

# 成田国際空港誘導路橋梁の長期モニタリングに基づく振動特性評価

稲田 裕

(技術研究所)

## Vibration analysis of taxiway-bridge based on long-term monitoring

Hiroshi Inada

成田空港誘導路橋梁では、施工時からひずみや温度の計測を5年以上にわたり継続して行っている。また、供用開始後には、モニタリングの維持管理への適用を目指し、画像計測と加速度計測の導入を図り、航空機の通過に伴う振動特性の評価を進めている。本報では、計測手法の概要を説明し、長期計測により得られた成果として、特に振動特性の検討結果を基に性能監視のための指標の抽出を図った結果を示す。さらに、構造解析手法を導入し、計測データとの比較や応答メカニズムの分析を行うとともに、長期性能評価のための構造解析モデルの構築を行う。

The authors have been continuously conducting the measurement of long-term behavior and structural response for a taxiway-bridge in Narita international airport for almost 5 years. Acceleration measurement and video systems have also been installed to monitor vibration property of the bridge. In this paper, long-term vibration characteristics and deformation against loading are investigated. Structural analysis is also introduced to evaluate mechanism and influence of various environmental factors on response of the structures.

### 1. はじめに

近年、橋梁等のインフラ施設の急速な老朽化に伴い、メンテナンスの重要性が社会的に注目され、ICTを用いた点検や非破壊検査等の技術開発が精力的に進められるようになってきた。一方、点検、検査の時間/空間的な補間、長期的な性能変化の監視の観点では、構造ヘルスマニタリングに期待される役割は大きい。これまでも長大橋のような大型かつ重要な施設については、振動や変形の長期計測を行い、地震、強風時の安定性の評価に役立てている例は幾つか見られる<sup>1)</sup>。しかし、橋梁数も多く、維持管理の上で課題が見られるような一般の中小橋梁については、長期的なデータの蓄積がなされた例は少なく、計測データの評価手法に関する検討も十分には行われていない。最近になって、点検により劣化が検出された橋梁について、継続使用の可否判断、補修法の検討や補修効果の確認のため、モニタリングを実施するケースも見られるようになってきた<sup>2)</sup>。しかし、供用が進み、変状が発生してからでは、検出された異常が施設固有の特性か、劣化や損傷によるものかの判定が困難なことも指摘され、建設時からの計測による初期状態の把握も求められる。

成田国際空港誘導路の合成床版橋梁では、施工中から約5年間に亘って、ひずみ、温度等の計測が継続されている。この橋梁は類似の一般的な道路橋に比べて、設計荷重が著しく大きく、コンクリート床版が厚いなど特殊な構造である。そのため、設計において準用した道路橋の手法の妥当性や構造物の安全性を確認するために、種々の計測機器を設置し、実機載荷試験や供用下で応答の評価を進めている。さらに供用開始後には、振動特性の長期変動評価のために、加速度計を用いた振動計測と通過機体の重量推定のための画像監視のシステムを導入した。

本報では、誘導路橋梁を対象として継続的に実施している一連の計測/試験の内容や性能評価により得られた成果をまとめ、今後のモニタリングのための資料とするとともに、一般の橋梁等の維持管理への展開に向けた考察を行う。特に、性能変化の監視や損傷検知のための指標抽出に向けて、振動モードの温度影響等の評価を行う。また、日常的な変状監視に航空機通過時のたわみの計測を活用することに着目し、加速度計測データからたわみ変動を推定し、航空機重量との関係の評価を通じて適用性を検討する。さらに構造解析を導入し、応答メカニズムの評価と計測結果の影響要因分析等を実施する。

## 2. 計測の概要

### 2.1 対象橋梁と計測目的

本研究で対象とする橋梁は、成田国際空港内のターミナルからB滑走路に向かう西側誘導路上で、主要県道を跨ぐ箇所に位置する。図-1に示すように、長さ48m、幅60mの2径間連続の鋼コンクリート合成床版橋である。なお、桁高は1.5m、主桁本数は63本、主桁間隔は0.95mである。

設計では道路橋の設計手法が準用され、設計時にはFEM解析による設計手法の妥当性の検証や、実規模大供試体の押し抜きせん断試験による床版の疲労耐久性の評価が行われた。計測の第一の目的は、竣工前に実航空機を用いた載荷試験時を実施し、発生するひずみ等の計測により応答性状を把握し、数値解析結果との整合性や構造物の安全性の確認を行うことである。また、打設直後からのコンクリート床版の温度応力状態やその変化を観察し、設計へのフィードバックを図るものとしている。これらの検討は、主に施設管理者である成田国際空港と九州大学の共同研究体制で進められた<sup>3),4)</sup>。清水建設は計測管理とデータ処理を担い、データの提供とその後の長期的な特性変化の評価を行ってきている。

計測計画時から、モニタリングの維持管理への適用を想定して、拡張性と耐久性の高い計測システムを採用した。そして、航空機の通過に伴う橋梁の変形や振動の長期計測への展開を図り、変動特性の把握、変状の評価指標の抽出の検討を実施している。

### 2.2 計測システムの概要

主な計測システムの配置を図-1中に、計測項目と点数を表-1に示す。航空機の主脚の通過が想定

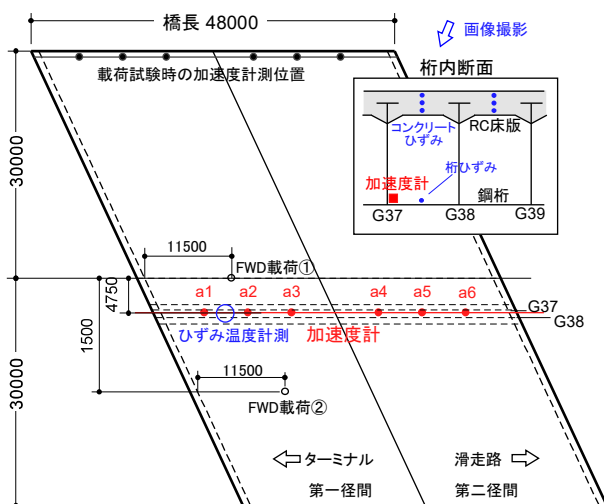


図-1 橋梁と計測の概要

され、荷重条件の厳しい図中の青丸に示す位置を応答特性の評価位置に設定した。そして、132点のひずみ計と熱電対を評価位置と性能評価用のダミー試験体に配置した。センサの設置は床版の配筋終了後に行い、コンクリート打設と同時に計測を開始し、打設後からの温度応力等の評価が行われた<sup>5)</sup>。供用開始前の2012年12月には、実航空機を用いた載荷試験として、航空機の主脚を評価地点に配置した静的載荷とそこを通過する動的載荷時の計測を行った。

2013年3月の供用開始後は、長期性状変化の監視に向けて、橋梁の振動特性の計測を新たに導入した。図中に赤で示すように、計測システムを設置した桁G37とG38間の桁内に、各径間の橋軸方向の1/4L, 1/2L, 3/4L(支間長L=23m)の6箇所について、下フランジ上面にサーボ型加速度計を設置した。さらに、通過機体を判別し、重量を推定するために、誘導路横の計測室内に画像監視システムを構築した。夜間の低照度にも映像取得できる高感度IPカメラを用いて、誘導路の通過機の映像を記録している。

計測項目と評価内容を図-2に示す。モニタリングでは、ある物理量を監視して、閾値の超過により異常の判定を行うことが一般的である。しかし、時間変化も緩やかで変化量も小さいインフラ施設の長期監視では、そのような方策が難しいことが多い。そこで本研究では、種々の物理量を計測し、変数同士の相関関係の分析によって、特性変化に敏感な関係式を導き、そこからの外れにより変状を検出する方策を提案する。なお、以下の検討では、特に振動特性に基づき評価を行った結果を示す。

表-1 計測項目と点数

対象構造	センサ種別	計測位置	点数
橋梁	コンクリートひずみ計	橋軸・直交(上中下)	13
	熱電対	ひずみ計設置位置	16
	鉄筋計	主筋・配力筋/他	74
	鋼板ひずみ計	主桁フランジ・ウェブ	8
	加速度計	橋軸方向	6
	温湿度計	桁内環境	2
ダミー試験体	コンクリートひずみ計	2方向, 上中下	9
	熱電対	ひずみ計設置位置	8
	鉄筋計		2
合計			138

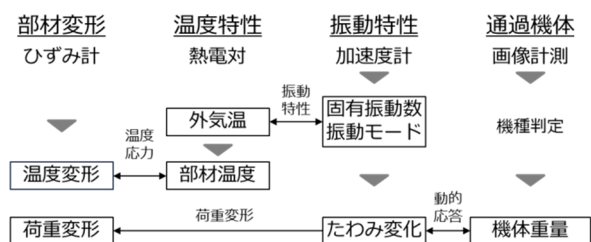


図-2 計測項目と評価内容

### 3. 加速度計測データの評価

#### 3.1 計測結果

振動計測データの例として、航空機の通過時に第一径間の中央 a2 において計測された加速度波形を図-3 に、同時刻に記録された通過機体の画像を図-4 に示す。橋梁の2つの径間を主脚が通過する際に、各々ピークを持つふた山の加速度変化が観察される。機種や速度の影響で、波形の性状には差異が見られる。また通過機種は、尾翼の形状と機体の大きさから、上は Boeing B737 (以下 B737)、下は B787 と判定できる。加速度波形を比較すると、図-3 下の機体が大きく重い B787 では、加速度振幅が大きい。なお、通常は 2Hz でデータを収録し、振動評価のために 1~2 ヶ月に 1 日程度の頻度で 100Hz に上げてデータを収録した。

#### 3.2 振動特性の分析

##### 3.2.1 振動モードの評価

対象橋梁では、4 章で示すように、異なる振動モ

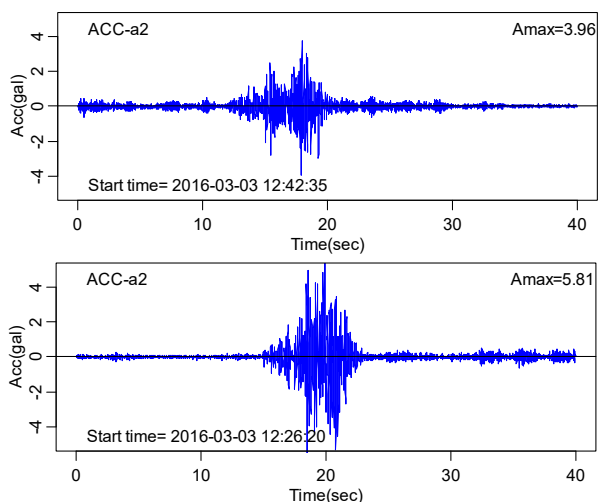


図-3 機体通過時の加速度波形

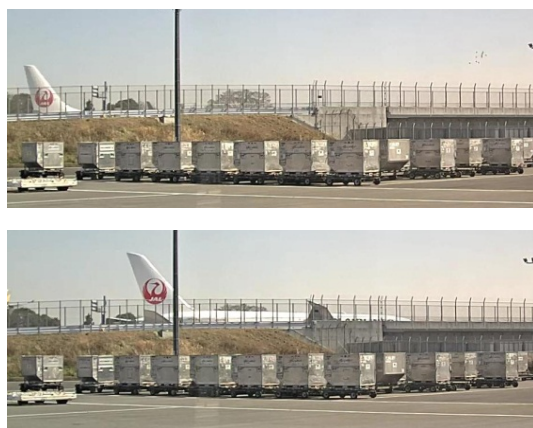


図-4 機体通過時の画像

ードの固有振動数が近接する場合も多く、FFT の評価ではスペクトルに多くのピークが現れ、固有振動数の判定が難しい場合もあった。そこで、複数の加速度データの相関を考慮する多変量自己回帰 VAR (Vector Auto-Regressive) モデル<sup>⑩</sup>を適用した。

冬期 (2015/12/18) と夏期 (2016/8/25) の計測結果から、図-3 と同様に機体通過時の径間中央 a2 の加速度を切り出し、周波数スペクトルを求めた結果を図-5 に比較して示す。なお、データ取得時の気温は、各々 8.2°C と 25.7°C である。1 次の卓越振動数が各々 6.76Hz と 5.96Hz に、2 次が 8.72Hz と 7.77Hz に見られる。夏期と冬期で卓越振動数には変化が生じ、気温が高い夏期の振動数が低い傾向がある。また、取り上げた振動モード以外にも、周辺や高次の振動数範囲に幾つかの振動モードが存在する。

前述の载荷試験の際には桁内の加速度計測システムはまだ設置しておらず、図-1 の上部に示す路側部の舗装上に加速度計を仮設し、計測を行った。

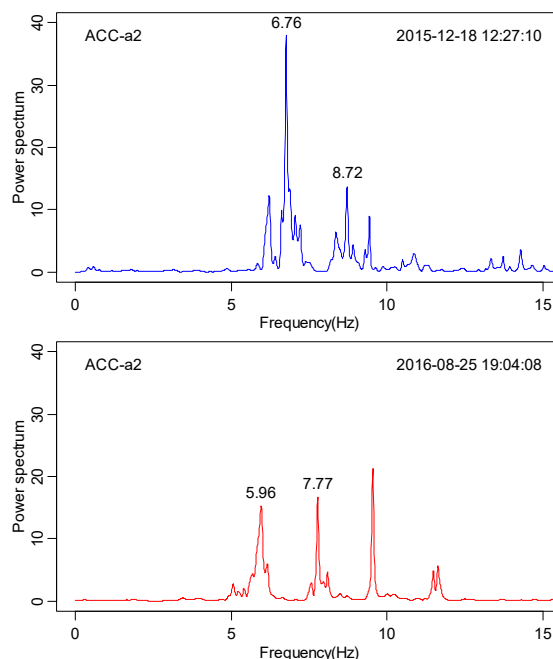


図-5 周波数スペクトル(上 12 月、下 8 月)

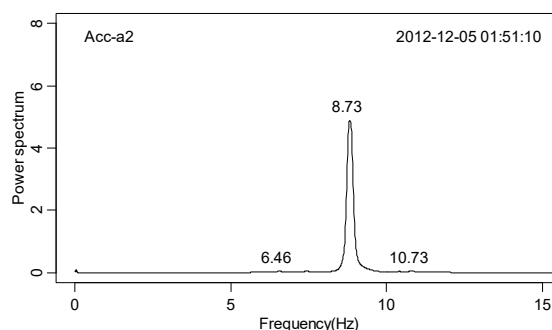


図-6 载荷試験時の周波数スペクトル

得られた周波数スペクトルの例を図-6 に比較して示す。卓越振動数は同時期の冬期の結果と概ね等しいが、計測位置が機体の通過位置から離れているため、スペクトルのパワーは小さく、また2次のみが卓越し、1次や3次のピークは検出しにくい。対象橋梁に応じた計測機器の配置は重要で、加速度計の設置位置はこの結果を考慮して決定している。

次に、図-5 下の結果について、各計測点の加速度フーリエスペクトルから計測点 a2 を基準とした伝達関数を算定し、各々卓越する1次と2次のモード形状を推定した結果を図-7 に示す。上図のモードでは、第一径間と第二径間の波形は逆位相の変動を示し、橋軸方向の1次の振動モード、一方下図では同位相で橋軸方向の2次の振動であると考えられる。以下の検討では、橋梁固有の振動として顕著なこの2つの橋軸方向の振動モードに着目する。

### 3.2.2 FWD 試験による振動特性の把握

航空機が通過による橋梁の強制振動では、機体の重量や通過位置、速度等が振動特性に与える影響が大きい。一方、衝撃可振は橋梁自体の振動特性の把握には有効と考えられる。そこで、舗装のたわみ計測用のFWD (Falling Weight Deflectometer) を用いた衝撃加振により振動特性を把握することとした。

ここでは、FWD 試験の载荷位置を、図-1 中の橋梁中心軸上①と側径間側②の2点とした場合について、振動性状の比較を行う。なお、試験は2017年6月15日に実施し、試験時の気温は17℃であった。

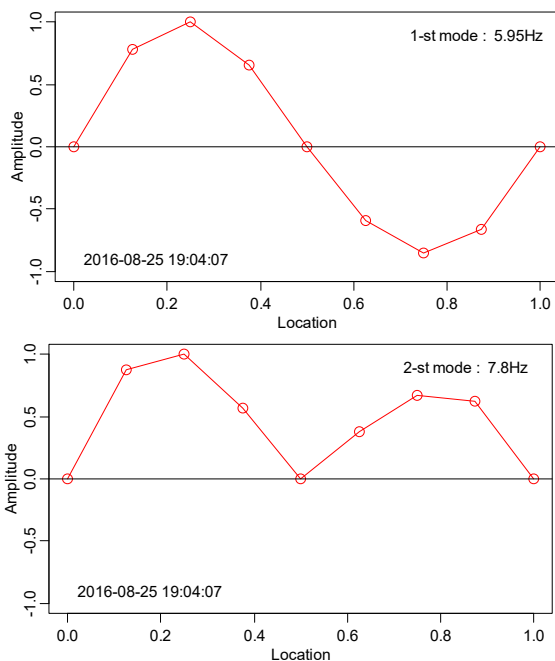


図-7 振動モード形状 (上1次、下2次)

载荷点①の場合に第一径間中央で得られた加速度データを図-8 に示す。打撃は4回行い、得られた加速度の振幅は機体通過時と比べると大きい。

2 箇所の打撃時に得られた振動の周波数スペクトルを図-9 に比較する。中心軸上に载荷した場合は、図-5 に類似した卓越振動数を示し、1, 2 次の卓越振動数は、各々6.22Hzと8.59Hzに見られる。一方、側径間への载荷時の試験結果では卓越振動数に変化が見られ、1次は7.72Hz、2は9.32Hzに卓越振動数が高い方にシフトし、载荷点①で見られた橋軸方向の1, 2 次の固有振動数に対応するピークは見えにくくなっている。この結果から、側径間への荷重の入力に対しては、橋軸方向以外の振動モードが励起されやすいことが確認できる。機体通過時の強制振動の評価においても、機種による車輪の配置の違いや機体通過位置によって、励起される振動モードが異なり、卓越振動数が増える場合もあることが推測される。固有振動数による性能評価では、このような異なるモードの影響を排除し、橋梁固有の振動特性を抽出し、監視することが重要となる。

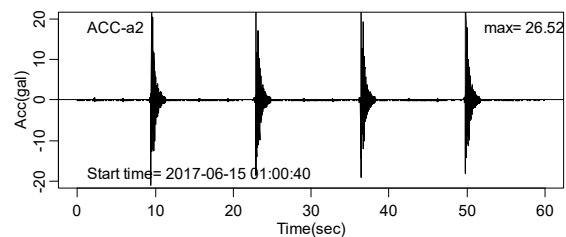


図-8 FWD 载荷時の加速度波形

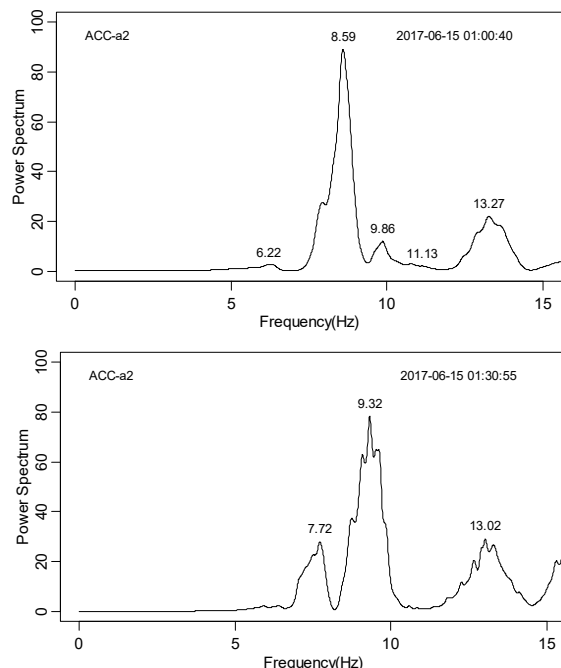


図-9 周波数スペクトル (上载荷点①、下②)



### 3.2.3 固有振動数の温度変化の検討

前述の橋軸方向の1,2次の振動モードに着目し、気温に対する固有振動数の関係の評価を行う。両変数の相関分析の結果はこれまでも発表してきたが、本報では評価データを更新し、データ数を増大させて結果の比較を行う。また、対象モードを精度良く抽出できるように、ピークの探索方法を修正した。

2年間16日の計測結果(データ数1470)について、気温に対する固有振動数の関係を図-10に示す。図中の実線は1次回帰の結果、破線は誤差の標準偏差の大きさを表す。1次、2次の結果ともに、気温に対する固有振動数の変化は明確な負の相関関係を示す。どちらの結果とも、温度に対する振動数のばらつきは小さくはないが、データが増加しても回帰式の係数には大きな変化は生じないことが確認できた。一方、相関係数は増加、平均値周りの値のばらつきは大幅に減少し、誤差の標準偏差の2倍程度の範囲にデータが集まっている。このようなばらつきの許容範囲を設定し、そこからの外れを変状の発生として判定することにより、長期的な構造物の変状の発生の監視が可能であると考えられる。図中の◆

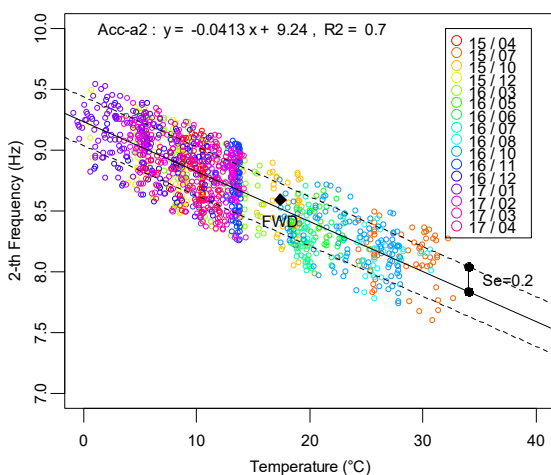
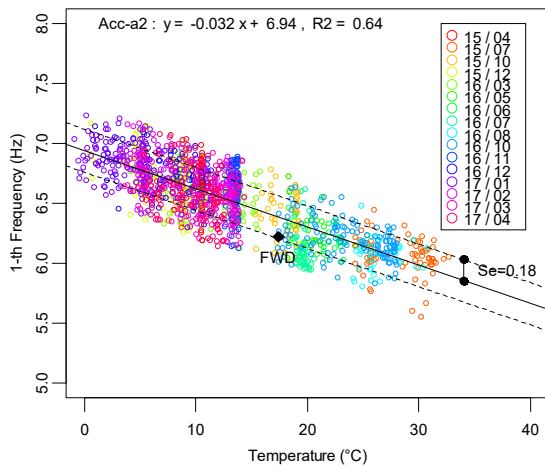


図-10 気温と固有振動数の関係(上1次、下2次)

は前項のFWD試験の①の载荷時の結果を表す。試験結果は回帰線の近傍に位置しており、機体通過時のデータから推定された卓越振動が、橋梁の固有振動と一致していることが確認できた。

なお、ばらつきの要因としては、通過する航空機の重量・形状や走行状態が考えられるが、その発生メカニズムを明らかにするには、計測データの分析のみでは難しく、構造解析との連携が求められる。

### 3.2.4 固有振動数と機体荷重の相関評価

前項のデータで天候等により画像が得られなかった2日を除いた14日間の計測データ(データ数1367)について、画像から機種を判定し、航空機会社の機種別の諸元表から、離陸、着陸毎の航空機荷重を推定した。ただし、実際には橋梁通過時の燃料搭載量によって重量が大きく変わる可能性もあり、詳細な重量把握にはさらに検討を要する。

計測点a2の1,2次モードの固有振動数について、気温の影響を低減するために、図-10に示す気温と固有振動数の回帰式を用いて標準温度20°Cにおける振動数に換算し、機体重量との関係を図-11に示

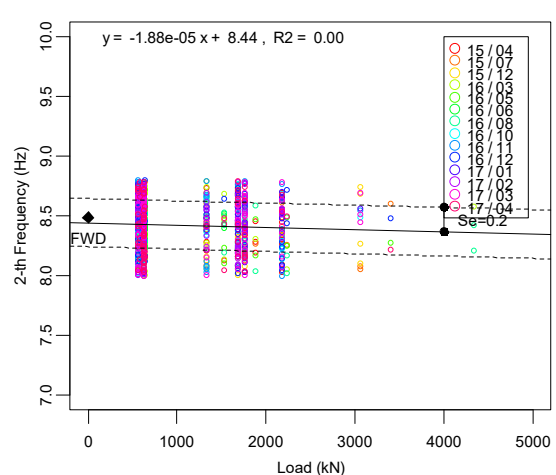
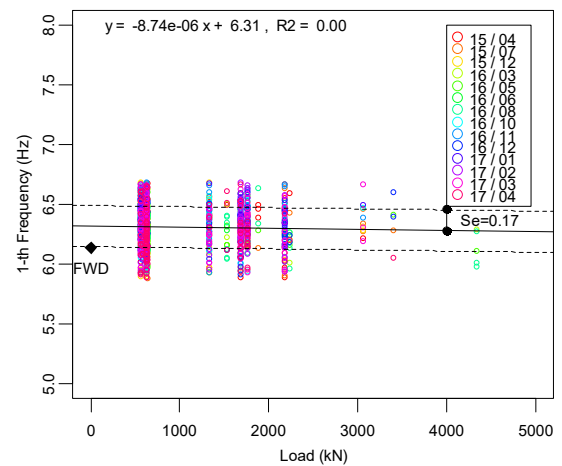


図-11 機体荷重と振動数の関係(上1次、下2次)

す。荷重の増大に伴い振動数は低下する傾向が確認できる。ただし、その傾きは小さく、ばらつきが大きいために相関係数も小さい。この結果では、機体荷重の振動数に及ぼす影響を明確に見いだすことはできなかった。機種が大型になるに伴い、重量の増加が固有振動数の低下を招くと考えられる。その一方で、脚配置、輪荷重等、機種により载荷条件にも差異が生じる。機体が大型で左右の主脚の間隔が大きくなると、载荷位置が側径間側に移動することとなり、FWD 試験結果に見られたような卓越振動数の変化を招く可能性もある。

前項と同様に、FWD 試験時の結果を◆でプロットしているが、この場合も衝撃加振により得られた固有振動数は、どちらの結果も計測データの回帰線の近くに位置している。

### 3.3 たわみの変動特性の評価

#### 3.3.1 たわみの推定法について

外乱や载荷により構造物に生じるたわみの計測は、支持条件や部材剛性の変化の監視に有効である。また、構造物の使用限界も変位で規定されている場合も少なくないため、固定点を必要とせず比較的簡易に計測が可能な加速度データから変位を推定できれば、性能評価には有効である。しかし、橋梁上の通過車両による加速度計測データを2階積分して変位を推定する際には、周辺振動の影響や、変位に影響が大きい低振動数領域のノイズにより、変位の算定に数値的な処理が求められる。対象橋梁においても、橋梁下の道路を通過する車両等による振動の影響とセンサの低振動数領域のノイズによって、変位の積分結果が大きくシフトしたり、挙動が乱れたりするなど、変位の推定精度が低下する傾向が見られた。そこで、加速度データの時間領域での積分の際

に、加速度の一次式で表される基線ずれを仮定して補正する大崎の手法<sup>8)</sup>による基線の補正を行うこととした。なお、速度の制約条件は、評価時間の速度の平均値が0とするとして定義した。

#### 3.3.2 加速度からのたわみの推定結果

図-2に示した2つの加速度波形について、航空機通過時の10秒間の加速度変動波形を切り出し、2階積分を行い、基線補正を施して得られたたわみの変動波形を図-12に示す。通過機体が大型の下の結果の方が、たわみ量が大きい。なお、FFTにより周波数領域で2階積分を行った場合とも比較したが、両結果は良く一致しており、たわみの推定は比較的安定していることが確認できた。

#### 3.3.3 航空機荷重とたわみの関係

前節で示した画像から機体荷重を算定した計測データについて、航空機荷重と最大たわみの関係を図-13に示す。たわみ評価も既に発表しているが<sup>9)</sup>、振動数と同様に評価データを更新した。図から明らかのように、両データは明確な比例関係を示し、相関係数も0.9と高い。また、固有振動数の場合と異なり、季節による差が見られず、温度影響が小さいことが分かった。日々の航空機の運航管理の中で、航空機荷重とたわみの関係を評価指標とした変状監視を行うことができれば、日常管理への適用性は高いと考えられる。ただし、幾つかのデータが回帰式から大きく外れ、特に割合の大きい中小機のデータにその傾向が強い。この原因としては、たわみ推定精度に加え、搭載燃料の重量影響と機体形状、走行条件などが想定される。変状監視のための評価式の定式化には、このような外れ値の検出と、たわみ推定精度の向上が課題として残されている。

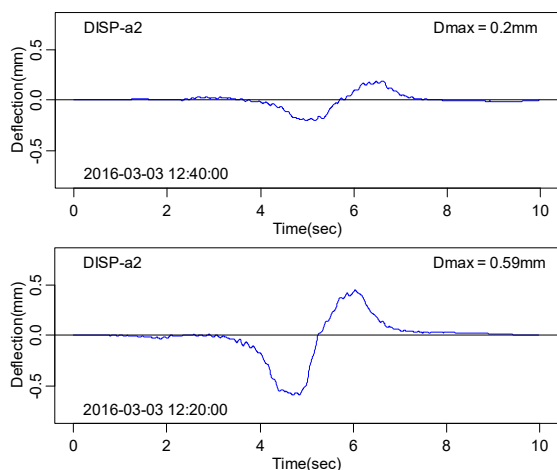


図-12 たわみの推定結果 (上 B737、下 B787)

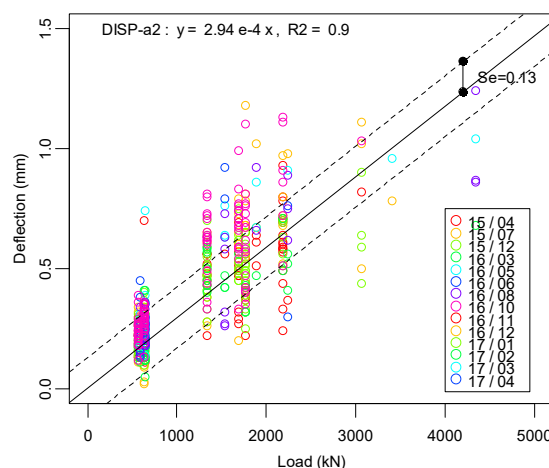


図-13 機体荷重と最大たわみの関係

## 4. 構造解析による応答特性評価

### 4.1 解析モデルと解析手法

計測データのばらつきの原因を把握、低減し、温度や荷重と振動特性との関係を定式化するためには、構造解析により振動応答を詳細に分析し、応答メカニズムや影響要因を明らかにする必要がある。また、将来的に劣化や損傷を考慮した長期的な性能評価を可能とするためには、計測データを反映した構造評価モデルの構築が重要である。

その基礎的な検討として、ここでは簡易な梁モデルを用いた構造解析を行う。図-14に示すように、橋梁上部工を橋軸方向の梁とそれをつなぐ横梁からなるフレームモデルにより表した。そして、床版と鋼桁のみを考慮して、表-2に示すように断面の重量と断面特性を与えた。なお支持条件は、中央橋脚上の支承はピン、橋台上はローラーとした。

橋梁上を移動する航空機による振動の解析では、振動系への重量の付加、載荷位置とその移動、さらには航空機と橋梁の振動の連成を考慮する必要がある。全てを一貫して考慮した動的応答評価は容易ではなく、計算の負荷も大きい。ここでは、橋梁に対する重量比が高く、空間的にも大きい航空機載荷の特徴を考慮して、重量と空間位置に関する評価を2段階で行う。はじめに固有値解析によって、橋梁自体の振動モードの分析と機体の荷重の付加による振動系の特性変化の評価を行う。次に、機体移動時の

表-2 解析に用いた断面諸元

部材	厚さ (mm)	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
床版	950	40.8	7700
ウェッジ	11	200	2450
フランジ	20	200	2450

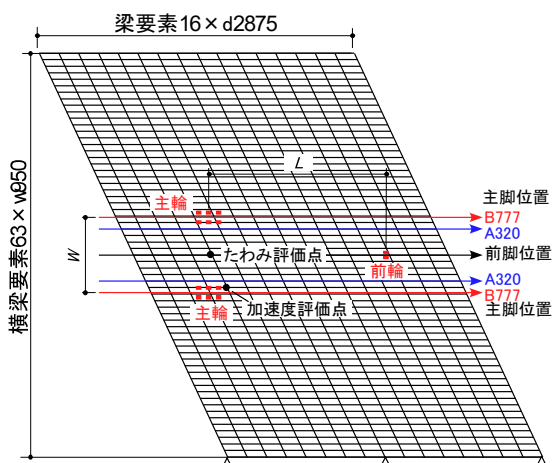


図-14 解析モデル

強制振動の動的解析により、機種による脚配置、走行時の速度等の影響を分析する。道路橋の場合、橋梁と車両の連成解析について様々な研究が進められているが、航空機についてはモデルの知見が十分ではないため、連成振動の評価は今後の課題とする。

### 4.2 固有値解析による評価

#### 4.2.1 固有振動モード

橋梁のみをモデル化した固有値解析により得られた主なモードの周波数とモード形状を表-3に、橋軸方向の1, 2次のモード形状を図-15に示す。橋軸方向の1, 2次の固有振動数は、各々6.92Hzと10.09Hzである。図-5の計測結果と比較すると、1, 2次ともに、解析結果のほうがやや大きい。固有振動数の対応は良好である。またモード形状も図-7の計測結果からの推定と一致している。橋梁固有の顕著な固有振動モードは、このような簡単なモデルでも評価が可能なが分かる。

また、表-3に示すように、橋軸方向の1次、2次の固有振動数に近接して、複数の橋軸直交方向やねじれの振動モードが存在する。斜角の大きい橋梁では、ねじれ振動の影響が大きいことはこれまでも指摘されている<sup>10)</sup>。本橋梁についても、ねじれや橋軸直行方向の振動が振動特性に及ぼす影響は非常に大きい。橋軸方向の固有振動数に着目し、季節変動

表-3 固有振動数とモード形状

次数	振動数 (Hz)	モード形状
1	6.92	橋軸方向1次
2	6.94	ねじれ1次
3	7.09	ねじれ2次
4	7.71	ねじれ3次
5	9.24	ねじれ4次
6	10.09	橋軸方向2次
7	10.10	橋軸直交方向1次
8	10.20	橋軸直交方向2次
:	:	:
19	24.92	橋軸方向3次
:	:	:
27	28.43	橋軸方向4次

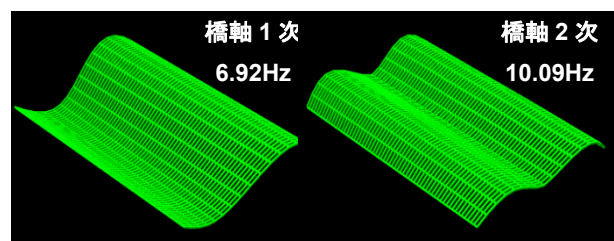


図-15 固有振動数とモード形状



や劣化／損傷による振動数変化を監視しようとする場合、载荷条件によって FWD 試験の結果で見られたように、近接するねじれ等のモードが卓越し、軸方向の固有振動の変化と判断してしまう可能性もあり、振動数やモードの同定には注意が必要となる。

#### 4.2.2 機体重量の振動特性への影響

本項では、計測データでは把握できなかった機体の重量の固有振動数への影響を把握するために、機体重量を考慮した固有値解析を行う。大中小の3つのタイプの航空機の機種を例として選定し、重量、輪荷重と前脚、主脚の配置を航空機の資料より表-4に示すように設定した。そして、各脚位置に当たる節点に相当する脚重量の質点を剛結した。なお、B777の車輪配置の例を図-14中に示した。

解析により得られた振動モード例として、小型機 Airbus A320 (以下、A320) と大型機 B777 の荷重条件における2次の固有振動数とモード形状を図-16に示す。各図の赤丸が脚荷重を载荷した位置に当たる。両図から機体荷重の増大に伴い、固有振動数は低下していることが分かる。その結果、得られた振動数の値は、計測値により近づいている。

次に、機体重量に対する1,2次の固有振動数の変化を求めた結果を図-17に示す。この結果では固有振動数に対する機体荷重の影響は大きく、1次モードの傾きは約 $5 \times 10^{-4} \text{ Hz/kN}$ である。図-9に示した計測結果と比べると、傾きが非常に大きいことが

表-4 評価航空機とその諸元

機種	総重量 (kN)	輪荷重 (kN)	主輪数 (個)	主脚間隔 W (m)	前後長 L (m)
A320	768	179	2	7.59	12.64
B767	1565	181	4	9.30	22.76
B777	2431	190	6	10.97	25.88

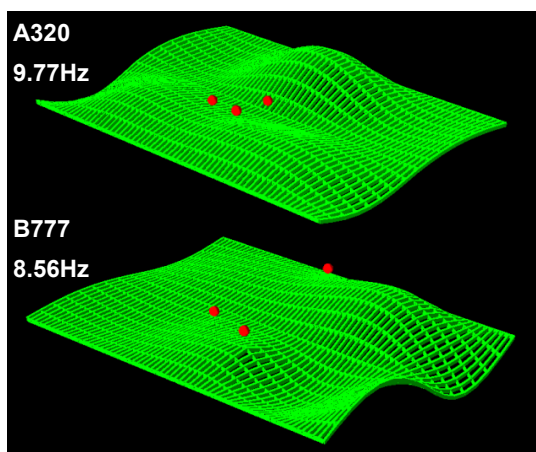


図-16 機体荷重を考慮したモード形状

分かる。この理由として、機体荷重の影響が最も大きい位置に固定してモード同定を行っていることの影響も考えられる。機体移動に伴う振動特性の変化の検討として、次節では荷重移動を考慮した動的応答評価を実施する。

#### 4.3 動的応答解析による機体移動の影響評価

##### 4.2.1 動的応答解析手法

図-14に前脚が橋梁中心軸上を通った場合の主脚が通過する位置をA320とB777を例として示した。橋梁の全長、幅に対して、主脚の間隔や前脚と主脚の前後長は大きく、また機種による通過位置の違いも無視できないことが分かる。そこで本項では、動的応答解析の基礎的な検討として、航空機の移動に伴う荷重変化を入力とした解析を行う。各車輪の重量を設定し、車輪が通過する節点にかかる荷重の時刻歴波形を求め、節点荷重として応答評価を行うこととした。減衰は Rayleigh 減衰として、橋梁の1,2次固有振動数で3%になるようにモデル化した。なお、解析の時間刻みは0.01秒、航空機の移動速度は20km/hと仮定して計算を行った。

##### 4.2.2 たわみ評価による解析の妥当性の検討

前述の実航空機を用いた载荷試験では、トーンカーの牽引による走行試験の際に、橋梁下からのトータルステーションを用いてたわみを計測した。はじめに解析結果の計測との比較として、走行試験時の航空機の荷重条件(総重量1750kN、主輪荷重131kN)を与え、動的応答解析を行い、解析結果の妥当性を検討する。

図-14中に示すトータルステーションによるたわみ計測位置にあたる橋梁中心軸上の節点について、動的応答解析によるたわみと計測結果を各々図-18、19に示す。たわみの変動傾向は一致しており、最大たわみは解析結果の方がやや大きい。これは舗装や

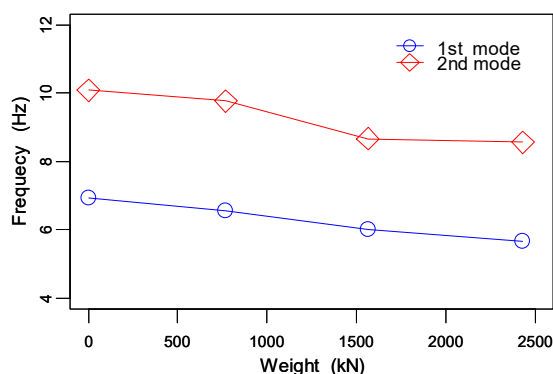


図-17 機体荷重と固有振動数の関係



地覆などの付帯施設等について、解析では考慮していないことによると考えられる。また、載荷試験時には静的 FEM 解析による検討も行ったが、主輪位置の最大たわみが 2.53mm という結果が得られている<sup>3)</sup>。一方、本解析により得られた主脚位置の最大たわみは 2.31mm であった。要素分割が粗い簡易モデルであることを考慮すると良く一致しており、妥当な解析結果と考えることができる。なお、図-19 の計測結果では、20 秒付近の最初のたわみが大きく、二つのピークを持つが、これはトーイングカーの重量影響で、解析では考慮していない。

加速度計測結果からのたわみ推定値は、図-12 に示したように最大たわみが 1.5mm 以下であり、解析値やトータルステーションによるたわみ計測値と比べると小さい。計測結果からたわみの全体的な傾向と荷重との関係やばらつきは把握できたと考えられるが、推定されたたわみの絶対値については小さく評価している可能性もある。たわみ推定結果の検証や、たわみ推定に適した加速度計測法等の検討は今後の課題である。

#### 4.2.3 機体移動時の振動特性評価

次に、動的応答解析によって機体移動時の加速度波形を算定し、航空機およびその走行条件が振動特性に及ぼす影響を検討する。

図-14 中に示した加速度計 a2 の位置に当たる加速度評価点について、A320 と B777 を例として加速度の時間波形を求め、前述の多変量 AR モデルを用いて周波数スペクトルを算定した結果を図-20 に示す。本検討では、機体重量を振動方程式の慣性力項の質量増加として考慮していないため、固有値

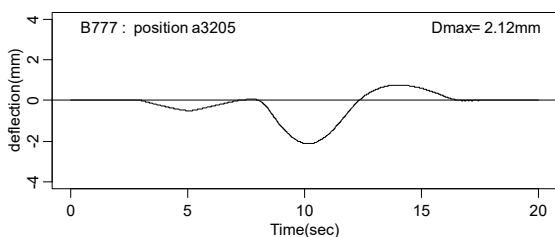


図-18 解析によるたわみ変動

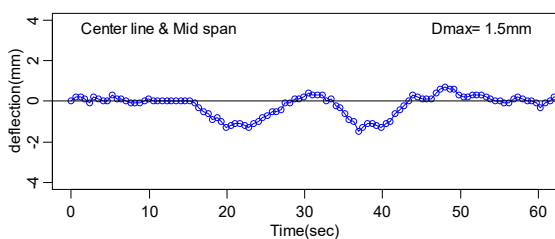


図-19 たわみ計測結果

解析で見られた重量影響による振動変化は生じない。したがって、機種による卓越振動数の傾向には大きな差異は見られず、図-15 の固有値解析結果とも概ね一致している。本解析の範囲では、移動荷重に伴い生じる強制振動の振動特性は、橋梁の固有振動特性と良い対応を示していることが分かる。ただし、一次の固有振動数の値は、A320 と B777 を比較すると、6.93Hz から 7.01Hz に増加している。機体の大型化に伴う載荷位置や重量配置などの要因の変化が、固有値解析結果の重量増加により振動数が低下する傾向とは逆の効果を招いていることが分かる。また、B777 の結果では、1 次の卓越振動数に隣接して、ねじれの振動モードと考えられる 7.65Hz のピークが顕著に見られる。

次に、移動速度を変化させた場合の卓越振動数の変化の評価を行う。機種を B777 として車輪位置を

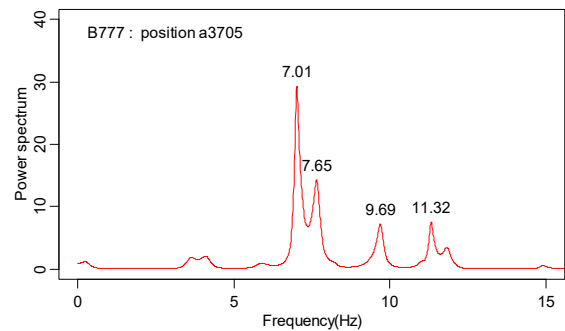
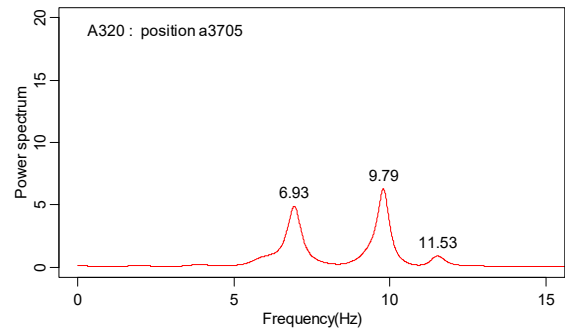


図-20 振動特性の比較 (上 A320、下 B777)

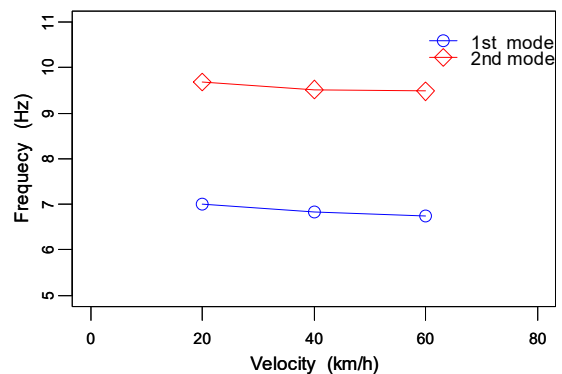


図-21 速度と固有振動数の関係

設定し、移動速度を 20, 40, 60km/h と変化させたときの 1, 2 次の卓越振動数を各々算定し、比較した結果を図-21 に示す。1, 2 次ともに時速を 20km/h から 60km/h に上げたときの卓越振動数の変化は -0.2Hz と大きくはないが、速度に伴う振動数の低下が観察されている。

## 5. おわりに

本報では、成田空港誘導路橋梁に設置したモニタリングシステムの概要を示し、得られたデータについて周波数特性を中心に分析を行った成果をまとめた。橋梁建設時からの長期間の継続した計測データの蓄積によって、橋梁の固有振動数の季節変化に伴う変動特性と、通過機体の重量とたわみ変動の関係を把握することができた。さらに構造解析を導入し、応答メカニズムの分析と計測のばらつきの要因評価を行い、長期モニタリングのデータを維持管理に活用する観点での可能性と課題を検討した。得られた主な成果を以下にまとめる。

- i) 橋軸方向 1, 2 次の固有振動数と気温は負の相関を示し、変数同士の関係式とそのばらつきの把握が可能となった。ばらつきを考慮して許容される範囲を設定することにより、長期的な性能の監視への適用が可能と考えられる。
- ii) 加速度データを時間領域で 2 回積分することによりたわみ変化を推定し、画像計測結果から得られた機体重量と最大たわみ量との相関の分析を行った。両者は明確な比例関係を示し、気温変化の影響も受けにくい。さらにばらつきを低減できれば、機体通過時のたわみ計測による日常管理も可能と考えられる。
- iii) 対象橋梁を簡単な梁モデルでモデル化し、固有値解析を実施した。斜角が大きい形状のため、性能評価で着目した橋軸方向の固有振動数の付近に、橋軸直交方向やねじれのモードの固有振動数が近接している。振動特性の評価では、このような近接するモードの影響を十分把握し、固有振動数の特定と分離を適切に行う必要がある。
- iv) 機体通過時の強制振動について、動的応答解析により機体の重量配置、平面形状、走行条件等の影響評価を行い、互いに相関を持つ複数の要因が振動特性に影響を及ぼしているため、個々の要因の影響評価が困難になっていることが分かった。

本研究は誘導路橋梁という特殊な橋梁を対象に実施したものであるが、ここで明らかとなった複数の要因の影響評価や隣接する振動モードの把握の重

要性等は、道路橋等の一般構造物の評価にフィードバックが可能であると考えられる。ただし、詳細な振動特性の把握のためには、航空機と橋梁との連成振動の影響の評価が今後求められる。さらに、詳細な構造解析手法を導入し、計測結果を反映した構造解析モデルを構築することにより、長期的な劣化や損傷が生じた際の性能や応答の変化を予測できるようにすることが今後の課題である。

## 謝辞

本研究は成田国際空港株式会社の御協力と御指導の下に実施したものである。関係者の方々にお礼を申し上げます。

## <参考文献>

- 1) 例えば、土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，246p.，2002.
- 2) 例えば、小林憲一，大平英生，登石清隆，羽田伸介：“妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策”，橋梁と基礎，Vol. 45.，No.9，pp.32-38，2011.
- 3) 堀洋介，崔智宣，山口浩平，日野伸一，金子雅廣，武井雄三：“大型航空機荷重に対応した合成床版橋の実機載荷試験および解析的評価”，土木学会第 68 回年次講演会，I-296，pp.591-592.，2013.
- 4) 金子雅廣，白井洋史，匂坂興平，山口浩平，日野伸一：“大型航空機を対象とした鋼コンクリート合成床版橋の実挙動とモニタリングシステムを用いた橋梁の常時計測”，土木学会論文集 A1，Vol.72，No.5，pp.II\_80-88.，2016.
- 5) 金子雅廣，尾関将克，山口浩平，日野伸一：“2 径間連続鋼コンクリート合成床版橋のコンクリート床版に生じる日温度応力に関する検討”，構造工学論文集，Vol.63A，pp.922-930，2017.
- 6) 例えば、北川源四郎：“時系列解析入門”，岩波書店，265P，2015.
- 7) 稲田裕，金子雅廣，尾関将克，出山裕樹：“誘導路橋梁の振動特性に関する解析的研究”，土木学会第 72 回年次講演会，VI-929，pp.1857-1858.，2017.
- 8) 大崎順彦：“新・地震動のスペクトル解析入門”，鹿島出版会，299P.，1994.
- 9) 金子雅廣，尾関将克，出山裕樹，稲田裕：“誘導路橋梁の加速度計測データを用いたたわみ変動特性の検討”，土木学会第 72 回年次講演会，VI-928，pp.1855-1856.，2017.
- 10) 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，pp.513-521.，2014.