

非線形地震応答解析を用いたレベル2地震時における横浜ベイブリッジの ウインド沓-ウインドタンク間の衝突応答とその影響の分析

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

長大橋は平時には経済を支える物流ネットワークの要であり、非常時には避難経路や緊急車両の交通網として重要である。災害時に橋梁が損傷し、このような機能が失われた場合、甚大な損失が発生することが予想される。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、横浜ベイブリッジでウインド沓-ウインドタンク間(図1)の衝突現象が観測された。この現象は設計時には考慮されておらず、ウインド沓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。これまでに簡易な骨組みモデルにより衝突力の評価が行われており、レベル2の設計地震動でウインドタンクが損傷する可能性があることが指摘されている。しかし、ケーブルや主塔を簡略化した簡易なモデルを用いた線形解析の検討であり、レベル2地震動で予想される部材の非線形性を考慮した衝突力や、他の部材への影響については明らかになっていない。

本研究では、ケーブルや主塔を考慮した骨組みモデルを用いてレベル2地震時のウインド沓-ウインドタンク間の衝突力を推定し、衝突が他の部材に与える影響を明らかにする。

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。桁を線形梁要素、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でモデル化している。タワーリンクおよびエンドリンクは鉛直方向の相対変位を拘束し、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。また、ウインド沓とウインドタンク間の衝突を再現するために遊間以上の変位が発生した際に剛性を持つ衝突ばねを導入した(図3)。衝突ばねのばね定数は、高本らの研究²⁾により、実計測と整合性の確認がされているものを用いた。各要

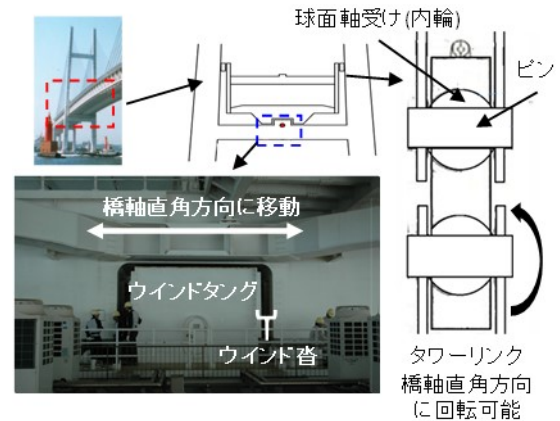


図1 ウインド沓、ウインドタンクとタワーリンク

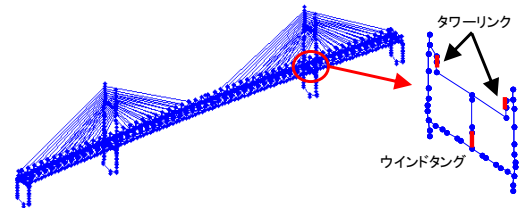


図2 骨組み解析モデル

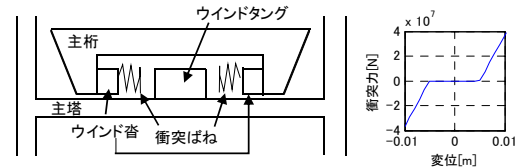


図3 衝突モデルと衝突ばねの復元力特性

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	0.133	0.131
橋軸直角1次	0.290	0.289
鉛直1次	0.303	0.339

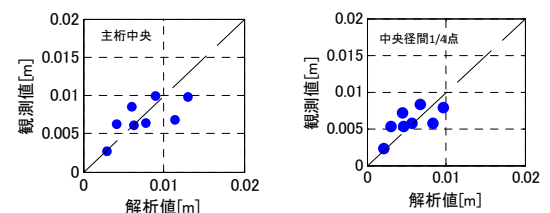


図4 解析と観測の変位RMSの比較

キーワード 横浜ベイブリッジ, レベル2地震動, 地震応答解析, ウインド沓-ウインドタンク, 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 TEL03-5841-6099

素のパラメータは耐震設計に用いられた骨組み解析モデルのものを用いた。

解析モデルの妥当性を検証するため、固有値解析を行い、過去の観測データから同定された固有振動数^[3]と比較することにより、モデルの妥当性の検証を行った。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。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。地震動には東北地方太平洋沖地震において横浜ベイブリッジで観測された地震波 10 波のうち、線形応答とみなせる振幅の小さい余震 8 波を用いた。図 4 に主桁中央及び中央径間の観測と解析の変位 RMS の比較を示す。解析と観測における変位 RMS の平均誤差は 25%程度であり、モデルが実応答を概ね再現できているといえる。

3. ウインド沓-ウインドタンク間の衝突を考慮した地震応答解析

ウインド沓とウインドタンクの間における衝突力を推定するため、衝突を考慮した非線形地震応答解析を行った。入力地震動には簡易モデルを用いた線形解析の結果^[2]からウインドタンクの耐力を上回る衝突力が発生すると推定された道路橋示方書で規定されているレベル 2 設計地震動 II-II-I を用いた。地震動の入力方向は橋軸直角方向としている。衝突力を精度よく推定するために積分時間間隔は 0.001 秒とし、ケーブルや橋脚の初期軸力を考慮した線形化有限変位解析を行った。減衰にはリンク部分と他の部材の剛性の大きな違いによる飛び移り現象を防ぐために、要素別剛性比例減衰を用いた。解析には東京大学橋梁研究室で開発した MATLAB による動的非線形骨組み構造解析プログラム Interactive Simulator and Analyzer for Structure(ISAS)を用いた。

4. ウインドタンクの安全性の評価と他の部材への影響の検討

衝突ばねに作用する復元力から衝突力を推定した。ウインドタンクに作用する衝突力の時刻歴を図 5 に示す。図より 0.7 秒後から衝突が発生し始め、7.5 秒後にはウインドタンクの耐力(79.9MN)を超える衝突力(87.1MN)が発生し、ウインドタンクが損傷することが明らかになった。そこで、ウインドタンクの耐力を超える衝突力が発生した後はウインドタンクの剛性が働

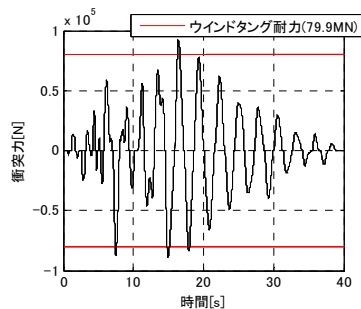


図 5 ウインドタンクの衝突力の時刻歴

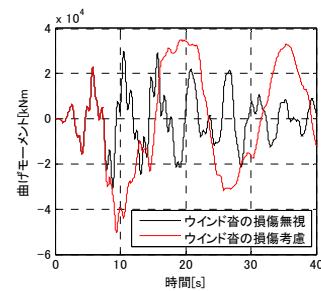


図 6 主塔基部の曲げモーメントの時刻歴

かず、ウインドタンクによる拘束はないと仮定し、ウインドタンク損傷後の他の部材への影響を検討した。ウインドタンクの損傷の考慮の有無における主塔基部の橋軸直角方向回りの曲げモーメントの時刻歴の比較を図 6 に示す。ウインドタンク損傷後には橋軸直角方向の拘束が減少することから応答が長周期化するとともに、ウインド沓の損傷を考慮しない場合に比べて約 1.6 倍の最大曲げモーメントが橋脚基部に発生することが明らかになった。

5. 結論

本研究では、ケーブルや主塔を含んだ詳細な骨組みモデルを用いてウインド沓-ウインドタンク間の衝突を考慮した地震応答解析により、レベル 2 地震時に発生する被害の検討を行った。その結果ウインドタンクの耐力を超える衝突力が発生し、レベル 2 地震時にウインドタンクが損傷することが明らかになった。さらに、ウインドタンク損傷を考慮した動的解析を行った結果、ウインドタンク損傷後には損傷を考慮しない場合に比べて橋脚基部に約 1.6 倍の最大曲げモーメントが発生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]高本剛太郎, 水谷司, 藤野陽三, シリンゴリンゴ ディオンシウス: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. [3]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, pp738-757, 2009.