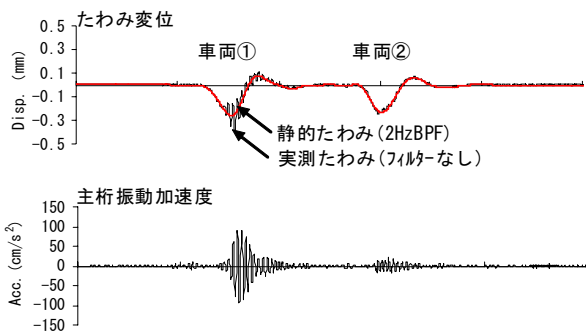


図-3.5.3 共振の有無による振幅の差異

データの収録については、以前はセンサーからの出力信号を増幅器で電氣的に増幅し、アナログ信号としてデータレコーダ等に記録する方法が主流であった。近年ではパーソナルコンピュータやシグナルコンディショナーが急速に発達し、現場でアナログ信号をデジタル値に変換（以下「A/D変換」という。図-3.5.4参照）してハードディスクに記録する方式が一般的となっている。また、測定器によってはパーソナルコンピュータが不要なものもある。アナログ信号をデジタル信号化するときの単位時間あたりの回数をサンプリング周波数というが、対象とする現象の速さに応じて適切なサンプリング周波数を選択する必要がある。サンプリングの定理により、ある周波数の信号を取得する場合には、少なくともその2倍以上のサンプリング周波数で計測する必要があるとされるが、忠実に波形を再現するためには10倍程度が理想的であると考えられる。また、サンプリングされた信号を、一意に復元するためには、元の信号がサンプリング周波数の半分（ナイキスト周波数）以下に帯域制限される必要がある。これは、A/D変換したサンプリング標本から元の信号が正しく再現できなくなるエイリアシングという現象を防止するためで、これを防止するためのフィルターをアンチエイリアシングフィルターという。なお、測定器の種類によっては、サンプリング周波数を決めると自動的にアンチエイリアシングフィルターが設定されるものもある。

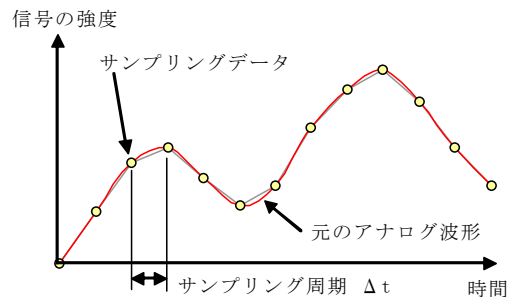


図-3.5.4 A/D変換の概念図

### (4) データの分析方法

#### a) 振幅の評価

測定した振動の振幅を定量的に評価する方法としては、車両通過時の前後数秒～数十秒の応答波形を作成して、その振幅を読み取るのが一般的な方法である。また、振幅の発生頻度を計数する振幅頻度分析を行うことも有効である。振幅頻度分析は一定の時間内に発生した振幅の発生頻度をヒストグラムとして求めるもので、その目的によってピークバレー法、レインフロー法など様々な方法があるが、振動の測定においてはピークバレー法の適用が考えられる。ピークバレー法（正極大、負極小）による頻度測定は、図-3.5.5に示したように信号の正側の

極大値と負側の極小値を読み取って、その発生頻度を計数するものである。分析結果の代表例を図-3.5.6に示す。

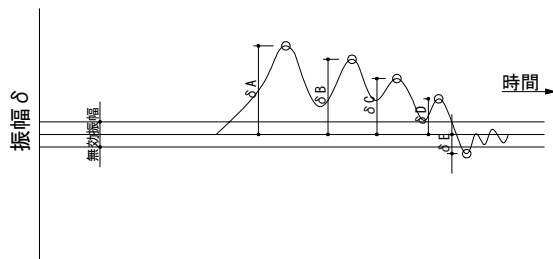


図-3.5.5 ピークバレー法による振幅頻度分析の方法

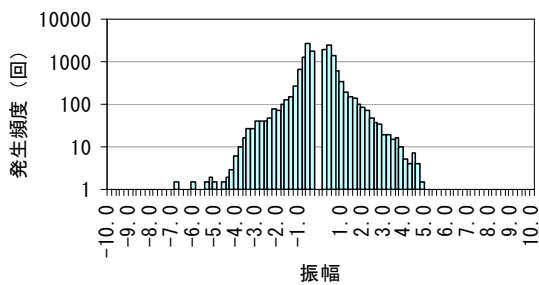


図-3.5.6 振幅頻度分布の例

### b) 周波数分析 (FFT)

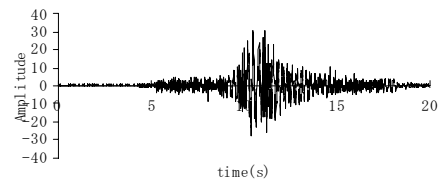
信号に含まれる周波数特性を分析する方法として最も一般的な方法がフーリエ変換である。フーリエ変換は、無限に続く任意の連続信号を、sin波とcos波の重ねあわせとして表現できることを利用したもので、式(3.5.1)で表される。

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)(\cos(2\pi xt) + j \sin(2\pi xt))dx \quad (3.5.1)$$

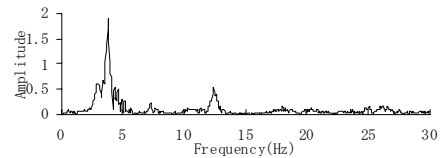
しかし、計算機の上では無限に続く連続信号を取り扱うことはできないため、有限長の離散化データが無限に繰り返すことを仮定して、式(3.5.2)に示す離散フーリエ変換(DFT)によりN個のデータを、N個の周波数のsin波とcos波の信号の大きさに変換している。実際の計算はDFTを高速に行えるアルゴリズムにより計算を行っており、これをFFT(Fast Fourier Transform)というが理屈はDFTと同一である。

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k) \cos \frac{2\pi kn}{N} + jb(k) \sin \frac{2\pi kn}{N} \quad (3.5.2)$$

図-3.5.7は実測した波形とこれをFFTによる周波数分析の結果を示したものである。



a) 時刻歴波形



b) スペクトル

図-3.5.7 時刻歴波形とFFTによる周波数スペクトル

### c) 周波数分析 (ウェーブレット変換)

FFTならびにMEMは時間領域の波形を周波数領域の波形に変換するため、変換後は時間の情報が失われ、周波数の時間的な変動を知ることができない。このため、時間の波形を短い間隔に区分し、各区分のデータをFFTにより周波数分析することにより周波数の時間変動を知ることができる。しかし、FFTによる周波数分析は、サンプリングのデータ個数に比例して周波数の分解能が低下するため、分割する時間の長さや周波数分解能がトレードオフの関係にあり、短い時間で変化する周波数を精度良く検出することが困難である。このようなことから、近年では、ウェーブレット変換による信号処理が取り入れられている。基本的な概念は、小さい波(ウェーブレット)を拡大縮小、ならびに時間軸を平行移動し、波形にあてがって、基準となるウェーブレット(ウェーブレット)に似た成分がどの程度含まれるのかを評価するものである。これは、ウェーブレットと波形の相関値を求めることに等しく、式(3.5.3)に示した関数の内積によって計算するのが一般的である。

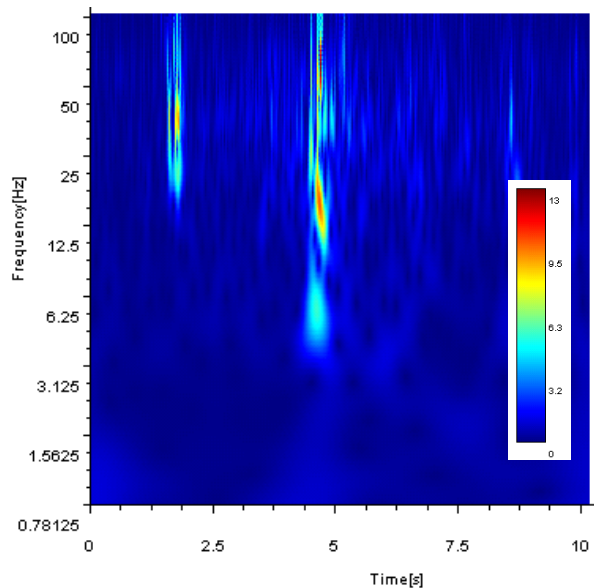


図-3.5.8 ウェーブレット変換による周波数分析の例

$$d\ell = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\overline{\psi_{\ell}(t)}dt \quad (3.5.3)$$

図-3.5.8 に中空床版橋におけるウェーブレットによる周波数分析結果の一例を示す。

### (5) 振動モード推定方法

橋梁は剛性やスパン等から定まる固有振動数とこれに対する振動モードを有している。一般的に橋梁が車両によって加振されると図-3.5.2 に示したように多くの振動モードが同時に励振される。地盤振動に対する寄与率は振動モードによって異なり必ずしも同じではない。このため地盤振動を低減するための橋梁の制振対策を検討する際には、地盤振動に対して影響の大きい振動モードを把握することが重要である。振動モードを求めるには、以下に示すようないくつかの方法がある。

#### a) モーダル解析による方法

モーダル解析は、ある系に入力加振が加えられたときの応答を計測することによって伝達を表すマトリックスの各成分（周波数、減衰）を決定し、その伝達系に特有の振動モードを重ねあわせの形で同定することである。この伝達を表すマトリックスの各成分（モーダルパラメータ）を推定する方法として以下のようなものが挙げられる。

- 一自由度法    ボード線図・・・振幅応答法、多項式近似法  
                  コクアド線図・・・虚数部応答法  
                  ナイキスト線図・・・サークルフィット
- 多自由度法    周波数領域法  
                  時間領域法・・・複素指数法

一般に橋梁は多自由度系になるため、モーダルパラメータを正確に推定するには多自由度法の適用が必要である。しかし、多自由度系のモーダルパラメータの推定には、初期値を推定したり、繰り返し計算が必要であった

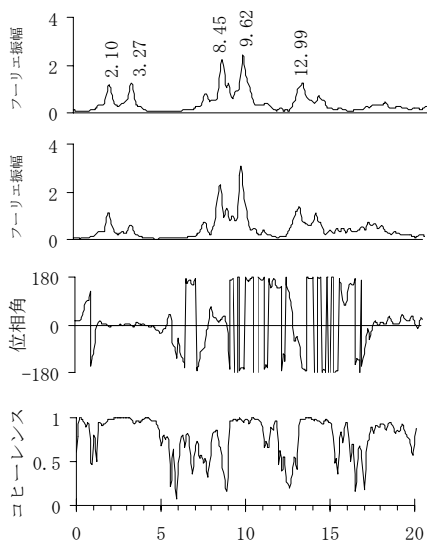


図-3.5.9 クロススペクトル分析結果例

り、初期値の与え方によっては結果が発散する欠点が指摘されている。また、一般的に多自由度系のモーダルパラメータの推定は高度な手法を適用する必要がある。

#### b) スペクトル解析から求める方法

振動の計測を複数点同時に実施した場合はスペクトル解析により振動モードを推定することができる。図-3.5.9 は鋼鉄桁橋の支間中央断面幅員両端部の測点におけるクロススペクトル分析結果を示したものである。位相角は2 測点間の位相の違いを表したもので、0 度の場合は同位相、180 度では逆位相となる。この例では2.10, 3.27 および 8.45Hz の成分は両測点で同位相、すなわちたわみモードを示し、9.62, 12.99Hz の成分は逆位相しなわねじり成分の振動であることがわかる。コヒーレンスは、両測点の相関の強さを示しており、1 に近いほど相関が強いことを示すものである。この例ではいずれの周波数成分もコヒーレンスは1 に近く、いずれも固有振動であると考えられる。

#### c) 多点同時測定から求める方法

3 点以上の多点で同時測定を行った場合、応答波形から振動モードを求めることができる。具体的には、FFT により各点のスペクトルを求め、矩形フィルターを用いて着目する周波数以外のフーリエ振幅をすべて0 として逆フーリエ変換することにより、着目周波数だけの応答を得ることができる。この応答波形から同一時刻における各点の振幅を読み取ってプロットすることでモード形状が得られる。

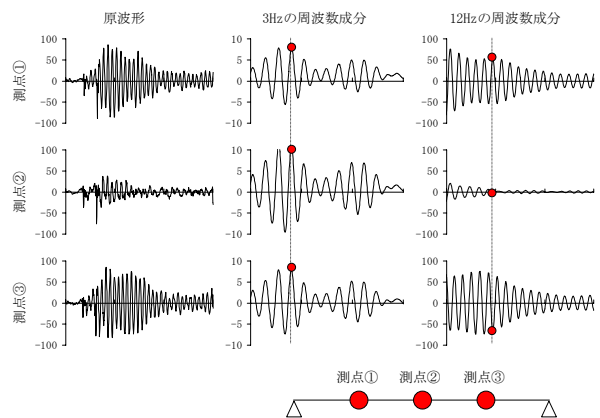


図-3.5.10 多点同時測定の逆フーリエ波形

### (6) 減衰性能の評価

実験データから橋梁の減衰性能を評価する方法としていくつかの手法が考案されているが、道路交通振動問題を扱う場合には、以下に示す理由により、正確に評価することはかなり難しいといえる。

- ・ 自動車による加振周波数に個体差がある。
- ・ 加振周波数や加振位置の違いで発現する振動モード



が異なる。

- 複数の固有振動が近接しており，単一の振動モードでは挙動しない。

このため，できるだけたくさんのデータを集めて分析することや発現している振動モードを加味して評価することが重要であると考えられる。

### a) 自由減衰振動波形から求める方法

実験で自由減衰振動波形が採取できた場合には，図-3.5.11 に示したような波形から，振幅の極値を順次読み取り，式 (3.5.4) により対数減衰率を求めることができる。 $h$  が比較的大きい場合には式 (3.5.5) を用いるが，通常の橋梁の減衰定数は1よりも小さいため式 (3.5.6) により減衰定数を求める。

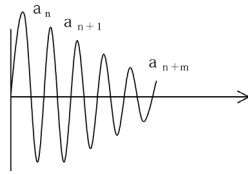


図-3.5.11 自由減衰振動の波形例

$$\delta = \log_e \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right) \quad (3.5.4)$$

$$\delta = h \frac{2\pi}{\sqrt{1-h^2}} \quad (3.5.5)$$

$$h \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (3.5.6)$$

実際の構造物においては，複数の固有振動モードが存在するため，応答波形にはそれぞれの振動成分が重畳することがある。このようなケースではフィルタリング処理により，着目する周波数成分のみを抽出して分析を行うことも有効である。

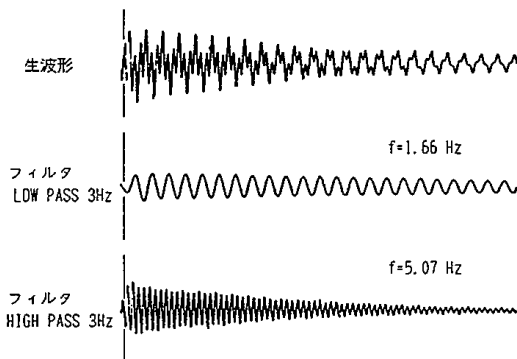


図-3.5.12 フィルタリング処理の例

また，複数の固有振動の周波数が近接する場合，図-3.5.12 に示すように振動が一様に減衰しないで，振幅

の増減を繰り返しながら減衰するビーティング現象が生じることがある。この場合，単純なフィルタ処理による対応では正確な減衰を求めるのは困難であるため，それぞれの減衰を評価する方法も提案されている<sup>5)</sup>。

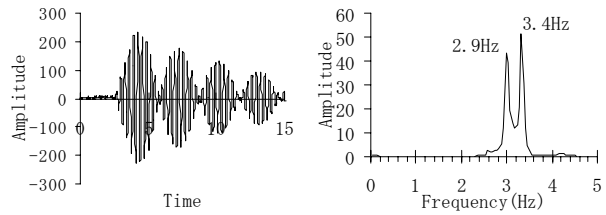


図-3.5.13 固有振動の近接によるビーティング現象の例

### b) パワースペクトルから求める方法

FFT により得られたパワースペクトル密度から図-3.5.14 に示したように近似的に減衰を求めることができる (Half Power Method)。ただし，この方法でも，複数の振動が近接して卓越する場合には適用は難しい。

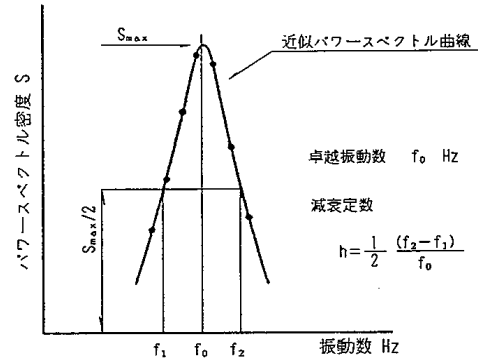


図-3.5.14 パワースペクトル密度から減衰を求める方法

### c) RD 法<sup>6)</sup>

上記の方法では，データの定常性が要求されるなど制約があり，条件によっては十分な精度が得られない場合がある。Jeary は，航空宇宙工学の分野で提案された RD 法 (Random Decrement Technique) が地上の構造物へ応用できることを述べている。ここで，ある系に対する応答 X の時系列標本がたくさんあるとしたとき，通常の減衰定数の範囲では構造物の応答は固有円振動数の狭帯域ランダム過程となる。このとき応答 X の時系列波形を時間  $t=0$  において極大値になるよう並べて，時間軸を揃えて重ねあわせることにより，ランダム成分は零に近づき，自由振動成分のみが残ることになる。このような重ねあわせをすることにより得られた自由振動波形から，上記 a)の方法や，重ねあわせた波形の極大値を結ぶ包絡線を指数関数で最小二乗近似することにより，ランダム成分を除いた減衰定数が得られるものである。なお，重ねあわせる個数は多いほど，推定誤差が小さくなり，1 質点系モデルでは  $N=200$  個程度で式 (3.5.7) により評価した誤差率  $\sigma$  を 20%以下にすることができるとしている。

ただし、2 質点系において異なる振動モードが近接する場合には誤差が大きくなる可能性があるとしている。

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\xi_i - \xi)^2}}{\xi} \quad (3.5.7)$$

ここに、 $\sigma$ : 誤差率

$\xi_i$ :  $i$  番目の波形から求めた減衰

$\xi$ : 真の減衰定数

### 3.5.3 支承部の変位測定

橋梁を支える支承には基本的な機能として荷重伝達機能と変位追従機能が求められる。また、主として地震時の振動に対して、減衰機能、アイソレート機能等が求められる重要な部材である。支承を主要な材料で分類するとゴム支承と鋼製支承およびコンクリートヒンジに大別できる。鋼製支承は極めて大きい反力や、大移動量、負の反力支持などに対しての適用性に優れており、従来から一般的に使用されてきた。しかし、兵庫県南部地震で想定以上の地震動の作用により、セットボルトの破損、せん断キーの破損、ストッパーの破損といった損傷が多く見られた。これに対して、ゴム支承には大きな損傷は報告されておらず、ゴムの弾性によって大きな変形性能や緩衝性を有するため、耐震性に優れていることが確認された。しかし、ゴム支承を使用した橋の設計の歴史は浅く、剛性のばらつきとその影響、疲労耐久性など必ずしもその特性が解明されたとはいえない。また、微小な領域における振動に対する影響についても必ずしもその特性は明らかとなっておらず、振動や騒音に対する影響についても今後検討していく必要があると考えられる。

このため、騒音や振動が生じている橋梁で調査を行う場合には、支承の状況について確認しておく必要があるといえ、場合によってはその挙動を計測することが望ましい。

#### (1) 支承の損傷

鋼製支承の場合は、桁端部からの漏水による腐食、セットボルトの緩みや脱落、ストッパーの破断等の損傷が生じていることがある。ゴム支承の場合は、写真-3.5.1に示すように、ゴムのひび割れや積層ゴム間のずれが生じているケースもある。



写真-3.5.1 ゴム支承の支承部の損傷状況

このような外観上容易に確認できる損傷が振動の原因となる可能性も否定出来ないため注意が必要である。

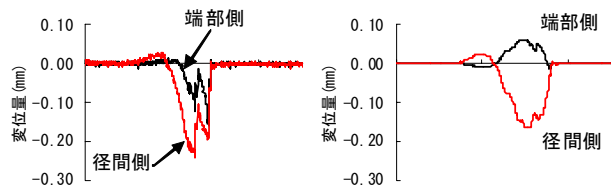
#### (2) 支承の反力バランス

多点支持される橋梁や上部構造が複雑な橋梁、あるいは支承の損傷や機能向上のために支承を交換した場合など、死荷重反力が設計で期待するとおりにないことがある。特に著しいケースでは死荷重による反力がほとんど作用せず、活荷重の載荷位置によってはアップリフトが生じていることもある。このような場合には、活荷重の載荷により衝撃的な振動が発生し、これが直接地盤へ伝播することや上部構造の振動を大きくすることがある。このようなことから、設計図書等を確認し、反力のアンバランスやアップリフトが生じやすい構造かどうかの確認を行うことが望ましい。

#### (3) 支承の変位測定

地盤振動や低周波音と同時に支承の変位を計測することにより、その発生箇所や原因を推定することができる。図-3.5.15に示したのは、同一の構造形式を有する橋梁でゴム支承と鋼製支承 (BP-B) の挙動を比較したものである。この事例では、支承本体を挟んで前後の測定を行っており、支承からの距離は前後で等しくしている。このため、前後の変位の平均がたわみ変位、前後の差分が回転変位を表すものである。図に示したとおり、ゴム支承では輪荷重によってたわみ変位が生じ、最後輪が橋梁から退出した瞬間に急激に変位が戻ることがわかる。この急激な変位の発生と同時に上部構造にも振動が生じていることが確認されている<sup>7)</sup>。

一方、ゴム支承の場合は、このような急激なたわみの変位は発生せず、滑らかな回転変位が生じていることがわかる。このような変位の挙動に関する普遍性は確認されておらず、死荷重反力の大きさやこれに伴うゴム支承のバネ剛性の大きさによって挙動は異なってくると考えられるが支承部の挙動と地盤振動を同時に計測することで発生原因の手がかりを得ることができると考えられる。場合によっては鉛直方向の変位よりも水平方向の変位の影響が大きくなることも想定される。



(a) ゴム支承

(b) BP-B 支承

図-3.5.15 ゴム支承と鋼製支承の挙動の違い

### 3.6 体感調査

体感調査は主として家屋内において、苦情の原因となる現象を体感することで、原因の特定の手がかりとするものである。ただし、振動などに対する感受性は個人差があるため定量的な指標とはならないが、可能であれば苦情者にも参加してもらうことで、現象がより明確にできると考えられる。また、振動計測と同時に体感調査を実施し、体感振動が発生したタイミングを振動データに記録することで、現象の特定がより正確に行えると考えられる。また、体感調査により体感の状況（床の振動か建具等のがたつきか、周期はどの程度か、縦揺れか横揺れか等）をより明確にできる。ただし、家屋内での測定を同時に実施する場合、調査員の歩行や身動きによる影響が計測値に混入することがあるため、注意が必要である。

### 3.7 交通調査

道路橋を原因とする騒音や振動の発生源は、主として橋梁を走行する大型車である。このため、騒音や振動レベルを統計的に評価すると概ね交通量に比例して大きくなることが知られている。橋梁振動については、橋梁の固有振動数と車両のバネ振動の共振の問題があるため、必ずしも車両重量と振動の大きさは比例しないが、少なくとも小型車よりも大型車の影響が大きいことは周知の事実である。このため、道路橋を原因とする騒音や振動を扱う場合には、交通量だけではなくその荷重特性も含めた交通特性を把握しておくことが非常に重要であるといえる。ここでは、交通量、走行速度、車種、交通荷重などの調査方法について概説する。

#### 3.7.1 交通量調査

交通量調査は、任意の地点における車種別、方向別の通過台数、走行速度等を把握するもので、調査方法としては下記のものがある。

##### (1) 人手による方法

この方法は、予め路面に測定線を設けて、この測定線を通過する車両毎に車種・方向・車線を判断して計数し、単位時間あたりに測定線を横切った車両台数を求めるものである。また、照明柱やジョイントなどの距離が既知の距離を車両が走行する時間を計測して、その速度を算出することもあわせて行うことが多い。測定の集計単位時間は目的によって異なるが、騒音や振動調査の場合、毎正時から10分などとする人が多い。この方法の場合、特別な装置や技能は必要でないため自由度が高く、任意の箇所での調査が可能である。一方、厳密な車種区分は難しいほか、速度の計測結果も誤差は大きい。また、近年では高架道路の遮音壁対策が進んでおり、外から目視

できないため調査ができない箇所が増えている。このような場合には、オーバブリッジや近隣のビル等の使用や、本線上に小型のビデオカメラを設置する方法などがある。

##### (2) トラフィックカウンターによる方法

トラフィックカウンターは、道路等において車両の存在や通過を検出するための装置であり、車両を感知する方式としては①金属反応式、②固体感応式、③圧力感応式に大別できる。①の金属反応式にはループコイル式や磁気変化を捉える方式のものがある。②の固体感応式は、超音波式、レーダー式、レーザー式、光学式などがある。また③の圧力感応式は圧力センサーを利用したものであるが耐久性はあまり高くない。

トラフィックカウンターでは、車種別交通量、速度、交通密度などの情報が得られる。集計時間単位は管理者により異なるが、渋滞に対応するため5分間や10分間といった短い時間のリアルタイムのデータが得られる。車種分類は一般に大型車とそれ以外の2車種分類程度で、詳細な車種分類はできない。

#### 3.7.2 交通流調査

交通流に明確な定義はないが、ここでは交通量以外に車間距離や通過位置等の車両の流れを表すものとして定義した。交通流の調査方法として以下のようなものがある。

##### (1) 光電センサー<sup>8)</sup>

光電センサーによる走行車両判定装置は、元来橋梁の疲労問題を解析する際に必要な走行車両の実態を把握するために開発されたものである。測定は路肩に図-3.7.1に示したとおり3組の光電センサーを設置し、出力信号をAD変換器でデジタル信号化している。車両の速度はAまたはBスイッチとCスイッチの信号波の立ち上がり時間差から求めている。また、センサーAとセンサーBは車線の境界部で交差させて通過車線を判定している。

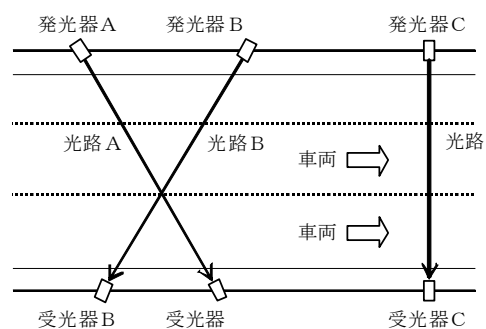


図-3.7.1 光電スイッチによる車種判定システム

## (2) TLAM システム<sup>9)</sup>

TLAM(Traffic Load Auto Measuring system)は、光電センサーによる車両判定装置と同様、走行荷重の測定を目的として開発されたものである。任意の地点にセンサーマット(0.85m×7.25m t=7.5mm)を設置(写真-3.7.1)して、この上を通過する車両の速度や車間距離、通過位置などを計測するものである。車輪通過の検出は圧力が作用すると通電する加圧導電ゴムセンサーを利用したものである。

TLAM システム(図-3.7.2)では、車輪毎に計測した通過時刻、通過位置、速度から1台の車両データを構成するため、軸形状に応じた詳細な車種分析(表-3.7.1)が可能である。また、速度や車間距離などのヒストグラム(図-3.7.3)のほか、例えば多軸を有する大型車など特徴的な車両の通過時刻を正確に特定することができる。

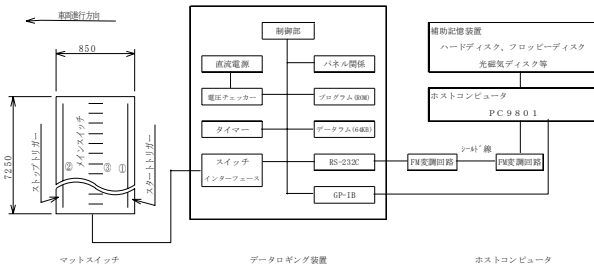


図-3.7.2 TLAM のシステムブロック図



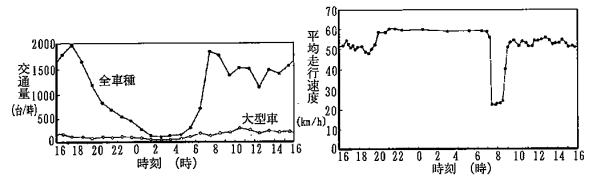
写真-3.7.1 測定状況

表-3.7.1 車種分類の例

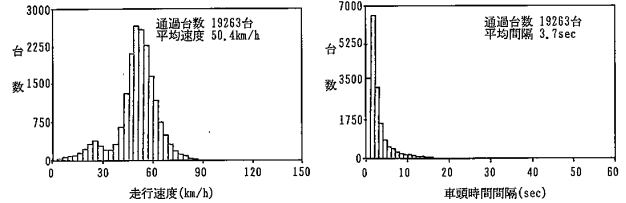
大分類	車種		軸形状
	小分類		
小型車類	小型車		○—○
大型車類	大型3軸車(後タンDEM)		○—○—○
	大型3軸車(前タンDEM)		○—○—○
	大型4軸車		○—○—○—○
トレーラー類	セミトレーラー(4軸)		○—○—○—○
	セミトレーラー(5軸)		○—○—○—○—○

## (3) ビデオ撮影による計測<sup>10)</sup>

上記の方法は、原則としてセンサーを設置する際一時的な交通規制が必要である。このため、走行する車両をビデオで撮影し、画像処理により自動で交通流を計測するシステムも考案されている。



(a) 各時刻の交通量 (b) 各時刻の平均速度



(c) 走行速度分布 (d) 車頭時間間隔分布

図-3.7.3 TLAM システムによる測定結果の一例

## 3.7.3 交通荷重測定

### (1) 軸重計

近年、高速道路の料金所には過積載車両の排除を目的とした軸重計(写真-3.7.2)が設置されていることが多い。軸重計にはロードセル方式(ひずみ変換式)と圧電素子を利用した棒状センサー方式がある。ロードセル方式は基本的に車両の走行速度が高くなると精度が低下することが知られている。一方の棒状センサーは逆に低速の場合に精度が低下する。近年ではETCの普及により料金所レーン内での走行速度にばらつきが大きいため両者を併設し、低速の場合はロードセル、高速の場合を棒状センサーで計測していることもある。

軸重計のデータを利用する場合に問題となるのは、振動や騒音の測定現場と料金所が離れている場合に、現場を通過した車両の重量が特定できないことである。このように個々のデータの重量が必要な場合には、現場に可搬式のナンバー読み取りシステムを設置して、これを介して料金所で読み取ったナンバーと整合させて軸重を求める方法もある。また、近年では料金所だけではなく、高速道路本線や国道に設置されていることもある。



(a) 高速道路料金所 (b) 国道  
写真-3.7.2 軸重計設置状況(定置式)

### (2) 荷重マット(可搬式軸重計)

道路の条件によっては輪荷重を計測するためのマット(写真-3.7.3)を道路に設置し、この上を通過した車両の輪荷重を計測する装置がある。測定の原理は静電容量



方式で、輪荷重は 5~150kN 程度、速度は 10~100km/h 程度まで測定できる。ただしマットが硬いので轍の大きい箇所での使用は困難である。また、マットの厚みが 10mm 程度あるため、マットが騒音や振動の原因となりうるので適用にあたっては十分な注意が必要である。

また、さらにポータブルな荷重計も開発されており、左右の車輪を静的に計器に載荷してその輪荷重を計測するものである。これは、一般に走行する車両を対象とすることはできないが、実験に使用する試験車の輪荷重を計測するためには有効な手段である。



(a) 荷重マット (b) 可搬式軸重計

写真-3.7.3 可搬式軸重計測状況

(3) BWIM<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>

BWIM (Bridge Weigh-in-Motion) は、車両走行時に橋梁部材に発生するひずみ応答から車両の軸重等を推定するものである。この方法は測定対象が橋梁でなければならないことや測定が可能な橋梁に若干の構造的制約はあるものの、測定箇所に対する自由度は比較的高いといえる。BWIM には計測する橋梁の部材によって表-3.7.2 に示したように様々な手法がある。国総研から公開されている桁支間中央部の曲げひずみを利用したもの、床版のひび割れ開閉量を計測するもの、桁端部の補剛材のひずみを計測するものなどが代表的なものである。桁の曲げひずみを計測する方法は、予め既知荷重である試験車の実測ひずみに一致する見かけの剛性を計算し、この剛

性を用いた計算値と実測波形の誤差が最小となるよう軸重を決定していくものである。床版のひび割れ開閉量による方法は、床版下面に発生するひずみが軸重と比例関係にあり、さらにひずみがひび割れに集約することにより感度が向上することに着目して開発したものである。支点反力法による活荷重計測の原理は、車両の軸通過時に発生する支点部のひずみ急変部を検出し、その変化の大きさから軸重を推定するものである。また、車両進入側支点と退出側支点の応答発生時刻の差と支間長から、車両の走行速度を求め、走行速度と各軸応答の発生時刻(軸間距離)から走行車両の車種の判定を行っている。いずれの方法にも特徴があり、対象とする橋梁の構造や損傷の状態などから方法を決定するとよい。

3.8 路面平坦性

騒音や振動問題に対して路面凹凸の影響が大きいことは自明であり、橋梁においては伸縮装置等の損傷により段差が生じ、これが苦情の原因となることが多い。このようなジョイント段差はいうまでもないが、凹凸の形状によっては凹凸量がそれほど大きくなくても振動や騒音の原因となることがある。定性的には路面の平坦性の確保が重要なことは一般的に認識されているものの、路面凹凸が周辺の振動や騒音に与える影響について定量的な議論はこれからの研究課題である。このようなことから、橋梁部において振動や騒音問題が発生した場合には、路面の平坦性調査を実施しておくことが望ましい。路面の平坦性を調査する方法としては、直接路面のプロファイルを計測するものと、車両のバネを計測して間接的に評価するものがある。以下では、路面の形状計測ならびに評価の方法について概説する。

表-3.7.2 BWIM の方法

計測手法 (部材・計測原理別)	桁の曲げひずみ を利用する方法 (国土交通省 国総研)	床版のひび割れ開閉量 を利用する方法 (松井名誉教授)	主桁の支点ひずみ を利用する方法 (山田教授, 小塩助教)
計測原理の イメージと概要	<p>推定した影響線と主部材の測定波形の誤差が最小となるように、各軸重影響の重ね合わせを仮定して軸重を推定する。</p>	<p>RC床版のひび割れ幅の変動と車両軸重の相関から軸重を推定する。</p>	<p>軸通過による支点反力の急変部を検出し軸重を計測する。車両進入側と退出側の支点で計測を行い車速を求め、軸間距離から車種を推定する。</p>

### 3.8.1 路面プロフィール<sup>15) 16) 17) 18)</sup>

#### (1) 測定方法

路面の形状を直接的に計測する方法としては、舗装表面の測量や水系を渡して相対変位を計測する方法がある。この方法では実際の路面形状を得ることができる。しかし、測定に時間がかかることや離散的なサンプリングしかできないため、振動問題を扱う場合には必ずしも合理的な方法とはいえない。連続的に路面のプロファイルを得る方法としてはプロフィールメーターの利用が一般的である。プロフィールメーターは図-3.8.1に示すように3mまたは8mの梁の両端を各4個の車輪で支持した基準梁を構成し、梁中央における路面と基準梁の相対高さを連続的に計測記録するものである。基準梁の長さは、検出しようとする路面の周期により異なり、一般に基準梁の長さが短いほど長周期の路面凹凸は検出しにくく、基準梁よりも長い周期の凹凸は検出できないとされる。このため対象となる振動の振動数3Hz、走行速度80km/hを仮定すると、その周期は7.4mとなり、8mプロフィールの使用が必要となる。

通常、プロフィールメーターによる測定は車線規制をして写真-3.8.1のように人力で機械を引いて行すが、近年では車線規制をしないで測定ができるように自動車の車体を基準梁に見立て、図-3.8.2に示したように3基のレーザー変位計を用いて普通で走行しながら計測する機器も開発されている<sup>19)</sup>。

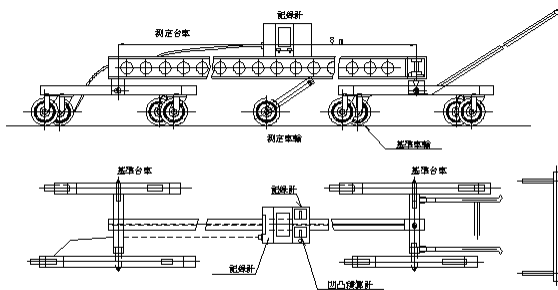


図-3.8.1 プロフィールメーターの構造



写真-3.8.1 8mプロフィールメーター

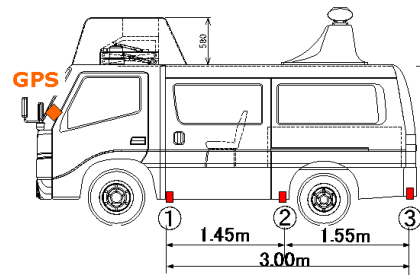


図-3.8.2 車載型プロフィールメーター

#### (2) データの補正

前述のとおりプロフィールメーターは基準梁と路面の相対変位を測定するものであるが、基準梁も移動するため、測定結果は絶対的な路面形状を反映したものではない。特に路面が周期的な形状を示す場合、その周期によっては測定値が過小評価されることがある。このようなことから、プロフィールメーターによる測定結果から、実際の路面形状を導出する研究も行われている<sup>20)</sup>。図-3.8.3はプロフィールメーターの基準梁の長さによる実測結果の差異と補正を行なった結果を比較したものである。

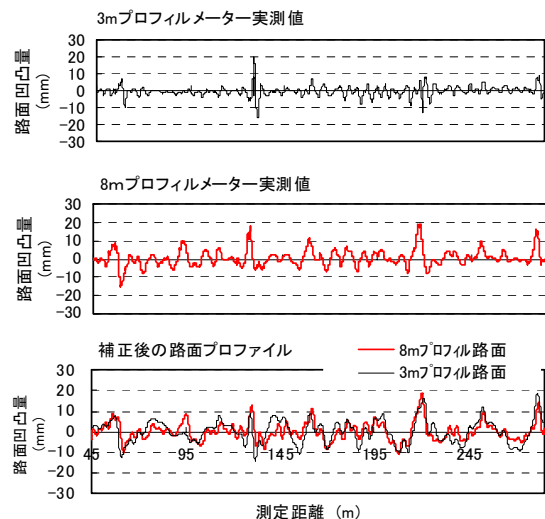


図-3.8.3 プロフィールメーターの実測値と補正結果の例

#### (3) プロフィール測定結果の評価

##### a) Pr.I (プロフィールインデックス)

Pr.I は主として舗装施工時の出来型管理のための指標で、記録した路面の波形の中央に6mm幅の帯を設け、帯の外にはみ出す波の高さを合計して距離で除したものである(式(3.8.1)参照)。Pr.Iの算出にあたっては、伸縮継ぎ手前後の5mの区間は評価対象外としている。

$$Pr.I = \frac{\sum a_i}{L} \quad (3.8.1)$$

Pr.I : Profile Index (cm/km)

$\sum a_i$  : 6mm幅の定規からのみ出し量 (cm)

L : 区間距離 (200m)

NEXCO（高速道路株式会社）では、8mプロファイルメーターによるPr.I（JHS-220-1992）に対する基準値は土工部で5cm/km以下、構造物部で8cm/km以下としている。

**b) 標準偏差**

標準偏差による評価は測定区間を200mごとに分割し、任意の基準線を設けて1.5m間隔で基準線からの高さを読み取り、式(3.8.2)により求めるものである。阪神高速道路株式会社では舗装出来形の合格判定値を2mmとしている。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2 - (\sum d)^2 / n}{n-1}} \quad (3.8.2)$$

$\sigma$ : 平坦性(mm)  
 $d$ : 波高測定値(mm)  
 $n$ : データ数

**3.8.2 IRI**

**(1) 概要**

IRI(International Profile Index)は1989年に世界銀行が提案した路面のラフネス指数で「2軸4輪の車両の1輪だけを取り出した仮想車両モデルをクォーターカーと呼び、このクォーターカーを一定の速度で路面上を走行させたときの車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比を、その路面のラフネスとする」と定義されている。IRIは応答する波長範囲が幅広い(1.2m~30m)という特徴を有しており、様々な波長に対する定量的な評価が可能といえる。IRIは通常200mや100mを単位として算出され、IRIと路面の状態の関係は図-3.8.4に示したとおりである。NEXCOでは、200m区間で求めたIRIによる路面管理目標を3.5mm/mとしている<sup>21)</sup>。

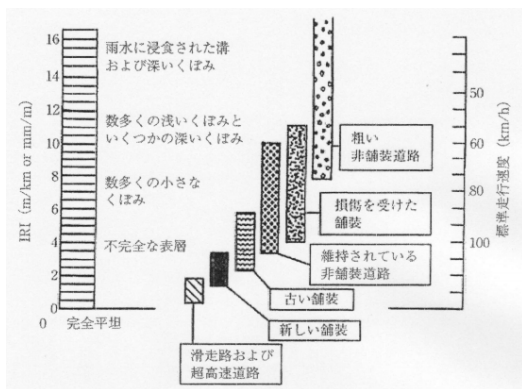


図-3.8.4 IRIと路面の状態

**(2) IRIの算出方法<sup>22) 23) 24) 25)</sup>**

IRIの算出のための路面凹凸計測方法ならびにIRIの算出方法には、グレードに応じて表-3.8.1に示すものがあり、目的によって最適な方法を選定すればよい。ただし、時系列の舗装劣化モニタリングや地点別の補修プ

ラオリティを付ける場合など、客観性が求められる場合にはクラス1または2の適用が望ましい。このうち、水準測量は測定作業に車線規制が必要であることから、車線規制を行わないで測定が可能な縦断プロファイルによる評価を行うことが多い。

表-3.8.1 路面凹凸の測定とIRI算出方法

クラス	路面凹凸等の測定	IRIの算出方法
1	水準測量	縦断プロファイルからQCシミュレーションによりIRIを算出
2	任意の縦断プロファイル測定装置	縦断プロファイルからQCシミュレーションによりIRIを算出
3	RTRRMS (レスポンス型道路ラフネス測定システム)	任意尺度のラフネス指数を測定し、相関式によりIRIに換算
4	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視	調査員の体感や目視によりIRIを推定

※QC: クォーターカー

IRI算出に用いられるクォーターカーのモデルは図-3.8.5のとおりで、式(3.8.3)を用いてIRIを算出する。このとき、クォーターカーの速度は80km/hを標準としている。

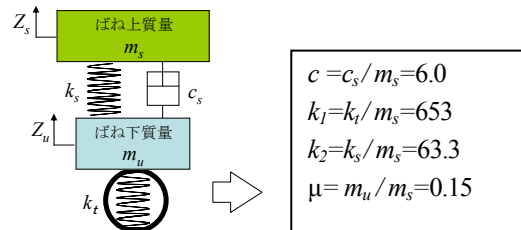


図-3.8.5 クォーターカー・モデルとその諸定数

$$IRI = \frac{L/V}{L} \int_0^{L/V} |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt \quad (3.8.3)$$

複素固有値解析の結果クォーターカーの1次の振動数は1.2Hzで減衰定数は33%、2次の振動数は10.8Hzで減衰定数は30%という特性を有していることがわかった。これは、一般の小型車両をモデル化したものであり、振動や騒音に対して影響が大きい大型車の特性とは若干異なっている。このため、クォーターカーの諸定数を変更し、日本のリーフサスペンションを有する大型車両モデルでIRIを算出する方法(以下「JRIT」という)についても研究されている。この研究によると、従来のIRIの評価では路面の周期によっては過大または過小評価する場合があることが明らかとなっている。また、橋梁の振動問題は比較的局所的に発生するため、200mという長いスパンで評価すると、その影響が薄められ顕著に現れな



い可能性がある。このため、振動問題を扱う場合の路面平坦性評価は 10m 程度の短いスパンで行うことがよいとしている。また、振動問題が生じていた様々な路面に IRI 評価および JRIT 評価を適用した結果、NEXCO が定める補修目標である IRI で 3.5mm/m の評価値は概ね妥当であると考えられるが、JRIT による評価手法を用いて補修目標値を「7.0」として評価した方が、より現実の振動問題に対応できるとしている。なお、JRIT の計算に用いられているパラメータは図-3.8.6 のとおりである。

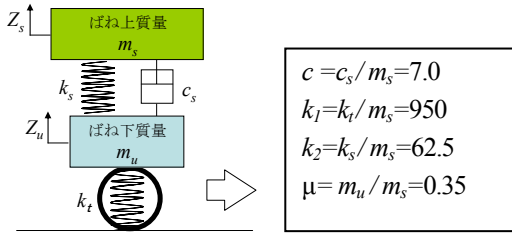


図-3.8.6 大型車両モデルとその諸定数

橋梁区間における路面凹凸と IRI の測定結果を図-3.8.7 に示す。

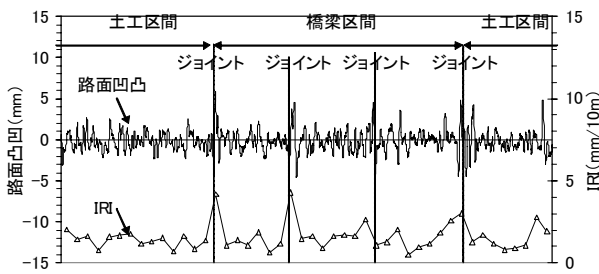


図-3.8.7 路面凹凸と IRI の測定結果の例

### 3.8.3 車両のバネ振動測定

路面に生じた凹凸により、走行する車両に振動が発生する。この振動は、路面凹凸の大きさや周期により振幅が異なる。このことから、車両に発生する振動を測定して路面凹凸の評価を行うことも可能である。図-3.8.8 に示したのは、一般的な大型車の車体構造である。車体は通常板バネ（乗り心地が重要な観光バスなどはエアバネが用いられる場合もある）とダンパーで車輪と連結されており、バネより上側の質点と下側の質点では振動の特性が異なるものになる。バネより上側の質点には、車体重量や貨物の重量が含まれ、質量が大きい部分である。バネより下側には、車軸やデファレンシャルギア・車輪などが含まれ、バネ上の質点よりも質量は小さい。このうち前者で発生する振動をバネ上振動、後方で発生する振動をバネ下振動といい、通常の場合、路面の凹凸に敏感に反応するのはバネ下振動である。

一般的な大型車のバネ上振動の卓越周波数は、リーフサスペンションで 3~4Hz、エアサスで 1~2Hz である。バネ下振動はいずれも 10~20Hz 程度といわれている。一方、

橋梁の固有振動は、構造や支間長により大きく異なるが、支間が 30m 程度の橋梁では 1 次の固有振動が 3~4Hz になり、さらに鉸桁の場合 10Hz 以上に高次の固有振動が存在することがある。また、15m 程度の比較的短いスパンが連続する橋梁において、10~15Hz の固有振動が卓越することがある。このように、対象となる橋梁によってバネ上振動の影響が大きい場合とバネ下振動の影響が大きい場合がある。したがって、車両バネ振動の計測に際しては、バネ下とバネ上いずれも測定しておくことが望ましい。

図-3.8.9 に橋梁区間で測定したバネ下振動の事例を示す。これより、バネ下振動はジョイント部で明瞭な応答を示していることがわかる。また、路面の補修後はこの応答が明らかに小さくなっていることがわかる。このように、車両のバネ振動を計測することにより、路面に生じた凹凸の発生箇所を明確にできるほか、補修等を行った場合の改善効果の評価をすることができると考えられる。

なお、現在のところ、騒音や振動防止を目的としたバネ振動の目標値や規制値は制定されておらず、また IRI 等との相関についても確認されていない。しかし、バネ振動は橋梁や周辺地盤に対する直接の原因となっていることが多く、今後、バネ振動による定量的な評価方法の確立が望まれる。

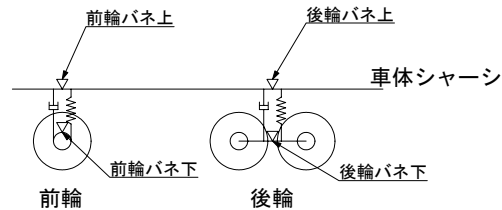


図-3.8.8 大型車バネの模式図

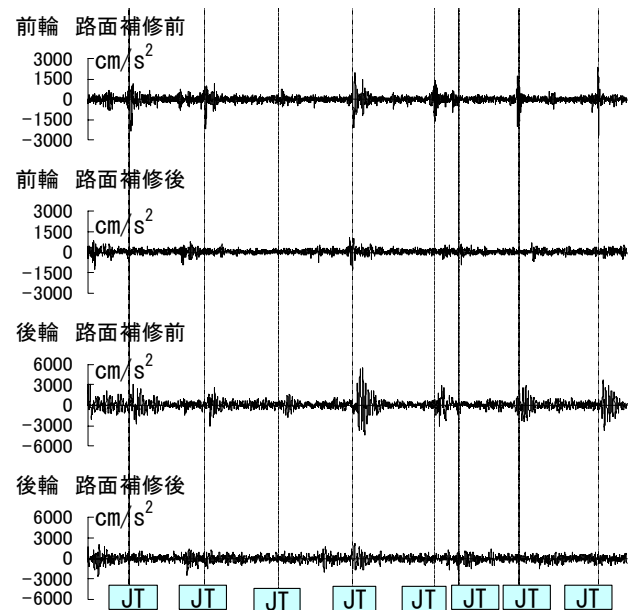


図-3.8.9 橋梁区間におけるバネ下振動の応答波形の例



## 参考文献

- 1) 社団法人産業環境管理協会：新・公害防止の技術と法規（騒音・振動編），2006.1.
- 2) 大保直人：地盤振動の伝播特性，騒音制御，Vol.18, No.6, pp.290-294, 1994.
- 3) 塩田 正純：地盤振動の伝搬経路における対策，騒音制御，Vol. 2, No. 2, pp.20-28, 1978.
- 4) 土木学会関西支部：都市域における環境振動の実態と対策講習会テキスト，pp.1-5, 2005.
- 5) 讃岐康博，大塚良隆，大舛孝美，金子鉄男：Beating 波形からの各単振動の対数減衰率算出法，第 2 回橋梁振動に関するコロキウム論文報告集，pp.109-114, 1989.8.
- 6) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 454, pp.29-38, 1993.12.
- 7) 石田博，久保真一，岡本晃，浜博和：支承構造の違いによる橋の振動特性に関する調査，橋梁と基礎，第 39 号，pp.51-56, 2005.1.
- 8) 三木千壽，村越潤，米田利博，吉村洋司：車両の重量測定，橋梁と基礎，pp.41-45, 1987.4.
- 9) 梶川康男，西沢辰男，杵本正信：可搬式交流流自動観測システムの開発，土木学会論文集，第 391 号/VI-6, pp.107-114, 1988.3.
- 10) 鈴木一史，中村英樹：交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証，土木学会論文集D, Vol.62, No.3, pp.276-287, 2006.
- 11) 松井繁之，Ahmed EL-HAKIM：RC 床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究，構造工学論文集，Vol.35A, pp.407-417, 1989.
- 12) 小塩達也，山田健太郎，小林直人，水野良由：鋼 I 桁橋の縦桁を用いた BridgeWeigh-In-Motion システムの開発，構造工学論文集，Vol.47A, pp.1082-1091, 2001.
- 13) 小塩達也，山田健太郎，若尾政克，因田智博：支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析，構造工学論文集，Vol.49A, pp.743-753, 2003.
- 14) 小林裕介，三木千壽，田辺篤史：リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング，土木学会論文集，No.773/1-69, pp.99-111, 2004.10.
- 15) 室井智文，薄井王尚，樺山好幸，深田宰史，梶川康男，幸田信則：伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.54A, pp.171-180, 2008.
- 16) 深田宰史，広井智，樺山好幸，室井智文，讃岐康博：大型車両のばね上振動に影響を与える長波長の路面凹凸に対する評価方法，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，I-286, 2009.8.
- 17) 岡林隆敏，岡谷まり子，呉慶雄：路面凹凸のモデル化と不規則振動論による道路橋交通振動加速度応答解析，構造工学論文集，Vol.47A, pp.411-418, 2001.
- 18) 深田宰史，室井智文，樺山好幸，梶川康男：路面補修前後の長期モニタリングから評価した周期性路面の橋梁に及ぼす影響，土木学会論文集，A1（構造・地震工学），Vol.67, No.1, pp.121-136, 2011.
- 19) 広井智，樺山好幸，讃岐康博，岡田裕行，兼澤秀和：路面路面プロファイル測定システムの開発，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，V-067, 2009.8.
- 20) 讃岐康博，梶川康男，深田宰史，杵本正信：プロファイルメータでの測定路面から実路面への近似法の提案，構造工学論文集，Vol.47A, pp.399-410, 2001.
- 21) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：設計要領第一集 舗装編，p.134, 2007.8.
- 22) Sayers,M.W.（笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎訳）：道路横断プロファイルからの IRI の算出（上），舗装，Vol.31, No.8, pp.12-17, 1996.8.
- 23) Sayers,M.W.（笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎訳）：道路横断プロファイルからの IRI の算出（下），舗装，Vol.31, No.8, pp.12-17, 1996.8.
- 24) 熊田一彦，大野滋也，佐藤正和：高速道路の構造・交通諸元と IRI の関係について，舗装工学論文集，第 7 巻，pp.10-1-10-6, 2002.12.
- 25) 兼澤秀和，松本大二郎，岡田裕行，広井智，樺山好幸，石川義人：路面プロファイル測定車を用いた国際ラフネス指数の評価と傾向，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，V-066, 2009.8.

## 4. 高架橋周辺において発生した環境振動問題の要因分析

深田宰史\*

\*博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

### 4.1 はじめに

橋桁上を車両が走行すると, 車両の振動は段差や路面凹凸によって励起され, さらに 橋梁の振動と連成する. 車両の振動と連成した橋梁の振動は, 図-4.1.1 に示すように, 高架橋の周辺環境に地盤振動や低周波音として伝播または放射される. 特に, 受振点または受音点となる家屋側(床, 建具, 人体など)の振動と加振源となる橋梁の振動数領域が近接した場合に振動や低周波音に関する苦情が生じる場合が多い.

ここでは 振動・低周波音問題を環境振動問題として, その伝播メカニズムについて, 図-4.1.1 をもとにして簡単にまとめた.

- ・伸縮継手上的路面凹凸(段差)を車両が通過する時に発生する衝撃的な振動(ばね下振動数領域)が橋梁振動を励起させ, 同時に橋脚, 地盤を介して家屋まで伝播する.
- ・伸縮継手上を車両が通過する時の衝撃により橋梁ウェブまたは伸縮継手などから構造音(ジョイント音)が発生し, 低周波音または騒音となって伝播する.

る.

- ・振動しながら橋梁上に進入した車両は, 橋梁と連成振動をする. 橋梁の卓越振動数が車両の卓越振動数に近接していた場合, その連成振動により, 共振が生じ, 橋梁は大きく揺れる.
- ・橋梁下面から放射される低周波音(スパン音)が発生する.
- ・橋梁または橋脚の振動(ばね上振動数領域)が地盤を介して家屋に伝播する.

近年の橋梁の多径間化や大型車交通量の増加, 軟弱地盤帯への高架橋の架設の増加等が振動・騒音発生メカニズムの解明を一層難しくしている. さらに, 苦情を訴える側の振動や騒音に対する感じ方にかなりの個人差が存在することが問題の解決を複雑にしている.

本章では, 加振源となる車両から受振点または受音点となる家屋(床, 建具, 人体など)までの間, 振動媒体となっている高架橋(上部・下部構造)の振動要因についてまとめることにした.

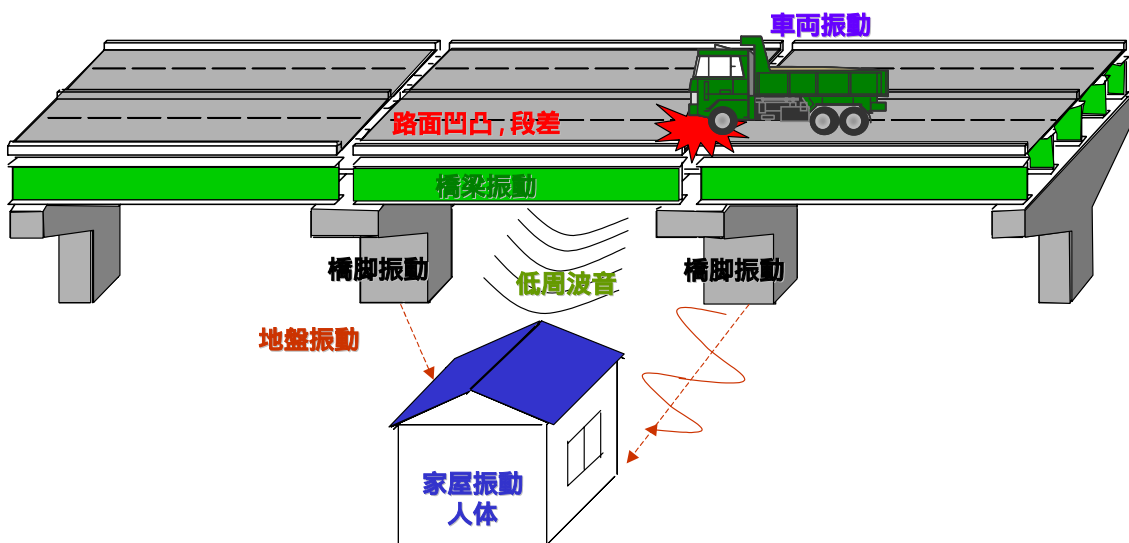


図-4.1.1 振動・騒音問題の概要図

## 4.2 各振動系の特性

環境振動問題は、受振側の人体が不快を感じなければ起こらない問題である。橋梁から伝播してきた振動を最後に受ける人体側では大きく分けて、大型車両のばね上振動数領域とばね下振動数領域に分けられる。そのような観点から、以下では各振動系での振動特性について述べることにする。

### 4.2.1 大型車両の振動特性

一般的な大型車両の振動系は、ばね上振動系とばね下運動系に分けることができ、リーフサスペンションを有する大型車両の場合、図-4.2.1 に示す黒線のように後輪ばね上振動数は3Hz付近に存在し、ばね下振動数は10Hz付近（または10～20Hz）に幅広く分布している<sup>1)</sup>。

一方、エアサスペンションを有する大型車の後輪ばね上振動数は、図-4.2.1 に示す赤線のように2Hz前後に卓越があるが、卓越が小さくその分布域が広がっている。近年の大型車は、エアサスペンションが標準装備となっており、今後は車両構造の改善により環境振動に対しても若干の変化が起こるものと考えられる。

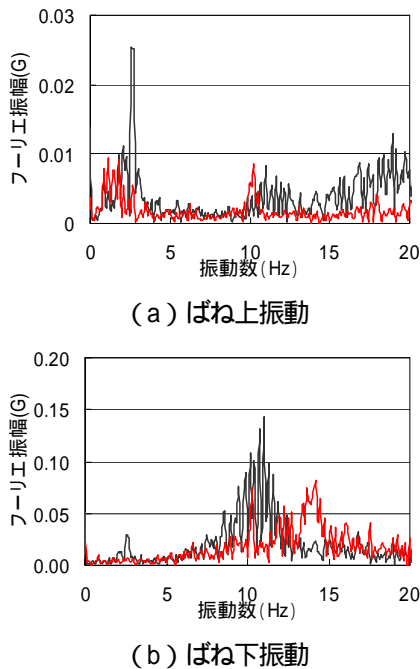


図-4.2.1 大型車両のばね振動特性

### 4.2.2 家屋の振動特性

家屋は、木造、RC造、SRC造など様々な形式が存在するが、日本の木造2階戸建住宅の振動特性について、福岡県、高知市、新潟市など8都市の合計163戸の常時微動波形を対象として統計的に分析した結果について文献<sup>2)</sup>でまとめられている。それによると、梁間方向と桁行方向の差は小さく、2007年に建てられた木造2階建て戸建住宅の平均周期は0.138秒(7.25Hz)、同様にその30

年前である1977年に建てられたものの平均周期は0.194秒(5.15Hz)となっている<sup>2)</sup>。また、文献<sup>3)</sup>では、一般の木造住宅を対象として、近畿、中国および九州地方など、合計116戸を対象とした微動計測の結果、建物の築後年と周期をまとめており、平均して、建築直後では0.113秒(8.85Hz)となっており、上記のデータと合わせて、築後若い木造住宅は、概ね7-8Hz付近に卓越振動数が存在するものと考えられる。

また、いずれの文献とも古い建物ほど共振周期が長くなる傾向があるが、これらの違いは、老朽化の影響だけでなく、設計基準や標準仕様および施工方法の変遷の影響も内包されているものと考えられる<sup>2)</sup>。なお、交通振動による影響は建物の1次振動モードだけでなく、2次振動モードにも及ぶことに注意が必要である。

### 4.2.3 人体の振動特性

振動レベルを算出する場合に用いる、体感補正特性を図-4.2.2に示す。当時のISO2631で規定していた等感覚曲線を用いたものであり、現在でもわが国の振動レベル値は、鉛直振動として、4-8Hzの振動成分が強調されていることがわかる。また、日本では水平振動についての要請限度値はないが、水平振動の補正特性をみると、2Hz以下において強調されている。これより、鉛直振動および水平振動に対しては、ばね上振動数領域に近い特性を有していると考えられる。

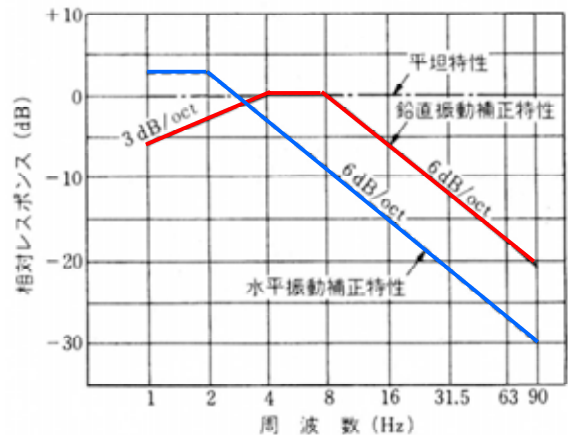


図-4.2.2 体感補正特性

つぎに、騒音測定の際に用いられる人体の聴感にあわせたA特性の周波数補正曲線を図-4.2.3に示す。人間の聴覚として最も聞きやすい2kHzを中心とした重みをおいている。騒音については、ばね振動領域とはかけ離れた振動数領域を有しているが、次に示す低周波音については、ばね下振動数領域に近いことがわかる。

低周波音の人体感覚特性を評価するための周波数特性としてISO7196で規定されているG特性を図-4.2.4に示す。低周波音として、10Hz～30Hz付近に重みをおいていることがわかる。

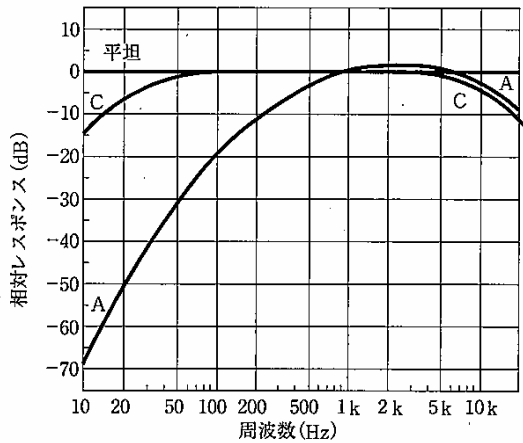


図-4.2.3 騒音計による周波数補正特性

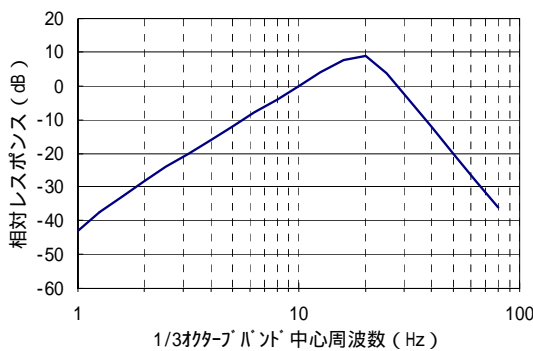


図-4.2.4 低周波音の周波数補正特性 (G 特性)

さらに、低周波音に関して、評価方法や明確な基準は設けられていないが、平成 12 年 10 月に環境省から「低周波音の測定方法に関するマニュアル」が公表されている。これより、計測した低周波音の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを図-4.2.5 に示した物的苦情に関する参照値と心身に係る苦情に関する参照値と比較し、参照値以上であれば低周波音による苦情の可能性が考えられる。

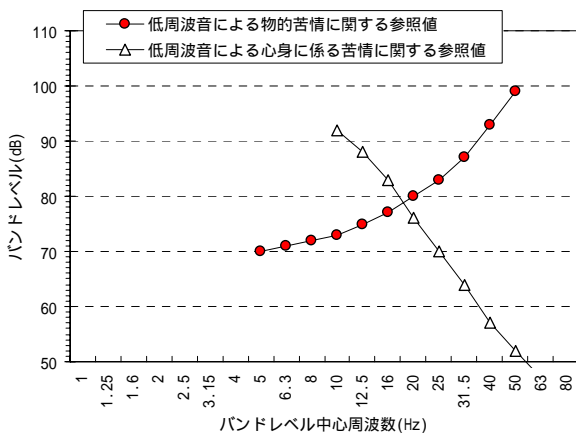


図-4.2.5 低周波音による苦情に関する参照値

#### 4.3 環境振動に及ぼす影響要因

上述した車両系の振動数は、ばね上 2-3Hz、ばね下 10-20Hz 付近の振動数域を有していた。これに対して、家屋および人体でも同じような振動数領域で受振および受音されている。ここでは、加振源から受振および受音点までの間において、媒体物となる高架橋（上部・下部構造）のどのような要因が影響して、振動を伝播、音圧を放射しているのか、これまでに報告されている環境振動問題をもとにして述べることにする。

##### 4.3.1 路面凹凸の長波長による要因

前出の通り、リーフサスペンションを有する大型車両の後輪ばね上振動数は 3Hz 付近に存在することが知られている。その振動数領域にたわみ 1 次振動数を有する橋梁は、大型車両の後輪ばね上振動数との連成により大きな振動を生じる。

しかし、大きな振動が生じる原因は、大型車両の後輪ばね上振動数と橋梁の卓越振動数が近接しているだけではなく、路面凹凸と車両振動との連成振動、特に路面凹凸の特性が原因となる場合がある。

事例を挙げると、以下の橋梁では、大型車両の後輪ばね上振動数と橋梁の卓越振動数が近接していたため、大きな振動を生じていた。しかし、主な要因は、路面凹凸であったことを報告している。

- ・ PC ポストテンション単純 T 桁橋 (37.5m)<sup>4)</sup>
- ・ 鋼桁橋 (35.0m)<sup>5)</sup>
- ・ 4 径間連続鋼床版箱桁橋 (40.0+47.5+50.0+46.3m)<sup>6)</sup>

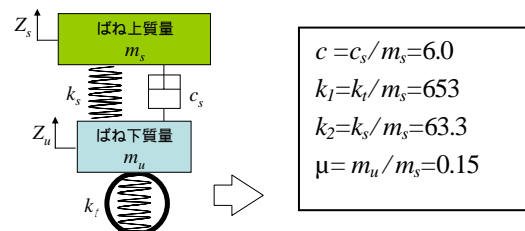


図-4.3.1 クォーターカー・モデルとその諸定数

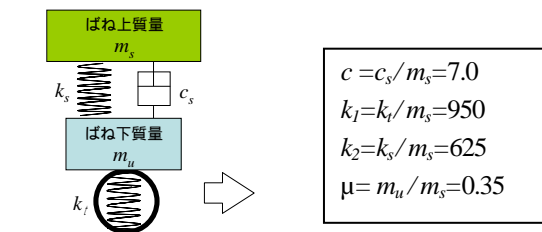


図-4.3.2 大型車両モデルとその諸定数

そこで、文献 7) では IRI の分析に用いるクォーターカー・モデル (図-4.3.1) の諸定数を日本のリーフサスペンションを搭載した大型車に対応したものに変更した

JRIT モデル(図-4.3.2)を提案している。このモデルを振動問題が生じた路面に適用すれば、車両と橋梁との連成が原因であるのか、車両と路面との連成が原因であるのかという判断材料として役立てることができるものと考えられる。また、評価基準長を 200m とした IRI<sub>200</sub> を評価手法として用いて、長波長の路面に適用し、補修目標値を「3.5」として評価しても対応できるが、JRIT による評価手法を用いて補修目標値を「7.0」として評価した方が、より現実の振動問題に対応した評価ができることがわかっている<sup>7)</sup>。

#### 4.3.2 路面凹凸の短波長による要因

振動苦情の要因として数多くの事例が報告されているものとして、橋梁の伸縮継手付近における波長の短い路面凹凸<sup>8)</sup>がある。この短波長の路面凹凸により、車両のばね下振動が大きく励起され、橋梁側に大きな衝撃力を与える。車両が加える衝撃力は、床版端部の変状や伸縮継手などの 2 次部材の耐久性能に影響を及ぼすだけでなく、箱桁のウェブ振動に起因する低周波音や地盤振動などの環境振動問題に発展する場合もある。

#### 4.3.3 床版劣化に伴う路面凹凸

名神高速道路の開通初期に建設された区間では、ロッカー式橋脚やラーメン式橋台を有した中空床版橋が数多く架設されている。予想もしない交通量の増加、車両の大型化に伴い、供用後 40 年以上経過した中空床版橋は、コンクリート床版のひび割れや漏水などの損傷が生じている。それにより、舗装の基層面と接する床版側が劣化・損傷していることが原因で舗装を打ち直してもすぐに舗装の不陸が生じ、結果的に振動問題へと発展した事例<sup>9)</sup>が報告されている。

#### 4.3.4 車両ばね上振動またはばね下振動と 1 次振動(曲げ振動モード)との連成(共振)による要因

大型車両が橋梁上を通過する際に放射される低周波音として、1 次振動(曲げ振動モード)の振動モードが、低周波音として家屋に伝播している。それらは、ばね上振動数領域(3Hz 付近)に卓越振動数を有する事例<sup>10)・12)</sup>やばね下振動数領域(10-20Hz 付近)に卓越振動数(図-4.3.3 参照)を有する事例<sup>13)</sup>が報告されている。いずれも、卓越振動数が近いことにより連成が生じ、大きな振幅を有して伝播したことが要因と考える。

さらに、連続桁の場合、1 次振動モード形状の振動モードが多径間に渡り同位相で連続する振動モードが生じた場合、低周波音としての大きな音圧が家屋まで伝播している。この振動モードについても、ばね上振動数領域(3Hz 付近)に卓越振動数を有する事例<sup>14)</sup>(図-4.3.4 参照)やばね下振動数領域(10-20Hz 付近)に卓越振動数を有する事例<sup>15)</sup>(図-4.3.5 参照)が報告されている。さらに、これらの卓越振動数により 3Hz または 10Hz 付近に

卓越していた場合、家屋内の家具のガタツキ音が苦情原因となっている。

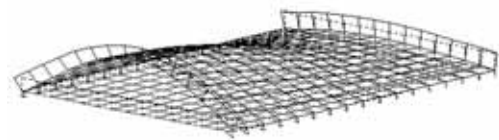
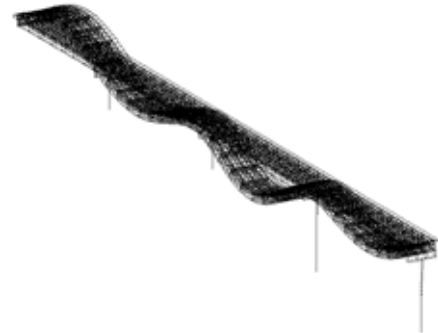
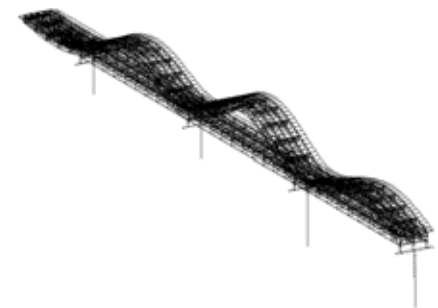


図-4.3.3 ばね下振動数領域(10Hz 付近)の振動モード



(a) 3.29Hz



(b) 3.00Hz

図-4.3.4 1 次振動モード形状の振動モードが多径間に渡り同位相で連続する振動モード(ばね上振動数領域)



(a) 8.83Hz



(b) 12.34Hz



(c) 13.83Hz

図-4.3.5 1 次振動モード形状の振動モードが多径間に渡り同位相で連続する振動モード(ばね下振動数領域)



4.3.5 車両ばね下振動と2次振動との連成による要因  
 大型車両がジョイントを通過する際に橋梁から放射される低周波音のうち、ばね下振動数領域(10Hz)において、鋼桁橋でよく観測されている振動モードが2次振動モード形状の逆対称振動(図-4.3.6 参照)である<sup>16) 17)</sup>。これらは、固有振動解析から主桁振動によるものと考えられる。事例では連続桁や連結桁における端部径間の振動モードとして観測されている。

一方、トラス橋の場合は、ばね下振動数領域に近い卓越振動数を有する床組(床版と縦桁が一体)の高次振動が低周波音として卓越している事例が報告されている<sup>18)</sup>。

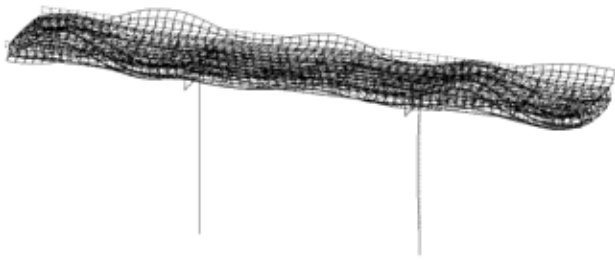


図-4.3.6 2次振動モード形状の逆対称振動(15Hz付近)

#### 4.3.6 軟弱地盤による要因

一般的に、振動源から50m以内が環境振動の影響範囲と考えられているが、文献<sup>19)</sup>では、支間41.6m+2@47.0m+41.6mの4径間連続非合成鋼箱桁が架設されている軟弱地盤上(表層10m程度までN値2-6程度という地盤)において、比較的低振動数域の振動が遠方まで伝播している事例を報告している。この橋梁では、曲げ振動3.0-3.4Hz、ねじれ振動4.0Hzに卓越があり、曲げ振動が支配的であった。橋脚脇および橋脚脇から80m程度離れた戸建住宅横では3.0-4.4Hzの卓越振動が伝播しており、橋脚からの鉛直および水平振動が遠方まで伝播していた。また、このような低周波域の地盤振動における遠距離伝播現象は高架橋の振動と地盤の振動との共振現象ではなく、橋脚からの鉛直・水平方向の同時加振の結果として生じたものと結論付けている<sup>19)</sup>。

次の事例として、軟弱地盤上の高架橋(深い根入れ基礎で支持している)において、地盤と橋梁(橋脚)との動的な相互作用により、軟弱地盤上の家屋まで橋梁の低振動数帯域の振動が伝播していた事例を報告している<sup>20)</sup>。この橋梁は、支間長47.0m+83.5m+58.7mを有する3径間連続鋼床版曲線箱桁橋(曲率1/800m)である。曲線桁ゆえに橋軸方向に固定となっている中間橋脚では、面内および面外方向のスウェイとロッキング振動が卓越していた上に、地盤条件は、丘陵に挟まれた軟弱な後背湿地が带状に広がっている状況であり、中間橋脚周辺の家屋において振動障害(夜間に60dB以上の振動が発生)が生じたと報告している<sup>20)</sup>。橋梁の振動は2.3Hz、3.5Hzおよび4.0Hz付近に卓越が見られ、橋軸方向の地盤上では3-4Hzに大きな卓越が見られた。このように、軟弱地盤

上に架設された高架橋周辺の家屋においては、高架橋と共振する可能性がある。

#### 4.3.7 橋脚形式による要因

都市内における高架橋では、高架下の有効利用からT型橋脚、門型橋脚が採用される場合が多い。特に、平面道路が高架橋と並行している場合には中央分離帯位置に橋脚を架設するため、T型橋脚が採用される。T型橋脚は脚柱から両側に横梁を延ばしているため、梁先端に荷重が載荷した場合、面内ロッキング振動に加えて、面外方向へのロッキング振動(図-4.3.7)が大きく卓越する。そのため、橋脚のロッキング振動による影響が周辺環境に伝播していることを報告している<sup>21) 22)</sup>。

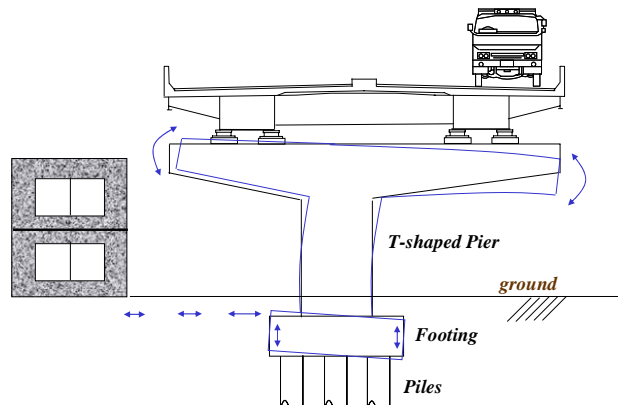


図-4.3.7 面外方向へのロッキング振動

#### 4.3.8 モジュラー型ジョイントに起因した要因

多径間連続橋や箱桁橋のように大きな支間を有する橋梁の場合、温度変化等による伸縮量が大きいいため、遊間を広くする必要があり、そのため、大きな伸縮装置が必要となるため、モジュラー型(ビーム型)ジョイント(図-4.3.8)を採用する場合がある。モジュラー型ジョイントは、止水ゴム空間に起因して発生する圧縮膨張音やミドルビームと呼ばれるジョイント部材の曲げ振動に起因した音が騒音の要因とされている<sup>23)</sup>。

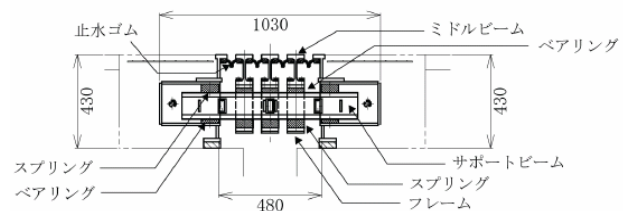


図-4.3.8 モジュラー型ジョイント<sup>23)</sup>

#### 4.3.9 弾性支承による要因

橋梁の支承形式として、これまで鋼製支承が数多く採用されてきたが、平成7年に起きた兵庫県南部地震における支承部の破損、またそれに伴う2次の被害が数多く発生したことから、それ以降、上部構造から下部構造に

加わる慣性力を分散させる目的として反力分散型ゴム支承を採用するケースが多い。また近年では、支承変形により減衰を確保させる鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承などの免震デバイスも高架橋全体の耐震性能を向上させるために採用されるケースが増えている。

このような弾性支承化により、鋼製支承の場合に比べて耐震性や維持管理が向上したことは言うまでもない。しかし、比較的柔らかい地盤（軟弱地盤）上に架設された高架橋の場合、弾性支承化により、高架橋の卓越振動数が低下し、今までと違った振動数領域に存在していた家屋固有の振動との共振が起こる場合や軟弱地盤上で地盤振動が増幅する可能性がある<sup>24)</sup>。

文献<sup>25)-27)</sup>では、交通振動により、橋梁が微小な振幅で振動している状態での鋼製支承とゴム支承の変位挙動の違いや振動挙動の違いについて報告している。さらに、ゴム支承の弾性変形に伴う桁端段差によって騒音や振動が大きくなることを懸念して、実測により確かめられており、鋼製支承とゴム支承で支承の回転角はほとんど変わらないこと、ゴム支承の場合、ゴム自体が圧縮されることから桁端部の跳ね上がりによる段差は相殺され、隣接桁との段差は生じておらず、さらに騒音レベル(L<sub>50</sub>)および振動レベル(L<sub>10</sub>)の増幅は認められなかったと報告している<sup>25)</sup>。

また、先に述べたように、多径間連続径間の端部径間では、遊間が広く、さらに支承高が高くなるため、弾性支承の鉛直変位が影響してジョイント段差に起因するウェブ振動・地盤振動問題が発生する可能性がある。また、弾性支承によるせん断変位により、T型橋脚などの橋脚振動が励起され、地盤振動問題が発生する可能性がある。

#### 4.3.10 交通荷重による要因

都市高速道路における振動苦情の多くは、夜中や明け方の大型車による振動を訴えており、それらの苦情実態と軸重違反車両の走行実態との整合が見られることから、過積載車両による要因が考えられる<sup>28)</sup>。

そのような背景のもと、文献<sup>29)</sup>では、走行荷重による橋梁の反力変動を測定して走行荷重を推定する方法（Bridge Weigh-in-Motion）を用いて走行車両の総重量と橋脚直下の加速度応答との相関について報告している。それによると、総重量の重たい大型車両が走行することにより、振動加速度レベルのピーク値が大きくなる傾向にあり、振動加速度レベルのピーク値と総重量の下限値とは正の相関が見られた（図-4.3.9）。しかし、一方で比較的重量が軽い車両でも大きな振動が生じており、振動加速度レベルのピーク値のばらつきが大きくなっていた。

したがって、高架橋の周辺環境に与える振動要因としては、大型車両の総重量だけでなく、大型車両のばね振動との相関もあるものと考えられる。

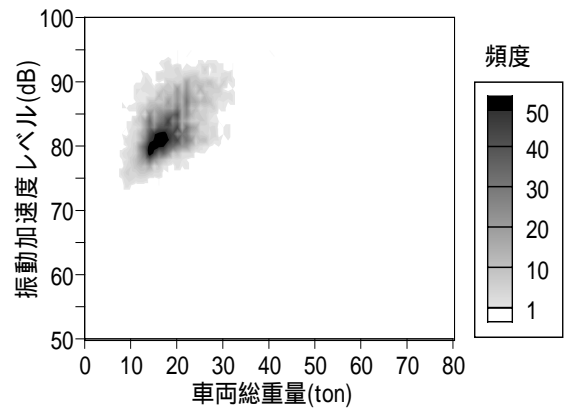


図-4.3.9 車両総重量(3,4軸類)と振動加速度レベル<sup>29)</sup>

#### 4.3.11 多径間連結桁橋で発生する可能性がある問題

桁連結をしてジョイントを取り除いたことにより、ばね下振動による衝撃的な加振がなくなり、横桁および主桁のウェブ振動などが大きく低減される。

しかしながらその一方で、端部径間では遊間が広くなるため、伸縮装置の大型化により、ジョイント段差に起因する振動・騒音問題が発生する可能性がある<sup>30)</sup>。

#### 4.3.12 中空床版橋で発生する可能性がある問題

名神高速道路の開通初期に建設された区間では、ロッカー式橋脚やラーメン式橋台を有した中空床版橋が数多く架設されている。予想もしない交通量の増加、車両の大型化に伴い、供用後40年以上経過した中空床版橋は、コンクリート床版のひび割れや漏水などの損傷が生じている。それにより、舗装の基層面と接する床版側が劣化・損傷していることが原因で舗装を打ち直しても直ぐに舗装の不陸が生じ、結果的に振動問題へと発展してしまう事例<sup>9)</sup>が報告されている。

また、特殊なラーメン式橋台（写真-4.3.1）では、両径間からの片持ち構造により、その橋台直上のジョイント部での振動問題が過去において生じていた。さらに、近年では、様々な振動対策が施工されているが、遮音壁の設置に伴う下面増厚により断面内の死荷重バランスが不均衡になったことが原因で振動問題が生じた事例<sup>31)</sup>もある。



写真-4.3.1 特殊なラーメン式橋台

さらに、先に述べたように中空床版橋は支間長が小さな橋梁が多く、比較的高い卓越振動数が観測されているが、ばね下振動数領域に近接した場合、低周波音問題を生じることがある<sup>15)</sup>。

#### 4.3.13 箱桁橋で発生する可能性がある問題

一般的に箱桁橋は、支間が比較的大きい橋梁として、大きな河川や広幅員の幹線道路と交差する場所に架設される。そのため、多径間連結桁橋の節で述べたように、遊間が広く、モジュラー型（ビーム型）ジョイントなど伸縮装置の大型化により、ジョイント段差に起因する主桁のウェブ振動が60Hz, 100Hz付近に卓越し、低音域騒音として苦情になった事例<sup>32)</sup>が報告されている。

また、T型橋脚を有する2箱桁において、T型橋脚の横梁先端に両方の桁の支承が設置されているため、T型橋脚の橋軸直角方向へのロッキング振動が励起した事例<sup>22)</sup>が報告されている。

さらに、箱桁間の間隔が広い2箱桁の場合において、箱桁間の端横桁、端部床版の剛性不足のため、端横桁の変形により構造的な段差が生じ、車両がジョイント近傍を通過した際に衝撃的な加振をすることで端横桁近傍の局部振動を増幅させ、振動苦情を生じた事例<sup>33)</sup>が報告されている。この対策方法として、図-4.3.10に示す擬似支承を設置している。

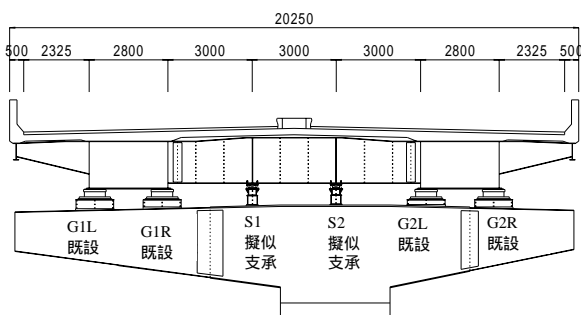


図-4.3.10 箱桁間の間隔が広い2箱桁

#### 4.4 おわりに

上述したように高架橋の周辺環境において発生した環境振動問題に関して、これまでの事例を基にして要因分析を行った。その結果、車両、家屋、人体および橋梁が有するそれぞれの振動数領域が非常に近いことが明らかとなった。また、環境振動問題を生じる様々な要因が複合していることも明らかとなった。しかしながら、これまでの著者の経験から、最も重要な要因は、橋面上や伸縮装置付近の路面凹凸であり、如何に平坦な路面を維持するかが大切であると考えられる。また、その他の対策を考える場合、しっかりと要因分析を行い、コストを考慮した最適な対策方法を検討することが必要である。

#### 参考文献

- 1) 梶川康男, 深田宰史, 林下貴彦, 山田健太郎, 小塩達也: サスペンション構造が異なった車両走行による高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.413-420, 2004.3.
- 2) 岩本亮, 川瀬博, 包那仁満都拉: 微動計測に基づいた在来木造住宅の振動特性の地域性および年代変化, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第635号, pp.33-39, 2009.1.
- 3) 境有紀, 飯塚裕暁: 非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp.32-45, 2009.
- 4) 室井智文, 薄井王尚, 縦山好幸, 深田宰史, 梶川康男, 幸田信則: 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両とPC桁橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.171-180, 2008.3.
- 5) 讃岐康博, 梶川康男, 深田宰史, 枚本正信: プロファイルメータでの測定路面から実路面への近似法の提案, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.399-410, 2001.3.
- 6) 鈴木信二, 中尾健太郎, 佐藤弘史, 橋義規, 林家祥: 車両走行に伴う橋梁振動の発生メカニズムに関する研究, 橋梁振動コロキウム'01 論文集, pp.133-140, 2001.10.
- 7) 広井智, 深田宰史, 縦山好幸, 室井智文, 岡田裕行: 高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法, 舗装工学論文集, 第14巻, pp.179-187, 2009.12.
- 8) 深田宰史, 松本剛也, 相葉忠一, 岡田裕行, 縦山好幸: 高速道路の橋梁伸縮継手付近における路面凹凸形状と補修順位評価の提案, 舗装工学論文集, 第15巻, pp.81-88, 2010.12.
- 9) 浜博和, 西山晶造, 西岡昌樹, 深田宰史, 松田哲夫, 枚本正信: 都市内高速における床版上面増厚による環境対策工事, 橋梁と基礎, Vol.42, No.6, pp.43-48, 2008.6.
- 10) 村井逸朗, 佐野千裕, 佐藤弘史, 葛西俊二, 橋義規: TMDによる橋梁振動および低周波音抑制効果に関する実橋実験, 橋梁振動コロキウム'01 論文集, pp.141-146, 2001.10.
- 11) 佐々木栄一, 關真二郎, 山田均, 勝地弘, 石川裕治, 葛西俊二: 同時多点計測による橋梁に起因する低周波騒音の実態分析と対策効果の検証, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, I-106, 2007.9.
- 12) 畔柳昌己, 高橋広幸, 上東泰, 安藤直文, 篠文明: 鋼桁橋のコンクリート床版から発生する騒音・低周波振動問題への対策 - 第二東名高速道路 刈谷高架橋環境対策工事 -, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第9巻, pp.369-374,



- 2009.10.
- 13) S. Fukada: Infrasound and Vibration of Short Span Bridge due to Running Vehicle, Proceedings of Inter-noise 2006, (on CD-ROM) No.078, 2006.12.
  - 14) H. Hama, S. Fukada, K. Usui, Y. Kajikawa, T. Matsuda: Infrasound and Ground Vibration Transmitted from Highway Bridge Using Moving Trucks, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, (on CD-ROM), 2010.8.
  - 15) H. Hama, S. Fukada, M. Sugimoto, H. Ishida and M. Yamada: Characteristics of infrasound radiated from the continuous short spans bridge due to running trucks, 13th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, (on CD-ROM), 2008.10.
  - 16) S. Fukada, Y. Kajikawa, M. Sugimoto, H. Hama and T. Matsuda: Characteristics of vibration and low frequency noise radiated from the highway bridge and countermeasure, Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, (on CD-ROM) ENV11-001-IP, 2007.9.
  - 17) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田友孝: 道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.237-250, 2010.3.
  - 18) 生田目尚美, 金哲佑, 畑中章英, 川谷充郎: ノージョイント化による鋼トラス橋の振動低減効果の検討, 鋼構造論文集, 第16巻, 第62号, pp.1-10, 2009.6.
  - 19) 中谷郁夫, 早川清, 西村忠典, 田中勝也: 高架道路橋を振動源とする地盤環境振動の遠距離伝播メカニズム, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.196-212, 2009.2.
  - 20) 竹宮宏和, 陳鋒, 井田啓子: 高架道路で発生する交通振動と沿線地盤への伝播性状 - 計測と FEM 解析のハイブリッド手法による予測と対策 -, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.204-214, 2006.4.
  - 21) 薄井王尚, 田中浩, 菊池正庸: 橋脚の挙動とその周辺地盤での振動特性, 橋梁振動コロキウム'01 論文集, pp.161-166, 2001.
  - 22) 薄井王尚, 梶川康男, 深田宰史: 2 箱桁橋における橋脚のロッキング振動に着目した地盤振動対策, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.459-469, 2005.3.
  - 23) 松本泰尚, 山口宏樹, 富田直幹, 加藤誠之, 鷓飼禎史, 廣本泰洋: モジュラー型エクспанションジョイントの騒音発生源と騒音制御策に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.75-92, 2007.1.
  - 24) 石田博, 岡本晃, 久保真一, 浜博和: 支承構造の違いによる橋の振動特性に関する調査, 橋梁と基礎, Vol.39, No.1, pp.51-56, 2005.1.
  - 25) 徳永法夫, 吉川実, 川北司郎, 山本豊: 高力黄銅支承板 (BP) 支承からゴム支承への取替えに対する有益性に関する一考察, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.17-25, 1997.12.
  - 26) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 吉川実, 薄井王尚: 弾性支承と桁連結構造を用いた既設高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.747-756, 1997.3.
  - 27) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 川北司郎, 浜博和: 連続立体ラーメン免震橋の車両走行時の振動特性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.801-810, 1998.3.
  - 28) 徳永法夫, 西村昂, 日野泰雄: 高架道路における交通振動と苦情要因に関する研究, 橋梁と基礎, Vol.32, No.3, pp.51-56, 1998.3.
  - 29) 小塩達也, 森田俊樹, 深田宰史, 山田健太郎, 梶川康男: 自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.395-402, 2004.3.
  - 30) 徳永法夫, 江上輝男, 西村昂, 刑部清次: 既設単純鋼桁の主桁連結工法による超多径間化に関する一考察, 橋梁と基礎, Vol.31, No.4, pp.21-30, 1997.4.
  - 31) 浜博和, 深田宰史, 梶川康男, 松田哲夫, 宮本雅章: R C 中空床版高架橋の周辺で生じた環境振動に対する低減対策, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.252-261, 2011.3.
  - 32) 連重俊, 平野廣和: 鋼橋低音域騒音低減工法の開発と試験施工, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.131-144, 2003.6.
  - 33) 徳永法夫, 江上輝男, 讃岐康博, 西村昂: 主桁間隔の広い 2 箱桁橋の防振工事, 橋梁と基礎, Vol.30, No.11, pp.16-24, 1996.11.

## 5. 振動・騒音問題に対する対策方法

浜博和<sup>\*</sup>，高田基樹<sup>\*\*</sup>，二木太郎<sup>\*\*\*</sup>，横川英彰<sup>\*\*\*\*</sup>，深田宰史<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>株式会社 フジエンジニアリング，調査設計部（〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28）

<sup>\*\*</sup>三井造船鉄構工事（株），東部支店 工事部（〒290-8531 市原市八幡海岸通り1番地）

<sup>\*\*\*</sup>博(工)，オイレス工業(株)，免制震事業部 開発推進室（〒550-0012 大阪市西区立売堀 1-11-2）

<sup>\*\*\*\*</sup>博(工)，オイレス工業(株)，免制震事業部 技術開発部（〒108-0075 東京都港区港南 1-6-34）

<sup>\*\*\*\*\*</sup>博(工)，金沢大学准教授，理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 金沢市角間町）

### 5.1 はじめに

振動，騒音，低周波音対策として過去に様々な装置や構造が考案され適用されてきた．その結果については論文や学会等で公表されているが，問題が一様ではなく画一的な評価ができないのが実情である．本章では振動や騒音に対する対策方法について過去の実施事例をもとにして紹介するが，その改善効果は前述のとおり絶対的なものではないため，今後の適用にあたっては十分な検討が必要である．

道路に起因する環境対策は道路構造や材料に関する純技術的な手法だけではなく，法律的な対応（振動や騒音に対する基準値の整備や自動車メーカーに対する基準等）や行政面での対応（ロードプライシングや大型車の通行規制等）など実施方法の選択肢が非常に広範である．しかし，ここでは橋梁を原因とする振動，騒音問題を取り扱うため，基本的には道路あるいはその周辺における技術的な対策を対象としている．

### 5.2 対策工の分類

一般に対策工は 発生源（橋梁）での対策， 伝播経路上での対策， 受振点での対策に大別でき具体的な対策方法としては表-5.2.1 に示したようなものが挙げられる．具体内容については項目ごとに述べるが本章では基本的に発生源である橋梁における対策について重点的に紹介するものとする．

橋梁に起因する振動と騒音では，その発生原因やメカニズムが同じではなく異なっているのが一般的である．したがって，振動と騒音を同一の土俵で論ずることはできないため両者を分けて記載する．低周波音については，伝播経路や伝播のメカニズムは騒音と同じ空気の振動であるが，発生源は橋梁の振動であることが多く，振動と同じことが多い．このように対策方法の内容によって期

待できる効果が異なるためそれぞれに対する評価を行う．

### 5.3 発生源対策

#### 5.3.1 路面对策

振動，騒音対策として最初に実施される場合が多いのが路面对策である．路面对策は振動や低周波音対策に実施する場合と騒音対策を目的として実施する場合で異なった対応となる．

（1）振動，低周波音対策を目的とした路面对策<sup>1)-9)</sup>

路面对策には，全面的に舗装（表層）を打ち換える場合もあるが，主として伸縮装置周辺の段差修正と伸縮装置の撤去（ノージョイント化）の2つに分類される．伸縮装置周辺の段差修正対策としては，ジョイント取り替えと伸縮装置前後の舗装擦り付け（薄層舗装の実施）がある．ジョイントの種別・構造と振動，騒音の発生傾向（発生レベル，卓越周波数等）については，何らかの傾向があると考えられるが明確になっていない．また，伸縮装置前後の舗装擦り付けについては，これまで伸縮装置や後打ちコンクリートと舗装の段差量と振動，騒音の発生との関係について研究されてきたが，最近伸縮装置前後 3～10m の縦断線形やその形状と振動，騒音の発生との関係も注目されている．

伸縮装置の撤去（ノージョイント化）対策としては，伸縮装置の埋設ジョイントがある．伸縮装置の撤去（ノージョイント化）対策による振動，騒音の低減効果は，10～20Hz，40～50Hz の周波数帯に影響があると考えられるが 必ずしも定量的に把握されているとはいえない．

なお，以上の路面对策は主として振動や低周波音に対するものである場合が多いが，車両がジョイントを通過するときの衝撃音が低減できることが期待できる．

(2) 騒音対策を目的とした路面対策<sup>10)-12)</sup>

騒音を低減するための路面対策としては、低騒音舗装の採用が挙げられる。低騒音舗装は、通常の密粒アスファルト混合物に比べて空隙率が約 20%のポーラスな舗装であり、排水性舗装などとも呼ばれている(図-5.3.1参照)。空隙率が高いため、降雨時には雨水が空隙を介して基盤上を通り側帯に排出され、舗装表面が滞水しにくい特徴を有している。低騒音舗装の採用により車両走行音のうち、特に 1000~2000Hz の周波数特性を有するポンピング音が低減できる。ポンピング音は、タイヤのトレッド面と舗装の間で圧縮された空気が、溝(グループ)を通じて外部に急激に放出し、これが断続して起こるためにノイズとなって空气中に放出されるものである。このポンピング音は、密粒アスファルトのように路面が平滑な場合にグループ内の空気が圧縮されやすくなるために大きくなる傾向にあり、逆に、低騒音舗装の場合は気密性が低いために生じにくい。なお、低騒音舗装は透水性が高いため、橋梁部に適用する場合には適切な防水層の設置が必要となる。

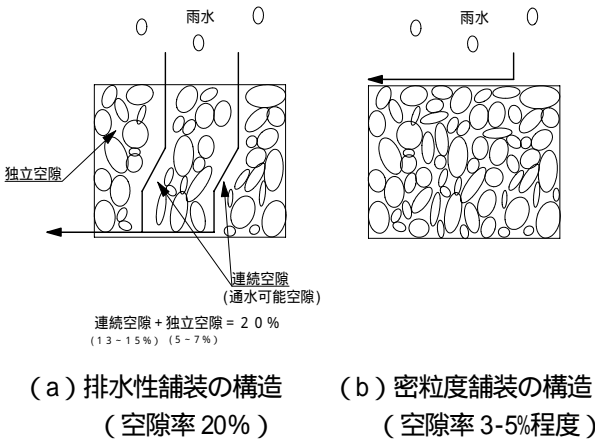


図-5.3.1 舗装の模式図

5.3.2 上部構造対策

上部構造対策は、発生源である橋梁に対して対策を講じるもので、振動低減メカニズムについては多種多様のものである。ここでは、(1) 構造変更によるもの、(2) 減衰機構を付加によるものに大別する。

(1) 構造変更

上部構造の構造変更は、上部構造の構造形式、構造部材や剛性、質量を変化させることにより、橋梁の固有振動数を車両のバネ振動領域からずらすことや、振幅そのものを低減させることを目的としたものである。

a) ノージョイント化工法<sup>13)-20)</sup>

ノージョイント化工法には、図-5.3.2 に示すように、主桁連結工法、床版連結工法、横桁連結工法および埋設ジョイント工法の4つが挙げられる<sup>21)</sup>。

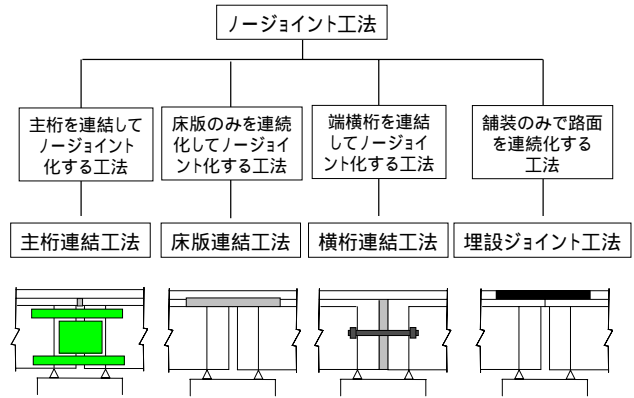


図-5.3.2 ノージョイント化工法<sup>21)</sup>

埋設ジョイント工法は、舗装のみ連続化する方法である。この工法の場合、大型車の交通量の多い場所では、輪荷重の影響を受けやすく、段差を生じ、損傷しやすいため、連続性を保持することが困難である。

鋼橋に対する床版連結化(図-5.3.3)の場合、既設の伸縮継手とRC床版の一部を撤去して、隣接する単純桁の主桁上フランジ端部およびRC床版と舗装の連続化を行う。さらに、既設の鋼製支承を弾性支承に変更することにより、活荷重によって生じる連結床版部の応力緩和を期待している。

鋼橋の主桁連結化(図-5.3.4)では、隣接する主桁のウェブ端部同士を連結板(シェアプレート、モーメントプレートなど)により連結化するとともに、舗装を連続化する。さらに、既設の鋼製支承を弾性支承化する。

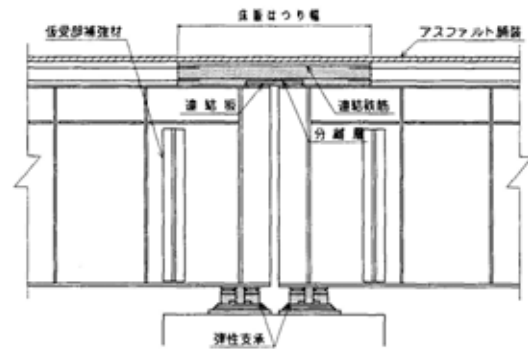


図-5.3.3 鋼橋の床版連結化<sup>22)</sup>

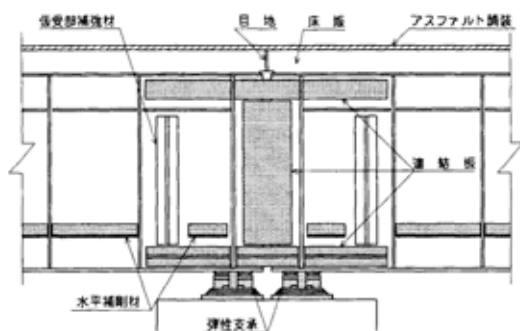


図-5.3.4 鋼橋の主桁連結化<sup>22)</sup>

ノージョイント化による振動，騒音の低減効果について，当初は連結化によって固有振動数が若干高くなることで振動が低減すること，さらに，伸縮装置がなくなることで比較的高い周波数帯の振動が低減することの2つが期待されていた．しかし，固有振動数の増加については，ほとんど効果がなく，主としてジョイントがなくなることによる路面の平坦性が向上することによって比較的高い周波数帯の振動，騒音が低減すると考えられる．

ノージョイント化（連結化）による振動，騒音の低減効果については数多く報告されており，振動で1～5dB，騒音で1～8dB程度低減すると考えられている．現在では異なる構造系（主桁の本数・高さが異なる，主桁の形式が異なる）のノージョイント化の検討も進められている．

#### b) 延長床版工法<sup>23)-26)</sup>

ジョイントを土工部に移設して振動，騒音の発生を抑える延長床版工法（図-5.3.5）の採用も路面対策のひとつと考えられる．

延長床版システムの採用（延長床版工法）は，最近実施事例が増加しつつあり，国土交通省のHPでも「振動の抑制が期待できる」工法として紹介されている．ただし，延長床版システムの採用による振動，騒音の低減効果を工事前後の統計処理値で比較すると，振動レベル，低周波音レベルでは明瞭な差異が認められない．しかし，橋梁周辺の住民のアンケート結果によると，大部分の住民が「振動が小さくなった」と述べている例もあり，対策工実施による振動，騒音の低減効果について，これまでのように振動，騒音の統計処理値で評価することが感覚的な評価と整合するのか検討していく必要があると考えられる．

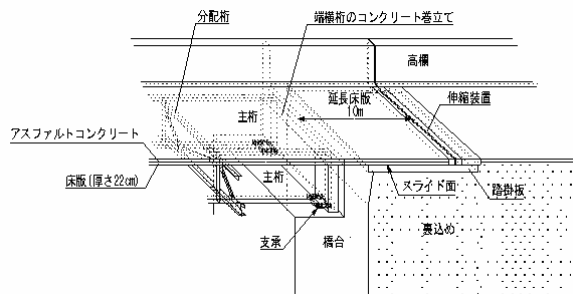


図-5.3.5 延長床版工法

#### c) 支承構造の変更<sup>27)-32)</sup>

支承部の構造を変更する事例も多い．特に，平成7年の阪神淡路地震以降，橋梁の耐震性能を向上させる目的で鋼製支承を積層ゴム支承に交換する機会が多いが，振動低減を目的とした弾性支承化の事例もある．弾性支承化は，支点部の弾性変形により橋梁の固有振動数が変化することや，ゴム支承の弾性変形によって振動の吸収を期待するものである．現在のところ，ゴム支承化による地盤振動への影響について，定性的，定量的な振動低減

効果は報告されていない．ただし，連続桁の端部など，きわめて限定された条件ではゴム支承の弾性変形が振動の原因となることがあり，ゴム支承の弾性変形を抑制する対策を実施している事例もある<sup>33)</sup>．

#### d) 床版上面増厚工法

床版上面増厚工法（図-5.3.6）は，床版の押抜きせん断耐力の向上を目的として実施されることが多く，増厚コンクリートの中に鉄筋を配置することもある．RC中空床版橋を対象とした床版上面増厚工事では振動レベルが4dB，騒音レベルが3dB程度低減された事例もある<sup>34)-37)</sup>．振動レベルの低減については，床版上面増厚による剛性向上効果も考えられるが，舗装をすべて切削オーバーレイしており路面平坦性向上による効果も大きいと考えられる．床版上面増厚により床版の健全性が向上し舗装の劣化速度が抑制できる効果も期待できる．このように，床版上面増厚は構造面での変更もあるが，路面対策という一面もある．

騒音レベルの低減については，床版厚が大きくなることで固体伝播音が小さくなり，その結果，高架構造物音が低減したことが主因と考えられる．なお，高架構造物音とは，高架道路上を車両が走行したとき，その加振力によって高架構造物の床版，桁などが振動し，それによって床版の裏面，桁などの表面から放射される騒音とされている．

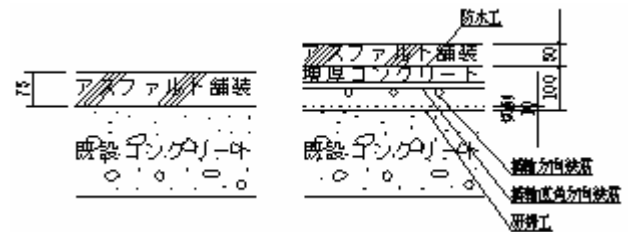


図-5.3.6 床版上面増厚工法の一例

#### e) 端横桁コンクリート巻立て工法

端横桁コンクリート巻立ては，低周波音対策，振動対策として比較的良好に実施されている工法である．しかし，巻き立て量については具体的な設計方法が確立されていないが，その施工については古くは日本道路公団の設計要領にも記載されている．ここでは，具体的な施工例とその効果について紹介する．

端横桁コンクリート巻立ての効果を実証した既往の研究として文献<sup>38)</sup>が挙げられる．この研究では試験橋を対象に2種類の巻き立て工法を比較して，試験車両を走行させたときの橋上の加速度の低減効果を確認している．比較した端横桁コンクリート巻立ては，図-5.3.7に示すように桁端から橋軸方向60cmの幅，主桁端部の下フランジから床版までの高さ1.6mのうち，端対傾構1.5mをコンクリートで巻立て，床版下10cmに無収縮モルタルを挿入して巻立てコンクリートと床版を一体化したもの

を対策1としている。また、対策2として、巻立てコンクリートと床版の間に25cmの空間を設けたものとしている。

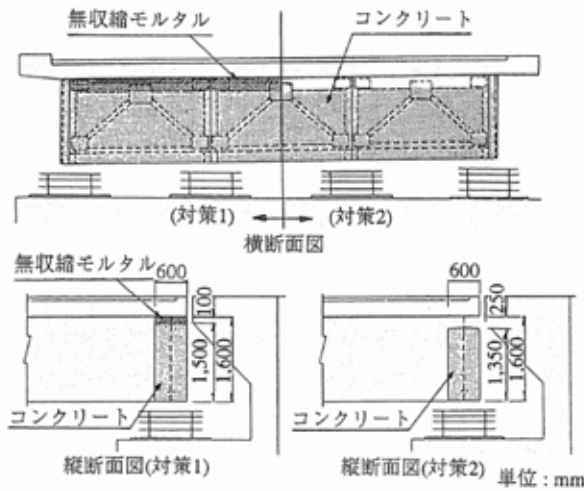


図-5.3.7 コンクリート巻立てによる対策<sup>38)</sup>

試験車両(大型ダンプトラック、空荷状態(10tf)と積載物を載せた状態(30tf))を用いた走行試験から、対策効果として、図-5.3.8に示すように、対策前後の最大加速度から、対策2については対策前と比較して加速度が大きくなる傾向にあるが、対策1については、対策前と比較して大きなところでは半分以下程度となっており、対策の効果があると報告している。

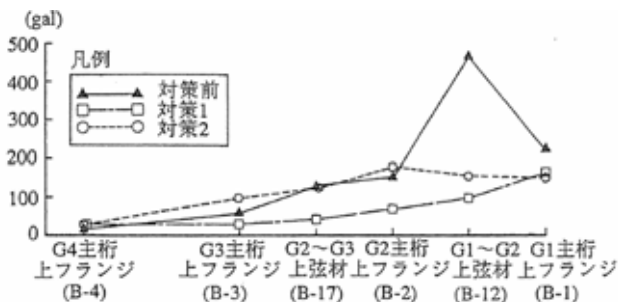


図-5.3.8 コンクリート巻立てによる対策効果<sup>38)</sup>

次の事例として、近年急速に普及してきた少数主桁構造の橋梁を対象に、床版下面増厚と鋼桁のウェブをコンクリートで増厚した例を示す<sup>39)</sup>。この対策は、車両がジョイントを通過したときの突出音と低周波空気音対策として行なった事例である。なお、この橋梁では、上述した対策以外にセンターダンパーとTMDを取り付けて、対策を行なっているが、ここでは対象外とする。

対象橋梁は、3径間連続橋と7径間連続橋、両橋の上り線と下り線の4橋である。橋長は、3径間連続橋の上り線で167.15m、下り線で132m、7径間連続橋の上り線下り線ともに422.5mである。両橋とも3主桁であり、PC床版で非合成桁である。

増厚・巻き立てによる突出音対策は、PC床版(支間6m,厚さ270mm)に対して230mmの層厚を、鋼主桁(板

厚20mm程度、桁高3050mm)に対してはコンクリートの打設性やウェブ補強リブの寸法を考慮して200mmの巻き立てを行っている。また、重量増加の負担から、桁端から10mまでの範囲で対策を行っている。

この橋梁において、対策前に計測を行なったところ、フィンガージョイントを大型車が通過後0.5秒間に50Hzから80Hzの主桁振動が発生していることがわかっている。また、振動レベルを計測したところ、大型車のばね下振動と連成されて高次振動が励起されていることが確認された。図-5.3.9に示した測点で計測された主桁加速度レベルを図-5.3.10に、図-5.3.11に対策前後の主桁の加速度を示す。

対策前と対策後と比較すると大きく加速度が減少している。この対策を行うことによりほぼ全周波数帯で主桁、床版の加速度が下がり、効果が顕著であったとしている。図-5.3.12に示すように、伸縮装置を通過したときに卓越する周波数30Hzについては低減効果がうかがえたが、低周波音で特に建具のがたつきに関する3Hz付近では、別途対策(センターダンパー、TMD)を必要とされた。

本文献では施工に関する事項も記載されており、床版下面増厚は繰り返し荷重の影響を考慮し、補強筋を配置し鋼繊維混入超速硬モルタルを用いて3層に乾式吹きつけを行ったとしている。また、鋼桁のウェブ巻立てに対しては、両者の接合面にスタッドを配置して一体性を確保し、巻立てコンクリートには補強筋を配置している。

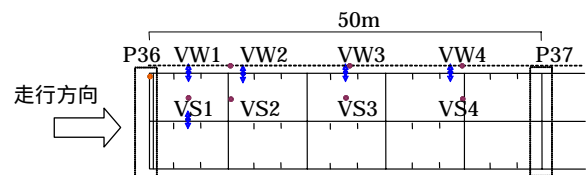


図-5.3.9 振動レベルの測点<sup>39)</sup>

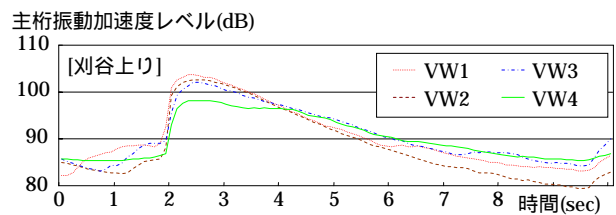


図-5.3.10 対策前の加速度レベル<sup>39)</sup>

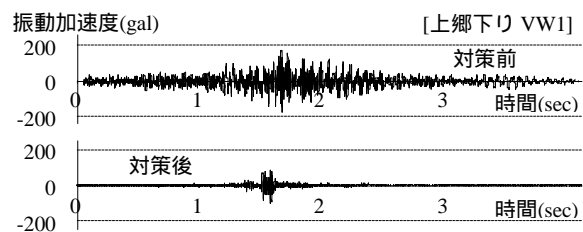


図-5.3.11 対策前後の加速度の比較<sup>39)</sup>



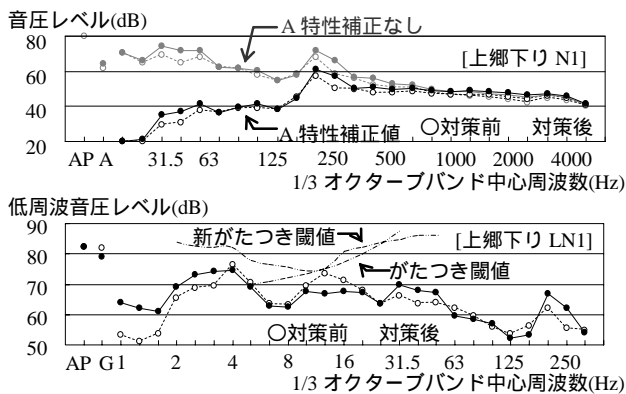


図-5.3.12 オクターブバンドレベルによる比較<sup>39)</sup>

上記の事例以外にも、トラス橋の端部（橋台部）における RC 巻立てを低周波音の低減対策として実施している事例がある。端横桁 RC 巻立てについては、解析的に研究された事例があるが、巻立て厚と低減効果の関係に対する検討や現地での効果については不明瞭な点が多いのが現状である。

f) その他の工法

その他に構造形式を変更する方法としては、鋸桁の箱桁化、鋸桁のアーチ化<sup>40)</sup>、主桁増設（縦桁の主桁化、増設主桁化）などが事例としてあげられるが、これらはいずれも B 活荷重対策・耐震補強対策として実施されたものであり、明確に振動、騒音に対する低減効果が把握されているとはいえない。

(2) 減衰付加による方法

減衰付加による方法は橋梁の構造には変更を加えず、減衰を与えるシステムを設置するものである。減衰を与えるシステムとしては、大別するとアクティブ型、パッシブ型、2 つを組み合わせたセミアクティブ型に分類できる。アクティブ型は、振動を積極的に制御する手法であり、一般的に制御機構を駆動させるために外部供給エネルギーを必要とする。パッシブ型は対象物の揺れに応じ制振効果を発揮し、外部供給エネルギーを要さない。アクティブ型は、パッシブ型に比較して、より制振効果が得られやすい反面、安定的なエネルギーの供給が必要となる。パッシブ型は、アクティブ型に比較し、制振効果が得られにくい反面、様々な状況下で安定した効果を期待できる。橋梁分野における実績としてはパッシブ型が用いられているケースが多い。

パッシブ制振装置にもいくつかの手法があるが、ここでは、「同調質量型(TMD, MMD)」、「キールダンパー」、「センターダンパー」に関して述べる。これらを大別すると、対象振動数への同調を必要とするタイプ「同調質量型(TMD)」と同調を必要としないタイプ「キールダ

ンパー」、「センターダンパー」に分けることが可能である。対象振動数への同調を必要とするタイプは、対象振動数の見極めがより重要となる。装置によっては橋梁への設置後に振動数の変更が比較的容易な装置も存在するが、大幅な振動数の変更は容易ではなく、事前の調査が非常に重要と言える。対象振動数への同調を必要としないタイプにおいても、減衰量の選定等にて対象振動数の事前把握は重要である。

対象振動数への同調が必要な装置と、不要な装置を設置方法で比較すると、同調を必要とする装置は上部構造内で設置が完了するのに対し、同調が不要な装置は対象物と不動点の間に制振装置を設置する必要がある。したがって、同調を必要とする装置は設置に関する制限を受けにくいという利点がある。同調を不要とする装置は対象振動数が多数存在する場合や対象振動数領域に幅がある場合に有効と言える。

a) TMD および MMD

同調質量型の制振装置 TMD<sup>41)-44)</sup> (Tuned Mass Damper) は、対象振動数と同調するように設定された錘及びバネと減衰装置より成り立つ(図-5.3.13)。桁が振動した際には錘が同調して振動し、桁の振動を抑制する。また、錘の振動は減衰装置により低減される。

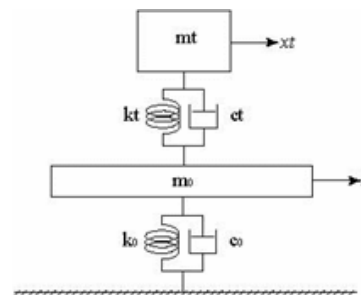


図-5.3.13 TMD 概念図

減衰機構には粘性体を用いた装置と磁気を用いた装置が見受けられる。一般的な橋梁における主桁の 1 次固有振動数は 2~6Hz であることが知られているが、2 次モード以上を対象とする際には、10Hz 程度以上と比較的高い振動数領域となり、桁および錘の振幅は微少となる。粘性減衰を用いる際には、微少振幅に対する減衰装置の追従性の確認が必要と考えられる。

減衰機構に磁気を用いた装置は、減衰装置部にて錘と架台が非接触であるため、微少振幅（比較的高い振動数領域）においても効果が期待できる。

TMD は制振対象とする周波数を特定してバネ剛性と重錘質量を調整する必要があり、特定の振動数以外の振動成分に対して制振効果は期待できないことから、ランダムな入力が多い道路橋においては適用が難しいとされてきた。しかし、1 つの対象振動数に対し微少に振動数を変え、振動数幅を持たせた装置を複数設置する MMD

(Multiple Mass Damper)( 図-5.3.14)が実用化されており、今後その適用拡大が期待されている<sup>45)</sup>。

設置位置は、桁の振動モードにおける腹の部分となり、不動点を要さず桁内のみで設置が可能である。建築限界等様々な制限下であっても、設置自由度が高いことが考えられる。粘性減衰装置を用いたTMDを写真-5.3.1に、磁気減衰装置を用いたTMDを写真-5.3.2に示す。

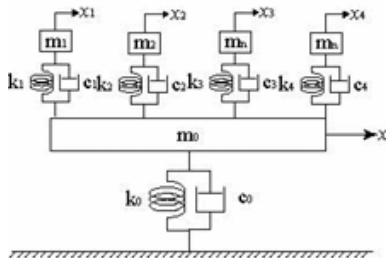


図-5.3.14 MMD 概念図



写真-5.3.1 TMD (粘性減衰)



写真-5.3.2 TMD (磁気減衰)

b) 桁端ダンパー (キールダンパー)<sup>46)47)</sup>

桁端ダンパー (キールダンパー, 図-5.3.15, 写真-5.3.3) とは、主桁下フランジからヒレ状のキールと呼ばれる鋼板を取り付け、橋脚からキールを挟み込むように取り付けた鋼板部材との隙間に制振樹脂を入れることで、桁端部の回転変位を並進変位に増幅させ、制振樹脂のせん断変形で減衰を付加する方法である。国内では鋼少数桁橋における風振動対策としての実績はあるが、交通振動対策としての適用は少ない。

キールの変位は、対象物の振動数に依存せず、振幅に依存するため、対象物の振動数が逐次変化する場合や複

数の振動数を対象とする際に有効となる。

設置にあたっては主桁下面に張り出す必要があり、橋脚への架台設置も必要となるため、設置の自由度に制限が考えられる。建築限界等の制限が生じている際には留意が必要であり、外観の低下も考えられる。近年実績が増加傾向にあるゴム支承を用いた免震橋梁においては、地震時に橋軸直角方向へも免震としている事例も少なくない。そのような橋梁においては橋軸直角方向へも、上部構造 下部構造間で相対変位が生じるため、変位への追従性も考慮する必要がある。

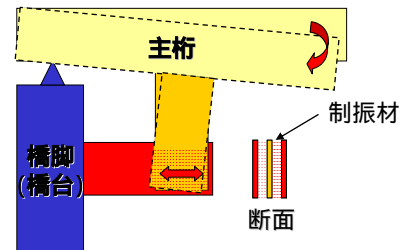


図-5.3.15 キールダンパーの概念図



写真-5.3.3 桁端ダンパー (キールダンパー)

c) センターダンパー<sup>39)</sup>

センターダンパー(写真-5.3.4および写真-5.3.5)は、支間中央において、鋼桁と支柱に取り付けた鉛直プレート間に高減衰ゴムダンパーを設置して、ゴムのせん断変形による履歴減衰により、エネルギー吸収を図るものである。

キールダンパーとの最も大きな違いは不動点を橋脚に取らず、地盤に取っている点である。これにより、ダンパーの設置位置は、桁の振動モードにおける腹部分に設置することが可能となり、効果的に振動の低減が期待できる。しかし、桁下空間の制限により設置ができない場合も想定される。

TMD の場合、設置位置が振動モードの腹部分であったとしても、同調する振動数が異なれば制振効果は期待できないのに対し、センターダンパーの場合、例えば1次と3次等で振動数が異なっていたとしても、振幅が生じる箇所に設置されていれば、制振効果が期待できる。

また、センターダンパーの設置においては、桁の振動が、支柱を介し、地盤に伝達されることより、地盤へ入力された振動の影響も事前に検討する必要があると考えられる。



写真-5.3.4 センターダンパー設置状況



写真-5.3.5 センターダンパー装置外観

d) 衝撃吸収ダンパー<sup>48)</sup>

運動量交換型衝撃吸収ダンパー(図-5.3.16)とは、建築における集合住宅などでフローリング床の衝撃振動問題対策として研究が進められているものであり、これを道路橋振動に適用しようとしたものである。具体的には、車両が橋梁に進入する際の車両が床版に与える運動量を、床版を介して、ダンパーの運動量に交換させるものであり、車両からの衝撃力に対して橋梁振動を低減させようとする方法である。

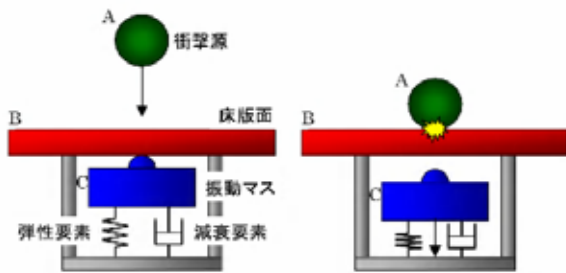


図-5.3.16 衝撃吸収ダンパーの概念図<sup>48)</sup>

e) アクティブダンパー<sup>49)</sup>

アクティブダンパーは、直接的に外部からエネルギーを与えて橋梁の振動を制御するため装置を設置するものである。アクティブダンパー橋梁の揺れを検出して制御することにより、パッシブタイプより高い制振効果を得ようとするものであるが、制御のための電源、制御装置および経年的な保守作業が必要となる。

f) 主桁ウェブ振動に対する連結型制振材<sup>50)</sup>

鋼橋が起因する騒音および振動問題の一つに、大型車両が伸縮継ぎ手を通る際の衝撃により、主桁の垂直補剛材および水平補剛材に囲まれたウェブのパネル(以下、主桁パネル)から発生する騒音がある。この騒音は、主桁パネルのウェブ板厚およびパネルの縦、横寸法により周波数の特性が決まり、低周波数成分の20Hz~100Hzを含むことが多い。

このような騒音を低減する対策として、騒音の発生源である主桁パネルに300mm×300mm角程度の制振材を全面に貼り付ける工法がある。しかし、低周波数成分を含む騒音においては、部材振動モードの波長が長い場合、通常の制振材では制振効果が低くなる傾向にある。また、長い波長の振動モードに見合った制振材は、主桁パネルと同等の面積が必要となるため、重量増加や狭隘箇所への搬入が困難となる等、施工性が大幅に悪化する。

そこで、低周波数成分を含む騒音に対処可能で、かつ施工性の問題を解決できる制振材として、隣り合う従来サイズの制振材を相互に連結することにより、低周波数成分に対しても良好な制振効果を得られる連結型制振材<sup>51)</sup>が開発された。

連結型制振材は、ブチル系合成ゴムの減衰層とステンレス鋼板の拘束層、ステンレス鋼板の連結板から構成される。主桁パネルへの標準的な配置例を図-5.3.17および写真-5.3.6に示す。複数枚の制振材単体を配置し、隣り合う単体同士の制振材の拘束層を連結させることで、図-5.3.18に示すように、拘束層が主桁腹板の変形と重ならず、減衰層の変形が大きくなる。その結果、低周波数成分に対しても良好な制振効果を得られる。

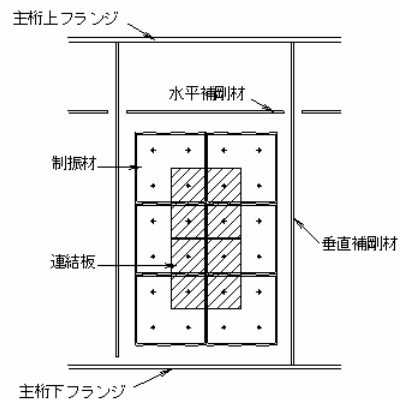


図-5.3.17 制振材標準配置図





写真-5.3.6 連結型制振材取り付け後

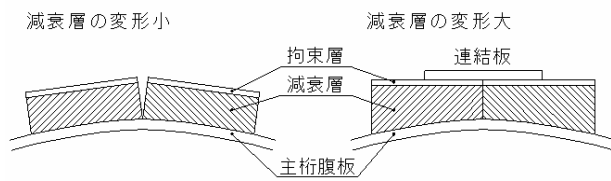


図-5.3.18 制振材連結による効果の概要

連結型制振材対策による効果を見るため、事前調査と同じ条件で試験車両を走行させ、伸縮継ぎ手通過時の騒音および振動計測を行った結果として、1/3 オクターブバンド分析における騒音のレベル値の対策前後の比較を図-5.3.19 に示す<sup>52)</sup>。連結型制振材が対象とする低周波数領域の50Hz～80Hz、また160Hz～400Hz帯の周波数の騒音レベルの低減が確認できる。さらに、オーバーオール値(AP)においても騒音レベルの低減が確認できる。

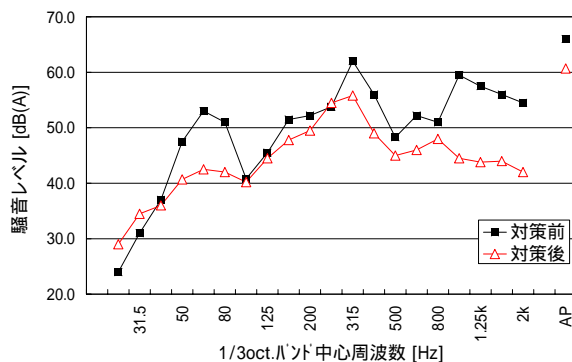


図-5.3.19 官民境界での騒音ピーク値比較

### 5.3.3 下部構造・基礎構造の対策(質量増加・断面増加)

下部構造や基礎構造の質量増加・断面増加は主として地震の耐荷力向上を目的として実施することがあるが、振動対策として実施された事例はほとんどない。このような基礎構造物に対する質量増加や断面増加の効果については軟弱地盤の水平変位抑制には有効と考えられるが、効果検証の事例がほとんどないため、今後検討が必要で

あると考えられる。なお、下部構造や基礎構造に対する対策は騒音に対しては低減効果が期待できない。

## 5.4 伝播経路上対策

### 5.4.1 地盤振動対策<sup>53)-58)</sup>

地盤振動を低減するための伝播経路対策としては、地盤改良、地中防振壁・防振溝、緩衝地帯の設置等がある。地盤改良は、土木工事としては頻繁に実施されており、軟弱地盤における振動の低減対策としても比較的良好に実施されている。したがって、用地の確保が可能で、地盤による振動の増幅が顕著である場合については、低減効果が発揮されると考えられる。

#### a) 空溝

地中防振壁は振動の伝播経路上である地盤に振動を遮断するための連続壁を構築するものである。連続壁の考え方としては、振動が伝播する地盤と密度が異なるすなわちインピーダンスが異なる材料で連続壁を設け、地表面に沿って伝播する振動を遮断するものである。ここで、地盤よりも密度が小さい材料としては、空溝(空気の壁)の振動低減効果が高く、理想的な工法と考えられる。しかし、空溝は、地盤の自立や地震時の安全性、維持管理性に問題があり、恒久的な対策として不向きである。そこで、内部に発砲ウレタンなどを詰める方法もある。また、溝の深さも重要であり、過去の実験の例では振幅を半分に落とすためには少なくとも波長の1/4以上の深さが必要であるとしている(図-5.4.1)。

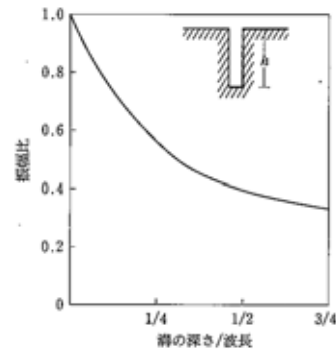


図-5.4.1 防振壁の効果の実験例

#### b) ハイブリッド振動遮断壁工法<sup>59)</sup>

ハイブリッド振動遮断壁は、空溝を志向し開発され、ガスクッションとソイルセメント、鋼矢板の三重構造で構成している。

ガスクッションは、空溝の状態に近づける役割を有しており、アルミニウムを主体とする材料で、チューブ状の二層構造となっている。ソイルセメント壁は、土圧に耐える役割を有している。鋼矢板は、遮断壁の剛性を増大させることと、ガスクッションの浮き上がりを防止する役割を有している。防振効果の面から、振動発生側に

鋼矢板を配置する．地表部は，人や車両の通行時の安全性を確保するため，頭部処理を行う．

ハイブリッド振動遮断壁の防振効果は，可変式起振機を用いた性能確認試験により確認している．試験区間の地盤概要と遮断壁の仕様を図-5.4.2に，振動測定位置を図-5.4.3に示す．振動の入力は，加振力10kNとし，加振周波数を6Hzから25Hzの範囲の数ケースとしている．遮断壁の頭部について，振動が伝搬しない構造の覆工板を設置している．この覆工板による影響を見るため，覆工板の有無の比較も行っている．

加振周波数6Hzと25Hzにおける振動測定結果を図-5.4.4に示す．ここでは，起振機直下での振動加速度レベルを基準とし，相対振動加速度レベルの比較を行っている．壁裏1mから3m区間では，遮断壁による防振効果が顕著に表れている．壁裏1mの振動低減量を確認したところ，加振周波数6Hzでは3dB程度，25Hzでは20dB以上の低減効果が得られている．壁からの距離が離れると防振効果は減少しているが，これは壁端部からの回折波による影響が表れているものと予想される．また，覆工板による影響を確認したところ，防振効果に与える影響は僅かである．

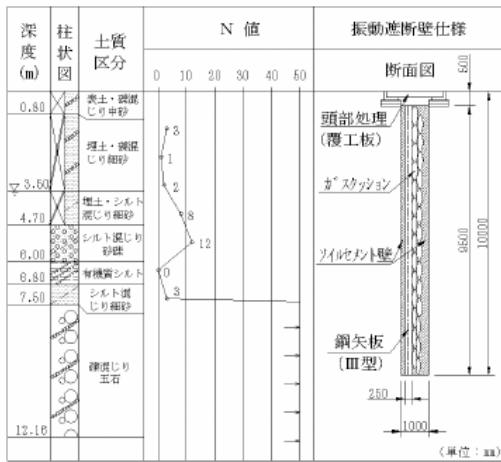


図-5.4.2 地盤概要と振動遮断壁仕様<sup>59)</sup>

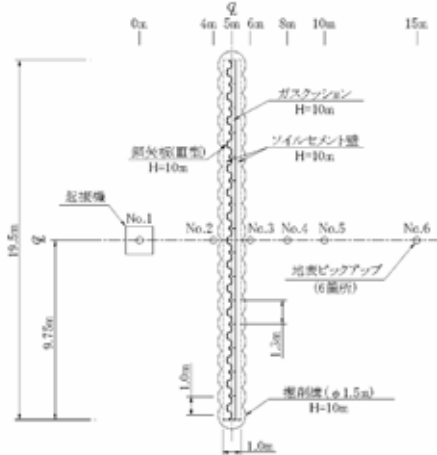
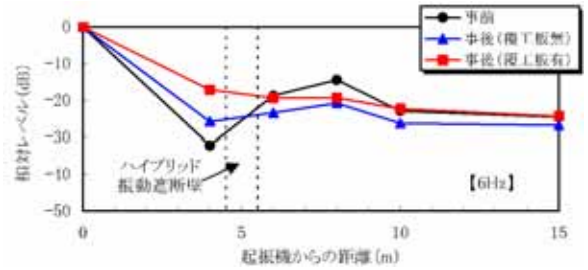
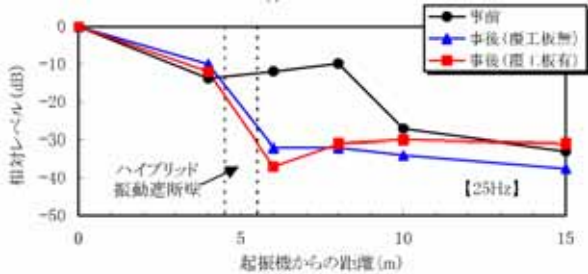


図-5.4.3 振動測定位置図<sup>59)</sup>



(a) 6Hz



(b) 25Hz

図-5.4.4 振動測定結果<sup>59)</sup>

c) EPS 合成遮断壁工法<sup>60)</sup>

EPS 合成遮断壁は，中心部に波動インピーダンス比が小さい材料 EPS (Expanded Poly Styrene) を配置し，外側に波動インピーダンス比が大きいコンクリートを配置したサンドイッチ構造で構成している．

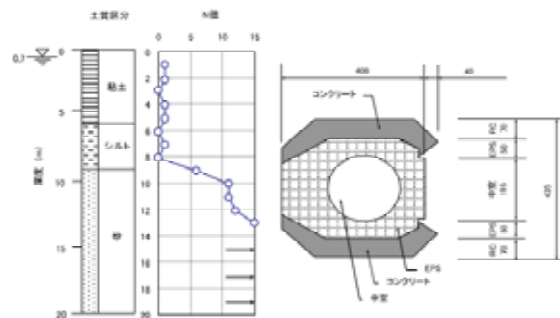


図-5.4.5 地盤概要と遮断壁断面図<sup>60)</sup>

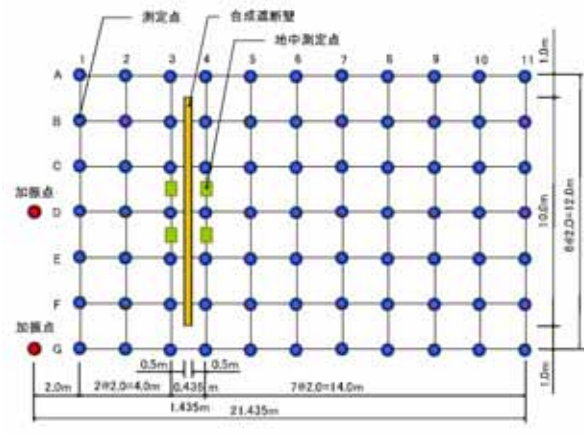


図-5.4.6 振動測定位置図<sup>60)</sup>

EPS 合成遮断壁の防振効果は、重錘の自由落下の衝撃加振を与えた性能確認試験により確認している。試験区間の遮断壁配置は、遮断壁単体をボルト接合により連続させ、打ち込み延長を  $L=10\text{m}$ 、埋設深さを  $D=GL-4.5\text{m}$  としている。試験区間の地盤概要と遮断壁単体の断面を図-5.4.5 に、振動測定位置を図-5.4.6 に示す。また、遮断壁の中央部は空洞になっているが、実際は地下水などが侵入する。このため、中空部に地下水侵入を防ぐための EPS 充填剤を挿入する仕様を検討しており、この影響を見るため、中空仕様と充填仕様の比較を行っている。試験区間の地盤は、1/3 オクターブバンド分析の結果より、 $3.15\text{Hz}$  付近が卓越していることがわかる。D ラインにおける遮断壁対策前後の鉛直方向の振動レベルの振動測定結果を図-5.4.7 に示す。比較の結果、合成遮断壁の背面から  $4.5\text{m}$  の地点までは約  $6\text{dB}$  程度の振動レベル低減が見られる。さらに、 $10.5\text{m}$  付近までは約  $3\text{dB}$  の振動低減効果が見られる。12.5m 付近では自然地盤とほぼ同じレベルを示したが、これは壁端部からの回折波による影響が表れているものと予想される。また、中空部に EPS 充填剤による影響を確認したところ、防振効果に与える影響は僅かである。

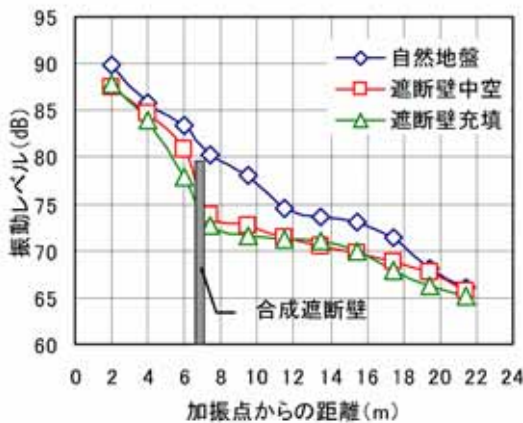


図-5.4.7 振動測定結果<sup>(6)</sup>

d) ハニカム WIB 工法<sup>(57)</sup>

地盤表面の波動伝搬を遮断するために、壁方式の工法の以外に、波動への緩衝構造物を設ける工法が開発されている。この工法は、WIB (Wave Impeding Barrier) 工法と呼ばれており、周辺地盤より剛性の高い平板ブロックを設けることによって、振動の伝搬を抑制するものである。さらに、平板ブロックをハニカム構造にすることにより、図-5.4.8 に示すように、波動の波動の逸散減衰とセル内部での消失減衰が期待できる。

コンピュータ・シミュレーションにより、ハニカム WIB の地盤振動減振の効果を検証している。まず、交通振動の地盤内の伝搬性状を波動論から把握した上で、図-5.4.9 に示すハニカム WIB の諸元を定めている。ハニカム WIB の地盤改良壁はシェル要素で、ハニカム WIB

内の地盤はソリッド要素でモデル化し、3次元加振解析を行っている。

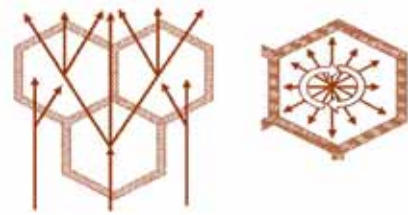


図-5.4.8 波動の散乱とセル内エネルギー減衰

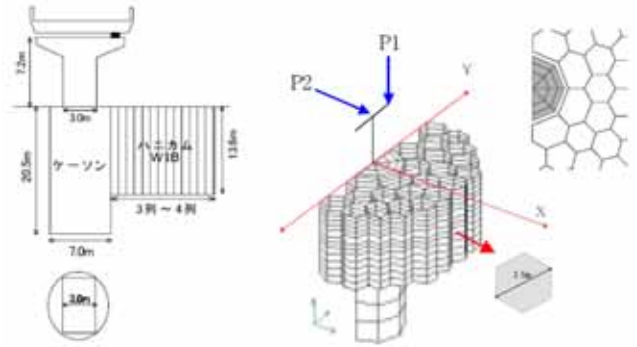
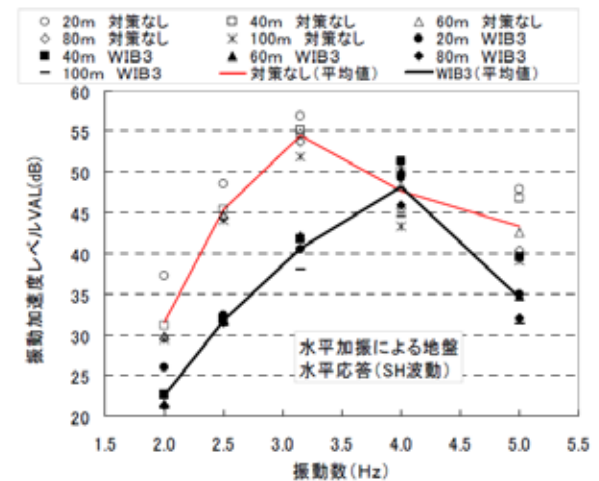
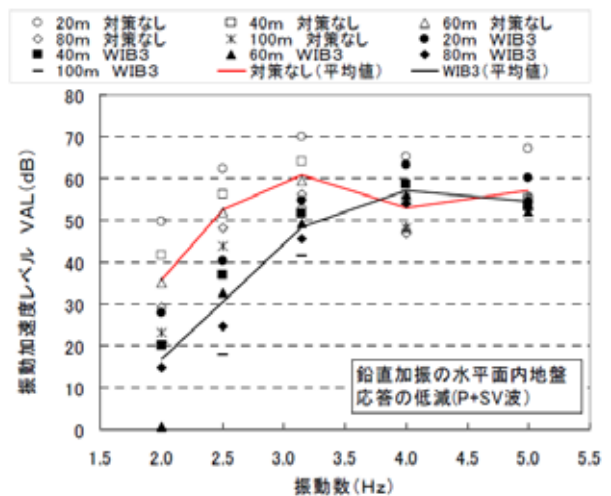


図-5.4.9 ハニカム WIB 諸元および解析モデル<sup>(57)</sup>



(a) 水平加振による地盤水平応答



(b) 鉛直加振による地盤水平応答

図-5.4.10 対策前後の振動減衰効果



応答結果は、振動加速度レベルで評価している。特定距離の振動加速度レベルと振動数との関係を図-5.4.10に示す。解析の結果、八二カム WIB による対策を行うことで、全体の応答結果は大幅に低減していることが確認できる。さらに、3Hz の振動に対しては、10dB 以上の低減効果が得られている。

#### 5.4.2 騒音対策<sup>61)</sup>

騒音に対する伝播経路上対策としては遮音壁の設置が一般的である。遮音壁は、音源と受音点の間に遮音物を挿入することにより、受音点での音圧レベルを低減させるものである。遮音壁による騒音の低減は、音源から伝播する音が遮音壁先端を回折するため、伝播距離が長くなることによる。近年では環境基準の達成努力の一環として、5m あるいは 8m の大型遮音壁が施工されることが多い。さらに大きな減音効果を得るため、ノイズリデューサーの設置<sup>62)</sup>、遮音壁を逆L型としたもの、遮音壁先端を分岐構造<sup>63)</sup>としたものも実用化されている（写真-5.4.1）。また、遮音壁の上端にスピーカーを設置して伝播する音と逆位相の音を発生させて伝播音を低減する ANC（Active Noise Control）も実用化されている例がある<sup>64)</sup>。

高架道路と平面道路の併設区間では、平面道路の騒音が高架道路の下面で反射し、遠方まで影響を与えることを防止するため、桁下に裏面吸音板（写真-5.4.2）を設置することがある<sup>65)</sup>。

なお、これらの騒音対策は車両の走行音に対しては有効に機能することが期待できるが、波長の長い低周波音に対する大きな低減効果は期待できない。



(a) 逆L型遮音壁 (b) 分岐型遮音壁  
写真-5.4.1 大型遮音壁



写真-5.4.2 裏面吸音板の設置例

## 5.5 受振点対策

### 5.5.1 振動対策<sup>66)</sup>

受振点対策としては、家屋・ビルの剛性増加や減衰付加等の対策が考えられる。既設家屋の剛性増加対策については、JR（新幹線、名古屋周辺）で実施された数多くの実績がある。また、新規の家屋については耐震設計・耐振設計が進んでおり、比較的揺れにくい構造となっている。減衰付加については、TMD や MMD の設置がある。高層ビルについては、耐震設計・耐風設計のひとつとして積極的に TMD や MMD の設置が進められている。また、家屋についても、最近では 3 階建ての家屋が増えてきたことから、これらについては TMD を標準工法として設置した家屋が販売されている。小規模なビルや家屋の TMD の効果については、概略 3～5dB 程度の低減が認められている。

### 5.5.2 騒音対策<sup>67)</sup>

騒音に対する受振点対策としては、防音壁や防音サッシに交換することが効果的である。また、低周波音による建具等のがたつきに対しては、一時的には簡易な器具による固定等が有効な場合もある。

表-5.2.1 対策工法の一覧

対策工法			用地	永続性	効果			経済性	施工性	備考	
対策区分	対策項目	対策工			振動	騒音	空気振動				
発生源対策	路面対策	1	路面部分補修（薄層舗装等）							振動発生源における車両バネ振動抑制に対して有効であり実績もある。騒音に対しても有効であり、相乗効果が期待できる。ただし最大限の効果を得るための施工が困難な場合がある。また、定期的な維持管理作業が必要である。	
		2	切削オーバーレイ								
		3	ノージョイント化（埋設ジョイント）					～	～		
		4	低騒音舗装								
	上部構造	構造変更	1	床版連結							1～3の対策は単体での効果はあまり期待できないが、路面対策とあわせて大きな効果が期待される。また、路面の永続性に対しても有効である。
			2	主桁連結							
			3	延長床版							
			4	主桁補強（鈹桁の箱桁化，断面増）							
		5	弾性支承化							主桁補強による大幅な固有振動数の変更や振動低減は期待できない。支承に関してはさらに検討が必要である。	
		7	床版増厚							床版増厚による騒音，振動，低周波音の低減が認められるが比較的長期の交通規制が必要で経済性にやや劣る。	
		8	端横桁RC巻立て								
		減衰付加	9	動吸振器（TMD，MMD）			～		～		
	10		高減衰ゴム							付加減衰機構による方法は，減衰を付加する原理により得失がある。地盤振動対策としての適用は試験施工段階であり，今後の研究に待たれる部分が多い。	
11	桁端ダンパー										
12	アクティブコントロール										
下部構造 基礎構造	質量増加 剛性増加	1	橋脚断面増							増杭・増フーチングは軟弱地盤には有効で，水平動の抑制については増杭の方向によっては効果がある。橋脚断面増とあわせて今後検討の余地がある。	
		2	増杭・増フーチング								
伝播経路上対策	地盤	質量・剛性増	1	地盤改良						施工実績が少なく，評価ができるに至っていない。また，用地の確保が困難で都市住宅部での実施は現実的とはいえない。 一般的な騒音対策として有効性が確認されている。 実績が少なく，研究段階である	
			2	地中防振壁・防振溝							
		距離減衰	3	緩衝地帯の設置							
			4	遮音壁・裏面吸音板							
		その他	5	アクティブノイズコントロール							
受振点対策	建物	剛性増加	1	筋交い，耐震壁補強，床組補強						個別の対応となるため，地域全体の改善には繋がらない。経済的ではあるが，行政上の問題もあり容易に実施することは難しい。	
		減衰付加	2	動吸振器（TMD，MMD）							
		その他	3	がたつき防止器具の設置							
			4	防音壁，防音サッシ							

記号			
用地	対応不要	対応は可能	対応が困難(不可)
永続性	効果が持続するもの	不確実なもの	
低減効果	効果が期待できる	効果が限定的	効果が期待できない
経済性	安価	普通	高価
施工性	容易	普通	困難

## 参考文献

- 1) 徳永法夫, 薄井王尚, 西村昂: 道路橋伸縮継手周辺の路面凹凸による交通振動の周辺影響に関する実験と解析, 構造工学論文集, Vol.47, pp.999-1008, 2001.
- 2) 武市学, 米田昌弘, 徳永法夫, 後藤裕功: 伸縮継手を含む波長の長い路面段差性状とそれによって誘起される橋梁交通振動について, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, I-40, 1999.
- 3) 徳永法夫, 日野泰雄, 西村昂: 高架道路橋の交通に起因する振動特性と人の感じ方に関する一考察, 橋梁と基礎, Vol.34, No.6, pp.27-32, 2000.
- 4) 青野茂生, 徳永法夫, 西村昂, 日野泰雄: 高架道路交通振動に対する沿道住民の知覚特性に関する考察, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, Vol.53, pp.408-409, 1998.
- 5) 徳永法夫, 西村昂, 日野泰雄, 宮原哲: 高架道路における交通振動低減対策効果と苦情要因の分析, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.451-458, 1997.
- 6) 広井智, 深田宰史, 樺山好幸, 室井智文, 岡田裕行: 高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法, 舗装工学論文集, 第 14 巻, pp.179-187, 2009.12.
- 7) 讃岐康博, 梶川康男, 深田宰史, 枚本正信: プロファイルメータでの測定路面から実路面への近似法の提案, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.399-410, 2001.3.
- 8) 室井智文, 薄井王尚, 樺山好幸, 深田宰史, 梶川康男, 幸田信則: 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.171-180, 2008.3.
- 9) 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, 1981.11.
- 10) 酒井秀男: タイヤ工学, グランプリ出版 pp.364-365, 1990.
- 11) 滝沢由美子, 松本晃一, 山本稔: 路面性状と騒音特性に関する調査検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.34, pp.145-150, 1997.11.
- 12) 日本音響学会: エネルギーベース道路交通騒音予測手法の橋梁・高架部等への適用性に関する研究 報告書, pp.55-69, 1999.
- 13) 幸左賢二, 関惟忠, 枚本正信: 高架橋の桁連結による防振効果について, 土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集, pp.205-206, 1980.
- 14) 久保雅邦, 梶川康男, 山田靖則, 松浦康夫, 伊関治郎: 弾性支承を用いた単純桁の連続化による橋梁振動軽減対策の開発, 土木学会第 44 回年次学術講演会講演概要集, PSVI-14, pp.28-29, 1989.
- 15) 讃岐康博, 梶川康男, 下村真弘: PC 単純高架橋の防振対策工に関するシミュレーション解析, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集 pp.488-489, 1992.
- 16) 佐原毅, 牧田孝二, 讃岐康博: 鋼桁連結によるジョイントレス工法, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, pp.766-767, 1992.
- 17) 薄井王尚, 永井淳一, 上羽坪勲, 川原斉: 主桁増設・桁連結による既設橋梁の補強効果・環境改善効果について, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, pp.712-713, 1995.
- 18) 山本豊, 福岡賢, 真田修, 讃岐康博: 桁連結およびノージョイント化による高架橋の環境改善効果, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp.824-825, 1996.
- 19) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 吉川実, 薄井王尚: 弾性支承と桁連結構造を用いた既設高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.747-756, 1997.3.
- 20) 生田目尚美, 金哲佑, 畑中章英, 川谷充郎: ノージョイント化による鋼トラス橋の振動低減効果の検討, 鋼構造論文集, 第 16 巻, 第 62 号, pp.1-10, 2009.6.
- 21) 梶川康男: 橋梁環境振動, 橋梁振動コロキウム'97, pp.71-76, 1997.10.
- 22) 財団法人 道路保全技術センター: 既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き(案), 1995.
- 23) 池田光次, 永井淳一, 衛藤繁美, 安藤亮介, 大林正和: 鋼桁橋の振動対策工法 - 中国道一後川橋延長床版工事 -, EXTEC'99, pp.35-37, 1999.
- 24) 讃岐康博, 梶川康男, 永井淳一, 浜博和: 延長床版工法に於ける振動対策効果について, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, pp.482-483, 1999.
- 25) 大石哲也, 新井恵一, 村越潤: 延長床版の振動低減効果に関する数値解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp.1503-1504, 2003.
- 26) H. Hama, S. Fukada, M. Sugimoto, H. Ishida and M. Yamada: Characteristics of infrasound radiated from the continuous short spans bridge due to running trucks, Proceedings of Low Frequency 2008, pp.27-34, 2008.10.
- 27) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 吉川実, 薄井王尚: 弾性支承と桁連結構造を用いた既設高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.747-756, 1997.3.
- 28) 徳永法夫, 吉川実, 川北司郎, 山本豊: 高力黄銅支承板(BP)支承からゴム支承への取替えに対する有益性に関する一考察, 土木学会論文集, 第 581 巻, VI-37, pp.17-25, 1997.12.
- 29) 薄井王尚, 徳永法夫, 西村昂, 松井繁之: 高架道路の弾性支承化と交通振動に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, pp.404-405, 1998.
- 30) 長尾章洋, 佐藤弘史, 今野久志: ゴム支承による交通振動軽減対策試験について, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, pp.1016-1017, 1995.
- 31) 溝口孝夫: 支承取替えに伴う上部構造の振動特性の変化, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集,

- pp.1147-1148, 2002.
- 32) 薄井王尚, 徳永法夫, 川谷充郎, 西村昂: ゴム支承化による橋梁交通環境振動への影響に関する実験, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, pp.148-149, 1997.
  - 33) 徳永法夫, 西村昂, 松井繁之, 刑部清次: 連結化工事に伴う弾性支承化前後の振動特性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.21(2), pp.189-192, 1998.
  - 34) 宇野巧, 中野正義, 田中浩: 都市高速道路における新しい橋梁振動対策の効果について, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, pp.1149-1150, 2002.
  - 35) 浜博和, 深田宰史, 梶川康男, 松田哲夫, 宮本雅章: RC 中空床版高架橋の周辺で生じた環境振動に対する低減対策, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.252-261, 2011.3.
  - 36) 浜博和, 西山晶造, 西岡昌樹, 深田宰史, 松田哲夫, 枚本正信: 都市内高速における床版上面増厚による環境対策工事, 橋梁と基礎, Vol.42, No.6, pp.43-48, 2008.6.
  - 37) 西岡昌樹, 織田広治, 西山晶造, 松田哲夫, 長岡誠一, 浜博和: 周辺環境に考慮した超早強コンクリートによる RC 中空床版の上面増厚工法, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.151-156, 2008.4.
  - 38) 佐藤弘史, 澤田憲文, 今野久志, 長尾彰洋: 高架橋の桁端部補強による道路交通振動の軽減対策, 土木技術資料, Vol.37, No.5, pp.58-63, 1995.
  - 39) 畔柳昌己, 高橋広幸, 上束泰, 安藤直文, 篠文明: 鋼桁橋のコンクリート床版から発生する騒音・低周波振動問題への対策 -第二東名高速道路 刈谷高架橋環境対策工事-, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 第 9 巻, 日本材料学会, pp.369-374, 2009.10.
  - 40) 水田洋司, 内谷保, 橋本晃, 吉富敬洋: 耐震補強を目的としたパイプアーチ補強が桁橋の振動特性に与える影響, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.801-808, 2005.3.
  - 41) 田所洋一, 林川俊郎: TMD を設置した場合の歩道橋の制振効果について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 46 号, pp.75-78, 1989.
  - 42) 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, 1989.3.
  - 43) 広瀬章則, 横谷利昭, 南條正洋, 田谷光, 畑中章秀: TMD による歩道橋の制振, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, pp.472-473, 1997.
  - 44) 神谷圭二, 鎌形健太郎, 松本進, 背戸一登: 多重動吸振器の最適設計法: 日本機械学会論文集 C, 第 62 巻, 第 601 号, pp.22-27, 1989.
  - 45) 二木太郎, 五十嵐隆之, 横川英彰, 岩崎雄一, 下田郁夫: マルチブルマスダンパー (MMD) の橋梁への適用と解析, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集 I-168, 2006.
  - 46) 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/I-23, pp.107-116, 1993.
  - 47) 深田宰史, 吉村登志雄, 岡田徹, 薄井王尚, 浜博和, 岸隆: 高架橋周辺の環境振動問題に対する桁端ダンパーの適用, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.329-342, 2009.3.
  - 48) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田知孝: 道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.237-250, 2010.3.
  - 49) 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, No.356/I-3, pp.435-444, 1985.4.
  - 50) 連重俊, 平野廣和: 鋼橋低音域騒音低減工法の開発と試験施工, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.131-144, 2003.6.
  - 51) 渡邊茂, 佐野健一, 井上浩男: 道路橋における構造音の低減・制振システムの開発, 三井造船技報告 174, p.31, 2001.
  - 52) 渡邊茂, 井上浩男, 佐野健一, 連重俊: 道路高架橋から発生する構造音の低減・制振対策, 三井造船技報告 172, p.108, 2001.
  - 53) 横山 功一: 道路交通振動対策事例, 騒音制御, Vol.13 No.3, pp.143-146, 1989.
  - 54) 公害防止の技術と法規, 経済産業省 2006, p.321
  - 55) 早川清, 中谷郁夫, 緒方広泰, 前育弘: EPS 合成遮断壁による地盤振動遮断効果とその評価法の提案, 土木学会論文集 G, Vol.63, No.2, pp.138-148, 2007.6.
  - 56) 中谷郁夫, 早川清, 櫻本孝彦, 西村忠典: スクラップタイヤを用いた地中振動遮断壁の提案とその振動低減効果の評価, 土木学会論文集 G, Vol.64, pp.46-61, 2008.
  - 57) 竹宮宏和, 島袋ホルヘ: 交通振動対策法「八二カム WIB」の減振効果, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.1, pp.68-77, 2006.
  - 58) 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関する研究委員会報告, 第 2 編対策事例, 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp.87-116, 2004.4.
  - 59) 櫛原信二, 大塚誠, 深田久, 早川清: 地盤環境振動対策へのハイブリッド振動遮断壁の適用性に関する考察, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.3, pp.276-288, 2008.
  - 60) 早川清, 中谷郁夫, 緒方広泰, 前育弘: EPS 合成遮断壁による地盤振動遮断効果とその評価法の提案, 土木学会論文集 G, Vol.63, No.2, pp.138-148, 2007.
  - 61) 三井澄夫: 道路交通騒音対策例, 騒音制御, Vol.13,

No.3 , pp.139-142 , 1989.

- 62) 庄野豊,吉村義朗,山本貢平:道路騒音低減装置(ノイズリデューサー)の騒音低減効果に関する境界要素法による解析,土木学会論文集, No.574 pp.15-20, 1997.
- 63) 大久保朝直:先端改良型遮音壁,騒音制御, Vol. 28, No.5, pp.317-322, 2004.
- 64) 大西慶三,西村正治:アクティブ・ノイズ・コントロールによる道路交通騒音対策の実情,騒音制御, Vol.23, No.3, pp.153-159, 1999.
- 65) 森喜仁:高架裏面吸音板による騒音対策,騒音制御, Vol.23, No.3, pp.170-173, 1999.
- 66) 徳永法夫,西村昂,谷口与史也,宮原哲:3階建家屋における道路交通振動に対する防振対策の研究,土木計画学研究・論文集, No.16, pp.365-370, 1999.
- 67) 木村翔:交通騒音と住宅の防音対策,騒音制御, Vol.8, No.1, pp.3-4, 1984.



## 6. 振動解析を用いた環境振動アセスメント

金哲佑<sup>\*</sup>，深田宰史<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Ph.D.，京都大学大学院教授，工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

<sup>\*\*</sup>博(工)，金沢大学准教授，理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 金沢市角間町）

### 6.1 はじめに

高架橋周辺における振動および低周波音に対するアセスメント手法として、すでに定式化した手法<sup>1)</sup>が提案されているが、これまでの実測データをもとにした予測式であり、すべての橋梁形式に対応できるわけでない。

そこで、本章では、振動解析を用いたアセスメントの一手法として、解析上で車両走行による数値シミュレーションを行うことによって受振点および受音点での振動および音圧の予測・評価を行う方法について述べる。

### 6.2 環境振動アセスメントの手順

振動や低周波音などの環境振動アセスメントとして、ここでは受振点および受音点での振動および音圧の予測・評価を行う一連の流れについて、有限要素法を用いた直接積分法による方法を例にして述べる。アセスメントの手順を図-6.2.1に示す。なお、このアセスメントは、計画および設計段階において適用する場合や供用段階での対策方法の検討において適用できるものである。

本手法では、橋梁の解析モデルを作成するために、剛性、質量および減衰マトリックスを順次構築していく。

まずは、剛性マトリックスを作成した後に静的解析を行い、たわみやひずみ等を算出して、設計値との比較から解析モデルの剛性を確認する。

つぎに、固有振動解析を行い、固有振動数や振動モードを算出して、振動特性を把握する。この際に、境界条件をパラメータとして、条件の違いによる振動特性の変化について把握しておくことが必要である。

そのつぎに、動的応答解析を行うため、減衰マトリックスを作成する。減衰マトリックスには、ひずみエネルギー比例減衰を仮定することにより、各振動次数でのモード減衰定数を算出し、そこから得られた任意の2組の固有振動数とそのモード減衰定数を用いることによりRayleigh減衰を算出する方法や剛性比例型の減衰などがある。各技術者の判断により、適切に対象橋梁の減衰特性が反映されるモデル化を行う必要がある。

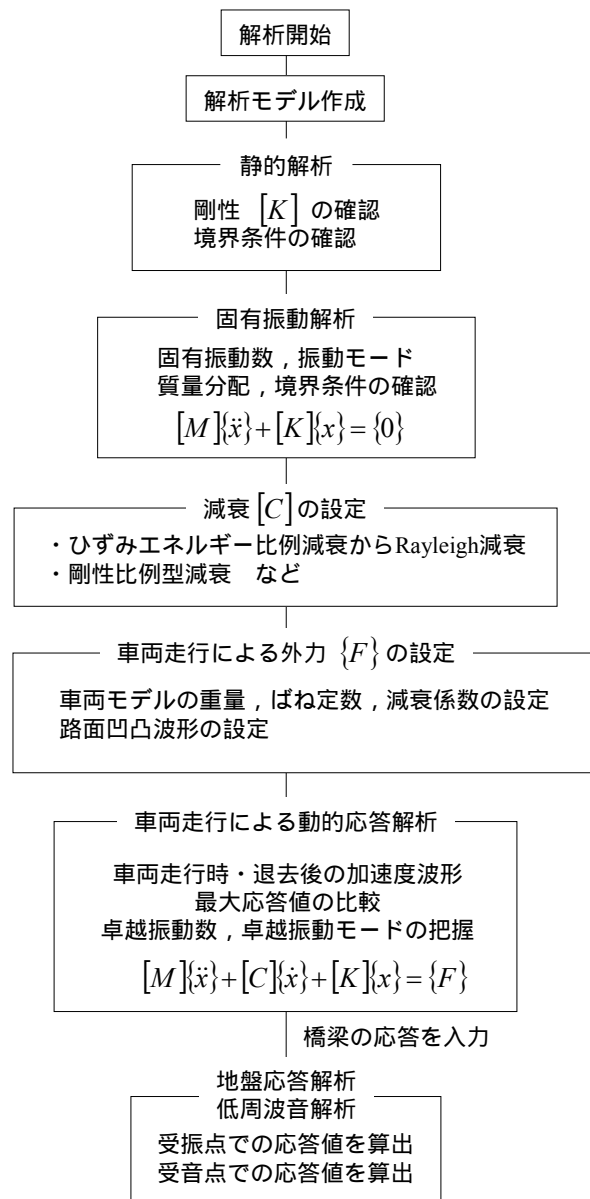


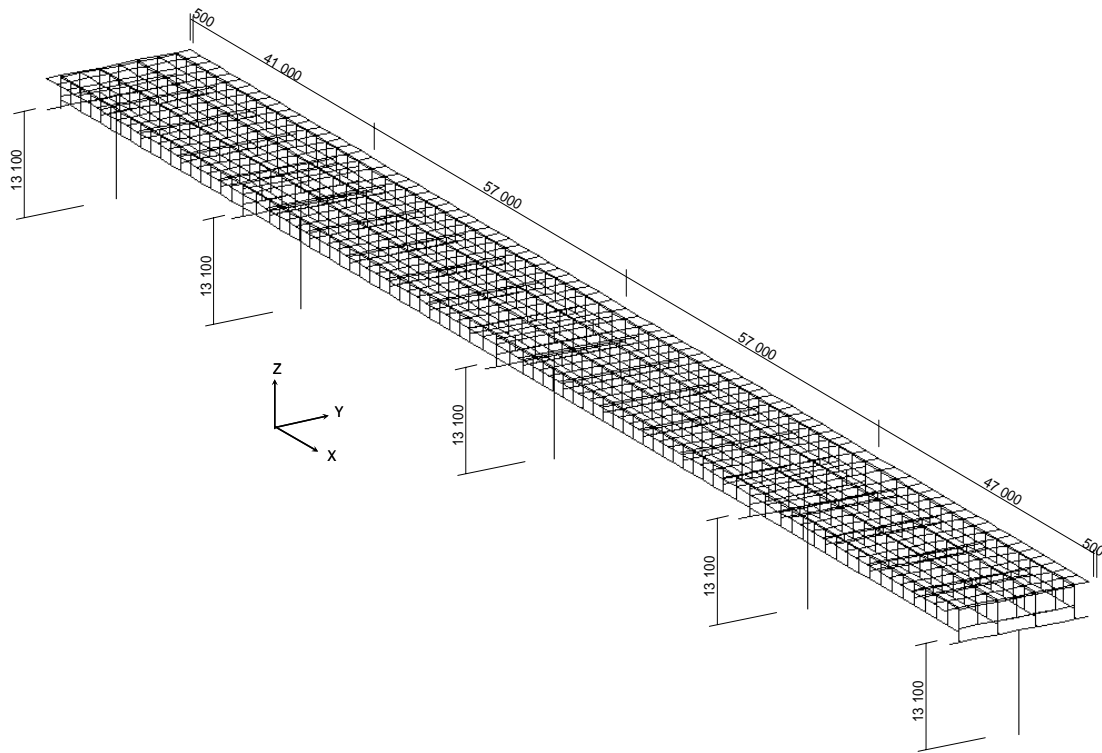
図-6.2.1 環境振動アセスメントの解析手順

さらに、車両の諸元（車両重量，ばね定数，減衰係数）や路面凹凸を設定して車両走行による動的応答解析を行う。動的応答解析により得られた結果から卓越振動数，振動モードおよび応答加速度の最大振幅量などの応答値を把握する。

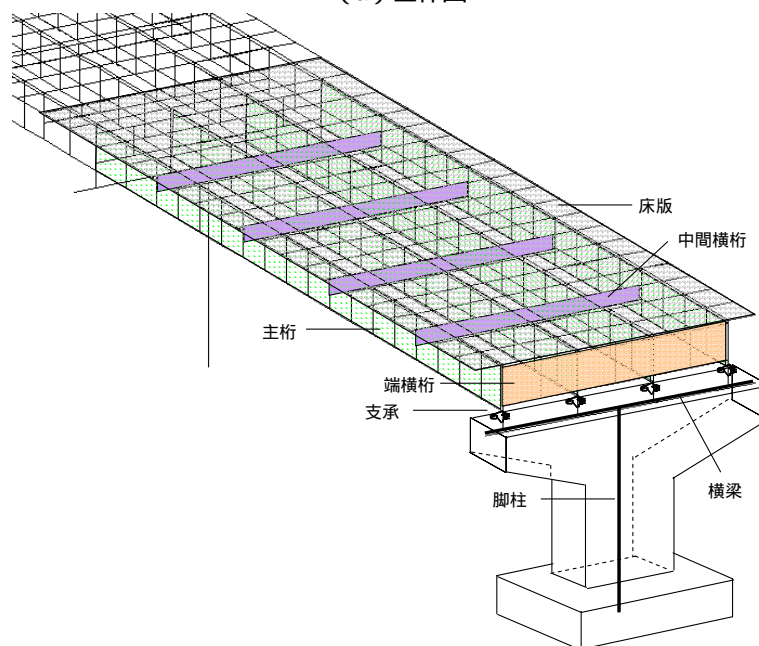
この際に，様々な路面状態，車両条件（積載，空車，他車種など）により応答の変化がどの程度あるのか把握する必要がある。特に，車両1台による応答特性を把握することが必要であるが，交通量が多い場所に架設され

た橋梁の場合には，交通状況を適切にモデル化することも必要である。

最後に，車両走行による動的応答解析から得られた応答値（橋脚下端での反力データまたは床版・主桁の速度応答など）を用いて地盤応答解析または音響解析を行う。この解析によって得られた敷地境界（官民境界）上での振動レベルまたは音圧レベルを算出する。



(a) 全体図



(b) 詳細図

図-6.3.1 解析モデル図

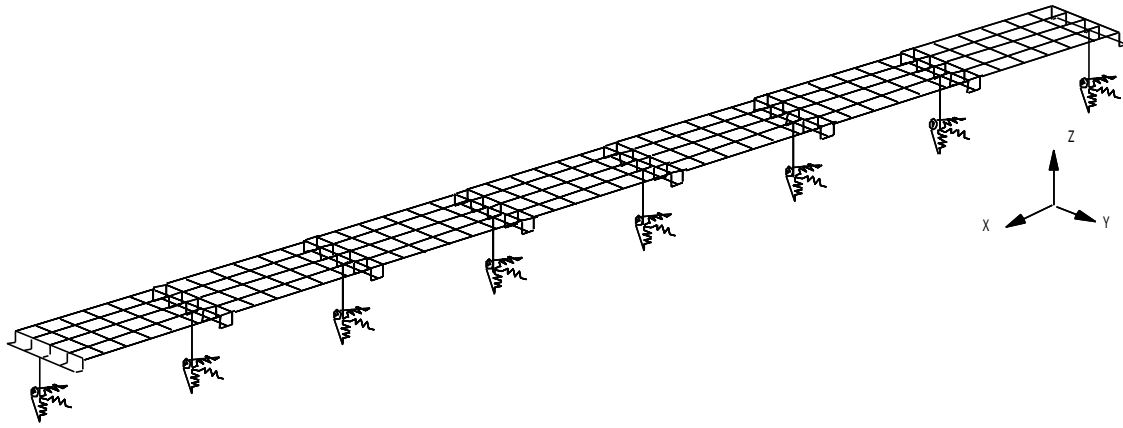


図-6.3.2 解析モデル図

### 6.3 解析モデル

対象橋梁のモデル化の例として、シェル要素やはり要素を用いた立体構造にモデル化した。解析モデルの全体図と詳細図を図-6.3.1に、はり要素のみを用いてモデル化した解析モデル図を図-6.3.2に示す。

解析モデルは、図-6.3.1に示すように、床版、主桁および横桁(中間横桁、端横桁)のウェブをシェル要素に、主桁や横桁(中間横桁、端横桁)の上下フランジをはり要素としてモデル化する場合や、図-6.3.2に示すように、すべてはり要素にモデル化する場合などがある。

また、主桁と床版については非合成であっても、微小振幅領域であることを考慮して、剛結してモデル化している。壁高欄、地覆および中央分離帯は質量のみを考慮した舗装についても質量のみ考慮している。橋脚柱は、はり要素としてモデル化して、各要素部材での中立軸のくい違いは、オフセット部材(剛部材)を用いて考慮した。また、橋脚下端の境界条件については、橋脚下端部を固定とする場合や地盤ばねを考慮する場合がある。

支承のモデル化は、対象橋梁における弾性支承または鋼製支承を線形ばね要素にモデル化する。弾性支承の場合、そのばね定数の算出方法は、既往の文献<sup>2)</sup>を参考にして算出した。なお、水平方向においては、交通振動などの微小振幅領域における支承の初期剛性が大きいことが報告されている<sup>3)</sup>ことから、それらを考慮して、文献<sup>2)</sup>において算出した水平ばね値(橋軸、橋軸直角)の10倍または100倍のケースを仮定して解析することが必要である。

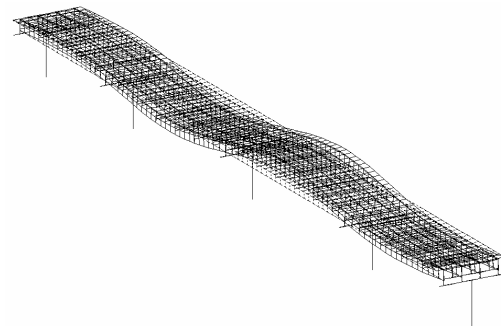
### 6.4 静的解析による剛性の確認

解析モデルの剛性を確認するために、静的解析を行う。計画および設計段階の場合には設計値との比較から剛性の妥当性について確認することができる。供用段階においては、既知重量の車両1台または複数台を用いて移動載荷した場合の任意の測点における変位量を比較するこ

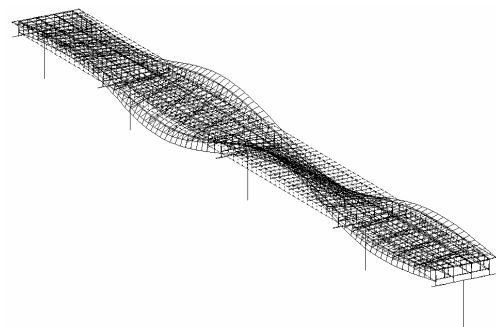
とにより剛性の妥当性について確認することができる。この際に、車線別に荷重を載荷した場合のたわみ量の違いとして、桁のねじりの影響や橋脚および基礎の影響について把握できるように立体的な検討が必要である。

### 6.5 固有振動解析

高架橋振動の場合、多径間であるほど近接した振動数で類似した振動モードが数多く出現し、さらに上部構造と下部構造との連成振動が生じることから、橋台間に架設された単純桁橋と比べてその振動特性は非常に複雑となる。そのため、固有振動解析を行って固有振動数および振動モードを把握しなければならない。一例として、たわみ振動とねじれ振動の振動モード図をそれぞれ図-6.5.1に示す。



(a) たわみ振動



(b) ねじれ振動

図-6.5.1 固有振動数および振動モード図の一例

計画および設計段階の場合には、設計値としての固有振動特性を把握することができ、供用段階においては、実測において得られた卓越振動数および振動モードとの比較をすることができる。また、実測との相違が生じたときは、境界条件などをパラメータとして扱い、様々な検討を行う必要がある。

## 6.6 減衰特性

解析モデルの構造減衰として、減衰エネルギーの主要因が、ひずみエネルギーに比例する内部減衰であると仮定したひずみエネルギー比例減衰<sup>4)5)</sup>を用いることが多い。ひずみエネルギー比例減衰は、エネルギー的な尺度により減衰を定義したものであり、一般的には次式で表される。これにより、 $i$  次振動におけるモード減衰定数  $h_i$  を求めることができる。

$$h_i = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \{\phi_{ij}\}^T [K_j] \{\phi_{ij}\}}{\{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\}} \quad (6.6.1)$$

ここに、 $n$  は構造要素数、 $\{\phi_{ij}\}$  は  $i$  次振動における要素  $j$  の振動モードベクトル、 $h_j$  は要素  $j$  の等価減衰定数、 $[K_j]$  は要素  $j$  の要素剛性マトリックス、 $\{\phi_i\}$  は  $i$  次振動における構造全体の振動モードベクトル、 $[K]$  は構造全体の全体剛性マトリックスである。

また、解析モデルにおける減衰特性を把握するために、固有値解析から得られた固有モードベクトルを用いて各構造要素のひずみエネルギー比を振動次数ごととめることにより、どの部材が減衰に大きく寄与しているのかを把握することができる。そして、上述したひずみエネルギー比と各要素の等価減衰定数を掛け合わせることで各振動モードのモード減衰定数を算出することができる。なお、構造要素として、各材料減衰を仮定することになるが、上部構造におけるコンクリート部材で 1~2% および鋼部材 1% 程度を仮定している<sup>6)7)</sup>。

モード解析法による動的解析の場合には、ひずみエネルギー比例減衰により算出したモード減衰定数をそのまま用いることができるが、直接積分法による動的解析の場合、減衰マトリックスを作成する必要がある。減衰モデルには大きく分けて、減衰が各次数の固有振動数に逆比例すると考えた質量依存型減衰、減衰が各次数の固有振動数に比例すると考えた剛性比例型減衰<sup>8)</sup>、減衰が剛性と質量の 1 次結合により表される Rayleigh 減衰の 3 種類 (図-6.6.1) がある。Rayleigh 減衰を仮定した場合には、次式の  $\alpha$  および  $\eta$  を決定しなければならない。

$$[C] = \alpha [K] + \eta [M] \quad (6.6.2)$$

$$\text{ここに、} \alpha = \frac{h_1 f_1 - h_2 f_2}{\pi(f_1^2 - f_2^2)}, \quad \eta = 4\pi f_2 (h_2 - \pi f_2 \alpha)$$

$f_1$  および  $f_2$  は対象とする 2 つの次数の振動数、 $h_1$  および  $h_2$  はそれらの 2 つの次数の振動モード減衰定数である。したがって、Rayleigh 減衰を仮定するためには、固有振動数とモード減衰定数の組みを 2 組選定することになる。

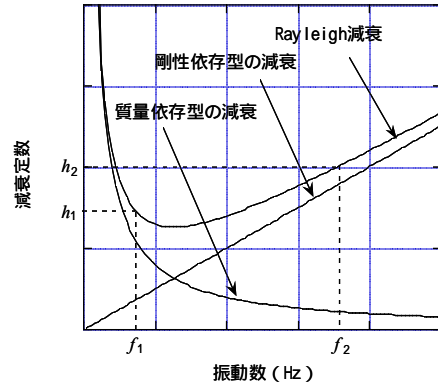


図-6.6.1 減衰モデルの種類

ここで重要な点は、解析に必要な振動数領域において、各振動のモード減衰が Rayleigh 減衰曲線によりモデル化できているのが確認することが必要である。事例として、解析におけるひずみエネルギー比例減衰により算出したモード減衰定数と仮定した Rayleigh 減衰曲線を図-6.6.2 に示す。

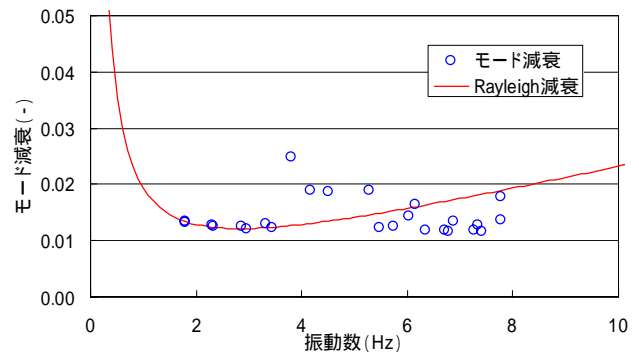


図-6.6.2 モード減衰定数と仮定した Rayleigh 減衰曲線

計画および設計段階の場合には、ひずみエネルギー比例減衰により得られたモード減衰定数の下限側をとるよう Rayleigh 減衰曲線を決めるが、供用段階において実測値が得られている場合、実測により得られたモード減衰定数を満足するような Rayleigh 減衰曲線を決定する。

## 6.7 車両走行による車両-橋梁系の応答解析

### 6.7.1 車両モデル

一般に、車両によるばね振動が橋梁に及ぼす影響とし

て支配的なものは、上下振動、ピッチング振動およびローリング振動とされており、車両走行による動的応答解析では、これらの実際の車両のばね上（サスペンションで支えられている車体や積載物などの質量系）、ばね下（車軸およびタイヤを含めた質量系）振動特性を忠実に表現できるようにモデル化することが必要である。ここでは、一事例として、動的解析に用いる車両モデル<sup>6)-7)</sup>を図-6.7.1に示す。また、その車両モデルの諸元を表-6.7.1に示す。この車両モデルでは、1車輪分のばね上とばね下を2自由度系とみなして固有値計算および複素固有値計算を行い、実測の車両振動特性に出来るだけ一致するように決定したものである。それらを6車輪分組み合わせ、上下振動、ピッチング振動およびローリング振動を再現できるようにモデル化している。

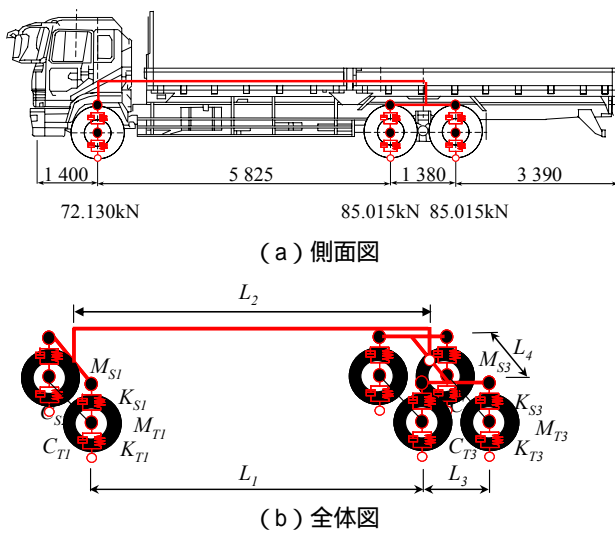


図-6.7.1 車両モデル

表-6.7.1 車両モデルの諸元

	項目	記号	単位	数値
全体	車両総重量		kN	242.160
	前輪-後輪前軸間	$L_1$	m	5.83
	前輪-後輪中心間	$L_2$	m	6.52
	後輪後軸間	$L_3$	m	1.38
前輪	左右車輪間	$L_4$	m	1.94
	ばね上質量	$M_{S1}$	kN/(m/sec <sup>2</sup> )	2.95
	ばね上ばね定数	$K_{S1}$	kN/m	441.00
	ばね上減衰係数	$C_{S1}$	kN/(m/sec)	2.94
	ばね上振動数		Hz	1.83
	ばね下質量	$M_{T1}$	kN/(m/sec <sup>2</sup> )	0.73
	ばね下ばね定数	$K_{T1}$	kN/m	3430.00
	ばね下減衰係数	$C_{T1}$	kN/(m/sec)	9.80
後輪	ばね下振動数		Hz	11.61
	ばね上質量	$M_{S2}, M_{S3}$	kN/(m/sec <sup>2</sup> )	3.39
	ばね上ばね定数	$K_{S2}, K_{S3}$	kN/m	1764.00
	ばね上減衰係数	$C_{S2}, C_{S3}$	kN/(m/sec)	7.84
	ばね上振動数		Hz	2.90
	ばね下質量	$M_{T2}, M_{T3}$	kN/(m/sec <sup>2</sup> )	0.95
	ばね下ばね定数	$K_{T2}, K_{T3}$	kN/m	3430.00
	ばね下減衰係数	$C_{T2}, C_{T3}$	kN/(m/sec)	9.80
	ばね下振動数		Hz	11.98

### 6.7.2 路面凹凸

車両走行による動的応答解析に用いる路面凹凸では、対象とする実橋において計測された路面凹凸を直接用い

る方法<sup>9)</sup>と仮定した路面凹凸パワースペクトル密度を利用して確率的な手法を用いて路面凹凸を解析的に作成する方法<sup>10)</sup>がよく用いられる。また、近年では、周期性を帯びた路面による橋梁と車両-路面系の連成振動<sup>9)</sup>が問題になったことから正弦波などの周期路面を波長ごと作成して、最も影響を受ける場合を想定して解析する手法<sup>6)</sup>も可能と考えられる。さらに、路面凹凸を考慮した解析の場合、構造形式による影響に加えて、路面凹凸の波長、振幅による影響が大きい。解析結果が大きく左右するために、振動対策の効果を比較する場合は、路面凹凸は考慮せず、橋梁構造モデルのみの影響を各解析モデル間で相対比較することも可能と考えられる。

立体車両モデルの場合には、左右車輪位置に路面凹凸を入力することにより、車両のローリング振動による影響を解析することも可能となる。

路面凹凸波形に対する評価方法として、MEM(最大エントロピー法)を用いた路面凹凸パワースペクトル密度を算出し、ISO8608における基準<sup>11)</sup>と比較する方法がよく用いられる(図-6.7.2参照)。さらに、近年ではIRI(国際ラフネス指数)による評価も多く用いられており、既往の文献<sup>12)</sup>から、6m程度以上の長波長成分では「C(普通)」ラインがIRI 3.5mm/m(高速道路における補修目標値に設定されている<sup>13)</sup>)に相当するとの知見が得られている。IRIによる評価と関連付けて解析に用いる路面凹凸を決定してもよいと考えられる。ただし、橋梁上のみ路面凹凸をIRIで評価する場合、IRI算出時の評価基準長により、IRI値が影響されるため注意が必要である(NEXCO試験方法では200m<sup>14)</sup>を標準としている)。

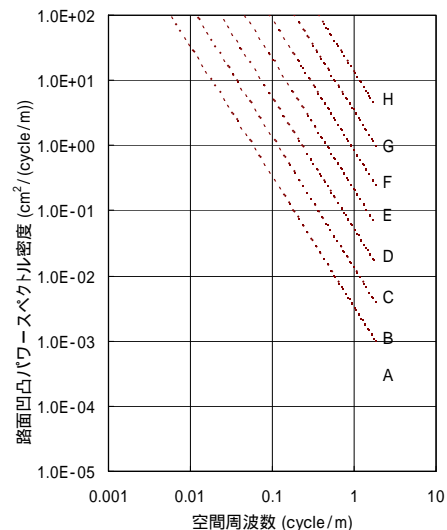


図-6.7.2 ISO8608による路面分類

### 6.7.3 運動方程式の解法

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ダル解析法と運動方程式を直接積分していく直接積分法の2つがある。直接積分法は、



モーダル解析法に比べて、考慮するモード次数に対する配慮が必要ないため、高次モードまで解析できるが、減衰マトリックスの設定上の不明確さや離散化した節点数が増加した大規模な橋梁を対象とする場合、マトリックスの項数が大きくなり、計算機の記憶容量や膨大な時間を要する。しかし、近年の電子計算機器の発達により自由度の大きなマトリックスにおいても容易に計算できるようになり、直接積分法による解法も見直されてきている。ここでは、直接積分法を用いた解析方法について説明する。

これまでに算出した 橋梁の全体質量マトリックス $[M]$ 、全体減衰マトリックス $[C]$ 、全体剛性マトリックス $[K]$ を用いて、橋梁系の各節点の変位ベクトルを $\{Z\}$ とすると、車両-橋梁系の運動方程式は、次式のように表される。ここに、 $\{F\}$ は車両が橋梁に与える外力ベクトルである。

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\} \quad (6.7.1)$$

また、車両が橋梁に与える外力ベクトルは、任意の時間  $t$ 、車両走行速度  $V$  において次式のようになる。ここに、 $i$ は軸数で  $n$  軸まで、 $j$ は左右輪分で 2 までの重ね合わせとなっている。また、鉛直上向きを正とし、 $m_{ij}g$ は各軸重、 $K_{Tij}$  および  $C_{Tij}$  は  $i$  軸目のばね下ばね定数およびばね下減衰係数をそれぞれ示す。 $W_{Tij}$  は車両のばね下の鉛直変位、 $Z_{ij}$  は各車軸位置における橋梁の鉛直変位、 $\Delta_{ij}$  は各車軸位置における路面の凹凸を表している。 $\phi(t)$  は車両の各軸重が載荷している要素の両節点に比例配分する係数ベクトルを表す。

$$\{F\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \{-m_{ij}g + C_{Tij}(\dot{W}_{Tij}(t) - \dot{Z}_{ij}(t) - \dot{\Delta}_{ij}(Vt)) + K_{Tij}(W_{Tij}(t) - Z_{ij}(t) - \Delta_{ij}(Vt))\} \phi(t) \quad (6.7.2)$$

前節にて示した車両モデルは、前輪および後輪を考慮し、ばね上、ばね下まで含めた 3 軸の立体車両モデルである。その車両の運動方程式を次式に示す。

$$[M_V]\{\ddot{W}\} + [C_V]\{\dot{W}\} + [K_V]\{W\} = \{F_V\} \quad (6.7.3)$$

ここに、 $[M_V]$ 、 $[C_V]$  および  $[K_V]$  はそれぞれ車両の質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスである。 $\{W\}$  は車両の変位ベクトル、 $\{F_V\}$  は車両が受ける外力ベクトルであり、次式で表される。なお、 $\psi(t)$  は車両のばね下節点に配分する係数ベクトルを表している。

$$\{F_V\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \{C_{Tij}(\dot{Z}_{ij}(t) + \dot{\Delta}_{ij}(Vt)) + K_{Tij}(Z_{ij}(t) + \Delta_{ij}(Vt))\} \psi(t) \quad (6.7.4)$$

これらの式を解法する上で車両と橋梁の連成項が生じるため、収束計算を用いた解法がよく使われる。また、式(6.7.1)および式(6.7.3)の運動方程式を解くために、Newmark  $\beta$ 法<sup>15)</sup>などを用いることにより、各時刻での橋梁と車両の応答値を算出することができる。

## 6.8 地盤応答解析

有限要素法などによって地盤振動を解析する方法もいろいろと開発されている。しかし、周辺環境を考慮するような高架橋の振動では、3次元の解析を必要とすることや、地震時などに比較して小さい振動振幅であり、地盤振動が逆に高架橋の振動の大きさに影響するような振動ではないこと、そして、高架橋付近の地盤内には複雑に多くの埋設物が入っており、ここに考えるのは困難であるので、むしろ一様な地盤とみなしたほうが妥当であるとの判断によって、地盤を半無限弾性体とみなすことが多い。

高架橋付近の地盤振動は、車両の接近に伴い数本手前の橋脚からの振動伝播を受けているために、それらを考慮した解析をする必要がある。このような現象を数値計算で再現し、地盤の応答を求めるために、地盤を半無限弾性体とみなし、高架橋のフーチング底面に働く反力が基礎底面全体に分布して作用していると考えた。以下にその地盤応答解析の手順について説明する。

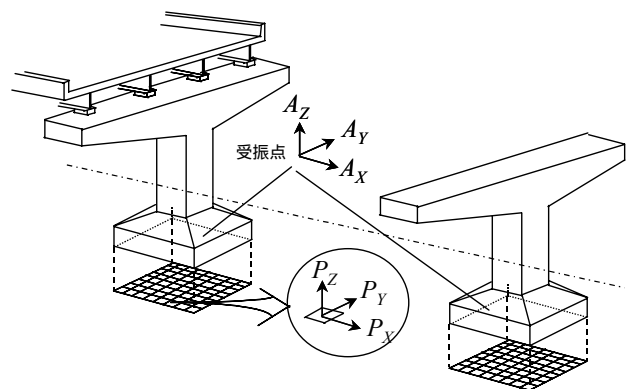


図-6.8.1 解析概要図

### 基礎反力を基礎底面に分割する

橋脚下端の反力を車両走行による動的解析から算出する。その結果をもとにして、フーチング底面を図-6.8.1に示すように微小の要素に分割し、各分割要素に働く  $X, Y, Z$  方向の反力を求め、その反力は地盤に対して 3 方向の点加振であるとする。なお、反力は基礎底面全体に

均等に分布すると仮定し，全面積に対する微小要素の積の割合に比例して各要素に作用すると仮定する．

各要素の反力波形を周波数領域に変換する

周波数応答関数を掛け合わせる

Lamb の解析解<sup>16)</sup>から得られる伝達(周波数応答)関数を掛け合わせて，受振点のフーリエスペクトルを  $X, Y, Z$  の各方向について求める．地盤振動の周波数応答関数は地表面に正弦波点加振が作用した時の変位として Lamb によって誘導されている．

$$\begin{aligned} u_{xz} &= -\frac{P_z e^{i\omega t}}{4\pi G} \cdot \frac{(1-2\nu)x}{r^2} \sqrt{e_1^2 + e_2^2} e^{-i\Phi_e} \\ u_{yz} &= -\frac{P_z e^{i\omega t}}{4\pi G} \cdot \frac{(1-2\nu)y}{r^2} \sqrt{e_1^2 + e_2^2} e^{-i\Phi_e} \\ u_{zz} &= \frac{P_z e^{i\omega t}}{2\pi G} \cdot \frac{1-\nu}{r^2} \sqrt{f_1^2 + f_2^2} e^{-i\Phi_f} \\ u_{xx} &= \frac{P_x e^{i\omega t}}{2\pi G} \cdot \left\{ \frac{1-\nu}{r} \sqrt{g_1^2 + g_2^2} e^{-i\Phi_g} + \frac{\nu x^2}{r^3} \sqrt{h_1^2 + h_2^2} e^{-i\Phi_h} \right\} \\ u_{yx} &= \frac{P_x e^{i\omega t}}{2\pi G} \cdot \frac{\nu xy}{r^3} \sqrt{h_1^2 + h_2^2} e^{-i\Phi_h} \\ u_{zx} &= \frac{P_x e^{i\omega t}}{4\pi G} \cdot \frac{(1-2\nu)x}{r^2} \sqrt{e_1^2 + e_2^2} e^{-i\Phi_e} \end{aligned} \quad (6.8.1)$$

ここに， $u_{ab}$ の意味は， $b$ 方向の点加振力による  $a$ 方向変位を示し， $P_c$ は  $c$ 方向加振力を示す． $\Phi_e, \Phi_f$ は偏角であり， $\Phi_e = -\tan^{-1}(e_2/e_1)$ ， $\Phi_f = -\tan^{-1}(f_2/f_1)$ である．

ここで， $u_{zz}$ を例にとって考えてみる． $P_z e^{i\omega t}$ という外力項がそのままの形で残されるので周波数応答関数  $H_{zz}(f)$ は次のように示すことができる．その他の場合の周波数応答関数に関しても同様に求めることができる．

$$H_{zz}(f) = -\frac{1}{2\pi G} \cdot \frac{1-\nu}{r} \sqrt{f_1^2 + f_2^2} e^{-i\Phi_f} \quad (6.8.2)$$

次に，鉛直方向の地盤振動は鉛直方向，橋軸方向および橋軸直角方向の基礎反力のフーリエ・スペクトル  $P_{zi}(f)$ ， $P_{xij}(f)$ および  $P_{yij}(f)$ と地盤振動変位  $H_{zu}(f)$ ， $H_{xu}(f)$ ， $H_{yu}(f)$ を掛け合わせる事により次式のようになる．

$$u_{zj}(f) = H_{zu}(f)P_{zj}(f) + H_{xu}(f)P_{xij}(f) + H_{yu}(f)P_{yij}(f) \quad (6.8.3)$$

全要素のスペクトルをすべて加え合わせる

ある橋脚の各要素及び各橋脚について，全要素によるスペクトルをすべて加え合わせる事によって，受振点

の周波数領域での変位応答が得られる．この際に，変位を微分して速度や加速度も求める．

基礎反力を分割要素の影響に対しての受振点における地盤振動変位のフーリエ・スペクトル  $u_z(f)$ はそれぞれの要素の合計，さらには影響している基礎(基礎数  $P$ )の合計で示される．

$$u_z(f) = \sum_{k=1}^P \sum_{i=2}^{m+1} \sum_{j=2}^{n+1} u_{zij}(f) \quad (6.8.4)$$

周波数領域の変位，速度，加速度を時間領域にする

周波数領域での変位，速度，加速度をフーリエ逆変換することによって，着目点での時間領域での変位，速度，加速度応答波形が得られる．また，スペクトルをフーリエ逆変換する前に，振動レベル形の持つ振動間隔補正回路に相当するフィルターをスペクトルに掛け合わせたのちに，フーリエ逆変換し，振動レベルの Slow 特性(時定数 0.63sec)に合わせて加速度の実効値を求めれば，その対数表示により振動レベルに換算することもできる．

以下，同様に  $X$ 方向， $Y$ 方向も求めることができる．地盤振動速度，地盤振動加速度においても周波数応答解析が求めることで算出できる．鉛直方向点加振による鉛直方向速度および加速度については， $u_z$ の時間について1階微分および2階微分することで表すことができる．

## 6.9 低周波音解析

### 6.9.1 はじめに

本節では橋梁交通振動解析結果を用いた橋梁周辺の音場をシミュレーションする手法について示す．音場解析の方法は大きく幾何音響学に基づく手法，波動論に基づく手法の二つの手法に分類される<sup>17)</sup>．幾何学的手法は主に室内音響解析で用いる方法で，特定の音源の境界面における反射を繰り返し計算によって求めることにより音線経路を求める手法である．計算量が少ないのが特徴であるが，波動性の取扱が困難で，周辺構造物の音の回折現象は近似的に取り扱わざるを得なく，また，反射面の寸法に比較し低周波音のような波長が長い場合は誤差が大きくなるなど，精度の面で問題がある．

一方，波動論に基づく手法は，空間内の音場を表す支配方程式を与えられる境界条件の下で，音場の解析範囲や境界形状，目標とする精度を総合的に勘案し，適切な数値解析手法により状態量を解く方法である．通常音場波動解析で用いられている数値解析手法は，差分法(Finite-Difference Method: FDM)，有限要素法(Finite Element Method: FEM)，境界要素法(Boundary Element Method: BEM)<sup>18)</sup>がある．それぞれの特徴を図-6.9.1にまとめる．



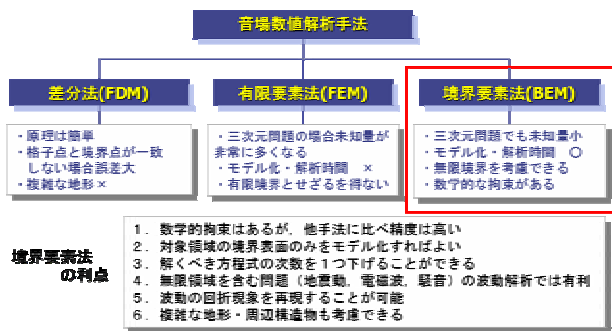


図-6.9.1 音場波動解析で用いられている数値解析手法

このうち 差分法はこの中で最も歴史が古く、流れの解析など適用範囲の広い手法である。この手法は、境界を含む対象領域全体を規則正しい格子状に差分化し、支配方程式および境界条件の微分演算子に差分近似を導入することで格点の状態量を計算する手法である。一般に格子点と境界点不一致の場合には誤差が大きくなり、複雑な境界形状の場合は適用に難がある。

また、有限要素法は FEM として世間一般にポピュラーになっている手法の一つで、変分法に基づく微分方程式の数値解析法である。現在構造物の静的、動的解析だけではなく、流体や音響問題、また、非線形問題でも多く用いられている。この方法では、対象とする領域全体を細かな要素に分割し、要素上の節点の状態量を未知数として定式化を行うため、差分法に比べ複雑な境界条件や、領域内で物性値が不均一な場合の問題を取り扱うことができる。ただしこの有限要素法は、無限領域を対象とする問題においても有限領域を対象とせざるを得なく、無限放射を扱う波動の問題では、仮想境界において波の反射などが生じないよう特別な処理が必要となる。また、領域内を全て要素分割することから、特に3次元問題や広い空間を取り扱う場合解くべき未知数が非常に多くなり、コンピュータが急速に発展している現在でも、対象とする問題によっては解析時間が非常に長くなる。

一方 境界要素法<sup>18)</sup>は、対象とする領域の問題から導かれる境界に関する積分方程式を導き、この境界積分方程式を有限個の境界の要素に関して離散的に数値解析を行う手法である。すなわち、対象問題が境界のみの方程式となるため、差分法や有限要素法的全領域法に比較し解くべき未知数を少なくできる。有限要素法に対する有利な点を以下に示す。

- 1) 領域全てではなく、境界のみを要素分割すればよい。
- 2) 2次元問題では境界が線、3次元問題では境界が面となることから方程式の次元数を1つ少なくできる。
- 3) 無限領域を扱う外部問題では、無限遠方への波動伝播問題の処理が容易。

ただし、境界積分方程式を導くにあたって現象の基本解が必要になり、また、数学的処理の拘束が大きく応用範囲に制限があるなどの欠点もある。音響解析の分野では支配方程式である波動方程式の基本解が明らかとなっており、特異点など数学的処理方法の研究も数多く進められている背景から、特に外部問題を扱う場合には広く採用されている。

ここでは次節に示す、球面波方程式に基づき、床版を無限バツフルに見立て半球状の点音源からの放射音を導く、より実務に取り入れやすい簡易的な方法<sup>19)</sup>と、以上に示したような波動論的に解析を行う手法として、精度や解析容量の面で優れている境界要素法<sup>20,21)</sup>の2手法を適用することとする。

### 6.9.2 球面波方程式による音場解析

橋梁周辺への放射音は、図-6.9.2に示すように床版上に配置された仮想の半球状の呼吸球音源により発生するものとする<sup>19,22)</sup>。その際、床版を無限平面バツフルとすると、床版上の点音源による音圧  $dp(r,t)$  は、速度ポテンシャル( $\phi = \phi(r,t)$ )より次式により求まる<sup>23)</sup>。

$$dp(r,t) = -\rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = i\rho_0 \omega \frac{v dA}{2\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \quad (6.9.1)$$

ここで、 $d\phi$ は半球呼吸音源からの速度ポテンシャル、 $r$ は点音源から受音点までの距離、 $\rho_0$ は空気密度(11.9N/m<sup>3</sup>)、 $\omega$ は円振動数、 $k$ は音波の波数、 $dA$ は床版の微少要素面積であり、また  $v$ は橋梁交通振動解析により求まる速度振幅スペクトルである。ある受音点での音圧  $P(r,t)$ は、式(6.9.1)を橋面積全体で積分することで求まる。

$$p(r,t) = \int_s dp(r,t) = \int_s i\rho_0 \omega \frac{v}{2\pi r} e^{i(\omega t - kr)} dA \quad (6.9.2)$$

また、音圧の実効値  $P_{rms}(r,t)$ は式(6.9.3)のように表される。

$$p_{rms}(r,t) = \sqrt{\left( \frac{1}{t} \int_0^t p(r,t)^2 dt \right)} \quad (6.9.3)$$

さらに、この音圧の実効値  $P_{rms}(r,t)$ を音圧レベル  $SPL(r,t)$ に換算する。

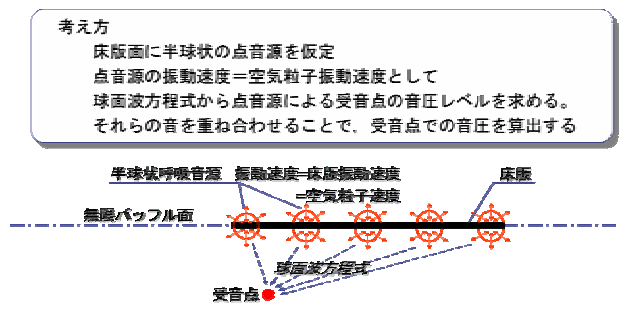


図-6.9.2 簡易法の考え方

$$SPL(r, t) = 20 \log_{10} \frac{P_{rms}(r, t)}{P_0} \quad (6.9.4)$$

ここで  $P_0$  は最小可聴値 ( $2.0 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ ) である。

以下では、この音圧レベル  $SPL(r, t)$  を用いて低周波音の評価を行う。

### 6.9.3 境界要素法を用いた音場解析手法

#### (1) 基礎式

空気中の小振幅の音波について、式(6.9.5)で表される D'Alembert の波動方程式が成立する。

$$\nabla^2 \phi(P, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (6.9.5)$$

$\phi$  が調和関数、すなわち  $\phi(P, t) = \phi(P)e^{i\omega t}$  とすると、受音点  $P$  における速度ポテンシャル  $\phi(P)$  は Helmholtz 方程式の解として表される。 $k$  は波数である。

$$\nabla^2 \phi(P) + k^2 \phi(P) = 0 \quad (P \in \Omega_0) \quad (6.9.6)$$

ある空間中の 1 点の点音源 ( $Q$ ) からの受音点 ( $P$ ) に対する寄与を表す Green 関数を  $G(P, Q)$  とするとき、この  $G(P, Q)$  は基本解と呼ばれ、

$$\nabla^2 G(P, Q) + k^2 G(P, Q) + \delta(Q - P) = 0 \quad (6.9.7)$$

を満足する。 $\delta(Q - P)$  は Dirac のデルタ関数である。また、 $|Q - P| = r$  とすると、Green 関数  $G(P, Q)$  は次式となることが知られている<sup>24)-26)</sup>。

$$G(P, Q) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad (6.9.8)$$

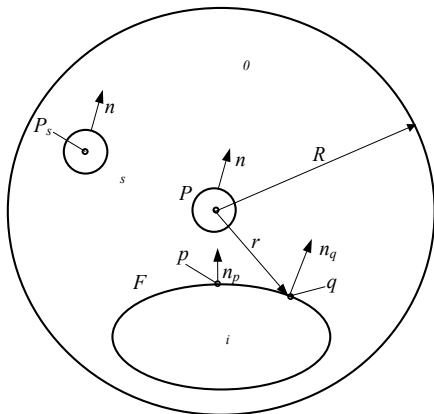


図-6.9.3 境界要素法における音波の領域

#### (2) 境界積分方程式

図-6.9.3 に示すように、音源を  $P_s$ 、受音点を  $P$  とし、その受音点を中心とした閉領域  $\Omega_0$ 、その領域内に表面  $F$  を有するなめらかな物体  $\Omega_i$  を考える。 $n$  は閉領域  $\Omega_0$  への内向き法線単位ベクトルである。この領域  $\Omega_0$  に対し Green の公式を適用すると、式(6.9.9)が得られる<sup>24)-26)</sup>。

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega_0} \{ \phi(q) \nabla^2 G(P, q) - G(P, q) \nabla^2 \phi(q) \} dv = \\ & \iint_{\Sigma + \sigma_s + F} \left\{ \phi(q) \frac{\partial G(P, q)}{\partial n} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n} G(P, q) \right\} ds \end{aligned} \quad (6.9.9)$$

左辺の体積積分は、Helmholtz 方程式および Dirac のデルタ関数の性質より  $\phi(P)$  となる。なお、 $P$  が  $\Omega_i$  内の場合には、 $\delta(q - P) = 0$  より左辺は 0 となる。

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega_0} \{ \phi(q) \nabla^2 G(p, q) - G(p, q) \nabla^2 \phi(q) \} dv = \\ & \iiint_{\Omega_0} \{ \phi(q) \nabla^2 G(p, q) + G(p, q) k^2 \phi(q) \} dv = \phi(P) \end{aligned} \quad (6.9.10)$$

$\sigma_s$  に対する積分は  $\sigma_s$  の半径  $\varepsilon \rightarrow 0$  とする極限值を考える。直接波  $\lim \int ds = \phi_D(P_s, P)$  となり、また境界  $F, \Sigma$  上の点では受音点  $P$  の球  $\sigma$  が領域  $\Omega_0$  に含まれる割合がなめらかな境界を考える場合 1/2 となることから、点  $P$  が  $\Omega_i$  内にある場合、境界上にある場合、 $\Omega_0$  内にある場合それぞれに対し式(6.9.10)は下式に書き改めることができる。

$$\begin{aligned} & \phi_D(P_s, P) + \iint_{\Sigma + F} \left\{ \phi(q) \frac{\partial G(P, q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} G(P, q) \right\} ds \\ & = \phi(P) \quad (P \in \Omega_0) \\ & = \frac{1}{2} \phi(P) \quad (P \in F, \Sigma) \\ & = 0 \quad (P \in \Omega_i) \end{aligned} \quad (6.9.11)$$

空間内の  $P$  点を物体上の面  $p$  まで極限まで近づけた場合、式(6.9.11)は下式の境界積分方程式が得られる。一般に式(6.9.12)は BF(Basic Form)と呼ばれている<sup>23),27)</sup>。

$$\begin{aligned} & \phi_D(P_s, p) + \iint_{\Sigma + F} \left\{ \phi(q) \frac{\partial G(p, q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} G(p, q) \right\} ds \\ & = \frac{1}{2} \phi(p) \quad (p \in F, \Sigma) \end{aligned} \quad (6.9.12)$$

なお、本稿での領域は橋梁から放射される音波の無限領域を扱う外部問題である。その場合領域  $\Omega_0$  の半径  $R$  を無限大とし、式(6.9.13)で示される Sommerfeld の放射条件<sup>28)</sup>を適用し、無限縁からの寄与は考えない。よって、

外部問題を扱う今回の積分範囲は領域内の物体  $F$  のみとなり，以降は領域  $\Omega$  は考えないこととする．

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \left[ r \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial r} - ik\phi \right\} \right] = 0 \quad (6.9.13)$$

### (3) 法線微分型境界積分方程式

振動する物体からの放射音を求める場合，境界面の振動を  $v = -\partial\phi/\partial n$  とすれば式(6.9.12)は未知数が  $\phi$  のみの第2種積分方程式となり，離散化して連立1次方程式を解くことで境界面の速度ポテンシャルを知ることができる．また，得られる速度ポテンシャルから式(6.9.12)を用いて任意の空間内の速度ポテンシャルを求めることが可能である．

ただしこの方法では，波長に比較し要素の厚さが非常に薄い場合，背中合わせの要素どうしの評価において距離が非常に近くなることから， $1/r$  や  $1/r^2$  の特異性が強くなり正確な解が得られない場合がある<sup>23),28)</sup>．そのような場合，以降に示す法線微分型境界積分方程式が有効であるとされ，それを応用した厚さ0の板からの放射音解析手法が考案されている．本研究では，床版や主桁など薄い部材の振動を扱うことから，この法線微分型境界積分方程式を用いる境界要素法を採用することとする．

式(6.9.12)を点  $p$  で法線方向  $n_p$  に微分すると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_D(P_s, p)}{\partial n_p} + \iint_F \left\{ \phi(q) \frac{\partial^2 G(p, q)}{\partial n_p \partial n_q} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} \frac{\partial G(p, q)}{\partial n_p} \right\} ds \\ = \frac{1}{2} \frac{\partial \phi(p)}{\partial n_p} \quad (p \in F) \end{aligned} \quad (6.9.14)$$

となる．一般に式(6.9.14)は式(6.9.12)の BF に対し，NDF(Normal Derivative Form)と呼ばれる法線微分型境界積分方程式である．この NDF を利用して自由空間中の厚さ0の板振動による放射音場を考える．図-6.9.4 に示す，物体表面の表面を  $F_1$ ，裏面を  $F_1$  と逆向きの  $F_2$  とし，それぞれの面における速度ポテンシャル，法線方向微分を  $\phi_1$ ， $\partial\phi_1/\partial n_{q1}$  および  $\phi_2$ ， $\partial\phi_2/\partial n_{q2}$  とすると，式(6.9.14)から式(6.9.15)が得られる．

$$\begin{aligned} \iint_F \left[ \phi_1(q) - \phi_2(q) \right] \frac{\partial^2 G(p, q)}{\partial n_p \partial n_q} \\ - \left[ \frac{\partial \phi_1(q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_2(q)}{\partial n_q} \right] \frac{\partial G(p, q)}{\partial n_p} \Bigg] ds \\ = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \phi_1(p)}{\partial n_p} + \frac{\partial \phi_2(p)}{\partial n_p} \right] \quad (p \in F) \end{aligned} \quad (6.9.15)$$

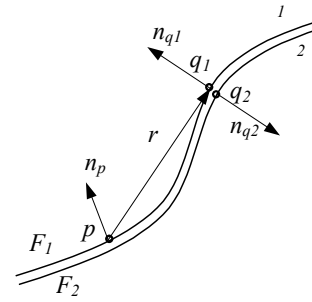


図-6.9.4 板振動による放射音場

同様に空間内の点における速度ポテンシャルは，式(6.9.11)より

$$\begin{aligned} \iint_F \left[ \left\{ \phi_1(q) - \phi_2(q) \right\} \frac{\partial G(P, q)}{\partial n_q} \right. \\ \left. - \left\{ \frac{\partial \phi_1(q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_2(q)}{\partial n_q} \right\} G(P, q) \right] ds \\ = \phi(P) \quad (P \in \Omega_0) \end{aligned} \quad (6.9.16)$$

### (4) 境界条件

振動面での音の吸収や透過を無視すれば，式(6.9.15)における  $\partial\phi/\partial n$  は Neumann 条件として境界面の振動速度  $v = -\partial\phi/\partial n$  となり<sup>29),30)</sup>，薄板両面の速度ポテンシャルの差  $\{\phi_1(q) - \phi_2(q)\}$  はそれを未知数とする第1種積分方程式を解けば求まることになる．

ここで，薄板の両面が一体振動する場合の振動面  $F$  の境界条件は，

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -v, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial n} = -v \quad (p \in F) \quad (6.9.17)$$

となり，式(6.9.15)の積分第2項は0となることから，式(6.9.18)に書き改めることができる．

$$\begin{aligned} \iint_F \left[ \phi_1(q) - \phi_2(q) \right] \frac{\partial^2 G(p, q)}{\partial n_p \partial n_q} \Bigg] ds \\ = \begin{cases} -v(p) & \text{: 橋梁振動面} \\ 0 & \text{: 周辺構造物} \end{cases} \end{aligned} \quad (6.9.18)$$

ここで，基本解の2階微分は下式となる．

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 G(p, q)}{\partial n_p \partial n_q} &= \frac{\partial^2}{\partial n_p \partial n_q} \frac{\exp(ikr)}{4\pi r} \\ &= \frac{\exp(ikr)}{4\pi r^3} \left[ (1 - ikr) \cos(n_q, n_p) \right. \\ &\quad \left. + \{3(ikr - 1) + k^2 r^2\} \cos(r, n_q) \cos(r, n_p) \right] \end{aligned} \quad (6.9.19)$$

また、空間内の任意点の速度ポテンシャルは、式(6.9.16)

より式(6.9.18)の解  $\{\phi_1(q) - \phi_2(q)\}$  を用いて、

$$\iint_F \left[ \overline{\{\phi_1(q) - \phi_2(q)\}} \frac{\partial G(P, q)}{\partial n_q} \right] ds \quad (6.9.20)$$

$$= \phi(P) \quad (P \in \Omega_0)$$

から求めることができる。

#### (5) 特異点の処理

式(6.9.18)の積分は  $1/r^3$  を含むことから非常に特異性が強くなり、 $p=q$  となる点では特別な処理が必要である。この処理については寺井<sup>31)</sup>が3次元における特異積分の評価を行っており、本解析においてもその方法を引用する。

$p=q$  の場合その要素縁辺に沿った下式の線積分で評価できる。なお、 $R(\theta)$  は要素縁までの距離である。

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \iint \Phi(q) \frac{\partial^2 G(p, q)}{\partial n_p \partial n_q} ds \quad (6.9.21)$$

$$= \Phi(p) \left\{ - \int \frac{\exp\{ikR(\theta)\}}{4\pi R(\theta)} d\theta + \frac{ik}{2} \right\}$$

#### (6) 境界積分方程式の離散化

境界積分方程式を  $M$  個の平面一定要素に分割し、要素上の積分を要素中心のポテンシャルおよびその微分と要素面積の積で近似して数値的に計算する。

式(6.9.18)を離散化したマトリックス形式で書くと下式となる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{2M} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1(q_1) - \phi_2(q_1) \\ \phi_1(q_2) - \phi_2(q_2) \\ \vdots \\ \phi_1(q_M) - \phi_2(q_M) \end{Bmatrix} \quad (6.9.22)$$

$$= \begin{Bmatrix} v(p_1) \\ v(p_2) \\ \vdots \\ v(p_M) \end{Bmatrix}$$

ここで、 $a_{ij}(i \neq j)$  は式(6.9.19)で表される基本解の2階微分と要素面積の積、 $a_{ij}(i=j)$  は式(6.9.21)の特異積分となる。このように求めた要素両面速度ポテンシャルの差より、空間内の速度ポテンシャルを以下により求める。

$$\{b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M\} \begin{Bmatrix} \overline{\phi_1(q_1) - \phi_2(q_1)} \\ \overline{\phi_1(q_2) - \phi_2(q_2)} \\ \vdots \\ \overline{\phi_1(q_M) - \phi_2(q_M)} \end{Bmatrix} = \phi(P) \quad (6.9.23)$$

$$b_q = \frac{\partial G(P, q)}{\partial n_q} = \frac{1}{4\pi r} \left( -\frac{1}{r} + ik \right) \exp(ikr) \cos(r, n_q)$$

(6.9.24)

### 6.9.4 道路橋交通振動による低周波音の理論解析

#### (1) 橋梁モデル

本研究において対象とする橋梁の一般図を図-6.9.5に示す。支間長  $25.40+2@25.70+25.40\text{m} = 102.2\text{m}$ 、総幅員  $14.90\text{m}$  の4径間連続6主鈎桁橋である。この橋梁は元来連続する単純桁橋であったが、環境対策のため現在はノージョイント連続化されており、また床版上面増し厚補強(厚さ6cm)、桁端部のRC巻き立て補強(厚さ50cm)も実施されている。さらに、支承はA1橋台部で鋼製支承、その他の橋脚部でゴム支承に取り替えられている。

#### (2) 走行車両モデル

本解析の用いる走行車両は、実際の試験走行に用いられた20t(196kN)トラックを想定し、図-6.9.6に示す8自由度系の三次元車両にモデル化する<sup>32)</sup>。車両諸元を表-6.9.1に示す。走行条件についても試験走行の状況に合わせ、第一走行車線を車頭間隔30mの3台連行、速度はともに75km/hrとする。

#### (3) 路面凹凸

対象橋梁において路面凹凸は実測されていないため、式(6.9.25)に示される路面凹凸パワースペクトル密度  $S_{z0}(\ )$  を用いて、モンテカルロシミュレーションにより路面凹凸波形を発生させる。

$$S_{z0} = \alpha / (\Omega^n + \beta^n) \quad (6.9.25)$$

、 $n$  は路面凹凸特性を決定するパラメータであり、名神高速道路完成直後の実測結果に基づくパラメータ ( $\alpha = 0.001(\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c}))$ ,  $\beta = 0.05(\text{c}/\text{m})$ ,  $n=2.00$ )<sup>33)</sup> を用いる。これは、図-6.7.2に示されているISO8608の路面分類によるとClass Aに分類される。

解析に使用する路面凹凸は、事前に40ケースの路面凹凸サンプル波形を用いて橋梁振動解析を実施し、それぞれ得られた加速度応答のR.M.S.値が最も実測結果に近いものを採用する。また、供用中である実橋を勘案し、橋梁端部においては高さ0.5cm、sin半波形の路面段差を設ける。

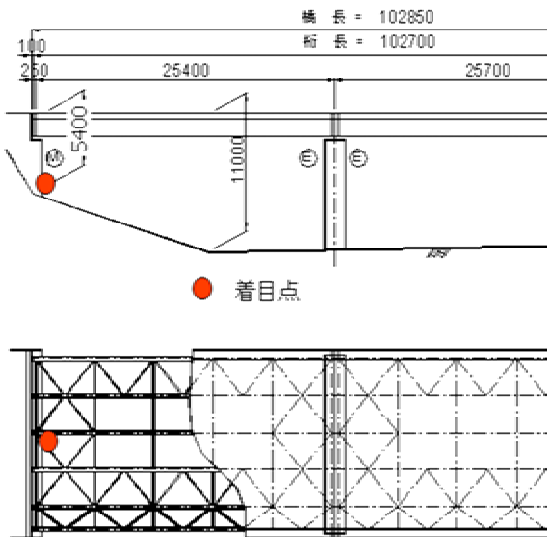


図-6.9.5 対象橋梁

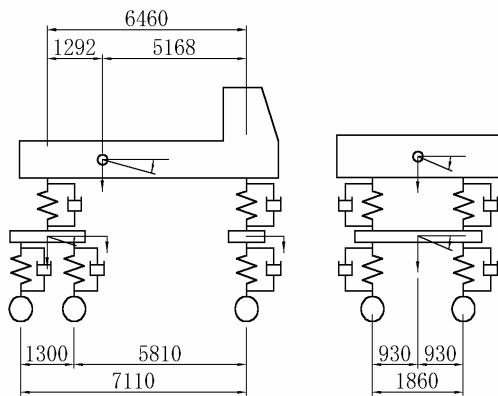
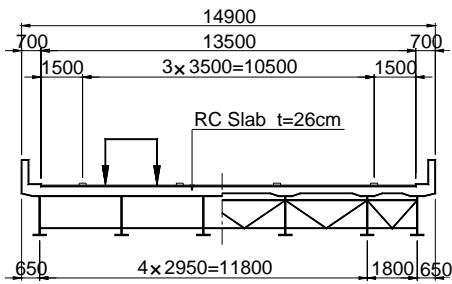


図-6.9.6 8自由度系車両モデル

表-6.9.1 車両モデルの諸元

Total Weight		196 kN	
Axle weight	Front	49 kN	
	Rear	147 kN	
Natural frequency	Front	upper	3.0 Hz
		lower	13.1 Hz
	Rear	upper	3.0 Hz
		lower	11.4 Hz
Spring constant	Front	upper	1279 kN/m
		lower	2558 kN/m
	Rear	upper	5116 kN/m
		lower	5116 kN/m

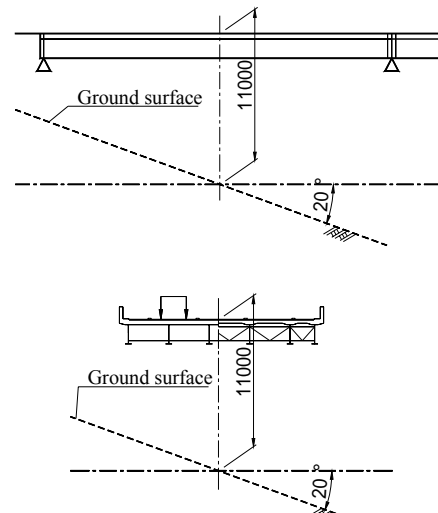


図-6.9.7 桁下の斜面モデル

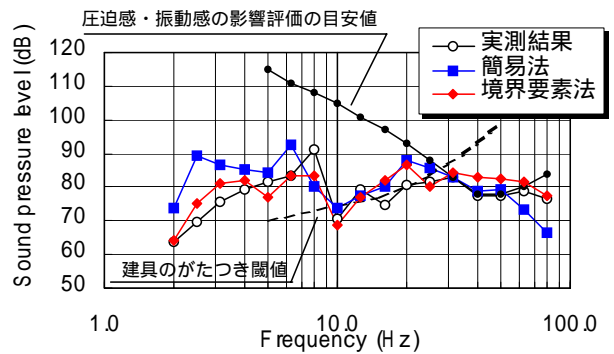


図-6.9.8 音圧レベル

#### (4) 解析法の違いによる低周波音解析結果

対象橋梁の交通振動解析で得られる床版振動の速度応答が式(6.9.17)に示される境界面上における空気粒子の振動速度と同じと考え、周辺の音圧レベルを評価する。なお、床版厚は波長に比較して充分小さく、橋梁周辺の広い放射音場を再現する上で床版の厚みによる影響は微小であると判断し、境界要素法による音場解析の際は板厚0の薄板からの音響放射として考える。なお、このように薄板からの放射音として解析することにより要素数が半分まで抑えることができ、多元連立方程式を解く上で非常に有利となる。低周波音解析においては、前述したように起点側1径間部より放射される音のみを扱うこととし、1台目車両が橋梁に進入してから3台目車両の後輪が第1径間を退出するまでの4.5sec間を対象とする。実橋梁が斜面上に位置していることから図-6.9.7に示す橋軸および橋軸直角方向ともに傾斜角 $20^\circ$ の地盤面を考え、音の地盤面における反射は鏡像法を用い、全反射するものとする。

解析結果の妥当性を確認するため、実測された音圧レベルと解析値の比較を行う。実測されたA1橋台地表面付近の音圧レベルを解析結果とともに図-6.9.8に示す。



実測データは文献 19)に示したとおり暗騒音をほとんど含まず、風の影響もない。解析結果には簡易法と境界要素法による方法の2 ケースを図示しているが、境界要素法による結果には後述する橋台および橋脚による反射を考慮している。

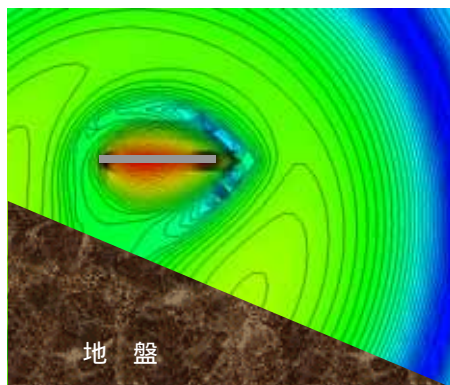
10Hz 以下の低周波域では簡易法による音圧レベルが大きくなっており、前述したように床版を呼吸音源とした結果、低周波域の音圧レベルを大きく見積もった影響がみられる。一方、床版を一体振動とした境界要素法ではこのような低周波域で音圧レベルを過大に評価することはなく、簡易法に比べ実測結果に近づいている。約 8Hz 以上の周波数では解析手法による違いは大きくないが、境界要素法では下部工面での反射を考慮しているため 40Hz 以上で音圧レベルが高くなる。

無限バツフル上の半球状点音源からの簡易的な音場解析結果、および境界要素法を用いた場合の結果のうち 1/3 オクターブバンド中心周波数 4.0Hz および 50.0Hz の橋梁周辺音圧レベルをそれぞれ図-6.9.9 および図-6.9.10 に示す。それぞれ支間中央の橋軸直角方向断面の音圧レベルを示している。なお、ここでは床版以外の構造物は考えていない。

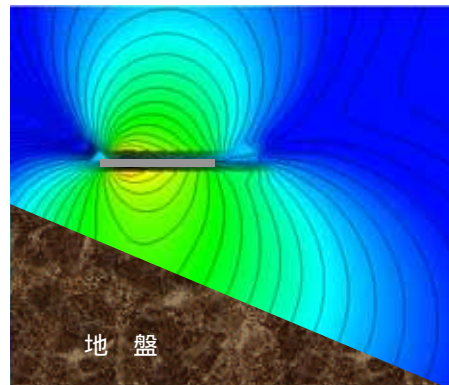
簡易法による結果と境界要素法による結果を比較す

ると、周波数の低い 4.0Hz の結果で音の広がり大きな違いが見られ、境界要素法では簡易法には見られない床版上方にディップを生じる傾向が見られる。これは簡易法では考慮していない床版上面と下面の一体振動を評価しているため、床版上下面お互いの空気振動の影響を考慮でき、二重層ポテンシャルの傾向が現れるためである。ここでは地盤面の反射を考慮しているため、床版端部より斜め上方に音圧レベルの小さくなる領域が生じる。一方簡易法による解析では、床版上面と下面が同時に呼吸振動していると見なされてしまうため、橋梁を中心とした円状に音が広がる。実際の床版は上面と下面が一体で振動していると見なされることから、簡易法による推定では床版に近い側方において音圧レベルを大きく推定していることとなる。

次に 50Hz の結果を比較すると、前述した境界要素法による結果で見られる明確な床版上方へ音圧が小さくなる傾向は見られず、周辺音圧レベルは簡易法による結果と比較的近くなる。これは、音の波長が振動面に比較し長くなる場合は空気粒子が側方へ逃げ有効な音圧にはならないが、波長が短い場合は有効に音として放射されることによるもので、音の回り込みを考慮しない簡易法による場合でも周辺音場を比較的良好に再現できる。しかし、

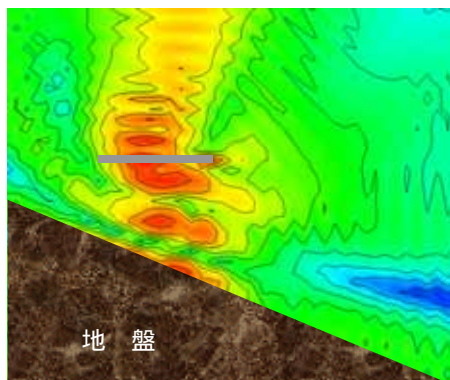


(a) 簡易法

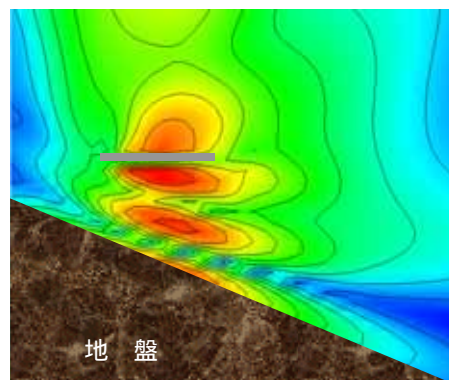


(b) 境界要素法

図-6.9.9 周辺音場 (1/3 オクターブバンド中心周波数 4Hz)



(a) 簡易法



(b) 境界要素法

図-6.9.10 周辺音場 (1/3 オクターブバンド中心周波数 50Hz)



この簡易法では地盤面での反射波が床版を素通りして床版上面の音場にそのまま影響しているため、特に床版面より上方では実際の音場とは誤差が大きくなる傾向になる。このように簡易法と境界要素法による違いは、波長の大きな低周波域ほど大きくなり、非可聴域の橋梁周辺の物理的影響を取り扱う際などは、簡易法は不向きといっている。

以上に紹介した解析手法を用い、供用中の交通状況のような様々な状況を考慮した音圧伝播のシミュレーション<sup>例えば 34, 35)</sup>が可能となり、桁からの放射音や新たな低減対策技術も含め、事前検討が可能である。

## 参考文献

- 1) (財)道路環境研究所：道路環境影響評価の技術手法，第2巻，pp.281-317，2000.
- 2) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：高減衰積層ゴム支承の3次元有限要素解析法，土木学会論文集，No.717/I-61，pp.37-52，2002.
- 3) 深田幸史，薄井王尚，梶川康男，原田政彦：解析上で斜角延長床版化した橋梁の振動・音響特性に関する一考察，構造工学論文集，Vol.53A，pp.287-298，2007.3.
- 4) 山口宏樹，高野晴夫，小笠原政文，下里哲弘，加藤真志，加藤久人：斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見つばさ橋への適用，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.217-227，1996.
- 5) 米田昌弘：ニールセン型ローゼ桁橋の構造減衰特性に及ぼす吊材の影響，土木学会論文集，No.651/ -47，pp.157-162，2000.
- 6) 深田幸史，室井智文，樺山好幸，梶川康男：路面補修前後の長期モニタリングから評価した周期性路面の橋梁に及ぼす影響，土木学会論文集，A1分冊，Vol.67，No.1，pp.121-136，2011.3.
- 7) 深田幸史，吉村登志雄，岡田徹，薄井王尚，浜博和，岸隆：高架橋周辺の環境振動問題に対する桁端ダンパーの適用，構造工学論文集，Vol.55A，pp.329-342，2009.3.
- 8) 横川英彰，中島章典，緒方友一，青戸清剛，笠松正樹：基部からの散逸減衰の影響を含む高架橋モデルの振動実験とその解析，構造工学論文集，Vol.54A，pp.209-217，2008.3.
- 9) 室井智文，薄井王尚，樺山好幸，深田幸史，梶川康男，幸田信則：伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両とPC桁橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.54A，pp.171-180，2008.3.
- 10) 橋梁振動研究会 編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.
- 11) ISO 8608：Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data，1995.
- 12) 広井智，深田幸史，樺山好幸，室井智文，岡田裕行：高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法，舗装工学論文集，第14巻，pp.179-187，2009.12.
- 13) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 舗装編，p.136，2010.7.
- 14) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：NEXCO試験方法，第2編 アスファルト舗装関係試験方法（JHS 248-2005），2010.7.
- 15) Bathe, K.J. and Wilson, E.L., 菊池文雄 訳：有限要素法の数値計算，科学技術出版社，1979.
- 16) 北村泰寿，桜井春輔：剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法，土木学会論文報告集，第290号 pp.43-52，1979.
- 17) 白木万博：騒音防止設計とシミュレーション，ISS 産業科学システムズ，応用技術出版，1991.
- 18) 例えば 小林昭一：波動解析と境界要素法，京都大学学術出版会，2000.2.
- 19) 河田直樹，川谷充郎，金 哲佑，十名正和：道路橋交通振動に起因する低周波音の理論解析，土木学会論文集，No.794/I-72，pp.203-212，2005.7.
- 20) 河田直樹，川谷充郎：境界要素法による道路橋交通振動に起因する低周波音の理論解析，土木学会論文集 vol.62, No.3, pp.702-712, 2006.9.
- 21) M. Kawatani, C.W. Kim, N. Kawada, and S. Koga: Assessment of traffic-induced low frequency noise radiated from steel box girder bridge, *Steel Structures*, Vol.8(4), pp.305-314, 2008.
- 22) 深沢泰晴，杉山俊幸，中原和彦，水上浩之：車両走行時に道路橋から放射される低周波騒音の基本特性，構造工学論文集，Vol.37A，pp.945-956，1991.3.
- 23) Y.Kawai and T.Terai: The application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers: *Applied Acoustics*, Vol.31, pp.101-117, 1990.
- 24) R.D.Cikawski, C.A.Brebbia: *Boundary Element Methods in Acoustics*, 1991.
- 25) C.A.Brebbia, J.Dominguez: 詳細 境界要素法，1993.1.
- 26) L.C.Wrobel: *The boundary element method*, Vol.1 Application in thermo-Fluida and Acoustics
- 27) 河井康人：境界要素法による音場解析，関西大学工業技術研究所技術報告，第101号，pp.25-33，1999.12.
- 28) A.Sommerfeld: Die Greensce Funktion der Schwin-gungsgleichung, *J.-Ber. Deutsch Math.-Verein*, 21, pp.309-353, 1912.
- 29) 長田晃一：境界積分方程式による放射音場の計算について（道路橋からの低周波放射音の計算例），（社）日本音響学会騒音研究会資料 N84-12-4, 1984.12.
- 30) 長田晃一：道路橋からの低周波放射，日本音響学会・日本建築学会環境工学委員会・音環境小委員会，建築音響研究委員会資料 AA87-05, 1987.2.

- 31) 寺井俊夫：音場予測のための積分方程式入門, 日本音響学会 建築音響研究委員会資料研究会資料, 1987.2.
- 32) C.W. Kim, M. Kawatani, and K.B. Kim: Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness, *Computers and Structures*, Vol.83/19-20, pp.1627-1645, 2005.
- 33) 川谷充郎, 小林義和, 高森和恵：曲げねじりを考慮した単純桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.231-238, 1997.7.
- 34) C.W. Kim, M. Kawatani, and K. Nishitani: Assessment of traffic-induced low frequency sound radiated from a viaduct by field experiment, *Interaction and Multiscale Mechanics, An Int J.*, Vol.3 No.4, pp.373-387, Dec. 2010.
- 35) M. Kawatani, C.W. Kim, K. Nishitani, and N. Kawada: Low frequency sound due to vibrations of a bridge under normal traffic, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Structural Dynamics (EURODYN2011), G De Roeck, G Degrande, G Lombaert, G Muller (eds.), pp.754-761, July 4-6, 2011, Lueven, Belgium.

## 7. 振動・騒音問題に対する評価方法

松本泰尚\*

\*PhD, 埼玉大学大学院准教授,理工学研究科環境科学・社会基盤部門  
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

### 7.1 はじめに

本章では、日本における環境振動および騒音の評価に関する現状について、特に道路橋に関連する振動、騒音、低周波音の評価に関連する事項について述べる。

まず、環境振動、騒音の評価に用いることのできる法的根拠を持つ基準類について整理する。本章では、個々の基準類の値自体の紹介については参考文献にまかせ、それぞれの基準の目的や意味合いについて述べることにする。つぎに、基準を設定するために用いられている評価量について概説する。ここでの評価量は、単に物理量ではなく、振動や音に対する人の反応をある程度考慮した量となっており、評価量の定義があってはじめて基準値が意味を持つこととなる。最後に、個別の振動・騒音問題の評価について述べる。個々の問題への対応については、平均的な、あるいは大多数の人を対象とした基準類の設定よりも困難な面を含んでいるとも言える。

### 7.2 環境基準・規制基準・要請限度<sup>1,2)</sup>

環境振動や騒音に対する環境保全のための日本の法体系は、基本的な法律である環境基本法のもと、環境振動、騒音を個別に規制するための振動規制法、騒音規制法が存在するという形になっている。

環境振動や騒音の評価を議論する際、「環境基準」という言葉がしばしば用いられるが、「環境基準」は、厳密には、政府が達成を目指す「人の健康を保護し、及び生活環境を保全するうえで維持されることが望ましい基準」として、環境基本法で定められている基準を指す言葉であるので、これ以外の意味で用いることは避けるべきである。「環境基準」については、環境省により次の説明が加えられている<sup>3)</sup>。

*環境基準は、「維持されることが望ましい基準」であり、行政上の政策目標である。これは、人の健康等を維持するための最低限度としてではなく、より積極*

*的に維持されることが望ましい目標として、その確保を図っていかうとするものである。また、汚染が現在進行していない地域については、少なくとも現状より悪化することとならないように環境基準を設定し、これを維持していくことが望ましいものである。*

環境基本法では、騒音に対する環境基準は、一般騒音、航空機騒音、新幹線鉄道騒音を対象に定められているが、振動に対する環境基準は定められていない。振動に対する環境基準が定められていないことが理解されていない場合が間々見られるので、注意が必要である。

一方、振動規制法や騒音規制法は、その名称の通り、「生活環境を保全し、国民の健康の保護に資すること」を目的に特定の振動や騒音を規制するもので、そこで定められる「規制基準」を達成できない場合は、発生源側が罰則を受ける可能性もある。ただし、振動規制法で道路交通振動に対し、また騒音規制法で自動車騒音に対し、それぞれ定められているいわゆる「要請限度」は、振動・騒音対策を道路管理者や都道府県公安委員会に要請するか否かの境界を与えるもので、罰則は伴わない。

ここで、本章での対象の一つである道路交通騒音については、上述の通り、「環境基準」と「要請限度」の2種類が異なる法律で定められている。最新の環境基準は実質的に平成10年に改定されたもので、要請限度もこれとの整合を図るために平成12年に改定されている。この要請限度の改定では、評価量や地域区分などについて環境基準との整合が図られ、それらの整合性に基づいて、環境基準を10dB上回る値となること基本として要請限度が定められた。環境基準は「維持されることが望ましい基準」、要請限度は何らかの対策が必要と判断される限度、という両者の制定目的の違いが、この10dBの差に反映されているものと言える。環境振動・騒音に対する環境基準、要請限度の具体的な設定については、当該法律や参考文献<sup>1,2)</sup>などを参照されたい。

なお、橋梁振動による振動・騒音問題に対処する際に、80Hz または 100Hz 以下の周波数領域の音と定義される

低周波音に対する評価が必要となることもあるが、低周波音を対象にした環境基準あるいは法的な規制は、現時点では存在しない。環境省では、低周波音の評価などに関する各種の資料を公開しているが、橋梁振動が関連する低周波音の評価法や評価基準を直接的に与える資料などの整備には至っていない。

### 7.3 評価量

順番が後先になったが、前項で述べた環境基準や規制基準、要請限度は、振動・騒音の評価量が定義されて初めて意味を持つ。前項を受けて本項では、主に、日本において法的な根拠を持つ、道路交通による環境振動・騒音に対する評価量について述べる。

#### 7.3.1 振動の評価量<sup>1,4)</sup>

道路交通振動に対して振動規制法で定められている評価量は、道路の敷地の境界線における鉛直方向の振動レベルである。計量証明が必要な際の振動レベルの定義は計量法で与えられており、環境振動の評価では、感覚補正（鉛直特性）を行って得た振動加速度レベルを用いる（計量法では、感覚補正の有無にかかわらず「振動加速度レベル」の用語が使われているので注意が必要である）。単位はデシベル(dB)であり、振動加速度実効値に感覚補正を行って得た値の基準値( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )に対する比の常用対数を 20 倍して算出する。この定義は、次式に相当する。

$$L_v = 20 \log_{10} \frac{a_w}{a_0} \quad (7.3.1)$$

$$a_w = \left( \sum_n a_n^2 \cdot 10^{\frac{w_n}{10}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.3.2)$$

$L_v$  : 振動レベル (単位: デシベル [dB])

$a_w$  : 振動加速度実効値 (単位:  $\text{m/s}^2$ ) に感覚補正を行って得られる値

$a_0$  : 基準の振動加速度 ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )

$a_n$  : 周波数が  $n$  ヘルツ (Hz) である成分の鉛直振動の振動加速度実効値

$w_n$  : 周波数  $n$  Hz における補正值 (表-7.3.1)

ここで、振動加速度実効値は、時定数 0.63 秒の指数移動平均により求めることとなっている。振動規制法は 1976 年に制定されているが、当時、振動レベルを用いて規制基準や要請限度を設定するために検討した結果として、表-7.3.2 に示す振動による影響と振動レベルとのおおよその関係が示されている<sup>1)</sup>。

道路交通振動の場合は、一般に、車両の走行状況に応じて、振動レベルが時間とともに不規則かつ大幅に変動するので、「5 秒間隔、100 個又はこれに準ずる間隔、個数の測定値の 80 パーセントレンジの上端の数値を、昼

間及び夜間の区分ごとにすべてについて平均した数値」をもって、対象とする振動の評価値とし、この値を前出の要請限度と比較することとなる。なお、この 80 パーセントレンジの上端値は  $L_{10}$  と呼ばれ、道路交通振動の評価量は振動レベルの  $L_{10}$ 、などと表現されることも多い。

表-7.3.1 鉛直振動の感覚補正值 (計量単位規則)

周波数 [Hz]	1	2	4	6.3	8
補正值 [dB]	-6	-3	0	0	-0.9
周波数 [Hz]	16	31.5	63	80	
補正值 [dB]	-6	-12	-18	-20	

備考: 該当値がないときには、補間法によって計算する

表-7.3.2 振動による影響と振動レベル (地表換算値) の関係 (文献<sup>1)</sup>より、一部改変。)

	(生理的影響等)	(睡眠影響)	(住民反応)
70 dB		・睡眠深度 1,2 と も全て覚醒する	よく感じるとい う訴え率が 50% になる ・軽度の物的被害 に対する被害感 がみられる
60 dB		・睡眠深度 1,2 と も覚醒する場合 が多い	よく感じるとい う訴え率が 40% になる
60 dB		・睡眠深度 1 の場 合は全て覚醒す る	よく感じるとい う訴え率が 30% になる
50 dB	・振動を感じ始め る (閾値)	・睡眠影響はほと んどない	やや感じるとい う訴え率が 50% になる ・住居内振動の認 知限界
40 dB		常時微動	

#### 7.3.2 騒音の評価量<sup>2,5)</sup>

主に道路交通騒音を想定した騒音に係る環境基準、および自動車騒音の要請限度の設定には、いずれも等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  が評価量として用いられる。等価騒音レベルとは、「変動する騒音の騒音レベルをエネルギー的な平均値として表した量」<sup>5)</sup>などと説明される量で、評価対象とする全時間における平均的な騒音の大きさを表す量と考えてよい。ここで騒音レベルとは、音圧実効値

に聴覚補正 (A 特性) を行って得た値の基準値(20μPa) に対する比の常用対数を 20 倍して算出するもので、単位はデシベル(dB)である。A 特性音圧レベルと呼ばれることもある。この定義は、次式に相当する。

$$L_{pA} = 20 \log_{10} \frac{p_A}{p_0} \quad (7.3.3)$$

$$p_A = \left( \sum_n p_n^2 \cdot 10^{\frac{w_n}{10}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.3.4)$$

- $L_{pA}$  : 騒音レベル (単位: デシベル [dB])
- $p_A$  : 音圧実効値 (単位: Pa) に聴覚補正 (A 特性) を行って得られる値
- $p_0$  : 基準の音圧 (20 μPa)
- $p_n$  : 周波数が  $n$  ヘルツ (Hz) である成分の音圧実効値
- $w_n$  : 周波数  $n$  Hz における補正值 (表-7.3.3)

ここで、一般的には、音圧実効値は、時定数 0.125 秒 (F 特性) の指数移動平均により求めることとなっている。

等価騒音レベルは、対象とする変動騒音を持つ全評価時間にわたる総エネルギーと等しい総エネルギーを持つ定常音の騒音レベルに相当する。等価騒音レベルによる環境騒音の評価は、国際的にも広く採用されており、日本でも等価騒音レベルによる評価に関する科学的知見が蓄積されてきたことを受けて、前述の平成 10 年の環境基準の改定の際に、評価量として採用された。

なお、等価騒音レベルの決定においては、環境基準と要請限度で対象とする場所が異なる。環境基準は受音側での暴露(immission)を管理する考え方に基づくものであり、「住居等の用に供される建物の騒音の影響を受けやすい面」での評価としている。一方、要請限度は排出(emission)を規制する考え方に立つもので、例えば、道路に接して住居等の建築物が存している場合には、道路の敷地の境界で評価することとしている。

補足として、道路交通による振動・騒音に対する基準や限度の設定には直接用いられていないが、例えば、道路橋の伸縮装置部で発生するような単発的な騒音の評価には、単発騒音暴露レベル  $L_{AE}$  を用いることが適切である場合もあり得る。単発騒音暴露レベル  $L_{AE}$  は、A 特性音圧の 2 乗を発生時間全体にわたって積分し、単位時間 (1 秒) で基準化してレベル表示した量で (式 (7.3.5))、単位はデシベル(dB)である。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad (7.3.5)$$

- $p_A(t)$  : 瞬時 A 特性音圧 (単位: Pa)
- $p_0$  : 基準の音圧 (20 μPa)
- $t_1 \sim t_2$  : 対象とする騒音の継続時間を含む時間 (単位: s)
- $T_0$  : 基準の時間 (1 s)

表-7.3.3 聴覚補正 (A 特性) 値 (計量単位規則)

周波数 [Hz]	16	20	25	31.5	40
補正值 [dB]	-56.7	-50.5	-44.7	-39.4	-34.6
周波数 [Hz]	50	63	80	100	125
補正值 [dB]	-30.2	-26.2	-22.5	-19.1	-16.1
周波数 [Hz]	160	200	250	315	400
補正值 [dB]	-13.4	-10.9	-8.6	-6.6	-4.8
周波数 [Hz]	500	630	800	1000	1250
補正值 [dB]	-3.2	-1.9	-0.8	0	+0.6
周波数 [Hz]	1600	2000	2500	3150	4000
補正值 [dB]	+1.0	+1.2	+1.3	+1.2	+1.0
周波数 [Hz]	5000	6300	8000	10000	12500
補正值 [dB]	+0.5	-0.1	-1.1	-2.5	-4.3
周波数 [Hz]	16000	2000			
補正值 [dB]	-6.6	-9.3			

備考: 該当値がないときには、補間法によって計算する

### 7.3.3 デシベルについて

7.3.1 および 7.3.2 で述べたように、環境振動や騒音の評価においては、一般にデシベルを単位とする評価量を用いることとなる。しかし、デシベルは、土木系の技術者には馴染みのない単位であるため、評価量の概説に対する補足として、デシベルを単位とする評価量に関する注意事項を以下に述べる。

そもそも、振動や騒音の評価に物理量を対数化した評価量が用いられるのは、特に音の評価に関して、人の耳で聴くことができる音の強さの範囲が広いことと、物理刺激 (振動、音など) に対する人の感覚量は刺激量の対数に比例するという精神物理学上の知見 (ウェーバー・フェヒナーの法則) に基づいている。振動の評価量については、音の評価量に準じて設定された側面がある。

前述の通り、振動レベル、騒音レベルともに、対象とする振動や音の物理量の基準値に対する比を対数化した量であるから、いずれも無次元量である。騒音レベル算出のための基準値(20μPa)は、平均的な人が聴くことのできる最小の音圧の目安の値である。このことは、騒音レベル 0 dB の騒音を「平均的な」人は聴くことができる可能性があることを意味する。一方、振動レベル算出のための基準値(10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>)は、人が感じることのできる振動加速度の目安とされている値より 2 桁以上小さく、「平均的な」人が感じることのできる振動の大きさは、振動レベル 55 dB 程度より大きい範囲となる。そのため、同じデシベルを単位とするものの、騒音レベルと振動レベルで数値の意味合いは大きく異なる。

### 7.4 振動・騒音問題対応のための評価

道路沿線住民からの苦情など、個別の振動・騒音問題

に対する評価を行うと、法的な基準値や限度値と比較しても、それらを超過しておらず問題がないとの判断になる場合もある。環境省による報告<sup>9)</sup>にもあるように、近年、この傾向は特に環境振動で顕著である。個別の問題に対しては、受け取る側の個人差<sup>7)</sup>の問題も無視できず、客観的な評価は難しくなることも予想されるが、それだけで上記の現状を説明できるものでもない。このような状況に対し、振動評価の問題点を整理し、今後の対応を検討する動きもある<sup>8)</sup>。また、橋梁振動が原因となり発生し得る低周波音については、前述の通り、評価方法や評価基準は確立されていない。本項では、振動および低周波音の問題に対応するための評価に関して述べる。

#### 7.4.1 振動問題の評価

##### (1) $L_{10}$ による評価

振動規制法に基づく道路交通振動の評価に対し、しばしば問題として指摘されるのが、変動する振動レベルの80パーセントレンジの上端値  $L_{10}$  による評価の妥当性である。振動規制法制定当時の資料<sup>1)</sup>によれば、 $L_{10}$ による評価としたのは、「道路毎の最大値のほぼ平均値と考えられること及び騒音に関して欧米で採用する動きにあるなどの理由によるものである」とされている。また、被験者実験による検討の結果、 $L_{10}$ が振動の感覚量と対応しない評価量であるとの結論は得られなかったとする報告<sup>9)</sup>もある。しかしながら、高速道路橋を対象にした詳細な検討<sup>10-12)</sup>や、平面道路での実測に基づく検討<sup>13,14)</sup>などでは、振動感覚や苦情実態と  $L_{10}$  評価の対応は不十分であり、評価の際に振動レベル最大値を考慮することの必要性を指摘している。

最大値を評価に用いるには、特異的に大きな値に対する評価などの問題があるが、上記のように、複数の既往の検討でその必要性が指摘されていることから、最大値による評価の妥当性と実現性を検討するべきと言える。なお、振動暴露による人体への影響を評価するための方法を規定している ISO 2631-1<sup>15)</sup>では、時間による振動特性の変動が大きい場合の評価量として、移動加速度実効値の最大値 (Maximum Transient Vibration Value) を定めており、これは振動レベル最大値を評価量とすることとほぼ同義である。

##### (2) 屋外での鉛直振動のみの評価

騒音規制法と同様に、振動規制法も排出(emission)量の規制の考え方に基づくため、評価対象とする振動は屋外での振動である。その際、地表振動では鉛直振動の方が水平振動より大きいものが多く、また、地表振動が問題となる振動数帯域では、人が鉛直振動をより強く感じるとの理由から、鉛直振動のみに着目することとされた<sup>1)</sup>。

一方、住民からの苦情などの振動問題に対応する場合には、評価の対象とすべきは問題となっている振動であ

り、その多くは屋内での振動である。振動規制法では、建物内外における振動の差異として、屋内で振動レベルが5dB増幅することを想定しているが、その根拠とした当時の資料<sup>1)</sup>からも分かるとおり、その増幅量が十分な精度を持っているとは言えない。したがって、個別の振動問題を適切に評価するためには、建物内の振動を精度よく推定する、あるいは建物内の振動を直接評価対象とする、などが必要となってくる。

ここで、建築物の低次の固有振動モードでは水平方向の振動が卓越し、例えば戸建住宅では、その固有振動数が3~10 Hzの範囲にあるとの報告がある<sup>16)</sup>。この領域の固有振動数は、高架道路橋の固有振動数や大型車両のバネ下振動の振動数と一致する可能性が高い。したがって、高架道路橋沿道の建物の上層では、橋梁の振動に起因する地盤の振動が建物の共振により増幅されることで、顕著な水平振動が発生して振動問題になることが想定され、実際にそれを示す報告もある<sup>11)</sup>。この他にも、水平振動も考慮した評価の重要性を指摘した研究<sup>17)</sup>がある。以上より、高架道路橋に起因する振動問題に対応する場合には特に、水平振動も考慮した評価が問題点の把握のために重要となると言える。

##### (3) 振動レベルによる評価

7.3.1で述べたように、振動レベルは、感覚補正(周波数補正)された加速度の移動実効値に基づく評価量である。環境振動の評価については、国内外で種々の異なる方法が設定されている状況にあるが、その多くで、周波数補正された加速度実効値に基づく評価方法を採用している<sup>4)</sup>。しかし、人間の振動感覚の周波数依存性を表すために導入されている周波数補正係数については、図-7.4.1に示すように、評価方法により異なる補正係数が用いられている現状にある。図より、周波数によっては、振動レベルの鉛直特性(図中のJIS C 1510(95)鉛直)と6dB異なる補正係数もあることが分かる。参考までに、

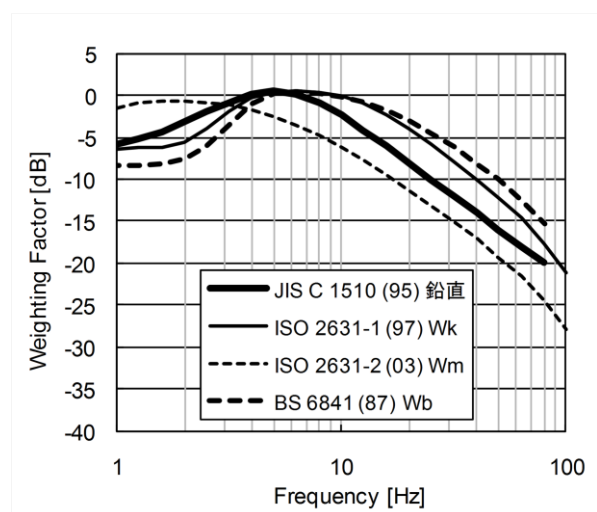


図-7.4.1 国内外の振動評価量における鉛直振動に対する周波数補正(感覚補正)



振動レベルで用いられる鉛直補正は、現在は効力を持たない旧版の国際規格 ISO 2631 で制定されていた補正係数に等しい。また、移動実効値を求める方法についても、時定数が異なるなど、各種評価方法の間に差異が認められる。このように種々の評価量が採用されている状況は、周波数補正や移動実効値の算出方法に国際的な整合性が見られる騒音の評価量とは異なるもので、振動の評価量に関する課題を表していると言える。このことは、個々の振動問題の評価における課題と言うより、一般的な評価量、評価基準に関する課題である。

#### 7.4.2 低周波音問題の評価

前述の通り、日本では、特に低周波音を対象にした環境基準あるいは法的な規制は、現時点では存在しないが、低周波音問題の評価について、環境省による「低周波音問題対応の手引書」<sup>18)</sup>に、低周波音問題対応のための「評価指針」が示されている。この評価指針は、「物的苦情に関する参照値」と「心身に係る苦情に関する参照値」、および測定・評価方法を明示しており、低周波音問題の評価をする際に参考となる情報を提供している。ただし、この評価指針は、「ある時間連続的に低周波音を発生する固定された発生源（工場及び事業場、店舗、近隣の住居などに設置された施設等）から発生する低周波音について苦情が発生した場合」に限定されたものであり、橋梁振動が原因とされる問題に必ずしも適用できるものではないことに注意が必要である。

なお、現在、「固定発生源」以外の発生源による低周波音問題に対しても同様の手引書書の検討が進められており<sup>18)</sup>、橋梁振動が原因とされる問題に適用できる評価指針が提示される可能性もあるため、今後の動向を注視すべきであろう。

#### 7.5 おわりに

本章では、環境振動・騒音問題に対する評価方法について、日本での現状を述べた。環境振動や騒音に対する評価量、評価基準は、研究などで得られた知見に基づき、振動や騒音が及ぼす人への影響、振動や騒音の低減に対する技術的な実現可能性などを加味した上で、ある判断により決められるものであって、当然のことながら、基準を満足していれば、まったく問題が生じないという趣旨のものではない。筆者は、振動や音に対する人の反応を研究対象としているが、多くの人の平均的な反応や、その反応の個人差の程度についての知見を得ることはある程度可能であるものの、いわゆる苦情といった個別の問題に対して何らかの直接的な知見を出すことは難しく、現実問題に対する力不足を感じることもある。個別の問題に対しても多少なりとも役に立つような活動を今後も続けていければと考えている。

#### 参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会編：振動規制の手引き，技報堂出版，2003.
- 2) 日本騒音制御工学会編：騒音規制の手引き [第2版]，技報堂出版，2006.
- 3) 環境省：環境基準について，  
<http://www.env.go.jp/kijun/index.html>
- 4) 松本泰尚：環境振動の評価方法，騒音制御，Vol.35, pp.171-177, 2011.
- 5) 橋秀樹，矢野博夫：環境騒音・建築騒音の測定，コロナ社，2004.
- 6) 環境省：平成21年度振動規制法施行状況調査，2010.
- 7) 国松直，平尾善裕，松本泰尚，北村泰寿：公害振動評価に関わる諸問題と今後の対応，騒音制御，Vol.35, pp.271-278, 2011.
- 8) 松本泰尚，国松直，末岡英之：水平方向の環境振動の知覚に基づく評価に関する基礎的研究，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，I-497, pp.993-994, 2010.
- 9) 横田明則，平尾善裕：建物内の振動評価，騒音制御，Vol.21, pp.28-32, 1997.
- 10) 徳永法夫，日野泰雄，西村昂：高架道路における交通振動と苦情要因に関する研究，橋梁と基礎，1998-3, pp.51-56, 1998.
- 11) 徳永法夫，日野泰雄，西村昂：高架道路橋の交通に起因する振動特性と人の感じ方に関する一考察，橋梁と基礎，Vol.34, No.6, pp.27-32, 2000.
- 12) 徳永法夫，日野泰雄，西村昂：都市内高架道路沿道における振動量と知覚特性の評価に関する研究，橋梁と基礎，Vol.35, No.3, pp.37-44, 2001.
- 13) 大野嘉章：道路交通振動のL10問題，騒音制御，Vol.30, pp.147-153, 2006.
- 14) 松島貢，武田鉄生，立成隆秀，久能幸二：道路交通振動の苦情対策とL10評価について，平成19年日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，pp.87-90, 2007.
- 15) ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- 16) 宮澤健二編著：目でみる木造住宅の耐震性，東洋書店，2007.
- 17) 国松直，三浦房紀，今村威，中川浩二：公害振動における構造物の応答特性と水平振動計測の重要性について，土木学会論文集，第403号/VI-10, pp.45-54, 1989.3.
- 18) 環境省：低周波音について，  
<http://www.env.go.jp/air/teishuha/index.html>

## 8. 計画・設計，維持管理において配慮すべき点

酒井修平\*，原田政彦\*\*

\* 中日本高速道路(株) 名古屋支社 建設事業部 計画設計チームサブリーダー  
(〒460-0003 名古屋市中区錦 2-18-19)

\*\* 博(工)，大日本コンサルタント(株) 大阪支社 技術部 構造保全計画室長  
(〒650-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

### 8.1 はじめに

本章では，これまで述べてきた振動・騒音の発生要因及びそれらに対する対策方法を施行するにあたり，橋梁の計画・設計及び維持管理において配慮すべき点を述べる。

### 8.2 橋梁形式

橋梁形式は，一般的に交差条件から決まる支間割から施工条件を含めた橋梁全体の合理性または経済性をもとに決められることが多い。振動・騒音の要素は，橋梁周辺に学校や病院などの施設がある場合や住宅地に建設される場合に配慮されるケースが少なくない。しかし，特に山間部などの新規に建設される橋梁はそうした配慮がないことから，供用後に問題となることがまれにある。これは，高架橋周辺の受振者・受音者の環境変化のイメージの相違や慣れなどの影響もあり，難しい問題となる。これらの振動・騒音問題は，車両の走行音や舗装の段差などの要素も含まれており，発生源などの調査を行い，対応しているのが一般的である。前述の点を含め，橋梁形式を決定する段階でどこまで対策を講じるのか，経済性を含めた決め方がないことから，設計者の判断に委ねられることが多い。

そこで，橋梁形式について，一般に考えられる配慮事項について以下にまとめた。

#### 8.2.1 橋梁ジョイント位置

橋梁ジョイント部は，伸縮装置の段差（伸縮装置そのものの段差や前後の舗装の段差も含む）により，振動及び騒音の発生源となる。また，ジョイントの遊間部から走行による音が直接伝搬することから，ジョイント位置については周辺に対する配慮が必要である。

連続高架橋では，下部構造や支承，伸縮装置などの常

時及び耐震設計から橋脚高さがそれほど高くない場合，300～600m程度を1連の橋梁とし，それ以上の橋梁では中間にジョイントを設ける場合が多い。それらのジョイントを設ける際には，居住家屋・集落などと適度な距離をとるように計画するなど配慮するとよい。また，河川や道路を跨ぐ橋梁でも橋台位置を決める際にも同様のことが考えられる。避けられない場合には，桁端部や伸縮装置の構造に配慮するとよい。延長床版システムやポータルラーメン化などもそれらの手法の一つである。それらの構造については，桁のたわみや耐震性などの適用に条件があるため，十分な検討が必要であるが，振動や音の発生源を根本的に抑制する点では有効である。

#### 8.2.2 上部構造の形式

上部構造の形式は，一般に支間長や施工条件により，鋼構造とするかコンクリート構造とするか決めることが多い。上部構造の形式による振動や騒音に関する研究から，以下のことがまとめられている<sup>1)</sup>。

- ① コンクリート橋及び鋼橋の高架構造物音のパワーレベルは，明確な速度依存性があり，速度項はおおよそ速度の常用対数で回帰できる。
- ② 高架構造物音のパワーレベルの重量依存性は10tと20t車では，明確な差はなかったが，コンクリート橋も鋼橋も5t車では3～5dB低い。
- ③ 高架構造物音のパワーレベルは，鋼橋がコンクリート橋より2～3dB大きな値である。

これらの傾向は，一般的な構造における傾向であるため，これにより発生音に対する対策として，コンクリート橋を採用しなければならないというわけではない。しかしながら，問題となる可能性がある条件において鋼橋を採用する際は，何らかの配慮が必要となる。鋼橋の振動特性としては，コンクリート橋と比べて減衰が低いこ

とが挙げられ、鋼桁や床版の振動が発生する音だけではなく、比較的低い周波数の低周波音による建物内の建具などの振動問題が生じる場合がある。そのため、発生源の振動の伝搬を抑制することで、低周波音による影響を小さくすることができる前述にあるような、延長床版システムなど有効な方法として挙げられるが、そのような特別な方法だけでなく、横桁のコンクリート巻き立てや床版コンクリートの桁端部の打ちおろしや床版厚の適切な設定<sup>2)</sup>、ウェブや床版に防振対策（ウェブのコンクリート巻き立て等<sup>3)</sup>）などの細部構造の配慮が重要となる。

### 8.2.3 下部構造の形式

下部構造の形式は、一般に経済性からコンクリート構造を用いることが多い。下部構造は振動の減衰から音や振動の発生源となることはほとんどないと考えられるが、上部構造の振動が下部構造を伝搬し、周辺環境への振動に影響することが考えられる。これは、橋梁に限らず、ボックスカルバートや盛土などでも路面に段差がある場合に起こりうる事象である。問題となるには、地盤による増幅とそれらの伝搬振動が建物やガタついている建具と共振する場合が考えられる。それらの対策として、発生源の振動を抑制するような路面対策、例えば延長床版などを採用するとともに、適切な路面管理が重要となる。また、それらの問題が大ききようであれば、振動伝搬を抑制するような対策（地盤改良、振動遮断溝など）を講じる場合もある。

## 8.3 床版

走行する車両のばね上振動数 1～3Hz、ばね下振動 10～20Hz となるため、車両—路面—橋梁系の振動においては、振動を抑制するとともに橋梁の振動特性がそれらに近接しないようにすることも重要となる。路面よりそれらの振動を直接伝える床版の特性について以下に述べる。

### 8.3.1 振動特性

鋼桁に支持される一般的な RC 床版の局部振動は 30Hz 以上となること<sup>4)</sup>から車両のばね振動数に近接することはないと考えられる。しかし、近年採用されている少数 I 桁橋や細幅箱桁橋等で使用されている PC 床版や合成床版では、床版支間の長支間化により振動数が低下し、車両のばね下振動に近接することも考えられる。図-8.3.1 は、支間長 53.0+53.0m の鋼 2 径間連続 PC 床版 2 主 I 桁橋の床版の局部振動モード<sup>5)</sup>を示したものである。対象橋梁は、床版の局部振動が 15.6Hz と車両ばね下振動と近接しており、低周波音の可能性が出てくるため、振動の発生源となる桁端部付近では十分な剛性が求められる。

橋梁周辺に家屋がある場合には、床版形式の選定に注

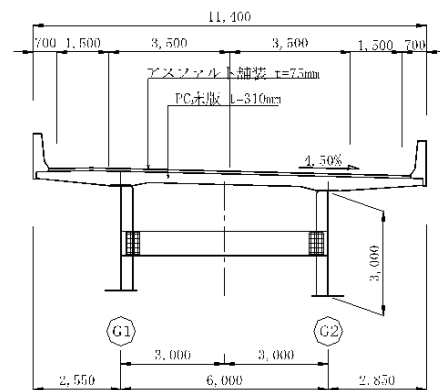
意するとともに、PC 床版、合成床版、鋼床版に対して固有振動解析を実施し、車両のばね振動数に近接しないことや床版厚や舗装厚など振動を抑えるような剛度にすることや、別途特別な対策を講ずることも考えられる。

### 8.3.2 床版上面の凹凸、不陸

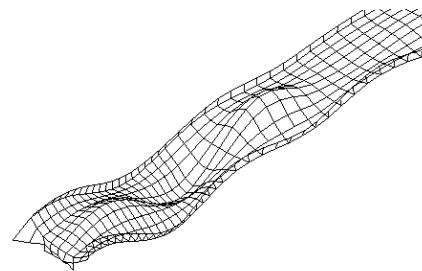
単位荷重にモデル化した車両の場合、路面凹凸波長と車両走行速度とは、式(8.3.1)で表され、図-8.3.2 の関係がある。

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (8.3.1)$$

ここに、 $f$ ：車両の加振振動数、 $V$ ：車両走行速度、 $\lambda$ ：路面凹凸波長



(a) 対象橋梁断面図



(b) 振動モード (15.64Hz)

図-8.3.1 PC 床版の局部振動<sup>5)</sup>

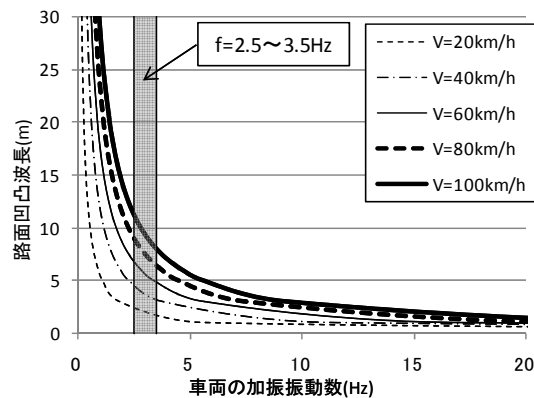


図-8.3.2 路面凹凸と車両の加振振動数

路面に周期性のある凹凸がある場合、車両の走行速度によっては、車両のばね振動と共振し、橋梁が大きく振動する可能性がある。過去には、6~8mの凹凸波長が卓越した高架橋において、ばね上振動が3.2Hz付近の車両が80km/hで走行した時に大きな振動が発生している<sup>9)</sup>。舗装は、施工時に一様の厚さで管理されることから、床版の上面が凹凸を有している場合があるので、対策時には床版上面の凹凸を解消することが重要となる。また、床版上面の劣化により比較的短い期間で舗装にわだち掘れやポットホール等の損傷が生じて、振動が大きくなった事例<sup>2)</sup>もあることから、床版上面の維持管理に注意する必要がある。

鋼床版はたわみ易い構造であり、車両の車輪の位置が横桁上ではたわみが小さく、横桁と横桁の1/2点ではたわみが大きく、その結果、車両走行によって周期性のある路面となることで振動が大きくなる可能性がある。環境問題が懸念される場合には、横桁間隔を調整することや、疲労対策などとあわせSFRC舗装などによる床版の剛性をあげる等の対策が考えられる。

### 8.3.3 桁端部床版

桁端部の床版は、伸縮装置の段差による衝撃によってたわみ振動を起し、低周波空気振動が問題となった事例がある<sup>3)</sup>。これに対して、床版の端部10mの範囲の床版厚を増し厚補強(床版厚310mm、ハンチ100mm、増し厚200mm)し、解析的に20Hz以上の周波数で約10dBのジョイント音を低減した事例が報告されている<sup>5)</sup>。また、同様に、床版支間6m、厚さ270mmのPC床版に対して、端部10mの範囲を+230mmの下面増し厚を行った結果、30Hz帯のジョイント音の低減効果は確認できたが、橋梁から離れている受振点では抑制効果は得られなかったとの報告もある<sup>3)</sup>。

受振点が橋梁から近い場合には、桁端部の増し厚(図-8.3.3)は有効であり、厚さとその範囲を個別に検討して決定するのが良い。また、端部横桁のRC巻き立ても合わせて検討することが有効である。

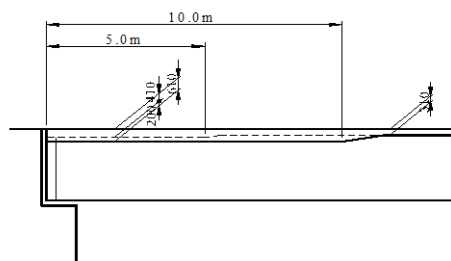


図-8.3.3 端部床版の増し厚<sup>5)</sup>

## 8.4 延長床版システム

橋梁の伸縮装置は、振動・騒音の発生源となることが多く、これを解消する方法として、延長床版システムが

採用されることが多くなっている。延長床版システムは、橋梁の床版を橋台裏込め土上に延長し、振動や騒音の発生源としての伸縮装置を橋梁本体から遠ざけて土工部で振動を減衰させることによって、橋梁から発生する振動や騒音を低減する構造である。

### 8.4.1 延長床版の長さ

延長床版の長さは、「伸縮装置部で発生した車両の振動が、橋桁上への進入時に十分に低減されること」、「主桁に作用する活荷重により延長床版部が浮き上がらないこと」を満足する必要がある。

振動低減に最適な延長床版の長さは、延長床版部を走行して車両バネ下加速度が所定の振動加速度まで減衰自由振動するものと仮定して算出した例<sup>7)</sup>を表-8.4.1に示す。

表-8.4.1 設計速度毎の延長床版長さ<sup>7)</sup>

設計速度 $V$ (km/h)	延長床版長さ $L$ (m)
40	3
60	6
80	10

また、延長床版が浮き上がらない長さは、橋梁のたわみによる回転変位と、延長床版の死荷重によるたわみが同程度となる長さとして、式(8.4.1)で与えられている<sup>8)</sup>。

$$L = \sqrt{\frac{8E_c I_c \tan \theta}{q}} \quad (8.4.1)$$

ここに、 $L$ ：延長床版長さ (m)

$E_c$ ：コンクリートのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$I_c$ ：単位幅当りコンクリートの断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>/m)

$q$ ：単位幅当りの死荷重 (N/mm/m)

$\theta$ ：橋梁のたわみによる回転角 (rad)

### 8.4.2 延長床版付け根部の構造

延長床版の付け根部は、橋梁本体部の活荷重による桁端部のたわみ角によって大きな曲げモーメントが作用する。付け根部の構造には、ヒンジ構造と剛構造があり、桁の変形への追随性からヒンジ構造の方が延長床版自体の設計が合理的となる場合があるが、舗装の耐久性の低下及びその損傷が危惧されることになる。上部構造の支間割りやたわみなどを勘案し設計者により決定しており、ジョイント部を含む側径間の支間が比較的長い場合はヒンジ構造とする例が多くなっているが、ヒンジ構造上の舗装については別途検討が必要である。なお、

剛結構造の場合、主桁腹板直上の床版下面に応力集中が生じることが知られており、これを緩和するため端対傾構や端横桁をコンクリートで巻き立てるなどの対策や、主桁外側の張り出し床版においても、剛なブラケットなどを設置し、応力集中を緩和する必要がある場合がある。また、それらの付け根部上は剛性の高い地覆・高欄部に応力が集中することから、図-8.4.1に示す床版と地覆を分離するなどの対策も必要となってくる。

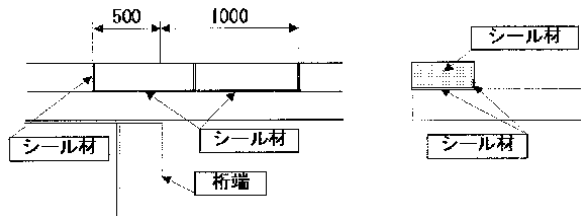


図-8.4.1 地覆の絶縁構造<sup>7)</sup>

### 8.4.3 延長床版の支持構造

延長床版の支持構造には、「すべり面形成構造」と「支承構造」がある。「すべり面形成構造」は、底版と延長床版の間にスライディングシート、ステンレス板+砂層、ステンレス板+ポリエチレン樹脂などを設置したものがあがるが、近年ではプレキャストのコンクリート版や平滑に形成した鋼板とコンクリート版などのすべり面形成構造を採用している事例もある。「支承構造」は、延長床版の下面に橋桁と同じような支承を設置したものである。どちらも、平坦性（スムーズな水平移動）の確保、鉛直荷重（振動）の伝達、活荷重時、温度変化時、地震時の滑動の機能が要求される。

計画に際しては、前述の要求性能を満足するとともに、縦断勾配がある場合には図-8.4.2に示す挙動に対して対応できることが必要となる。また、施工性、施工時の品質確保、維持管理性、路面、伸縮装置部の排水機能の確保ができる構造とすることが要求される。設計において延長床版による地震荷重の伝達の影響を考えなければならない場合は、地震時における摩擦係数、減衰が明確な構造であるとともに、それらを考慮した設計照査が必要となる。

### 8.4.4 設計法

延長床版の設計において最も重要な条件に桁端部のたわみ角の設定がある。そのたわみ角の算出は、延長床版を考慮しない橋梁本体だけをモデル化した格子解析によって算出することが一般的である。橋梁本体の設計で用いられる格子解析の値は、実際の挙動より大きくなることが知られている。それは、設計で用いられる格子解析のモデルに、床版（非合成桁の場合）、地覆、舗装、高欄、横構などが考慮されていないためであり、また、設計活荷重と実交通との差から、実挙動は小さくなる傾向にある。これを反映して、延長床版の設計では、設計

で用いられる格子解析の活荷重時のたわみ角を80%<sup>9)</sup>、あるいは50%<sup>10)</sup>とすることが採用されている。このため、延長床版の設計に際しては、延長床版の要求性能、橋梁本体の構造、構造解析方法などから、使用するたわみ角の算出方法を最初に決定する必要がある。

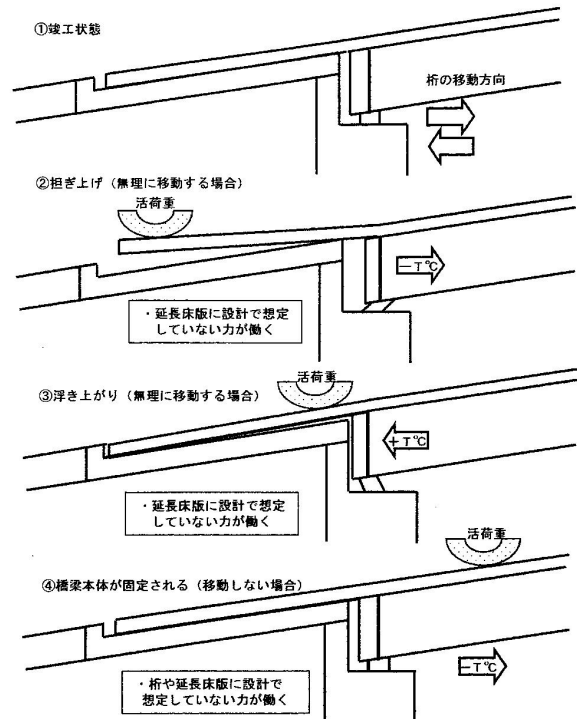


図-8.4.2 縦断勾配がある場合の挙動<sup>7)</sup>

## 8.5 ジョイントレス構造

延長床版と同様に、伸縮装置の段差によって発生する振動・騒音を低減する方法として、ジョイントレス構造がある。ジョイントレス構造は、埋設ジョイント、主桁連結構造、床版連結構造、横桁連結構造の4つに大きく分類される。埋設ジョイントは、舗装のみで路面を連続化する工法で、上部構造と橋台パラペット、上部構造同士の伸縮装置部に適用できる構造であるが、大型車交通量の多い場合や伸縮量が大きい場合に耐久性に問題がある。他の3構造（図-8.5.1参照）は、上部構造同士の伸縮装置部にだけ適用できる工法で、耐久性に優れる構造である。

### 8.5.1 埋設ジョイント

埋設ジョイントは、舗装と同程度の性状を有する舗装材料を用いて路面を連続化させるもので、上部構造の伸縮を舗装体で吸収する構造である。舗装体で伸縮を吸収するため、大きな変形に対応することができない。また、変形を吸収する舗装体は軟質な材料が使用されることが多く、夏場の高温時に輪荷重により流動化を起こすなど、耐久性は他の工法より著しく低い。しかし、支承の交換の必要がなく、安価である特徴がある。このため、

適用にあたっては、設計伸縮量、大型車交通量、補修の容易さなどから、LCC（ライフサイクルコスト）を検討することが重要となる。

### 8.5.2 主桁連結構造

主桁連結構造は、隣接する主桁同士を連結し、温度変化、地震、活荷重に対して連続桁に近い挙動となる特徴がある。適用にあたっては、以下の条件<sup>11)</sup>を満足する必要がある。

- ① 橋種、支間長、構造がほぼ等しい。
- ② 平面線形が直線区間である。
- ③ 主桁中心線が一致している。
- ④ 下部工形式・形状寸法がほぼ同じである。
- ⑤ 地震時に地盤が液状化しない。

連結後の支承は、連続構造で近接して支承が2基となり、負反力が生じやすい構造となることから、弾性支承に取り換え、負反力が発生しない鉛直バネ定数を設定する必要がある。また、支承条件が変化することから、地震時の慣性力の分担を下部構造の耐力を考慮の上、分散させる必要がある。

連結径間数は、温度変化及び地震による連結径間の桁端部の変位量が桁遊間以内であること、支承の高さが既設橋梁の支承と同程度であることから、決定される。

### 8.5.3 床版連結構造

床版連結構造は、隣接する橋梁の床版を鉄筋コンクリート床版により連結させることによって、活荷重に対しては単純桁、温度変化及び地震時に対しては連続桁の挙動となる。主桁連結工法と同様、支承の取替えが必要となり、連結部床版の発生応力の調整によって鉛直バネ定数が決定され、連結後の各橋脚への地震時上部構造慣性力の分散の調整によって水平バネ定数が決定される。

主桁の本数、主桁中心線が一致していなくても適用することができることから、主桁連結工法よりも適用範囲は広い。しかし、連結床版の厚さや床版支間は既設橋梁の構造によって限界があることから、連結床版の耐力力によって適用範囲が決定される。連結部床版は、桁端回転変形、桁端回転に伴うキックアップによる鉛直変位、弾性支承の鉛直変位によって設計されるが、支間長が大きい橋梁では桁端回転変形が大きくなり、連結部床版の設計が困難となる。しかし、延長床版と同様、主桁設計時とは異なる解析モデルや活荷重の載荷方法を用い、実挙動に近い桁端回転変形量で設計を行うことによって、その適用範囲は広がってきている。また、連結部床版の中央部へのヒンジ構造の導入などによって、適用可能な範囲は広がるものと考えられる。

なお、連結部床版の付け根部では、延長床版と同様に、主桁腹板上に応力集中が発生する可能性があることか

ら、FEM解析によって応力照査を行うことが望ましい。

### 8.5.4 横桁連結構造

横桁連結構造は、隣接する橋梁の端対傾構を鉄筋コンクリートで巻き立て、端横桁同士をPC鋼棒で締め付けて連結するもので、活荷重に対しては単純桁、温度変化及び地震時に対しては連続桁の挙動となる。主桁連結構造と同様、負反力が発生しない鉛直バネ定数を有する支承への取替えが必要であり、連結後の各橋脚への地震時上部構造慣性力の分散のために支承の水平バネ定数を調整する必要がある。主桁の本数、主桁中心線が一致していなくても適用することができることから、主桁連結構造より適用範囲が広いが、PC橋での実績はあるが、鋼橋での実績はほとんどない。適用にあたっては、隣接する横桁同士あるいは横桁と主桁の結合方法など、構造的に解明する必要がある。

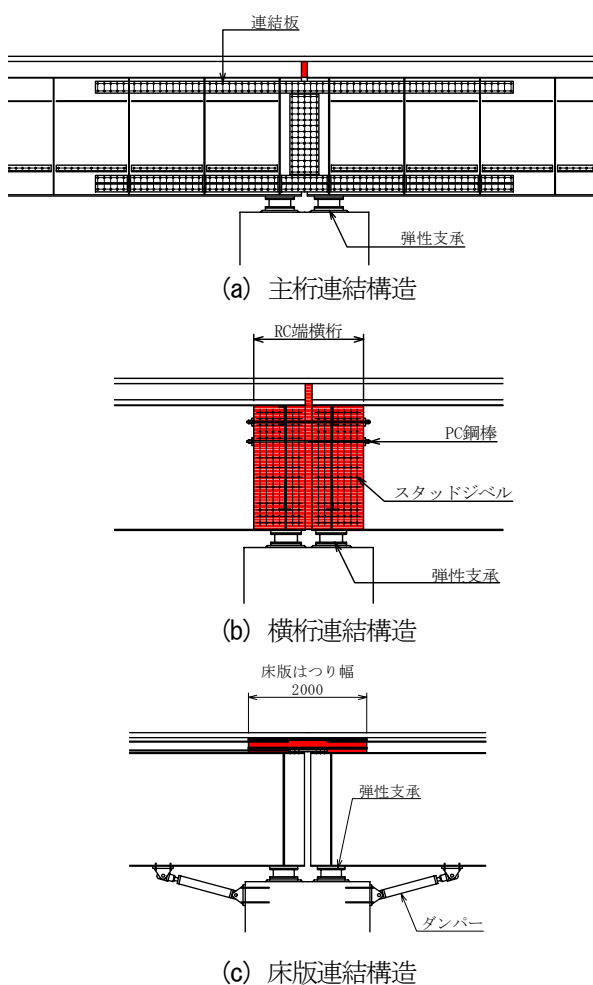


図-8.5.1 鋼桁橋の連結型ノージョイント構造

## 8.6 支承

鋼橋の支承は、平成7年の兵庫県南部地震を契機に鋼製支承からゴム支承へと交換されており、現在、老朽化



により支承を交換する際にもゴム支承が基本となっている。鋼製支承は鉛直方向に変形しないのに対して、ゴム支承では支承直上の輪荷重の載荷によって鉛直方向に変形し、この結果、路面に段差を生じさせ、有害な振動を励起させることが懸念される。既設の連続高架橋において、鋼製支承からゴム支承へ取り替える工事の前後での計測結果から、騒音及び振動レベルは、支承交換前後でほとんど変化が認められなかったとする報告もある<sup>12)</sup>。また、ゴム支承では鋼製支承に比べて偏載荷時に橋軸直角方向の変位が大きく、橋梁全体が橋軸直角水平方向に振動するモードが車両走行により励起することも報告されている<sup>13) 14)</sup>。文献 15) では、ゴム支承の採用により、固有振動数、減衰及び一般化質量が低下し単位調和入力に対する振動応答が増大する振動モードの存在を確認している。

以上のように、ゴム支承においては、使用するゴムの種類や構造によって挙動が異なることも予想され、十分解明されていない点もある。これらのことから、橋梁周辺に家屋がある場合には、ゴム支承の採用には注意が必要である。特に、連続桁や連結桁の端部支承は、温度変化時の変化量が大きく、ゴム支承の高さが高くなる傾向にあり、ゴム支承の鉛直変形によって確実に路面段差が生じるので、採用にあたっては十分に検討しておく必要がある。また、橋軸直角方向に振動するモードが励起することも考えられるので、十分に検討を行って、橋軸直角方向の変形を固定とすることも考える必要がある。

## 8.7 ジョイント構造

橋梁の振動・騒音の主なものとして、車両走行音の他に、路面や橋梁ジョイント部の段差を車両走行に伴い発生する橋梁振動、ジョイント部の舗装、コンクリート、鋼材、ゴム等の材料硬さの異なる箇所の車両走行による振動・騒音、伸縮装置の隙間からの音漏れなどが挙げられる。これらの橋梁の振動・騒音の主な原因は、橋梁ジョイント部の車両走行に伴う衝撃である。橋梁ジョイント部の標準的な構造は図-8.7.1 のようになるが、土工と橋梁または橋梁同士の間隙を路面として機能させるため、伸縮装置を設けるのが一般的である。橋梁ジョイント部は、温度変化等による橋梁の伸縮を吸収するために必要不可欠な橋梁の部材である。近年では、振動・騒音の低減や耐震性の確保、漏水による劣化防止等の観点から、多径間連続化が進み、新設時だけでなく改良でも橋梁ジョイント部を減らす方向に進んでいる。しかし、橋梁の長大化に伴い、伸縮装置も大きくなり、補修が容易でなくなることからより耐久性の高いものが求められるようになってきている。

### 8.7.1 伸縮装置に求められる性能

伸縮装置は、橋梁の部材としてのみならず、道路の路

面としての性能が求められる。道路橋示方書では、伸縮装置において以下の性能が求められるとしている<sup>16) 17)</sup>。伸縮装置の設計、施工ではこれらの性能を照査する。これらの照査項目のうち、耐久性や騒音・振動に関する照査は、解析では困難であることから実験や今までの実績等で判断することが多い。

- ① けたの温度変化、コンクリートのクリープ及び乾燥収縮、活荷重等による橋の変形が生じた場合にも、車両が支障なく通行できる路面の平坦性を確保する。
- ② 車両の通行に対して耐久性を有するものとする。
- ③ 雨水等の浸入に対して水密性を有するものとする。
- ④ 車両の走行による騒音、振動が極力発生しないよう配慮した構造とする。
- ⑤ 施工、維持管理及び補修の容易さに配慮した構造とする。
- ⑥ 伸縮装置の耐震性能としては、レベル 1 地震動に対して損傷しない。

### 8.7.2 伸縮装置の形式

一般的に使われる伸縮装置の形式には、埋設ジョイント、ゴムジョイント（簡易型ジョイントを含む）、鋼製フィンガージョイントがある（図-8.7.2 参照）<sup>18)</sup>。また、曲線橋等では橋軸直角方向の伸縮にも対応可能なビーム型ジョイントも使用される。伸縮装置は、橋梁の伸縮量や車両の交通量に応じ、性能とコストを考えこれらの中から選定される。埋設ジョイントは、ゴムアスファルト等の材料で構成され、アスファルト舗装との剛性差がコンクリートや鋼材等に比べ小さいため段差ができにくく、隙間がないため比較的振動・騒音は少ない。しかし、伸縮量が多い橋梁や交通量の多い道路では耐久性の面で劣るため、他の形式が用いられるのが一般的である。埋設ジョイント以外の形式の伸縮装置では、遊間にできる段差による振動・騒音の発生は避けられない。また、伸縮装置の構造によっては、伸縮装置の凹凸と走行車両のタイヤにより密閉された圧縮空気が音の発生源となるという報告もあり、騒音対策としてそれらの改良がなされたものもある。

### 8.7.3 伸縮装置の設計で考えられる段差

鋼橋で最も用いられる鋼製フィンガージョイントを例に、設計上考えられる段差について考える。鋼製フィンガージョイントのフェイスプレートの先端形状は、桁の活荷重たわみや縦断勾配の影響で生じる段差を考え、スムーズな走行を確保するように設計している。活荷重たわみによる段差 $\Delta h_1$ は、以下の式で求められる（図-8.7.3 参照）。

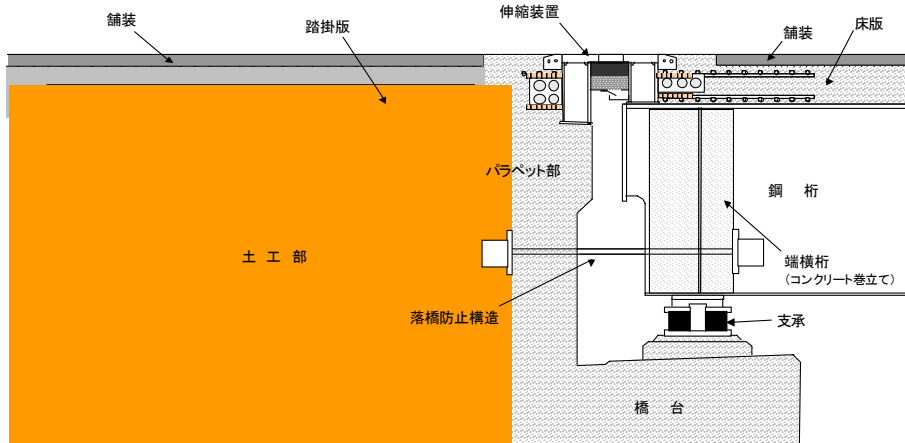


図-8.7.1 一般的な橋梁ジョイント部の構造


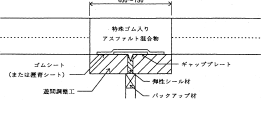

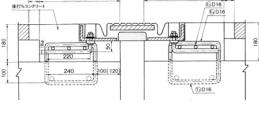
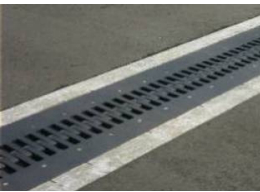
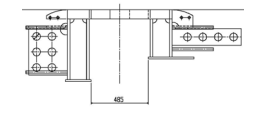
形式	埋設ジョイント	ゴムジョイント	鋼製フィンガージョイント
概要	  <p>前後の舗装と同程度の性状を有する舗装材料を主材料とする構造。</p>	  <p>伸縮自由な各種ゴム材と鋼材を組み合わせた構造。表面が、ゴム製、鋼製による分類および荷重の支持ができない(突合せ型)、できる(荷重支持型)による分類の組み合わせにより4種類に分類できる。</p>	  <p>鋼材で組み立てられ、直接輪荷重に耐えることのできるクシ型構造。</p>

図-8.7.2 伸縮装置の主な形式

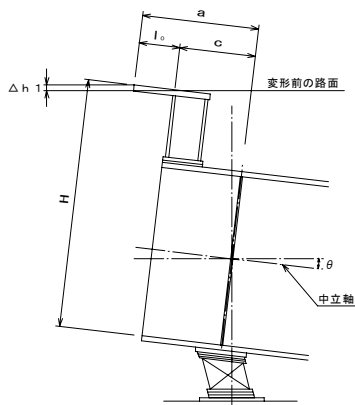


図-8.7.3 活荷重たわみによる伸縮装置の段差

$$\Delta h_1 = H \times \theta \times \theta + a \times \theta \approx a \times \theta \quad (8.7.1)$$

ここに、 $\theta$  : 活荷重たわみによるけたの回転角で、鋼橋では以下の式で求められる。

$$\theta = 2 \times L / 600 / (L/2) = 1/150 \quad (8.7.2)$$

a : 端部長さ

桁高による変位の影響は僅かであると考え、端部長さ a が 1,000mm 程度の場合、 $\Delta h_1$  は約 7mm 程度になる。

また、縦断勾配によるけたの伸縮に伴う段差  $\Delta h_2$  は、以下の式で求められる (図-8.7.4 参照)。

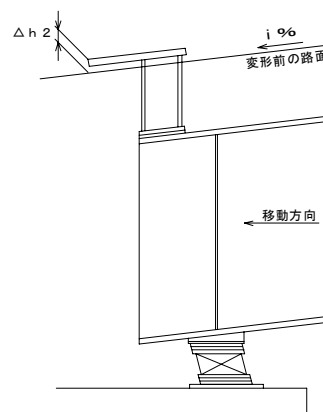


図-8.7.4 縦断勾配の影響による伸縮装置の段差

$$\Delta h_2 = \Delta l \times i / 100 \quad (8.7.3)$$

ここに、 $\Delta l$ ：温度変化に伴う標準温度からのけたの伸縮量  $\Delta l = \alpha \times L \times \Delta T$ 、 $\alpha$ ：線膨張係数、 $L$ ：伸縮けた長、 $\Delta T$ ：標準温度からの温度変化、 $i$ ：縦断勾配、 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$ 、 $L = 260\text{m}$ 、 $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 、設計速度が40km/h（高速道路のランプ橋を想定）の場合の  $i = 7\%$  と考えると、 $\Delta h_2$ は約3mm程度になる。

以上から、活荷重たわみや縦断勾配の影響を考えると、設計上で10mm程度の段差が考えられる。

#### 8.7.4 伸縮装置の施工で考えられる段差

伸縮装置の施工で考えられる段差について、鋼製フィンガージョイントの例で考える。表-8.7.1は橋梁ジョイント部の段差に関する施工管理基準を示したものである<sup>19)</sup>。フェイスプレートの歯の噛み合い分の高低差と舗装面の仕上げ高さの誤差の合計は4mmまで許容され、設計で考えられる段差と併せ最大14mm程度の段差が考えられる。橋梁ジョイント部では、常にこれらの0～14mm程度の段差を車両が通過することで発生する衝撃があると考えられる。

表-8.7.1 橋梁ジョイント部の段差に関する施工管理基準（鋼製フィンガージョイント）

項目	許容誤差	摘要
伸縮装置の表面の凹凸	3mm	長手方向に3mの直線定規で計って凹凸が3mm以下
フェイスプレートの歯噛み合い分の高低差	2mm	ジョイント組立時のフィンガー中心A・B点の差
舗装面の仕上げ高さ	舗装面に対し0～2mm	高さ 舗装面

#### 8.7.5 振動・騒音に配慮した橋梁ジョイント構造

橋梁ジョイント部は振動・騒音源となることから、その対策として様々な方法で配慮されており、その代表的な例を以下に挙げる。

##### (1) 端横桁コンクリート巻立て

鋼少主桁橋の端横桁は、桁端部の防錆、横座屈や落橋防止構造の定着等の耐震性、騒音の低減を考えて、コンクリート巻立て（図-8.7.5）を行っている<sup>18)</sup>。

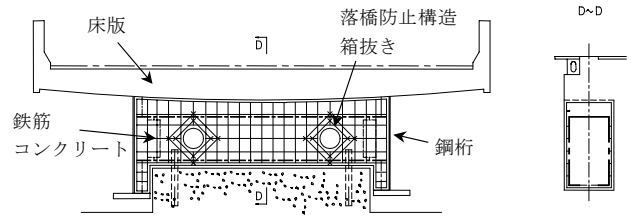


図-8.7.5 鋼橋の端横桁のコンクリート巻立て

##### (2) 延長床版システム

延長床版システムは、図-8.7.6に示すように、上部構造の床版を橋台背面の土工部まで延長する構造で、伸縮装置を桁遊間部から土工部にもってくることで、車両走行による振動・騒音の低減、水密性の確保等を図っている。車両等による桁のたわみを考えた延長床版の設計、橋台の背面土の沈下対策などを考える必要がある<sup>20)21)</sup>。

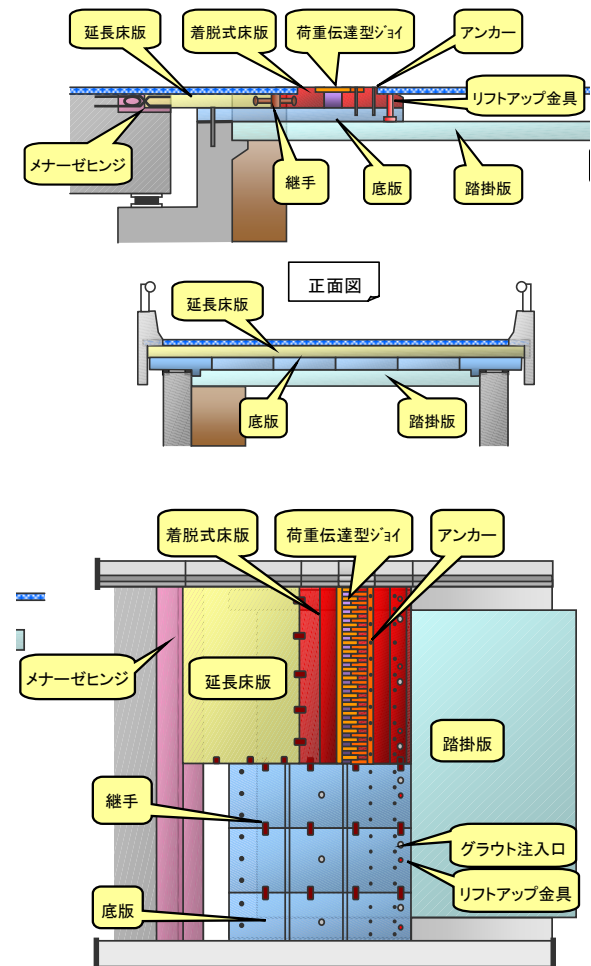


図-8.7.6 延長床版システムの例

##### (3) ダブル埋設ジョイント

近年、埋設ジョイントは、舗装との一体性による走行性向上や騒音・振動の低減や、積雪地域の除雪による伸縮装置の損傷を考え採用が多くなっている。しかし、伸縮遊間の適用範囲が小さいため、一般に小規模の橋梁し

か採用できないが、最近、図-8.7.7のような伸縮遊間を分散し埋設ジョイントを2つ並べた構造が開発され、埋設ジョイントの適用拡大を図っている。

#### (4) 橋台との剛結化（鋼ポータルラーメン橋）

鋼橋において伸縮装置をなくした橋梁が、近年採用される例も出てきている。その例として鋼ポータルラーメン（図-8.7.8）が挙げられるが、橋台コンクリートと鋼桁の接合部の設計、施工及び耐震設計について十分な検討が必要である<sup>22)</sup>。

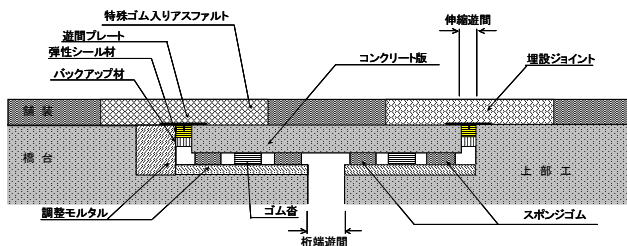


図-8.7.7 ダブル埋設ジョイントの例

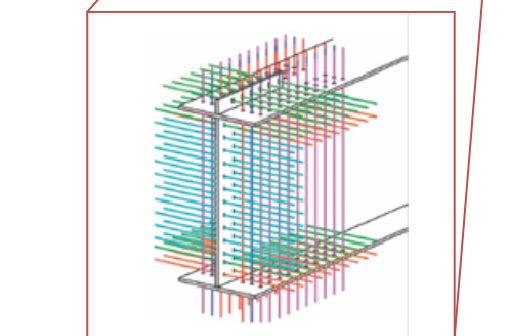


図-8.7.8 鋼ポータルラーメン橋と接合構造例

### 8.8 路面管理

一般的に、橋面上及び伸縮継手付近の路面凹凸は、車両のばね上振動に大きな影響を及ぼす長波長成分とばね下振動に大きな影響を及ぼす短波長成分に分けられる。

長波長成分を有した路面凹凸による車両や橋梁への影響を報告した事例として、大型車のばね振動や橋梁振

動と連成した場合、振動苦情などの環境振動問題に発展することがわかっている<sup>23)</sup>。

それに対して、振動苦情の要因として数多くの事例が報告されているものとして、橋梁の伸縮継手付近における波長の短い路面凹凸がある。この短波長の路面凹凸により、車両のばね下振動が大きく励起され、橋梁側に大きな衝撃力を与える。車両が加える衝撃力は、床版端部の変状や伸縮継手などの2次部材の耐久性能に影響を及ぼすだけでなく、低周波音や地盤振動などの環境振動問題に発展する場合もある。

我が国の高速道路における舗装は、わだち掘れ、段差、すべり摩擦係数、縦断方向の凹凸及びひびわれ率の5つの指標に対して補修目標値を設定し、補修改良を行う範囲を決め、総合的に補修の順位付けを行い、維持管理しているのが現状である。このうち、道路利用者の乗り心地に大きな影響を及ぼす縦断方向の凹凸に対しては、国際ラフネス指数<sup>24)25)</sup>（以下、IRI、図-8.8.1）を用いて補修目標値 3.5mm/m（評価基準長 200m）により管理している<sup>26)</sup>。

特に、橋梁のたわみ 1 次振動と大型車のばね上振動（3Hz）に大きな影響を与える橋梁伸縮継手付近における波長 6m 以上の路面凹凸に対する評価として、IRI を用いた評価基準長 200m の IRI<sub>200</sub> や大型車をモデル化した JRIT（図-8.8.2）<sup>27)</sup>を用いた評価を行うことにより、長波長成分の維持管理に用いることができる。

これまでの研究<sup>27)</sup>から、振動問題が生じていた様々な路面に IRI<sub>200</sub> 評価及び JRIT 評価を適用した結果、IRI<sub>200</sub> を評価手法として用いて、長波長の路面に適用し、補修目標値を「3.5」として評価しても対応できるが、JRIT による評価手法を用いて補修目標値を「7.0」として評価した方が、より現実の振動問題に対応した評価ができることがわかっている。

また、段差（橋梁の取付部）に対しては、補修目標値 20mm により、管理されているが、橋梁の取付部、特に伸縮継手付近における路面凹凸は局部的に路面高さが変化した、いわゆる“段差”形状をしておらず、橋梁取付部の数 m 手前だけでなく、橋梁桁端部の数 m 区間にわたり、様々な波長を持った連続した凹凸形状となっているため、計測した路面凹凸波形から単純に段差量 20mm の基準で管理することは、維持管理費を縮減されている現在、困難な状況にある。そのため現在では、評価基準長を 10m または 5m とした IRI<sub>10</sub> または IRI<sub>5</sub> により評価する試みがされている。これは、評価基準長 200m で評価した場合、局部的な凹凸は平均化されてしまうためであり、一般的に知られている IRI を用いて、評価基準長を 10m または 5m に変えるだけで同様な分析が可能となる。既往の研究<sup>28)</sup>では、様々な伸縮継手周辺の路面凹凸を分析して、最大振幅と IRI<sub>10</sub> との相関性が高いことを明らかにしており、最大振幅と IRI<sub>10</sub> との関係を用いて、段差における補修目標値、最大段差量（最大振幅）



20mm から伸縮継手付近の路面凹凸に対する補修目標値として IRI<sub>10</sub>「7」により管理することを提案している。

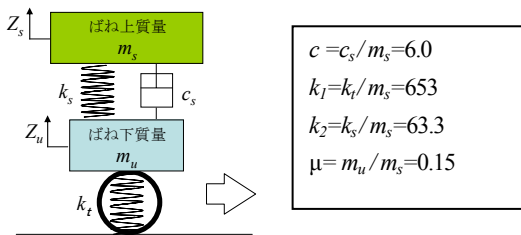


図-8.8.1 クォーターカー・モデルとその諸定数

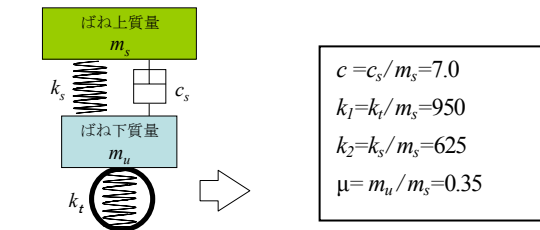


図-8.8.2 大型車両モデルとその諸定数

#### 参考文献

- 1) 池谷公一, 並河良治, 田久保博司, 玉川大, 鳥海英宏, 福島昭則, 田近輝俊, 山本貫平: 実測調査に基づく高架構造物音の予測方法に関する検討, (社) 日本音響学会騒音振動研究会資料, pp.161-167, 2004.
- 2) 浜博和, 西山昌造, 西岡昌樹, 深田宰史, 松田哲夫, 杵本正信: 都市内高速における床版上面増厚による環境対策工事, 橋梁と基礎, Vol.42, No.6, pp.43-48, 2008.
- 3) 畔柳昌己, 高橋広幸, 上東泰, 安藤直文, 篠文明: 鋼桁橋のコンクリート床版から発生する騒音・低周波振動問題への対策—第二東名高速道路 刈谷高架橋環境対策工事—, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第9巻, pp.369-374, 2009.10.
- 4) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, pp.184-188, 1993.
- 5) 土木学会鋼構造委員会 鋼橋の振動・騒音に関する環境負荷低減工法の評価検討小委員会: 鋼橋の振動・騒音問題とその対策事例, pp.84-92, 2008.
- 6) 讃岐康博, 梶川康男, 深田宰史, 杵本正信: プロファイルメータでの測定路面から実路面への近似法の提案, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.399-410, 2001.
- 7) 麓興一郎, 宮崎正男, 小澤一誠, 畑中章秀: 新型延長床版の既設橋への適用と設計, 鋼構造論文集, 第14巻, 第56号, pp.1-16, 2007.
- 8) 財団法人 高速道路技術センター: 延長床版システムの設計・施工マニュアル (案), 2005.
- 9) 新井恵一, 村越潤, 清田錬次, 小澤一誠, 江口慎介: 延長床版工法の新しい構造と設計法に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.207-214, 2003.
- 10) 上田勝, 高畑和弘, 浜田東彦, 三ツ木幸子: 延長床版の設計法, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.255-262, 2000.
- 11) 財団法人 道路保全技術センター: 既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き (案), 1995.
- 12) 徳永法夫, 吉川実, 川北司郎, 山本豊: 高力黄銅支承板 (BP) 支承からゴム支承への取替えに対する有益性に関する一考察, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.17-25, 1997.
- 13) 梶川康男, 深田宰史, 林秀侃, 吉川実, 薄井王尚: 弾性支承と桁連結構造に用いた既設高架橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.747-756, 1997.
- 14) 石田博, 久保真一, 岡本晃, 浜博一: 支承構造の違いによる橋の振動特性に関する調査, 橋梁と基礎, Vol.39, No.1, pp.51-56, 2005.
- 15) 山田均, 沢田繁樹, 篠原修二, 風間浩二: 支承特性差に着目した橋梁振動応答特性に関する研究, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.271-276, 1999.
- 16) 社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002.3.
- 17) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3.
- 18) 東日本・中日本・西日本高速道路 (株): 設計要領第二集橋梁建設編, 2006.6.
- 19) 東日本・中日本・西日本高速道路 (株): 構造物施工管理要領, 2011.7.
- 20) 紫桃孝一郎, 久保田賢司, 塩畑英俊, 黒田建二, 酒井修平, 石川裕一, 伊藤彰彦: 延長床版システムの性能評価に関する検討, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006.9.
- 21) 本間淳史: JH橋りょう技術の動向, EXTEC, No.71, 2004.12.
- 22) 芦塚憲一郎, 和田圭仙, 堀井千絵, 佐古周一: 鋼ポータルラーメン橋剛結部への孔あき鋼板ジベルの適用, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006.9.
- 23) 室井智文, 薄井王尚, 椋山好幸, 深田宰史, 梶川康男, 幸田信則: 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.171-180, 2008.3.
- 24) (著) Sayers, M. W., (訳) 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎: 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (上), 舗装, Vol.31, No.7, pp.21-27, 1996.7.
- 25) (著) Sayers, M. W., (訳) 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎: 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (下), 舗装, Vol.31, No.8, pp.12-17, 1996.8.
- 26) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社: 設計要

領 第一集 舗装編, p.134, 2007.8.

- 27) 広井智, 深田幸史, 樺山好幸, 室井智文, 岡田裕行 : 高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法, 舗装工学論文集, 第 14 卷, pp.179-187, 2009.12.
- 28) 深田幸史, 松本剛也, 相葉忠一, 岡田裕行, 樺山好幸 : 高速道路の橋梁伸縮継手付近における路面凹凸形状と補修順位評価の提案, 舗装工学論文集, 第 15 卷, pp.81-88, 2010.12.