

地盤反力の三次元的効果を考慮した群杭基礎構造物の 二次元有限要素法解析モデルの作成方法

FORMULATION OF AN ANALYTICAL MODEL OF PILED FOUNDATION FOR TWO-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD CONSIDERING THE EFFECT OF THREE-DIMENSIONAL SUBGRADE REACTION

大平 彰*・田蔵 隆**・中桧 新***・清水勝美****

By Akira OHIRA, Takashi TAZOH, Shin NAKAHI and Katsumi SHIMIZU

An analytical model for two-dimensional finite element method is developed to clarify the behavior of piled foundation subjected to lateral load. The formulation of this procedure is presented and numerical simulations are carried out for two different models of a piled foundation with twenty-five piles. It is found from these simulations that the proposed procedure is useful to evaluate the three-dimensional behavior of piled foundation.

1. ま え が き

有限要素法によって杭基礎の挙動解析を行う場合、地盤をソリッド要素、杭をはり要素でモデル化し、通常はこれを平面ひずみ問題として解析することが多い。この場合、奥行き方向に無限に続く構造系を仮定したことになり、杭はあたかも矢板のような状態で解析されることになる。

しかし、現実の基礎杭は奥行き方向にある杭間隔で配置され、しかもその杭本数は有限である。したがって、上記のようなモデル化によって得られる解析結果が、必ずしも有効な解を与えているという保証はない。

ところが、これを三次元有限要素法で解析しようとする、杭本数および杭配列にもよるが、一般には途方もない節点数および要素数になり、コンピューターのランニングコストの面から考えても実用的でなくなる。

三次元的杭挙動が十分表現できるような二次元有限要素法によるモデル化が可能であれば、設計的にも経済的にもきわめて有効な手段になると考えられる。

過去に行われたこの種の研究として、正木ら¹⁾、長岡ら²⁾、横山ら³⁾、脇田⁴⁾の研究がある。

正木らは橋脚の基礎杭を曲げせん断円筒シェル要素に置換し、軸対称有限要素法解析のためのモデル化の方法を検討している。長岡らは地上式円筒タンクの杭基礎に対して、正木らと同様のモデル化について検討している。横山らは杭基礎の円筒形PC貯水タンクを二次元有限要素法により、近似的に解析することを試みている。脇田は二次元有限要素法により、基礎杭の挙動を解析するためのモデル化の方法として、群杭効率から算定されるばねを杭に付加させる方法を提案している。しかし、いずれの方法も群杭基礎の個々の杭挙動までを評価するには十分ではないと考えられる。

本論文は、二次元有限要素法により群杭基礎の挙動解析を行ううえで、各杭の荷重分担率が三次元モデルと等価になるように杭間の地盤剛性を補正することによって、基礎杭の三次元的挙動を有効に評価し得る解析モデルの作成方法について検討したものである^{5),6)}。

2. 提案する解析手法

(1) 群杭基礎・地盤系の剛性評価

ここでは、平面ひずみ状態を仮定したときの二次元有限要素法解析モデルによる群杭基礎・地盤系の全体剛性

* 正会員 清水建設(株)技術本部技術研究所副所長
(〒135 江東区越中島 3-4-17)

** 正会員 工修 清水建設(株)土木本部設計部

*** 正会員 工修 清水建設(株)技術本部技術研究所

**** 正会員 清水建設(株)技術本部技術研究所

が、三次元モデルの全体剛性に等価になるようにするための方法について考える。

検討の対象とした杭基礎モデルは、図-1に示すような m 列 \times n 列の群杭基礎モデルで、各杭の杭頭は剛なフーチングに結合されているものとし、水平力 $m \cdot n \cdot P$ がフーチングに作用した状態について考える。

三次元モデルの解析によって得られるフーチング部の水平変位を δ^{3d} とし、二次元有限要素法モデルの変位を δ^{2d} とすれば、水平力と変位の関係はそれぞれ、

$$m \cdot n \cdot P = K^{3d} \cdot \delta^{3d} \dots\dots\dots (1)$$

$$m \cdot n \cdot P = K(T)^{2d} \cdot \delta^{2d} \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、 K^{3d} は三次元モデルによる群杭基礎・地盤を全体系で評価したときのばね定数で、 $K(T)^{2d}$ は奥行き方向解析幅を T とした二次元有限要素法解析モデルによる群杭基礎・地盤系のばね定数である。

図-1に示すような m 列 \times n 列からなる群杭基礎を二次元有限要素法で解析する場合、奥行き方向に平面ひずみ状態を仮定し、解析幅は通常杭間隔あるいはフーチング幅を基準にして定めることが多い。たとえば、フーチング幅 W を基準に解析幅 T を考えた場合、杭の解析定数としては、 $(T/W)mEI$ 、 $(T/W)mEA$ が用いられる。外力に関しても同様の換算を行うことから、結果的には解析幅に依存しない解が得られる。

しかし、本論文で述べる二次元有限要素法解析では、外力に関しては奥行き方向解析幅に関係なく $m \cdot n \cdot P$ をそのまま作用させることにする。図-2はこの状態を解析幅 T に関して図示したものであるが、特にはり要素でモデル化される杭を強調的に描いている。

いま、 δ^{2d} が δ^{3d} に一致したときの T を T^* とすると、式(1)および式(2)において、

$$K^{3d} = K(T^*)^{2d} \dots\dots\dots (3)$$

でなければならない。

ここで、 K^{3d} および $K(T^*)^{2d}$ に対して、次のような定義を行う。

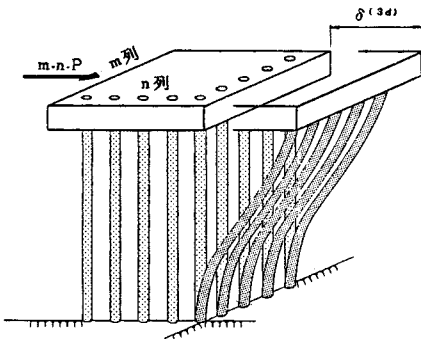


図-1 m 列 \times n 列の群杭基礎モデル

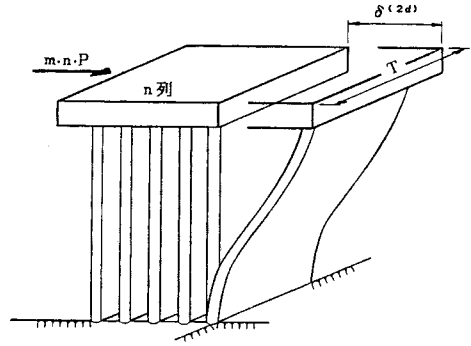


図-2 平面ひずみ問題としたときの二次元有限要素法モデル

$$K^{3d} = \eta^{3d} \cdot m \cdot n \cdot K_0^{3d} \dots\dots\dots (4)$$

$$K(T^*)^{2d} = \eta^{2d} \cdot (T^*/T^1) \cdot n \cdot K_{0,n}^{2d} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 η^{3d} は m 列 \times n 列の杭基礎の三次元モデルに対する群杭効率、 η^{2d} は二次元有限要素法解析において、 n 列杭モデルを解析した場合の単列杭モデルに対する群杭効率、 K_0^{3d} は単杭の三次元モデルに関するばね定数、 $K_{0,n}^{2d}$ は二次元有限要素法解析において、解析幅を $T = T^1$ (T^1 は任意である) としたときの単列杭モデルのばね定数である。

特に本論文では、二次元有限要素法モデルの杭に対して、単列杭あるいは n 列杭といった表現を多く用いるが、これは三次元モデルにおける杭との混同を避けるためである。

$\alpha = T^*/T^1$ として、式(4)および式(5)を式(3)に代入すると、

$$\alpha = m \cdot (\eta^{3d} \cdot K_0^{3d}) / (\eta^{2d} \cdot K_{0,n}^{2d}) \dots\dots\dots (6)$$

となる。

K_0^{3d} は単杭・地盤系に関する軸対称有限要素法解析などから、水平力 P に対する杭頭変位 δ_0^{3d} より、

$$K_0^{3d} = P / \delta_0^{3d} \dots\dots\dots (7)$$

で求められる。 $K_{0,n}^{2d}$ は奥行き方向解析幅を $T = T^1$ とした単列杭モデルの二次元有限要素法解析において、水平力 P に対する杭頭変位 δ_0^{2d} から、

$$K_{0,n}^{2d} = P / \delta_0^{2d} \dots\dots\dots (8)$$

によって計算できる。

また、二次元有限要素法モデルの群杭効率 η^{2d} は、 n 列杭モデルにおいて、水平力 $n \cdot P$ を作用させたときの変位 δ_n^{2d} から、

$$\eta^{2d} = \delta_0^{2d} / \delta_n^{2d} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

これより、同じ外力に対して、三次元モデルの解析で得られる変位と同じ変位を二次元有限要素法解析で得るために必要な奥行き方向解析幅 T^* は、式(7)、式(8)および式(9)を式(6)に代入することによって、次式のように得られる。

$$T^* = \alpha \cdot T^1$$

$$= m \cdot \eta^{3d} \cdot (\delta_n^{3d} / \delta_0^{3d}) \cdot T^1 \dots \dots \dots (10)$$

さて、式(10)において、 δ_0^{3d} および δ_n^{3d} は上述したような解析から容易に求めることができる。しかし、群杭効率 η^{3d} に関しては、この場合三次元解析を行わなければ得られない諸量である。

群杭効率に関する研究は、これまで多くの研究者によって行われており、本論文では η^{3d} は、既往の実験、実測データに基づく経験式、あるいは解析的研究による理論式⁷⁾⁻⁹⁾ などから与えられるものとする。

(2) 各杭の荷重分担率に対する検討

前節では、同一の水平外力に対して、三次元解析による変位と同じ変位を二次元有限要素法解析で得るためには、二次元解析における奥行き方向解析幅 T^* をどのように定めればよいかについて考えた。そのため、各解析モデルの群杭基礎・地盤を全体系でとらえ、そのばね定数を K^{3d} あるいは $K(T)^{2d}$ で評価した。

しかし、前節での検討は、基礎系の全体的挙動を把握するうえでは有効であると考えられるが、1本ごとの杭挙動評価といった観点からは十分でないことが懸念される。

群杭効率とは、杭相互の力学的干渉によって生じる杭・地盤系の支持力低下の割合で、前節における η^{3d} あるいは η^{2d} は、それを群杭基礎・地盤の全体系で定義したものになっている。

既往の研究成果が示すように、群杭効率は群杭を構成する各杭の支持力低下に起因し、その値は各杭の支持力低下率の平均値である。

しかし、各杭の支持力低下は、杭自身の剛性の低下によるものではなく、杭の変形に伴う地盤反力の干渉による地盤支持力の見掛け上の低下である。そして、その低下率は配置された杭の位置によって異なり、一般に内部の杭ほどその値は大きくなる。

各杭の支持力低下がそれぞれ異なるということは、解析的にも個々にその低下率を考慮しなければならないことを示唆し、それらが十分反映されたモデル化を行わなければ、各杭の挙動が有効に評価されたことにならないと考えられる。

そこで、本節では二次元有限要素法モデルにおいて、各杭の支持力低下が三次元モデルの支持力低下に等価になるようにするためにはどのようにすればよいかについて検討を行う。

前節と同様、図-1に示した群杭モデルにおいて、フーチングに水平力 $m \cdot n \cdot P$ が載荷した場合について考える。

三次元モデルと二次元モデルの各杭の荷重分担力を対比しようとした場合、二次元モデルで得られるものは、

列杭としての荷重分担力である。そこでここでは、三次元モデルの荷重分担力に対しては、奥行き方向にある杭本数 m の総和をとることとする。総和をとって対比する理由は、二次元解析においても外力 $m \cdot n \cdot P$ を作用させた解析を行うことから、二次元解析によって得られる荷重分担力は、三次元モデルの杭列の奥行き方向の総和に対応するからである。

ところで、フーチングが剛で各杭の杭頭がフーチングに結合されていれば、すべての杭の杭頭変位は同じになる。したがって、この場合の群杭モデルは、並列ばねモデルとして取り扱うことができる。並列ばねモデルの性質から、各杭の荷重分担力とばね定数の間には比例関係が成り立ち、両モデルの荷重分担力の対応を図ることはばね定数を一致させることに等しいといえる。

三次元モデルの各杭のばね定数として、 k_j^{3d} を定義し、さらにその奥行き方向の杭本数 m の総和を k_j^{*3d} と書くことにする。つまり、

$$k_j^{*3d} = \sum_i^m k_{ij}^{3d} \dots \dots \dots (11)$$

である。

いま、二次元有限要素法モデルの列杭・地盤ばねを補正する係数として、 β_j を定義すると、これは、

$$k_j^{*3d} - \beta_j \cdot k_j^{2d} = 0 \dots \dots \dots (12)$$

を満たすものでなければならない。

ここで、 k_j^{*3d} および k_j^{2d} を荷重分担率 η_j^{3d} および η_j^{2d} を用いて、

$$k_j^{*3d} = \eta_j^{3d} \cdot m \cdot K_0^{3d} \dots \dots \dots (13)$$

$$k_j^{2d} = \eta_j^{2d} \cdot K_{0,n}^{2d} \dots \dots \dots (14)$$

と表わすことにすると、

$$\beta_j = \eta_j^{3d} \cdot m \cdot K_0^{3d} / (\eta_j^{2d} \cdot K_{0,n}^{2d}) \dots \dots \dots (15)$$

となる。ここに、 $\bar{\eta}_j^{3d}$ は j 列杭の平均荷重分担率で、

$$\bar{\eta}_j^{3d} = (1/m) \sum_i^m \eta_{ij}^{3d} \dots \dots \dots (16)$$

である。なお、三次元モデルの荷重分担率 η_j^{3d} および $\bar{\eta}_j^{3d}$ と二次元モデルの荷重分担率 η_j^{2d} の関係を模式的に示すと、図-3のように描ける。

また、式(6)より、

$$m \cdot K_0^{3d} / K_{0,n}^{2d} = \alpha \cdot \eta^{2d} / \eta^{3d} \dots \dots \dots (17)$$

であるから、 $\xi = \eta^{2d} / \eta^{3d}$ とし、式(15)に式(17)を代入すれば、

$$\beta_j = \alpha \cdot \xi \cdot \bar{\eta}_j^{3d} / \eta_j^{2d} \dots \dots \dots (18)$$

と書ける。

すなわち、二次元有限要素法モデルにおいて、各列杭のばね定数 k_j^{2d} を形成する各要素の剛性に β_j を乗ずれば、三次元モデルに対応する荷重分担力が作用した解析が行える。

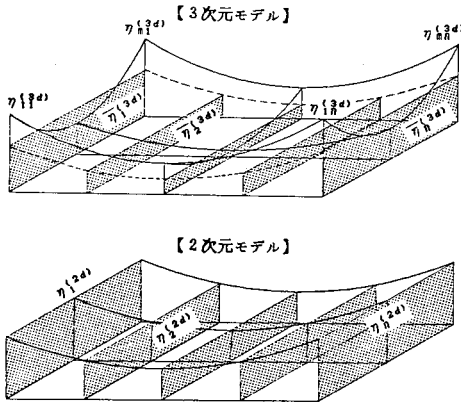
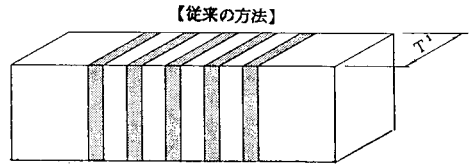


図-3 三次元モデルと二次元モデルの荷重分担率に関する模式図



■ 杭部分
□ 地盤部分

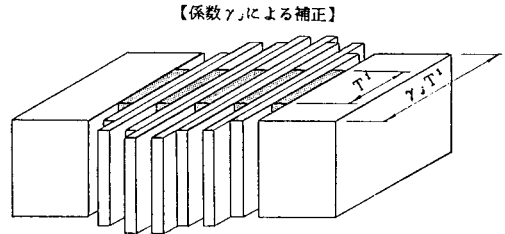


図-5 従来のモデル化の方法と γ によるモデル化の方法の地盤厚 T の比較概念図

(3) 杭間の地盤剛性を補正する係数 γ

前節で示した β_i は、二次元有限要素法モデルの列杭・地盤ばねに乗ずる係数であり、この β_i の補正により二次元モデルの列杭・地盤ばねを三次元モデルと等価にすることができる。しかし、この列杭・地盤ばねは、杭と地盤の両者の剛性によって形成されるばねであるため、 β_i による補正は杭と地盤の両者の剛性にかかわることになる。

先述したように、各杭の支持力低下は杭間地盤の見掛け上の剛性低下であることから、 β_i を杭の剛性にも乗ずることは有効でないと考えられる。しかも、各杭の剛性に β_i を乗ずると、杭本数が奥行き方向に同じであるにもかかわらず、各列杭の剛性が解析上個々に異なることになり、問題の本質を失いかねない。

本節では式(12)の関係を乱さないで、地盤の剛性だけを補正する係数 γ について検討する。

平面ひずみ状態を仮定した有限要素法モデルでは、奥行き方向解析幅と剛性は比例関係にあることから、ここでは単列杭の二次元有限要素法モデルにおいて、地盤部の奥行き方向解析幅 T を変化させたときの列杭・地盤ばね定数 $k^{(2d)}$ について考えることにする。それがたとえば、図-4 のように与えられていれば、式(12)における $k^{*(3d)}$ と $k^{(2d)}$ に対応する奥行き方向解析幅 $T^{(3d)}$ およ

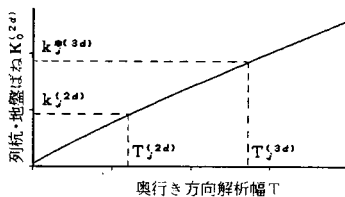


図-4 地盤部の奥行き方向解析幅 $T \sim$ 列杭・地盤ばね定数 $K_0^{(2d)}$ 曲線

び $T^{(3d)}$ が算定できる。これより、 $k^{(2d)}$ と $k^{*(3d)}$ が一致するように、当初任意に定めた解析幅 T' を補正する係数として γ を得ることができる。つまり、

$$\gamma = T^{(3d)} / T^{(2d)} \dots \dots \dots (19)$$

である。これより、杭間の地盤要素の解析幅は $\gamma \cdot T'$ となる。

この方法を用いれば、任意の地層構成からなる地盤を対象にした場合でも、単列杭に対する二次元有限要素法解析から、奥行き方向解析幅 T と $K_0^{(2d)} (= P / \delta^{(2d)})$ の関係を求めておけば、容易に係数 γ を得ることができる。

係数 γ によって、杭間地盤の奥行き方向解析幅 T' を $T^{(3d)}$ に補正するモデル化の方法と従来のモデル化の方法を概念図により比較すると、図-5 のように描ける。係数 γ によるモデル化の方法は、杭間地盤の解析幅 $T^{(3d)}$ を変化させることによって、杭の変形に伴う地盤反力の三次元的効果を得ようとした方法であるといえる。

つまり、係数 γ は式(12)の β_i に対して、

$$\beta_i = k^{*(3d)} / k^{(2d)} \rightarrow T^{(3d)} / T^{(2d)} = \gamma_i \dots \dots \dots (20)$$

としたことに相当する。

この場合、二次元有限要素法モデルにおいて、係数 γ を乗じる領域を的確に定めなければならないという問題が生じる。しかし、有限要素法モデルにおいて、各列杭の地盤ばねを形成する領域を規定するための一般的な方法はないと考えられる。なぜならば、この場合地盤ばねは解析領域内のすべての要素の連成効果によって形成されるものであるから、ここではその近似的措置として、各杭間の地盤要素を2分した領域に対して、その補正を行うことにする。また、補正は地盤の深さ方向に一定とした。

3. 提案した解析手法の有効性検証のための数値実験

提案した解析手法の有効性の検証を行うために、5列×5列の群杭基礎モデルに対して数値実験を試みた。本章ではその検討結果について述べる。

ここでは、地盤を1層の均質地盤とした場合と、途中に中間支持層がある場合の2つのケースについて考え、いずれも三次元有限要素法による解析結果に対して、提案した解析手法の有効性に関する検討を行った。

(1) 1層地盤の場合の解析結果

図-6に対象とした群杭基礎の三次元有限要素法モデルを示す。三次元有限要素法解析では、杭をシェル要素、地盤を三次元ソリッド要素でモデル化した。なお、解析モデルは対称性を考慮し、4分の1モデルとした。この場合の節点数は4041、要素数は4224である。

図-7は単杭に対する三次元有限要素法モデルを示したものである。この場合も4分の1の解析モデル(節点数540、要素数384)とした。

図-8および図-9に、図-6および図-7の杭頭部付近を拡大したものを示す。解析定数としては、表-1に示すような地盤定数および杭定数を用いた。

二次元有限要素法解析のための解析モデルは図-10に示すとおりである。解析モデルは対称性を考慮し、2

分の1モデルとした。節点数は189で、要素数は188である。なお、二次元有限要素法解析では、杭ははり要素でモデル化し、地盤は二次元ソリッド要素によりモデル化した。

外力条件としては、フーチングに水平力 $m \cdot n \cdot P = 25 \text{ tf}$ ($P = 1 \text{ tf}$) を作用させた。フーチングは剛体であると仮定し、三次元解析では各杭の杭頭変位が同値になるような解析方法を用い、二次元解析ではフーチングを剛性の高いはり要素によりモデル化した。また、これらの解析はすべて杭頭回転拘束および杭先端固定とした。

図-11は三次元有限要素法解析によって得られた各杭の荷重分担率ならびに荷重分担力について示したものである。この群杭モデルに対して、小坪・高西らの理論⁸⁾に基づいて計算した各杭の荷重分担率および荷重分担力

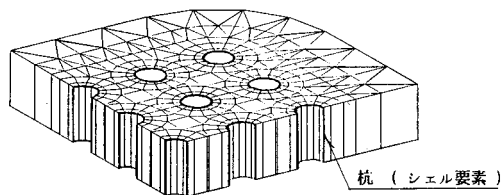


図-8 5列×5列杭モデルの杭頭拡大図

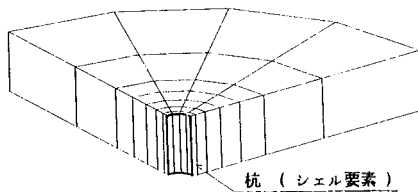
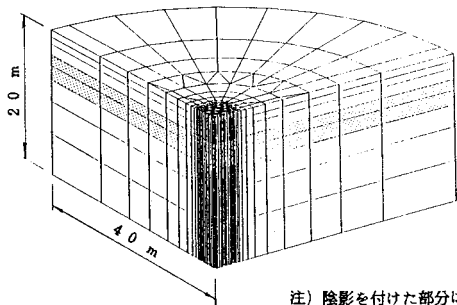
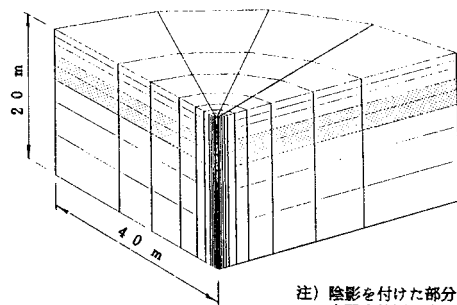


図-9 単杭モデルの杭頭拡大図



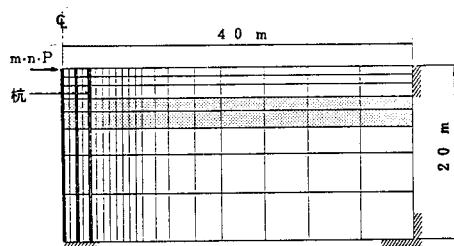
注) 陰影を付けた部分は中間支持層を表す。

図-6 三次元有限要素法モデル (5列×5列杭モデル)



注) 陰影を付けた部分は中間支持層を表す。

図-7 三次元有限要素法モデル (単杭モデル)

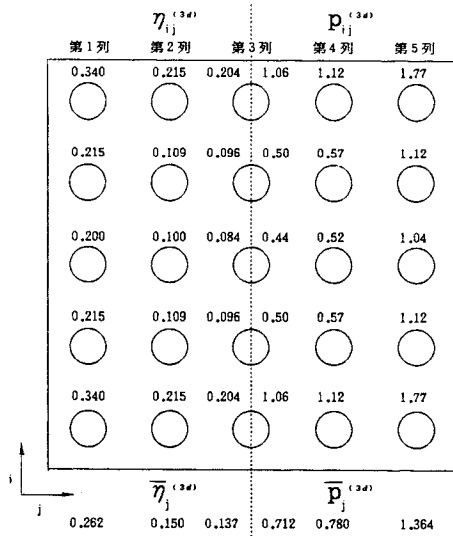


注) 陰影を付けた部分は中間支持層を表す。

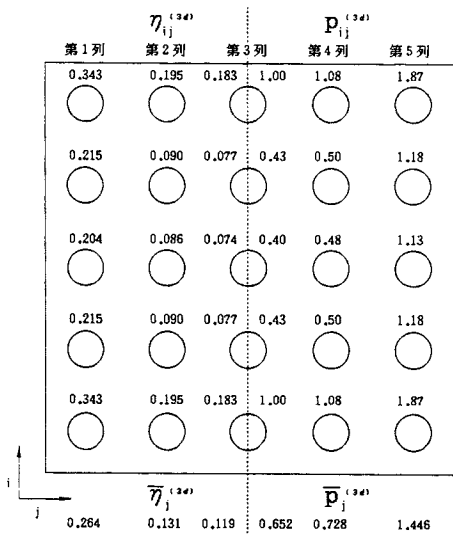
図-10 二次元有限要素法モデル (5列杭モデル)

表-1 解析に用いた地盤および杭の定数 (1層地盤の場合)

地盤定数	杭の諸元	杭の境界条件
$E = 1,000 \text{ tf/m}^2$ $\nu = 0.3$	$E = 2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ $\nu = 0.3$ $I = 7.2974 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ $l = 20.0 \text{ m}$ $\phi = 600 \text{ mm}$ $t = 9 \text{ mm}$	杭頭: 回転拘束 杭先端: 固定 杭間隔: $2.5 \phi = 1.5 \text{ m}$



図一11 三次元有限要素法解析による荷重分担率 η_{ij}^{3d} および荷重分担力 p_{ij}^{3d} (1層地盤の場合)



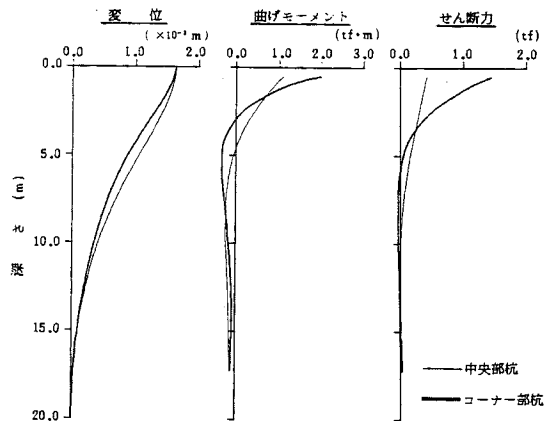
図一12 小坪・高西理論による荷重分担率 η_{ij}^{3d} および荷重分担力 p_{ij}^{3d} (1層地盤の場合)

を図一12に示す。小坪・高西らの解は三次元弾性論に基づく厳密解で、これと図一11の結果を比較すると、両者はよく対応していることがわかる。これより、三次元有限要素法による解析はメッシュ分割ならびに解析領域の設定上の問題に対して、信頼できる結果を与えていると考えられる。

三次元有限要素法解析による群杭基礎・地盤モデルの全体系ばね定数 K^{3d} 、フーチング変位 δ^{3d} および群杭効率 η^{3d} と、単杭・地盤モデルのばね定数 K^{2d} 、杭頭変位 δ^{2d} を表一2に示した。

表一2 三次元および二次元有限要素法モデルのばね定数、杭頭変位および群杭効率の比較 (1層地盤の場合)

モデル	ばね定数、杭頭変位、群杭効率		外力	
3 次元	全体系	K^{3d} δ^{3d}	15,230tf/m 1.642×10^{-3} m	25tf
	単杭	K^{2d} δ^{2d}	3,170tf/m 3.155×10^{-4} m	1tf
	群杭効率	η^{3d}	0.192	—
2 次元	全体系	K^{2d} δ^{2d}	7,340tf/m 3.408×10^{-3} m	25tf
	単列杭	K^{2d} δ^{2d}	5,040tf/m 0.992×10^{-3} m	5tf
	群杭効率	η^{2d}	0.291	—



図一13 三次元有限要素法解析によるフーチング中央部とコーナー部の杭挙動の比較 (1層地盤の場合)

図一13は三次元解析によって得られた中央部の杭 ($i=3, j=3$) とコーナー部の杭 ($i=1, j=5$) の変位、曲げモーメントおよびせん断力の分布形状を対比したものである。これより、群杭を構成している各杭の挙動は杭の位置によって大きく変化していることが理解できる。

二次元有限要素法モデルの奥行き方向解析幅は、フーチング幅に一致させ、 $T^1=7.5$ mとした。また、この場合の杭の解析定数は、1本の杭定数の m (奥行き方向にある杭本数 $m=5$) 倍とした。

この解析による結果を表一2に示した。いずれの値も三次元解析の結果と大きく異なっていることがわかる。

以上の解析結果から、式(6)あるいは式(10)で示した α および式(19)の γ を計算すると、表一3のようになる。この場合の γ は、単列杭に対する二次元有限要素法解析において、地盤部の奥行き方向解析幅 T に関して作成した $T \sim K^{2d}$ の関係図 (図一14参照) から定めた。このときの T^{2d} の値を表一4に示す。

表一3の γ の値から、これは当初定めた地盤部の解析幅 $T^1=7.5$ m をおよそ2~3倍にしなければ、二次元

表-3 補正係数 α および γ_j の値 (1層地盤の場合)

α	γ_j		
	第1列 第5列	第2列 第4列	第3列
2.076	2.041	2.762	3.000

表-4 γ 補正に用いた k_j^{3d} , T_j^{3d} および k_j^{2d} , T_j^{2d} の値 (1層地盤の場合)

モデル	杭・地盤ばね および解析幅	第1列 第5列	第2列 第4列	第3列
3次元 モデル	k_j^{3d} (tf/m)	4,160	2,370	2,170
	T_j^{3d} (m)	6,000	3,160	2,850
2次元 モデル	k_j^{2d} (tf/m)	2,230	1,010	870
	T_j^{2d} (m)	2,940	1,140	0,950

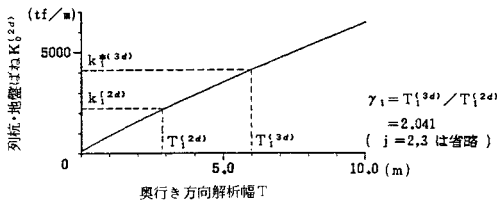


図-14 奥行き方向解析幅 T ~ 列杭・地盤ばね定数 K_0 曲線

有限要素法解析で杭基礎の三次元挙動を有効に評価することができないことがわかる。

図-15 に三次元有限要素法解析結果と係数 α および係数 γ_j を用いて行った二次元有限要素法解析結果を示す。比較のために、従来のモデル化による解析結果も同図に示した。

これより、従来のモデル化の方法では、杭の変位は二倍程度大きくなっていることがわかる。一方、係数 α および係数 γ_j を用いた解析では、杭頭変位はいずれも三次元解析の結果によく一致しているが、杭の深さ方向の変位分布に関してはわずかな違いがみられる。ただし、係数 γ_j による解析結果は、係数 α の場合と比較して三次元解析の結果に近づく傾向にあることを示している。

曲げモーメントについては、従来の方法ではやや過大評価の傾向を示す。係数 α による解析では、従来の方法の解析モデルの奥行き方向解析幅 T^1 を単純に α 倍したものであるから、従来の方法による解析結果と一致する。一方、係数 γ_j による解析では、三次元解析の結果によく近似しているが、完全であるとはいえない。この原因の1つとして、有限要素法モデルにおいて、係数 γ_j を乗ずる領域設定の問題があると考えられる。

せん断力に関しては、従来のモデル化の方法を適用しても三次元解析の結果と同等の結果を与えており、解析モデルの違いによる影響は少ないといえる。

ところで、従来のモデル化の方法による杭の変位が、係数 γ_j による解析の場合に比較して2倍程度大きく

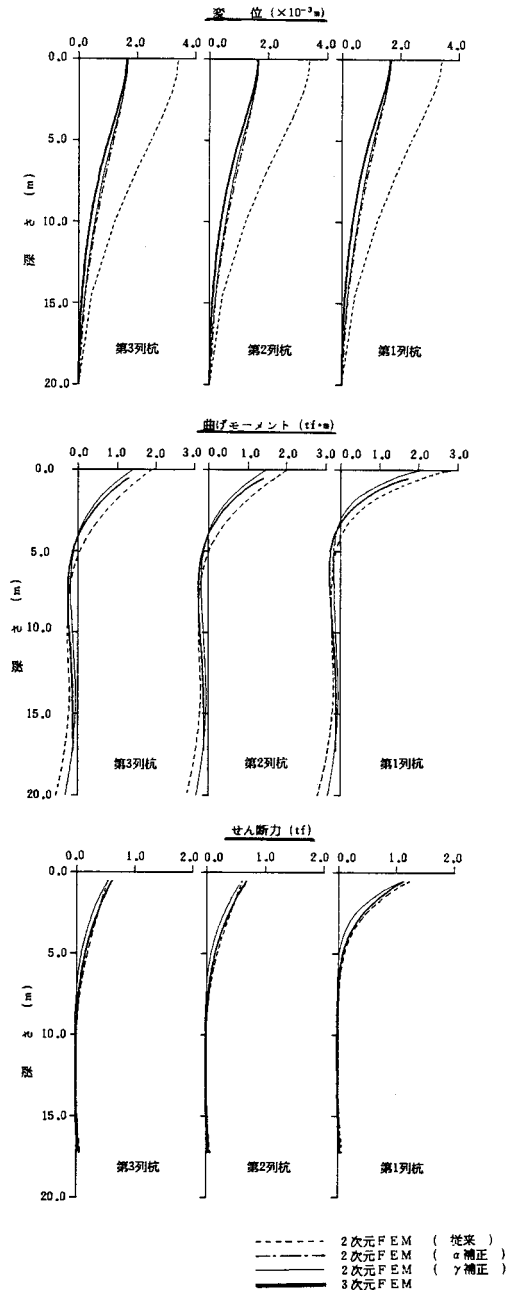


図-15 三次元および二次元有限要素法解析結果の対比 (1層地盤の場合)

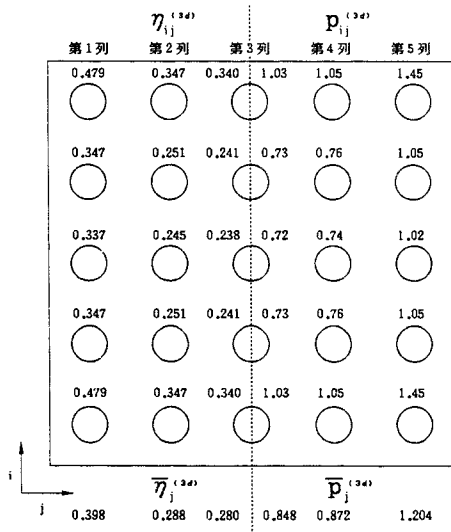
なっているにもかかわらず、断面力に関する両者の比がそれほど大きくない結果になっている。これに関しては、地盤係数が異なる弾性床の上のりの解析において (係数 γ_j による補正によって地盤係数が変化した場合を想定)、変位の比が曲げモーメントの比には対応しないことから理解できよう。

表一五 解析に用いた地盤および杭の定数
(中間支持層がある場合)

地盤定数	杭の諸元	杭の境界条件
$E=1,000\text{tf/m}^2$ $\nu=0.3$	$E=2.1 \times 10^7 \text{tf/m}^2$ $\nu=0.3$ $I=7.2974 \times 10^{-4} \text{m}^4$	杭頭: 回転拘束 杭先端: 固定
中間支持層 $E=10,000\text{tf/m}^2$ $\nu=0.3$	$\phi=20.0\text{m}$ $\phi=600\text{mm}$ $t=9\text{mm}$	杭間隔: $2.5\phi=1.5\text{m}$

表一六 三次元および二次元有限要素法モデルのばね定数, 杭頭変位および群杭効率の比較 (中間支持層がある場合)

モデル	ばね定数, 杭頭変位, 群杭効率	外力	
3次元	全体系 $K^{(3d)}$ $\delta^{(3d)}$	$33,170\text{tf/m}$ $7.538 \times 10^{-4} \text{m}$	25tf
	単列杭 $K_j^{(3d)}$ $\delta_j^{(3d)}$	$4,020\text{tf/m}$ $2.488 \times 10^{-4} \text{m}$	
	群杭効率 $\eta^{(3d)}$	0.330	
2次元	全体系 $K^{(2d)}$ $\delta^{(2d)}$	$16,490\text{tf/m}$ $1.516 \times 10^{-3} \text{m}$	25tf
	単列杭 $K_j^{(2d)}$ $\delta_j^{(2d)}$	$8,917\text{tf/m}$ $5.607 \times 10^{-4} \text{m}$	
	群杭効率 $\eta^{(2d)}$	0.370	



図一六 三次元有限要素法解析による荷重分担率 η_j^{2d} および荷重分担力 P_j^{2d} (中間支持層がある場合)

(2) 中間支持層がある場合の解析結果

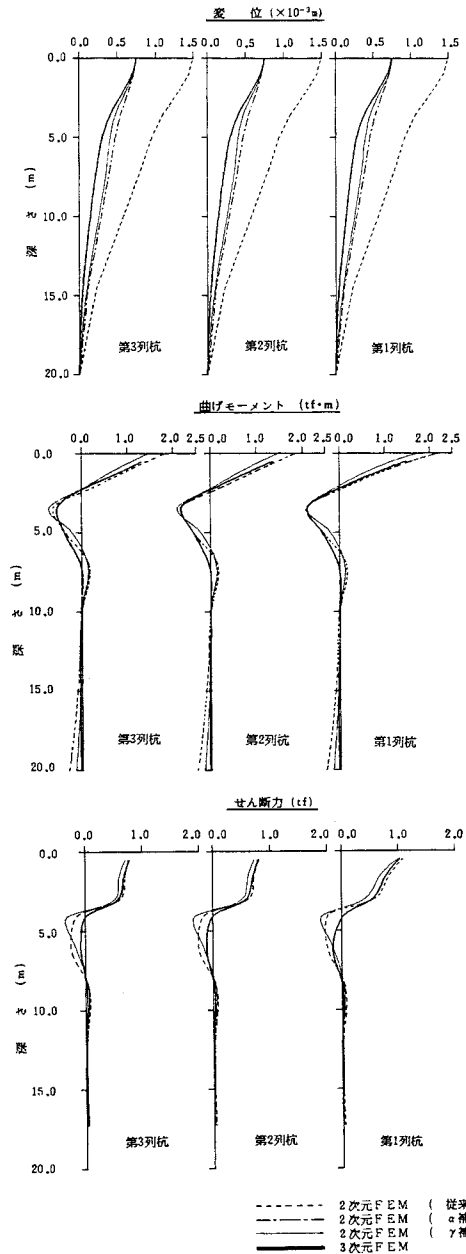
解析モデルは1層地盤の場合と同じモデルを用いた。中間支持層は図一六, 図一七および図一十において, 陰影を付けた部分とした。また, 解析定数は表一五のとおりである。

解析手順に関しても, 1層地盤の場合と同様とした。

表一六に三次元有限要素法による解析結果と $T'=7.5\text{m}$ として行った二次元有限要素法解析結果を示す。図一六は三次元解析によって得られた各杭の荷重分担率および荷重分担力を示したものである。また, 係数 α

表一七 補正係数 α および γ_j の値 (中間支持層がある場合)

α	γ_j		
	第1列 第5列	第2列 第4列	第3列
2.011	2.261	2.663	2.740



図一七 三次元および二次元有限要素法解析結果の対比 (中間支持層がある場合)

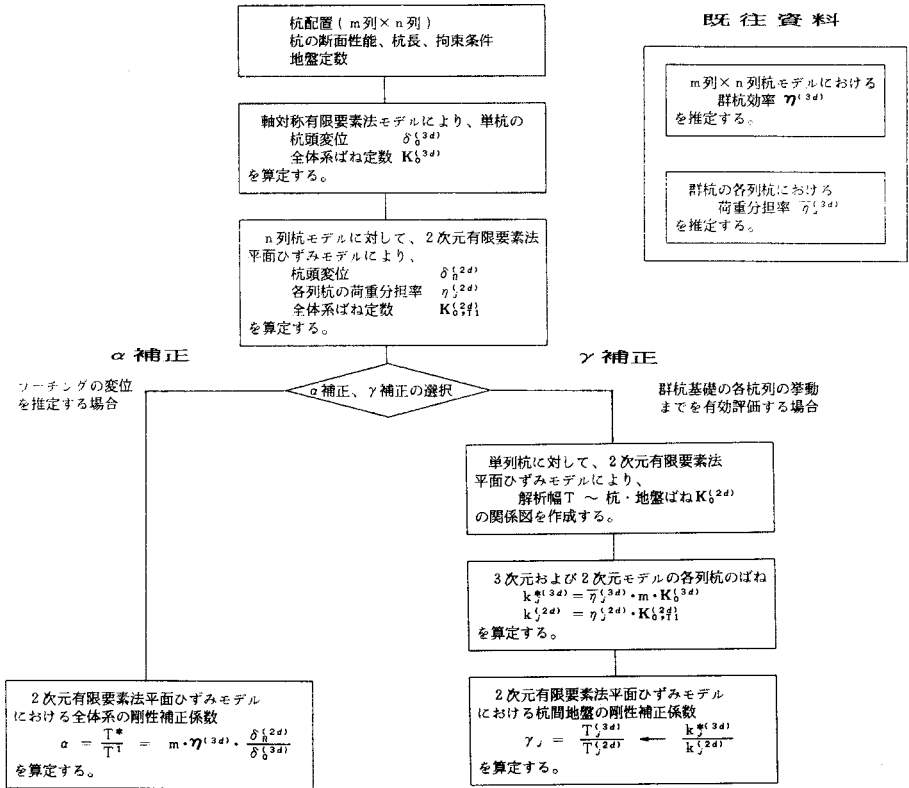


図-18 提案した二次元有限要素解析モデルの作成のフローチャート

および係数 γ_j の値を表-7に示した。

1層地盤の場合と比較して、中間支持層がある場合、 $\eta^{(3d)}$ は大きくなり、また各杭の荷重分担率に関しても両者の傾向には差がみられる。 γ_j の値は2.0~3.0の間にあるが、値の格差は1層地盤の場合ほど大きくない。

提案した解析手法に基づく解析結果を図-17に示す。解析結果に関しては、杭の変位、曲げモーメントおよびせん断力いずれも1層地盤の場合と同様の考察が可能であると考えられる。

4. まとめ

本論文は、m列×n列の群杭基礎の三次元的挙動を二次元有限要素法によって有効に解析するための手法について検討したものである。検討結果をまとめると以下のようになる。

(1) 従来のモデル化の方法では変位が過大に評価される。その原因としては、従来のモデル化では地盤反力の三次元的効果が十分評価できないためと考えられる。

(2) フーチングの変位を推定するには、解析モデルの奥行き方向解析幅 T を、式(10)で与えられる T^* として解析を行えばよい。

(3) 式(19)で与えられる γ_j を算定し、各杭間の地

盤剛性を補正したモデル化を行えば、群杭基礎の各杭列の挙動までを有効に評価することができる。

なお、本論文において提案した解析モデル作成のフローチャートを示すと、図-18のように描ける。

5. あとがき

平面ひずみ状態を仮定して、杭の挙動解析を行う場合、最大の難点は杭の変形に伴う地盤反力の三次元的効果が解析上無視されるところにある。また、群杭基礎では群杭効果という現象が発生し、通常のモデル化による二次元有限要素法解析ではその現象を忠実に表現することができない。

本解析手法における特徴は、杭間地盤の奥行き方向解析幅 $T_j^{(2d)}$ を変えることによって、地盤の地層構成に影響されずに地盤反力の三次元的効果を解析結果に反映させようとしたことと、さらに、 $T_j^{(2d)}$ の算定において三次元モデルの荷重分担率を考慮した点にある。

この場合、地盤の剛性を変化させることによって同様の効果を得ることができるが、地盤の地層構成が複雑であるとき、それらを互いにどのような基準によって変化させるかという点で、その方法は一般性を欠くことになる。

地盤の剛性を変えずに奥行き方向解析幅 T を変化させるという方法は、群杭基礎の地震時挙動の解析においてまた別の意義が考えられる。それは、剛性と同時に質量も同じ割合で変化させることができ、地盤の固有周期を一定に保つことができるからである。群杭基礎の地震時挙動の問題に関しては、今後研究を進める予定である。

ところで、係数 γ_i によって杭間地盤の奥行き方向解析幅 T_i^{3d} を変化させた解析を行う場合、荷重分担率 η_i^{3d} を正しく推定する必要がある。この問題に関しては、今後の研究に待つ面が大きいといえよう。

謝 辞：本研究を進めるうえで、九州大学工学部小坪清真教授ならびに烏野 清助教授から貴重なご意見を賜った。また、群杭基礎の荷重分担率算定のためのプログラムの利用に関して、九州工業大学 高西照彦助教授ならびに九州大学大学院生 若原敏裕氏に多大なご便宜を図って頂いた。記して感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 正木義春・富岡好雄・後藤洋三・小出忠男・前田安治・高森貞彦：軟弱地盤中の杭基礎橋脚の振動特性，第4回日本地震工学シンポジウム，pp. 527～534，1975年11月。
- 2) 長岡弘明・榊 信昭・岡本 隆・大塚博一・横山幸満・吉田 映：強震を受けた地上式低温金属二重殻貯槽の挙動解析，日本鋼管技報，No. 88，pp. 95～104，1981年1月。
- 3) 横山正義・泉 博允・西橋秀一・杉原 豊：杭基礎構造物の地震時挙動と連成振動解析，第18回土質工学研究発表会，pp. 595～598，1983年6月。
- 4) 脇田英治：水平力を受ける群杭基礎の二次元有限要素法による解析，土と基礎，Vol. 27，No. 9，pp. 35～42，1979年9月。
- 5) 田蔵 隆・中松 新・清水勝美・木全宏之・時田秀往・古川慎一：二次元有限要素法による群杭基礎構造物に対する新しい解析手法の提案（その1解析手法について），第19回土質工学研究発表会，pp. 725～728，1984年6月。
- 6) 田蔵 隆・中松 新・清水勝美・木全宏之・時田秀往・古川慎一：二次元有限要素法による群杭基礎構造物に対する新しい解析手法の提案（その2数値シミュレーション），第19回土質工学研究発表会，pp. 729～732，1984年6月。
- 7) 小坪清真・高西照彦：不規則な配置をもつ杭径の異なる群杭に対する横方向群杭効果の解析法，土木学会論文報告集，第277号，pp. 15～24，1978年9月。
- 8) 小坪清真・高西照彦・烏野 清・園田敏矢：多柱基礎の横方向荷重分担率と群杭効果，土木学会論文報告集，第312号，pp. 15～26，1981年8月。
- 9) 高西照彦・若原敏裕：水平方向群杭効率の簡易計算式，九州工業大学研究報告，No. 46，pp. 1～9，1983年3月。（1984. 3. 12・受付）