

杭支持構造物の合理的な地震力評価法

前 田 克 馬*¹ 安 部 晋 司*¹
多 賀 章 *¹

要 旨

本研究では、3次元弾性波動論に基づいた単一層地盤における田治見の解析解を利用して、多層地盤を対象とした単杭の杭頭ばね・杭応力算定法（田治見改良法）の開発を行った。群杭の杭頭ばねへの適用については、単杭の評価は田治見改良法とし、群杭効果は杭相互間の影響係数評価による土方の方法を採用した。

研究目的は、杭頭ばねの算定に動的相互作用を考慮することによって、杭支持構造物の地震力低減を合理的に評価すること、すなわち、経済設計を可能にすることである。

試算例による比較検討の結果、①単杭の杭頭ばね、杭頭慣性力・地盤震動による杭応力は田治見改良法により評価できることが確認できた。また、②杭本数の多い構造物は逸散減衰効果が大きくなることから、耐震的に有利になることが判った。したがって、この種の構造物では建設のコストダウンが期待できるものと考えられる。

キーワード 弾性波動論／杭頭ばね／杭応力／群杭効果／動的相互作用／杭支持構造物／地震力／地盤震動

目 次

- | | |
|---------------|---------------|
| 1. はじめに | |
| 2. 単杭の杭頭ばね算定法 | 4. 試算例による比較検討 |
| 3. 群杭の杭頭ばね算定法 | 5. まとめ |

REASONABLE EVALUATION METHOD FOR SEISMIC FORCE OF STRUCTURES SUPPORTED ON PILES

Katsuma MAEDA
Akira TAGA

Shinji ABE

Synopsis:

In this report, we have developed analytical method (advanced Tajimi's method) of dynamic impedances at a single pile head and pile stress in layers soil, which made good use of Tajimi's analytical solution on wave theory of 3-dimensional elasticity in the homogeneous soil. Dynamic impedances at pile group head were analyzed by the method above and Hijikata's method, which evaluated by interaction factor among piles.

The purpose of this report is to evaluate reasonably reducing seismic force of structures supported on piles, which is obtained by consideration of soil-pile-structure dynamic interaction. The summary is as follows, we wish to design structures economically.

As a result of comparison by analytical examples, ① we ascertained that analytical method of dynamic impedances at a single pile head and pile stress can be evaluated by advanced Tajimi's method. ② In the structures supported on numbers of piles, the effects of radiation damping become more largely, then it seems that cost-cutting of construction work can be expected in case of such structures.

* 1 本店 技術本部 原子力Gr.

1. はじめに

軟弱地盤上に建設される杭支持構造物の地震応答解析には以下の方法がある。

- ・ 一体解法である有限要素法、薄層要素法
- ・ 分離解法であるスウェイ・ロッキングモデル（以下、SRモデル）
- ・ 両者の中間的な解法である Penzien 型のモデル

最近では解析モデルの簡便さや計算効率の面から、SRモデルが多く提案されている^{1), 2)}。しかしながら、これらの提案は単一層地盤を対象としている。

本研究では、多層地盤を対象として、動的相互作用を考慮した単杭の杭頭ばね・杭応力算定法（田治見改良法）の開発を行う。群杭の杭頭ばねへの適用については、単杭の評価は田治見改良法とし、群杭効果は杭相互間の影響係数評価による土方の方法¹⁾を採用する。

単杭の杭頭ばね・杭応力の算定を田治見改良法によって適切に評価できることを確認するため、ならびに群杭の杭頭ばねをSRモデルに適用するために、試算例による比較検討を行う。

2. 単杭の杭頭ばね算定法

単杭の杭頭水平ばねは単位深さあたりの静的水平地盤ばね（以下、静的地盤ばね）と杭の曲げ剛性より求められる。ここでは静的地盤ばねに着目して、その評価法の違いを取り上げると以下ようになる。

①弾性支承上のはり理論（Chang の方法）

- ・ 静的地盤ばねの深さ方向分布を一定とする。例をあげると野添らの Winkler ばね評価³⁾、Francis の簡易式⁴⁾等がある。

②静的 Mindlin 解を用いる方法

1) 山原の側面ばね定数算定式⁵⁾、山本の方法⁶⁾によると、静的地盤ばねは地表面付近では小さく、深くなるとともに大きくなり、一定値に近づく。

2) Penzien の方法⁷⁾によると、円筒の中心軸上に幅をもつ等分布線荷重を作用させると、変位分布は荷重領域内に限定され、ほぼ一定となる。：①の考え方

③3次元弾性波動論に基づいた田治見の解析解⁸⁾

- ・ 地盤の上下変位を拘束しているため、地表近くの静的地盤ばねは基盤（杭先端）付近のそれより大きくなる。原田の側面地盤ばね⁹⁾もこの解析解を利用している。

本研究では、①と③を組み合わせた方法を提案する。具体的には、静的地盤ばねの深さ方向分布を一定とし、3次元弾性波動論に基づいた田治見の解析解を利用して多層地盤に拡張する方法（田治見改良法）を提案する。

田治見改良法の解析条件を以下に示す。

- ・ 地盤は基盤上の多層の粘弾性体表層地盤とする。
- ・ 各層の静的地盤ばねは深さ方向に一定とする。
- ・ 基盤は実状の物性とする。すなわち、表層と基盤の波動インピーダンス比に基づくエネルギー逸散効果を考える。¹⁰⁾

- ・ 外力は杭頭慣性力および地盤震動とする。

上記以外の解析条件は田治見の解析解に準じる。

- ・ 半径 a の円形断面で長さ H 、その先端が基盤に支持されている杭を対象とする。
- ・ 杭頭は構造物に固定され、構造物の慣性力はすべて杭頭に伝えられるものとする。
- ・ 構造物は水平にのみ移動し、ロッキングによる効果は無視する。

以下では、まず無次元化静的地盤ばねの算定法を示し、次に単杭の杭頭水平ばねの算定法を示す。

2.1 無次元化静的地盤ばね

単一層の表層地盤内に埋め込まれ、基盤に支持された円筒基礎の静的問題を考える。

円筒基礎（剛体）の変位分布 $u_t(z)$ を三角形分布（基盤で 0、地表面で 1）と仮定すると（図 -1）、田治見の解析解による静的地盤反力は式 [1] で表される。添字 t は三角形分布を、添字 0 は静的を表す。

$$p_0(z) = G \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \bar{k}_{0n} \cdot u_{tn} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [1]$$

$$\bar{k}_{0n} = \bar{k}_n (\omega=0) \quad [2]$$

$$\bar{k}_n = \pi \left(\frac{\pi a}{2H} \right)^2 \cdot \xi_{sn}^2 \cdot \frac{P_{ab}}{U_{ab}} \quad [3]$$

$$u_{tn} = \frac{8}{n^2 \pi^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \quad [4]$$

$$\frac{P_{ab}}{U_{ab}} = \frac{\bar{K}_\gamma + \bar{K}_\beta + 4}{\bar{K}_\gamma \cdot \bar{K}_\beta + \bar{K}_\gamma + \bar{K}_\beta} \quad [5]$$

ここに、

$\bar{k}_n$: 無次元化動的地盤ばね、 n : フーリエ展開次数

G : 円筒基礎周辺地盤のせん断弾性係数

a : 円筒基礎の半径、 H : 表層地盤の深さ

$$\xi_{sn}^2 = n^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_{gs}} \right)^2 + 2i \left\{ h_{gs} \left(\frac{\omega}{\omega_{gs}} \right) + h_{sn} n^2 \right\}$$

$$\bar{K}_\gamma = \gamma_{na} \cdot K_0(\gamma_{na}) / K_1(\gamma_{na})$$

$$\bar{K}_\beta = \beta_{na} \cdot K_0(\beta_{na}) / K_1(\beta_{na})$$

$$\gamma_n = \frac{\xi_{sn} \cdot \omega_{gs}}{V_p^*}, \quad \beta_n = \frac{\xi_{sn} \cdot \omega_{gs}}{V_s^*}$$

$$V_p^{*2} = V_p^2 (1 + 2i h_p), \quad V_s^{*2} = V_s^2 (1 + 2i h_s)$$

$$C_{gs} = \alpha_s \cdot \rho \cdot \omega_{gs}$$

$$\alpha_s = \frac{(\rho V_s)_{\text{表層}}}{(\rho V_s)_{\text{基盤}}} \div 2 h_{gs}, \quad \omega_{gs} = \frac{\pi V_s}{2H}$$

$K_0()$ 、 $K_1()$: 0次、1次の第2種変形ベッセル関数

円筒基礎を杭として考えると、式 [5] は杭周面から放射方向に或る範囲の地盤（以下、杭接触地盤）とその周囲の地盤が同一の地盤物性の場合である。

以下の算定では、同一の地盤物性の場合を示すが、現実的には杭頭付近で地盤剛性の低下が考えられる。これ

については、放射方向に2種類の地盤物性を考えた「杭接触地盤の剛性低下を考慮する方法」をAppendixに示す。

深さ方向に一定の無次元化静的地盤ばねを次式で定義する。定義する位置は表層地盤の上下変位拘束の影響が小さいと考えられる基盤付近とする ($h_m = H/10$)。添字 c は深さ方向に一定の静的地盤ばねまたはその使用を表す。

$$\begin{aligned} c k_0 &= \left[\frac{1}{h_m} \int_0^{h_m} p_0(z) / G dz \right] / \frac{h_m}{2H} \\ &= \frac{32}{\pi^3} \left(\frac{H}{h_m} \right)^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[1 - \cos \frac{n\pi h_m}{2H} \right] \\ &\quad \cdot k_{0n} \cdot \frac{1}{n^3} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \quad [6] \end{aligned}$$

式 [6] の無次元化静的地盤ばねの実数部を模擬した提案式を式 [7] に示す。

$$\begin{aligned} \bar{E}_h &= \frac{4.9(2a/H)^{0.5+1}}{1-\nu^m} \quad 2a/H \leq 0.5 \\ \bar{E}_h &= \frac{4.9(2a/H)^{0.5+0.5+2a/H}}{1-\nu^m} \quad 2a/H > 0.5 \end{aligned} \quad [7]$$

ここに、 ν : ポアソン比、 $m=1.5-0.2(2a/H)$

図-2 は式 [6] と式 [7] を比較したものである。

提案式 ($\bar{E}_h$) は $c k_0$ に極めて良く一致することから、静的地盤ばねは提案式の分母にほぼ反比例することがわかる。また、静的地盤ばねは G に比例する。

以下の単杭の杭頭水平ばね算定には、最下層地盤の物性を用いて多層地盤を表現するために、図-3 に示すように最下層地盤ばねに対する各層の減少分地盤ばね比を用いる。 G_1 は最下層地盤のせん断弾性係数である。

$$\bar{G}_i = 1 - \frac{G_i}{G_1} \cdot \frac{1-\nu_1^m}{1-\nu_i^m} \quad [8]$$

2.2 単杭の杭頭水平ばね

田治見改良法による、単杭の杭頭水平ばねの算定を静的問題と動的問題に分けて以下に示す。杭頭慣性力 $q_1(z)$ 、地盤震動 $q_2(z)$ による杭応力は静的問題に限定する。

まず、静的問題を考える。杭-多層地盤系の力の釣り合い方程式は次式で表される。

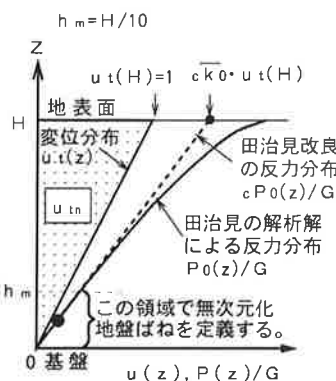


図-1 円筒基礎の地盤反力分布

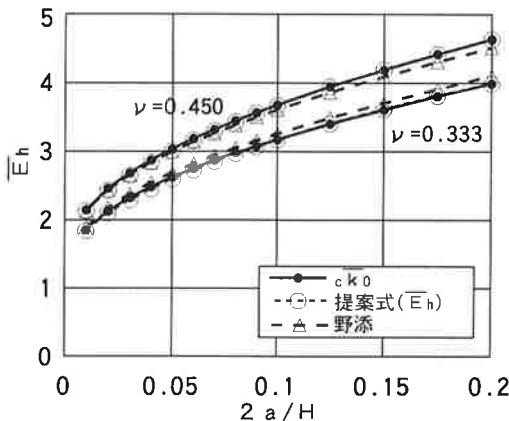


図-2 無次元化静的地盤ばね

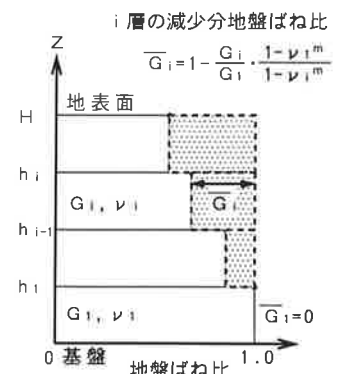


図-3 減少分地盤ばね比

$$EI \frac{\partial^4 c u_0(z)}{\partial z^4} + c p_0(z) = q_1(z) + q_2(z) \quad [9]$$

式 [9] の z の関数をフーリエ級数で展開する。

$$c u_0(z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} u_{0n} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [10]$$

$$\begin{aligned} c p_0(z) &= \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} c k_0 (u_{0n} \\ &\quad - \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot U_{0ni}) \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \end{aligned} \quad [11]$$

$$q_1(z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2V}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [12]$$

$$\begin{aligned} q_2(z) &= \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} c k_0 (D_{0n} \\ &\quad - \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot D_{0ni}) \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \end{aligned} \quad [13]$$

ここに、 $c k_0 = G_1 \cdot c k_0$ 、 L : 層数

$$D_{0ni} = \frac{2}{H} \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} D(z) \sin \frac{n\pi z}{2H} dz$$

$$D_{0n} = D_{0n1} + \dots + D_{0ni} + \dots + D_{0nL}$$

D_{0ni} : i 層地盤震動変位のフーリエ係数

$D(z)$: 地盤震動変位

式 [9] ~ [13] より、杭の静的変位は次式で表される。

$$c u_0(z) = \frac{1}{k_p} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{c F_{0n}}{n^4 + c k_0 / k_p} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [14]$$

$$\begin{aligned} c F_{0n} &= \left[\frac{2V}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} + c k_0 (D_{0n} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot D_{0ni}) + c k_0 \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot U_{0ni} \right] \end{aligned} \quad [15]$$

$$\text{ここに、} U_{0ni} = \frac{2}{H} \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} c u_0(z) \sin \frac{n\pi z}{2H} dz$$

U_{0ni} : i 層杭変位のフーリエ係数

式 [15] の右辺の第3項は、最下層地盤を用いたことによる地盤反力の増加分であり、杭変位に関係する。したがって、最初は、 U_{0ni} を0として、式 [14] により杭変位を求める。2回目以降は、得られた U_{0ni} を用いて同式の繰返し計算を行い、杭変位を収れんさせて求める。また、杭応力についても同様に行う。

$$c M_0(z) = \left(\frac{2H}{\pi} \right)^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n^2 \cdot c F_{0n}}{n^4 + c k_0 / k_p} \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [16]$$

$$c Q_0(z) = \frac{2H}{\pi} \cdot \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n^3 \cdot c F_0 n}{n^4 + c k_0 / k_p} \cos \frac{n\pi z}{2H} \quad [17]$$

以上のように多層地盤では杭変位の収れん計算を要することから、地盤の層分割は細かく、例えば、10層程度に分割する必要がある。

次に、動的問題を考える。杭-多層地盤系の運動方程式を以下に示す。ここでは杭頭水平ばねを算定する。

$$EI \frac{\partial^4 c u(z)}{\partial z^4} + \rho A \frac{\partial^2 c u(z)}{\partial t^2} = [-c p(z) + q_1(z)] e^{i\omega t} \quad [18]$$

式 [18] の z の関数をフーリエ級数で展開する。

$$c u(z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} u_n \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} e^{i\omega t} \quad [19]$$

$$c p(z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} c k_n (u_n - \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot U_{ni}) \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [20]$$

$$q_1(z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2V}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad [21]$$

$$c k_n = G_1 \cdot [\bar{k}_n - (\bar{k}_0 n - c \bar{k}_0)] \quad [22]$$

式 [22] の $\bar{k}_n$ は式 [3] より求められるが、その変数である固有振動数 ω_{gs} は以下の方法で換算する。

多層地盤における1次の換算固有振動数 ω_{gs} は、単一層および多層地盤の伝達関数より求められる1次の共振振動数 ω_r を用いて修正する。

$$\omega_{gs} = \frac{L \omega_r}{s \omega_r} \cdot \frac{\pi V_{s1}}{2H} \quad [23]$$

ここに、 $L \omega_r$: 多層地盤の共振振動数

$s \omega_r$: 最下層単一層地盤の共振振動数

V_{s1} : 最下層地盤のせん断波速度

式 [18] ~ [21] より、杭の動的変位は次式で表される。

$$c u(z) = \frac{1}{k_p} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{c F_n}{n^4 - M_p \omega^2 + c k_n / k_p} \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} e^{i\omega t} \quad [24]$$

$$c F_n = \left[\frac{2V}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} + c k_n \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot U_{ni} \right] \quad [25]$$

外力項の厳密解である式 [25] の右辺第2項の U_{ni} は周波数によって変化するため、式 [25] の近似解を次式に示す。

$$c F_n \approx \left[\frac{2V}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} + c k_n \cdot g(\omega_{j-1}) \cdot \sum_{i=1}^L \bar{G}_i \cdot U_{0ni} \right] \quad [26]$$

$$g(\omega_{j-1}) = \frac{c u(H, \omega_{j-1})}{c u_0(H)} \quad [27]$$

後述の3層表層地盤モデルを例とした、厳密解と近似解による単杭の杭頭水平ばねの比較図(図-4)によると、両者は良く一致する。よって、外力項は式 [26] とすることが可能と考える。

以上より、単杭の動的杭頭水平ばねは、式 [26] において、杭頭慣性力 V を1とする。そして、式 [24] において、 $z=H$ として逆数をとることにより求められる。

なお、杭変位算定式の変数 k_p 、 M_p は杭の EI 、 ρA 等で表されるが、詳細については文献8を参照されたい。

3. 群杭の杭頭ばね算定法

土方による文献1では、杭相互間の影響係数を薄層要素法による2本杭の解析から逆算し、Dobryの方法¹¹⁾に改良を加えている(土方の方法)。すなわち、影響係数を次式で表している。なお、鉛直成分は省略する。

$$\alpha_{Hij}(\theta = 0^\circ) = f_x e^{-h\omega S/VLa} \cdot e^{-i\omega S/VLa} \quad [28]$$

$$\alpha_{Hij}(\theta = 90^\circ) = f_y e^{-h\omega S/Vs} \cdot e^{-i\omega S/Vs} \quad [29]$$

$$f_x = \{0.3 + 0.16 \log(E_p/E_s)\} (B/S)^{0.75} \quad [30]$$

$$f_y = \{0.1 + 0.18 \log(E_p/E_s)\} (B/S)^{0.75} \quad [31]$$

ここに、 B : 杭径、 S : 杭間隔、 h : 減衰定数、 ω : 円振動数、 $VLa = 3.4 Vs / \{\pi(1-\nu)\}$: Lysmerの波動速度

群杭の杭頭水平ばね K_H は、以上の影響係数から次式で求めることができる。

$$K_H = k_H \{1\}^T \{F_H\} \quad \{F_H\} = [\alpha_H]^{-1} \{1\} \quad [32]$$

α_H を多層地盤に適用する場合、単杭の杭頭水平ばね k_H が地表層付近の地盤条件に大きく影響されるため、 α_H の物性値は地表層を用いることとする。 k_H は田治見改良法(式 [24]、式 [26]、式 [27])より求める。

図-5は群杭による低減係数(静的値)を土方の方法と文献12を比較したものである。これより、文献12の低減係数は土方の方法に比べ2倍程度大きいことが解る。

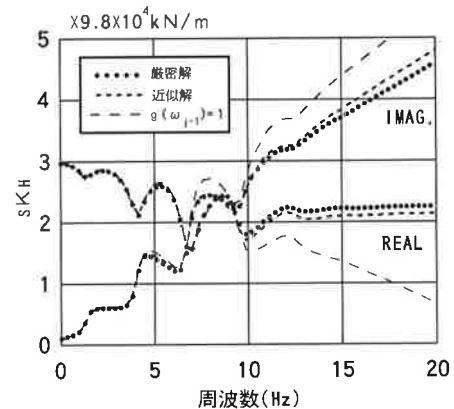


図-4 単杭の杭頭水平ばねの比較

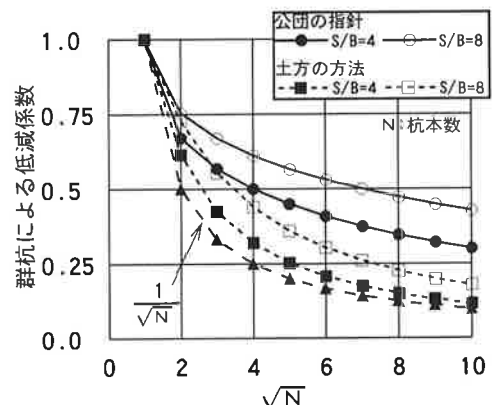


図-5 群杭による低減係数の比較

4. 試算例による比較検討

ここでは杭－多層地盤モデルを想定し、まず、単杭の杭頭水平ばね、杭応力を算定して結果の比較、検討を行う。次に、群杭の杭頭水平ばねを変動させたSRモデル（基礎固定モデル含む）による地震応答解析から杭頭水平ばねの変動が応答に及ぼす影響を検討する。

杭の境界条件は杭頭回転拘束、杭先端ピン支持とする。

4.1 杭頭水平ばね・杭応力の算定

単杭の杭頭水平ばね算定および杭応力算定に用いる単杭－地盤モデルを図-6に示す。

杭応力は杭頭慣性力および地盤震動（地盤の強制変位）による静的応力とする。杭頭慣性力は9.8kNとし、地盤震動および地盤の剛性低下は図-7、図-8に示す値とした。地盤震動は地表面において100Gal相当である。なお、図-6～8の地盤条件等は三浦らの方法¹³⁾を参考にした。

杭応力算定用の杭側面の水平地盤ばねはひとつは分布ばね、もうひとつは杭長を20等分した19の集中ばねとした。分布ばねは田治見改良法である。集中ばねは田治見改良法で適切に評価できることを確認するためのもの

であり、市販の応力算定ソフトを使用した。集中ばね算定の無次元化静的地盤ばねは式[7]より求めた。

単杭の杭頭水平ばね算定結果を図-9に示す。また、杭頭慣性力および地盤震動による杭応力算定結果（変位、曲げモーメント）を図-10に示す。図-10の添字Iは杭頭慣性力を、添字Kは地盤震動を表す。

算定結果をまとめると以下ようになる。

- ・単杭－多層地盤モデルにおいて、杭頭の静的水平変位（杭頭慣性力=9.8kN）は動的杭頭水平ばねの周波数0における値の逆数に一致する。また、杭頭慣性力および地盤震動による杭応力を分布ばねモデル（田治見改良法）と集中ばねモデルで比較すると、地表面のIMの若干の違い（分布ばねと集中ばねの違い）を除けば殆ど良く一致する。
- ・地表面で100Gal程度の地震動の場合、地盤のせん断剛性低下を考慮したモデルの単杭の杭頭水平ばねおよび杭応力は、これを考慮しないモデルの結果とほぼ等しい。すなわち、杭頭水平ばね、杭応力とも地盤のせん断剛性低下による影響は少ない。
- ・地盤震動による杭応力は層の境界に集中するため、杭の設計では注意を要する。

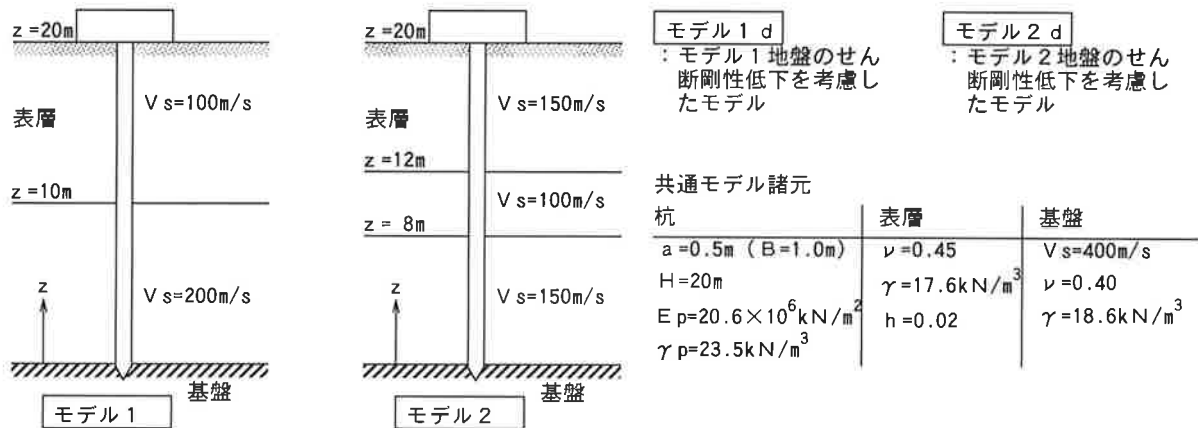


図-6 単杭－地盤モデル

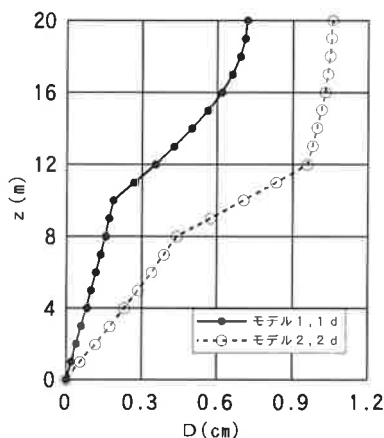


図-7 地盤震動変位

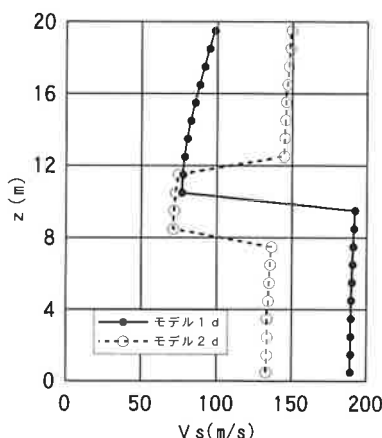


図-8 地盤の剛性低下

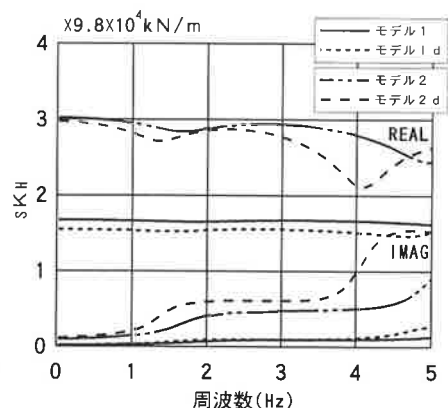


図-9 単杭の杭頭水平ばね

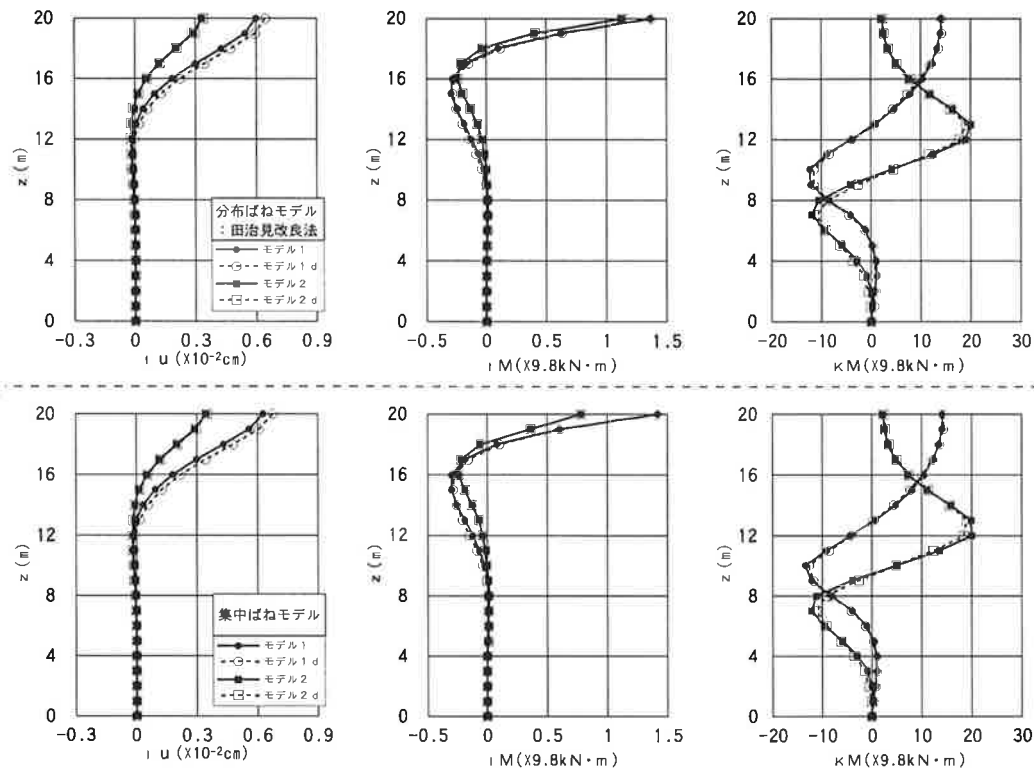


図-10 応力算定結果(u, M)

4.2 杭頭水平ばねを変動させた応答解析

単杭の杭頭水平ばねを一定とした場合、土方の方法¹⁾による群杭の杭頭水平ばねを1とすると、Dobryの方法¹⁾による杭頭水平ばねは約0.5となり、「公団住宅地震入力評価指針・同解説」¹²⁾による杭頭水平ばねは約2となる(図-5参照)。また、「国鉄建造物設計標準解説」¹⁴⁾の群杭係数による杭頭水平ばねは、後図(図-12)の杭配置では約3となる。

そこで、ここでは杭支持構造物(原子力関連施設を想定、杭は場所打ち鉄筋コンクリート杭を想定)のSRモデルによる地震応答解析を実施し、杭頭水平ばねの変動(0.5～3倍の変動)が応答に及ぼす影響を検討する。

杭頭水平ばねは静的ばねを用いるものとし、杭頭回転ばねは単杭の軸剛性による回転ばねとする。

入力地震動は、模擬地震動による成層地盤の一次元波動伝播解析より得られた地表面応答波であり、その加速度時刻歴を図-11に示す。また、杭配置を図-12に示す。

なお、地盤モデルは4.1のモデル1である。

群杭の杭頭水平ばねの算定結果を図-13に、この算定結果を反映した基本SRモデルを図-14に示す。

基本SRモデルの杭頭水平ばねを変動させたSRモデルおよび基礎固定モデルによる応答解析結果を図-15に示す。

解析結果をまとめると以下ようになる。

- ・今回のSRモデルの場合、群杭の杭頭水平ばねの変動が応答に及ぼす影響は小さく、水平ばね反力では変動ばね比の0.3乗程度となった。例えば、杭頭水平ばねが2倍になると、応答は1.2倍程度になる。
- ・SRモデルに田治見改良法と土方の方法による群杭の杭頭水平ばねを適用すると、逸散減衰係数が杭本数に比例するため、杭頭水平ばねの等価減衰定数は大きくなり、その応答値は基礎固定モデルのそれに比べると、ベースシャー係数で約4割弱低減した(1.20 → 0.75)。

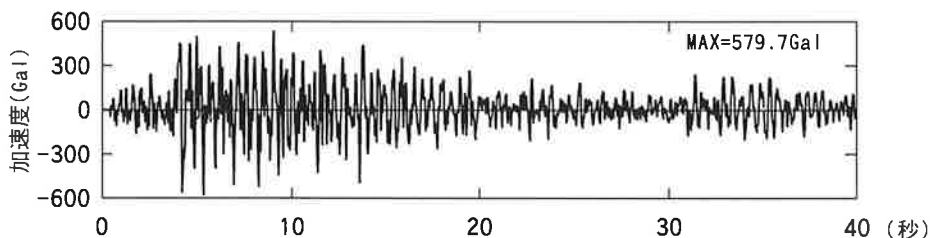


図-11 入力地震動の加速度時刻歴

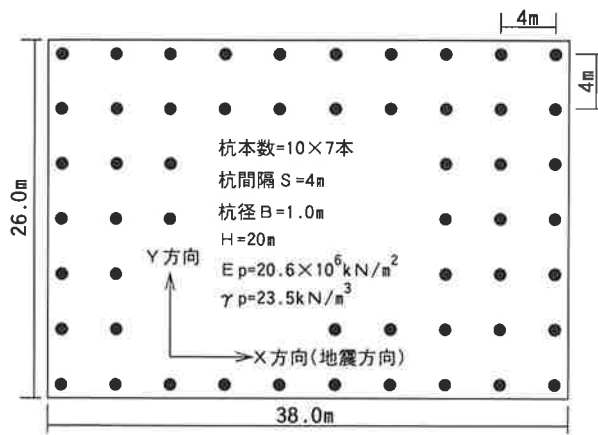


図-12 杭配置

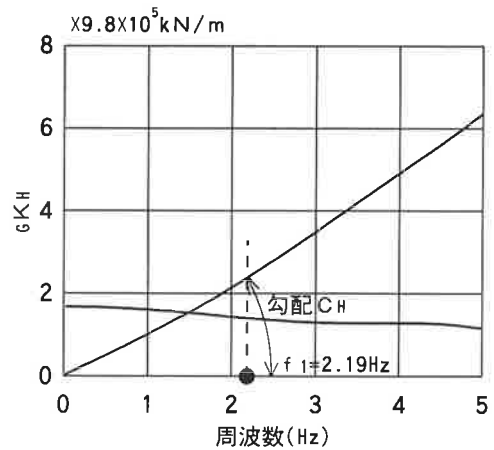


図-13 群杭の杭頭水平ばね

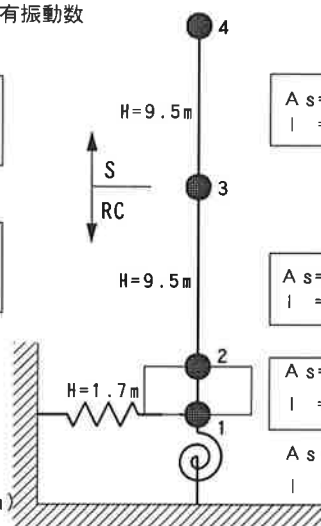
基本SRモデルの一次固有振動数
 $f_1=2.19\text{Hz}$

$$\begin{aligned} E_s &= 20.6 \times 10^7 \text{ kN/m}^2 \\ G_s &= 79.2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2 \\ h_s &= 0.02 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 22.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2 \\ G_c &= 99.6 \times 10^5 \text{ kN/m}^2 \\ h_c &= 0.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_H &= 1.670 \times 10^5 \\ C_H &= 1.727 \times 10^4 \\ K_H (\times 9.8 \text{ kN/m}) \\ C_H (\times 9.8 \text{ kN} \cdot \text{sec/m}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma &= 579.7 \text{ Gal} \\ T &= 40.96 \text{ sec}, \Delta t = 0.01 \text{ sec} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} K_R &= 7.620 \times 10^8 \\ h_R &= 0.05 \\ K_R (\times 9.8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}) \end{aligned}$$

$$W_4 = 780$$

$$\begin{aligned} A_s &= 0.157 \\ I &= \infty \end{aligned}$$

$$W_3 = 1380$$

$$\begin{aligned} A_s &= 42.5 \\ I &= 7010 \end{aligned}$$

$$W_2 = 4290$$

$$I_{g2} = 6.99 \times 10^5$$

$$W_1 = 2010$$

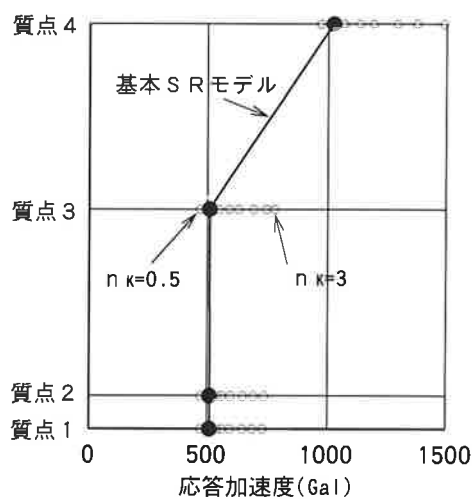
$$I_{g1} = 3.28 \times 10^5$$

$$W (\times 9.8 \text{ kN})$$

$$I_g (\times 9.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$$

$$\Sigma W = 82908 \text{ kN}$$

図-14 基本SRモデル



$$n\kappa : \frac{K_H \text{ 変動モデルの水平ばね定数}}{\text{基本モデルの水平ばね定数}}$$

$$H/W : \frac{\text{水平ばね反力}}{\text{構造物総重量}}$$

$$Q/W : \frac{\text{ベースシャー}}{W_3 + W_4}$$

$$\alpha/g : \frac{\text{応答加速度}}{\text{重力加速度}}$$

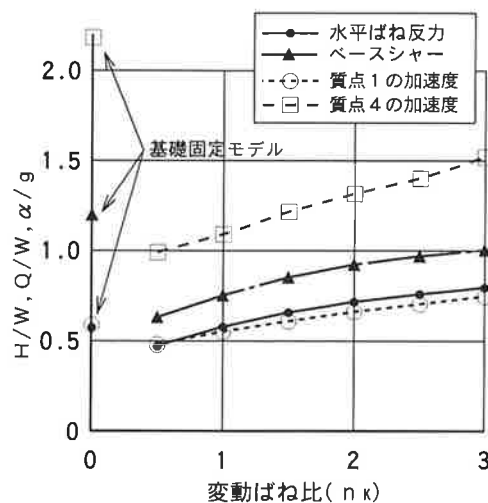


図-15 応答解析結果

5. まとめ

単杭・群杭の杭頭ばね算定法、ならびに試算例による比較検討の結果から、得られた知見をまとめると以下のようになる。

・3次元弾性波動論に基づいた田治見の解析解を用いて基盤付近（杭先端位置に相当）で定義した、無次元化静的水平地盤ばね（式 [6]）は杭径 / 杭長比（ $2a/H$ ）とポアソン比（ ν ）に依存する。この依存性は野添らの Winkler ばね評価からも確認できる（図-2 参照）。

・無次元化静的水平地盤ばねおよび最下層地盤に対する各層の減少分地盤ばね比（式 [8]）を、地盤反力（式 [11]、式 [20]）と地盤震動（式 [13]）に導入することによって、多層地盤における単杭の杭頭水平ばね・杭応力算定が可能になった。

・試算例による杭頭ばね算定の結果、単杭の杭頭水平ばね、杭頭慣性力・地盤震動による杭応力は田治見改良法により評価できることが確認できた。

・試算例による S R モデルの応答解析結果より、杭本数の多い構造物（例えば、清掃工場、火力発電所建屋等）は逸散減衰効果が大きくなることから、応答は小さく耐震的に有利になることが判った。したがって、この種の構造物では建設のコストダウンが期待できるものと考えられる。

なお、杭頭ばね算定および応答解析には、それぞれ自社開発コードの「TEST-3D」、「DAPLUS3」を用いた。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、貴重なご助言を頂いた東京電力株式会社建設部（現 横須賀営業所長）土方勝一郎氏（工学博士）に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土方勝一郎他 2 名：群杭の動的インピーダンス簡便評価法、日本建築学会構造系論文集、第 455 号、1994
- 2) 藤森健史他 4 名：拡張したスウェー・ロッキングモデルによる杭応力評価法、第 5 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、日本建築学会、1998
- 3) 野添久視他 2 名：単杭の鉛直・水平振動特性の簡易評価法、日本建築学会構造系論文報告集、第 438 号、1992
- 4) Francis, A.J.: Analysis of Pile Groups with Flexural Resistance, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM3, 1964
- 5) 山原浩：環境保全のための防振設計、彰国社、S49 年
- 6) 山本鎮男：杭のある構造物のロッキング振動（その 1）、日本建築学会論文報告集、第 125 号、1966
- 7) Penzien: Earthquake Engineering, Ch. 14 1970 Prentice Hall
- 8) 田治見宏：深い基礎を有する剛構造物の地震応答について、第 2 回地震工学シンポジウム論文集、1966
- 9) 原田隆典他 3 名：地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数、土木学会論文報告集、第 339 号、1983

- 10) 吉田一博他 5 名：表層中に埋込まれた構造物の合理的評価法、日本建築学会学術講演梗概集、1996
- 11) Dobry R., Gazetas G.: Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups Geotechnique, Vol. 38, No. 4, 1988
- 12) 住宅・都市整備公団：公団住宅地震入力評価指針・同解説、平成 3 年 3 月
- 13) 三浦賢治他 2 名：杭の地震時応力の実用的な解析法（その 1, 2）、日本建築学会学術講演梗概集、1997
- 14) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、基礎構造物、杭土圧構造物、1986

Apendix 杭接触地盤の剛性低下を考慮する方法

1) P_{ab} 、 U_{ab} の算定

P_{ab} 、 U_{ab} は次式で算定する。同式で $\bar{A}_r = \bar{B}_\beta = 0$ とすれば式 [5] に一致する。

$$P_{ab} = S_{ab} + T_{ab} \quad [A-1]$$

$$U_{ab} = \bar{K}_{r1a+1} + \bar{A}_r (\bar{I}_{r1a-1}) - T_{ab} \quad [A-2]$$

$$S_{ab} = 1 - \bar{A}_r \quad [A-3]$$

$$T_{ab} = (1 - \bar{B}_\beta) \frac{\bar{K}_{r1a+2} + \bar{A}_r (\bar{I}_{r1a-2})}{\bar{K}_{\beta1a+2} + \bar{B}_\beta (\bar{I}_{\beta1a-2})} \quad [A-4]$$

ここに、

$$\begin{aligned} \bar{A}_r &= A_r \frac{I_1(\gamma_{n1a})}{K_1(\gamma_{n1a})} / \frac{I_1(\gamma_{n1b})}{K_1(\gamma_{n1b})} \\ \bar{B}_\beta &= B_\beta \frac{I_1(\beta_{n1a})}{K_1(\beta_{n1a})} / \frac{I_1(\beta_{n1b})}{K_1(\beta_{n1b})} \\ A_r &= \left(1 - \bar{G}_\beta \frac{A + \bar{K}_{r1b}}{A + \bar{K}_{r2b}} \right) / \left(1 - \bar{G}_\beta \frac{A - \bar{I}_{r1b}}{A + \bar{K}_{r2b}} \right) \\ B_\beta &= \left(1 - \bar{G}_\beta \frac{B + \bar{K}_{\beta1b}}{B + \bar{K}_{\beta2b}} \right) / \left(1 - \bar{G}_\beta \frac{B - \bar{I}_{\beta1b}}{B + \bar{K}_{\beta2b}} \right) \\ \bar{G}_\beta &= \frac{G_2^*}{G_1^*} \cdot \frac{\beta_{n2}^2}{\beta_{n1}^2} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \frac{\xi_{sn2}^2}{\xi_{sn1}^2} \\ A &= 1 - \frac{\bar{K}_{r2b+2}}{\bar{K}_{\beta2b+2}}, \quad B = 1 - \frac{\bar{K}_{\beta2b+2}}{\bar{K}_{r2b+2}} \\ \bar{I}_{r1a} &= \gamma_{n1a} \cdot I_0(\gamma_{n1a}) / I_1(\gamma_{n1a}) \\ \bar{I}_{\beta1a} &= \beta_{n1a} \cdot I_0(\beta_{n1a}) / I_1(\beta_{n1a}) \\ I_0(\cdot), I_1(\cdot) &: 0 \text{ 次、1 次の第 1 種変形ベッセル関数} \end{aligned}$$

添字 1, 2 は、それぞれ、杭接触地盤の物性とその周囲の地盤の物性を表す。b：杭接触地盤の半径 (m)

2) $\bar{G}_i$ の算定

$\bar{G}_i$ は各層の無次元化静的地盤ばねを式 [6] より求め、次式で算定する。

$$\bar{G}_i = 1 - \frac{G_i}{G_1} \cdot \frac{\text{REAL}(c \bar{k}_{0i})}{\text{REAL}(c \bar{k}_{01})} \quad [A-5]$$

ここに、

G_1 ：杭接触地盤最下層のせん断弾性係数

G_i ：杭接触地盤 i 層のせん断弾性係数