

エネルギー入力に基づく複合非線形系の耐震性に関する一考察

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

(株)建設技術研究所 正会員 入江 達雄

1. はじめに

免震支承を有する単柱式橋脚が大規模な地震動を受ける場合、支承部のみならず橋脚基部まで塑性化する場合が考えられる。そのような複合非線形系の単柱式橋脚を設計するときに問題となるのは、免震支承と橋脚の最大応答をいかに精度よく推定するかということである。その一つの方法として著者らは、地震時に構造物に投入されるエネルギーの総量、およびそのエネルギーを免震支承と橋脚基部とがどのように分担吸収するのかという点に着目した。地震によるエネルギー入力を考慮した耐震設計法は Housner の研究に始まり、秋山らの一連の研究により、エネルギー入力の総量が構造物の非線形挙動を評価する上で安定した地震荷重指標であることがすでに示されている。そこで本研究では、エネルギー入力の総量を地震荷重指標として用い、それが構造物の総吸収エネルギーと釣り合うとして免震支承の最大変位と橋脚の最大応答塑性率を推定する方法を提案し、それらを動的応答解析結果と比較することにより本推定法の適用性を検討した。

2. エネルギー入力を地震荷重指標とした応答推定法

(1) エネルギー入力¹⁾

式(1)は、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いたものである。

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

ここで、 m : 質点の質量、 c : 粘性減衰定数、 $F(y)$: 復元力、

z_0 : 水平地動、 y : 質点の相対変位

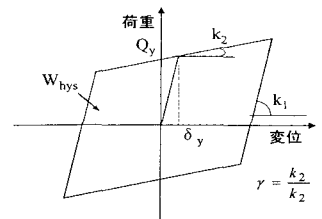
右辺は地震終了時 ($t=t_0$) の地震動による振動系へのエネルギー入力の総量を表している。左辺第1項は地震終了時の系の運動エネルギーを表し、左辺の第2項は粘性減衰による吸収エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表す。

(2) エネルギー入力を地震荷重指標とした応答推定法

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、それらの釣り合いから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 α をかけたものと仮定する。本推定法では完全弾塑性型のバ

イリニアモデルを用いて式(1)から計算した非線形エネルギー入力の総量 $E = \sqrt{2E/m}$ で速度換算し、それを弾性固有周期 T に対してプロットしたエネルギースペクトルを用いる。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 $E(T)$ を求め、式(2)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 α の値は既往研究²⁾を参考に $\alpha=1, 2, 3$ とした。本研究では免震支承と橋脚基部双方の非線形性を考慮するので、 W_{hys} を免震支承の履歴吸収エネルギーと橋脚基部の履歴吸収エネルギーとの和として扱う。

$$E(T) = \alpha \cdot W_{\text{hys}} \quad (2)$$



$$k_2 = 0 \quad W_{\text{hys}} = 4Q_y(\delta_{\max} - \delta_y) \quad \text{: 橋脚基部}$$

$$k_2 \neq 0 \quad W_{\text{hys}} = 4(1-\gamma)Q_y(\delta_{\max} - \delta_y) \quad \text{: 免震支承}$$

図-1 構造物の総吸収エネルギー

(3) 本推定法の複合非線形系への適用³⁾

免震支承と橋脚基部双方の塑性化を想定する単柱式橋脚に本推定法を適用する場合の手順を以下に示す。

- 1) エネルギースペクトル VE を用いて、系が弾性時の周期と免震支承の降伏荷重から系へのエネルギー入力の総量 E を読み取る。その理由は、実際の橋脚では免震支承の非線形性が橋脚基部のそれよりも支配的になると考えられるからである。
- 2) 橋脚基部の降伏荷重が免震支承に生じる最大せん断力に等しいとして免震支承の最大変位 $\delta_{\max}$ を計算する。このとき、系は桁のみが剛体で振動する1次モードを仮定している。
- 3) 図-1 から求まる免震支承の履歴吸収エネルギー W_i に係数 α をかけた $\alpha \cdot W_i$ と1)で求めた E を比較し、 $E \leq \alpha \cdot W_i$ ならば橋脚基部は降伏しない、すなわち免震支承のみでエネルギー吸収するとみなし、 $E > \alpha \cdot W_i$ ならば $(E - \alpha \cdot W_i)$ 分のエネルギーは橋脚基部で吸収するとみなす。
- 4) 免震支承で吸収しきれなかった $(E - \alpha \cdot W_i)$ 分のエネルギーと図-1 から求まる橋脚基部の履歴吸収エネルギー W_p に係数 α をかけた $\alpha \cdot W_p$ との釣り合いから橋脚の最大変位 $\delta_{p\max}$ を計算する。

(4) 本推定法の実橋脚モデルへの適用性

I 種地盤の A 地域・支保固定の条件で試設計された単柱式橋脚モデルを用いて、上述の応答推定法の適用性を検証する。免震支承の設計変位は 30cm とした。橋脚基部の非線形性は M- ϕ 関係を完全弾塑性のバイリニア型でモデル化した。モデル化に際し、免震支承とともに橋脚基部も塑性域に入るように橋脚基部の降伏荷重を適宜低減した。また本推定法の精度を検証する動的応答解析では、I 種地盤 A 地域のタイプ I の入力地震動 (KAHOKU BRG.LG) を用いた。図-2 にそのエネルギースペクトルを示す。表-1 に免震支承の最大変位と橋脚の応答塑性率の推定結果および動的応答解析結果を示す。なお、表-1 中の W_U および W_T は、それぞれ桁の重量と桁一橋脚一基礎系の全重量とを表す。

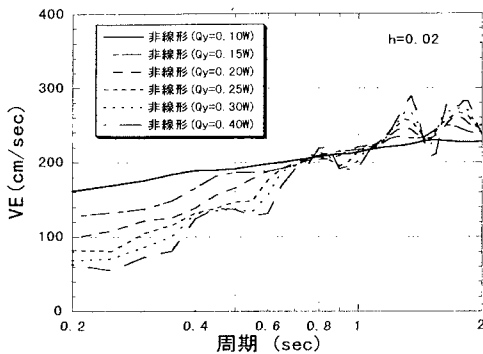


図-2 エネルギースペクトル
(タイプ I I 種地盤 KAHOKU BRG.LG)

表-1 推定結果と動的応答解析結果の比較

弾性周期 (sec)	降伏荷重 (免震支承) (tf)	VE (cm/sec)
0.98	0.10 W_U	210

降伏荷重 (橋脚基部) (tf)	免震支承: 最大変位 δ_{max} (m)	推定値			動的 応答 解析 結果
	橋脚: 応答塑性率 μ_p	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=3$	
0.15 W_T	δ_{max}	0.0766	0.0766	0.0766	0.0775
	μ_p	20.5	9.67	6.04	24.7
0.20 W_T	δ_{max}	0.123	0.123	0.123	0.109
	μ_p	11.1	4.93	2.89	15.7
0.25 W_T	δ_{max}	0.170	0.170	0.170	0.141
	μ_p	6.83	2.91	1.61	6.64
0.30 W_T	δ_{max}	0.216	0.216	0.216	0.183
	μ_p	4.63	1.91	1.00	2.48
0.40 W_T	δ_{max}	0.310	0.310	0.217	0.189
	μ_p	2.57	1.04	1以下	1以下

免震支承の最大変位の推定値は、橋脚基部の降伏荷重 Q_{py} が 0.15 W_T から 0.30 W_T までの各場合は動的解析結果とよく一致しており、しかもいずれも安全側の評価となっている。また、 $Q_{py}=0.40W_T$ の場合は $\alpha=3$ で動的解析結果とよく一致した。この場合動的解析結果から、橋脚基部は弾性であることがわかる。

橋脚の応答塑性率の推定値をみると、 Q_{py} が 0.15 W_T と 0.20 W_T の場合は $\alpha=1$ で動的解析結果に近い値を示している。また、 $Q_{py}=0.25W_T$ および 0.30 W_T の場合は、 $\alpha=1 \sim 2$ の推定値が動的解析結果によく対応している。 $Q_{py}=0.15W_T$ から 0.30 W_T までの場合に $\alpha=1$ 程度で推定値が動的解析結果に対応するのは、今回検討したケースでは系の挙動が交番荷重的なものではなく、変形が一方に累積したためである。一方、 $Q_{py}=0.40W_T$ の場合の応答塑性率は、 $\alpha=3$ とすれば動的応答解析結果と対応する。

橋脚基部の降伏荷重が免震支承のそれに対して大きくなるにしたがって、動的解析結果に対応する係数 α の値は 1 から 3 へと大きくなっている。これは、橋脚基部の降伏荷重が大きくなるにつれて基部は塑性化しにくくなり、それだけ免震支承のエネルギー吸収分担率が高くなるためと考えられる。

3. まとめ

免震支承を有する単柱式橋脚において、総エネルギー入力を地震荷重指標として用い、それが支保部と橋脚基部双方による総吸収エネルギーと釣り合うとして免震支承と橋脚の最大応答を推定する応答推定法の適用性に関して検討した結果、以下の知見が得られた。

1) 免震支承の降伏荷重と桁一橋脚一基礎全体系の弾性周期とに等しい降伏荷重と弾性周期をもつ 1 自由度振動系への総エネルギー入力と、支保部・橋脚基部双方による総吸収エネルギーとの釣り合いによる応答推定法は、免震支承と橋脚基部の最大応答を評価する手法として有効である。今回検討を行った範囲では、I 種地盤のタイプ I 地震動に対しては $\alpha=1$ 程度を用いた推定値が動的解析結果と近い値となった。ただし、橋脚基部が大きく塑性化する場合や、逆にほとんど塑性化しない場合への適用には注意が必要である。

今後は、タイプ II 地震動に対する本推定法の適用性の検討や推定精度の向上を図る必要がある。

<参考文献>

- 1) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第 2 版、東京大学出版会、1987.7
- 2) 松田・入江・大塚・山本：エネルギー入力を考慮した構造物の応答推定に関する一考察、第二回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.339-344、1997.1
- 3) 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 回地震時保有水平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、pp.303-308、1998.12