

I - 5

非線形地震応答の評価指標としての地震動特性に関する基礎的検討

日本大学工学部 正会員 中村 晋
日本大学工学部 学生員 ○坂元 将史

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以後、構造物の耐震設計は、所要の耐震性能に応じた構造物の変形性能と応答の比較に基づいて行われている。その際、従来の設計で用いられる地震動より大きな地震動を考慮することになり、このような大きな地震強さに対して構造物は非線形な挙動を示すことから、構造物の応答も非線形応答として評価することが必要となる。ここで、構造物の変位応答を評価する手法¹⁾としては、入力地震動の周期が系の固有周期に対して短周期側ではエネルギー一定則²⁾が、系の固有周期にたいして長周期側では変位一定則が用いられ、弾性系の最大変位応答から弾塑性系のそれを予測する手法がある。一方、地動の特性は加速度、速度、変位等の最大値、周波数特性、非定常特性など複雑であり、構造物の非線形応答に影響を及ぼす因子が構造物ごとに異なっている。明らかになっているとはいえない。このことは、設計地動を評価する上で構造物の応答を支配する統一的な地動の特性が明らかになっていないことを意味している。本検討は地動の特性のうち非線形応答に影響を与えている特性として入力最大加速度、速度を掛けあわせた $A_{MAX}V_{MAX}$ というエネルギー的な評価指標の有用性を検討する。

2. 地震動の評価指標

前報³⁾では、もっとも単純な振動系である 1 質点系を対象とし、その非線形応答を支配する調和地動の特性について検討を行った。検討は、入力調和地動の周期毎に 1 質点系のモデルに対する応答変位が降伏変位の整数倍(=応答塑性率)となる際の入力地動の加速度、速度と周期の関係を対象として検討を行った。その際、得られた二次剛性が初期剛性の 1/6 のモデルに対し基準化した周期と加速度、速度の関係を図-1、図-2 に示す。

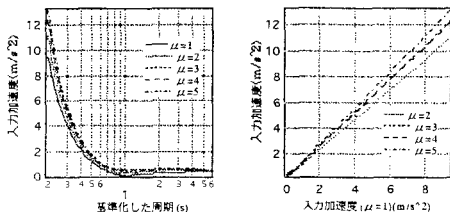


図-1 塑性率に応じた入力調和地動の加速度振幅レベル

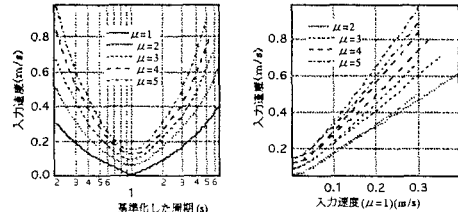


図-2 塑性率に応じた入力調和地動の速度振幅レベル

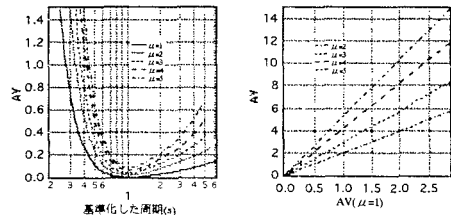


図-3 塑性率に応じた $A_{MAX}V_{MAX}$

次に本解析で扱う応答の評価指標である $A_{MAX}V_{MAX}$ と基準化した周期の関係を図-3 に示す。

図-1 より入力加速度に関しては異なる応答塑性率 3、4 において短周期側では応答塑性率 1 の入力加速度振幅レベルに対する比率が近似している。図-2 より速度に関しては、系の固有周期に対して、同じ塑性率であっても比率が入力周期の短周期側と長周期側では異なる。また、図-3 では、各塑性率毎に $A_{MAX}V_{MAX}$ は比例関係があり、応答塑性率 1 の AV に対して比率が一定である。このことから、入力加速度と入力速度を応答の評価指標として検討するのは困難となる。そのため本検討では、新たに各周期毎にエネルギー的な指標である最大入力加速度と最大入力速度を掛けあわせた $A_{MAX}V_{MAX}$ を評価指標として用いる。

3. 解析条件及び方法³⁾

本解析では、図-4 に示すバイリニア型の復元力特性を有する図-5 に示すような 1 質点系のモデルに対し、入力調和地動の周期毎に非線形地震応答解析を行った。ある所定の応答塑性率になるように入力調和波の入力加速度を種々変化させくり返し応答解析を行い、得られた最大入力加速度にその積分値である最大速度を掛けあわせることにより、応答の評価指標である $A_{MAX}V_{MAX}$ を算出した。ここで、系の復元力特性のうち初期剛性 K_1 は解析の対象となる 1 質点系の弾性固有周期の値となるように仮定し、すべてのモデルで使われる系の降伏力は $0.4mg$ とした。また、系に入力される調和波形はサイン型の 20 波の時刻歴波形

とした。非線形地震応答解析では wilson の θ 法による直接積分法を用い、系の応答を求め、 θ は解の安定性を考慮し 1.4 とした。

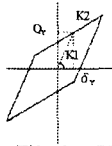


図4 解析モデルの復元力特性

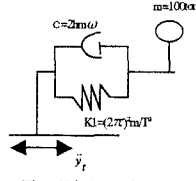


図5 質点系のモデル

4. 解析結果

各応答塑性率毎にエネルギー的な評価指標である $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ と入力調和地動の周期の関係を求めた。さらに、各応答塑性率毎の $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ に及ぼす振動系の非線形に伴う固有周期の長周期化の影響をのぞくため、各系の固有周期で周期軸を基準化する。ここで p は調和入力地動の周期で、 ω は系の固有周期である。図-6 に弾性固有周期が 1.0(s) の系について二次剛性が初期剛性の 1/6 の復元力特性を持つモデルに対し基準化した周期と各応答塑性率毎の $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ との関係を示す。ここで、応答塑性率が 1 の $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ は弾性限の挙動に対する系の周波数特性から式(1)に示すように理論的に求められる。

$$AV(\mu=1) = p^3 \cdot \left(\frac{y_t}{x_t} \right)^2 \cdot \delta_y^2 \quad \cdots(1)$$

$$\left| \frac{x_t}{y_t} \right| = \frac{\left(\frac{p}{\omega} \right)^2}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{p}{\omega} \right)^2 \right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{p}{\omega} \right)^2}}$$

図-6 より塑性率に応じた $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ の値は比例的関係がみられるので、各応答塑性率毎に基準化された $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ と弾性限である応答塑性率 1 となる $AV(\mu=1)$ の関係を求めた。図-7 に弾性固有周期が 1.0 (s) の系について二次剛性が初期剛性の 1/6 の復元力特性を持つモデルに対して周期軸を基準化した AV との関係を示す。図-7 より弾性限である応答塑性率が 1 となる理論的に求められる $AV(\mu=1)$ と各応答塑性率塑性率毎に基準化された解析値 $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ との間に線形関係が認められることから、各応答塑性率毎に最小自乗法を用い $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ と $AV(\mu=1)$ の関係を(2)式に示す回帰直線に近似し、(2)式を式変形した(3)式による各応答塑性率毎に各塑性率に比例するパラメーター a_{AV} の関係を求める。

$$AV(AV(\mu=1)) = a_{AV} \cdot AV(\mu=1) + b_{AV} \quad \cdots(2)$$

$$a_{AV} = \frac{AV - b_{AV}}{AV(\mu=1)} \quad \cdots(3)$$

図-8 に弾性固有周期が 0.5, 1.0, 1.5(S) の系についてそれぞれ

二次剛性が初期剛性の 1/6 の復元力特性を持つモデルの回帰直線により近似された a_{AV} とその応答塑性率の関係を、図-9 に弾性固有周期が 1.0(s) において二次剛性が初期剛性の 1/3, 1/6, 1/12 の復元力を持つそれぞれのモデルに対する関係を示す。図-8, 9 より系の弾性固有周期によらず応答塑性率と a_{AV} の関係はほぼ等しく、履歴毎に異なることがわかった。このことから、弾性限である応答塑性率 1 となる $AV(\mu=1)$ で基準化された $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ が評価指標としての有意性があることがわかった。

5. おわりに

調和入力地動に対する復元力の異なる 1 質点系の非線形応答解析に基づき、応答変位を支配する地動の特性について検討を行った。その結果、各周期毎の入力加速度、入力速度を掛けあわせたエネルギー的な評価指標 $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ というパラメーターを使った本検討では、系の固有周期や入力地震動の周期に関係なく、理論的に求められる弾性限の $AV(\mu=1)$ と入力地震動の最大加速度、最大速度から応答が簡易的に評価できる可能性があることがわかった。今後は実際の地震動に対しても同様に応答を評価できるか検討していきたい。

<参考文献>

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，pp113-144，1981
- 2) 中村晋、坂元将史：平成 11 年度 東北支部技術研究発表会 社団法人 土木学会東北支部，pp28-29，2000
- 3) 大崎順彦：建築振動理論，彰国社，pp378-386，1996

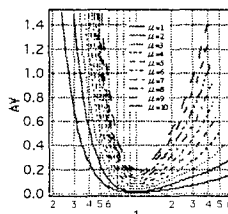


図6 塑性率に応じた基準化した $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ (系の弾性固有周期 1.0(S))

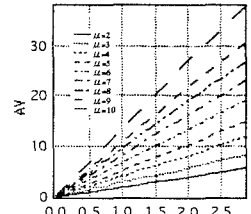


図7 各応答塑性率毎に基準化された $A_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}$ と $AV(\mu=1)$ (系の弾性固有周期 1.0(S))

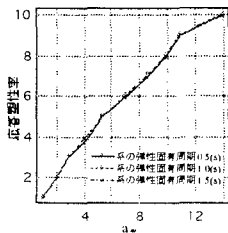


図8 a_{AV} と塑性率の関係 (二次剛性が初期剛性の 1/6 のモデル)

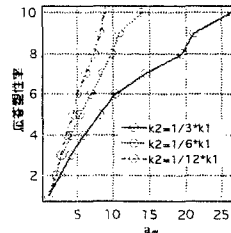


図9 a_{AV} と塑性率の関係 (系の弾性固有周期 1.0(S))