

東北地方太平洋沖地震の余震観測記録に基づいた鶴見つばさ橋の地震応答特性

筑波大学大学院 学生会員 ○宇都宮大治 筑波大学システム情報系 正会員 庄司学

1. はじめに: 2011年3月13日2時56分18秒に鶴見つばさ橋において東北地方太平洋沖地震の余震による観測記録が得られた。本研究では、これらを基に鶴見つばさ橋の3次元非線形フレームモデルを構築し、3次元動的解析を行い、地震応答の再現性と動的解析モデルの妥当性を検証する。

2. 対象橋梁と地震観測記録: 鶴見つばさ橋は、東京湾内に位置する3径間連続鋼斜張橋である。橋長1020.0[m]、中央径間510.0[m]、側径間255.0[m]である。P2・P3主塔基部はSRC構造であり、端橋脚であるP1・P4はRC構造である。支持形式としては、P2・P3に鉛直支承、水平支承、弾性拘束ケーブル、ストッパー及びベン型オイルダンパーが設置され、P1・P4にペンデル支承及び水平支承が設置されている。鉛直支承は橋軸、橋軸直角方向ともに可動、水平支承は橋軸方向が可動、橋軸直角方向が固定である。ペンデル支承は、鉛直方向に対する支持機能を有し橋軸方向は可動である。主塔と主桁を繋ぐ橋軸方向の支持には弾性拘束ケーブルが採用されている。また、計27箇所、50成分の加速度及び変位による地震観測が行われている。波形のサンプリング周波数は100[Hz]、計測時間は174.50[s]である。P3橋脚基礎底面の加速度波形を分析すると、その振幅は小さく、地震動のパワーは小さいことが分かるが、フーリエスペクトルによれば、周期2.5秒以上の長周期成分を豊富に含んでいる地震動と判断できる。

3. 動的解析モデルと解析方法: 新潟県中越地震を基に鶴見つばさ橋を対象として動的解析を行った山本らの論文¹⁾および鶴見つばさ橋工事誌²⁾に基づき、3次元非線形フレームモデルを構築した(図-1)。主桁、弾性拘束ケーブルの桁定着部、主ケーブルの桁定着部、主桁の仮想横梁、主塔の主桁との取合部は線形梁要素で、端橋脚と主塔の残りの部分については非線形梁要素でモデル化した。主ケーブルと弾性拘束ケーブルは初期張力を考慮したトラス要素で、鉛直支承、ペンデル支承もトラス要素でモデル化した。水平支承は線形ばね要素、ストッパーおよび基礎—地盤間ばねは非線形ばね要素でモデル化した。ベンダンパーは非線形の粘性要素でモデル化した。減衰マトリックスはRayleigh型を仮定し、上部工、橋脚、基礎—地盤間ばねのそれぞれに減衰定数を与え、モデル化を行った(図-2)。本解析における地震動は多点異入力で与えた。このときP1においては、P1端橋脚基礎天端位置のCH25(橋軸方向)、CH26(橋軸直角方向)およびCH27(鉛直方向)、P2においてはCH25(橋軸方向)とP2橋脚基礎天端位置のCH29(橋軸直角方向)およびCH30(鉛直方向)、P3においてはP3基礎底面位置のCH37(橋軸方向)およびCH39(鉛直方向)とP3基礎重心位置のCH41(橋軸直角方向)、P4においてはP4端橋脚基礎天端位置のCH34(橋軸方向)、CH35(橋軸直角方向)およびCH36(鉛直方向)における観測波を入力地震動とした。なお、解析条件として、数値積分にはNewmark β 法($\beta=0.25$)を用い、積分時間間隔は0.01秒とした。

4. 固有値解析結果: 本研究と文献1), 3), 4)および耐震補強検討時の固有値解析結果との比較を図-3に示す。図-4には主たる固有振動モード形を示す。図-3によると全体的に整合性は高い。鉛直方向は主桁鉛直曲げ対称1次($T_1=4.811$ 秒)、主桁鉛直曲げ逆対称1次($T_3=3.455$ 秒)、主桁中央径間ねじれ対称1次($T_5=2.001$ 秒)、主桁鉛直曲げ対称2次($T_6=1.953$ 秒)、主桁鉛直曲げ逆対称2次($T_7=1.658$ 秒)が卓越する。また、図-4から主桁の鉛直方向の振動に伴い、主塔は橋軸方向に振動していることが分かる。橋軸直角方向は主桁水平曲げ対称1次($T_2=3.925$ 秒)、P2およびP3主塔橋軸直角方向1次($T_{10}=1.431$ 秒、 $T_{11}=1.359$ 秒)が卓越する。主桁水平曲げ対称1次モードは主塔の鉛直軸回りの境界条件に大きく依存するため、先行研究と比べ、固有周期に差が見られる。さらに図-4によると主桁の橋軸直角方向の振動に伴い、主塔も橋軸直角方向に振動する。橋軸方向は主桁遊動円木モード($T_8=2.831$ 秒)が卓越する。このモードは建設時には観測・解析が困難なモードであるため、実際の地震観測記録による解析が重要となるが、本モデルにおいては弾性拘束ケーブルの評価に大きく依存することが明らかとなった。

5. 地震応答特性: 図-5にはP3主塔頂部およびP3-P4間主桁における観測記録と動的解析結果の比較を示す。P3主塔頂部CH19(橋軸方向)およびCH20(橋軸直角方向)に着目すると、観測では加速度応答の最大値はCH19が $0.24[\text{m/s}^2]$ 、CH20が $0.18[\text{m/s}^2]$ である。これに対して解析ではCH19が $0.10[\text{m/s}^2]$ 、CH20が $0.25[\text{m/s}^2]$ である。橋軸方向のフーリエ振幅については、解析波の約0.2~0.35[Hz]において主桁鉛直曲げ対称1次(0.208[Hz])、主桁鉛直曲げ逆対称1次(0.289[Hz])、主桁遊動円木(0.353[Hz])のピークが見られ、約0.5~0.6[Hz]において主桁鉛直曲げ対称2次(0.512[Hz])、主桁鉛直曲げ逆対称2次(0.603[Hz])のピークが見られる。観測波と比べて、それらの振動数帯域での再現性は良好である。橋軸直角方向のフーリエ振幅については、解析波の0.25[Hz]付近において主桁水平曲げ対称1次(0.255[Hz])のピークが見られる。0.7[Hz]付近のピークはP2およびP3主塔橋軸直角方向1次であると推察されるが、解析波の方が大きく卓越している。

P3-P4間主桁CH1(橋軸方向)の応答に着目すると、加速度応答の最大値は観測波に比べて解析波の方が0.4倍小さくなっている。フーリエ振幅については、0.35[Hz]付近に主桁遊動円木(0.353[Hz])のピークが見られ、再現性は良好である。また、今回の地震動による主桁遊動円木モードへの刺激は小さかったと推察される。P3-P4間主桁CH3(橋軸直角方向)の応答に着目すると、加速度応答の最大値は観測波に比べて解析波の方が約2倍大きい。フーリエ振幅キーワード 東北地方太平洋沖地震、鶴見つばさ橋、斜張橋、3次元フレームモデル、動的解析、地震応答特性
連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学大学院システム情報工学研究科 TEL029-853-7368

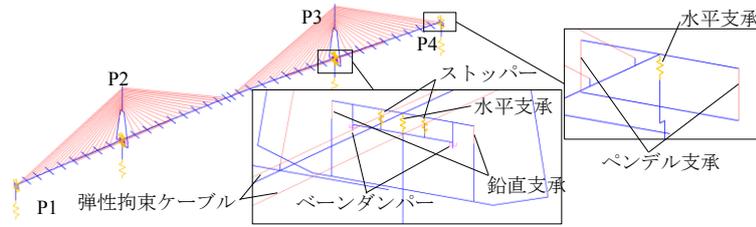


図-1 鶴見つばさ橋の3次元非線形フレームモデル

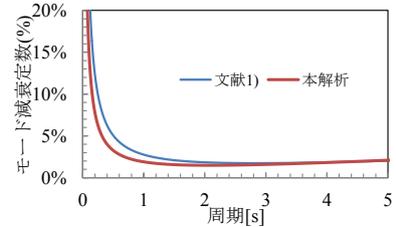


図-2 Rayleigh 型の減衰定数と周期

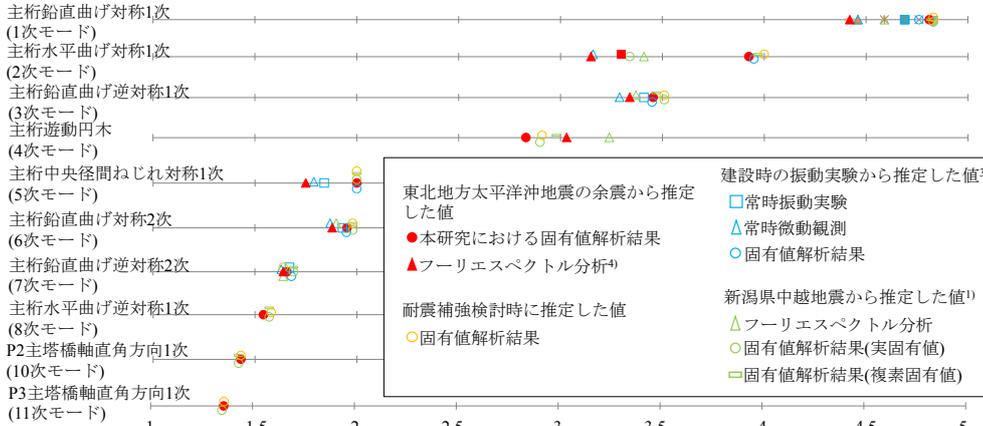


図-3 固有周期の比較

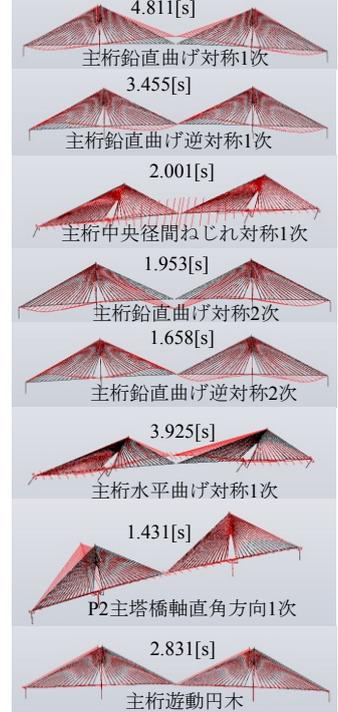


図-4 主たる振動モード形

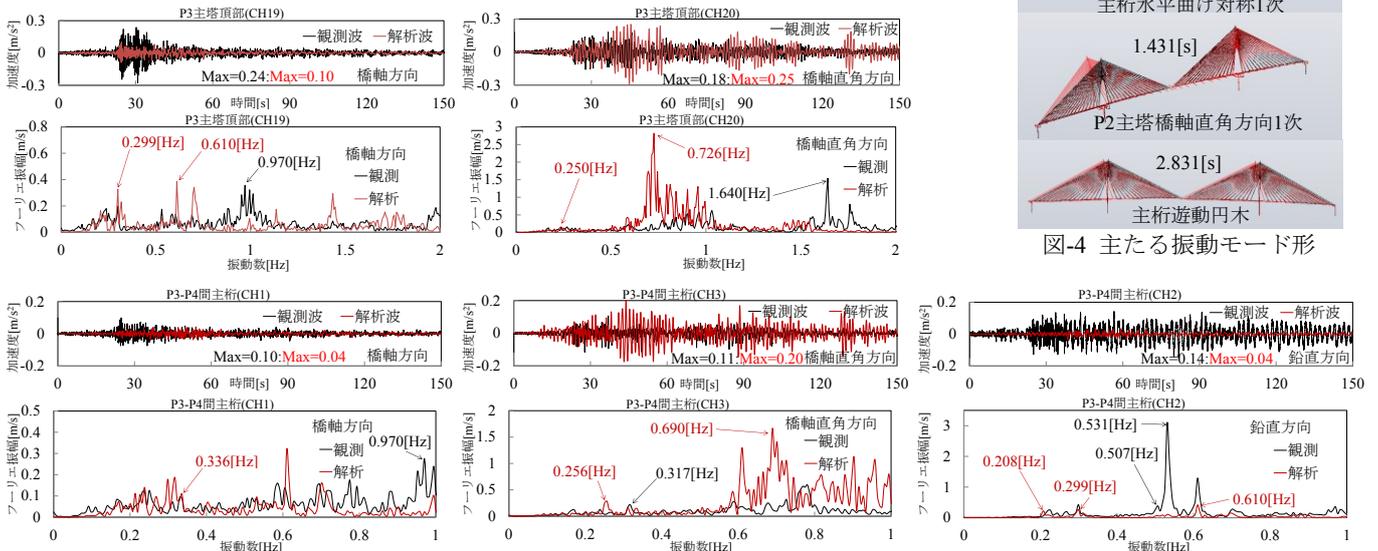


図-5 P3 主塔頂部および P3-P4 間主桁における観測記録と動的解析結果の比較

については、解析波の 0.25[Hz]付近に主桁水平曲げ対称 1 次(0.255[Hz])のピークが見られるが、観測波の 0.317[Hz]と比較するとピークが低振動数側にシフトしている。先述したように、0.7[Hz]付近には P2 および P3 主塔橋軸直角方向 1 次によるピークが見られる。P3-P4 間主桁 CH2(鉛直方向)の応答に着目すると、加速度応答の最大値は観測波に比べて解析波の方が約 0.29 倍小さく、それにより全体的にフーリエ振幅も小さくなっている。0.2[Hz]付近には主桁鉛直曲げ対称 1 次(0.208[Hz])、約 0.3[Hz]付近には主桁鉛直曲げ逆対称 1 次(0.289[Hz])のピークが見られ、再現性は良好である。このとき解析波を見ると、主桁中央径間ねじれ対称 1 次(0.500[Hz])および主桁鉛直曲げ対称 2 次(0.512[Hz])は励起されていないことが分かる。0.6[Hz]付近には主桁鉛直曲げ逆対称 2 次(0.603[Hz])のピークが見られ、解析波の方が小さくなっている。

5. まとめ：東北地方太平洋沖地震の余震の地震観測記録が記録された鶴見つばさ橋を対象として、その 3 次元非線形フレームモデルを構築し、先行研究を踏まえ、固有値解析に基づき振動特性を明らかにした。その上で、前述の地震観測記録が入力された場合の鶴見つばさ橋の地震応答の特徴を解明した。

謝辞：首都高速道路株式会社技術部技術推進グループ、(株)長大の矢部正明博士には鶴見つばさ橋の設計および地震観測記録に関する貴重な資料、構造特性についての有用な情報を頂きました。ここに関係各位に厚く御礼申し上げます。

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橋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, 2009.8. 2) 首都高速道路公団: 鶴見つばさ橋工事誌, pp.5-100-5-111, 1994. 3) 山口宏樹, 高野晴夫, 小笠原正文, 下里哲弘, 加藤真志, 岡田淳: 鶴見つばさ橋の振動実験による動的特性の同定, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.247-258, 1996.7. 4) 庄司学, 針谷諒大, 三浦壽美花: 東北地方太平洋沖地震の余震観測記録に基づいた鶴見つばさ橋の動特性の検証, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), pp.1_730-I_741, 2017.