

エネルギー入力地震荷重指標としての適用性に関する基礎的研究

九州大学工学部	学生員	内田広明
九州大学大学院	学生員	神農誠
九州大学	正会員	松田泰治
九州大学	フェロー	大塚久哲

1. はじめに

兵庫県南部地震以降は、道路橋の耐震設計において、地震時の損傷を橋脚基部に集中させる設計法が採用され、単柱式橋脚において、非線形を考慮すべき箇所は免震支承等を採用した場合の支承部分と橋脚基部に限定された。これによりエネルギー入力を考慮した耐震設計がより適用しやすい状況になった。本研究ではまず、エネルギー入力の総量をバイリニアモデルの弾性剛性に対する周期でプロットしたエネルギースペクトルが単柱式橋脚の代表的損傷指標であるじん性率を評価する上で、従来の荷重指標に比べて優れていることを示す。そして次にバイリニア型復元力特性をもつモデルにおいて、完全弾塑性タイプのもので、降伏後の第2剛性がゼロでないもののエネルギー入力の総量を比較した。

2. エネルギー入力の荷重指標としての有効性

(1) 解析手法

図-1のような復元力特性を有する1自由度系モデルに対して、兵庫県南部地震で観測された代表的な地震動9波、および既往の著名波9波を入力とした非線形時刻歴応答解析を行った。その結果得られるじん性率とエネルギー入力および既存の地震荷重指標との相関を検討する。解析では、質点の重量を1000tf、系の弾性固有周期(0.2秒～2.0秒)をパラメータとして弾性剛性を定め、第2剛性を0(tf/cm)、粘性減衰定数を2%、降伏荷重は質点の重量の0.2、0.3、0.4、0.5、0.6倍と設定した。

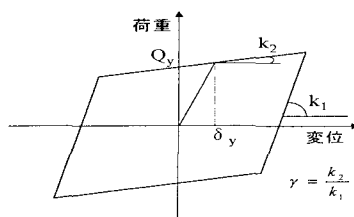


図-1 復元力特性

(2) エネルギー入力

1自由度系の振動方程式よりエネルギーの釣り合い方程式を導くと式(1)のようになる。

$$m \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (1)$$

右辺は地震外力によって系になされた仕事の総量を表している。左辺の第1項は地震終了時の運動エネルギーを表し、左辺の第2項は粘性減衰による吸収エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表す。地震荷重指標として(1)式より求める粘性減衰定数10%を仮定した線形エネルギー入力の総量と図-1のモデルによる非線形エネルギー入力の総量を選択し、じん性率との相関を検討した。

(3) 既存の地震荷重指標

エネルギー入力と比較する既存の地震荷重指標として、エネルギー一定則と変位一定則の考え方を選択した。それぞれの考え方からすると、前者は弾性ひずみエネルギーが、後者は弾性変位がじん性率を評価する上での地震荷重指標となっている。従って、加速度応答スペクトルより読み取った慣性力による弾性ひずみエネルギーと変位応答スペクトルより読み取った最大応変位とじん性率との相関を検討した。いずれのスペクトルも粘性減衰定数は5%のものを用いた。

(4) 解析結果

線形および非線形のエネルギー入力、弾性ひずみエネルギー、弾性変位の各地震荷重指標に対してじん性率との相関係数の平均値を各降伏荷重について評価したものを図-2に示す。図より分かるように非線形エネルギー入力がじん性率を評価するための地震荷重指標として適用性が高いことが確認できる。

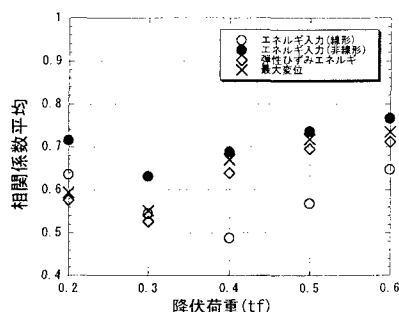


図-2 各地震荷重指標のじん性率に対する相関係数の平均値

3. 非線形エネルギー入力量の総量の比較

完全弾塑性タイプの復元力特性を用いて求めたエネルギースペクトルの地震荷重としての適用性を確認するため、第2剛性がゼロでない復元力特性を用いて求めたエネルギースペクトルとの比較を行った。ここでエネルギースペクトルとは、(1)式で求めたエネルギー入力量の総量を速度換算して弾性周期に対してプロットしたものである。

(1) 解析手法

図-1と同様な復元力特性を有する1自由度系モデルに対して兵庫県南部地震で観測されたⅠ，Ⅱ，Ⅲ種地盤の代表的な地震動 (type2-1, 2-4, 2-7) を入力とし、非線形時刻歴応答解析を行った。その結果得られたエネルギー入力量の総量を速度変換した $V_e(\text{cm/sec})$ 値を剛性比 γ が0の場合と $1/4, 1/6, 1/8, 1/10$ のそれぞれの場合について比較した。解析では系の弾性固有周期を $0.2 \sim 2.0$ 秒とし、粘性減衰定数を2%、降伏荷重を質点の重量の $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ 倍と設定した。比較のため各周期ごとに、 γ が0のときの V_{e0} と γ が0でないときの V_e の比を整理した。

(2) 解析結果

解析結果を図-3、4に示す。免震および耐震を代表する降伏荷重として $0.2W, 0.5W$ の場合の結果を例として示した。降伏荷重が $0.2W$ のTYPE2-4, 2-7の図をみると周期 0.5 秒以下で周期が短くなるにつれ V_e 比が減少している。一般に短周期側では、弾性のエネルギー入力量の総量は、完全弾塑性のエネルギー入力量の総量より小さくなる傾向がある。短周期領域で γ がゼロでないケースは等価剛性が高いため、 γ が0のケースよりもより線形挙動に近いと考えられ、その結果エネルギー入力量の総量が相対的に小さくなり、 V_e 比が減少したと考えられる。ただし、免震で重要となる長周期側では V_e 比はほぼ $1.0 \sim 1.2$ の間に収まっている。降伏荷重 $0.5W$ においては V_e 比はほぼ $0.8 \sim 1.2$ の間に収まっている。他の降伏荷重についてもほぼ同様の結果が得られた。

4. まとめ

- ・非線形エネルギースペクトルは他の地震荷重指標に比べ、損傷指標のひとつであるじん性率と広い周期範囲において安定して相関が高く、弾塑性変形を評価するための地震荷重指標として適用性が高い。
- ・完全弾塑性のモデル、剛性比 γ が存在するモデルの両者のエネルギー入力量の総量はほぼ等しい。従って耐震モデル、免震モデルの両者に対して完全弾塑性のモデルに基づくエネルギースペクトルを利用する事は可能である。

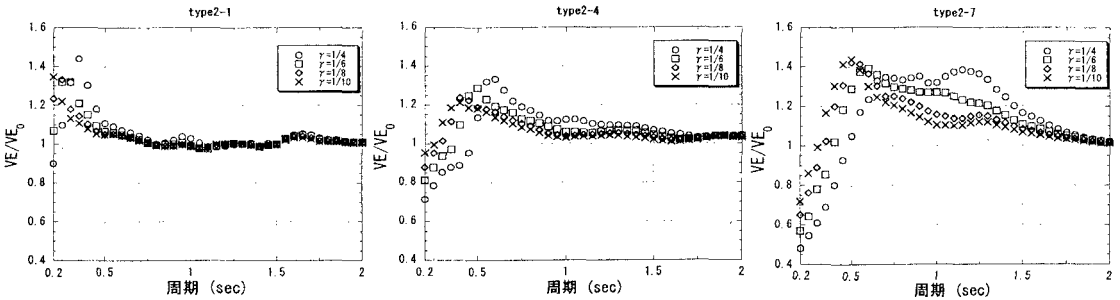


図-3 非線形エネルギー入力量の総量の比較(降伏荷重 $0.2W$)

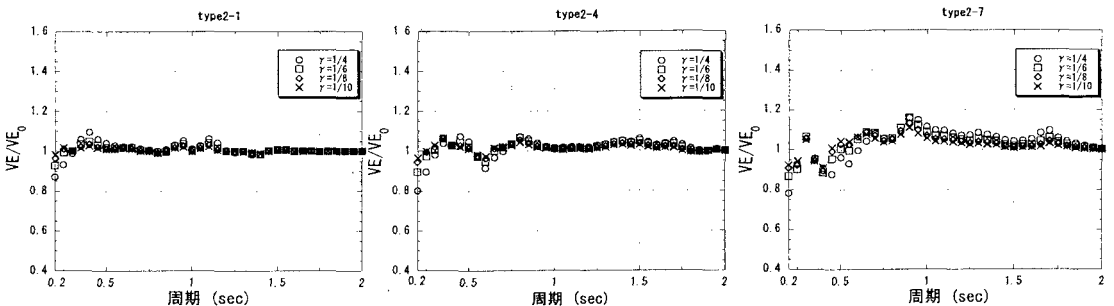


図-4 非線形エネルギー入力量の総量の比較(降伏荷重 $0.5W$)