

免震建物・免震装置の基本動特性について

武田 寿一 寺村 彰
野畑 有秀

Study of Dynamic Properties of Base Isolation Systems

Toshikazu Takeda Akira Teramura
Arihide Nohata

Abstract

The dynamic properties of base isolation systems made up of laminated rubber sheets and dampers are roughly simulated by bi-linear force-deflection relations. To find the required strengths and deflection capacities of the isolation systems, the responses of a one-mass vibration model excited by El Centro '40 NS, Hachinohe '52 NS, and artificial earthquakes of 50-kine velocities are obtained under the parameters of bi-linear yield values. As a result, the optimum yield shear coefficients of the bi-linears to minimize the responses are about 0.08 to 0.10. The eigenvalues of a two-mass model which are easily calculated from the structure's first period (T_b) and the isolation period (T_g) are studied. As a result, the eigenvalue of the first mode will be nearly equal to the values of the one-mass model in case of a ratio less than $T_b/T_g=0.2$. Similar results are obtained from the earthquake responses of the two-mass model.

概要

免震建物の動的設計資料を得る目的でバイリニア型復元力特性を有する免震装置の基本的な応答性状に関する検討を行なった。地震動は EL CENTRO 1940NS, 八戸 1952NS, EW などの記録地震波と 1 秒～4 秒のやや長周期域で速度スペクトルがほぼ一定になる人工地震波でありその大きさは最大速度 50 カインである。まず、免震装置の基本的な応答性状を調べる目的で、上部構造剛体の 1 質点系振動モデルで復元力特性値を変数にして応答計算を行なった結果、免震装置の変形と強度が小さくなる状態は降伏震度がほぼ 0.08～0.10 の範囲である。次に、上部構造の連成効果を知る目的で、上部構造一次周期 (T_b) と免震周期 (T_g) からなる 2 質点置換系の固有値近似式を導き固有値変動量を検討した結果、周期比 (T_b/T_g) がほぼ 0.2 以上の場合に連成効果を考慮する必要がある。地震動に対する応答計算結果からも同様の結論を得た。

1. まえがき

本報告は積層ゴムと完全弾塑性復元力特性のダンパーで構成される免震装置と免震建物の基本的な応答性状を 1～2 質点系振動モデルを用いて検討したものである。

2. 1 質点系の応答

上部構造を剛体に仮定した 1 質点系モデルで地震波入力に対する免震装置の応答の基本性状について述べる。

2.1. 地震波に対する弾性応答

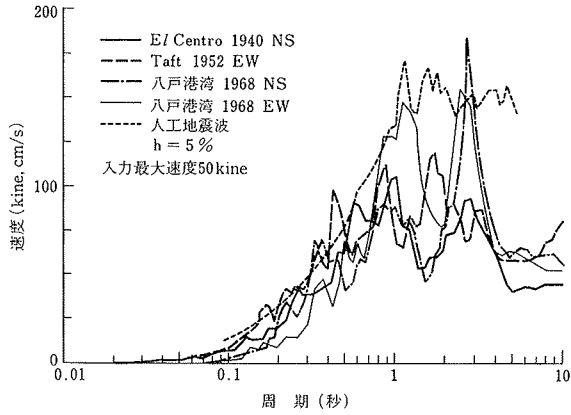
地震動入力に対する粘性減衰型の 1 質点系弾性応答は、地震動の応答スペクトルから評価できる。代表的な記録地震波 (EL CENTRO '40NS, 十勝沖地震八戸港湾 '68NS, EW など) の最大速度 50 kine 入力に対する加速度および速度応答スペクトル ($h=5\%$) を図-1～図-2 に示す。やや長周期域が卓越する周期は八戸港湾 68NS

地震波の周期 2.5 秒付近で顕著である。さらに、同図にはやや長周期成分が比較的強い人工地震波入力に対する応答も示してある。

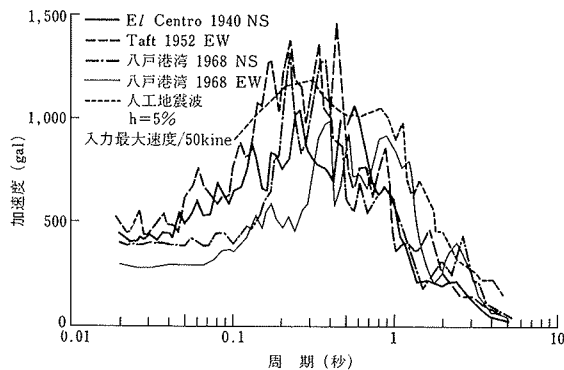
人工地震波は図-3 に示す第 1 種～第 3 種地盤の振動特性係数 R のうち、第 2 種地盤の形状を目標スペクトルにして繰り返し計算し、スペクトルから波形への逆変換の際には八戸港湾 68NS の位相特性を用いて作成したものである。代表的な記録地震波と比較すると記録地震波の平均応答値と同程度の強さを持ち、かつ、周期 1 秒～4 秒のやや長周期成分の範囲で速度スペクトルがほぼ一定の傾向にある。減衰定数を変数にして計算したこの 1 質点系応答せん断力係数 C および応答変位 D を図-4 に示す。

2.2. 振動解析モデル

積層ゴムは通常、弾性ばね要素として扱う。減衰要素の復元力解析モデルには各種標準的な減衰モデルがあり、



図一1 各種地震波の速度応答スペクトル (50 kine, h=5%)



図二 各種地震波の加速度応答スペクトル (50 kine, h=5%)

実用に当たっては実験などの検証データに基づいて判断すればよい。ここでは復元力特性を図一5に示すように、積層ゴムの弾性ばね k_2 に減衰要素の完全弾塑性を加算するバイリニア履歴減衰型で評価する。そして、免震装置として効率の良い減衰性と積層ゴムとの組み合わせを調べる。

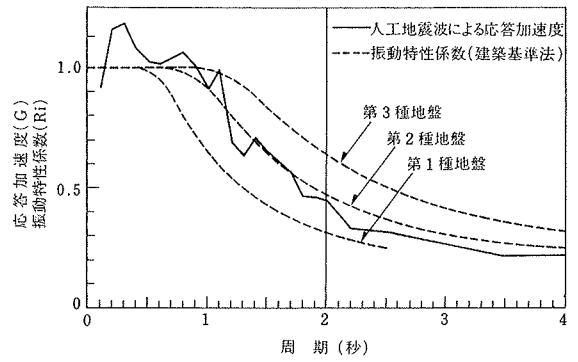
2.3. バイリニア型復元力モデルに対する弾塑性応答

2.3.1. 記録波に対する応答 入力波としては、EL-CENTRO '40NS, 八戸港湾 '68NSなどで入力レベルは50 kineである。諸定数は表一に示すように、積層ゴムの剛性のみを考えた場合の周期 T_r , 降伏震度 k_y と降伏変位 δ_y をパラメータにして、減衰定数は応答スペクトルと対比しやすいように零にする。なお、積層ゴム周期 T_r をパラメータにするのは大変形を対象にしているからである。

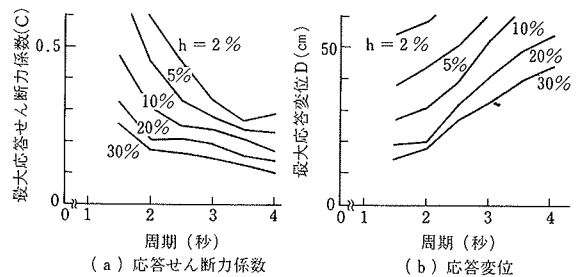
積層ゴム周期(T_r)	2秒~3秒
降伏震度(k_y)	0.06, 0.08, 0.10
降伏変位(δ_y)	3cm, 5cm, (7cm)

表一 免震装置解析定数

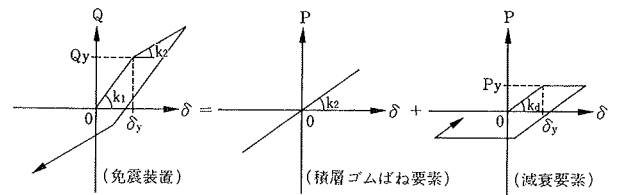
最大応答変位 D と最大応答せん断力係数 C との関係 $\delta_y=5\text{cm}$ (一定), 降伏震度 k_y を変数にして図一6に



図一3 振動特性係数 (R_i) と、人工地震波の加速度応答スペクトル (50 kine, max 541 gal, h=5%)



図一4 人工地震波の1質点系応答スペクトル (50 kine)



記号: k_1, k_2 : 免震装置の初期剛性($k_1=k_2+k_d$)と第2剛性 k_2 (積層ゴムの弾性ばね)
 Q_y, δ_y : 免震装置の降伏せん断力($Q_y=k_1\delta_y$)と降伏変位
 P_y, k_d : 減衰要素を完全弾塑性復元力特性で仮定したときの降伏荷重と初期剛性
 T_r : 積層ゴム周期 ($T_r=2\pi\cdot(m/k_2)^{1/2}$)
 k_y : 降伏震度 ($k_y=Q_y/mg$, g : 重力加速度)

図一5 免震装置のバイリニア復元力モデル

示す。また、降伏震度 $k_y=0.08$ (一定)で降伏変位 δ_y を変数にして図一7にそれぞれ積層ゴム周期 T_r を横軸にして示す。なお、TAFT '52EWなどの他の地震動による応答値は八戸港湾 '68NS地震の場合を大きく越えることは無かったので、ここでは八戸港湾 '68NSとEL-CENTRO '40NS地震波の場合とを示している。両図から次のことが分かる。

- ① 八戸港湾 '68NS入力に対する応答が最大値を与える。この八戸港湾 '68NSは図一1に示したとおり周期2.5秒付近で著しく卓越するためである。
- ② 積層ゴム周期 T_r に関する応答性状では、八戸波に対する $k_y=0.06$ の場合に特別の動きを示すが、一般に、長周期にするとせん断力係数 C がやや減少し、応答変位 D はやや増大する。
- ③ 降伏変位 $\delta_y=5\text{cm}$ (一定)で降伏震度 k_y を変

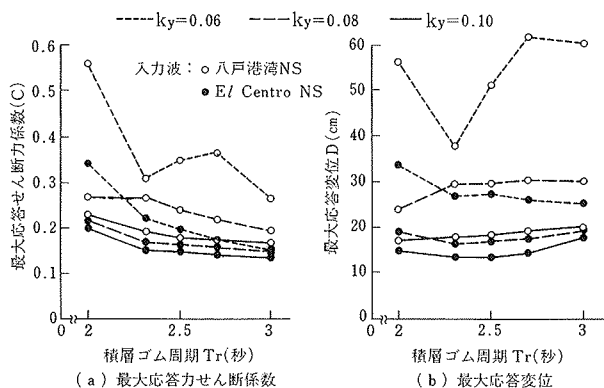


図-6 1質点系バイリニアモデルによる応答結果 ($\delta_y=5\text{ cm}$ (一定), $h=0\%$)

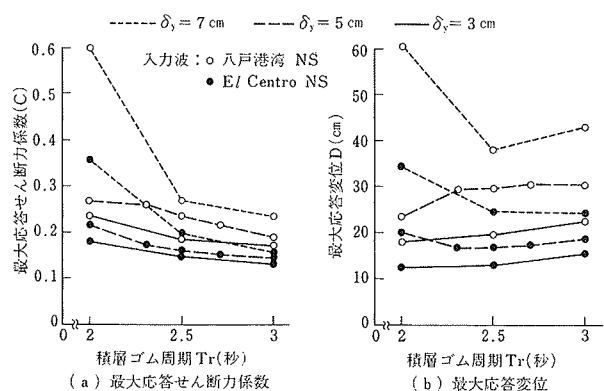


図-7 1質点系バイリニアモデルによる応答結果 ($k_y=0.08$ (一定), $h=0\%$)

化させると k_y の大きい方が応答値は小さい。特に $k_y=0.06$ から 0.08 に上げるとその効果は大きく、適正な降伏震度 k_y が存在することが分かる。④ 降伏震度 $k_y=0.08$ (一定) で降伏変位 δ_y を変化させると δ_y の小さい方が応答値は小さい。但し、塑性率は大きくなる傾向にある。

図-8には上記の八戸港湾 '68NS に対する応答結果から、横軸に応答変位 D 、縦軸にせん断力係数 C をとって書き直したものである ($h=0\%$)。若干のパラツキはあるが一般的にみて降伏変位の小さい方が応答値は小さい。図-9には積層ゴムの材料減衰定数 $h=2\%$ を用いて応答計算を行なった場合を示すが、両図より減衰定数が 0% と 2% とでは結果における差は余り大きくない。また、最大変位 D および最大せん断力係数 C は $\delta_y=3\text{ cm}$ ~ 5 cm , $k_y=0.08\sim 0.10$ 付近で比較的小さくなることが分かる。

2.3.2. 人工地震波に対する応答 バイリニア型復元力モデルの降伏震度 k_y 、および、積層ゴム周期 T_r の相違による応答値の変化を人工地震波 50 kine を用いて調べてみる。図-10に最大応答変位 D を横軸に、最大応

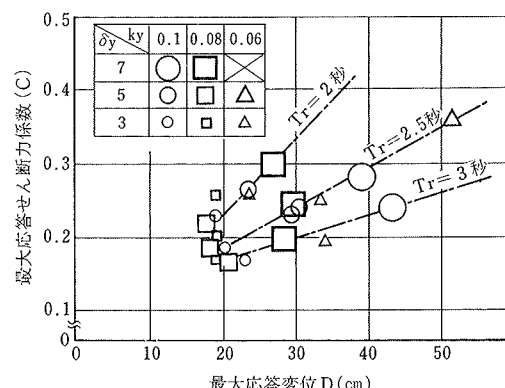


図-8 1質点系バイリニアモデルによる応答結果 (八戸港湾 '68NS, 50 kine, $h=0\%$)

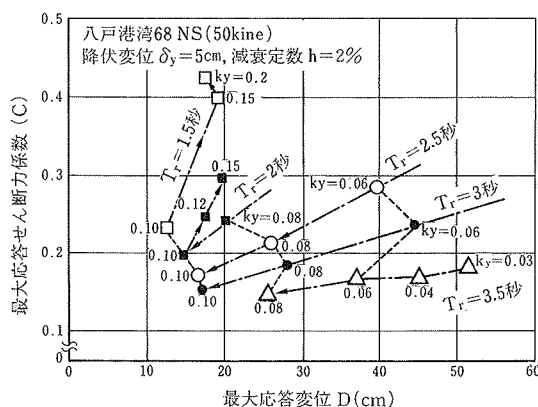


図-9 1質点系バイリニアモデルによる応答結果 (八戸港湾 '68NS, 50 kine, $h=2\%$)

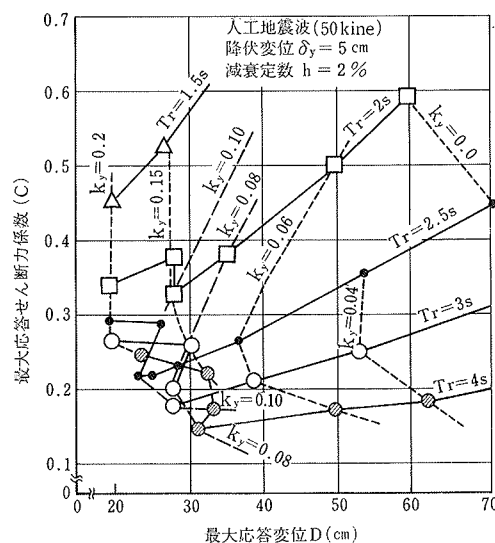


図-10 1質点系バイリニアモデルによる応答結果 (人工地震波 50 kine , $h=2\%$)

答せん断力係数 C を縦軸にとって計算値を示す。減衰定数は $h=2\%$ 降伏変位は $\delta_y=5\text{ cm}$ である。パラメータである積層ゴム周期 T_r は $T_r=1.5\text{ 秒}$ (Δ 印), $T_r=2\text{ 秒}$

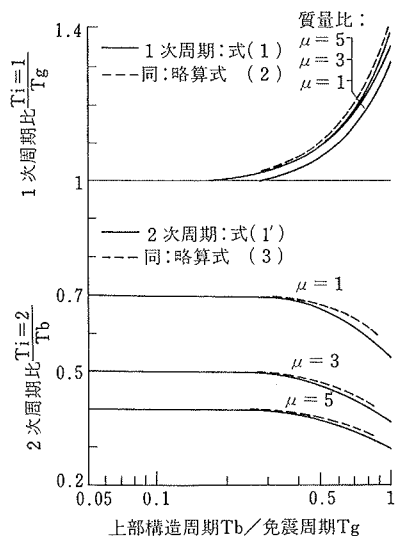


図-11 2質点連成系の1次および2次周期 (T_g , T_R)

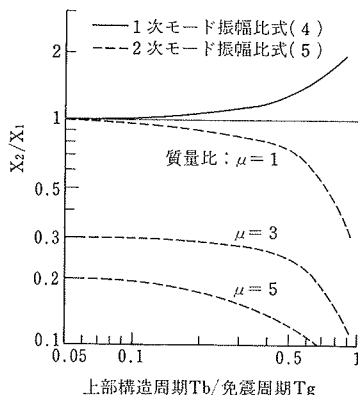


図-12 2質点連成系のモード振幅比 (X_{21}/X_{11})

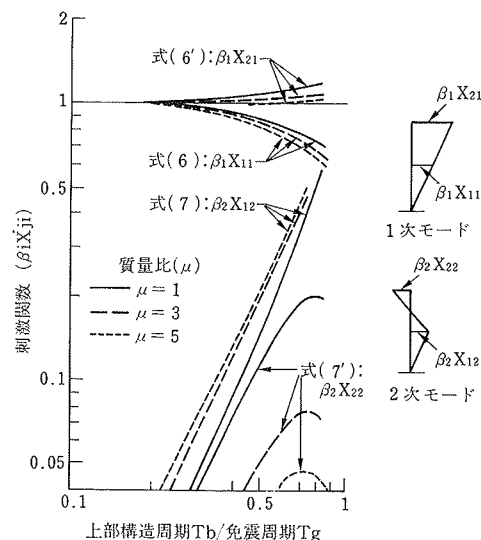


図-13 2質点連成系の刺激関数 ($\beta_i \cdot X_{ji}$)

(□印), $T_r=2.5$ 秒(●印), $T_r=3$ 秒(○印), $T_r=4$ 秒(●印), また, 降伏震度は $k_y=0.04\sim 0.20$ の範囲である。

復元力特性の初期剛性 k_1 に対する塑性域第2剛性 k_2 の比 ($\beta=k_2/k_1$) は, $T_r=2$ 秒の場合(□印)に $k_y=0.2$ で $\beta=0.25$, $k_y=0.06$ で $\beta=0.84$, また, $T_r=4$ 秒(●印)の場合に $k_y=0.2$ で $\beta=0.06$, $k_y=0.06$ で $\beta=0.21$ であり, 図-10の右上方向に β が相対的に大きく, 復元力特性が弾性に近いので減衰が見かけ上小さい場合の応答に対応している。一方, 左下方向では β が小さく, 完全弾塑性特性に近いので履歴減衰が大きい場合に対応している。応答値を小さくする要素としてこの完全弾塑性特性に近い場合にまで β に関して検討すると良い。

積層ゴム周期に関してはほぼ $T_r=2$ 秒, および, 降伏震度に関しては $k_y=0.08\sim 0.10$ の場合において, 応答変位と応答せん断力係数とが共に小さくなる。このときの剛性比 β は, 積層ゴム周期 T_r により異なり $\beta=0.35\sim 0.15$ の範囲にある。

記録地震波の八戸港湾 '68NS の場合(図-9) と比べると全体傾向が良く似ているが応答値が全体的にやや大きい。これは長周期領域における地震動の強さが平均して若干大きいためである。

以上の結果, 粘性減衰型の応答は減衰定数が大きくなると最大応答変位および応答せん断力係数が減少するが, バイリニア型復元力の弾塑性応答の場合には適切な降伏震度 k_y , 降伏変位 δ_y および初期剛性 k_1 に対する第2剛性 k_2 の比 ($\beta=k_2/k_1$) の設定が重要であると言えよう。

3. 2質点系の応答

免震建物の応答の基本となる振動解析モデルは, 免震

装置部の変形が卓越する一次振動モードと, 上部建物の変形が免震装置部に対して逆相になる二次振動モードを考慮した2質点系モデルである。本章では上部構造と免震装置との2質点系モデルの応答に関する検討を行なう。

3.1. 固有振動

2質点系モデルの一次および二次固有周期は, 上部構造を剛体に仮定した場合の免震周期 T_g と上部構造のみの一次周期 T_b から以下のように計算される。2質点連成系の振動数方程式に, 上部質点の質量とばね定数をそれぞれ m_2, k_2 , 免震装置下部質点の質量とばね定数を m_1, k_1 で表して固有振動数 (ω) に関して解くと連成一次固有周期 ($T_i=1$) および二次固有周期 ($T_i=2$) は, 式(1), あるいは式(1')になる。

ここに, $\mu=m_2/m_1$ (質量比), $T_g=2\pi\sqrt{(m_1+m_2)/k_1}$ (免震周期), $T_b=2\pi\sqrt{m_2/k_2}$ (上部構造一次周期)であり, 分母の負号, 正号がそれぞれ一次および二次固有周期に対応する。

式(1)は, 上部構造周期 T_b を掛けて2質点系の固有周期 T_i を求める式であり, 式(1')は逆に, 免震周期 T_g を掛けて T_i を求める式である。

免震周期 $T_g=1\sim 4$ 秒, 上部構造周期 $T_b=0.1\sim 1.0$ 秒程度を想定して, 式(1)~(1')から計算される固有周期 T_i を質量比 μ を変数にして, $T_b/T_g=0.025\sim 1.0$ の範囲で計算した結果を図-11に示す。

同図から一次周期 T_1 は, $T_b/T_g=0.2\sim 0.3$ 以下の範囲において $T_1/T_g=1.0$ すなわち, 免震周期 T_g に等しくかつ, 質量比 μ にあまり関係しないことが分かる。一方二次周期 T_2 は, 同図から上部構造周期 T_b に比べて常に短周期 ($T_2/T_b < 1.0$) であり, かつ, $T_b/T_g=0.3$ 以下の範

囲で一定値に収れんしている。

以上のように T_b/T_g が小さい場合、つまり上部構造の周期(T_b)が短周期である場合には、さらに簡単に一次二次固有周期、モード形、刺激係数が概算的に計算できる。

一次固有周期は式(1')で T_b/T_g の4乗項を微小量とすると T_1 に収れんする式(2)が得られる。二次固有周期は式(1)で同様に T_g/T_b の4乗項を微小量とすると T_2 に収れんする式(3)が得られる。

$$T_1 = \sqrt{\frac{2/(1+\mu)}{\{1+(T_b/T_g)^2\} \pm \sqrt{1+\{2-4/(1+\mu)\}(T_b/T_g)^2+(T_b/T_g)^4}}} \cdot T_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{2/(1+\mu)}{\{1+(T_g/T_b)^2\} \pm \sqrt{1+\{2-4/(1+\mu)\}(T_g/T_b)^2+(T_g/T_b)^4}}} \cdot T_g \quad \dots\dots\dots (1')$$

$$T_1 = \sqrt{1+(T_b^2/T_g^2)} \cdot T_g \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{\sqrt{1+\mu+\mu(T_b^2/T_g^2)}} \cdot T_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

これらの概算式による固有周期は、図-11に破線で示すとおり、かなり広い T_b/T_g の範囲で式(1)~(1')の計算周期に対応している。しかし、 $T_b/T_g \rightarrow 1.0$ に近づくときと

違が生じる。上部構造のみの周期が相対的に免震周期よりも短周期であれば適用できる簡単な式である。

次に、振動モードと刺激関数について検討して見る。2質点連成系の固有モード振幅(X_1, X_2)の周知の連立方程式に一次および二次固有周期の式(2), (3)を代入すると一次振幅比の式(4)と二次振幅比の式(5)を得る。

$$\frac{X_{21}}{X_{11}} = 1 + (T_b^2/T_g^2), \quad (i=1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{X_{22}}{X_{12}} = -\frac{1}{\mu} \{1 - (T_b^2/T_g^2)\}, \quad (i=2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

一次振幅比の式(4)は周期比(T_b/T_g)のみに関係して質量比 μ に関係しない。二次振幅比は質量比 μ (あるいは上部構造の質量 m_2)が大きくなると振幅 X_{22} が相対的に小さくなる。式(4), (5)の計算値を図-12に示す。

刺激係数(β_1, β_2)は、2質点連成系の基本式に式(4), 式(5)を代入して一次刺激係数が式(6), (6'), 二次刺激係数が式(7), (7')として得られる。

$$\beta_1 = \left\{ 1 - \frac{\mu(T_b^2/T_g^2)}{1+\mu+2\mu(T_b^2/T_g^2)} \right\} \cdot \frac{1}{X_{11}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$= \left\{ 1 + \frac{(T_b^2/T_g^2)}{1+\mu+2\mu(T_b^2/T_g^2)} \right\} \cdot \frac{1}{X_{22}} \quad \dots\dots\dots (6')$$

$$\beta_2 = \frac{\mu(T_b^2/T_g^2)}{1+\mu-2(T_b^2/T_g^2)} \cdot \frac{1}{X_{12}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$= -\frac{(T_b^2/T_g^2)}{1+\mu-2(T_b^2/T_g^2)} \cdot \frac{1}{X_{22}} \quad \dots\dots\dots (7')$$

式(6)~(7)の計算値を刺激関数($\beta_i X_{ji}$)の値で図-13に示す。質量比 $\mu=1\sim 5$ に対し、周期比(T_b/T_g)が0.3以下では二次刺激関数が0.1以下になり二次の固有振動がほとんど刺激されない。

以上の結果、周期比 T_b/T_g が0.3以下の範囲は、1秒~数秒の連成一次周期を持つ一般的な免震建物に相当するが、固有値は上部構造を剛体と見なして簡単に計算できることが分かる。

3.2. 応答解析

応答解析は各々の免震周期 T_g のもとで、上部構造周期 T_b が変化するとき、上部構造の応答相対変位($X_2 - X_1$)と応答せん断力係数 C_2 、免震装置の応答変位 X_1 とせん断力係数 C_1 の最大応答値がいか

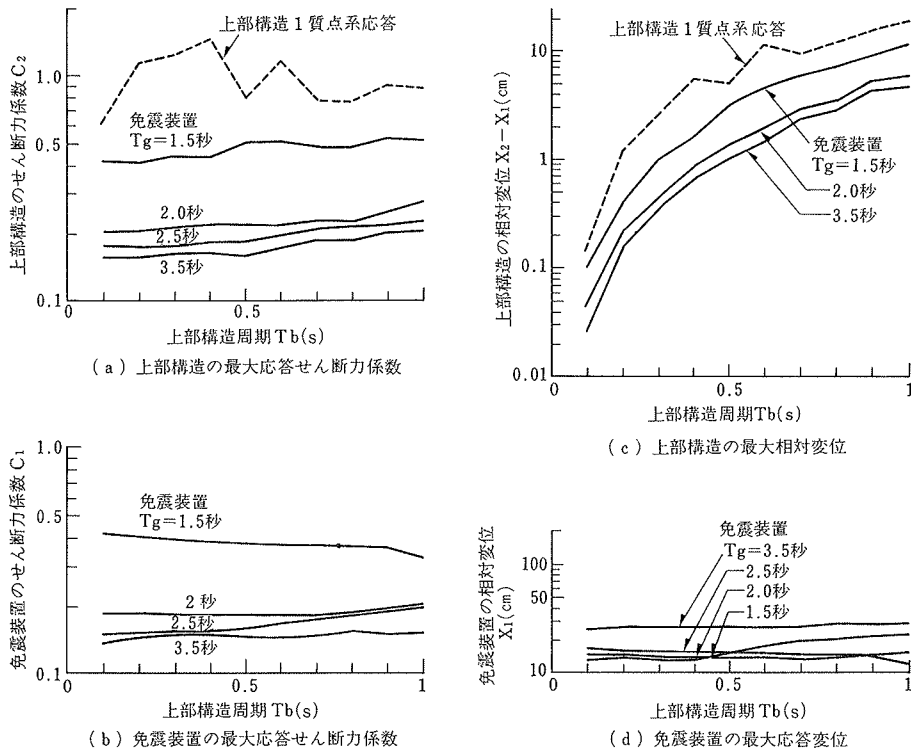


図-14 八戸港湾 '68NS 記録地震波 (50 kine) に対する2質点系振動モデルの応答結果 (h=2%)

に変わるか、また、上部構造を剛体と見なせる周期領域は、といった問題について、2質点系モデルの質量比 $\mu = m_2/m_1 = 1.19$ の場合について以下にのべる。上部構造の周期 T_b と免震周期 T_g などの諸定数を表-2に示す。周期 T_b と T_g の周期比 (T_b/T_g) はほぼ $T_b/T_g = 0.03 \sim 0.5$ である。免震構造の降伏震度 k_y は各々の免震周期 T_g に対応し1質点系の応答結果によるほぼ適正な降伏震度とする。

3.2.1. 記録地震波に対する応答 八戸港湾'68NS 入力に対する応答結果を図-14(a)~(d)に T_b を横軸にとって示す。同図から次の傾向が指摘できる。

① $T_b = 0$ 秒~1 秒の間で C_1, C_2 が一定値に近い。特に0.6 秒あたりまでその傾向が強い。これは上部構造を剛体として略算できることを示すものである。この周期範囲は図-11の上部構造剛体とした免震周期 T_g と全体一次の周期 T_1 との比 T_1/T_g がほぼ等しい周期範囲に対応している。②免震装置の最大応答せん断力係数 C_1 は、同図(d)から①で述べた周期範囲内でも略算的には上部構造剛体として求めたせん断力係数とばね定数から変位量を求めればよい。また、上部構造の周期が短いほど、上部構造の相対変位は小さくなり免震の効果が見られることが分かる。③上部構造の相対変位 ($X_2 - X_1$) は、 C_2 が T_b に対しほぼ一定値とすれば T_b の2乗に比例する。

3.2.2. 人工地震波に対する応答 同様に人工地震波に対する応答結果を図-15(a)~(d)に示す。この結果、上部構造周期 T_b に対する応答の変動傾向は記録地震波の場合と同様に少なく、ほぼ同じ傾向である。上部構造が短周期の場合には免震装置の応答値は上部構造剛体の応答値にほぼ等しい。

応答せん断力係数 C_2, C_1 で見ると免震周期 $T_g = 2$ 秒、2.5秒で記録地震波の場合に対してかなり大きくなっているが、反対に免震周期の伸びに対応して均等にその値が低下している。記録地震波の場合も含めて図(a)より上

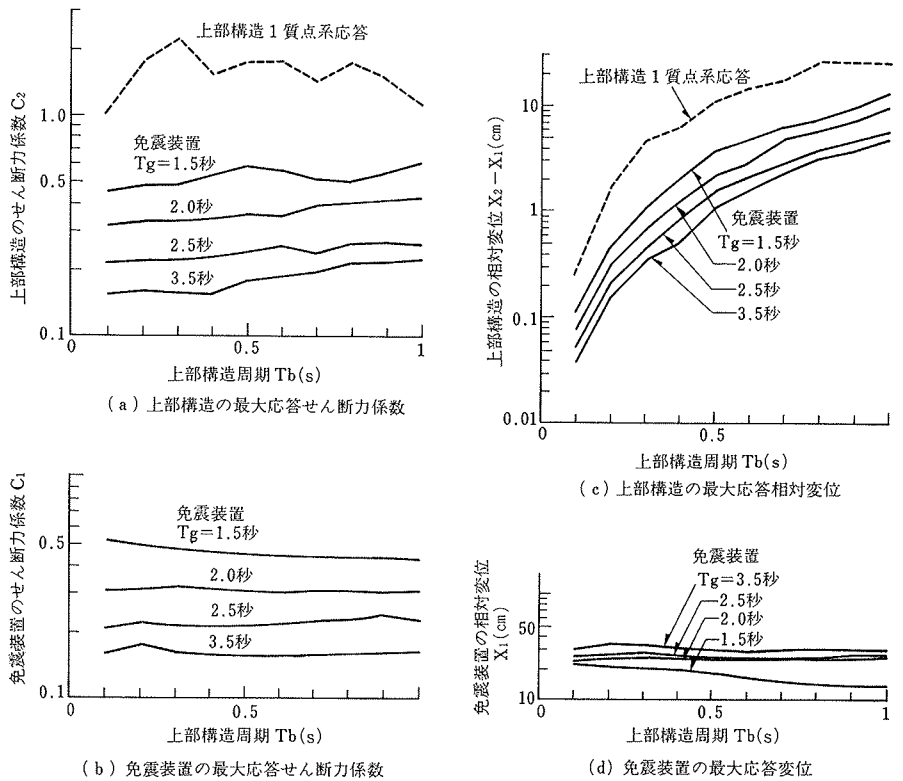


図-15 人工地震波 (50 kine) に対する2質点系振動モデルの応答結果 (h=2%)

上部構造	単独周期 (T_b)	0.1~1.0秒(間隔0.1秒)				
	減衰定数 (h)	2%				
免震構造	免震周期 (T_g)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	降伏震度 (k_y)	0.20	0.10	0.09	0.08	0.08
	減衰定数 (h)	2%				

表-2 2質点系モデルのパラメータ定数

部構造せん断力係数 C_2 は、上部構造周期 T_b が小さいとその値が若干小さく、また変形量も小さくなることから上部構造の耐力より、むしろ、初期剛性を高める方が効果的であることが分かる。

これまで質量比 $\mu = 1.19$ の場合についてのべたが、図-13の刺激関数から質量比 $\mu = 5$ 程度までは同様の傾向を持つと考えて良からう。

まとめ

以上の結果、免震周期と上部構造のみの周期との比が小さい場合は上部構造を剛体と見なして略算的に計算でき、また、免震装置に必要な強度と変形も上部構造剛体の1質点系応答から推定できることが分かる。