

着地部に適切な摩擦係数 μ の材料を使って滑り構造とすると、変位比例型のせん断摩擦抵抗が得られて従来のダンパ機能も期待できることとなる。設計に当たり、着地装置の鉛直剛性を適度に弾性特性 (ソフト) にして上部構造に対する着地時の衝撃緩和策となし、積層ゴムの環境温度変化による伸縮やクリープの吸収をはかる。

3. 限界特性試験

3.1 試験体

試験体は、重量 200 tf を支持する天然ゴム系積層ゴム ($\phi=500$ mm, 面圧 100 kgf/cm²) を想定しこの1/7縮小モデルとして製作した。上部構造体は、振動台に乗せた状況を写真-1 に示すが、RC 造 9.8 tf とその頂部に乗せた鋼板 6.6 tf からなり総重量 16.4 tf である。頂部重量を大きくしてロッキング振動の検証も調査目的としている。

積層ゴムの形状を図-2 に示す。面圧 100 kgf/cm², 直径 70 mm, ゴム厚さ 1 mm, 総厚 14 mm, 許容変位約 25 mm, 1次, 2次形状係数16.8, 5.0であり, ゴムの総厚 14 mm をせん断ひずみ100%として, 実機のせん断ひずみ100%に換算すると約 10 cm となる。

ソフトランディング装置の形状を図-3 に示す。同装置は構造体側に取り付けられ, 下側に解放された鉄容器内に, 滑り材料としての厚さ 30 mm, 直径 106 mm のテフロン, 鉛直剛性を調整するためのゴムシートと, 荷重計が直列配置で収納されている。テフロン部は地盤側に敷かれた厚さ 3 mm の鏡面仕上げステンレス板上を滑る。

ソフトランディングは鉛直方向の特性に関して次の条件を満たすように設計した。

- ① 上部構造の荷重を支持できること。
- ② 積層ゴムの温度収縮 (0~25°C) : ± 0.035 mm, 同ゴムの60年クリープ量: -0.56 mm の計 0.595 mm の鉛直ひずみ変動に追従できること。
- ③ ダンパ機能に変わる摩擦抵抗力を早期に得るため若干の初期面圧をかけること。
- ④ 鉛直剛性は積層ゴムのそれ (約 100 tf/cm) の半分程度乃至以下とすること。

条件④については文献⁴⁾で, 実機の免震周期 $T=3\sim 5$ 秒で, ソフトランディングの摩擦係数, 同鉛直振動数をパラメータとして検討し, $u=0.1\sim 0.2$, $s_f v=5$ Hz 程度以上で良好な応答加速度および変位が得られること示している。今回ケーススタディから, ソフトランディングの鉛直剛性 sk_v の最適値は約 30 tf/cm, また, ③の初期荷重は 0.1~0.2 tf が良い傾向を得た。

3.2 特性試験

積層ゴムは14個製造し, その内 2 個を用いて軸力零でせん断破壊試験を行った結果, その 1 例を図-4 に示すように, 約 40 mm (せん断ひずみ285%) よりハードニングを起こし, 破断ひずみはそれぞれ450%, 550%であった。

試験体を大型振動台に組立後, ソフトランディング 4

個にそれぞれ初期面圧 0.2 tf を与えて, 油圧ジャッキを用いて静的加力試験と, 振動台で動的加振試験を行った。このせん断力と変位の関係において両者の履歴ループが対応することを確認したので, 本報告では動的試験結果を代表して述べる。

動的特性の試験は, 1次, 2次固有振動数 ($f_1=0.99$ Hz, $f_2=14.2$ Hz) を確認して後, 1次固有振動数で振動台に入力する正弦波の振幅を漸時大きくして, せん断ひずみ約400%の水平変位 56 mm 程度までを目標に行った。計測された水平変位と割線剛性および減衰定数の関係を,

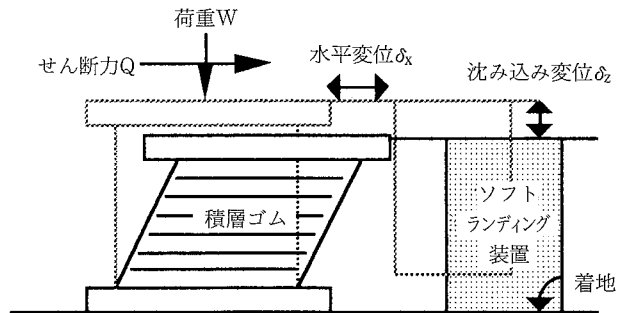


図-1 ソフトランディングの概念図

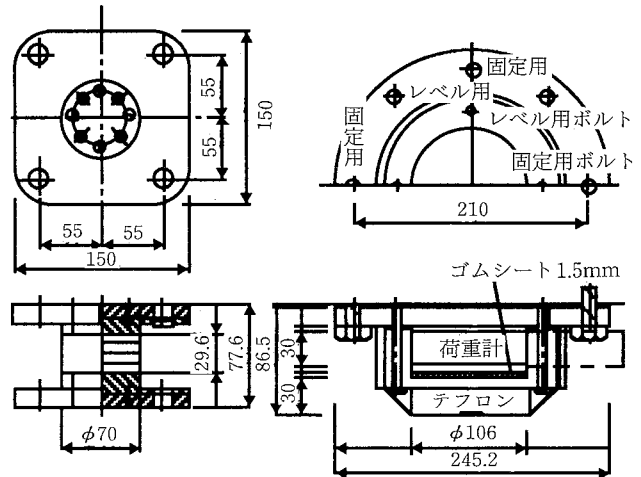


図-2 積層ゴム試験体

図-3 ソフトランディング試験体

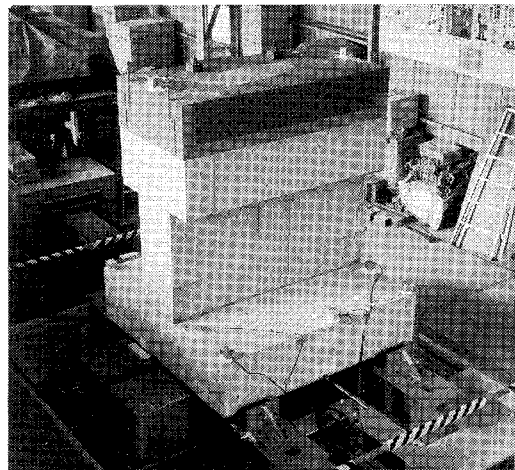


写真-1 試験体図

積層ゴム支持の場合と、積層ゴム+ソフトランディングの場合について図-5 (a), (b)に示す。この積層ゴムの減衰定数($h=C/C_c$)は、自由振動試験、履歴ループ面積の等価減衰評価法などから求めた結果、図-5 (a)●印に示すように、 $h=5\sim 10\%$ 程度であり、天然ゴム系であるにもかかわらず高減衰積層ゴムの特性に近寄った値であることがわかった。

積層ゴム+ソフトランディングの場合の等価減衰定数は、図-5 (b)より、 $h=15\sim 25\%$ と大きい。水平変位が100 mm までは初期面圧による摩擦抵抗が効いて大きい。ソフトランディングにかかる荷重が大きくなると摩擦抵抗力も大きくなり減衰性が増加する。

積層ゴム支持の場合の水平変位とせん断力、水平変位と沈み込み鉛直変位の関係をそれぞれ図-6 に示し、また、積層ゴム+ソフトランディング支持の場合の結果を図-7 に示す。双方の図(a)を比較すると、ソフトランディング支持で大きな履歴ループ面積を描くことが分かる。図(b)では、加振方向の前・後の測点の軌跡を示しているが、上部構造の慣性力により転倒モーメントを受ける圧縮側の積層ゴムが大きく沈み込み、引っ張り側となる積層ゴムはほとんど鉛直変位が生じないことが分かる。なお、鉛直変位が約+4 mm になると積層ゴムに引き抜きが生じることとなるが、引っ張り側は0.4 mm 以下で十分小さい。また、双方の変位50 mm 付近の鉛直変位を比較すると、積層ゴム単独の場合が最大-1.7 mm (水平変位と鉛直変位がなす傾斜角 $\tan\theta=(1.7+0.3)/100$)、ソフトランディング付与の場合が-0.9 mm (同、 $\tan\theta=(0.9+0.3)/100$) となり、沈み込みが抑制されている。

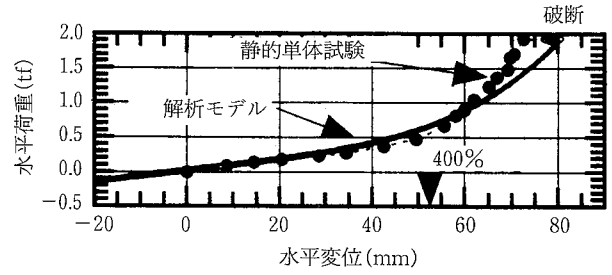
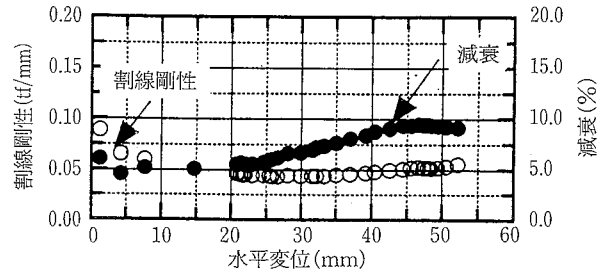
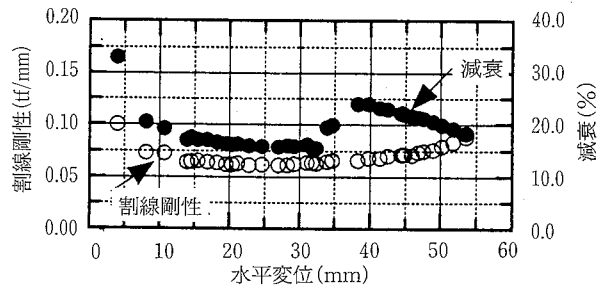


図-4 積層ゴム水平方向の静的加力試験結果と解析に用いた水平変位～水平荷重の関係

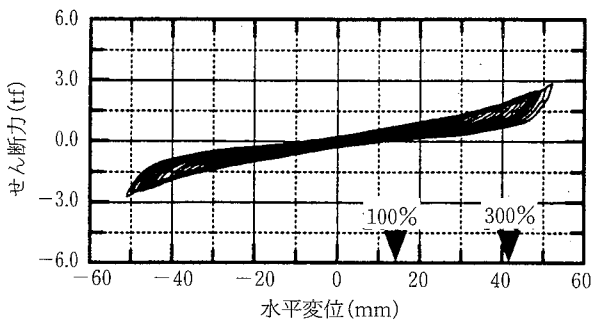


(a)積層ゴムのみ試験体

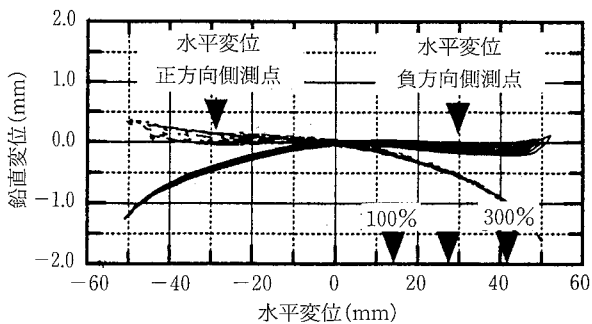


(b)積層ゴムとソフトランディング試験体

図-5 免震装置の剛性と減衰

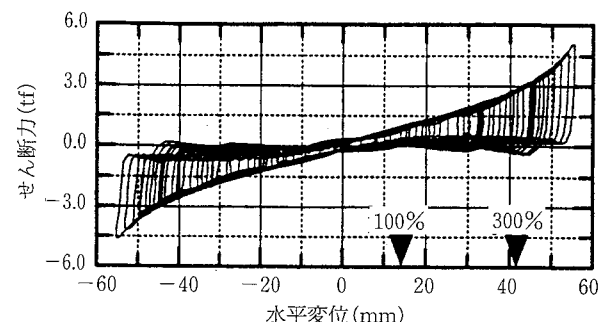


(a)水平変位とせん断力

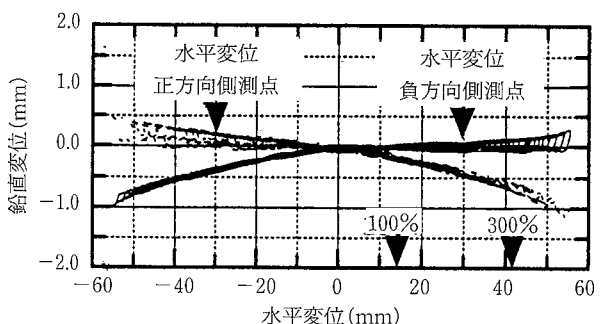


(b)水平変位と沈み込み

図-6 積層ゴムのみで支持された試験体の特性



(a)水平変位とせん断力



(b)水平変位と沈み込み

図-7 積層ゴムとランディング支持された試験体の特性

3.3 解析方法

解析モデルは、上部 RC 構造を剛体とし、積層ゴム 2 箇所の水平および鉛直自由度、ソフトランディング 2 箇所の水平および鉛直自由度を考慮したロッキング・スウェーイ振動モデルである。この運動方程式を以下に示す。

$$m(\ddot{\delta} + h\ddot{\theta}) + c(\dot{\delta} + h\dot{\theta}) + Q(\delta) = -m\ddot{y}$$

$$I_G\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} + (k_R(\delta, P) + k_H(\delta, P)h^2)\theta - Q(\delta)h = 0$$

$$Q(\delta) = \sum_{\text{landing}} \mu(P_i) + \sum_{\text{rubber}} k_{hi}(\delta, P_i)\delta$$

$$P_i = k_{vi}(\delta) \left(\frac{1}{\sum (k_{vi}(\delta))} \left(mG + \sum_j k_{vj}(\delta)(\ell_{Vj} - \ell_{Vj}) \right) + \ell_i \theta \right)$$

$$k_H(\delta) = \Delta Q(\delta) / \Delta \delta, \quad k_R(\delta) = \sum k_{vi}(\delta) \ell_i^2$$

ここに、 m は質量、 δ は免震層の水平変位、 θ は重心廻りの回転角、 μ はランディングの動摩擦係数、 k_h は各要素の水平バネ定数、 k_v は各要素の鉛直バネ定数、 G は重力加速度、 ℓ は各要素までの水平支点距離、 ℓ_v は鉛直バネ無負荷時から荷重を加え初めて接触するまでの距離、 ij は左右 2 個ずつのソフトランディングと積層ゴムを表す。

積層ゴムの水平剛性は、Lindley の水平剛性式に、ハードニングの効果をべき関数で表現するせん断バネ K'_H を採用した⁵⁾。

$$K_H = \frac{P^2}{2K_r \tan\left(\frac{qh}{2}\right) - Ph} \quad q = \sqrt{\frac{P}{K_r} \left(1 + \frac{P}{K_s}\right)}$$

$$K_r = E_{rb} \frac{h}{nt_r}, \quad K_s = GA \frac{h}{nt_r}$$

$$E_{rb} = \frac{E_r E_b}{E_r + E_b}, \quad E_r = 3G \left(1 + \frac{2}{3} k S_1^2\right)$$

$$K'_H = \left\{1 + a_1(a_2 + 1) \left(\frac{\delta}{nt_r}\right)^{a_2}\right\} K_H$$

ここに、 δ : ゴムの水平変形量、 h : 積層ゴム高さ、 G : ゴムの剪断弾性係数、 t_r : ゴム 1 層の厚さ、 n : ゴム層数、 A : ゴムの断面積、 I : ゴムの断面 2 次モーメント、 E_b : 体積弾性率、 k : ゴム硬度によって定まる定数(本解析では 0.825)、 S_1 : 1 次形状係数、 P : 軸力、 a_1 : ハードニングを性状を規定するパラメータ(同, 0.01)、 a_2 : ハードニングを性状を規するパラメータ(同, 3.0)

積層ゴムの鉛直剛性は、報告(その1)、(その2)で示した有効支圧断面積に比例して剛性を低下させる方法(評価1)と、曲げ剛性による沈み込み量を考慮する方法⁹⁾(評価2)がある。各々の式は以下のように設定される。ここで、 D : 積層ゴムの直径、 σ_{cr} : 単純圧縮載荷時の座屈応力を表す。

評価 1 :	評価 2 :
$E_a = \frac{E_0 E_b}{E_0 + E_b}$	$E_b = \frac{\sigma_{cr}^2}{G \left(\frac{ \delta }{nt_r}\right)^2}$
$E_0 = 3G(1 + 2kS_1^2)$	
$K_v = \frac{E_a A_{ef}}{nt_r}$	$E_{ap} = \frac{E_a E_b}{E_a + E_b}$
$A_{ef} = \frac{D^2 T_H}{4} - \frac{D \delta \sin\left(\frac{T_H}{2}\right)}{2}$	$K_v = \frac{E_{ap} A}{nt_r}$
$T_H = 2 \cos^{-1} \left(\frac{ \delta }{D}\right)$	

試験体の代表的な諸元は次のとおりである。上部構造は重心高さ $h = 136.8$ cm (試験体下部より)、重心回りの回転慣性 $I_G = 142/2$ tf \cdot cm⁴/sec²である。

積層ゴムのせん断弾性係数 G は、試験結果の 400% 変形までの割線剛性から逆算すると $G = 3.5$ kg/cm²、初期水平バネ定数は 0.8 tf/cm となる。減衰定数は、図-5(a)より 1 次モード減衰定数を 8%、2 次を共振検索結果より 1.4% とした。鉛直剛性 k_v は、積層ゴム支持状態の小振幅ロッキング 2 次固有振動数 14.2 Hz を表現できるように体積弾性係数 $E_b = 14.5$ tf/cm² を決めた結果、 $k_v = 105$ tf/cm となった。

積層ゴムの水平変形に伴う沈み込み量を、特性試験結果に基づいて評価 1 と評価 2 の方法で検討した結果、積層ゴムのせん断ひずみ 200% 程度までは両方法とも大差なく、300~400% と大きくなると、評価法 2 の方が剛性低下率を小さく評価し試験結果に近いことが分かり、解析では評価法 2 を適用することとした。

ソフトランディングのテフロン動摩擦係数は実測値から 0.15、鉛直剛性はソフトランディング単体の静加力試験試験のよる荷重変位曲線より 25 tf/cm とした。

3.4 地震波入力試験とその解析

3.4.1 地震波入力応答 入力地震波は、人工地震波を作成し、時間軸を縮尺率に合わせて $1/\sqrt{7}$ 倍して用いた。振動台試験の試験結果と解析結果について、積層ゴムの水平変位がせん断ひずみで 400% 前後の場合を代表して以下に示す。

積層ゴム支持の場合の時刻歴応答波形を図-8 に、水平変位とせん断力および沈み込みの関係を図-9 に示す。同図より入力最大加速度が 530.1 cm/sec² のとき免震層水平変位は最大 52 mm (370%) であり、変位 -28 mm (200%) 付近より沈み込み量が急増する傾向がみられる。

点線の試験値と実線の解析値とは水平応答加速度、応答変位などおおむね対応している。しかしながら時間軸 12~16 秒付近でせん断ひずみ 300% を越える付近で上下の沈み込み変位は解析値の方が大きい。この理由として、ひずみ 300% 以上について解析方法の精度不足か、あるいは今回使用した積層ゴムが超小型であるため実機クラスの解析法に乗り難いためと考えられる。解析に関しては図-9 を参考にして検討すると、解析変位が 60 mm で大きいことが分かり、もし水平変位が減少すれば、沈み込みが急増する変位域であるため、沈み込み量も対応して小さくなると考えられる。このことは大変形域の積層ゴムは単にハードニング剛性と粘性減衰で考慮するだけでなく、面積成分を持つ履歴特性として評価する必要性を示すものであろう。

積層ゴム+ソフトランディング支持の場合の応答波形を図-10 に示す。入力最大加速度が 902.3 cm/sec² で免震層水平変位が 53.4 cm (380%) であり、積層ゴム支持の場合の入力加速度の 1.7 倍である。また、水平変位と上下沈み込み変位は試験値と解析値と良く対応し、ソフトランディングの特性が強いため積層ゴムの特性の不確かさ

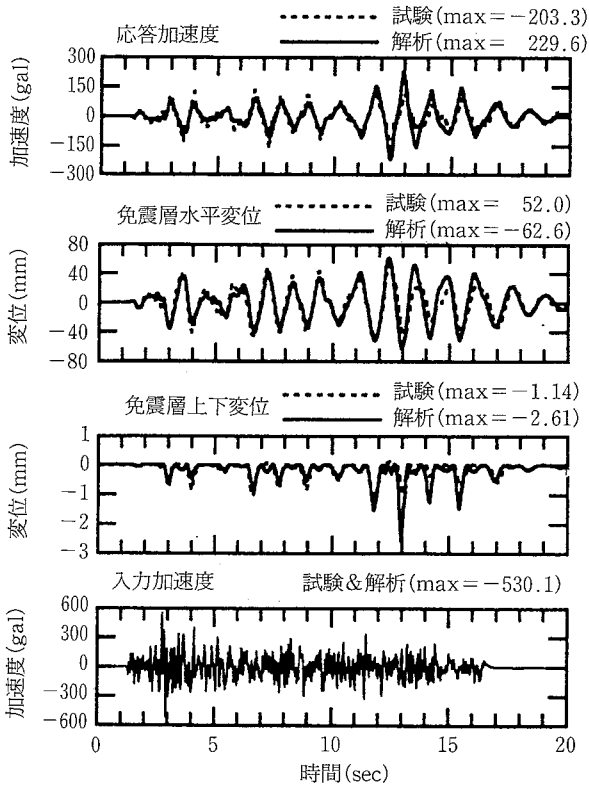


図-8 積層ゴム支持の時刻歴波形

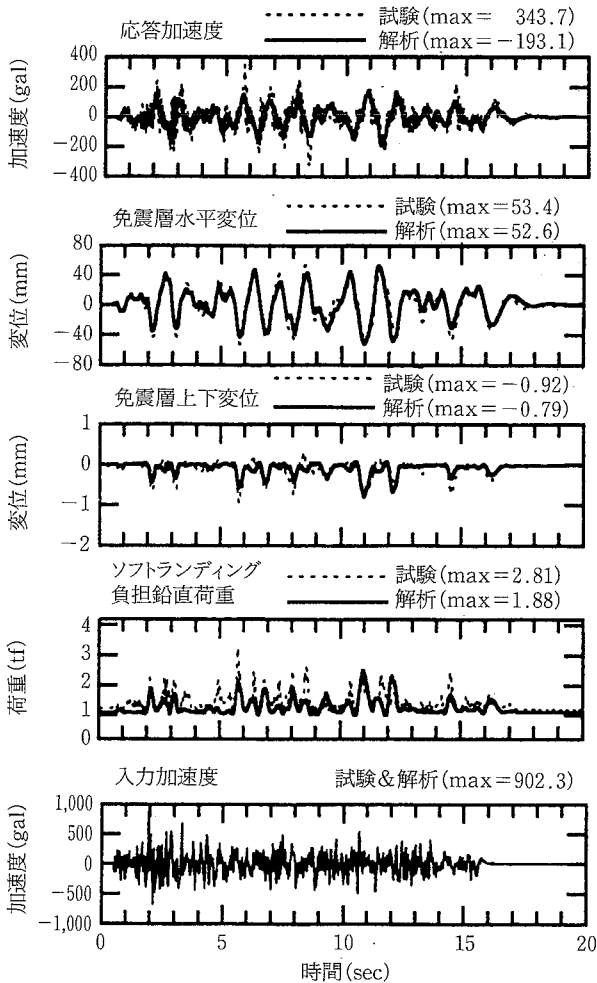
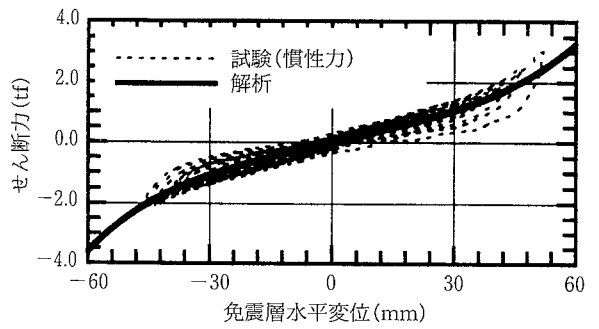
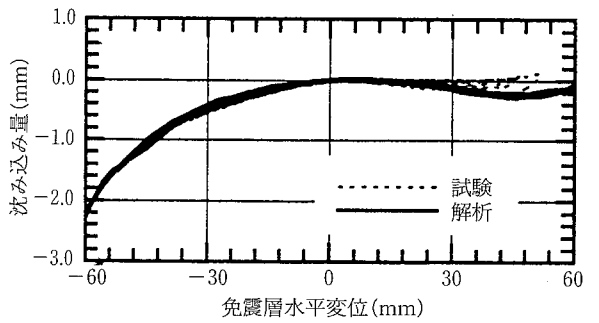


図-10 積層ゴムとソフトランディング支持の時刻歴波形

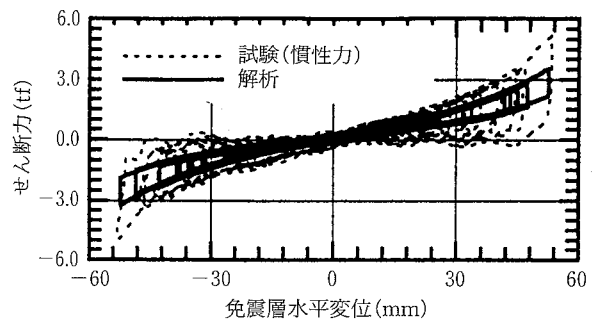


(a)せん断力と水平変位の関係

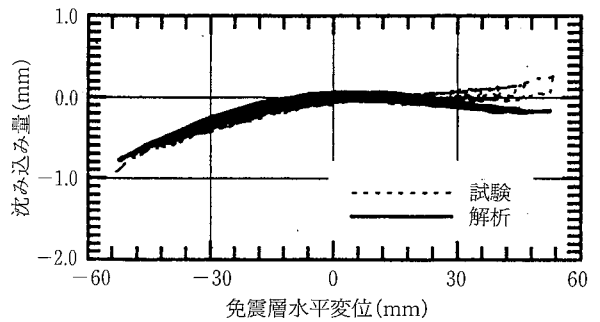


(b)鉛直変位と水平変位の関係

図-9 積層ゴム支持の特性曲線



(a)せん断力と水平変位の関係



(b)鉛直変位と水平変位の関係

図-11 積層ゴムとソフトランディング支持の特性曲線

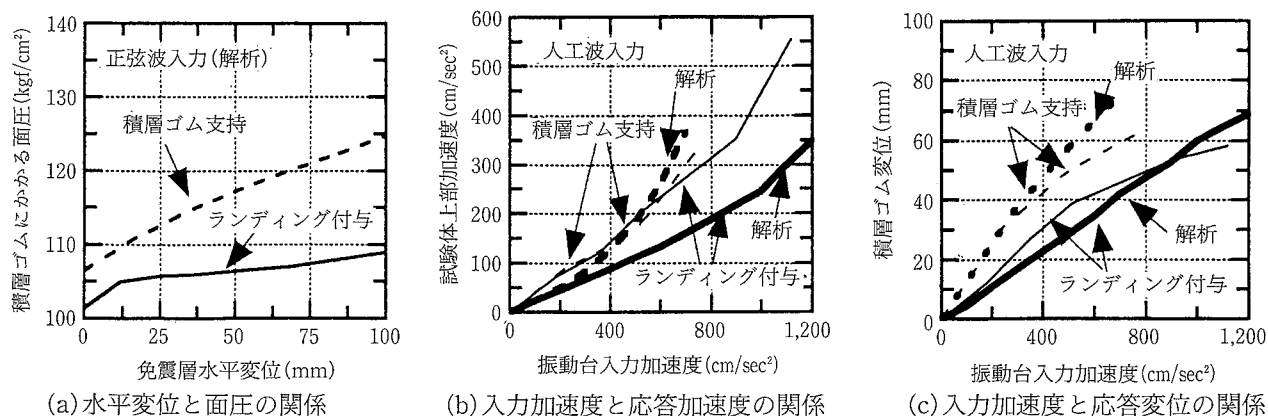


図-12 入力と面圧，応答加速度，変位の関係

が薄められる傾向にある。応答加速度は時間軸 6 秒および 8 秒の最大値付近で解析値の方が小さい。この現象はソフトランディング負担荷重の波形にも現れていることから、解析上、上下動の慣性力の影響を無視したためと考えられる。水平変位応答とせん断力および沈み込み特性を図-11に示す。図-11(a)に示す水平変位とせん断力の関係は、解析上、積層ゴスを履歴特性ではなく粘性減衰で考慮したため、試験値の方が面積が小さい。図-11(b)に示す沈み込み量は水平変位 55 mm で、積層ゴム支持の図-9(B)の場合の 1.6 mm と比較して、半分の 0.8 mm であり着地による沈み込み抑制機能が十分達成されている。

3.4.2 限界特性 図-12(a)に、積層ゴム支持および積層ゴム+ソフトランディング支持の場合の正弦波入力時の積層ゴムの面圧と水平変位の関係を示す。積層ゴム支持の場合には、上部構造の転倒モーメントの影響で圧縮側の積層ゴムは初期面圧 106 kg/cm²から変位 50 mm で約10%増となっている。ソフトランディング付与によりこの面圧増は少ない。

積層ゴム支持の限界はせん断破壊を含めゴムの終局状態によるものであった。ソフトランディング付与の場合には全てせん断破壊であった。地震波入力加速度を順次大きくして限界に達するまでの試験および解析結果を図-12(b), (c)に示す。その外の試験データも参考にすると、積層ゴムの限界変位は 50~62 mm (440%) で、ソフトランディング付与により 58~72 mm (510%) へ増加し、また入力最大加速度は 700~800 cm/sec²から 1,100~1,200 cm/sec²へと改善される傾向にあることが分かった。また、解析上、特に最大応答変位が良く再現されており、免震構造の計算法の信頼性に寄与するものと考ええる。

4. まとめ

積層ゴムは建物の支承としての重要性から、設計上、

十分安全な水平変形範囲内で使用されている。この変形を越えて破壊に至る領域の特性も工学的にかなり解明されている。しかし、ゴム材料が有機質材料であること、同一モールドで製造されても3.2で破断ひずみが異なったように特性も異なることなどの不確かさが残る。このような課題に対して、強震時に建物重量の支承機能を着地装置でバックアップすることは免震構造の信頼性向上に役立つであろう。本報告では、さらに着地装置にダンパ機能、着地時の衝撃緩和機能等々の多機能性をもたせてソフトランディングと名づけ、これに与えるべき特性、積層ゴムの破壊に至るまでの性能を試験および解析から検証したものである。

なお、この報告は、動力炉核燃料事業団との共同研究の一貫としての成果の一部である。同事業団・東海事業所建設工務管理室担当役の瓜生満氏、鈴木政美氏には全般的な協力を頂いており、ここに感謝します。

参考文献

- 1) 寺村 彰, 中村 嶽, 野畑有秀, 他: 免震装置のフェイルセーフ機構に関する研究 - フェイルセーフ装置の基本動特性一, 大林組技術研究所報, No. 41, p. 38~44, (1990)
- 2) 大平 満, 寺村 彰, 他: フェイルセーフ機構を有する免震構造体の地震応答特性, 第8回日本地震工学シンポジウム, p. 1719~1724, (1990)
- 3) 中村 嶽, 他: 免震装置のフェイルセーフ機構に関する研究 (その2) - 実機用ソフトランディング装置の性能試験一, 大林組技術研究所報, No. 48, p. 37~42, (1994)
- 4) 瓜生 満, 寺村 彰, 野畑有秀, 他: 防護装置を有する免震構造物の大変形時における応答特性 (その2 ソフトランディングタイプ), 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol. 2, p. 1801~1806, (1994)
- 5) 免震構造設計指針: 日本建築学会, (1993)
- 6) 飯塚, 笠原: 水平変位を受ける積層ゴムの鉛直剛性評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1994)