

鋼製橋脚振動系の弾塑性応答の予測

東北大学工学部

東北大学大学院工学研究科

東北大学大学院工学研究科

○学生員 栗原 修

正 員 中沢 正利

正 員 岩熊 哲夫

1. まえがき

土木鋼構造物の耐震設計では、これまでの震度法による検討の他に、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、地震を受けた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、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入力エネルギー、エネルギー入力率などの関係を検討した。

2. 理論の概略

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、図-2に示すようにバイリニア型であるとする。

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。その式の左辺の第1項を運動エネルギー E_k 、第2項を粘性減衰エネルギー E_c 、第3項を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 、右边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 $E_k = 0$ であることから、地震力の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-3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-3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。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。

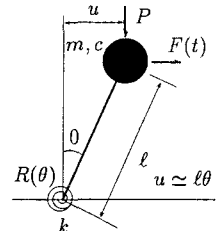


図-1 1自由度系振動モデル

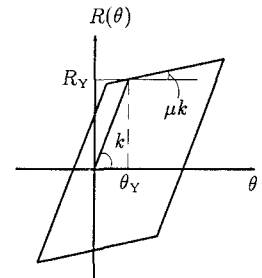


図-2 回転ばねの復元力特性

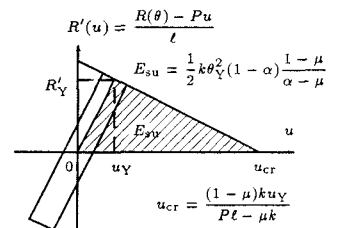


図-3 水平方向復元力特性

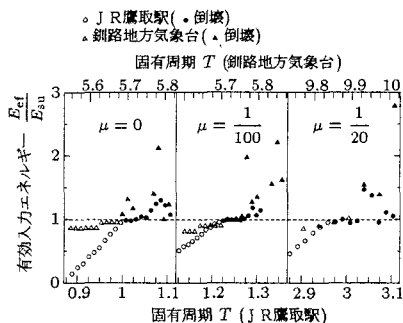


図-4 入力エネルギーによる倒壊判定基準

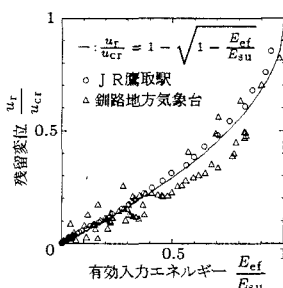


図-5 有効入力エネルギー—残留変位関係

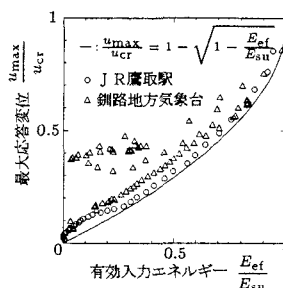


図-6 有効入力エネルギー—最大応答変位

3. 解析結果

(1) 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規定し、兵庫県南部地震・JR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動的解析を行った。質点の質量 m を変化させて解析を行ったため横軸を固有周期 T とし、縦軸には有効入力エネルギー E_{ef} を弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} で無次元化し、解析例を図-4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倒壊判定基準の指標になり得ると言える。また、構造物の復元力特性によらず、有効入力エネルギー E_{ef} が弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} に達した時、構造系が倒壊に至ることが分かる。

(2) 振動系が倒壊しない場合の残留変位、最大応答変位の検討

振動系が倒壊しない場合の残留変位 u_r 、最大応答変位 u_{max} と有効入力エネルギー E_{ef} の関係をそれぞれ終局変位 u_{cr} と弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} で無次元化し、図-5, 6に示した。実線は、それぞれ図中の式によって表される近似曲線である。結果を見ると兵庫県南部地震(内陸直下型)においては実線に良く一致しているが、釧路沖地震(プレート境界型)の一部はそれほど実線に一致しているとは言えない。しかし、最大応答変位 u_{max} も残留変位 u_r 程ではないが、実線に比較的一致すると言える。つまり、有効入力エネルギーは地震動の特性によらず、残留変位、最大応答変位を予測するのに有効である。

(3) エネルギー指標と応答変位量の相関

最大応答変位あるいは残留応答変位などの応答変位量を予測するためには、地震動の特性を表わすエネルギー指標との相関を調べる必要がある。横軸に構造物の固有周期、縦軸に無次元化したエネルギー入力率 ΔE_{max} や有効入力エネルギー E_{ef} 、および無次元化した残留変位 u_r や最大応答変位 u_{max} をプロットした結果を図-7, 8に示した。これらの結果より、内陸直下型地震では、 ΔE_{max} と E_{ef} はともに u_r や u_{max} と強い相関があると言える。しかし、プレート境界型地震では基本的には応答量はランダムであり、 ΔE_{max} と u_r および u_{max} とはある程度の相関が見られるが、 E_{ef} とはほとんど相関が見られず、地震動特性の違いが顕著に表われている。

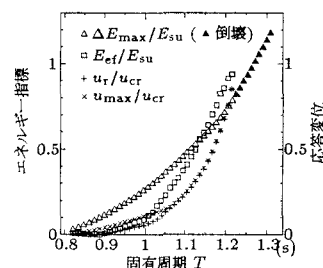


図-7 エネルギー特性(JR鷹取駅)

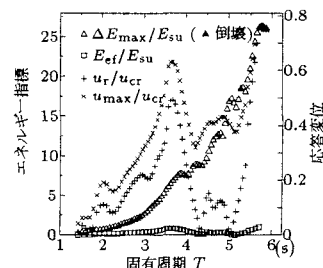


図-8 エネルギー特性(釧路地方気象台)

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1月。