

§ 3. 実橋振動計測

3-1. 概要

前章の文献調査結果を踏まえ、無線センシング技術とレーザードップラー速度計（LDV）の振動計測性能や利点、改善点を明らかにすること、耐震補強や損傷による振動特性変化を検知できるか否かを明確にすることを目的として、3橋の実橋振動計測および解析的検討を行った。

まず、鋼逆ランガー橋の槇木沢橋では、無線センサにより耐震補強前後の多点振動計測を行い、振動計測性能や耐震補強による特性変化を分析した。立体曲線ラーメン橋である首都高大橋 JCT ランプ橋では、複雑な構造系における有線センサに対する無線センサの優位性の差を明らかにした。2径間連続鋼斜張橋である幸魂大橋では、LDVによるケーブル振動計測の精度および有効性を示すとともに、立体骨組み解析によりケーブルに変状が生じた場合のケーブル張力の変化量や閾値の検討を行った。

3-2. 榎木沢橋－耐震補強前後の振動特性比較

3-2-1. 概要

無線センサシステムを利用して橋梁の動的挙動を詳細に計測し、有限要素モデルと比較することで、構造特性を推定する方法を検討した。補強工事が行われる橋梁は構造が変化し、それによる動特性変化も想定されるため、耐震補強橋梁の工事前後でそれぞれ無線センサを使って詳細に多点同期計測を行なった。密なセンサ配置による同期計測を行なったため、固有振動数のみならず、詳細モード形状とそれらの変化が得られた。一方で、有限要素モデルを作成し、モデルと実橋梁の違いを、主にモード形状の観点から比較した。これらが互いに整合的となるようにモデル更新することで支承条件を推定した。

3-2-2. 無線センサによる耐震補強前後の振動計測

3-2-2-1. 同期振動計測システムの概要

ここで用いるスマートセンサは MEMSIC 社が販売している研究用無線センサ端末 Imote2(図 3-1)に基づくものである。Imote2 の起動時作動周波数を 13MHz から 416MHz まで設定可能な CPU と 32MB の SDRAM を搭載している。無線通信には IEEE802.15.4 規格の CC2420 を利用している。

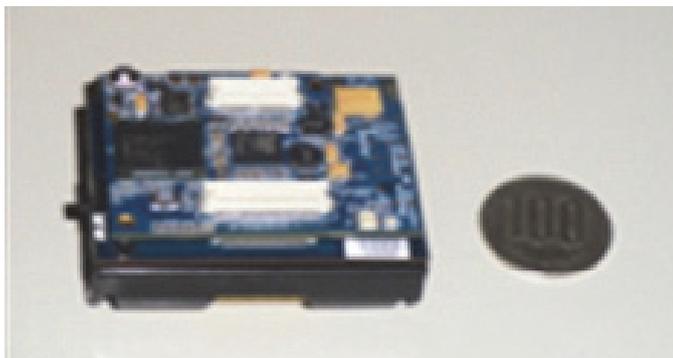


図 3-1 MEMSIC 社製 Imote2

これらハードウェア上に、イリノイ大学が中心となり開発が進む計測用オープンソフトウェア ISHMP⁴⁾を組み込み、また独自に開発を進めているマルチホップ通信、データ収集プログラムを実装した。経路作成には AODV プロトコル、同期には FTSP プロトコルをそれぞれカスタマイズしている。3成分加速度を計測後、基地局に高速マルチホップ転送する仕組みである。加速度計測には STMicroelectronics 社 LIS344 を搭載したセンサボードを使用しており、0.2mg 程度の振動まで捉えられる性能である。

Imote2 自体は研究開発用端末であり、必ずしも屋外での使用を想定したハードウェアではない。そこでプラスチックケース、アンテナ、アンテナ用延長同軸ケーブル、ソーラーパネル式充電池を利用して図 3-2 のような計測端末を用意した。無線センサではアンテナを端末に直接接続するケースが多いが、橋梁では多数の部材や車両などにより見通しの効かない場所に端末を設置することが多いと考えられる。そこで、同軸ケーブルを介してアンテナの設置位置に自由度を持たせる設計にしている。



図 3-2 Imote2 設置状況

3-2-2-2. 同期振動計測システムの概要

岩手県内国道 45 号線に架かる逆ランガー橋の槇木沢橋（図 3-3）において耐震補強として、アーチリブや垂直材，下横構に当て板補強がなされた。本耐震補強の前後において，路面とアーチリブ上に計 48 個の imote2 を設置し，交通振動を詳細に計測し（図 3-4），モード振動数，モード形など動特性の観点から耐震補強前後の変化を調べた。サンプリング周波数は 50Hz，1 回あたり計測時間は 6 分である。計測日にはそれぞれセンサ設置に 1 時間余り，計測に 4 時間程，撤去に 1 時間弱を要している。なお，Imote2 の計測加速度と比較する目的で，有線サーボ型加速度計（東京測振 CV373）を計 6 台橋面上に設置している。



図 3-3 槇木沢橋外観

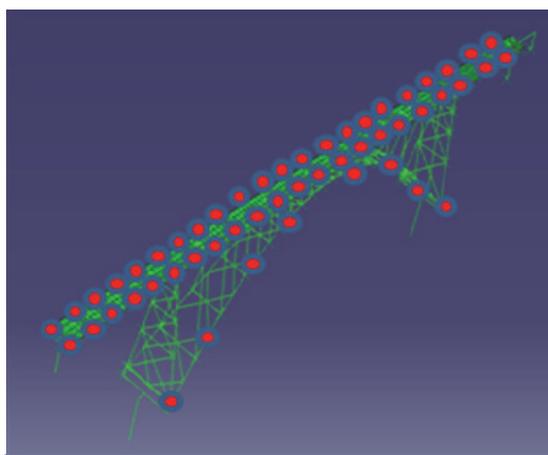


図 3-4 センサ設置位置

3-2-2-3. 計測振動特性

まず、計測精度を分解能の観点から有線加速度計と比較し評価した。振動レベルが小さい場合は計測信号がノイズに埋もれるが、車両走行時の 5mg 程度の加速度応答は有線センサと無線センサの計測値がほぼ一致する事が確認された(図 3-5)。図 3-6 に示すようにパワースペクトルを比較すると卓越周波数の近傍では有線・無線加速度計の値が互いに一致している事がわかる。鉛直方向は 6 次モードまで、橋軸直角方向では 5 次モードまでの振動モードが推定できた。有線加速度計は imote2 設置位置に合わせて計 6 台設置しているが、これら 6 点の計測結果から求めたモード形は、無線計測のモード形に一致している。

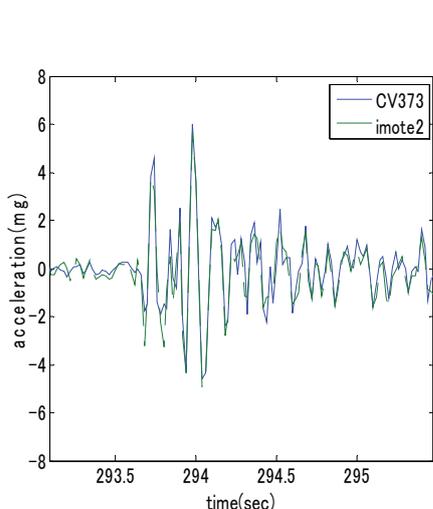


図 3-5 鉛直方向加速度時刻歴

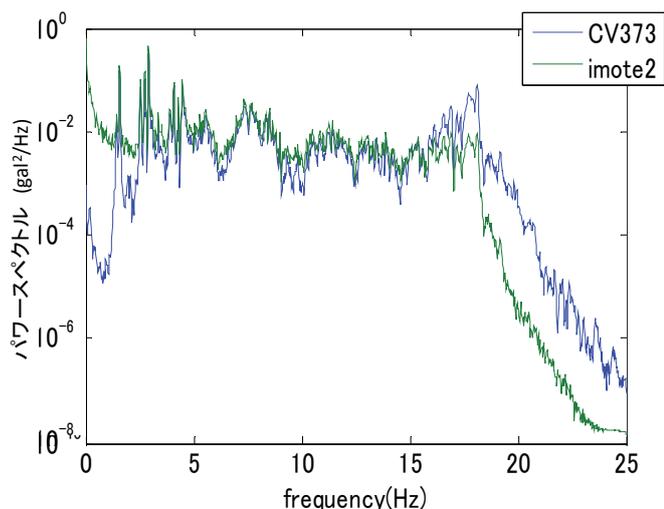


図 3-6 鉛直方向加速度パワースペクトル

実計測による補強前後での比較では、橋軸直角方向の固有振動数の増加、鉛直方向では固有振動数の減少が確認出来た(表 3-1)。前者は耐震補強による剛性の増加、後者は、重量増化に起因していると推測される。また、橋軸直角方向・鉛直方向それぞれでモード形状を比較したところ、推定誤差もあるものの有意な変化を確認出来た(図 3-7)。

表 3-1 FEM と計測から推定された固有振動数 (Hz)

	FEM			実測		
	補強前	補強後	変化(%)	補強前	補強後	変化(%)
鉛直 1 次	1.459	1.385	-5.07	1.44	1.44	0
鉛直 2 次	1.566	1.448	-7.53	1.57	1.51	-3.82
橋直 1 次	0.923	1.026	11.2	0.93	1.03	10.8
橋直 2 次	1.616	1.669	3.3	1.58	1.66	5.1

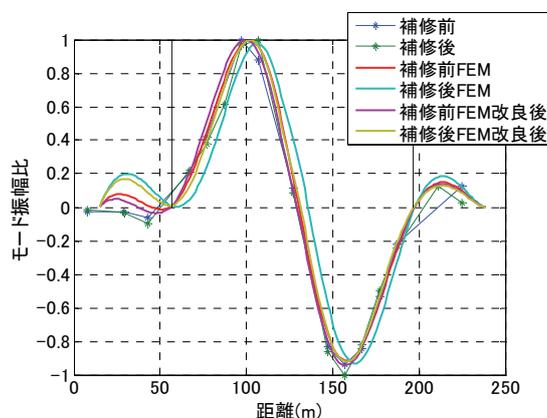


図 3-7 鉛直 1 次モード形
(計測値と FEM 解析値)

3-2-2-4. FEM と計測データの比較

設計図面を元に対象橋梁を耐震補強前後で有限要素解析し、モード特性の観点から計測値と比較した。図 3-4 は有限要素モデル上に計測ノードの位置を示したものである。橋軸直角方向は振動数とモード形状およびそれらの変化が実測データとほぼ整合的である事を確認した。一方で、鉛直方向では重量増加により実測同様、FEM においても固有振動数が低下したが、FEM において振動数低下がより顕著であった（表 3-1）また、モード形の変化では実測と FEM で定量的に一致する変化と一致しないものが確認できた。例えば、鉛直 1 次モードは、左端（宮古側）からの距離 70-100m 付近のモード形が耐震補強後に右側（久慈側）に移動しているが、FEM でもこの移動が確認された。一方で、130-170m 付近のモード形の移動は FEM でのみ確認された。なお、これらモード形の変化は密に計測を行ったために観測ができた変化と言える。仮に計測点数が数点の場合は、モード形ピークの橋軸方向への移動と鉛直方向の変化を明確に区別できない、といったことが考えられる。

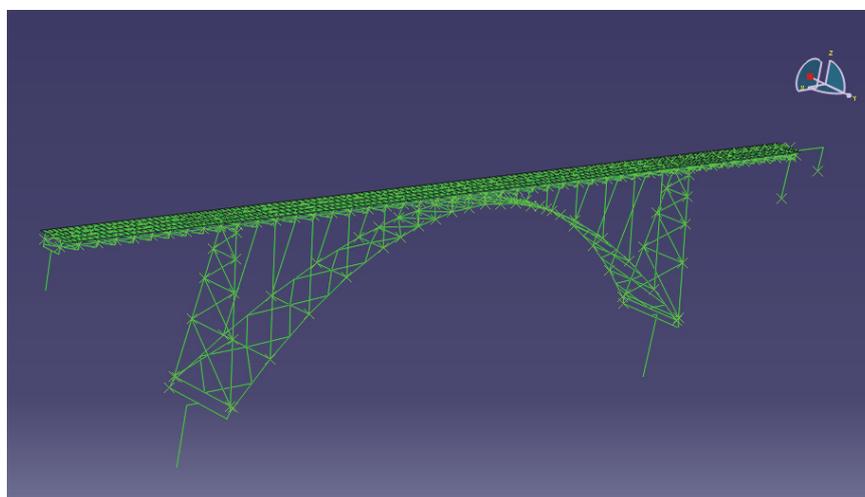


図 3-8 槇木沢橋有限要素モデル

3-2-2-5. FEM アップデート

実測に比べ補強後 FEM の鉛直振動数が低い事から実構造物の剛性が高いと考えられる。ここでは FEM と実橋梁の違いを、支承における境界条件の違いに起因するものと考え、様々な境界条件のもとで再解析した。特に、モード形の変化が、実計測と FEM とで整合的であるように、境界条件を分析した。その結果、宮古側脚下部の支承の回転のみ固定として場合に、固有振動数は計測値に近づき（表 3-2）、モード形状の詳細変化も一部再現できた（図 3-4）。

表 3-2 モデル更新後の固有振動数

補強後	FEM 改良前	FEM 改良後	実測
鉛直 1 次	1.385	1.402	1.44
鉛直 2 次	1.448	1.5326	1.51

3-2-2-6. まとめ

スマートセンサを利用して、実橋梁を耐震補強前後で密に振動計測し、振動挙動を詳細に把握した。さらに、計測値と FEM と比較することで違いを明らかにし、振動数に加えて詳細モード形も

基準としてモデルアップデートを試みた。FEM のより詳細な検討と計測誤差の分析が必要であるものの、密な計測を利用することで、構造物のより精緻なモデル化ができることを示した。

3-2-3. 振動特性変化の解析的検討

3-2-3-1. 概要

全項では、鋼逆ランガー橋の耐震補強前後により、橋全体系の鉛直振動モードにおいて固有振動数には有意な差が見られないものの、多点同時計測により得られたモード形には変化が生じていることが確認された。また、支点条件をパラメータとした FEM モデルアップデーティングにより、固有振動数、モード形ともに実挙動を大まかに捉えた。

本項では、FEM モデルを用いて支承部の拘束条件や部材に損傷が生じた場合の振動特性変化の感度解析をより精緻に行い、密な多点モード計測による損傷検知の可能性について考察を加える。

3-2-3-2. 基本モデル

(1) モデル概要

前項では ABAQUS を用いて解析したが、本項では耐震補強設計で用いた SeanFEM に戻して感度解析を行う。その際、RC 床版のモデル化は、上部工の振動特性をより精緻に評価するため ABAQUS のモデルと同様にファイバー要素からシェル要素に変更した。また、床版を支持する鉛直材の回転成分を全方向フリーとし、力の並進成分のみ伝達するモデル化とした。

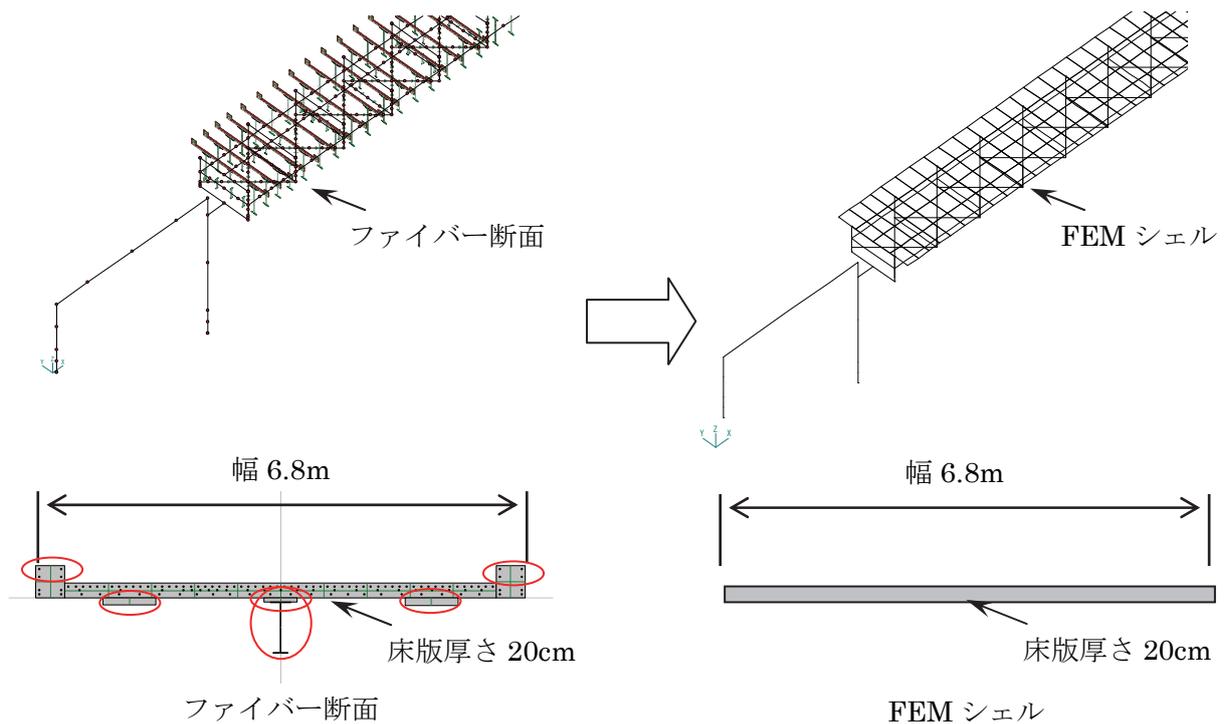


図 3-9 RC 床版モデルのファイバー要素からシェル要素への変更

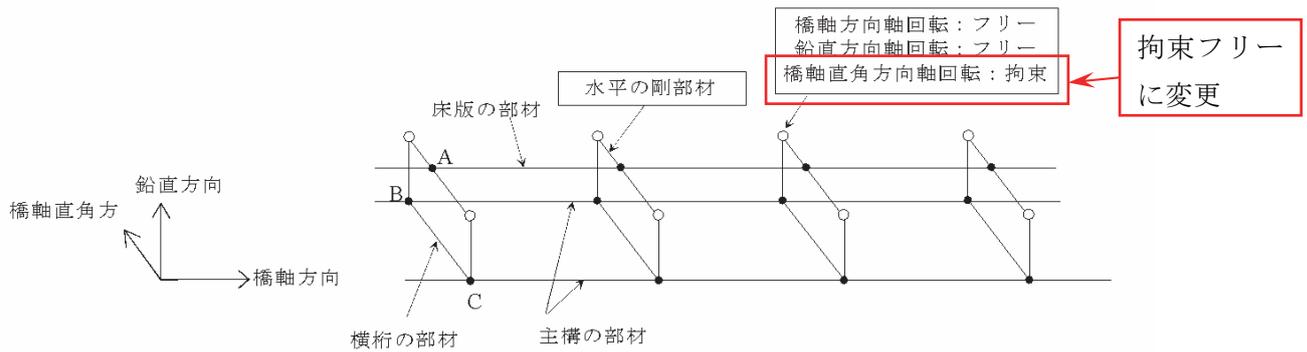


図 3-10 RC 床版モデルの支持条件の変更

(2) 予備解析

補強前の現況モデルおよび補強モデルにおいて、固有値解析による ABAQUS と SeanFEM の固有振動数を以下に比較する。どちらも SeanFEM は死荷重状態を初期状態として固有値解析を行った結果である。

現況モデルにおける橋軸直角方向では ABAQUS と SeanFEM で比較的近い結果であるが、鉛直方向および補強モデルの橋直・鉛直方向では 5%以上の相違が生じているモードがあり、十分に近似する結果ではないものの、計測値に対する支点条件の変化や損傷の有無の感度を確認する上においては、この SeanFEM の現況モデルで十分と考え、以降の検討に使用することとした。

表 3-3 現況モデルにおける固有振動数比較

振動数 (Hz)	Before			Diff (%)	Before		
	計測	SeanFEM			ABAQUS	SeanFEM	Diff (%)
橋直	1次	0.93	0.96	3%	0.92	0.96	4%
	2次	1.58	1.57	-1%	1.62	1.57	-3%
鉛直	1次	1.44	1.34	-7%	1.46	1.34	-8%
	2次	1.57	1.48	-6%	1.57	1.48	-6%

表 3-4 補強モデルにおける固有振動数比較

振動数 (Hz)	After			Diff (%)	After		
	計測	SeanFEM			ABAQUS	SeanFEM	Diff (%)
橋直	1次	1.03	1.11	7%	1.03	1.11	7%
	2次	1.66	1.64	-1%	1.67	1.64	-2%
鉛直	1次	1.44	1.35	-6%	1.39	1.35	-3%
	2次	1.51	1.59	5%	1.45	1.59	9%

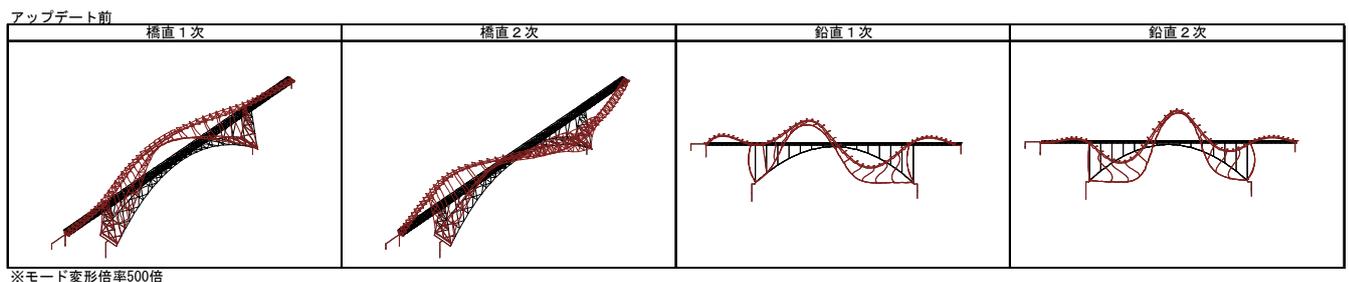


図 3-11 主要な固有振動モード (SeanFEM 現況モデル)

3-2-3-3. 支点条件のモデルアップデート

(1) アップデート方法

対象橋梁の支点条件の変化が固有振動数に及ぼす影響を確認する。検討に使用するモデルは、現況モデルの死荷重載荷有りとした。着目した支点条件は、アーチ基部および桁端支承部の直角方向軸回りおよび A2 支点の橋軸方向とした。アップデートの方法は、支点部弾性バネのバネ定数を自由の 0 から $1.0E+03\text{kN/m}$ → $1.0E+05\text{kN/m}$ → $1.0E+07\text{kN/m}$ → $1.0E+10\text{kN/m}$ と段階的に増加させた。

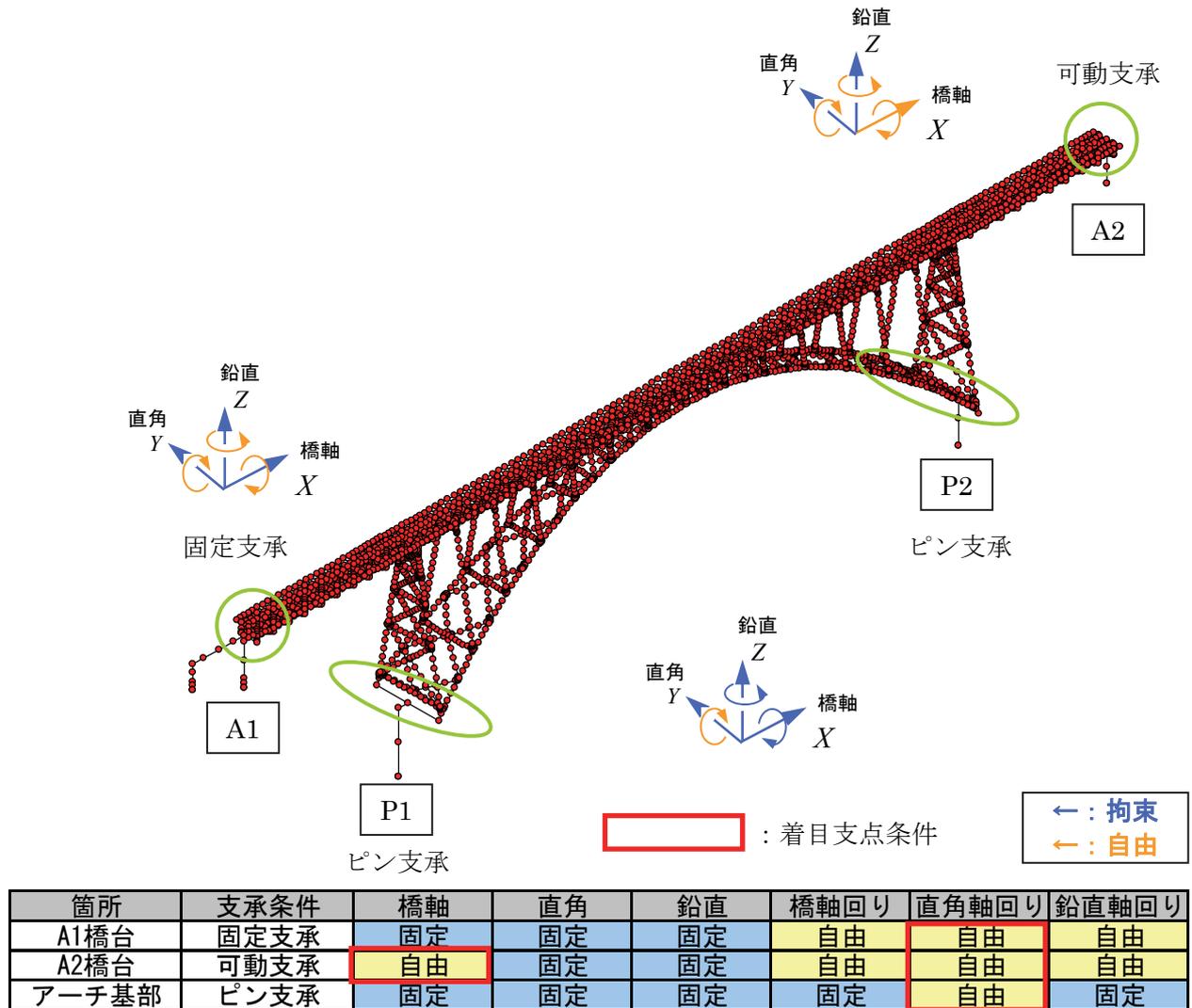
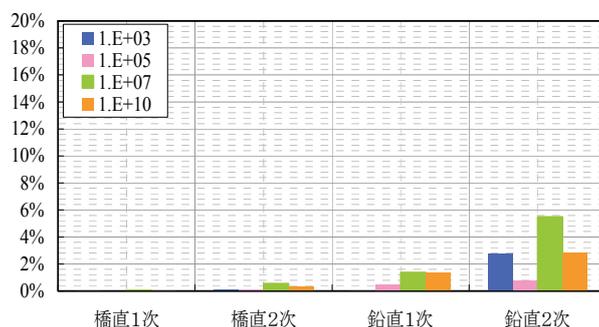


図 3-12 モデルアップデートにおける着目支点条件

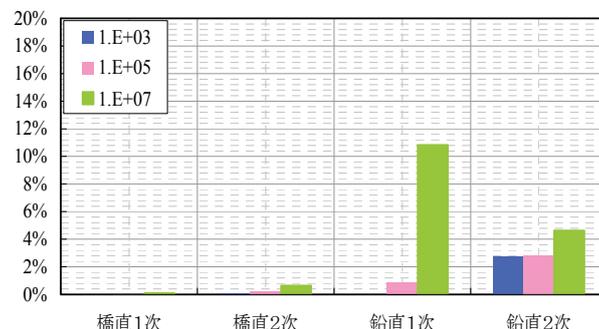
(2) アップデート結果

支点条件のアップデートによる固有振動数の変化率をグラフ化したものを図3-11に示す。鉛直モードにおいて最も感度が大きかったのはA2桁端の水平拘束であり、次いでA1・A2桁端部の直角軸回りの回転拘束であった。また、橋軸直角モードにおいては支点条件が固有振動数に及ぼす影響は小さく、支承部に加えて部材に損傷が生じた場合に変化を捉えるモードとして有意となる可能性が示唆される。

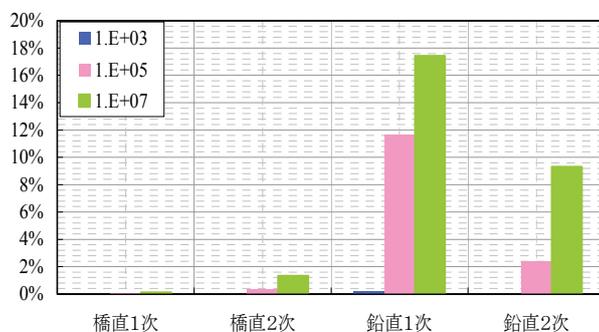
また、計測振動数に最も近似する場合のアップデート後の支点条件を表3-5に、振動数の比較結果を表3-6にそれぞれ示す。アップデートにより±3%の誤差で計測値に近似できていることがわかる。



(a) アーチ基部：回転拘束



(b) 桁端部：回転拘束



(c) A2 桁端部：水平拘束

図3-13 支点条件のアップデートによる固有振動数の変化率

表 3-5 アップデート後の支点条件

アップデート後

箇所	支承条件	橋軸	直角	鉛直	橋軸回り	直角軸回り	鉛直軸回り
A1橋台	固定支承	固定	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
A2橋台	可動支承	3.5E+04	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
アーチ基部	ピン支承	固定	固定	固定	固定	1.0E+07	固定

表 3-6 アップデート後の固有振動数（現況モデル）

振動数 (Hz)		Before		Diff (%)	Before		Diff (%)
		計測	SeanFEM		ABAQUS	SeanFEM	
橋直	1次	0.93	0.96	3%	0.92	0.96	4%
	2次	1.58	1.58	0%	1.62	1.58	-3%
鉛直	1次	1.44	1.44	0%	1.46	1.44	-2%
	2次	1.57	1.52	-3%	1.57	1.52	-3%

3-2-3-4. 部材損傷が生じた場合の感度解析

(1) 解析ケース

支点条件のアップデートを行ったモデルを使用し、部材損傷が生じた場合を想定した感度解析を行う。表 3-7 に解析ケースを示す。解析ケース S では、支承の機能不全を想定し、A2 可動支承の水平方向が腐食等により固着化した状態や、両桁端の回転やアーチ基部が固定された状態などを実施する。ケース AC, AR では、アーチクラウン部が疲労により破断したケースや、アーチ基部に水溜まりによる断面欠損を想定したケースを実施する。また、ケース D では床版上面の土砂化およびジョイント近傍の床版の疲労損傷を想定したケースを実施する。

表 3-7 解析ケース

ケース数	損傷状況	ケース名	内容
1	支承の機能不全	S1	桁端部の可動支承の水平方向固定 (A2橋台)
2		S2	桁端部の回転方向固定 (A1, A2橋台)
3		S3	アーチ基部の回転方向固定 (P1, P2)
4		S4	全支承の全方向固定
5	アーチクラウン部の疲労による破断	AC1	アーチリブと上部工の結合部材削除 (R側のみ)
6	アーチリブの腐食による断面欠損	AR1	アーチリブ基部の断面を減厚 (-25%減 1カ所 P1のR側)
7		AR2	アーチリブ基部の断面を減厚 (-25%減 4カ所)
8		AR3	アーチリブ基部の断面を減厚 (-75%減 4カ所)
9	床版の損傷	D1	床版上面の土砂化 (全板厚-1/3減)
10		D2	ジョイント近傍の床版の疲労亀裂 (端部想定区間剛性ゼロ)

※A1→A2橋台方向に向かってL側, R側

(2) 支承の機能不全

1) 損傷のモデル化

ケース S1～S4 における支点条件を表 3-8 に示す。健全状態の表 3-6 に対してピンク網掛け部が支点条件を変更した箇所である。

表 3-8 ケース S1～S4 における支点条件

S1：桁端部 (A2橋台) の可動支承の水平方向固定

箇所	支承条件	橋軸	直角	鉛直	橋軸回り	直角軸回り	鉛直軸回り
A1橋台	固定支承	固定	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
A2橋台	可動支承	1.0E+10	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
アーチ基部	ピン支承	固定	固定	固定	固定	1.0E+07	固定

S2：桁端部 (A1, A2橋台) の回転方向固定

箇所	支承条件	橋軸	直角	鉛直	橋軸回り	直角軸回り	鉛直軸回り
A1橋台	固定支承	固定	固定	固定	1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10
A2橋台	可動支承	3.5E+04	固定	固定	1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10
アーチ基部	ピン支承	固定	固定	固定	固定	1.0E+07	固定

S3：P1, P2アーチ基部の回転方向固定

箇所	支承条件	橋軸	直角	鉛直	橋軸回り	直角軸回り	鉛直軸回り
A1橋台	固定支承	固定	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
A2橋台	可動支承	3.5E+04	固定	固定	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+05
アーチ基部	ピン支承	固定	固定	固定	固定	1.0E+10	固定

全支承の全方向固定

箇所	支承条件	橋軸	直角	鉛直	橋軸回り	直角軸回り	鉛直軸回り
A1橋台	固定支承	固定	固定	固定	1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10
A2橋台	可動支承	1.0E+10	固定	固定	1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10
アーチ基部	ピン支承	固定	固定	固定	固定	1.0E+10	固定

2) 振動数変化

ケース S3 は、前項で設定したアップデートの設定値が剛に近い値のため変化が小さい。ケース S4 の場合よりもケース S1 の方が、鉛直 1 次モードへの影響が大きい。拘束条件が異なることで死荷重載荷時の受け持つ荷重バランスの影響が原因と考えられる。よって、対象橋梁では、桁端部可動支承の水平方向の拘束条件の感度が高いことがわかった。

現況モデルー死荷重有

モード	支承機能不全			
	桁端部		アーチ基部	全支承拘束
	水平拘束	回転拘束	回転拘束	
	S1	S2	S3	S4
橋直 1 次	0%	0%	0%	0%
橋直 2 次	1%	0%	0%	2%
鉛直 1 次	14%	6%	0%	7%
鉛直 2 次	7%	1%	0%	8%

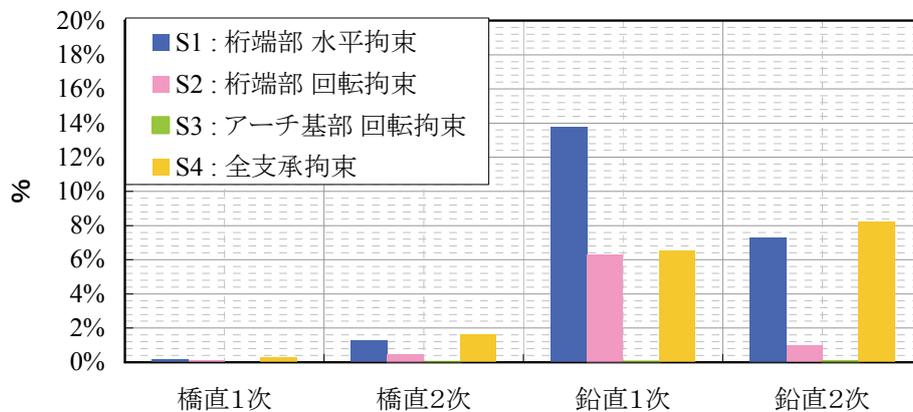
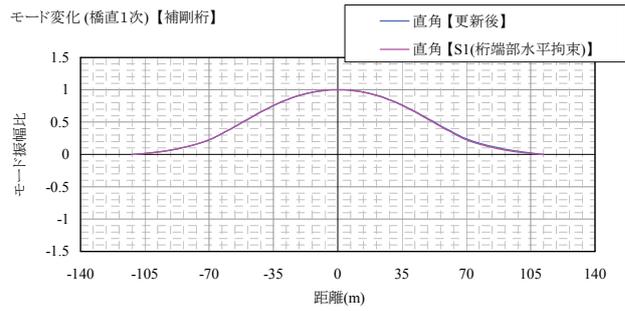
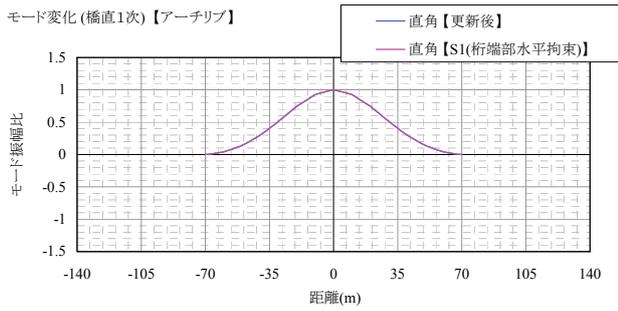


図 3-14 支承の機能不全による固有振動数の変化率

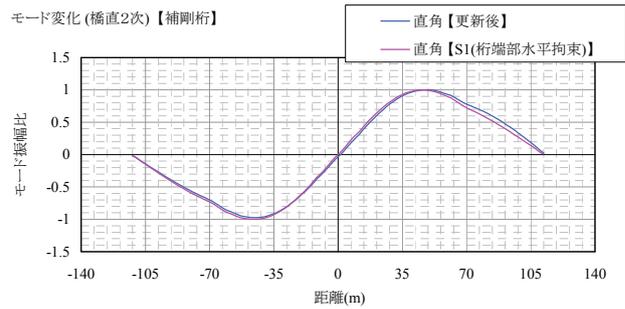
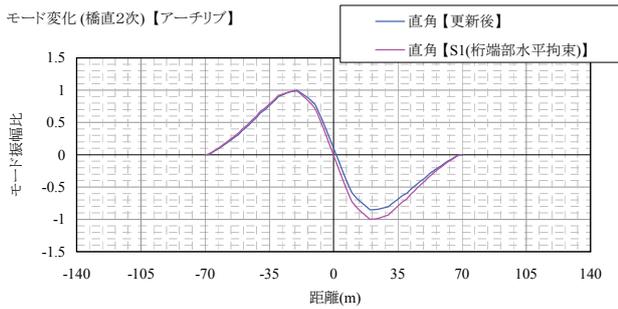
3) モード変化

各振動モードの主方向のモード形変化を図 3-15~18 に示す。鉛直振動の振動数変化の感度が最も大きかった桁端部水平拘束のケース S1 では、モード形変化においても鉛直モード形の変化が全ケースの中で最も大きく、アーチリブ、補剛桁ともに同程度の変化を呈している。桁端部の回転が拘束されたケース S2 では、鉛直 2 次モードの振動数は 1% の変化しかないが、鉛直モード形では有意な変化が見られる。また、アーチ基部の回転が拘束されたケース S3 では、鉛直モード形のアーチ基部で僅かに変化する程度でほとんどモード形の変化を示さなかった。

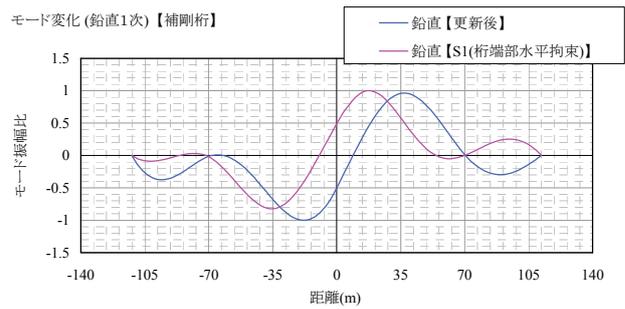
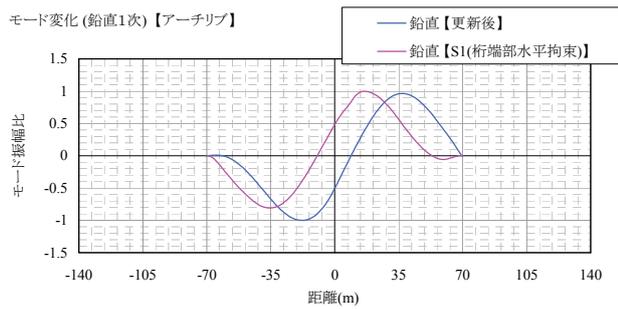
したがって、桁端部の支承の機能不全であれば、加速度計を設置しやすい補剛桁の鉛直モード形変化によって検知できる可能性が示唆される。



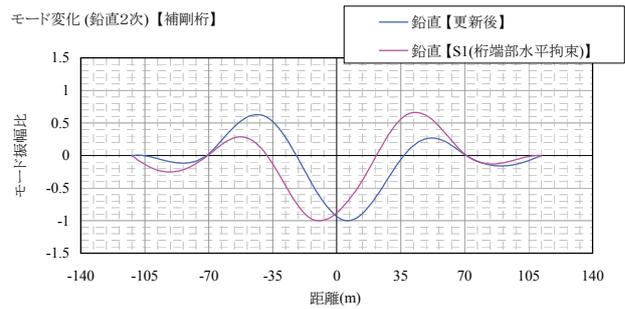
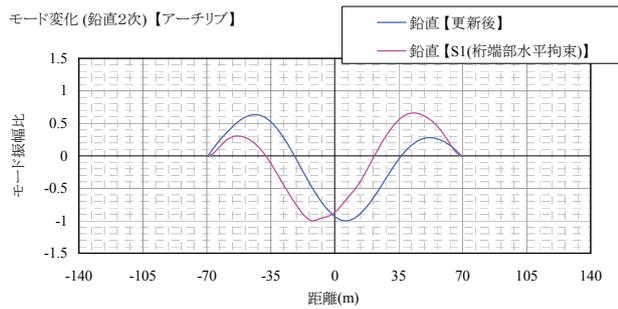
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

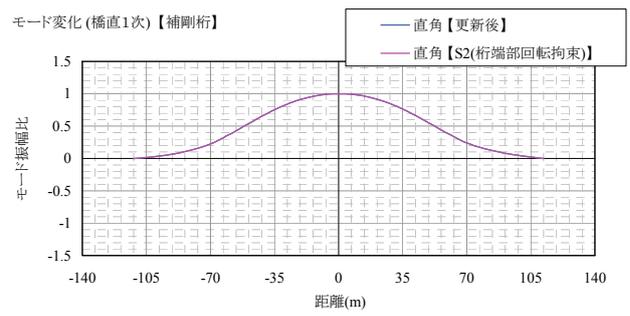
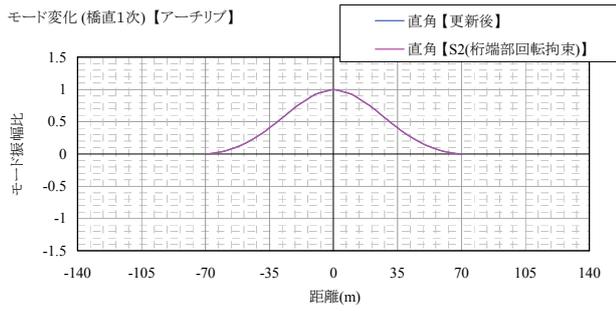


(c) 鉛直 1 次モード

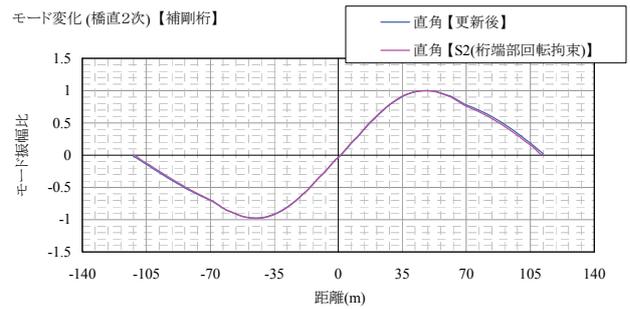
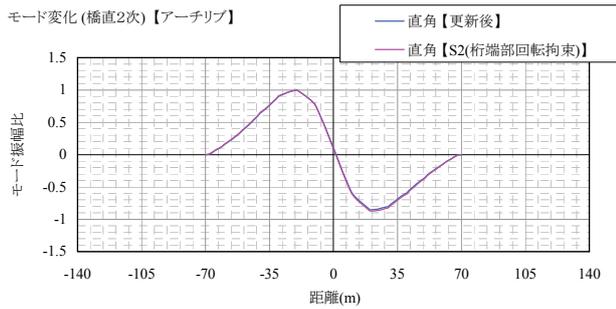


(d) 鉛直 2 次モード

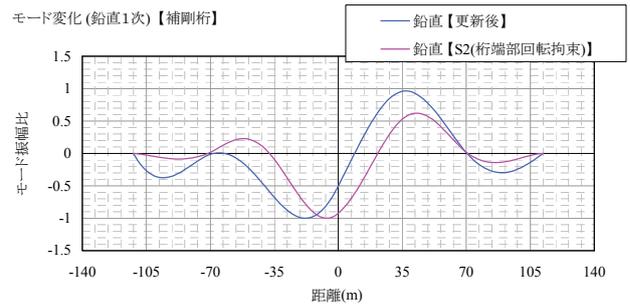
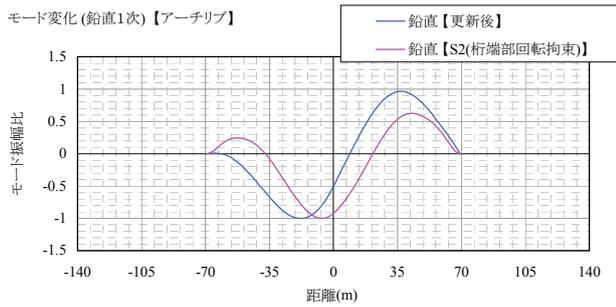
図 3-15 ケース S1 : 桁端部水平拘束のモード変化



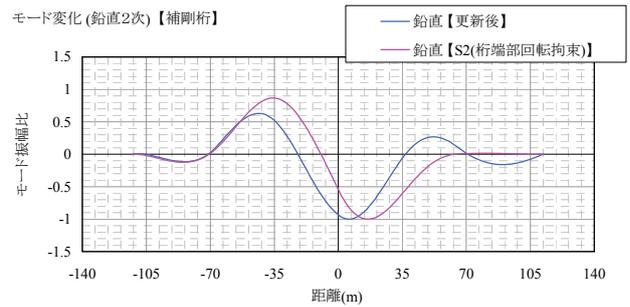
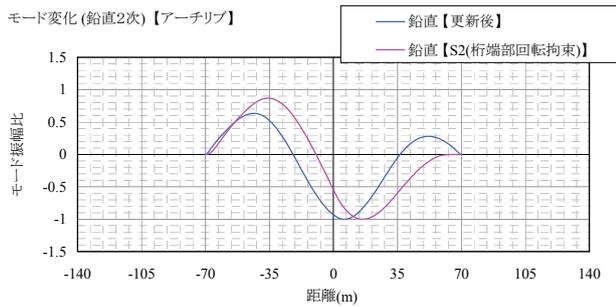
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

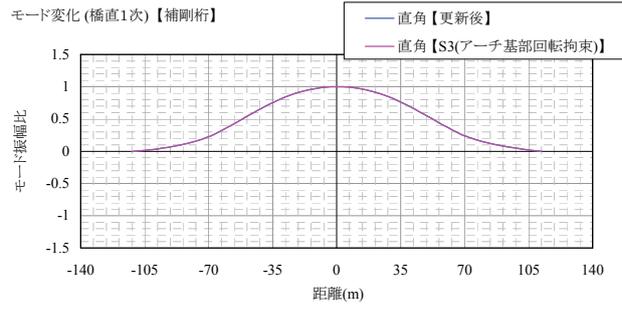
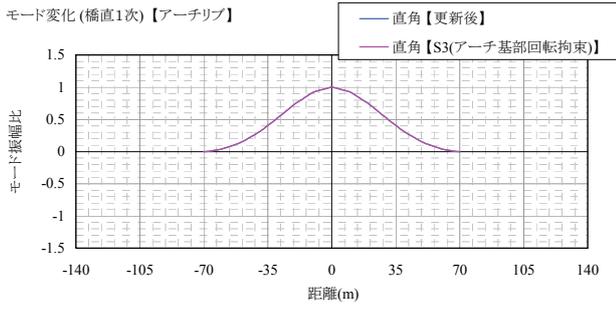


(c) 鉛直 1 次モード

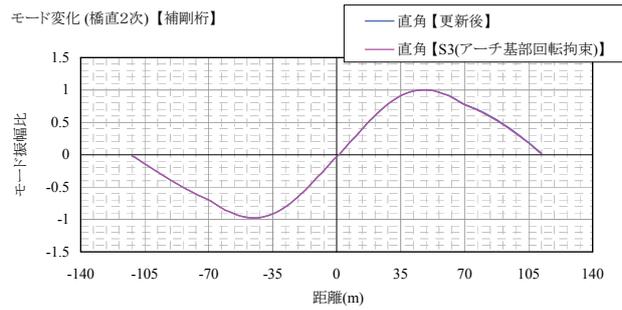
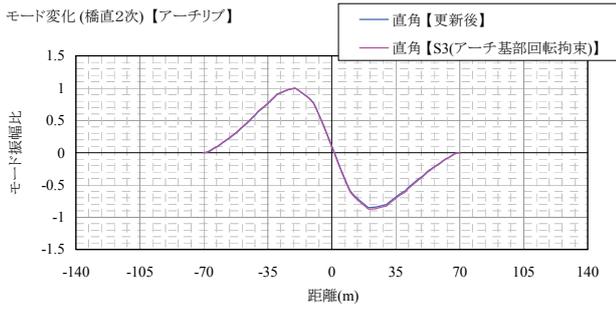


(d) 鉛直 2 次モード

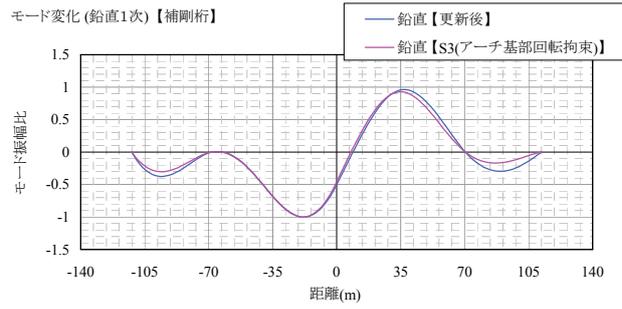
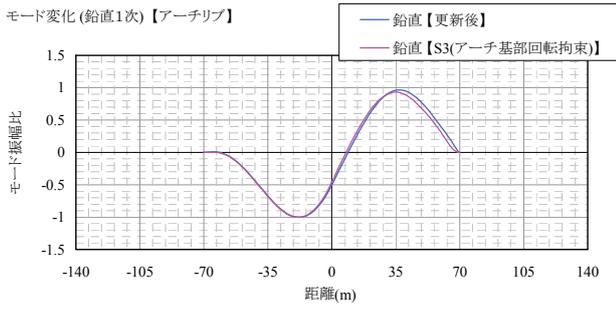
図 3-16 ケース S2 : 桁端部回転拘束のモード変化



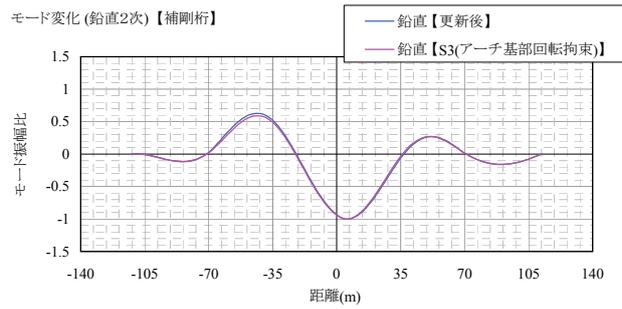
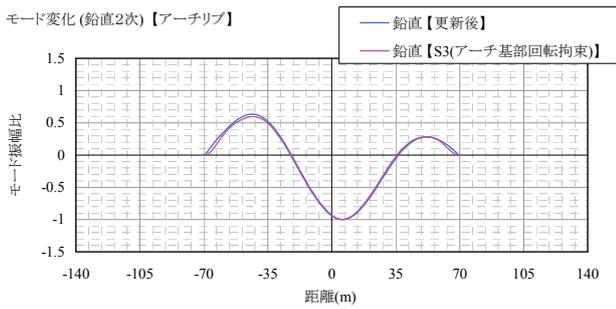
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

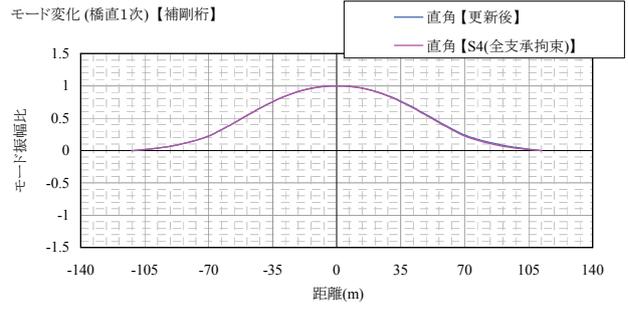
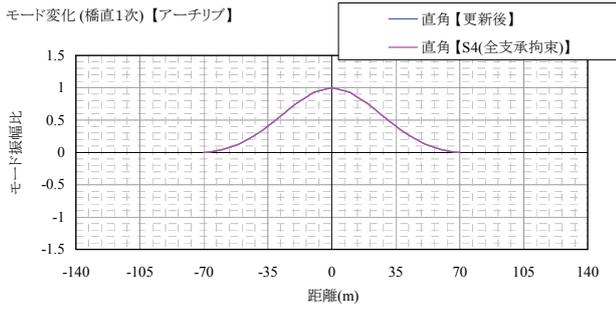


(c) 鉛直 1 次モード

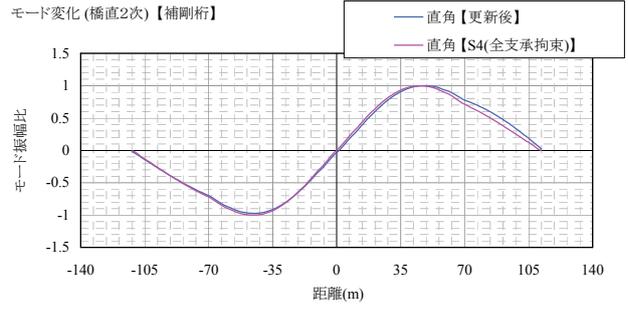
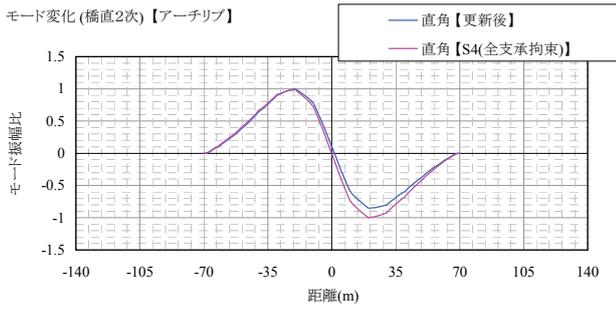


(d) 鉛直 2 次モード

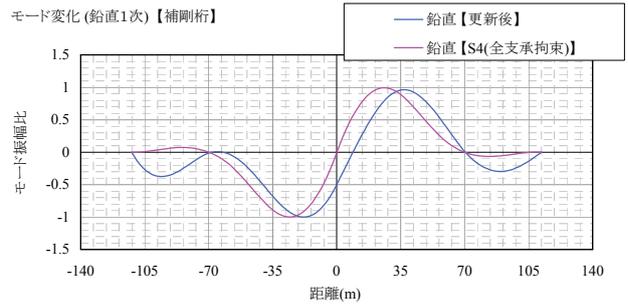
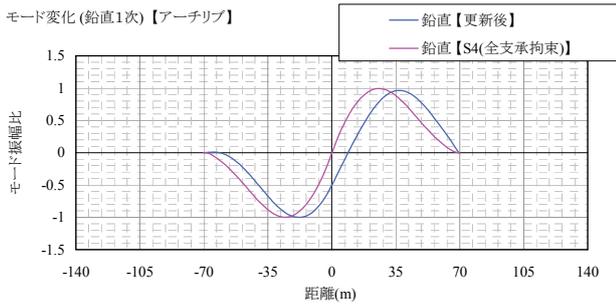
図 3-17 ケース S3 : アーチ基部回転拘束のモード変化



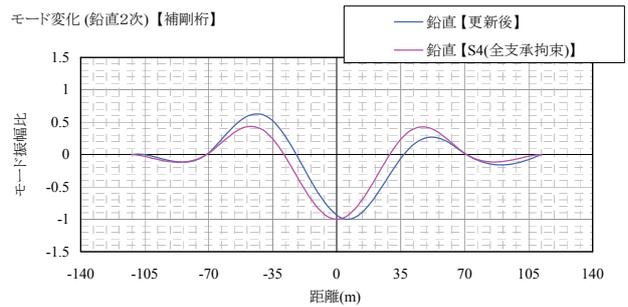
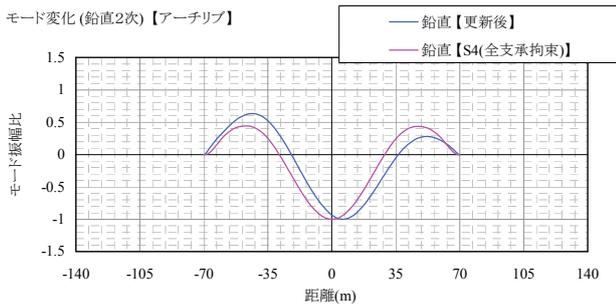
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード



(c) 鉛直 1 次モード



(d) 鉛直 2 次モード

図 3-18 ケース S4 : 全支承拘束のモード変化

(3) アーチクラウン部の疲労破断

1) 損傷のモデル化

アーチクラウン部の疲労破断を想定したケース AC1 のモデル化を図 3-19 に示す。

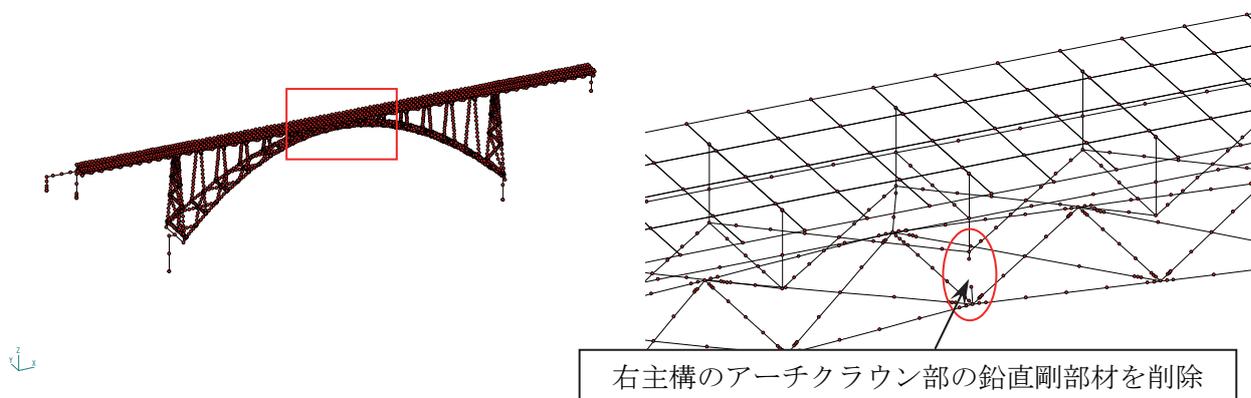


図 3-19 アーチクラウン部疲労破断のケース AC1 のモデル化

2) 振動数変化

表 3-9 に示すとおり、クラウン部の片側破断による振動数変化率は鉛直振動で 1~2% 程度であり、有意な変化ではない。

表 3-9 固有振動数の変化率

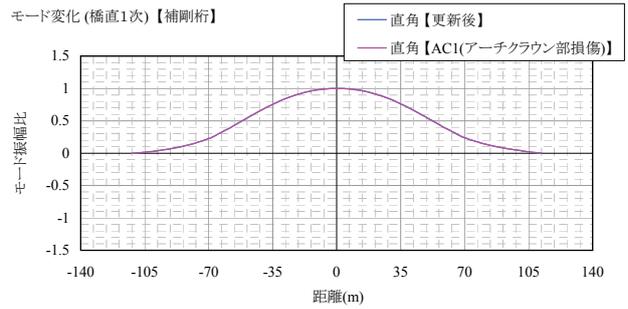
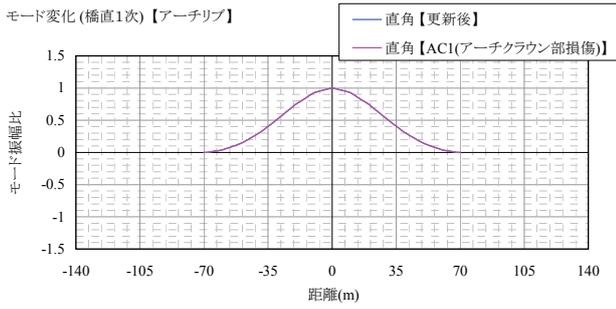
AC1 : クラウン部片側破断

振動数 (Hz)		SeanFEM		Diff (%)
		変更後	破断	
橋直	1次	0.96	0.96	0%
	2次	1.58	1.58	0%
鉛直	1次	1.44	1.44	1%
	2次	1.52	1.56	2%

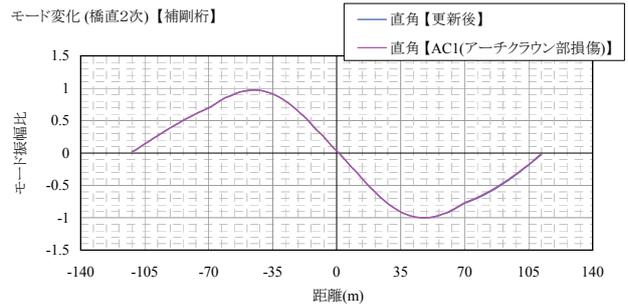
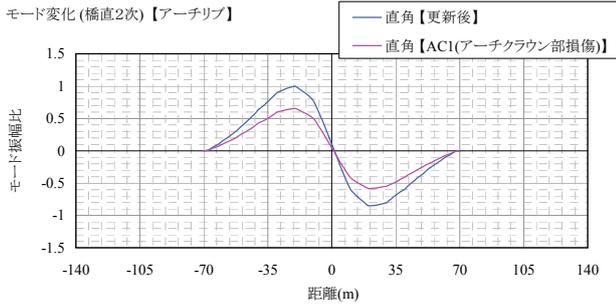
3) モード変化

アーチクラウン部の片側破断前後の各振動モードの主方向のモード形変化を図 3-20 に示す。鉛直モードのアーチリブおよび補剛桁で変化が生じているほか、橋軸直角方向 2 次モードのアーチリブにおいてもモード形の変化が認められる。

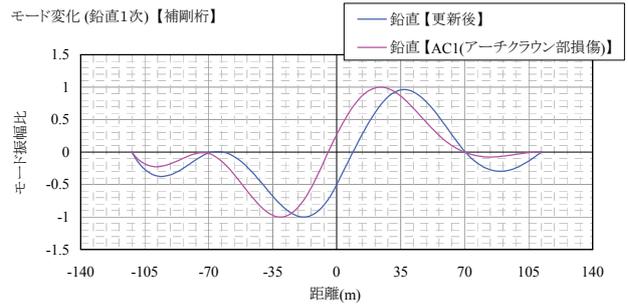
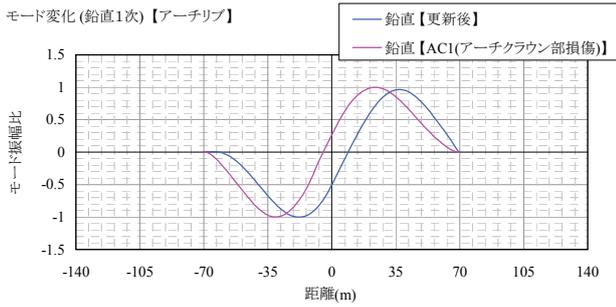
したがって、クラウン部の疲労破断は、橋全体モードの振動数変化は僅かであるものの、モード形に着目すれば検知できる可能性が考えられる。



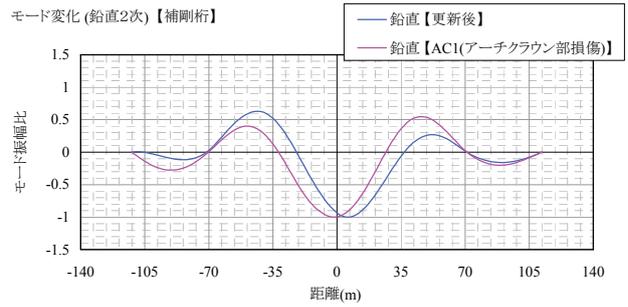
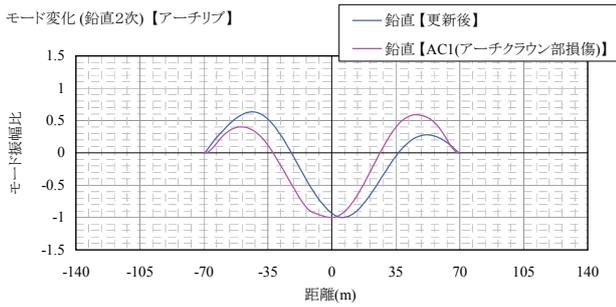
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード



(c) 鉛直 1 次モード



(d) 鉛直 2 次モード

図 3-20 ケース AC1 : アーチクラウン部疲労破断のモード変化

(4) アーチリブの腐食による断面欠損

1) 損傷のモデル化

アーチリブ基部の腐食による断面欠損を想定したケース AR1~AR3 のモデル化を図 3-21 に示す。アーチ基部の約 2m の範囲を腐食対象範囲として、ウェブとフランジの板厚を減厚させ、さらに同位置の質量も減厚分だけ減らしたモデルとした。

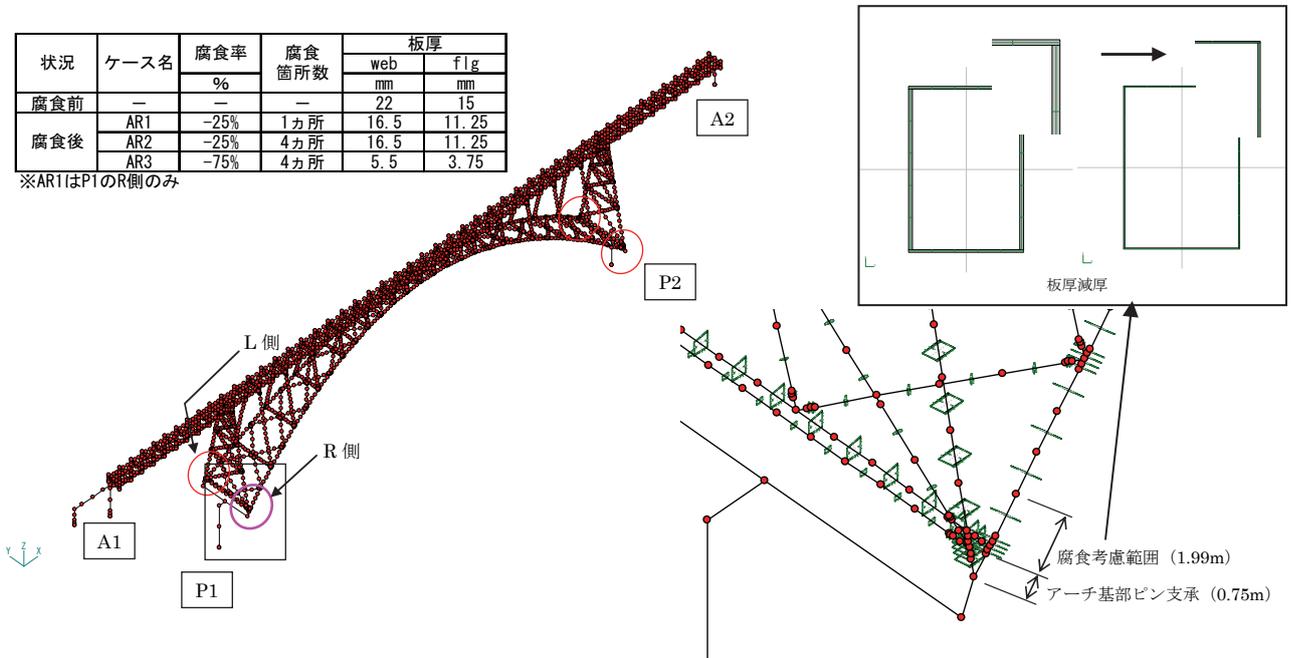


図 3-21 アーチ基部腐食のケース AR1~3 のモデル化

2) 振動数変化

図 3-22 に示すとおり、腐食率-25%のケース AR1, AR2 では振動数変化は 2%未満と小さいが、腐食率-75%@4 箇所では、橋直 1 次モードの振動数が 12%低下した。また、腐食率-25%@1 箇所において鉛直モードの振動数が僅かに増加する傾向を示したが、剛性低下より質量低下が影響したものと考えられる。

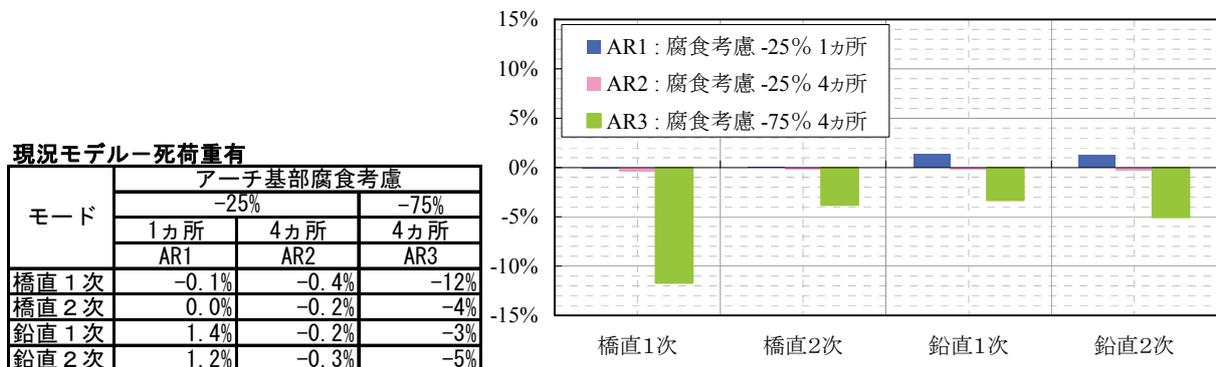


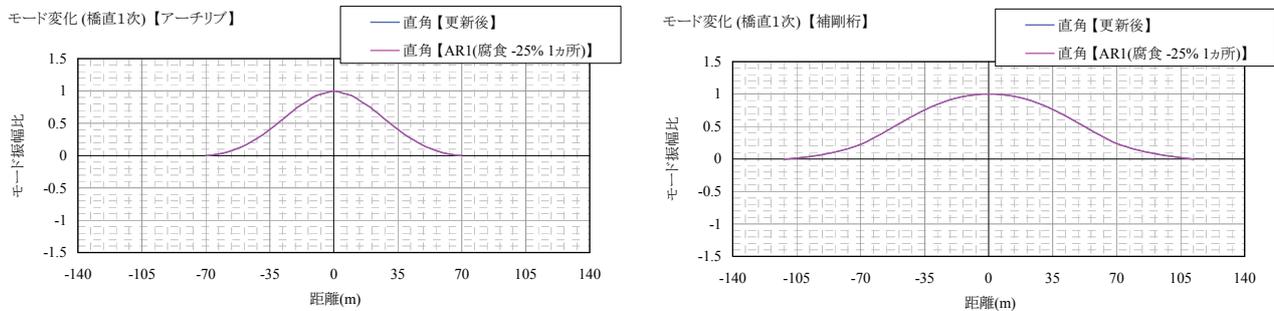
図 3-22 アーチ基部が腐食した場合の固有振動数の変化率

3) モード変化

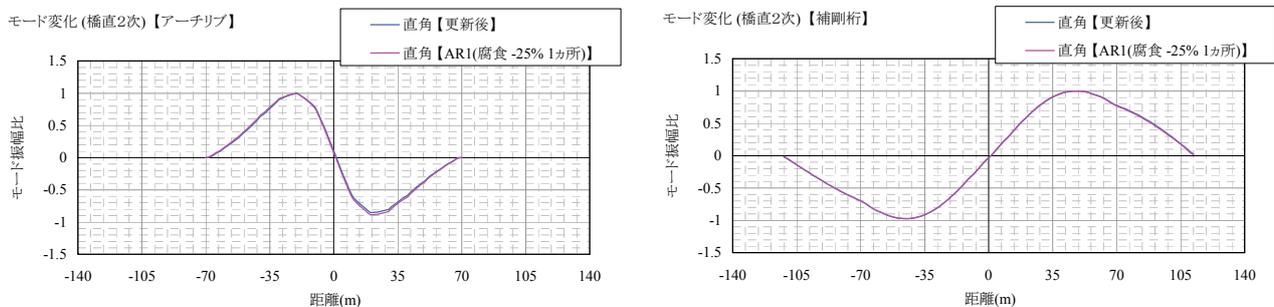
各振動モードの主方向のモード形変化を図 3-23~25 に示す。腐食率-25%@4 箇所のケース AR2 に比べて、腐食率-25%@1 箇所のケース AR1 の方が鉛直振動の鉛直モード形の変化が大きいことが特

徴的であり、1 箇所の腐食という非対称性の損傷の方がモード形での損傷検知が有効となることを示唆している。また、橋軸直角 2 次モードにおいてもアーチリブの鉛直モード形では有意な変化が生じている (図 3-26)。実際、橋面排水における鉛直垂れ流し排水管の位置関係や日照方向の関係などにより、アーチ基部 4 箇所が非対称に腐食が進行することが良く起こりうるものと考えられる。

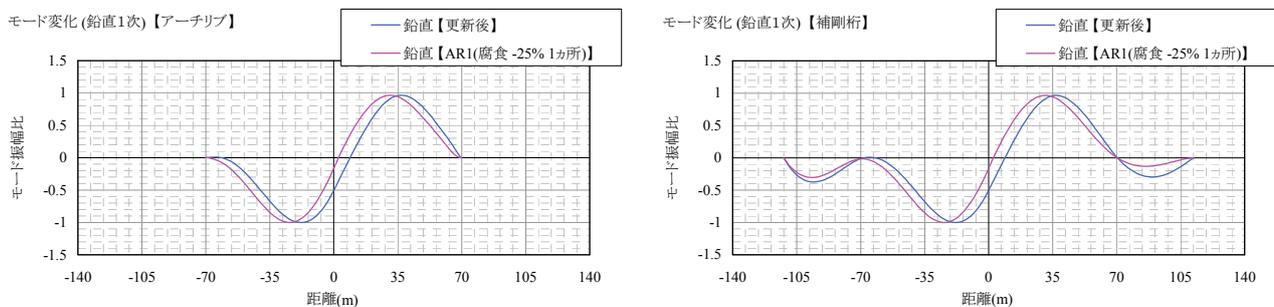
また、ケース AR3 のモード形 (図 3-25) より腐食率が-75%まで進行すれば 4 箇所が同程度進行した場合でもモード形の変化が見て取れる。



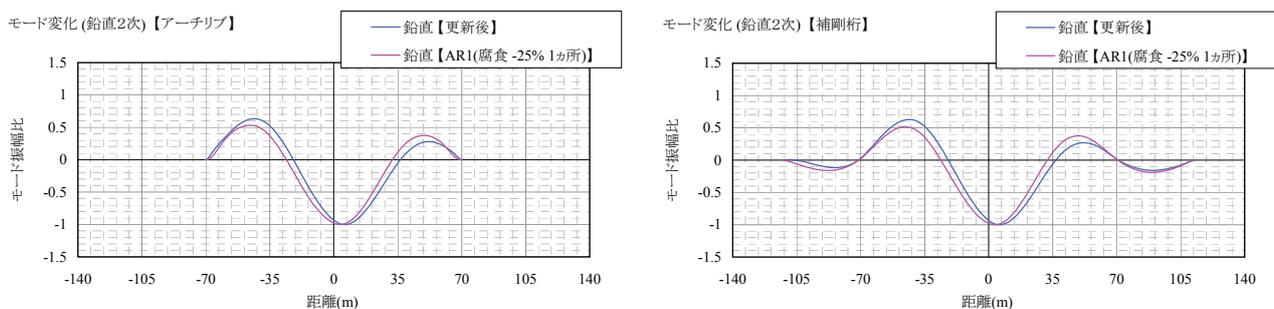
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

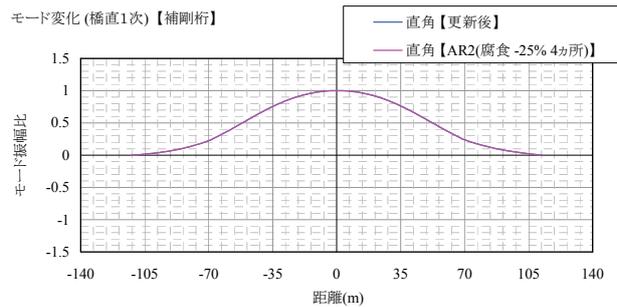
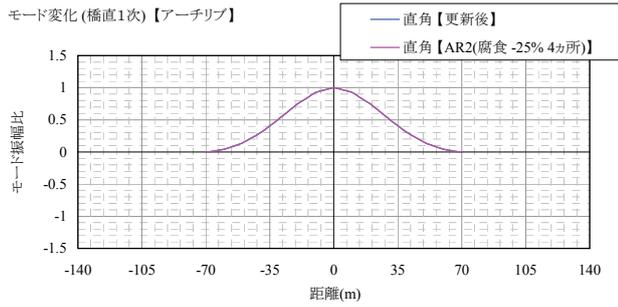


(c) 鉛直 1 次モード

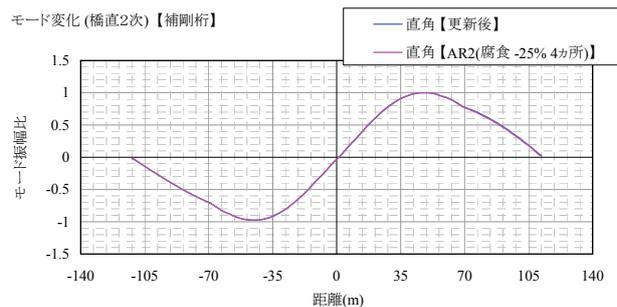
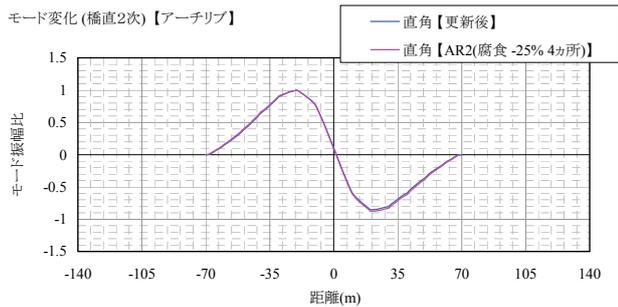


(d) 鉛直 2 次モード

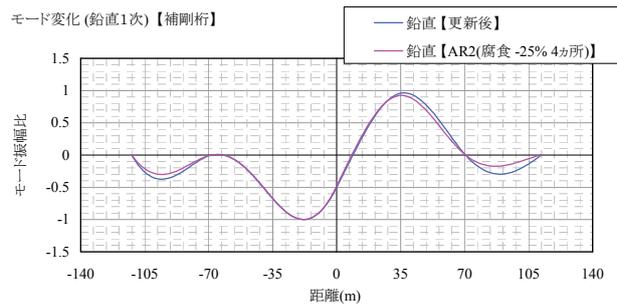
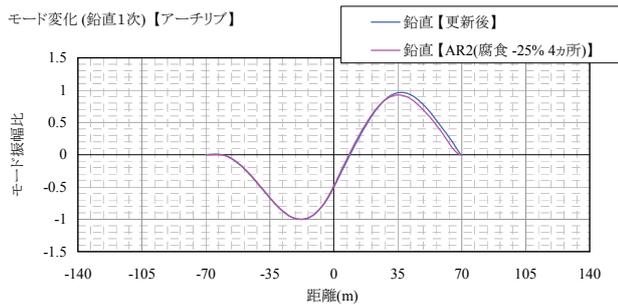
図 3-23 ケース AR1 : 腐食率-25%@1 箇所 (P1R) のモード変化



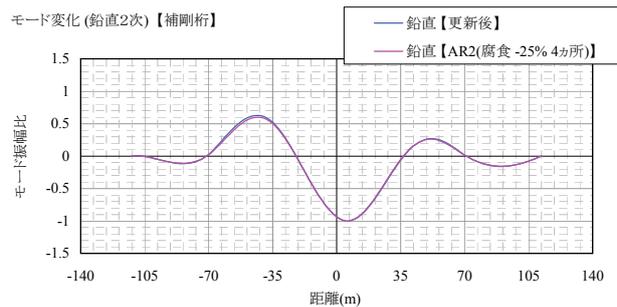
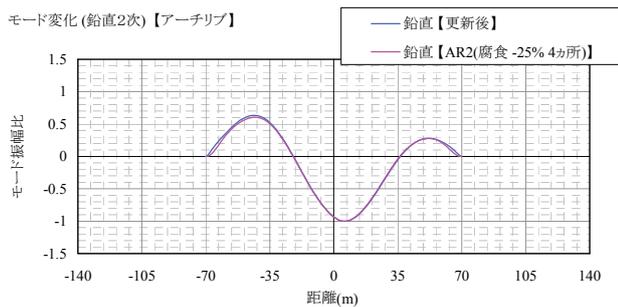
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

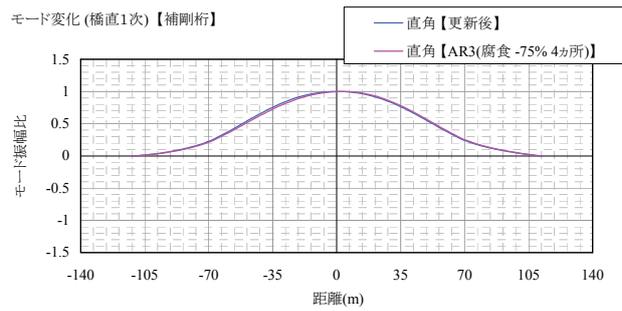
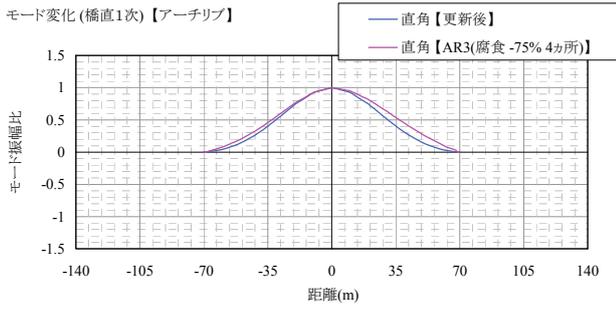


(c) 鉛直 1 次モード

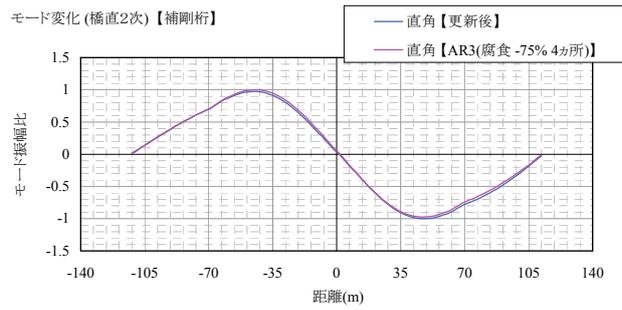
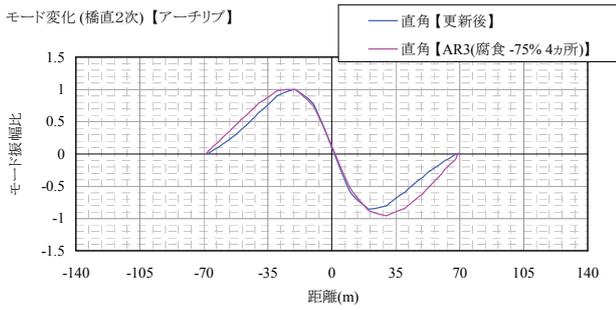


(d) 鉛直 2 次モード

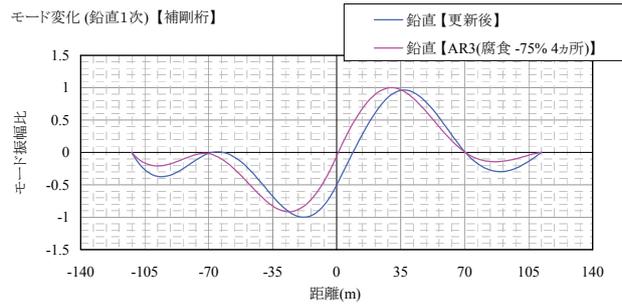
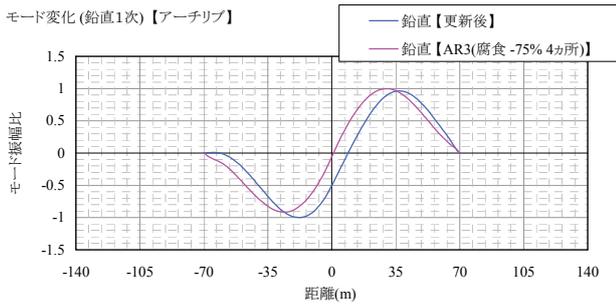
図 3-24 ケース AR2 : 腐食率-25%@4 箇所でのモード変化



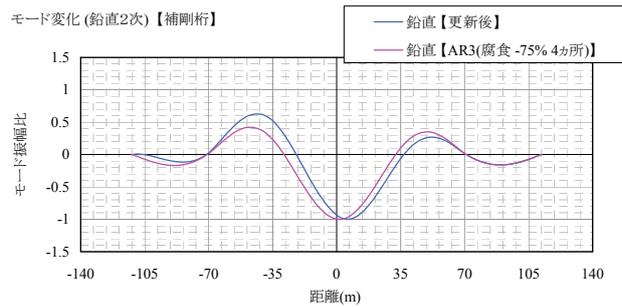
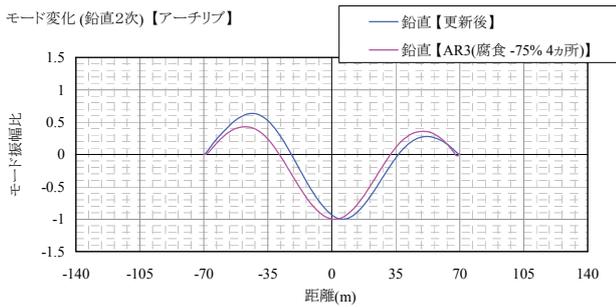
(a) 橋軸直角 1次モード



(b) 橋軸直角 2次モード

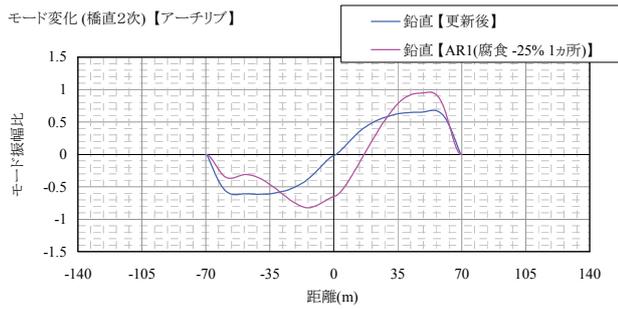


(c) 鉛直 1次モード

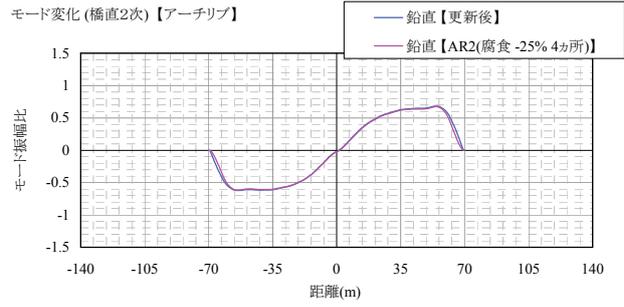


(d) 鉛直 2次モード

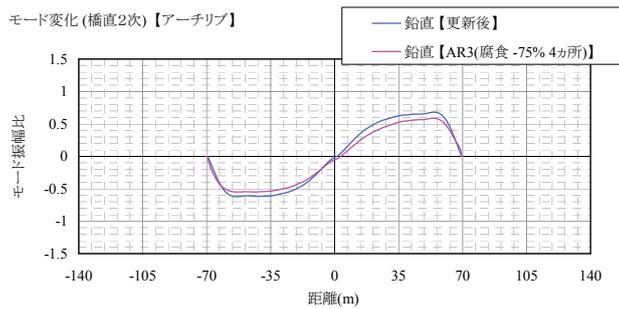
図 3-25 ケース AR3 : 腐食率-75%@4 箇所モード変化



(a) ケース AR1 : 腐食率-25%@1箇所



(b) ケース AR2 : 腐食率-25%@4箇所



(c) ケース AR2 : 腐食率-25%@4箇所

図 3-26 橋軸直角 2 次モードの鉛直モード形の変化

(5) 床版の損傷

1) 損傷のモデル化

床版の損傷を想定したケース D1, D2 のモデル化を図 3-21 に示す。床版上面の土砂化を想定したケース D1 では、床版シェル要素の板厚を一律-1/3 減とした。ジョイント近傍の床版の疲労亀裂を想定したケース D2 では、青色着色部のシェル要素を削除して剛性を 0 とした。なお、質量は残した。

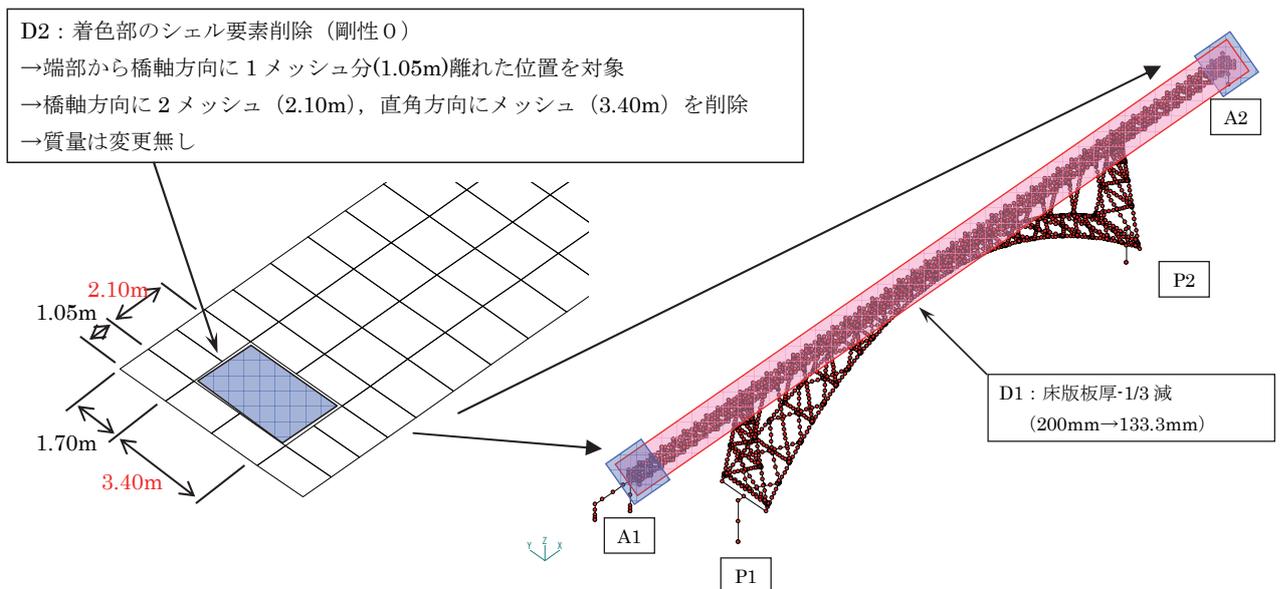


図 3-27 床版損傷のケース D1, D2 のモデル化

2) 振動数変化

図 3-28 に示すとおり、端部床版が局所的に疲労損傷したケース D2 では振動数は全く変化しないが、床版全板厚が一律-1/3 減となったケース D1 では橋軸直角モードの振動数が 3~4% 減となった。これは、本ランガー橋における床版剛性の寄与が鉛直モードより橋直モードの方が大きいため橋直振動数の変化が顕著となったものと考えられる。

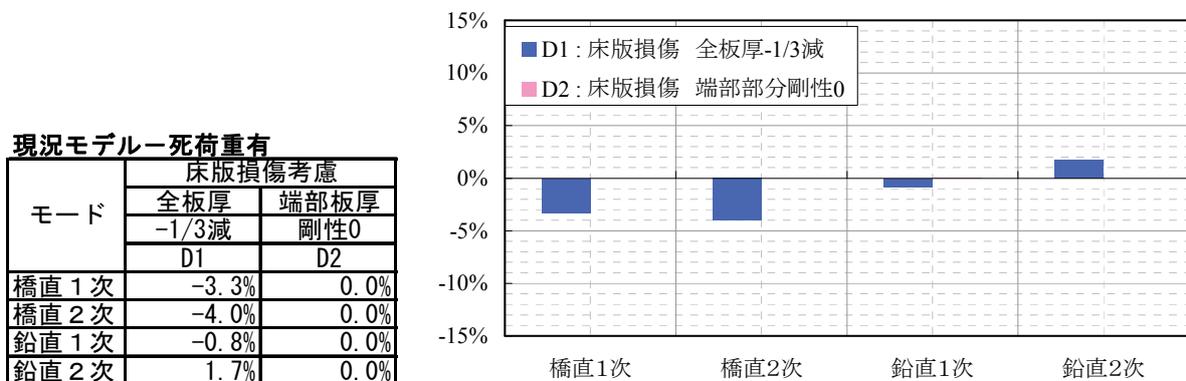
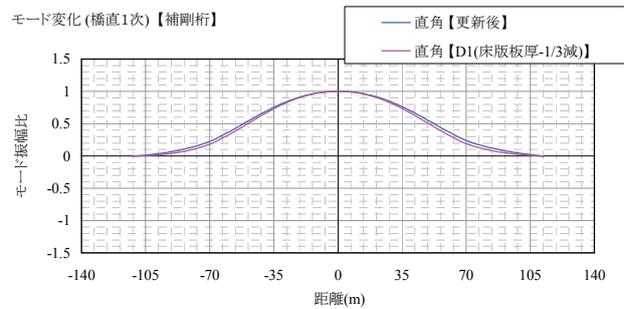
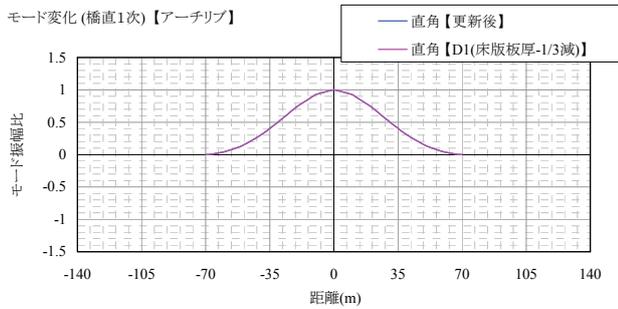


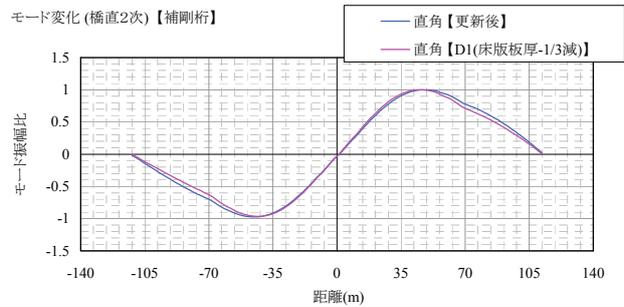
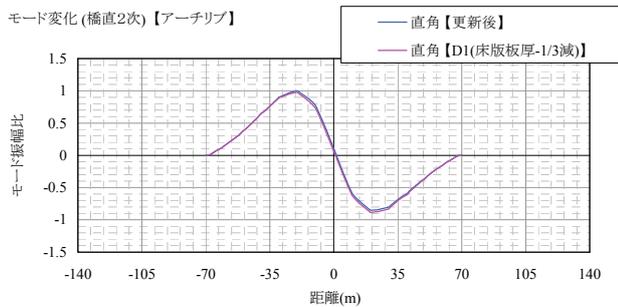
図 3-28 床版が腐食した場合の固有振動数の変化率

3) モード変化

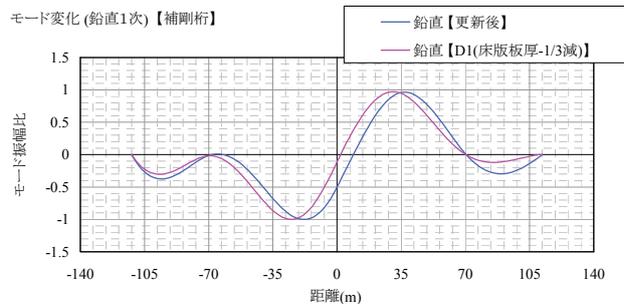
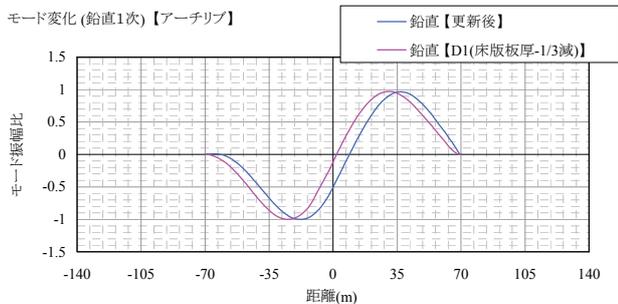
各振動モードの主方向のモード形変化を図 3-29~30 に示す。床版全板厚-1/3 減のケース D1 では橋軸直角モードの振動数変化が大きかったが、モード形では鉛直モードの変化が大きい傾向にある。また、端部床版が局部的に疲労損傷したケース D2 では振動数変化と同様にモード形変化はほとんど見られないが、鉛直 1 次モードの端支間の補剛桁において僅かな変化が見て取れる。



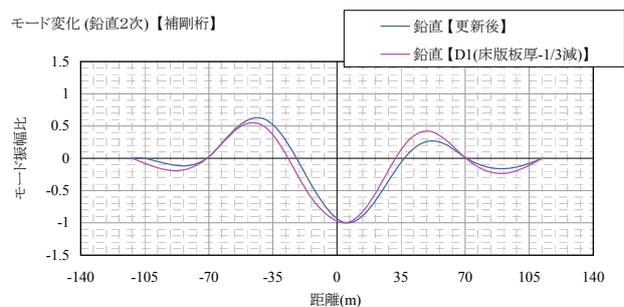
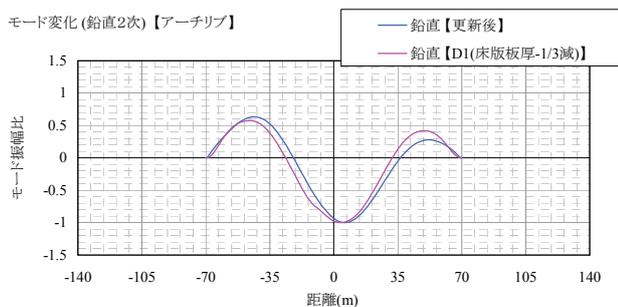
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード

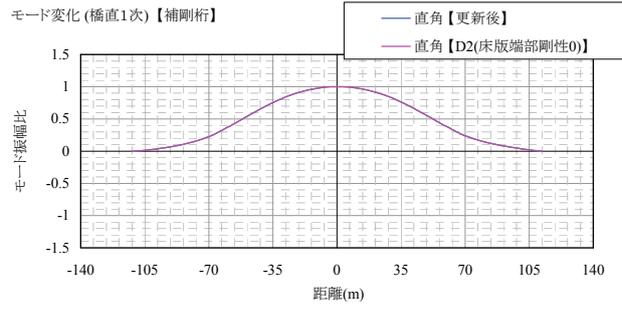
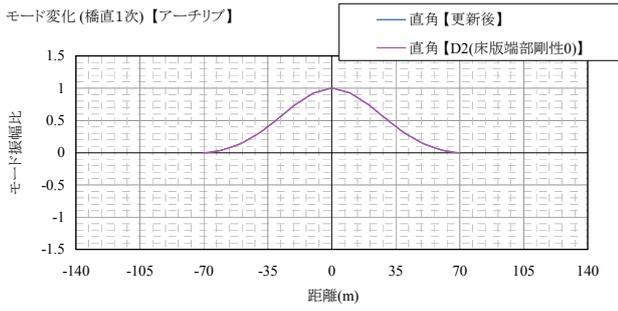


(c) 鉛直 1 次モード

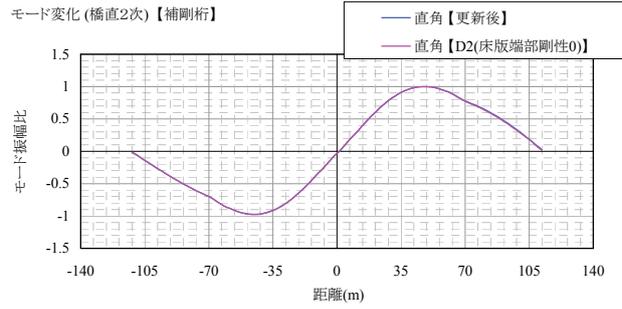
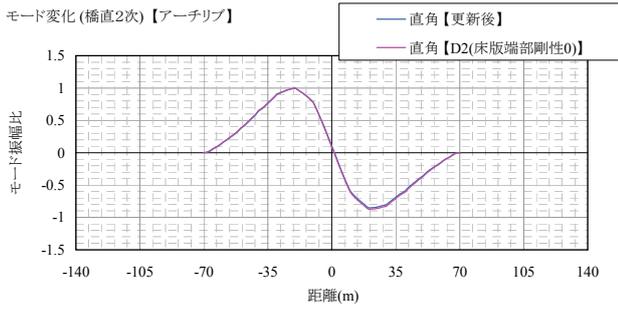


(d) 鉛直 2 次モード

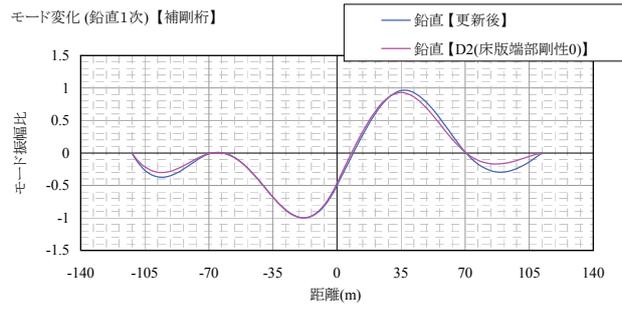
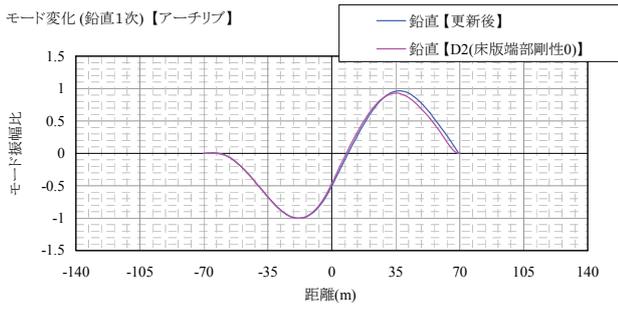
図 3-29 ケース D1 : 床版全板厚-1/3 減のモード変化



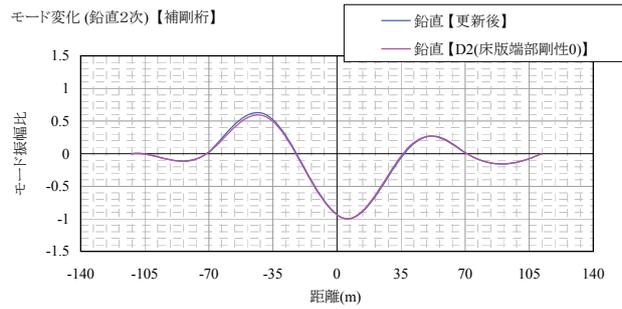
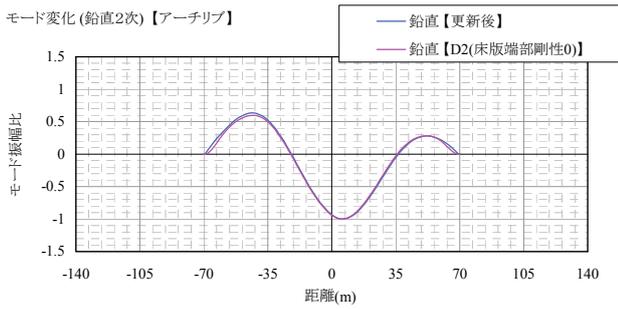
(a) 橋軸直角 1 次モード



(b) 橋軸直角 2 次モード



(c) 鉛直 1 次モード



(d) 鉛直 2 次モード

図 3-30 ケース D2 : 端部床版剛性ゼロのモード変化

3-2-3-5. 鋼材腐食による耐荷力変化と振動特性変化の比較分析

(1) 分析方法

アーチ基部の腐食を模擬したケース AR1～3 のモデルを用いて弾塑性有限変位プッシュオーバー解析を行い、荷重変位曲線の比較から腐食による橋全体系の耐荷力変化を確認する。载荷方法は図 3-31 に示すとおり、鉛直方向、直角方向それぞれに自重を漸増させる方法とする。

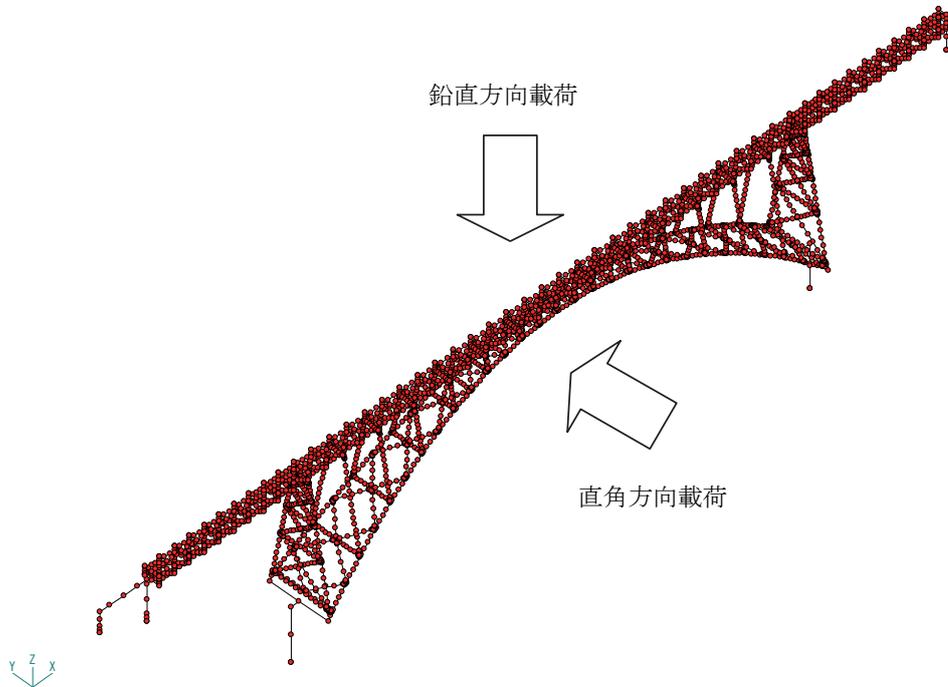


図 3-31 漸増载荷する荷重の载荷点と方向

(2) 鉛直方向载荷解析結果

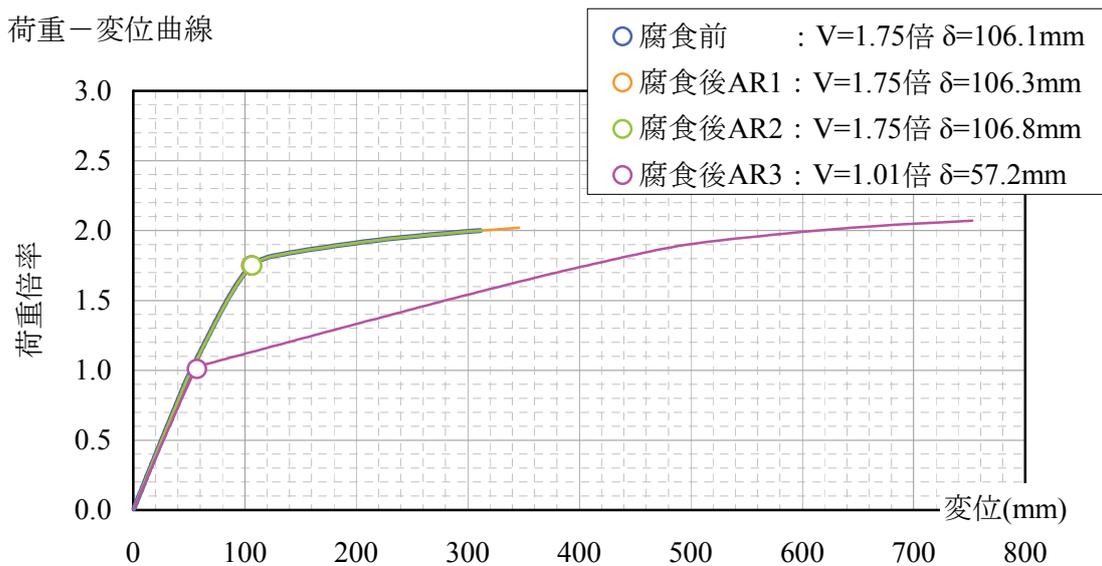


図 3-32 鉛直方向载荷による荷重変位曲線

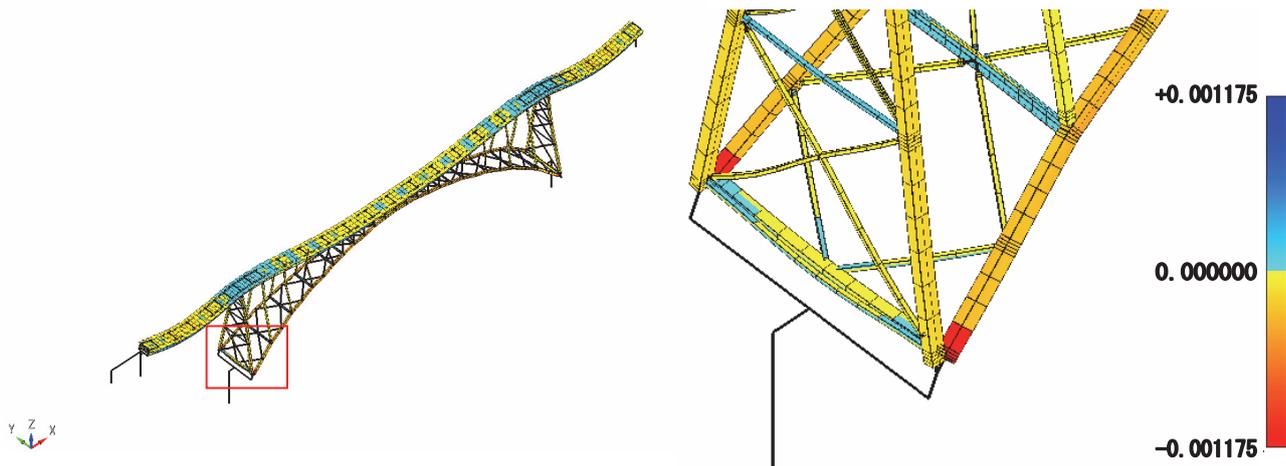


図 3-33 ケース AR3 : 腐食率-75%@4箇所 のひずみコンター図 (荷重倍率 $V=1.01$ 倍)

(3) 直角方向荷重解析結果

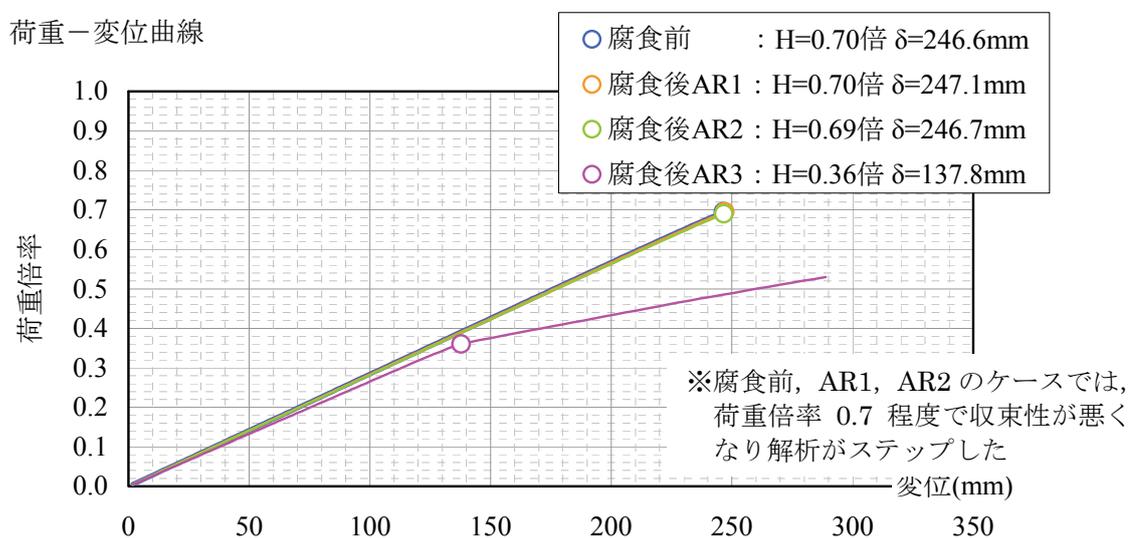


図 3-34 直角方向荷重による荷重変位曲線

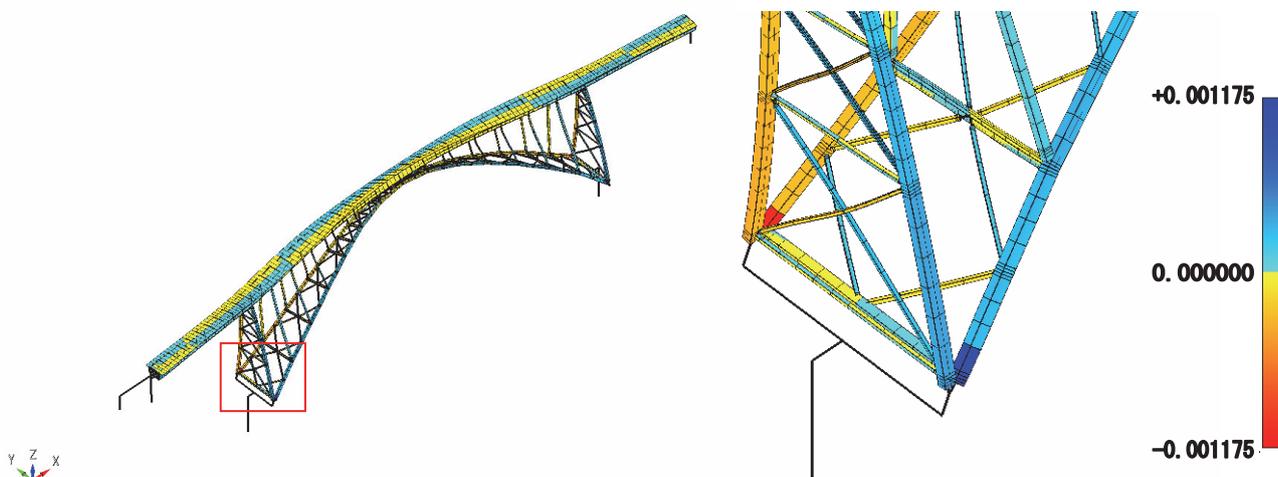


図 3-35 ケース AR3 : 腐食率-75%@4箇所 のひずみコンター図 (荷重倍率 $H=0.36$ 倍)

(4) 腐食による振動数変化と降伏荷重倍率変化の比較

表 3-10 に示すとおり、アーチ基部 4 箇所の腐食率が-75%の場合、橋全体系の降伏耐力が 40~50%程度減となり、振動数が 3~12%の変化率となっている。しかし、耐荷力が半分程度にまで下がった状態の検知では安全性上遅いと考えられ、耐荷力に影響を及ぼさない腐食率-25%の段階で検知できると有用である。

1 箇所の腐食率を-25%としたケース AR1 では、振動数の変化は限定的であり、環境変化による振動数のばらつきに埋もれる可能性があるが、先に述べたとおり、鉛直モード形の変化が大きく、モード形の計測により耐荷力低下前の鋼材腐食を検知できる可能性がある。

表 3-10 腐食による振動数変化と降伏荷重倍率変化

AR1 : 腐食考慮 -25% 1カ所

振動数 (Hz)		SeanFEM		Diff (%)
		変更後	腐食後	
橋直	1次	0.96	0.96	-0.1%
	2次	1.58	1.58	0.0%
鉛直	1次	1.44	1.46	1.4%
	2次	1.52	1.54	1.2%

AR1 : 腐食考慮 -25% 1カ所

降伏荷重 (倍)	SeanFEM		Diff (%)
	変更後	腐食後	
橋直	0.70	0.70	0%
鉛直	1.75	1.75	0%

AR2 : 腐食考慮 -25% 4カ所

振動数 (Hz)		SeanFEM		Diff (%)
		変更後	腐食後	
橋直	1次	0.96	0.96	-0.4%
	2次	1.58	1.58	-0.2%
鉛直	1次	1.44	1.43	-0.2%
	2次	1.52	1.52	-0.3%

AR2 : 腐食考慮 -25% 4カ所

降伏荷重 (倍)	SeanFEM		Diff (%)
	変更後	腐食後	
橋直	0.70	0.69	-1%
鉛直	1.75	1.75	0%

AR3 : 腐食考慮 -75% 4カ所

振動数 (Hz)		SeanFEM		Diff (%)
		変更後	腐食後	
橋直	1次	0.96	0.85	-12%
	2次	1.58	1.52	-4%
鉛直	1次	1.44	1.39	-3%
	2次	1.52	1.45	-5%

AR3 : 腐食考慮 -75% 4カ所

降伏荷重 (倍)	SeanFEM		Diff (%)
	変更後	腐食後	
橋直	0.70	0.36	-49%
鉛直	1.75	1.01	-42%

3-2-3-6. まとめ

鋼逆ランガー橋を対象とした本検討により、得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 桁端部の支承の機能不全では、振動数の変化が比較的大きいが、加速度計を設置しやすい補剛桁の鉛直モード形変化によって明確に検知できる可能性がある。
- 2) アーチクラウン部の疲労破断では、橋全体モードの振動数変化は僅かであるものの、補剛桁の鉛直モード形に着目すれば検知できる可能性がある。
- 3) アーチ基部の断面欠損では、1 箇所の 25%腐食という非対称性の損傷の方が全箇所同程度の損傷の場合より鉛直モード形の変化が大きく、損傷検知ができる。また、腐食による橋全体系の耐荷力変化を検討した結果、1 箇所の 25%腐食では耐荷力の低下は認められず、モード形の計測により、致命的な状態となる前の橋の状態変化を検知できると考えられる。
- 4) 床版のジョイント近傍の疲労損傷をモード形変化により検知することは困難であるが、床版上面の一様な土砂化により鉛直モード形は明確に変化した。

3-3. 首都高速大橋 JCT-ランプ橋の振動特性の同定

3-3-1. 概要

首都高速大橋ジャンクションランプ橋は、ループ状の二層立体ラーメン構造であり、その動的特性は極めて複雑であると考えられる。動的挙動の解明には実測が不可欠である。加えて、三次元的で複雑な挙動は多点で密に計測することで始めて明らかとなる。そこで、詳細な動的挙動を明らかにすることを目的として、常時微動、衝撃振動、車両通過時（20トン荷重車）の加速度応答を計測する。また、構造物の経年変化を把握するうえで、動特性変化を追跡することが有効な手段となるが、本計測は対象構造物の動特性の初期値を与えるものでもある。

3-3-2. 計測概要

(1) 対象橋梁

本研究で、計測対象としたのは、首都高速3号渋谷線と中央環状新宿線および中央環状品川線を接続する「大橋ジャンクション」の一部であるランプ橋であり、地下トンネル部から高低差約70mを上がるループ状のRC躯体と高速3号渋谷線の都心方向とを結ぶ。本ランプ橋は鋼床版箱桁による二層立体ラーメン構造であり（図3-36）、特徴として、①曲率が非常に大きな線形条件であること、②都市市街地における橋脚の断面制約から、全体として非常に変形量の大きい構造系であることが挙げられる。

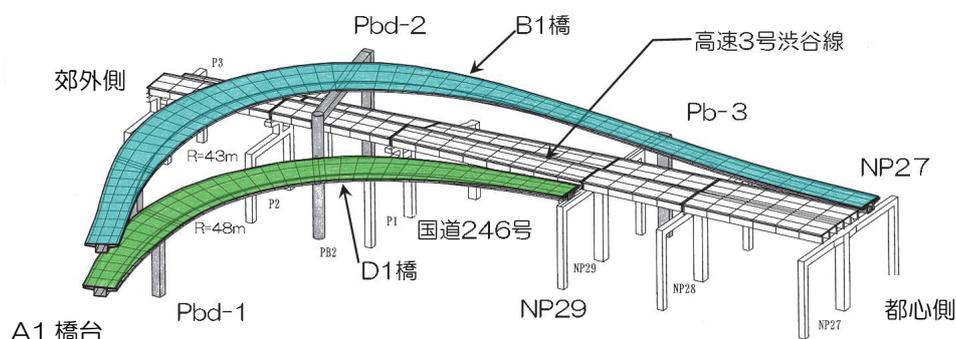


図3-36 大橋ジャンクションランプ橋

(2) 計測方法

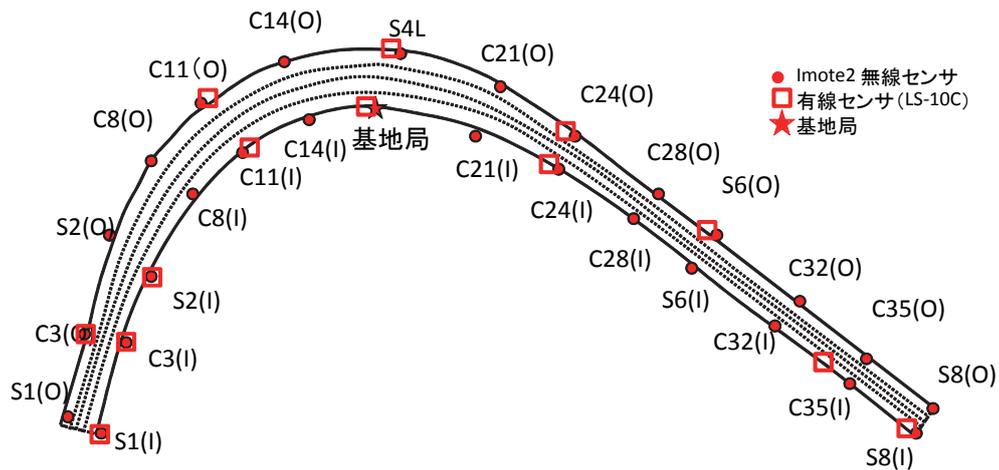
①有線センサ

有線センサであるサーボ型加速度計をBランプ橋の路面上に15個設置して動的挙動を計測する。計測方向は鉛直方向とし、サンプリング周波数200Hzで時刻歴波形を記録する。周波数解析から固有振動数、さらにピークピッキング法を用いて振動モード形を同定する。解析対象とする振動は、試験用の荷重車が単独走行する時の振動、常時微動とする。Bランプ橋におけるサーボ型加速度計の配置図を図3-37に、設置状況を図3-38に示す。振動計測の実施日は、2010年3月22日である。

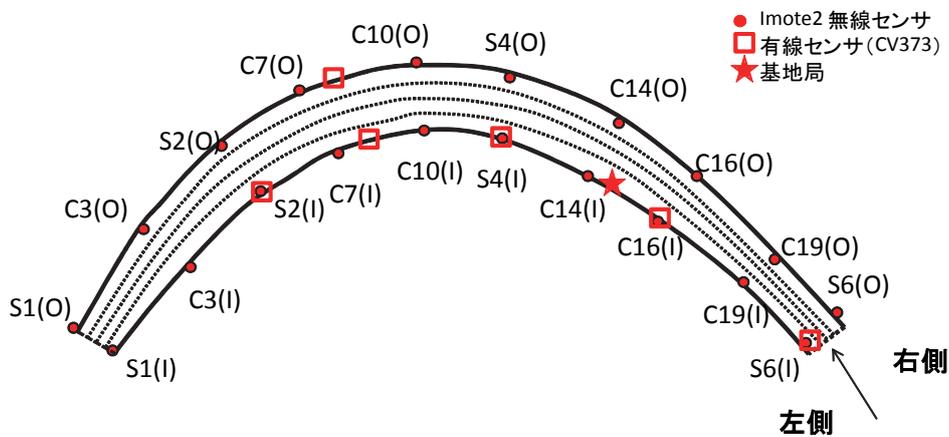
②無線センサ

無線センサノードImote2を計49個利用して動的挙動を計測する。Imote2はMEMS型の無線セン

サであり、センサノードが取得したデータをマルチホップ通信によって他のノードを中継することでデータ収集を行うことができる。B1 橋、D1 橋の加速度計の設置位置を図 3-37 に、加速度計の設置状況を図 3-38 に示す。B1 橋、D1 橋の車線の両側の路肩上に無線センサを 49 点設置している。また、センサはいずれも路面上に設置してあるが、脚の真上に位置するものを図 3-37 中では「S」、それ以外は「C」で表している。無線センサのサンプリング周波数は 50Hz とし 6 分間の計測を 5 回行っている。無線センサ同士で同期のとれた計測を行っている。



a) B1 橋

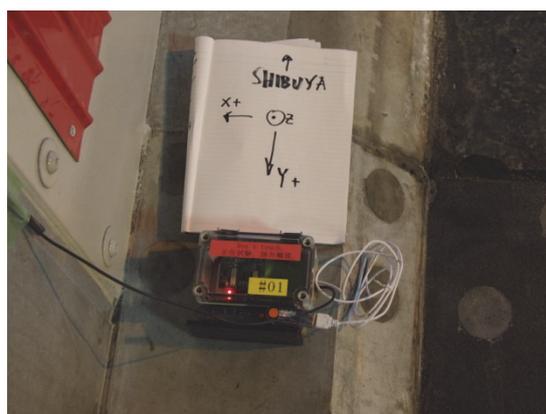


b) D1 橋

図 3-37 センサ配置



(a) 有線センサ



(b) 無線センサ

図 3-38 センサ設置状況

3-3-3. 計測結果

(1) 荷重車がDランプ橋を走行する場合

各加速度計で計測された時刻歴波形ならびに参照点を計測点4として算出した平均化クロススペクトルを図 3-39 に示す。平均化クロススペクトルの平均化の時間間隔は 10 s であり、804 個のデータを平均化した。周波数分解能は 0.1 Hz となる。また、平均化クロススペクトルを用いてピークピッキング法から同定された振動モード形を図 3-40 に示す。

(2) 荷重車がBランプ橋を走行する場合

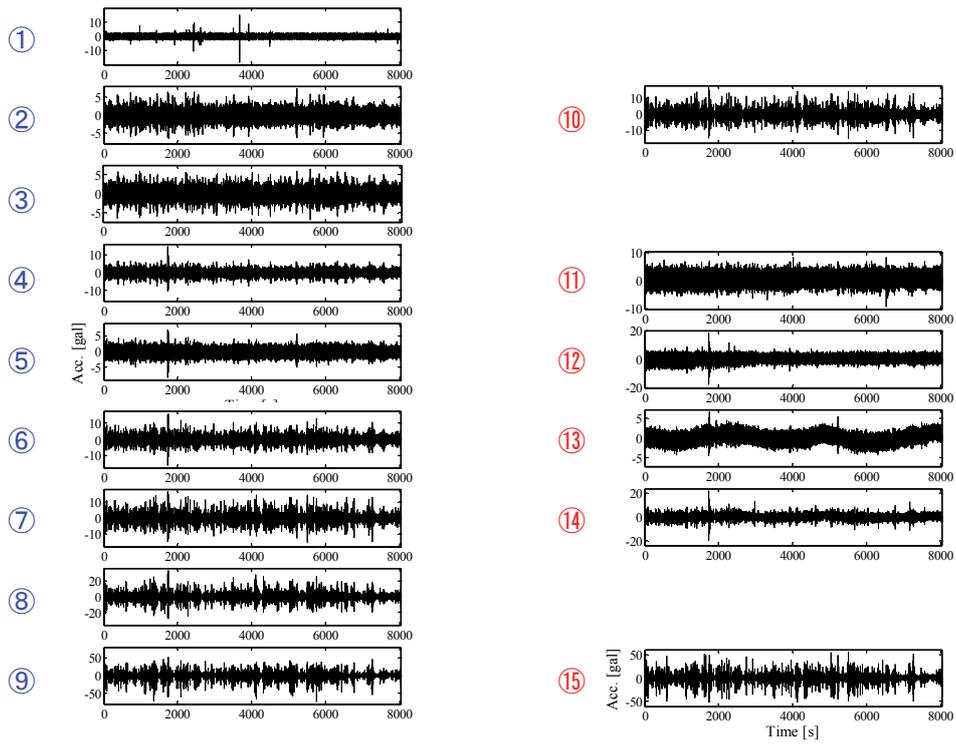
各加速度計で計測された時刻歴波形と平均化クロススペクトルを図 3-41 に示す。平均化クロススペクトルの算出方法は前節と同様である。また、平均化クロススペクトルから同定された振動モード形を図 3-42 に示す。

(3) 結果の比較

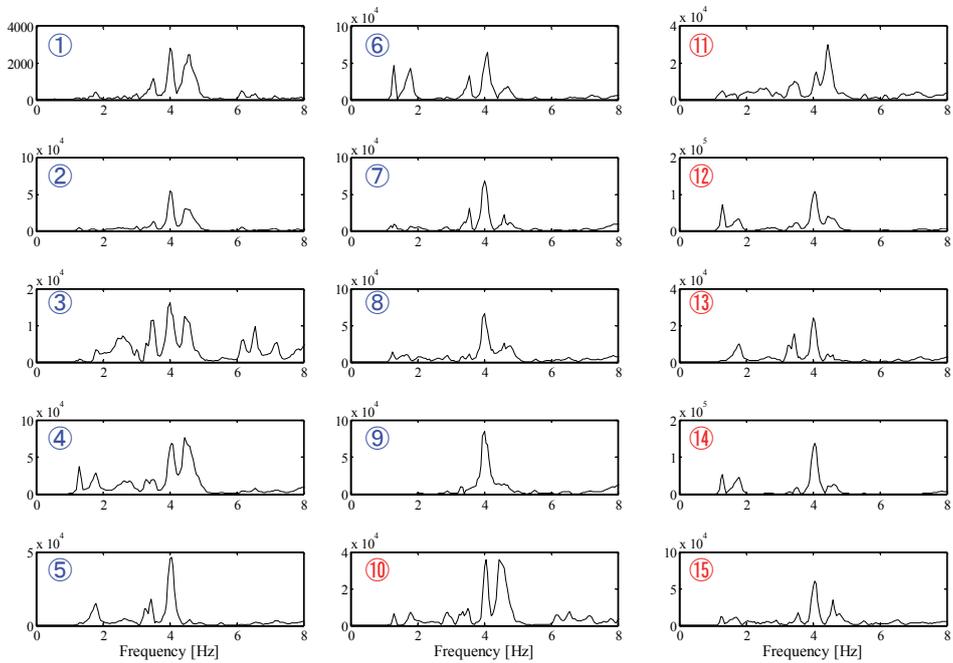
前節(1), (2)の振動モード形の同定結果である図 3-39, 図 3-41 を比較すると、固有振動数の差は 0.1 Hz となっており、これは計測、計算誤差の範囲である。また、振動モード形の形状も両者で概ね一致していることが確認される。このことから、振動モード形ならびに同定手法は問題ないと言える。

(4) 無線センサを利用した計測結果

図 3-43 に無線センサノードを利用して計測した交通振動から ERA 法により同定した D1 橋 1 次振動モード形を示す。無線センサは計測に失敗するノードも有り、設置したセンサ数よりも少ない点でのモード形同定となっている。また、ERA 法では 2 次モードより高次のモードは同定された振動モード形に、繰り返し再現性が確認できなかったことから、1 次モードのみを示す。

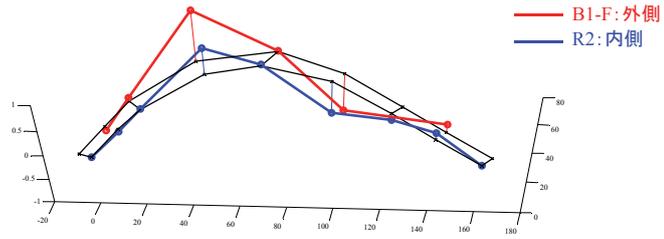


(a) 時刻歴波形

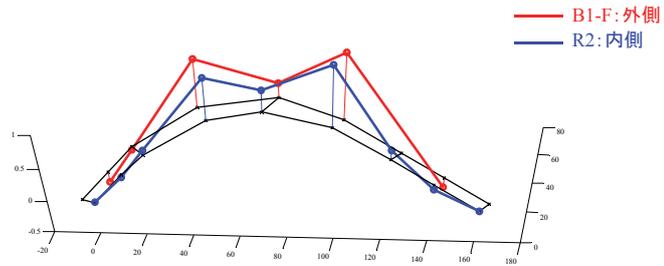


(b) 平均化クロススペクトル

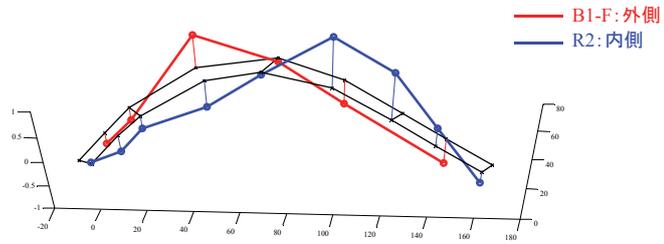
図 3-39 計測結果



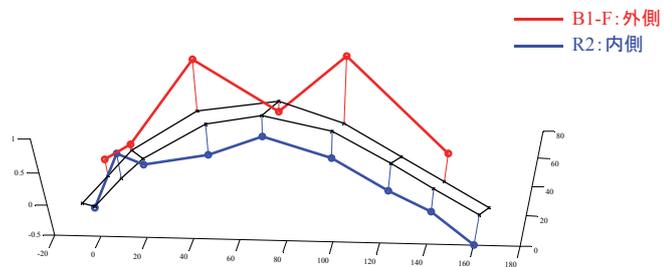
(a) 1.3 Hz



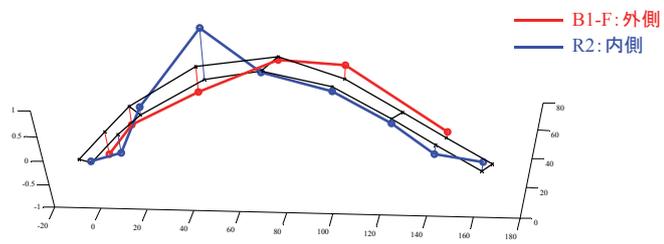
(b) 1.8 Hz



(c) 3.6 Hz

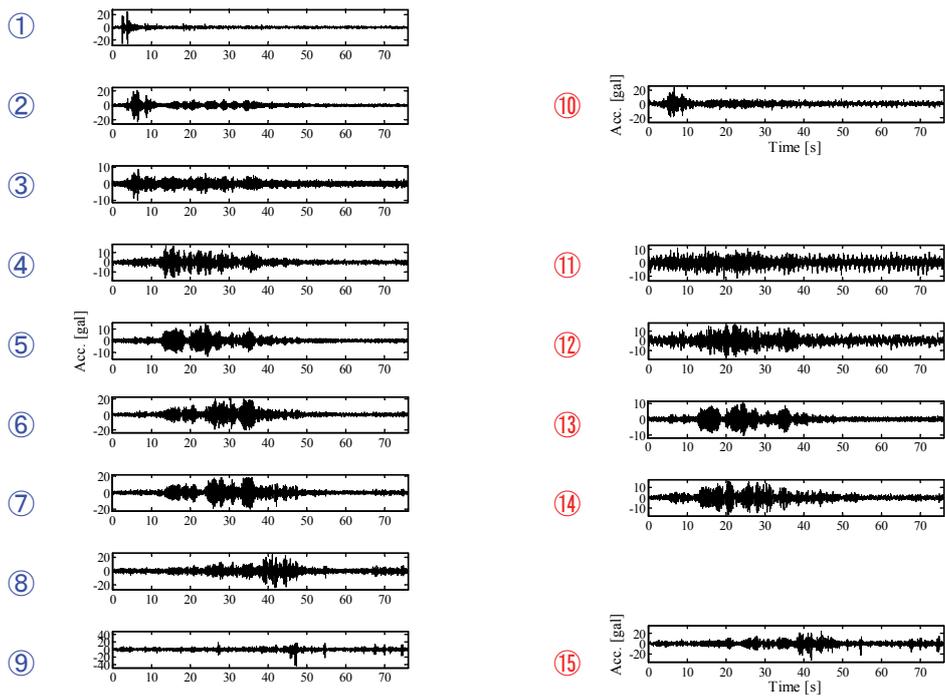


(d) 4.1 Hz

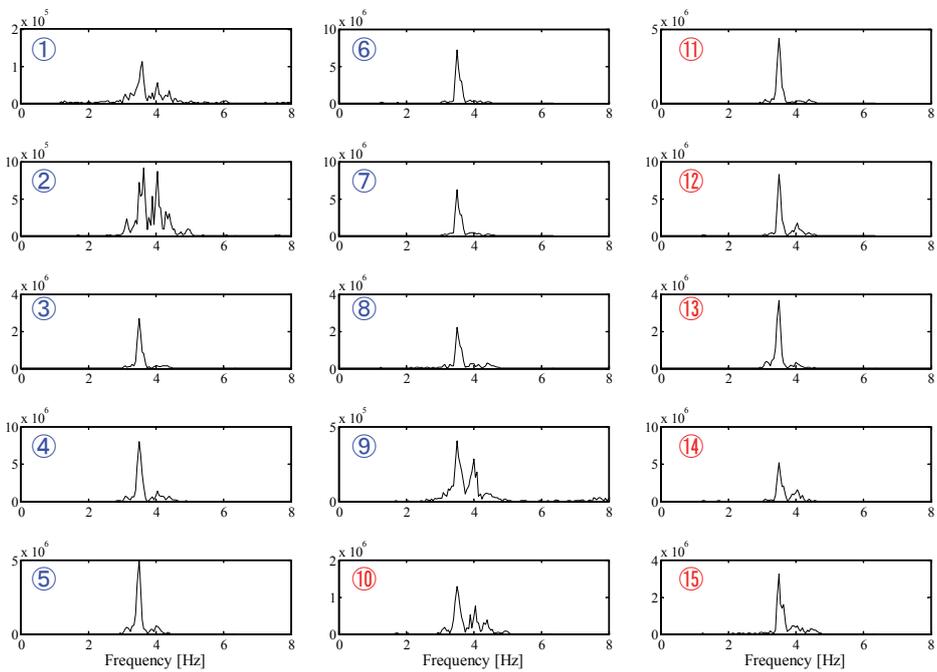


(e) 4.6 Hz

図 3-40 同定された振動モード形

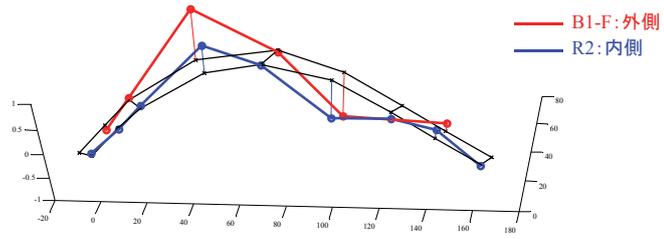


(a) 時刻歴波形

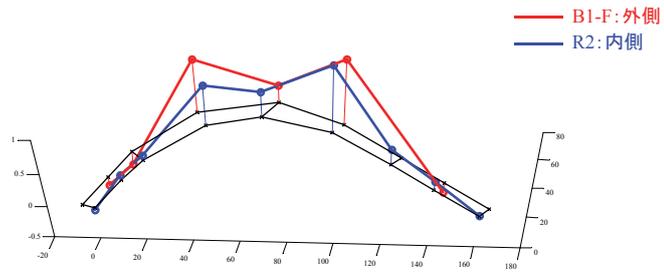


(b) 平均化クロススペクトル

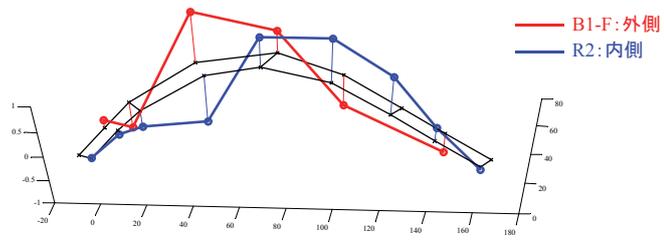
図 3-41 計測結果



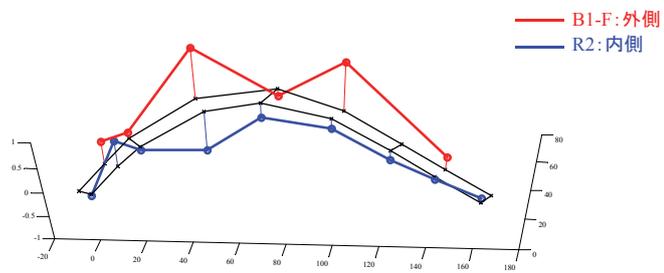
(a) 1.3 Hz



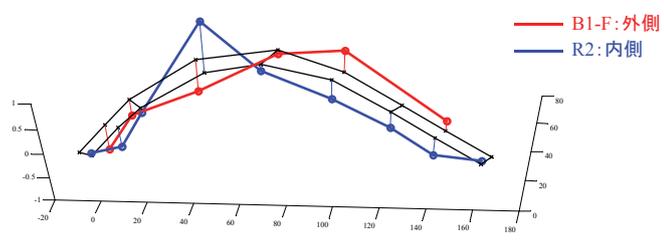
(b) 1.8 Hz



(c) 3.5 Hz



(d) 4.1 Hz



(e) 4.4 Hz

図 3-42 同定された振動モード形

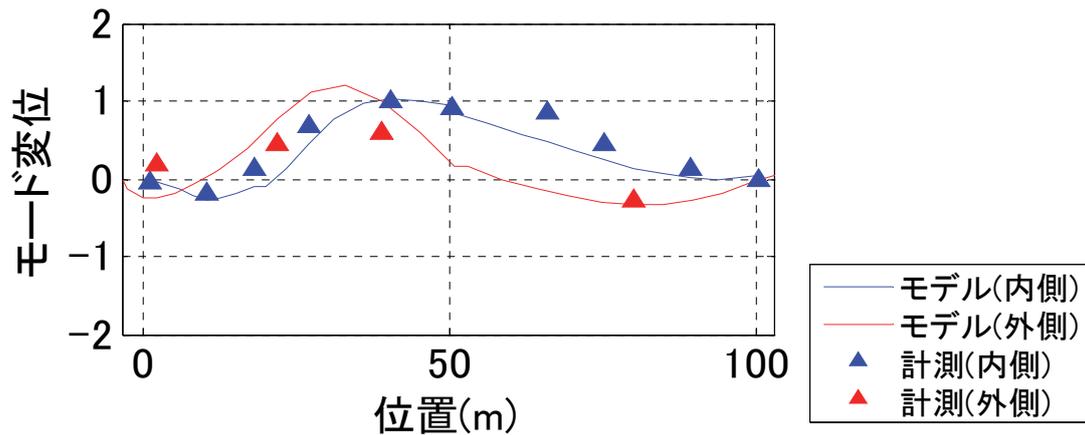


図 3-43 無線センサ計測から得られた D1 橋振動モード形 (実線は骨組みモデル)

3-3-4. 解析モデルとの比較

設計時に用いられた解析モデルを用いて固有振動解析を行い、対象橋梁の振動特性を調べた。解析モデルを図3-44に示す。解析モデルの詳細を以下に列挙する。

- 1) 対象橋梁は主桁、橋脚およびフーチングまでをモデル化し、主桁は B1 橋、D1 橋をそれぞれ 4 径間、3 径間を 3 次元立体骨組み構造としてモデル化している。
- 2) 剛性および重量の算出には 2 次部材を無視して主要な部材のみを考慮している。
- 3) 隣接橋の反力は接点重量としてモデル化している。
- 4) 上部工の剛性は鋼床版箱桁を全断面有効とみなして算出している。
- 5) 上部工の慣性力の作用位置は上部工の骨組み中心としている。
- 6) 橋脚は図 3-45 のように端部を剛部材とし、中間部材を非線形梁要素でモデル化している。
- 7) 桁端支承のモデル化については、可動沓の場合は摩擦力に伴う橋軸方向水平力の影響は微小であるとして、支承部を摩擦のない完全な可動支承としてモデル化している。
- 8) 質量は桁、舗装、壁高欄、遮音壁、裏面吸音版、付加荷重を考慮している。
- 9) 設計モデルでは壁高欄と遮音壁による慣性モーメントは考慮しない。
- 10) 鋼材のヤング係数は 200GPa とし、ポアソン比を 0.3 としている。
- 11) 橋脚下端の地盤の支持条件は、各橋脚に図 3-45 のように動的地盤ばねを配置することでモデル化している。ばね定数の値は設計時に用いられた動的解析計算書を参考に表 3-11 に示す値を用いた。

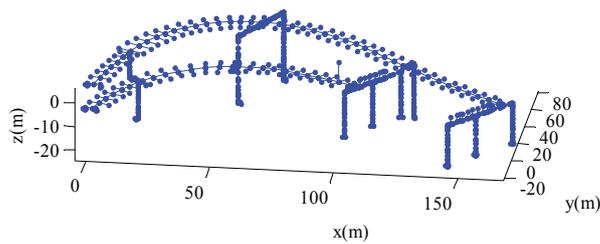


図 3-44 解析モデル

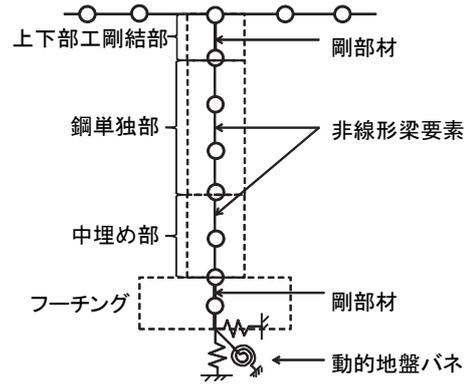


図 3-45 動的地盤バネ

表 3-11 モデルに用いた地盤ばね定数

橋軸方向 橋軸直角方向	水平ばね	鉛直ばね	回転ばね (鉛直軸)	回転ばね (水平軸)	連成ばね	
	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	
Pbd-1	4188032	7598794	1E+12	357940100	30507500	
Pbd-2	角柱	2413061	6320034	1E+12	166657300	16624640
	円柱	2070227	4476725	1E+12	202699600	16666760
Pbd-3	3033877	7635438	1E+12	321560300	24339780	
NP27	下り	2521300	1E+12	1E+12	93406000	11212000
	上り	4018200	1E+12	1E+12	270950000	25634000
	中央	2521300	1E+12	1E+12	93406000	11212000
NP29	下り	3031000	1E+12	1E+12	98632000	12881000
	上り	4815100	1E+12	1E+12	268700000	28785000
	中央	3031000	1E+12	1E+12	98632000	12881000

計測結果との比較によるモデルの妥当性の検証

解析モデルに対して固有値解析を行い、固有振動数とモード形状を算出した。振動計測結果との比較で用いるモード形状を図 3-46 に示す。このモード形状の D1 橋でのモード振幅と無線計測および有線計測により得られたモード形状の比較をそれぞれ図 3-47, 図 3-48 に示す。モード形状は計測結果から得られた鉛直方向成分のモードベクトルの最大値を 1 として正規化している。振動計測との比較には、複数回の計測データから安定して同定されたモードと比較を行っており、無線計測では 1 次モードのみ、有線計測は 1 次モードと 2 次モードでそれぞれ比較を行っている。計測とモデルの振動数比と MAC を比較したものを表 3-12 に示す。

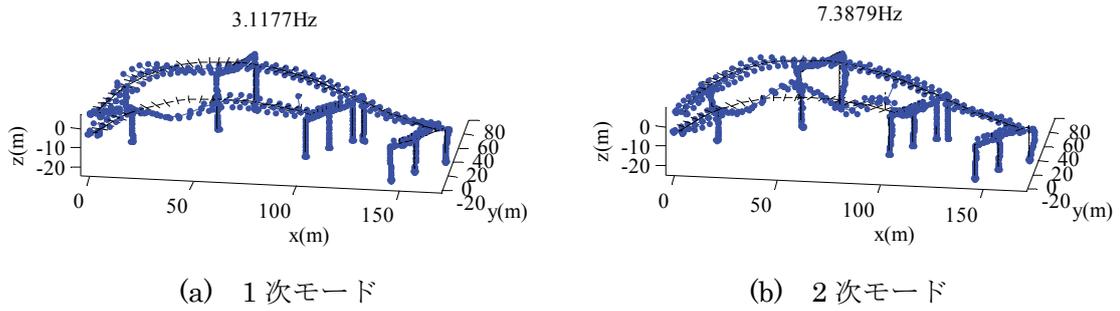


図 3-46 解析モデルの固有振動モード

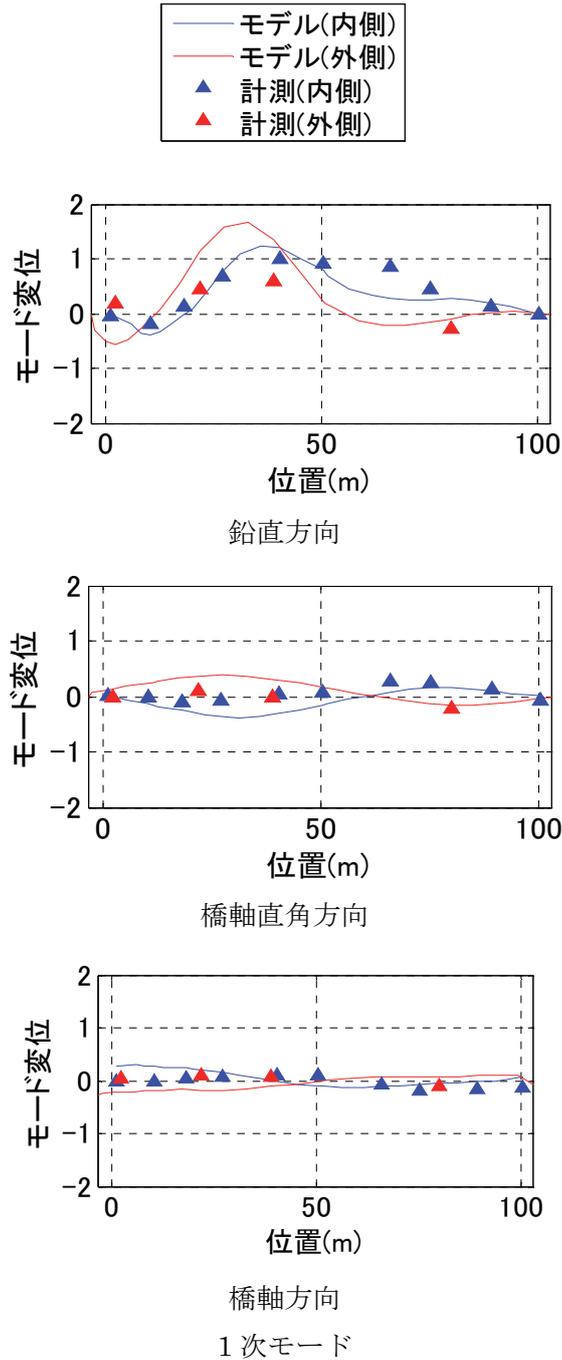


図 3-47 無線計測とのモード形状の比較(設計モデル)

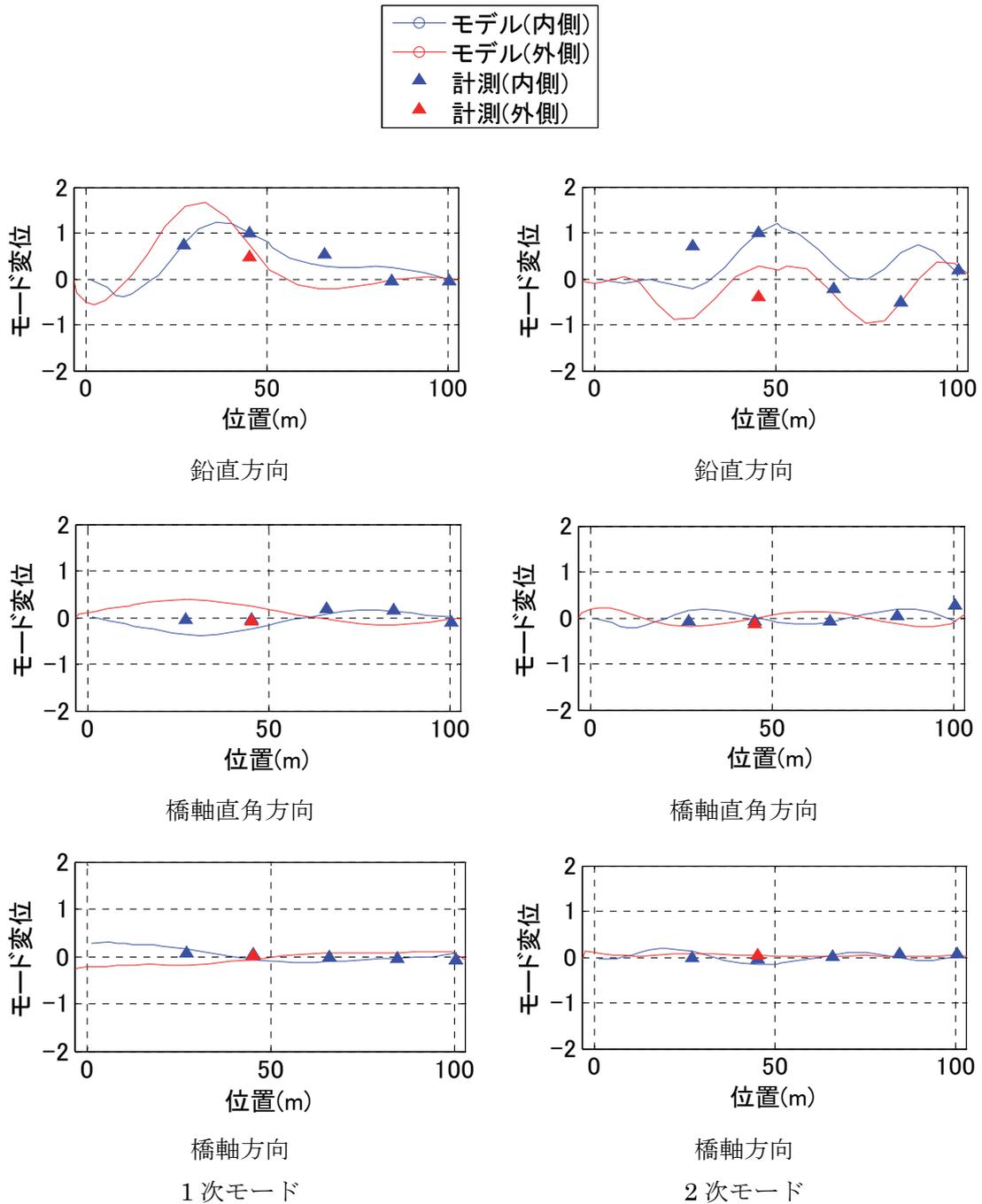


図 3-48 有線計測とのモード形状の比較 (設計モデル)

まず、無線計測で求められたモード形状と設計モデルでのモード形状を比較する。1次モードは表 3-12 から振動数比が 0.9 以上と比較的合っており、橋軸方向と鉛直方向でのモード振幅の傾向も比較的合っているが、橋軸直角方向は計測結果とは大きくずれたモード形状となった。MAC で見ても 0.4 程度である。有線計測と設計モデルを比較しても同様の傾向が確認できた。有線計測では、1次モードの振動数比は無線計測と同程度であり、MAC で見ても無線計測よりもモード形状が合っているように見えるが、2次モードではモード振幅がどの点でも大きくずれており、振動数比や MAC も大きな誤差がみられる。これは、設計モデルでは2次モードのねじれ挙動を再現できなかったため、このモードが現れなかったと考えられる。そのため、設計モデルでは2次モードの

ねじれ挙動を正確に反映できていないといえる。本研究の対象橋梁は、表 3-13 のように壁高欄や遮音壁が桁重量に比べて大きな重量を持っており、図 3-49 のように桁両側がそれらの荷重位置になっているため、実際には慣性モーメントが作用すると考えられるが、設計モデルではこれらを考慮していない。図 3-48 の計測で同定されたモード形状をみると、水平方向のモード振幅は進行方向の両側で大きな変化は見られないが、鉛直方向に対しては車線進行方向の両側のモード振幅の差から鉛直方向にねじれが生じていることが分かる。そのため、このような複雑な構造の橋梁の実挙動をモデルで再現するには鉛直方向のねじれを正確に再現する必要があるといえる。

表 3-12 計測結果と理論値との比較

(a) 無線計測との比較

	無線計測		理論値		振動数比	MAC
	次数	振動数(Hz)	次数	振動数(Hz)		
設計モデル	1	3.4052	20	3.1177	0.9156	0.3907
慣性モーメント 考慮モデル	1	3.4052	20	3.0678	0.900916	0.5392

(b) 有線計測との比較

	有線計測		理論値		振動数比	MAC
	次数	振動数(Hz)	次数	振動数(Hz)		
設計モデル	1	3.4287	20	3.1177	0.9093	0.6973
	2	6.0032	42	7.3879	1.2307	0.0467
慣性モーメント 考慮モデル	1	3.4287	20	3.0678	0.8947	0.7725
	2	6.0032	42	6.0513	1.0080	0.6573

壁高欄と遮音壁の遮音壁によって生じる慣性モーメントがねじれに大きな影響を与えると考え、これらの重量を桁両側に分配することで、壁高欄と遮音壁による慣性モーメントを再現したモデルの構築を行った。慣性モーメント考慮後のモード形の鳥瞰図と計測とのモード形状の比較をそれぞれ図 3-50、図 3-51、図 3-52 に、計測との振動数と振動数比、MAC の比較を表 3-12 に示す。1 次モードでは有線計測、無線計測ともに慣性モーメント考慮前に比べて MAC が上昇しており、モード形状の再現性が向上しているといえる。また、2 次モードでは、設計モデルでは再現することのできなかったねじれモードが再現できており、振動数比、MAC で見ても比較的良好に一致している。そのため、壁高欄や遮音壁による慣性モーメントを考慮することにより、設計モデルに比べてモデルが実挙動をより正確に再現することができたといえる。本研究で対象としているような、複雑な形状の橋梁のように、主桁の重量に比べて壁高欄や遮音壁のような付属物の重量が無視できない場合は、これらの慣性モーメントを考慮してモデル化することで実挙動を再現できるといえる。

表 3-13 桁重量に対する壁高欄・覆蓋構造の重量

	壁高欄	覆蓋構造
荷重[kN/m]	16.400	20.520
鋼重[kN/m]	31.600~48.900	
桁重量に対する割合[%]	33.5~51.9	42.0~64.9

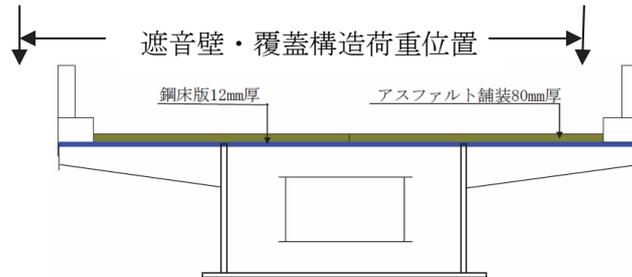


図 3-49 遮音壁・覆蓋構造の荷重位置

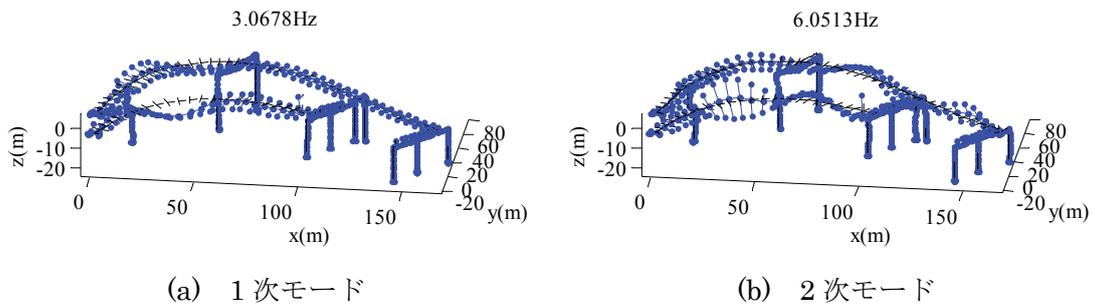


図 3-50 壁高欄・遮音壁の慣性モーメント考慮後のモデルの固有振動モード

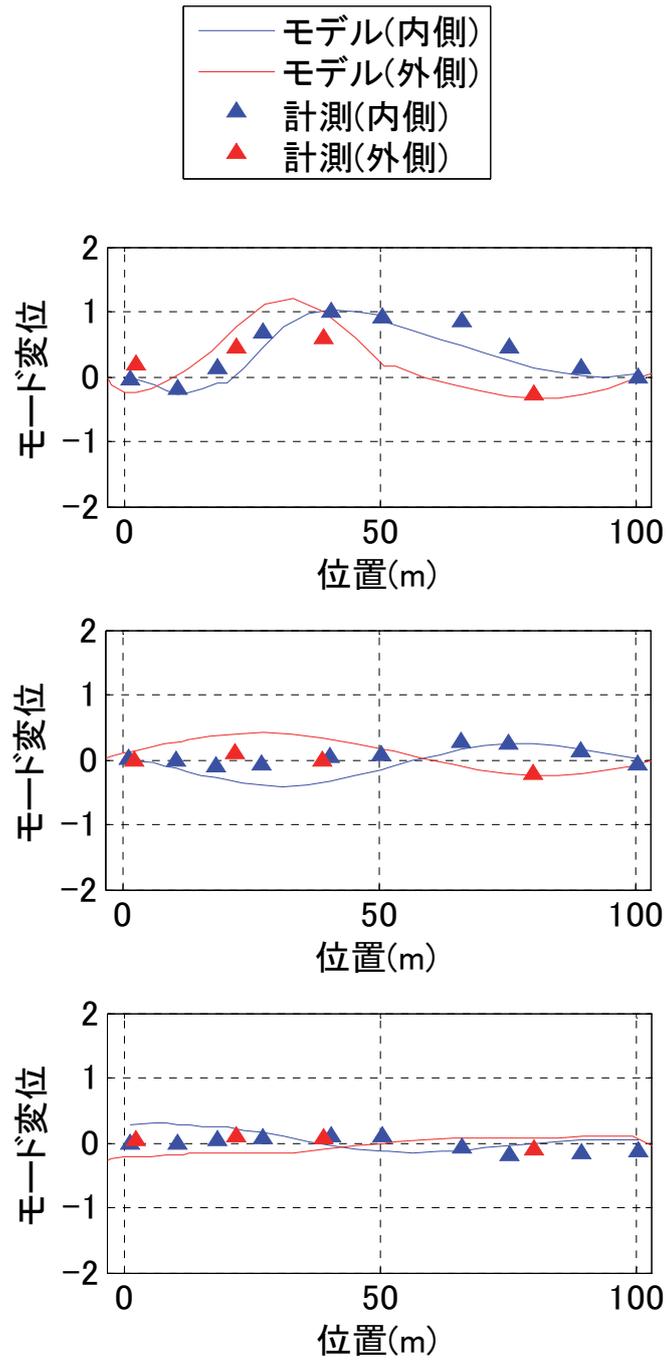


図 3-51 無線計測とのモード形状の比較 (壁高欄・遮音壁の慣性モーメント考慮)

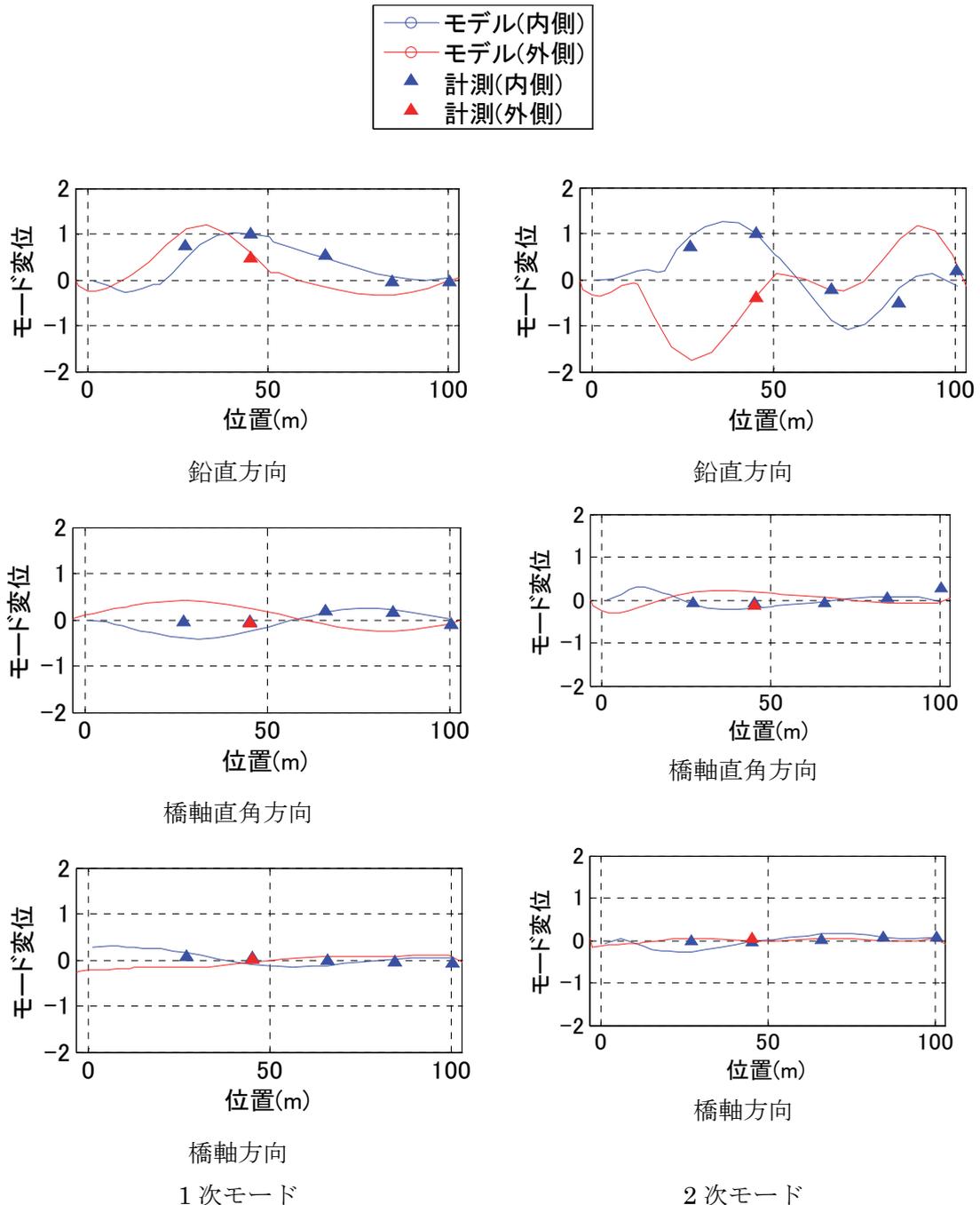


図 3-52 有線計測とのモード形状の比較 (壁高欄・遮音壁の慣性モーメント考慮)

実計測に基づいた 3 次元骨組みモデルを構築するため、大橋ジャンクション B1 連結路および D1 連結路で加速度計測を行った。モード同定を行い、設計モデルと比較した結果、設計モデルではねじれモードを再現できていないことが明らかとなった。この原因は設計モデルでは壁高欄や遮音壁など、桁重量に比べて大きな質量をもつ非構造部材の質量による慣性モーメントが考慮されていないためであると考えられる。そこで、壁高欄や遮音壁等の質量を詳細にモデル化することにより、実計測に基づいたモデルを構築した。その結果、1 次モード、2 次モードともに MAC が上昇し、壁高欄や遮音壁の質量のモデル化の違いが曲線橋の動的応答に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

3-4. 幸魂大橋斜張ケーブルー最新センシング技術による張力測定

3-4-1. 概要

斜張橋やニールセン橋を構成するケーブルの張力値は、一般的に振動法^{1),2)}を用いて計測される。これは、ケーブルの張力値が固有振動数の関数となる関係を利用するものである。具体的には、加速度計をケーブルに取り付けて振動計測を実施する。ここで、ケーブルの加振力が十分でない場合は、ケーブルを人手で加振することもある。取得された加速度応答に対して周波数解析を行い、卓越振動数を抽出してケーブルの固有振動数とする。

従来の手法では、加速度計をケーブルに固定する必要があるため、ケーブル本数が多くなると、多大な手間を要する（図 3-53）。そこで、レーザードップラー速度計（LDV）を利用してケーブルの振動を非接触遠隔計測により効率化する試みが行われている^{3),4)}。



図 3-53 従来のケーブル張力計測方法

3-4-2. 不可視レーザー光を用いた新しい LDV

本報では、新たに開発された LDV（図 3-54）の評価を目的とし、幸魂大橋のケーブルの振動計測を実施した。この LDV は、従来の LDV と比較して、レーザー光源（エルビウムレーザー）の波長が赤外光よりも長く（1550nm）、不可視光で長距離計測を実現する点に特徴がある。スペックは、最大計測距離が 150m、計測レンジが 0.4mm/s/V～100mm/s/V*、周波数帯域が DC～5kHz*である（*プロトタイプ仕様のため変更される可能性あり）。レーザーの安全基準はクラス 1 であり、屋外計測にも問題はない。仕様を表 3-14 に示す【要確認】。また、従来の LDV とは異なり、計測対象の表面が黒色となる場合でも、反射テープの貼付など特別な表面処理を必要とせずに計測することが可能である。この理由として、レーザー出力の増加、レンズ口径の増大、レーザー波長が長くなったことによる物質反射率の増大などが挙げられる。ただし、レーザー光を肉眼で直接確認できないため、焦点合わせは、ヘッドに内蔵されたカメラにより PC 上で行う（図 3-55）。



図 3-54 不可視レーザー光を用いた新しい LDV

表 3-14 不可視レーザー光を用いた LDV の仕様

データ収集/処理系	RSV-E-150 コントローラ
速度出力	デジタル速度デコーダ 0.4mm/s/V ~ 100mm/s/V フルスケール(p-p) ±1m/s, BNC アナログ出力 ±10V
変位出力	デジタル変位デコーダ: 1μm/V ~ 100mm/V フルスケール(p-p) ±1m, BNC アナログ出力 ±10V
周波数範囲	0 Hz - 25kHz (測定レンジによる)
フィルタ	High pass: 10Hz, 100Hz Low pass: 1kHz, 5kHz
ビデオ出力	CVBS信号: 1V (p-p)/75Ω, BNC, PAL standard
インジケータ	コントローラ前面に配置
外形寸法 [L × W × H] mm	235 × 320 × 150mm
重量	約 6kg
電源	100V - 240 VAC (50/60 Hz) / 12 - 24 V DC (オプション)
保護クラス	IP-20
使用環境条件	+5°C ~ +40°C

アクセサリ/オプション	
ターゲット用	A-VIS-SCOP1 3.9 × 40 ズーム機能付きスコープ
3.5" モニタ	A-MON-TFT3 センサ取付用モニタ
補正用	A-VIB-ACC01 リファレンス用加速度計 (環境振動用の補正用)
インバータ	A-CONDCAC 12V to 230V
ビデオアダプタ	A-CON-VIDEO USBビデオコンバータ
VibSoft-20 データ収集ソフトウェア	
仕様概要	時間軸/周波数軸の解析機能, LiveVideo映像表示, 測定データの 後加工機能(Signal Processor), UFF, ASCIIなどのエクスポート機能, コントローラのリモート設定, VisualBasic互換のスクリプト機能など
データ収集帯域	20kHz
チャンネル数	2ch (測定用信号および参照用)
フロントエンド	VIB-E-200 USBデータ収集ユニット

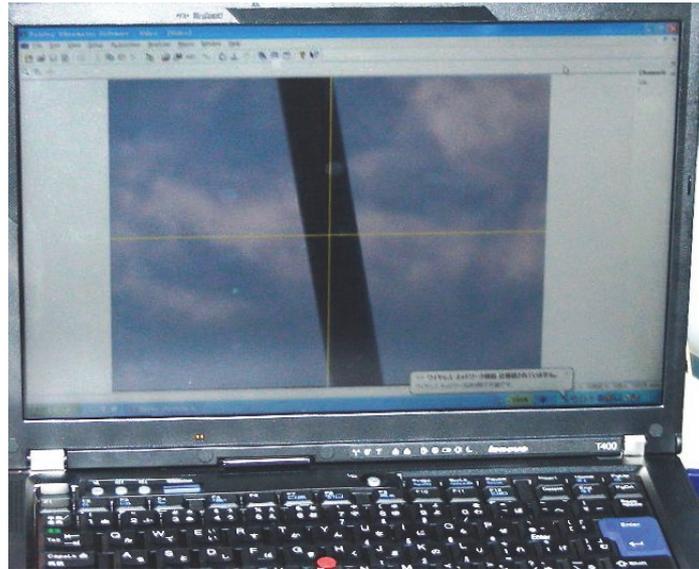


図 3-55 レーザー光の焦点合わせ

3-4-3. 計測対象橋梁（幸魂大橋）

対象とした橋梁は幸魂大橋であり，支間長 190m でマルチファン型一面吊りの 2 径間連続鋼斜張橋である（図 3-56）。東京外環自動車道と国道 298 号が一体構造となる斜張橋が，内回りと外回りで 2 橋並列されている⁵⁾。



図 3-56 計測対象橋梁（幸魂大橋）

3-4-4. 計測概要

計測日時は、2010年9月14日の10時～12時と2011年6月24日の10時～12時である。両日ともに天候は晴れで、気温は約30度であった。計測対象としたケーブルは、図3-57に示すように、外回り線のT1～T7およびW1～W7である。各位置に2本のケーブルが並列しているため、計測対象の総数は28本である。ケーブルの表面色は黒で、ディンプルなどはない。LDVの設置位置は、主塔付近(P12)の外回り線の歩道である。

本研究で使用したLDVのレーザーは不可視光であることから、赤色光のHe-Neレーザーを使用した従来のLDVとは異なり、車道を跨いだ計測が可能である。また、ケーブル表面に反射テープは貼付していない。計測状況を図3-58に示す。2010年度の計測では、LDVによる振動計測と合わせて、検証用に、有線加速度計による計測も実施した。計測は自由交通流下で実施し、加速度計の計測では、さらに人手による加振を加えた。振動計測のサンプリング周波数はLDV、加速度計ともに200Hzとした。LDVの計測レンジは10mm/s/Vである。

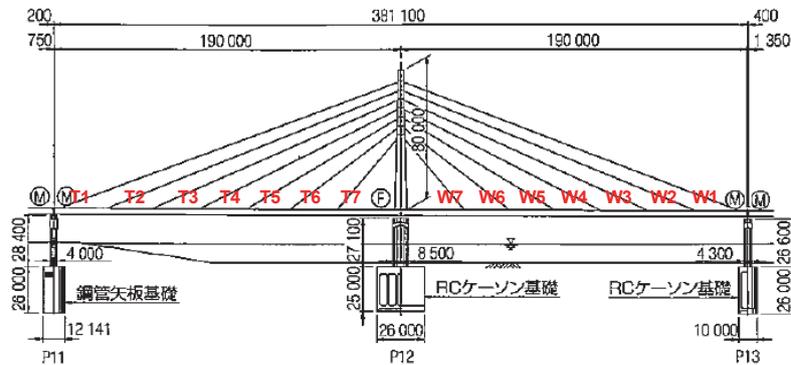


図 3-57 計測対象ケーブル



図 3-58 計測状況

3-4-5. 計測結果

表 3-15 に、同定された固有振動数を示す。理論値は、ケーブルの曲げ剛性ならびにサグの影響を考慮して算出した^{1),2)}。実測値は、面外方向の振動データの周波数解析から同定した結果である。

加速度計の応答周波数は 0.4~2000Hz であることから、1 次の固有振動数が同定されにくいのに対して、LDV の周波数特性は低周波数領域からフラットであるため、1 次の固有振動数が同定されやすい。実測値と理論値との差異は、温度ならびに車両通行による影響と考えられるが、LDV と加速度計間の差異は小さい。よって、LDV による計測に問題は無いと言える。また、図 3-59、図 3-60 に LDV による計測結果の一例を示す。計測距離が長くなると時刻歴波形にスパイク状のスペックルノイズが目立つようになるが、固有振動数の同定に対しては問題が無い。

表 3-15 固有振動数の同定結果

ケーブル番号	固有振動数 (Hz)																備考 計測距離 ²⁾ (m)			
	理論値 ¹⁾				実測結果 (2010年9月)								実測結果 (2011年6月)							
	1次	2次	3次	4次	ケーブルa		ケーブルb		ケーブルa				ケーブルb							
P12-P13 P3側 左側	W1	0.55	1.10	1.65	2.20	0.54	1.05	0.54	1.05	0.382	0.552	1.074	1.647	0.400	0.552	1.054			95	
	W2	0.68	1.36	2.04	2.72	0.63		0.63	1.26	0.399	0.622	1.243	1.842	0.399	0.637	1.274			82	
	W3	0.78	1.56	2.34	3.12	0.75	1.45	0.76		0.401	0.761	1.458		2.955	0.404	0.737	1.336		71	
	W4	0.92	1.85	2.77	3.70	0.87		0.83		0.393	0.856	1.705		3.495	0.394	0.846	1.670	3.409	58	
	W5	1.15	2.30	3.45	4.59	1.07	2.36	1.08		0.400	1.080	2.192	3.295	4.400	0.394	1.082	2.147	3.435	4.341	47
	W6	1.50	2.99	4.49	5.98	1.32	2.55	1.34	2.67	0.398	1.313	2.578	3.953	5.305	0.400	1.342	2.677	4.025		37
	W7	2.26	4.52	6.77	9.03	1.94	3.89	1.92	3.88	0.396	1.940	3.910	6.120		0.406	1.945	4.096	6.158		27
P11-P12 A2側 右側	T7	2.25	4.49	6.74	8.98	1.92	4.00	1.94	3.98	0.394	1.921	3.958	5.788	0.401	2.035	3.945	6.159		27	
	T6	1.49	2.98	4.46	5.95	1.36		1.39		0.398	1.373	2.739	4.391	5.646	0.402	1.366	2.722	4.259		37
	T5	1.14	2.29	3.43	4.57	1.03		1.05		0.403	1.027	2.106	3.202		0.401	1.025	2.198	3.179	4.216	47
	T4	0.92	1.84	2.76	3.68	0.85	1.72	0.88	1.76	0.401	0.842	1.759			0.394	0.885	1.764	2.630	3.527	58
	T3	0.78	1.55	2.33	3.10	0.75		0.75	1.49	0.399	0.751	1.445		3.006		0.756	1.488		2.981	71
	T2	0.68	1.35	2.03	2.71		1.27	0.60	1.30	0.405	0.643	1.273		2.232	0.398	0.641	1.266	1.859	2.539	82
	T1	0.55	1.09	1.64	2.19	0.56	1.05	0.52	1.04	0.399	0.531	1.055			0.376	0.541	1.051		2.172	95

1) 新家式より算出
2) 計測機器設置位置からケーブル中央点までの距離

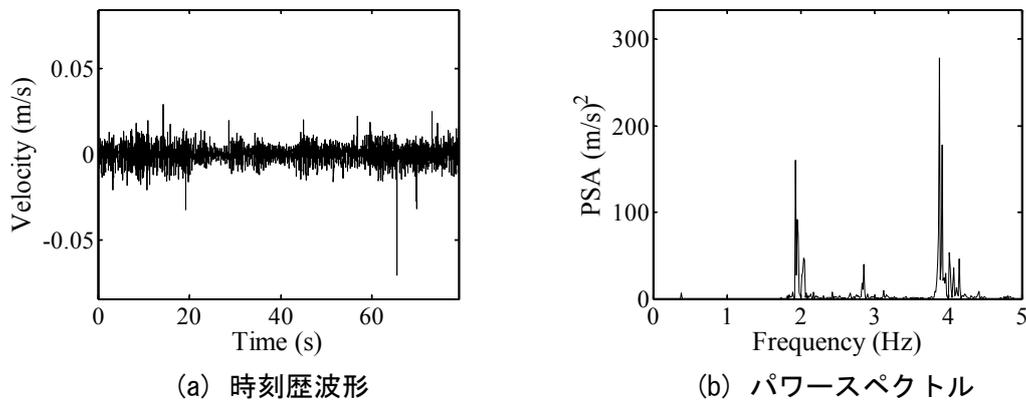


図 3-59 LDV による計測結果の一例 (W7a, 計測距離: 約 30m)

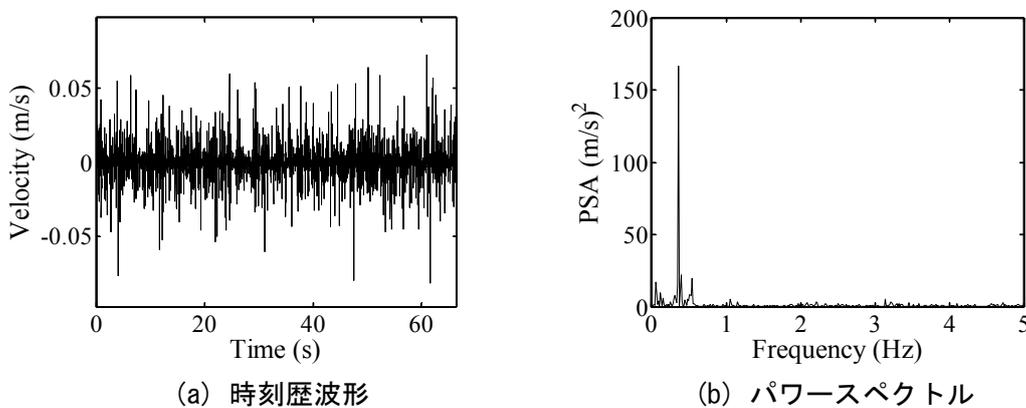
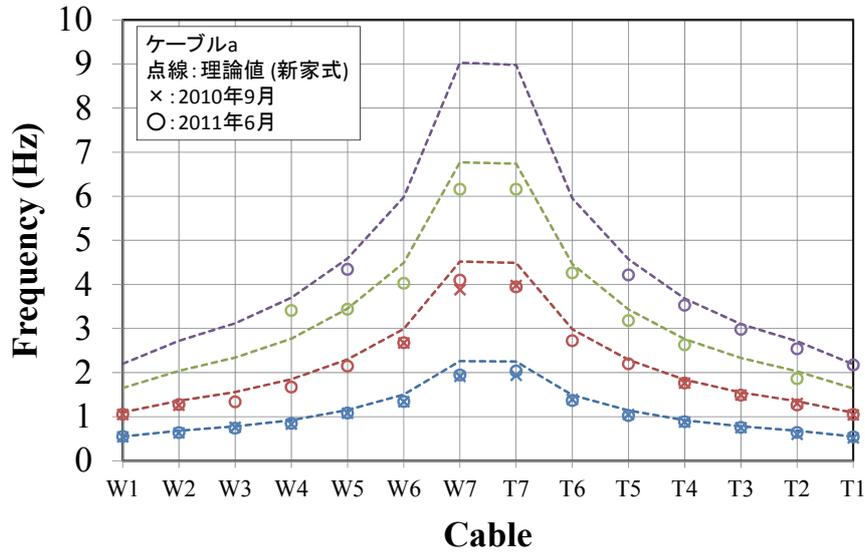


図 3-60 LDV による計測結果の一例 (W1a, 計測距離: 約 100m)

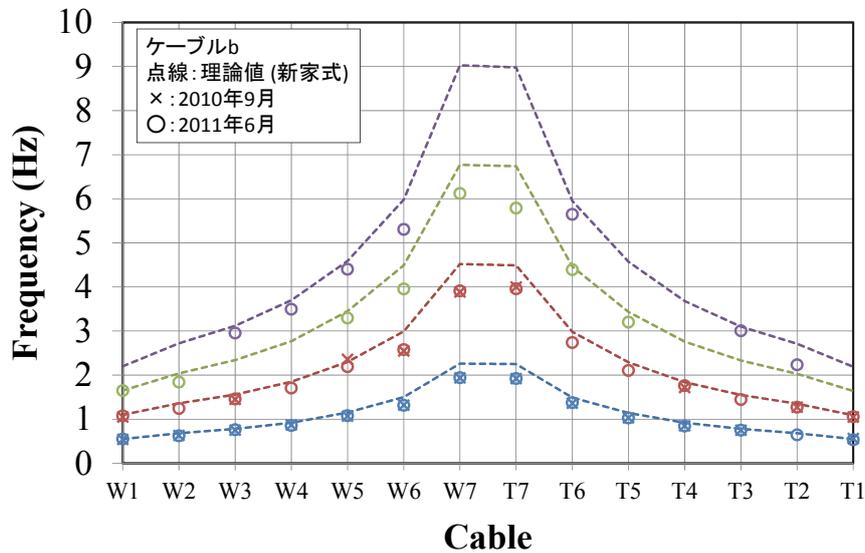
3-4-6. 計測結果の比較

(1) 固有振動数

- 2010年度と2011年度の計測結果から同定された各ケーブルの固有振動数を図3-61に示す。
- 図中の点線は理論値(新家式)であり、文献1), 2)にもとづいて算出した。
- 2010年度と2011年度で、固有振動数の同定値の差は約±5%である。



(a) ケーブル a



(b) ケーブル b

図3-61 同定された固有振動数の比較

(2) 張力

- 表 3-16 に示すケーブル諸元と LDV を用いた振動計測から同定された固有振動数にもとづいてケーブルの張力を算出することとした。
- ケーブルの張力の算出では、文献 1), 2) にある以下の式を使用した。

a) 対称 1 次振動を対象とする場合 (サグが小さい場合 $3 \leq \Gamma$)

$$T = \frac{4w}{g}(f_1 l)^2 \left\{ 1 - 2.20 \frac{C}{f_1} - 0.550 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (17 \leq \xi) \quad (1a)$$

$$T = \frac{4w}{g}(f_1 l)^2 \left\{ 0.865 - 11.6 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (6 \leq \xi \leq 17) \quad (1b)$$

$$T = \frac{4w}{g}(f_1 l)^2 \left\{ 0.828 - 10.5 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (0 \leq \xi \leq 6) \quad (1c)$$

b) 逆対称 1 次振動を対象とする場合 (サグが大きい場合 $\Gamma \geq 3$)

$$T = \frac{w}{g}(f_2 l)^2 \left\{ 1 - 4.40 \frac{C}{f_2} \right\} \quad (60 \leq \xi) \quad (2a)$$

$$T = \frac{w}{g}(f_2 l)^2 \left\{ 1.03 - 6.33 \frac{C}{f_2} - 1.58 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right\} \quad (17 \leq \xi \leq 60) \quad (2b)$$

$$T = \frac{w}{g}(f_2 l)^2 \left\{ 0.82 - 85.0 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right\} \quad (0 \leq \xi \leq 17) \quad (2c)$$

ここで、

$$\xi = \sqrt{\frac{T_1}{EI}} l : \text{剛性パラメータ}$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{wl}{128EA\delta^3 \cos^3 \theta}} \left(\frac{0.31\xi + 0.5}{0.31\xi - 0.5} \right) : \text{サグパラメータ}$$

$$C = \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}} : \text{振動パラメータ}$$

T_1 : ケーブル張力 (設計荷重) [tf]

w : ケーブルの単位長さ当たりの重量 [tf/m]

g : 重力加速度 [m/s²]

f_1, f_2 : 計測した 1 次, 2 次の固有振動数 [Hz]

l : ケーブルの長さ [m]

E : ケーブルの弾性係数 [tf/m²]

I : ケーブルの断面 2 次モーメント [m⁴]

A : ケーブルの断面積 [m²]

δ : サグ比

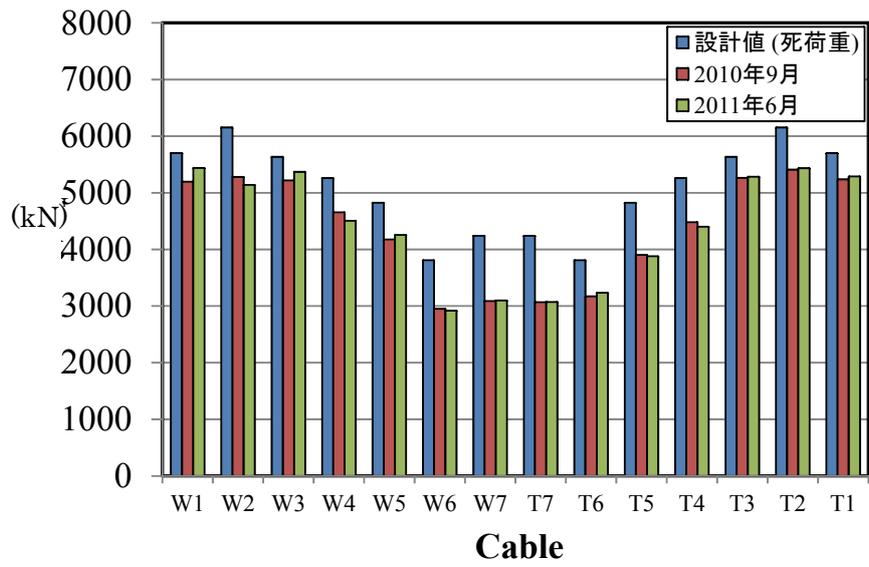
θ : ケーブルの傾斜角

- ・ 上記の方法の特徴としては、数式が厳密解との誤差が 0.4%以内の代数近似式として表現されており、その取扱いが容易な点が挙げられる。
- ・ 2010 年度と 2011 年度の固有振動数の同定結果から算出された張力を図 3-62 に示す。
- ・ 2010 年度と 2011 年度で、張力の変動は約±10%である。

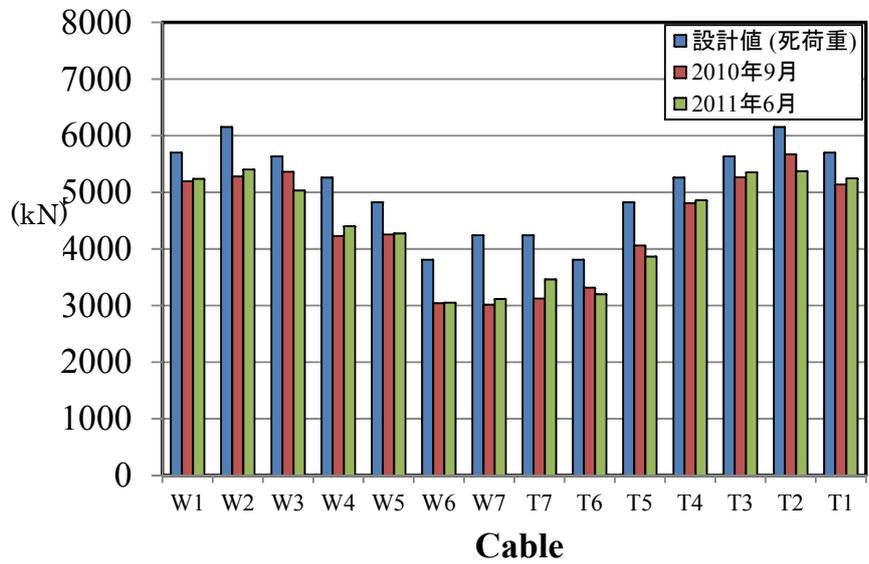
表 3-16 ケーブル諸元

ケーブル番号	カタログ値 ¹⁾				設計値					計算値					
	鋼線本数 7φ×n	ストランド 外径(被覆前) (m)	単位質量 w (t/m)	断面積 A (m ²)	ケーブル長さ (定着ブロック 間距離) L (m)	傾斜角 θ (deg)	サグ s (m)	設計張力 (死荷重時) T ₁		断面2次 モーメント I (m ⁴)	弾性係数 E (kN/m ²)	引張剛性 (仮定値) EA (kN)	曲げ剛性 (仮定値) EI (kN・m ²)	サグ比 δ	
								(t)	(kN)						
P12-P13 P3側 左側	W1	397	0.1532	0.1240	0.015278	197.2260	21.591	1.0132	581.2	5699.6	0.000027	2.00E+08	3.06E+06	5408	0.0055
	W2	367	0.1470	0.1150	0.014124	172.1050	23.116	0.6798	627.4	6152.7	0.000023	2.00E+08	2.82E+06	4584	0.0043
	W3	349	0.1420	0.1100	0.013431	147.1400	25.151	0.5195	574.7	5635.9	0.000020	2.00E+08	2.69E+06	3992	0.0039
	W4	337	0.1406	0.1060	0.012969	122.4190	27.997	0.3745	536.3	5259.3	0.000019	2.00E+08	2.59E+06	3837	0.0035
	W5	313	0.1353	0.0986	0.012046	98.1060	32.228	0.2393	492.0	4824.9	0.000016	2.00E+08	2.41E+06	3290	0.0029
	W6	253	0.1217	0.0801	0.009737	74.5550	39.063	0.1336	388.6	3810.9	0.000011	2.00E+08	1.95E+06	2154	0.0023
	W7	253	0.1217	0.0801	0.009737	52.5130	51.383	0.0509	432.5	4241.4	0.000011	2.00E+08	1.95E+06	2154	0.0016
P11-P12 A2側 右側	T7	253	0.1217	0.0801	0.009737	52.7900	51.624	0.0512	432.5	4241.4	0.000011	2.00E+08	1.95E+06	2154	0.0016
	T6	253	0.1217	0.0801	0.009737	74.9520	39.436	0.1343	388.6	3810.9	0.000011	2.00E+08	1.95E+06	2154	0.0023
	T5	313	0.1353	0.0986	0.012046	98.5900	32.670	0.2405	492.0	4824.9	0.000016	2.00E+08	2.41E+06	3290	0.0029
	T4	337	0.1406	0.1060	0.012969	122.9730	28.480	0.3761	536.3	5259.3	0.000019	2.00E+08	2.59E+06	3837	0.0035
	T3	349	0.1420	0.1100	0.013431	147.7600	25.659	0.5217	574.7	5635.9	0.000020	2.00E+08	2.69E+06	3992	0.0039
	T2	367	0.1470	0.1150	0.014124	172.7870	23.640	0.6825	627.4	6152.7	0.000023	2.00E+08	2.82E+06	4584	0.0043
	T1	397	0.1532	0.1240	0.015278	197.9670	22.126	1.0169	581.2	5699.6	0.000027	2.00E+08	3.06E+06	5408	0.0055

1) NEW-PWS(東京製綱)



(a) ケーブル a



(b) ケーブル b

図 3-62 張力の比較

3-4-7. ケーブルの温度変化および断面減少による解析的検討

3-4-7-1. 検討概要

ここでは、完成時からの温度変化 -20°C の影響について自重解析（幾何学的非線形性を考慮した有限変位解析）により検討した。また、完成後のケーブルの腐食による断面減少の影響についても検討した。

3-4-7-2. 解析内容

(1) 解析ケース

ここでは、完成時からの温度変化（ -20°C ）およびケーブルの局部腐食の影響について検討するために、以下の10ケースについて自重解析を行った。なお、③～⑩の解析ケースについては、ケーブルの局部的な腐食による断面減少の影響を見るために、着目したC5,C1ケーブルの下端要素について、腐食率が10%の場合には断面積を90%とし、設定する腐食率に応じた断面積の減少により考慮することとした。

表 3-17 解析ケース

解析ケース名		内容	備考
①	D+Ps	死荷重+プレストレス	完成時
②	D+Ps+T (-20°C)	死荷重+プレストレス+温度変化 -20°C	完成時+温度変化(-20°C)
③	D+Ps+C5A(-10%)	死荷重+プレストレス+C5ケーブル下端部_腐食率10%	完成時+C5ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 10%)
④	D+Ps+C5A(-20%)	死荷重+プレストレス+C5ケーブル下端部_腐食率20%	完成時+C5ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 20%)
⑤	D+Ps+C5A(-50%)	死荷重+プレストレス+C5ケーブル下端部_腐食率50%	完成時+C5ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 50%)
⑥	D+Ps+C5A(-80%)	死荷重+プレストレス+C5ケーブル下端部_腐食率80%	完成時+C5ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 80%)
⑦	D+Ps+C1A(-10%)	死荷重+プレストレス+C1ケーブル下端部_腐食率10%	完成時+C1ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 10%)
⑧	D+Ps+C1A(-20%)	死荷重+プレストレス+C1ケーブル下端部_腐食率20%	完成時+C1ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 20%)
⑨	D+Ps+C1A(-50%)	死荷重+プレストレス+C1ケーブル下端部_腐食率50%	完成時+C1ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 50%)
⑩	D+Ps+C1A(-80%)	死荷重+プレストレス+C1ケーブル下端部_腐食率80%	完成時+C1ケーブル局部腐食(下端要素の断面減少 \cdot 80%)

(2) 解析モデル

本橋の耐震補強設計時に作成した解析モデルを一部簡素化し、本検討に使用した。

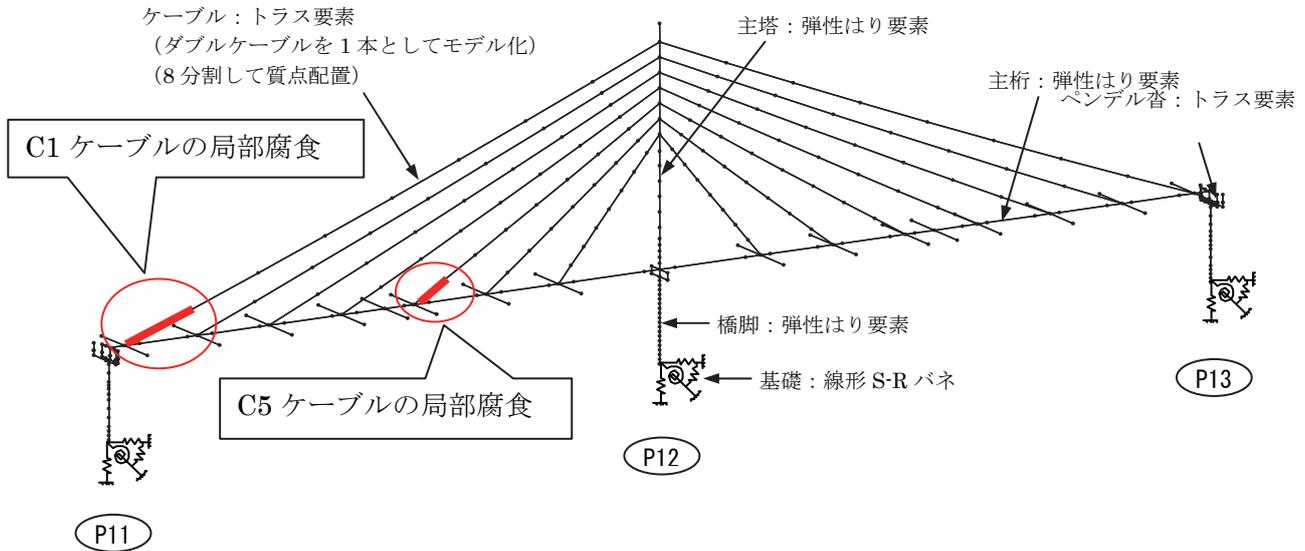


図 3-63 立体骨組モデル

表 3-18 支承条件

橋脚	支承名	支承タイプ	拘束条件							移動可能量 (mm)	
			橋軸方向 UX	橋軸直角方向 UY	鉛直方向 UZ		橋軸回り RX	橋軸直角回り RY	鉛直回り RZ		
					正	負					
P11 P13	正反力脊 ペンデル脊 水平脊(ワイド脊)	ピボットローラー ペンデル 支承板支承	自由	自由	拘束	自由	自由	自由	自由	自由	±110
P12	主桁脊 主塔脊	ピボット ピボット	自由	自由	拘束	拘束	自由	自由	自由	自由	-

(3) 材料特性

表 3-19 材料特性

材料名	材料No.	E (kN/m ²)	G (kN/m ²)	ポアソン比	線膨張係数	備考
鋼	100	2.000E+08	7.692E+07	0.300	1.2E-05	主塔・主桁(弾性はり)
ケーブル	500	1.950E+08	7.500E+07	0.300	1.2E-05	ケーブル
コンクリート	1000	2.350E+07	1.007E+07	0.167	1.0E-05	橋脚(弾性はり)

(4) 死荷重 D

死荷重は、竣工図書より上部構造死荷重強度および橋脚重量を集計し、要素分割された各部材の節点が分担する重量分を節点荷重により载荷した。

表 3-20 斜張橋部の重量 (当初設計計算書より)

項目		重量			備考
		延長	死荷重強度	重量	
上部構造	主塔	80.0m	13.000tf/m	1040tf	ケーブル重量1/2含む
	主桁	380.0m	18.053tf/m	6860tf	〃
	総重量	7900tf			
支点反力	P11		P12	P13	
		-108tf	8116tf	-108tf	
橋脚	P11		P12	P13	
		4096tf	8213tf	4131tf	基礎重量は含まない

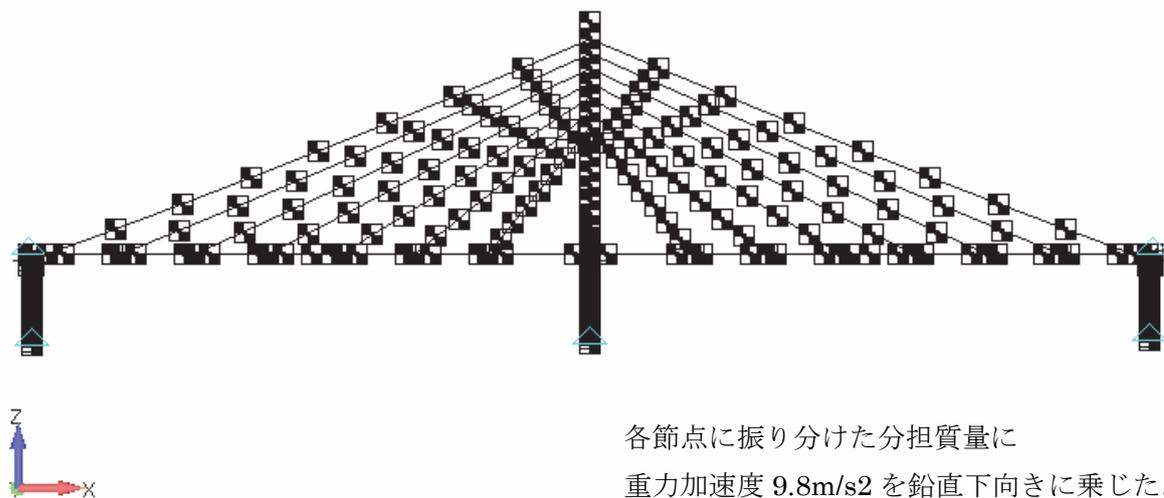


図 3-64 死荷重 D の載荷図

(5) プレストレス Ps

ケーブル張力 T はケーブル公式により算出し、温度荷重として解析モデルに載荷した。主桁および主塔のプレストレスについても同様に、関係式から求めた主桁への水平張力 H および主塔への鉛直張力 V を温度荷重に換算して載荷した。また、温度変化時はさらに -20℃ を加えることで、ケーブルに作用するプレストレスを考慮した。

表 3-21 ケーブルサグ、ケーブル張力および温度荷重の算出（死荷重時）

ケーブル名	水平投影長 l (m)	水平単長 重量 w(tf/m)	主桁分担重 量Wg (tf)	ケーブル勾配 θ (deg)	水平張力 H (kN)	鉛直張力 V (kN)	最大サグ (m)	ケーブル平均 張力T (kN)	断面積A (m ²)	温度(°C)
CABL01	185.000	0.284	315.197	21.801	8371.2	3606.0	1.422	9016.1	0.03056	-126.1
CABL02	160.000	0.267	450.282	23.328	10725.5	4834.9	0.782	11680.3	0.02825	-176.7
CABL03	135.000	0.260	450.282	25.364	9677.5	4760.0	0.600	10709.9	0.02686	-170.4
CABL04	110.000	0.261	450.282	28.207	8495.2	4697.3	0.456	9640.0	0.02594	-158.8
CABL05	85.000	0.257	450.282	32.428	7119.3	4629.9	0.320	8434.5	0.02409	-149.6
CABL06	60.000	0.229	450.282	39.237	5489.7	4550.7	0.184	7087.7	0.01947	-155.6
CABL07	35.000	0.293	540.338	51.499	4255.0	5399.4	0.103	6835.1	0.01947	-150.0

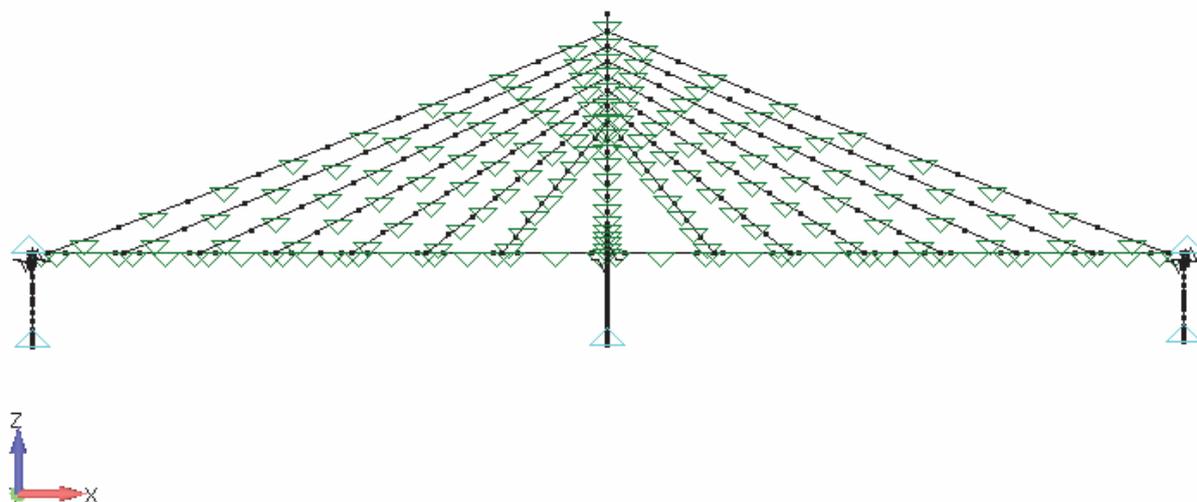


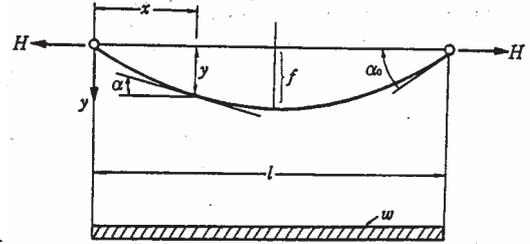
図 3-65 プレストレス Ps の載荷図

<ケーブル公式>

最大サグ $f = \frac{wl^2}{8H}$

ケーブル張力 $T = \frac{H}{\cos \theta}$

温度 (°C) $Temp = \frac{T}{\alpha EA}$ (α : 線膨張係数)



(6) ケーブルの局部腐食を考慮した断面積 CA

ケーブル下端部の局部腐食による影響を考慮するために、腐食率を 10%、20%、50%、80%とした時の残存断面積を以下に示す。着目した C1 および C5 ケーブルの下端部要素の断面積を腐食率に応じた断面積として腐食時の検討を行う。

表 3-22 腐食率に応じた残存断面積

対象ケーブル	断面積A(m2)				
	完成時	腐食率_10%	腐食率_20%	腐食率_50%	腐食率_80%
C1	0.030560	0.027504	0.024448	0.015280	0.006112
C5	0.024090	0.021681	0.019272	0.012045	0.004818

(7) 解析条件

- 解析ソフト : Femap with NX Nastran ver9.3J
- 解析タイプ : 非線形静解析 (幾何学的非線形性を考慮した有限変位解析)
- 反復法 : ニュートンラプソン法
- 最大反復回数 : 25 回
- 収束判定基準 : 変位判定 1.0E-2

(8) 実用算定式を用いたケーブル張力による固有振動数の逆算

各解析ケースより算出したケーブル張力より、実用算定式を用いて固有振動数を逆算し、固有振動数への影響を検討する。

3-4-7-3. ケーブルの局部腐食を考慮した解析結果

(1) 張力の算出結果

- 完成後の温度変化後のケーブル張力は、完成時とほぼ同値となり、温度変化によるケーブル張力への影響はかなり小さい。
- ケーブルの腐食率が80%の場合、張力は最大で25%減少するが、腐食率が50%では最大でも8%程度の減少となり、局部腐食によるケーブル張力への影響は小さい。
- 腐食によるケーブル張力の変化率は、C1よりもC5の方が大きい。

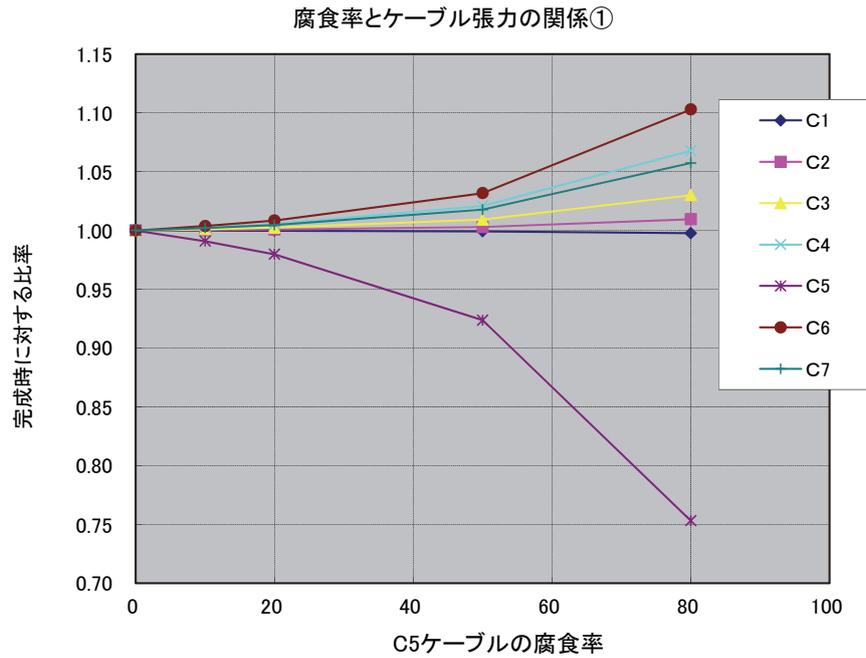


図 3-66 C5 ケーブルの腐食率とケーブル張力の関係

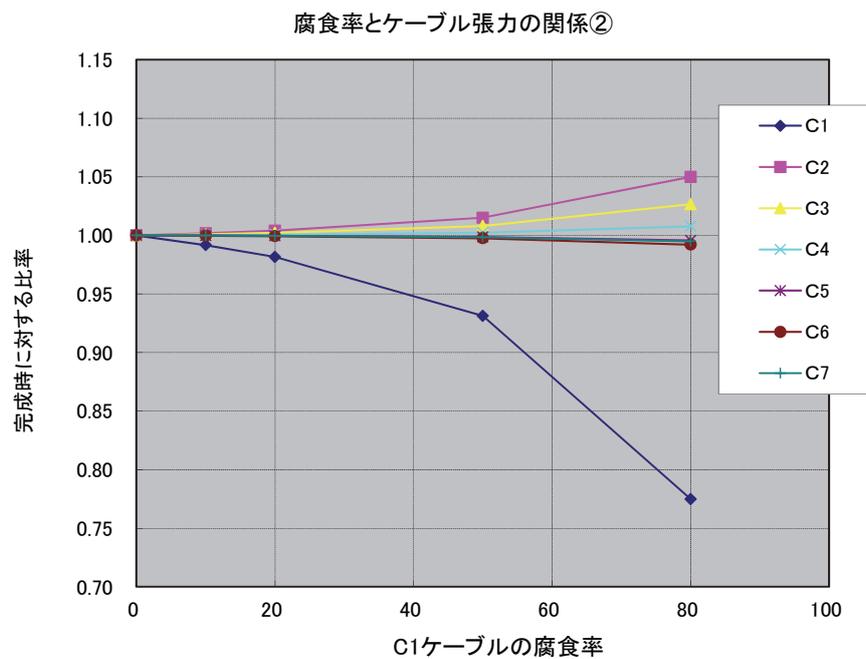


図 3-67 C1 ケーブルの腐食率とケーブル張力の関係

表 3-23 張力の算出結果一覧

対象 ケーブル	完成時 D+Ps ①	完成時+温度変化 D+Ps+T(-20℃) ② 張力比 ②/① 張力差 ②-①		ケーブルの局部腐食																																												
				→C5腐食10% ③ 張力比 ③/① 張力差 ③-①		→C5腐食20% ④ 張力比 ④/① 張力差 ④-①		→C5腐食50% ⑤ 張力比 ⑤/① 張力差 ⑤-①		→C5腐食80% ⑥ 張力比 ⑥/① 張力差 ⑥-①																																						
				C1	9032.2	9032.5 (1.00) (0.27)	9031.5 (1.00) (-0.78)	9030.5 (1.00) (-1.74)	9025.8 (1.00) (-6.46)	9011.7 (1.00) (-20.57)	C2	11734.6	11734.7 (1.00) (0.15)	11738.7 (1.00) (4.11)	11743.7 (1.00) (9.14)	11769.0 (1.00) (34.43)	11846.3 (1.01) (111.73)	C3	10764.4	10764.5 (1.00) (0.06)	10776.3 (1.00) (11.90)	10790.9 (1.00) (26.47)	10864.1 (1.01) (99.61)	11087.3 (1.03) (322.89)	C4	9682.9	9682.8 (1.00) (-0.01)	9707.0 (1.00) (24.19)	9736.7 (1.01) (53.80)	9885.3 (1.02) (202.47)	10339.3 (1.07) (656.44)	C5	8440.9	8440.9 (1.00) (-0.05)	8364.0 (0.99) (-76.93)	8269.9 (0.98) (-171.05)	7797.4 (0.92) (-643.55)	6357.9 (0.75) (-2083.02)	C6	7027.2	7027.2 (1.00) (-0.07)	7053.9 (1.00) (26.66)	7086.5 (1.01) (59.29)	7250.3 (1.03) (223.07)	7750.0 (1.10) (722.81)	C7	6764.3	6764.3 (1.00) (-0.02)
C3	10764.4	10764.5 (1.00) (0.06)	10776.3 (1.00) (11.90)	10790.9 (1.00) (26.47)	10864.1 (1.01) (99.61)	11087.3 (1.03) (322.89)	C4	9682.9	9682.8 (1.00) (-0.01)	9707.0 (1.00) (24.19)	9736.7 (1.01) (53.80)	9885.3 (1.02) (202.47)	10339.3 (1.07) (656.44)	C5	8440.9	8440.9 (1.00) (-0.05)	8364.0 (0.99) (-76.93)	8269.9 (0.98) (-171.05)	7797.4 (0.92) (-643.55)	6357.9 (0.75) (-2083.02)	C6	7027.2	7027.2 (1.00) (-0.07)	7053.9 (1.00) (26.66)	7086.5 (1.01) (59.29)	7250.3 (1.03) (223.07)	7750.0 (1.10) (722.81)	C7	6764.3	6764.3 (1.00) (-0.02)	6778.6 (1.00) (14.30)	6796.1 (1.00) (31.79)	6883.9 (1.02) (119.60)	7151.6 (1.06) (387.30)														
C5	8440.9	8440.9 (1.00) (-0.05)	8364.0 (0.99) (-76.93)	8269.9 (0.98) (-171.05)	7797.4 (0.92) (-643.55)	6357.9 (0.75) (-2083.02)	C6	7027.2	7027.2 (1.00) (-0.07)	7053.9 (1.00) (26.66)	7086.5 (1.01) (59.29)	7250.3 (1.03) (223.07)	7750.0 (1.10) (722.81)	C7	6764.3	6764.3 (1.00) (-0.02)	6778.6 (1.00) (14.30)	6796.1 (1.00) (31.79)	6883.9 (1.02) (119.60)	7151.6 (1.06) (387.30)																												
C7	6764.3	6764.3 (1.00) (-0.02)	6778.6 (1.00) (14.30)	6796.1 (1.00) (31.79)	6883.9 (1.02) (119.60)	7151.6 (1.06) (387.30)																																										

対象 ケーブル	ケーブルの局部腐食																																	
	→C1腐食10% ⑦ 張力比 ⑦/① 張力差 ⑦-①		→C1腐食20% ⑧ 張力比 ⑧/① 張力差 ⑧-①		→C1腐食50% ⑨ 張力比 ⑨/① 張力差 ⑨-①		→C1腐食80% ⑩ 張力比 ⑩/① 張力差 ⑩-①																											
	C1	8957.3 (0.99) (-74.93)	8866.0 (0.98) (-166.25)	8411.7 (0.93) (-620.56)	6999.0 (0.77) (-2033.24)	C2	11755.9 (1.00) (21.34)	11782.0 (1.00) (47.40)	11912.2 (1.02) (177.63)	12320.4 (1.05) (585.85)	C3	10774.9 (1.00) (10.44)	10787.6 (1.00) (23.19)	10851.3 (1.01) (86.87)	11050.6 (1.03) (286.17)	C4	9685.6 (1.00) (2.75)	9689.0 (1.00) (6.11)	9705.7 (1.00) (22.88)	9758.2 (1.01) (75.31)	C5	8439.6 (1.00) (-1.31)	8438.0 (1.00) (-2.90)	8430.1 (1.00) (-10.86)	8405.1 (1.00) (-35.83)	C6	7025.2 (1.00) (-2.00)	7022.8 (1.00) (-4.44)	7010.6 (1.00) (-16.63)	6972.2 (0.99) (-55.05)	C7	6763.1 (1.00) (-1.22)	6761.6 (1.00) (-2.71)	6754.1 (1.00) (-10.15)
C3	10774.9 (1.00) (10.44)	10787.6 (1.00) (23.19)	10851.3 (1.01) (86.87)	11050.6 (1.03) (286.17)	C4	9685.6 (1.00) (2.75)	9689.0 (1.00) (6.11)	9705.7 (1.00) (22.88)	9758.2 (1.01) (75.31)	C5	8439.6 (1.00) (-1.31)	8438.0 (1.00) (-2.90)	8430.1 (1.00) (-10.86)	8405.1 (1.00) (-35.83)	C6	7025.2 (1.00) (-2.00)	7022.8 (1.00) (-4.44)	7010.6 (1.00) (-16.63)	6972.2 (0.99) (-55.05)	C7	6763.1 (1.00) (-1.22)	6761.6 (1.00) (-2.71)	6754.1 (1.00) (-10.15)	6730.5 (1.00) (-33.73)										
C5	8439.6 (1.00) (-1.31)	8438.0 (1.00) (-2.90)	8430.1 (1.00) (-10.86)	8405.1 (1.00) (-35.83)	C6	7025.2 (1.00) (-2.00)	7022.8 (1.00) (-4.44)	7010.6 (1.00) (-16.63)	6972.2 (0.99) (-55.05)	C7	6763.1 (1.00) (-1.22)	6761.6 (1.00) (-2.71)	6754.1 (1.00) (-10.15)	6730.5 (1.00) (-33.73)																				
C7	6763.1 (1.00) (-1.22)	6761.6 (1.00) (-2.71)	6754.1 (1.00) (-10.15)	6730.5 (1.00) (-33.73)																														

単位(kN)

(2) ケーブルの固有振動数の算出結果

- ・ 張力の算出結果と同様に，完成後の温度変化後のケーブルの固有振動数は，完成時とほぼ同値となり，温度変化によるケーブルの固有振動数への影響はかなり小さい。
- ・ 張力の算出結果と同様に，ケーブルの腐食率が 80%に及ぶ場合，固有振動数は最大で 12%減少するが，腐食率が 50%では最大でも 3%程度の減少となり，局部腐食によるケーブルの固有振動数への影響は小さい。
- ・ 腐食によるケーブルの固有振動数の変化率は，C5 よりも C1 の方が大きい。

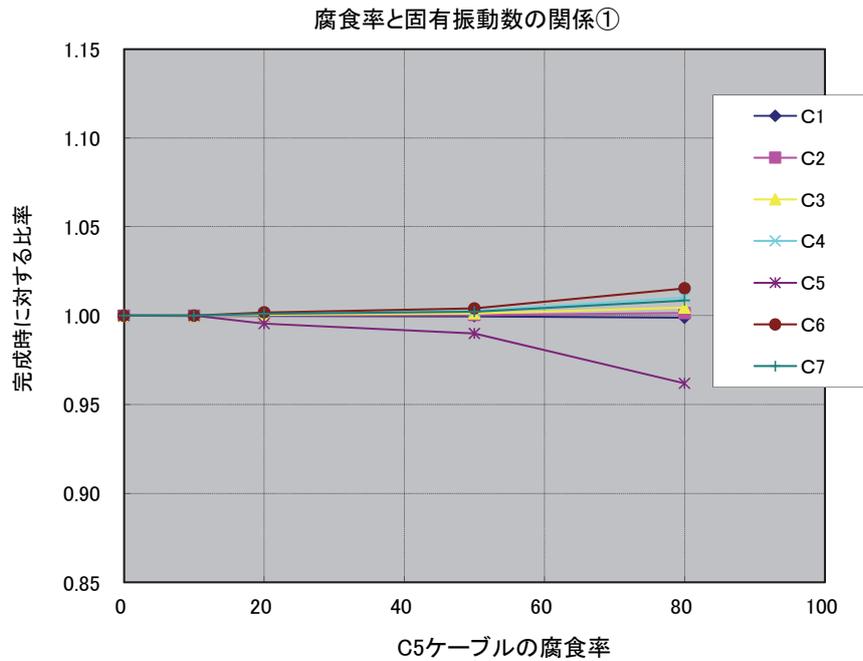


図 3-68 C5 ケーブルの腐食率と固有振動数の関係

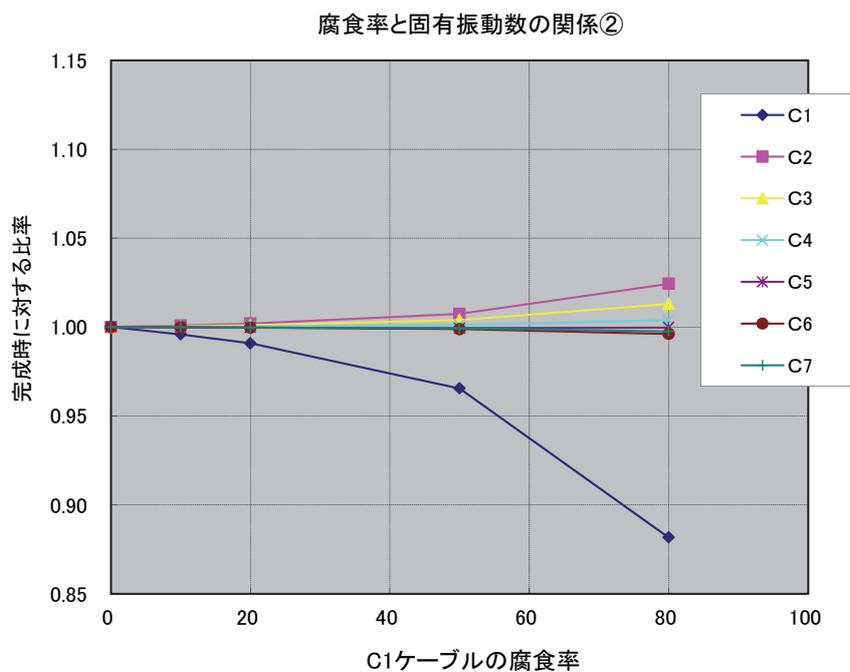


図 3-69 C1 ケーブルの腐食率と固有振動数の関係

表 3-24 固有振動数の算出結果

ケーブル 番号	振動数理論値h (Hz)																				
	①死荷重時							②死荷重時+温度変化(-20℃)							③C5ケーブル10%腐食						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
C1	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43
C2	0.66	1.33	1.99	2.65	3.32	3.98	4.65	0.66	1.33	1.99	2.65	3.32	3.98	4.65	0.66	1.33	1.99	2.65	3.32	3.98	4.65
C3	0.76	1.52	2.28	3.05	3.81	4.57	5.33	0.76	1.52	2.28	3.05	3.81	4.57	5.33	0.76	1.52	2.28	3.05	3.81	4.57	5.33
C4	0.89	1.77	2.66	3.55	4.44	5.32	6.21	0.89	1.77	2.66	3.55	4.44	5.32	6.21	0.89	1.77	2.66	3.55	4.44	5.32	6.21
C5	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53
C6	1.44	2.88	4.31	5.75	7.19	8.63	10.06	1.44	2.88	4.31	5.75	7.19	8.63	10.06	1.44	2.88	4.31	5.75	7.19	8.63	10.06
C7	2.02	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16	2.02	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16	2.02	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16
ケーブル 番号	振動数理論値h (Hz)																				
	④C5ケーブル20%腐食							⑤C5ケーブル50%腐食							⑥C5ケーブル80%腐食						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
C1	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.42
C2	0.66	1.33	1.99	2.66	3.32	3.98	4.65	0.66	1.33	1.99	2.66	3.32	3.98	4.65	0.66	1.33	1.99	2.66	3.32	3.99	4.65
C3	0.76	1.52	2.29	3.05	3.81	4.57	5.33	0.76	1.52	2.29	3.05	3.81	4.57	5.33	0.76	1.53	2.29	3.06	3.82	4.59	5.35
C4	0.89	1.78	2.66	3.55	4.44	5.33	6.22	0.89	1.78	2.67	3.56	4.45	5.34	6.23	0.90	1.79	2.69	3.58	4.48	5.38	6.27
C5	1.07	2.14	3.21	4.28	5.35	6.42	7.50	1.06	2.13	3.19	4.26	5.32	6.39	7.45	1.03	2.07	3.10	4.14	5.17	6.21	7.24
C6	1.44	2.88	4.32	5.76	7.20	8.64	10.08	1.44	2.89	4.33	5.77	7.22	8.66	10.10	1.46	2.92	4.38	5.84	7.30	8.76	10.22
C7	2.03	4.05	6.08	8.10	10.13	12.15	14.18	2.03	4.06	6.08	8.11	10.14	12.17	14.20	2.04	4.08	6.12	8.16	10.20	12.24	14.28
ケーブル 番号	振動数理論値h (Hz)																				
	⑦C1ケーブル10%腐食							⑧C1ケーブル20%腐食							⑨C1ケーブル50%腐食						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
C1	0.49	0.98	1.46	1.95	2.44	2.93	3.41	0.49	0.97	1.46	1.94	2.43	2.91	3.40	0.47	0.95	1.42	1.89	2.36	2.84	3.31
C2	0.66	1.33	1.99	2.66	3.32	3.99	4.65	0.67	1.33	2.00	2.66	3.33	3.99	4.66	0.67	1.34	2.01	2.67	3.34	4.01	4.68
C3	0.76	1.52	2.29	3.05	3.81	4.57	5.33	0.76	1.52	2.29	3.05	3.81	4.57	5.34	0.76	1.53	2.29	3.06	3.82	4.59	5.35
C4	0.89	1.77	2.66	3.55	4.44	5.32	6.21	0.89	1.77	2.66	3.55	4.44	5.32	6.21	0.89	1.78	2.66	3.55	4.44	5.33	6.22
C5	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53	1.07	2.15	3.22	4.30	5.37	6.45	7.52
C6	1.44	2.87	4.31	5.75	7.19	8.62	10.06	1.44	2.87	4.31	5.75	7.19	8.62	10.06	1.44	2.87	4.31	5.74	7.18	8.62	10.05
C7	2.02	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16	2.02	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16	2.02	4.04	6.07	8.09	10.11	12.13	14.15
ケーブル 番号	振動数理論値h (Hz)																				
	⑩C1ケーブル80%腐食																				
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次														
C1	0.43	0.86	1.30	1.73	2.16	2.59	3.02														
C2	0.68	1.36	2.04	2.72	3.40	4.08	4.76														
C3	0.77	1.54	2.31	3.09	3.86	4.63	5.40														
C4	0.89	1.78	2.67	3.56	4.45	5.34	6.23														
C5	1.08	2.15	3.23	4.30	5.38	6.45	7.53														
C6	1.43	2.86	4.30	5.73	7.16	8.59	10.02														
C7	2.02	4.04	6.06	8.07	10.09	12.11	14.13														

3-4-8. まとめ

(1) 実橋計測

- ・ 不可視レーザー光を用いた新たな LDV (RSV) の評価を目的として、幸魂大橋の振動計測を実施した。
- ・ 計測表面が黒色で、かつ計測距離が約 100m となる場合でも、ケーブル表面に特別な表面処理を施さなくても計測できることを確認した。本 LDV は、従来の LDV を比較して非接触で長距離振動計測を効率化するデバイスと言える。
- ・ 2010 年と 2011 年の計測結果から得られた固有振動数の変化は約±5%で、張力に換算すると約±10%の変化が見られた。

(2) 解析検討

- ・ 現状では損傷程度と張力変化量との関係は不明確であり、構造安全性を判断するための閾値が設定されていない。温度など環境条件の変化に対する張力や振動数の感度も明らかになっていない。そこで立体骨組みモデルを作成して、損傷と張力変化、温度変化の関係を検討した。
- ・ 完成後の温度変化後のケーブル張力は、完成時とほぼ同値となり、温度変化によるケーブル張力への影響はかなり小さい。
- ・ ケーブルの腐食率が 80%の場合、張力は最大で 25%減少するが、腐食率が 50%では最大でも 8%程度の減少となり、局部腐食によるケーブル張力への影響は小さい。
- ・ 腐食によるケーブル固有振動数の変化の傾向は、張力の傾向と同様である。
- ・ ケーブル腐食に対する振動数や張力の変化量の解析値は、2010 年と 2011 年の実測値の差と比較して明らかに大きいとは言えない。ケーブル腐食を振動数計測から検出できるとは結論できない。今後、高頻度なケーブル振動計測などにより環境条件依存性を実測から明らかにした上で、厳密な感度分析が必要である。

【参考文献】

- 1) 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，土木学会論文報告集，第 294 号，pp.25-32，1980.
- 2) 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.
- 3) 久保田ら：レーザードップラー速度計とトータルステーションを用いた超遠隔自動振動計測システムの構築，第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.62，pp683-684，2007.
- 4) 玉田ら：健全度評価のための斜張橋ケーブルの振動計測，第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，2010.
- 5) 川平ら：幸魂大橋(2 径間連続鋼斜張橋)の耐震補強設計，pp.13-20，橋梁と基礎，2010.6.