

杭応力簡易評価のための 拡張スウェイロッキングモデル

藤森健史¹・中川太郎²・羽鳥敏明³・八幡夏恵子⁴

¹工博 (株)大林組 技術研究所 振動研究室 (〒204 東京都清瀬市下清戸四丁目 640)

²工修 (株)フジタ 技術研究所 構造研究部 (〒224 神奈川県横浜市都筑区大瀬町 74)

³戸田建設(株) 技術研究所 (〒104 東京都中央区八丁堀四丁目 6-1)

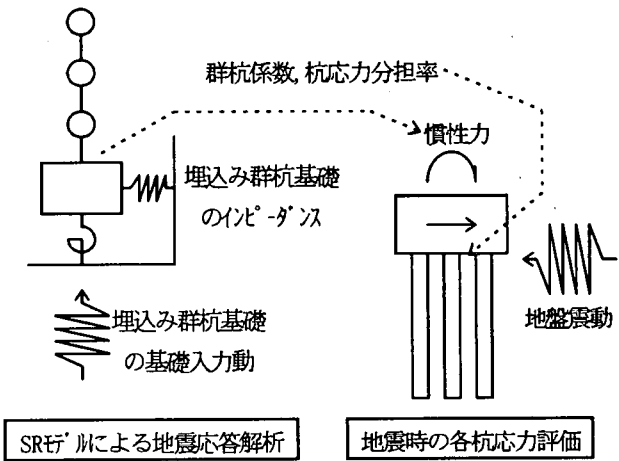
⁴工博 鹿島建設(株) 技術研究所 第3研究部 (〒182 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)

地震時杭応力評価に構造物と地盤の動的相互作用効果を取り入れた簡便な評価手法を既往の要素技術を合理的に組み合わせることにより提案した。提案手法は SR モデルと杭―地盤系の弾性支承モデルに基づいており、埋め込み群杭基礎の基礎入力動とインピーダンスおよび杭応力分担率に基づいた地震時の各杭の応力を評価することができる。また、この手法は、比較的簡易な計算により結果を得ることを目的のひとつとし、汎用性の高い評価法を目指している。評価手法の妥当性を検討した結果、埋め込み群杭基礎の基礎入力動とインピーダンスおよび杭応力分担率に関する基本的な性質を評価できることを確認した。また、最終的に評価された各杭の応力も精算解法や実験による値と概ね対応し、本評価手法の適用性が示された。

key Words: pile stress, SR-model, soil-structure interaction, effect of pile group, embedment effect, input motion, impedance, kinematic interaction, inertial interaction

1. はじめに

基礎部分が地中に埋め込まれた群杭基礎構造物の地震時応答および地震時杭応力を適切かつ簡便に評価できる手法を既往の要素技術を合理的に組み合わせることにより提案する。提案手法は地盤―構造物連成系の SR モデルと杭―地盤系の弾性支承モデルに基づいており、埋め込み群杭基礎の基礎入力動(入力損失効果)とインピーダンスおよび杭応力分担率に基づいた地震時の各杭の応力を評価することができる。また、この手法は、比較的簡易な計算により結果を得ることを目的のひとつとし、汎用性の高い評価法を目指している。



2. モデル化と評価の方法

本手法における杭応力評価法の概要を図-1 に、フローを図-2 に示す。本手法におけるモデルは、図-1 に示したように SR モデルに基づいているため、拡張 SR モデルと称する。また、本手法では、杭応力評価の際、地盤震動による杭応力と上部構造物の慣性力による杭応力を別々に評価する方法を用いている。このため、上部構造物の慣性力を評価するためにあらかじめ SR モデルによる地震応答解析を行う。このとき、群杭効果や基礎埋め込み効果は、基礎入力動とインピーダンスに集約され、応答解析結果に反映される。また、同時に、群杭係数と

図-1 拡張 SR モデルによる杭応力評価法の概要

各杭毎の応力分担の割合も基礎入力動、インピーダンス算定時に評価しておく。これら上部構造物の慣性力、群杭係数、杭応力分担率と別途評価する自由地盤の震動を杭―地盤系の弾性支承モデルに適用し、地震時の各杭応力を評価する。各要素の解析方法については次章で述べる。

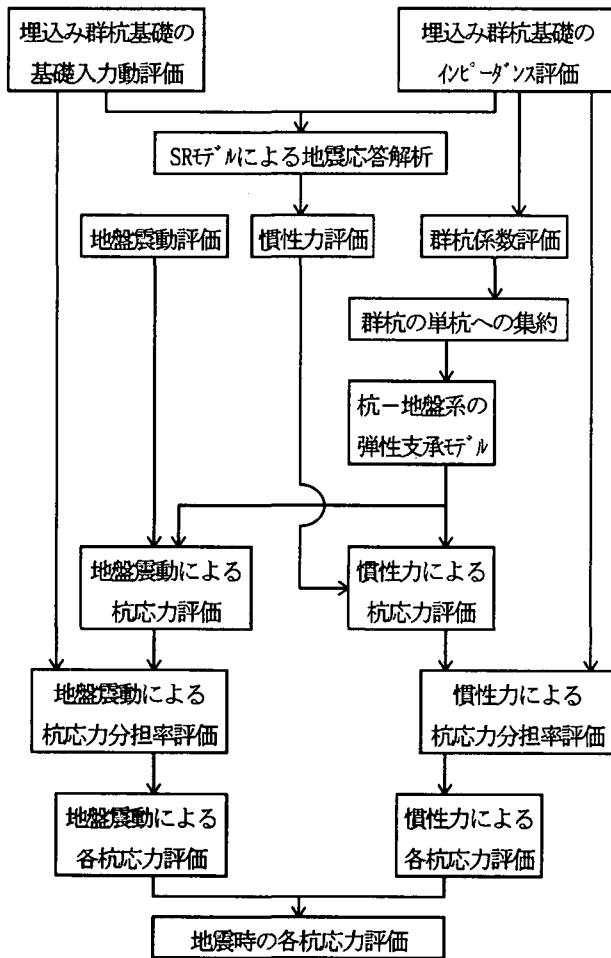


図-2 拡張SRモデルによる杭応力評価法のフロー

3. 各要素の解析方法

(1) 基礎入力動

埋め込み群杭基礎の基礎入力動は、基礎底面位置における(E+F)波に群杭基礎の基礎入力動を乗ずることにより評価する(式(1))。群杭基礎の基礎入力動の評価法は文献1による(式(2))。

$$U_{EG}^* = (U_G / U_f) \times [\cos(\omega H_b / (Vs(1 + 2\beta)^{-1}))] / [\cos(\omega H / (Vs(1 + 2\beta)^{-1}))] \quad (1)$$

$$U_G = U_{mn} + \sum \alpha_{mn}^K U_{nn} + F_m / k_x + \sum \alpha_{mn}^I F_n / k_x \quad (2)$$

ここに、 U_{EG}^* :埋め込み群杭基礎の基礎入力動、 U_G :群杭の応答変位、 U_f :自由地盤地震動、 H_b :基礎埋め込み深さ、 V_s :地盤S波速度、 β :複素減衰定数、 H :表層地盤厚さ、 U_{mn} :単杭の応答変位、 α_{mn}^K :下部加振時(地震入力時)の杭間相互作用係数、 F_m :各杭の杭頭応力、 $k_x + i\omega c_x$:単杭の地盤ばね、 α_{mn}^I :上部加振時(杭頭加振時)の杭間相互作用係数である。なお、 U_{mn} 、 α_{mn}^K 、 α_{mn}^I は下式³⁾による。

$$U_{mn} = U_g (\cos \delta z) / (\cos \delta L) \times [(k_x + i\omega c_x) / (E_p I_p \delta^4 + k_x + i\omega c_x - m\omega^2)] \quad (3)$$

$$\alpha_{mn}^K = \psi(r, \theta) \times [((k_x + i\omega c_x) / (E_p I_p \delta^4 + k_x + i\omega c_x - m\omega^2))^{-1}] \quad (4)$$

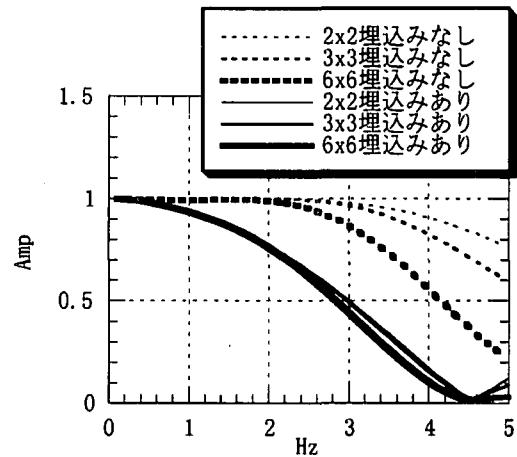


図-3 基礎入力動(群杭効果と基礎埋め込み効果)

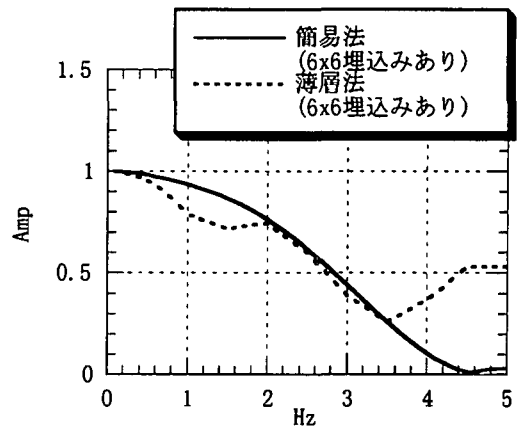


図-4 基礎入力動(精算解法との比較)

$$\alpha_{mn}^I = (3/4)\psi(r, \theta) \times [(k_x + i\omega c_x) / (k_x + i\omega c_x - m\omega^2)] \quad (5)$$

ここに、 U_g :基盤地震動、 δ :波数、 z :深さ、 L :杭長、 $E_p I_p$:杭曲げ剛性、 m :杭質量、 $\psi(r, \theta)$:杭間の波動伝播を表す伝達関数で杭間距離、方向、杭半径、逸散減衰を表す減衰定数、 S 波速度の関数である。

埋め込み群杭基礎の基礎入力動の解析例を図-3に、また、精算解(薄層法²⁾)と比較した結果を図-4に示す。なお、モデル構造物は、6×6本の場所打RC杭(1700φ、5.5m間隔)に支持された地下階(埋め込み深さ6.6m)を有する標準的な10階建RC建築構造物である。モデル地盤は、表層厚25m($V_s=120$ m/s)の2層地盤モデルである(支持地盤 $V_s=300$ m/s)。図-3の結果より、杭本数の増加や基礎埋め込みによる入力低減効果等基礎入力動の基本的な性質を表現できていることを確認できる。また、図-4より、精算解と概ね一致した傾向を示していることを確認できる。

(2) インピーダンス

埋め込み群杭基礎のインピーダンスは埋め込み基礎の側面水平インピーダンス³⁾と群杭基礎の水平インピーダンスを並列ばねと考え足し合わせるにより評価した。回転インピーダンスについては杭体の軸剛性によ

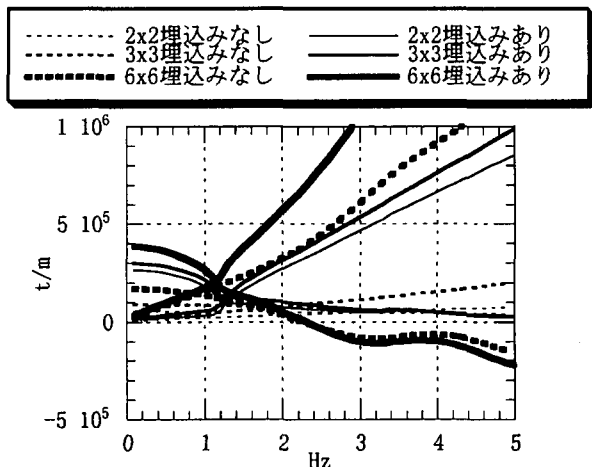


図-5 インピーダンス(群杭効果と基礎埋め込み効果)

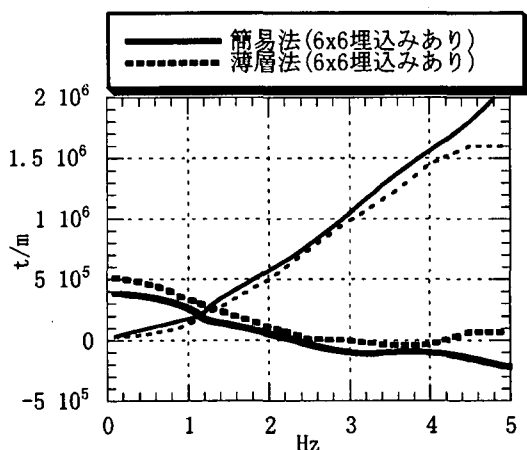


図-6 インピーダンス(精算解法との比較)

る回転剛性($K_R = (E_p/L) \sum (y^2 A_p)$, y :各杭の基礎中心からの水平距離, A_p :杭断面積)のみを考慮した。また、群杭基礎のインピーダンス(式(6))は、文献1による群杭係数と式(7)による単杭インピーダンスを用いて評価した。なお、単杭のインピーダンスは、ウインクラー型ばね(式(8)⁴⁾)で地盤と連結された一様地盤中の単杭の地盤反力分布を深さ方向に積分した後、 $\omega=0$ として用いた。

$$K_{Gh} = \kappa N K_{sh}, \quad \kappa = 1 / (1 + \sum \alpha_{mn}^I) \quad (6)$$

$$K_{sh} = k_x (1/R') (1 - e^{-R'z} \cos R'z) + i \alpha c_x (1/R') (1 - e^{-R'z} \cos R'z) \quad (7)$$

$$R' = (k_x / (4E_p I_p))^{1/4}$$

$$k_x = 12E_s, \quad c_x = 6a_0^{-1/4} \rho V_s d + 2\beta_k / \omega \quad (8)$$

ここに、 K_{Gh} :群杭基礎のインピーダンス、 κ :群杭係数、 K_{sh} :単杭のインピーダンス、 N :杭本数、 E_s :地盤のヤング係数、 $a_0 = \omega d / V_s$ 、 ρ :地盤密度、 d :杭径である。

埋め込み群杭基礎のインピーダンスの解析例を図-5に、また、精算解(薄層法)と比較した結果を図-6に示す。モデル構造物、モデル地盤は、前節と同じである。図-5の結果より、杭本数の増加や基礎埋め込みによる地盤ばね値(実数部分)と地下逸散効果(虚数部分)の増加傾向等インピーダンスの基本的な性質を表現できていることを確認できる。また、図-6より、精算解と概ね一致した傾向を示していることを確認できる。

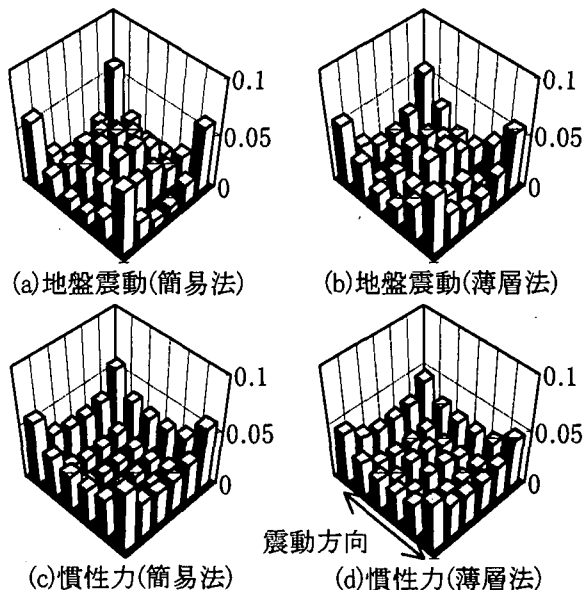


図-7 杭応力分担率(精算解法との比較)

(3) 杭応力分担率

杭応力分担率は、式(4)、(5)に示した杭間相互作用係数マトリクス α_{mn}^I 、 α_{mn}^K を用いて各杭頭に変位拘束条件を与えた場合の各杭頭反力により評価した。杭応力分担率の解析例($\omega=0.2$, 埋め込みなし)を、精算解(薄層法)と比較して図-7に示す。図-7の結果より、コーナー杭の応力分担率が大きくなる等の基本的な性質を表現できていることを確認できる。また、精算解とも概ね一致した傾向を示していることを確認できる。

(4) 杭応力

杭応力評価は、本章に示した要素技術を用いて図-2のフローに従い行う。このとき、基本的に、群杭係数、杭応力分担率は、地盤震動による杭応力評価においては地盤の1次固有振動数における値を、慣性力による杭応力評価においては地盤-建屋連成系の1次固有振動数における値をそれぞれ用いる。杭応力の解析例を精算解(薄層法)と比較して図-8に示す。なお、ここでは、地盤震動による杭応力と慣性力による杭応力を二乗和平方し全杭応力とした。また、入力地震波は基盤における最大加速度を60galに基準化したTaft1952EWである。

4. シミュレーション解析による提案評価法の検証

大型振動台上のせん断土槽に設置された上部建屋付き杭支持埋め込み基礎模型構造物(上部建屋高さ=1.1m, 基礎埋め込み深さ=0.5m, 杭長=3.5m, 杭本数=2本)の振動実験結果⁵⁾のシミュレーション解析を行い提案手法の適用性を検討する。インピーダンスについて比較した結果を図-9に示す。地盤定数は、実験結果の地盤伝達関数を基に等価線形解析により同定した値の地表面付近の平均値を用いた($V_s=50\text{m/s}$, $h=4\%$, $\rho=1.66\text{t/m}^3$)。図-9の結果より、解析結果は実験結果に比べて実数部分が小さく

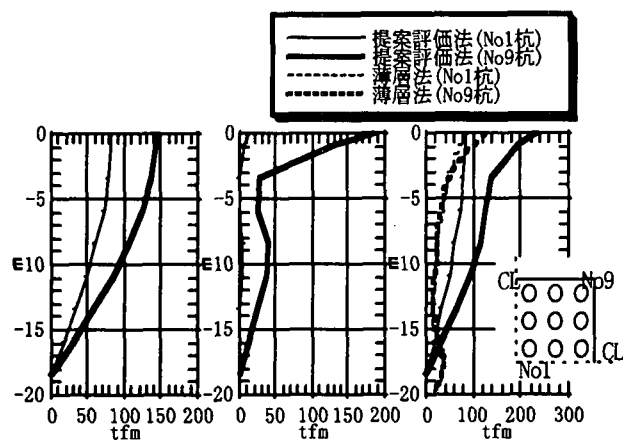


図-8 杭モーメント分布(精算解法との比較)

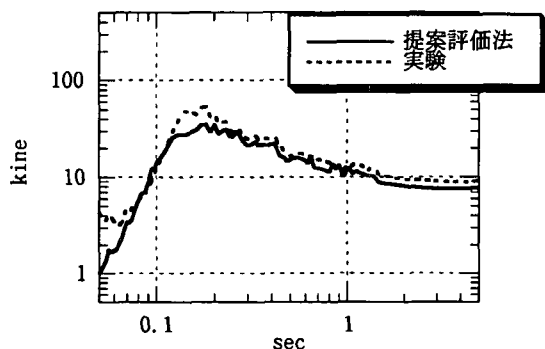


図-10 建屋頂部の応答スペクトル

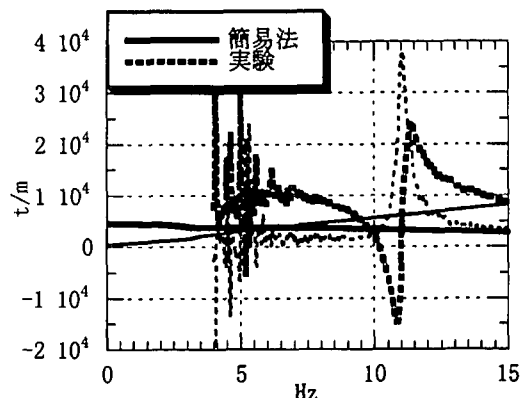


図-9 インピーダンス

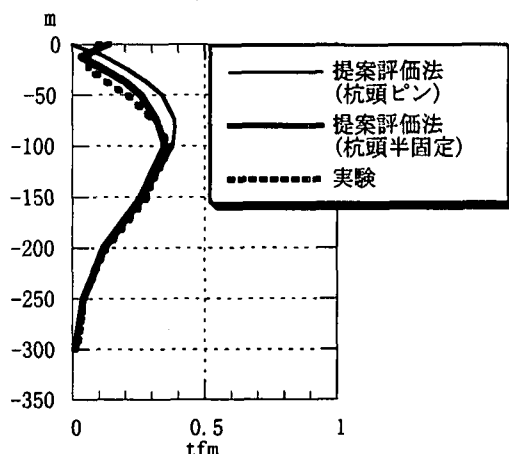


図-11 杭モーメント分布

虚数部分が大きい簡易なモデルを仮定しているにもかかわらず平均的な傾向は概ね表現できている。また、建屋頂部応答波形の速度応答スペクトル($h=3\%$)について比較した結果を図-10に示す。入力地震波は最大加速度を100galに基準化した臨海波である。ここでは、基礎や杭頭部分の剥離による地下逸散減衰効果の減少を模擬するためにインピーダンスの虚数部分を1/2にして応答計算を行った。図-10の結果より、解析結果は実験結果と概ね一致した傾向を示している。さらに、杭応力について比較した結果を図-11に示す。図-11の結果より、杭頭拘束条件を半固定とすることで解析結果は実験結果と概ね一致した傾向を示すことを確認できる。

5. まとめ

基礎部分が地中に埋め込まれた群杭基礎構造物の地震時応答および地震時杭応力を適切かつ簡便に評価できる手法を要素技術を合理的に組み合わせることにより提案した。また、パラメトリックスタディーや実験結果のシミュレーション解析を行い評価手法の妥当性を検討した。その結果、提案手法によれば、比較的簡易な計算法を用いているにもかかわらず、埋め込み群杭基礎の基礎入力動(入力損失効果)とインピーダンスおよび杭応力分担率に関する基本的な性質を評価できることを確認した。また、最終的に評価された各杭の応力も精

算解法や実験による値と概ね対応し、本評価手法の適用性が示された。

謝辞：本研究は、建設省建築研究所とBCSによる「大都市地域における地震防災技術の開発・耐震設計分科会・作業委員会」の研究成果の一部である。主査の東京理科大学井口道雄教授はじめ他の委員からの貴重な助言やご指導を多数頂きました。記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) N.Makris and G.Gazetas: Dynamic Pile-soil-pile Interaction. Part II: Lateral and Seismic Response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, pp145-162, 1992
- 2) 高野, 安井他: サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析 その6) 基礎が埋め込みを有する場合の定式化について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp595-596, 1992
- 3) 原田他: 地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰定数, 土木学会論文報告集, 第339号, pp79-88, 1983
- 4) G.Gazetas and R.Dobry: Horizontal Response of Piles in Layered Soils, J. geotech. eng. ASCE 110, pp20-40, 1984
- 5) 井口, 水野, 飯場, 安井, 杉本, 箕輪他: 大型せん断土槽による杭基礎の地震時挙動説明と杭応力算定法の提案(その1)~(その14), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997(投稿中)