

# 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——

中村 嶽 寺村 彰 角田 智彦  
岡田 宏 安井 譲

## Study on Characteristics of Base Isolation System with Fail-safe Device (Part 2)

——Characteristic Tests of Practical-size Fail-safe Device——

Takashi Nakamura Akira Teramura Tomohiko Tsunoda  
Hiroshi Okada Yuzuru Yasui

### Abstract

A study on a fail-safe device of landing type “Soft-Landing” has been carried out to apply base isolated important buildings such as nuclear fuel facilities to secure the safety against excessive strong ground input motion. The Soft-Landing has a sliding surface on which the superstructure will be landing when lateral large deformation of the rubber bearing occurs. Two types of rubber bearings made of natural rubber and high-damping rubber with practical size Soft-Landing were used in experiments. The experiments consisted of static and dynamic tests, and several parameters such as the material of the sliding surface, load magnitude, and amplitude of lateral deformation were performed. The basic characteristics of Soft-Landing were investigated during static and dynamic tests. Further, its behavior was assessed during dynamic limit tests conducted under the conditions of large deformations occurring in the base isolation devices. Following the results of these tests and numerical simulation, it was concluded that Soft-Landing is applicable as a safety device for base isolation systems.

### 概 要

耐震重要度の高い核燃料施設等に免震構法を適用する際に、万一の過大入力に対する安全性を確保することを目的として、積層ゴムが水平方向に変形したときに沈み込む性質を利用して、上部建物を滑り面を有する支持台に軟着地させるランディングタイプのフェイルセーフ（ソフトランディングという）を開発している。

本報告は、天然ゴム系と高減衰ゴムの40 tf用積層ゴムを用いて、実大レベルのソフトランディングの滑り面の素材や支持荷重、水平加力の変位振幅などをパラメータとした静的および動的加力による基本特性試験、免震装置の大変形時の挙動を調べる動的加力の限界試験およびシミュレーション解析を行って、ソフトランディングの免震装置のバックアップ装置としての有効性を確認したものである。

## 1. まえがき

前報に引き続いて、耐震重要度の高い核燃料施設等に免震構法を適用し、耐震安全性の向上と設計の合理化を図る際に、積層ゴム免震装置の信頼性を確保するためのバックアップ装置として開発しているフェイルセーフ機構について報告する。積層ゴムが水平方向に変形したときに沈み込む性質を利用して、上部建物を滑り面を有した荷重支持装置に軟着地させる実大レベルのランディングタイプ・フェイルセーフ（以後ソフトランディングという）を開発し、天然ゴム系と高減衰ゴムの40 tf用積層ゴムを用いて、ソフトランディングの滑り面の素材や支持荷重、水平加力の変位振幅などをパラメータとした静的および動的加力試験により基本特性を調べた。また、動的加力の限界試験により、免震装置の過大变形時に於けるソフトランディングの特性を把握し、シミュレーシ

ョン解析を行って、ソフトランディングの過大入力に対する免震装置のバックアップ装置としての有効性の確認を行った。

## 2. ソフトランディング装置の概要

免震構法の信頼性を向上するための一つの方法として、在来の積層ゴムを用いる免震装置に、バックアップ装置を組込む方式が考えられる。バックアップ装置に要求される機能は、万一の過大入力に対して免震装置の過大变形を抑制し、免震装置、上部構造物、接続配管などの破壊を防ぐ機能と、装置の作動により上部構造物に伝達される加速度を可能な限り低減する機能がある。本研究では、積層ゴムの水平方向の変形による沈み込みを利用して、滑り面を有する荷重支持装置に上部建物を着地させるソフトランディングについて、実大レベルでの静的お

よび動的加力試験を行い、免震装置のバックアップ装置としての性能を確認した。図-1に積層ゴムを示す。

積層ゴムは、素材が天然ゴム系の標準積層ゴムと高減衰ゴムの高減衰積層ゴムの2種類を用い、設計荷重は40tfで水平方向振動数は約0.5Hz、鉛直方向振動数は約15Hzで、許容変形量は約15cmである。図-2にソフトランディングの概要を示す。免震装置の水平変形の進行に伴って、上部建物はソフトランディングに接地して滑り始め、積層ゴムが支持する上部建物の荷重は次第にソフトランディングに乗り移る。従って、大変形により積層ゴムの荷重支持能力が低下しても上部構造はソフトランディングに安定的に支持される。またソフトランディングは、支持荷重の増加に伴い、滑りに対する摩擦抵抗力(減衰)が漸次増加するので、大変形時における減衰装置として機能する。ソフトランディングの滑り面の素材は、適度な摩擦係数および強度が要求され、四フツ化エチレン樹脂、超高分子量ポリエチレンおよびステンレス板を用いて比較を行った。また支持荷重を計測するために、ソフトランディングにロードセルが内蔵されている。

### 3. 試験方法

写真-1に動的加力試験装置を、図-3に動的加力試験装置および測点を示す。加力装置は軸力用に200tf静的ジャッキ、水平方向用に動的アクチュエータ(最大動的荷重±30tf、最大ストローク±200mm、最大加振速度±75cm/sec)を用いている。主な測点は、水平方向は動的アクチュエータの荷重と試験体の変位および加速度で、鉛直方向は静的ジャッキの荷重(軸力)、試験体の変位と加速度およびソフトランディングの支持荷重である。また熱伝対により気温と積層ゴムの温度を測定している。なお加力装置の安定性を確保するために、試験体は2体ずつ用いており、試験データは全て解析により平均値を求めて試験体1体のデータに換算している。本加力装置により、基本特性試験として、免震装置を構成する積層ゴムおよびソフトランディング各単体の特性を調べる要素試験と、免震システムとしての積層ゴムとソフトランディングの組合せ試験を行った。また組合せ試験では過大変形を与える限界試験により、免震装置の過大変形時におけるソフトランディングの特性を調べた。実験の主なパラメータは軸力と入力(周期と振幅)で、特性試験では積層ゴムの許容水平変形±150mm以下の定振幅5波を入力する正弦波両振り加力試験を、限界試験では積層ゴムの直径に相当する0~350mmの定振幅5波を入力する正弦波片振り加力試験を行った。なお、積層ゴムは同じ構造・寸法で、素材が天然ゴム系の標準積層ゴムと高減衰ゴムの高減衰積層ゴムの2種類を用いたが、標準積層ゴムは主に積層ゴムとソフトランディングの組合せの基本的な力学的挙動の把握を目的に用い、高減衰積層ゴムは標準積層ゴムに減衰装置を付加したシステムと見なして、ソフトランディングを組合せた免震装置の全体的な力学的挙動の把握を目的に用いた。

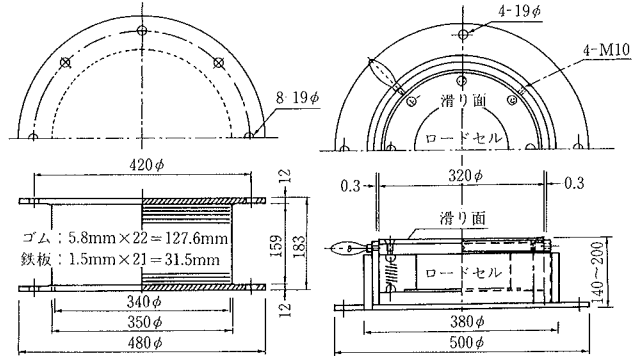


図-1 積層ゴム

図-2 ソフトランディングの概要

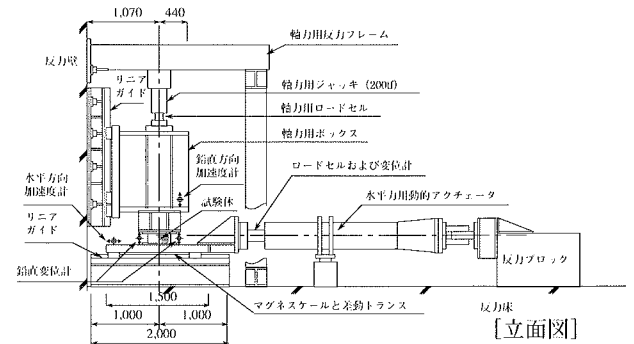
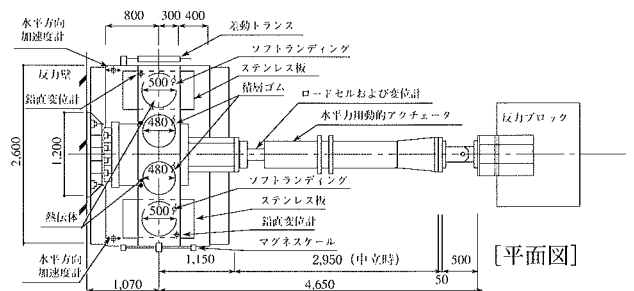


図-3 動的加力試験装置および測点

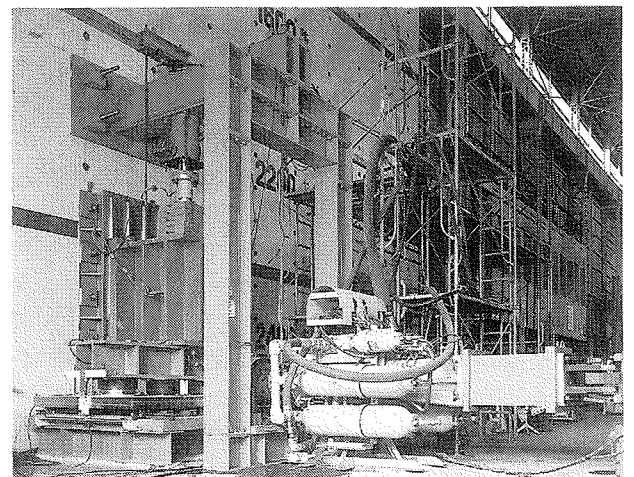


写真-1 動的加力試験装置

3.1 基本特性試験

免震装置を構成する積層ゴムおよびソフトランディング単体の特性を調べる要素試験と、免震システムとしての組合せ試験を行った。ここでは積層ゴムの設計振動数である 0.5 Hz の正弦波入力の特性的試験の結果を主にまとめる。

3.1.1 積層ゴム単体の特性

(1) 標準積層ゴム 図-4(a)に標準積層ゴム単体の復元力特性を示す。標準積層ゴムの復元力特性は、許容水平変形量±150 mm 程度までほぼ線形である。図-4(b)に標準積層ゴムの沈み込み量を示す。標準積層ゴムの沈み込み量は二次曲線的に増大し、過大変形時には座屈が生じる恐れがある。図-4(c)に標準積層ゴムの減衰定数を示す。変位振幅により若干バラツキが見られるが、標準積層ゴムの減衰定数は約 2% である。

(2) 高減衰積層ゴム 図-5(a)に高減衰積層ゴム単体の復元力特性を、図-5(b)に高減衰積層ゴムの沈み込み量を示す。また図-5(c)に高減衰積層ゴムの減衰定数を示す。高減衰積層ゴムの復元力特性は安定した紡錐形を示し、減衰定数は約 8~15% である。

3.1.2 ソフトランディング単体の特性 ソフトランディングの滑り面の素材は、四フッ化エチレン樹脂、超高分子量ポリエチレンおよびステンレス板である。ソフトランディングに接触する側にはステンレス板を張付けており、摩擦はこのステンレス板とソフトランディングの滑り面の間に作用する。図-6に、軸力と加振速度をパラメータにした水平変形±10 cm の正弦波入力の特性的試験で得た滑り面の各素材の摩擦力と動摩擦係数  $\mu$  を示す。また図-7に、振動数 0.5 Hz で振幅±10 cm の正弦波入力の特性的試験で得た滑り面の各素材の復元力特性を示す。試験結果は次のようである。

① 四フッ化エチレン樹脂の動摩擦係数  $\mu$  は約 0.15 で 3 者の中で一番小さい。しかし動的試験で滑り面に薄い箔状の剥離片が生じ、入力の回数が多い場合には摩擦の問題が生じる。

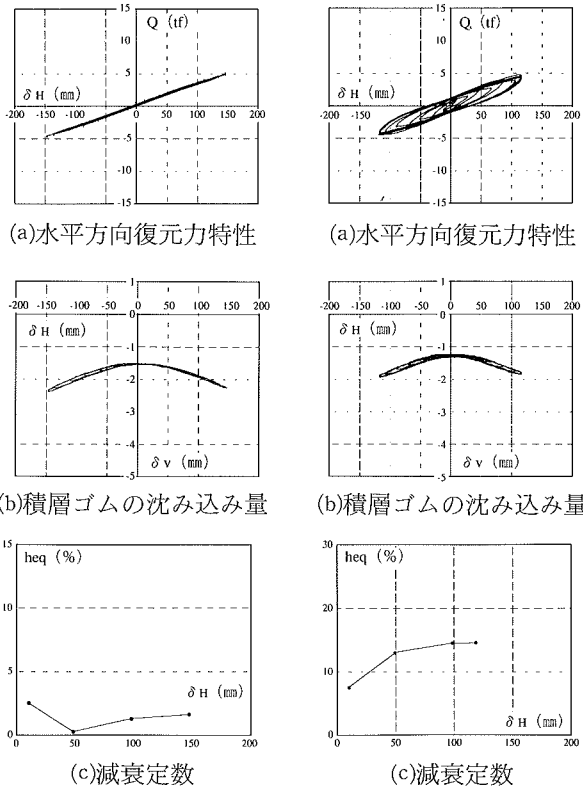
② 超高分子量ポリエチレンの動摩擦係数  $\mu$  は約 0.19 で四フッ化エチレン樹脂と同程度である。動的試験で摩擦熱により滑り面が溶けた痕跡が見られ、正弦波入力の繰返し数が多くなるに従って、せん断力はやや漸減するが、安定した復元力特性を示し、滑り面の摩擦などの耐久性上の問題は見られない。

③ ステンレス板の動摩擦係数  $\mu$  は約 0.55 と大きく、ソフトランディングの作動時に衝撃が生じる。

従って、ソフトランディングの滑り面には四フッ化エチレン樹脂または超高分子量ポリエチレンの使用が適当と考えられる。以後ソフトランディングは主に超高分子量ポリエチレンの滑り面を用いた結果を述べる。

3.1.3 積層ゴムとソフトランディングの組合せの特性

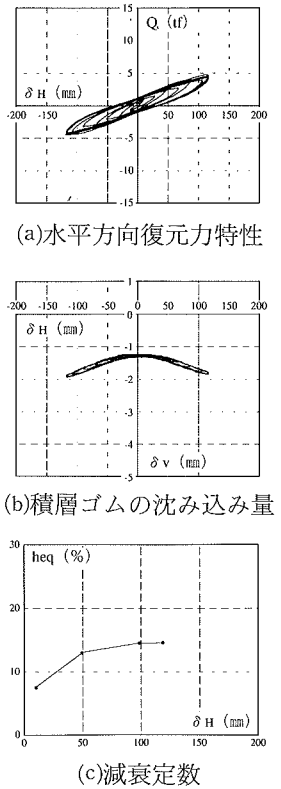
標準積層ゴムとソフトランディングを組合せたときの軸力 40 tf で振動数 0.5 Hz、水平変形±15 cm の正弦波入力の動的試験の各測点の時系列波形を図-8に示



(a)水平方向復元力特性

(b)積層ゴムの沈み込み量

(c)減衰定数



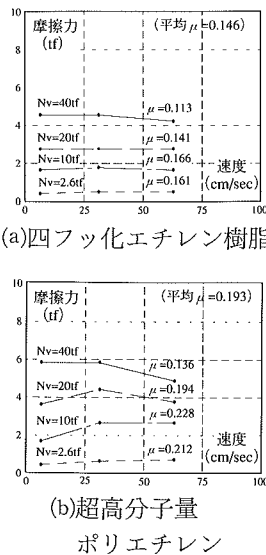
(a)水平方向復元力特性

(b)積層ゴムの沈み込み量

(c)減衰定数

図-4 標準積層ゴムの動的試験

図-5 高減衰積層ゴムの動的試験

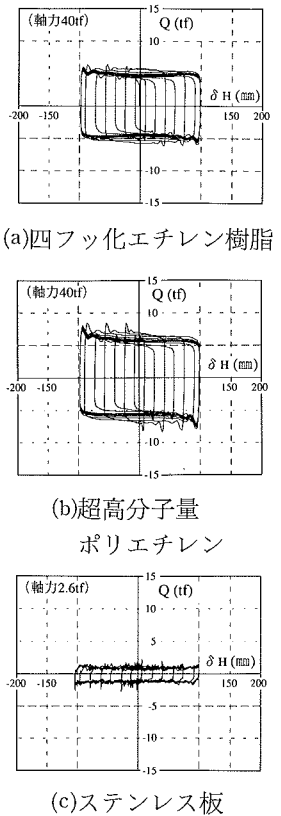


(a)四フッ化エチレン樹脂

(b)超高分子量ポリエチレン

(c)ステンレス板

図-6 滑り面各素材の摩擦力と動摩擦係数  $\mu$



(a)四フッ化エチレン樹脂

(b)超高分子量ポリエチレン

(c)ステンレス板

図-7 滑り面各素材の復元力特性 (振動数 0.5 Hz, 振幅 ±10 cm)

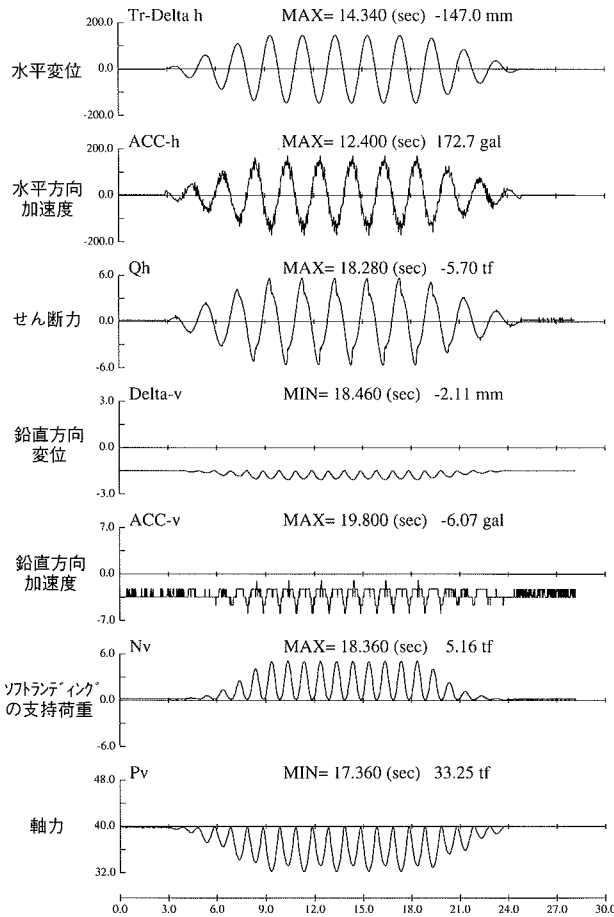


図-8 標準積層ゴムとソフトランディングの動的特性試験 (各測点の時系列波形)

す。水平方向の加速度にはソフトランディングの摩擦が切れる時のパルスが見られるが 25 gal 程度で、加速度の極端な増幅は見られず、鉛直方向加速度も 6 gal 程度で問題にはならない。またそのときの復元力特性、沈み込み量、ソフトランディングの支持荷重および減衰定数を、図-9(a)、図-9(b)、図-9(c)および図-9(d)に示す。積層ゴムの水平変位に伴う沈み込み量の増大と共に、積層ゴムに支持された荷重がスムーズにソフトランディングに移るのが判る。水平変位に伴うソフトランディングの支持荷重の増大に比例して摩擦抵抗力が大きくなり、減衰定数は最大約 5% に達している。同じく、高減衰積層ゴムとソフトランディングを組合せたときの復元力特性、沈み込み量、ソフトランディングの支持荷重および減衰定数の動特性を、図-10(a)、図-10(b)、図-10(c)および図-10(d)に示す。復元力特性は、水平変位の増大に伴ってソフトランディングの摩擦抵抗力が付与され、紡錘形から平行四辺形になる。また、減衰定数は水平変位振幅にあまり依存せず、約 12~15% となっている。

### 3.2 限界特性試験

積層ゴムとソフトランディングの組合せで大変形水平加力試験により復元力特性、沈み込み挙動およびソフトランディングの支持荷重変化を確認する限界試験を行っ

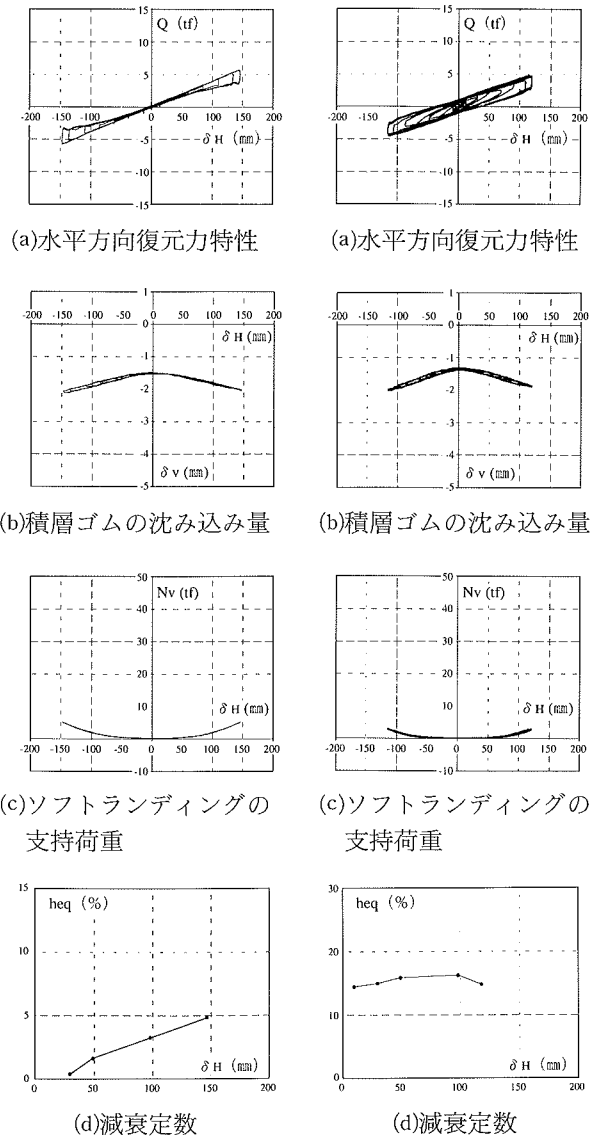


図-9 標準積層ゴムとソフトランディングの動的特性試験

図-10 高減衰積層ゴムとソフトランディングの動的特性試験

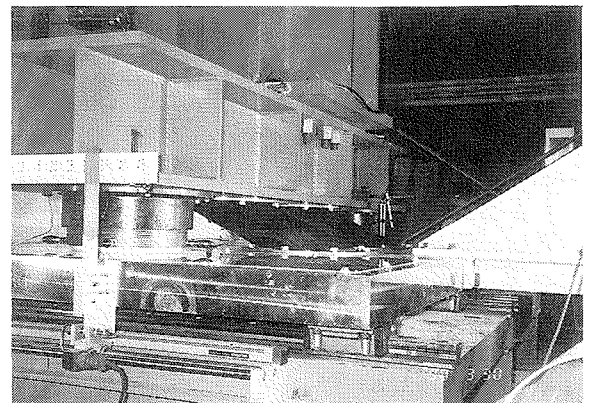
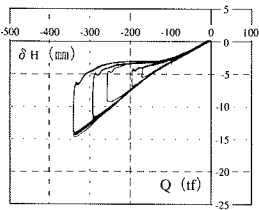
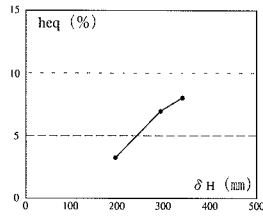


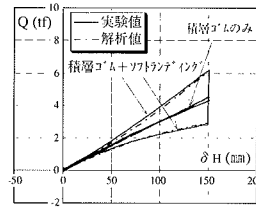
写真-2 限界試験 (最大変位 35 cm の状況)



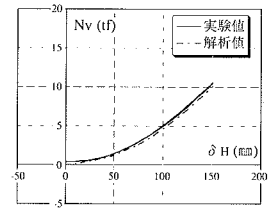
(a)水平方向復元力特性



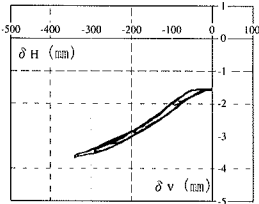
(d)減衰定数



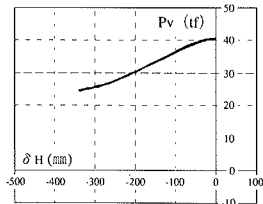
(a)水平方向復元力特性



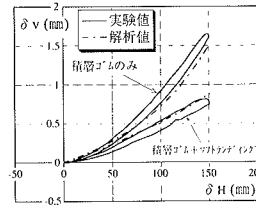
(c)ソフトランディングの支持荷重



(b)積層ゴムの沈み込み量

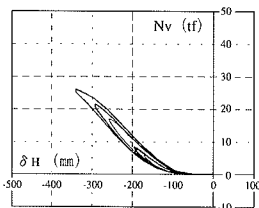


(e)軸力



(b)積層ゴムの沈み込み量

図-12 標準積層ゴムとソフトランディングの静的特性試験および解析



(c)ソフトランディングの支持荷重

図-11 標準積層ゴムとソフトランディングの動的限界試験

た。ここでは標準積層ゴムとソフトランディングの組合せで、軸力 40 tf で振動数 0.5 Hz、水平変位 0~350 mm の正弦波片振り入力の限界試験結果を述べる。

写真-2 に限界試験の水平変位約 35 cm での状況を示す。また限界試験の復元力特性、沈み込み、ソフトランディングの支持荷重、減衰定数および軸力の変化を、図-11(a)、図-11(b)、図-11(c)、図-11(d)および図-11(e)に示す。図-11(a)においては、ソフトランディングの支持機能により、積層ゴムの直径に相当する水平変位 350 mm (積層ゴムのせん断ひずみ274%) まで安定した復元力特性を示し、積層ゴムのハードニングおよび座屈の危険は見られない。また、大変形後も積層ゴムの復元力により原点復帰することが確認される。図-11(c)のソフトランディングの支持荷重より、水平変位の増大とともに積層ゴムに働く荷重がフェイルセーフにスムーズに乗り移ることが分かる。動的加力試験装置の軸力用に静的ジャッキを使用しているために、図-11(e)の軸力においては、最大水平変位約 35 cm のときには約 15 tf の軸力の抜けが生じており、ソフトランディングの支持荷重は約 25 tf となる。図-11(d)の減衰定数は、標準積層ゴムの約 2% から水平変位の増大とともに大きくなって最大約 8% となっているが、軸力の抜けが無ければ、ソフトランディングの支持荷重が増えてより大きな減衰となり、このソフトランディングの摩擦減衰を付与する機能により積層ゴムの過大変形が制御される。以上より、ソフトランディングが過大入力に対する安全装置として機能することが確認される。

#### 4. シミュレーション解析

標準積層ゴムについてソフトランディングを組合せた特性試験と限界試験のシミュレーション解析結果を示す。解析手法は以下による。

① 積層ゴム単体支持の場合 (水平変位が小さいか、積層ゴム高さソフトランディング間に隙間があり、ソフトランディングに荷重が乗り移らない状態) 積層ゴムの沈み込み量は水平変形時の積層ゴムの上面と下面との重なる面積 (荷重支持有効面積) の減少量から積層ゴムの鉛直剛性を評価し、積層ゴムの支持荷重より算出する。

② 積層ゴムとソフトランディングで支持の場合 (ソフトランディングに荷重の一部が乗り移っている状態) ソフトランディングの鉛直方向の復元力特性より得たソフトランディングの鉛直剛性と、上述の方法により算出した積層ゴムの鉛直剛性の2個並列バネで、鉛直荷重を支持した時の沈み込み量を算定する。ソフトランディングの支持荷重は、沈み込み量とソフトランディングの鉛直剛性より算出する。ソフトランディングの水平方向の摩擦力はソフトランディングの支持荷重に滑り面の素材の動摩擦係数  $\mu$  を乗じて求め、積層ゴムの復元力特性に足し合せて、全体の復元力特性を得る。

③ ソフトランディング単体支持の場合 (積層ゴムの直径以上の水平変位が生じ、積層ゴムは荷重を支持しない状態) ソフトランディングの鉛直方向の復元力特性より得た鉛直剛性と支持荷重より、ソフトランディングの沈み込み量を算出する。ソフトランディングの水平方向の摩擦力はソフトランディングの支持荷重に滑り面の素材の動摩擦係数  $\mu$  を乗じて求める。

##### 4.1 積層ゴムとソフトランディングの静的特性試験

図-12(a)と図-12(b)に、静的試験と解析による積層ゴム単体と積層ゴムとソフトランディングの組合せの復元力特性と沈み込み量を比較して示す。また図-12(c)に、静的試験と解析によるソフトランディングの支持荷重を比較して示す。実線の試験結果と破線の解析結果とは良

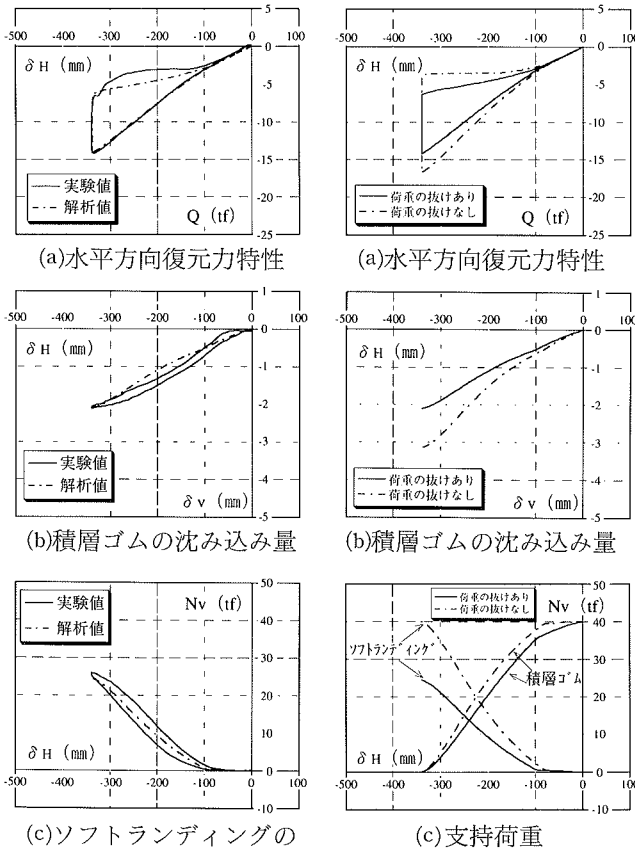


図-13 動的限界試験および解析

い対応を示す。水平変位 15 cm のときの沈み込み量は、積層ゴム単体の場合約 1.6 mm であるが、ソフトランディング組込みの場合約 0.8 mm に低減される。その際のソフトランディングの支持荷重は約 10 tf で、動摩擦係数  $\mu=1.6$  を用いたときの摩擦力は約 1.6 tf となる。

4.2 積層ゴムとソフトランディングの動的限界試験

図-13(a), 図-13(b)および図-13(c)に、軸力 40 tf で振動数 0.5 Hz, 水平変形 0~350 mm の正弦波片振り入力の動的限界試験と解析による積層ゴムとソフトランディングの組合せの復元力特性, 沈み込み量およびソフトランディングの支持荷重を比較して示す。加力試験装置の軸力用静的ジャッキ使用により, 最大水平変位約 35 cm のときに約 15 tf の軸力の抜けが生じるため, ソフトランディングの支持荷重は約 25 tf となり, 摩擦力は約 4.0 tf となる。またそのときの沈み込み量は約 2.1 mm となる。実線の試験結果と破線の解析結果とは良い対応を示し, 本解析手法の妥当性が確認される。

図-14(a), 図-14(b)および図-14(c)に, 加力試験装置の軸力用静的ジャッキに起因する軸力の抜けの影響を解析により評価して求めた復元力特性, 沈み込み量および支持荷重を示す。軸力の抜けが有る場合を実線で, 軸力

図-14 大変形における解析検討

の抜けが無く 40 tf 一定の場合を破線で示す。実際の免震構造では軸力の抜けは無いので, 図-14(c)より水平変位 0 cm で積層ゴムに支持された荷重 40 tf は, 最大水平変位約 35 cm のときには完全にソフトランディングに移り積層ゴムの支持荷重が零となる。また摩擦力は約 6.4 tf となって減衰が増大するが, 図-14(a)の復元力特性より大変形後も積層ゴムの復元力により原点復帰する。そのときの沈み込み量は図-14(b)より約 3.2 mm となる。

5. まとめ

積層ゴムとソフトランディングよりなる準実大免震装置の動的試験により, ソフトランディング機構は, 上部構造物に過大な加速度を与えることなく作動し, 上部構造物の荷重を支持する機能により積層ゴムの変形に伴う座屈を防ぐと共に, 摩擦減衰を付与する機能により積層ゴムの過大変形を制御し, 大変形後も積層ゴムの復元力により原点復帰することが確認され, 本システムの実機施設への安全装置としての適用性が確かめられた。またシミュレーション解析結果は試験結果と良い対応を示し, 解析手法の妥当性が確かめられた。

今後はこの装置を大型モデルに適用し, 動力炉・核燃料開発事業団・東海事業所内で地震観測を行いながら, 本システムの実用化および検証を継続する。

謝辞

本研究は動力炉・核燃料開発事業団との共同研究として実施しているものであり, 特に同事業団・東海事業所建設工務管理室担当役の瓜生 (旧姓: 大平) 満氏には全般的な協力を戴いており, ここに感謝します。

参考文献

- 1) 寺村, 中村, 角田, 岡田, 安井, 他: 免震装置のフェイルセーフ機構に関する研究, 大林組技術研究所報 No. 41, p. 38~44, (1990)
- 2) 中村, 大平, 檜垣, 寺村: 核燃料施設への免震構法適用研究 (その9 ソフトランディングタイプフェイルセーフ装置の動的試験), 日本建築学会大会講演梗概集, p. 1451~1452, (1990)
- 3) 中村, 大平, 檜垣, 寺村: 核燃料施設への免震構法適用研究 (その13 ソフトランディング装置を有する免震構造物の解析的検討), 日本建築学会大会講演梗概集, p. 1391~1392, (1991)
- 4) 中村, 寺村, 大平, 檜垣: Study on Fail-Safe Mechanism in Base-Isolation Device, SMIRT11, Vol. K2, p. 85~90, (1991)
- 5) 中村, 寺村, 角田, 大平: Study on soft-landing mechanism in base-isolation device, 10 WCEE. Vol. 4, p. 2005~2011, (1992)