

群杭基礎-地盤-構造物系の動的相互作用 におけるSRモデルの構築

山下典彦¹・土岐憲三²・佐藤忠信³

¹正会員 博(工) 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学防災研究所教授 工学研究科土木工学専攻 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

地震時における構造物と地盤との動的相互作用の問題が、耐震設計指針や基準に考慮されていることは稀である。これは動的相互作用の解析が煩雑であることにもよるが、こうした現状を改善するためには、動的相互作用の効果をより簡単な形式で表現し、通常構造物の耐震設計にも簡易な形で取り入れる必要がある。そこで、都市内高架橋で多く見られる非合成鉄筋-鉄筋コンクリートT型橋脚を対象とし、群杭基礎-地盤-構造物系の振動連成系を離散化の考えに基づき多質点系にモデル化する。そして、そのモデルの杭頭部における相互作用特性を抽出し、SRモデルに取り込むことによって複雑な連成振動系を簡便に表現する。さらに、構築した等価SRモデルを用いて、地震時における橋脚の塑性応答と基礎の塑性応答の相互関連性を明らかにする。

Key Words : pile group, sway and rocking model, dynamic soil structure interaction, time domain

1. はじめに

一般に橋梁構造物は、常時荷重に対する安定性および地震時の安定性を確保することを目的として岩盤等の硬質地盤に直接設置される直接基礎、もしくは杭を介して下部の硬質な地盤の支持層に設置される群杭基礎によって建設される。

前者の直接基礎に対する動的相互作用の問題は従来からの解析とそれを検証するための実験の両面から数多くの研究がなされ、その基本的特性はほぼ解明されて実際設計にも適用されている。一方、後者の杭支持構造物の地震応答解析を精度良く行うためには群杭基礎-地盤-構造物系の動的相互作用解析が重要となる。しかし、この動的相互作用の問題に関しては現在までに非常に多くの研究が行われてきたにも拘らず、有効な地震応答解析ならびに合理的な耐震設計法の提示は未だになされていない。

そこで本研究では、群杭基礎-地盤-構造物系から構成される全体系を考慮した動的相互作用を表現できる簡便な力学モデルを構築し、その多質点系モデルから等価SRモデルへの置換手法について検討を行うものである。さらに、この置換手法を1995年兵庫県南部地震において甚大な被害を受けた阪神高速道路3号神戸線の橋脚について適用し、構築された

等価SRモデルを用いて橋脚の塑性応答と基礎の塑性応答の相互関連性を求める。

2. 群杭基礎-地盤-構造物系の非線形解析

ここでは、杭基礎近傍地盤の非線形特性が基礎の応答に与える影響を考慮し、多質点系モデルの杭頭部における相互作用特性を抽出し、SRモデルに取り込む方法について述べる。

(1) 多質点系モデル

解析対象とする群杭基礎-地盤-構造物系は、都市内高架橋に多くみられる非合成鉄筋-鉄筋コンクリートT型橋脚を考え、それらは $n \times n$ の群杭基礎に支持されている。上部構造物とフーチングを含めた地盤-構造物系の動的問題を考える場合、上部構造物はその重心高さと質量がフーチングの回転運動に大きな影響を与える。またフーチングはその埋め込み深さが系のエネルギーの地下逸散を大きく支配する。ここでは、杭とそれを支持する地盤との間の相互作用を評価することを目的とするため、フーチングには埋め込みがないとし、その並進-回転により地盤から受ける摩擦力、反力は考慮しないこととする。さらに、杭頭はフーチングに剛結されているとし、

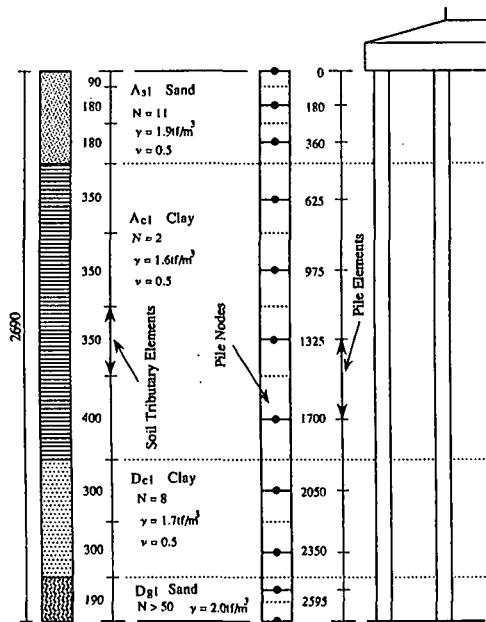


図-1 杭の要素分割と地盤の薄層分割

表-1 杭の諸元

杭種		場所打ち杭
杭長	(m)	26.9
杭径	(m)	1.5
断面積	(m^2)	1.7672
断面2次モーメント	(m^4)	0.2485
ヤング係数	(t/m^2)	$2.50E+6$
杭本数	(本)	$4 \times 4 = 16$

表-2 上部構造物の諸元

上部工死荷重	(t/m)	23.135
橋脚の高さ	(m)	12.00
脚柱の重量	(t)	814.80
脚柱の弾性係数	(t/m^2)	$2.65E+6$
フーチングの幅	(m)	14.50
フーチングの厚さ	(m)	3.50
フーチングの重量	(t)	1597.78

杭は場所打ち杭で変位および回転が杭先端で固定され、表層地盤は図-1に示す砂および粘土で構成される3層地盤とし、支持基盤は完全に剛とした。表-1に杭の諸元を、表-2に上部構造物の諸元を示す。

群杭基礎-地盤-構造物系の解析モデルとしては、図-2(b)に示すように群杭基礎-地盤系を基礎近傍地盤の非線形性を考慮した多質点系にモデル化する。すなわち、杭端は支持基盤に達し基盤変位 u_g によって地盤とともに杭は地震動を受ける。このとき、 u_j^s は杭から遠く離れた場所での地盤変位であり、杭の変位 u_j^p は u_j^s による影響を受けるが、 u_j^s は u_j^p の影響を受けない。したがって、相互作用の影響はすべて杭と地盤との間の見かけの相互作用ばねにより考慮されることになる。この相互作用ばねの復元力特性は、Hardin-Drnevich型モデルで表され、骨格曲線は初期剛性と降伏強度の二つのパラメータを用いて双曲線

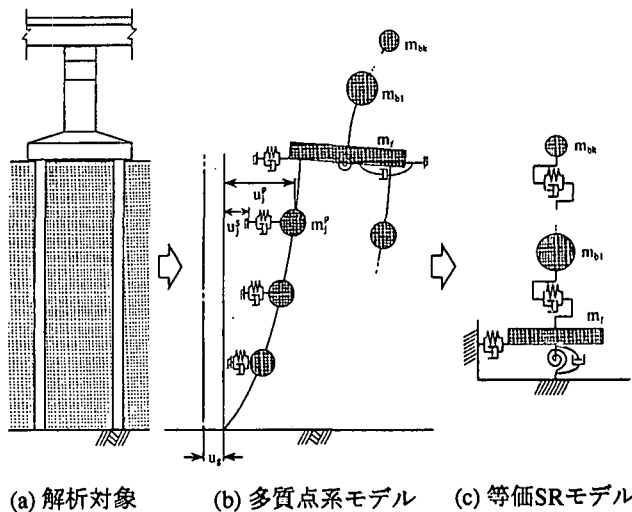


図-2 群杭基礎-地盤-構造物系のモデル化の概念

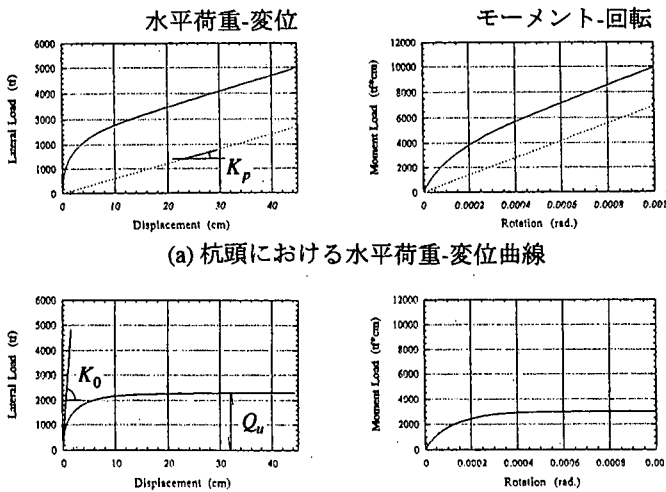
関数で表す。初期剛性としてはNovakらによる複素剛性を時間領域解析に取り入れる手法を用い、降伏強度はBromsが提案したRankineの受動土圧の3倍を用いている。これらのパラメータを求める際に必要となる諸量はすべてN値により推定するものとする。また、減曲線、加曲線は骨格曲線を2倍に相似拡大することにより決定した。さらに逸散減衰と粘性減衰を表現するダッシュポットは、剛性比例型減衰で評価し初期剛性の2%を用い、 u_j^s は次元有限要素法を用いた応答計算を行って決定した。

(2) 簡易解析モデル

a) 静的解析

図-2(c)に示されるSRモデルの並進と回転ばねを決定するためには、多質点系モデルの杭頭において静的に載荷された水平荷重と水平変位、モーメント荷重と回転変位の関係を知れば良い。したがって、多質点系モデルの杭頭における静的載荷シミュレーションにより、杭頭部における地盤反力-変位関係を杭の弾性変形成分および地盤の非線形変位成分の和で表現し¹⁾、地盤の非線形成分を杭頭における並進および回転ばねとして評価することにより多質点系モデルをSRモデルに置き換える。その際、荷重は1方向載荷とし杭体および支持基盤にはいかなる降伏も生じないと仮定して、全ての相互作用ばねが降伏するまで載荷を行う。

図-3に図-1の3層地盤のN値、表-1の杭の諸元を持つ群杭基礎のフーチングに組み合わせ荷重、水平荷重 $Q = 5000(\text{tonf})$ 、モーメント荷重 $M = 10000(\text{tonf} \cdot \text{cm})$ を作用させた場合の荷重変位曲線を示す。



(a) 杭頭における水平荷重-変位曲線

(b) (a)より杭の弾性変形分を引いた値

図-3 荷重-変位曲線の地盤寄与分

杭は弾性変形を仮定しているため、図中(a)における曲線が一定の勾配を持つ部分は、相互作用ばねが降伏し、杭の剛性だけで載荷荷重の増加を負担していると考えられる。そこで図中(a)に点線で杭を片持ちばりと考えた場合、すなわち地盤を取り除いた場合の杭頭における載荷荷重-変位関係を示した。これより杭基礎-地盤系の杭頭における相互作用ばねの非線形特性は図-3(a)の実線部により、点線を引くことによって表現できると考えられる。その結果が図-3(b)である。ここでは、図-3(b)の曲線を次式のようにモデル化した。

$$Q(x) = \frac{K_0 x}{1 + \left| \frac{x}{x_f} \right|} + K_p x, \quad x_f = \frac{Q_u}{K_0} \quad (1)$$

式(1)に現れる K_p , K_0 , Q_u の定義は図-3より与えられる。なお、ここでは履歴復元力特性のモデル化を簡単にするため、並進と回転のカップリングは無視した。

b) 動的解析

得られたSRモデルと多質点系モデルの両者を用いて地震応答解析を行うことにより、SRモデルの妥当性を確かめる。SRモデルの並進と回転のばねの履歴曲線は相互作用ばねと同様に骨格曲線を2倍に相似拡大することにより決定した。また、減衰定数はばねの初期剛性の2%とした。入力加速度は基盤層に図-4に示す最大加速度 403 cm/sec^2 の兵庫県南部地震の神戸本山における振り切れ波形を再現したものを作用させ、計算時間間隔は0.005秒とした。図-5は両者のモデルの応答変位波形を比較したものである。図中、実線と破線はそれぞれ等価SRモデルと多質点系モデルによる結果である。上部構造物

およびフーチングの並進においては両者の応答は比較的一致しているものの、フーチングの回転においては最大7倍程度の開きがある。しかし、回転に関しては値が非常に小さいこともあり等価SRモデルの応答としては妥当な値と思われる。

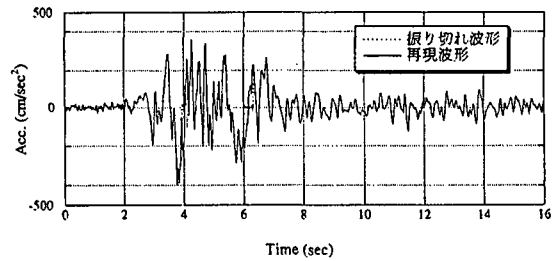


図-4 神戸本山における振り切れ記録の再現波形

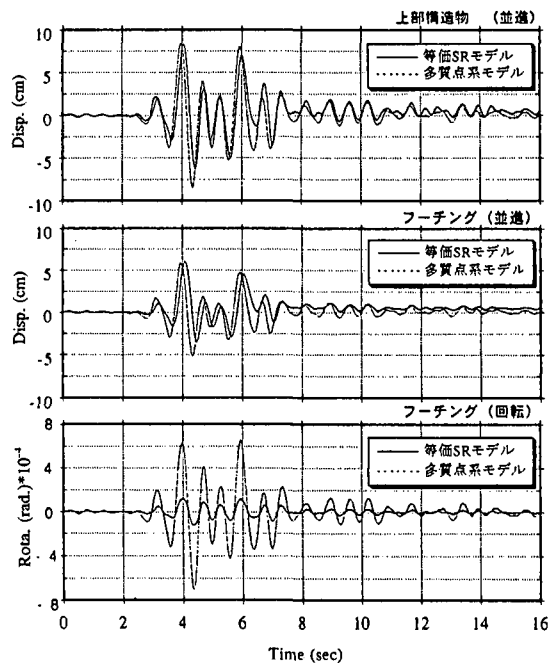


図-5 多質点系モデルと等価SRモデルの応答変位の比較

3. 阪神高速道路3号神戸線を対象とした等価SRモデルの構築

(1) 等価SRモデルの妥当性の検証

ここでは、2章で述べた等価SRモデルを構築する手法を用いて、阪神高速道路3号神戸線上の橋脚P137とP252を対象に数値解析を行った。また、地盤パラメータは各橋脚位置でのボーリング調査結果を参考にした。さらに、入力地震動としては図-6に示すように構造物設置位置で予想される理論加速度応答スペクトル²⁾を与え、これに適合する模擬地震波を求め、さらに重複反射理論を用いて工学的基盤面における地震動とした。図-6の強震観測記録としては、図-4に示す神戸本山における再現波形を作用させた。

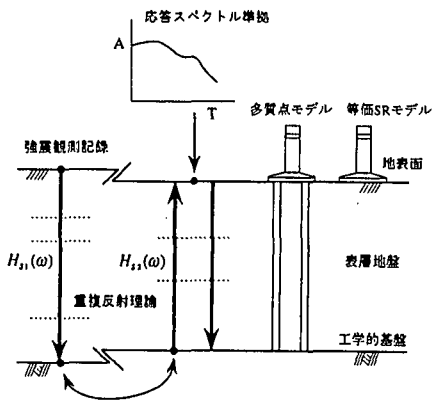


図-6 応答スペクトル準拠の入力地震動の考え方

図-7はP137とP252の上部構造物の応答変位を比較したものであり、図中実線が等価SRモデル、点線が多質点系モデルのものである。P137においては変位値が最大3.6cm程度で両者はよく一致しているが、P252では上部構造物の非線形性により多質点系モデルの最大変位が等価SRモデルのものと比較して3cm程度大きくなっている。さらに、上部構造物の履歴曲線を示したものが図-8である。これより、P137においてはあまり非線形性はみられないが、P252では大きな非線形性を示していることがわかる。

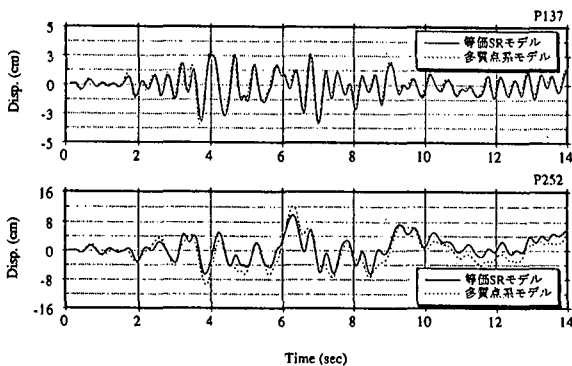


図-7 上部構造物の応答変位の比較

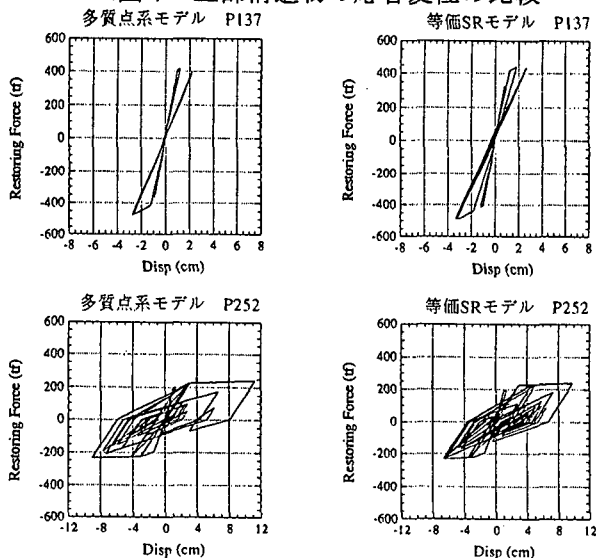


図-8 上部構造物の履歴曲線の比較

(2) 橋脚と基礎の塑性応答の相互関連性

ここでは、P137とP252の等価SRモデルを用いることにより、橋脚の塑性率と基礎の水平方向変形の塑性率の関係を求める。方法としては、橋脚躯体そのものの特性は一定とし、基礎の水平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。図-9は、それぞれP137とP252の橋脚と基礎の水平方向変形の塑性率の関係を示したものである。図中の○印(●印は等価SRモデル)が数値計算によるもので、図中の実線は数値計算結果を近似した曲線である。これより、基礎の水平方向変形の塑性率が大きくなると橋脚の塑性率が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示している。

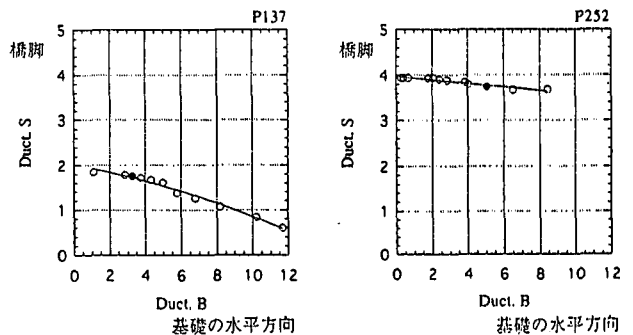


図-9 橋脚と基礎の水平方向変形との塑性率の関係

4. まとめ

群杭基礎-地盤-構造物系を、SRモデルに取り込むことにより複雑な連成系を簡便に表現し、それらの妥当性を検証することを目的に阪神高速道路3号神戸線上の橋脚を対象に数値解析を行った。その結果、杭基礎近傍地盤の塑性変形量が大きいときには上部構造物の塑性変形量は少なく、地盤の塑性変形量が小さいときには上部構造物の塑性変形量が大きくなることがわかった。今後は、杭体の非線形性を考慮した等価SRモデルの構築や、さらにそれらを基にした必要強度スペクトルを求めることにより、弾塑性耐震設計法に関する研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 佐藤忠信：講座「地盤と構造物の動的相互作用の解析法」，土と基礎，土質工学会，pp.63-70，1992.
- 2) 山下典彦，関口春子，佐藤忠信，川瀬博：兵庫県南部地震における阪神高速道路3号神戸線を対象とした理論加速度応答スペクトルの推定，第32回地盤工学研究発表会（投稿中）