

マルチスケールモデルを用いた横浜ベイブリッジの地震応答解析とウインドタングの損傷評価

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○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ウインド杵-ウインドタング間(図1)の衝突現象が観測された^[1]。この現象は設計時には考慮されておらず、ウインドタングが損傷した場合にはタワーリンクの脱落やケーブルの破断が連鎖的に発生する。このような被害を防ぐために、兵庫県南部地震以降に行われたレベル2地震動を考慮した動的解析の結果をもとに、段差防止構造やアップリフト防止ケーブル等の耐震補強が行われてきた。しかし、ウインドタングに関しては設置スペースの関係から補強出来ないと判断されている^[2]。簡易モデルを用いたレベル2の設計地震動でウインドタングの耐力を上回る衝突力が発生することが指摘されているが^[3]、衝突時のウインドタングの変形状態やどのような損傷が発生するかについては明らかになっていない。

本研究では、梁要素でモデル化した全体モデルとシェル・ソリッド要素でモデル化した衝突部の詳細モデルを組み合わせたマルチスケールモデルを構築し、動的解析により、衝突時のウインドタングの変形状態および損傷状態を明らかにする。

2. 解析モデルの概要と妥当性の検証

解析モデルを図2に示す。モデルの構築および解析には汎用有限要素解析プログラムであるABAQUSを用いた。全体モデルは桁を線形梁要素、主塔・橋脚をM-φの非線形梁要素でモデル化している。ケーブルは初期軸力を考慮した非抗圧のトラス要素を用いている。リンク部材の復元力特性は水平バネによってモデル化している。また、橋脚基部には基礎構造の変形を表すSRバネモデルを用いている。詳細モデルは横桁、ウインドタングおよびその周辺の主塔部をシェル要素、ウインド杵をソリッド要素でモデル化している。詳細モデルと全体モデルの境界はMPC梁により結合している^[4]。ウインド杵とウインドタングの間は衝突を再現するために接触面を定義している。

解析モデルの妥当性を検証するため、固有値解析を行い、観測データから同定された固有振動数と比較した。表1に主なモードの固有振動数の比較を示す。表より、構築したモデルの固

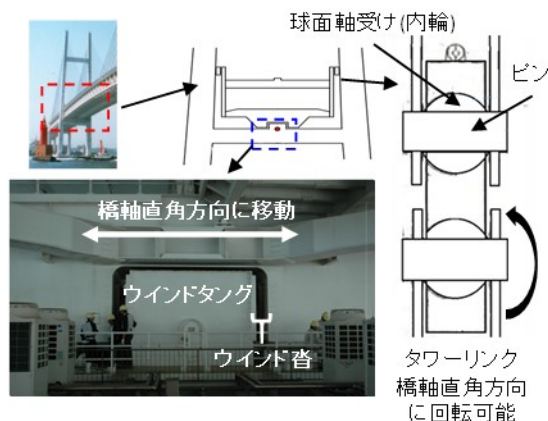


図1 ウインド杵、ウインドタングとタワーリンク

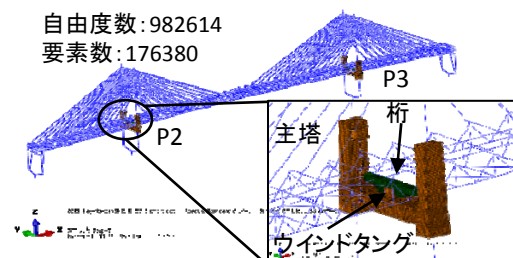


図2 マルチスケールモデル

表1 主なモードの固有振動数の比較

	モデル(Hz)	観測(Hz)
遊動円木	0.146	0.142
橋軸直角1次	0.265	0.272
鉛直1次	0.303	0.339

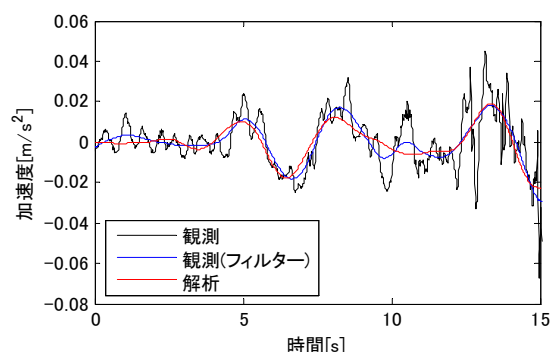


図3 余震における主桁中央の橋軸直角方向加速度

キーワード マルチスケールモデル, 横浜ベイブリッジ, レベル2地震動, ウインド杵-ウインドタング, 衝突
 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 TEL 03-5841-6099

有振動数は観測データから同定された固有振動数と概ね一致している。鉛直モードは観測値が解析に比べ 10%程度大きい。これは、鉛直モードの加振力が小さく、リンクの摩擦力を超えなかったためと考えられる。さらに、小振幅時の地震動を用いて応答を比較することで動的応答の再現性について検討を行った。図 3に余震 15 秒間における主桁中央で観測された橋軸直角方向の加速度応答をカットオフ周波数 0.5Hz の FIR 型の 2 次のバターワースフィルタで高周波成分を低減したものと解析結果の比較を示す。図より、構築したモデルは低周波領域において実応答を概ね再現している。

3. ウインド沓-ウインドタング間の衝突を考慮した地震応答解析とウインドタングの損傷評価

ウインド沓とウインドタングの間における衝突力を推定しウインドタングの損傷の有無を検討するため、衝突を考慮した非線形地震応答解析を行った。本研究では、推定された衝突力がウインドタングの耐力を超えることを「損傷」と定義している。入力地震動には道路橋示方書で規定されているレベル 2 設計地震動(III 種地盤)を用いた。地震動の入力方向は橋軸直角方向としている。

解析結果の一例として、設計地震動 II-III-I を入力した時のウインドタングに作用する 0~15 秒における衝突力の時刻歴波形を図 4に示す。図より、衝突力の時刻歴は 2つのウインドタングではほぼ同位相であり、ウインドタングの最大耐力(79.9 MN)を上回る衝突力が発生することが明らかになった。そこで、ウインドタングに発生する損傷状態およびその時の変形状態について検討した。図 5は最大衝突力が発生した時刻におけるウインドタング変形状態および相当塑性ひずみ分布を示している。図より、ウインドタングがせん断変形し、基部に塑性ひずみが発生している。また、ウインド沓を介して衝突により桁部分にも塑性化が発生している。

4. 結論

本研究では、横浜ベイブリッジを対象に梁要素を用いた全体モデルと、シェル・ソリッド要素を用いた詳細モデルを組み合わせ、マルチスケールモデルを構築した。ウインド沓-ウインドタング間の衝突を考慮した地震応答解析により、レベル 2 地震時における衝突時のウインドタングの変形状態および損傷状態について検討を行った。その結果、レベル 2 地震時においてウインドタングの耐力を超える衝突力により損傷し、ウインドタング基部および横桁が塑性化することが明らかになった。

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. [3]高本剛太郎, 水谷司, 藤野陽三, シリングリノ デイオンシウス: 東北地方太平洋沖地震においてみられた横浜ベイブリッジの主塔主桁間の衝突とその再現による動的特性の解明, 構造工学論文集 Vol.60A, pp242-248, 2014. [4]Z.X. Li, T.Q. Zhou, T.H.T. Chan and Y. Yu: Multi-scale numerical analysis on dynamic response and local damage in long-span bridges, Engineering Structures, 29, pp1507-1524, 2007.

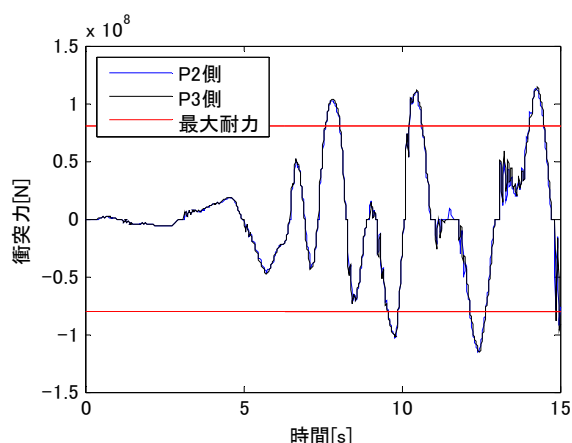


図 4 ウインドタングの衝突力の時刻歴

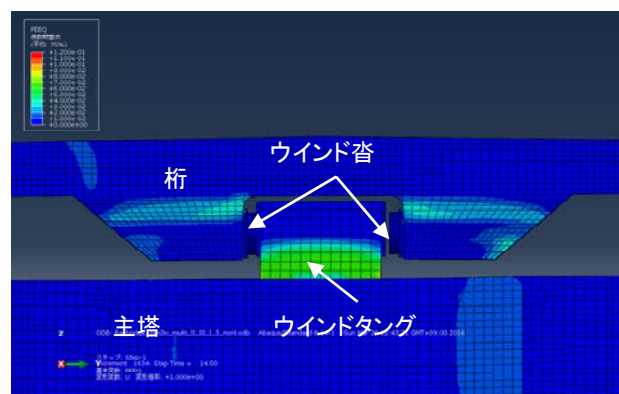


図 5 衝突時の相当塑性ひずみ分布