

鋼製橋脚振動系の弾塑性応答の予測に関する研究

AN ESTIMATION OF ELASTO-PLASTIC DYNAMIC RESPONSE OF STEEL BRIDGE
PIER

栗原 修*
Osamu KURIBARA

*構造強度研究室 (指導教官: 中沢正利 助教授)

本研究では、鋼製橋脚振動系をバイリニア型の回転ばね復元力特性を有する一自由度振動系にモデル化し、構造物の倒壊判定基準として弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} が指標となり得ることを示した。さらに、各種エネルギー指標と、弾塑性応答変位の相関を検討した。その結果より、弾性解析による最大応答変位やエネルギー入力率から弾塑性応答変位を予測する方法について提示した。

Key Words : 倒壊判定基準, 残留変位, 最大応答変位, 有効入力エネルギー, エネルギー入力率

1. まえがき

土木鋼構造物の耐震設計では、動的解析を行った上で耐震性能を評価することが要求されるようになった。しかし、動的解析の方法および解析レベル、異なる地震動に対する応答結果の評価法などについては不明確な点も多い。鋼製橋脚のような静定系構造物の基本的な耐震強度あるいは倒壊判定基準については、エネルギー論的な評価法に基づいた研究がある程度の成果をあげている。しかし、構造物が壊れない場合の最大応答変位、残留応答変位は一般に予測精度が悪いとされており¹⁾、異なる地震動特性とこれら応答変位の関係を明らかにすることは、構造物の耐震性能評価において重要な検討課題である。ここでは、鋼製橋脚構造系に着目して、まず構造物の復元力特性と倒壊判定基準について明らかにし、次に構造物が倒壊しない場合の応答変位と、地震動指標としてのエネルギー指標との関係を検討した。

2. 弾塑性応答解析とエネルギー指標

解析対象モデルを図-1に示す。この振動系の運動方程式は、

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + \frac{R(\theta) - Pu}{\ell} = F(t)$$

となる。ここで m は質点の質量、 c は粘性減衰係数、 ℓ は剛棒の長さ、 u は質点の水平変位、 θ は回転ばねの回転角、 P は鉛直荷重、 $R(\theta)$ は復元力モーメント、 $F(t)$ は地震波による加振力であり、 θ は ℓ と比較して十分小さいとする。回転ばねの復元力特性はバイリニア型であるとし、塑性域剛性と弾性域剛性の比を μ とする。上式の両辺に $\dot{\theta}$ を乗じ、動的外力の継続時間 t にわたって積分する。その式の左辺の左の項から運動エネルギー E_k 、粘性減衰エネルギー E_c 、ばね系の弾塑性ひず

みエネルギー E_s と履歴減衰エネルギー E_h 、右辺を地震力によって系に入力されるエネルギー E_f とすると、エネルギー収支は $E_k + E_c + E_s + E_h = E_f$ と表わされる。ここで、地震終了時 $E_k = 0$ であることより、地震力の弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} を $E_{ef} \equiv E_f - E_c - E_h$ と定義する。

また、弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} は、図-2において水平復元力 $R'(u)$ が0となるときの、すなわち水平方向変位 u が終局変位 u_{cr} に達するまでになすエネルギーとして斜線部分の三角形の面積で表される。鉛直荷重 P と座屈荷重 $P_{cr} = k/\ell$ の比を α としたとき、 E_{su} や u_{cr} は図-2に示される式で表され、橋脚の構造諸元から直接求めることができる量である。

次に任意の時間 t_1 から $t_1 + \Delta t$ の間に入力されるエネルギーのうち、地震の発生から終了時まで最大となる量をエネルギー入力率 ΔE_{max} と定義し、

$$\Delta E_{max} \equiv \max \left\{ \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} F(t) \dot{u} dt \right\}$$

と表す²⁾。今回はこの単位時間 Δt を構造物の固有周期の1/4とした。本研究では、これらのエネルギー指標を用いて、鋼製橋脚振動系に実地震波を作用させたときの弾塑性応答について評価する。

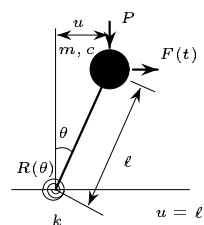


図-1 1自由度系振動モデル

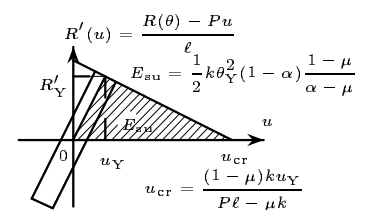


図-2 水平方向復元力特性

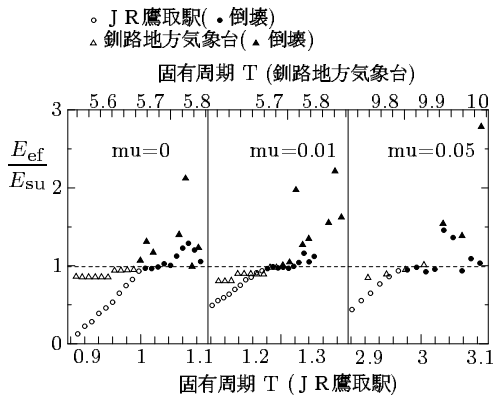


図-3 有効入力エネルギーによる倒壊判定基準

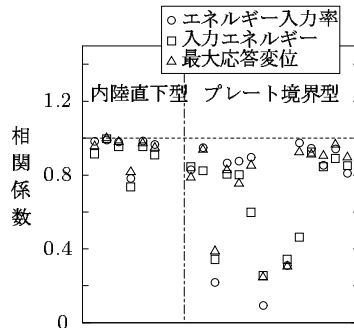


図-4 弾塑性有効入力エネルギーと弾性指標の相関係数

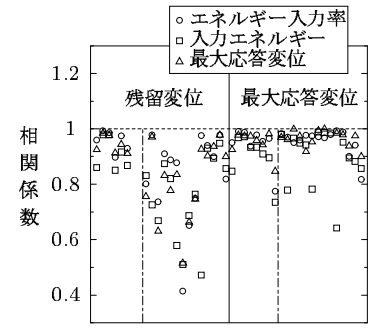


図-5 弾塑性応答変位と弾性指標の相関係数

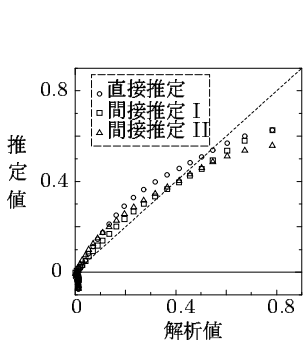


図-6 残留変位の推定値 (J.R. 鷹取駅)

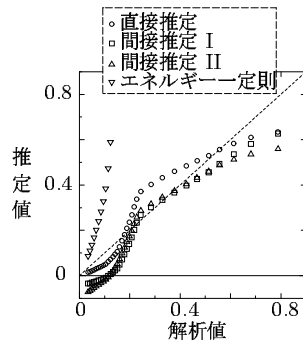


図-7 最大応答変位の推定値 (J.R. 鷹取駅)

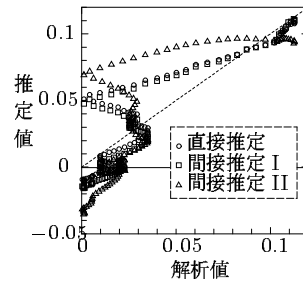


図-8 残留変位の推定値 (釧路地方気象台)

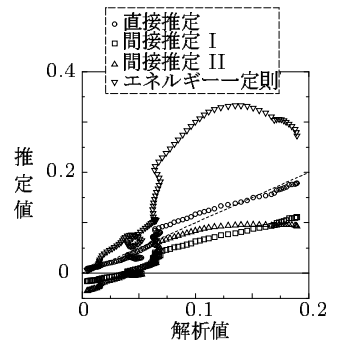


図-9 最大応答変位の推定値 (釧路地方気象台)

3. 倒壊判定基準の検討

解析に用いた鋼製橋脚には実際の構造諸元を想定し、兵庫県南部地震・J.R.鷹取駅(内陸直下型)と釧路沖地震・釧路地方気象台(プレート境界型)において観測された地震波を用いてパラメトリック解析を行った。横軸を固有周期 T とし、縦軸には弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} を E_{su} で無次元化し、解析例を図-3 に示した。この結果より、有効入力エネルギー E_{ef} は異なる地震波の特性とは関係なく、また構造物の復元力特性によらず、倒壊判定基準の指標になり得ると言える。

4. 弾塑性指標と弾性指標の相関

弾塑性動的解析は一般に困難であることより、弾性解析によって倒壊判定が行うことができるかを検討するため、弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} と弾性解析による指標の相関係数を、図-4 に示した。この結果を見ると、内陸直下型地震ではどの指標においても強い相関が見られるものが多く、その中でもエネルギー入力率と最大応答変位が強い相関を示している。一方、プレート境界型地震では相関係数のばらつきが大きく、 E_{ef} を回帰することは難しいと思われる。

また、弾塑性応答変位量と弾性指標の相関係数を図-5 に示した。この結果を見ると、最大応答変位では全体的に安定して強い相関が見られるが、残留変位では相関のばらつきが大きい。その中でもエネルギー入力率にあ

る程度の強い相関が見られる。

5. 弾塑性応答変位量の予測

応答変位量を予測する方法として、(1) 弾性計算によるエネルギー入力率と弾塑性解析における応答変位の回帰式から直接応答変位量を求める(直接推定)。(2) 弾性計算によるエネルギー入力率や最大応答変位をもとに弾塑性有効入力エネルギーを回帰し、エネルギーを求めて近似式より応答変位量を求める(間接推定 I, II)。また、最大応答変位に関しては(3) エネルギー一定則による推定値との比較も行った。横軸を解析値、縦軸を推定値を取り、プロットしたものを図-6 ~ 図-9 に示す。この結果を見ると、弾性解析におけるエネルギー入力率や最大応答変位に有意な相関があることが分かる。また、エネルギー一定則による最大応答変位の推定は、プレート境界型地震には適用できるが、内陸直下型地震には適用性に問題があると思われる。

参考文献

- 1) 中島章典・深山大介・大塚久哲・佐藤貴志・鈴木基行：鋼製橋脚の弾塑性最大応答変位推定法について，土木学会論文集，No.570/ I-40，pp.297-304，1997。
- 2) 桑村仁・竹田拓也・佐藤義也：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率，日本建築学会構造系論文集，第491号，pp.29-36，1997年。

(1999年2月22日提出)