

論文の内容の要旨

論文題目 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
(Reproduction of long-span bridge seismic responses
involving tower-girder pounding and damage process
estimation for large earthquakes)

氏 名 武 田 智 信

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交通網における最重要リンクの1つである。将来起こり得る地震に対して確実に備えることが求められる。本論文で対象とする横浜ベイブリッジでは、東北地方太平洋沖地震において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杓との間で供用中に初めて衝突が観測された。観測された応答は供用中の長大斜張橋が経験した最も大きい地震動によるものであり、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。脱落後を想定した耐震補強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。

しかし、ウインドタンクの損傷過程や損傷後にタワーリンクにどのような応力や変形が発生し脱落に至るかといった過程は明らかになっていない。ウインドタンク損傷については静的解析による検討のみであり、タワーリンク脱落については動的解析から得られた最大変位と図面を基にした、タワーリンク部材の干渉の有無のみにより脱落判定している。発生したタワーリンクのボルト破断もメカニズムが分かっておらず、さらに、ウインド杓とウインドタンクは一体となって挙動すると仮定されており衝突を考慮した検討もなされていない。ウインドタンク、タワーリンク系の損傷過程を明らかにすることは、長期間の交通機能低下を防ぐための対策を検討する上でも重要である。そこで、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うえ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。

まず、二次部材およびタワーリンクの剛性や、ウインド杓とウインドタンク間の遊間も考慮して、橋梁全体を3次元骨組みモデルで表し、東北地方太平洋沖地震の本震と余震の観測記録との比較によりモデルの妥当性を検証した。地震時に卓越する水平方向のモード振動数は観測値と整合的である。さらに、衝突発生時には固有振動数の増加が観測されたが、観測データに合わせ

たモデル修正をすることなく、この変化を再現した。時刻歴応答については通常のレイリー減衰を用いた場合に衝突加速度への寄与が大きい高次モードを過大評価していたため、要素別レイリー減衰により高次モードの応答を低減し、衝突を含む時刻歴応答を加速度・変位の最大値、衝突応答の間隔、対象モードのフーリエ振幅スペクトル、および加速度 RMS の観点から再現した。

続いて、構築した3次元骨組みモデルに対して、将来の大地震を想定し、レベル2地震動を入力し、ウインドタングが損傷する地震動について検討を行った。その結果、道路橋示方書で規定されているレベル2地震動において衝突力がウインドタングの耐力を大きく上回り、ウインドタングが損傷する可能性があることを明らかにした。

次に、全体応答に加えて局部損傷も再現するため、主塔、横梁、ウインドタング、ウインド脊をシェルおよびソリッド要素で詳細にモデル化し、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。東北地方太平洋沖地震の本震を用いた動的解析を行い、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を骨組みモデルと同程度の精度で再現した。さらに、動的解析から得られたタワーリンク部分の橋軸直角方向の最大変位を、ソリッド要素からなるタワーリンクの詳細モデルに静的に入力し、タワーリンクのボルト破断を再現した。

最後に、骨組みモデルの動的解析でウインドタングが損傷すると判定された地震動をマルチスケールモデルに入力し、ウインドタングやタワーリンクの損傷過程を推定した。ウインドタングは基部にせん断変形が発生し、延性破壊に至った。さらに、動的解析から得られたタワーリンクの最大変位をタワーリンク-主塔一体モデルに入力し、タワーリンク-主塔間の衝突により生じる主塔の損傷および、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を行った。その結果、タワーリンクが主塔に接近する方向に変位する場合、タワーリンクが主塔に衝突し、主塔のダイヤフラムおよび縦リブが一部塑性化する一方で、タワーリンクの上側のピンが約20cm 抜け、余裕量が1/3まで低下することが明らかになった。また、タワーリンクが主塔から離れる方向に変位する場合、タワーリンクの上側のピンが抜け、タワーリンクが脱落する可能性があることを示した。

本論文では、長大橋で観測された極めて稀で貴重な、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現実的な計算コストで再現する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うことにより、ウインドタングの損傷およびウインドタング損傷後の部材の損傷過程を明らかにしている。これに基づいて、タワーリンク脱落など供用性を低下させ復旧に時間を要する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。