

(149) 神戸気象台観測波(1995)に対する免震橋梁の  
非線形応答に関する研究

○(株)竹中土木 平井 卓  
(株)竹中土木 鈴木一彦  
(株)竹中工務店 杉本三千雄

1. 概要 阪神、淡路大震災を起こした1995年1月17日の兵庫県南部地震や、これに比べると被害規模の小さかった1993年1月15日の釧路沖地震において観測された地震波の中には、このような地震動が構造物に入力した場合に道路橋示方書・同解説V耐震設計編における保有水平耐力法レベル程度の応答が推定されるものがある。免震橋梁は、免震支承によって橋梁の減衰性能向上と長周期化を図り橋脚等の耐震性能を向上させる橋梁であり、このような大きな地震入力においてもその効果を充分発揮すると考えられる。しかし、このレベルの入力に対しては、免震橋梁の橋脚、免震支承の両者が塑性化し、非線形多自由度の応答となり応答を正確に予測することが困難となる。そこで、ここでは神戸湾岸を想定した地盤に試設計した免震橋梁及び非免震橋梁の単純化モデルを用い、橋脚、免震支承の履歴特性を考慮した非線形時刻歴応答解析を実施し、入力地震動として道路橋の免震設計法マニュアル(案)における地震時保有水平耐力法の標準入力用地震動、神戸海洋気象台観測波、釧路気象台観測波を入力し発生機構の異なる入力地震動に対する応答特性の比較と免震効果の確認を行った。

2. 対象橋梁と解析モデル 対象橋梁は、図-1(a)に示したような、神戸湾岸地域を想定したⅡ種地盤上に試設計された、多径間連続の免震橋梁と単純桁式の非免震高架橋とした。RC橋脚断面は、非免震、免震ともに図-1(b)に示したとおりであり、免震橋梁の支承は、図中の表に示したようなLRB支承とした。図-2はこの橋脚部分(上部工含む)の質点系モデルである。免震支承においては、支承のばね特性が図-3(b)に示したような骨格線のバイリニア型とし、非免震では、 $K=\infty$ (剛結)とした。橋脚の梁要素におけるM- $\phi$ 関係は、免震、非免震ともに図-3(a)

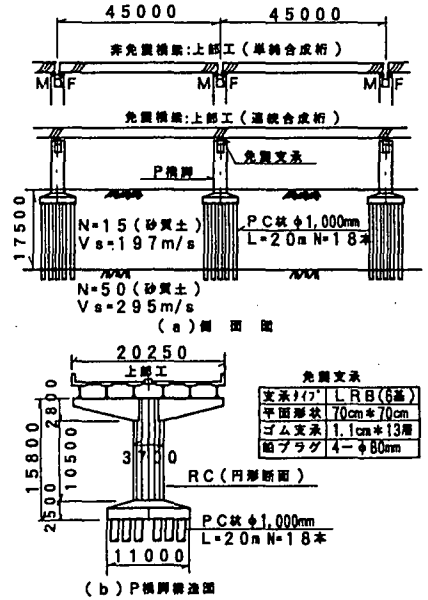


図-1 対象橋梁

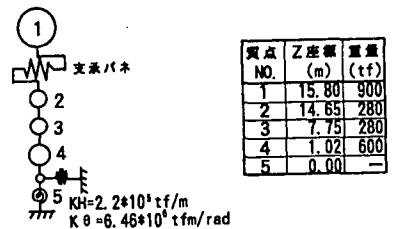
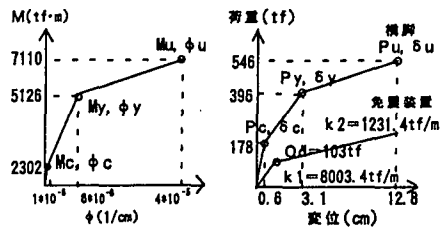


図-2 解析モデル



(a) 橋脚のM- $\phi$ 関係 (b) 荷重変位関係

図-3 非線形履歴骨格線

のような骨格線を有するトリリニア型とした。

3. 入力地震動 解析モデルへの入力地震動としては、図-4に示した3種類を考えた。(a)は、免震設計マニュアル(案)における保有水平耐力法レベル標準入力波であり、Ⅱ種地盤用の波形である。(b)は、直下型地震である兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測の地震動のNS成分である。(c)は、プレート内地震とされる釧路地震における釧路気象台観測の地震動のEW成分である。(b)、(c)の地震動は、共に地表での最大加速度が1g程度と非常に大きいが発生機構の異なる地震である。これらの地震動は、図-1(a)のⅡ種地盤相当に対しては、長周期成分が過小になる可能性があるが応答性状の傾向の比較には充分であると考えた。

#### 4. 解析結果及び考察

①時刻歴応答及び最大応答 2.で設定したモデルに対し3.で示した入力地震動を入力し、非線形時刻歴応答解析を実施した結果は、上部工の加速度応答波形については図-5に、各最大応答値については、表-1に示したとおりである。これらの図、表より以下の事が解る。

(a)全ての入力に対して、入力加速度波形よりも応答加速度波形の方が長周期化している。

(b)最大応答加速度が生じる時刻は、マニュアル(案)、神戸海洋気象台については、入力加速度最大値の発生時刻付近であり、釧路気象台の場合は、2~5sec遅れる。これは、マニュアル(案)、神戸海洋気象台の場合は、入力加速度最大値付近の卓越周周期成分が橋梁の固有周期と近いためと推定される。

(c)上部工の最大加速度は、免震の場合に非免震より低減する傾向にあり、釧路気象台、神戸海洋気象台の場合が特に大きく40%程度の低減率である。

(d)上部工の最大絶対変位は、マニュアル(案)の場合は、非免震に比べ免震の方が約1.7倍大きくなるが、他の入力地震に対しては、ほぼ同一である。

(e)橋脚基部に発生する最大曲げモーメントは、免震の場合に非免震より低減する傾向にあり、釧路気象台、神戸気象台の場合が特に大きく25%程度の低減率である。

(f)橋脚の最大塑性率は、免震の場合に非免震より

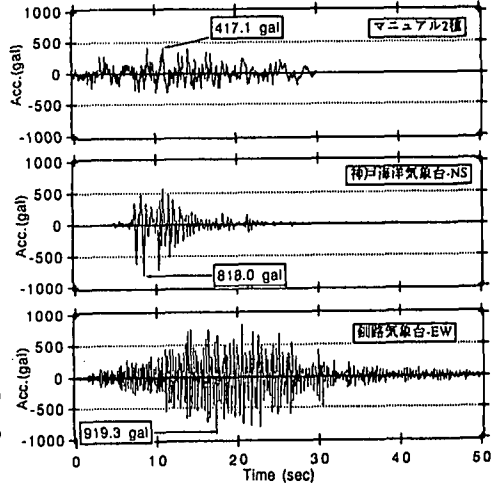


図-4 入力地震動

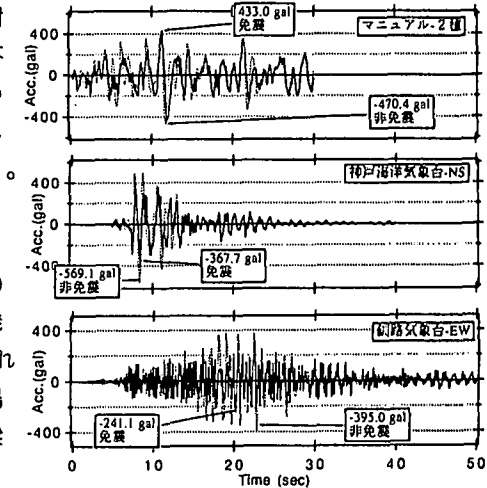


図-5 上部工加速度時刻歴

表-1 最大応答値

|     |          | 上部工    | 上部工   | 橋脚基部   | 橋脚基部   | 橋脚最大 | 橋脚最大 | 橋脚位置 | 橋脚位置 | 橋脚位置  |
|-----|----------|--------|-------|--------|--------|------|------|------|------|-------|
|     |          | 最大加速度  | 最大変位  | 最大変位   | 最大変位   | 塑性率  | 塑性率  |      |      |       |
|     |          | (gal)  | (cm)  | (t)    | (t·m)  |      |      | (cm) |      | (sec) |
| 免震  | マニュアル(案) | 433.03 | 32.78 | 390.73 | 5675.6 | 1.5  | 5.9  | 1.7  |      |       |
|     | 神戸-NS    | 367.75 | 21.43 | 333.33 | 5283.7 | 1.3  | 0.9  | 1.5  |      |       |
|     | 釧路-EW    | 241.09 | 9.63  | 224.91 | 4091.5 | -    | 0.5  | 1.3  |      |       |
| 非免震 | マニュアル(案) | 470.37 | 18.69 | 516.50 | 6595.7 | 2.7  | 1.7  | 1.3  |      |       |
|     | 神戸-NS    | 569.06 | 22.00 | 491.82 | 6881.8 | 2.3  | 0.8  | 1.3  |      |       |
|     | 釧路-EW    | 394.95 | 9.87  | 349.45 | 5422.4 | 1.0  | 1.4  | 1.0  |      |       |

低減する傾向にあり、特に釧路気象台の場合は、免震の場合塑性化しない。

(g)上部工の絶対残留変位は、マニュアル(案)に対する免震橋梁の場合に大きく約6cmである。免震の場合非免震に比較して、橋脚の最大塑性率が低減するにもかかわらずある程度の残留変位が生じている。これは、免震橋梁において橋脚の最大変位時に免震装置が大きなエネルギー吸収をするために、その後の応答が非免震の場合よりも小さくなるために最大変位が復元されずに残留するためと考えられる。

②応答スペクトルと最大応答 図-6、図-7は、各入力地震動に対する加速度応答スペクトル、変位応答スペクトルである。これらの図には、表-1の免震装置の最大荷重  $S_{max}$  と上部工最大変位  $D_{max}$  から計算した等価剛性  $K_{eq} = S_{max} / D_{max}$  と上部工重量  $W$  より求められる等価固有周期  $T_{eq} = \sqrt{W / g K_{eq}}$  に対して、非線形応答解析によって求められた免震、非免震に対する最大応答値を示してある。これらの図より以下の事がわかる。

- (a)免震、非免震橋梁に対して、橋梁の等価減衰は、マニュアル(案)、神戸海洋気象台では15~20%以上と大きいのに対し、釧路気象台の場合は、10%程度と比較的小さい。
- (b)免震橋梁では、非免震に比べて橋梁の等価減衰は、神戸海洋気象台、釧路気象台では増加しているのに対し、マニュアル(案)では低下している。
- (c)免震、非免震の等価固有周期1~2secの範囲において、加速度応答スペクトルは、固有周期の増加に対して全ての地震波に対して減少傾向にあり、変位応答スペクトルにおいては、マニュアル(案)の場合に増加傾向にあり、神戸海洋気象台、釧路気象台においては、多少の凹凸は有るがほぼ一定である。等価固有周期  $T_{eq}$  は、非免震に比べ免震橋梁では長周期化しているが、これに対する応答スペクトルの傾向は表-1における上部工の最大加速度、最大変位の免震、非免震の差に反映されている。

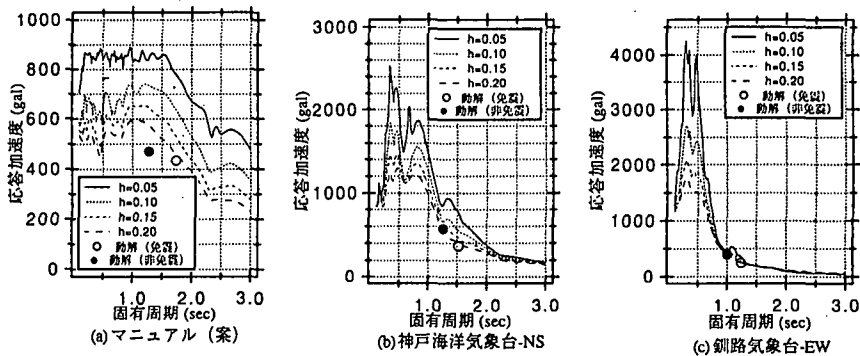


図-6 加速度応答スペクトル

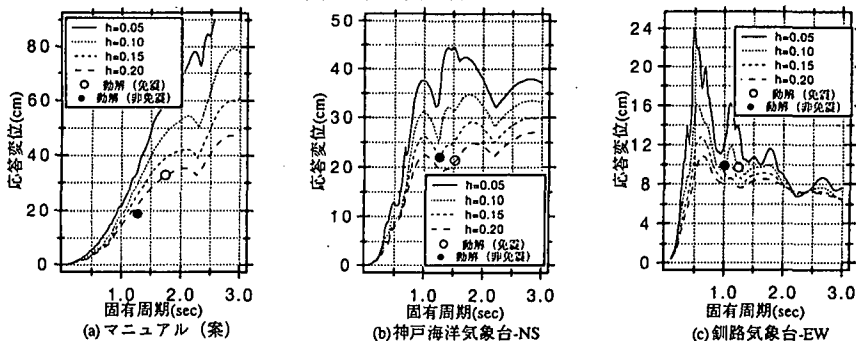


図-7 変位応答スペクトル

③累積塑性ひずみエネルギー 地震時における橋脚等の損傷度と累積ひずみエネルギーが関連するといった考え方もあることから、図-4の各入力地震動に対して免震橋梁、非免震橋梁の橋脚、橋脚+免震支承の累積塑性ひずみエネルギーの時刻歴を求めた。エネルギーを求める解析は、図-2のモデルを簡略化した図-8に示した2質点モデルを用いた。このモデルでは、橋脚、免震支承ともにバイリニア履歴特性を仮定している。図-9は、各累積塑性ひずみエネルギーの時刻歴を示したものである。この図より、以下のことが解る。

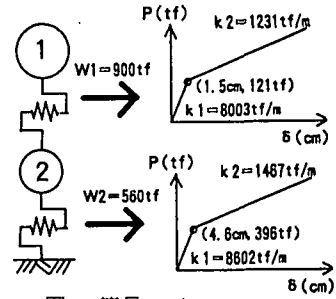


図-8 簡易モデル

(a) 橋脚における累積塑性ひずみエネルギーの最大値は、免震橋梁では、非免震に比較して非常に小さくなっており特に神戸の場合が顕著で、免震の場合、非免震の約10%となる。

(b) 上部工の最大変位時刻における、橋梁全体の累積塑性ひずみエネルギーは、免震橋梁の方が非免震橋梁より大きくなっている。したがって最大変位が生じるまでの過程で免震橋梁では免震装置によるエネルギー吸収が充分に行われていることが解る。

(c) 神戸海洋気象台の非免震橋梁では、他の入力の場合に比べて累積塑性ひずみエネルギーの増加勾配が急である。このような急激なエネルギー入力が、構造物の破壊と関係あるかどうか今後研究の必要があると考えられる。

### 5. まとめ

- ① 釧路気象台、神戸海洋気象台観測波に対しても免震橋梁は有効であり最大加速度応答は、非免震に比較して約40%低減され、橋脚基部の曲げモーメントは、約25%低減される。
- ② 釧路気象台、神戸海洋気象台観測波による免震橋梁の上部工の最大変位応答は、非免震の場合と同等である。
- ③ 橋脚の累積塑性ひずみエネルギーの最大値は、神戸海洋気象台の場合に、免震橋梁の場合非免震の約10%と非常に小さくなる。

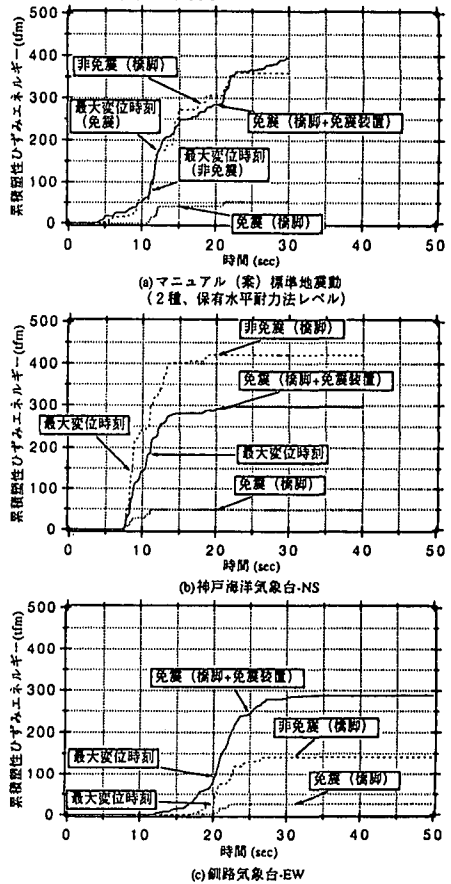


図-9 累積塑性ひずみエネルギー

(参考文献)

- 1) (財) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成2年2月
- 2) 建設省土木研究所: 道路橋の設計法マニュアル(案)、平成4年10月
- 3) 家村浩和, 山田善一, William TANZO, 野村武司: 橋梁における免震支承の地震入力エネルギー分担率、第21回土木学会地震工学研究発表会、平成3年
- 4) 平井卓, 杉本三千雄, 広中良和: 免震橋梁の橋脚、支承へのエネルギー配分について、第47回土木学会年次学術講演会、平成4年