

I - B185

一自由度振動系の弾性エネルギー指標と弾塑性応答との相関

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 安藤 聡
 東北学院大学工学部 正 員 中沢 正利
 東北大学大学院工学研究科 正 員 岩熊 哲夫
 長岡高専環境都市工学科 正 員 井林 康

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、解析レベル、また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はまだまだ重要な検討課題である。本研究では鋼製橋脚構造に着目し、まず、一自由度系の弾塑性動的応答解析を行うことで構造物の倒壊判定基準を明らかにした。次に、構造物が倒壊しない場合の応答変位と、弾性解析から求まるエネルギー指標との関係を検討した。

2. 解析手法とエネルギー指標

本研究では鋼製橋脚を図-1に示すような一質点系回転ばねにモデル化した。この系の運動方程式は以下のように表すことができる。

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

ここに 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、 $F(t)$ は地震波外力であり、また θ は ℓ と比較して十分小さいとする。回転ばね定数 k をもつ回転ばねの復元力特性を図-2に示すような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。式(1)は以下のようにエネルギー的に表現できる。

$$E_k + E_c + E_s + E_h = E_f \quad (2)$$

ここに E_k は運動エネルギー、 E_c は粘性減衰エネルギー、 E_s はばね系の弾塑性ひずみエネルギー、 E_h は履歴減衰エネルギー、 E_f は地震力によって系に入力されるエネルギーである。ここで、地震終了時に $E_k \approx 0$ であることより、地震終了時のエネルギー収支は、式(2)より以下のように表すことができる。

$$E_s = E_f - E_h - E_c \quad (3)$$

左辺の最大値を構造物が吸収可能な弾塑性ひずみエネルギー E_{su} 、右辺を地震によって実質的に入力される有効入力エネルギー E_{ef} とおき、二者のエネルギー指標の関係をを用いて構造物の倒壊判定を検討する。

3. 有効入力エネルギーによる倒壊判定基準の検討

ここでは有効入力エネルギー E_{ef} を用いて構造物の倒壊判定が可能かを検討するため、実際の鋼製橋脚を参考にして解析モデルの構造諸元を与え、塑性域剛性の値を変え、特性の異なる実地震波を作用させてパラメトリック解

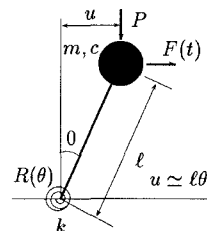


図-1 一自由度系振動モデル

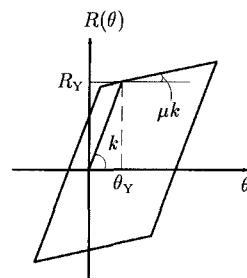


図-2 回転ばねの復元力特性

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

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (TEL 022-217-7443, FAX 022-217-7441)

析を行った。本解析で用いた入力地震波は、内陸直下型としてJR 鷹取駅（兵庫県南部地震）、プレート境界型として釧路地方気象台（釧路沖地震）において観測されたものを用いた。横軸に固有周期 T (sec)，縦軸に弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} で無次元化した有効入力エネルギー E_{ef} をとった弾塑性応答解析の結果を図-3に示した。図-3より、有効入力エネルギー E_{ef} は地震波の特性、構造物の復元力特性に関係せず倒壊判定基準の指標になり得ることがわかる。

4. 弾塑性応答量と各種弾性指標との相関

弾塑性解析を直接適用できるのであれば、各種応答変位量を推定する必要はないものと思われる。しかしながら、弾塑性解析は動的解析レベルの差異により応答変位が大きく異なることが知られている。そこで本研究では、解が一意的に定まる弾性解析により、入力エネルギー、最大応答変位、エネルギー入力率といった3つの指標を導き出し、それらの値から弾塑性応答変位量を推定することを試みた。ここでエネルギー入力率とは、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} と定義したもので、

$$\Delta E_{max} \equiv \max \left\{ \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} F(t) \dot{u} dt \right\} \quad (4)$$

と表される²⁾。本研究では単位時間 Δt を構造物の固有周期の1/4として ΔE_{max} を求めた。まず、弾性解析のみで構造物の倒壊判定を行うことを目的として、弾塑性解析から得られる有効入力エネルギー E_{ef} と弾性解析から得られる指標との相関を調べ、両者の相関係数を図-4に示した。ここで、系に入力した地震波外力は内陸直下型としてJR 鷹取駅（兵庫県南部地震）など計8波形、プレート境界型として釧路地方気象台（釧路沖地震）など計14波形である。図-4より、内陸直下型地震においてはエネルギー入力率、入力エネルギー、最大応答変位ともに比較的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有効入力エネルギーと強い相関を示した。一方、プレート境界型地震においては相関係数のばらつきが大きく、3つの指標ともに入力地震波に依存する結果となった。

次に、弾性解析から構造物の弾塑性応答変位量の予測可能性を検討するため、先程と同様に3つの弾性指標に対する弾塑性解析から得られる残留変位、および最大応答変位の相関を調べ、図-5に示した。ここで、系に入力した地震波外力は先程と同様である。図より、内陸直下型、プレート境界型を問わず最大応答変位と各種弾性指標とは全体的に強い相関が見られた。一方、残留変位と各種弾性指標との相関は内陸直下型の場合は比較的相関が高いが、プレート境界型の場合には非常にばらつきが大きい結果が得られた。しかしながら、エネルギー入力率とは内陸直下型、プレート境界型のそれぞれにおいてある程度の強い相関があることが分かる。

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.

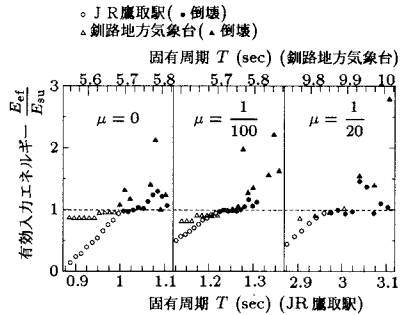


図-3 固有周期-有効入力エネルギー関係

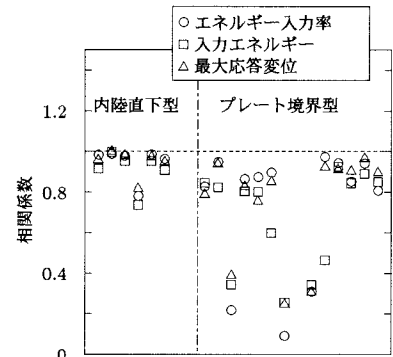


図-4 有効入力エネルギーと各種弾性指標との相関係数

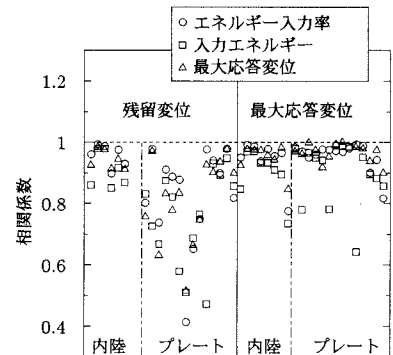


図-5 弾塑性応答変位と各種弾性指標との相関係数