

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第2642号

土 木 研 究 所 資 料

地 す べ り 抑 止 杭 の 解 析

昭和63年6月

建 設 省 土 木 研 究 所
砂防部地すべり研究室

Copyright © (1988) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

地すべり抑止杭の解析

地すべり研究室 室 長 中村 浩之
部外研究員 土屋 智*
" 永田健太郎**

要 旨

地すべり防止対策工の一つとして多く用いられている杭工の設計の合理化に役立てるために杭の解析法等をとりまとめたものである。

地すべり移動層の変位量、移動層や不動層の地盤特性等を変化させても解析が可能な、解析プログラムを開発するとともに、杭の解析法も示す。

また種々の条件下での解析事例を示すことによって地すべり地内の杭の挙動を明らかにした。

キーワード：地すべり防止工、杭工、杭工の設計、アンカー付杭

ま え が き

地すべり防止対策工事においては、地すべりを助長する誘因である地下水の排除や、地すべり地の土塊を移動して斜面の安全率上昇を目的とした抑制工、また、地すべり力に力で対抗しようとした抑止工に分類されるが、ここでは、抑止工として特に地すべり地で多く採用されている杭工についての検討を行うものである。

地すべり抑止杭の設計では地すべりの移動による水平外力により杭本体に発生する応力（曲モーメント，せん断力）が杭材の許容応力を超えないようにするのが一般的である。従来より提案されている地すべり抑止杭の解析諸式は杭にかかる水平外力を分布荷重とするか，集中荷重とするかの相違はあるがいずれも作用外力を既知としている。このとき杭打ち地点での地すべり土塊の杭背面の土塊についての効果の考慮の仕方が異なっている。

- (i) 杭背面の土塊の抵抗力は考慮しない。
- (ii) 杭背面の土塊は地すべり全土塊と一体となって移動しないが，杭周辺地盤の反力は十分期待できる。
- (iii) 杭背面の土地は地すべり全土塊と一体となって移動し，また杭周辺の地盤応力は十分期待できる。しかし，これらの考え方はいずれも地すべり移動土塊の杭に作用する影響を十分考慮しているものとはいえないものである。そこで今回ここに示す解析方法は次のような点を考慮できるものとした。
 - (a) 杭背面の土塊は地すべり全土塊と一体となって移動するが，地すべり移動土塊内の深度方向における速度は一定ではなく，任意の分布形を与えられる。
 - (b) 杭周辺地盤の応力は考慮する。
 - (c) 地すべり土塊，根入れ部の地盤のいずれにおいても地盤は一様な弾性地盤ではなく，多層構造，非線型地盤についても考慮できる。
 - (d) 任意の長さの杭に対しても解析が可能であり，深度方向における杭の剛性を変化できる。
 - (e) 杭頭部をアンカーで補強するような場合の解析も可能である。

したがってここで示す解析方法は前述の(i)～(iii)における杭背面に作用する水平外力を地すべりの移動による地盤の変位に置き換えることによって検討が可能になり(iii)項については一様な移動速度を持つ地盤における解析をさらに発展させたものと考えることができる。

本報告は，建設省近畿地方建設局大和川工事事務所で亀の瀬地すべり防止工事の一部として実施されている杭の挙動解析結果をとりまとめたもので，杭の解析プログラムや多数の計算事例を示したが今後の杭設計や杭工の効果判定に際して参考になれば幸いである。

最後に本報告とりまとめるにあたり，地すべり研究室の皆様に多大の御援助を頂いたことに深く感謝致します。

昭和 63 年 6 月

地すべり研究室室長 中 村 浩 之

部外研究員 土 屋 智

(現静岡大学農学部)

部外研究員 永 田 健 太 郎

(現地質基礎工業株式会社)

目 次

地すべり抑止杭の解析

1. 解 析 方 法	1
1-1 一 般 解	1
1-2 解 析 諸 式	2
1-3 解 析 手 順	7
2. 解析プログラム	9
2-1 入力データ, フォーマット	9
2-2 入力, 出力事例	13
2-3 プログラムリスト (計算用)	19
2-4 プログラムリスト (図化用)	29
3. 計 算 事 例	36
3-1 杭長を変化させた場合	36
3-2 杭の断面 (剛性) を変化させた場合	44
3-3 移動層の変化量を変化させた場合	47
3-4 移動層の地盤変形係数を変化させた場合	49
3-5 移動層の地盤変形係数を層別に変化させた場合	50
3-6 すべり面が数枚ある場合	55
3-7 移動層の変位量測定結果を入力した場合	59
3-8 杭背面の土塊の抵抗力を考慮した場合	64
3-9 アンカー付杭の場合	67
3-10 地盤反力の非線型性を考慮した場合	85

1. 解析方法⁽¹⁾

1-1 一般解

地すべり移動層を貫いて、不動層で支持される杭に対して、地すべり運動に起因する杭周辺地盤の変位が生じると、杭には図 1.1 に示すような曲げ変形を起こす。この時に杭の曲げ剛性 EI が極めて小さくなっていれば、杭は周辺土層と同様な変形を示し、杭には応力が発生しない。しかし現実には杭は剛性を有するため、杭の変位(y)は地盤変位(g)と一致せず、杭前面と背面との間に圧力差が生じ、図 1.1 における左向き矢印で示され、地盤反力と右向き矢印で示される水平外力が作用することになる。従って、周辺地盤を弾性体と仮定すれば、任意の深度 x において、杭に作用する力は、杭の変位 $y(x)$ と地盤の変位 $g(x)$ との差、 $\Delta y = y(x) - g(x)$ に比例するものとして与えることが出来る。すなわち、任意の深度 x における地盤弾性係数、杭の剛性をそれぞれ $E_s(x, \Delta y)$ 、 $EI(x)$ とすれば、杭における釣り合いの基本方程式は、

$$EI(x) \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s(x, \Delta y) [y(x) - g(x)] = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表すことができる。⁽²⁾

(1)式において、 $E_s(x, \Delta y)$ は深度 x と変位差 Δy との関数であり、同深度における地盤の反力 P - 変位差 Δy の曲線上における割線係数 $K(x, \Delta y)$ (図 1.2 参照) と同深度での杭径 $B(x)$ の積、

$$E_s(x, \Delta y) = K(x, \Delta y) \cdot B(x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で求めることができる。但し、図 1.2 において Δy の正、負を問わず、同一の反力が与えられるものとする。

ところで、(1)式を下式のように変形すると、

$$EI(x) \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s(x, \Delta y) y(x) = E_s(x, \Delta y) \cdot g(x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $E_s(x, \Delta y)$ は深度 x における $\Delta y = y(x) - g(x)$ の関数であるが、 $y(x) = 0$ の時には地盤変位のみの関数となり(3)式の $E_s(x,$

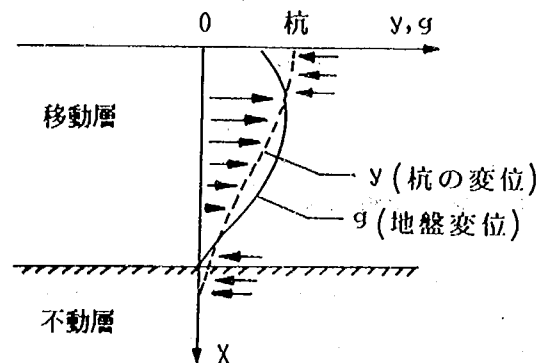


図 1.1 杭の変形モデル

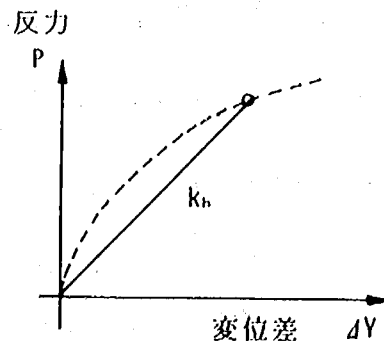


図 1.2 地盤反力係数の与え方

$\Delta y) \cdot g(x)$ (2つの積) は地盤変位に伴って発生する反力とも考えられ、杭前面から杭に作用する荷重に等しく、その次元は $[F]/[L]$ である。この意味で、 $E_s(x, \Delta y) \cdot g(x)$ は深度 x での杭に作用する地盤からの荷重に置き換えられ、多層系に分割された各層内では等分布荷重 $f(z)$ と同一の取扱いが許されるものと考えられる。

中⁽³⁾は地すべり移動層、不動層の二層の場合において、移動層に分布荷重が働く条件での地すべり抑止杭の理論解を導き、等分布荷重 f が働く場合での移動層での杭のたわみ y を、

$$y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + f/E_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えている。(4)式右辺の最終項 f/E_s は上述の理由から地盤変位 g に相当することが明らかである。よって(1)式の一般解は、

$$y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + g \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}, \quad c_1 \sim c_4 : \text{積分定数}$$

g : 地盤変位

で表されることになる。

1-2 解析諸式

移動層内での鉛直変位量を既知として、杭のたわみ曲線方程式を解くことになるが、ここでは、図 1.3 に示すような多層地盤系の杭としての解析諸式を取り扱うこととする。

杭のたわみ曲線の方程式は(1)式に示すように、

$$(EI)_i \frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + B_i k_{hi} y_i = B_i k_{hi} \cdot g_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(0 \leq x_i \leq l_i, \quad \sum_{i=1}^n l_i = l)$$

(6)式における杭の変形、応力に関する一般解は、

$$y_i = e^{\beta_i x_i} (c_{1i} \cos \beta_i x_i + c_{2i} \sin \beta_i x_i) + e^{-\beta_i x_i} (c_{3i} \cos \beta_i x_i + c_{4i} \sin \beta_i x_i) + g_i \quad \dots\dots\dots (7a)$$

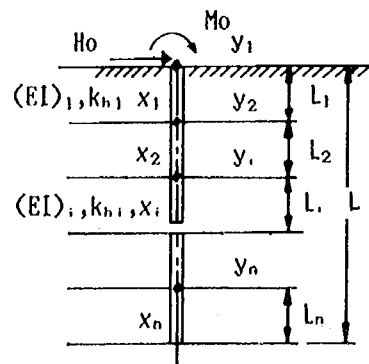


図 1.3 多層系地盤の杭

$$\begin{aligned}
\theta_i = -y_i' = & -\beta e^{\beta_i x_i} [c_{1i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i) \\
& + c_{2i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i)] \\
& + \beta_i e^{-\beta_i x_i} [c_{3i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i) \\
& - c_{4i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i)] \dots\dots\dots (7b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{M_i}{EI_i} = -y_i'' = & -2\beta_i^2 e^{\beta_i x_i} (-c_{1i} \sin \beta_i x_i + c_{2i} \cos \beta_i x_i) \\
& - 2\beta_i^2 e^{-\beta_i x_i} (c_{3i} \sin \beta_i x_i - c_{4i} \cos \beta_i x_i) \dots\dots\dots (7c)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{S_i}{EI_i} = -y_i''' = & -2\beta_i^3 e^{\beta_i x_i} [-c_{1i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i) + c_{2i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i)] \\
& - 2\beta_i^3 e^{-\beta_i x_i} [c_{3i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i) \\
& + c_{4i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i)] \dots\dots\dots (7d)
\end{aligned}$$

で与えられる。従って(7)式をマトリックス表示すると、

$$\begin{Bmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i/EI_i \\ S_i/EI_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(\beta_i x_i) & F_3(\beta_i x_i) \\ -\beta_i F_2(\beta_i x_i) & -\beta_i F_4(\beta_i x_i) \\ 2\beta_i^2 F_3(\beta_i x_i) & -2\beta_i^2 F_1(\beta_i x_i) \\ 2\beta_i^3 F_4(\beta_i x_i) & -2\beta_i^3 F_2(\beta_i x_i) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{Bmatrix} G_1(\beta_i x_i) & G_3(\beta_i x_i) \\ \beta_i G_2(\beta_i x_i) & -\beta_i G_4(\beta_i x_i) \\ -2\beta_i^2 G_3(\beta_i x_i) & 2\beta_i^2 G_1(\beta_i x_i) \\ -2\beta_i^3 G_4(\beta_i x_i) & -2\beta_i^3 G_2(\beta_i x_i) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{1i} \\ c_{2i} \\ c_{3i} \\ c_{4i} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
F_1(\beta_i x_i) &= e^{\beta_i x_i} \cos \beta_i x_i & F_3(\beta_i x_i) &= e^{\beta_i x_i} \sin \beta_i x_i \\
G_1(\beta_i x_i) &= e^{-\beta_i x_i} \cos \beta_i x_i & G_3(\beta_i x_i) &= e^{-\beta_i x_i} \sin \beta_i x_i \\
F_2(\beta_i x_i) &= e^{\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i) & F_4(\beta_i x_i) &= e^{\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i) \\
G_2(\beta_i x_i) &= e^{-\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i + \sin \beta_i x_i) & G_4(\beta_i x_i) &= e^{-\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i)
\end{aligned}$$

であり、 $\beta_i = 4\sqrt{\beta_{ik} k_i / 4(EI)_i}$ 、 $y_i' = dy_i/dx_i$ 、 $y_i'' = d^2 y_i/dx_i^2 \dots\dots$ を示す。これより(8)式において $c_{1i} \sim c_{4i}$ の積分定数が定まれば、杭の変形と応力を計算することができる。この積分定数を定めるために、積分定数を未知数とする $4(n+1)$ 元連立方程式を直接解く方法⁽⁴⁾と伝達マトリックス法⁽⁵⁾により解く方法で最終的に2元連立方程式とする方法の2通りの方法がある。前者は記憶容量の大きな計算機に、後者は、記憶容量の小さな計算機でも対処し得る方法である。ここでは、現場でもパーソナルコンピュータ等により、簡単に解析出来ることが可能な伝達マトリックスによる解法を取り扱うこととする。

伝達マトリックス法によれば、まず第一に、杭の地表面でのたわみ y_0 、傾斜角 θ_0 を定めると

とが必要である。図 1.3 に示すように、地表面に作用するモーメントを M_0 ，鉛直方向力を H_0 とすれば(7)，(8)式において地表面では， $x_1 = 0$ だから，

$$\left. \begin{aligned} [y_1]_{x_1=0} &= y_0 = c_1 + c_2 + g_0 \\ [y_1']_{x_1=0} &= \theta_0 = -\beta_1 (c_1 + c_2 - c_3 + c_4) \\ [-EI y'']_{x_1=0} &= M_0 = 2EI_1 \beta_1^2 (c_2 - c_4) \\ [-EI y''']_{x_1=0} &= H_0 = 2EI_1 \beta_1^3 (-c_1 + c_2 + c_3 + c_4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式から， $c_1 \sim c_4$ を未知数として解けば

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{2} \cdot y_0 - \frac{1}{4\beta_1} \cdot \theta_0 - \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} \cdot H_0 - \frac{1}{2} g_0 \\ c_2 &= -\frac{1}{4\beta_1} \cdot \theta_0 + \frac{1}{4EI_1 \beta_1^2} \cdot M_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} \cdot H_0 \\ c_3 &= \frac{1}{2} \cdot y_0 + \frac{1}{4\beta_1} \theta_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} \cdot H_0 - \frac{1}{2} g_0 \\ c_4 &= -\frac{1}{4\beta_1} \theta_0 - \frac{1}{4EI_1 \beta_1^2} \cdot M_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^2} \cdot H_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式を(8)式に代入すると，第 1 層内でのたわみ y_1 が，

$$\begin{aligned} y_1 &= \left(\frac{1}{2} y_0 - \frac{1}{4\beta_1} \theta_0 - \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} H_0 - \frac{1}{2} g_0 \right) \cdot e^{\beta_1 x_1} \cos \beta_1 x_1 \\ &+ \left(-\frac{1}{4\beta_1} \theta_0 + \frac{1}{4EI_1 \beta_1^2} M_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} H_0 \right) e^{\beta_1 x_1} \sin \beta_1 x_1 \\ &+ \left(\frac{1}{2} y_0 + \frac{1}{4\beta_1} \theta_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} H_0 - \frac{1}{2} g_0 \right) e^{-\beta_1 x_1} \cos \beta_1 x_1 \\ &+ \left(-\frac{1}{4\beta_1} \theta_0 - \frac{1}{4EI_1 \beta_1^2} M_0 + \frac{1}{8EI_1 \beta_1^3} H_0 \right) \cdot e^{-\beta_1 x_1} \sin \beta_1 x_1 + g_0 \\ &= y_0 z_1(\beta_1 x_1) - \frac{1}{\beta_1} \cdot \theta_0 \cdot z_2(\beta_1 x_1) + \frac{1}{EI_1 \beta_1^2} M_0 z_3(\beta_1 x_1) \\ &+ \frac{1}{EI_1 \beta_1^3} H_0 z_4(\beta_1 x_1) + g_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

こゝで， $z_1(\beta x) = \cosh \beta x \cdot \cos \beta x$

$$z_2(\beta x) = \frac{1}{2} (\cosh \beta x \cdot \sin \beta x + \sinh \beta x \cdot \cos \beta x)$$

$$z_3(\beta x) = \frac{1}{2} \sinh \beta x \cdot \sin \beta x$$

$$z_4(\beta x) = \frac{1}{4} (\cosh \beta x \cdot \sin \beta x - \sinh \beta x \cos \beta x)$$

$$\cosh \beta x = \frac{1}{2} (e^{\beta x} + e^{-\beta x})$$

$$\sinh \beta x = \frac{1}{2} (e^{\beta x} - e^{-\beta x})$$

と表される。また、次に示す関係式を用いることにより、

$$\frac{dz_1}{dx} = -4\beta z_4, \quad \frac{dz_2}{dx} = \beta z_1, \quad \frac{dz_3}{dx} = \beta z_2, \quad \frac{dz_4}{dx} = \beta z_3$$

杭のたわみ、傾斜角、曲げモーメント、せん断力は、

$$\begin{Bmatrix} y_x \\ \theta_x \\ M_x \\ S_x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z_1(\beta x) & -\frac{1}{\beta} z_2(\beta x) & -\frac{1}{EI\beta^2} z_3(\beta x) & -\frac{1}{EI\beta^3} z_4(\beta x) \\ 4\beta z_4(\beta x) & z_1(\beta x) & \frac{1}{EI\beta} z_2(\beta x) & \frac{1}{EI\beta^2} z_3(\beta x) \\ 4EI\beta^2 z_3(\beta x) & -4EI\beta z_4(\beta x) & z_1(\beta x) & \frac{1}{\beta} z_2(\beta x) \\ 4EI\beta^3 z_2(\beta x) & -4EI\beta^2 z_3(\beta x) & -4\beta z_4(\beta x) & z_1(\beta x) \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ -M_0 \\ -H_0 \end{Bmatrix} + g_0 \begin{Bmatrix} 1 - z_1(\beta x) \\ -4\beta z_4(\beta x) \\ -4EI\beta^2 F_3(\beta x) \\ -4EI\beta^3 F_2(\beta x) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

で表されることになる。従って、(12)式を、

$$V_1 = E_1 \cdot V_0 + Z_1$$

と表せば、 E_1 は(12)式の右辺第1項の係数行列で伝達マトリックスと呼ばれるものである。また、

$$V_0 = \{ y_0, \theta, -M_0, -H_0 \}^T$$

$$V_1 = \{ y_x, \theta_x, M_x, S_x \}_1^T$$

である。同様に、第2層、第3層では、

$$(i = 2 \text{ 層})$$

$$\begin{aligned} V_2 &= E_2 \cdot V_1 + Z_2 = E_2 (E_1 \cdot V_0 + Z_1) + Z_2 \\ &= E_2 \cdot E_1 \cdot V_0 + E_2 \cdot Z_1 + Z_2 \end{aligned}$$

$$(i = 3 \text{ 層})$$

$$V_3 = E_3 \cdot V_2 + Z_3 = E_3 \cdot E_2 \cdot E_1 \cdot V_0 + E_3 \cdot E_2 \cdot Z_1 + E_3 \cdot Z_2 + Z_3$$

となり、これより第 n 層では、

$$\begin{aligned} V_n &= E_n \cdot E_{n-1} \cdot E_{n-2} \cdot E_1 \cdot V_0 \\ &\quad + E_n (E_{n-1} (E_{n-2} \cdots E_3 (E_2 \cdot Z_1 + Z_2) + Z_3) + Z_4) \cdots Z_{n-1}) + Z_n \quad \dots\dots (13a) \end{aligned}$$

ここで、

$$A = E_n \cdot E_{n-1} \cdots E_2 \cdot E_1$$

$$B = E_n (E_{n-1} (E_{n-2} \cdots E_3 (E_2 \cdot Z_1 + Z_2) + Z_3) \cdots Z_{n-1}) + Z_n$$

とすれば,

$$V_n = A \cdot V_0 + B$$

であり, A , B はそれぞれ 4×4 行列, 4 列の表示となるから, これらを,

$$A = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix}$$

とする。 A , B は既知であることから, V_n が定まれば, 地表面での V_0 が求められる。

V_n ベクトルは n 層での最下端, すなわち杭先端の状態を表しており, 有限長の杭かあるいは無限長の杭であるかによって異なったものとする。すなわち, 実用的かつ工学的見地から有限長 ($l > \pi/\beta$, ここに l : 杭長, β : 平均的杭の特性長) と判断される場合⁽⁶⁾には,

$$\begin{Bmatrix} y_b \\ \theta_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ -M_0 \\ -H_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix}$$

一方, 無限長と判断される場合 ($l < \pi/\beta$) には, $y_b = 0$, $\theta_b = 0$ であることから, 杭先端でのモーメント, せん断力をそれぞれ M_b , S_b とすれば(14)式の左辺は, $\{0, 0, M_b, S_b\}^T$ である。従って有限長の杭では(14)式から,

$$\begin{aligned} a_{31} \cdot y_0 + a_{32} \theta_0 - a_{33} M_0 - a_{34} H_0 + b_3 &= 0 \\ a_{41} \cdot y_0 + a_{42} \theta_0 - a_{43} M_0 - a_{44} H_0 + b_4 &= 0 \end{aligned}$$

であることより,

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \frac{1}{D} (a_{33} a_{42} - a_{32} a_{43}) M_0 \\ &+ \frac{1}{D} (a_{34} a_{42} - a_{32} a_{44}) H_0 \\ &+ \frac{1}{D} (a_{32} b_4 - a_{42} b_3) \\ \theta_0 &= \frac{1}{D} (a_{31} a_{43} - a_{41} a_{33}) M_0 \\ &+ \frac{1}{D} (a_{31} a_{44} - a_{41} a_{34}) H_0 \\ &+ \frac{1}{D} (a_{41} b_3 - a_{31} b_4) \\ D &= (a_{31} a_{42} - a_{41} a_{32}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15a)$$

が得られる。同様に無限長の杭の場合には、

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \frac{1}{d} (a_{13} \cdot a_{22} - a_{12} a_{23}) M_0 \\ &+ \frac{1}{d} (a_{14} \cdot a_{22} - a_{12} a_{24}) H_0 \\ &+ \frac{1}{d} (a_{12} b_2 - a_{22} b_1) \\ \theta_0 &= \frac{1}{d} (a_{11} \cdot a_{23} - a_{21} \cdot a_{13}) M_0 \\ &+ \frac{1}{d} (a_{11} \cdot a_{24} - a_{21} \cdot a_{14}) H_0 \\ &+ \frac{1}{d} (a_{21} b_1 - a_{11} b_2) \\ d &= (a_{11} a_{22} - a_{21} \cdot a_{12}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15b)$$

(15)式によって、地表面の状態量 $V_0 = \{y_0, \theta_0, -M_0, -H_0\}^T$ は、 M_0, H_0 が既知であることから決定されたことになり、(12)式から出発し第 i 層では (13a) 式を用いることで、各層での杭の変位と応力が求められることとなる。

1-3 解析手順

(2)式において、あらかじめ $K(x, dy)$ が与えられている場合、各層での地盤変形係数を $E_s(x, dy) = K(x, dy) \cdot B(x)$ として杭の特性値を定めれば、(13)式を用いることにより、たわみ、曲げモーメント、せん断力が計算される。

一方、各層での地盤反力係数が dy とともに変化する場合には、解析的な答を見出すことは困難であり、繰り返し反復による数値解を得ることになる。この場合の手順については、次に示す通りである。

地盤は n 層に分割されているものとするが、これら各層の厚さは層内での反力 P -変位差 dy の関係が同一であると仮定できる厚さとする。また、同曲線関係において、地盤反力係数 K_h は dy の大きさに応じた割線係数 (図 1.4) として与えられるものとする。これら各層において、まず初期で仮定した割線係数値 K_{hi}^1 を n 層にわたり与え、杭のたわみ y_i^1 を計算する。この計算過程は地盤反力係数があらかじめ与えられている場合と同一である。次に得られた各層での杭のたわみ y_i^1 と各層での地すべり変位 g_i とから変位差を $dy = y_i^1 - g_i$ として求め、解析対象第 i 層での P - dy 曲線上におとし、第 2 回目の割線係数 K_{hi}^2 を図 1.4 に示すように定める。順次この過程を繰り返し、各層での K_{hi} が反復計算によって変化しなくなる (許容誤差内に収束する) まで行うことにより、変位差 dy に応じた地盤反力係数 K_h が得られ、その状態での杭の変位、応力を求めることができる。

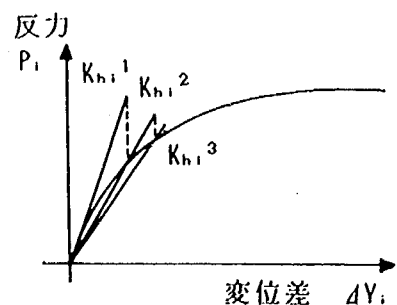


図 1.4 第 i 層で繰り返し過程における地盤反力係数の与え方

2. 解 析 プ ロ グ ラ ム

2-1 入力データ フォーマット

「PILE2. FOR」入力データフォーマット

入力データの説明

(1) NI, MODE, ITYPE (3 1 5)

NI ; 層の分割数

MODE ; 1. すべり面集中荷重のみの解析
2. 移動層の変位量 (地盤変位)
3. 1 + 2 の場合の解析

ITYPE ; 1. 地盤変形係数 E_s が変化する時
2. 地盤変形係数が層内で一定の時
(MODE $\neq$ 1 の場合に適用)

(2) HED ; (9A4) 入力データのタイトル

(3) NN, HS, DHO, DMO (1 5 , 3 F 1 0 . 0)

NN ; 移動層の分割数

HS ; すべり面集中荷重

DHO ; 杭頭水平力

DMO ; 杭頭モーメント

(4) IJ, EI, BO, H1, YS, DK (1 5 , 5 E 1 0 . 0)

IJ ; 分割番号

EI ; 杭の曲げ剛性

BO ; 杭の直径

H1 ; 各層での分割幅

YS ; 分割された層での地盤変位量

DK ; " 地盤反力係数

(ITYPE = 1 の時は初期仮定時の K_{hi})

(ITYPE = 2 の時は層内平均 K_{hi})

(5) NP (1 5) , 反力 (P) - 変位差 (Δy) の関係点数 (図 2. 1)

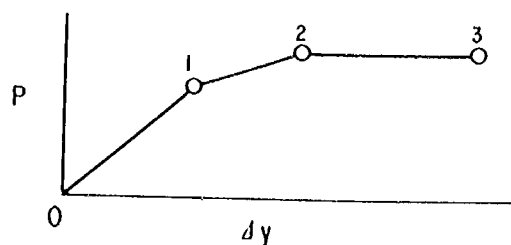


図 2. 1

(6) I J, I D, X D, Y P (2 I 5, 2 E 10.0)

I J ; 各分割層での番号

I D ; X P - Y P の関係番号

X P ; 変位差 Δ

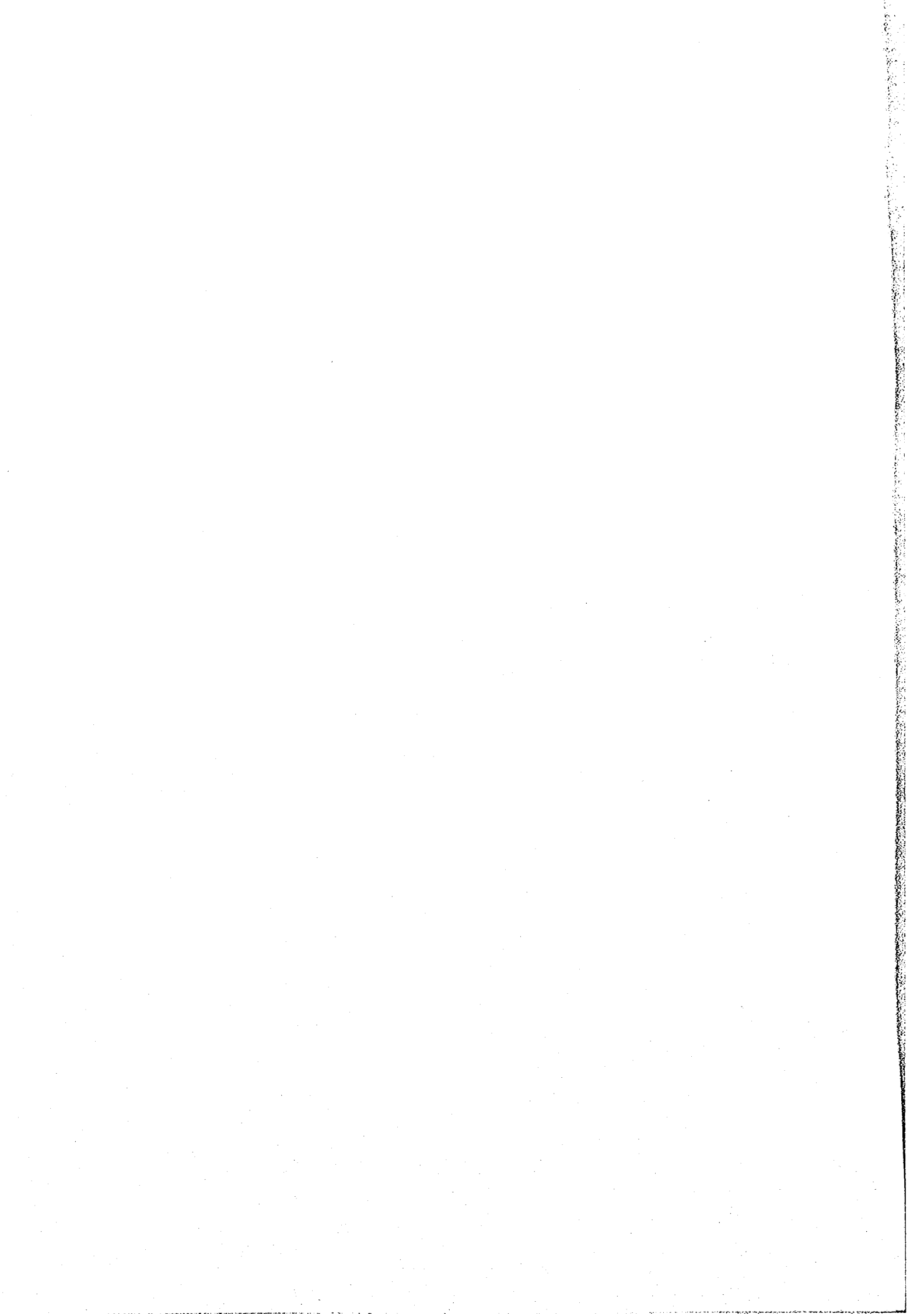
Y P ; 反力 P

このレコードは各層での NP 個分, 即ち $N I \times N P$ 個入力する。なお, 入力に際しては次の点に留意する。

I) 単位は, (m, t · m, t) とする。

II) I T Y P E = 1 の時に与える地盤反力係数については $P - \Delta y$ 関係線上の外側に位置するように与えること。(図 1.4)

2-2 入 力, 出 力 事 例



• データ入力例

Change-Delta Y,P ← タイトル

ONLY DISPLACEMENTS IN MOVING LAYERS
すべり面集中荷重
杭頭水平力
杭頭モーメント
NUM.MOV. : LOAD,P(T):LOAD H(T):MO.(T/M2)
6 .000 .000 .000

出し剛性 杭径 層の分割幅
NO : EI(T*M2) : P(DIA.(M)) : WIDTH(M) : DIS.Y(M) : INI.KH(T/M3)
1 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04
2 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04
3 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04
4 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04 ← 移動層の地盤反力係数
5 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04
6 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .700E-01 .942E+04
7 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
8 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
9 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
10 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05 ← 不動層の地盤反力係数
11 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
12 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
13 .250E+04 .319E+00 .100E+01 .000E+00 .314E+05
↑
地盤変位量

"ES" IS CHANGE IN EACH LAYER

NUMBER OF LAYER = 1
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00 変位
2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 2
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00
2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 3
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00
2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 4
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00
2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 5
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00
2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 6
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)
1 .000E+00 .000E+00

2 .100E-01 .942E+02
3 .300E-01 .126E+03
4 .100E+01 .628E+02

NUMBER OF LAYER = 7
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 8
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 9
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 10
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 11
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 12
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

NUMBER OF LAYER = 13
NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)

1 .000E+00 .000E+00
2 .200E-01 .628E+03
3 .300E-01 .628E+03
4 .100E+01 .628E+03

<< MOVING LAYER >>

BETA = .740 L = 6.000 ← 移動層の杭長

<< BASE LAYER >>

BETA = 1.000 L = 7.000 ← 不動層の杭長
← 不動層での杭の特性長

INFINITE-PILE CALCULATION

出力データ

DEPTH(M):	KH(T/M**3):DIS. (M)	たわみ	たわみ角	MOMENT(TF*M)	せん断力	地盤反力
		↓	↓		↓	↓
		RAD.	RAD.		SH.FOR. (TF)	REACT.FOR. (TF)
.000		.0701	-.0013	.0000	.0000	2.2178
1.000	.942E+04	.0714	-.0012	-.7956	-2.2352	5.3846
2.000	.942E+04	.0722	-.0001	-5.6406	-7.8846	4.1626
3.000	.942E+04	.0706	.0041	-16.5260	-13.1016	-10.7362
4.000	.942E+04	.0623	.0132	-27.4526	-4.6449	-33.5258
5.000	.617E+04	.0436	.0236	-19.2619	27.1578	-39.8195
6.000	.321E+04	.0185	.0236	25.6312	66.9598	103.0678
6.000		.0185	.0236	25.6312	66.9598	2.0961
7.000	.314E+05	.0021	.0088	33.7532	-23.2892	-13.0955
8.000	.314E+05	-.0017	.0003	9.9498	-18.3142	-5.4567
9.000	.314E+05	-.0009	-.0011	-.6139	-4.1420	-.4292
10.000	.314E+05	-.0001	-.0005	-1.6232	.7814	.2422
11.000	.314E+05	.0001	.0000	-.6504	.8325	-.5620
12.000	.314E+05	.0000	.0001	-.0545	.4851	.0000
13.000	.314E+05	-.0001	.0000	.6739	1.1283	.0000

地盤反力係数

曲げモーメント

地盤反力係数

曲げモーメント

2-3 プログラムリスト(計算用)


```

$DEBUG
C *****
C ** PILE ANALYSIS BY MATRIX METHOD **
C ** PRODUCT DATE 03/01 1987 **
C *****
C PROGRAM MAIN
C
C OPEN(5,FILE=' ' ,STATUS='OLD')
C OPEN(6,FILE=' ' ,STATUS='NEW')
C OPEN(7,FILE=' ' ,STATUS='NEW')
C
C *****C
C NI=TOTAL NUMBER OF SOIL : MODE= CALCULATION TYPE C
C MODE='1' ... ONLY LATERAL LOAD AT SLIP SURFACE TYPE C
C MODE='2' ... ONLY DISPLACEMENTS IN MOVING LAYERS C
C MODE='3' ... MODE '1'+ MODE '2' C
C *****C
C IF MODE=2 OR MODE=3 THEN INPUT THE 'ES' CONDITION C
C ELSE SKIPPING THE NEXT STATEMENT C
C TYPE='1' ... 'ES' IS CHANGE IN EACH LAYER C
C TYPE='2' ... 'ES' IS CONSTANT IN EACH LAYER C
C *****C
C READ(5,100) NI,MODE,ITYPE
100 FORMAT(3I5)
C IF(MODE.EQ.1) ITYPE=0
C
C CALL PILE(NI,MODE,ITYPE)
C
C STOP
C END
C
C.....PILE CALCULATION
C
C SUBROUTINE PILE(NI,MODE,ITYPE)
C COMMON /DATA1 /HS,NN,EI(50),B0(50)
C DIMENSION A(4,4),B(4,4),C(4,4),DK(50),H1(50),YX(4),XX(50),DP(50),
C * XP(50,50),YP(50,50),ST(50,4),DL(50),YY(4),Z1(4),Z(4),E(4),
C * YS(50),A1(4,4),B1(4)
C
C CALL DATAIN(NI,MODE,ITYPE,H1,YS,DK,XP,YP,NP,DH0,DM0)
C CALL PCHECK(NI,DK,H1,IP)
C
C DO 50 ITER=1,100
C WRITE(7,666) ITER
C 666 FORMAT(' ITERATION=',I5/)
C DO 10 KAI=1,NN
C BB = (DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25
C BX = BB*H1(KAI)
C CALL CCALC(A,EI(KAI),BB,BX)
C CALL ZCALC(A,Z,YS(KAI))
C IF(KAI.GE.2) GO TO 11
C CALL CHANGE(A,B,4)
C CALL CHANGE(Z,Z1,2)
C GO TO 10
C 11 CALL MATCAL(A,B,C)
C CALL CHANGE(C,B,4)
C CALL ECALC(A,Z1,Z,E)
C CALL CHANGE(E,Z1,2)
C 10 CONTINUE
C
C CALL CHANGE(C,A1,4)
C CALL CHANGE(E,B1,2)
C
C DO 15 KAI=NN+1,NI
C BB = (DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25

```

```

      BX = BB*H1(KAI)
      CALL CCALC(A,EI(KAI),BB,BX)
      CALL ZCALC(A,Z,YS(KAI))
      IF(KAI.GE.NN+2) GO TO 16
      CALL CHANGE(A,B,4)
      CALL CHANGE(Z,Z1,2)
      GO TO 15
16    CALL MATCAL(A,B,C)
      CALL CHANGE(C,B,4)
      CALL ECALC(A,Z1,Z,E)
      CALL CHANGE(E,Z1,2)
15    CONTINUE
C
      YX(3)=-DM0
      YX(4)=-DH0
      CALL FHHCAL(A1,B1,C,E,HS,DH0,DM0,YX(1),YX(2),IP)
C
      DL(1)=0.
      CALL STOCK(ST,YX,1)
      DO 20 KAI=1,NN
        BB=(DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25
        BX=BB*H1(KAI)
        CALL CCALC(A,EI(KAI),BB,BX)
        CALL ZCALC(A,Z,YS(KAI))
        CALL MULTI(A,YX,YY)
        DO 37 I=1,4
          YY(I)=YY(I)+Z(I)
37    CONTINUE
        DO 35 J=1,4
          YX(J)=YY(J)
35    CONTINUE
        DL(KAI+1)=DL(KAI)+H1(KAI)
        CALL STOCK(ST,YX,KAI+1)
20    CONTINUE
C
      YX(4)=YX(4)-HS
      DL(NN+2)=DL(NN+1)
C
      CALL STOCK(ST,YX,NN+2)
      DO 22 KAI=NN+1,NI
        BB=(DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25
        BX=BB*H1(KAI)
        CALL CCALC(A,EI(KAI),BB,BX)
        CALL ZCALC(A,Z,YS(KAI))
        CALL MULTI(A,YX,YY)
        DO 38 I=1,4
          YY(I)=YY(I)+Z(I)
38    CONTINUE
        DO 36 J=1,4
          YX(J)=YY(J)
36    CONTINUE
        DL(KAI+2)=DL(KAI+1)+H1(KAI)
        CALL STOCK(ST,YX,KAI+2)
22    CONTINUE
C
      DO 65 K=1,2
      IF(K.LE.1) THEN
        N1=1
        N2=NN
        L1=0
      ELSE
        N1=NN+2
        N2=N1+1
      ENDIF
      DO 65 I=N1,N2
        L1=L1+1

```

```

      AVE=(ST(I,1)+ST(I+1,1))/2.
      XX(L1)=ABS(AVE-YS(L1))
65  CONTINUE
C
      IF(IABS(MODE-1).LE.0) GO TO 999
      IF(IABS(MODE-2).GE.0.AND.IABS(ITYPE-2).LE.0) GO TO 999
      CALL MODUL(XP,YP,XX,DK,NI,NP,ICLK)
      IF(ICLK.EQ.0) GO TO 999
50  CONTINUE
C
999  CONTINUE
C  SUBGRADE REACTION CALCLATION
      DO 41 I=1,NN
        DP(I)=DK(I)*B0(I)*((ST(I,1)+ST(I+1,1))/2.-YS(I))
41  CONTINUE
      DO 42 I=NN+1,NI
        DP(I)=DK(I)*B0(I)*((ST(I+1,1)+ST(I+2,1))/2.-YS(I))
42  CONTINUE
C  WRITE RESULTS
      WRITE(6,600)
600  FORMAT(1H1,///' DEPTH(M): KH(T/M**3):DIS. (M) : RAD.(RAD):MOMEN
T      *(TF*M) :SH.FOR.(TF):REACT.FOR.(TF)')
      L1=0
      DO 40 I=1,NI+2
        IF(IABS(I-1).LE.0.OR.IABS(I-NN-2).LE.0) THEN
          WRITE(6,700)DL(I), ST(I,1),ST(I,2),ST(I,3),ST(I,4),DP(I)
          L1=L1+1
        ELSE
          WRITE(6,710)DL(I),DK(I-L1),ST(I,1),ST(I,2),ST(I,3),ST(I,4),DP(I)
        ENDIF
40  CONTINUE
700  FORMAT(F10.3,10X ,5F12.4)
710  FORMAT(F10.3,E10.3,5F12.4)
C
      DO 88 I=1,NI+2
        IF(ABS(DL(I)-DL(I+1)).LE.1E-2) GO TO 88
        WRITE(7,888) DL(I),ST(I,1),ST(I,2),ST(I,3),ST(I,4)
88  CONTINUE
888  FORMAT(5E10.3)
      RETURN
      END
C
C.....MODULUS OF SOIL CALC.
C
      SUBROUTINE MODUL(XP,YP,XX,DK,NI,NP,ICLK)
      DIMENSION XP(NI,50),YP(NI,50),DUMX(50),DUMY(50),XX(NI),DK(NI)
C
      ICHK=0
      DO 10 I=1,NI
        DX=XX(I)
        IF(XX(I).LE.0.) DX=1.0E-5
        DO 20 J=1,NP
          DUMX(J)=XP(I,J)
          DUMY(J)=YP(I,J)
20  CONTINUE
        CALL INTER(DUMX,DUMY,DX,DZ,NP)
        IF(ABS(DK(I)-DZ).GE.5.) ICHK=1
        DK(I)=DZ
10  CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
C..... DATA READ
C

```

```

SUBROUTINE DATAIN(N,MODE,ITYPE,H1,YS,DK,XP,YP,NP,DH0,DM0)
COMMON /DATA1 / HS,NN,EI(50),B0(50)
DIMENSION H1(N),YS(N),DK(N),XP(N,50),YP(N,50)
CHARACTER*4 HED(9)

```

```

C*****

```

```

C
C      "UNIT"      HS(T),DM(T*M),EI(T/M**2),B0(M),H1(M),YS(M),DK(T/M**3),
C
C                  XP(M),YP(T/M2)
C

```

```

C*****

```

```

C
C      HED... THE TITLE OF THIS CALCULAION      '20A4'
C
C      NN ... TOTAL NUBER OF MOVING LAYERS      '1-5'   COLUMN 15
C
C      HS ... LATERAL LOAD AT SLIP SURFACE      '6-15'  COLUMN F10.0
C
C      DH0... LATERAL LOAD AT TOP OF PILE      '16-25' COLUMN F10.0
C
C      DM0... MOMENT OF TOP OF PILE             '26-35' COLUMN F10.0
C
C      1J ... DUMMY                             '1-5'   COLUMN 15
C
C      EI ... MODULUS OF PILE RIGIDTY          '6-15'  COLUMN E10.0
C
C      B0 ... PILE DIAMETER                    '16-25' COLUMN E10.0
C
C      H1 ... WIDTH OF IN EACH LAYER           '26-35' COLUMN E10.0
C
C      YS ... DISPLACEMENT IN EACH LAYER      '36-45' COLUMN E10.0
C
C      DK ... DODULUS OF ELASTICITY IN EACH LAYER '46-55' COLUMN E10.0
C
C      NP ... NUMBER OF RELATION 'DY' AND 'PRES' '1-5'   COLUMN 15
C
C      1J,1D DUMMY                             '1-10'  COLUMN 215
C
C      XP ... RELATIVE DISPLACEMENT 'Y-G'     '11-20' COLUMN E10.0
C
C      YP ... SOIL PRESSURE WHICH REACTS 'XP'   '21-30' COLUMN E10.0
C

```

```

C*****

```

```

C
      READ(5,105) (HED(I),I=1,9)
      WRITE(7,105) (HED(I),I=1,9)
      READ(5,100) NN,HS,DH0,DM0
      IF(1ABS(MODE-2).LE.0) HS=0.
      READ(5,110) (1J,EI(1),B0(1),H1(1),YS(1),DK(1),I=1,N)
      IF(MODE.LE.1) THEN
        DO 20 I=1,N
20      YS(I)=0.
        GO TO 99
      ENDIF
      IF(1ABS(ITYPE-2).LE.0) GO TO 99
      READ(5,120) NP
      READ(5,115) ((1J,1D,XP(1,J),YP(1,J),J=1,NP),I=1,N)

```

```

C
99 WRITE(6,600) (HED(I),I=1,9),N
      IF(1ABS(MODE-1).LE.0) WRITE(6,410)
      IF(1ABS(MODE-2).LE.0) WRITE(6,420)
      IF(1ABS(MODE-3).LE.0) WRITE(6,430)
      WRITE(6,500) NN,HS,DH0,DM0
      WRITE(6,505)
      WRITE(6,510) (1,EI(1),B0(1),H1(1),YS(1),DK(1),I=1,N)

```

```

      IF(MODE.LE.1) GO TO 999
      IF(1ABS(ITYPE-2).LE.0) THEN
        WRITE(6,450)
        GO TO 999
      ELSE
        WRITE(6,440)
      ENDIF
      DO 10 I=1,N
        WRITE(6,520) I
        WRITE(6,515) (J,XP(I,J),YP(I,J),J=1,NP)
10    CONTINUE
C
105  FORMAT(20A4)
100  FORMAT(I5,3F10.0)
110  FORMAT(I5,5E10.0)
115  FORMAT(2I5,2E10.0)
120  FORMAT(I5)
410  FORMAT(/, ' ONLY LATERAL LOAD TYPE ')
420  FORMAT(/, ' ONLY DISPLACEMENTS IN MOVING LAYERS ')
430  FORMAT(/, ' LATERAL LOAD AND DISPLACEMENTS ')
440  FORMAT(/, ' "ES" IS CHANGE IN EACH LAYER')
450  FORMAT(/, ' "ES" IS CONSTANT IN EACH LAYER')
500  FORMAT(/, ' NUM.MOV. :LOAD.P(T):LOAD H(T):MO.(T/M2)'
      */I10,3F10.3)
505  FORMAT(/, ' NO : EI(T*M2) :P-DIA.(M)): WIDTH(M): DIS.Y(M):INI.KH(
      *T/M3)')/
510  FORMAT(I5,5E10.3)
515  FORMAT(I5,2E10.3)
520  FORMAT(/ ' NUMBER OF LAYER = ',I5/' NO : DEL Y(M):PRESS(T/M2)')/
600  FORMAT(1H1//1X,20A4// ' TOTAL LAYERS = ',I5)
C
999  RETURN
      END
C
C..... COEFFICIENTS IN 'A' MATRIX
C
      SUBROUTINE CCALC(A,EI0,B,BX)
      DIMENSION A(4,4)
C
      CH=.5*(EXP(BX)+EXP(-BX))
      SH=.5*(EXP(BX)-EXP(-BX))
      F1=CH*COS(BX)
      F2=.5*(CH*SIN(BX)+SH*COS(BX))
      F3=.5*SH*SIN(BX)
      F4=.25*(CH*SIN(BX)-SH*COS(BX))
C
      A(1,1)=F1
      A(1,2)=-1./B*F2
      A(1,3)=-1./(EI0*B*B)*F3
      A(1,4)=-1./(EI0*B*B*B)*F4
      A(2,1)=4.*B*F4
      A(2,2)=F1
      A(2,3)=1./(EI0*B)*F2
      A(2,4)=1./(EI0*B*B)*F3
      A(3,1)=4.*EI0*B*B*F3
      A(3,2)=-4.*EI0*B*F4
      A(3,3)= F1
      A(3,4)=1./B*F2
      A(4,1)=4.*EI0*B*B*B*F2
      A(4,2)=-4.*EI0*B*B*F3
      A(4,3)=-4.*B*F4
      A(4,4)=F1
C
      RETURN
      END
C

```

```

C..... MULTIPLY IN 'C=A*B'
C
  SUBROUTINE MATCAL(A,B,C)
  DIMENSION A(4,4),B(4,4),C(4,4)
C
  DO 10 I=1,4
    DO 20 J=1,4
      C(I,J)=0.
      DO 30 L=1,4
        C(I,J)=C(I,J)+A(I,L)*B(L,J)
30    CONTINUE
20    CONTINUE
10    CONTINUE
C
  RETURN
  END
C
C..... DISPLACEMENT OF HEAD OF PILE
C
  SUBROUTINE FHHCAL(A,B,C,D,HS,H0,DM,YX1,YX2,IP)
  DIMENSION A(4,4),B(4),C(4,4),D(4)
C
  IF(IP.GE.1) GO TO 111
  A1=C(3,1)*A(1,1)+C(3,2)*A(2,1)+C(3,3)*A(3,1)+C(3,4)*A(4,1)
  B1=C(3,1)*A(1,2)+C(3,2)*A(2,2)+C(3,3)*A(3,2)+C(3,4)*A(4,2)
  D1=C(4,1)*A(1,1)+C(4,2)*A(2,1)+C(4,3)*A(3,1)+C(4,4)*A(4,1)
  E1=C(4,1)*A(1,2)+C(4,2)*A(2,2)+C(4,3)*A(3,2)+C(4,4)*A(4,2)
  C1=(C(3,1)*A(1,3)+C(3,2)*A(2,3)+C(3,3)*A(3,3)+C(3,4)*A(4,3))*DM
1  +(C(3,1)*A(1,4)+C(3,2)*A(2,4)+C(3,3)*A(3,4)+C(3,4)*A(4,4))*H0
2  -C(3,1)*B(1)-C(3,2)*B(2)-C(3,3)*B(3)-C(3,4)*(B(4)-HS)
3  -D(3)
  F1=(C(4,1)*A(1,3)+C(4,2)*A(2,3)+C(4,3)*A(3,3)+C(4,4)*A(4,3))*DM
1  +(C(4,1)*A(1,4)+C(4,2)*A(2,4)+C(4,3)*A(3,4)+C(4,4)*A(4,4))*H0
2  -C(4,1)*B(1)-C(4,2)*B(2)-C(4,3)*B(3)-C(4,4)*(B(4)-HS)
3  -D(4)
C
  GO TO 999
C
111 A1=C(1,1)*A(1,1)+C(1,2)*A(2,1)+C(1,3)*A(3,1)+C(1,4)*A(4,1)
    B1=C(1,1)*A(1,2)+C(1,2)*A(2,2)+C(1,3)*A(3,2)+C(1,4)*A(4,2)
    D1=C(2,1)*A(1,1)+C(2,2)*A(2,1)+C(2,3)*A(3,1)+C(2,4)*A(4,1)
    E1=C(2,1)*A(1,2)+C(2,2)*A(2,2)+C(2,3)*A(3,2)+C(2,4)*A(4,2)
    C1=(C(1,1)*A(1,3)+C(1,2)*A(2,3)+C(1,3)*A(3,3)+C(1,4)*A(4,3))*DM
1  +(C(1,1)*A(1,4)+C(1,2)*A(2,4)+C(1,3)*A(3,4)+C(1,4)*A(4,4))*H0
2  -C(1,1)*B(1)-C(1,2)*B(2)-C(1,3)*B(3)-C(1,4)*(B(4)-HS)
3  -D(1)
  F1=(C(2,1)*A(1,3)+C(2,2)*A(2,3)+C(2,3)*A(3,3)+C(2,4)*A(4,3))*DM
1  +(C(2,1)*A(1,4)+C(2,2)*A(2,4)+C(2,3)*A(3,4)+C(2,4)*A(4,4))*H0
2  -C(2,1)*B(1)-C(2,2)*B(2)-C(2,3)*B(3)-C(2,4)*(B(4)-HS)
3  -D(2)
C
999 YX1=(E1*C1-B1*F1)/(E1*A1-B1*D1)
    YX2=(C1*D1-F1*A1)/(D1*B1-A1*E1)
C
  RETURN
  END
C
C..... EXCHANGE OF 'A'=> 'B'
C
  SUBROUTINE CHANGE(A,B,N)
  DIMENSION A(N,N),B(N,N)
C
  DO 15 I=1,N
    DO 15 J=1,N
15  B(I,J)=A(I,J)
C

```

```

        RETURN
        END
C
C.....MULTIPLY 'C'='A'*'B'
C
        SUBROUTINE MULTI(A,B,C)
        DIMENSION A(4,4),B(4),C(4)
C
        DO 15 I=1,4
            C(I)=0.
            DO 15 J=1,4
15 C(I)=C(I)+A(I,J)*B(J)
C
        RETURN
        END
C
C.....DATA STOCK
C
        SUBROUTINE STOCK(A,B,JI)
        DIMENSION A(50,4),B(4)
C
        DO 15 I=1,4
            A(JI,I)=B(I)
            IF(I.GE.3) A(JI,I)=-A(JI,I)
15 CONTINUE
C
        RETURN
        END
C
C.....EXTERNAL LOAD MATRIX
C
        SUBROUTINE ZCALC(A,Z,W)
        DIMENSION A(4,4),Z(4)
C
        Z(1)=(1.-A(1,1))*W
        Z(2)=-A(2,1)*W
        Z(3)=-A(3,1)*W
        Z(4)=-A(4,1)*W
C
        RETURN
        END
C
C..... MATRIX 'E' CALC.
C
        SUBROUTINE ECALC(A,Z1,Z,E)
        DIMENSION A(4,4),Z1(4),Z(4),E(4)
C
        DO 10 I=1,4
            E(I)=0.
            DO 15 J=1,4
                E(I)=E(I)+A(I,J)*Z1(J)
15 CONTINUE
            E(I)=E(I)+Z(I)
10 CONTINUE
C
        RETURN
        END
C
C.....NAISOU KEISAN
C
        SUBROUTINE INTER(X,Y,DX,DZ,N)
        DIMENSION X(N),Y(N)
C
        DO 10 I=1,N-1
            IF(DX.GE.X(I).AND.DX.LT.X(I+1)) GO TO 20
10 CONTINUE

```

```

C      WRITE(6,100)
100  FORMAT(5X,' OVER RANGE ERROR'/)
      STOP
20  CONTINUE
      IF (X(I+1).EQ.X(I)) GO TO 15
      A0=(Y(I+1)-Y(I))/(X(I+1)-X(I))
      B0=Y(I)-A0*X(I)
      DP=(A0*DX+B0)
      DZ=DP/DX
      RETURN

C
15  WRITE(6,150)
150  FORMAT(5X,' INPUT DATA ERROR (DY-P)')
      END

C
C..... PILE CONDITION INFINITE-PILE OR FINITE-PILE
C
      SUBROUTINE PCHECK(NI,DK,H1,IP)
      COMMON /DATA1 / HS,NN,EI(50),B0(50)
      DIMENSION DK(NI),H1(NI)

C
      D1=0.
      D2=0.
      B1=0.
      B2=0.
      DO 10 KAI=1,NI
        IF(KAI.LE.NN) THEN
          B1=B1+(DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25
          D1=D1+H1(KAI)
        ELSE
          B2=B2+(DK(KAI)*B0(KAI)/(4.*EI(KAI)))*0.25
          D2=D2+H1(KAI)
        ENDIF
      10 CONTINUE

C
      B1=B1/NN
      B2=B2/(NI-NN)

C
      IF(B2*D2.GE.3.14159) IP=1
      IF(B2*D2.LT.3.14159) IP=0
      WRITE(6,300) B1,D1
      WRITE(6,310) B2,D2
      IF(IP.LE.0) WRITE(6,100)
      IF(IP.GE.1) WRITE(6,200)

C
300  FORMAT(/' << MOVING LAYER >>'/' BETA = ',F10.3,' L =',F10.3)
310  FORMAT(/' << BASE LAYER >>'/' BETA = ',F10.3,' L =',F10.3)
100  FORMAT(/,' FINITE-PILE CALCULATION '/')
200  FORMAT(/,' INFINITE-PILE CALCULATION '/')

C
      RETURN
      END

```

2-4 プログラムリスト(図化用)


```

$DEBUG
C *****
C ** PILE DEFLECTION PLOTTE **
C ** PILEG.FOR **
C *****
C
PROGRAM MAIN
DIMENSION DAT(5,100),X(100),Y(100)
CHARACTER*4 TITLE(9)
C
OPEN (7,FILE=' ',STATUS='OLD')
C
CALL DATAIN(DAT,N,TITLE)
C
CALL PLOTS
CALL NEWPEN(0)
C
CALL CLSX
CALL CLSC
CALL NEWPEN(5)
C
CALL WINDOW(0.0,-100.0,2400.0,1700.0)
CALL VPORT (0.0,0.0,1.6,1.0)
C*****
C X-MAX=23(CM): Y-MAX=16(CM) B5-SIZE
C*****
X0=0.
Y0=0.
X1=2300.
Y1=1650.
C
C*****
C FRAME PLOTTE (X0,Y0),(X1,Y0),(X1,Y1),(X0,Y1),(X0,Y0)
C*****
CALL PLOT(X0,Y0,3)
CALL PLOT(X1,Y0,2)
CALL PLOT(X1,Y1,2)
CALL PLOT(X0,Y1,2)
CALL PLOT(X0,Y0,2)
CALL SYMBOL(200.,1610.,30.,TITLE,0.,36)
C*****
C DATA CHANGE DAT(2,1)=Y(1) PILE'S DISPLACEMENT
C PLOTTE AND AXIS TITLE WRITE
C X-AXIS==> 4(CM)
C*****
DO 10 I=1,N
X(I)=DAT(2,I)
I1=N-I+1
10 Y(I)=DAT(1,I1)
C
CALL MAXSET(X,N,X0,X1)
CALL SCALEX(X1,SCALX,DISX,500.,1)
CALL SCALEY(Y(1),SCALY)
CALL PLOT(X,Y,N,SCALX,SCALY,400.,50.)
CALL YAXIS(400.,50.,Y(1),SCALY,1)
CALL YAXIS(200.,50.,Y(1),SCALY,0)
XNAME=0.
CALL XAXIS(300.,Y(1)*SCALY+50.,DISX,'Y (M)',5,XNAME,2,0)
XM=AMAX1(ABS(X0),X1)
IF(ABS(X0).EQ.XM) XM=X0
CALL MAXPL(500.,50.,XM,'YMAX=',3)
C*****
C DATA CHANGE DAT(4,1)=Y(1) PILE'S MOMENT
C PLOTTE AND AXIS TITLE WRITE
C Y-AXIS==> 12.5 (CM)
C*****

```

```

      DO 15 I=1,N
        X(I)=DAT(4,I)
        I1=N-I+1
15   Y(I)=DAT(1,I1)
C
      CALL MAXSET(X,N,X0,X1)
      CALL SCALEX(X1,SCALX,DISX,300.,0)
      CALL YAXIS(1250.,50.,Y(1),SCALY,1)
      CALL PLOT(X,Y,N,SCALX,SCALY,1250.,50.)
      XNAME=-2.*DISX/3.
      CALL XAXIS(950.,Y(1)*SCALY+50.,DISX,'MOMENT (TF*M)',13,
*       XNAME,1,1)
      XM=AMAX1(ABS(X0),X1)
      IF(ABS(X0).EQ.XM) XM=X0
      CALL MAXPL(1350.,50.,XM,'MMAX=',1)
C*****
C DATA CHANGE DAT(5,I)=Y(I) PILE'S SHEAR FORCE
C PLOTTE AND AXIS TITLE WRITE
C Y-AXIS==> 19 (CM)
C*****
      DO 20 I=1,N
        X(I)=DAT(5,I)
        I1=N-I+1
20   Y(I)=DAT(1,I1)
C
      CALL MAXSET(X,N,X0,X1)
      CALL SCALEX(X1,SCALX,DISX,300.,0)
      CALL YAXIS(1900.,50.,Y(1),SCALY,1)
      CALL PLOT(X,Y,N,SCALX,SCALY,1900.,50.)
      XNAME=-2.*DISX/3.
      CALL XAXIS(1600.,Y(1)*SCALY+50.,DISX,'SHEAR F. (TF)',13,
*       XNAME,1,1)
      XM=AMAX1(ABS(X0),X1)
      IF(ABS(X0).EQ.XM) XM=X0
      CALL MAXPL(2000.,50.,XM,'SMAX=',1)
C
      READ(*,'(A1)') ITYPE
      IF ( ITYPE.EQ.'C' ) CALL GCOPY
      CALL NEWPEN(0)
      CALL CLSX
      CALL CLSC
C     CALL PLOTE
      STOP
      END
C
C..... DATA READ IN FILE=5
C
      SUBROUTINE DATAIN(DAT,N,TITLE)
      DIMENSION DAT(5,100)
      CHARACTER*4 TITLE(9)
C
      READ(7,200) (TITLE(I),I=1,9)
      DO 10 I=1,100
        READ(7,110,END=20) DAT(1,I),DAT(2,I),DAT(3,I),DAT(4,I),DAT(5,I)
10   CONTINUE
20   N=I-1
C
      DO 15 I=1,N
        WRITE(6,120) I,DAT(1,I),DAT(2,I),DAT(3,I),DAT(4,I),DAT(5,I)
15   CONTINUE
C
110  FORMAT(5E10.3)
120  FORMAT(15,5E10.3)
200  FORMAT(9A4)
C
      RETURN

```

```

      END
C
C.....XMAX,XMIN
C
      SUBROUTINE MAXSET(X,N,X0,XM)
      DIMENSION X(N)
C
      X0=1.0E+09
      XM=-X0
C
      DO 10 I=1,N
        IF(X0.GT.X(I)) X0=X(I)
        IF(XM.LT.X(I)) XM=X(I)
10 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
C.....SCALE CALC.
C
      SUBROUTINE SCALEX(X1,SCALX,DISX,DIS0,IC)
C
      IF(IC.LE.0) GO TO 20
      IF(X1.GT.0. .AND.X1.LE.0.02 ) DISX=0.02
      IF(X1.GT.0.02 .AND.X1.LE.0.05 ) DISX=0.05
      IF(X1.GT.0.05 .AND.X1.LE.0.10 ) DISX=0.10
      IF(X1.GT.0.10 .AND.X1.LE.0.20 ) DISX=0.20
      IF(X1.GT.0.20 .AND.X1.LE.0.50 ) DISX=0.50
      IF(X1.GT.0.50 .AND.X1.LE.1.00 ) DISX=1.00
      IF(IC.GE.1) GO TO 10
20 IF(X1.GT.0.00 .AND.X1.LE.3.00 ) DISX=3.00
      IF(X1.GT.3.00 .AND.X1.LE.6.00 ) DISX=6.00
      IF(X1.GT.6.00 .AND.X1.LE.15.0 ) DISX=15.0
      IF(X1.GT.15.0 .AND.X1.LE.30.0 ) DISX=30.0
      IF(X1.GT.30.0 .AND.X1.LE.60.0 ) DISX=60.0
      IF(X1.GT.60.0 .AND.X1.LE.150. ) DISX=150.
      IF(X1.GT.150. .AND.X1.LE.300. ) DISX=300.
      IF(X1.GT.300. .AND.X1.LE.600. ) DISX=600.
      IF(X1.GT.600. .AND.X1.LE.1500. ) DISX=1500.
C
10 SCALX=DIS0/DISX
C
      RETURN
      END
C
C.....SCALE Y-DIRECTION
C
      SUBROUTINE SCALEY(YM,SCALY)
C
      IF(YM.GT.0.00 .AND. YM.LE.5.00) DISY=5.00
      IF(YM.GT.5.00 .AND. YM.LE.10.0) DISY=10.0
      IF(YM.GT.10.0 .AND. YM.LE.15.0) DISY=15.0
      IF(YM.GT.15.0 .AND. YM.LE.20.0) DISY=20.0
      IF(YM.GT.20.0 .AND. YM.LE.25.0) DISY=25.0
      IF(YM.GT.25.0 .AND. YM.LE.30.0) DISY=30.0
      IF(YM.GT.30.0 .AND. YM.LE.35.0) DISY=35.0
      IF(YM.GT.40.0 .AND. YM.LE.45.0) DISY=45.0
      IF(YM.GT.45.0 .AND. YM.LE.50.0) DISY=50.0
C
      IF(DISY.LE.5.0) SCALY=200.
      IF(DISY.GT.5.0 .AND. DISY.LE.10.0) SCALY=140.
      IF(DISY.GT.10.0 .AND. DISY.LE.15.0) SCALY= 92.
      IF(DISY.GT.15.0 .AND. DISY.LE.20.0) SCALY= 70.
      IF(DISY.GT.20.0 .AND. DISY.LE.25.0) SCALY= 55.
      IF(DISY.GT.25.0 .AND. DISY.LE.30.0) SCALY= 45.
      IF(DISY.GT.30.0 .AND. DISY.LE.35.0) SCALY= 40.

```

```

        IF(DISY.GT.35.0 .AND. DISY.LE.40.0) SCALY= 35.
        IF(DISY.GT.45.0 .AND. DISY.LE.50.0) SCALY= 28.
C
        RETURN
        END
C
C.....XY PLOTTE
C
        SUBROUTINE PLOT(X,Y,N,SCALX,SCALY,X0,Y0)
        DIMENSION X(N),Y(N)
C
        XP=X(1)*SCALX+X0
        YP=Y(1)*SCALY+Y0
        CALL PLOT(XP,YP,3)
C
        DO 10 I=2,N
            XP=X(I)*SCALX+X0
            YP=Y(I)*SCALY+Y0
            CALL PLOT(XP,YP,2)
10 CONTINUE
C
        CALL PLOT(X0,Y0,3)
        CALL PLOT(X0,Y(1)*SCALY+Y0,2)
C
        RETURN
        END
C
C.... Y-AXIS PLOTTE
C
        SUBROUTINE YAXIS(XS,YS,YDIS,SCALY,IC)
C
        CALL PLOT(XS,YS,3)
        Y1=YDIS*SCALY+YS
        CALL PLOT(XS,Y1,2)
C
        YY=Y1
        XX2=10.
        IF(IC.GE.1) XX2=7.
        X1=XS-XX2
        X2=XS-80.
        YNAME=0.0
        DO 10 I=1,20
            IF(Y1.LT.YS) GO TO 15
            IF(IC.GE.1) GO TO 21
            CALL NUMBER(X2,Y1-8.,20.,YNAME,0.,1)
21      CALL PLOT(X1,Y1,3)
            CALL PLOT(XS,Y1,2)
            Y1=Y1-2.*SCALY
            YNAME=YNAME+2.
10 CONTINUE
15 IF(IC.GE.1) RETURN
        CALL SYMBOL(90.,YY/2.,30., 'DEPTH',90.0,5)
        CALL SYMBOL(10.,YY-100.,30., '(M)',0.0,3)
C
        RETURN
        END
C
C.....X AXIS PLOTT
C
        SUBROUTINE XAXIS(XS,YS,DISX,YNAM,NN,XNAME,MM,1C)
        CHARACTER*1 YNAM(16)
C
        CALL SYMBOL(XS+200.,YS+80.,30.,YNAM,0.,NN)
        CALL PLOT(XS,YS,3)
        CALL PLOT(XS+600.,YS,2)
        X1=XS+100.

```

```

Y1=YS
XDIV=5.
IF(IC.GE.1) XDIV=3.
DX =DISX/XDIV
DO 10 I=1,20
  IF(X1.GT.XS+600.) GO TO 15
  CALL PLOT(X1,Y1,3)
  Y1=Y1+20.
  CALL PLOT(X1,Y1,2)
  XD=30.
  IF(XNAME.LT.0.) XD=45.
  CALL NUMBER(X1-XD,Y1+5.,20.,XNAME,0.,MM)
  XNAME=XNAME+DX
  Y1=Y1-20.
  X1=X1+100.
10 CONTINUE
15 RETURN
END
C
C.....MAX VALUE PLOTTE
C
  SUBROUTINE MAXPL(X,Y,VALUE,NBCD,N)
  CHARACTER*5 NBCD
C
  SIZE=25.
  CALL SYMBOL(X,Y,SIZE,NBCD,0.,5)
  X1=X+SIZE*6.
  CALL NUMBER(X1,Y,SIZE,VALUE,0.,N)
C
  RETURN
  END

```

3. 計 算 事 例

3-1 杭長を変化させた場合

(1) 目 的

ある地盤条件のもとで、移動層の厚さを変化させた場合の（杭長が変化する）杭の挙動を見るために行った。

(2) 杭の仕様及び地盤条件

杭及び、地盤条件としては表 3.1, 3.2 に示す通りであるが、この場合変化するのは移動層厚のみで、与える地盤変位量としては、杭が持つ許容曲げモーメントを越えないようにした。

表 3.1 杭 仕 様

杭 径	318.5mm
肉 厚	10.3mm
曲 げ 剛 性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	(長期) $2,200 \text{ kg/cm}^2$

表 3.2 地 盤 条 件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^2)
移 動 層	2000	6.279×10^3
不 動 層	1000	3.140×10^4
地盤変位量	2.0 cm	
すべり深度	移動層の杭長により変化する	

(3) 計算結果及び考察

計算により図 3.1 ~ 図 3.12 の結果が得られた。これらの結果から以下のことがわかった。

- i) 不動層での杭長 (L_1) を固定し、移動層中の杭長 (L_0) を変化させると、 L_0 が短くなるにしたがって杭に発生する応力の変化は“くさび杭”⁽⁷⁾の形状から次第に“抑え杭”⁽⁷⁾に近い形状を示すようになる（図 3.13 参照）。すなわち図 3.3 ~ 図 3.12 に示すようにくさび杭の場合には杭の頭部付近の変位は移動層と一体となり動き、変位量は同一であり、またすべり面を挟み上下に曲げモーメントの極大点を持つが、 L_0 が短くなると移動層内曲げモーメントが小さくなり、杭の頭部付近の変位量が移動層の変位量より大きくなり、杭は全体にすべり面下部を支点として傾動するようになる。
- ii) 計算プログラム上の問題であるが L_1 に比して L_0 が長くなると ($L_0 \geq 10 \text{ m}$) モーメント図の杭末端部（図 3.9 ~ 3.12 参照）にみられるようにうまく値が収束しない傾向が出てくる。

PILE LENGTH UPPER = 3M , LOWER = 5M

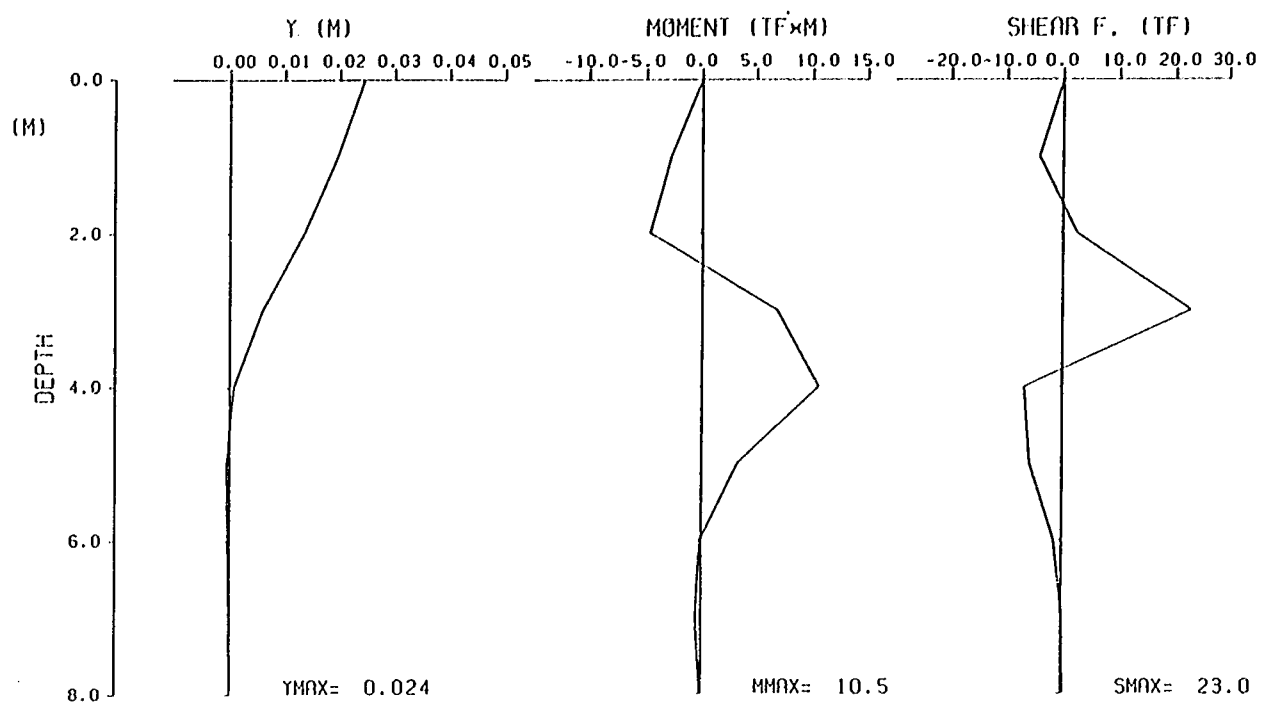


図 3.1 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 4M , LOWER = 5M

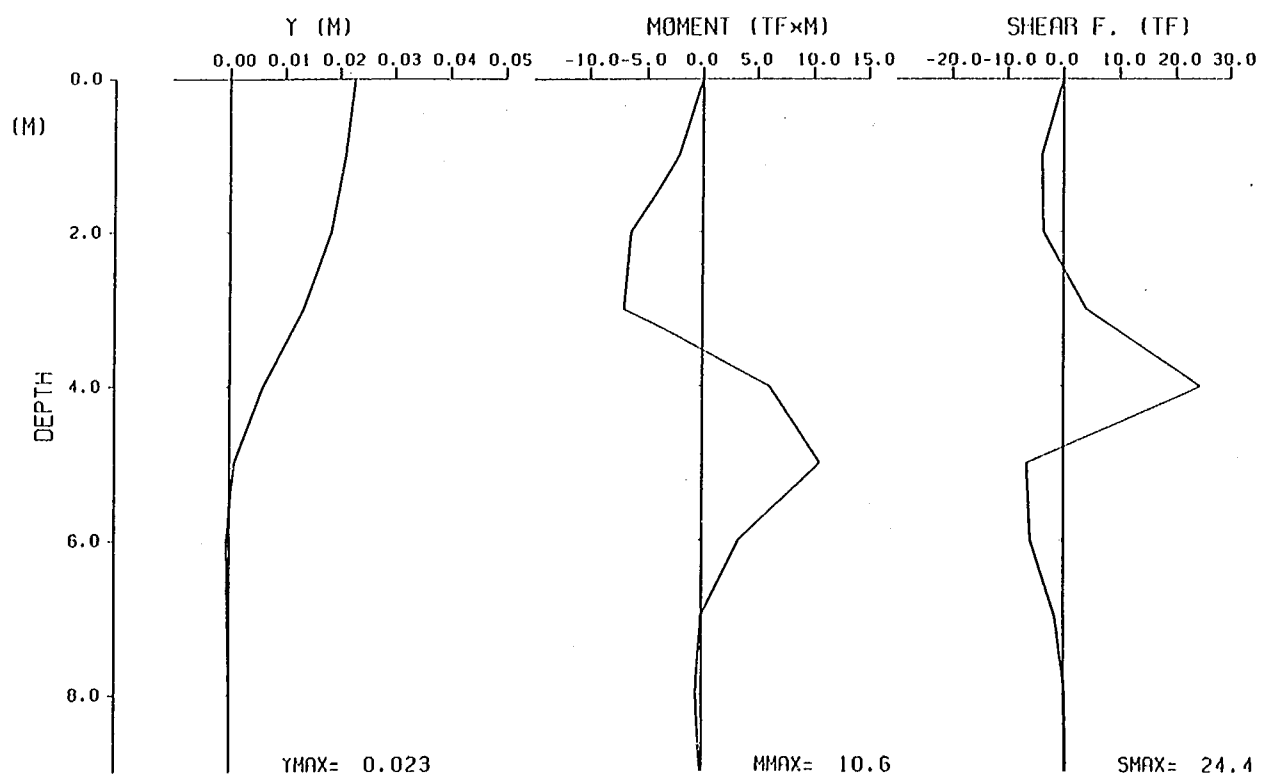


図 3.2 杭長の違いによる杭応力図

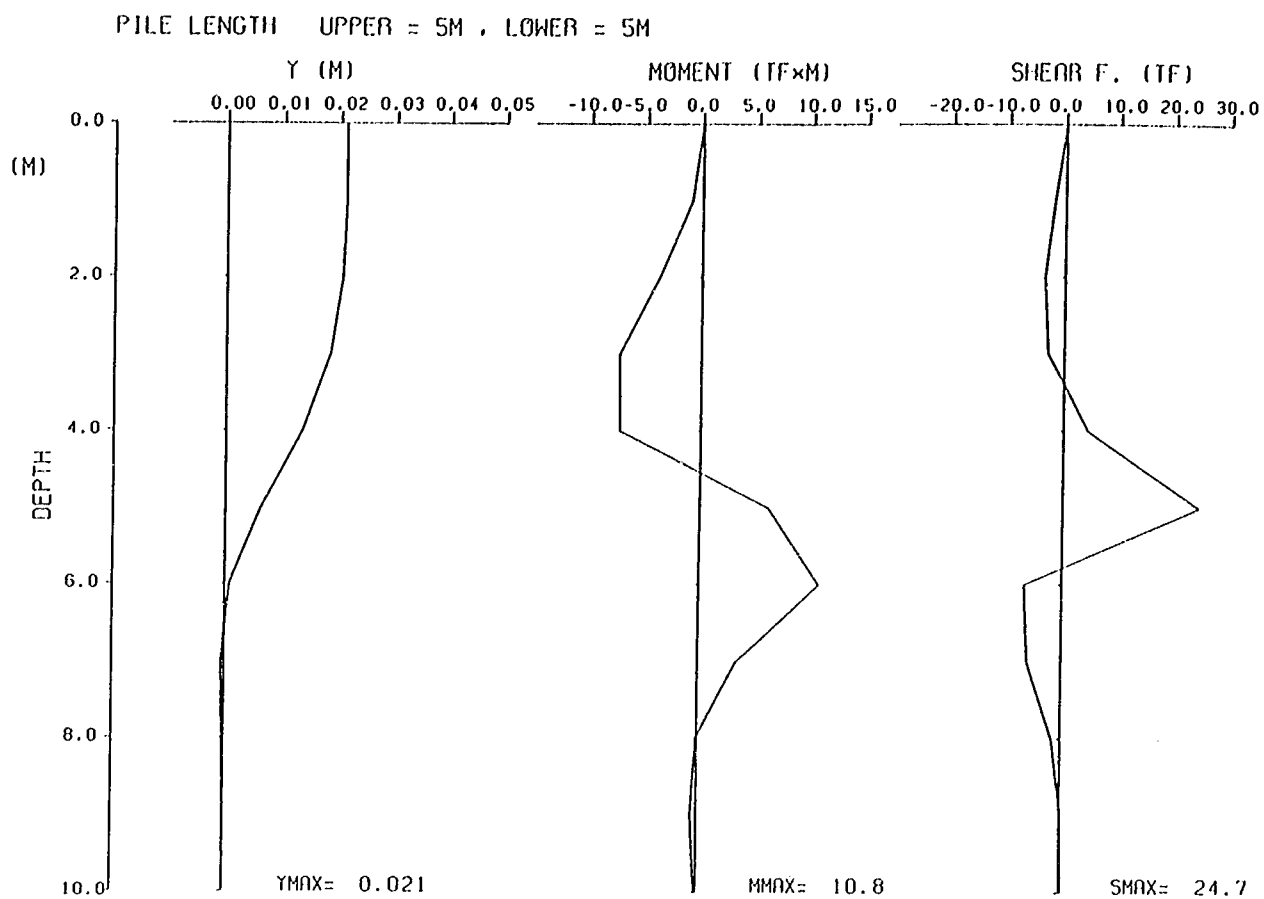


図 3.3 杭長の違いによる杭応力図

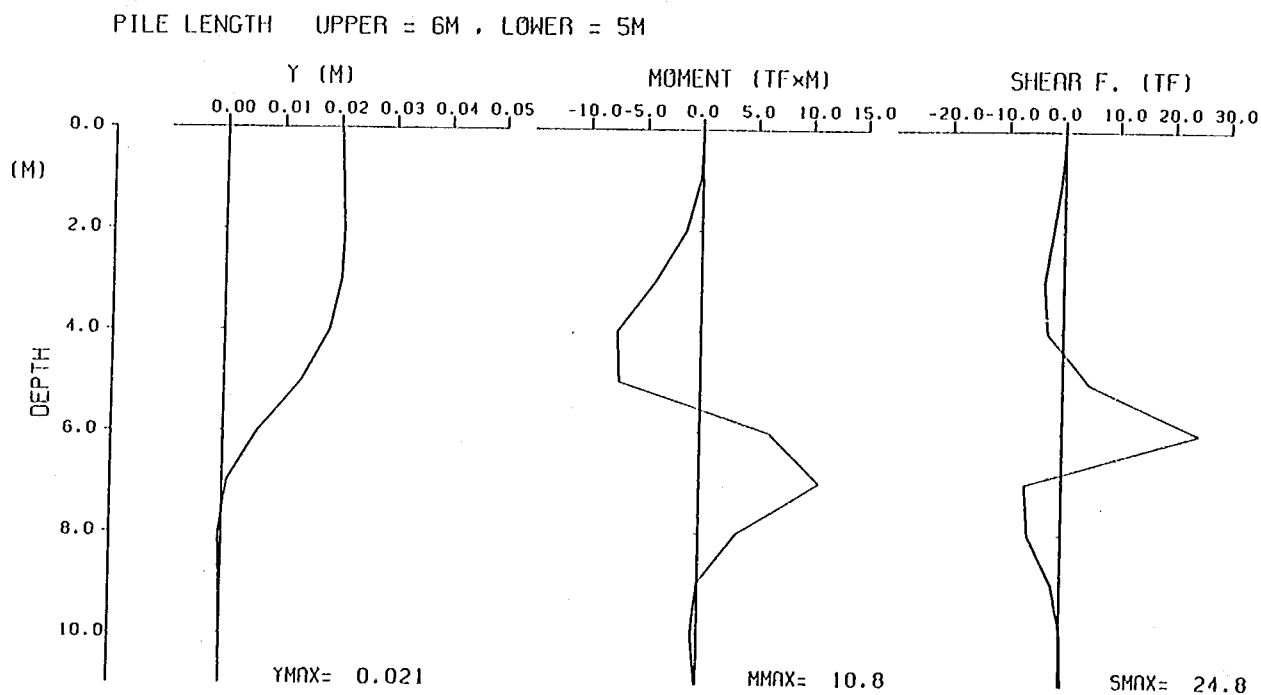


図 3.4 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 7M , LOWER = 5M

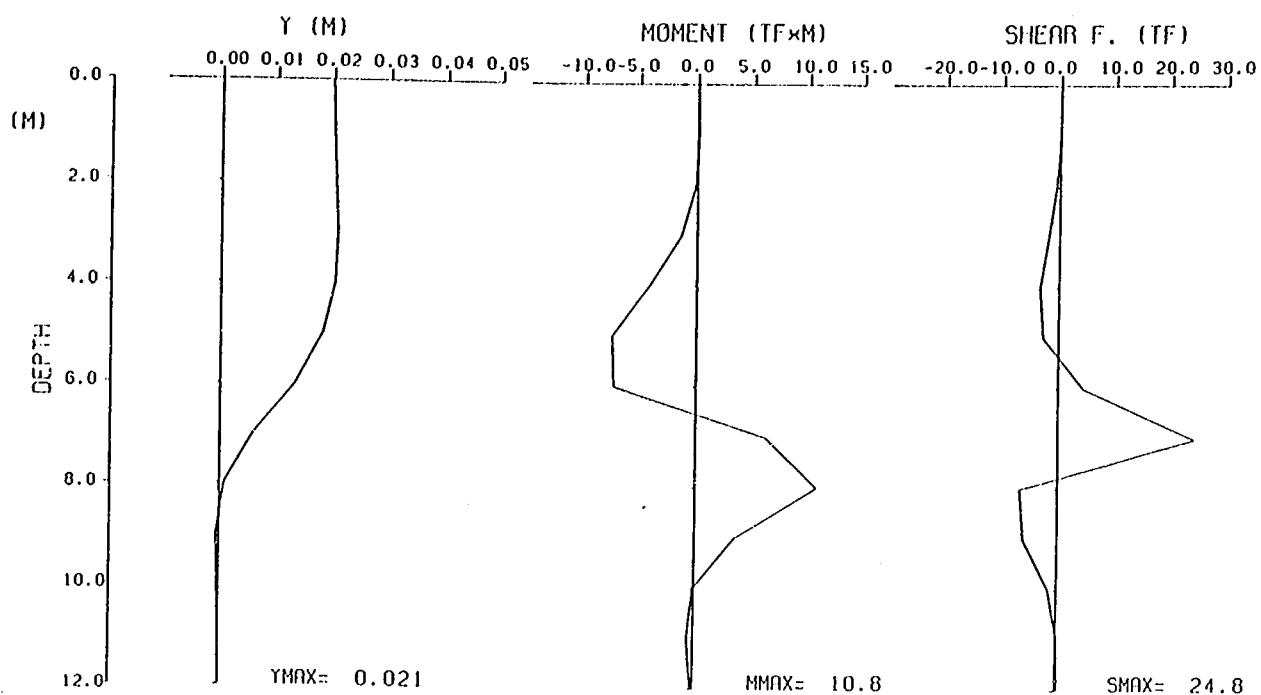


図 3.5 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 8M , LOWER = 5M

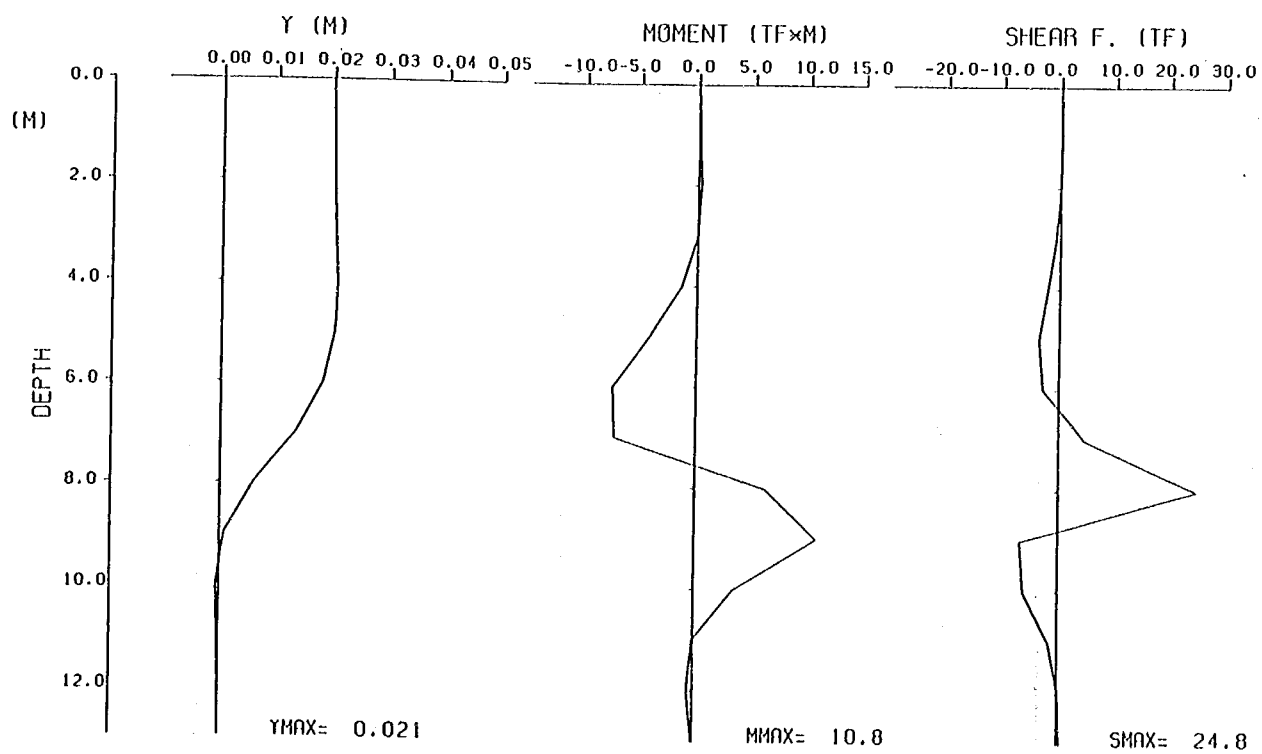


図 3.6 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 9M , LOWER = 5M

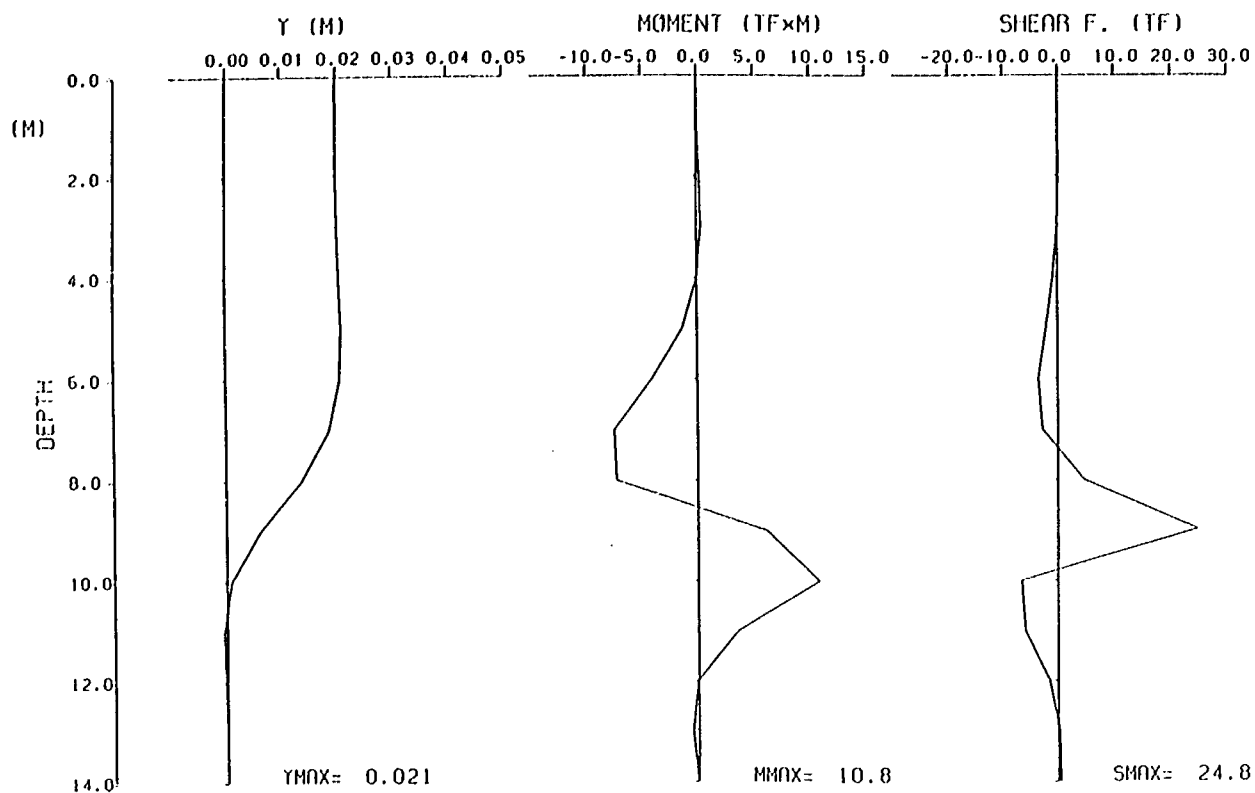


図 3.7 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 10M , LOWER = 5M

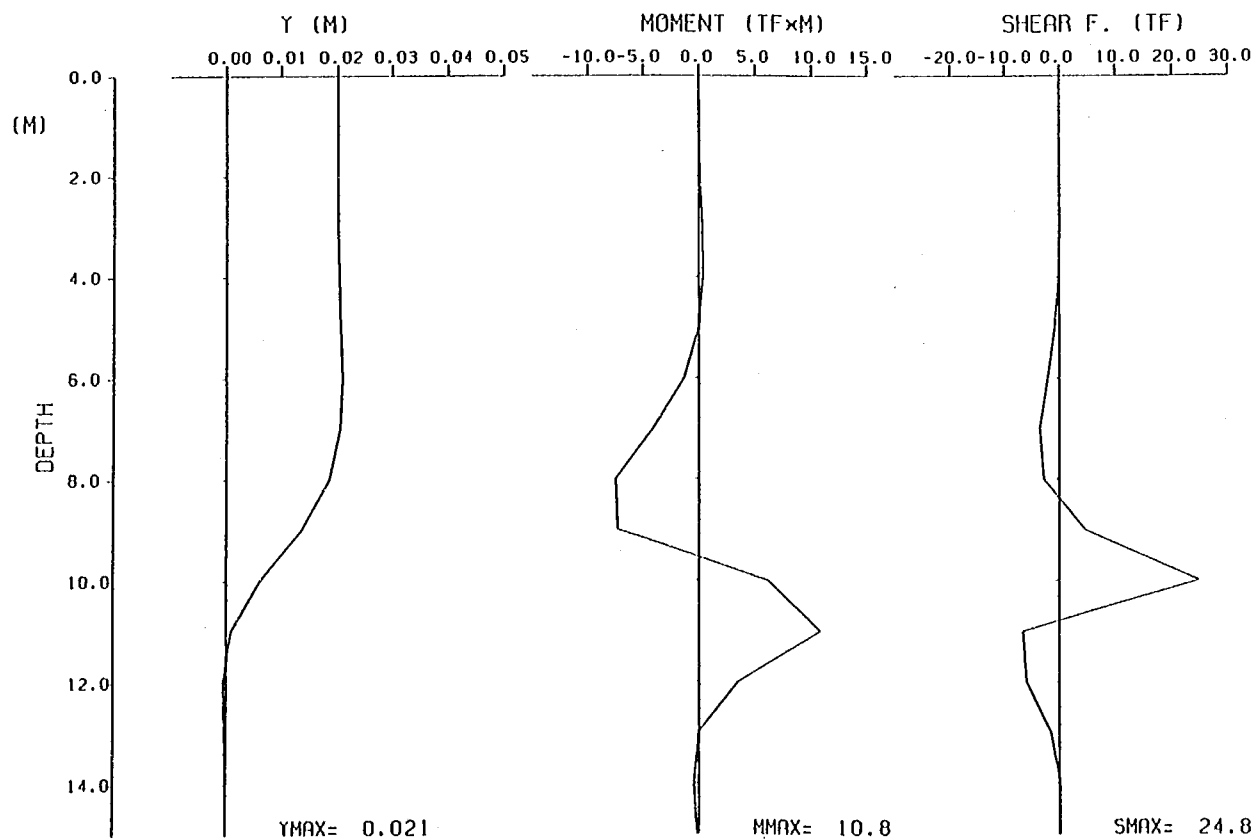


図 3.8 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 11M , LOWER = 5M

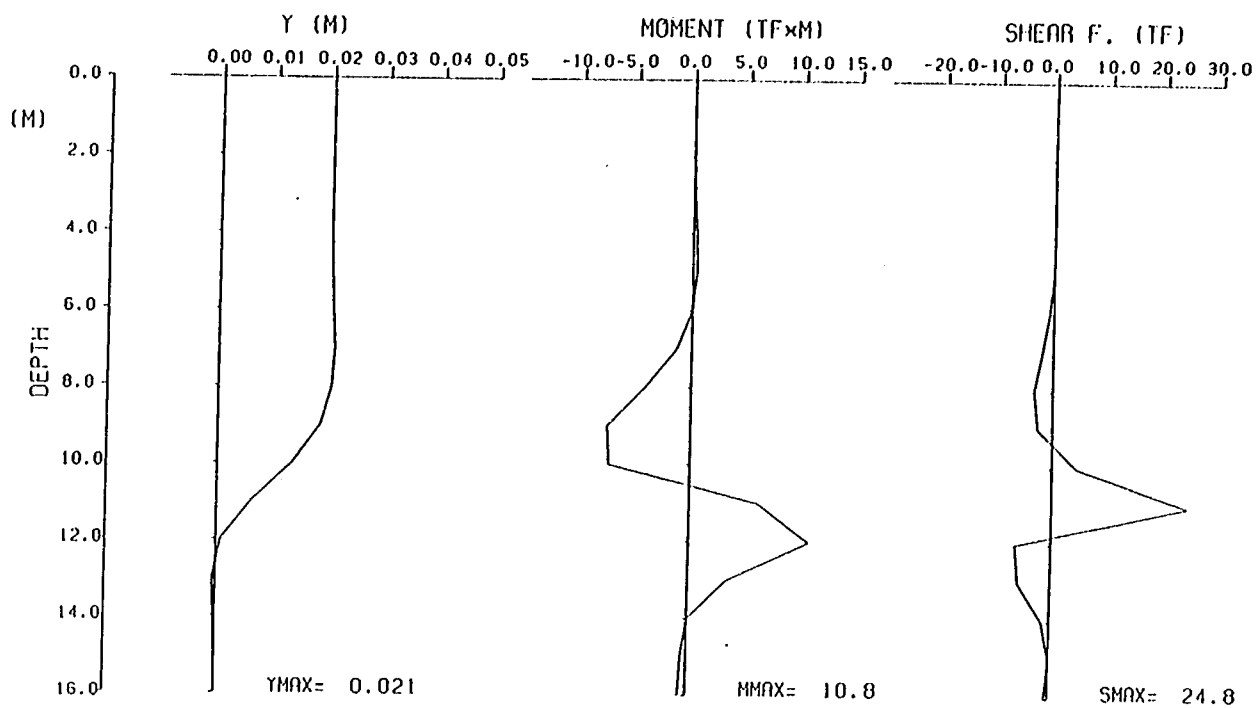


図 3.9 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 12M , LOWER = 5M

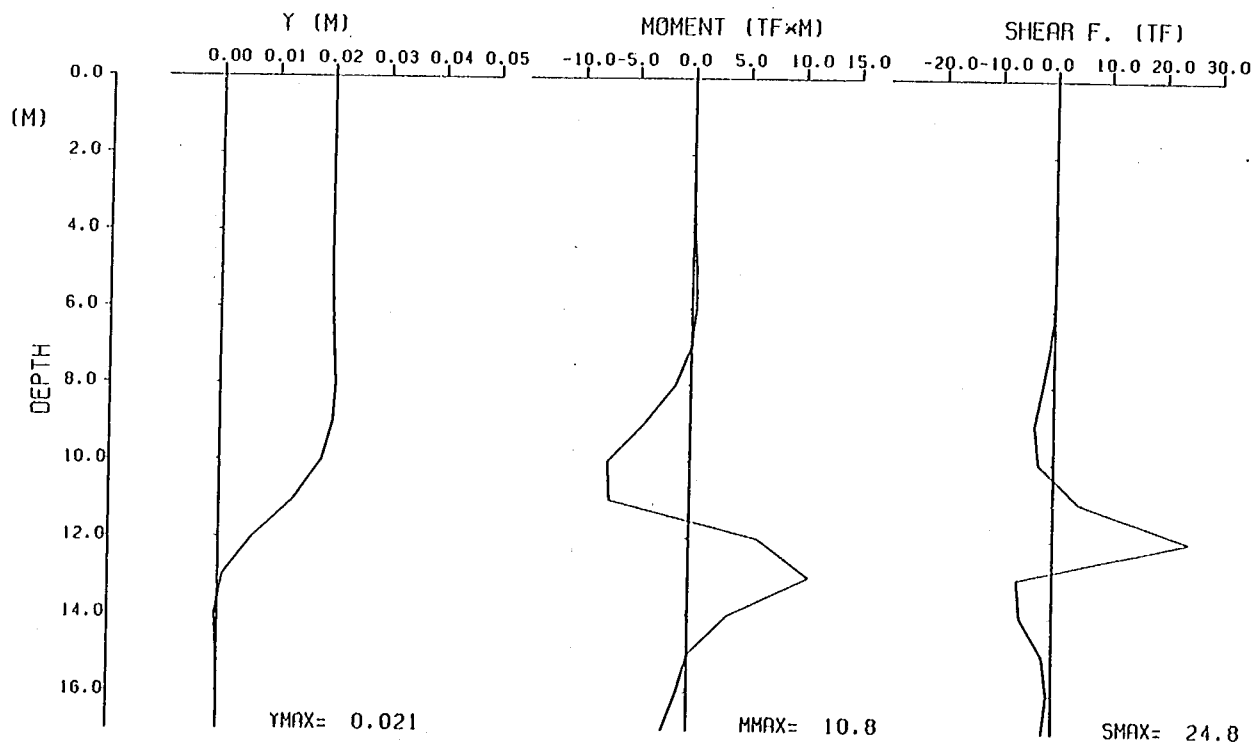


図 3.10 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 13M , LOWER = 5M

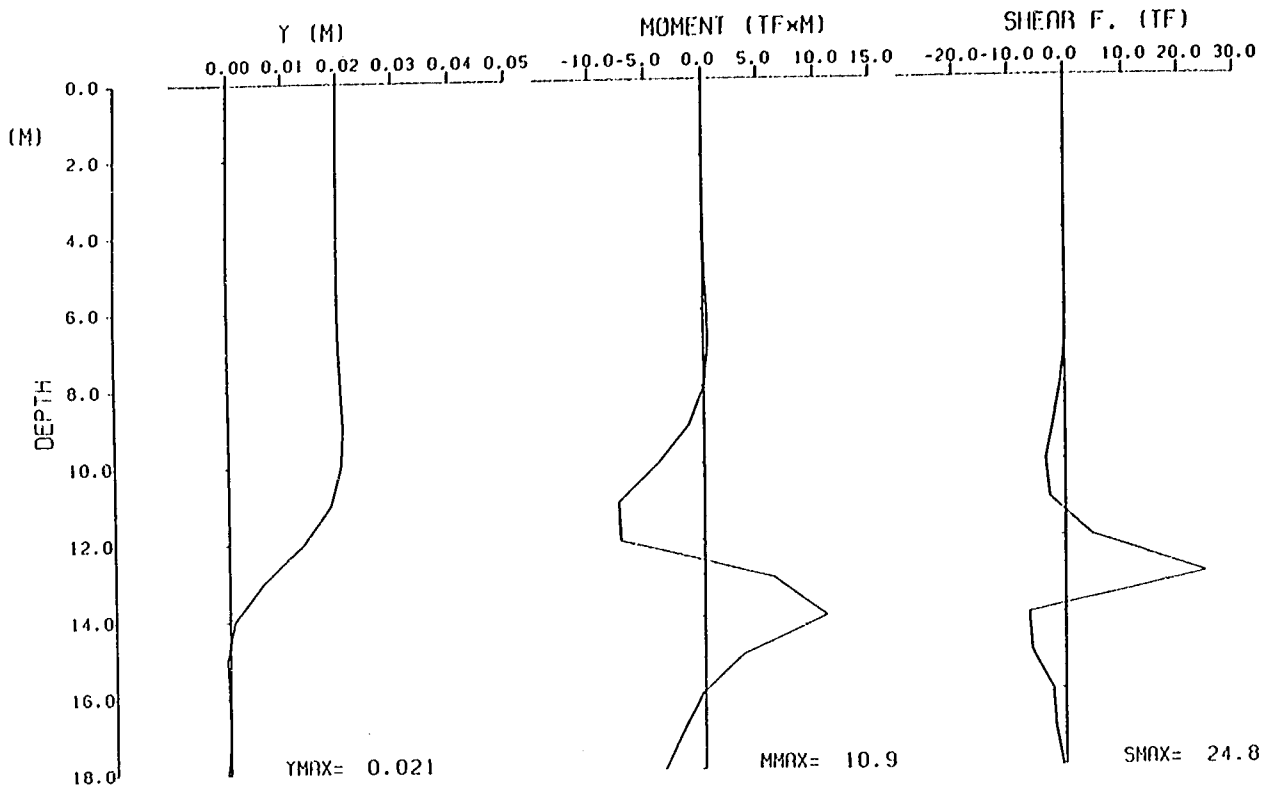


図 3.11 杭長の違いによる杭応力図

PILE LENGTH UPPER = 14M , LOWER = 5M

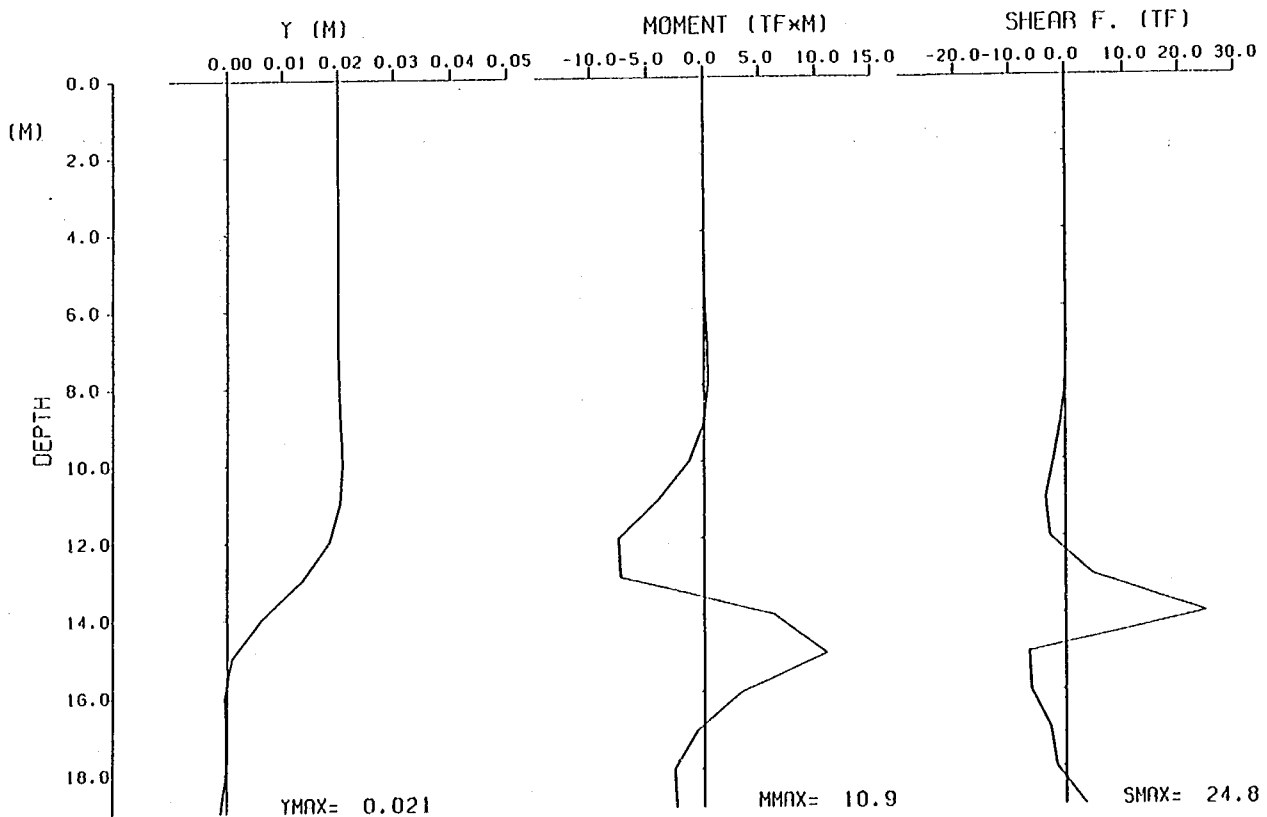


図 3.12 杭長の違いによる杭応力図

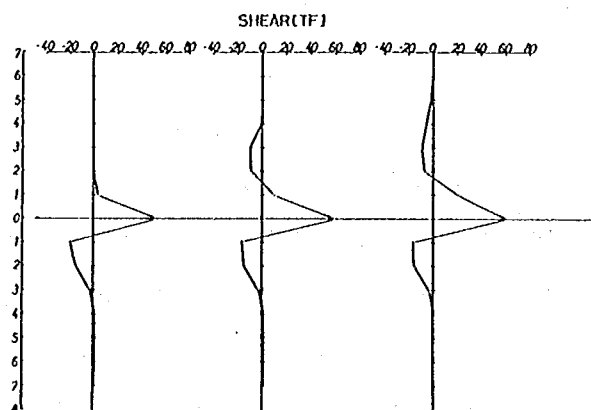
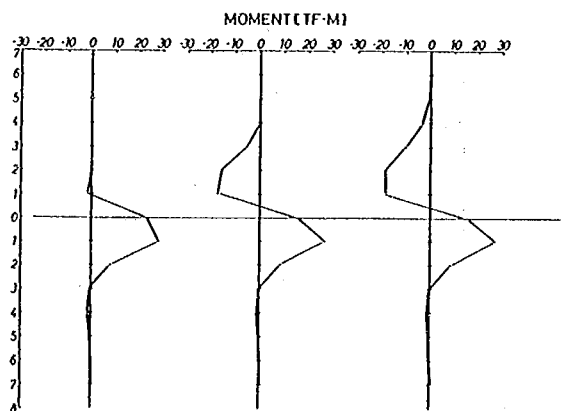
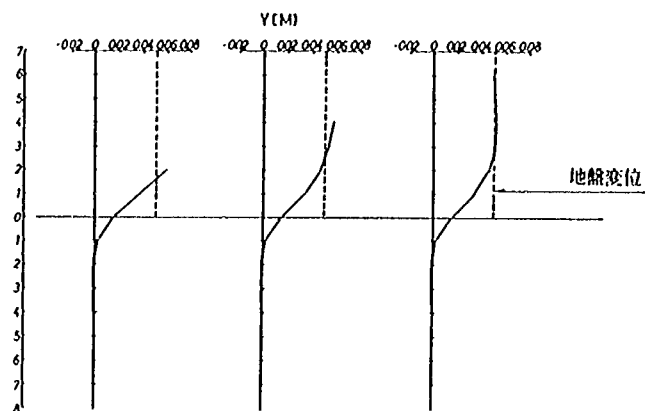
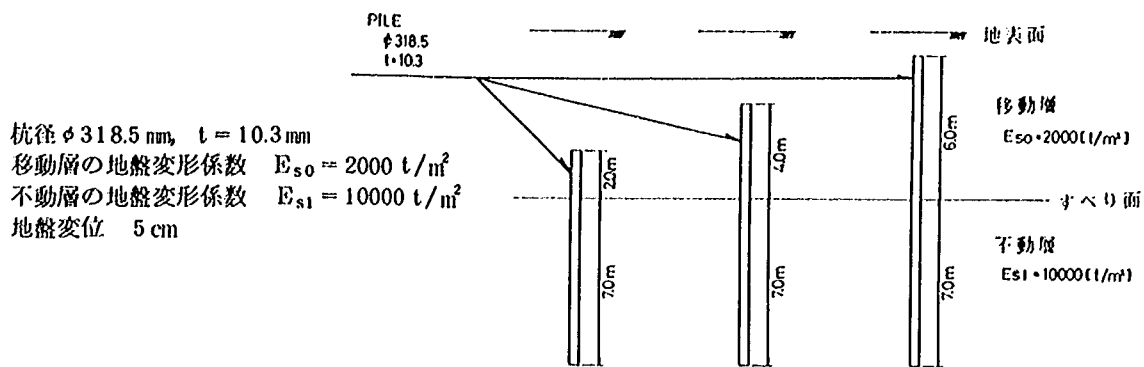


図 3.13 杭長を変化させた場合の解析

3-2 杭の断面（剛性）を変化した場合

(1) 目 的

杭を設計する際に、一般的に多く使用されている形状としては、杭頭部から底部まで同一剛性のもの（肉厚が一定）であるが、ここでは、すべり面付近以外で杭の剛性を変化させた場合の（図 3.14），杭の挙動を見るものである。

(2) 杭の仕様及び地盤条件

各々の諸元は、表 3.3，3.4 に示す通りであるが、変化させる条件としては、杭の曲げ剛性（肉厚に応じて変化する）のみである。なお、剛性を変化する深度は、図 3.15 で、モーメントがすべり面の上下部で最大になる深度を基準にした。

表 3.3 杭 仕 様

杭 径	450.0 mm		
肉 厚	15 mm	20 mm	35 mm
曲げ 剛 性	$1.02 \times 10^3 \text{ t/m}^2$	$1.31 \times 10^3 \text{ t/m}^2$	$2.08 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	（長期） $2,200 \text{ kg/cm}^2$		

表 3.4 地 盤 条 件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^3)
移 動 層	2000	6.279×10^3
不 動 層	1000	3.140×10^4
地盤変位量	2.0 cm	
すべり深度	12.0 m	

(3) 計算結果及び考察

図 3.16，3.17 のような結果が得られたが、比較として、図 3.15 に、杭頭部から底部まで一様な剛性をもつ杭のモーメント図等を示した。図 3.15 の杭と剛性を深度によって変化した杭とでは、剛性の大小、深度にかかわらず、剛性が一様な杭の方が、杭に発生する最大曲げモーメント、最大せん断力共に大きくなっている。

例えば図 3.16 では、剛性が一様な杭（ケース 1）の最大曲げモーメントは $35.68 \text{ t} \cdot \text{m}$ に対し、ケース 6 は $33.53 \text{ t} \cdot \text{m}$ ，最大せん断力では前者が 42.05 t に対し、ケース 6 は 41.03 t というように小さくなっていることがわかる。両者の相異点としては、後者においては、0～8 m 間で肉厚 $t = 20 \text{ mm}$ ，9～14 m 間で肉厚 $t = 35 \text{ mm}$ ，15～19 m 間で肉厚 $t = 20 \text{ mm}$ とすべり面上下付近以外は剛性（肉厚）を落としているということである。また、図 3.17 のように、さらに剛性（肉厚）を落とした場合では（例えばケース 3），最大曲げモーメントが、 $32.35 \text{ t} \cdot \text{m}$ ，

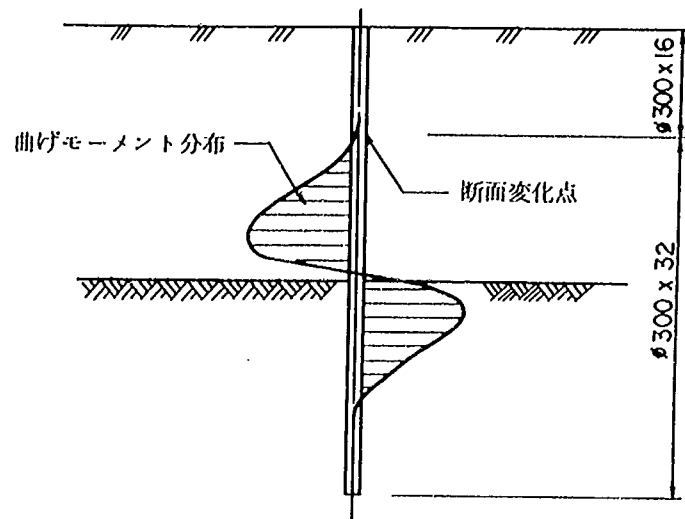


図 3.14 断面変化杭の一例

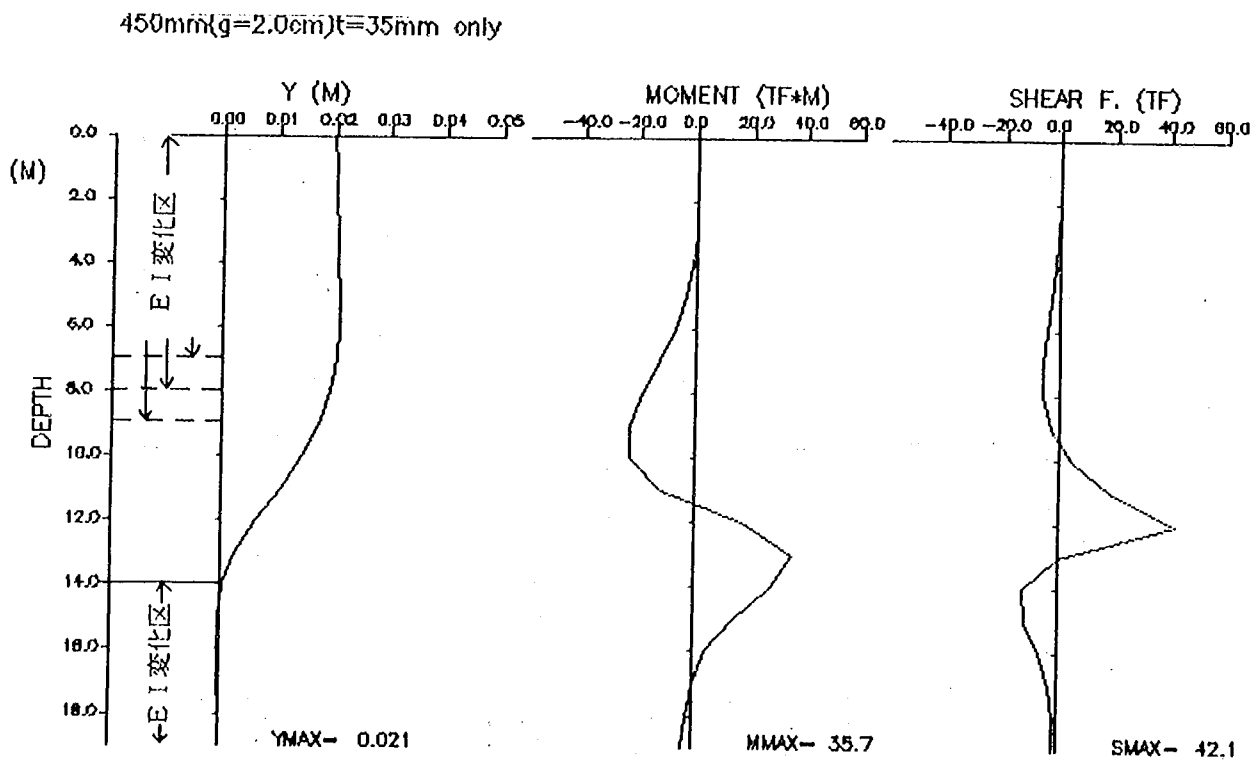


図 3.15 断面変化杭 $\phi 450\text{ mm}$, $t 35\text{ mm}$

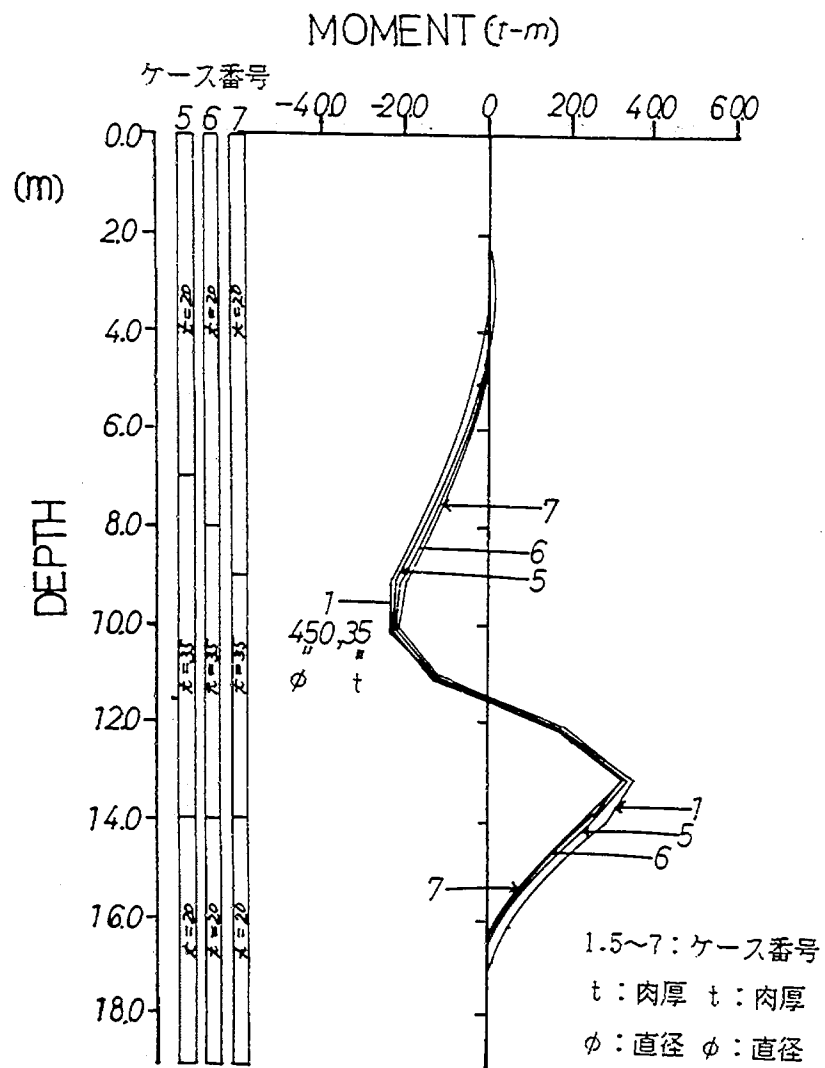


図 3.16 深度により断面（剛性）を変化した杭のモーメント

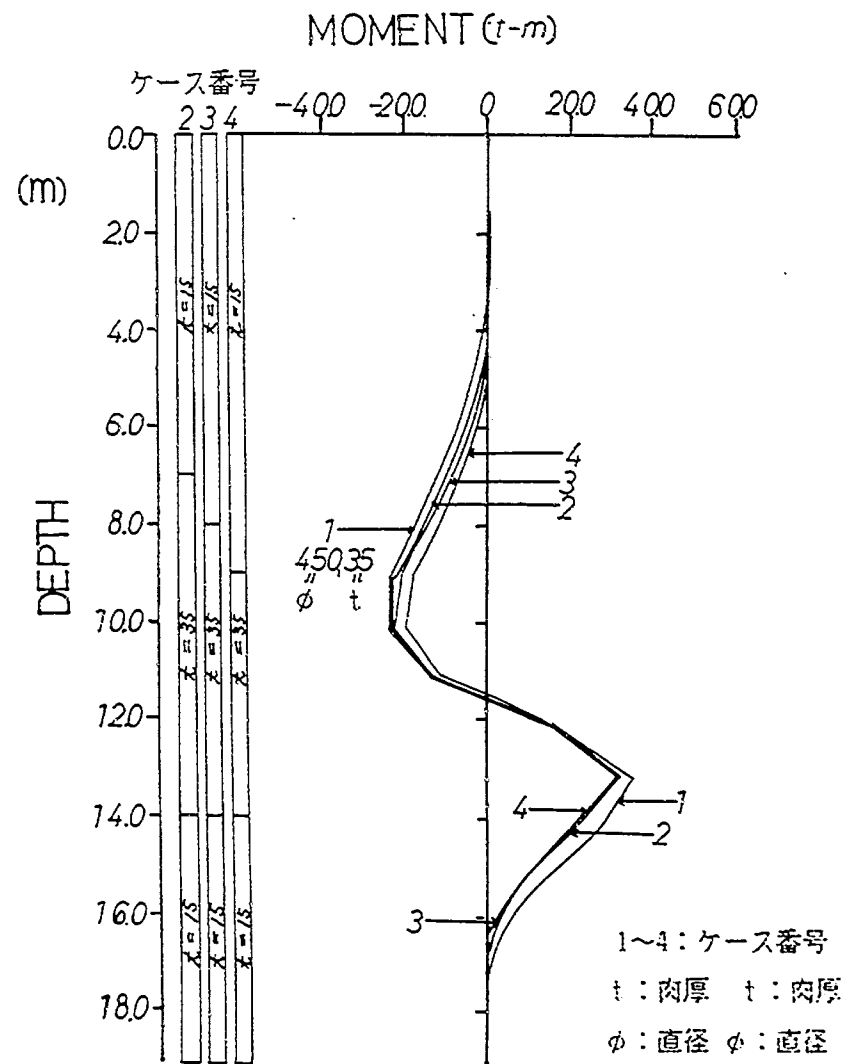


図 3.17 深度により断面（剛性）を変化した杭のモーメント

最大せん断力が 40.45 t と低下している。

このように、深度によって断面（剛性）を変化した場合には、図 3.16，3.17 から以下のことが得られる。

- I) 1本の杭で、剛性（肉厚）を小さくする深度が地表より深いほど、最大曲げモーメント，最大せん断力共に小さくなる。
- II) 1本の杭で、剛性を変化する場合、剛性が小さいもの（肉厚の薄いもの）ほど、杭に発生する最大曲げモーメント，最大せん断力共に小さくなる。

これらから、剛性を変化させて杭を設計する場合には、図 3.16，図 3.17に示すように発生するモーメントが許容内に収まり、しかもその時、杭に発生する最大せん断力は、剛性（肉厚）を変化しても、極端に低下しないので、杭ピッチや経済性等を加味すると、移動層，不動層何れにおいても、断面変化杭を採用しても良いと考えられる。しかし、肉厚の差が極端に異なると、施工性が低下することもあると考えられるので、設計時には、注意を要する所であろう。

3-3 移動層の変位量を変化させた場合

(1) 目的

ある地盤に杭を施工する場合、移動層の変位が垂直方向に等速で変位した時の杭の挙動を見るために計算するものである。

(2) 杭の仕様及び地盤条件

杭及び地盤条件は、表 3.5，3.6 に与えられている通りである。このケースでは、移動層変位量のみを変化させるが、杭に発生する許容曲げモーメントを最大曲げモーメントが越えないように移動層が変位するものとする。

(3) 計算結果及び考察

移動層の変位量の増大と共に、杭に発生するモーメント，せん断力は共に大きくなっていくが、その増加する割合は、地盤を弾性体と考えているので、一定である（表 3.7 参照）。また、杭の挙動は、移動層の変位が増大すると共に、次第にたわみ方が増大していくのがわかる。

表 3.5 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ 剛 性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	（長期） 2,200 kg/cm ²

表 3.6 地 盤 条 件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^3)
移 動 層	2000	4.444×10^3
不 動 層	10000	2.222×10^4
地盤変位量	0.5 ~ 3.09 cm	
すべり深度	6.0 m	

表 3.7 地盤の変位に対するモーメントせん断力

ケース番号	地盤変位(cm)	最大曲げモーメント ($t \cdot m$)	最大せん断力(t)	比率
1	0.5	2.70	6.19	1.0
2	1.0	5.39	12.38	2.0
3	1.5	8.09	18.57	3.0
4	2.0	10.78	24.76	4.0
5	2.5	13.48	30.95	5.0
6	3.09	16.34	37.51	6.05

以上から、次のことがわかる (図 3.18 参照)。

- 1) 杭に移動層の垂直方向の速度を等分布的に変位を与えると、その大きさにより、モーメント、せん断力に変化するが、移動層の変位量に比例するので (弾性地盤)、ある杭が持つ

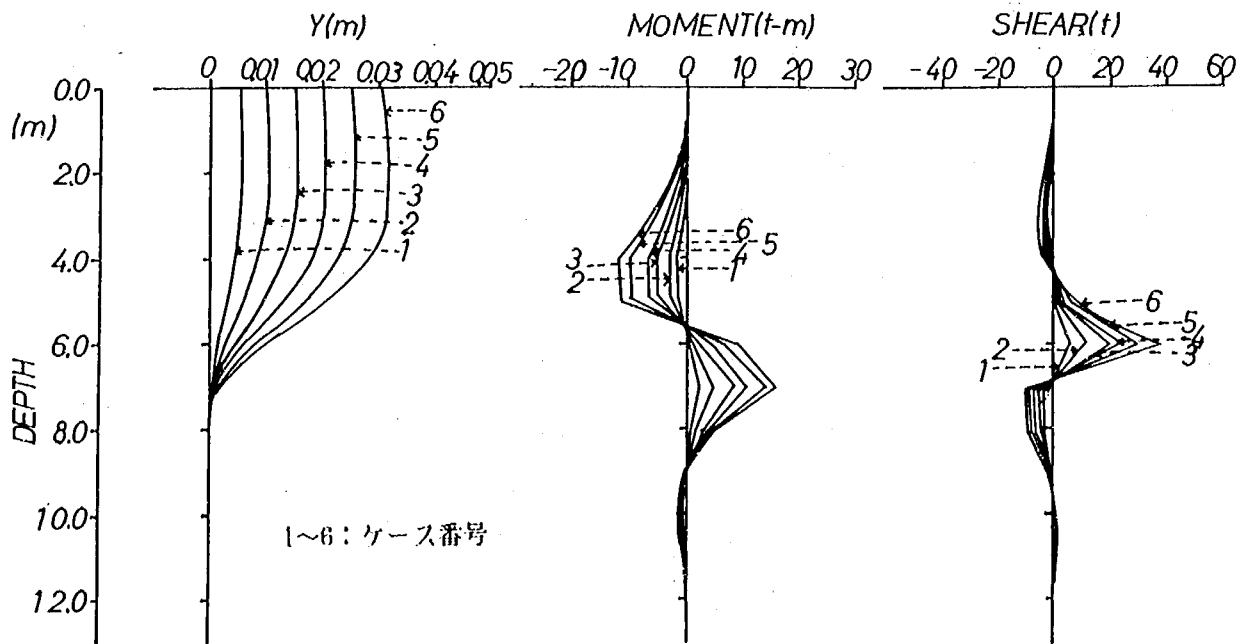


図 3.18 移動層の変位量を変化させた場合の応力図

許容曲げモーメントに等しくなる。つまり、杭としての効果が最大に期待される時の移動層の変位量を逆に計算することが可能である。

II) 杭に発生する最大曲げモーメントは、すべり面より下に発生し、最大せん断力はすべり面付近に発生している。

3-4 移動層の地盤変形係数を変化させた場合

(1) 目的

移動層の地盤変形係数を変化させて、杭の挙動を見るために計算を行ったものである。ただし地盤は移動層と不動層の2層系の地盤とし、それぞれの層は均一と考える。

(2) 杭仕様及び地盤条件

本ケース計算に使用した杭及び地盤条件は、表3.8、3.9に示す通りだが、移動層の地盤変形係数は、不動層と比較して、相対的に小さくし、かなり変形係数の小さなものから、変形係数の大きなものまで6ケースを解析した。

(3) 計算結果及び考察

本解析では、種々の移動層（地盤変形係数 E_{so} の変化による）を与えて、杭に発生するモーメントやせん断力の分布を見たが、その結果は表3.10に示してある。それによると、移動層の E_{so} が増加するに従って、モーメント、せん断力共に増加しているが、比率は一定ではない。例えば、 E_{so} を3倍にした場合、最大曲げモーメントは、1.25倍、最大せん断力は、2.11倍となる。また E_{so} を50倍にしても、同様に、最大曲げモーメントで2.82倍、最大せん断力で9.48倍、と比例関係を示さないことがわかる。以上から下記のこと得られる。

表 3.8 杭 仕 様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ 剛 性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	$2,200 \text{ kg/m}^2$
杭 長	13.0 m

表 3.9 地 盤 条 件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^3)
移 動 層	100 ~ 5000	$3.14 \times 10^2 \sim 1.57 \times 10^4$
不 動 層	10000	3.14×10^4
地盤変位量	2.0 cm	
すべり深度	6.0 m	

表 3.10 移動層の地盤変形係数の変化に伴うモーメント，せん断力の変化

ケース番号	移動層の E_{s0} (t/m^2)	最大曲げモーメント ($t \cdot m$)	最大せん断力 (t)
1	100 (1.00)	4.79 (1.00)	3.99 (1.00)
2	300 (3.00)	5.99 (1.25)	8.40 (2.11)
3	500 (5.00)	6.86 (1.43)	7.59 (3.23)
4	1000 (10.00)	8.75 (1.83)	17.27 (4.33)
5	3000 (30.00)	12.01 (2.51)	30.09 (7.77)
6	5000 (50.00)	13.53 (2.82)	37.83 (9.48)

i) 表 3.10 に示すように，移動層の変位量を一定とした場合，移動層の E_{s0} の増加に対して杭に発生する最大曲げモーメント，最大せん断力は E_{s0} に比例せず，増加率は，せん断力の方が大きくなっている。つまり， E_{s0} が不動層の地盤変形係数 ($= E_{s1}$) に対して相対的に大きいほど，せん断力が大きくなっている。

ii) 杭のたわみは図 3.19 に示すように，移動層の変形係数 E_{s0} が不動層の変形係数 E_{s1} に対して小さいほど，逆三角形に近くなり，逆に E_{s0} が E_{s1} に近くなるほど移動層の変位と同形状を示している。

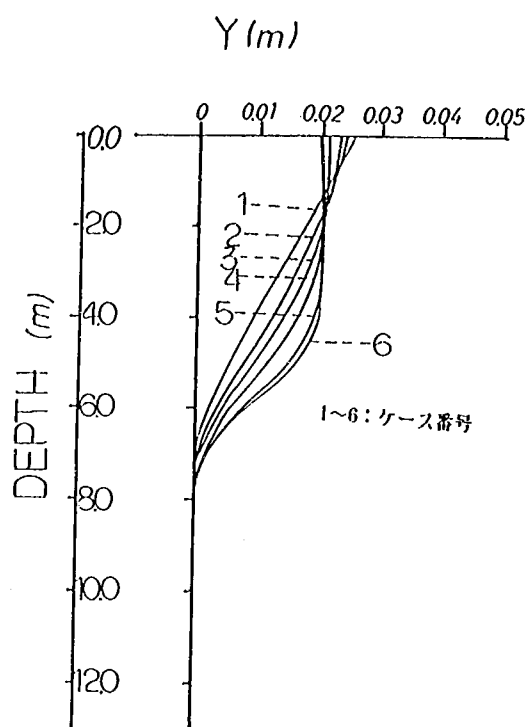


図 3.19 移動層の地盤変形係数の変化に伴うたわみ変化図

3-5 移動層の地盤変形係数を層別に変化させた場合

(1) 目的

前ケースと異なるのは，移動層での地盤変形係数 E_{s0} が均一ではなく，層毎（深度毎）に変わっている点である。移動層中の E_{s0} を数層に分けて，それぞれに E_{s0} を与え，その時の杭の挙動を見るものである。

(2) 杭仕様及び地盤条件

表 3.11，表 3.12 に示す通りであるが，ここには，層毎に地盤変形係数（移動層中の E_{s0} ）を変化させる以外は条件を固定して解析するものとする。

表 3. 11 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ剛性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	2,200 kg/m ²
杭 長	13.0 mm

表 3. 12 地盤条件

	地盤変形係数 (t/m ²)	地盤反力係数 (t/m ²)
移 動 層	層別に変化	層別に変化
不 動 層	//	//
地盤変位量	2.0 cm	
すべり深度	6.0 m	

(3) 計算結果及び考察

以下の4ケースについての計算を行った。

ケース1：移動層の変形係数 (E_{s0}) を地表からすべり面の間を 1000~6000 t/m² の5層系地盤とする。また $E_{s1} = 10000 \text{ t/m}^2$ 。(図 3. 20)

ケース2： E_{s0} を地表からすべり面の間を 100~600 t/m² の5層系地盤とする。また $E_{s1} = 10000 \text{ t/m}^2$ 。(図 3. 21)

ケース3： E_{s0} を 10, 100, 1000 t/m² の3層系とする。また, $E_{s1} = 15000 \text{ t/m}^2$ 。(図 3. 22)

ケース4： E_{s0} を地表より 1000, 2000, 100 t/m² 3層系地盤とし, 不動層を $E_{s1} = 5000 \text{ t/m}^2$ と 10000 t/m² の2層系地盤とする。(図 3. 23)

各ケース共, 分割層内での地盤は均一であると仮定している。また, E_{s0} がすべり面まで一層として計算した結果を図 3. 24 に示す。

まず, ケース1とケース2では, ケース2の方が移動層の E_{s0} が小さくなっている。また, 最大曲げモーメントは, 移動層の E_{s0} が大きいほどすべり面付近で, 一点で突出するように現れるが, E_{s0} が小さいときは, すべり面でのみ突出せず, その上位から"コ"の字型を示すようになっている。また, E_{s0} が小さいので, モーメントはすべり面上位で, 小さくなっている。たわみは, E_{s0} が小さいほど"抑え杭"⁽⁷⁾に近いパターンを示す傾向にある。

ケース3では, 上位の E_{s0} が非常に小さく, 下位に従って E_{s0} の増加の割合を大きくしているが, たわみを見ると, E_{s0} が小さいため, ケース2よりもさらに"抑え杭"⁽⁷⁾に近いパターンを示している。また, 6.0 m付近では E_{s0} と E_{s1} (不動層の地盤変形係数) の相対的な差が大きいので屈曲するような挙動が見られている。また, 不動層と移動層の地盤変形係数の差が相

ES (1000-6000T/M2)

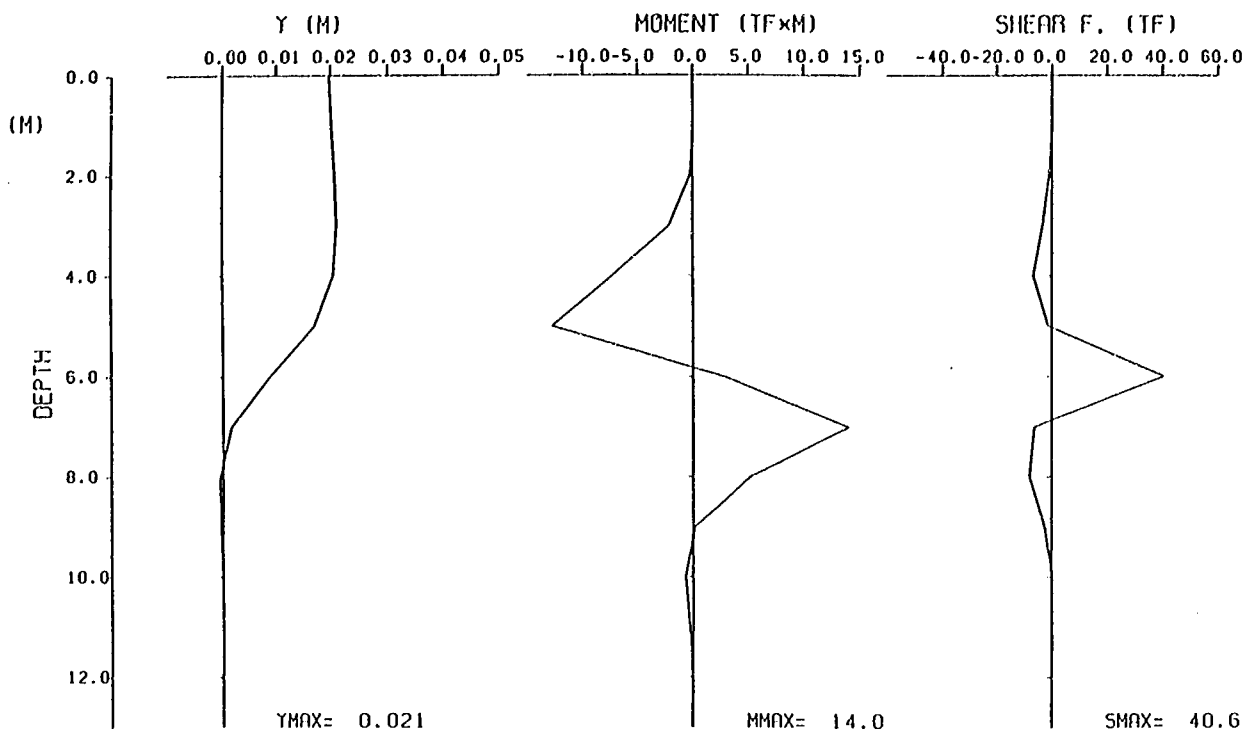


図 3.20 多層系 (6 層) 地盤での杭の応力図 (ケース 1)

ES0 (100-600T/M2) , ES1 (10000T/M2)

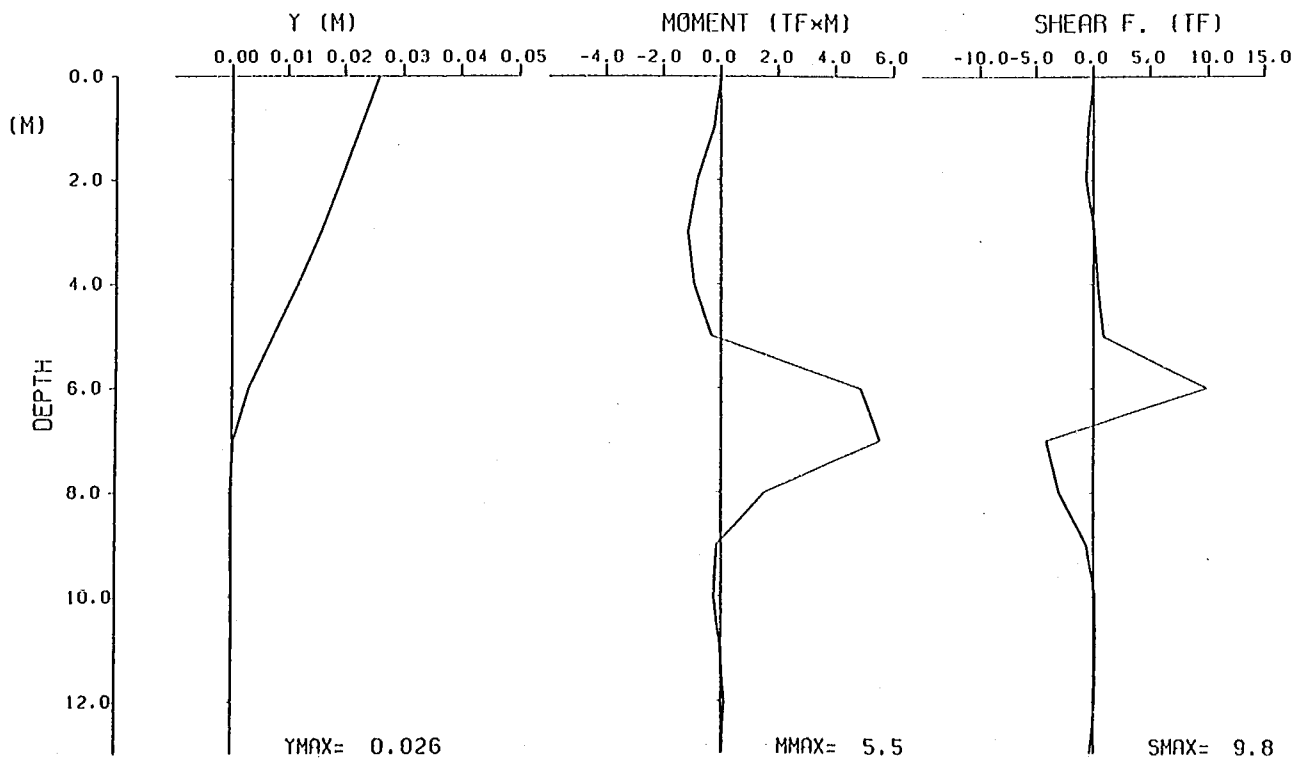


図 3.21 多層系 (6 層) 地盤での杭の応力図 (ケース 2)

ES (10-100-1000-15000)

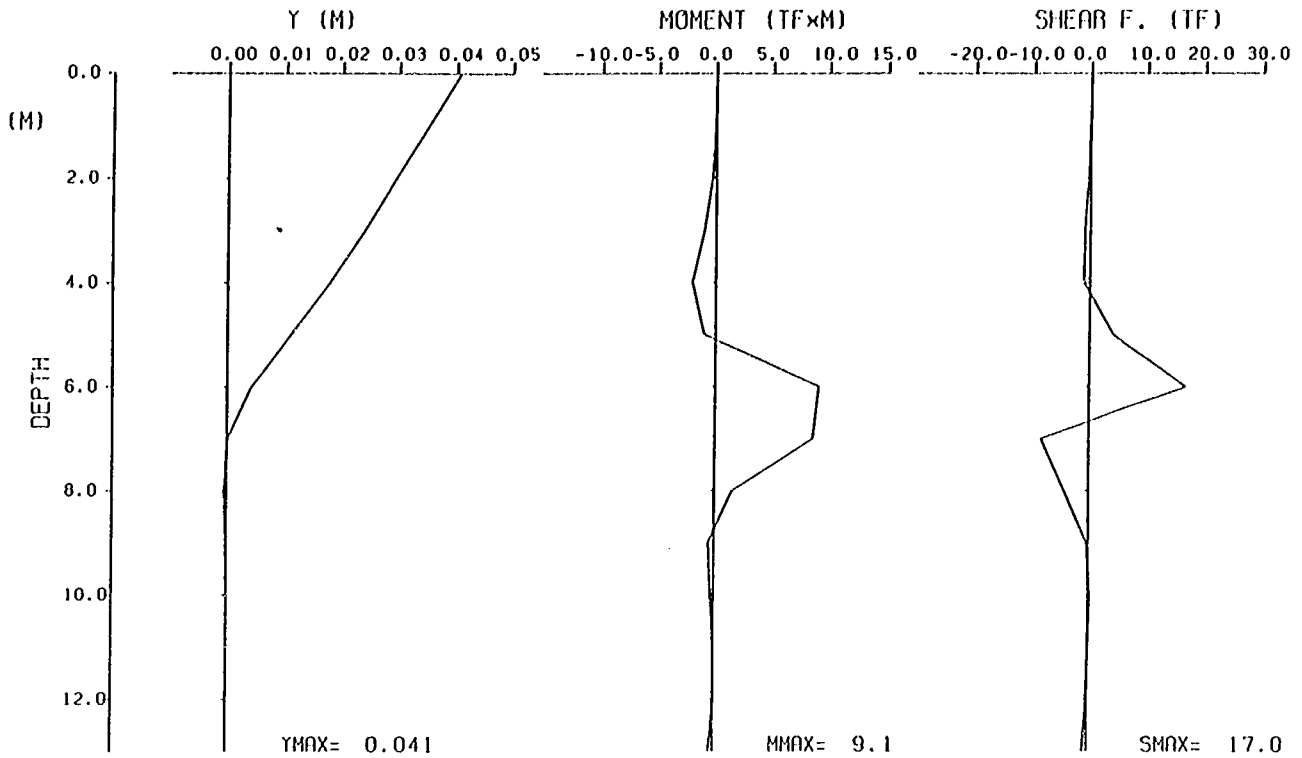


図 3.22 多層系 (6 層) 地盤での杭の応力図 (ケース 3)

ES (1000-2000-100-5000-10000)

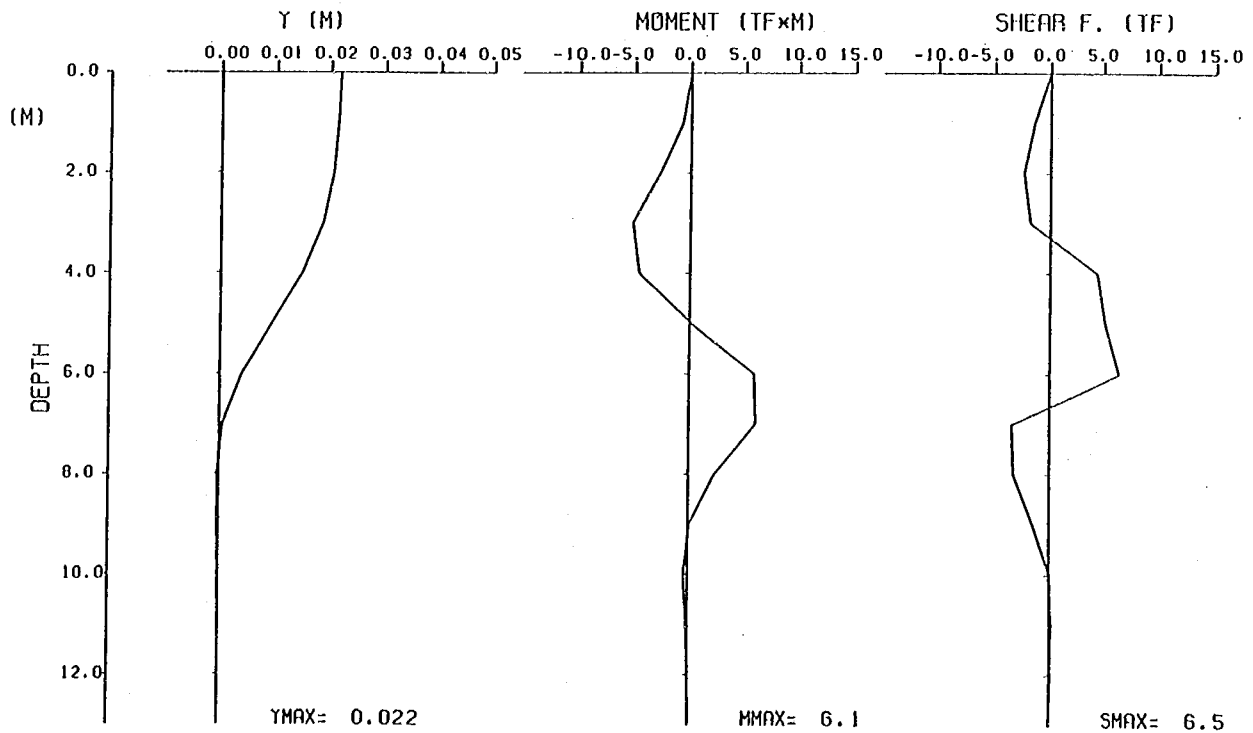


図 3.23 多層系 (6 層) 地盤での杭の応力図 (ケース 4)

$EI_0 = 2000T/M^2$, $EI_1 = 10000T/M^2$

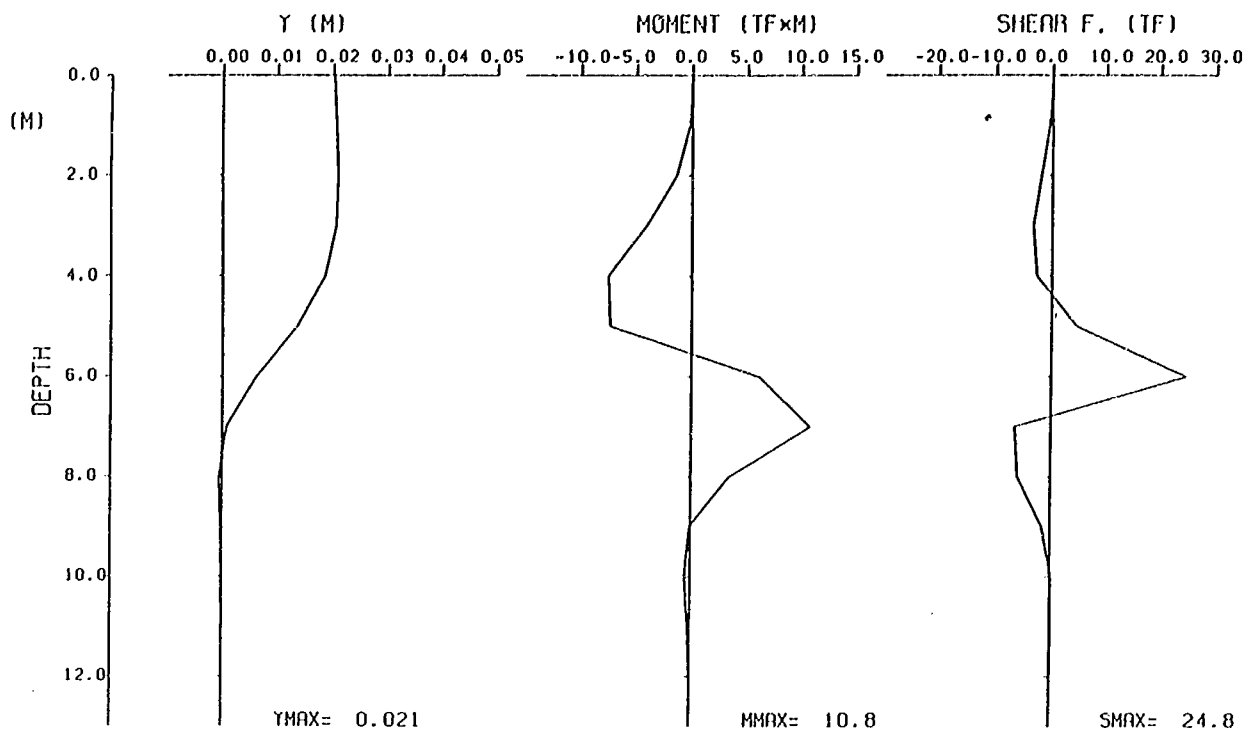


図 3.24 二層系地盤の杭応力図

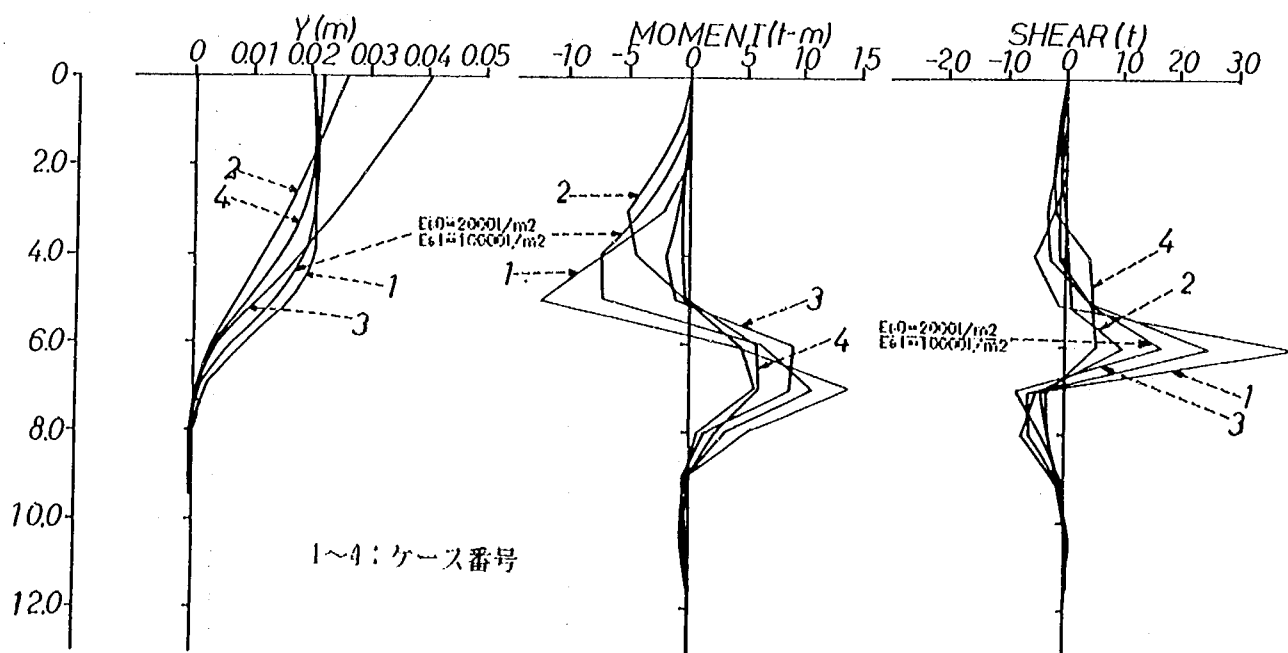


図 3.25 多層地盤における杭応力比較図

対的に大きいほど，すべり面より下位でのモーメントの発生の仕方が異なり，差が大きいほど“台形”，小さいほど“三角形”形状を示していることがわかる。

ケース4では， E_{s0} を層別に不規則に並びかえての計算だが，最上位の E_{s0} が相対的に大きいので，たわみとしては，“くさび状”⁽⁷⁾パターンに似ている。しかし，せん断力は，すべり面6.0 mより上位の4.0～6.0 m間に弱い層（ $E_{s0} = 100 \text{ t/m}^2$ ）が存在するので，その部分でも大きくなっていることがわかる。

以上から次のことが判明した（図3.25参照）。

- i) 移動層における E_{s0} の並び方にほとんど関係なく，移動層上部での E_{s0} が不動層の E_{s1} と比較し，相対的に小さいほど“抑え杭”，相対的に大きいほど“くさび杭”のパターンを示す。
- ii) 移動層内で，ある部分において E_{s0} が他の E_{s0} と比較して，非常に小さいときは，せん断力がその部分に集中するため，すべり面上部でのせん断力図は，“台形”形状を示す。
- iii) 移動層の E_{s0} と不動層の E_{s1} の差が相対的に大きいほど，すべり面下部でのモーメント図は“台形”，小さいほど“三角形”形状を示す。

なお，実際の地盤も，上記のように何層かに分かれている場合が多いので，移動層内での E_{s0} の平均を取らずに，実際の計測（標準貫入試験，孔内水平載荷試験）などでデータを入力するのが効果的である。

3-6 すべり面が数枚ある場合

(1) 目的

本ケースは，すべり面が数枚存在する場合の解析で，異なる地盤変位量を入力することにより，すべり面を数層仮定して計算するものである。

(2) 杭仕様及び地盤条件

2ケースの計算例を示す。杭仕様，地盤条件についてはそれぞれ後述する計算結果の中で説明する。

(3) 計算結果及び考察

2ケース（1ケースは実際の現場での測定データを入力）の計算結果について以下説明する。

a) すべり面が1～3枚存在する場合

表3.13，3.14の条件で計算したが，5.5 mのすべり面は，最下部のものとして固定されており，その上位に，3.0 m，2.0 mと4.0 mの2面のすべり面をもつ場合について，それぞれ計算した。その結果，すべり面が1枚だけ存在する場合よりも，すべり面がその上位にさらに何枚か存在する時の方が，杭のたわみ方は，逆三角形に近い形状を示しやすくなっている。しかし，地表面に近いほど地盤変位量を大きくしているので，多層すべり面を持つ場合での杭頭変位は，何れも一枚のすべり面の方よりも大きくなっている（図3.26）。

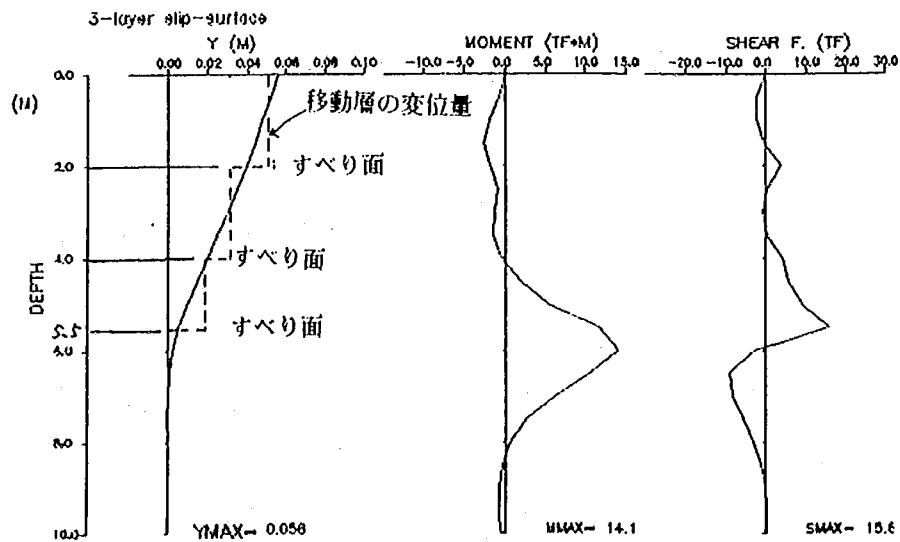
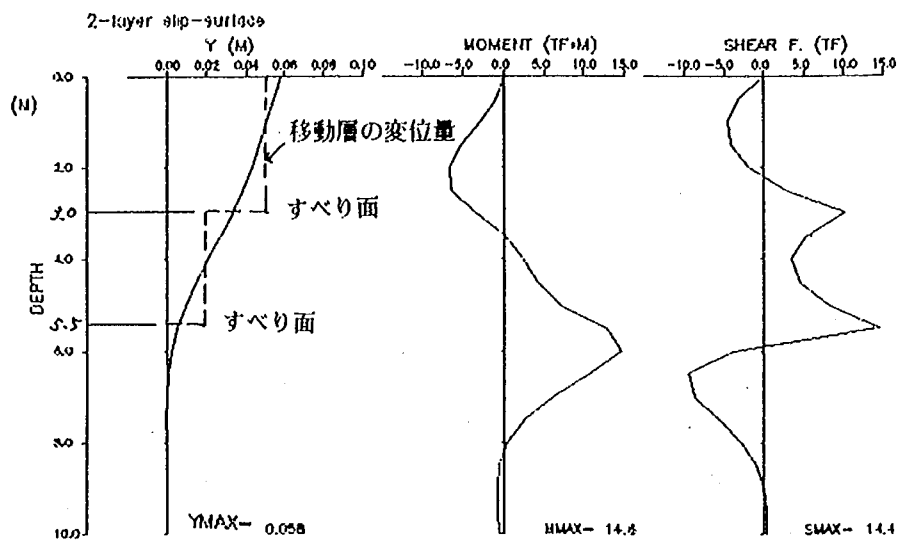
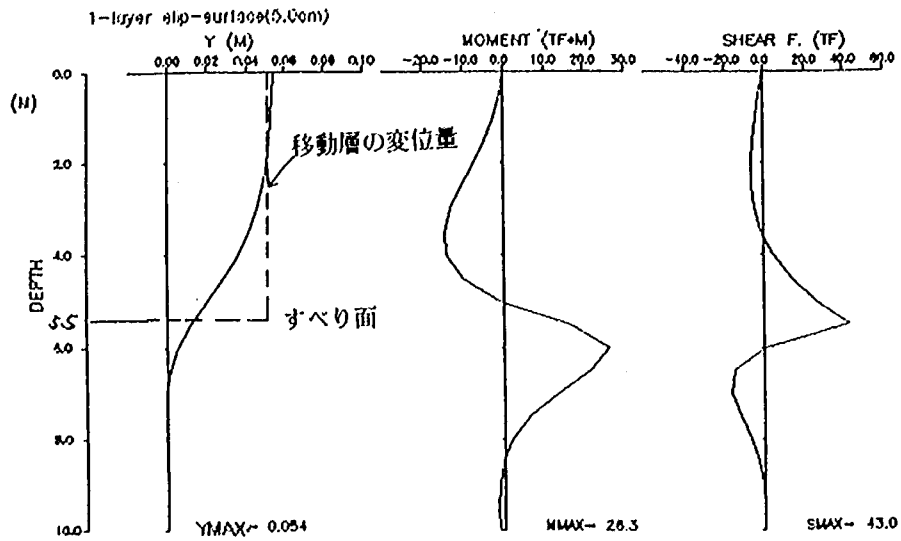


図 3.26 複数すべり面を持つ地すべり地での杭応力解析

表 3.13 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ剛性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

表 3.14 地盤条件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^3)
移動層	1000	3.140×10^3
不動層	10000	3.140×10^4
地盤変位量	2.0 ~ 5.0 cm	
すべり深度	(5.5 m) : (3.0 m, 5.5 m) : (2.0 m, 4.0 m, 5.5 m)	

以上のことから、このケースの場合、次のことが言える。

- i) 地盤変位量の差によって、すべり面を仮定した場合、その差がモーメント図、せん断力図に明瞭に出てくる。
- ii) 地盤変位量が、地表面より次第に小さくなるように与えた場合、杭のたわみ方は、逆三角形に近い形状を示す。
- iii) 地盤変位量を地表面からすべり面まで、等分布的に与えず、階段状に与えてやると、等分布的に与えた時よりも、モーメント、せん断力共に小さくなる。

b) 実際の現場事例 (上平丸; 新潟県) ⁽⁸⁾

i) 現場概要

本現場は、新潟県南端の東頸城地すべり地帯の1つであり、この地域では春先の融雪期に地すべりが頻発しており、本地すべりでも過去にも数年毎に大規模な地すべり変動が発生した所である。本地域の地盤は、黒色泥岩層で構成され一部砂岩を挟在する。

ii) 杭仕様及び地盤条件

杭仕様は、表 3.15 に示す通りである。地盤条件は、実際のデータとしては、現地で得られているものより換算して入力した。

計算時に入力する地盤変位は、0.0 ~ 3.0 m, 3.0 ~ 5.5 m; であり、図 3.27 の右側に示される ⁽⁸⁾ 実測のデータを使用した。

表 3.15 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ剛性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$

Kamihiramaru (1979.7.31 - 1979.8.31)

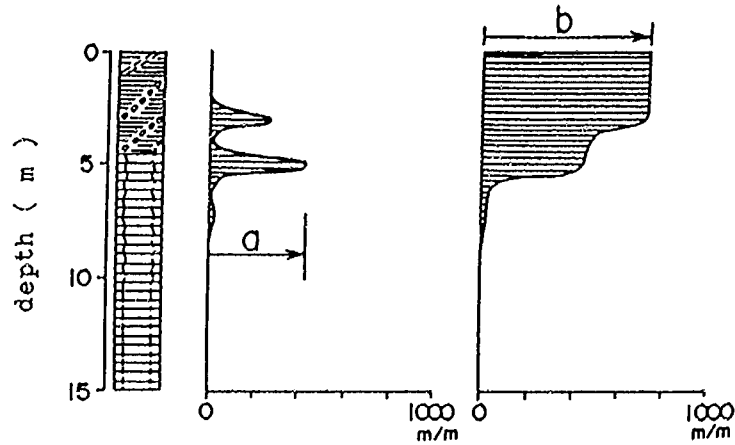


図 3.27 地すべり移動量測定例⁽⁸⁾

iii) 計算結果及び考察

図 3.27 を見ると、すべり面が 2 枚存在すると考えられており、計算出力結果からも、せん断力図に突出部分が 2 ケ所明瞭に表れている (図 3.28 参照)。杭のたわみ図では、地表面から深度が深くなるにしたがって、次第にたわみが減少し、逆三角形の形状を示している。これは、もちろん、移動層の変形係数が一定で、地表面に近いほど地盤変位量が大きいからである。

KAMI-HIRAMARU LANDSLIDE 1979.7.31-8.31

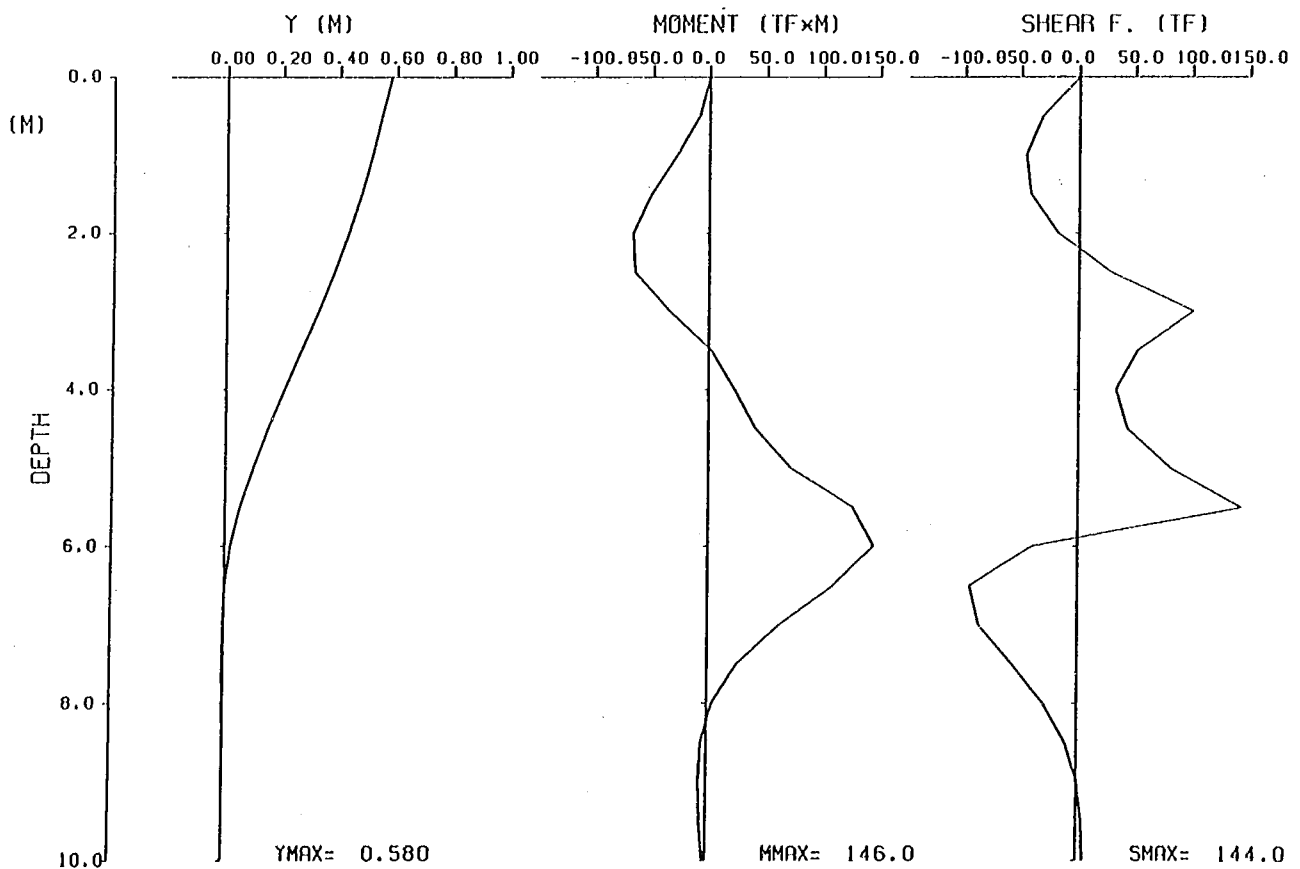


図 3.28 上平丸地すべりを例にした杭解析図

3-7 移動層の変位量測定結果を入力した場合

(1) 目的

ここでは、実際の現場で地中変位計（孔内傾斜計）、標準貫入試験、孔内水平載荷試験などから得られた地盤定数を入力して、杭の挙動を見るものである。

(2) 計算結果

a) 孔内傾斜計による地盤変位測定結果を入力した場合

孔内傾斜計によって測定されたデータを図 3.29 より読みとって入力し、杭の挙動を見たものが、図 3.30～32 である。K-1, K-2, K-3 のそれぞれの実測値は計測時期の異なるものである。なお、杭の仕様、地盤条件については表 3.16, 表 3.17 に示す通りである。

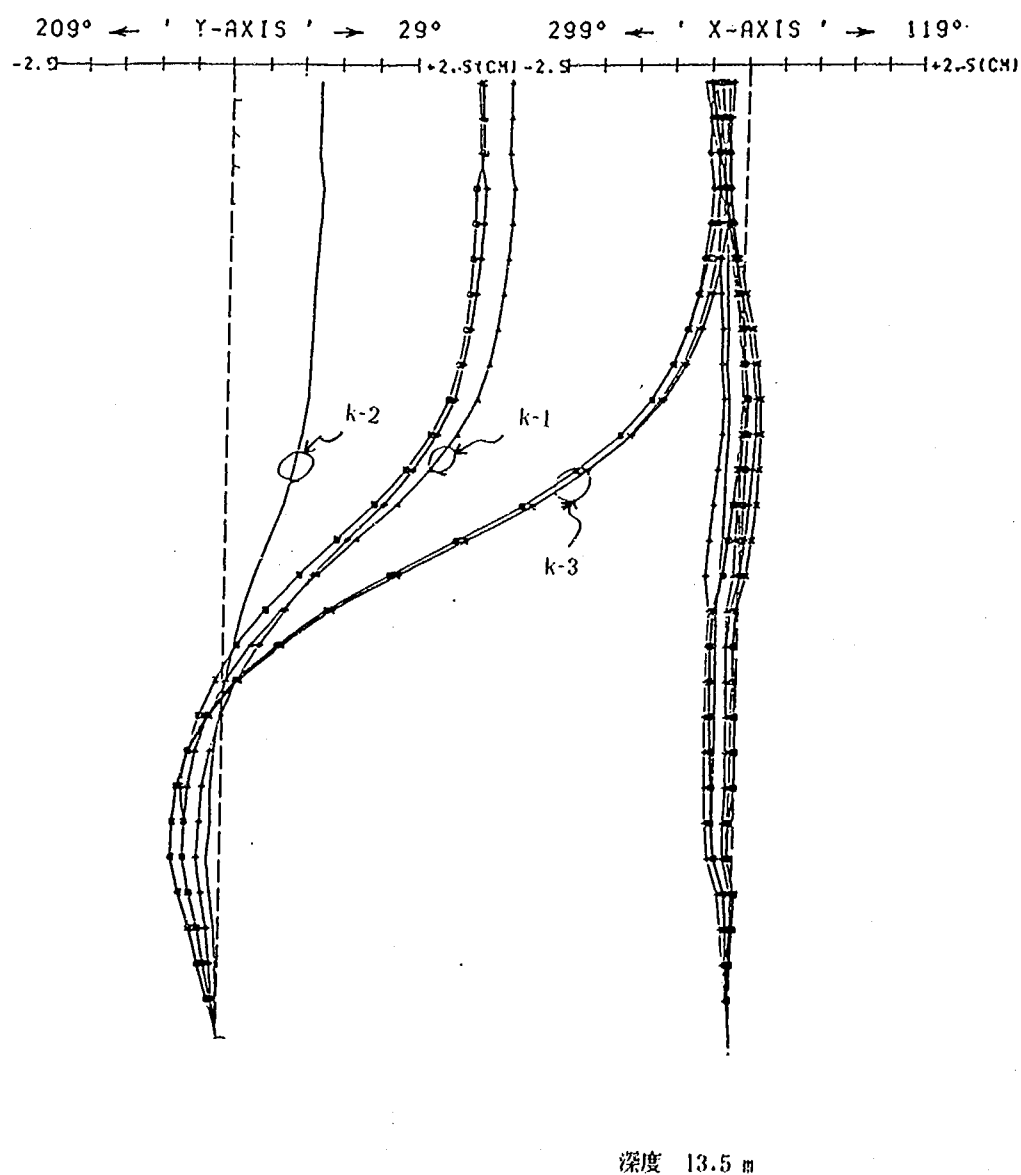


図 3.29 孔内傾斜計解析図

BOREHOLE INCLINOMETER NO.1

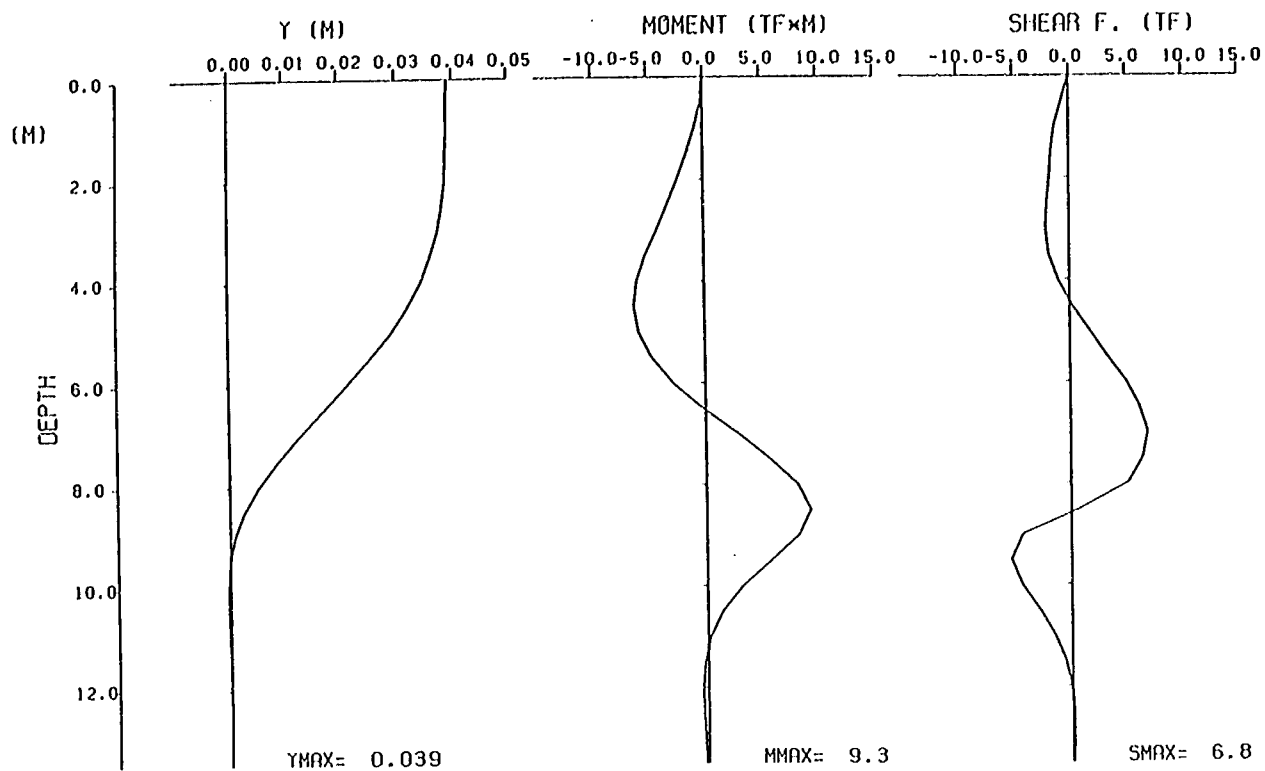


図 3.30 孔内傾斜計測定結果 (K - 1) による杭応力解析図

BOREHOLE INCLINOMETER NO.2

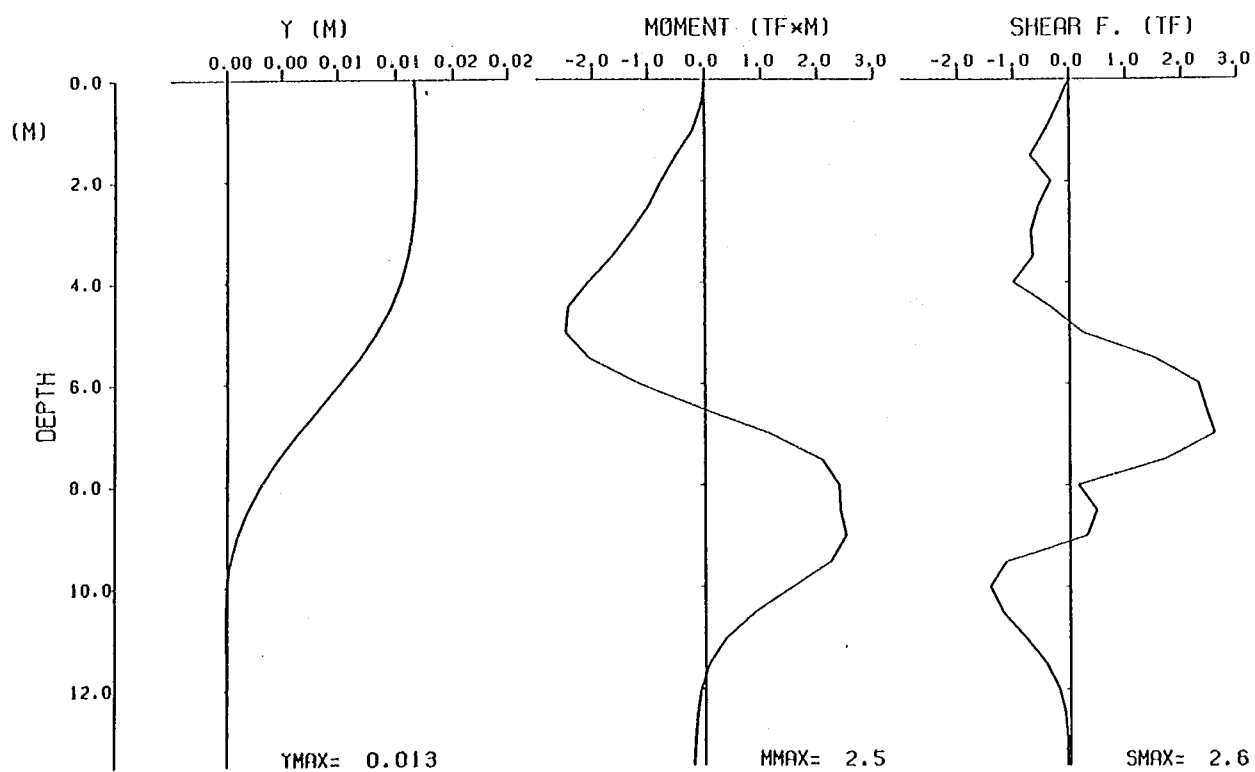


図 3.31 孔内傾斜計測定結果 (K - 2) による杭応力解析図

BOREHOLE INCLINOMETER NO.3

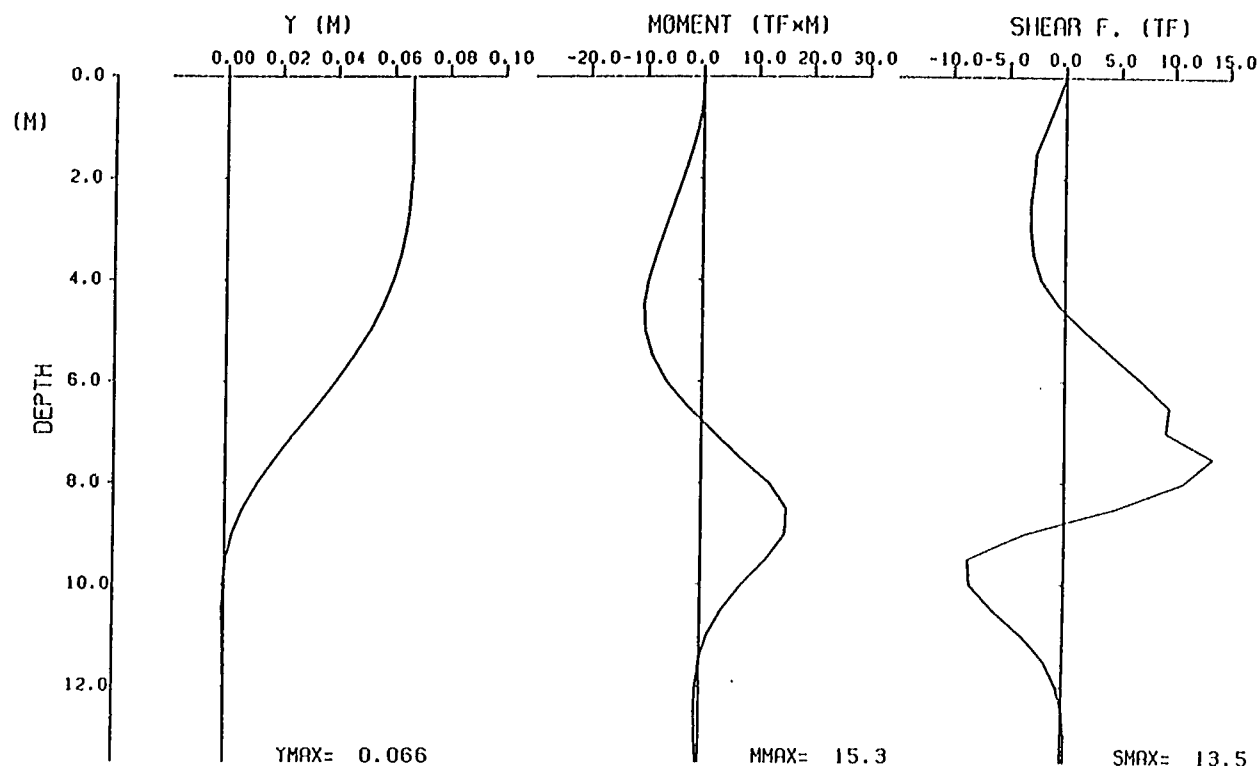


図 3.32 孔内傾斜計測定結果 (K - 3) による杭応力解析図

表 3.16 杭仕様

杭 径	318.5mm
肉 厚	10.3mm
曲げ剛性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
杭 長	13.5mm

表 3.17 地盤条件

	地盤変形係数 (t/m^2)	地盤反力係数 (t/m^3)
移 動 層	—————	4.000×10^3
不 動 層	—————	2.000×10^4
地盤変位量	実測による	
すべり深度	7.0 m	

これら3ケースから言えることは、本解析法で計算した場合に、この杭が持つ許容曲げモーメントは $16.37 \text{ t} \cdot \text{m}$ なので、何れのケースにおいてもこの値以下となり、図3.32に示すように最大の変位量が観測された場合でも、 $15.34 \text{ t} \cdot \text{m} < 16.37 \text{ t} \cdot \text{m}$ で、十分に杭が効果を発揮しているということになる。

b) 国道274号線現場⁽⁹⁾

i) 現場概況

現場は国道274号線沿いにある楓峠付近に位置し、道路改良工事の計画にあたって地すべり調査を行った結果、盛土による地すべりの誘発が推定され、その対策工として昭和61年8月に抑止杭工を実施されている。地質は白亜紀の砂岩を基盤とし、その上に崖錐堆積物～崩積土～既往盛土の順で堆積しており、地盤強度特性としては、盛土層は $N = 3 \sim 10$ 、堆積層は $N = 10 \sim 30$ 、基盤は $N \geq 50$ である。

ii) 抑止杭位置と各諸元

抑止杭の施工位置としては、盛土中の中間部に位置する(図3.33)。

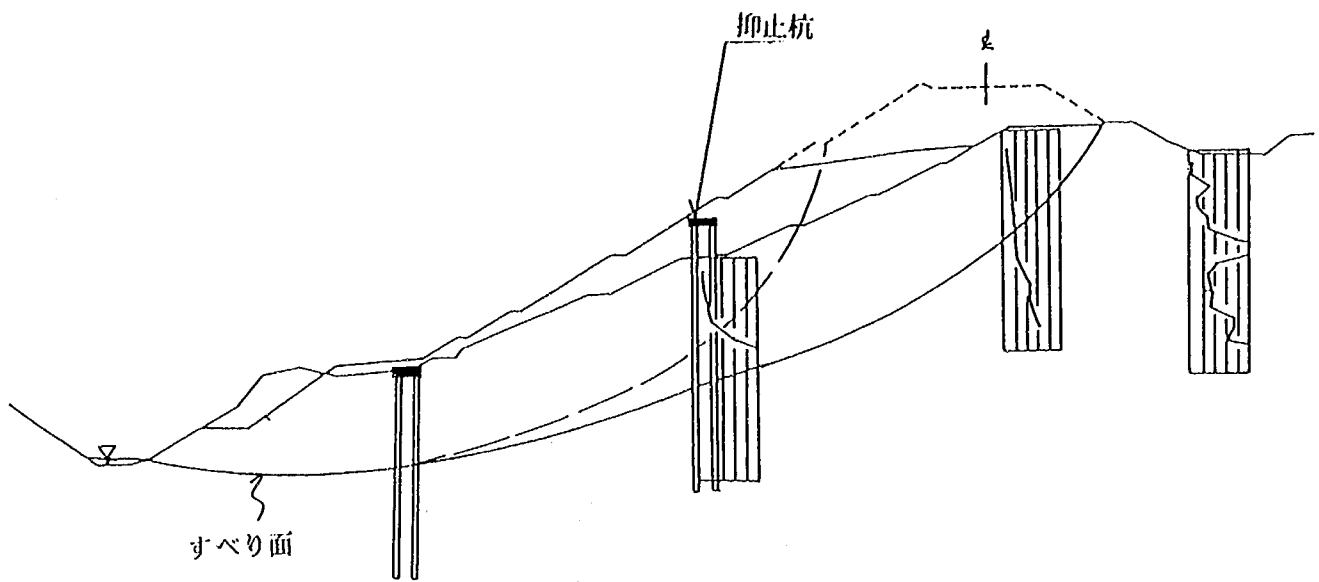


図 3.33 C地すべり断面図⁽⁹⁾

杭径、肉厚、杭長など諸元は、表3.18に示す通りである。地盤条件は、移動層の平均 N_0 値 $= 3.9$ 、不動層の平均 N_1 値 $= 50$ が標準貫入試験より得られているので、福岡、宇都のボーリング孔を利用した式より kh (地盤反力係数)を求めた。

地盤変位量としては、図3.34に示すように実際のデータを入力した。

表 3.18 杭仕様

杭 径	600.0 mm
肉 厚	18.0 mm
曲げ剛性	$2.930 \times 10^4 \text{ t/m}^2$
杭 長	23.5 m

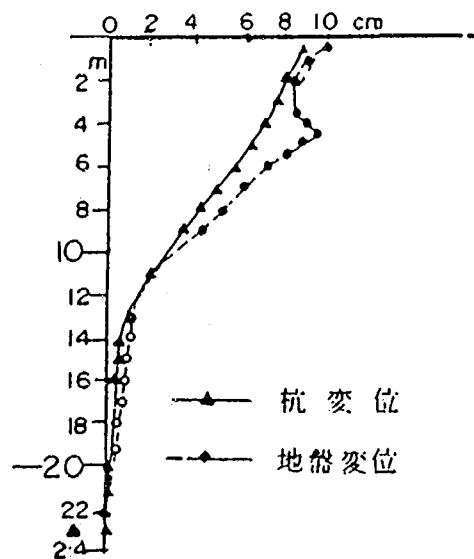


図 3.34 杭および地盤変位図

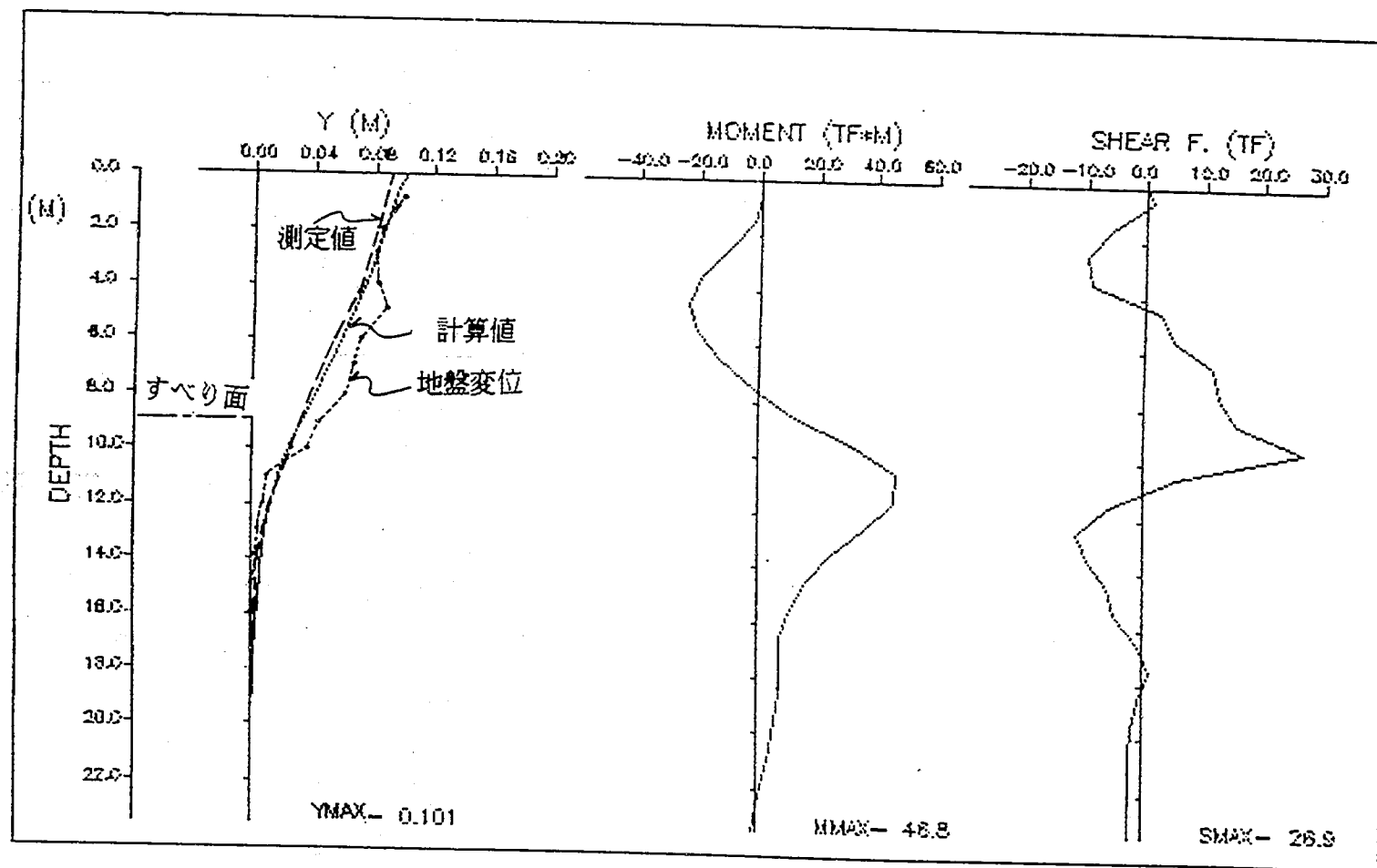
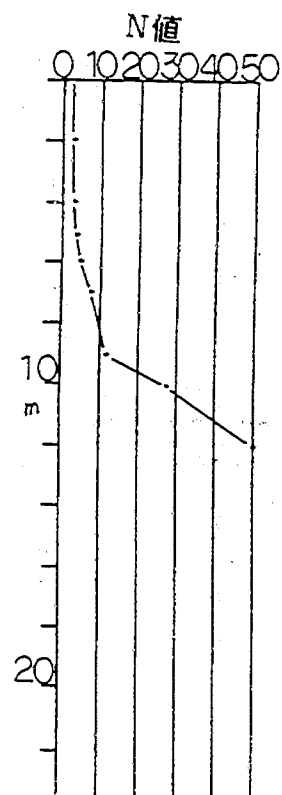


図 3.35 地盤変位を考慮した杭応力解析図

Ⅲ) 計算結果及び考察

データを入力して得られた計算結果が図 3.35 である。これを見ると、計算値と実際に杭の変位を測定した測定値が非常に近い形状を示すことがわかった。

3-8 杭背面の土塊の抵抗力を考慮した場合

(1) 目的

地すべり地、特に末端に近い所で杭を施工する場合には、杭背面（杭下流側）の土塊が少ないことが多いので、通常杭は片持梁として設計していたが、土塊が存在している以上、ある程度その抵抗力を考慮して設計出来るものとする。

(2) 杭の仕様及び地盤条件

表 3.19、表 3.20 に示す杭や地盤の条件を仮定し、杭が許容曲げモーメントを発生するまで地盤変位を与える。

(3) 計算結果及び考察⁽¹⁰⁾

地すべり地の地盤は移動層、不動層が共に一様な弾性地盤であり、したがって二層系の地盤である。また移動層内の速度は深度方向に対し一様とする。このような条件のとき、杭の谷側の地盤抵抗力が図 3.36 に示すように十分にならないとする。このとき杭の谷側の地盤抵抗力 R と地すべり移動層の変位との関係は図 3.37 とする。図で OA の勾配は移動土塊の変形係数 (E_{so}) と

表 3.19 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ剛性	$2499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
許容応力度	$2,200 \text{ kg/m}^2$
杭 長	13.0 m

表 3.20 地盤条件

	地盤変形係数 (t/m^2)
移 動 層	2000,940,260
不 動 層	10000
地盤変位量	3.03 cm
すべり深度	6.0 m

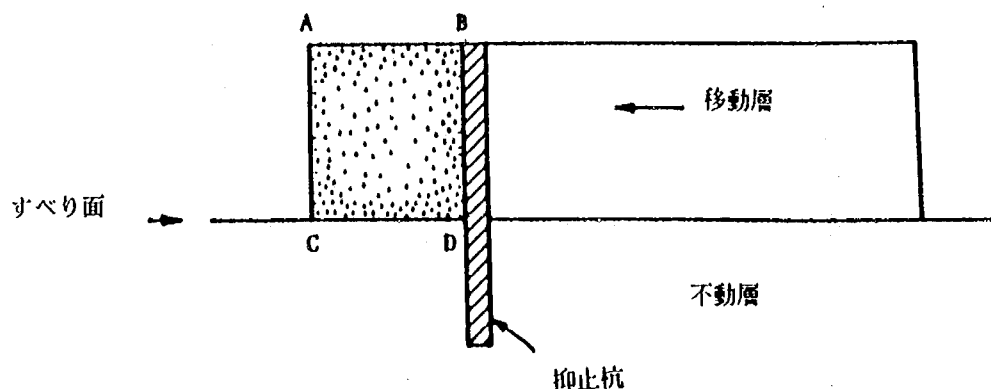


図 3.36 地すべり地内の杭

考えられる。 R が R' を超えると、杭の谷側の土塊 $ABCD$ (図 3.36 参照)の変位量は力の増加はなくても、大きくなって行く。ここで杭の土塊の谷側の抵抗力が十分に期待できないところに杭が設置されたとする。

杭は移動土塊が変位するとともに変形する。杭に発生するモーメントが許容モーメントに達したときの地すべり移動層の変位量を g' 、すべり面で発揮するせん断力を R' とする。このとき杭の解析を行う場合には、移動層の変形係数 E_s' を直線 OC の勾配とし、移動層の変位量を g' とすれば良いことがわかる。

参考のために、杭の谷側の土塊の抵抗力が十分期待できる場合、同種の杭の許容モーメントが発生するときの地すべり移動層の変位量は g_0 であり、このときすべり面で杭に作用するせん断力は R_0 である。

いまここで地すべり移動層、不動層の変形係数および杭の種類(直径、肉厚など)を変化させたときの R'/R_0 と E_s'/E_{s0} との関係を求めたものが図 3.38 である。これより杭の谷側の土塊の抵抗力の大きさが、十分期待できない場合はその程度(R'/R_0)に応じて、移動層の変形係数を減少すれば良いことがわかる。

次に計算例を示す。

杭背面の土塊の抵抗力が十分ある場合(3.2 参照)地盤変位量(g) = 3.03 cm の時に、この杭に発生する曲げモーメントは、許容曲げモーメント(16.34 t・m)とほとんど等しくなる。また、その時に杭に発生する最大せん断力は、37.51 t である。したがって $R_0 = 37.51$ t なので、 $R_0 > R'$ となる R' の値を $R' = 30$ t, 20 t となるようなケースについて計算してみる。

$R' = 30$ t のとき $R'/R_0 = 0.80$ ($E_{s0} = 2000$ t/m²) となるので、図 3.38 の図上に落とすと、

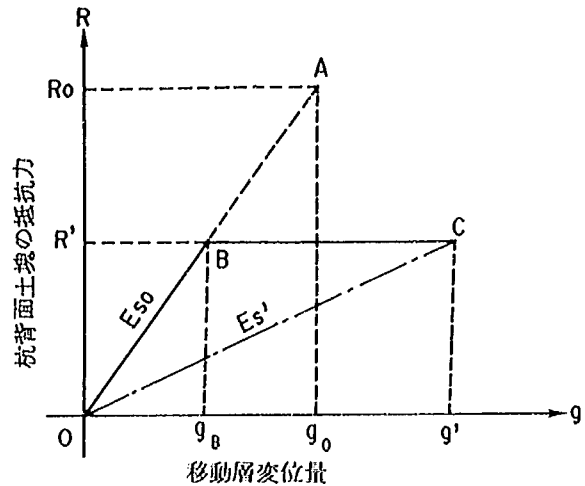


図 3.37 杭背面土塊の抵抗力と移動層変位量関係図

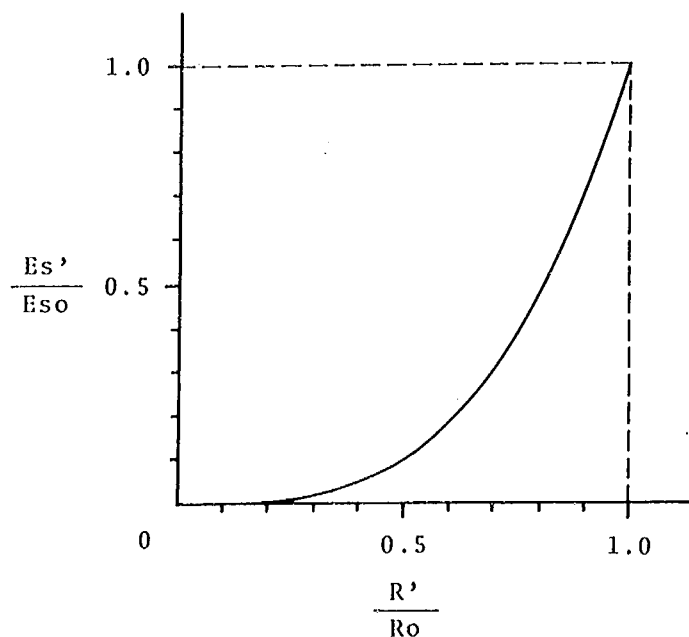


図 3.38 $\frac{E_s'}{E_{s0}}$ と $\frac{R'}{R_0}$ の関係図

$E'_s = 940 \text{ t/m}^2$ となる。また、 $R' = 20 \text{ t}$ のときは $R'/R_0 = 0.53$ に対し $E'_s/E_{s0} = 0.13$ となり、従って低減した E'_s は 260 t/m^2 となる。

ここで、得られた E'_s をそれぞれ入力して計算すると、図 3.39、図 3.40 のようになり、いずれにおいても、モーメント、せん断力共に E_{s0} と低減させない場合より小さくなっていることがわかる。

以上とりまとめると次の通りである。

- i) 杭施工位置が地すべり地の末端に近く、しかも杭背面の土塊が少ないときには、背面土塊の地盤変形係数を低減して計算を行うことが可能である。
- ii) 地盤変形係数の落とし方は、図 3.38 に示す E'_s/E_{s0} と R'/R_0 との関係から求めることができるので、これから求めた地盤変形係数を入力することができる。

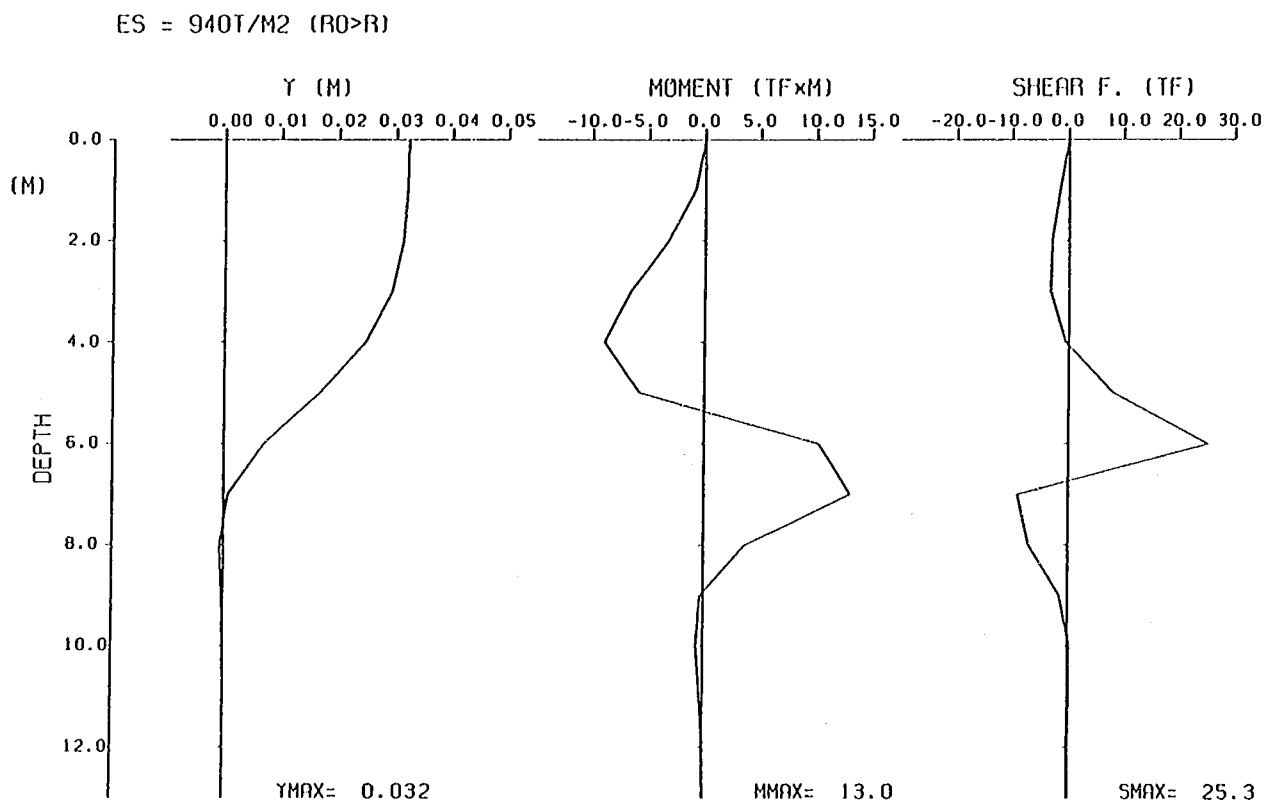


図 3.39 杭背面土塊の抵抗力を考慮した杭解析図

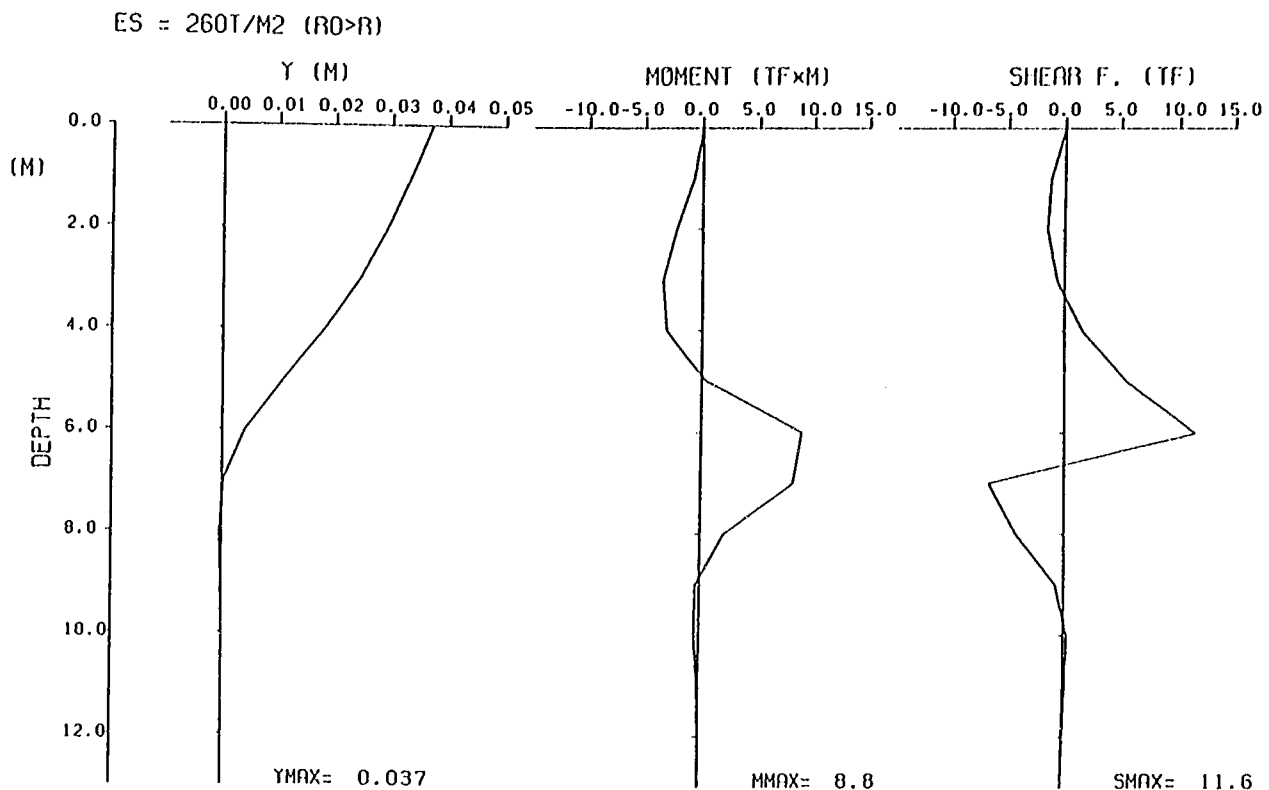


図 3.40 杭背面土塊の抵抗力を考慮した杭解析図

3-9 アンカー付杭の場合

(1) 目 的

一般にアンカー付き杭の設計を行う場合には、ほとんどが杭にかかる設計外力を三角形分布⁽¹⁾とし、この外力に対し杭とアンカーが抵抗するとしているが(図 3.41)本解析のように地盤変位量を与えて解析した事例はみられない。ここでは土塊がすべり面上部で一体となって移動し、杭背面の土塊の反力を考慮しながら解析することを目的とする。

(2) 計算方法

a) 杭の前面、背面に十分土塊が存在する場合

ある地すべり地で、杭にアンカーをつけて施工する場合には、まず、杭とアンカーそれぞれの諸元を決定する必要がある。しかし、アンカーは杭ほど種類が多くないので、通常は杭を決定してからアンカーを選定するのが望ましいと考える。

すべり面上部の移動層の垂直方向での移動速度が一定である状態にアンカー付杭を設置した場合の解決法についてここに示すことにする。

図 3.42 に示すようにプリテンションを与えないで、アンカー付杭が地すべり地に設置されたとき、もし移動層が d_g だけすべり面上を移動したとする。このときアンカーが固定されている杭点は当初 A 点にあったものが、移動層 d_g 移動した後は C 点まで変位し、アンカ

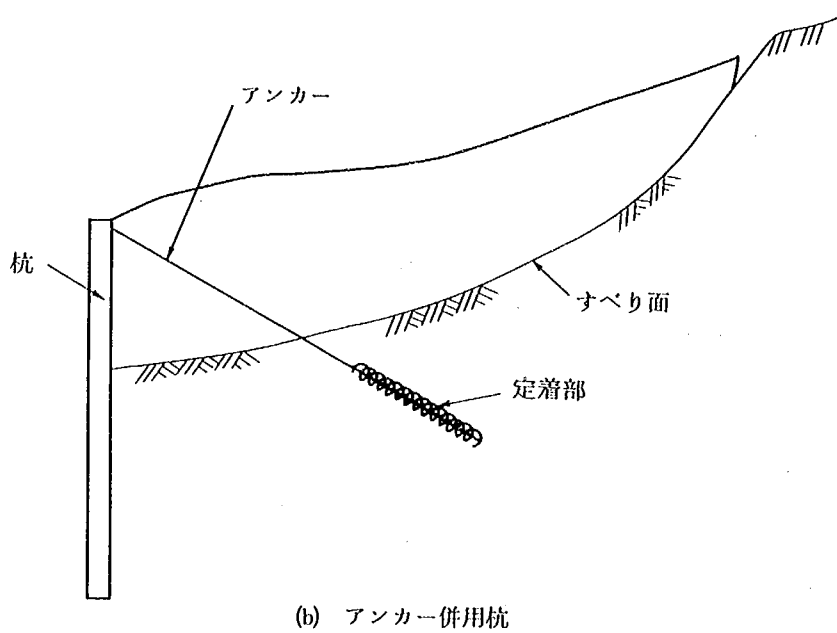
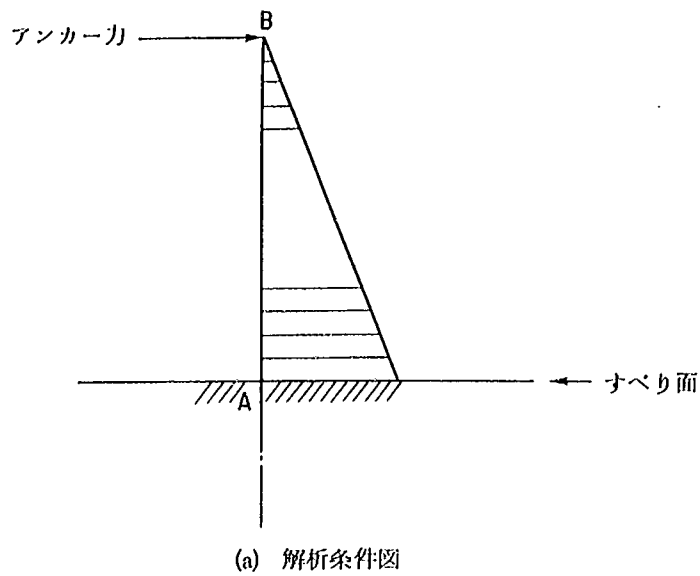


図 3.41 アンカー付杭の解析概略図（従来法）

一長が $\Delta l'$ だけ伸びることになる。もし杭にアンカー力が作用しなければアンカー点の杭は A 点から B 点まで変位することになるが、ブリテンションなしのアンカー力の設置によって、移動層が Δg 変位したとき B 点より C 点まで引きもどされることになる。すなわちアンカーを設置することによって杭のアンカー点を B 点より C 点にまで押し戻し、これが地すべりに対する水平抑止力としての力を発揮することになる。

当然のことながら移動層が Δg 変位するに伴って杭はすべり面付近で抵抗力を発揮し、地すべりの抑止力を増加させることになる。

したがって図 3.42 により以上の関係をさらに説明すれば、移動層中の I—I' 断面より上部では杭はアンカーと一体となり抑止力を発揮し、杭はアンカーの一種の受圧盤としての効果を示すことになり、一方 I—I' より下部では杭は本来の抑止効果を示すことになる。

ところで図 3.42 は杭にブリテンションを与えていないケースであるが、これを与えた場合どのようなようになるか考えてみることにする。

図 3.43 はアンカーにあらかじめテンションを与えた場合の図である。杭設置当初アンカー固定点は点 A にあったものとすれば、ブリテンションをアンカーに導入することによって杭のアンカー固定点は P 点にまで移動し、その時の杭の変位は $\Delta y''$ となる。このようにアンカーにブリテンションを与えた状態でアンカーが杭に固定され、与えられたブリテンションの減少はないとすると移動層が Δg だけ変位したとすると、杭のアンカー固定点は P 点より C 点に移動し、アンカーは $\Delta l'$ だけ伸びることになる。もしアンカーにブリテンションを導入しなければ、移動層が Δg だけ移動したときに B 点まで移動するはずであるが、ブリテンションを与えたことによって B 点より $\Delta y'$ 戻った C 点にアンカー固定点は留まることになる。ここでもしアンカー力が杭に導入されていなければ、杭のアンカー点は A 点から D 点にまで移動することになる。

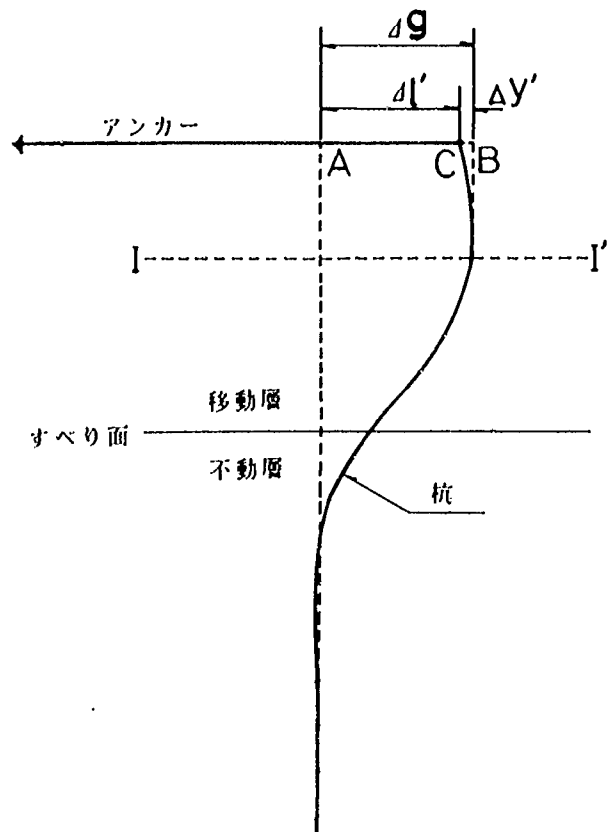


図 3.42 アンカー付杭の変形挙動
(ブリテンションがない場合)

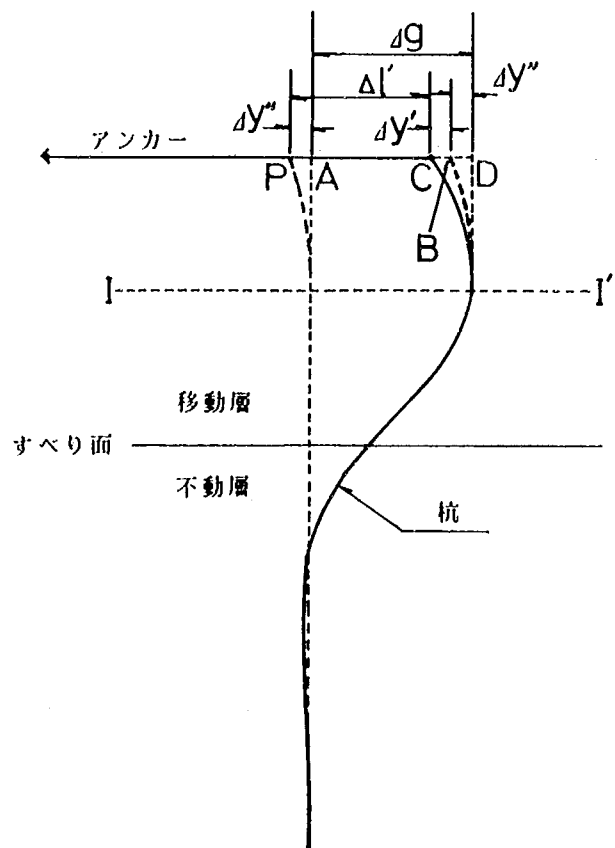


図 3.43 アンカー付杭の変形挙動
(ブリテンションをかけた場合)

図 3.43 の場合も図 3.42 と同じように、移動層中の I-I' 断面より上下で、アンカーと杭の抵抗力によって抑止効果を発揮することがいえる。

ところで従来よりアンカーにプリテンションをどの程度導入すればよいのか、また同じ力に対してアンカーの伸びと、杭のアンカー点での杭の変位が異なるのでこれをどのように設計に取り込んでよいのか問題点として残されている。そこでこれらの不明な点を明確にするために一つの解決法を提案し、これを図 3.44 を用いて説明する。

図 3.44 に示すように縦軸にはアンカー作用力とアンカー固定点での杭に作用する水平力を、また横軸にはアンカー引張材の伸びとアンカー固定点での杭変位をとる。アンカーの作用力と伸びとの関係は直線 OQ で示される。また移動層が杭に許容モーメントを発生させるに必要な変位量 Δg だけ移動したときにアンカーは引き戻されるため、杭のアンカー点にこのとき作用する力と杭の変位との関係は直線 BG で示される。図より伺えるように直線 OQ と直線 BG の交点 C が、アンカーと杭に同じ力が作用したときアンカーの伸びた地点と杭の変位した地点が一致していることを示している。すなわちアンカーを杭に固定した後、移動層が

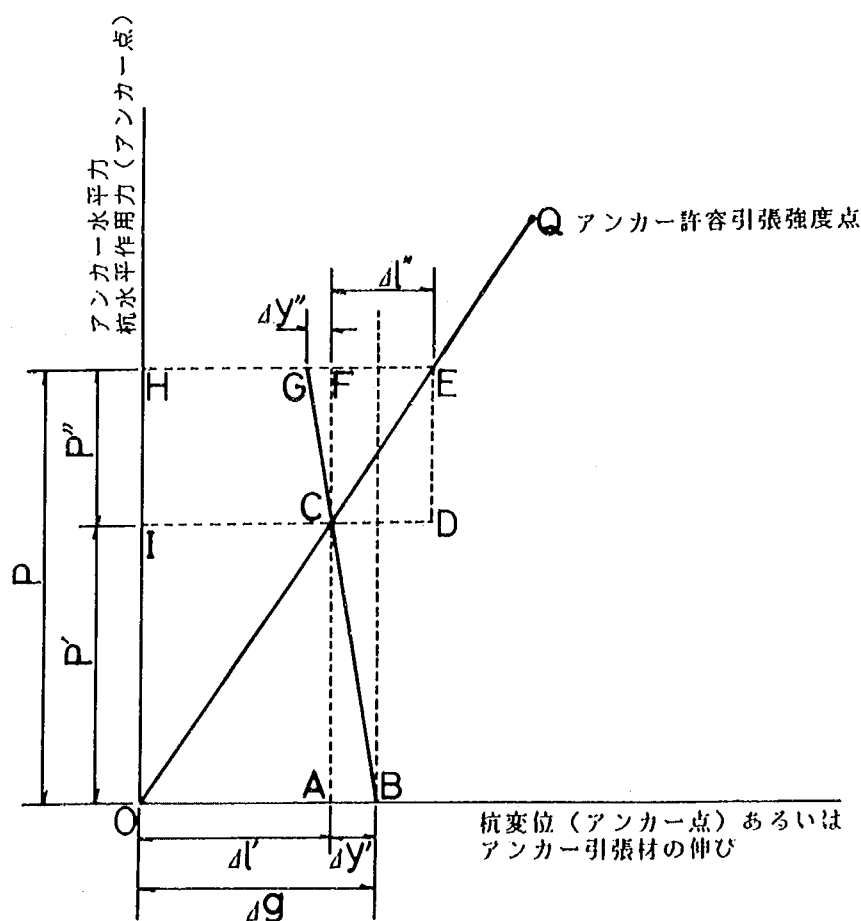


図 3.44 作用力-変形関係図

しかし、図 3.42, 3.43 において杭のアンカーによる杭の抑止効果と杭本来の抑止効果はアンカー設置点とすべり面までの位置が接近するとそれらの効果が相互に作用し合い、杭に発生する応力等も、アンカーによるものと杭本来のものとの判別が難しくなり、図 3.44 においても簡単に C 点を求めることは困難となり試行錯誤の繰り返し計算が必要になる。しかしある作用力に対してアンカーの伸び量と杭の変位量が調和する点が求まれば、ブリテンションの導入量を求めることが可能となる。

地表面

移動層
 $E_s = 2000 \text{ [t/m}^2\text{]}$

アンカー

すべり面

定着部

不動層
 $E_s = 10000 \text{ [t/m}^2\text{]}$

杭

5.0m

2.5m

$l = 10\text{m}$

- 71 -

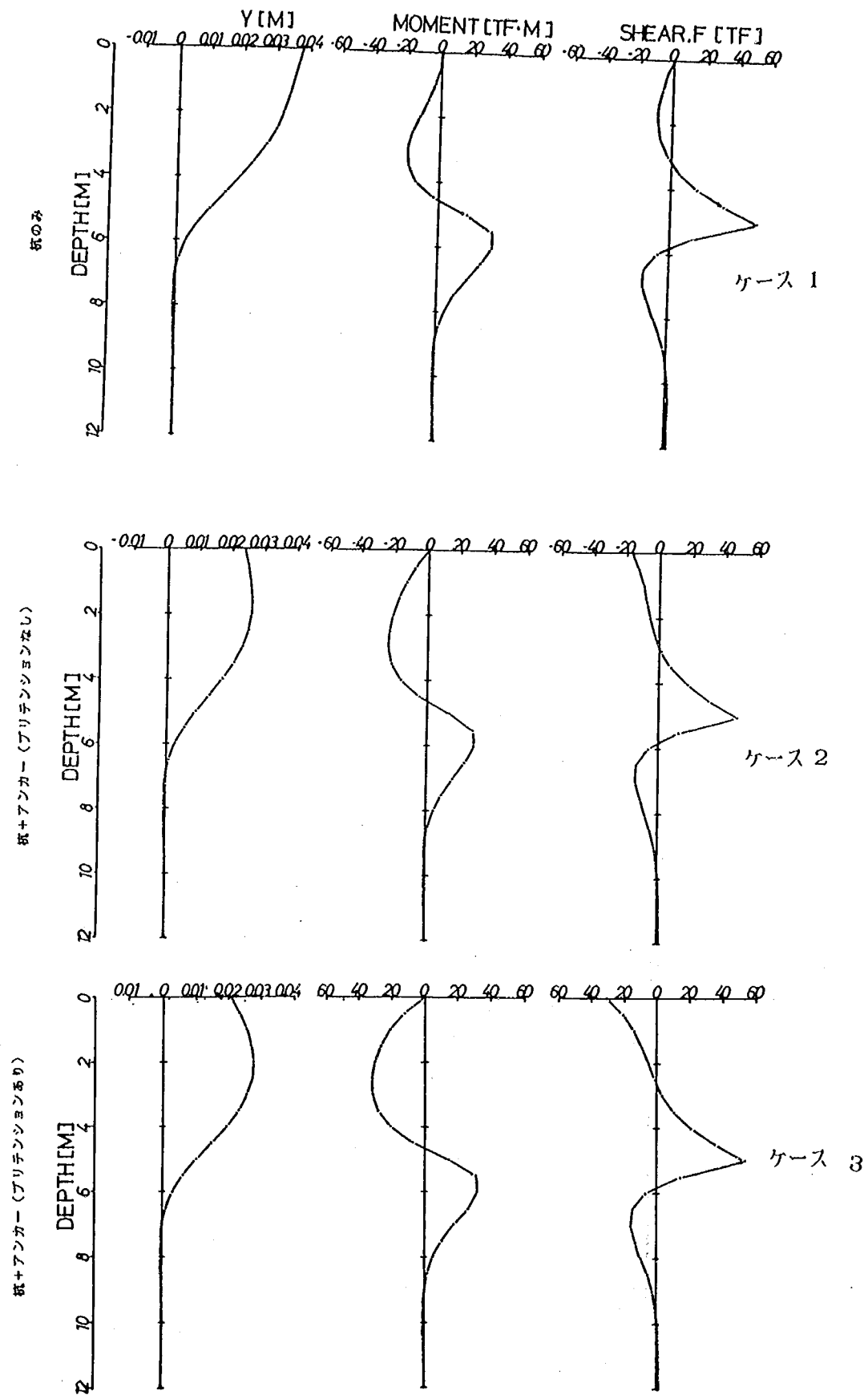


図 3.46 アンカー付杭の応力解析図

ブリテンションがない場合には移動層が 2.81 cm 変位したときアンカーに水平力が 17.2 t 作用し、その時の杭のアンカー点の変位とアンカーの伸びが 2.35 cm となる。このときの地すべり抑止力は杭として 46.7 t、またアンカーとして 17.2 t の合計 63.9 t が期待されることになる。またもしアンカーにブリテンション 13.3 t を導入したとすれば、移動層が 3.12 cm 変位したときにアンカーには 30.5 t の水平力が作用したことになり、杭の抑止力 53.6 t と合わせて合計で 84.1 t の抑止力が期待できることになる。図 3.47 に図 3.44 に具体的な数字を入れて示してみる。アンカーなしの杭が移動層と共に

3.26 cm 変位したときに、杭に許容モーメントが発生するものとする。このような条件でアンカーにブリテンションを与えない場合には移動層が 2.81 cm 変位したとき杭のアンカー点は 2.35 cm 変位し、アンカーおよび杭には水平力 17.2 t が作用することになる。もしここでブリテンション 13.3 t を導入すればその時点でアンカーは 1.8 cm の伸びを示し、杭は山側に 0.68 cm 変位することになる。アンカーの設計水平力を 30.5 t とすればブリテンションとして $(13.3 \div 30.5) \times 100 = 43.6 (\%)$ を導入すればよいことになる。

ここで参考までにアンカー付杭の解析事例を 3 ケース紹介する。

3 ケースの解析概略図は図 3.48 に示す。

図 3.49 は図 3.48 のケース 1 の計算結果を示したものである。この図よりも明らかなように杭頭に作用するアンカーとすべり面で抵抗力を発揮する杭の部分は明瞭に分離できる。アンカーにブリテンションを作用しない場合には移動層の変位に伴って（杭に発生するモーメントが許容値に達するまで）杭頭には 9.5 t のアンカー力が作用し、すべり面では 40.8 t の抵抗力を発揮することになる。もしここでゲビンデスターブ（PC23B）のアンカーにブリテンション 28.1 t を作用すればすべり面付近で発生する許容モーメントが 16.3 t・m になるとき、アンカーに作用する力はこのアンカーの許容値である 37.6 t となる。したがってこのケースのブリテンションはアンカーの設計荷重 37.6 t の 75 % に当たる 28.1 t になる。

図 3.50 は図 3.48 のケース 2 の計算結果を示したものである。この図より明らかなように図 3.48 のケース 1 と比較すると、すべり面より上部の杭長が短くなっており、アンカーに作用する力の影響とすべり面で抵抗力を発揮する杭の影響が相互に現れることになり、計算でも

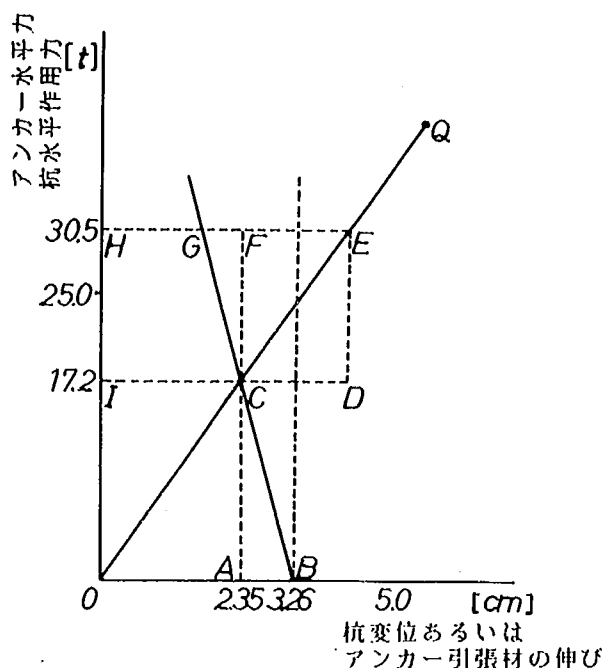
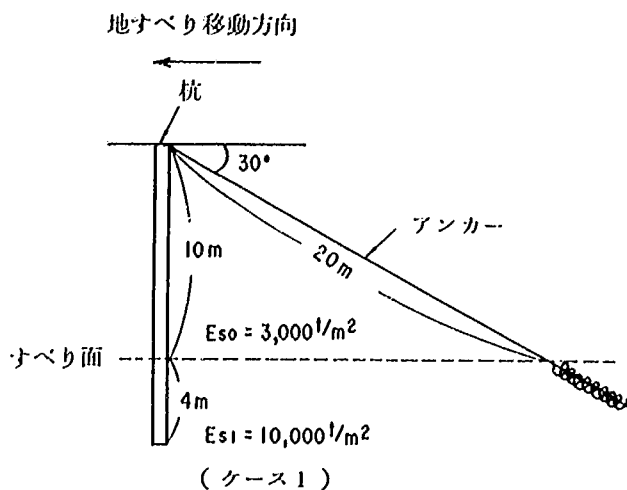


図 3.47 作用力－変形関係図

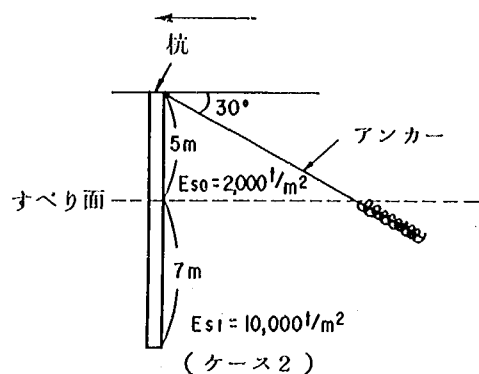


杭の計算入力条件

・長期許容応力度 = 2200 (kg/cm²)
 杭径 = 318.5 mm 曲げ剛性 = $2.499 \text{ E}+03 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
 許容曲げモーメント $F = 16.37 \text{ t}$
 地盤反力係数 1 = $9.419 \text{ E}+03 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 2 = $0.000 \text{ E}+00 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 = $3.140 \text{ E}+04 \text{ t/m}^3$

アンカーの諸元

アンカー自由長 = 20.0 m 移動層の杭長 = 10.0 m
 アンカー名 = PC 23 (B)
 断面積 = $4.048 \text{ E}+02 \text{ m}$ 水平力 = 38.54 t
 バネ = $3.681 \text{ E}+02 \text{ t/m}$ $G = 1.05 \text{ E}-01 \text{ m}$
 角度 = 30° $\phi = 0.866$

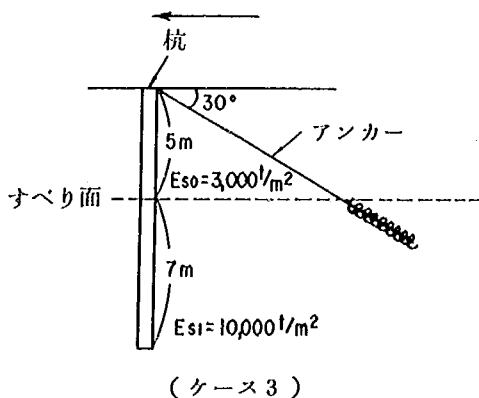


杭の計算入力条件

・長期許容応力度 = 2200 (kg/cm²)
 杭径 = 457.2 mm 曲げ剛性 = $9.408 \text{ E}+03 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
 許容曲げモーメント = 43.10 t/m 肉厚 = 13 mm
 地盤反力係数 1 = $4.374 \text{ E}+03 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 2 = $0.000 \text{ E}+00 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 = $2.187 \text{ E}+04 \text{ t/m}^3$

アンカーの諸元

アンカー自由長 = 10.0 m 移動層の杭長 = 5.0 m
 アンカー名 = PC 23 (B)
 断面積 = $4.048 \text{ E}+02 \text{ m}$ 水平力 = 38.54 t
 バネ = $7.362 \text{ E}+02 \text{ t/m}$ $G = 5.23 \text{ E}-02 \text{ m}$
 角度 = 30° $\phi = 0.866$



杭の計算入力条件

・長期許容応力度 = 2200 (kg/cm²)
 杭径 = 318.5 mm 曲げ剛性 = $2.499 \text{ E}+03 \text{ t} \cdot \text{m}^2$
 許容曲げモーメント = 16.37 t/m
 地盤反力係数 1 = $9.419 \text{ E}+03 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 2 = $0.000 \text{ E}+00 \text{ t/m}^3$
 地盤反力係数 = $3.140 \text{ E}+04 \text{ t/m}^3$

アンカーの諸元

アンカー自由長 = 10.0 m 移動層の杭長 = 5.0 m
 アンカー名 = PC 23 (B)
 断面積 = $4.048 \text{ E}+02 \text{ m}$ 水平力 = 38.54 t
 バネ = $7.362 \text{ E}+02 \text{ t/m}$ $G = 5.23 \text{ E}-02 \text{ m}$
 角度 = 30° $\phi = 0.866$

図 3.48 アンカー付杭設置概略図

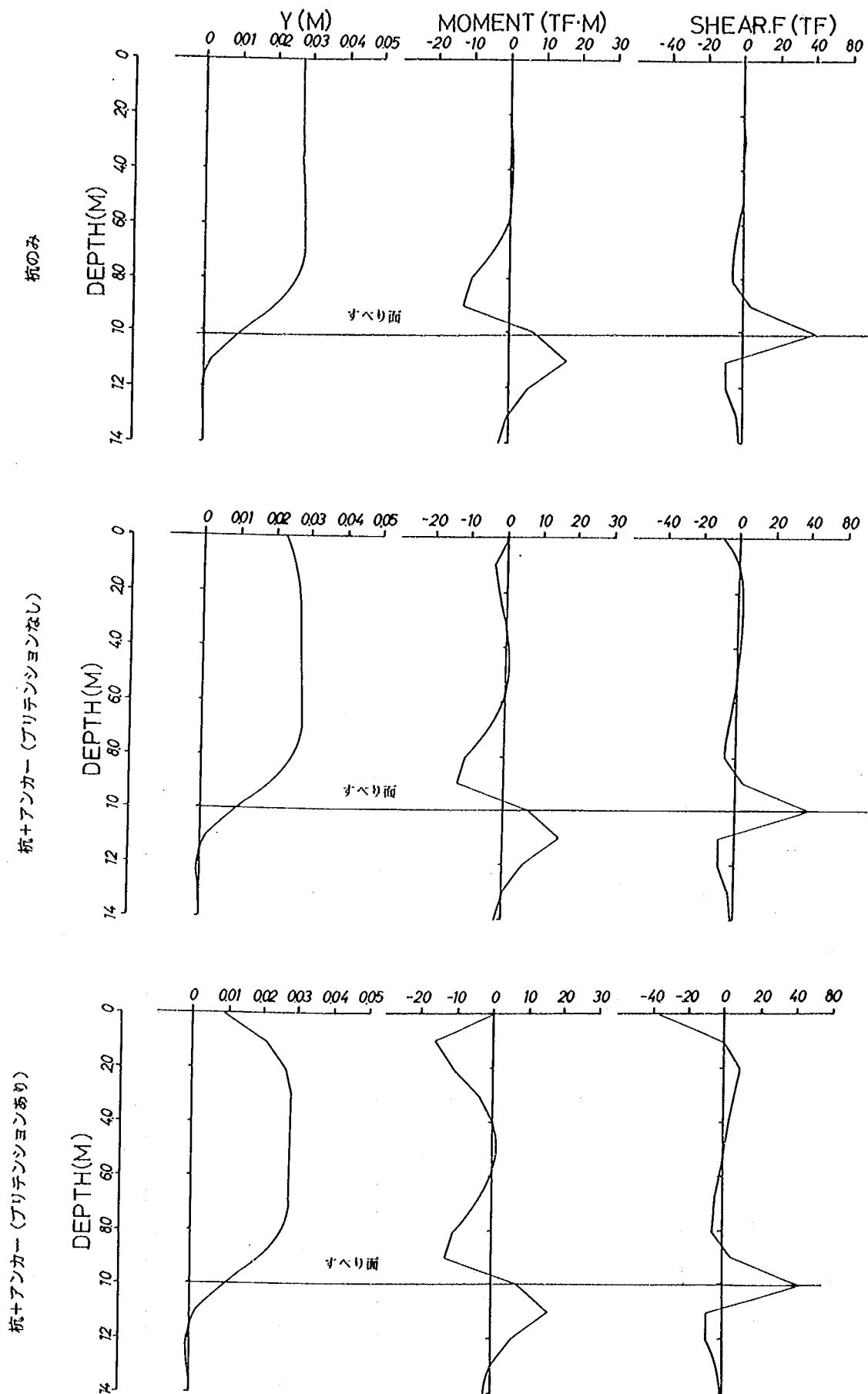
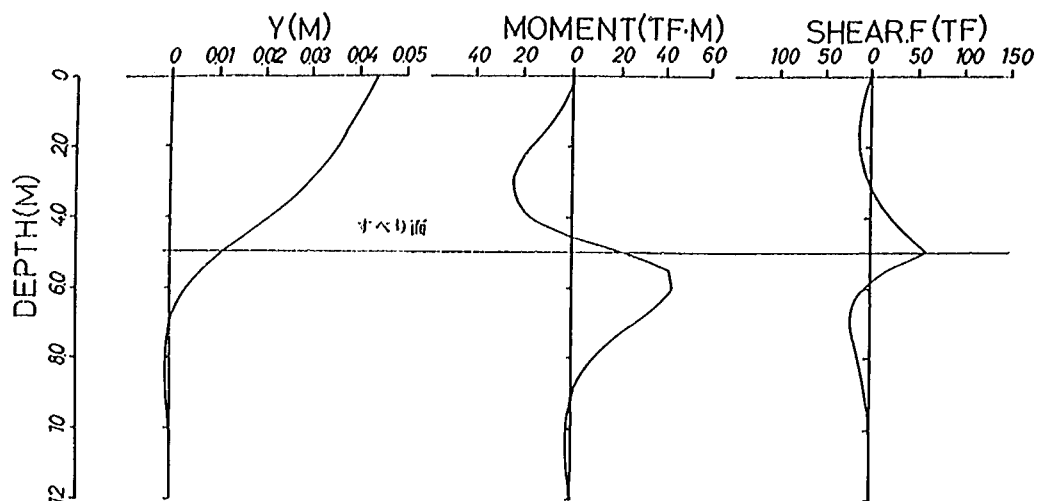
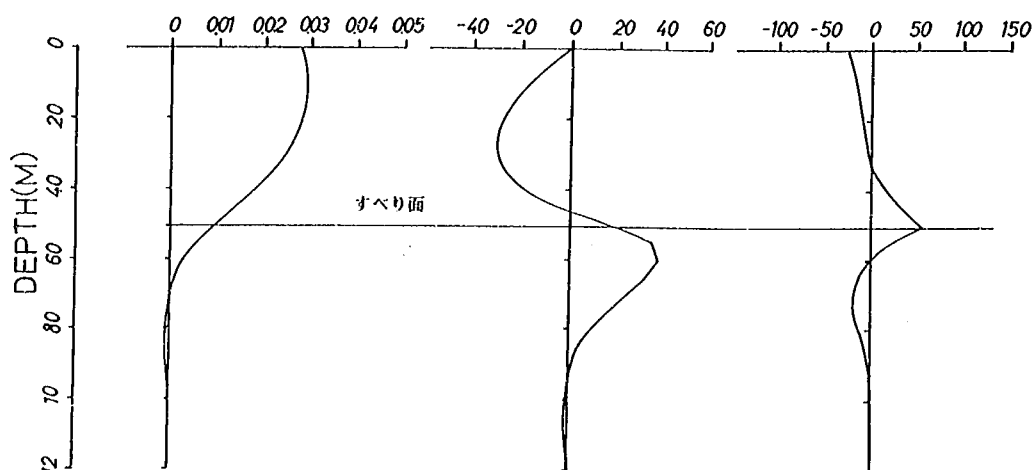


図 3. 49

杭のみ



杭+アンカー (プリテンションなし)



杭+アンカー (プリテンションあり)

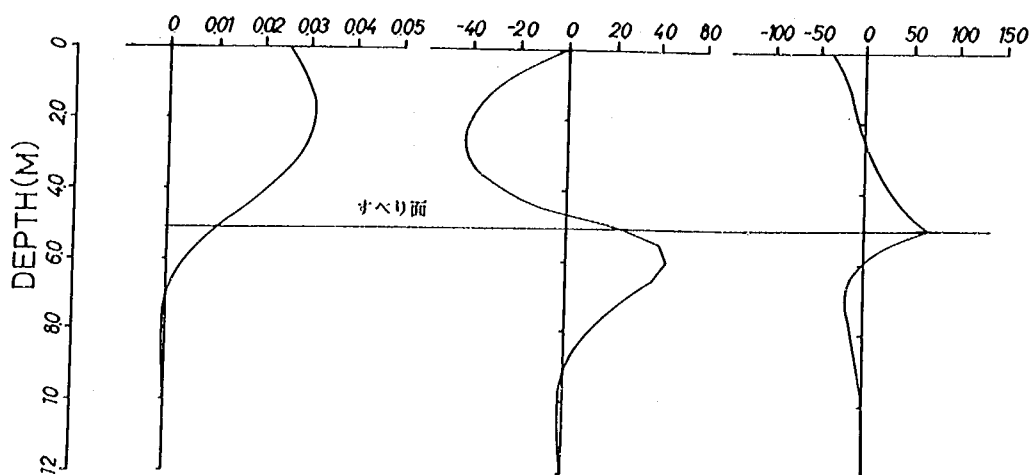
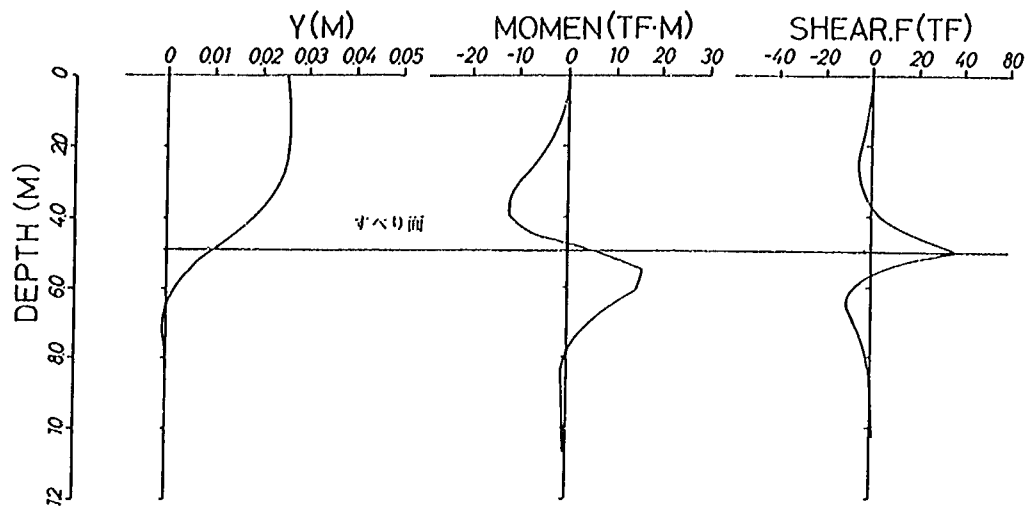
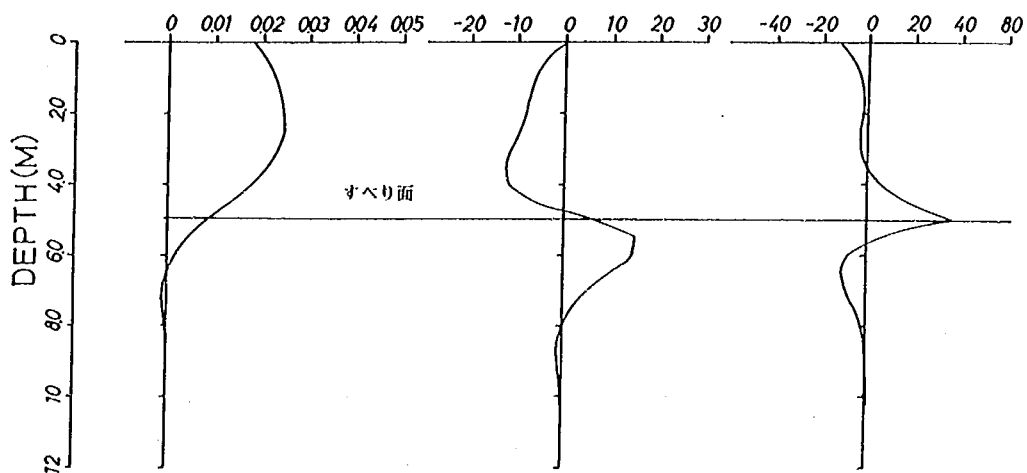


図 3. 50

杭のみ



杭+アンカー (プリテンションなし)



杭+アンカー (プリテンションあり)

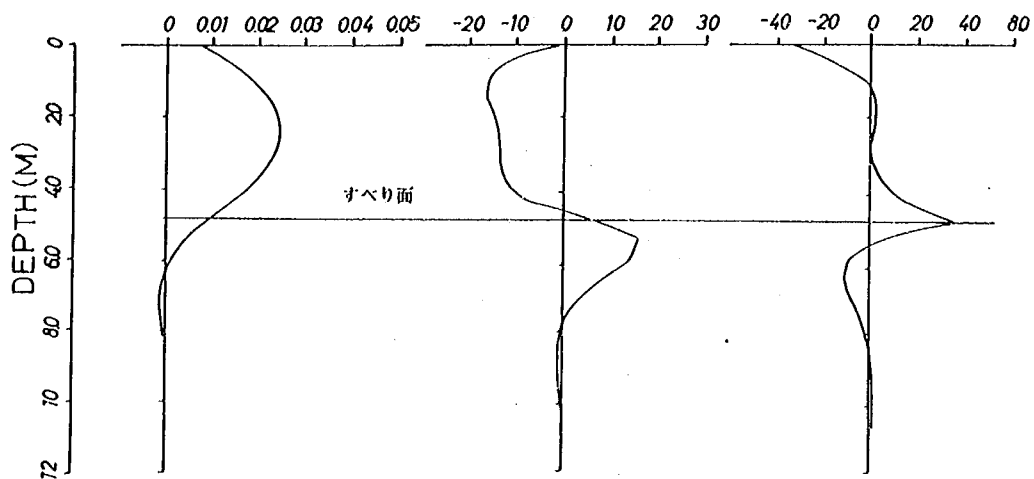


図 3. 51

図 3.44 に示す C 点が簡単には求められなくなり，試行錯誤の計算を行うことになる。この計算結果では杭に発生するモーメントが許容値に達するとき，アンカーのブリテンションがない場合にはアンカーには 20.3 t の力が作用し，すべり面での抵抗値 56.4 t と合わせて 76.7 t の力で地すべりに対抗することが可能であり，また 16.7 t のブリテンションをアンカーに作用させ，移動層が 3.65 cm 変位したとき，アンカーには合計で 37 t の力が作用し，すべり面では 67.5 t の抵抗力が生じることになる。したがってアンカーにブリテンションを与えることによって合計 104.5 t 抵抗力を発揮することになる。またこのケースの場合にはブリテンションは設計アンカー力 37.0 t の 45 % に当たる 16.7 t となる。

図 3.51 は図 3.48 のケース 3 の計算結果を示したものである。ブリテンションなしの場合には移動層の変位に伴って杭に許容モーメントが発生するとき，アンカーには 13.0 t の力が作用するが，ブリテンションを 22.7 t と与えること（設計アンカー力の 63.6 %）によってアンカーには 35.7 t の力を期待でき，またすべり面における杭の抵抗力 35.8 t を合わせて 71.5 t の抵抗力をこのアンカー付杭に期待することが可能となる。

以上の解析によれば，アンカー付杭により地すべりに対する抑止力を高めることができ，さらにアンカーにブリテンションを導入することにより，抑止効果を高めることが可能となり，地すべり抑止工としての杭工の応用範囲をさらに高めることができる。

またここでの解析事例は杭の谷側の地盤反力を期待できるものとして検討してきたが，これが不十分な場合でも地盤の水平反力係数を低減させることによって上記に述べた方法と同様なやり方で解析できる。

b) 杭背面土塊の抵抗力が少ない場合

図 3.52 に示すようにすべり面の上部の移動土塊の谷側の地盤反力を考慮できるような地盤条件に杭を打設した場合の杭について検討する。検討は以下に示す 3 方法で行うことにした。

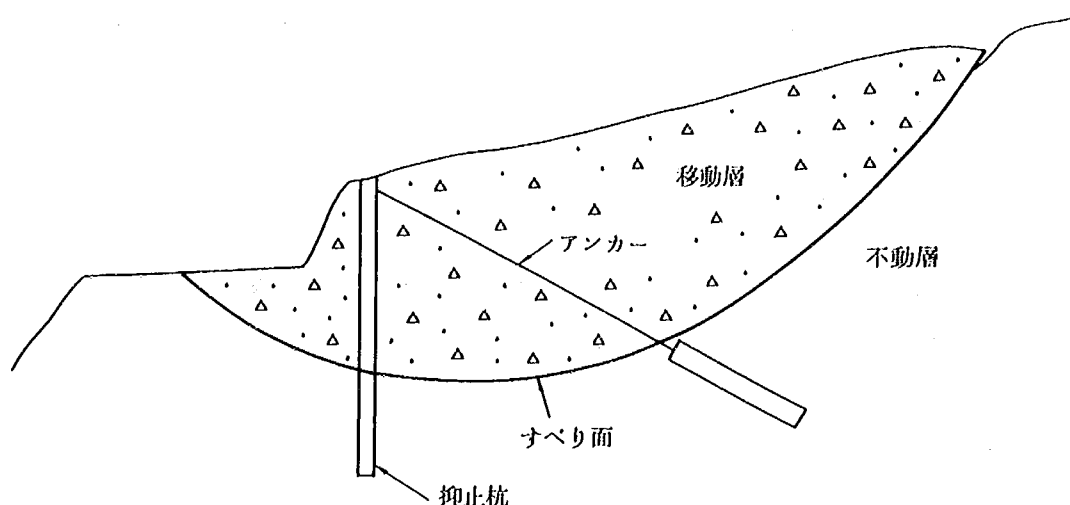


図 3.52 地すべり模式図

解析Ⅰ……………従来用いられている解析法の一つ。

解析Ⅱ……………くさび杭解析

解析Ⅲ……………フレーム解析

ここで地すべりを抑止するに必要な必要抑止力は 60.44 t/m である。ここでは解析Ⅰによって得られた結果を解析Ⅱ，解析Ⅲのものと比較することにする。

解析Ⅰでは必要抑止力 60.44 t/m に対し，図 3.53 に示すように弾性床土の梁として計算されたものである。すなわち必要抑止力を三角形分布荷重とし，抑止力は不動層，および移動層の一部で弾性支持され，アンカー頭部は固定支点として計算する。解析に用いた杭は径 = $\phi 350 \text{ mm}$ ，肉厚 $t = 14 \text{ mm}$ のもので杭材の許容応力度 $\sigma_{sa} = 1600 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

解析Ⅱでは解析Ⅰで用いた杭と同一であるが図 3.54 に示すような地盤条件で計算した。基本的にはくさび杭に適用する計算方法であるが，杭の谷側の移動層の一部の地盤反力がほとんど期待できないため，移動層の変位がない状態で杭頭に水平アンカー力が作用した状態(A)とアンカーがなく，移動層が垂直方向に一樣な変位をする状態(B)でのそれぞれの杭に発生する応力を加算することによって杭に発生する応力等の計算を解析Ⅱでは行った。ここでアンカー力の作用する状態(A)では杭の山側の地盤の E_s を $E_{s0} = 150 \text{ kgf/cm}^2$ とし，また状態(B)では谷側の移動層の地盤の E_s を $E_{s0} = 10 \text{ kgf/cm}^2$ と $E_{s0} = 150 \text{ kgf/cm}^2$ の弾性地盤とした。

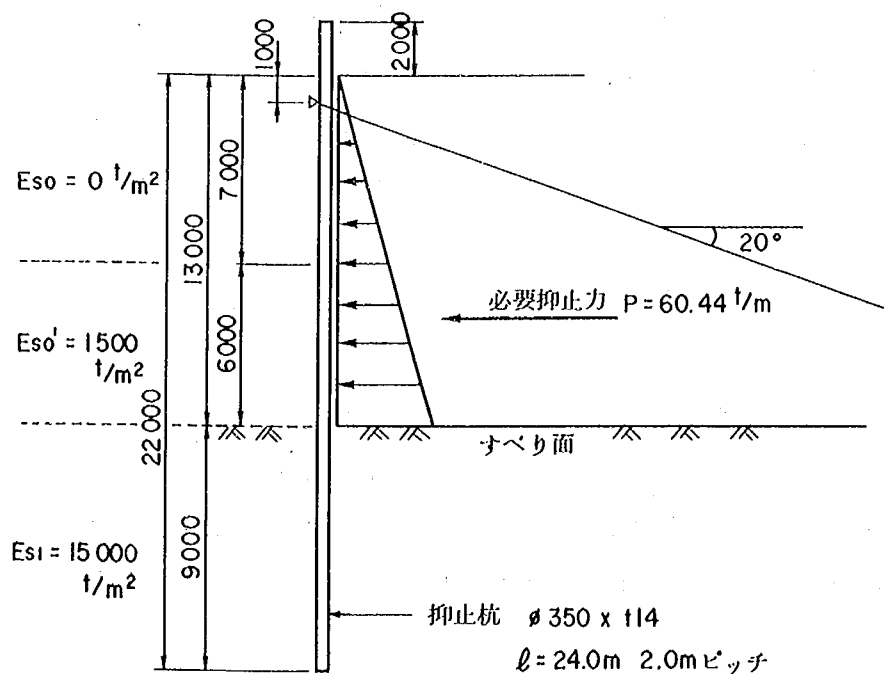


図 3.53 アンカー付杭の設置概略図

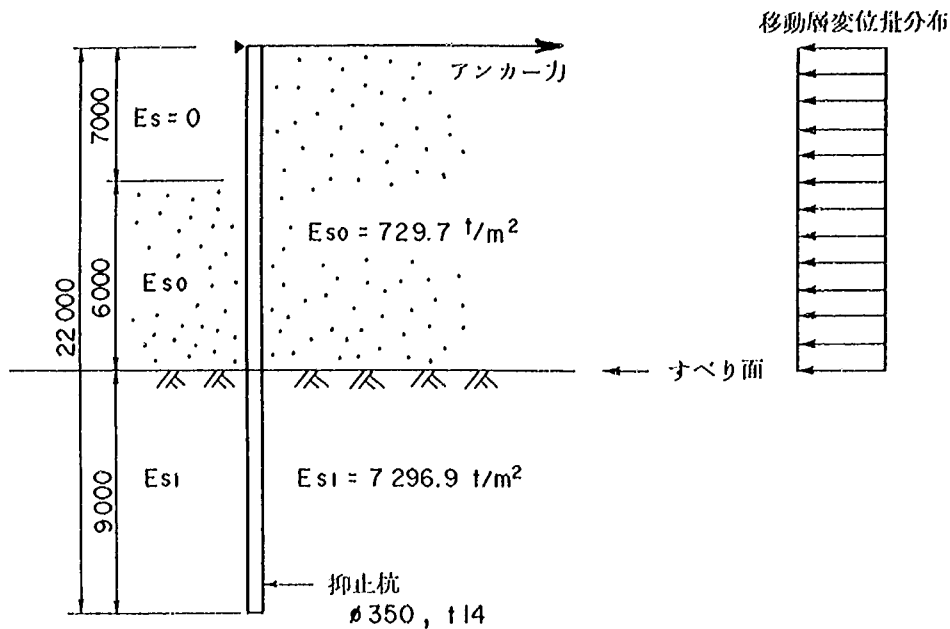


図 3.54 解析 II モデル

解析 III では解析 I, II で用いた同様の杭やアンカーを用い、また解析 II と同じように移動層が変位するにともなう杭に発生する応力等の計算を行った。このとき杭の頭部にはアンカーを作用させた。解析 III では有限要素法に基づいての構造解析を目的として開発されたシステム ISASHI (HITAC) を用いた。図 3.55 に解析モデルを示すがすべり面上部の移動層の地盤反力係数を K_1, K_2, K_3 まで不動層の地盤反力係数を K_4 、またアンカーと地盤との定着端ではアンカー力に見合った変位を与えた。さらに地すべり移動層を解析 II と同様に移動層内での垂直方向の変位を一定になるように変位させるために、杭周辺の地盤のパネ、 K_1, K_2 と一方に固定端を持つパネ K_3 との間の節点には移動層の変位に見合った変位を与えた。

解析 I により 1.0 m 当り 60.44 t/m の荷重が作用したときの杭に発生する応力等の分布図を図 3.56 に示す。

最大曲げモーメント	$M_{\max} = 12.15 \text{ t} \cdot \text{m/m}$
最大せん断力	$S_{\max} = 11.32 \text{ t/m}$
アンカー取付位置支点反力	$R = 6.59 \text{ t/m}$
杭頭変位	$\delta = 7.79 \text{ mm/m}$

ここで杭一本当りの抵抗力は抵抗曲げモーメント $M_a = \sigma_{sa} \times Z = 1600 \times 1192 = 19.1 \text{ t} \cdot \text{m}$ 、抵抗せん断力 $S_s = \tau_{sa} \times A = 1300 \times 148 = 192.4 \text{ t}$ となり杭間隔 (ℓ) は曲げモーメントより決まり、

$$\ell = M_a / M_{\max} = 19.1 / 12.154 = 1.572 \text{ m}$$

となる。

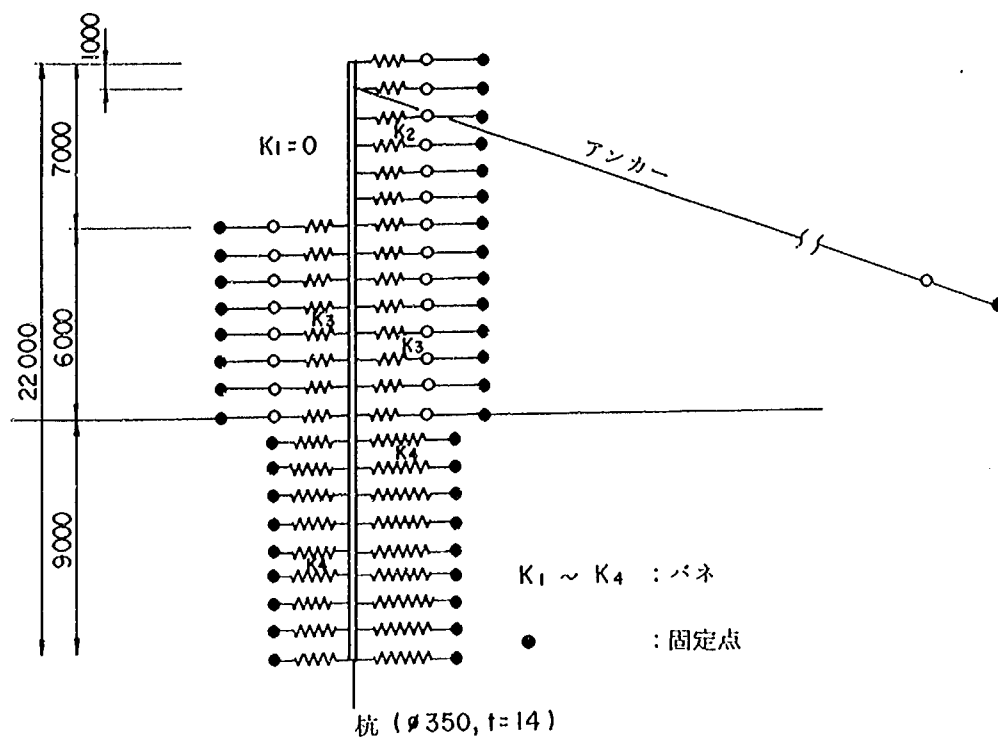


図 3.55 解析Ⅲモデル

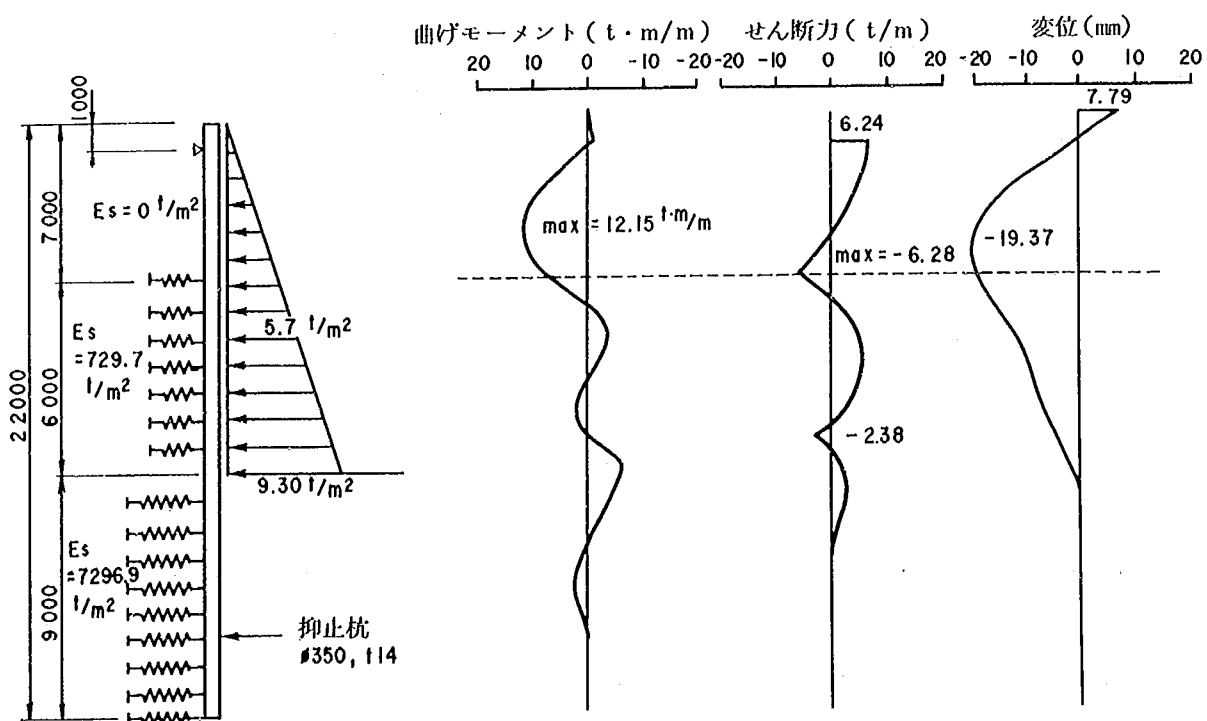


図 3.56 杭の応力図 (1 m 当り, 抑止力 60.4 ℓ/m)

またアンカーの施工角度を水平より下向 20° とし、ゲビンデステープ D 32 を用いたとすれば、アンカーの施工間隔は 7 m に一本とすれば良いことになる。

すなわち、

$$\text{アンカーの施工間隔} = 7.0 \text{ m}$$

$$\text{施工角度} \quad \theta = 20^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{水平力} \quad T' &= R_A \times 7.0 \quad (\text{ただし } R_A = \text{アンカー支点反力}) \\ &= 6.6 \times 7.0 \\ &= 46.2 (\text{t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{アンカーへの作用力} \quad T &= T' / \cos \theta \\ &= 46.2 / \cos 20^\circ \\ &= 49.2 (\text{t/本}) \end{aligned}$$

$$\text{アンカー径} \quad D = 116 \text{ mm}$$

$$\text{引張材} \quad \text{ゲビンデステープ D 32}$$

$$\text{径} \quad d = 32 \text{ mm}$$

$$\text{面積} \quad A = 804.2 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{許容引抜力} \quad Pa &= 804.2 \times 110 \text{ kg/cm}^2 \times 0.6 \\ &= 53.123 \text{ kg} \\ &= 53.123 \text{ t} > 49.2 (\text{t}) \cdots \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

となりアンカー作用力に対し、グラウト材と地盤、グラウト材と鋼材との間の抵抗力が十分にありとすれば、アンカー施工間隔は 7 m に 1 本となり、1 本当りに作用するアンカー力は非常に小さくて良いことになる。

しかし実際の地すべり移動土塊がこの面に沿って変位するような状態のところにアンカー付き杭が施工されたとして解析をした、解析 II、解析 III では解析 I によって得られた結果と著しく異なってくる。

図 3.57 に解析 II によって求めた計算結果を示す。

移動層の変位がなく杭頭に水平アンカー力が作用した状態(A)とアンカー力なしで移動層の変位のみを与えた状態(B)としたときそれぞれの状態で杭に発生する応力や変位を加算したものが図 3.57 -(C)である。この解析より得られた結果はアンカーに初期緊張力 32 t を作用させ山側に引っ張られた杭頭が、地すべり移動層の変位によって、アンカー付の杭頭が谷側に 2.3 cm 程度押しもどされているため実際には杭頭やアンカーにもある程度の力が作用するものと考えられるが、少なくともアンカーには 32 t の力が作用し、杭はすべり面で 30 t の抵抗力を発揮している。このため、地すべりに対する抑止力としては、アンカーの初期緊張力が有効に作用しているものとすれば、少なくとも 62 t を期待することができる。すなわち解析 I で用いた同材料の一組のアンカー付杭では 62 t の抑止力が期待でき、地すべりの必要抑止力

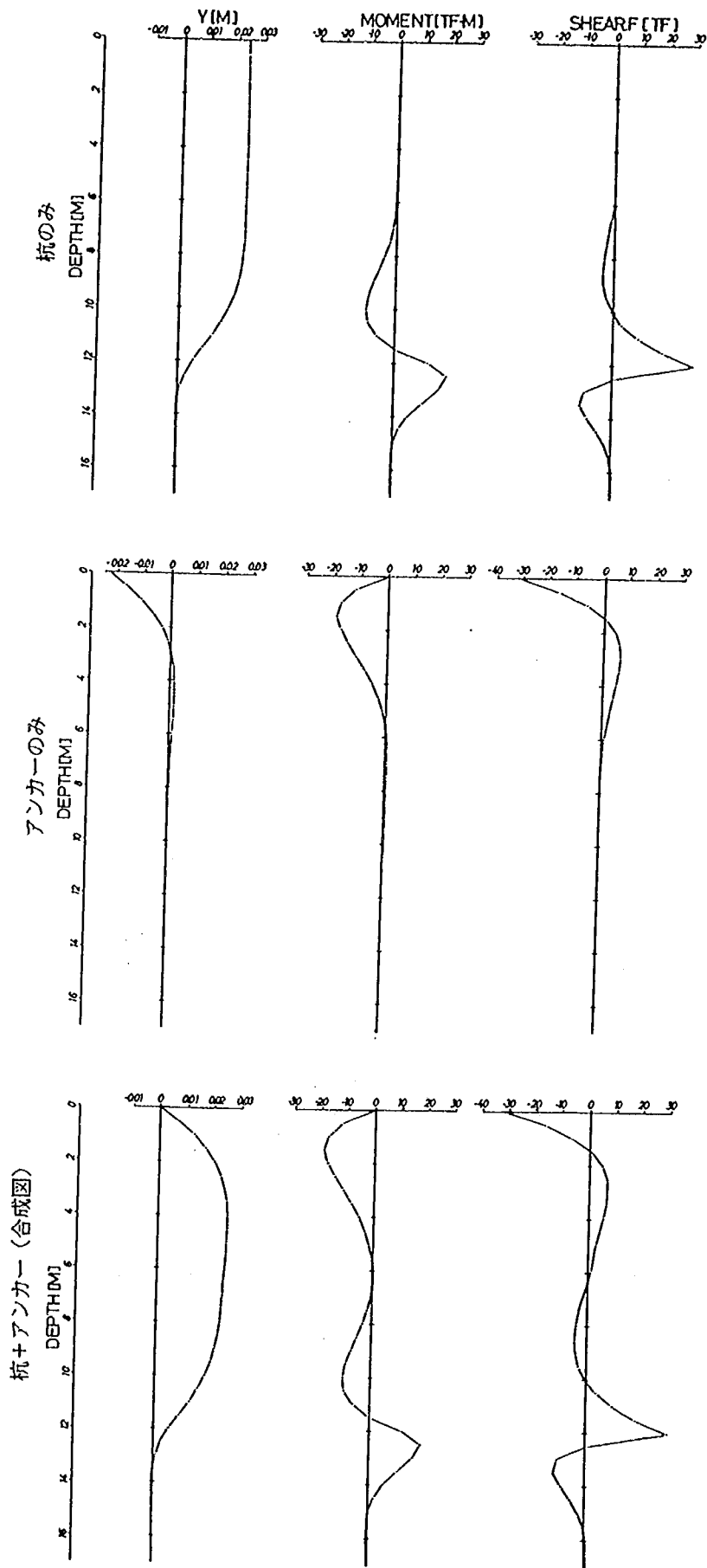


図 3.57 アンカー付杭の応力解析例

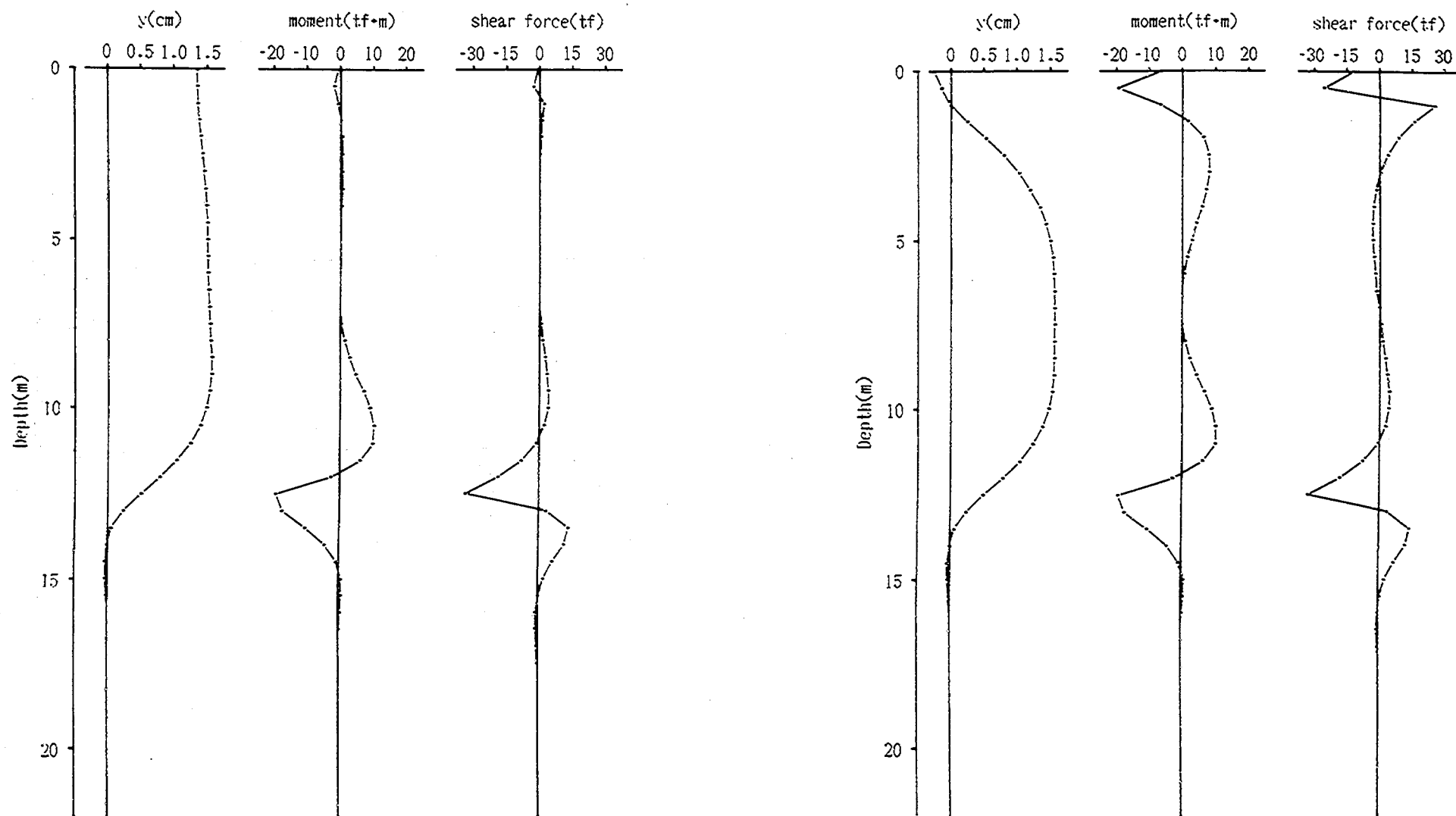


図 3.58 解析Ⅲモデルの計算結果

60.44 t/m からすると、少なくとも m 当り一組のアンカー付杭が必要になり、解析 I において、1.57 m 当り 1 本の杭と、7 m 当り 1 本のアンカーで十分であったとする計算結果とは大変な違いとなる。

解析 III では解析 II の計算精度を上げるために大型計算機を用い解析したものである。その計算結果を図 3.58 に示す。この解析ではアンカーに初期緊張力を与えた場合と零の場合の 2 通りのケースについて計算を行った。図 3.58 より明らかなように杭頭付近にアンカー力を作作用させない場合には杭に発生するモーメントが許容値に達したときほとんどすべり面での杭の抵抗力 32.9 t しか期待できないが、これをアンカーの方向に 65.5 t の力を作用させれば、杭頭のアンカー固定点で杭にせん断力 22 t が発生していることより一組のアンカー付杭は地すべりに対する抑止力として $32.9 + 22.0 = 54.9$ t を期待することができる。解析 III での計算結果は解析 II のものと比較した場合地すべりに対する抑止効果という点ではほぼ同等と考えられるが、図 3.57 と図 3.58 を比較すると杭のアンカー固定点付近の応力状態は著しく異なっていることが伺える。すなわち解析 III ではアンカー方向に 65.5 t の力を作用させるため、約 $20 \text{ t} \cdot \text{m}$ の曲げモーメントが発生しているが解析 II ではアンカー力 (32 t) を水平に作用させているため、曲げモーメントは零となっている。解析 II の計算結果よりは解析 III のものより実際の状態に近いと思われるので、より複雑な設計条件では解析 III のような構造解析をする必要が生じてくる。しかし、解析 II, III のいずれによっても、従来アンカー付杭の設計として用いられてきた手法によって得られた計算結果に比較してより大きな力が杭やアンカーに作用することは明らかである。

3-10 地盤変形係数の非線形性を考慮した場合

(1) 目 的

本来ならば、地すべり土塊の移動に伴う杭の変位量に地盤反力係数 (kh) は、変化していくはずであるが、3-1 ~ 3-9 での解析のように通常は、変位—地盤反力が比例する線形計算を行っているのが現状である。従ってここでは、地盤変形係数の非線形性を考慮しながら計算した結果と、線形計算との比較をするために解析を行った。

(2) 杭の仕様及び諸元

表 2.21 に示す通りである。但し、地盤反力係数 (kh)、地盤反力 (P)、変位 (Δy) との関係は次式

$$kh = \frac{P}{\Delta y}$$

によって P と Δy の関係を与えることによって kh ををもとめた。

表 3.21 杭仕様

杭 径	318.5 mm
肉 厚	10.3 mm
曲げ剛性	$2.499 \times 10^3 \text{ t/m}^2$
杭 長	13.0 m

(3) 計算結果及び考察

図 3.59 は、表 3.22 または図 3.60 に示すような p ， Δy の与え方をした場合の杭に生じるたわみ，モーメント，せん断力図を示している。また，図 3.61 は，移動層において変位がある程度増加した時に， P が減少するような地盤変形特性（表 3.23，図 3.62 参照）を持つ場合である。何れの図を見ても，杭は“くさび杭”のパターンを示しており，地盤変位（ Δg ）の増加と共に，杭のモーメント，せん断力共に大きくなっている。たわみも次第に湾曲するような挙動を示している。

ここで，上記図 3.59，3.61 の 2 ケースとの比較として，地盤反力係数が一定の場合の図を図 3.63，3.64 に示す。これらの計算でも P と Δy の関係を図 3.60，3.62 の(1)～(2)の勾配をとっているがいずれの場合においても，モーメント，せん断力共に，非線形計算の方が少なくなっている。

表 3.22 $P - \Delta y$ 関係表

移	No	Δy (m)	p (t/m ²)
動	1	0.0	0.0
	2	1.0×10^{-2}	9.419×10^1
	3	3.0×10^{-2}	1.256×10^2
層	4	4.0×10^0	1.256×10^2

不	No	Δy (m)	p (t/m ²)
動	1	0.0	0.0
	2	1.0×10^{-2}	6.280×10^1
	3	3.0×10^{-2}	6.280×10^2
層	4	1.0×10^0	6.280×10^2

この時，地盤変位量（ Δy ）を $\Delta g = 5$ cm，7 cm，8 cm，1.5 cm と変化した。

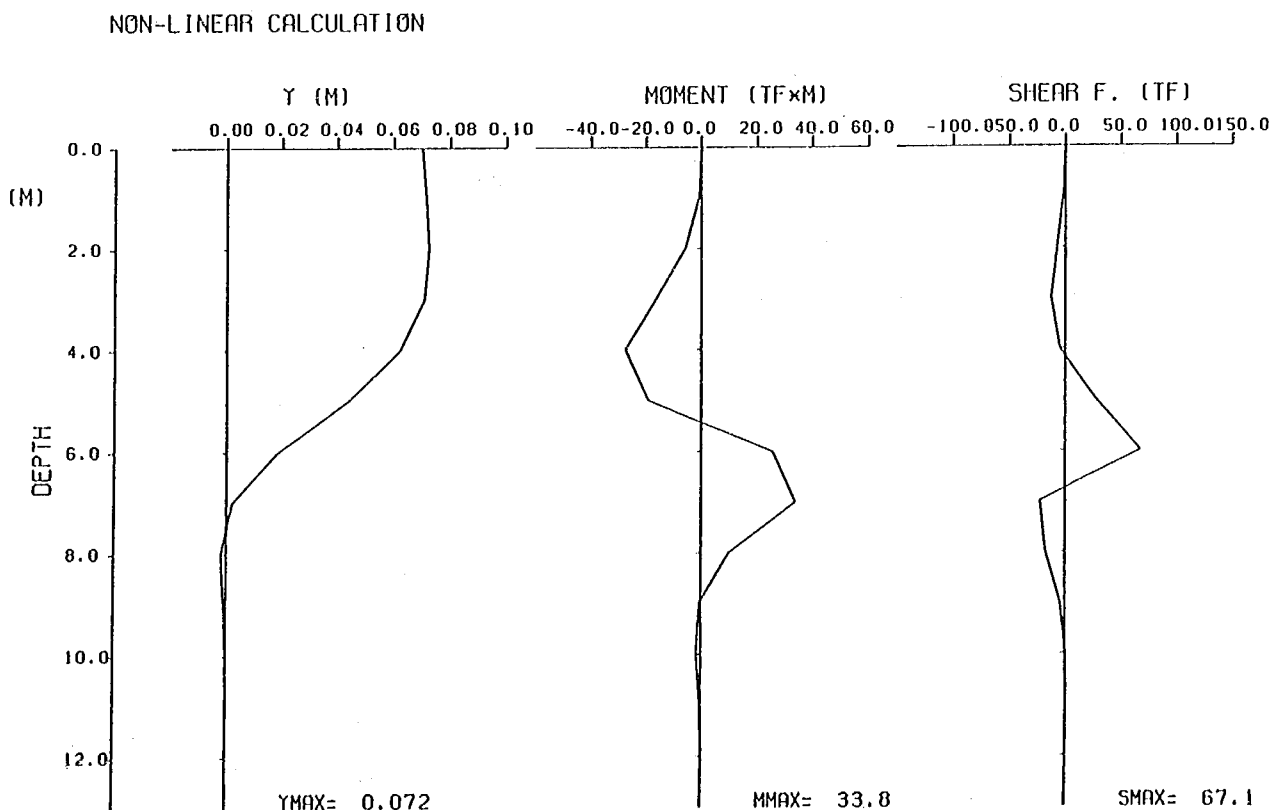


図 3.59 非線型地盤における杭応力図

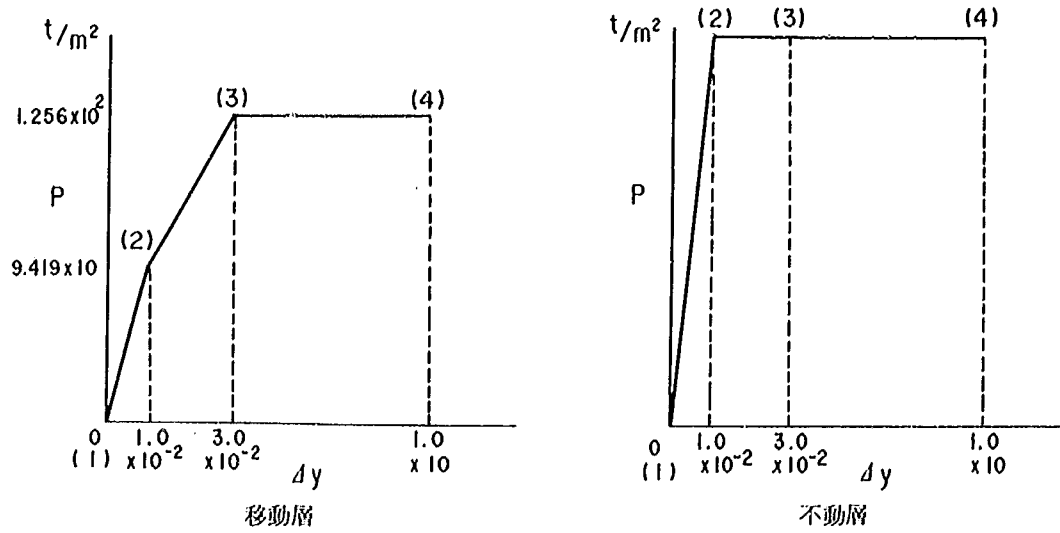


図 3.60 $p - \Delta y$ 関係図

NON-LINEAR CALCULATION

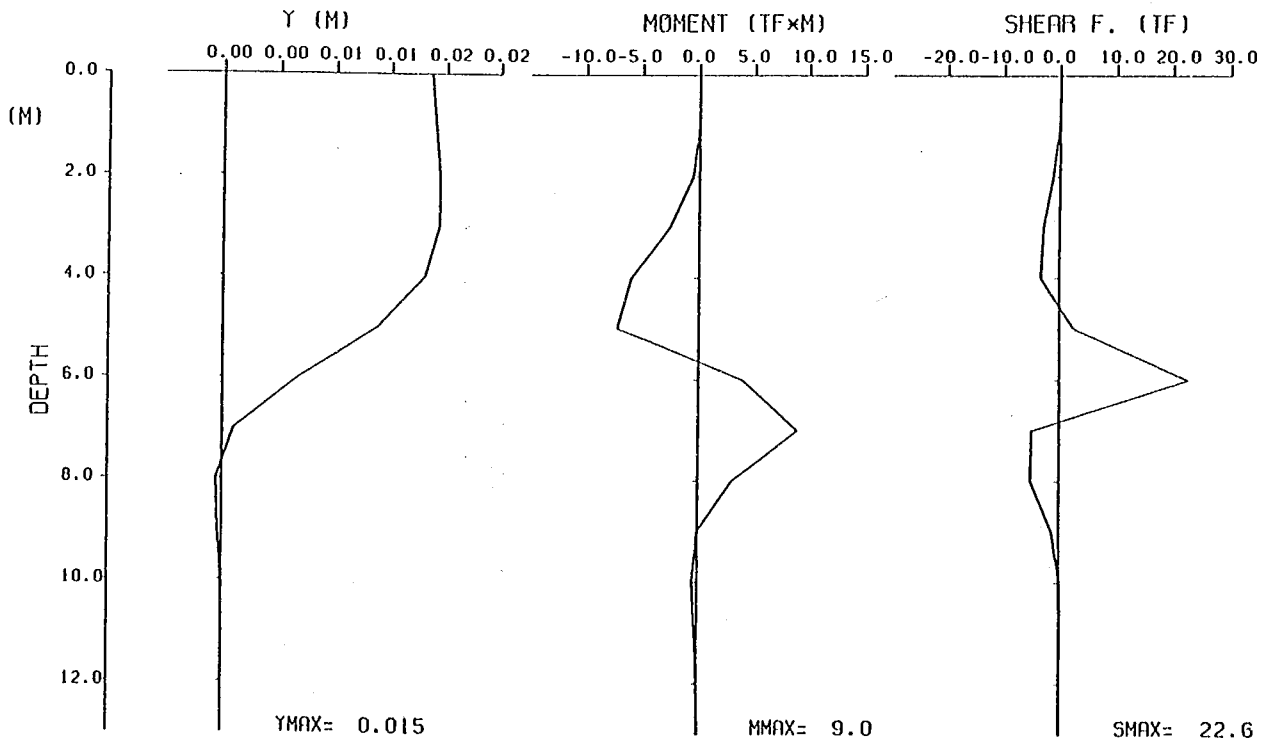


図 3.61 非線型地盤における杭応力図

表 3.23 P - Δy 関係表

移動層	No	Δy (m)	p (t/m ²)
	1	0.0	0.0
	2	1.0×10^{-2}	9.419×10^1
	3	3.0×10^{-2}	1.256×10^2
層	4	1.0×10^0	6.280×10^1

不動層	No	Δy (m)	p (t/m ²)
	1	0.0	0.0
	2	1.0×10^{-2}	6.280×10^2
	3	3.0×10^{-2}	6.280×10^2
	4	1.0×10^0	6.280×10^2

$\Delta g = 7.0$ m とした。

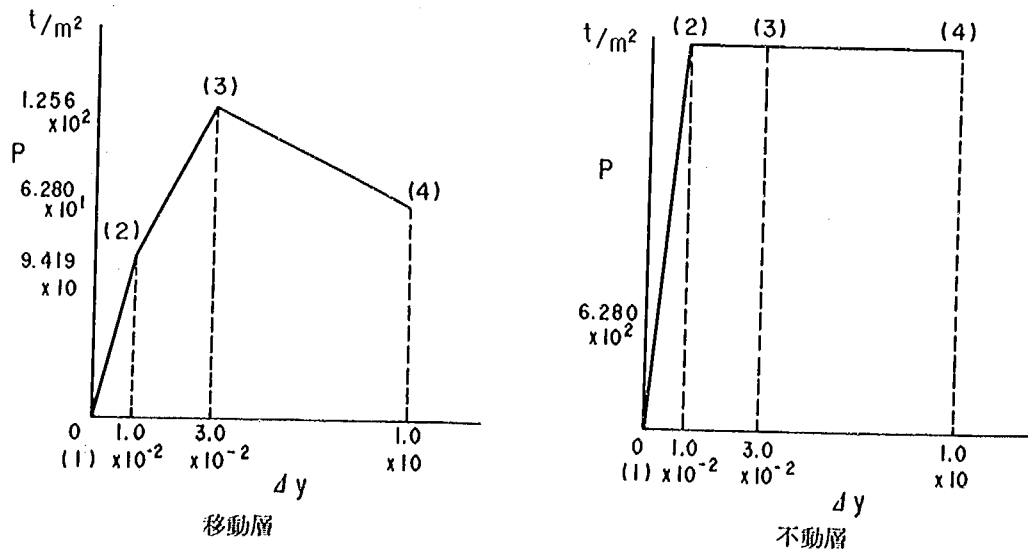


図 3.62 p - Δy 関係図

LINEAR CALCULATION

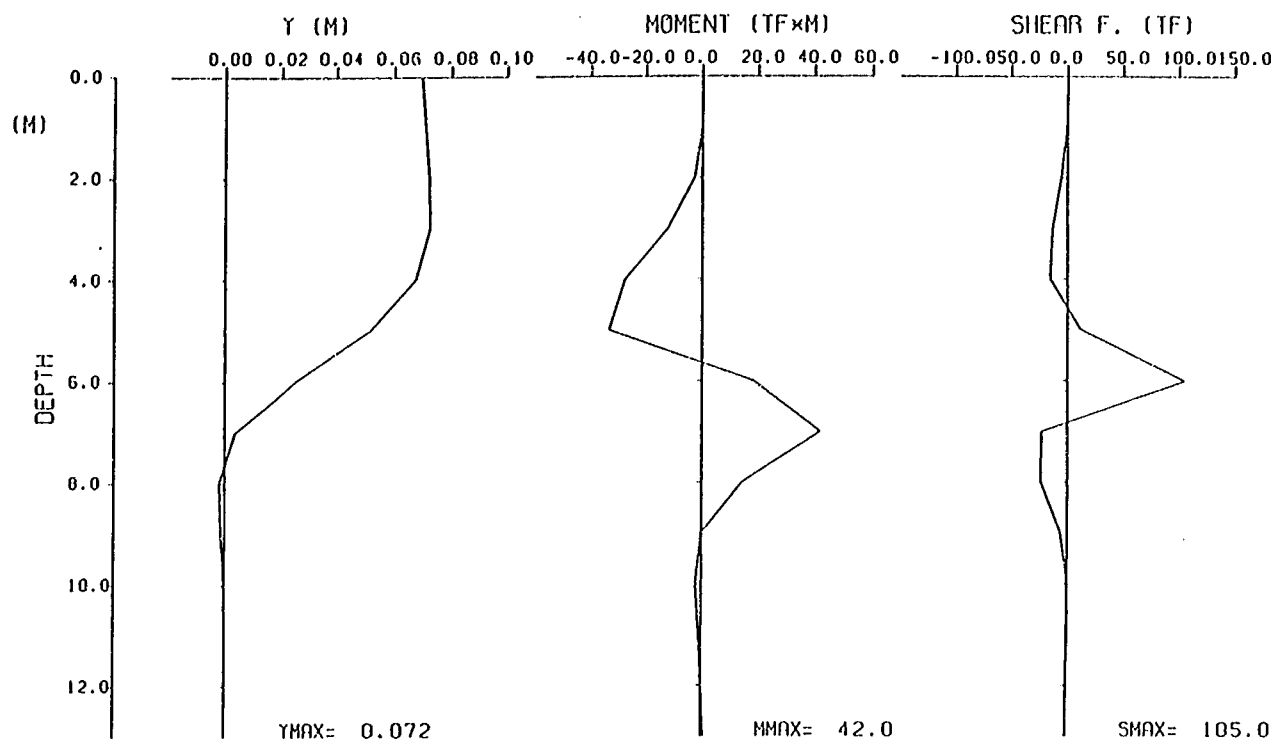


図 3.63 線型地盤における杭応力図

LINEAR CALCULATION

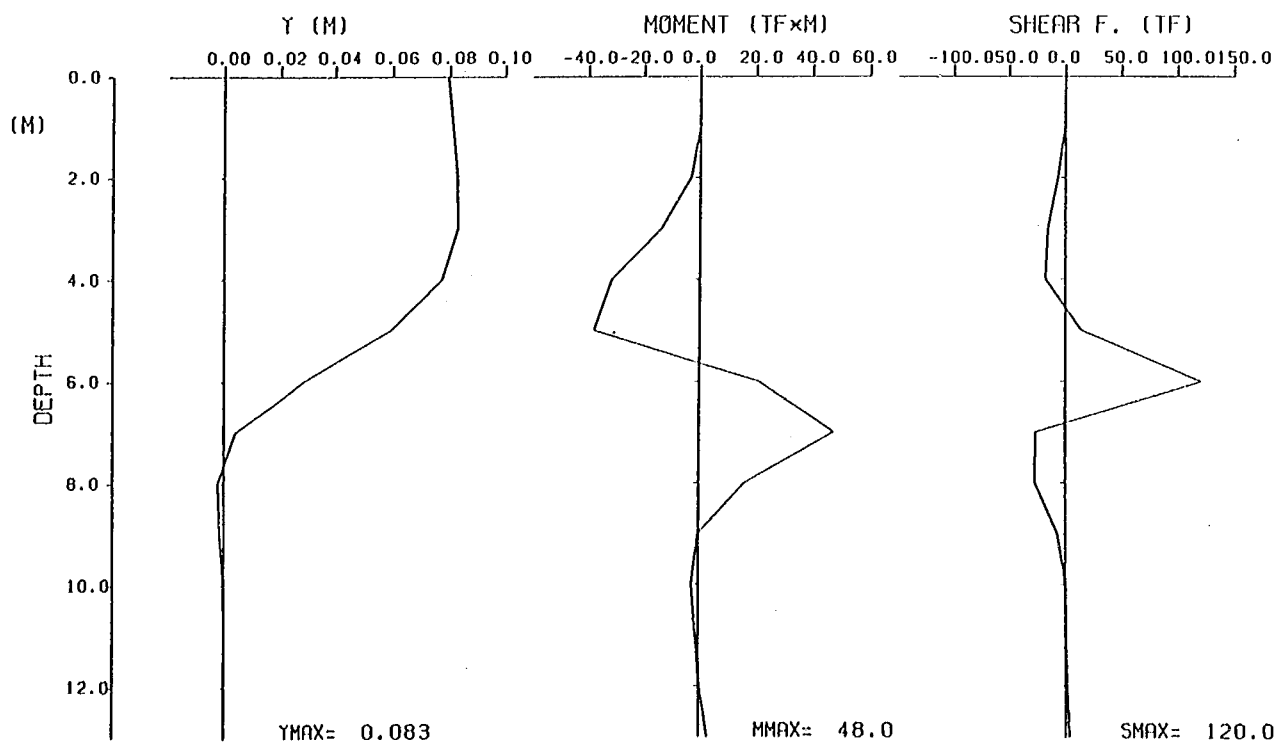


図 3.64 線型地盤における杭応力図

以上から、次のことが得られた。

- I) $P - \Delta y$ の関係により変位によって地盤反力係数を変化させ、計算した場合でもたわみ方は、線形計算と同様な形状を示し Δy の増加に従い湾曲するようになる。
- II) 線形計算から得られた最大曲げモーメント、最大せん断力の方が非線形計算よりも大きくなっている。従って、地盤を弾性体と仮定した場合に、 $P - \Delta y$ (応力-変位) の関係で、非線形計算を行った場合よりも線形計算の方が、杭の効果は少なく評価することになる。

参 考 文 献

- (1) 中村浩之, 土屋 智: 地すべり変位を考慮した地すべり抑止杭の解析, 地すべり, Vol. 24, No 2, pp. 17~23, 1987
- (2) F. BAGUELIN, R. FRANK, Y. GUEGAN: Calcul sunordinateur des pieux sollicités horizontalement ou subissant des poussées parasites, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., juillet, pp. 113~120, 1976
- (3) 中 潤植: 弾性床土のハリとしての地すべり抑止グイの式 — 分布荷重が働く場合 — , 地すべり, Vol. 15, No 1, pp. 1~9, 1978
- (4) 横山幸満: くい構造物の計算法と計算例, pp. 58~60, 山海堂, 昭和53年
- (5) 同上 pp. 60~62
- (6) 鋼管杭協会: 鋼管杭 — その設計と施工 — , pp. 219~221, 昭和59年
- (7) 中村浩之: 地すべり防止対策グイ三つの機能, 土質工学会論文報告集, Vol. 17, No 1, pp. 99~109, 1977
- (8) Terakawa, T., Oonishi, Y., Nakashima A.: The Behavior of Landslide Earth Lumps Monitored by the Wire Type Multilayers Displacement: Proc. IV th International Conference and Field Workshop on Landslide, pp. 181~184, 1985
- (9) 地すべり地における抑止杭・構造物基礎に関する調査研究: 第30回北海道開発局技術研究発表会, pp. 79~88, 北海道開発局, 1986
- (10) H. Nakamura, S. Tsuchiya: Analysis on Piles Subjected to Lateral Displacement in the Landslide Areas, : Proc. The China-Japan Field Workshop on Landslide, pp. 85~90, 1987, Xian-Lanzhou, China
- (11) 砂防・地すべり技術センター: 「砂防・地すべり設計実例」: pp. 266~268, 山海堂, 1987

地すべり抑止杭の解析

ISSN 0386-5878

土研資料 第2642号

昭和63年6月 (1988)

地すべり研究室 室長 中村 浩之

部外研究員 土屋 智

// 永田健太郎

要 旨 地すべり防止対策工の一つとして多く用いられる杭工の設計の合理化に役立てるために杭の解析法等を取りまとめたものである。

地すべり移動層の変位量，移動層や不動層の地盤特性等を変化させても解析が可能な，解析プログラムを開発するとともに，杭の解析法も示す。

また種々の条件下での解析事例を示すことによって地すべり地内の杭の挙動を明らかにした。

キーワード; 地すべり防止工, 杭工, 杭工の設計, アンカー付杭

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

砂防部地すべり研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2642号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

