

鋼製橋脚の弾塑性終局挙動に関する研究

東北大学工学部 ○学生員 安藤 聡
東北大学工学部 正 員 中沢 正利
東北大学工学部 正 員 岩熊 哲夫

1. まえがき

近年、土木構造物の耐震性能設計の観点から動的解析法的重要性が増すと共にその適用が必要不可欠となっている。構造物の耐震性能を照査することはその倒壊条件あるいは損傷度を評価することであり、エネルギー論的な方法によれば地震外力の異なる特性を包含できる可能性があることは既に知られている。本研究では、鋼製橋脚構造の応答特性を十分再現し得る一自由度振動系の簡易モデルを用いてその倒壊条件をエネルギー論的に考察するための基本的な特性を数値解析により求めたので報告する。

2. 基礎理論

本研究では、実際の鋼製橋脚を一自由度振動系モデルに置き換えた簡易モデルを対象とし、図-1に示す。この振動系の運動方程式はモーメントのつり合いより、次のように表される。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + \frac{R(\theta) - Pu}{\ell} = F(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき、回転ばねの復元力特性は図-2に示すように完全弾塑性型であるとする。また、式(1)の左辺の第3項によって表される水平変位-復元力特性は、鉛直方向の軸力 P の影響により、図-3に示すように、降伏変位 u_y を越えると水平方向復元力が減少し、 $u = u_{cr}$ で不安定、すなわち倒壊する。

一方、エネルギー論より、式(1)の両辺に $\dot{\theta}$ をかけて、動的外力の継続時間 t にわたって積分すると、

$$\left[\frac{1}{2} m \dot{u}^2 \right]_0^t + c \int_0^t \dot{u}^2 dt + \int_0^t R(\theta) d\theta - \frac{P}{\ell} \left[\frac{1}{2} x^2 \right]_0^t = \int_0^t f(t) \dot{u} dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで θ 、 u は時刻 t での回転角および水平変位を表す。式(2)において、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 、第4項を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 とすると次のようになる。

$$E_k + E_c + E_s + E_h = E_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、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となるまでになすエネルギーとして斜線部の面積で表され、橋脚の構造諸元から直接求めることができる。粘性減衰を無視し共振正弦波外力を受ける場合には、入力エネルギー E_f と履歴減衰エネルギー E_h の差で表される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} をはじめて越えた時を振動系の動的終局状態と定義し、そこに至ると系は倒壊すると報告されている¹⁾。本研究では粘性減衰(減衰定数 $h=5\%$)を考慮した上で、実際の鋼製橋脚に則した構造諸元を持つ一自由度振動系が実地震波を受ける場合の弾塑性終局挙動を追跡し、系が u_{cr} に達した時の E_{ef} を次のように定義して系の倒壊時のエネルギーを用いて倒壊判定基準を考察する。

$$E_{ef} \equiv E_f - E_c - E_h \quad \dots\dots\dots (4)$$

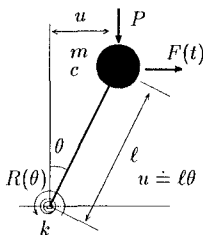


図-1 一自由度系振動モデル

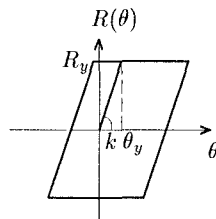


図-2 回転ばねの復元力特性

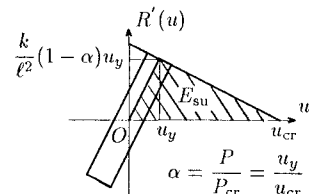


図-3 水平変位-復元力特性

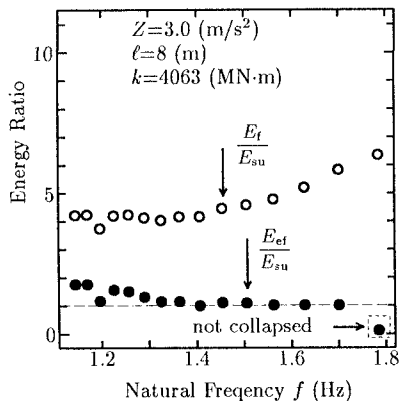


図-4 入力エネルギー-振動数関係 (正弦波外力)

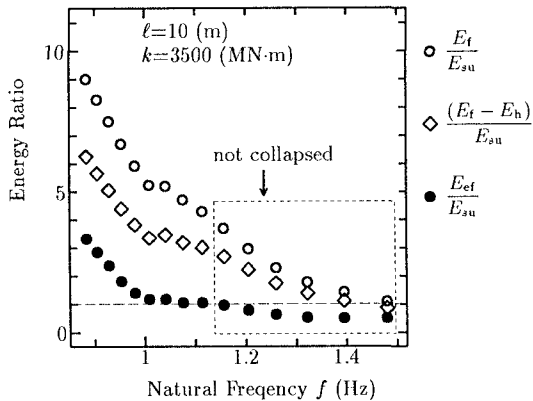


図-5 入力エネルギー-振動数関係 (東神戸大橋)

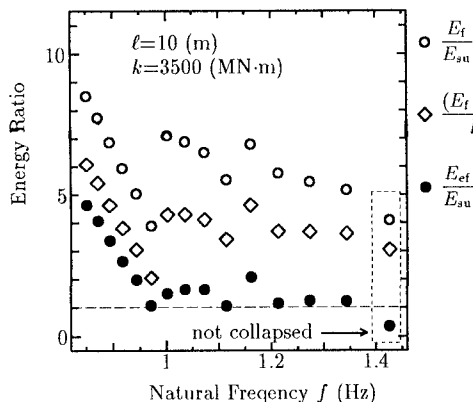


図-6 入力エネルギー-振動数関係 (JR 鷹取駅)

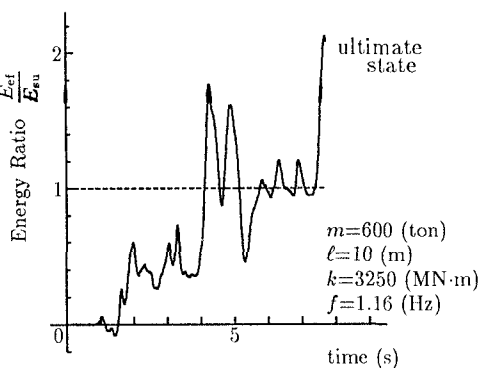


図-7 エネルギー入力曲線 (JR 鷹取駅)

3. 解析結果

まず、正弦波外力を受ける減衰振動系についての結果を図-4に示す。この振動系と共振する調和正弦波外力 (最大加速度振幅 Z は一定) を与えるものとし、上部工の重量を変化させた。文献1)と同様に、終局時のエネルギーを用いても振動系の倒壊条件として $E_{ef}/E_{su} \geq 1$ を適用できることが確認できる。

一方、兵庫県南部地震の際に観測された地震波を外力として用いて解析した結果のうち、東神戸大橋 (N12W) の地震波による解析結果を図-5に、JR 鷹取駅 (N-S) の地震波による解析結果を図-6に示す。これらより、実橋脚に則した構造諸元を持ち、実地震波外力を受ける振動系についても、正弦波外力と同様に、 E_{su} という指標をその振動系の倒壊条件の下限值として規定できることが分かる。しかし、正弦波外力を受ける場合と比較すると倒壊時の E_{ef}/E_{su} が1を大きく上回る事例が多数認められる。図-7はエネルギーの累積の様子を表したものであるが、文献1)では E_{ef}/E_{su} がはじめて1を越えた時のエネルギーで評価しているのに対して、本研究では倒壊時のエネルギーで評価しているため上で述べたようなばつぎが生じている。

参考文献

- 1) Nakajima, A. et al.: Dynamic Failure of Structures with Structural Instability, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, JSCE, Vol.4, pp.351s-360s, 1987.