

長大橋の観測データの活用による維持管理支援 システムの検討

報 告 書

令和 3 年 3 月

国立大学法人 京都大学大学院 工学研究科

目 次

第 1 章 研究概要	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 研究実施方針	2
1. 3 研究実施体制	3
第 2 章 橋梁定期点検の限界を補足できる条件の検討	4
2. 1 吊り橋の構造と着目すべき部材	4
2. 2 着目すべき部材と配慮事項	5
2. 2. 1 主ケーブル	5
2. 2. 2 ケーブル定着部	5
2. 2. 3 アンカレッジ	7
2. 2. 4 主塔	8
2. 2. 5 ハンガーケーブル	9
2. 3 着目すべき部材と橋梁定期点検結果の分析	10
第 3 章 長期計測における季節変動成分の除去法の構築	18
3. 1 概要	18
3. 2 EOV 駆動法 (EOV-driven approach)	20
3. 2. 1 最小 2 乗回帰モデル	20
3. 2. 2 スパースモデル	20
3. 2. 3 ベイズ線形回帰	20
3. 2. 4 ガウス過程回帰	21
3. 3 非 EOV 駆動法 (Non EOV-driven approach)	22
3. 3. 1 自己回帰和分移動平均モデル	22
3. 3. 2 共和分・多次元誤差修正モデル	22
3. 3. 3 SARIMA モデル	24
3. 3. 4 Long Short-Term Memory	24
3. 4 非 EOV 駆動法による長期モニタリングの季節変動除去の有効性	27
3. 4. 1 EOV 駆動法による予測	27
3. 4. 2 非 EOV 駆動法による予測	31
3. 5 まとめ	36
第 4 章 自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期モニタリングの実施	38
4. 1 概要	38
4. 2 斜張橋を対象とした短・長期モニタリング	39
4. 2. 1 対象橋梁	39
4. 2. 2 工程概要	41
4. 2. 3 データ収集手順	43
4. 3 常時振動による斜張橋の振動特性同定	49

4.3.1	桁の振動	50
4.3.2	ケーブルの振動	53
4.4	常時振動計測によるケーブル張力同定	60
4.4.1	ケーブル振動数を用いたケーブル張力同定の基礎	60
4.4.2	ケーブル張力同定	60
4.5	まとめ	68
第5章 モニタリングデータと目視点検データとの相関検討		69
5.1	概要	69
5.2	解析モデル	69
5.2.1	対象橋梁	69
5.2.2	解析モデル	70
5.3	解析結果	71
5.3.1	固有値解析	71
5.3.2	死荷重解析	72
5.4	損傷解析	74
5.4.1	解析概要	74
5.4.2	解析結果	79
第6章 研究会議事録		80
6.1	第1回研究会 議事録（令和2年8月27日）	81
6.2	第2回研究会 議事録（令和2年9月30日）	83
6.3	第3回研究会 議事録（令和3年1月13日）	84
巻末資料		
1.	特殊橋梁（吊り橋）点検資料整理一覧表	88
2.	道路使用許可書（国道29号カラウコ大橋モニタリング）	92

第1章 研究概要

1.1 研究目的

本研究プロジェクトの目的は、図 1-1 に示すように産・官・学の協力により、ケーブル構造を持つ特殊橋について利用可能な計測データおよび目視点検記録から特殊橋の維持管理に必要な有益な情報の抽出と橋梁条件や架橋条件、着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界の明確を図り「特殊橋の劣化特性や実態を精査した情報の確保による維持管理手法の検討」を目的とする。

令和1年度の「ケーブル構造の特殊橋の劣化や実態の精査」、「ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査」、「長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備」、「長期計測データにおける季節変動の調査」の結果を踏まえて、令和2年度は、「定期点検の限界を補足できる条件の検討」、「長期計測における季節変動成分の除去法の構築」、「モニタリングデータと目視点検データとの相関検討」、「自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施」を行った。本報告書は、令和2年度の研究活動をまとめたものである。

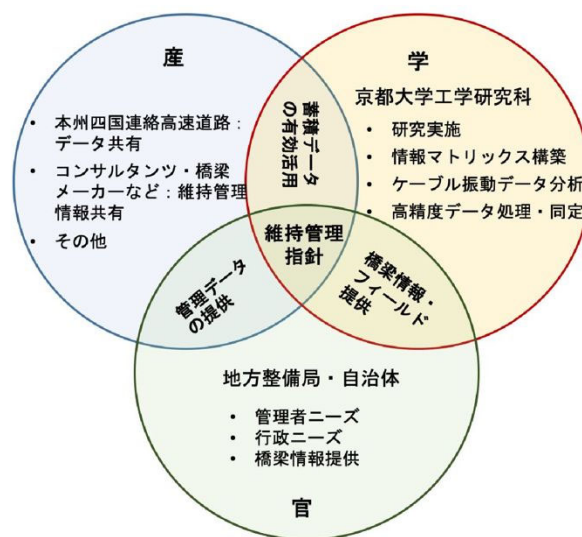


図 1-1 本プロジェクトの概要と体制

1.2 研究内容

1.1 節でも述べたように、令和2年度は、「定期点検の限界を補足できる条件の検討」、「長期計測における季節変動成分の除去法の構築」、「モニタリングデータと目視点検データとの相関検討」、「自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施」の4項目について研究を行った。研究項目それぞれの概要は以下のとおりである。

- ㊦ **定期点検の限界を補足できる条件の検討**：小規模の吊り橋について、構造形式や橋梁規模など着目すべき部材に対して、橋梁定期点検結果をもとに損傷状況の整理を行い、橋梁規模、各種形式による損傷部位、度合い等の相関性について検討を行った。
- ㊦ **長期計測における季節変動成分の除去法の構築**：令和1年度に検討した長期計測における季節変動成分の除去は、現在主流である外部因子を入力情報とする除去法による検討を行った。その結果、橋梁のような土木構造物はさまざまな外部因子によって影響されており、全ての外部因子を入力情報とするのは難しいことが明らかになった。それで、令和2年度は、外部因子の入力情報を必要としない季節変動成分の除去法について検討を行った。
- ㊦ **自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施**：供用中の小規模斜張橋を対象に、短期計測および長期モニタリングを実施している。短期計測は、対象橋の基本振動特性とケーブル張力の把握を目的にしている。長期モニタリングは、対象橋の長期にわたる振動特性の変動や張力の変動を計測し、季節変動除去法の性能について検証する。長期モニタリングについては次年度にも継続することになっている。また、本モニタリングで得られた経験は、次年度の小規模吊り橋を対象とする検討に活かせることができる。
- ㊦ **モニタリングデータと目視点検データとの相関検討**：ケーブル構造を持つ特殊橋をセンサ情報によって異常を検知するためには、着目対象の物理量（特徴量）を決め、それが劣化や損傷にどれくらい敏感なのか検討しておく必要がある。そこで、「定期点検の限界を補足できる条件の検討」から目視点検から得られる損傷を、有限要素解析により模擬し、検討を行っている。対象橋は、「自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施」項目で対象としている斜張橋である。長期モニタリング実施橋を対象にしている主な理由は、設計図書に基づいて作成した解析モデルをモニタリング情報からキャリブレーションできるからである。本年度は、橋梁選定、計測システムのカスタマイズなど対象橋へのモニタリングの実施が遅れたこともあり、限定的に損傷を模擬した検討を行った。

1.3 研究実施体制

本研究は、下表のメンバーにて実施した。

新都市社会技術融合創造研究会 プロジェクトチーム メンバーリスト
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」

	氏名	所属・役職	備考
学	金 哲佑	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授	PJ リーダー
	八木 知己	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授	
	五井 良直	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 助教	
	林 巖	大阪市立大学大学院 助教	
	古川 愛子	京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 准教授	
	玉越 隆史	京都大学経営管理大学院 特定教授	オブザーバー
産	小野和行	(株)エイト日本技術開発 国土インフラ事業部 神戸支店 道路・構造グループ	幹事
	遠山直樹	本州四国連絡高速道路(株) 長大橋技術センター	
	丸山武士	株式会社長大 西日本構造事業部	幹事
	織田敏彰	株式会社長大 西日本構造事業部	
	榊 一平	神鋼鋼線工業株式会社	
	矢島卓	東京製綱株式会社 鋼構造ケーブル部	
官	河合 良治	道路部 道路情報管理官	
	吉津 宏夫	道路部 道路保全企画官	
	松本 太一	道路部 道路構造保全官	整備局 窓口
	富永 義人	近畿道路メンテナンスセンター 保全対策官	
	増田 寛四郎	近畿道路メンテナンスセンター 技術課長	
	坂本 千秋	近畿道路メンテナンスセンター 技術課 保全企画係長	
	上原 秀樹	近畿技術事務所 副所長	
	高祖 亮一	近畿技術事務所 技術情報管理官	契約 担当
	石鍋 一文	姫路河川国道事務所 副所長	
	竹内 浩二	姫路河川国道事務所 管理第二課長	
	吉井 寿光	姫路河川国道事務所 管理第二課専門員	

第2章 橋梁定期点検の限界を補足できる条件の検討

以下では、橋梁定期点検結果を参考に、吊り橋の損傷分類、及び相関分析を行うこととする。なお、分析に際しては昨年度入手している管内の吊り橋全 198 橋の内、橋梁定期点検調書が確認できる 127 橋に対して実施している。

2.1 吊り橋の構造と着目すべき部材

吊り橋には、主ケーブルとハンガーの接合部や主ケーブルのアンカー定着部、サドル部など吊形式橋梁以外にはない特殊な構造も多く用いられている。そのため、一般的な桁橋の健全度評価が適用できないケースもあり、損傷度合いを適切に判断するには更なる知見が必要である。

表 2-1 には、一般的な吊り橋の点検位置、点検内容を示す。これらについては、概ね近接目視にて確認できる内容である。したがって、定期点検によって、対象となる吊り橋の現状の損傷状態は定性的に確認できることとなる。

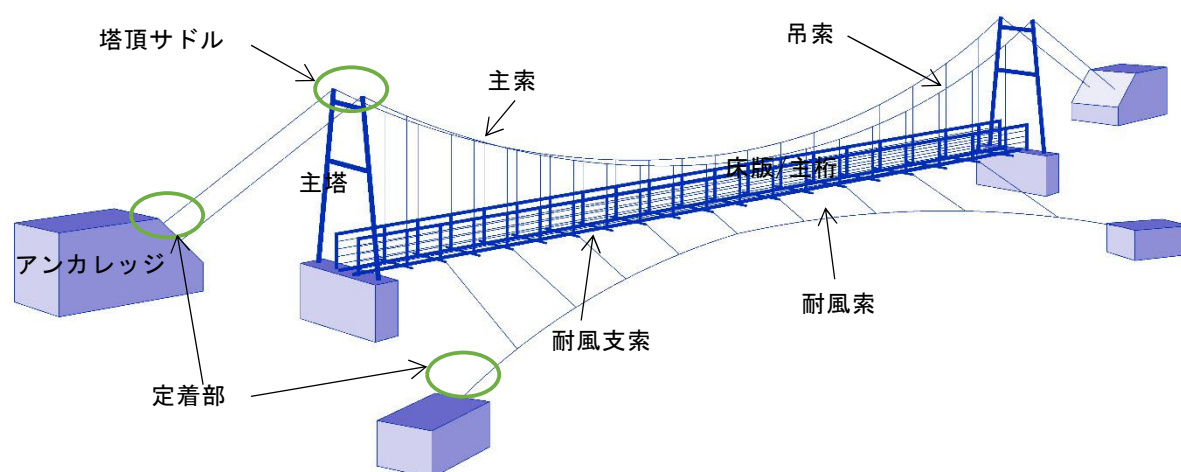


図 2-1 吊り橋構造概要図

表 2-1 一般的な吊り橋点検ポイント

点検位置	点検内容
橋の形状	橋面の傾き・変形，異常な振動など
ケーブル	ロープ径，腐食，断線，摩耗，軸折れ，弛み，取付方法など
定着部	ソケット抜出し，腐食，泥等の堆積，変形，弛み，湿潤環境など
吊 索	ロープ径，腐食，弛み，ワイヤグリップの弛み，ケーブルバンドの滑りなど
床板・手摺	損傷脱落，腐食，弛み（釘抜け）など
その他	ボルト類の脱落，ネジ部の腐食など

しかし、これらの損傷が橋全体に及ぼす影響を定量的に把握することは、現状では困難である。そのため、どの部位の損傷がどの程度の損傷であれば、対策を講じる必要があるのかという指標を示すことが重要な事項となる。そこで、本章では実際の橋梁点検調書を利用し、損傷部位と損傷状態を種々の構造諸元との相関性を分析することとする。

2.2 着目すべき部材と配慮事項

吊橋は、図 2-1 に示すように主塔間を張り渡したメインケーブルから懸垂する形式の橋梁であり、上部構造の剛性ではなく、各種ケーブルの張力により成り立っている。そのため、これらの各種ケーブル（メイン索・吊索・耐風索等）、アンカレッジ、主塔、塔頂サドル等の損傷が橋梁全体の健全度に大きく直接影響することとなる。

以上のことから、橋梁全体に大きく影響を与える着目すべき部材、それらに対する配慮事項を以下で整理する。

2.2.1 主ケーブル

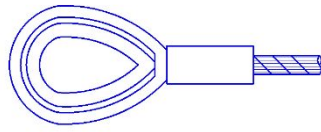
主ケーブルは、自重及び活荷重により下向きの力が作用するため、その影響がケーブルシステム全体に影響することとなる。規模の大きい吊り橋では、主ケーブルに作用している張力の大半を自重が占めることとなるため、活荷重が多少超過しても張力変化はわずかである。一方、規模が小さい吊り橋では、主ケーブルの断面に占める活荷重分の比率が大きく、その変化の影響が問題となる可能性がある。主ケーブルが健全であれば問題ないが、腐食、切断等の損傷が生じていればその影響は橋全体に及ぶこととなる。

主ケーブルは桁を懸垂するための吊材が、ケーブルバンドや種々の形式のクリップ等により摩擦力で抵抗するように固定されている。そのため、過度な鉛直力によってハンガーケーブルが引張られることで定着部が滑ることが懸念される。この際、主ケーブルとケーブルバンドの定着構造は、締付ボルトのクリープや主ケーブルの張力変化等に伴う影響で、当初の締付力が十分に期待できなくなっていることも懸念される。

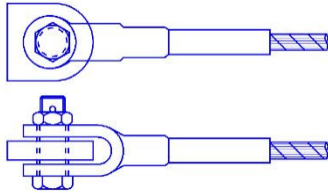
2.2.2 ケーブル定着部

ケーブル定着部の構造は、圧縮止め・ソケット止め・くさび止め等が用いられる。なお、くさび止めは規模の大きい橋梁に適用され、中小規模の橋梁には圧縮止め・ソケット止めが適用される。

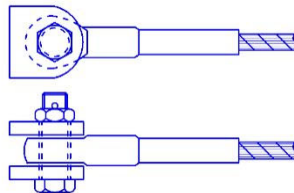
各構造の概要図を図 2-2～図 2-4 に示す。



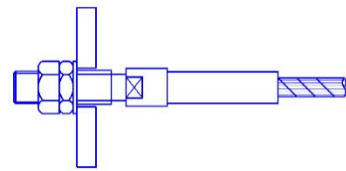
アイ圧縮止めタイプの形状



a) オープンタイプ



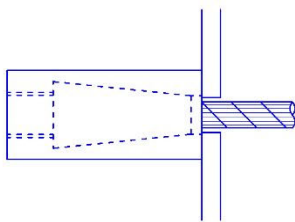
b) クローズタイプ



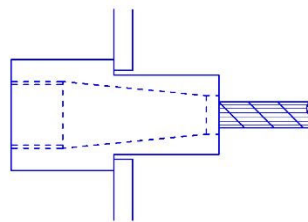
c) エンドネジタイプ

スウェージタイプの形状

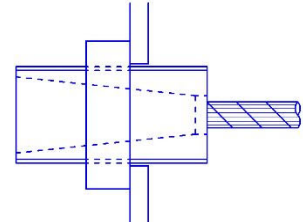
図 2.2 圧縮止め定着構造事例



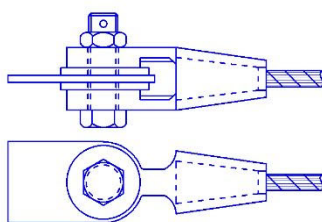
a) 前面支圧タイプ



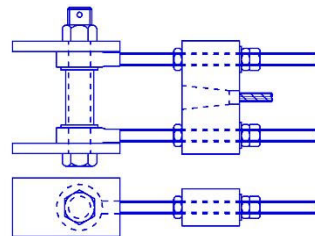
b) 背面支圧タイプ



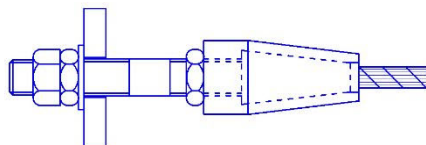
c) ナット定着タイ



d) オープンタイプ



e) ブリッジタイプ



f) ロッド定着タイ

図 2-3 ソケット止め定着構造事例

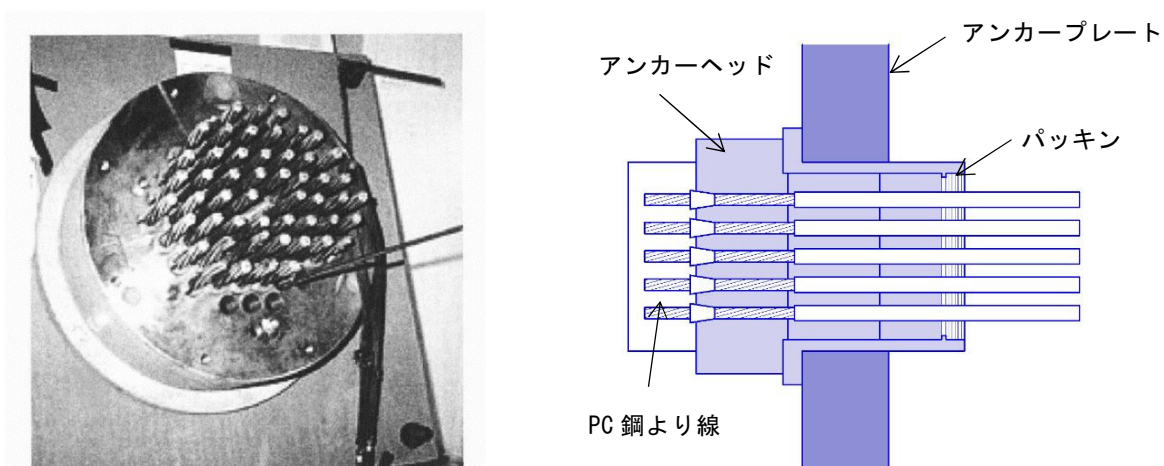


図 2-4 くさび止め定着構造事例

2.2.3 アンカレッジ

図 2-1 に示すとおり，アンカレッジは，主ケーブルを定着し，その張力の全てを受け持つ部材である．一般的に用いられるアンカレッジの構造は，表 2-2 のとおりである．

表 2-2 一般的なアンカレッジの構造形式

構造形式	概 要	事 例
重力式	大規模な吊り橋で適用される構造である．	
半重力式	規模を縮小した重力式と地盤への埋め込み抵抗を考慮する構造である．	
トンネル式	主ケーブルをアンカーフレームに接合，アンカーフレーム自体を地山に埋め込み抵抗を考慮する構造である．	

なお，本研究で対象としている吊り橋では，重力式は用いられておらず，半重力式，若しくはトンネル式のアンカレッジとなり，トンネル式が圧倒的に多い．この形式の場合，土砂や雨水の影響を直接受け，アンカーフレーム及び主ケーブル等の腐食が懸念される．

2.2.4 主塔

主塔は、主ケーブルのサグを確保する他、鉛直荷重とケーブルサドルからの水平力を分担する構造である。

主塔には鋼製及びコンクリート製があるが、対象吊り橋では両構造が適用されている。鋼製の場合、溶接部のき裂、腐食による断面減少や添接ボルトの破断等に配慮が必要である。一方、コンクリート製の場合、コンクリート部材の損傷（ひび割れ、剥離・鉄筋露出）、鉄筋の腐食等に配慮が必要である。

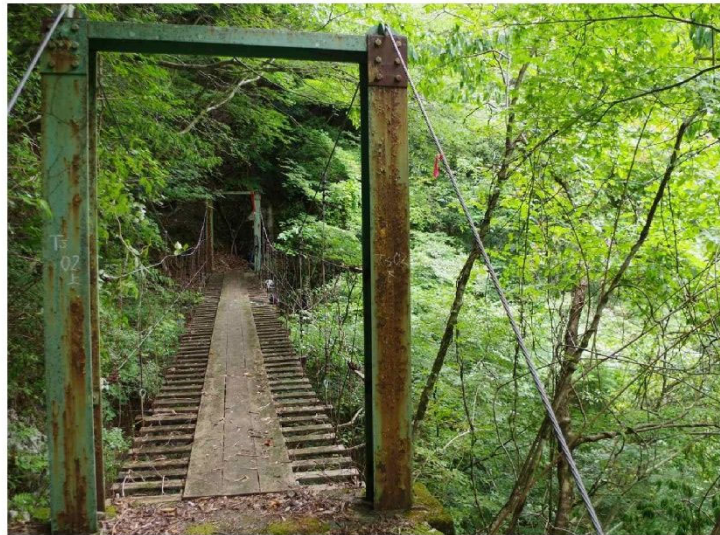


写真 2-1 鋼製主塔



写真 2-2 コンクリート製主塔

2.2.5 ハンガーケーブル

ハンガーケーブルは、桁と主ケーブルを懸垂する部材であり、より線によるケーブル類が用いられることが多いが、鋼製ロッドも用いられている。主ケーブル同様、腐食、切断等の損傷は、通行安全性に影響を及ぼすこととなる。

また、ハンガーケーブルは主ケーブル及び桁に定着されており、その代表的な定着方法を表2-3に示す。

表 2-3 代表的な定着方法

定着方法	概 要	事 例
ソケットタイプ	ソケット内でばらした素線を樹脂充填等により固め、塗装等により防食機能を確保する。 ソケット内部への雨水の進入による腐食が懸念される。	
ねじ,カップラータイプ	鋼製ロッドに用いられる定着方法であり、ねじ構造であることから長さ調節が可能となる。 ねじ部の防食機能の劣化による腐食は、カップラー部、およびロッドへの影響が大きく損傷を生じ易い箇所となる。	
クリップタイプ	小規模吊り橋の定着方法として用いられる簡易な構造である。 ケーブルとクリップ部において、雨水が滞留してしまいケーブル自体の腐食が進行する場合がある。	
ピンタイプ	ハンガーケーブルと桁の相対変位によって部材に過度な応力が生じないようにピン構造を適用した定着方法である。 ピンタイプは可動を条件に設計されており、腐食等による可動機能喪失の際には、設計で想定していない応力が生じ、き裂等の損傷が生じることが懸念される。	

2.3 着目すべき部材と橋梁定期点検結果の分析

以下では，前項で示した吊り橋の着目すべき部材に対して，実際行われている橋梁定期点検結果の内容を整理する．

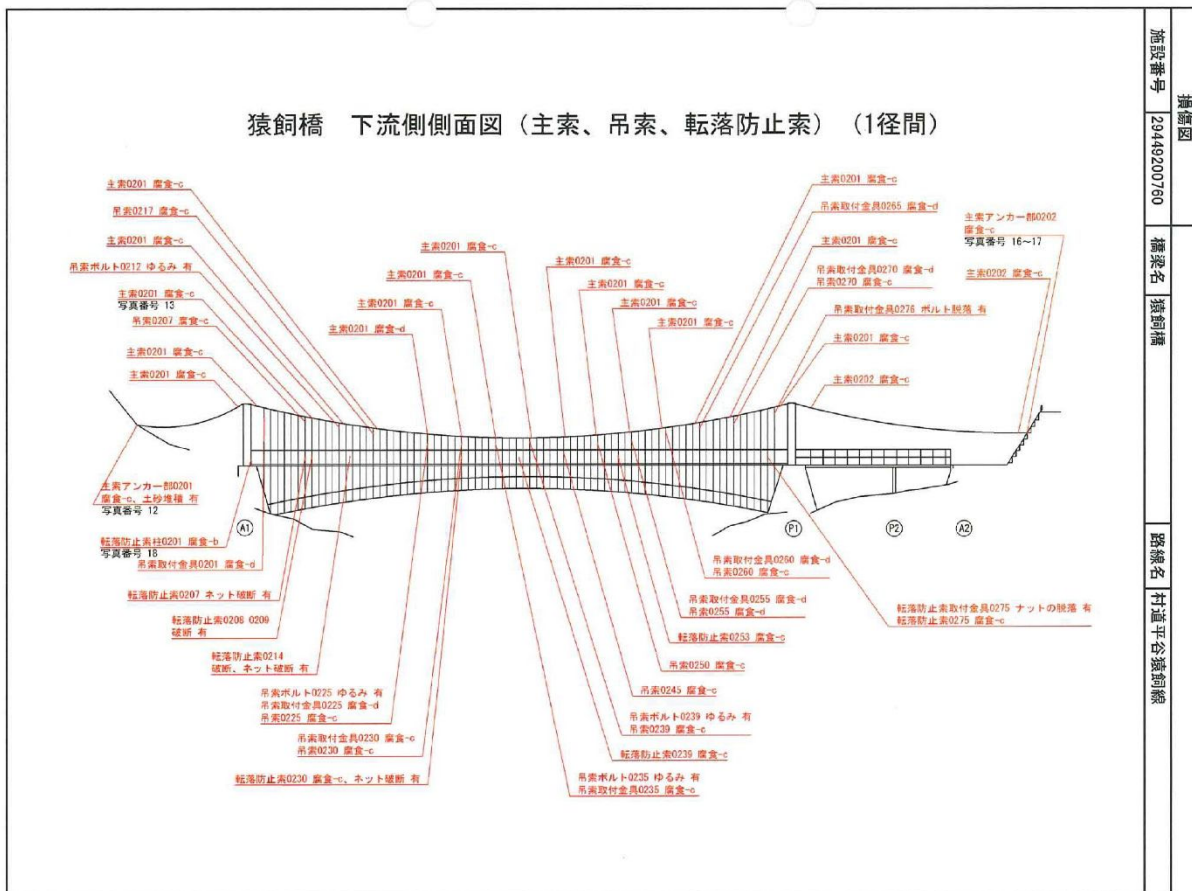
整理に用いた橋梁定期点検は，下表のとおりである．

表 2-3 橋梁定期点検結果

架橋位置	橋梁数	備 考
奈良県十津川村	43 橋	
和歌山県田辺市	61 橋	
和歌山県古座川町	23 橋	

なお，次頁より橋梁定期点検結果の記載事例を示す．

(奈良県橋梁定期点検例)



損傷写真帳

橋梁名	猿飼橋	橋梁管理番号	29449200760
路線名	村道平谷猿飼線	所在地	吉野郡十津川村
	写真番号	10	
	径間番号	1	
	部材名称	主索	
	部材番号	0101	
	損傷の種類	腐食	
評価区分	b		
メモ			
	写真番号	11	
	径間番号	1	
	部材名称	吊索	
	部材番号	0159	
	損傷の種類	腐食	
評価区分	b		
メモ			
	写真番号	12	
	径間番号	1	
	部材名称	主索 アンカー部	
	部材番号	0201	
	損傷の種類	腐食、土砂の堆積	
評価区分	c、有		
メモ			

損傷写真帳

橋梁名	猿飼橋	橋梁管理番号	29449200760	
路線名	村道平谷猿飼線	所在地	吉野郡十津川村	
	写真番号	13		
	径間番号	1		
	部材名称	主索		
	部材番号	0201		
	損傷の種類	腐食		
評価区分	c			
メモ				
	写真番号	14		
	径間番号	1		
	部材名称	耐風索		
	部材番号	0201		
	損傷の種類	腐食		
評価区分	c			
メモ				
	写真番号	15		
	径間番号	1		
	部材名称	耐風索 アンカー部		
	部材番号	0201		
	損傷の種類	腐食		
評価区分	c			
メモ				

(和歌山県橋梁定期点検例)

別紙3 点検表記録様式
橋梁名・所在地・管理者名等

様式1(その1)

橋梁名	路線名	所在地	起点側	緯度	33° 35' 21"	経度	135° 45' 57"
うのす橋 (フリガナ)ウノスハシ	町道椎平洞尾線	和歌山県東牟婁郡古座川町小川地内					
管理者名	点検実施年月日	路下条件	代替路の有無	自専道or一般道	緊急輸送道路	占用物件(名称)	
古座川町	2019.1.18	小川	無	一般道	その他	無	

部材単位の診断(各部材毎に最悪値を記入)				点検者	株式会社アーバン・ハイオニア設計	点検責任者	西口勝次
点検時に記録				措置後に記録			
部材名	判定区分 (Ⅰ～Ⅳ)	変状の種類 (Ⅱ以上の場合 に記載)	備考(写真番号、 位置等が分かる ように記載)	措置後の 判定区分	変状の種類	措置及び判定 実施年月日	
上部構造	主桁	Ⅱ	腐食、防食機能の劣化	写真1、吊り材01			
	横桁	Ⅱ	腐食、防食機能の劣化	写真2、横桁21			
	床版	Ⅱ	変形・欠損(腐朽)				
下部構造	Ⅱ	剥離・鉄筋露出	写真3、塔柱01				
支承部							
その他	Ⅱ	腐食、防食機能の劣化	写真4、防護柵01				

道路橋毎の健全性の診断(判定区分Ⅰ～Ⅳ)				点検時に記録	措置後に記録
(判定区分)	(所見等)	銅部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。		(再判定区分)	(再判定実施年月日)
Ⅱ	横桁について板厚減少が確認されるが局部的なため、予防保全段階とする。				

全景写真(起点側、終点側を記載すること)

架設年次	橋長	幅員	起点	終点
1959年	37m	2.0m		
				

※架設年次が不明の場合は「不明」と記入する。

状況写真(損傷状況)
○部材単位の判定区分がⅡ、Ⅲ又はⅣの場合には、直接関連する不具合の写真を記載のこと。
○写真は、不具合の程度が分かるように添付すること。

上部構造(主桁)【判定区分: Ⅱ】		上部構造(横桁)【判定区分: Ⅱ】	
写真1 	吊り材01	写真2 	横桁21
下部構造【判定区分: Ⅱ】		その他【判定区分: Ⅱ】	
写真3 	塔柱01	写真4 	防護柵01

県により点検結果の様式等は異なるが、これらの資料をもとに以下の示す項目にて整理した。

表 2-4 整理項目

橋梁名	
管理者	
橋長(m)	
径間数	
桁形式	
幅員(m)	
床版型式	
主塔の有無	有
	無
主ケーブル防食仕様の有無	有
	無
主ケーブル定着構造 ¹⁾	重力式
	半重力式
	トンネル式 ¹⁾
主ケーブル定着 ²⁾	圧縮止め
	ソケット止め
	くさび止め
バンガーケーブル	ケーブル類
	鋼製ロッド
ハンガー定着構造 ³⁾	ソケット
	ねじ/カップラー
	クリップ
	ピン

対象橋梁に生じている損傷	桁	腐食
		断面減少
		破断
	主塔	腐食
		き裂
		破断
	主ケーブル	腐食
		断面減少
		破断
	ケーブル定着部	腐食
		断面減少
		破断
	ハンガーケーブル (定着部も含む)	腐食
		断面減少
		破断

図 2-5 には、対象橋梁の主な諸元を示す。

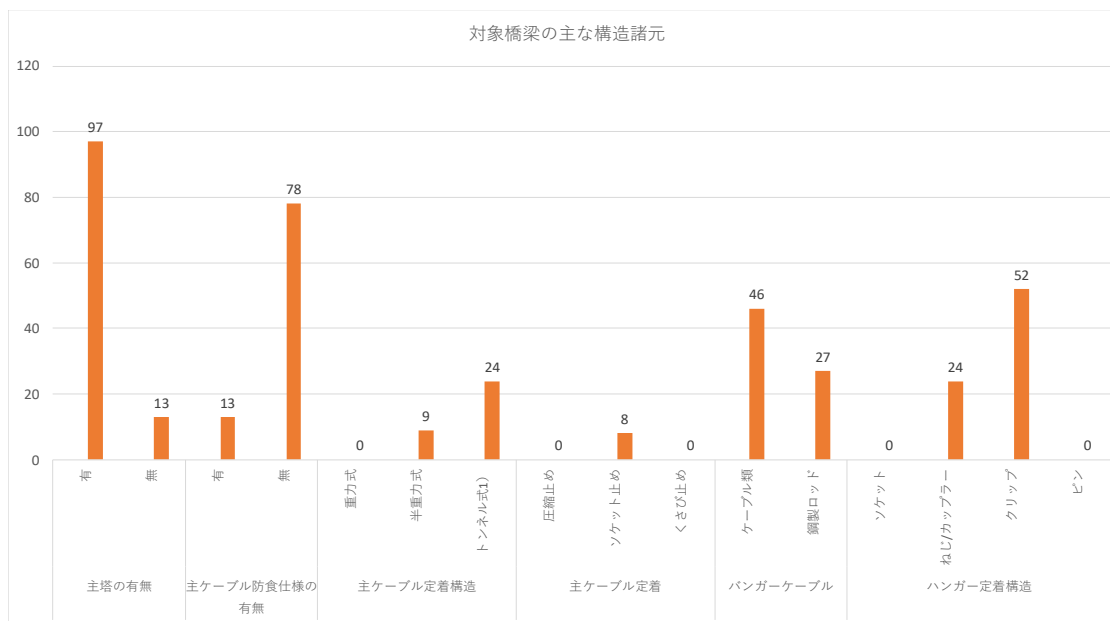


図 2-5 吊り橋の主な構造諸元

上図より、下記の事項が確認できる。

- ・ほとんどの吊り橋は、主塔が設置されており、主塔の損傷は橋全体の致命的な損傷に繋がる恐れがある。
- ・主ケーブルの防食仕様は、写真で確認できる範囲では、ほとんどの吊り橋でない（既に防食仕様が機能していない？）状況にある。架橋年次の新しい一部の吊り橋では、防食対策が施されている。
- ・主ケーブルの定着は、写真から確認できる範囲では、トンネル定着が多い。
- ・ハンガーケーブルは、ケーブル類が多く、確認できる範囲では 60% 程度の吊り橋で用いられている。
- ・ハンガー定着構造は、クリップタイプが多く、確認できる範囲では 70 程度の吊り橋で用いられている。なお、奈良県（十津川村）の吊り橋は、そのほとんどがクリップタイプの定着であるのに対し、和歌山県（田辺市・古座川町）の吊り橋は、ねじ/カップラータイプである。

図 2-6 には、橋梁定期点検結果から判定できる損傷状況を示す。

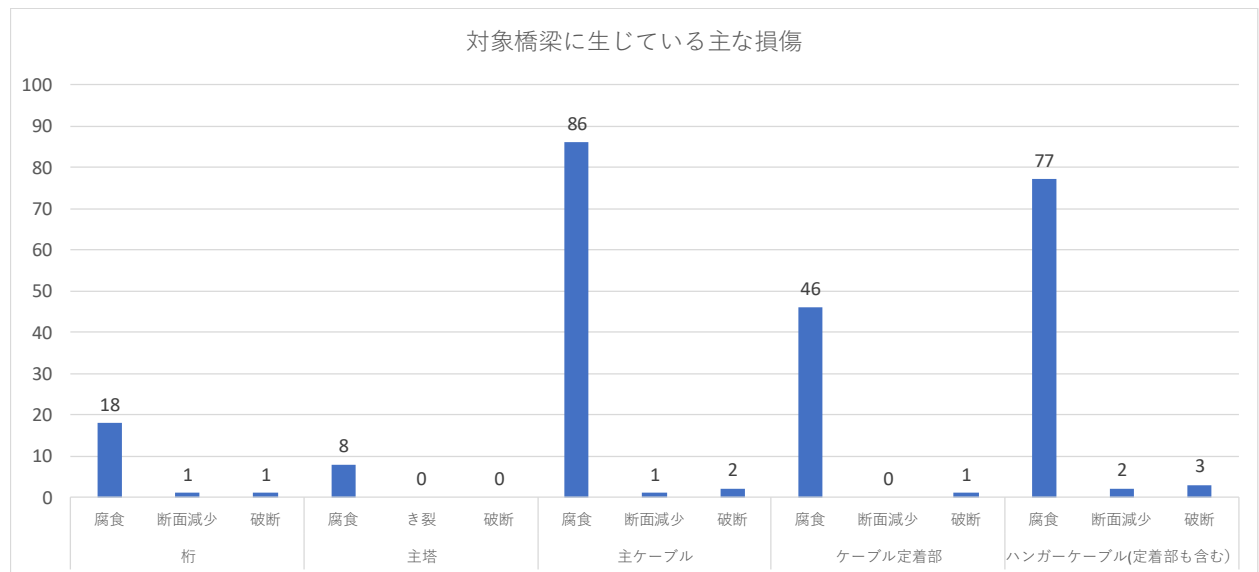


図 2-6 吊り橋に生じている損傷状況

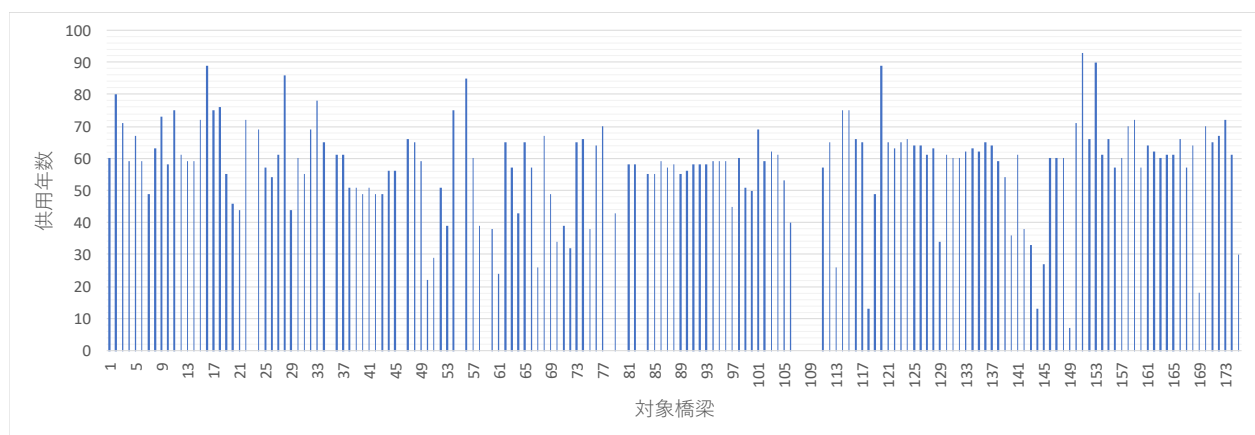


図 2-7 対象吊り橋の供用年数

上図より、下記の事項が確認できる。

- ・ほとんどの吊り橋は、架橋後、50 年以上経過し 90 年近いものも 6 橋あり損傷が顕著となっている。
- ・特に鋼部材およびケーブル類については、対象橋梁のほとんどで腐食が顕著となっている。
- ・ケーブル類では、一部の吊り橋で部分的な破断が確認されている。

以上、吊り橋として着目すべき部材に対して、橋梁定期点検結果をもとに損傷状況を整理したが、主たる損傷は“鋼部材（ケーブルを含む）の腐食”であり、橋梁規模、各種形式による損傷部位、度合い等の相関性を確認することは困難である。

ただし、今回対象としている小規模吊り橋の場合、最も注意すべきはメインケーブル及びハンガーケーブルである。これらのケーブルについては、ほとんどの橋梁で腐食が生じておりここに着目する必要がある。

さらに、これらケーブルの腐食で最も弱点となるのは定着部と考える。その中でもトンネル式定着構造は、周辺環境の影響を受けやすく、腐食の進行が他の部位より早いことが想定される。また、塔頂サドル部での腐食も同様に腐食環境にあると考えられる。

人道橋のような小規模吊り橋の場合、ケーブル破断は、活荷重等の影響による直接的な破断ではなく、腐食等による断面減少により破断に至る可能性が高いと考えられる。

したがって、これらの部位等を入念に点検することで落橋のような最悪の事態は免れると考える。さらに、入念な点検と合わせ簡易なモニタリングによる振動特性の変化に着目することも今後有効な維持管理手段となると考える。

第3章 長期計測における季節変動成分の除去法の構築

3.1 概要

構造物のモードパラメータのような振動特性は、構造物の健全性を反映する指標と考えられるため、振動に基づく構造物の長期ヘルスマニタリング (SHM) の研究で広く利用されている。橋梁構造物のモードパラメータ同定においては、常時振動データを用いて出力のみのシステム同定を行う実働モード解析 (OMA) が実用的な構造物の振動同定方法となっている。一方で、長期モニタリングにおいては、温度、交通、湿度、風などの様々な環境および供用時の変動要因 (Environmental and Operational Variables: 以下 EOVS と称する) によって、同定振動特性にはばらつきあるいは変動が生じる。このような変動は損傷や劣化に起因する振動特性の変化との区別が難しく、モニタリングによる構造物の状態評価の精度を低下させる¹⁾。

長期モニタリングの特徴量に含まれる構造物の健全性に関わる変動と気温や交通量の変化がもたらした変動を区別しない限り、長期モニタリングによる異常検知は容易ではない。特に、吊り構造を持つ吊り橋などは温度に加えて風による影響も大きい。しかしながら長期モニタリングにおける特徴量の季節変動に関する既往の研究や経験が少なく、吊り構造を持つ橋梁の特徴量の季節変動について調査するのは、吊り構造の特殊橋のみならず一般橋の長期モニタリングの計画のためにも大変意義がある。

長期 SHM における同定特徴量の変動性に対処する方法、すなわち季節変動成分の除去法として、大きく 2 つの方法に大別できる。EOVS 駆動法 (EOVS-driven approach) と非 EOVS 駆動法 (non EOVS-driven approach) である²⁾。令和 1 年度の研究報告書にもまとめている最小二乗回帰モデル、ベイズ線形回帰、ガウス過程回帰、共和分・多変量誤差修正モデルなどが EOVS 駆動法に分類される手法で、測定される EOVS と振動特性の相関に着目している。

一方で、長期 SHM においてすべての EOVS を監視することは非常に困難である。さらに、長期 SHM による特徴量の変動要因を全て特定しない限り、EOVS 駆動法による季節変動成分の除去には限界がある。このような問題を回避するために、非 EOVS 駆動法を使用することが推奨されている。非 EOVS 駆動法は、部分的に測定された EOVS を利用せずに、教師なしの方法として扱うことができる。

本研究では、長期 SHM における特徴量の変動をモデル化するために、非 EOVS 駆動法を検討する。非 EOVS 駆動法により、普遍推定ができるのであれば、残差に基づく異常検出手法につながる。本研究では、Seasonal ARIMA (SARIMA) モデル³⁾と Long Short Term Memory (LSTM) ネットワーク³⁾⁻⁵⁾による季節変動成分の除去を調べる。SARIMA モデルをベンチマークモデルとして選択し、時系列問題に対応する能力を持つ一般的なモデルとして LSTM ニューラルネットワークを用いて、長期 SHM におけるモーダル周波数の変動性を調べる。

本章では、EOVS 駆動法を再掲するとともに、非 EOVS 駆動法の Seasonal ARIMA (SARIMA) モデルと Long Short Term Memory (LSTM) ネットワークについて解説と有効性の検討を行う。特記すべき点として、本章紹介する理論は、近年データサイエンス分野で広く使われている理論であり、関連コードも公開されているものが多い。理論の理解が望ましいが、その手法の特徴さえ理解できれば手法の適用には問題がないと考える。本章に紹介する各手法による季節変動要因に低減効

果を確認できれば本章で検討した研究目的は十分達成したと考えられる. このような点に注意して, 研究内容を眺めてもいい. 提案する異常検出のフローチャートを図 3-1 に示す.

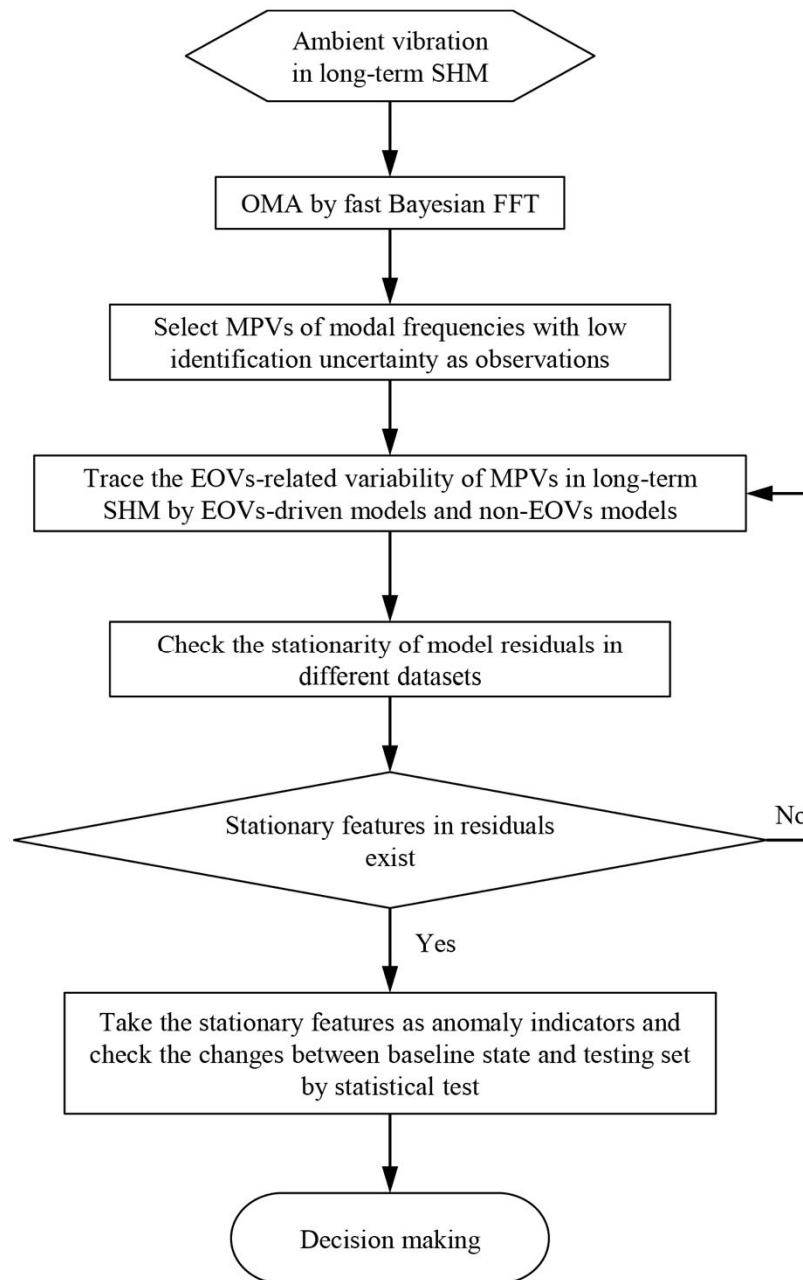


図 3-1 長期モニタリングにおける季節変動を考慮する異常検知のフローチャート

3.2 EOV 駆動法 (EOV-driven approach)

3.2.1 最小 2 乗回帰モデル (Ordinary Least Squares Regression: OLSR)

長期モニタリングにおける変位，振動数のようなセンサ情報を y ，また気温，交通量，風速などの外部因子を $\mathbf{X}$ とすると，観測センサ情報と外部因子の線形回帰モデルの一般的形式は式 (3-1)のように表す．

$$y = \mathbf{w}\mathbf{X} + \varepsilon \quad (3-1)$$

ここに， $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ は外部因子， $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ は観測センサ情報と外部因子の線形関係を表す線形回帰係数ベクトル，また， ε は誤差項を表す．

長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係は，線形回帰係数ベクトルにより示はされることになる．結局，下記の目的関数の式 (3-2) を最小にする係数ベクトル ($\hat{\mathbf{w}}$) の同定問題に帰着する．

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{n} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\mathbf{X}\|_2^2 \quad (3-2)$$

ここに， $\|\cdot\|_2$ は L_2 ノルムを表す．

3.2.2 スパースモデル (Least absolute shrinkage and selection operator : LASSO)

スパースモデリングは，近年，情報学，機械 学習，統計学など，様々な分野から注目を集めているが，統計学で最もよく用いられるスパースモデリングは， L_1 正則化法であり，その代表が，LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)である．LASSO は，回帰モデルの損失関数にパラメータの L_1 ノルムに基づく正則化項を加えた正則化損失関数を最小化することによってパラメータを推定する方法で，推定の安定化とともに変数選択も行うことができる．LASSO 型の目的関数を式 (3-3) に示す．

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{n} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\mathbf{X}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|_1 \quad (3-3)$$

ここに， $\|\cdot\|_1$ は L_1 ノルムを， λ は正則化係数を表す．

3.2.3 ベイズ線形回帰 (Bayesian linear regression: BLR)

ベイズ線形回帰は線形回帰にベイズ推論を導入した手法である．例えば，季節変動の訓練データの数は限られている場合，対象となるモデルのパラメータの事前分布を仮定し，得られたデータの情報を用いてパラメータの事後分布（教師信号の予測分布）を求めるベイズ線形回帰による季節変動の予測に適用されている．

同様に長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係を表す線形回帰係数ベクトルの推定にも利用できる．ただし，線形回帰式(3-1)の誤差の分布は平均 0，逆 Gamma 分布分散を持つ正規分布と仮定する（式(3-4)参照）．

$$\begin{cases} \varepsilon \sim N(\varepsilon|0, \sigma_n^2) \\ \sigma_n^2 \sim \text{Inv-Gamma}(\sigma_n^2|a, b) \end{cases} \quad (3-4)$$

ここに、 ε は回帰の誤差分布、 σ_n^2 は誤差の逆 Gamma 分布分散、 a および b は超パラメータを表す。ベイズ理論により推定係数ベクトルの事後確率分布を式 (3-5) に示す。

$$p(w|X, y, \sigma_n^2) = \frac{p(y|X, w, \sigma_n^2)p(w)}{p(y|X, \sigma_n^2)} \quad (3-5)$$

ここに、 $p(\cdot)$ は確率密度分布を、 $p(\cdot|\cdot)$ は条件確率分布を表す。

式 (3-5) から MPV (Most Probable Value) 推定により $\hat{w}$ が得られる。ベイズ線形回帰の仕組みは逐次推定への拡張が容易であり、モニタリングデータの実時間処理に有用である。

3.2.4 ガウス過程回帰 (Gaussian process regression: GPR)

ガウス過程回帰は、式 (3-6) のように、入力変数 X から出力変数である実数値 y への関数 $y = f(X)$ を推定するモデルの一つであり、線形回帰モデルの無限次元への拡張を表すものである。また、潜在機能 (Latent function) $f(X)$ の推定にはベイズ推定を利用する。

$$y = f(X) + \varepsilon \quad (3-6)$$

式 (3-6) の $f(X)$ は式 (3-7) の確率過程を従うと仮定する。

$$f(X) \sim GP[0, k(X, X^T)] \quad (3-7)$$

ここに、 $k(X, X^T) = E[f(X)f(X^T)]$ は分散を表す。T は転置を表す。 $\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$ が IID、 $k(\cdot)$ がカーネル分散行列を表すと、予測事後確率分布は式 (3-8) のように求められる。

$$\begin{aligned} p(f_*|X, y, X_*, \sigma_n^2) &= N(f_*|\bar{f}_*, \text{cov}(f_*)) \\ \bar{f}_* &= k(X_*, X)[k(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1}y \\ \text{cov}(f_*) &= k(X_*, X_*) - k(X_*, X)[k(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1}k(X, X_*) \end{aligned} \quad (3-8)$$

ここに、 X_* はテストデータを、 f_* はテストデータによる予測潜在機能を、 $\bar{f}_*$ は平均予測潜在機能を表す。

ガウス過程回帰の特徴の一つはその非線形性であり、線形回帰ではうまくフィッティングできない場合にも有効である。もう一つ重要な特徴はベイズ推定を用いる点である。推定される関数は一つの関数ではなく、関数の分布として得られることから、推定の不確実性を表現することができる。ただし、高次元データを取り扱う場合 GPR の計算負担は高く、さらに尤度関数が非ガウス分布の場合は取り扱いにくい点もある。

3.3 非 EOV 駆動法 (Non EOV-driven approach)

3.3.1 自己回帰和分移動平均モデル (Autoregressive integrated moving average model: ARIMA model)

定常な時系列過程を前提とした ARMA モデルとは異なり ARIMA モデルは非定常過程に対する時系列モデルである。時系列において平均値が時間的に変動する場合（傾向変動が見受けられる場合など）は非常によく見受けられるものであり、それらに対して、ARMA モデルはそのままでは適用できない。そのため、平均値揺動を取り除くために様々な方法が用いられるが、時系列の階差をとり、その階差時系列に対して ARMA モデルを適用する。このモデルを ARIMA モデルあるいは自己回帰和分移動平均モデルという。

ARIMA(p, d, q)モデルの基本形式を式(3-9)に示す。

$$\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i L^i\right) (1-L)^d y_t = \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i\right) \varepsilon_t \quad (3-9)$$

ここに、 L は時間遅れ演算子を、 p はAR成分の次数を、 q はMMA成分の次数を、 d は積分次数を表す。パラメータ(p, d, q)が決まれば、観測データおよび誤差 ε_t の統計特性から係数 ϕ_i と θ_i が計算できる。

3.3.2 共和分・多次元誤差修正モデル (Co-integration and vector error correction model: VECM)

経済時系列データの因果関係の分析法である多次元誤差修正モデル (VECM) は、変数間に共和分関係があるときに使えるモデルであり、誤差修正モデルに双方向の因果を想定した次元時系列モデル(Multiple Time Series Models)の1つである多次元自己回帰モデル(VAR)の概念を加えたものである。したがって、多次元誤差修正モデルも多重時系列モデルの1つである。多くの時系列では一般的に、最初の差分で定常になると考えられ、時系列データの差分を取り、前述のARIMAなどのモデルを推定する。そのようなモデルからの予測は、データにある周期性と季節性を反映するが、データに含まれる長期的なトレンドに関する情報は失われ、長期予測は信頼できなくなる欠点が指摘されている。

VECM の概念は、定常変数を生み出す線形結合をあるシステム内の長期的な均衡関係式とみなし、過去に生じた誤差（均衡からの外れ具合）が均衡に向けて修正される動きが現在の短期的変動にも影響を与える、という解釈を施すのである。VECM は変数間に何らかの長期的均衡が存在する場合の分析手法として用いられる。

1) 共和分モデル (Cointegration model)

非定常性を持つ時系列データで、データの合成によって定常過程 ($I(0)$) として表現できる場合、これらのデータ間には共和分関係があると言える。そのときの共和分モデルを式 (3-10) に示す。

$$u_t = \theta^T X_t, \quad u_t \sim I(0) \quad (3-10)$$

ここに、 θ は共和分ベクトルを示しており、データ X_t の成分同士の長期的な関係（例えば、季節変動のようなトレンド）を示す係数行列、 u_t は定常確率過程（ $I(0)$ ）を表す。

2) 多次元誤差修正モデル (VECM)

ある時系列変数同士が共和分の関係にあれば、その時系列変数同士の短期的な関係を適切に表現し系列データ同士の共和分関係を自動的に構築する誤差修正モデル (ECM) が存在する (式 (3-11))。

$$AR(L)(1-L)X_t = -\lambda u_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3-11)$$

ここに、 L は ARIMA モデルと同様には時間遅れ演算子を、 $AR(L)$ は AR 多項式を、 λ は一般的に $\lambda \in (0,1)$ の調整係数を、 ε_t は白色雑音の誤差モデルを表す。

式 (3-11) によると、 X_t は過去の値のみならず過去の均衡バイアスと関連がある。過去の u_{t-1} を用いて、 X_t の修正が可能である。すなわち、修正前の均衡バイアスが正であれば、修正項が負になり、結果的に Δu_t とともに $\Delta X_t = (1-L)X_t$ の低減につながる。言い換えれば、過去より現在がより均衡点に近いことを示す。共和分・多次元誤差修正モデルの推定には一般的に Eagle-Granger テストと Johansen テストが用いられる。

Eagle-Granger テスト

ステップ 1：変数に対する最小 2 乗回帰 (OLSR) と残差に対する拡張ディッキー-フラー検定 (Augmented Dickey-Fuller test : ADF test) を適用。上記のように、残差に定常性があれば共和分が存在する。

ステップ 2：修正誤差モデル (ECM) 構築のために最小 2 乗回帰 (OLSR) を適用。ただし、Eagle-Granger テストは安定的な手法である反面、一つの最小 2 乗回帰に対して一つの共和分を考慮するために、2 変数までのデータに有効である。

Johansen テスト

Eagle-Granger テストの弱点である多次元データに適用するために提案された手法である。Johansen テストは最尤法と多次元誤差修正モデル (式 (3-12)) を用いて、多次元データ間の共和分関係を判別する。

$$\Delta y_t = \Pi y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} B_j y_{t-j} + \phi D(t) + \varepsilon_t \quad (3-12)$$

ここに、 $\Pi = AB$ 、（ただし A は調整係数行列、 B は共和分ベクトルで構成される行列）、 B_j は AR モデルの係数行列を、 $\phi D(t)$ は共和分ベクトル内に（または共和分ベクトルを制約する）決定論的な項があることを示している。もちろん共和分ベクトル外の決定論的な項を使用することもできる。 ε_t は白色雑音の誤差モデルを表す。また、 Π のランクは、多次元変数間の共和分の数に一致する。

3.3.3 SARIMA モデル (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average)

SARIMA モデルは、トレンド、季節性、ランダム成分を含むデータの変動を追跡できる古典的な線形時系列モデルである²⁾。SARIMA モデルの一般的な乗算表現である $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ モデルは、式(3-13)式のように表すことができる。

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)\nabla^d\nabla_s^D y_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (3-13)$$

ここで、 B は $By_t = y_{t-1}$ の後方シフト演算子を示す。また、 s は季節性期間、 $\nabla = 1 - B$ は差分演算子、 $\nabla_s = 1 - B^s$ は季節差分演算子を表す。多項式である $\phi_p(\cdot)$ 、 $\Phi_P(\cdot)$ 、 $\theta_q(\cdot)$ 、 $\Theta_Q(\cdot)$ は、それぞれ未知の係数を持つ p, P, q, Q として順序付けされている。また、 d と D は、それぞれ差分と季節差分の次数を表す。イノベーションは、一般的にガウス分布またはスチューデント t 分布に従うと仮定する。

SARIMA モデルの次数パラメータの初期設定には、自己相関関数(ACF)と部分自己相関関数(PACF)を用いたプロットを参照することができる。さらに、赤池情報基準(AIC)やベイズ情報基準(BIC)などの指標は、モデルの最適な構造を評価するのに有用である。一般的には、AIC や BIC の小さいモデル次数パラメータを採用することができる。推定する係数の数を k 、サンプルサイズを n 、最尤度を $\hat{L}$ とすると、式(3-14)および式(3-15)を用いて、それぞれ AIC と BIC を推定することができる。

$$AIC = 2k - 2\ln(\hat{L}) \quad (3-14)$$

$$BIC = k\ln(n) - 2\ln(\hat{L}) \quad (3-15)$$

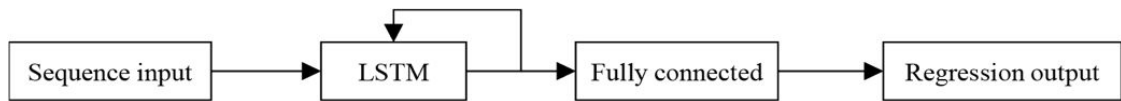
3.3.4 Long Short-Term Memory (LSTM)

前述の SARIMA のような古典的な時系列モデルにはいくつかの欠陥がある。線形性は予測された応答の分布を制限し、残差に異種混合性 (heteroscedasticity) を生じさせる可能性がある。時系列の近似化として有限次数の時系列モデルを考えると、その近似化が残差の不偏性に影響を与える可能性がある。SARIMA のこのような問題点は、LSTM 層を持つ非線形ニューラルネットワークにより解決できる可能性がある。

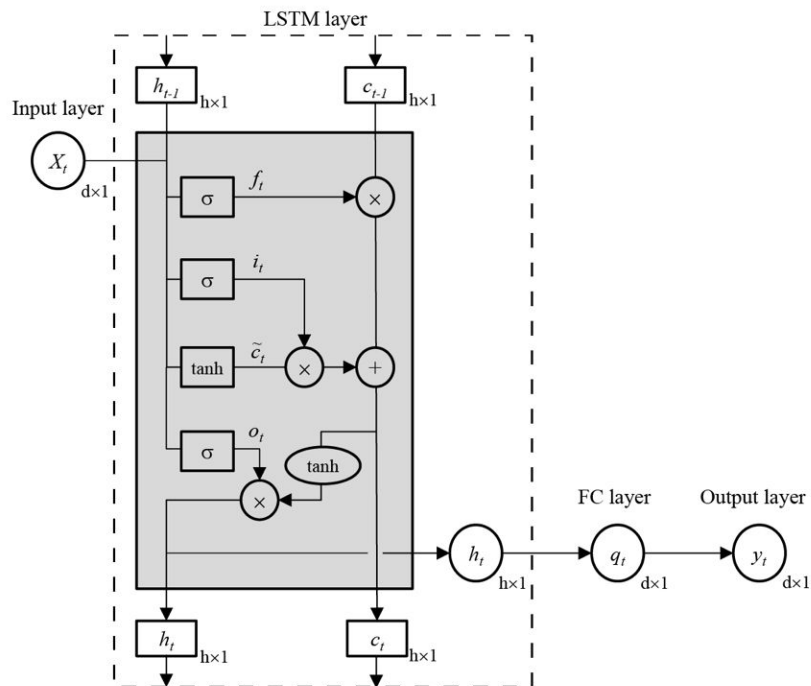
LSTM ニューラルネットワークはリカレントニューラルネットワーク(RNN)の一種であり、時系列データの長期依存性を学習することができる³⁾⁻⁵⁾。従来の RNN では、時間を通じたバックプロパゲーション(Back Propagation Through Time: BPTT)アルゴリズムにおいて、勾配消失・爆発と呼ばれる計算問題があるため、長期依存性の学習は現実的に困難であったが、LSTM ネットワークでは、各時間ステップからの情報を忘れて更新するためのセル状態といくつかの特別なゲートを導入することで、この問題をうまく解決する仕組みを持っている。

時系列回帰問題のための一般的な LSTM ネットワークは、図 3-2(a)に示すような階層構造を持っている。多層パーセプトロン (MLP) や畳み込みニューラルネットワーク (CNN) のような従来のフィードフォワードニューラルネットワークと比較して、LSTM 層の大きな違いはリカレ

ント構造であることである．バニラ LSTM 層の局所的な詳細を示す模式図を図 3-2(b)に示す．縦方向は時間的なデータの流れを示し，横方向は入力から出力までのデータの流れを示している．



(a) 時系列の LSTM ネットワーク構造



(b) LSTM 層

図 3-2 LSTM ネットワーク

アーキテクチャは，主にセルと，それぞれの忘却ゲート（forget gate），入力ゲート（input gate）,出力ゲート（output gate）と呼ばれる 3つのゲートで構成されている．セルは時系列の依存性を追跡して記録するために使用され，ゲートはセルに出入りする情報の流れを制御する．LSTM 層におけるフォワードパスの詳細な動作は，以下のように記述できる．

$$f_t = \sigma_g(W_f X_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (3-16a)$$

$$i_t = \sigma_g(W_i X_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (3-16b)$$

$$o_t = \sigma_g(W_o X_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (3-16c)$$

$$\tilde{c}_t = \sigma_c(W_c X_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (3-16d)$$

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \tilde{c}_t \quad (3-16e)$$

$$h_t = o_t \circ \sigma_c(c_t) \quad (3-16f)$$

ここで，演算子 $\circ$ は Hadamard 積を表し， $X_t \in R^{d \times 1}$ は d 個の特徴量を持つ入力ベクトルである． $f_t \in R^{h \times 1}$ ， $i_t \in R^{h \times 1}$ ， $o_t \in R^{h \times 1}$ は，LSTM 層の隠れユニットの数に等しい h 次元を持つ忘却ゲート，入力ゲート，出力ゲートの出力である． $h_t \in R^{h \times 1}$ は出力ステップと次ステップに配信される隠れ状態ベクトルであり， $\tilde{c}_t \in R^{h \times 1}$ は候補セル状態の入力である． $c_t \in R^{h \times 1}$ は長期依存性を記録したセル状態ベクトル， $W \in R^{h \times d}$ ， $U \in R^{h \times h}$ ， $b \in R^{h \times 1}$ は，それぞれ学習する入力重み行列，再帰重み行列，バイアスベクトルを， σ_g はシグモイド関数であるゲート活性化関数， σ_c は一般的に双曲正接関数を用いた状態活性化関数を表す．

一歩先の予測の場合には，逐次入力である $\{X_i\}_{i=1}^t = \{y_i\}_{i=1}^t$ と一歩先の出力である y_{t+1} との学習相関関係は，最終的には式(3-17)のようになる．

$$y_{t+1} = \varphi\left(\{y_i\}_{i=1}^t, h_0, c_0\right) + \varepsilon_{t+1} \quad (3-17)$$

初期状態 h_0 と c_0 を一般的に 0 とする 2 つの超パラメータを持つ非線形でノーカットオフの自己回帰モデルとみなすことができる． $\varphi(\cdot)$ は 1 ステップ先の予測 $\hat{y}_{t+1}$ と過去の観測値 $\{y_i\}_{i=1}^t$ との長期的な相関関係を表示する非線形関数である．

3.4 非 EOV 駆動法による長期モニタリングの季節変動除去の有効性

長期モニタリングにおける季節変動成分の除去方として、非 EOV 駆動法の有効性を確認するために、図 3-3 に示すように、ある橋梁において 5 ヶ月間で計測された振動数の時系列について検討を行う。図 3-3 の赤の縦線はその左側のデータを学習データ、また右側のデータをテストデータとする境界線を表す。

3.4.1 EOV 駆動法による予測

比較のために、EOV 駆動法であるベイズ線形回帰モデルとガウス過程回帰モデルによる予測性能を検討する。図 3-4 と図 3-5 にそれぞれベイズ線形回帰モデルとガウス過程回帰モデルによる予測振動数の時系列を示す。ベイズ線形回帰モデルよりはガウス過程回帰モデルの方が、相対的に大きなばらつきまで表現しているように見える。

予測精度を定量的に評価するために、観測振動数と予測振動数の残差分布の検討を行う。残差分布を図 3-6 と図 3-7 に示す。図 3-6 のベイズ線形回帰モデルによる予測残差分布を見ると、予測残差の平均値が f_1 で 0.07, f_2 で 0.05 になっている。一方で、図 3-7 のガウス過程回帰モデルによる予測残差分布を見ると、予測残差の平均値が f_1 で 0.09, f_2 で 0.05 になっており、 f_1 の予測ではベイズ線形回帰モデルより若干予測精度が良い結果となった。しかしながらいずれのモデルによる予測残差分布でも、誤差の平均値がゼロにならず不偏推定にはならない。特に、異常検知の精度には、平均値のみならず残差分布の裾野の精度も重要である。図 3-8 と図 3-9 にそれぞれベイズ線形回帰モデルとガウス過程回帰モデルによる予測残差分布 Q-Q プロットを示す。予測残差分布 Q-Q プロットからは、ガウス過程回帰モデルと比べベイズ線形回帰モデルが残差分布をより精度良く表現していることが分かる。しかしながら、いずれのモデルでも残差分布の裾野の予測に劣っていることがわかる。

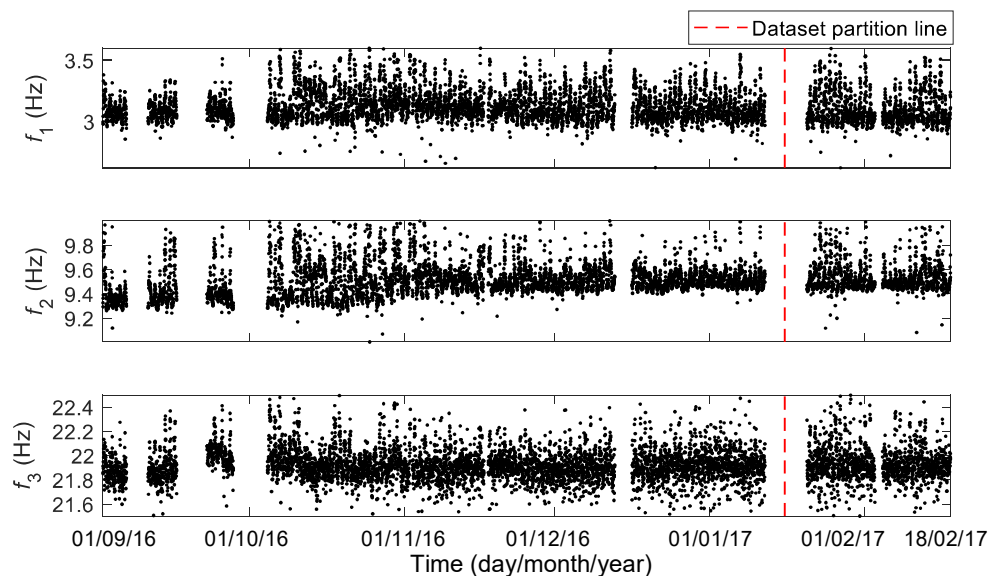


図 3-3 長期モニタリングで観測された振動数の時系列

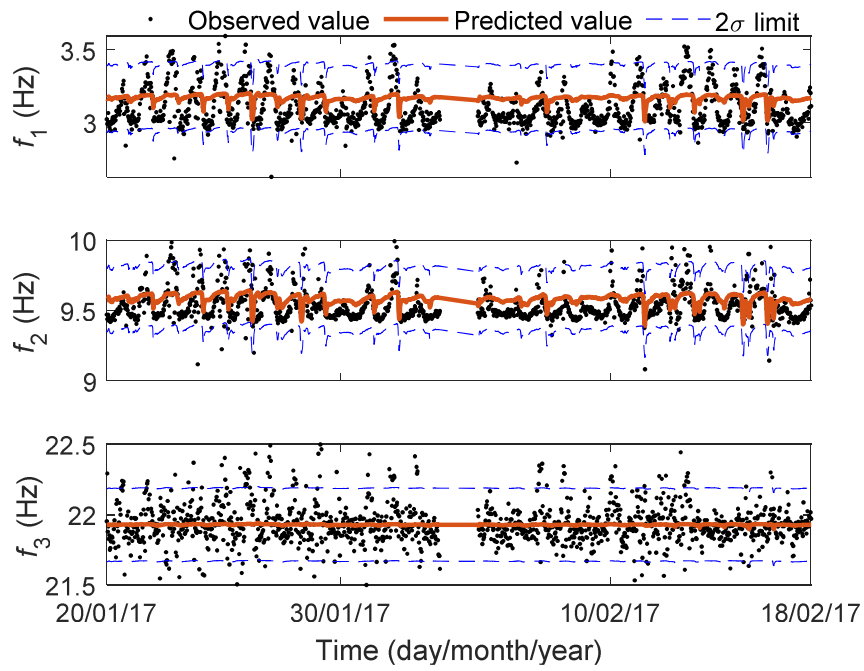


図 3-4 E0V 駆動法による予測（ベイズ線形回帰：BLR）

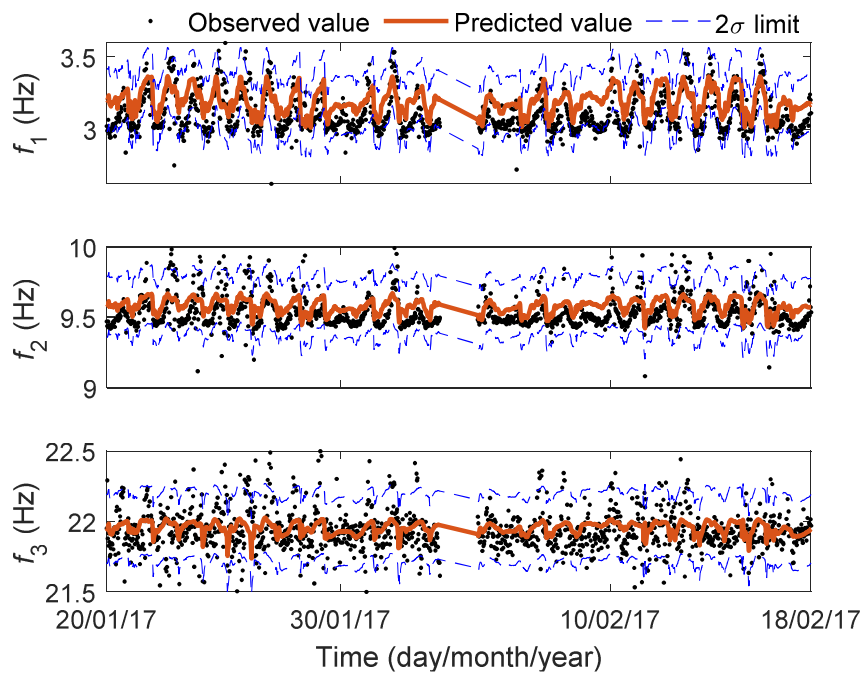


図 3-5 E0V 駆動法による予測（ガウス過程回帰：GPR）

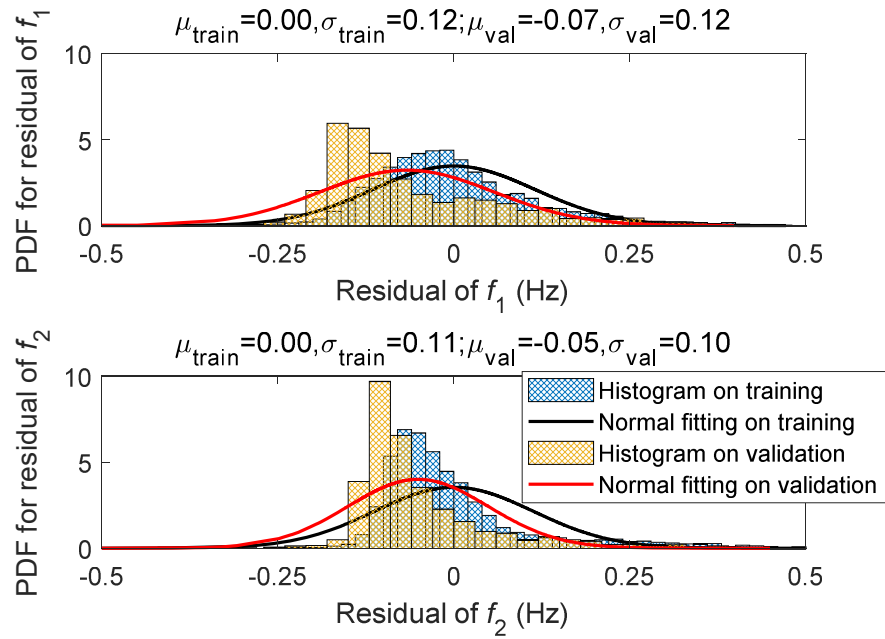


図 3-6 EOV 駆動法による予測残差分布（ベイズ線形回帰：BLR）

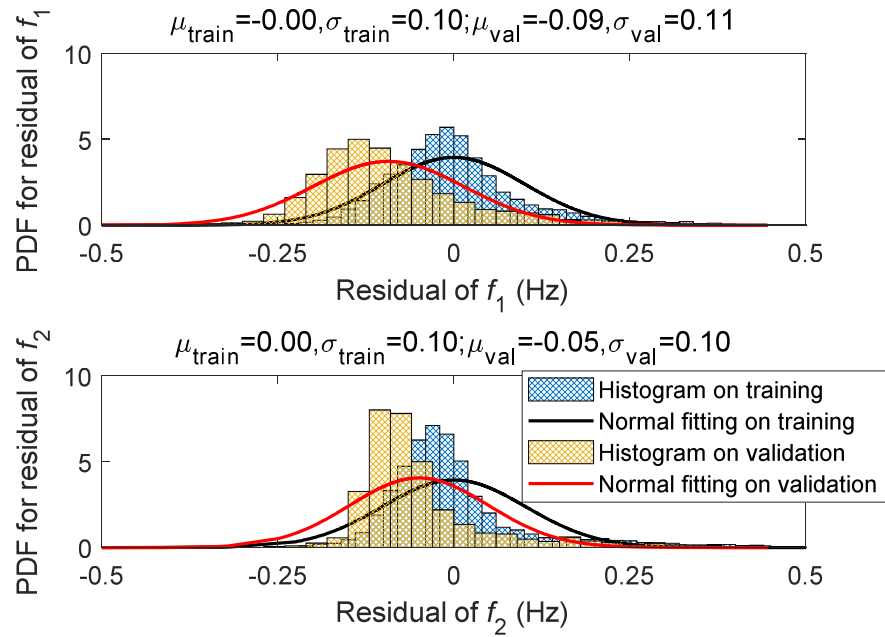


図 3-7 EOV 駆動法による予測残差分布（ガウス過程回帰：GPR）

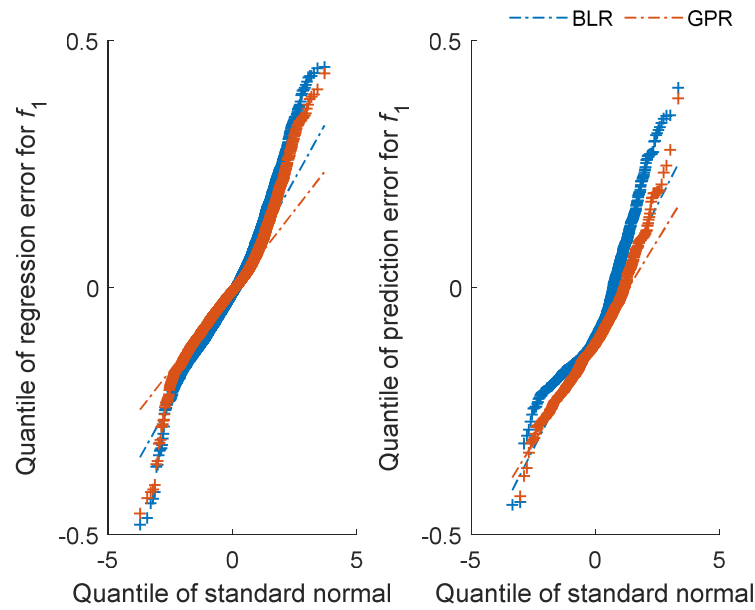


図 3-8 EOV 駆動法による予測残差分布の Q-Q プロット（ベイズ線形回帰: BLR）

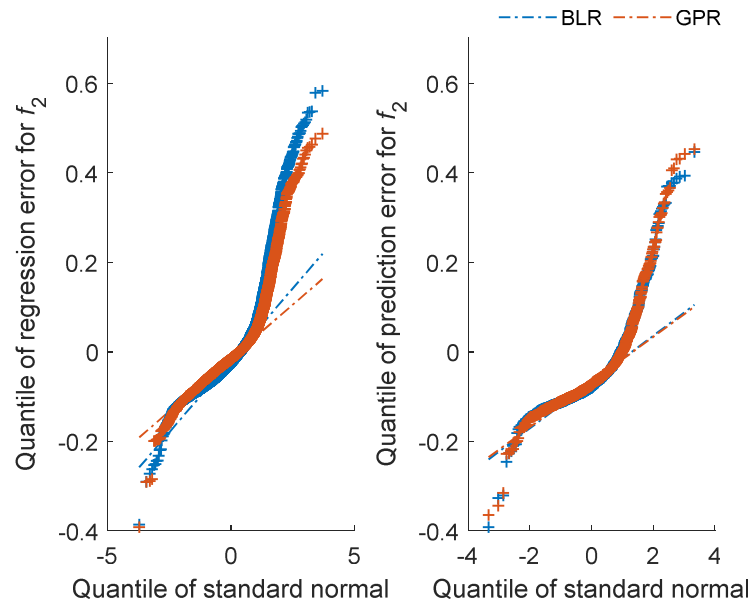


図 3-9 EOV 駆動法による予測残差分布 Q-Q プロット（ガウス過程回帰: GPR）

以上の EOV 駆動法は、入力情報が不足すると回帰モデルのモデル化精度が劣る結果となり、季節変動の除去能力には限界があることが明らかである。その結果、異常検知の精度にも影響を及ぼすことになる。EOV 駆動法以外の手法がない場合は、EOV 駆動法による予測性能を把握した上で、異常検知が可能な特徴量の変化幅などを事前情報として検討しておく必要がある。

幸に、近年の人工知能や深層学習分野の発展により、学習によって入力情報を必要としない予測手法が開発されて産業分野に適用されている。次節には、季節変動のモデル化に入力情報を必要としない非 EOV 駆動法による予測手法について検討を行う。

3.4.2 非 EOV 駆動法による予測

まず、ベンチマークモデルとして SARIMA モデルを構築する。図 3-10 に示す f_1 の自己相関関数 (ACF) と部分自己相関関数 (PACF) によれば、24 時間 (= 48×0.5 h) に対応する 48 時間ステップの季節頻度が観測され、1 日の周期性を持つ季節成分が観測される。次に、元のシーケンス f_1 に対して季節差分の演算を行い、得られた季節差分シーケンスを調べる。図 3-11 は、季節移動平均成分 SMA(1) と自己回帰成分 AR(p) を提案する f_1 の季節差分シーケンスの自己相関関数 (ACF) と部分自己相関関数 (PACF) を示しており、 p は AR 次数を表す。表 3-1 に示すように、SARIMA モデルの AIC 値と BIC 値を用いて、最適な AR モデルの順序を $p=3$ とした。EOV 関連の変動を捉えるために、SARIMA(3,0,0) $\times$ (0,1,1)₄₈ モデルを用いた。

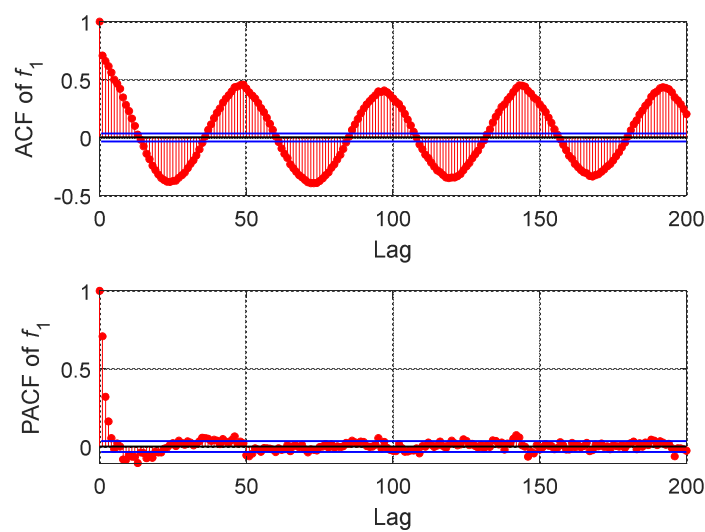


図 3-10 f_1 の自己相関関数 (ACF) と部分自己相関関数 (PACF)

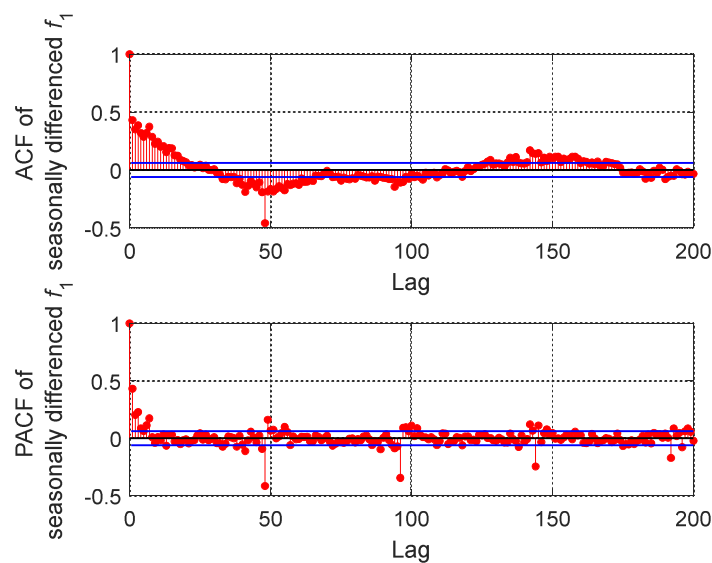


図 3-11 f_1 の季節差分の自己相関関数 (ACF) と部分自己相関関数 (PACF)

表 3-1 SARIMA モデルの AR 次数 p による AIC と BIC

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$	$p = 6$
AIC	-1678.5	-1734.3	-1774.8	-1773.6	-1777.2	-1778.6
BIC	-1658.6	-1709.5	-1745.0	-1738.8	-1737.5	-1734.0

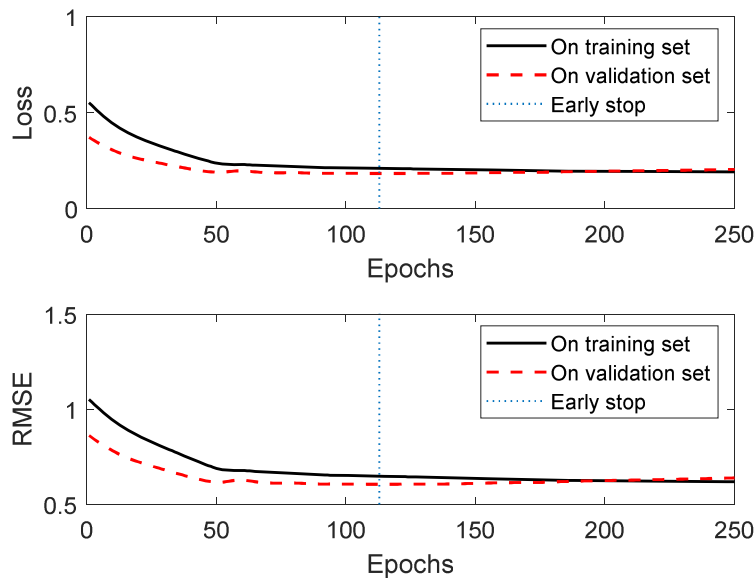


図 3-12 The training process of LSTM network.

一般的なディープラーニング手法であるバニラ LSTM ニューラルネットワークについては、超パラメータ(Hyper Parameter)の調整を十分に試行した後、ネットワークの構造とそれに対応する超パラメータを決定する。ネットワークは一変量の一步先の予測構造として定義される。最適なネットワークパラメータは、Adam アルゴリズム⁹⁾を用い、目的関数の平均二乗誤差 (MSE) に対する確率的最適化によって学習される。LSTM 層の隠れユニット数は 30 とした。最大エポック数 (一つの訓練データを何回繰り返して学習させるかの数) は 250 とした。初期学習率は 0.001 としたが、エポック数の半分を経過した時点で 0.1 に収束した。勾配爆発を避けるために勾配のしきい値を 1 とし、過学習を避けるために Early Stopping を導入した。Early Stopping は「前のエポックの時と比べ誤差が増えたら学習を打ち切る」ようにして過学習を避ける方法である。LSTM における学習過程を図 3-12 に示す。

SARIMA モデルと LSTM ネットワークを用いて、EOV 関連の変動を追跡する性能を調べる。図 3-13 に示すように、両モデルとも EOV 関連の変動を良好に予測していることがわかる。しかし、LSTM ネットワークによる予測に比べて、SARIMA モデルによる予測では局所的な変動が多く見られる結果となった。図 3-14 と図 3-15 に示すように、訓練データと検証データの予測残差分布からは、両モデルとも EOV 駆動法 (図 3-6, 図 3-7) よりも残差の定常性、特に残差分布は

不偏推定されていることが分かる。図 3-15 からわかるように、学習された LSTM ネットワークは、特に残差分布の裾の予測において、SARIMA モデルよりも優れた予測性能を示している。

図 3-16 に示された SARIMA モデルの残差の自己相関関数(ACF)と部分自己相関関数(PACF)をみると、SARIMA モデルには 1 日の周期性 (SMA(1)成分が存在する) が残っているのがわかる。一方で、図 3-17 の LSTM ネットワークによる残差の自己相関関数 (ACF) と部分自己相関関数 (PACF) からは、予測残差に自己相関がないこと、すなわち周期性が観測されず季節変動成分の除去に優れた性能を示している。

予測残差の累積確率分布を図 3-18 に示す。予測残差の累積分布を見ると、SARIMA モデルと LSTM による残差分布がガウス分布ではなく、対称的ではあるが重い裾 (Heavy tail) を引いた分布を示している。

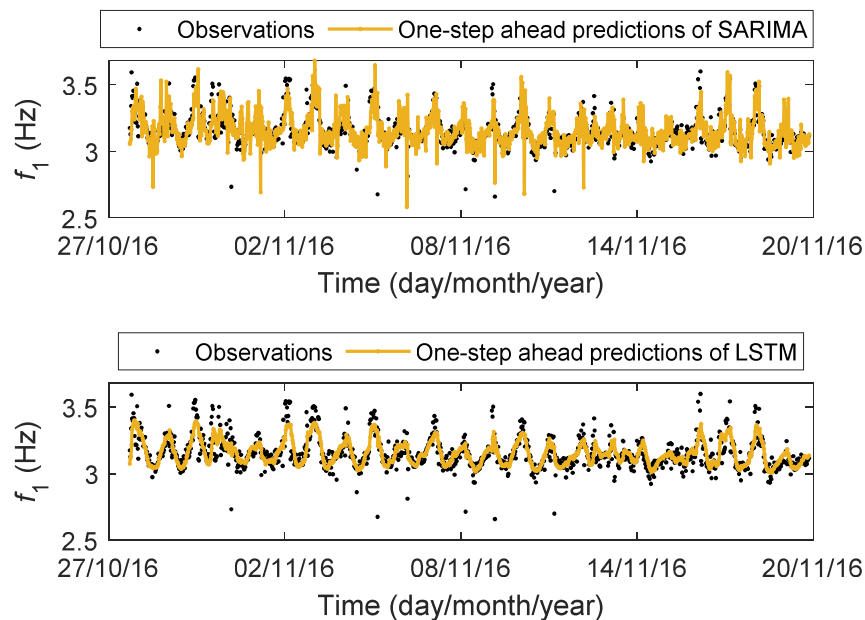


図 3-13 One-step ahead predictions of two models on validation set.

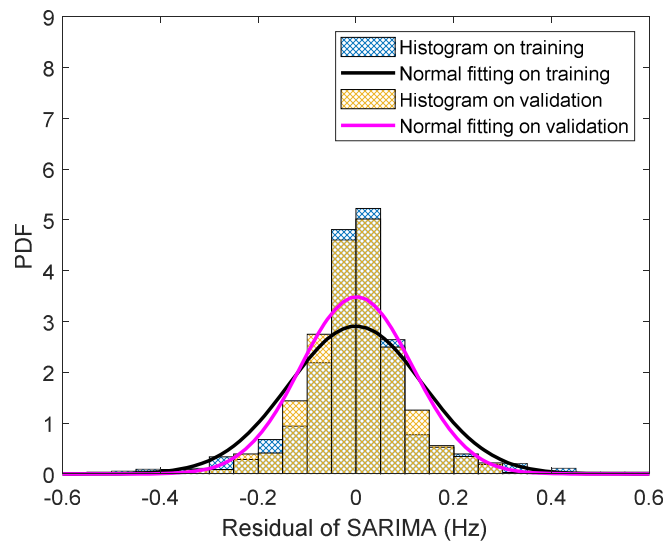


図 3-14 SARIMA モデルによる訓練データと検証データの予測残差分布

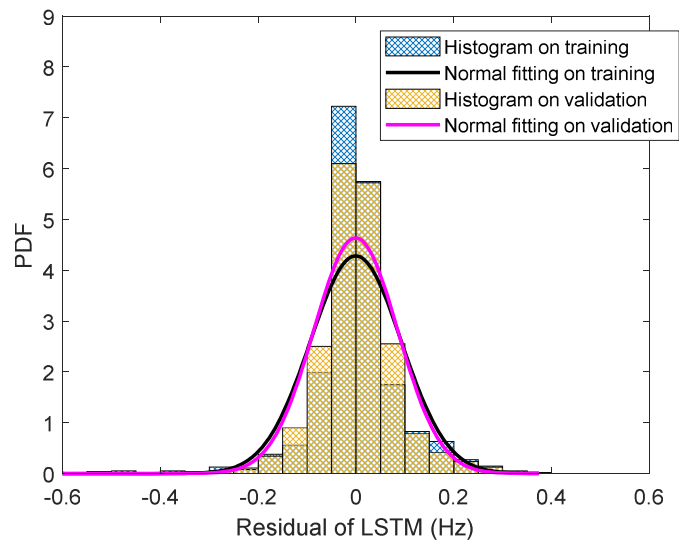


図 3-15 LSTM による訓練データと検証データの予測残差分布

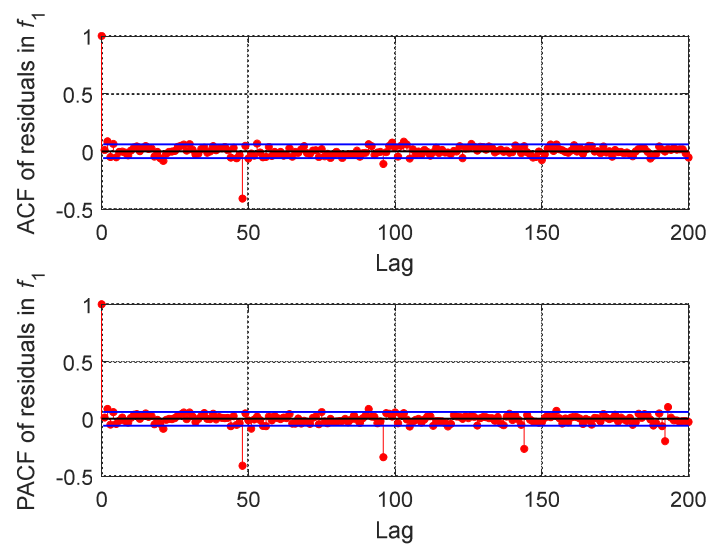


図 3-16 SARIMA モデルによる f_1 の自己相関関数（ACF）と部分自己相関関数（PACF）

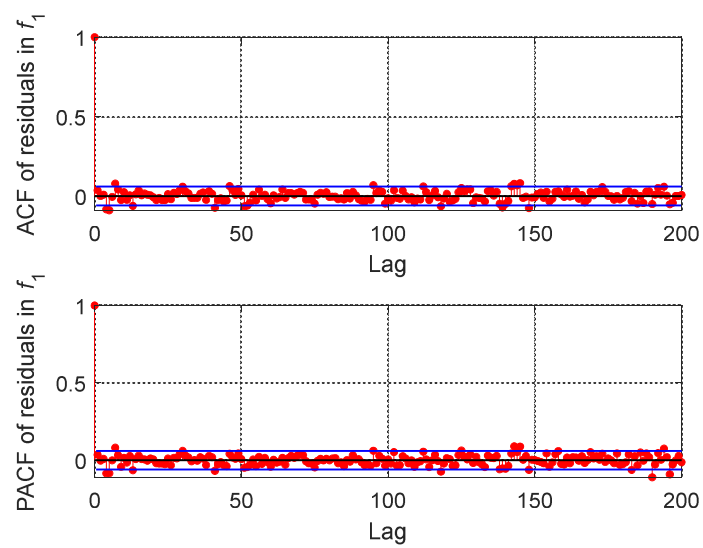


図 3-17 LSTM による f_1 の自己相関関数（ACF）と部分自己相関関数（PACF）

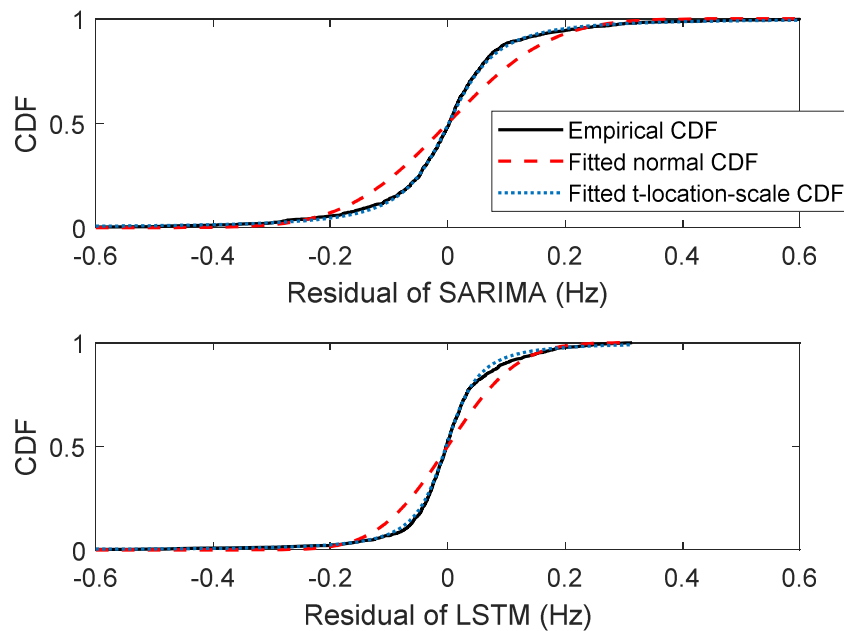


図 3-18 予測残差の累積確率分布

3.5 まとめ

本章では、橋梁長期モニタリングにおける季節変動の検討方法について検討を行った。初年度の入力情報を必要とする季節変動成分の除去法は、モニタリング対象の特徴量の変動に影響を及ぼす外部因子を全て計測できることを前提にしており、もしも観測されていない外部因子の季節変動への影響が無視できない場合は、長期モニタリングによる異常検知精度にも影響を及ぼすことになる。本年度の長期モニタリングにおける季節変動成分の除去については、入力情報を必要としない季節変動成分の除去法（非 EOV 駆動法）について検討を行った。

非 EOV 駆動法として、Seasonal ARIMA (SARIMA)モデルと Long Short Term Memory (LSTM)ネットワークによる季節変動成分の除去性能について検討を行った結果、初年度の EOV 駆動法と比べ、SARIMA モデルの季節変動成分除去能力が優れていることがわかった。しかしながら、SARIMA モデルであっても、異常検知において重要な役割を果たす予測の誤差分布の裾野の再現が十分ではないことが明らかになった。SARIMA モデルの代わりに深層学習に広く使われている LSTM ニューラルネットワークを用いて、季節変動成分の除去性能について検討を行った。その結果、予測の誤差分布の裾野の再現はもちろんのこと、予測残差に自己相関がないこと、すなわち周期性が観測されず季節変動成分の除去に優れた性能を示していることがわかった。

参考文献

1. Guo, A., A. Jiang, J. Lin, and X. Li. 2020. “Data mining algorithms for bridge health monitoring: Kohonen clustering and LSTM prediction approaches.” *The Journal of Supercomputing*, 76, 932–947. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-03045-8>.
2. Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung. 2015. *Time Series Analysis: Forecasting and Control (Fifth edition)*. Wiley.
3. Hochreiter, S. and J. Schmidhuber. 1997. “Long short-term memory.” *Neural Computation*, 9 (8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
4. Gers, F. A., J. Schmidhuber, and F. Cummins. 2000. “Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM.” *Neural Computation*, 12 (10), 2451–2471. <https://doi.org/10.1162/089976600300015015>.
5. Graves, A. 2012. *Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks*. Berlin Heidelberg: Springer.
6. Kingma, D. P. and J. L. Ba. 2015. “ADAM: A method for stochastic optimization.” Proc. of the Third International Conference for Learning Representations. San Diego, USA.

第4章 自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期モニタリングの実施

4.1 概要

鋼部材の腐食に伴うケーブルおよび定着部の損傷の検出を目的として、自治体管理のケーブル構造をもつ特殊橋を対象にケーブルの張力計測を中心としたモニタリングが実施されている。3章に述べたように、季節変動を伴うケーブルの振動特性についてモニタリングの有効性を確認するため、長期的な計測が必要とされる。また5章に述べるように、ケーブル張力のモニタリングの有効性を検証するためFEモデルによる感度解析が計画されているが、モデルの妥当性を確認するうえで橋梁全体の振動特性計測が必須となる。なお、斜張橋においてはケーブルにあらかじめ導入された張力が橋梁全体の挙動に大きく影響するため、感度解析に先立った事前の張力推定が望まれる。

従って令和2年度においては小規模斜張橋をモニタリング対象橋とし、①FEモデルにおけるデータ同化および初期張力の推定を目的とした短期的な計測（以下、短期計測と呼称する。）②ケーブル張力計測によるモニタリングの有効性検討を目的とした長期的な計測（以下、長期計測と呼称する。）の2通りの計測を行った。本章では、上記計測の手順を概説し、計測結果に基づく対象橋梁の振動特性、ケーブル張力の推定についてまとめる。なお、長期計測については来年度も継続して実施され、特に気温が上昇する春以降のデータを比較対象に詳細検討を行う予定である。

短期モニタリングの主な検討内容と実施項目は以下のとおりである。

検討内容

- 対象橋梁の基本振動特性の把握
- 常時振動計測によるケーブル振動推定の精度検討
- 特徴量検討：ケーブル張力、複数モードの振動数
- FEモデルのキャリブレーション
 - モデル構築における構造全体系の推定の妥当性を担保
 - 感度解析などに基づく損傷検知の有効性を検討（損傷と特徴量の相関）

実施項目

- 全ケーブル張力推定を目的としたケーブル加振実験
- 斜張橋全体の振動モード推定を目的として常時振計測
- 画像解析による振動計測を目的とした動画撮影

また、長期モニタリングの主な検討内容と実施項目は以下のとおりである。

検討内容

- 特徴量の季節変動検討
- 季節変動成分除去による特徴量のばらつき検討
（特徴量の季節変動成分除去後の変動幅と損傷による変動幅との比較）

実施項目

- ケーブル2本の張力変動の監視を目的とした振動計測
- 橋梁各部の表面温度計測

4.2 斜張橋を対象とした短・長期モニタリング

4.2.1 対象橋梁

対象橋梁は、兵庫県宍粟市にある姫路河川国道事務所管理の「カラウコ大橋」である。図4-1に位置と橋梁の全景写真を示す。この写真に示されるように、本対象橋梁は主塔より姫路側の径間（以下、主径間と呼称する。）が鋼箱桁、鳥取側の径間がRCT桁で構成された非対称な構造である。また、鳥取側のケーブルは桁ではなくアンカレッジに定着されている。図4-2に橋梁全体の寸法を示す。

ケーブルの振動は構造全体の特性からも影響を受けることが想定される。ただしRCT桁により構成される径間は構造的に斜張橋から独立しているためケーブルの張力には影響しない。したがって損傷によるケーブル張力への影響の把握を目的としたFEモデルの構築を行うにあたっては、主塔 - 鋼箱桁 - ケーブルからなる構造全体の特性の把握が望まれる。一方で、モニタリングにおいては経済的な観点から、損傷に対して鋭敏に変動する特徴量を少数抽出して計測することが望ましい。本研究ではケーブルの破断にいたる深刻な腐食の発生



図 4-1 モニタリング対象橋の位置と全景

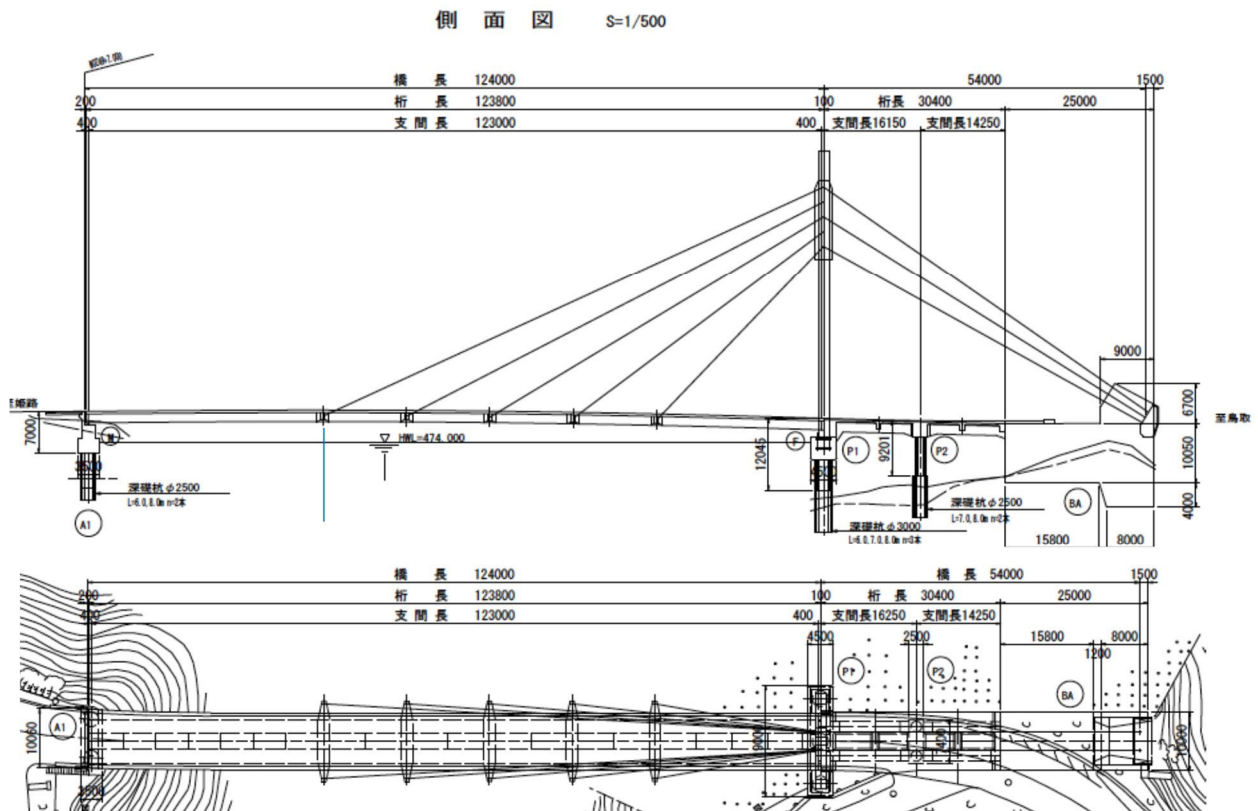
を想定し、いずれかのケーブルが破断した際に荷重分担に大きな変動が生じると想定される2本のケーブルを抽出して長期計測の対象とした。以上の検討に基づき、上述の短期・長期計測においては次の項目について計測するものとする。

短期計測

- 全ケーブル張力推定を目的とした加速度計測
- 斜張橋振動モード推定を目的とした主塔の加速度計測
- 桁一ケーブル間の連成振動の計測を目的とした主径間ケーブル定着部の加速度計測
- 画像解析による振動計測を目的とした動画撮影

長期計測

- ケーブル2本の張力変動の監視を目的とした振動計測
- 橋梁各部の表面温度計測



【橋梁諸元】

橋梁形式： 単径間鋼箱桁斜張橋（姫路側）＋2 径間連続 RCT 桁ラーメン橋（鳥取側）
 完成年度： 1990 年
 橋 長： 179.500m
 主径間長： 124.000m
 全 幅 員： 9.70m

4.2.2 工程概要

令和2年11月10日から12日にかけて、交通規制および橋梁点検車によるセンサ設置短期計測が実施された。短期計測においては橋梁点検車によるセンサ設置作業を行うため、随時片側車線規制を行った。また、本計測において計測時の速やかな無線通信・制御を可能とするため株式会社ロジカルプロダクト（以下、LP社と略記する）へ後述の業務委託を行った。短期計測終了時点では現場への電気工事が完了していなかったため一部計測機器を残置し、給電の準備が整い次第、令和2年12月26日以降長期計測が開始された。本計測の実施日時および実施体制について下記にまとめる。

実施日程

短期計測 令和2年11月10-12日

- 11/10 加速度計設置・各ケーブルの加振実験
- 11/11 各ケーブルの加振実験（続き）・交通振動計測
- 11/12 加速度計撤収・長期計測準備

長期計測開始 令和2年12月26日～

（来年度も継続して実施）

実験参加者

プロジェクト関係者

- 金, 五井 (京都大学)
- 林 (大阪市立大学)
- 小野 (株式会社エイト日本技術開発)

実験補助（社名のみ）

- ソフトウェア開発： 株式会社ロジカルプロダクト
- 橋梁点検車運転： ショーボンド建設株式会社
- 交通規制： 神姫警備保障株式会社

業務再委託

LP社へは下記3点の業務再委託を行った。

- 1) データ収集補助
- 2) 無線中継器およびアプリケーションソフトのカスタマイズ
- 3) 上記機器類の現場設定・調整業務

データ収集においては、図4-3に示す有線・無線加速度計の同時計測およびデータ送受信のための中継器（写真4-1）を開発し、各機器の制御アプリケーションを開発した。また、計測当日の現場での設定・調整作業を行った（写真4-2）。

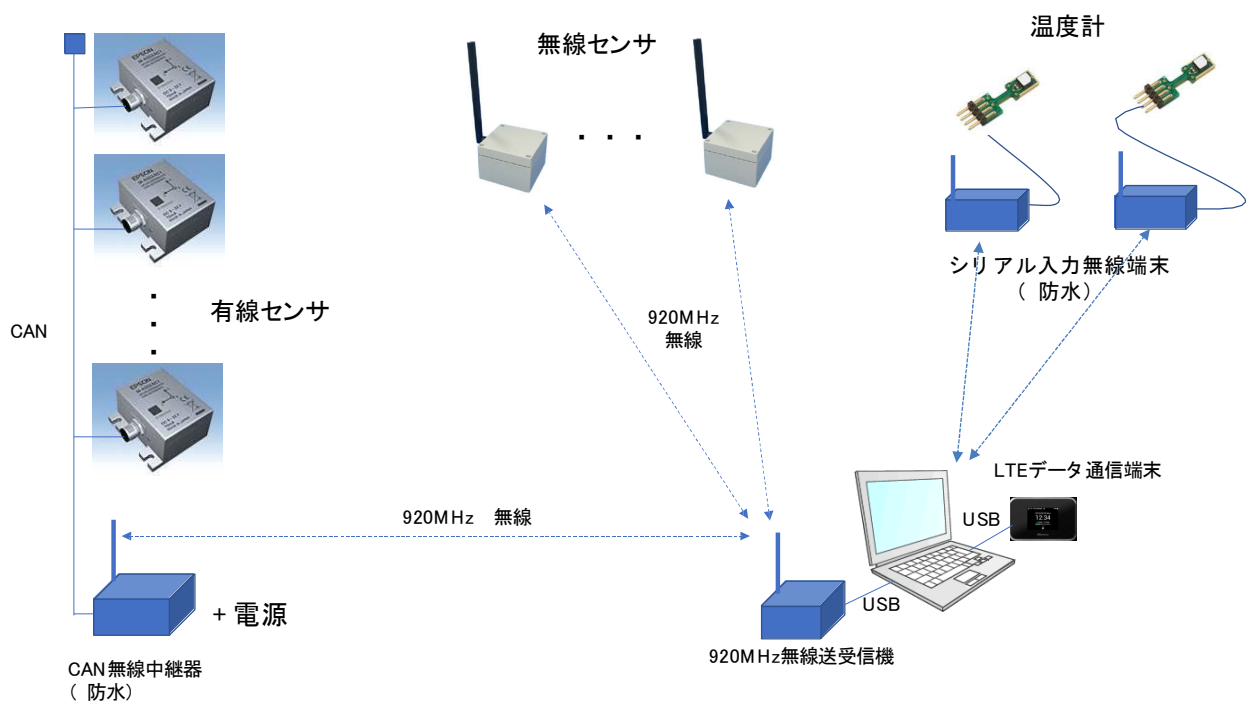


図 4-3 有線・無線センサの同時計測の概要



写真 4-1 カスタマイズ無線中継機



写真 4-2 カスタマイズ機器類の現場設定・調整

4.2.3 データ収集手順

主な使用機材

本モニタリングに利用した主な使用機材を表 4-1 にまとめる。特に本計測に用いた加速度センサについては、近年開発された水晶発振式の MEMS 素子を用いた低ノイズ・高感度の加速度センサである。このセンサの自己雑音によるパワースペクトル密度曲線を図 4-4 に示す。図 4-4 から分かるように土木構造物の振動数帯域である 0.1Hz～100Hz の振動数帯の自己雑音レベルが $0.1 \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダー程度となり極めて微弱であることがわかる。上記の特長は常時振動計測において風による加振や軽自動車の通過など微弱な外力に対しても振動推定が可能となる点から、モニタリングに有利と考えられる。また、採算性の観点からより感度の低いセンサの使用を検討する際に、要求性能を把握するうえで本計測の結果が参考値となると期待される。

表 4-1 主な使用機材

品 目	数量	備 考
データ収集 PC CF-20E5097VJ (パナソニック)	1	長期計測においては現地に設置。
LTE ルータ SC-RRX220 (サン電子)	1	長期計測でのみ使用。別途契約したデータ通信 SIM を導入してインターネット接続を行う。
3 軸有線加速度センサ M-A352AD10 (EPSON)	20	長期計測では 2 機のみを主径間側のケーブル振動計測に使用。アンカレッジ側ケーブルにも 2 機設置されているが、電源不足のため長期計測には利用していない。(写真 4-3a)
3 軸無線加速度センサ (LP 社)	7	短期計測でのみ使用。センサ本体は上記有線センサと同様。(写真 4-3 b)
無線中継器 (LP 社)	1	LP 社によるカスタマイズ (写真 4-1)
温度計 RTR-505BL (T & D)	5	長期計測でのみ使用。無線通信による収集に対応した熱電対式温度計。
温度データ収集機器 RTR-500BC (T & D)	1	長期計測でのみ使用



写真 4-3 有線および無線センサ

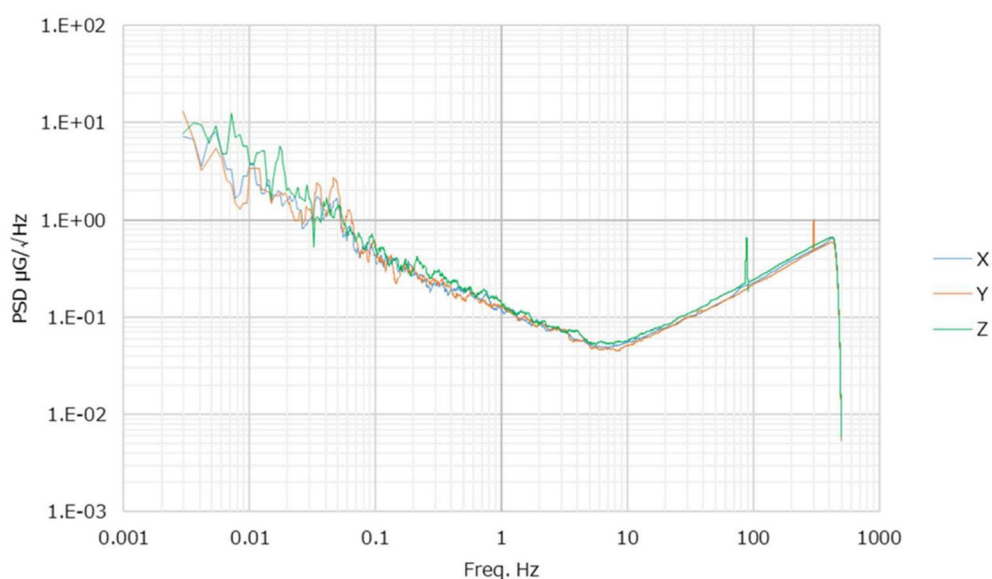


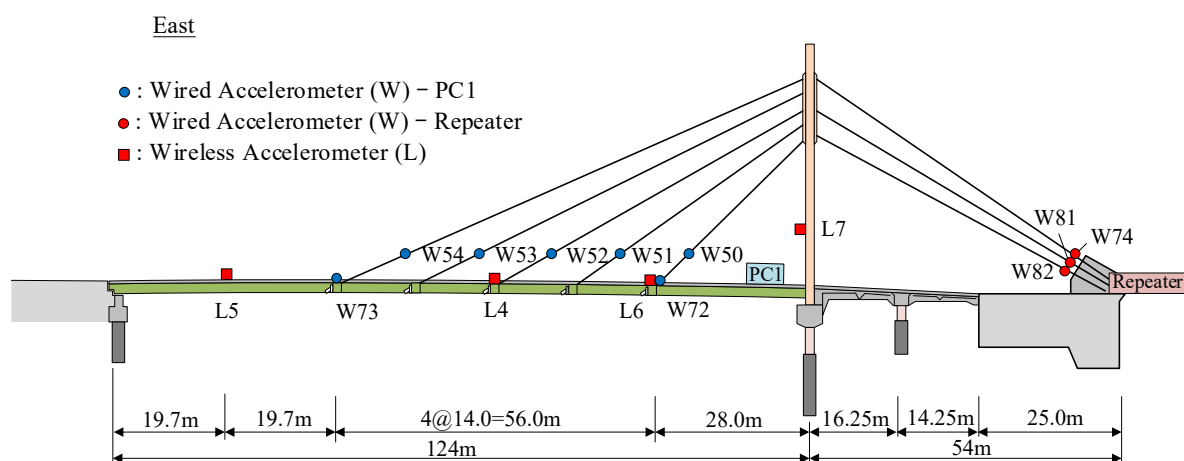
図 4-4 モニタリングに導入した加速度センサの自己雑音のパワースペクトル密度

短期計測

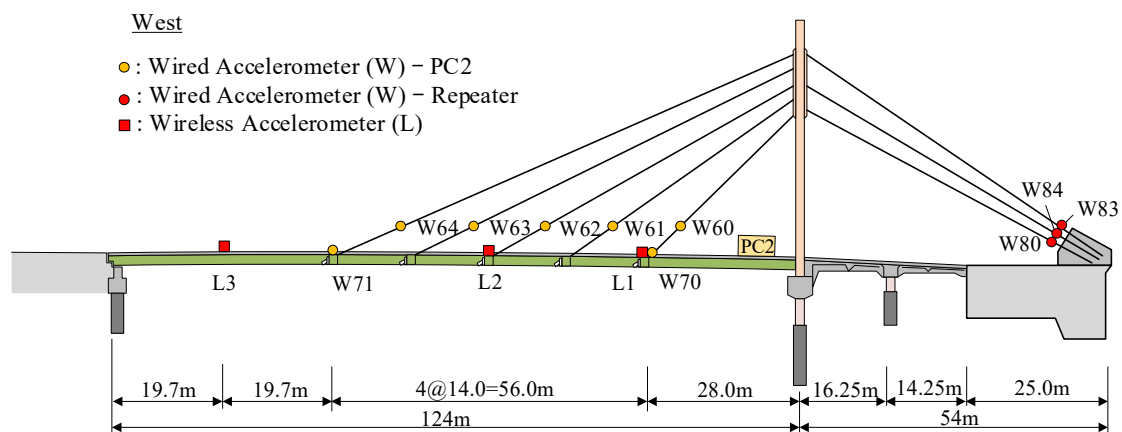
加速度計および収集機器の設置位置を図 4-5 に示す。設置に際しては、主径間側ケーブルへの設置作業の安全性に配慮し、必要に応じて片側車線規制のうえ写真 4-4 に示すように橋梁点検車から各種ケーブルにアクセスした。

有線センサについてはケーブル総延長の上限および片側通行車線確保の観点から、主径間の東側・西側のそれぞれについて個別の収集機で計測を行っている（図 4-5 中の青色・黄色の丸印に対応）。また、アンカレッジ側ケーブルの加速度計（図 4-5 中の赤色の丸印に対応）の計測結果を上述の無線中継器において収集し、主径間および主塔の各所に配置された無線機（図 4-5 中の赤色の四角印に対応）と同期計測を行った。各ケーブルへのセンサ設置が完了した時点で随時ケーブルを数回手で押して衝撃加振を行い、それぞれの短期計測時点での張力推定の参照値とした。

また短期計測においては上述したように全ケーブルおよび主塔、鋼箱桁の振動特性を把握するため、各計測点の同時計測を目的の一つとしている。この目的を達成するため上述の 4 系統の計測結果について事後的に同期処理を行い全データの同時計測を実現した。具体的には、計測位置を重複させたセンサ間（図 4-5 中の L1 と W70、および L7 と W72）のそれぞれについて各時系列の相互相関関数を計測することで、収集されたデータごとのラグを算出し補正を行い全データの同期をとっている。以上の方法で 11 月 11 日 12:30 から 15:00 にかけて、インターバルを除いて計 2 時間程度、片側車線規制の条件下における常時振動を計測した。これらのデータ分析の結果については 4.3 節に後述する。



(a) 東側のセンサ配置



(b) 西側のセンサ配置

図 4-5 短期モニタリングにおけるセンサ配置

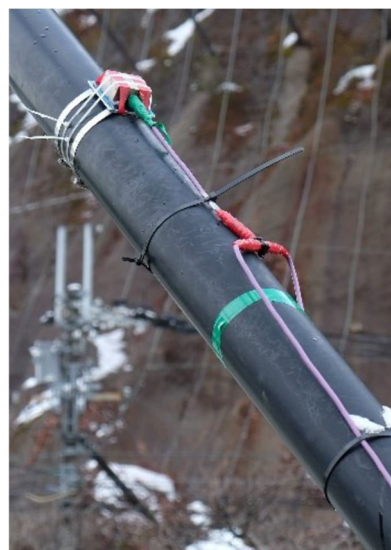


写真 4-4 ケーブルへのセンサ設置作業とセンサ設置状況

長期計測

長期計測においては、データ収録効率の観点から、図 4-6 に示すように観測点数を限定した計測を行う。ケーブル張力推定に関して、加速度については短期計測時にあらかじめ設置された加速度計を用いて、主径間側・東側のケーブル 2 本について計測がなされている（図 4-6 中の青色丸印に対応）。また、振動特性の季節変動について変動要因を把握するため、下記各点に熱電対式の温度計を配置する（写真 4-5）。

- 主塔表面に計 2 点（図 4-6 中の赤色四角印 T1 および T5）
- 鋼箱桁ウェブ外面に計 3 点（図 4-6 中の赤色四角印 T2 から T4）

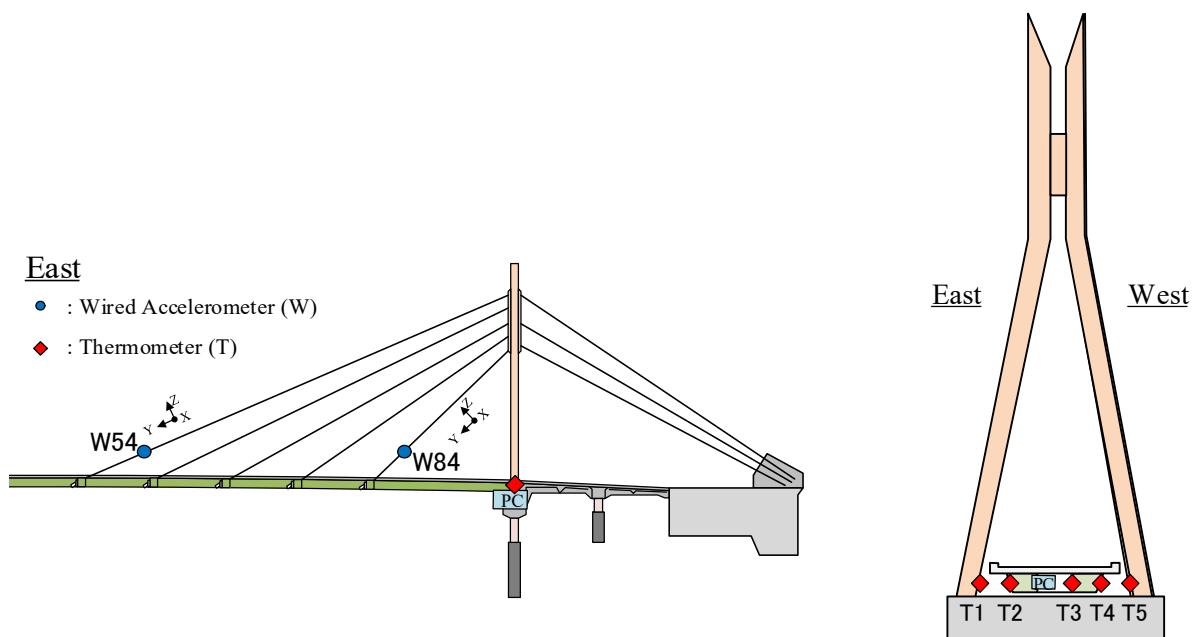


図 4-6 センサ配置（長期モニタリング）

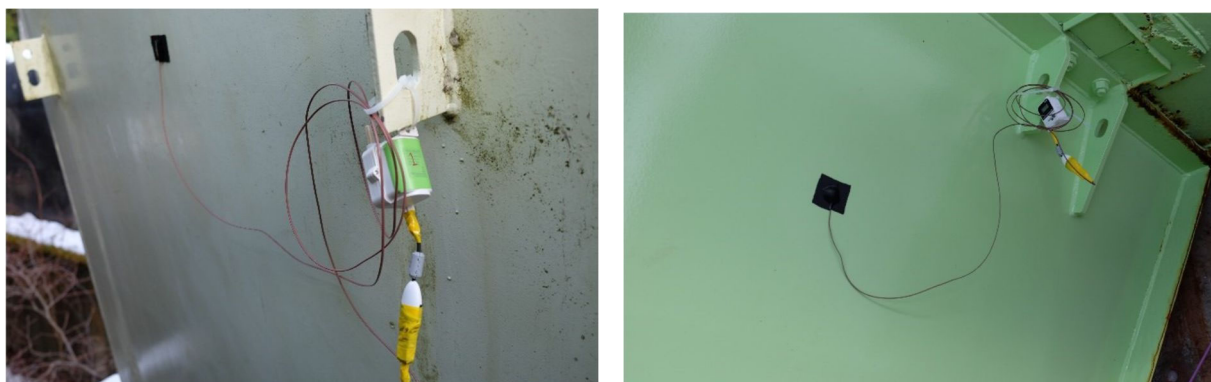


写真 4-5 温度計設置状況の例

各データは桁下の橋台上に配置された計測 PC（写真 4-6）へ集約され、LTE ルータを介してクラウドストレージ上にアップロードされる。同時に、リモートデスクトップ接続用のソフトウェアを導入し遠隔地からの機器の制御および保守管理を行う。図 4-7 は、以上の計測についてハードウェアの構成を概略的にまとめたものである。計測 PC においては次のソフトウェアが常駐し上記のデータ収集手順を実現している。

- 加速度計制御ソフト：サンプリングレート200Hzにて連続計測。10分毎に分割して記録。
- 温度計制御ソフト：10分毎の計測値を、1日毎にまとめて記録。
- Dropbox：上記計測結果を適宜クラウドストレージへアップロード。
- Team Viewer: リモートデスクトップによる制御・保守管理。

リモートデスクトップによる管理画面の例を図 4-8 に示す。この例では、画面左側に約半日の各点の温度変化、画面右側に各加速度計の計測結果の PSD が表示されている。現場においては電源供給が不安定であるなどの理由から、計測が中断される事態が想定される。このため、計測 PC の再起動と同時にリモートデスクトップを起動させ、現場の計測結果を確認しつつ速やかな復旧作業が行えるよう設定がなされている。



写真 4-6 計測 PC コンテナ

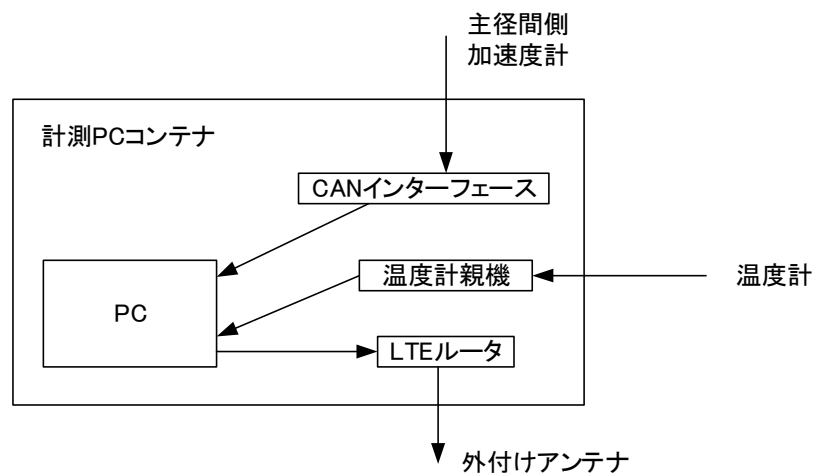
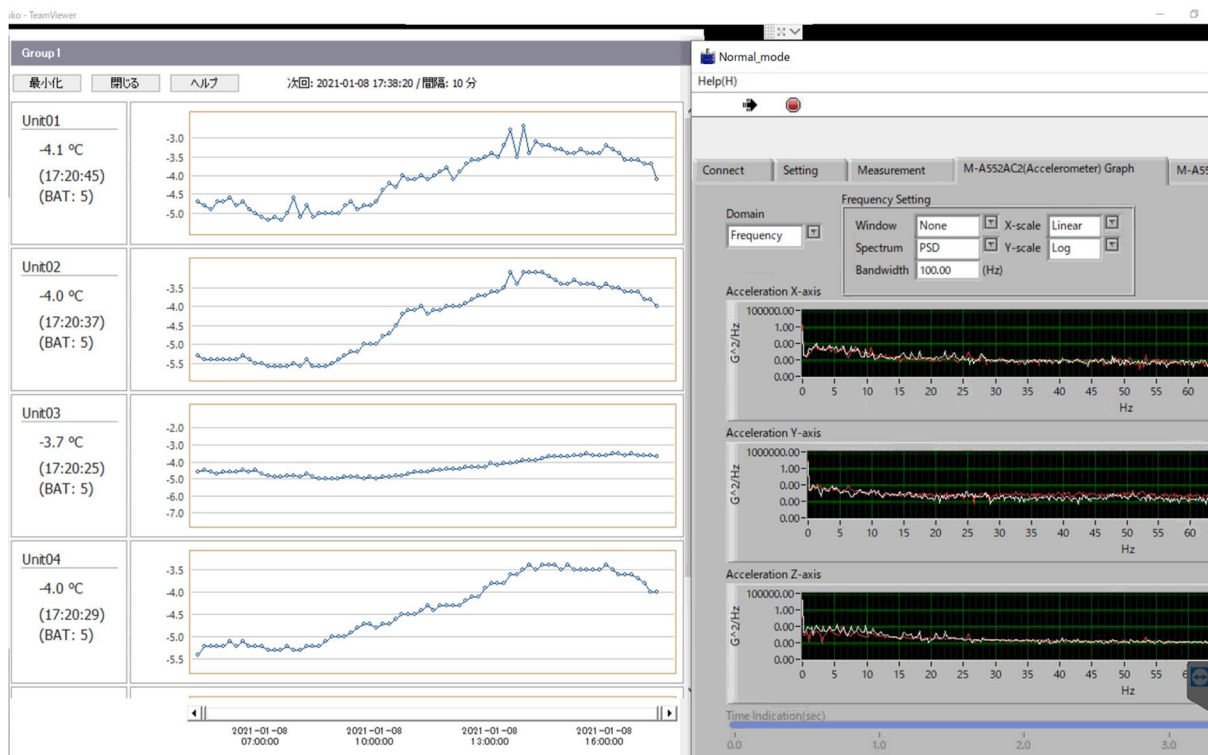


図 4-7 長期計測機器の構成



橋の表面温度の推移

ケーブル常時振動（加速度）の振動数推移

図 4-8 長期モニタリングにおけるリモートデスクトップによる管理画面

4.3 常時振動による斜張橋の振動特性同定

対象橋梁の振動特性を把握するために、ケーブルの場合は、人力による衝撃振動と常時振動を、また、橋梁部の桁の振動特性については、常時振動を用いる。特に、常時振動計測によるケーブル振動特性が同定可能であれば、長期モニタリングによるケーブルの振動および張力のモニタリングが可能になるため、常時振動計測によるケーブル振動特性の同定について検討を行った。

解析のためにセンサに ID 番号を付与しており、各センサの ID 番号を図 4-9 に示す。特に以降のケーブルの番号は図 4-9 に従う。

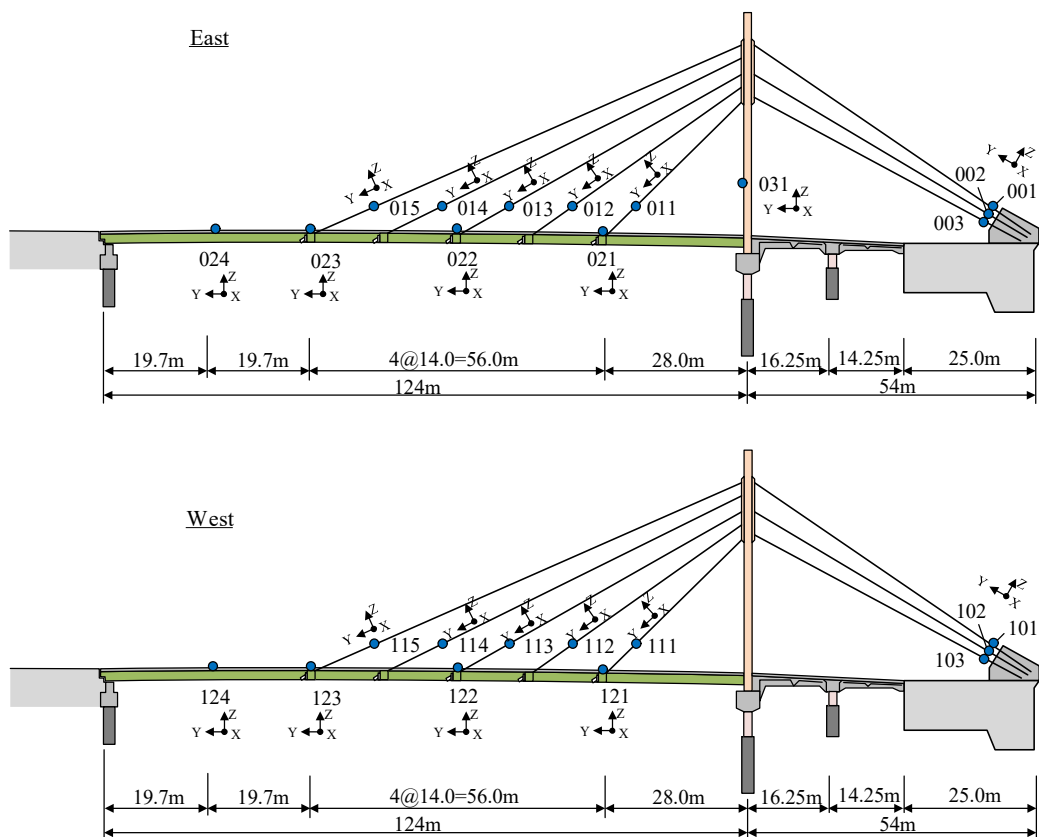


図 4-9 各センサの ID 番号

4.3.1 桁の振動

常時振動による橋梁の桁部の加速度応答の一例を図4-10に示す。また、図4-10のS1, S2, S3は、それぞれ本報告書の振動特性同定結果の例として用いたデータを表す。振動同定には、周波数領域の高速ベイズFFTを利用する。高速ベイズFFTについては、初年度の研究報告書（令和1年度活動報告書）の4.2.2節に解説している。また、高速ベイズFFTでは既知の情報として特異値スペクトルを使っている。特異値スペクトルの一例を図4-11に示す。図4-11の第1主成分の特異値スペクトルは対象橋梁の桁の振動特性を表す。

このような卓越振動数を既知の情報として、高速ベイズFFTを行い得られた振動数、減衰定数の一部を、それぞれ表4-2と表4-3にまとめる。関連の振動モードを図4-12にまとめる。表4-3の同定減衰定数から、対象橋の減衰定数は0.01~0.02に分布することがわかる。また、図4-12から、常時振動でも高次の振動数まで精度良く同定されることがわかる。関連して、1, 2, 3, 5, 8次モードは、それぞれ曲げ1次, 2次, 3次, 4次, 5次モードに相当する。また、4次モードはねじれ1次モードを、6と7次モードはねじれ2次モードに相当する。ただし、6次と7次モード形状の違いは、明確ではない。図4-12のモード形状から特記すべき点は、桁の曲げ1次, 2次, 3次振動モードがケーブル振動に影響を及ぼす可能性である。たとえば、桁の曲げ1次モードの腹に位置するケーブル015, 115, 014, 114は桁の曲げ1次振動に影響を受ける可能性がある。また、桁の曲げ2次モードの腹に位置するケーブル013, 113, 012, 112は曲げ2次振動に、桁の曲げ3次モードの腹に位置するケーブル011, 111は曲げ3次振動に影響を受ける可能性がある。このことについては、4.3.2のケーブル振動同定結果からも明らかである。

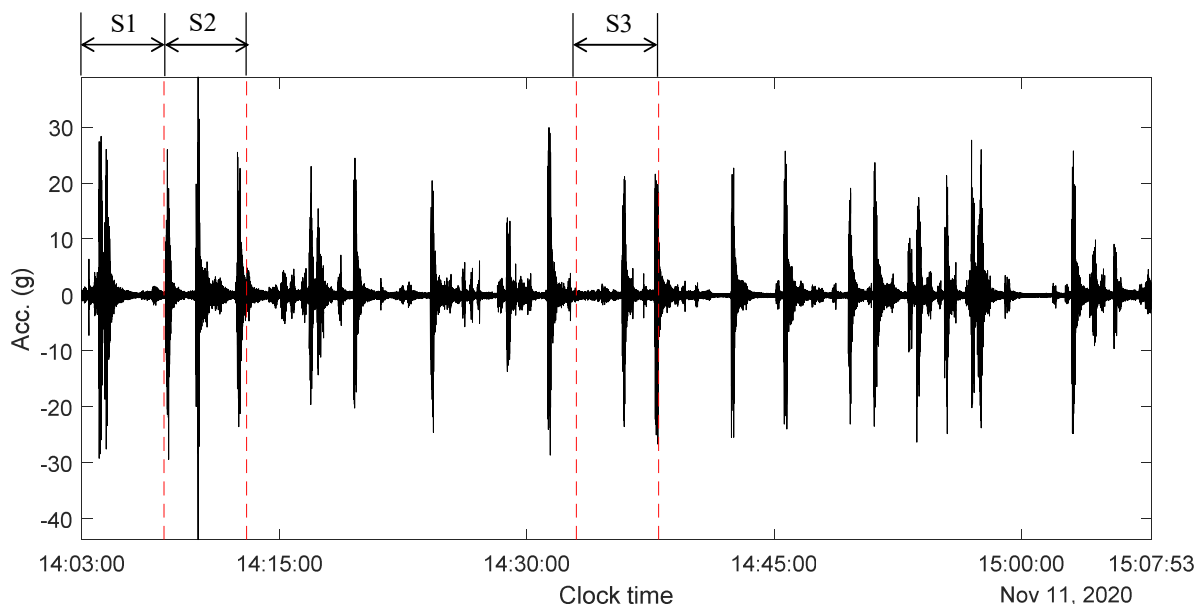


図4-10 橋梁の桁部の観測常時振動の一例

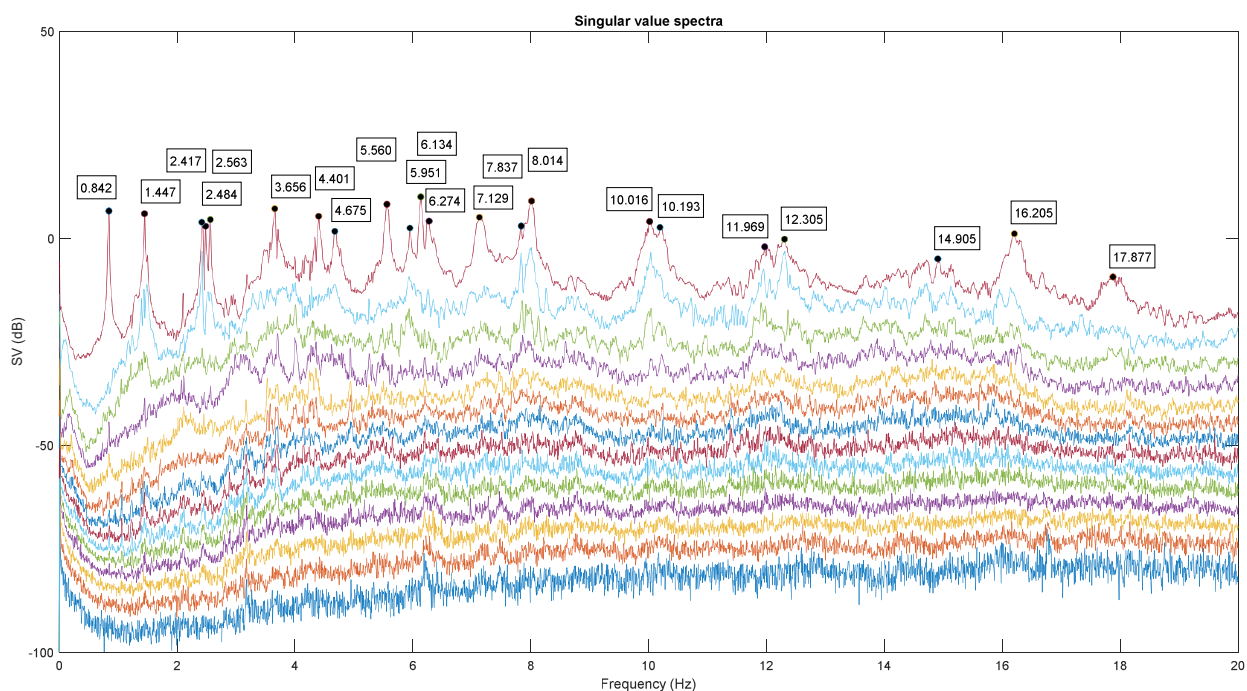


図4-11 橋梁の桁部の観測常時振動の特異値スペクトル一例（図4-2(a)の東側のセンサの3方向のデータ）

表 4-2 同定振動数（8次まで）

Data	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
S1	0.83	1.45	2.43	2.55	3.65	4.37	4.73	5.56
S2	0.84	1.42	2.44	2.55	3.64	4.39	4.71	5.56
S3	0.82	1.44	2.4	2.5	3.67	NA	NA	5.56
Average	0.83	1.44	2.42	2.53	3.65	4.38	4.72	5.56

NA: 同定されなかったケース

表 4-3 同定減衰定数（8次まで）

Order	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ζ_6	ζ_7	ζ_8
S1	0.016	0.002	0.014	0.009	0.018	0.013	0.008	0.010
S2	0.011	0.014	0.004	0.009	0.020	0.010	0.014	0.007
S3	0.012	0.006	0.015	0.040	0.008	NA	NA	0.006
Average	0.013	0.007	0.011	0.019	0.015	0.012	0.011	0.008

NA: 同定されなかったケース

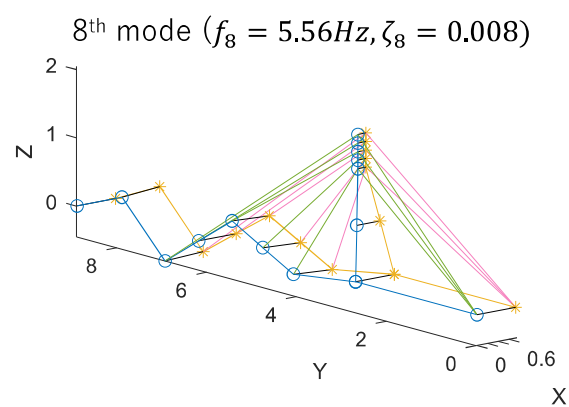
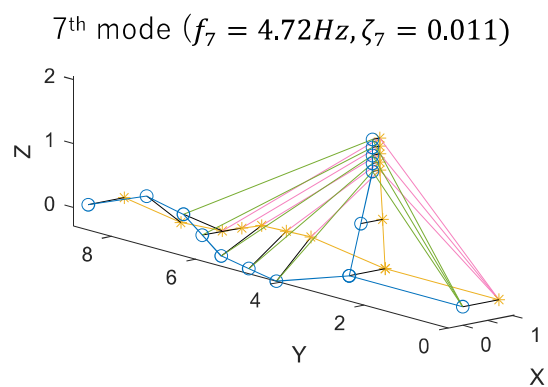
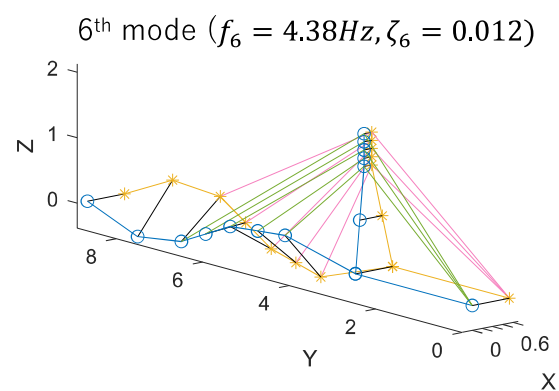
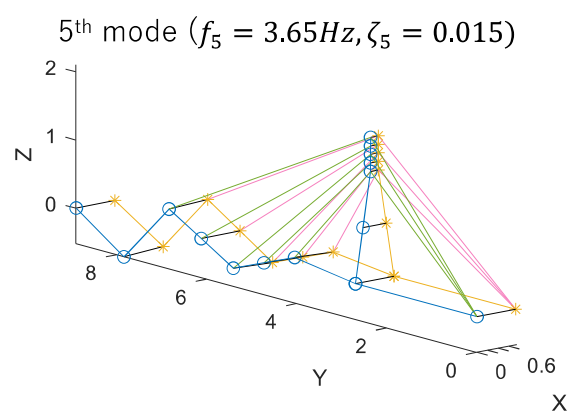
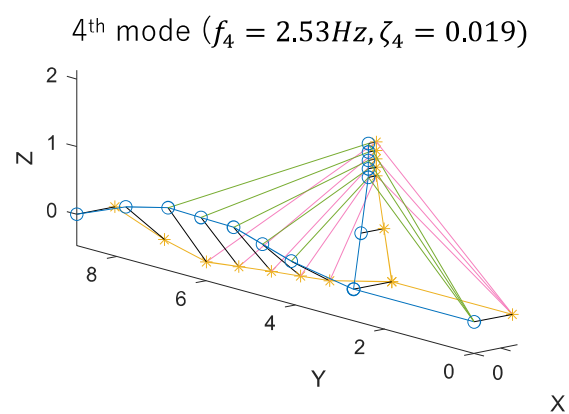
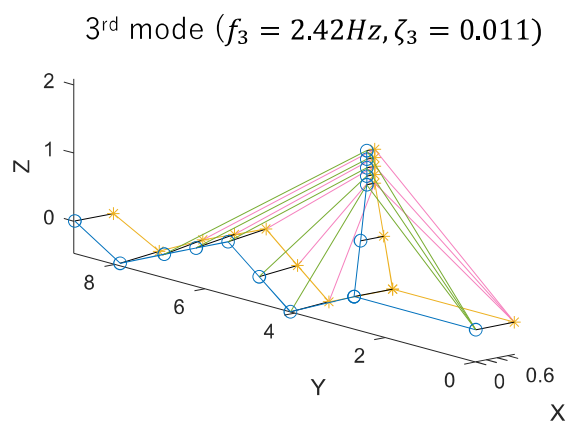
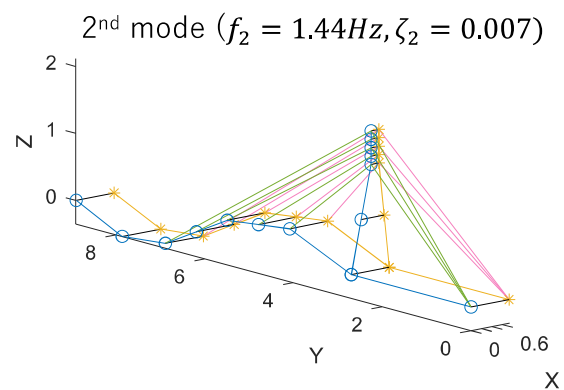
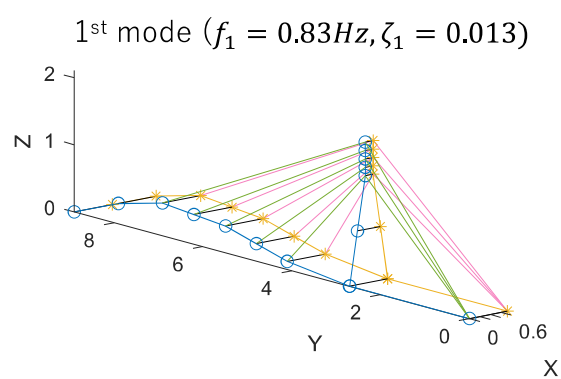


図 4-12 S1, S2, S3 データから同定された平均振動特性

4.3.2 ケーブルの振動

従来のケーブル振動同定による張力推定には、対象ケーブルにセンサを設置し、人力などで加振し卓越振動数を推定するのが一般的であった。近年、土木構造物に振動特性に合わせて開発された低周波領域での信号雑音比が高いセンサの利用が可能になっている。このような土木構造物に振動特性に合わせて開発された高精度のセンサを用いて、ケーブルの常時振動による振動数推定が可能であれば、斜張橋のような多量のケーブルを持つ橋梁の維持管理には有用であると考えられる。

振動数

常時振動によるケーブル振動数同定の可能性を検討するために、各ケーブルにセンサを設置した後、まずは人力による衝撃実験を行った。その結果推定された振動数を表 4-4 にまとめる。表 4-4 の「NA」は同定できなかったモードを表す。特に 1 次振動数同定に失敗したケースが多く、これは人力加振のため、加振者が十分に力を入れて衝撃を与えられるような姿勢が確保できず、加振力が不足していることが原因と思われる。一方で、 i 次のケーブル振動数は、1 次振動数の i 倍になるため、高次振動数から容易に推定が可能である。

図 4-10 の S1, S2, S3 の時間帯の常時振動によるケーブル振動数の同定結果の平均値を表 4-5 に示す。また、S1, S2, S3 の時間帯の常時振動による同定結果をそれぞれ表 4-6, 表 4-7, 表 4-8 に示す。表 4-4 の衝撃加振による同定振動数と表 4-5 の常時振動による同定振動数の平均値を比較すると、常時振動から推定した 1 次振動数は、衝撃加振による 1 次振動数と隔たりがあることがわかる。

C-1 ケーブルについて考察を行うと、衝撃加振による 1 次振動数は 1.06Hz であるが、常時振動からは 0.84Hz および 0.86Hz になっており、桁の曲げ 1 次振動数の影響を受ける結果になった。C-2 ケーブルについては、衝撃加振による 2 次振動数 2.47Hz の半数とすると 1 次振動数は 1.24Hz になるが、常時振動による 1 次振動数は 1.03Hz および 1.23Hz になっており、1.03Hz は C-2 ケーブルの本来の振動数とは差がある。C-3 ケーブルに着目すると、衝撃加振による 1 次振動数は 1.40Hz と 1.44Hz であり、常時振動からも 1.40Hz と 1.44Hz になっており、桁の曲げ 2 次振動数とも連動している結果となった。C-4 ケーブルに着目すると、衝撃加振による 1 次振動数は 1.78Hz と 1.80Hz であり、常時振動からは 1.60Hz と 1.67Hz になっており C-4 ケーブルの本来の振動数とは差がある。C-5 ケーブルに着目すると、衝撃加振による 1 次振動数は 2.08Hz と 2.12Hz であるが、常時振動からは 2.22Hz と 2.28Hz になっており C-5 ケーブルの本来の振動数とは差がある。定着部のケーブルである C-6, C-7, C-8 の 1 次振動数については、桁部のケーブルのような大きな差は見られないが、2 次以上の高次の振動数に比べて差があるといえる。

以上の衝撃加振によるケーブル振動数の推定結果と常時振動によるケーブル振動数の推定結果の比較から、常時振動を利用する場合、ケーブルの 1 次振動数は桁の振動などに影響されやすい傾向があることから、2 次以上の振動数に着目すれば、常時振動によるケーブル振動同定は有効になると考える。特に、斜張橋のケーブル振動計測の重要な目的の一つがケーブル張力推定であることを考えると、ケーブル張力推定に安定的で精度のいい振動数を用いる必要があるため、2 次以上の振動数に着目すれば常時振動は有用であると考えられる。

表 4-4 ケーブルの衝撃振動より同定された振動数

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	NA	3.28	NA	6.60	8.15	9.87	11.45	14.83
	101	1.60	3.26	4.88	6.57	8.29	9.96	11.42	14.62
C-7	002	1.77	3.41	5.34	7.10	8.87	10.69	12.17	15.68
	102	1.79	3.56	5.39	7.23	9.10	10.79	12.43	15.70
C-6	003	1.55	3.23	4.89	6.37	7.98	9.52	10.97	13.21
	103	1.56	3.16	4.79	6.31	7.94	9.44	10.69	13.32
C-5	011	2.08	4.19	6.28	8.43	10.63	12.98	14.63	16.82
	111	2.12	4.25	6.40	8.55	10.84	13.15	15.55	16.83
C-4	012	1.80	3.60	5.42	7.24	9.07	10.99	12.94	14.86
	112	1.78	3.55	5.35	7.13	8.99	10.86	12.78	14.74
C-3	013	1.44	2.90	4.37	5.84	7.31	8.81	10.31	11.87
	113	1.40	2.82	4.24	5.67	7.11	8.56	10.04	11.56
C-2	014	NA	2.47	3.71	4.96	6.22	7.50	8.79	10.11
	114	NA	2.47	NA	4.96	6.22	7.50	8.80	10.13
C-1	015	1.06	2.13	3.20	4.28	5.28	6.45	7.55	8.66
	115	NA	2.12	3.19	4.28	5.34	6.43	7.53	8.64

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-5 ケーブルの常時振動より同定された振動数 (S1, S2, S3 の時間帯の常時振動によるケーブル振動数の同定結果の平均値 : 表 4-6, 5-7, 5-8 の平均値)

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	1.65	3.31	5.06	7.24	8.13	9.85	11.40	12.35
	101	1.65	3.29	5.03	7.23	8.08	9.93	11.32	12.34
C-7	002	1.67	3.80	5.72	7.53	8.69	10.56	12.14	13.86
	102	1.80	3.87	5.52	7.54	8.89	10.60	12.29	13.93
C-6	003	1.50	3.16	4.69	6.06	7.99	10.03	10.95	12.28
	103	1.48	3.15	4.64	5.99	7.92	9.59	10.55	12.34
C-5	011	2.22	4.14	6.24	8.41	10.67	13.00	14.67	16.21
	111	2.28	4.21	6.32	8.57	10.78	13.15	14.65	16.18
C-4	012	1.67	3.60	5.40	7.22	9.08	10.93	12.84	14.85
	112	1.60	3.55	5.34	7.15	8.96	10.86	12.76	14.80
C-3	013	1.44	2.71	4.36	5.84	7.28	8.76	10.25	11.87
	113	1.40	2.66	4.23	5.65	7.09	8.52	10.05	
C-2	014	1.23	2.44	3.69	4.94	6.18	7.46	8.75	10.09
	114	1.03	2.45	3.70	4.95	6.20	7.49	8.78	10.13
C-1	015	0.86	2.16	3.18	4.25	5.32	6.41	7.52	8.61
	115	0.84	2.13	3.18	4.24	5.32	6.39	7.50	8.59

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-6 ケーブルの常時振動より同定された振動数（図 4-10 の S1 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	1.64	3.40	4.99	7.22	8.12	9.82	11.41	NA
	101	1.65	3.33	4.98	7.25	8.02	9.91	11.33	NA
C-7	002	1.77	3.57	5.75	NA	8.83	10.59	12.15	13.85
	102	1.80	3.60	5.56	7.75	8.67	10.60	12.24	13.92
C-6	003	1.49	3.17	4.75	6.04	7.98	10.06	10.85	NA
	103	1.47	3.15	4.74	5.98	7.90	NA	10.50	NA
C-5	011	2.10	4.14	6.25	8.44	10.63	12.96	14.55	16.22
	111	2.26	4.21	6.31	8.59	10.80	13.07	14.60	16.22
C-4	012	1.79	3.59	5.40	7.22	9.08	10.92	12.84	14.84
	112	NA	3.55	5.34	7.15	8.97	10.82	12.76	14.71
C-3	013	1.44	2.66	4.35	5.83	7.28	8.77	10.27	11.86
	113	1.40	2.75	4.22	5.66	7.08	8.55	10.03	NA
C-2	014	NA	2.44	3.69	4.93	6.20	7.46	8.74	10.10
	114	NA	2.45	3.70	4.94	6.23	7.49	8.76	10.15
C-1	015	0.88	2.25	3.18	4.25	5.31	6.41	7.50	8.61
	115	0.84	NA	NA	4.24	5.31	6.38	7.49	8.61

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-7 ケーブルの常時振動より同定された振動数（図 4-10 の S2 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	1.66	3.25	5.10	7.23	8.18	9.91	11.40	12.31
	101	1.66	3.25	5.07	7.20	8.18	9.96	11.36	NaN
C-7	002	1.45	4.00	5.74	7.25	8.95	10.61	12.16	13.89
	102	1.81	4.00	5.47	7.32	9.10	10.74	12.30	13.94
C-6	003	1.51	3.15	4.74	6.11	8.00	10.00	10.81	12.28
	103	1.48	3.14	4.73	6.02	7.96	9.59	10.60	12.29
C-5	011	2.41	4.16	6.24	8.43	10.72	13.04	14.86	16.17
	111	2.40	4.21	6.33	8.57	10.79	13.30	NA	16.14
C-4	012	1.44	3.60	5.40	7.22	9.11	10.96	12.84	14.89
	112	1.43	3.56	5.34	7.15	8.98	10.89	12.73	14.87
C-3	013	1.44	2.63	4.36	5.84	7.28	8.76	10.24	11.86
	113	1.40	2.65	4.23	5.65	7.10	8.52	10.07	NA
C-2	014	1.23	2.45	3.69	4.94	6.17	7.45	8.76	10.06
	114	0.84	2.45	3.70	4.95	6.19	7.49	8.82	10.12
C-1	015	0.85	2.12	3.18	4.26	5.32	6.41	7.51	8.61
	115	0.85	2.15	3.18	4.24	5.31	6.39	7.52	8.60

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-8 ケーブルの常時振動より同定された振動数（図 4-10 の S3 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	1.64	3.28	5.08	7.28	8.08	9.81	11.38	12.39
	101	1.65	3.30	5.05	7.23	8.04	9.92	11.26	12.34
C-7	002	1.78	3.84	5.67	7.81	8.28	10.48	12.10	13.85
	102	1.80	4.00	5.52	NA	NA	10.46	12.32	13.93
C-6	003	1.49	3.16	4.59	6.04	7.98	NA	11.18	NA
	103	1.50	3.16	4.44	5.96	7.90	NA	10.55	12.39
C-5	011	2.14	4.13	6.23	8.37	10.67	13.00	14.61	16.25
	111	2.18	4.21	6.32	8.54	10.75	13.08	14.69	16.19
C-4	012	1.79	3.61	5.40	7.22	9.05	10.91	12.84	14.82
	112	1.77	3.55	5.34	7.14	8.94	10.86	12.80	14.81
C-3	013	1.44	2.83	4.37	5.84	7.28	8.76	10.25	11.88
	113	1.40	2.58	4.23	5.63	7.08	8.50	10.05	NA
C-2	014	1.23	2.43	3.69	4.94	6.18	7.46	8.74	10.10
	114	1.22	2.44	3.70	4.95	6.19	7.50	8.76	10.11
C-1	015	0.85	2.11	3.18	4.25	5.34	6.41	7.54	8.60
	115	0.84	2.11	NA	4.25	5.33	6.39	7.49	8.57

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

減衰定数

図 4-10 の S1, S2, S3 の時間帯の常時振動による各ケーブルの減衰定数の同定結果の平均値を表 4-9 に示す。表 4-9 の同定減衰定数から、ケーブルの減衰定数が 0.001～0.05 まで幅広く分布している結果となった。減衰定数を異常検知の特徴量として利用するのは、現段階では容易ではないと考えられる。また、S1, S2, S3 の時間帯の常時振動による減衰定数の同定結果をそれぞれ表 4-10, 表 4-11, 表 4-12 に示す。

表 4-9 ケーブルの常時振動より同定された減衰定数（S1, S2, S3 の時間帯の常時振動によるケーブル振動数の同定結果の平均値：表 4-10, 4-11, 4-12 の平均値）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	0.0042	0.0119	0.0266	0.0342	0.0066	0.0048	0.0025	0.0697
	101	0.0068	0.0084	0.0237	0.0372	0.0110	0.0065	0.0033	0.0236
C-7	002	0.0032	0.0297	0.0453	0.0049	0.0032	0.0126	0.0061	0.0054
	102	0.0019	0.0046	0.0104	0.0258	0.0629	0.0303	0.0059	0.0033
C-6	003	0.0166	0.0017	0.0132	0.0286	0.0020	0.0610	0.0414	0.0323
	103	0.0147	0.0035	0.0185	0.0195	0.0035	0.0026	0.0066	0.0041
C-5	011	0.0501	0.0023	0.0037	0.0027	0.0034	0.0046	0.0676	0.0081
	111	0.0499	0.0023	0.0065	0.0034	0.0037	0.0067	0.0177	0.0091
C-4	012	0.0037	0.0020	0.0017	0.0016	0.0054	0.0018	0.0009	0.0025
	112	0.0056	0.0021	0.0028	0.0017	0.0053	0.0037	0.0039	0.0048
C-3	013	0.0010	0.0438	0.0015	0.0081	0.0011	0.0011	0.0006	0.0048
	113	0.0006	0.0273	0.0013	0.0027	0.0014	0.0024	0.0030	NA
C-2	014	0.0012	0.0024	0.0006	0.0005	0.0014	0.0018	0.0010	0.0022
	114	0.0274	0.0027	0.0006	0.0007	0.0019	0.0052	0.0017	0.0026
C-1	015	0.0340	0.0339	0.0006	0.0022	0.0015	0.0013	0.0036	0.0010
	115	0.0128	0.0307	0.0012	0.0019	0.0015	0.0013	0.0011	0.0007

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-10 ケーブルの常時振動より同定された減衰定数（図 4-10 の S1 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	0.0049	0.0256	0.0166	0.0246	0.0052	0.0044	0.0025	NA
	101	0.0107	0.0116	0.0126	0.0337	0.0098	0.0063	0.0032	NA
C-7	002	0.0023	0.0032	0.0447	NA	0.0056	0.0065	0.0051	0.0052
	102	0.0024	0.0109	0.0181	0.0443	0.0569	0.0207	0.0048	0.0026
C-6	003	0.0153	0.0018	0.0013	0.0299	0.0030	0.0491	0.0275	NA
	103	0.0110	0.0056	0.0020	0.0212	0.0037	NA	0.0067	NA
C-5	011	0.0654	0.0008	0.0022	0.0032	0.0018	0.0023	0.0206	0.0064
	111	0.0634	0.0014	0.0061	0.0032	0.0037	0.0020	0.0178	0.0108
C-4	012	0.0014	0.0006	0.0024	0.0013	0.0039	0.0016	0.0008	0.0023
	112	NA	0.0010	0.0027	0.0012	0.0036	0.0017	0.0047	0.0053
C-3	013	0.0011	0.0538	0.0012	0.0057	0.0012	0.0011	0.0006	0.0043
	113	0.0007	0.0171	0.0007	0.0019	0.0005	0.0024	0.0028	NA
C-2	014	NA	0.0018	0.0006	0.0005	0.0019	0.0013	0.0006	0.0030
	114	NA	0.0018	0.0008	0.0003	0.0016	0.0011	0.0008	0.0030
C-1	015	0.0586	0.1004	0.0003	0.0014	0.0006	0.0014	0.0009	0.0006
	115	0.0014	NA	NA	0.0023	0.0002	0.0021	0.0004	0.0009

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-11 ケーブルの常時振動より同定された減衰定数（図 4-10 の S2 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	0.0045	0.0064	0.0331	0.0450	0.0047	0.0036	0.0025	0.1303
	101	0.0054	0.0060	0.0314	0.0438	0.0139	0.0044	0.0050	NA
C-7	002	0.0032	0.0015	0.0521	0.0073	0.0031	0.0115	0.0061	0.0051
	102	0.0014	0.0017	0.0018	0.0072	0.0688	0.0438	0.0071	0.0030
C-6	003	0.0145	0.0015	0.0019	0.0250	0.0011	0.0729	0.0251	0.0323
	103	0.0135	0.0014	0.0033	0.0176	0.0036	0.0026	0.0037	0.0026
C-5	011	0.0251	0.0023	0.0017	0.0022	0.0048	0.0079	0.1668	0.0042
	111	0.0347	0.0036	0.0072	0.0038	0.0034	0.0162	NA	0.0032
C-4	012	0.0086	0.0031	0.0017	0.0014	0.0064	0.0028	0.0008	0.0028
	112	0.0093	0.0035	0.0024	0.0029	0.0048	0.0062	0.0021	0.0029
C-3	013	0.0008	0.0521	0.0017	0.0069	0.0008	0.0014	0.0008	0.0053
	113	0.0005	0.0351	0.0021	0.0037	0.0023	0.0010	0.0031	NA
C-2	014	0.0013	0.0013	0.0005	0.0005	0.0014	0.0008	0.0015	0.0015
	114	0.0524	0.0014	0.0006	0.0007	0.0021	0.0017	0.0035	0.0030
C-1	015	0.0196	0.0008	0.0009	0.0040	0.0007	0.0007	0.0011	0.0006
	115	0.0290	0.0603	0.0012	0.0025	0.0003	0.0007	0.0023	0.0004

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

表 4-12 ケーブルの常時振動より同定された減衰定数（図 4-10 の S3 データと同じ時間帯のケーブル振動データ）

Cable ID*	Cable No	Mode order							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C-8	001	0.0031	0.0036	0.0300	0.0329	0.0099	0.0064	0.0024	0.0091
	101	0.0043	0.0076	0.0270	0.0342	0.0092	0.0089	0.0018	0.0236
C-7	002	0.0040	0.0845	0.0391	0.0025	0.0008	0.0198	0.0070	0.0060
	102	0.0019	0.0011	0.0114	NA	NA	0.0263	0.0059	0.0043
C-6	003	0.0200	0.0017	0.0365	0.0308	0.0018	NA	0.0715	NA
	103	0.0197	0.0034	0.0503	0.0196	0.0031	NA	0.0093	0.0055
C-5	011	0.0598	0.0039	0.0072	0.0026	0.0035	0.0036	0.0153	0.0136
	111	0.0515	0.0020	0.0062	0.0033	0.0041	0.0020	0.0175	0.0132
C-4	012	0.0010	0.0022	0.0011	0.0022	0.0059	0.0011	0.0010	0.0023
	112	0.0018	0.0017	0.0033	0.0010	0.0074	0.0031	0.0050	0.0061
C-3	013	0.0012	0.0256	0.0016	0.0117	0.0014	0.0008	0.0004	0.0048
	113	0.0005	0.0296	0.0010	0.0024	0.0013	0.0037	0.0032	NA
C-2	014	0.0011	0.0040	0.0006	0.0005	0.0009	0.0033	0.0008	0.0020
	114	0.0024	0.0049	0.0004	0.0010	0.0021	0.0129	0.0007	0.0018
C-1	015	0.0237	0.0006	0.0005	0.0011	0.0032	0.0018	0.0088	0.0017
	115	0.0080	0.0010	NA	0.0010	0.0039	0.0012	0.0007	0.0009

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

4.4 常時振動計測によるケーブル張力同定

4.4.1 ケーブル振動数を用いたケーブル張力同定の基礎

ケーブル張力同定には弦理論とはり理論を利用する。ただし、対象橋梁はケーブル直径も大きくないため、弦理論が相応しいと判断しているが、比較のためにはり理論による張力同定もおこなう。また、張力同定における回帰モデル推定にはベイズ一般化線形モデル (Bayesian Generalized Linear Model: BGLM) を利用する。BGLM を適用する理由は、常時振動による同定ケーブル振動数のばらつきや不確定性を考慮するためである。

式 (4-1) に弦理論による振動数と張力の関係式を示す。

$$f_i^2 = \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad (4-1)$$

ここに、 f_i はケーブルの i 次振動数、 T はケーブル張力、 ρ はケーブルの密度、 A はケーブルの断面積、 L はケーブル長を表す。

高次モードまでの振動数を利用する場合、式 (4-1) は、次の式 (4-2) のように回帰モデルとして書きなおすことができる。

$$f_i^2 = ai^2 \quad (4-1)$$

結局、振動数 f_i と次数 i の線形関係の傾き a を求めることで張力 T の推定が可能である。

はり理論による振動数と張力の関係式を式 (4-3) に示す。

$$f_i^2 = \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 + \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 \quad (4-3)$$

ここに、 f_i 、 T 、 ρ 、 A 、 L は、式 (4-1) と同じである。 π は円周率、 E はヤング係数、 I はケーブルの断面 2 次モーメントを表す。

弦理論と同様に、式 (4-3) は、次の式 (4-4) のように回帰モデルとして書きなおすことができる。

$$\left(\frac{f_i}{i}\right)^2 = a + bi^2 \quad (4-4)$$

結局、振動数 f_i と次数 i の線形関係の傾き a を求めることで張力 T の推定が可能である。

4.4.2 ケーブル張力同定

カラウコ大橋の常時振動計測データからケーブルの振動数を同定し、同定振動数を用いたケーブル張力の同定を行う。表 4-13 に対象橋梁のケーブル諸元を示す。また、設計張力と曲げ剛性を表 4-14 に示す。

2020 年 11 月 11 日 14:03 から 2 時間の常時振動データを 23 サンプルの分割し、23 サンプルの常時振動データから高速ベイズ FFT により推定されたケーブル振動数の平均値と標準偏差を表 4-15 に示す。ただし、5.3 節で考察した通り、常時振動により同定されたケーブルの 1 次振動数は桁の振動などに影響を受ける可能性が高いため、2 次から 6 次までの振動数を張力同定に利用する。2 時間の常時振動計測中に、主に車両 1 台の通過が観測され、同定張力の検討には、表 4-14 の最小設計張力と比較検討を行う。

ベイズ一般化線形モデル (BGLM) による推定された、振動数 f_i と次数 i の線形関係を図 4-13 と図 4-14 に示す。図 4-13 は桁部ケーブルの線形関係を、図 4-14 には定着部ケーブルの線形関係を示す。

図 4-13 と図 4-14 の振動数と振動次数の線形関係のばらつき (図の $\pm 2\sigma$) を見ると、定着部ケーブルの振動数と振動次数の線形関係のばらつきが、桁部の振動数と振動次数の線形関係のばらつきより大きいことが分かる。桁部は、車両走行による桁の振動がケーブル振動を励起するが、定着部ケーブルの場合、風あるいはタワーの振動により励起されることから桁部のケーブルよりか信号が弱く、同定のばらつきが大きくなると考えられる。

無情報事前分布によるベイズ張力推定を行った結果を表 4-16 にまとめる。また、推定張力最確値と設計張力 (死荷重) の比較を図 4-15 に示す。桁部のケーブルの同定張力は設計張力の約 80% になっていることが分かる。一方で、定着部ケーブルの同定張力は、設計張力の 99%~89% の張力を示している。特に、桁部のケーブルの同定張力の標準偏差はわずか 1kN~3kN に分布しており、同定における不確定性は少ない結果である。定着部ケーブルの同定張力の標準偏差は 5kN~30kN に分布しており、桁部ケーブルの同定張力に比べてばらつきが大きい結果となった。同定ケーブル張力の確率分布を図 4-16 および図 4-17 に示す。

表 4-13 ケーブル諸元

Cable ID*	Cable type	Diameter (mm)	Length (m)	Unit mass (kg/m)	Break load (kN)
C-8	HiAm 283	180	66.028	91.6	17100
C-7	HiAm 283	180	63.335	91.6	17100
C-6	HiAm 121	140	60.68	39.4	7310
C-5	HiAm 109	125	40.311	35.5	6590
C-4	HiAm 109	125	52.474	35.5	6590
C-3	HiAm 109	125	65.435	35.5	6590
C-2	HiAm 199	160	78.893	64.3	12000
C-1	HiAm 199	160	92.544	64.3	12000

* C-1~C-5: 桁部ケーブル, C-6~C-8: 定着部ケーブル

表 4-14 設計張力と曲げ剛性

Cable ID*	$T_{\max}$ (kN)	$T_{\min}$ (kN)	EI (kN·m ²)**
C-8	5480	4400	10048
C-7	5680	4680	10048
C-6	1990	1610	3677
C-5	2060	1360	2337
C-4	2020	1490	2337
C-3	2020	1530	2337
C-2	3720	2890	6273
C-1	3850	3120	6273

* C-1~C-5: 桁部ケーブル, C-6~C-8: 定着部ケーブル

**ヤング係数 $E = 1.95 \times 10^5$ MPa と仮定, $T_{\max}$: 最大設計張力 (死荷重+活荷重), $T_{\min}$ (kN): 最小設計張力 (死荷重)

表 4-15 23 サンプルの常時振動データにより同定された振動数の平均値と標準偏差

Cable ID*	Cable No.	Stats	Mode order				
			2	3	4	5	6
C-8	001	Mean	3.30	5.02	7.23	8.08	9.85
		Std	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05
	101	Mean	3.31	5.01	7.22	8.06	9.96
		Std	0.05	0.07	0.08	0.06	0.04
C-7	002	Mean	3.79	5.59	7.23	8.83	10.42
		Std	0.21	0.12	0.14	0.14	0.17
	102	Mean	3.77	5.52	7.35	8.87	10.52
		Std	0.17	0.06	0.12	0.19	0.23
C-6	003	Mean	3.16	4.71	6.16	7.98	9.80
		Std	0.01	0.08	0.13	0.01	0.20
	103	Mean	3.15	4.70	6.09	7.91	9.43
		Std	0.01	0.09	0.13	0.02	0.10
C-5	011	Mean	4.13	6.24	8.34	10.64	12.96
		Std	0.04	0.01	0.17	0.03	0.05
	111	Mean	4.20	6.30	8.54	10.76	13.09
		Std	0.02	0.04	0.02	0.07	0.07
C-4	012	Mean	3.60	5.40	7.22	9.08	10.94
		Std	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
	112	Mean	3.55	5.33	7.14	8.96	10.83
		Std	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
C-3	013	Mean	2.75	4.35	5.83	7.27	8.77
		Std	0.11	0.01	0.03	0.02	0.02
	113	Mean	2.72	4.22	5.63	7.09	8.53
		Std	0.07	0.01	0.02	0.02	0.03
C-2	014	Mean	2.44	3.69	4.94	6.19	7.45
		Std	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03
	114	Mean	2.44	3.70	4.95	6.20	7.48
		Std	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02
C-1	015	Mean	2.13	3.18	4.25	5.33	6.41
		Std	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01
	115	Mean	2.15	3.18	4.24	5.32	6.39
		Std	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

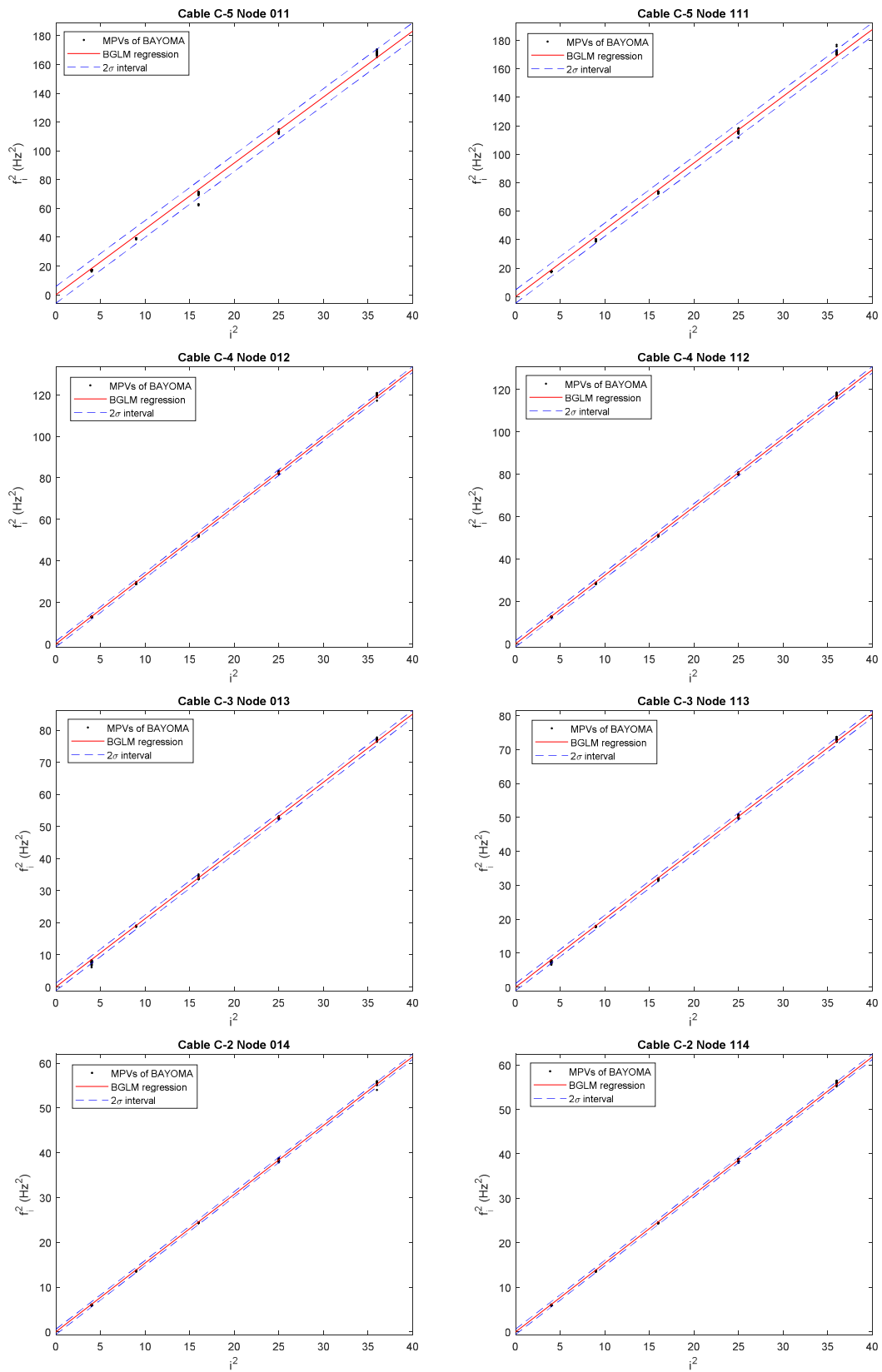


図 4-13 桁部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線： $\pm 2\sigma$ (σ ：標準偏差)），次項に継続。

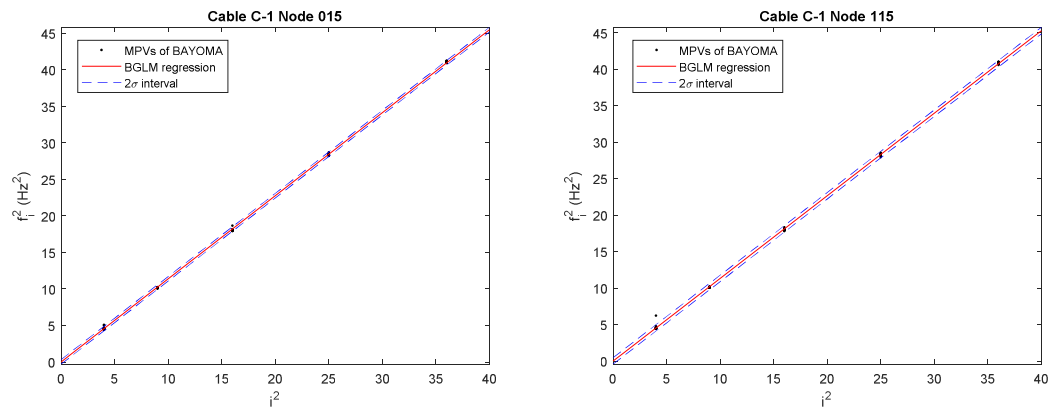


図 4-13 桁部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線： $\pm 2\sigma$ （ σ ：標準偏差）），前項から継続。

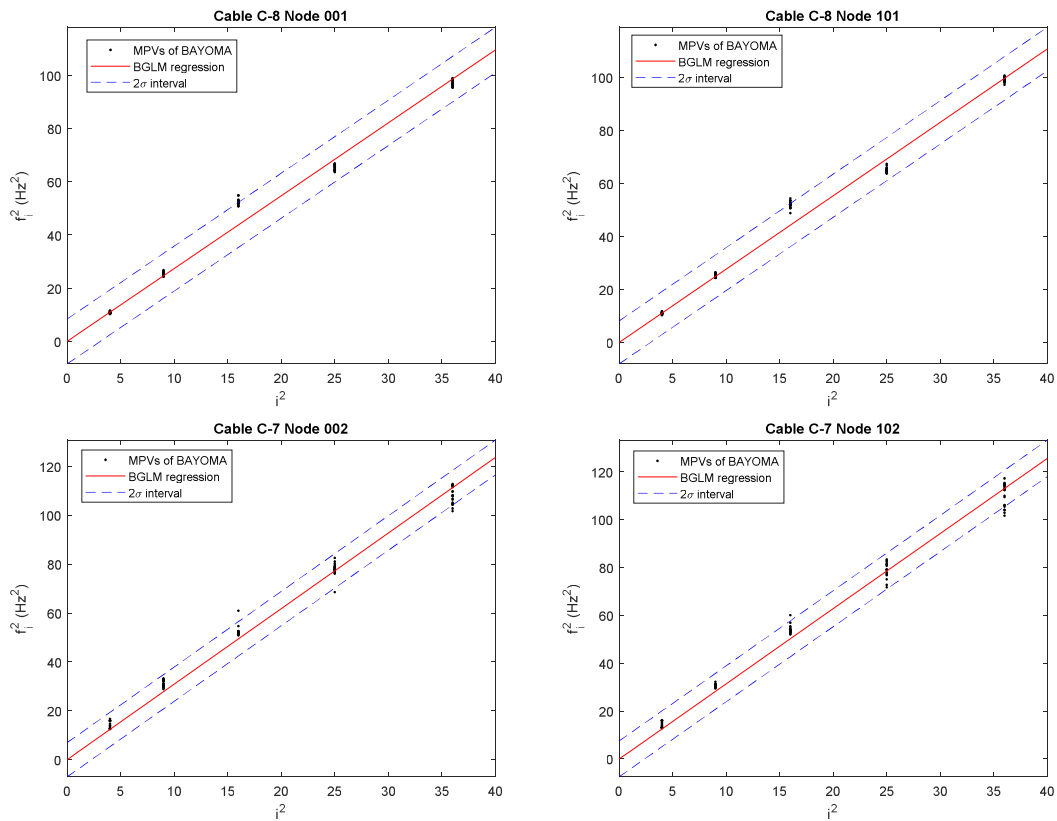


図 4-14 定着部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線： $\pm 2\sigma$ （ σ ：標準偏差）），次項に継続。

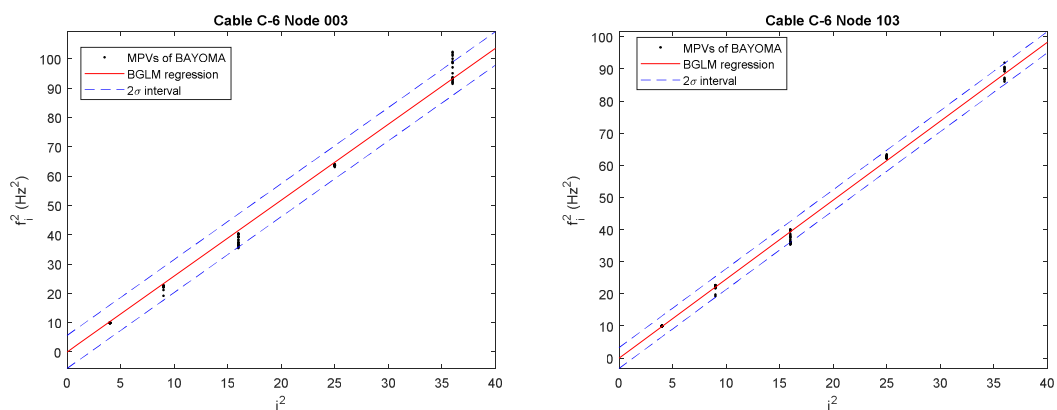


図 4-14 定着部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線： $\pm 2\sigma$ （ σ ：標準偏差）），前項から継続。

表 4-16 ケーブル張力の同定結果

Cable ID	Cable No.	Non-informative prior					
		Posterior Mean (kN)	Posterior Std. (kN)	Std/Mean (%)	2*Std/Mean (%)	3*Std/Mean (%)	Relative error to $T_{\min}$
C-8	001	4374.0	29.5	0.67	1.35	2.02	0.6%
	101	4421.6	28.4	0.64	1.28	1.93	-0.5%
C-7	002	4544.4	23.0	0.51	1.01	1.52	2.9%
	102	4617.7	25.7	0.56	1.11	1.67	1.3%
C-6	003	1502.2	7.4	0.49	0.99	1.48	6.7%
	103	1426.3	4.9	0.34	0.69	1.03	11.4%
C-5	011	1055.7	2.9	0.27	0.55	0.82	22.4%
	111	1081.9	2.4	0.22	0.44	0.67	20.5%
C-4	012	1292.2	1.2	0.09	0.19	0.28	13.3%
	112	1263.8	1.3	0.10	0.21	0.31	15.2%
C-3	013	1292.0	1.5	0.12	0.23	0.35	15.6%
	113	1223.3	1.4	0.11	0.23	0.34	20.0%
C-2	014	2459.5	2.1	0.09	0.17	0.26	14.9%
	114	2474.8	2.1	0.08	0.17	0.25	14.4%
C-1	015	2505.3	1.5	0.06	0.12	0.18	19.7%
	115	2493.6	2.2	0.09	0.18	0.26	20.1%

* C-1～C-5: 桁部ケーブル, C-6～C-8: 定着部ケーブル

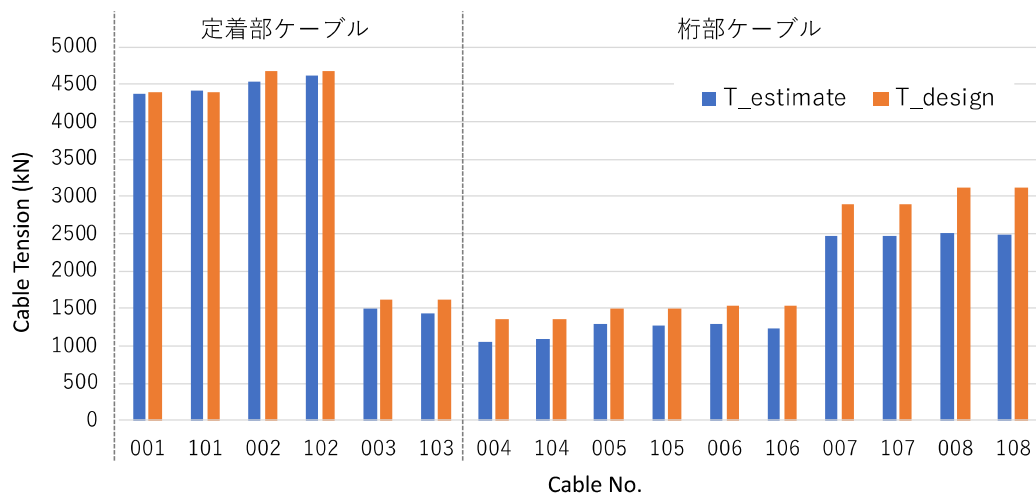


図 4-15 ケーブルの同定張力と設計張力

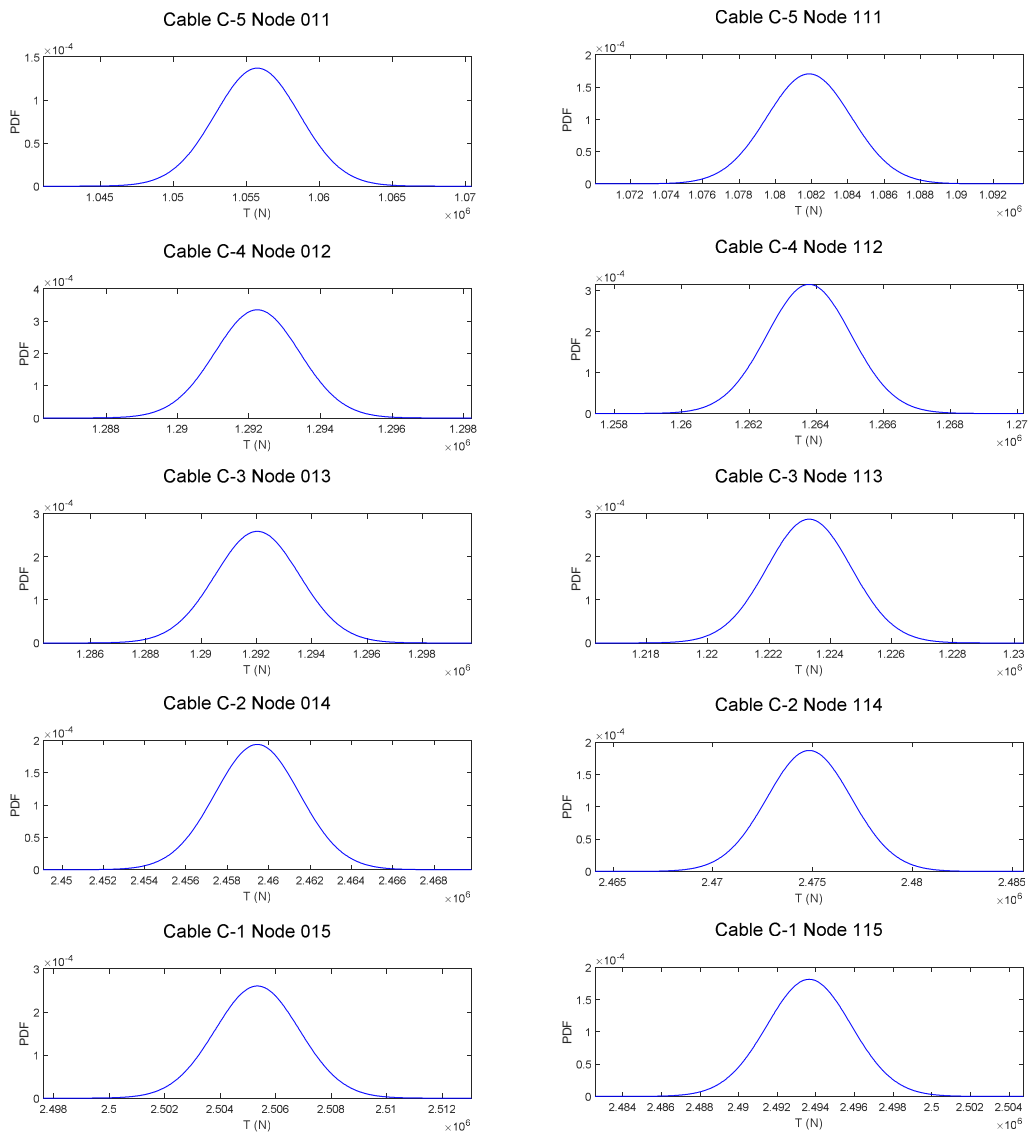


図 4-16 桁部ケーブルの同定張力の確率分布

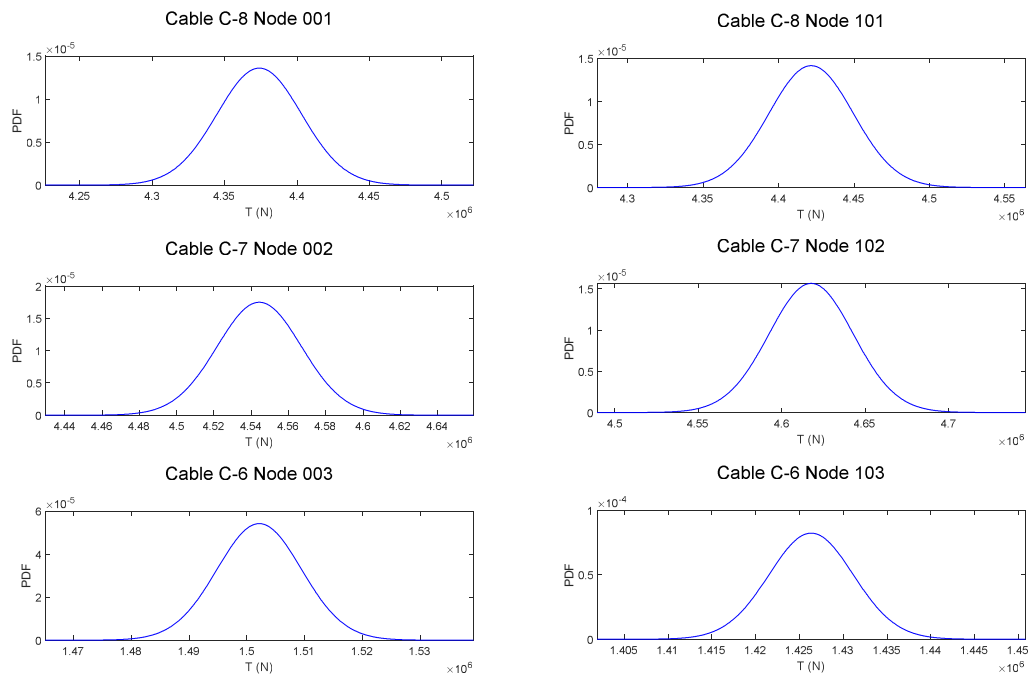


図 4-17 定着部ケーブル同定張力の確率分布

4.5 まとめ

自治体管理の斜張橋を対象に短期および長期モニタリングを実施している。短期モニタリングは、「対象橋梁の基本振動特性の把握」、「常時振動計測によるケーブル振動推定の精度検討」、「特徴量としてケーブル張力と振動数の精度」、「FE モデルのキャリブレーションのためのデータの確保」を目的に、ケーブルの加振実験および常時振動計測を行った。長期モニタリングは、「特徴量の季節変動検討」、「季節変動成分除去による特徴量のばらつき検討」を目的に遠隔計測システムを整備し、モニタリングを実施している。

衝撃加振によるケーブル振動数の推定結果と常時振動によるケーブル振動数の推定結果の比較から、常時振動を利用する場合、ケーブルの 1 次振動数は桁の振動などに影響されやすい傾向があることから、2 次以上の振動数に着目すれば、常時振動によるケーブル振動同定は有効であることが分かった。特に、斜張橋のケーブル振動計測の重要な目的の一つがケーブル張力推定であることを考えると、ケーブル張力推定に安定的で精度のいい振動数を用いる必要があるため、2 次以上の振動数に着目すれば常時振動は有用であると考えられる。また、定着部ケーブルの振動数と振動次数の線形関係のばらつきが、桁部の振動数と振動次数の線形関係のばらつきより大きいことが分かる。桁部は、車両走行による桁の振動がケーブル振動を励起するが、定着部ケーブルの場合、風あるいはタワーの振動により励起されることから桁部のケーブルよりか信号が弱く、同定のばらつきが大きくなると考えられる。

無情報事前分布によるベイズ張力推定を行った結果、桁部のケーブルの同定張力は設計張力の約 80%になっていることが分かる。一方で、定着部ケーブルの同定張力は、設計張力の 99%~89%の張力を示している。特に、桁部のケーブルの同定張力の標準偏差はわずか 1kN~3kN に分布しており、同定における不確定性は少ない結果である。定着部ケーブルの同定張力の標準偏差は 5kN~30kN に分布しており、桁部ケーブルの同定張力に比べてばらつきが大きい結果となった。すなわち、季節変動がないと仮定すると、張力変動による異常検知の可能性は定着部ケーブルより桁部ケーブルの方が高いことを表す。ただし、実際には季節変動は無視できないため、対象橋の今後の長期モニタリングデータから季節変動まで考慮した常時振動による推定張力を用いた異常検知の可能性について検討を行う必要がある。これについては令和 3 年度に継続検討を行う予定である。

第5章 モニタリングデータと目視点検データとの相関検討

5.1 概要

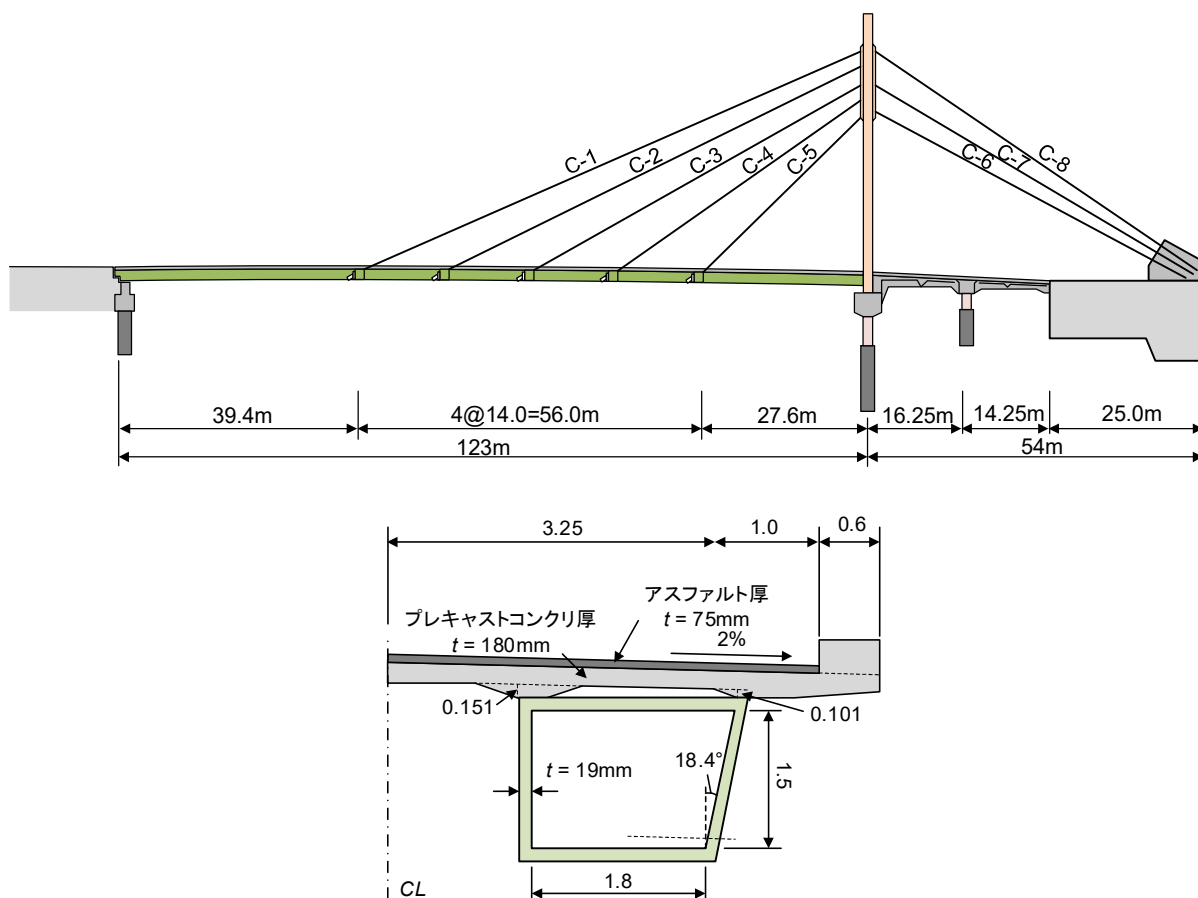
斜張橋の振動実験から、同定される斜張橋のケーブル張力による損傷検知の可能性を検討するために、ケーブルの減肉を模擬した対象橋梁の有限要素解析を行い、解析による張力変化量と同定張力のばらつきを比較し、同定される斜張橋のケーブル張力による損傷検知の可能性を検討する。対象橋梁、第4章のモニタリング対象であるカラウコ橋である。比較対象の同定張力も第4章の結果を用いる。

検討にあたり、まず、設計図面に基づきモデルを構築する。その後、加速度センサを用いた車両走行実験を実施したため、その加速度応答から同定した振動特性と比較することで、基本モデルの構築を実施する。その後、上記、ケーブル張力の原因究明のために、死荷重解析を行う。また、同様のモデルを用いて、ケーブル損傷時の橋梁応答の変化についても検討を実施する。

5.2 解析モデル

5.2.1 対象橋梁

図に示すカラウコ橋は、1990年に竣工されたバックアンカー一体式の単径間鋼箱桁斜張橋である。橋長：124.1m、支間長：123m、有効幅員：8.5mである。



5.2.2 解析モデル

本解析においては、汎用有限要素ソフトウェア DIANA 10.4 を用いて検討を行う。使用要素は、ケーブル、主塔・主桁・横桁ははり要素、床版はシェル要素でモデル化を行った。本対象橋梁にはキャンバーがついており、これについては設計図面に基づいて、同形状を再現することでモデル化を実施する。拘束条件は、ケーブルー主塔間・ケーブルー横桁間は Pin 接合、主桁ー床版間は節点共有とした。また、境界条件は、図に示すように左岸側が移動支承、右岸側が回転支承、主塔の下部の拘束は完全固定、アンカレッジ側のケーブル定着部は Pin 接合とした。

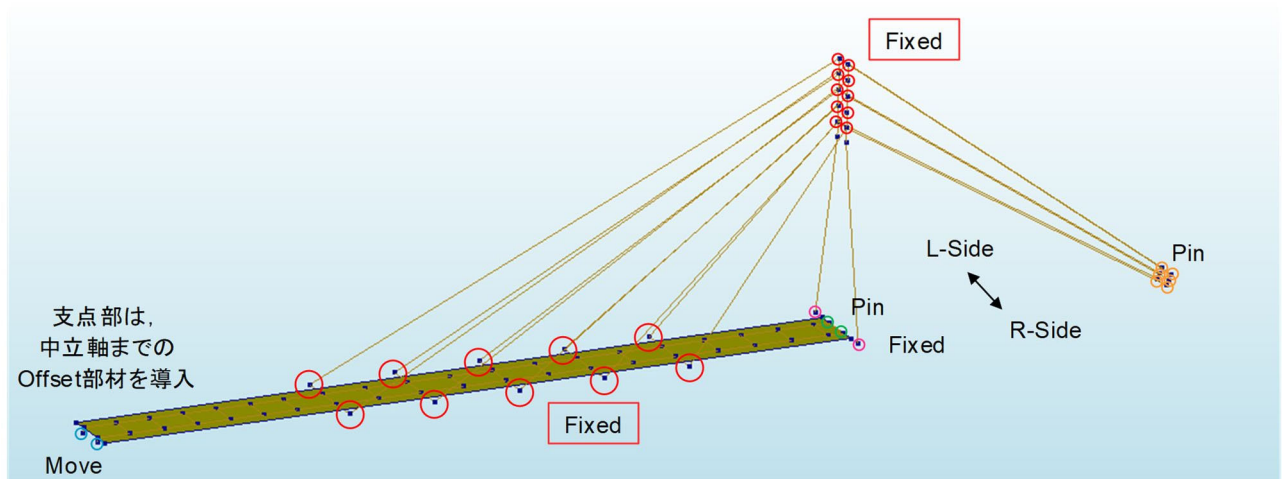


図 5.2 解析モデル

弾性係数は、鋼材を 200GPa、ケーブルを 115GPa、コンクリートを 24GPa とし、比重はそれぞれ、9.5, 8.0, 2.4 とした。ここで、鋼材の比重が大きい理由は、箱桁のリブ等の補剛材の有する断面を対象に単位長さあたりの重量を算出し、それを実際に与えた以下のような箱桁断面の断面積で除したためである。

また、オフセット部材は、弾性体としてモデル化し、剛性を上げることにより、剛体要素に近い挙動をするように設定した。

ケーブルの張力は、要素プレストレストとして、トラス要素に与えた。その際の張力は、表に示す設計時の導入量力を C1-C8 まで、それぞれ 920kN, 210kN, -50kN, -80kN, -810kN, 110kN, 790kN, 300kN とした。

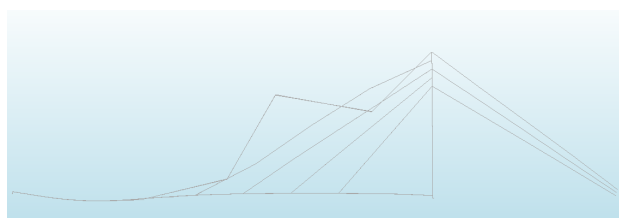
固有振動解析によるモデルの選定後、それに対して死荷重解析を実施し、死荷重によりケーブルに加わる張力を検討した。

5.3 解析結果

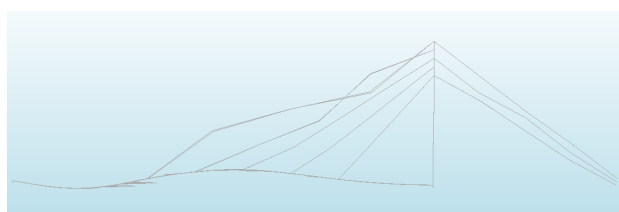
5.3.1 固有振動解析

固有振動解析結果を表，図に示す．表には，固有振動数，図は橋梁全体のモード形状を示す．本検討にあたり，まず，鉛直曲げモードを重要な振動モードとして，曲げ3次までの振動モードまで着目する．

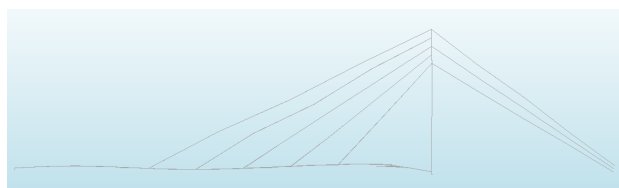
表から読み取れるように，固有振動解析における曲げ1次，曲げ2次モードの振動数は同定結果よりも18.4%，8%程度大きいことが分かる．一方，曲げ3次モードの振動数は，24%程度小さいことが分かる．低次の曲げ振動数が大きくなる要因として，床版と鋼箱桁を完全合成として断面2次モーメントを計算しているため，解析モデルの剛性が実際よりも高くなっていることが考えられる．また，質量については，図面の部材寸法から重量を算出し，それと一致するように解析モデルに与えたが，ボルトや高欄などの重量は無視しているため，実際の構造物よりも軽量となっていることが挙げられる．



(a) 曲げ1次



(b) 曲げ2次



(c) 曲げ3次

図 5.3 橋梁全体モード図

表 5.1 固有振動数 (Unit: Hz)

	FEM	同定結果	差異 (%)
曲げ1次	1.03	0.84	18.4
曲げ2次	1.55	1.43	7.7
曲げ3次	1.98	2.45	-23.7

5.3.2 死荷重解析

前述した解析モデルに対して死荷重解析を行った結果を表 5.2 と図 5.4 に示す。

表には、各ケーブル張力（導入時，設計時の死荷重による張力，現地観測における同定結果，FEM による死荷重解析）を示す。また，図 5.4 には，設計時および FEM による主桁部材の曲げモーメント図を示す。

図より，解析結果と設計時の曲げモーメントが概ね同様の傾向があることがわかる。A2 支点部の曲げモーメントが異なる理由として，設計図面では主桁端部から水平方向に支承が設置されていたため，本解析モデルにあたり，図に示すように，主桁部材にオフセット部材を剛結し，そのオフセット部材の端部から回転支承をの回転中心まで剛体とし，その先端を回転拘束することで境界条件を与えた。そのため，主桁 A2 点においては，曲げモーメントが発生する構造となったためである。

以上，固有振動数および死荷重解析の曲げモーメント図が概ね一致したことから，以後の検討では，本モデルを用いて検討を行う。

表 5.2 ケーブル張力 (Unit: ton)

	設計時		現地計測	設計値	FEM	設計値	推定値
	導入張力	死荷重張力	推定結果	差異 (%)	死荷重	差異 (%)	差異 (%)
C-1	92	315	250	-26.0	294	-7.1	15.0
C-2	21	291	246	-18.3	263	-10.6	6.5
C-3	-5	153	125	-22.4	112	-36.6	-11.6
C-4	-8	151	120	-25.8	124	-21.8	3.2
C-5	-81	142	106	-34.0	138	-2.9	23.2
C-6	11	161	145	-11.0	68	-136.8	-113.2
C-7	79	468	450	-4.0	411	-13.9	-9.5
C-8	30	440	440	0.0	441	0.2	0.2

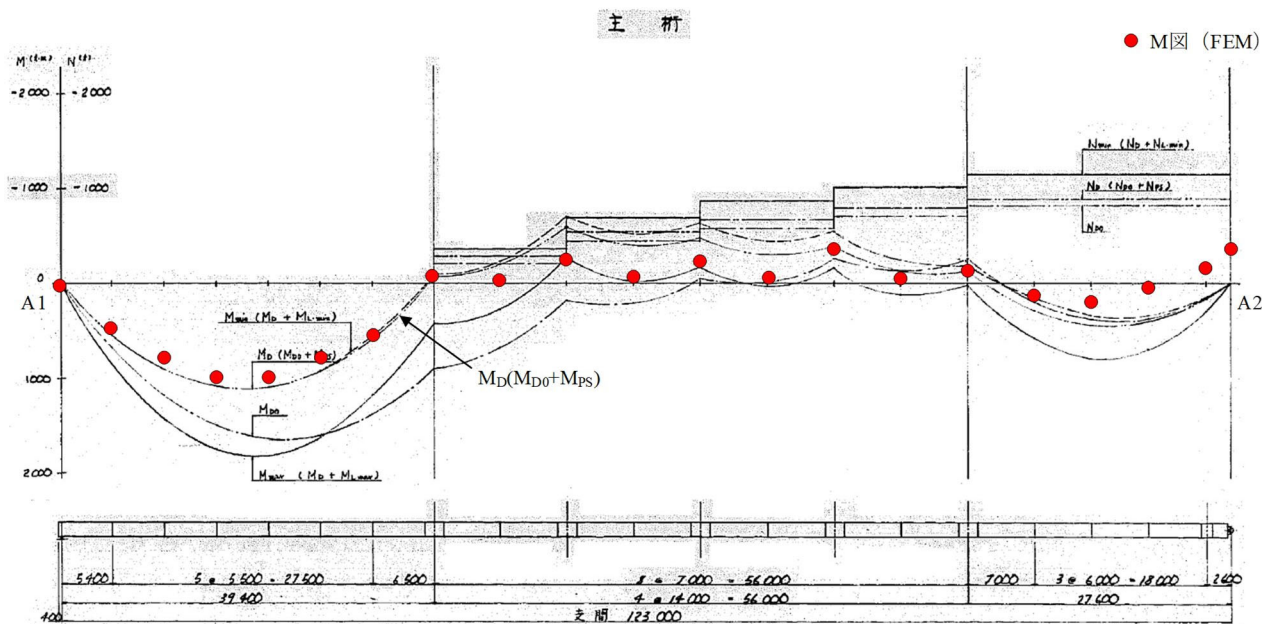


図 5.4 死荷重解析における主桁断面解析モデル

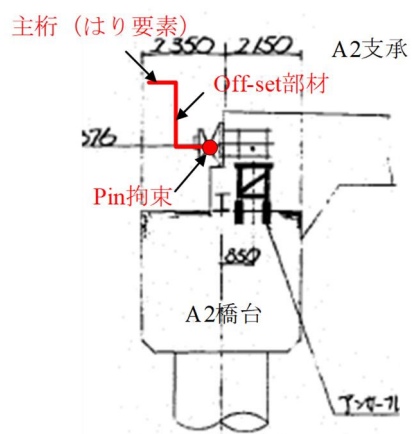


図 5.5 A2 支承部の詳細および FE モデリング

5.4 損傷解析

5.4.1 解析概要

本章では、各ケーブルに対して模擬損傷を与え、固有振動解析および死荷重解析を行い、損傷による橋梁の固有振動数、ケーブル張力の変化を検討する。

模擬損傷は、ケーブルの直径に対して、一律に 5%、10%、20%、30%、40%減肉させる。損傷を与えるケーブルは、図に示す L 側の各ケーブルとして、損傷によるケーブル張力の変化を表 5.3~表 5.10、固有振動数の変化を表 5.11~5.18 に示す。

表 5.3 L-Side の C-1 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

L-Side

	設計値	推定 結果	FEM					
			INT	5%	10%	20%	30%	40%
C-1	315	250	295	283	269	240	208	173
C-2	291	246	265	271	277	290	305	322
C-3	153	125	112	113	113	115	117	119
C-4	151	120	124	124	125	125	125	125
C-5	142	106	138	138	138	138	138	138
C-6	161	145	68	68	68	68	68	67
C-7	468	450	412	411	409	406	403	399
C-8	440	440	442	439	437	431	426	419

R-Side

	設計値	推定 結果	FEM					
			INT	5%	10%	20%	30%	40%
C-1	315	250	315	318	321	327	334	344
C-2	291	246	264	265	266	268	271	274
C-3	153	125	108	108	107	106	105	103
C-4	151	120	121	121	121	119	118	116
C-5	142	106	132	132	132	131	130	129
C-6	161	145	69	69	69	69	69	69
C-7	468	450	415	413	412	412	410	409
C-8	440	440	448	442	440	438	435	433

表 5.4 L-Side の C-2 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

L-Side

	設計値	推定 結果	FEM					
			INT	5%	10%	20%	30%	40%
C-1	315	250	295	300	305	317	330	344
C-2	291	246	265	254	242	216	187	155
C-3	153	125	112	115	117	123	130	138
C-4	151	120	124	125	126	129	132	135
C-5	142	106	138	138	138	138	139	139
C-6	161	145	68	68	68	68	68	68
C-7	468	450	412	412	411	419	408	407
C-8	440	440	442	442	440	439	438	436

R-Side

	設計値	推定 結果	FEM					
			INT	5%	10%	20%	30%	40%
C-1	315	250	315	315	316	317	319	320
C-2	291	246	264	266	267	270	273	277
C-3	153	125	108	109	109	110	112	113
C-4	151	120	121	122	122	121	121	120
C-5	142	106	132	132	131	130	129	127
C-6	161	145	69	69	69	69	69	69
C-7	468	450	415	413	413	413	413	413
C-8	440	440	448	443	443	443	443	442

表 5.5 L-Side の C-3 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	296	297	297	300	301
	C-2	291	246	265	268	271	278	285	291
	C-3	153	125	112	105	98	83	68	53
	C-4	151	120	124	126	129	133	137	142
	C-5	142	106	138	138	139	140	141	143
	C-6	161	145	68	68	68	68	68	68
	C-7	468	450	412	412	412	412	412	412
	C-8	440	440	442	442	442	442	442	442
R-Side	C-1	315	250	315	314	314	314	314	312
	C-2	291	246	264	263	265	265	266	267
	C-3	153	125	108	109	110	111	112	113
	C-4	151	120	121	122	123	124	125	126
	C-5	142	106	132	132	132	131	131	130
	C-6	161	145	69	69	69	69	69	69
	C-7	468	450	415	415	415	414	414	414
	C-8	440	440	448	443	443	443	444	444

表 5.6 L-Side の C-4 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	296	296	296	296	296
	C-2	291	246	265	267	268	270	273	276
	C-3	153	125	112	114	116	121	125	130
	C-4	151	120	124	118	111	96	80	65
	C-5	142	106	138	140	143	149	155	163
	C-6	161	145	68	68	68	68	68	68
	C-7	468	450	412	412	412	412	412	412
	C-8	440	440	442	442	442	442	442	442
R-Side	C-1	315	250	315	315	314	314	312	311
	C-2	291	246	264	264	264	264	263	263
	C-3	153	125	108	109	109	110	110	11
	C-4	151	120	121	123	124	125	127	128
	C-5	142	106	132	133	133	134	135	136
	C-6	161	145	69	69	69	69	69	69
	C-7	468	450	415	415	415	415	415	417
	C-8	440	440	448	443	444	444	444	444

表 5.7 L-Side の C-5 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	295	295	295	296	296
	C-2	291	246	265	265	266	266	267	267
	C-3	153	125	112	113	114	115	116	118
	C-4	151	120	124	127	130	136	142	151
	C-5	142	106	138	133	128	117	103	88
	C-6	161	145	68	68	68	68	68	68
	C-7	468	450	412	412	412	412	412	412
	C-8	440	440	442	442	442	442	442	442
R-Side	C-1	315	250	315	315	315	315	314	313
	C-2	291	246	264	264	264	264	261	260
	C-3	153	125	108	108	108	108	106	106
	C-4	151	120	121	122	122	123	123	124
	C-5	142	106	132	134	135	139	143	148
	C-6	161	145	69	69	69	69	69	69
	C-7	468	450	415	414	414	414	414	414
	C-8	440	440	448	444	444	444	444	444

表 5.8 L-Side の C-6 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	295	295	295	295	295
	C-2	291	246	265	265	265	265	265	265
	C-3	153	125	112	112	112	112	112	112
	C-4	151	120	124	124	124	124	124	124
	C-5	142	106	138	138	138	138	138	138
	C-6	161	145	68	62	56	45	34	25
	C-7	468	450	412	414	416	419	422	425
	C-8	440	440	442	443	444	447	449	450
R-Side	C-1	315	250	315	315	315	315	315	315
	C-2	291	246	264	264	264	264	264	264
	C-3	153	125	108	108	108	108	108	108
	C-4	151	120	121	122	122	122	122	122
	C-5	142	106	132	132	132	132	132	132
	C-6	161	145	69	69	69	70	70	71
	C-7	468	450	415	415	415	417	419	420
	C-8	440	440	448	444	444	445	446	447

表 5.9 L-Side の C-7 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	296	295	295	295	295
	C-2	291	246	265	265	265	265	265	265
	C-3	153	125	112	112	112	112	112	112
	C-4	151	120	124	124	124	124	124	124
	C-5	142	106	138	138	138	138	138	138
	C-6	161	145	68	70	73	77	81	84
	C-7	468	450	412	382	352	293	235	180
	C-8	440	440	442	453	464	486	518	527
R-Side	C-1	315	250	315	314	315	315	315	315
	C-2	291	246	264	264	264	264	264	264
	C-3	153	125	108	108	108	108	108	108
	C-4	151	120	121	121	121	121	121	121
	C-5	142	106	132	132	132	132	132	132
	C-6	161	145	68	70	71	73	76	78
	C-7	468	450	412	419	426	440	453	465
	C-8	440	440	442	449	456	469	482	494

表 5.10 L-Side の C-7 ケーブル損傷時の各ケーブルの張力 (Unit: tf)

		設計値	推定 結果	FEM					
				INT	5%	10%	20%	30%	40%
L-Side	C-1	315	250	295	295	295	295	294	290
	C-2	291	246	265	265	265	265	265	265
	C-3	153	125	112	112	112	112	112	112
	C-4	151	120	124	124	124	124	124	124
	C-5	142	106	138	138	138	138	138	138
	C-6	161	145	68	70	71	74	77	80
	C-7	468	450	412	424	437	461	486	510
	C-8	440	440	442	413	384	325	264	206
R-Side	C-1	315	250	315	315	315	315	314	313
	C-2	291	246	264	264	264	264	264	264
	C-3	153	125	108	108	108	108	108	108
	C-4	151	120	121	121	121	121	121	121
	C-5	142	106	132	132	132	132	132	132
	C-6	161	145	69	69	70	71	72	73
	C-7	468	450	415	420	428	442	456	470
	C-8	440	440	448	454	464	486	507	529

表 5.11 L-Side の C-1 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.023	1.017	1.003	0.990	0.970
曲げ2次	1.547	1.554	1.547	1.546	1.545	1.544
曲げ3次	1.984	1.984	1.984	1.984	1.984	1.983

表 5.12 L-Side の C-2 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.027	1.026	1.024	1.020	1.021
曲げ2次	1.547	1.544	1.542	1.500	1.519	1.512
曲げ3次	1.984	1.975	1.976	1.975	1.972	1.965

表 5.13 L-Side の C-3 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028
曲げ2次	1.547	1.541	1.535	1.523	1.511	1.500
曲げ3次	1.984	1.984	1.984	1.984	1.984	1.983

表 5.14 L-Side の C-4 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029
曲げ2次	1.547	1.542	1.537	1.526	1.514	1.502
曲げ3次	1.984	1.982	1.981	1.977	1.974	1.971

表 5.15 L-Side の C-5 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029
曲げ2次	1.547	1.545	1.544	1.542	1.537	1.531
曲げ3次	1.984	1.968	1.955	1.946	1.830	1.779

表 5.16 L-Side の C-6 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028
曲げ2次	1.547	1.546	1.546	1.545	1.544	1.543
曲げ3次	1.984	1.984	1.984	1.983	1.983	1.983

表 5.17 L-Side の C-7 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.028	1.027	1.024	1.022	1.020
曲げ2次	1.547	1.544	1.542	1.538	1.534	1.53
曲げ3次	1.984	1.984	1.984	1.983	1.982	1.982

表 5.18 L-Side の C-8 ケーブル損傷時の橋梁の固有振動数の変化 (Unit: Hz)

	INT	5%	10%	20%	30%	40%
曲げ1次	1.027	1.027	1.025	1.021	1.017	1.013
曲げ2次	1.547	1.544	1.543	1.540	1.536	1.533
曲げ3次	1.984	1.984	1.984	1.984	1.984	1.984

5.4.2 解析結果

損傷によるケーブル張力の変動に着目する．すべてのケースにおいて、各ケーブルに対して、損傷を導入すると、その損傷ケーブルの張力は、低下することがわかる．そして、腐食量が大きくなるにつれて、その低下率は大きくなる．

一方、損傷ケーブルの張力が低下したことにより、周辺のケーブルに分配され、それらのケーブル張力は増加し、腐食損傷に近いケーブルの方が、分担率が大きいことがわかる．この張力の再分配は、ケーブル本数が少ないアンカレッジ側の方が大きくなっている．また、橋梁側の上側のケーブルが腐食した際には、アンカレッジ側のケーブル張力が変動するが、アンカレッジ側のケーブルが腐食した際には、橋梁側のケーブルに与える影響は小さい結果となった．振動モニタリングによる推定張力のばらつきを考慮したケーブル減肉（5%）によるケーブル張力変化検知の可能性が明らかになった．特に、同定張力による損傷ケーブルと隣接ケーブルの張力低減の検知可能性が高い結果となった．

固有振動数に着目すると、橋梁側の中央付近に定着しているケーブルが腐食した際には、曲げ1次モードの振動数が変化することがわかる．一方で、橋梁側の中央から離れた位置に定着しているケーブルが腐食した際には、曲げ2次や曲げ3次モードの振動数が変化している．これは、卓越する振動モードの腹の部分にケーブルが設置されており、その位置の剛性が変化するため、橋梁の固有振動数に影響をと考えられる．また、発生張力が大きいケーブルに損傷が入るほど、固有振動数に及ぼす影響が大きいことがわかる．

ただし、解析有限要素モデルによる振動特性が計測振動特性と少し異なることから、モデルの改良やモデルアップデートを行う必要がある．対象橋梁の元の設計資料を探しており、それによってモデルの改良を行う予定である．また、諸番の事情によって対象橋梁の長期モニタリングの実施が12月下旬になり遅れたこともあり、気温が上昇する5月以降の計測データによる張力同定を行い、季節変動によるケーブル張力の変動とその除去による同定張力のばらつきも考慮した上で、同定張力による損傷検知可能性について最終確認を行う予定である．

第 6 章 研究会議事録

新都市社会技術融合創造研究会
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
第1回会議議事録（案）

日時：令和2年8月27日（木）13：30～15：30

場所：京都大学桂キャンパス C1-2 棟 会議室（315）、および Zoom による Web 会議

出席者：金、八木、玉越、五井、河合、坂本、上原、高祖、石鍋、竹内、遠山、榊、矢島、丸山、小野
（記録）（敬称略、順不同）

配布資料：1-0 議事次第

- 1-1 昨年度研究内容の中間評価結果の報告
- 1-2 令和2年度研究会メンバーの報告
- 1-3 今年度の研究内容と目標及びスケジュール
- 1-4 実橋梁のモニタリングについて議論（斜張橋：カラウコ大橋、吊り橋：自治体管理橋）
- 1-5 WG と役割分担
- 1-6 その他

1. 昨年度研究内容の中間評価結果の報告（資料 1-1）

（金教授）

令和元年度の本プロジェクトの中間評価が公表され A 判定であった。昨年度は予備検討的なものがメインであり、本年は、モニタリング等を実施し具体的な維持管理手法の検討を実施していく予定である。

2. 令和2年度研究会メンバーの報告（資料 1-2）

（小野）

資料1-2に示しように、本年度より大阪市立大学大学院林助教がメンバーとして参画する予定である。

また、本年度、長期モニタリングを予定している国道29号カラウコ大橋の管理者である姫路河川国道事務所石鍋副所長、竹内管理二課長も参画予定である。

3. 今年度の研究内容と目標及びスケジュール（資料 1-3）

（金教授）

今年度の研究内容は、以下のとおりである。

- （1）定期点検の限界を補足できる条件の検討
- （2）長期計測における季節変動成分の除去法の構築
- （3）モニタリングデータと目視点検データとの相関検討
- （4）自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施

今年度は、実橋梁のモニタリングの実施を予定している。その中で、まず、姫路河川国道事務所管理の国道29号カラウコ大橋を対象に長期モニタリングを実施する予定である。それに加え、自治体管理のケーブル構造特殊橋のモニタリングの実施を考えている。長期モニタリングにおいては、季節変動成分の除去法の有用性を検討し、長期計測における季節変動成分除去の構築を目指す。

（玉越氏）

季節変動成分は、無理をして除去しなくてもよい。変動成分は一定であることを示すことができれば、その影響を考慮し検討すれば良いだけである。

また、国総研で実施している共同研究においても、カラウコ大橋を対象として用いる予定である。なお、点検までは実施しないが。

(河合)

本省案件で、メンテナンスセンター主導にて行う無線センサーの有用性に関する検討においても、同様にカラウコ大橋を対象とする予定である。なお、この検討で得られるデータについても本研究会で利用することは可能であるので、今後、メンテナンスセンターと調整すると良い。

(金教授)

本年度の研究内容における自治管理体吊り橋のモニタリングは、カラウコ大橋のモニタリング結果も踏まえた上で、来年度実施する予定とする。

また、カラウコ大橋のモニタリング計画は現在検討中である。主に加速度を用いた計測を行う予定である。予定として、10月にはセンサー設置を行い1年間計測する予定である。

－ 以 上 －

議事録		作 成 日	令和 2 年 10 月 1 日(木)
		作 成 者	小野 和行
会議名	カラウコ大橋の現地視察(2)		
開催日時	令和 2 年 9 月 30 日(水) 13:00~16:00	開催場所	兵庫県宍粟市, 山崎維持出張所
参加者 (敬称略)	金哲佑(京都大学) 玉越隆史(京都大学) 小野和行(エイト) 榊一平(神鋼) 五井良直(京都大学)		
議 題	1 研究会のモニタリング及び本省関連のモニタリングに関する概要説明 2 現地における確認事項等 3 4 5		山崎維持出張所 兵庫県宍粟市

内 容	期限/担当
■研究会のモニタリング及び本省関連のモニタリングに関する現地確認 1. 研究会のモニタリング及び本省関連のモニタリングに関する概要説明 ○本省関連のモニタリングに関して ・メンテナンスセンター発注によるモニタリング技術の性能検証に関わる計測を実施するものである。 ・日本工営が計測を実施、センサー等はサンシステムサプライのシステムを使用する。 ・計測は、桁の加速度をメインとして、温度、湿度、風向も併せて計測する。 ・10月上旬でセンサー設置、載荷試験、その後、10月中旬から来年1月下旬までの間、計測を行う予定である。 ・なお、本計測で得られたデータは研究会での利用も可能である。さらに、必要であれば2月以降、こちらのセンサーを研究会に引き継いでも問題ない。 →12月までのデータを研究会に提供願うことを了承いただく。 ○研究会のモニタリングに関して ・橋梁全体系の振動特性把握を目的として短期及びケーブルをメインとした長期モニタリングを実施予定。 ・現状の計画は、案であり、事前解析により最終決定する予定である。 ・また、計測システム等のカスタマイズ等の関係から、計測開始は11月上旬になる予定である。 ・短期計測に関しての車両は、凍結防止剤散布車を用いることでよい(姫路河川国道事務所に調整)。 2. 現地における確認事項等 ・センサー設置は、研究会独自で行うこととなる。 ・センサー設置に際して、橋梁点検車を用いる必要がある(交通誘導員が必要)。 ・また、作業時には道路使用許可を取る必要がある。使用許可は個別に取得すること。なお、作業予定日を姫路河川国道事務所に連絡のこと。 ・長期モニタリングに際して、センサーの電源であるが、鳥取側に設置されている照明用の受電設備を利用してもよい。 →先行でセンサー設置予定であるサンシステムサプライにより、分電盤からの配線を行ってもらう。 ・また、アンカレッジ近傍の道路照明からの受電についても了解を得る。 ・なお、現況の電気設備の詳細な仕様等については、出張所の方で確認頂く。	橋梁点検車、センサー設置にかんする人員→金先生が段取り 道路使用許可及び交通誘導員→小野が段取り

新都市社会技術融合創造研究会
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
第3回会議議事録（案）

日時：令和3年1月13日（水）13：30～15：30

場所：ZoomによるWeb会議

出席者：金、八木、玉越、五井、古川、吉津、松本、増田、坂本、上原、高祖、遠山、榊、矢島、小野
（記録）（敬称略、順不同）

配布資料：3-0 議事次第

3-1 メンバーリスト

3-2 カラウコ大橋モニタリングに関する資料

3-3 本年度報告書項目（案）等

3-4 来年度スケジュール

3-5 参考資料

1. 研究会メンバー紹介（資料3-1）

（金教授）

研究会のメンバーとして、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 古川准教授が加わることを報告した。今後、ケーブルのモニタリング結果、及び解析等において御意見等を頂く予定である。

2. 本年度報告書項目（案）等の説明（資料3-3）

（小野）

資料3-3に示しように、本年度研究項目である4項目に関して検討結果を取りまとめ報告書とする予定である。

- ①定期点検の限界を補足できる条件の検討
- ②特徴量目視点検データとの相関検討
- ③長期計測における季節変動分析の除去法の構築
- ④モニタリングによるケーブルと定着部の腐食・破断検知法について検討

なお、上記うち、①について資料3-5に示すように、昨年度入手した近畿地整管内の橋梁定期点検結果を参考に、吊り橋の損傷分類、及び相関分析を行った。

検討では、吊り橋の構造と着目すべき部材を抽出、橋梁定期点検調書が確認できる127橋について損傷状況等を整理した。なお、対象となる吊り橋の主な構造諸元も併せて整理した。

対象吊り橋の構造諸元は下記のとおりである。

- ・ほとんどの吊り橋は、主塔が設置されており、主塔の損傷は橋全体の致命的な損傷に繋がる恐れがある。
- ・主ケーブルの防食仕様は、写真で確認できる範囲では、ほとんどの吊り橋でない（既に防食仕様が機能していない？）状況にある。架橋年次の新しい一部の吊り橋では、防食対策が施されている。
- ・主ケーブルの定着は、写真から確認できる範囲では、トンネル定着が多い。
- ・ハンガーケーブルは、ケーブル類が多く、確認できる範囲では60%程度の吊り橋で用いられている。

- ・ハンガー定着構造は、クリップタイプが多く、確認できる範囲では70程度の吊り橋で用いられている。なお、奈良県（十津川村）の吊り橋は、そのほとんどがクリップタイプの定着であるのに対し、和歌山県（田辺市・古座川町）の吊り橋は、ねじ/カップラータイプである。

さらに、確認されている損傷は下記のとおりである。

- ・ほとんどの吊り橋は、架橋後、50年以上経過し、90年近いものも6橋あり損傷が顕著となっている。
- ・特に鋼部材、及びケーブル類については、対象橋梁のほとんどで腐食が顕著となっている。
- ・ケーブル類では、一部の吊り橋で部分的な破断が確認されている。

以上、吊り橋として着目すべき部材に対して、橋梁定期点検結果をもとに損傷状況を整理したが、主たる損傷は“鋼部材の腐食”であり、橋梁規模、各種形式による損傷部位、度合い等の相関性を確認することは困難である。

なお、その他の項目に関しては、現在、検討中であり今後、報告書として取りまとめ各委員に確認頂くようにする予定である。

3. カラウコ大橋モニタリング状況の説明（資料3-2）

（金教授）

昨年、姫路河川国道事務所管理の国道29号カラウコ大橋（斜張橋）のモニタリングを実施した。実施工程は下記のとおりである。

- ・短期モニタリング：11月10日～11月11日
- ・長期モニタリング：12月26日開始

設置センサ等は、資料3-2に示すとおりである。なお、短期モニタリング結果の一部を整理しているので、本日報告する。

ケーブル強制加振によるケーブルの振動数を整理した。ケーブル定着部及び主桁の振動特性がある程度把握できた。また、常時振動計測結果から橋梁全体の振動モードを把握することができた。

また、弦理論によりケーブル緊張力を試算中である。これにより、現状のケーブル緊張力の把握がある程度可能である。

現在、設計図書を参考してカラウコ大橋の解析モデルを作成中である。今後、短期モニタリング結果を用いて解析モデルのアップデートを行い、疑似損傷を与えた場合の振動モードの変化等による分析を行っていく予定である。

また、画像解析による振動計測を目的とした動画撮影も併せて実施した。振動数毎の画像解析結果を示すが、ケーブル及び主桁等の振動モードが視覚的に確認でき、モニタリング手法の1つとして適用が考えられる。今回は、4Kカメラでの撮影であるが、今後、画像解析によるモニタリング実施に際して、使用機材等の検討も必要ある。

以上、短期モニタリング結果等の現状での検討結果を報告したが、今後、今年度の成果として、先に示した報告書項目に合わせ検討、及び取りまとめを行っていく予定である。

また、来年度以降の研究方針として下記の内容を考えている。

本年度検討の振動モニタリングから同定される特徴量の損傷への感度について引き続き検討を行うとともに、検討対象を吊り橋に拡張する。また、吊り橋の振動特性から同定した特徴量の損傷に対する感度解析を行い、吊り橋の異常検知に活用できる特徴量の提案を目指す。具体的には、下記のとおりである。

・実橋へのモニタリングについて

吊り橋：モニタリング対象橋を選定し、短期モニタリングの試行予定である。画像およびスマートフォン内蔵の加速度センサによる主ケーブルとハンガーケーブルの振動モニタリングの可能性を検討する。

カラウコ大橋：長期モニタリングデータの分析と季節変動成分除去による着目特徴量のばらつきを確認し、ばらつきを考慮した損傷検知可能な損傷度を確認する。

・吊り形式橋梁の損傷に対する感度解析について

実態調査に基づき、吊り形式橋梁の損傷シナリオを設定し感度解析を行う予定である。また、モデル作成には設計図書とモニタリングの結果を反映する。

・モニタリング支援システムの検討について

市町村のモニタリングを支援できる仕組みを検討する。例えば、現在構築を行なっている振動計測支援システムを活かし、市町村の橋梁管理者がスマートフォンでケーブルの振動を計測しデータ処理できる提案を行う。

・点検のための資料作成について

以上の研究成果をまとめ、自治体の吊り形式橋梁点検のための資料作成を目指す。

(八木教授)

今回のモニタリング結果である振動特性を、本来の研究目的にどのように対応していくのか。

(金教授)

今後、振動特性を用いたモニタリング手法を検討していく予定である。また、ケーブル緊張力計測も同様である。さらに、今回紹介した画像での処理により視覚にて確認できる分かり易い説明資料の作成も目指していく予定である。なお、今回は4kカメラを使用しているが画像解析を行う上では十分であり、8kのiPhoneであれば十分対応できると考えている。

(玉越氏)

カラウコ大橋のモニタリング結果は、あくまでも1例に過ぎない。カラウコ大橋は、一般的な桁橋とは異なるので、モニタリングによる損傷把握方法を検討することは可能である。しかし、研究会の本来の目的である吊り橋に対して、どのように今回のモニタリング結果を活かしていくのか。なお、モニタリング等によるケーブル系橋梁の維持管理が、どこまでが可能で、これ以上は困難であるというラインを出すべきではないか。その点を踏まえた上で、吊り橋及び斜張橋等の維持管理において、今後、何を実施していく必要があるのか議論すべきである。

(金教授)

今後、モニタリング結果を用いて、FEモデルにより損傷を与えた場合、どの程度の応答の相違が得られるのか検討し、モニタリングによる損傷把握の基礎資料とする。

(玉越氏)

橋独自の結果ではなく、吊り形式の橋の維持管理に対して、どの程度のアウトプットが得られるのかという視点で整理すべきではないかと思われる。

(メンテナンスセンター増田氏)

モニタリングデータによる閾値的なものが得られればいいのではないと思う。ただし、個別の橋で整理するのは難しいため、吊り形式の橋としてある程度の目指すべきところを示した上で整理するのはどうか。

(八木教授)

カラウコ大橋は、現状健全であるため損傷の影響は受けていない。したがって、何をモニタリングし、それが損傷が生じているというレベルが分かるような方法を考えてはどうか。

(金教授)

現在実施している長期モニタリングにより、物理量の変化を確認するとともに、環境影響の有無を考慮して上記内容を検討する。

(八木教授)

物理量を評価するに際して、振動数を用いるのは難しいかと思う。なお、減衰は損傷に大きな影響を与えているため、減衰の変化を考慮することで損傷の有無を判断できないか。

(金教授)

減衰であれば、感度による傾向は確認できるが、どのような損傷がどの部位に生じているのかまでは把握できない。

本研究の成果としては、橋自体に損傷が生じているか否かを判断できればいいのではと考える。

(八木教授)

現在検討中のカラウコ大橋のFEモデルによる解析において、損傷を与えての応答の変化を確認するような検討は行わないのか。

(金教授)

現在、モデル化を検討中であり今後、そのような解析を行う予定である。

(古川准教授)

解析モデルにおいて、境界条件は重要である。特にケーブル定着部の境界条件には十分配慮する必要がある。

(榊氏)

アンカー定着部の構造によっては、一般的な条件では解析結果が計測値となかなか合致しないことが多い。また、モニタリング結果が適用できるか否かも、計測の難しさとして今回の成果となるのではないかとと思われる。

(玉越氏)

本研究の目的において、解析により橋梁の挙動を把握することはあまり必要ないように思われる。維持管理を行う上では、橋梁形式にはよらず、危険な状態にあることを確認できる手法が求められている。橋梁が、「どうなった時、どのような状態になる」という点で整理するのが必要である。

これらに対して、本研究で、何がどこまで可能であり、それ以上は対応できないというラインを明らかにすることも成果の一つである。

着目点を何にするのかをはっきりさせて、最終成果とする必要がある。

(金教授)

以前、ヒアリングにより得た実際に管理する自治体の要望を改めて整理し、それらに対する具体的な対応を考えていく。

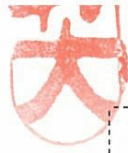
現状、本研究の検討内容及び成果に対する方向性が多岐にわたっており、十分な整理ができていない。今回、頂いた種々の意見を整理し、どの方向で取りまとめるべきか検討する。

なお、本年度は、この2年間の成果を整理し報告書として取りまとめる方向で考えている。

— 以 上 —

卷末資料

1. 特殊橋梁（吊り橋及）点検結果整理一覧表



道路使用許可申請書

2020 年 10 月 16 日

宍粟警察署長 殿

住 所 大阪市淀川区野中北一丁目12番39号

申請者 氏 名 株式会社エイト日本技術開発 印

電 話 06-6397-3888

道路使用の目的	橋梁点検車によるカラウコ大橋のセンサー設置		
場所又は区間	兵庫県宍粟市波賀町引原地先		
期 間	2020年 11月 2日 9時から2020年 11月 30日 17時まで		
方法又は形態	橋面を片側1車線規制・占用し、橋梁点検車にてセンサー設置を行う。作業員は3名程度。		
添 付 書 類	点検位置案内図、略図、工程表		
現 場	住 所	神戸市中央区西町通35番地 三井神戸ビル7F	
責任者	氏 名	小野 和行	電 話 078-326-2679 090-1678-6113

第 385 号 道路使用許可証

上記の通り許可する。ただし、次の条件に従うこと。

条 件	別紙記載のとおり
-----	----------

令和 2年10月19日

宍粟 警察署長 印

- 備 考
- 1 申請者が法人であるときは、申請者の欄には、その名称、主たる事務所の所在地及び代表者の氏名を記載すること。
 - 2 申請者は、氏名の記載と押印に代えて、署名することができる。
 - 3 方法又は形態の欄には、工事又は作業の方法、使用面積、行事等の参加人員、通行の形態又は方法等使用について必要な事項を記載すること。
 - 4 添付書類の欄には、道路使用の場所、方法等を明らかにした図面その他必要な書類を添付した場合に、その書類名を記載すること。
 - 5 用紙の大きさは、日本工業規格A列4番とする。

この処分について不服がある場合には、この処分があったことを知った日の翌日から起算して3箇月以内に兵庫県警察本部交通部交通規制課を経由して兵庫県公安委員会に対し審査請求をするか、この処分があったことを知った日の翌日から起算して6箇月以内に神戸地方裁判所に対し兵庫県を被告としてこの処分の取消しの訴えを提起することができます。

なお、審査請求をした場合には、この処分の取消しの訴えは、その審査請求に対する裁決書を受け取った日の翌日から起算して6箇月以内に提起することができます。



道路使用許可条件書

1 期間及び時間

(1) 期間は、令和2年11月 2日 から 令和2年11月30日 までの間

(2) 時間は、午前9時 から 午後5時 までの間

2 使用場所

申請書添付の図面記載のとおりとする。

3 施工方法

- (1) 歩道を占用する場合は有効幅員を0.75m以上確保し、不可能な場合は仮歩道を設置して施工すること。
- (2) 「作業中」「片側交互通行」等の看板（種類、区間、期間）を設置すること。
- (3) 重機等の使用、移動については地盤の防護措置をとり倒壊等による事故を起こさないようにすること。
- (4) 上空使用中の作業帯内は通行させないこと。
- (5) 作業帯以外の上空を使用しないこと。重機（クレーン車）、高所作業車等の旋回等でやむを得ず上空を使用する際は、一時車両等の通行を止め、作業を中止してから誘導すること。
- (6) 作業用資機材等の落下防止措置を講ずること。
- (7) 許可時間外にあっては作業帯を撤収し、全面交通開放すること。

4 道路交通に対する措置に関すること

- (1) 危険防止のための交通安全施設等を適切に設置すること。
- (2) 作業用車両の使用及び保安施設等の設置にあたっては、横断歩行者等の見通しを妨げ、また信号機・道路標識等の視認性を妨げないこと。
- (3) 工事区間の始点及び終点に交通誘導員を配置し、昼間は赤（白）旗、夜間にあっては赤色灯等を用い車両等を誘導すること。
- (4) 施工場所が通行止めとなる場合、現場付近には適切な迂回案内看板、及び迂回案内のための交通誘導員を配置すること。
- (5) 夜間は安全対策とし照明灯又は保安灯、電光標示等を必要数点灯するとともに交通誘導員等は、反射ヘルメット及び夜光服を着用すること。
- (6) 歩行者の安全を確保し必要に応じて仮歩道を設置すること。
- (7) 工事・作業現場及びその周辺は常に整理して、一般交通に支障を及ぼさないようにすること。
- (8) 使用する道路の範囲内に作業用車両以外の車両を違法駐車しないこと。

遵 守 事 項

- 1 申請者又は、現場責任者は工事・作業着手前にこの条件を関係者全員に徹底すること。
- 2 現場責任者は、工事・作業中この許可証又はその写しを携行すること。
- 3 申請者又は現場責任者は、交通誘導員の交通誘導要領に基づき、信号機のある交差点付近では信号機の表示に合わせた誘導をし、その他の場所においては一般交通の安全と円滑を優先した誘導をするよう十分指導すること。
- 4 公安委員会が設置した信号機、道路標識等を損傷した場合は、速やかに当署交通課に届け出たうえ、警察官立ち合いのもと原型に復旧すること。
- 5 道路使用方法・形態の変更及びやむを得ない事由が生じ作業時間を延長して作業を行う場合は、その都度、警察署交通課に届け出て指示を受けること。

穴栗警察署 (0790) 62-0110

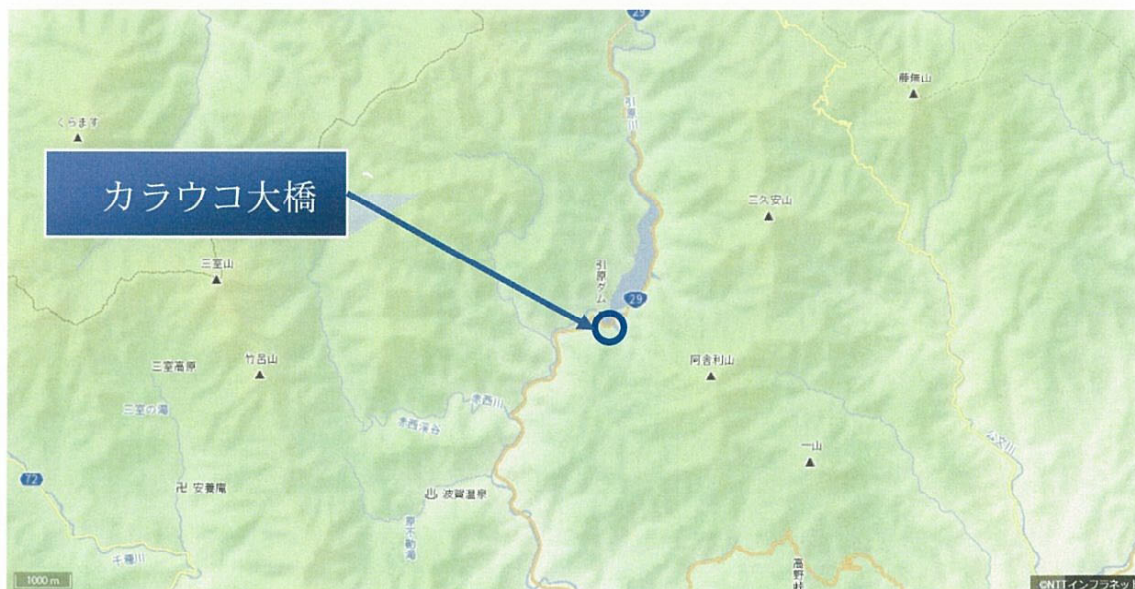
作業概要

- (1) 業 務 名： 新都市社会技術融合創造研究会
長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討
- (2) 道路管理者： 国土交通省 近畿地方整備局 姫路河川国道事務
- (3) 対象箇所： (位置図参照)

橋梁名	住所	規制方法
カラウコ大橋	兵庫県宍粟市波賀町引原地先	片側交互通行規制

- (4) 履行期間： 自) 令和 2 年 11 月 2 日 ～ 至) 令和 2 年 11 月 30 日
- (5) 規制の理由： 橋梁調査のためのセンサー設置
- (6) 規制の種類： 片側交互通行規制
- (7) 規制時間： 9:00～17:00 (昼間)
- (8) 作業請負者： 株式会社エイト日本技術開発 神戸支店 国土インフラ事業部
〒650-0038 神戸市中央区西町 35 番地
TEL：078-326-2679 (ダイヤルイン)
FAX：078-326-2688
現場責任者： 小野和行
携帯：090-1678-6113

(9) 位置図



(10) 現地写真

カラウコ大橋



(11) 実施工程

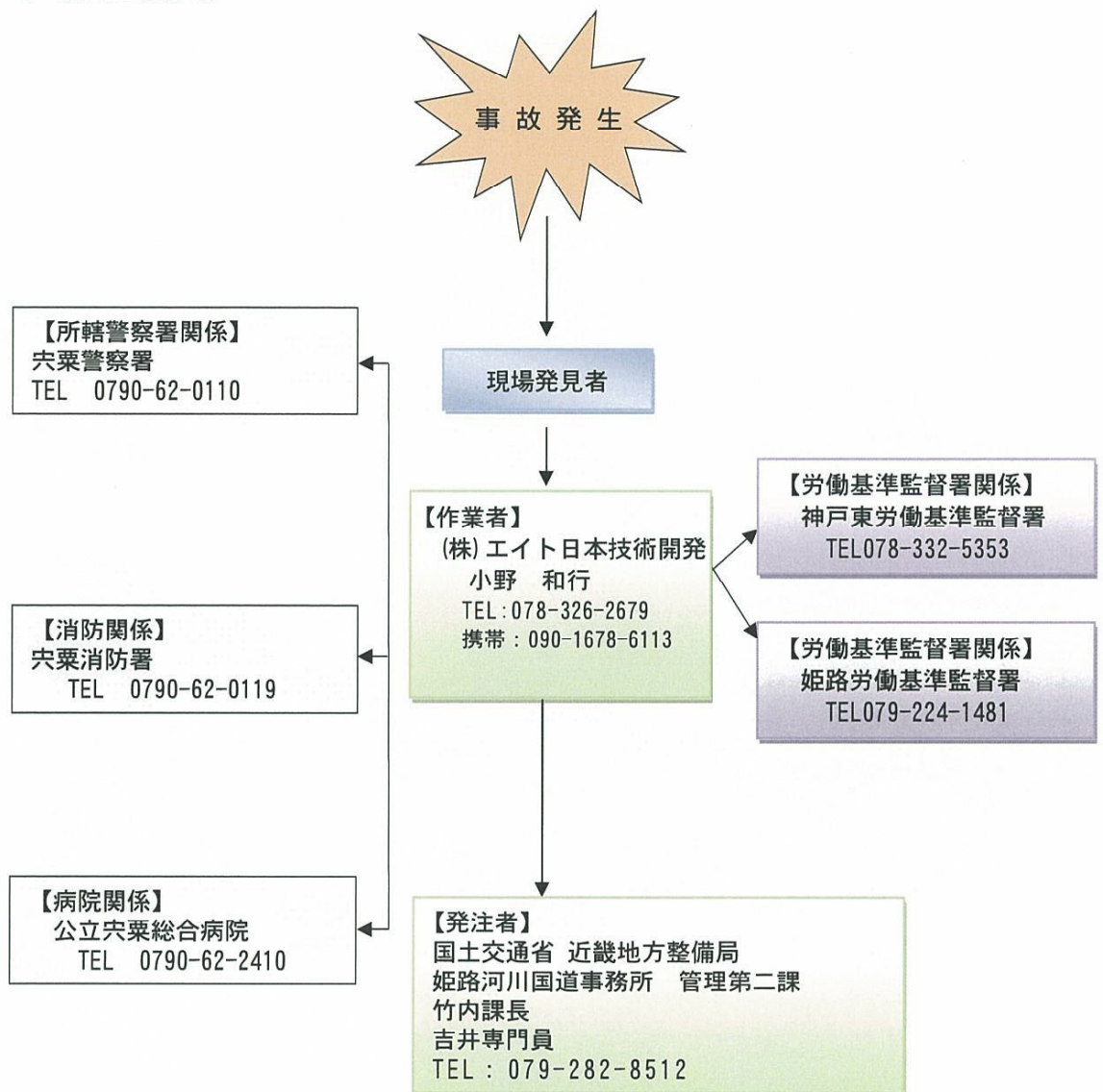
実施時期(予定)：令和2年11月10日～令和2年11月12日

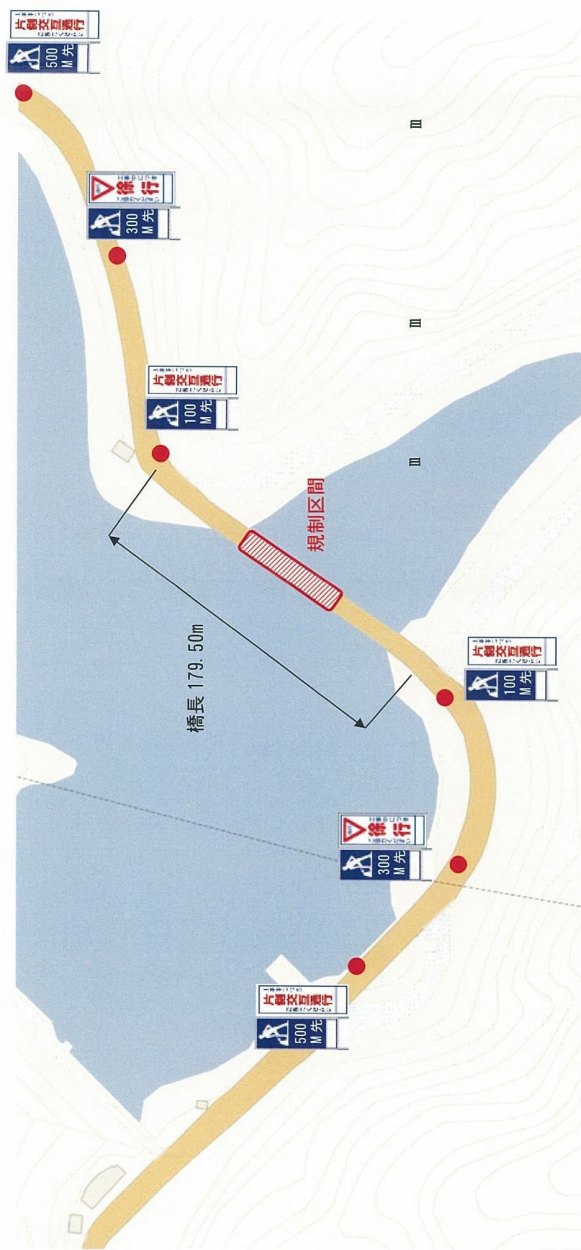
土日祝日を除く、昼間3日

実施時間：昼間 9:00～17:00

令和2年11月							備考
日	月	火	水	木	金	土	
1	2	3	4	5	6	7	
8	9	10	11	12	13	14	
15	16	17	18	19	20	21	
22	23	24	25	26	27	28	
29	30						

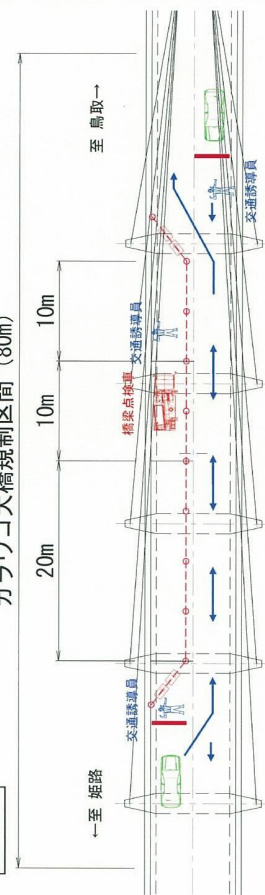
(12) 緊急連絡体制



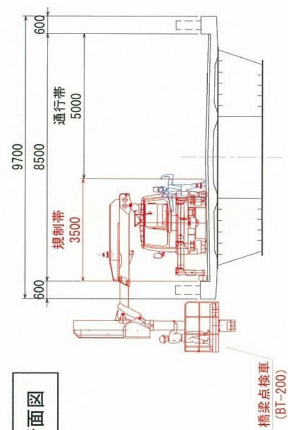


平面図

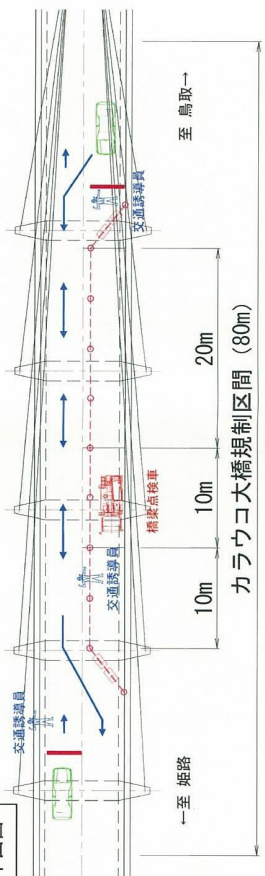
カラウコ大橋規制区間 (80m)



断面図



平面図



断面図

