

ハイブリッド実験による両面スライド型 免震支承の地震応答特性に関する検討

高橋 良和¹・家村 浩和²・配野 英朗³・陳 友真⁴

¹正会員 工(修) 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-01 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 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 (株) ビービーエム (〒 103 東京都中央区八重洲1丁目5番3号 不二ビル5F)

⁴学生員 京都大学大学院土木工学専攻 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

両面スライド型免震支承は、積層ゴム支承の両面にスライド部を有する免震装置である。本装置はスライド面を2面持っていることから、大きな履歴特性を持ち、小変形時においても等価減衰定数が極めて大きいことが静的載荷試験より示された。またこの支承の動特性を検証するためハイブリッド実験を行い、その結果より極めて安定したバイリニア型の履歴特性を持ち、エネルギー消散能力が優れていることなどが明らかになった。

Key Words : Isolator, Double Slide Plates, Hybrid Experiment

1. はじめに

現在、免震装置として鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) や高減衰積層ゴム支承 (HDR)、すべり方式免震装置などが開発・利用されている。従来のすべり方式免震装置は、すべり支承における残留変形の問題から、水平復元力装置が併用されているが、ここで扱う両面スライド型免震支承は、積層ゴム支承の上下部にスライド部を有する形状の免震装置であり、水平復元力を持ちながらすべり支承の特性をも兼ね備えた支承である。本論文ではこの両面スライド型免震支承に対し、静的載荷実験及びハイブリッド実験を行い、その基本的特性を検討することを目的としている。

2. 両面スライド型免震支承

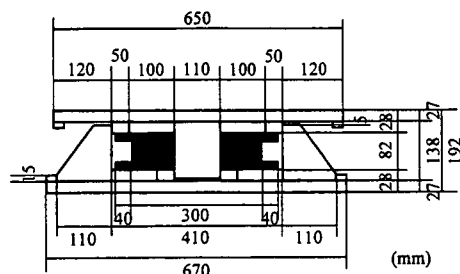


図-1 両面スライド型免震支承

実験・解析対象となる免震支承を図-1に示す。支承サイズは $300 \times 300 \times 82\text{mm}$ ($\sum t_e = 40\text{mm}$) であり、ゴムの両面にスライド面が装着されている。本支承はベッドプレート（純テフロン製）とスライディングブ

レート（ステンレス製）の滑動によって生じる摩擦力が、エネルギーを消費して減衰効果を発揮する構造になっており、従来のすべり型免震支承に比べてすべり面を2つ有しているため、より大きな履歴を描くことができる特徴を持つ。一方、本支承はすべり型の支承ではあるが、すべりによる変形と積層ゴムの変形が全く同じであることから、ゴム支承とすべり支承が並列につながっているとみなすことができ、従来のすべり支承とダンパーの併用型に比べてコンパクトな形状をしている。積層ゴムが変形することによってすべりが生じることから、すべり型支承の欠点である変形後の残留変形の問題はゴムの復元力により克服されている。

3. 実験システム

実験システムの概要を図-2に示す。実験システムは載荷システム・制御システム・計測システム・記録システムにより成っている。載荷装置として3台のアクチュエーターを用い、水平載荷ビームを介して免震支承に水平変形を与えている。上下方向にある2台のアクチュエーターは鉛直荷重を加えるだけでなく、免震支承が水平に保つよう計算制御を行っている。

4. 静的繰り返し載荷実験

本免震支承の水平方向の基本的特性を調べるために、鉛直荷重 400 kN 載荷状態において水平方向にせん断変形を与える静的な載荷実験を行った。

静的載荷実験より得られた変位・荷重履歴応答、等価剛

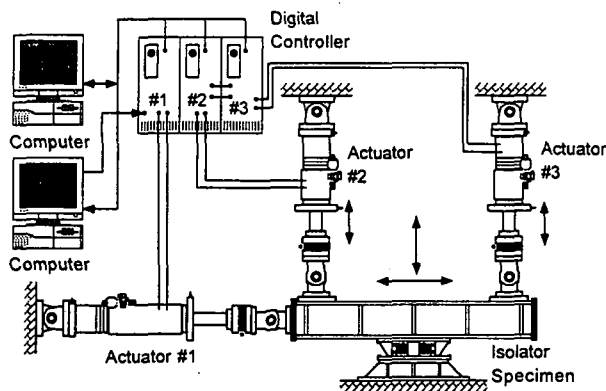


図-2 実験システム概要

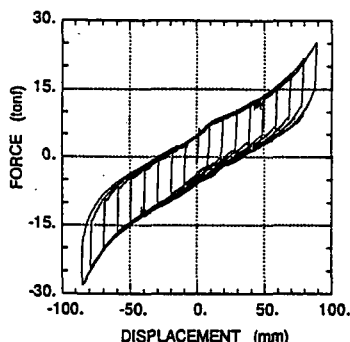


図-3 変位-荷重履歴

性、等価減衰定数をそれぞれ図-3、図-4、図-5に示す。

履歴応答曲線は安定した形状を保ち、バイリニア型の形状となっている。80 mm を越えたあたりからややハードニング現象が確認される。またいわゆる一次剛性は大きく、すべり支承型の履歴特性が現れていることが分かる。

また図-4より、ひずみ率が大きくなるにつれて等価剛性は減少し、ある程度まで変形すると一定の値になることが分かる。若干あるひずみ率以上の領域では増加する傾向が見受けられるが顕著な特徴ではなく、安定した特性を持っていることがわかる。このことにより、特に強震時における加速度の低減効果が優れていると予想される。

図-5より、非常に大きな等価減衰定数を持っており、特にせん断ひずみ率が小さい時に等価減衰定数が30%を超える大きな値を持っていることが特徴となることが分かる。純粋なすべり型支承では、等価減衰定数はせん断ひずみ率に関わらず一定値をとる（変位に依存しない）が、本支承は積層ゴムが直列に配置されていることから二次剛性を持ち、変位が大きくなるにつれて小さな値になっている。

5. ハイブリッド地震応答実験

免震支承は中程度の地震に対しては当然のことながら、兵庫県南部地震級の大規模な地震に対しても、十

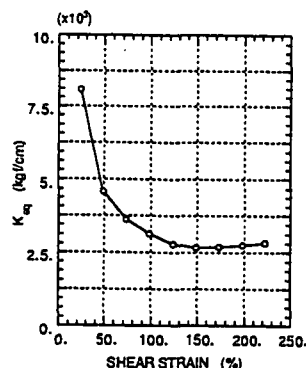


図-4 等価剛性

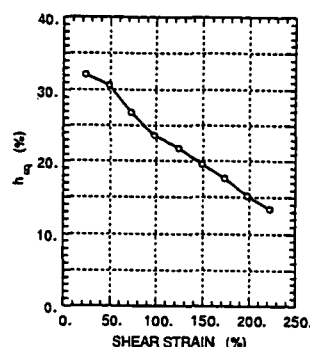


図-5 等価減衰定数

分な安全性を持つ必要があり、その設計においては地震動の入力レベルが規定されている。そこで本免震支承を有する構造物がそれぞれのレベルの地震時にどのような挙動を示すか検証するために、大変形領域を含めたハイブリッド地震応答実験を実施した。

(1) 構造物のモデル化

免震支承を有する構造物は、静的繰返し载荷実験より得られる等価剛性から等価固有周期が2.0秒になるように上部構造の質量を決定して、1自由度にモデル化する。本供試体の等価剛性 K_{eq} は 3.07×10^6 N/m であり、上部構造質量 M は 3.12×10^5 kg とした。なお、この1自由度構造モデルは減衰定数にして1%の粘性減衰を仮定し、減衰係数 C は Rayleigh 減衰に従って定めた。また、地震応答計算の数値積分間隔 Δt は0.01秒である。

(2) 入力加速度の大きさ

レベル1における入力地震波形としては、平成2年度版の道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編)に時刻歴応答解析用の標準波形例として示されたI, II, III種地盤用の地震波形を用いる。レベル2における入力地震波

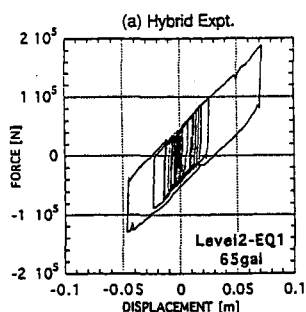


図-6 履歴応答

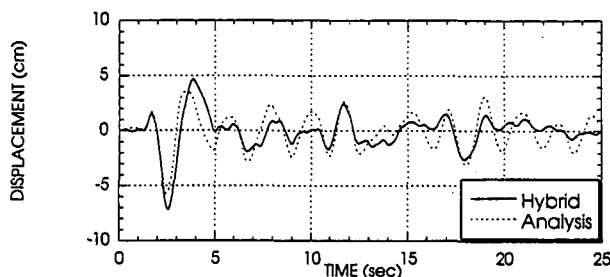


図-7 変位応答時刻歴

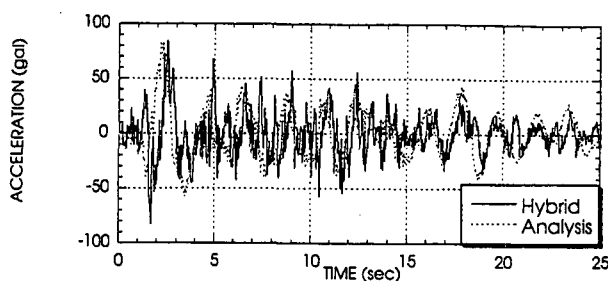


図-8 加速度応答時刻歴

形は、建設省土木研究所耐震研究室によって作成された保有水平耐力レベルの検討に用いる I, II, III 種地盤用の標準波形を用いる。これらの地震波の入力最大加速度を、レベル 1 では各供試体のせん断ひずみ率 100% から 150% 付近を、レベル 2 では 150% から 200% 付近を目標として設定している。

(3) 履歴形状・時刻歴応答

ハイブリッド実験のうち、レベル 2 (I 種地盤) の波形を用いた時の水平変位-復元力の履歴曲線、応答変位および応答加速度の時刻歴をそれぞれ図-6 から図-8 に示す。これらの図には静的解析より定めた等価線形解析結果も同時に示している。解析時の諸量としては、せん断ひずみ率 100% 時の値を用いている。解析結果と実験結果は良く一致していることが分かる。ただし、本支承は小変形時の等価減衰が大きいので、小変形時の応答を大きく見積もる傾向がある。

加速度応答波形には短周期成分が現れている。これ

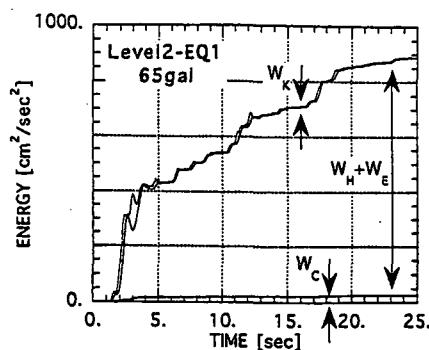


図-9 吸収エネルギー時刻歴

は一次剛性と二次剛性の差が非常に大きいことが原因と考えられ、すべり型支承の特徴が現れている。従来のすべり型支承では、スライディングプレートが滑動するときには、復元力が頭打ちになり、加速度の増大が抑えられる傾向にある。しかしながら、本支承では常にゴムの変形とともにすべりが生じるため、このような傾向は顕著には現れていない。

(4) 最大応答値

供試体のハイブリッド実験による最大応答値を表-1 にまとめた。表中には応答加速度の大きさを比較する指標として、最大応答加速度を最大入力加速度で割った値である加速度応答倍率も示した。レベル 1 のどの地震波に対しても、加速度応答倍率は 1.0 以下となり、レベル 2 の地震波に対しても同様の傾向があり、有効な免震効果が得られていると言える。

各供試体に最大入力加速度と同じ大きさの力が静的に作用した場合に生じる変位に対する最大応答変位の値を増幅率 M_D と呼び、同じく表-1 中に示してある。レベル 2 であっても約 1.0 前後の値を示している。

(5) 履歴エネルギー吸収能の評価

供試体の免震効果をエネルギーの観点から評価するため、地震入力エネルギーとその分担率を図-9 に示す。この図は構造物モデルの単位質量当たりの値がプロットされており、最上部の曲線が総入力エネルギーの累積値 E を表している。この図より、運動エネルギーの分担率が非常に低く、動的応答がかなり低減されていることがうかがえる。

地震終了時における E, W_C, W_H 及び履歴吸収エネルギーの入力総エネルギーに対する分担率 W_H/E を表-2 に示した。

(6) 免震化による応答加速度の低減効果

ここでは供試体を用いて一般の構造物を免震化することにより、最大加速度がどの程度低減されるか、また最大変位がどの程度増大するかを検討した。

非免震構造物としては固有周期 T (0.1 秒から 2.0 秒)、

表-1 ハイブリッド地震応答実験における最大応答値

Earthquake			Acceleration Response		Displacement Response		
Level	Type	Input (gal)	Max. (gal)	Amp.	Max. (mm)	Shear Strain (%)	Mag.
1	I	70	50.9	0.73	58.3	145.75	0.82
	II	95	47.6	0.50	54.5	136.25	0.57
	III	75	53.3	0.71	54.5	136.25	0.72
2	I	65	66.3	1.02	71.9	179.75	1.09
	II	95	56.2	0.59	64.7	161.75	0.67
	III	65	66.0	1.02	68.9	172.25	1.05

表-2 地震終了時における各エネルギーとその分担率

Earthquake		E	W_c	W_h	W_h/E
Level	Type	(cm^2/sec^2)	(cm^2/sec^2)	(cm^2/sec^2)	(%)
1	I	695.5	18.36	652.1	93.75
	II	1981	72.19	1881	91.44
	III	2761	81.51	2572	93.15
2	I	890.1	29.90	861.6	96.8
	II	2335	92.88	2212	94.73
	III	3731	128.9	3463	92.80

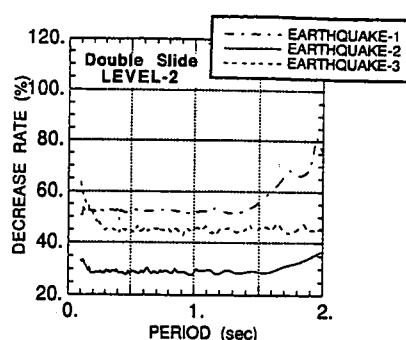


図-10 加速度低減率

減衰定数 5% の 1 自由度線形モデルを考える。このモデルの各地震波入力に対する最大加速度はそれぞれ加速度応答スペクトルより容易に求めることができる。一方、この非免震構造物を免震化した後の構造物にはハイブリッド実験で用いた 1 自由度モデルを仮定し、その最大応答値は実験より既に得られた値とする。

非免震構造物の最大応答に対する免震構造物の最大応答（すなわちハイブリッド実験での最大応答）の比率を、加速度については加速度低減率と呼び、免震効果の指標とした。レベル 2 の地震動入力に対する加速度低減率を図-10に示す。

レベル 1 の入力においては、固有周期 1.0 秒以下の非免震構造物を免震化した時の加速度低減率は約 20% から 40% と低く、免震化によって地震時慣性力が大きく

低減されることが期待できる。一方、図-10に示したようにレベル 2 ではレベル 1 と比べるとその低減率は大きい値を示すが、それでも 30% から 60% 程度であり、比較的大きな免震効果を示している。

6. まとめ

両面スライド型免震支承は、履歴形状にはすべり支承の特徴が良く現れており、等価減衰定数も大きいことが分かる。動的特性としては、入力エネルギーのほとんどを履歴エネルギーとして消散することにより、応答がかなり低減されている。また履歴形状が完全なバイリニア型を示すため、示方書にある様な等価線形化法と良く一致することが示された。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計マニュアル（案）（道路橋の免震構造システムの開発に関する官民連帯共同研究），1992.
- 2) 山田善一・家村浩和・William Tanzo・鶴野禎史・中村鎮雄：ハイブリッド地震応答実験手法による高減衰ゴム支承の免震効果，土木学会構造工学論文集 Vol.37A，1991.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成 8 年.