

強震時における基礎の塑性変形が 全体系の耐震性能に及ぼす影響について

小野祐輔¹・土岐憲三²・清野純史³

¹学生員 修(工) 京都大学工学研究科 博士後期課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学工学研究科 教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博(工) 京都大学工学研究科 助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1995年兵庫県南部地震以後、構造物の非弾性挙動を積極的に考慮した設計が注目されるようになった。これらは、現状では基礎を剛とみなす条件、いわゆる基礎固定の条件のもとで、上部構造のみに着目したものがほとんどである。しかしながら、構造物の基礎に許容される塑性変形をあらかじめ定義しておき、その範囲内において上部構造の塑性変形との配分をコントロールすることで、構造物の全体系としての耐震性能を合理的に考慮した設計が可能になると考えられる。そこで本研究では、構造物の基礎の非弾性挙動が上部構造の耐震性能に及ぼす影響を、上部構造に生じる応答塑性率と構造物の固有周期、並びに基礎の塑性変形の程度を表すパラメータとの関係を求めることで評価した。

Key Words : *pile-foundation, inelastic behaviour, interaction system, demanded strength*

1. はじめに

地盤と構造物の間で発生する動的相互作用が、構造物の地震時の挙動に及ぼす影響については古くから注目されてきた。例えば、Parmelee¹⁾は調和的な外力を受ける構造物の定常振動について検討し、ある地盤条件においては構造物に大きな振動が生じ得ることを示した。Parmeleeの研究が仮想的な構造物と地盤を対象として行われたのに対し、Merrit and Housner²⁾は入力として観測記録を用いて、堅固な沖積層に支持される典型的な高層建築物の応答に関して検討し、地盤-構造物系の相互作用効果はあまり大きな影響を与えないという結論を得ている。しかしMerritらの研究は、比較的軟らかい構造物と固い地盤を対象としており、剛性の大きな構造物と軟弱な支持地盤との組み合わせを考えれば、相互作用の影響が相対的に大きくなることが予想される。そこでParmeleeら³⁾は半無限弾性地盤上の線形構造物の応答スペクトルを求め、様々な構造物と地盤の組み合わせについて、地盤と構造物の間の相互作用の影響を調べた。

Castellani⁴⁾は同様の目的で3自由度2質点系SRモデルを用いた簡便な解析により、軟弱地盤中に位置する基礎に調和外力が作用する場合の応答スペクトルについて検討し、ある条件の下では相互作用を考慮することで構

造物の地震応答を大幅に低減できることを示した。

また、Jennings and Bielak⁵⁾は構造物に及ぼす動的相互作用の効果について様々な観点から詳細に検討を行った結果、相互作用は構造物の卓越振動数を低下させること、この効果は構造物の階数が多ければ1次モードのみで顕著に現れること、スウェイよりもロッキングで顕著なこと、基礎固定としている構造物が減衰を持っていれば、相互作用を考慮することで応答が基礎固定で考えるよりも大きくなる場合があること、などの結論を得た。

本研究では、構造物の基礎の非弾性挙動が上部構造の耐震性能に及ぼす影響を、上部構造に生じる応答塑性率と構造物の固有周期、並びに基礎の塑性変形の程度を表すパラメータとの関係を求めることで評価した。

2. 解析モデルの設定

(1) 解析モデルの諸元

本研究では、図-1に示すようなT字型の道路橋橋脚を解析の対象とした。ただし、後で述べるように本研究では、地盤-杭基礎系の動的相互作用を考慮した必要強度スペクトルを求めることを目的としているため、固有周期、すなわち大きさの異なる数多くのモデルを解析対象としている。従って、図-1はあくまでも対象としているモデルを概念的に示しているにすぎない。

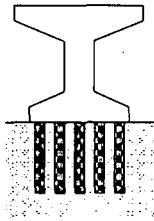
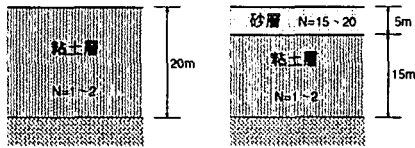


図-1 解析対象橋脚



(a) 地盤モデル A (b) 地盤モデル B

図-2 解析対象地盤モデル

一方、これらの橋脚を指示する地盤については、図-2に示す2種類のモデルを想定した。これらは大阪地域における平均的な地盤像を意識して設定したものである。地盤モデルAは、支持基盤の上にN値が2程度、せん断波速度が125m/sの粘性土層を仮定したモデルである。それに対して地盤モデルBでは、モデルAと同じ物性を持つ粘性土層の上にN値がおよそ15で、せん断波速度が200m/s程度の砂質土が存在するものとした。

解析対象とした杭基礎は、杭径が1.0m及び1.2mである2種類の4本杭基礎とした。杭間隔は群杭効果が顕著に現れるの防ぐために3.0mとしている。

(2) SRモデルの設定

本研究で求める必要強度スペクトルは、構造物の非弾性挙動を考慮した応答スペクトルの一種であると位置づけることができる。応答スペクトルは数多くの構造物の平均的な性質を示すものであり、個々の構造物の特性を事細かに考慮して求める性質のものではない。そこで、杭-地盤系の動的相互作用の影響を解析モデルに取り入れるにあたり、図-3のような最も簡便なSRモデルを用いることにした。

SRモデルを用いる際には、スウェイ、ロッキングばねの設定法が常に問題となる。ここではスウェイばねをバイリニアモデル、ロッキングばねを線形モデルとした。スウェイばねの初期剛性と、ロッキングばねの剛性は非弾性梁でモデル化した杭と地盤ばねからなる系に対して、Pushover解析を行い、得られた荷重-変位曲線の傾きを求めることで設定した。この解析により得られた荷重-変位曲線の一例が図-4である⁶⁾。図-4において、 $f(x)$ とした直線をスウェイばねの初期剛性として用いる。

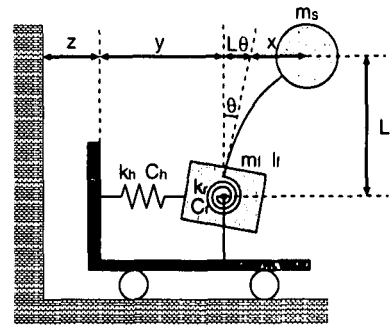


図-3 3自由度2質点SRモデル

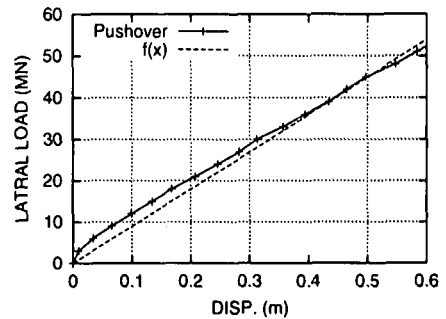


図-4 荷重-変位関係

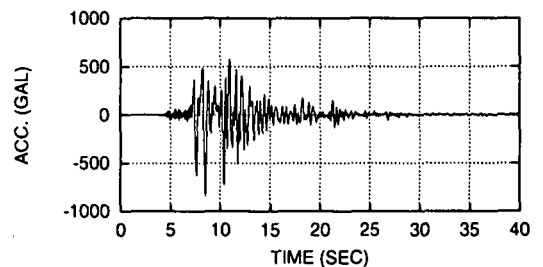


図-5 入力地震動

なお、Pushover解析に際しては、地盤のばね定数、極限支持力並びに群杭効果の補正係数については道路橋示方書⁷⁾⁸⁾を参考に決定した。水平方向地盤ばねの復元力特性については完全弾塑性型モデルとし、鉛直方向については線形としている。

以下の検討で用いた解析モデルと、本節で示した解析により得られたスウェイ運動の初期剛性 K_h とロッキング運動の剛性 K_r を表-1にまとめて示す。

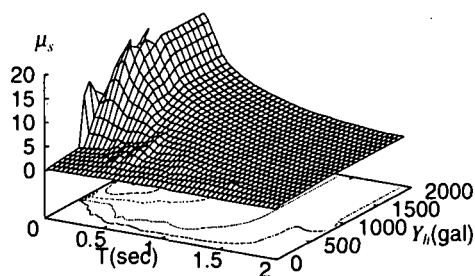
3. 解析結果と考察

通常、必要強度スペクトルは基礎固定の1自由度系を対象として、構造物の塑性率毎に固有周期と降伏強度の関係が与えられる。

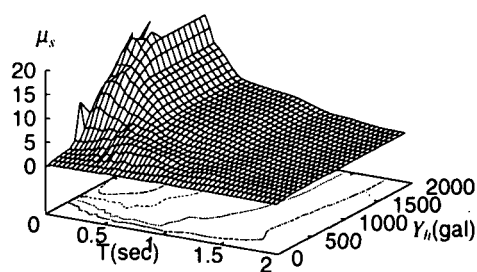
ここでは、基礎杭の非弾性挙動が上部構造の耐震性能に及ぼす影響の性質を見るために、上部構造の降伏強度

表-1 解析ケース

解析ケース	地盤モデル	杭径 (m)	K_h (MN/m)	K_r (MN/rad)
case 10A	A	1.0	229.299	7098.7
case 12A	A	1.2	336.866	12578.5
case 10B	B	1.0	394.973	
case 12B	B	1.2	557.952	13987.5

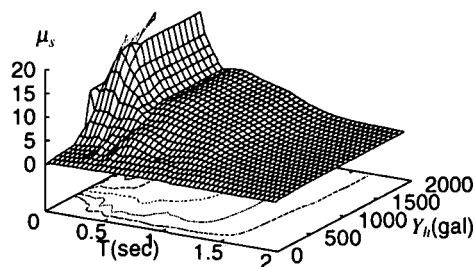


(a) 杭径 1.0m

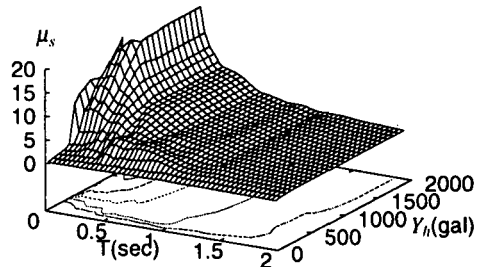


(b) 杭径 1.2m

図-6 構造物の固有周期と塑性率及びスウェイ運動の降伏力との関係 (地盤モデル A)



(a) 杭径 1.0m



(b) 杭径 1.2m

図-7 構造物の固有周期と塑性率及びスウェイ運動の降伏力との関係 (地盤モデル B)

を固定し、バイリニアとして定義したスウェイ運動の降伏強度を変化させたときに上部構造に生じる塑性率を3次元空間に描いた。すなわち、ある一つの構造物の固有周期と、基礎の降伏強度の組み合わせに対して地震応答計算を行い、得られた応答塑性率を3次元空間上に一つの点としてプロットする。この応答塑性率を多数の固有周期と基礎の降伏強度との組み合わせについて求めたものが図-6並びに図-7である。

これらの解析では、いずれも上部構造の降伏強度を500 galとし、ロッキング運動は線形としている。減衰は上部構造では2%、スウェイ、ロッキング運動に対してはそれぞれ10%を与えている。また、入力に用いた地震

波形は、図-5に示す神戸海洋気象台における1995年兵庫県南部地震の加速度記録である。

図-6及び図-7を見ると、いずれのケースにおいても、固有周期が小さく基礎の降伏強度が大きくなるほど、上部の応答塑性率が大きくなるのがわかる。これは、Tが小さい程基礎の影響が大きく反映されること、基礎の降伏強度が小さい程上部の応答塑性率が小さくなることを示している。すなわち、基礎を降伏させることで、剛性の低下と履歴エネルギー吸収が生じ、その結果、上部構造に生じる応答塑性率が低減されていることを意味しているものと考えられる。

一方、図-6、図-7をコンター表示したものがそれぞれ

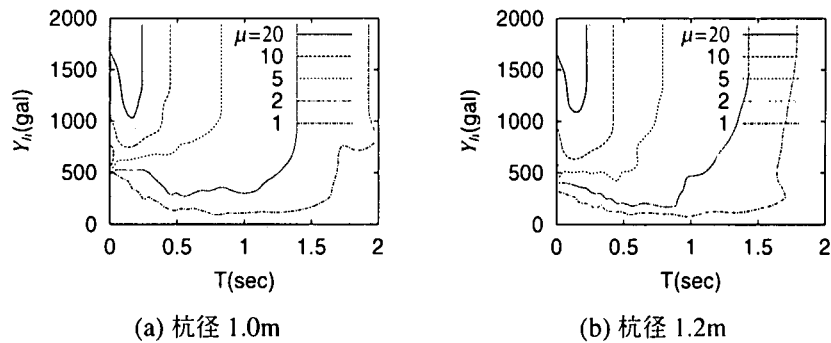


図-8 構造物の固有周期と塑性率及びスウェイ運動の降伏力との関係(地盤モデル A)

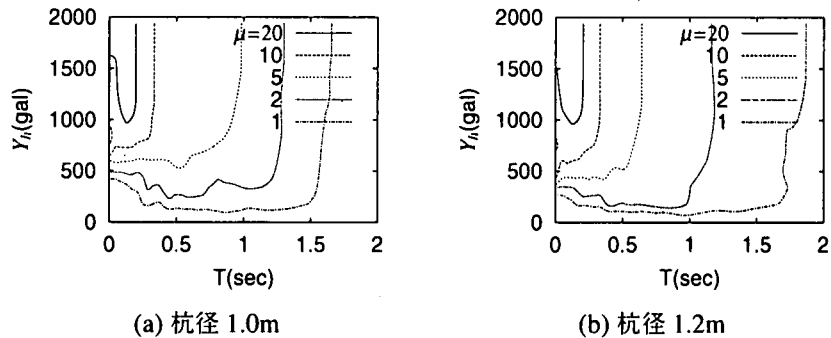


図-9 構造物の固有周期と塑性率及びスウェイ運動の降伏力との関係(地盤モデル B)

図-8、図-9である。これらのコンターは、上部構造の塑性率 μ が 1, 2, 5, 10 及び 20 の場合について示してある。地震時における構造物の塑性率と被害・損傷の程度の間には、相関があることが知られている。例えば、 $\mu = 1$ では応答が弾性範囲にあり、構造物の状態として健全維持であることを示す。また、 $\mu = 2$ では、軽微な損傷が発生し、 $\mu \geq 5$ になると構造物にかなりの損傷が生じているものと考えられる。

従って、例えば図-8(a)において固有周期 T が 0.5 秒の上部構造に生じる塑性率を 2~5 の間に押さえるならば、杭の水平方向の降伏力を 300~500 gal の間に設定すれば良いことが分かる。

4. 結論

本研究では、上部構造の応答塑性率と固有周期、及び基礎の強度の三つのパラメータの関係を求めることにより、杭基礎構造物における杭-地盤系の相互作用の非弾性挙動が全体系の耐震性能に及ぼす影響について評価を行った。その結果、相互作用ばねの非弾性化の程度を変化させることで、上部構造に生じる塑性変形が大きく影響を受けることが明らかとなった。これは、基礎の強度をパラメータとした設計を行うことで、個々の構造物に要求される性能、すなわち全体系の耐震性能をコント

ロールした設計法の実現可能性を示唆するものである。

参考文献

- 1) R.A. Parmelee. Building-foundation interaction effects. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 93, No. EM2, pp. 131-152, April 1967.
- 2) R. G. Merrit and G. W. Housner. Effect of foundation compliance on earthquake stress in multistory buildings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 44, No. 4, Oct 1954.
- 3) R. A. Parmelee, D. S. Perelman, and S. L. Lee. Seismic response of multiple-story structure on flexible foundation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 59, pp. 1061-1070, 1969.
- 4) Alberto Castellani. Foundation compliance effects on earthquake response spectra. *Journal of Soil Mechanics, ASCE*, No. SM4, pp. 1335-1353, 1970.
- 5) Paul C. Jennings and Jacobo Bielak. Dynamics of building-soil interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 1, pp. 9-48, Feb 1973.
- 6) 古川愛子. Pushover 解析に基づく杭基礎-地盤系のモデル化と非弾性挙動の解析に関する研究. 京都大学卒業論文, 2000.
- 7) 道路橋示方書・同解説 下部構造編, 1996.
- 8) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 1996.