研　究　速　報
UDC 699.841:001.891:621.826

予引張あるいは予圧縮ばねを利用した免震床の研究
(第6報　実大免震床についての解析—その1—)

An Earthquake Isolation Floor Using Pre-Tensed or Pre-Compressed Springs
(6th Report: Analysis for Actual Earthquake Isolation Floors —Part 1—)

藤　田　隆　史*・服　部　　忍*
Takafumi FUJITA and Shinobu HATTORI

1. ま え が き

本研究では予引張あるいは予圧縮ばね（通常は予引張ばね方式が採用される）による非線形復元力特性を利用した免震装置，免震床を考案し，それについての基礎および実用化研究を行っている．研究の第一段階では免震装置の特性についての基礎研究[1)~3)]を行い，次の第二段階では実際の電算機システムを搭載した実大モデルによる加振実験[4),5)]を行っている．現在，研究の第三段階として実大免震床についての解析を進めており，その結果は本報と続報で述べられる．

2. 地震動による建物の床応答

図1は1978年宮城県沖地震の際に東北大学工学部建設系研究棟（地上9階建地下なしの鉄骨鉄筋コンクリート造）の1階床（地表）と9階床で記録された地震加速度の三成分記録である．1Gを越える床応答加速度が記録されたことで有名になった記録であるが，中低層建物における床応答の典型例と考えることができる．この場合，1階と9階の最大加速度を比較すると，NS方向で4.0倍，EW方向で2.6倍，UD方向で2.3倍の増幅がみられる(図7の破線参照)．一般に中低層建物では建物の高さにあまり関係なく屋上階で大略3倍程度に，中間層ではほぼ直線的に増幅するという性質は多くの調査や解析から認められている．図2は9階の床応答記録から作成した床応答スペクトルであり，横軸に当該床上の一質点系（機器）の固有周期をとって一質点系に生じる最大

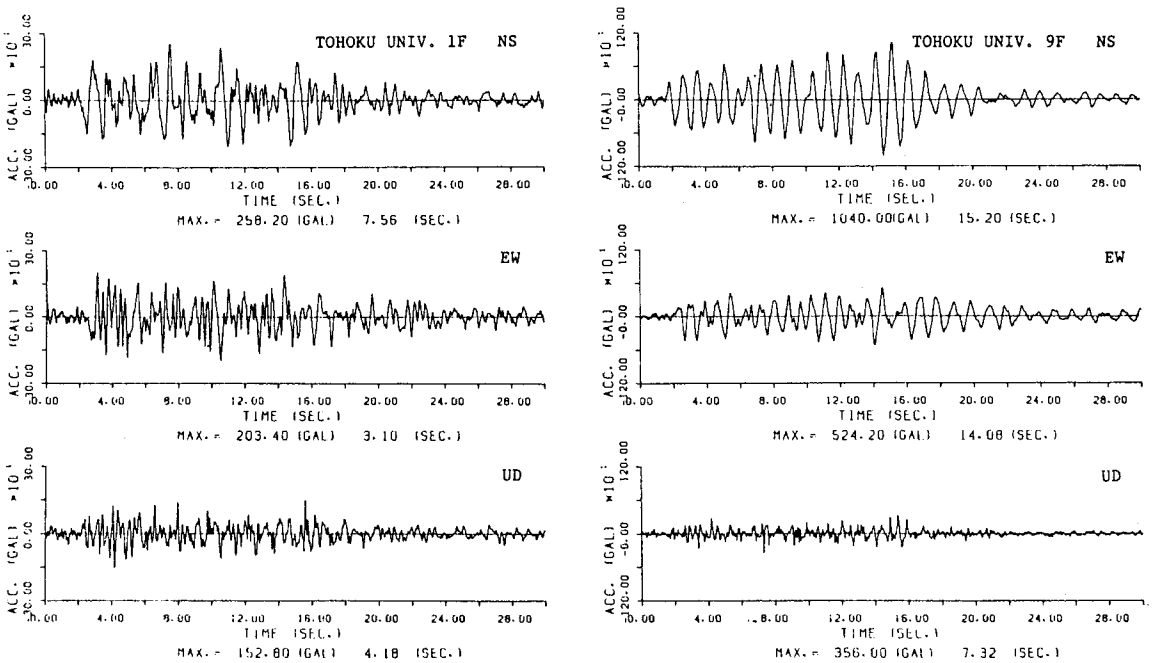

図1　1978年宮城県沖地震の際の東北大学における地動と床応答の記録

* 東京大学生産技術研究所　第2部

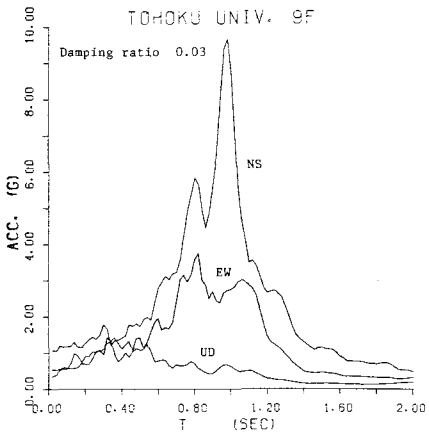

図2　東北大学9階の床応答スペクトル

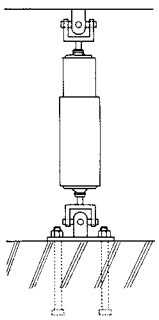

図3　ダンパの装着方法

応答加速度を示したものである．この場合，固有周期1秒前後の機器は建物と擬共振の状態となり，減衰比が3%であればNS方向に約10Gの応答加速度の発生することがわかる．

3. ダンパの適用について

一般に，免震床にダンパを装着することは免震床の応答加速度を大きくし，免震性能を低下させる方向に働く．しかし，実用に際しては免震床の床スラブに対する相対変位をある範囲に押さえることが絶対条件となる．そこで，場合によっては，免震床にダンパを装着し，免震性能はある程度犠牲にしても相対変位を押さえる必要性が生じる．

免震床に装着し得るダンパは片振幅30 cm程度の相対変位を許容し得るものでなければならない．しかし，汎用のオイルダンパにはこれだけのストローク長を持つものはない．しかし，免震床と床スラブの間にオイルダンパを図3のように装着すれば，汎用のオイルダンパを利用することができて経済的となる．ただし，この場合の減衰特性は次に述べるような非線形のものとなる．

4. 一自由度系モデルによる解析

4.1 一自由度系解析モデル

実大免震床に用いる予引張ばねのばね定数，予引張力，ダンパの減衰定数など設計パラメータの値を検討するためには，詳細な解析モデルを用いるより次の一自由度系解析モデルによるのが適当である．

$$M\ddot{x}+\mu Mg\ \mathrm{sgn}(\dot{x})+C\dot{x}x^2/(x^2+h^2)+F(x)=-M\ddot{z}_H \quad (1)$$

ただし，

$$F(x)=\begin{cases}\beta M+K(x-\beta M/k):\ x\geqq\beta M/k\\ kx:\ |x|\leqq\beta M/k\\ -\beta M+K(x+\beta M/k):\ x\leqq-\beta M/k\end{cases} \quad (2)$$

$$\mathrm{sgn}(\dot{x})=\begin{cases}1:\ \dot{x}>0\\ -1:\ \dot{x}<0\end{cases} \quad (3)$$

運動開始条件：$|\ddot{z}_H|\geqq\mu g$　(4)

ここで，x は免震床の床スラブに対する相対変位，M は免震床と搭載機器（コンピュータ機器など）の質量，μ は免震床の動摩擦係数，C はダンパの減衰定数，h はダンパの取り付け高さ，K は予引張ばねのばね定数，k は緩衝ゴムのばね定数，βM は予引張力，g は重力加速度，$\ddot{z}_H$ は水平方向の床応答加速度である．式（1）の左辺第3項が前述のダンパによる非線形減衰を表している．次に，式（1）の両辺を M で割り，

$$\Omega=\sqrt{K/M},\ \omega=\sqrt{k/M},\ \zeta=C/(2\sqrt{MK}) \quad (5)$$

とおくと，式（1），（2）は次のようになる．

$$\ddot{x}+\mu g\ \mathrm{sgn}(\dot{x})+2\zeta\Omega\dot{x}x^2/(x^2+h^2)+f(x)=-\ddot{z}_H \quad (6)$$

ただし，

$$f(x)=\begin{cases}\beta+\Omega^2(x-\beta/\omega^2):\ x\geqq\beta/\omega^2\\ \omega^2x:\ |x|\leqq\beta/\omega^2\\ -\beta+\Omega^2(x+\beta/\omega^2):\ x\leqq-\beta/\omega^2\end{cases} \quad (7)$$

鉛直方向の床応答加速度 $\ddot{z}_V$ を考慮する場合には，式（6）の代わりに次式を用いる．

$$\ddot{x}+\mu(g+\ddot{z}_V)\mathrm{sgn}(\dot{x})+2\zeta\Omega\dot{x}x^2/(x^2+h^2)+f(x)=-\ddot{z}_H \quad (8)$$

4.2 床応答記録による設計パラメータ値の検討

前述の東北大学における床応答と地動の記録を用いて式（6）あるいは式（8）による免震床の応答解析を行い，種々の設計パラメータの値を検討しており，以下では結果の一部を示す．なお，パラメータの内，μ については実大モデル実験により得られた実験値 $\mu=0.026$ を用いている．また，ω については，$\omega/2\pi$ を1〜25 Hzの範囲で変化させても免震床の加速度，相対変位にほとんど変化がないことを確認しており，ここでは $\omega/2\pi=15$ Hz で統一している．h についてもほぼ一意的に定まり，$h=30$ cm を採用している．したがって，パラメータ値の検討は $\Omega(=2\pi/T)$，β，ζ についての検討が中心となる．

図4は9階NS方向の記録を用いて T と ζ を変化させた場合の免震床の加速度と相対変位を調べたものである．実線と破線は鉛直方向加速度を考慮しない場合と考慮した場合の結果であって，両者にほとんど差のないことがわかる．ζ を大きくすると加速度は大きくなるが相対変位の減少はある所で飽和する傾向にあり，適当な ζ の値のあることがわかる（この場合は $\zeta=2.0$ 程度）．なお，$\zeta=2.0$ の値は線形系での減衰比200%とは意味の違うことをことわっておく．一方，T を大きくすると加速

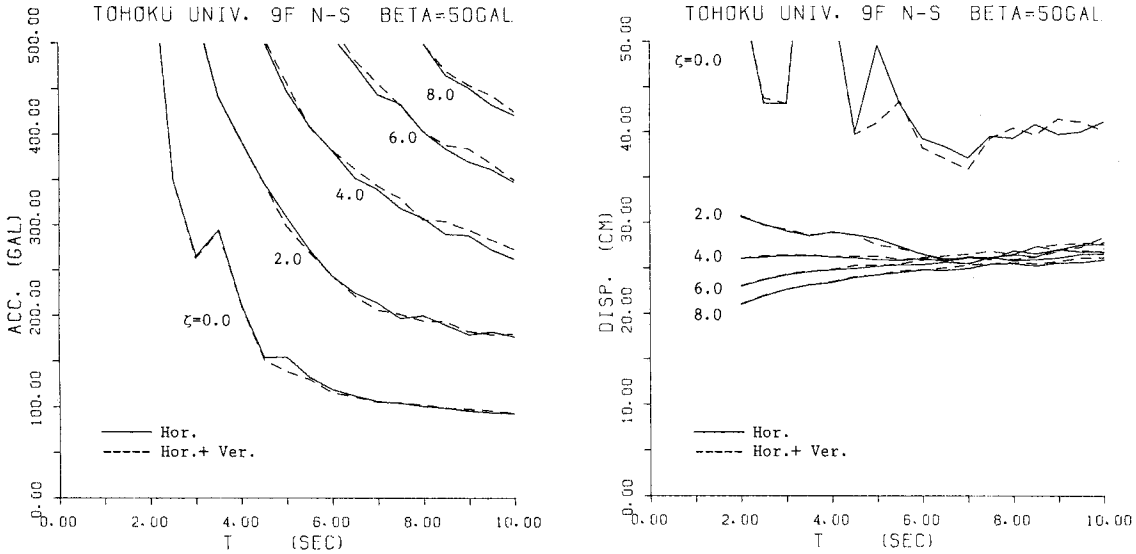

図4　T と ζ による効果（床応答入力の場合）

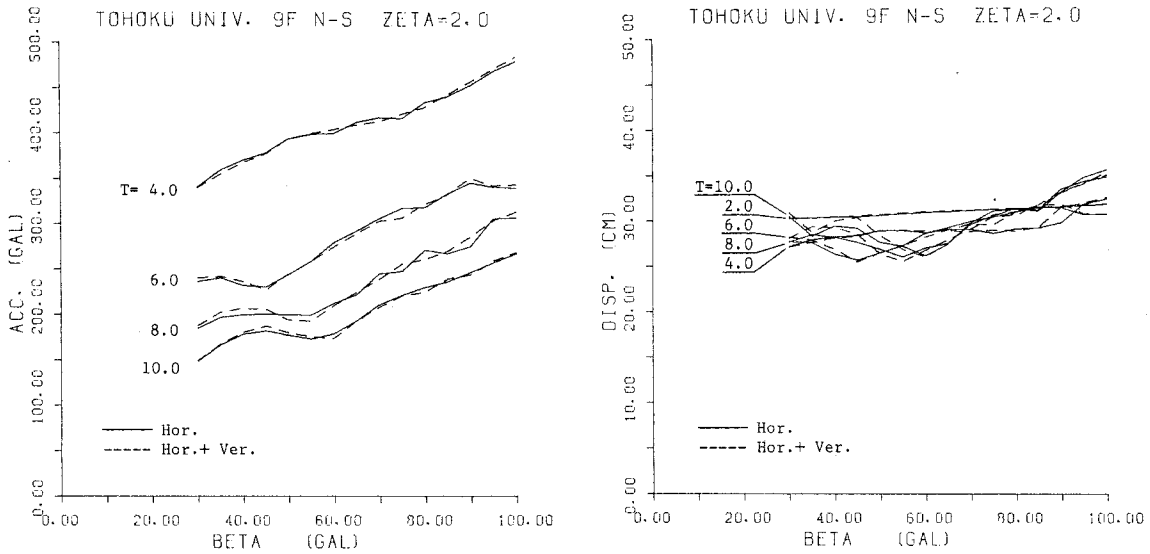

図5　β と T による効果（床応答入力の場合）

度は減少し相対変位も増加しないが，免震装置製作上の制約からいくらでも大きくできるものではない．

図5は上と同じ入力によって β と T を変化させた場合の結果である．β を大きくすると相対変位はあまり変化しないが加速度は大きくなる．したがって，β は必要最小限の値を採用するのが良く，免震装置についての基礎研究[1] での結論と同じ結論が得られる．

図6は1階（地動）NS 方向の記録を用いた場合の結果であって，図4と比較すると，T および ζ の変化による効果は小さいことがわかる．

以上のような検討をもとに，$T=6$ sec，$\beta=50$ Gal，$\zeta=2.0$ を採用した場合の免震床を各階に設置したときの加速度と相対変位をわかり易く図示したのが図7である．この場合には鉛直方向加速度は考慮していない．同図で実際に計算されたのは1階と9階についてだけであるが，中間階も直線補間された値でほぼ推定されるものと思われる．図8はこの場合の9階 NS 方向記録に対する免震床の加速度と相対変位の応答波形である．加速度，相対変位とも周期6秒のような長周期成分は現れておらず，入力と同じ卓越振動数を持った波形となっている．これ

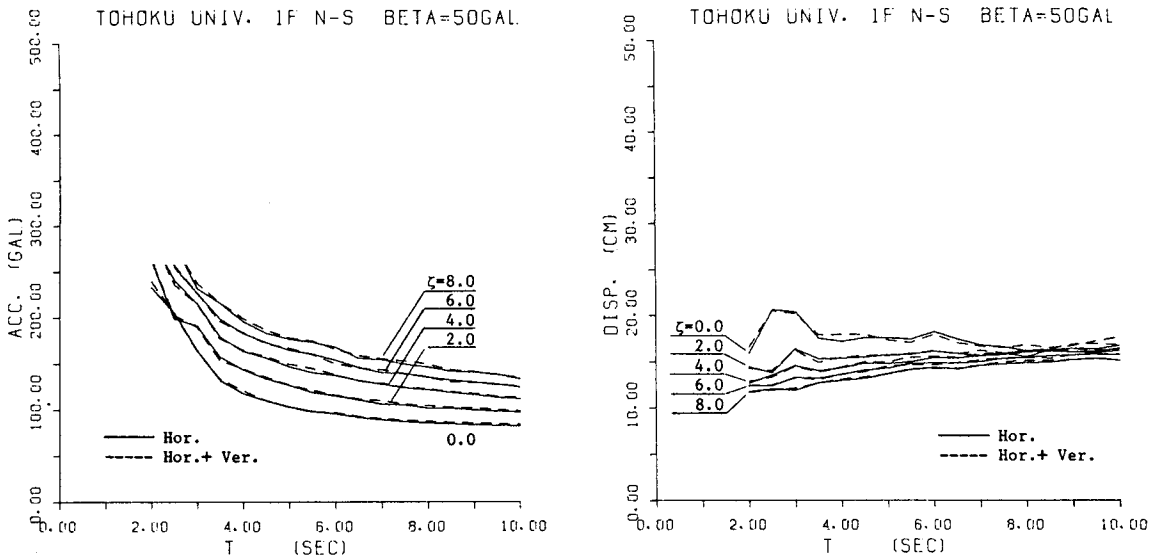

図6　T と ζ による効果（地動入力の場合）

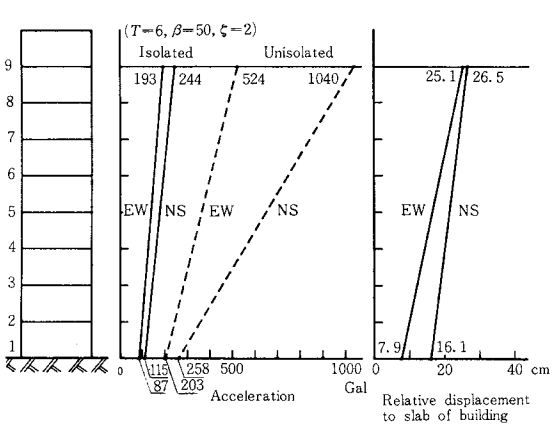

図7　東北大学での記録による免震床の性能

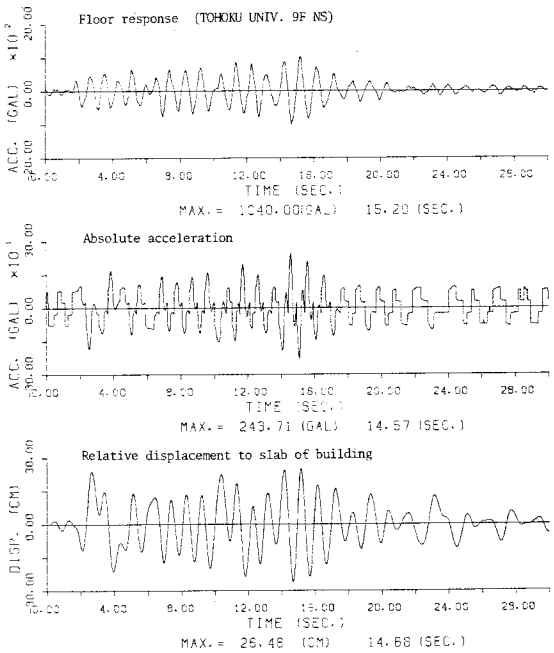

図8　東北大学9階NS方向床応答入力に対する免震床の加速度と相対変位の波形

は，この相対変位がほとんど建物の9階床の絶対変位を示すものであるためと考えられる（免震床は変位計のようなものと考えるとわかり易い）．そこで，図8の免震床の加速度を振動台で実現する場合のことを考えると，卓越振動数1 Hzの波で244 Galの加速度を出すものとして，6 cm程度の振幅であれば良いことがわかる．

5. あとがき

1978年宮城県沖地震の際，東北大学の他に住友生命仙台ビル(地上18階建地下2階の鉄骨造)でも地下2階，9階，18階で加速度記録が得られており，この記録による検討も行っている．ただ，そこで得られた結論事項もここで述べたものとほとんど同じであることを述べておく．

(1981年4月17日受理)

参考文献

1) 藤田，服部，石田；生産研究，Vol. 32，No. 8 (1980)
2) 藤田；生産研究，Vol. 32，No. 10 (1980)
3) 藤田，服部，石田；生産研究，Vol. 32，No. 12 (1980)
4) 藤田，石田，服部；生産研究，Vol. 33，No. 2 (1981)
5) 藤田，服部，石田；生産研究，Vol. 33，No. 2 (1981)