

弾塑性系の応答に影響を与える要因について

平沢 高史¹・田村 敬一²・中尾 吉宏³

¹正会員 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

³正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

兵庫県南部地震では非常に強い地震動により多くの土木構造物が甚大な被害を受けたことを契機として、耐震設計において非常に強い地震動が考慮されるようになったが、このような耐震設計では構造物の弾塑性応答に影響を及ぼす地震動特性を明らかにし、設計地震動の設定に考慮する必要がある。本論文では、地震動特性を表すフーリエスペクトル、弾性応答スペクトルに加え、地震の規模、震央距離等の指標が弾塑性系の応答に与える影響について検討し、弾塑性降伏耐力を簡便に推定する評価式を提案した。

Key Words: *Elasto plastic response, Ground motion characteristics, Correlation coefficient*

1. はじめに

構造物の耐震設計では、地震動特性が構造物に及ぼす影響を弾性応答スペクトルを用いて評価し、設計地震動を設定する方法が最も一般的に用いられている。この方法は、構造物の挙動が弾性域内にある場合には有効な手法である。それに対し、構造物が弾塑性域で挙動する強い地震動を想定した耐震設計では、構造物の弾塑性域での挙動に影響を与える地震動特性を考慮して設計地震動を設定する必要がある。しかしながら、構造物の弾塑性域における応答特性と地震動特性の関係については、未だ未解明の点が多く残されている。

本論文では、弾塑性系の応答に影響を及ぼす地震動特性や地震の諸元等の要因を抽出し、その要因を用いて弾塑性系の応答を簡便に推定する方法を提案した。

2. 弾塑性応答解析

質点の質量を M 、降伏時の質点の加速度を a_y とすれば、質点に働く慣性力 $M \cdot a_y$ と降伏耐力 F_y の間には $F_y = |M \cdot a_y|$ の関係が成り立つ。本論文では、 $M=1.0(\text{kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{cm})$ とし、弾塑性応答解析によって算出した弾塑性応答加速度 a_y を弾塑性降伏耐力 F_y とした。

弾塑性応答解析には、図-1 に示す1質点系弾塑性型せん断バネモデルを用い、非線形履歴特性としては完全バイリニアモデルを用いた。また、内部減衰は5%とした。解析では、図-2 に示す最大応答変位 $\delta_{\max}$ と降伏変位 δ_y の比として定義される靱性率 μ をパラメー

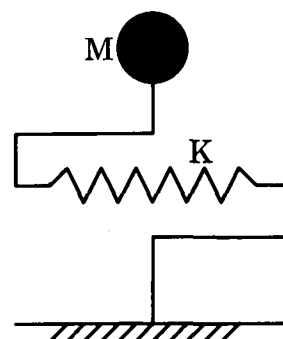


図-1 構造モデル

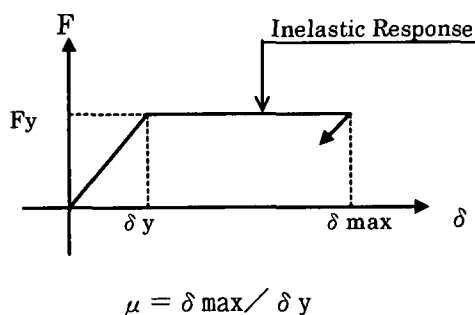


図-2 靱性率の定義

タとした。ただし、靱性率は応答計算の結果得られるものであるため、実際には、弾塑性降伏耐力を種々変化させて弾塑性解析を繰り返し行い、靱性率を目標値の誤差1%以内に収束させることにより弾塑性降伏耐力 F_y を算出した。

表-1 解析対象固有周期

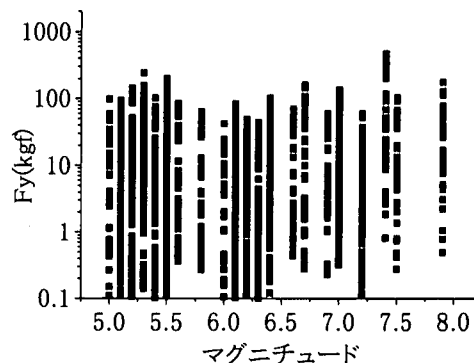
固有周期 T(sec)	0.100	0.126	0.158	0.200	0.251	0.316	0.398	0.501	0.631
	0.794	1.000	1.259	1.585	1.995	2.512	3.162	3.981	5.012

表-2 各地震動特性と弾塑性降伏耐力との相関係数

地盤種別	靱性率	弾塑性降伏耐力 F_y との相関係数			
		マグニチュード	震央距離	震源深さ	最大加速度値
I	2	0.151	-0.183	-0.003	0.376
	4	0.155	-0.173	-0.005	0.365
	6	0.149	-0.166	-0.008	0.351
	8	0.146	-0.160	-0.009	0.343
II	2	0.191	-0.041	-0.029	0.343
	4	0.195	-0.027	-0.028	0.321
	6	0.192	-0.022	-0.024	0.308
	8	0.189	-0.016	-0.019	0.294
III	2	0.079	-0.055	0.045	0.275
	4	0.091	-0.036	0.041	0.253
	6	0.100	-0.022	0.040	0.239
	8	0.103	-0.016	0.035	0.226

弾塑性降伏耐力を算出した系の固有周期を表-1 に示す。表-1 の固有周期は、0.1sec から 5.012sec までを対数軸上で等間隔に 17 分割した点に相当する。解析には、過去に発生した地震による水平 394 成分の加速度強震記録¹⁾を用い、靱性率 μ は 2, 4, 6, 8 とした。

なお、目標の靱性率を与える弾塑性降伏耐力が複数存在する場合があるため²⁾、そのような場合には、解析で算出された複数解の最大値を弾塑性降伏耐力として用いることとした。

図-3 弾塑性降伏耐力とマグニチュードの関係(I 種地盤、 $\mu=4$ の場合)

3. 弾塑性降伏耐力に影響を及ぼす要因

弾塑性系の応答に影響を及ぼす要因について検討するため、以下の①から⑥と弾塑性降伏耐力の関係について検討した。

- ①マグニチュード
- ②震央距離
- ③震源深さ
- ④最大加速度値
- ⑤フーリエ振幅スペクトル(加速度・速度・変位)
- ⑥弾性応答スペクトル(加速度・速度・変位)

ここで、フーリエ振幅スペクトルは、表-1 に示した周期を代表値としてこの点を中心に対数軸上に等間隔に分割した区間に入るフーリエ振幅スペクトルの平均値とした。また、弾性応答スペクトルは減衰定数 5%、表-1 に示す固有周期に対するスペクトル値とした。

394 成分の強震記録を用いて弾塑性応答解析を行い、結果を観測点の地盤条件と靱性率により整理した。ここで、観測点の地盤条件は、地盤の特性値により I 種地盤

($T < 0.2\text{sec}$)、II 種地盤 ($0.2 \leq T < 0.6\text{sec}$)、III 種地盤 ($0.6\text{sec} \leq T$) に分類した⁴⁾。地盤条件及び靱性率ごとに算出された弾塑性降伏耐力と上記の①から⑥との関係について検討するために、式(1)に示す指数関数を用いて、回帰分析を行った。

$$Y = A \times X^B \quad (1)$$

ここで、Y: 目的変数(F_y)

X: 説明変数(①～⑥)

A, B: 回帰係数

結果として、①～⑥をそれぞれ説明変数とした場合の相関係数を表-2 および表-3 に示す。

表-2 及び表-3 を用いて弾塑性降伏耐力と相関性の大きな要因について考察する。

(1) マグニチュード・震央距離・震源深さ・最大加速度値

表-2 から、マグニチュード、震央距離、震源深さ及び最大加速度値は、いずれについても弾塑性降伏耐力との相関係数が-0.2～0.4 程度であり、相関性が低い。特

表-3 各地震動特性と弾塑性降伏耐力との相関係数

地盤種別	靱性率	弾塑性降伏耐力 F_y との相関係数					
		フーリエ振幅スペクトル			応答スペクトル		
		加速度	速度	変位	加速度	速度	変位
Ⅰ	2	0.863	0.121	-0.404	0.992	0.517	-0.190
	4	0.848	0.095	-0.409	0.985	0.493	-0.218
	6	0.836	0.074	-0.417	0.981	0.474	-0.240
	8	0.827	0.058	-0.422	0.977	0.459	-0.256
Ⅱ	2	0.814	0.094	-0.439	0.987	0.318	-0.191
	4	0.778	0.038	-0.460	0.978	0.264	-0.245
	6	0.756	0.043	-0.471	0.967	0.232	-0.278
	8	0.740	0.020	-0.480	0.953	0.207	-0.303
Ⅲ	2	0.679	-0.014	-0.423	0.982	-0.075	-0.279
	4	0.610	-0.100	-0.456	0.975	-0.012	-0.359
	6	0.573	-0.147	-0.473	0.961	-0.061	-0.403
	8	0.550	-0.175	-0.483	0.945	-0.090	-0.430

に、震源深さについては、相関係数が 0 に近い。例として図-3 にⅠ種地盤、靱性率=4 の場合のマグニチュードと弾塑性降伏耐力 F_y の関係を示す。この図からもマグニチュードと弾塑性降伏耐力の間には相関が認められない。

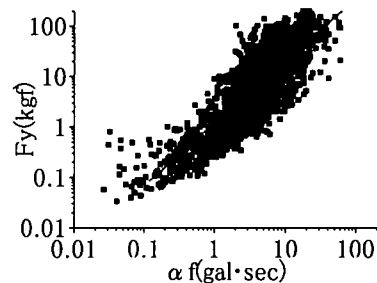
(2) フーリエ振幅スペクトル

表-3 から、加速度フーリエ振幅スペクトルと弾塑性降伏耐力との相関係数は正の値をとり、相関係数の絶対値も比較的大きいことがわかる。すなわち、ある周期で加速度フーリエ振幅値が大きくなるほど、その周期と同じ固有周期を持つ系の弾塑性降伏耐力が大きくなる傾向があるといえる。図-4 に靱性率=4 の場合の加速度振幅スペクトル αf と弾塑性降伏耐力 F_y の関係の回帰結果を地盤種別ごとに示す。この図より加速度振幅スペクトルと弾塑性降伏耐力には、ある程度の相関があることがわかる。また、Ⅱ種地盤とⅢ種地盤については、弾塑性降伏耐力が 10kgf 付近よりも小さい場合と 10kgf 付近よりも大きい場合で、弾塑性降伏耐力と加速度フーリエ振幅スペクトルの相関関係が異なるという特徴が見られる。この傾向は特にⅢ種地盤で顕著である。

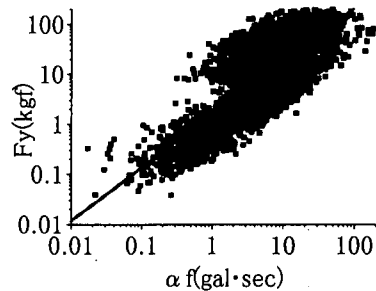
速度振幅スペクトルと弾塑性降伏耐力との相関係数は -0.2~0.2 程度であり、相関性が低い。

変位振幅スペクトルと弾塑性降伏耐力との相関係数は負の値をとり、これは変位振幅スペクトルの値が大きくなると弾塑性降伏耐力が小さくなる傾向があることを示している。しかし、相関係数の絶対値が全体に 0.4 程度で、相関性は低い。

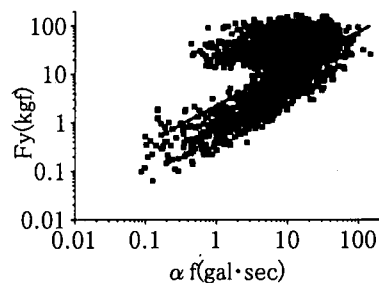
(3) 弾性応答スペクトル



①Ⅰ種地盤の場合



②Ⅱ種地盤の場合



③Ⅲ種地盤の場合

図-4 弾塑性降伏耐力と加速度フーリエ振幅スペクトルの関係 ($\mu=4$)

表-3 から、弾性加速度応答スペクトルと弾塑性降伏耐力との相関係数は 1.0 に近く、両者の相関が高いこ

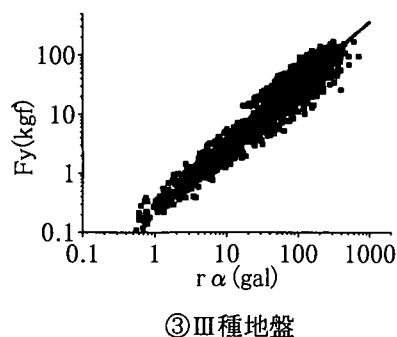
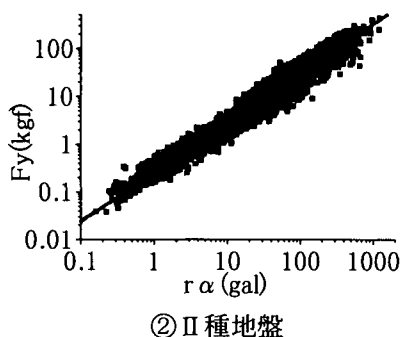
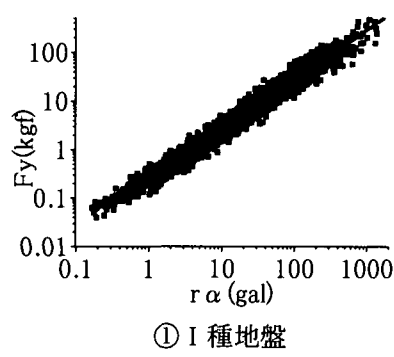


図-5 弾塑性降伏耐力と弾性加速度
応答スペクトルの関係($\mu=4$)

とがわかる。

図-5 に靱性率 $\mu=4$ の場合の弾性応答加速度 $r\alpha$ と弾塑性降伏耐力 F_y の関係の回帰結果を地盤種別ごとに示す。図からも弾性応答スペクトルと弾塑性応答耐力の相関性が高いことがわかる。また、弾性応答加速度 $r\alpha$ から弾塑性降伏耐力 F_y を推測する回帰式の係数を表-4 に示す。

図-6 には、弾塑性応答解析で弾塑性降伏耐力 F_y を計算した結果と、回帰式によって弾性加速度応答スペクトル $r\alpha$ から弾塑性降伏耐力 F_y を計算した結果を、固有周期 T ごとに示す。計算は、II 種地盤、靱性率 $\mu=4$ の場合の 4 ケースの入力地震動について行った。また、図-6 では、入力地震動の違いを線種で分けし、弾塑性応答解析で求めた結果には黒丸を付している。この図から、回帰式による推測結果は解析結果とよく一致していることがわかる。

表-4 弾性応答加速度 $r\alpha$ と弾塑性応答降伏耐力

F_y の回帰式の係数

地盤種別		$\mu=2$	$\mu=4$	$\mu=6$	$\mu=8$
I	A	0.461	0.241	0.164	0.125
	B	1.0086	1.0523	1.0416	1.0521
II	A	0.479	0.255	0.173	0.129
	B	1.0089	1.0307	1.0520	1.0688
III	A	0.491	0.251	0.161	0.115
	B	1.0116	1.0537	1.0913	1.1235

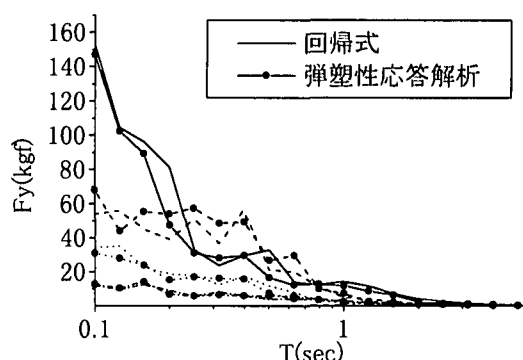


図-6 回帰式による推定と応答解析結果
(II 種地盤、 $\mu=4$ の場合)

弾性速度応答スペクトル及び弾性変位応答スペクトルについては、弾塑性降伏耐力との相関係数が地盤種別ごとに变化しており、弾塑性降伏耐力との相関性が地盤種別に左右されるという特徴が見られる。ただし、相関係数の絶対値は小さく、相関性は低い。

4. まとめ

マグニチュード、震央距離、震源深さ、最大加速度値、フーリエ振幅スペクトル及び弾性応答スペクトルについて、弾塑性降伏耐力との相関性を考察した。その結果、弾塑性系の応答と相関が高い地震動特性として、弾性加速度応答スペクトル及び加速度フーリエ振幅スペクトルが挙げられ、特に弾性加速度応答スペクトルと弾塑性降伏耐力との間に高い相関性があることがわかった。また、弾性加速度応答スペクトルから弾塑性降伏耐力を推定する回帰式を導出した。

参考文献

- 1) 川島、相沢、高橋, 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告第 166 号, 1985.9
- 2) 山本、本田、田村、中尾, リダクションファクターによる弾塑性系の応答評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998.11
- 3) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, (財)日本道路協会, 丸善, 1996.12