

弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討

- 1 はじめに
- 2 応答解析用地震動とその破壊力を表わす指標
- 3 構造物の復元力特性
- 4 応答解析結果とその検討
- 5 まとめ

西川 孝夫*

関 崇夫**

要 約

構造物の弾塑性域にわたる応答解析を行う場合、その応答は地震動の破壊力と構造物の力学的特性との関係に支配され、しかも地震動の周期特性の影響を強く受けるために、地震動の破壊力はその周期特性をも考慮したものであることが望ましい。そこで地震動の破壊力を表わす指標として4種類を選び、周期特性の異なる地震動の破壊力を同等に評価するためには、どのような指標で表わしておくのが適切かそれぞれの指標で基準化した地震動で数種の復元力に対して1質点系の弾塑性応答計算を行い、建物の復元力特性と耐力、周期にそれらの指標の及ぼす影響について検討した結果、ごく短周期の構造物に対しては最大加速度、自乗和平方根強度が、また0.4秒前後以上の比較的周期の長い構造物に対してはスペクトル強度、最大速度が適していることが明らかになった。また、構造物の耐力と塑性率の関係をスペクトル強度を考慮に入れた関係式で定式化し、その関係式を実地震波に適用してその有効性について検討した。

1 はじめに

構造物の耐震設計を行う場合には、設計スペクトルを用いる場合と地震波を用いる場合がある。特に、構造物の塑性域まで至る挙動を解析するためには地震波を用いた弾塑性応答計算を行う必要があり、この場合には過去の実地震を用いることが多く、構造物の建設場所等の地盤の特性が無視されがちであった。近年、地震動を不規則性を有する確率事象としてとらえ、特性を予め考慮した人工地震波を作成する種々の手法が提案され、弾塑性応答計算に使用されるようになった。その弾塑性応答を大きく支配する要因は、地震動の破壊

力と構造物の力学的特性との関係であることはよく知られている。この地震動の破壊力を表わす指標としては、最大加速度・最大速度・最大変位のような最大振幅値、周期特性を考慮に入れたスペクトル強度、また地震動のパワーを表わす自乗和平方根強度などがあり、これらは弾塑性応答計算を行う際の入力地震動の加速度振幅を操作する指標でもある。実際の弾塑性応答計算の場合には、最も分かり易い加速度波形の最大振幅値(最大加速度)をそろえて(規準化して)用いることが多い。しかし、たとえば、エルセントロのように硬い岩盤上で記録された短周期成分の卓越する地震波と、八戸のように表層地盤上で得られた比較的

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

** 東京都立大学工学部

長周期成分を多く含む地震波を使って弾塑性応答計算を行うと、構造物の弾塑性応答は大きく異なることがあり両地震動の破壊力を同程度に評価しているとは言えない。最近これらの点を考慮し周期の長い高層建物の耐震設計では最大速度を破壊力を表わす指標とし地震動を規準化して弾塑性応答計算に用いるようになった。しかしながら、建物の力学的特性や耐力、周期に対してこれら地震動の破壊力を表わす指標がどのような影響を及ぼすか定量的に研究された例が少ない。本稿では、周期特性の全く異なる2種類の人工地震波を作成し、その破壊力を表わす指標に4種類を選び、それぞれで規準化した地震波を使って4種類の復元力特性に対して1質点系の弾塑性応答解析を行い、破壊力を表わす指標とその選択が応答に及ぼす影響、又復元力特性の違いとそれらの指標の関係が応答に及ぼす影響について検討した。

2 応答解析用地震動とその破壊力を表わす指標

応答解析に用いた地震波形は、周期特性の異なる2種類の人工地震波で、その群はそれぞれ20波の波形からなっている。図-1に各グループの平均応答スペクトルを示したが、TYPE-Sのグループは地盤の平均的な特性を示し単一のピークを持つ比較的短周期に顕著な卓越周期(約0.4秒)を、TYPE-Gは地盤の成層性を考慮した比較的長い周期範囲にわたって複数の卓越周期を有するような特性を持つ地震波群である。各グループの地震波形の例を図-2に示した。尚、各地

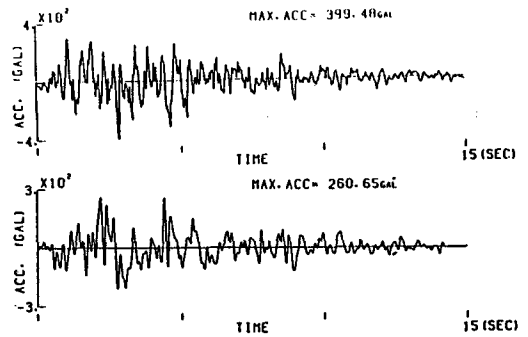


図-1 加速度波形

震動の継続時間は15秒である。

次にそれらの周期特性の全く異なる地震波を用いて応答解析を行った場合、その周期特性の違いにかかわらず、地震動の破壊力を同等に評価するには、どのような指標を用いて地震動の破壊力を表わしておくのが適切か検討するために、本稿では、最大加速度(A.M)、最大速度(V.M)、スペクトル強度(S.I)、加速度波形の自乗和平方根強度(R.M.S)の4つをその指標として選び種々の考察を行う。ここで

$$S.I = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dt \quad (1)$$

$$R.M.S = \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} (\ddot{y})^2 dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

但し、 S_v : 速度応答スペクトル

T_0 : 地震動の継続時間

\ddot{y} : 地動の加速度波形

応答解析を行う際の各指標間の具体的な値としてはTYPE-Sの地震動の最大加速度を1000 galとした時の最大速度、スペクトル強度、自乗

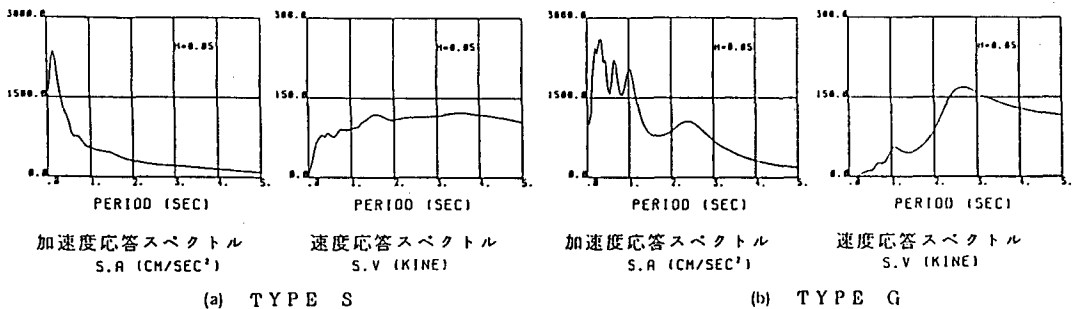


図-2 平均応答スペクトル

和平方根強度の値を用いることにする。すなわち最大加速度を地震動の破壊力を表わす指標とする場合には、全ての地震動の最大加速度が1000 gal になるように修正して応答解析を行うこととし、別にスペクトル強度を指標とする場合には、TYPE-Sの最大加速度1000 galの時のスペクトル強度の値 ($S \cdot I = 154 \text{ cm}$) にTYPE-Gのスペクトル強度が一致するように加速度波形の振幅を修正することになっている。両地震波形の各指標間の関係は表-1に示した通りである。し

表-1 両地震波形の各指標間の関係

TYPE	AVE. ACC. MAX (GAL)	AVE. VEL. MAX (KINE)	AVE. S. I (20%) (CM)	AVE. R. M. S (GAL)	
S	1000.0	80.0	154.0	210.0	
	S.D	0.0	25.2	34.6	22.7
	COV	0.0	0.32	0.22	0.11
G	$\times 1000.0$	159.9	296.0	253.1	
	S.D	0.0	37.1	58.9	32.6
	COV	0.0	0.23	0.17	0.13
	530.0 \times	80.0	152.3	132.3	
	514.1	79.8 \times	154.0	120.1	
	841.3	132.3	244.9 \times	210.0	

S.D : STANDARD DEVIATION
 COV : COEFFICIENT OF VARIATION
 KINE : CM/SEC

たがってこの場合、例えばTYPE-Sの各地震波の最大加速度が1000 gal なのに対して、TYPE-Gの地震波群の平均最大加速度は約514 gal に減少することになる。

3 構造物の復元力特性

応答計算用復元力特性としては、Bi-linear型、Degrading Tri-linear (D-TRI型)、Origin Oriented (Origin)型、Slip型の4つのモデルを用いることにした。それらの復元力特性の概略の形状を図-3に示す。Bi-linear型の場合は $K_2 = K_1 / 10$ としているが、他の3つのモデルは、 $K_3 = K_2 / 20$ 、 $Q_c = Q_y / 3$ としている。又降伏点剛性 K_y は $K_1 / 4$ と仮定して降伏変形を定めている。構造物の降伏強度 Q_y は、TYPE-Sの最大加速度を1000 gal にしていることを勘案して、建物の降伏せん断力係数 C_y にして、

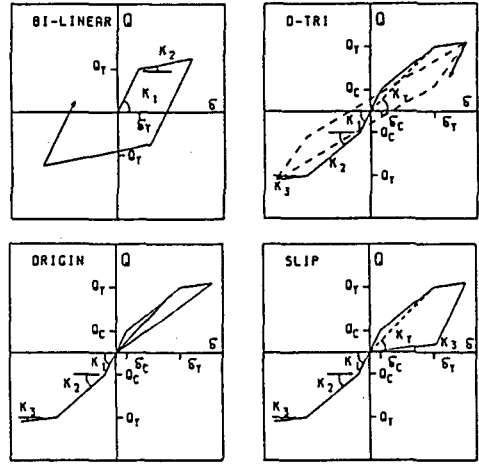


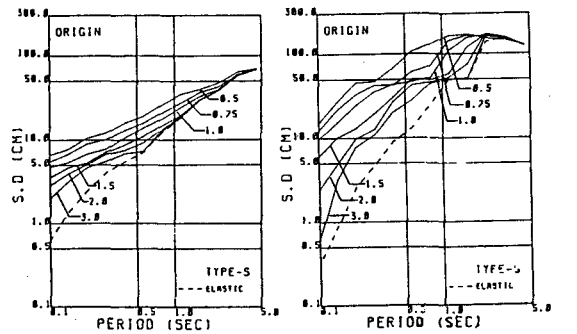
図-3 復元力特性

0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0の6種類の値に設定して計算を行った。又初期剛性 K_1 は、構造物の弾性周期が0.1秒、 $0.1\sqrt{2}$ 秒、0.2秒、……… $3.2\sqrt{2}$ 秒の計12周期になるようにそれぞれ設定している。

4 応答解析結果とその検討

i) 破壊力を表わす指標と応答

図-4に、地震動の破壊力を表わす指標として



(a) TYPE-S (AM=1000 gal) (b) TYPE-G (AM=1000 gal)

図-4 弾塑性変位応答スペクトル

最大加速度を用いた（全ての地震動の最大加速度は1000 galに統一されている。）場合の、Origin型復元力特性に対する弾塑性変位応答スペクトルを示した。尚、地震動の周期特性の差による応答の違いが明瞭に分別できるように、各グループごとに地震波群に対する応答の平均をそれぞれグループ別に示している。スペクトルの図中の6本の線はそれぞれ降伏せん断力係数 C_y に対応し、点線は弾性である。この図から明らかなように、地震動の破壊力を最大加速度を用いて評価すると、TYPE-Gに対する応答がTYPE-Sに対する応答より全体的にかなり大きくなっている。こ

のように最大加速度で地震動の破壊力を表わした場合には、主にその地震動の有する周期特性によって、構造物に与える破壊力は相当異なってくることがわかる。そこで本稿で用いた4つの指標で各々の地震動を基準化した場合、地震動の周期特性や構造物の復元力特性、耐力、周期の違いによる応答の違いがどの様であるかを定性的に見るために、TYPE-Gに対する応答の最大値をTYPE-Sに対する応答変位で除したものを C_y が1.0について各復元力ごとに図-5に示した。この図で縦軸が1.0になる時、両地震動の破壊力が同等であると評価すると、最大加速度で破壊力を

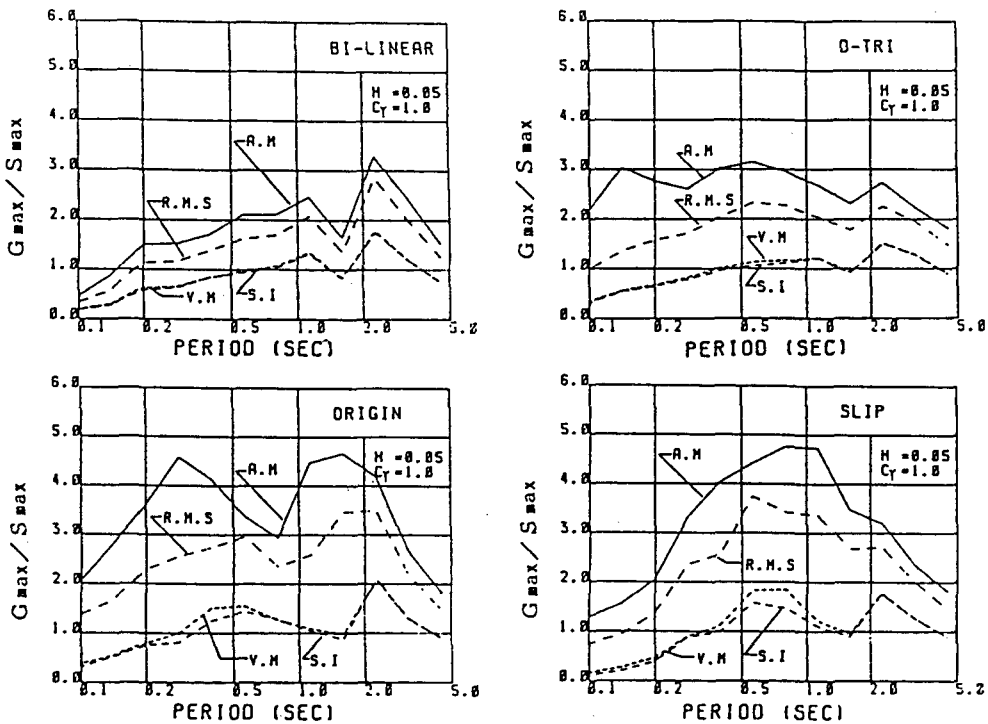
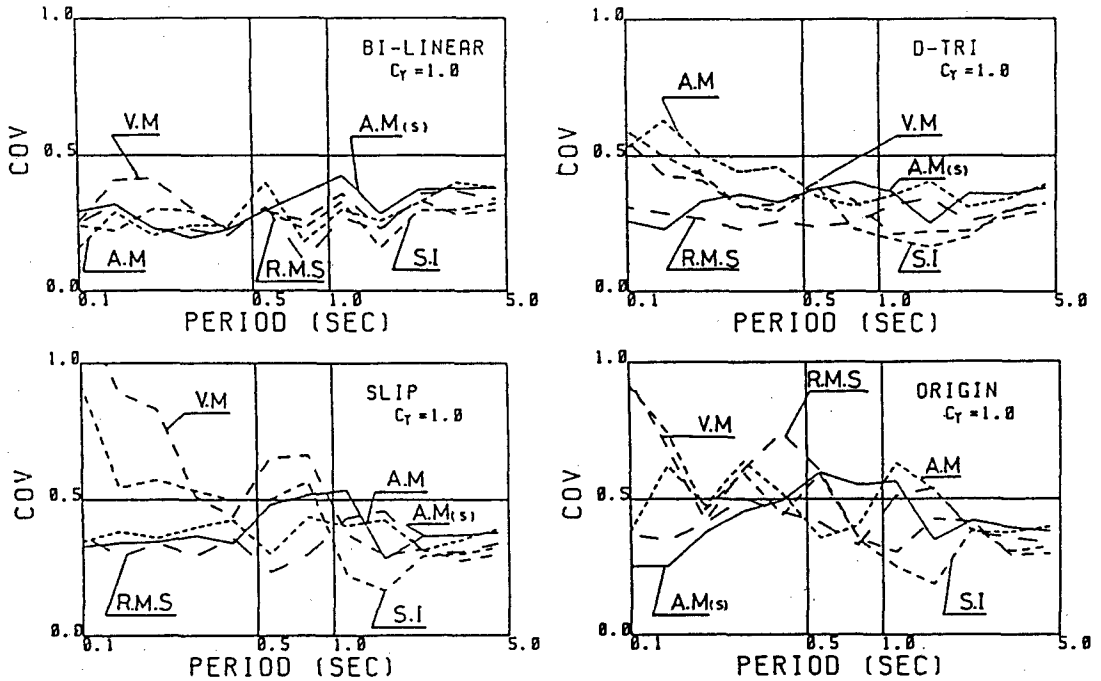


図-5 最大変位の比 (TYPE-G/TYPE-S)

考えた場合には、構造物の強度にかかわらず、ごく短周期部分を除いて長周期成分を多く含むTYPE-Gの地震動の破壊力はTYPE-Sの地震動の破壊力よりかなり大きいことが明瞭に読みとれる。また最大速度あるいはスペクトル強度を用いると、特に弾性周期が0.4秒前後以上の構造物に対しては、地震動の周期特性にかかわらず、その破壊力を同等に評価し得ることが分かる。しか

し、0.2～0.3秒付近の周期を持つ建物に対しては、本解析によると最大加速度よりもむしろ加速度波形の自乗和平方根強度を用いる方が適切と考えられるが、この指標は波形の継続時間をパラメータとして含むことを考慮すると、従来から言われているように最大加速度で地震動の破壊力を表わすのが適切と思われる。

また、図-6に地震動の周期特性の違いが応答



図一六 変位応答の変動係数

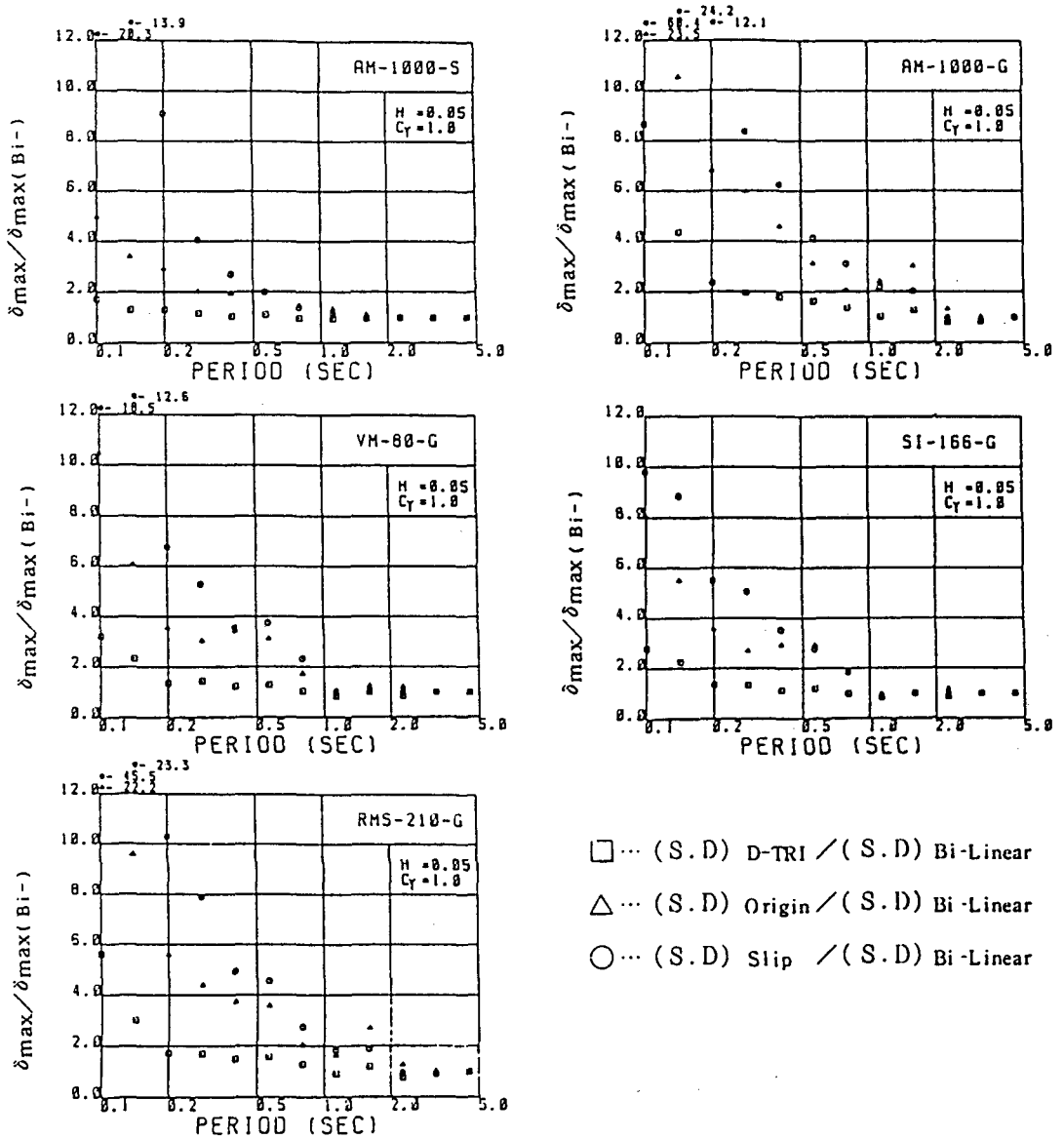
値のばらつきに及ぼす影響を見るために応答値の平均値からのばらつきを表わす変動係数 (COV) を示したものである。この図で縦軸の値が小さいほど応答のばらつきが少ないことを示している。復元力特性による多少の違いはあるが、構造物の周期が比較的短い範囲では、最大加速度、自乗和平方根強度で基準化した方が、最大速度、スペクトル強度で基準化した場合よりも変動係数が小さく安定している。しかし、周期が長くなると全体的に変動係数は小さくなり、なかでもスペクトル強度、最大速度で基準化した場合が最小となる傾向がある。

以上より建物の周期が0.1～0.3秒範囲の比較的剛性の高い構造物に対しては地震動の破壊力を表わす指標としては、最大加速度、自乗和平方根強度を、0.4秒前後以上より長い周期については、最大速度、スペクトル強度等の速度に関するものを用いて地動の加速度波形の規準化を行うと、周期特性の全く異なる地震動の構造物に対する破壊力を同等にとらえることが可能であると思われ

る。

ii) 復元力特性と応答

図一七には、復元力特性の違いが応答にどの様に関連しているか見るために、各タイプの応答をそれぞれ Bi-linear に対する応答で除したものを示した。短周期成分では、剛性低下をする復元力に対する応答は剛性低下しない Bi-linear に対する応答よりはるかに大きくなっていること、その傾向は地震動の破壊力が強い程顕著であることが分かる。又、地震波群の違いによる応答を見ると、TYPE-S に対しては図一の応答スペクトルから予想されるように、剛性低下が極端に生じず、短周期部分でもそれほど大きな倍率とはならないが、TYPE-G に対しては、その地震動の持つ周期特性の影響で剛性低下が大きく起こり、応答値は Bi-linear よりもはるかに大きくなっている様子が分かる。



図一七 復元力特性と応答の関係

iii) 応答の塑性率と建物の強度

構造物の破壊は、地震動の入力エネルギーと構造物の累積歪エネルギー、弾性振動エネルギー、減衰による吸収エネルギーで定量的に評価できることが秋山等により示されている。しかし、応答計算を行うたびに上記のエネルギーを計算するのはやっかいである。そこで、ここでは地震動の破壊力としてスペクトル強度を、また構造物の強度として降伏せん断力係数を用いて、応答の塑性率

と建物の強度の関係を表わす。この両者の関係を定式化するために、まず図一八に示すような1質点の完全弾塑性系を考える。

一般に弾塑性応答の場合C点までに復元力がなす仕事は、弾性応答の場合に復元力がA点までになす仕事に等しいこと(エネルギー一定則)より、降伏せん断力係数(C_y)とせん断力係数(C_e)の関係は(3)式で表わせる。

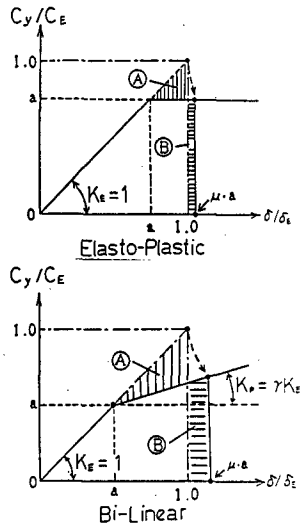


図-8 非線形復元力モデル

$$\frac{C_y}{C_e} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (3)$$

また、弾塑性系の復元力がなす仕事と初期の運動エネルギーが等しいことにより(4)式で表わされ

$$\frac{1}{2} M V_{\max}^2 = \frac{1}{2} \cdot Q_y \cdot \delta \gamma (2\mu - 1) \quad (4)$$

(4)式で V_{\max} は、速度応答スペクトル $S_v(T, h)$ で表わされるから

$$\frac{1}{2} M S_v^2(T, h) = \frac{1}{2} Q_y \delta \gamma (2\mu - 1) \quad (5)$$

(5)式の表現が可能となる。ここで、ハウスナーのスペクトル強度の定義式(1)式を考慮すると、降伏せん断力係数 (C_y) とスペクトル強度 (S, I) の関係は

$$\frac{C_y}{S, I} = \zeta \cdot \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (6)$$

(6)式で表わすことができる。

Bi-linear 型, Tri-linear 型の復元力モデルの場合は, (7)~(8)式で表わすことができる。

Bi-linear 型

$$\frac{C_y}{S, I} = \zeta \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma \left(\frac{1}{\gamma} + \mu - 1 \right) - \frac{1}{\gamma}}} \quad (7)$$

Tri-linear 型

$$\frac{C_y}{S, I} = \zeta \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \beta}}{\sqrt{2\mu - 1 + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \beta}} \quad (8)$$

- α : K_e / K_y (K_e : 弾性剛性
 K_y : 降伏点剛性)
- β : C_c / C_y (C_c : ひび割れせん断力係数)
- γ : K_p / K_e (K_p : Bi-linear 型の第二次剛性)
- ζ : 未定係数 ($1/cm$)

ここでは, $\alpha = 4$, $\beta = 1/3$, $\gamma = 1/10$ とした。

そこで、この関係式と弾塑性応答解析より得られた結果との対応を見るために、最大加速度、スペクトル強度の2つを破壊力を表わす指標として、建物の降伏せん断力係数 (C_{By}) と応答の塑性率 (μ) の関係を先の4種類の復元力モデルに関して建物の周期が0.2秒, 0.4秒の場合について得られた結果を図-9に示した。縦軸は降伏せん断力係数で最大加速度で規準化する時は、建物の降伏せん断力係数 (C_{By}) と地動の加速度を1000 gal で除した値との比

$$C_y = \frac{C_{By}}{\text{地動の最大加速度 (gal)} / 1000 \text{ gal}} \quad (9)$$

又、スペクトル強度で規準化するには

$$C_y = \frac{C_{By}}{\text{地動のスペクトル強度 (cm)} / 154 \text{ cm}} \quad (10)$$

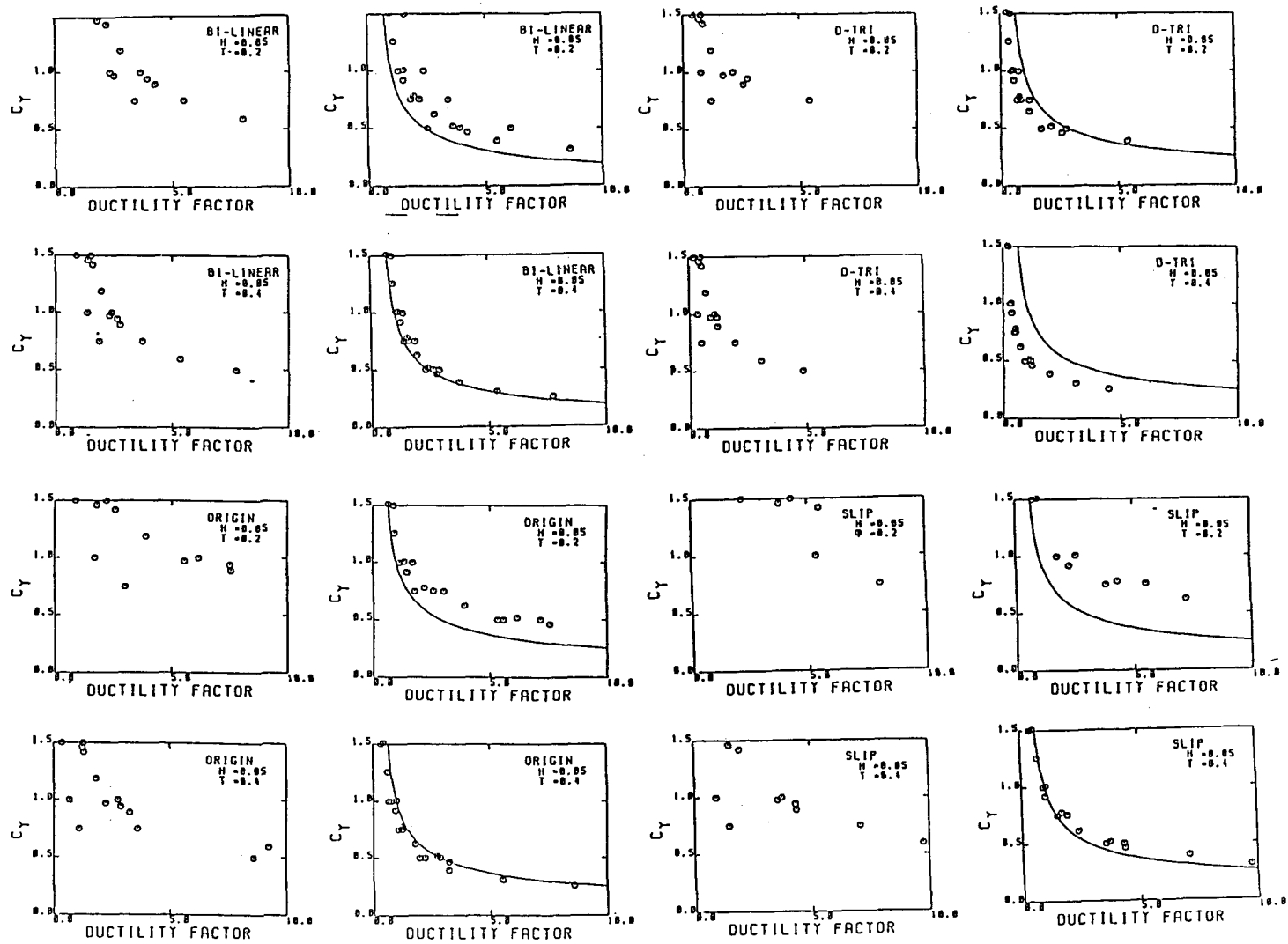
である。

但し、 C_{By} : 建物の降伏せん断力係数

(0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0)

である。建物の周期について見ると、どの復元力モデルについても建物の周期が長くなると同一の降伏せん断力係数値での塑性率のばらつきが小さく、特に、Origin 型, Slip 型の場合には、明らかにその傾向が見られる。また、地震動の破壊力を表わす指標間で比較するならば、スペクトル強度について降伏せん断力係数と塑性率の関係を表わすほうが、最大加速度に関して表わすよりも塑性率のばらつきはかなり小さくなり、建物の周期が0.4秒になるとプロットされたデータにある一定の傾向があることが認められる。

また、図中の実線は、 $\zeta = 1.0$ としたときの(7)~(8)式の値をプロットしたものである。この図より特に構造物の周期が0.4秒のとき、ほぼ応答計算より得られた降伏せん断力係数と塑性率の関係を包絡する傾向がみられることにより、この関係



図一9 規準化別の降伏せん断力係数と塑性率

式を用い最小2乗法により周期ごとにこの値を算定した。その結果の一例を図-10に示した。図

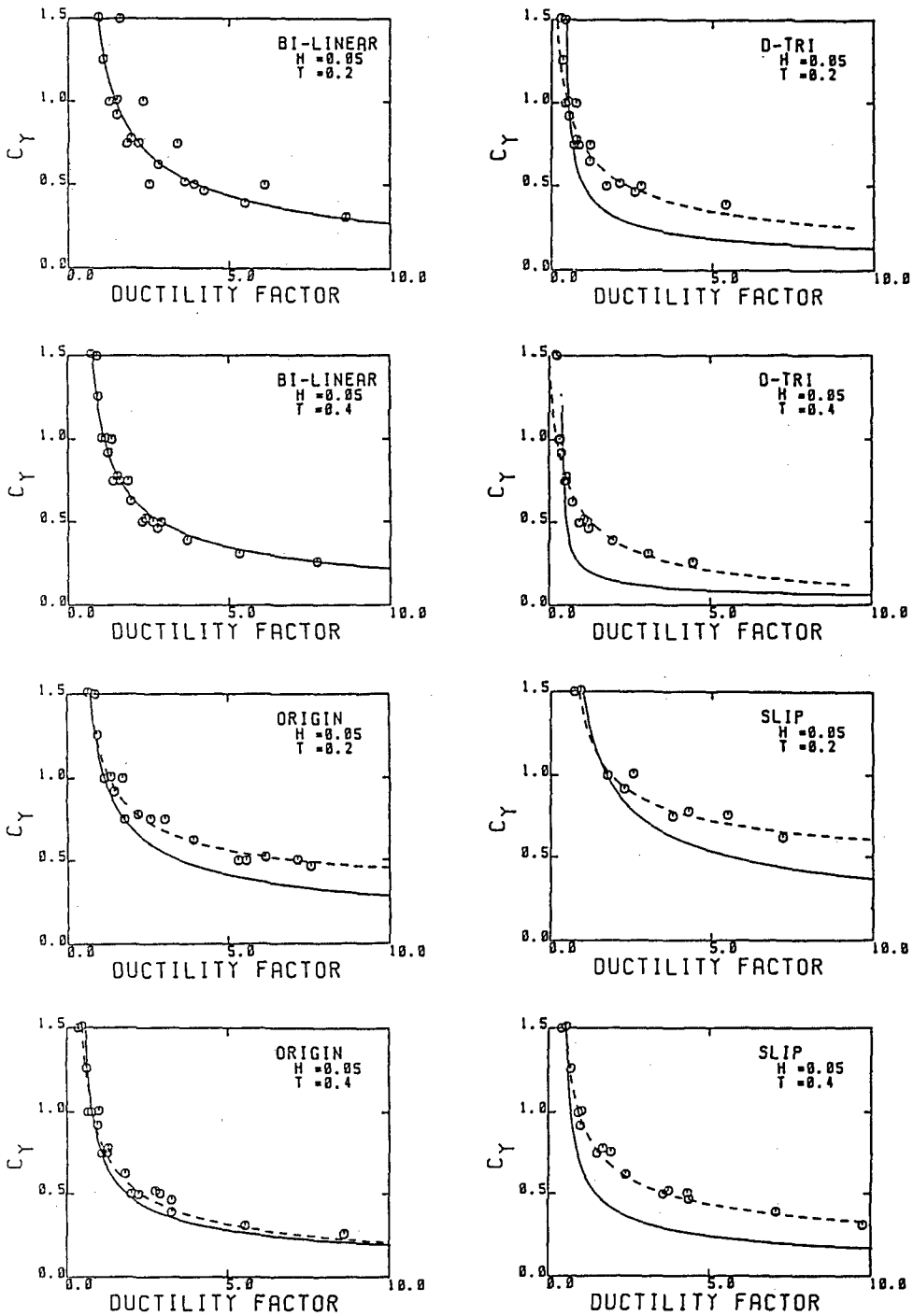


図-10 降伏せん断力係数と塑性率 (人工地震波)

中の実線は得られた ζ の値を使って(7)~(8)式をプロットした結果である。これを見ると、Bi-linearモデルに関しては、それぞれの周期についても(7)式でかなりシュミレートできることが分かる。しかし、他の3復元モデルについては、そのように簡単に表現できない場合がある。これは、Bi-linearモデル、D-Triモデルのように履歴吸収エネルギーが明確に定義されている復元力モデルと異なり、Slip、原点指向(Origin)モデル等が、過去の最大応答値を超えない範囲では履歴吸収エネルギーがないことや、復元力モデルの形状を決定する諸パラメーター(α , β , γ 等)の設定値、及び地震動の入力の大きさの影響が含まれているものと思われる。特に、D-Triモデルに対しては入力レベルが小さく、応答が塑性域にそれほど入らなかったと考えられる。しかし、これらの場合も全体としての傾向は(8)式と相似な関係にあると思われ、(7), (8)式に補正項を付加し $\zeta = 1.0$ と

したときの関係つまり、(1), (2)式として

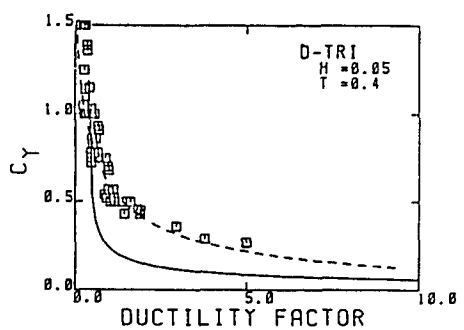
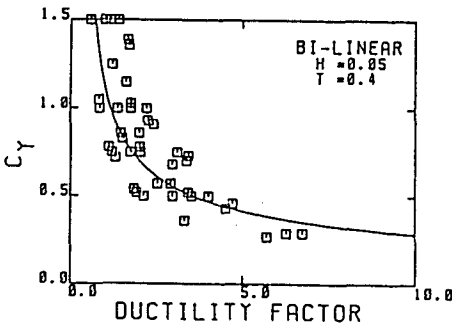
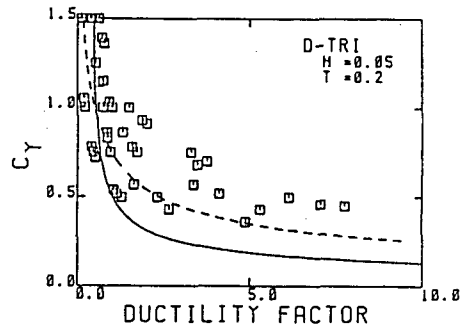
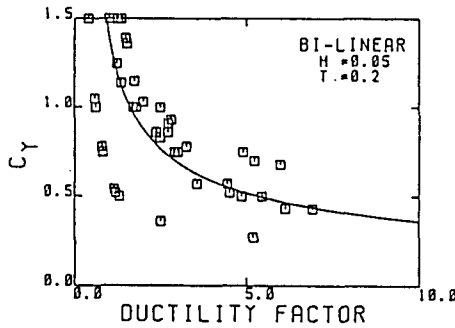
$$\frac{C_y}{S \cdot I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma \left(\frac{1}{\gamma} + \mu - 1 - B \right)^2 - \frac{1}{\gamma}}} \quad (1)$$

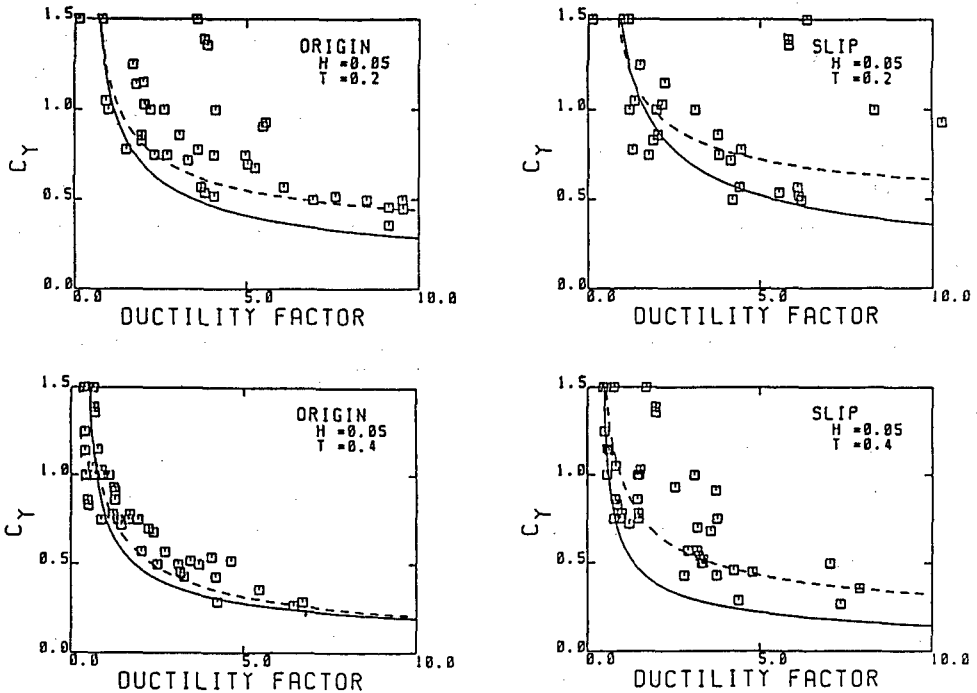
$$\frac{C_y}{S \cdot I} = C + \frac{\sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) \beta}}{\sqrt{2(\mu + D) - 1 + \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) \beta}} \quad (2)$$

降伏せん断力係数と塑性率の関係を表わす、図中の破線は(1), (2)式により得られた結果を示している。実線と比較すると全ての復元力モデルについてもかなりよく傾向を捉えている。

iv) 実地震波への適用

次に、この関係式を実地震波に適用してみた。使用した地震波は、エルセントロ(1940 NS)、八戸(NS, EW)、宮城(NS)の4成分でそれぞれ周期特性の異なる地震動であり規準化の値は人工地震波(最大加速度1000 gal, スペクト





図一 11 降伏せん断力係数と塑性率（実地震波）

ル強度 1.5 4 cm) の場合と同様である。図一 1 1 に建物の周期が 0.2 秒、0.4 秒の場合について降伏せん断力係数と塑性率の関係を復元力モデルごとに示した。図中の実線及び破線は図一 1 0 と同じのものであり、Bi-linear モデルについて見ると、人工地震波と同様実地震波についてもかなりその傾向をとらえており、他の 3 復元力モデルについてもやや小めにではあるがこれらの関係式が実際の地震動にもある程度有効であることが分かる。また、この関係式を用いることにより、たとえば構造物の周期 (T)、復元力の破壊形式 (復元力モデル、Cy)、設計時の許容塑性変形量(μ) が既定されれば、(6)~(8)と(11)~(12)式により地震動の入力レベル (S・I) が与えられ構造物の応答計算を行う場合の入力地震動の大まかな規準化のレベルを算定することができると思われる。

5 まとめ

周期特性の異なる地震動に対してもその破壊力を同等に評価するために、どのような指標で地震

動の破壊力を表わしておけば適切か 4 種類の復元力特性について、周期特性の異なる人工地震波に対する 1 質点系弾塑性応答計算を行い、地震動の破壊力を定量的に表わす指標が (最大加速度、最大速度、スペクトル強度、自乗和平方根強度) 構造物の力学的特性、耐力や周期にどのような影響を及ぼすか検討し、ごく短周期の構造物に対しては、最大加速度、自乗和平方根強度で、また、0.3~0.4 秒前後以上の比較的周期の長い構造物については、最大速度、スペクトル強度等の速度に関する指標が適していることを述べた。

また、構造物の耐力と強震時に予想される、塑性率の関係をスペクトル強度を考慮に入れた関係で定式化し、その関係式を実地震波の場合に適用しその有効性について検証を行った結果、実際の地震動の場合でも比較的短周期の建物に対しては 4-iii) で定式化した関係式がある程度有効であることが分かった。また、この関係式を用いることにより対象とする建物の諸パラメータ (周期、破壊形式、許容塑性変形量等) を定めると入力地震動の規準化の値を求めることができると思われ

る。

文 献 — 覧

長橋純男・小林啓美

- 1969 「構造物の破壊作用を対象とした地震動の強さの評価」『日本建築学会論文報告集』第160号, pp. 25 ~ 34。

長橋純男・小林啓美

- 1971 「地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅」『日本建築学会論文報告集』第181号, pp. 15 ~ 21。

秋山 宏

- 1980 『建築物の耐震極限設計』東京大学出版会。

関 崇夫・西川孝夫

- 1983 「弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討」『日本建築学会関東支部研究報告集』pp. 109 ~ 112。

関 崇夫・西川孝夫

- 1983 「弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討(その2)」『日本建築学会大会学術講演梗概集』pp. 705 ~ 706。

関 崇夫・西川孝夫

- 1984 「弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討(その3)」『日本建築学会大会学術講演梗概集』pp. 655 ~ 656。

西川孝夫・関 崇夫

- 1984 「鉄筋コンクリート構造物の弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討」『コンクリート工学年次講演会論文集』pp. 681 ~ 684。

Nishikawa, T., Hayama, S., Seki, T.

- 1984 "Normalization Parameters of Maximum Values of Earthquake Motion for Non-Linear Response Analyses of Structure" Proc. 8-WCEE, pp. 83 ~ 86.

関 崇夫・西川孝夫

- 1985 「弾塑性応答解析に用いる地震動の強さの評価に関する検討(その4)」『日本建築学会大会学術講演梗概集』pp. 125 ~ 126。

Key Words (キー・ワード)

Maximum Acceleration (最大加速度) **Maximum Velocity** (最大速度),
Spectrum Intensity (スペクトル強度), **Root Mean Square** (自乗和平方根),
Ductility Factor (塑性率), **Destructive Power of Earthquake Motion** (地震動の破壊力),
Non-linear Response Analyses (非線形解析),
Normalization Parameters (規準化パラメータ), **Hysteresis Rules** (履歴ルール),
Response Spectrum (応答スペクトル)