

鋼橋のモニタリング技術

長山 智則
東京大学

平成26年1月15日

第26回鋼構造基礎講座「鋼橋の維持管理-迫りくる大修繕時代に備えて-」

鋼橋のモニタリング技術

東京大学大学院工学系研究科

長山智則

近年の計測技術

振動計測

- 無線センサネットワーク
- レーザードップラ速度計
- レーダー変位計
- 圧電型加速度計



鋼箱桁橋の振動計測 ケーブルの遠隔計測

応力歪計測

- 磁歪法
- 応力聴診器
- 高感度サーモグラフィ
- 応力発光体
- 中性子イメージング
- 3MA
- 光ファイバ

出典: 鋼橋技術研究会「最新センシング技術の適用に関する研究部会」報告書

無線センサネットワーク

長所:

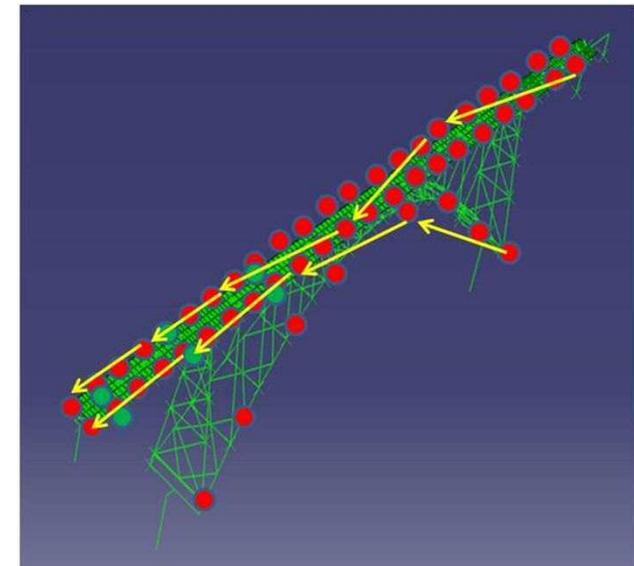
- 無線通信で配線不要
- 安価(数万円-10万円/ノード)
- 加速度(・歪)計測性能 1gal以下まで
- 同期精度:数十 μ 秒可能
- データ欠損なし, マルチホップ可
- 密な計測が可能.
モード形推定, 部材ごとの測定etc.



短所:

- バッテリ切れ (単3電池で数年連続計測可能なものも)
- 信頼性(数年連続計測可能なもの, 0.1gal以下まで計測可能なもの, データ欠損がないものも)
- 部品コスト安いが, 開発コストは高い

適用例: 歩道吊り橋, 道路橋の詳細動特性同定

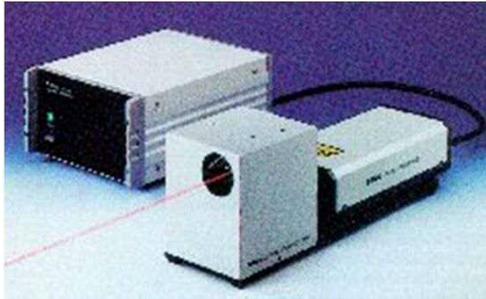


レーザードップラ速度計 (LDV)

ドップラー効果を利用して速度を計測

長所：

- ・ 非接触・長距離計測 → 100 m以上
- ・ 高分解能 → 0.1 $\mu\text{m/s}$
- ・ 高周波数領域 → 0~35kHz以上
- ・ スキャニングにより多点計測 (+- 20°)
- ・ 長距離用LDVも利用可能に
 - ✓ 100m程度まで反射テープなしで計測可
 - ✓ μm 分解能の変位・速度推定可能



短所：

高価，低反射率の対象物は計測ノイズ大，多点同時計測困難

適用例：

高密度で，高精度の非接触計測に利用されつつある。

斜張橋ケーブルの張力推定，部材毎の局部振動計測，桁たわみの非接触計測

IBIS-Sマイクロ波干渉計

長所:

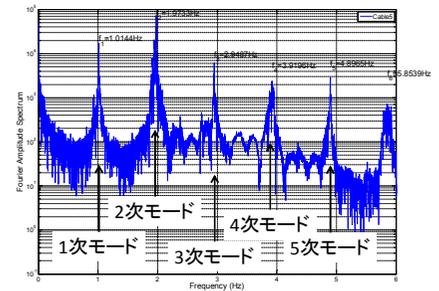
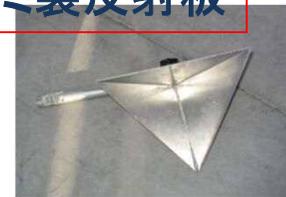
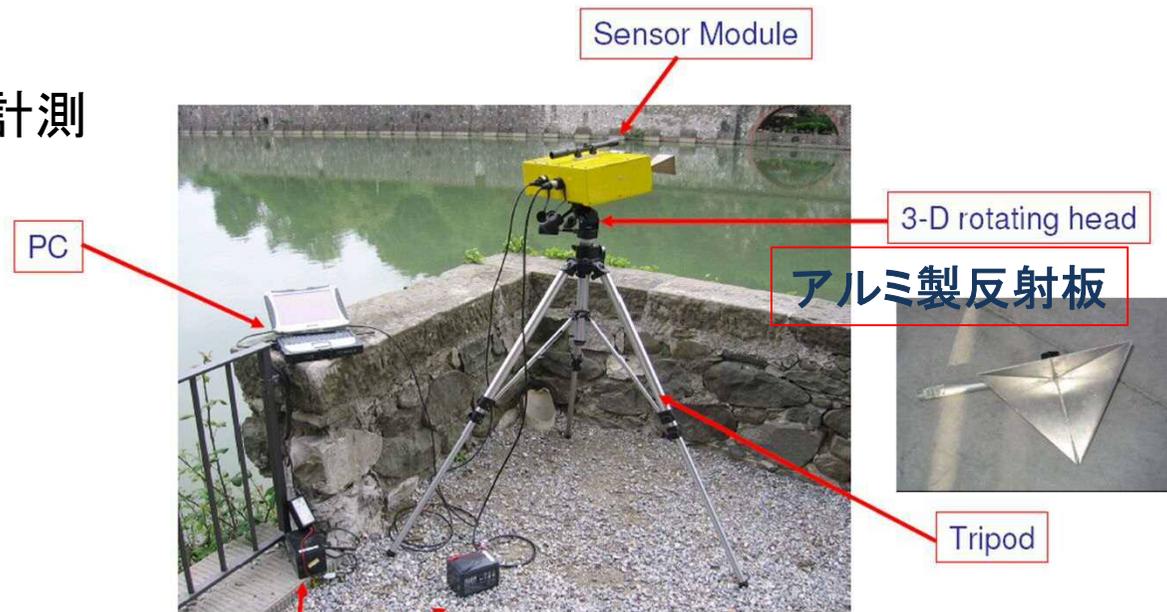
- 高精度遠隔(1kmまで)変位計測
- 多点同期計測が可能
- 250Hzサンプリングまで
- 変位精度0.01mm

短所:

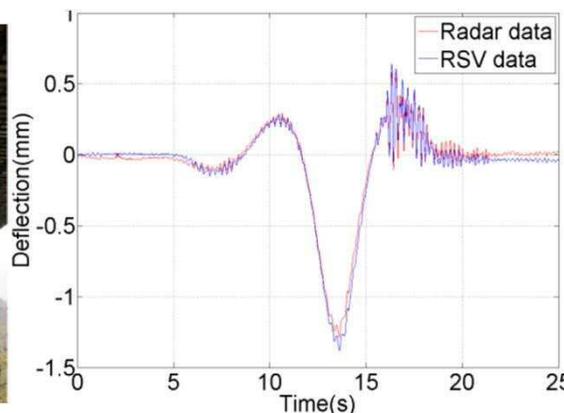
- 複数の反射物の影響が重畳
- 変位計測値のドリフト

適用例:

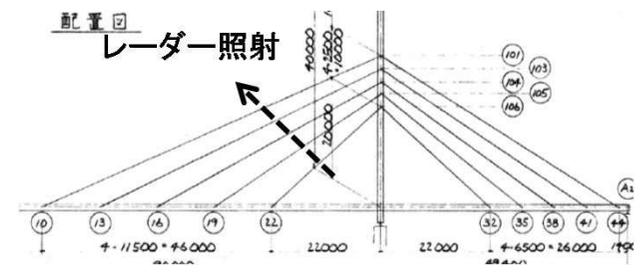
- 桁たわみの多点同時計測
- 斜張橋ケーブル張力の一括推定



IBIS-Sを利用した遠隔たわみ計測



車両通過時たわみ計測値



斜張橋ケーブル張力の一括計測

応力聴診器

長所:

- 磁石を利用した摩擦型歪みゲージ
- 測定した場所に設置し、すぐに測定可能
・着脱可能
- 歪計測用ブリッジで測定可
- 無線センサネットワークに接続も可能

短所:

- 接触面におけるすべり
- 本体サイズから、狭い間隔での測定が困難

適用例:

- 橋梁各部の発生歪レベル測定
- 疲労き裂が予想される箇所では、活荷重による応力レベルの事前調査
- ひずみゲージとの比較研究多い



出典: 東京測器研究所HP

磁歪法

引張応力で磁化しやすくなる性質を利用
・透磁率変化を検出

長所:

- 非破壊で全応力が測定可
- 表面処理不要

短所:

- プローブと計測面の離れの影響あり
- キャリブレーション必要
- PC鋼材や鋼桁内部の応力探査に適用例あり

適用事例:

- 新設・既設橋梁の応力状態の測定に利用された実績あり。
- EMセンサによるグランドアンカーの張力管理

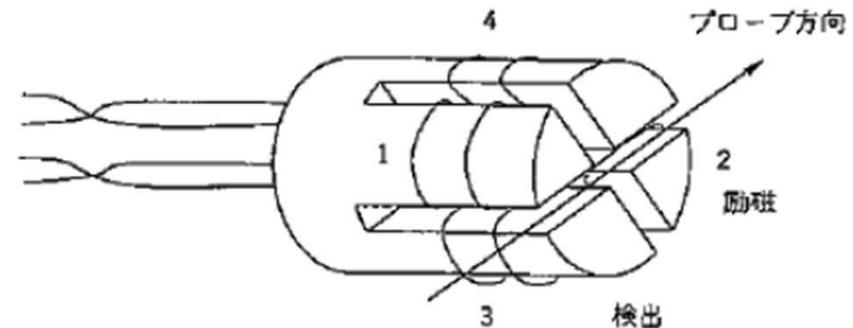
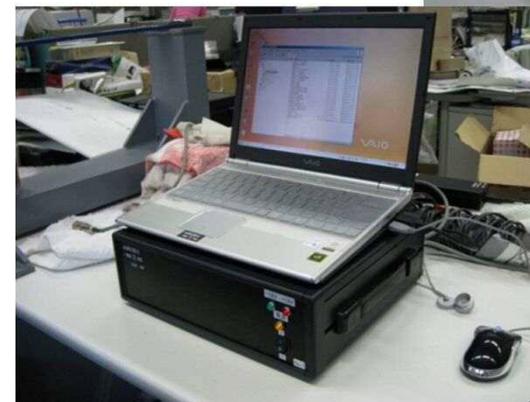


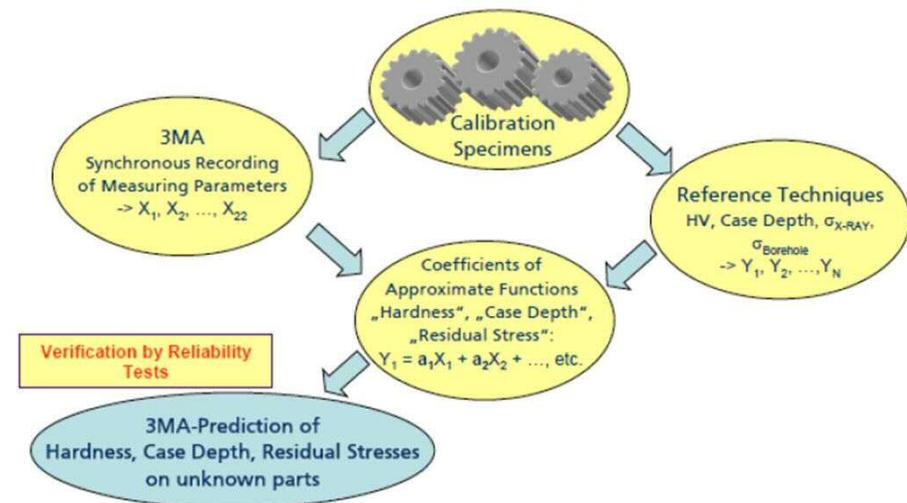
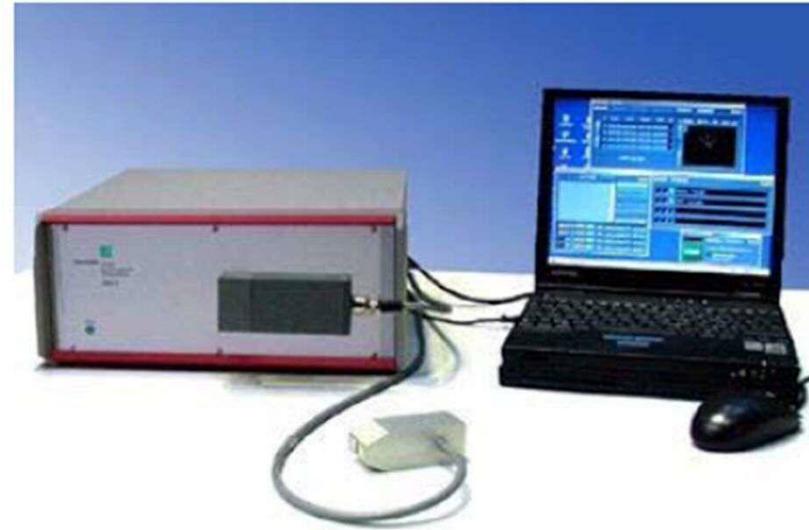
図-1 磁気プローブの一例



磁歪法計測システムとプローブ

3MA Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis

- 複数のマイクロ磁気パラメータを計測し，鋼材の機械的性質を把握
- 計測マイクロ磁気パラメータ: バルクハウゼンノイズ (BN), 増分透磁率, 磁界強度の時間信号, マルチ周波数渦流
- 応力を推定可. リアルタイム非破壊計測.
- 屋外での長期適用事例なし



計測ニーズ

振動

- ケーブル張力管理
- 歩道橋使用性確認
- 動的耐風・耐震設計された橋梁の設計検証
- 標識柱の振動・損傷検知
- 地震時の異常検知
- 洗掘調査
- 環境振動
- 過積載車モニタリング(WIM) など
- 変状発生予測箇所の監視 など

応力・歪

- 橋梁各部発生歪レベル測定
- 疲労き裂予想箇所での応力レベル事前測定
- 疲労き裂の検出・発生要因分析
- 補修・補強効果の検証
- 過積載車モニタリング(WIM)
- 変状発生予測箇所の監視

健全度評価・損傷評価への応用 (モニタリングへの期待)

米国ロスアラモス国立研 究所の報告書

振動計測を元にした健 全度評価の世界の事 例を紹介

impedance between two structural DOF to estimate the level of damage in the connecting members.

METHODS BASED ON UPDATING STRUCTURAL MODEL PARAMETERS

構造モデルパラメータの更新に基づく方法

Another class of damage identification methods is based on the modification of structural model matrices such as mass, stiffness, and damping to reproduce as closely as possible the measured static or dynamic response from the data. These methods solve for the updated matrices (or perturbations to the nominal model that produce the updated matrices) by forming a constrained optimization problem based on the structural equations of motion, the nominal model, and the measured data. Comparisons of the updated matrices to the original correlated matrices provide an indication of damage and can be used to quantify the location and extent of damage. The methods use a common basic set of equations, and the differences in the various algorithms can be classified as follows:

1. Objective function to be minimized
2. Constraints placed on the problem
3. Numerical scheme used to implement the optimization

The following sections describe each of the classification items in this list. For the formulas and equations for each of these sections, please refer to Doebling, et al. (1996a).

損傷同定法のもうひとつのクラスは、質量、剛性、そして、静的または動的応答から計測可能な限り厳密に再現した、減衰等の構造行列の修正に基づくものである。これらの同定法では、運動方程式、公称モデル、そして、計測データに基づく制約付最適化問題を形成することにより、更新行列を求める。更新行列と元の相関行列の比較により、損傷の指標を規定し、損傷の位置と程度を示すために使用することができる。その方法では、一般的な基本方程式を使い、そして、以下の様に、各種アルゴリズムの違いを分類することができる。

1. 目的関数の最小化
 2. 問題に課せられた制約条件
 3. 数値系の最適化での使用
- 以下のセクションでは、このリストの分類項目について述べる。各セクションで用いられる公式と方程式は、Doebling等 (1996a) の論文を参照のこと。

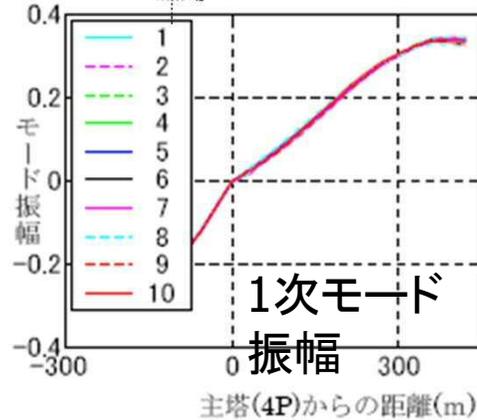
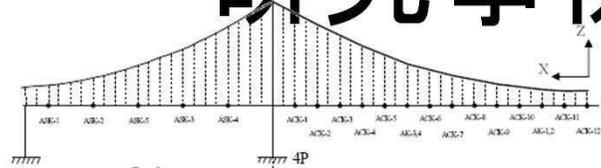
Objective Functions and Constraints

目的関数と制約条件

There are several different physically based equations that are used as either objective functions or constraints for the matrix update problem, depending upon the update algorithm. The structural equations of motion are the basis for the "modal force error equation." It is first assumed that the structural eigenvalue equation is satisfied for all measured modes. Substituting the eigenvalues (modal frequencies) and eigenvectors (mode shapes) measured from the damaged structure into this equation along with the mass and stiffness matrix from the undamaged structure yields a vector that is defined as the "modal force error," or "residual force." As described by Ojalvo and Pilon (1988), this vector represents the

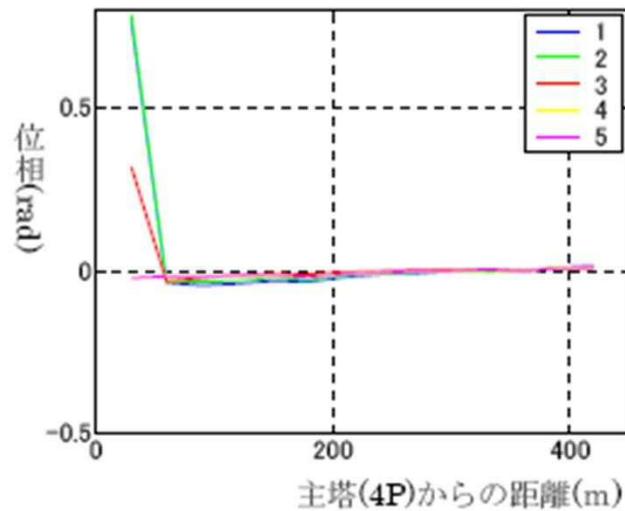
- 振動数変化
 - 損傷に対する感度低い
 - 他モード特性に比べ安定
- モード形状変化
 - 損傷など異常箇所の特
定に利用可
 - モード形の2階微分や歪
モード形感度が高い
- モデルアップデート
 - アップデートは唯一解で
ない

研究事例①: モード形変化

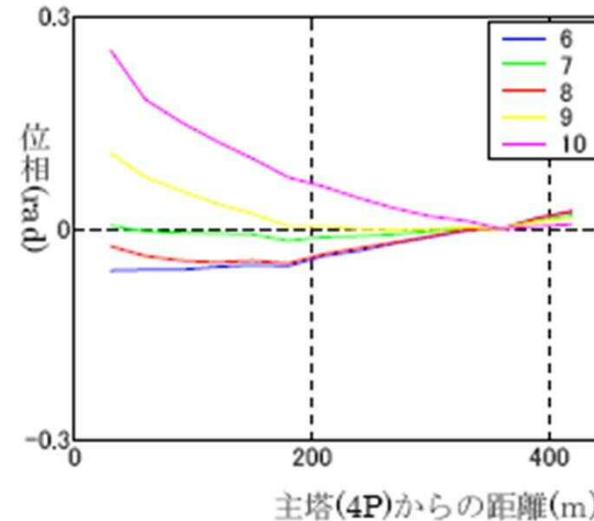


モード形振幅の変化は小さいが、
位相の変化は大きいことも。

動特性の変化を丁寧に精査する必要



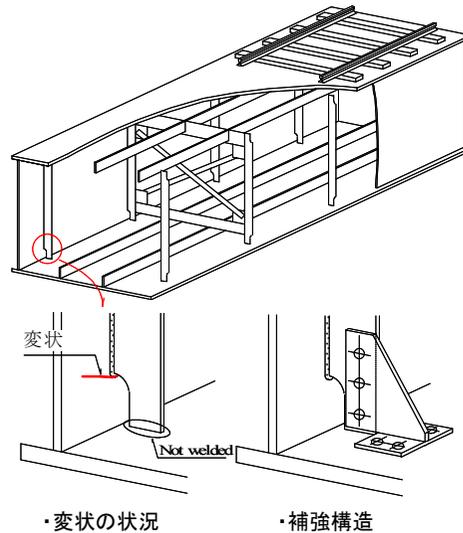
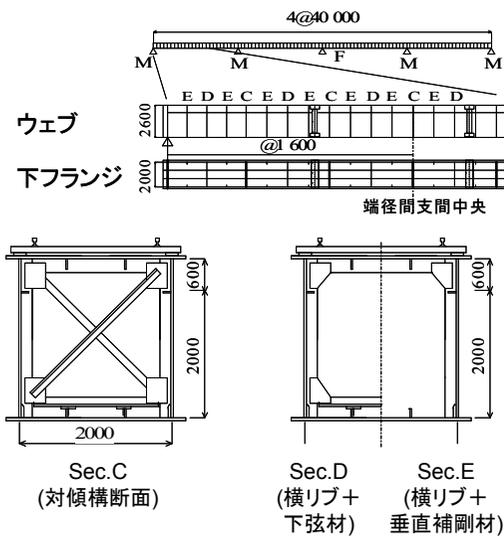
1次モード位相



1次モード位相

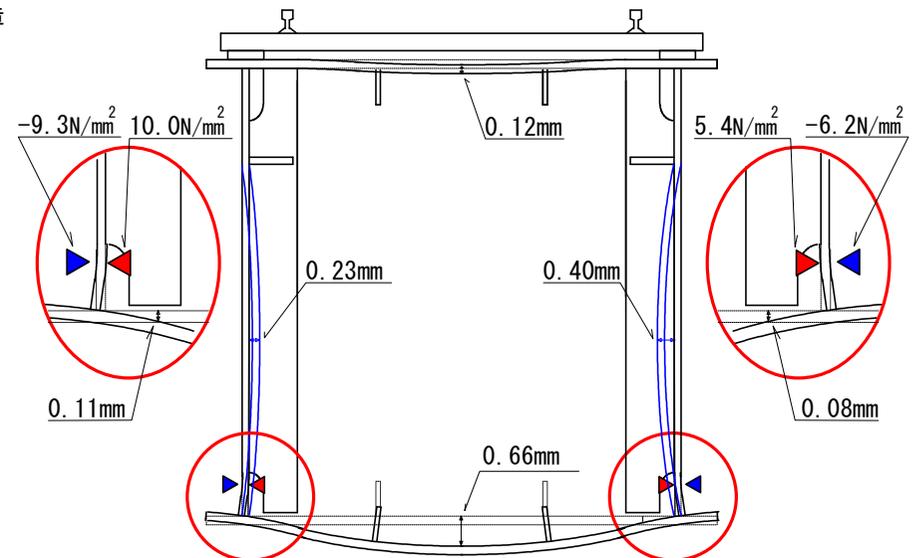
長山智則ら: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解

研究事例② 鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響



補強材を一時的に撤去する前後で、振動計測により、局部応力と局部振動、列車速度との関係を調査

- 垂直補剛材下端と主桁ウェブとの溶接部に局部応力を発生させる要因が、主桁下フランジを主体とする局部振動であることを明らかにした。
- 高速運転した場合、局部振動は列車速度に比例して大きくなるのではなく、台車通過周波数がパネル固有周波数の $1/n$ に近づいたときに大きくなる。



宮下剛ら:レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響

研究事例③ 鋼トラス橋を主とした振動特性変化に基づく構造ヘルスマニタリング

打撃試験による高次振動数変化を利用した健全度評価法

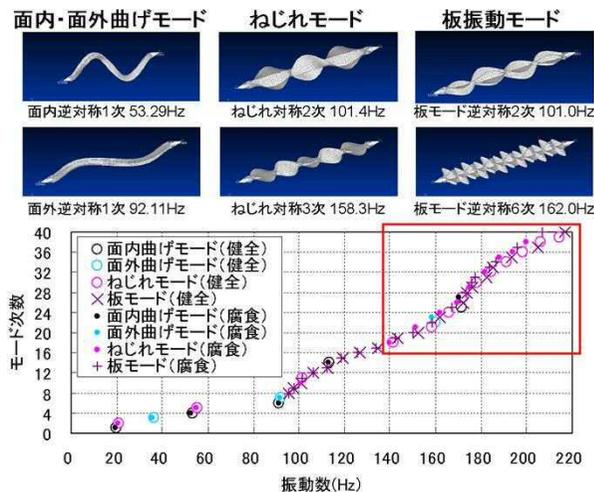


図 2-71 局所振動モード特性

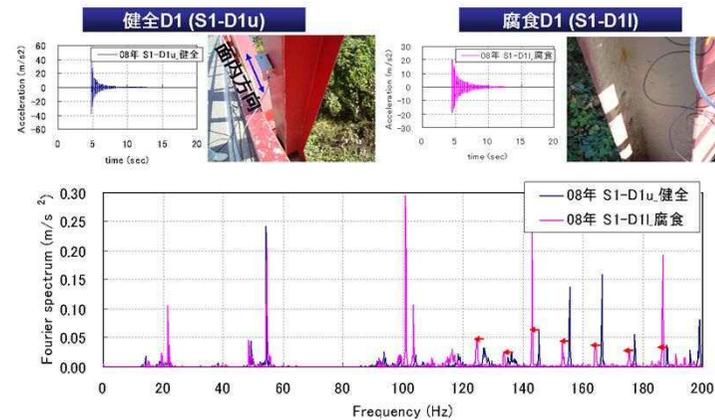


図 2-72 打撃試験結果 (第1径間)

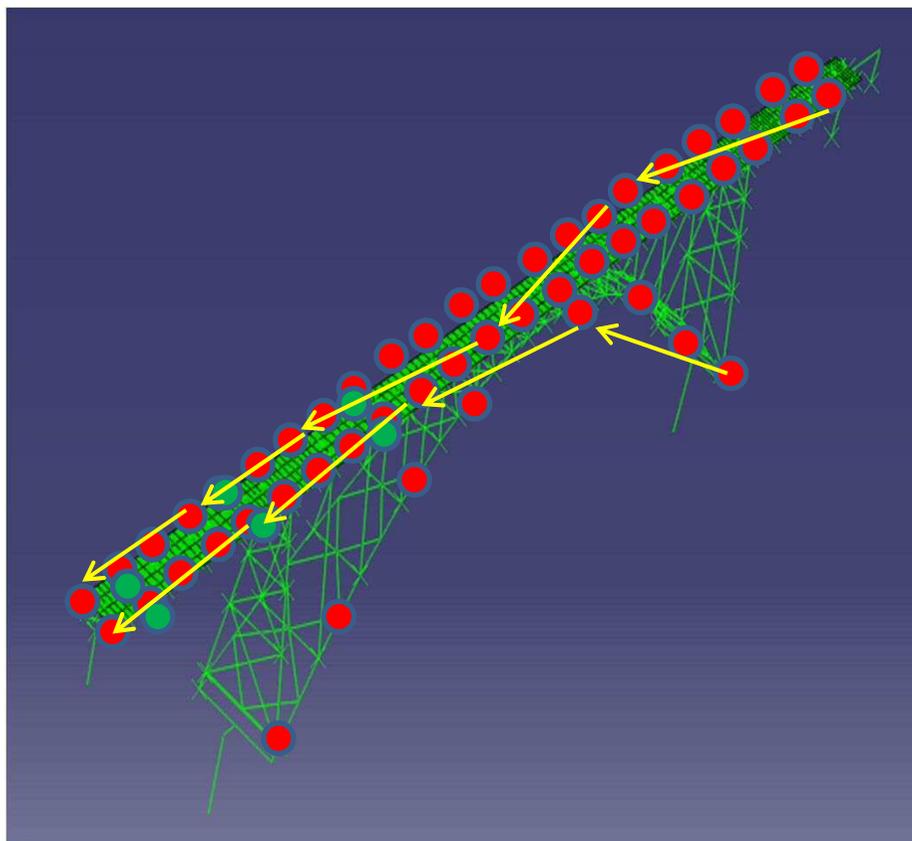
吉岡勉ら: 鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価

無線センサネットワークを利用した 橋梁動特性の詳細計測とモデル更新

耐震補強前後の動特性詳細調査
岩手県内国道45号線にかかるアーチ橋

橋長 240m (42+140+42+18m)

竣工 1965年



交通振動を3軸加速度計で計測
スマートセンサ 48個
有線加速度計 6個

設置の手間・時間はほぼ同じ

ただし、計測における改善点多数

- ・マルチホップ経路選定
- ・計測安定性
- ・電源安定
- ・ケーシング



補強工事内容

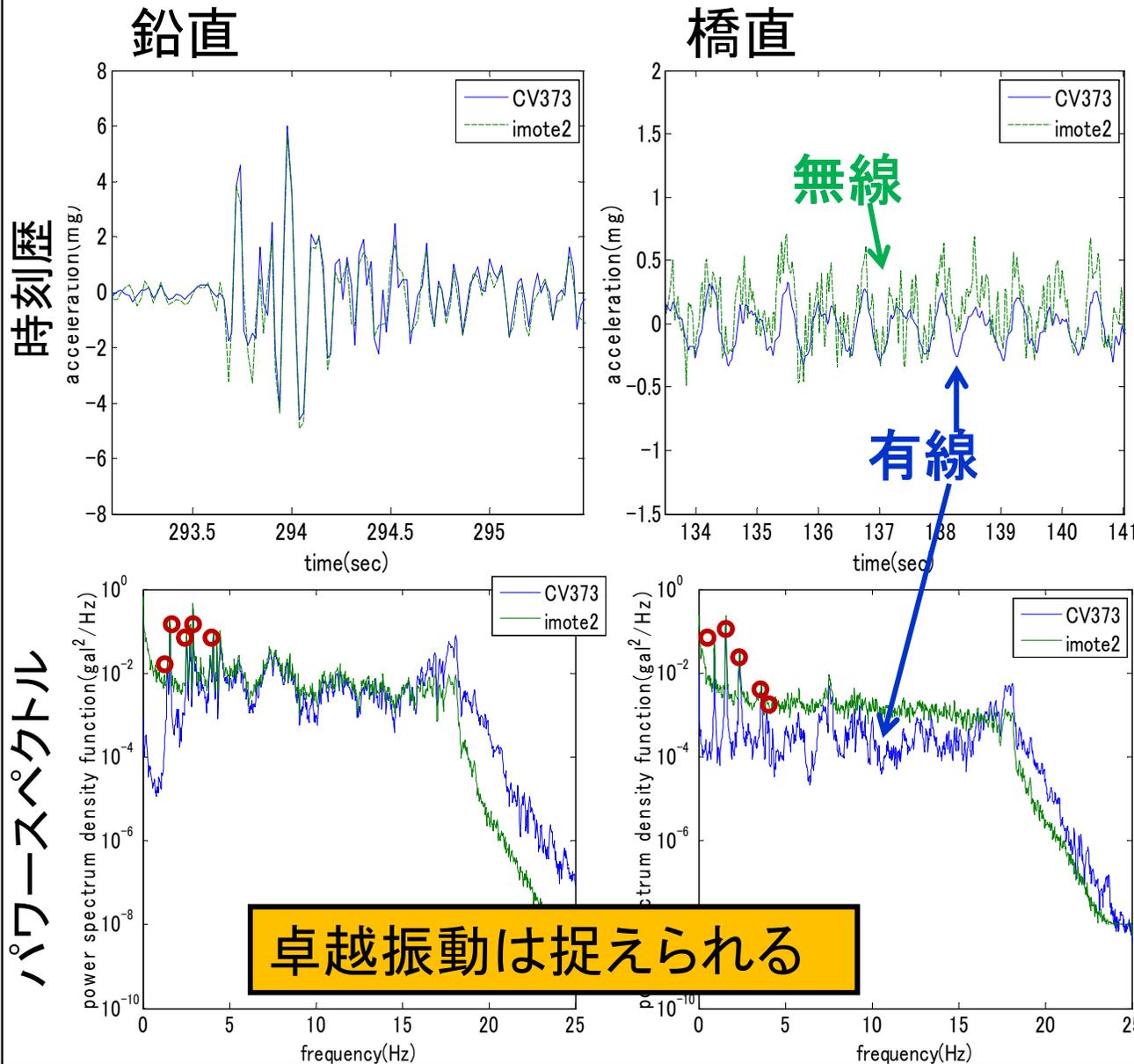
当板補強 → 断面積が2倍

- 橋直方向に剛性増加効果
- 鉛直方向に質量増加効果

動特性の変化は?



計測性能の比較: 無線センサと有線センサの比較

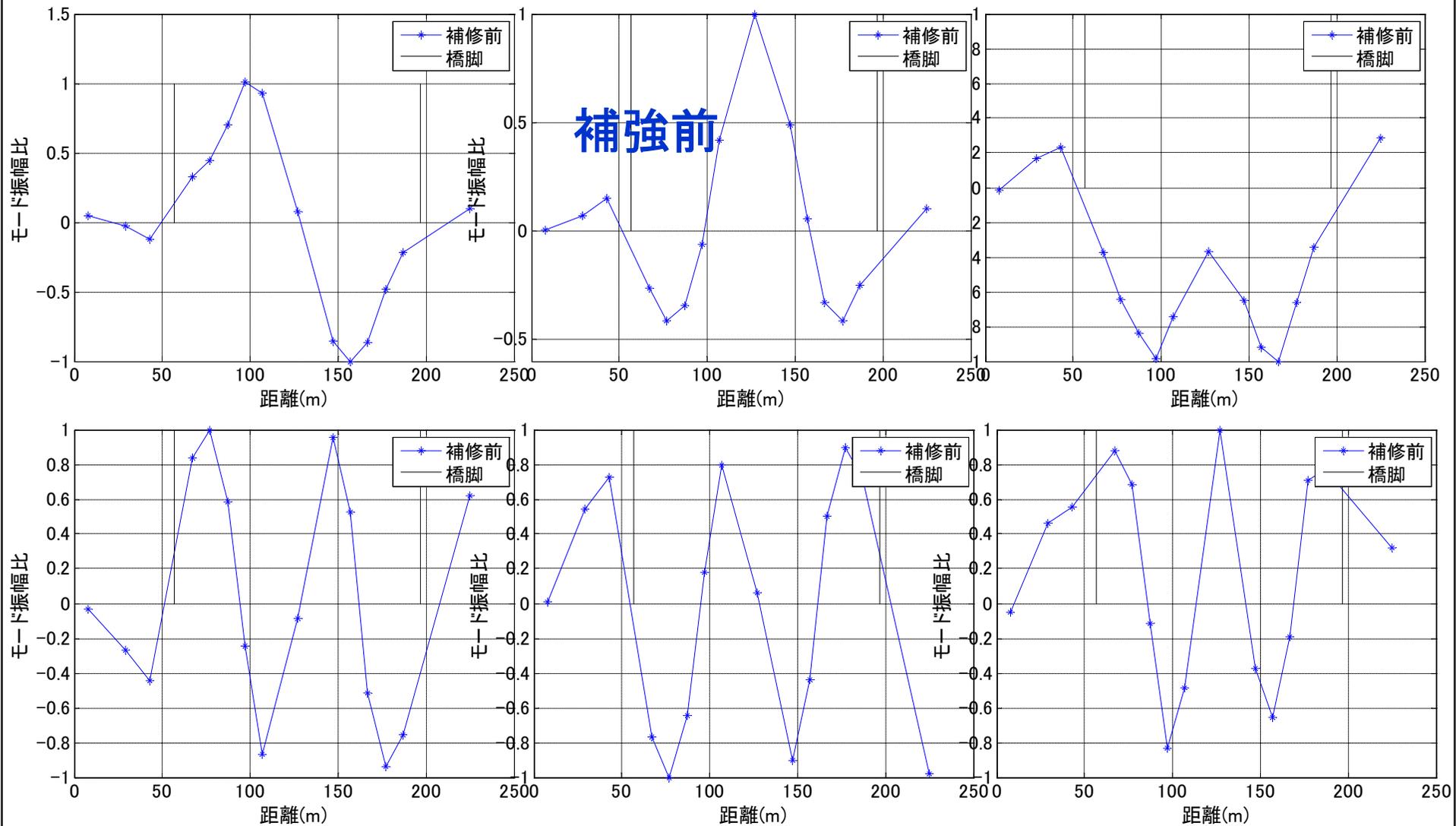


固有振動数(Hz)
(鉛直)

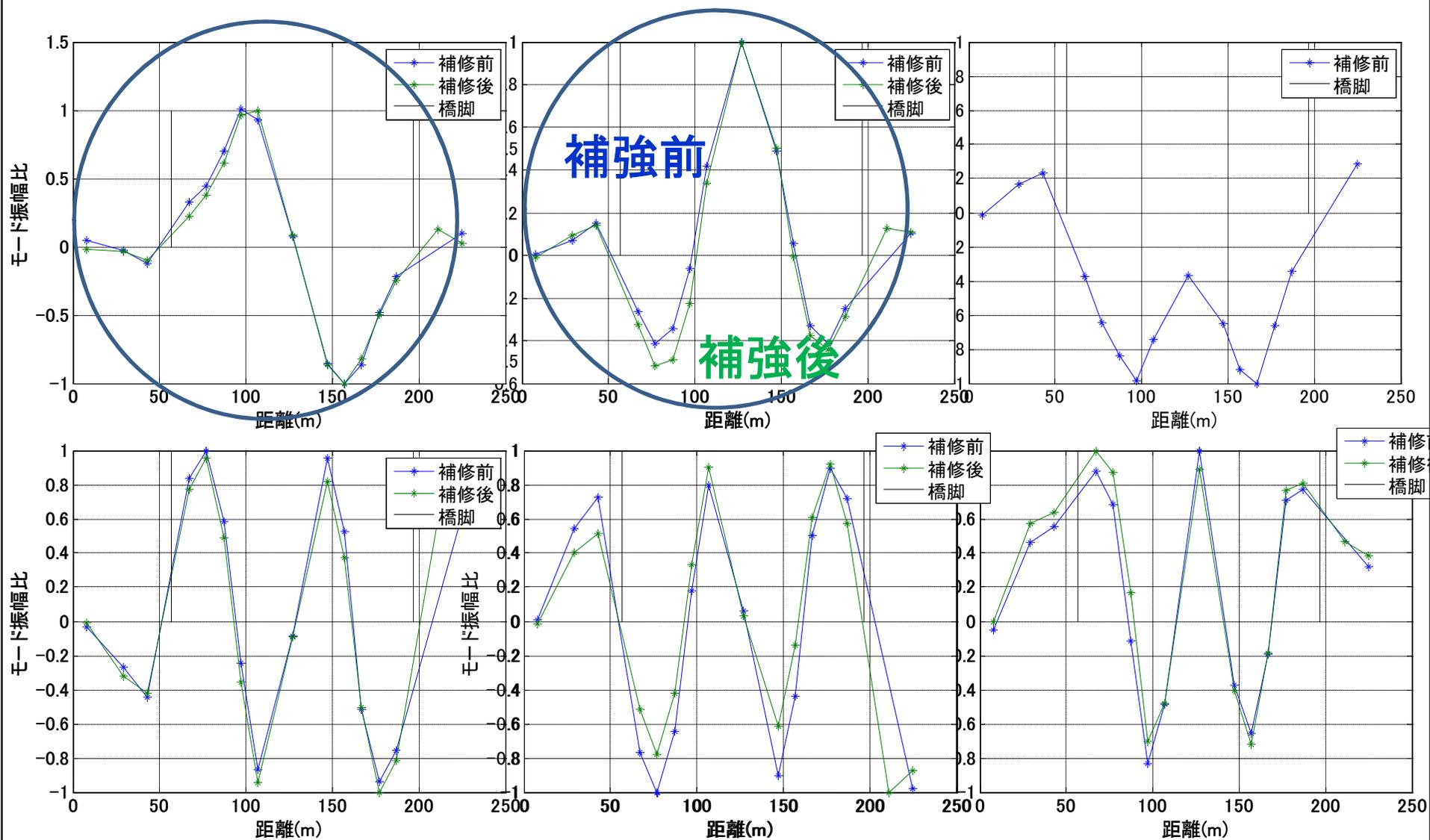
| 有線 | 無線 |
|------|------|
| 1.43 | 1.44 |
| 1.57 | 1.57 |
| 2.54 | 2.54 |
| 2.72 | 2.72 |
| 2.92 | 2.92 |

卓越振動数推定値
の差は1%以下

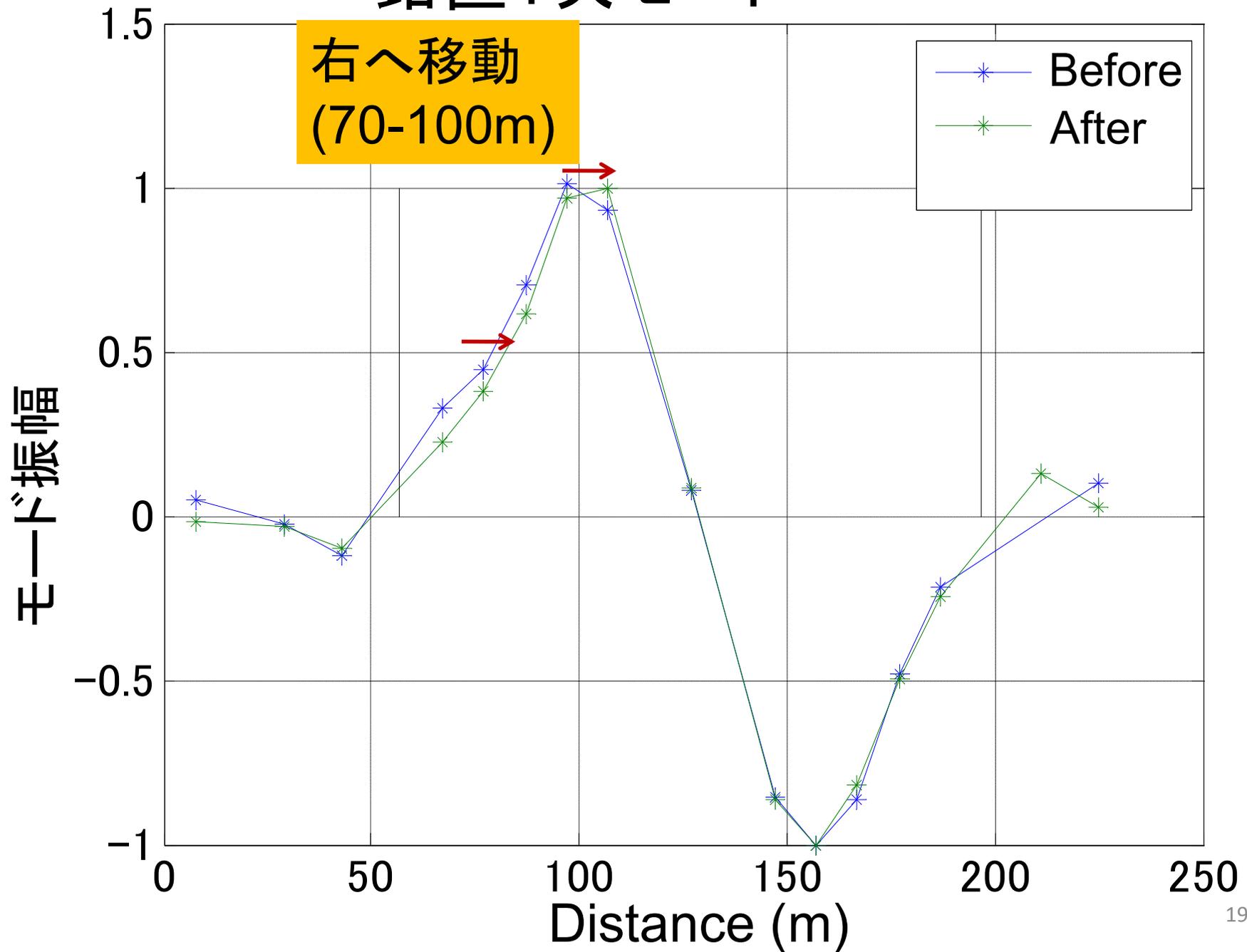
モード形の変化 鉛直モード形



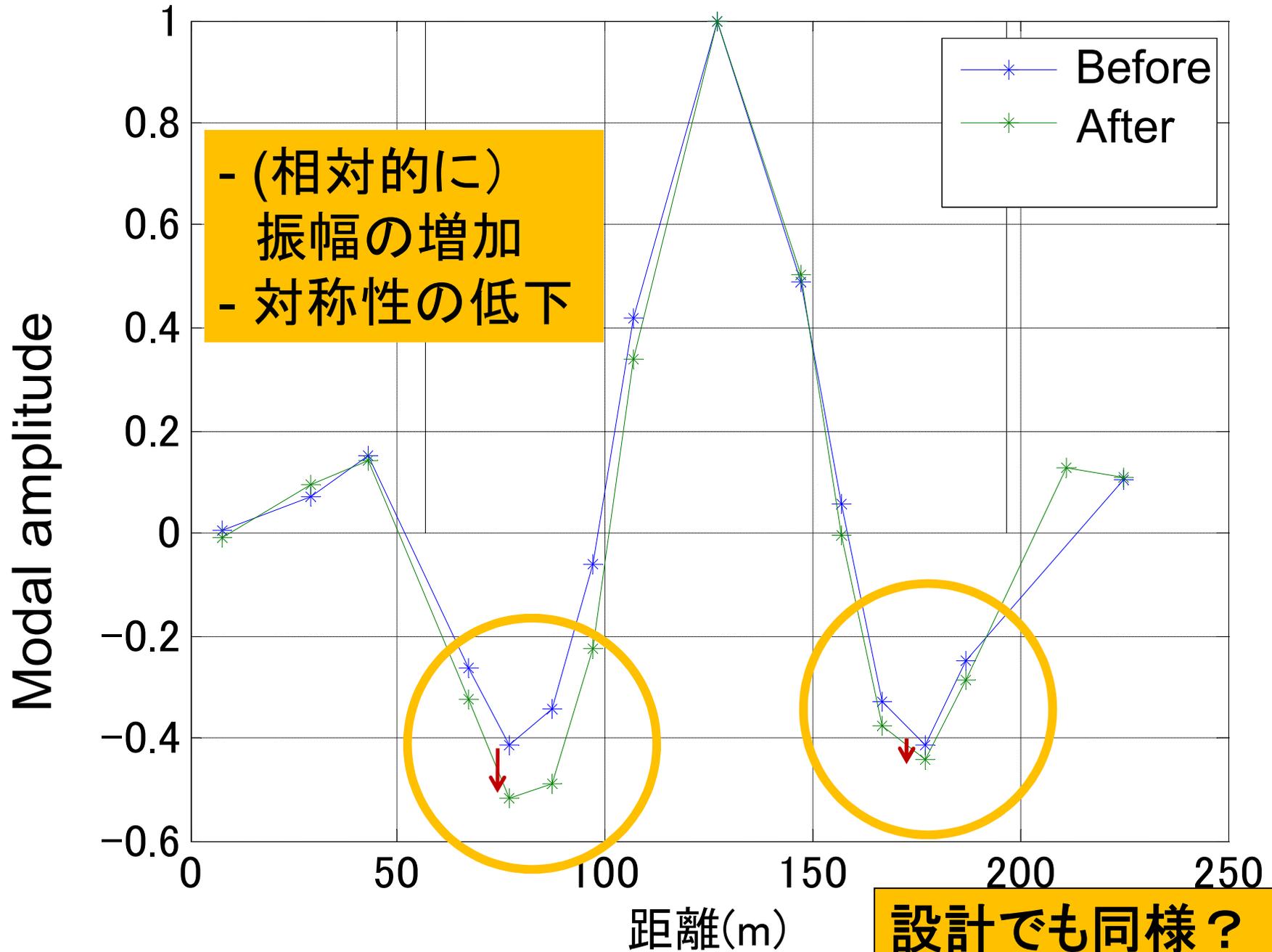
モード形の変化 鉛直モード形



鉛直1次モード



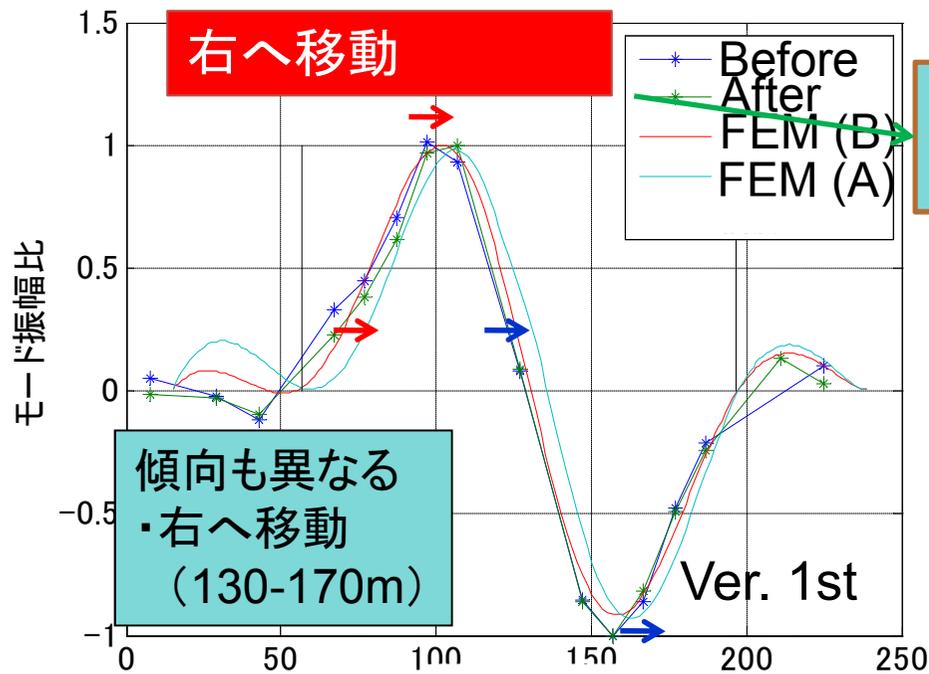
鉛直2次モード



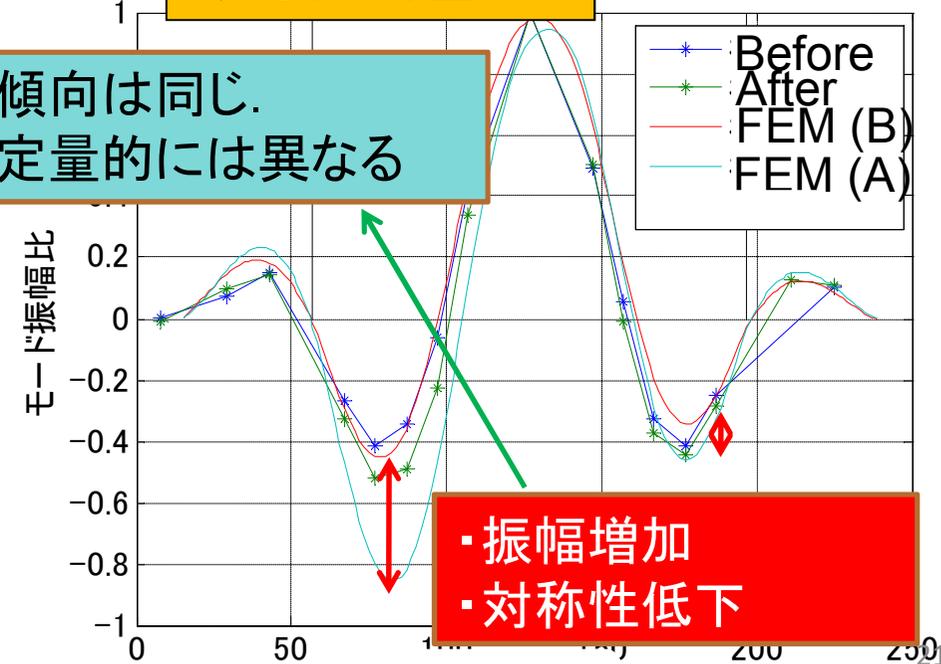
FEMとの比較

| 振動数 (Hz) | FEM (設計) | | | 計測 | | |
|-------------|----------|-------|----------|--------|-------|----------|
| | Before | After | Diff (%) | Before | After | Diff (%) |
| 橋直1次 | 0.92 | 1.03 | 11.2 | 0.93 | 1.03 | 10.8 |
| 橋直2次 | 1.62 | 1.67 | 3.3 | 1.58 | 1.66 | 5.1 |
| 鉛直1次 | 1.46 | 1.39 | -5.07 | 1.44 | 1.44 | 0 |
| 鉛直2次 | 1.57 | 1.45 | -7.53 | 1.57 | 1.51 | -3.82 |

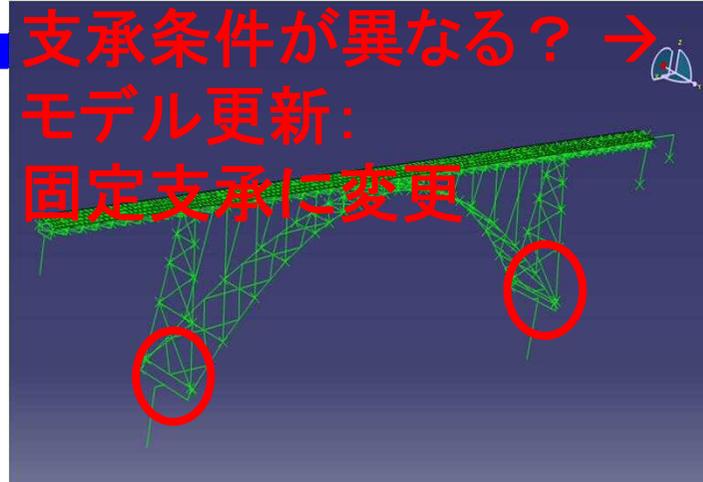
顕著な違い



傾向は同じ。
定量的には異なる

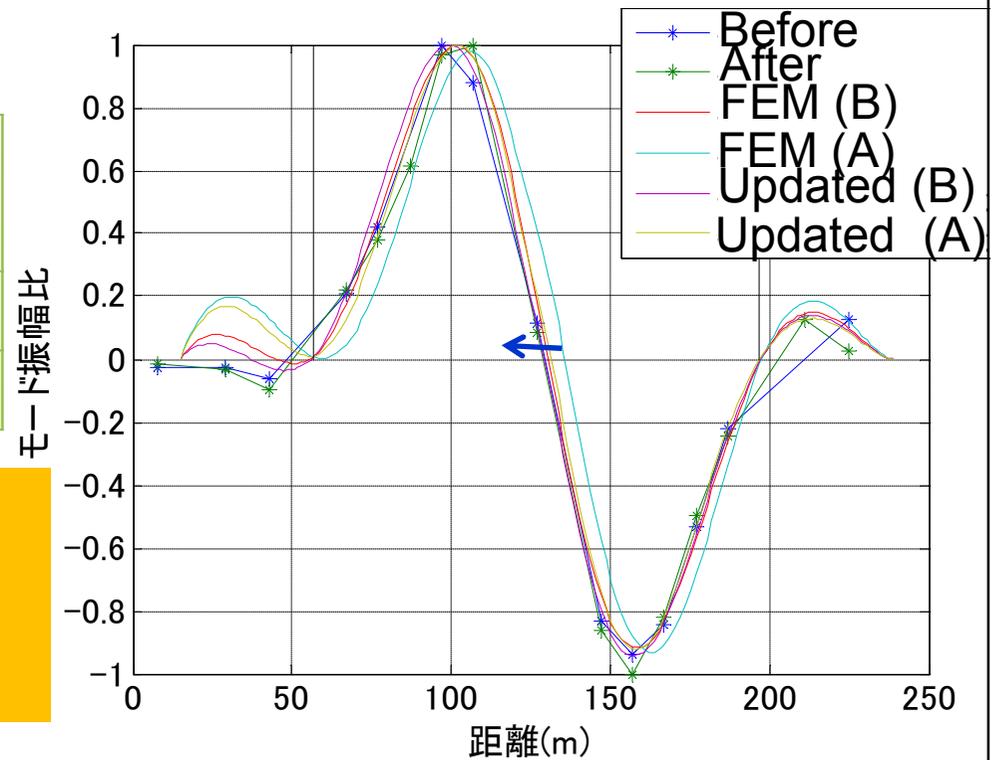


FEMと計測の違い



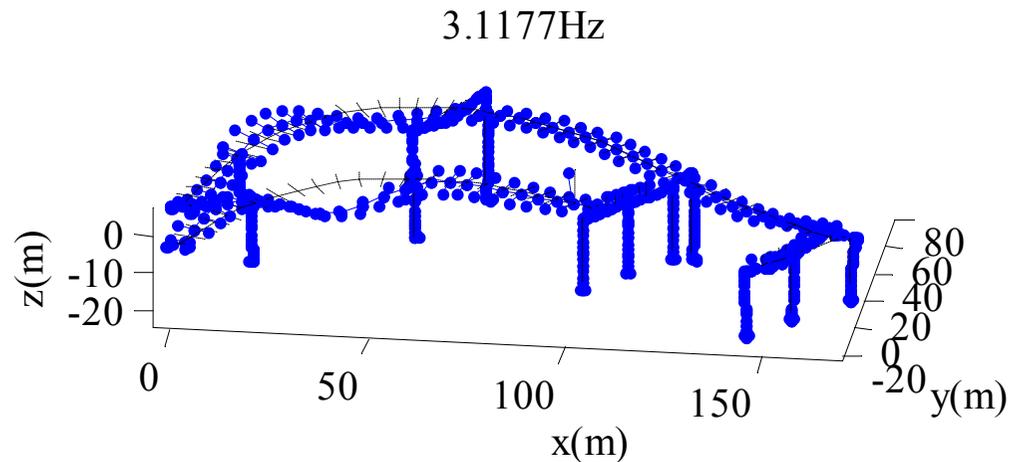
固有振動数 (Hz)

| After | FEM (更新前) | FEM (更新後) | 計測 |
|-------|--------------|--------------|------|
| 鉛直1次 | 1.39 | 1.40 | 1.44 |
| 鉛直2次 | 1.45 | 1.53 | 1.51 |



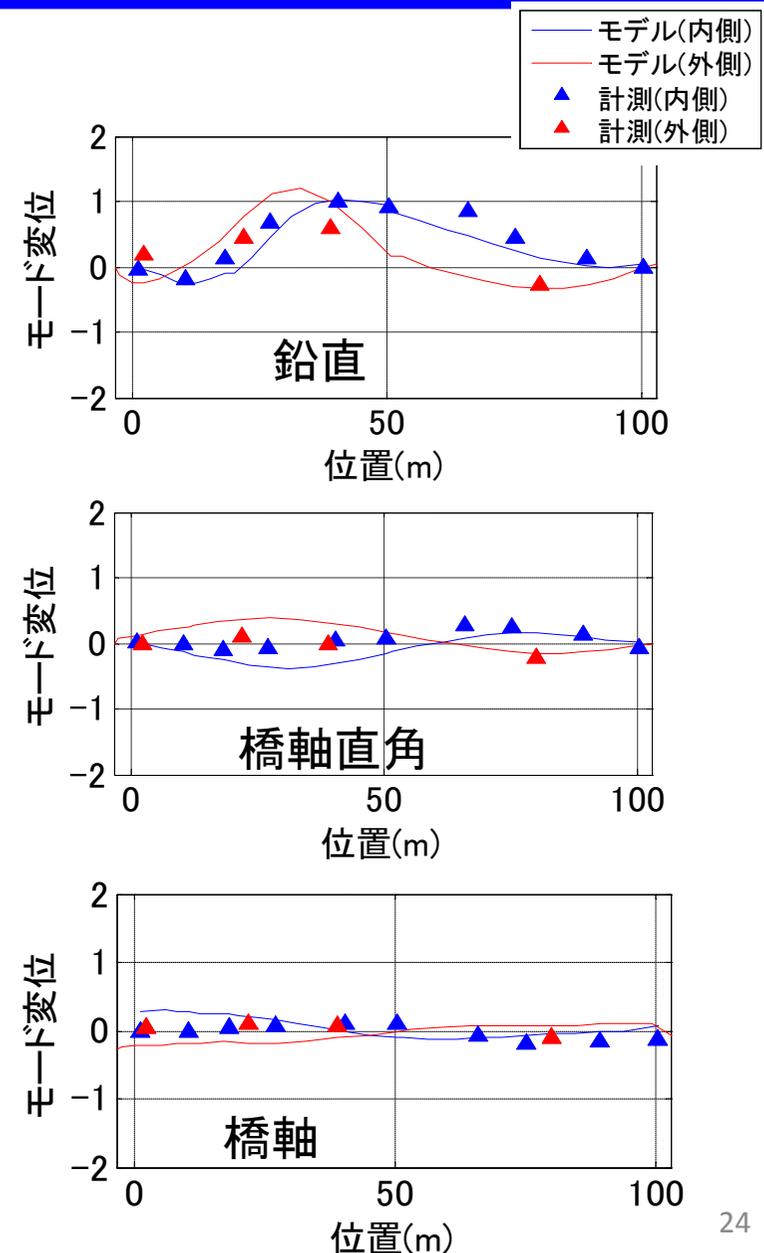
✓モード形を利用したアップデートはモデル検証の有カツール
 ✓計測・モデル化誤差の検討必要

首都高大桥JCT-ランプ橋の振動特性の同定

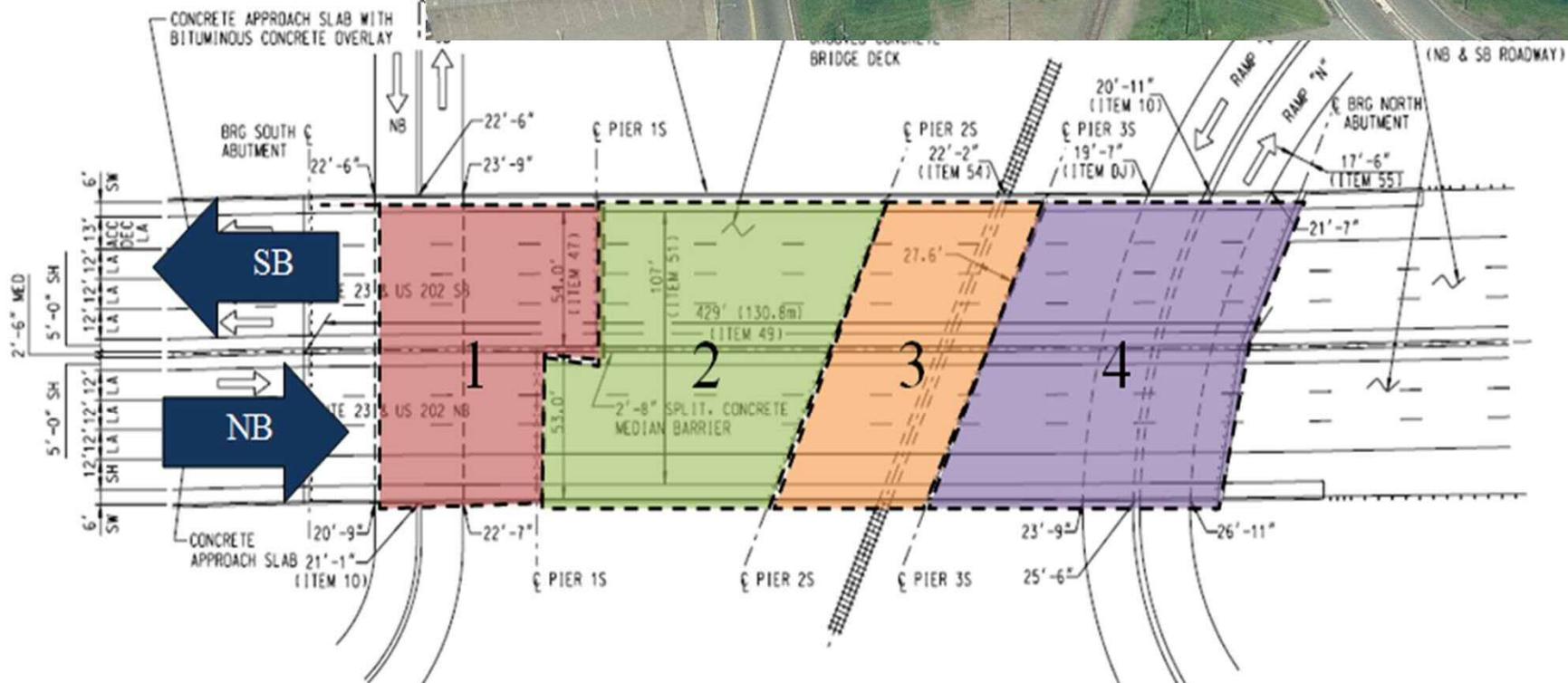


有限要素解析から得られた1次モード

慣性モーメントの考慮により、
モード形の再現性あり。
設計の検証ツールとして有効



US 202/NJ 23 Bridge, Wayne, NJ



International Research Collaborators

Japan

- University of Tokyo
- Central Nippon Expressway Co. (NEXCO-W)
- Keisoku Research Consultant

European Union

- Sheffield University (United Kingdom)
- Vienna Consulting Engineers (Austria)
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Switzerland)

South Korea

- KAIST
- Seoul National University
- INHA University
- Pyunghwa Engineering Consultants
- Korea Expressway Corporat
- SEJONG University

China

- Southeast University



Domestic Research Collaborators

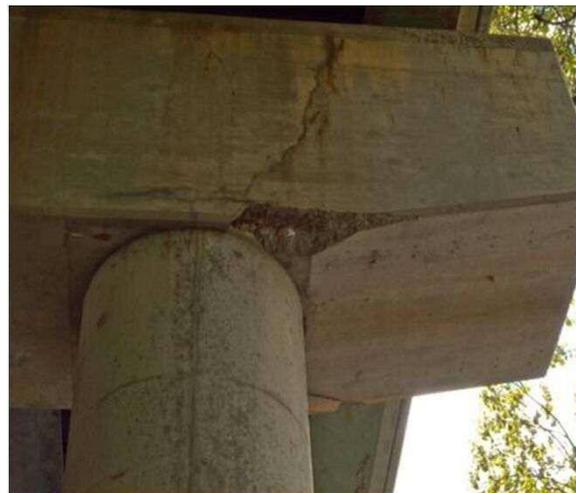
- Rutgers University, Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT)
- Intelligent Infrastructure Solutions, LLC
- Parsons Brinckerhoff
- Utah State University
- Drexel University
- Princeton University
- Georgia Tech
- Western Michigan University
- Inspecttech
- Pennoni Associates
- Olsen Engineering
- Smart Structures
- University of New Hampshire



US 202/NJ 23 Bridge, Wayne, NJ



US-202/NJ-23 Bridge – Condition Overview



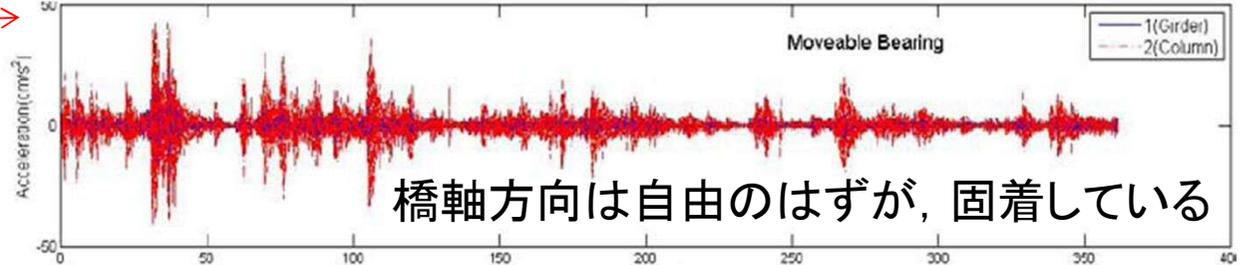
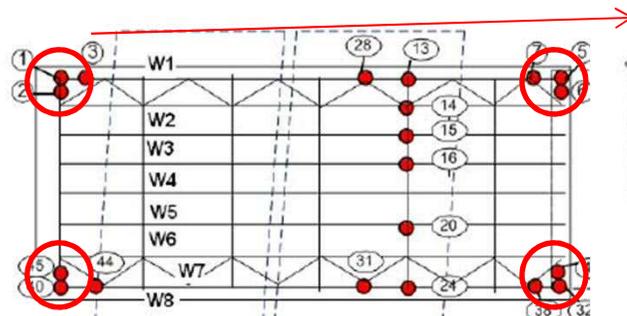


有線，無線加速度計を利用
した動特性の把握

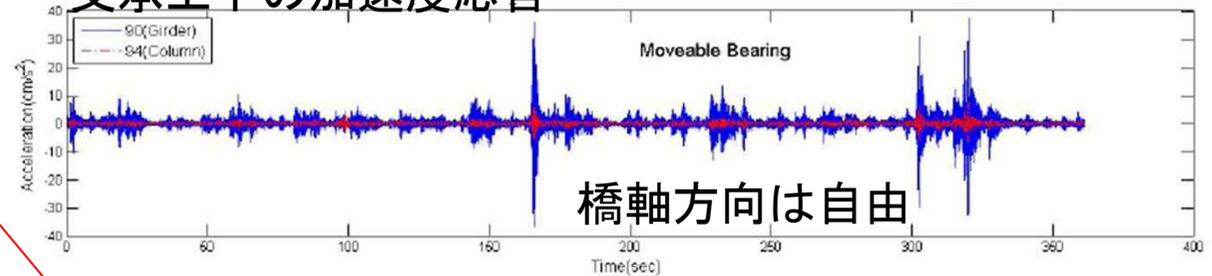
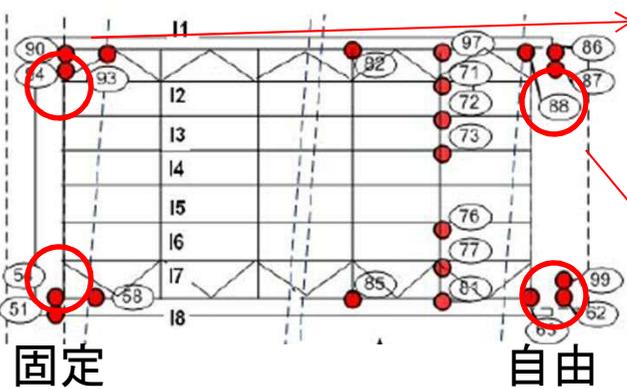


支承状態の把握

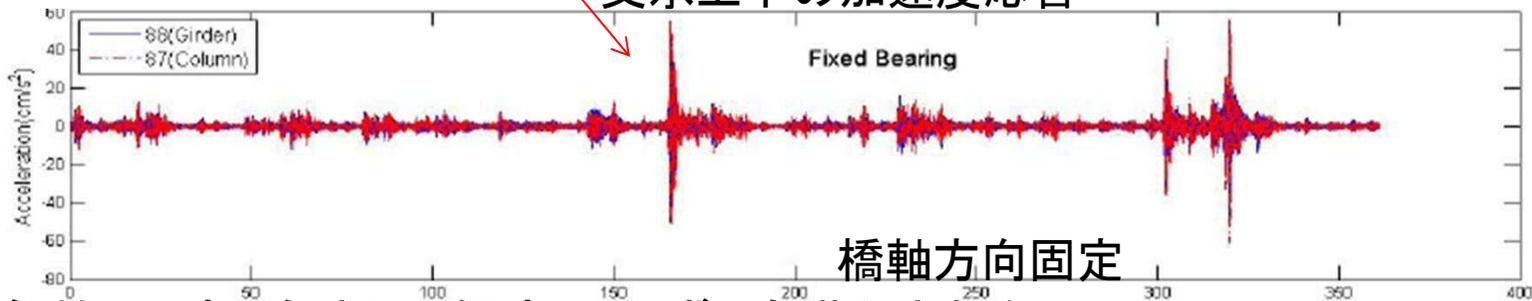
支承上下の加速度応答



支承上下の加速度応答



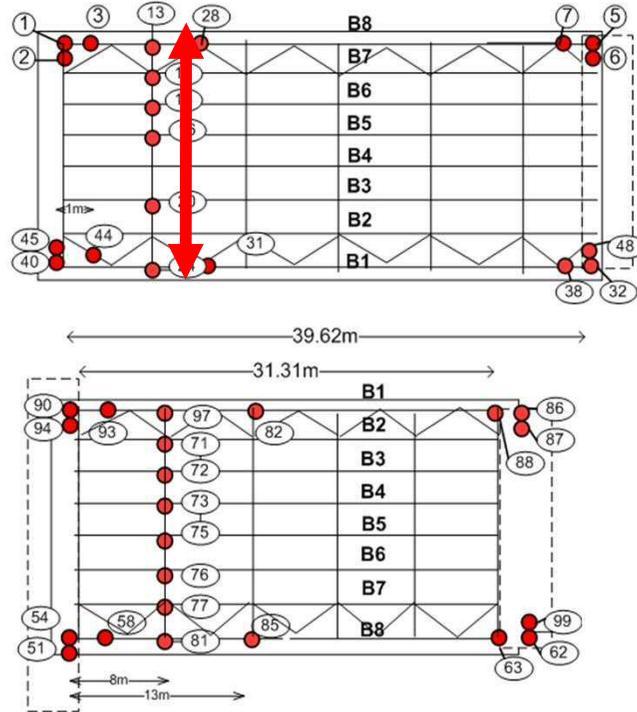
支承上下の加速度応答



支承条件(固定・自由)の仮定は必ずしも満たされない
目視点検結果と必ずしも一致していない。

(目視で固着が確認されていないが、加速度計測から固着が判明する例も)

外桁, 内桁の振動レベルの違い



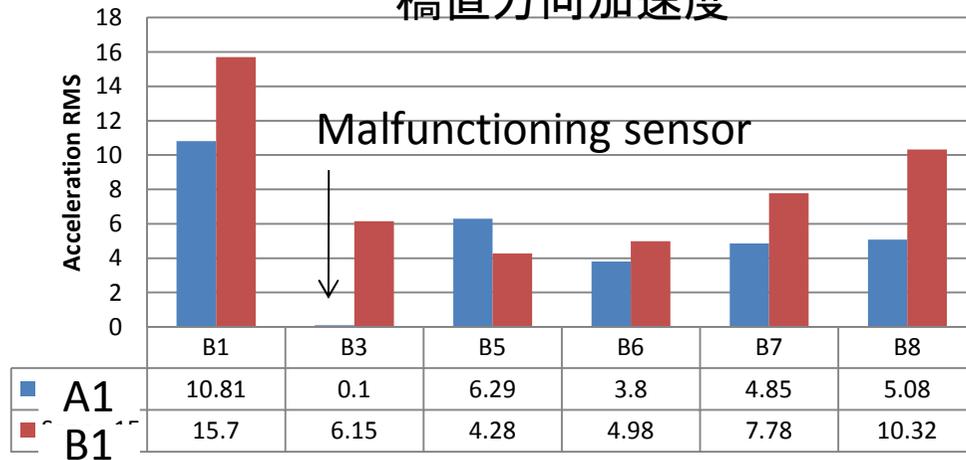
橋直方向加速度:

外桁で大きい

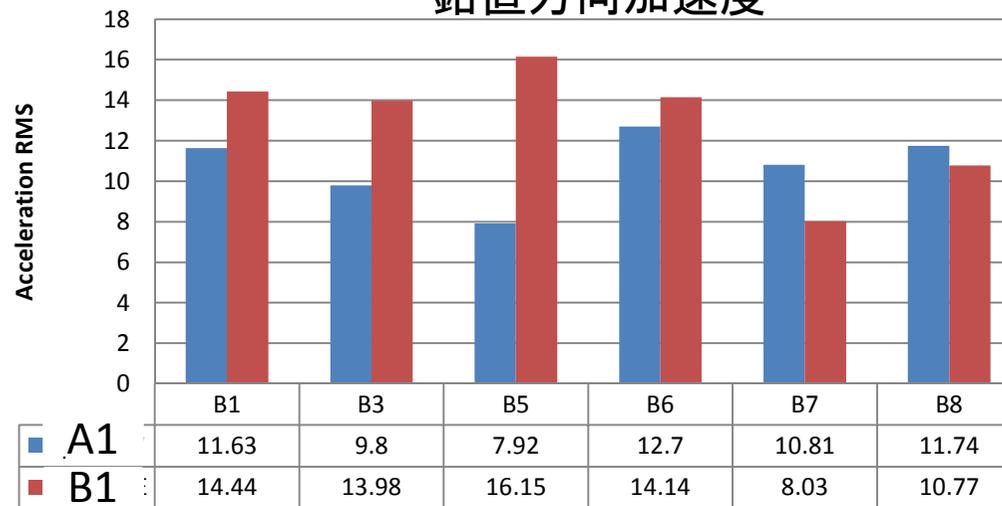
鉛直方向加速度:

外桁・内桁の違いは小さい

橋直方向加速度



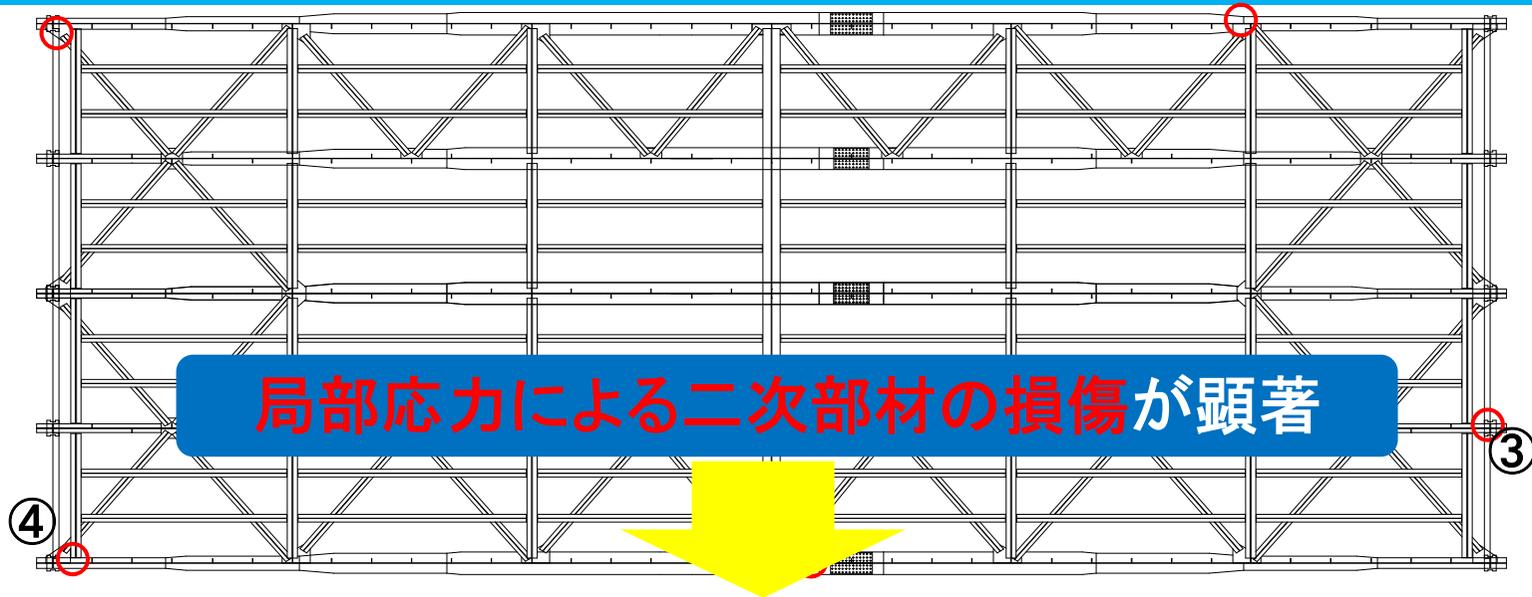
鉛直方向加速度



-> 外桁は水平方向振動が大きい. → モデルに反映して応力レベルの分析



交通荷重下の鋼桁橋の応答計測と FEMを利用した局部応力の評価

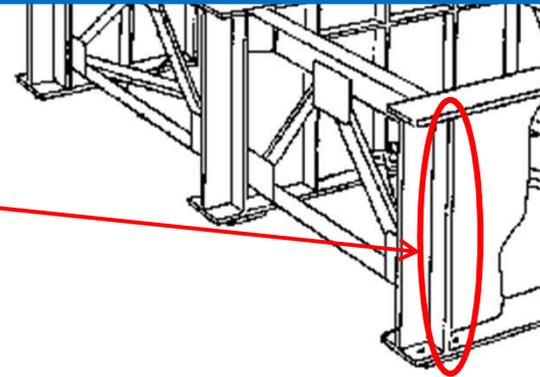


局部応力による二次部材の損傷が顕著

適切な補修・補強を行うには、損傷の進行度合いを把握するために局部応力をモデルを用いて正確に把握することが必要

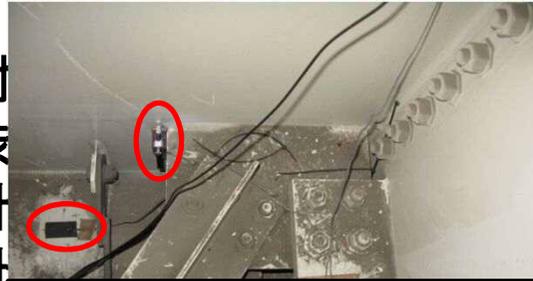


④垂直補剛材



出典:「首都高速道路構造物の現状」 増井 隆/「鋼橋の疲労について」 村越 潤
「鋼橋の補修補強技術」 小西拓洋/「道路橋の損傷状況」 岩崎英治

対
流
計
計



主桁下フランジ
ガセット横



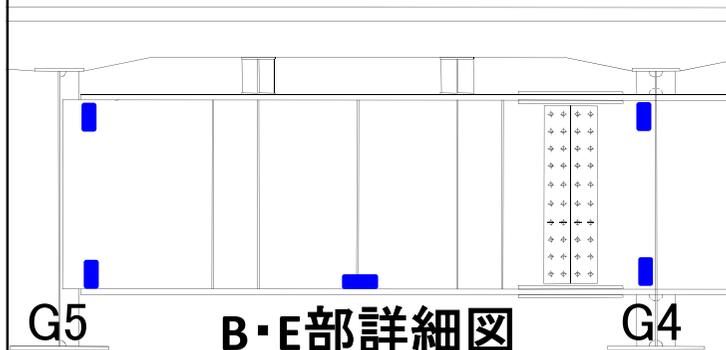
主桁ウェブ



対象橋梁

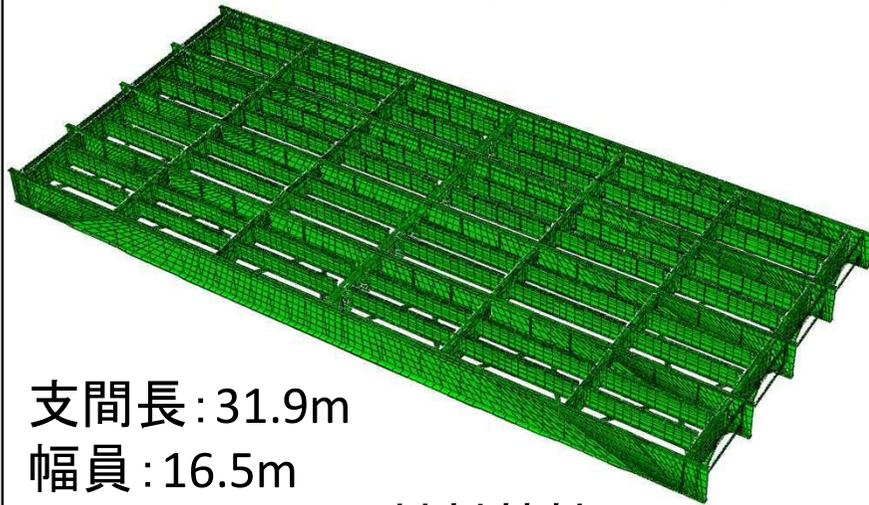
A・C・D部詳細図

ひずみゲージ設置場所



| 設置場所 | 本数 |
|---------|----|
| 主桁下フランジ | 9 |
| 主桁ウェブ | 8 |
| 横構 | 8 |
| ガセット横 | 12 |
| 垂直補剛材 | 2 |
| 横桁 | 7 |

橋梁モデル(ABAQUS)



支間長: 31.9m
幅員: 16.5m

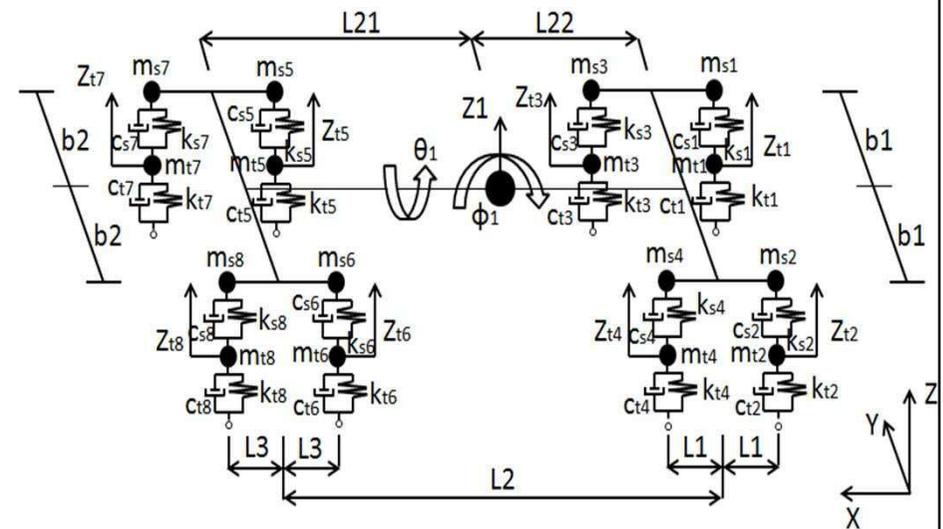
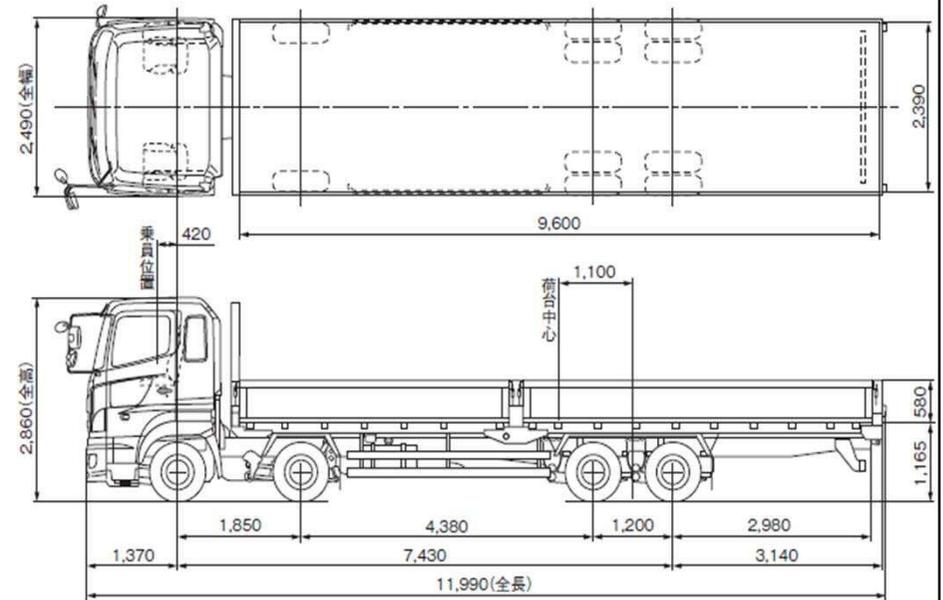
材料特性

| | ヤング率 | 密度 | ポアソン比 | 減衰比 |
|--------------|-----------|--------------------------|-------|------|
| 鋼材 | 200 [Gpa] | 7.9 [g/cm ³] | 0.3 | 0.02 |
| 鉄筋 コンクリート | 24 [Gpa] | 2.5 [g/cm ³] | 0.2 | 0.05 |

境界条件(道路橋支承便覧)

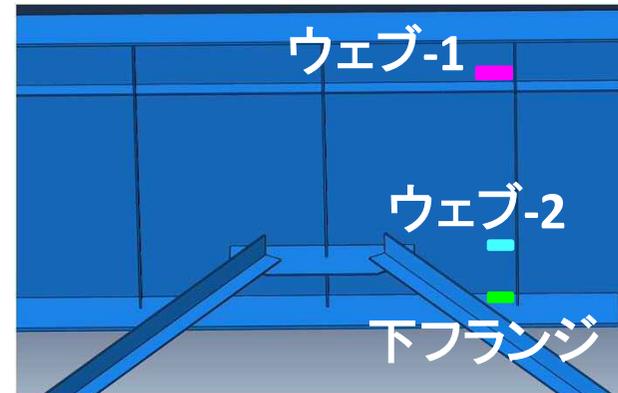
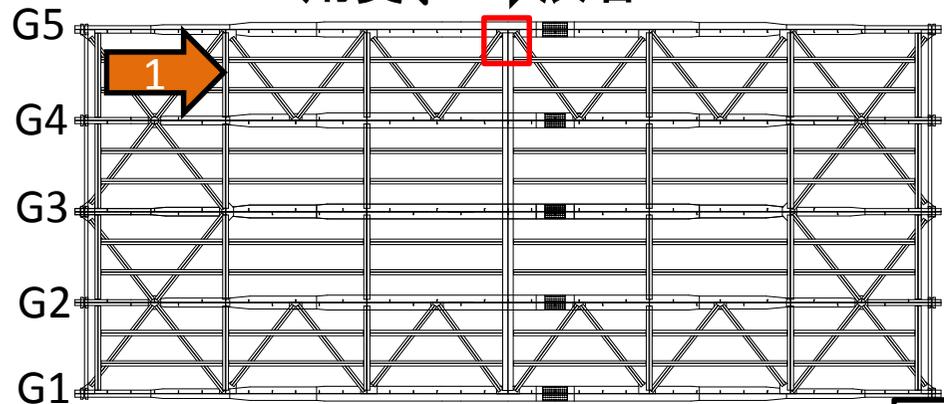
| 鉛直剛性 | せん断剛性 | 回転剛性 |
|-------------|------------|----------------|
| 729.2[MN/m] | 3.33[MN/m] | 0.91[MN・m/rad] |

荷重車モデル

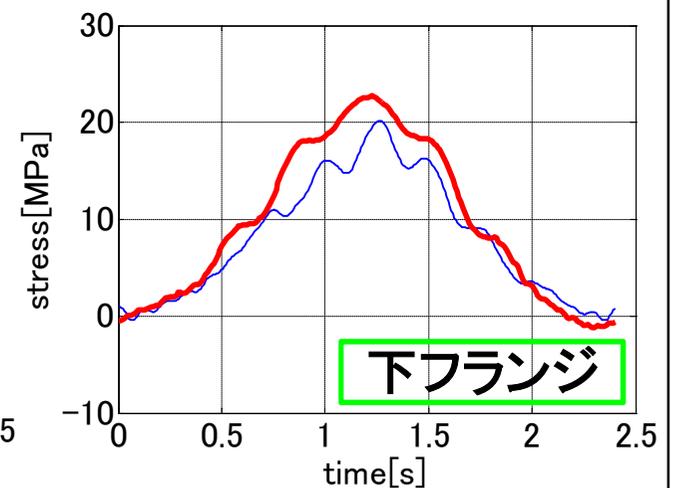
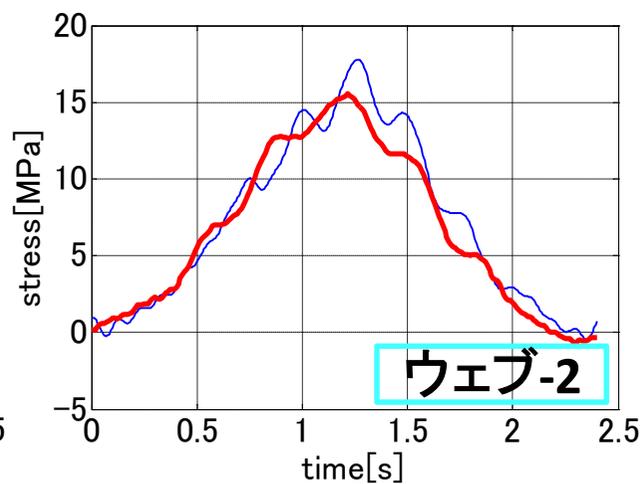
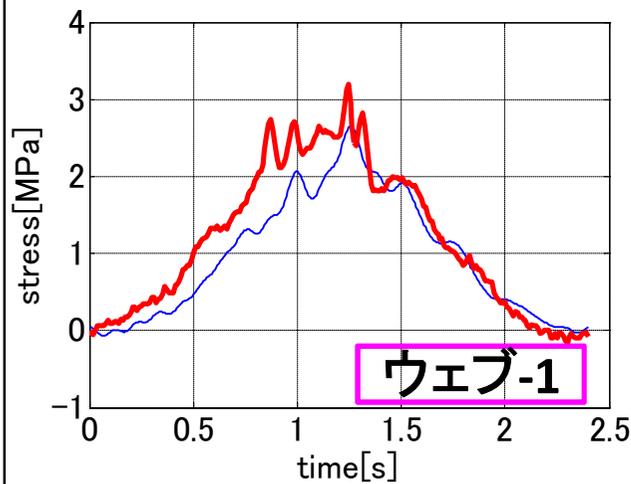


11自由度で車両をモデル化

荷重車上り走行車線通過時ウェブ・下フランジ応力応答 用賀 ← → 渋谷

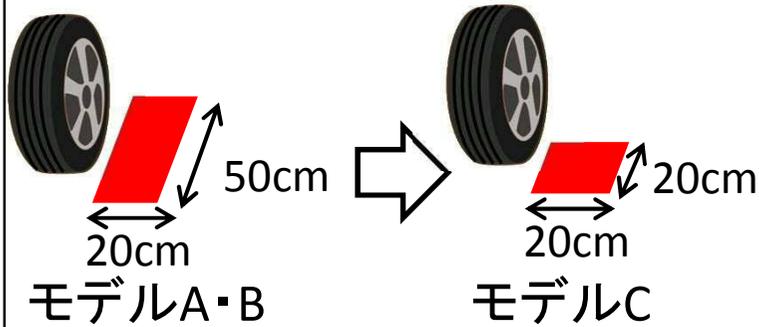


G5桁
— 実測 (Red line)
— モデル (Blue line)

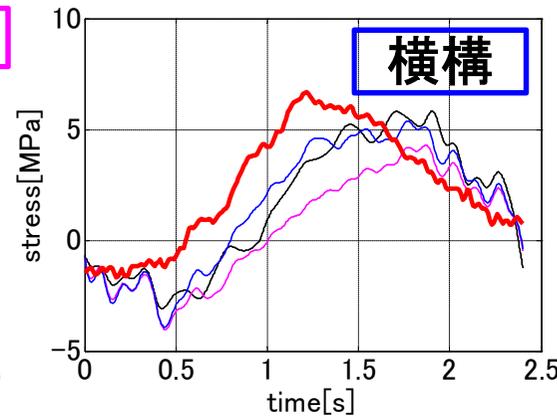
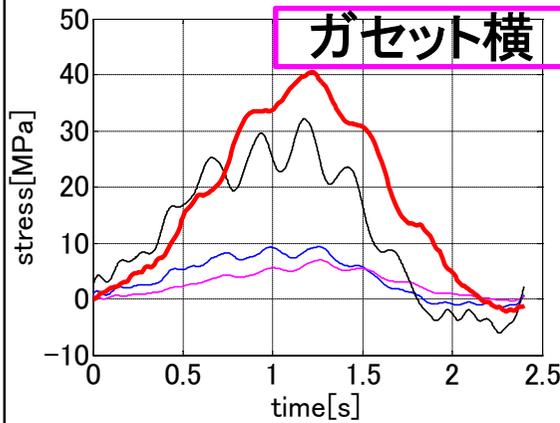
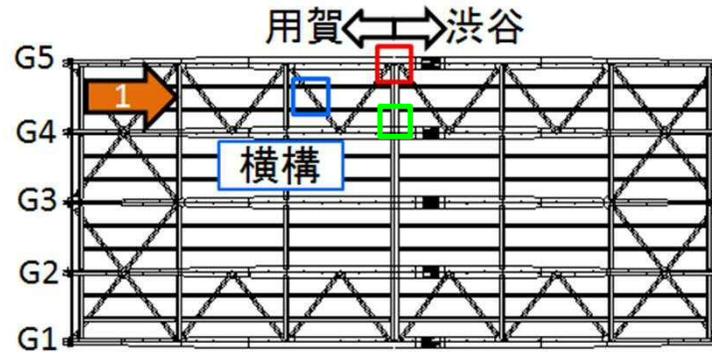


モデルの応力応答は実測と一致している

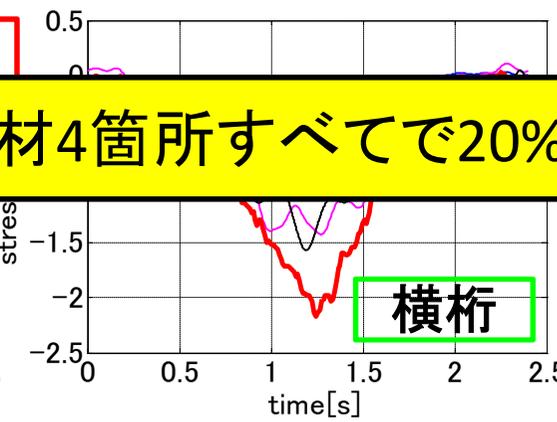
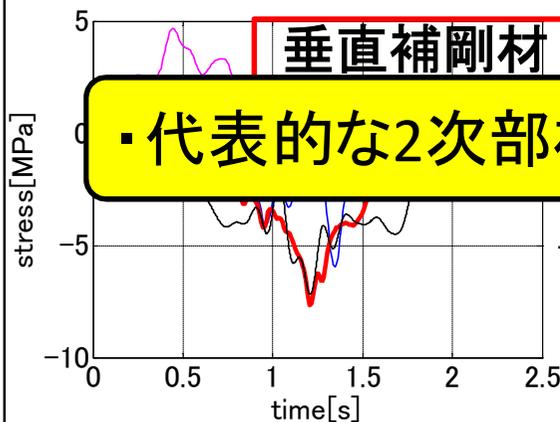
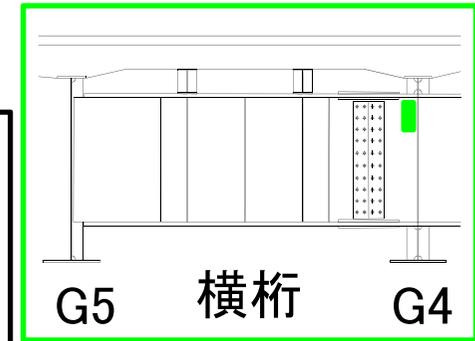
3.タイヤの接地面積



荷重車の実態に即した
接地面積を考慮



- モデルA
- モデルB
- モデルC
- 実測



接地面積に対する感度
 ・代表的な2次部材4箇所すべてで20%程度のばらつきに収まる
 は改善された

局部振動に着目した
ベルトコンベアトラス構造の
部材剛性評価手法

背景

ベルトコンベア:

- ・発電所, 製鉄所などを支える産業インフラ.
- ・総延長は1施設あたり数10キロに及ぶことも
- ・構造部材(トラス), 機械部品, 歩廊などから成る

- ・深刻な**腐食**が発生. 断面欠損・切断も珍しくない.
人的被害, 経済被害を防ぐため, 状態評価が急務

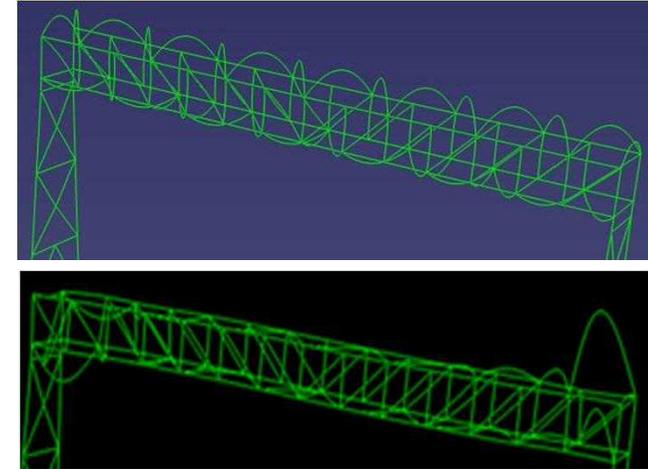
背景

- 局所振動モードを利用した損傷同定

既往研究が少ない:

1. 他種類の局所振動モードの判別が困難

- Coupled local modes
- Chaotic local modes
- **Periodic Local Vibration Modes (PLVM)**
(周期的局所振動モード)
- **Isolated Local Vibration Modes (ILVM)**
(孤立局所振動モード)



2- 可観測性上の問題

- 高精度センサ
レーザードップラ振動計(LDV)
- 非接触
- 微小振動計測可(高分解能)
- 広い周波数帯域

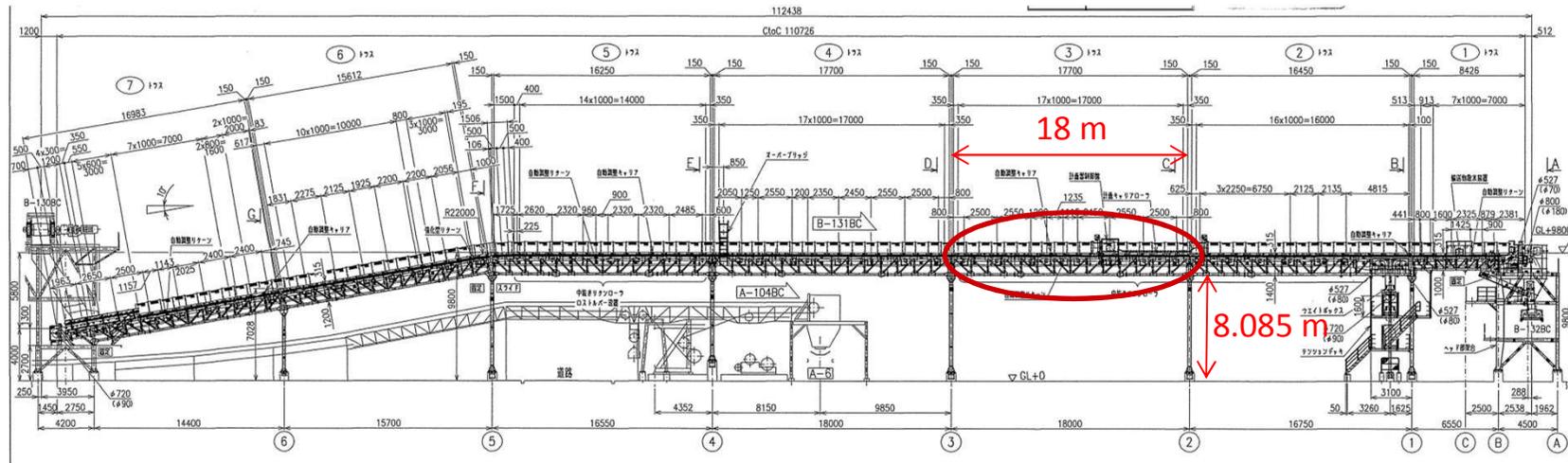


目的

1. ベルトコンベアトラス構造の局部振動特性を明らかにする.
2. 2種類の局部振動モードを利用した損傷検知法を開発する.

ベルトコンベアトラス構造の振動特性の把握

対象ベルトコンベア構造



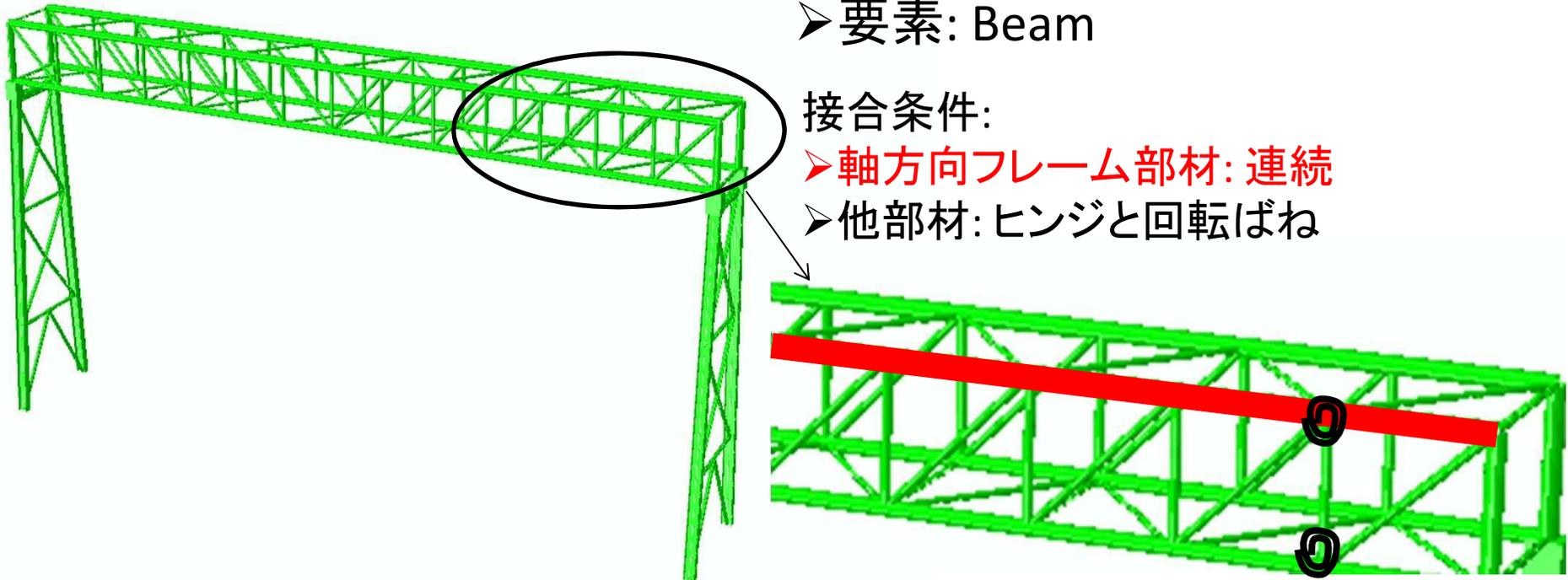
➤ 材料特性: SS400

➤ 要素: Beam

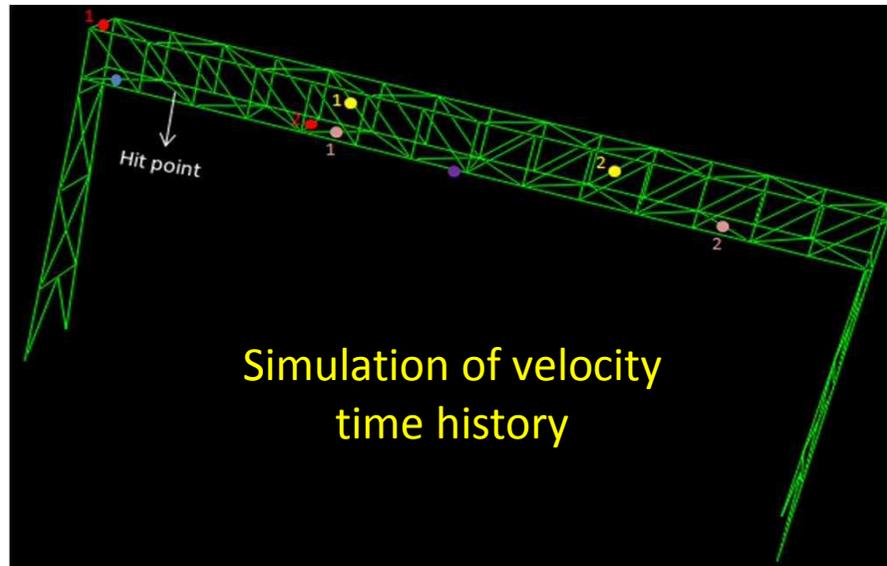
接合条件:

➤ 軸方向フレーム部材: 連続

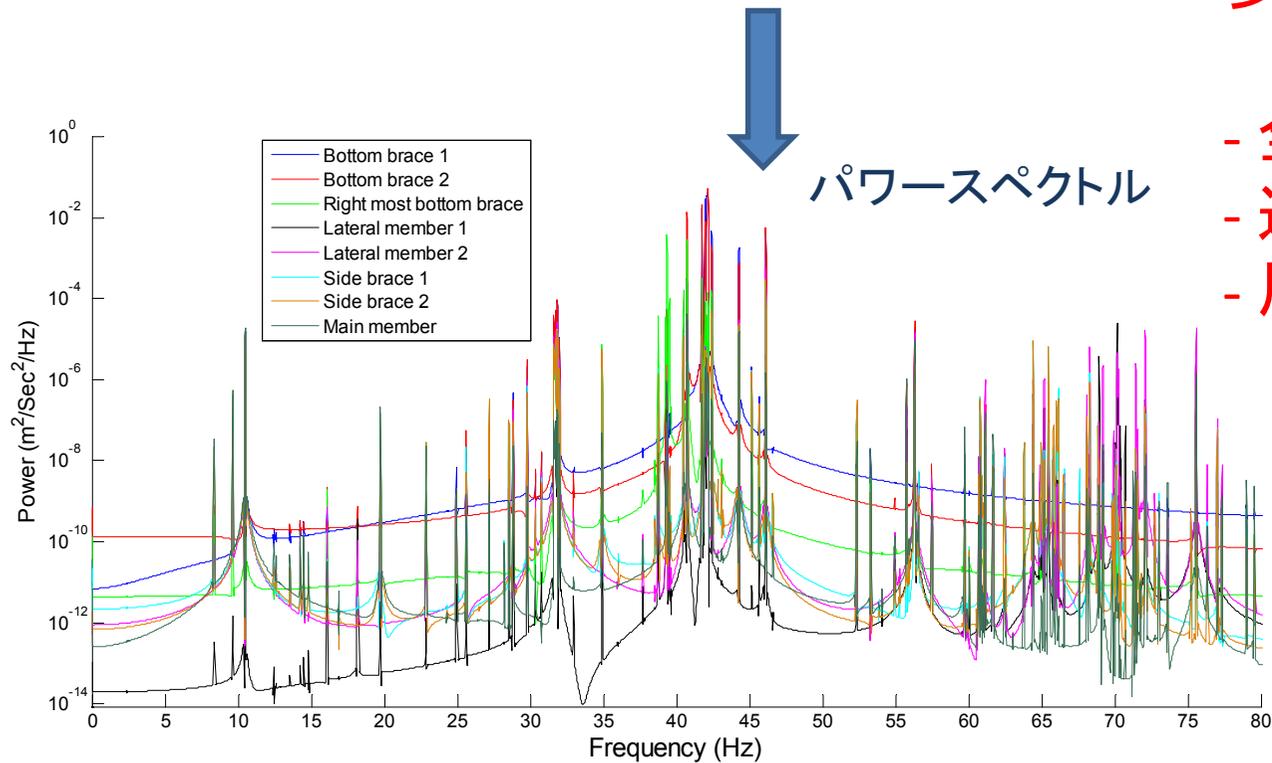
➤ 他部材: ヒンジと回転ばね



多種類の振動モード



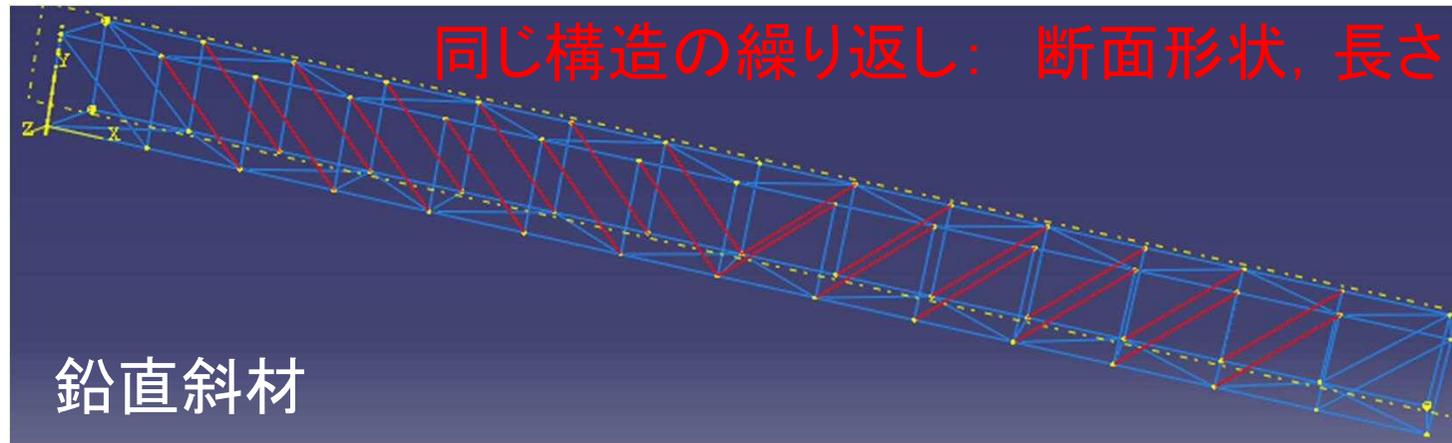
多数のモードが存在



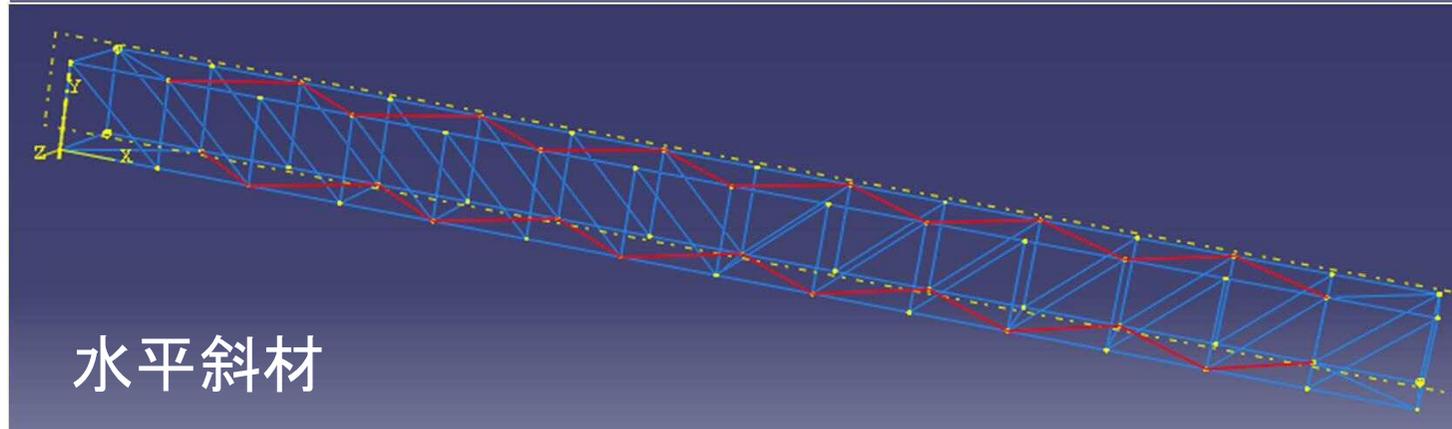
- 全体モード
- 連成モード
- 局部振動モード

ベルトコンベアトラスの特徴的な構造： 多数の同一部材

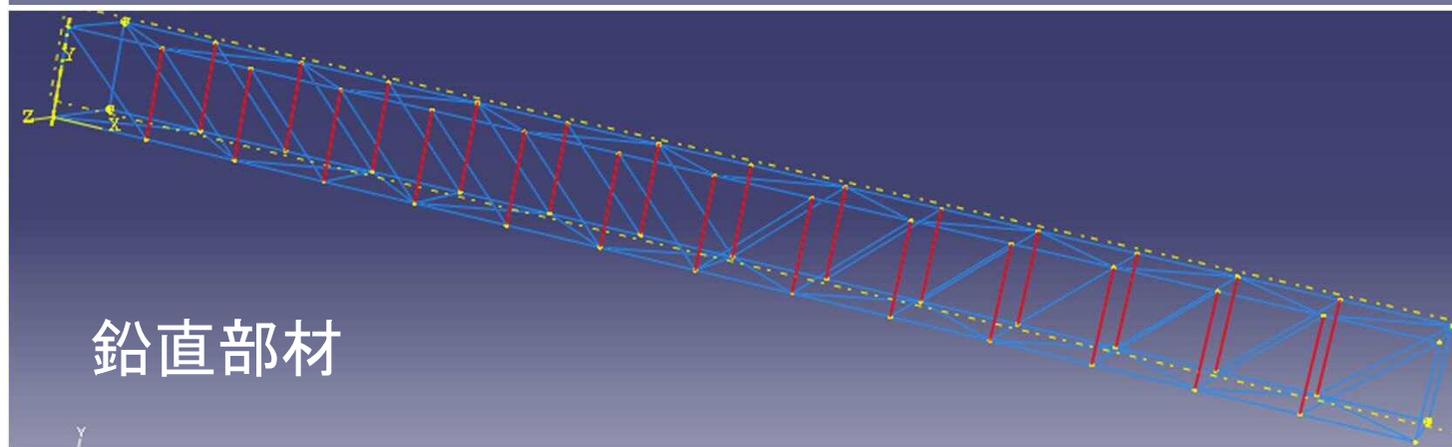
同じ構造の繰り返し： 断面形状, 長さ



鉛直斜材



水平斜材

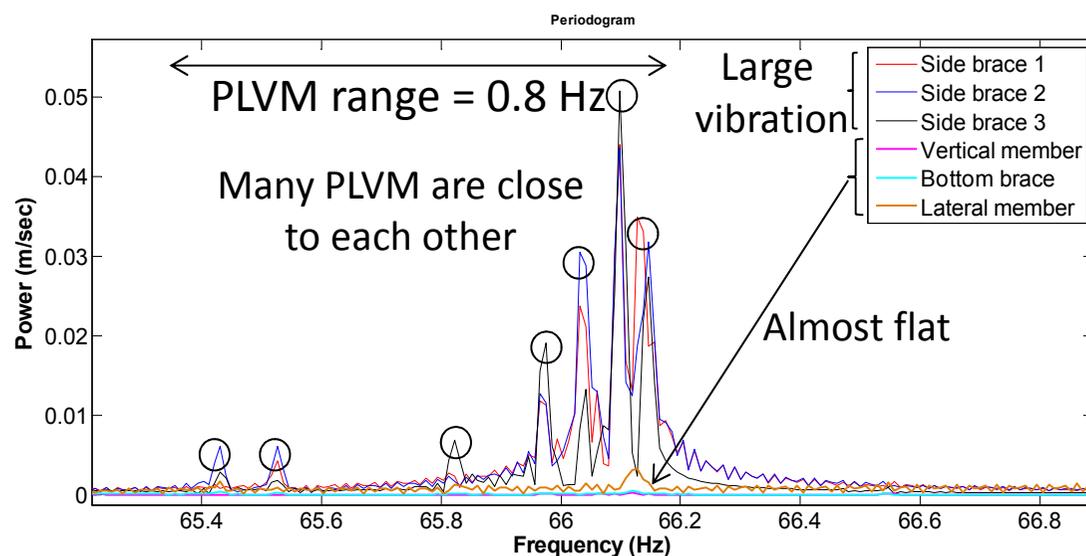
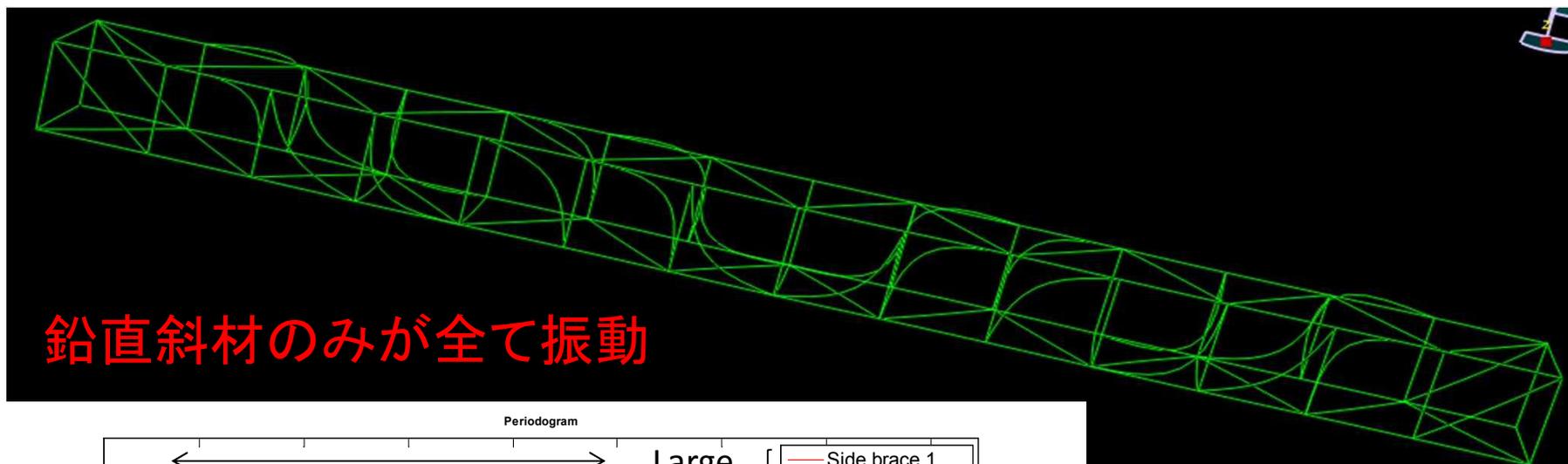


鉛直部材

ベルトコンベアトラスの特徴的な構造： 多数の同一部材

周期的局部振動(Periodic Local Vibration Mode):

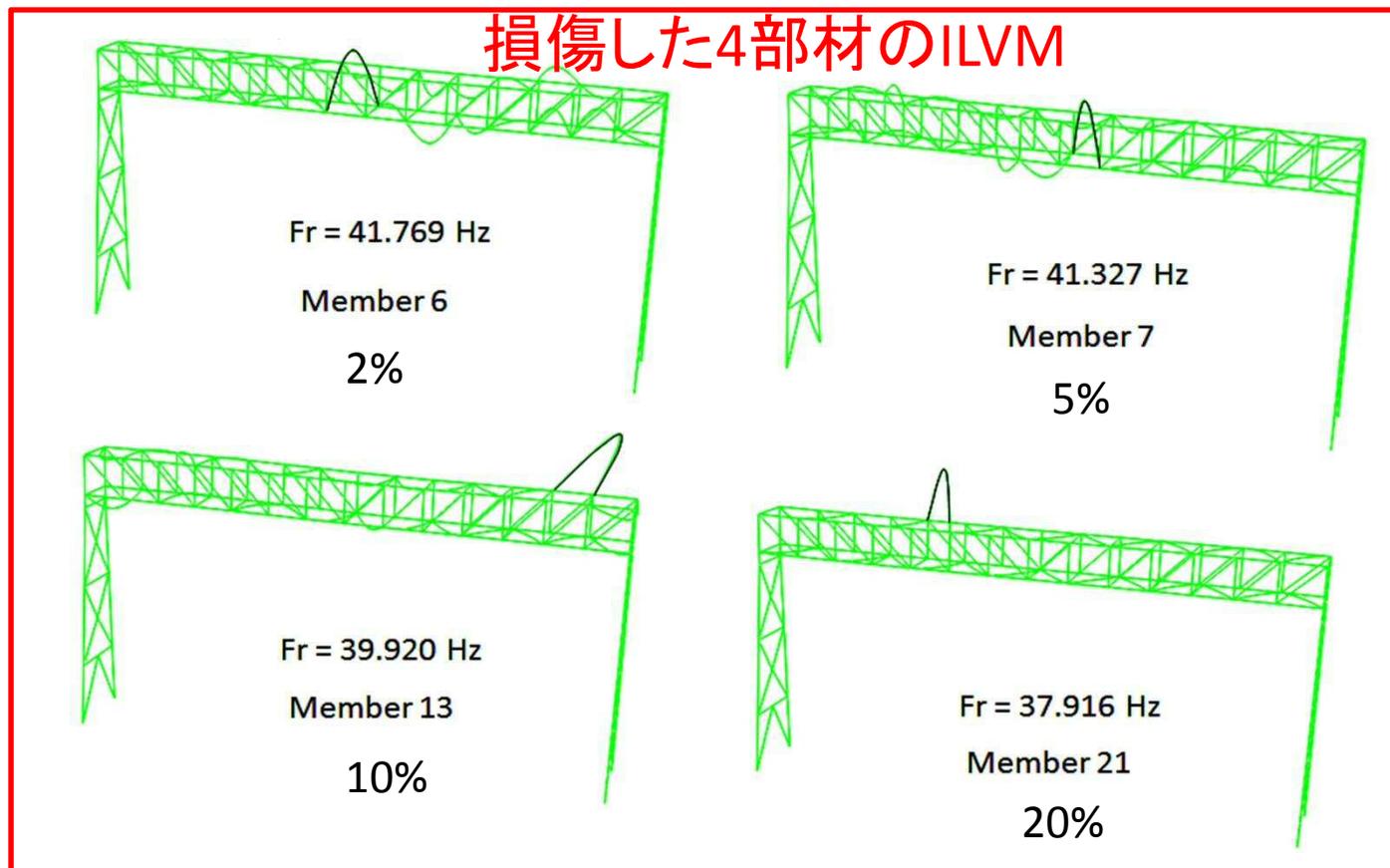
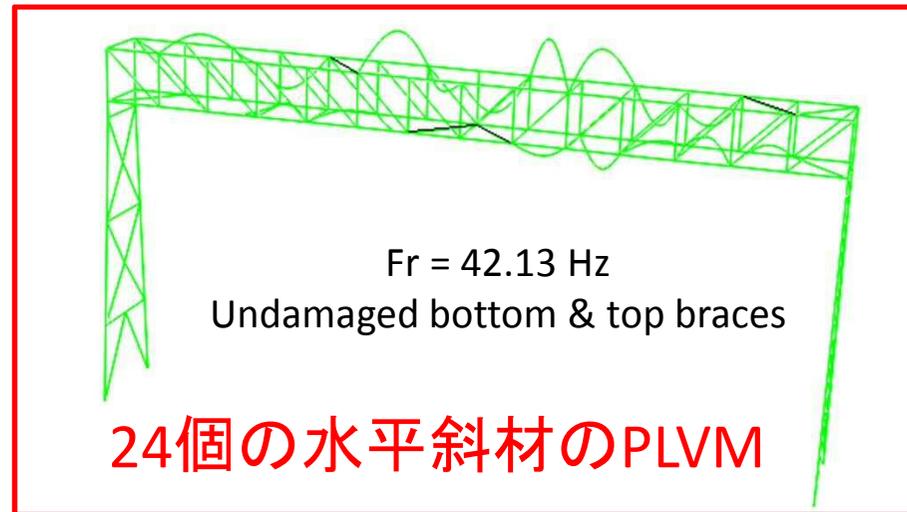
同一部材全てが振動し，他部材の振動は極めて小さいモード
(ただし，トラスフレームには存在しない)



PLVMを利用した損傷検知

PLVM → PLVM + ILVM
損傷

ILVM: 孤立局部振動モード

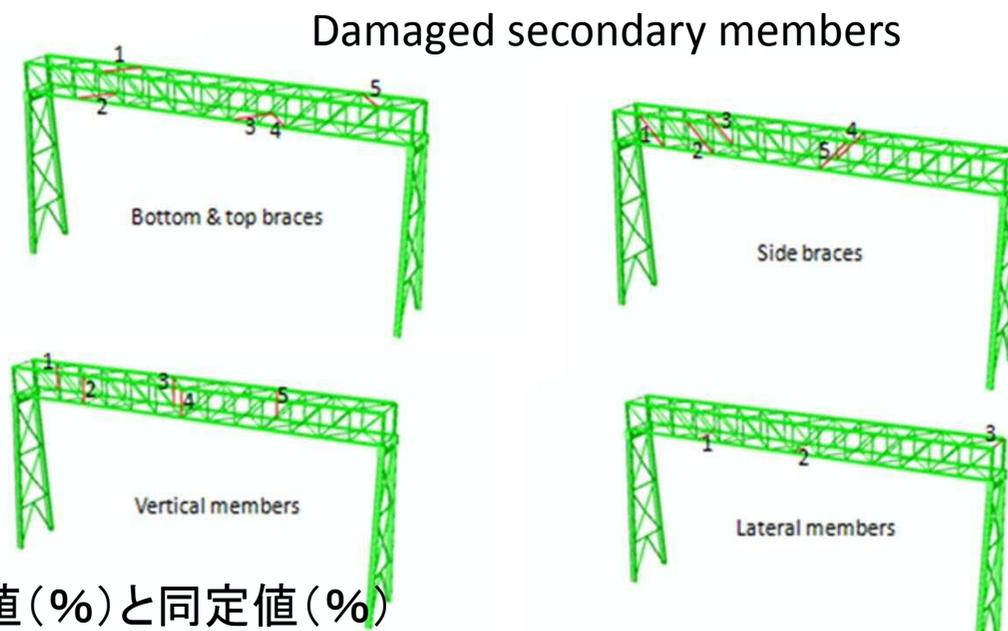


ILVM

有限要素モデルにおける損傷同定

- ・同一諸元の部材の内複数に損傷模擬
- ・速度応答時刻歴をシミュレーション

PLVM, ILVMの変化を調査

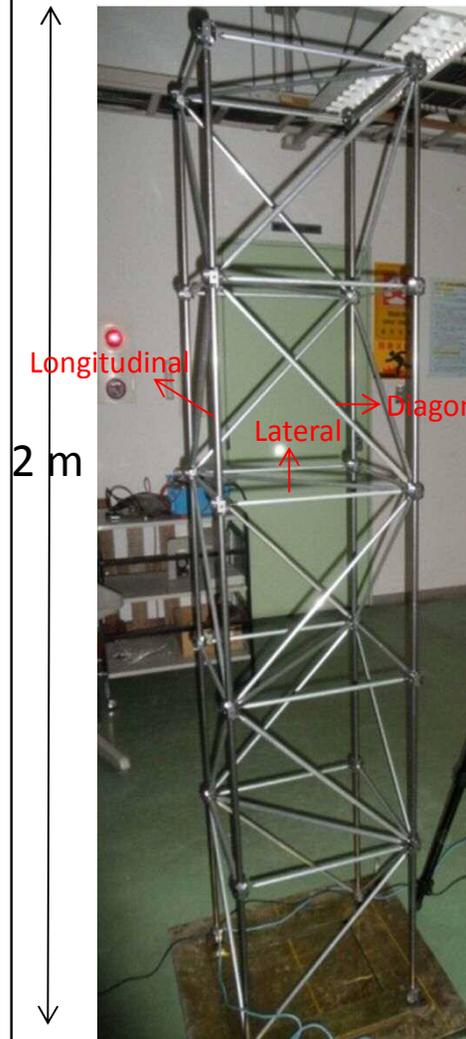


損傷導入値(%)と同定値(%)

| Member sets | member 1 | | member 2 | | member 3 | | member 4 | | member 5 | |
|-----------------------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| | 75 | 74.1 | 5 | 4.5 | 10 | 10.0 | 20 | 19.0 | 35 | 35.2 |
| Bottom and top braces | 75 | 74.1 | 5 | 4.5 | 10 | 10.0 | 20 | 19.0 | 35 | 35.2 |
| Side braces | 90 | 89.9 | 5 | 5.2 | 65 | 64.4 | 25 | 25.4 | 25 | 25.4 |
| Vertical members | 85 | 85.1 | 5 | 5.3 | 55 | 55.3 | 15 | 15.9 | 30 | 31.7 |
| Lateral members | 5 | 4.3 | 15 | 14.1 | 40 | 39.7 | - | - | - | - |

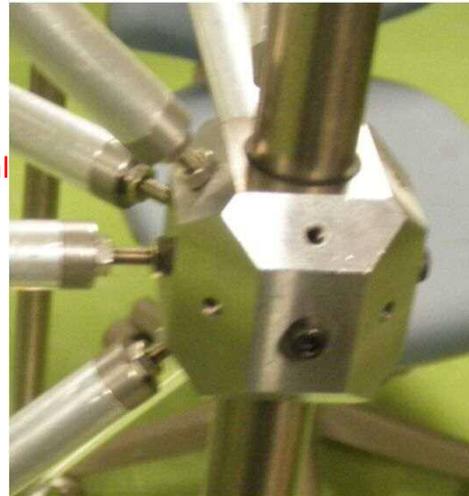
実験室モデルを利用した損傷同定

- 多数の損傷が存在する場合の同定性能

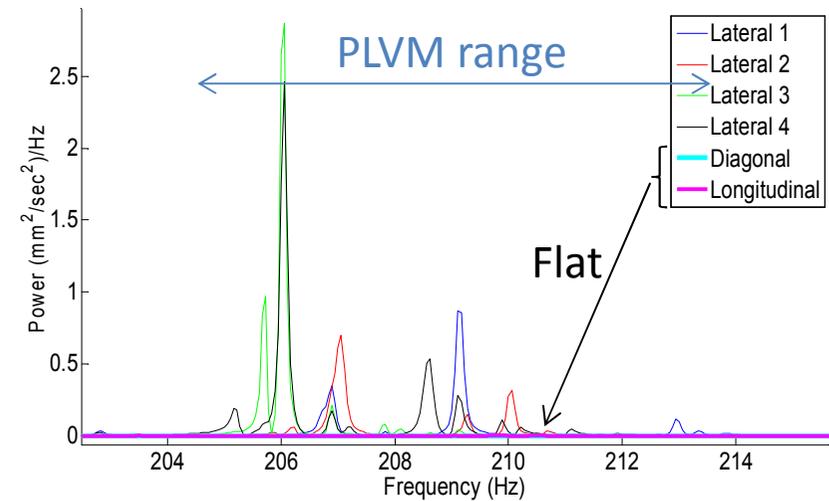


鉛直部材は連続

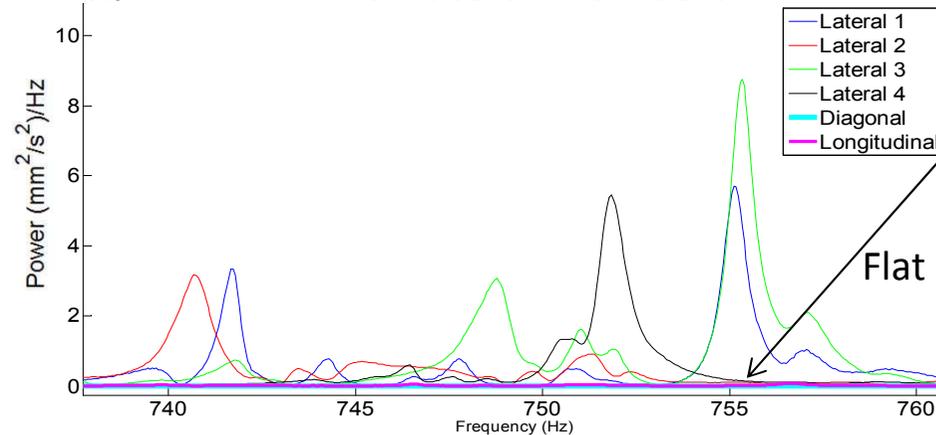
各部材を直接ハンマー打撃
速度応答をLDVで計測



1st PLVM of lateral members



2nd PLVM of lateral members



実験室モデルを利用した損傷同定

14部材に損傷を導入

Undamaged members $\phi 10 \times 1$

PLVM range before damage

水平部材PLVM およびILVM の振動数

