

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—

寺村 彰 中村 嶽 鈴木 哲夫
野畑 有秀 角田 智彦 岡田 宏
安井 譲

Study on Characteristics of Base Isolation System with Fail-safe Devices

—Fundamental Dynamic Characteristics of Fail-safe Devices—

Akira Teramura Takashi Nakamura Tetsuo Suzuki
Arihide Nohata Tomohiko Tsunoda Hiroshi Okada
Yuzuru Yasui

Abstract

Fail-safe mechanisms considered as back-ups for base isolation systems have been developed for application to baseisolated buildings. Two types of fail-safe devices have been developed. One is a landing type on which the building is supported and the other a stopper type for restricting excessive development. The basic characteristics of the two devices were grasped by tests of combination models of fail-safe devices, laminated rubber bearings supporting a 2-ton weight, and a base-isolated structure reduced to a single story, using static and dynamic actuators and a shaking table. As a result of these tests and analyses, it was shown that the two types of fail-safe devices prevent buckling and overturning of rubber bearings under input of excessive earthquake forces to the building.

概 要

耐震重要度の高い原子力施設等への地震力を低減し、かつ、万一の過大入力に対する安全性を確保するための免震構法の開発を目的にして、積層ゴム免震装置に組み込むフェイルセーフの開発を行っている。基礎研究として開発したフェイルセーフ装置は、積層ゴムが水平方向に変位すると沈み込む性質を利用して建物の底面が滑り面を持つ台に着地するランディングタイプと、最大変形を制限するストッパータイプとの2種類である。これらの諸性能は、2t荷重を支持する積層ゴムと組み合わせて静的・動的な要素試験により、また、総合試験として免震装置と重量が8tの1層鉄骨構造モデルと組み合わせて振動台上で地震波入力の試験により調べた。この実験と解析の結果、地震波の過大入力に対して積層ゴムの座屈等を防ぎ、上部構造物の安全性を高めるものであることが検証された。

1. まえがき

核燃料施設の種類の非常に多いが、その設計用静的地震力は耐震重要度に応じて一般建築物の1.5倍～3倍と与えられ、結果として非常に剛強な構造となっている。また、内部施設機器は標準化が進んでいない特殊なものにおいて耐震安全性をその都度保証していくものも多い。

従って、今後の条件整備により免震構法を核燃料施設に導入できれば耐震重要度の高い施設ほど、建物、内部施設機器共に耐震安全性を向上させつつ設計の合理化も期待できるものと考えられる。

本研究は、核燃料施設へ適用するために必要な技術基盤の確立を目指して、同時に、免震装置の信頼性を確保するために開発しているフェイルセーフ機構について述べる。

2. フェイルセーフ機構の概念

免震構法の信頼性を確立するための一つの方法として、従来の天然ゴム系の積層ゴムとPC鋼棒ダンパーとで構成している免震装置に、フェイルセーフ機構を組み込むことが考えられる。

フェイルセーフとは、ある装置がその機構を喪失しても安全上支障ないように別の機構が働くと解する場合が多い。しかし、ここでは免震装置が建物の荷重を支える機能を喪失しないようにサポートするという意味で使う。具体的には、応答変位制御と応答加速度制御の二つを目標としている。変位制御とは設計用地震力以上の入力があった場合でも、免震装置の過大変形を抑制し、免震装置、上部構造物、接続配管などの破壊を防ぐことであり、また、加速度制御とはフェイルセーフ機構の作動により、上部構造物に伝達される加速度を可能な限り低減することである。本研究で

対象にした装置においてはストッパータイプが前者に、ランディングタイプが後者にそれぞれ対応する。

3. 免震構造モデルの概要

本報告ではランディングタイプとストッパータイプとの2種類を試作して静的および動的な要素試験を行ない、さらに写真-1に示す様に、それらを免震構造物を模擬した鉄骨構造モデル（以下免震構造モデルという）に組み込み、地震波入力による振動台試験を行ない、応答特性を調べる。以下に装置と免震構造モデルの概要を示す。

3.1 上部構造物と免震装置

上部構造物は鉄骨構造1層1スパンの正方ラーメン構造で、上下層PC版各4ton、重量計8tonで、基礎固定時の周期0.3秒を目標にして製作された。

天然ゴム系積層ゴム（Φ10cm）とPC鋼棒（Φ5.5mm）ダンパーの免震装置の概要を図-1に示す。免震構造モデルの各柱下4箇所配置される。積層ゴムは固有周期を1秒前後に設定し面圧を想定される実機に合わせた。

3.2 フェイルセーフ装置

図-2に積層ゴム、鋼棒ダンパー、ソフトランディング装置とストッパー装置の概略配置を示す。図-3に水平変形に伴う積層ゴムの沈み込みを利用するランディング（着地）装置を示す。着地面の上面には、設計上有効な弾性材料（ソフトランディングの性質）と、適正な減衰力に対応する摩擦材料を選択することになるが、今回、滑り摩擦係数の比較的小さい四フックエチレン樹脂を用いた。また、建物側の着地面には鏡面仕上げステンレス板を取り付けている。

図-4にハニカム金属材料の座屈破壊によるエネルギー吸収を利用するストッパー装置を示す。アルミハニカムを使用して両端にアルミ製表面板を取り付けたものである。構造物が衝突すると、ハニカム（蜂の巣状）の小室が順次、破壊して建物への衝撃力を緩和する構造である。本報告では代表的に図-4に示す単層アルミハニカム（セルサイズ

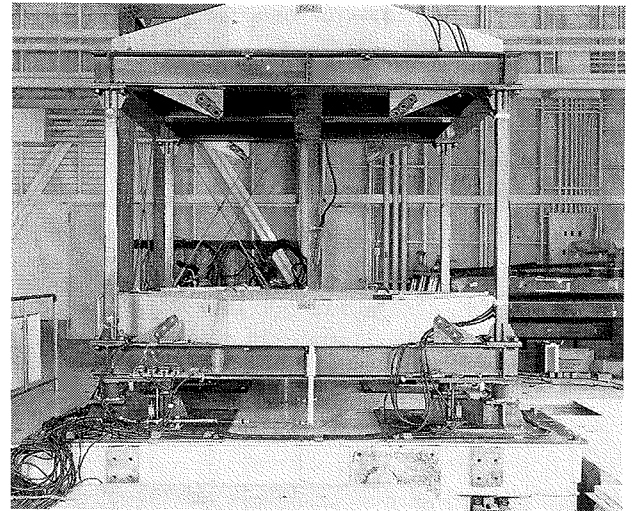


写真-1 免震構造モデル

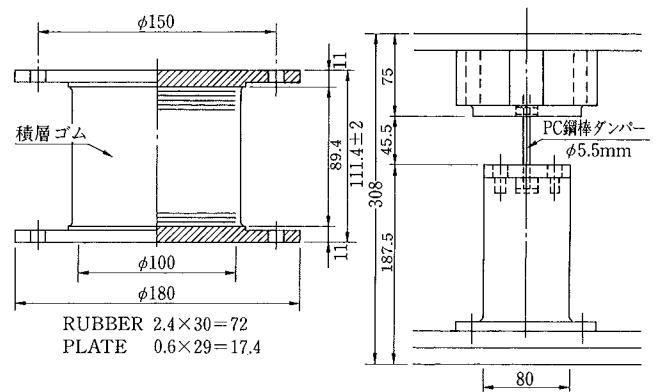


図-1 積層ゴムとPC鋼棒ダンパーの概要

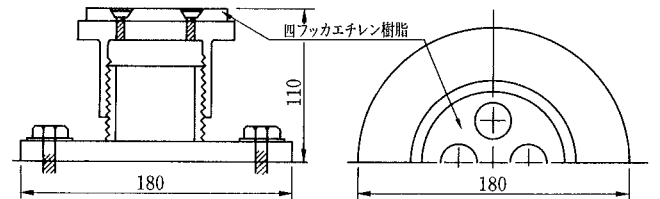


図-3 ソフトランディング装置の概要

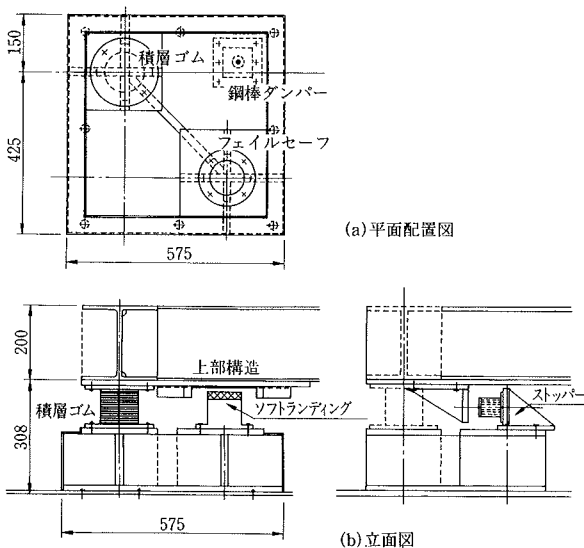


図-2 フェイルセーフ装置の概略配置

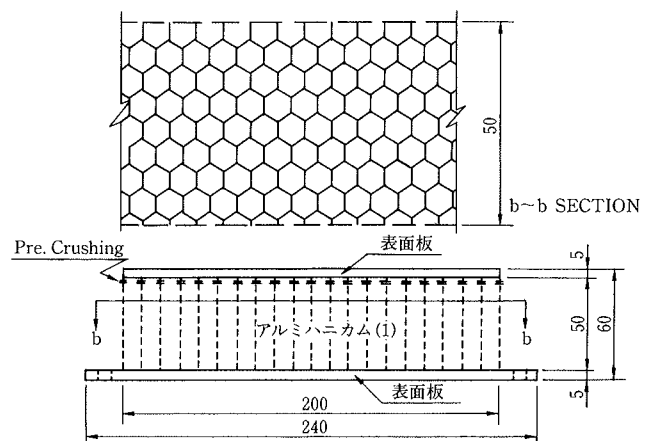


図-4 アルミハニカムストッパー装置の概要

0.635 cm, 箔厚さ 0.00254 cm, 座屈強度 $\sigma_{cr}=6.2 \text{ kg/cm}^2$ について行った試験結果を示す。

4. フェイルセーフ装置の要素試験

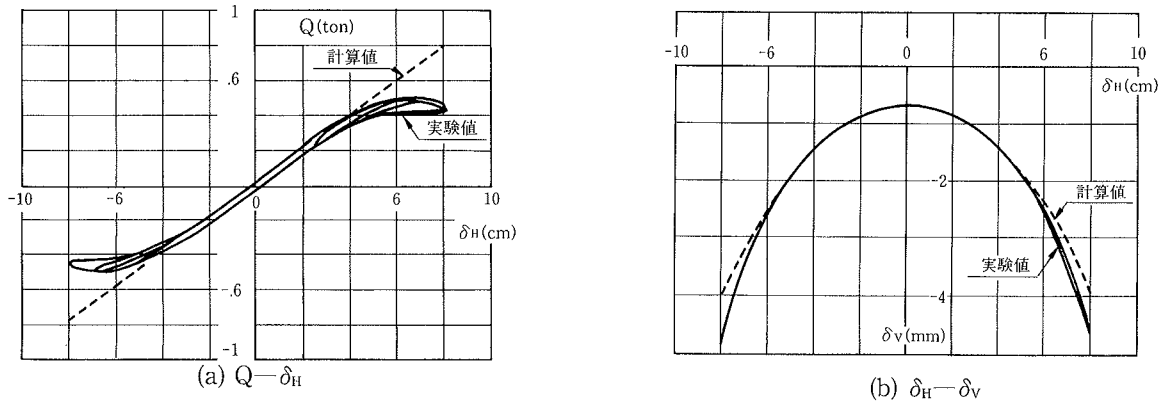
4.1 試験内容と方法

免震装置を構成する各要素の基本特性を調べるための試験内容は、①積層ゴムの静的試験、②積層ゴム+PC 鋼棒ダンパーの静的試験、③積層ゴム+ソフトランディング装置の静的・動的試験、④積層ゴム+PC 鋼棒ダンパー+ソフトランディング装置の静的・動的試験、⑤積層ゴム+ハニカ

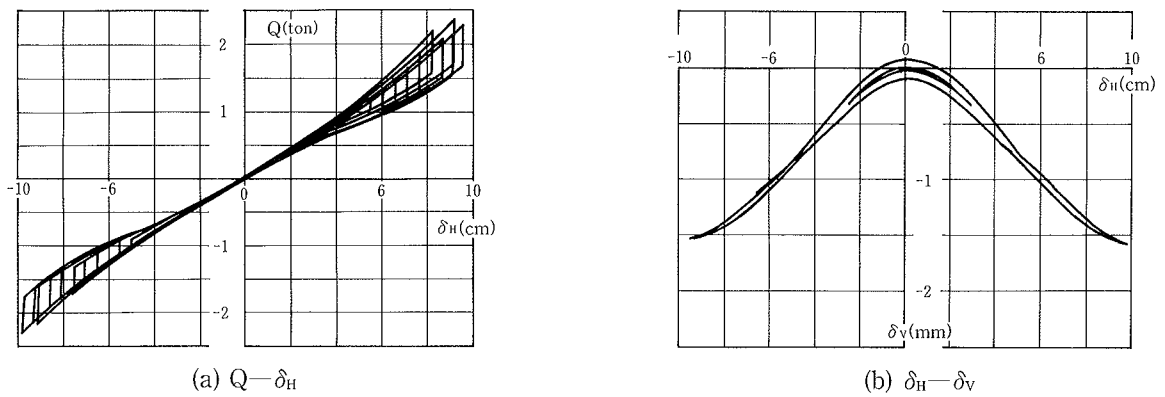
ムストッパー装置の動的試験などである。これらの要素試験に使用した装置は、鉛直軸力载荷用のジャッキと水平加力用ジャッキからなる静的加力装置と、1軸振動台である。

4.2 積層ゴムの特性試験結果

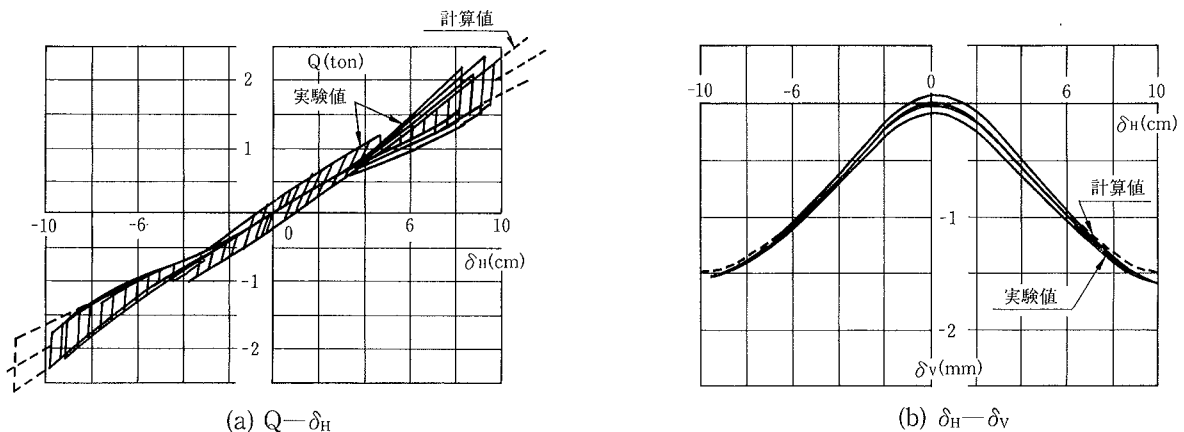
鉛直荷重 2 ton 载荷状態で積層ゴムの水平方向のせん断力 Q ~変位 δ_H の関係と、鉛直方向の沈み込み量 δ_V の関係を図一5に示す。(a) Q ~ δ_H の復元力図で水平変形が $\pm 4 \text{ cm}$ を超えると、積層ゴムの剛性低下の非線形性が現われる。この積層ゴムは実機用と異なり、試験用の小型かつ縦長であるという形状的な理由に因り線形域が少ない。同図に示す



図一5 積層ゴムの水平方向の荷重 Q ~変位 δ_H および水平変位 δ_H ~沈み込み δ_V 測定結果



図一6 積層ゴムとソフトランディングの水平方向の荷重 Q ~変位 δ_H および水平変位 δ_H ~沈み込み δ_V 測定結果



図一7 積層ゴム、鋼棒ダンパーとソフトランディング装置の水平方向の荷重 Q ~変位 δ_H および水平変位 δ_H ~沈み込み量 δ_V 測定結果

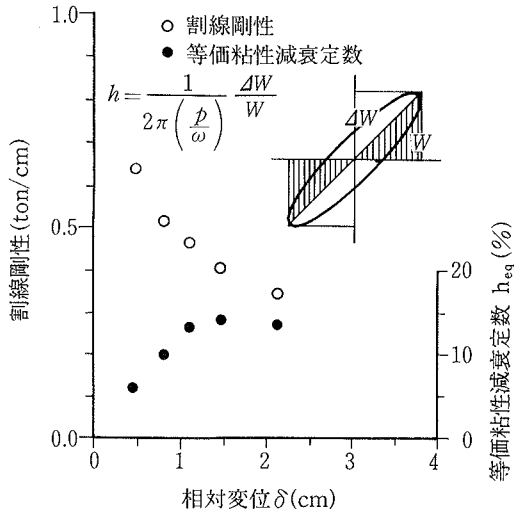


図-8 積層ゴムとPC鋼棒の等価減衰定数と割線剛性の測定結果

計算値はこの形状効果を考慮しない場合である。

(b)沈み込み特性は、水平変形が±2 cm程度までは近似的に線形範囲と見なせるが、変形が更に増加すると沈み込み量が二次曲線的に増大する傾向にある。沈み込み計算値は、水平変形時に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)の減少量から鉛直剛性を評価する方法によって求めたものであり、実験値にはほぼ対応する。

以上の結果、この積層ゴムは水平変形が±6 cmを超えると復元力が低下して載荷重2 tonを支えることができず座屈する恐れがあるといえる。なお、積層ゴムの減衰定数は約2%であった。

4.3 積層ゴムと鋼棒ダンパー組み合わせ試験結果

積層ゴムと鋼棒ダンパー組み合わせ時の試験では、水平変形±4 cm程度までは鋼棒の破断を生ぜず、安定した紡錘形の復元力特性を示す。減衰定数は、図-8に割線(対角)剛性と共に等価粘性減衰の評価値を示すが、変位量2 cm程度で10%以上である。

以上により、鋼棒ダンパーは水平変形が4 cm以上になると破断するおそれが生じ、破断すると免震装置の減衰力喪失につながる。積層ゴムと鋼棒ダンパーは、以上のとおり早期に機能を喪失する、いわゆる弱小モデルになっており、これはフェイルセーフ機能を早期に確認するために意図的に設計したものである。

4.4 積層ゴムとソフトランディング装置の試験結果

ソフトランディング装置は、積層ゴムの水平変形が±3 cm、この時の沈み込み量約0.5 mmに達すると効き始める設計である。詳細を省くが同装置の回転式レベル調整装置を操作してこのクリアランス約0.5 mmを保持して試験している。

図-6に荷重2 ton 載荷して水平加力したときの復元力特性と沈み込み特性を示す。復元力特性では積層ゴムの直径が10 cmであるにもかかわらず、10 cmの変位まで線形範囲を保つという点に特徴がある。また、水平変位±3 cmを超えると、ランディング装置の摩擦抵抗力に起因する履

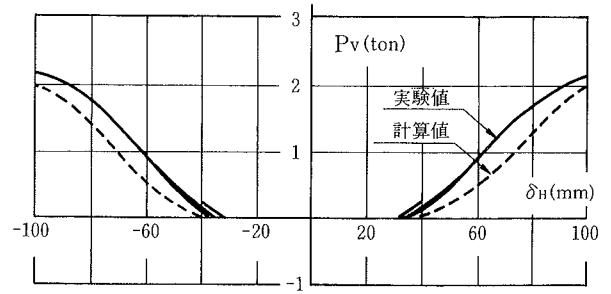


図-9 ソフトランディングの水平変位 δ_H に対する負担荷重 P_v 測定結果

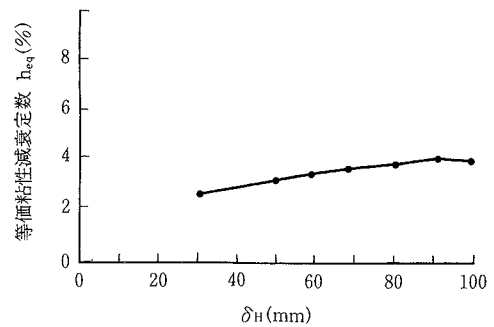


図-10 ソフトランディングの水平変位 δ_H に対する等価減衰定数 h_{eq} (%)の測定結果

歴特性を示し始める様子が分かる。

沈み込み量は2 mm程度を限度に完全に抑制され、積層ゴムの座屈を防止している。

図-9に水平変位 δ_H とソフトランディング装置の負担荷重 P_v tonの関係を示す。水平変位約3 cmまで積層ゴムが荷重2 tonを支持し、その後、ソフトランディング装置に荷重が次第に移行し、変位10 cmで同装置がほぼ荷重2 tonを支持する様子が確認できる。この間の滑り摩擦係数はほぼ0.1で一定であるが、摩擦抵抗力は支持荷重 P_v が水平変位 δ_H と共に増加するために大きくなり、従って、等価減衰定数 H_{eq} が、図-10に示す様に、水平変位と共に増加する。

図-11に振動台で正弦波加振して得た水平方向の動的な荷重 Q_H -変位 δ_H の関係と、計算結果を示す。

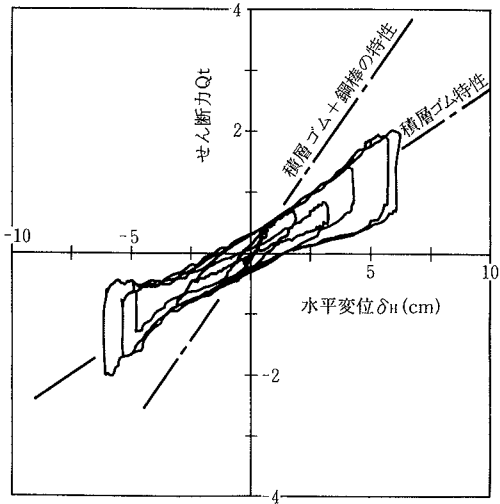
4.5 積層ゴム、PC鋼棒とソフトランディング装置の試験結果

積層ゴム、PC鋼棒ダンパーとソフトランディング装置が組み合わされた場合には、図-7に示すとおり、それぞれの水平方向の復元力特性を単純に加算した全体特性になっている。この試験ではPC鋼棒は、降状変位 δ_v を0.4 cm程度に設計したが、繰り返し変位暫増加力試験において水平変位5 cm付近で破断している。

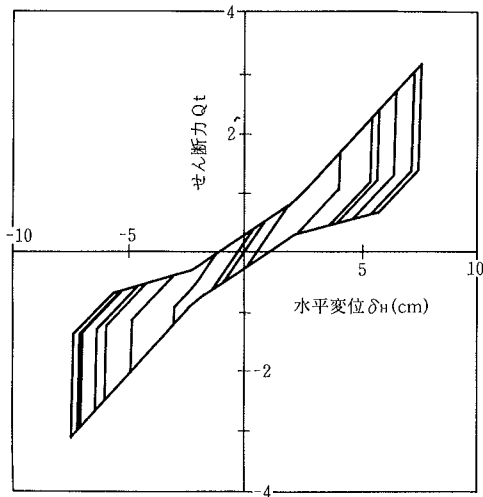
以上の結果、ソフトランディング装置は積層ゴムの座屈を防ぎ、鋼棒破断後の減衰力を補うことによって、過大入力に対する安全装置として機能することが分かる。

4.6 積層ゴムとアルミハニカムストッパーの試験結果

試験は積層ゴムで支持された重量約6 tonのコンクリー



(a) 正弦波振動台入力実験結果



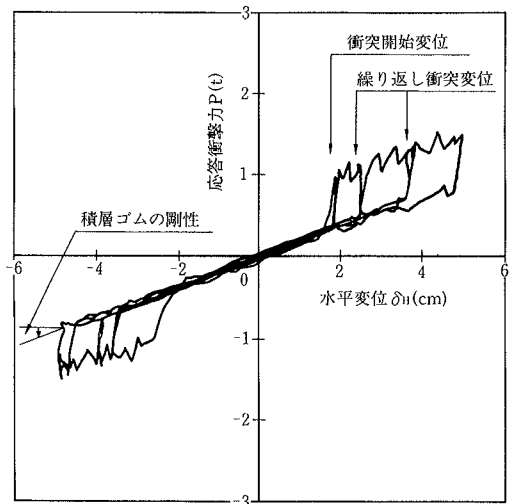
(b) 解析結果

図一11 積層ゴム、鋼棒ダンパーとソフトランディング装置組み合わせの荷重Q～変位 δ_H 関係

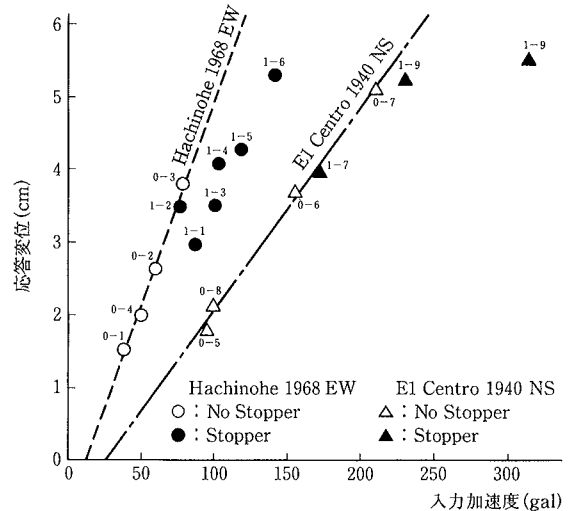
ト製剛体の側面に2cmのクリアランスを設けて地震入力による1軸振動台試験を実施した。

図一12に、代表的にEL CENTRO 1940 NS 230 galを振動台入力した時の荷重～変位の関係を示す。ストッパーが取り付けられない状態では約6cmの応答変位であったが、3回程度衝突して最大応答変位が5.5cmに押えられている。エネルギー吸収すると共に変位制御を果たしている。

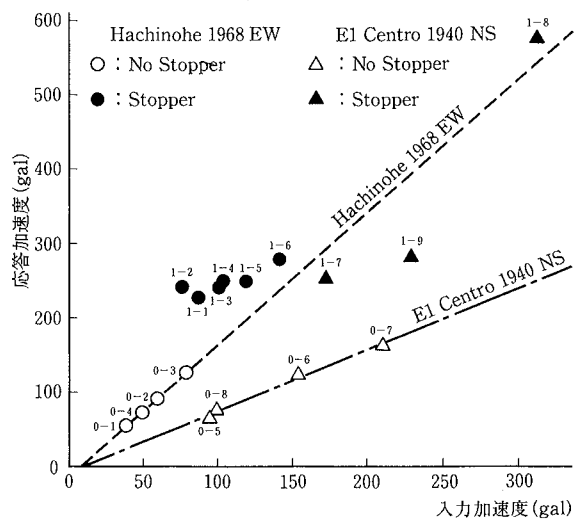
図一13にEL CENTRO 1940 NS, HACHINOHE 1968 EWの記録地震波を振動台入力したときの入力加速度に対する応答最大変位と、応答最大加速度を示す。同図より、ストッパー有りの場合(●▲印)には、無しの場合(○△印)に比べて応答変位が抑制され、応答加速度が増加する傾向にある。ストッパー型フェイルセーフの基本特性としては、応答変位を約7～8割に制御できるが、ハニカムコアの座屈強度、もしくは、衝突変位の設定レベルの加減に



図一12 ハニカムストッパー衝突時の衝撃力P～応答変位 δ_H の測定結果



(a) 応答変位

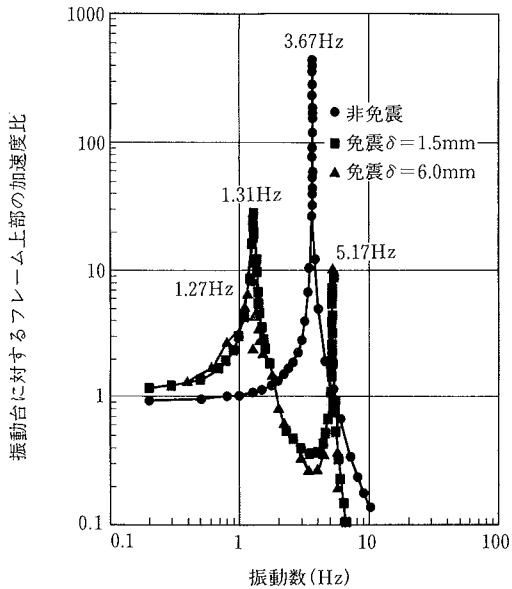


(b) 応答加速度

図一13 ハニカムストッパー装置の振動台地震波入力実験結果

表一 免震構造モデルの固有振動数と減衰定数

モデル	次数	固有振動数 (Hz)		減衰定数 h (%)
		試験値	解析値	
非免震モデル	1	3.67	3.66	0.1
積層ゴム免震モデル	1	0.88	0.88	2.5
	2	5.12	5.16	—
積層ゴムと鋼棒ダンパー免震モデル	1	1.31	1.31	1.7
	2	5.20	5.26	—



図一14 免震構造モデルの共振応答倍率曲線

より短周期加速度成分が生じやすくなるため、これら2項目の事前評価による慎重な設計が必要である。

5. 免震構造モデルの地震応答特性

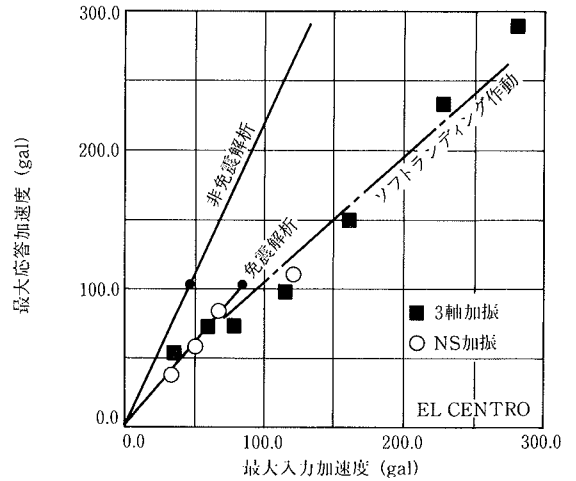
5.1 免震・非免震構造モデルの動的特性

免震構造モデルの動的特性試験は振動台で行なった。鉄骨構造モデルのみの非免震モデルと、免震構造モデルの共振検索試験による固有振動数の試験結果を表一1および図一14に示す。

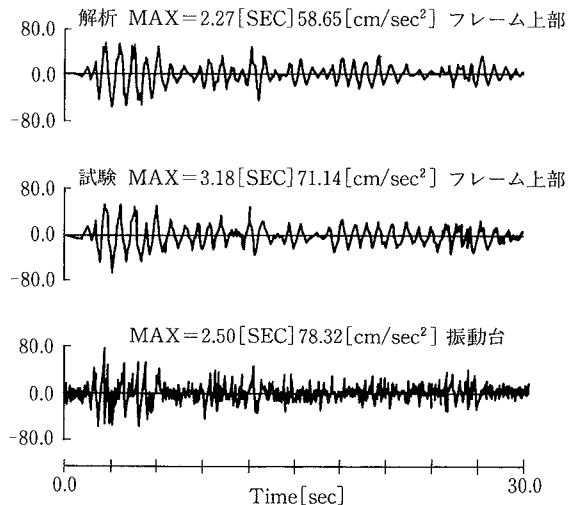
5.2 地震応答特性

フェイルセーフ機構を有する免震構造モデルの地震応答特性に関する試験は3軸振動台を使用して行なった。地震波はEL CENTRO 1940, HACHINOHE 1968である。XYZ 3軸の入力加速度の比率は実記録比に対応している。地震波入力試験では、例えば、HACHINOHE 1968地震波の場合に、70 gal 入力時 (NS 70 gal, EW 57 gal, UD 35 gal) には免震部相対変位が約3 cmで鋼棒が弾塑性挙動範囲にあり、140 gal 入力時には鋼棒が破断 (変位約5.5 cm) して積層ゴムの固有周期に基づく長周期化された振動性状に入り、かつ、ソフトランディングも効いた状態になった。

図一15にこれらの試験結果として、EL CENTRO 1940地震波の入力加速度とフレーム上部の最大応答加速度の関



図一15 EL CENTRO 1940 NS 1軸および3軸地震波振動台入力に対するフレーム上部の応答加速度



図一16 EL CENTRO 1940 70gal 振動台入力に対するフレーム上部の加速度測定波形と解析波形

係を示す。入力加速度が60 gal程度までは積層ゴムと鋼棒に基づく解析値である実線にプロットされるが、60 galを超えると実線から離れ、ソフトランディングの作動域に入っている。なお、同図には1軸NS加振の場合も参考までに示しているが、3軸入力の場合と比べて最大値に特異な変化は認められない。また、XY 2軸入力と3軸入力の場合の水平面内オービット分析では、両者に差が見られず上下方向の影響が小さいことが分かった。

5.3 シミュレーション解析

固有振動数の解析結果を表一1に示す。地震入力に対する応答解析は、免震装置部について積層ゴムと鋼棒ダンパーの弾塑性特性を考慮して水平2軸入力力で解析した。免震装置部の解析モデルはMSSモデル¹⁾を採用している。免震装置部の諸定数はほぼ設計値を、上部構造のそれは脚部固定時の振動試験結果より得られた値を用いた。

EL CENTRO 70 gal 水平2軸入力時の上部フレームでの測定加速度波形と解析加速度波形を図一16に示す。また、

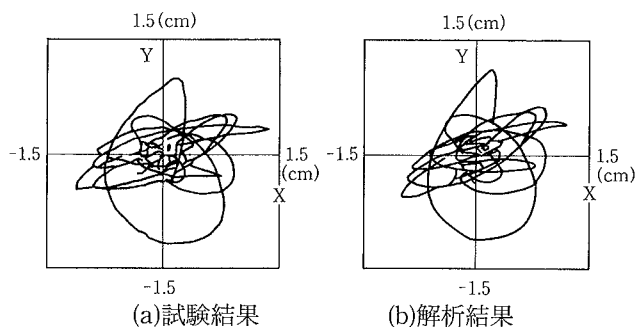


図-17 EL CENTRO 1940 NS, EW, UD 3方向入力に対するNS, EW水平面内軌跡の試験結果と解析結果

免震装置部の水平オービットを解析値と比較したものを図-17に示す。図より解析結果は試験結果にほぼ対応していることが確認できる。

5.4 免震装置全体の復元力特性

以上の試験結果より、積層ゴム、PC 鋼棒ダンパーと、フェイルセーフ装置からなる免震装置全体に関する水平方向の復元力特性は図-18の様にまとめられる。すなわち、全体系の復元力特性は各要素の特性を単純に加算する方法により容易に求められる。

6. まとめ

以上の試験結果より積層ゴム、鋼棒ダンパーと二つのフェイルセーフを含む全体系の復元力特性は、ほぼ、初期の目標どおりであり、また、地震応答特性も当初設計した性能を満足する傾向にあることを確認した。今後、検討をさらに進めると共に、実用規模の実験検討も進める予定である。最後に二つのフェイルセーフの特徴をまとめて以下に述べる。

① ソフトランディング機構は、過大変形時に積層ゴムの座屈を防ぎ、形状要因に基づく復元力の非線形性の改善に寄与し、大変形後も免震装置が原点復帰する性状を賦与する。

② ランディング時に上部構造への衝撃も少ない。

③ 鋼棒破断後の減衰力は、ソフトランディング装置のクローン摩擦による減衰力で補うことができる。実用規模の研究に際しては必要な減衰力に見合う摩擦材料を選択する。

④ ハニカムストッパーは、限界変形に至る前に段階的に作動し、応答変位制御機能を示す。これは形状や寸法から導かれる材料の座屈強度および、衝突変位の設定により予測しうる。

⑤ なお、フェイルセーフ装置として、ソフトランディング装置とハニカムストッパー装置とは単独使用、あるいは、併用も可能である。

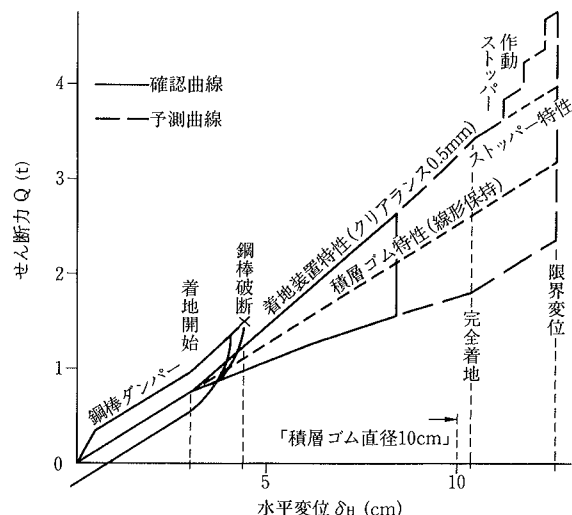


図-18 フェイルセーフ含む免震装置の水平方向の荷重 Q ~変位 δ_h 特性

免震構法は一般建物ばかりでなく耐震重要度の高い施設への適用も検討され始めている。免震装置の耐震安全性の向上と共に、免震装置の信頼性確立に寄与できれば幸いである。

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、とくに同事業団工務建設室、主査 大平 満氏、檜垣 茂雄氏には全般的な指導を戴いているものであり、また、社内においては原子力本部 営業部部長 山崎 坦氏、同次長 岡 一幸氏、設計部次長 久納 俊雄氏、技術部課長代理 白浜 健二氏の協力を得ている。さらに、3軸地震波入力試験にあたり、株式会社 NTT 建築総合研究所の3軸振動台を使用した。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 和田ほか：NSS モデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析，日本建築学会大会講演梗概集，p. 313~314, (1985)
- 2) 大堀，南，大沢：フェイルセーフ系免震構造物に関する研究(その1. 機構の提案)，日本建築学会大会講演梗概集，p. 843~844, (1986)
- 3) 藤田，津田，鈴木：重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験(第2報 バックアップ機構がある場合) 東大生産研究，Vol. 38, No. 3, p. 26~29, (1986. 3)
- 4) 大平，檜垣，角田，岡田，安井，寺村，鈴木，中村，野畑ほか：核燃料施設への免震構法適用研究，日本建築学会大会講演梗概集，p. 1025~1028, (1989)