

パルス状地震荷重に対する免震橋の 応答特性の評価

五十嵐 晃¹・家村 浩和²・平井 崇士³

¹正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

近年、直下型地震に対して橋梁の地震時安全性を高める方法として免震構造が広く採用されるようになってきている。しかし、兵庫県南部地震のような直下型地震において被害に大きな関連があると考えられている大きなパルス状地震動に対しては、極めて非定常性の高い過渡応答特性がその挙動や効果等に大きな影響を及ぼすことが予想される。本研究では、直下型地震において特徴的なパルス状の地震動に対する免震橋梁の応答特性を数値応答解析により明らかにし、単一パルスに対する LRB 型免震橋と摩擦型免震橋の応答特性について、また単一パルスと二個のパルスに対する応答特性の相違についてそれぞれ検討した。

Key Words : near-fault earthquakes, pulse loads, isolated bridge structure

1. はじめに

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震は、橋梁等の各種土木構造物に甚大な被害をもたらした。特にこの経験以来、ゴム支承等の使用による構造物の長周期化と履歴吸収エネルギーによる減衰を利用して、地震力の低減を計る免震構造がおおいに注目を浴びることとなった。そして、平成 8 年の道路橋示方書¹⁾の改訂では初めて免震設計が正式に取り入れられるに至った。このように、免震装置の使用による道路橋の耐震性の向上が期待されているものの、直下型地震における免震橋の挙動ならびに免震効果等については、必ずしも十分に解明されているとは言えない。

現在、震源となる断層が近傍にある直下型地震では、速度波形がパルス状になることが知られている。現行の耐震設計で考慮されている地震荷重に比べ、パルス地震動は構造物に対して大きな荷重が短時間に作用し、構造物の応答もごく短時間で決定されるという点が特徴的である。そこで、このようなパルス入力に対して免震橋梁などの免震構造がどのような応答特性を示すかを明らかにしておくことが重要であるといえる。

本報告では、兵庫県南部地震のような直下型地震において特徴的なパルス状地震動に対する免震橋梁の応答特性を数値応答解析により明らかにした。そして、LRB 型免震橋と摩擦型免震橋の応答特性の相違について、また単一と二個のパルスに対する応答特性の相違について検討した。

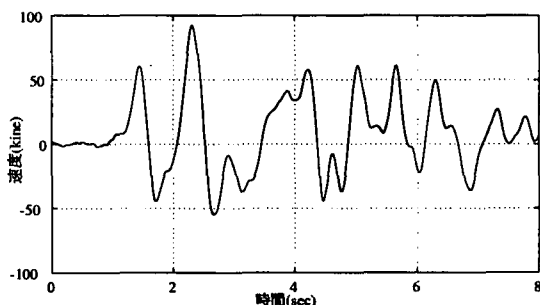


図-1 神戸海洋気象台記録 NS 成分の速度時刻歴

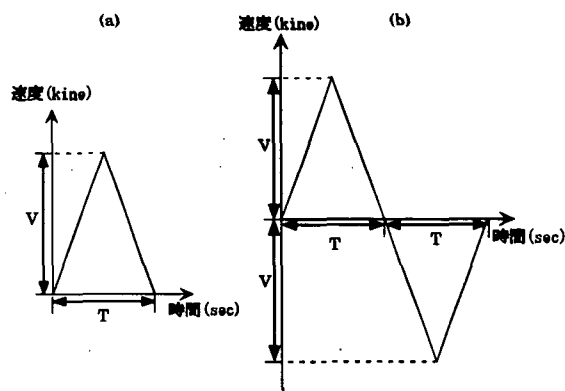


図-2 三角パルス ((a):単一パルス (b):二個のパルス)

2. 直下型地震とパルス波

兵庫県南部地震のような直下型地震において、特に顕著に観測されたパルス状の地震動が構造物の被害に大きな関連があるものと考えられている。図-1 は兵庫

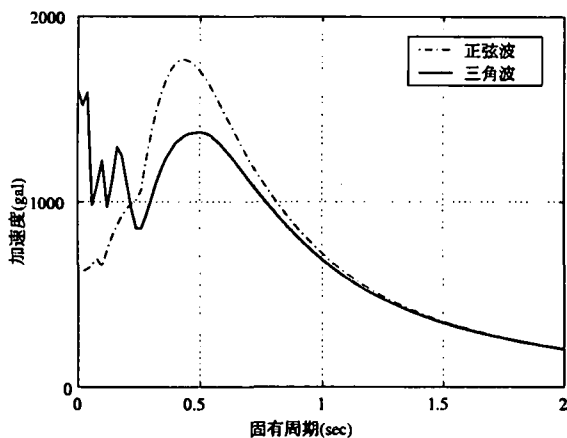


図-3 加速度応答スペクトル

県南部地震の神戸海洋気象台観測加速度記録を線形加速度法を用いて速度時刻歴に変換したものである。これによると、作用時間幅約0.4(sec)、大きさ約90(kine)の大きなパルスが存在していることがわかる。直下型地震においては、このような少数の大きなパルスが構造物の応答に大きく影響を及ぼしているものと考えられる。そこで、直下型地震の観測波形中に存在する最も大きなパルスを想定して、速度波形を図-2のような単純な三角パルスに近似した。ここでは少数の三角パルス波として、単一と二個のパルスについて検討することにした。パラメータとして、作用時間幅 $T(\text{sec})$ と大きさ $V(\text{kine})$ を考えた。図-3は、特定の三角パルス($T=0.5(\text{sec}), V=100(\text{kine})$)、および参考のため同一の振幅及び作用時間幅をもつ正弦波状パルスに対する加速度応答スペクトルを示したものである。これによると、三角形パルスの場合、短周期領域で応答が大きくなっているが、これは速度が急変する部分の影響であると考えられる。また、いづれのパルスにおいても作用時間幅である0.5(sec)付近にピークが見られることから、作用時間幅 T をパルスの卓越周期と見なすことができる。

3. 解析概要

(1) 解析対象橋梁及び解析モデル

本研究で対象とした橋梁は、図-4に示すような兵庫県南部地震以降に設計された典型的な5径間連続橋の免震橋²⁾である。橋脚には鉄筋コンクリート、免震支承にはLRB型(鉛プラグ入り積層ゴム)を用いた設計が行われている。上部構造は12(m)の幅員を持つ、径間長40(m)の鋼板桁構造で、下部構造が支持する桁の重量は6.0(MN)である。橋脚上には、平面寸法620(mm)×620(mm)、高さ196(mm)、ゴム層厚さ14(mm)×8層からなる鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)が5基設置されている。鉄筋コンクリート橋脚

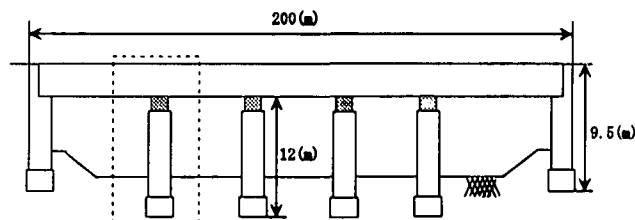


図-4 解析対象橋の全体図

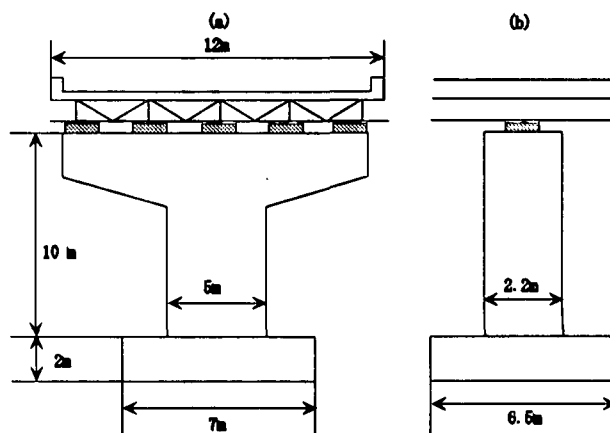


図-5 解析対象橋脚 ((a) 正面図 (b) 側面図)

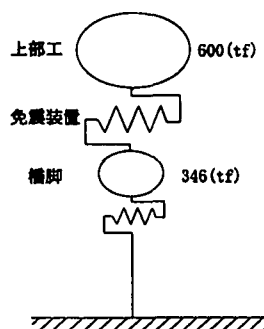


図-6 解析モデル

躯体の断面寸法は幅5.0(m)×2.2(m)、躯体高さは10(m)である。また、基礎として直接基礎形式が採用されている。フーチングは平面寸法7.0(m)×6.5(m)、高さ2.0(m)である。図-5に対象橋脚の寸法を示す。この免震橋梁を図-6に示すような橋桁と橋脚の2質点系にモデル化し、免震橋の自由度は支承部と橋脚の橋軸方向変位の2自由度のみとした。また、上部工の重量は600(tf)、橋脚の重量は346(tf)とし、粘性減衰定数は免震支承、橋脚ともに2%とした。

(2) 免震支承と橋脚の復元力履歴特性

本解析では、免震支承としてLRB型と摩擦型を取り扱い、復元力履歴特性はそれぞれ図-7(a)、(b)のようなバイリニア型で近似することにした。LRB型については、設計時のパラメータをそのまま採用した。摩擦型については、LRB型の設計の際に採用された等価水平震度0.4を仮定して、LRB型の場合と等価剛性が等し

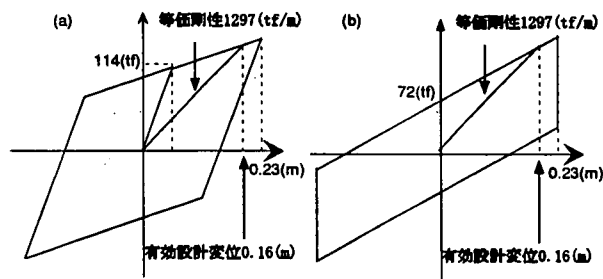


図-7 免震装置の復元力履歴特性 ((a):LRB 型 (b):摩擦型)

表-1 免震支承のパラメータ

	(a) LRB 型	(b) 摩擦型
等価剛性 (tf/m)	1297	
初期剛性 (tf/m)	5695	∞ (51350)
二次剛性 (tf/m)	876	1027
降伏力 (tf)	114	72

くなるように 2 次剛性の値を設定した。これらのパラメータを表-1 に示す。なお、等価剛性は道路橋示方書の規定に従い設計変位の 0.7 倍に相当する応答変位 (有効設計変位) における割線剛性により定義している。本解析対象橋梁の設計変位と有効設計変位は、それぞれ 0.231(cm)、0.161(m) である。また、橋脚の復元力履歴特性は、トリリニア型で近似した。橋脚の降伏耐力は 355.5(tf)、降伏変位は 0.0309(m) である。なお、免震支承の等価剛性と橋脚の降伏剛性を直列バネとしてモデル化した時の免震橋の固有周期は 1.63(sec) である。また、LRB 型と摩擦型の等価減衰定数を道路橋示方書に規定された方法に基づいて算出したところ、それぞれ 0.23、0.19 となった。

4. 解析結果

前述の三角パルス入力に対する LRB 型と摩擦型免震橋の応答を時刻歴応答解析により算出した。応答特性の評価項目としては、免震設計をする上で重要と考えられる免震支承の最大相対変位と、橋脚の非線形化と損傷度を知る上で重要な橋脚の最大応答塑性率に着目した。

(1) 単一パルスに対する応答特性

図 2(a) の単一パルスに対する LRB 型と摩擦型免震橋の免震支承の最大相対変位をそれぞれ図-8 の (a)、(b) に、橋脚の最大応答塑性率をそれぞれ図-9 の (a)、(b) に示す。この図は、 T を 0.1(sec) から 2.0(sec) まで変化した時と V を 10(kine) から 200(kine) まで変化した時の応答特性を 3 次元にグラフ化したものである。

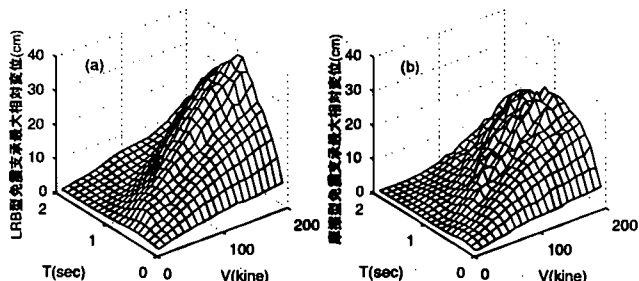


図-8 単一パルスに対する免震支承最大相対変位 ((a):LRB 型 (b):摩擦型)

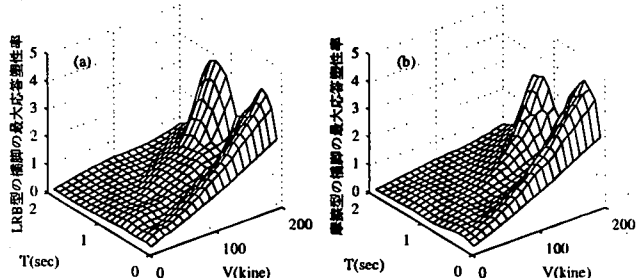


図-9 単一パルスに対する橋脚の最大応答塑性率 ((a):LRB 型 (b):摩擦型)

免震支承の最大相対変位は LRB 型も摩擦型もパルスの作用時間幅により山があり、橋梁の固有周期よりも短めの約 1(sec) 付近でピークを迎えている。設計変位 23.1(cm) を越える領域はこの $T=1$ (sec) 前後に存在している。全体的に見ると、LRB 型の方が摩擦型より等価減衰が大きいため変位が大きくなっている。また、LRB 型は摩擦型と比較してパルスの時間幅が 1(sec) からずれると急激に変位が小さくなるが、降伏力が摩擦型より大きい事が原因であると思われる。

橋脚の最大応答塑性率は LRB 型も摩擦型も、速度の大きなところでパルスの作用時間幅により 2 つのピークが存在していることが分かる。作用時間幅が長い側のピークは等価固有周期の影響と考えられ、免震支承の最大相対変位よりも等価固有周期寄りの T においてピークを示している。時間幅が短い側のピークは免震支承により地震エネルギーを吸収することができないためであると考えられる。すなわち、支承部を剛結とした時の非免震橋の固有周期に強く関係しているものと考えられる。橋脚の最大応答塑性率は LRB 型と摩擦型においてほとんど相違は見られない。

(2) 二個目のパルスによる応答の影響

単一パルスと二個のパルスに対する免震橋の応答特性の相違について検討した。図-2 で示した単一パルスと二個のパルスの大きさ V を一定の 100(kine) とし、作用時間幅 T を変化した時の LRB 型と摩擦型免震橋

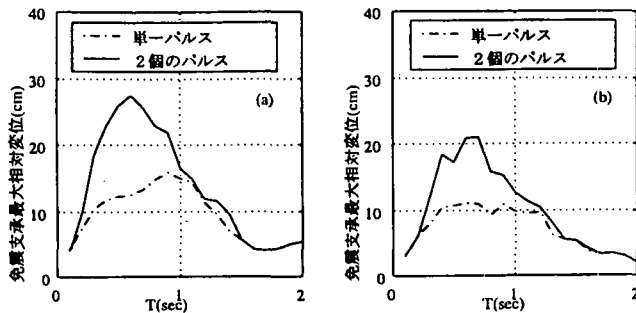


図-10 単一パルスと二個のパルスに対する免震支承最大相対変位の比較 ((a):LRB 型 (b):摩擦型)

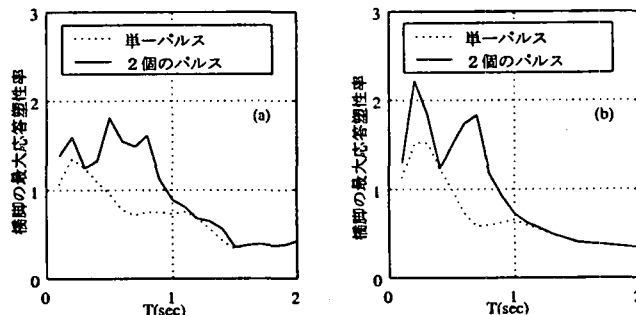


図-11 単一パルスと二個のパルスに対する橋脚の最大応答塑性率の比較 ((a):LRB 型 (b):摩擦型)

の免震支承の最大相対変位をそれぞれ図-10の(a)、(b)に、橋脚の最大応答塑性率をそれぞれ図-11の(a)、(b)に示した。図10によると、免震支承の最大相対変位はパルスの作用時間幅 T が約 1(sec) より短くなると、二個目の影響が大きくなっていることがわかる。逆に、パルスの作用時間幅 T が長い入力に対しては、パルスの個数にかかわらず免震支承の最大相対変位はほとんど変わらず、二個目の影響はあまりないといえる。また、LRB 型と摩擦型の最大相対変位を比較すると、LRB 型の方が全体的に大きく、設計変位 23.1(cm) を超える領域も存在しているが、これは二次剛性の影響であると思われる。二個のパルス入力に対してピークを迎える作用時間幅 T は、単一パルスの場合より小さくなっている。

また、図 11 の橋脚の最大応答塑性率についても同様に、パルスの作用時間幅 T が 1(sec) より短い入力に対して二個目の影響が大きくなっていることがわかる。二個のパルス入力では、作用時間幅 T が 1.0(sec) より小さくなると降伏するが、単一パルス入力では T が 0.5(sec) まで小さくならないと降伏しない。

5. まとめ

本研究では、直下型地震を単純にモデル化した少数の三角パルスに対する免震橋の応答特性を検討した。本解析で明らかになったことを以下に示す。

1. 単一パルス入力については、免震支承の最大相対変位は入力パルスの作用時間幅によりピークが存在し、橋梁の等価固有周期よりもやや短めのパルスに対して最大値を示した。
2. 橋脚に大きな損傷を与えるパルスとしては、作用時間幅が等価固有周期に近いものと免震支承が機能できない程短いもの、すなわち支承部を剛結とした時の固有周期に近いものの2種類存在することがわかった。
3. LRB 型と摩擦型を比較すると、LRB 型の方が等価減衰が大きいにも関わらず橋脚の最大応答塑性率はほぼ等しく、免震支承の最大相対変位についてはむしろ摩擦型の方が小さくなる傾向が見られた。
4. 二個目のパルスの影響については、作用時間幅が短いパルスに対して大きな影響が現れることがわかった。

参考文献

- 1) 日本道路協会、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996.11
- 2) 日本道路協会、道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- 3) 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、Vos.45A, pp.819-828, 1999.3