

平成12年鳥取県西部地震の地震動特性と 橋梁構造物への影響

熊木幸¹・丸山博史²・中口寛³・矢部正明⁴

¹正会員 修(工) 株式会社社長 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6)

²工修 八東町企画国際課 (〒680-0601 鳥取県八頭郡八東町大字北山63-1)

³鳥取県土木部道路課 (〒680-8570 鳥取県鳥取市東町1-220)

⁴正会員 博(工) 株式会社社長 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6)

平成12年鳥取県西部地震は、地震の規模を表す気象庁マグニチュードや観測された最大加速度が、橋梁構造物に甚大な被害を生じた平成7年兵庫県南部地震よりも大きいにもかかわらず、橋梁構造物に与えた被害は軽微なものであった。本研究は、平成12年鳥取県西部地震と橋梁構造物に被害を生じた既往の地震において観測された地震動を比較し、平成12年鳥取県西部地震の地震動特性が橋梁構造物に与える影響を明らかにした。震源域周辺には、平成7年兵庫県南部地震以降に耐震補強されたRC橋脚が多数存在しており、その耐震補強の効果を、平成12年鳥取県西部地震で観測された地震動を用いた非線形動的解析によって確認した。

Key Words : The Western Tottori prefecture earthquake in 2000, Bridge damage, Seismic retrofit, Strong ground motion

1. 橋梁の被害状況

平成12年鳥取県西部地震(鳥取県西部地震とする)は、地震の規模が気象庁マグニチュード $M_J=7.3$ 、気象庁計測震度が最大震度階6強と大きく、KiK-net¹⁾の日野記録NS成分で最大加速度0.95gが観測され、これらの値は、平成7年兵庫県南部地震(兵庫県南部地震とする)に匹敵するものである。しかし、鳥取県西部地震によって生じた橋梁の被害は、兵庫県南部地震で生じたそれと異なり、軽微な損傷に留まっている。

図-1は、鳥取県西部地震の震央と推定された断層²⁾および、鳥取県が管理する橋梁のうち、何らかの損傷が生じた橋梁の位置を示したものである。図には、後述する非線形動的解析を行った橋梁も示してある。損傷が生じた橋梁は、震央から半径20km圏内に分布している。表-1は、損傷が確認された橋梁の一覧である。最も多い損傷形態は、支承や支承取り付け部の破損、橋座の破損であり、橋脚のクラックや伸縮装置のずれも確認されているが、何れも軽微な損傷である。

2. 地震動特性が橋梁に与える影響

(1) 検討対象とする強震記録

鳥取県西部地震の強震記録は、防災科学技術研究所のK-NET³⁾とKiK-net¹⁾で観測された強震記録のうち、耐震設計上の地盤種別がI種地盤で最も大きい最大加速度0.74gが観測された江府記録NS成分

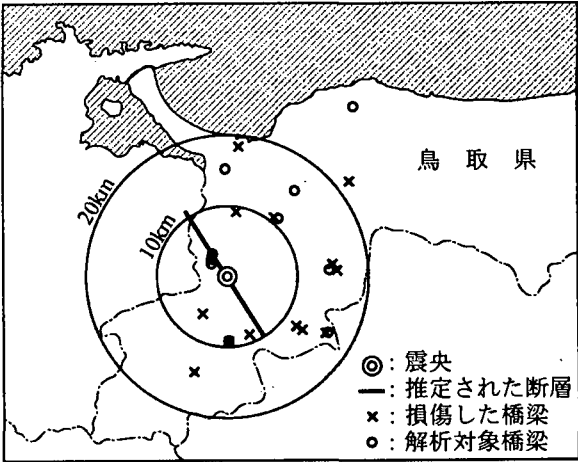


図-1 鳥取県西部地震の震央と損傷した橋梁

表-1 鳥取県西部地震で損傷した橋梁

No.	橋名	橋梁形式	損傷状況
1	白山橋	鋼単純I桁	橋座破損
2	本山橋	鋼ニールセンローゼ	伸縮装置のずれ
3	中菅橋	鋼単純I桁	支承破損
4	乗越橋	鋼単純I桁	支承破損
5	石塔橋	鋼単純I桁	橋台にクラック
6	金持上橋	鋼単純I桁	桁とバラベットの段差
7	金持下橋	鋼単純I桁	遊間不均等
8	霞橋	鋼単純I桁	橋台にクラック
9	ホレコ橋	PC単純T桁	橋台前面張出コンクリート破損
10	新浅井橋	PC単純T桁	橋座クラック
11	川床橋	鋼単純合成桁	橋座クラック
12	大江橋	PC単純T桁	橋脚クラック
13	大満橋	鋼単純I桁	支承部ストッパー破損
14	南大山大橋	鋼アーチ	支承ボルト破損

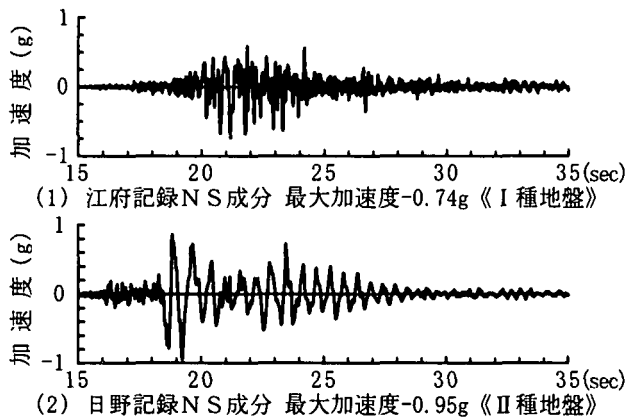


図-2 鳥取県西部地震で観測された強震記録

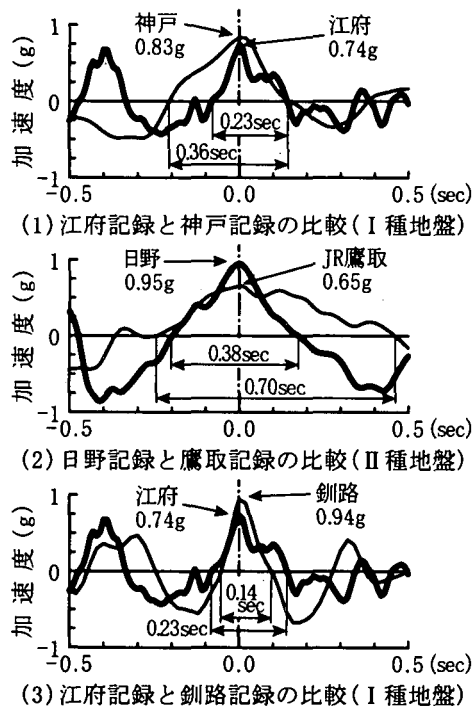


図-3 パルス波の大きさの比較

(江府記録とする)と、II種地盤で最も大きい最大加速度0.95gが観測された日野記録NS成分(日野記録とする)、やはりII種地盤で大きな最大加速度0.39gが観測された米子記録EW成分(米子記録とする)を対象とする。図-2は、江府記録と日野記録の加速度波形である。日野記録には、加速度波形としては周期の長いパルス状の振幅がみられる。

鳥取県西部地震の地震動が橋梁に与える影響を検討するために、構造物に甚大な被害が生じた兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分⁴⁾(神戸記録とする)とJR鷹取駅記録NS成分⁵⁾(鷹取記録とする)および、0.94gという大きな最大加速度が観測されたにもかかわらず橋梁の被害が軽微だった平成5年釧路沖地震(釧路沖地震とする)の釧路海洋気象台記録EW成分⁴⁾(釧路記録とする)も検討対象とする。

(2) パルスの大きさ

断層直近で観測される地震動には、最大加速度が大きく周期が長いパルス波が含まれている。兵庫県南部地震では、このパルス波によって構造物に甚大

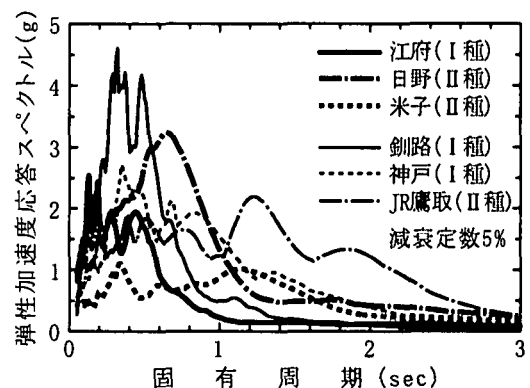


図-4 弾性加速度応答スペクトルの比較

な被害が生じたことが明らかにされている⁶⁾。

図-3(1)は、鳥取県西部地震と兵庫県南部地震において、I種地盤上で観測された江府記録と神戸記録のパルス波である。江府記録の最大加速度は0.74gで神戸記録の0.83gに匹敵するが、江府記録の継続時間は0.23秒で神戸記録の0.36秒の2/3と短く、パルス波としての大きさは江府記録の方が小さい。同図(2)は、鳥取県西部地震と兵庫県南部地震において、II種地盤上で観測された日野記録と鷹取記録のパルス波である。日野記録の方が最大加速度は1.5倍大きい継続時間は1/2と短く、日野記録のパルス波の方が小さい。同図(3)は、江府記録と、橋梁構造物の被害が軽微であった釧路沖地震の釧路記録のパルス波である。最大加速度は釧路記録の方が大きい、継続時間は江府記録の方が大きい、パルス波としての大きさはほぼ等しい。これより、鳥取県西部地震で観測されたパルス波の大きさは、兵庫県南部地震で観測されたものより小さく、鳥取県西部地震は橋梁に与える影響が相対的に小さい地震動であったといえる。

(3) 弾性加速度応答スペクトル

地震動による構造物の応答レベルを検討するために、減衰定数5%の弾性加速度応答スペクトルを作成した。

図-4は、対象とする強震記録6波形の加速度応答スペクトルを示したものである。鳥取県西部地震の米子記録の加速度応答スペクトルは、全ての周期帯において兵庫県南部地震よりも小さい。江府記録の加速度応答スペクトルは、周期0.5秒よりも長周期になると兵庫県南部地震よりも小さい。日野記録の加速度応答スペクトルは、周期0.7秒より長周期となると急激に低下し、周期1.0秒より長周期になるとその応答レベルは兵庫県南部地震よりも小さくなる。

ここで対象とするような大きな地震動が作用すると、橋梁には何らかの損傷が生じるため橋梁の剛性はやわらかくなり、その固有周期も長くなる。固有周期が長くなった領域でも、大きな地震動が作用すると、橋梁の損傷が進行することになる。次章で示す図-6(1)より、損傷前の橋梁の固有周期を0.5～1.0秒とし、塑性化にともなう固有周期の長周期化を2倍程度と見込むと、周期1.0秒～2.0秒付近の加速度

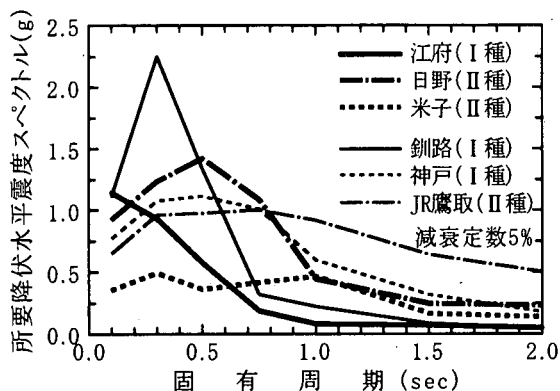


図-5 所要降伏水平震度スペクトル($\mu=2$)の比較

応答スペクトルの値が構造物に与える影響を評価するうえで重要となる。鳥取県西部地震の加速度応答スペクトルは、周期1.0秒～2.0秒付近では兵庫県南部地震よりも小さく、降伏以降の橋梁の応答に与える影響が小さい地震動であったといえる。

(4) 所要降伏水平震度スペクトル

所要降伏水平震度スペクトルは、対象としている地震動が橋梁に作用したときの最大応答変位を、耐震設計上許容できる塑性変形以下に留めるために橋梁が保有していなければならない降伏水平耐力を、水平震度の形で示したものである。

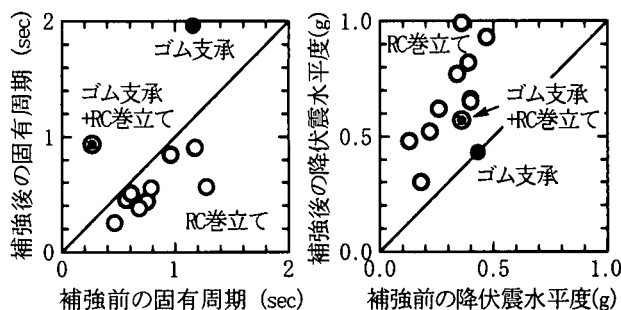
ここではRC橋脚を想定して、非線形特性をTakedaモデルで表した1自由度非線形振動系を対象に、所要降伏水平震度スペクトルを作成した。図-5は、応答塑性率2に対する所要降伏水平震度スペクトルを示したものである。鳥取県西部地震の江府記録と米子記録の所要降伏水平震度は、周期0.1秒を除く全ての周期帯で兵庫県南部地震よりも小さい。日野記録も周期が0.8秒以上の領域では、兵庫県南部地震よりも小さい。したがって、鳥取県西部地震は兵庫県南部地震よりも橋梁の非線形応答に与える影響が小さい地震動であったといえる。

3. 橋梁の耐震補強効果の確認

(1) 検討対象橋梁と解析モデル

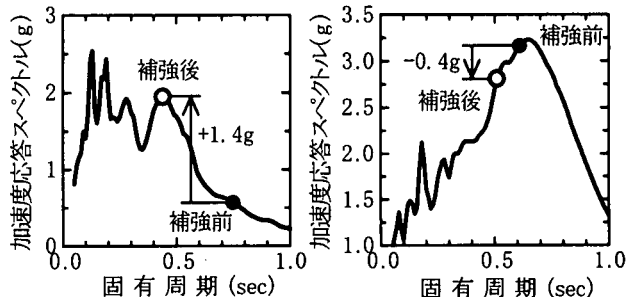
震源域周辺に建設されている橋梁を対象に、鳥取県西部地震で観測された地震動を用いて、非線形動的解析を行った。ここでは、耐震補強前後のRC橋脚を対象とし、兵庫県南部地震以降実施されている耐震補強の効果を確認した。

検討対象橋梁は、RC橋脚によって支持されている10橋梁(12橋脚)である。図-6(1)は、対象とするRC橋脚の耐震補強前後の固有周期を示したものである。RC巻立て工法を用いて曲げ耐力と剛性を大きくしたRC橋脚10基は、補強後に固有周期が短くなっている。既設の支承をゴム支承に取替えて橋梁全体系として長周期化を図ったRC橋脚1基と、ゴム支承取替えとRC巻立て工法を併用したRC橋脚1基は、補強後の固有周期が長くなっている。図-6(2)は、RC橋脚の耐震補強前後の降伏水平震度を比較したものである。RC巻立てを行ったRC橋脚11基は、補



(1) 固有周期の比較 (2) 降伏水平震度の比較

図-6 補強前後の固有周期と降伏水平震度の変化



(1) 江府記録NS成分, 賀正橋(I種地盤) (2) 日野記録NS成分, 丸山橋(II種地盤)

図-7 弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%)

強後の降伏水平震度が補強前の約2倍となっている。

ここでは、震源から3km付近に位置するI種地盤上の賀祥橋、支承に損傷を受けた震源から10km付近に位置するI種地盤上の乗越橋、震源から15km付近に位置するII種地盤上の丸山橋を検討対象とする。いずれも、RC巻立て工法によって耐震補強された橋脚である。

解析モデルは、橋梁の設計振動単位を1基の下部構造とそれが支持する上部構造部分の重量とみなした、1自由度非線形振動系とした。履歴モデルは、RC橋脚の非線形特性を最も良く表しているTakedaモデルを用いた。減衰力は、構造減衰定数を2%とし、剛性比例型の減衰マトリクスでモデル化した。

入力地震動は、I種地盤上に建設されている橋梁には江府記録を、II種地盤上に建設されている橋梁には日野記録を作用させた。

図-7は、補強前後の賀祥橋と丸山橋の固有周期に対応する江府記録と日野記録の加速度応答スペクトルの変化を示したものである。補強によって賀祥橋では、固有周期が0.75秒から0.44秒に変化したため、加速度応答スペクトルが1.4gも大きくなり、丸山橋では、固有周期が0.61秒から0.51秒に変化したため、加速度応答スペクトルは0.4g小さくなっている。耐震補強により固有周期が変化し、それにともない橋脚に作用する地震力も大きく変化することがわかる。

(2) 橋梁の非線形応答と耐震補強効果

図-8は、RC橋脚の水平力-水平変位関係の応答履歴を示したものである。降伏水平耐力が大きくなったにもかかわらず、賀祥橋と乗越橋の補強後のRC橋脚に生じる応答塑性率は補強前と同程度かそれよりも大きくなっている。一般には、降伏水平耐力が

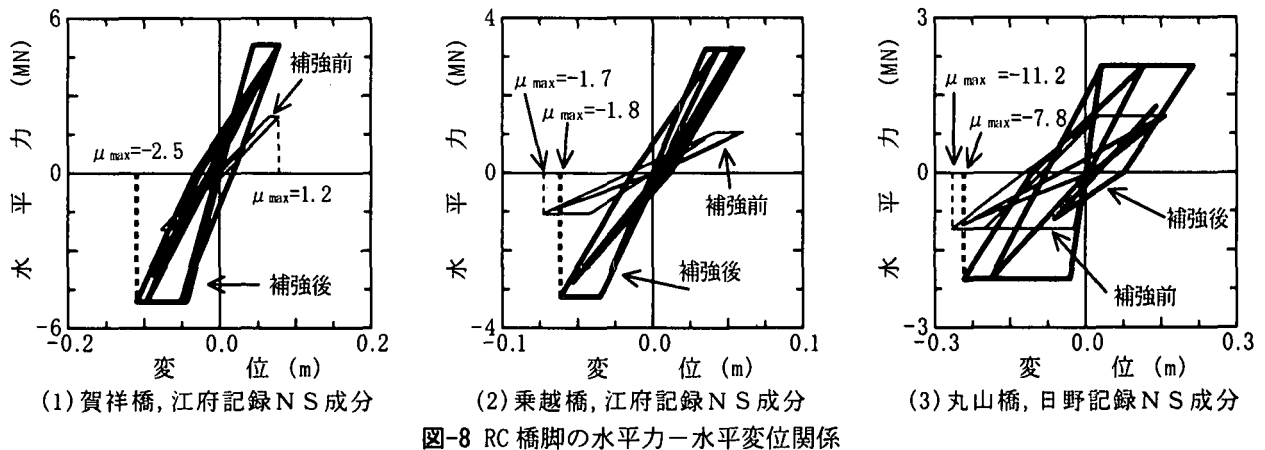


図-8 RC 橋脚の水平力-水平変位関係

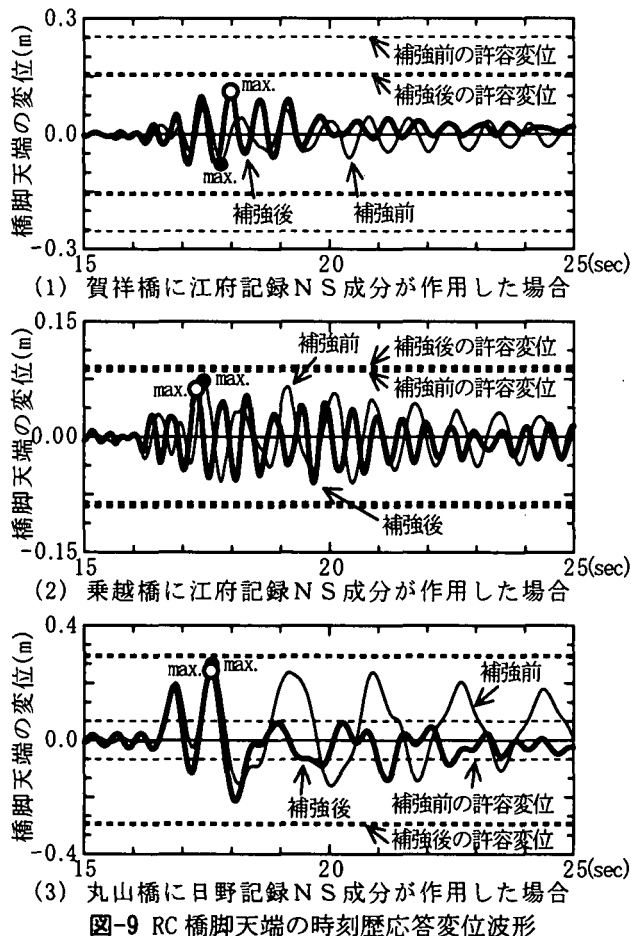


図-9 RC 橋脚天端の時刻歴応答変位波形

大きくなれば、橋脚に生じる応答塑性率は小さくなるはずである。これは、図-7に示したように、RC巻立て工法によって剛性が大きくなり、その結果、RC橋脚の固有周期が補強前よりも短くなったために、補強後の方が補強前よりも大きな地震力の作用を受けているからである。丸山橋に生じる応答塑性率が補強前の方が大きいのは、図-7に示したように補強による地震力の変化が小さいからである。このように、RC巻立て工法は、鋼板を用いた曲げ耐力制御式工法と異なり対象とする橋脚の固有周期を短周期化する傾向にあり、その結果、補強前よりも大きな地震力の作用を受けることになるので、耐震補強効果という観点からは、あまり効率的ではない。しかし、実際には、曲げ耐力制御式工法では十分な曲げ耐力やせん断耐力が得られないRC橋脚も多数

存在するので、RC巻立て工法により曲げ耐力と塑性変形性能およびせん断耐力の向上を図ることが必要となる。

図-9は、RC橋脚に生じた応答変位を、最大応答値発生付近に限定して示したものである。賀祥橋と乗越橋は、補強前においても最大応答変位が許容変位以内に収まっている。我が国の道路橋の耐震補強は、兵庫県南部地震以後に行われており、その際目標とした耐震性能は、兵庫県南部地震クラスの地震動に対して余裕を持って耐えられる構造である。このような耐震性能を目標にして耐震補強されたRC橋脚の中には、賀祥橋と乗越橋のように補強前の性能でも、鳥取県西部地震に耐えられるものもある。図より、丸山橋は、耐震補強されたことにより、鳥取県西部地震に耐えることができた橋梁であることがわかる。また、3橋とも、耐震補強後の方が、補強前に比較して最大応答発生後の応答変位が小さくなっており、確実に耐震性能が増していることがわかる。

4. おわりに

鳥取県西部地震で観測された地震動が、橋梁に与える影響が小さいことを示した。また、鳥取県が実施した耐震補強の補強効果を、鳥取県西部地震で観測された地震動を用いた非線形動的解析によって確認した。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 (KiK-net), <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 2) 国土地理院: <http://www.gsi-mc.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2000/1007-2.htm>
- 3) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET), <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 4) 財団法人日本気象協会：気象庁87型電磁式強震計波形データ
- 5) Nakamura, Yutaka: "Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-ken-Nanbu Earthquake", JR Earthquake Information No.23c, Railway Technical Research Institute, Feb.1995
- 6) 堺淳一, 川島一彦：パルス応答スペクトルに基づく断層直近地震動の特性, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.41-50, 1999.3