

# 変位制御装置付き免震支承

坂井藤一<sup>1</sup>・小川一志<sup>2</sup>・斎藤敏雄<sup>3</sup>・玉木利裕<sup>4</sup>・八部順一<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 (〒136東京都江東区南砂2-11-1)

<sup>2</sup> 正会員 工博 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部(〒673明石市川崎町1-1)

<sup>3</sup> 正会員 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部(〒673明石市川崎町1-1)

<sup>4</sup> 正会員 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部(〒136東京都江東区南砂2-11-1)

<sup>5</sup> 正会員 川崎重工業 鉄構事業部 橋梁技術総括部 東部橋梁技術部(〒136東京都江東区南砂2-11-1)

阪神大震災により高速道路が壊滅的な被害を被り、免震装置の必要性が認識された。しかし、従来のLRB（鉛プラグ入り積層ゴム支承）や高減衰積層ゴム支承などの免震支承では阪神大震災クラスの地震に対して橋桁が大きく水平変位（30～70cm）する可能性があり、伸縮装置部（橋桁と橋台の繋ぎ部）の設計が問題となることがある。本論文では従来の免震支承の免震性能を損なうことなく橋桁の過大な水平変位を抑制するために、新たに開発した変位制御装置についての地震時応答シミュレーション解析および滑り摩擦試験を実施してその有効性を検討した結果を以下に報告する。

**Key Words :** displacement control device, isolator, dynamic simulation analysis, coulomb damping

## 1.はじめに

橋梁の地震応答を低減し耐震性を向上するために、免震支承<sup>1)</sup>を用いて長周期化、高減衰化が計られている。LRB（鉛プラグ入り積層ゴム支承）や高減衰積層ゴム支承などの免震支承を用いる場合、全体の変位が大きくなり、エキスパンションジョイントや落橋防止の設計変位を大きくとる必要がある。そこ

で、免震支承の効果を保ち、変位を小さくする方法として、摩擦力を用いた変位制御装置が考えられる。

本論文では、従来の免震支承の免震性能を損なうことなく桁の過大な水平変位を抑制するために、新たに開発した変位制御装置<sup>2)</sup>についての地震時応答シミュレーション解析および本装置の重要なファクターである摩擦係数 $\mu$ の滑り摩擦試験を実施してその有効性を検討した結果を以下に報告する。

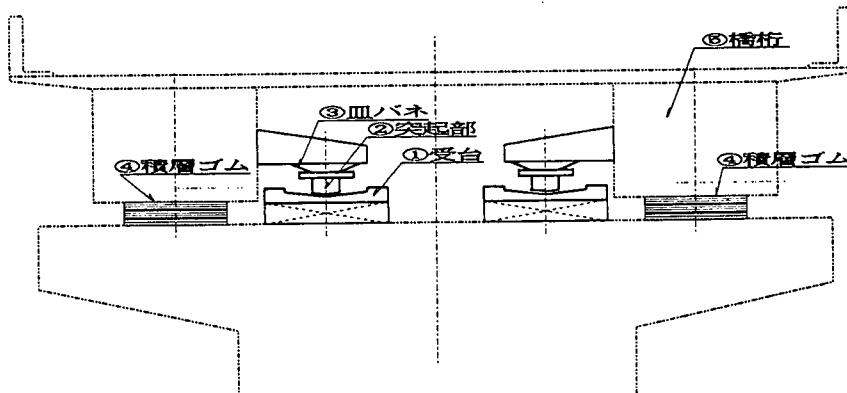


図-1 変位制御装置付き免震支承

## 2. 変位制御装置付き免震装置

変位制御装置付き免震支承は図-1に示すとく、従来の積層ゴム④に付設して用いられる受台①、受台と接する突起部②および突起部を支持するバネ③から構成されている。受台①および突起部②の接触面は、お互いに同勾配となっており、どの方向に移動してもお互いに接触する構造となっている。通常時は、橋桁⑤の全荷重は積層ゴム④で支持されている。地震時には、橋桁が水平に変位することによって橋桁下面に付けた突起部②が受台①に強く押し付けられて皿バネ③は変形し、その反力に比例して受台と可動部の間のクーロン摩擦力は増大し、橋桁の水平変位を拘束することができる。

従来のすべり支承が設置された橋桁に、水平方向に外力（たとえば地震力）が作用して、水平に振動するとき、図-2に示すように、橋桁には水平バネによる復元力  $F_1 (=K_H X)$  と滑り支承のクーロン摩擦力  $F_2 (=μ W)$  が作用する。復元力  $F_1$  は変位量  $X$  に比例するのに対して、摩擦力  $F_2$  は一定値となる。外力の作用がなくなったとき、摩擦力  $F_2$  よりも復元力  $F_1$  が大きければ、構造体は振動前の位置に復帰できるが、小さければ復帰することはできず、摩擦力  $F_2 =$  復元力  $F_1$  となる位置  $X_0$  で静止して残留変位を生ずる。

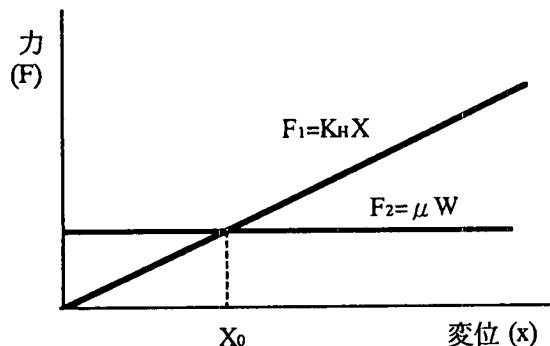


図-2 復元力と摩擦力の関係  
(従来のすべり支承)

それに対して、図-1に示す変位制御装置付き免震支承を設置した場合には、摩擦力  $F_2$  はクーロン摩擦係数  $μ$ 、皿バネ③のバネ定数  $K_s$ 、摩擦面の勾配  $θ$  および変位  $X$  に比例し、 $F_2 = μ θ K_s X$  と表され、変位量  $X$  に比例するので、摩擦力  $F_2$  の値を常に復元力  $F_1$  より小さくなるように設定して、残留変位が生じないようにすることができる。つまり、

$$K_H > μ θ K_s \quad (1)$$

となる  $μ$ 、 $K_s$  および  $θ$  を決定すればよい。

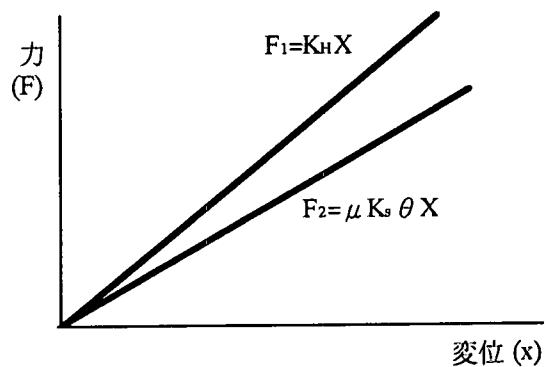


図-3 復元力と摩擦力の関係  
(変位制御装置付き支承)

## 3. 摩擦係数測定試験

2項で述べたように、クーロン摩擦係数が本装置の重要なファクターを占めているために摩擦係数測定試験を行った。以下に摩擦係数測定試験結果を報告する。

摩擦特性試験は、図-4に示す試験装置に試験体を設置し、上方より油圧シリンダーにより一定な荷重を試験体に載荷して、水平方向に一定の変位振幅および振動数で正弦波振動させて摩擦係数を計測した。試験において、上下方向および水平方向の荷重はロードセルで、上下方向の変位はマイクロメータで、水平方向の変位はレーザ変位計で計測した。

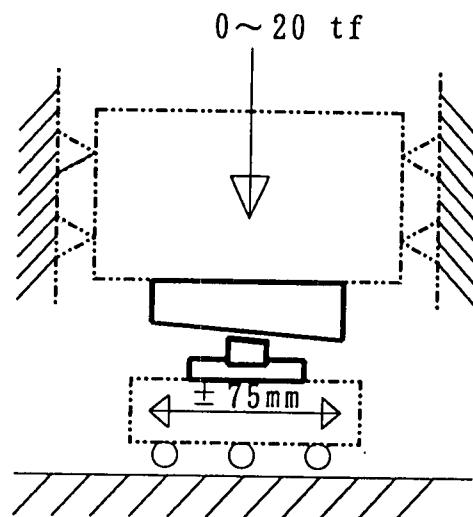


図-4 試験装置概略図

試験体模型を設計する上での実橋の諸元は、文献1)によった。模型の縮尺は $1/n = 1/4$ とした。実橋および模型の諸元を表-1に示す。

表-1 実橋および模型の諸元  
(模型縮尺:  $1/n = 1/4$ )

	実橋	相似率	モデル
橋モデル重量	1280 [tf]	$1/n^3$	$1/64$
支承反力	320 [tf]	$1/n^3$	$5$ [tf]
最大ストローク	$\pm 600$ [mm]	$1/n$	$1/4$
最大加速度	1.0 [G]	1/1	1.0 [G]
面圧	$10000$ [tf/m <sup>2</sup> ]	$1/n$	$250$ [kg/cm <sup>2</sup> ]

試験項目は表-2に示す試験条件により  
①摩擦面の違い(Cu-Cu, Sus-Sus, Sus-Cu)  
②面圧の違い(35kgf/cm<sup>2</sup>~350kgf/cm<sup>2</sup>)  
③水平振幅の違い( $\pm 20$ mm~ $\pm 75$ mm)  
の確認を行なった。

表-2 摩擦特性試験 試験条件

摩擦面材	鉛直荷重P [tf]	変位D [mm]	固有振動数N [Hz]
Cu - Cu	2~16	$\pm 25$	0.5
Sus - Sus	2~8	$\pm 25 \sim \pm 75$	0.5~1.0
Sus - Cu	2~20	$\pm 25$	0.5

### (1) 摩擦面の違い

摩擦面を(Cu-Cu), (SUS-SUS)および(SUS-Cu)の3ケースにおいて実験した。

試験結果を表-3および図-5に示す。表-3に示す最大値は移動方向が登り勾配の場合であり、最小値は下り勾配の場合を示す。この値が大きく違っているのは、登り勾配の場合はクーロン摩擦による水平力と構造体を上方に持ち上げるに要する力の水平分力が加わるために大きく、下り勾配の場合はこの逆で小さくなっている。図-5に示す摩擦係数は平均値を示す。表-3によれば(Cu-Cu)の摩擦係数は0.8~1.9であり、平均値は1.27である。この値は、文献3)の値1.4とほぼ合致している。

(SUS-SUS)の摩擦係数は0.55~0.70であり平均値は0.60である。この値は、文献3)の値0.35~0.40とかけ離れた値となっており、こ

の原因は同種合金同士であり、かつ金属が硬いために金属が焼き付いたことによるものと思われる。

(Sus-Cu)の摩擦係数は0.12~0.66であり平均値は0.37である。この値は、文献3)の値0.30~0.35に対して試験体の表面が荒れているために若干大きな値を示している。

表-3 摩擦係数試験結果

接触面の種類	摩擦係数		
	実験値	平均	文献値
Cu - Cu	0.80~1.90	1.27	1.4
Sus - Sus	0.55~0.70	0.6	0.35~0.40
Sus - Cu	0.12~0.66	0.37	0.30~0.35

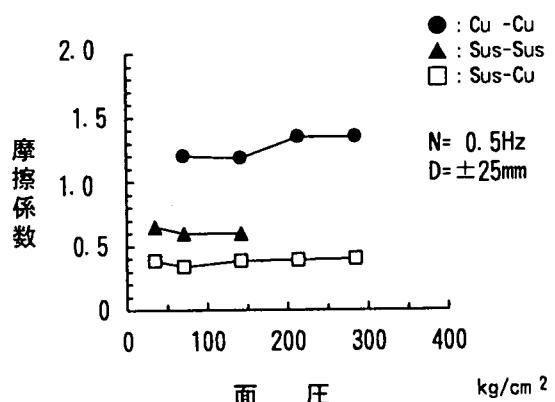


図-5 摩擦面の違いによる摩擦係数の比較

### (2) 面圧の違い

(Sus-Cu)の試験体の面圧を、35~350kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で変化させ、面圧の違いでの摩擦力を計測した。試験結果を図-6に示す。

本図によれば、使用範囲(250kgf/cm<sup>2</sup>)では変化しないことを示している。

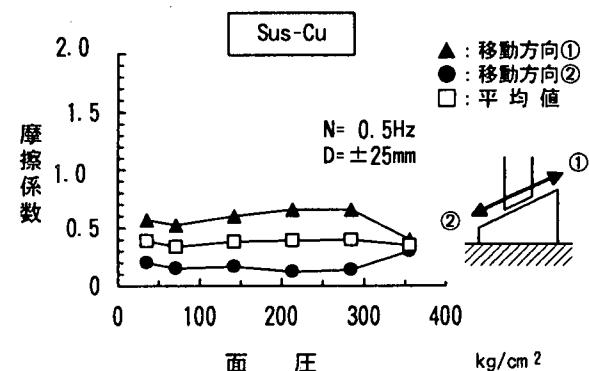


図-6 面圧の違いによる摩擦係数の比較

### (3) 水平振幅の違い

水平振幅を、 $\pm 20\text{ mm}$ ～ $\pm 75\text{ mm}$ の範囲で変化させ、摩擦係数を計測した。図-7に試験結果を示す。水平振幅の違いは、言い換えれば、すべり速度の違いであり、すべり速度の違いにより動摩擦係数は変化しないことが判る。これは、Coulombの法則のとうりである。

なお、本試験のすべてのケースにおいて、水平方向に10回振動を加えたが図-8に示すように、水平振幅と水平荷重の関係にはばらつきはなかった。

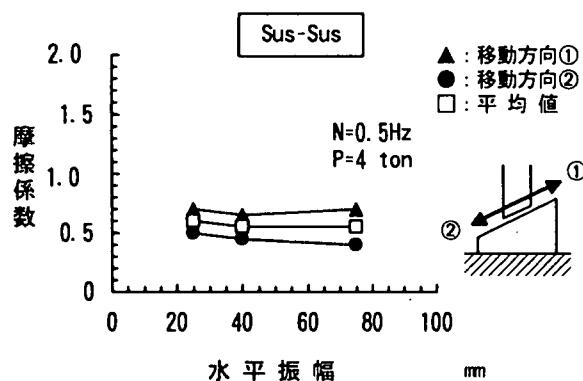


図-7 水平振幅の違いによる摩擦係数の比較

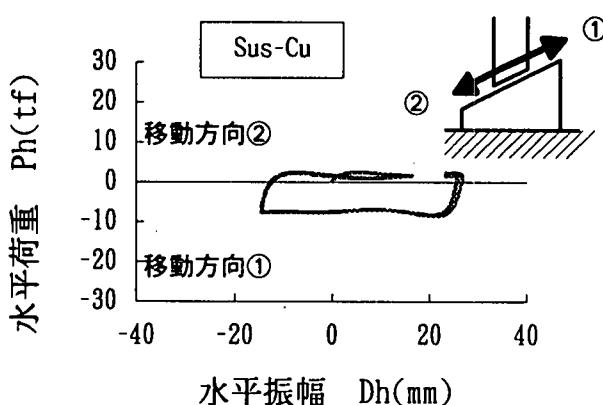


図-8 水平振幅と水平荷重の関係

## 4. 解析による検討

### (1) 簡易計算による検討

鋼橋の試設計例<sup>1)</sup>を検討対象とする。いま、橋桁は積層ゴムと滑り摩擦によって図-9に示すように支持されているものとする。最大速度 $V_0$ を有する橋桁の運動エネルギーは橋桁の最大変位時において積層ゴムのひずみエネルギーと変位制御装置の散逸エネルギーに置換されるものとして変位制御装置の応答変位低減効果を概略検討した。以下に、検討結果を述べる。

### 「検討条件」

- ・受台は突起部と常に接触しているものとする。
- ・外力が作用しないで、橋桁が中立の位置( $X=0$ )にあるとき、滑り面に圧縮力は作用しないものとする。

(変位制御装置無の場合)

$$1/2 \cdot MV_0^2 = 1/2 \cdot K_H X_0^2 \quad (2)$$

(変位制御装置有の場合)

$$1/2 \cdot MV_1^2 = 1/2 \cdot K_H X_1^2 + \int_0^{X_1} \mu N dx \quad (3)$$

$$N = K_s \theta X \quad (4)$$

ここに、 $K_s$ : 皿バネ③のバネ定数。

式(3)の第2項は式(4)を考慮して、

$$\int_0^{X_1} \mu N dx = \int_0^{X_1} \mu K_s \theta x dx = 1/2 \cdot \mu K_s \theta X_1^2 \quad (5)$$

式(2), (3)と(5)より

$$1/2 \cdot K_H X_0^2 = 1/2 \cdot K_H X_1^2 + 1/2 \cdot \mu K_s \theta X_1^2$$

$$X_1 = X_0 / \sqrt{1 + \mu \theta (K_s / K_H)} \quad (6)$$

$$X_D = \alpha X_1$$

ここで $\alpha$ は地震応答の補正係数である。(地震応答において、橋桁は不規則外乱である地震力によって自由振動とは異なる動きになる。その影響をここでは地震応答の補正係数とする。)

例えば  $\mu = 0.35$ ,  $K_s/K_H = 21$ ,

$\theta = 0.04$   $\alpha = 0.6$  の時

$$X_D = 0.5 \cdot X_0$$

となり、水平変位量は変位制御装置を付けることにより、約50%の低減効果があることが予想される。

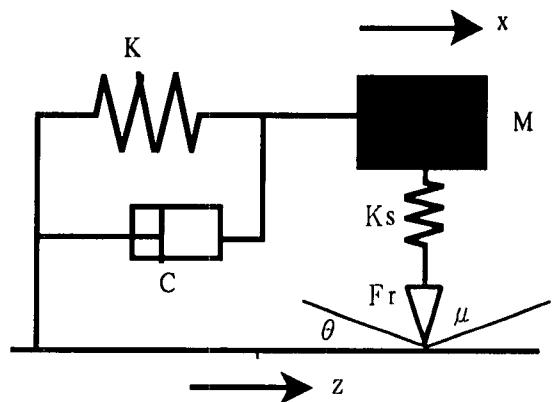


図-9 変位制御装置の地震応答解析モデル

### (2) 時刻歴応答解析による検討

#### a) モデル化

図-1の鋼橋に変位制御装置を適用した場合について地震時の応答を検討した。本橋梁の場合、橋桁全体が水平移動する1次モードが地震時の挙動に支配的であると考えられ、図-9の1自由度のバネ・ダッシュポット・質点系でモ

モデル化した。質量は上部工5353[ton]とし、パネ定数はLRBを用いた場合の1次モードの固有振動数に対応する値とし、減衰はLRBの等価減衰を考慮して約18%とした。これに変位制御装置の摩擦を変位に比例するクーロン摩擦として考慮した。

比較のために、非免震の場合、LRBを用いた場合についても同様のモデルで応答解析を行った。各モデルの諸元を表-4にまとめる。

(1)のケースは文献1)の試設計程度の固有周期とした場合、(2)のケースは(1)より長くしたものである。

表-4 解析モデル諸元

解析ケース	固有周期 [sec]	減衰比 [%]
非免震	0.5	5
LRB免震(1)	1.4	17.6
LRB免震(2)	2.6	18.8
変位制御装置(1)	1.4	17.6
変位制御装置(2)	2.6	18.8

図-9の系が水平地動を受けるときの運動は次の式で表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{z} + F_r \quad (7)$$

$$F_r = -\text{sgn}(\dot{x})\mu_d K_s |x|\theta \quad (8)$$

整理すると、

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C\dot{x} + \text{sgn}(\dot{x})\mu_d K_s \theta |x| + K_H x \\ = -M\ddot{z} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\dot{x} = 0$$

$$|f(t) - C\dot{x} - Kx| \leq \mu_s N = \mu_s K_s \theta |x| \quad (10)$$

の場合は  $M\ddot{x} = 0$ ,  $\dot{x} = 0$  すなわち、速度が0になるときに作用力が静摩擦力の上限以下であれば、振動は停止する。

摩擦試験の結果によれば、摩擦係数は接触面の相対速度にほとんど依存せず、本検討では、(SUS-Cu)の場合の動摩擦係数  $\mu_d = 0.35$  (一定値) とし、静摩擦係数  $\mu_s = 0.35$  とした。

運動方程式を離散時間でステップバイステップに解く場合には、静摩擦と動摩擦の切り替えを厳密に評価するのは困難である。そこで、(10)式の代わりに微小な値  $\epsilon$  を定め、

$$\begin{aligned} |\dot{x}| \leq \epsilon \\ |f(t) - C\dot{x} - Kx| \leq \mu_s K_s \theta |x| \end{aligned} \quad (11)$$

により判断するものとする。次のステップでは、初

期条件として、 $\dot{x} = 0$  により計算を続行する。

微分方程式の求解には、時間刻み  $\Delta t$  を0.001秒を基本に積分誤差が大きい場合には0.0001秒までの範囲で可変としたAdams/Gear法を用いた。微小値  $\epsilon = 1.0 \times 10^{-5}$  とした。

### b) 入力地震波

地盤種別(I種、II種、III種)ごとにL2レベル保有耐力照査用地震波<sup>1)</sup>と阪神大震災の地震記録(神戸海洋気象台、JR鷹取駅、東神戸大橋)を用いた。

### c) 地震応答解析結果

変位制御装置付き免震支承を用いた場合と非免震の場合およびLRBを用いた場合の地震応答を比較する。例として、阪神大震災の地震記録を用いた場合の絶対加速度、相対変位の波形を図-10、11に示す。各ケースの地震応答解析結果について最大応答値についてまとめると、表-5のようになる。

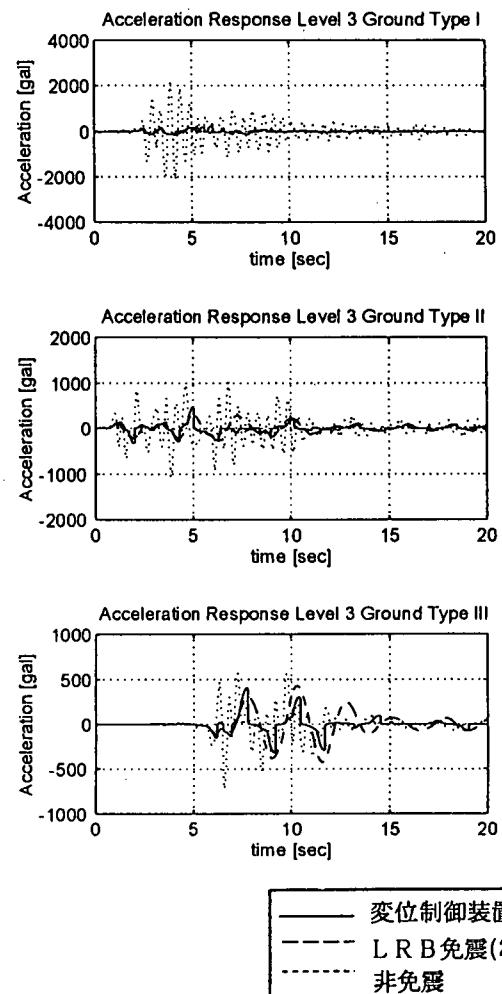


図-10 加速度応答の比較

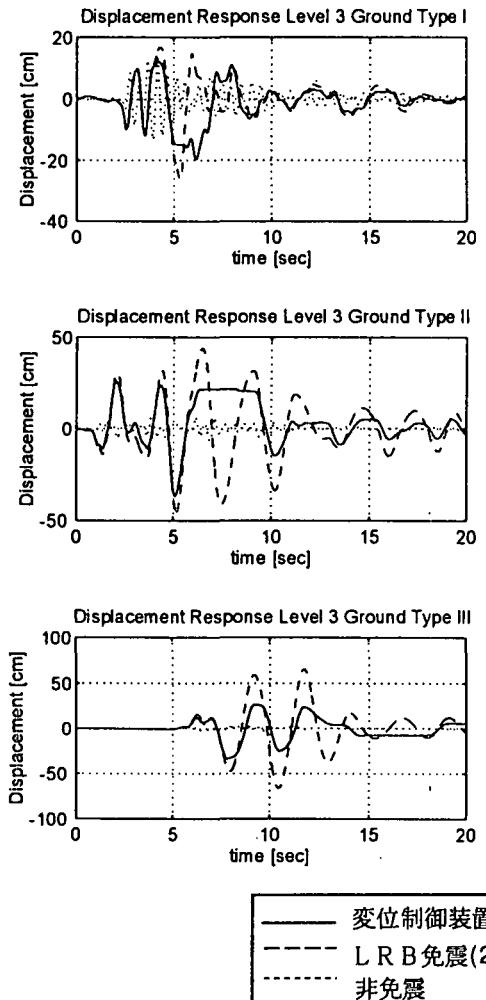


図-11 変位応答の比較

## 5. まとめ

橋桁の免震装置のうち、変位応答を抑制できる変位制御装置付き免震装置について、地震を受ける場合の応答について検討した。

これらの免震装置の効果を検討する上で重要なファクターである摩擦係数を計測し、その値に基づいて変位制御装置付き免震装置を用いた場合と、非

表-5 地震応答最大値の比較

地盤	解析ケース	レベル2		レベル3	
		加速度 [Gal]	変位 [cm]	加速度 [Gal]	変位 [cm]
I 種	非免震	690	4.3	2,098	13.2
	LRB免震(1)	497	23.6	483	21.8
	LRB免震(2)	319	48.1	174	26.2
	変位制御装置(1)	542	16.6	512	15.0
II 種	変位制御装置(2)	383	31.4	248	19.7
	非免震	857	5.4	1,063	6.7
	LRB免震(1)	574	27.4	868	40.7
	LRB免震(2)	245	37.2	322	45.3
III 種	変位制御装置(1)	559	16.8	866	26.3
	変位制御装置(2)	325	26.2	459	36.7
	非免震	999	6.3	721	4.5
	LRB免震(1)	569	27.0	458	21.9
III 種	LRB免震(2)	437	66.2	430	66.1
	変位制御装置(1)	584	17.8	527	16.1
	変位制御装置(2)	365	30.0	412	33.9

免震およびLRBによる免震を行った場合の地震応答解析により、応答特性を比較した。この結果から変位制御装置を用いた場合には、LRBの場合に対して、変位応答が30～50%程度低減しており、その効果が確認できた。

## 参考文献

- 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル（案），（財）土木研究センター，1992
- 小川一志、齊藤敏雄、玉木利裕：変位制御装置付き免震支承の開発、土木学会第51回年次学術講演概要集、第1部(B)，pp.104-105, 1996
- 日本機械学会：機械工学便覧、1987

(1996年9月14日受付)

## ISOLATOR WITH DISPLACEMENT RESPONSE CONTROL DEVICE

Fujikazu SAKAI, Kazushi OGAWA, Toshio SAITOU, Toshihiro TAMAKI, Junnichi YABE

Several highway bridges have been damaged severely during the Great Hanshin earthquake. In the highway bridges which are isolated by LRBs (Lead Rubber Bearings) or High-damping Rubber Bearings, large amplitude of horizontal displacement response (30~70cm) possibly will be caused by the earthquake of a class of Great Hanshin earthquake. The design of expansion joints of such a bridge will become difficult. The authors are developing a new type of isolators with displacement response control device for isolated bridges. The device suppresses the response of the bridge using energy dissipation of the friction. In this paper the earthquake response analysis of the bridge with the device and the experiments of the friction of the device are discussed.