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

東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	学生会員	○高本	剛太郎
東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	フェロー会員	藤野	陽三
東京大学大学院工学系研究科	社会基盤学専攻	正会員	Diony	sius Siringoringo
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

1.はじめに

横浜ベイブリッジは橋長 860m, 最大支間長 460m の 大型斜張橋であり,世界でも類を見ない充実した地震 応答計測システムを有している.本橋は、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、本震 余震を含む多くの地震応答の観測に成功しており、そ の応答記録は、世界で供用中の長支間斜張橋が経験し た最も大きい地震動によるものであった.この地震応 答記録を分析した既往の研究回により,主塔のウィンド 沓部における主桁主塔間の橋軸直角方向の衝突の発生 と橋軸直角方向の1次モードに関するパラメータ(固 有振動数,減衰比,モード形)の時間的変化が明らか となっている(図 6). 主塔主桁間の衝突は東北地方太 平洋沖地震において初めて観測された現象であったた め,建設時および耐震補強設計時にはこの衝突を考慮 した解析が行われていない. したがって、衝突が橋梁 全体の動的特性に及ぼす影響および衝突力が生じるウ ィンド沓の安全性について検討する必要がある.

本研究では、衝突を考慮した地震応答解析によって 観測された地震応答を再現し、衝突が橋梁の動的特性 に与える影響について解明するとともに、将来の大地 震時における衝突力を推定し、ウィンド沓の安全性に ついて評価することを目的とした.



図1 解析モデル

表1 橋軸直角方向の振動モードの振動数

	システム同定[Hz]	モデル[Hz]
対称1次モード	0.274	0.275
逆対称1次モード	0.766	0.551
対称2次モード	1.029	0.710

2. 構造モデルとその精度検証

衝突を考慮した動的解析には計算時間が多くかかる ため、衝突の生じる橋軸直角方向の応答のみをよく再 現する簡易モデルを用いることにした(図1).橋軸直角 方向の応答への寄与の小さいケーブルは無視し、主桁 を8つの梁要素、橋脚・主塔を一質点、リンクをばね 要素でモデル化した.各部材の質量と剛性は、建設時 の構造計算書および、システム同定の結果に基づいて 定めた.システム同定の手法には、System Realization using Information Matrix (SRIM)^[1]を用いた.

表1には、モデルの橋軸直角方向1次モードの固有 振動数と観測値からシステム同定によって求めた値を 示すが、1次モードに関して精度良いモデルである一方、 高次モードには誤差があるとわかる.しかし、図2の 本震時に観測した主桁および主塔の変位応答のパワー スペクトル密度のグラフに示すように、全応答におい て1次モードが最も支配的であり高次モードの誤差に ついて無視できるといえる.図3は衝突が見られなか った余震時の地震波(計8波)を用いた地震応答解析 の結果を示すが、モデルが観測された応答を概ね再現 できていることがわかる.







キーワード 横浜ベイブリッジ 東北地方太平洋沖地震 ウィンド沓 衝突 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 03-5841-6098

3. 主塔主桁間の衝突を考慮した地震応答解析

衝突が観測された本震時の地震波を用いて, 衝突を考 慮した地震応答解析を行った. ウィンド沓における衝 突を再現するために,隣接する要素が接触する時に作 動し,非接触時には作動しない衝突ばね要素22を主桁主 塔間に挿入し、衝突のモデル化をした(図 4). また、本 震時に観測されたモード減衰比の変化を考慮するため に、主桁と主塔を結ぶタワーリンク部分に生じる摩擦 力が衝突時の主塔と主桁の接触によって低下すると仮 定し、減衰のモデル化を行った(表 2). これらのモデル を用いて解析を行った結果,図5に示すように、本震 時の地震応答において、衝突の考慮によって応答の予 測精度が向上した.また、図6に示すように、本震時 に観測された橋軸直角方向の1次モードに関する固有 振動数及び減衰比の変化がモデル上でも再現されてお り、この非線形応答が主塔主桁間の衝突に起因するこ とを明らかにした.

4. ウィンド沓の安全性の評価

衝突ばねに働く力より、最大衝突力を推定し、ウィ ンド沓の安全性を評価した.衝突力の推定値は衝突ば ねの剛性の大きさに影響を受けるため、観測した地震 応答をよく再現する剛性の値を用いて、衝突力を計算 することにした.本震時にウィンド沓に作用する最大 衝突力は 19.9MN となり、建設時に想定した水平反力 (48.0MN)の半分以下であることが明らかとなった.ま た、将来の大地震におけるウィンド沓の安全性を評価 するために、耐震設計時に用いられたレベル 2 地震動 による動的解析を行った.その結果、内陸直下型地震 において、ウィンド沓に最大耐力(79.9MN)を超える衝 突力(110.0MN)が働き、損傷が生じる可能性があるとわ かった.

5. 結論

本研究では、横浜ベイブリッジを対象として、主塔 主桁間の衝突を考慮した動的解析を行い、東北地方太 平洋沖地震において観測した地震応答を再現し、本震 時における非線形応答が衝突に起因することを明らか にした.また、将来の大地震を想定した動的解析を行 い、内陸直下型のレベル2地震動において、主塔主桁 間の衝突によりウィンド沓が損傷しうることを明らか にした.



図4 主塔主桁間の衝突を再現する衝突ばね

表2 橋軸直角方向対称1次モードの減衰比

主塔主桁間の状態	非接触時	接触時
リンク部の摩擦力	大	小
減衰比	0.03	0.005



図5 本震時の地震波を用いた時刻歴応答解析 と観測値における橋軸直角方向の変位の RMS 値



図6 橋軸直角方向曲げ1次モードの固有振動数と 減衰比の変化(本震時・衝突を考慮)

謝辞:首都高㈱の並川様には地震観測データを, ㈱長大の矢部 様には建設時の構造解析モデルの資料を提供していただきまし た.ここに感謝申し上げます.

参考文献:[1] Fujino Y., Siringoringo D.M.: Lessons Learned from Seismic Monitoring of the Yokohama-Bay Bridge and Tall Base-Isolated Building during the 2011 Great East-Japan Earthquake, The 7th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structure Technology. ANCRiSST 2012,July27-28, 2012. [2]Maison, B.F., Kasai, K.: Analysis for type of structural pounding, Earthquake Engrg. And Struct. Dyn., 26, 797-813