

免震支承技術の現状と今後の課題

赤尾嘉彦¹・山田親文²・本間洋一²・川端英一³

1正会員 工博 横浜ゴム(株)MB開発一部 嘱託(〒254平塚市追分二丁目一番地)
東京大学地震研究所受託研究員(〒113文京区弥生一丁目一番地)

2横浜ゴム(株)MB開発一部(〒254神奈川県平塚市追分二丁目一番地)

3(株)ヨコハマテクノリサーチ(〒254神奈川県平塚市追分二丁目一番地)

我々は、免震支承メーカーとして各種の免震装置に関する文献を収集・調査し、その機能について検討をおこなっている。また、自社製品の積層ゴム免震支承の特性を調べ、従来の常識に囚われずに基本的な性質を調べる努力をおこなっている。今までの各種試験や解析検討の結果、従来の評価方法や考え方では支承の特性を正確に表現できない点が多々あることが判ってきた。本論文でその結果を公表することにより、今後の構造解析の技術向上や技術開発に役立つと考えた。これらの技術は地震災害防止に貢献すると信じる。

Key Words: Isolater, Functional Classification, Dynamic Characteristics, Laminated Rubber Bearing

1. はじめに

イタリアでは、1908年のMssina-Reggio地震の後で免震構造の検討がされているが、日本において免震構造の研究が盛んになったのはずっと遅く、おそらく1970年代になってから、主として建築構造に対してであろう。土木構造に対してはさらに遅く1980年代になってからではないかと思われる。

従って、土木における免震技術やその考え方の多くは、先駆の外国の研究や建築で使われた技術に依るところが大きく、そこで用いられた方法をそのまま移籍したと思われるものが多い。技術を移籍すること自体は問題ではないが、十分に検討されていないものをそのまま移籍した技術の中には、本質を見失い無意味な検討を要求しているものがいくつか見受けられる。本論文では材料特性などを中心に、本質からズレた考え方や評価方法について2~3の改善提案をおこなった。

なお、本論文では構造上1つにまとまったものを免震支承と呼び、構造上機能分解できる部材を含むものを免震装置と呼び、上部構造と免震装置を含めた構造を免震構造、それを機能として見るとき免震システムと呼ぶことにする。

2. 免震装置の機能分類における考え方

(1) 免震装置の機能分類

免震装置についての機能分類については、Buckle, Mayer, Kelly の分類があるが、Jurukovski の分類が一番解り易いので紹介する。Jurukovski は免震(isolator)をベアリング(bearing)とダンパー(damper)からなるものと機能分類している。この分類において、ベアリングに当たるものとしてフレックス柱、ロッキングホール、スプリング、ゴムなどを挙げている。また、ダンパーに当たるものとして履歴ダンパー、粘性ダンパー、摩擦ダンパー、流体ダンパーを挙げている。

建築学会では、免震支承(bearing isolater)の機能分類として、鉛直支持機能、水平支持機能、減衰機能を挙げている。また、ゴム協会の機能分類では、免震支承はアイソレート、ダンピング、トリガーの機

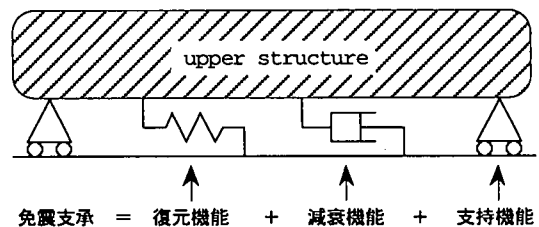


図-1 我々の考える免震装置の機能分類

表-1 免震部材の機能分類

Jurukovskiの分類	提案する分類	
	機能	材種
ベアリングbearing フレックス柱 ロッキングホール バネspring ゴムrubber	支持機能bearing 上部構造の荷重を支える	鋼材/鋼板、スプリング 積層ゴム、油圧/空気圧
	復元機能recovery 上部構造の変位を原位置に戻す	弾性体の復元力 積層ゴム、スプリングなど 重力ポテンシャル ロッキングホール その他
ダンパーdamper 履歴ダンパー 粘性ダンパー 摩擦ダンパー 液体ダンパー	減衰機能damping 上部構造の振動エネルギーを吸収する	履歴ダンパー (≡塑性変形) 鉛/鋼棒、高減衰ゴム 摩擦ダンパー 鋼板+テフロン 粘性ダンパー (≡液体ダンパー) 油の粘性、空気の粘性

能を有しているとしているが、それぞれの部材が何に相当するのか、または概念的な機能分類なのか明確ではない。

我々は、「水平方向」の地震動に対する免震システムにおいて、免震支承を含む装置の機能分類として、Jurukovski や建築学会などとは異なる考え方を持っている。すなわち、支承としての本来の機能である上部構造を支えるという支持機能(bearing)、地震動によって上部構造と下部構造に変位が生じたときに、変位を元に戻す復元機能(recovery)、上部構造の振動エネルギーを吸収する減衰機能(damping)である。

免震支承とは1つ以上の機能を有する部材の集合体であり、集合体としては原則として以上の3つの機能(function)を備えた構造であると考えている。ただし、復元機能を有しない免震支承もある。これを図示すれば、図-1のようになる。この機能分類に従えば、Jurukovski のベアリング機能は、我々の分類における支持機能と復元機能を併せたものと考えられる。また、建築学会の分類の水平支持機能は、我々の分類の復元機能に近い概念と考えられる。表-1にJurukovski の分類と我々の分類の比較を示す。

(2) 各種免震装置の構造分析

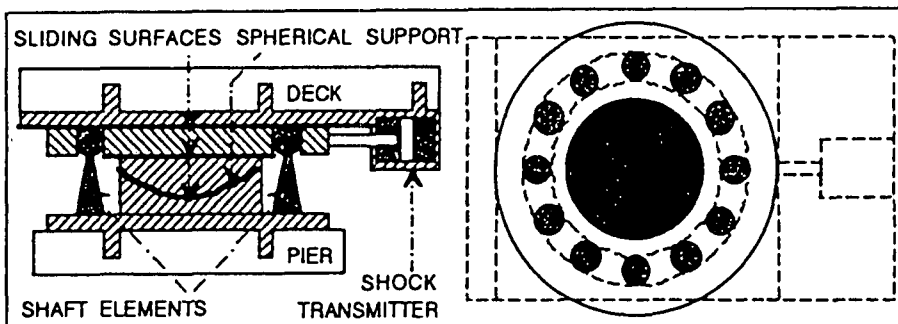
我々の機能分類を実際の支承に当てはめ、現在ある主な免震支承の部材の機能を分析する。

鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)や鋼材ダンパー+積層ゴムでは、鉛プラグや鋼材ダンパーが減衰機能を分担し、積層ゴムが支持機能と復元機能を分担する。ゴムコア入りスライドリム(R-FBI)は、ゴムコアが復元機能を分担し、スライドリムは支持機能と減衰機能を分担するが復元力に対してはマイナスの機能を有する。ゴムコアのないスライドリム支承は支持機能と減衰機能だけを持つ支承である。また、高減衰ゴム支承(HDR)は、一つの部材で3つの機能を持つ唯一の支承である。

特殊な構造の免震支承も、我々の機能分類によれば理解しやすい。例えば、イタリアで開発されたシャフト型免震装置は、図-2に示すように構造上は特異なものであるが、機能分類すれば、復元機能として重力を利用し、減衰機能として塑性変形を利用したものと考えられる。また、Zayasらの開発した摩擦振り子支承(FPS)も、機能構造上はこれに大変よく似ている。

ただし、全ての免震装置が図-1のような並列型

図-2 シャフト型免震支承



の機能を持ったものと言うこともできない。フランス電力公社の開発したEDFベアリングや、アメリカの大学などの共同研究により開発されたNCEERシステムなどは、通常の積層ゴム免震支承に摩擦減衰の装置を直列に繋いだものである。

以上で紹介した以外に、複雑な構造の免震支承が数多く考案されている。しかし、これらは原則として支持機能、復元機能、減衰機能の3つの機能を有し、免震部材の接続構造により、並列型、直列型、ハイブリッド型に全て分類することができる。

3. 免震装置特性のモデル化の問題

この章では、免震装置として積層ゴムを念頭に置き、各種試験方法と特性値の評価方法の問題について提起する。

(1) 特性値の測定方法

免震システムの振動に係わる力学特性（せん断剛性や減衰定数）の測定方法には、以下の3つの方法が考えられる。

- a) 減衰自由振動による振動測定方法
- b) 強制加振振動による振動測定方法
- c) 強制変形による履歴反力-変位測定方法

減衰自由振動は、免震システムに初期変位または初期速度を与え減衰振動を起させ、振幅の対数減衰率や固有周期から剛性や減衰定数を推定しようとする方法である。強制加振振動は、免震構造全体を振動台や起震機で加振して振動を励起させ、定常状態の応答スペクトル特性から力学特性値を推定しようとする方法である。履歴反力測定方法は、写真-1のようなせん断試験機で二軸の荷重を免震装置に与え、免震装置を繰り返しせん断変形させて変位-反力の履歴曲線を測定し、免震部材としての力学特性を調べようとするものである。理論上は3つの測定方

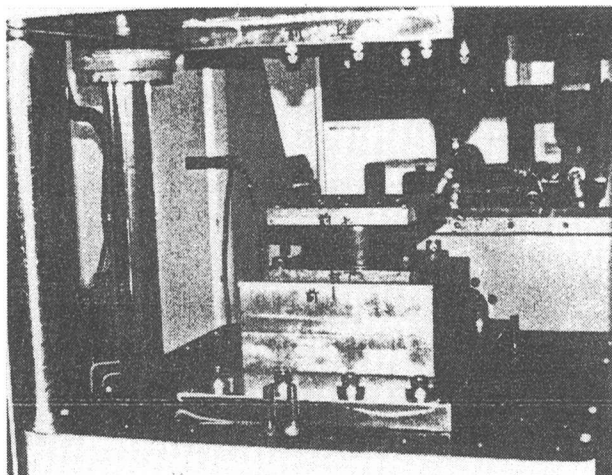


写真-1 ミニチュアモデル用二軸試験機

法によって決められた測定値は同一でなければならないが、実際には誤差が生じるのが通例である。また、解析方法によっても特性値は変化する。この点について、次章で詳細に検討する。

実際に特性値を測ろうとするときは、測定方法が限られてしまう。例えば、積層ゴムなどの免震支承の特性を調べようとするときには、大きな質量の上部構造を振動させるのは困難であり、たとえ振動させたとしても大変形を与えるのは不可能である。そのため、免震装置の測定法には履歴反力測定方法しか採り得ない。この場合、変形の周期が実際の振動周期とはかなり異なる場合がある。例えば、実物大の免震装置の試験では、アクチュエーターの能力不足のために、周期200秒のゆっくりしたsin波による変形試験をおこなっているに過ぎない。従って、履歴反力測定方法は免震システムの振動特性を測っているのではなく、変形量と復元力の関係を計測しているに過ぎないことを注意する必要がある。

(2) 減衰の発生機構

免震装置の減衰の発生機構には、大きく分けて以下の3つが考えられる。

- a) 摩擦型減衰
- b) 粘性型減衰
- c) 履歴型減衰

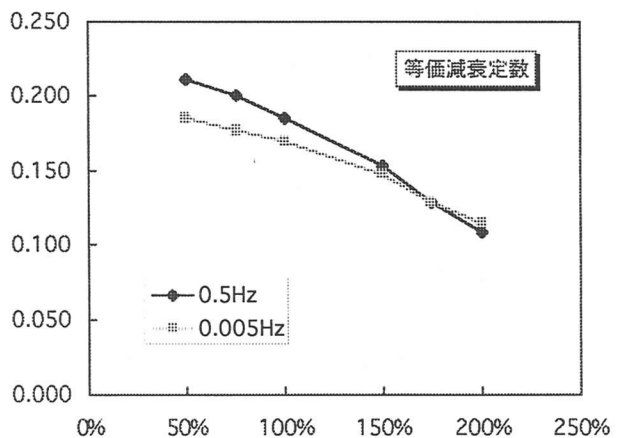
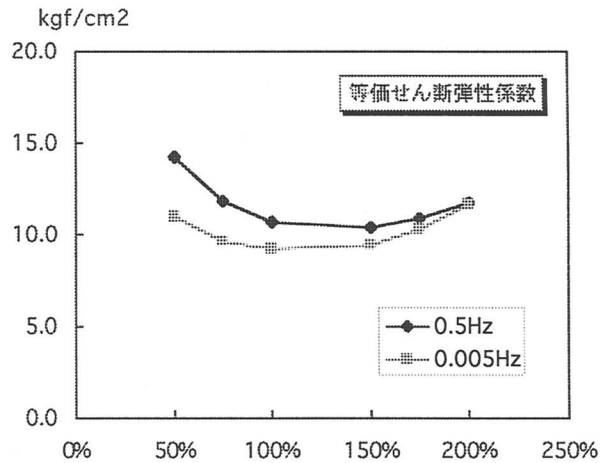


図-3 変形周期の違いによる特性値の推定差

摩擦型減衰としては、鋼板とテフロンの中で摩擦を発生させて振動エネルギーを吸収する摩擦ダンパーが典型例として挙げられる。粘性型減衰としては、油の液体ダンパーや空気ダンパーが挙げられる。履歴型減衰としては、鉛プラグや鋼棒の塑性変形を利用したダンパーが典型としてあげられる。

高減衰ゴムも一応履歴型減衰に分類されるが、実際には振動周期によって特性が異なる。図-3は高減衰ゴム支承のミニチュアモデルを用いて力学特性を調べた結果である。二つの線は、変形周期2秒の場合と200秒の場合の比較である。上図は等価せん断係数であり、下図は等価減衰定数である。建築の免震構造設計指針や土木研究所の免震設計法マニュアル(案) (以後これらをマニュアル類と呼ぶ) では、積層ゴム支承は履歴型減衰として扱われているが、図示したようにかなりの変位速度依存性が見られる。

(3) スケルトン特性のモデル化の問題

マニュアル類では、履歴反力特性(hysteresis loop)から求めた積層ゴム支承の等価弾性係数や等価減衰定数を、各試験の最大せん断歪 γ に対する高次関数でモデル化することを推奨している。例えば、免震マニュアルでは、横浜ゴムのHDRの特性値を以下のように記載している。

$$G(\gamma) = 43.58 - 155.36\gamma + 286.21\gamma^2 - 257.90\gamma^3 + 110.72\gamma^4 - 18.07\gamma^5$$

$$h(\gamma) = 0.2159 - 0.0870\gamma + 0.0397\gamma^2 - 0.0113\gamma^3$$

この式は最大せん断歪10%~200%に対して適用される式であり、原則として25%間隔で歪を変化させた試験の結果から最小自乗法で求めたものである。しかし、高次式であるために最小自乗法の自由度は極めて低い。そのために、以下のような問題がある。

表-2および図-4のように、この式を少しでも適用範囲外の変形に適用しようとする値が急激に変化し、変形量225%以上では弾性係数が負になってしまう。また、マニュアル類で規定される等価弾性係数とは、復元力特性図におけるゼロ点と特性曲線を結んだ割線剛性であるが、接線剛性を求めると図-4のように適用範囲内の変形においても値が大きく変動する。以上の問題は等価減衰定数の評価式にも内在している。

4. 免震装置のモデル化

(1) 各種力学モデル

弾性係数(バネ定数)が k の線形バネと、減衰係数が c の粘性減衰を構成要素として、減衰振動する物体の力学特性を表わすモデルについて検討する。

図-5のように線形バネと粘性減衰を並列に繋げた構造をVoigtモデル、直列に繋げた構造をMaxwellモデルと呼ばれている。ここではさらに、図-5に示すようなVoigt型とMaxwell型を複合した構造をhybridモデル①とhybridモデル②と呼ぶことにする。

通常使われる基本モデルには、VoigtモデルとMaxwellモデルの他に、Voigt型の粘性減衰係数 c を周波数に比例した履歴モデルがある。このモデルでは履歴曲線が振動数によって変わらないが、地震動のような非定常不規則過程の現象に対して時刻歴解析するときは適用できない。

表-2 高次式近似の特性値

せん断歪 γ	割線剛性 Geq	接線剛性 Gtr	復元力 Fra
0.00	43.58	43.58	0.00
0.25	19.01	5.50	4.75
0.50	11.57	5.14	5.79
0.75	10.00	7.75	7.50
1.00	9.18	5.07	9.18
1.25	8.04	2.64	10.05
1.50	7.40	7.05	11.10
1.75	7.88	13.30	13.80
2.00	7.78	-7.98	15.56
2.25	0.94	-123.18	2.12
2.50	-25.34	-448.42	-63.36

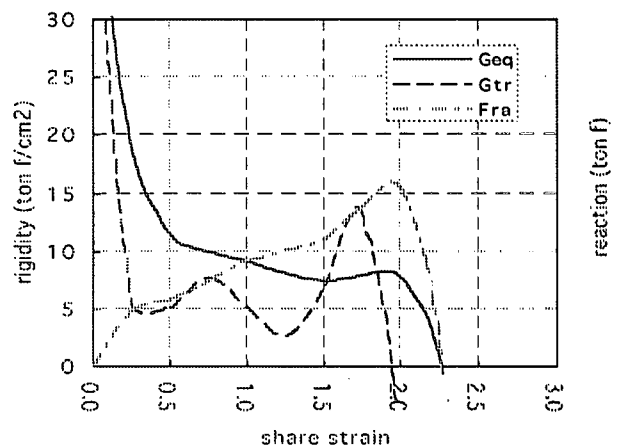


図-4 高次式近似による特性値

Voigt model Maxwell model hybrid model ① hybrid model ②

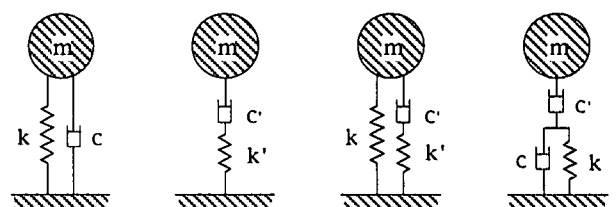
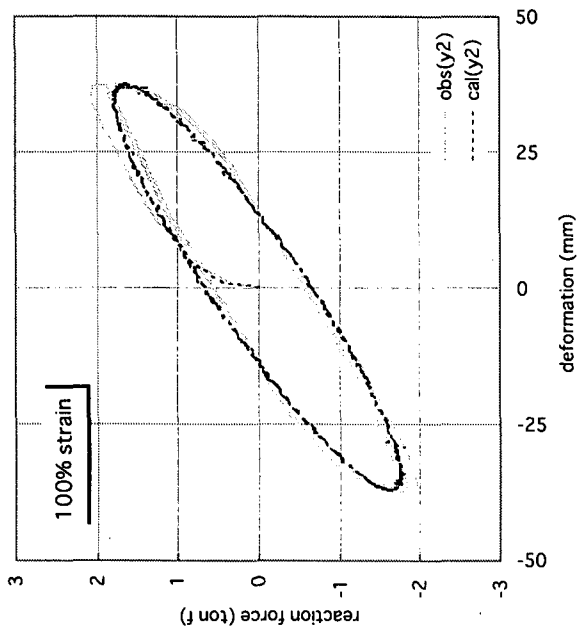
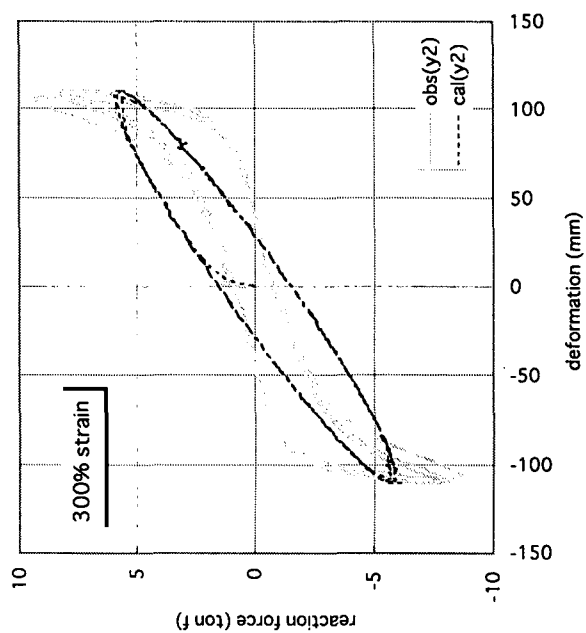


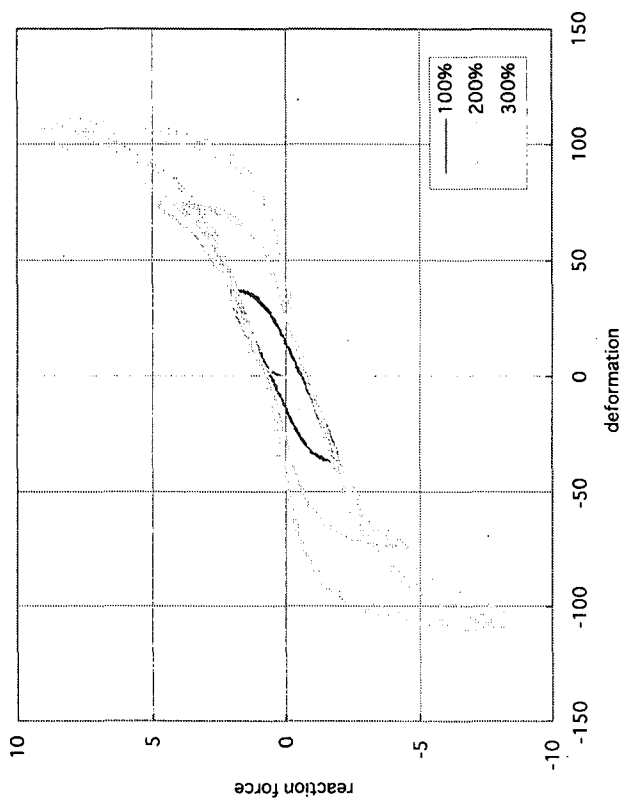
図-5 基本的な力学モデル



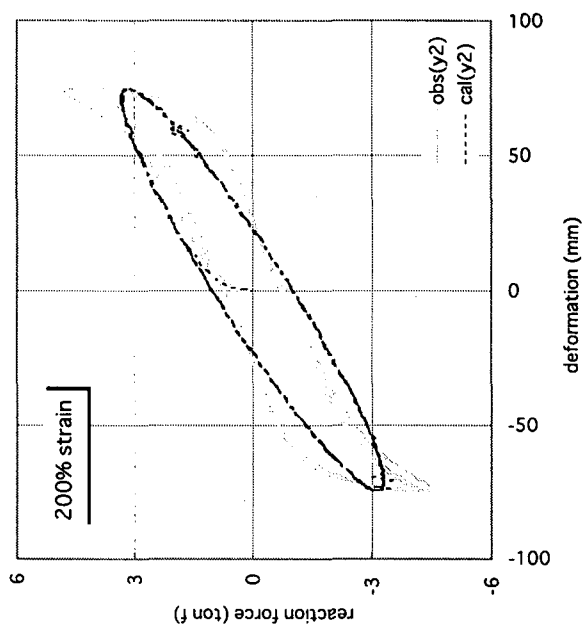
7



9



6



8

(2) 特性値の同定方法と適用の問題

図-6は、高減衰積層ゴム支承(G8)に100%, 200%, 300%の最大せん断変形を与えたときの履歴曲線である。この履歴曲線から、Voigt型モデルを仮定して免震ゴム支承の復元力特性値 k, c を求めることを考える。図-7, 図-8, 図-9は、それぞれ100%, 200%, 300%のせん断歪に対して最小自乗法により k, c を求めたときの結果である。実線は復元力の観測値を示し、波線は同定した k, c から求めた復元力の計算値である。

マニュアルでは、図-10のように変形速度ゼロになったときの割線剛性を等価剛性とし、振動エネルギーに対する一周期の減衰エネルギーの割合から減衰定数を求めている。この方法もVoigt型モデルを想定した計算法と考えられるが、最小自乗法で求めた値と比較するとどうであろうか。

図-11, 図-12, 図-13は、それぞれせん断弾性係数 G (剛性)、粘性減衰係数 c 、減衰定数 h の比較である。なお、剛性 G や減衰係数 c は一義的に定まるが、振動数 ω_0 や減衰定数 h は振り子の質量 m を決めなければ定まらない。そこで、積層ゴムの面圧が100kgf/cm², 80kgf/cm², 60kgf/cm²に相当する質量を想定して比較をおこなった。図-11~13を見ると、同じVoigt型モデルを想定しても算定される特性値にかなりの差が見られる。この差は、積層ゴムの力学特性がVoigt型モデルの特性とはかなり異なる性質を有しているための考えられる。

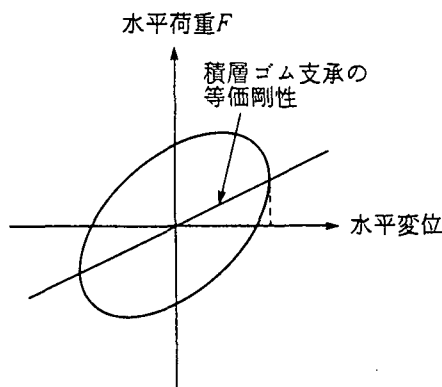


図-10 マニュアルにおける特性値の決定法

5. 非線形性のモデル化

(1) バイリニアモデルの適否

図-14は300%変形の際の復元力特性である。マニュアルでは、この復元力特性を二つの剛性を有するバイリニアモデルでモデル化する方法が推奨されている。バイリニアモデルでは、履歴試験における最大せん断変形時の割線剛性を等価剛性として、

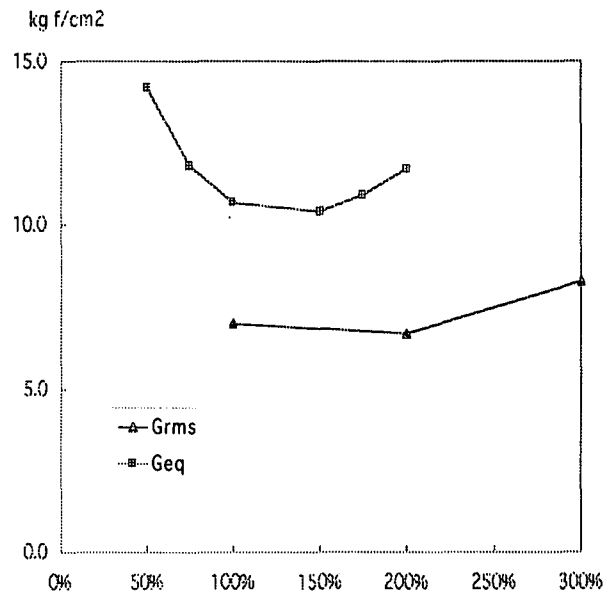


図-11 せん断弾性係数特性

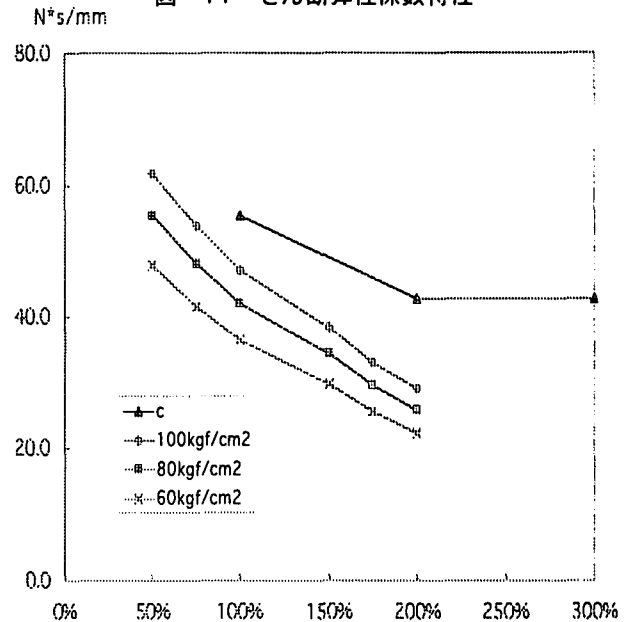


図-12 減衰係数特性

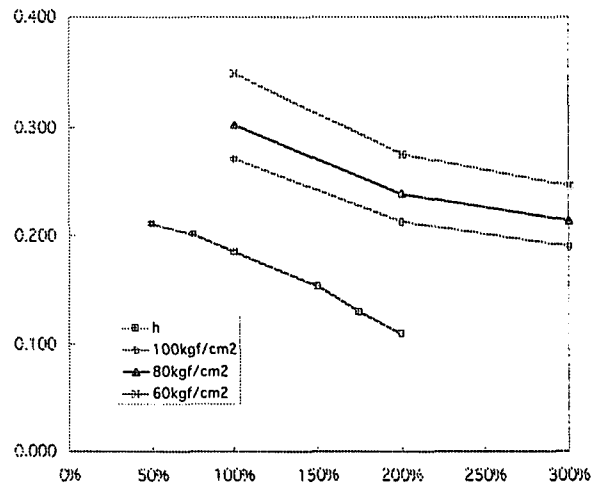


図-13 減衰定数特性

バイリニアモデルの最大変形時の割線剛性を合わせるようにモデルを決めている。現在、免震システムの振動解析はこのバイリニアモデルを使って時刻歴解析がおこなわれているようである。このモデルは200%以下の変形するときには適当なモデルであるかもしれないが、図示したような大変形時の非線形問題に対しては適当ではない。

また、一般にバイリニアモデルでは、モデルの履歴ループの面積を実験のヒステリシスループの面積と一致させて、減衰を合わせることを推奨している。その場合には、一次剛性がマイナスになることもある。このようなモデルは、解析上、究めて不適当である。

(2) ハードニングモデルの提案

前述のように、バイリニアモデルは積層ゴムのようなハードニング現象を生じる材料に対して用いることは適当ではない。そこで、図-14のように大変形になると著しくハードニングするシステムに対して、まったく新しい力学モデルを考えたのでここで紹介する。

上部構造がx方向に水平変位するときに、x方向以外の方向に線形バネを付加した上にx方向以外の方向の変位の自由度を拘束することによって、見かけ上、非線形なハードニングやソフトニング現象を表現するモデルである。例えば、図-15はx方向の水平バネの他にz方向に鉛直のバネを付加したモデル

である。このモデルでは、小変形時には水平バネだけが復元力に作用し、大変形になると鉛直バネが復元力に加わり、結果として非線形を表現できる。

図-16, 17は、図-15のハードニングモデルの構成要素に適当な物性値を与えたときの復元力-変位特性と、せん断弾性係数-変位特性である。図-17に、総合的な復元力特性を実線で示してある。実際には、チューニングを行って非線形材料の試験結果に合うように構成要素の物性値を決めればよい。

(3) 履歴モデルの提案

実験の履歴ループの結果に合うような力学モデルはまだ見つかっていない。見通しとしては、前述のハードニングモデルの水平バネをhybridモデル①またはhybridモデル②で置き換えることにより、近似表現できるのではないかと考えられる。

6. まとめ

土木技術の歴史から見ると、日本の免震構造の歴史は浅く、免震装置の研究や免震システムの研究において、十分な検討がされたとは言い難い。たとえば、機能分類に関しても土木学会としての考え方がまとめられていない。また、積層ゴムの特性の評価方法でも、材料の性質とは掛け離れた評価法が実施されている。そこで、我々はいくつかの問題を提起し、改善方法に関する提案をおこなった。

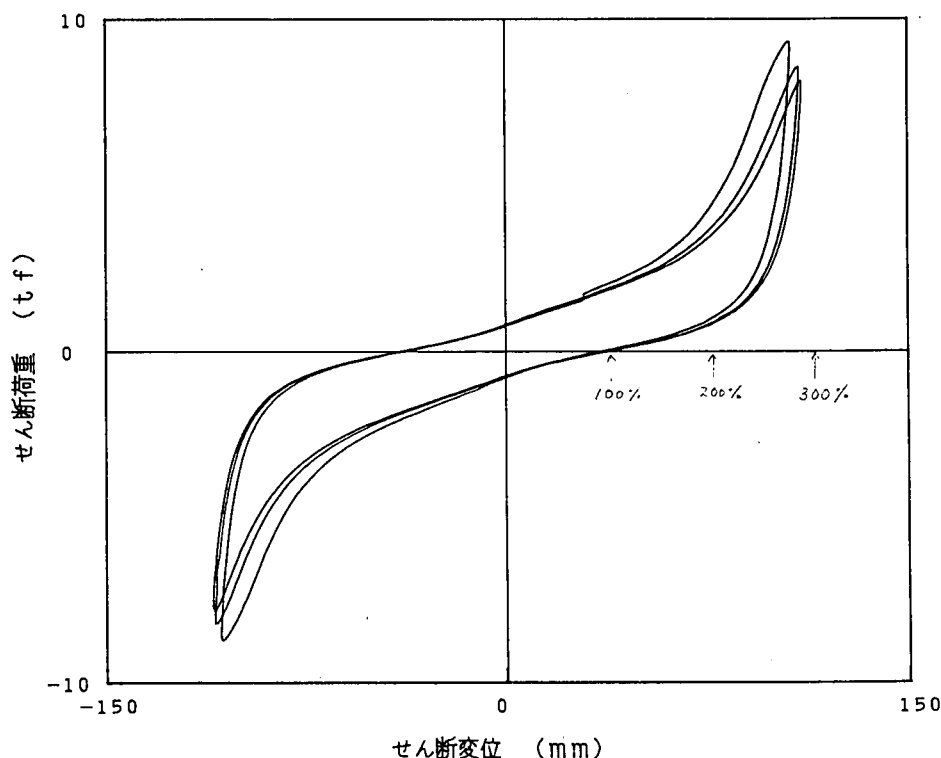


図-14 300%せん断変形の履歴曲線(hysteresis loop)とバイリニアモデルの比較

非線形性に対しては、従来は変形方向に各種の非線形を入れてモデル化する努力がされてきた。その中にはMathieuの振動方程式のように理論的に解を求めたものもあるが、一般に非線形性の解は極めて難解であり、現実の免震装置の特性を表わすのは現実的とは言えない。

これに対して我々は、変位の方向とは異なる方向に線形材料を付加して非線形性を考慮するまったく新しい方法を考えた。文献調査をした限りでは、変位方向以外の方向にバネを付加して非線形性を表現するという方法は例がない。

しかし、この方法は机上の単なる奇抜なアイデアではなく、ゴムのような非線形材料を表現するのに適当な実用性の高いモデルである。このモデルを用いることにより、従来の線形解析プログラムを多少修正するだけで地震応答解析ができるというメリットもある。そのときの線形材料の特性値は実際の材料の特性に合うように予めチューニングをおこなえばよい。

参考文献

- 1) D. Jurukovski, et al.: Vibratiion base isolation development and application, 10th Euro. Cjon. on Earthq. Eng., 751-754, 1995.
- 2) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 丸善, 1993.

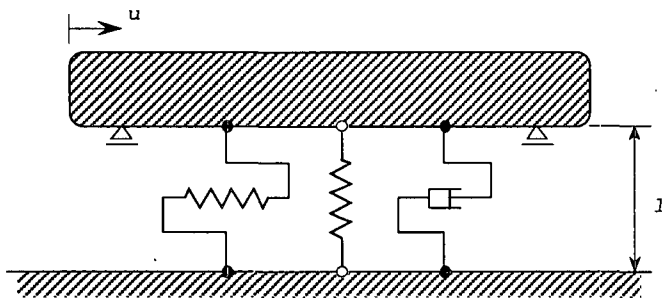


図-15 疑似非線形力学モデル

- 3) 建設省土木研究所: 道路橋の免震設計法マニュアル(案), (財)土木研究センター, 1995.
- 4) 免震構造用積層ゴム特別委員会: 免震構造用積層ゴムの寿命と信頼性, 日本ゴム協会, 1988.

(1996年9月14日受付)

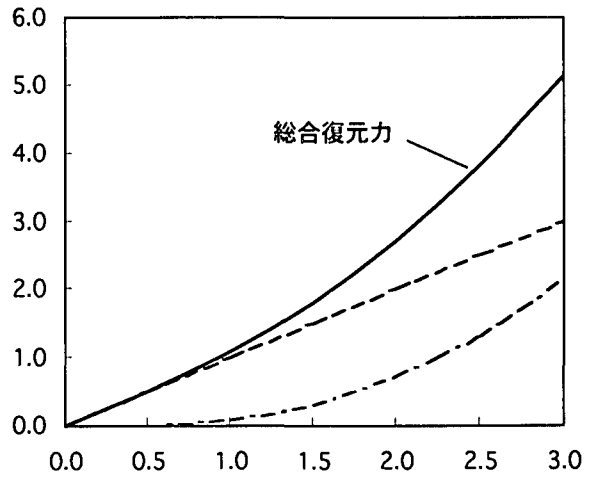


図-16 正規化した復元力特性

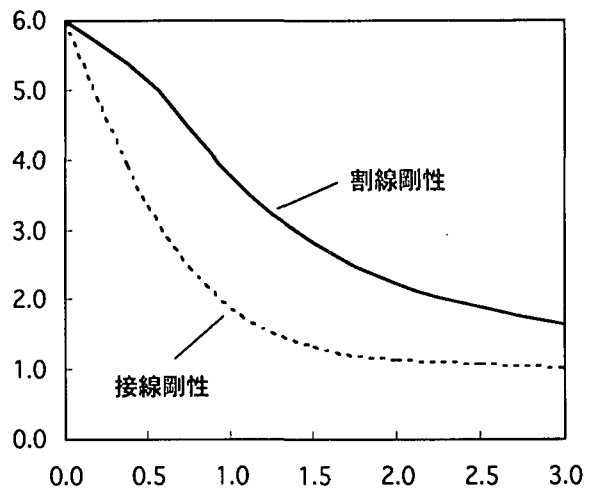


図-17 正規化したせん断剛性特性

STATE OF THE ART ON BEARING ISOLATION SYSTEM AND PROGRESSIVE SUBJECT

Yoshihiko AKAO, Chikafumi YAMADA, Yoichi HONMA, Eiichi, KAWABATA

We are constantly collecting and investigating literatures regarding to bearing isolation system in the world. We are also testing a big number of laminate rubber bearings to get dynamic and static characteristics of them.

As a result of those surveyes, it was found that surprisingly much kinds of isolation systems are existing or proposed in foreign countries. It seems difficult even to classify those isolation systems. First in this paper, we proposed simple functional classification for bearing isolation systems. As another result of the surveyes, it was found several inadequate estimation procedures or analyzing methods are existing. In this paper, we remark some important problems and indicate some revising methods.