東北地方太平洋沖地震の強震記録による地震時 水平力分散構造を有する高架橋の地震応答解析

片岡 正次郎1・長屋 和宏2・矢部 正明3・松岡 一成4・金子 正洋5

¹国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室主任研究官(〒305-0804 つくば市旭1) E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

²国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室主任研究官(〒305-0804 つくば市旭1) 3株式会社長大構造事業本部耐震技術部長(〒305-0812つくば市東平塚730)

4国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室研究官(〒305-0804 つくば市旭1) 5国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室長(〒305-0804 つくば市旭1)

東北地方太平洋沖地震の際に地震時水平力分散構造を有する高架橋の周辺地盤で観測された強震記録を 用いて、この高架橋の地震応答解析を行った.設計時と同じゴム支承の剛性を用いた場合、橋脚上および 橋桁上で得られた地震応答波形とは卓越周期が一致しなかった.ゴム支承の剛性を設計時の6倍とすると 橋軸方向の卓越周期が一致した.支承ーサイドブロック間の衝突と摩擦,さらに橋脚基部を固定にすると スペクトルの形状の一致度が向上した.

Key Words : earthquake response analysis, viaduct, horizontal force distributed structure, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

1. はじめに

積層ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造の道路橋は、耐震設計の際、一般に動的照査法による耐震性能照査が行われている.一方、実測された強震記録で地震応答解析を行った事例は少なく^{1),2)}、実地震時の応答再現性は必ずしも検証されていない.

2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震(モー メントマグニチュード9.0)の際,国道45号山田高 架橋及び周辺地盤上で水平力分散構造を有する橋梁 の橋脚上,橋桁および周辺地盤上で強震記録が得ら れた.同橋では2008年7月24日に発生した岩手県沿 岸北部を震源とする地震(気象庁マグニチュード 6.8)でも地震応答が観測されており,検討の結果, 地震応答解析による実測挙動の再現には,支承の上 フランジとサイドブロックの接触を考慮したモデル 化など課題があることがわかっている².

本論文では、本橋の解析モデルを作成し、実測された強震記録を入力地震動とした地震応答解析を行った結果を報告する.まず現行道路橋示方書³⁾に即してモデル化、地震応答解析を実施し、その結果を踏まえて、支承の剛性、支承とサイドブロックの接触、橋脚基部のモデル化の順に、実測挙動に整合する解析結果を与えるモデルを検討した.

2. 観測記録

国道45号山田高架橋及び周辺地盤上で,東北地方 太平洋沖地震の加速度記録が得られた.橋梁の側面 図を図-1に示す.本橋は橋長470.7m,鋼4径間連続 非剛性桁を2つ組み合わせて構成されており,積層 ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造が採用され ている.図-2に示すように,P3橋脚上と同位置の桁 上及び橋脚の周辺地盤上の3箇所に加速度センサー を設置して地震時挙動を観測している.

この地震で得られた周辺地盤の地動加速度波形及 び加速度応答スペクトルを図-3に示す. 宮城県沖で 発生した2度の大きな破壊⁴⁾に対応する2つの主要な 揺れが見られる. また, I種地盤³⁾に分類される堅 い地盤上に設置されていることもあり, 比較的短周 期が卓越した強震記録となっている.

橋脚上および橋桁上で観測された加速度応答波形 を図-4に、また3箇所の観測記録のフーリエ振幅ス ペクトルを図-5に示す.水平方向の加速度応答振幅 は橋脚上よりも橋桁上の方が小さく、特に橋軸方向 では半分以下になっている一方で、鉛直方向は橋桁 上で橋脚上の3倍になっている.また図-5のスペク トルからは、箇所ごとに卓越周期が大きく異なるこ とがわかる.



3. 地震応答解析モデル

(1) 現行道路橋示方書に即したモデル(モデル1)

地震応答解析に用いるモデルとして,橋梁の設計 図書に基づいて図-6に示す骨組みモデルを作成した.

上部構造の軸方向剛性が橋脚や杭に比較してはる かに大きいため上部構造を1つの質点で表し,積層 ゴム支承は線形せん断ばね,鉄筋コンクリート橋脚 躯体は線形はり要素でモデル化している.横ばりと フーチングは剛体とし,フーチングは橋軸方向への 並進と橋軸直角回りの回転を有する2自由度系でモ デル化している.

質点は、橋脚が地震時に支持すべき上部構造質量 を横ばりの重心位置に、脚柱部の質量を脚柱重心位 置に、フーチングの質量と橋軸直軸角周りの回転慣 性質量をフーチングの重心位置に配している.

基礎~地盤系のばね定数は、A1~A2の基礎ごと

に設計時の値をそれぞれ用いた.積層ゴム支承は, 地震時に橋軸直角方向の変形が生じないようサイド ブロックにより固定されているため,橋軸直角方向 のばね定数は変形が生じない大きな値を入れた.

これをモデル1として固有値解析を行った結果, 全体系橋軸方向および橋軸直角方向の1次モードは 図-7のようになり,固有周期はそれぞれ1.9[s], 0.8[s]となった.

(2) 支承の剛性を変更したモデル(モデル2)

図-5には観測波形のフーリエスペクトルとあわせ てモデル1の主要な固有周期も示しているが,固有 周期とフーリエスペクトルのピークは一致していな い.このため,橋桁上橋軸方向の観測記録の卓越周 期と一致する積層ゴム支承の水平方向剛性を検討²⁾ し,設計値の6倍にしたモデルを作成した.これを モデル2とする.



(3) 支承とサイドブロック間の衝突と摩擦を考慮したモデル(モデル3)

地震後の現地調査の結果,2008年岩手県沿岸北部 地震の際と同様,今回の地震でもサイドブロック上 フランジにサイドブロックとの接触痕が新たに見つ かった(**写真-1**).

この影響を考慮するために、橋軸直角方向の衝突

と橋軸方向の摩擦力をモデル化した.衝突力は,橋 桁上の橋軸直角方向加速度波形の実効値RMS=0.08g の2倍の加速度である0.16gに橋軸直角方向の分担荷 重を乗じた値とした.また摩擦力は上記の衝突力に 摩擦係数0.1を乗じた値とした.支承の剛性はモデ ル2と同様,設計値の6倍とした.これをモデル3と する.





写真-1 支承の上フランジとサイドブロックの接触痕(赤囲み部分)



図-8 モデル3の支承構造周辺のモデル化

(4) 橋脚基部を固定としたモデル(モデル4)

(1) で述べたとおり,フーチングは現行道路橋示 方書に即して,橋軸方向への並進と橋軸直角回りの 回転を有する2自由度系でモデル化している.一方, 現地は良好な堅い地盤であること,入力地震動がそ れほど大きくはないことを考慮して,橋脚基部を固 定としたモデルを作成した.これをモデル4とする.

4. 地震応答解析結果

(1) モデル1の結果

モデル1を用いた地震応答解析結果を図-9に示す. 橋軸直角方向は振幅がある程度一致しているものの, 橋軸方向は橋桁上では過小評価,橋脚上では過大評 価となっている.橋桁上の橋軸方向の解析結果には



積層ゴム支承の影響とみられる周期2秒弱の揺れが みられるが、観測波形にそのような成分は見られない.

(2) モデル2の結果

モデル2を用いた地震応答解析結果を図-10に示す. ゴム支承の剛性を調整したことで橋軸方向でも振幅 がやや一致するようになり,橋桁上の橋軸方向の振 動周期も1秒強となり観測波形と一致するようにな った.このモデルの全体系橋軸方向1次モードの固 有周期は1.1[s]である.

図-11は橋桁上の観測波形と解析結果のフーリエ スペクトルを比較したものである.橋軸方向では周 期1[s]付近のピークが過大評価になっていることに 加え,周期0.1[s]付近にも観測波形にはないピーク が見られる.また,橋軸直角方向では周期0.2[s]付近のピークが再現できていないことがわかる.

(3) モデル3の結果

モデル3を用いた地震応答解析結果を図-12に示す. 摩擦力の影響で,解析結果では橋桁上の橋軸方向の 応答振幅が小さくなっているものの,周期1[s]程度 の揺れは再現できている.

図-13のフーリエスペクトルを見ると,モデル2で は再現できなかった橋軸直角方向の周期0.2[s]付近 のピークが解析結果に表れており,このピークが支 承とサイドブロックの衝突によるものである可能性 が指摘できる.一方,橋軸方向の周期0.1[s]付近の ピークはモデル2と同様に再現できていない.

(4) モデル4の結果

モデル4を用いた地震応答解析結果を図-14に示す. 特に橋脚上の橋軸方向の観測波形と解析結果がよく 一致するようになっている.図-15のフーリエスペ クトルを見ると,モデル2,3では存在した観測波形 に見られない橋軸方向の周期0.1[s]付近のピークが なくなっている.一方,橋軸直角方向の周期0.2[s] 付近のピークが過小評価になっており,減衰の設定 に改良の余地があることを示唆する結果となってい る.

5. まとめ

本論文では、東北地方太平洋沖地震で周辺地盤上 と橋脚上、橋桁上での観測波形が得られた国道45号 山田高架橋を対象に骨組みモデルを作成し、周辺地 盤上で観測された加速度波形を入力地震動とする地 震応答解析を行い、解析結果と観測記録を比較した. 得られた結果を以下にまとめる.

①山田高架橋は,積層ゴム支承を採用した地震時水 平力分散構造であり,橋軸方向の基本固有周期が約 1.9[s]と長い.しかし,山田高架橋の橋桁上で観測 された橋軸方向の加速度記録には,基本固有周期に 近い長周期成分が明確に現れていない.これは,こ の地震で山田高架橋の周辺地盤上で生じた地震動で は,積層ゴム支承に大きな変形を生じさせるだけの パワーがなかったため,積層ゴム支承の剛性が設計 時に想定したものより大きいためと推測される. ②積層ゴム支承の水平方向剛性を設計値の6倍とすると、上記の問題が解消された.

③地震後の現地調査で確認された積層ゴム支承の上 フランジとサイドブロックの接触(衝突力および摩 擦力)を考慮することにより,橋軸直角方向の周期 0.2[s]付近のピークを再現することができた.

④今回の対象橋梁の周辺地盤の状況や入力地震動の 大きさでは、橋脚基部を固定とすることで観測波形 と解析結果の一致度が向上する可能性があることが わかった.

謝辞:本論文の作成に当たっては,国土交通省東北 地方整備局三陸国道事務所本間係長より設計資料を 提供いただくとともに,同事務所工藤係長には現地 調査の立会いをしていただいた.記して御礼申し上 げる.

参考文献

- 1) 地震記録を用いた免震支承を有する橋梁の応答解析モデルに関する検討,寒地土木研究所月報,No636,2006.
- 2) 松橋学,片岡正次郎,高宮進:強震記録に基づく地震 時水平力分散構造を有する橋梁の地震応答解析,第13 回日本地震工学シンポジウム論文集,pp. 3268-3275, 2010.
- 3) (社) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設 計編, 2002.
- 4) 気象庁:「平成23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」 について(第28 報), 2011.

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF A VIADUCT WITH HORIZONTAL FORCE DISTRIBUTED STRUCTURE USING STRONG MOTION OBSERVED DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

KATAOKA Shojiro, NAGAYA Kazuhiro, YABE Masaaki MATSUOKA Kazunari and KANEKO Masahiro

Dynamic analysis is widely used for the seismic design of the bridge with horizontal force distributed structure in recent years. There is few research on dynamic analysis of such bridges using real earthquake data. In this research, we carried out dynamic analysis using accelerograms recorded during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0). The analytical earthquake response shows a good agreement with the observed response when colliding and friction forces acted between sideblocks and shoes are taken into account.





