

主塔主桁間の衝突を伴う長大橋の地震応答の再現と大地震時の損傷過程の推定

東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	正会員	○武田 智信
東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	正会員	水谷 司
東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	正会員	長山 智則
横浜国立大学	先端科学高等研究院	フェロー	藤野 陽三

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、横浜ベイブリッジで桁の橋軸直角方向の変位を制限する機構であるウインドタンクとウインド沓(図1)の間に衝突が観測された^[1]。この地震ではウインドタンクの損傷は見られなかったものの、タワーリンクの一部のボルトが破断する被害が発生した。衝突によりウインドタンクが損傷した場合、橋軸直角方向の拘束力が低下し、タワーリンクの脱落が発生する恐れがある。脱落后を想定した耐震補強^[2]がなされているものの、一旦脱落が生じれば、恒久的な補修や速度制限が必要で、長期間の交通機能の低下は免れない。また、実際に発生したボルト破断のメカニズムの解明にも至っていない。

本研究では、横浜ベイブリッジを対象とし、観測された応答を再現した上で、大地震時の長大橋の衝突による損傷過程を明らかにすることを目的とした。

2. マルチスケールモデルの構築

解析モデルを図2に示す。まず、二次部材およびウインド沓とウインドタンクの遊間等を考慮して橋梁全体の三次元骨組みモデルを構築した。その後、シェルおよびソリッド要素から成る主塔、横桁、ウインドタンク、ウインド沓の局所モデルを構築し、骨組みモデルと組み合わせることでマルチスケールモデルを構築した。骨組みモデルと局所モデルの境界はMPCにより結合し、ウインド沓とウインドタンクの間には衝突を再現するために接触面を定義している。

3. 動的解析による観測された地震応答の再現

解析モデルの妥当性を検証するために東北地方太平洋沖地震の本震を用いた動的解析を行い、観測された加速度応答の時刻歴および固有振動数の時間変化といった全体応答の再現性について検討した。動的解析から得られた加速度応答を移動式の時間窓で分割し、各時間窓にシステム同定を適用して固有振動数を同定した。システム同定には System Realization using Information Matrix (SRIM)^[3]を用いた。同定された解析と観測の固有振動数の時間変化を図3に示す。図より、構築したモデルが衝突による固有振動数の増加を再現している。また、主桁中央における橋軸直角方向の加速度応答の比較を図4に示す。図より最も支配的な応答である1次モードの振幅が観

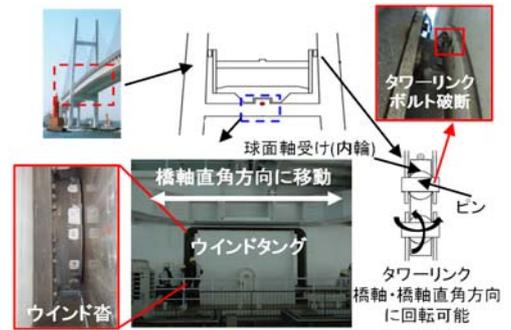


図1 ウインドタンクとタワーリンク

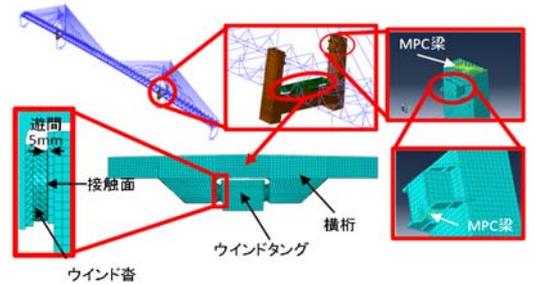


図2 マルチスケールモデル

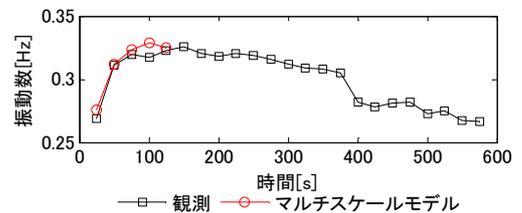
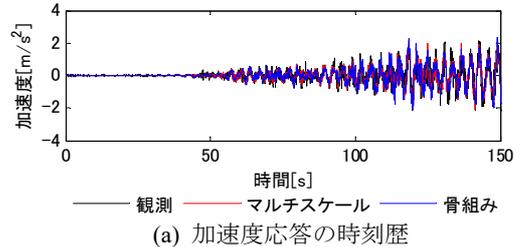
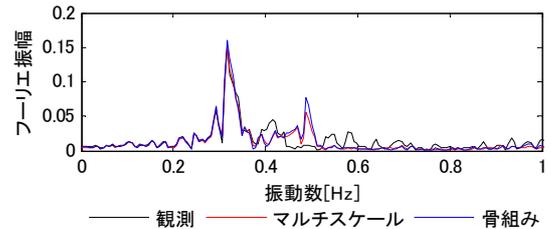


図3 観測と解析の固有振動数の時間変化



(a) 加速度応答の時刻歴



(b) フーリエ振幅スペクトル

図4 本震における解析と観測の主桁中央の橋軸直角方向加速度応答の比較

キーワード 衝突, 地震応答解析, マルチスケールモデル, ウインド沓 - ウインドタンク, タワーリンク
 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL03-5841-6099

測と概ね一致している。以上から、構築したマルチスケールモデルは骨組みモデルと同程度の精度で全体応答を再現しているといえる。

4. 東北地方太平洋沖地震におけるタワーリンクボルト破断のメカニズムの解明

本震の動的解析から得られた最大変位を図 5 に示すタワーリンクの詳細モデルに強制変位として入力することで、東北地方太平洋沖地震時に発生したタワーリンクのボルト破断メカニズムについて検討した。プッシュオーバー解析により得られたタワーリンクボルト部分の変形状態および応力状態を図 6 に示す。強制変位によりリンクプレートの並進変位と球面軸受の回転により、リンクプレート側の L 型鋼がリンク本体側のボルトに接触している。また、現地調査で観察された破断位置およびボルトに発生したせん断方向の接触力とボルトのせん断耐力の比較を示すとそれぞれ図 7, 表 1 のようになり、破断位置が現地調査の結果と整合的であった。以上から、東北地方太平洋沖地震では、L 型鋼とリンク本体側のボルトがせん断方向に接触し、ボルトが破断したと考えられる。

5. マルチスケールモデルを用いた大地震時における損傷過程の推定

将来の大地震を想定し、レベル 2 地震動をマルチスケールモデルに入力して動的解析を行った。入力地震動には、ウインドタングに最も大きな衝突力が発生した道路橋示方書のレベル 2 地震動 I-III-II を用いた。ウインドタングの変形状態と損傷状態を図 8 に示す。損傷の判定には延性破壊基準を用いた。図より、ウインドタングの基部で損傷が集中している。

さらに、ウインドタング損傷後におけるタワーリンクの脱落可能性について検討するために、動的解析から得られたタワーリンクの橋軸直角方向の最大変位をタワーリンクの詳細モデルに強制変位として入力するプッシュオーバー解析を行った。プッシュオーバー解析から得られたタワーリンクの変形状態を図 9 に示す。タワーリンクの上側のピンがリンクブラケットから抜け出し、タワーリンクが脱落する可能性があるといえる。

6. 結論

本研究では、横浜ベイブリッジを対象に観測された衝突を含む地震応答記録に基づいて全体応答と局所的な応答の双方を再現可能なマルチスケールモデルを構築し、将来の大地震を想定した動的解析を行った。その結果、レベル 2 地震時にウインドタング、ウインド杵間の衝突によりウインドタング基部が損傷し、ウインドタング損傷後にタワーリンクが脱落する可能性があることを示した。これに基づいてタワーリンクの脱落など重大な損傷を防ぐための具体的な対策の検討が可能となると考えられる。

謝辞

本研究において、貴重なご意見を頂いた首都高速道路の並川様、(株)長大の矢部様に感謝の意を表します。

参考文献

[1]Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino, M.ASCE, Kenji Namikawa: Seismic Response Analysis of the Yokohama Bay Cable-Stayed bridge in the 2011 Great East Japan Earthquake, Journal of Bridge Engineering, 19, DOI 10.1061/(ASCE) BE.1943-592.0000508, 2014. [2]小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強検討, 土木学会論文集 No. 801/I-73, pp.1-20, 2005.

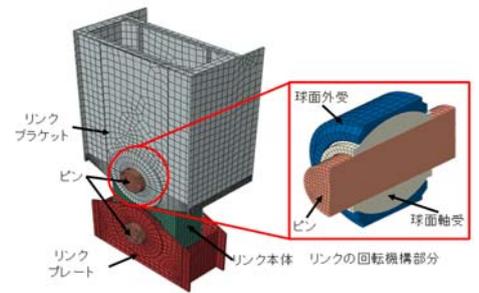


図 5 タワーリンクの詳細モデル

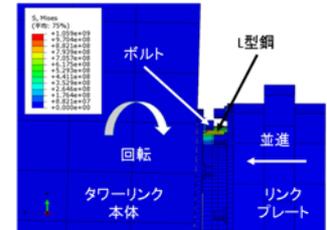


図 6 ボルトと L 型鋼の接触時の応力状態とボルトの破断メカニズム

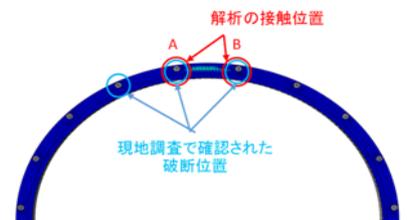


図 7 接触が発生したタワーリンク側のボルトの位置と現地調査の破断位置

表 1 各ボルトに発生した接触力とせん断耐力の比較

位置	接触力 [kN]	せん断耐力 [kN]
A	49.1	17.4
B	43.7	

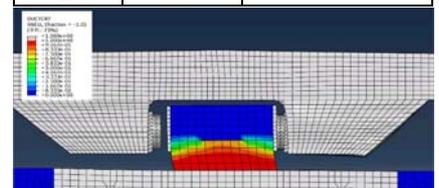
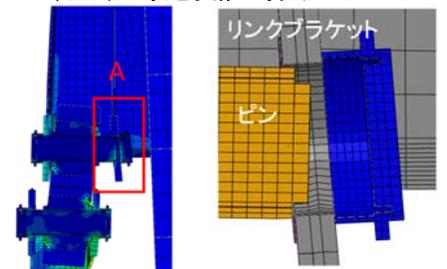


図 8 ウインドタングの変形状態と延性破壊基準の状態変数の分布



(a) タワーリンク全体 (b) A 部拡大図
図 9 最大変位時におけるタワーリンクの変形状態