

§ 2. 振動計測技術の文献調査

2-1. 振動計測のニーズと事例の整理

2-1-1. 実務の事例

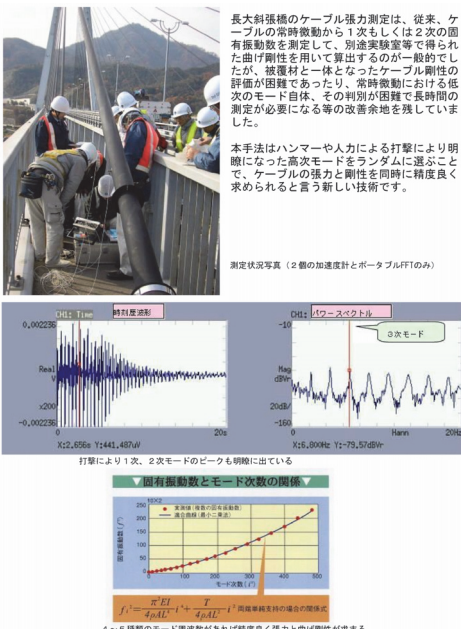
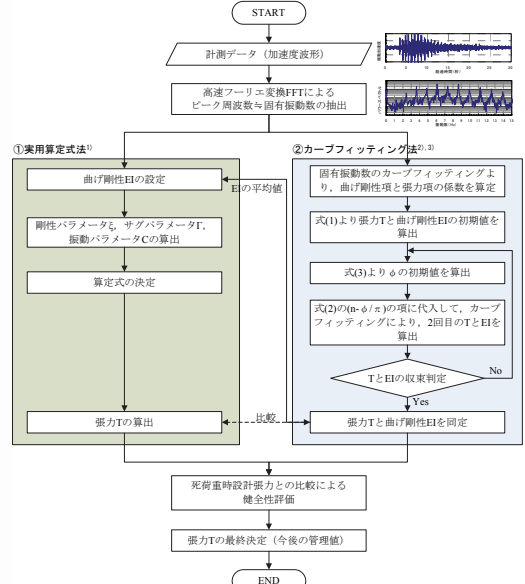

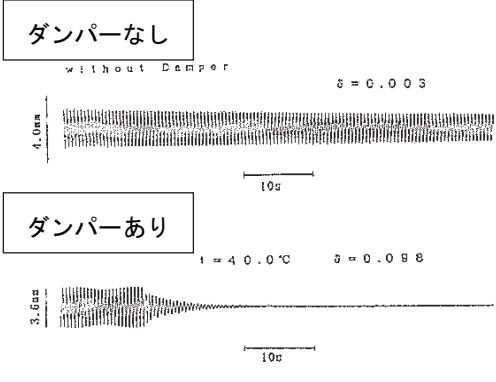

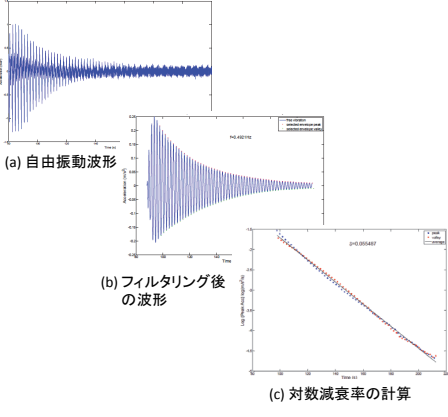
ニーズ	健全性評価のためのケーブル張力測定
<p>内容</p>	<ul style="list-style-type: none"> 斜張橋や吊橋、ニールセン橋などのケーブル構造において、導入されたケーブル張力の経年変化を定量的に評価したいというニーズがあり、振動を用いた方法が確立されている。 本州四国連絡高速道路(株)の点検要領（平成14年3月改訂）では、5年周期の精密点検において、斜張ケーブルやハンガーロープの張力測定が義務づけられている。
<p>事例の有無</p>	<p>多数あり</p>
<p>事例紹介</p>	<p>明石海峡大橋ハンガーロープや生口橋斜張ケーブルなど、本四架橋の長大橋ケーブル類で実績がある。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  <p>長大斜張橋のケーブル張力測定は、従来、ケーブルの常時微動から1次もしくは2次の固有振動数を測定して、別途実験室等で得られた曲げ剛性を用いて算出するのが一般的でしたが、被覆材と一体となったケーブル剛性の評価が困難であったり、常時微動における低次のモード自体、その判別が困難で長時間の測定が必要になる等の改善余地を残していました。</p> <p>本手法はハンマーや人力による打撃により明確になった高次モードをランダムに選ぶことで、ケーブルの張力と剛性を同時に精度良く求められると言う新しい技術です。</p> <p>測定状況写真（2個の加速度計とボータブルFFTのみ）</p> <p>固有振動数とモード次数の関係</p> <p>4～5種類のモード測定数があれば精度良く張力と曲げ剛性が求まる</p> </div> <div style="width: 45%;">  <p>START</p> <p>計測データ（加速度波形）</p> <p>高速フーリエ変換FFTによるピーク周波数から固有振動数の抽出</p> <p>①実用算定式法¹⁾</p> <p>曲げ剛性EIの設定</p> <p>剛性パラメータ、サグパラメータT、振動パラメータCの算出</p> <p>算定式の決定</p> <p>張力Tの算出</p> <p>②カーブフィッティング法^{2),3)}</p> <p>固有振動数のカーブフィッティングより、曲げ剛性項と張力項の係数を算定</p> <p>式(1)より張力Tと曲げ剛性EIの初期値を算出</p> <p>式(3)よりφの初期値を算出</p> <p>式(2)の(n-φ/π)の項に代入して、カーブフィッティングにより、2回目のTとEIを算出</p> <p>TとEIの収束判定</p> <p>Yes: 張力Tと曲げ剛性EIを同定</p> <p>No: 比較</p> <p>死荷重時設計張力との比較による健全性評価</p> <p>張力Tの最終決定（今後の管理値）</p> <p>END</p> </div> </div>
<p>課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> 環境変動や測定方法による結果のばらつきがある。 損傷程度と張力変化量との関係が不明確。すなわち、構造安全性を判断するための閾値が設定されていない。

図 2-1 (株)ブリッジ・エンジニアリングのHP

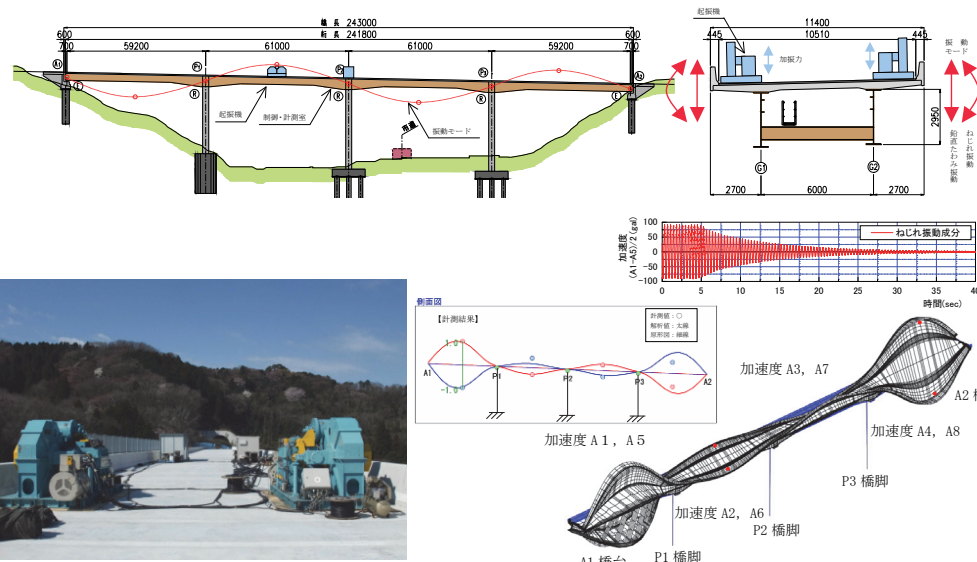
図 2-2 ケーブル張力算定手順

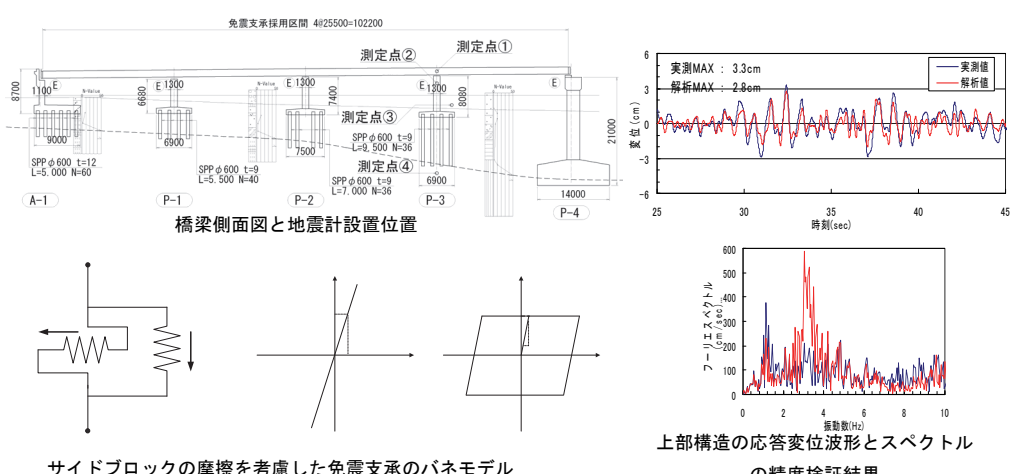
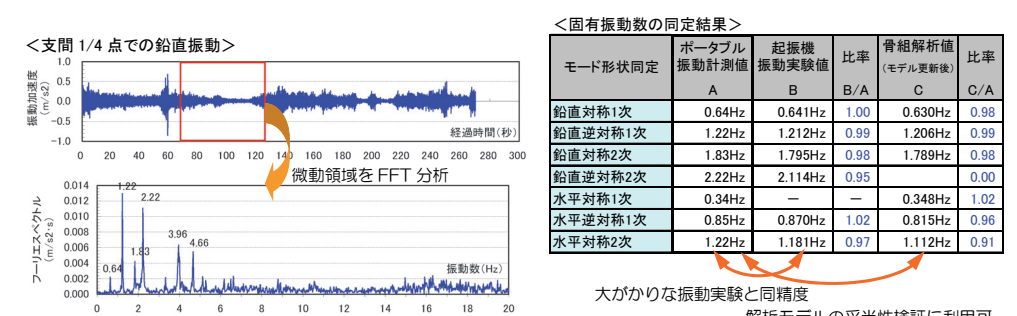
- 1) 頭井洋, 新家徹, 濱崎義弘: 振動法によるケーブル張力実用算定式の補正, 土木学会論文集 NO.525/I-33, pp.351-354, 1995.10
- 2) 宇津野 秀夫, 山極 伊知郎, 遠藤 浩司, 杉井 謙一: 振動伝達関数法によるケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法, 構造工学論文集 Vol.44A, pp.853-860, 1998.3
- 3) 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 杉井謙一, 本田祐嗣: ケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法, 神戸製鋼技報/Vol.49, No.2, pp.12-15, 1999.9

ニーズ	ケーブル制振装置の減衰性能評価
内容	<ul style="list-style-type: none"> 斜張橋では、長スパン化に伴い、ケーブルの長大化が進んでいる。これにより、レインバイブレーションなどの風によるケーブル自身の振動が問題となる。 この対策として、オイルダンパーや高減衰ゴムなどをケーブルに設置する制振対策が行われる。 制振対策の判断基準の目安は、「ケーブルの1次固有振動数が3Hz以下であること」と「構造物の風による振動に対する反応性を示す質量減衰パラメータであるスクルトン数が60以下であること」とされている。 また、制振効果の評価基準は、制振装置設置時のケーブルの対数減衰率が0.03より大きいこととされている。
事例紹介	<p>【事例1】 幸魂大橋 本橋では、ケーブル用の新たな制振装置として、粘性せん断型ダンパーが設置され、その減衰性能評価試験が現地で実施された。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="486 757 858 1137">  <p>図 2-3 粘性せん断型ダンパーの設置状況</p> </div> <div data-bbox="874 757 1372 1137">  <p>図 2-4 面内 2 次の減衰自由振動波形</p> </div> </div> <p>参考文献：米田昌弘，前田研一，町田文孝，枝元勝哉，柳澤則文，寺本耕一：ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの開発，川田技法，Vol.10，pp.30-36，1991.</p> <p>【事例2】 ストーンカッターズ橋</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="534 1321 810 1736">  <p>図 2-5 ケーブルの加振状況</p> </div> <div data-bbox="874 1321 1324 1736">  <p>図 2-6 計測結果の一例</p> </div> </div> <p>参考文献：D. Su, Y. Fujino, T. Nagayama and S. Yamazaki: Identification of Cable Damping Characteristics of a Long-span Cable-stayed Bridge, <i>Proceeding of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring</i>, CD-ROM, Tokyo, Japan, 2010.</p>


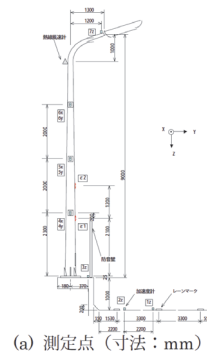
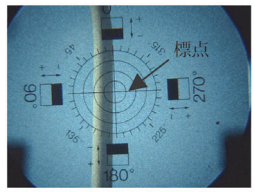

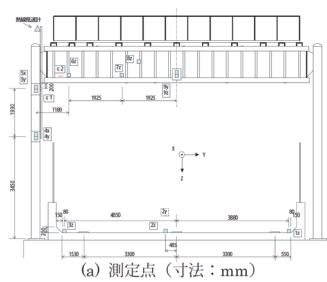
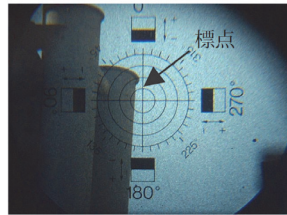
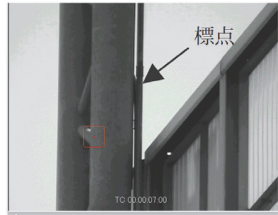
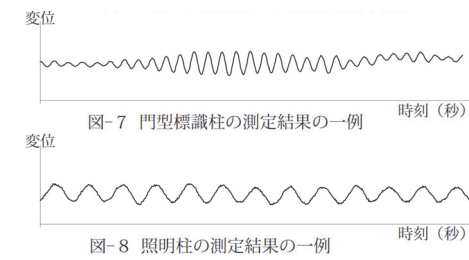
課題	<ul style="list-style-type: none">• ケーブルに制振装置が設置された後、現地で減衰性能の全数検査が行われているか不明。• ケーブルの加振方法として、一般的に、人手による強制加振が行われている。しかし、ケーブルが長大化するにつれて加振が困難となる。加振方法の工夫が必要。• 上記の問題に対する改善案として、常時微動の活用が考えられる。しかし、常時微動から同定される減衰はばらつきが大きい。そのため、同定精度を向上させる方策が必要である。また、常時微動と強制加振から得られる減衰の整理が十分にされていない。
----	--

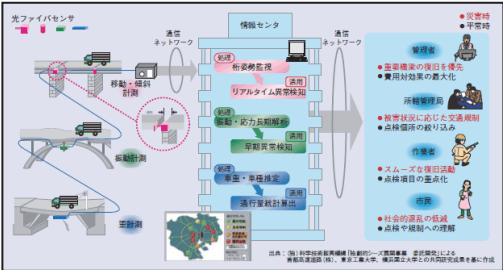
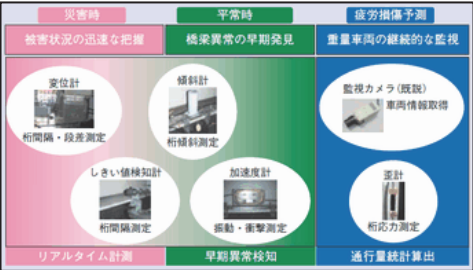
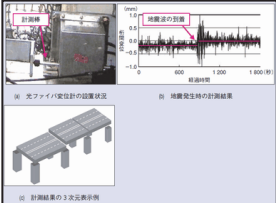
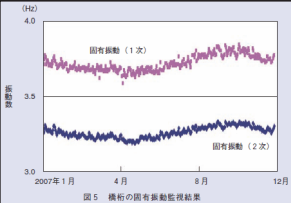
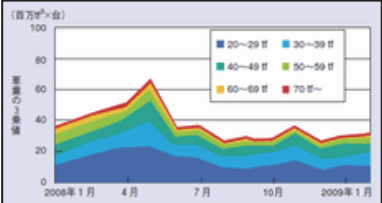
ニーズ	歩道橋の振動使用性の確認
内容	<ul style="list-style-type: none"> 歩道橋の設計では、立体横断施設技術基準(1979年)に従い、たわみ制限(L/600)および振動(2Hz前後を避ける)の2項目を遵守する。 揺れやすく苦情が出た歩道橋や1979年より前に設計された歩道橋では、振動を計測するニーズがある。
事例の有無	多数あり
事例紹介	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div data-bbox="384 528 836 965" style="text-align: center;"> <p>1次固有振動数 f (Hz)</p> <p>支間長 L (m)</p> <p>○ 基準以前 ▲ 基準以後</p> <p>$f=87.3/L+0.158$ (全体)</p> <p>$f=115/L-0.339$ ("基準"以後)</p> <p>$f=75.8/L+0.318$ ("基準"以前)</p> </div> <div data-bbox="871 636 1369 965" style="text-align: center;"> </div> </div> <p>図 2-7 固有振動数と支間長の関係²⁾ 図 2-8 砂袋による衝撃加振の状況³⁾</p> <ol style="list-style-type: none"> 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集 NO.325，pp.23-33，1982.9 田中信治，加藤雅史：歩道橋設計時における振動使用性のチェック方法，橋梁と基礎，pp.29-33，1995.11. 田中信治，加藤雅史：歩道橋の固有振動の測定と解析による検討，構造工学論文集，Vol.36A，pp.671-678，1990.3.
課題	・ 特になし

ニーズ	動的耐風設計された実橋振動計測
内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物の対風応答は、固有振動数や振動モード形状および構造減衰によって大きく影響を受ける。合理的な動的耐風設計を行うためには、構造物の振動特性を十分に把握しておく必要がある。 ・ 吊橋や斜張橋のような長大橋では、動的耐風設計が設計上極めて重要であり、風洞実験による空力応答現象の検証に加えて、振動特性を把握するために実橋振動計測が実施されている。 ・ けた橋においても、合理化橋梁である鋼少数主げた橋を長支間で適用する場合に、ねじれ振動の耐風安定性の確保が重要となり、風洞実験に加えて実橋振動計測が実施されている。
事例の有無	多数あり
事例紹介	<p>多々羅大橋など長大橋をはじめ、鋼少数主桁橋および複合ラーメン I 桁橋で実橋振動計測が実施されている。</p>  <p>図 2-9 複合ラーメン I 桁橋の実橋振動試験</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 真辺保仁, 佐々木伸幸, 山口和範: 多々羅大橋の実橋振動実験, 橋梁と基礎 Vol. 33, No. 5, pp.27-30, 1999.5 2) 西岡直樹, 鳥海隆一, 岡清志, 佐々木伸幸: 安芸灘大橋の振動実験, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I-B104, pp.208-209, 2000.9 3) 村越潤, 麓興一郎, 芦塚憲一郎, 清田鍊次, 宮崎正男: 鋼少数主桁橋の耐風安定性と振動特性に関する実験的検討, 橋梁振動コロキウム'03 論文集, pp.357-362, 2003.9 4) 奥村学, 結城洋一, 中野隆, 上島秀作, 畑中章秀, 宮崎正男, 新井恵一, 麓興一郎, 横山功一: 複合ラーメン I 桁橋の起振機を用いた実橋振動試験, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-494, pp.987-988, 2010.9
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造減衰の計測結果にばらつきが大きく、ある値に特定できるとは言い難い。 ・ 構造減衰を解析的に推定することが困難であり、実橋振動計測で評価せざるを得ないが、十分な計測データが現状では得られていない。 ・ 構造減衰には振幅依存性があると指摘されており、動的耐風設計に採用する構造減衰は、起振機試験において 100gal 程度により振動させる必要がある。

ニーズ	動的耐震設計された橋梁の設計検証																																																						
内容	<ul style="list-style-type: none"> 耐風設計と同様に、構造物の地震応答は固有振動数や振動モード形状および構造減衰によって大きく影響を受ける。合理的な動的耐震設計を行うためには、構造物の振動特性を十分に把握しておく必要がある。 																																																						
事例の有無	数件あり																																																						
事例紹介	<ul style="list-style-type: none"> 動的耐震設計された橋梁（免震支承を有する4径間連続鋼板桁橋）の設計検証として、地震時の強震記録を用いて地震応答解析を行い、設計想定どおりの免震効果が発揮されているかを検証した事例がある¹⁾。 <div style="text-align: center;">  <p>橋梁側面図と地震計設置位置</p> <p>サイドブロックの摩擦を考慮した免震支承のパネモデル</p> <p>上部構造の応答変位波形とスペクトルの精度検証結果</p> </div> <p>図 2-10 強震記録との比較による解析精度の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> 可撓性の高い長大トラス橋において常時振動を簡易計測し、耐震補強設計用の解析モデルの精度検証を行った事例がある。 <div style="text-align: center;">  <p><固有振動数の同定結果></p> <table border="1" data-bbox="925 1344 1388 1568"> <thead> <tr> <th>モード形状同定</th> <th>ポータブル振動計測値</th> <th>起振機振動実験値</th> <th>比率</th> <th>骨組解析値 (モデル更新後)</th> <th>比率</th> </tr> <tr> <td></td> <td>A</td> <td>B</td> <td>B/A</td> <td>C</td> <td>C/A</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鉛直対称1次</td> <td>0.64Hz</td> <td>0.641Hz</td> <td>1.00</td> <td>0.630Hz</td> <td>0.98</td> </tr> <tr> <td>鉛直逆対称1次</td> <td>1.22Hz</td> <td>1.212Hz</td> <td>0.99</td> <td>1.206Hz</td> <td>0.99</td> </tr> <tr> <td>鉛直対称2次</td> <td>1.83Hz</td> <td>1.795Hz</td> <td>0.98</td> <td>1.789Hz</td> <td>0.98</td> </tr> <tr> <td>鉛直逆対称2次</td> <td>2.22Hz</td> <td>2.114Hz</td> <td>0.95</td> <td></td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>水平対称1次</td> <td>0.34Hz</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.348Hz</td> <td>1.02</td> </tr> <tr> <td>水平逆対称1次</td> <td>0.85Hz</td> <td>0.870Hz</td> <td>1.02</td> <td>0.815Hz</td> <td>0.96</td> </tr> <tr> <td>水平対称2次</td> <td>1.22Hz</td> <td>1.181Hz</td> <td>0.97</td> <td>1.112Hz</td> <td>0.91</td> </tr> </tbody> </table> <p>大がかりな振動実験と同精度 解析モデルの妥当性検証に利用可</p> </div> <p>図 2-11 簡易振動計測による解析モデルの精度検証</p> <p>1) 吉岡, 岡田, 西, 佐藤, 原田: 強震記録を用いた免震橋の地震応答解析モデルに関する検討 (その1), 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006.9</p>	モード形状同定	ポータブル振動計測値	起振機振動実験値	比率	骨組解析値 (モデル更新後)	比率		A	B	B/A	C	C/A	鉛直対称1次	0.64Hz	0.641Hz	1.00	0.630Hz	0.98	鉛直逆対称1次	1.22Hz	1.212Hz	0.99	1.206Hz	0.99	鉛直対称2次	1.83Hz	1.795Hz	0.98	1.789Hz	0.98	鉛直逆対称2次	2.22Hz	2.114Hz	0.95		0.00	水平対称1次	0.34Hz	—	—	0.348Hz	1.02	水平逆対称1次	0.85Hz	0.870Hz	1.02	0.815Hz	0.96	水平対称2次	1.22Hz	1.181Hz	0.97	1.112Hz	0.91
モード形状同定	ポータブル振動計測値	起振機振動実験値	比率	骨組解析値 (モデル更新後)	比率																																																		
	A	B	B/A	C	C/A																																																		
鉛直対称1次	0.64Hz	0.641Hz	1.00	0.630Hz	0.98																																																		
鉛直逆対称1次	1.22Hz	1.212Hz	0.99	1.206Hz	0.99																																																		
鉛直対称2次	1.83Hz	1.795Hz	0.98	1.789Hz	0.98																																																		
鉛直逆対称2次	2.22Hz	2.114Hz	0.95		0.00																																																		
水平対称1次	0.34Hz	—	—	0.348Hz	1.02																																																		
水平逆対称1次	0.85Hz	0.870Hz	1.02	0.815Hz	0.96																																																		
水平対称2次	1.22Hz	1.181Hz	0.97	1.112Hz	0.91																																																		
課題	<ul style="list-style-type: none"> 地震応答の場合、橋梁の水平モードの実験・解析比較による精度検証が重要となるが、常時微動の簡易計測では、水平モードの加振・同定が難しい場合がある。 																																																						

ニーズ	制振対策された標識柱の振動抑制効果の検証
内容	<ul style="list-style-type: none"> 高架道路上の標識柱は、橋梁の交通振動によって振動が誘起され、取付ボルトの緩みや部材の疲労損傷が発生することがある。 F型標識柱を対象として、小型の制振装置（TMD）を設置して、その振動抑制効果を計測した。 制振装置により、柱基部の発生応力および梁先端における加速度応答が大幅に低減したことを確認した。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<p>高速道路上の F 型標識柱をはじめ、門型標識柱等で振動計測および柱基部の応力測定が実施されている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="395 712 786 969"> </div> <div data-bbox="815 683 1382 978"> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div data-bbox="464 999 727 1025"> <p>図 2-12 F 型標識柱の制振</p> </div> <div data-bbox="963 999 1230 1025"> <p>図 2-13 F 型標識柱の固有</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="395 1055 651 1317"> </div> <div data-bbox="683 1077 1018 1335"> </div> <div data-bbox="1042 1077 1393 1335"> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>(※) ●は振動計測点</p> <p>基部鉛直-梁先端鉛直（1次モード相当） 基部橋軸-梁先端橋軸（2次モード相当）</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>図 2-14 F 型標識柱の制振対策と振動計測</p> </div> <ol style="list-style-type: none"> 1) 安藤高士, 松本茂, 迫田治行, 南條正洋, 畑中章秀, 松田良平: 高架道路上の F 型標識柱に対する制振装置の振動抑制効果について, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 1-412, pp.823-824, 2004.9 2) (財)阪神高速道路管理技術センター: 阪神高速道路における鋼橋の疲労対策【三訂版】, 第 11 章 道路標識柱基部の疲労損傷, pp. 111-117, 2012.3 3) 尾畑守夫, 森尻渉, 島崎洋治: 照明柱に対する TRMD の制振効果, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I-598, pp.1195-1196, 2002.9 4) 立石一真, 波多野保史, 多田仁志, 飯田毅, 河野健二: 走行荷重による高架橋上照明柱の振動計測とチェーンダンパーの制震効果, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I-599, pp.1197-1198, 2002.9
課題	<ul style="list-style-type: none"> 標識柱の振動は、橋梁の交通振動に誘起されるため、標識柱の設置位置によって振動性状が異なる。 供用下での振動計測となるため、非接触タイプの振動測定の確立が望まれる。

ニーズ	標識柱の損傷発見のための非接触型振動測定と評価システムの開発																																																		
内容	<ul style="list-style-type: none"> 高架道路上の標識柱の損傷発見のための点検方法は、交通規制が必要なこと、点検箇所が高所で作業が困難な場所にあること、また対象構造の数量が多いことなどの課題があり、交通規制することなしに容易にかつ安全に点検できることが要望されている。 門型標識柱および逆L型照明柱を対象として、接触型のサーボ型変位測定器、非接触型の光学式変位測定器およびビデオカメラ画像解析器の3つの測定方法で振動挙動を実測した。 非接触型の光学式およびビデオカメラによる測定方法の有効性が確認され、1次の固有振動と振幅については良好な結果が得られた。 																																																		
事例の有無	数件あり																																																		
事例紹介	<p>都市高速道路上の門型標識柱等で、交通規制無しで非接触型変位測定器による振動計測が実施されている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="391 806 829 1164"> <p>対象標識柱</p>  </div> <div data-bbox="877 806 1085 1164">  <p>(a) 測定点 (寸法: mm)</p> </div> <div data-bbox="1101 772 1356 963">  <p>(b) 光学式測定標点</p> </div> <div data-bbox="1101 985 1356 1176">  <p>(c) ビデオカメラ測定標点</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 2-15 非接触型による振動測</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="391 1232 718 1512">  <p>(a) 測定点 (寸法: mm)</p> </div> <div data-bbox="734 1254 1021 1467">  <p>(b) 光学式測定標点</p> </div> <div data-bbox="1077 1254 1356 1467">  <p>(c) ビデオカメラ測定標点</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 2-16 逆L型照明柱の測</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="391 1545 861 1803">  <p>図-7 門型標識柱の測定結果の一例</p> </div> <div data-bbox="925 1545 1356 1814"> <p>表-1 測定振動数の比較と固有振動解析結果</p> <table border="1" data-bbox="933 1568 1348 1803"> <thead> <tr> <th>測定項目</th> <th>測定法</th> <th>サーボ型変位測定器</th> <th>光学式変位測定器</th> <th>ビデオカメラ画像解析器</th> <th>骨組構造固有振動解析</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">門型標識柱</td> <td>面内1次</td> <td>3.10</td> <td>3.08</td> <td>3.05</td> <td>3.22</td> </tr> <tr> <td>2次</td> <td>8.15</td> <td>*</td> <td>*</td> <td>8.14</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">照明柱</td> <td>面外1次</td> <td>3.11</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>3.21</td> </tr> <tr> <td>2次</td> <td>6.69</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>6.43</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">照明柱</td> <td>面内1次</td> <td>1.31</td> <td>1.29</td> <td>1.29</td> <td>1.28</td> </tr> <tr> <td>2次</td> <td>4.94</td> <td>4.98</td> <td>4.92</td> <td>5.02</td> </tr> <tr> <td>面外1次</td> <td>1.41</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>1.39</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2次</td> <td>4.90</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>5.38</td> </tr> </tbody> </table> <p>注) *: 測定不可、—: 未測定</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 2-17 門型標識柱の測定</p> <p style="text-align: center;">図 2-18 振動測定結果</p> <p>1) 井舎英生, 宮脇潔, 乙黒幸年, 北田俊行, 山口隆司: 道路橋の標識柱・照明柱の損傷発見のための振動測定・解析・評価システムの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会, I-A154, pp.308-309, 2001.10</p>	測定項目	測定法	サーボ型変位測定器	光学式変位測定器	ビデオカメラ画像解析器	骨組構造固有振動解析	門型標識柱	面内1次	3.10	3.08	3.05	3.22	2次	8.15	*	*	8.14	照明柱	面外1次	3.11	—	—	3.21	2次	6.69	—	—	6.43	照明柱	面内1次	1.31	1.29	1.29	1.28	2次	4.94	4.98	4.92	5.02	面外1次	1.41	—	—	1.39		2次	4.90	—	—	5.38
測定項目	測定法	サーボ型変位測定器	光学式変位測定器	ビデオカメラ画像解析器	骨組構造固有振動解析																																														
門型標識柱	面内1次	3.10	3.08	3.05	3.22																																														
	2次	8.15	*	*	8.14																																														
照明柱	面外1次	3.11	—	—	3.21																																														
	2次	6.69	—	—	6.43																																														
照明柱	面内1次	1.31	1.29	1.29	1.28																																														
	2次	4.94	4.98	4.92	5.02																																														
	面外1次	1.41	—	—	1.39																																														
	2次	4.90	—	—	5.38																																														
課題	<ul style="list-style-type: none"> 2次以上の振動モードの測定精度の向上が必要である。 どの程度の損傷の有無の可能性が発見できるかを明らかにする必要がある。 																																																		

ニーズ	地震時の異常検知（常時モニタリング）
内容	<ul style="list-style-type: none"> 大規模な震災が発生した場合、地域の緊急輸送ネットワークをいち早く確保することは、発災直後の救急活動、救援物資輸送などの震後対応において極めて重要である。これより、地震発生時に道路構造物の被害を迅速に把握し、通行可能ルート在即座に判定するシステムの整備が求められている。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<p>NTT データでは、東京工業大学、横浜国立大学、首都高速道路株式会社と協同で、道路橋に発生した異常を、継続的かつリアルタイムに検知するモニタリングシステム（BRIMOS: BRIdge MONItoring System）を開発している。</p> <p>このシステムでは、道路橋に設置した光ファイバセンサから橋桁および橋脚の段差、間隔、振動、傾斜などのさまざまなデータを連続的かつ継続的に収集し、解析することで道路橋の異常や損傷を検知する。また、光ファイバセンサの歪データおよび監視カメラ映像情報から車両重量を推定するとともに車種判別を行い、道路橋の損傷の主要因となっている車重・車種の通行データを自動収集する。</p> <p>最近では、東京ゲートブリッジに導入されている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">図 2-19 橋梁モニタリングシステム BRIMOS の概要¹⁾</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div> <p style="text-align: center;">図 2-20 橋桁移動の監視結果 図 2-21 橋桁の固有振動監視結果 図 2-22 重量車両の交通量監視結果¹⁾</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> 長期にわたって大量のセンサから収集されるデータの蓄積と、蓄積されたデータの分析手法を確立する。 センサデータを横断的に活用し、より付加価値の高いサービスを提供する。

ニーズ	地震時の異常検知（被災度判定）
内容	<ul style="list-style-type: none"> 震後の巡視点検を迅速化するとともに発災時刻，天候，施設の設置状況などによらない施設被害の把握，観測記録に基づく定量的な被災判定を実現し，早期の交通啓開や2次災害などによる危険回避を行うとともに，効率的な震後復旧計画の立案を支援する必要がある。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<p>総合技術開発プロジェクトで行われた技術開発の1つに，「大規模地震発生直後に橋梁の被災度を迅速に把握する技術」がある。構造物の被災度の定量的な判定を行うため，構造物の固有周期が損傷によって変化する特性を利用した“被災度判定手法の開発”，および，広域に及ぶ巡視点検を迅速に行うため，“パトロールカーを用いて移動しながら被災度判定で用いる計測データを収集する技術の開発”が行われている。</p> <p>(1) 被災度判定手法の開発</p> <p>RC橋脚の損傷に伴う構造物の固有周期の変化に基づき，構造物の最大応答変位および被災度を推定する手法が提案されている。</p> <p>「ここでは，図2-23に示すように構造物を1質点系の振動モデルに簡略化する。構造物の慣性質量，剛性をそれぞれM，Kとすると，振動モデルの固有周期Tは次式で与えられる。</p> $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \quad (1.1)$ <p>ここで，地震前の健全な状態の固有周期，剛性をそれぞれT_0，K_0とし，地震後の被災した状態の固有周期，剛性をそれぞれT_d，K_dとすると，被災前後の固有周期の変化は次式で与えられる。</p> $\frac{T_d}{T_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K_d}} \quad (1.2)$ <p>ここで，構造物が図2-24に示すような弾完全塑性型の骨格曲線を有すると仮定すると，被災前の健全な状態の剛性K_0は，降伏荷重P_y，降伏変位d_yを用いて次式で与えられる。</p> $K_0 = \frac{P_y}{d_y} \quad (1.3)$ <p>被災した後の剛性K_dは，一般には構造物の履歴特性に依存するが，これを仮に最大応答変位$d_{r,max}$に対する割線剛性で与えると次式で表される。</p> $K_d = \frac{P_y}{d_{r,max}} \quad (1.4)$ <p>式(1.3)，式(1.4)を式(1.2)に代入し，応答塑性率μとして整理すると次式が得られる。</p> $\mu = \frac{d_{r,max}}{d_y} = \left(\frac{T_d}{T_0}\right)^2 \quad (1.5)$

応答塑性率は構造物の損傷度合いに密接な関係があるため、これにより構造物の被災度を推定する。」¹⁾

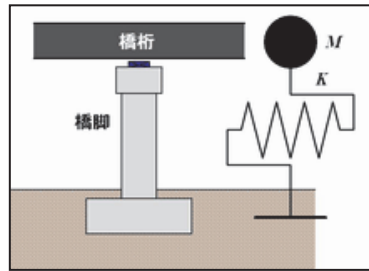


図 2-23 橋梁の 1 自由度振動系へのモデル化¹⁾

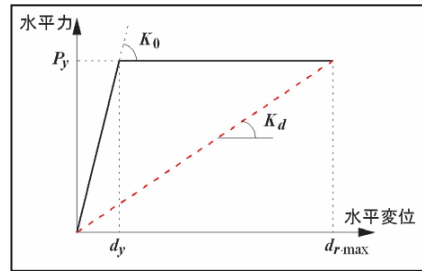


図 2-24 水平力～水平変位関係のモデル化と損傷前後の剛性¹⁾

被害の程度	小	中程度	大
応答塑性率	3以下	3～6程度	6程度以上
損傷のイメージ			
	曲げひび割れの発生	かぶりコンクリートの浮き・軽微な剥落	かぶりコンクリートの剥落 軸方向鉄筋の屈曲 帯鉄筋のゆるみ

図 2-25 RC 柱の損傷と応答塑性率の関係¹⁾

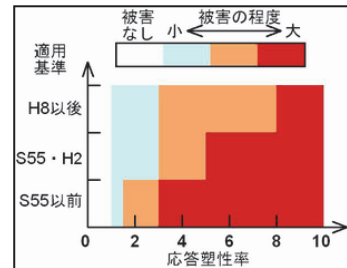


図 2-26 基部で曲げ破壊する RC 橋脚の適用基準に応じた被災度の判定基準(暫定提案)¹⁾

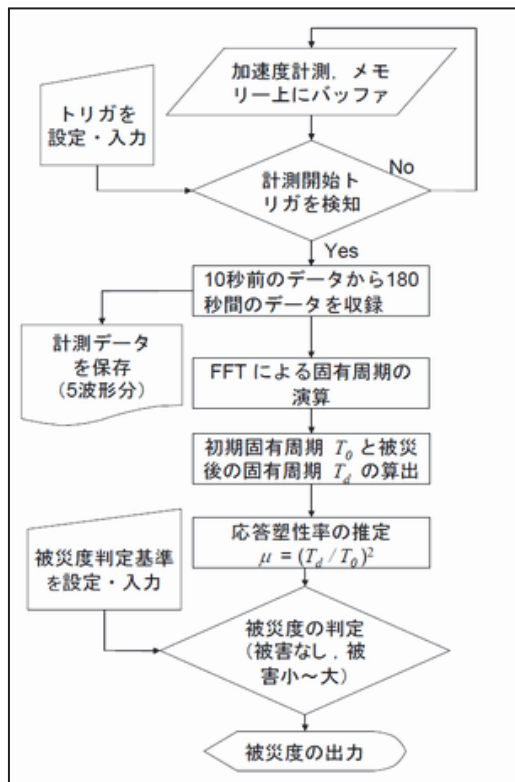


図 2-27 被災度判定フロー¹⁾

(2) パトロールカーを用いた計測データの収集技術

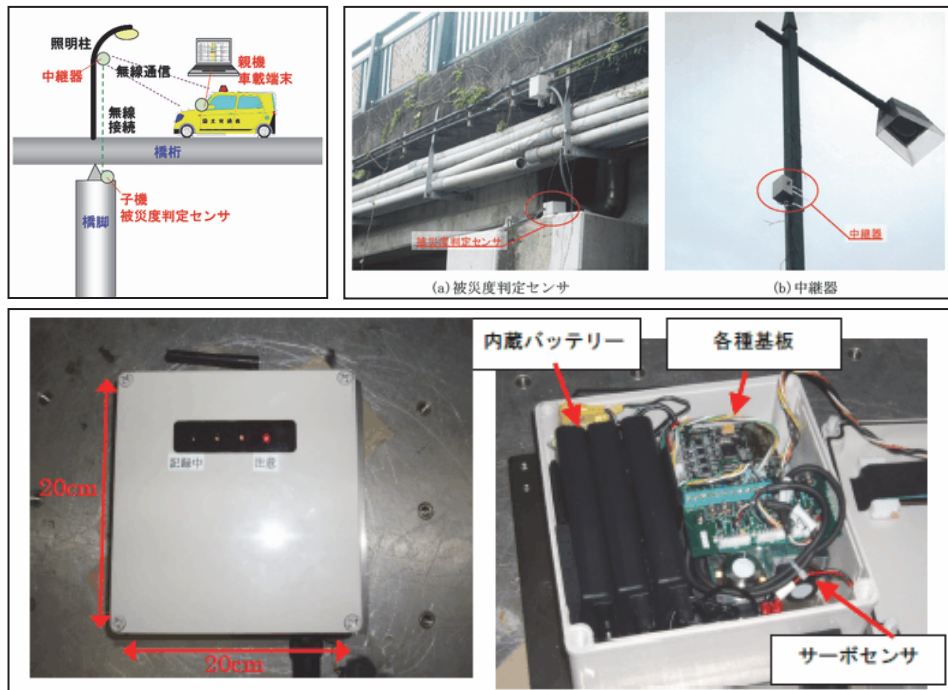
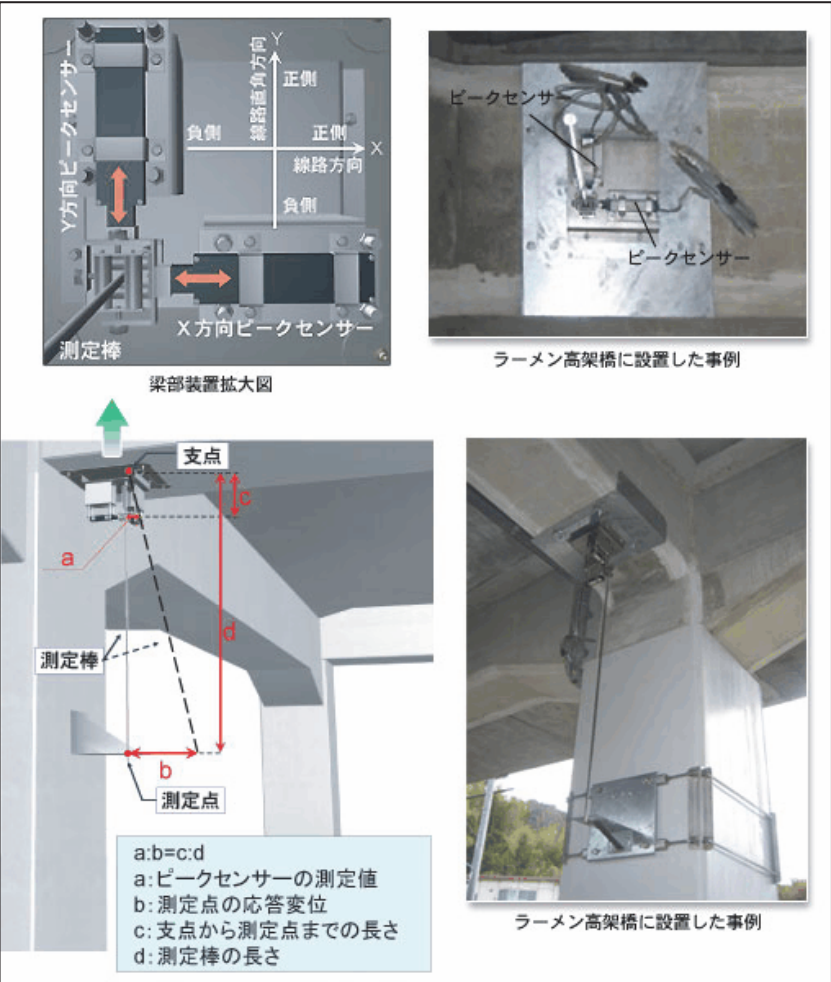


図 2-28 被災度判定システムの概要、および、被災度判定センサ¹⁾

- 1) 国土交通省：国土交通省総合技術開発プロジェクト「社会資本の管理技術の開発」総合報告書 第3章 大規模地震発生直後に橋梁の被災度を迅速に把握する技術の開発，2008.12
- 2) 運上茂樹，塚淳一：インテリジェントセンサを用いた橋梁地震被災度判定手法に関する研究，独立行政法人 土木研究所 報告 No. 213，2009.3

課題

- ・ 被災度判定が実施できるよう，重要な橋梁などを対象に計測機器の設置推進が必要である。
- ・ 実運用結果より，被災度判定の更なる精度向上を目指す必要がある。
- ・ 耐候性が必要な環境に設置するため，高いレベルでの防水，防塵処理を行う必要がある。

ニーズ	橋脚の損傷レベル検知
内容	<ul style="list-style-type: none"> 鉄道 RC ラーメン高架橋の損傷は、通常被災後の随時検査において目視により確認がなされる。しかし、近年鋼板巻き補強が施され、目視による損傷の把握が困難な RC 柱の本数が増加する傾向にある。一方、柱端部に生じる最大応答部材角と損傷レベルの関係は概ね把握されているため、最大応答部材角を効率的に測定出来れば、地震後早期に柱の損傷レベル評価が可能となり、復旧作業の効率化やダウンタイムの減少が期待できる。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<ul style="list-style-type: none"> (株)計測リサーチコンサルタント「ピークセンサー」 計測開始から現在までに生じた変位の最大値をセンサ自体が記憶し、任意の時点で取り出すことができるセンサ。無電源で最大変形を記憶することができ、測定時のみ通電する。(財)鉄道総合技術研究所と共同で、橋脚の柱端部に生じる最大応答部材角を測定し、橋脚の損傷レベルを評価する「鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システム」が開発されている。¹⁾ <div style="text-align: center;">  <p>図 2-29 損傷レベル検知センサと設置事例 ¹⁾</p> </div>

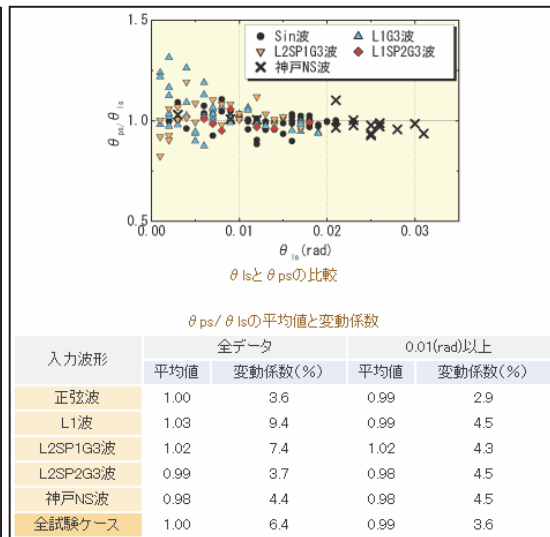
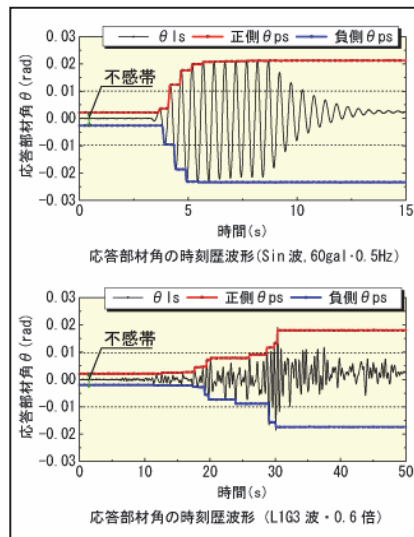
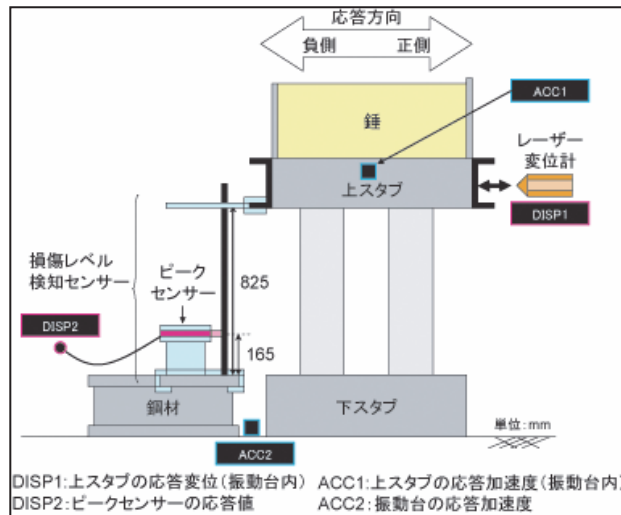
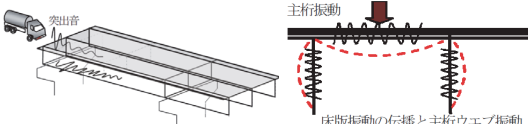

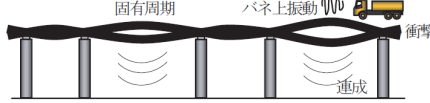


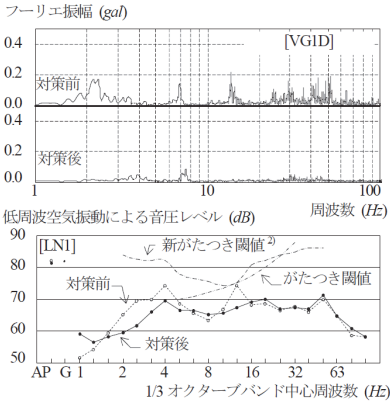
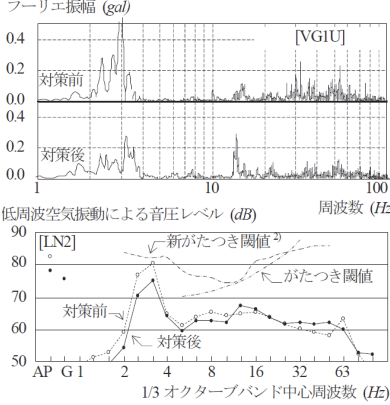
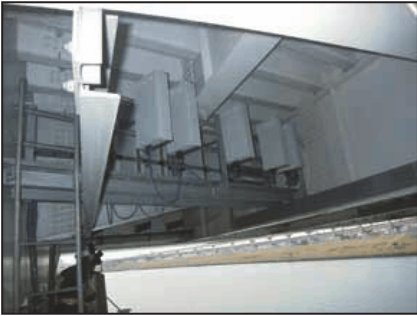
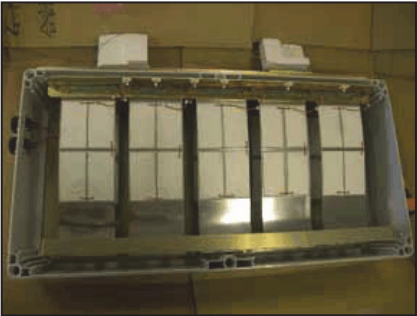
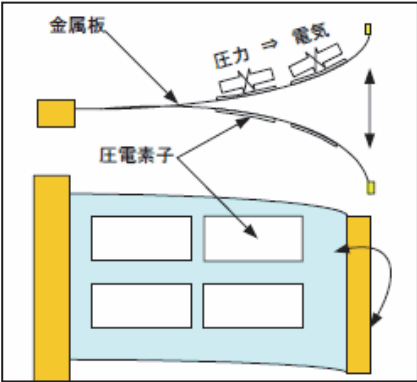


図 2-30 測定方法, ならびに, 測定結果¹⁾

- 1) 株式会社計測リサーチコンサルタント: 最新技術情報 事例 3, 入手先, http://www.krcnet.co.jp/tech/tech_peaksensor03.html, (参照 2012.08.09).
- 2) 鈴木 哲也, 仁平 達也, 曾我部 正道, 宮本 則幸: 鉄道 RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, 2007
- 3) 松本 光矢, 曾我部 正道, 谷村 幸裕, 仁平 達也: 応答部材角測定システムによる高架橋群の損傷レベル推定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, 2009

ニーズ	環境振動問題（振動，騒音，低周波音）の計測
内容	<ul style="list-style-type: none"> 橋梁の交通振動による低周波音は，車両が橋梁上を通過する際に橋梁上部工から空気振動として放射され，近接する居住地域の家具等が振動するなどの物的影響，あるいは振動感や頭痛，吐き気などの心理的・生理的影響がある。 供用下での交通振動と放射音の実態を把握するため，建設後間もない7径間連続ラーメン箱桁橋を対象に，低周波音および振動加速度の現地計測を実施した。 現地計測の結果より，支間中央での低周波音は，3～5Hzといった鋼桁の低次振動に伴う放射音が大きくなる傾向にあり，可聴域音については支点部近傍で高くなる傾向が認められた。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<p>7径間連続ラーメン箱桁橋を対象に，低周波音および振動加速度の現地計測が実施されている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="406 790 896 1086"> <p>(a) 側面図・平面図・現地計測地点</p> </div> <div data-bbox="927 763 1385 1048"> <p>一般車両走行状況</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="464 1178 844 1417"> <p>(b) 上部工標準断面図</p> </div> <div data-bbox="932 1099 1374 1249"> <p>(a) 3.15Hz</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="927 1290 1374 1440"> <p>(b) 4Hz</p> </div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">図 2-31 7径間連続ラーメン箱桁橋の低周波音測定</p> <p>1) 河田直樹，川谷充郎，金哲佑，高見洋平：実供用荷重下における橋梁交通振動とそれに起因する低周波音，振動コロキウム2011，pp.171-178，2011.9</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> 橋梁から放射される低周波音は，橋種やジョイント構造，路面凹凸，車両速度や重量等により一様ではないため，周辺音場を推定することが難しく，対策が遅れているのが現状である。

ニーズ	環境振動問題（振動，騒音，低周波音）への対策
内容	<ul style="list-style-type: none"> 伊勢湾岸自動車道の鋼橋において，開通直後から騒音・振動による周辺住民の生活環境悪化が課題となっていた。騒音振動調査やシミュレーションによって，騒音振動の発生源は鋼橋の主桁振動から発生する低周波空気振動であると判断した。 騒音振動対策として，路下制限を受けない橋梁ではセンターダンパーを設けて，路下制限を受ける橋梁では鋼桁内に制震装置（TMD）を設けて，それぞれ期待通りの振動抑制効果が得られた。 伸縮装置周辺の衝撃音対策として，桁端部の床版増厚および鋼桁コンクリート巻き立ても実施した。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<p>鋼多径間連続非合成少数I桁橋を対象に，騒音振動調査ならびにその対策後の低周波空気振動の低減効果を検証している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-32 騒音の発生イメージ</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-34 床版下面増厚と鋼桁巻き立てによる対策状況</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-33 低周波空気振動の発生イメージ</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-35 センターダンパーによる対策状況</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-36 制震装置（TMD）による対策状況</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-37 センターダンパーによる対策効果</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-38 制震装置（TMD）による対策効果</p> </div> </div> <p>1) 畔柳昌己，安藤直文：鋼桁橋から発生する低周波空気振動問題への対策，振動コロキウム 2011，pp.166-170，2011.9</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> 床版増厚および鋼桁コンクリート巻き立て対策は，伸縮装置部に車両が通過する際の衝撃に対する振動は抑制されたが，対策範囲が桁端部に限定されたことから，橋梁全体から発生する音の影響により対象家屋への効果は少なかった。

ニーズ	振動発電
内容	<ul style="list-style-type: none"> 電源確保の困難な場所の計測や構造全体の多点計測では、電池を内蔵した自立型のセンサネットワークを用いることで、配線の手間やコストをかけることなく、計測を行うことができる。しかし、電源が電池による有限な供給となるため、長期間にわたる計測を行う場合、電池交換のメンテナンス作業の手間や、意図しないバッテリー切れの発生による計測中断等が問題となる。 この限られた電源への対策として、駆動部品の省電力化やバッテリー容量の向上が行われているが、近年「振動発電」の利用検討も進められている。「振動発電」とは、橋梁や鉄塔等の構造物等で常に発生している常時微動の振動エネルギーを、微少な電力へ変換する技術であり、エネルギーハーベスティング技術の一種である。 「振動発電」により得られた電力を一定量蓄積することにより、センサネットワークを駆動させることが考えられている。また、ICの低消費電力化が進むことで、$10\mu\text{W}$程度の発電量であっても、間欠的にセンサからデータを取り込み、無線で送信することが可能になると期待されている。 振動発電の材料には、主に“圧電素子(ピエゾ素子)”，“永久磁石”，“エレクトレット”，“磁歪材料”が用いられているが、それぞれ、出力電圧、共振周波数、寸法等の特性が異なる。
事例の有無	数件あり
事例紹介	<ul style="list-style-type: none"> 首都高速道路㈱「五色桜大橋」 五色桜大橋の橋梁下層の点検通路内に、振動のエネルギーを利用して発電する「振動力発電装置」を設置。「振動力発電装置」は、日中、車両が通行することによって生じる振動により発電、バッテリーに蓄積する。蓄積された電力(1日あたり $0.24\text{Wh} \times 10$ 台)は、イルミネーションの点灯消費電力(1700Wh)の一部に利用されている。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-39 発電ユニット設置状況¹⁾</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 2-40 発電ユニット内部¹⁾</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>図 2-41 発電の原理¹⁾</p> </div>

- ・ (株)ネクスコ東日本エンジニアリング「“夢シス” 環境発電」
オムロン(株)、旭硝子(株)と共同で、高速道路の橋梁に設置することにより、車両が通過した時の振動による発電実験が行われている。小型の振動発電デバイスでは、周波数 20Hz、加速度 1G の振動入力時に $10\mu\text{W}$ の発電効果が得られる。振動発電によって得られた電力は、“夢シス” ゴム支承反力測定システム RFID データロガーの電力への利用等が期待される。

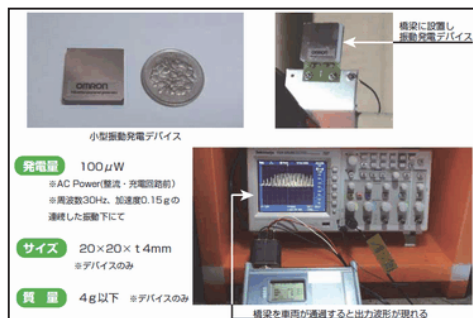


図 2-42 小型振動発電デバイスの概要図²⁾ 図 2-43 ゴム支承反力測定システムの概要図³⁾

- 1) 首都高速道路(株)：環境にやさしい発電技術を募集， pp.1-6， 入手先， http://www.tech-shutoko.jp/newtech/topbosyu/new_energie.pdf， (参照 2012.08.09).
- 2) (株)ネクスコ東日本エンジニアリング：夢シス「環境発電」リーフレット， p.1， 入手先， <http://www.e-nexco-engi.co.jp/bird-eye-view/jp/pdf/energy-harvesting.pdf>， (参照 2012.08.09).
- 3) (株)ネクスコ東日本エンジニアリング：夢シス「ゴム支承反力測定システム」リーフレット， pp.1-2， 入手先， <http://www.e-nexco-engi.co.jp/pdf/rubber.pdf>， (参照 2012.08.09).

課題

- ・ 使用側の消費電力に比べ発電量が小さく、需要と供給のバランスがとれていない。
- ・ 効率良く発電するためには、加振周波数と発電機振動系の共振周波数を一致させる必要があるため、あらかじめ、加振源の特性の把握が必要である。
- ・ 振動が規則的な場合、発電量に期待が持てるが、不規則な振動となる場合、発電量に対する信頼性が低くなってしまう。
- ・ 常時微動を加振源とする場合、大きな発電量は期待できないため、小電力で稼働するシステムの構築が必要である。

ニーズ	常時微動観測による地盤調査
内容	<ul style="list-style-type: none"> 常時微動の卓越周期から観測地点直下の地盤の固有振動周期を推定でき、地震時に特にその周期の地震波が卓越する。 常時微動のアレイ観測は、多点における観測記録の時間差から地表面を様々な方向に伝播する常時微動の周期毎の伝播速度を求め、その結果を逆解析することによって地盤構造を求める。 H/V スペクトル特性は、1地点で観測された常時微動の水平動のスペクトルを上下動のスペクトルで除したスペクトル比で、発生源の影響を受けない安定した地盤増幅特性を得ることができる。
事例の有無	多数あり
事例紹介	<p>敦賀平野の動的地盤構造の解明するために、常時微動のアレイ観測と一点三成分観測を実施されている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="411 763 874 952"> <p>図 2-44 地震動と常時微動</p> </div> <div data-bbox="948 741 1318 1003"> <p>図 2-45 常時微動の発生源</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="411 1016 820 1417"> <p>▲アレイ観測点 ○一点三成分観測点</p> <p>図 2-46 常時微動観測点</p> </div> <div data-bbox="884 1070 1374 1429"> <p>図 2-47 三成分微動のフーリエおよびH/V</p> </div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">敦賀平野の常時微動のアレイ観測</p> <ol style="list-style-type: none"> 上半文昭：常時微動による地盤・構造物の評価法，(財)鉄道総合技術研究所 RRR, Vol. 66, No. 9, pp.36-37, 2009.9 佐藤毅，青柳友丈，黒田貴紀，小嶋啓介：常時微動のアレイ観測に基づく敦賀平野の地盤構造の推定，土木学会第 59 回年次学術講演会，1-764, pp.1525-1526, 2004.9 紺野克昭，長尾毅：地震防災に向けた常時微動の活用例ー常時微動のアレイ観測を用いた表層地盤の平均S波速度の推定方法，JSCE, Vol. 86, pp.40-43, 2001.11
課題	<ul style="list-style-type: none"> 市街地ではアレイ観測の場所確保が難しく、観測の省スペース化が重要な課題である。 不整形地盤におけるアレイ観測では、地盤構造の推定精度がどの程度有しているのか不明であり、実測と数値シミュレーション等で解明する必要がある。

ニーズ	騒音・振動計測データのリアルタイム収集システム
内容	振動・騒音が規定値に達した場合に現場のパトランプ等を起動させるのみならず、モバイル通信技術を活用して、現場から遠く離れた管理事務所に設置したパトランプを同時に起動させたり、メールで担当者へ即座に異常を通知することができる。
事例の有無	あり
事例紹介	<p>■株式会社 仙台銘板 (URL : http://www.s-meiban.net/sq/vibration_noise.html)</p> <p>図 2-48 ※ 株式会社 仙台銘板 HP の掲載物</p>
課題	・電源の確保

2-1-2. 研究の事例

研究事例 1：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¹⁾

(1) 背景

鋼橋は薄板の組み合わせで構成されており、列車走行の高速化による低次モードを中心とした全体モードだけでなく、板としての振動を伴う高次モードによる振動が大きな問題となる可能性がある。このような高次モードによる局部振動は、低次モードでは励起されないような大きな局部応力を伴うことも予想され、耐久性への影響が懸念される。局部振動がどのようなメカニズムで発生するのかを把握することは、列車の高速運転への対応を考える際に極めて重要である。

本研究において計測対象とした鋼箱桁橋では、主桁ウェブの垂直補剛材下端回し溶接部に変状が発生した。この変状は列車走行に伴う振動現象が原因であると推測されたため^{2), 3)}、同一の構造ディテールを有する部位は変状の有無にかかわらず全て補強が施され、その後、不具合は報告されていない。変状の原因については、文献²⁾、³⁾において詳細に検討されている。ここでは、実橋において広範囲な計測を実施しているが、変状の発生した垂直補剛材下端部の鉛直方向応力計測から、変状の原因が列車走行時に発生する高次の面外曲げ応力によるものであること、その発生応力の大きさが列車速度に依存することを明らかとしている。しかし、その高次応力を発生させる振動モードを、桁全体が面外ねじれ変形を起こすことによるウェブの面外振動と推察しているものの、振動性状と局部応力との関係は明確でない点もあり、より詳細な検討が必要と考えられた。また、列車速度と振動の相関についても定量的な評価を行うには至っていないことから、列車の高速運転がなされる中で、さらなる検討により定量的な評価手法を確立することが望まれる。

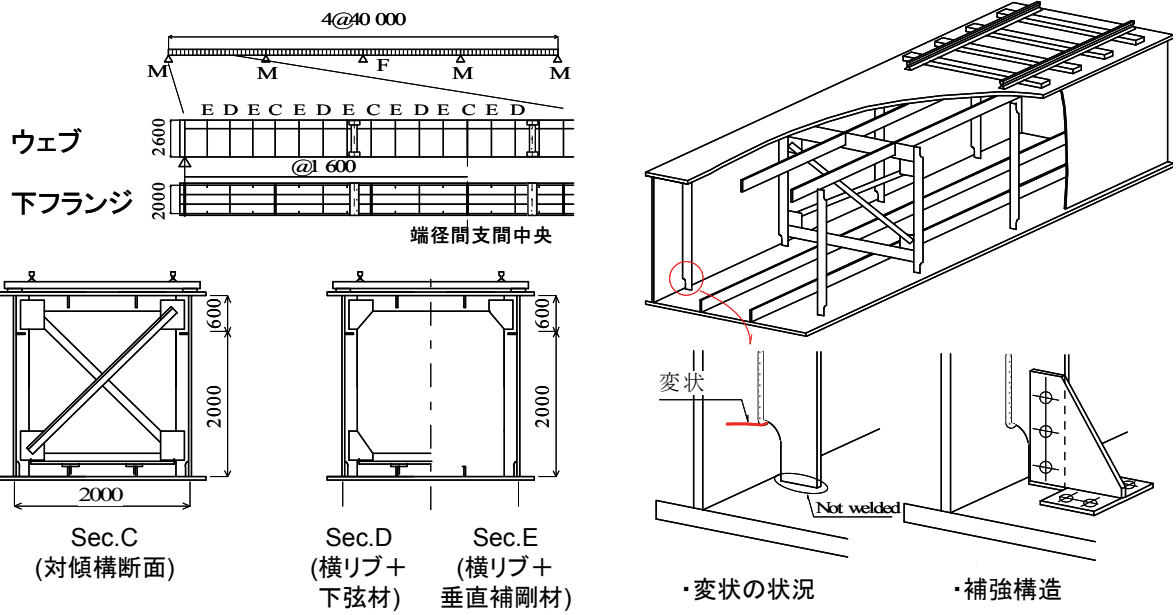
(2) 目的

本研究では、垂直補剛材下端部の応力と主桁ウェブの加速度に加えて、主桁下フランジの加速度についても詳細な計測を行い、局部応力を発生させる振動モードおよび振動と速度の相関を定量的に評価し、列車高速化が局部振動および局部応力の発生に与える影響について検討することとした。

(3) 実橋の振動計測

a) 対象橋梁

計測対象橋梁は、完成後 40 年が経過した、主桁高 2600mm、主桁ウェブ間隔 2000mm の標準的な断面を有する支間 40m の 4 径間連続鋼一主箱桁橋である (図 2-49)。主に E 断面の垂直補剛材下端の主桁ウェブに変状が発見された。そのため、同一の構造を有する全ての部位は、図 2-49 (b) に示すように T 型の補強材を主桁下フランジと主桁ウェブの間に高力ボルトで取り付ける補強工事が実施され、それ以来、不具合は報告されていない。



(a) 計測対象橋梁 (b) 変状の状況および補強構造

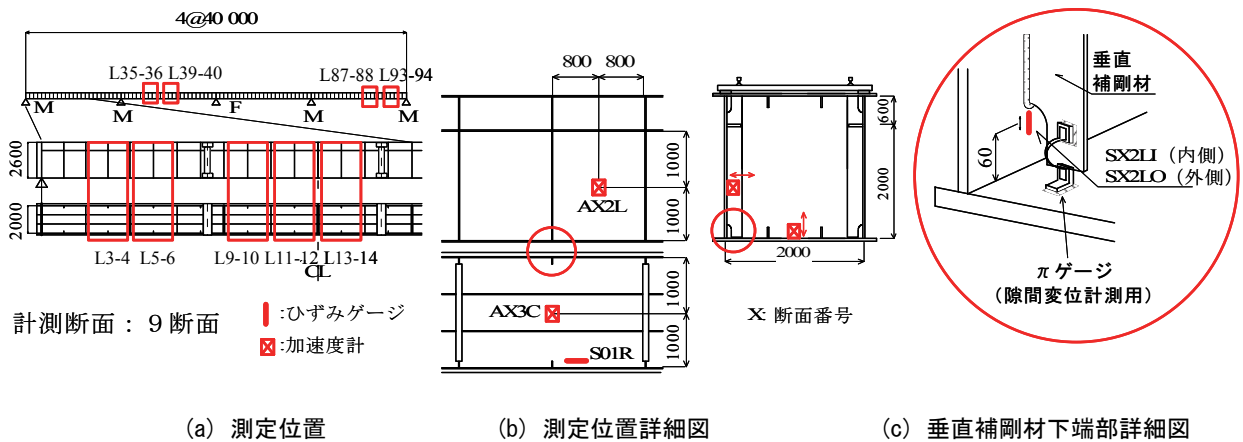
図 2-49 検討対象橋梁と変状の概要

b) 通過車両

橋梁上を通過する列車は 16 両編成で、一車両あたりの車両長さは 25.0m、重量は定員乗車で約 45t である。一車両あたり 2 台の台車を有し、台車の車軸間隔は 2.5m、台車間隔は 17.5m である。計測対象橋梁は直橋であり、通過列車は 270km/h を上限として橋梁上を一定速度で通過する。

c) 計測方法

実橋の振動現象、局部振動と局部応力、列車速度との関係を明らかにするため、加速度計およびひずみゲージを計測対象橋梁に設置した。計測位置を図 2-50 に示す。計測断面は車両退出側の端径間 5 断面、2 径間目 2 断面、車両進入側の端径間 (4 径間目) 2 断面の合計 9 断面とした。



(a) 測定位置 (b) 測定位置詳細図 (c) 垂直補剛材下端部詳細図

図2-50 検討対象橋梁の詳細図

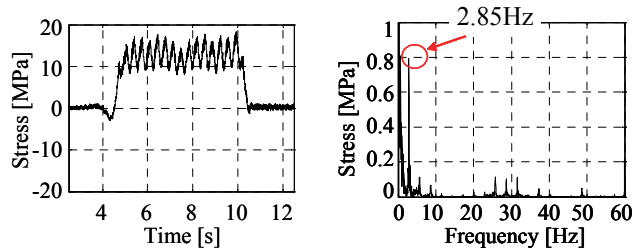
(4) 振動計測の結果

a) 主桁の振動性状

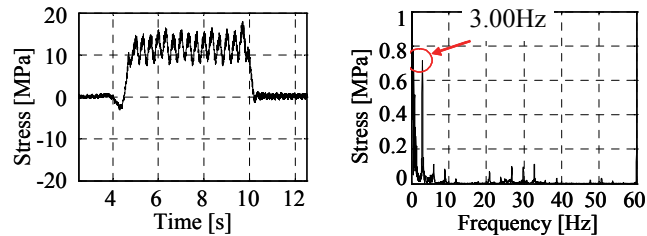
主桁応力の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルの一例を図 2-51 に示す。速度の異なる 2 列車 (列車 A および列車 B) における計測結果である。主桁下フランジの応力波形には、列車全体が橋梁に載荷されることによる大きな 1 つの波形と、規則的に並ぶ 17 個のピークが見られる。後者は規則的な車軸、台車の通過によるピークであり (列車 A : 2.85Hz, 列車 B : 3.00Hz), 「連行荷重による速度効果」⁴⁾ として知られているものである。これは台車の規則的な通過周波数が列車速度に依存するためであり、次式で表すことができる⁵⁾。

$$f_b = V/90 \text{ [Hz]} \tag{1}$$

ここで、 f_b は列車走行時における振動のスペクトルの 1 次のピークを与える周波数 [Hz], V は列車走行速度 [km/h] である。これは、列車が走行するとき軸重が桁に対して、周期的に加える強制振動の周波数となる。



(a) 列車A (258.0 km/h)



(b) 列車B (268.4 km/h)

図2-51 主桁下フランジの応力計測結果

図 2-52 は、計測した 39 列車について、周波数分解能の影響を除去するために、計測された応力の時刻歴波形の後ろにゼロパディングして、ピーク周波数を集計し、列車速度との関係を表したものである。図中には、式(1)の数値線も併記した。このときの列車速度とピーク周波数の相関係数は 0.9989 であり、計測結果と式(1)が極めて良く一致していることが確認される。

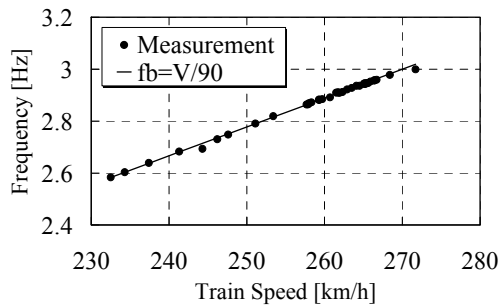


図2-52 主桁振動の卓越周波数と列車速度の関係

b) 主桁ウェブと主桁下フランジの振動性状

主桁ウェブと主桁下フランジの加速度の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルの一例を図 2-53 に示す。図 2-51 で示した速度の異なる 2 列車における断面 L11-12 の計測結果である。主桁ウェブ、主桁下フランジともに、最大 40m/s^2 程度の高周波の加速度が見られる。顕著な周波数成分は、主桁ウェブが $20\text{Hz}\sim 50\text{Hz}$ まで多くのピークを持つのにに対し、主桁下フランジは列車 A が 28.65Hz 、列車 B が 32.80Hz に顕著なピークを持っている。また、主桁ウェブ、主桁フランジともに、卓越する周波数のピークは図中の矢印で示したように等間隔に並んでいる。この間隔は、前述した「連行荷重による速度効果」の式により算出される周期外力 f_b の整数倍となっている。連行荷重は、調和波でないため、このような成分があるのは当然であるものの、高次のピークが非常に大きいため、高次モードとの共振が示唆される。 f_b の成分が確認される主桁下フランジの加速度に着目すると、列車 A の場合、局部振動の卓越周波数 28.65Hz と主桁卓越周波数 $(258.0/90=) 2.85\text{Hz}$ の比は 10.0 、列車 B の場合、局部振動の卓越周波数 32.80Hz と主桁卓越周波数 $(268.4/90=) 2.98\text{Hz}$ の比は 11.0 となる。

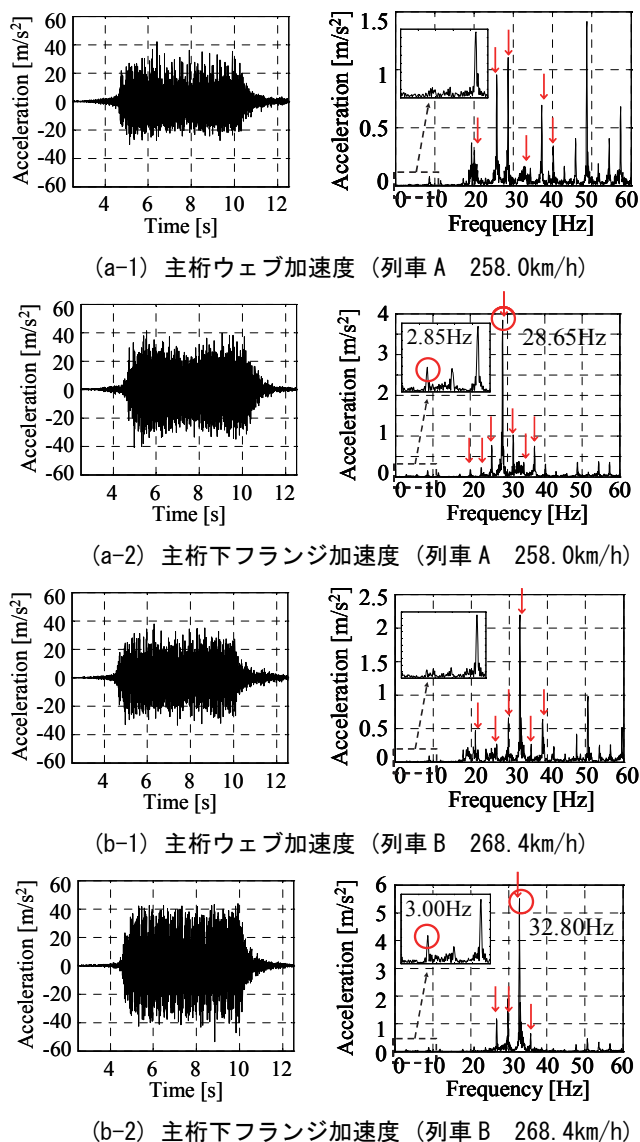


図2-53 主桁ウェブ・主桁下フランジの加速度測定結果

c) 垂直補剛材下端部ウェブの局部応力の性状

垂直補剛材下端部における主桁ウェブの局部応力の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルの一例を図 2-54 に示す。時刻歴波形から、高周波の振動波形が観察できる。卓越する周波数は列車 A が 28.65Hz、列車 B が 32.80Hz であり、図 2-53 に示した主桁下フランジのフーリエ振幅スペクトルと同じ傾向にある。図 2-55 に、表裏の応力を拡大して重ねた図を併記しているが、表裏の応力は正負反転しており、板曲げ応力が卓越していることがわかる。また、表裏の応力より曲げ応力および膜応力を求めた結果からも、曲げ応力の方が膜応力と比較して、応力振幅が大きく、高周波数成分が卓越している様子が確認される。

図 2-56 には補強材を取付けた状態にして計測した 39 列車のうち、最も大きな応力が発生した列車の応力波形を示す。図 2-54 で示した補強前の応力に比べ、高周波の応力波形は見られず、発生応力は大幅に低減しており、補強構造が変状の防止に対して効果的であることが確認できる。

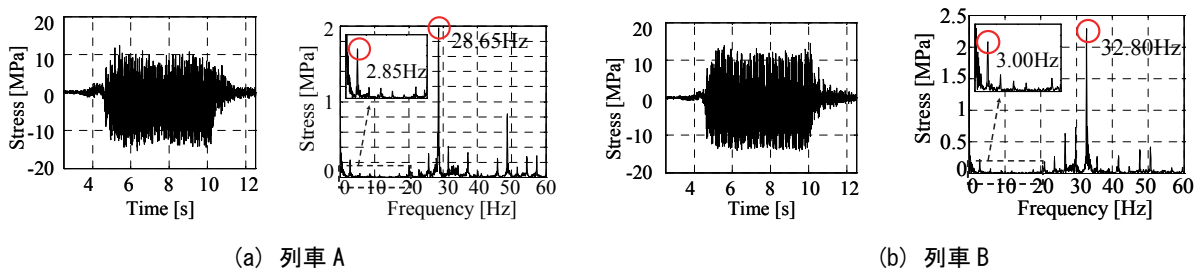


図2-54 垂直補剛材下端部における主桁ウェブの応力測定結果

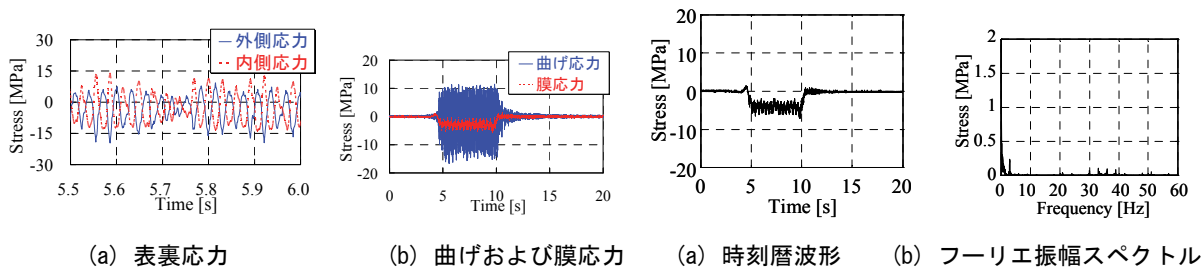


図2-55 主桁ウェブの表裏応力 (列車B 268.4km/h) 図2-56 補強後の垂直補剛材下端部主桁ウェブの応力

(5) 計測結果の分析

a) 局部振動と局部応力の関係

図 2-50 (c) に示した垂直補剛材下端部においてひずみゲージにより計測された局部応力と、図 2-50 (b) に示した主桁ウェブ・主桁下フランジの各中央部分において加速度計により計測された加速度の相関を調査することにより、局部応力の発生原因を検討する。計測した 39 列車について、主桁下フランジ、主桁ウェブの加速度、対象部の局部応力のフーリエ振幅スペクトルのピーク値を集計し、縦軸を加速度のフーリエ振幅スペクトル、横軸を応力のフーリエ振幅スペクトルとした図を図 2-57 (a), (b) に示す。主桁ウェブの加速度と対象部の局部応力の相関係数が断面 L9-10 において 0.73、断面 L11-12 において 0.49 であった。また、主桁下フランジの加速度と垂直補剛材下端応力の相関係数が断面 L9-10 において 0.98、断面 L11-12 において 0.89 であった。主桁下フランジ加速度と対象部局部応力の相関が高いことから、局部応力の発生原因は主桁下フランジ振動の影響が大きいと考えられる。

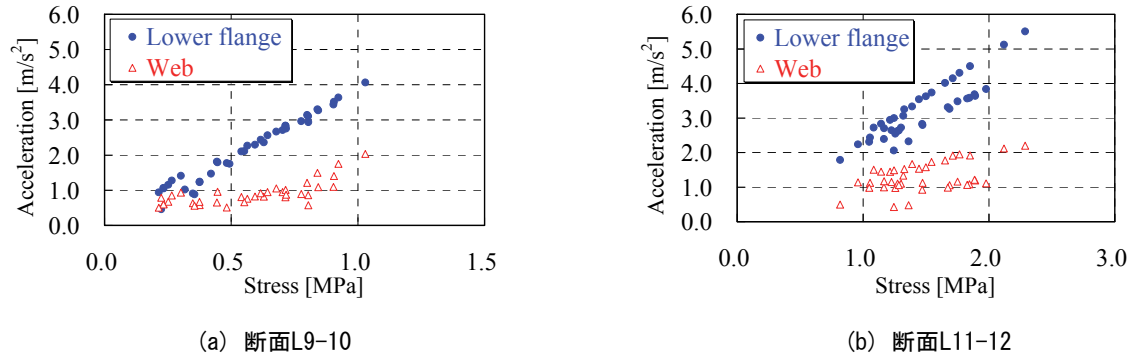
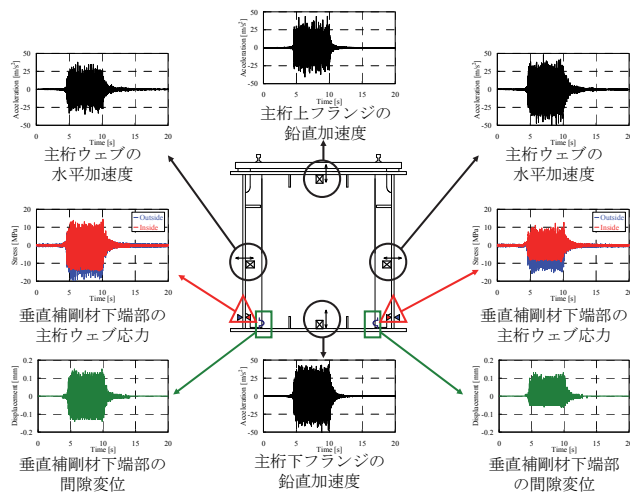
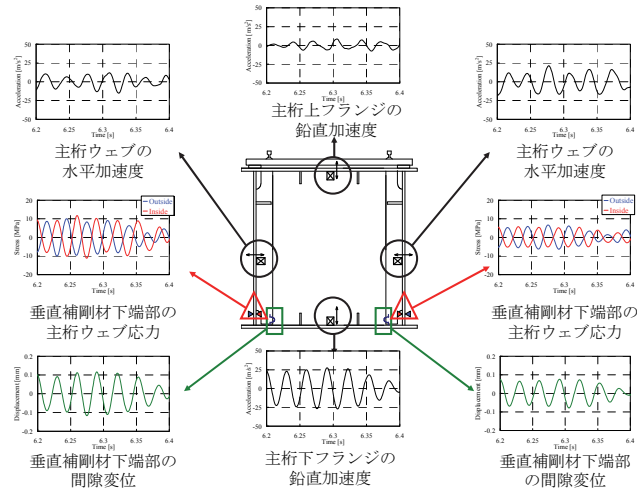


図2-57 主桁ウェブ・主桁下フランジ加速度と局部応力の相関

次に、局部応力を発生させる振動モードについて検討する。断面 L11-12 の列車 B 通過時(列車速度 268.4km/h)における主桁上下フランジ加速度，主桁左右ウェブ加速度，垂直補剛材下端の局部応力，垂直補剛材下端と主桁下フランジとの隙間変位の分布を図 2-58 (a) に示す。主桁上フランジの鉛直加速度および主桁下フランジの鉛直加速度，垂直補剛材下端部の主桁ウェブ応力，垂直補剛材下端部の隙間変位は，図 2-49 に示した E 断面における計測結果である。また，主桁ウェブ水平加速度は，図 2-49 に示した C 断面と E 断面の中央部における計測結果である。図 2-53 (b-1), (b-2) より，列車 B 通過時には，20Hz から 40Hz の振動成分が卓越することが確認される。そのため，図 2-58 (a) の振動波形に対して 20Hz から 40Hz のバンドパスフィルタを適用した後に，拡大して表示した図を図 2-58 (b) に示す。さらに，あるピーク時刻(6.256 秒)における各値を読み取り，位相を考慮して振動モード形を図にすると図 2-59 のようになる。ただし，加速度は図 2-53 (b-2) の卓越周波数である 32.80Hz において変位に換算した。図 2-59 は，垂直補剛材下端の主桁ウェブ回し溶接部を支点とし，主桁下フランジ中央を腹とする振動モードであり，この振動モードが対象とする局部応力の発生要因であることがわかった。補強後においては，垂直補剛材下端と主桁下フランジを T 型の補強材で連結するため，変状の発生した回し溶接部は主桁下フランジの振動の支点にはならなくなるので，局部応力は大幅に低減することになる。



(a) 全体波形



(b) フィルタ適用後の拡大波形

図 2-58 補強前の垂直補剛材下端部の主桁ウェブ応力，間隙変位，主桁ウェブ・上下フランジ加速度測定結果
(列車速度 268.4km/h)

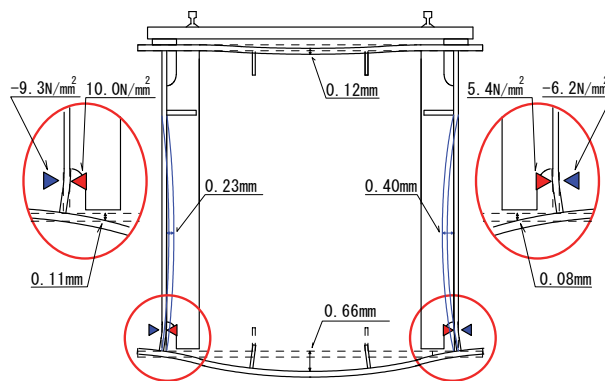


図 2-59 局部応力を発生させる振動モード形

(黒線は E 断面，青線は C 断面と E 断面の中央部)

b) 主桁の振動と局部振動の相関

連行荷重による速度効果により説明される主桁の振動性状と，主桁下フランジの局部振動の関係に着目する。図 2-60 に，主桁下フランジにおいて補強材を取付ける前に加速度計により計測した全 39 列車分の加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルを周波数-列車速度-フーリエ振幅スペクトルの関係として断面 L11-12 について図示する。

まず，図 2-60 において，各列車速度のフーリエ振幅スペクトルに対して上位 3 つのフーリエ振幅スペクトルとそのときの周波数(以下，卓越周波数)についてまとめた図を断面 L9-10 および断面 L11-12 についてそれぞれ図 2-61 (a)および図 2-61 (b)に示す。この図は，列車の各走行速度における出力加速度をフーリエ変換し，そのときのフーリエ振幅スペクトルの卓越周波数を読み取り，図示したものである。列車速度が変化すると，着目位置に入力される列車の車軸列間隔に基づく荷重列の間隔が変化する。つまり，列車速度に応じて入力荷重が変化する。図 2-61 は，様々な入力に対する出力応答のフーリエ振幅スペクトルにおける卓越周波数成分を抽出したものであるため，各断面に対する共振曲線と見なすことができる。

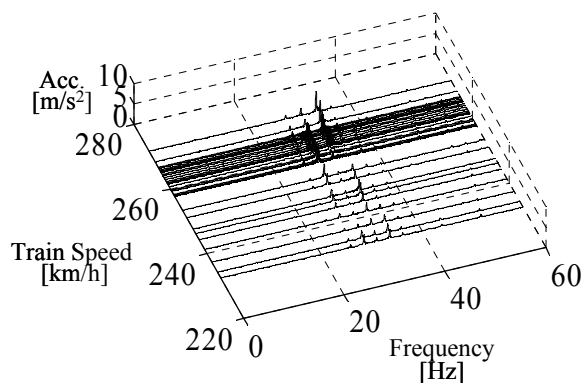
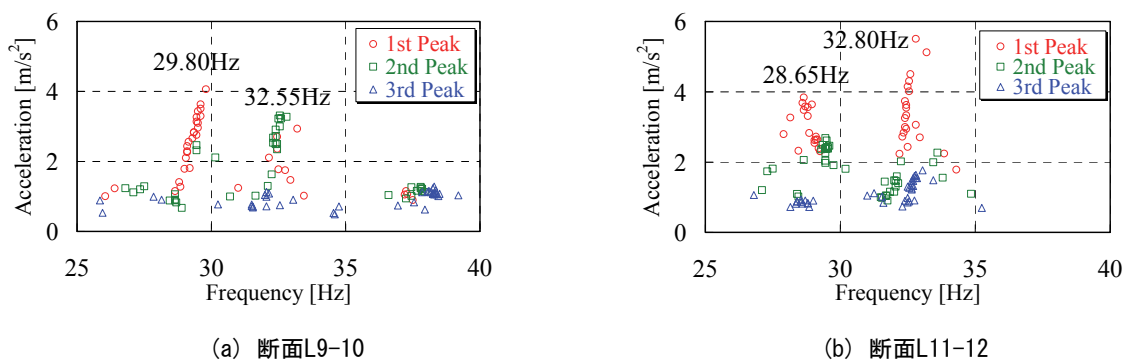


図 2-60 周波数—列車速度—フーリエ振幅スペクトルの関係



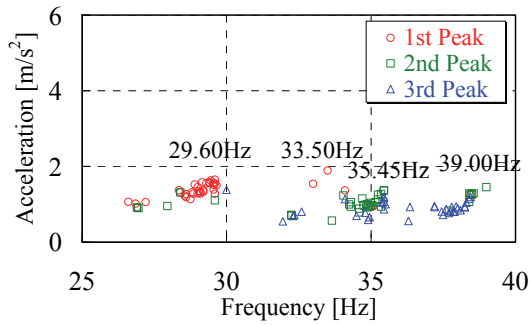
(a) 断面L9-10

(b) 断面L11-12

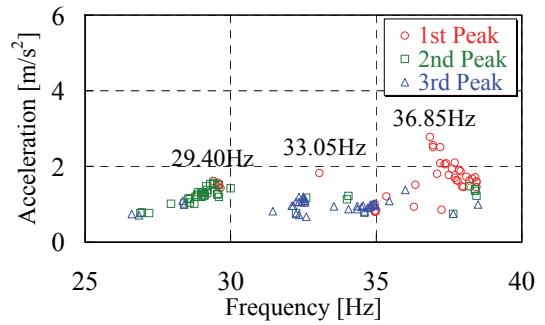
図2-61 卓越周波数とフーリエ振幅スペクトルの関係（補強前）

次に、図 2-60 と同様にして、主桁下フランジにおいて補強後に加速度計により計測した全 37 列車分の加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルを卓越周波数とフーリエ振幅スペクトルについてまとめた図を断面 L9-10 および断面 L11-12 についてそれぞれ図 2-62 (a) および図 2-62 (b) に示す。図 2-62 より、主桁下フランジの局部振動の固有振動数として、断面 L9-10 では 29.60Hz および 33.50Hz, 39.45Hz, 39.00Hz, 断面 L11-12 では 29.40Hz および 33.05Hz, 36.85Hz が同定される。補強前後の固有振動数の変化について見ると、補強前後で固有振動数の変化は大きくないものの、若干の増加傾向が見られる。また、補強後では、補強効果に起因すると思われる補強前に見られない新たな局部振動が発生していることが確認される。

さらに、図 2-60 を卓越周波数と列車速度についてまとめた図を断面 L9-10 および断面 L11-12 についてそれぞれ図 2-63 (a) および図 2-63 (b) に示す。図中、連行荷重による速度効果の式(1)により算出された強制振動 f_b の整数倍にあたる数値線を併記した。ピーク周波数は列車速度に依存し、また、周波数 30Hz 付近を中心として等間隔に分布していることがわかる。また、それらのプロットは式(1)から算出される f_b の整数倍(10・13 倍)に一致していることが確認される。

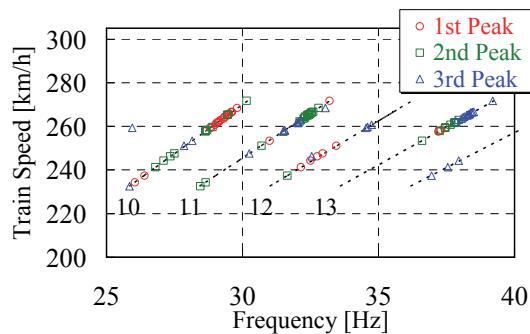


(a) 断面L9-10

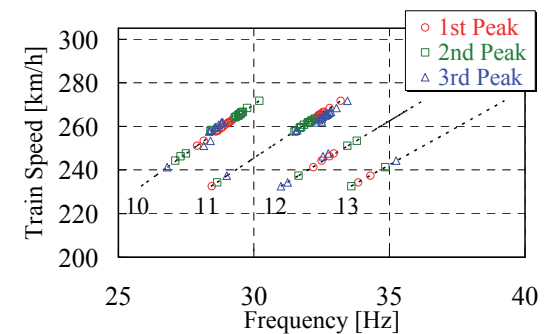


(b) 断面L11-12

図2-62 卓越周波数とフーリエ振幅スペクトルの関係 (補強後)



(a) 断面L9-10



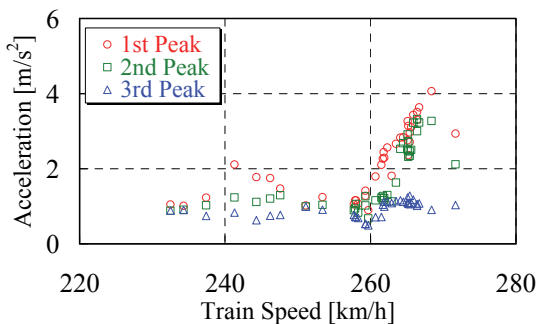
(b) 断面L11-12

図2-63 卓越周波数と列車速度の関係 (補強前)

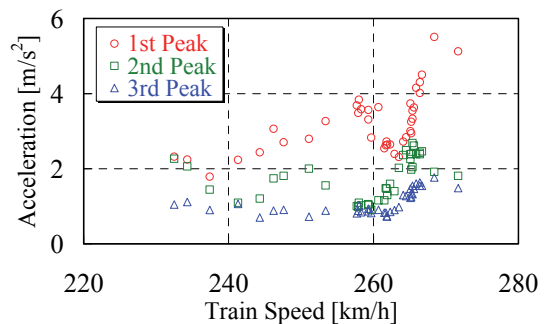
(図中の数字は、固有振動数と主桁の一次の卓越振動数の比を表す。)

c) 局部振動と列車速度の関係

図 2-60 において、列車速度と卓越周波数におけるフーリエ振幅スペクトルについてまとめた図を断面 L9-10 および断面 L11-12 についてそれぞれ図 2-64 (a) および図 2-64 (b) に示す。さらに、図 2-64 を各固有振動数に着目してまとめ直した図を断面 L9-10 および断面 L11-12 についてそれぞれ図 2-65 (a) および図 2-65 (b) に示す。それぞれの固有振動数に対して、ある速度においてフーリエ振幅スペクトルが大きくなっているが、この時の主桁下フランジの卓越周波数は主桁の振動数の整数倍となっている。以上より、主桁の強制振動数 f_0 と主桁下フランジの局部振動の固有振動数の比が整数となると、局部振動が増幅されることが明らかとなった。

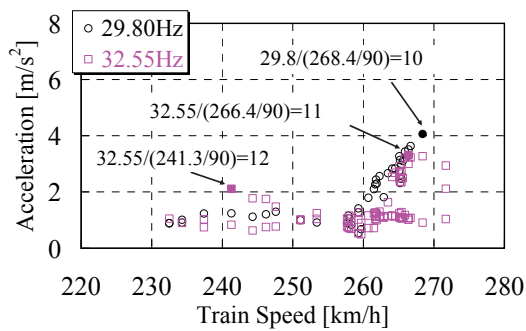


(a) 断面L9-10

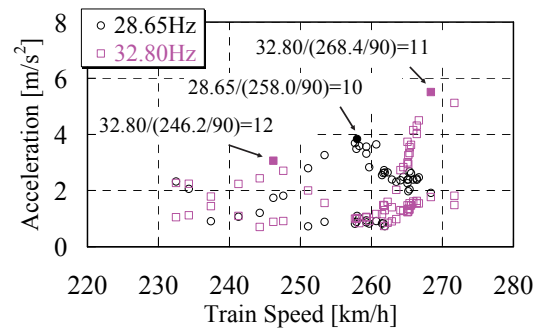


(b) 断面L11-12

図2-64 列車速度とフーリエ振幅スペクトルの関係 (補強前)



(a) 断面L9-10



(b) 断面L11-12

図2-65 列車速度とフーリエ振幅スペクトルの関係（補強前）

(6) まとめ

変状が発生した鉄道鋼箱桁橋を対象とし、補強材を一時的に撤去する前後で、接触型センサを用いた詳細な振動計測により、局部応力と局部振動、列車速度との関係を調査した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- ・ 変状の発生した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は、主桁下フランジを主体とする局部振動である。
- ・ 主桁の一次の卓越振動数 f_b は、列車速度 V に比例する ($f_b = V/90$)。主桁下フランジにはこの f_b の整数倍の局部振動が発生し、この整数倍の周波数が主桁下フランジの局部振動の固有振動数に接近すると、下フランジパネルの振動が大きくなる。T型材で主桁下フランジと垂直補剛材を連結する現行の補強方法により、振動モード形が変化し、変状を発生させた局部応力は著しく小さくなる。
- ・ 列車が高速運転した場合、主桁下フランジパネルの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 f_b がパネル固有周波数の $1/n$ (n は整数)に近づいたときのみ大きくなる。

参考文献：

- 1) 宮下剛，石井博典，藤野陽三，庄司朋宏，関雅樹：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，土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.4.
- 2) 杉本一郎：溶接鋼鉄道橋の疲労強度と延命化に関する研究，鉄道総研報告，特別23号，1997.
- 3) 杉本一郎，三木千壽，市川篤司，伊藤裕一：高速走行下での鋼鉄道箱桁の動的挙動と補剛材下端部の応力，構造工学論文集 Vol.43A, pp.1003-1012, 1997.
- 4) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文集，No.256, pp.35-47, 1976.
- 5) 原恒雄，吉岡修，神田仁，舟橋秀麿，根岸裕，藤野陽三，吉田一博：新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発，土木学会論文集，No.766/ I -68, pp.325-338, 2004.

研究事例 2：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

(1)研究背景

近年、国内外で損傷事故が相次いでいる鋼トラス橋において、信頼性が高く効率的な維持管理法の確立が急務である。本論文では振動特性変化に基づく 2 タイプの健全度評価法について検討している。一つは、車両走行時におけるトラス全体と斜材が連成振動するモードの減衰変化を利用した健全度評価法（手法 1）で、もう一つは、打撃試験による斜材の高次振動数変化を利用した健全度評価法（手法 2）である。



図 2-66 最近のトラス橋の重大損傷事例

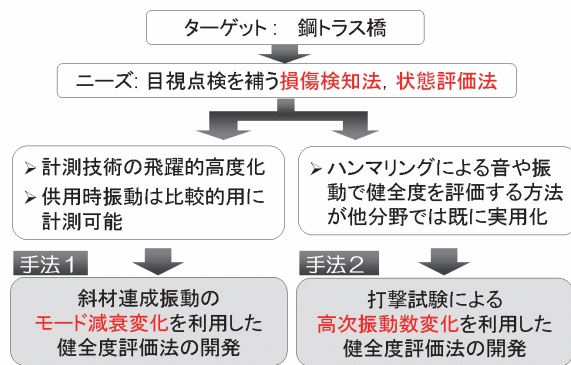


図 2-67 研究の着眼点

(2)斜材連成振動のモード減衰変化を利用した健全度評価法（手法 1）

手法 1 では、まず、鋼トラス橋の基本振動特性を理論的に把握することを目的に、実在するトラス橋を対象として各種の固有振動解析を行った。その結果、トラス橋の振動モードとして、上下弦材の振動が卓越するトラスモード、局所振動としての斜材卓越モードに加えて、それらが連成した斜材連成モードが理論的に存在することを明らかにした。

次に、理論モード解析によって得られた振動特性が実際のトラス橋に認められるかを実験的に把握することを目的として、下弦材の格点や斜材に加速度計を多数配置した多点同期の供用時振動計測を行い、計測データを ERA 解析した。その結果、トラスモード、斜材卓越モードおよび斜材連成モードの存在を実験的にも確認し、同定された固有振動数やモード形状は概ね理論どおりの振動特性であることを示した。また、トラス橋のモード減衰比については、支承摩擦減衰の影響の大きい低次トラスモードではばらつきや振幅依存性が顕著であるものの、斜材振動が連成する可能性のある高次モードでは安定した減衰同定が可能であり、振幅依存性も小さいことを明らかにした。

さらに、斜材連成モードの減衰変化に着目することで損傷した斜材を検知することが可能かについて結論を得ることを目的として、斜材下端部に部分的な破断が生じた径間を対象に当て板補強前後で荷重車走行試験を実施し、振動計測を行った。その結果、

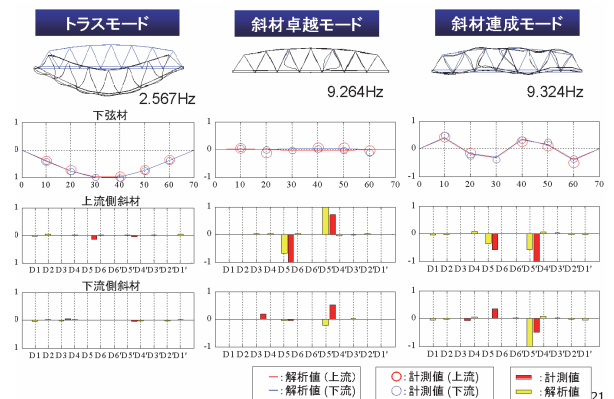


図 2-68 実験と理論のモード形状の比較

斜材連成モードの固有振動数の変化は僅かであるものの、損傷した斜材の連成により減衰比が明確に増加することを捉えることができた。これにより、斜材連成モードの減衰比に着目すれば少ない計測点で斜材の損傷を同定できる可能性を示唆した。

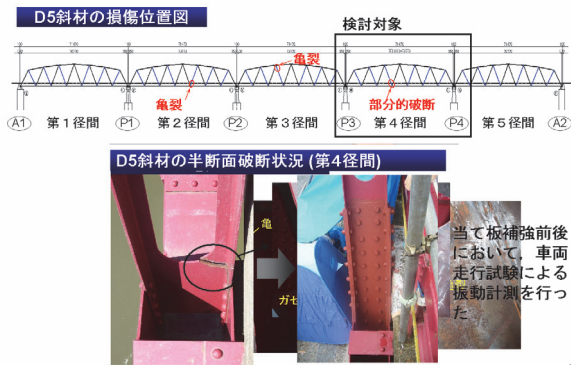
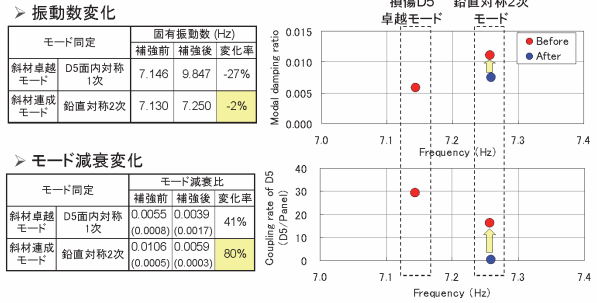


図 2-69 D 5 斜材の損傷状況と当て板補強



斜材連成モードの減衰比に着目すれば少ない計測点で斜材の損傷を検出できる可能性を示唆 (SHM手法1)

図 2-70 補強前後の振動特性変化 (3 点 ERA 結果)

(3) 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 (手法 2)

一方、手法 2 では、トラス斜材をターゲットとして、腐食程度の異なる斜材と補強前後の斜材の打撃試験計測を行い、詳細なデータ分析から高次の局部振動を利用した損傷検知の可能性について検討した。まず、斜材の局部振動特性を理論的に把握するために行った FEM 解析より、対象とした斜材のフランジ腐食では 140Hz 以上の高次ねじれモードおよび板振動モードの振動数低下が顕著であり、ガセット近傍でのフランジ亀裂では逆対称形の面内曲げモードの振動数低下が顕著となり、振動数変化には損傷形態に応じたモード依存性があることを示した。次に、実際のトラス斜材を対象に行った打撃試験データより、100Hz 以上の振動数領域において腐食が進行した斜材の固有振動数は健全な斜材の振動数に比べて一様に 2~3Hz 小さい値を示し、FEM 解析によって得られた腐食による振動数変化と大まかに整合した。これにより、リダンダンシー解析によって事前に崩壊に至らしめる重要な部材を絞った上で、打撃試験診断法を適用することの有用性を示唆した。また、路面より斜材に手が届く断面内での 3 点同期計測とすること、また、加振位置をウェブ中央とフランジこぼ面の 2 箇所を実施することで、曲げモード、ねじれモード、板振動モードの大まかな分類が可能であった。損傷による振動数変化を正確に捉える上で対応するモードをきちんと判別することは重要であり、この方法の有効性を示した。

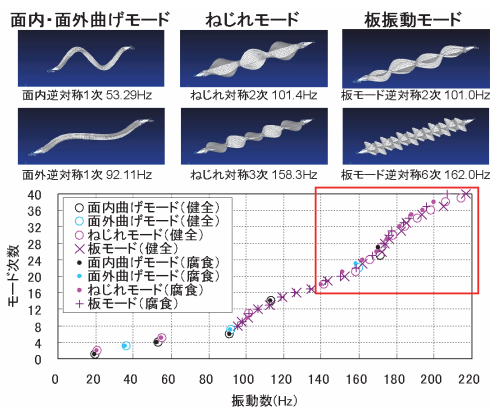


図 2-71 局所振動モード特性

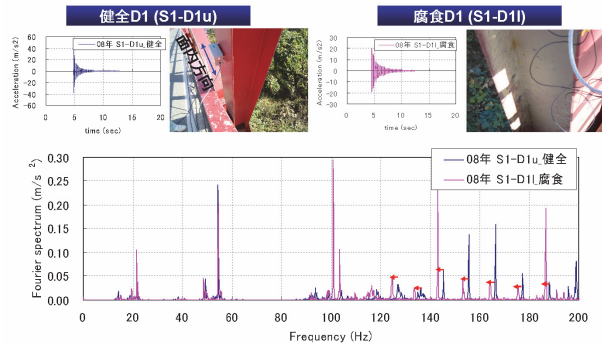
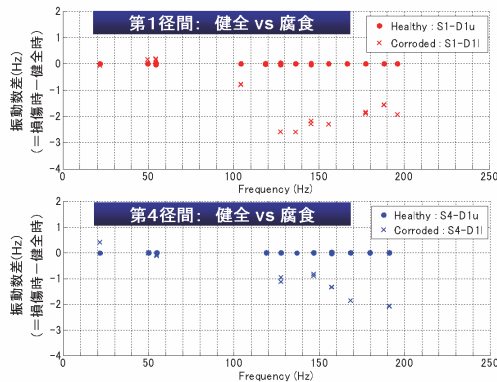


図 2-72 打撃試験結果 (第 1 径間)



同一部材ではないものの、腐食による振動数低下を捉えたことと同意

図 2-73 腐食の有無による振動数差

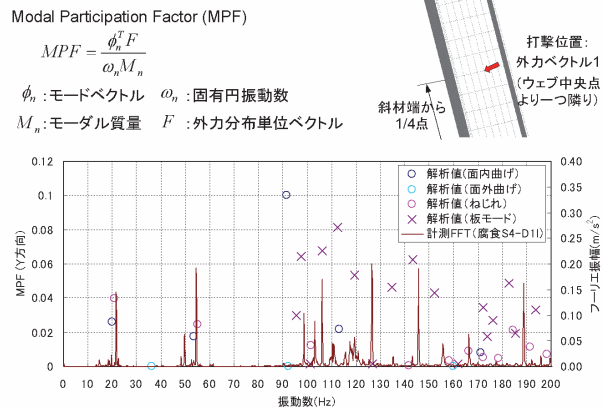
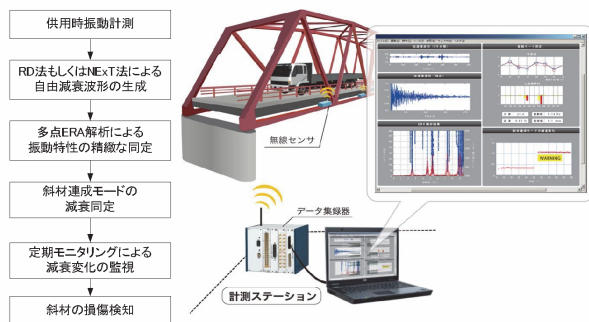


図 2-74 モードの卓越性

(4)おわりに

最後に、以上の研究成果を基に、振動特性変化に基づく構造ヘルスマニタリングのニーズとシーズを整理した上で、本研究で開発の可能性を示した、斜材連成モードの減衰変化を利用した鋼トラス橋の斜材損傷検知法（手法 1）、打撃試験による高次振動数変化を利用した鋼部材の機能性評価法（手法 2）の実用化に向けた提案を行った。重大な損傷や欠陥の内在が懸念される既設鋼橋に対し、詳細調査を行う前段階としての外査ツールとして本手法を適用することによって、客観的で定量的な健全度評価が可能となり、劣化予測の精度向上にも繋がることから橋梁の長寿命化に有効である。

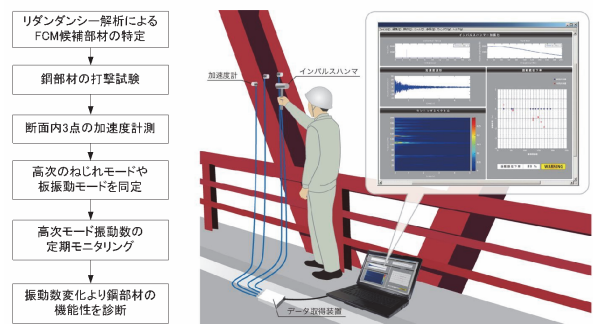
斜材連成振動のモード減衰変化を利用した鋼トラス橋の斜材損傷検知法



B/Cに優れた少ない計測点での斜材損傷検知が可能

図 2-75 斜材損傷検知法の概要

打撃試験による高次振動数変化を利用した鋼部材の機能性評価法



見た目の損傷程度を鋼部材の機能性として診断可能

図 2-76 鋼部材の機能性評価法の概要

参考文献：

- 1) 吉岡勉, 原田政彦, 山口宏樹, 伊藤信: 斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 199-208, 2008. 3.
- 2) 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 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, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 3, pp. 516-534, 2010. 8.
- 3) T. Yoshioka, H. Yamaguchi, Y. Matsumoto: Structural health monitoring of steel truss bridges based on modal damping changes in local and global modes, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, No. 167, 2010. 7.

研究事例 3：積層圧電アクチュエータによる局部加振法を用いた鋼橋の損傷評価^{1), 2)}

(1) 背景と目的

我が国で現存する橋梁の多くは高度経済成長期に建設されており、建設後数十年が経過しなんらかの損傷が起こっている可能性があると考えられる。これらの構造物に対して、その損傷を初期の段階で発見して対策を行いながら、構造物の長寿命化を目指すことが必要である。このためには目視点検以外の簡便かつ容易な方法の確立が急がれている。本研究事例では積層圧電アクチュエータを使用して、橋梁部材の局部加振を行い、測定した加速度データから振動特性の変化を解析して、損傷を同定する。

(2) 実験概要

a) 対象橋梁

実験対象橋梁は、1987年に竣工した橋長 119.4m、全幅 9.7m の 4 径間連続曲線鋼鈹桁橋である。図 2-77 のように 4 主桁と中間横桁、対傾構、下横構を有する一般的な多主桁形式である。曲線半径は $R=170\text{m}$ で 5% の縦断勾配があり、横断方向は 6% の片勾配となっている。本橋は路線切り替えに伴い撤去が予定されていた橋梁であり、撤去工事前に第 4 径間で下横構のガセットプレートの高力ボルトを緩めて模擬的な損傷を導入しながら実験を行った。

b) 実験方法

実験対象橋梁に圧電型加速度計と小型加振装置を設置する。小型加振装置は図 2-78 のような、電圧を加えると変形を生じる小型圧電素子を使ったもので、入力電圧を変化させることで任意の周波数で橋を振動させることができる。鋼部材には磁石ホルダーで固定が可能であり、総重量は 1.5kg 程度と橋梁本体に対して無視できるほど軽量である³⁾。この小型加振装置を主桁腹板中央に設置して橋梁を局部的に加振し、加速度計で加速度応答を計測する。実験橋梁の横構の接合部に程度が異なる損傷を導入し、損傷させていない健全状態と損傷ごとの加速度応答を測定する。



図 2-77 対象橋梁

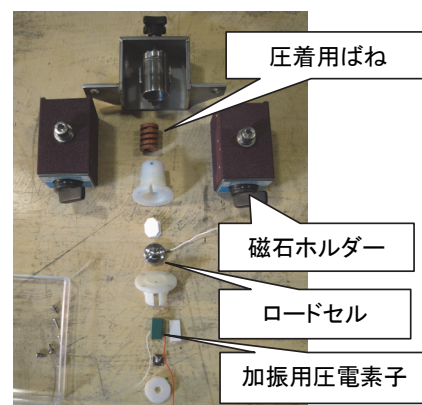


図 2-78 小型加振装置

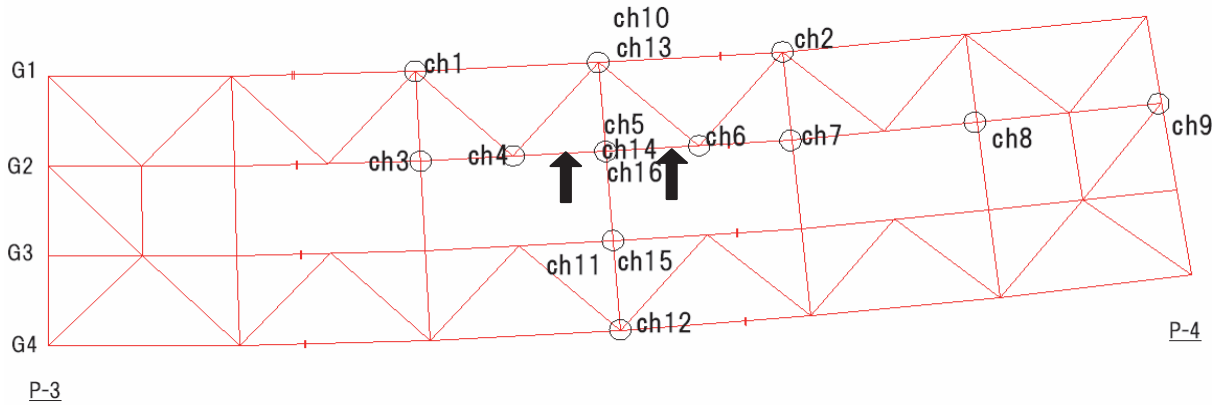


図2-79 対象径間の平面図

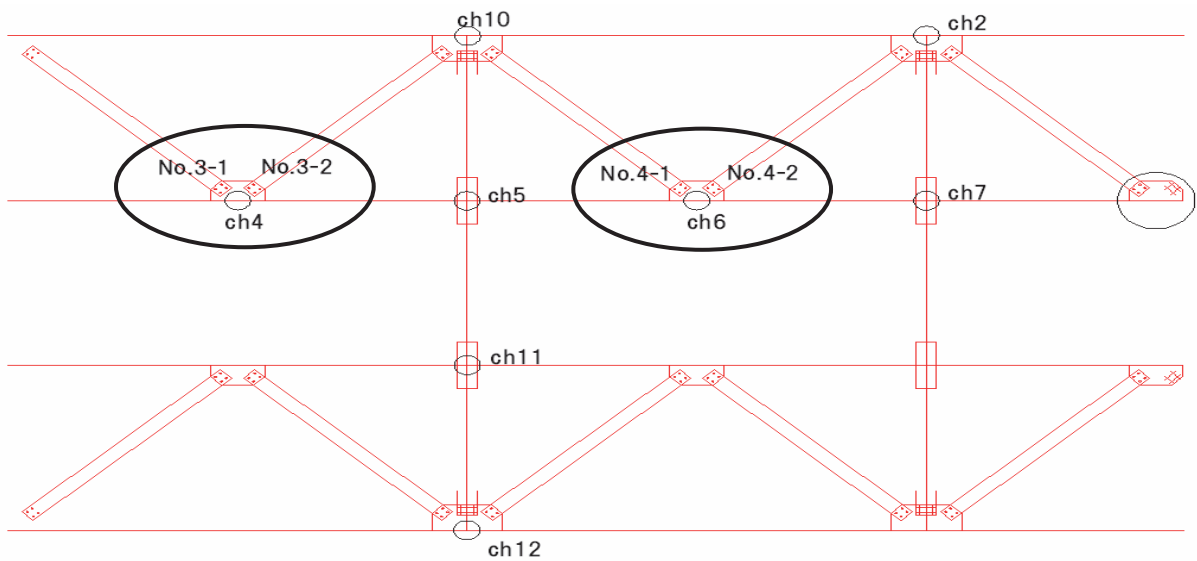


図2-80 損傷位置

実験は図 2-79 で示す第 4 径間に対して行い、加速度計を 16 箇所に設置した。加速度計番号を ch1～ch16 とし ch1～ch12 は主桁下フランジに設置し、ch13～ch15 までを横桁下フランジに近い主桁腹板に設置した。ch16 は主桁腹板に設置した。加速度計の設置方向はアクチュエータによる加振方向と同じ方向になるように設置した。加振波は sweep 波による加振を行い、加振方法は周波数が 1～650Hz まで一様に変化する sin 波(sweep 波)として、20sec の加振を行った。サンプリング周波数は 8000Hz で実験を行った。振動の発生源には積層圧電アクチュエータ(10×10×20mm) を用いた。このアクチュエータは電圧(0 から 100V)を印加することで体積が増減し、その体積の増減を利用して振動を起こしている。橋梁に振動を与えるため、アクチュエータに荷重(初期荷重)をかけて起振力を与えている。本実験では初期荷重は 30kg とした。設置位置は図 2-80 の矢印の位置である。

c) 損傷

この実験ではボルトの張力開放(弛緩)を損傷とし、本研究では損傷ケースを case1～case2 で表した。損傷位置は実験橋梁の第 4 径間の横構接合部に注目し、図 2-80 の丸で囲まれている部分のボルトを張力開放した。この接合部のボルトは合計 16 本あり、case1 は横構のうち横桁に近い 8 本のボルトを緩め、case2 は残りの 8 本のボルトを緩め合計 16 本のボルトを緩めた。

(3) 損傷評価手法

実験で得られた加速度波形から高速フーリエ変換を用いてパワースペクトル密度(PSD)を算出し、損傷状態の PSD と損傷させていないとき(健全状態)の PSD の変化率を計算する。

$$D_i = \frac{|G_i(f) - G_i^*(f)|}{1 + |G_i(f)|} \quad (1)$$

ここで、 D_i : PSD の変化率

$G_i(f)$: 健全状態の PSD

$G_i^*(f)$: 損傷状態の PSD

上式を設置加速度計数(n)と加振周波数(m)ごとに算出し、マトリクス D で表す。

$$D = \begin{matrix} \left[\begin{array}{cccc} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \Lambda & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \Lambda & D_2(f_m) \\ \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \Lambda & D_n(f_m) \end{array} \right] \\ \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{設置加速度計}(ch) \end{matrix} \quad (2)$$

\downarrow
 加振周波数

各周波数で最大のパワースペクトル密度変化(マトリクス D のそれぞれの列の最大値)を選択して、他のパワースペクトル密度変化を最大のパワースペクトル密度変化で除す。計算された結果をマトリクス C で定式化する。例えばマトリクス D で $D_3(f_1)$ の値が 1 列目の最大値であるなら、 $C_3(f_1)$ の値は 1 となり、列の他の値はより小さい値となる。同様に 2 列目は $D_2(f_2)$ 、 m 列目は $D_5(f_m)$ が最大値をとったものとする以下のようなになる。

$$C = \left[\begin{array}{ccc} C_1(f_1) = \frac{D_1(f_1)}{D_3(f_1)} & C_1(f_2) = \frac{D_1(f_2)}{D_2(f_2)} & \Lambda & C_1(f_m) = \frac{D_1(f_m)}{D_5(f_m)} \\ C_2(f_1) = \frac{D_2(f_1)}{D_3(f_1)} & C_2(f_2) = \frac{D_2(f_2)}{D_2(f_2)} & \Lambda & C_2(f_m) = \frac{D_2(f_m)}{D_5(f_m)} \\ \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ C_n(f_1) = \frac{D_n(f_1)}{D_3(f_1)} & C_n(f_2) = \frac{D_n(f_2)}{D_2(f_2)} & \Lambda & C_n(f_m) = \frac{D_n(f_m)}{D_5(f_m)} \end{array} \right] \quad (3)$$

これらのマトリクス D, C に対して、各行の総和を式(4)、式(5)のように求める。

$$SD2 = \left\{ \begin{array}{c} \sum_f D_1(f) - 2\delta \\ \sum_f D_2(f) - 2\delta \\ M \\ \sum_f D_n(f) - 2\delta \end{array} \right\} \quad (4)$$

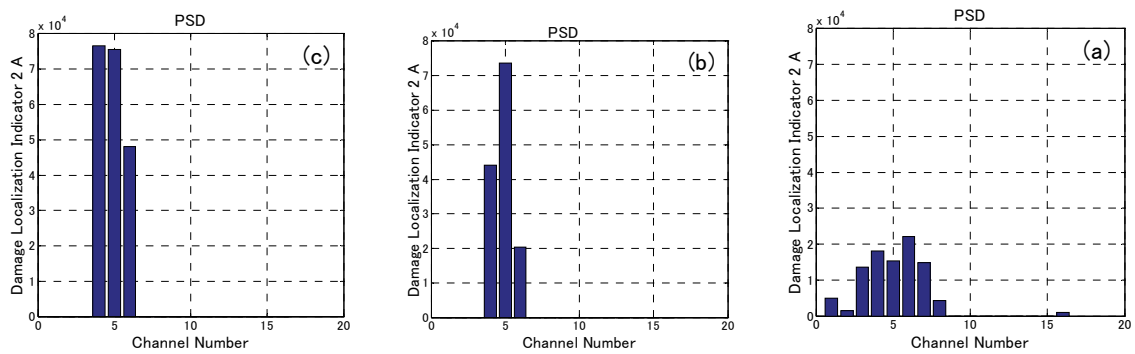
$$SC2 = \left\{ \begin{array}{c} \sum_f C_1(f) - 2\lambda \\ \sum_f C_2(f) - 2\lambda \\ M \\ \sum_f C_n(f) - 2\lambda \end{array} \right\} \quad (5)$$

ここで、 δ および λ はそれぞれ D_i , C_i の標準偏差で、測定結果に含まれるノイズなどの影響を除去するためのデータ処理上の工夫である。この SD2 と SC2 の各要素の積が式(6)の損傷位置指数であり、損傷位置指数が大きい加速度計位置周辺に損傷がある可能性が高いことを表している。

$$DI2 = \left\{ \begin{array}{c} SD2(1) \times SC2(1) \\ SD2(2) \times SC2(2) \\ M \\ SD2(n) \times SC2(n) \end{array} \right\} \quad (6)$$

(4) 実験結果

実験結果を図 2-81 に示す。縦軸は損傷位置指数、横軸は加速度計の ch 番号（加速度計の設置位置）を表わしており値が大きいところに損傷がある可能性が高いと判断する。



(a) case 0とcase 1の比較

(b) case 0とcase 2の比較

(c) case 1とcase 2の比較

図2-81 損傷位置指数

case0 と case1 を比較したグラフ (a) では損傷を加えた主桁に設置した加速度計 ch3～ch6 の損傷位置指数の値が大きいことがわかる。特に損傷を加えた位置に近い ch4, ch6 の損傷位置指数の値が大きくなっている。したがって (a) からは ch4, ch6 周辺に損傷がある可能性が高いと判断でき、損傷も ch4, ch6 周辺に加えているため損傷位置の同定ができていると判断できる。case0 と case2 を比較した (b) では ch4～ch6 の損傷位置指数の値がほかの加速度計よりも大きいことがわかり、(b) からは ch4～ch6 周辺に損傷があると評価できる。実際の損傷は ch4, ch6 に加えているので損傷の同定ができていると言える。また (a) と (b) を比較すると、(a) より (b) の方が損傷位置指数の値が大きいので、(a) と (b) の比較から case2 の損傷の方が大きいと評価できる。実際の損傷は case2 の方が大きな損傷を加えているので損傷の大小の評価ができていると判断できる。次に case1 の損傷状態を基準として case2 の損傷状態の評価を行った。(c) から ch4～ch6 の損傷位置指数の値が大きく、case1 から case2 の損傷の変化で ch4～ch6 に損傷の影響があると評価できる。

(5) まとめ

今回の実験結果から実橋における微小損傷の評価、および損傷の大小の比較を検討できた。

圧電アクチュエータで鋼構造部材を加振し、得られた応答加速度を用いて損傷の評価を行うという本手法は、実橋梁のような鋼構造物の損傷検出に有効であると考えられる。

参考文献：

- 1) 坪川良太, 大島俊之, 三上修一, 宮森保紀, 山崎智之：圧電アクチュエータの局部加振による実橋梁の微小欠陥検出に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, vol. 65, I-453, pp.905-906, 2010.
- 2) 坪川良太, 大島俊之, 山崎智之, 三上修一, 宮森保紀：積層圧電アクチュエータによる局部加振法を用いた実橋梁の損傷評価に関する研究, 橋梁振動コロキウム 2011 論文集, pp.51-55, 2011.
- 3) Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Yasunouri Miyamori, Tomoyuki Yamazaki and Sheriff Beskhyroum: Damage identification of civil infrastructure with array sensing under local excitation, SHMII-4, Zurich, Switzerland, 2009.

2-2. 振動を利用した橋梁健全度評価の海外事例

海外における橋梁健全度評価事例を体系的にまとめられているロスアラモス報告書を抄訳して整理した。以下に ABSTRACT のみ示す。全文の抄訳は巻末資料に示す。

A SUMMARY REVIEW OF VIBRATION-BASED DAMAGE IDENTIFICATION METHODS

Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, and Michael B. Prime

Engineering Analysis Group

Los Alamos National Laboratory

Los Alamos, NM

ABSTRACT

【抄訳】

この論文では、計測した振動応答の変化を調べることによって、構造系と力学系における損傷の特徴を明らかにし、発生位置を検出する手法の概要を説明する。振動を利用した損傷同定の研究は、過去数年間で急速に拡大している。この技術の背後にある基本的な考え方は、「モードパラメータ(特に周波数、モード形状、モード減衰)は、構造体の物理特性(質量、減衰、剛性)の関数である」ということである。つまり、物理特性の変化により、モード特性に検出可能な変化が生じるのである。この技術を発展させるための方法が発表されており、モデルベースと非モデルベースによる比較や、線形と非線形の比較によって与えられる損傷検出のレベル等、様々な基準に従って分類されている。それらの実施方法と正確さに関する難しさを含めて、一般論として説明する。また、実際のエンジニアリングシステムにおける技術の歴史と今後の計画の要約を示す。最後に、振動を利用した損傷同定の分野における、今後の研究のための重要な課題について考察する。

2-3. 各種センサの特徴整理

計測技術名	サーボ型加速度計
技術概要	目標値に追従するように位置制御するサーボ機構を利用した加速度計
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高精度 ・高分解能 ・高感度 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・衝撃に弱い ・静的成分を含めて低周波数成分も検知可能 ・高周波領域では数百 Hz 以下に限られる ・高コスト <p>センサそのものは1軸当たり10万円から30万円程度であるが、電源装置、増幅器、シグナルコンディショナなどが必要であり、これらがセンサと同程度かそれ以上の価格であることも多い。</p>
計測原理	<p>物体の位置を目標値に追従するように自動制御するサーボ機構を利用した加速度計である。錘が慣性力を受けて動くときサーボ機構を通じて変位を抑えようと制御する。この制御に必要な力を加速度として検出する。サーボ機構に流れる電流が制御力に比例するとして電流計測により、あるいはそれを電圧に変換して、慣性力すなわち加速度を検知している。</p> <p>サーボ型速度計も同様の仕組みである。加速度出力を直接検出するのではなく、アナログ微分回路が組み込まれており、その入力、出力側でそれぞれ速度、加速度が得られる。</p>
適用事例	<p>サーボ型加速度計は高精度、高感度という特徴から、地震計測、橋梁振動計測に従来から広く利用されている。長大橋の地震観測（横浜ベイブリッジ、鶴見つばさ橋、レインボーブリッジ）^{1,2)}、動態観測（白鳥大橋）³⁾に利用されている他、短期間の交通振動調査⁴⁾や常時微動計測をはじめ、橋梁振動の調査に利用されている例が多い。</p>
参考文献	<ol style="list-style-type: none"> 1) Siringoringo, D., Fujino, Y. : Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, Structural Control and Health Monitoring, 13(1), pp226-244. 2006. 2) Siringoringo, D., Fujino, Y.; System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37, pp361-386, 2008 3) 長山智則, 阿部雅人, 藤野陽三, 池田憲二 : 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, 土木学会論文集, No.745, pp.155-169, 2003. 4) Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., Hernandez, Jr. J. Y., and Seki, M.; Vibration of reinforced concrete viaducts under high-speed train passage: measurement and prediction including train-viaduct interaction 6(5), pp 621-633. 2010.
今後の展望	<p>近年ではMEMS型のサーボ型加速度計が開発されるなど、小型化、低価格化、省電力化が進んでいる。これまでは高コストが大きな課題であったものの、今後はより利用がしやすくなり広く普及する事も考えられる。一方で、MEMS型加速度計の精度向上も著しいため、用途によって使い分けが必要となる。</p>

計測技術名	無線センサネットワーク
技術概要	MEMS 型加速度計等の小型で安価なセンサと無線通信、信号処理、小型バッテリーを備えた計測ノードから構成されるネットワーク
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 安価 ・ 配線が不要。特に車線をまたぐセンサ配置の場合や、長大構造物を対象とする場合に有用 ・ 多点計測が容易 ・ データ処理も組み込む事が可能 ・ 加速度、歪、温度等、複数の物理量を計測し、総合的に扱うことが可能 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 信頼性（計測精度、長期安定性、通信安定性）は必ずしも高くない ・ バッテリ切れの恐れがある ・ パーツコストは低いものの、信頼性を高めるためのソフト・ハード両面でのカスタマイズを行うとシステムコストが高くなる恐れがある
計測原理	<p>無線センサノードによって採用するセンサは異なるが、MEMS 型加速度計、温度計が搭載されることが多い。</p> <p>MEMS は、電子回路と機械要素を 1 つの基板上に集積したデバイスであり、センサを小型化、省電力化、低価格化できると期待される。代表的な MEMS 型加速度計は、内部に錘とバネを持ち、バネの変形量を加速度として検知している。変形量検知の方式には、ひずみゲージの代わりにピエゾ素子を利用するピエゾ抵抗方式や、錘と固定部の間の静電容量が変形量に応じて変わることを利用した静電容量検出方式などがある。ノイズレベルが $200 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度のものであれば 1 個あたり数百円のものも多く販売されている。ノイズレベルに有効周波数帯域幅の平方根を乗ずれば、ノイズ RMS 値に換算できる。例えば 100Hz の周波数帯域の場合、2mg ($=200 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{100\text{Hz}}$) 程度の RMS 値となる。これは橋梁モニタリング一般には十分とはいえないレベルである。1 チャンネル当たりコストは高くなるが (1 万円以上)、$10 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度のノイズレベル (0.1mgRMS ノイズ相当) の加速度計も市販されている。なお、サーボ型加速度計は $10\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度 ($0.1 \mu\text{gRMS}$ ノイズ相当) のノイズレベルである。</p> <p>近年では多くのスマートフォンにも MEMS 型加速度計が搭載されており、これを利用して簡易に振動計測を行うことも試みられているが、上述の通りノイズレベルが比較的高く、橋梁振動計測に利用できるケースは限られている。さらに、スマートフォンは計測用に設計されたシステムではなく、一定間隔のサンプリングなど、サンプリングタイミングの管理が難しい。有効な周波数帯域は限られるなどの制約が生じるため、計測や分析に注意が必要である。</p> <p>MEMS 型加速度計を CPU、無線チップ、メモリ、バッテリーと組み合わせた無線センサネットワークは実装するプログラム次第で様々な役割を担うことができ、また機能の</p>

	<p>拡張ができる。例えば、無線通信を利用することで、数マイクロから数十マイクロ秒の精度で同期をとる事ができる。複数の中間ノードを経由したマルチホップ通信も実現可能である。</p>
適用事例	<p>無線センサネットワークを利用して、米国サンフランシスコのゴールデン・ゲート橋の振動計測を数カ月にわたって行った事例が報告されている¹⁾。計 64 ノードを主径間および主塔に設置し、加速度計測をしている。データ収集に 12 時間を要するなど問題点も指摘されている。</p> <p>韓国 Jindo 島にかかる斜張橋 Jindo 橋に無線センサ 100 ノード以上を設置し、1 年以上に渡り遠隔モニタリングを行った事例も報告されている^{2,3)}。ソーラーパネルや小型風力発電を利用し、長期に渡った間欠的なモニタリングを実現している。斜張橋ケーブルに設置したノードは、計測加速度をデータ処理することでケーブル張力に変換した上で、結果を転送する仕組みとなっている。無線センサネットワークを単なる計測機器として利用するのではなく、データ処理・判断を含めたモニタリングシステムとしての工夫が幾つか見られる。</p> <p>国内では、耐震補強前後でアーチ橋の振動特性を密に推定した事例や、レインボーブリッジの桁振動を密に計測した事例が報告されている^{4,5)}。</p>
参考文献	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fennes, G., Glaser, S., and Turon, M. : Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks, Proc. of 6th International Conference on Information Processing in Sensor networks, pp. 254-263, 2007. 2) Jang, S.A., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K.A., Rice, J.A., Sim, S.H., Jung, H.J., Yun, C.B., Spencer, Jr., B.F., and Agha, G., "Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation," Journal of Smart Structures and Systems, 6(5), 439-459 (2010). 3) Cho S., Jo, H., Jang, S.A., Park, J., Jung, H.J., Yun, C.B., Spencer, Jr., B.F., and Seo, J.W., "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses," Journal of Smart Structures and Systems, 6(5), 461-480 (2010). 4) Nagayama, T, Urushima, A., Miyashita, T., Yoshioka, T., and Ieiri, M. "Dense vibration measurement of an arch bridge before and after its seismic retrofit using wireless smart sensors," Proc. SPIE 8345, 834536, San Diego, USA 2012. 5) Nagayama, T., Moinzadeh, P., Mechitov, K., Ushita, M., Makihata, N., Ieiri, M., Agha, G., Spencer, Jr., B. F., Fujino, Y., and Seo, J.-W.: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring. Smart Structures and Systems, Int'l Journal Vol. 6 No. 5, 2010
今後の展望	<p>一般に利用されている無線センサネットワークはそのほとんどが温度計測などの静的計測であり、橋梁加速度応答などの動的計測の利用を想定しているものは極めて少ない。サンプリングタイミングの制御が厳密でない、データ転送に長時間を要するなどの問題があり、無線センサネットワークを利用した橋梁振動モニタリングが本格的に普及するには未だ時間を要すると考えられる。一方で静的歪モニタリングや応答最大値のモニタリングなど、現在の無線センサネットワークの性能に見合う利用であれば既に応用も幾つか見られ、今後も普及が進むと考えられる。</p>

計測技術名	マイクロ波干渉計を利用した多点変位計測
技術概要	ステップ周波数連続波レーダーを利用して対象物までの距離を計測し、差分鑑賞により対象物の変位を推定するもので、多数のターゲットの変位を非接触で同時に計測することができる。
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非接触遠隔多点計測（数十メートルまでは実績あり。数百メートルでも計測できる可能性あり） ・変位が計測可能 ・必ずしもターゲットを必要としない <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・センサヘッドからの距離が同じターゲットは互いに区別がつかない ・計測値のドリフトが小さくない
計測原理	ステップ周波数連続波 (Stepped-frequency Continuous Wave) レーダーを利用して、対象物までの距離を計測し、差分干渉により対象物の変位を推定するものである。対象物までの距離が異なれば、複数のターゲットを同時に捉え、変位計測できる。長期的な計測信号の安定性など検証すべき点も多いが、RMS 値で 0.01mm 程度の測定誤差で変位計測できる、非接触遠隔計測で必ずしもターゲットを必要としない、複数対象物の変位を同時に捉えられる、対象物までの距離数十メートル程度までは計測実績がある、など橋梁計測にとって有利な特徴を備えている。一方で、センサヘッドからの距離が互いに近いターゲットが相互に影響し合うなど、計測原理固有の注意点もある。
適用事例	斜張橋の複数ケーブルの振動を一度に捉えたり、ニューヨークのマンハッタン橋の列車通過時の変位応答を空間的に極めて密に計測したりする事例 ¹⁾ が報告されている。
参考文献	6) Mayer, L., Yanev, B, Olson, L. D., and Smyth, A.: Monitoring of the Manhattan Bridge for Vertical and Torsional Performance with GPS and Interferometric Radar Systems, Proceedings of Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010.
今後の展望	<p>遠隔で変位計測が可能のため、変位管理が重要な橋梁の計測には多く利用される可能性がある。一方で、センサヘッドからの距離が互いに近いターゲットが相互に影響するなどの特性から、利用に当たって注意すべき点も多い。</p> <p>斜張橋ケーブルの振動計測では、本センサを利用すれば1度に多数ケーブルの振動を遠隔で捉えられるため、大幅な計測時間短縮につながる。斜張橋ケーブルの張力推定の目的では今後急速に利用が拡大する可能性がある。</p>

計測技術名	レーザードップラー速度計 Laser Doppler Vibrometer (LDV)
技術概要	レーザー光のドップラー効果を利用して速度を計測する光学機器
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非接触計測 ・長距離計測 ・高分解能 ・高周波数帯域 ・スキヤニングによる多点計測 ・電気回路の数値積分により変位の動的計測が可能 ・3台を連動させることで三次元振動計測が可能 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コスト ・計測機器本体の振動に対する補正が必要 ・過渡現象の多点同時計測が困難
計測原理	<p>LDVとは、ドップラー効果を利用した非接触式の振動計測機器であり、基準となる参照レーザービームと計測対象物から反射してきた測定レーザービームの位相差を検出する光学的な干渉装置である。位相差は、ドップラー効果により発生するものであり、検出された位相差からレーザー光軸方向の速度の絶対値が決定される。速度の方向に関しては、ヘテロダイン方式により、方向情報を与える FM 搬送波を利用して決定される。</p> <p>レーザー光の周波数Ωは非常に高い(約 $4.74 \times 10^{14} \text{Hz}$)ので、光を直接復調することは不可能である。そのため、光学的干渉計を利用して計測対象物から反射した測定ビームと参照ビームを干渉させる。干渉した混合ビームの周波数は、参照ビームと測定ビームとの間の差の周波数に等しくなり、この混合光の強度を光検出器で測定する。</p> <p>具体的には、図 2-82 に示すマイケルソン干渉計を利用して実現している。まず、He-Ne レーザーが、ビームスプリッタ(以下 BS)1 により、参照用のビームと計測用のビームに分離される。次に、BS2 により、計測対象物に照射された計測用のビームは反射する。最後に、対象物から反射したビームは、BS2 の下面で反射して BS3 で参照用のビームと干渉が生じ、検出器において式(1)で表される時間 t に依存する光強度 $I(t)$ が検出される。</p>

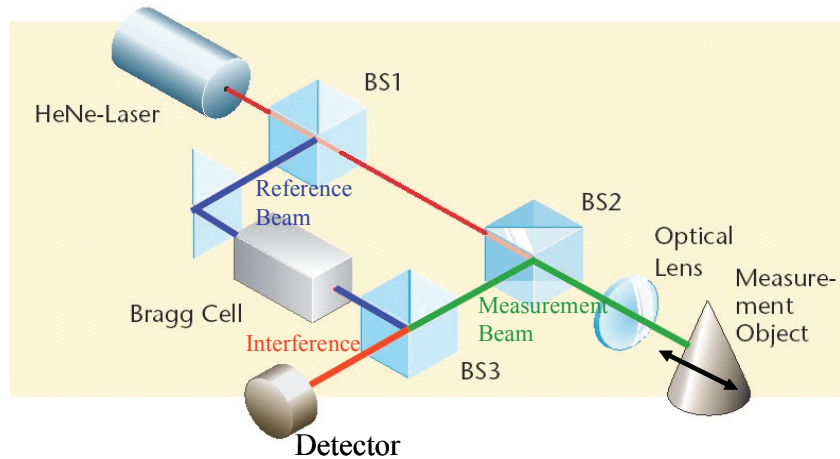


図 2-82 レーザードップラー速度計の光学系

$$I(t) = I_R I_M + 2\sqrt{I_R I_M} \cos \left[\frac{2\pi(x_R - x_M)}{\lambda} \right] \quad (1)$$

ここで、 I_R, I_M はそれぞれ参照ビームおよび測定ビームの光強度、 x_R, x_M はそれぞれ参照ビームの位相および測定ビームの移動距離、 λ はレーザーの波長である。

式(1)における位相を Φ 、また $\Delta L = x_R - x_M$ とすると、

$$\Phi = \frac{2\pi(x_R - x_M)}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda} \quad (2)$$

であり、光強度の位相が、計測対象物の振動変位に比例することになる。また、振動変位 ΔL が連続的に変化するとき、光強度 $I(t)$ が式(1)に基づいて周期的に変化することになる。

ここで、式(1)における位相 Φ を

$$\Phi = 2\pi f_D t \quad (3)$$

と表すと、 f_D がドップラー周波数であり、位相 Φ の時間変化率を考えると、

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= \frac{d}{dt}(2\pi f_D t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi\Delta L}{\lambda} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi 2Vt}{\lambda} \right) \\ \Leftrightarrow f_D &= \frac{2V}{\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $\Delta L = 2Vt$ とした。これは、参照ビームおよび測定ビームの移動距離において、参照ビームの移動距離は干渉計内部にあるため、ほぼ変化しないと考えられる。しかし、測定ビームの移動距離は、計測対象物が一定速度 V で移動したときに、ビーム経路の往路と復路で合計 $2Vt$ だけ変化することに基づく。

以上より、LDVは、式(4)に基づいて、ドップラー周波数から計測対象物の速度を計測することになる。しかし、光強度を検出する検出器は、式(1)のように、余弦関数で表される。そのため、式(4)により、速度の正負に応じて、ドップラー周波数も正負となるものの、ドップラー周波数は、式(1)における余弦関数の周波数であることから、

	<p>速度の符号は検出されない。そこで、LDV では、振動の方向を区別するために、ブラッグセル(音響光学式変調器)と呼ばれる光ヘテロダイン方式を使用している。ブラッグセルは、光の周波数をシフトさせる光学変調器で、リファレンスドライバーからの信号で決定される周波数 f_b のシフトを行う。この方式では、ブラッグセルにより一定の周波数シフトを与えられたレーザーが参照ビームとして使用され、計測対象物からの計測ビームと受光素子上で光干渉を起こす。そのとき、反射ビームは計測対象の振動によるドップラーシフトを受けているので、その干渉光のビート周波数は、ブラッグセルによるシフト周波数を中心とする FM 変調波となる。これを受光素子で電気信号に変換して FM 復調することにより、計測対象の振動速度に比例した電圧信号が得られ、正負の符号を持った速度信号が出力されることになる。</p>
適用事例	<p>従来、LDV は、薄肉部材から構成される自動車や固定式センサの設置が困難なハードディスクの振動計測など、屋内での使用に限定されていた。しかし、LDV は非接触で長距離振動計測を実現することから、空間スケールの大きな社会基盤構造物に対して適用することが検討された。その先駆的な研究として、文献 1)~3)が挙げられる。その後、主として橋梁を対象とした社会基盤構造物に LDV を適用する研究が進められた。以下に一例を示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新幹線鋼箱桁橋の振動計測 ⁴⁾ <p>対象橋梁では、主桁ウェブの垂直補剛材下端回し溶接部に変状が見られた。この原因として、列車走行に伴う振動現象が推察された。そのため、複数台の LDV を用いた常時微動計測と列車走行時の振動計測が実施された(図 2-83)。その結果、主桁の一次卓越振動数 f_b は列車速度に比例し、主桁下フランジパネルには f_b の整数倍の局部振動が発生すること、そして、この整数倍の振動数が下フランジパネルの固有振動数に接近するとパネルの振動が大きくなることが明らかとなった、</p> ・新幹線コンクリート高架橋の振動計測 ⁵⁾ <p>鉄道のコンクリート高架橋では、振動を利用した健全性診断が実施されている ⁶⁾。具体的には、高架橋を重錘で加振し、全体系と柱の局所系の固有振動数を同定する。そして、予め数値計算に基づいて作成された剛性と固有振動数の関係図と比較して健全性を評価する。</p> <p>本研究では、地震などの災害発生時に、高架橋を重錘で加振することが難しい場合を想定して、LDV を用いた非接触常時微動計測の適用性を検討することとした(図 2-84)。その結果、常時微動でも従来手法と同様に固有振動数の同定が可能であり、さらに振動モード形の同定を可能とすることから、健全性評価手法の精度向上に結び付く可能性が示唆された。しかし、コンクリート高架橋の常時微動の振動レベルは小さく、風などの外乱による LDV 本体の振動が問題となった。そこで、文献 7)を参考にして、LDV 本体の振動を別のセンサで計測して、LDV の計測結果を補正する必要があった。</p>

・ケーブルの張力計測⁸⁾

斜張橋ケーブルなどの張力は、振動法⁹⁾と呼ばれる手法に基づき、振動計測から同定される。これは、ケーブルを張力を受ける弦と仮定すると、固有振動数と張力が簡易な関係式で表現されることを利用するものである。

従来は、各ケーブルに固定式の加速度計を取り付けて振動計測が実施されている。ここでは、高所での作業や配線の取り回しが必要となるため、作業の安全性や効率性を向上させることが求められている。そこで、本研究では、これらのニーズの実現を目的として、LDVを用いたケーブルの張力計測の適用性について検討した(図2-85)。

その結果、LDVは非接触計測を可能とすることから、効率良く多数のケーブルの振動計測を実現することができた。また、LDVは加速度計と比較して、低周波数領域の応答特性が良い。そのことから、固有振動数が1Hz以下となる長いケーブルの固有振動数を常時微動から同定することが可能となった。さらに、測量用のプリズムを使用してレーザーの反射率を向上させることで、仕様の計測可能距離を超えた長距離計測が実現できることが確認された。これにより、ケーブルの振動計測のさらなる効率化が可能となる。ただし、計測距離が仕様を超える場合は、時刻歴波形にノイズが多く含まれるため、適切な信号処理を行う必要がある。



図 2-83 鋼箱桁橋への適用



図 2-84 高架橋への適用



図 2-85 ケーブルの計測

参考文献

- 5) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.183-199, 2001.
- 6) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和宏: 局所的な振動特性変化に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集, No.690/V-53, pp.121-132, 2001.
- 7) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 本村均: 実構造物の非接触スキャニング振動計測システムの開発, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.173-186, 2001.
- 8) 宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹: 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, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.
- 9) J. Hernandez Jr., T. Miyashita, V. Phouthaphone and Y. Fujino: Understanding the Dynamic Behavior of Shinkansen RC Viaducts, Proc. of the 25th International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), (Full paper is enclosed in CD-ROM), Orland, Florida, USA, 2007.
- 10) 関正樹: 固有振動数に着目した構造物の健全度評価および動的応答に関する各種提案, JR 東海技法, Vol.6, pp.7-14, 2006.
- 11) 上半文昭, 目黒公郎: 鉄道構造物の振動診断を目的とした非接触微動測定法の開発, 地震工学論

	<p>文集, Vol.27, pp.1-8, 2003.</p> <p>12) K. Kubota, T. Miyashita, Y. Fujino, N. Miyamoto, S. Umemoto, H. Suehiro: Development of a Super Remote Laser Sensing System for Monitoring of Cable-Supported Bridges, <i>Proc. of the 6th International Cable Supported Bridge Operators' Conference (6th ICSBOC)</i>, Vol.6, pp.77-84, Takamatsu, Japan, 2008.5.</p> <p>13) 新家徹, 広中邦汎, 頭井洋, 西村春久: 振動法によるケーブル張力の実用算定式について, 土木学会論文集, Vol.294, pp.25-32, 1975.</p>
<p>今後の展望</p>	<p>十分な反射光が必要であるため, 計測対象との距離が短く反射ターゲットが設置可能な計測事例 (例えば, 自動車などの工業製品を室内試験) が多かったが, 次第に計測可能な距離が延び, 反射ターゲットが不要なタイプの LDV も利用可能になってきている。100m を超える距離からターゲットなしで計測をすることも可能である。遠隔から効率的に振動を高精度に, 広周波数帯域に渡り把握できる可能性を持っている。一方で, レーザー照射の性質上, 照射経路上のちり, 埃によりノイズが生じることもある。霧の生じやすい地域, 粉塵の発生しやすい現場などでは, チリ, 埃によるノイズの影響を受けないで安定して計測を行うことは現状では難しい。</p>

計測技術名	圧電型加速度計 Piezoelectric accelerometer
技術概要	圧電素子にひずみがかわると電圧が発生する圧電効果を利用する
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安価で軽量，小型，3軸測定も可能 ・適用可能な振動数や容量の選択肢が広い <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・感度はそれほど高くない ・温度変化により雑音が発生する場合がある ・重力加速度など静的加速度の測定は不可能 <p>・容量 最大使用加速度は，300-100,000m/s²程度までの製品がある。耐衝撃加速度は最大使用加速度と同程度から1桁多いものまでがあり，耐衝撃性に優れている。</p> <p>・感度 圧電型加速度計はプリアンプを内蔵しない電荷出力型とアンプ内蔵型がある。電荷出力型では電荷感度で表示され，0.1-40 pC/ (m/s²) 程度までの製品がある。アンプ内蔵型では0.5-10 mV/(m/s²)の製品が多い。</p> <p>・適用周波数帯 1Hz-20kHz 程度以上</p> <p>費用 センサそのものは数万円から10数万円程度であるが，以下に述べる装置が必要である。アンプ内蔵型のもは相応に高価となる。</p> <p>他に必要な機器 アンプ内蔵型でない電荷感度を出力する場合はチャージアンプによって電圧に変換する。データを記録するデータロガーなどの記録器やコンピュータを接続して使用するが，コンピュータに取り込む際にはアナログな電圧変化をデジタルデータに変換するA/D変換ボードが必要になる。</p>
計測原理	<p>センサ内のおもりに圧電素子を接続し，質点の振動により圧電素子にひずみがかわると電圧が発生する圧電効果を利用したセンサである。圧電素子に作用させる力のかかり方によってせん断型と圧縮型がある。圧縮型は機械的強度が大きく衝突・衝撃測定に適しており，せん断型は出力感度が大きいとされており，振動測定用の加速度計はせん断型が多い。</p> <p>小型，軽量であり質量は1g未満～100g程度である。2軸や3軸の測定に対応した製品もありラインナップが多い。対応振動数範囲や測定できる加速度の幅（ダイナミックレンジ）が広いが，静的加速度の測定はできない。温度変化により雑音が発生する。</p>

適用事例	<p>橋梁や建築構造物での振動応答計測， 模型実験などにおける振動応答計測</p> <p>【代表例】</p> <p>リオン PV シリーズ， 小野測器 NP-2000 シリーズ， 富士セラミクス S SG シリーズ， 昭和測器 など多数</p>
参考文献	<p>1) リオン：リオン音響・振動計測器 総合カタログ 2011～2012， http://svmeas.rion.co.jp/catalog.aspx</p> <p>2) 昭和測器：製品案内 http://www.showasokki.co.jp/product/04/ssenser.html</p> <p>3) 西原主計，山藤和男：計測システム工学の基礎 第2版，森北出版，2005.</p>
今後の展望	<p>小型化，低価格化を進める事例が増えつつある。安価でかつ高精度の加速度計として利用可能になる可能性がある。ただし，橋梁振動の計測に利用するにあたっては，低周波数帯域の計測も必要なケースもあり，適用周波数帯に配慮する必要がある。</p>

計測技術名	ひずみゲージ型加速度計 Strain gage accelerometer
技術概要	板ばねに貼りつけたひずみゲージの抵抗値の変化を加速度に変換する
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安価で軽量，小型，3軸測定も可能 ・適用可能な振動数や容量の選択肢が広い ・重力加速度など静的加速度の計測が可能 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・感度はそれほど高くない ・温度により周波数特性が変わる場合がある <p>・容量</p> <p>一般的な振動測定用：10m/s²-500m/s² 高応答（高振動数）の測定用：50m/s²-2,000m/s² 衝撃的な現象の測定用：1,000m/s²-10,000m/s²</p> <p>・感度</p> <p>ひずみゲージ型のため製品カタログでは定格出力を等価ひずみであらわすことが多い。一般的な製品の定格出力は1,000×10⁻⁶ε (0.5mV/V)であり，高容量型だと相対的に感度が低く，低容量だと感度が高くなる。また，定格出力が30,000×10⁻⁶εの高感度型のものもある。</p> <p>・適用周波数帯</p> <p>一般的な振動測定用：50Hz-500Hz まで 高応答（高振動数）の測定用：150Hz-2,000Hz まで 衝撃的な現象の測定用：1.3kHz-5kHz まで</p> <p>費用</p> <p>センサそのものは数万円から10数万円程度であるが，以下に述べる装置がセンサより高価な場合が多い。</p> <p>他に必要な機器</p> <p>このセンサはひずみゲージの微小な抵抗値の変化を電圧の変化として取り出すものだが，センサから出力される電圧変化も微小なのでこれを増幅する増幅器（アンプ，シグナルコンディショナとも呼ばれる場合がある）や，ナイキスト振動数以上の振動数成分を遮断するローパスフィルタが必要となる。フィルタ回路が内蔵された増幅器もある。また，データを記録するデータロガーなどの記録器やコンピュータを接続して使用するが，コンピュータに取り込む際にはアナログな電圧変化をデジタルデータに変換するA/D変換ボードが必要になる。</p>

計測原理	<p>ひずみゲージ型加速度計は、検出部にひずみゲージを利用したセンサである。図 2-86 のようにおもりと板ばねからなる振動系が本体内部に封入されていて、板ばねにひずみゲージが貼り付けられている。振動によりおもりに慣性力が作用して、板ばねがたわむとそれに応じたひずみが発生する。ひずみゲージと同様にひずみゲージの抵抗値の変化をホイートストンブリッジ回路における電圧の変化として検出する。</p> <p>構造が簡単であるため小型で軽量であり、質量は 10 数 g 程度である。2 軸や 3 軸の測定に対応した製品もある。製品としてのラインナップが多い。感度はサーボ型加速度計などと比較すると低く、内部に封入したオイルの特性によって温度によって周波数特性が変わる場合もある。</p>
適用事例	<p>橋梁や建築構造物の振動応答測定， 模型実験などにおける振動応答測定， 斜張橋における振動応答からのケーブル張力測定</p> <p>【代表例】</p> <p>東京測器研究所(TML) ARF-A シリーズ， 共和電業 AS-GB, GA シリーズ など</p>
参考文献	<p>14) 東京測器研究所：2009-2010 総合製品カタログ</p> <p>15) 共和電業：2004-2005 KYOWA ひずみゲージ センサ 計測機器 総合カタログ</p> <p>16) 西原主計， 山藤和男：計測システム工学の基礎 第 2 版， 森北出版， 2005.</p> <p>17) 井口征士編：センシング工学， オーム社， 1999.</p>
今後の展望	<p>ひずみゲージ型加速度計は原理が簡易で堅牢， 出力が安定している。直流(0Hz)から計測が可能。成熟した技術であり信頼性も高い。小型， 堅牢， 軽量， 高信頼性， といった特徴を必要とする計測に今後も利用されると考えられる。</p>

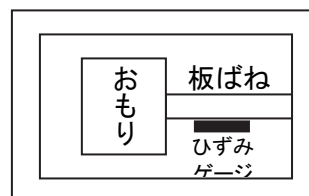


図 2-86 ひずみゲージ型加速度計

計測技術名	振動レベル計
技術概要	主として公害振動の測定に使用され、振動ピックアップにより測定した振動加速度に周波数領域の重み付けを行った測定器。
特徴	<p>【長所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・比較的安価で、小型、3軸測定も可能 ・公害振動を評価するための L_{v10} 値や時間率レベル等の自動演算が可能 <p>【短所】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・感度はそれほど高くない ・測定周波数範囲が限られる(1~80Hz) <p>幅広い測定用途や種々の振動源に対する振動レベルの評価量を測定するため、振動レベルまたは振動加速度レベルの時間率レベル、パワー平均値、パワー合計値、最大値、最小値、波形ピーク値などの多様な評価量を3軸分をまとめて演算することができる。</p> <p>価格は、ピックアップとセットで30~40万円程度であり、計測計測点が少ない場合は計測が容易であるが、多い場合はコストがかかる。</p>
計測原理	<p>振動レベルとは、周波数 1~80Hz の振動加速度に鉛直または水平方向の振動に対する全身の振動感覚補正を実効値変換した量と基準の加速度の比の対数を20倍した量であり、次式で表される。単位はデシベル(dB)。</p> $\text{振動レベル} : Lv(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{a}{a_0} \quad (1)$ <p>a_0 : 基準の加速度 (10^{-5} m/s^2)</p> <p>a_0 : 周波数補正された加速度の実効値で、次式で表される</p> $a = \left(\sum a_n^2 \cdot 10^{C_n/10} \right)^{1/2}$ <p>C_n : 周波数 n(Hz)における補正值</p> <ul style="list-style-type: none"> ・振動ピックアップ <ul style="list-style-type: none"> 一般に振動レベル計の振動ピックアップは鉛直(Z軸)、水平(XおよびY軸)方向の3つの加速度ピックアップが組み込まれ、地盤に設置できる構造になっている。それぞれの加速度ピックアップには圧電素子に圧縮型が使用されるものが多かったが、温度変化によるパイロ電圧の発生(風雑音の影響として報告されている)が顕著でその対策が難しいことなどにより、現在はせん断型が多い。 ・指示計器の動特性 <ul style="list-style-type: none"> 人の振動感覚は、振動発生と同時に生じるものではなく、振動発生と振動感覚の間には時間遅れがあり、この時間遅れより短い継続時間の振動は同じ振幅であっても小さく

	<p>感じる。この振動感覚の時間依存性を表すのが動特性で、0.63 秒の値に決められている。振動レベル計は振動加速度の実効値をデシベル表示するが、実効値を求める回路の平均化時定数 0.63 秒が動特性である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 振動レベル計の測定範囲 <p>振動レベルの測定において、対象とする振動の大きさにより測定値が指示計の指示範囲になるよう減衰器（レベルレンジ切換器）を選択する。対象とする振動が小さい場合、測定器から発生する雑音（電気回路から発生する雑音または加速度ピックアップの自己雑音）の影響を受ける。JIS C 1510 では、測定範囲の下限値をこの雑音レベルより 6dB 以上高い値とすることを定めている。振動レベル計の自己雑音は広い周波数範囲に分布しており、振動レベル計に分析器を接続して特定の周波数のみを測定するとき、分析周波数のバンド幅以外の雑音周波数成分は除去される。</p>
適用事例	騒音・低周波音等の公害振動の計測に使用される。
参考文献	<ol style="list-style-type: none"> 1) (社)日本騒音制御工学会編 振動法令研究会著：振動規則の手引き—振動規制法逐条解説／関連法令・資料集一，技報堂出版，2003 2) (社)日本騒音制御工学会編：地域の環境振動，技報堂出版，2001 3) リオン：リオン音響・振動計測器 総合カタログ 2011～2012 http://svmeas.rion.co.jp/catalog.aspx 4) 小野測器：現行製品カタログ http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/whats_new/catalogs/pdftop.html
今後の展望	

各種加速度計，速度計，変位計の特性比較を表 2-1，表 2-2 に示す。

表 2-1 振動計測センサの比較表

対象物理量	加速度				速度	
センサの種類	圧電型	ひずみゲージ型	サーボ型	MEMS 型 ※方式複数あり	レーザードップラー型	サーボ型
最大計測範囲	○ 300-100,000m/s ²	△ 10-10,000m/s ²	○	△	○	○
振動数範囲	○ 1Hz-20kHz	○ 0-5kHz	△	△	◎ 広周波数帯	△
感度	△ 0.1-40 pC/(m/s ²) 0.5-10 mV/(m/s ²)	△ 1,000 × 10 ⁻⁶ e (0.5mV/V) 高感度型も有	◎	△	◎ 高分解能	◎
静的応答	×	○	○	○	○	○
ノイズレベル	○	○	◎	△	◎	◎
分解能	◎	◎	◎	△	◎	◎
測定対象との距離	- 接触	- 接触	- 接触	- 接触	◎ 非接触 長距離計測	- 接触
同時測定点数	1	1	1	1	スキャンニング 可	1
対応軸数	1~3	1~3	1~3	1~3	1 3台連動で3軸	1~3
温度特性	△ 雑音発生	△ 周波数特性	○	△	○	○
質量	◎ 1~100g	◎ 10数g程度	○ 加速度計と しては比較 的大	◎ 基盤に集積した 場合は別	△	○
価格	◎ 数万~10数万円	◎ 数万~10数万 円	○	◎	△ 高価. 数百万 から数千万円	○
必要機器	アンプ(内蔵型 あり), A/D	アンプ, A/D 変 換器	アンプ, A/D 変換器	通常は専用基盤 に組み込み	アンプ, A/D 変 換機, 三脚	アンプ, A/D 変 換器
適用事例			橋梁振動, 地 震計	無線センサ, ス マートフォン	ケーブル, 局 部振動 本体の振動補 正が必要	橋梁振動, 地 震計
その他						

表 2-2 振動計測センサの比較表

対象物理量	変位							その他
センサーの種類	レーザードップラ型	レーダー型	レーザー型	LVDT	ワイヤ型	ダイヤルゲージ	高速カメラ	振動レベル計
最大計測範囲	◎	○	○	○	○	△	○	
振動数範囲	◎ 数 k-数 10kHz	○ 数百 Hz	◎	△	○	△	△	
感度	◎	◎	◎	○	○	△	△	
静的応答	△	△	○	○	○	○	○	
ノイズレベル	○	○	◎	◎	◎	◎	○	
分解能	○	○	◎	◎	◎	◎	○	
測定対象との距離	◎ 100m 超	◎ 100m 超	○	-	○	△ ワイヤーで延長する方法	◎	
同時測定点数	スキャンング可	多点	1	1	1	1	◎	
対応軸数	1	1	1	1	1	1	2	
温度特性	○	△	○	○	△	○	○	
質量	△	△	○	△	○	○	△	
価格	△	△	○	○	○	○	△	
必要機器	アンプ, A/D 変換器, 三脚	三脚	アンプ, A/D 変換器	アンプ, A/D 変換器	アンプ, A/D 変換器	アンプ, A/D 変換器	三脚	
適用事例 その他	本体の振動補正が望ましい	本体の振動補正が望ましい					本体の振動補正が必要	

2-4. 振動データの分析方法の整理

2-4-1. ピークピッキング法によるモード同定

モード形の基準となる位置での、固有振動数 ω における複素応答スペクトルを $X_{ref}(\omega) = a + bi$ 、質点 k での、固有振動数 ω における複素応答スペクトルを $X_k(\omega) = c + di$ とすると位置 k の固有振動数 ω におけるクロススペクトルは、

$$Y_k(\omega) = X_k(\omega)X_{ref}(\omega) = (c + di)(a + bi)$$

で表わされる。

$X_{ref}(\omega), X_k(\omega)$ の両方の応答スペクトルが卓越する振動数成分において $Y_k(\omega)$ が卓越する。クロススペクトルの基準点を、同定する次数のモード形の節でない点に選べば、質点間で相関のある固有振動数成分が卓越する。したがって、測定誤差のような、測定点間で相関のないと考えられる誤差によるピークの卓越を抑制することができる。

次にモード形についてだが、伝達関数によるモード振幅比は

$$Z_k(\omega) = \frac{X_k(\omega)}{X_{ref}(\omega)}$$

であるから、クロススペクトルと伝達関数は、

$$Y_k(\omega) = |X_{ref}(\omega)|^2 Z_k(\omega)$$

と比例関係にある。したがってクロススペクトルからモード形を同定する事が出来る。

2-4-2. Eigensystem Realization Algorithm を利用したモード同定

ERA(Eigensystem Realization Algorithm)は構造物をシステムとしてとらえ、そのシステムを表す状態マトリクスを決定する手法である。以下に ERA の理論と同定手順について述べる。

離散時間における線形時不変系のシステムの状態方程式は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (2.2)$$

ここで、 $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}$ はそれぞれ状態ベクトル(n 次元)、入力ベクトル(m 次元)、出力ベクトル(p 次元)であり、 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ はそれぞれ $n \times n$ 次元、 $n \times m$ 次元、 $n \times p$ 次元の行列である。また、 k は時間ステップを表している。

この系のインパルス応答による(1)、(2)のシステムはマルコフパラメーターと呼ばれる次の式で

あらわされる。

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^{k-1}\mathbf{B} \quad (2.3)$$

$\mathbf{Y}(k)$ は計測から得られるため、(2.3)式より $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ を求めることで、システムを同定する。

ERA はインパルス応答を時間ステップごとに並べたハンケルマトリクスを作成することから始める。

$$\mathbf{H}_{rs}(k-1) = \begin{bmatrix} y\mathbf{Y}(k) & y\mathbf{Y}(k+t_1) & \Lambda & y\mathbf{Y}(k+t_{s-1}) \\ y(j_1+k) & y\mathbf{Y}(j_1+k+t_1) & \Lambda & \mathbf{Y}(j_1+k+t_{s-1}) \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ y\mathbf{Y}(j_{r-1}+k) & y\mathbf{Y}(j_{r-1}+k+t_1) & \Lambda & y\mathbf{Y}(j_{r-1}+k+t_{s-1}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ここで、 $j_i (i=1, \mathbf{K}, r-1)$ と $t_i (i=1, \mathbf{K}, s-1)$ は任意の整数である。

また、 k ステップでのハンケルマトリクスは

$$\mathbf{H}_{rs}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{j_1} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{j_{r-1}} \end{bmatrix} \mathbf{A}^k \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(0) & \mathbf{A}^{t_1} \mathbf{x}(0) & \Lambda & \mathbf{A}^{t_{s-1}} \mathbf{x}(0) \end{bmatrix} = \mathbf{V}_r \mathbf{A}^k \mathbf{W}_s \quad (2.5)$$

ここで、 $\mathbf{V}_r, \mathbf{W}_s$ はそれぞれ可観測行列($r \times n$)、可制御行列($n \times s$)である。

次に、式(2.3)を最小の次元で満たす行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ を求めるために、時間ステップ 0 でのハンケルマトリクス $\mathbf{H}_{rs}(0)$ の特異値分解を行う。特異値分解により、 $\mathbf{H}_{rs}(0)$ は、

$$\mathbf{H}_{rs}(0) = \mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{Q}^T \quad (2.6)$$

と表せる。

ここで、 $\mathbf{P} (r \times n)$ 、 $\mathbf{Q} (n \times s)$ はどちらも列が互いに直行なマトリクスであり、 $\mathbf{D} (n \times n)$ の対角要素に $\mathbf{H}_{rs}(0)$ の特異値 $d_1, d_2, \mathbf{K}, d_c$ を大きい順に持つ対角行列である。

これを用いて、擬似対角行列を作成し、数学的に式を変形することにより、最小実現されたシステムの状態を表す数学モデルは最終的に次のようになる。

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{p}^T \mathbf{H}_{rs}(1) \mathbf{Q} \mathbf{D}^{-1/2}$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{p}^T \mathbf{E}_m \quad (2.7)$$

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{E}_p^T \mathbf{p} \mathbf{D}^{1/2}$$

ここで、

$$\mathbf{E}_p^T = \begin{bmatrix} I_p & 0_p & \Lambda & 0_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_m^T = \begin{bmatrix} I_m & 0_m & \Lambda & 0_m \end{bmatrix}$$

0_p : p 次元の正方ゼロ行列である。また、 $(\bar{\quad})$ は等価な行列を意味する。

以上のように最小実現された状態マトリクス $\bar{\mathbf{A}}$ を複素固有値解析することでモード特性を同定する。

$$\boldsymbol{\Psi}^{-1} \bar{\mathbf{A}} \boldsymbol{\Psi} = \mathbf{z} \quad (2.8)$$

ここで、 \mathbf{z} は離散時間における共役複素固有値、 $\boldsymbol{\Psi}$ は固有ベクトルである。これより、式(2.3)の状態方程式はモードごとに分解され、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(k+1) &= \mathbf{z} \mathbf{q}(k) = \mathbf{z}^k \mathbf{q}(0) \\ \mathbf{y}(k) &= \boldsymbol{\Phi} \mathbf{q}(k) \\ \mathbf{q}(0) &= \boldsymbol{\Phi}^{-1} \mathbf{x}(0) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \overline{\mathbf{C} \boldsymbol{\Psi}}$$

ここで、 $\mathbf{q}(k)$ はモード座標、 $\boldsymbol{\Phi}$ は複素固有ベクトルである。これにより、共役複素固有値 \mathbf{z} および共役複素固有ベクトル $\boldsymbol{\Phi}$ が求められたので、計測データから固有振動数に対応した固有振動数、モード減衰比および複素振動モードが同定できる。複素固有値 \mathbf{z} は離散時間におけるものであるため、次式の関係より、連続時間の固有値に変換する。

$$\mathbf{z} = e^{s \Delta t} \quad (2.10)$$

$$s = \frac{\ln(\mathbf{z})}{\Delta t} \quad (2.11)$$

よって、固有振動数とモード減衰比は連続時間の固有値 s から次式より同定できる。

$$s_j = -\zeta_j \omega_j \pm \sqrt{1 - \zeta_j^2} \omega_j \quad (2.12)$$

2-4-3. Octave を用いた Web サービスの構築

ピークピッキング法によるモード同定の原理は 2-4-1 に述べたが、エクセル等一般に利用が容易なソフトウェア環境ではこのモード同定の実装も容易ではない。そこで、だれでも利用できるウェブインターフェースを通じてサーバー上のプログラムを実行することで、ピークピッキング法によるモード解析を行う方法を提案した。

(1) 構築の目的

通常、Octave を用いた数値計算を行うには、以下の準備作業が必要である。

- 1) Windows や Mac OS X 等への Octave のインストール
- 2) Octave の動作方法の習得
- 3) 計算処理用スクリプト、結果出力用スクリプト等の作成

しかし、複数人が数値計算を行うことを考えた場合、各人が実行環境を用意する必要、ならびに、動作方法を習得する必要がある。このことから、Octave の実行環境とスクリプトを Web

サービス配下で動作させることにより、典型的な処理を手軽に、簡単に動かすことができる仕組みを実装した。また、計算処理用スクリプトについて、一部のパラメータ値の変更を簡単に行えるようにした。

(2) Web サービスの流れ

実装した Web サービスは、特定の波形データに対し、ピークピッキング法を用いて振動モード形を表示するもので、処理の流れは下図の通りである。

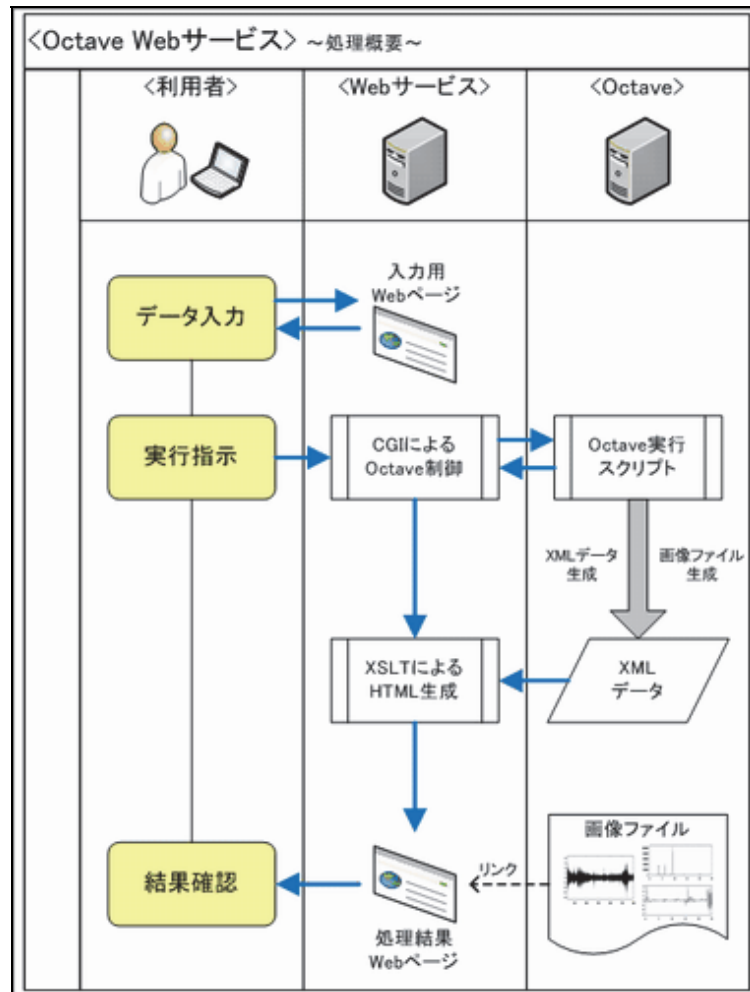


図 2-87 Web サービスの処理の流れ

1) データ入力

計算処理用のスクリプトは、Web サービス配下に配置されている。スクリプト内のいくつかのパラメータの値は変更可能としており、データ入力用の Web ページで設定することができる。

図 2-88 データ（パラメータ値）の入力ページ

2) 実行指示

入力用の Web ページでの実行指示により、CGI スクリプトが Web サービス配下の Octave を起動する。その際、計算処理用の Octave スクリプトにパラメータを設定する。Octave による計算結果は、XML データとして XSLT に渡され、出力用のグラフ画像（時刻歴波形、クロススペクトル、振動モード形等）のファイルは、サーバーに保存される。

```

1#!/usr/bin/perl
2
3use strict;
4use XML::Simple;
5use XML::LibXSLT;
6use XML::LibXML;
7use CGI;
8
9my $CURRENTHOST="AAA.BBB.CCC.DDD";
10my $CURRENTHOST="localhost";
11
12my $username = $ENV{REMOTE_USER};
13
14my $q = new CGI;
15my $refCh = $q->param('refCh');
16my $at = $q->param('at');
17my $rangeS = $q->param('rangeS');
18my $rangeE = $q->param('rangeE');
19my $ChN = $q->param('ChN');
20
21my $dir_root = "/var/www/html";
22my $octave_root = "/opt/app/scripts/octave";
23my $outhtml = "/kougiken/result/$username";
24
25# Error監視
26my $return_value = "";
27my $results = "";
28eval {
29    $outhtml .= "/vibration.html";
30    $return_value = "$octave_root/vibration.n $username $refCh $at $rangeS $rangeE $ChN";
31};
32my $parser = XML::LibXML->new();
33my $xslt = XML::LibXSLT->new();
34
35my $source = $parser->parse_string($return_value);
36my $style_doc = $parser->parse_file("/var/www/html/kougiken/xsl/vibration.xsl");
37my $stylesheet = $xslt->parse_stylesheet($style_doc);
38my $results = $stylesheet->output_string($stylesheet->transform($source));
39;
40if($?) {
41    # Error発生時
42    $results = "Content-type: text/html\n\n".$return_value."\n\n".$?;
43};
44
45open(OUT, "> $dir_root$outhtml");
46print OUT $results;
47close(OUT);
48print "Location:http://$CURRENTHOST$outhtml\n\n";
49
50

```

図 2-89 CGI スクリプト（抜粋）

```

1#!/usr/local/bin/octave -s
2
3% 2011/6/22
4% Takashi MIYASHITA
5% ピークピッキング法を用いて振動モード形を表示するプログラム
6% 2011/6/22
7% クロススペクトルのスタッキングを追加
8% 2011/12/2
9% Webサービスとして稼働するよう改造
10
11clear all;
12close all;
13clc;
14pause(1);
15
16ON = 1; OFF = 0;
17
18%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
19%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20% ユーザーの条件設定
21%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
22% 実行確認
23if nargin == 6;
24    printf('margin != 6');
25    return;
26endif;
27
28%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
30% フォルダとファイル名の指定
31pathname = '/opt/app/scripts/octave';
32originaldata = 'vibration.ivm';
33inputfile = fullfile(pathname,originaldata);
34
35html_root="/var/www/html";
36
37# 出力ファイル名
38# 出力フォルダユーザー名(引数[1])
39username = nth(argv, 1);
40output_image_dir=printf('%s/%s', pathname, username);
41output_image_name='vibration';
42output_text = '-smc';
43
44% クロススペクトルを計算する際の参照点(チャンネルの指定は1から)(引数[2])
45% 着目するモードで飽とならない位置を選択する
46% refCh = 2;
47% refCh = str2num( nth(argv, 2));
48
49% 着目する固有振動数(Hz)
50% 考えなくてもプログラムは実行可能
51% クロススペクトルのピークから着目する振動数を決定する
52% グラフ内のデータチャンネルの有効数字が足りない場合は、グラフ内で
53% 右クリックをして"テキストの更新頻度の選択(NewCallback)"を実行すること
54
55ffn = 5.584;

```

図 2-90 Octave スクリプト（抜粋）

3) 結果確認

前述の XSLT により、計算結果の HTML ページが生成される。生成された HTML ページは、Web ブラウザにより参照することができる。

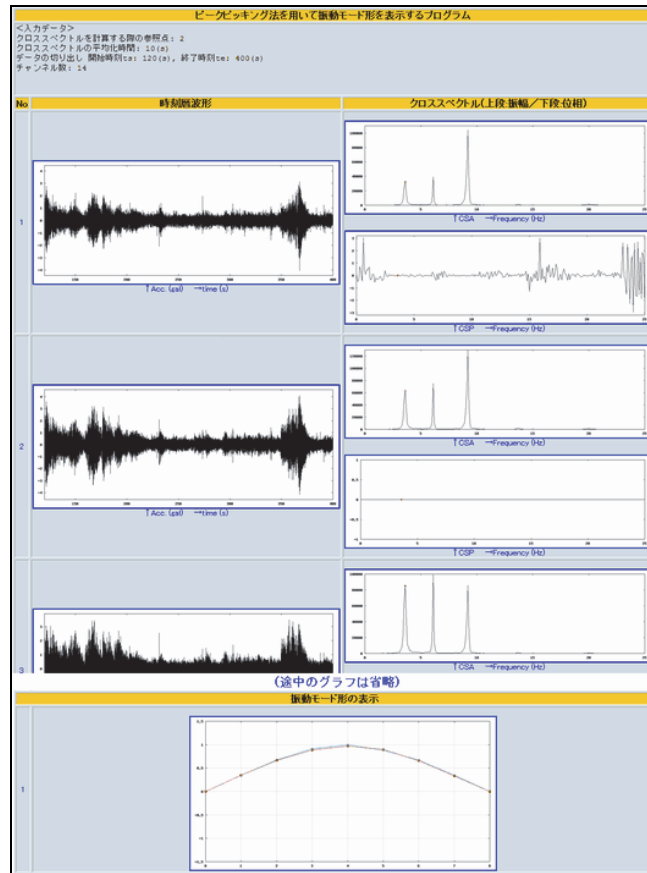


図 2-91 計算結果の HTML ページ (抜粋)

(3) 今回の実装における課題

- ・ 表示されるグラフが画像ファイルであるため、動的に表示範囲を切り替えたり、プロット点の値を取得したりすることができない。
- ・ 任意の振動データを対象とした場合、計算実行に支障を与えないような初期パラメータの設定が行えない。
- ・ 定型的な処理を対象としているため、計算用のスクリプトの編集が手軽でない。

(4) Web サービス化のメリット

- ・ クライアント側への実行環境の導入が必要ないため、OS や端末環境 (PC, タブレット, スマートフォン) によらず、Web ブラウザで処理を行うことができる。
- ・ 定型的な処理については、計算スクリプトを加工することなく、パラメータの調整程度の操作で、手軽に処理を行うことができる。
- ・ Web サービス側で計測データや計算結果を管理することができれば、点在するデータを集めて、それらを関連付けた統計や集計等の処理を行うことができる。

(4) Octave を利用したウェブサービスの調査結果

1) ワルシャワ大学 : Web Interface to Octave

URL : <http://weboctave.mimuw.edu.pl/weboctave/web/> , (参照 2012.08.09).

- Octave のコマンドを入力すると、実行結果が同一画面に表示される。

The screenshot displays the 'Web Interface to Octave' web application. At the top, it says 'Version 0.1.1' and 'Try Octave in your browser!'. Below this, there is a text area for 'Input your commands here' containing the following code:

```
A = [1,2,3,4];
eig(A)
y = x = linspace(0,10);
[X,Y] = meshgrid(x,y);
mesh(X,Y,sin(X).*cos(Y).*X);
```

Buttons for 'Submit to Octave' and 'Clear' are visible. The 'Output' section shows the execution results, including the matrix A and the eigenvalues. Below the text, a 3D mesh plot is displayed, showing a complex surface with multiple peaks and valleys, colored with a gradient from blue to red. The plot axes range from -10 to 10. At the bottom, there are error messages and a footer with contact information and a last updated date of March 13 2009.

①以下のコマンドを実行

```
A = [1,2,3,4];
eig(A)
y = x = linspace(0,10);
[X,Y] = meshgrid(x,y);
mesh(X,Y,sin(X).*cos(Y).*X);
```

②実行結果とグラフが表示される

図 2-92 入力、および、実行結果 1

2) Math Cloud

URL : <http://www.mathcloud.se/index.jsp> , (参照 2012.08.09).

- Octave のコマンドを入力すると, 実行結果が別画面に表示される。
- Script ファイルをアップロードし, それを用いて計算実行できる。
- 前述の「Web Interface to Octave」と同じスクリプトを実行したが, mesh 作図は行えなかった。

① 「a=0:100; b=sin(a); plot(a,b)」を入力して実行

② 計算結果のグラフが表示される

図 2-93 入力, および, 実行結果 2