

I - B176

# エネルギー規範に基づく道路橋の耐震性評価に関わる基礎的研究

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

1. はじめに

既往研究<sup>1)</sup>では、エネルギー入力には特に構造物の非線形性を考慮した耐震設計法において有効な地震荷重指標であるとされている。著者らもこれまでの研究<sup>2)</sup>において、完全弾塑性タイプのエネルギー入力の総量が地震荷重指標として適用性が高い事を示した。本研究ではエネルギー入力の総量を地震荷重指標とした道路橋橋脚の応答推定法を提案し、その推定法において不明な点を瞬間最大入力エネルギーという指標を導入し検討を行った。

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式を導く  $m \int_0^{t_0} \ddot{y} y dt + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) y dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 y dt$  (1) と式(1)のようになる。左辺第1項は運動エネルギー $E_V$ を表し、左辺第2項は粘性減衰による吸収エネルギー $E_D$ を表している。 $(E_V + E_D + E_H = E)$  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弾性ひずみエネルギー $E_H$ を表す。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おり、地震終了時( $t=t_0$ )の地震動による振動系へのエネルギー入力の総量 $E$ である。

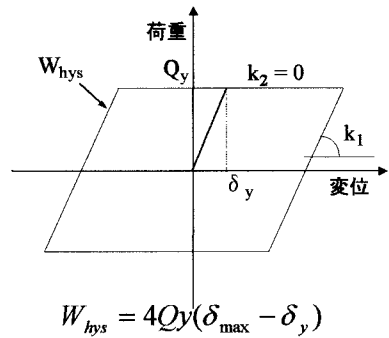


図-1 構造物の総吸収エネルギー

3. エネルギー入力を地震荷重指標とした応答推定

(1) エネルギーの釣り合いに基づく応答推定法

エネルギーの釣り合いによる応答推定法は、地震動によるエネルギー入力の総量と振動系で消費される弾塑性変形による構造物の総吸収エネルギーに着目し、エネルギーの釣り合いにより最大応答値を推定する方法である。本推定法では、式(1)で示されるエネルギーの釣り合いを考慮して最大応答値を推定する。最大応答変位  $\delta_{max}$  における総吸収エネルギー  $W_{total}$  は、図-1に示すように1サイクル間の履歴吸収エネルギー  $W_{hys}$  (図-1の平行四辺形の面積) に係数  $\alpha$  をかけたものと、第1剛性による弾性ひずみエネルギーの和で定義する。また、長周期側において最大応答変位  $\delta_{max}$  が降伏変位  $\delta_y$  に達しないケースについては、 $W_{total}$  は弾性ひずみエネルギーで定義する。本推定法では完全弾塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系のモデル(質点の重量  $W=1000$  (tf))を用いて式(1)の右辺により計算した非線形エネルギー入力の総量を周期に対して速度変換してプロットしたエネルギースペクトル(粘性減衰定数2%)を用いる。このエネルギースペクトルより各地震動に対するエネルギー入力の総量  $E$  を求め、式(2)、(3)を満足する  $\delta_{max}$  をエネルギーの釣り合いより算定する。ここで係数  $\alpha$  の値は、既往研究<sup>3)</sup>を参考に  $\alpha=1, 2, 3$  とした。本推定法のフローを図-2に示す。

弾塑性時:  $E = \frac{1}{2} k_1 \delta_y^2 + \alpha \cdot W_{hys}$  (2)

弾性時:  $E = \frac{1}{2} k_1 \delta_{max}^2$  (3)

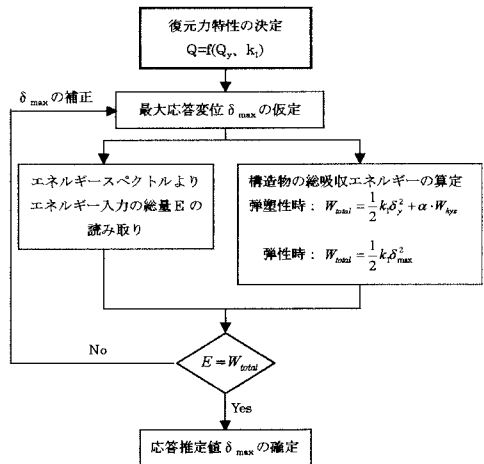


図-2 エネルギーの釣り合いによる応答推定法の計算フロー

(2) 応答推定結果

本推定法を適用して得られた最大応答塑性率と非線形時刻歴応答解析より得られた最大応答塑性率を  $\alpha$  をパラメータに重ね書きしたものをJMAKOBENSの降伏荷重  $Q=0.4W$  のケースについて例として図-3に示す。図を見ると、周期が2秒を越えた領域で最大応答塑性率が1より小さくなり弾性となっている。弾塑性の周期領域を見ると推定結果は  $\alpha=1$

キーワード: エネルギー・スペクトル、エネルギー入力の総量、瞬間最大入力エネルギー

連絡先: 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 工学部本館336号室 TEL:(092)641-3131(8653)

～2のケースに対して応答解析結果と良く一致している。しかし、一部の周期帯で応答解析結果が推定結果を上回っているところがある。この原因の一つとして考えられるのはこの周期帯における振動系の挙動が、本推定法で仮定している図-4の周期0.7秒ような交番載荷的なものではなく、図-4の周期1.2秒のように一方向に変形が累積するようなものになっているためと考えられる。

4. 瞬間最大入力エネルギーによるエネルギー入力の評価

先の推定法において応答解析結果が推定結果を上回っている原因について検討を行うために瞬間最大入力エネルギー $\Delta E_{max}$ という指標を用いて考察を行った。

(1) 瞬間最大入力エネルギー

瞬間入力エネルギー $\Delta E$ は(4)式で定義される。

$$\Delta E = c \int_t^{t+\Delta t} \dot{y}^2 dt + \int_t^{t+\Delta t} F(y) y dt = -m \int_t^{t+\Delta t} \ddot{z}_0 y dt \quad (4)$$

ここで、(4)式における $\Delta t$ にはいくつかの定義<sup>4)</sup>が考えられているが、本研究では最大応答変形時における等価剛性 $K_e$ を求め、それに対応した等価周期 $T_e$ の1/2の時間を $\Delta t$ とした。また、瞬間入力エネルギー $\Delta E$ の最大値を瞬間最大入力エネルギー $\Delta E_{max}$ とする。

(2) 瞬間最大入力エネルギーによるエネルギー入力の評価

瞬間最大入力エネルギー $\Delta E_{max}$ とエネルギー入力の総量の1/2の値 $E/2$ との比をとり、各周期に対して比較を行った。解析結果としてJMAKOBENSの降伏荷重0.4wのケースを図-5に示す。比が1を超えている周期帯は、先の推定法において $\alpha$ の値が0.5以下になっているということである。よってエネルギーの入力過程が交番載荷的なものになっていないので先の推定法を適用するにあたり注意が必要である。ただし、約2.2秒以上の周期では塑性率が1以下になっているので瞬間最大入力エネルギーでの評価は行っていない。

(3) エネルギー入力から見た地震動の特性

地震動のタイプ別による瞬間最大入力エネルギーの違いについて考察するために、所定の最大応答塑性率( $\mu=4$ )になるように地震動を変動させて、非線形時刻歴応答解析を行った。その結果得られた瞬間最大入力エネルギーを速度換算した $V_{\Delta E}$ とエネルギースペクトル $V_E$ の比をとり、 $V_E$ に対して $V_{\Delta E}$ の占める割合について考察した。解析結果としてKAIHOKUBRG\_LG(TYPE1)、JMAKOBENS(TYPE2)の $V_{\Delta E}/V_E$ 比を比較したものを図-6に示す。図よりKAIHOKUBRG\_LGに比べJMAKOBENSは $V_{\Delta E}$ が支配的になっていることがわかる。

5. 結論

- ・非線形エネルギースペクトルを地震荷重指標としたエネルギーの釣り合いによる応答推定法は道路橋橋脚の弾塑性挙動を評価する手法として有効である。
- ・瞬間最大入力エネルギーが支配的である周期帯については、エネルギーの釣り合いによる応答推定法で仮定されているような交番載荷的なエネルギー吸収ではなく、エネルギー入力の総量で弾塑性変形は評価できない。従ってそのような周期帯では、瞬間最大入力エネルギーに基づく耐震性評価を併せて行う必要がある。
- ・TYPE2地震動はTYPE1に比べ瞬間最大入力エネルギーが支配的で、短時間にエネルギーが入力される。

参考文献

1) 松田、大塚、入江、神農：エネルギー入力の地震荷重指標としての適用性に関する一考察、第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、1998  
 2) 内田、神農、松田、大塚：エネルギー入力の地震荷重指標としての適用性に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp. 82-83、1999  
 3) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993  
 4) 中村、堀井上：瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊特性評価と応答変形の推定、日本建築学会構造系論文集第513号、pp65-72、1998

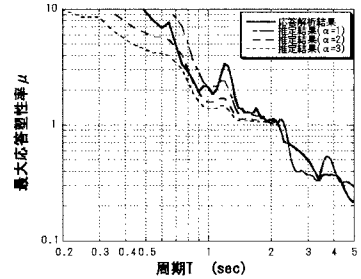


図-3 推定値と最大応答塑性率の比較

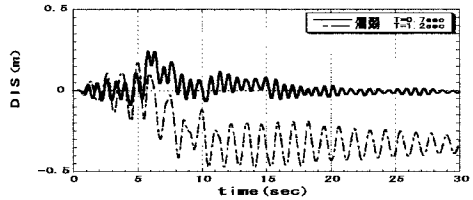


図-4 時刻歴で見た応答変位の挙動

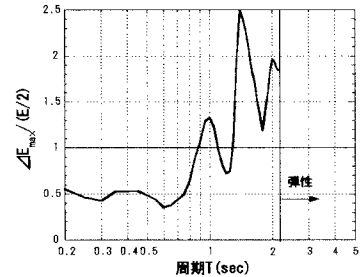


図-5 エネルギー入力の総量と瞬間最大入力エネルギーの比較

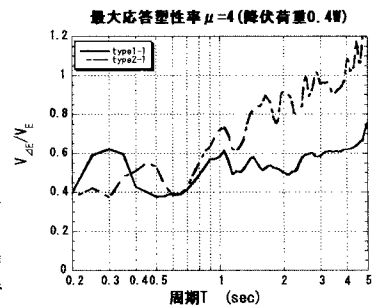


図-6 地震動の違いによる $V_E$ に対して $V_{\Delta E}$ が占める割合の比較