

免震装置の最適設計に関する基礎検討

FUNDAMENTAL STUDIES ON OPTIMUM DESIGN FOR BASE ISOLATION DEVICE

鈴木 英世* 海津 信廣** 竹内 幹雄*** 高橋 一成****

By Hideyo SUZUKI, Nobuhiro KAIZU, Mikio TAKEUCHI and Kazushige TAKAHASHI

This paper deals with comparison of three kinds of base isolation devices; elasto-plastic, frictional and viscous device. And this paper describes that optimum characteristics exist separately for the three kinds of base isolation devices from a point of view of high reduction of response acceleration and moderate relative displacement due to base isolation devices. Quantitative solutions of equations of motion and energy are presented in this paper for the three types of base isolation devices with various input wave patterns which can be expected to occur at major sites of different types of ground conditions. Comprehensive characteristics of general base isolation devices are shown and the presented data are thought to be available for designers in decision of isolation method and for basic design use.

1. まえがき

筆者らは、電力施設の耐震性能を高める方法のひとつとして、免震装置の実用化を目指し、解析・装置の試作及び検証実験などを行っている。^{1) 2)} 一方、国内外では建築構造物を中心に免震装置が相次いで採用され、かなりの数の建物に実用化されている。免震装置は、各種方式のものが各機関で開発されており、現実的な形式についてはほぼ出揃った感がある。³⁾

これらの、実際の設計にあたっては、免震装置の物性値を設定し、構造物の特性、建設地点の地震動の特性等を考慮に入れて動的応答解析が個々になされている。従って、採用した値はそれぞれの構造物の検討としては十分なものであると考えられるが、一般論として免震方式の選定の考え方や各々の方式の最適な特性値の設定方法は必ずしも確立していないように見受けられる。

本文では、上述の総合的な実用化検討のうち、最適設計に関する解析的な基礎検討の結果を述べる。ここでは弾塑性・摩擦及び粘性の3種の免震装置を対象とした。これらの装置を基礎と構造物の間に設けるものとし、その基本設計に際し1) 対象とする構造物に適した免震装置の方式を選択すること、2) 各方式の免震装置の最適設計の基礎資料を得ること、を目的とし地震応答解析による検討を行った。

*	工修	東京電力(株)	技術研究所	(〒182 調布市西つつじヶ丘2-4-1)
**	工修	東京電力(株)	技術研究所	(〒182 調布市西つつじヶ丘2-4-1)
***	工修	(株)奥村組	東京支社	(〒107 港区元赤坂1-3-10)
****		(株)奥村組	東京支社	(〒107 港区元赤坂1-3-10)

2. 免震方式の分類

現在迄に様々な方式の免震装置が提案され、その一部は実用化されている。これらの方式は、(i) 固有周期調節方式、(ii) エネルギー吸収方式、(iii) 絶縁方式、(iv) 特殊構造方式、(v) 自動制御方式、(vi) 遮へい方式の6種類に分類することができる。⁴⁾ この中で最も実用化が進んでおり、構造物への適用性が有望視できるのは、(i) と (ii) を組み合わせた方式である。

すなわち、(i) 積層ゴムに代表される水平方向の剛性の小さい重量支持装置で固有周期を調整し、(ii) それに並列にエネルギー吸収装置を設置する方式である。本報告ではこの方式を対象とし、エネルギー吸収装置の違いによりさらに弾塑性系、摩擦系、粘性系に分類し検討を行った。各エネルギー吸収装置と復元バネを組み合わせた復元力特性を図-1に示す。

3. 解析モデル

解析モデルは、図-2に示すとおり構造物とその基礎部に設けた免震装置からなるものとした。このうち構造物は水平方向1自由度、免震装置がない場合の1次の固有周期が0.25秒となる1質点モデルとした。構造物に免震装置の柔い復元バネが接続されることにより、地震時には免震装置の特性が優勢となり、構造物がほぼ剛体的な挙動を示すことが、解析・実地震観測^{5) 6)}で確認されており、このように構造物の特性を特定しても、一般性が大きくは損われないと考えられる。想定した免震装置は、復元バネとエネルギー吸収装置を組み合わせたものであり、構造物と同様水平方向の自由度のみを考えた。

4. 入力地震波の設定

入力地震波は、幅広い地盤条件に対応した地震動の特性の違いを考慮できるよう、3種類の模擬地震波を設定した。模擬地震波の作成方法は、実地震波の位相特性を使い、振幅特性を目標応答スペクトルに合うように振動数領域で変化させる方法を用いた。目標応答スペクトルは、道路橋示方書(耐震設計編)の地盤種別毎のスペクトルを参考に、スペクトルを1種、2・3種、4種に分類し、各々のスペクトルを包絡するように図-3に示すとおり3種類設定した。実地震波には、1種地盤には開北橋TR波(宮城県沖地震1978)を、2・3種地盤にはエルセントロNS波(Imperial Valley地震1940)を、4種地盤には細島EW波(日向灘沖地震1968)を選んだ。作成した模擬地震波を図-4に示す。

5. 解析方法

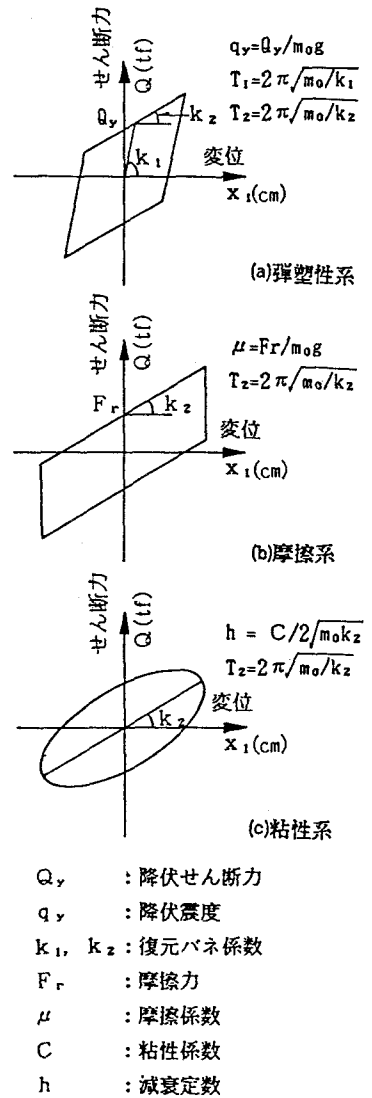


図-1 各免震装置の復元力特性

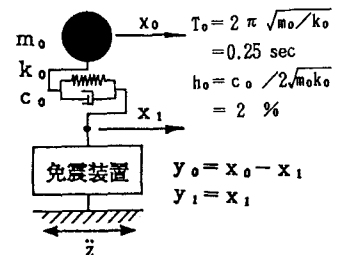


図-2 解析対象モデル

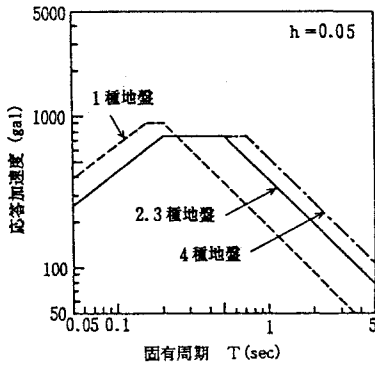


図-3 応答加速度スペクトル

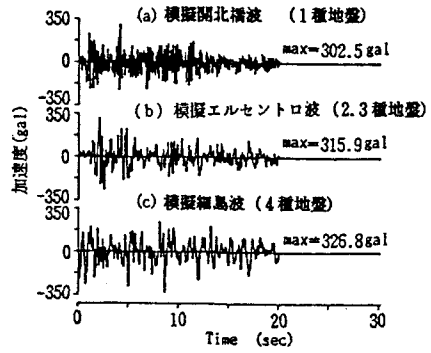


図-4 入力模擬地震波

図-1に示した弾塑性系・摩擦系・粘性系の各方式を用いた場合の運動方程式は(1)~(4)式のとおりとした。また、免震装置に入力されるエネルギー量については式(5)により算定した。

6. 解析結果及び考察

(1)弾塑性系免震装置

図-5(a)(b)は、弾塑性系免震装置の降伏震度 q_y (図-1(a)参照)と最大応答加速度・変位の関係を示したものである。この図では、復元力特性の第一剛性(復元バネ+ダンパーのバネ)、第二剛性(復元バネ)から得られる T_1 、 T_2 をそれぞれ1.0秒、2.0秒としている。

応答加速度は、いずれの地震波に対しても $q_y=0.04$ 付近で最小値を示し、免震装置がない場合の1/4程度に低減されている。このことは応答加速度を最小にする q_y 値の時に、変位~せん断力の履歴ループが最も有効な形状となっていることを示している。

応答変位については、各種地盤とも q_y が0.04より大きい範囲ではほぼ一定となっているが、0.04より小さくなると急激に増大している。

図-5(c)に、降伏震度 q_y とエネルギー吸収率の関係を示す。エネルギー吸収率は免震装置のダンパー吸収エネルギーを入力エネルギーで除し(E_4/IE)、無次元化したものである。

運動方程式

a) 弾塑性系システム

$$\begin{aligned} m_0\ddot{x}_0 + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= -m_0\ddot{z} \\ c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= Q(x_1, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$Q(x_1, t)$: 免震装置の復元力

b) 摩擦系システム

滑りがない場合

$$\begin{aligned} m_0\ddot{x}_0 + c_0\dot{x}_0 + k_0(x_0 - x_1) &= -m_0\ddot{z} \\ |c_0\dot{x}_0 + k_0(x_0 - x_1) - k_2x_1| &\leq Fr \\ x_1 &= \text{const.}, \quad \dot{x}_1 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

滑りがある場合

$$\begin{aligned} m_0\ddot{x}_0 + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= -m_0\ddot{z} \\ c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= k_2x_1 + Fr \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1) \\ |c_0\dot{x}_0 + k_0(x_0 - x_1) - k_2x_1| &> Fr \end{aligned} \quad (3)$$

k_2, Fr : 免震装置の復元バネ係数 摩擦力

c) 粘性系システム

$$\begin{aligned} m_0\ddot{x}_0 + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= -m_0\ddot{z} \\ c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_0(x_0 - x_1) &= C\dot{x}_1 + k_2x_1 \end{aligned} \quad (4)$$

k_2, C : 免震装置の復元バネ係数 粘性係数

エネルギー方程式

$$\begin{aligned} \int_0^t m_0\dot{x}_0\dot{x}_0 dt + \sum_{E_1} \int_0^t c_1\dot{y}_1\dot{y}_1 dt \\ + \sum_{E_3} \int_0^t k_1y_1\dot{y}_1 dt + \int_0^t Q(x_1, t)\dot{x}_1 dt - \int_0^t m_0\dot{z}\dot{z} dt &= IE \end{aligned} \quad (5)$$

- E_1 : 運動エネルギー
- E_2 : 復元バネ吸収エネルギー
- E_3 : 復元バネ弾性エネルギー
- E_4 : ダンパー吸収エネルギー
- IE: 入力エネルギー

どの地震波に対してもエネルギー吸収率を最大にする q_y が存在し、その値は $q_y=0.02\sim 0.06$ となり、応答加速度・変位を最小とする値とはほぼ一致している。また、軟弱な地盤になる程この値は若干大きくなる傾向にある。

次に、図-5(d)に、復元バネ定数から得られる T_2 と最大応答加速度・変位及び残留変位の関係を示す。入力波は模擬エルセントロ波とし、降伏震度は上記結果から $q_y=0.04$ を用いた。応答加速度は T_2 を2.0秒より大きくしてもそれほど低減しないが、2.0秒より小さくすると急激に増大する。応答変位は $T_2=2.0$ 秒付

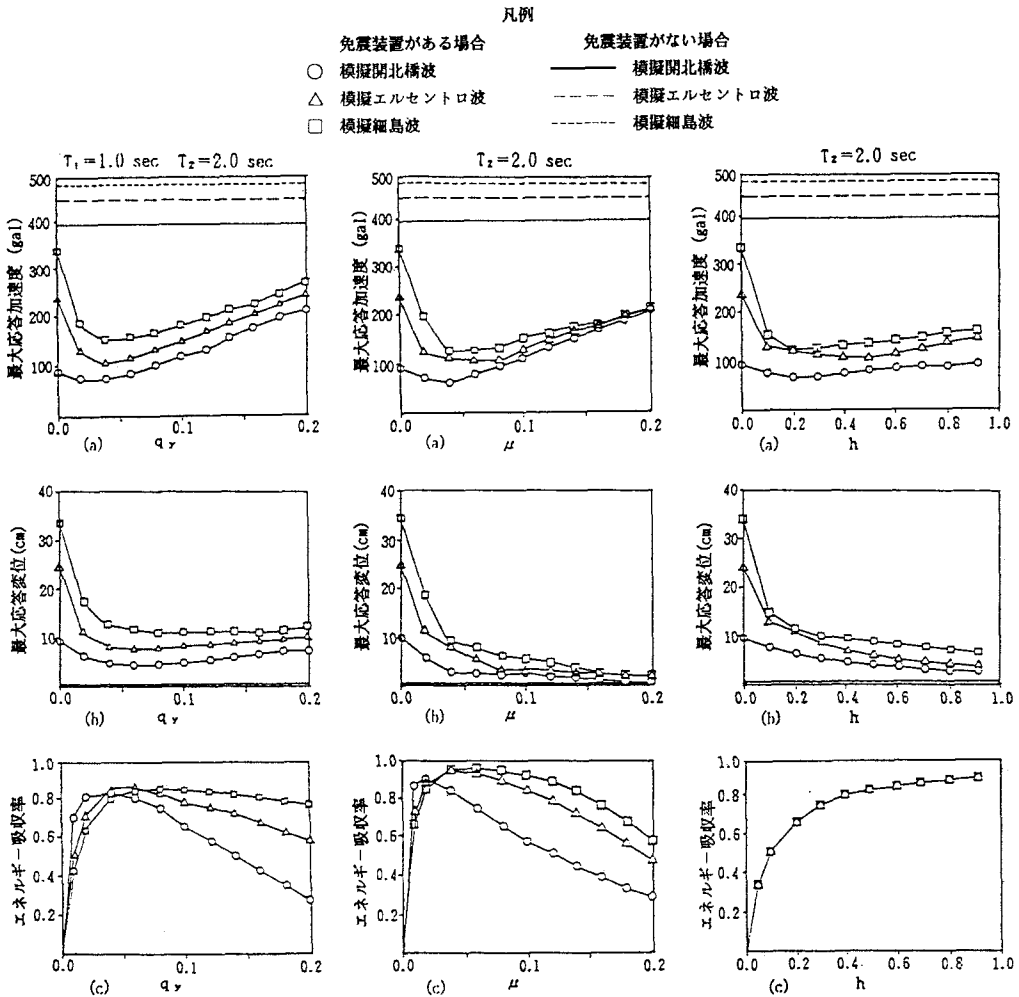


図-5 弾塑性系応答結果

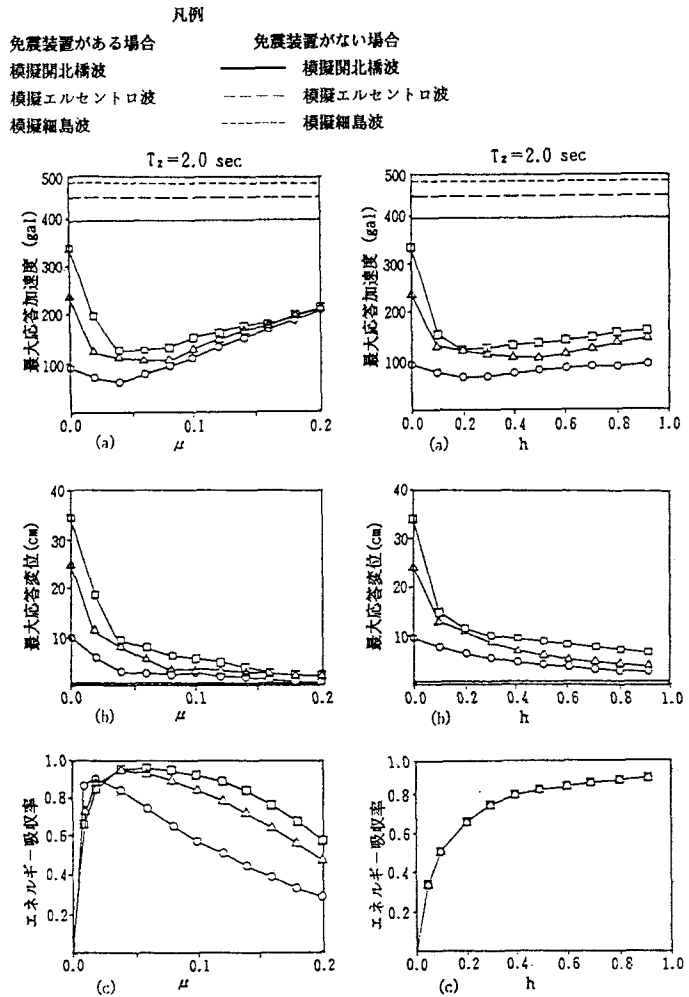


図-6 摩擦係数応答結果

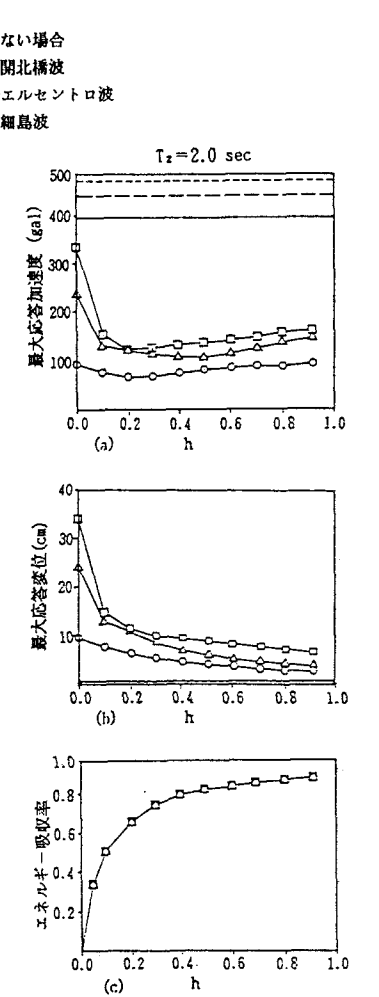
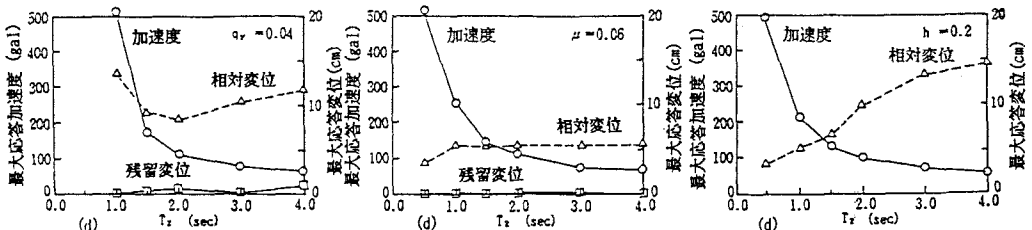


図-7 粘性系応答結果



近で最小値を示す。以上の結果より、弾塑性系免震装置においては、降伏震度 $q_y=0.04$ 程度、復元バネ定数は $T_2=2.0$ 秒程度に設定すれば応答加速度を最小にすることができる。

(2) 摩擦系免震装置

図-6(a)(b)は、摩擦系免震装置の復元バネ定数から得られる T_2 を2.0秒とした場合の摩擦係数 μ と最大応答加速度・変位の関係を示したものである。

応答加速度は弾塑性系の場合と同様、どの地震波に対しても μ がある値で最小値をとることがわかる。その μ の値は地震波によって若干異なるがほぼ $\mu=0.04\sim 0.08$ の範囲内にある。応答変位は $\mu=0.04$ 以上では漸減しており、 μ の値を適切に設定すれば変位の制御が可能である。

次にエネルギー吸収率について示したものが図-6(c)である。どの地震波においてもエネルギー吸収率を最大とする μ は $0.02\sim 0.08$ の範囲であり、応答加速度を最小にする値とおおむね一致する。

次に模擬エルセントロ波に対して $\mu=0.06$ とした場合の、復元バネ定数から得られる T_2 と最大応答加速度変位及び残留変位の関係を図-6(d)に示す。応答変位は $T_2=1.0$ 秒以上ではおおむね一定となり、応答加速度は T_2 が大きくなる程小さくなる。

以上の結果より摩擦系免震装置においては、復元バネの T_2 を1.5~2.0秒程度に、摩擦係数を0.04~0.08程度に設定すれば応答加速度を最小とすることができる。しかし、現実の免震装置¹⁾では最大相対変位を抑制するために $\mu=0.08\sim 0.12$ 程度を採用している。

(3) 粘性系免震装置

図-7(a)(b)は、粘性系免震装置の復元バネ定数から得られる T_2 を2.0秒とした場合の、免震装置の等価減衰定数 h と最大応答加速度・変位の関係を示したものである。

応答加速度は $h=0.2$ 以上になるとほぼ一定の値を示しているが、それ以下では1種地盤を除いて急激に増大している。免震装置がない場合と比較してみると、応答は $h=0.2$ で1/4程度になり、弾塑性系、摩擦系と同程度低減している。応答変位は $h=0.2$ 以上になると、 h が大きくなるにつれ徐々に小さくなる。

図-7(c)は、 h とエネルギー吸収率の関係を示す。 $h=0.1$ 以内では h が大きくなる程増大するが、 $h=0.1$ 以上では大きな増大は示さなくなる。また、エネルギー吸収率は入力地震波に関係なく各減衰定数で一定になっているが、これは粘性減衰力が速度に線形に比例すると仮定しているからであり、現実の免震装置では必ずしも一定にはならない。

図-7(d)に、復元バネ定数から得られる T_2 と各応答値の関係を示す。 $h=0.2$ とし、模擬エルセントロ波を入力した場合である。これは入力地震波の応答スペクトルを意味し、 T_2 が大きくなるにつれ応答加速度は小さく、変位は大きくなる。

以上の応答加速度・変位の結果から、どの地震波に対しても $h=0.2\sim 0.8$ の広い範囲で免震効果が現れることが示されている。

7. 免震方式による応答特性の比較

地震応答解析で得られた結果をもとにして同一の復元バネを用

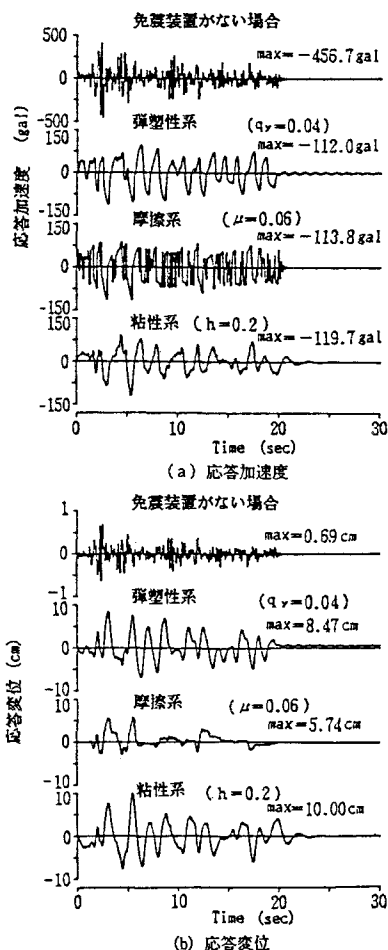


図-8 応答波形

い、エネルギー吸収装置で最適と考えられる物性値を設定して、免震方式による応答特性の比較を行った。設定した各免震装置のパラメータは、弾塑性系では $q_y=0.04$ 、 $T_1=1.0$ 秒、摩擦系では $\mu=0.06$ 、粘性系では $h=0.2$ である。

復元バネ定数は各方式とも $T_2=2.0$ 秒となるよう設定し、入力波は模擬エルセントロ波とした。なお、解析モデルは図-2に示すモデルとした。

図-8(a)に、構造物の応答加速度波形を示す。弾塑性系・粘性系では高振動数成分はほとんど含まれていないが、摩擦系では高振動数成分をかなり含んでおり、波形のピーク部分が約70gal以上でカットされた形状となっている。最大応答加速度はどの方式でもほぼ同程度であり、免震装置がない場合の1/4程度となっている。また、弾塑性系では地震入力の終了後(20秒後)も、残留振動がしばらく続いていることが特徴である。

図-8(b)に、構造物の応答変位波形を示す。弾塑性系・粘性系では類似の波形を示しているが、摩擦系では異なった波形を示し、すべりがある場合とない場合がくりかえされていることが示されている。

図-9に、図-8(a)の応答加速度波形のフーリエスペクトルを示す。粘性系では、復元バネで固有周期が調整されているため、0.5 Hz付近の成分が卓越しており、弾塑性系では第1剛性の影響で卓越振動数が0.73Hzと若干高くなっている。摩擦系では免震装置がない場合とほぼ似た形を示し、種々の振動数を含んでおり、固有周期調整機能が弾塑性系・粘性系に比べ小さいことがわかる。

図-10に入力加速度をパラメータとした場合の構造物の応答を示す。この時の各免震装置の物性値は図-8と同じであり、最大入力加速度が300gal程度として設定した時のものを用いた。なお、入力地震波は模擬エルセントロ波である。応答加速度については、弾塑性系・摩擦系では100gal以下の範囲では、エネルギー吸収機能が働かず、応答の低減効果はほとんどない。粘性系では入力加速度の増加に伴いほぼ線形的に増大するが、低加速度レベルにおいても応答を低減させている。入力加速度が300gal以上では三方式ともほぼ同じ値となっている。応答変位については、弾塑性系・粘性系ともほぼ線形的に増大し、免震装置がない場合に比べてかなり大きな値となっている。摩擦系では、200gal程度までは免震装置がない場合と同程度の値を示すが、それ以上になると急激に増大している。

三方式を比べてみると、い

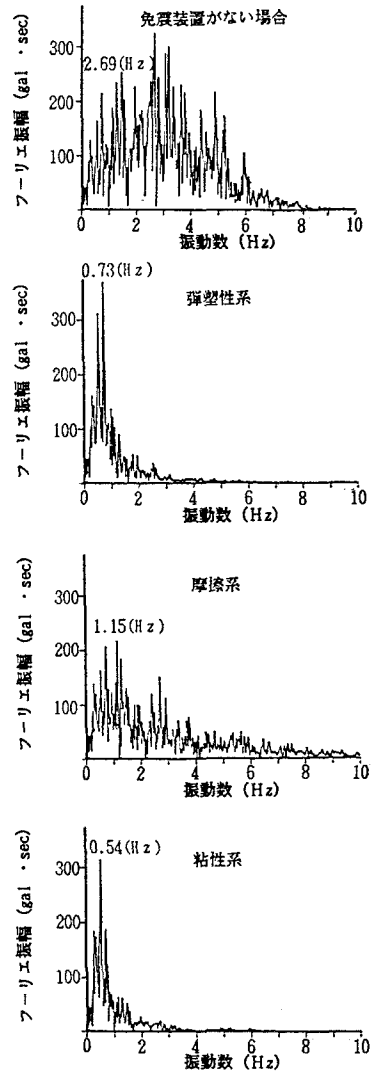


図-9 各種の免震システムの
応答加速度フーリエスペクトル

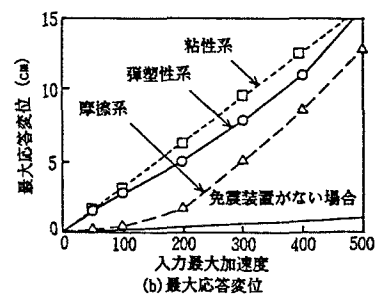
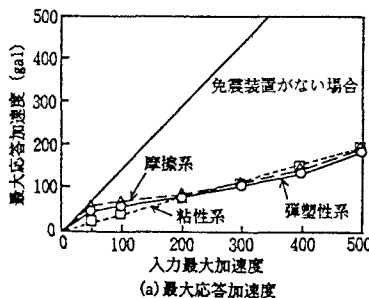


図-10 入力最大加速度と最大応答の関係

ずれも免震装置がない場合より大きな値となるが、この中では摩擦系が最も応答変位を小さく抑えることができる。図-11に構造物の加速度応答スペクトルを示す。これは図-8(a)の応答加速度波形を用いたものである。弾塑性系・粘性系の応答は短周期領域で大きく低減しているが、長周期領域でピークを持ち逆に免震装置がない場合より大きくなっている。摩擦系では短周期領域では弾塑性系・粘性系より大きな値を示すが、狭帯域でピークを持たないのが特徴である。

8. 結論

免震装置をエネルギー吸収方式の違いにより3方式に分類するとともに、入力地震波として地盤条件により3種類の模擬地震波を設定し地震応答解析を行った。主な結果は以下の通りである。

① 対象とする構造物に応じ、

- i) 加速度低減効果
- ii) 最大相対変位の制限
- iii) 小地震の際の作動の必要性

などに着眼し、免震装置の方式を選択する為の基礎資料が得られた。

② いずれの入力地震波に対してもそれぞれの免震方式ごとに、加速度の低減効果が最大となるパラメータが存在し、最適設計が可能であることがわかった。

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に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 海津・堀口・真紫：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) Suzuki, H., Sugi, H. et al. : Studies on Aseismic Isolation Device for Electric Substation Equipment, 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, June, 1987.
- 3) 日本建築センター：ビルディングレター，No. 217号，1987年8月。
- 4) 松田・青柳・塩見：免震構造に関する調査，電力中央研究所報告，No.385010，1985年10月。
- 5) 竹内・原田他：免震構法とその実証実験，火力原子力発電，pp.37～47，1987年5月。
- 6) 青柳・大塚他：免震構物の地震時挙動に関する研究，日本建築学会大会講演概要集，pp.755～758，1987年5月。
- 7) Watanabe, H., Tochigi, H.: A Consideration on the Equivalent Linearization of Restoring Force Characteristic of Structures, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 1, 2, No.1, pp.195～205, April, 1985.

(1988年10月12日受付)

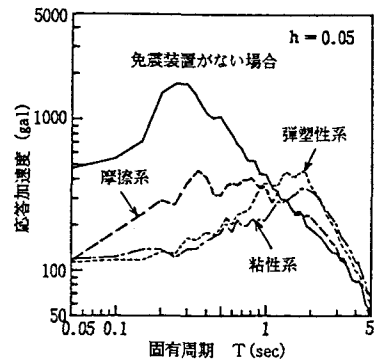


図-11 加速度応答スペクトル