

非線形履歴特性を有する構造物の応答推定法に関する研究

九州大学工学部 学生員 ○アラン スマヤ
九州大学工学部 正 員 松田 泰治
建設技術研究所 正 員 入江 達雄

1. はじめに

近年、震度法レベルの荷重に対しても非線形応答による地震力低減効果を考慮した免震橋梁等が数多く設計されている。しかし、それに伴い復元力特性のモデル化や非線形時刻歴応答解析の実施等、設計上の作業も増加する。これに対し、比較的簡便な方法で非線形応答を予測する多くの手法が提案され、注目を集めている。

本研究ではバイリニア型の復元力を持つ1自由度モデルに対して、エネルギーの釣り合いによる応答推定法(A法)と、非線形系に対して応答スペクトルを用いた推定法(B法)による応答推定を行い、標準波形¹⁾を入力したときの時刻歴解析結果と比較検討する。

2. 解析方法

応答推定を行うにあたっては、図-1に示すようなバイリニア型の復元力を持つ1自由度モデルに、標準波形を入力したときの非線形時刻歴解析結果と、A法とB法による推定結果を比較する。

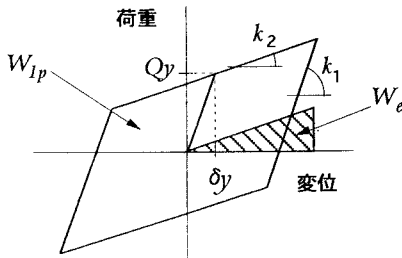


図-1 バイリニア型の復元力を持つ1自由度モデル

$$W = M \cdot g = 1000 \text{ t} \quad T_1 = (0.6, 0.8, 1.0) \text{ sec}$$

$$k_1 = 4 \pi^2 M / T_1^2 \quad k_2 = (1/4, 1/6, 1/8) \times k_1$$

$$Q_{yi} = 0.025 i W \quad (i = 1, \dots, 6) \quad h = 0$$

M: 1自由度系の質量 h: 減衰定数

エネルギーの釣り合いによる推定法(A法)

1質点系振動系に対する振動方程式は次のように書ける。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = F_e \quad (1.1)$$

ここで、M、C、F(y)、F_e(=Mz₀)、z₀、y は各々は質量、粘性減衰力、復元力、地震外力、水平地動、質点の相対変位を示している。式(1.1)の両辺に dy = y-dot dt をかけ地震の全継続時間 t₀ にわたって積分すると、t₀におけるエネルギーの釣り合い式が導かれる。

$$M \int_0^{t_0} \ddot{y} y dt + C \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) y dt = \int_0^{t_0} F_e y dt \quad (1.2)$$

右辺は地震外乱による系へのエネルギー入力の総量

E(t₀)を表している。左辺の第1項は地震終了時の運動エネルギーを表す。左辺の第2項は減衰機構による消費エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系に蓄えられる塑性歪エネルギーと地震終了時の弾性歪エネルギーを表す。なお、ここでは左辺第2項を考慮しない。

履歴型非線形系の変位 δ における各エネルギーについては、既往の研究²⁾において免震構造物の応答推定に用いられた定義を参考に設定している(図-1)。本解析においては、最大変位 δ_{max}(t=t_m)における、第2剛性 k₂ による弾性歪エネルギー W_e (図-1の斜線部分の面積)と1サイクル間の履歴吸収エネルギー W_{lp} (図-1の閉ループの面積)にある係数 α をかけたものの和を構造物の総吸収エネルギー W_{total} と定義する。α の値については、α = 2.0²⁾と、各標準波形に対し E(t₀)との釣り合いを考慮しながら相対変位が一致するように各ケースの α を求めその平均値(α = 1.62, 3.29, 6.85)を用いた。

エネルギー入力と等価線形化を考慮した非線形系の最大応答値推定法の手順を以下に示す。

- 1) 最大変位 δ_{max} を仮定する。(初期値 = 降伏変位)
- 2) δ_{max} に対する等価周期 T_E と等価減衰定数 h_E、
W_{total}(=W_e + α W_{lp})を求める。
- 3) 2)で求めた T_E、h_E に対応するエネルギー入力の総量 E(t₀)を求める。
- 4) W_{total} と E(t₀) を比較し、両者が一致するまで 1)~3)を繰り返す。

なお、ここでは各解析ケースのうち耐震性の評価が安全側となる E(t_m) ≤ E(t₀)²⁾ のケースのみを考慮した。

応答スペクトルを用いた推定法(B法)

B法は加速度応答スペクトルを用いて等価線形化法で最大応答値を求める解析である。ここで用いた減衰定数0.05の加速度応答スペクトル S₁は、道路橋示方書V耐震設計編に規定されるもので、地盤種別ごとに定められている。なお、その値は(1.3)式により算出する。

$$S = c_Z c_I c_D S_0 \quad (1.3)$$

ここに、

c_Z: 地域別補正係数、c_Z=1

c_I: 重要度別補正係数、c_I=1

c_D: 減衰定数(h)別補正係数、

$$c_D = \frac{1.5}{40h + 1.0} + 0.5 \quad (1.4)$$

S₀: 標準加速度応答スペクトル

この推定法については、最大応答変位を仮定し、復元力特性から等価周期と等価減衰定数を求め、それより応答加速度を計算する。そして、それをせん断力に置換し、最大変位を求め、これが仮定値と一致するまで、計算を繰り返す。

3. 解析結果

各応答推定法による最大応答加速度と最大応答変位を非線形時刻歴解析結果と比較し、その相関係数 R を求めた。図-2と図-3は、それぞれA法とB法の第1種地盤（硬質）及び第2種地盤（普通）における解析結果である。

A法で求めた応答推定値は、 α の平均値を考慮した場合に、各地盤において時刻歴解析結果とよい相関を示す。 $\alpha=2.0$ の場合は、 α の平均値を考慮した結果に対し、第1種地盤では解析結果に対して相関は高いが、小さな推定値を示すケースが多い。しかし、第2種地盤では大きな推定値が多く、相関も低い。

第2種地盤に対する標準波形は、第1種地盤よりも最大加速度が大きく、継続時間が長い。このため、エネルギー入力の総量が大きくなり、大きな履歴吸収エネルギーが必要とされる。したがって、 α の値が小さい場合には、大きな推定値が得られ、時刻歴解析結果との相関が低くなると考えられる。

A法においては、等価減衰定数が小さく、塑性率が大きい場合に、第2種剛性による弾性歪エネルギー W_e が1サイクルの履歴吸収エネルギー W_{lp} より大きいケースが存在する。このようなケースでは、相対変位を一致させるように定めた α が全体の平均値に対し著しく大きくなる。このため、より大きな推定値（図-2での最大値）を示す。

B法では、応答加速度は時刻歴解析結果とよい相関を示した。特に、第1種地盤では、B法で求めた応答加速度は、ほとんどのケースに対して時刻歴解析結果とよく一致している。また、応答変位も時刻歴解析とよい相関を示した。

4. まとめ

エネルギーの釣り合いによる推定法のうち α が平均値を考慮した場合と、応答スペクトルを用いた推定法では、非線形時刻歴解析の結果とよい相関を示した。今後、A法における α の設定は履歴特性や入力地震波形等の事前に得られる情報から客観的に行う必要がある。また、他の推定法も含めさらに広い非線形パラメータ範囲を考慮し、推定精度の向上をはかる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方（V耐震設計編）・同解説、pp.148～163、1990年4月。
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針、pp.84～89、1993年12月。
- 3) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、第2版、pp.9～22、1987年7月。

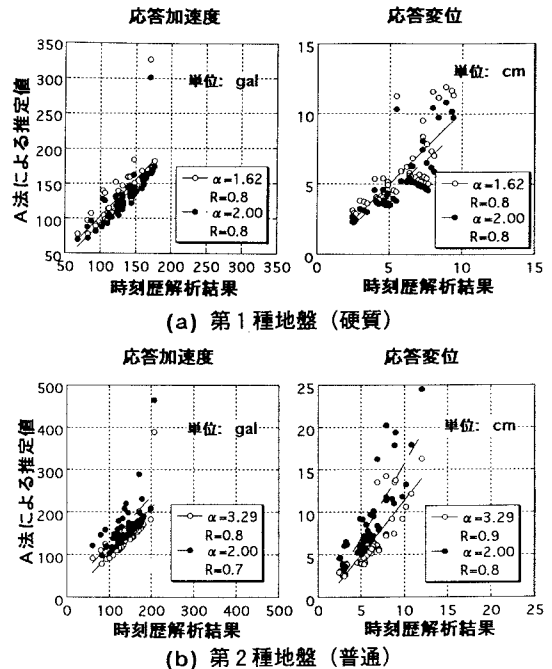


図-2 時刻歴解析結果とA法による推定値の比較

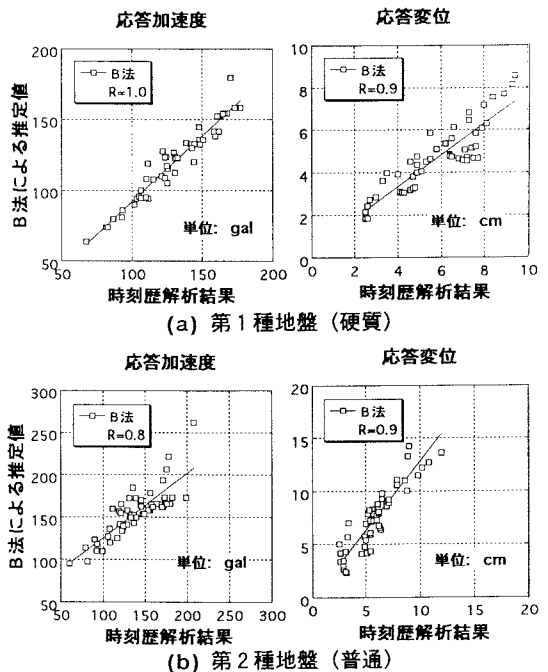


図-3 時刻歴解析結果とB法による推定値の比較