

博士論文

長大特殊橋維持管理のための デジタル画像相関法およびGNSS変位計測 の適用に関する研究

(Application of Digital Image Correlation and GNSS
Displacement Measurement for the Maintenance of
Long Span Bridges)

2024年3月

有井 賢次

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	8
1.3	本論文の構成	9
	参考文献	11
第2章	既往の知見と本研究の意義	12
2.1	序言	12
2.2	デジタル画像相関法を用いた計測技術	13
2.2.1	デジタル画像相関法	13
2.2.2	デジタル画像相関法の橋梁モニタリングへの適用に関する既往研究	14
2.3	GNSS を活用した変位モニタリング技術	16
2.3.1	GNSS (Global Navigation Satellite System)	16
2.3.2	GNSS のインフラモニタリングへの適用に関する既往研究	18
2.4	橋梁維持管理におけるモニタリング研究事例	20
2.5	本研究の意義	21
	参考文献	22
第3章	画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測	24
3.1	序言	24
3.2	画像計測に基づくケーブルの振動計測	25
3.2.1	斜張橋ケーブル張力計測に求められる精度	25
3.2.2	ケーブル張力推定における高次振動の影響	26
3.2.3	対象橋梁と対象ケーブル	27
3.2.4	加速度計計測	29
3.2.5	画像計測	31
3.2.6	計測ケースと計測時間	33
3.3	デジタル画像相関法による解析	34
3.4	サブセットの設定や画像解像度が画像計測の精度に及ぼす影響	39
3.4.1	加速度計測結果	39
3.4.2	加速度計と画像計測の比較	43
3.4.3	2K カメラと 4K カメラの抽出精度の比較	46
3.4.4	サブセットサイズとサブセット位置の影響	48
3.5	結論	52
	参考文献	53

第4章	スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング	54
4.1	序言	54
4.2	大島大橋の事故時の損傷状況と復旧過程	55
4.2.1	大島大橋および船舶衝突事故の概要	55
4.2.2	復旧工事の概要と載荷荷重	57
4.3	GNSSによる橋梁の変位モニタリング	59
4.3.1	GNSS変位計測システム	59
4.3.2	その他の計測機器	66
4.4	GNSSによる橋梁の長期モニタリング	69
4.4.1	上空視界と受信衛星数の確認	69
4.4.2	GNSS連続計測と橋梁モニタリングの適用結果	71
4.4.3	高さ方向変位に着目した沈下計との比較	75
4.5	構造解析による検証	76
4.5.1	温度変化時の橋軸方向変位とGNSS計測結果	76
4.5.2	温度変化時の傾斜計変位とGNSS計測結果	82
4.5.3	構造解析による長期変位計測結果の検証	85
4.6	短期的変位挙動への適用	87
4.6.1	車両載荷試験の荷重ステップと載荷位置	87
4.6.2	短期的変位挙動把握の方法と追従性	88
4.7	結論	91
	参考文献	92
第5章	総括	94
5.1	本研究における全体総括	94
5.2	本研究の成果・課題と今後の展望	96
5.2.1	画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測	96
5.2.2	スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング	97
5.2.3	今後の展望	98
5.3	本研究に関連した成果	99
	参考文献	100
	謝辞	101

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我国の道路は、これまで重要な社会基盤として私たちの豊かで安全・安心な暮らしを支えてきた。昭和20年代後半より整備が進められた我が国の道路実延長（高速自動車国道を含む）は、令和3年度末において約123万kmに上っており、その内、橋梁は約13,700kmとなっている¹⁾。

全国の橋長2m以上の橋梁数は約73万橋あり、このうち、建設後50年を超える橋梁の割合は2032年度に約59%（**図-1.1** 参照）となり²⁾、現状においても、立地環境が厳しい箇所など一部の構造物で老朽化による重大な損傷が顕在化してきている。また、これら橋梁のうち、維持管理人材が特に不足している地方公共団体が管理する橋梁は、**図-1.2** に示す通り全体の9割以上²⁾となっており、橋梁維持管理の効率化と早期の安全性の確保が強く求められている。

そのような中、国土交通省においては、平成24年12月に発生した笹子トンネル天井板落下事故を踏まえ平成25年を「メンテナンス元年」と位置づけるとともに、平成26年6月に「道路橋定期点検要領」を定め、5年に1回の頻度で橋梁に近接して直接人の目で損傷の確認を行う「近接目視」による点検手法が義務化された。

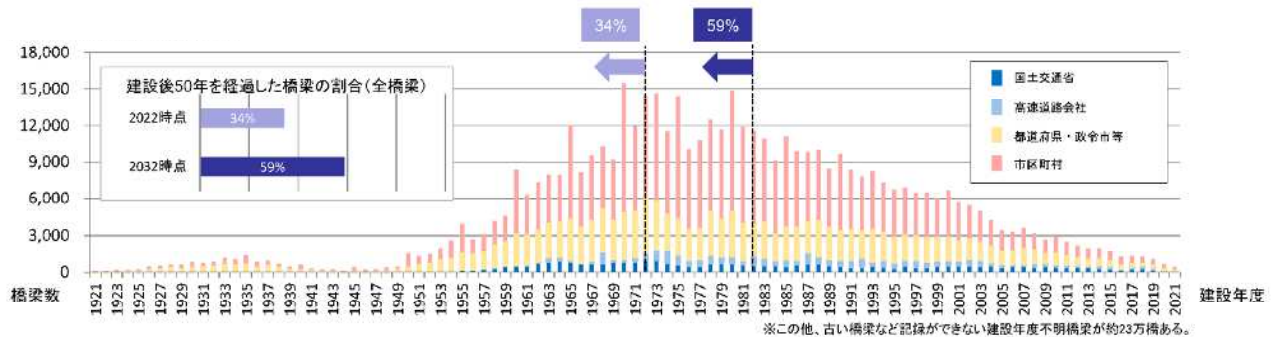


図-1.1 橋梁の建設年度別橋梁数²⁾

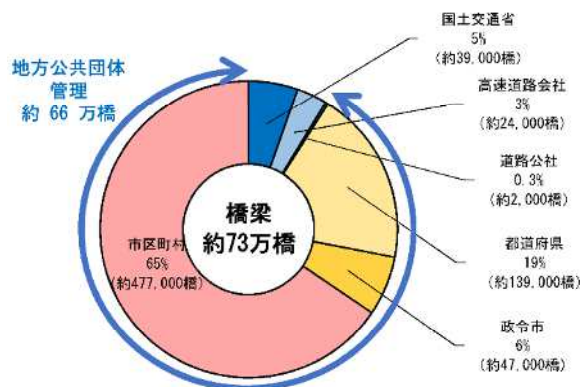


図-1.2 道路管理者別橋梁数²⁾

【第1章 序論】

我が国の橋梁の現況をもう少し詳細に見ていく。全国の橋長 15m 以上の橋梁約 17.6 万橋のうち、「長大橋」に分類されている橋長 100m 以上の橋梁数は約 2.4 万橋（表-1.1），さらに，そのうち特殊橋に分類されている橋長 100m 以上のトラス橋，アーチ橋，ラーメン橋，斜張橋及および吊橋は約 3 千橋である（表-1.2）。これらの長大特殊橋は，その構造規模より重要路線や離島等への唯一のルートとして建設されていることが多いことや，一般橋と比較して多大な維持管理費用を要することから，長大特殊橋の維持管理の高度化，効率化は非常に重要な課題であり、本研究ではこれら長大特殊橋の中でも特に斜張橋とトラス橋に着目した検討を行っている。

表-1.1 橋長 15m 以上の橋梁に占める長大橋の割合^{※)}

	橋梁数	割合(%)
橋長 15m 以上	176,446	—
橋長 100m 以上	23,922	13.6

表-1.2 長大橋に占める特殊橋の割合^{※)}

	橋梁数	割合(%)
トラス橋	731	12.8
アーチ橋	926	
ラーメン橋	1,068	
斜張橋	172	
吊橋	171	
合計	3,068	

※) 参考文献2)をもとに筆者が作成

長大特殊橋は、一般的に海上、河川上や溪谷などに架橋されることや、架橋位置の条件に応じた種々の構造検討のもとに建設されたものが多く、他橋との類似性が低いことから、これら長大特殊橋では、橋毎に「個別施設維持管理計画」を定めている事例が多く見られる。

一例として、斜張橋の点検要領に定められる詳細点検の種類と点検項目を表-1.3に示す。この点検要領では、詳細点検の種類として、一般的な桁橋で実施されている「近接目視点検」および精密点検に位置づけられる「橋体観測」の2手法を設定し、5年に1回の頻度で実施することが規定されている。橋体観測の点検項目として、温度測定（気温・部材表面）、縦断線形測定および斜張橋ケーブル張力測定を行うことにより、異常の有無と経年的な変化を把握し、橋梁の全体的な健全度評価を行う。

縦断線形測定では、従来の光波測量を用いて車道または歩道上での測量作業が実施されているが、長大特殊橋は測定距離が長く測量作業に時間を要することや、交通振動や風などによる揺れが大きい場合には、測量作業が困難となり測量精度に影響が出かねない状況が度々発生する。また、斜張橋ケーブル張力測定では、計測対象となるケーブルに加速度計を直接設置する方法が一般的であるが、ケーブルの定着位置によっては計測装置の取り付けに危険が伴うケースや、容易に近接できる場合でも通行車両により惹起されるケーブル振動の発生によって計測装置の取り付けに時間を要するケースが見られる。

その他に、建設後間もない斜張橋において、主桁を支えるケーブルのクリープ現象が進行したことにより道路縦断が徐々に低下したために、計測頻度を増やして監視を強化した事例や、単径間吊橋の事例では、主ケーブルが定着されている斜面の緩みが継続的に進行した後に落橋に至った事例も見られ、ケーブル張力や橋梁全体の変位を適切にモニタリングすることは、道路利用者の安全を確保する上で非常に重要な維持管理手法として認識する必要がある。

表-1.3 斜張橋における詳細点検時の内容（例）

	種類	項目		備考
詳細点検	近接目視点検	一般的な点検手法 (点検要領に示される手法など)		ミクロ的な点検
	橋体観測	橋体全体の 健全度評価	温度測定 (気温・部材表面)	マクロ的な点検
			縦断線形測定	
	構成部材の 健全度評価	斜張橋ケーブルの 張力測定		

【第1章 序論】

ここで、長大特殊橋における損傷内容を把握するため、いくつかの既往損傷事例について述べる。

1つ目の事例として、**図-1.3**に示す本庄大橋（秋田県）および木曾川大橋（三重県）の斜材の破断を挙げる³⁾。これらの鋼トラス橋は、それまでの点検ではあまり着目していなかったトラス斜材のコンクリート埋込部において、腐食が進行し破断に至っていることが確認された。いずれの橋梁も落橋に至る危険性があったため、通行規制を行い支保工によって支持した後、当て板等による補修工事が実施された。



(a) 本庄大橋（秋田県）

(b) 木曾川大橋（三重県）

図-1.3 鋼材腐食によるトラス橋斜材の破断事例³⁾

2つ目の事例として、**図-1.4**に示す原田橋（静岡県）における単径間吊橋のケーブル損傷・落橋事例を挙げる⁴⁾。この事例では、斜面にアンカー定着されていた主ケーブルの一部に素線の破断が確認され、全面通行止めを行ってセーフティーケーブルによる補強後に供用が再開されたが、その後の斜面崩壊により落橋に至った。



図-1.4 腐食によるケーブル破断が確認された事例⁴⁾

3つ目の事例として、**図-1.5**に示すモランディ橋（イタリア）における落橋事例を挙げる^{4),5)}。当該橋梁の落橋の原因は複数の要因があり明確ではないが、コンクリート被覆されたケーブルの腐食の可能性も1要因として指摘されている。なお、本橋は落橋以前からモニタリングが実施されていた。



図-1.5 連続斜張橋の落橋事故事例⁴⁾

4つ目の事例として、上関大橋（山口県）におけるダブルックバンド橋における鋼材破断事故の事例を挙げる⁶⁾。この事例では、桁端部の浮き上がりを防止するためのPC鋼棒が腐食によって破断したことにより、桁端部が浮き上がり路面伸縮装置部に段差が生じた。その後、全面通行止めと各種の補強が実施された。



図-1.6 連続斜張橋の落橋事故事例⁶⁾

これらの事例に共通する点は、ケーブルや引張材を構成部材とすることが多い長大特殊橋では、損傷は徐々に進行し、一見、重大損傷に至らないような振る舞いを呈しているが、ある時点で急激な変化を伴い大事故につながる人が多いことである。これらの事例は、そのような予兆を早期に捉えて安全対策を講じるための「常時モニタリング」の必要性を示唆している。

【第1章 序論】

以上を踏まえて、長大特殊橋の特徴は以下のように整理できる。

- ①斜材，鉛直材等，細長い部材やケーブル材などで構成されることが多い
- ②細長い部材やケーブル材は振動しやすいため，損傷の影響が振動数の変化に現れる
- ③一般橋に比べてたわみや変形が大きいため，損傷の影響が変位に現れる

このような長大特殊橋の特徴に対し，維持管理における課題とその解決の方向性を以下とした。

課題1．細長い部材，ケーブル材の損傷や破断は直ちに重大な損傷に進展しやすく，5年に1回の点検では手遅れとなる。

【解決の方向性】早期発見のためには常時モニタリングが必要である。

課題2．橋梁規模が大きいため，ひずみゲージ等の従来手法では橋の全体的挙動の把握が困難

【解決の方向性】全体挙動把握のため，全視野計測法や三次元計測手法を用いる。

課題3．長大特殊橋は，点検作業の安全性・確実性の確保とコスト・効率性の両立が難しい

【解決の方向性】非接触・遠隔モニタリングを積極的に採用する。

以上のとおり，本研究では長大特殊橋に特有の維持管理上の課題を解決するため，斜張橋ケーブル張力測定を遠隔から非接触に実施することが可能な画像解析技術であるデジタル画像相関法（Digital Image Correlation）と，長大な橋梁構造の全体的かつ三次元的な変形挙動を常時監視できるGNSS（Global Navigation Satellite System）モニタリング技術に着目し，これらの技術の実際の維持管理作業への適用に焦点を当てた研究を行う。

以下に研究対象とする計測・モニタリング手法の選定経緯を示す。

■光学的全視野計測法

インフラメンテナンスに用いられる全視野計測手法（光学的全視野計測法）としては、モアレ縞・干渉縞応用計測法とデジタル画像相関法が多く適用されている。モアレ縞・干渉縞応用計測法は、計測対象に付与した格子状模様の変形前後に発生するモアレ縞を撮影して変形を求める手法で、高精度なひずみ計測が可能であるが、対象に格子模様の設置が必要である。一方、デジタル画像相関法（Digital Image Correlation「以下、DIC」）は、計測対象表面に存在するランダムパターン等を利用し、変形前後の画像相関を用いて直接変位を求める。したがって、本研究では対象に接触することなく遠隔モニタリングが可能な点において有利である DIC を対象手法とする。

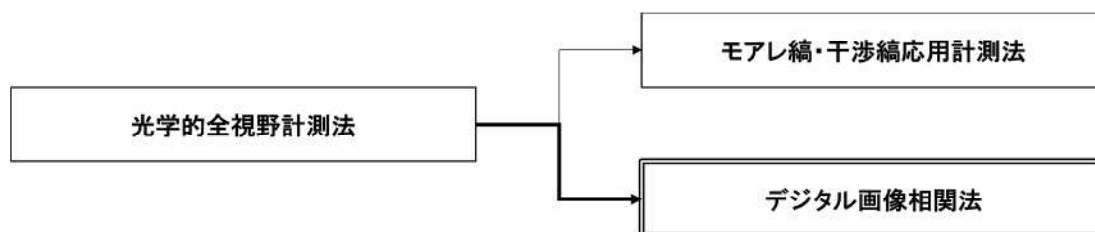


図-1.7 光学的全視野計測法の選定

■多次元計測手法

インフラメンテナンスに用いられる三次元計測手法としては、画像変位解析、マイクロ波レーダおよび GNSS 変位計測が挙げられる。三次元画像変位解析を用いるためには、多くのカメラ機材を必要とすること、画像データ量の増大や画像解析用の高性能 PC を要するなど、現時点では常時モニタリングには不向きである。マイクロ波レーダは、レーダ信号を利用してその反射波から三次元画像処理を行う技術であるが、多数のアンテナが必要であることや全天候型に対応不可であること、レーダ出力の法規制があることなどの制約がある。一方で、GNSS 変位計測は、計測対象への機器の設置が必要となるが、受信機上空の視界環境が整えば、天候に左右されず常時連続的に三次元変位を遠隔監視することが可能であり、屋外環境でのモニタリングに適した手法である。本研究では GNSS を対象手法とする。

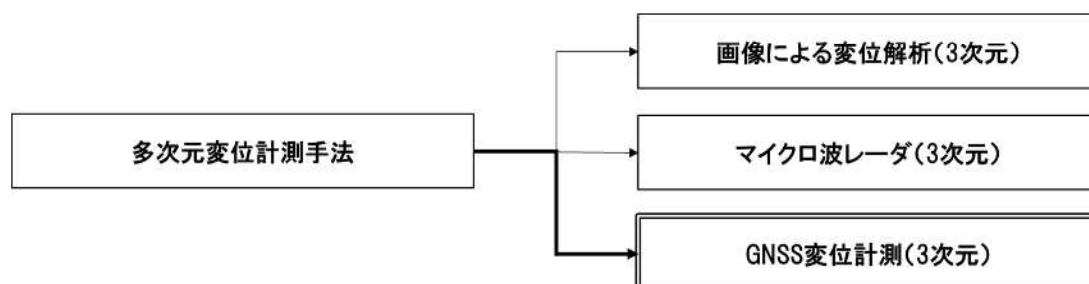


図-1.8 多次元変位計測手法の選定

1.2 本研究の目的

上記の長大特殊橋の維持管理における背景と課題を踏まえ、本研究の目的を以下に示す。

損傷による社会的影響が大きな長大特殊橋において、新しい点検技術と常時モニタリング技術の適用性を検討し、損傷の早期発見と橋梁性能の定量化に繋がる技術の実用性検証を行うことを目的とする。本研究で実施した2つの実用化技術における具体的な目的をそれぞれ以下に整理する。

■画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測

斜張橋の精密点検におけるケーブル張力計測で一般的に用いられている加速度計を用いた振動計測に対し、DIC法を用いた振動計測が同等の精度が得られることを確認し、その具体的な適用手法と特徴を明らかにする。

■スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング

大規模トラス橋において、スタティック測位法で取得した三次元変位データと、種々のモニタリングデータや構造解析結果との比較により、荷重載荷時や温度変化時の変形挙動の解明を通じて、橋梁モニタリングへの適用性を検証する。

1.3 本論文の構成

本研究は、斜張橋およびトラス橋を対象に、2つの計測・モニタリング技術の適用性を検討したものであり、以下の5章から構成される。

第1章は、本研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成を述べる。

第2章は、研究を行った2つの計測・モニタリング技術の進展の経緯と、研究内容を記述するにあたり必要なそれらの技術の基本原理や考え方を説明する。また、それらの分野でこれまでに行われた主要な研究成果を整理し、本研究の意義を述べる。

第3章は、「画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測」に関する研究成果について述べる。本研究では、実橋において2K,4Kカメラで撮影した動画像にDIC法を適用して変位時刻歴波形を求め、同時計測した加速度計測結果と比較を行い、DIC法が加速度計による振動数計測と同等の精度が得られることを確認する。また、DIC法適用過程において、ケーブル画像とサブセットサイズおよび位置の適正範囲を求めるとともに、2Kカメラと4Kカメラの比較において、4Kカメラが高次振動数抽出への適用性が高いことを確認する。

第4章は、「スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリング」に関する研究成果について述べる。本研究では、既存橋梁の安全監視へのGNSSによる変位計測の適用性を明らかにすることを目的に、センサーの設置方法の工夫、長期計測の安定性、変位計測精度などを調査し、GNSS変位計測が橋梁の複雑な変位挙動把握の有効な手段になり得る可能性を考察するものである。研究では、スタティック測位方式で取得した三次元変位データと種々のモニタリングデータとの比較により、載荷荷重に対する橋梁のたわみおよび温度変化に起因する比較的長期かつ周期的な三次元変形挙動に対して、必要な精度で計測可能であることを示すとともに、構造解析や計測データの解析結果に基づき、長期および短期の変位挙動把握の可能性に関する検討結果を報告する。

第5章は、本研究を総括するとともに、橋梁モニタリング技術における今後の展望を述べる。

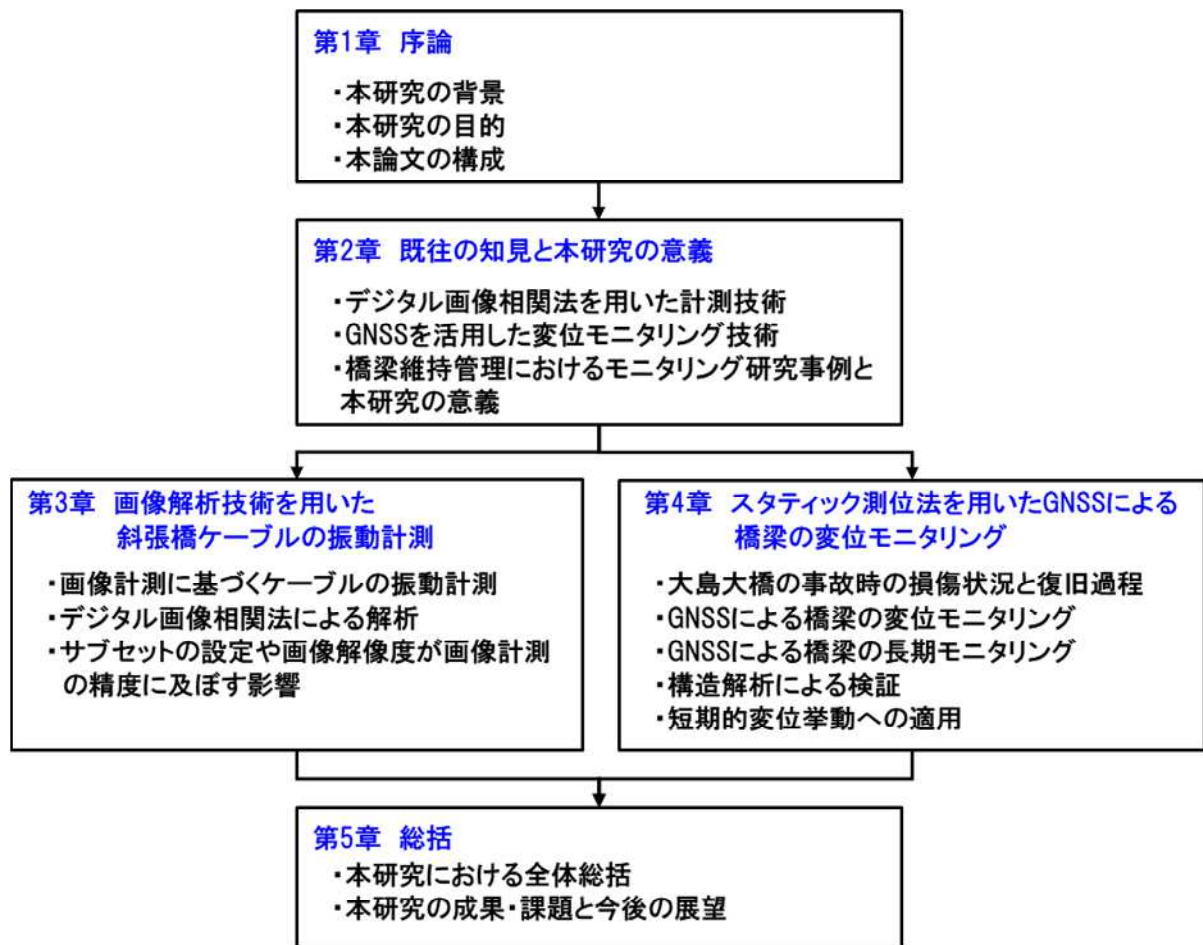


図-1.9 本論文の構成

参考文献

- 1) 道路統計年報 2022, 国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>, (参照 2024.2.1.)
- 2) 道路の老朽化対策 老朽化対策の取組み, 国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>, (参照 2024.2.1.)
- 3) 国土交通省ホームページ, 鋼橋(上部構造)の損傷事例, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf, (参照 2024.2.1.)
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課: 監視計画の策定とモニタリング技術の活用について, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1-5.pdf, (参照 2024.2.1.)
- 5) Matteo M., Gerard O., Nicola S., Ricardo M., Daniele M., Paolo M., and Rui P. : Once upon a Time in Italy : The Tale of Morandi Bridge : Structural Engineering International, pp. 198-217, 2018.12.
- 6) 上関大橋復旧検討会議 報告書, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf, (参照 2024.2.1.)

第2章 既往の知見と本研究の意義

2.1 序言

本研究では、画像解析ならびに GNSS 変位モニタリングの2つの変位計測技術を用いて、特に長大特殊橋における変位追跡技術に着目し、それらの変位計測結果を用いた橋梁性能評価への適用性について論ずる。

2.2 節では、デジタル画像処理の歴史とデジタル画像相関法について概観し、同手法を用いた構造物の静的または動的な挙動把握に関する既往の研究成果について説明する。

2.3 節では、GNSS 技術について概観し、本研究で用いている GNSS 測位手法について概説した後、同手法を用いて実践されてきた測位精度向上技術や、主に斜面分野への適用に関する成果および構造物変位モニタリングへの適用成果について、既往の研究を説明する。

2.4 節では、本研究で実施しているケーブル振動と橋体変位の計測結果を用いて、今後の橋梁点検の効率化や性能評価へ活用する方法を示唆しているいくつかの既往研究を説明する。

2.5 節では、上記を踏まえて本研究の意義を述べる。

2.2 デジタル画像相関法を用いた計測技術

2.2.1 デジタル画像相関法

デジタル画像処理の端緒は、1960年代における宇宙探査用人工衛星の画像処理であると言われており、1969年に月面に着陸したアポロ11号が送ってきた映像がその代表例である。その後、画像処理技術は、医用画像処理や高エネルギー物理学への応用の試みを経て、画像理解、コンピュータビジョン、物体認識、ロボットビジョン、コンピュータグラフィックス (CAD) およびテレビジョンにおける画像伝送技術などの分野へと発展していった。地球科学関連分野においては、地球表面撮影用の人工衛星 Landsat1号が1972年に打ち上げられ、後の海洋観測衛星、気象衛星などの画像と合わせて、地質、植生、気象、農林水産業、海洋、都市計画などのきわめて広範囲に利用されるリモートセンシング (remote sensing) 画像処理という一大応用分野が形成された。そして、今やデジタル画像処理技術は、私たちの生活に欠かすことのできない重要な技術基盤のひとつとなっている¹⁾。

近年、インフラ維持管理分野では、デジタル画像処理の適用として光学的全視野測定法が多く用いられている。構造物の安全性評価では応力やひずみ計測技術が重要であるが、これまで一般的に多用されてきたひずみゲージは、構造物全体のひずみを測定するためには、ゲージの設置個所数の増加、設置作業の困難さ、作業環境およびゲージそのものの耐久性が課題となることが多い。これに対し、光学的全視野測定法は、対象構造物に非接触、遠方より広範囲かつ高密度な計測を行うことが可能であるという特徴を有する。

光学的全視野測定法の中で、インフラモニタリングに多く用いられているのが、モアレ縞・干渉縞応用計測法 (以下、モアレ法)^{2),3)}およびデジタル画像相関法 (DIC法)⁴⁾である。モアレ法は、対象構造物に格子状の模様を付与し、変形前後の2種類の格子をデジタル画像として撮影し、それらの重ね合わせにより発生するモアレ縞を解析することにより、計測対象の形状やひずみ分布を求める手法であり、高精度にひずみ分布を求めることが可能であることが知られているが、計測対象に格子模様を設置できない環境の場合は適用が困難となる課題がある。一方、DIC法は、計測対象表面が元来有するランダムパターンを利用し、変形前後の画像相関を用いて直接変位を求める点において、前者より有利な計測方法である。

2.2.2 デジタル画像相関法の橋梁モニタリングへの適用に関する既往研究

我が国におけるデジタル画像相関法の橋梁構造への適用は、2005年頃より見ることができる。

北側ら⁵⁾は、図-2.1 (a)に示す支点間距離 5000mm の H 型鋼の単純梁試験体の載荷試験に対し、普通レンズによる正面からの撮影とシフトレンズによる斜方からの撮影の 2通りの撮影方法、ランダムパターンの有無および照明の有無を組み合わせたケースの試験を行い、被測定体寸法の 1/9000 の精度で計測可能であること、および実橋での載荷試験（同図(b)参照）において、被測定体の長さが 30m であっても 1mm 以下(1/30000)の誤差で計測可能であることを示した。

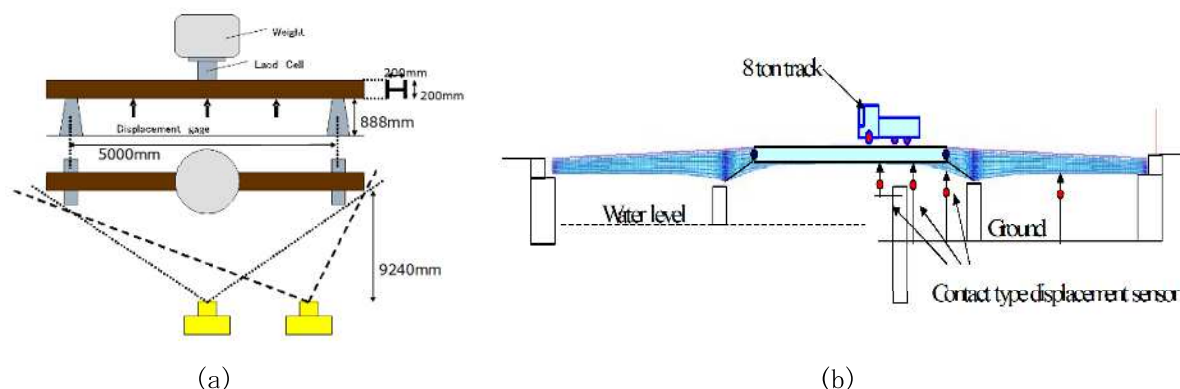


図-2.1 室内載荷試験（左）と実橋載荷試験（右）の方法⁵⁾

また、出水ら⁶⁾は、DIC法を用いて数 100μ 以下の微小ひずみ領域において精度よくひずみ計測を行うため、H鋼を用いた一軸圧縮試験や有孔板の引張試験を行い、サブセットサイズを大きくした解析、加算平均処理法の適用および加算平均処理枚数の増加によりひずみ計測精度が向上すること、ならびにマルチロゼット解析を用いることにより円孔近傍やその周辺のひずみを高精度に計測することができることを示した。

DIC法を用いて振動計測を行い、構造性能評価につなげようとする研究も行われている。

大町、町田⁷⁾は、斑点模様を施したウレタンゴム試験片の振動を高速カメラで撮影した画像からDIC法で抽出した固有周期と、FEM解析モデルから求めた固有周期を比較することにより、DICにより固有振動数の推定が可能であることを示した。

また、DIC法によるコンクリート構造の動的挙動の把握に関する研究については、今井ら⁸⁾によって行われている。研究では、繰り返し載荷中の桁試験体ならびに供用中の橋梁に対してフレームレート 100fps で動画を撮影し、フレームごとに DIC 法で得られる変位分布の時刻歴変化をもとに、たわみやひび割れ幅の変化を評価した結果、得られたたわみ量変化がジャッキストローク量と良く一致すること、ひび割れ幅を挟んだ位置の変位の差分からひび割れ幅開閉量を算出した結果は、クリップゲージによるひび割れ開口変位と良く一致することを示した。

ここで、本研究内容の橋梁工学における意義を明確化するため、DIC法に関する研究ではないが、斜張橋の構造冗長性に関してケーブルに着目して実施された既往研究について記述する。

橋本ら⁹⁾は、ケーブルに腐食損傷を有する実際の少数ケーブルの鋼斜張橋を対象に、腐食進行解析およびケーブル腐食後の耐荷力解析を行い、ケーブル腐食の進行に伴ってケーブル軸力は減少すること、ケーブル軸力の減少後、主桁変形、ケーブル降伏、主桁変形の増大および主桁フランジの座屈・降伏といった順にシナリオが進行する過程を示した(図-2.2 参照)。これらは、ケーブルが斜張橋の全体構造安定に必要な部材(クリティカルメンバー)であること、斜張橋において多く見られるケーブルの腐食が、ケーブル軸力の減少と主桁変位として現れることを示しており、本研究で対象としたケーブル張力や変位モニタリング技術が斜張橋の安全確保に対して重要な役割を果たすことを示唆している。

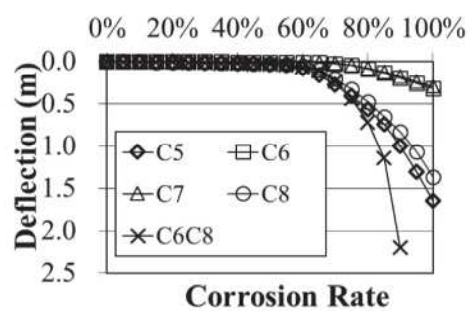


図-2.2 桁の鉛直たわみと腐食率の関係⁹⁾

2.3 GNSS を活用した変位モニタリング技術

2.3.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSS は全地球測位衛星システムを意味し、米国が運用している GPS (Global Positioning System)の他に、ロシアの GLONASS, 欧州連合の Galileo, 中国の BeiDou, インドの IRNSS, 日本の準天頂衛星：みちびき(QZSS)があり、それらの総称が GNSS と呼ばれている。



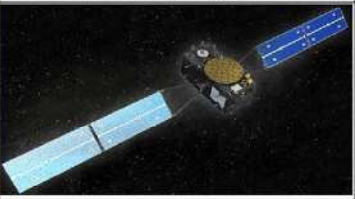


GNSS		
GPS (米国)	GLONASS (ロシア)	Galileo (欧州連合)
		
6軌道面×4機 計24機 (2018年12月現在、31機稼働)	・3軌道面×8機 計24機 (2018年12月現在、25機稼働 (予備機含む))	・3軌道面×10機 計30機 (2018年12月現在、22機稼働 (試運転中を含む))
GNSS		RNSS
BeiDou (中国)	IRNSS (インド)	みちびき (日本)
		
・静止衛星 5基、中高度軌道衛星 30基 (2018年12月現在、合計40機稼働)	・静止衛星 3機、地球同期軌道衛星 5機 (2018年12月現在、合計8機稼働)	準天頂衛星 4機 (2018年12月現在、4機稼働)

図-2.3 GNSS の種類¹⁰⁾

GPS は、地球を周回する 24 機以上の GPS 衛星と利用者の GPS 受信機および GPS 衛星を監視・制御している地上管制局などから構成され、GPS 衛星は地上から約 20,000km の高度で約 12 時間で 1 周する円軌道で周回している。GPS 衛星からは測位に用いる信号や衛星の位置情報が載せられている電波が常に発信されており、利用者は GPS 受信機で衛星からの電波を受信し、GPS 受信機の位置を知ることができる。一方、我が国が運用する「みちびき」の軌道は、日本やアジア・オセアニア地域での利用に適した「8 の字軌道」とすることにより、GPS のみでは計測が困難な都市部や山岳地帯での測定不能地域の解消が期待されている。

GNSS の測位方法は、大きく図-2.4 に示す単独測位と図-2.5 に示す相対測位の 2 種類に大別される。単独測位は主にカーナビゲーションシステムを中心とした移動体における測位方法として使用され、一般的に約 10m の誤差を有する。一方、相対測位は主に基準点測量分野を中心に用いられ、高精度な測位を可能とする。

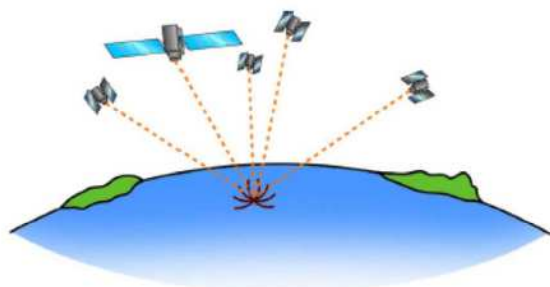


図-2.4 単独測位¹⁰⁾

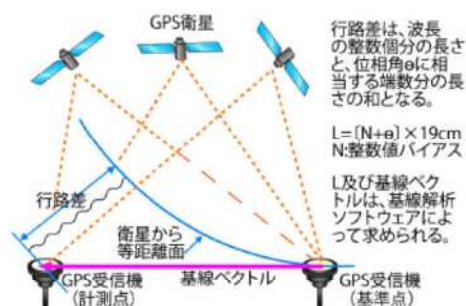


図-2.5 干渉測位¹⁰⁾

GNSS 測量の種類を表-2.1 に示す。本研究では、これらの GNSS 測量のうち最も計測精度が得られるスタティック法を用いており、観測時間（セッション）は 60 分、データ取得間隔（エポック）は 30 秒である。スタティック法は、一般的に 10mm 程度の誤差を有しているが、時系列統計処理技術を用いて高精度(2mm 程度)の変位計測が可能となっている。

表-2.1 GNSS 測量の種類¹⁰⁾

観測方法	観測時間 (セッション)	データ取得間隔 (エポック)	摘要
スタティック法	120 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量 (2 周波、10km 以上 ※1)
	90 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量 (3 周波、10km 以上 ※1)
	60 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量(10km 未満) 2~4 級基準点測量
短縮スタティック法	20 分以上	15 秒以下	3~4 級基準点測量
キネマティック法	10 秒以上 ※2	5 秒以下	3~4 級基準点測量
RTK 法	10 秒以上 ※3	1 秒	3~4 級基準点測量
ネットワーク型 RTK 法	10 秒以上 ※3	1 秒	3~4 級基準点測量
備考	※1 観測距離が 10km 以上の場合は、1 級 GNSS 測量機により 2 周波または 3 周波による観測を行う。ただし、節点を設けて観測距離を 10km 未満にすることで、2 級 GNSS 測量機により 1 周波による観測を行うこともできる。 ※2 10 エポック以上のデータが取得できる時間とする。 ※3 FIX 解を得てから 10 エポック以上のデータが取得できる時間とする。		

2.3.2 GNSS のインフラモニタリングへの適用に関する既往研究

GPS のインフラモニタリングへの応用については、桜井、清水¹¹⁾が、1990年に米国などでの適用事例を紹介している。当報文では、人工衛星を用いる新しい計測技術である“GPS”について解説し、地盤工学における変位計測への応用例をいくつか紹介した。これにより、GPS による地盤変位の測定精度、観測に要する時間などの測定効率が従来測量手法に比較して優れていること、観測時間の短縮化のためにキネマティック GPS という方法が提案されていること、GPS の観測結果は、湿度や大気の状態および観測点周辺の構造物などの影響を受けやすいため、それらによる誤差の評価および観測点の配置などには十分な注意が必要であることなどを報告している。

その後、清水らを中心として GPS を用いた岩盤や長大斜面の変位計測への適用、精度検証やシステム開発が数多く行われた^{12)~16)}。1994年には清水ら¹⁷⁾によって GPS による変位計測結果の精度向上と幾何学的拘束条件を考慮し逆解析を行う新しい評価手法が提案され、誤差を含んだ計測結果から精度良く観測時点の変位を推定できることや、クリープ変位の最終変位と収束時期を概ね妥当な値で予測できることが示された。さらに、清水ら¹⁸⁾は、GPS モニタリングシステムによる斜面変位計測をより高精度化するため、長期にわたり掘削される斜面を対象に、変位として、1) 静止状態、2) ステップ変位、3) 等速度変位、4) 収束クリープ変位、5) 加速クリープ変位、の5つのモードを想定し、実測ノイズを用いて上記の5つの変位モードに対してトレンドモデルを適用し、いずれのモードに対しても真の変位に精度よく適合することを示した。トレンドモデルによって平滑化を行うことで、それまで一般的な GPS では計測が困難であった緯度、経度、高さのいずれの成分も 2mm のステップ変位、また、速度が 0.5mm/日の変位を検出できることを示した。また、気象の影響の補正方法に関する増成ら¹⁹⁾の研究、上空障害物の影響とその低減法に関する増成ら²⁰⁾、松田ら²¹⁾の研究、GPS による変位計測へのダムへの適用を行った小堀ら²²⁾の研究およびトンネル坑口における長期計測を行った平野ら²³⁾の研究がある。

橋梁分野への GNSS の適用では、以下のような研究が見られる。

中村²⁴⁾は、風によって生ずる長大吊橋補剛桁の変位の GPS による直接計測方法の提案、加速度計では困難であった実橋梁における準静的変位の計測値と、風洞試験結果や FEM 解析結果との整合、GPS 計測結果のスペクトル解析により求めた振動特性の起振実験および FEM 解析結果との整合や加速度を2回積分して求めた変位との整合を確認し、GPS が長大吊橋の準静的および極長周期特性の把握や長期モニタリングに有効であることを示した。また、木村ら²⁵⁾は、GNSS センサーを吊橋に設置し、静的および動的に橋梁変位を計測することを試みている。

このように、GNSS のインフラモニタリングへの適用は、斜面、ダムおよびトンネルの分野での適用や応用が進む一方で、橋梁分野における適用は限定的である。このことから、本研究では GNSS の橋梁モニタリングへの適用を中心に議論する。

ここでも、本研究内容の橋梁工学における意義を明確化するため、GNSS に関する研究ではないが、トラス橋の構造冗長性に関して実施された既往研究について記述する。

永谷ら²⁶⁾は、国内のトラス橋2橋を対象に非線形リダダンシー解析を実施し、各部材破断時の橋梁各部の状態について、全塑性状態を示す算定式 R を用いて整理するとともに、各部の変形を図-2.6 のように示した。この研究は、トラス橋の部材破断が変位モニタリングによって検知可能であることを示唆している。

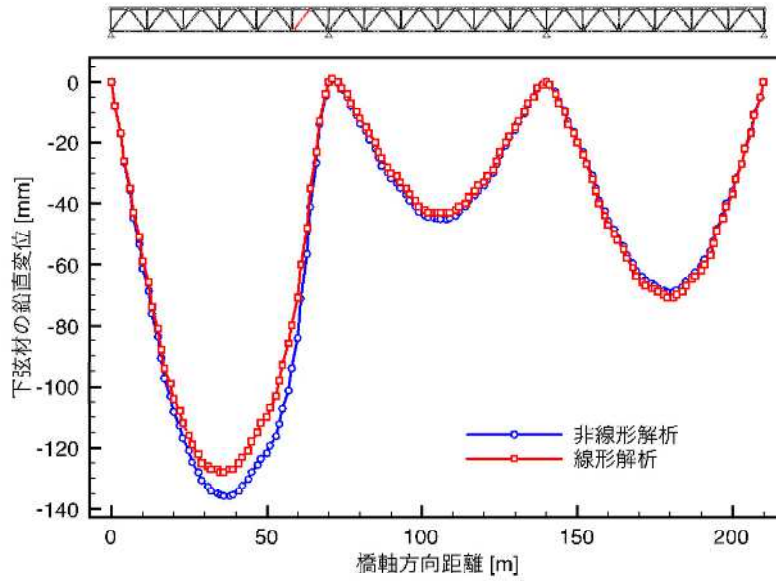


図-2.6 リダダンシー解析結果²⁶⁾

2.4 橋梁維持管理におけるモニタリング研究事例

本研究では、常時モニタリングへの適用を1つの目的としている。モニタリングでは、橋梁を長期に観測することから、橋梁に長期かつ連続的に作用する温度変化をパラメータとする研究が多く行われている。

例えば、原田ら²⁷⁾による吊橋主ケーブルの温度応答特性に関する詳細検討や、高木ら²⁸⁾によるインテグラル橋の温度変化による橋梁全体の内部応力や変形状態を評価するための、光波式測距儀を用いた測定結果とFEM解析結果との比較を行った研究がある。

また、小林ら²⁹⁾は常時活荷重が作用している橋梁において、温度変化による変形量のみを評価するシステムを構築したうえで、既設の鋼床版箱桁橋梁を対象として、物体温度計やひずみゲージ、変位計といったセンサーを設置し、2年以上にわたって橋梁部材の温度と変形を継続的に測定した結果をもとに、実橋梁における部材温度の年変動と日変動に対する変形挙動を明らかにし、温度と変形との相関関係を定量的に評価する手法を提案し、健全度モニタリングに用いる温度と変形の測定項目を抽出した上で、温度変形挙動の健全度評価モニタリングへの適用を試みた。

その他に、橋本ら³⁰⁾はSRC構造を有する合成トラスローゼ橋を対象に、現場にて赤外線サーモグラフィによる非接触温度計測を実施して橋梁部材ごとの温度変化挙動を把握し、その結果を用いてFEM解析により温度荷重を与えることで各部材の詳細な応力状態および変形挙動を追跡し、列車の走行安全性や部材の安全性を検討しているが、実橋梁変位の計測や実変位との整合についての検討は行われていない。

2.5 本研究の意義

デジタル画像相関法の既往研究では、インフラ構造物の振動に同手法を適用した研究はいくつか見られるが、ケーブル振動を対象としたものは見られない。

本研究によって、橋梁のケーブル張力計測において、これまで一般的に用いられてきた加速度計測手法に対し、デジタル画像相関法が同等の精度を確保できることを明らかにすることにより、ケーブル張力計測作業がより安全で効率的な作業となる。ケーブル張力計測がより身近で簡易なものとなり、計測頻度の短縮や日常的な計測手法としての活用により、ケーブルの常時遠隔モニタリングの将来的な実現可能性を示すことができる。これにより、ケーブル腐食や破断などを要因とする重大損傷の早期発見と、事前の経過把握による落橋予知につなげることが期待される。

GNSS 変位モニタリングでは、橋梁への適用による直接的な変位を把握した事例はみられるが、橋梁分野において、長期連続的な三次元変位の計測や、温度変化量と GNSS 変位との関係に関して検討した事例はみられない。

本研究によって、橋梁各部の着目箇所の三次元変位を 1 時間に 1 回の定常波形として精度良く計測できることが示され、GNSS の橋梁常時モニタリングへの適用性を示すことが可能となる。この技術のさらなる応用により、これまで実施されてこなかった様々な橋梁に対し、損傷の進行による橋梁各部の剛性低下、支承部・伸縮部の挙動異常、洗堀による傾斜や地震後、暴風後の挙動把握、その他の指標と併せた橋梁全体の挙動把握による常時遠隔モニタリングの実現可能性を示すことができると考える。

参考文献

- 1) 高木幹雄, 下田陽久:新編 画像解析ハンドブック, 財団法人 東京大学出版会, 2004.9.
- 2) 山田朝治, 横関俊介:モアレ縞・干渉縞応用計測法, コロナ社, 1996.12.
- 3) C. A. Walker: *Handbook of Moire Measurement*, Series in Optics and Optoelectronics, Inst. Of Physics Publishing, 2003.
- 4) 例えば, Satoru Y., and Hiroki U.: Bridge Deflection Measurement Using Digital Image Correlation with Camera Movement Correction, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 2 (2012) pp. 285-290 Special Issue on APCNDT 2009.
- 5) 北側彰一, 谷和彦, 岩田節雄, 北村幸嗣, 米山聡: デジタル画像相関法による鋼構造物のたわみ分布測定, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 2005f. No. 358, 2005.11.
- 6) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68, No.2 (応用力学論文集 Vol. 15) , pp. I_683-I_690, 2012.
- 7) 大町博崇, 町田賢司: デジタル画像相関法による構造物の振動解析, 実験力学, Vol.10, No.1, pp.57-62, 2010.3.
- 8) 今井道男, 太田雅彦, 露木健一郎, 今井浩, 三浦悟, 村田一仁, 高田巡: 高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 1, pp. 279-289, 2016.
- 9) 橋本国太郎, 林宏行, 川辺直人, 渡邊裕規, 清水晋作: ケーブルが腐食損傷した少数ケーブル鋼斜張橋の残存性能に関する解析的研究, 鋼構造論文集, Vol. 28, No.109, pp. 103-115, 2021.3.
- 10) Shamen-net 研究会 編集委員会: [新]知っておきたい GPS/GNSS のはなし, p. 26, 2019.5.
- 11) 桜井春輔, 清水則一: GPS (汎地球測位システム) の地盤変位計測への応用, 「土と基礎」, 38(4), pp. 65-72, 1990.4.
- 12) 桜井春輔, 清水則一: 人工衛星による精密測位システム (GPS) の岩盤変位測定への応用, 第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 41-48, 1991.
- 13) 清水則一, 桜井春輔, 皿海章雄, 古谷茂也: GPS (人工衛星測量システム) による長大斜面の変位モニタリング, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 440-444, 1992.
- 14) 清水則一, 桜井春輔: GPS の岩盤変位計測への適用, 資源と素材, Vol. 109, pp. 1-7, 1993.
- 15) 藤岡晃, 菊田勝之, 清水則一, 桜井春輔: GPS 測量を用いた土工事の出来形測定システムの開発, 土木学会論文集, No.468, IV-19, pp. 31-38, 1993.6.
- 16) 桜井春輔, 清水則一, 皿海章雄, 古谷茂也: GPS による切り取り斜面の変位測定, 土木学会論文集, No.475, III-24, pp. 137-142, 1993.9.
- 17) 清水則一, 江上知幸, 中川浩二, 桜井春輔: GPS による地盤変位計測結果の適応フィルタリングを用いた一評価法, 土木学会論文集, No. 487, III-26, pp. 275-278, 1994.3.
- 18) 清水則一, 安立寛, 小山修治: GPS 変位モニタリングによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源と素材, Vol. 114, pp. 397-402, 1998.
- 19) 増成友宏, 清水則一: GPS による地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討, 土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 5, pp. 437-447, 2007.10.
- 20) 増成友宏, 武地美明, 田村尚之, 船津貴弘, 清水則一: GPS 変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 4, pp. 394-402, 2008.11.
- 21) 松田浩朗, 筒井隆規, 生田圭介, 清水則一: 上空障害物のあるトンネル坑口斜面における GPS 変位計測システムの適用, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 68, No. 2, pp. 21-28, 2012.
- 22) 小堀俊秀, 山口嘉一, 岩崎智治, 中島伸一郎, 清水則一: フィルダム天端堤体内部に設置する GPS アンテナの変位計測性能実験とダム外部変形計測への適用性, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 70, No. 1, pp. 18-28, 2014.

- 23) 平野宏幸, 白田芳彦, 神澤幸治, 宮田和, 清水則一: トンネル施工時における地すべり斜面の三次元変位計測への GPS 変位計測システムの適用とその評価, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.2 (200), pp.7-18, 2011.3.
- 24) 中村俊一: GPS を用いた吊橋補剛桁の風圧変形計測に関する研究, 土木学会論文集, No. 658, IV-48, pp. 231-243, 2000.9.
- 25) 木村保崇, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 村上新一: GPS を用いた橋梁健全度モニタリング, 土木学会北海道支部, 59 巻, pp. 108-111, 2003.1.
- 26) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65 No.2, pp. 410-425, 2009.5.
- 27) 原田康夫, 長谷川鏞一: 吊橋ケーブルの温度応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 251 号, pp. 17-27, 1976.7.
- 28) 高木優任, 横山功一, 原田隆郎: 外部環境の変化がインテグラル複合ラーメン橋の挙動に及ぼす影響に関する検討, 鋼構造論文集, Vol. 10, No.38, 2003.6.
- 29) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: 鋼床版箱桁橋の温度変形挙動を利用した健全度評価モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 4, pp. 794-807, 2006.10.
- 30) 橋本国太郎, 奥村駿, 杉浦邦征, 谷口望, 藤原良憲: SRC 構造を有する合成トラスドローゼ橋の温度変化挙動, 構造工学論文集, Vol. 61A, 2015.3.

第3章 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測

3.1 序言

構造部材に生じる応力やひずみおよび変形の計測には様々な手法が存在するが、測定領域の大きさに応じて局所計測法と全視野計測法に大別される¹⁾。各種ゲージやセンサー等を用いる局所的計測法は、測定原理が簡便であり広く用いられている。しかし、測定領域が限られるため、広域を対象とした分布計測では多数の機器の利用や繰り返し測定が必要となる。一方、分布計測を得意とするモアレ法やデジタル画像相関法（以後、DIC法：Digital Image Correlation法）は、光学的非接触型の全視野計測法で高感度・高精度であり、処理の自動化により計測の効率化が図れることから期待を集めている²⁾。

モアレ法³⁾は、部材に添付した等間隔格子を持つ画像を変形前後で重ね合わせた際に出現する干渉縞を用いて構造物の変形を測定する。モアレ干渉縞の輝度分布を波と見なして位相解析と組み合わせることで、格子間隔の1/1000の精度で変形を計測できるとされている。しかし、格子画像を部材に添付するのが困難な場合や、構造部材に周期模様がない場合には計測が困難となる。

一方、DIC法は、ターゲット（テンプレート画像）と一致する領域をパターンマッチングによりデジタル画像内で探索することで、変形前後の構造部材の変位を計測する。精密探査と組み合わせることで、1/30画素相当の精度で変位計測が可能であることが知られている。

DIC法を用いて構造物の静的な変位や変形および応力場を、静止画像を用いて把握するための研究は数多く見られ、吉田ら⁴⁾は画像解析により大変形するゴムの変形場の計測に対して、出水ら⁵⁾はDIC法による室内実験において試験片のひずみ計測に対して、米山ら⁶⁾は鉸桁橋の載荷試験時の変位計測に対して、それぞれDIC法を適用している。

一方、振動する物体を対象に画像計測を実施した研究事例は少ない。大貫、町田⁷⁾は、構造物に見立てた連続体の室内振動計測へDIC法を適用し、今井ら⁸⁾は、コンクリート桁の繰り返し載荷試験を実施し、重量車両通行時の床版のたわみ挙動やひび割れの開閉挙動の計測を行っている。しかし、屋外での実橋梁構造部材を対象とした現場計測による動的挙動や振動特性の評価を目的としたDIC法の適用に関する研究は少ない。

斜張橋や吊り橋などの長大橋の維持管理では、ケーブルの性能管理が重要な課題となっており、点検時にはケーブルの導入張力の確認作業が行われている。現状のケーブル点検では、電磁誘導法による計測や加速度センサーによる振動計測⁹⁾に基づくケーブル部材の振動特性評価をもとに、ケーブル張力の推定を行うのが一般的である。これらはいずれも接触型の局所計測法による計測手法であり、ケーブル毎の計測作業に時間を要することから、点検効率の改善が求められている。

本研究では、斜張橋のケーブル張力推定にDIC法を適用し、計測精度の議論や課題の抽出を行う。また、光学機器の高性能化、デジタル画像の高精細化によって計測精度の向上が見込まれることから、デジタル画像の高精細化が計測精度に及ぼす影響についても考察を行う。

3.2 画像計測に基づくケーブルの振動計測

3.2.1 斜張橋ケーブル張力計測に求められる精度

本研究に先立ち、斜張橋ケーブル張力計測に求められる振動数計測の精度について整理する。ケーブル理論振動数の算定式を式(3.1)に示す。

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{Tg}{w} \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2 T} \right)} \quad (3.1)$$

ケーブル点検では、一般的にケーブル張力が設計値から 10%程度の乖離が許容されている。上式より、ケーブル張力の変動を 10%まで許容する場合、振動数の許容幅は約 5%程度となる。

したがって、本研究における計測誤差の目標値を±5%とする。

3.2.2 ケーブル張力推定における高次振動の影響

ケーブル張力測定における高次振動モードの影響については、島田¹⁰⁾による研究がある。島田はケーブルのサグ・傾斜・曲げ剛性を考慮したケーブル振動の特性方程式を導き、高次モードの固有振動数から張力を求めることにより常時微動法の適用を可能とした。同時に、低次モードよりも高次モードから張力を算定する方が、振動数の分解能の影響による誤差が低減すること等を示した

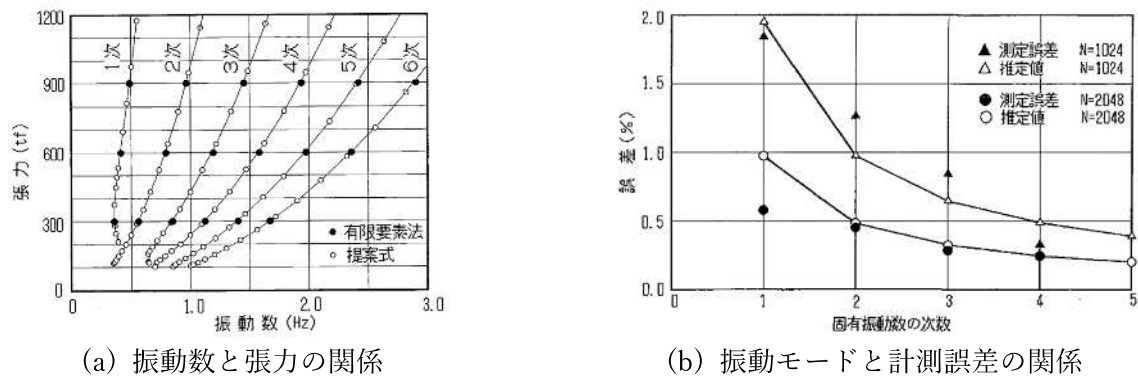


図-3.1 高次モードを用いた時の測定精度¹⁰⁾

また、山極ら¹¹⁾による研究では、高次モードの振動数を用いて「ケーブル張力と曲げ剛性を同時に推定する手法」が示されており、曲げ剛性が不明な既設斜張橋のケーブル点検で使用されることが一般的になっている。

これらの観点から、本研究では DIC による高次モード検出の可能性について考察する。

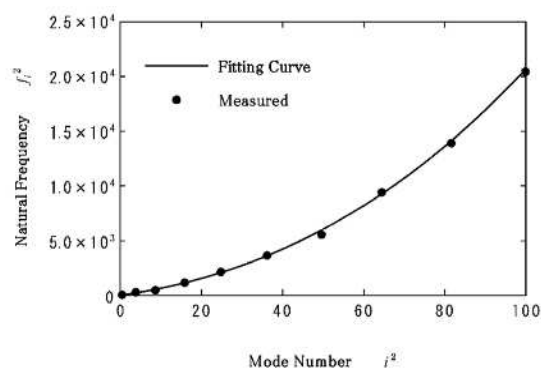


図-3.2 ケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法¹¹⁾

3.2.3 対象橋梁と対象ケーブル

本研究では、画像計測法に基づいて斜張橋の主構造部材であるケーブルの性能評価を行うことを目的として、ケーブルの振動計測において画像計測法を適用し、ケーブルの導入軸力を推定する手法に関する検討を行う。図-3.3 に対象とした斜張橋の一般図を示す。本橋は橋長 491m (斜張橋部 310 m) の 5 径間の鋼斜張橋である。各部の構造を表-3.1 に示すが、主桁部は片側 2 車線 (合計 4 車線) の全幅 25.8m の連続鋼床版箱桁構造となっており、渡河部の P2~P4 径間では、鋼製の逆 Y 字型主塔が鋼床版箱桁をケーブルで支持する構造となっている。なお、本橋を研究対象に選定した理由の一つとして、鋼床版箱桁を吊るケーブルは中央 1 面にのみ配置されているために、活荷重によって桁にねじり振動が発生してもケーブル張力に変動は生じないことが挙げられる。

ケーブルは同図に示したとおり、P3~P4 径間では最も内側に配置したケーブル C10 から順に最外縁のケーブル C18 まで計 9 本のケーブルが配置されており、合計 18 本 (P2~P3 間のケーブル C1~C9 を含む) のケーブルで鋼床版箱桁を吊り上げている。なお、今回の計測では C10, C14 および C18 のケーブルを対象に振動計測を実施したが、表-3.2 には同ケーブルの諸元を示す。何れのケーブルとも、ケーブルストランドには直径 $\phi 7\text{mm}$ の亜鉛メッキ鋼線が用いられており、防錆のためにポリエチレン材により被覆している。ケーブルが主塔から離れるに従って、仰角が小さくなりケーブル張力が小さくなることから、ケーブルに作用する応力が、概ね等しくなるように、ストランド本数およびケーブル断面積が調整されている。

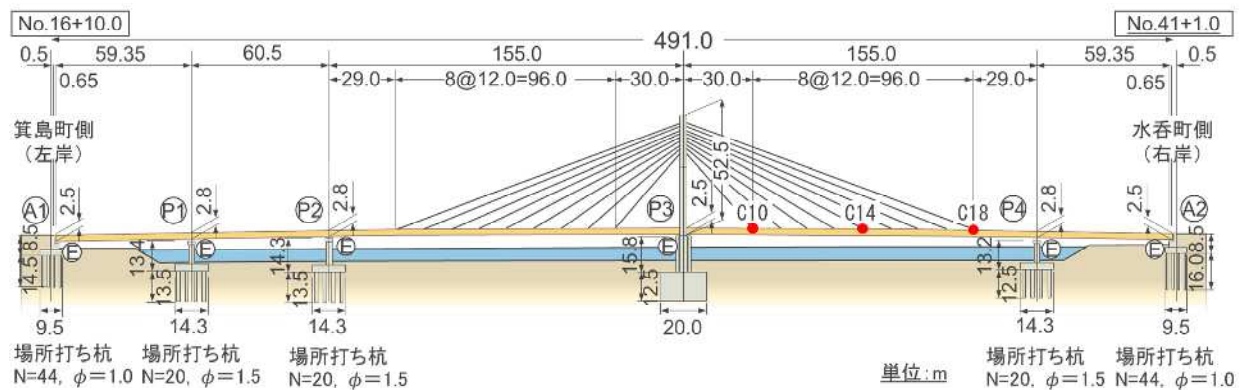
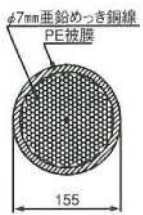




図-3.3 対象橋梁と計測ケーブルの位置

表-3.1 対象橋梁の構造諸元

道路規格	第4種第1級
設計速度	50 km/h
荷重種別	B活荷重
幅員	車道：7.25m×2 歩道：3.5m×2
主桁	3室箱桁 2室箱桁
主塔	逆Y字型柱 (塔高 52.5 m)
ケーブル	ファン形式 (1面9段マルチケーブル)

表-3.2 計測対象ケーブル諸元

ケーブル No.	C10	C14	C18
ストランド径	φ7mm	φ7mm	φ7mm
本数	301	283	163
ケーブル断面構成			
標準断面積 (mm ²)	11600	10900	6720
破断荷重 (MN)	18.2	17.1	9.85
弾性係数 (GPa)	195	195	195
単位長さ重量 (kN/m)	0.956	0.899	0.520

3.2.4 加速度計計測

ケーブルの基本振動モード形状と各モードの最大振幅位置を図-3.4，加速度計設置位置と各振動モードの最大振幅発生位置との関係および画像計測範囲を図-3.5に併せて示す。ここで，加速度計設置位置は3次～5次の振動モードの最大変位が発生する位置に近いが，これらのモード次数の卓越振動数スペクトルは容易に捉えることができるが，1次および2次モードの最大変位位置からは離れていることに留意する。なお，加速度計設置位置は，手作業による設置が可能な範囲で路面から約2～2.5m程度の高さにテープにより緊結して設置した。

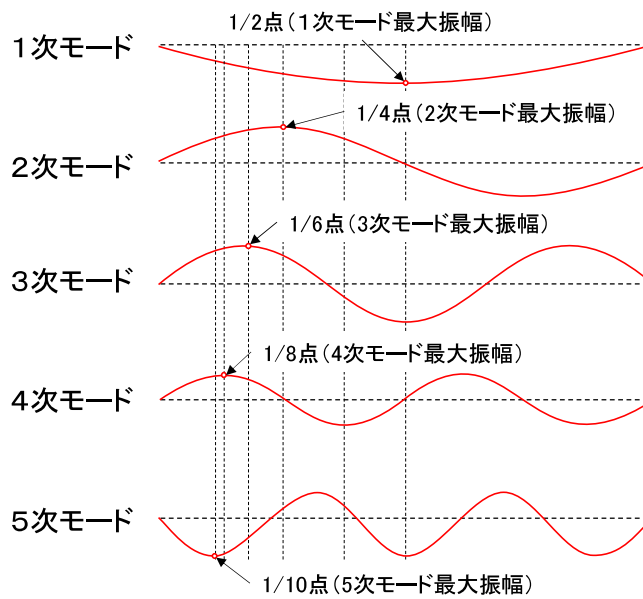


図-3.4 ケーブルの基本振動モード形状

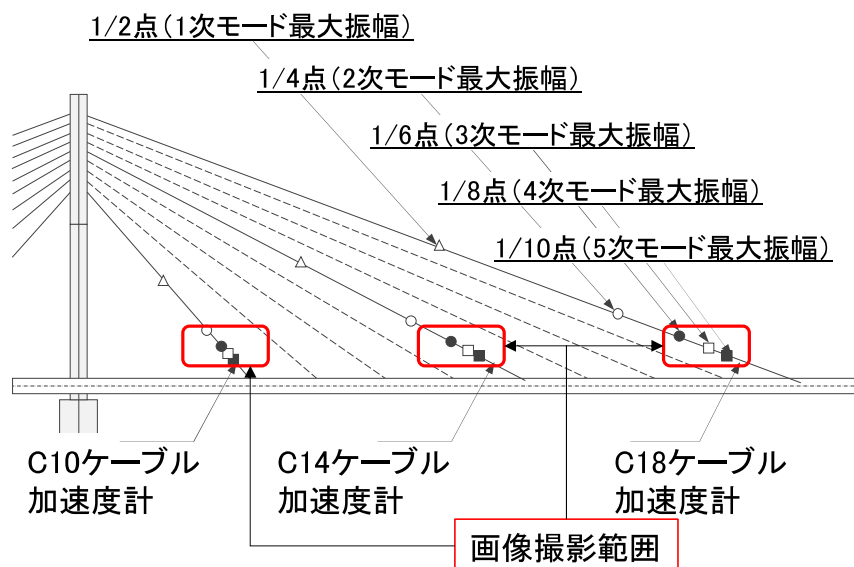


図-3.5 振動モード最大変位位置と加速度計位置

【第3章 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測】

図-3.6 に加速度計の設置状況を示す。各ケーブルに設置した加速度センサーは通信ケーブル (CAN-Cable) を介して記録用 PC に直列接続して同期計測を行った。加速度センサーはセイコーエプソン株式会社製の M-A550AC2 ($\pm 2G$) を使用し、サンプリング周波数は 100Hz とした。同センサーは水晶振動子型の加速度センサーで、小型かつ高精度の計測が可能なセンサーである。

加速度計による計測は、ケーブルの強制加振は実施せず、通行車両より惹起される常時微振動を用いた。

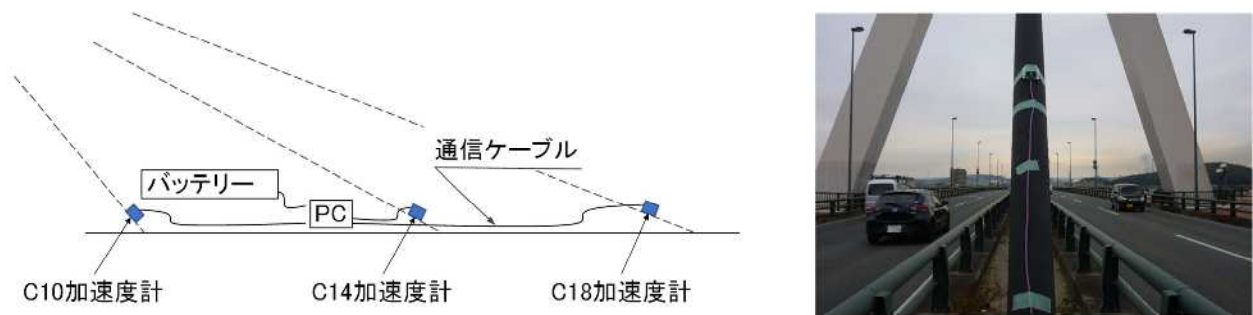


図-3.6 加速度計の設置状況

3.2.5 画像計測

画像計測は、C10、C14、C18 ケーブルでそれぞれ 6 回の計測を実施した。図-3.5 にはカメラによりケーブルを撮影した範囲を着色して示している。画像撮影範囲は加速度計設置位置を含んでおり、かつケーブル長の 1/6 点、1/8 点、1/10 点に近く加速度計と同様、3 次～5 次モードの振動を捉えやすい位置となっている。

対象ケーブルとカメラの位置関係を図-3.7、現地撮影状況を図-3.8 に示す。撮影用カメラを三脚上に固定して歩道路面上に設置し、ケーブルの長手直交方向の振動を捉えやすいように斜ケーブルの真横にカメラを設置し、ケーブルが画像内で水平となるようにカメラを傾けて撮影を行った。ケーブルとカメラの距離は約 9 m である。

撮影カメラの仕様を表-3.3 に示す。2K カメラの画角は 1920×1200 pixel, 1 秒間における撮影枚数を示すフレームレートは 40fps (frame per second), 4K カメラの場合は、画角 3840×2400 pixel, 30fps である。

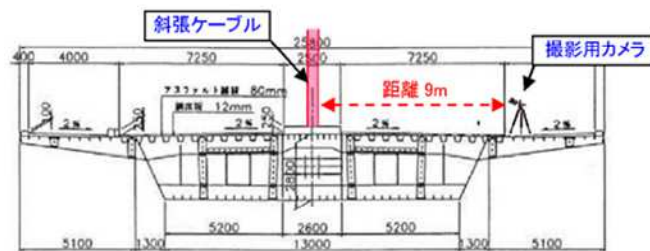


図-3.7 対象ケーブルとカメラの位置



図-3.8 現地撮影状況

表-3.3 撮影カメラの仕様

カメラ種別	2K カメラ 【GS3-U3-23S6M-C】	4K カメラ 【GS3-U3-89S6M-C】
メーカー	FLIP Japan	
イメージセンサ	1/1.2 型[2K]	1 型[4K]
画角	1920×1200	3840×2400
fps	40	30

3.2.6 計測ケースと計測時間

加速度計測および画像計測の計測ケースと計測時間を表-3.4 に示す。加速度計測は 1 回あたり 10 分を各 3 ケース、画像計測は 1 回あたり 1 分間の撮影を各 6 ケース、2K、4K のそれぞれで実施した。なお、画像計測の計測時間を 1 分間とした理由は、ケーブルをほぼ真横の位置で撮影可能な高さにカメラを設置した場合に、通行車両に遮られずに連続撮影できる時間が 1 分程度であったことと、1 回の計測におけるデータ容量が 4~8 GB と大きく、データ伝送とストレージ容量に配慮して計測時間の設定を行ったことによる。

表-3.4 計測ケースと計測時間

		C10	C14	C18	計測時間
加速度計		3 ケース	3 ケース	3 ケース	10 分
画像計測	2K	6 ケース	6 ケース	6 ケース	1 分
	4K	6 ケース	6 ケース	6 ケース	1 分

3.3 デジタル画像相関法による解析

本研究で用いた DIC 法の解析方法を以下に詳述する．先ず，計測対象部位の動画像を，256 濃度階調の濃淡のあるグレー画像で撮影する．この画像に対し，変位を追跡したい着目微小領域（サブセット）を図-3.9 のように任意に決定する．この時，サブセットのサイズ（例えば縦 32pixel×横 32pixel）についても任意に決定する．着目したサブセット A 内の平均輝度値を求め，この輝度値と最も相関の高い範囲を次の画像内で探査し，着目範囲が移動した座標を求める．これを所定の動画像すべてにおいて連続的に行い，変位時刻歴波形を得る．変位検出方法は，式 (3.2) に示す類似度を評価値として利用した正規化相互相関法（Normalized Cross Correlation）を用いる．

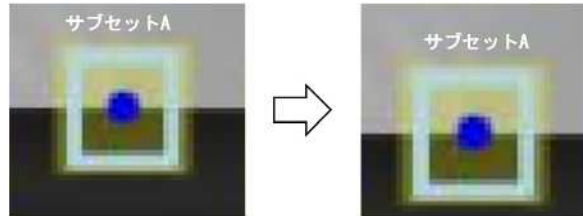


図-3.9 サブセットの移動

$$R(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^{M_T} \sum_{l=1}^{N_T} \{I_{k,l}(i, j) - \bar{I}\} \{T_{k,l} - \bar{T}\}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{M_T} \sum_{l=1}^{N_T} \{I_{k,l}(i, j) - \bar{I}(i, j)\}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{M_T} \sum_{l=1}^{N_T} \{T_{k,l} - \bar{T}\}^2}} \quad (3.2)$$

$$\bar{I}(i, j) = \frac{1}{M_T N_T} \sum_{k=1}^{M_T} \sum_{l=1}^{N_T} I_{k,l}(i, j) \quad (3.3)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{M_T N_T} \sum_{k=1}^{M_T} \sum_{l=1}^{N_T} T_{k,l} \quad (3.4)$$

ここで，各変数は次式の通りである．

$R(i, j)$: サイズ($M_T \times N_T$)のサブセット画像と，撮影画像内の位置(i, j)を基準とするサイズ($M_T \times N_T$)の領域画像との類似度を表す正規化相互相関係数

$I_{k,l}(i, j)$: 撮影画像内の位置(i, j)を基準とする相対位置(k, l)における撮影画像の輝度値 (0 : black ~ 255 : white)

$T_{k,l}$: サブセット画像の位置(k, l)における輝度値

$\bar{I}(i, j)$: 撮影画像内の位置(i, j)を基準とするサイズ($M_T \times N_T$)の領域内における平均輝度値

\bar{T} : サブセット画像の平均輝度値

変位検出方法には，上記のような方法により画素（pixel）単位で変位を求める粗探査と，1画素以下（サブピクセルオーダー）の精度で変位を求める精密探査が存在する．

粗探査による変位追跡方法について，具体的に説明する．

まず，撮像内の変位前画像に対し任意のサブセットサイズを指定する．次に，撮像内における全画素に対し，左上隅から順次，指定した大きさのサブセット内の輝度値分布を求め，指定サブセット画像と最も相関が高い位置を変位後座標位置とする．

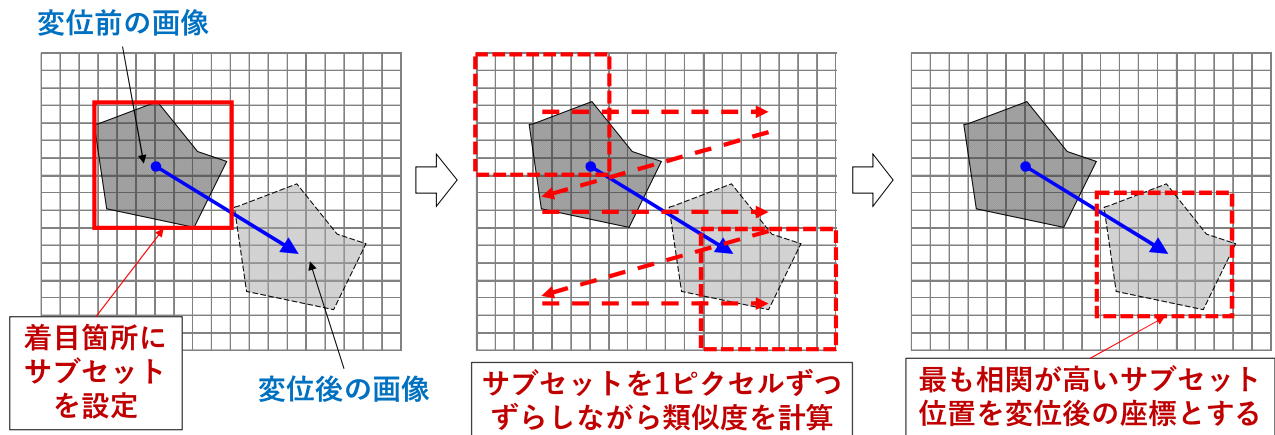


図-3.10 位置追跡の方法

次に，精密探査の方法について，2つの画像 $f(i,j)$ ， $g(i,j)$ 間の一致度を図-3.11 および式 (3.2) に示す類似度で評価した場合について説明する．なお，説明は簡単のため1次元の場合について記述する．

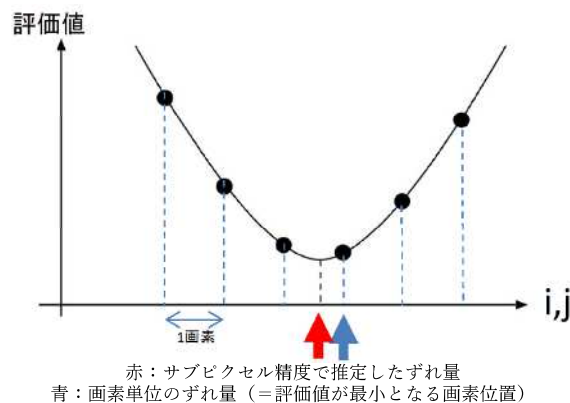


図-3.11 画素単位とサブセット単位のずれ量

画素単位のずれ量とサブピクセル精度で推定したずれ量の関係図-3.11 に示す。評価値が最小となる座標値 (i, j) が、2つの画像間の「画素単位のずれ量」に相当し、この評価値がなめらかに変化すると仮定し、評価値を放物線で近似することで、1画素以下（サブピクセル）の「画像のずれ量」を推定する。サブピクセルオーダーの変位算出手順を図-3.12 に示す。はじめに、画素単位で評価値を算出する（同図 (a)）。次に評価値の最小値（相関値の場合は最大値）を選択する（同図(b)）。最小値を含めて最小値近傍の3点を選択する（同図(c)）。選択した3点をパラボラに当てはめる（同図(d)）。最後に当てはめたパラボラの最小値を計算し、その最小値に対応する座標位置をサブピクセル精度で推定した変位とする（同図(e)）。

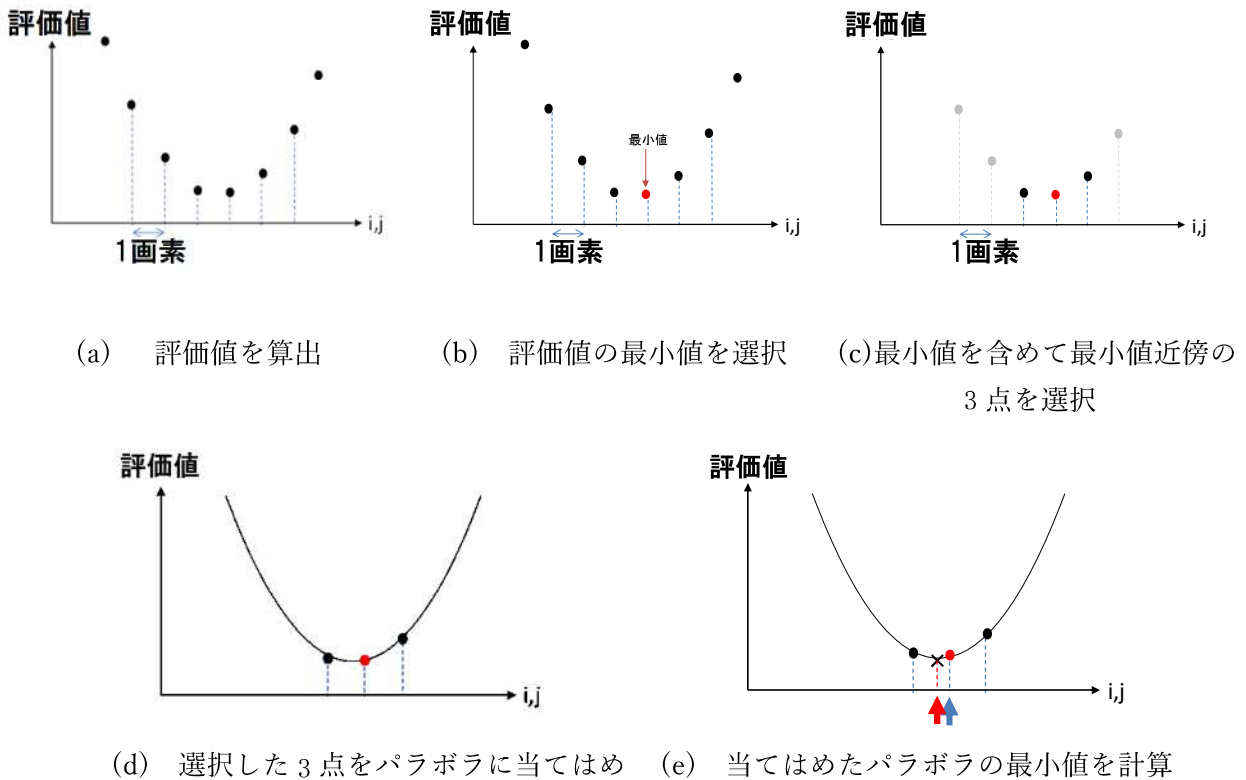


図-3.12 サブピクセルオーダーの変位算出手順

このようにして得られた時刻歴波形に FFT を実施することによりケーブルの卓越振動数を得ることが可能となる。なお、本研究における DIC 法による解析は、パナソニック・システムソリューションズ・ジャパン社製「微小変位検出ソフトウェア」を使用した。

本研究では、DIC法による振動数計測が一般的に用いられている加速度計測と比較してどの程度の精度の違いが生じるかを確認することに加え、2Kおよび4K画像それぞれにおいて、着目するサブセットの大きさとその位置が、解析結果である振動数抽出精度にどの程度の影響を与えるかについて検討することを目的として、表-3.5に示すとおり、2Kカメラで8ケース、4Kカメラで10ケースの合計18ケースの解析をC10ケーブルにおいて実施した。解析におけるサブセットの大きさは、2Kカメラでは $32 \times 32 \sim 256 \times 256$ (pixel)の4種類、4Kカメラでは $32 \times 32 \sim 512 \times 512$ (pixel)の5種類、サブセット位置は、各サブセットの大きさにおいて中央および上部のそれぞれ2ケースを実施した。なお、サブセットの位置とは、サブセットの図心がケーブル径の中心に位置するものを「中央」、ケーブル径の外側上部に位置するものを「上部」と定義する。

2Kおよび4K画像と設定したサブセットの関係をそれぞれ図-3.13および図-3.14に示す。撮影範囲に対応するケーブル長は、2K画像で約5.5m、4K画像で約7.8mのため、画像中における1pixelに相当する実際の長さは、それぞれ約2.86mmおよび約2.03mmとなる。解析は、セットしたサブセットでの変位時刻歴波形を抽出し、FFTにより卓越振動数を求めた。

表-3.5 解析ケース

CASE	カメラ種別	サンプリング周波数 (Hz)	サブセットの大きさ (N×N)	サブセット位置	CASE	カメラ種別	サンプリング周波数 (Hz)	サブセットの大きさ (N×N)	サブセット位置
1	2K	40	32×32	中央	9	4K	30	32×32	中央
2				上部	10				上部
3			64×64	中央	11			64×64	中央
4				上部	12				上部
5			128×128	中央	13			128×128	中央
6				上部	14				上部
7			256×256	中央	15			256×256	中央
8				上部	16				上部
					17				中央
					18			512×512	上部

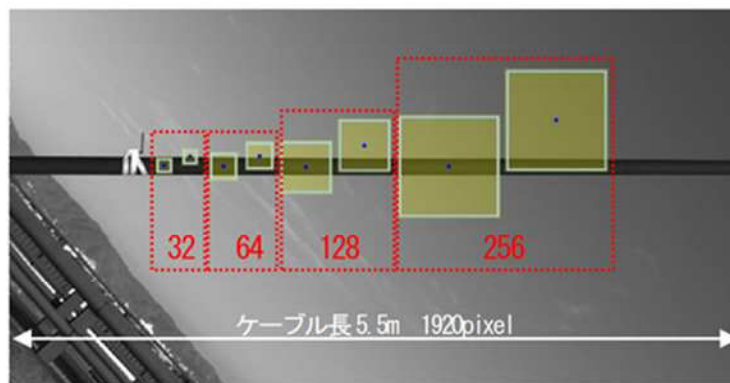


図-3.13 2K 画像におけるサブセット

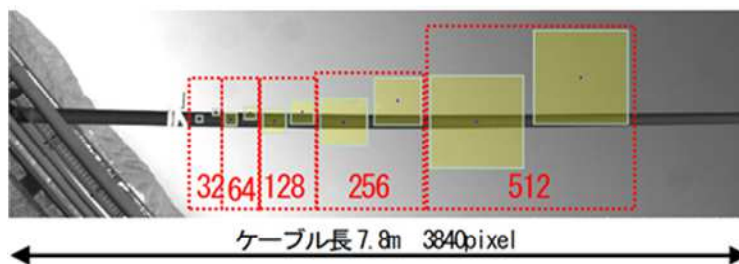


図-3.14 4K 画像におけるサブセット

3.4 サブセットの設定や画像解像度が画像計測の精度に及ぼす影響

3.4.1 加速度計測結果

加速度計を用いて計測した時刻歴波形と FFT 結果を図-3.15 および図-3.16 に、ケーブル理論振動数を表-3.6 に示す。ケーブル理論振動数は式(3.1)により算出した。

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{Tg}{w} \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2 T} \right)} \quad (3.1) \text{ 再掲}$$

ここで、 T ：ケーブル張力 (tf)、 n ：振動次数、 f_n ： n 次の卓越振動数 (Hz)、 L ：ケーブル長 (m)、 w ：ケーブルの単位重量 (tf/m)、 g ：重力加速度 9.8 m/s^2 である。

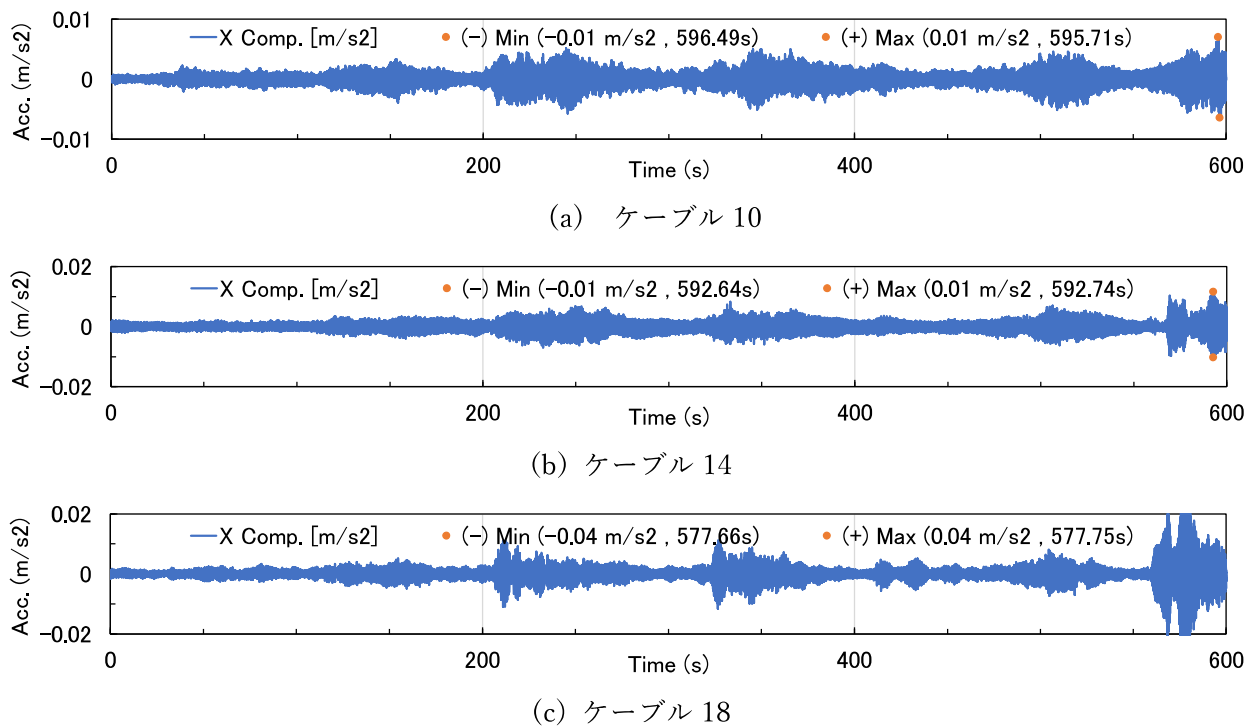
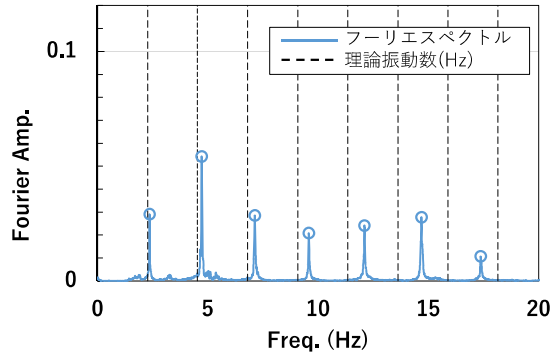
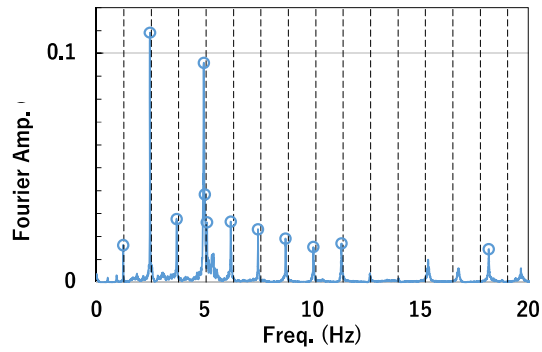


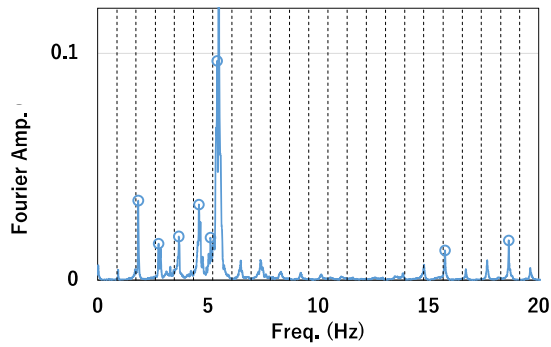
図-3.15 ケーブル振動の加速度計測結果



(a) ケーブル 10



(b) ケーブル 14



(c) ケーブル 18

図-3.16 加速度波形のフーリエスペクトル

表-3.6 ケーブル理論振動数

	ケーブル 番号	振動次数 n				
		1	2	3	4	5
ケーブル理論 振動数 (Hz)	C10	2.27	4.55	6.84	9.16	11.50
	C14	1.27	2.53	3.80	5.06	6.33
	C18	0.87	1.74	2.61	3.48	4.36

加速度計測結果における理論値との差は最大約 6%であった。各ケーブルにおいて加速度計測結果よりサグの影響を考慮しない式 (3.5) を用いて張力を推定した結果を**図-3.17**、式 (3.5) に対しサグの影響を考慮した式 (3.6) を用いて張力を推定した結果との比較を**図-3.18** に示す。同図よりサグの影響は 5%未満であり、以後はサグを考慮しない式(3.5)を用いることとする。

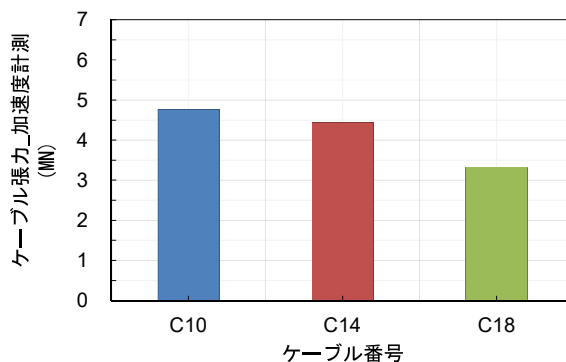


図-3.17 ケーブル張力_加速度計測 (1次)

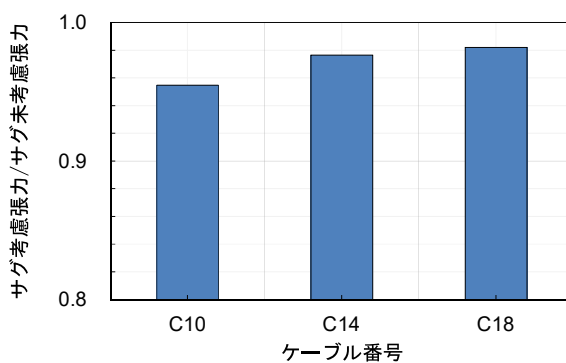


図-3.18 サグ考慮有無による計測張力への影響 (1次)

$$T = \left(\frac{2Lf_n}{n}\right)^2 w/g - \frac{n^2\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.5)$$

ここで、 EI はケーブル剛性 (Nm^2)

$$T = \frac{w}{g} (f_2 L)^2 \left\{ 1 - 4.40 \frac{C^2}{f_2} \right\} \quad (3.6)$$

1次～3次モードにおける設計張力に対する計測張力の比率を図-3.19に示す。いずれのモードにおいても計測張力に対して同じばらつきを示しており、加速度計測が一定の精度であることを示している。

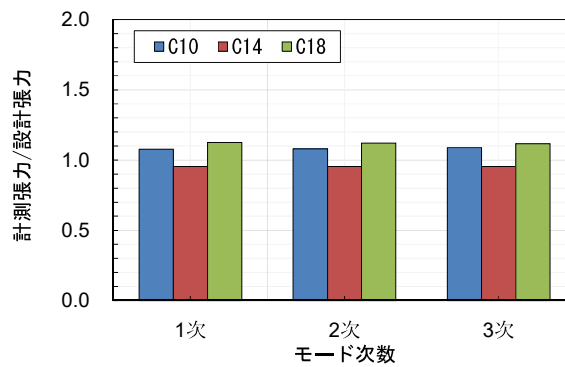


図-3.19 計測張力と設計張力の比率

3.4.2 加速度計と画像計測の比較

画像計測による時刻歴波形を図-3.20 に示す。この時刻歴波形から、画像計測では 1mm 以下の微小な変形も計測できていることが分かる。

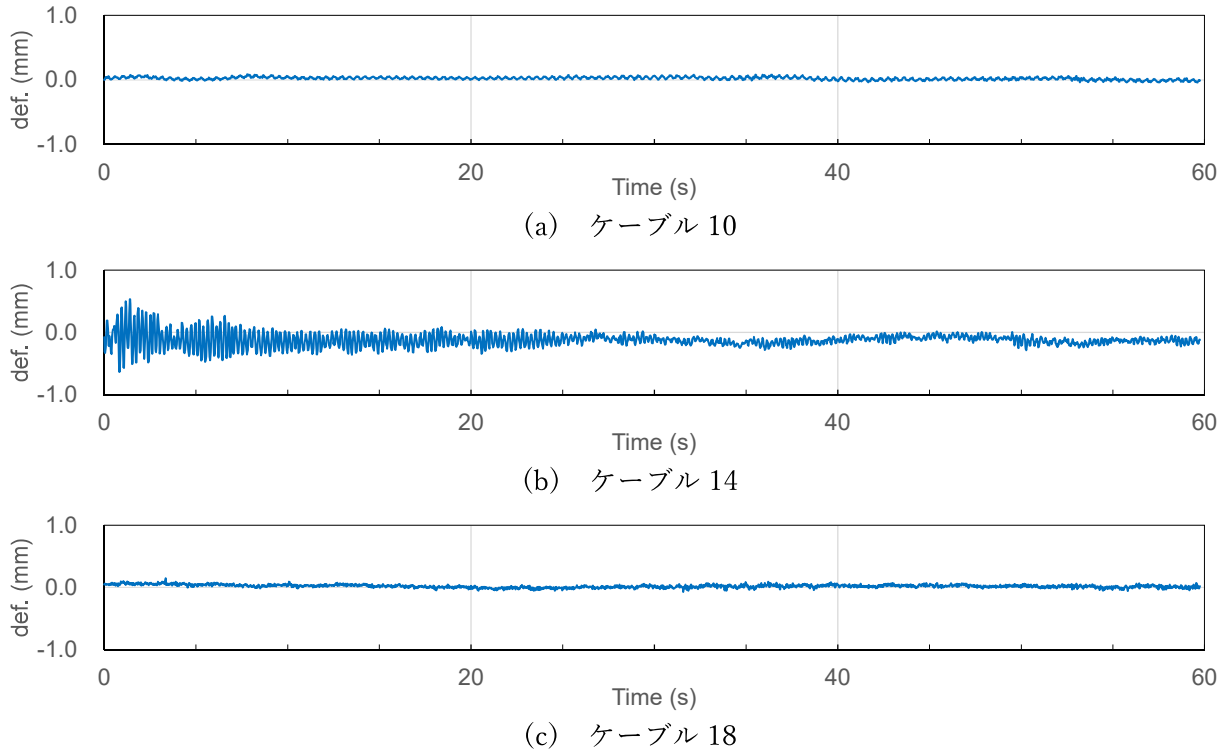
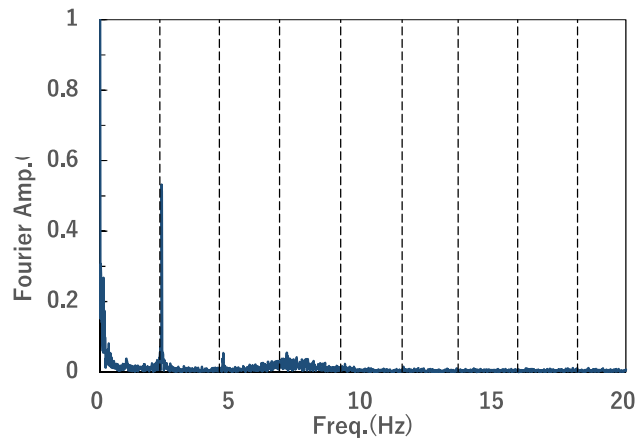


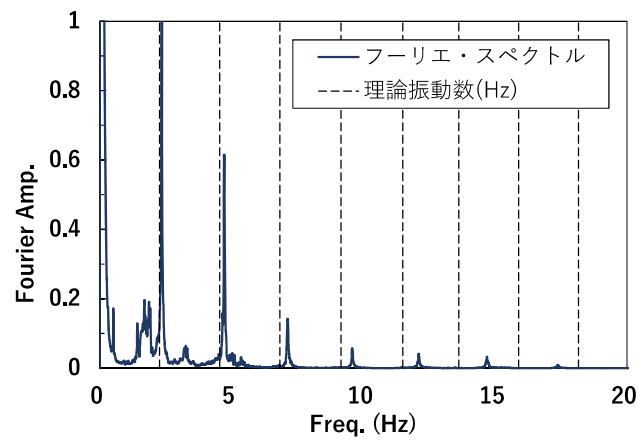
図-3.20 時刻歴波形_画像計測

図-3.21 (a) には、画像計測で得られた変位のフーリエスペクトルを示す。また、同図 (b) には、図-3.16 (a) に示した加速度のフーリエスペクトルを振動数領域で 2 階積分して求めた変位のフーリエスペクトルを示す。なお、画像解析では後述するサブセットサイズを 64×64 として分析を行った CASE3 を用いている。画像計測により求めた 1 次振動数は 2.34 Hz となり、加速度計測により求めた結果と比較するとその差は 0.5% 以内となっていることから、画像計測によるケーブル振動数は加速度計とほぼ同等の精度でケーブル振動数を抽出できている。

これに対して、2 次モードは 4.68 Hz となっているが振幅が非常に小さく、3 次モードに至ってはノイズとの判別が出来なくなっている。同図 (b) に示した加速度センサーで計測した加速度のフーリエスペクトルを $1/\omega^2$ (ω : 角円振動数) 倍して変位の次元で表示した結果でも、高次振動数ほど振幅が小さくなっており、固有振動モードの検出が困難になっている。



(a) 画像計測

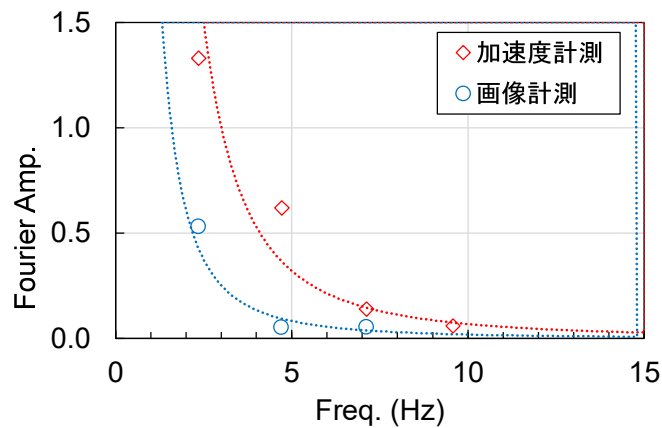


(b) 加速度計計測

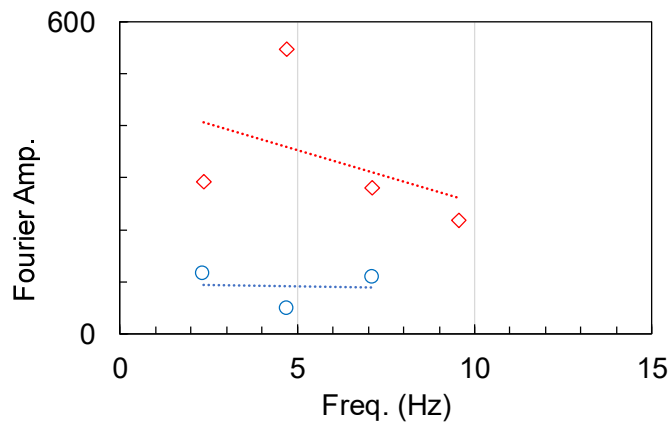
図-3.21 加速度計測と画像計測結果の比較（変位のフーリエスペクトル，ケーブル 10）

画像計測で得られた変位および加速度計測で得られた加速度について、振動数領域で微分・積分処理を行って求めた変位および加速度のフーリエスペクトルを求め、ピーク抽出した結果を図-3.22に示す。なお、前述の通り、画像計測結果は高次振動モード（3次以降）の振幅が小さく固有振動数の検出が出来なかったケースがあったことから、表-3.4に示した各3回の実験結果の中からかろうじて固有振動数の抽出が出来たケースについて示した。

同図(a)に示した変位のフーリエスペクトルを見ると、加速度計測および変位計測とも、前述の通り振動数の増加に伴い振幅レベルが急激に小さくなっている。同図には累乗近似 ($F(y) = a \cdot f^b$) により近似した結果を示すが、表-3.7に示した回帰係数から分かる通り、変位のフーリエ振幅は、振動数 f の概ね2乗に反比例している。このため、前述のとおり、高次振動になるほど振幅が小さくなり卓越振動数の抽出が困難となる。一方、同図(b)に示した加速度のフーリエスペクトルは、飛び抜けて大きな値を示している2次モードを除くと、各モードのフーリエ振幅は概ね同レベルとなっており、比較的高次モードまで計測可能であることを示している。また、このことは、振動する物体を変位で計測するよりも加速度で計測する方が、高次の振動数領域まで計測が可能であることを示唆している。



(a) 変位のフーリエスペクトル



(b) 加速度のフーリエスペクトル

図-3.22 加速度計測と画像計測の比較（ケーブル 10）

表-3.7 加速度フーリエスペクトルの累乗近似による回帰係数

	a	b	R
加速度計測	11.62	-2.23	0.965
画像計測	2.76	-2.18	0.927

3.4.3 2K カメラと 4K カメラの抽出精度の比較

加速度計測に対する画像計測の精度ならびに画像計測における 2K 画像計測と 4K 画像計測の精度検証を行った結果を図-3.23 に示す。同図 (a) は 2K 画像計測と加速度計測を、同図 (b) は 4K 画像計測と加速度計測の結果を、式 (3.5) を用いてケーブル張力を推定して比較した結果である。図中の破線は、加速度計測結果を用いてケーブル張力を推定した値の $\pm 5\%$ の範囲を示している。同図 (a) の 2K 画像計測および (b) の 4K 画像計測のいずれの場合も、加速度計測を用いた場合の 5%以内 に分布しており、加速度計測とほぼ同等の精度での計測が可能であることが分かる。ただし、同図 (b) 図中の C10 ケーブルの値が 1 点だけ外れ値となっている理由を、図-3.24 を用いて説明する。同図は、各ケーブルにおいて 4K 画像計測結果を用いて式 (3.5) によりケーブル張力を推定し、設計張力で除した結果を 1 次～3 次まで示している。1 次および 2 次については設計張力に対するばらつきは小さいが、3 次については C10 ケーブルにおいて設計張力の約 1.5 倍の張力が計測される結果となっている。この原因は、後述する図 3-27 (b) に示す不明瞭な 3 次のスペクトルから卓越振動を読み取ったことに起因しており、この不明瞭なスペクトルの発生は、ケーブル振動ではない雑音振動が計測されていると考えられることから、図-3.23 (b) の外れ値については精度検証から除外するものとする。

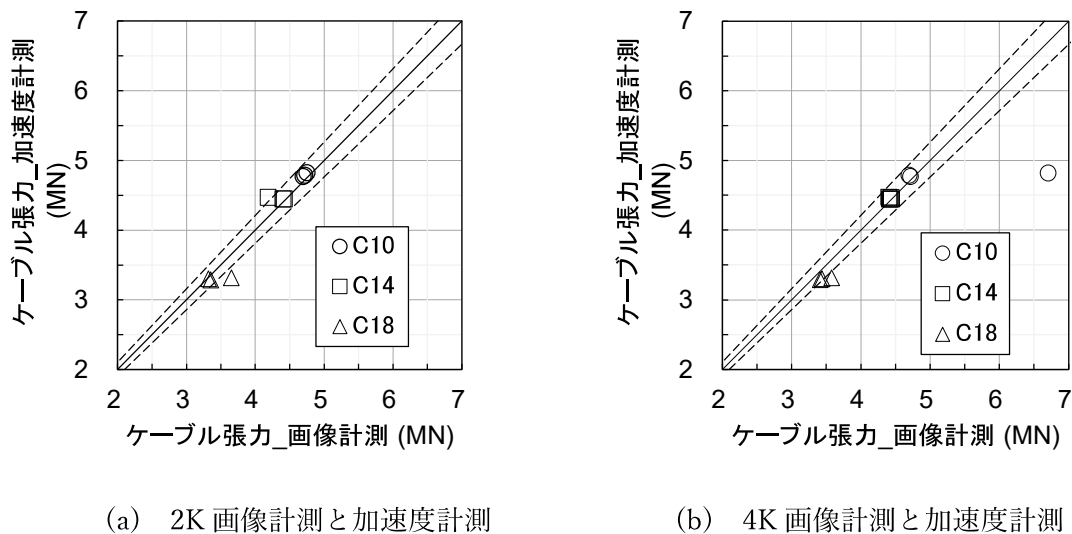


図-3.23 加速度計測に対する画像計測の誤差

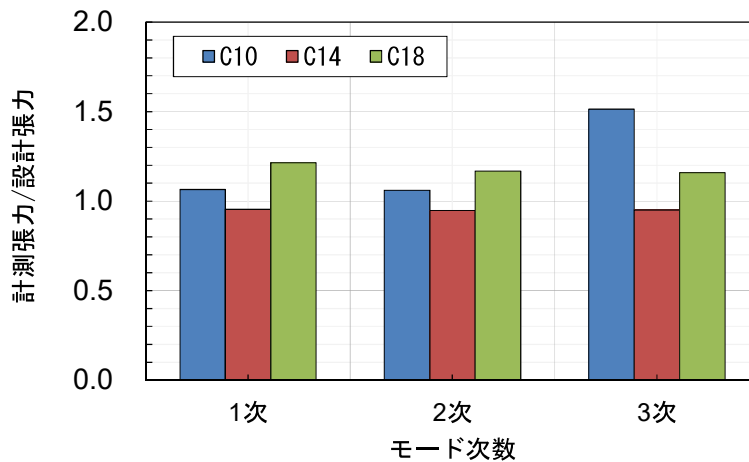


図-3.24 計測張力と設計張力の比率（4K 画像計測）

4K 画像計測において 5 次の振動モードまで計測可能となったケースにおいて、2K 画像計測、4K 画像計測および加速度計測結果から算定した張力を比較した結果と、2K 画像および 4K 画像の加速度計測結果に対する張力比率を、**図-3.25** および**図-3.25** にそれぞれ示す。この結果では、4K 画像計測の方が加速度計測に近い結果となり、2K 画像に比べて精度向上が確認できる一方で、5 次については加速度計測との乖離が大きくなっており、画像計測による高次振動が取得しにくい傾向が見られる。

なお、本ケースでは 2K 画像に比較して 4K 画像の計測精度向上が見られたが、本研究全体を通しては、2K 画像と 4K 画像の顕著な差は見られなかった。

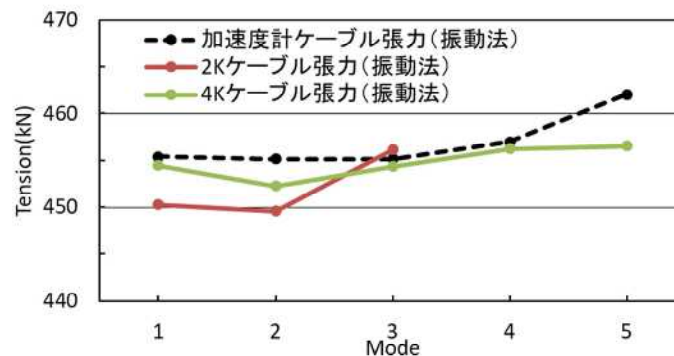


図-3.25 計測張力と設計張力の比率（4K 画像計測）

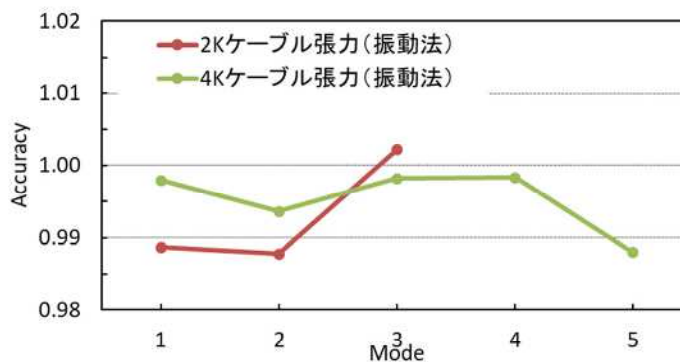


図-3.26 計測張力と設計張力の比率（4K 画像計測）

3.4.4 サブセットサイズとサブセット位置の影響

デジタル画像相関法における変位抽出精度は、一般的にサブセットサイズやサブセットの輝度値分布に影響を受けるため、C10 ケーブルを 2K 画像および 4K 画像で撮影したケースにおいて、設定したサブセットサイズの変化と着目したサブセット位置の違いにより、卓越振動数抽出結果にどの程度影響を与えるかについて検討した。ここで、サブセットサイズは、対象構造物との距離や画角などにより、1 画素に相当する変位量が異なることから、ケーブル径に対するサブセット 1 辺の長さの比をケーブル径比率と定義している。表-3.8 にサブセットサイズとケーブル径比率の対応を示す。

表-3.8 サブセット範囲とケーブル径比率

ケーブル径 (mm)	カメラ種別	画素長 (mm/pixel)	サブセット 範囲 (N×N)	ケーブル径比率 ((画素長×N)/ケーブル径) (倍)
155	2K	2.86	32	0.6
			64	1.2
			128	2.4
			256	4.7
	4K	2.03	32	0.4
			64	0.8
			128	1.7
			256	3.4
			512	6.7

先ず2K画像計測において、サブセットサイズ($n \times n$ pixel)を 32×32 , 64×64 , 128×128 , 256×256 の4ケース、4K画像計測では、 512×512 のケースを追加した合計5ケースについて検討を行った。

2K画像計測におけるサブセット範囲を4種類に変化させて時刻歴波形を抽出し、フーリエ変換を行った結果を図-3.27 (a)~(d)に、ケーブル径比率と卓越振動数の取得状況を図-3.28に示す。2K画像計測では、ケーブル径比率が0.6のケースでは1次振動数のみの計測に留まり、1.2~4.7のケースでは2次振動数までの計測が可能であった。

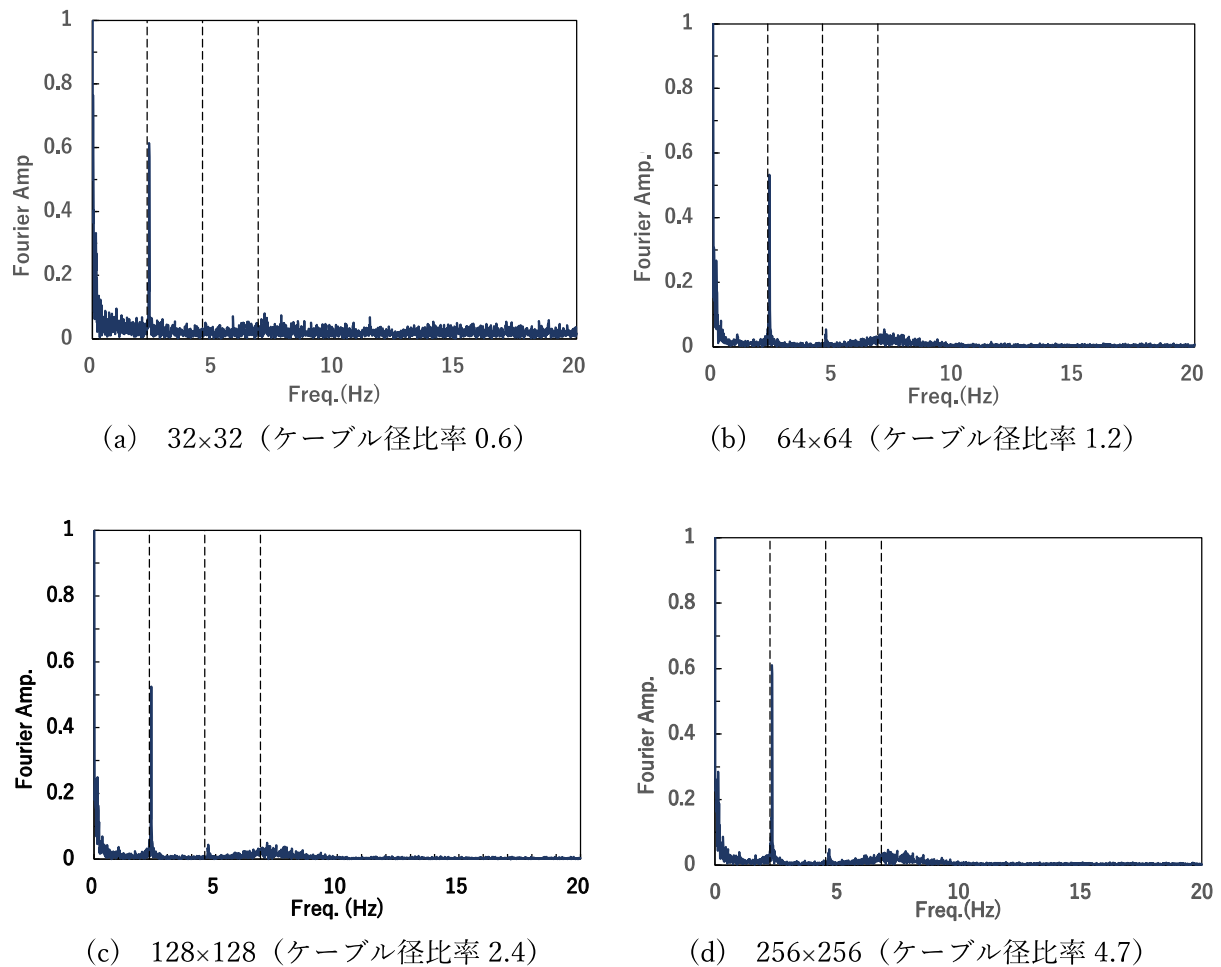


図-3.27 異なるサブセットサイズによる周波数分析結果_フーリエスペクトル (2K画像計測)

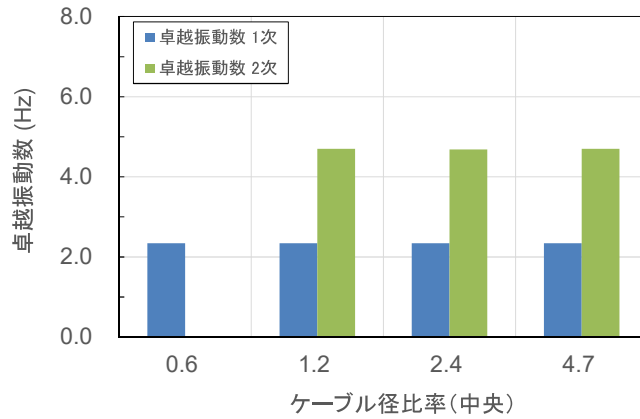


図-3.28 ケーブル径比率と卓越振動数の取得状況 (2K 画像計測)

次に、サブセットの位置を中央および上部にセットしたそれぞれの場合の振動数計測状況について図-3.29 に示す。なお、同図には図-3.28 と同じ 2K 画像計測を C10 ケーブル上部について行ったケースについても示す。サブセット位置を上部に変更しても振動数計測結果に変化はなかった。

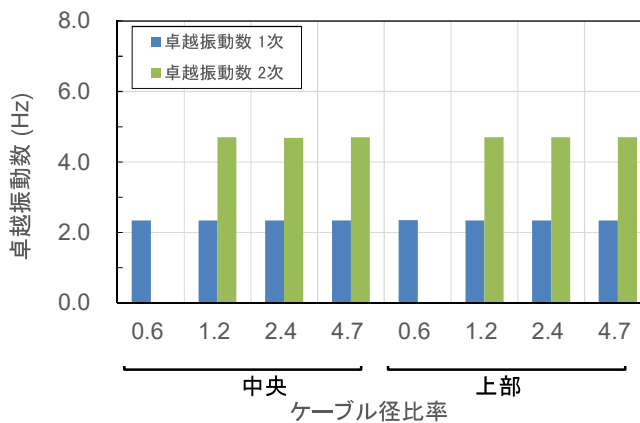


図-3.29 サブセット位置の影響 (2K 画像計測)

図-3.30 は、上記の 2K 画像計測において行った検討を、4K 画像計測について同様に行ったものである。4K 画像計測では、サブセット位置による違いが見られた。サブセット位置が中央の場合、ケーブル径比率が小さい 0.4 および 0.8 のケースにおいて、1 次振動数の計測ができていないが、サブセット位置が上部の場合、すべてのケースにおいて 1 次振動数の計測が可能となっている。また、ケーブル径比率が 3.4 以上の範囲では、3 次振動数まで計測が可能となっている。3 次まで計測可能であった 4K 画像計測におけるケーブル径比率 3.4、サブセット位置が「上部」のケースの変位スペクトルを図-3.31 に示す。

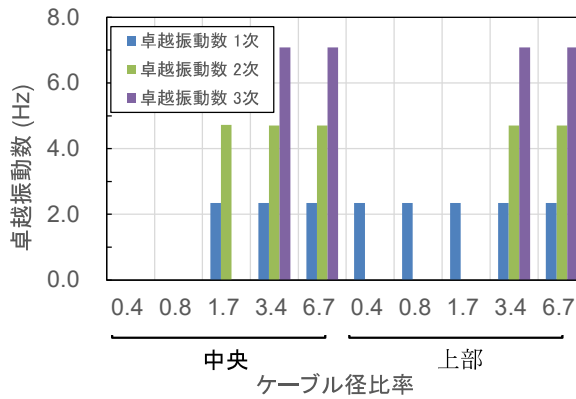


図-3.30 サブセット位置の影響 (4K 画像計測)

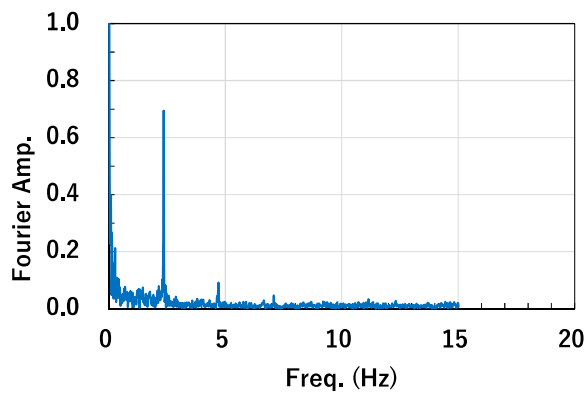


図-3.31 変位スペクトル (4K 画像計測)

これらの検討結果より、ケーブル径比率が「1」より小さい場合に振動数の取得が困難となるケースが見られ、ケーブル径比率が大きくなるほど、高次振動まで計測可能となる。また、サブセット位置は、ケーブル中央に比べ上部にセットする方が、計測結果が得られやすい結果となった。なお、ケーブル径比率が1より小さい場合に計測不能となる理由は、サブセット範囲がケーブル径より小さくなるため、サブセット中の輝度値分布がほぼ単一なケーブル本体の輝度値分布となり、相関が高い領域を探索することが困難となっているためと考えられる。

3.5 結論

本研究では、DIC法のケーブル振動計測への適用を目的として、実橋の斜張ケーブルの動画を撮影し、従来から用いられている加速度計による振動数計測結果と比較することにより、DIC法を用いた計測精度をサブセットの大きさと位置をパラメータとして検証した。また、2K画像計測と4K画像計測で得られた動画より抽出した振動数を比較し、画素数の違いによる振動数抽出精度への影響を検討した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 斜張橋のケーブル振動計測において、DIC法による方法においても、比較的低次の振動数領域において、現在一般に用いられている加速度計による振動計測と同等の精度で振動数計測が可能である。
- 2) DIC法による振動数解析におけるサブセットサイズは、ケーブル径比率（ケーブル径に対するサブセットの1辺の長さ）を1以上とすることで振動数抽出状況が改善する。
- 3) 4K画像計測を用いてケーブル径比率を3以上に設定することで、3次振動まで計測が可能となる。
- 4) 本研究の条件の範囲では、ケーブル振動計測精度に2Kおよび4Kによる顕著な違いは見られなかった。
- 5) 斜張橋ケーブル張力の測定では、デジタル画像相関法を用いた非接触型全視野計測法が有効な計測法の1つであることが確認できた。

参考文献

- 1) 松田浩, 牧野高平, 宮本則幸, 岡本卓慈, 伊藤幸広, 出水亨, 肥田研一, 川村淳一, 佐川康貴, 原田耕司, 一宮一夫, 森田千尋, 山根誠一: 光学的非接触全視野計測法によるコンクリート構造物のマルチスケール診断法の開発 (国土交通省 建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書), 長崎大学工学部インフラ長寿命化センター (全視野計測技術研究会), p.196, 2010.7.
- 2) J.M.Huntly, P.D.Ruiz : *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics*, Procedia IUTAM, Vol. 4, pp. 82-91, 2012.
- 3) 森本吉春, 藤垣元治, 米山聡: モアレ法・格子法による形状・変形計測の最近の研究, 非破壊検査, 第 52 巻, 3 号, pp. 116-121, 2003.3.
- 4) 吉田純司, 阿部雅人, CHAMINDALAL Sujeewa Lewangamage, 藤野陽三: 画像解析を利用した連続体の変形場の計測法, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.165-179, 2002.7.
- 5) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15), pp. I_683-I_690, 2012.
- 6) 米山聡, 北側彰一, 岩田節雄, 谷和彦, 北村幸嗣, 菊田久雄: デジタル画像相関法を用いた橋梁の非接触たわみ分布測定, 非破壊検査, 第 55 巻 3 号, pp.119-125, 2006.
- 7) 大貫博崇, 町田賢司: デジタル画像相関法による構造物の振動解析, 実験力学, Vol.10, No.1, pp.57-62, 2010.3.
- 8) 今井道男, 太田雅彦, 露木健一郎, 今井浩, 三浦悟, 村田一仁, 高田巡: 高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.1, pp. 279-289, 2016.
- 9) 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.
- 10) 島田忠幸: ケーブルの高次振動モードの固有振動数測定値からの張力測定法について, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.163-171, 1994.10.
- 11) 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 杉井謙一, 本田祐嗣: ケーブル張力の曲げ剛性の同時推定法, R&D KOBELCO STEEL ENGINEERING REPORT, Vol. 49, No.2, pp. 12-15, 1999. 9.
- 12) 国土交通省 道路局国道・技術課: 橋梁定期点検要領, 2019. 3.
- 13) 吉田隆: 巨大構造物ヘルスマニタリング, エヌ・ティー・エス, 2015. 3.

第4章 スタティック測位法を用いた GNSS による橋梁の変位モニタリング

4.1 序言

橋梁の維持管理においてモニタリングによる状態監視は重要であり、これまでも、加速度計、地震計および風速計による振動数や外力評価、ひずみ計、変位計および張力計による変形および損傷度評価などの研究が進められてきた^{1), 2)}。それらの従来手法に加え、橋梁の挙動を長期連続的に高精度で監視できる手法が望まれている。

GNSS (Global Navigation Satellite System) による変位モニタリングはそのような要望に応える可能性のある方法である。GNSS による変位計測では基準となるセンサーを橋梁構造の外部に設置し、計測用のセンサーを橋梁部材等に設置すれば、橋梁の三次元変位を直接かつ長期連続的に計測できる利点がある。

これまでに、斜面等の安全監視を対象とした GPS (Global Positioning System) によるシステムが開発され^{3), 4)}、高精度化のためのデータ処理方法や誤差低減法が提案され^{5) -7)}、三次元変位の高精度な自動連続計測が可能となっており、地すべり斜面、道路沿線の切土斜面などの斜面の安全監視だけでなく、トンネルの施工管理やダム堤体の管理などにも適用されている^{8) -12)}。

一方、橋梁分野においても GNSS による変位計測がヘルスマニタリングに適用され、高周波 GNSS センサーを用いたキネマティック測位の適用および精度向上のための適切なフィルタリングに関する研究が、海外の長大橋においてみられる^{13) -16)}。我が国においても、中村¹⁷⁾による、GNSS の橋梁の動的計測に関する先駆的な研究がある。しかしながら、橋梁モニタリングにおける GNSS 変位計測の適用の試みはまだ研究段階にあり、実務での適用事例に関する例は著者の知る限りほとんどないようである。

筆者らは、船舶衝突によって損傷した橋梁¹⁸⁾の安全監視およびその復旧工事による性能回復を検証するため、長期にわたり GNSS 変位計測を実施する機会を得た。損傷した橋梁は船舶衝突により、設計では通常考慮されない大きな横荷重を受け、橋梁全体の安定性や事故後の変動荷重による状態変化により引き起こされる大規模損傷への進展が懸念され、それらを監視する方法として GNSS モニタリングを採用した。

適用に当たっては、対象橋梁の構造特性を踏まえた適切な設置方法、中路橋などの上空視界が遮蔽される橋梁形式におけるマルチパスや電波障害の影響の有無の検討とともに、橋梁維持管理に必要な変位計測精度の確保が必要となる。

本報告では、トラス橋において約2年間に亘り、スタティック測位法を用いて変位モニタリングを行ったデータを分析、評価することにより、GNSS 変位計測の橋梁モニタリングの有効性を検証する。なお、分析、評価に際しては、他計測機器の結果との比較、また、外気温の変化および復旧工事の載荷荷重に対する構造解析結果との比較を行い、長期および短期の挙動に分けて述べる。

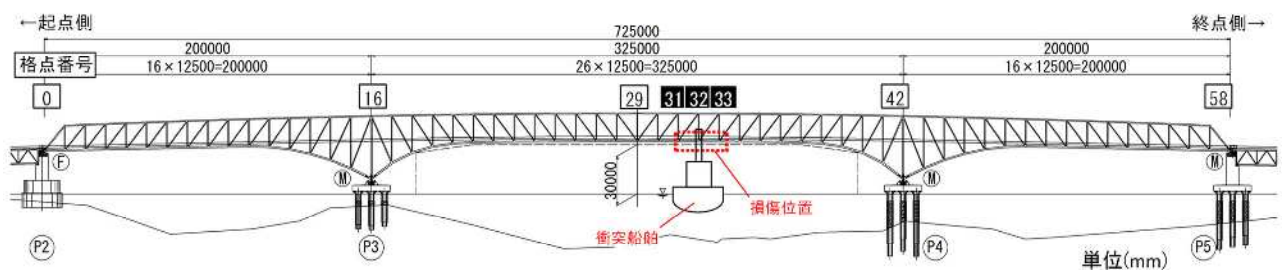
4.2 大島大橋の事故時の損傷状況と復旧過程

4.2.1 大島大橋および船舶衝突事故の概要

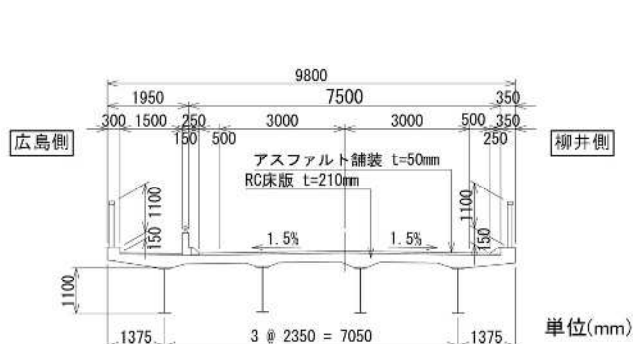
対象橋梁である大島大橋は、山口県周防大島町と柳井市大島町を結ぶ山口県道 437 号における渡海橋で、竣工後 46 年が経過している。本橋は大島瀬戸をほぼ南北方向に架橋されており(図-4.1)、海峡部に位置する主橋梁と本土側取付橋および大島側取付橋の3連で構成される。この内、本研究の検討対象は、主橋梁である鋼3径間連続下曲弦プラットラス橋である。同橋梁は、中間支点上のブロックを含む側径間を大ブロック架設した後、径間中央に向けて順次桁を張出すカンチレバー架設工法にて架設された。図-4.2に対象橋梁の全体図、幅員構成・床版縦桁断面図およびトラス断面図を示す。



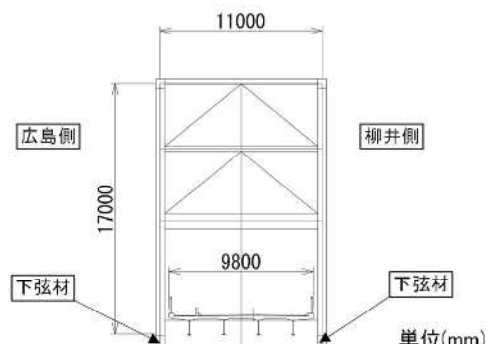
図-4.1 架橋位置平面図



(a) 全体図



(b) 幅員構成・床版縦桁断面図



(c) トラス断面図

図-4.2 対象橋梁

【第4章 スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング】

この橋梁に対し、2018年10月22日未明、主橋梁の桁下を通過しようとした貨物船がP3-P4径間中央付近に衝突し、橋梁に大きな損傷が生じた¹⁸⁾。主な損傷箇所は、**図-4.2(a)**に示す格点31～33付近の下弦材、対傾構、縦桁、下横構および床版で、これらのうち床版を除く鋼部材については、その断面の一部または全部が破断した。**図-4.3**に損傷状況の概要を示す。主構造である下弦材は最も損傷が激しく、上フランジ以外のほぼすべての断面が破断し、応力伝達がほぼ期待できない状況であったが、前述の架設工法が採用されていたため、損傷部付近の部材の常時の発生応力は非常に小さかったことから、橋の崩落等の大事故には繋がらなかった。



(a) 下弦材(柳井側より)



(b) 柳井側 格点 32 内側



(c) 広島側 格点 32 内側

図-4.3 損傷状況

4.2.2 復旧工事の概要と載荷荷重

本橋では約 8 カ月に亘る復旧工事が行われた。ここでは、復旧工事の施工ステップについて説明し、後述する工事荷重による変形挙動の再現解析を行う際に用いる載荷荷重の増減の様子について述べる。

表-4.1 に復旧工事過程における主要工事ステップと各ステップにおける載荷荷重を示す。工事ステップは、荷重の増減がたわみに影響を与える主要な荷重載荷ステップを示している。表中の STEP1～5, 8, 11～14 は補強部材または復旧部材の設置により鉛直荷重が増加したステップ、STEP6, 9, 15～19 は部材撤去により鉛直荷重が減少したステップであり、それぞれ載荷範囲を表中に横棒で示している。荷重載荷範囲に示す番号はトラス下弦材の格点番号で、29 が中央支間中央の格点、31～33 が船舶が衝突して部材破断に至った下弦材を含む格点番号である。

表-4.1 復旧工事の工種・載荷重・載荷範囲

STEP	工種	載荷重 (kN)	荷重載荷範囲(下弦材格点番号)																		
			側径間		中央径間							側径間									
			0~	16	~	29	~	31	32	33	~	42	~58								
1	0次補強	49.0																			
2	水道管φ75敷設	21.6																			
3	足場組立・組替	1158.4																			
4	仮設バイパスビーム補強	819.3																			
5	水道管φ300敷設	329.3																			
6	水道管φ75撤去	-21.6																			
7	床版炭素繊維補強(張出部)	0.0																			
8	損傷縦桁補修	401.8																			
9	補強縦桁撤去	-174.4																			
10	床版炭素繊維補強(支間部)	0.0																			
11	仮設トラス設置	921.2																			
12	損傷主構トラス復旧部材設置	161.7																			
13	既設下横構復旧部材設置	51.9																			
14	既設下副資材復旧部材設置	15.7																			
15	仮設トラス撤去	-921.2																			
16	仮設バイパスビーム撤去	-644.8																			
17	足場解体	-1158.4																			
18	片付け	-49.0																			
19	水道管φ300撤去	-329.3																			

図-4.4 は表-4.1 に示した載荷荷重の工事期間中の推移を示したものであり、3月下旬から4月上旬の期間において、工事期間中で最も大きな荷重が載荷されていたことが確認できる。

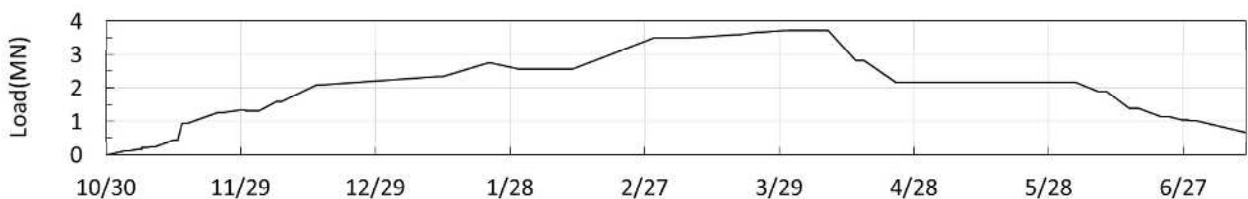
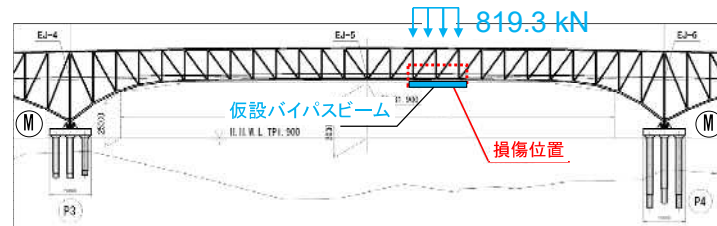


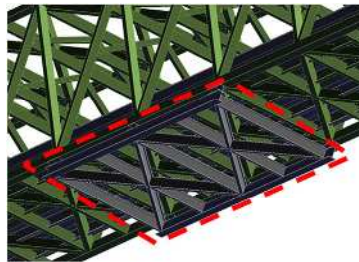
図-4.4 載荷荷重の推移

図-4.5 および図-4.6 は、表-4.1 に示した載荷荷重の内、足場荷重以外で最も橋体変形への影響が大きいSTEP-4 (仮設バイパスビーム) およびSTEP-11(仮設トラス)について、載荷位置および仮設部材の設置模式図をそれぞれ示したものである。当該ステップでは、非常に大きな鉛直荷重が損傷部材近傍に集中したことが理解できる。

本研究では、上記のような荷重増減に対応した変位を含む橋梁の三次元的な変位挙動の計測結果とその詳細な検証結果について、次節以降で述べる。

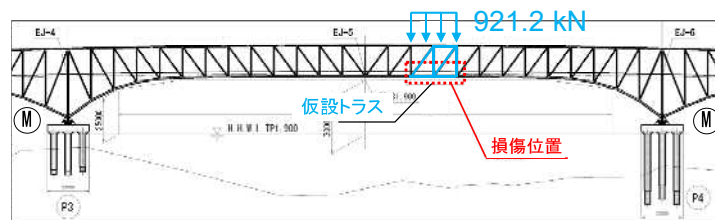


(a) 載荷位置 (Step 4)

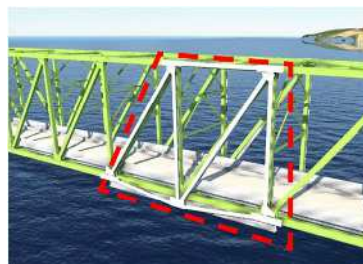


(b) 設置模式図

図-4.5 仮設バイパスビーム



(a) 載荷位置 (Step 11)



(b) 設置模式図

図-4.6 仮設トラス

4.3 GNSS による橋梁の変位モニタリング

4.2.節で述べた損傷により、事故発生日から、車道および歩道は断続的な全面通行止めとなり、その後、復旧工事期間を含め、片側交互通行および車両重量制限などの交通規制が実施された。

交通規制および復旧工事期間の橋梁の安全性の確認、また、その後の復旧工事の妥当性を確認するためには、正確かつリアルタイムに橋梁の挙動を連続計測できる手段を適用する必要がある。そこで、斜面やダム堤体のリアルタイム監視に活用されている GNSS による変位計測⁸⁾⁻¹²⁾を参考に、本橋では GNSS を採用することとした。

本章では、GNSS 計測システムの具体的な設置および GNSS 変位計測結果の検証を行うために設置した GNSS 変位センサー以外の様々な計測機器について述べる。

4.3.1 GNSS 変位計測システム

a) 計測方法の概要

GNSS の測位方式は、GNSS センサー1 台を用いる単独測位と GNSS センサー複数台を用いる相対測位に大別される。相対測位は GNSS センサーを 2 台以上用いて 2 点間の相対的な位置関係である基線ベクトルを求める「基線解析」を行うもので、電離層や対流圏の影響による伝播の遅延を含めた各種の誤差が打ち消されることから、高精度測位が可能である。本橋の計測ではこの相対測位の中でも最も計測精度が高く、基準点測量や構造物に用いられているスタティック測位方式^{19),20)}を採用した。

表-4.2 GPS/GNSS 測量の種類²⁰⁾

観測方法	観測時間	データ取得間隔	摘要
スタティック法	120 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量 (2 周波、10km 以上 ※1)
	90 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量 (3 周波、10km 以上 ※1)
	60 分以上	30 秒以下	1 級基準点測量 (10km 未満) 2~4 級基準点測量
短縮スタティック法	20 分以上	15 秒以下	3~4 級基準点測量
キネマティック法	10 秒以上 ※2	5 秒以下	3~4 級基準点測量
RTK 法	10 秒以上 ※3	1 秒	3~4 級基準点測量
ネットワーク型 RTK 法	10 秒以上 ※3	1 秒	3~4 級基準点測量
備考	※1 観測距離が 10km 以上の場合は、1 級 GNSS 測量機により 2 周波または 3 周波による観測を行う。ただし、節点を設けて観測距離を 10km 未満にすることで、2 級 GNSS 測量機により 1 周波による観測を行うこともできる。 ※2 10 エポック以上のデータが取得できる時間とする。 ※3 FIX 解を得てから 10 エポック以上のデータが取得できる時間とする。		

【第4章 スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング】

スタティック測位では、計測対象位置にGNSSセンサーを設置すると同時に、不動点と考えられる場所に基準局を設置する。計測対象位置であるGNSSセンサーの設置位置は、3径間連続トラス橋の中間支点上となるP3、P4上にそれぞれ1箇所および各径間の中央にそれぞれ1箇所の合計5箇所とし、起点側から順にG-1～G-5計測点とした(図-4.7)。

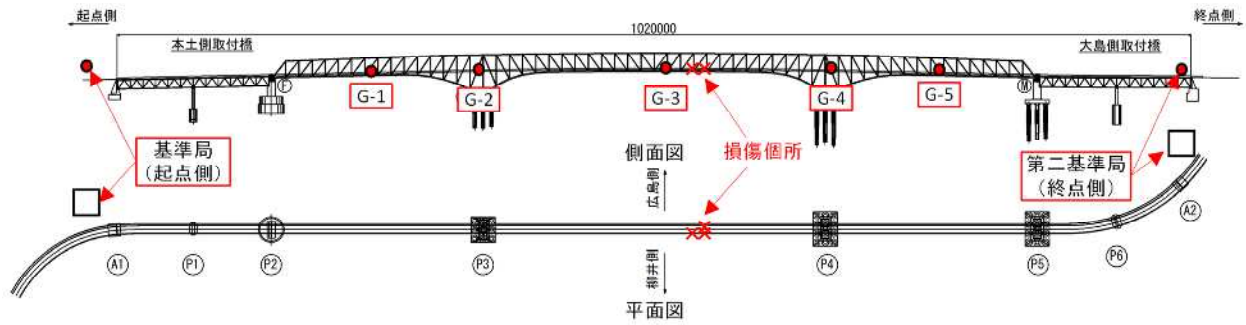


図-4.7 センサーの設置位置

基準局の設置場所は、上空視界の状況と回線集約器との見通しを考慮して、起点側陸上部の電気設備室建屋の屋上に設置した。回線集約器とは、基準点および橋梁上のセンサーから送信されたデータを集約する機器で、設置スペースを考慮して終点側陸上部に設置した。また、基準局を建屋の屋上としたことから、基準局自体が変位する可能性が懸念されたため、確認用として、回線集約器と同じ終点側陸上部を第二基準局に設定した。なお、後に基準局および第二基準局を用いてそれぞれの計測値を比較した結果、値に違いはなかったことを確認したため、第二基準点を用いた計測結果は本論文では用いていない。GNSS センサー、基準局、第二基準局および回線集約器の設置状況を**図-4.8**、各 GNSS センサーの機種を**表-4.3**にそれぞれ示す。橋梁上の計測点では、センサーの上空にトラス弦材があり衛星からの電波受信の障害となることが懸念されたため、センサーの取り付け位置を工夫し、歩道外側の高欄から剛な角パイプを用いて 30 cm 程度外側へ張り出した状態で設置することとした。また、GNSS センサー周辺の橋梁トラス部材等から反射した電波による影響(マルチパス)回避に配慮し、トラス鉛直材から 2 m 程度距離を確保して設置した (**図-4.8 (a)**)。



(a)GNSS センサー(橋梁上)



(b)基準局(起点側)



(c)第二基準局回線集約器
(終点側)

図-4.8 センサー等の設置状況

表-4.3 各計測点の計測機器

計測点名	設置位置	センサー機種	電源
基準局	本土側_電気室屋根南側壁面	古野電気製 MG-87M01	ソーラーパネル (0.5×0.4m)
G-1	P2-P3径間中央		
G-2	P3支点上		
G-3	中央径間中央		
G-4	P4支点上		
G-5	P4-P5径間中央		
第2基準局 回線集約器	大島側_大島大橋南詰付近	古野電気製 MG-87M02	ソーラーパネル (1.0×0.7m)

本橋で構築したGNSS変位計測システムの構成を図-4.9に示す。計測点のGNSSセンサーで受信したデータは指向性アンテナ(無線LAN 2.4GHz/11Mbps)を用いて第二基準局の回線集約器に送信する。回線集約器に集約された計測点および基準点のデータは、3G回線によりインターネット上のFTPサーバを経由してLTEデータ専用回線にて現地付近の事務所に設置した解析用PCへ転送し、基線解析(古野電気製GNSS変位計測システムソフトウェアMG-100S01 ver.2.30)を実施して変位を求めた。これらはすべて自動処理される。

GNSSセンサーによる三次元変位の連続計測は、交通規制の期間を含めて2018年11月14日～2020年11月2日までの約2年間、橋梁の安全監視と復旧工事の妥当性を確認するために実施した。

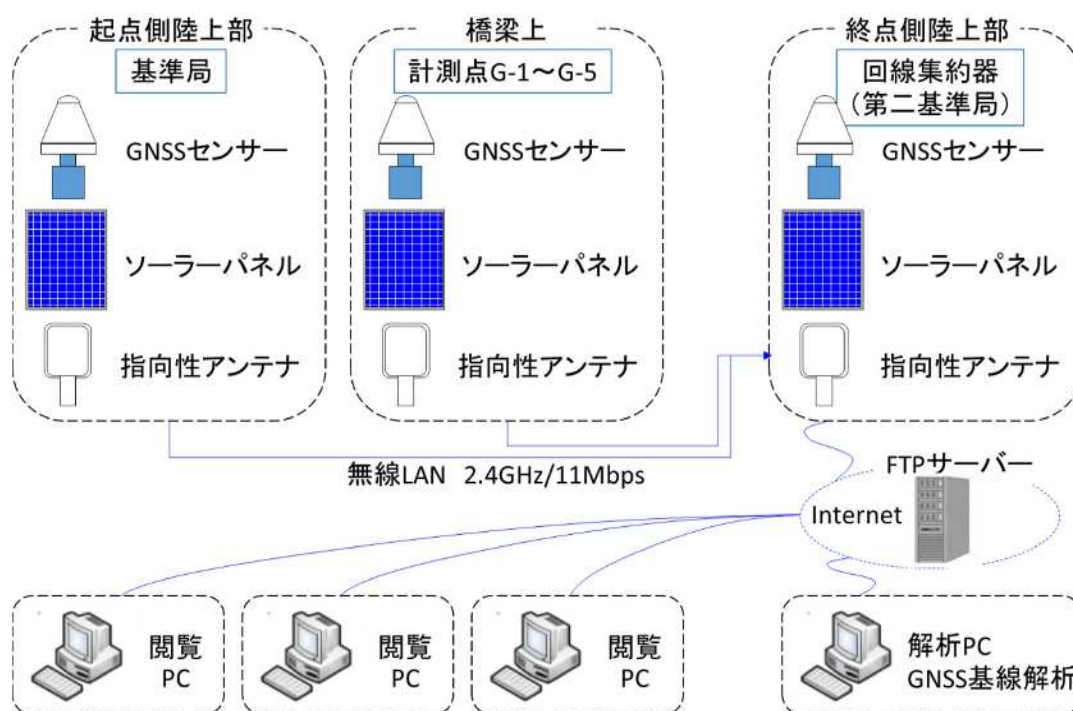


図-4.9 GNSS変位計測システム

b) 変位の算出とトレンドモデルの適用

前述のとおり、GNSSによる変位計測は、基準局を橋梁構造外の不動と考えられる地点とし、橋梁上の着目点を計測点として、スタティック方式で各計測点の三次元座標を求め、それぞれの座標の時間推移から変位を計算する方法とした。

スタティック方式においては、衛星から受信する搬送波位相をカウントする周期(エポック)は30秒で、搬送波位相データを用いて測位を行う計測時間間隔(セッション)は60分とした。すなわち、30秒毎に衛星から電波を受信し、そのデータを60分毎にまとめてスタティック測位の基線解析を行うことにより、60分(1時間)毎に計測点の座標を得ることができ、計測した変位(座標)を連続的に算出する。基線解析によって得られた座標の時間推移(具体的には計測時刻における座標と基準時刻における座標との差)を変位とし、その値を変位の「計測値」とする。得られた変位はランダム誤差を含むので、後述するトレンドモデル²⁰⁾を適用して真の変位を推定する。

スタティック測位の場合、一般的な基線解析結果の標準偏差は、基線長(計測点と基準点間の距離) D (単位: km)に対し、水平方向は $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D$ 、高さ方向(楕円体高さ方向)は $\pm 10 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ である^{19), 21)}。本計測における基線長は約0.8kmのため、基線解析結果の標準偏差 σ の一般値は、水平方向で約 $\pm 6 \text{ mm}$ 、高さ方向で約 $\pm 12 \text{ mm}$ であり、 3σ の値は水平方向で $\pm 18 \text{ mm}$ 、高さ方向で 36 mm となる。この一般値のばらつきは、例えば本橋の中央径間に対して、鋼橋架設工事における出来形管理基準値を用いて算出される「主桁、主構の中心間距離 B 」の規格値を適用した場合、その値は $\pm 8.5 \text{ mm}$ ($= 3 + B/2$: B は主構幅11.0 m)となることから、橋梁の変位監視のための計測精度としては必ずしも十分ではない。そこで、計測精度を高めるためトレンドモデルを適用する⁵⁾。

トレンドモデルは、計測値を確率構造をもった時系列データと捉え、ノイズを含む計測データから真の変位挙動を推定するもので、式(4.1)および式(4.2)で表される²⁰⁾。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{状態方程式}) \quad (4.1)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (4.2)$$

ここで、 v_n は平均値0、標準偏差 τ のシステムノイズ、 w_n は平均値0、標準偏差 σ の計測ノイズで、いずれも正規分布に従うと仮定する。また、 Δ は時間差分演算子で、 Δ^k は k 階差分である。

具体的には、基線解析によって得られた変位の計測値 y_n を入力データとして、真の変位の推定値 u_n を式(4.1)および式(4.2)に基づきカルマンフィルターによって求める。その際、次数 k (整数値)、システムノイズ τ 、計測ノイズ σ が同時に推定される²⁰⁾。この処理を基線解析から得られた橋軸方向、橋軸直交方向、高さ方向の各変位に対してそれぞれ行う。本稿では、このトレンドモデルの適用結果を、変位の「平滑値」と呼ぶことにする。

トレンドモデルを適用し、平滑値で変位を評価することにより、1 mm程度の変位、また、0.1 mm/日程度の速度をもつ定常変位を検出できる可能性が示されている⁵⁾。

4.4.節では、上記の変位モニタリングシステムおよびトレンドモデルを適用して計測を行った結果と

他の計測結果との比較ならびに構造解析結果との比較を行ったので、これについて述べる。

本橋におけるGNSS変位計測に求められる精度について以下に整理する。

橋梁の状態判断は、GNSSにより計測された値と橋梁の各制限値との比較により行われることが一般的である。各制限値には、例えば上下方向（鉛直方向）に対しては、許容変位（たわみ）や降伏変位（たわみ）、水平方向（橋軸方向および橋軸直角方向）に対しては、支承変位（常時および地震時）や伸縮装置の変位がある。GNSSによって計測されたばらつきを持った値が、これらの値のいずれに近いまたはいずれに属するかをそれぞれ判断する必要があることから、GNSS変位モニタリングに求められる精度を以下に定めた。

- ・各制限値に対して、 $\pm 5\%$ の誤差以下とする。
- ・上下方向変位に対しては、許容変位と降伏変位が判別可能である。
- ・水平方向変位に対しては、常時変位と地震時変位が判別可能である。

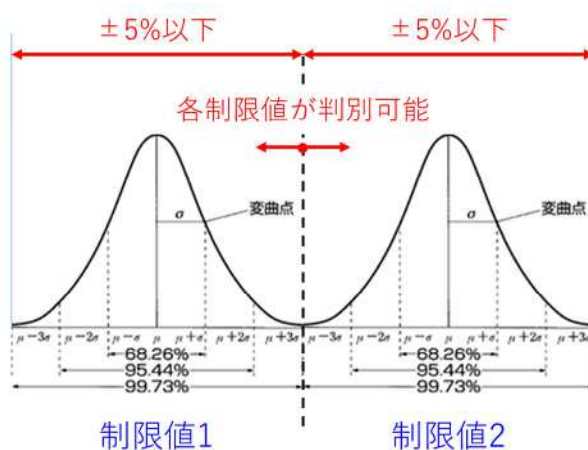


図-4.10 平滑値に求められる精度の考え方

上記の考え方に基づき設定した精度目標値を表-4.4に整理する。

なお、橋軸直角方向の制限値については本研究の対象外とした。

表-4.4 平滑値に求められる精度目標値

	項目	側径間	中央径間			
		P2-P3,P4-P5 (G-1,G-5)	P3-P4 (G-3)			
上下方向 (mm)	① 許容変位(最大活荷重たわみ)	230	460			
	±5%	±11.5	±23.0			
	② 降伏変位(許容たわみ×1.7)	390	780			
	±5%	±19.5	±39.0			
③	(②-①)/2	80.0	160.0			

	項目		P2	P3 (G-2)	P4 (G-4)	P5
	水平方向 (mm)	④ 常時(±30°C)	±5%以下	0	199	322
⑤ 地震時(L1相当)			-	10.0	16.1	18.3
±5%			-	11.7	22.4	27.4
⑥ フィンガ [®] -遊間量		±5%	-	-	-	405
		±5%	-	-	-	20.3
⑦		(⑤(⑥)-④)/2	0	17.5	63.0	(20.0)

4.3.2 その他の計測機器

表-4.5, 図-4.11 および図-4.12 に, モニタリングを実施した項目, 設置位置, モニタリング機器, 計測頻度および計測期間ならびに設置位置および設置状況を示す. GNSS センサーを除く各機器の計測頻度は1回/10分, 計測開始日および終了日をそれぞれ表中に示している.

各機器の設置位置は, 部材温度計については, 損傷部材を代表して格点31~32の柳井側下弦材の上フランジに, 外気温計は, 道路面付近の気温把握のため格点31付近の柳井側の車両防護柵に, 傾斜計は損傷進行による支間中央たわみの増加やトラス全体の直角方向への傾斜監視のため, 格点31および33それぞれの広島側および柳井側の合計4つのトラス鉛直材に設置した.

表-4.5 橋梁モニタリングの項目

項目	設置(計測)位置	モニタリング機器	頻度	計測期間
温度	下弦材 破断部	部材温度計 (EI-1022 ICセンサー)	1回/10分	2018/11/26 ~2019/2/24
	破断部材近傍の路面上	外気温計 (EI-1022 ICセンサー)	1回/10分	
傾斜	破断各間両端の鉛直材 (各点31,33 左右)	傾斜計 (CM-961-K1010A)	1回/10分	
たわみ	P3~P4径間支間中央 (損傷部近傍)	連通管式沈下計 (KWL-100E)	1回/10分	2018/11/26 ~2019/4/30
三次元変位	P3,P4支点上及び 各径間中央の高欄外側	GNSSセンサー (MG-87M10/02)	1回/1時間	2018/11/14 ~2020/11/2

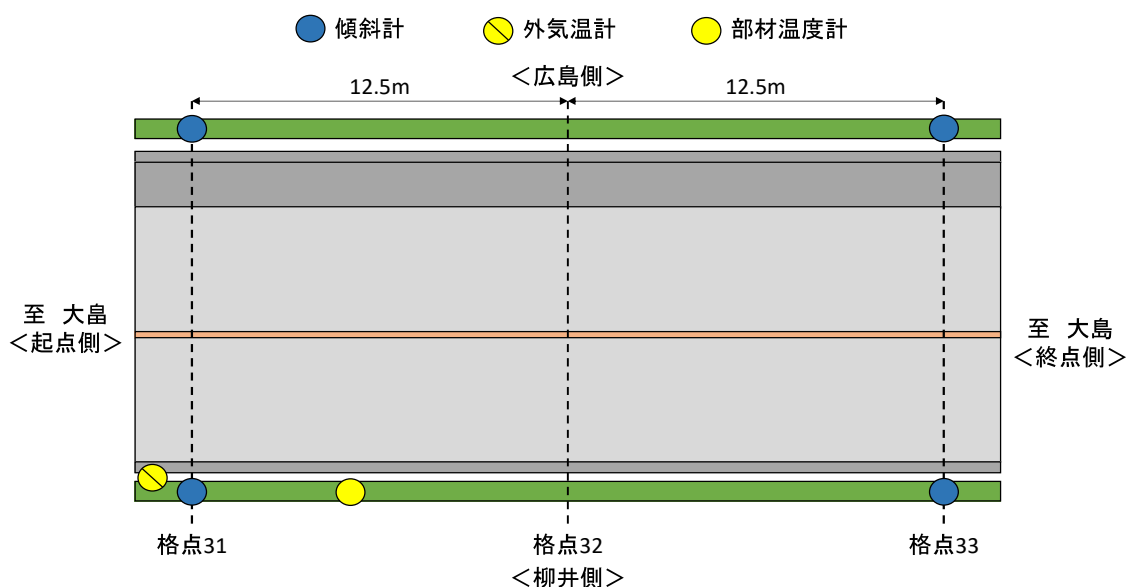


図-4.11 モニタリング機器の設置位置



図-4.12 モニタリング機器の設置状況

傾斜計の設置位置と傾斜方向の符号を図-4.13 に示す。傾斜計は 2 軸(水平橋軸方向回りおよび水平橋軸直角方向回り)の計測が可能で、検出範囲は $\pm 10^\circ$ 、分解能は 0.002° である。

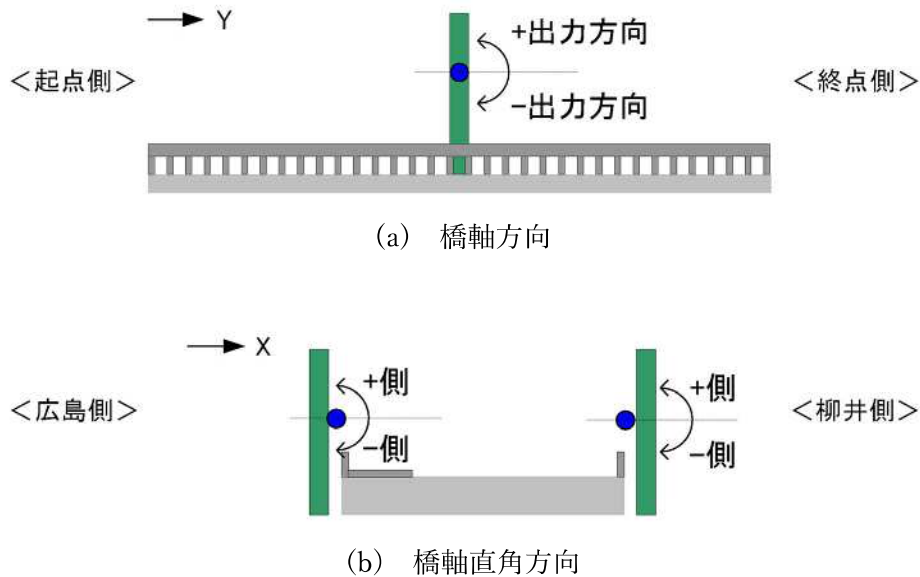
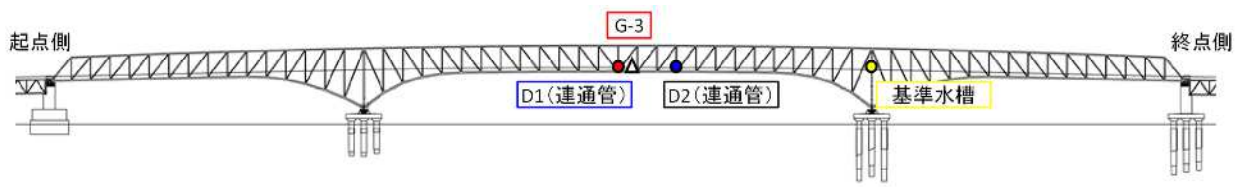
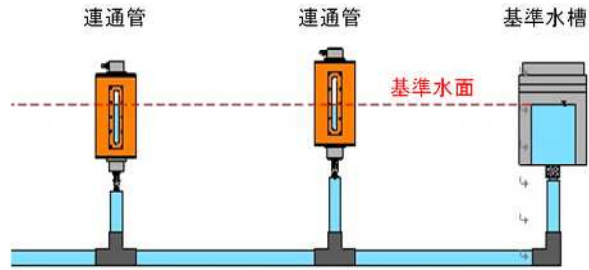


図-4.13 傾斜計の設置位置と傾斜方向

連通管式沈下計(以下、「沈下計」)の設置位置を図-4.14 (a) , 計測方法を同図(b)に示す。沈下計は、中央径間中央部の高さ方向変位の連続計測を行うとともに、GNSS による高さ方向変位の計測結果の検証に用いる。沈下計の計測可能レンジは $\pm 100 \text{ mm}$ 、計測精度は $\pm 0.5 \text{ mm}$ である。沈下計は P4 支点上に基準水槽を、中央支間中央(D1)および損傷位置近傍(D2)にそれぞれ連通管を設置し、それらの水頭差により P4 支点からの相対的な変位を計測し、中央支間の沈下変位を計測する。



(a) 設置位置



(b) 計測方法

図-4.14 連通管式沈下計の設置位置と計測方法

4.4 GNSS による橋梁の長期モニタリング

本節では、まず、GNSS による長期モニタリング結果を示し、その後、復旧工事における補強部材架設時の沈下計変位との比較、温度変化時の橋軸方向変位と解析結果の比較および橋軸直角方向変位と傾斜計測結果との比較を通して GNSS 変位計測結果の妥当性を検証する。

4.4.1 上空視界と受信衛星数の確認

GNSS 変位モニタリングにおいて、上空視界と受信衛星数は、計測可否および計測精度に大きな影響を与える。中島ら²³⁾は、受信衛星数と測位精度(標準偏差)の関係を調べ、受信衛星数が多いほど測位精度が向上し、日本上空に長時間滞在する QZSS(みちびき)の利用が測位精度向上に寄与することを報告している。

図-4.15 (a)～(c)に計測開始当初の 2018 年 11 月 18 日正午における基準局、第二基準局および計測点 G-3 上空の人工衛星の軌道(スカイプロット)を示す。円の中心が計測点の天頂(仰角 90°)であり、地表面に近づくと仰角は小さくなる。仰角が小さくなるほど大気の影響や障害物の影響を受けて電波の受信状況は悪くなる傾向にあり、受信状況の悪化は計測精度の悪化に繋がることから、仰角 15°以下の領域にマスク処理を施して当該衛星の電波を受信しないことを基本とした。図中の軌道上に示す 2 桁の番号は GPS 衛星、3 桁の番号は QZS(準天頂衛星みちびき)衛星で、同図では上空に 11 基の衛星が存在している。基準局上空には高圧線鉄塔、第二基準局上空には南方に山岳地形と樹木、計測点 G-3 上空には本橋トラス部材が確認される。

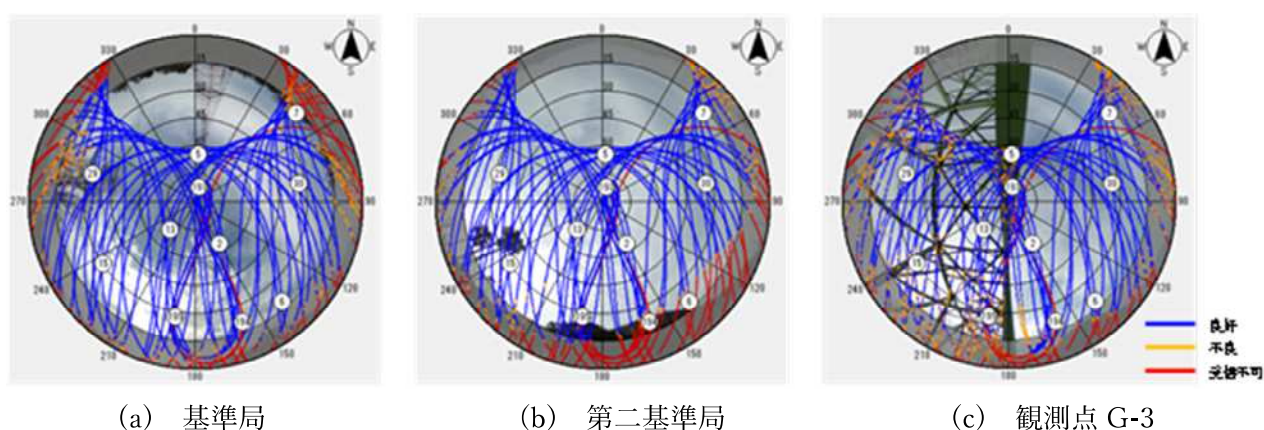


図-4.15 GNSS 変位計測システム

図-4.16には、同日における計測点 G-3 上空の可視衛星数(計測点上空に存在する衛星数)および観測衛星数(実際に電波を受信できた衛星数)の 24 時間の推移を、GNSS 全体と QZS に区別して示している。12 時では、可視衛星数は 11 基であるのに対し、観測衛星数は 3 基少ない 8 基となっている。QZS に着目すると、可視 QZS が 3 基に対し、観測 QZS は 1 基となっている。これは、図-4.15 (c)において、図示の衛星数が合計 11 基であるが、GNSS 番号 5, 193 および 195 がトラス斜材と重なっており、3 基の衛星の電波が遮蔽され受信できなかったことによるものと考えられる。

以上のように、下路式トラス橋における GNSS 変位監視において、トラス部材で上空が一定程度遮蔽された場合においても、基線解析に最低限必要な 4 基を大きく上回る受信衛星数を確保でき、また QZSS を利用することでそれらの受信衛星数を増加させることが可能であることが確認できた。なお、本橋よりも多くの部材が路面より上空に存在する橋梁形式の場合には、計測点の選定後に受信衛星数を確認するなど慎重な計画が必要である。

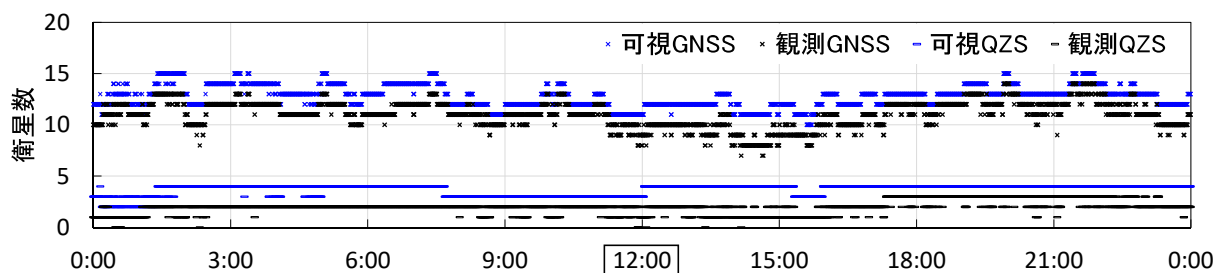


図-4.16 観測点 G-3 上空の可視衛星数と観測衛星数 (2018 年 11 月 18 日)

4.4.2 GNSS 連続計測と橋梁モニタリングの適用結果

本項では、各計測点 G-1～G-5 の三次元変位成分の連続計測結果について考察する。

図-4.17 および**図-4.18** に、各計測点の高さおよび水平(橋軸および橋軸直角)方向変位の時間推移を示す。図中の黒点が GNSS による変位計測結果、また、赤線はトレンドモデルによる平滑化値を連ねたものである。**表-4.6** に GNSS 変位計測結果の各成分の計測期間を通じた標準偏差を示す。各計測標準偏差は、高さ方向では G-1～G-5 のいずれもほぼ同様の値を示しているが、橋軸方向では、基準局に近い G-1, G-2 に比べ終点側に近い G-4, G-5 の標準偏差が大きくなっている。一般に、GNSS 計測の標準偏差は基線長(基準局と計測点間距離)に比例して大きくなる。さらに**図-4.15** (c) に示すように、上空のほぼ半分の領域においてトラス部材が障害物となっており、この上空障害の影響が、標準偏差に対する基線長の影響をより大きくしているものと考えられる。また、橋軸方向の標準偏差が橋軸直角方向に比べ大きくなるのは、トラス部材による上空障害範囲が西側のほぼ南北全域となり、西側からの電波が障害物の影響を強く受けて、橋軸方向の変位を左右から均等に計測できないからである。

一方、トレンドモデルでは、ランダムな計測誤差を除去することによって平滑値は滑らかな挙動を示している。本研究では、トレンドモデルの平滑値を用いて計測結果について議論する。

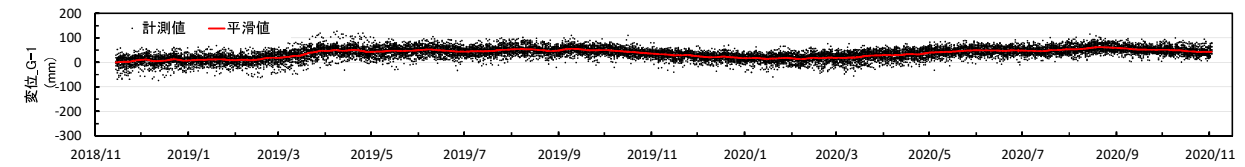
高さ方向変位の推移において(**図-4.17**)、G-2 および G-4 は支点上の計測点のため、計測期間中で変動はほとんど見られない。支間中央の計測点である G-1, G-3 および G-5 のうち、G-3 および G-5 は工事期間中は高さ方向に比較的大きな変位が現れているが、それ以外の期間においては大きな変位は計測されていない。一方、G-1 は工事による影響はほとんど計測されていないが、全体的に大きな周期変動が見られる。これについては、4.4.3 における沈下計との比較ならびに、4.5.3 における構造解析との比較により議論する。

橋軸方向変位は(**図-4.18(a)**)、いずれの計測点も季節変動と考えられる長周期の変位の変動が見られる。特に橋軸方向の支承部拘束条件がピンである P2 支点から計測点が離れるにつれ、すなわち G-1～G-5 の順に変位振幅が大きくなっていることがわかる。この挙動は気温が低くなる冬期には橋体が縮むマイナス方向、気温が高くなる夏期には橋体が伸びるプラス方向に変位しており、約 2 年間における外気温の季節変動に対応した挙動と推察される。これについては 5.(1)で議論する。

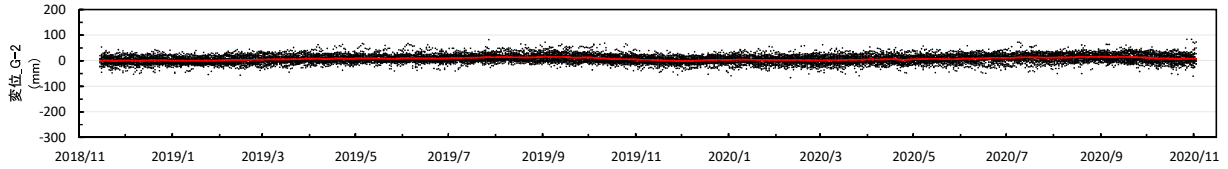
一方、橋軸直角方向変位には(**図-4.18 (b)**)、全計測期間を通じて大きな変位の変動は生じておらず、6 mm 程度の微小な変動が局所的に生じている。これについては、5.(2)で議論する。

表-4.7 に約 2 年間を通じての各計測点の欠測率を示す。欠測の原因は、トラス部材による上空障害や受信機近傍における補修工事の影響による SN 比の低下等が考えられるが、欠測率は最大で 2.37%であり、今回の計測では、全期間を通じてほぼ欠測することなく安定して計測が実施できている。

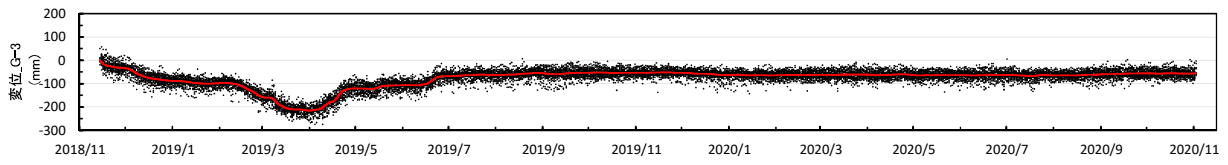
【第4章 スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリング】



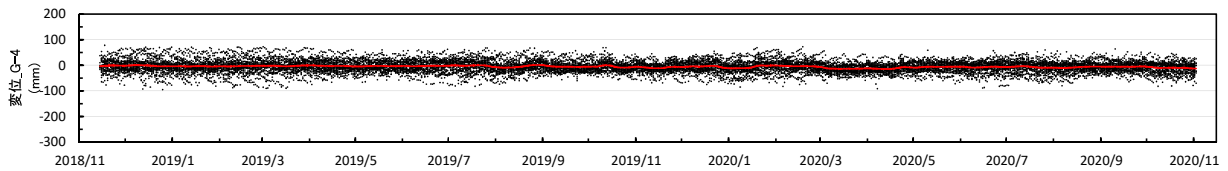
(1) 計測点 G-1



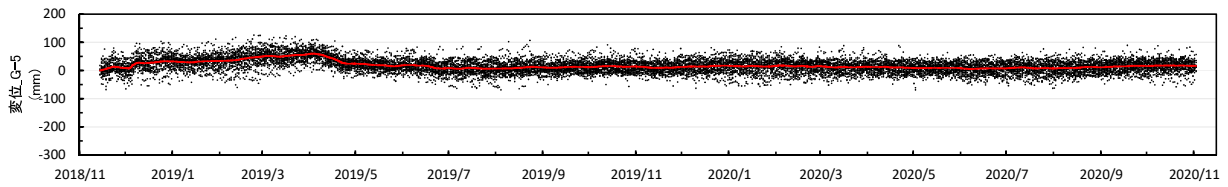
(2) 計測点 G-2



(3) 計測点 G-3

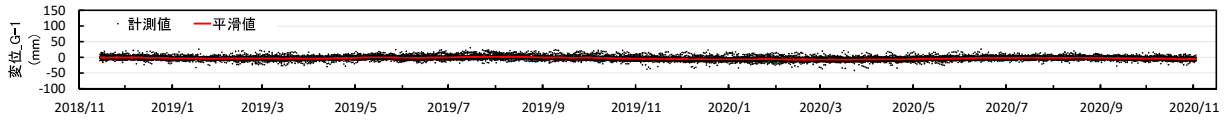


(4) 計測点 G-4

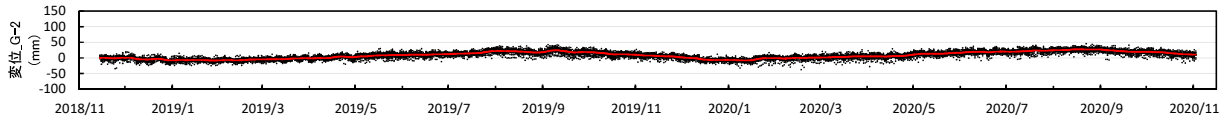


(5) 計測点 G-5

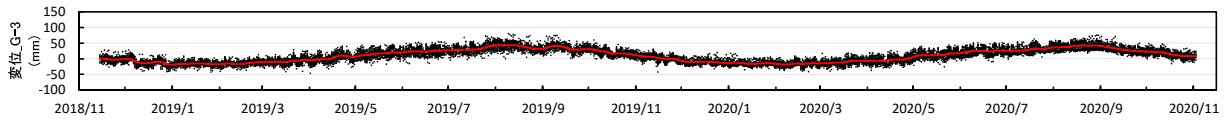
図-4.17 高さ方向変位の推移



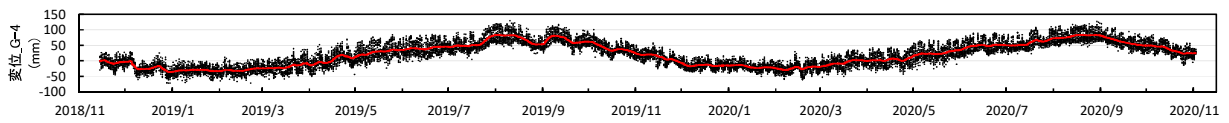
(1) 計測点 G-1



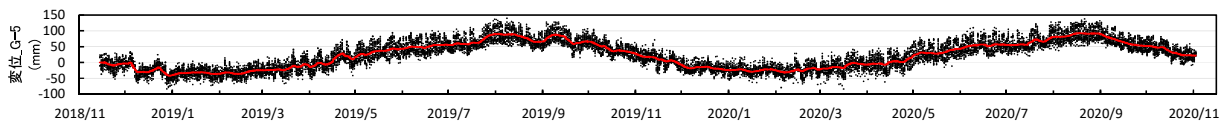
(2) 計測点 G-2



(3) 計測点 G-3

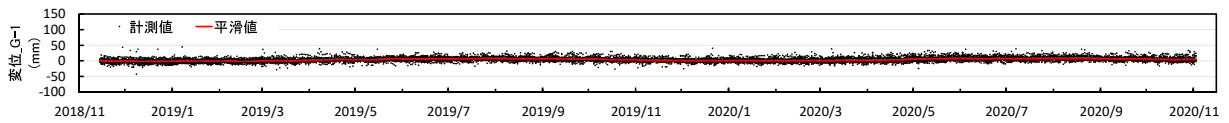


(4) 計測点 G-4

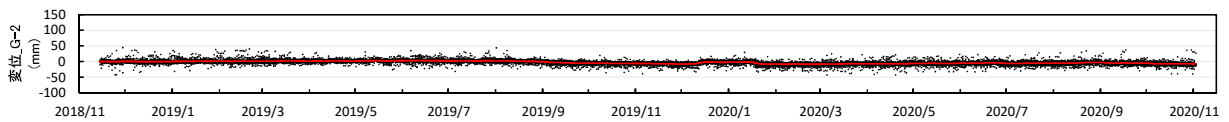


(5) 計測点 G-5

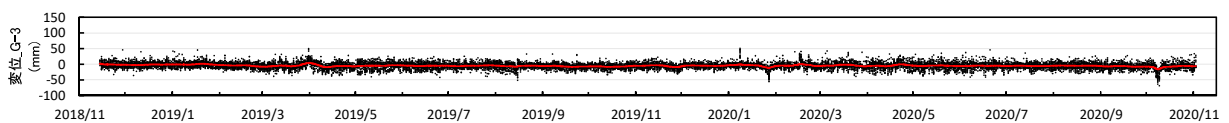
(a) 橋軸方向変位の推移



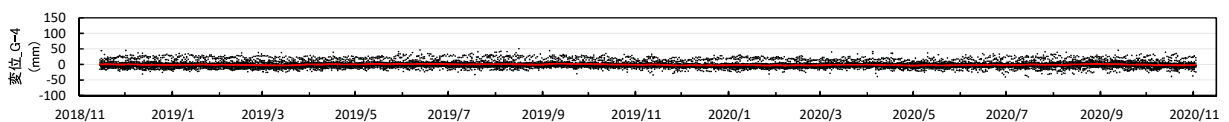
(1) 計測点 G-1



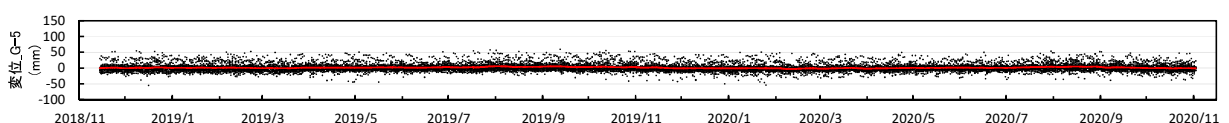
(2) 計測点 G-2



(3) 計測点 G-3



(4) 計測点 G-4



(5) 計測点 G-5

(b) 橋軸直角方向変位の推移

図-4.18 水平方向変位の推移

表-4.6 GNSSによる三次元変位計測結果の各成分の標準偏差（単位：mm）

計測点	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	平均
高さ方向	17.7	15.1	20.4	22.2	19.4	19.4
橋軸方向	5.9	5.0	9.7	15.2	17.3	10.8
橋軸直角方向	5.7	6.0	9.0	8.6	10.6	8.0

表-4.7 計測値の欠測率（単位：%）

計測点	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	平均
欠損率	0.41	0.33	1.19	0.82	2.37	1.02

ここで、制限値と平滑値の関係について整理した結果を図-4.20に示す。

計測結果を平滑化した値（表中上段の値）は、制限値（表中下段の値）以下となっており、GNSS変位モニタリング結果は、本橋における健全性評価において十分な計測精度を有している。

表-4.8 制限値と平滑値

		G-1	G-2 (P3)	G-3	G-4 (P4)	G-5	
3σ (mm/°C)	鉛直方向		3.0	1.6	2.1	3.4	
			≦ 11.5	—	≦ 23.0	—	≦ 11.5
	水平方向	LG	0.6	2.2	4.2	9.1	9.6
		TR	—	≦ 10.0	—	≦ 16.1	—
		0.9	1.3	2.7	1.0	1.3	

4.4.3 高さ方向変位に着目した沈下計との比較

工事期間中の連通管式沈下計 D1 および D2 (図-4.14) による橋梁のたわみ(沈下量)の計測値と GNSS による計測点 G-3 の高さ方向変位の平滑値との比較を図-4.19 に示す。計測点 G-3 の高さ方向変位(平滑値)は D1 と D2 の間にあり、G-3 の位置が D1 に近いいため、やや D1 に近い値となり、その挙動は両沈下計と概ね一致している。

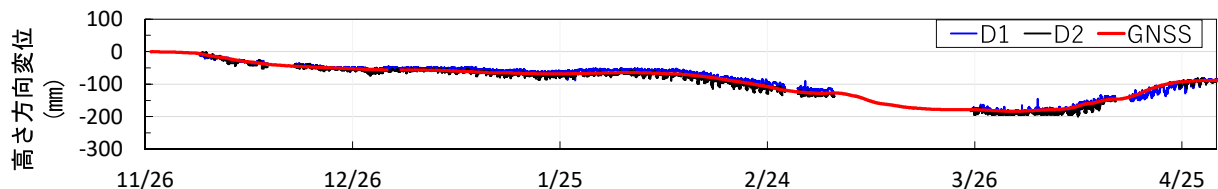


図-4.19 GNSS による高さ方向変位と連通管式沈下計変位の比較

図-4.20 に沈下計 D1 の計測値と G-3 の高さ方向変位の平滑値との同時刻における対応(相関)を示す。プロット点の近似式の傾きは 0.96、決定係数は 0.94 であり、長期変動に対する計測において、両者は非常に高い相関を示していることがわかる。

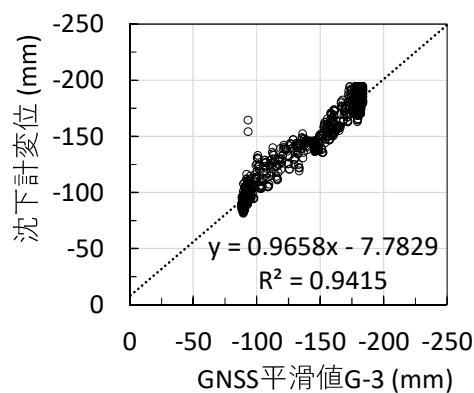


図-4.20 連通管式沈下計 D1 の計測値と GPS 計測の平滑値との比較

以上のように、GNSS による高さ方向変位の長期計測は、高精度な沈下計と同等なモニタリング手法として有効であるといえよう。また、本計測に用いた沈下計の計測レンジは 100mm で、計測期間中の機器の盛替え作業が必要であったが、GNSS 変位計測ではそのような制約はない。これに加え、GNSS 変位計測は、自動的、連続的に三次元変位の把握が可能であること、橋梁外部の基準点(不動点)からの橋梁の巨視的な変位を計測できること、および計測コストが安価でありほぼメンテナンスフリーであることから、長期計測に適していると考えられる。

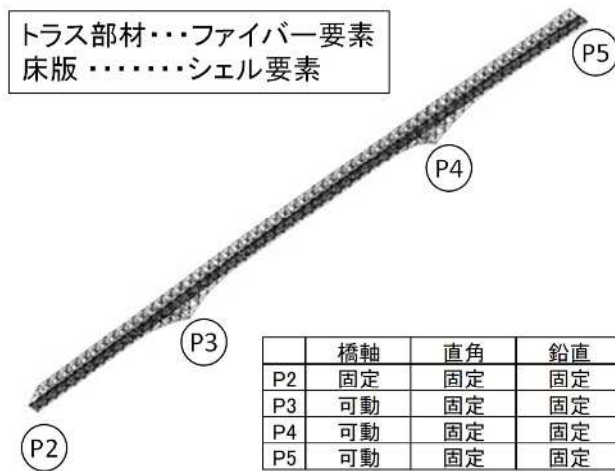
4.5 構造解析による検証

本節では、これまでに見てきたGNSSを用いた長期変位計測結果に対し、構造解析による検証を行う。4.5.1.項では、橋軸方向変位に対して温度変位と構造解析変位の比較によるGNSS変位計測結果の妥当性検証を行い、4.5.2.項では、高さ方向と直角方向変位に対して、構造解析変位および傾斜計変位との比較を行うことにより、GNSS計測と傾斜計の併用による橋梁の三次元変位挙動の把握の可能性に関して考察する。4.5.3.項では、高さ方向変位に対し、復旧工事荷重に対する構造解析変位との比較を行い、GNSS長期連続変位計測の工事監視や変位急増把握への適用性について論じる。

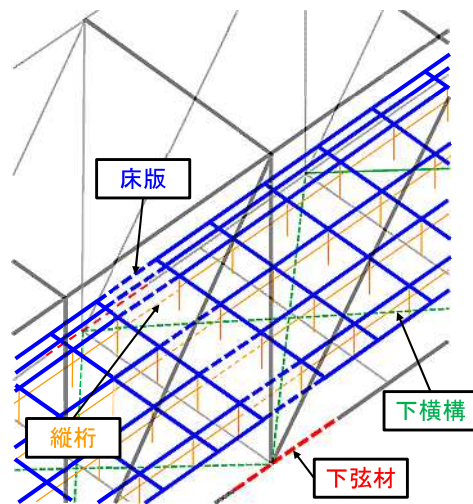
4.5.1 温度変化時の橋軸方向変位とGNSS計測結果

本項では、構造解析によって求めた外気温変化による橋軸方向変位とGNSS変位(平滑化)の比較結果を用いて、GNSS変位計測結果の妥当性検証を行う。

検討に用いた構造解析モデルを図-4.21(a)に示す。構造解析は、汎用構造解析プログラムSeanFEM(株式会社地震工学研究開発センター)を用いて次のとおりモデル化を行った。すなわち、トラス部材をファイバー要素、床版をシェル要素を用いて線形部材でモデル化し、支承条件は、P2支承を全方向固定のピン支点、その他の支承を橋軸方向可動、橋軸直角方向固定のピンローラー支点としてモデル化した。基礎バネについては、上部構造たわみへの影響が小さいと仮定してモデル化は省略した。また、モデル化にあたっては、図-4.21(b)に示すように、床版、縦桁および下横構の床組み構造についてもそれぞれ忠実にモデル化を行い、可能な限り実橋梁に近い三次元変位挙動が再現できるように留意した。



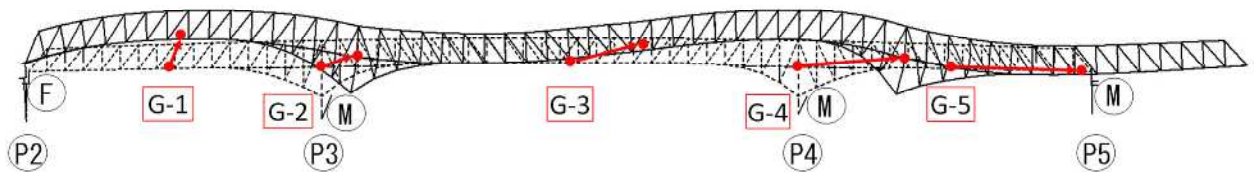
(a) モデル概要



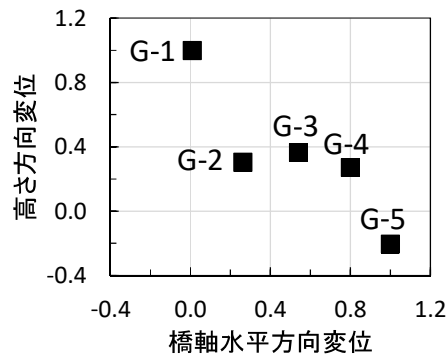
(b) 撤去部材

図-4.21 構造解析モデル

構造解析結果とGNSS平滑値との比較を行う前に、温度変化時の橋梁の変形性状を構造解析より確認する。構造解析モデル全体に単位温度上昇を与えた場合の変形の様子を図-4.22 (a) に示す。図に示すように、温度変化時の各計測点変位は橋梁の長手方向(橋軸方向)のみではなく、各支点を中心に橋体が回転し水平変位と高さ方向変位を伴う変形となる。起点側の固定支点P2に近いG-1計測点の変位は、水平方向変位に比べて高さ方向が卓越するのに対し、着目計測点がP2支点から離れるに連れて、水平方向が卓越する変位挙動に変化する。図-4.22 (b) には各計測点の変位ベクトルを高さ方向変位と橋軸方向変位に分解してプロットした。各方向変位は5つの計測点の最大変位で正規化して示している。このグラフからG-1、G-3およびG-5は、卓越する変位方向が高さ方向変位から水平方向へと推移することが理解できる。また、G-2およびG-4については支点上であり高さ方向変位が拘束されていることから、橋軸水平方向変位のみが増加する。



(a) 変位方向ベクトル (高さ方向-橋軸面内)

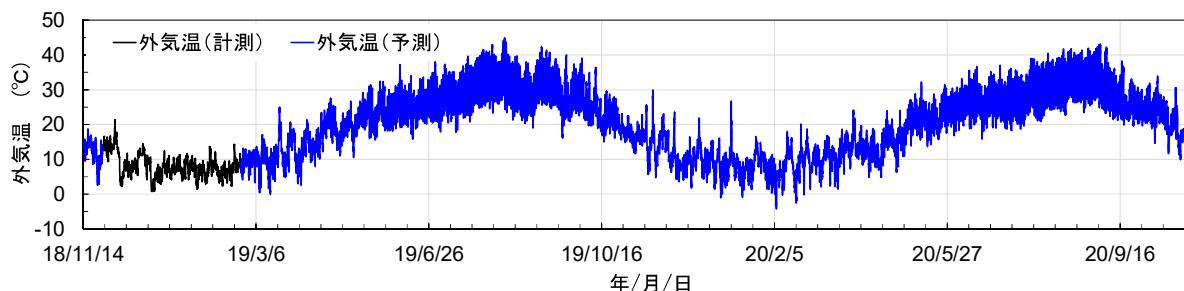


(b) 変位方向の変化

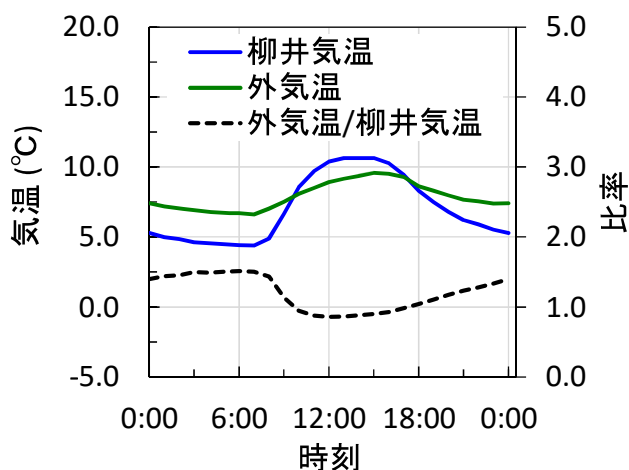
図-4.22 構造解析による温度変化時の変形形状

図-4.23(a) に構造解析モデルに作用させる外気温変化の様子を示す。図の外気温変化のグラフは工事期間中に計測された橋面上における外気温計測結果と、それと同時刻の気象庁柳井観測所における気温の関係をもとに、全計測期間に対する橋面上の外気温を予測してプロットしたものである。橋面上の外気温計測は工事期間中のみ計測可能であったため、全計測期間における外気温変化はこの方法による予測値を用いた。

図-4.23 (b) に外気温計と柳井観測所の気温の1日の推移および同時刻における気温との比率を示す。各グラフの値は計測期間中における各時刻における平均値である。また、橋面上の外気温の1日の変化は、柳井観測所の気温変化にくらべて緩やかであり、午前0時～10時および午後5時～24時は、柳井観測所気温に比べて橋面上の外気温の方が高い。この橋面上の外気温と柳井観測所気温との比率を用いて、全計測期間の橋面上外気温の予測を行い、それを構造解析モデルに温度変化量として作用させた。なお、橋面上外気温と柳井観測所気温との相関係数は0.97であり非常に高い相関がある。



(a) 橋面上の外気温予測



(b) 気温相関(柳井・橋面)

図-4.23 柳井観測所気温・部材温度・外気温

以上の温度変化時の橋梁変形挙動を踏まえ、G-1～G-5の各計測点の温度変化による橋軸方向変位について、GNSS変位計測結果(平滑値)と構造解析結果の比較を行った結果を図-4.24(a)に、相関図を同図(b)に示す。

変位の時系列変化において、構造解析変位は1日の外気温変化に対応した微小な伸縮変位を繰り返しながら、季節的な気温変化にも対応した大きな周期の伸縮変位の変動となっており、これに対してGNSS変位は、それら構造解析変位のほぼ中央付近の値を示している。同図(b)の相関図を確認すると、伸縮量の絶対値が小さいG-1を除いて、いずれの計測点も高い相関を示しており、両者はよく一致していると言える。また、同図(a)では、構造解析変位およびGNSS変位のいずれもG-1からG-5に連れて順次、変位振幅が大きくなっていることが確認でき、図-4.22で示した本橋温度変化時の変形形状と合致している。これより、GNSS計測結果は、本橋の支承条件や構造特性が適切に反映された計測値であると判断でき、妥当な計測結果であると言える。このように、長期のGNSS変位計測を行うことにより、温度変化による橋軸方向の長期的な桁伸縮変位の挙動を適切に把握することが可能である。

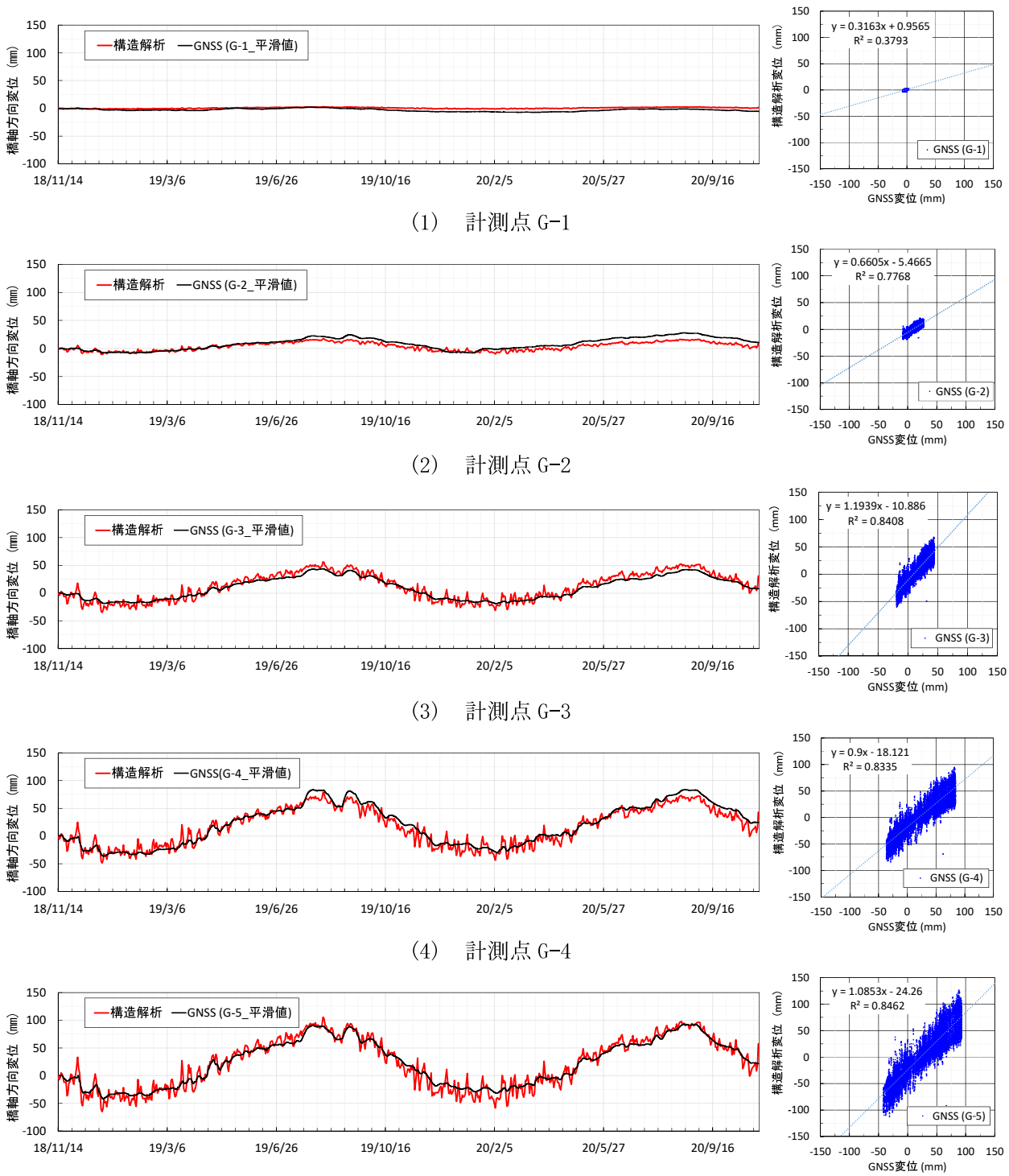


図-4.24 GNSS 計測による橋軸方向変位と構造解析変位の比較(橋軸方向)

4.5.2 温度変化時の傾斜計変位とGNSS計測結果

本項では、GNSS計測結果と傾斜計による計測結果とを比較することにより、GNSS計測と傾斜計の併用による橋梁の三次元変位挙動把握の可能性に関して考察する。

図-4.25 (a) に計測点 G-3 における高さ方向変位と外気温の 1 日の変化を示す。GNSS 計測値(平滑値)および外気温ともに計測期間中における同時刻の平均値をプロットしている。なお、外気温変化の影響のみを把握するため、いずれの計測値についても工事期間中の計測値は除外している。GNSS 計測値は、前節で示した橋軸方向変位と同様に、外気温の時間変動に連動した高さ方向の変化を生じている。

図-4.26 (a) はトラス鉛直材に設置した傾斜計の橋軸方向の傾斜の 1 日の変化を示している。傾斜計の値の時間変化は、午前中は終点側に小さく傾き、午後は起点側に大きく傾きが推移する挙動が確認できる。

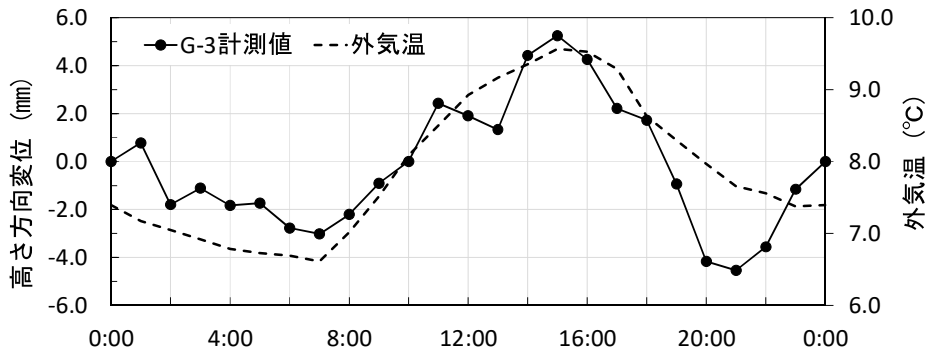
GNSS 計測値 (図-4.25 (a)) と傾斜計の値 (図-4.26 (a)) を比較すると、時間的なずれが生じているものの、傾斜計の値は GNSS 変位に追従して変化している。

このような両者の値の推移について、図-4.27 に示す温度変化時の構造解析結果を用いて考察する。同図は、橋梁変位と計測点 G-3 および傾斜計の設置位置について、温度上昇時の変形前後をそれぞれ示したものである。この解析結果をみると、G-3 計測点は温度上昇により図中右方向に変位するとともに、高さ方向上向きに増加している。また、傾斜計が設置されているトラス鉛直材に着目すると、変形前にほぼ垂直な状態であった部材が温度上昇による変形後には、図中右側に変位しながら起点側(P3 側)に傾きを生じている。これら解析結果における変位や傾きの様子は、前述の温度上昇時の GNSS 計測値 (図-4.25 (a)) や傾斜計の値 (図-4.26 (a)) のグラフの推移と一致している。

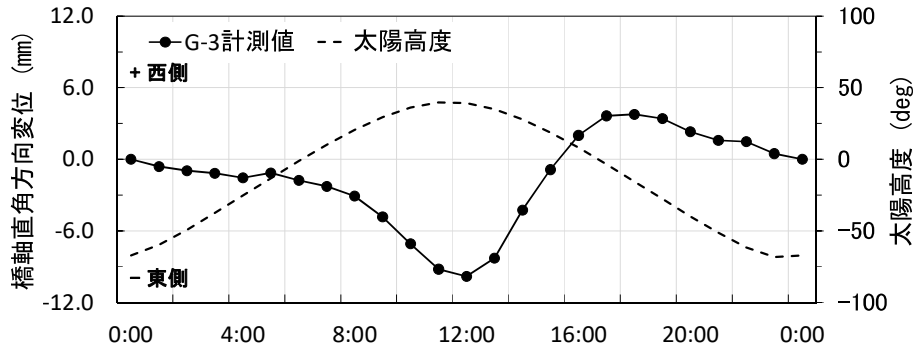
次に、図-4.25 (b) に計測点 G-3 における直角方向変位と太陽高度の 1 日の変化を示す。太陽高度に連動して橋軸直角方向の G-3 計測値が変化している。本橋はほぼ南北方向に架橋されており、日の出から日没までの太陽高度の変化に応じ橋梁の東側側面から西側側面へ日射方向が変化し、温度変化に伴う部材の伸縮が発生する箇所が変化することが想定される。

GNSS 計測値 (図-4.25 (b)) と傾斜計の値 (図-4.26 (b)) を比較する。GNSS 変位が西側から東側方向へ推移する 0 時～12 時の時間帯では、傾斜計の値は西側から東側への傾きが増加して 9 時前後に最も東側へ傾く最大値に達し、太陽がほぼ天頂に位置する 12 時に向けて傾きは減少傾向に転じた後に、12 時に最も西側に傾く最小値となる。次に GNSS 変位が東側から西側へ推移する 12 時～18 時の時間帯では、最も西側に傾いていた鉛直材の傾きは増加傾向に転じ 18 時に再び東側に最も傾き最大値をとる。このように、橋軸直角方向についても、橋軸方向と同様に、外気温、傾斜計および GNSS 変位の値が連動する様子を把握することができた。

以上のように、GNSS 計測および傾斜計を組み合わせた長期連続計測を行う方法においても、温度変化に対応した橋梁全体の変形挙動把握のための有用な情報が得られることが示された。

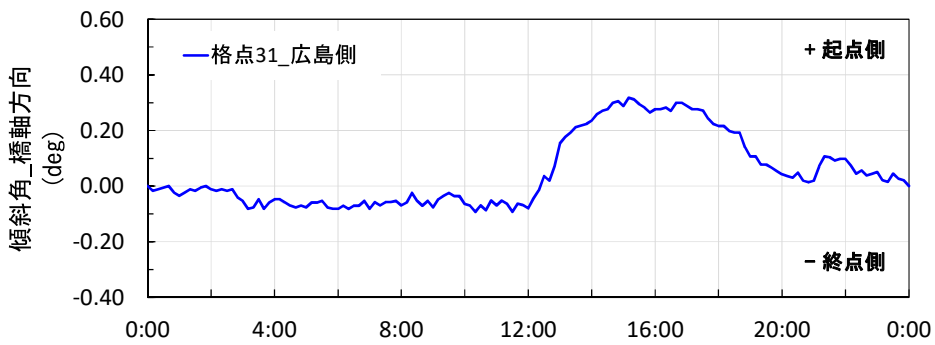


(a) 高さ方向変位と外気温

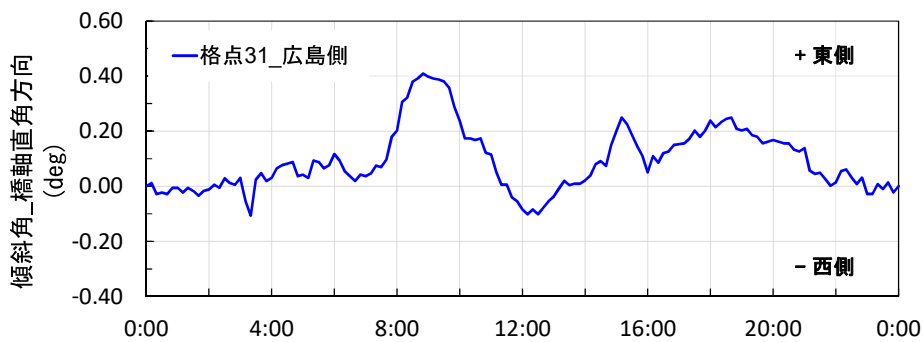


(b) 橋軸直角方向変位と太陽高度

図-4.25 計測値(G-3)・外気温・太陽高度の時間変化 (2018/11/14~2020/11/2 の各時刻の平均値)



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-4.26 トラス鉛直材の傾斜角の日変化

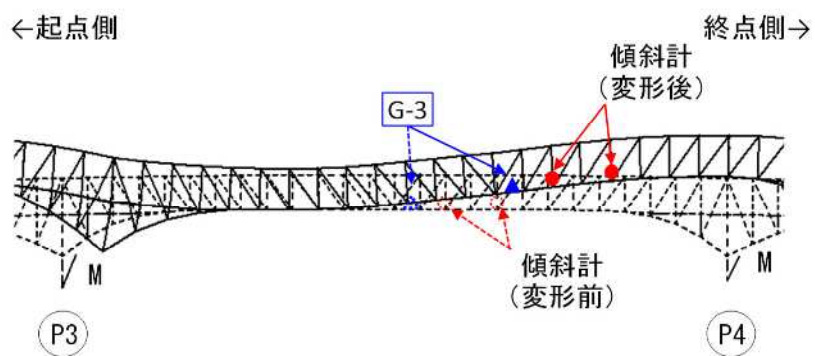


図-4.27 温度変化によるトラスの変形（構造解析変位，橋軸方向）

4.5.3 構造解析による長期変位計測結果の検証

GNSS 長期連続変位計測の工事監視や変位急増把握への適用性を検証するため、詳細構造解析モデルを用いたたわみ再現解析を実施し、復旧工事期間中における補強部材の載荷荷重によって発生する橋梁のたわみと GNSS 計測による変位との比較を行った。

荷重は、表-4.1 に示した荷重ステップ、載荷重および載荷範囲をもとに載荷し、各施工ステップに応じて図-4.4 のとおり段階的に増減させた。さらに、図-4.21 (b) に示した床版、縦桁、下横構、下弦材の破線部材を順次取り外すことにより、各施工ステップの橋梁の状態を再現した。

施工ステップは大きく 3 つの「状態」を考え、衝突事故直後の下弦材、下横構および縦桁が破断し、それぞれの部材はほぼ応力伝達機能を失ったと考えられる状態を「状態 1：下弦材・床版・下横構・縦桁撤去モデル」、床版の炭素繊維補強が完了し、床版を介した応力伝達を行うことが出来る状態を「状態 2：下弦材・下横構・縦桁撤去モデル」、すべての損傷部材の復旧が完了し、事故前の健全時の状態に復旧した状態を「状態 3：健全モデル」とした。

GNSS 平滑値と解析結果の比較を図-4.28 に示す。構造解析結果における状態 1、状態 2、状態 3 の変位値は、非常によく一致する結果となった。着目すべき点は、状態 2 と状態 3 の境界に約 35mm 程度の急激な変化が確認できる点である。この変位急変のタイミングは、復旧工事ステップ (表-4.1) における「ステップ 11：仮設トラス設置」(図-4.6) であり、変位急変の要因は次のようであると考察できる。すなわち、仮設トラス設置により所要の剛性が確保され、見かけ上は事故以前と同様にすべての荷重伝達が損失なく行われる状態となることが期待されるが、実橋梁においては、トラス本体と仮設トラス間の応力伝達部である摩擦ボルト接合部での「ずれ」等が発生し、図-4.28 に示す変位の急変が生じたものと考えられる。なお、この実際の工事においては、構造解析結果に示すような変位急変はなく、GNSS 平滑値に示す緩やかな変位増加であったと推察される。

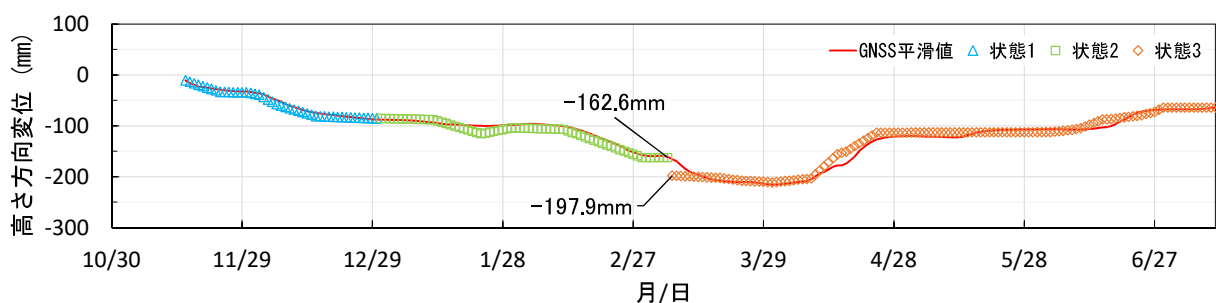


図-4.28 GNSS 高さ方向変位(平滑値)と構造解析変位(たわみ)の比較

次に、各状態におけるGNSS平滑値と構造解析変位との相関を図-4.29に示す。状態1~3のいずれのケースにおいても、1次近似曲線の傾きおよび決定係数がほぼ1.0となっていることから、GNSS連続計測結果と構造解析結果はほぼ一致していると言える。復旧工事完了後の状態3は健全モデルであることを踏まえると、GNSS変位連続計測結果と構造解析モデルの一致度を用いて、復旧後の橋梁全体系の力学特性の上では健全であることが変位計測を用いて検証できたことになる。

以上の検討結果より、GNSS連続計測結果の平滑値を用いて、逐次変化する復旧工事の荷重増減に対応したたわみを正確にモニタリングし、構造解析結果と比較することにより、工事監視や変位急増の把握と、健全性の評価を行うことが可能であることが示された。

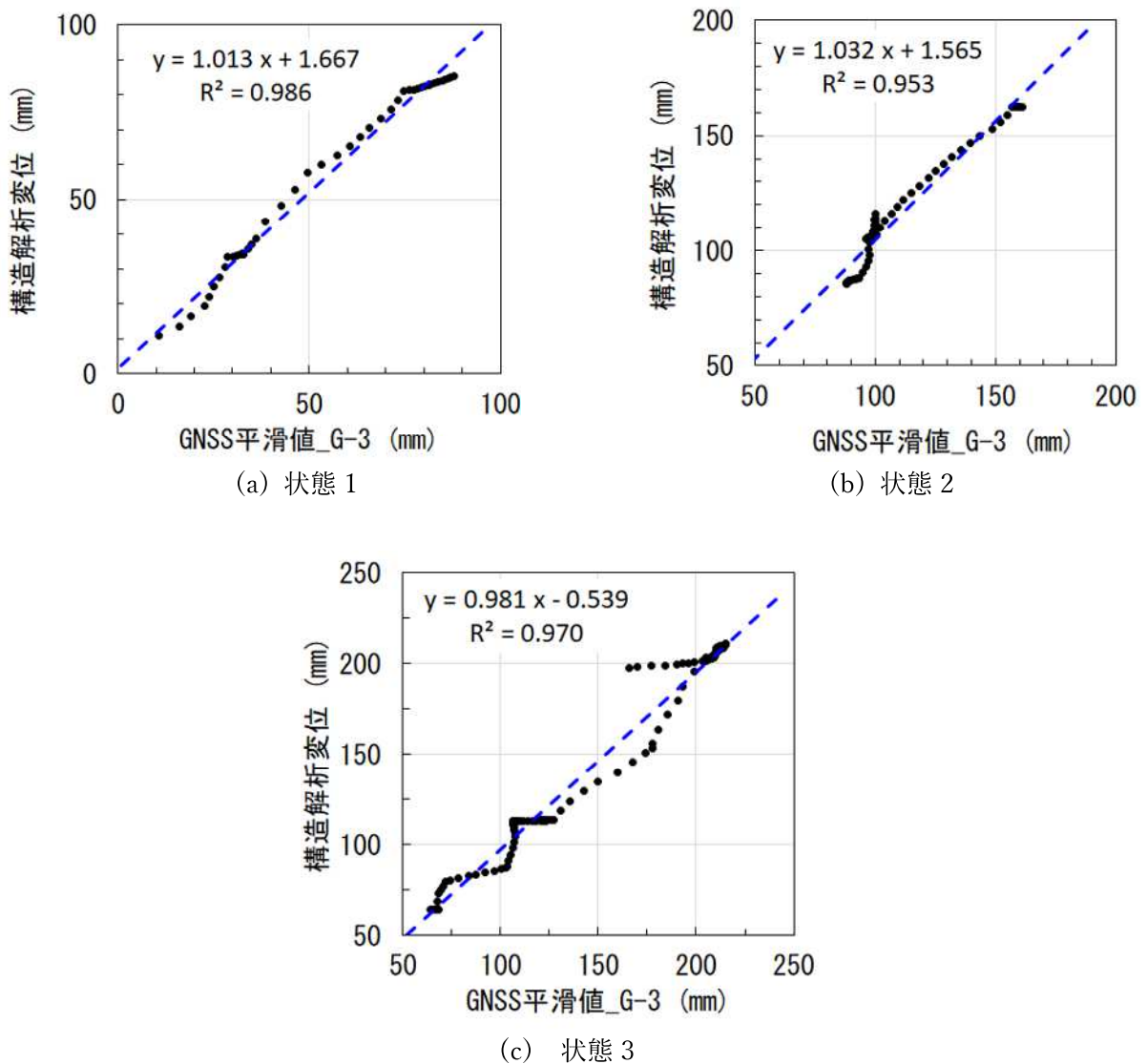


図-4.29 構造解析変位と平滑値(G-3)

4.6 短期的変位挙動への適用

本節では、GNSS 橋梁モニタリングにおいて、比較的短時間に発生する橋梁変位に対する GNSS 計測変位の追従性について検討した結果を報告する。

4.6.1 車両載荷試験の荷重ステップと載荷位置

本橋では供用再開後の車両通過時の耐荷力確認のため、車両載荷による橋梁のたわみ計測を 2 回実施した。載荷試験における荷重ステップ毎の車両位置、台数および載荷荷重を

図-4.30 に示す。

試験 1 (荷重ステップ S1-1~S1-10) は、仮設バイパスビーム設置後に実施した。まず、車両重量を 40 トンに調整したトラックを損傷部近傍の格点位置に停車させ(ステップ S1-1)、変位計測を行った後に次の載荷位置へ移動し(ステップ S1-2~S1-3)、次に載荷車両を順次追加していき、載荷重を 120 トンになるまで増加させる(ステップ S1-4, S1-5)。この荷重ステップを上下線でそれぞれ実施する(ステップ S1-6~10)。

試験 2 (荷重ステップ S2-1~S2-4)では、復旧工事の完了後、40 トントラック 3 台(合計 120 トン)を同時に載荷させ、支間中央(格点 29)および損傷位置中央(格点 32)に載荷し、この荷重ステップを上下線でそれぞれ行う。

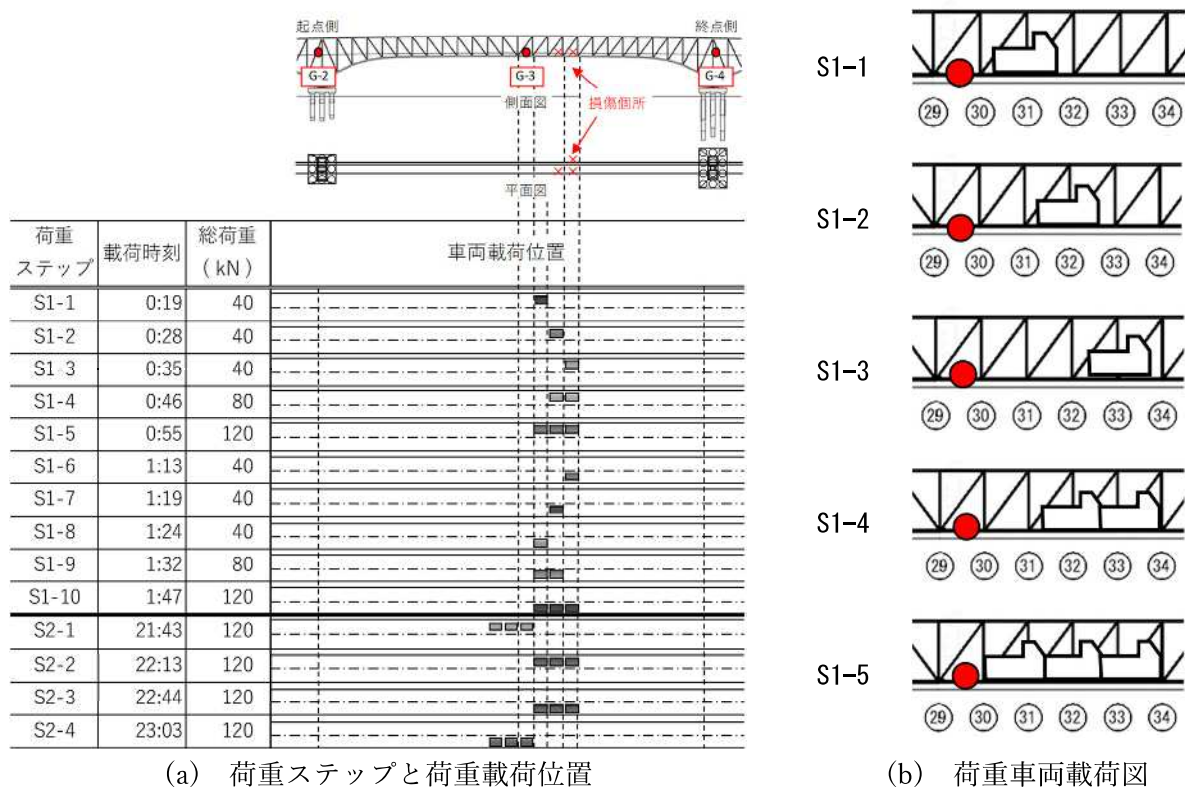


図-4.30 載荷試験における荷重載荷方法

4.6.2 短期的変位挙動把握の方法と追従性

本研究では、4.3.1 で述べたように GNSS による変位計測は 1 セッション(位相の計測時間)を 60 分間としたスタティック測位を実施している。しかし、載荷試験の車両の停止時間はおよそ 5~30 分であり、60 分毎の計測時間では試験結果に対応した変位を得ることはできない。そこで、スタティック測位におけるセッション長を 30 分および 60 分の 2 ケースとし、セッションの開始時間を 5 分および 60 分ずつスライドさせて基線解析を行うこととした。すなわち、**図-4.31** に示すように、1 セッション 60 分で 60 分ずつスライドさせる通常のスタティック解析の結果を方法 A、1 セッション 60 分で 5 分スライドの結果を方法 B、さらに、1 セッション 30 分で 5 分スライドの結果を方法 C とする。これにより、方法 A は 1 時間毎、方法 B および方法 C は 5 分毎に変位が得られる。なお、方法 B および方法 C は試験後の事後解析にて求めた計測値である。

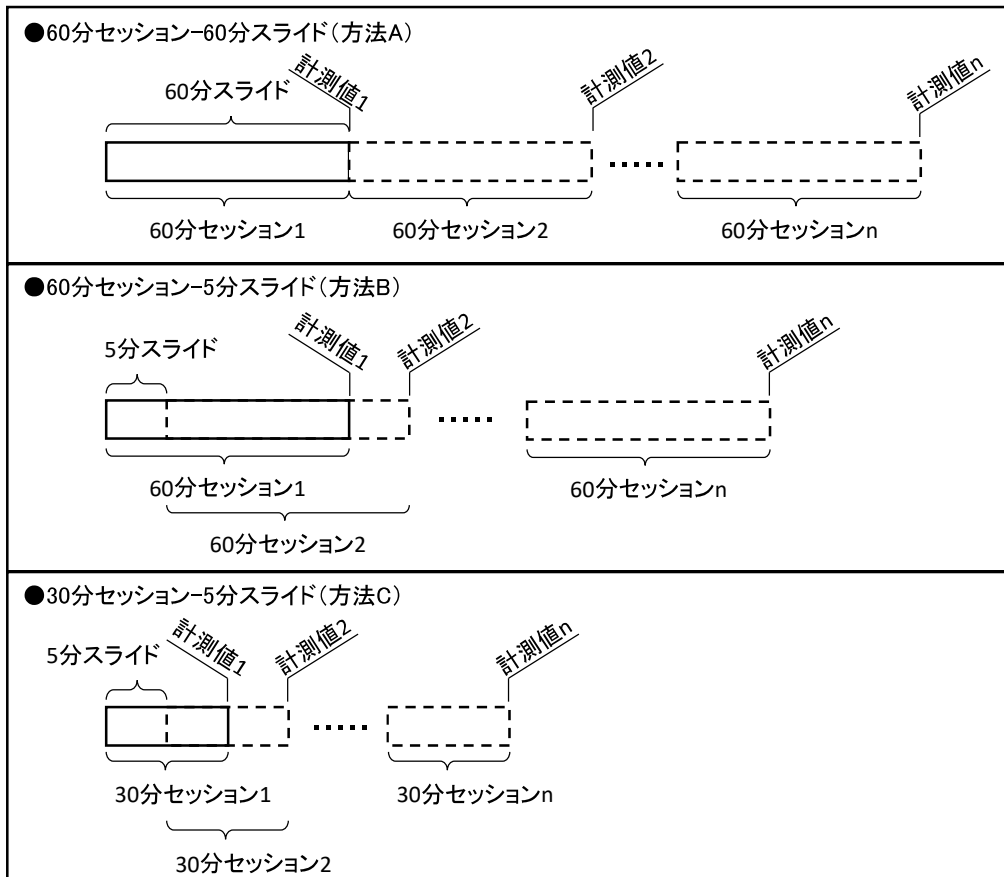


図-4.31 セッション長とスライド長

載荷試験結果を図-4.32 に示す。同図は各荷重ステップに対応した構造解析変位と沈下計による変位および GNSS 変位計測から得られる 3 ケースの方法 A, B, C をそれぞれ示している。同図において、構造解析変位は階段状のグラフとなっているが、これは

図-4.30 (a) における各荷重ステップの載荷時間に対応して荷重を変化させているためである。また、沈下計変位においても、構造解析変位の値とは異なるが、同一の荷重ステップに対応した変化となっている。

方法 A では、載荷試験 1 では S1-5、載荷試験 2 では S2-4 からそれぞれ約 1 時間後に最大変位が計測されている。これは、方法 A は 60 分セッション-60 分スライドでの解析であり、発生変位が 1 時間後の解析結果に反映されるためである。

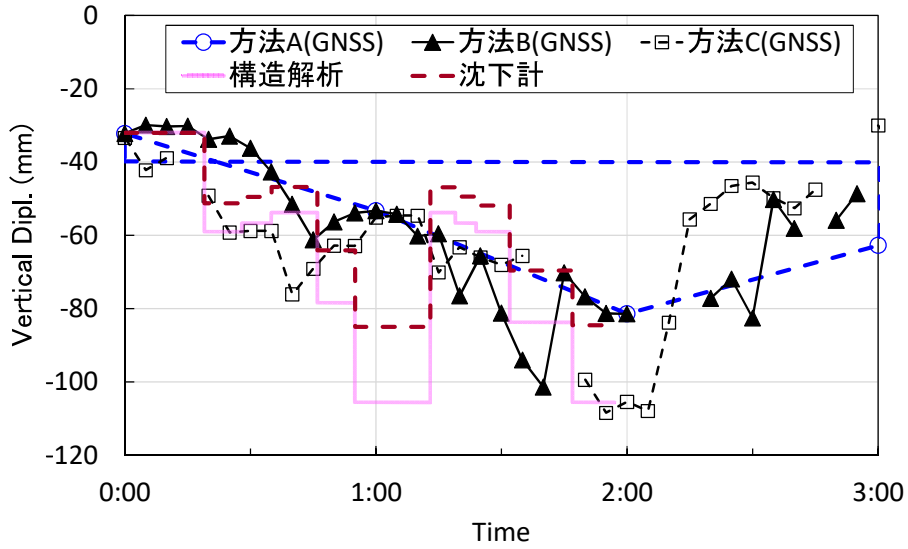
方法 B は、5 分スライドの解析結果であるため、方法 A に比べて小刻みな変位を計測できているが、セッション長が 60 分のため、方法 A と同様に対象時刻の前 1 時間分の変位が反映された結果となる。

方法 C は、5 分スライドの解析結果であるため、方法 B と同様に小刻みな変位を計測できている。また、セッション長が 30 分のため、変位のピークが方法 B で不明瞭であったのに対し、方法 C では載荷試験 1 で 2 回、載荷試験 2 で 4 回確認することができる。

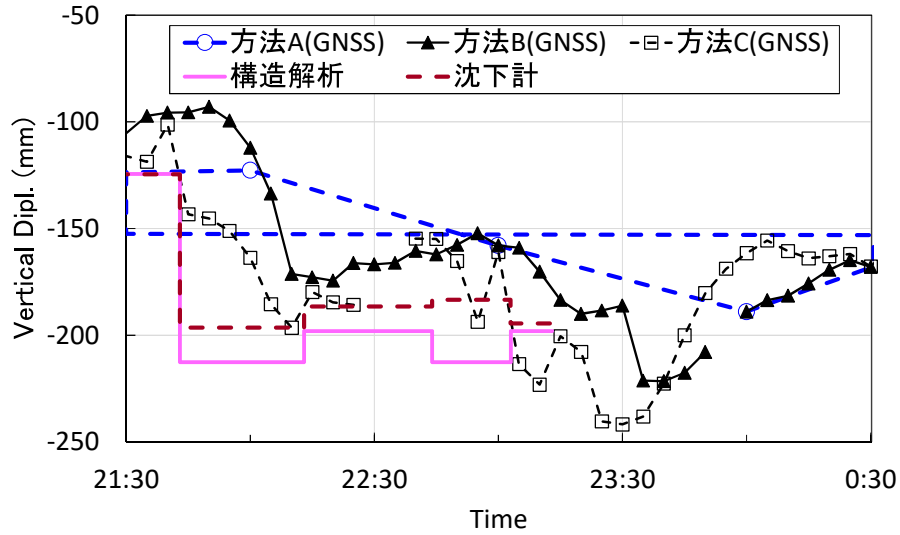
この方法 B と方法 C の計測結果の違いは以下のように考察される。すなわち、載荷試験 1 においては、最大荷重に至るまでの荷重ステップ S1-1~S1-5 までに要した載荷時間は約 40~50 分、S1-6~S1-10 までは約 30~40 分であり、いずれも 30 分以上 1 時間以内の載荷時間となっている。また、載荷試験 2 においても、各荷重ステップの載荷時間は 30 分程度である。したがって、方法 C の場合、セッション長が 30 分であるため、30 分に 1 回程度の変位の変化をより明確に計測可能となった。

以上の検討では、セッション長とスライド長の変更により、短期的変位挙動に対する追従性は一定程度改善されるものの、明確な変化を捉えきれていない結果となった。このことから、本方法による短期的変位挙動把握については、今後の研究課題とする。

なお、短期的、緊急的な（即時的）変位を計測する方法としてキネマティック測位方式の利用が考えられるが、一般的に同方式では計測のばらつきがスタティック測位方式と比べ大きくなり、精度が要求される橋梁の変位計測への適用は今後の課題と考えている。



(a) 荷重試験 1



(b) 荷重試験 2

図-4.32 荷重試験におけるGNSS変位のセッション長・スライド長による比較

4.7 結論

本報告では、船舶衝突によって損傷した鋼 3 径間連続トラス橋を対象に実施した GNSS による長期連続変位計測の有効性を検証した。本報告で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 橋長 725m の長大渡海トラス橋に GNSS センサーを設置し、ソーラーパネル、無線通信および Internet 回線を用いた自動連続モニタリングシステムを構築し、スタティック測位法によって橋梁主桁の主要点の三次元変位を約 2 年間にわたり連続計測した。その結果、センサー上空に電波の遮蔽物となるトラス部材がある状態でも、計測に必要な受信衛星数を十分確保でき、毎時連続的にほぼ欠測なく、変位を自動計測できることが実証された。
- 2) GNSS による変位計測結果にトレンドモデルを適用して得た平滑化結果を用いることにより、逐次変化する復旧工事の荷重増減に対応したたわみを把握し、変位増加のトレンドや変位急増の兆候を捉え、長期連続的な工事監視を行うことができた。
- 3) 橋梁中央付近の GNSS による高さ方向変位計測結果(平滑値)は連通管式沈下計による計測値(公称精度 ± 0.5 mm)と同程度の精度でたわみが計測されることが検証された。さらに、補修工事時に橋梁に載荷した荷重を与えた構造解析結果と GNSS による各計測点の計測変位は良い一致を示した。
- 4) さらに、橋梁外の不動点からの橋軸方向の変位を連続的に計測することができ、計測結果(平滑値)は、温度構造解析結果とよく一致していることが示された。GNSS 変位計測は、橋桁の橋軸方向の長期的な変位挙動、また、桁伸縮の把握にも適用可能なことが示された。
- 5) 温度変化に対応した橋梁全体の変形挙動の把握において、GNSS 計測および傾斜計を組み合わせた長期連続計測を行うことにより、構造解析結果を裏付ける有用な情報が得られることが示された。
- 6) 計測時間が 1 時間のスタティック測位方式を用いて長期変位モニタリングを行った結果に対し、対象構造物の変位の時間的变化に応じて、セッション長やスライド長を変更して再解析を行うことにより、短期的変位挙動に対し、GNSS モニタリングを用いて追跡できる可能性が示されたが、その計測精度についてはさらなる検討が必要である。

以上のことより、橋梁の長期連続変位計測において、スタティック測位法を用いた GNSS 変位計測システムは有効かつ効率的な手法になりうるものと考えられる。一方、キネマティック測位方式を用いた短期変位挙動の把握や、10Hz 程度の動的振動挙動を捉える研究も行われているが、これらを構造物変位モニタリングに用いるためには計測精度の向上が課題である。

GNSS 変位モニタリングは、オープンスカイ環境が必要であるという制約や、計測時間と計測精度にトレードオフの関係があること、および橋梁構造における同モニタリング手法の知見の蓄積が少なく、変位計測結果の評価手法が確立していないこと等の課題が存在するが、今後は、これらの課題解決に向けた継続的な取り組みや、長期および短期モニタリングそれぞれの特徴を生かした橋梁健全度評価手法の確立を目指すことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 石田雅博, 廣江亜妃子, 藤木裕二: 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン(案), 国立研究開発法人土木研究所, モニタリングシステム技術研究組合, 土木研究所資料, 第 4408 号, 2020. 12.
- 2) 国土交通省 道路局 国道・技術課: 監視計画の策定とモニタリング技術の活用について(参考資料), 2020. 6.
- 3) 岩崎智治, 武智国加, 武石朗, 清水則一: 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, Vol. 50, No. 6 (533), pp. 25-27, 2002.
- 4) 岩崎智治, 原口勝利, 佐藤渉, 増成友宏, 内田純二, 清水則一: GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発, 日本地すべり学会誌, 第 49 巻, 第 4 号, pp. 174-185, 2012.7.
- 5) 松田浩朗, 安立寛, 西村好恵, 清水則一: GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No. 715/III-60, pp. 333-343, 2002.
- 6) 増成友宏, 武地美明, 田村尚之, 船津貴弘, 清水則一: GPS 変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 4, pp. 394-402, 2008.
- 7) 増成友宏, 武地美明, 船津貴弘, 清水則一: 現場気象データを用いた GPS 変位計測の補正について, 土木学会論文集 F, Vol. 65, No. 3, pp. 356-363, 2009.
- 8) 中里裕臣, 井上敬資, 紺野道昭, 伊藤吾一, 佐藤透: GPS を用いた大規模すべり斜面の長期自動変位観測, 応用地質, 第 58 巻, 第 6 号, pp. 402-407, 2018.
- 9) 中島伸一郎, 古山陽太, 林佑一郎, Nguyen TRUNG KIEN, 清水則一, 廣川誠一: 急傾斜長大斜面の GPS 三次元変位計測における誤差補正の効果と長期連続モニタリング結果, 日本地すべり学会誌, Vol. 55, No. 1, pp. 13-24, 2018.
- 10) 平野宏幸, 白田芳彦, 神澤幸治, 宮田和, 清水則一: トンネル施工時における地すべり斜面の三次元変位計測への GPS 変位計測システムの適用とその評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 48, No. 2, pp. 81-92, 2011.
- 11) 板屋英治, 森田陽弘, 新垣敏一: フィルダム安全管理の高度化を目的とした堤体外部変形計測への GPS 全面導入に関する取組み, ダム技術, No. 264, pp. 47-56, 2008.
- 12) 小堀俊秀, 山口嘉一, 岩崎智治, 中島伸一郎, 清水則一: フィルダム天端堤体内部に設置する GPS アンテナの変位計測性能実験とダム外部変形計測への適用性, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 70, No. 1, pp. 18-28, 2014.
- 13) Xin J., Zhou J., Yang X., Li X., and Wang Y.: Bridge structure deformation prediction based on GNSS data using Kalman-ARIMA-GARCH Model, MDPI, sensors, Article, Vol. 18, 2018.1.
- 14) Chen Q., Jiang W., Meng X., Jiang P., Wang K., Xie Y., and Ye J.: Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower using GNSS: A case study of the Forth Road Bridge in the UK, MDPI, remote sensing, Article, Vol. 10, 364, 2018.2.
- 15) Jiayong Y., Xiaolin M., Banfu Y., Bin Xu., Qian F. and Yilin X.: Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: *Structural Control Health Monitoring*, Vol. 27(1), 2020.1.
- 16) Xinpeng W., Qingzhi Z., Ruijie X., Chenfeng L., Guanqing L. and Ling'ai L.: Review of bridge structural health monitoring based on GNSS: From displacement monitoring to dynamic characteristic identification, *IEEE Access*, Vol.9, pp. 80043-80065, 2021.
- 17) 中村俊一: GPS を用いた吊橋補剛桁の風圧変形計測に関する研究, 土木学会論文集, No. 658/VI-48, pp. 231-243, 2000.
- 18) 国土交通省 運輸安全委員会: 船舶事故調査の経過報告について, 2019.3.(あるいは, 山口県: 平成 30 年 10 月 22 日 大島大橋外国船衝突事故対応記録, 2020. 3.)
- 19) 佐田達典: GPS 測量技術, オーム社, 2003.
- 20) Shamen-net 研究会 編集委員会: [新]知っておきたい GPS/GNSS のはなし, shamen-net 研究会, 2019.5.

- 21) 北川源四郎：FORTRAN77 時系列解析プログラミング，岩波書店，pp. 255-258, 1996.
- 22) Misa, P. and Enge, P. (測位航法学会誌)：精鋭 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機，改訂第 2 版，測位航法学会，pp. 162-164, 2010.
- 23) 中島和希，佐田達典，江守央：QZSS の機数と仰角に応じた GPS・QZSS 測位の精度変化検証，土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 74, No. 2, pp. II_63-II_70, 2018.

第5章 総括

5.1 本研究における全体総括

第1章「序論」では、1.1節において、橋梁維持管理を取り巻く社会背景と長大特殊橋の維持管理の高度化、効率化の重要性および課題を述べ、本研究のテーマとして2つのモニタリング技術に着目した理由を述べた。2つのモニタリング技術とは、斜張橋ケーブル張力測定を遠隔から非接触に実施することが可能な「画像解析技術」と、長大な橋梁構造の全体的かつ三次元的な変形挙動を常時監視できる「GNSSによる変位モニタリング技術」であり、1.2節にそれぞれの研究目的、1.3節に本論文の構成を記述した。

第2章「既往の知見と本研究の意義」では、2つのモニタリング技術に対し、2.2節でDIC法を用いた計測技術、2.3節でGNSSを活用した変位モニタリング技術について、それぞれの技術の概要と既往の研究成果を整理した。2.4節では橋梁の温度変化に着目した研究事例を整理し、2.5節で本研究の意義を述べた。DIC法を用いた計測技術は、これまで、応力、ひずみ、変位および振動計測に積極的に利用されてきているが、斜張橋ケーブルの振動計測に適用された事例はなく、本研究が国内初の試みであると思われる。GNSSを活用した変位モニタリング技術は、斜面、ダムおよびトンネル分野での研究と適用事例は多いが橋梁分野への適用は限定的であり、橋梁に対して長期連続的に三次元変位をモニタリングし、橋梁の状態評価を試みた事例はほとんど見られない。この意味において、本研究で取り組んだ2つのモニタリング技術の実橋梁への適用性に関する研究は、工学的に意義深いと考えている。

第3章「画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測」では、実橋の斜張ケーブルの動画を撮影し、従来から用いられている加速度計による振動数計測結果と比較することにより、DIC法を用いた計測精度をサブセットの大きさと位置をパラメータとして検証した。また、2K画像計測および4K画像計測で得られた動画より抽出した振動数を比較し、画素数の違いによる振動数抽出精度への影響を検討した。本研究で得られた知見として、1)斜張橋のケーブル振動計測において、DIC法による方法においても、比較的低下した振動数領域において、現在一般的に用いられている加速度計による振動計測と同等の精度で振動数計測が可能であること、2)DIC法による振動数解析におけるサブセットサイズは、ケーブル径比率（ケーブル径に対するサブセットの1辺の長さ）を1以上とすることで振動数抽出状況が改善すること、3)4K画像計測を用いてケーブル径比率を3以上に設定することにより、3次振動まで計測が可能となったこと、4)本研究の条件の範囲では、ケーブル振動計測精度に2Kおよび4Kによる違いは見られなかったことを明らかにし、斜張橋ケーブル張力の測定では、デジタル画像相関法を用いた非接触型全視野計測法が有効な計測手法の1つであることを確認した。

第4章「スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリング」では、船舶衝突によって損傷した鋼3径間連続トラス橋を対象に実施したGNSSによる長期連続変位計測の適用性を検証した。本研究で得られた知見として、1)橋長725mの長大渡海トラス橋にGNSSセンサーを設置し、ソーラーパネル、無線通信およびInternet回線を用いた自動連続モニタリングシステムを構

築し、スタティック測位法によって橋梁主桁の主要点の三次元変位を約2年間にわたり連続計測した結果、センサー上空に電波の遮蔽物となるトラス部材がある状態でも、計測に必要な受信衛星数を十分確保でき、毎時連続的にほぼ欠測なく変位を自動計測できることが実証されたこと、2)GNSSによる変位計測結果にトレンドモデルを適用して得た平滑化結果を用いることにより、逐次変化する復旧工事の荷重増減に対応したたわみを把握し、変位増加のトレンドや変位急増の兆候を捉え、長期連続的な工事監視を行うことができたこと、3)橋梁中央付近のGNSSによる高さ方向変位計測結果(平滑値)は連通管式沈下計による計測値(公称精度 ± 0.5 mm)と同程度の精度でたわみが計測されることが検証され、補修工事時に橋梁に載荷した荷重を与えた構造解析結果とGNSSによる各計測点の計測変位は良い一致を示したこと、4)橋梁外の不動点からの橋軸方向の変位を連続的に計測することができ、計測結果(平滑値)は、温度構造解析結果とよく一致していること、5)GNSS変位計測は、橋桁の橋軸方向の長期的な変位挙動、また、桁伸縮の把握にも適用可能なこと、6)温度変化に対応した橋梁全体の变形挙動の把握において、GNSS計測および傾斜計を組み合わせた長期連続計測を行うことにより、構造解析結果を裏付ける有用な情報が得られること、7)計測時間が1時間のスタティック測位方式を用いて長期変位モニタリングを行った結果に対し、対象構造物の変位の時間的変化に応じて、セッション長やスライド長を変更して再解析を行うことにより、短期的変位挙動に対し、GNSSモニタリングを用いて追跡できる可能性が示されたが、その計測精度についてはさらなる検討が必要であることが明らかとなり、橋梁の長期連続変位計測において、スタティック測位法を用いたGNSS変位計測システムは有効かつ効率的な手法になり得ることを示した。これらの研究により、長大特殊橋における損傷の早期発見と橋梁性能の定量化に繋がる技術の実用性検証を行う目的は達成されたと考えている。

本研究で取り組んだ2つのモニタリング技術は、実橋梁への適用性を検証する意味で、実用的価値の高い研究成果である。これらのモニタリング技術が橋梁分野で広く普及することにより、点検、維持管理の高度化、効率化が図られ、橋梁が末永く社会を支える安全、安心なインフラとして位置づけられることを願うものである。

5.2 本研究の成果・課題と今後の展望

本研究では、「画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測」、ならびに、「スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリング」の2つの実証的研究により、実用に資する成果を得ることができた。以下では、本研究における成果と研究の結果明らかになった課題を整理し、課題解決のための今後の研究の方向性と展望についてそれぞれの技術に分けて述べた後、本研究から繋がる橋梁モニタリングにおけるデジタルツインメンテナンスに向けた展望を述べる。

5.2.1 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測

斜張橋ケーブルの張力計測における従来手法では、計測対象となるケーブルに直接加速度計を設置して時刻歴加速度波形を計測し、その計測結果を用いてFFTを行って卓越振動数を算定し、それらを張力算定式に代入することによりケーブル張力を推定していたのに対し、本研究では、加速度計を用いずデジタルカメラを用いて、計測対象ケーブルに非接触かつ遠方より撮影を行い、得られたデジタル動画像に対してデジタル画像相関法を用いて解析を行うことにより時刻歴変位波形を取得することに成功した。これにより、斜張橋の詳細点検で課題となっていた作業員の安全性の向上や加速度計設置作業の効率化が図られるものと思われる。

しかしながら、本研究において次の課題が明らかになった。すなわち、筆者らの行った実証研究では、卓越振動数を3次までしか特定することができなかった。このことは、ケーブルの高次振動モードの固有振動数測定値からの張力算定法は適用が限定されることを意味している。したがって、今後は、デジタル画像相関法を用いたケーブル振動数測定の高次振動抽出手法の研究が課題となる。ただし、これについては、本研究を引用した四井ら¹⁾の研究において高次振動抽出の可能性が見出されており、これらを参考に、デジタル画像相関法による振動抽出技術を進展させる必要がある。また、デジタル画像相関法以外の手法を用いた画像処理手法による振動抽出方法による異常検知²⁾や、デジタル画像相関法によるひずみ分布計測を用いたデータ同化性能に関する研究³⁾も行われている。

今後は、画像処理手法研究の進展や画像撮影機器の低廉化、画像処理に用いるコンピュータの処理速度や通信速度の向上により、画像解析技術はより身近なインフラモニタリング手法として用いられると考えられる。本研究分野をさらに発展させることが、効率的かつ安全安心な社会の実現に不可欠であると考えられる。

5.2.2 スタティック測位法を用いた GNSS による橋梁の変位モニタリング

当該研究では、鋼 3 径間連続トラス橋の道路面高さの高欄外側に GNSS を設置して、約 2 年間にわたり三次元変位を長期連続的に自動計測し、上空障害物となるトラス部材がある場合においても、ほぼ欠測なくスタティック測位が実施できることを実証するとともに、GNSS 変位計測結果にトレンドモデルを適用して平滑化を行うことにより、長期の工事監視における変位急変を捉えることに成功した。また、橋梁上の載荷荷重に対し、連通管式沈下計と同程度の精度での計測が可能であることや、平滑化した値が温度構造解析結果とよく一致すること、橋軸方向の桁伸縮の把握に適用可能であることを示した。これにより、温度変化に伴う橋梁の全体変形挙動を把握するための有用な情報が、GNSS モニタリングによって得られることを実証した。その反面、スタティック測位法におけるセッション長やスライド長を変更して、より短期的な挙動を把握しようとしたが、その計測精度については今後の検討課題であった。

短期的変位を GNSS モニタリングによって捉えようとする試みは、国内外において精力的に行われており^{4)~7)}、橋梁分野についてもこれらの手法を活用した研究を進めていくことにより、災害時等の緊急的な橋梁の状態把握などに有効となり得る。また、GNSS を用いて高周波の振動数を捉えて橋梁性能評価に活用する試みも行われており、GNSS 計測技術がデジタルツインメンテナンスへ向けた重要な要素技術となることが大いに期待される。

一方で、本研究で実施したように、良好な精度が得られるスタティック測位法を橋梁の変位計測に長期連続的に適用した事例は国内ではほとんどみられない。GNSS の最大の特徴である三次元変位の計測結果を用いた橋梁の性能評価への活用については、様々な検討手法が考えられることから、今後は本手法を様々な橋梁形式に適用し、橋梁の三次元的な変位挙動を詳細に解明することにより、これまでの点検・維持管理手法にない定量的なメンテナンス指標の作成を目指すことが重要である。

5.2.3 今後の展望

本研究で取り組んだ、「画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測」および「スタティック測位法を用いた GNSS による橋梁の自動連続三次元変位モニタリング」について、今後の展望をそれぞれ記述する。

DIC 法による振動数抽出技術は、斜張橋ケーブルに限らず、吊橋のハンガーケーブル、桁橋上部工や橋脚の振動抽出や、緩慢なたわみ進行のモニタリングにも利用可能である。例えば、画素数や対象物との距離に関する課題はあるものの、国や自治体が設置している街頭や河川に設置しているカメラを活用した振動や変位の監視などが考えられる。さらに、デジタル動画を用いている利点を最大限に活用するために、撮影画像から橋梁上の通過車両の重量を AI にて判別すると同時に、通過した橋梁の振動も同時に解析するということも考えられよう。今後の画像処理技術の進展と応用研究が期待される。

GNSS 変位モニタリング技術は、現在、技術開発が盛んに行われている分野である。本研究で用いたスタティック測位法に比べ計測精度は低下するが、より計測間隔が短い RTK 測位によるモニタリング技術の研究が多く行われている。また、基準局の設置が不要なネットワーク RTK や電子基準点の活用や、GNSS センサーの低価格の進展など、今後、同計測技術がより社会に普及していくことが見込まれる。このような GNSS 変位モニタリングを取り巻く状況に加え、常時取得したデータに機械学習を適用した異常検知技術の開発、AI 技術を活用した予測やデータ同化技術も進展していくものと考えられ、今後は橋梁の状態評価の精度がより向上するものと予想される。

今後は、本研究で取り組んだ2つの技術に留まらず、その他のセンサー技術も組み合わせたより高度な IoT 環境の構築とそれらを活用した応用研究を積極的に推進していく所存である。

5.3 本研究に関連した成果

1. 有井賢次, 天羽千佳, 渡邊学歩, 藤本英太: 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動数測定, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会
2. 有井賢次, 渡邊学歩, 幸左賢二: 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 77, No. 4 (地震工学論文集第 40 巻), I_626-I_637, 2021.
3. 西村勇輝, 渡邊学歩, 有井賢次, 今田吉貴: GNSS 変位観測に基づく鋼連続トラス橋の日変動リアルタイムトレンド推定, AI・データサイエンス論文集 3 巻 J2 号, 2022
4. 有井賢次, 渡邊学歩, 武智国加, 清水則一: スタティック測位法を用いた GNSS による橋梁の自動連続三次元変位モニタリング, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 6, 23-00002, 2023.
5. Elfrido Elias Tita, Gakuho Watanabe, Peilun Shao, Kenji Arii: Development and Application of Digital Twin-BIM Technology for Bridge Management, Appl.Sci.2023,13, 7435.
6. Elfrido Elias Tita, 渡邊学歩, Shao Peilun, 有井賢次: Structure performance evaluation based on the bridge Digital Twin developed by the Building Information Modeling Technology, JSCE 令和 5 年土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会
7. 竹下聡一郎, 有井賢次, 今田吉貴, 渡邊学歩, 佐藤渉, 江川真史, 田中剛, 清水則一: デジタルツインメンテナンスに向けた連続桁橋の熱変形挙動の有限要素解析に基づく考察, JSCE 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会
8. 有井賢次, 竹下聡一郎, 今田吉貴, 渡邊学歩, 佐藤渉, 江川真史, 田中剛, 清水則一: デジタルツインメンテナンスに向けた連続桁橋の熱変形挙動と GNSS モニタリング, JSCE 令和 5 年土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会

参考文献

- 1) 四井陽貴, 松岡弘大, 貝戸清之: サブピクセル推定誤差発生メカニズムに着目した橋梁変位の全視野画像計測の実用的改善法, 土木学会論文集, Vol.79, No. 15, ID 22-15054, 2023.
- 2) 河邊大剛, 横山拓海, 金哲佑: 動画情報を用いた道路柱状構造物の固有振動数の推定と異常検知の可能性, AI・データサイエンス論文集, 3巻, J2号, pp. 315-325, 2022.
- 3) 佐藤開, 西尾真由子: 局所損傷を有する構造物のデータ同化性能評価に向けた画像ひずみ分布計測の適用性検討, 構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 139-147, 2023.
- 4) 堤浩志, 小濱健吾, 中村葵, 小泉圭吾: 斜面管理における RTK-GNSS データの変化点検知手法, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 75, No.2, pp. I_15-I_26, 2019.
- 5) 堤浩志, 小濱健吾, 小泉圭吾: 斜面管理における RTK-GNSS データの変化点検知手法の改良, AI・データサイエンス論文集, 1巻, J1号, pp. 437-444, 2020.
- 6) 小濱健吾, 吉田伊織, 田山聡, 貝戸清之: 斜面管理における RTK-GNSS データの測定誤差を考慮した変化点検知手法, 土木学会論文集, Vol. 79, No.7, ID 22-00133, 2023.
- 7) Chenyu Xue, Panos A. Psimoulis : Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers, Engineering Structures, Volume 284, 2023.6.

謝 辞

本論文は、筆者が山口大学大学院創成科学研究科博士後期課程に在籍した2019年4月から2024年3月の約6年間に研究を行った、デジタル画像相関法とGNSSスタティック測位法を用いた橋梁変位モニタリングに関する研究を取り纏めたものになります。

本論文の主査を務めていただきました山口大学大学院創成科学研究科准教授 渡邊学歩先生 には、私を研究の世界に誘っていただき、研究のいろはや研究者としての心構え、未知の知見を導き発見することの楽しさを教えていただきました。また、遅々として進まない私の研究を、時には厳しくご指導をいただき学位取得まで導いていただきました。心より感謝いたします。

山口大学大学院創成科学研究科 麻生稔彦教授、中村秀明教授、河村圭教授、中島伸一郎准教授 には、大変ご多忙のところ本論文の審査をお引き受けいただき、誠にありがとうございます。様々な切り口からのご指摘をいただくことにより、私の視野が広がり、研究成果を充実したものにすることができました。深く感謝いたします。

九州工業大学名誉教授 幸左賢二先生 には、主に本論文の第3章に関連する論文執筆にあたり大変お世話になりました。先生には私の研究力、論文執筆力の稚拙さをお察しいただき、頻回かつ丁寧に論文のご指導をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

山口大学名誉教授 清水則一先生（現 関西大学客員教授）には、主に本論文の第4章に関連する論文執筆にあたり大変お世話になりました。GNSSモニタリング業務を通じて、当時、山口県橋梁アドバイザーでいらっしゃった先生とお会いする機会を得て以来、GNSSモニタリング全般にわたるご指導と論文執筆にあたって詳細なご指導を賜りました。ここに心より感謝の意を記します。

私が山口大学に在籍し、学位取得に至るまでの6年間ともに研究を行ってきた渡邊研究室所属の学生の皆様には非常にお世話になりました。論文の技術的なサポートや現地計測で協働していただきましたパナソニック株式会社テクノロジー本部（当時）日下博也氏、パナソニックシステムソリューションズジャパン株式会社 天羽千佳氏、古野電気株式会社の武智国加氏、実橋計測のためのフィールド提供をご快諾いただきました広島県東部建設事務所および国土交通省福山河川国道事務所、ならびに山口県防府土木建築事務所長（当時道路整備課長）城一俊幸氏をはじめ、道路整備課および山口県柳井土木建築事務所の皆様に心から感謝の意を表します。

また、株式会社長大 構造事業本部長（当時）加藤雅彦様、西日本構造事業部長（当時）元山寿様、構造事業本部長 富田克彦様、同事業部長 田中剛様 の他、広島構造技術の皆様には、私の研究活動をサポートいただきました。心より感謝いたします。

最後に、私事になりますが、約6年間の長きに亘る研究活動の中、家族の時間を潰して研究に費やすことをこころよく見守ってくれた妻の はるみ に心より感謝いたします。ありがとう。

2024年3月 有井賢次