

非弾性動的相互作用を考慮した地盤-構造物系の最大応答予測

京都大学防災研究所 正 員 土岐憲三 佐藤忠信

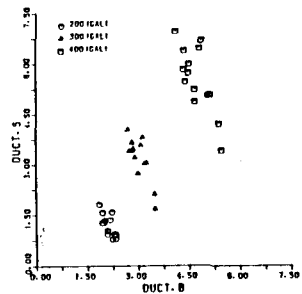
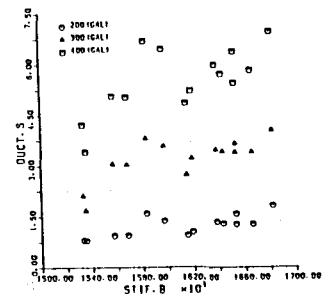
京都大学大学院 学生員 ○宮田 和

1. まえがき：構造物の弾塑性応答特性は、その復元力特性と入力地震動をどの様に設定するかによってかなり異なってくる。したがって、数値解析に基づいた動的な非線形挙動を把握するためには膨大な計算を行った上で、各種の検討を加えなければ不変的な特性を捉えることはできない。一方、等価線形化手法は、弾塑性応答を線形に置換して解析的な表現形式を求めるものである。応答量についての定量的な考察を加えやすいという一面を持っている。特に応答の確率的な量を求めるには有効な手法である。ここでは、基礎の並進や動揺も考慮した3自由度系についてRC橋脚を対象としパワースペクトル密度関数の理論的な表現形式を利用しスペクトルモーメント法によって塑性率の期待値を計算し、弾塑性応答解析を行う。

2. 基礎の動特性を考慮した解析方法：橋脚躯体を1自由度系とし、フーチング基礎を1質点系で表し、その基礎の並進、動揺振動を考慮する2質点3自由度系にモデル化する。この3自由度系の非線形応答を等価線形化しモードの重ね合わせ法を利用して、平均応答スペクトル¹⁾を用いることにより、応答の期待値を算出する²⁾。ここで、上部構造物の復元力特性は、tri-linear型(武藤モデル)で表現する。等価剛性は、最大点剛性を用いる。基礎の動揺振動及び並進運動の復元特性は双曲線モデルで表し、等価剛性・等価減衰定数を定めた。まず減衰項、及び外力項のない場合の運動の運動方程式を用いてモード解析を行う。つぎに、ホワイトノイズが入力される場合のクロススペクトルモーメントの理論的表現式を用いて、ピーク係数を算出し、応答の期待値を算出する。塑性率の期待値は、各降伏変位で除すことにより求められる。塑性率の期待値の計算には繰り返し計算が必要になるので塑性率がある誤差の範囲に入った時に計算を終了するアルゴリズムを構築した。

3. 基礎の動特性を考慮した場合の解析結果及び考察：橋脚躯体そのものの特性は一定とし、基礎の剛性を変化させた場合に橋脚の塑性率がどのように変化するかを調べた。基礎のモデル化に際しては基礎の質量、慣性モーメント、並進ばね・回転ばねといった値を建築基礎構造設計基準・同解説(基礎の設計)により定め14ケースについて解析した³⁾。基礎の動的構造特性が橋脚の非線形応答特性に及ぼす影響を調べるために、基礎の水平変位に対する塑性率 μ_B と橋脚の塑性率 μ_S の関係をプロットしたのが図-1である。図中の○、△、□印の区別は入力加速度レベルを200, 300, 400galと変化させた場合を意味している。いずれの場合も μ_B が大きくなるにつれて μ_S の減少することがわかる。これは基礎の塑性変形量が大きくなるにしたがって、入力地震エネルギーが基礎部分の履歴特性によって消費され、橋脚に入力される地震エネルギーが減少することを意味している。図-2は基礎の水平ばね剛性 K_B と μ_S との関係を示したものである。基礎が剛になるにしたがって、橋脚の非線形応答の大きくなることすなわち入力地震エネルギーが増大することを意味している。

4. 降伏力と塑性率：構造物の塑性化が一様に近い場合には、弾性応答の最大変位と弾塑性応答の最大変位の間には、ほぼ変位一定あるいはエネルギー一定の関係が成り立つと仮定できる。ここでは、塑性率にあるレベルを設け、応答塑性率と設定レベルと

図-1 塑性率 μ_S と μ_B との関係図-2 塑性率 μ_S と剛性 K_B との関係

Kenzo TOKI, Tadanobu SATO, Kazu MIYATA

の間の差を最小にする問題を考える。最小化に関しては、Powellの方法⁴⁾を使用する。構造物の剛性を制御することによって、目的関数を最小化することを試みる。降伏応力を一定にし、剛性を変化させると降伏点も変動する。従って、降伏変位を固定して降伏力を増減させることで、剛性を変化させる。よって、上部構造は、武藤モデルにおける初期勾配と第2勾配の比 α_1 をパラメータとする。また、基礎の並進は、降伏水平抵抗力 Q_v を上下することで、剛性を制御した。同様に、基礎の回転も降伏曲げモーメント M_v のレベルを上下した。パラメータ α_1, Q_v, M_v を変化させることによって、次式で表される目的関数が最小値を取るパラメータ値を最適解とした。

$$E = \left(\frac{\mu_y - a}{a} \right)^2 + \left(\frac{\mu_v - b}{b} \right)^2 + \left(\frac{\mu_{\phi} - c}{c} \right)^2$$

但し、 a, b, c は独立に異なる値を設定できるが、ここでは入力レベルを300galと設定し、 $a = b = c = 3.0$ とした。3つのパラメータは、各々の塑性率に対する影響の度合いが異なっているため、3つのパラメータを同時に変化させながら最適解を算出するアルゴリズムは、解の収束安定時の上でかなりの困難を伴うことが判明したので、効率よく、目的関数の最小化を行うために、多段階最小化を行った。図-3は、最適解で初期値を除いた値が%で示されている。降伏水平抵抗力 Q_v は上限と下限の差が大きい。下限値は厳密解の約50%であるが上限値は5倍となっている。したがって Q_v については初期化の値の設定をかなり荒く取っても良いことがわかる。一方、降伏曲げモーメント M_v 、剛性の比 α_1 は、初期値の幅がかなり小さい。これは、初期値の与え方が、目的関数を最小化するための重要な要因となっていることを示している。よってPowellの方法を使用する際には、誤差の少ない初期値を与える必要がある。なお最適解を用いた時の E の値は0.02であり、十分な精度で塑性率が3.0に収束していることがわかる。

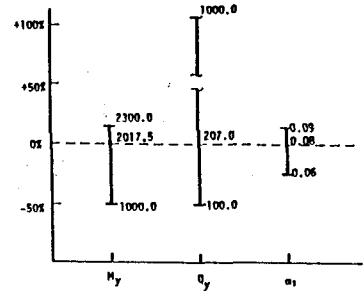


図-3 パラメータの収束状況

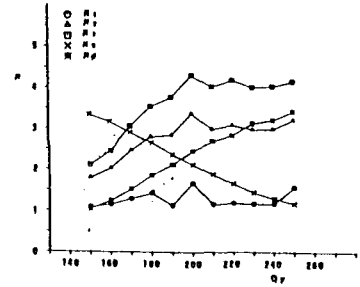


図-4 Q_v による塑性率の変化 ($M_v = 500$)

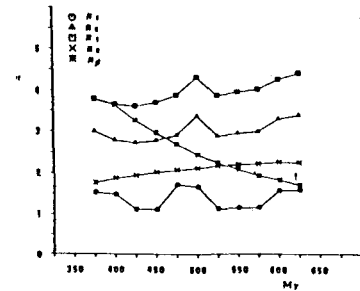


図-5 M_v による塑性率の変化 ($Q_v = 200$)

5. 多質点系とした場合の解析結果及び考察：簡単のため、上部構造物の質点数を3とし、質点の質量を一定にし、剛性も一定にし、塑性領域での挙動を考察する。図-4は基礎の降伏曲げモーメント M_v を一定値に設定し、降伏水平抵抗力 Q_v を変化させたもの、また降伏水平抵抗力 Q_v を一定にし、降伏曲げモーメント M_v を変化させたものが図-5である。これらの図より、 Q_v, M_v が増加するにつれ上部構造物の塑性率は、最上層を除いて増加する。特に最下層の質点への影響は大である。基礎の水平方向と回転のばねを強くすると、今まで基礎で受け持たれていた地震の人力エネルギーが、上部構造物で受け持たれるようになるためである。このように、多質点系のモデルを用いた解析からも、上部構造物と基礎との間で入力エネルギーの分担が行われていることが理解される。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、p115, 1980
- 2) A. Der Kiureghian: A Response Spectrum Method for Random Vibration analysis of MDF System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9, pp. 419-435, 1981
- 3) 白井孝治：RC橋脚と基礎における耐震安全性の配分に関する研究、京都大学修士論文, 1987年
- 4) Zangwill, W.I.: Minimizing a function without calculating derivatives, Computer Journal, 10, pp. 293-296, 1967.