

I-71

振動実験によるLRBの振動特性について

鹿島技術研究所 ○正会員 南 浩郎
鹿島技術研究所 正会員 山野辺慎一
パシフィックコンサルタンツ F会員 林 亜紀夫

1. はじめに

鋼製免震支承と鉛プラグ入り積層ゴム支承（以下、LRB）の動的応答の周波数依存性および動的復元力特性の把握を目的とし、上部構造を表現する上載荷重を支承で支持する試験体を用いた振動実験を行った。本報告では、上記のうちLRBを用いて行った振動実験について記述する。

2. 実験供試体および実験装置

本実験に使用したLRBを図-1に、諸元を表-1に示す。また、図-2に実験装置の全体図を示す。振動実験は、アクチュエータ（動的荷重：±200tf、ストローク：±15cm）の動きを、てこを用いて振幅を増幅させ、振動台を加振した。また、LRBが負担する上部構造の慣性力を大きくするため、上部構造を支持するLRBは片側2点とし、他方の支持は水平ローラによるものとした。

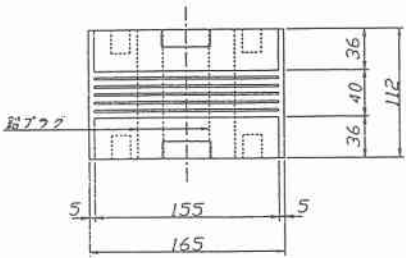


図-1 実験に使用したLRB

表-1 LRBの諸元

諸元	特性値
平面形状	155×155mm
高さ	40mm（ゴム5mm×6層，内部補強鋼板2mm×5枚）
鉛プラグ面積	平面形状の5.8%（=1385mm ² ）
鉛プラグ形状・本数	φ21.0mm×4本
せん断弾性係数	8 kgf/cm ² （ゴム）
支圧応力度	20.8 kgf/cm ² （上載荷重：20tonf） （許容値：15～80 kgf/cm ² ）

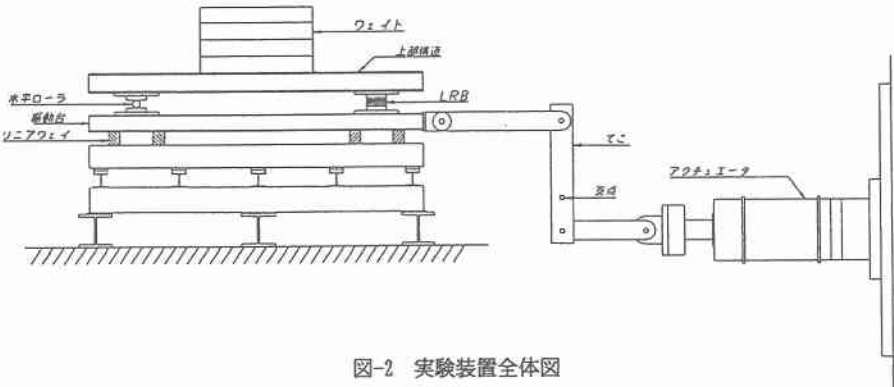


図-2 実験装置全体図

Study on a characteristic of a Lead Rubber Bearing(LRB) under shaking table test
by Hiroshi MITAMURA, Masashi SATOH, Shinichi YAMANOBE, and Hiroo MINAMI

3. 静的繰返しせん断載荷試験

振動実験に先立ち、LRBの製作工場にて実験に使用する支承2体の静的繰返しせん断載荷試験を行い、等価剛性、等価減衰定数を算出した。

載荷には正弦波を用い、載荷回数は10サイクルとした。また、載荷変位は、せん断ひずみ50、100、150、200%の4段階とし、載荷速度は最大値2.0cm/sとした。等価剛性、等価減衰定数の算出に際しては、10サイクルの載荷のうち、4～10サイクルの平均値を用いた。なお、試験時のLRBの面圧は、振動実験と同じとなるように約21kgf/cm²とした。

試験結果を表-2に、履歴曲線を図-3に示す。また、等価剛性と等価減衰定数を「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」²⁾による計算値と比較して図-4に示す。等価剛性については、せん断ひずみ50%のケースでは、計算値より17%小さいが、その他のケースでは、その差は3%程度である。また、等価減衰定数については、せん断ひずみ150%付近ではほぼ計算値に等しいが、それよりせん断ひずみが小さい範囲では計算値より大きく、逆にせん断ひずみが大きい範囲では計算値より小さい。すべての領域における等価減衰定数と計算値との差は10%程度である。

表-2 試験結果

試験体	有効変形量 (mm)	有効せん断 ひずみ	免震支承の 等価剛性 (t/cm)	免震支承の 等価減衰定数
No. 1	15	0.5	1.355	0.271
	30	1.0	0.900	0.249
	45	1.5	0.685	0.191
	60	2.0	0.633	0.159
No. 2	15	0.5	1.276	0.285
	30	1.0	0.894	0.250
	45	1.5	0.690	0.227
	60	2.0	0.630	0.156

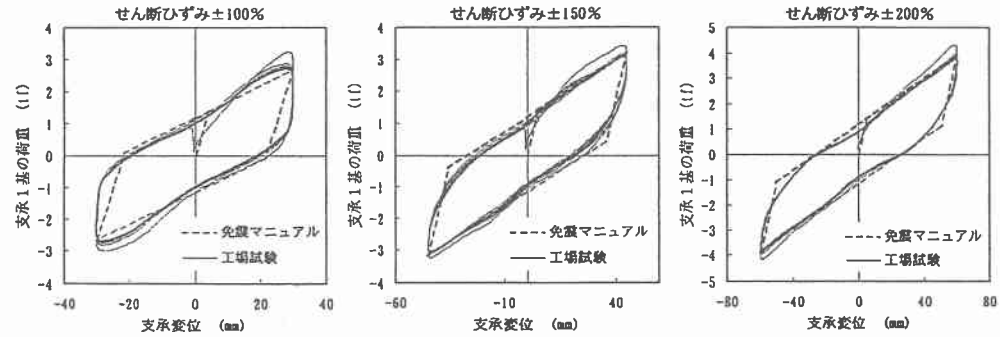
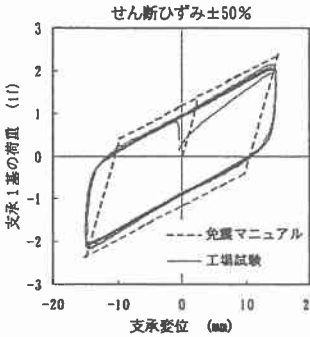


図-3 履歴曲線

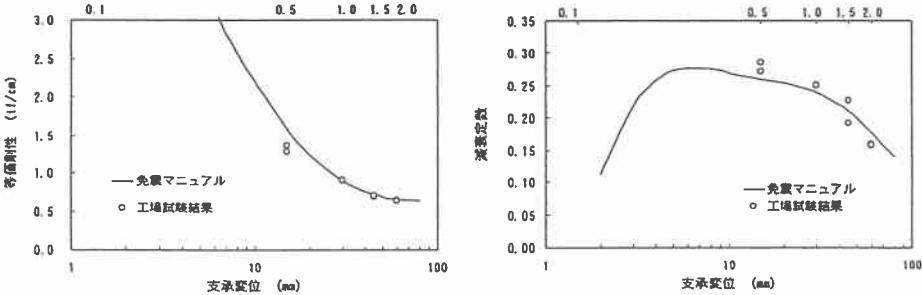


図-4 等価剛性と等価減衰定数の比較

4. 正弦波加振実験

L R Bと上部構造で構成される振動系の共振曲線を求め、振動系の卓越振動数を把握すると共に、L R Bの動的加振時の振動特性を把握する目的で、正弦波加振実験を行った。実験は、表-3に示す振動台振幅と振動周波数の組み合わせで、振動周波数を0.1Hz毎に増加して行った。図-5に共振曲線を示す。また、図-6には、各振動台振幅での共振点におけるL R Bの水平変位と水平力の履歴曲線を、表-4には履歴曲線から得られたL R Bの等価剛性、2次剛性、等価減衰定数を示す。

図-5からも明らかなように、L R Bの水平変位の増加に伴いせん断剛性が低下し、共振点の振動数は低くなる。図-6の履歴曲線内の波線は、「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」²⁾に従い、最大水平変位が等しくなるように算出したL R Bの履歴曲線である。実験で得られた履歴曲線と比較して、2次剛性は両者ともほぼ等しいが、履歴曲線の面積すなわちL R Bの吸収エネルギーは実験の方が小さくなっている。L R Bについては、繰り返し载荷により等価剛性、等価減衰定数が低下することが確認されており³⁾、今回の実験でも大変位で繰り返し载荷を行ったために、その影響が現れたものと考えられる。

表-3 正弦波加振実験

No.	上載荷重	振動台振幅	周波数範囲
1	20tf	6mm	0.1~5.0Hz
2		12mm	0.1~3.0Hz
3		18mm	0.1~2.0Hz
4		30mm	0.1~1.5Hz
5		30mm ^{*)}	0.1~1.5Hz
6	10tf	12mm	0.1~3.0Hz
7		18mm	0.1~2.0Hz
8		30mm	0.1~1.5Hz
9	0tf	6mm	0.1~5.0Hz

*)全実験終了後に実施

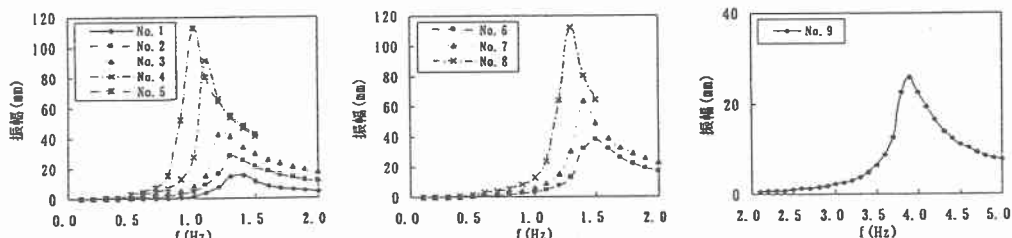


図-5 共振曲線

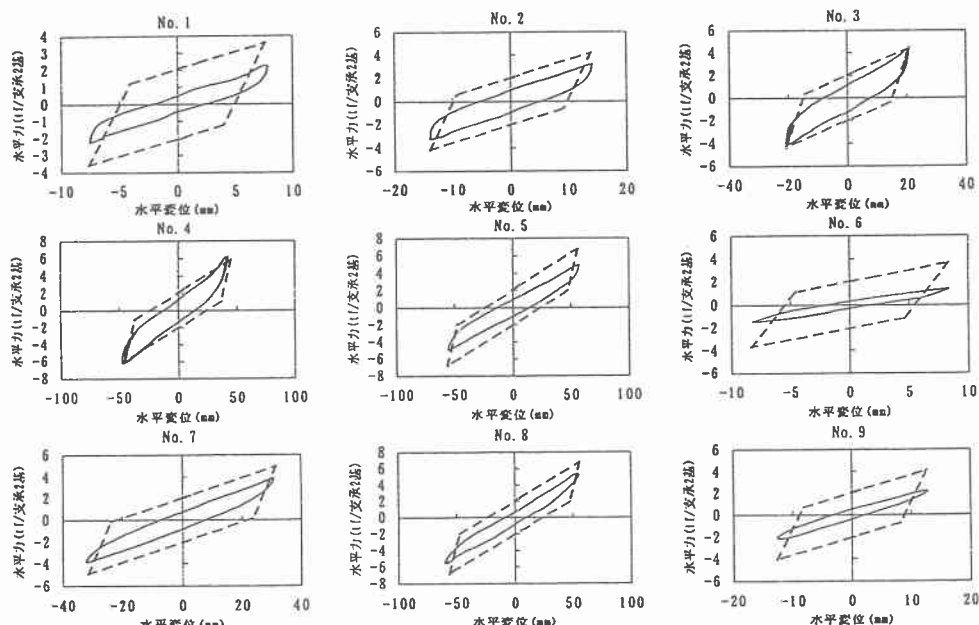


図-6 L R B履歴曲線

5. ランダム波加振実験

ランダム波で加振した状態でのLRBの動的復元力特性を把握するためにランダム波加振実験を行った。ランダム波としては、成分周波数0.5~10Hzの間のフーリエ振幅が一定となるようなピンクノイズ、地震波として北海道東方沖地震での温根沼大橋および兵庫県南部地震での神戸海洋気象台の各地震記録、そして模擬波として北海道3大地震平均⁴⁾を入力した。また、LRBの振動特性の温度依存性を確認するために、常温での実験のほか、支承表面温度を-10℃、-20℃とした場合についての実験も併せて行った。

各ランダム波を入力波として振動実験(上載荷重 20t)を行った際の、振動台と上部構造の加速度波形と加速度のフーリエスペクトル、周波数伝達関数、およびLRBの水平変位と水平力の履歴曲線を図-7示す。

上部構造の応答加速度は、いずれも振動台加速度に比べ大きく低減している。また、上部構造加速度のフーリエスペクトルをみると1Hz付近にピークがあるものの2Hz以上の成分は急激に減少しており、LRBによる振動の長周期化の効果が確認できる。履歴曲線内の波線は支承表面温度を-20℃とした場合の履歴曲線であるが、支承を冷却することによって、せん断剛性が增加することが確認できる。

図-7の履歴曲線から、LRBの1次剛性および2次剛性を求めてバイリニアのモデルを作成し、振動台加速度を入力として解析を行った結果を図-8に示す。図-8は、LRBの相対変位が最も大きかった、ピンクノイズを入力したケースを一例として示したものであるが、実験値と解析値は良く一致する。

6. まとめ

LRBの動的応答の周波数依存性および動的復元力特性の把握を目的とし、上部構造を表現する上載荷重をLRBで支持する試験体を用いた振動実験を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- ①正弦波加振実験を行った結果、振幅の増加すなわちLRBのせん断ひずみの増加に応じてLRBのせん断剛性が低下し、共振点の振動数が低下した。
- ②正弦波加振実験でのLRBの履歴曲線と「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」による計算値を比較

表-4 正弦波加振実験結果一覧

No.	共振振動数 (Hz)	振幅 (mm)	等価剛性 (t/f/m)	2次剛性 (t/f/m)	等価減衰定数
1	1.4	15.3	291.3	209.3	0.130
2	1.3	27.9	228.1	171.0	0.167
3	1.2	41.8	208.3	142.8	0.165
4	1.1	90.8	141.7	97.0	0.133
5	1.0	112.5	89.5	71.1	0.107
6	1.5	16.7	174.7	158.6	0.125
7	1.4	63.2	123.6	104.5	0.113
8	1.3	112.3	95.8	82.3	0.080
9	3.9	25.4	171.5	157.1	0.108

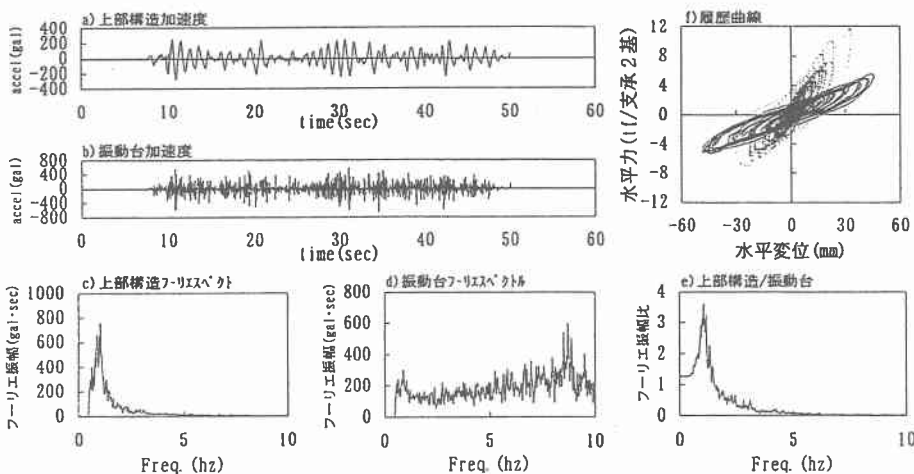


図-7 (I) ランダム波加振実験結果 (ピンクノイズ)

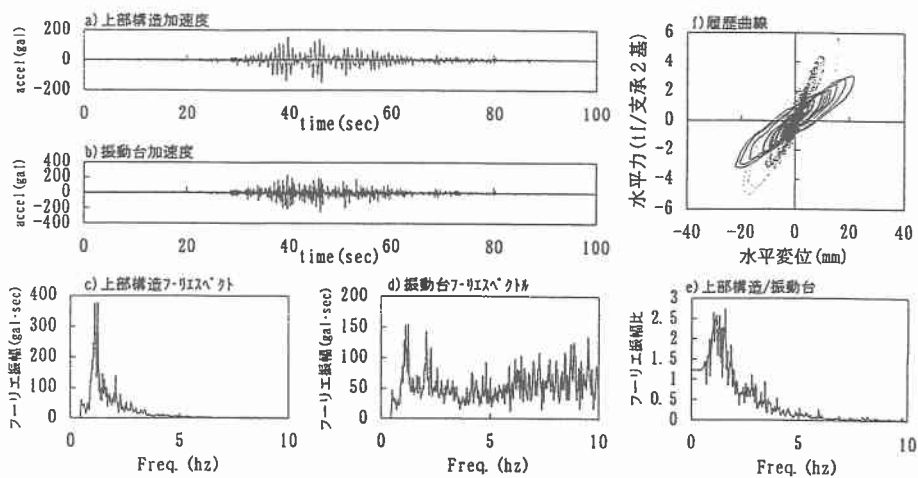


図-7 (2) ランダム波加振実験結果 (温根沼大橋観測波)

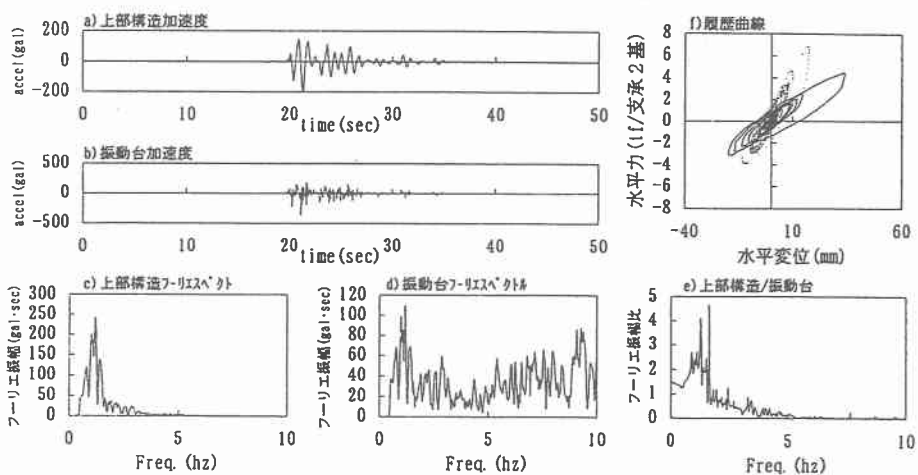


図-7 (3) ランダム波加振実験結果 (神戸海洋気象台観測波)

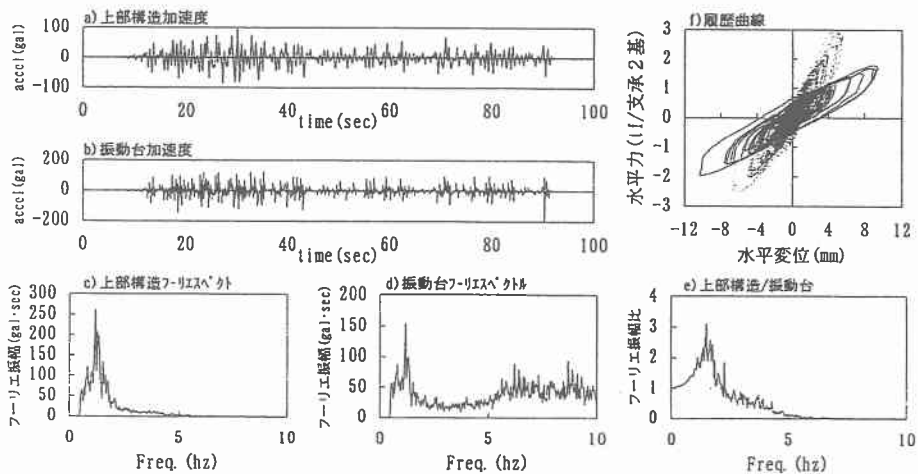


図-7 (4) ランダム波加振実験結果 (模擬波)

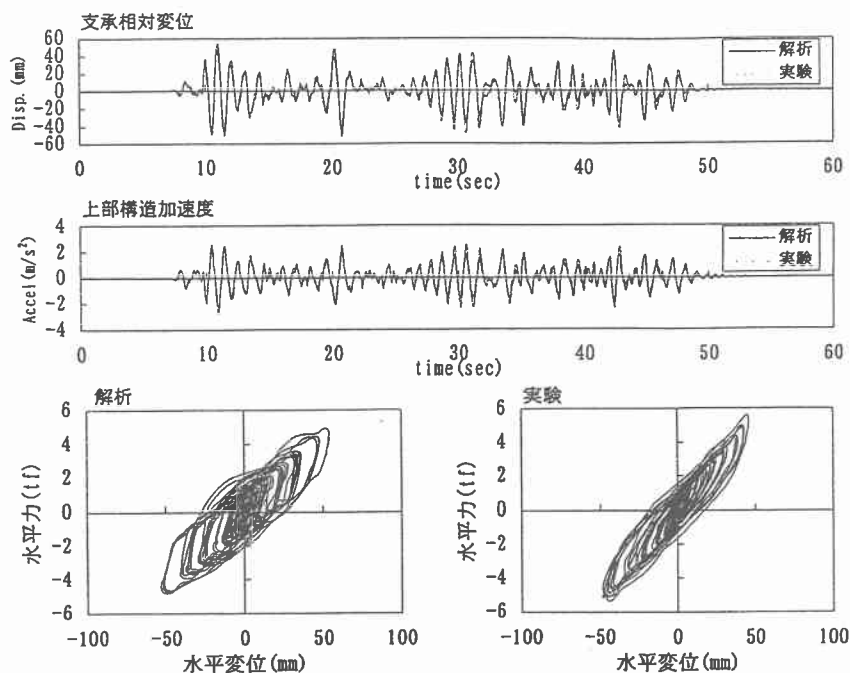


図-8 実験値と解析値の比較（ピンクノイズ，上載加重 20tf）

すると，LRB製作時に行った静的繰り返しせん断荷試験では良く一致していたが，正弦波加振実験では，2次剛性は同程度であるのに対し降伏点の荷重が低下し履歴曲線の面積が小さくなった。これは，大变位でのLRBの繰り返し載荷による疲労が原因であると考えられる。

③ランダム波加振実験を行った結果，上部構造の応答加速度の低下や応答の長周期化など，LRBの免震効果が確認できた。

④LRBを -20°C に冷却した場合，せん断剛性の増加が認められた。

⑤実験で得られたLRBの履歴曲線から，1次剛性，2次剛性，降伏変位を求め，これを用いてLRBのバイリニアモデルを作成し，非線形時刻歴応答解析を行った結果，実験値と解析値は良く一致した。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V編、平成8年12月
- 2) (財)土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル(案)，平成4年12月
- 3) 建設省土木研究所：免震支承の動的特性に及ぼす温度依存性および疲労特性に関する実験的研究，土木研究所資料，平成8年11月
- 4) 畑一洋，島田武，小林将，金子孝吉：北海道の3大地震を用いた動的解析における確率加速度と疑似地震波，土木学会北海道支部論文報告集 第54号(A)，pp.180～183，平成9年2月