

群杭基礎の相互作用ばねの簡易評価式に関する検討

三輪 滋^{*1}・森伸一郎^{*1}

¹正会員 飛島建設(株) 技術研究所 (〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間が瀬 5472)

Penzien 型モデルは、地盤と杭基礎構造物の非線形地震時挙動を検討する有効な手法の一つである。この手法の実務設計への適用性の向上をはかるため、相互作用ばねと付加質量の簡易評価式について検討を行った。Mindlin- II 解に基づいた式を用いて、影響の大きいと考えられる深さ z 、杭直径 d 、杭本数 n 、杭配置形状 s の 4 つをパラメータとして相互作用ばね、付加質量を求め詳細計算値とした。つぎに、これらが 4 つのパラメータの関数で表現できるとし、基準値にこれらの影響度を表わす関数を乗じる形式で簡易評価式を作成した。また、その適合度についての検討を行った。

Key Word: *Pile Foundation, Soil-Structure-Interaction, Modified Penzien Model, Mindlin's Solution*

1. はじめに

杭基礎構造物の非線形地震時挙動を検討する場合、ばね-質点系でのモデル化が可能な Penzien 型モデルは有効な手法の一つである(文献 1)~5)など。この手法の実務設計への適用性の向上をはかるため、相互作用ばねの簡易評価式について検討を行った。ここでは、著者らが提案した地盤ばねの簡易評価式⁶⁾の改善を図る⁷⁾とともに、新たに付加質量の簡易評価式を開発した。

2. 検討方法

杉村²⁾の方法にならい、Mindlin- II 解を深さ方向に等分布な水平荷重に拡張した式を用いて、影響の大きいと考えられる深さ z 、杭径 d 、杭本数 n 、杭配置形状 s の 4 つをパラメータとして相互作用ばねを求め、これを詳細計算値とした⁶⁾。つぎに、相互作用ばねが、4 つのパラメータの関数として表現できると仮定し、適当な関数を当てはめ、式(1)のように、基準となる相互作用ばね $\alpha \cdot G$ にこれらの影響度を表わす関数 $f1 \sim f4$ を乗じる形式で単位深さ当たりの相互作用ばねを求める簡易評価式を作成した⁷⁾。

付加質量については、モデル化した杭-周辺地盤系の運動エネルギーが、実際の地盤のそれと等価であるとして詳細計算値を求める^{2) 5)}。簡易評価式は相互作用ばねの場合と同様の形式で基準となる付加質量 $\beta \cdot \gamma$ に影響度を表わす関数 $g1 \sim g4$ を乗じる式(2)で表現する。最後に、簡易評価式の結果と詳細

計算値を比較しその適合度についての検討を行った。

$$k_i = \alpha \cdot f1(z) \cdot f2(d) \cdot f3(n) \cdot f4(s) \cdot G \quad (1)$$

$$m_i = \beta \cdot g1(z) \cdot g2(d) \cdot g3(n) \cdot g4(s) \cdot \gamma \quad (2)$$

k_i : 相互作用ばね, m_i : 付加質量, α, β : 係数, $f1, f2, f3, f4, g1, g2, g3, g4$: それぞれのパラメータの影響度を表す関数, G : せん断剛性, γ : 単位体積重量

検討においては、各種の杭の杭径が 0.4 ~ 2.0m 程度であることを考慮して杭直径 d が 1.0m の杭を基準とした。また相互作用ばねを求める地盤の層厚は、有限要素法などでの地盤の層分割が 1m 程度であること、設計的にも 1m 程度に分割して検討することが多いことなどから、1.0m とした。また、ポアソン比はその違いによる影響が小さいこと²⁾ から 0.5 (一定) を仮定した。また、杭直径 d の 20 倍を基準化深さとして整理する。

3. 相互作用ばねの簡易評価式⁷⁾

相互作用ばねについては、文献 6) で検討した式の改善をはかり、基準径の杭(杭径 1m)の単杭の単位深さ当たりの相互作用ばねを基にして、深さ、杭径、杭本数、杭配置形状について補正を行うことで、要求される条件での単位深さ当たりの相互作用ばねの簡易評価式を提案した⁷⁾。式(3)に評価式を示す。

簡易式の適合度を見るために、図-1に式(3)を用いて求めた相互作用ばねと詳細計算値の比をそれぞれ杭径、深さ、本数をパラメータとして示す。両者の違いは概ね 10% 以下であり設計上十分な精度を持っている⁷⁾。

$$k_i = \alpha \cdot f_1(z, n, d) \cdot f_2(d) \cdot f_3(n, d) \cdot f_4(s) \cdot G \quad (3)$$

$$f_1(z, n, d) = f_{1a}(z) \cdot f_{1b}(z, n, d)$$

$$f_{1a}(z) = -0.013/(z/20d) + 1.013$$

$$f_{1b}(z, n, d) = (0.102 \log(n) \cdot \log(z/20d) + 1$$

$$f_2(d) = 0.71(d/d_0) + 0.29$$

$$f_3(n, d) = f_{3a}(n) \cdot f_{3b}(n, d)$$

$$f_{3a}(n) = (3.0 \times 10^{-6} n^2 - 1.8 \times 10^{-2} n + 1.2) n^{0.54} \quad (n=1 \text{ の時は } f_{3a}(1)=1.0)$$

$$f_{3b}(n, d) = \begin{cases} = (0.02(d/d_0) + 0.98) n^{(0.02(d/d_0) - 0.02)} & (d/d_0 \geq 1.0) \\ = (-0.13(d/d_0)^2 + 0.29(d/d_0) + 0.84) \times n^{(-0.12(d/d_0)^2 + 0.27(d/d_0) - 0.15)} & (d/d_0 < 1.0) \end{cases}$$

$$f_4(s) = 0.32s^2 + 0.17s + 1.0$$

ここに k_i : 単位深さ当たりの相互作用ばね定数,
 $\alpha = 9.16$: 基準となる杭 (杭径 $d=1.0\text{m}$) の深さ
 $20d(20\text{m})$ の基準係数でせん断剛性を乗じると単位
 深さ当たりのばね定数となる, z : 深さ, d : 杭直径,
 d_0 : 基準杭直径 ($=1.0\text{m}$), n : 杭本数, s : $\log(m/l)$,
 m/l : 2 辺の長さの比, l : 変形する方向の辺の長さ,
 m : 変形直角方向の辺の長さ, G : せん断剛性

4. 付加質量の簡易評価式の検討

(1) 付加質量におよぼす深さ方向の影響

付加質量についても相互作用ばねと同様の整理を行なった。単杭の付加質量の深さ方向の変化を、基準化深さ ($20d$) で整理したものを図-2 に示す。深さ方向の変化は杭直径によらず概ね同じであることから基準径の杭 (杭直径 $d=1.0\text{m}$) の付加質量の深さ方向の変化をもとに補正係数 g_{1a} を設定した。

群杭の場合の単杭に対する付加質量の深さ方向の変化は複雑なため、基準化深さが 1.0 より浅い場合と、変化がそれほど大きくない 1.0 より深い場合に分けて表す。なお、基準化深さが 1.0 より浅い場合は群杭の本数により、さらに 3 つに場合分けした。それぞれの詳細計算値と補正式を図-3、図-4 に示す。深さ方向の補正式は式 (4) のように表現できる。

$$g_1(z, n, d) = g_{1a}(z, d) \cdot g_{1b}(z, n, d) \quad (4)$$

$$g_{1a}(z, d) = (z/20d) / (-0.05 + 1.05 \cdot (z/20d)) \quad (z/20d \leq 0.15 \text{ では } z/20d = 0.15 \text{ とする})$$

$$g_{1b}(z, n, d) \quad (z/20d < 1)$$

$$= (0.19 \log(n) + 0.35) \cdot \log(z/20d) + 1.40 \quad (n < 40)$$

$$= (0.13 \log(n) + 0.27) \cdot \log(z/20d) - 0.13 \log(n) + 1.43 \quad (40 \leq n < 100)$$

$$= (-2.05 \log(n) + 6.22)(z/20d)^3 + (3.69 \log(n) - 11.93)(z/20d)^2 + (-1.61 \log(n) + 6.29)(z/20d) - 0.04 \log(n) + 0.42 \quad (n \geq 100)$$

$$(z/20d \geq 1) \quad (z/20d \leq 0.15 \text{ では } z/20d = 0.15 \text{ とする})$$

$$= (-0.18 \log(n) + 0.06) \cdot \log(z/20d) + 1 \quad (n \geq 36 \text{ では } n = 36 \text{ とする})$$

ここに z : 深さ, d : 杭直径, n : 杭本数

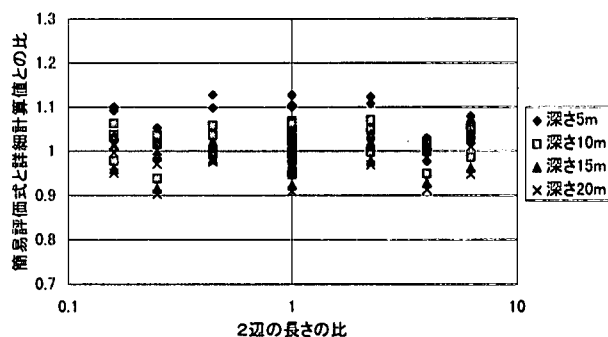


図-1 相互作用ばねの簡易評価式の適合度

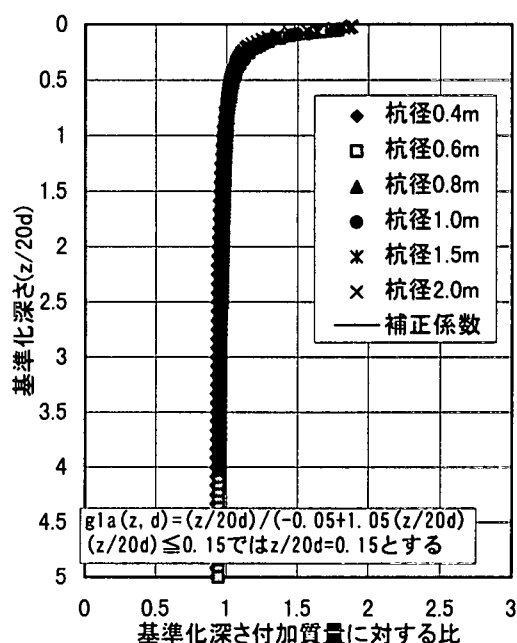


図-2 単杭の付加質量の深さ方向の変化と補正

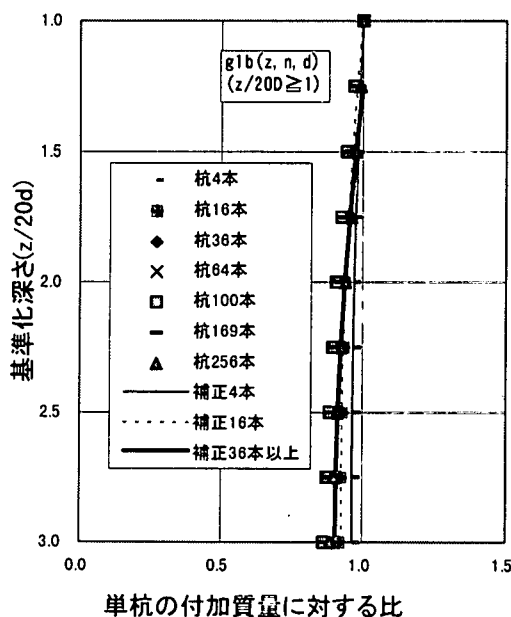


図-3 群杭の基準化深さ 1.0 以深の深さ方向の補正

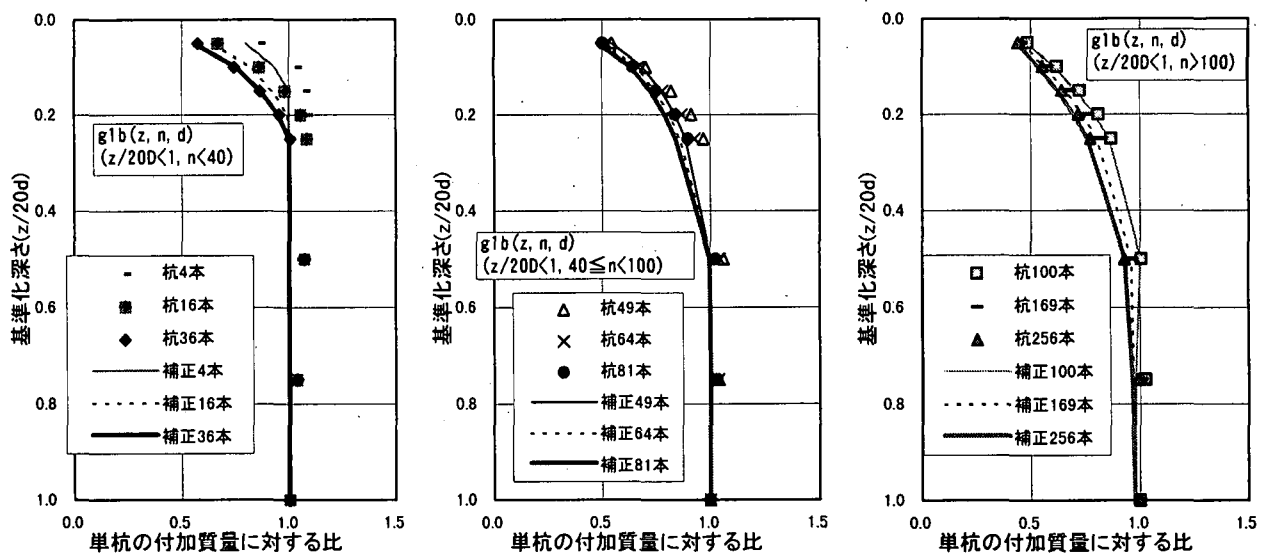


図-4 群杭の基準化深さ 1.0 以浅の深さ方向の付加質量の補正

(2) 付加質量および杭径の影響

図-5に杭径の違いによる付加質量の変化を杭径 1.0m の付加質量を基準として示す。付加質量は杭径が大きくなるにしたがい 2 次関数的に増加する。そこで式 (5)、図-5に示す補正係数を乗じることで考慮する。

$$g2(d/d_0) = 0.6(d/d_0)^2 + 0.21(d/d_0) + 0.19 \quad (5)$$

ここに d_0 : 基準杭直径 (=1.0m)

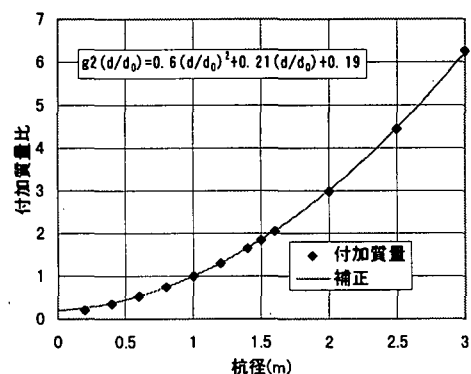


図-5 杭径による付加質量の補正

(3) 付加質量におよぼす杭本数の影響

図-6(a)に杭本数の増加に伴う杭 1 本当たりの付加質量の変化を示す。杭本数が増加するにしたがって杭 1 本当たりの付加質量は大きくなっている。この増加のしかたは杭径によっても異なる。

そこで杭本数の違いの影響は基準杭の単杭に対する本数補正と、杭径による補正に分けて考える。図-6(a)に基準杭の本数による付加質量の変化とその補正係数 $g3a$ を示す。図-6(b)に杭径の違いによる付加質量の変化とその補正係数 $g3b$ を示す。

以上より杭本数による補正は式 (6) で表現する。

$$g3(n, d) = g3a(n)g3b(n, d) \quad (6)$$

$$g3a(n) = n \cdot (3.4 \log(n) + 1)$$

$$g3b(n, d) = \begin{cases} \{-0.23(d/d_0)^2 + 0.44(d/d_0) + 0.79\} \\ \quad \times n^{(-0.27(d/d_0)^2 + 0.61(d/d_0) - 0.34)} & (d/d_0 < 1.0) \\ (0.03(d/d_0) + 0.97)n^{(0.05(d/d_0) - 0.05)} & (d/d_0 \geq 1.0) \end{cases}$$

(4) 付加質量におよぼす杭の配置形状の影響

杭の配置形状による付加質量の変化を見るために、同一本数・同一杭間隔で杭配置つまり縦横の杭本数 (二辺の長さの比) を変えて付加質量を求めた。

図-7にこの付加質量を二辺の長さの比が 1 (正方配列) の場合で基準化して、二辺の長さの比 (変形直角方向の辺の長さの変形する方向に対する比) の対数で整理したものを示す。杭配置の違いによる付加質量は、正方配列の場合を基準として式 (7) に示す補正係数を乗じることで考慮できる。

$$g4(s) = 0.77s^2 - 0.02s + 1.0 \quad (7)$$

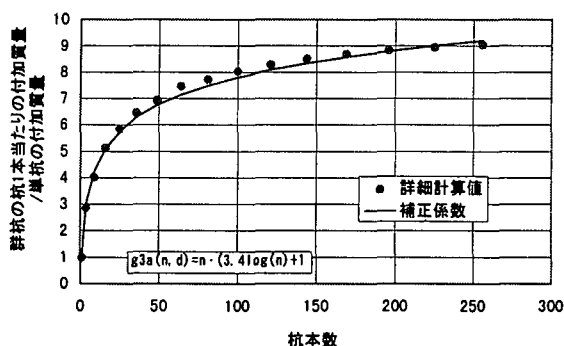
ここに $s: \log(m/l)$, m/l : 二辺の長さの比,
 l : 変形する方向の辺の長さ,
 m : 変形直角方向の辺の長さ

(5) 付加質量の簡易評価式

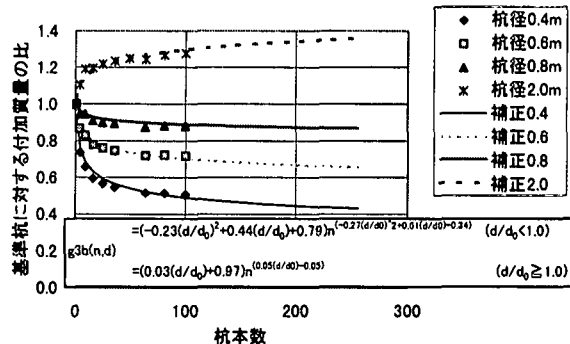
以上の結果を総合して、式 (8) に示すように、杭径 1.0m の単杭の単位深さ当たりの付加質量を基にして、深さ、杭径、杭本数、杭配置形状の補正を行うことで、要求される条件での単位深さ当たりの付加質量を簡易に得ることができる。

$$mi = \beta \cdot g1(z, n, d) \cdot g2(d) \cdot g3(n, d) \cdot g4(s) \cdot \gamma \quad (8)$$

ここに mi : 単位深さ当たりの付加質量



(a) 基準杭の付加質量の変化と補正



(b) 杭径の違いによる群杭の付加質量の変化と補正

図-6 杭本数による付加質量の変化と補正

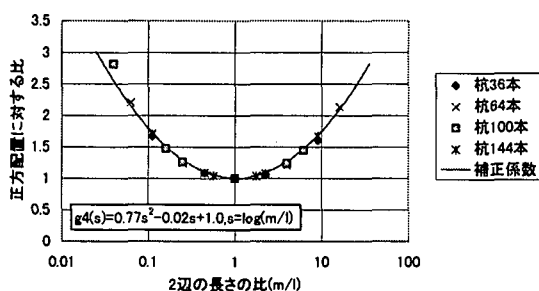


図-7 杭配置形状による付加質量の変化と補正

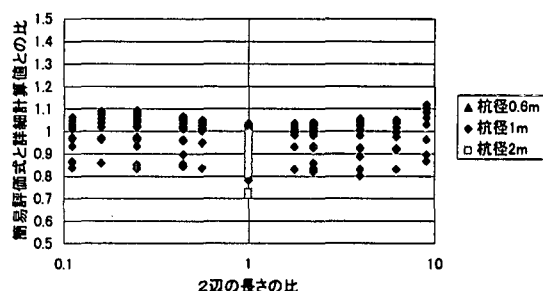


図-8 付加質量の簡易評価式の適合度

$\beta = 1.50$: 基準となる杭 (杭径 $d=1.0\text{m}$) の深さ $20d$ (20m) の基準係数で単位体積重量 γ を乗じると単位深さ当たりの付加質量となる

図-8に式 (8) を用いて求めた付加質量と詳細計算値の比を示す。両者の違いは概ね 20% 程度であり、設計上十分な精度と考えられる。

5. まとめ

実務設計での Penzien 型モデルの適用性向上を目的に Mindlin- II 解を用いて単位深さ当たりの相互作用ばね、および付加質量の簡易評価式を検討・提案した。ここでは、詳細計算値にもとづいて簡易評価式を作成したが、この式を用いて実際の構造物の地震動観測記録との適合性を検討するまでには至っていない。今後、実際の構造物の地震時挙動シミュレーションを実施して、その適用性の検討改善を進めていく必要がある。

謝辞：本研究の一部は、総プロ「大都市地域における地震防災技術の開発」耐震設計作業委員会（委員長：井口道雄東京理科大学教授）の活動の一環として実施したものである。関係各委員の方々のご協力に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) J. Penzien, C.F. Scheffey, R.A. Parmelee: Seismic Analysis of Bridge on Long Piles, Journal of the Engineering Division of ASCE, Vol.90, No.EM3, 1964.4, pp.223-254
- 2) 杉村義広：軟弱地盤における長尺支持くい基礎の地震時振動性状に関する研究，早稲田大学学位論文，1972.10
- 3) 河村壮一：埋立地盤に建つ杭支持構造物の地震動観測と解析，（その 7） Penzien 型モデルと集約型モデル，1975 年度日本建築学会大会学術講演梗概集，1975.10
- 4) 三輪滋，清水勝美，田蔵隆，森伸一郎：杭基礎構造物の動的相互作用解析手法に関する検討－修正 Penzien 型モデルと三次元波動論モデルの比較検討－，第 47 回土木学会年次学術講演会講演概要集（第 I 部門），pp.154-155, 1992.9
- 5) 日本建築学会：『杭基礎構造物の質点系化』，入門・建物と地盤との動的相互作用，pp.194-211，1996.4
- 6) 三輪 滋，森伸一郎：Mindlin- II 解を用いた群杭基礎の相互作用バネの簡易評価式に関する検討，第 27 回土質工学研究発表会，pp.1051-1054, 1992.6
- 7) 三輪 滋，小林恒一，高木政美，王英，石原哲哉：大型せん断土槽による杭基礎の地震時挙動解明と杭応力算定法の提案（その 14）地盤・基礎模型による Penzien 型モデルの評価法の検討－地盤ばねの簡易評価法の提案－，1997 年日本建築学会大会学術講演，1997.9（投稿中）