

(16) 矢板式基礎の構造解析

建設省 塩井幸武・岡原美知夫・○光家康夫

要旨

矢板式基礎は、約10年程前に開発された新しい基礎形式であるが、その施工上の有利さからその施工実績は近年非常に増加しつつある。しかしその構造特性が十分につかみきれていないことや、実績の少なさ等の理由により、重要構造物の基礎としては在来基礎形式にとって替るほどの位置はつかみ得ていないのが実情である。

そこで3次元有限要素法を用いた解析プログラムを作成し、それを用いた矢板式基礎の構造解析を行なった。その結果、矢板式基礎の構造特性に大きな影響を与える構造要素を抽出することができた。

このような3次元有限要素法による解析は、実際現象を非常によく捉えているのではあるが、計算のために莫大な時間と費用を要する。そこでより実用性の高い実用計算式を提案し、それによる解析プログラムを作成した。さらにこの実用計算式の精度を確認するために、3次元有限要素法による計算値および実際の矢板式基礎の載荷試験結果との比較を行なった。その結果非常によい対応を示した。

この実用計算式をより容易に利用できることを目的として、くい基礎と矢板式基礎とをつなぐインターアクションカーブを作成した。

1. 構造解析

1.1 3次元解析プログラム

矢板式基礎は、施工はくいとして行なわれるが、その施工後の形状はケーソンに近いものであり、それら2つの基礎形式の中間的存在であると言える。その挙動は矢板間をつなぐ継手の剛性に大きく左右され、継手の剛性が大きい場合はケーソン基礎に近く、剛性がゼロの場合はくい基礎そのものになる。

このような複合体の挙動をとうえるには、次のような変形を考慮する必要がある。

- (i) 矢板式基礎全体の棒としての変形
- (ii) 矢板間の継手のずれ変形
- (iii) 矢板式基礎全体を井筒とみなした時の井筒の断面形状の変形
- (iv) 矢板式基礎全体を井筒とみなした時の井筒周長の伸張変形

実際の変形は(i)～(iv)の変形の組み合わせとして表われると思われる。これらの変形を3次元的に扱うために、矢板式基礎を深さ方向の一定長さで輪切りにした有限要素を考え、3次元の有限要素法を適用した。なおこの際、地盤は要素に分割するのではなく、ばね支承におきかえて解析を行なった。継手および地盤ばねは弾塑性特性を持つものとして扱った。

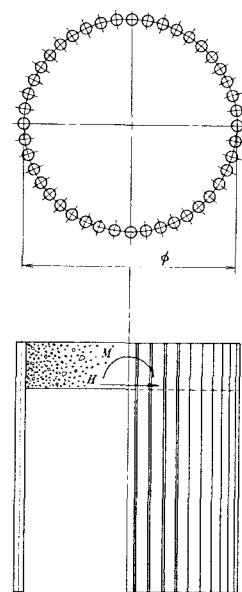


Fig.1 Sheet pile foundation

1.2 解析モデル

Fig 1 に示す形状を持つ外径 $\phi 15.488\text{ m}$ 、根入れ深さ 20.000 m の矢板式基礎を用いる。矢板断面は $\phi 800\text{ mm} \times \text{t} 14\text{ mm}$ の鋼管に $\phi 165.2\text{ mm} \times \text{t} 7.1\text{ mm}$ の継手管を接合したものである。計算に用いる地盤条件をFig 2 に示す。

1.3 考慮するパラメーター

次のパラメーターについて検討する。

$$\gamma_1 = \frac{k_{n1}}{k_{n2}}$$

k_{n1} : 前面の地盤の反力係数

k_{n2} : 背面の地盤の反力係数

$$\gamma_2 = \frac{l_1}{l_0}$$

l_1 : 背面の地盤反力係数を減少させる区間

l_0 : 16 m

$$\gamma_3 = \frac{k_{ni}}{k_{ni}(N=25)}$$

: N 値が25の場合を基準と

した水平地盤反力係数比

$$\gamma_4 = \frac{K_v}{K_v(N=50)}$$

: 底面地盤バネ定数比

$$\gamma_5 = \frac{G}{G_0}$$

: 継手の剛性比 $G_0 = 120,000\text{ t/m}^2$

1.4 応力特性

Fig 3 に、Fig 2 の地盤条件で継手剛性 $G = 12,000\text{ t/m}^2$ の場合の応力分布を示す。図中 Pile 1 とあるのは、もっとも前面にある矢板、Pile 23 は 1 と対称の位置にあるもっとも背面にある矢板である。前面と背面の地盤反力係数の違いにより、Pile 1 と Pile 23 の応力分布が対称形にならない。くい頭部最大応力 σ_1 と地中部最大応力 σ_2 に着目して、パラメーター γ_1 と γ_5 との相関を調べたのが Fig 4 である。前背面の地盤反力係数および継手剛性が、くい体応力に大きく影響していることがわかる。この図より、前背面の地盤反力係数の差が大きいほど、継手の剛性が小さいほど、大きな応力を生じていることがわかる。

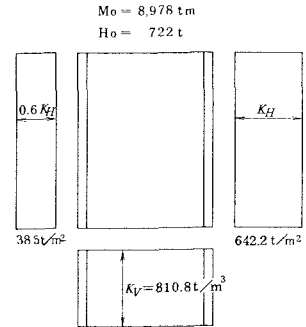


Fig.2 Model used for structural analysis

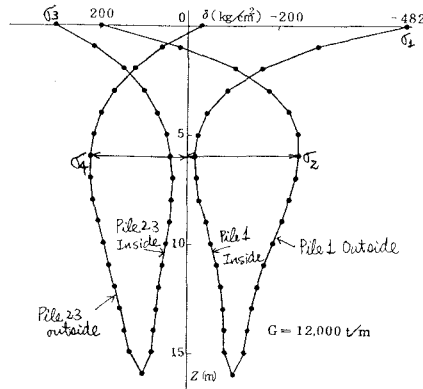


Fig.3 Stress distribution

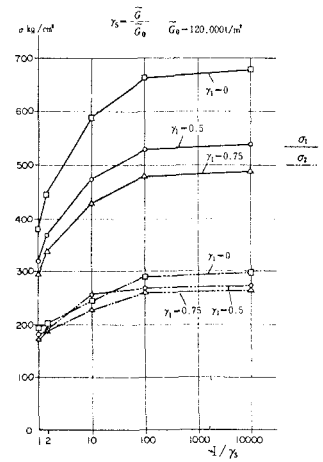


Fig.4 Relation between stress and shear strength

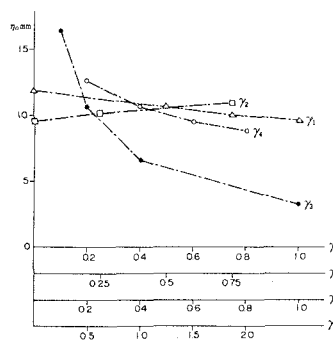


Fig.5 Relation between displacement and some parameter

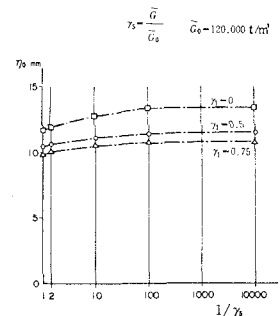


Fig.6 Relation between displacement and shear strength

1.5 水平変位特性

Fig 5 よりフーチング下面の水平変位は η_1 、 η_2 、 η_4 にほとんど影響されず、水平反力係数のパラメータである α に非常に敏感である。矢板式基礎の設計においては水平方向反力係数の推定が非常に大きな意味を持つことを示している。Fig 6 において継手のせん断剛性が水平変位にほとんど影響しないことが注目される。

以上1.4 および1.5より矢板式基礎の設計に大きく影響するものとして、水平地盤反力係数および継手のせん断剛度が抽出された。水平地盤反力係数については、地盤調査法および算定法に依存するものであるから設計計算の段階においては、継手の剛度がもっとも重要な要素とみなすことができる。この継手の効果を設計計算にとり入れた新しい計算法について次に述べる。

2. 実用設計計算法

2.1 実用設計計算法の位置づけ

矢板式基礎に影響する因子は従来の基礎構造物に比べると多く、また複雑である。これらを全て基本式の中に組み入れると非常に煩雑なものとなり、およそ実用計算式としては不向きなものとなる。またこれらの因子のうち、とくに地盤の耐力機構に関するものは未解決の問題が多く、考えられる因子を全て組み入れても無意味となる。そこで本提案式では、設計計算として複雑にならない範囲で矢板式基礎の基本的な性質を組み入れ、かつ種々の断面形状の矢板式基礎に適用できることを念頭において作成した。ここで求めた基本式は、継手のせん断剛性を無限大にすると(すれ変形を無視する)、弾性体としてのケーソンを表現できる。また継手のせん断剛性を零とすると変位を考慮したくい基礎の式になる。矢板式基礎がケーソンとくい基礎の中間的な存在であることを文字通り数式上で表現している。

2.2 前提条件

Fig 7 (a)に示すような井筒断面を考える。井筒の断面の重心 C に原点を有する X 、 Y 座標を井筒の断面主軸と一致するように選ぶ。井筒の軸方向には Z 座標を設定する。またFig 7 (b)に示すように矢板の重心点を連ねる仮想の薄肉断面を考え、この薄肉断面から成る井筒を仮想井筒とよぶことにする。この仮想井筒は単に不連続体を連続的に扱うための便宜的なもので、各矢板の重心軸はこの仮想井筒に固定されていると考える。

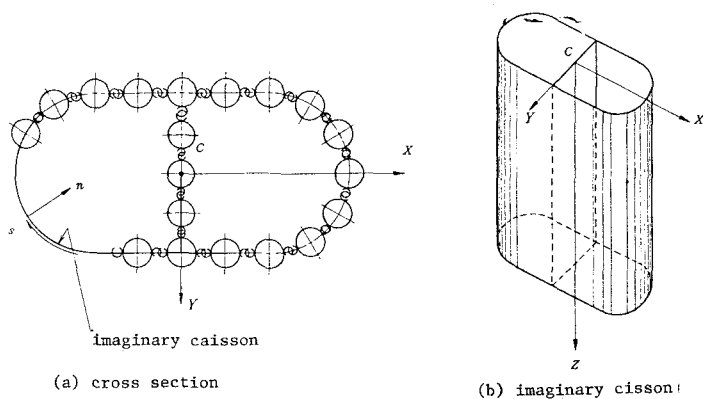


Fig.7 Imaginary caisson and co-ordinates

井筒の変位場を求めるため、この仮想井筒の変形に対し次の仮定を行なう。

(i) 仮想井筒の断面は変形しない。

(ii) セン断変形は生ずるが、仮想井筒の断面は平面を保持する棒として働く。

(iii) 各矢板断面は変位後も矢板中心軸に直交する平面を保持する。

(iv) 井筒の断面構成はY軸に関して対称とする。すなわち、矢板の断面とその配置はもちろんのこと、継手のせん断剛性、矢板に作用する地盤バネ定数もY軸に関して対称とする。

(v) 仮想薄肉断面の板厚中心線は矢板の重心軸位置において矢板の断面主軸と一致していると考える。

(vi) 仮想井筒の板厚中央面に矢板の重心軸は固定されており、矢板の重心軸は仮想井筒の板厚中央面と同じ変位をする。

(vii) 外力はY-Z平面内に作用する。すなわち、水平外力の合力はY方向を向き、Y軸上にあり、鉛直（Z方向）外力の合力もY軸上にある。

前述した3次元解析に比較して、(i)の仮定により井筒の断面変形および井筒周長の伸張変形を無視したこと、また仮定(ii)によりせん断変形後も仮想井筒断面が平面を保持すると仮定したことにより、3次元解析に比較して変形の自由度が著しく減少し、解析の式を簡単なものにすることができ、さらには、井筒断面形状が自由なものについて扱うことができる。当然3次元解析に比較して精度は落ちるが、その検討については後述する。

2.2 変位の表示

仮想井筒の一般点X、Y、Z方向の変位を u 、 v 、 w と表わすと

$$\left. \begin{aligned} u &= 0 \\ v &= v_c \\ w &= w_c - Y(v_c' - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

を得る。ここに v_c 、 w_c は井筒の断面重心点のY、Z方向変位また β はせん断ひずみである。Fig.7に示すように座標 S 、 n を定義し、 S 軸上の S 、 n 方向の変位成分を ξ^* 、 η^* とすると

$$\left. \begin{aligned} \xi^* &= l^* u + m^* v = m^* v_c \\ \eta^* &= -m^* u + l^* v = l^* v_c \end{aligned} \right\} \quad (2.2) \quad \text{ここに} \quad l^* = \left(\frac{\partial X}{\partial S} \right)_{n=0}, \quad m^* = \left(\frac{\partial Y}{\partial S} \right)_{n=0}$$

i 番目の矢板の局部座標を x 、 y とし、その方向変位を ξ_0 、 η_0

とすると

$$\left. \begin{aligned} (\xi_0)_i &= \xi^*(S=s_i, Z) = (m_0)_i v_c \\ (\eta_0)_i &= \eta^*(S=s_i, Z) = (l_0)_i v_c \\ (\zeta_0)_i &= w(Y=Y_i, Z) = w_c - Y_i(v_c' - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

である。ここに

$$l_0 = \frac{\partial X}{\partial x}, \quad m_0 = \frac{\partial Y}{\partial x}$$

継手のせん断すれ変位 $(\Delta\zeta)_i$ は全体のY座標を用いて

$$(\Delta\zeta)_i = -(\Delta Y)_i \cdot \beta = -(Y_{i+1} - Y_i) \cdot \beta$$

と求まる。

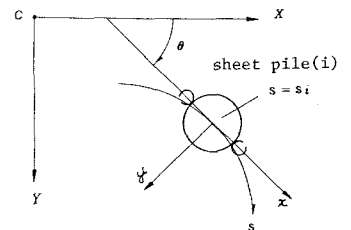


Fig.8 Relation of co-ordinates

2.3 地盤の取り扱い

側面地盤の抵抗は、矢板の局部座標 x , y 方向の水平方向地盤反力係数 $(k_x)_i$, $(k_y)_i$ および鉛直方向のせん断に働く $(k_z)_i$ を考慮する。

底面地盤の抵抗は、ばねとして扱い、鉛直方向 $(K_z)_i$ および x , y 方向のせん断ばね $(K_x)_i$ および $(K_y)_i$ として評価する。

2.4 つりあい式と境界条件

仮想仕事の原理を、井筒に作用する外力および地盤反力に適用してつりあい条件式をもとめると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} -M'' + prh - PH + (mrv - Mv)' &= 0 \\ -N' + prv - Pv &= 0 \\ -M^* - \sum_i (q_z \Delta Y)_i + mrv - Mv &= 0 \end{aligned} \right\} (2.4)$$

ここに M : 矢板の z 方向断面応力による x 軸まわりモーメント

prh : 側面地盤の水平方向反力による y 方向成分

PH : 水平方向分布外力の y 方向成分

mrv : 側面地盤の鉛直方向せん断反力係数による x 軸まわり回転剛度

Mv : 底面鉛直ばねによる x 軸まわり回転剛度

N : 鉛直方向断面力の和

prv : 底面鉛直ばねの和

Pv : 鉛直方向分布外力

M^* : 矢板の z 方向応力を一本の矢板内で一定とした場合の x 軸まわりモーメント

q_z : 継手のせん断流

(2.4)式に井筒上下端の水平力、鉛直力、モーメントに関する境界条件を適用すれば、解を得ることができる。しかし連立微分方程式を解析的に解くのは難しいので、有限要素法を利用した数値解を求めることとし、実用計算式による電算プログラムを作成した。

このプログラムは、地盤および継手を弾性体として扱えるように作成してある。

3. 実用計算式の精度

3.1 各種計算式の比較

現行法: 矢板式基礎の設計と施工指針による。

矢板式基礎全体を一本の棒とみなしその

断面剛性を、合成効率 μ により低減させる。

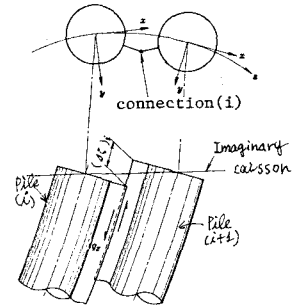


Fig 9 Shear deformation of the connection

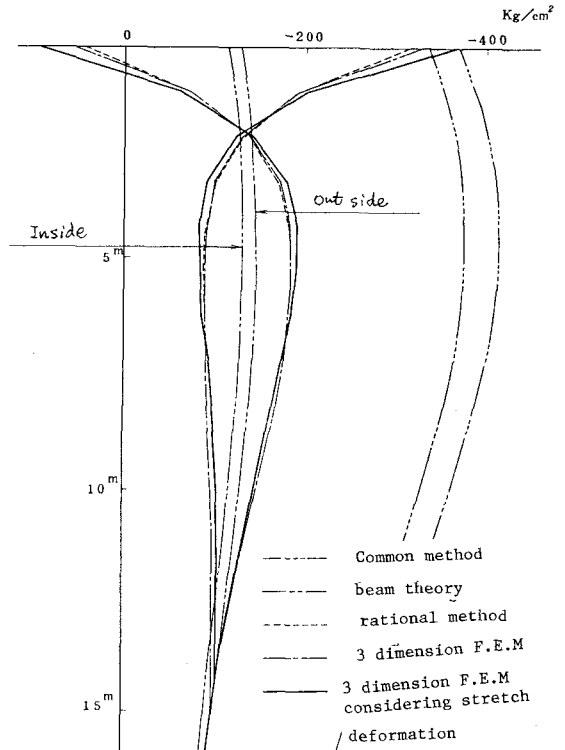


Fig.10 Comparison of calculation methods

棒理論：継手が強く、ずれがまったくない場合。

実用設計計算式：2章で述べた継手のすべりを考慮できる計算法

三次元有限要素解析：1章で用いた矢板式基礎全体の断面変形を考慮できる方法であり、井筒周長の伸びを考える場合と考えない場合の2種類行なう。

以上の5種類について、1章の検討に利用したモデルを用いて、解析結果の比較を行なった。Fig 10は、もっとも大きな応力を生ずる最前列の矢板の深さ方向応力分布を、矢板の外側、内側について表わしたものである。現行法、棒理論と比較して実用設計計算式、三次元解析は応力分布形状が大きく異なることがわかる。この例から見る限り現行法は、地中部において安全すぎる設計になっているように思われる。実用計算式と三次元解析では、応力集中を考慮できない実用計算式が危険側に来る傾向にあるが、比較的よい対比をしていると思われる。

3.2 載荷試験との対比

首都高速道路公団で行なわれた、 $\phi 10,010 \times L 5,600$ なる形状を持つ矢板式基礎の載荷試験²⁾との比較を行なった。計算値としては、(i)三次元有限要素解析、(ii)実用設計計算法、(iii)矢板式基礎をくい基礎として解いた場合の3種類を求めた。図より3次元解析および実用設計計算法は、かなりの精度で実験値をとらえていることがわかる。

しかし前面矢板No.10において、実用設計計算法の値が載荷試験の値よりも数ヶ所危険側にあることを考慮し、実用設計計算法の実設計への適用にあたっては、安全率を併用した形の取り扱いが必要となろう。

本載荷試験の矢板式基礎は、比較的細長い形状を持つため、今後多くの載荷試験結果との検証を重ねていく必要があると考えられる。

4. インターアクションカーブ

実用設計計算式は、三次元有限要素解析に比較すると非常に簡単であるが、より実用性を増し概略設計等に利用できることを目的として、くい基礎の計算結果から、矢板式基礎の諸量を類推することのできるインターアクションカーブを作成した。

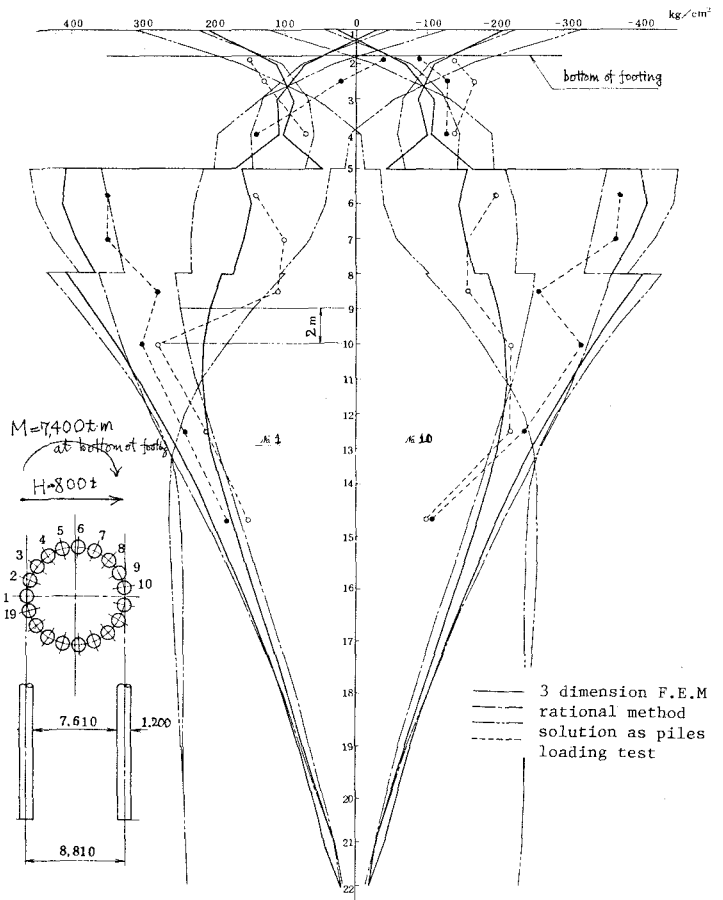


Fig.11 Actual loading test and analyses

Fig. 12は十字の隔壁を持ち井筒径D、長さ20mの矢板式基礎が、先端地盤N値20、周辺地盤N値5の地盤におかれた場合のインターアクションカーブである。横軸に示される継手剛性 G_j が零である時がくい基礎に対応し、それ以外の時の応力、変位等の比率が表示されている。

曲げモーメントは、継手剛性を考慮することによりくい頭部地中部共に減少する。逆にくい先端軸力、回転変位は増加しているが、これは矢板式基礎がケーソン基礎に近くなり回転変位が卓越するためと思われる。しかしこれらの曲線の傾向は、井筒形状や地盤条件などに敏感に対応して変位するため、実用に供するためには莫大な図表となるところに難がある。

5. 結論および問題点

(1) 矢板式基礎を三次元解析により分析した。応力については、井筒の断面変形により前面矢板に応力集中が起こることを確認した。また構造特性に与える因子について検討した結果、応力には前背面地盤反力係数比、継手剛性が、また変位には水平地盤反力係数が大きく影響することがわかった。

(2) 三次元解析よりは精度は落ちるが、計算が簡単な実用設計計算法を提案した。現行法と比較して非常に応力特性をよく把握することができた。載荷試験結果とも比較的よい対応を示した。

(3) くい基礎の設計法により矢板式基礎の設計を行なうためのインターアクションカーブを作成した。

(4) 矢板式基礎の設計法に残された最大の問題点は、地盤の反力特性の評価の問題であろう。特に水平変位に与える影響が大きいことを考え合わせると、ケーソンとして算定する水平方向地盤反力係数が過小な値を与えているのではないかと思われる。今後地盤の評価について検討を重ねる必要がある。

参考文献

- 1) 矢板式基礎の設計法，土木研究所資料1175号（その1），1977. 2
- 2) 鋼管矢板井筒基礎の水平載荷試験，橋梁と基礎Vol.12，No. 7, 8，1978，7および8

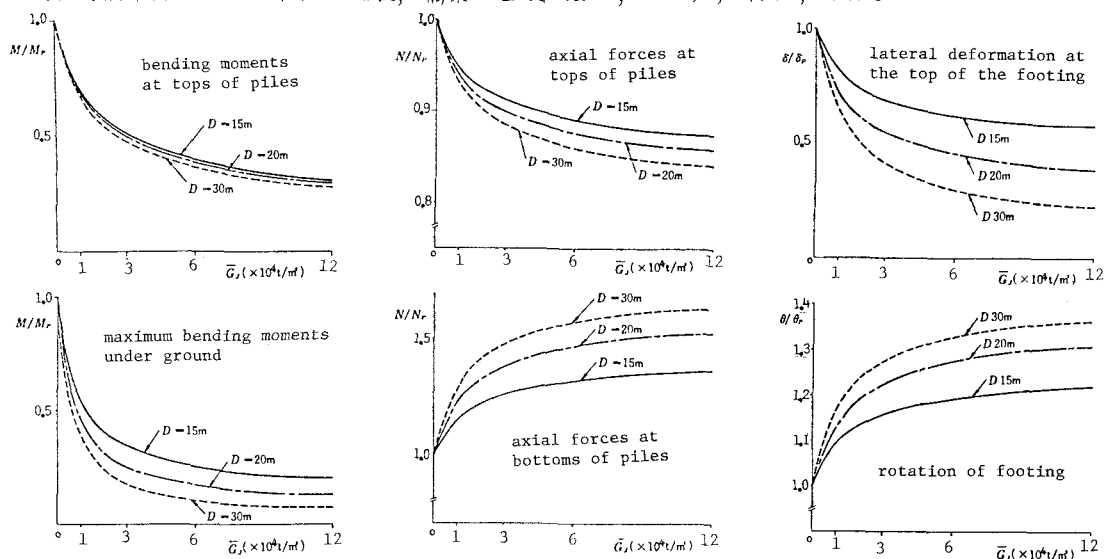


Fig.12 Inter action curves

Structural Analysis of the Sheet Pile Foundation

Yukitake Shioi*, Michio Okahara** and Yasuo Mitsuie**

The sheet pile foundation is a new type of foundation which has been developed about ten years ago. Whereas, the number of sheet pile foundations constructed has increased due to remarkable advantages in construction works, and it may be identified as the fourth type of foundation which comes after a spread foundation, a pile foundation and a caisson foundation.

Herein we produced a three dimensional analysis calculation method using F.E.M method. Through this method, we investigated about the structural characteristics of a sheet pile foundation, and selected the important factors to be taken into consideration in equations for design calculation. As for the stress strength of the sheet pile, the shear strength of the connection and the difference of ground reaction coefficients of front and back grounds have large influences. And for the lateral displacement of the footing, the ground reaction coefficient of the surrounding ground has the largest meaning.

Considering the results of structural analyses, we established the rational design calculation method. In order to confirm the accuracy of the new method, we compared the results of calculations with those of an actual loading test. And we think the rational design calculation method has the enough accuracy for the practical uses.

Even using the rational design calculation method, we have to use the electric computer. For the easy application for practical designs, interaction curves between pile foundations and sheet pile foundations were made. These curves can practically be used for modifying values to be calculated as a pile foundations.

* Head of Foundation Engineering Section, Structure and Bridge Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

** Research Engineer of Foundation Engineering Section, Structure and Bridge Division, P.W.R.I., Ministry of Construction