

地震観測記録を用いた横浜ベイブリッジの 固有振動特性の推定

柳瀬 匡雄¹・張 広鋒²・松原 拓朗³・山本 一貴³

¹正会員 修士（工学） 一般財団法人首都高速道路技術センター 構造技術研究所
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番地11号虎ノ門PFビル）

²正会員 博士（工学） 一般財団法人首都高速道路技術センター 構造技術研究所
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番地11号虎ノ門PFビル）

³正会員 修士（工学） 首都高速道路株式会社 技術部
（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1日土地ビル）

1. はじめに

首都高速道路では、構造物の安全性の検討や地震時の構造特性の把握をするため、高架橋やトンネルといった構造物及びその周辺地盤に地震計を設置しており、長大橋梁においては横浜ベイブリッジで集中観測を行っている。横浜ベイブリッジは、1989年9月に開通した橋長860m、最大支間長460mのダブルデッキ形式の長大斜張橋であり、地震観測記録を用いた動的解析モデルの検証¹や東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震動を用いた横浜ベイブリッジの地震時挙動の解明²が行われている。横浜ベイブリッジにおける地震計設置位置と稼働状況（研究当時）を図-1に示す。横浜ベイブリッジでは、工学的基盤面上（G.L.-100m付近）に設置されたG1をトリガーとし、X・Y・Z方向のいずれかで 0.8cm/s^2 以上の加速度が生じると記録装置が起動して記録を開始するように設定されている。

本論文では、実地震における横浜ベイブリッジの固有振動特性を把握することを目的として、2017年～2019年に横浜ベイブリッジで観測された地震応答の分析を行った結果を報告する。分析では、横浜ベイブリッジの主要な固有振動モードの固有周期が、観測された地震応答記録から抽出できるかを検討した。横浜ベイブリッジの地震計は設置から30年以上が経過しているため、地震観測記録の収集時には、図-1に示すように全86チャンネル中、25チャンネルで計測ができなくなっていた。そのため、分析に用いた加速度記録は、計27箇所（61チャンネル）で観測されたものである。

2. 横浜ベイブリッジの固有振動特性

固有値解析より得られた横浜ベイブリッジの主要な固有振動モード形の一部を図-2に示す。図では橋軸方向（X方向）と鉛直方向（Z方向）からなる面を面内、橋軸直角方向（Y方向）と鉛直方向（Z方向）からなる面を面外としている。図-2の(1)に示す遊動円木（Sway）は、横浜ベイブリッジの基本固有振動モードであり、基本固有周期は7.18秒である。

桁の面内たわみ対称1次と逆対称1次を図の(2)と(3)、面外たわみ対称1次と逆対称1次を図の(4)と(5)に示す。面内たわみ対称1次の固有周期は3.23秒、逆対称1次の固有周期は2.35秒である。面外たわみ対称1次、逆対称1次の固有周期はそれぞれ、3.45秒、1.35秒である。図の(6)と(7)は、横浜ベイブリッジのH型主塔の固有振動モードであり、大黒側と本牧側の主塔の振動方向が逆位相となる固有振動モードの固有周期は2.36秒、同位相となる固有振動モードの固有周期は2.28秒である。

本論文では、上述した横浜ベイブリッジの上部構造の主要な固有振動モードと、主塔を支持する基礎構造の固有振動モードに着目して、地震観測記録の分析を行った。

3. 観測地震記録の整理

2017年～2019年に観測された22地震のマグニチュードと震央距離の関係、工学的基盤面上で観測された地震動の水平2成分（図-1のG1のX、Y成分）の最大加速度のベクトル和（2乗和平方根の値）と震央距離の関係を図-3に示す。地盤を放射状に伝播す

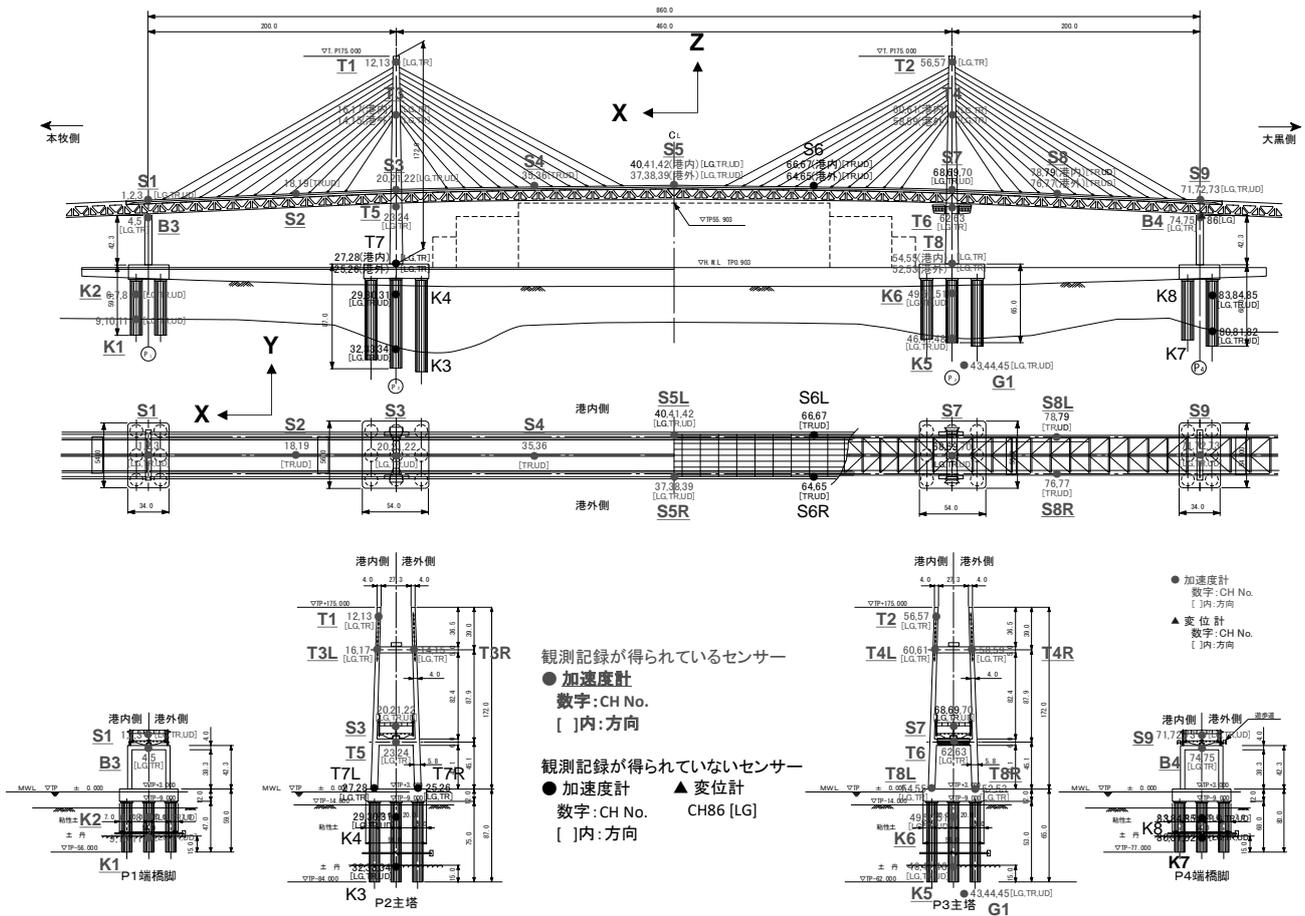


図-1 横浜ベイブリッジの地震計位置と稼働状況

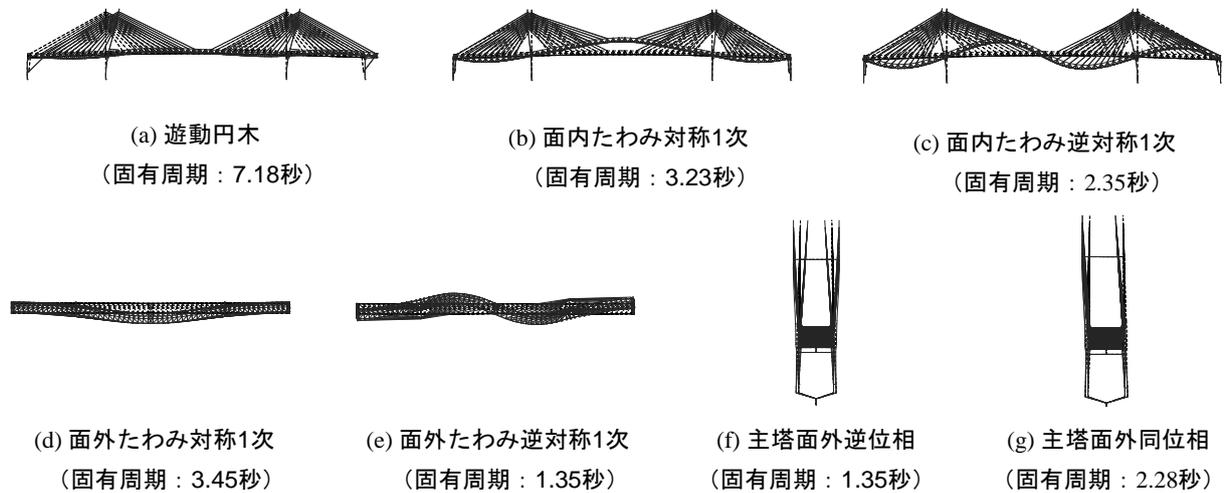


図-2 横浜ベイブリッジの上部構造の固有振動モードと固有周期の一例

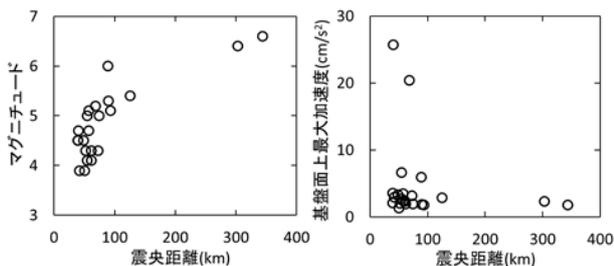


図-3 震央距離と地震の規模及び基盤面上最大加速度

る地震動のうち、地震計で観測される地震動は地震計の感応方向の地震動だけである。ここでは、水平成分の最大加速度をX方向とY方向の最大加速度のベクトル和とすることで、水平成分の最大加速度としている。後述する地震応答スペクトルも同様である。対象とした22地震の震央距離は39km～344kmに分布し、マグニチュードは $M_j 3.9$ ～ $M_j 6.6$ の範囲に分布している。工学的基盤面上で観測された地震動の

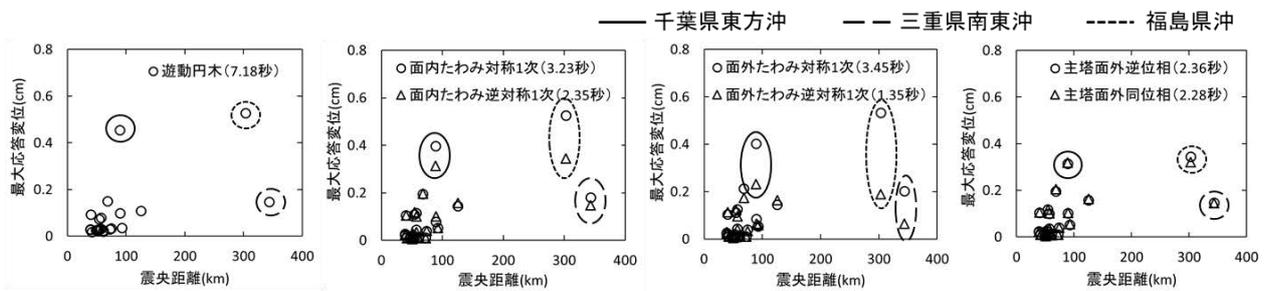


図-4 横浜ベイブリッジの地震応答

表-1 分析対象とした地震

No.	発生時刻	震源地	マグニチュード	震央距離	震源深さ	最大震度	横浜震度
1	2018/7/7 20:24	千葉県東方沖	M _j 6.0	89km	89km	震度5弱	震度3
2	2019/7/28 3:33	三重県南東沖	M _j 6.6	344km	393km	震度4	震度2
3	2019/8/4 19:24	福島県沖	M _j 6.4	303km	45km	震度5弱	震度2

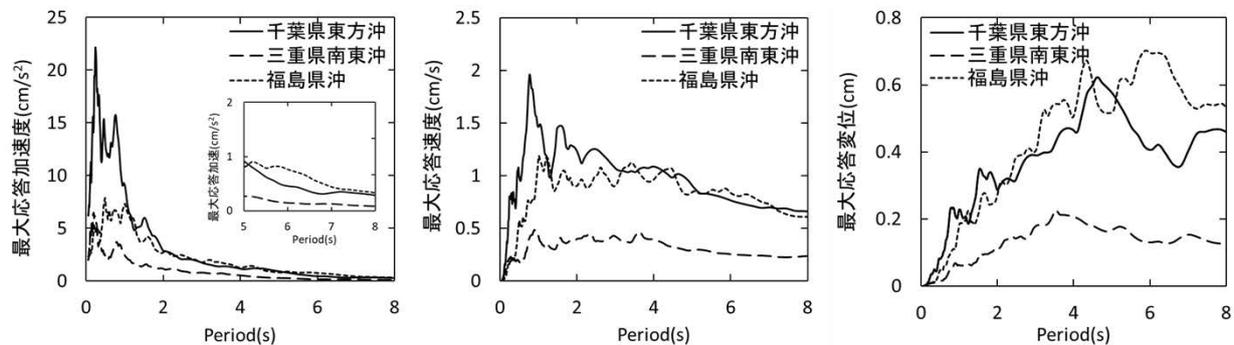


図-5 G1地震計での応答スペクトル

最大加速度は、 $1.3\text{cm/s}^2 \sim 25.7\text{cm/s}^2$ である。2011年東北地方太平洋沖地震での工学的基盤面上の最大加速度（ベクトル和）は約 48cm/s^2 であったが、図-3に示す地震の地震動強度はその半分程度以下であることがわかる。

図-4は、横浜ベイブリッジの地震応答に与える影響が大きい地震動を抽出するために、観測された地震動を前述した横浜ベイブリッジの主要な固有振動モードの固有周期（7.18秒、3.23秒、2.35秒、3.45秒、1.35秒、2.36秒、2.28秒）を有する1自由度系（減衰定数5%）に入力した時の最大応答変位を求めたものである。入力地震動は、工学的基盤面上で観測された地震動の水平2方向の加速度であり、図には最大応答変位のベクトル和を示している。図-4より、最大応答変位の値が他の地震よりも大きい2018.7.7千葉県東方沖地震と2019.8.4福島県沖地震で観測された記録を分析対象とした。南海トラフ沿いの巨大地震が起きた場合には、震源域から発せられた表面波がフィリピン海プレートに沿って関東平野まで続いている付加体（海洋プレートが陸のプレートに沈み込む際に、海洋プレートの上面に海底の柔らかい堆積物が日本列島にこすりつけられるように積もっている地質体）を伝播して首都圏に到達し、横浜ベイブリッジのような長周期構造物に大きな影響を与えることが懸念されている。そのため、南海トラフ沿いの巨大地震の震源域に近い2019.7.28三重県南東

沖地震も分析対象として残した。複数の地震動を検討対象としたのは、震源位置の違いによって、震源から発せられた地震動の伝播特性の違いが架橋地点で地震動特性に影響を与えたと考えられたからである。

表-1に対象とする3地震の諸元、図-5に工学的基盤面上の地震応答スペクトル（ベクトル和）を示す。いずれの地震も横浜ベイブリッジ周辺（横浜市鶴見区）の気象庁震度階は震度2もしくは震度3であり、地震動強度が小さい地震であった。

図-5より、周期1秒～8秒の長周期域で地震応答スペクトルが0となっていないことから、選定した3地震の地震動には横浜ベイブリッジを励起するために必要な長周期成分が含まれていることがわかる。加速度応答スペクトルは、周期1秒よりも短周期域において千葉県東方沖地震の地震動が他の2つの地震で観測された地震動の3倍以上の応答値を示している。これは千葉県東方沖地震が他の2つの地震よりも震央距離が近いからである。速度応答スペクトルと変位応答スペクトルは、千葉県東方沖地震と福島県沖地震で観測された地震動の長周期成分が大きいことがわかる。表面波が横浜ベイブリッジの基本固有振動モードを励起するのではと考えられた三重県南東沖の地震は、震源深さが他の2地震と比較して極端に深かったために、励起された表面波の強度が小さかったようである。そのため、長周期領域にお

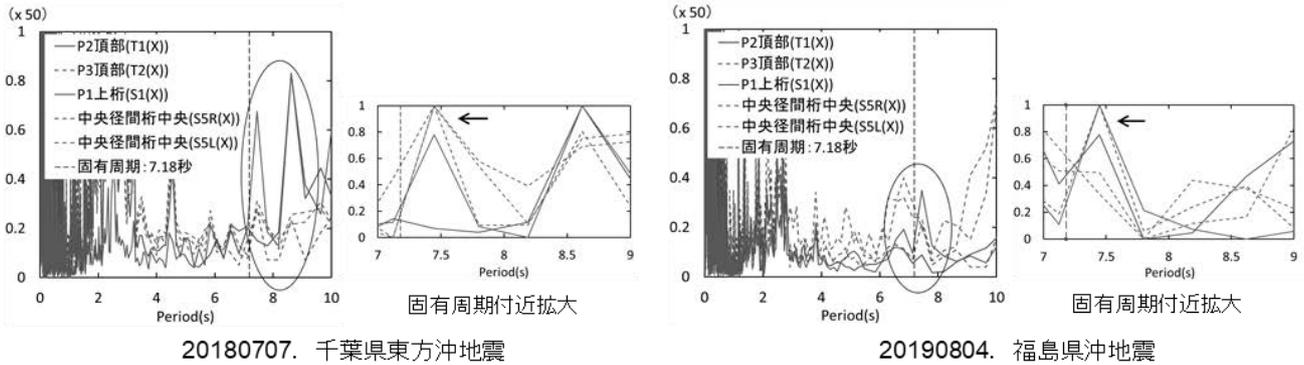


図-6 遊動円木（橋軸方向：X）に着目

ける地震応答スペクトルが他の2地震の半分以下と小さいことがわかる。

4. 地震応答の分析

固有振動モードの固有周期を確定する方法としては、観測された地震応答から固有振動モード形を推定し、それと固有値解析結果を比較するのが一番確実な方法である。しかし、前述したように大黒側に設置された地震計の多くが計測できなくなっていたため、ここでは主要な固有振動モードごとに、着目したセンサー位置の伝達関数を求め、固有振動モードの固有周期付近で伝達関数の振幅が卓越しているかを確認することで、固有振動モードの固有周期に相当する卓越周期を推定した。

(1) 上部構造の固有振動特性

観測された地震応答（応答加速度）波形に横浜ベイブリッジの固有振動モードに相当する成分が記録されているかを確認するために、式(1)に示す伝達関数（周波数応答関数）を求めた。橋梁のような線状構造物の地震応答に関する伝達関数は、各基礎構造位置から作用する地震動を入力とした多入力系としての伝達関数を求める必要がある。しかし、ここでは入力に相当する地盤上の地震動を観測した地震計が大黒側の地下約100mの土丹層上に設置されたG1の1箇所のみであることから、式(1)に示す1入力系の伝達関数を求めた。

$$H(T) = F_o(T) / F_i(T) \quad (1)$$

ここに、 $H(T)$ は周期 T における伝達関数、 $F_o(T)$ は周期 T における構造物の応答加速度波形のフーリエスペクトル、 $F_i(T)$ は周期 T における工学的基盤面上地震動（加速度）のフーリエスペクトルである。フーリエスペクトルはParzen ウィンドウ（バンド幅：0.01Hz）を用いて平滑化している。上述したように、式(1)の分母（入力）は工学的基盤面上のG1で観測された地震動であり、式(1)の分子（出力）は本牧側桁端から中央径間の桁中央までに設置された地震計（S1, S2, S4, S5RL）、主塔は本牧側と大黒側

の主塔頂部付近に設置された地震計（T1, T2, T3RL, T4RL）で観測された応答加速度を用いた。

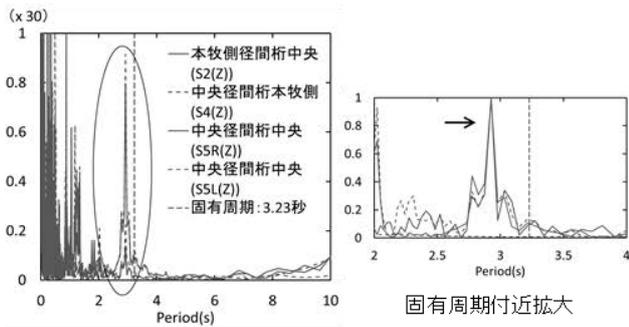
図-6から図-9に各地震計位置で得られた応答加速度波形より求めた伝達関数を示す。グラフの縦軸は伝達関数であり、各図とも伝達関数の最大振幅が1となるように正規化している。また、横軸は周期である。図は、左側に千葉県東方沖地震での固有周期0.05秒～10秒までの伝達関数を示しており、着目した固有振動モードの固有周期付近の振幅を黒丸で囲んでいる。右側には着目した固有振動モードの固有周期付近の周期帯域を拡大した千葉県東方沖地震と福島県沖地震の伝達関数を示している。図中、着目した固有周期を矢印で示している。三重県南東沖地震については、前述したように、他の2地震よりも長周期成分の強度が小さく、基本固有振動モードである遊動円木に相当する振幅が確認できなかったため図には示していない。

a) 主桁と主塔面内方向の固有振動

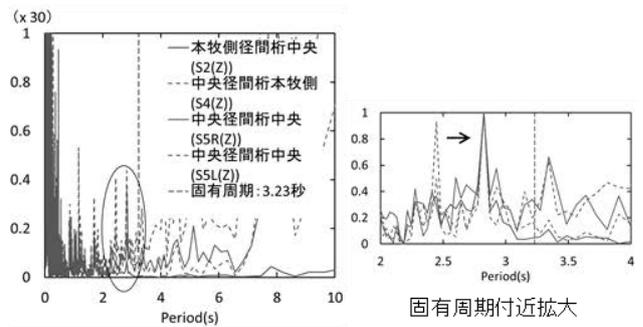
図-6より、基本固有振動モードである遊動円木（7.18秒）は、千葉県東方沖地震による地震動でのP2頂部（T1：X）を除いたセンサー位置で遊動円木の固有周期に相当すると思われる7.45秒で振幅の卓越を確認できた。

図-7の(1)より、面内たわみ対称1次（3.23秒）に相当する周期2.9秒付近で振幅の卓越を確認できた。これは面内たわみ対称1次の3.23秒よりかなり短い。2011年東北地方太平洋沖地震で観測された地震応答から推定された固有周期も約2.93秒²⁾であったことから、面内たわみ対称1次と判断した。図-7の(2)より、面内たわみ逆対称1次（2.35秒）は、福島県沖地震の中央径間桁本牧側（S4：Z）で固有周期に近い2.44秒での振幅の卓越を確認できた。しかし、その他のセンサー位置では固有周期付近での振幅の卓越はみられなかった。

図-8の(1)より、面外たわみ対称1次（3.45秒）は、着目した2つのセンサー（S5R：Y, S5L：Y）ともに固有周期に近い3.48秒で振幅の卓越を確認できた。図-8の(2)より、面外たわみ逆対称1次（1.35秒）は、2つの地震動ともに本牧側径間桁中央（S2：Z）で1.18秒、中央径間桁本牧側（S4：Z）で1.36秒の振幅の卓越を確認できた。

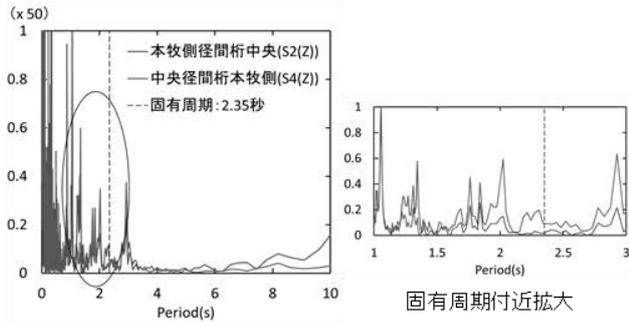


20180707. 千葉県東方沖地震

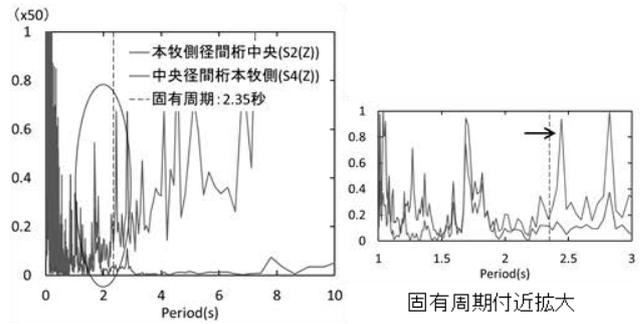


20190804. 福島県沖地震

(1) 面内たわみ対象1次



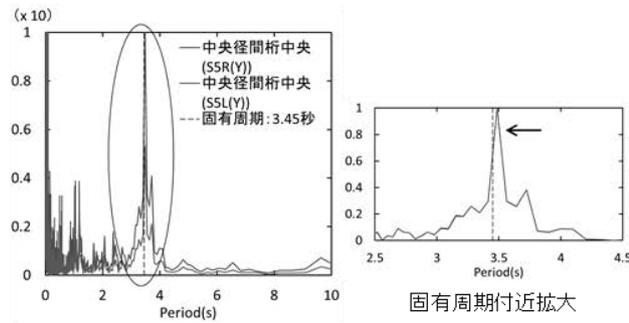
20180707. 千葉県東方沖地震



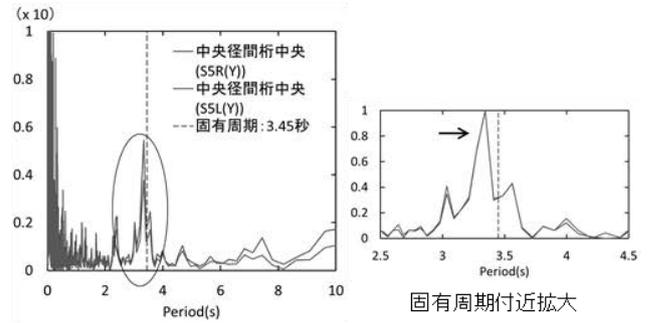
20190804. 福島県沖地震

(2) 面内たわみ逆対象1次

図-7 桁の面内たわみ（鉛直方向：Z）に着目

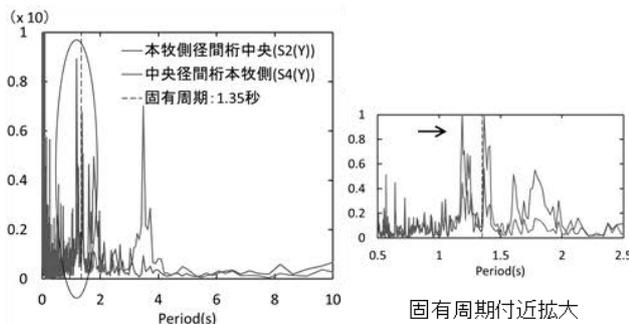


20180707. 千葉県東方沖地震

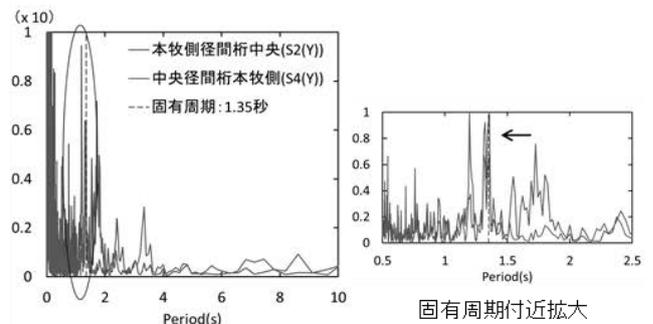


20190804. 福島県沖地震

(1) 面外たわみ対象1次



20180707. 千葉県東方沖地震



20190804. 福島県沖地震

(2) 面外たわみ逆対象1次

図-8 桁の面外たわみ（橋軸直角方向：Y）に着目

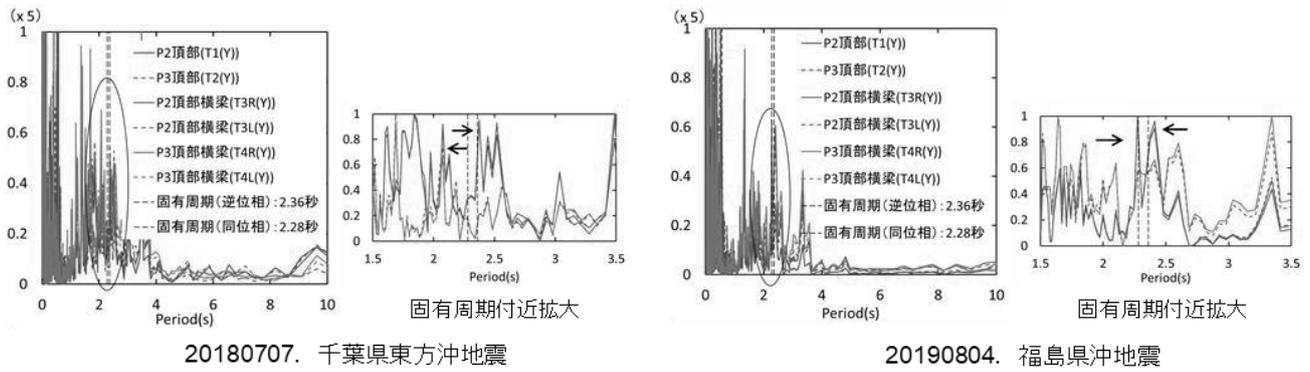
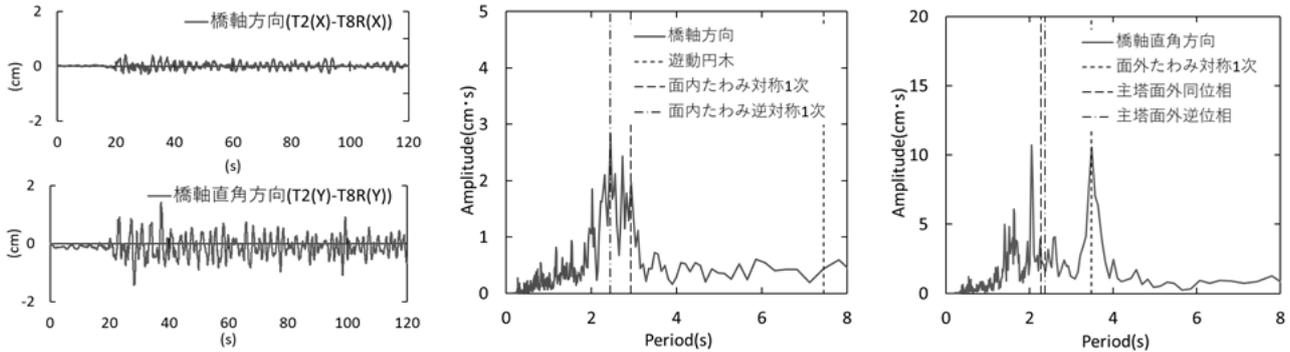
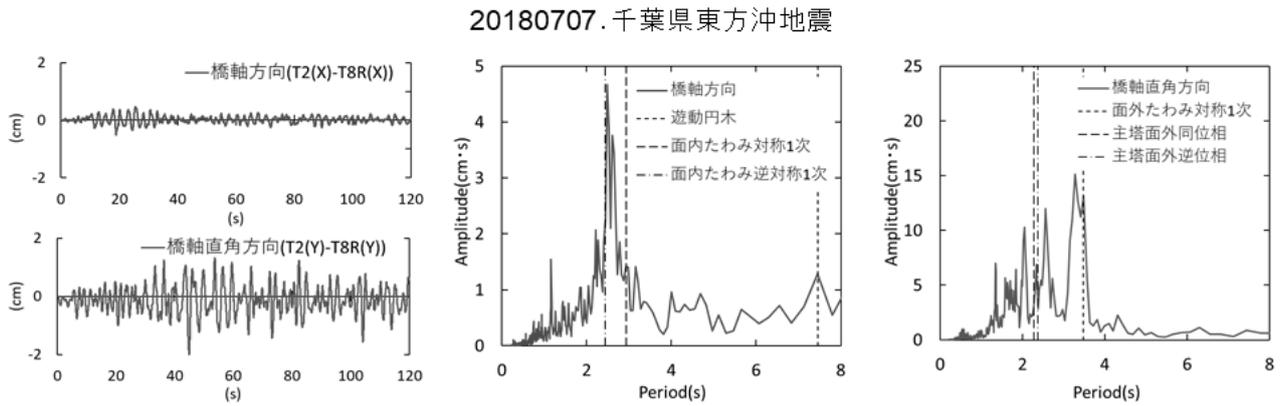


図-9 主塔面外（橋軸直角方向：Y）に着目



大黒側主塔（P3）相対変位波形

大黒側主塔（P3）相対変位のフーリエスペクトル



大黒側主塔（P3）相対変位波形

大黒側主塔（P3）相対変位のフーリエスペクトル

20190804.福島県沖地震
図-10 大黒側主塔（P3）で観測された相対変位とその周期特性

b) 主塔面外方向の固有振動

図-9より、主塔面外の固有振動モード（逆位相：2.36秒，同位相：2.28秒）は、千葉県東方沖地震では、2.07秒と2.37秒に振幅の卓越を確認できる。これらがそれぞれ逆位相と同位相の固有周期に相当すると考えられる。同様に福島県沖地震では、2.27秒と2.41秒に振幅の卓越を確認できる。

(2) 主塔の相対変位

図-10は、千葉県東方沖地震と福島県沖地震で観測されたP3主塔頂部（T2）と基部（T8R）の相対変位の波形とフーリエスペクトルである。相対変位は、応答加速度波形を2回積分して求めた応答変位波形

から求めた。図より、ここで対象とした地震では、主塔頂部の応答変位は橋軸方向よりも橋軸直角方向の方が大きいことがわかる。千葉県東方沖地震で観測された地震動での橋軸方向の最大相対変位は0.42cm，橋軸直角方向の最大相対変位は1.4cmであった。福島県沖地震で観測された地震動での橋軸方向の最大相対変位は0.52cm，橋軸直角方向の最大相対変位は2.0cmであった。

図より、橋軸方向の相対変位のフーリエスペクトルは、対象とした2地震で観測された地震応答とも2.5秒付近で卓越している。これより、橋軸方向の変位は、千葉県東方沖地震と福島県沖地震で観測されたいずれの地震応答も、桁の面内たわみ逆対称1

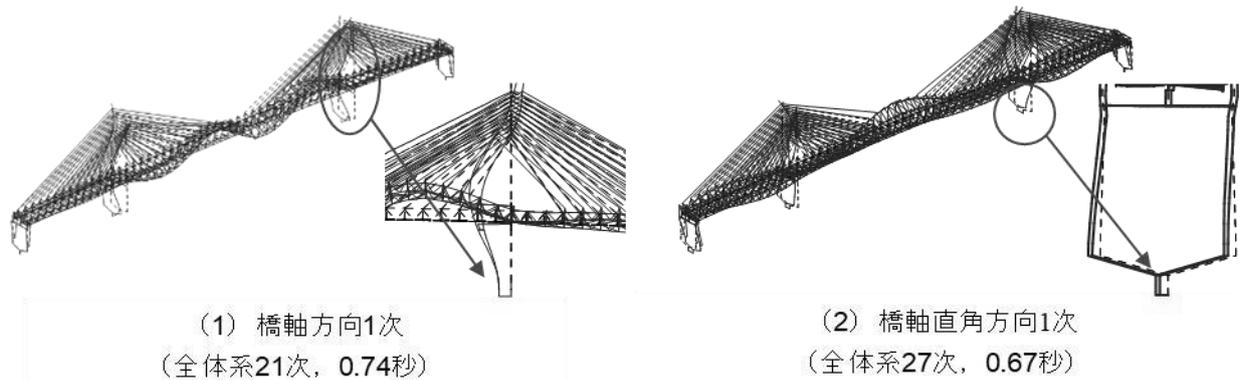


図-11 大黒側主塔 (P3) 基礎の固有振動モード形と固有周期

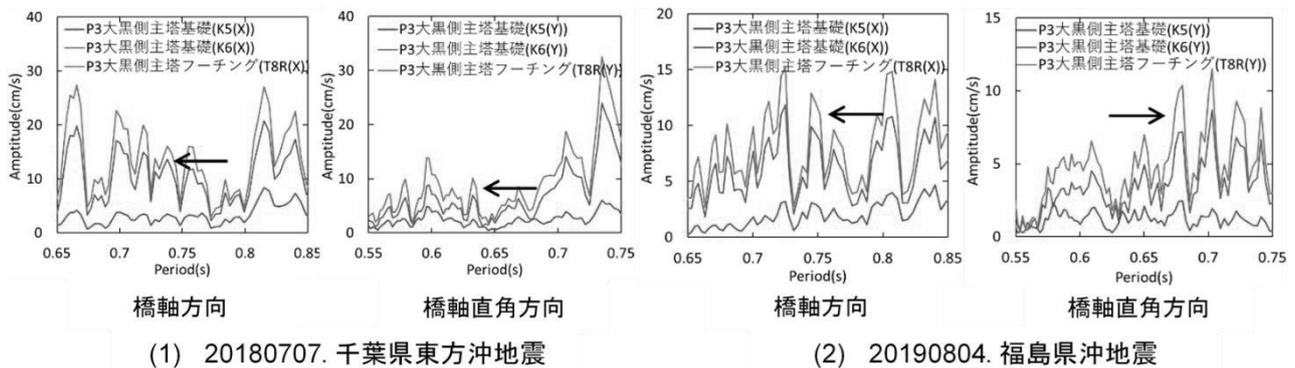


図-12 大黒側主塔 (P3) 基礎とフーチング頂部で観測された応答加速度の周期特性

次の固有振動モードの影響が強く表れていることがわかる。また、福島県沖地震で観測された地震応答では、遊動円木の固有周期でも振幅の卓越が確認できる。横浜ベイブリッジの主塔面外方向の固有振動モードの固有周期は逆位相で2.36秒、同位相で2.28秒であるが、橋軸直角方向の相対変位から求めたフーリエスペクトルは、千葉県東方沖地震と福島県沖地震で観測された地震応答とも約3.5秒で周期が卓越している。これより、桁の面外たわみ対称1次の固有振動モードの影響が強く表れていることがわかる。

(3) 基礎構造の固有振動特性

図-11は、横浜ベイブリッジの橋梁全体系モデルから求めた固有振動モードのうち、大黒側主塔 (P3) 基礎の動きが卓越した固有振動モードを示したものである。大黒側主塔基礎橋軸方向の固有振動モードは全体系の21次でその周期は0.74秒、橋軸直角方向固有振動モードは全体系の27次でその周期は0.67秒である。

前述した上部構造の固有振動モードは、固有周期が1.0秒よりも長周期域に存在していたので、式(1)で伝達関数を求め、その卓越周期に着目して固有振動モードに相当する固有周期を特定した。しかし、図-11に示すように基礎構造の固有振動モードは固有周期が1.0秒よりも短く、その周期帯域では長周期領域よりも数多くの周期成分がフーリエスペクトルに存在し、振幅の大小も激しく変化している。そのため、式(1)に示すような除算では、伝達関数中

に目的とする固有振動モードに相当する振幅の卓越を見出すことは難しい。ここでは、多柱基礎先端付近のK5と多柱基礎頂部付近のK6、及びフーチング頂部のT8で観測された応答加速度波形のフーリエスペクトルに着目して、大黒側主塔基礎の固有振動モードを探した。

図-12に千葉県東方沖地震と福島県沖地震で観測された大黒側主塔基礎 (K5, K6) 及びフーチング (T8) の応答加速度波形より求めたフーリエスペクトルを示す。図中、着目した固有周期を矢印で示している。多柱基礎の固有振動モード形は、固い土丹層中に根入れされた基礎先端付近でほとんど変形せず、基礎先端から基礎頂部にかけて基部が固定された片持ち梁状の変形をするので、地震応答も基礎先端付近K5では小さく、基礎頂部K6に向かうほど大きくなる。さらに、地震応答は、基礎頂部付近K6よりもフーチング頂部T8の方が大きくなる。このような多柱基礎としての変形性状を考えると、基礎先端付近K5の地震応答には基礎構造の固有振動モードは明瞭に表れないが、基礎頂部付近K6やフーチング頂部T8には固有振動モードが明瞭に表れ、その振幅の大きさはフーチング頂部T8の方が基礎頂部K6よりも大きいはずである。このような観点で図-12中のフーリエスペクトルを眺めると、矢印で示した大黒側主塔基礎の固有振動モードに相当する周期におけるフーリエ振幅はその条件を満足していることがわかる。以上より、多柱基礎の先端付近K5と頂部付近K6、及びフーチング頂部T8の地震応答中には、基礎構造の固有振動モードの影響が含ま

れていることがわかる。

図-1では、本牧側端部橋脚（P1）基礎の地震計K1とK2も計測可となっているが、観測された応答加速度波形を図示した結果、K2位置の応答加速度波形が正しく記録されていなかったため、検討対象としなかった。

5. まとめ

本論文では、2017年～2019年に横浜ベイブリッジで観測された地震応答を収集、整理し、実地震での横浜ベイブリッジの振動特性を分析した。分析の結果、長周期成分が他の地震よりも卓越していた2018.7.7千葉県東方沖地震と2019.8.4福島県沖地震において、横浜ベイブリッジの主要な固有振動モードの固有周期に相当する卓越周期を確認することができた。

橋の地震応答は、橋の固有振動特性と地震動特性によって決まるため、様々な地震動に対する地震応答を観測し、上述した量（固有周期、減衰定数、相対変位、変位状況等）を蓄積していくことによって、橋の耐震設計の信頼性の向上や合理化につなげることができる。本論文では、横浜ベイブリッジの主要な固有振動モードの固有周期だけに着目したが、今後、地震応答の観測記録を生かし、耐震設計上重要な橋の減衰定数の推定や、加速度波形を2回積分した変位波形による上下部構造間の相対変位や橋の変形状態の把握などを実施する予定である。

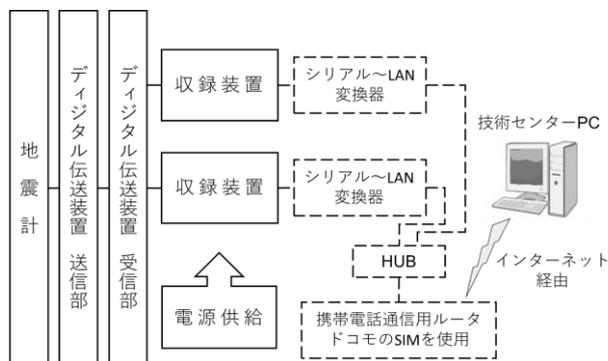
参考文献

- 1) 山本泰幹, 藤野陽三, 矢部正明: 地震観測された長大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.738-757, 2009.
- 2) 藤野陽三, シリゴリンゴディオシウス, 並川賢治, 矢部正明: 2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.2, pp.372-391, 2013.

付録：ワイヤレス通信機器の設置

地震観測においては、地震計や収録装置などの設置といった初期費用のほか、長期における機器の維持管理や更新、地震時におけるデータの回収及び解析などを行うための費用が必要となる。持続的に効率よく地震観測を行っていくためには、費用の低減が求められる。そこで、地震データの回収、解析費用を低減させるための対策として、広域ネットワーク通信機能と波形解析機能を整備することが有効と考えられる。

首都高速道路では、2017年10月に横浜ベイブリッジの既設収録装置にワイヤレス通信機器を設置することによって、地震計の稼働状態の確認や観測データの回収が現場で行うことなく、遠隔で実施できるようになった。横浜ベイブリッジの地震観測システムの概要図と通信機器一覧を付図-1と付表-1に示す。付図-1中の破線で示す部分が整備した広域通信ネットワークである。ワイヤレス通信機器を整備したことによって、事務所にてデータ回収や収録した加速度波形の解析が実施できるようになった。また、広域モバイル通信ネットワークを整備は、地震後の早期のデータ回収のみならず、稼働状況の確認や観測した加速度波形のフーリエスペクトルや応答スペクトル分析により、データ有効性の確認も可能となった。



付図-1 横浜ベイブリッジの地震計システム概要図

付表-1 横浜ベイブリッジの地震計システムの通信機器

名称	型式	数量	備考
シリアル・デバイス・サーバ	Nport5110	2台	シリアル～LAN変換
HUB	LSW4-TX-5NS/WH	1台	
携帯端末用ルータ	LM-100	1台	NTTドコモUSIMカード専用
LTE対応アンテナ	FMM800W-4T-5M	1台	LTEアンテナ
通信ソフト	TS-Terminal	1式	波形表示ソフト含む