

(104) 地震動が多質点系構造物の 損傷に寄与する因子の評価

東電設計(株) 松島 学
東京電機大学 松井 邦人
東京電機大学 ○井出 周治

1. はじめに

構造物はその耐用期間中に大地震の作用を受けることはまれであり、そのような構造物を弾性の範囲内で設計することは経済的でない。構造物に入力される全エネルギーの一部を構造物の持つ減衰機構と構造部材の塑性により消費させる、即ち、僅少の損傷で地震エネルギーをこのように吸収あるいは消散し、大地震に耐えることのできるように設計、施工することが合理的である。

大きな地震入力を受け、塑性変形を生じる構造物の応答を表すのに最もよく用いられる指標は塑性率であり、これは最大応答に注目し、その値を降伏変位で除したものである。しかし、構造物が損傷を大きくするのは、正負の塑性変形を繰り返し受ける結果であると思われ、その様な損傷を表すためには、最大応答よりも塑性歪エネルギーが重要であるとも考えられている。近年、この観点から1質点系モデルを用い、損傷を評価しようとする試みがなされている。^{1)~4)}

本研究では各層の復元力特性が Bi-linearモデルで表せる3質点系の構造物を対象とし、入力地震動と構造物特性が塑性率、及び塑性歪エネルギーにどのような影響を与えるかを定量的に把握しようと試みている。

2. 応答解析法と解析モデル

多質点系の運動方程式は次式のように表される。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + K(y)y = -M\ddot{Z}_0 \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 M : 質量マトリックス、 C : 減衰マトリックス、 $K(y)$: 系の復元力特性を表す剛性マトリックス、 \ddot{y} , \dot{y} , y , \ddot{Z}_0 : 応答の変位、速度、加速度の列マトリックスおよび地動の加速度である。地動によって生じる各エネルギーは、式(1)を地動の継続時間 t_0 まで積分すると求まる。

$$M \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} K(y) y \dot{y} dt = -M \int_0^{t_0} \ddot{Z}_0 \dot{y} dt \quad \text{--- (2)}$$

式(2)で、左辺の第一項は、運動エネルギー、第二項は系の減衰エネルギー、第三項は系に蓄えられる塑性ひずみエネルギーと地動終了時の弾性ひずみエネルギーである。ただし、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーは、地動終了後しばらくして減衰機構により消費されるものである。ここで重要なのは、系の損傷に影響する塑性ひずみエネルギーであり、この値は構造物や入力地震動の特性によって決定されるもので、構造物の損傷を表わす指標の一つである。本研究では、前述した塑性ひずみエネルギーと一般に安全性の指標として利用されている塑性率の二つを構造物の損傷を表わす指標として取り扱い、3. で述べるパラメータでどのように影響を受けるかを検討した。

本研究での式(1),(2)の各質点の復元力特性として

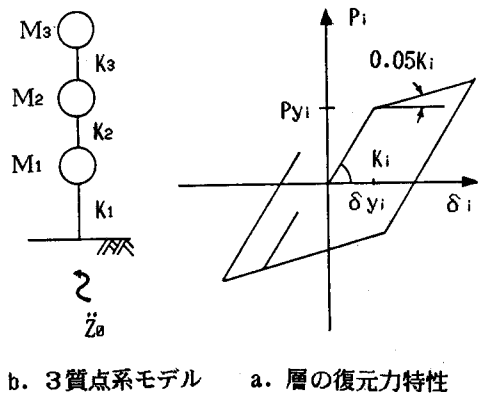


図1 解析モデル

は、図1に示すような、Bi-linear型の3質点系モデルを採用した。そして、減衰定数は、 $h=0.0$ 、降伏後の剛性は弾性剛性の0.05倍とした。また各質点の合計が $4tf \cdot sec^2/cm$ となるように、各層の質量の分布を与えた。固有周期は、系の一次固有周期のみを合わせるように、与えられた質量分布から、各層の剛性分布を求めた。入力地震動としては、① El-Centro NS 1940年 Imperial Valley Earthquake, ② 八戸 N S 1968年 十勝沖地震 ③ Taft S69E 1952年 Arvin Tahachapi Earthquake の周波数特性が異なる3つものを用いた。また、これらの各地震動の継続時間は、Trifunac and Brady⁵⁾によるパワーの蓄積時間に基づき継続時間の決め方を利用して、地動の初期微動から全パワーの95%の値になる時間を採用した。なお、数値計算は、地震波のきざみを $\Delta t=0.02sec$ とし、ニューマークの β 法を用いて、 $\beta=1/6$ として計算を行った。

3. 解析パラメータ

本研究では、構造物の損傷を表す指標として、塑性率と塑性ひずみエネルギーがあることを2. で述べたが、この2つの指標に影響を及ぼす因子として、構造物の復元力特性①-④と地動の特性⑤-⑥としてつぎのものを設定した。ただし、設定した各因子の対象とした変動範囲は、実構造物を念頭におき、あまり実際のものとかげはなれないように留意した。

- ① 構造物の系の一次固有周期 T_1
- ② 各層の全質量に占める比 M_i/M_T
- ③ 各層の降伏耐力比 $\alpha_i (=P_{yi}/\Sigma M)$
- ④ 第一層に対する*i*層の降伏耐力比 α_i/α_1
- ⑤ 入力地振動の種類
- ⑥ 入力加速度の最大加速度 A_{max}

ここで、①は、一般に3質点系程度の構造物は、一次固有周期が系の挙動に支配的であり、二次、三次固有周期は無視出来るものとし、 $T_1=0.3, 0.5, 0.8, 1.2 sec$ のパラメータを設定した。②は、全質量の内、各層が占める比率で無次元化したものである。Housner⁶⁾によると、地震時の塑性ひずみエネルギーは、質量と最大弾性応答速度で表されるとしており、質量の分布が重要なパラメータとなっている。そのため全質量の合計を $4tf \cdot sec^2/cm$ とし、($M_1=M_2=M_3=1.33$), ($M_1=2, M_2=1, M_3=1$), ($M_1=1, M_2=2, M_3=1$), ($M_1=1, M_2=1, M_3=2$)の4通りを設定した。③は、各層の降伏耐力比 α_i で、*i*層から上の質量のたし合わせたもの ΣM にたいしての*i*層の降伏耐力 P_{yi} の比 $P_{yi}/\Sigma M$ とし、その値を設計で利用されている一般的な値 $\alpha=0.2$ を中心に $\alpha_i=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ を設定した。④は、降伏耐力比の違いにより、各層に応力集中を生じることを考慮して設定した因子で、③の値の分布により一義的に決定される値であり、1層の降伏耐力比に対する各層の降伏耐力比をとり、 $\alpha_i/\alpha_1=0.25\sim 1.0$ の範囲で設定された。⑤は、3種類の特性の異なる地震波を用いることにより周波数特性の影響を考慮した。⑥は、最大加速度の最大値を考慮したもので、比較的強震と仮定できる大きさで、300gal, 400gal, 500galに設定した。

表1 数量化理論I類のアイテムとカテゴリー区分

No	Item	Category
1	一次固有周期 $T_1(sec)$	0.0~0.3
		0.3~0.6
		0.6~0.9
		0.9~1.2
2	第1層 降伏耐力比 α_1	0.0~0.1
		0.1~0.2
		0.2~0.3
3	第2層 降伏耐力比 α_2	0.0~0.1
		0.1~0.2
		0.2~0.3
4	第3層 降伏耐力比 α_3	0.0~0.1
		0.1~0.2
		0.2~0.3
5	第1層に対する 第2層の降伏比 α_2/α_1	0.0~1.0
		1.0~2.0
		2.0~3.0
		3.0~4.0
6	第1層に対する 第3層の降伏比 α_3/α_1	0.0~1.0
		1.0~2.0
		2.0~3.0
		3.0~4.0
7	第1層の重量比 M_1/M_T	0.0~0.5
		0.5~1.0
8	第2層の重量比 M_2/M_T	0.0~0.5
		0.5~1.0
9	第3層の重量比 M_3/M_T	0.0~0.5
		0.5~1.0
10	地震波の種類	El-Centro
		Taft
		八戸
11	最大入力加速度 の大きさ(gal)	300
		400
		500

4. 解析結果および考察

構造物の損傷の指標として、塑性率 μ とひずみエネルギー E_p を考慮している。しかし、塑性ひずみエネルギーは次元を有するため、各層の塑性ひずみエネルギー E_{pi} の総和、即ち全塑性ひずみエネルギー E_{pt} を求め、 E_{pi} を E_{pt} で除した無次元量、即ち塑性ひずみエネルギー比を用いている。塑性率、塑性ひずみエネルギー比に影響を及ぼす因子について数量化理論 I 類を用いて定量的な評価を試みた。考慮した

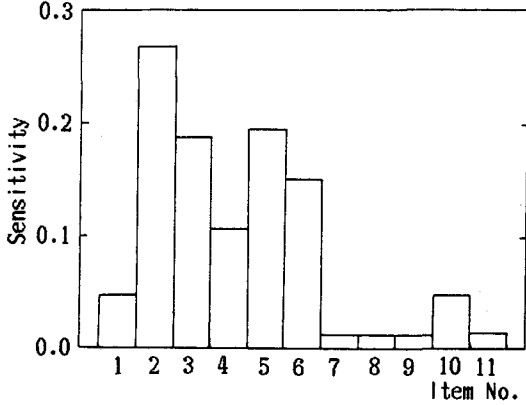


図2-a 一層の塑性率に対する各アイテムの感度

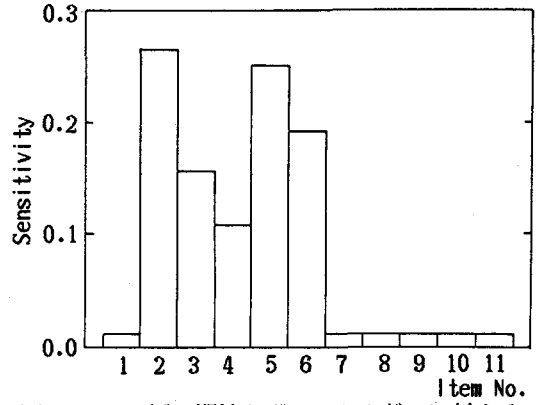


図3-a 一層の塑性ひずみエネルギーに対する各アイテムの感度

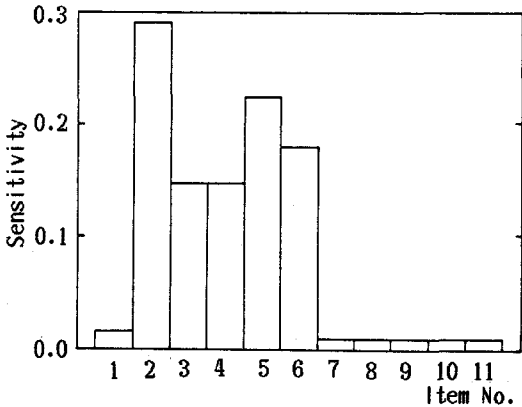


図2-b 二層の塑性率に対する各アイテムの感度

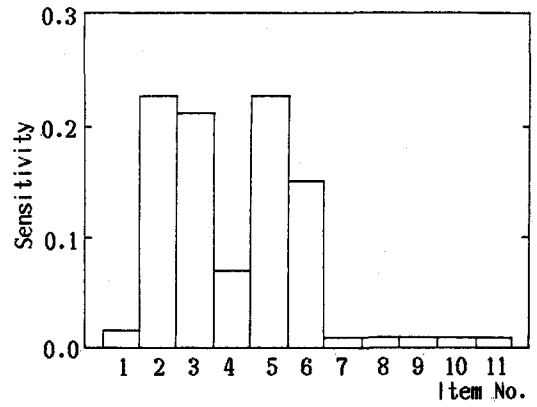


図3-b 二層の塑性ひずみエネルギーに対する各アイテムの感度

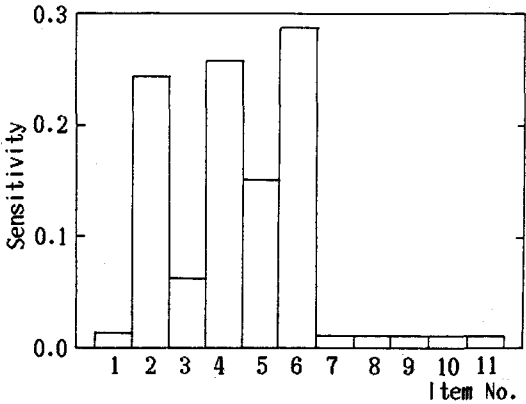


図2-c 三層の塑性率に対する各アイテムの感度

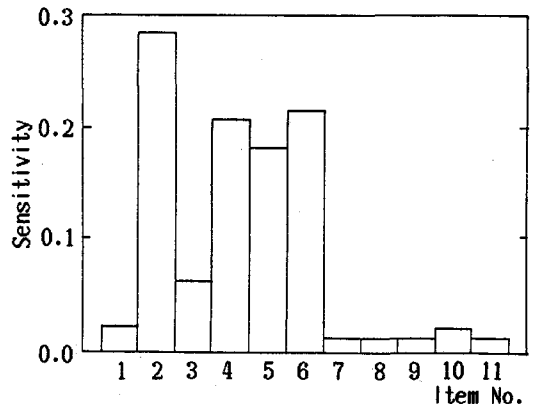


図3-c 三層の塑性ひずみエネルギーに対する各アイテムの感度

因子とその変動範囲の区分(カテゴリー)は表1に示した通りである。各外的基準(塑性率、塑性ひずみエネルギー)に対して、各アイテムのレンジを数量化理論I類を用いて計算した。レンジとは外的基準となる塑性率や塑性ひずみエネルギーに対して各因子が寄与する大きさを表したものであり、本研究では、各因子のレンジをその総和で除すことにより、無次元化したものを感度とした。なお、解析した結果の各因子の各指標に対する重相関係数は、 $r=0.690\sim 0.967$ となり、最頻値は0.8前後であり、良好な相関があることが示された。図2 a,b,c に1~3層の各塑性率について、図3 a,b,c に同じように塑性ひずみエネルギーの各因子の感度を示す。

数少ない計算ケースではあるが、これらの計算結果から、塑性率および塑性ひずみエネルギーに及ぼす各因子の影響について、次の様な事がわかった。

- i) 塑性率および塑性ひずみエネルギーともに各因子の影響は同じような結果となっており、両者には密接な関係があるものと思われる。
よって、以降には両者の指標についてまとめて言及する。
- ii) 影響の大きい因子の順序としては、各層の降伏耐力比 α_i 、および最下層の降伏耐力比に対するi番目の層の降伏耐力比の比 α_i/α_1 が最も影響を及ぼし、次に系の1次固有周期 T_1 が大きい、そして、質量の比(= M_i/M_T)、地震波の種類、最大入力加速度 A_{max} は、ほとんど影響をあたえなかった。つまり、構造物の各因子は影響が大きい、地震波の各因子はあまり影響しないことがわかった。
- iii) 各層ともに、対象とした層の降伏耐力比 α_i は影響があるが、それ以上に最下層の降伏耐力比 α_1 の影響の方が大きく影響し、最下層の降伏耐力比 α_1 が最も重要な因子であることがわかる。
- iv) 同様に、最下層に対する降伏耐力比 α_i/α_1 の比率も大きく影響され、iii)の事を裏づける結果となっている。

(謝辞)

本研究に関し元東京電機大学理工学部学生、井上 剛氏(現長野県庁)には、計算をまた現卒研究生、鎌田勝士、斉藤亮宏君にはワープロ、図表の整理に協力を頂いた。ここに深く謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 松島, 松井; 構造物の弾塑性モデルに及ぼす地震波の影響, 構造工学論文集, vol.32A 1986.3
- 2) 加藤, 秋山; 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物への損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号 昭和50年9月
- 3) 大野, 西岡, 藤野; 構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価, 土木学会論文報告集, No.333, PP91-99 1983年5月
- 4) 平尾, 沢田, 成行, 笹田; 履歴吸収エネルギーに注目した鋼箱型断面橋脚の損傷度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.333, 1-7, PP.429-437, 1987年4月
- 5) Trifunac.M.D., Brady.A.G.; A Study on the during of Strong Earthquake Ground Motion, Bull. Seis. Soc.Am.
- 6) Housner,G.W.; Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proceedings of 1st World Conference on Earthquake Engineering, 1956
- 7) 林, 駒沢; 「数量化理論とデータ処理」, 朝倉書店, 1982,6