

原子力発電所の耐震設計に関する研究

武藤研究室 武藤 清

○内田 一義

高瀬 啓元

1. まえがき

わが国でも原子力発電がいよいよ実用の時代に入り、すでに数基の原子力発電所が建設、又は計画されている。このような情勢を反映して、その耐震解析も電子計算機の大規模化とともに、日を追って格段の進歩をとげ、そのシュミレーションの方法、および減衰の選定が重要な要素として真剣に検討されるようになった。

とくに、原子力発電所のような各種の材料、構造からなる複雑な構造体の振動解析に当っては、材料構造別に違った減衰係数を採用することが必要とされるが、このことは他面数値解析の困難をひきおこすものである。この報告では、特にこの問題を取りあげることにした。

従来、減衰評価の問題は、実験データの不足等の事情から、多くの場合、“特定の固有モードのもつべき臨界減衰に対するその系の減衰比（以後減衰定数 h と称す）で表わす”という習慣によっている。例えば昨年 11 月 東京で開催された IAEA の耐震部会に提出された G.W. Housner 教授 (C.I.T.), N.M. Newmark 教授 (イリノイ大), R.U. Weight 氏 (ベクトル社) などは、材料別に減衰定数 h を与えている。しかしこれを振動解析にとり入れる方法については明確には示されていない。特に対応周期が与えられていないのは最大の欠点である。

ところで、今日のところ、理論的に減衰を扱うためにその現象を理想化して変形速度に比例

する内部粘性係数 r_i 、対外速度に比例する外部粘性係数 r_e による 2 種類に分類し、耐震応答計算では一般に内部粘性として取り扱うのが普通である。とすると、計算に当っては内部粘性係数値を決める必要がある。このための手がかりとして、我々は先の各諸氏のいう減衰比 h を工学的に判断し、該当する周期を推定し、また日本での各種実験による減衰値も参考として減衰係数 r_i を求め、動的解析の基礎としたい。

内部粘性係数 r_i が定まれば、各部の材料、構造の不規則性に対応して、その振動モデルは、irregular damping をもつ連成系となる。この解は従来の constant damping を用いたコンピュータ・プログラムに較べて一段と複雑なものとなる。けれども今日では、これを十分に処理することができるようになった。

2. 内部減衰係数 r

一般に構造物の変形が急速に起こるときには徐々に変形の起こったとき以上の抵抗がおこる。例えば、片持ばりの先端を押して、たわみ y をおこすとき、静的には

$$f = c \cdot y \quad (2-1)$$

だけの抵抗 f を与えるが、振動時のように急速にこのたわみをおこすと抵抗は $c \cdot y$ 以上となる。

この余力に加わる抵抗力は分子間の摩擦力や構造各部の構造方式によるもので、一般に内部粘性とか内部摩擦力、または固体粘性ともよば

れるものである。

内部摩擦力と変形速度との関係は、決して簡単なものではないが、数学的取り扱いの便宜から両者が正比例するものと仮定するのが常である。そのときの物体の振動は次のように扱われる。すなわち内部摩擦力は変形を ϵ 、変形速度を

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$$

とすると、その付加応力は $rE\dot{\epsilon}$ となる。

したがって、このときの有効応力度は次のように表わせる。

$$E\epsilon + rE \frac{d\epsilon}{dt} = E(1 + r \frac{d}{dt})\epsilon \quad (2-2)$$

ここに r は内部摩擦係数。

したがって内部粘性に伴うときの有効応力度は $\{1 + r(d/dt)\}$ 倍の剛性があるものと考えることができる。

このような内部粘性の考え方を振動に関係するすべての剛性係数（構造各部や地盤の定数）に適用することにする。このようにすれば、いろいろな材料からなる構造物を解析する場合、材料構造別にそれぞれの減衰係数 r を用いた振動解析が可能となる。

次に r の値そのものが問題となるが、一般に r と h との関係は周期を媒介とすると、つぎのような関係になる。^(*)

$$r = \frac{Th}{\pi} \quad (2-3)$$

ここで T 、 h は与えられた周期、減衰定数である。

たとえば、実験データの h が、1次モードに対して測定されたものであるとすれば、そのときの1次周期 T_1 を用いて r は算定され、それがその材料の内部摩擦係数と定義されるのである。

3. 減衰定数の提案値

さてここで世界的権威者であるHousner教授、Newmark教授、Weight氏が昨年（1967年6月）のIAEAシンポジウムに提出された原子炉設計用減衰定数 h の使い方を検討してみるとHousner教授はDesign SpectrumとAmplitude Design Spectrumの場合に分けているので略算用の提案とみられる。Weight氏は原子力発電所建物各部をかなりこまかく分類して減衰定数を示す努力をなし、Newmark教授は前記二人の分類法とは少し異なっていて、原子炉建物内の各構造部の地震時の応力レベルに応じて減衰を変える方法をとっている。しかしその振動解析に用いる方法は論文からは明確でない。筆者はIAEA会議の機会にこれらの提案者に

(1) 減衰定数 h を評価した根拠は

(2) 各部別の減衰係数を用いて連成系の解析を行っているかどうか

の2点をたずねたのであるが、これに対しての答は(1)に対しては工学的判断で定めた。(2)に対してはいまだこの形式の計算はやっていないとのことであった。

動的解析も緒についたばかりであるから、こ

* 自由振動方程式より

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + cr \frac{dy}{dt} + cy = 0$$

今 h の定義より

$$h = \frac{cr}{c_c}$$

ここに c_c は臨界減衰をあらわし

$$c_c = 2\sqrt{mc}$$

で与えられる。

ここで $\sqrt{\frac{c}{m}} = w = \frac{2\pi}{T}$ を用いれば

$$\therefore r = \frac{Th}{\pi}$$

れもやむを得ないことであるが、学術的体系をつくる上には工学的判断を高めながら進歩を図らなければならないので、我々はこの解析理論と、これに対するプログラムを開発し、今春末不規則な減衰係数をもつ複合振動系の具体的解析を行っているが、ここには原子力発電所について述べることにする。

4. 振動方程式

内部粘性系の減衰係数 r が定まれば振動解析は軌道にのることになる。

振動モデルの質点と質点とを結ぶ i 部材の外力 P_i と変位 v_i の関係は局所座標系で内部減衰を考慮に入れると次のように表わせる。

$$P_i = B_i v_i \left(1 + r_i \frac{\partial}{\partial t} \right) \quad (4-1)$$

ここに B_i は局所座標系での i 部材の stiffness。
(4-1)式を機械的に並べると局所座標系外力 β と局所座標系変位 α の関係は

$$\beta = \bar{K}\alpha + \bar{C}\dot{\alpha} \quad (4-2)$$

ただし $\bar{K} = [B_i]$, $\bar{C} = [r_i B_i]$
一方全体座標系変位 v , 速度 $\dot{v}$, 局所座標系変位 α , 速度 $\dot{\alpha}$ との関係は変換マトリックス T を用いると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= T \cdot v \\ \dot{\alpha} &= T \cdot \dot{v} \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここでいずれの座標系においても外部仕事は等しいから、次式が成立する。すなわち

$$\alpha^t \beta = v^t f \quad (4-4)$$

(4-2), (4-3), (4-4)式より

$$f = K v + C \dot{v} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } K &= T^t \bar{K} T \\ C &= T^t \bar{C} T \end{aligned} \quad (4-6)$$

以上を用いれば、振動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = 0 \quad (4-7)$$

ここに M は慣性マトリックスである。

5. 計算用減衰係数の選定

原子力発電所の振動解析に使用する内部減衰係数 r として一応つぎの数値を用いることにする。

原子炉振動 モデル大別	材料・構造名	$T_0=1\text{sec}$ を標準 とした減衰定数 h (%)	内部粘性係数 r (sec)
地 盤	岩 ~ 礫	8 ~ 10	0.025 ~ 0.032
建 屋	R.C外壁と シールド・ウォール	2	0.0064
	鉄 骨 ト ラ ス	1	0.0032
機 器	ドライウエル コア(鉄)	0.1 ~ 0.4	0.00032 ~ 0.0013

これは全く工学的判断によるものであって、今後実例によって適確な数値が判明する日が一日も早くくることを望む。

6. 建物概要(東海原子力発電所の諸元)

東海発電所の原子炉建物は図1に示すように、鉄筋コンクリート構造物であり、上部に鉄骨造上屋が、内部には遮蔽壁(シールド・ウォール)があり、さらにその内側に格納容器(ベッセル)、反応炉(リアクター・コア)がある。本論文では短辺方向の振動性について検討することにする。

先に述べたように原子炉建物は、振動性状の違ういろいろな構造物の集合体と考えられるから、その振動モデルを図2に示すように基礎版を共有する4つの構造物、すなわち建物、シールド・ウォール、ベッセルおよびコアに区分し、これらの連成体として解析することにする。図には各部並列して示したが、これは中心線上に重なっているものを図示の便宜からならべたものである。

次にモデル化に関連する重要な事項を説明する。

形状

解析モデルは図2に示す形式である。

上部構造の諸元

各構造部の質点を建物床位置に設け建物とシールドウォールを結ぶ建物床は同一水平変位連成とした。接合点での回転は自由とする。ベッセルは4質点、コアは1質点とした。

シールドウォールとベッセルはE.L. 32.2 m点でUpper Skirtで連結されているので同一変位とした。

剛性計算に際しては建物、ベッセル、コアはせん断変形のみを、シールドウォールはせん断変形と曲げ変形の両方を考慮した。

これらに関連する諸元を記すと表1のようになる。

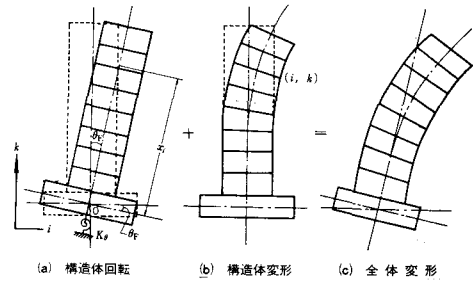
表-1 解析モデル諸元

	点	高さ (cm)	重量 (t)	面積 (cm ²)	断面二次 モーメント (cm ⁴)
建 物	6	1180	2000	0.81×10^6	
	5	760	7500	0.91	
	4	600	14600	1.70	
	3	710	8200	1.70	
	2	680	13300	2.20	
	1	400	11900	2.80	
シールド・ ウォール	4	600		0.85×10^6	0.26×10^{10}
	3	710	3570	0.85	0.26
	2	680	3860	0.85	0.26
	1	400	3670	0.85	0.26
ベッセル	4	600		0.24×10^5	
	3	710	580	2.00	
	2	680	730	2.00	
	1	400	230	1.20	
コ ア	1	680	2500	0.12×10^5	

総 重 量 : 90440 t
ヤ ン グ 率 : $E = 210 \text{ t/cm}^2$
せん断弾性係数 : $G = 90 \text{ t/cm}^2$

基礎部の取り扱い

基礎固定とみなしうる場合は簡単であるが、この場合には、建物がケーソン上に支持されているので、基礎の支持剛性を算入する必要がある。すなわち、建物には基礎変位(スウェイと



回転)による変位と構造体の弾塑性変形とが重なって図(c)のような変位となる。

この変位を運動にとり入れる場合に、その各階の水平成分は独立に取りあげなければならないが、各点(i, k)に起る鉛直変位を厳密に計算に取り入れるのは計算を徒らに複雑にする。そこで我々は上部構造部の質量の鉛直変位については構造体変形の影響(b)図は、これを無視し、基礎回転に伴う変化だけを計算に取り入れることにする。このようにすると基礎の運動方程式としては、

- ・スウェイに対しては基礎だけの質量 M をとり
- ・回転に対しては、基礎自身の J_{F_0} のほかに上部の質量を基礎回転中心0を通る水平面上に集まるものとして計算した J_s を加え、有効値を $J_F = J_{F_0} + J_s$ から求める。

方法をとることにより簡易化される。

この方法は原子炉建物や壁式アパートなどで回転の影響が割合に大きい場合の計算に用いるに適當である。

このように計算して出した基礎に関する諸元はつぎのようである。水平バネはケーソンの実測結果から、回転バネはケーソンの軸変形と基礎の地盤係数から算出した。

重 量 $W_F = 17.8 \times 10^3 \text{ t}$

回転慣性 $J = 470 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{cm}^2$

水平剛性 $K_s = 60 \times 10^3 \text{ t/cm}$

回転剛性 $K_R = 220 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{cm/rad.}$

減衰係数

各部減衰係数は次のように選定した。建物の第1次振動周期が0.4 secであるので、これに対応する λ と計算用 r 値を示すと同時に1 secに対応する λ 値をも併記した。

	内部減衰係数	対応する λ	
		$T_1=1\text{ sec}$ に対し	$T_1=0.4\text{ sec}$ に対し
R.C造建物と シールド・ウォール	0.00637	2 %	5 %
S造ベッセルとコア	0.00127	0.4 %	1 %
地盤	0.02546	8 %	20 %

7. 自由振動

各部が不規則減衰をもつ場合には、完全な固有振動は存在しないのであるが、これを便宜上 constant r とみなして固有函数、固有周期を算出すると、図3のようになる。

これを見ると第1次固有モードには sway と回転による変位 δ_s, δ_r が大きく影響し、第2次固有モードでは $+\delta_s$ を回転 $-\delta_r$ が大きく消していることがわかる。第3次はベッセルとコアだけが大きく動いている。

8. 地震応答解析

地震応答としては、EL CENTRO 1940 (NS) と1966年に高萩沖地震のときの観測地動(EW)の2波について述べることにする。

これら記録された加速度記録は基礎の動きとして、入力扱いをすることになるので、解析モデルとしては基礎回転だけをとりあげればよい。

(1) EL CENTRO 地震に対する応答

応答最大値をとり出して加速度と変位を図示したものが図4,5である。加速度の各部増幅を見ると、一般に僅少で、コアの1.7倍が目立つ

だけである。耐震仕様書では、これらに対して0.6 g の設計震度を要求したが、この比例からみてコアは地動350 gal が許容値となるので、十分な安全性が見られる。また図11の応答相對変位も極めて小さく、コアでも100 gal について1.2 mm にすぎない。

(2) 高萩沖地震に対する応答

東海村原子炉建物内には3セットの加速度計SMACがG.L床(E.L.床8.3 m), 5階床(E.L. 33.7 m)及び6階床(E.L. 40.0 m)に設置されている。たまたま1966年4月3日のTAKAHAGI-OKI地震によって記録が得られたので、そのEW成分に対して応答解析を行った。すなわち、シールド・コンクリート上端における観測値をG.Lにおける地動を入力として計算した結果とを比較すると図12のようになり、シュミレーションの適合性の判定の資料となる。

また各部応答最大値のうち、加速度と変位とを図示すると図13,14のようである。

建物、シールドウォール、ベッセル等の変形は、ほとんど剛体回転に相当しており、加速度の増幅も地盤の減衰で振動が大きく吸収されて増幅は一般に非常に小さい。ただコアについてみると増幅はほぼ1.7倍になっている。

9. むすび

本論文は不規則減衰を採用して、東海原子力発電所の動的特性を試算したものであるが、この発電所における応答増幅は極めて小さいことが判明した。

この結論は今後の地震観測の確認と減衰性の実体の把握待ちと考えるが、この種の動的取り扱いに対する一つの資料として、これを発表するとともに、御意見を寄せられるよう期待するものである。

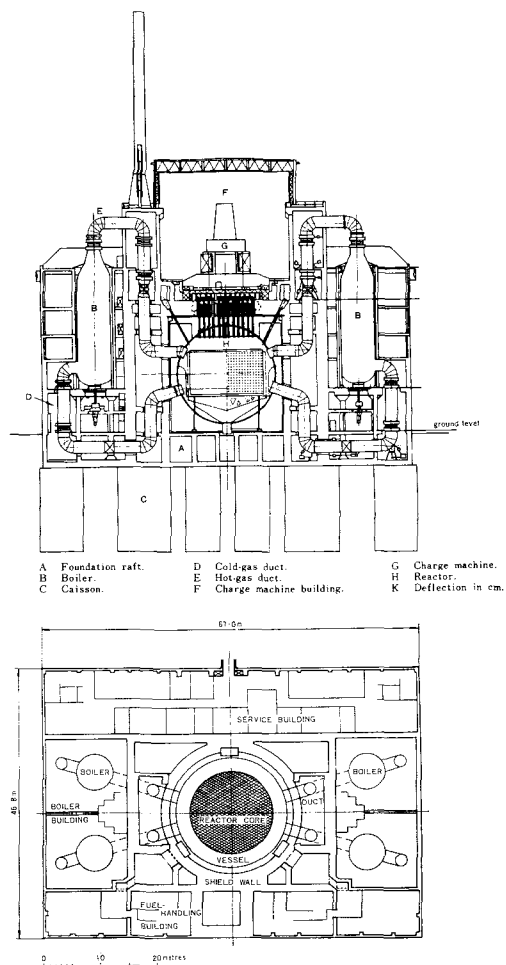


図-1 原子炉建物の断面図および平面図

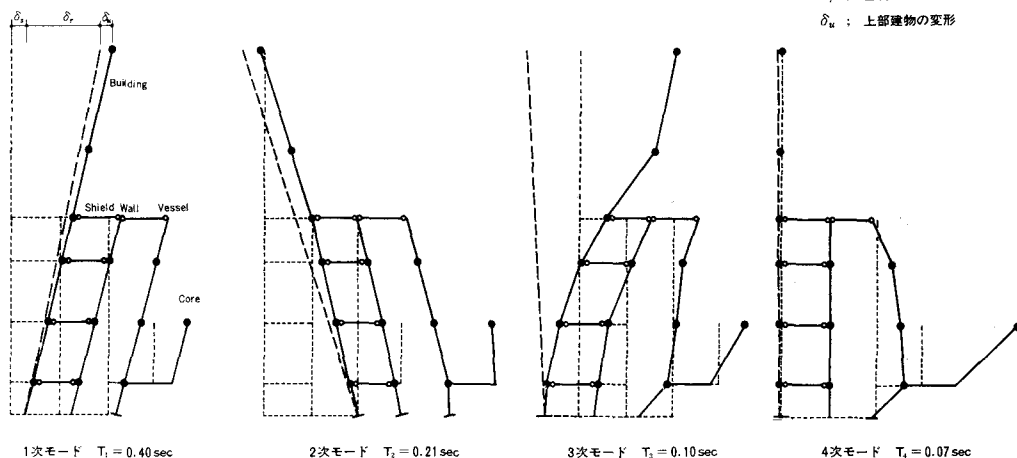


図-3 固有周期および固有モード

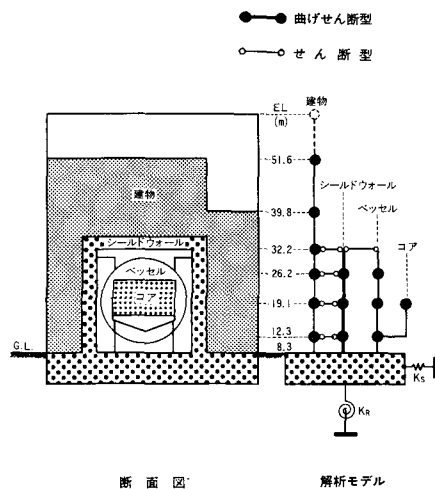


図-2 振動モデル

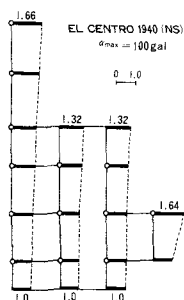


図-4 応答最大加速度倍率

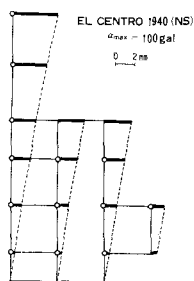
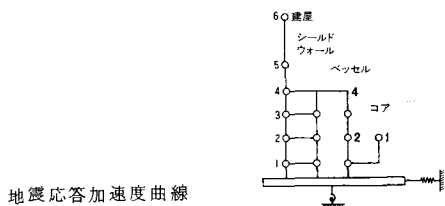


図-5 応答最大変位



地震応答加速度曲線

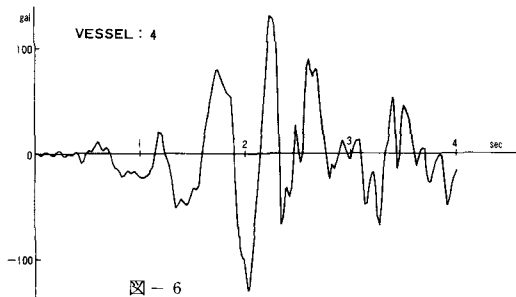


図-6

入力地震波	EL CENTRO 1940 (NS) $a_{max} = 100 \text{ gal}$
減衰定数	$T = 0.40 \text{ sec}$ に対して STEEL $\lambda = 0.01$ R. C $\lambda = 0.05$ 地 盤 $\lambda = 0.20$

地震応答変位曲線

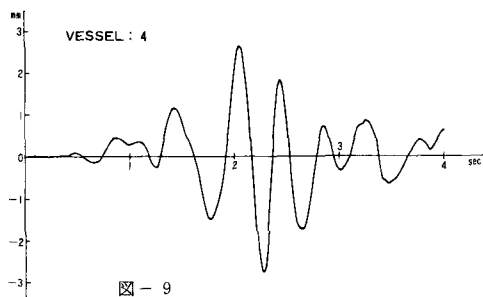


図-9

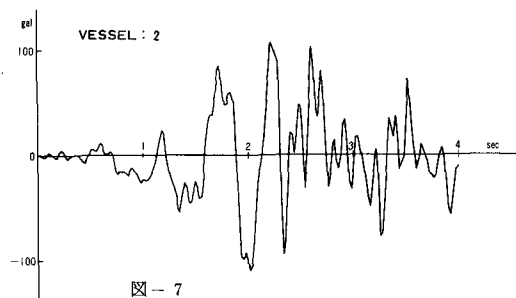


図-7

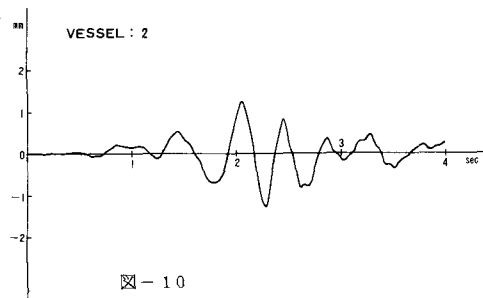


図-10

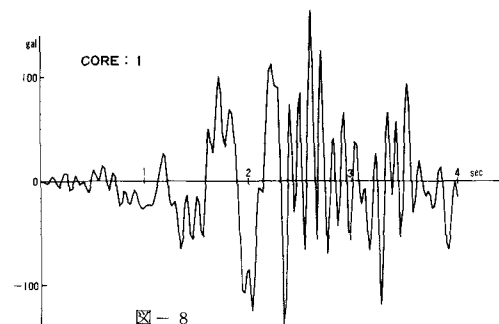


図-8

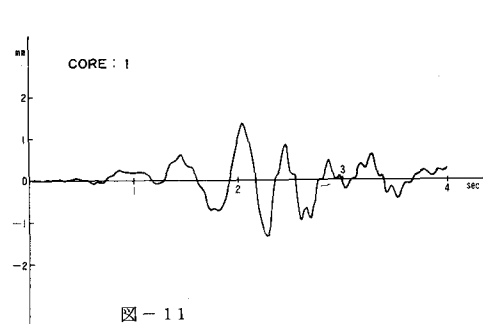
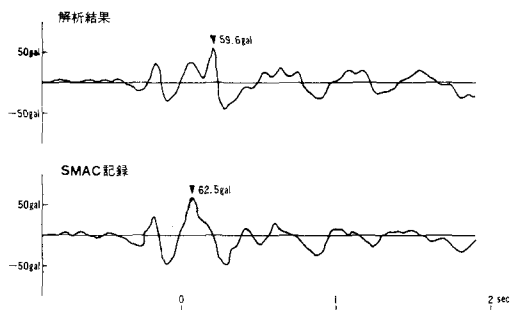


図-11

a) +22 m (振動モデルの建物 Point 4) における応答比較



b) FOOTINGの地動

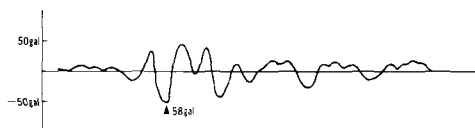


図-12 応答比較

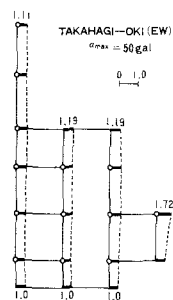


図-13 応答最大加速度倍率

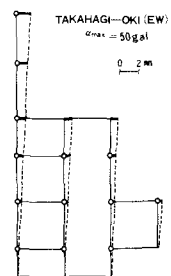


図-14 応答最大変位