

# (124) 電力施設に適用する免震装置の実験的研究

東京電力㈱○鈴木英世 海津信廣

㈱奥村組 竹内幹雄 高橋一成 有井孝典

## 1. まえがき

近年、重要構造物の耐震性向上を目指して免震システムの研究が数多く行われている。筆者らも、電力施設を対象に免震装置の導入を検討しており<sup>1)</sup>、これまでに免震装置の最適設計に関する基礎検討を行ってきた<sup>2)</sup>。今回は、解析で求めた最適物性値を有する免震装置を製作し、基本的特性を把握するために振動台模型実験ならびに数値シミュレーションを行ったので、その結果について報告する。

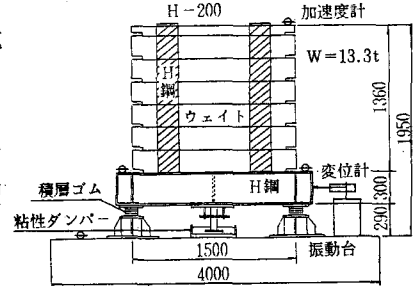


図-1 試験装置

## 2. 実験概要

図-1に試験装置の構造および計測器配置を示す。試験体は全重量約13.3tの鋼製ウェイトで構成されており、剛体として挙動するようにH形鋼で固定されている。今回用いた免震装置は、積層ゴムのみ、積層ゴム+粘性ダンパー、積層ゴム+鋼棒ダンパーの3種類である。積層ゴムは試験体の四隅に配置し、粘性ダンパーと鋼棒ダンパーは試験体中央に取付けた。本実験で適用した相似律は表-1に示すとおりであり、積層ゴムの面圧が実物と1:1になるよう配慮した。

積層ゴムには天然ゴムを用い、表-2に示す諸元から構成されており、実物での固有周期が2秒になるように相似律からバネ定数を設定している。

粘性ダンパーの構造を図-2に示す<sup>3)</sup>。抵抗板と受け皿及び粘性体で構成されたせん断型粘性ダンパーであり、クリアランスを変化させることによりせん断抵抗力の調整が可能なものである。

鋼棒ダンパーの構造を図-3に示す。鋼棒(SS41)とボールジョイントから成り、変形に応じて鋼棒が抜け出すように工夫されている。

両ダンパーとも本実験に先立ち単独の要素実験を行い、解析上得られた最適物性値<sup>2)</sup>に近い値となるように設定した。粘性ダンパーは、減衰定数 $h$ が0.2程度になるようにクリアランスを $d=3.5\text{mm}$ に、鋼棒ダンパーは、降伏震度 $q_y$ (降伏せん断力/試験体重量)が0.04程度になるように鋼棒の長さを $\ell=13\text{cm}$ に設定した。

## 3. 実験結果

各免震装置の自由振動実験の結果を図-4に示す。これは試験体に各共振振動数の正弦波を3波入力した後、自由振動させたも

表-1 相似律

|      | 縮尺モデル                     | 実物         |
|------|---------------------------|------------|
| 長さ   | $L_m = L_p / 3$           | $L_p$      |
| 時間   | $T_m = T_p / \sqrt{3}$    | $T_p$      |
| 変位   | $\delta_m = \delta_p / 3$ | $\delta_p$ |
| 加速度  | $\alpha_m = \alpha_p$     | $\alpha_p$ |
| 振動数  | $f_m = \sqrt{3} f_p$      | $f_p$      |
| 鉛直力  | $P_m = P_p / 9$           | $P_p$      |
| 面圧   | 1.0                       | 1.0        |
| バネ定数 | $K_m = K_p / 3$           | $K_p$      |

表-2 積層ゴム諸元

|         |                                                      |
|---------|------------------------------------------------------|
| 直径      | $\phi = 100\text{mm}$                                |
| ゴム厚     | $t = 2.5\text{mm} \times 14\text{層} = 35\text{mm}$   |
| 鉄板      | $t = 1.2\text{mm} \times 13\text{層} = 15.6\text{mm}$ |
| せん断バネ定数 | 91 kgf/cm                                            |
| 圧縮バネ定数  | 40000 kgf/cm                                         |

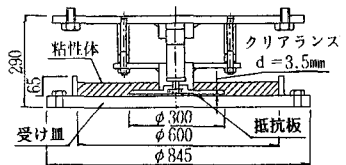


図-2 粘性ダンパーの構造

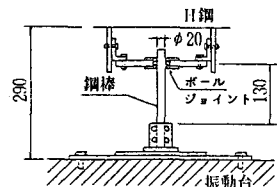


図-3 鋼棒ダンパーの構造

のである。時刻歴波形から、以下のことが読みとれる。積層ゴムのみの場合には減衰が小さいため残留振動がしばらく続く。減衰定数を対数減衰率から求めると  $h = 0.035$  となった。粘性ダンパーが付加された場合は、ダンパーによりエネルギーが吸収されすぐに振動がおさまる。鋼棒ダンパーの場合は、振幅が大きく鋼棒が塑性領域にある範囲では減衰が大きい、弾性領域では減衰が小さくなるので残留振動がしばらく続いている。

ヒステリシスで比較すると、積層ゴムの場合には減衰が小さく変位に対してほぼ線形の剛性を有することがわかる。粘性ダンパーでは、振幅に関係なく滑らかな履歴を有しているが、ヒステリシスの傾きは積層ゴムの場合より大きくなっている。これは抵抗板が動く際に伴って周囲に粘性体が盛り上がることで、粘性体の粘弾性的な性質等が影響しているものと考えられる。積層ゴム+鋼棒ダンパーでは、バイリニア形のヒステリシスを示している。第1勾配は鋼棒と積層ゴムの剛性の和となっており、第2勾配は積層ゴムの剛性とほぼ一致する。図-5に、各免震装置の水平方向と鉛直方向加振の共振曲線を示す。粘性ダンパーと鋼棒ダンパーを付加させた場合の共振振動数は1.30Hz、1.21Hzと、積層ゴムだけの場合(0.84Hz)より高くなっている。これは前述したダンパーにより付加される剛性によるものである。加速度応答倍率では、積層ゴムでは約9倍であるのに対し、粘性ダンパー・鋼棒ダンパーでは約2.5倍まで低減し、ダンパーが有効に働いていることがわかる。鉛直方向では、ダンパーの有無・種類に関係なく共振振動数はほぼ17.3Hzであり、加速度応答倍率も9倍前後である。当初の想定通り、粘性ダンパー・鋼棒ダンパーは、鉛直方向の剛性・減衰にはほとんど影響を与えないことがわかった。

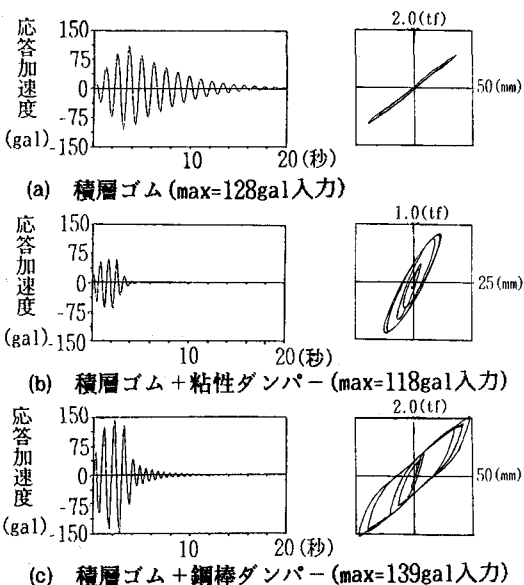


図-4 自由振動

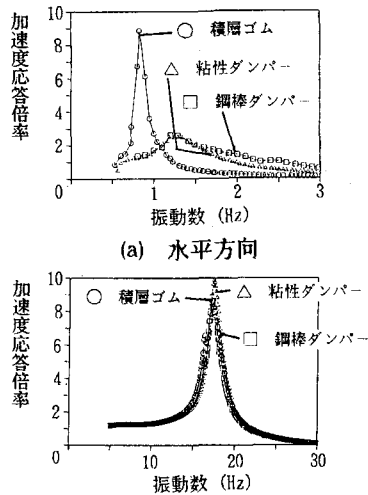


図-5 共振曲線

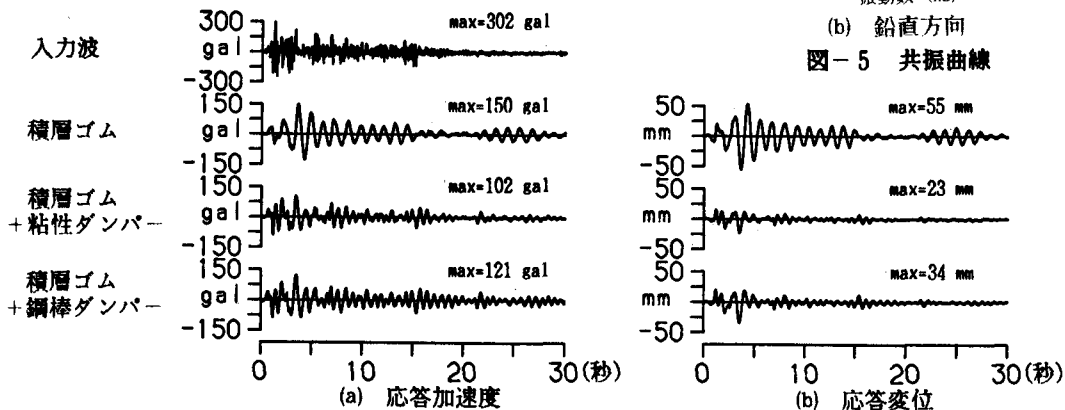


図-6 入力波と応答波形 (エルセントロ波 300gal入力)

各免震装置の地震波加振の結果を図-6に示す。入力波はエルセントロ波であり、最大加速度は300galとし、時間軸は相似律より $1/\sqrt{3}$ に縮小した。卓越振動数は2.0～4.0Hzである。どの応答加速度波形も入力波の持っている高振動数成分がカットされ、低振動数が卓越した波形となっている。最大応答加速度は、ダンパーがない場合でも固有周期が調節され、入力波に対して $1/2$ 程度に低減している。最大応答変位については、積層ゴムの場合にはダンパーがないために、55mmと大きな値となっているが、ダンパーを付加することによりその半分程度まで減少し、いずれのダンパーも高い免震効果があることを示している。

#### 4. 実験結果のシミュレーション

ダンパー単体の特性試験、自由振動実験、定常波加振実験の結果をもとに、地震波加振結果の数値シミュレーションを行った。

試験体はほぼ剛体的に挙動していることから、図-7に示すように1質点1自由度にモデル化した。また免震装置部は図-4の自由振動実験結果をもとにして図-8に示すようにモデル化した。解析に用いた物性値を表-3に示す。

各免震装置の運動方程式は以下のとおりとした。

##### (1) 積層ゴム

$$m\ddot{x} + c_R\dot{x} + k_Rx = -m\ddot{y} \quad (1)$$

$m$  : 試験体の質量  $c_R$  : 積層ゴムの粘性係数

$k_R$  : 積層ゴムのバネ定数  $\ddot{y}$  : 入力加速度

積層ゴムの粘性係数、バネ定数は線形と仮定し、自由振動実験の結果から物性値を設定した。

##### (2) 積層ゴム + 粘性ダンパー

$$m\ddot{x} + (c_R + c_D(\dot{x}_{\max}))\dot{x} + (k_R + k_D)x = -m\ddot{y} \quad (2)$$

$c_D(\dot{x}_{\max})$  : 粘性ダンパーの粘性係数

$k_D$  : 粘性ダンパーのバネ定数

ダンパーの粘性係数 $c_D$ は、特性試験結果より図-9のとおり最大速度の関数で表現でき、これを満足する $c_D$ を繰り返し計算で求めた。ダンパーのバネ定数は、変位に対して非線形であるが、振幅が大きくなればほぼ一定とみなせることから、特性試験結果より一定のバネ定数を与えた。

##### (3) 積層ゴム + 鋼棒ダンパー

$$m\ddot{x} + c_R\dot{x} + Q(x, t) = -m\ddot{y} \quad (3)$$

$Q(x, t)$  : 積層ゴム + 鋼棒ダンパーの復元力特性

降伏せん断力、第1剛性、第2剛性は、図-4のヒステリシスから求めた。なお、応答は線形加速度法により直接積分で求めた。

表-3 解析に用いた物性値

|                                 | 積層ゴム  | 積層ゴム<br>+ 粘性ダンパー | 積層ゴム<br>+ 鋼棒ダンパー |
|---------------------------------|-------|------------------|------------------|
| 質 量 $m$ (tf・s <sup>2</sup> /cm) | 0.014 | 0.014            | 0.014            |
| 第 1 剛 性 (tf/cm)                 | —     | —                | 1.67             |
| 第 2 剛 性 (tf/cm)                 | 0.36  | 0.59             | 0.36             |
| 降 伏 震 度 $q_y$                   | —     | —                | 0.04             |
| 積層ゴムの減衰定数 $h_R$                 | 0.035 | 0.035            | 0.035            |

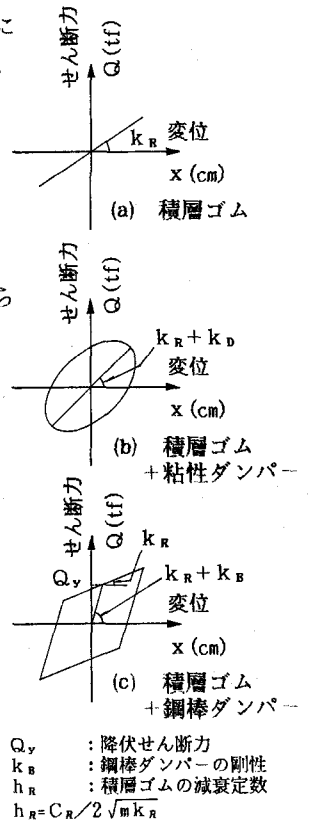
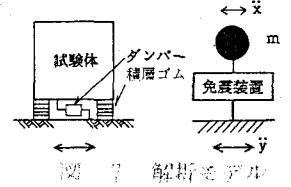


図-8 各免震装置のモデル化

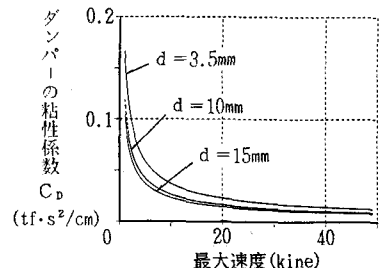


図-9 粘性係数と最大速度との関係

入力最大加速度を300galにした場合の、各免震装置の実験結果と解析結果の応答波形と応答加速度スペクトル( $h=0.05$ )を比較して、図-10, 11 に示す。積層ゴムの場合、最大応答値、波形とも良い精度で一致している。粘性ダンパー、鋼棒ダンパーの場合は、最大応答値で10%程度の差を示すものの、波形・スペクトルでは解析結果と実験結果はよい一致を示しており、このようなモデル化、物性値の設定法、解析方法は十分実用的であると考えられる。

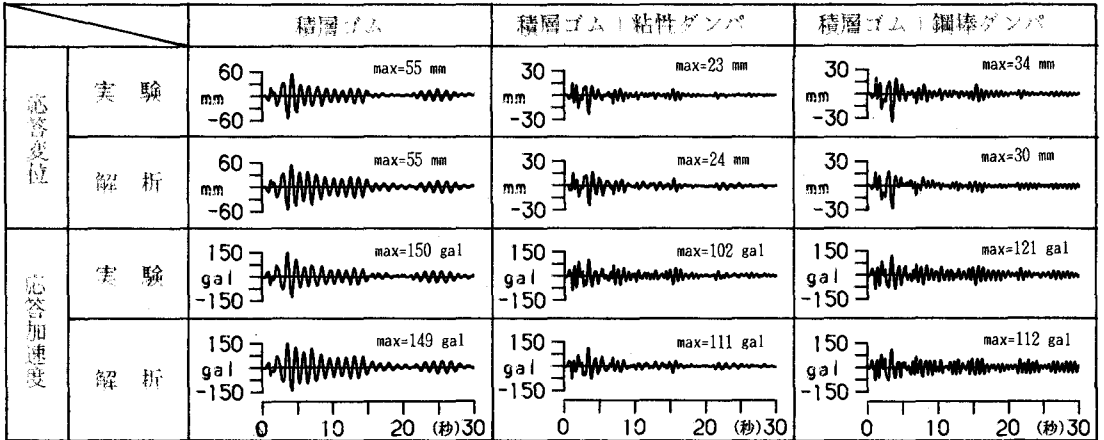


図-10 応答時刻歴波形の比較 (エルセントロ波 300gal入力)

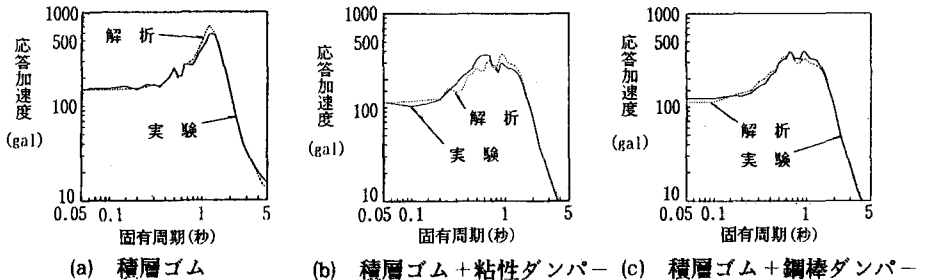


図-11 応答加速度スペクトルの比較 (エルセントロ波 300gal入力,  $h=0.05$ )

## 5. あとがき

解析上得られた各免震装置の振動特性、免震効果を振動台模型実験によって確かめることができた。また従来用いてきた解析手法によって実験結果を良い精度でシミュレーションすることができ、その実用性を検証することができた。なお摩擦ダンパー・高減衰積層ゴムを使った実験も実施しており、今後各種免震装置の詳細な比較・検討を実施し、免震システムを総合的に検討していく予定である。

最後に、本文をまとめるに当たり丁寧な御指導を賜りました、久保慶三郎東京大学名誉教授、ならびに粘性体の製作に御協力頂いた出光興産㈱の関係各位に深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 海津・堀口・真柴：変電機器の免震装置の開発，第7回日本地震工学シンポジウム，pp.1645～1650，1986年11月。
- 2) 鈴木・竹内他：免震装置の最適設計に関する基礎検討，構造工学論文集，Vol.35A，pp.621～627，1989年3月。
- 3) 三宅・相沢・速水：積層ゴムを用いた免震支持装置の検討エネルギー吸収装置の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.895～896，1983年9月。