

博士論文

小規模橋梁を対象とした簡易試験による
健全度評価手法の研究

岩手大学大学院工学研究科
機械・社会環境システム工学専攻

千葉 陽子

2022年9月

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 既往の研究.....	7
1.2.1 トラック車両を用いた動的載荷試験.....	7
1.2.2 走行車両を用いた振動試験による上部構造の損傷評価.....	8
1.2.3 温度変化が橋梁の挙動に及ぼす影響に関する検討.....	9
1.2.4 振動試験に基づく健全度評価.....	15
1.2.5 FWDを用いた衝撃振動試験.....	16
1.3 本研究の目的.....	18
1.4 本研究の構成.....	19
第2章 車両載荷試験による橋梁の評価.....	20
2.1 対象橋梁概要.....	21
2.2 車両載荷試験.....	28
2.2.1 変位計測試験概要.....	28
2.2.2 変位計測試験結果.....	34
2.3 車両走行試験.....	40
2.3.1 応答加速度計測試験概要.....	40
2.3.2 応答加速度計測試験結果と考察.....	43
2.4 車両載荷試験のまとめ.....	46
第3章 24時間計測試験.....	47
3.1 計測試験概要.....	48
3.1.1 橋体温度分布計測.....	48
3.1.2 各主桁の各支間断面における鉛直変位計測.....	51
3.1.3 各主桁の支間部の水平変位計測.....	53
3.2 計測結果.....	54
3.2.1 橋体温度分布計測結果.....	54
3.2.2 鉛直変位計測結果.....	64
3.2.3 水平変位計測結果.....	73
3.3 FEM解析.....	77
3.3.1 FEM解析概要.....	77
3.3.2 FEM解析結果と考察.....	79
3.4 24時間計測試験のまとめ.....	83

第4章 小型 FWD 試験による検討	85
4.1 小型 FWD 試験概要	86
4.1.1 橋梁全体系計測	88
4.1.2 床版パネル系計測	89
4.2 固有振動数による検討	90
4.2.1 高速フーリエ変換 (FFT) 概要	90
4.2.2 橋梁全体系計測結果	93
4.2.3 床版パネル系計測結果	99
4.2.4 固有振動数による検討のまとめ	103
4.3 計測点間の応答加速度差による検討	104
4.3.1 検討方法概要	105
4.3.2 橋梁全体系計測の結果と考察	106
4.4 応答加速度差による検討のまとめ	117
第5章 FEM 動的解析	118
5.1 FEM モデル概要	119
5.2 固有振動解析	121
5.2.1 バネモデルによる支承水平拘束状態の検討	121
5.2.2 床版の剛性低下が低次固有振動数に与える影響	124
5.3 FEM 時刻歴応答解析	125
5.3.1 解析概要	125
5.3.2 解析結果と考察	127
5.4 FEM 動的解析のまとめ	134
第6章 結論	135
参考文献	139
謝辞	142
付録	143

第 1 章

序論

1.1 研究背景

我が国では戦後の高度経済成長期にかけて、東海道新幹線や東名高速道路等の大都市を結ぶ交通網を始めとした鉄道や道路、また治水、上下水道などの社会インフラの整備が急激に進んだ。図-1.1 に示すように、道路橋も高度経済成長期に建設数が急激に増加し整備が進められ¹⁾、現在では道路橋の数は約 72 万橋²⁾にも及んでいる。これらの道路橋のうち約 75%は、地方自治体が管理している橋梁となっており、全体の約 80%は中小規模の橋梁である。それらの橋梁は老朽化の進行等により、通行止めや荷重制限等の交通制限が課される橋梁が平成 20 年から平成 30 年にかけて 3 倍にもなっている。昨今は、建設から 50 年以上経過した橋梁の数が急激に増加する時期に差し掛かっている。そのため老朽化橋梁の増加に伴い補修・補強業務も増加することが予測され、効率的な橋梁の維持管理手法の確立が求められている。

社会インフラの老朽化対策の本格的な議論が始まるきっかけとなった出来事のひとつに、2012 年 12 月 2 日の中央自動車道笹子トンネル上り線における天井板落下事故が挙げられる。この事故では、トンネル内の天井板のコンクリート版が約 130m に渡って落下し、走行中の車両複数台が巻き込まれ 9 名が犠牲になった。この事故の後、平成 25 年 6 月に道路法の改正がなされ道路の点検基準が法定化されることとなった。平成 26 年 4 月の社会資本整備審議会道路分科会では、道路の老朽化の本格実施に関する提言³⁾が出され、その中には橋梁やトンネル等は国が定める基準により 5 年に 1 度近接目視による点検を実施することなどが盛り込まれている。表-1.1 に橋梁定期点検における状態の把握の標準的な方法を示す⁴⁾。これを見ると、ほとんどの点検項目において近接目視による点検が基本となっていることがわかる。目視点検は、必要な知識及び技能を有する者が行うとされている。しかし、図-1.2 と図-1.3 に示すように道路橋の 7 割超を市町村道が占めているにも関わらず、橋梁保全業務に携わる土木技術者数は市町村において不足しているという実態がある⁵⁾。また、目視点検は外観性状により損傷の程度を推測するものであり、定量的な点検手法とは言い難く、また、点検範囲が目視可能な部分に限定され、点検結果が点検者の技術や経験に左右されやすいという課題がある。そのため、目視点検を補完する工学的な性能判定手法の確立が求められる。

既設道路橋に対する主な健全度評価手法として、目視点検の他に車両載荷試験が実施されている。車両載荷試験は、実際の橋梁に既知荷重を静的または動的に載荷させることで詳細な耐荷性能の評価に使用されている。しかし、この手法は調査内容に応じた各種センサの種類や設置位置などに慎重な検討が必要であ

り、全ての橋梁に対する実施は実用的ではない。そのため、定量的かつ簡易的に実施できる橋梁の健全度評価手法が必要であると考えられる。

道路橋床版は交通荷重を直接支持するため、道路橋の中でも損傷を受けやすい部材である⁶⁾。図-1.4に橋梁架け替えの理由となった上部工損傷の内訳を示す。床版の損傷は橋梁の種別に関わらず大きな割合を占めている。床版の劣化の因子は、車両の通過に伴う外荷重による疲労や、アルカリシリカ反応をはじめとする材料劣化などが挙げられる⁷⁾。また、積雪寒冷地における融雪剤などによる供給塩分や海浜部の飛来塩分による内部鉄筋の腐食や、ひび割れへの雨水の浸入による劣化や腐食の促進など気象環境条件にも強く影響を受ける。床版は1つの要因のみによって劣化するとは限らず、これら複数の劣化因子が複合的に影響を及ぼすことがほとんどである。床版損傷は目視点検では発見しにくい内部の損傷も多い。床版損傷を初期の段階に発見することは難しく、損傷を確認したときには既に劣化がある程度進行していることが多い。このような背景から、道路橋の維持管理において床版の健全度評価は重要であると考えられている。

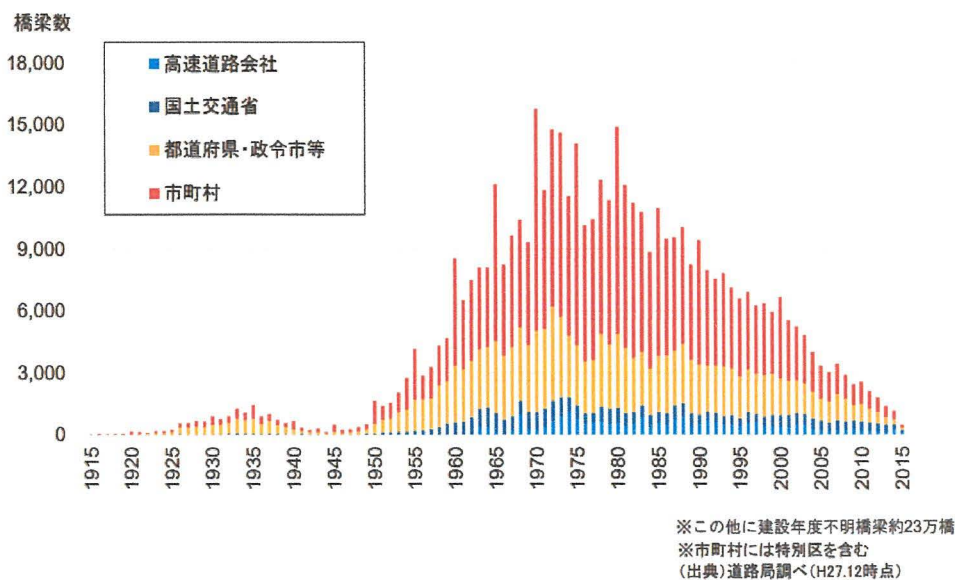


図-1.1 建設年度別の橋梁数
(引用) 国土交通省 道路構造物のメンテナンスの現状¹⁾

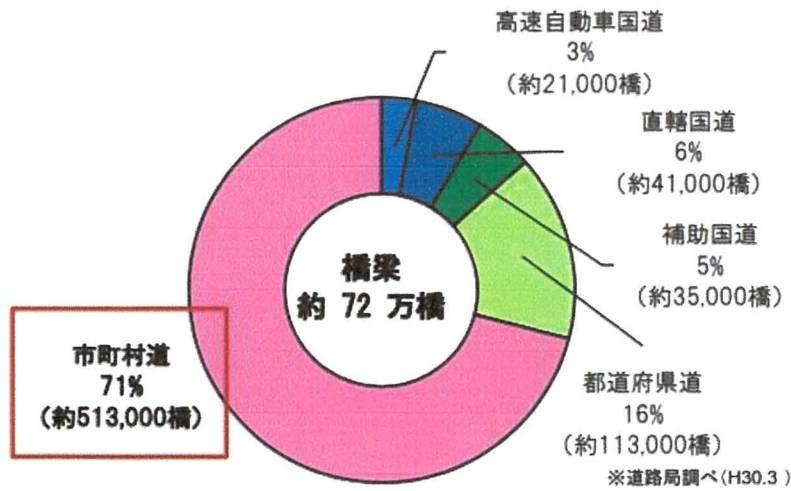
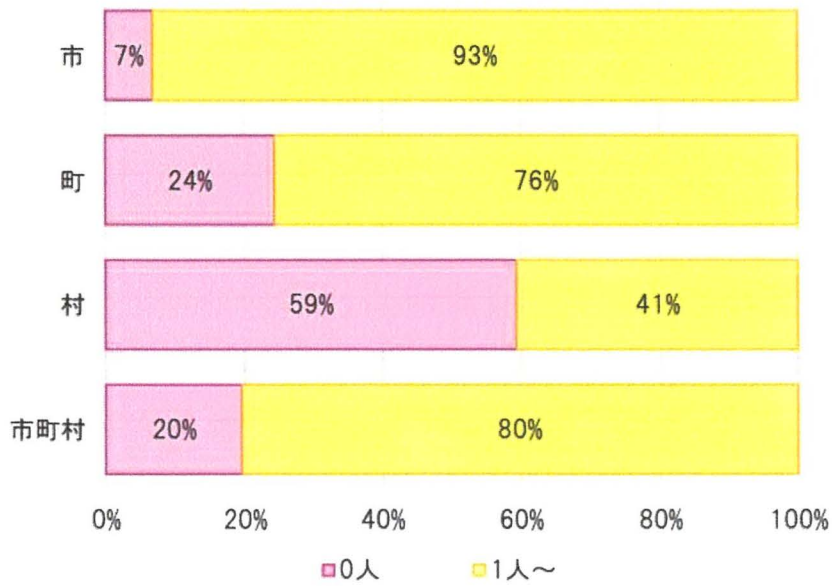


図-1.2 道路種別橋梁数
 (出典) 国土交通省：発表資料 老朽化対策の取組み²⁾

<令和元年6月時点>



※有効回答数 N=1,600

※道路局調べ(R1.6)

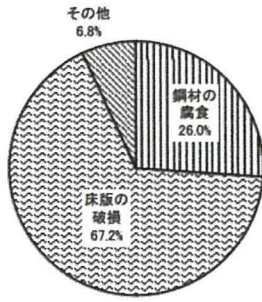
図-1.3 市町村における橋梁保全業務に携わる土木技術者
 (出典) 国土交通省：発表資料 老朽化対策の取組み²⁾

表-1.1 橋梁定期点検における状態の把握の標準的な方法

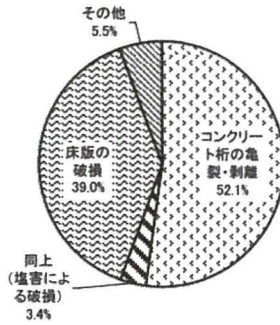
材料	番号	損傷の種類	点検の標準的方法	必要や目的に応じて採用することのできる方法の例
鋼	①	腐食	目視、ノギス、点検ハンマー	超音波板厚計による板厚計測
	②	亀裂	目視	磁粉探傷試験、超音波探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験
	③	ゆるみ・脱落	目視、点検ハンマー	ボルトヘッドマークの確認、打音検査 超音波探傷(FIT等)、軸力計を使用した調査
	④	破断	目視、点検ハンマー	打音検査(ボルト)
	⑤	防食機能の劣化	目視	写真撮影(画像解析による調査) インペーダンス測定、膜厚測定、付着性試験
コンクリート	⑥	ひびわれ	目視、クラックゲージ	写真撮影(画像解析による調査)
	⑦	剥離・鉄筋露出	目視、点検ハンマー	写真撮影(画像解析による調査)、打音検査
	⑧	漏水・遊離石灰	目視	
	⑨	抜け落ち	目視	—
	⑩	床版ひびわれ	目視、クラックゲージ	写真撮影(画像解析による調査)
	⑪	うき	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
その他	⑬	遊間の異常	目視、エンベックス	—
	⑭	路面の凹凸	目視、エンベックス、ボール	—
	⑮	舗装の異常	目視、エンベックス又はクラックゲージ	—
	⑯	支承部の機能障害	目視	移動量測定
	⑰	その他		—
共通	⑩	補修・補強材の損傷	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
	⑱	定着部の異常	目視、点検ハンマー、クラックゲージ	打音検査、赤外線調査
	⑲	変色・劣化	目視	—
	⑳	漏水・滞水	目視	赤外線調査
	㉑	異常な音・振動	聴覚、目視	—
	㉒	異常なたわみ	目視	測量
	㉓	変形・欠損	目視、水系、エンベックス	—
	㉔	土砂詰まり	目視	—
	㉕	沈下・移動・傾斜	目視、水系、エンベックス	測量
㉖	洗掘	目視、ボール	カラーイメージングソナー、水中カメラ	

注：写真撮影は、カメラ、ビデオ等のデジタル撮影機器により行う。

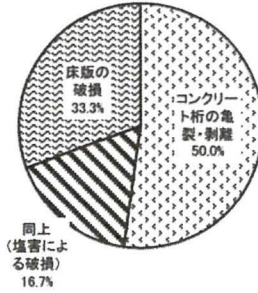
(出典) 国土交通省 道路局 国道・技術課
橋梁定期点検要領 pp14 2019.3⁴⁾



鋼橋(73橋)

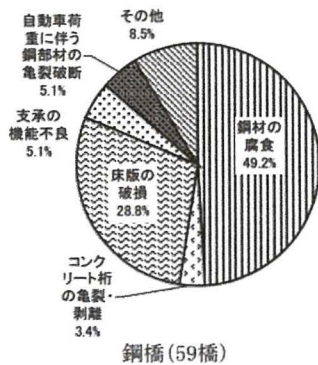


RC橋(142橋)

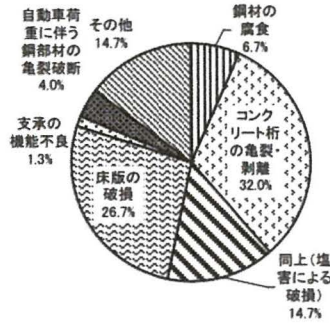


PC橋(23橋)

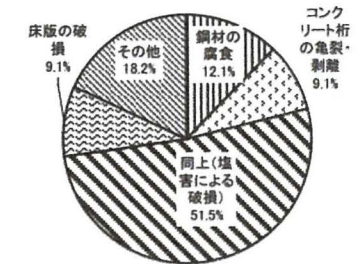
(a) 平成8年度調査



鋼橋(59橋)

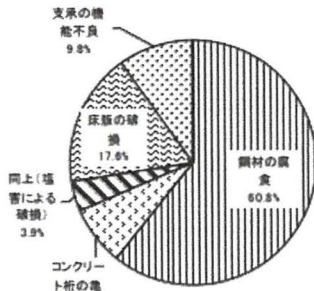


RC橋(75橋)

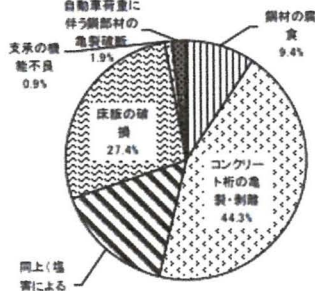


PC橋(33橋)

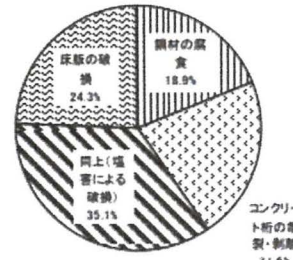
(b) 平成18年度調査



鋼橋(51橋)



RC橋(106橋)



PC橋(37橋)

(c) 平成28年度調査

図-1.4 上部構造の損傷による橋梁架け替え理由の内訳

(出典) 国土交通省：国土技術政策総合研究所 資料第1112号
橋梁の架替に関する調査結果 (V) I編 pp23 2020.6⁶⁾

1.2 既往の研究

1.2.1 トラック車両を用いた動的載荷試験

遊田等⁸⁾においては、長寿命化のため床版取替等の大規模改修が行われた北上市九年橋に対し、20tfトラックを用いた動的載荷試験を実施した。トラックを単独および2台直列、10km/h および 20km/h で幅員中央を走行させた場合と、左後輪のみ段差 13cm の踏み台から落下させた場合の加速度応答波形を計測した。高速フーリエ変換 (FFT) により算出されたパワースペクトル図を図-1.5 と図-1.6 に示す。単独走行試験と踏み台落下試験の結果から共通の卓越振動数が得られており、これを基本固有振動数とした。動的載荷試験から対象橋梁の補修効果が確認されるとともに、補修直後の貴重な初期値が得られた。九年橋を対象に同様な研究^{9),10)}が行われている。

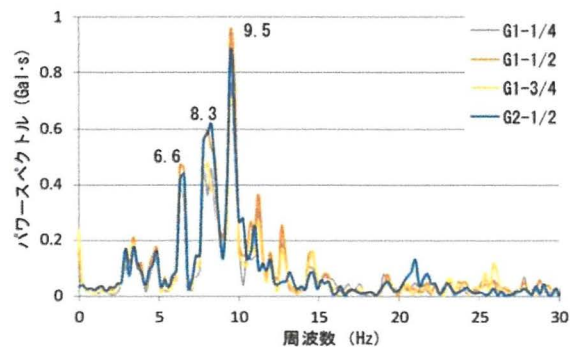


図-1.5 単独走行 (20km/h) 時のパワースペクトル図

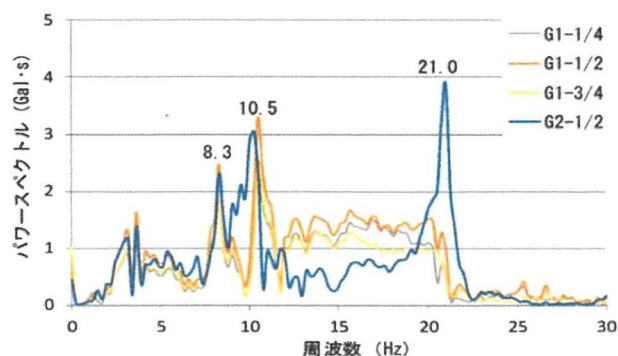


図-1.6 踏み台落下時のパワースペクトル図

(出典) 遊田勝：大規模改修した九年橋の固有振動数
土木学会第 71 回年次学術講演会 I-447, 2016.9⁸⁾

1.2.2 走行車両を用いた振動試験による上部構造の損傷評価

渡邊ら¹⁾は、撤去予定の中規模斜橋を対象に、トラックを用いた走行振動試験を実施し固有振動数を算出した。さらに、車両と上部構造の相互作用を考慮できる格子モデルを作成し再現解析を行った。解析によって部材に生じた損傷が橋梁の振動に及ぼす影響を検討するため、健全な場合と主桁部材の曲げ剛性を2割低減させた場合の振動応答を比較した。図-1.7に支間中央点のフーリエ振幅を示す。主桁部材に損傷が存在する場合、1次モードから3次モードまでの振動モードにおいて固有振動数が1割程度の低下が確認された。鋼鈹桁橋において全ての桁部材で剛性が2割も低下することは考えにくく、剛性の低下に対する固有振動数の変化も鈍い。本研究により剛性低下が小さい段階において、鋼鈹桁橋の上部構造の劣化を低次固有振動数の変化から正確に評価する困難さが確認された。

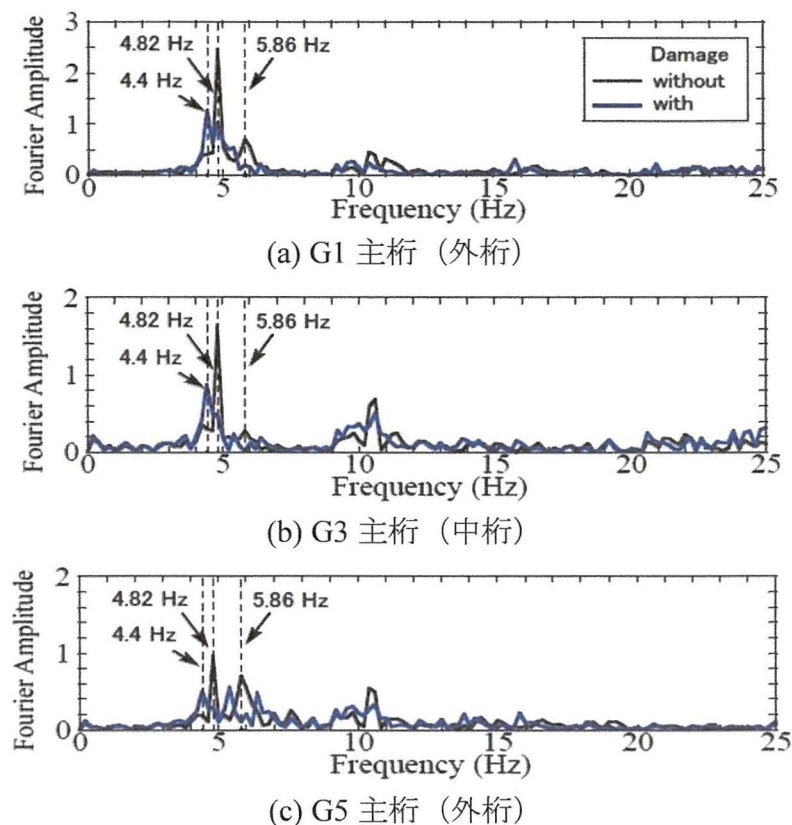


図-1.7 支間中央点のフーリエ振幅⁹⁾

1.2.3 温度変化が橋梁の挙動に及ぼす影響に関する検討

橋梁の健全度モニタリングシステムの構築の目的で、小林・三木¹²⁾らが温度による橋梁の変形に着目した研究がある。また、西川・山本¹³⁾らは研究所内の試験橋梁において温度変化が橋梁の挙動に及ぼす影響についての検討を行っている。

しかし、前者の研究では試験体を作成しての挙動の測定結果、後者では走行輪荷重がない橋梁での測定結果であり、実際に供用されている橋梁で各部材の温度を含めた日周期挙動を詳細に測定している研究は少ない。既設橋梁の維持管理を簡素化するためには、日常的に発生する挙動についての基礎的検討が必要である。そこで、著者らは2017年に供用後6年を経過した新設の小規模橋梁に対して計測実験¹⁴⁾を実施したので内容を記述したい。この橋梁の現況写真と一般図をそれぞれ写真-1.1～1.3と図-1.8～1.10に示す。また、既設橋梁に対しても同様の日周期挙動の計測に関する研究^{15)～18)}が行われている。



写真-1.1 対象橋梁現況写真（側面全景）



写真-1.2 対象橋梁現況写真（舗装上面）



写真-1.3 対象橋梁現況写真（支承部）

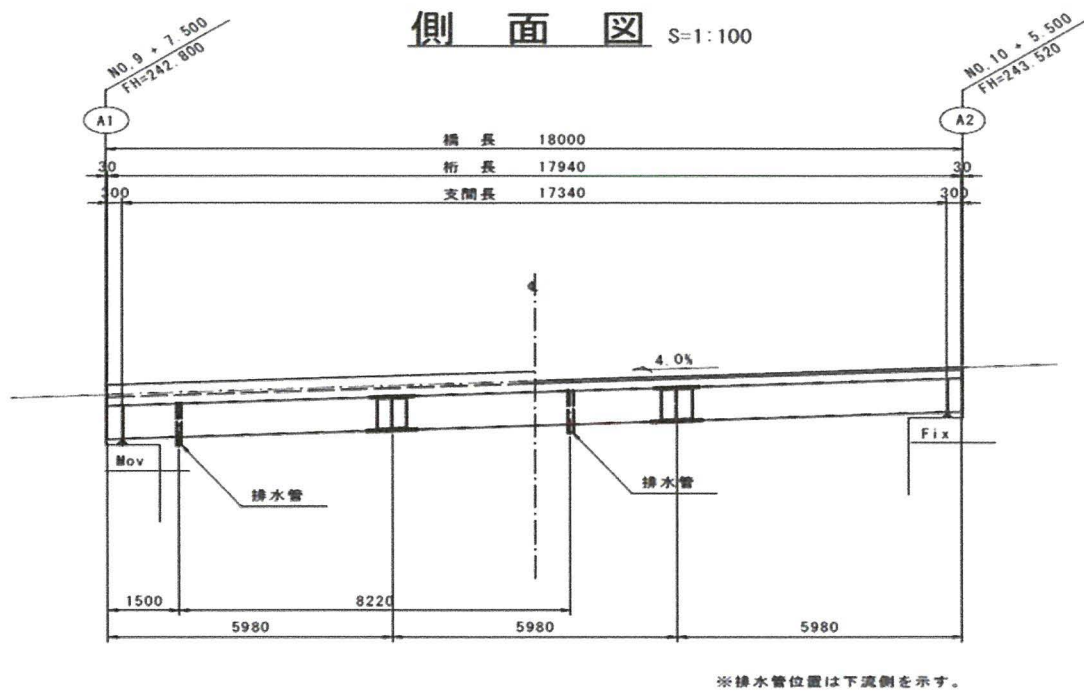


図-1.8 対象橋梁側面図

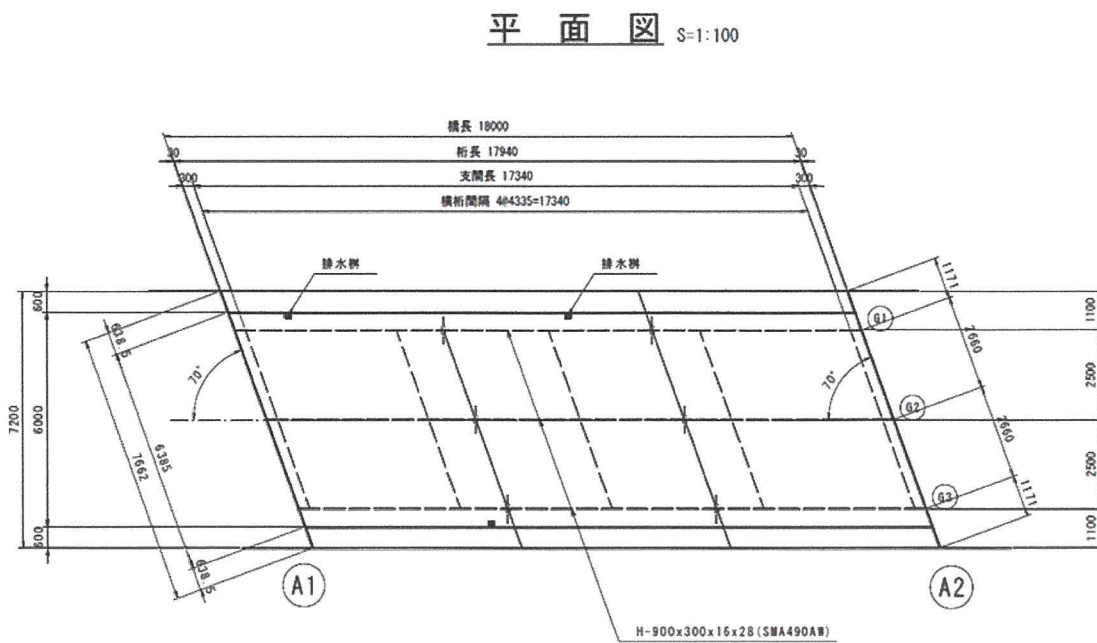


図-1.9 対象橋梁平面図

上部工断面図 S=1:50

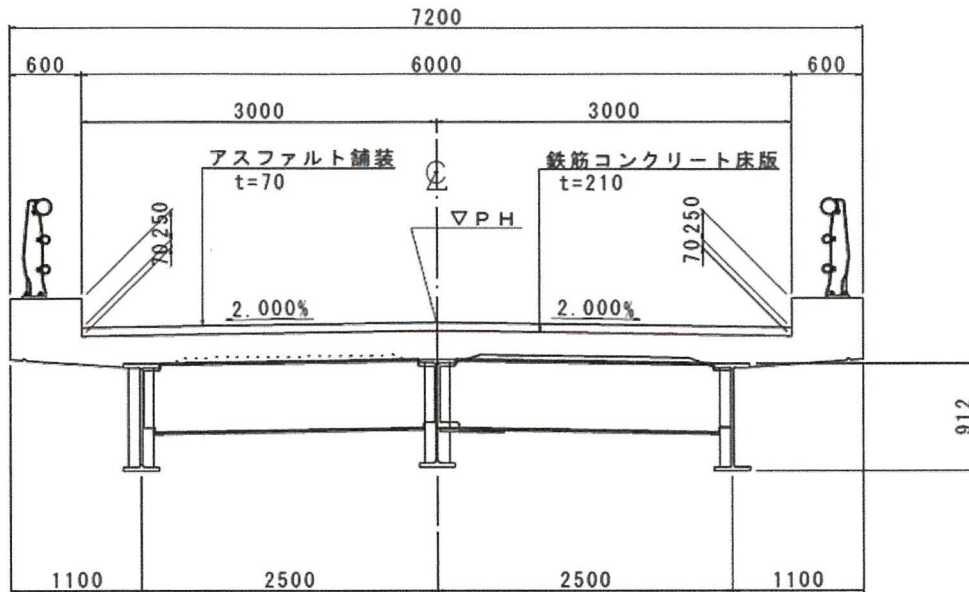


図-1.10 対象橋梁断面図

対象橋梁は鋼線支承を有する鋼単純H桁橋である。橋台は、逆T式橋台である。この実験では、新設橋の日周期挙動を計測するため、24時間連続で上部工温度計測、支間中央部の鉛直変位計測、可動支承部の水平変位計測、橋台間距離計測を実施した。計測結果を以下に示す。図-1.11は上部工の各構成部材温度の時刻歴変化を表している。舗装表面は直射日光による影響が顕著に出ており、温度変化が急激に起こっている。これに対して床版下面と桁の温度は緩やかに変化している。

図-1.12は支間中央断面における上部工の鉛直変位の時刻歴変化を表したグラフである。橋梁部材の温度変化に伴って、主桁支間中央に鉛直変位が生じている。

図-1.13～14はそれぞれ可動・固定支承部における上部工の水平変位の時刻歴を示したグラフである。計測時間中における最大の変位量は、1.54mmであった。固定支承部の最大変位量は0.40mmであった。可動支承は、温度変化に伴い伸縮挙動が確認されたため、支承が拘束されず機能をしていることが確認できた。

以上の結果より、橋梁部材の温度変化に伴い全体系の挙動が発生していることが確認できる。また、この実験は架設から40年以上経過した既設橋梁の計測結果と比較し既設橋梁の日周期挙動の特徴について議論がなされている。日周期挙動の特徴は、気象条件の他に支承の拘束状態や橋梁の形状等様々な要因で異なってくると考えられる。

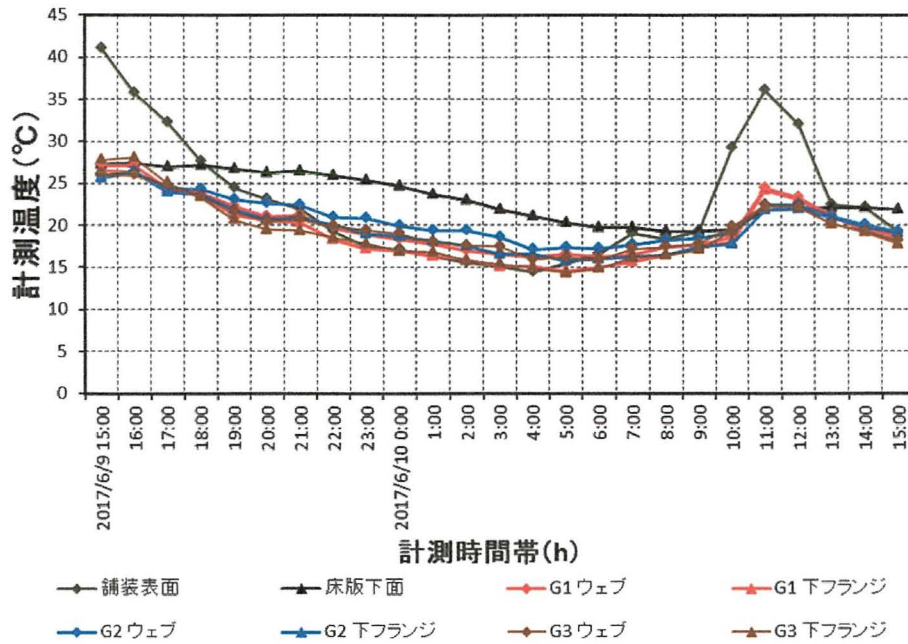


図-1.11 上部工部材の時刻歴温度変化

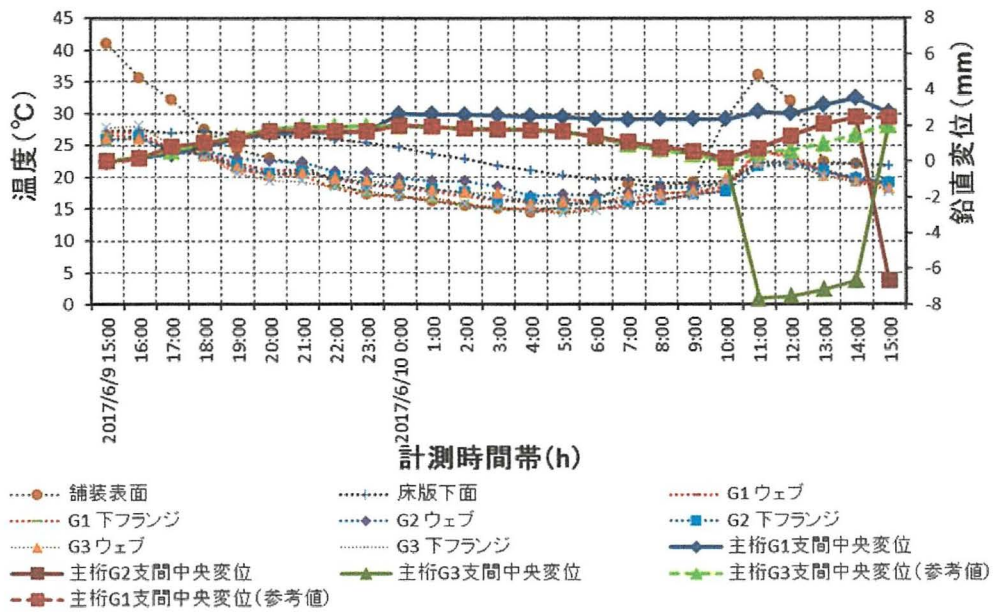


図-1.12 上部工部材の鉛直変位の時刻歴変化

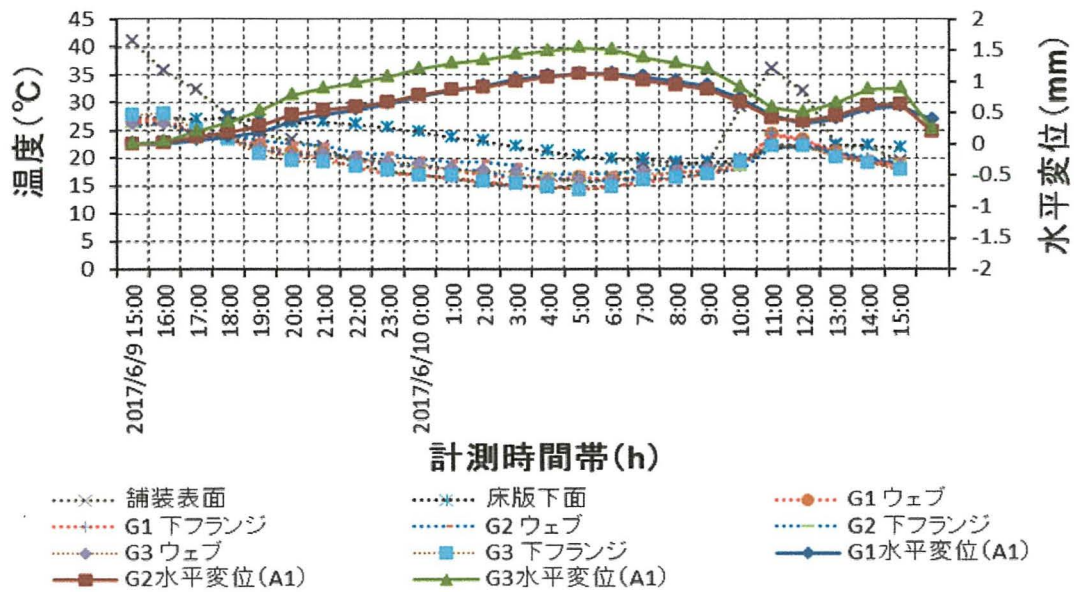


図-1.13 上部工部材の水平変位の時刻歴変化（可動支承部）

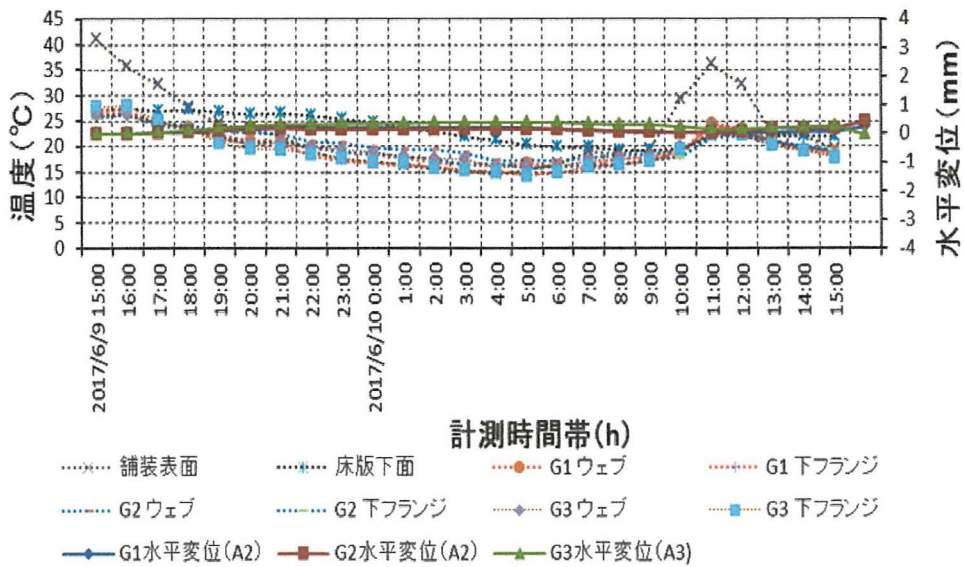


図-1.14 上部工部材の水平変位の時刻歴変化（固定支承部）

1.2.4 振動試験に基づく健全度評価

橋梁の定量的な健全度評価手法として振動試験^{19),20)}が挙げられる。振動試験とは、車両の走行や重錘の落下、起振機の利用などによって構造物に振動を与え、その応答に基づき構造物の健全度評価を行う非破壊検査手法である。橋梁床版は自動車荷重を直接支持するため疲労損傷を生じやすく、道路橋の中でも床版は損傷の多い部材とされている⁶⁾。そのため、振動試験は床版内など目視できない部分を含めて調査できる点検手法であることから橋梁の点検に有効であるといえる。衝撃振動試験の目的は、目視ができない部分を含めた構造物の健全度を定量的に判定することであり、判定指標には主に固有振動数が用いられる。

一般に構造物を 1 質点の振動系と考えると固有振動数は式(1.1)²⁰⁾によって決定される。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1.1)$$

ここで、 f_n ：固有振動数、 K ：バネ定数（強度）、 M ：構造物の質量

経年劣化や災害などにより構造物が損傷した時、その剛性や地盤強度が低下する。これらはバネ定数の低下となる。一方でひび割れや腐食などによる質量変化は全体の質量から見ると非常に小さい。質量が不変と考えると、バネ定数の低下は固有振動数の低下となって現れる。この低下率から構造物の剛性や支持地盤の強度が推定できると考えられる。そのため振動試験から算出される固有振動数は様々な構造物の健全度評価に適用されている。

1.2.5 FWD を用いた衝撃振動試験

衝撃振動試験とは、重錘などを用いて構造物を打撃することで振動を発生させる振動試験の手法である。車両走行や起振機による振動と比べて簡単に振動を与えることができ、広い範囲の周波数を含むことが利点である。簡易的な非破壊健全度評価手法として、鉄道橋の橋脚や柱部材に対して積極的に活用されており²⁰⁾、近年では上部工の健全度評価へ活用する手法が検討されている²¹⁾。

FWD (Falling Weight Deflectometer) は動的な衝撃荷重を作用させたときの応答たわみを計測し、その計測値から構造を評価しようとする装置である²²⁾。図-1.15 に FWD の外観を示す。山口ら²³⁾は、舗装や地盤の構造評価に活用されていた FWD を橋梁 RC 床版の健全度評価に活用する手法を検討した。FWD の打撃に伴う床版のたわみ量を計測し補修必要範囲を設定し、開削後の床版全面たたき調査の結果と比較した。図-1.16 に示すように提案した補修範囲と浮きや砂利化が確認された箇所は概ね一致しており、FWD を用いた床版の健全度評価に関する有用性を示した。

小型 FWD は FWD とほぼ同じ構成であるが、小型で可搬性に優れるためより簡易に試験を実施することができる装置である。図-1.17 に小型 FWD の構成例を示す。小型 FWD を用いた衝撃振動試験によって道路橋の振動特性を把握し健全度評価に利用する種々の研究が著者らを中心に行われている^{24)~30)}。

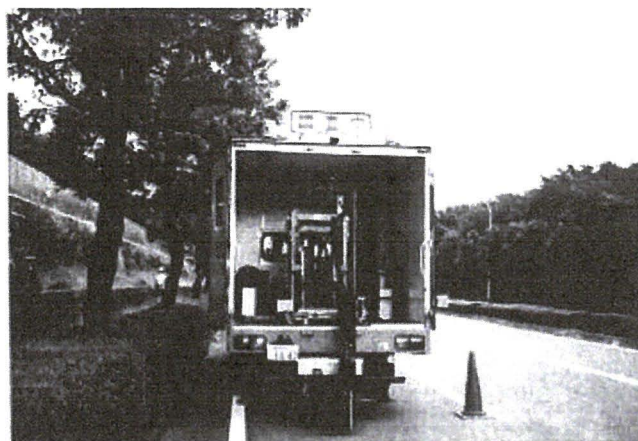
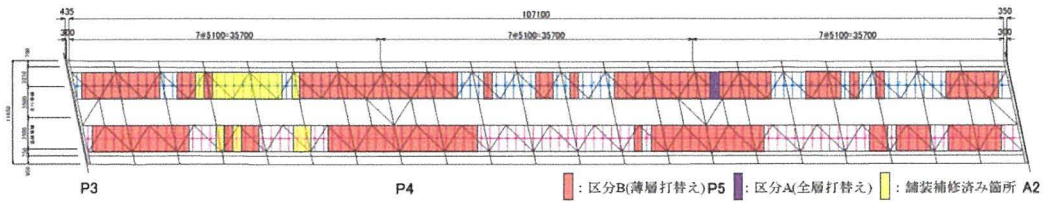
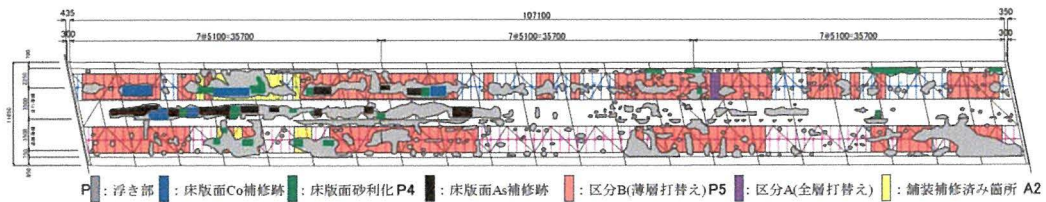


図-1.15 FWD 外観

(出典) 土木学会舗装工学委員会
FWD および小型 FWD 運用の手引き 2004.12²²⁾



(a) 提案した補修必要範囲



(b) 提案した補修必要範囲と床版上面たたき調査結果の比較

図-1.16 FWD 試験から得た補修範囲

(出典) 山口ら：FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法
に関する一提案，構造工学論文集，Vol.58A，2015.3²³⁾

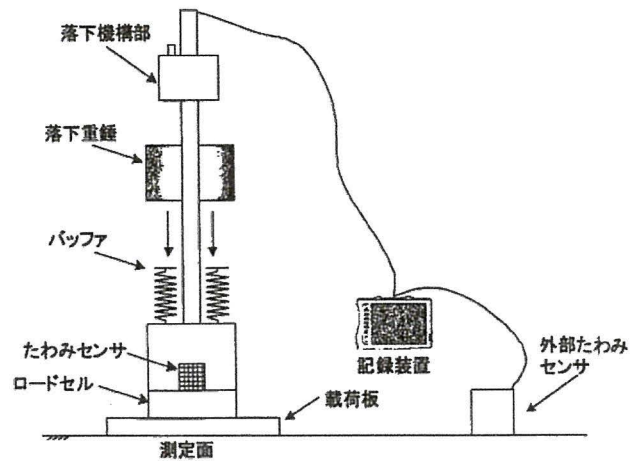


図-1.17 小型 FWD 構成例

(出典) 土木学会舗装工学委員会
FWD および小型 FWD 運用の手引き 2004.12²²⁾

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、地方自治体が管理する小規模橋梁の健全度を、24 時間橋体温度分布を計測して求める方法と、小型 FWD 試験を用いて評価する方法の 2 つのアプローチから把握し、それらの手法が橋梁の新たな健全度評価手法として提案できるか検討することである。

最初に、道路橋の耐久性能を調べるために、従来から橋梁の点検及び健全度評価手法の一つとして使用されている車両載荷試験および車両走行試験によって、床版取替工事前の対象橋梁の変位および応答加速度を測定し、床版取替工事後の計測結果と比較検討を行う。

24 時間温度計測を用いた検討方法では、同じ小規模橋梁を対象に、床版取替前後で赤外線カメラを用いた橋梁各部材の温度分布計測、上部工の鉛直変位及び水平変位計測を 24 時間に亘り実施した。対象橋梁の 3 次元 FEM モデルを作成し、実測値と解析値を比較し上部工の日周期挙動の検討を行う。また、橋体の計測温度と変位挙動の関連性についての検討も行った。

小型 FWD 試験を用いた検討方法では、同じ対象橋梁において床版取替前後で小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を行い、応答加速度を計測した。計測値からフーリエスペクトルを取得し固有振動数を推定する従来の方法に加え、計測点間に生じる応答加速度の差分を検討する方法により、床版内の劣化状態の推定を試みた。床版取替前後のデータで検討することにより劣化状態と健全状態の比較が可能であり、それぞれの方法が劣化推定に適用可能か検討した。さらに 3 次元 FEM モデルを作成し時刻歴解析を行うことにより、実橋試験の再現を試みた。従来は、固有振動数により健全度評価を行っているが、本研究では応答加速度の差分のより評価を行うところに新規性があり、また、小型 FWD 試験機は従来の FWD 試験機と違い、扱い易さなど汎用性に優れており、実用性が高いと考えられる。

1.4 本研究の構成

本研究は全6章で構成されている。本研究の構成を図-1.18に示す。

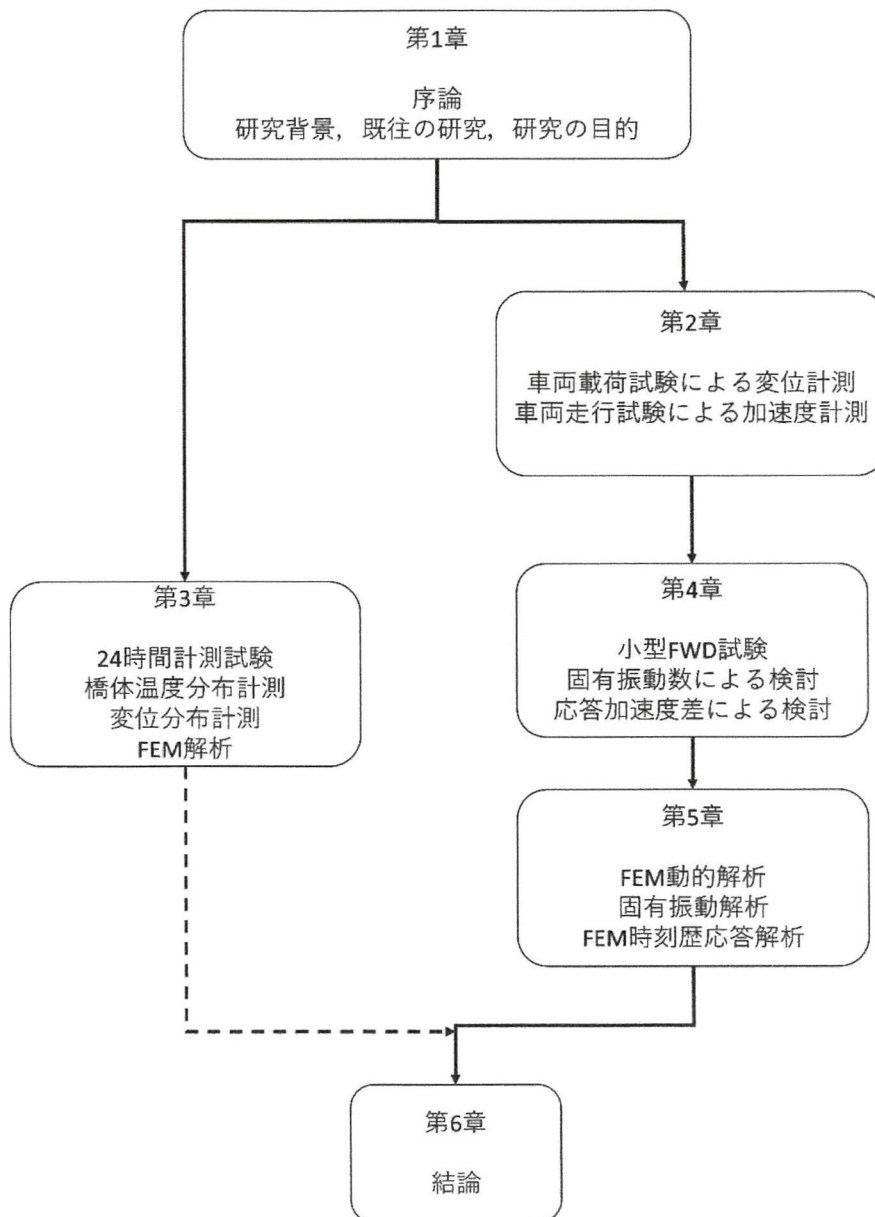


図-1.18 本研究の構成

第 2 章

車両載荷試験による橋梁の評価

2.1 対象橋梁概要

本研究では山形県上山市赤山地内の金山川に架かる赤山橋を対象とし、車両載荷試験¹⁷⁾および後述する24時間計測試験と小型FWD試験を実施した。本橋は橋長16m、幅員8.2m、桁高700mmでRC床版を有する鋼合成単純H型桁橋である。また本橋は83°の斜角を持つ斜橋となっている。図-2.1に赤山橋の架橋位置、写真-2.1に床版取替前後の赤山橋の全景、写真-2.2に床版取替前後の路面状況、図-2.2~2.5に赤山橋一般図（側面図、平面図、床版取替前後の断面図）、表-2.1に床版取替前後の赤山橋の諸元を示す。



図-2.1 赤山橋架橋位置



写真-2.1 対象橋梁全景（左：床版取替前，右：床版取替後）



写真-2.2 対象橋梁路面状況（左：床版取替前，右：床版取替後）

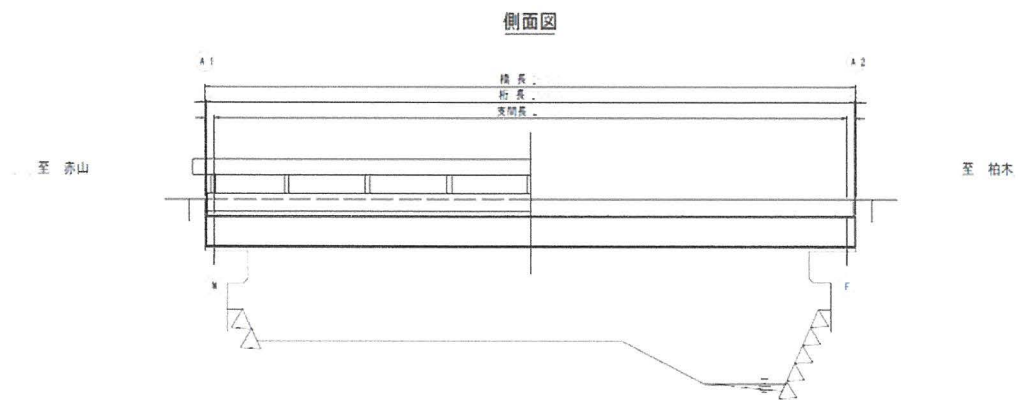


図-2.2 赤山橋側面図

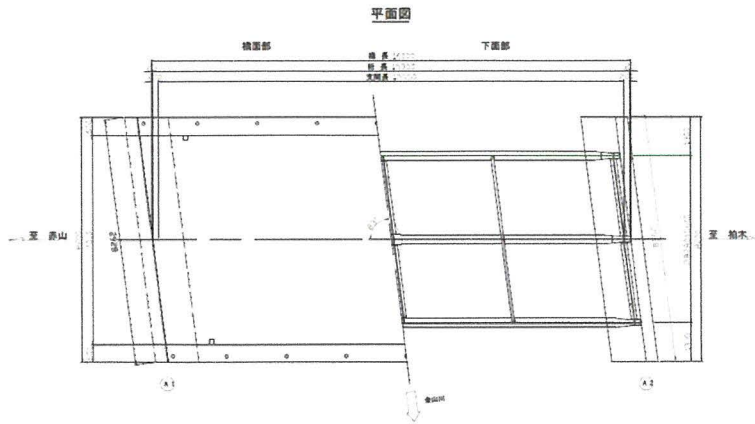


図-2.3 赤山橋平面図

現況上部工断面図

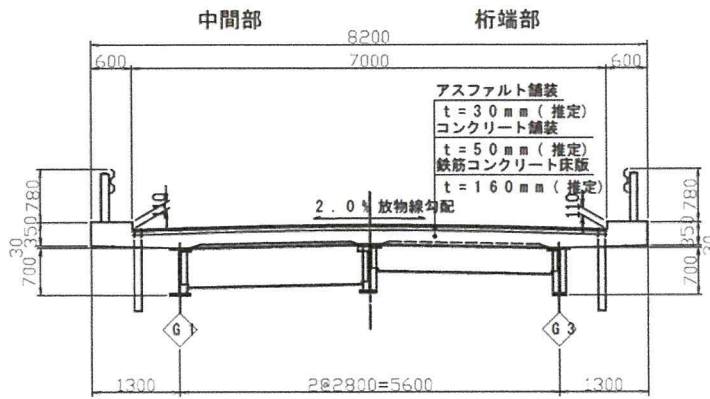


図-2.4 赤山橋断面図 (床版取替前)

上部工補修断面図 S=1:50

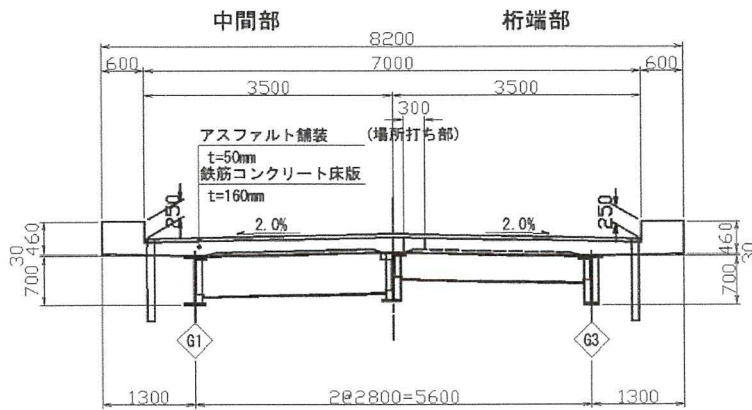


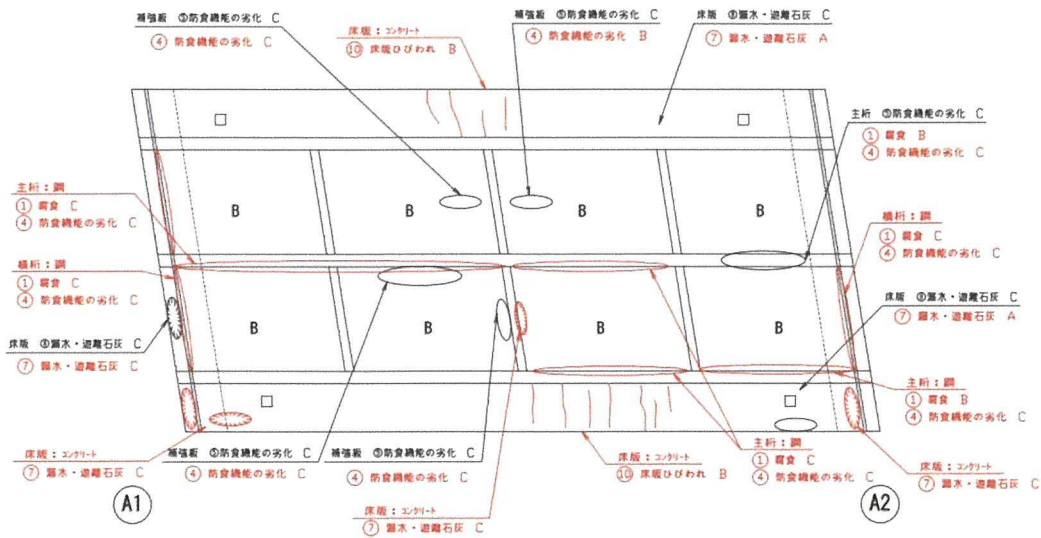
図-2.5 赤山橋断面図 (床版取替後)

表-2.1 対象橋梁諸元

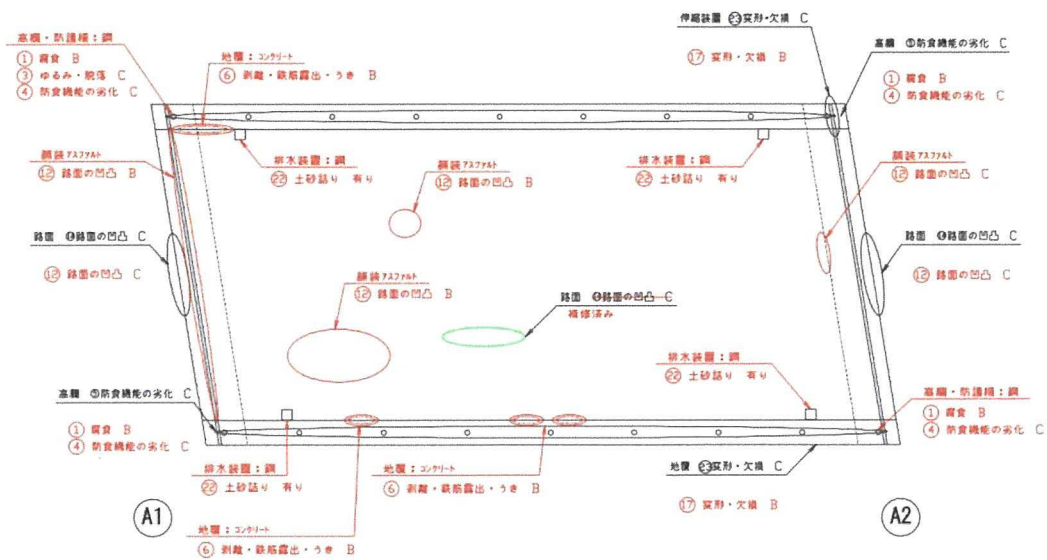
上部構造	鋼合成単純 H 型桁橋
下部構造	逆 T 式橋台
基礎	直接基礎
主桁本数	3 本
床版形式	RC 床版
橋長	16,000mm
支間長	15,550mm
幅員構成	600+7,000+600=8,200mm
斜角	83°
活荷重	TL-14
床版形式	RC 床版 t=160mm (床版取替前) プレキャスト RC 床版 t=160mm (床版取替後)
舗装形式	コンクリート舗装 t=50mm アスファルト舗装 t=30mm (床版取替前) アスファルト舗装 t=50mm (床版取替後)

対象橋梁は 1974 年の供用開始以降 40 年以上が経過している。2015 年の定期点検において、桁部材に腐食および防食機能の劣化が確認された。床版下面に鋼板補強がなされていたことにより、床版の内部コンクリートの劣化状況を目視では判定し得なかったが、橋面舗装においては凹凸が頻発し、補強鋼板の全面的な浮きや遊離石灰の滲出が見られたことから、床版の土砂化や凍害、ASR 等の全体的な損傷が推測された。また床版張出し部では乾燥収縮によるひび割れ、経年劣化による浮きや剥離などの損傷が確認された。図-2.6 に対象橋梁の上部工下面と上部工橋面の損傷図を示す。

これらの点検結果とライフサイクルコストを考慮した結果、2019 年に床版取替および鋼材の再塗装工事が行われた。床版取替の際に、取替前の床版でコンクリートのコア抜き試験が実施され、圧縮強度は 15.7~28.2N/mm²、静弾性係数 14.6~18.7N/mm² と劣化が著しいと判定される値であった。取替前の床版には写真-2.3, 2.4 に示されるような ASR が疑われる損傷や水平ひびわれが確認され、床版コンクリートの損傷が著しいことが分かった。



(a) 上部工下面



(b) 上部工橋面

図-2.6 対象橋梁損傷図

(黒字 : 2010 年点検結果, 赤字 : 2015 年点検結果)



写真-2.3 取替前床版の水平ひびわれ状況



写真-2.4 取替前床版のコア採取孔における水平ひびわれ状況

2019年の取替工事後の床版には RC 構造のプレキャスト床版が採用されており、床版厚は取替前後共に 160mm である。橋軸方向に並列されたプレキャスト床版の間詰部にコンクリートを打設して一体化している。間詰部の鉄筋端部に突起形状を有することで、付着力を確保した弱点となりにくい継手構造となっている。プレキャスト床版と中間横桁（床版取替前のみ）を含む各主桁はスタッドジベルによって一体化している。舗装については、床版取替前はコンクリート舗装厚 50mm、アスファルト舗装厚 30mm であり、床版取替後はアスファルト舗装厚 50mm となっている。床版取替後のプレキャスト RC 床版のコンクリート設計強度は 40N/mm^2 としている。支間中央の横桁は写真-2.5 に示すように床版取替前は床版下面と接着していたが、床版取替後は離れた構造となっている。



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

写真-2.5 対象橋梁の支間中央横桁と床版下面の接着状況

2.2 車両載荷試験

既設橋梁の床版等の剛性低下による変状の例としてたわみの増加や振動特性の変化が挙げられる。橋梁維持管理の面において床版の劣化の程度を知るための簡便な指標として、床版のたわみや振動特性に着目する場合³¹⁾がある。また従来から補修・補強後橋梁の改善効果や新設橋梁の耐荷性能を調べる際に用いられてきた試験方法のひとつに車両載荷試験^{32)~35)}がある。本節では、床版取替前後の赤山橋において設計荷重である 14t トラックを用いた静的載荷試験を実施し、車両載荷に伴い発生する橋軸方向の水平変位と鉛直方向変位の計測を行った³⁶⁾。

2.2.1 変位計測試験概要

写真-2.6に示すような重量 14t のトラック 1 台を用いて対象橋梁上に載荷を行った。載荷試験は、表-2.2 に示すように橋軸方向支間 1/2 断面の幅員中央、または主桁 G1, G3 桁上にトラック片側の車輪が乗るように載荷する計 3 ケース（各 2 回）で実施した。載荷試験における試験車両の載荷位置の断面図を図-2.7~2.9 に示し、側面図を図-2.10 に示す。なお支間 1/2 断面の載荷とは後輪 2 輪の前側車輪が支間 1/2 断面に位置する場合である。



写真-2.6 試験車両

表-2.2 載荷試験の項目

試験番号	橋軸方向（支間）	幅員方向
1	1/2 断面	主桁 G1 側
2	1/2 断面	中央
3	1/2 断面	主桁 G3 側

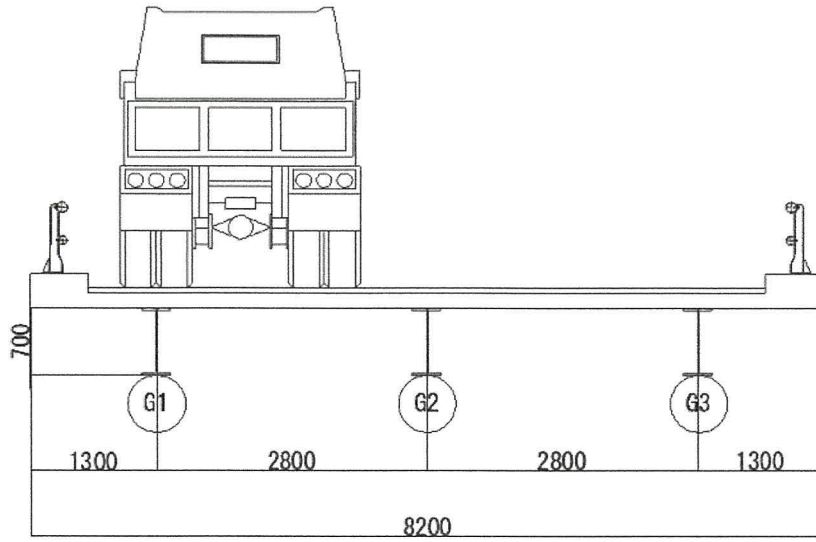


図-2.7 試験車両載荷位置（主桁 G1 側）

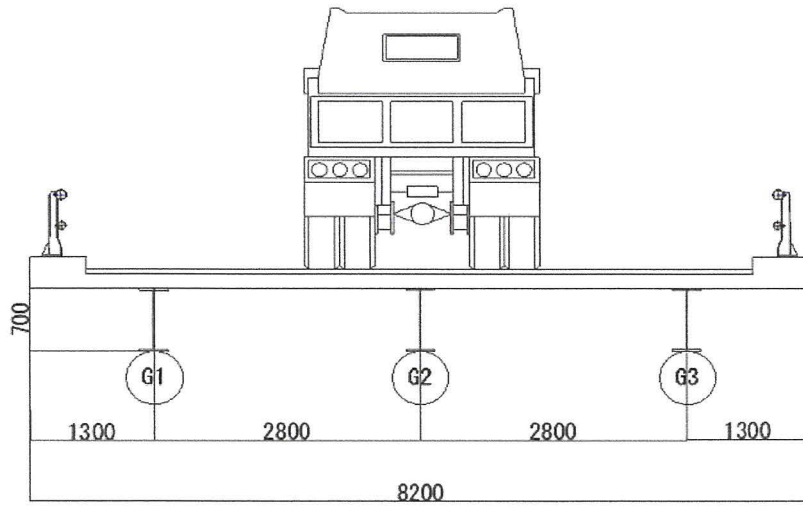


図-2.8 試験車両載荷位置（幅員中央）

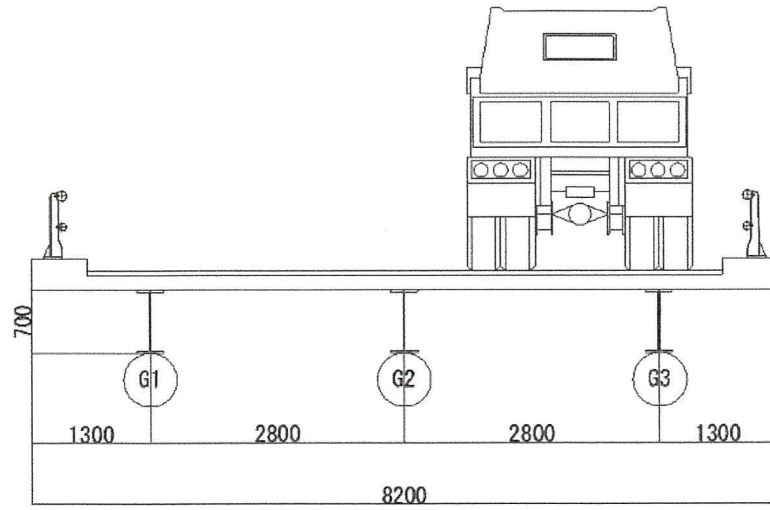


図-2.9 試験車両載荷位置（主桁 G3 側）

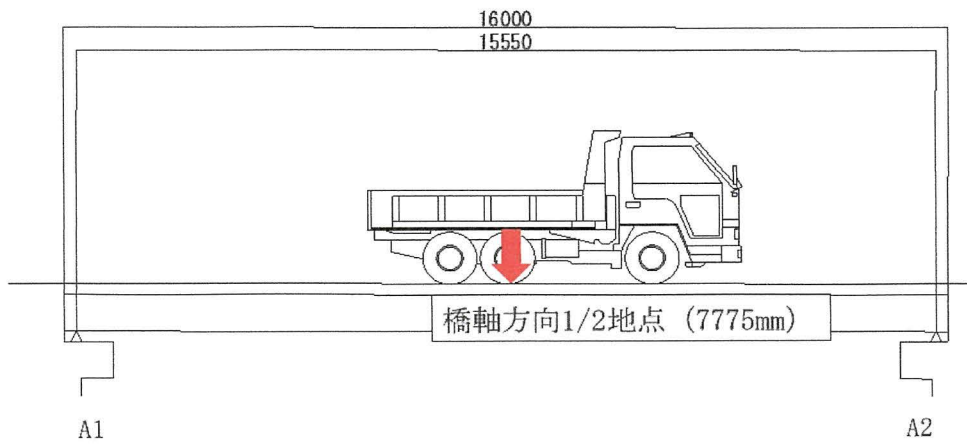


図-2.10 試験車両の載荷位置（側面図）

計測機器の設置位置を図-2.11, 2.12 に示す. 各主桁の A1 支承, 支間 1/4 点, 支間 1/2 点, 支間 3/4 点, A2 支承で鉛直変位を計 15 点, 各主桁の A1 支承, A2 支承で水平変位を計 6 点計測した. 写真-2.7, 2.8 に鉛直方向に設置した変位計 (SDP-50) を, 写真-2.9 に水平方向の変位計 (CDP-10) の設置例を示す. 写真-2.7 に示すように, 支承部付近の垂直変位を計測する際は設置の都合上変位計を実際の支承から橋台前面側にずらしている. また床版取替後の試験では, 写真-2.10 に示すように端横桁の内側に工事に取付けた補強用の横桁がある関係で, 支承部付近の変位計の位置が取替前よりも前面に出ている. 各主桁の支間 1/4 点, 支間 1/2 点, 支間 3/4 点の変位計は, 図-2.12, 写真-2.11 に示すように橋体下部にパイプの足場を組み変位計を設置している. 変位計は延長ケーブルを介して写真-2.12 に示すマルチレコーダー (TDS-301) に接続し計測を行った.

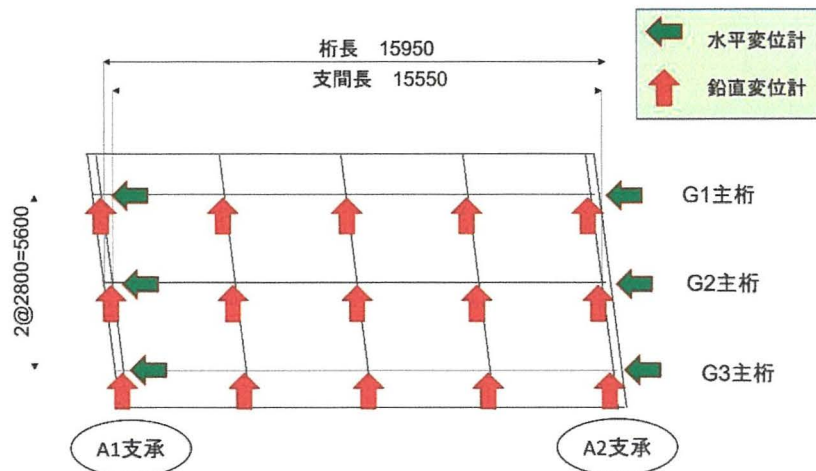


図-2.11 変位計測機器設置位置 (平面図)

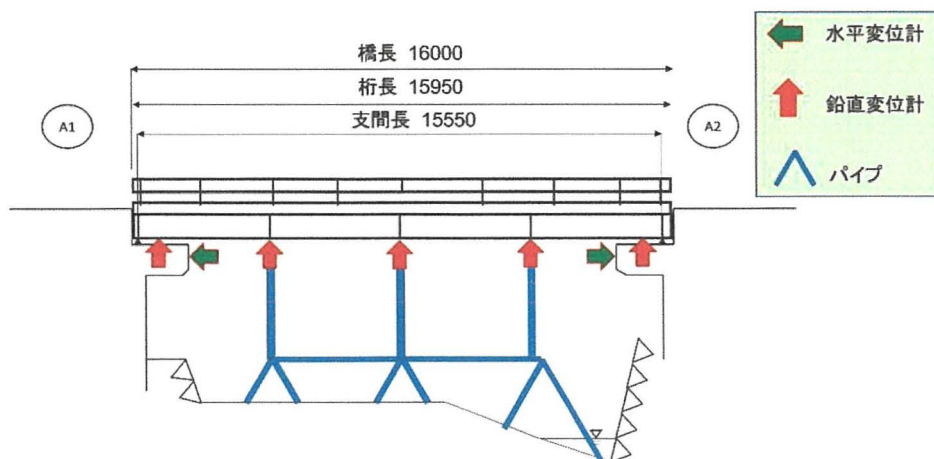


図-2.12 変位計測機器設置位置 (側面図)



写真-2.7 鉛直変位計設置例（支承部付近：床版取替前）



写真-2.8 鉛直変位計設置例（支間 1/4 点）



写真-2.9 水平変位計設置例（A2 支承側）

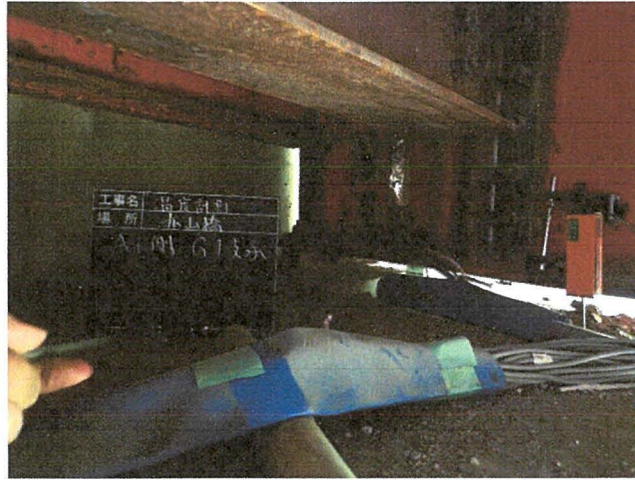


写真-2.10 鉛直変位計設置例（支承部付近：床版取替後）



写真-2.11 橋体下部の足場設置状況

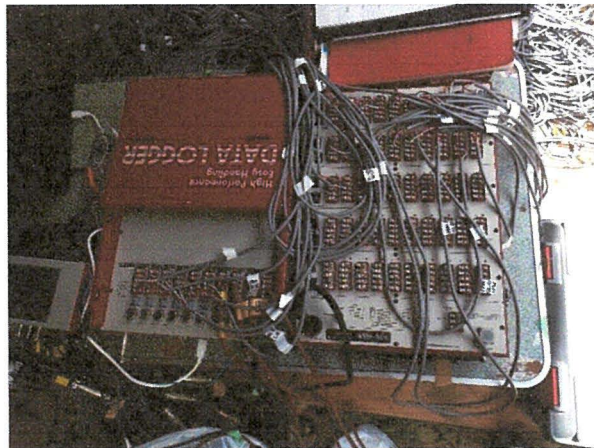


写真-2.12 計測機器(TDS-301)

2.2.2 変位計測試験結果

(1) 鉛直変位計測結果と考察

各試験の載荷時における床版取替前後での橋軸方向の鉛直変位分布をそれぞれ表-2.3, 2.4 に示す。また、各試験番号における床版取替前後での橋軸方向の鉛直変位分布を図-2.13, 2.14, 2.15 に示す。符号は桁が下方方向に変位する方向を負の値となるようにしており、実線が床版取替前、破線が床版取替後の変位分布を表す。試験番号は載荷試験項目（表-2.2）で示した通りである。なお、写真-2.7 と写真-2.10 に示すように支承部に設置した鉛直方向の変位計は正確には支承よりも前面に設置されており、床版取替後は工事のため取替前よりも前面に出ているため支承部側の変位値がやや大きめに出ている。そのため、床版取替後については変位計の設置位置による測定変位の誤差の補正を施している。

床版取替前後で各主桁の支間中央鉛直変位を比較すると、図-2.13 に示す試験 1 においては床版取替後 3～35%程度変位が減少し、図-2.14, 2.15 に示す試験 2, 3 において床版取替後では 24～48%程変位が減少している。変位量が減少した理由としては、取替後床版の剛性が取替前の劣化床版に比べて向上したことが挙げられる。橋体側面から見た主桁 G1, G2, G3 の橋軸方向の鉛直変位分布形状は各試験において同じような形状になった。主桁 G1, (または G3) に車両を偏載荷した際、偏載荷した側の主桁の変位が大きくなり、反対側の主桁では小さい変位が得られたため、床版、横桁等により車両の荷重が適切に各主桁に分配されていると考えられる。

表-2.3 床版取替前の各載荷試験の橋軸方向の鉛直変位分布 (mm)

試験番号	主桁	橋軸方向の距離 (mm)				
		225	4056.25	7887.5	11718.75	15550
1	主桁 G1	-0.065	-1.658	-1.991	-1.094	-0.015
	主桁 G2	0.005	-0.929	-1.168	-0.619	0.007
	主桁 G3	0.002	-0.145	-0.266	-0.141	0.006
2	主桁 G1	-0.049	-0.884	-1.355	-0.918	-0.009
	主桁 G2	0.011	-1.044	-1.743	-1.212	-0.006
	主桁 G3	-0.005	-0.880	-1.337	-0.898	0.011
3	主桁 G1	-0.005	-0.284	-0.371	-0.281	-0.029
	主桁 G2	0.002	-0.864	-1.506	-1.028	-0.018
	主桁 G3	-0.013	-1.633	-2.474	-1.678	-0.004

表-2.4 床版取替後の各載荷試験の橋軸方向の鉛直変位分布 (mm) (補正有)

試験番号	主桁	橋軸方向の距離 (mm)				
		225	4056.25	7887.5	11718.75	15550
1	主桁 G1	0.000	-1.079	-1.827	-1.144	0.000
	主桁 G2	0.000	-0.699	-0.880	-0.561	0.000
	主桁 G3	0.000	-0.184	-0.205	-0.138	0.000
2	主桁 G1	0.000	-0.557	-0.939	-0.617	0.000
	主桁 G2	0.000	-0.796	-1.053	-0.721	0.000
	主桁 G3	0.000	-0.578	-0.712	-0.469	0.000
3	主桁 G1	0.000	-0.178	-0.276	-0.189	0.000
	主桁 G2	0.000	-0.651	-0.875	-0.583	0.000
	主桁 G3	0.000	-1.058	-1.392	-0.936	0.000

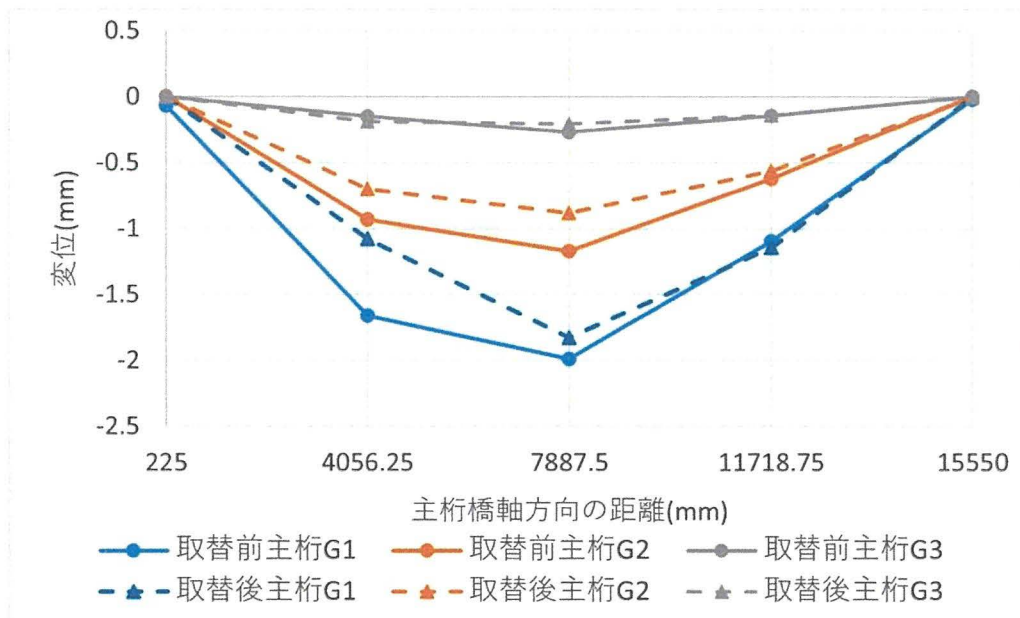


図-2.13 床版取替前後の試験1における各主桁の橋軸方向の鉛直変位分布

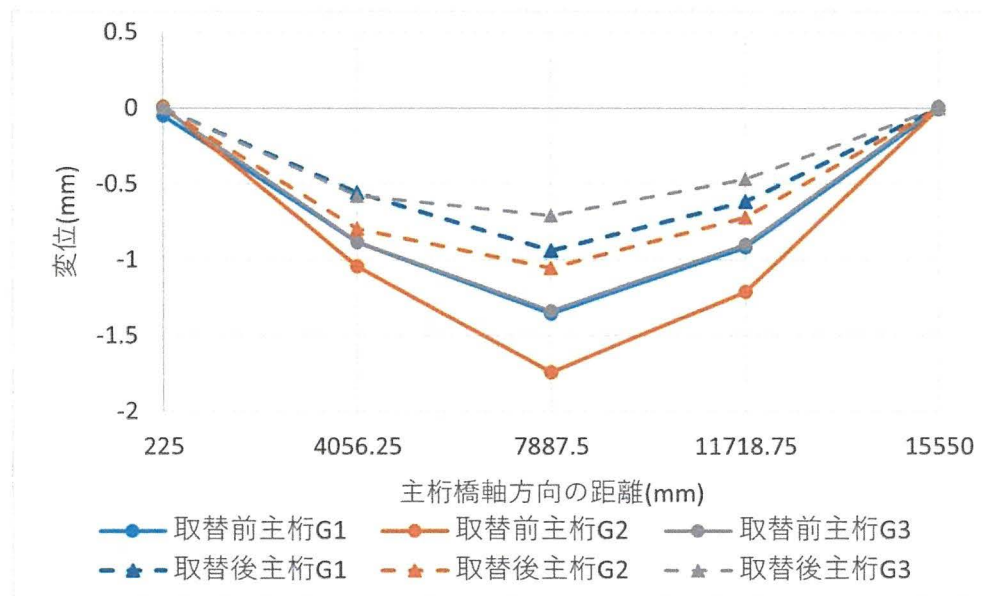


図-2.14 床版取替前後の試験2における各主桁の橋軸方向の鉛直変位分布

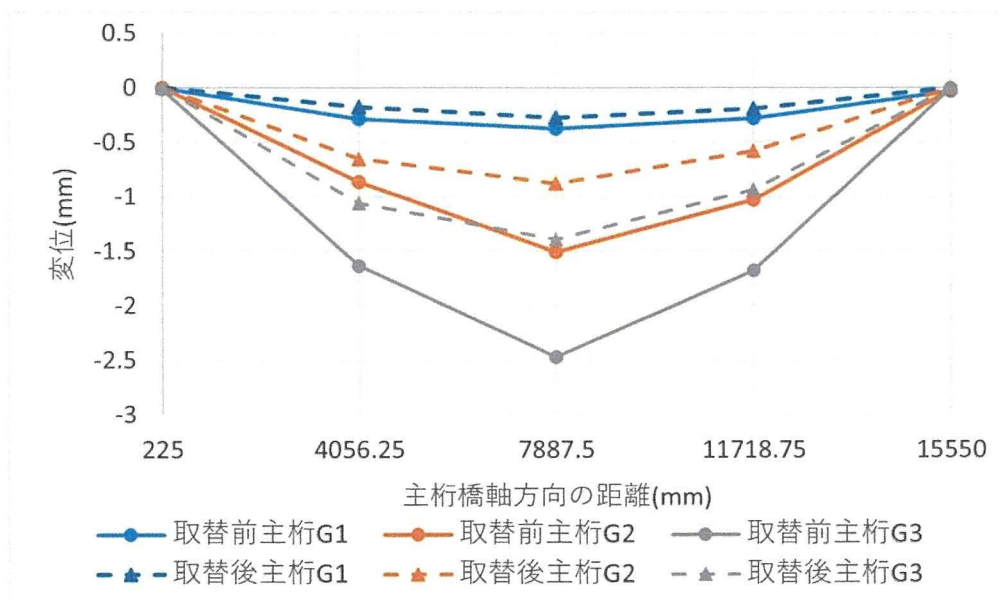


図-2.15 床版取替前後の試験3における各主桁の橋軸方向の鉛直変位分布

(2) 水平変位計測結果と考察

各試験の載荷時における床版取替前後での橋軸方向の水平変位結果を表-2.5～2.6に示す。変位値の符号は、各測点において支間中央側に変位した時を+、支承側に変位した時を-としている。試験番号は、載荷試験項目（表-2.2）で示した通りである。なお、A1 橋台側の支承は可動支承で、A2 橋台側は固定支承となっている。

床版取替前では、荷重が直接載荷している各主桁の A1, A2 支承部に-0.123～-0.171mm 程度の水平変位が発生している。床版取替後では、同様な傾向を示しているが発生する水平変位が-0.125～-0.209mm 程度と幾分増加傾向にある。トラック重量の分配が大きい主桁に大きな水平変位が生じていることから、荷重効果の影響を受けていると考えられる。本橋の両支承には錆などにより水平移動を妨げる支点拘束が生じている。そのために両支点に発生する水平反力が水平変位に影響を与えていると推測される。

表-2.5 床版取替前の各載荷試験の両支点部の水平変位(mm)

試験番号	主桁	橋台 A1 側の支点部	橋台 A2 側の支点部
1	主桁 G1	-0.139	-0.170
	主桁 G2	-0.012	-0.077
	主桁 G3	-0.015	-0.017
2	主桁 G1	-0.085	-0.107
	主桁 G2	-0.123	-0.142
	主桁 G3	-0.100	-0.075
3	主桁 G1	-0.014	-0.022
	主桁 G2	-0.110	-0.129
	主桁 G3	-0.171	-0.140

表-2.6 床版取替後の各載荷試験の両支点部の水平変位(mm)

試験番号	主桁	橋台 A1 側の支点部	橋台 A2 側の支点部
1	主桁 G1	-0.183	-0.200
	主桁 G2	-0.103	-0.100
	主桁 G3	-0.041	0.003
2	主桁 G1	-0.094	-0.093
	主桁 G2	-0.125	-0.153
	主桁 G3	-0.120	-0.039
3	主桁 G1	-0.024	-0.009
	主桁 G2	-0.098	-0.122
	主桁 G3	-0.209	-0.118

2.3 車両走行試験

2.3.1 応答加速度計測試験概要

車両を用いた橋梁の振動特性を調べる方法に、車両走行試験^{8)~10)}がある。対象橋梁の設計荷重である14tトラックを用いて車両走行試験を実施し、トラックの走行に伴う振動による応答加速度を計測した。加速度計(LS-10C)は3本の主桁の支間1/4, 1/2, 3/4点において写真-2.13のように主桁下フランジの上面に計9点設置し、延長ケーブルを介してマルチレコーダー(TMR-200)に接続し計測を行っている。加速度計のサンプリング間隔は0.1msである。トラックは幅員中央、またはG1桁, G3桁上に片側の車輪が乗るように走行速度20km/hで走行し鉛直方向の応答加速度を計測した。図-2.16にトラックの走行進路と加速度計の設置位置を示す。

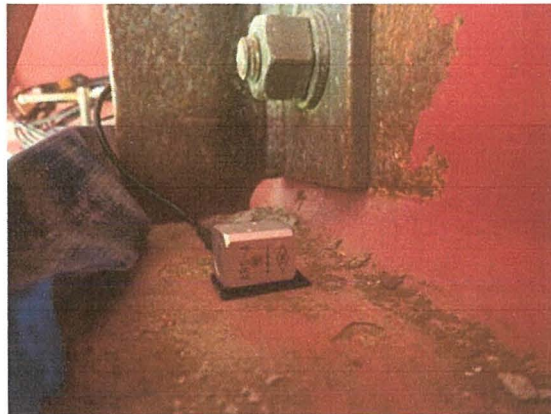


写真-2.13 主桁下フランジに設置された加速度計

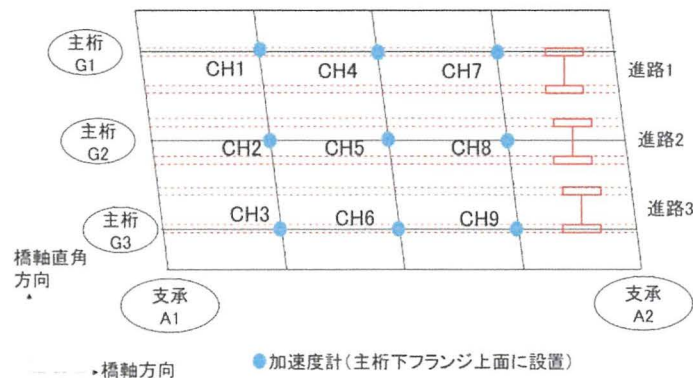


図-2.16 車両走行試験の加速度計配置位置と走行進路

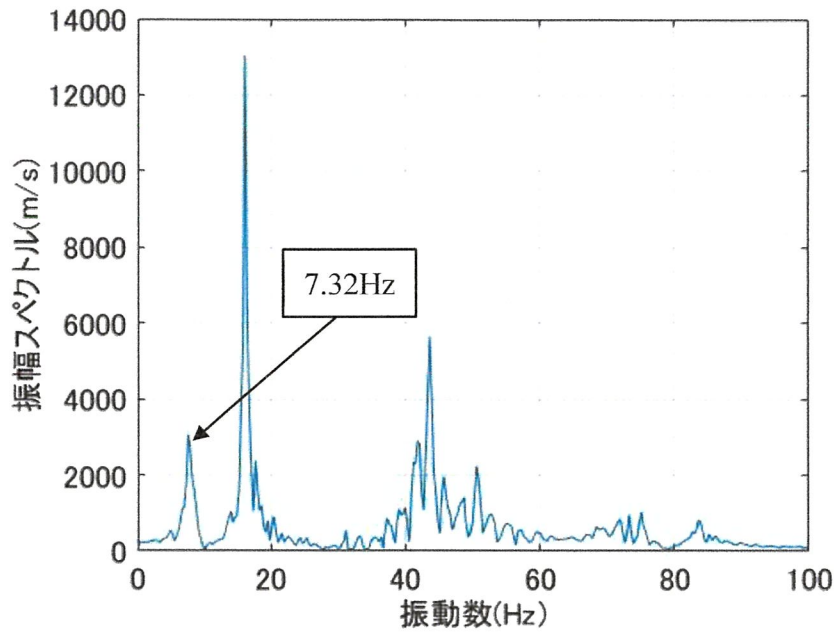
車両走行試験で計測した加速度データに対し高速フーリエ変換（FFT）を実行することで、振幅スペクトルと位相差スペクトルが得られる。FFTによる振動特性の特定精度に影響する周波数分解能（ $\Delta\omega$ ）は式(2.1)によって求まる。

$$\Delta\omega = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \quad (2.1)$$

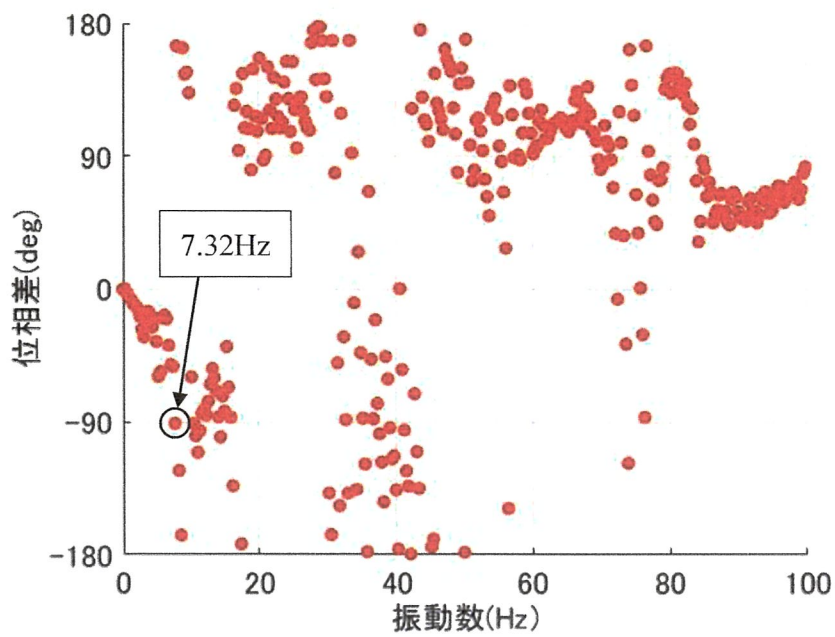
Δt : サンプル間隔, n : データ数

車両走行試験で計測した加速度データは、床版取替前の試験ではサンプリング間隔が 1ms, データ数 2^{12} (4096) 個で周波数分解能約 0.24Hz, 床版取替後の試験ではサンプリング間隔 0.1ms, データ数 2^{15} (32768) 個, 周波数分解能約 0.31Hz で検討している。

図-2.17にFFTによって得られる振幅スペクトルと位相角スペクトルの一例を示す。本研究では、振幅が卓越し位相差が $-90^\circ(270^\circ)$ を示す振動数を卓越振動数として検討した。



(a) 振幅スペクトル



(b) 位相差スペクトル

図-2.17 FFT から得られる各スペクトル例

2.3.2 応答加速度計測試験結果と考察

車両走行試験の結果を以下に示す。図-2.18～図-2.21 にトラックが幅員中央または G1 桁上を走行した際の支間中央および支間 1/4 点における床版取替前後の振幅スペクトルを示す。図-2.18 に示す支間中央点の振幅スペクトルから、最低次の卓越振動数は床版取替前で 7.33Hz, 床版取替後において 7.94Hz が得られた。また、図-2.19 に示すようにトラックが外桁上を走行した際には、床版取替前は 8.55Hz, 床版取替後は 8.85Hz の卓越振動数が現れた。

次に FFT 解析によって得られる各測点の振幅スペクトルと位相差スペクトルを用いて振動モードと固有振動数を特定した。打撃点で位相差が $270^\circ(-90^\circ)$ 付近を示す卓越振動数において、同時に得られる各計測点の振幅 a_n と位相差 b_n を用いて式(2.2)から求まる比率により振動モードを特定する。

$$a_1 \sin(b_1) : a_2 \sin(b_2) : \dots : a_n \sin(b_n) \quad (2.2)$$

ただし n : CH 番号 (1~9)

車両走行試験から得られた曲げ及びねじれ振動の 2 次までの各振動モードの固有振動数を表-2.7 に示す。試験の結果から、床版取替前後において 3.5~8.3% の固有振動数の増加が認められた。車両走行試験からは床版取替前の曲げ 2 次モードの固有振動数は特定されなかった。

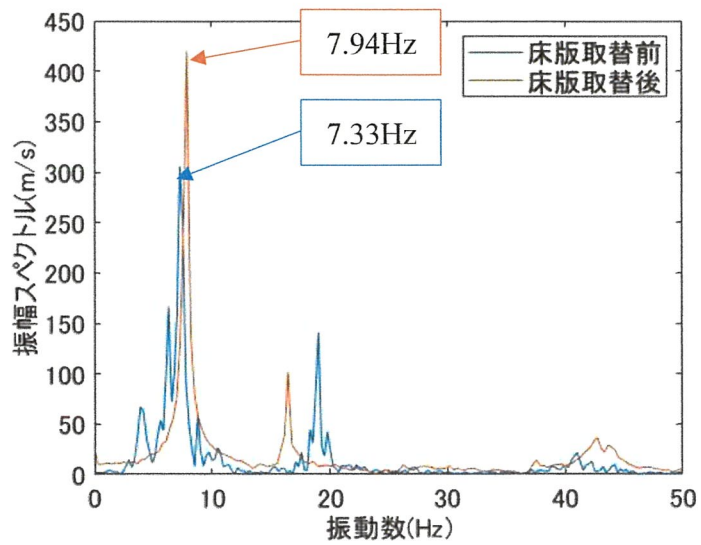


図-2.18 幅員中央走行時の G2 桁支間中央 (CH5) における床版取替前後の振幅スペクトル

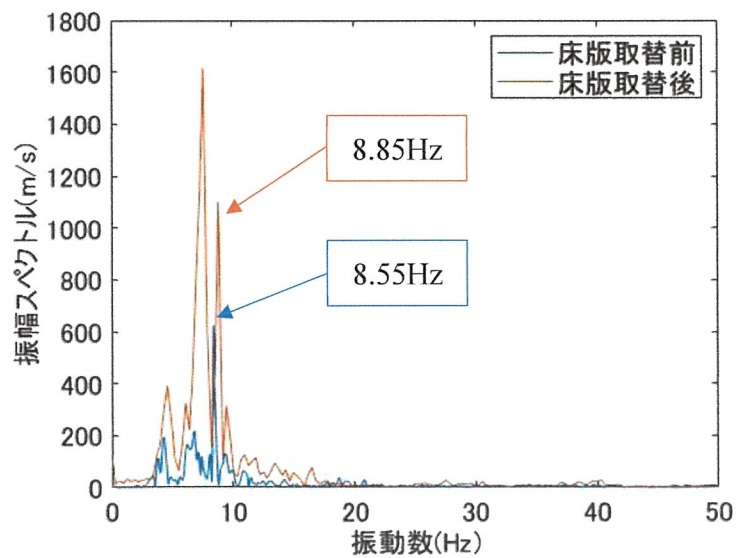


図-2.19 G1 桁上走行時の G1 桁支間中央 (CH4) における床版取替前後の振幅スペクトル

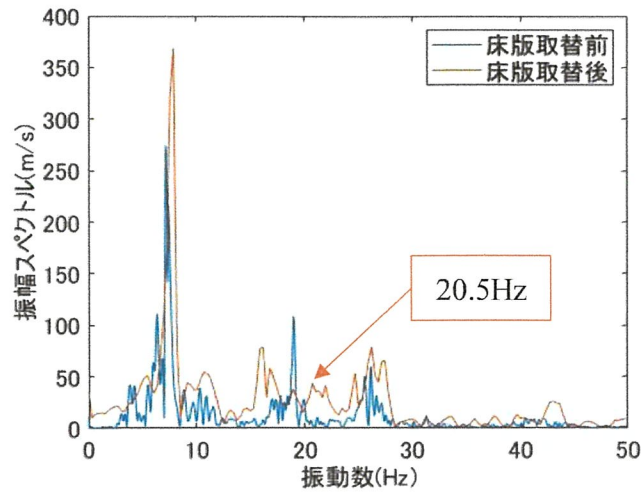


図-2.20 幅員中央走行時の G2 桁支間 1/4 点 (CH2) における床版取替前後の振幅スペクトル

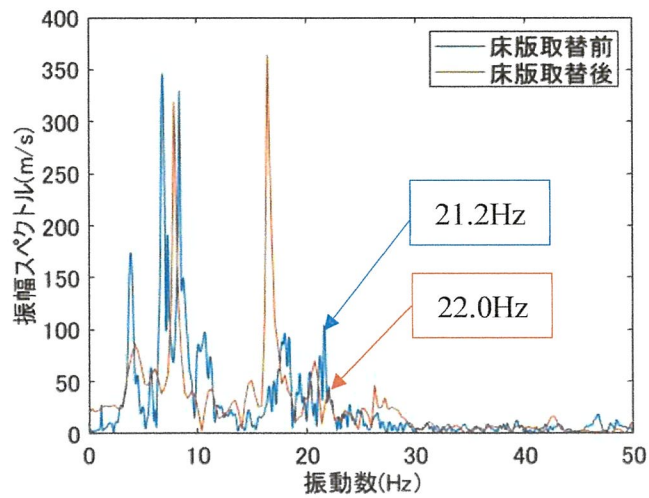


図-2.21 G1 桁上走行時の G1 桁支間 1/4 点 (CH1) における床版取替前後の振幅スペクトル

表-2.7 振動モードと床版取替前後の固有振動数

振動モード	固有振動数 (Hz)	
	車両走行試験	
	床版取替前	床版取替後
曲げ 1 次	7.33	7.94
ねじれ 1 次	8.55	8.85
曲げ 2 次	-	20.5
ねじれ 2 次	21.2	22.0

2.4 車両載荷試験のまとめ

対象橋梁の床版取替工事の前後において、14tトラックを用いて車両載荷試験及び車両走行試験を行った。車両載荷試験においては各主桁の下面及び支承部に変位計を設置し、鉛直変位と水平変位の計測を行った。鉛直変位計測の結果から橋軸方向の鉛直変位分布を取得し、それらの分布形状は主桁 G1（または G3）に車両を偏載荷した際、偏載荷した側の主桁の変位が大きくなり、反対側の主桁では小さい変位が得られたため、車両の荷重が各主桁に適切に分配されていることが確認された。また、床版取替前後で各主桁の支間中央鉛直変位の値を比較すると床版取替後で最大で 48%程度の変位の減少がみられた。これは床版剛性が取替前床版に比べて増加したことが理由として考えられる。水平変位計測の結果から、床版取替前で最大で約 0.17mm 程度、床版取替後で最大約 0.2mm 程度の水平変位が計測された。対象橋梁の支承部には錆などにより水平移動を妨げる支点拘束が生じており、両支点に発生する水平反力が水平変位に影響を与えていることが推測された。

車両走行試験では主桁下フランジに加速度計を設置し、トラックの走行で発生する振動による応答加速度の計測を行った。計測した応答加速度データに対し FFT 解析を実施し、橋梁全体の振動モードと固有振動数を特定した。床版取替前の曲げ 2 次振動モードを除き、それぞれ床版取替前後において曲げ及びねじれ振動の 2 次までの固有振動数を特定することができ、床版取替後において床版取替前に比べて 3.5~8.3%の固有振動数の増加が認められた。

第 3 章

24 時間計測試験

3.1 計測試験概要

今回実施した計測試験は、日照による橋梁の各部材温度変化の影響で日常的に繰り返される日周期挙動を把握するために 24 時間連続で橋体温度分布計測、各主桁の鉛直変位計測、各支承部の水平変位計測を実施した。第 2 章の車両載荷試験と同様、山形県上山市の赤山橋において試験を行い、各データの収集は橋体の温度変化が顕著な時期である 5 月から 8 月の間で実施した。以下、計測した項目を示す。

3.1.1 橋体温度分布計測

赤外線カメラを用いて、舗装面及び床版下面・桁の温度分布を計測した。24 時間計測は 1 時間毎に行い、構成部材の全ての面が計測できるように撮影位置を移動して計測を実施した。また、赤外線カメラで得られたデータの信頼性を確認するため、橋梁の支間中央下フランジ地点に熱電対を設置し、該当位置の局所温度計測も並行して実施した。さらに、外気温計測も熱電対を用いて行った。計測時の赤外線カメラの撮影状況、赤外線サーモグラフィー画像と熱電対の設置状況を写真-3.1～写真-3.4 に、熱電対の設置位置を図-3.1 に示す。撮影した赤外線画像は日本アビオニクス社製の InfReC Analyzer NS9500 Standard を用いて各部材の温度を読み取った。



写真-3.1 赤外線カメラによるサーモグラフィーの撮影状況



写真-3.2 赤外線サーモグラフィー画像（主桁，床版下面）

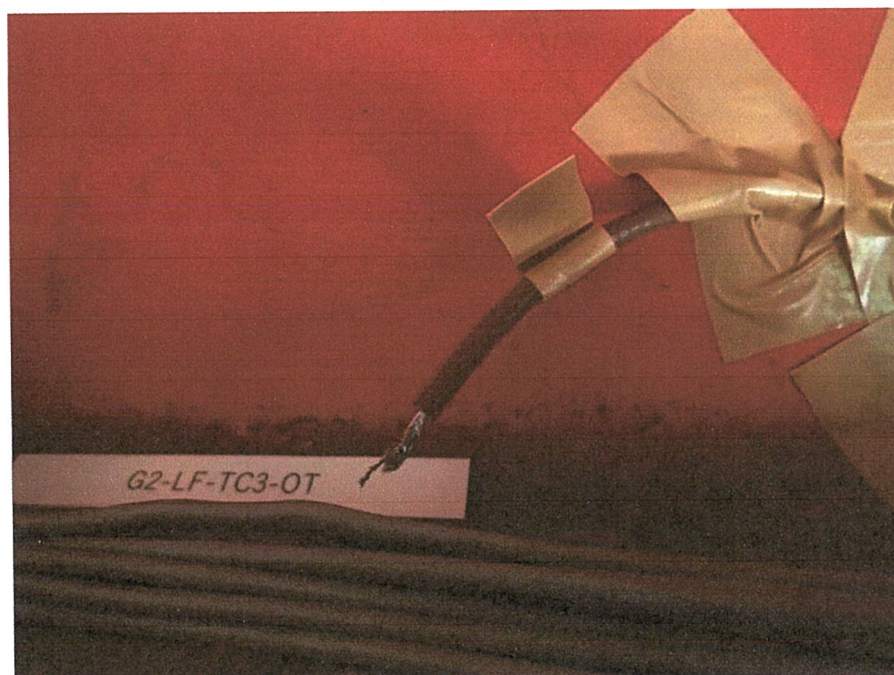


写真-3.3 熱電対による温度計測状況（外気温計測）



写真-3.4 熱電対による温度計測 (G2 主桁支間中央の温度計測)

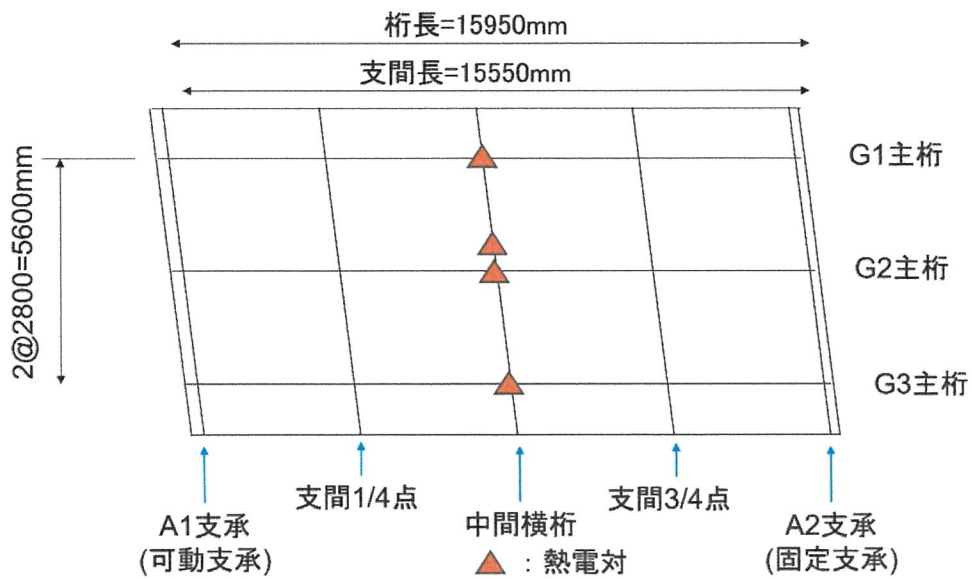


図-3.1 熱電対の設置位置

3.1.2 各主桁の各支間断面における鉛直変位計測

本計測では、各支間断面における下フランジから地面までの距離が大きく、マグネットベースを直接下フランジに設置し計測することは物理的に困難であったため、主桁の各支間断面に位置する下フランジに単管パイプを取り付けそこにマグネットベースを設置し鉛直方向に変位計を設置して計測を行った。各主桁における各支間断面（支間 1/4 点、1/2 点、3/4 点）の変位計設置状況例を写真-3.5 に、支承部の変位計設置状況例を写真-3.6 に示す。図-3.2 は鉛直変位計設置位置の平面図を示している。変位計の設置位置については第 2 章の車両載荷試験における鉛直変位計測と同様なので省略する。

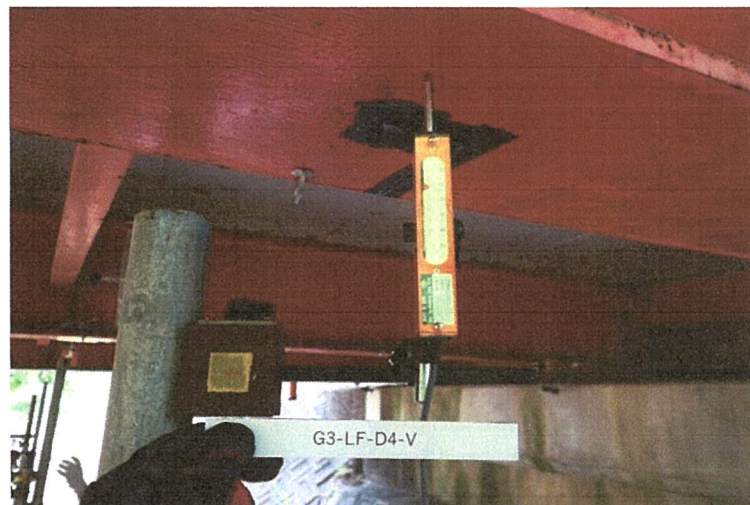


写真-3.5 各支間断面の変位計設置状況

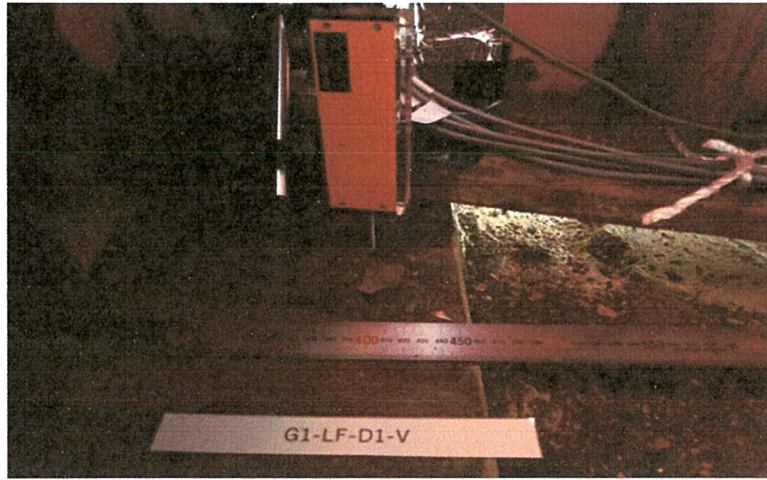


写真-3.6 支承部の変位計設置状況

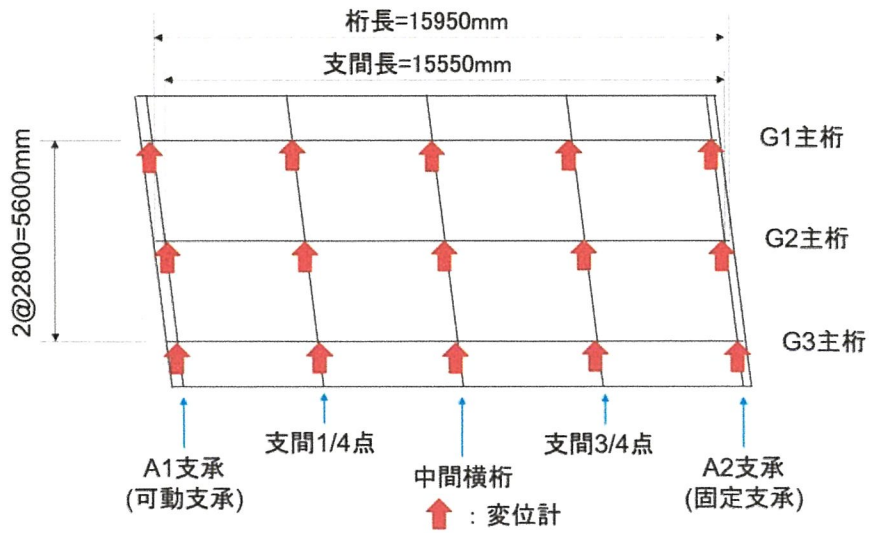


図-3.2 鉛直変位計設置位置平面図

3.1.3 各主桁の支間部の水平変位計測

各主桁下フランジ下面にマグネットベースを設置し、橋台の堅壁に対して変位計の針が橋軸方向と平行に向くように変位計を設置した。変位計の設置状況を写真-3.7、設置位置の平面図を図-3.3 に示す。



写真-3.7 支承部の変位計設置状況

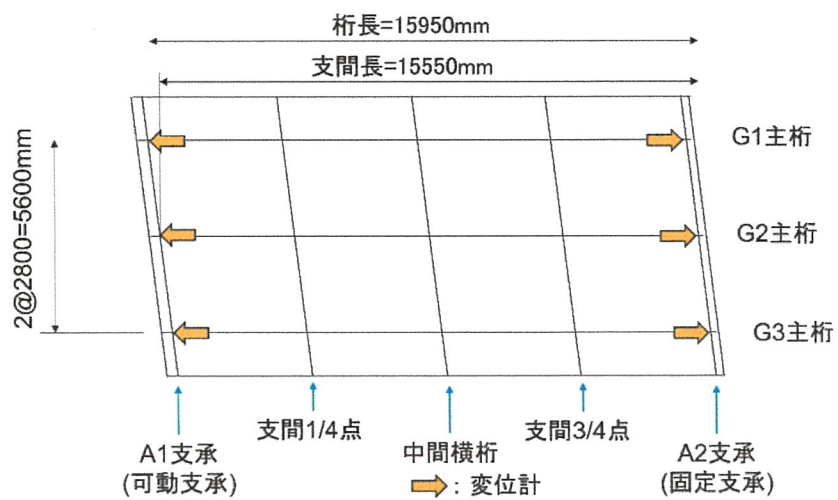


図-3.3 水平変位計測の変位計設置位置平面図

3.2 計測結果

床版取替前後での試験状況と気象条件について以下に示す。

床版取替前の24時間計測試験は、平成30年8月2日10:00から8月3日9:00にかけて行った。天候は8月2日、3日両日共に晴れており、気温の上昇が確認された。このときの外気温は、気象庁観測データ³⁷⁾より最も近隣の観測地点での最高気温34.1℃最低気温20.9℃で気温差が13.2℃であった。計測実施中に当該橋梁を通行した車両は無かった。

床版取替後の24時間計測試験は、令和元年5月31日13:00から6月1日13:00にかけて実施した。5月31日は曇りのち雨、6月1日は雨のち晴れであった。5月31日20:00から6月1日4:00頃にかけて小雨が降り、夜間の気温降下が確認された。外気温は、気象庁観測データより最高気温23.0℃最低気温12.7℃で気温差は10.3℃であった。計測実施中に当該橋梁を通行した車両は無かった。

3.2.1 橋体温度分布計測結果

(1) 床版取替前

写真-3.8～写真-3.10に対象橋梁の舗装表面のサーモグラフィー画像を示す。画像中の十字型の指定点及び周辺の数値は格子部分の中心点の温度を表している。なお、アルファベットは赤外線カメラ上で割り振られた各測定点の番号表示を示している。

舗装面は特に日照の影響を直接受けるため、写真-3.8の15時では約48℃と高温になっていることが確認できた。写真-3.9の18時では、3時間前より約10℃低下しているものの約37℃と高い温度を保っていた。写真-3.10の21時になると夜間ということもあり外気温に近い約30℃まで温度が低下した。

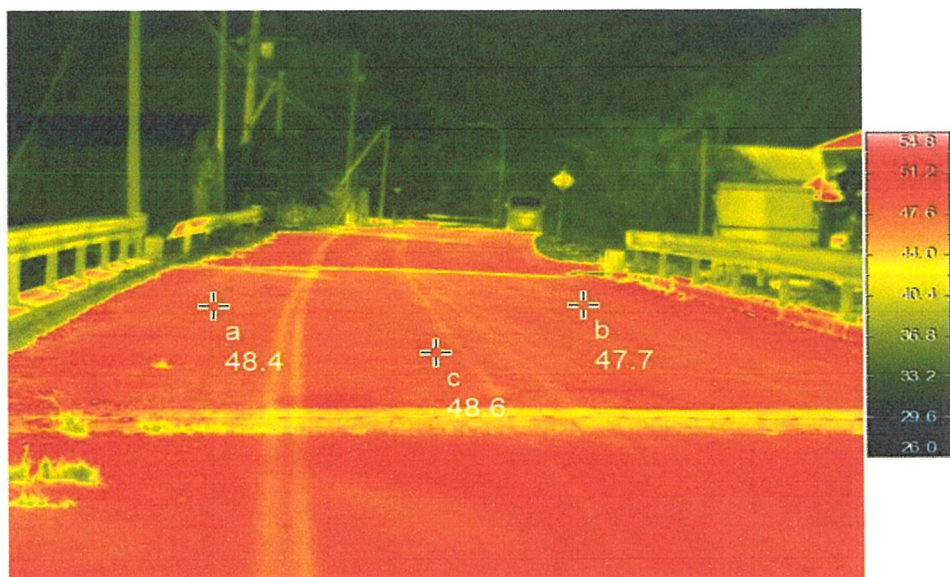


写真-3.8 舗装面サーモグラフィー画像(2018年8月2日15:00)

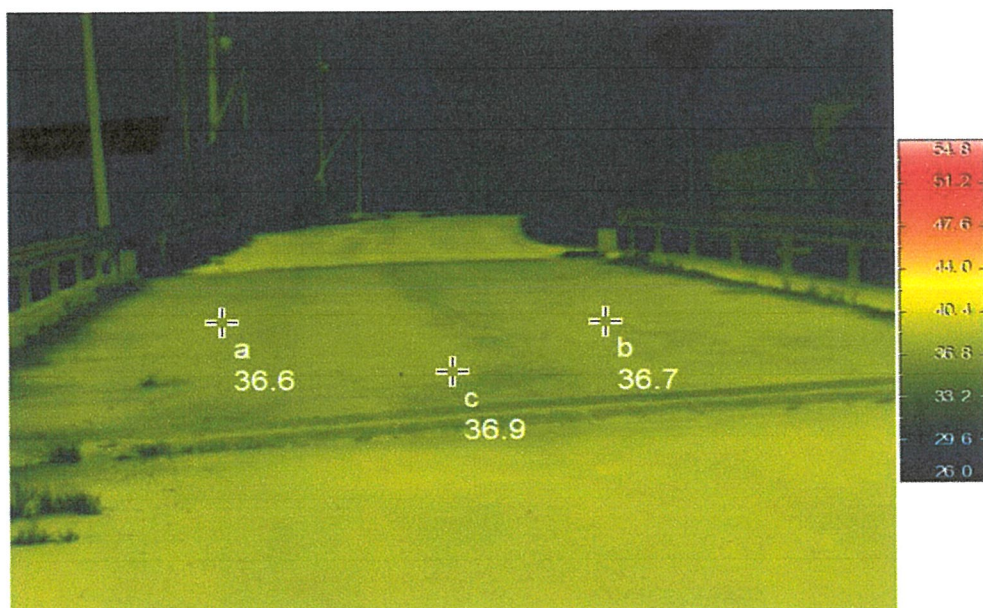


写真-3.9 舗装面サーモグラフィー画像(2018年8月2日18:00)

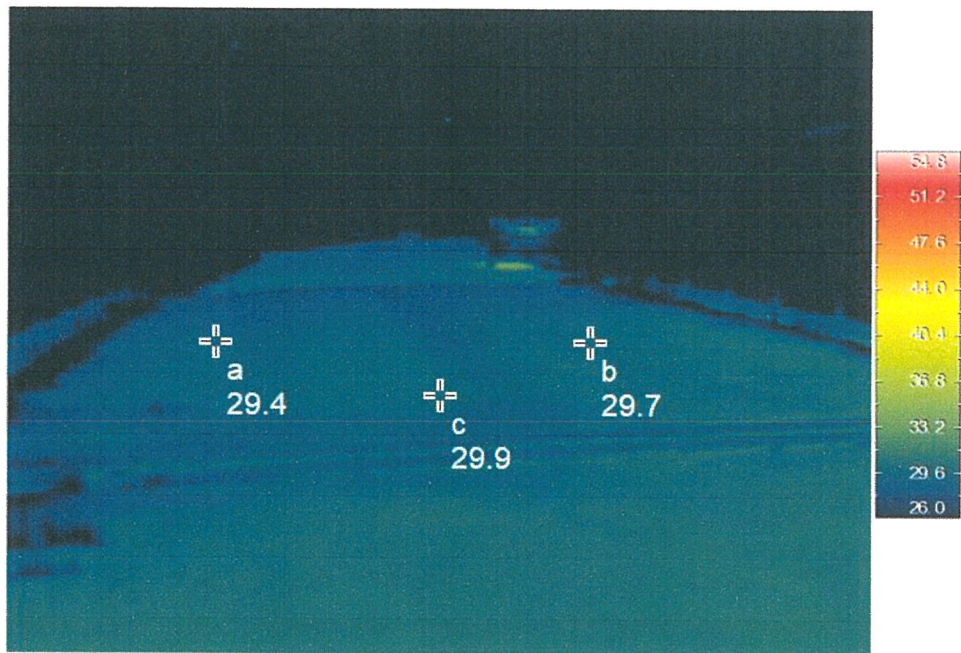


写真-3.10 舗装面サーモグラフィー画像 (2018年8月2日 21:00)

次に、写真-3.8～3.10 に示した舗装面の画像と同時刻の床版下面及び主桁のサーモグラフィー画像を写真-3.11～写真-3.13 に示す。画像中の指定点は、a,c 点が主桁下フランジ下面，b,d 点が主桁ウェブ側面，e,f,g 点は床版下面にプロットしている。

写真-3.11 の 15 時では、床版下面温度が約 32°C となっており、同時刻における舗装の表面温度約 48°C と比較して約 16°C の温度差が生じている。写真-3.12 の 18 時においては、3 時間前に比べ床版の温度が約 1～2°C 上昇しており、舗装面とは逆の変化を示した。日没から時間が経過した 21 時の写真-3.13 では、舗装面よりも床版下面の温度が約 2～3°C 高くなった。主桁については、ウェブ側面の方が下フランジ下面より約 2～3°C 程高温であることが観測された。

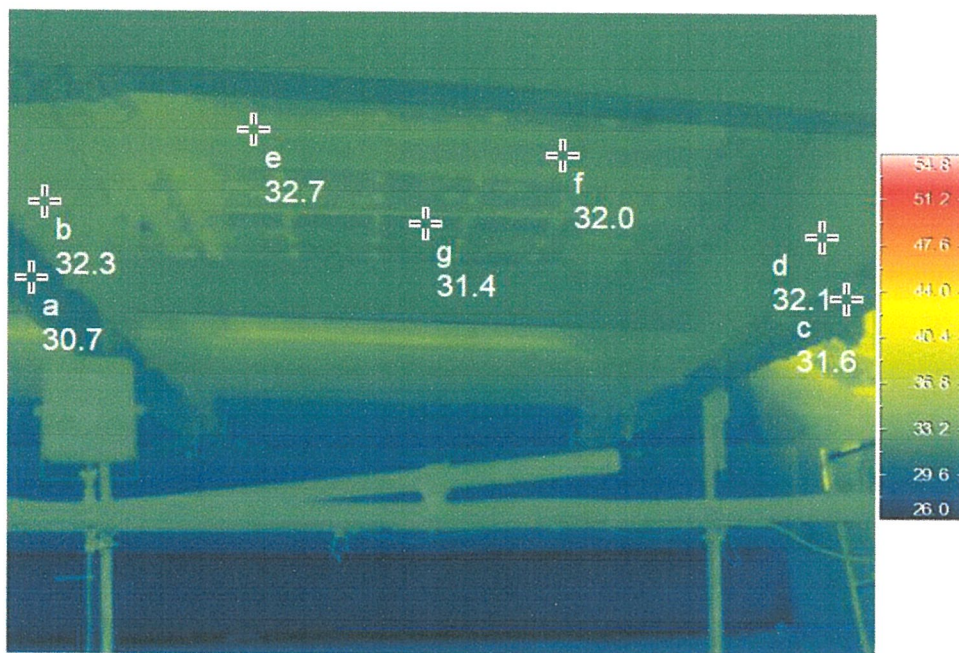


写真-3.11 床版下面及び主桁のサーモグラフィー画像
(2018年8月2日15:00)

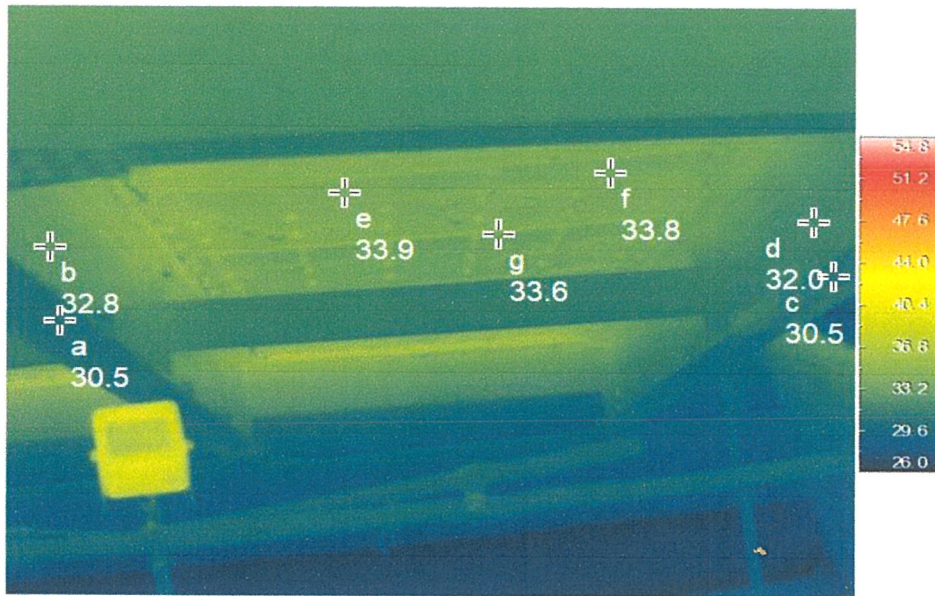


写真-3.12 床版下面及び主桁のサーモグラフィ画像
(2018年8月2日 18:00)

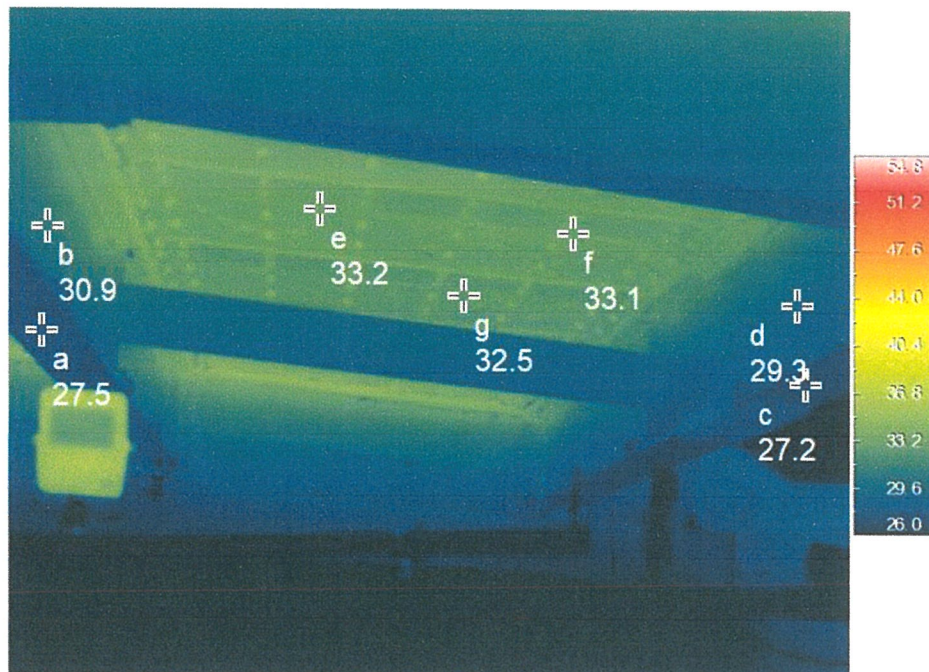


写真-3.13 床版下面及び主桁のサーモグラフィ画像
(2018年2月2日 21:00)

最後に、上部工各部材の温度変化を時刻歴で表示したグラフを図-3.4 に示す。床版下面、各主桁部材及び舗装表面の各温度の値は、赤外線カメラから得られた値の平均値を使用している。グラフより、日照のある時間帯(10:00~17:00)で舗装表面温度が外気温、床版下面、各主桁部材の各温度より高温になっていることが確認できた。また、17時以降の日没後の時間帯では、床版下面の温度が他の構成部材より高い温度を示しており、各主桁部材は約2~3°Cの温度範囲内で同様に变化していた。また、舗装表面温度のピークを12時とした場合、床版下面温度のピークが18時を示していることから、舗装を介して床版下面温度への熱伝導に6時間程度要することが明らかになった。

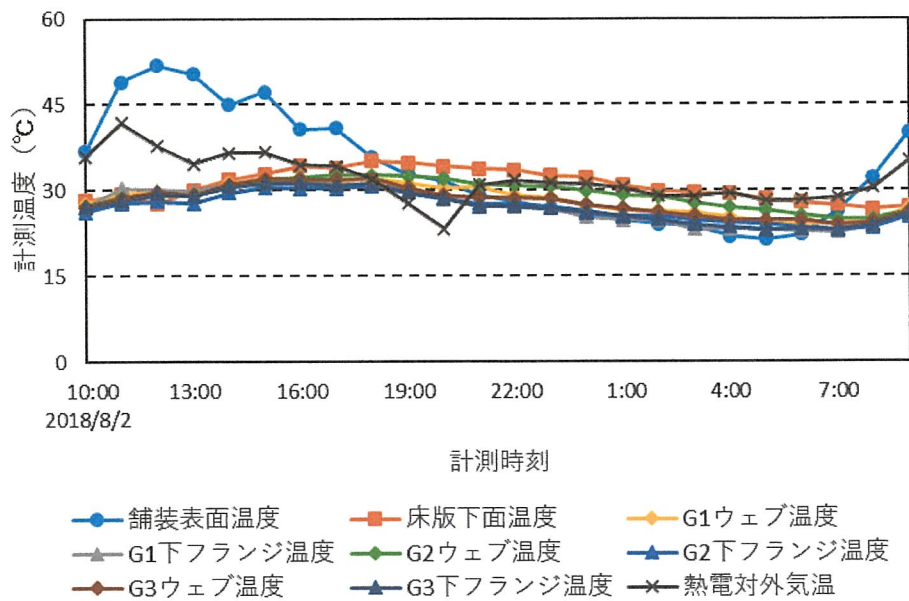


図-3.4 上部工部材の計測温度の時刻歴応答 (床版取替前)

(2) 床版取替後

写真-3.14～写真-3.16に対象橋梁の床版取替後に行った舗装表面のサーモグラフィー画像を示す。また、写真-3.17～写真-3.19に舗装面の画像と同時刻の床版下面および主桁のサーモグラフィー画像を示す。画像中の十字型の指定点及び周辺の数値の意味するところは床版取替前と同様である。

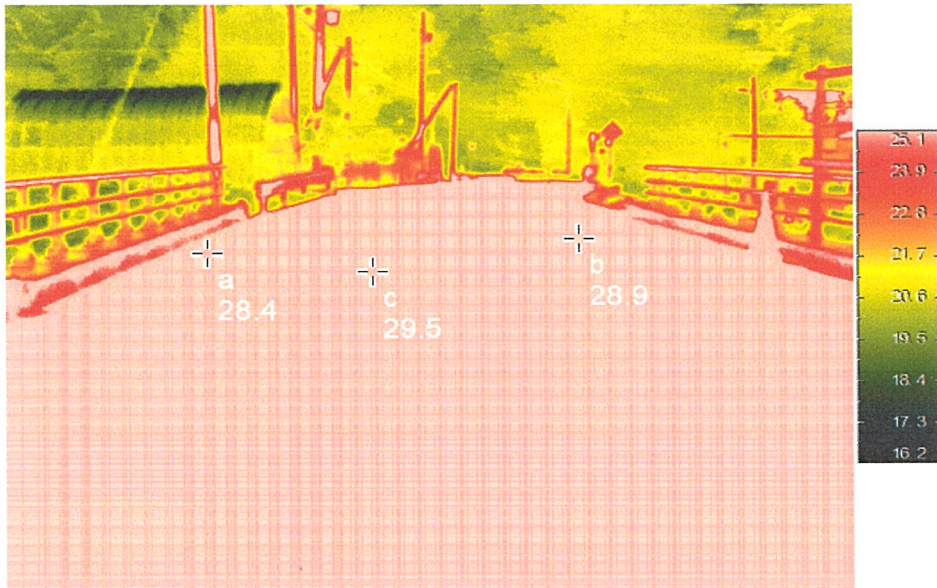


写真-3.14 舗装面サーモグラフィー画像 (2019年5月31日13:30)

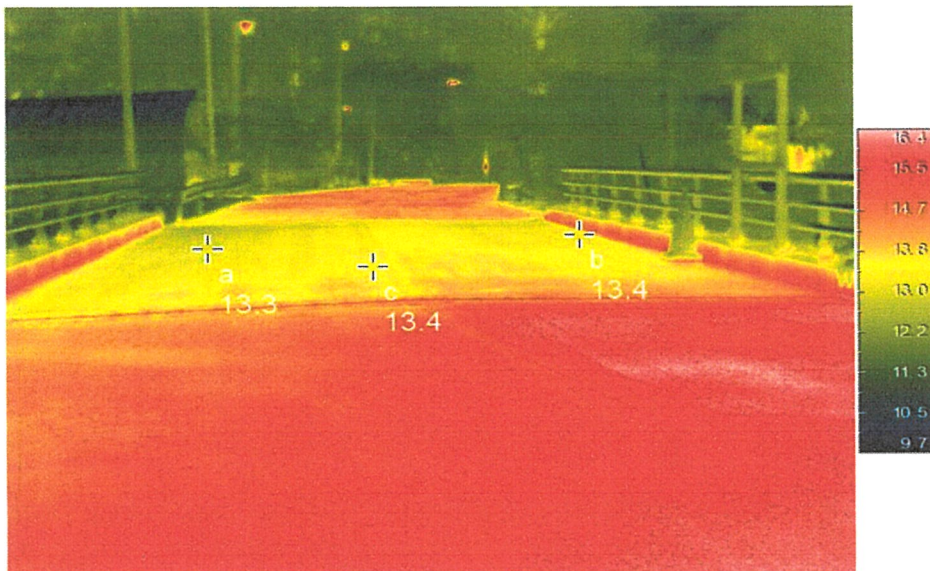


写真-3.15 舗装面サーモグラフィー画像(2019年6月1日0:30)

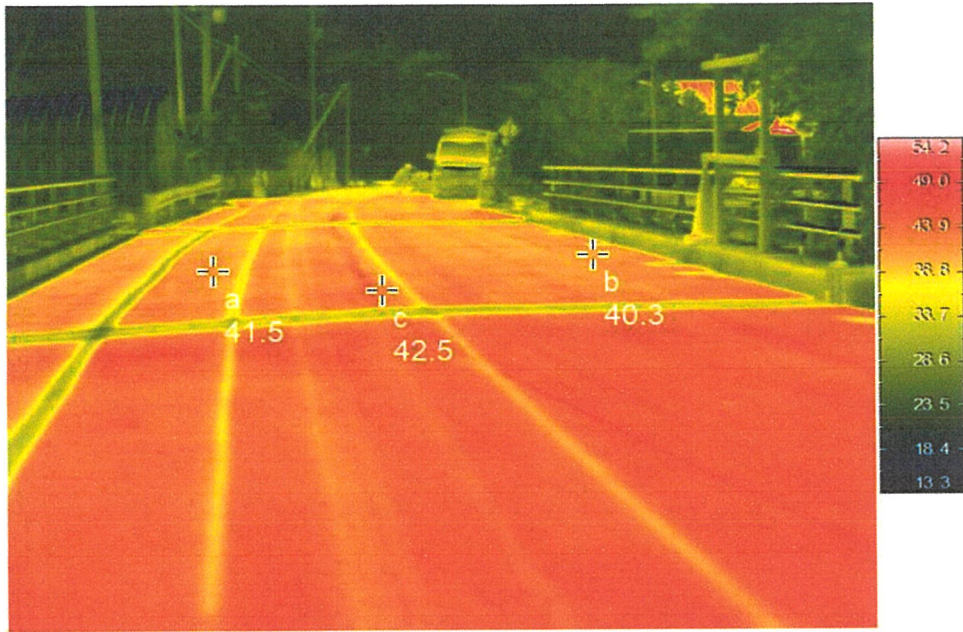


写真-3.16 舗装面サーモグラフィー画像 (2019年6月1日 13:30)

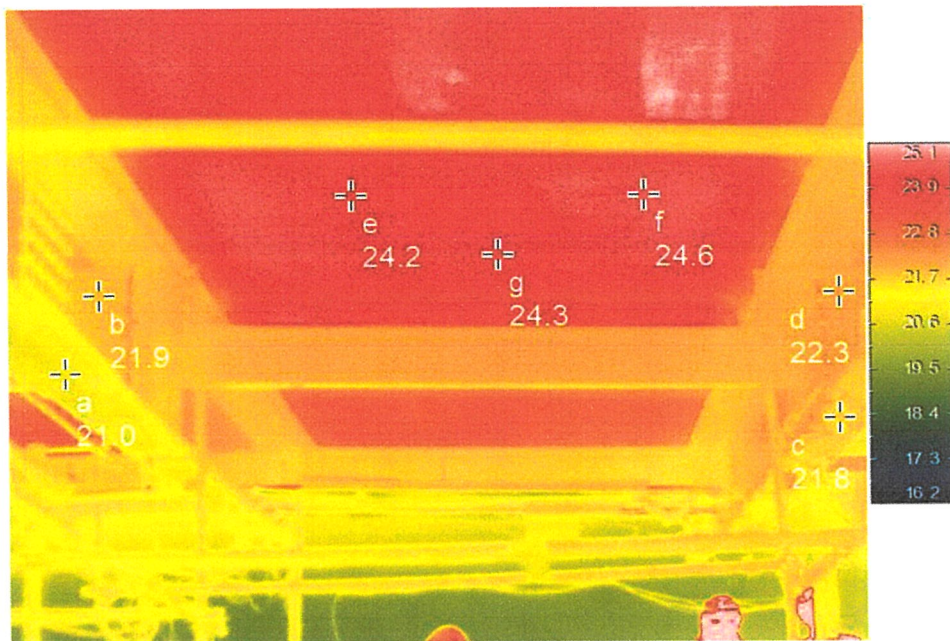


写真-3.17 床版下面及び主桁のサーモグラフィー画像 (2019年5月31日 13:30)

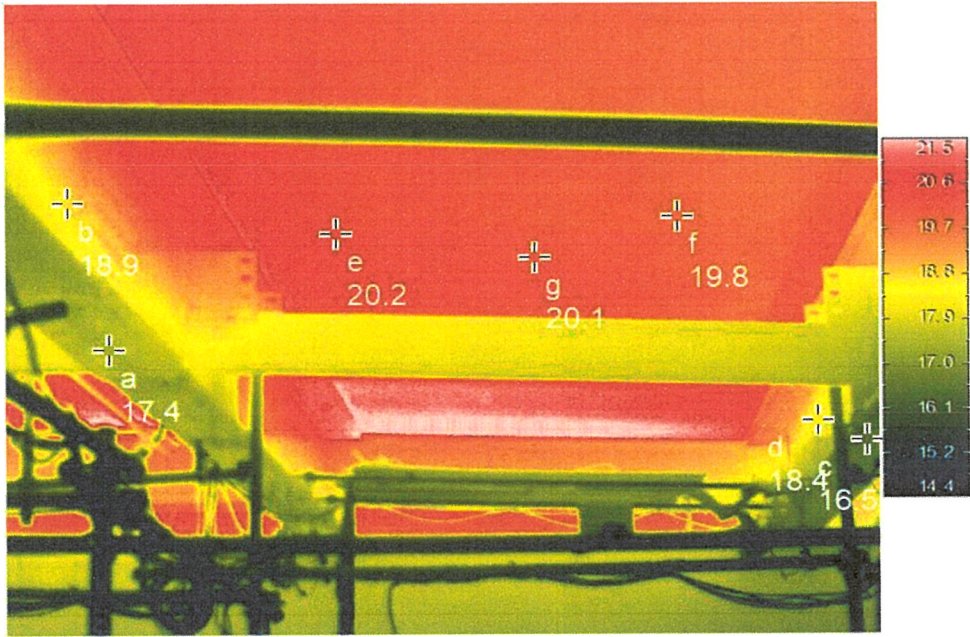


写真-3.18 床版下面及び主桁のサーモグラフィー画像
(2019年6月1日 0:30)

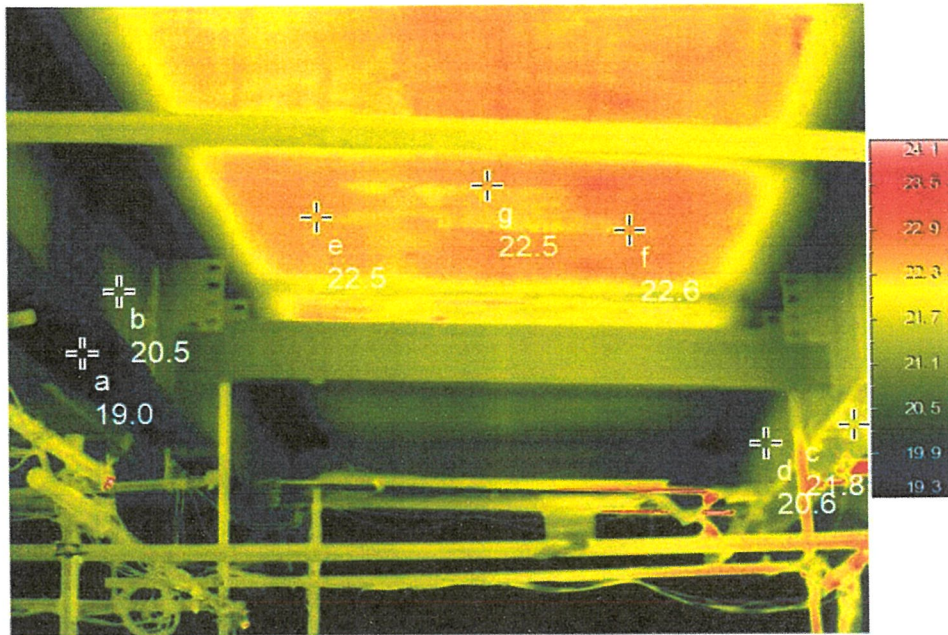


写真-3.19 床版下面及び主桁のサーモグラフィー画像
(2019年6月1日 13:30)

床版取替後の計測試験実施中においては夜間(20:00~4:00)に降雨があったため、その時間帯では写真-3.15に示すように舗装表面の温度が約17°Cから約13°Cへと緩やかに低下していることが確認できた。同時刻の床版下面および主桁の温度は、写真-3.18に示すようにそれぞれ約20°Cと約17~19°Cとなっており、写真-3.17に示す前日の日中時の温度と比較しても約3~4°Cしか低下していない。写真-3.16に示すように翌日の昼間にかけては天候も回復し、日照の影響もあり舗装表面の温度は約40°Cまで上昇していた。このため舗装表面温度は特に天候の影響を受けやすいことが確認できた。床版下面温度についても降雨のあった時間帯で温度が下がり、写真-3.19に示すように昼間にかけては温度が少し上昇した。しかし、舗装表面の温度変化と比べると鈍い変化であった。

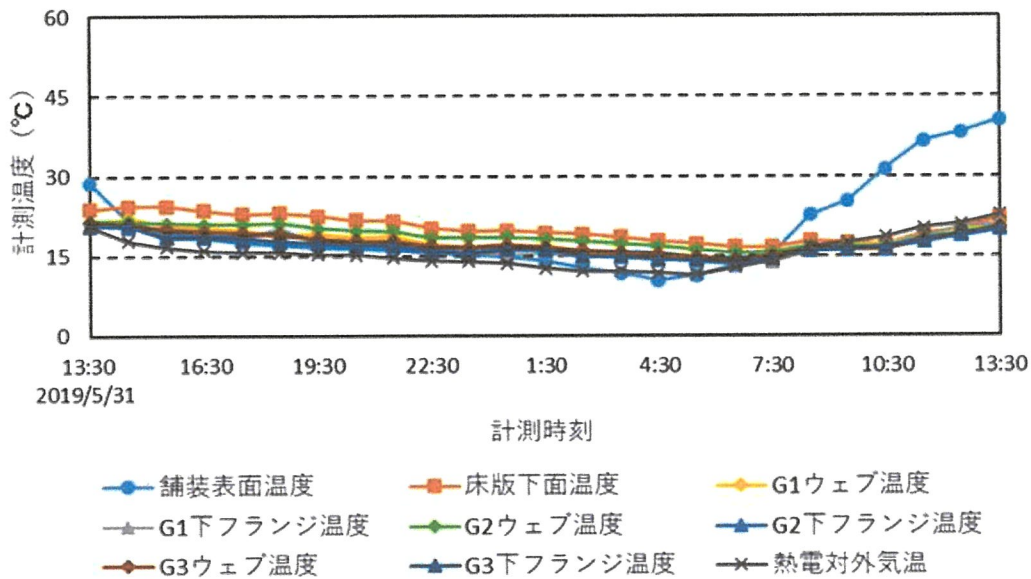


図-3.5 上部工部材の計測温度の時刻歴応答 (床版取替後)

最後に上部工各部材の温度変化を時刻歴で表したグラフを図-3.5に示す。図-3.5より、降雨のあった時間帯(20:00~4:00)では、舗装表面は床版や主桁よりも低い表面温度であった。降雨が止んだ後は舗装表面温度が上昇しており、主桁下フランジから床版にかけては上部にいくほど温度が上昇することが確認された。また熱電対による外気温計測から舗装表面温度は、外気温よりも温度が上昇しているため、舗装表面は日照による影響を大きく受けていることが考えられる。

3.2.2 鉛直変位計測結果

各支間における床版取替前後での鉛直変位計測結果を示す。実線部が鉛直変位の結果であり、計測開始の変位を基準に計測している。点線部はそれぞれ図-3.3, 3.4 の温度変化の時刻歴である。

(1) 床版取替前

床版取替前の上部工部材の温度変化に伴う各支間の鉛直変位について図-3.6～図-3.8 に示す。鉛直変位の符号は、主桁が下方方向に変位した場合を－としており、以降の図でも同様とする。図-3.6, 3.7 に示すように上部工部材の温度変化に伴い、鉛直変位も周期的に変化することが分かった。図-3.6 の支間中央については、主桁等の部材温度の最高温度を計測した1～2時間後に、最大変位を計測していることから上部工部材温度と鉛直変位の時刻歴応答には位相差が生じていることが認められた。最大変位は、図-3.6 に示すように支間中央 G2 で 1.686mm であった。各主桁支承部の鉛直変位に大きな変動は確認できなかった。

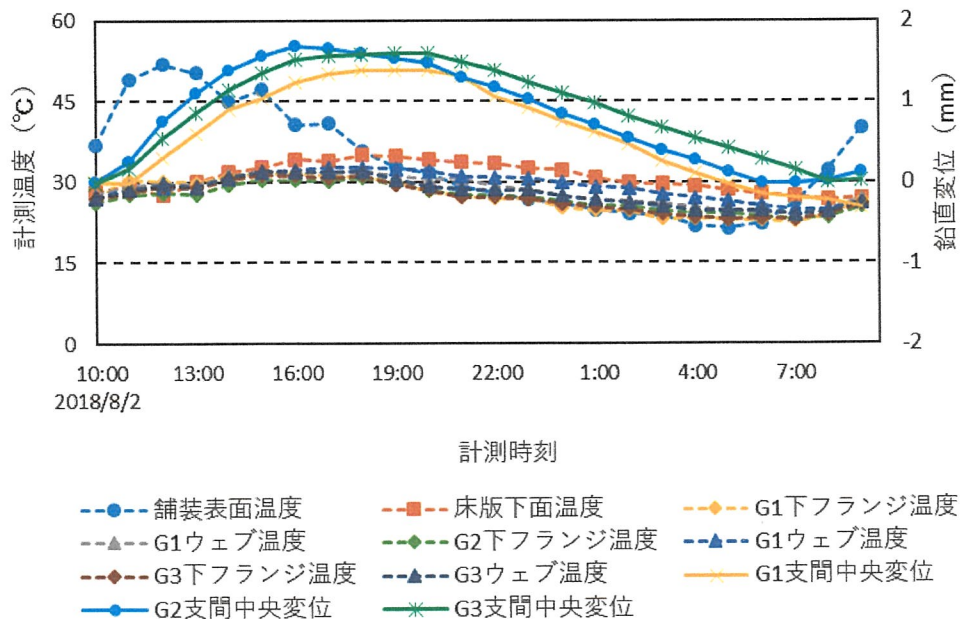


図-3.6 上部工の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答(支間中央)

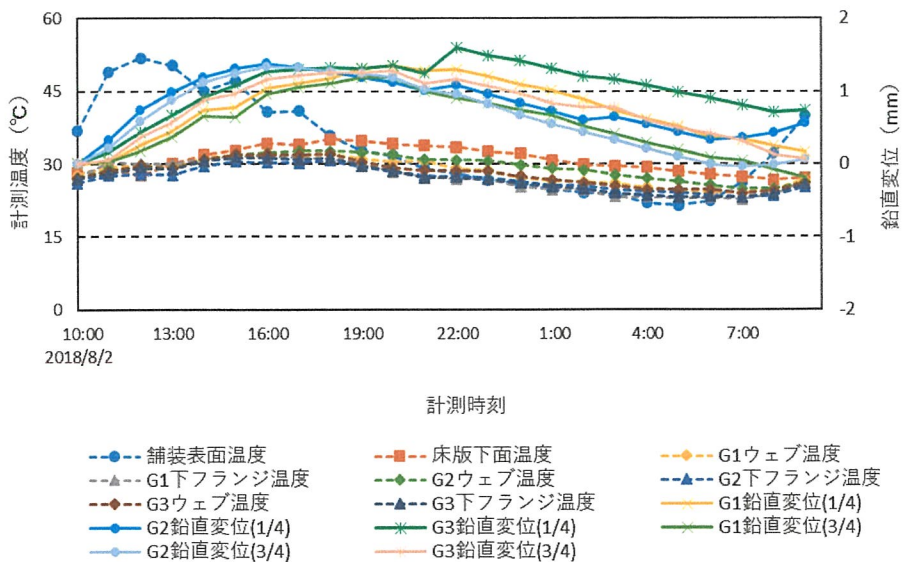


図-3.7 上部工の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答(1/4・3/4 支間部)

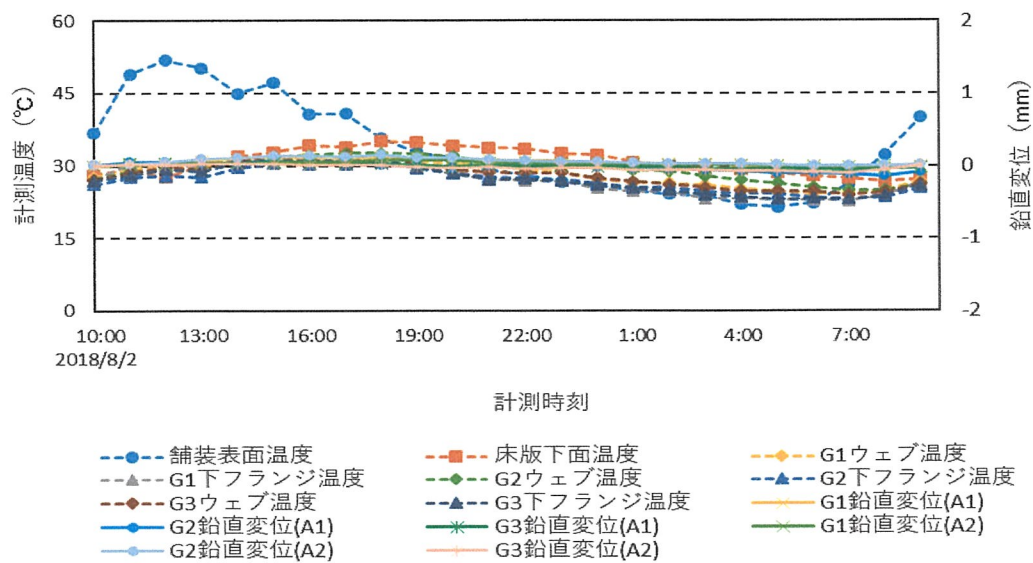


図-3.8 上部工の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答(支承部)

(2) 床版取替後

床版取替後の温度変化に伴う各支間の鉛直変位について図-3.9～図-3.11 に示す。温度変化と鉛直変位の関係については、床版取替前と同様に上部工部材の温度変化に伴い鉛直変位も周期的に変化する傾向が認められた。最大変位量は、図-3.9 に示すように支間中央 G2 で 1.783mm であった。床版取替前後で、鉛直変位量を比較すると床版取替後の方が大きくなった。床版取替前後では、床版取替後の方が橋梁全体の剛性は高くなっているため、変位は小さくなるはずである。そうならない理由の一つとしては、支間中央の横桁は床版取替前には床版下面と接着していたが、床版取替後は中間横桁と床版が離れた構造となっていることが考えられる。

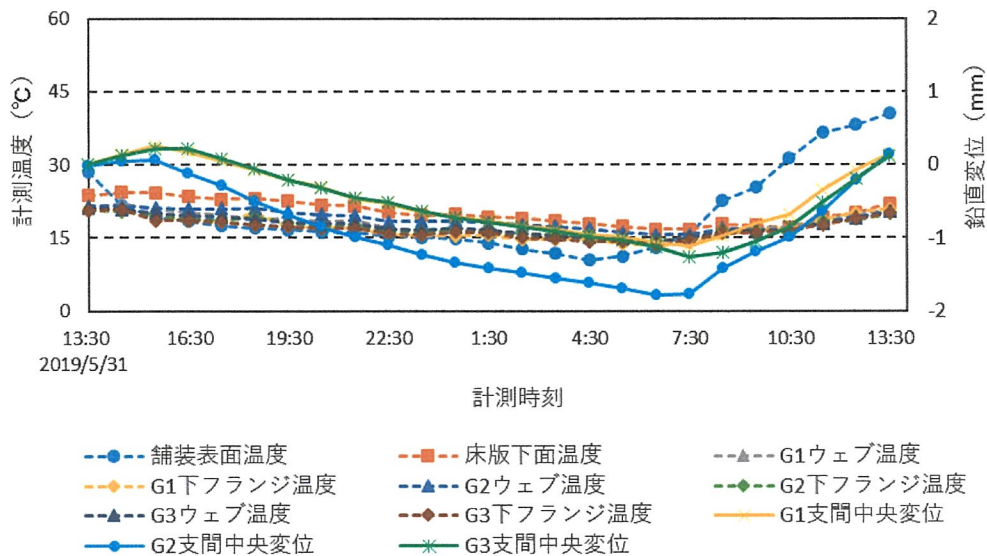


図-3.9 上部工部材の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答（支間中央）

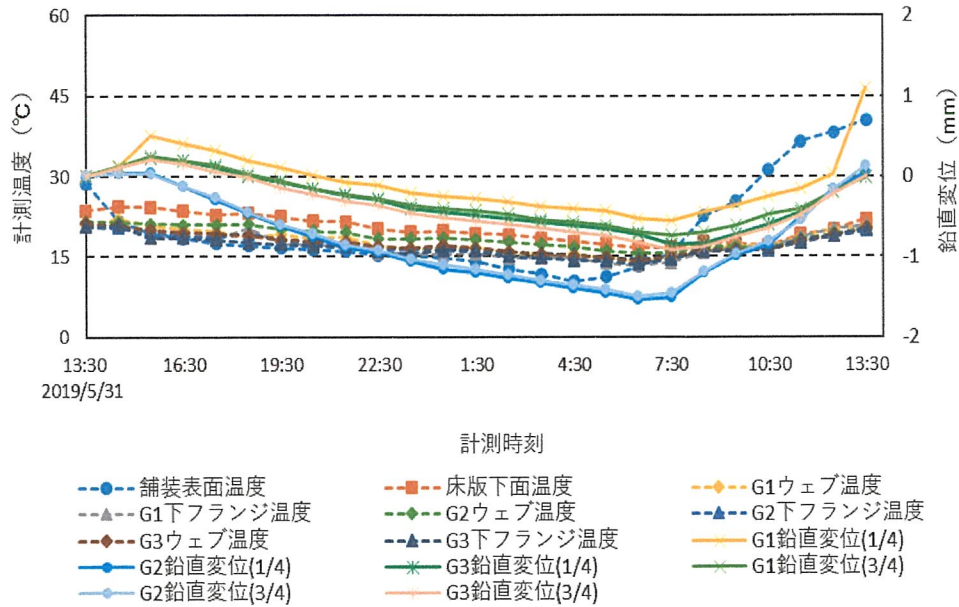


図-3.10 上部工部材の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答（支間 1/4・3/4 部）

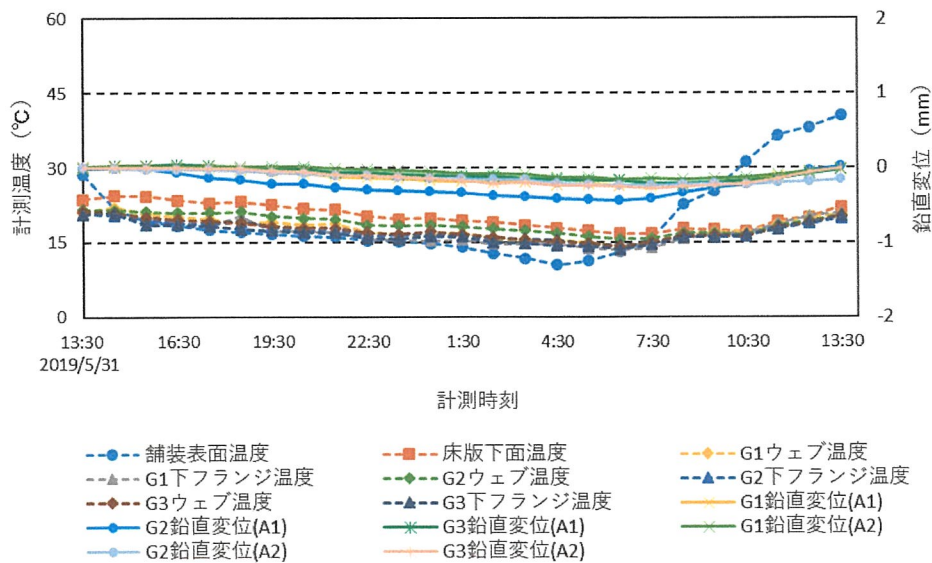


図-3.11 上部工部材の温度変化に伴う鉛直変位の時刻歴応答（支承部）

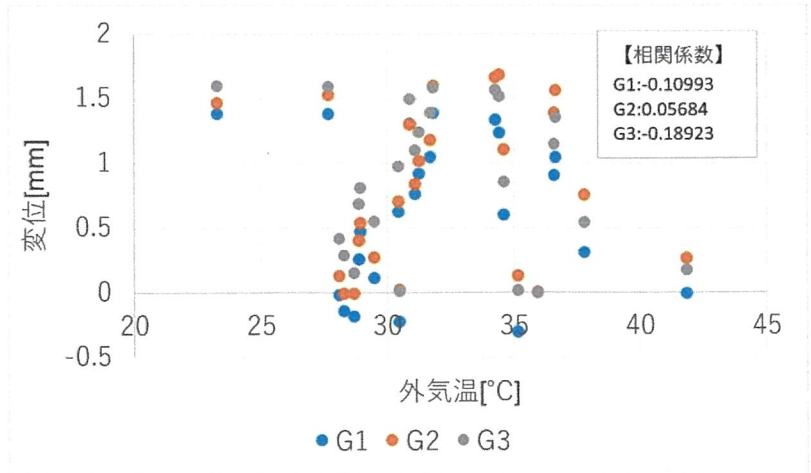
さらに計測温度と鉛直変位との関連性を調べるために、床版取替前後での 24 時間計測におけるそれぞれ外気温、各主桁の上フランジ、ウェブ、下フランジ、主桁平均温度、床版下面温度、断面内温度差、舗装表面温度に対する支間中央鉛直変位の時刻歴応答値との相関を調査した。主桁平均温度は各計測時刻におけるそれぞれの主桁の上フランジ、ウェブ、下フランジの平均温度としている。断面内温度差は、舗装表面温度と各主桁の下フランジの温度差とした。表-3.1 と表-3.2 を比較すると床版取替前の相関係数は、床版取替後に比べると相関係数が低くなる傾向にあった。床版取替前後に関わらず、主桁部材の温度と主桁平均温度、床版下面温度と鉛直変位の相関係数は高い傾向にある一方、外気温と断面内温度差、舗装表面温度との相関は低くなる傾向になった。このことから、橋梁に生じる鉛直変位の日変動は外気温や舗装表面温度ではなく上部工の主桁温度や床版下面温度に依存していると考えられる。図-3.11(a)～(e)に床版取替前の各計測温度と支間中央鉛直変位の分布図を、図-3.12(a)～(e)に床版取替後の同様の分布図を示す。

表-3.1 各計測温度と支間中央鉛直変位の相関係数(床版取替前)

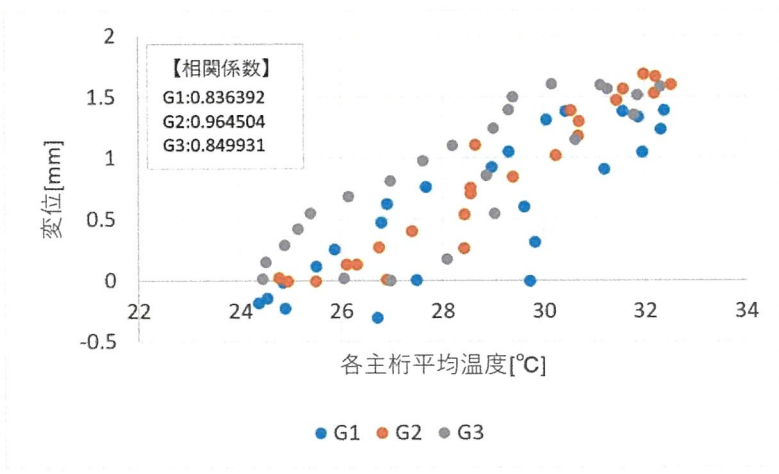
各計測温度項目	主桁 G1	主桁 G2	主桁 G3
外気温	-0.1099	0.05684	-0.1892
上フランジ温度	0.97246	0.90715	0.96835
ウェブ温度	0.82562	0.96011	0.75261
下フランジ温度	0.63921	0.90793	0.65950
主桁平均温度	0.83639	0.96450	0.84993
床版下面温度	0.97432	0.9215	0.9674
断面内温度差	-0.0785	0.15413	-0.16870
舗装表面温度	0.15114	0.35681	0.05543

表-3.2 各計測温度と支間中央鉛直変位の相関係数(床版取替後)

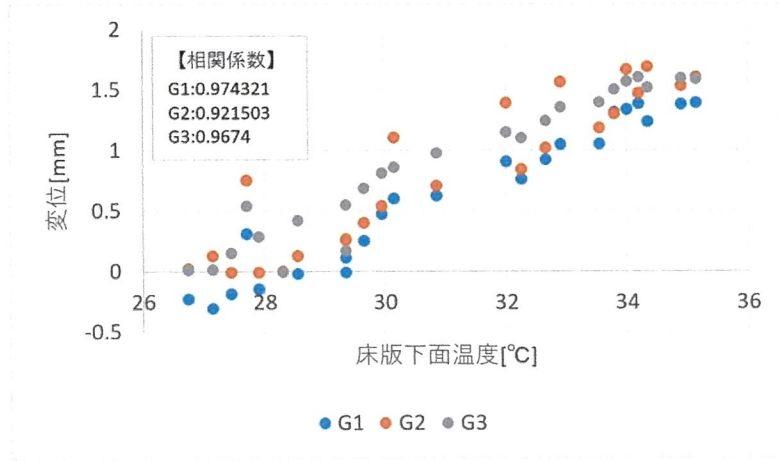
各計測温度項目	主桁 G1	主桁 G2	主桁 G3
外気温	0.63425	0.76221	0.53374
上フランジ温度	0.93483	0.6500	0.88743
ウェブ温度	0.96201	0.88379	0.9394
下フランジ温度	0.92117	0.96525	0.87586
主桁平均温度	0.97088	0.87239	0.94909
床版下面温度	0.92309	0.85957	0.9516
断面内温度差	0.23894	0.43649	0.16632
舗装表面温度	0.45851	0.60137	0.35034



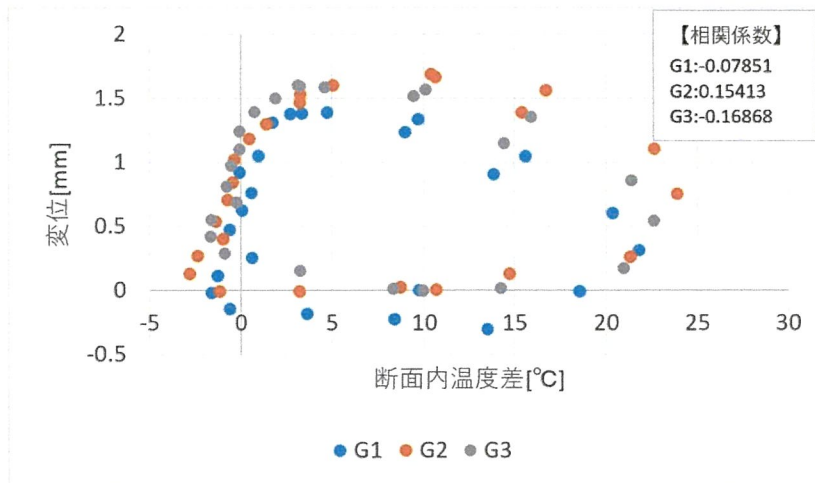
(a)外気温と鉛直変位



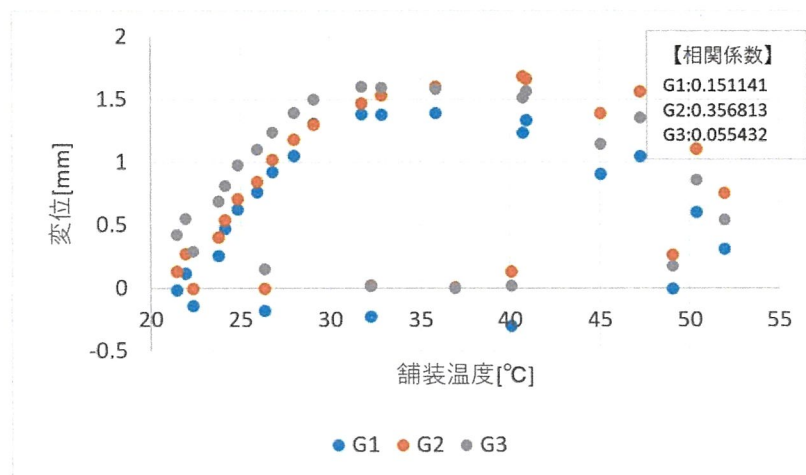
(b)各主桁平均温度と鉛直変位



(c)床版下面温度と鉛直変位

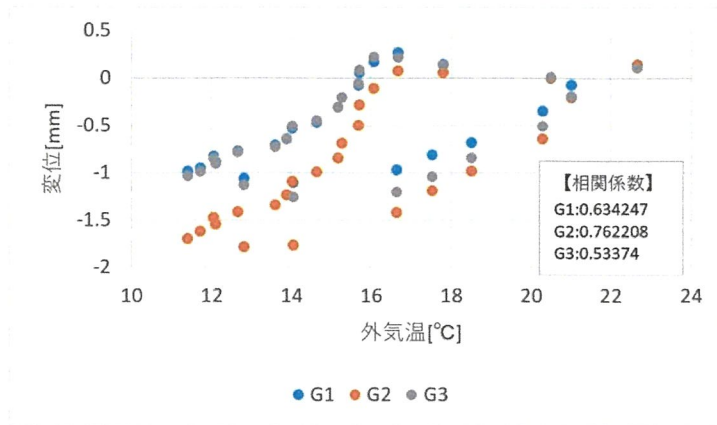


(d)断面内温度差と鉛直変位

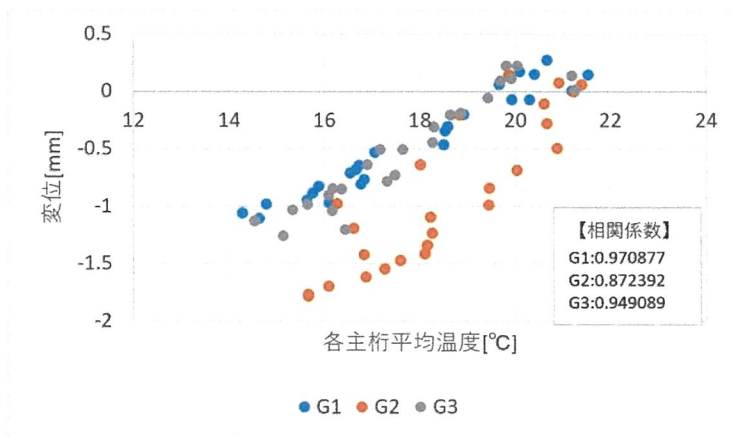


(e)舗装表面温度と鉛直変位

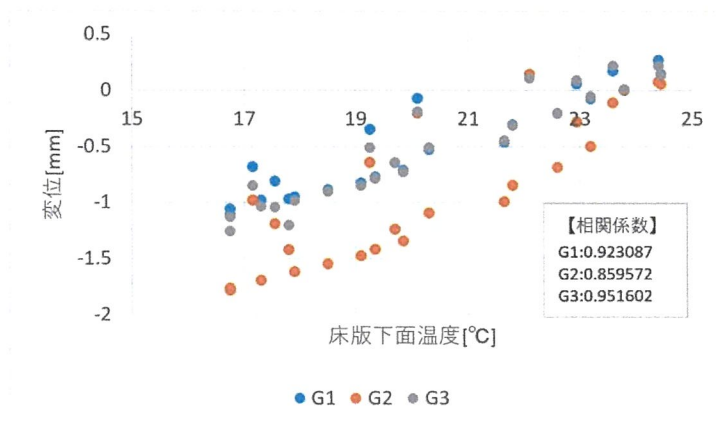
図-3.11 床版取替前の各上部工部材の計測温度と鉛直変位の分布図



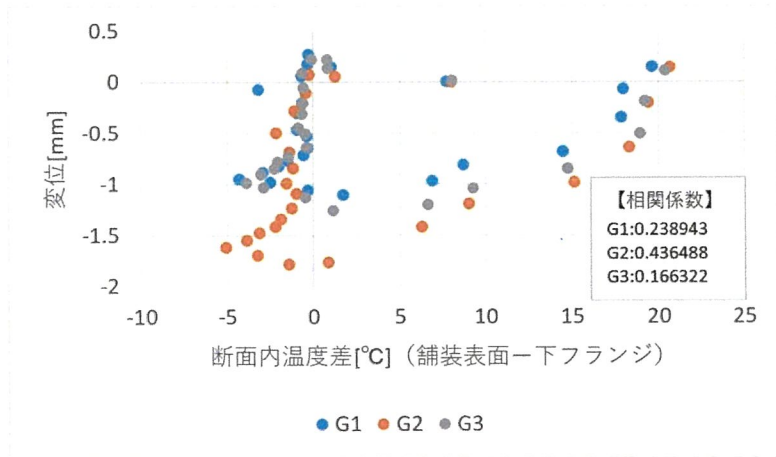
(a)外気温と鉛直変位



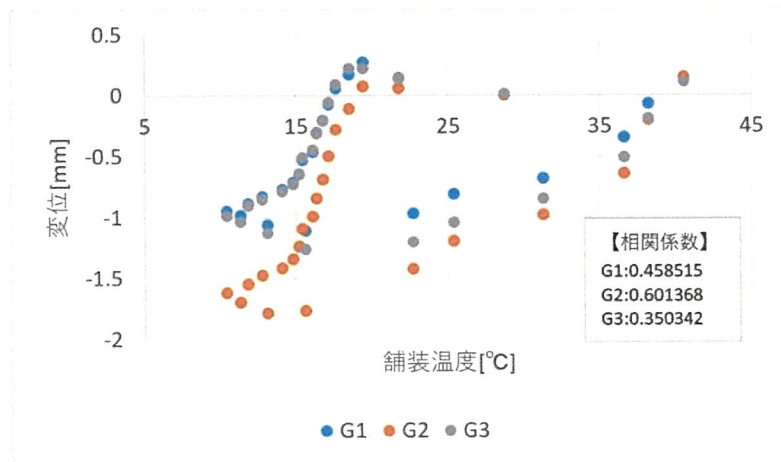
(b)各主桁平均温度と鉛直変位



(c)床版下面温度と鉛直変位



(d)断面内温度差と鉛直変位



(e)舗装表面温度と鉛直変位

図-3.12 床版取替後の各上部工部材の計測温度と鉛直変位の分布図

3.2.3 水平変位計測結果

図-3.13～図-3.16 に上部工部材の温度変化に伴う支承部における床版取替前後での水平変位計測結果を示す。水平変位の符号は、桁の支間中央に向かう変位を+、桁端に向かう変位を-としている。実線部は水平変位の計測結果である。点線部は図-3.3, 3.4 に示すように床版取替前後の上部工部材の温度変化の時刻歴である。

(1) 床版取替前

床版取替前の上部工部材の温度変化に伴う可動支承部(A1)と固定支承部(A2)の水平変位の結果について、それぞれ図-3.13, 3.14 に示す。ただし、主桁 G2 の A1 側の水平変位が 12:00 付近で急激に変化した部分は変位計のずれによる異常値と判断し、補正後に破線表示とした。両図から水平変位の計測結果は、可動支承側では最大値 0.07mm、固定支承側の最大値は 0.1mm と非常に小さい値であった。

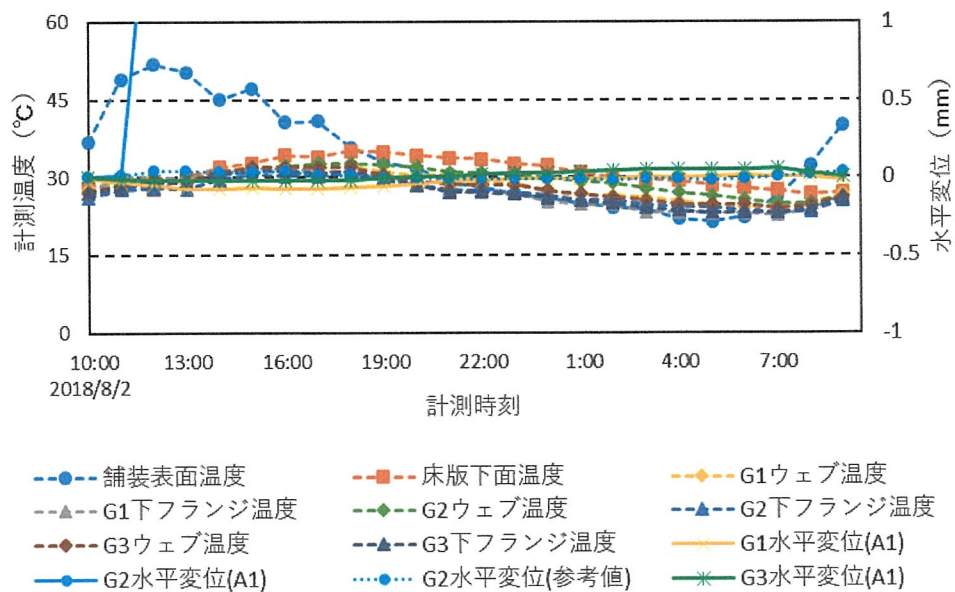


図-3.13 上部工部材の温度変化と支承部の水平変位（可動支承側）

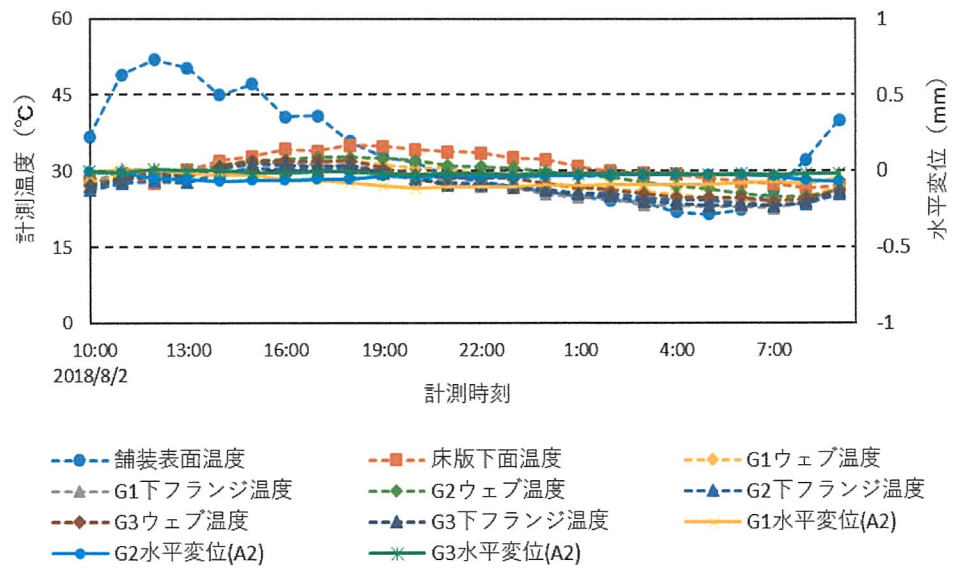


図-3.14 上部工部材の温度変化と支承部の水平変位（固定支承側）

(2)床版取替後

床版取替後の上部工部材の温度変化に伴う可動支承部(A1)と固定支承部(A2)の水平変位の結果について、それぞれ図-3.15, 3.16 に示す。水平変位の結果は、可動支承側では最大値 0.09mm 固定支承側では最大値 0.07mm であった。支承は床版取替前後で補修されていないため、おおよそ同じような値が得られた。

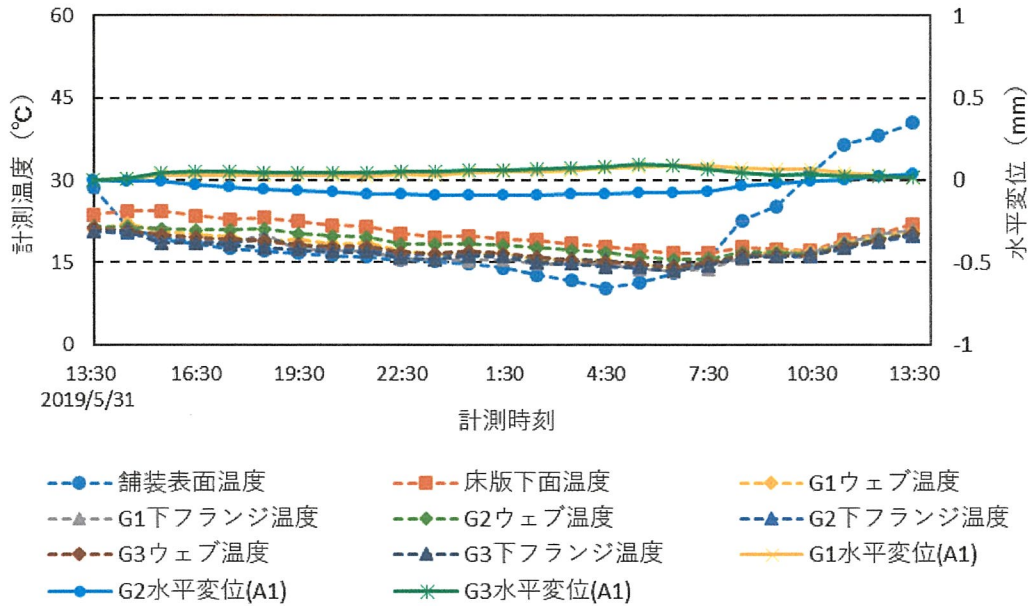


図-3.15 上部工部材の温度変化と支承部の水平変位（可動支承側）

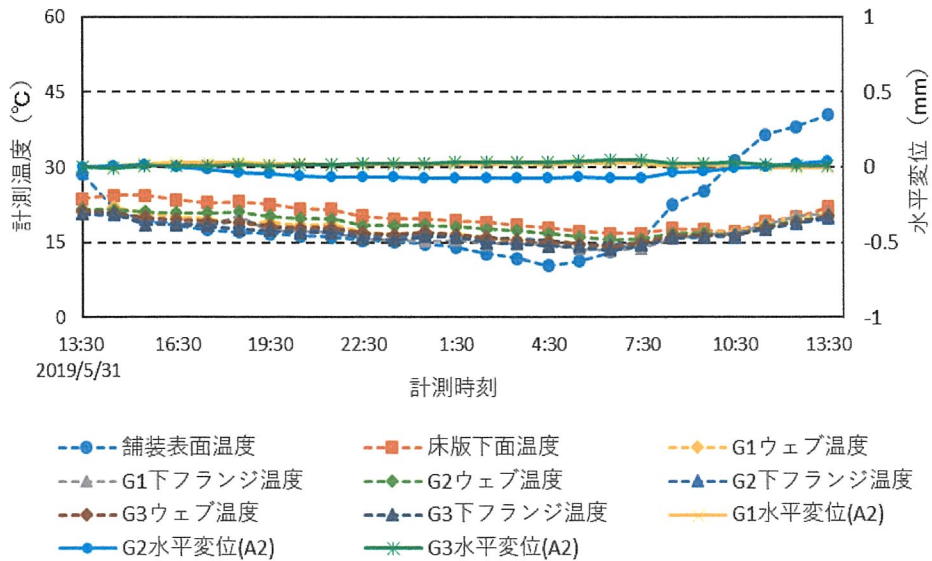


図-3.16 上部工部材の温度変化と支承部の水平変位（固定支承側）

支承部が正常に機能しているか確認するために温度変化による支承部の移動量を算出し実測値と比較する。道路橋示方書³⁸⁾による温度変化による支承部の移動量は次式(3.1)で求められる。

$$\Delta l_t = \Delta T \cdot \alpha \cdot l \quad (3.1)$$

ここで、 Δl_t ：温度変化による移動量 (mm)， α ：線膨張係数， l ：伸縮桁長 (mm)， ΔT ：温度変化の範囲を表す。

実験時の外気温の最高気温と最低気温の温度差は取替前 3.325°C，取替後 1.950°C であった。線膨張係数 12×10^{-6} を用いて移動量を算出すると床版取替前は 0.636mm，取替後は 0.373mm であり，算出された移動量と比較すると支承部の計測値は，取替前は約 1 割，取替後は約 3 割程度の移動量であった。現況の支承状態からも腐食等による劣化が認められるため，支承の機能低下が生じている可能性が推測された。

3.3 FEM解析

3.3.1 FEM解析概要

SolidWorks, HyperMesh を用いて、対象橋梁である赤山橋の 3 次元 FEM モデルを作成し、汎用構造解析ソフト ANSYS を用いて解析を実行した。本解析で用いた 3 次元 FEM モデルを図-3.17 に、その詳細について表-3.3 に示す。

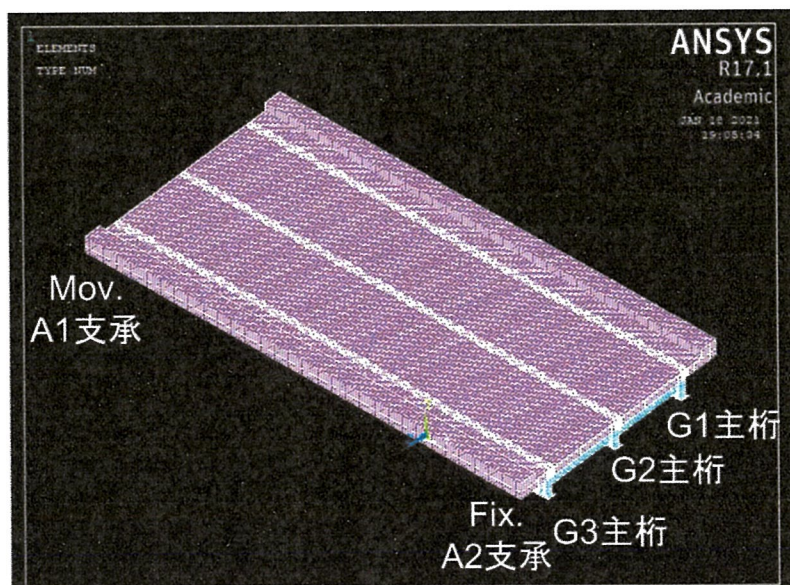


図-3.17 再現した 3 次元 FEM モデル（床版取替後）

表-3.3 3 次元 FEM モデルの詳細

	床版取替前	床版取替後
節点数	88482	78877
要素数	73077	62766
要素種類	コンクリート部材：Solid 要素	
	鋼部材：Shell 要素	

本解析で使用した物性値を表-3.4 に示す。それらの値は道路橋示方書³⁸⁾、赤山橋架橋当時の鋼道路橋設計示方書及び鋼単純 H 桁橋カタログを参考に決定している。表-3.5 に本解析に使用した主桁、床版、舗装のヤング係数値を示す。床版のヤング係数の値に関しては、床版取替工事の際に実施した床版のコア抜き試験結果の値を採用した。解析条件及び解析ケースは、現地試験で確認された現況利用実態から推定した。以下に詳細を示す。

1)主桁の温度については、各主桁の上フランジ・下フランジ・ウェブ、横桁にそれぞれ赤外線サーモグラフィで得られた表面温度を入力した。

2)床版コンクリートの温度は、桁間の床版下面で計測された温度を床版厚内に一定の温度として入力した。

3)支承のモデル化に際しては支承部の腐食による劣化状況を考慮し、支承条件を架設当時の初期条件である「pin 支点+roller 支点」から水平移動完全拘束条件である「pin 支点+pin 支点」と想定することで現橋の日周期挙動の再現を試みた。

4)解析時間刻みに関しては、24 時間計測試験の結果から、各上部工部材の温度変化及び鉛直変位は周期的に変化することが確認できたため、3 時間ごとに解析を実施した。

5)解析データの処理方法は、鉛直変位の実測値のうち上部工全体の温度のばらつきが少ない時間帯（床版取替前は 2018 年 8 月 2 日 10:00、床版取替後は 2019 年 6 月 1 日 7:30）において、解析値の鉛直変位が 0（基準値）となるように補正を行っている。

表-3.4 本解析に用いた物性値

項目	部材	物性値
ポアソン比	床版	0.167
	主桁	0.3
熱膨張係数 [1/°C]	床版	1.2×10^{-5}
	主桁	1.2×10^{-5}

表-3.5 本解析に用いたヤング係数(N/mm²)

	床版取替前	床版取替後
主桁	2.0×10^5	2.0×10^5
床版	1.46×10^4	3.1×10^4
アスファルト舗装	2.0×10^3	2.0×10^3

3.3.2 FEM 解析結果と考察

24 時間計測試験から得られたデータを実測値，FEM 解析から得られたデータを解析値として処理した．図-3.18， 3.19 はそれぞれ床版取替前後の支間中央鉛直変位の実測値と解析値の比較した図である．両図において実線は解析値を，点線は実測値を示している．

図-3.18 より床版取替前の実測値と解析値を比較すると「pin-pin」支承モデルでは全体的な挙動は類似しているものの，変位量については約 2 倍近く大きくなった．一方で，「pin-roller」では，最大変位量は同じような値ではあるが挙動に位相差が生じていることが確認できた．日照の影響が大きい時間帯では，実測値と解析値の差が大きくなった．これらのことから，解析には反映できない日照等の要素が実測値には影響していると考えられる．また実際の床版では，FEM モデルに反映できていない内部の水平ひび割れや損傷等が生じていたことや床版上面と下面の温度が異なっていた等により，解析値との差が大きくなった可能性も考えられる．

図-3.19 より床版取替後の実測値と解析値を比較すると，「pin-roller」支承モデルでは，実測値と解析値の値がおおむね一致したが「pin-pin」支承モデルではほとんどの時間帯において解析値の値が 2 倍以上大きな値になった．「pin-roller」支承モデルでは，降雨のあった時間帯で実測値と解析値の値が概ね一致しているが，天候が回復している時間帯においては，実測値と解析値の誤差が大きくなっている．床版取替前に比べると，床版取替後の床版剛性は増加しているので，「pin-pin」支承モデルの実測値と解析値が合わないのは支承の機能低下が大きいためと考えられる．今後の課題としては，可動支承にバネモデルを導入して解析することも考えられる．

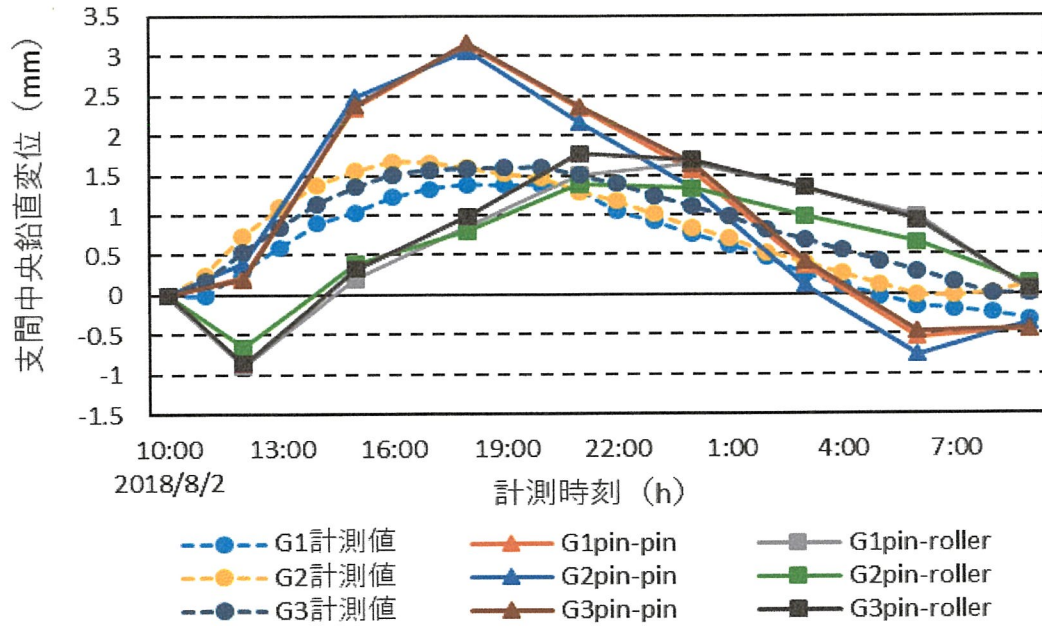


図-3.18 支間中央鉛直変位の実測値と解析値の比較 (床版取替前)

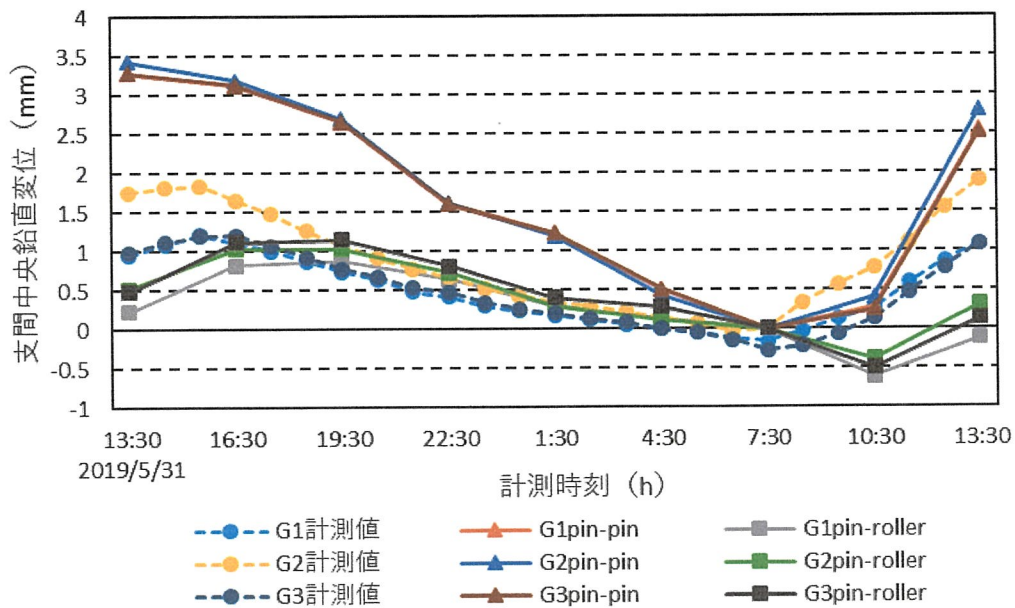


図-3.19 支間中央鉛直変位の実測値と解析値の比較 (床版取替後)

次に、床版の剛性変化が橋梁の鉛直変位挙動にどの程度影響があるのか検討するために床版の剛性を変化させてFEM解析を実施した。なお、床版剛性の変化は、床版のヤング係数を変化させることで考慮した。解析モデルは床版取替後のモデルを使用した。床版のヤング係数については、道路橋示方書で定められる基準を下回ることも考慮し、取替前床版のコア供試体を用いた静弾性係数の結果と道路橋示方書を参考に決定した。FEM解析時の各部材温度については床版取替後の計測値を用いた。図-3.20, 3.21 はそれぞれ「pin-pin」支承と「pin-roller」支承における床版剛性変化に伴う主桁 G2 の支間中央鉛直変位の時刻歴応答を比較した図である。図-3.20 に示す「pin-pin」の支承条件では、剛性が高くなるにつれ鉛直変位の値は小さくなったが、その差は最大で 0.2mm 程度である。しかし、図-3.21 に示す「pin-roller」支承では剛性が高くなるにつれて鉛直変位の値も大きくなったが、その差は「pin-pin」支承と同様に 0.2mm 程度である。支承条件に係わらず約 50%の剛性低下率では、鉛直変位にはあまり影響を与えないようである。しかし、再現した FEM モデルでは床版内部の水平ひび割れなどが再現できていないため、それらの影響については今後検討が必要である。

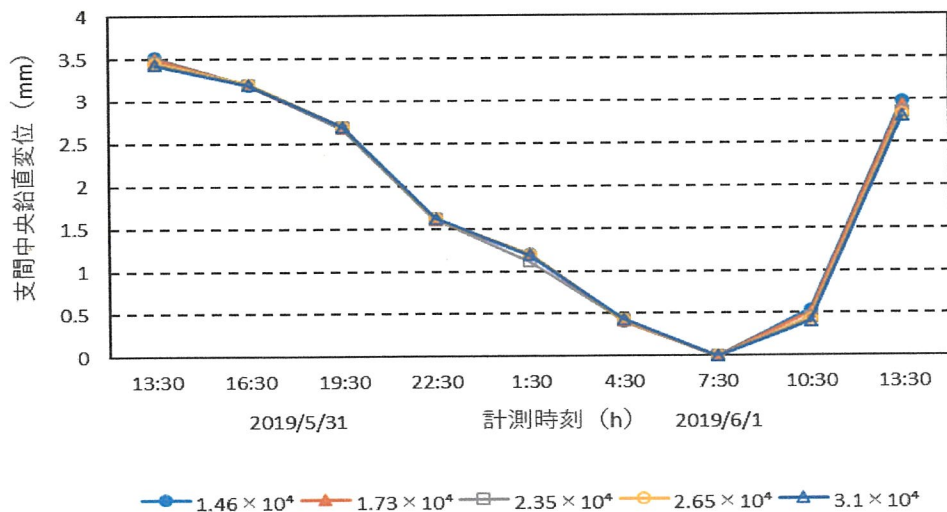


図-3.20 床版の剛性変化に伴う支間中央鉛直変位挙動の比較
(単位 : N/mm², 支承条件 : pin-pin)

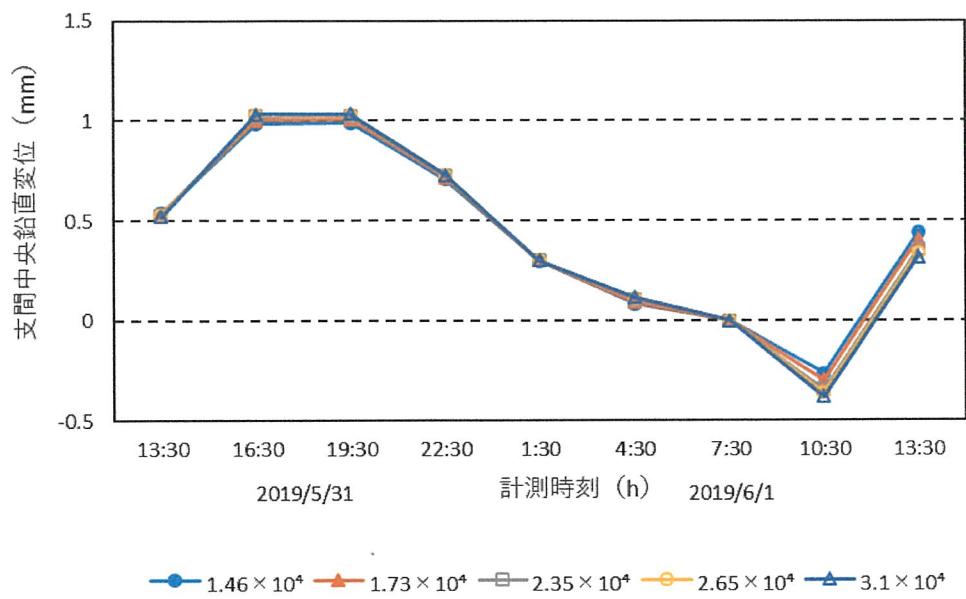


図-3.21 床版の剛性変化に伴う支間中央鉛直変位挙動の比較
(単位：N/mm²，支承条件：pin-roller)

3.4 24 時間計測試験のまとめ

日照による橋梁の部材温度変化の影響で繰り返される日周期挙動を把握するため、赤外線カメラ及び変位計を用いて対象橋梁において上部工の橋体温度分布、各主桁の鉛直変位、各支承部の水平変位の 24 時間計測試験を行う方法を検討した。橋体温度分布計測結果から、特に舗装表面温度は日照や天候の影響を受けやすいことが分かった。一方で、床版下面や主桁部材は舗装からの熱伝導に数時間程度要することが確認され、舗装表面と比べると温度変化が鈍い傾向にあることが赤外線カメラのサーモグラフィ画像から明らかになった。各主桁の鉛直変位計測では、床版取替前後ともに上部工部材の温度変化に伴い鉛直変位も周期的に変化する傾向があることが分かった。床版取替前後で鉛直変位量を比較すると、床版取替後の方が変位量が大きくなった。これは床版取替後に中間横桁と床版下面が離れた構造に変更されたことが要因と考えられる。水平変位の計測においては床版取替工事では支承の補修はなく、取替前後の水平計測ではいずれも 0.1mm 以下の非常に小さな値が計測され支承の腐食等による機能低下が生じている可能性が推測される。

また、計測温度と鉛直変位の関連性を調べるために、床版取替前後における上部工各部材の計測温度と支間中央鉛直変位との間に 24 時間計測値の分布図を作成し相関係数を用いて評価する方法を提案した。それらの評価の結果、床版取替前後に関わらず各主桁の支間中央鉛直変位は床版下面温度と各主桁の上下フランジ、ウェブの温度との相関が強く、外気温や舗装表面温度との相関は弱いことが分かった。これにより、相関係数の高い計測点の組み合わせが分かれば、それらの最小で最適な計測点でのみ 24 時間温度計測を行うことで健全度評価に利用できると考えられる。

対象橋梁の 3 次元 FEM モデルを作成し、床版のヤング係数や支承条件を変化させて 24 時間計測試験を再現する解析を実施した。床版取替前の支間中央鉛直変位の実測値と解析値を比較すると、「pin-pin」支承モデルでは全体的な挙動は類似していたが、最大変位は解析値が実測値の約 2 倍大きくなった。その一方で「pin-roller」支承モデルでは同じような変位量になるが挙動に位相差が生じた。日照の影響が大きい時間帯では実測値と解析値の差が大きくなり、解析には反映できない日照等の要素が実測値には影響していると考えられる。また FEM モデルには実際の床版に生じていた水平ひびわれや損傷が反映できていないため、それらの影響で実測値との差が大きくなった可能性が考えられる。床版取替後の実測値と解析値を比較すると、「pin-roller」支承モデルでは実測値と解析値は概ね一致したが、「pin-pin」支承モデルではほとんどの時間帯で解析値が 2 倍以

上大きな値となった。床版取替後の床版剛性は取替前に比べて向上しているの
で、「pin-pin」支承モデルの実測値と解析値が合わないのは支承の機能低下が強
すぎるためと考えられる。

第4章

小型 FWD 試験による検討

4.1 小型 FWD 試験概要

本章では、TML 式小型 FWD システム「FWD-Light」を使用して衝撃振動試験を実施した。図-4.1 に示す小型 FWD 試験機は重錘とその落下機構、載荷盤で構成され、変位計とロードセルを内蔵している。小型 FWD は通常の FWD と比べ人力またはキャリアで持ち運びができる程度の大きさで可搬性に優れるため、短時間で多数の計測点で計測が可能である。高さを固定した落下機構から重錘が棒状のガイドに沿って自由落下することで、床版に安定した衝撃力を与えることができる。本章における試験では重錘重さを 25kg、落下高さを 1m としている。

また、外部センサとして図-4.2 に示すサーボ式加速度計を併用し、衝撃振動による鉛直方向の加速度計測を行った。加速度計はリオン社製のサーボ式加速度計 (LS-10C) を使用し、東京測器研究所製のマルチレコーダ (TMR-200) を使用して記録を行った。加速度計測のサンプリング間隔は 0.1ms である。図-4.3 に加速度計を用いた小型 FWD 試験状況を示す。

衝撃振動試験の加速度計測は橋梁全体の振動特性の把握を目的とした橋梁全体系計測と、床版内の局所的な振動の計測を目的とする床版パネル系計測の 2 つの方法で行った。1 つの打撃点につき、3 回以上の打撃を行っている。

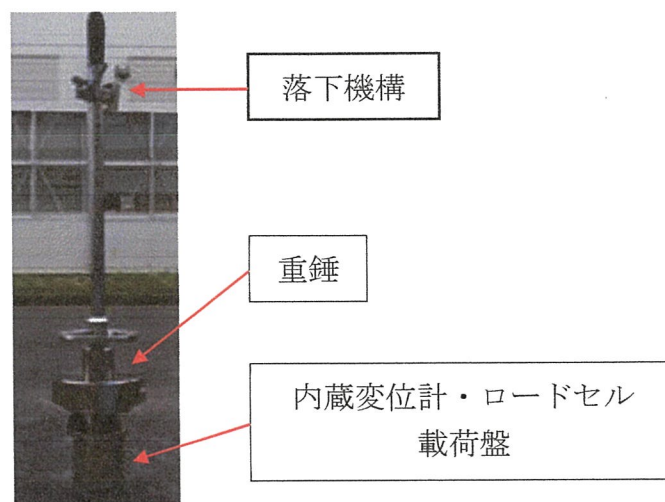


図-4.1 小型 FWD 試験機本体

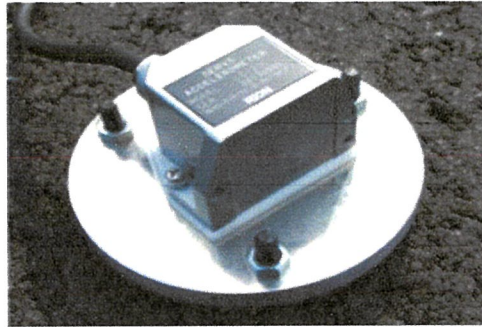


図-4.2 サーボ式加速度計



図-4.3 加速度計を用いた小型 FWD 試験実施状況

4.1.1 橋梁全体系計測

橋梁全体系計測における床版取替前後の打撃点と加速度計の配置を図-4.4 に示す。3本の主桁（G1～G3）が横桁と交差するそれぞれ支間 1/4、1/2、3/4 点の合計 9 点を小型 FWD の打撃点および加速度の計測点とし、それぞれの点の打撃において 9 測点の応答加速度の同時計測を行った。なお、床版取替後の計測では計測機器に不具合が確認されたため 6 台の加速度計で試験を実施している。1 つの打撃点に対し、支間 1/4 点と 1/2 点、または 1/2 点と 3/4 点の 2 パターンの加速度計配置で計測した。

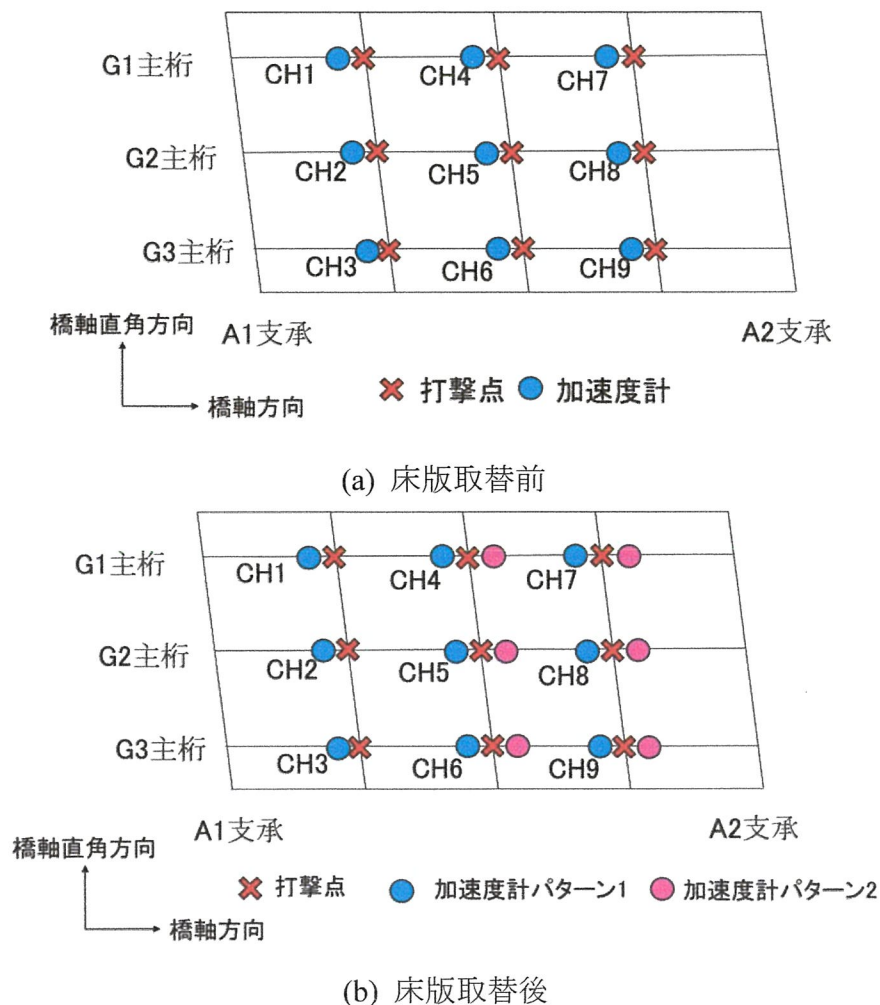


図-4.4 橋梁全体系計測における打撃点と加速度計配置パターン

4.1.2 床版パネル系計測

床版パネル系計測では、主桁と中間横桁に囲まれた床版の範囲を 1 つの計測範囲（パネル）とし、各パネルに関して試験を行った。図-4.5 に床版のパネル分割を示す。打撃点は各パネルの中央とし、加速度の計測点は橋軸方向および橋軸直角方向に 4 等分するように十字型に配置した。なお、床版取替前は 3 台の加速度計で 6 パターン、床版取替後は 5 台の加速度計で 2 パターンの配置により試験を実施した。図-4.6 にパネル内における打撃点と計測点の配置および計測パターンを示す。

RC 床版と支間中央横桁は、床版取替前は接着しているが、床版取替後は接着していない。このため、床版取替前はパネル毎の振動特性が把握でき、対して床版取替後はパネル 1 と 2、パネル 3 と 4 が一体となった振動を示すものと考えられる。

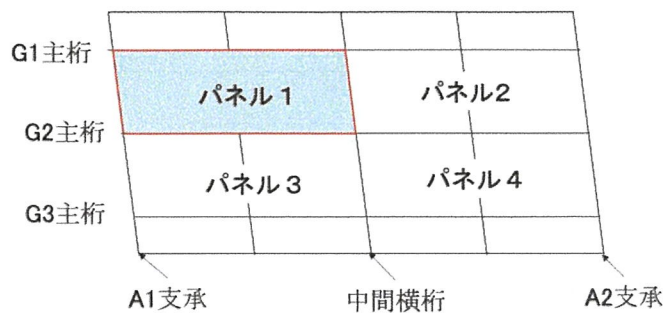


図-4.5 床版パネル分割図

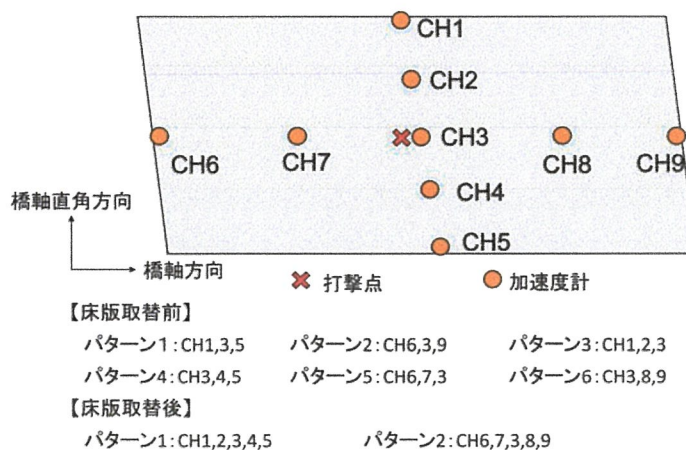


図-4.6 床版パネル系計測における各パネル内の打撃点と応答加速度の計測点および配置パターン

4.2 固有振動数による検討^{39),40)}

4.2.1 高速フーリエ変換 (FFT) 概要

小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験で計測した応答加速度の時刻歴データに対し、2.3 節で述べたのと同様に高速フーリエ変換 (FFT) を実行することで、振幅スペクトルと位相差スペクトルが得られる。この得られた振幅スペクトルと位相差スペクトルから、対象橋梁の固有振動数を求めた。

図-4.7 に小型 FWD 試験で得られた応答加速度波形の一例を示す。横軸は時間、縦軸は加速度 (m/s^2) を示している。小型 FWD 試験では自由落下した重錘がゴムバッファに衝突することで床版に衝撃力を与えている。重錘はゴムバッファの反発弾性によってバウンドするため、図-4.7 の赤い枠で示した部分のように複数回の衝撃が発生し応答加速度にも複数のピークが確認される。これによって生じるリバウンド波形の影響を小さくするため重ね合わせ処理を実施した。各打撃点で複数回打撃したデータで、打撃点における最大値以降の波形を全計測点で重ね合わせている。図-4.8 に重ね合わせ処理を行った後の加速度波形を示す。複数回のデータを重ね合わせることでより振動波形の振動成分の大小差が大きくなるため、FFT による振幅スペクトルの卓越が明瞭に得られるようになる。

FFT を行う際には、周波数分解能をできるだけ小さくし、精度を高める必要がある。FFT による振動特性の特定精度に影響する周波数分解能 ($\Delta\omega$) は式(4.1)によって求まる。

$$\Delta\omega = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \quad (4.1)$$

ここで Δt : サンプル間隔, n : データ数

本章の小型 FWD を用いた衝撃振動試験で計測した加速度データは、サンプル間隔が 0.1ms, データ数が 2^{15} (32768) 個で、周波数分解能は約 0.31Hz である。図-4.9 に FFT によって得られる振幅スペクトルと位相差スペクトルの一例を示す。小型 FWD 試験においても 2.3 節と同様に、振幅が卓越し位相差が -90° (270°) を示す振動数を卓越振動数とした。

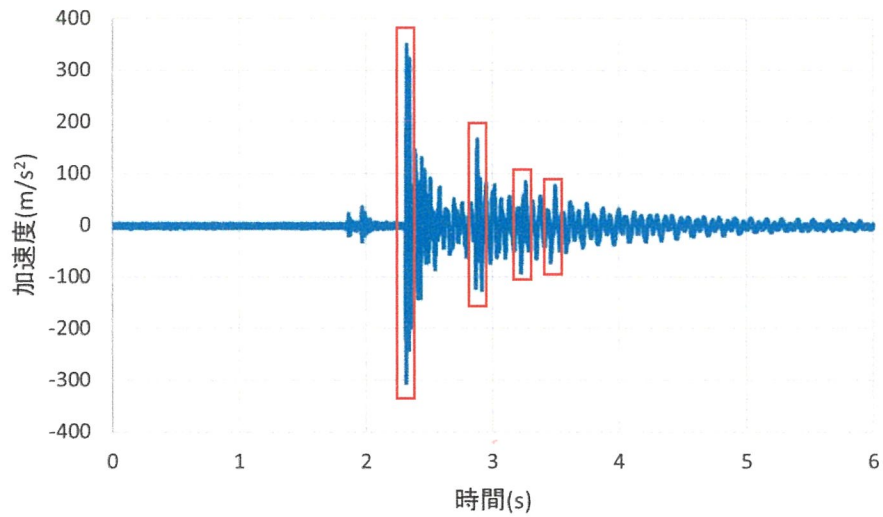


図-4.7 応答加速度波形の一例

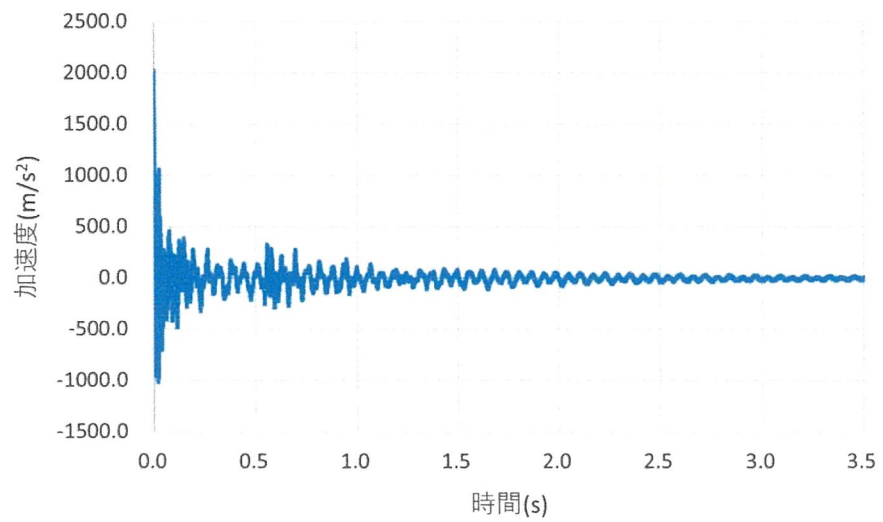
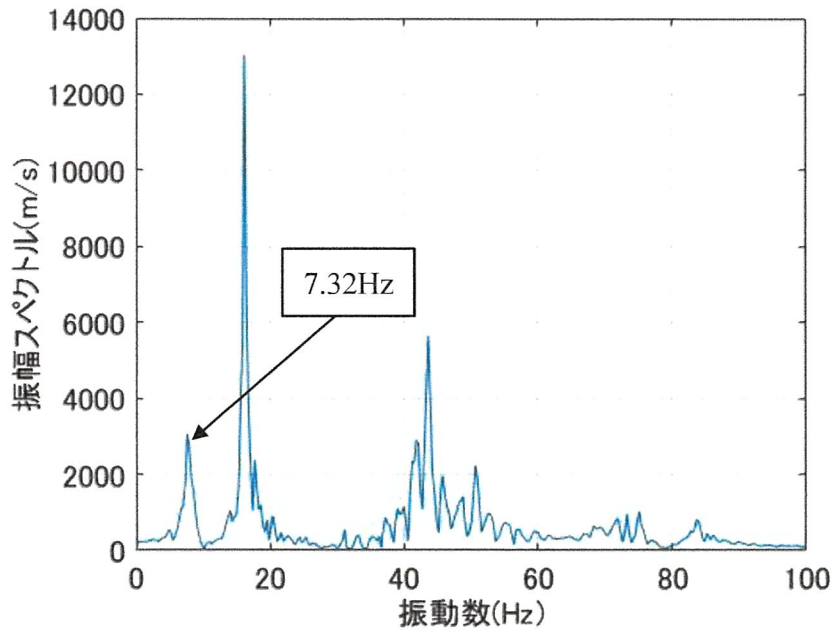
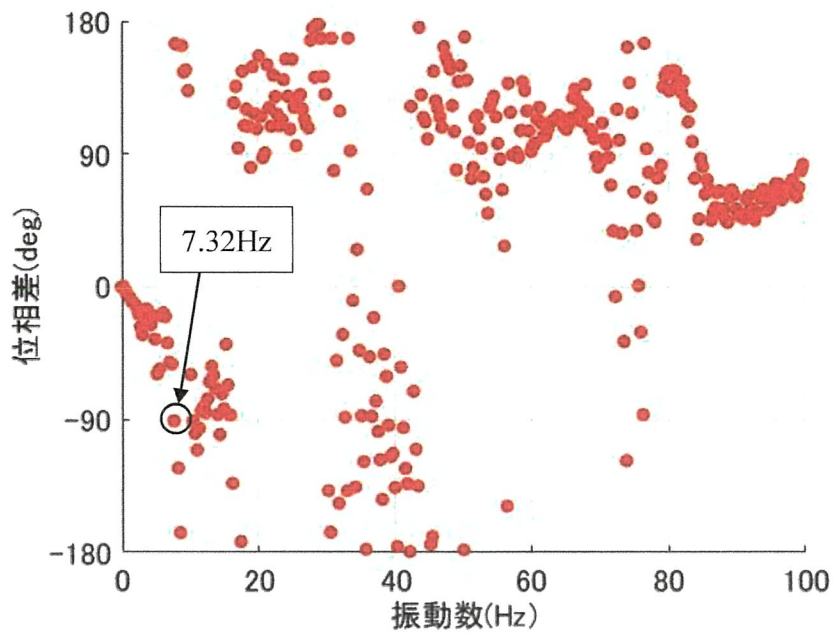


図-4.8 重ね合わせ処理後の応答加速度波形



(a) 振幅スペクトル



(b) 位相差スペクトル

図-4.9 FFT 解析から得られる振幅及び位相差スペクトル例

4.2.2 橋梁全体系計測結果

小型 FWD 試験結果として、図-4.10 及び図-4.11 に G2, G1 桁支間中央 (CH5, CH4) を打撃した際の打撃点における床版取替前後の振幅スペクトルを示す。最低次の卓越振動数として図-4.10 より床版取替前は 7.32Hz, 床版取替後は 7.94Hz が得られた。図-4.11 のように G1 桁支間中央を打撃した際には、G2 桁支間中央打撃時の卓越振動数に加えて、床版取替前は 8.55Hz, 床版取替後は 8.85Hz の卓越振動数が算出された。

小型 FWD で G2, G1 桁支間 1/4 点 (CH2, CH1) を打撃した際の打撃点の床版取替前後の振幅スペクトルを図-4.12 及び図-4.13 に示す。支間 1/4 点を打撃した際には支間中央打撃時の卓越振動数に加えて、床版取替前で 18.9Hz, 床版取替後では 21.1Hz の卓越振動数が算出された。さらに G1 桁支間 1/4 点を打撃した際には、床版取替前で 21.1Hz, 床版取替後 22.6Hz の卓越振動数が特定された。

なお、図-4.10～図-4.13 の各卓越振動数の特定に際しては、各振幅スペクトルに対応する位相差スペクトルを考慮して決定しているが、ここでは省略している。

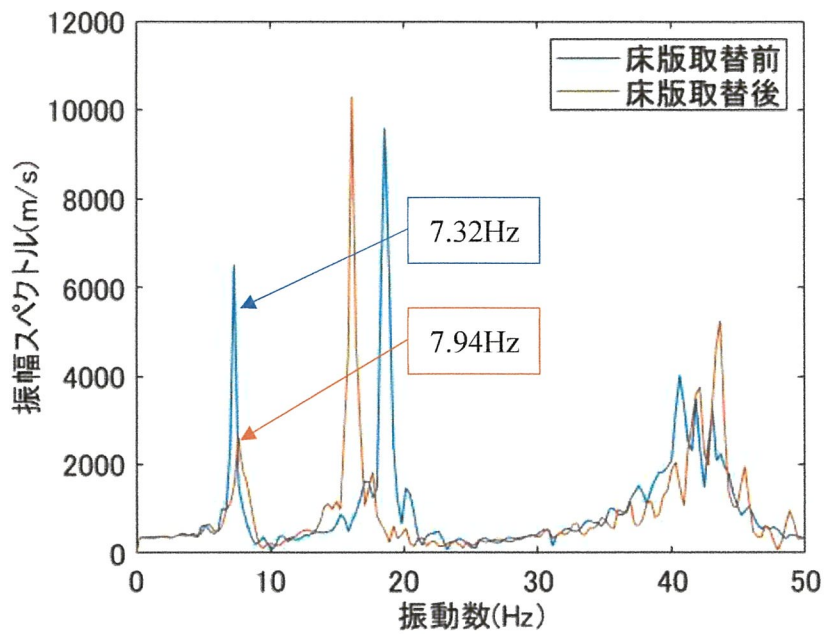


図-4.10 小型 FWD 試験において G2 桁支間中央 (CH5) を打撃した際の床版取替前後の振幅スペクトル

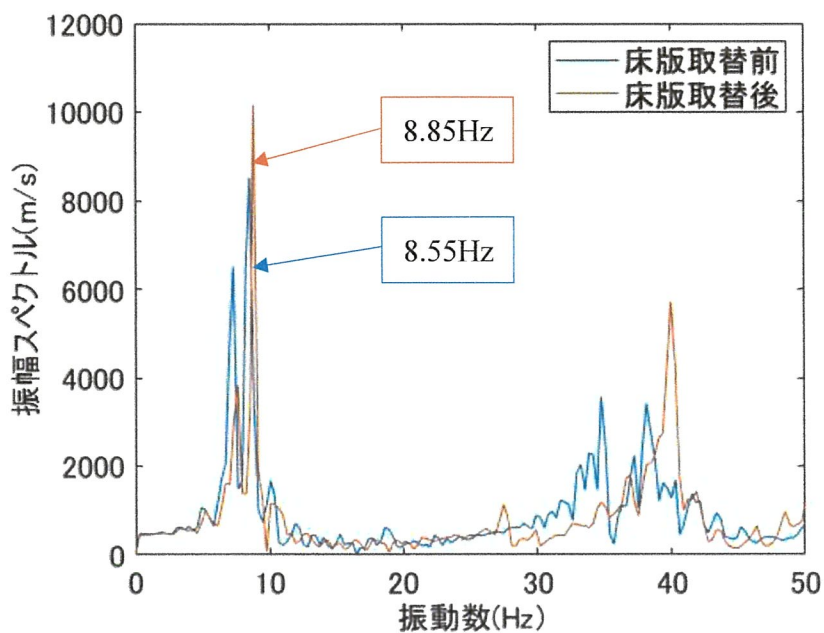


図-4.11 小型 FWD 試験において G1 桁支間中央 (CH4) を打撃した際の床版取替前後の振幅スペクトル

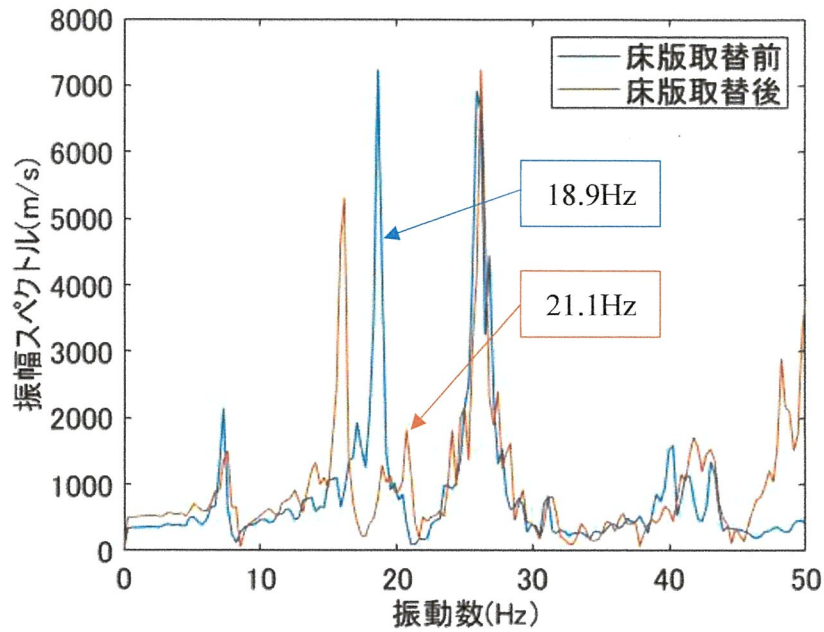


図-4.12 小型 FWD 試験において G2 桁支間 1/4 点 (CH2) を打撃した際の床版取替前後の振幅スペクトル

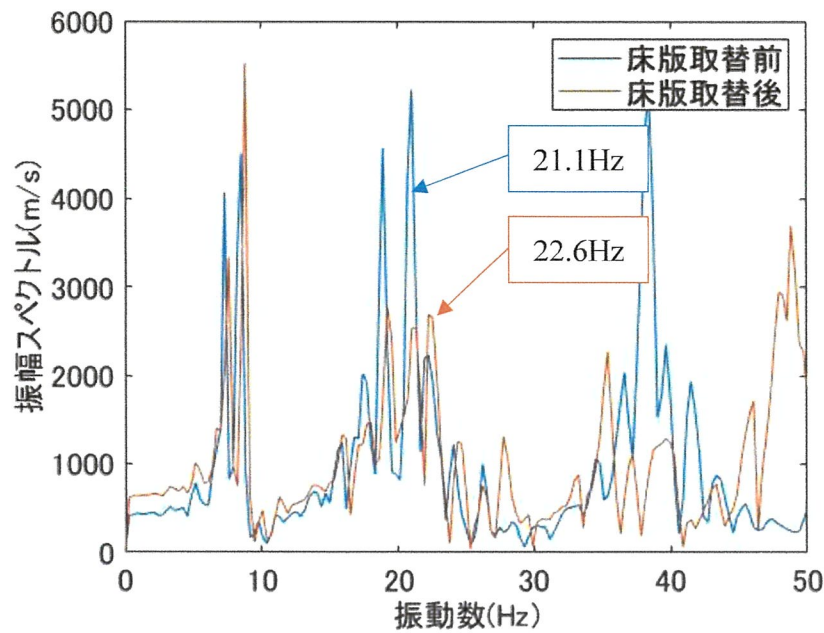


図-4.13 小型 FWD 試験において G1 桁支間 1/4 点 (CH1) を打撃した際の床版取替前後の振幅スペクトル

次に FFT によって得られる各測点の振幅スペクトルと位相差スペクトルを用いて振動モードと固有振動数を特定した。打撃点で位相差が $-90^\circ(270^\circ)$ 付近を示す卓越振動数において、同時に得られる各計測点の振幅 a_n と位相角 b_n を用いて式(4.2)から求まる比率により振動モード形状を特定する。

$$a_1 \sin(b_1) : a_2 \sin(b_2) : \dots : a_n \sin(b_n) \quad (4.2)$$

ただし n : CH 番号 (1~9)

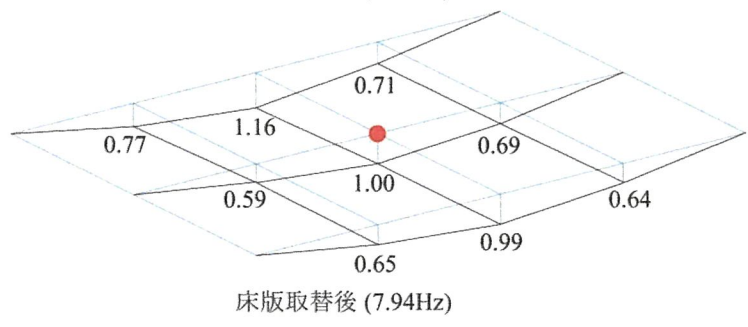
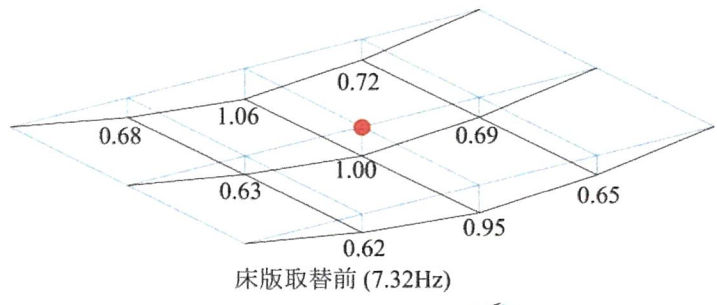
図-4.14 に小型 FWD 試験によって得られた卓越振動数のモード形状を示す。式(4.2)より打撃点を1.0とした比率で描画している。図中の赤丸は打撃点を示す。図-4.14 より小型 FWD 試験結果における最低次の卓越振動数である 7.32Hz および 7.94Hz は、支間中央が振動の腹となる曲げ 1 次振動モードを励起する固有振動数である。さらに、G1 桁支間中央打撃時に得られる卓越振動数では、両側の外桁振動の向きが逆向きとなるねじれ 1 次振動モードが励起される。また、支間 1/4 点を打撃した際には、支間中央が節、支間 1/4 および 3/4 点が腹となる 2 次振動モードを励起する固有振動数が現れることが分かった。

小型 FWD 試験から得られた各振動モードの固有振動数を表-4.1 に示す。なお、比較のため 2.3 節で述べた車両走行試験の結果も同表に掲載する。小型 FWD 試験と車両走行試験の両試験の結果から、床版取替前後とも非常に近い値の固有振動数が得られた。床版取替前の車両走行試験では曲げ 2 次振動モードを励起する固有振動数が得られなかったが、小型 FWD 試験を行った結果では 18.9Hz で励起することが確認された。

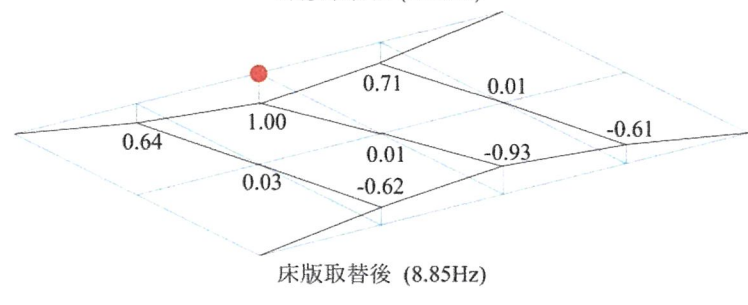
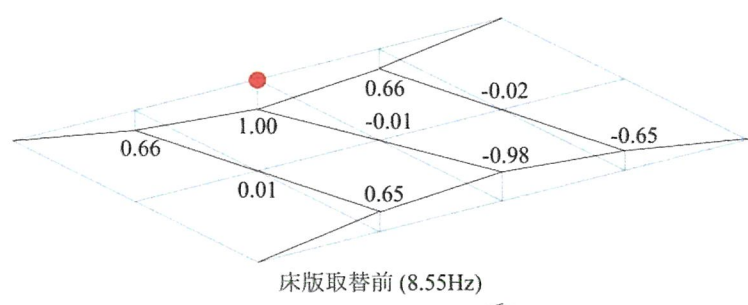
両試験ともに、各振動モードにおける固有振動数の値が床版取替後の試験で増加しており、これらは床版取替による床版剛性の上昇に起因しているものと考えられる。

表-4.1 振動モードと床版取替前後の固有振動数

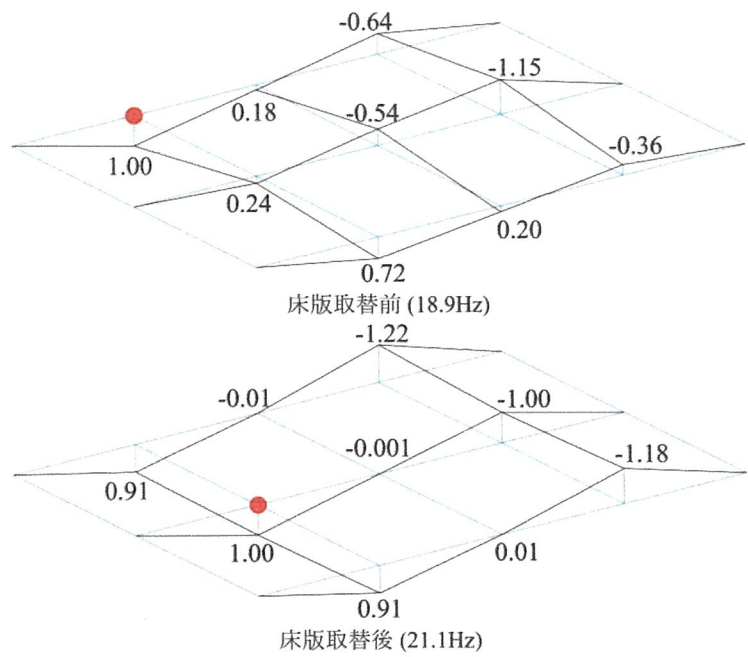
振動モード	固有振動数 (Hz)			
	小型 FWD 試験		車両走行試験	
	床版取替前	床版取替後	床版取替前	床版取替後
曲げ 1 次	7.32	7.94	7.33	7.94
ねじれ 1 次	8.55	8.85	8.55	8.85
曲げ 2 次	18.9	21.1	-	20.5
ねじれ 2 次	21.1	22.6	21.2	22.0



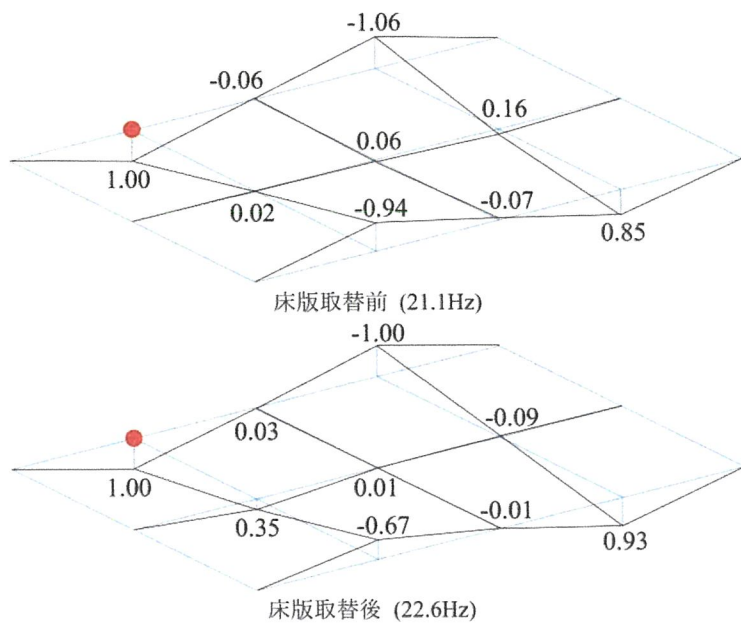
(a) 曲げ 1 次振動モード



(b) ねじれ 1 次振動モード



(c) 曲げ 2 次振動モード



(d) ねじれ 2 次振動モード

図-4.14 小型 FWD 試験から得られた床版取替前後の各振動モード図

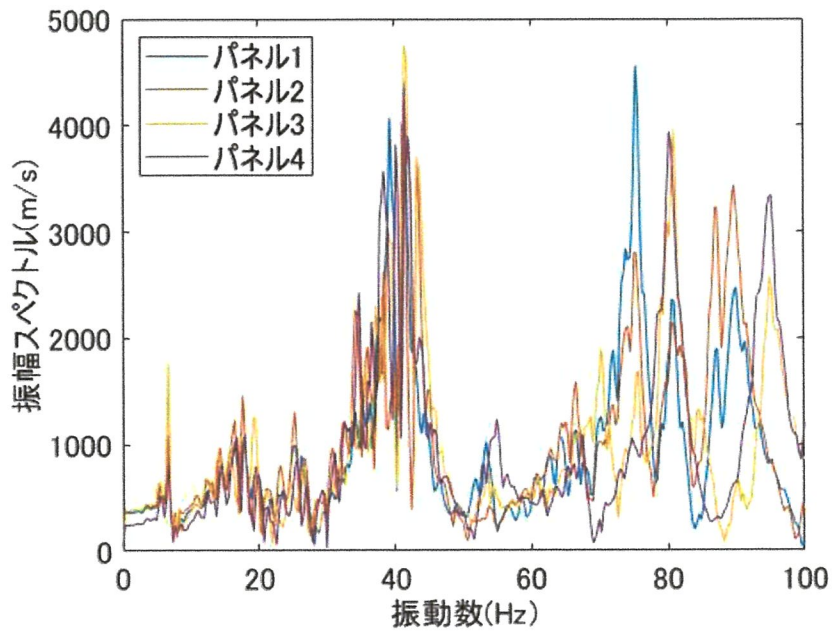
4.2.3 床版パネル系計測結果

橋梁全体系計測においては、小型 FWD の重錘落下による衝撃振動から橋梁の全体的な挙動を把握したのに対し、床版パネル系計測では部分的な床版の振動特性について検討を行った。主桁と中間横桁によって床版を 4 パネルに区切り、それぞれについて小型 FWD 試験を実施して振幅及び位相差スペクトルを取得した。図-4.15 に 4 枚のパネルの打撃点（パネル中央）における床版取替前後の振幅スペクトルを示す。2.1 節で述べた通り、対象橋梁の中間横桁は床版取替前には床版下面と接着していたが、床版取替後は離れた構造となっている。これによりパネルの支持条件が異なるため、橋梁全体系のように固有振動数の値を床版取替前後で比較することは適切でないと考えられる。そのため、パネル同士の卓越振動数の分布を比較することによって床版の剛性の差異を検討する。

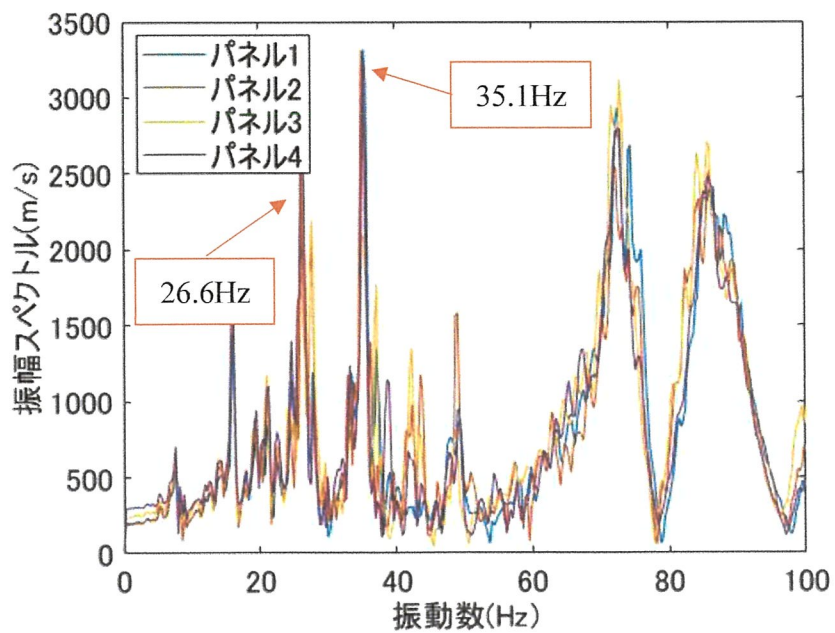
図-4.15(a)に示す床版取替前の振幅スペクトルを見ると、各パネルにおける卓越振動数にばらつきが生じている。各パネルの卓越振動数が一致していないことから、取替前の床版においては各パネル間で剛性や振動特性が異なっていることが推測される。また、パネル 1~3 は 55Hz 付近及び 75Hz 付近にピークが生じているが、パネル 4 では確認されていない。そのためパネル 4 は高振動数域において他パネルと異なる挙動を示している可能性が考えられる。

また、全てのパネルで 40Hz 付近に多数の卓越振動数が現れている。式(4.2)によりモード図を作成すると、図-4.16 に示すようにそれらはパネル中央部を腹とする局部曲げ 1 次振動のモード形状を表す。表-4.2 にそれぞれのパネルで局部曲げ 1 次振動を励起させる複数の卓越振動数を示す。卓越振動数が複数現れた理由として、床版内に損傷が存在することによって高振動数帯の振動が不安定になったことが考えられる。また、パネル 4 は他パネルより表-4.2 の固有振動数の値がやや小さい傾向にあるため、相対的に剛性の低下が進行していた可能性が考えられる。

一方で床版取替後の振幅スペクトル図（図-4.15(b)）では、全てのパネルで 26.6Hz と 35.1Hz の卓越振動数を示している。図-4.17 に床版取替後のパネル 1 と 2 の 26.6Hz 及び 35.1Hz の各モード形状を示す。26.6Hz はパネル 1 と 2 の境界に振動の腹があり、床版取替後は中間横桁と床版下面は離れた構造であるため、2 つのパネルが一体となった振動モードが現れていると考えられる。35.1Hz はパネル中央に腹を持つ振動モードである。パネル 3 と 4 においても同様なモード形状が得られた。床版取替後は全てのパネルで卓越振動数が一致している。床版取替後はパネル間に剛性の違いがない健全な床版であると考えられる。



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

図-4.15 各パネル打撃点における床版取替前後の振幅スペクトル

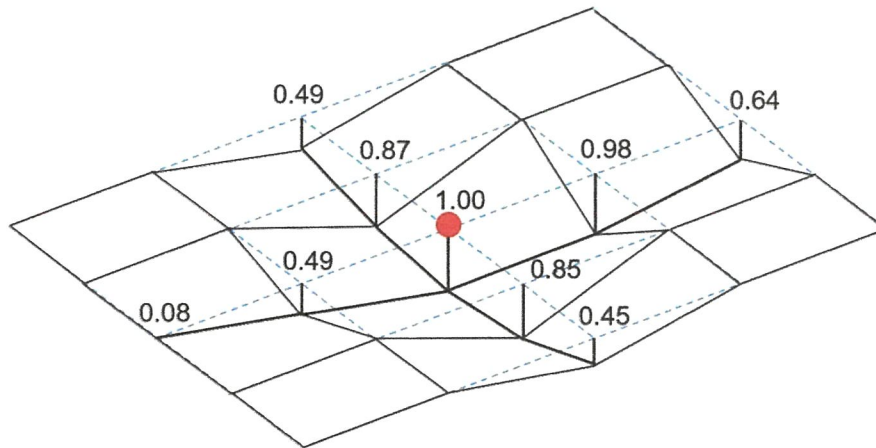
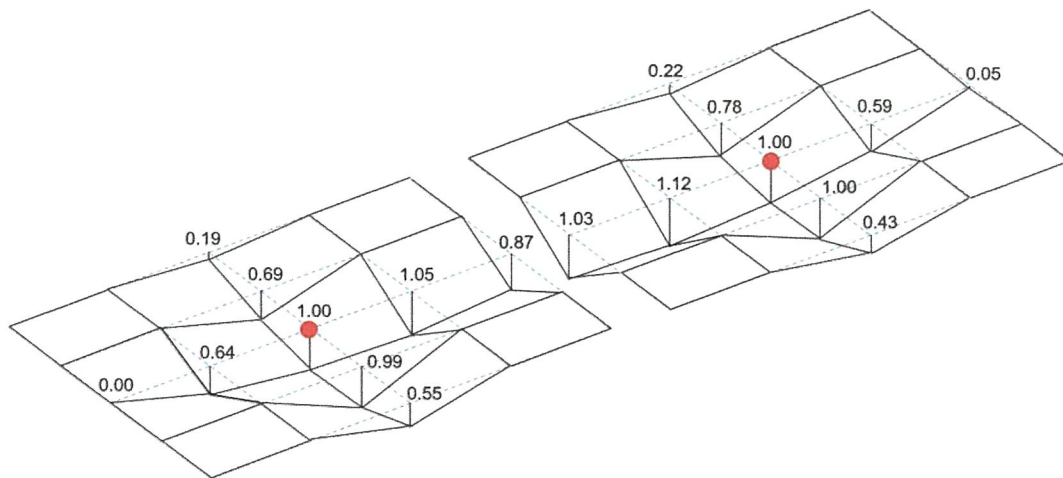


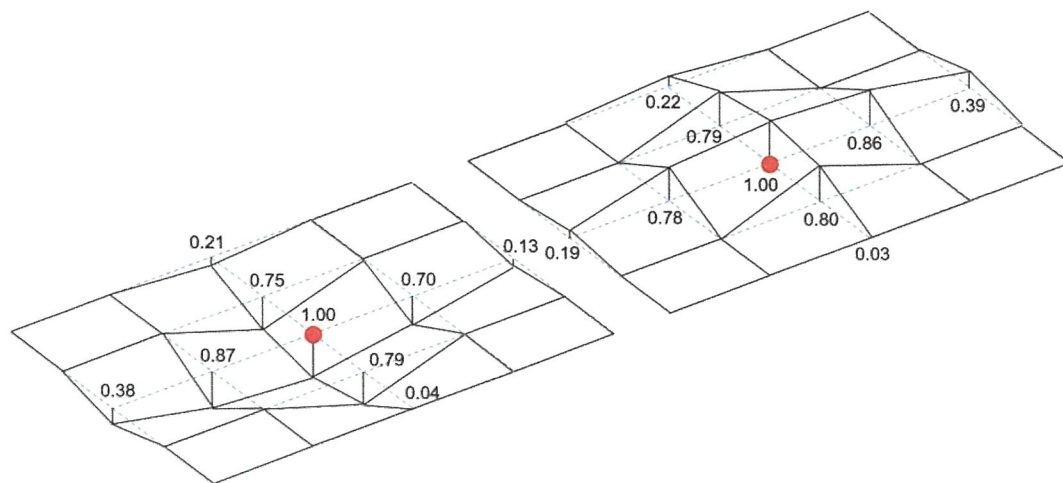
図-4.16 局部曲げ1次振動モード（床版取替前パネル4：41.8Hz）

表-4.2 床版取替前各パネルにおける局部曲げ1次振動モードを励起させる複数の固有振動数

	固有振動数 (Hz)
パネル1	39.1, 41.8
パネル2	38.5, 41.2, 44.0
パネル3	39.1, 41.8, 44.0
パネル4	38.5, 41.8



(a) 26.6Hz



(b) 35.1Hz

図-4.17 床版取替後のパネル1とパネル2の振動モード形状

4.2.4 固有振動数による検討のまとめ

対象橋梁において床版取替補強工事の前後で加速度計を主桁上の支間 1/4, 1/2, 3/4 点に配置して小型 FWD 試験を実施した。その結果、橋梁全体系の 2 次までの固有振動数と固有振動モードを特定できた。床版取替後に固有振動数が 1 次振動で 3~8%程度、2 次振動で 7~11%増加しており、これらの結果は床版取替によって橋梁全体の剛性が上昇したことに起因するものと考えられる。

また床版パネル系計測により床版の局所的な劣化の特定を試みた。床版をパネル分割しパネル毎に加速度計を密に配置し、床版の局所的な固有振動数を検討した。その結果、床版取替前では各パネルの振幅スペクトルの卓越にばらつきがあり、パネルごとに内部の剛性が一様でなかったことが推測される。床版取替後は全パネルの卓越振動数が一致しており、パネル間の相対的な剛性の低下はなく、剛性は床版全体で一様になっているものと考えられる。

本項で提案した床版パネル系計測においては、パネルごとに衝撃振動試験を実施することでパネル間の振動特性の差異を捉えることができるため、劣化部位の推定に利用できる可能性があると思われる。

床版取替前後で実施した橋梁全体系計測では、橋梁全体の固有振動数の増減で床版全体の剛性の改善効果について検討することができ、床版パネル系計測ではどの床版パネルで相対的に劣化が生じているか検討することができた。しかし、これらの固有振動数の検討方法のみでは床版の局所的な劣化部の位置を判断するにはまだ不十分であると考えられる。

4.3 計測点間の応答加速度差による検討 ^{41),42),43)}

対象橋梁の固有振動数の特定だけでは分からなかった，床版内の局所的な応答挙動の違いを明らかにするため，各計測点の間に生じる応答加速度の差分に着目した。

図-4.18 に応答加速度の差による検討方法の概略図を示す。小型 FWD の重錘落下により発生した衝撃波動は，床版内の各部分を振動させながらそれぞれの計測点に到達し，応答加速度が計測される。いま，図-4.18 において小型 FWD の打撃点から等距離にある 2 計測点に設置された加速度計 A および B に注目する。このとき打撃点（加速度計 O）とそれぞれの計測点に挟まれた 2 区間 OA, OB が検討区間となる。仮に 2 区間の剛性が同じ場合，発生した衝撃が同じように伝達されていくため加速度計 A と B では同じ応答加速度が計測されると思われる。2 区間の剛性が異なる場合，伝達される振動波形が変化するため 2 つの加速度計における計測値は異なると思われる。打撃点に設置した加速度計 O との計測値の差「O-A」と「O-B」においても同様の傾向が得られることが推測される。このように 2 つの計測点の加速度差を他区間の加速度差と比較して一致度を検討することにより，床版内の局所的な剛性の違いが推定できると考えた。2 計測点間に生じる加速度差によって検討することにより，計測点ではなく計測点に挟まれた区間を対象とするため，計測点数以上の位置での健全度評価ができる可能性があると思われる。

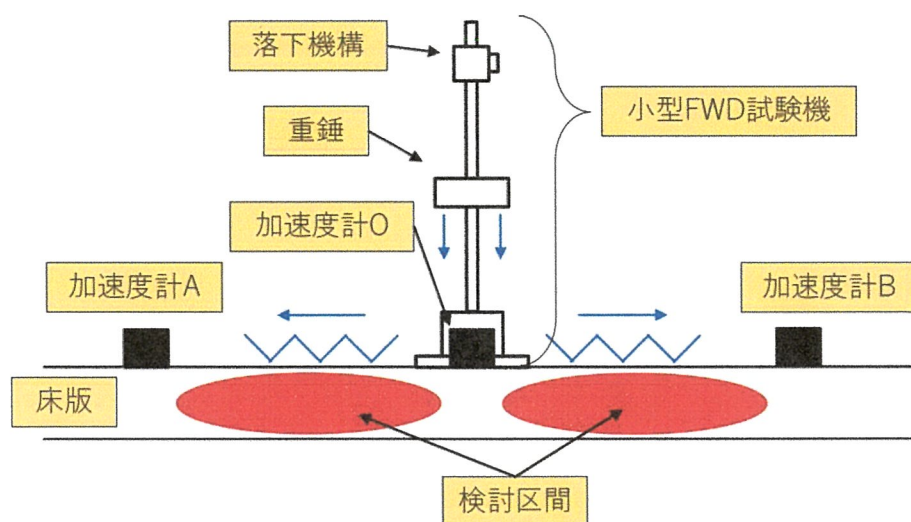


図-4.18 応答加速度の差による検討方法概略図

4.3.1 検討方法概要

前項で述べた通り，各計測点間に生じる応答加速度の差分を検討することにより床版内の局所的な応答挙動の違いを明らかにした．検討には橋梁全体系計測で得られた応答加速度データを用いる．小型 FWD を用いた衝撃振動試験では打撃の際に発生する重錘のバウンドにより，図-4.19 のように複数の応答加速度のピークが現れる．この時，いずれの打撃においても 1 回目のピークから約 0.55 秒後に 2 回目のピークが計測されている．本項では 2 回目以降のバウンドによる衝撃の影響を取り除くため，打撃点の加速度データにおいて 1 回目のピークから 0.5 秒間を加速度の検討範囲とした．打撃点ごとに複数回計測している加速度データから検討範囲のデータを取り出し，それらの始点を合わせて各時間（0.1ms 毎）の加速度平均をとることでノイズの影響を低減している．また，それらの振動振幅の大きさのばらつきを抑えるため，式(4.3)で表される標準化処理を施している．

$$z_i = (x_i - \bar{x})/s \quad (4.3)$$

ただし， z_i ：標準化データ， x_i ：元データ（平均加速度）， \bar{x} ：元データの平均値， s ：元データの標準偏差

標準化処理後のデータを使用して，打撃点と他の計測点の間に生じる応答加速度差の 0.5 秒間の時間変化を算出した．

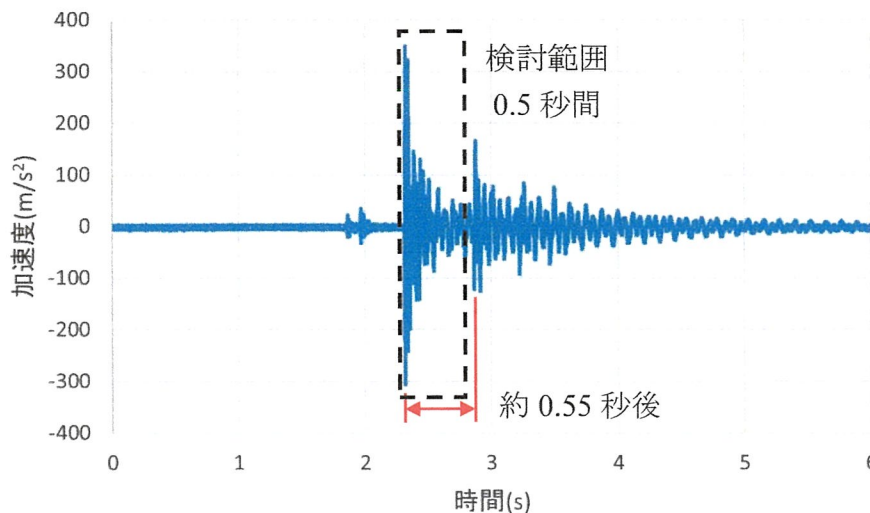


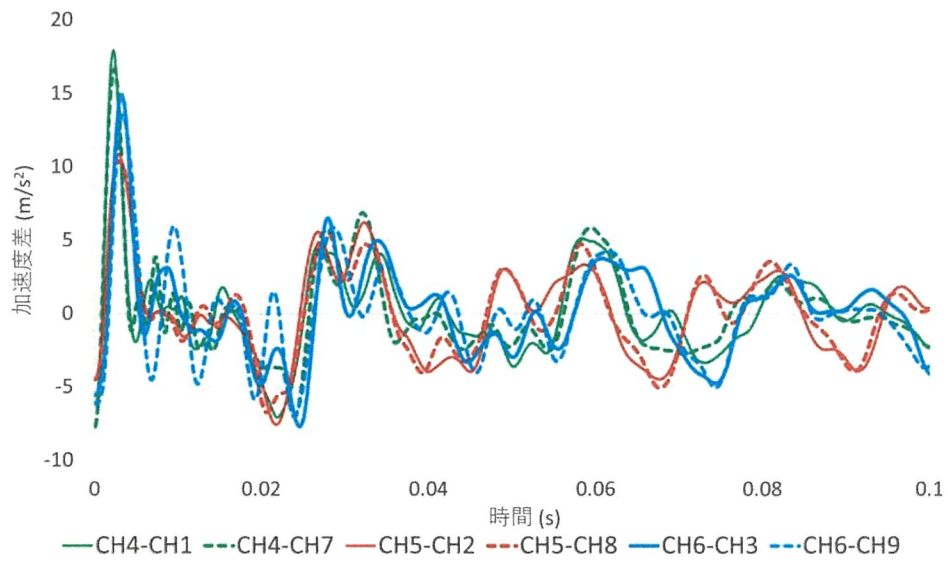
図-4.19 小型 FWD 試験から得られた加速度波形と検討範囲

4.3.2 橋梁全体系計測の結果と考察

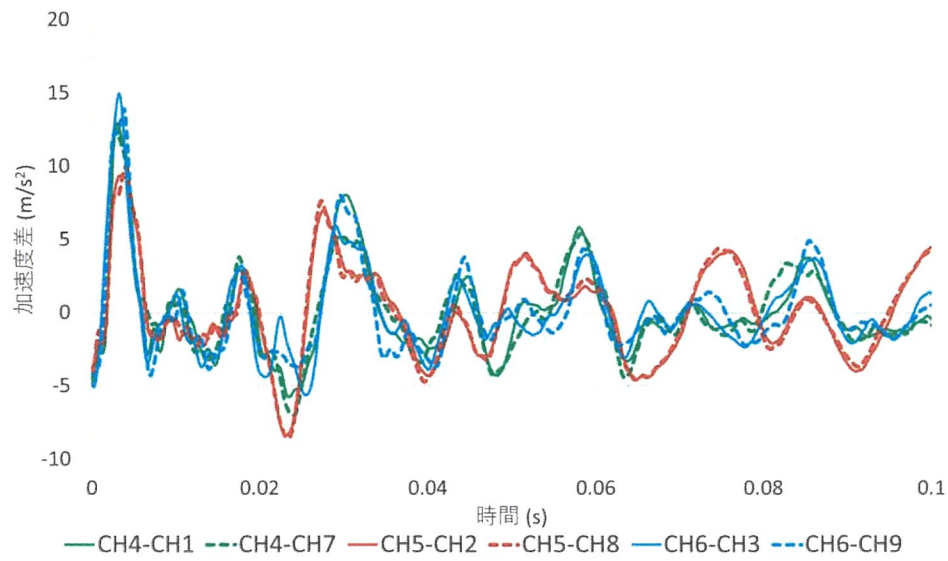
(1)主桁支間中央打撃時の応答加速度差の結果と考察

各主桁の支間中央を打撃した際の、打撃点と支間 1/4 または 3/4 点の間に生じた応答加速度の差分の時間変化を図-4.20 及び図-4.21 に示す。以下、本文や図表中における「CH4-CH1」等の表記は（(打撃点) - (加速度差をとる計測点)）を表すものとする。

図-4.20 及び図-4.21 より床版取替前における加速度差は取替後のものと比較して各区間の加速度差の一致度が低い。各区間の振動応答が異なることから、床版取替前の床版剛性が一様ではなかったことが推測される。また図-4.20(b)では、G1 桁及び G3 桁上の 4 区間（CH4-CH1, CH4-CH7, CH6-CH3, CH6-CH9）の加速度差は概ね一致しているものの、それらと G2 桁上の 2 区間（CH5-CH2, CH5-CH8）では大きく異なる傾向が認められる。G1 桁及び G3 桁は外桁、G2 桁は中桁であることから、外桁上の点を打撃した時に強く励起されるねじれ振動による応答挙動の違いが影響していると考えられる。

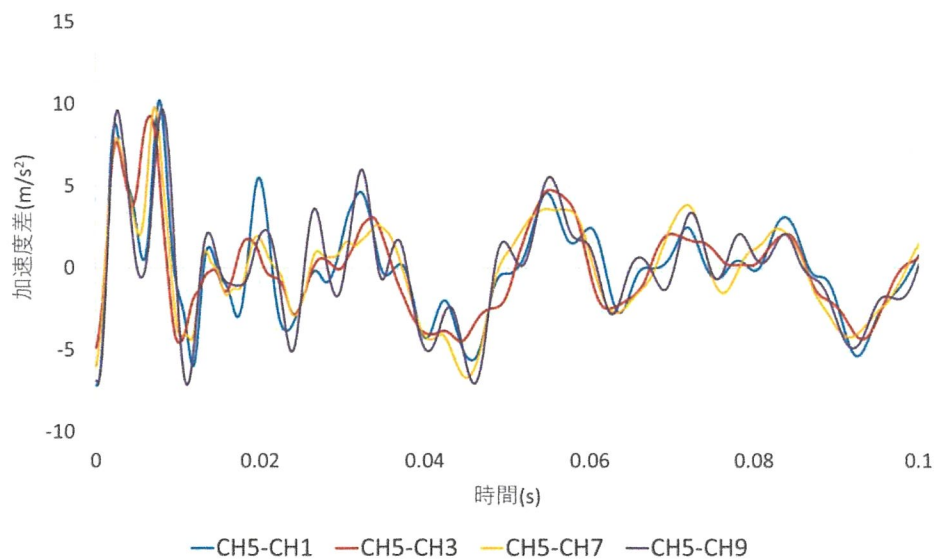


(a) 床版取替前

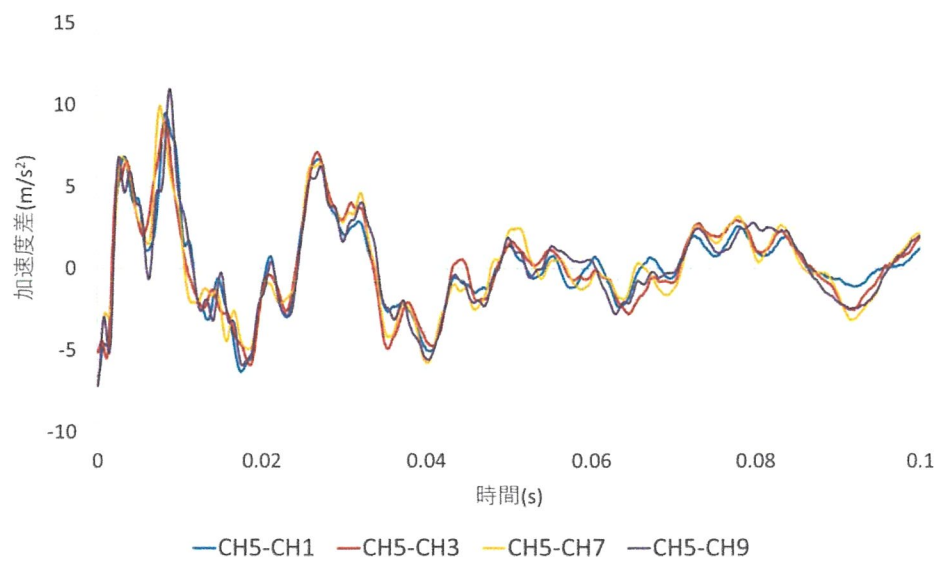


(b) 床版取替後

図-4.20 各主桁支間中央打撃時の主桁方向の区間における床版取替前後の加速度差の時間変化



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

図-4.21 中桁支間中央打撃時の主桁に沿わない区間における床版取替前後の加速度差の時間変化

さらに本研究では 2 区間の加速度差の一致度を定量的に評価するため、相関係数を用いて検討する。相関係数 r は式(4.4)によって算出される。

$$r = s_{xy}/s_x s_y \quad (4.4)$$

ただし s_{xy} ：加速度差 x と y (0.5 秒間) の共分散, s_x ：加速度差 x の標準偏差, s_y ：加速度差 y の標準偏差

一般に相関係数の絶対値 $|r|$ が 0~0.2 のときほとんど相関はなく, 0.2~0.4 で弱い相関, 0.4~0.7 で中程度の相関, 0.7~1.0 で強い相関があると評価される。

表-4.3 及び表-4.4 に主桁支間中央打撃時の床版取替前後の加速度差のそれぞれの組み合わせによる相関係数を示す。表-4.3 より, 同じ主桁上にある 2 区間の組み合わせ (CH4-CH1 と CH4-CH7 など) では床版取替の前後ともに強い相関がみられた。G1 桁上の区間と G3 桁上の区間の組み合わせ (CH4-CH1 と CH6-CH3 など) は, 取替前の床版では中程度の相関であったが, 取替後は強い相関を示している。一方で外桁上の区間と中桁上の区間の組み合わせ (CH4-CH1 と CH5-CH2 など) においては, 床版取替前後ともに中程度または弱い相関を示している。

表-4.4 より桁に沿わない区間の組み合わせ (CH5-CH1 と CH5-CH3) では, 床版取替前も強い相関を示しているものの床版取替によって全ての組み合わせで相関係数が増加している。これらの結果から, 健全な床版において打撃点と計測点の方向が対をなすような 2 区間を比較すると, 強い相関が得られると考えられる。

表-4.3 各主桁支間中央打撃時の主桁方向の区間における
床版取替前後の加速度差の相関係数

(a) 床版取替前

	CH4- CH1	CH4- CH7	CH5- CH2	CH5- CH8	CH6- CH3	CH6- CH9
CH4-CH1		0.87	0.51	0.56	0.69	0.60
CH4-CH7			0.59	0.64	0.68	0.58
CH5-CH2				0.95	0.39	0.38
CH5-CH8					0.46	0.45
CH6-CH3						0.86
CH6-CH9						

(b) 床版取替後

	CH4- CH1	CH4- CH7	CH5- CH2	CH5- CH8	CH6- CH3	CH6- CH9
CH4-CH1		0.93	0.45	0.46	0.80	0.84
CH4-CH7			0.46	0.48	0.80	0.78
CH5-CH2				0.98	0.50	0.51
CH5-CH8					0.50	0.54
CH6-CH3						0.90
CH6-CH9						

表-4.4 中桁支間中央打撃時の主桁に沿わない区間における
床版取替前後の加速度差の相関係数

(a) 床版取替前

	CH5- CH1	CH5- CH3	CH5- CH7	CH5- CH9
CH5-CH1		0.80	0.88	0.90
CH5-CH3			0.90	0.78
CH5-CH7				0.86
CH5-CH9				

(b) 床版取替後

	CH5- CH1	CH5- CH3	CH5- CH7	CH5- CH9
CH5-CH1		0.94	0.92	0.93
CH5-CH3			0.94	0.92
CH5-CH7				0.93
CH5-CH9				

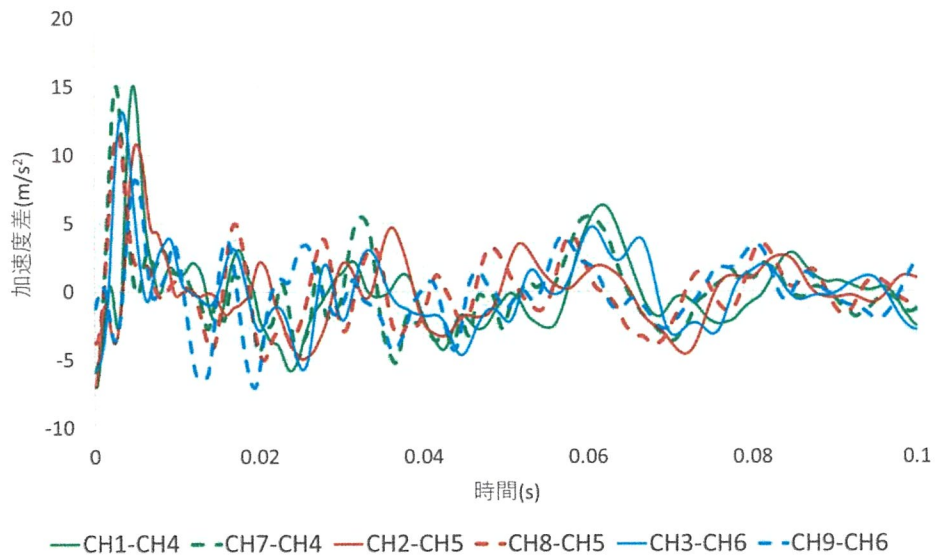
(2)主桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の応答加速度差の結果と考察

各主桁の支間 1/4 または 3/4 点を打撃した際の打撃点と支間中央点の床版取替前後の加速度差の時間変化を、図-4.22 と図-4.23 に示す。また、それらの組み合わせによる相関係数を表-4.5 と表-4.6 に示す。

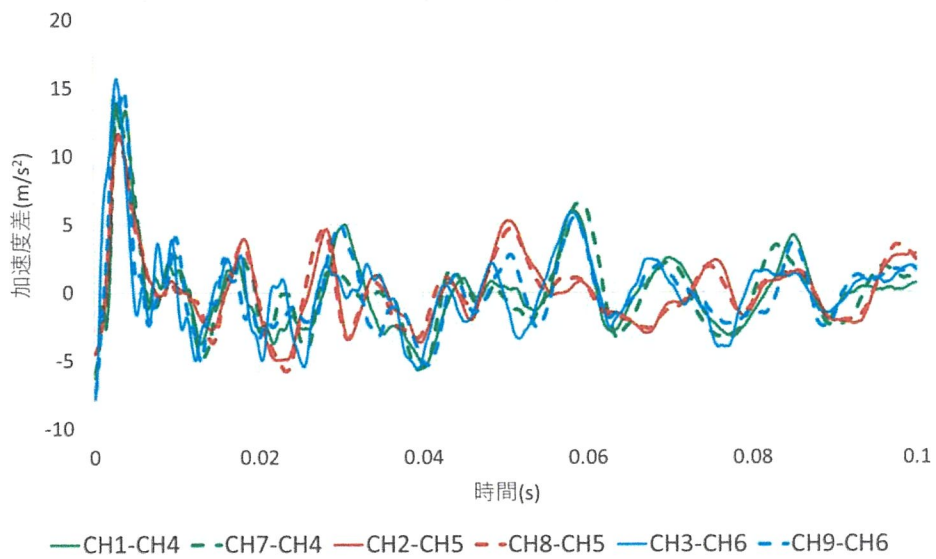
図-4.22 より、外桁上の区間 (CH1-CH4, CH3-CH6 など) と中桁上の区間 (CH2-CH5 など) では応答波形が異なることが確認できる。表-4.5 に示す相関係数から、特に床版取替後の同じ桁上の区間同士 (区間 CH1-CH4 と CH7-CH4, CH2-CH5 と CH8-CH5 など) では高い相関が見られる。その一方で、外桁上の区間と中桁上の区間同士 (CH1-CH4 と CH2-CH5 など) によるすべての組み合わせでの相関の強さは、床版取替前後ともに中程度以下となっている。これらは外桁上の点を打撃した時に強く励起するねじれ振動による応答挙動の違いが影響していると推測される。

また、表-4.5 中の区間 CH9-CH6 を除く外桁に沿った 3 区間の組み合わせ、及び表-4.6 中の区間 CH9-CH5 を除く 3 区間の組み合わせにおいて、床版取替前は中程度、床版取替後は強い相関が示されている。その一方で区間 CH9-CH6 及び区間 CH9-CH5 を含む組み合わせは、取替前の床版で全て弱い相関が認められる。他区間との振動応答の一致度が低いことから、床版取替前の区間 CH9-CH6 及び区間 CH9-CH5 近傍では他区間と異なる振動応答を引き起こす剛性変化が生じていた可能性が考えられる。

また、支間 1/4, 3/4 点打撃時の相関は支間中央打撃時と比較して弱い相関傾向にある。この原因としては、支間 1/4, 3/4 点の近傍に損傷箇所があることで打撃による応答振動が影響を受けた可能性がある。また、外桁の支間 1/4, 3/4 点を打撃した際には曲げ 2 次振動モードとねじれ 2 次振動モードが混在して励起されるため、振動形状が複雑であることが相関係数を低下させる原因となっていることも考えられる。

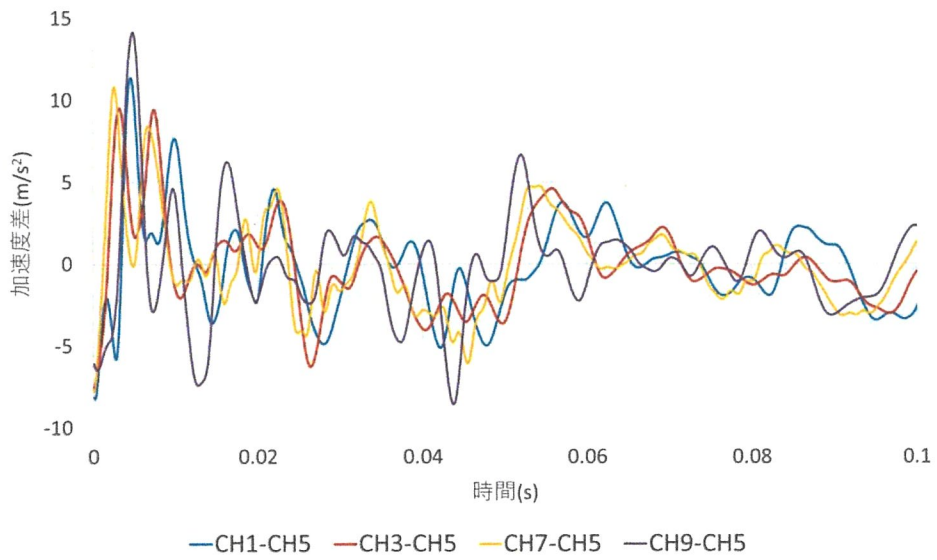


(a) 床版取替前

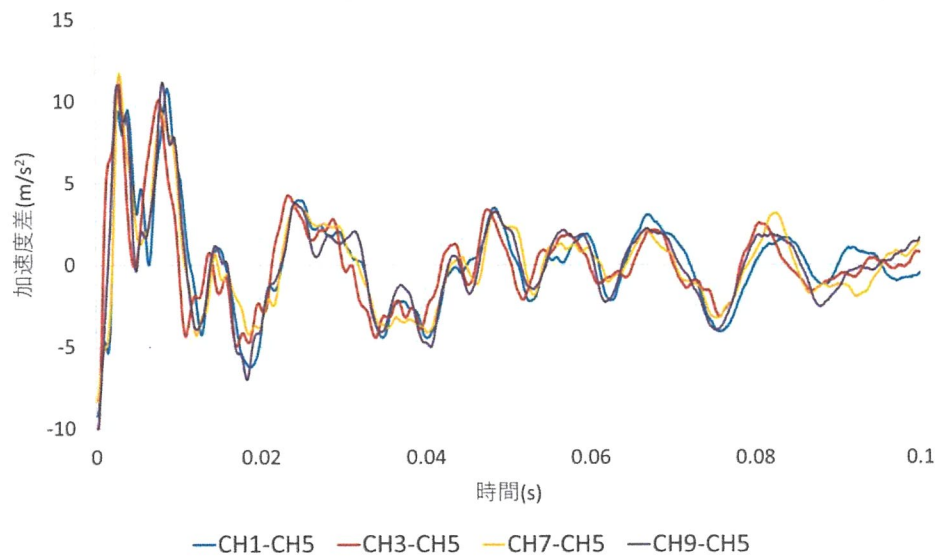


(b) 床版取替後

図-4.22 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿った区間における床版取替前後の加速度差の時間変化



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

図-4.23 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿わない区間における床版取替前後の加速度差の時間変化

表-4.5 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿った区間における
床版取替前後の加速度差の相関係数

(a) 床版取替前

	CH1- CH4	CH7- CH4	CH2- CH5	CH8- CH5	CH3- CH6	CH9- CH6
CH1-CH4		0.42	0.47	0.26	0.64	0.21
CH7-CH4			0.17	0.60	0.68	0.27
CH2-CH5				0.14	0.30	0.21
CH8-CH5					0.47	0.28
CH3-CH6						0.17
CH9-CH6						

(b) 床版取替後

	CH1- CH4	CH7- CH4	CH2- CH5	CH8- CH5	CH3- CH6	CH9- CH6
CH1-CH4		0.84	0.44	0.47	0.68	0.86
CH7-CH4			0.50	0.53	0.75	0.77
CH2-CH5				0.95	0.44	0.51
CH8-CH5					0.47	0.52
CH3-CH6						0.77
CH9-CH6						

表-4.6 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿わない区間における
床版取替前後の加速度差の相関係数

(a) 床版取替前

	CH1- CH5	CH3- CH5	CH7- CH5	CH9- CH5
CH1-CH5		0.52	0.40	0.38
CH3-CH5			0.81	0.28
CH7-CH5				0.29
CH9-CH5				

(b) 床版取替後

	CH1- CH5	CH3- CH5	CH7- CH5	CH9- CH5
CH1-CH5		0.74	0.84	0.85
CH3-CH5			0.77	0.81
CH7-CH5				0.92
CH9-CH5				

4.4 応答加速度差による検討のまとめ

計測点間に生じる応答加速度の差分を検討することにより、床版内の局所的な振動応答の把握を試みた^{41)~43)}。二つの計測点から成り立つ各区間の加速度差を比較すると、床版取替後は取替前よりも加速度差の一致度が高く相関係数が高くなる傾向が認められた。これらの結果から取替後の床版では各区間で同様の振動応答を示しており、剛性が一様な状態に改善されたものと考えられる。また、中桁上の区間と外桁上の区間の組み合わせでは加速度差の相関係数は中程度であり、中桁と外桁でそれぞれ異なる振動応答が得られていることが推測される。このことから外桁あるいは中桁を打撃することにより、振動応答が打撃位置によって強く励起される振動形状の影響を受けると思われる。

また、床版取替前の加速度差の応答から、区間 CH9-CH5 及び CH9-CH6 は他区間との相関が弱く、これらの区間近傍において床版剛性が他区間とは異なることが考えられる。これら 2 区間は床版パネル系計測におけるパネル 4 に含まれる区間であり、3.3 節においてパネル 3 と 4 は相関が強いものの、パネル 4 の振幅スペクトルは他の床版パネルとの乖離がより大きいことが確認されている。両検討方法から同様の結果が得られており、取替前の床版内において当該位置での相対的な剛性の低下や振動特性の変化が推測される。

同じ位置の区間の組み合わせでも打撃位置によって相関係数が異なっており（「CH4-CH1 と CH4-CH7」と「CH1-CH4 と CH7-CH4」など）、支間 1/4、3/4 点を打撃した時には支間中央を打撃した時と比べ相関が弱い傾向が見られた。この理由として、床版取替前の支間 1/4、3/4 点の近傍に損傷箇所が存在することにより、打撃による振動形状が変化した可能性が考えられる。また、支間 1/4、3/4 点を打撃した際には曲げ 2 次振動モードとねじれ 2 次振動モードが混在して励起するため、振動形状が複雑になることが相関係数を低下させる要因になっている可能性がある。

2 種類の検討方法から、床版内で剛性が他部位と異なる部位の推定ができた。ただし、床版剛性の変化は床版の劣化によるもののみとは限らず、施工不良や主桁との付着状態による可能性も考えられる。今後詳細な検討が必要である。

また、固有振動数の変化が床版の局所的な損傷に対して小さく、検討が必要な応答加速度のデータ数は加速度差の検討に比べて多くなる。したがって、計測点間の応答加速度差による新たな検討方法は、従来から用いられている固有振動数による検討方法に比べて、床版剛性が他部位と異なる部位の効率的な推定に活用できる可能性が考えられる。

第 5 章

FEM 動的解析

5.1 FEM モデル概要

本章では本論文の対象橋梁である赤山橋の動的特性の把握のため、汎用 3 次元 FEM 解析ソフト ANSYS を用いて対象橋梁の床版取替後の上部工モデルを作成し動的解析を行なった。図-5.1 に作成した FEM モデルを示す。床版及び主桁、横桁、垂直補剛材を Shell 要素でモデル化しており、本研究のモデルでは舗装と地覆は考慮していない。それぞれの要素は図心高さに作成しているため、特に主桁及び端横桁の上フランジと床版の鉛直方向間を剛体ビーム要素を用いて結合している。総節点数は 16186、総要素数は 17416 である。

表-5.1 に使用した物性値を示す。床版取替後の対象橋梁ではコア抜き試験や鋼材の材料試験等を行っていないため、道路橋示方書³⁸⁾の値を採用している。床版のヤング係数は取替後床版の設計基準強度 40N/mm^2 を、式(5.1)に代入することにより求めている。

$$E_c = \left(3.1 + \frac{f'_c - 40}{50} \right) \times 10^4 \quad (5.1)$$

ここで、 E_c : ヤング係数 (N/mm^2)、 f'_c : コンクリート設計基準強度 (N/mm^2)
ただし $40 \leq f'_c < 70$

図-5.1 に示す 3 次元 FEM モデルでは、床版の色の異なる部分ごとで部材のヤング係数等の物性値を変更できるように設定している。

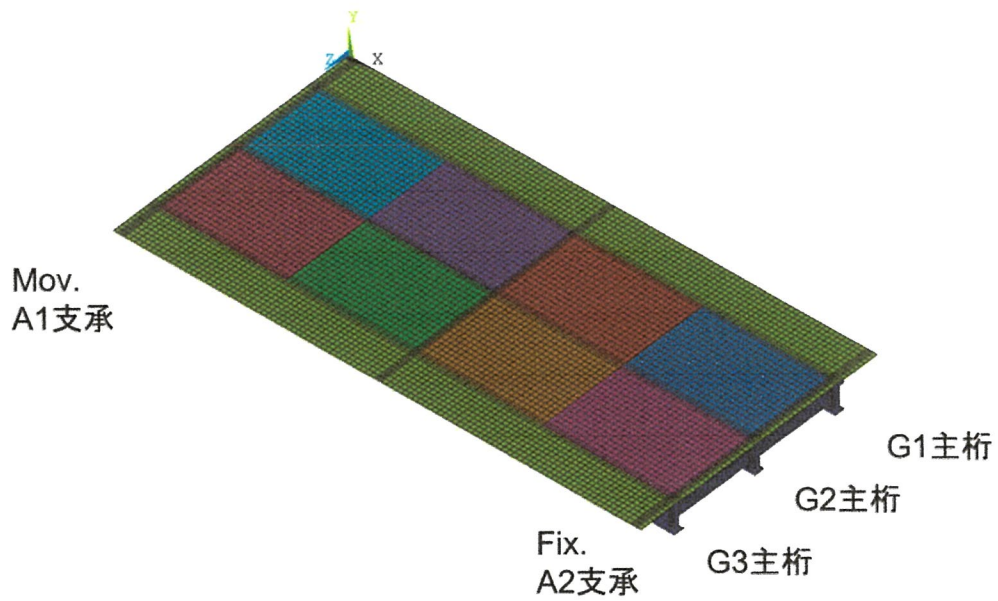


図-5.1 対象橋梁上部工の3次元FEMモデル

表-5.1 3次元FEMモデルに使用した物性値

	ヤング係数 E_0 (N/mm^2)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m^3)
床版	31,000	0.167	24.5
鋼材	200,000	0.300	77.0

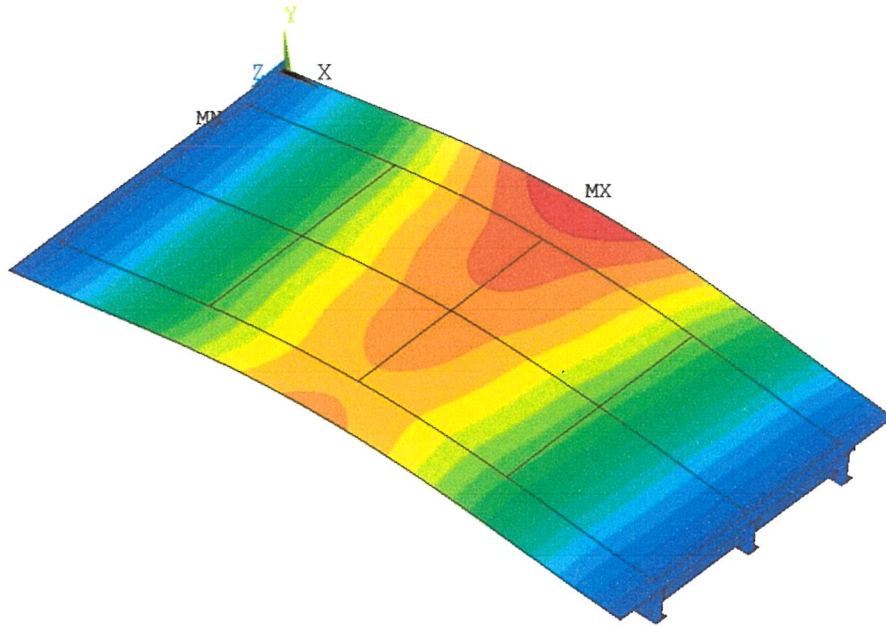
5.2 固有振動解析

5.2.1 バネモデルによる支承水平拘束状態の検討

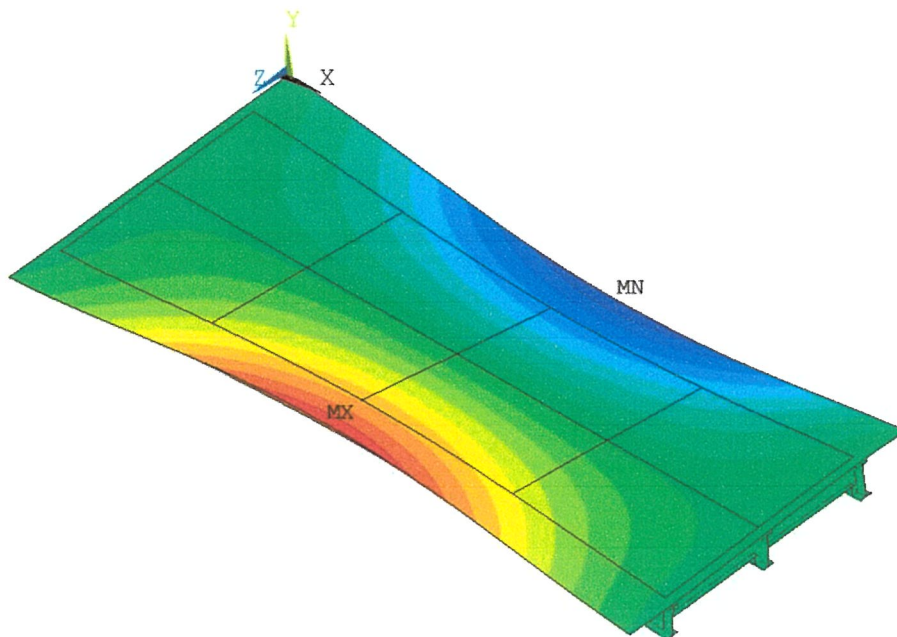
解析モデルに対し実際の対象橋梁の支承状態に近い境界条件を与えるために橋軸方向に作用する並進バネ要素を導入し、腐食により劣化した可動支承の水平移動拘束状態の再現を試みる。並進バネ要素のバネ定数を変化させて固有振動解析を行い、各振動モードの固有振動数を取得した。表-5.2 に固有振動解析の結果を示す。バネ要素を導入することで pin-roller 支承（単純支持）と pin-pin 支承（水平移動を完全拘束した状態）の中間状態（実際の状態）を再現することができると考えられる。ただし、並進バネ定数の変化に対し曲げ及びねじれ 2 次振動モードの固有振動数の変化は鈍い。バネ定数を変化させて固有振動解析を行った結果、バネ定数 $1.1 \times 10^4 \text{N/mm}$ において床版取替後の実測固有振動数に最も近い値が得られた。このときの各振動モード形状を図-5.2 に示す。実際の対象橋梁が持つ振動特性に近い状態を再現できたと考えられるため、以下の解析ではこのバネ定数を採用する。

表-5.2 バネ定数と固有振動数 (Hz)

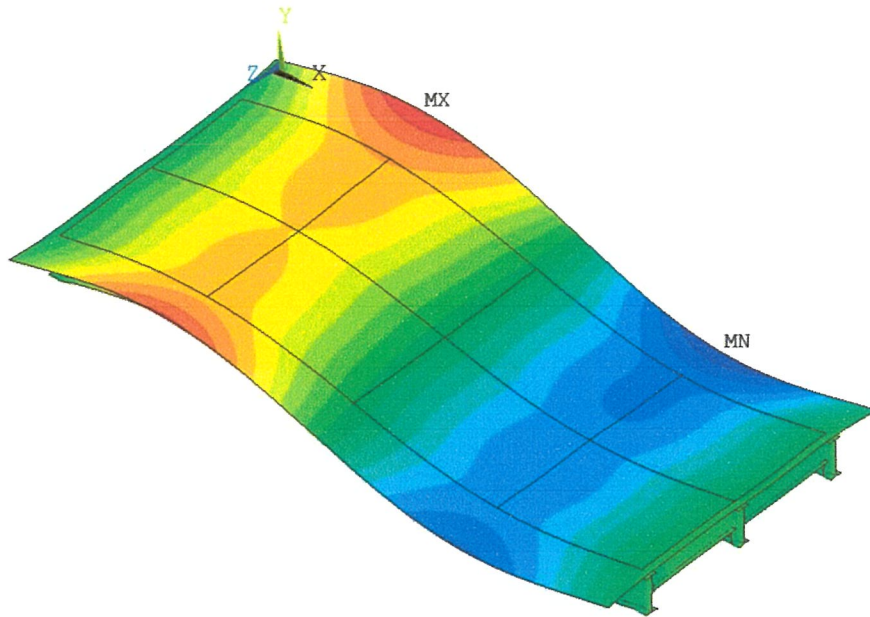
バネ定数		固有振動数 (Hz)			
kgf/mm	N/mm	曲げ 1 次	ねじれ 1 次	曲げ 2 次	ねじれ 2 次
pin-roller 支承		6.17	8.25	20.4	22.5
1.0×10^1	9.8×10^1	6.20	8.26	20.4	22.5
1.0×10^2	9.8×10^2	6.44	8.33	20.4	22.5
1.0×10^3	9.8×10^3	7.83	8.82	20.4	22.6
1.1×10^3	1.1×10^4	7.93	8.86	20.4	22.6
1.2×10^3	1.2×10^4	8.01	8.89	20.4	22.6
1.5×10^3	1.4×10^4	8.23	8.99	20.5	22.7
2.0×10^3	2.0×10^4	8.51	9.13	20.5	22.7
1.0×10^4	9.8×10^4	9.64	9.84	20.5	22.9
1.0×10^5	9.8×10^5	10.1	10.2	20.6	23.0
1.0×10^6	9.8×10^6	10.2	10.3	20.6	23.0
pin-pin 支承		10.2	10.3	20.6	23.0
実測値		7.94	8.85	21.1	22.6



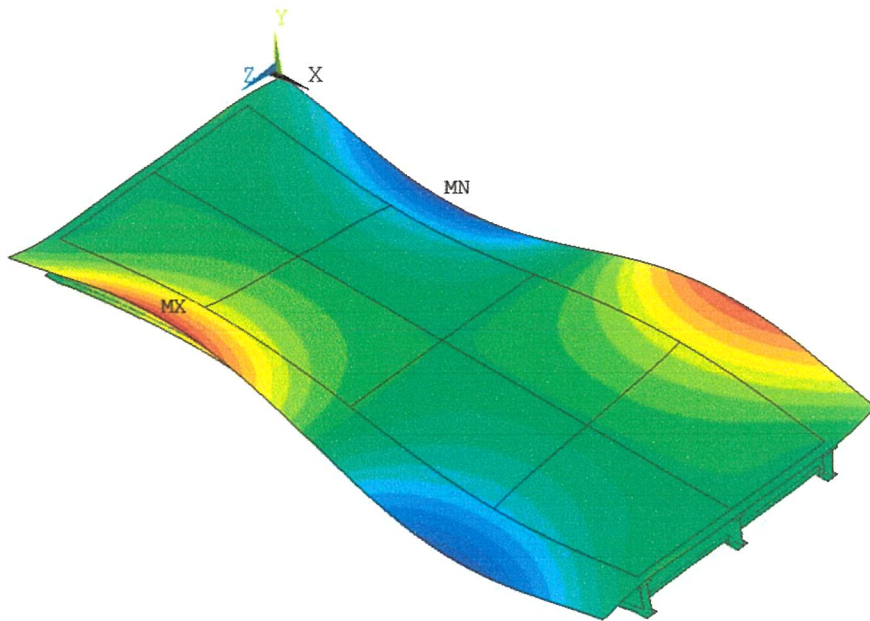
(a) 曲げ 1 次振動モード (7.93Hz)



(b) ねじれ 1 次振動モード (8.86Hz)



(c) 曲げ 2 次振動モード (20.4Hz)



(d) ねじれ 2 次振動モード (22.6Hz)

図-5.2 バネ定数 $1.1 \times 10^4 \text{N/mm}$ のときの 1,2 次の振動モード形状

5.2.2 床版の剛性低下が低次固有振動数に与える影響

床版の劣化が固有振動数に与える影響を把握するため、FEM モデルの床版全体または一部のヤング係数を低下させて固有振動解析を行った。本項の解析では、床版の剛性低下をヤング係数の低下によって再現する。表-5.3 に床版全体のヤング係数を一様に低下させた際の固有振動解析結果を示す。床版のヤング係数 E を表-5.1 の初期値 E_0 から 10%ずつ低下させて解析を行った。ヤング係数を 50%低下させたモデルでは、各振動モードにおいて初期モデルと比べて 7%~12% 程度の固有振動数の低下が認められた。一方、「4.1.2 床版パネル系計測」における図-4.5 に示すパネル 4 のみヤング係数を低下させた際の固有振動解析結果を表-5.4 に示す。剛性の低下に伴う固有振動数の低下が見られるが、ヤング係数が 50%低下したモデルにおいてもその低下率は 1%程度とわずかな変化である。これらの解析結果から判断すると実橋試験において、低次の固有振動数の変化から床版の局所的な劣化の程度や位置を判定することは困難であると思われる。

表-5.3 床版全体を一様に剛性低下させた際の固有振動数 (Hz) の変化

ヤング係数 低下率(E/E_0) ×100%	曲げ1次 振動数	ねじれ1次 振動数	曲げ2次 振動数	ねじれ2次 振動数
100%	7.93	8.86	20.4	22.6
90%	7.83	8.70	20.2	22.2
80%	7.72	8.51	20.0	21.8
70%	7.59	8.31	19.7	21.2
60%	7.44	8.07	19.4	20.6
50%	7.25	7.79	19.0	19.7

表-5.4 床版パネル4のみ剛性低下させた際の固有振動数 (Hz) の変化

ヤング係数 低下率(E/E_0) ×100%	曲げ1次 振動数	ねじれ1次 振動数	曲げ2次 振動数	ねじれ2次 振動数
100%	7.93	8.86	20.4	22.6
90%	7.91	8.84	20.4	22.6
80%	7.89	8.82	20.4	22.5
70%	7.87	8.80	20.3	22.5
60%	7.85	8.77	20.3	22.4
50%	7.83	8.75	20.2	22.3

5.3 FEM 時刻歴応答解析

5.3.1 解析概要

計測点間の応答加速度差の組み合わせの一致度により床版劣化を推定するため、小型 FWD 試験を再現する FEM 時刻歴応答解析を行った。5.2.1 節で得られた可動支承にバネ要素を導入した FEM モデルに与える衝撃荷重は、実橋試験において得られた小型 FWD 試験機内ロードセルの荷重計測値を入力している。図-5.3 に FEM 時刻歴応答解析に用いる衝撃荷重曲線を示す。実橋における小型 FWD 試験と同様に、各主桁の支間 1/4, 1/2, 3/4 点にこの衝撃荷重を与え時刻歴応答解析を実施し、その時の応答加速度を図-5.4 に示す CHI~CH9 の 9 測点で出力する。0.1ms 間隔で 5000 個 (0.5 秒) の出力データをサンプリングしている。

床版の局所的な劣化による応答加速度差の変化を把握するため、健全モデル及び部分劣化モデルを作成して解析を行う。健全モデルは表-5.1 の物性値を用いた一様な剛性の床版を持つ 3 次元 FEM モデルである。部分劣化モデルは、健全モデルの床版において図-5.4 に示す床版パネル系計測のパネル 4 のうち中間横桁と支間 3/4 横桁の間の範囲のヤング係数を低下させたモデルである。床版のヤング係数 E は表-5.1 の初期ヤング係数 E_0 から 10% ずつ 50% まで低下させる。

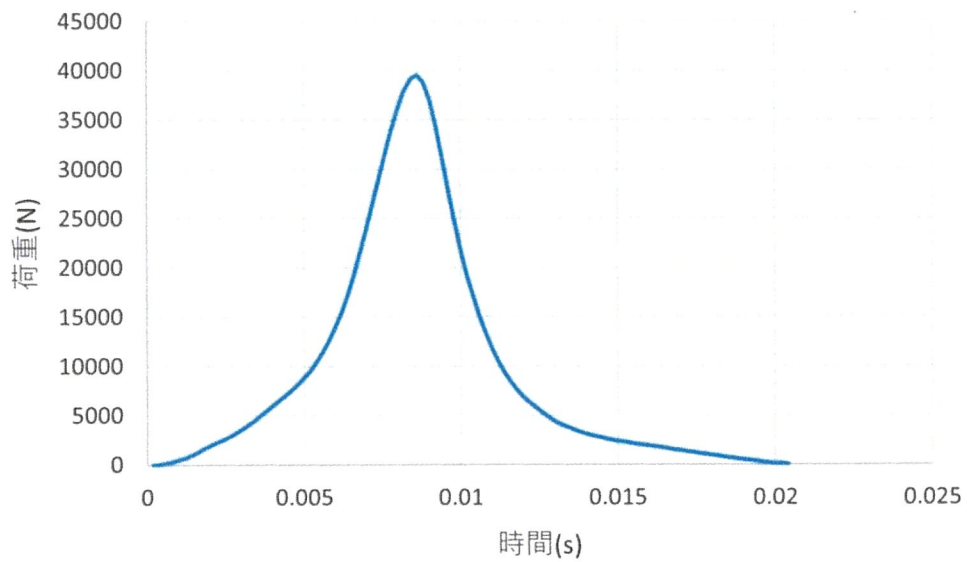


図-5.3 FEM 時刻歴応答解析に用いた衝撃荷重

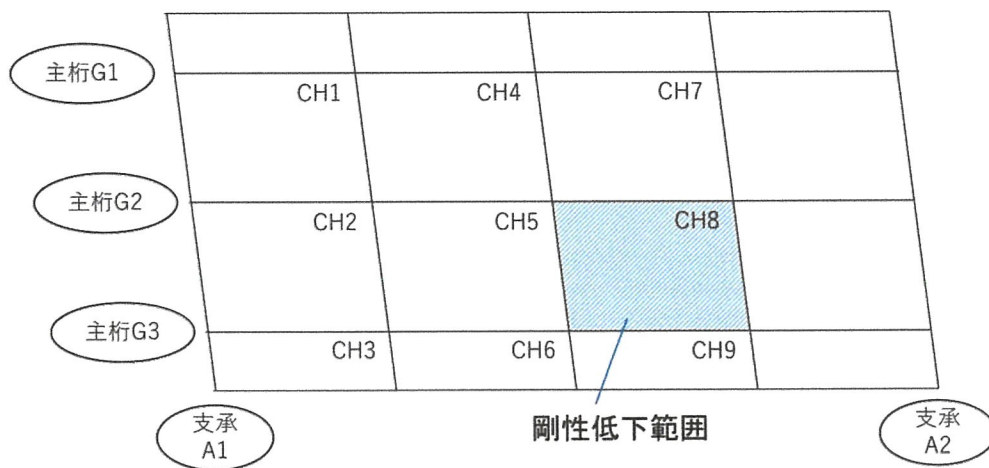


図-5.4 床版部分劣化モデルにおける剛性低下範囲

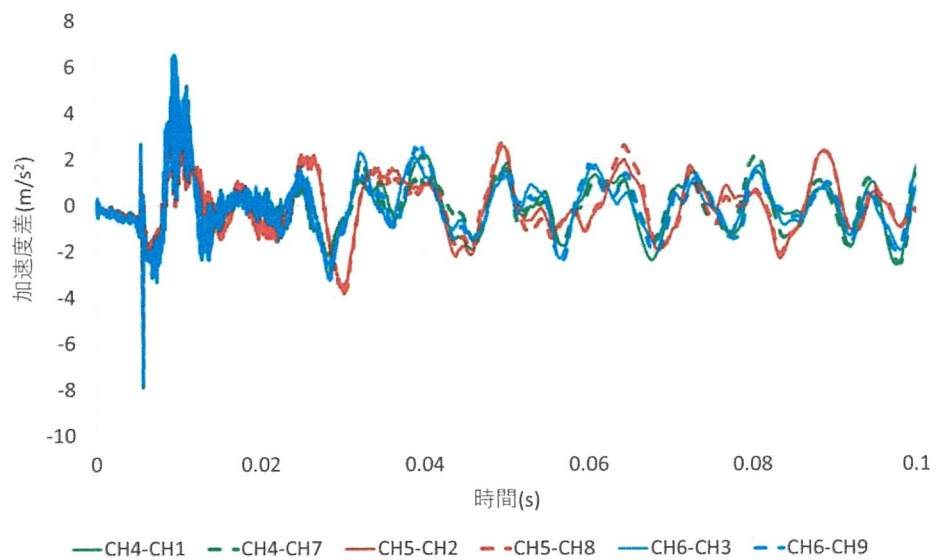
5.3.2 解析結果と考察

図-5.5～図-5.8に健全モデル及びヤング係数を50%に低下させた部分劣化モデルから得られた主桁に沿った区間と主桁に沿わない区間の応答加速度差の時間変化を示す。表-5.4に健全モデルと剛性低下範囲の剛性を10%ずつ50%まで低下させていった部分劣化モデルにおけるそれぞれの区間の組み合わせによる相関係数を示す。

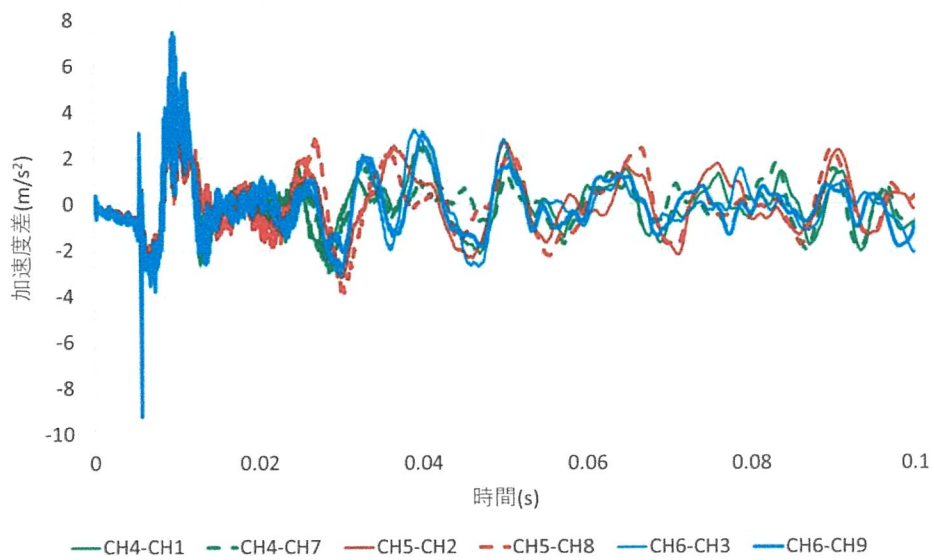
図-5.5及び図-5.6より、中桁上の区間と外桁上の区間では異なる応答挙動が示されている。また表-5.4の(a)と(b)及び(c)と(d)を比較すると、支間1/4, 3/4点打撃時の相関係数は支間中央打撃時の相関係数より小さい傾向にあることが分かった。これらの結果は実測から得られた加速度差の相関係数と同様の傾向にある。

表-5.4(b)より支間1/4, 3/4点打撃時の健全モデルの加速度差において、対角に位置する区間同士の組み合わせ(CH1-CH4とCH9-CH6, CH7-CH4とCH3-CH6)の相関が強いことが認められる。一方、その他の組み合わせでは中程度の相関である。この理由として、対象橋梁が斜橋であり橋梁形状が床版中央を中心に点対称であるため、対角となる区間の振動特性が類似していることが推測される。

表-5.4(b), (d)より劣化範囲のヤング係数を100～70%まで低下させたモデルにおいて、対角となる区間の組み合わせのうち、劣化範囲を含む組み合わせ(CH1-CH4とCH9-CH6など)は含まない組み合わせ(CH3-CH6とCH7-CH4など)よりも剛性の低下による相関係数の減少が若干大きい。しかし、剛性低下率が70%を下回ると全ての組み合わせで相関が弱まるため、詳細な劣化位置を判定するのは困難となった。

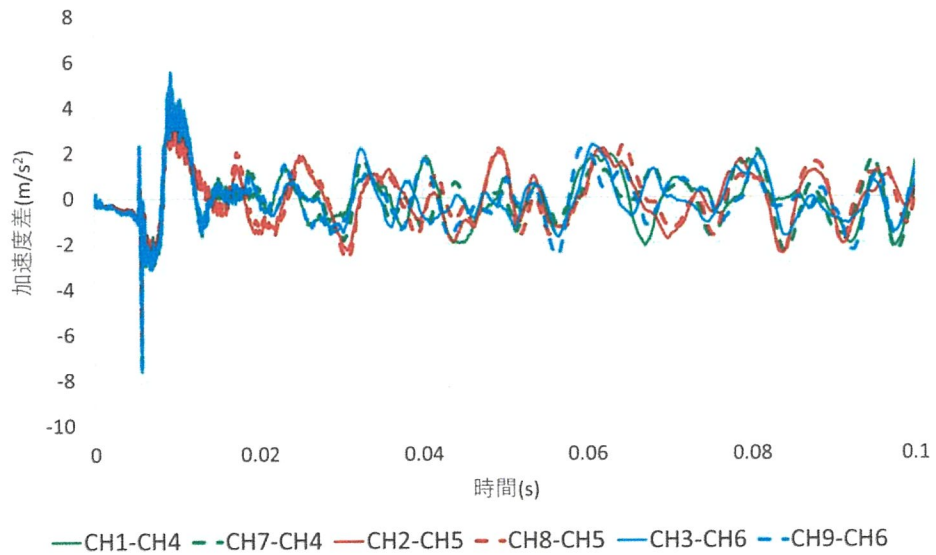


(a) 健全モデル

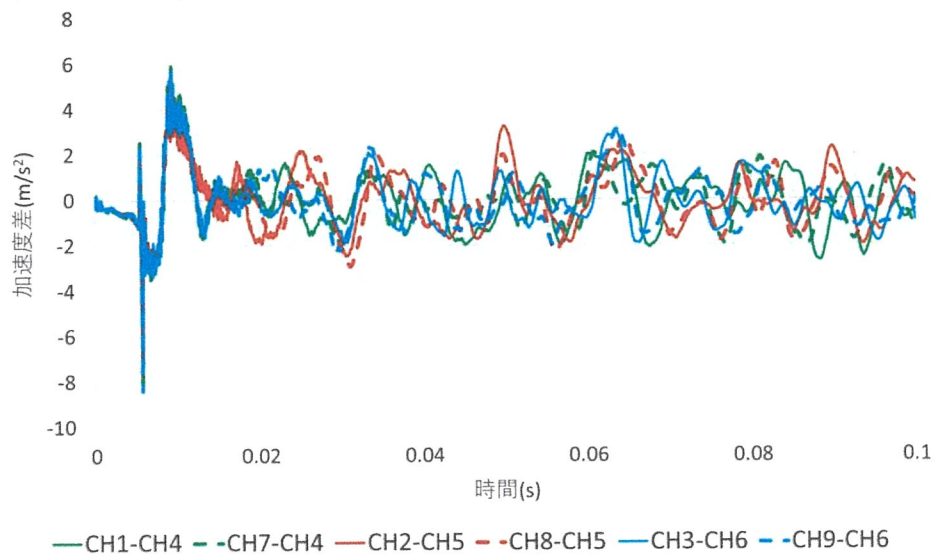


(b) 部分劣化モデル (剛性低下率 50%)

図-5.5 主桁に沿った区間の加速度差の時間変化 (主桁支間中央打撃)

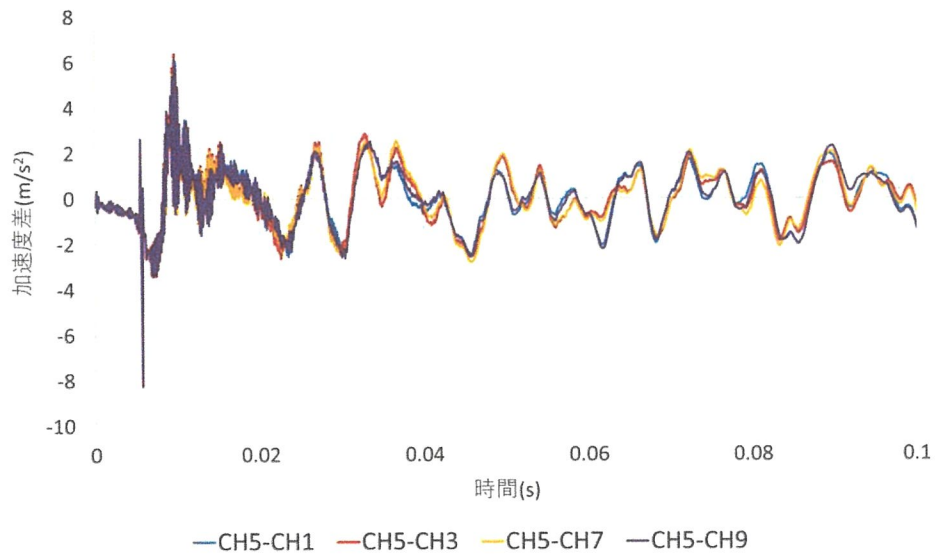


(a) 健全モデル

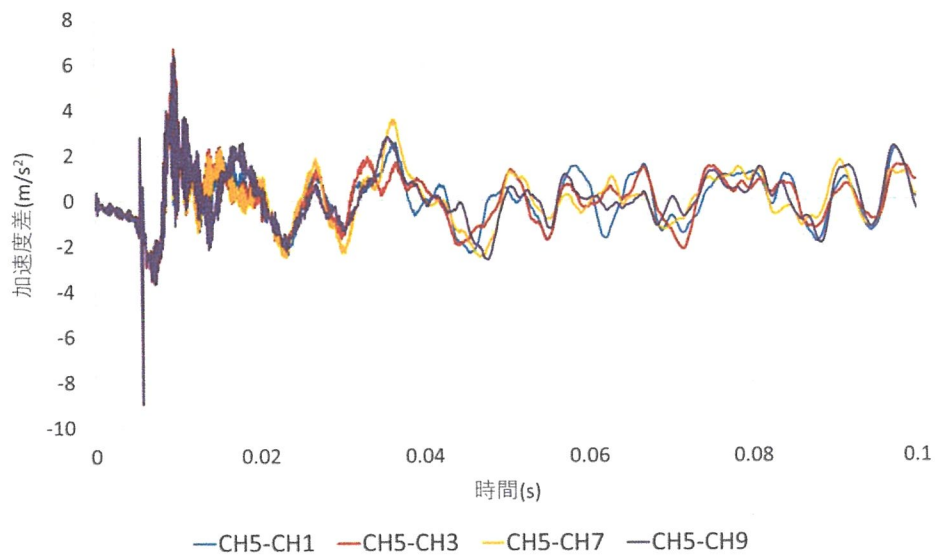


(b) 部分劣化モデル (剛性低下率 50%)

図-5.6 主桁に沿った区間の加速度差の時間変化 (主桁支間 1/4, 3/4 点打撃)

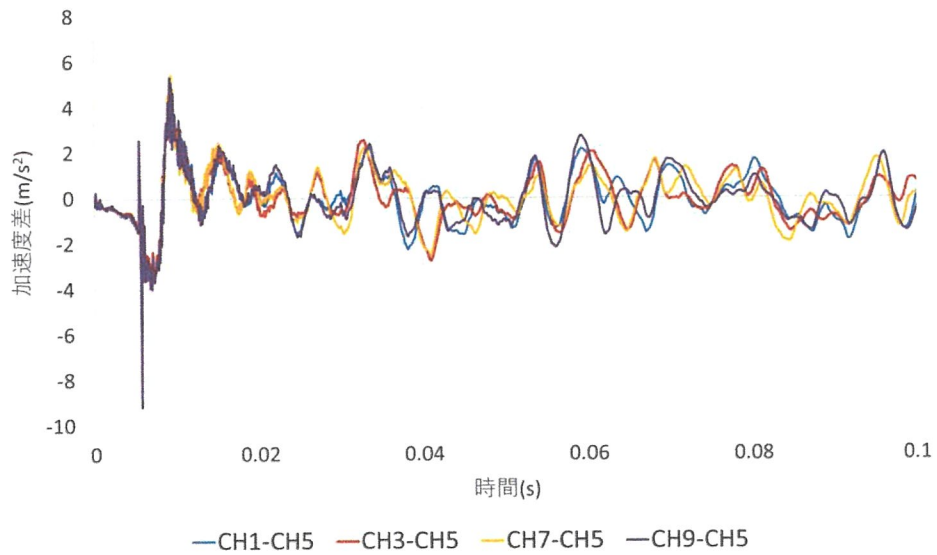


(a) 健全モデル

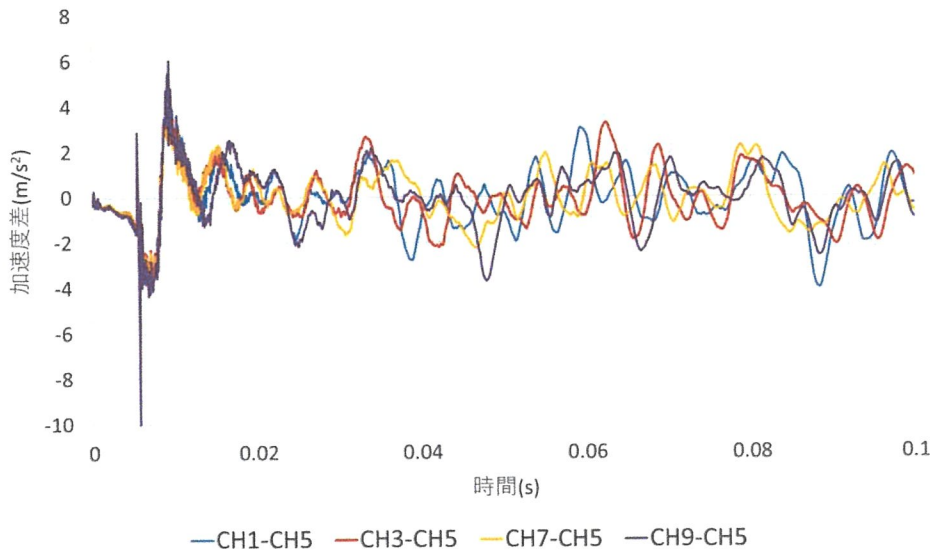


(b) 部分劣化モデル（剛性低下率 50%）

図-5.7 主桁に沿わない区間の加速度差の時間変化（中桁支間中央打撃）



(a) 健全モデル



(b) 部分劣化モデル (剛性低下率 50%)

図-5.8 主桁に沿わない区間の加速度差の時間変化
(外桁支間 1/4, 3/4 点打撃)

表-5.4 健全モデル及び部分劣化モデルにおける加速度差の相関係数

(a) 外桁支間中央打撃時の主桁に沿った区間の組み合わせ

剛性 低下率	CH4-CH1	CH6-CH3	CH4-CH1	CH4-CH1	CH4-CH7	CH4-CH7
	CH4-CH7	CH6-CH9	CH6-CH3	CH6-CH9	CH6-CH3	CH6-CH9
100%	0.90	0.93	0.86	0.95	0.88	0.88
90%	0.88	0.93	0.80	0.86	0.81	0.83
80%	0.87	0.92	0.64	0.70	0.65	0.70
70%	0.85	0.89	0.50	0.58	0.48	0.58
60%	0.82	0.84	0.57	0.64	0.46	0.61
50%	0.79	0.83	0.61	0.68	0.51	0.68

(b) 外桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿った区間の組み合わせ

剛性 低下率	CH1-CH4	CH3-CH6	CH1-CH4	CH1-CH4	CH7-CH4	CH7-CH4
	CH7-CH4	CH9-CH6	CH3-CH6	CH9-CH6	CH3-CH6	CH9-CH6
100%	0.60	0.63	0.62	0.90	0.90	0.62
90%	0.60	0.62	0.57	0.86	0.89	0.64
80%	0.57	0.62	0.51	0.78	0.82	0.61
70%	0.49	0.63	0.46	0.72	0.71	0.54
60%	0.45	0.62	0.43	0.69	0.63	0.52
50%	0.43	0.59	0.43	0.68	0.60	0.49

(c) 中桁支間中央打撃時の主桁に沿わない区間の組み合わせ

剛性 低下率	CH5-CH1 CH5-CH3	CH5-CH1 CH5-CH7	CH5-CH1 CH5-CH9	CH5-CH3 CH5-CH7	CH5-CH3 CH5-CH9	CH5-CH7 CH5-CH9
100%	0.90	0.90	0.97	0.98	0.90	0.91
90%	0.88	0.87	0.94	0.95	0.88	0.89
80%	0.83	0.84	0.87	0.88	0.86	0.85
70%	0.81	0.81	0.81	0.81	0.82	0.82
60%	0.84	0.80	0.82	0.80	0.80	0.85
50%	0.86	0.79	0.81	0.79	0.77	0.85

(d) 中桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿わない区間の組み合わせ

剛性 低下率	CH1-CH5 CH3-CH5	CH1-CH5 CH7-CH5	CH1-CH5 CH9-CH5	CH3-CH5 CH7-CH5	CH3-CH5 CH9-CH5	CH7-CH5 CH9-CH5
100%	0.67	0.65	0.86	0.88	0.65	0.67
90%	0.67	0.64	0.80	0.84	0.63	0.71
80%	0.64	0.55	0.68	0.76	0.64	0.73
70%	0.59	0.47	0.61	0.69	0.64	0.72
60%	0.58	0.46	0.60	0.58	0.62	0.66
50%	0.55	0.41	0.60	0.48	0.60	0.58

5.4 FEM 動的解析のまとめ

可動支承にバネ要素を導入した対象橋梁上部工の3次元FEM解析モデルを作成し、時刻歴応答解析によって衝撃荷重に対する応答加速度を取得した。各区間における応答加速度の差分の一致度を検討した結果、支間1/4, 3/4点打撃時における加速度差の相関係数は、支間中央打撃時よりも小さい傾向が認められた。これは実橋試験によって得られた加速度差の相関係数と同様の傾向である。特に外桁の支間1/4, 3/4点を打撃した際には曲げ2次振動モードとねじれ2次振動モードが励起され、振動形状が複雑であることが、相関係数を低下させた可能性が考えられる。

また、対角となる位置の2区間の組み合わせによる相関係数はそれ以外の組み合わせよりも高い傾向が見られた。対象橋梁が斜橋であり、橋梁形状が床版中央を中心に点対称であるため、対角位置の振動特性が類似していることが推測される。本研究で作成した解析モデルの時刻歴応答解析では減衰効果を考慮していないため、解析値は実測値よりも橋梁形状の影響を強く受けたものと思われる。

床版の部分劣化モデルのうち剛性低下率が70%までの応答加速度差において、劣化範囲を含む区間の組み合わせは含まない区間の組み合わせよりも、剛性低下による相関係数の低下が若干大きい。しかし劣化範囲の剛性低下率が健全時の70%以下になると全ての組み合わせで相関が弱まり、劣化位置の判定は困難となった。この理由は、劣化範囲の剛性の低下が大きくなると、局所的な範囲であつても劣化・損傷が橋梁全体の振動に与える影響が大きくなるためと考えられる。

第 6 章

結論

本研究では、床版取替工事が行われた小規模橋梁を対象に床版取替前後で橋体温度分布と主桁変位分布の 24 時間計測試験と小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を実施し、得られた計測データから床版取替工事に伴う振動特性や剛性の変化について検討した。また、実測試験を再現する 3 次元 FEM 静的解析及び動的解析を行い、得られた解析結果から床版内部の劣化推定について検討した。本研究で提案する二つの簡易試験と車両載荷試験から得られた知見を以下に示す。

- (1) 小規模橋梁である対象橋梁の床版取替工事前後で車両載荷試験及び車両走行試験を実施した。車両載荷試験における鉛直変位計測では、床版取替の前後で主桁の鉛直変位の減少が確認された。車両走行試験では応答加速度を計測し、計測データから対象橋梁全体系の 2 次までの固有振動モードと対応する固有振動数の特定を行った。床版取替後における鉛直変位の減少と、各振動モードにおける固有振動数の増加は、床版取替に伴う床版剛性の改善効果によるものと考えられる。
- (2) 橋梁部材への日照による温度変化の影響で日々繰り返される日周期挙動を把握するため、対象橋梁の床版取替前後において赤外線カメラ及び変位計を用いて上部工部材の温度分布、主桁の鉛直変位、支承部の水平変位の 24 時間計測試験を行った。橋体温度分布計測の結果から、舗装表面温度は特に日照や天候の影響を受けやすく、温度変化は周期性を持つことが分かった。床版下面や桁部材は、舗装表面に比べて日周期の温度変化は小さく、舗装からの熱伝導にある程度の時間差を要することが分かった。各主桁の鉛直変位計測の結果より、主桁の鉛直変位は上部工部材の温度変化に伴い周期的に変化することが分かった。また、床版取替前後における上部工各部材の計測温度と支間中央変位の 24 時間計測値間の相関について相関係数を用いて評価を行った。それらの結果、各主桁の支間中央鉛直変位は床版取替前後に関わらず床版下面及び各主桁の上下フランジ、ウェブの温度と相関が強く、外気温や舗装表面温度との相関は弱いことが分かった。実際の橋梁での 24 時間計測試験に加えて、実測温度分布を入力データとする 3 次元 FEM 静的解析を用いて主桁の鉛直変位の時間変化の再現を試みた。鉛直変位挙動は、上部工部材の温度変化以外に支承条件の影響を大きく受けることが FEM 解析から明らかになった。
- (3) 対象橋梁において床版取替工事前後で小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を実施し、主桁上の支間 1/4, 1/2, 3/4 点で応答加速度の計測を行った。

計測データの FFT 解析の結果、橋梁全体系の 2 次までの固有振動数と固有振動モードの特定ができ、それらの結果は車両走行試験の結果とほぼ一致した。床版取替後の固有振動数は、床版取替前に比べて 1 次振動数で 3~8%程度、2 次振動数で 7~11%程度の増加が認められた。これらの結果は床版取替に伴う床版剛性の増加によるものと考えられる。

- (4) 床版を 4 つのパネルに分割し、各パネル毎に加速度計を密に配置し小型 FWD 試験を実施することにより床版の局所的な振動特性の差異について検討を行った。計測データの FFT 解析の結果、床版の局所曲げ 1 次及び 2 次振動数が高次振動数帯に存在することが分かった。床版取替前では各パネルの振幅スペクトルの卓越にばらつきがあり、パネル毎に床版内部の剛性が一様でなかったことが推測された。一方で床版取替後は全てのパネルの卓越振動数が一致しており、パネル間の相対的な剛性低下はなく床版全体で一様な剛性であったと考えられる。パネル毎で小型 FWD 試験を実施する本論文の提案手法はパネル間の振動特性の差異を捉えることができるため、床版の劣化部位の推定に利用できる可能性があると思われる。
- (5) 小型 FWD 試験で得られた対象橋梁の応答加速度データを用い、計測点間に生じる応答加速度差から区間ごとの振動応答の把握を試みた。床版取替前の加速度差は取替後よりも相関が弱く振動応答の一致度が低いことから、取替前の床版は剛性が一様なものではなかったことが考えられる。他区間との相関が弱い区間は、取替前の床版パネル系計測結果において他パネルより卓越振動数の差異が大きいパネルに含まれ、取替前の床版内において当該位置での相対的な剛性低下や振動特性の変化が推測された。また、床版の局所的な損傷・劣化に対して固有振動数の変化は小さく、検討に必要な応答加速度データ数は加速度差の検討に比べて多くなる。したがって計測点間の応答加速度差を検討する本提案手法は、従来から用いられている固有振動数による検討方法に比べて、床版内において床版剛性が他と異なる部位の効率的な推定に活用できる可能性が考えられる。
- (6) 計測点間の応答加速度差の組み合わせの一致度により床版劣化を推定できるか検討するため、小型 FWD 試験を再現する FEM 時刻歴応答解析を行った。可動支承に水平バネ要素を導入した対象橋梁上部工の 3 次元 FEM モデルを作成し、衝撃荷重に対する時刻歴応答解析より求めた応答加速度差の一致度について検討を行った。実測応答加速度差による検討と同様、解析においても中桁上の区間と外桁上の区間では応答挙動が異なること、支間 1/4、

3/4点打撃時の相関係数は支間中央打撃時より小さくなる傾向が認められた。これらの原因は応答挙動が衝撃荷重の打撃点によって励起される振動モード形状の影響を強く受けるためと推測される。また床版の約10%の範囲のヤング係数を低下させた劣化モデルで解析を行った結果、計測点間の応答加速度差の組み合わせの相関が健全モデルより低下することが確認できた。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路構造物のメンテナンスの現状
- 2) 国土交通省：道路の老朽化対策，老朽化対策の取組み
- 3) 日本道路橋会：道路橋点検必携，平成 27 年度版～橋梁点検に関する参考資料
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領，2019.3
- 5) 国土交通省：発表資料 老朽化対策の取組み
- 6) 国土交通省：国土技術政策総合研究所 資料第 1112 号，橋梁の架替に関する調査結果 (V)，2020.6
- 7) 松井繁之 編著：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007
- 8) 遊田勝，岩崎正二，出戸秀明，大西弘志，小崎慎一郎：大規模改修した九年橋の固有振動数，土木学会第 71 回年次学術講演会 I-447，2016.9
- 9) 葛西智文,岩崎正二,大西弘志,出戸秀明,山村浩一：静的及び動的載荷試験を用いた九年橋の剛性評価に関する一考察,鋼構造年次論文報告集 第 23 卷,2015.11
- 10) 松原和則,岩崎正二,出戸秀明,大西弘志,杉澤康友:大規模補修した九年橋の動的挙動,土木学会第 71 回年次学術講演会,I-448,2016.9
- 11) 渡邊学歩，友廣郁也，後藤悟史，江本久雄：橋梁振動実験に基づく斜橋の固有振動数の同定と部材の損傷が振動特性に及ぼす影響に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.60A，2014.3
- 12) 小林裕介，三木千壽，出野麻油子，斉藤勝晶：合成桁橋梁の健全度モニタリングを目的とした温度変形挙動の検討，構造工学論文集 Vol.48A，2002.3
- 13) 西川和廣，山本悟司，鹿嶋久義：温度変化に伴う橋梁の挙動に関する計測結果の分析、土木学会第 47 回年次学術講演会，1992 年 9 月
- 14) 近藤直輝：小規模橋梁の経時挙動解析に基づく長期劣化予防対策の検討，修士論文，2018 年 3 月
- 15) 高橋明彦,大西弘志,近藤直輝,類家慧史,岩崎正二：既設鋼小規模橋梁における日変動挙動に与える支承部の影響,第 21 回応用力学シンポジウム,(C000125),2018.5
- 16) 高橋明彦,大西弘志,類家慧史,岩崎正二：供用年が異なる既設小規模橋梁の日変動と橋梁構造への影響,第 31 回信頼性シンポジウム講演論文集,3-19,2018.12
- 17) 菅原智大,大西弘志,高橋明彦,千葉陽子,寺島紀瑛：床版取替した小規模橋梁の剛性変化に伴う日周期変動への影響に関する検討,第 11 回道路橋床版シンポ

ジウム論文報告集,2020.10

- 18) 菅原智大,大西弘志,高橋明彦,千葉陽子,寺島紀瑛:橋梁日周期変動モニタリングとその結果を用いた橋梁挙動に関する検討,第 32 回信頼性シンポジウム講演論文集,1-13,2020.12
- 19) 西村明彦,羽矢洋:橋梁基礎の健全度判定法と判定例,第 21 回地震工学研究発表会,土木学会、1991.7
- 20) 羽矢洋:衝撃振動試験法による鉄道橋梁下部構造の健全度診断,特集/都市機能を支えるコンクリート技術, Vol.46, No.1, 2008.1
- 21) 宮村正樹,岩崎正二,出戸秀明,加藤哲,早坂洋平:衝撃振動試験および動たわみ測定による実橋 RC 床版の健全度評価,構造工学論文集, Vol.58A, pp.1134-1143, 2012.3
- 22) 土木学会舗装工学委員会:FWD および小型 FWD 運用の手引き, 2002.12
- 23) 山口恭平,早坂洋平,曾田信雄,大西弘志:FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案,構造工学論文集, Vol.61A, 2015.3
- 24) 三東豪士,大西弘志,岩崎正二,出戸秀明,宮村正樹:小型 FWD 試験機を用いた道路橋床版健全度評価の試み,第 8 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2014.10
- 25) 千田昌磨,大内皓平,千葉陽子,高橋明彦,岩崎正二,大西弘志:衝撃振動試験による RC 床版の健全度評価手法の可能性に関して,第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集,2016.11
- 26) 石川遼祐,大西弘志,岩崎正二,千葉陽子,八重樫大樹,木村如水:小型 FWD 試験機を用いた床版架け替え前後の小規模橋梁全体振動特性の比較検討,令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会,2020.3
- 27) 八重樫大樹,大西弘志,岩崎正二,千葉陽子,石川遼祐,木村如水:小型 FWD 試験機を用いた小規模橋梁床版の構造特性評価,第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集,2020.10
- 28) 八重樫大樹,大西弘志,岩崎正二,千葉陽子,木村如水:小型 FWD 試験機を用いた小規模橋梁の振動特性評価に関する一考察,鋼構造年次論文報告集 第 28 巻,2020.11
- 29) 石川遼祐,大西弘志,岩崎正二,八重樫大樹,千葉陽子:小型 FWD 試験による床版取替が小規模橋梁全体振動特性に与える影響の調査,第 20 回コンクリート構造物の補修,補強,アップグレードシンポジウム,2020.10
- 30) 石川遼祐,大西弘志,岩崎正二,千葉陽子,八重樫大樹,木村如水:床版取替が小規模橋梁の振動特性に与える影響に関する一考察,第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集,2020.10
- 31) 土木学会,道路橋床版の維持管理マニュアル 2020

- 32) ルウンミーグェット,岩崎正二,出戸秀明,大西弘志,杉澤康友:静的載荷試験を用いた 78 年供用鋼鈹桁橋の静的挙動に関する検討,鋼構造年次論文報告集 第 21 巻,pp.907-912,2013.11
- 33) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,佐々木健史郎,出戸秀明:静的載荷試験による九年橋の補修後挙動調査,鋼構造年次論文報告集 第 24 巻,2016.11
- 34) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,佐々木健史郎:静的載荷試験による既設小規模橋梁の支承挙動検討,鋼構造年次論文報告集 第 25 巻(報告),2017.11
- 35) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二:既設小規模橋梁の実橋載荷試験に基づく支承挙動検討,第 21 回応用力学シンポジウム,(C000139),2018.5
- 36) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,八重樫大樹,小野晃良:静的載荷試験に基づく単純鈹桁橋床版取替え前後の静的挙動特性の検討,令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会,2020.3
- 37) 気象庁観測データ, 各種データ・資料
- 38) 公益社団法人日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 2017 年 11 月
- 39) 石川遼祐,大西弘志,岩崎正二,八重樫大樹,千葉陽子:小型 FWD 試験による床版取替が小規模橋梁全体振動特性に与える影響の調査,第 20 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム,2020.10
- 40) 石川遼祐,大西弘志,岩崎正二,千葉陽子,八重樫大樹,木村如水:床版取替が小規模橋梁の振動特性に与える影響に関する一考察,第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集,2020.10
- 41) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,木村如水,佐々木太一:衝撃振動試験で得られた小規模橋梁床版の応答加速度に関する検討,第 21 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム,2021.10
- 42) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,木村如水,佐々木太一:複数点で計測された応答加速度による RC 床版劣化状況の推定,第 33 回信頼性シンポジウム講演論文集,2-10,2021.12
- 43) 千葉陽子,大西弘志,岩崎正二,木村如水,佐々木太一:小型 FWD 試験で得られた応答加速度を用いた床版の劣化判定手法の検討,構造工学論文集 Vol.68A,2022.3

謝辞

本論文は、岩手大学工学部 大西弘志教授、岩崎正二名誉教授のもとまとめられたものです。両先生に厚く御礼申し上げます。

指導教官である大西先生には、研究を進める上で必要な考え方や事象の捉え方、研究の方向性、社会人ドクターとしての立場や学生との接し方など、多くのご指導を賜りました。

岩崎先生には、研究の考え方、実験の注意点、論文の書き方など貴重なご助言やモチベーションが低下したときには温かい励ましをいただくなど、研究開始からこれまで終始気にかけてくださり、最後まで研究をやり遂げることが出来ました。

構造工学研究室の修士課程学生であった葛西智文氏、佐々木健史郎氏、八重樫大樹氏、石川遼祐氏、寺島紀瑛氏、木村如水氏、佐々木太一氏には、右往左往しながらの研究で指示が曖昧になりがちの中、研究を前に進めていただくなど様々ご協力いただき深く感謝申し上げます。

研究を進めるにあたり、高橋明彦氏（(株)小野工業所、現新和設計(株)）には実橋試験フィールドでの共同の実験に声をかけてくださり、また博士課程の先輩としてご助言、ご意見をいただき精神面でも前向きに考えることが出来ました。心より感謝申し上げます。

(株)小野工業所 社長 小野晃良氏、取締役技術部長 重松伸也氏には、赤山橋載荷試験および床版取替工事において、様々な要望に対してご対応いただきました。上山市副主幹兼土木係長 武田秀人氏には、実験フィールドとしての提供にご尽力いただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に、本論文をまとめるにあたり多くの方々にご指導、ご協力をたくさんいただきました。心より感謝の意を表し謝辞とさせていただきます。

2022年9月

岩手大学大学院工学研究科機械・社会環境システム工学専攻

千葉 陽子

付録

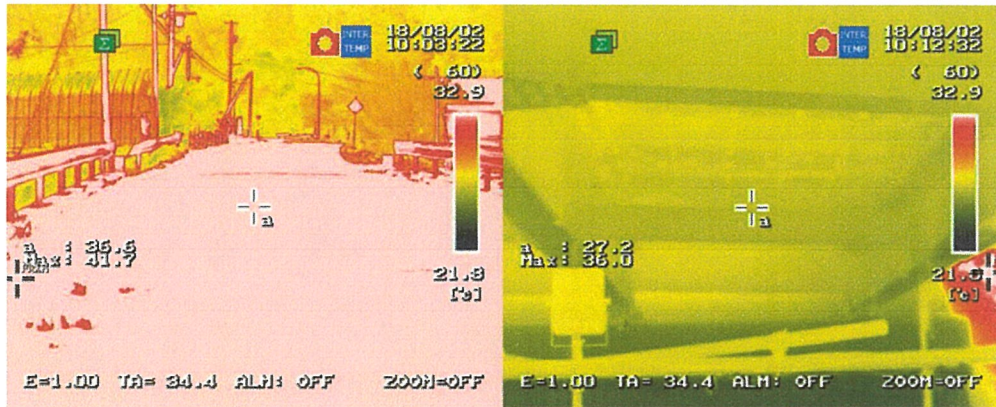


写真-付.1 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日10:00)

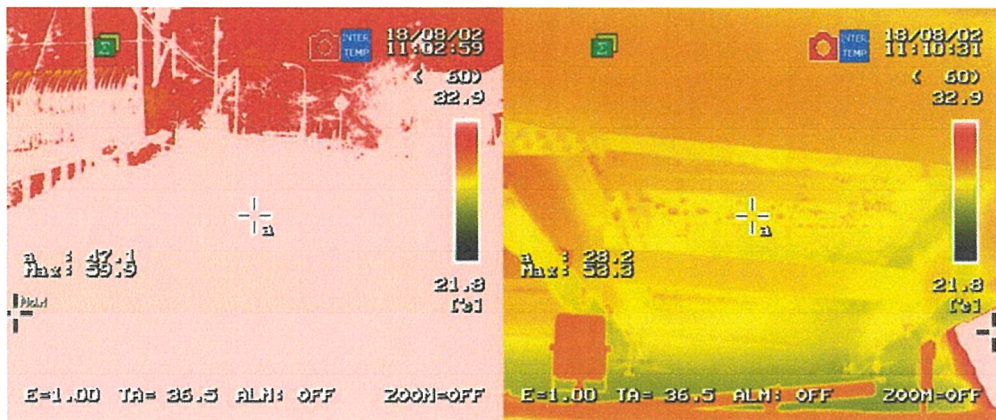


写真-付.2 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日11:00)

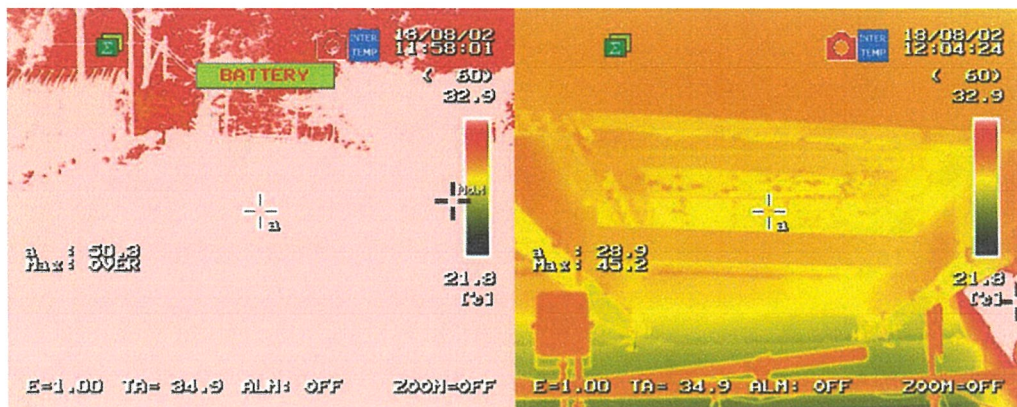


写真-付.3 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日12:00)

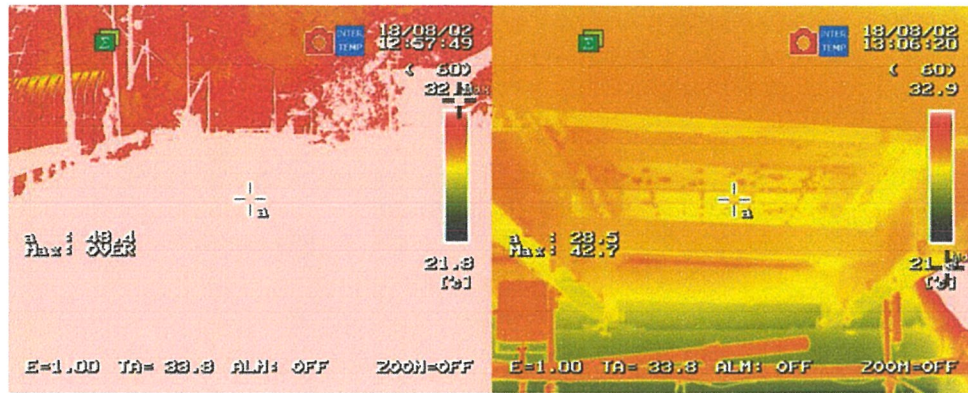


写真-付.4 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日13:00)

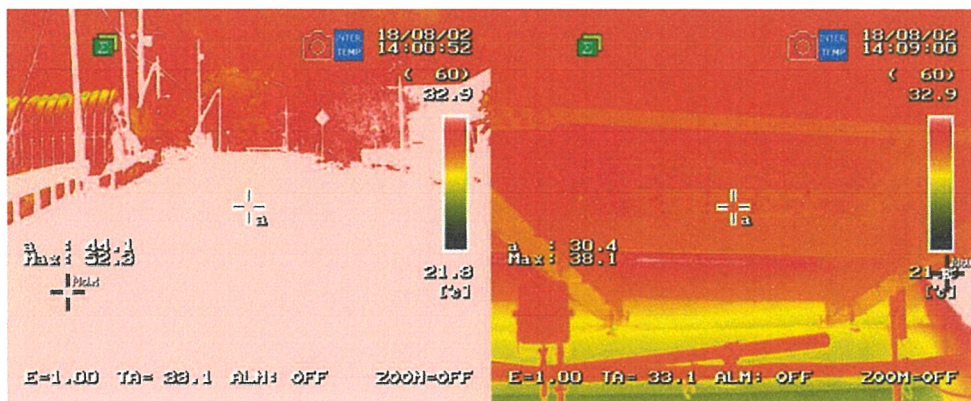


写真-付.5 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日14:00)



写真-付.6 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日16:00)



写真-付.7 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2018年8月2日17:00)



写真-付.8 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2018年8月2日19:00)

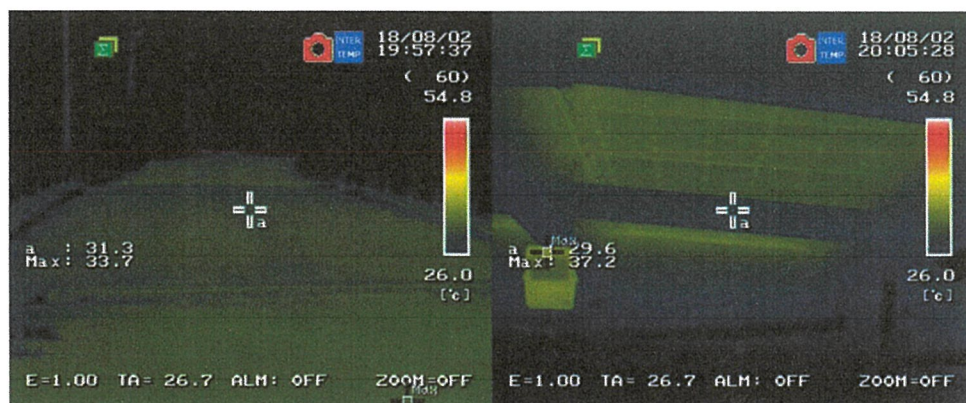


写真-付.9 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2018年8月2日20:00)

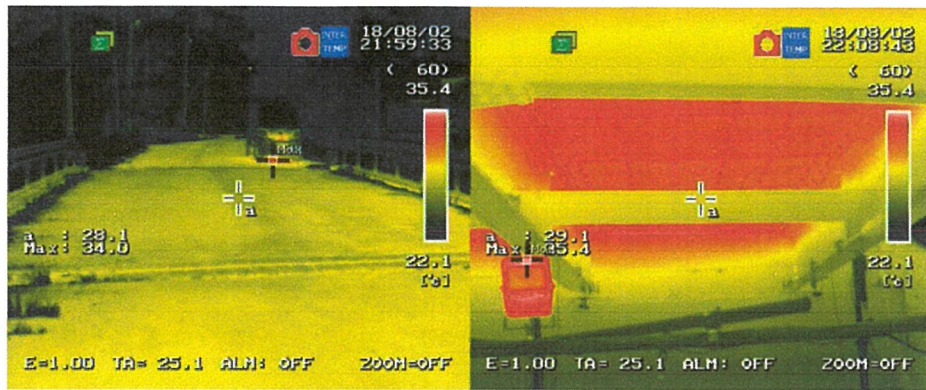


写真-付.10 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日22:00)



写真-付.11 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月2日23:00)

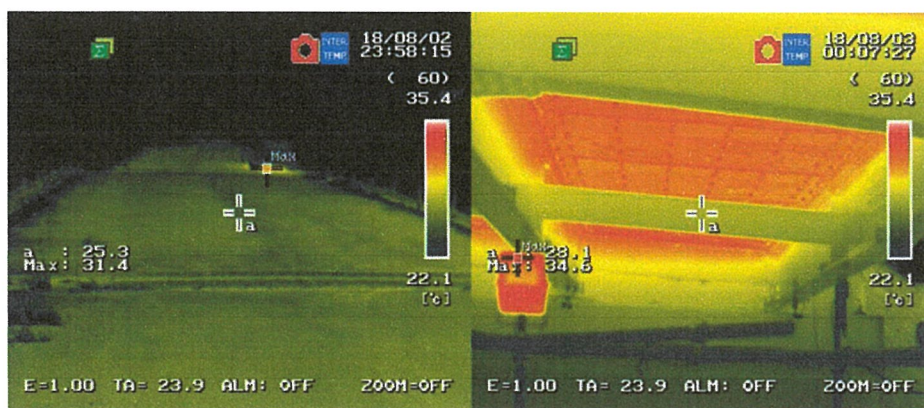


写真-付.12 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日0:00)

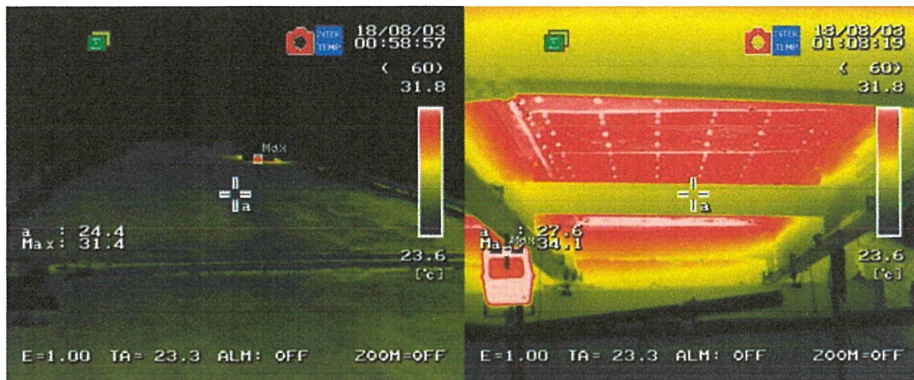


写真-付.13 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日 1:00)

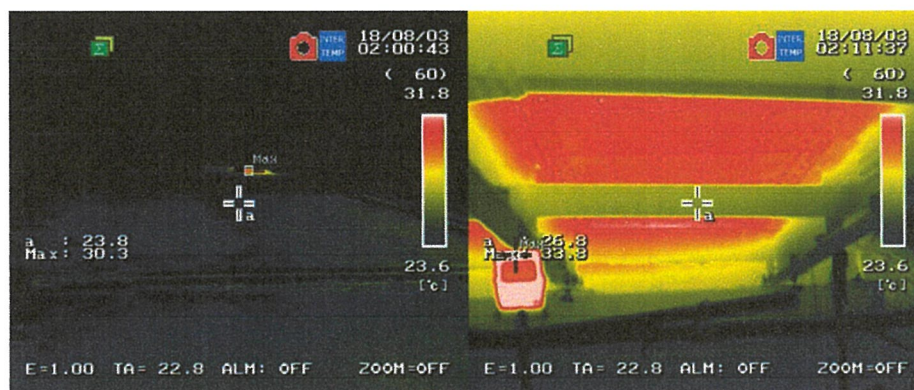


写真-付.14 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日 2:00)

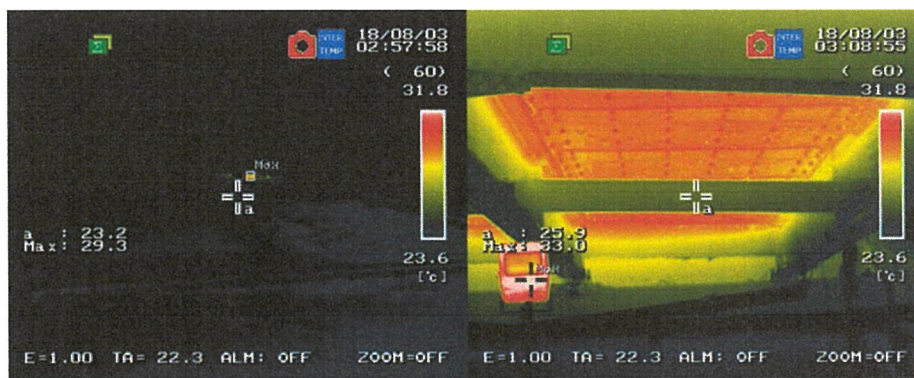


写真-付.15 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日 3:00)



写真-付.16 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日4:00)

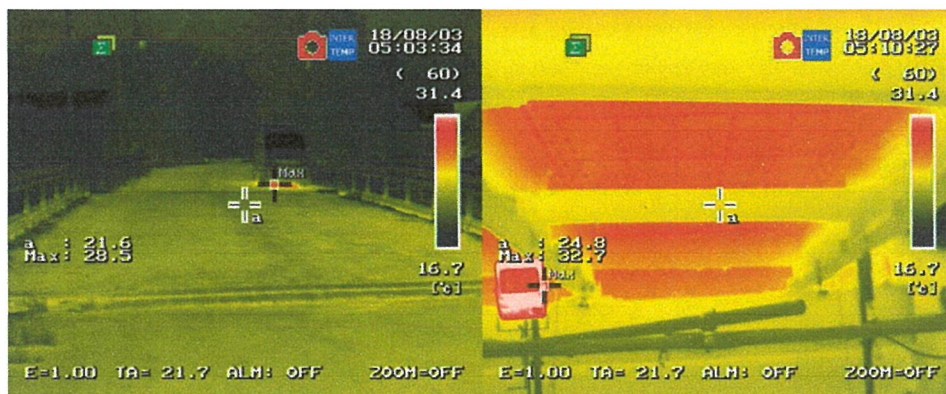


写真-付.17 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日5:00)



写真-付.18 床版取替前赤外線サーモグラフィ画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日6:00)



写真-付.19 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日7:00)

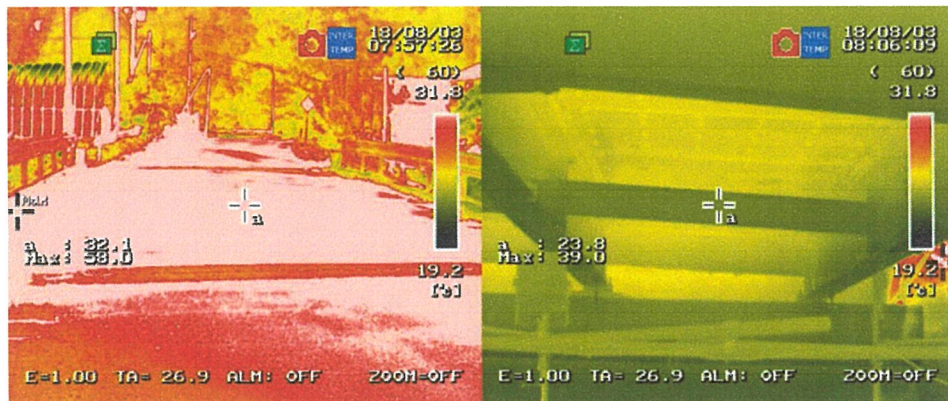


写真-付.20 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日8:00)

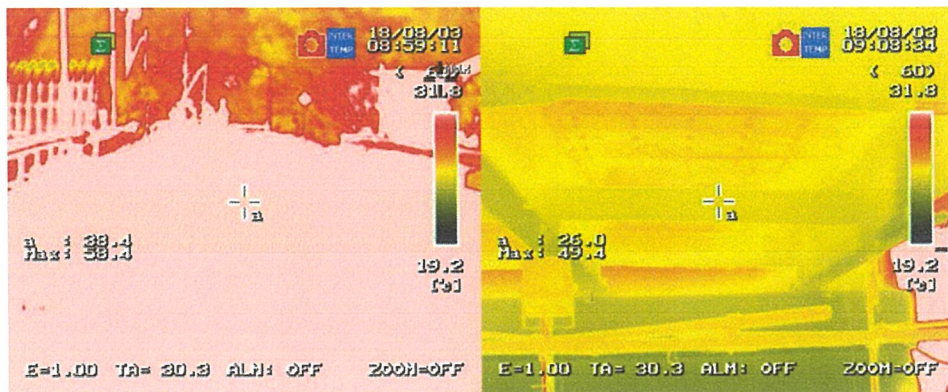


写真-付.21 床版取替前赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2018年8月3日9:00)

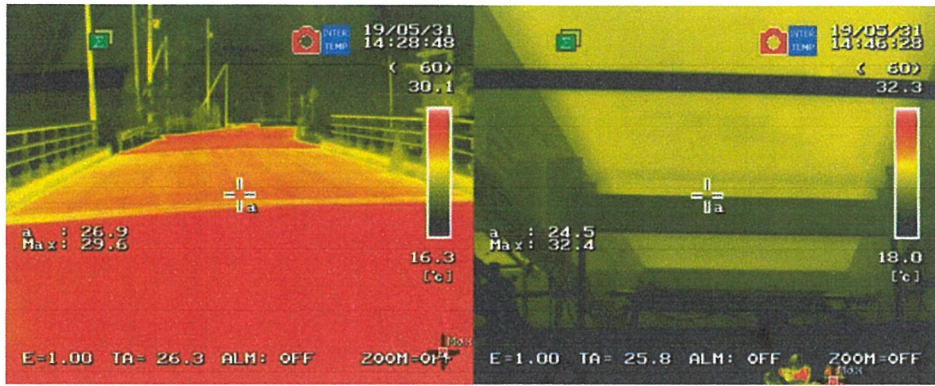


写真-付.22 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2019年5月31日14:30)



写真-付.23 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2019年5月31日15:30)

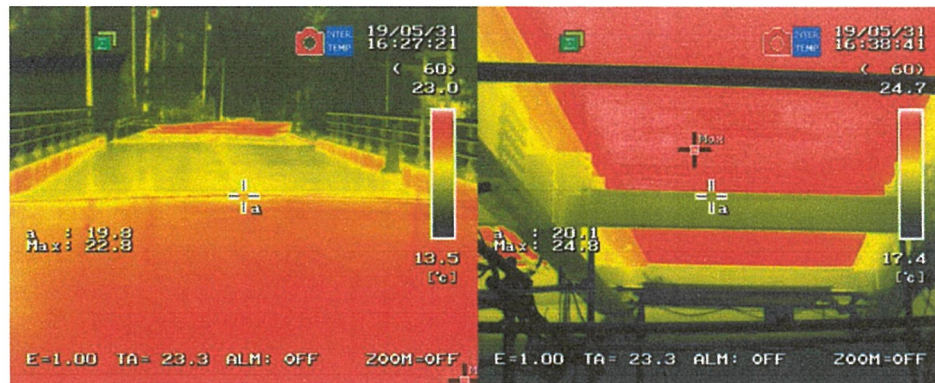


写真-付.24 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及びび桁，2019年5月31日16:30)



写真-付.25 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日17:30)

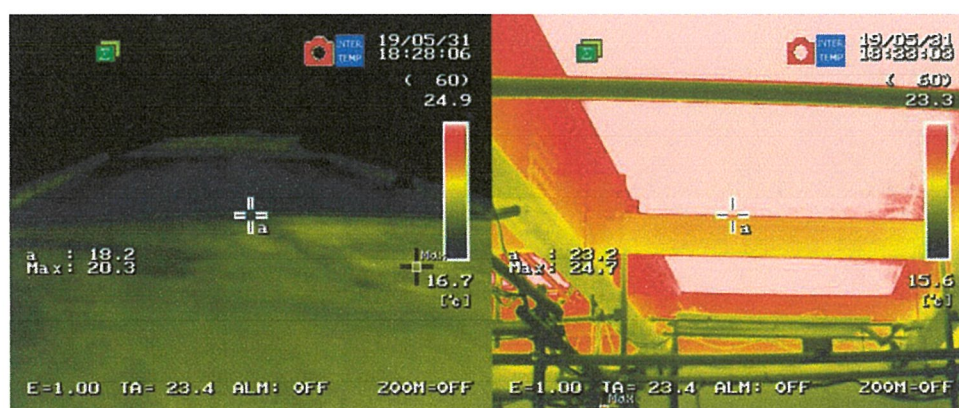


写真-付.26 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日18:30)

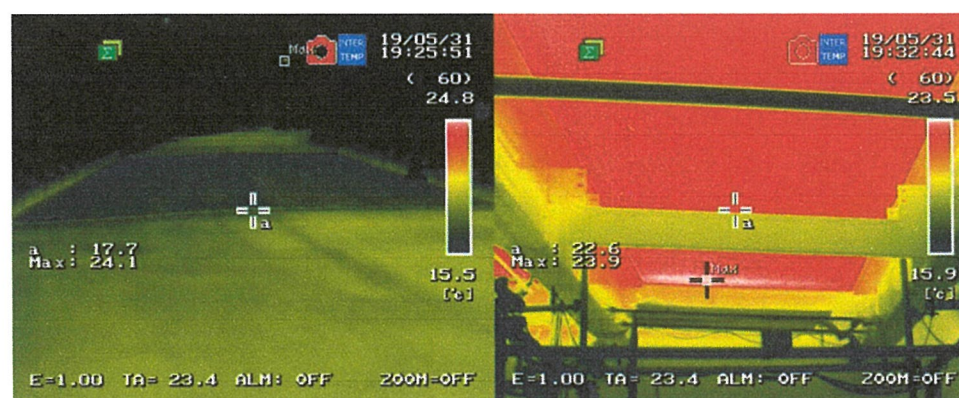


写真-付.27 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日19:30)



写真-付.28 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日20:30)



写真-付.29 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日21:30)

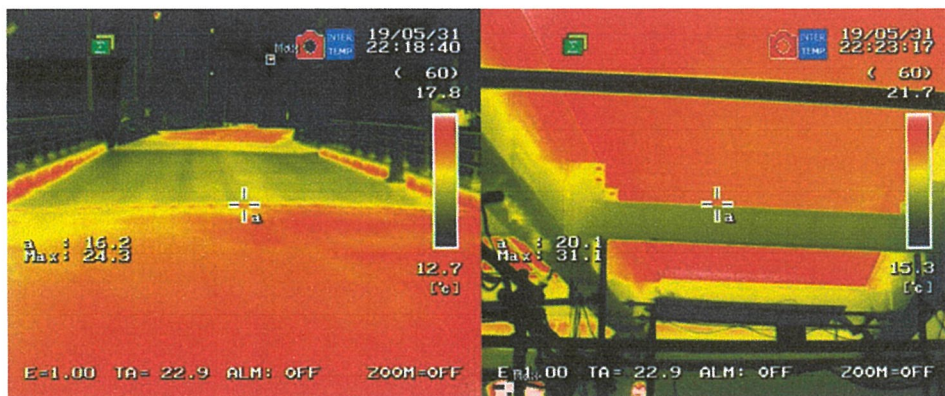


写真-付.30 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日22:30)



写真-付.31 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月31日23:30)



写真-付.32 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月1日1:30)



写真-付.33 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年5月1日2:30)



写真-付.34 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日 3:30)

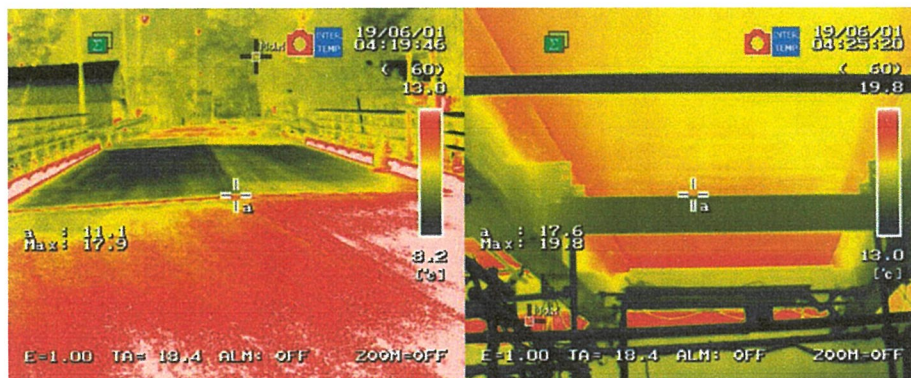


写真-付.35 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日 4:30)

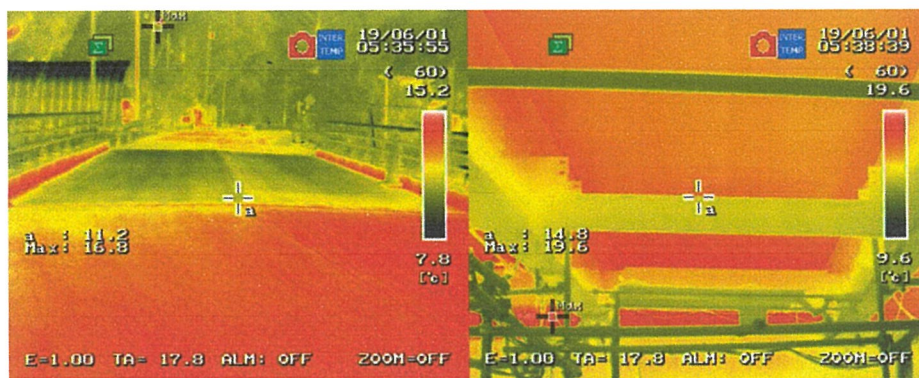


写真-付.36 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日 5:30)



写真-付.37 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日6:30)



写真-付.38 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日7:30)



写真-付.39 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
(左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日8:30)

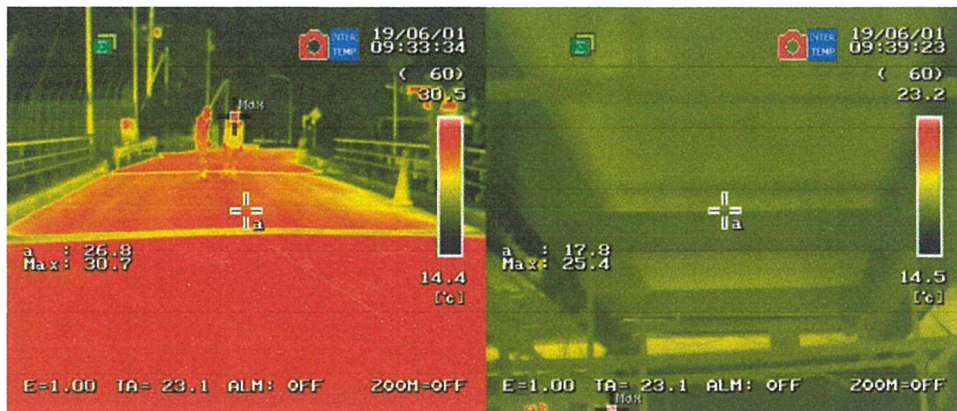


写真-付.40 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日9:30)



写真-付.41 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日10:30)



写真-付.42 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日11:30)



写真-付.43 床版取替後赤外線サーモグラフィー画像
 (左：舗装表面，右：床版下面及び桁，2019年6月1日12:30)

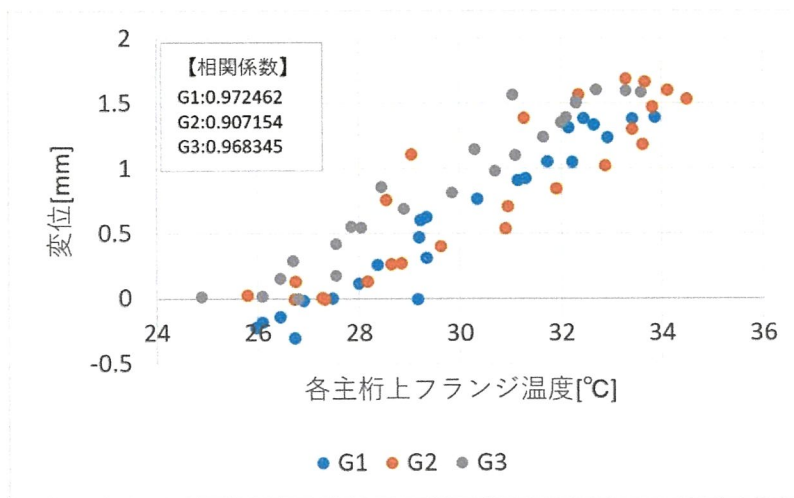


図-付.1 床版取替前の各主桁上フランジの計測温度と鉛直変位の分布図

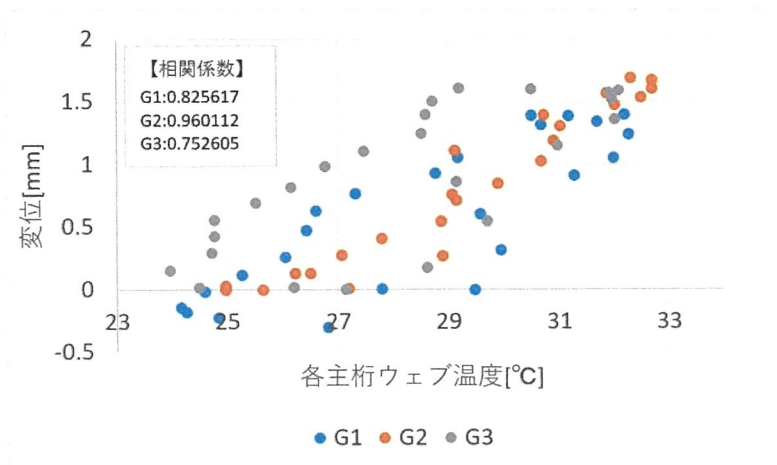


図-付.2 床版取替前の各主桁ウェブの計測温度と鉛直変位の分布図

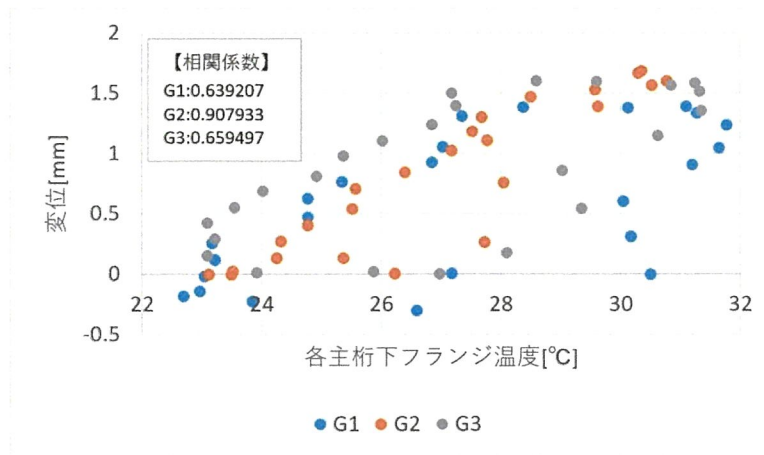


図-付.3 床版取替前の各主桁下フランジの計測温度と鉛直変位の分布図

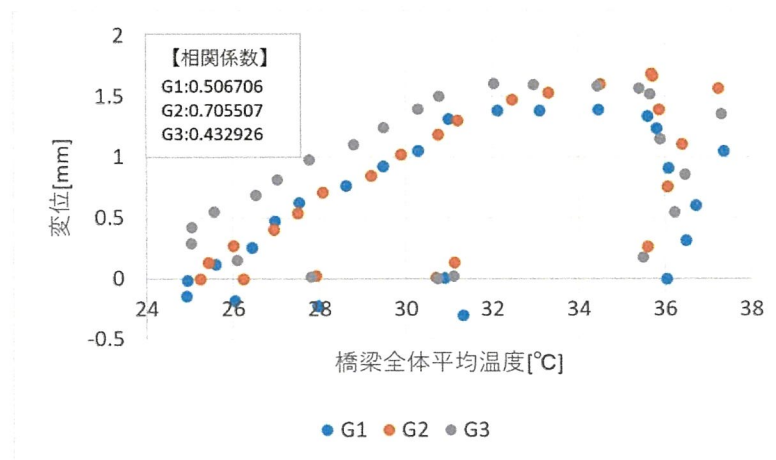


図-付.4 床版取替前の橋梁全体の平均温度と鉛直変位の分布図

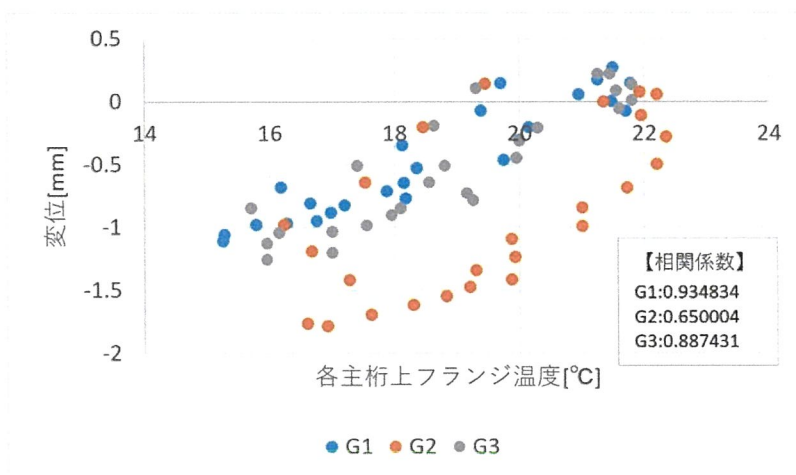


図-付.5 床版取替後の各主桁上フランジの計測温度と鉛直変位の分布

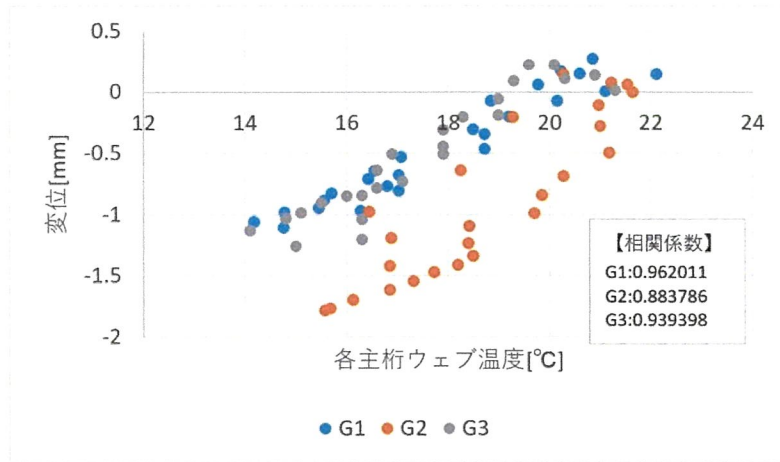


図-付.6 床版取替後の各主桁ウェブの計測温度と鉛直変位の分布図

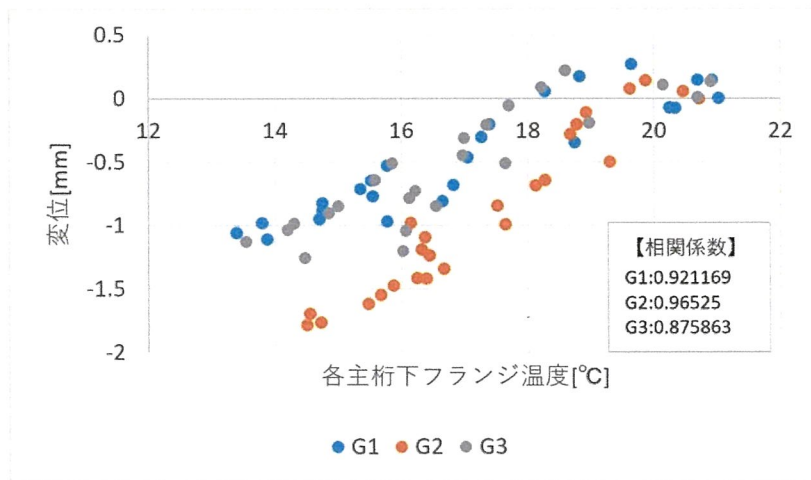


図-付.7 床版取替後の各主桁下フランジの計測温度と鉛直変位の分布

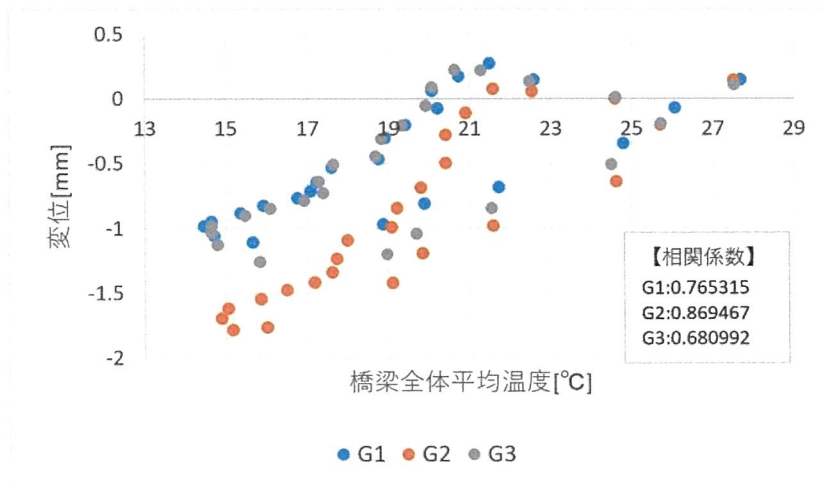


図-付.8 床版取替後の橋梁全体の平均温度と鉛直変位の分布図

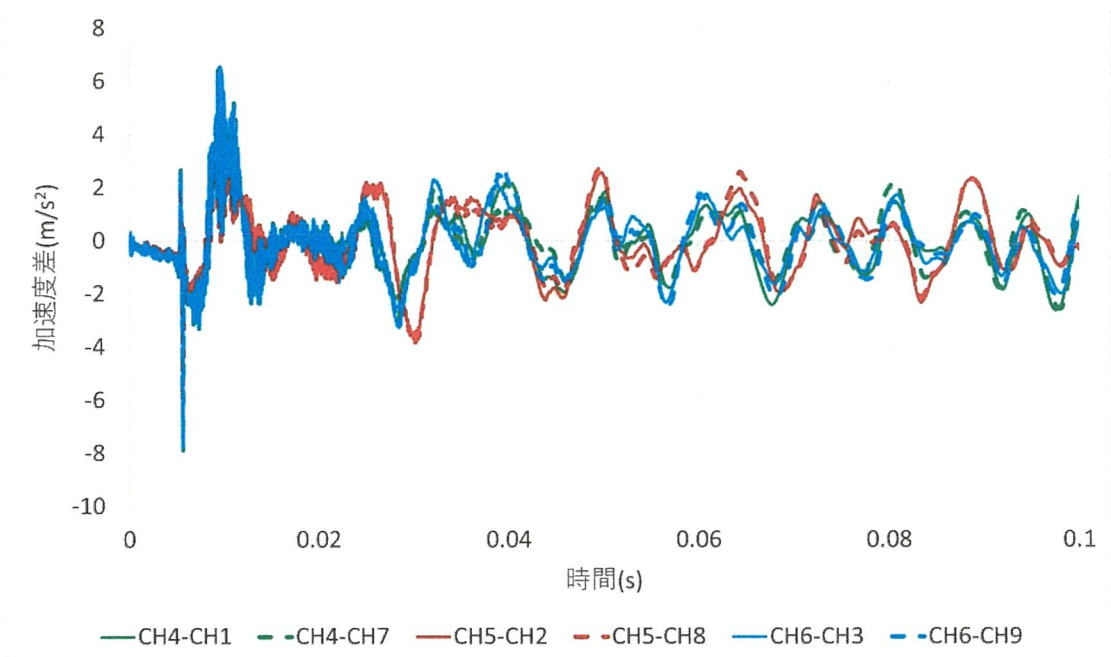


図-付.9 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 100%

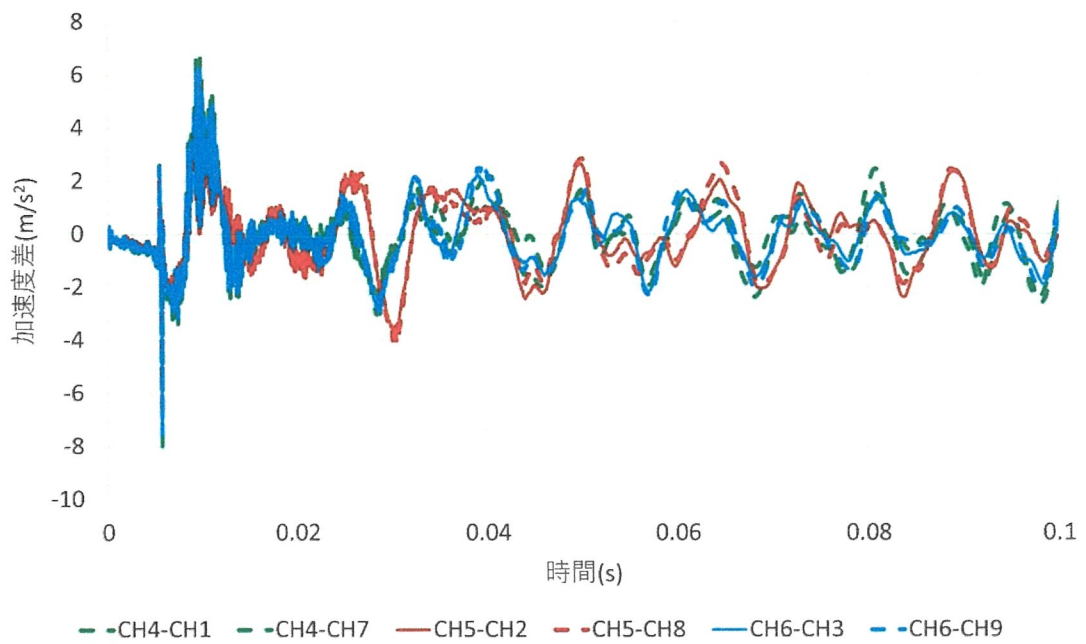


図-付.10 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 90%

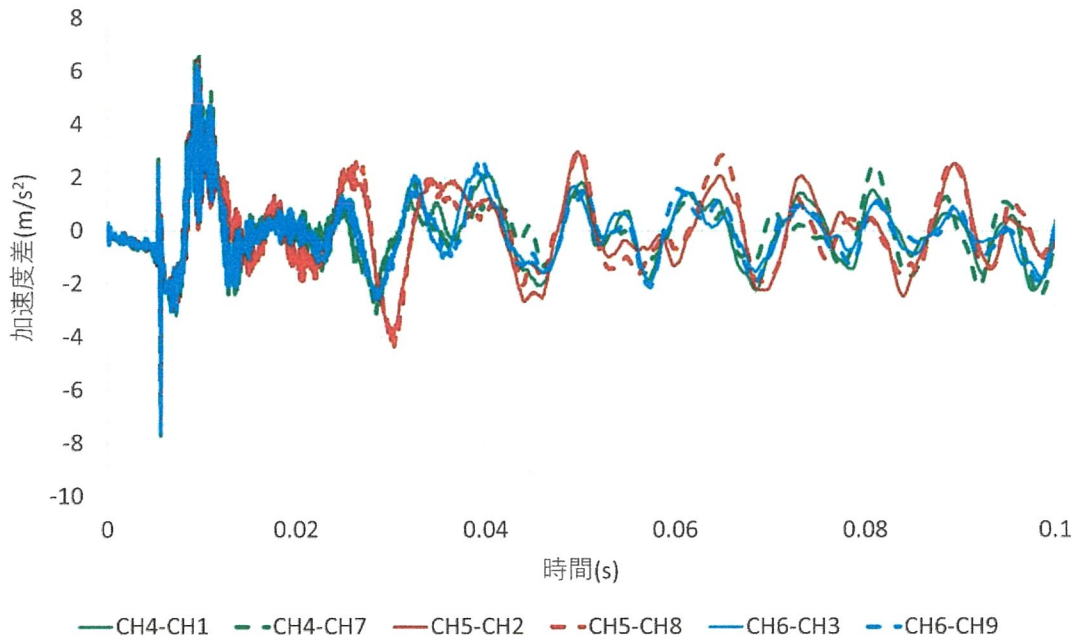


図-付.11 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 80%

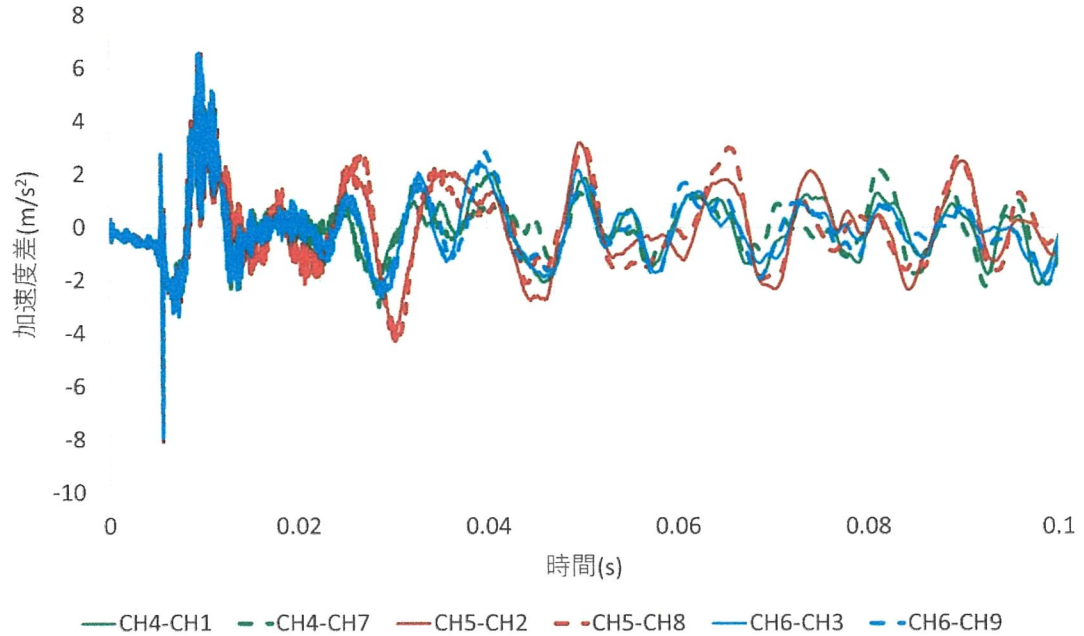


図-付.12 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 70%

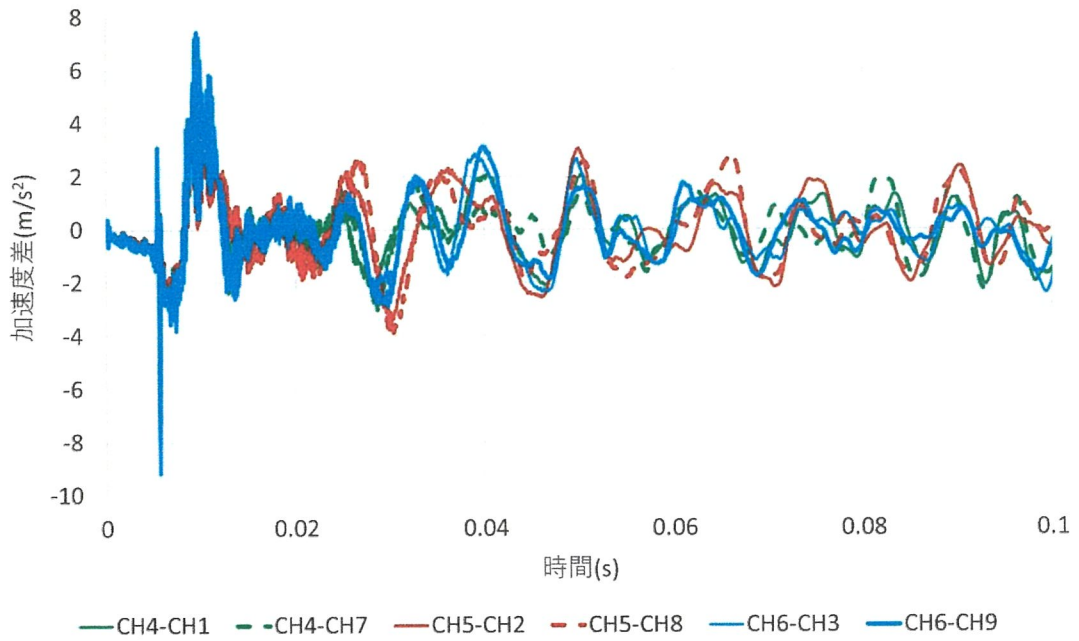


図-付.13 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 60%

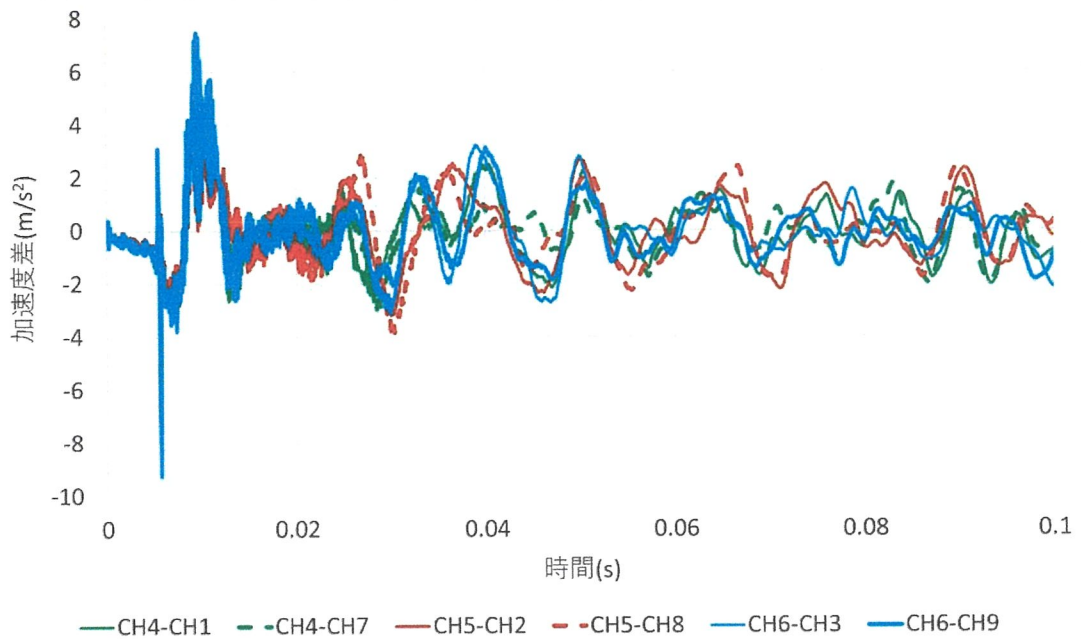


図-付.14 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 50%

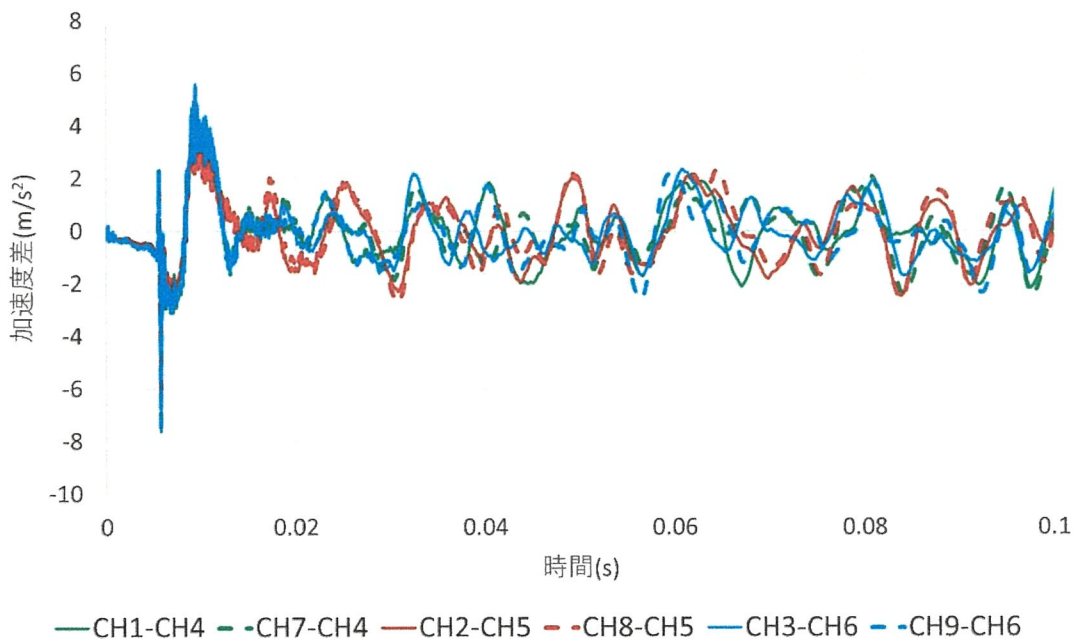


図-付.15 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 100%

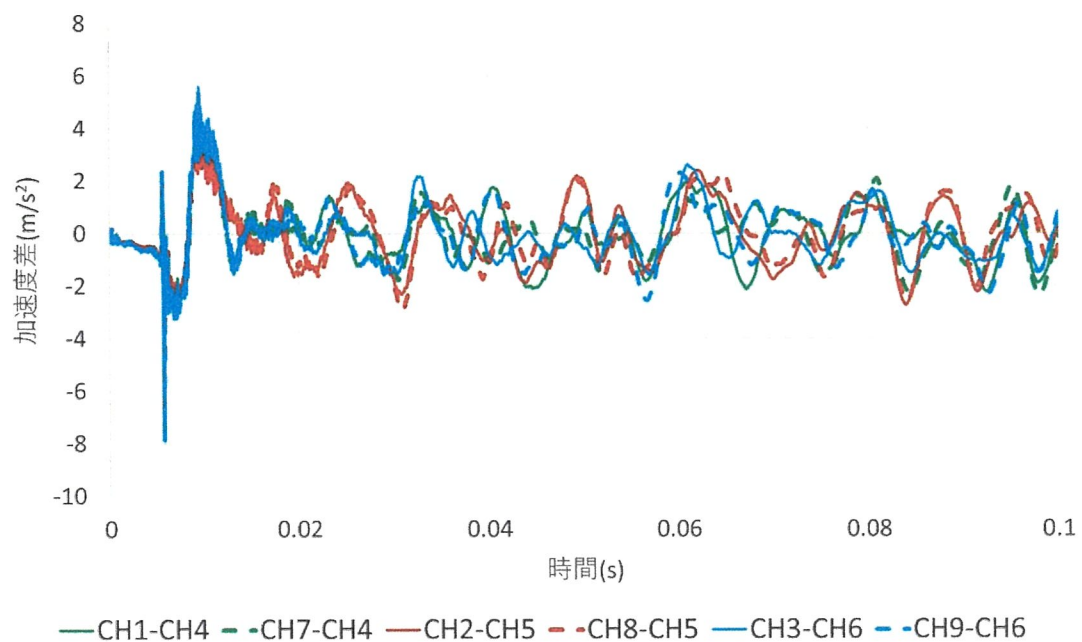


図-付.16 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 90%

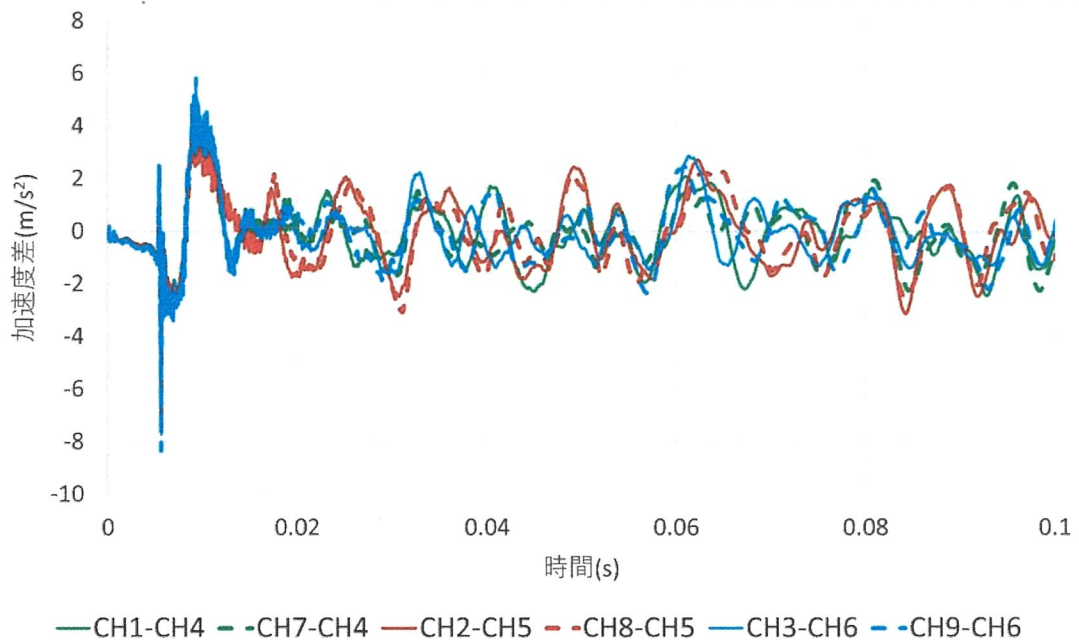


図-付.17 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 80%

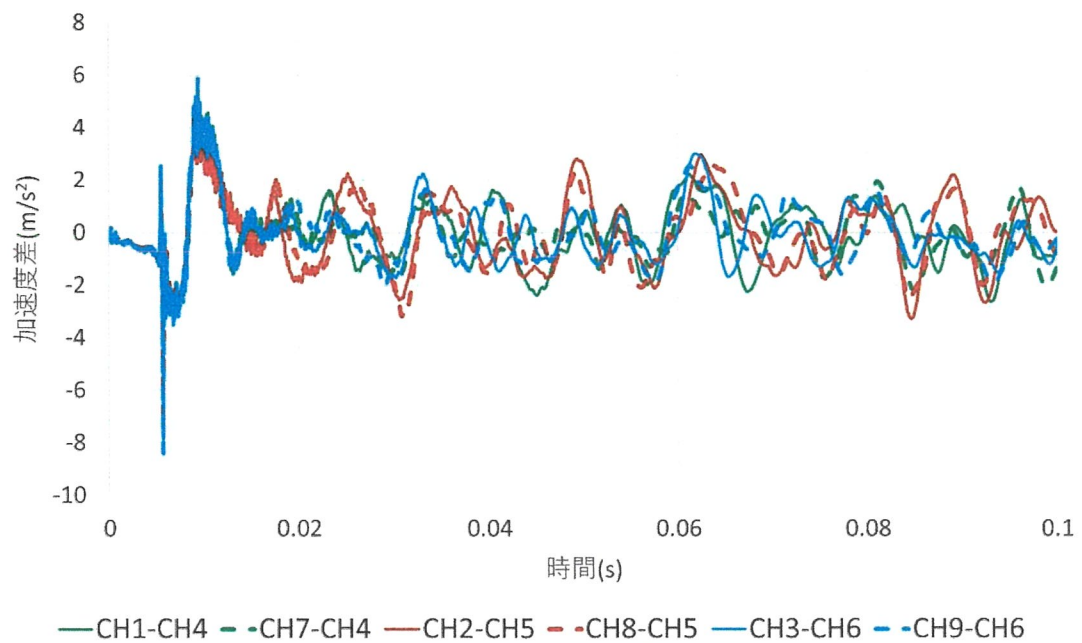


図-付.18 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 70%

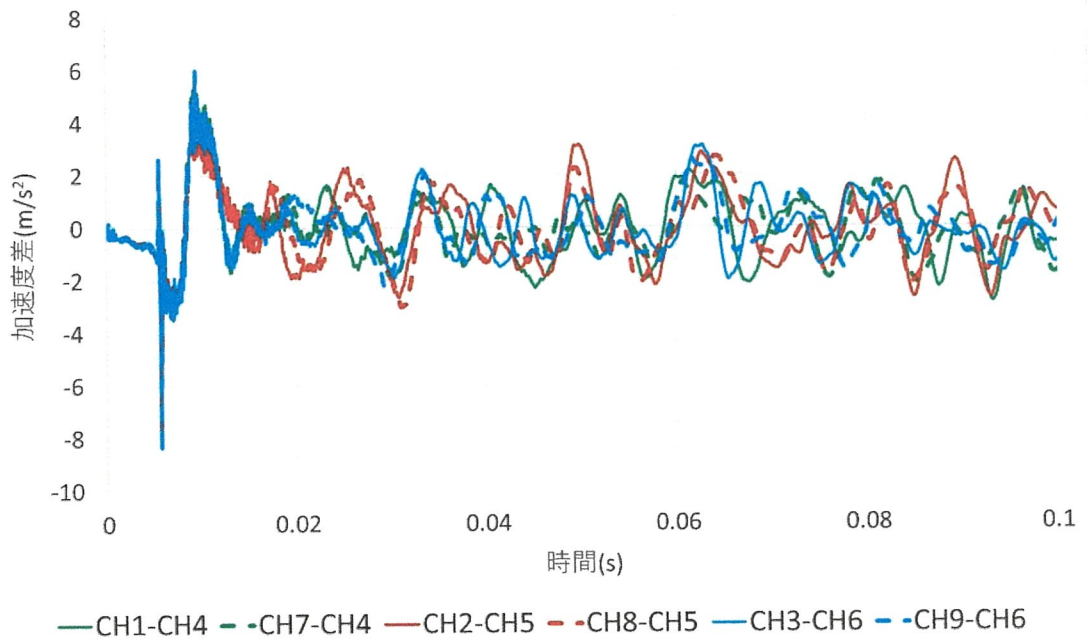


図-付.19 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 60%

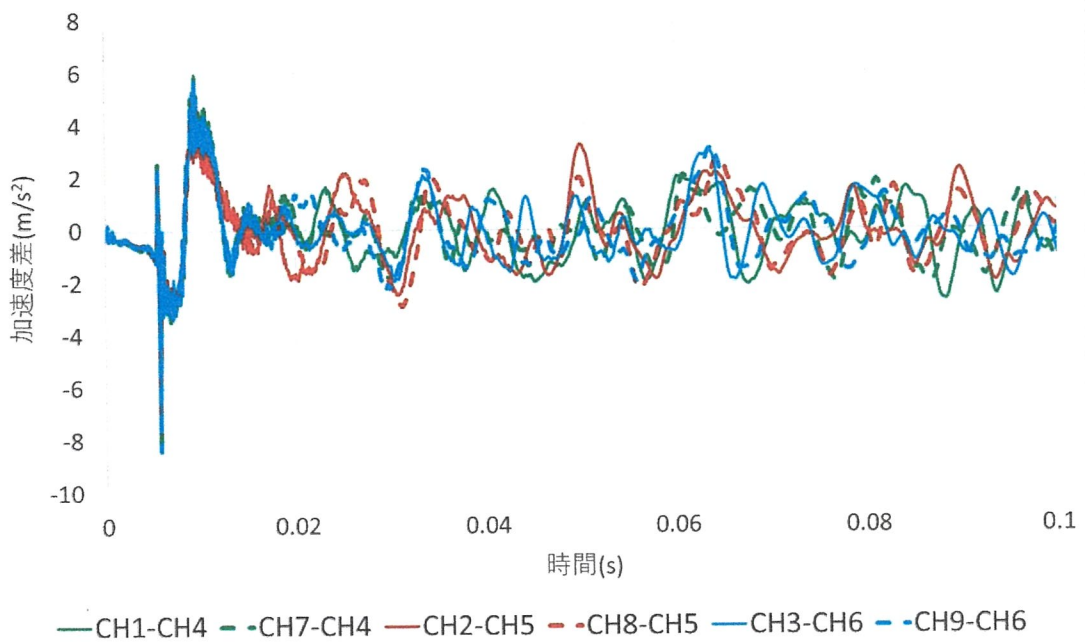


図-付.20 時刻歴応答解析結果 主桁方向区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 50%

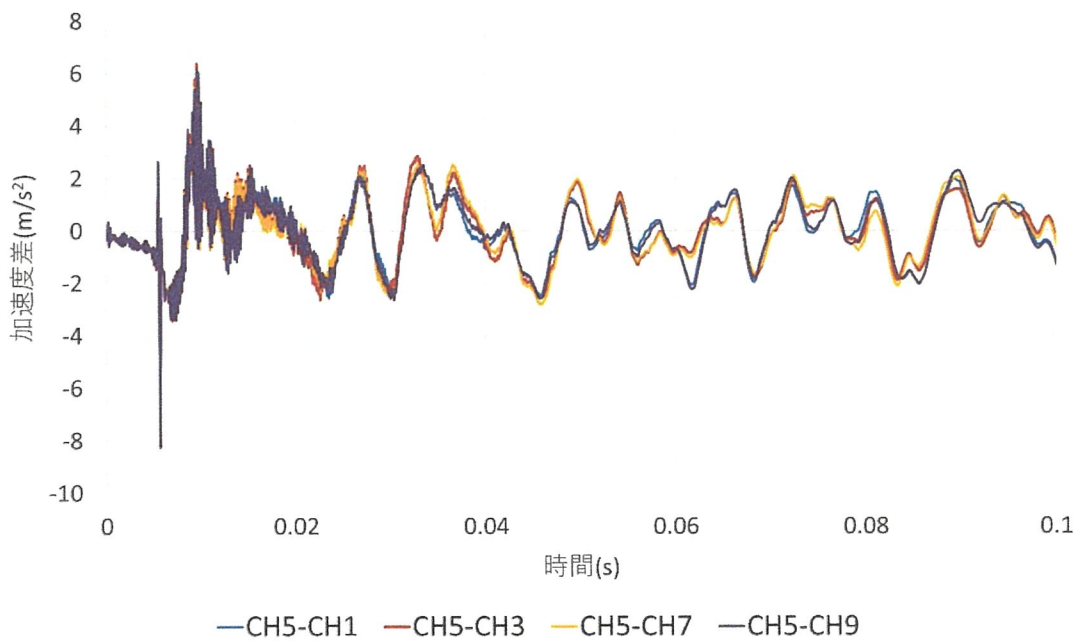


図-付.21 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 100%

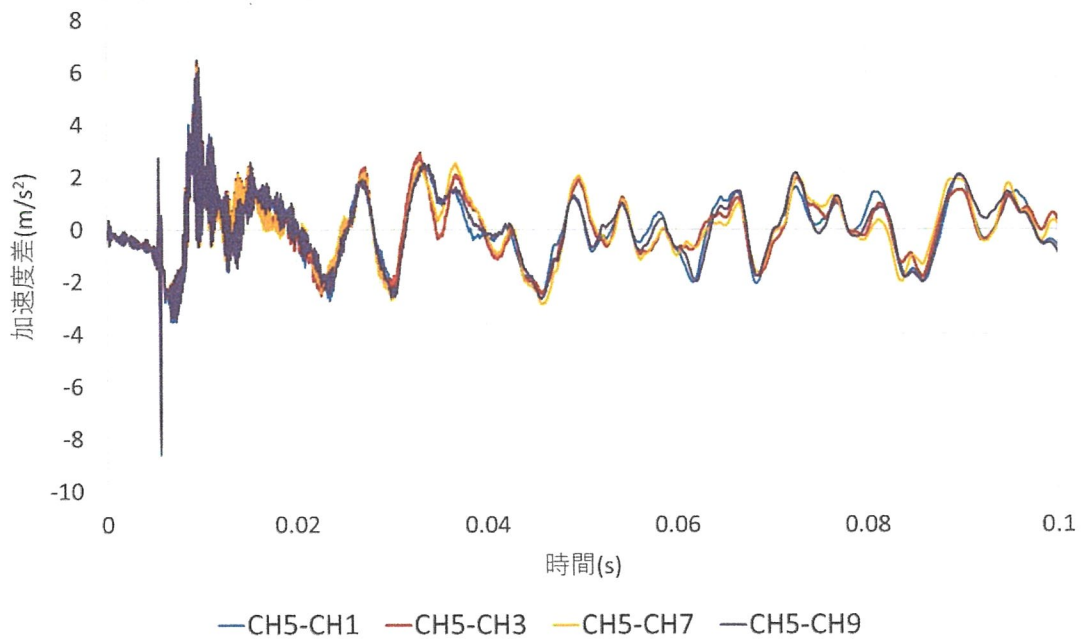


図-付.22 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 90%

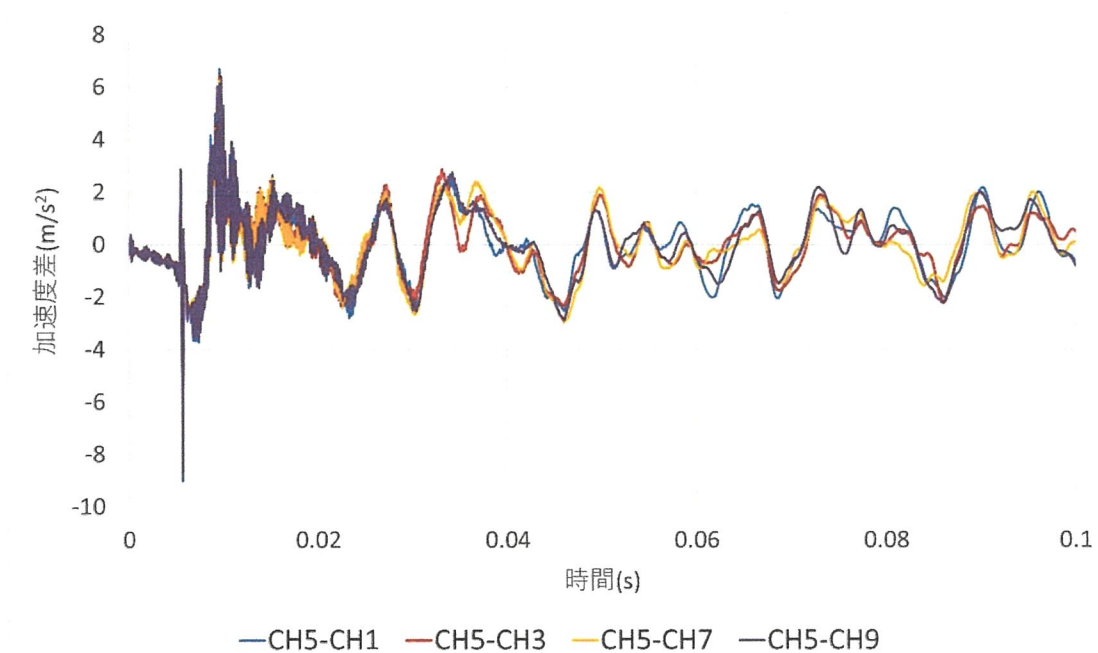


図-付.23 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 80%

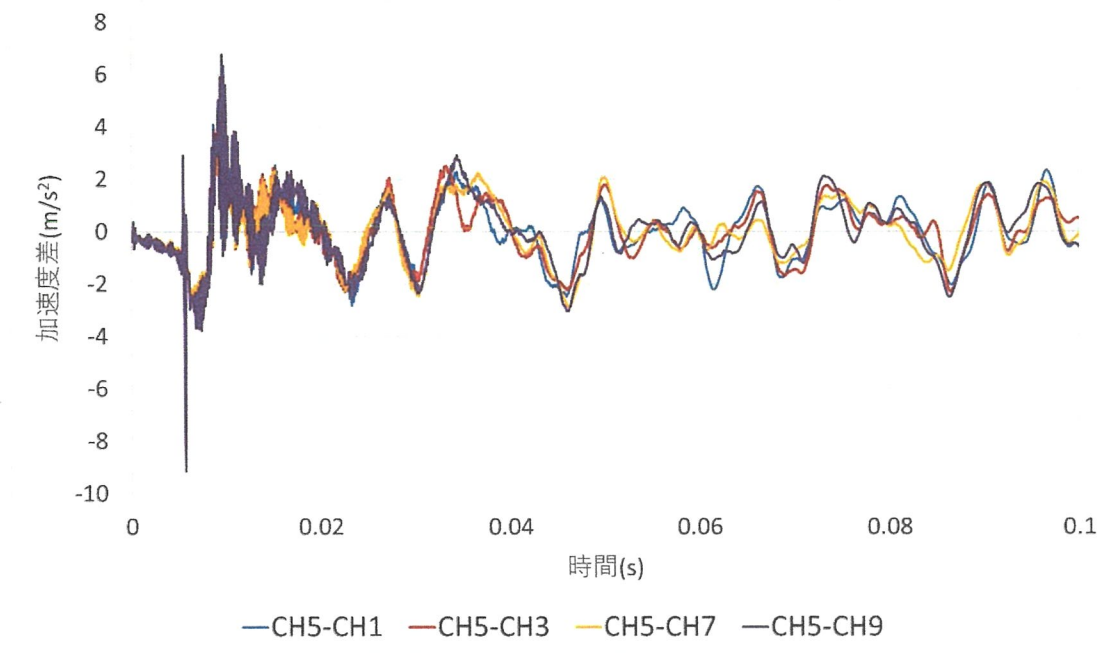


図-付.24 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 70%

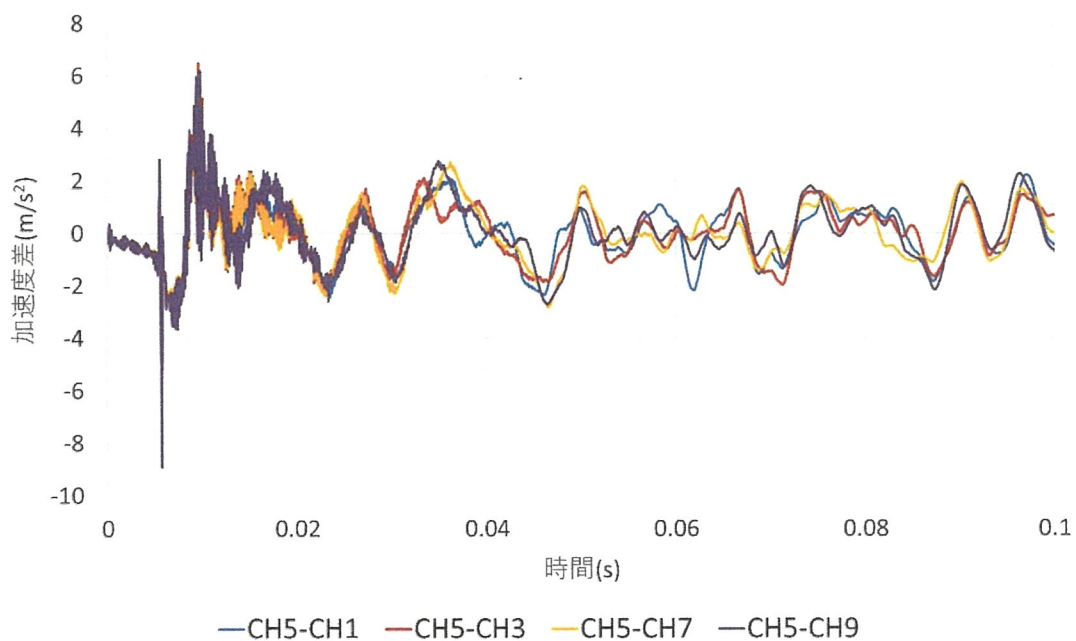


図-付.25 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 60%

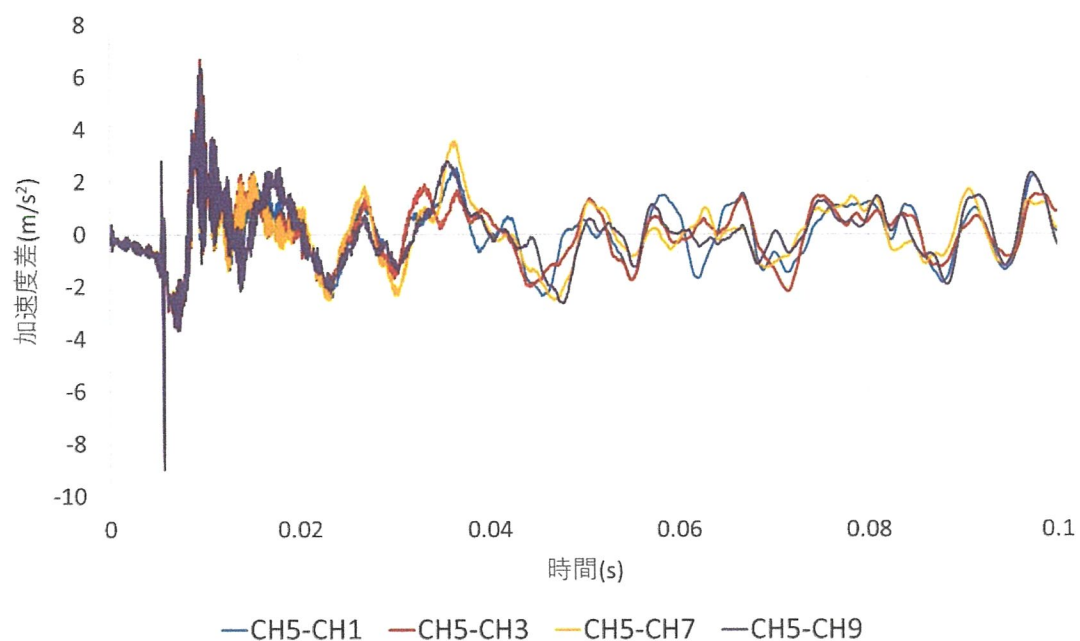


図-付.26 時刻歴応答解析結果 主桁に沿わない区間 主桁支間中央打撃
劣化範囲のヤング係数 50%

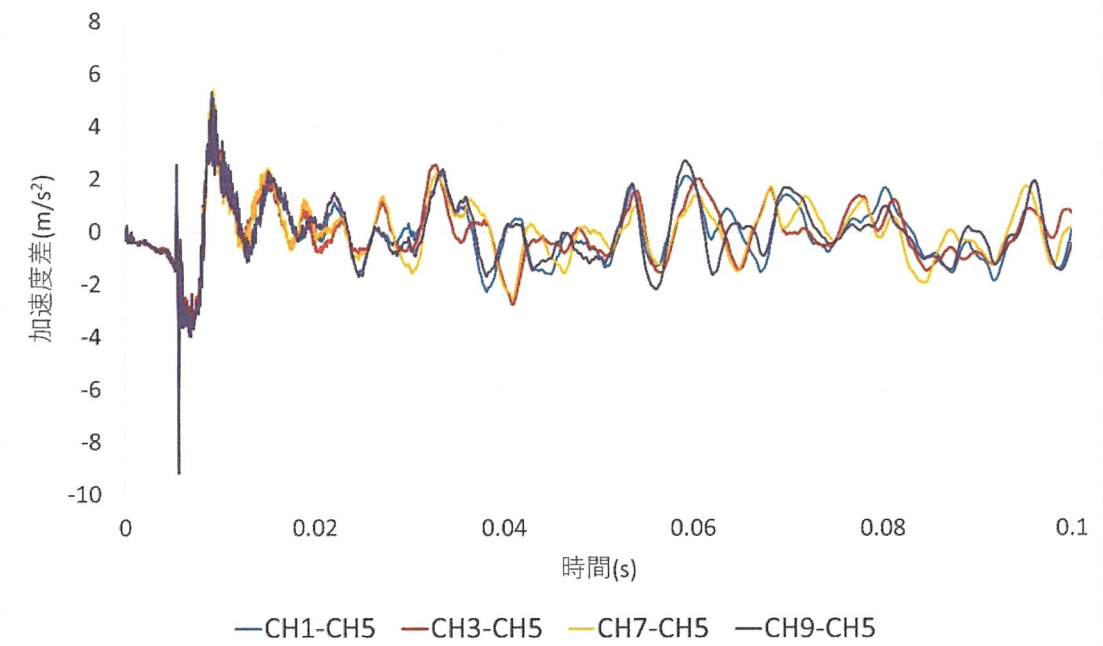


図-付.27 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 100%

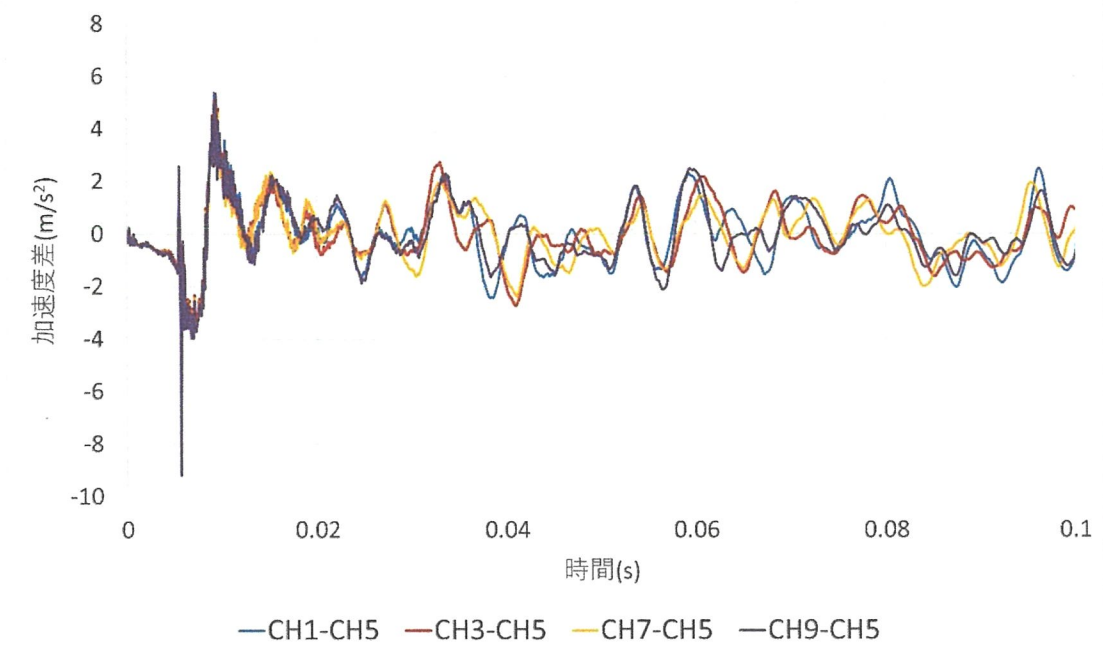


図-付.28 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 90%

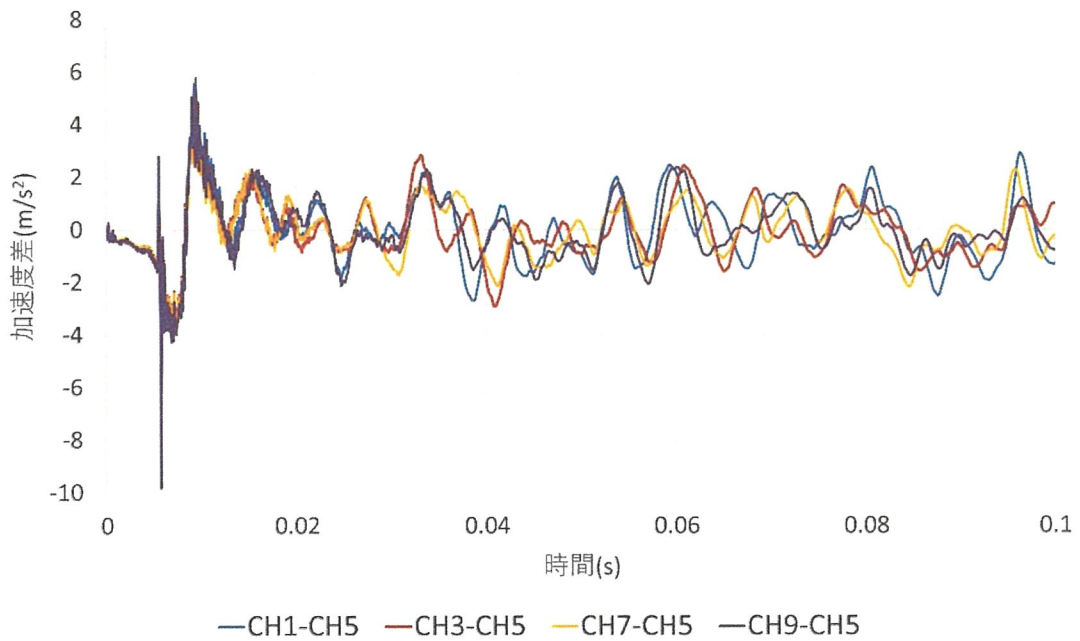


図-付.29 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 80%

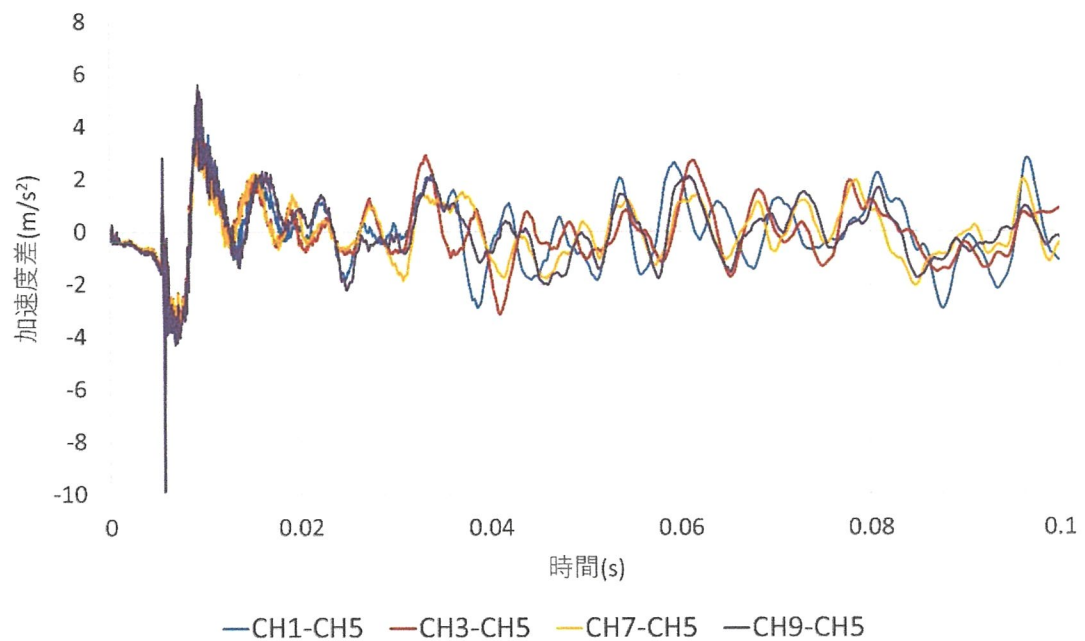


図-付.30 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 70%

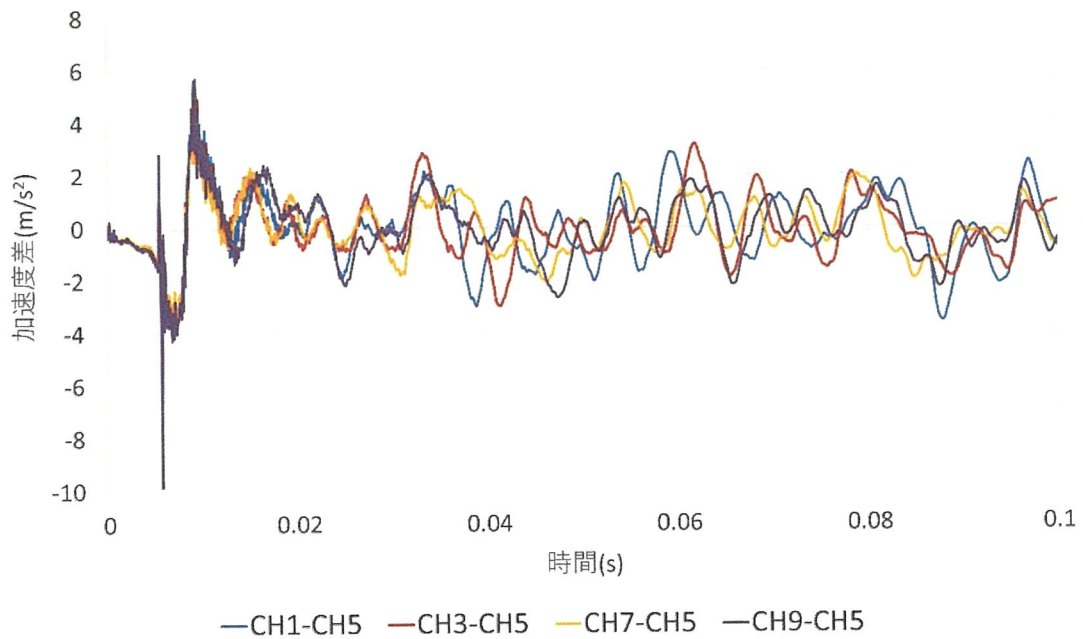


図-付.31 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 60%

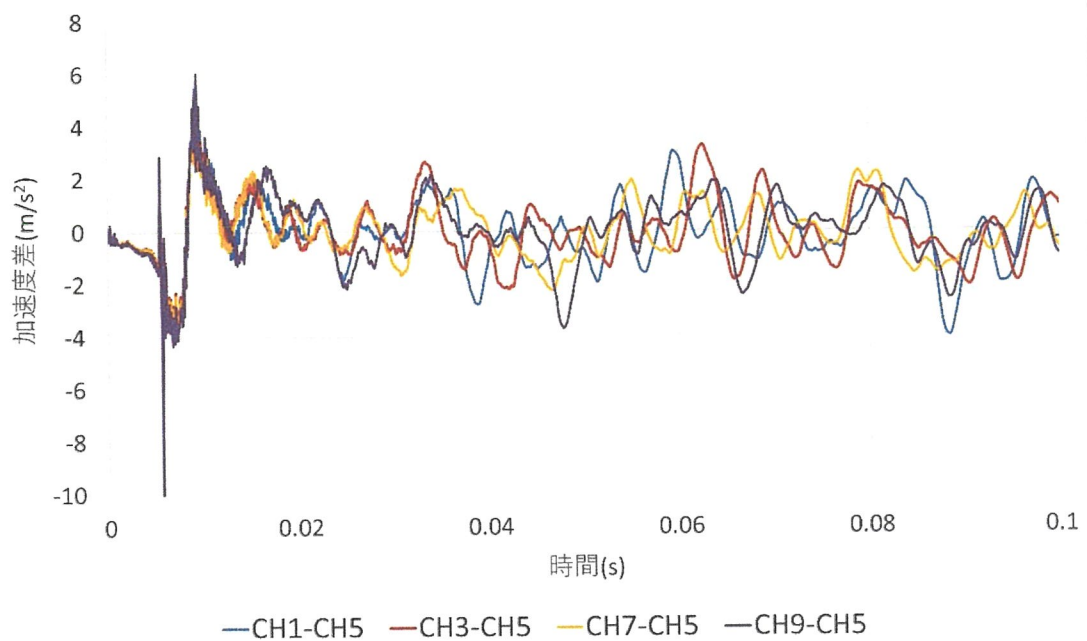


図-付.32 時刻歴応答解析結果 桁に沿わない区間 主桁支間 1/4, 3/4 点打撃
劣化範囲のヤング係数 50%