

耐震構造研究室

土田

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 29 June 1967

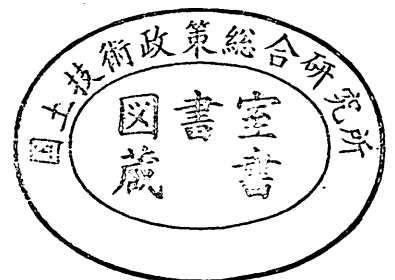
移動式荷役機械（モビールクレーン）のけい船岸に

およぼす影響……………北島 昭一・堀井 修身

円形すべりに対するクイの影響……………北島 昭一・岸 正平

昭和 42 年 6 月

運輸省港湾技術研究所



## 総目次

移動式荷役機械（モビールクレーン）のけい船岸に

およぼす影響……………北島昭一・堀井修身…… 1

円形すべりに対するクイの影響……………北島昭一・岸 正平……63

円形すべりに対するクイの影響

北島 昭一, 岸 正平

# 円形すべりに対するクイの影響

## 目 次

概 要	66
1. ま え が き	66
2. 円形すべりに対するクイの挙動	66
2-1 円形すべりについて	66
2-2 クイの横抵抗について	67
2-3 円形すべりにおけるクイの挙動	68
3. 計算モデルの作成	68
3-1 概 要	68
3-2 クイの長さ	69
3-3 地盤破壊	69
3-4 計算上の仮定	69
3-5 計算モデルの分類	69
3-6 境界条件	70
3-7 計算の原理	71
3-8 計 算 式	73
3-9 計 算 データ	76
4. 計 算 結 果	76
4-1 短グイと中間グイ	76
4-2 中間グイと中間グイ	77
4-3 長グイと長グイ	77
5. 結 果 の 考 察	78
5-1 たわみ曲線および曲げモーメント曲線	78
5-2 クイの抵抗りに影響する要素	79
5-3 地盤破壊の検討	80
5-4 土の変形とクイの変形	81
6. 提 案	82
6-1 クイの抵抗モーメントの計算法	82
6-2 計 算 例	82
7. 結 論	85
8. あ と が き	85
参 考 文 献	85
記 号 表	85
付 図	86

## A Effect of Embedded Pipes to Increase Resistance against Circular Slides in Soft Clay Foundation

Shoichi Ktajima\*

Shohei Kishi\*\*

### Synopsis

The report deals with increments of resistance against circular slides in soft cohesive layers, which are brought by pipes penetrated into them. Amount of the increments depend upon strength of clay, and bending strength, embedded length from sliding surfaces and lateral deflection of pipes. Clayey strength determines them if embedded length is not long enough, in the other case, characters of pipes do.

As long as foundation does not fail, its reaction to pipes are assumed in proportion to the lateral deflection according to Chang's idea, and they are assumed constant values, 9 times of the cohesion, after its failure according to Bengt B. Broms' idea.

The increments are calculated in ranges of the cohesion between  $1 \text{ t/m}^2$  and  $6 \text{ t/m}^2$ , of diameter of pipes between 40 cm and 100 cm, and of embedded length from sliding surfaces between  $0.3/\beta$  and  $3/\beta$ , here  $\beta$  is  $\sqrt{E_s/4EI}$ . For convenience, they are figured as concentrated loads, applied on sliding surfaces, in this report, and you can compute the increasing resisting moment easy to multiply them by radii of sliding circles.

---

\*chief of design standard section

\*\*member of design standard section

# 円形すべりに対するクイの影響

北島 昭一\* 岸 正平\*\*

## 概 要

この資料は粘性土地盤の円形すべりに対する鋼管グイの抵抗力をクイの破壊強度と地盤強度をもとにして計算したものである。計算の便宜上、クイに働く地盤反力はクイの横方向変位に比例するとするChangの方法と変位の大きい所では地盤反力が一定となるとする Bengt, B. Broms の用いた方法による。

クイの抵抗力はクイとすべり面との交点に集中力として作用し、地盤の粘着力(C)、クイの径(D)と肉厚(t)、クイの根入れ深さおよびすべり面の位置の関数として表わされる。

## 1. ま え が き

軟弱地盤上に構造物を建設した場合、地盤が構造物を支持できず、地盤にすべりを生じ、構造物が転倒することがある。その対策として各種の工法がとられている。地盤改良により地盤強度を大きくする方法(例一名古屋港)、押え盛土をしてすべりに対する抵抗を増加する方法(例一八郎瀉)、ケーソンの下にH型鋼沈床を入れ荷重の分散をはかる方法<sup>1)</sup>(京浜港川崎堤)、横さん橋においてはクイによって抵抗力を増す方法などが考えられる<sup>2)</sup>。川崎の千鳥町のさん橋においてはすべりに抵抗するようにクイを打ったためすべりが止まっている。

すべりに対するクイの抵抗力の算定方法としては、港湾構造物設計基準において鉛直控えグイの模型実験より、次のように提案している<sup>3)</sup>。すなわち、すべりに対するクイの抵抗力としてすべり面を地表面と仮定した場合の $\frac{l_{m1}}{3}$ (ただし $l_{m1}$ は頭部自由グイの曲げモーメント第一ゼロ点)までの受働土圧をとることとしている。

この資料は粘性土地盤のすべりに対する鋼管グイの抵抗力をクイの破壊強度と地盤強度をもとにして計算によって求めたものである。計算方法は、クイに働く地盤反力としてクイの水平変位に比例するとするChangの方法<sup>4)</sup>および変位がある限界に達した場合、地盤反力は一定値となるとする Bengt, B. Broms の用いた方法<sup>5)</sup>を用いた。

クイの破壊の考え方としてはすべり面におけるクイの変位がある値以上に達したときを破壊と考える場合とクイに発生する内部応力がある値以上に達したときを破壊

と考える場合の二つがある。すなわち破壊状態を変位で決めるか応力で決めるかにより解析方法も異なる。しかし変位で決めることはクイがない場合の円形すべりにおいてもあまり研究されていないので、この資料ではクイの破壊状態としてクイに発生する応力によって決める。

この資料の構成は2章で計算のもととなる基本的な事項について述べ、3章で計算モデルを作成して各モデルについて計算式を立てている。4章は各モデルについて計算した結果を示し、5章でその考察を加えた。6章では計算結果にもとずく円形すべりの計算方法を述べ、具体例の計算を行なっている。

## 2. 円形すべりにおけるクイの挙動

### 2.1 円形すべりについて<sup>6)</sup>

構造物の設計においてはその基礎の地盤が安定となるように地盤と構造物の設計を行なわなければならない。一般に行なわれている安定計算は次のような方法である。

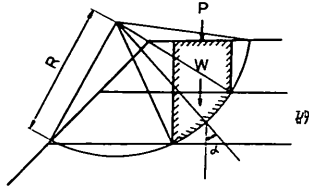
- (1) 一つの断面においてすべりは円弧状に発生するものと仮定してすべりそうな円弧をいくつか想定する。
- (2) 仮定した円弧の中心点に対して円弧にかかるすべての外力のすべりモーメントの総和( $M_s$ )を計算する。
- (3) すべり面上に発生する地盤のせん断に対する抵抗モーメントの総和( $M_r$ )を計算する。砂地盤、粘土地盤およびクイの存在する場合の抵抗モーメント( $M_r$ )の計算のしかたを図-1に示す。
- (4)  $M_r$ に対する $M_s$ の比を安全率( $F$ )として、各円弧に対して $F$ の値を求める。
- (5) 安全率( $F$ )の最小値が設計で決められた安全率になるよう構造物の断面を決定する。

\* 設計基準部設計基準課長

\*\* 設計基準部設計基準課

(a) 砂

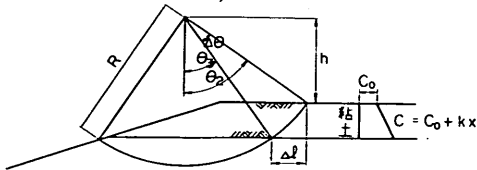
$$M_r = (P+W) \cos \alpha \tan \phi R$$



(b) 粘土

$$M_r = R \int_{\theta_1}^{\theta_2} CR d\theta$$

$$= \{(C_0 - kh) \Delta\theta + k \Delta l\} R^2$$



$$k=0 \quad M_r = C_0 \Delta\theta R^2$$

(c) くい  $M_r = Hh$

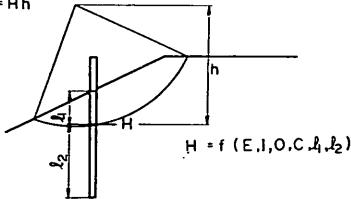


図-1 抵抗モーメント ( $M_r$ ) の計算式

港湾構造物設計基準においては設計安全率を 1.3 としている。

## 2.2 クイの横抵抗について

クイの横抵抗の算定方法については久保氏をはじめいくつかの研究がなされている。この詳細については参考文献を参照されたい<sup>7)</sup>。この資料においては計算の簡便上 Chang の方法を用い、クイのたわみが大きい部分(地盤破壊部分)については Bengt, B. Broms の方法による反力を用いる。以下 Chang の方法と地盤破壊における反力および横抵抗の計算方法について述べる。

### (1) Chang の方法<sup>4)</sup>

Chang は「地盤反力  $P$  はクイのたわみ  $y$  に比例する」と仮定し、問題を解いている。

上の仮定を式に書くと

$$P = E_s y \quad (1)$$

となる。係数  $E_s$  については(3)でのべることにする。

地表面に座標の原点をとり、クイの深さ方向に  $x$  軸、クイのたわむ方向に  $y$  軸をとるとクイの満足すべき微分方程式として次式が得られる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P = 0 \quad (2)$$

ここで

$E$ ; クイのヤング係数

$I$ ; クイの断面二次モーメント

(1)式を(2)式に代入すると

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y = 0 \quad (3)$$

(3)式の一般解は

$$y = e^{\beta x} (A_n \cos \beta x + B_n \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_n \cos \beta x + D_n \sin \beta x) \quad (4)$$

ここで  $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}$

$A_n, B_n, C_n, D_n$  は積分常数で適当な境界条件を与えることによって定めることができる。

たわみ曲線の方程式が得られればこれを用いて

$$\text{たわみ角} \quad \theta = \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (6)$$

$$\text{せん断力} \quad S = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \quad (7)$$

が計算できる。

(2) クイのたわみが大きい部分の横抵抗<sup>5)</sup>

クイのたわみが大きくなると地盤反力はクイのたわみに比例しなくなる。クイのたわみが大きくなって地盤が破壊した場合の反力について、いくつかの研究がされている。

Brinch Hansen は円形断面、正方形断面のクイも近似的に等しいとして、粘性土に埋めこまれた水平荷重を受けるクイの局限地盤反力は  $C$  を粘土の粘着力、 $D$  をクイの直径とすると  $8.3CD \sim 11.4CD$  の間の値であることを示した。

L. C. Lecee は局限地盤反力は地表面近くで約  $2CD$ 、地表面より直径の 3 倍以上の深さでは  $12CD$  であることを示した。

T. R. McKenzie は最大横方向反力として約  $8CD$ 、

A. G. Dastidar は粘性土に埋めこまれたクイの拘束効果を計算したとき  $8.5CD$  の値を用いた。

表-1

断面形	表面状態	反力
□	粗表面	12.56CD
◇	"	11.42CD
□	滑面	11.42CD
◇	"	8.24CD
○	"	9.14CD

Bengt, B. Broms は表-1のような断面形の無限長のクイが粘土地盤中で横方向に移動する場合の地盤の局限抵抗力の大きさを計算した。表-1 は単位長当りの地盤反力を計算した値である。この計算の仕方については Brinch Hansen の土圧の計算による<sup>3)</sup>。

上記の各値を考慮してクイの横抵抗の計算において地盤反力として  $9CD$  なる値を用いる。この資料では地盤反力が一定値  $9CD$  になる値を用い「地盤破壊がある」と称する。

地盤反力を  $9CD$  にとった場合のクイの弾性方程式は次のようになる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + 9CD = 0 \quad (8)$$

(8)式の一般解は

$$y = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_n x^3 + B_n x^2 + C_n x + D_n \quad (9)$$

$A_n, B_n, C_n, D_n$  は積分常数で適当な境界条件を与えることによって定めることができる。

たわみ角, 曲げモーメント, せん断力は, (5)(6)(7)式のとおりである。

(3) 地盤反力係数  $E_s$ <sup>4)</sup>

テルツァギーは粘土について標準貫入試験の  $N$  値と一軸圧縮強度  $q_u$  との間に

$$q_u = \frac{N}{8} (\text{kg/cm}^2) \quad (10)$$

なる関係を示している。

また,  $E_s$  と  $N$  との関係はクイの巾に関係なく

$$E_s = 4N (\text{kg/cm}^2) \quad (11)$$

なる関係があるとしている。

$$E_s = 32q_u = 64C \quad (12)$$

ここで  $C$  は粘着力で  $q_u/2$  である。わが国で行なわれたいくつものクイの横抵抗の試験結果においてもこの関係が成り立つような値が出ている。

また地盤反力係数  $E_s$  の値は  $\beta$  の値に対し 4 乗根で関係してくるので粗な推定をしてもさしつかえないものと考えられる。

### 2.3 円形すべりにおけるクイの挙動

クイの抵抗力の大きさを求めるためにまずすべりが発生した場合のすべり面に打ちこまれたクイの挙動を考察する。

(1) クイの断面のせん断抵抗力が小さく, すべり面においてクイが切断される場合がまず考えられるが, 実際のすべり破壊においてはすべり面に沿うある巾をもった層が破壊し, クイの一部に集中してせん断力がかかることがないので, クイの切断という現象はないものと思わ

れる。

(2) 地盤がすべるにしたがってクイはすべり面上の土塊に押されて曲げ変形が生ずる。クイの曲げに対する抵抗力には限界があり, クイに生ずる曲げモーメントがクイの最大抵抗曲げモーメントより大きくなるとクイは折れる。したがってすべりに対する抵抗力としてはクイに働く曲げモーメントがクイの最大抵抗曲げモーメントになった時のすべり土塊に対して働く水平力をとる。

(3) 地盤にすべりが発生した場合, クイが折れずにすべり面上下のどちらか一方の土塊と一体となり, 他方の土塊をかき進む場合が考えられる。この状態はクイに働く地盤反力がクイのたわみ量に比例せず一定値となった場合である。

(4) すべりによりクイが前面に転倒してしまう状態も考えられるが, この状態も実際の構造物ではクイが構造物に拘束されている場合が多いので生ずることが少ない。

以上の考察により, 破壊の生ずるケースとしてクイが折れる(2)の場合と地盤が破壊する(3)の場合が実際に起る可能性が大きいので, この報告ではこの二つについてクイの抵抗力の算定方法を検討する。実際にはこの二つの場合が重なり, 地盤の一部が破壊し, クイが折れることも考えられるので算定方法もその組合せを考える。

## 3. 計算モデルの作成

### 3.1 概 要

すべり面に打ちこまれたクイの長さや地盤のせん断強さ(すなわち地盤破壊があるかどうか)により, クイの抵抗力の算定式が異なってくる。したがってクイの長さや地盤破壊の有無によりクイの状態をいくつかに分類し, 各状態についてもモデルを想定し, 計算式をたてる。

### 3.2 クイの長さ

クイの根入れ長により短いものから順に短グイ, 中間グイ, 長グイと三つに分類する。

#### (1) 短グイ

クイの根入れ長さが比較的短かく, クイに働く地盤反力は破壊反力 ( $9CD$ ) がクイ全体に等分布にかかるものとする。円形すべりが発生した場合, このクイは 2.3 円形すべりにおけるクイの挙動において地盤がこわれてクイが抵抗する(3)の場合, またはクイの回転する(4)の場合に相当する働きをする。

#### (2) 長グイ

クイの長さが十分長く, クイの上部で横方向の力が働



いたとしても、クイのある深さより深い所では地盤に固定され、たわみもたわみ角もゼロとなるクイを長グイという。

### (3) 中間グイ

短グイと長グイの中間にあり、クイの上部で横方向力が働いたとき、クイ先端においてたわみ、たわみ角がゼロではない。すべりに対して抵抗するにはクイの曲げ強度によって抵抗する。

以上の各クイの範囲はクイの諸元（すなわち、ヤング係数、断面二次モーメントおよび曲げ強度）と地盤強度によって定まるものであり、具体的数値については4. 計算結果で述べることにする。

図-2に各クイの地盤反力の状態を示す。

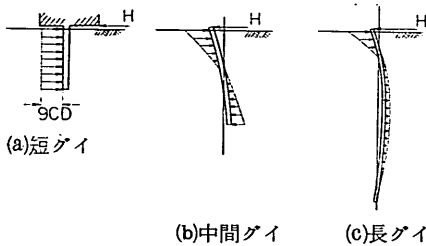


図-2 クイの長さによる分類

### 3.3 地盤破壊

地盤に埋め込まれたクイに作用する横方向が大きくなると、クイのたわみが大きくなり、地盤が破壊する。そのときのクイに作用する地盤反力としてはたわみに比例する反力ではなく、一定値(9CD)なる反力を用いる。その境界にあるたわみ $y_{cr}$ は次のようにして決まる。

破壊前の反力

$$P = E_s y_{cr} \quad (1)$$

破壊後の反力

$$P = 9CD \quad (2)$$

(1)=(2)として

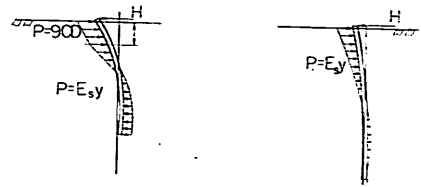
$$E_s y_{cr} = 9CD \quad (3)$$

したがって

$$y_{cr} = \frac{9CD}{E_s} \quad (4)$$

たわみが(4)式の $y_{cr}$ より大きくなった場合には(2)式による反力を用いて計算を行なう。

短グイは全て地盤破壊したものとして計算する。中間グイ、長グイにおいても地盤の一部が破壊する場合がある。この場合、地盤反力として破壊前の地盤反力と破壊後の地盤反力の両方が存在する。その状態を図-3に示す。



(a) 地盤の一部が破壊する場合 (b) 地盤が破壊する場合

図-3 地盤状態による分類

### 3.4 計算上の仮定

クイの水平抵抗力の計算を進める上に次の仮定を設ける。

- (1) クイは弾性体とし、地盤反力は地盤破壊をしない部分はクイのたわみに比例し、地盤破壊をした部分は一定値 $9CD$ とする。
- (2) クイは鉛直方向に打ち込まれたものとし、すべり面はクイの周辺で水平な平面とする。
- (3) クイには地盤反力以外の力は働かないものとする。  
クイに働く軸方向力は曲げモーメントに較べて小さいので、クイに働く軸方向力はないものとする。
- (4) 地盤は粘着力 $C$ が一定の粘土地盤とし、地盤反力係数 $E_s$ は

$$E_s = 64C \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

なる関係があるものとする。

### 3.5 計算モデルの分類

円形すべりにおいてクイの根入れもすべり面の位置により、クイを図-4に示すように2つの部分に分ける。

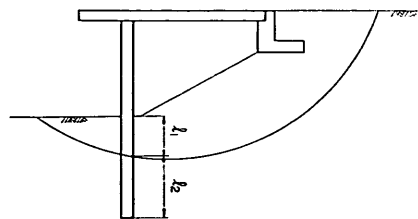


図-4 クイとすべり面の関係

$l_1$ 、 $l_2$ の長さで地盤破壊の有無で分類するとモデルとして表-2にあげるものがある。

ここで短グイを $S$ 、中間グイを $M$ 、長グイを $L$ とする。また地盤破壊がある場合を $F$ 、ない場合を $NF$ とする。ただし短グイでは必ず地盤破壊があるので $F$ を省略する。

表-2の組合せのうち次のものが省略できる。

- (1) No. 1 クイの回転の場合であり、実際にケースが少

表-2

No.	$l_1$	$l_2$	No.	$l_1$	$l_2$	No.	$l_1$	$l_2$
1	S	S	6	M-NF	S	16	L-NF	S
2	S	M-NF	7	M-NF	M-NF	17	L-NF	M-NF
3	S	M-F	8	M-NF	M-F	18	L-NF	M-F
4	S	L-NF	9	M-NF	L-NF	19	L-NF	L-NF
5	S	L-F	10	M-NF	L-F	20	L-NF	L-F
			11	M-F	S	21	L-F	S
			12	M-F	M-NF	22	L-F	M-NF
			13	M-F	M-F	23	L-F	M-F
			14	M-F	L-NF	24	L-F	L-NF
			15	M-F	L-F	25	L-F	L-F

ない。

(2) No. 20, 24

$l_1, l_2$  共すべり面を境として対象であることから生じない。

(3) No. 6, 11, 16, 17, 18, 21, 23

$l_1, l_2$  を入れかえた場合、計算上他のものと重複する。  
 $l_1, l_2$  を入れかえても計算上支障がないことは3-6(1)で述べる。

(4) No. 8, 10

一般に短い方のクイの地盤が先にたわみが大きくなり、 $l_1, l_2$  がより短いものとする生じない。

(5) No. 4, 5, 9, 14, 15, 19, 25

長グイの抵抗力は長さに無関係に一定値である。長グイと中間グイの抵抗力はその境界付近で連続しておるので、長グイの抵抗力としてその境界付近の中間グイの抵抗力をとることにより、長グイの抵抗力は計算する必要はない。

したがって残った組合せとしてNo. 2, 3, 7, 12, 13となる。

No. 19, No. 25 を特に取り出して、すべり面を境として対称である場合の計算を行なう。

したがって表-3に示す場合について計算式を立てる。

表-3

短ぐい— 中間ぐい	中間ぐい—中間ぐい	長ぐい—長ぐい
S-(M-NF)	(M-NF)-(M-NF)	(L-NF)-(L-NF)
S-(M-F)	(M-NF)-(M-F) (M-F)-(M-F)	(L-F)-(L-F)

### 3.6 境界条件

2.2 で述べたクイの弾性方程式の係数を定めるために各モデルにおいて、境界条件をそれぞれ決める。ここでは境界条件としての一般的な性質について述べる。こ

で座標としてすべり面より上下に分けて図-5のように定める。

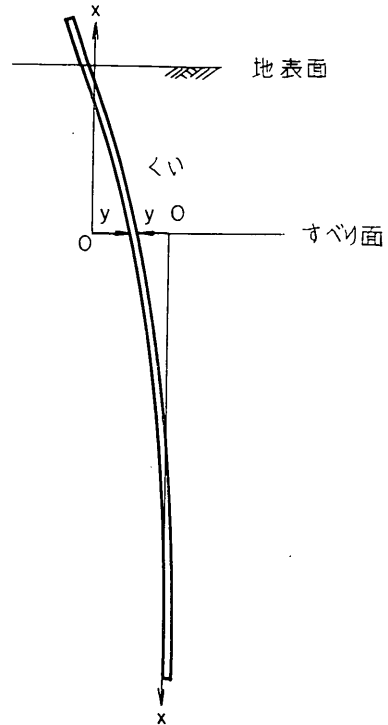


図-5 座標のとり方

(1) クイ先端および地表面における境界条件

短グイ、中間グイの先端および地表面において、クイの曲げモーメントとせん断力はゼロである。境界条件としてクイの先端と地表面を同じにしたことは $l_1$ と $l_2$ を入れかえても計算上支障がないことになる。

$x=l_1$  または  $l_2$  において

$$M = -EI \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \quad (\text{曲げモーメント})$$

$$S = -EI \frac{d^3y}{dx^3} = 0 \quad (\text{せん断力})$$

長グイにおいて  $x$  の十分大きい所でたわみ, たわみ角がゼロとなる。

$$x \rightarrow \infty$$

$$y = 0 \quad (\text{たわみ})$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad (\text{たわみ角})$$

### (2) 地盤破壊の境界条件

地盤が破壊した部分としない部分の境界において, たわみ, たわみ角, 曲げモーメント, せん断力は連続する。

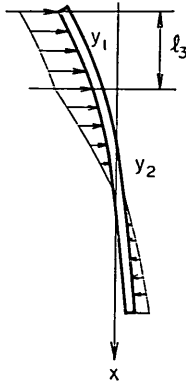


図-6 地盤破壊の境界

$$x = l_3$$

$$y_1 = y_2 = y_{cr} \quad (\text{たわみ})$$

$$y_1' = y_2' \quad (\text{たわみ角})$$

$$y_1'' = y_2'' \quad (\text{曲げモーメント})$$

$$y_1''' = y_2''' \quad (\text{せん断力})$$

### (3) すべり面における境界条件

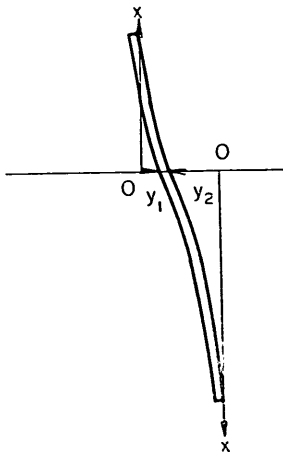


図-7 すべり面における境界条件

すべり面において二つのクイが連続するが, 座標が異なるので, たわみは連続しないが, たわみ角とせん断力は連続し, 曲げモーメントは符号が逆になって絶対値が同じである。

$$x = 0 \quad y_1' = y_2' \quad (\text{たわみ角})$$

$$y_1'' = -y_2'' \quad (\text{曲げモーメント})$$

$$y_1''' = y_2''' = \frac{H}{EI} \quad (\text{せん断力})$$

ここで  $H$  は水平抵抗力

### 3.7 計算の原理

3.5 で述べた計算モデルについて, すべりに対する抵抗力の計算の考え方を次に述べる。

#### (1) 短グイと中間グイ

この組合せは図-8のように  $l_1$  が短グイで  $l_2$  が中間グイの場合である。図-8(b)のように  $l_2$  が短グイで  $l_1$  が中間グイの場合には  $l_1$  と  $l_2$  を入れかえて短グイを  $l_1$  とする。

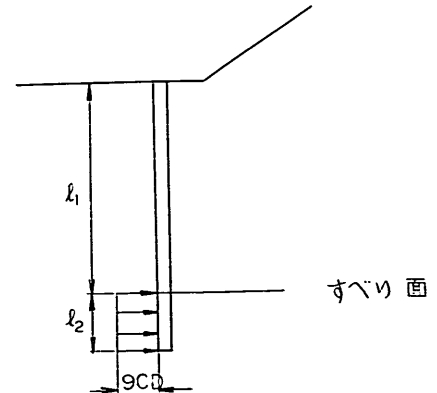
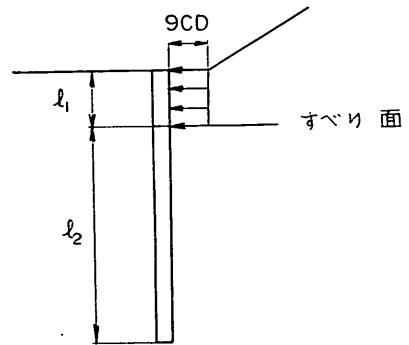


図-8 短グイと中間グイ

仮定(3)によるとクイには地盤反力以外の外力が作用せず, すべりはすべり面を境とした土塊の相対的水平変位となるので,  $l_1$  と  $l_2$  を入れかえても計算上支障はない。したがって短グイを  $l_1$  とするとすべりに対するクイの水

平抵抗力は破壊時の地盤反力  $9CD$  に短グイの長さに乗じたものとなる。

すなわち

$$H = 9CDl_1$$

ただし  $l_1$  が大きくなるとクイに発生する曲げモーメントが大きくなり、クイの抵抗曲げモーメントより大きくなるとクイは折れるので、水平抵抗力としては  $9CDl_1$  とならない。そのような抵抗のしかたをするものは短グイではなくなる。したがって短グイと中間グイの限界長さ ( $l_{cr}$ ) は、 $9CDl_1$  なる水平抵抗力を外力として作用させた場合、クイに発生する曲げモーメントがクイの最大抵抗曲げモーメントに達した時の  $l_1$  の大きさである。

### (2) 中間グイと中間グイ

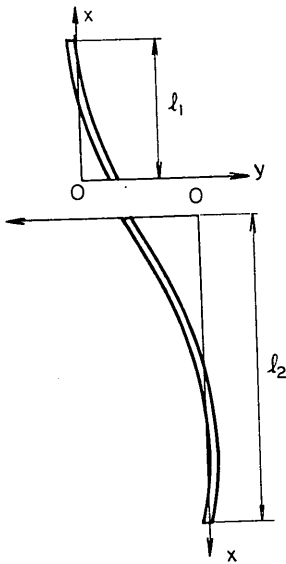


図-9 中間グイと中間グイ

この場合にはすべりに対するクイの抵抗力はクイの曲げによって抵抗する。この場合も  $l_1$  と  $l_2$  を入れかえても同じとなるので、短い方のクイを  $l_1$  とする。

すべり面附近で地盤破壊がある場合にはまず短い方の  $l_1$  で先に破壊が生ずる。また曲げモーメントの最大値は長い方の  $l_2$  の地盤破壊がない部分で生ずる。最大曲げモーメントの発生する深さはせん断力がゼロとなる深さで生ずる。

### (3) 長グイと長グイ

すべり面上下に十分長くクイが埋め込まれている場合、すべり面上部の土塊全体が水平方向に平行移動すると、それに従ってクイは変形する。その状態は 図-10 のようになる。

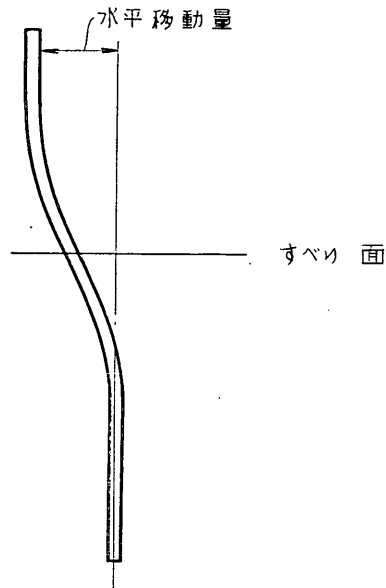


図-10 長グイと長グイ

この状態はクイに地盤反力以外に力が働かない場合、クイはすべり面と交わる点を中心として点対称の変形をする。したがって、その中心点はクイの変曲点となり、クイの曲げモーメントはゼロとなる。

またクイの性状が点対称となることから、すべり面より上半分が下半分のどちらかについて計算式を立て、すべり面で曲げモーメントがゼロ、せん断力として水平抵抗力 ( $H$ ) をとればよい。いま下半分について考えるとクイの性状は 図-11 のようになる。

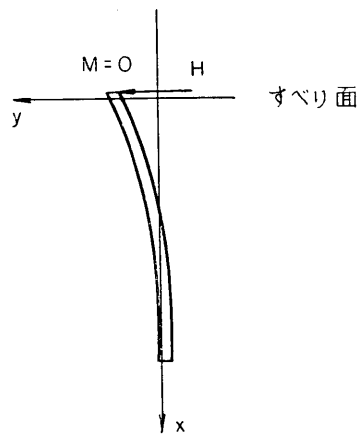


図-11

クイに作用する水平力 ( $H$ ) により、クイに発生する曲げモーメントが最大抵抗曲げモーメントに等しくなっ

たとき、水平力 $H$ はすべりに対するクイの水平抵抗力となる。

### 3.8 計算式

各計算モデルについて水平抵抗力 ( $H$ ) を求める計算を述べる。

#### (1) S-(M-NF)

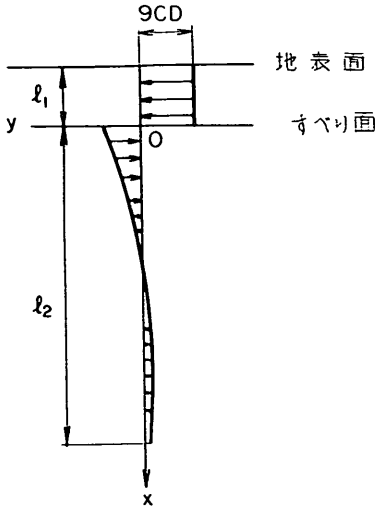


図-12 S-(M-NF)

$x < 0$

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} - 9CD = 0$$

$$y_1 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + D_1$$

$x > 0$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y_2 = 0$$

$$y_2 = e^{\beta x} (A_2 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_2 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x = -l_1 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = 0$$

$$x = 0 \quad y_1^{(n)} = y_2^{(n)} \quad (n=0, 1, 2, 3)$$

$$x = l_2 \quad y_2'' = 0 \quad y_2''' = 0$$

以上の8個の式から係数  $A_1 \sim D_1, A_2 \sim D_2$  を求める。

最大曲げモーメント ( $M_{max}$ )

$$S = -EI y_2''' = 0 \text{ なる } x \text{ において}$$

$$M_{max} = -EI y_2''$$

水平抵抗力

$$H = 9CD l_1$$

#### (2) S-(M-F)

$x < 0$

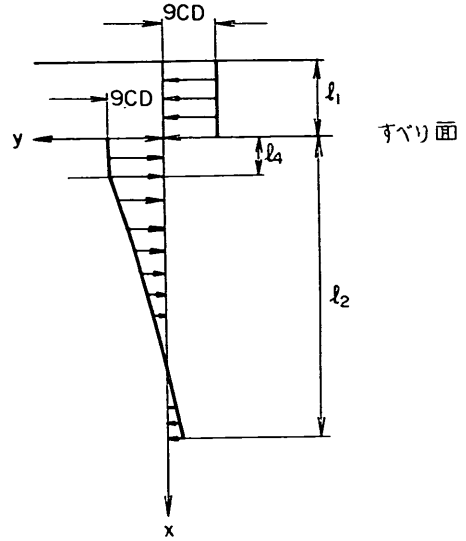


図-13 S-(M-F)

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} - 9CD = 0$$

$$y_1 = \frac{9CD}{24EI} x^4 + A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + D_1$$

$0 < x < l_4$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + 9CD = 0$$

$$y_2 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_2 x^3 + B_2 x^2 + C_2 x + D_2$$

$x > l_4$

$$EI \frac{d^4 y_3}{dx^4} + E_s y_3 = 0$$

$$y_3 = e^{\beta x} (A_3 \cos \beta x + B_3 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + D_3 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x = -l_1 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = 0$$

$$x = 0 \quad y_1^{(n)} = y_2^{(n)} \quad (n=0, 1, 2, 3)$$

$$x = l_4 \quad y_2^{(2)} = y_3^{(2)} \quad (n=1, 2, 3)$$

$$y_2 = y_3 = \frac{9CD}{E_s}$$

$$x = l_2 \quad y_3'' = 0 \quad y_3''' = 0$$

以上の13個の境界条件式より、係数  $A_n, B_n, C_n, D_n$  ( $n=1, 2, 3$ ) および  $l_4$  を求める。

最大曲げモーメントは  $y_3''' = 0$  なる  $x$  を  $M = -EI y_3''$  に代入して求める。

#### (3) (M-NF)-(M-NF)

すべり面上下で座標が異なるので I, II 2つの領域に分けて式を立てる。

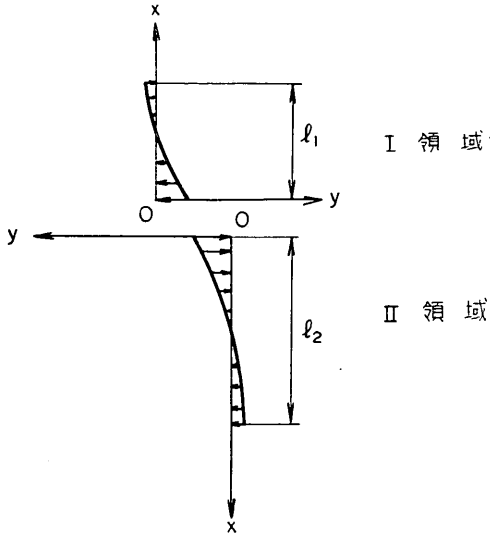


図-14 (M-NF)-(M-NF)

I 領域

$$0 < x < l_1$$

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + E_s y = 0$$

$$y_1 = e^{\beta x} (A_1 \cos \beta x + B_1 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + D_1 \sin \beta x)$$

II 領域

$$0 < x < l_2$$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y = 0$$

$$y_2 = e^{\beta x} (A_2 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_2 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x = l_1 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = 0$$

$$x = 0 \quad y_1' = y_2' \quad y_1'' + y_2'' = 0 \quad y_1''' = y_2''' = \frac{H}{EI}$$

$$x = l_2 \quad y_2'' = 0 \quad y_2''' = 0$$

以上の8個の境界条件式より  $A_n, B_n, C_n, D_n (n=1, 2)$  を求める。

(4) (M-F)-(M-NF)

I 領域

$$l_3 < x < l_1$$

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + E_s y = 0$$

$$y_1 = e^{\beta x} (A_1 \cos \beta x + B_1 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + D_1 \sin \beta x)$$

$$0 < x < l_3$$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + 9CD = 0$$

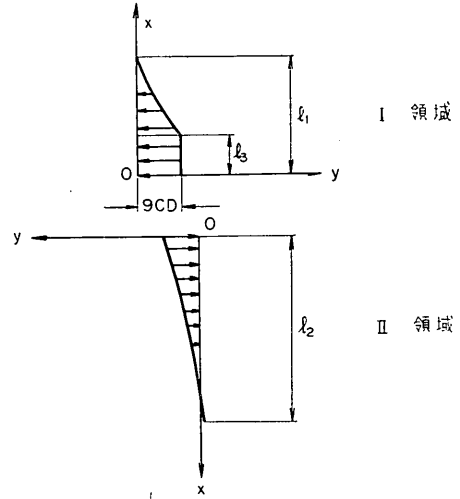


図-15 (M-F)-(M-NF)

$$y_2 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_2 x^3 + B_2 x^2 + C_2 x + D_2$$

II 領域

$$0 < x < l_2$$

$$EI \frac{d^4 y_3}{dx^4} + E_s y = 0$$

$$y_3 = e^{\beta x} (A_3 \cos \beta x + B_3 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + D_3 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x = l_1 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = 0$$

$$x = l_3 \quad y_1 = y_2 = \frac{9CD}{E_s}$$

$$y_1^{(n)} = y_2^{(n)} \quad (n=1, 2, 3)$$

$$x = 0 \quad y_2' = y_3' \quad y_2'' + y_3'' = 0 \quad y_2''' = y_3''' = \frac{H}{EI}$$

$$x = l_2 \quad y_3'' = 0 \quad y_3''' = 0$$

以上の13個の境界条件式より  $A_n, B_n, C_n, D_n (n=1, 2, 3)$  および  $l_3$  を求める。

(5) (M-F)-(M-F)

I 領域

$$l_3 < x < l_1$$

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + E_s y = 0$$

$$y_1 = e^{\beta x} (A_1 \cos \beta x + B_1 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + D_1 \sin \beta x)$$

$$0 < x < l_3$$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + 9CD = 0$$

$$y_2 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_2 x^3 + B_2 x^2 + C_2 x + D_2$$

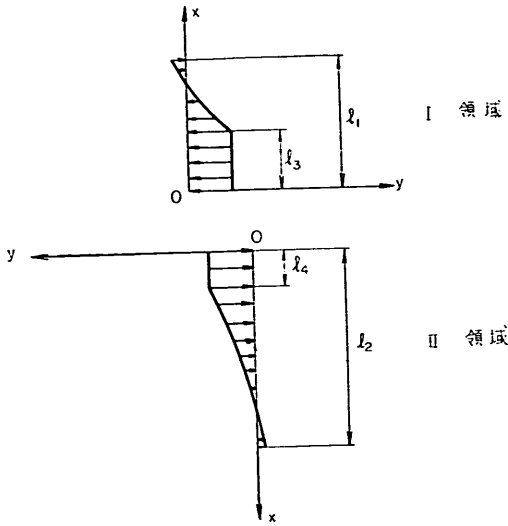


図-16 (M-F)-(M-F)

II 領域

$$0 < x < l_4$$

$$EI \frac{d^4 y_3}{dx^4} + 9CD = 0$$

$$y_3 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_3 x^3 + B_3 x^2 + C_3 x + D_3$$

$$l_4 < x < l_2$$

$$EI \frac{d^4 y_4}{dx^4} + E_S y_4 = 0$$

$$y_4 = e^{\beta x} (A_4 \cos \beta x + B_4 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_4 \cos \beta x + D_4 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x = l_1 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = 0$$

$$x = l_3 \quad y_1 = y_2 = \frac{9CD}{E_S}$$

$$y_1^{(n)} = y_2^{(n)} \quad (n = 1, 2, 3)$$

$$x = 0 \quad y_2' = y_3' \quad y_2'' + y_3'' = 0 \quad y_2''' = y_3''' = \frac{H}{EI}$$

$$x = l_4 \quad y_3 = y_4 = \frac{9CD}{E_S}$$

$$y_3^{(n)} = y_4^{(n)} \quad (n = 1, 2, 3)$$

$$x = l_2 \quad y_4'' = 0 \quad y_4''' = 0$$

以上の18個の境界条件式より  $A_n, B_n, C_n, D_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) および  $l_3, l_4$  を求める。

(6) (L-NF)-(L-NF)

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + E_S y_1 = 0$$

$$y_1 = e^{\beta x} (A_1 \cos x + B_1 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + D_1 \sin \beta x)$$

境界条件

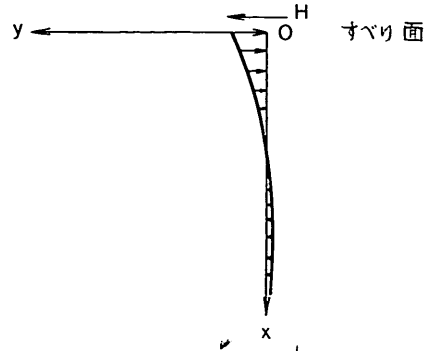


図-17 (L-NF)-(L-NF)

$$x = 0 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = \frac{H}{EI}$$

$$x = \infty \quad y_1 = 0 \quad y_1' = 0$$

以上の4個の境界条件式より  $A_1, B_1, C_1, D_1$  を求める。

この式は簡単であるので係数を次に示す。

$$A_1 = B_1 = 0$$

$$C_1 = D_1 = \frac{H}{2EI\beta^2}$$

したがって

$$たためし \quad y_1 = \frac{H}{2EI\beta^2} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

曲げモーメント

$$M = -\frac{H}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x$$

$$x = \frac{\pi}{4\beta} \text{ のとき}$$

$$M_{\max} = -\frac{H}{\beta} e^{-\frac{\pi}{4}}$$

水平抵抗力

$$H = -e^{\frac{\pi}{4}} \beta M_{\max} = \frac{\beta M_{\max}}{0.3224}$$

すべり面におけるたわみ

$$y_s = \frac{H}{2EI\beta^3} = \frac{2H\beta}{E_S}$$

第一不動点の深さ

$$x = \frac{\pi}{2\beta}$$

(7) (L-F)-(L-F)

$$0 < x < l_3$$

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + 9CD = 0$$

$$y_1 = -\frac{9CD}{24EI} x^4 + A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + D_1$$

$$l_3 < x < \infty$$

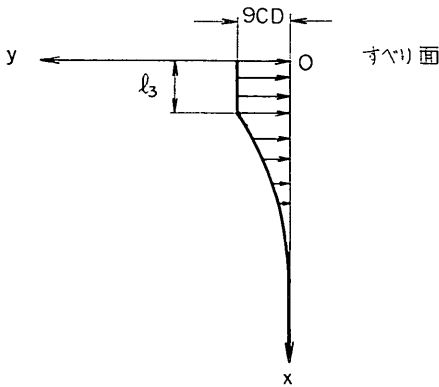


図-18 (L-F)-(L-F)

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_S y_2 = 0$$

$$y_2 = e^{\beta x} (A_2 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_2 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x)$$

境界条件

$$x=0 \quad y_1'' = 0 \quad y_1''' = \frac{H}{EI}$$

$$x=l_3 \quad y_1^{(n)} = y_2^{(n)} \quad (n=1, 2, 3)$$

$$y_1 = y_2 = \frac{9CD}{E_S}$$

$$x \rightarrow \infty \quad y_2 = 0 \quad y_2' = 0$$

以上の9個の境界条件式より係数  $A_n, B_n, C_n, D_n$  ( $n=1, 2$ ) および  $l_3$  を求める。

### 3.9 計算データ

(1) 計算に用いた数値を次に示す。

(a) クイの直径  $D$ (cm)

40.64	45.72	50.80	55.88	60.96
71.12	81.28	91.44	101.60	

(b) クイの肉厚  $t$ (cm)

0.95	1.27	1.60
------	------	------

(c) ヤング係数  $E=2.1 \times 10^6$ (kg/cm<sup>2</sup>)

(d) 許容応力度  $\sigma_{cr}=2,000$ (kg/cm<sup>2</sup>)

(e) クイの長さ  $l_1, l_2$ (cm)

$l_2=1.5/\beta$	$2.0/\beta$	$2.5/\beta$	$3.0/\beta$	
$l_1=0.2l_2$	$0.4l_2$	$0.6l_2$	$0.8l_2$	$1.0l_2$

(f) 地盤強度  $C$ (kg/cm<sup>2</sup>)

$C=0.1$	$0.2$	$0.3$	$0.4$	$0.5$	$0.6$
---------	-------	-------	-------	-------	-------

(2) 計算の前提となる式

(a) クイの断面二次モーメント ( $I$ )

$$I = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D-t)^4]$$

(b) クイの断面係数

$$z = \frac{2I}{D}$$

(c) クイの最大曲げ抵抗モーメント ( $M_{max}$ )

$$M_{max} = \sigma_{cr} z$$

(d) 地盤反力係数

$$E_S = 64C$$

## 4. 計算結果

### 4.1 短グイと中間グイ (S-M)

すべり面上下で短グイと中間グイの連続している場合すべり面におけるタイの水平抵抗力 ( $H$ ) は

$$H = 9CDl_1$$

で求めることができる。したがって水平抵抗力 ( $H$ ) は短グイの長さ按比例して直線的に増加する。短グイの限界長さ ( $l_{cr}$ ) としてすでに7.3(1)で述べたように  $l_1$  を増加していった場合、クイに発生する最大曲げモーメントがクイの最大抵抗曲げモーメントに等しくなる時の  $l_1$  であることから  $l_{cr}$  が計算できる。

(S-M) の  $l_{cr}$  は (S-L) の  $l_{cr}$  より大きいことが予想される。なぜならば  $l_1$  を同じにしたとき、(S-M) に発生する曲げモーメントは (S-L) の曲げモーメントより小さくなる。このことから計算の便宜上および安全側をとって (S-L) の  $l_{cr}$  および水平抵抗力 ( $H$ ) を計算し、図-19、図-20に示す。

計算式は3.8(1)および(2)において、 $l_2$  を  $3/\beta$  として計算を行なった。

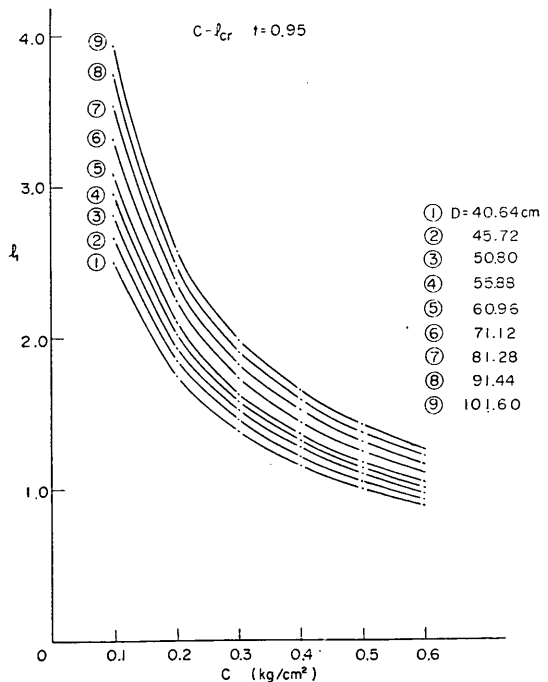


図-19 短グイの範囲



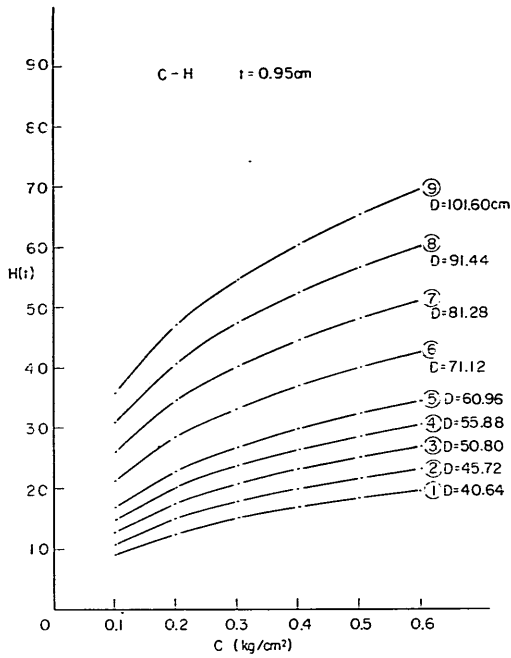


図-20 短グイの抵抗力

#### 4.2 中間グイと中間グイ (M-M)

中間グイと中間グイの組合せの場合、はじめに水平抵抗力 ( $H$ ) を仮定して、クイに発生する最大曲げモーメントを求め、最大曲げモーメントが抵抗曲げモーメントに等しくなるまで  $H$  を変化させる試算法によって水平抵抗力を求める。図-21 に求めた結果の1例を図示する。各  $D$ ,  $t$ ,  $C$  に対する抵抗力を付図に示す。計算は3.8(3)~(5)の計算式を用いて行なったものである。

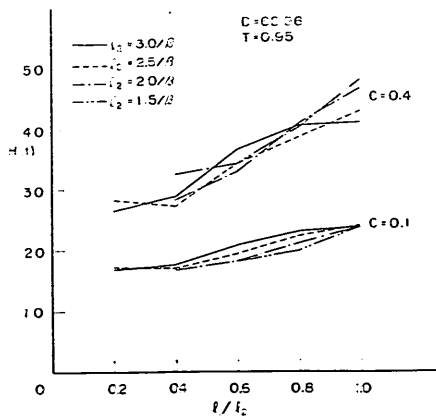


図-21 中間グイの抵抗力

#### 4.3 長グイと長グイ (L-L)

すべり面上下のクイの長さを大きくするにしたがって

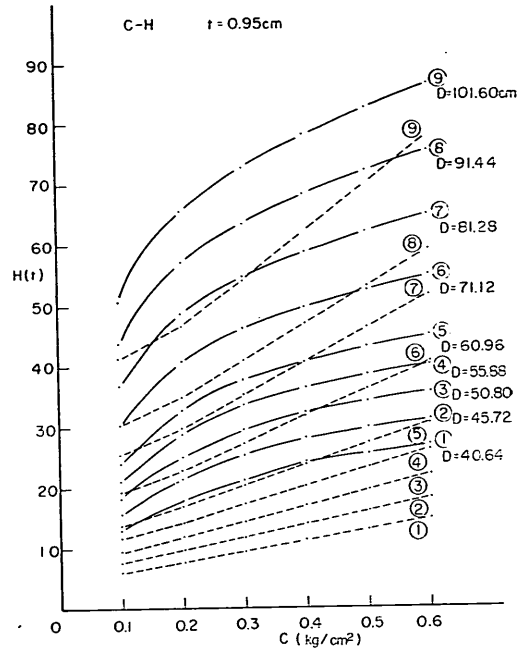


図-22 長グイの抵抗力

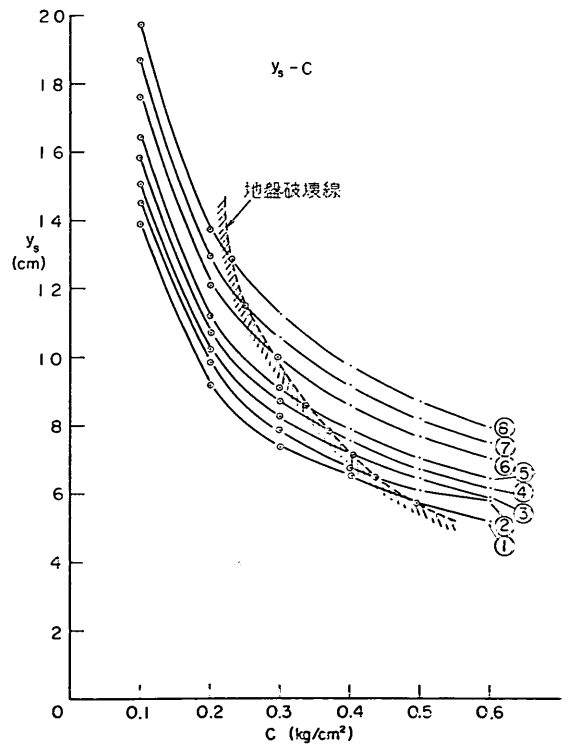


図-23 長グイの変位

クイの水平抵抗力 ( $H$ ) は一定値に近づく。長グイと長グイの組合せはその一定値を求めるために計算したもので、図-22 にこの値を示す。またこのときのすべり面における一方のクイのたわみ量を計算し、その結果を図-23 に示す。図-23 には地盤の1部が破壊した領域を示してある。

計算式は 3.8(6) および 3.8(7) を用いて行なった。

この場合、比較のために設計基準によるクイの抵抗力を点線で図示する。

## 5. 結果の考察

### 5.1 たわみ曲線および曲げモーメント曲線

クイがすべり土塊により力を受けて破壊点に達した時のクイ各点のたわみおよび曲げモーメントの状態の一例について図-24、図-25に示す。

これはクイ径60.96cm、肉厚0.95cm、地盤強度 $C=0.1 \text{ kg/cm}^2$  の場合についてすべり面より下の根入れ長  $l_2=3/\beta=17.1 \text{ m}$  とし、すべり面と地表面の距離を  $0.2l_2 \sim 1.0l_2$  まで  $0.2l_2$  間隔に存在する場合を図示したものである。すべり面上下で座標が異なるので、曲線は連続しないが曲げモーメント曲線は符号をかえることによりそれを連続させたものである。3.6(3)参照

たわみ曲線は図-5の座標のとおり方においてすべり面上下の  $x$  軸を一直線上に一致させたものである。 $x$  軸を土

塊に固定された座標とすると、すべり面上下における土塊の相対変位はすべり面における二つのクイのたわみ  $y$  の総和となる。例えばたわみ曲線の  $l_2=17.1 \text{ m}$ 、 $l_1=3.4 \text{ m}$  において土の相対変位は  $8.72+13.05=21.77 \text{ cm}$  となる。

反力曲線はたわみ曲線より求めることができる。たわみと反力の関係は 3.3 によるとたわみが  $y_{cr}$  より小さい部分では反力はたわみに比例し、 $E_s y$  となり、 $y_{cr}$  より大きい部分では反力は一定値  $9CD$  となる。図示した例では  $y_{cr}$  は  $8.57 \text{ cm}$  となる。すべり面より  $y_{cr}$  の存在する点までの長さを地盤の破壊領域の幅として、上下それぞれ  $l_3$ 、 $l_4$  で表わす。図-24 によると  $l_1$  が大きく変化しても  $l_3$  はあまり変化しない。このことはすべり面のクイの反力をすべり土塊よりクイに働く外力と見るならば、その外力は  $l_1$  が短い場合には等分布荷重に近い状態となり、 $l_1$  が長い場合には Chang の地盤反力に似た形となり、途中の段階ではその変化過程を表わしている。

円形すべりに対するクイの抵抗としてはクイをすべり面で切り、図-24 より求めた反力状態によって生ずるすべり面の水平力  $H$  がすべり土塊に抵抗力として作用するものと考えてよい。したがって円弧に対するクイの抵抗モーメントとしてはすべり面とクイの交点に発生する水平抵抗力  $H$  と円弧の中心とその交点までの鉛直距離を乗じたものとなる。

すなわち

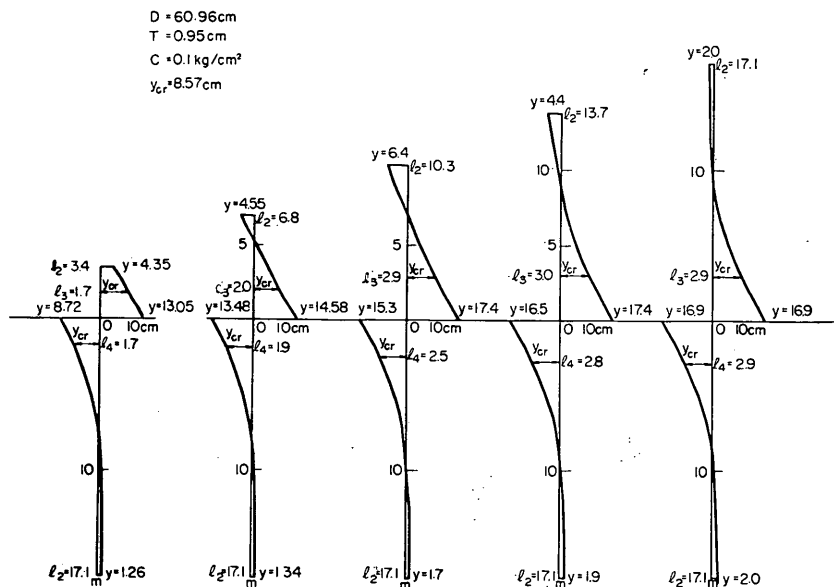


図-24 たわみ曲線図 (M-M)

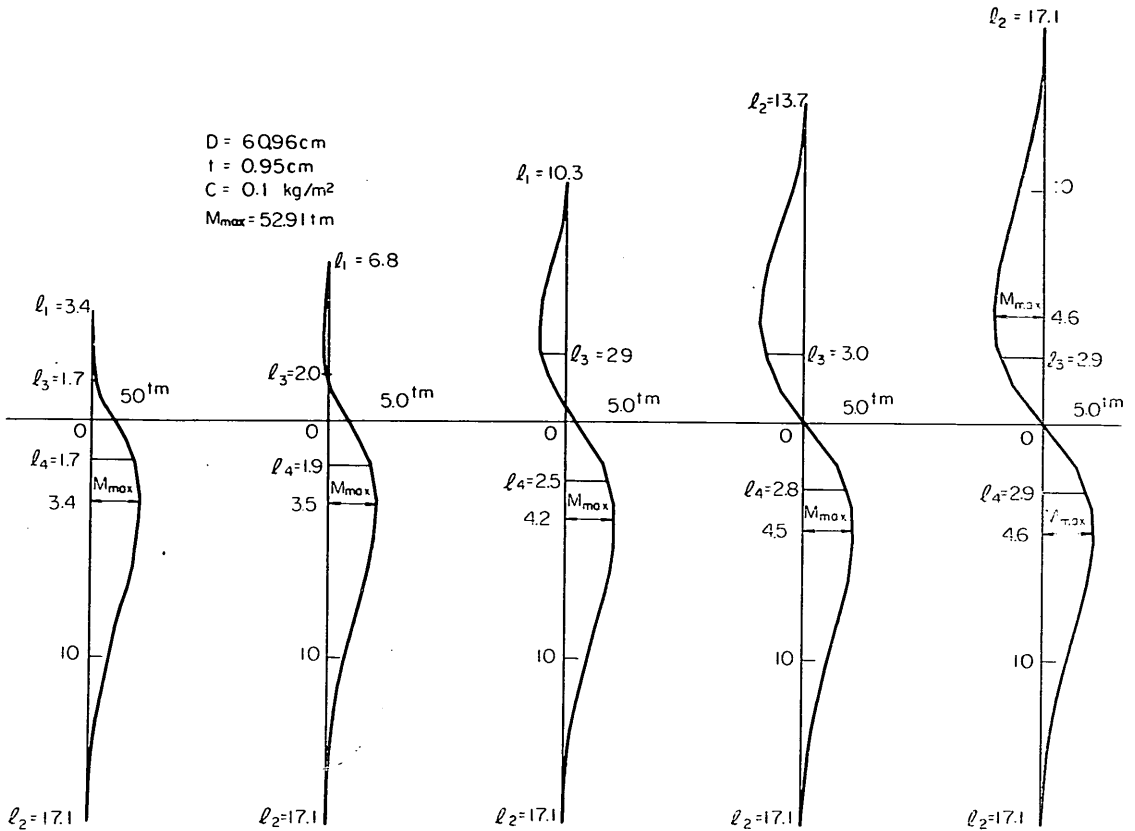


図-25 曲げモーメント曲線図 ( $M-M$ )

$$M_{r,p} = Hh$$

ここで

$M_{r,p}$  ; クイによる抵抗モーメント

$H$  ; 水平抵抗力

$h$  ; 円弧の中心と  $H$  の作用点までの鉛直距離

曲げモーメント図において曲げモーメント最大点は、(S-L) および (L-L) の場合においては、 $l_1$ ,  $l_2$  のうち長い方の地盤破壊の生じない部分すなわち  $l_4$  と  $l_2$  の間に発生することが証明された。しかし ( $M-M$ ) については計算式が複雑な連立方程式となるため証明は簡単ではないが、 $l_2$  と  $l_4$  の間に発生すると仮定して計算を行なった。結果としては、図示の例に見られるように行なった計算においてはすべてこの仮定が成立した。

## 5.2 クイの抵抗力に影響する要素

(1)  $D$ ,  $t$ ,  $C$

すべりに対するクイの水平抵抗力に影響する要素としては、クイ径 ( $D$ )、クイの肉厚 ( $t$ )、地盤強度 ( $C$ )、クイの長さ ( $l_1$ ,  $l_2$ ) がある。これらの要素の影響のうち、

$D$ ,  $t$ ,  $C$  についてはそれぞれの値が大きくなるに従い、水平抵抗力が増加することが定性的に計算結果から推察することができる。 $D$ ,  $t$ ,  $C$  について一例をあげて定量的に調べて見ると表-4に示されるような値となる。この値は図-21の  $l_2$ ,  $l_1$  の変化に対して平均的な値を出したものである。

表-4  $H$  の値

$D \backslash t$	60.96			71.12			101.60		
	0.95	1.6	比	0.95	1.6	比	0.95	1.6	比
0.1	20	25	1.25	25	31	1.24	54	76	1.41
0.2	28	36	1.29	34	45	1.32	65	90	1.38
0.3	33	42	1.27	40	53	1.33	70	96	1.37
0.4	35	50	1.43	42	60	1.43	72	105	1.46
0.5	40	55	1.38	45	65	1.44	80	114	1.43

(2)  $l_2$

図-21によると  $l_2$  が小さくなるにしたがい、 $l_1$  に対する  $H$  の変化は一般に急になることが読みとれるが、 $H$  の値そのものはあまり変化しない。このことは  $C$  の値が小

さい場合には $l_2$ が小さくなるにしたがい、 $H$ が減少していることが読みとれるが、 $C$ の値が大きい場合には $l_2$ の減少に対して $H$ が減少するとはかぎらず、 $l_1$ と $l_2$ が等しい場合にはむしろ $l_2$ が小さい方が水平抵抗力 $H$ は大きくなる。この理由はクイの曲げモーメントを曲げ抵抗モーメントに等しくするには短いクイの方が力を大きくしなければならないからである。このことはすべりをクイでとめようとする場合、クイを長くしてもあまり効果がないということを示している。しかしクイが短くなるとすべり面におけるクイの変位が大きくなり、実質上構造物の機能を果さなくなる。曲げを発生させるための水平抵抗力の増加と地盤反力の発生領域の幅の減少の影響による水平抵抗力の減少とが打ち消し合って $l_2$ の減少によって水平抵抗力はあまり変化しない。とくに地盤強度が小さいほど $l_2$ の影響は少なくなり、一個の値であらわしてもさしつかえないほどになる。変位を考えるならば $l_2$ の理想的な長さは $2.0/\beta \sim 3.0/\beta$ をとるのがよいと考えられる。

### (3) $l_1$

$l_1$ の影響は $l_1$ が大きくなるにしたがって水平抵抗力 $H$ は増加する。しかし短グイと中間グイの境界附近では、逆に $l_1$ の減少に対して増加する傾向になる。この理由も $l_2$ の場合と同様に $l_1$ が短い場合、曲げモーメントが発生しにくくなることが推定されるが、安全のためにこの

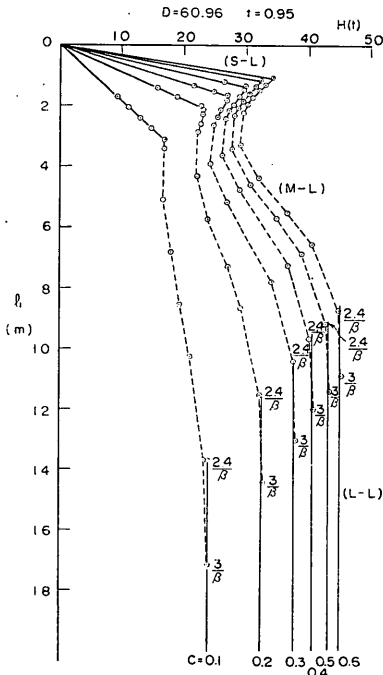


図-26  $l_1-H$

部分をさけてクイを使用するかまたは増加分を考慮しない値を用いることがのぞましい。したがって $l_1$ としては $0.4l_2 \sim 1.0l_2$ 値をとることによって増加領域をさけるかまたは $l_1=0.4l_2$ の $H$ の値を用いることがのぞましい。

次にクイの長さ $H$ との関係の一例を図-26に示し、これについて説明する。

図-26は $l_2$ を無限長とし、 $l_1$ をゼロから無限長まで変化した場合のクイの水平抵抗力( $H$ )の値を図示したものである。(S-L)の範囲では $H$ は直線的に増加し、(L-L)の範囲では $H$ は一定値である。この二つの中間の領域(M-L)では点線で表わしたような変化を示す。(S-L)と(M-L)の境界附近において(M-L)の $H$ は $l_1$ が減少するにつれ増加する。しかし実際には地盤強度やクイの曲げ強度もそれほど厳密な値でないことを考えれば、(M-L)における $H$ の値としてこの増加量をとらず、 $H$ の最小値をとることがのぞましい。したがって $l_1$ が境界附近にある場合(2~3mで $0.4l_2$ より小さい場合)には短グイの計算式 $H=9CDl_1$ から計算した値と付図(M-M)より求めた最小値とを比較し、そのうち小さい方の値をとるのがよい。

(M-L)と(L-L)との境界における長さは $3/\beta$ であるといわれているが $2.4/\beta$ でもほとんど実用上さしつかえない。

### 5.3 地盤破壊の検討

計算においてはたわみが $y_{cr}$ 以上になった部分では、地盤の一部がこわれるものとし、反力を一定として計算を行なったが、この地盤破壊の考えを入れて計算した場合、地盤破壊を生ずる状態において、この考えを入れない場合に比べて水平抵抗力( $H$ )は小さくなる。この考えを入れない場合に $l_1$ 、 $l_2$ が小さくなると水平抵抗は次第に増加してクイが短かければ短かいほどすべりに対して安全となる。これはたわみの増加に対して反力が比例的に増加することによる。これは実際に危険側となることも考えられる。

地盤破壊を生じた部分と生じない部分の $l_1$ 、 $l_2$ に対する曲線もスムーズに連続し、設計を行なう場合には、図-19~図-22を見ることにより地盤破壊の有無を考慮せず計算を行なうことができる。ここでは地盤破壊を有する部分の一般的性質について次にのべる。

まず $C$ が小さい方が地盤破壊が発生しやすい。このことは地盤が弱いほど破壊しやすいとして当然のことと思われる。また $l_1$ 、 $l_2$ の長さとの関係は $l_2$ が小さいほど破壊しやすい。また $l_1$ が小さいほど破壊しやすい。しかしこの場合、 $l_1$ 、 $l_2$ の組合せによっては必ずしも地盤破壊

が生ずるとは限らない。

#### 5.4 土の変形とクイの変形

円形すべりにおいて土の抵抗力として考えるものは、土がまさに破壊状態になろうとする時の抵抗力を考えている。したがってクイが土中に埋めこまれて存在する場合、クイの破壊状態における抵抗力をクイのすべりに対する抵抗力として採用するには土とクイが一体となつて同時に破壊しなければならない。すなわち土の破壊時の変形とクイの破壊時の変形が同じ形にならなければならない。もしクイの破壊時の変形が土の破壊時の変形に比べて小さい場合には、円形すべり破壊においてクイの抵抗力は破壊後の塑性領域で抵抗することになる。クイの塑性領域の抵抗力が弾性領域の抵抗力よりも大きい場合には、弾性限界の抵抗力をもってクイの抵抗力として採用することは安全側である。しかしクイが構造物として用いられている場合には構造物としての破壊が生じ、構造物としての目的は果さなくなる。

また反対にクイの破壊時の変形が土の破壊時の変形よりも大きい場合にはクイのすべりに対する抵抗は破壊しない前の強度となり、破壊時の抵抗をとることは危険となる。

実際のすべりにおける土の変形については今まであまり検討されておらず、すべり面上の土質が変化していても、すべりに対し、すべり円弧上にその土が同時に破壊状態に達し、破壊時の抵抗力を示すものとして計算されて来た。したがってここでもクイの破壊時の変形量と土の破壊時の変形量と土の破壊時の変形量が同じ大きさのものと考えられることを証明して、クイの破壊時の抵抗力をもってすべりに対する抵抗力とする。

ここでその証明として次のような検討を行なう。便宜的に土の変形を次のように計算し、クイの変形量と比較してみる。

一軸圧縮試験において、図-27 に示したような関係より、せん断ひずみ $\gamma$ を求めると次のような関係がある。

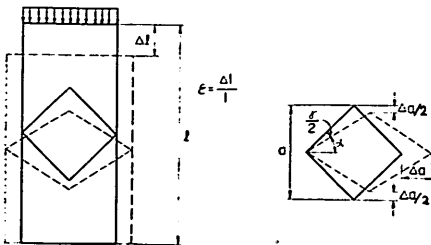


図-27

$$\tan \alpha = \frac{a - \Delta a}{a + \Delta a} = 1 - 2\varepsilon$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$$

$$\tan \gamma = \cot 2\alpha = \frac{2\varepsilon}{1 - 2\varepsilon} \doteq 2\varepsilon$$

$$\therefore \gamma \doteq \tan \gamma \doteq 2\varepsilon$$

$$\therefore \gamma \doteq 2\varepsilon$$

ここに

$\gamma$ ; せん断ひずみ

$\varepsilon$ ; 圧縮ひずみ

$a, \Delta a, \alpha$ ; 図-27参照

すなわちせん断ひずみは圧縮ひずみの倍にほぼ等しくなる。

円形すべりにおいて、実際にはすべり面を中心としてある巾をもった層がせん断変形を受ける。その層厚をすべりをおこした例について一軸圧縮強度分布の減少によって調べてみると、次のような値が推定される。

和歌山港 2.5~6 m

広島港 3 m

錦海湾 1~2 m

いま平均として4 mとする。

また一軸圧縮試験における圧縮ひずみ( $\varepsilon$ )として、土質試験結果より調べてみると、せん断強度に関係なく、2%~10%の範囲となっている。

すべり土層上面と下面との相対変形量は次のようにして求まる。

$$f = 4\gamma = 8\varepsilon$$

$$\varepsilon = 2\% \text{ のとき } f = 8 \times 0.02 = 0.16(\text{m})$$

$$\varepsilon = 10\% \text{ のとき } f = 8 \times 0.10 = 0.80(\text{m})$$

となる。すなわち、クイの変形量が16cm~80cmであれば、クイと土とは一体となって働くものと考えられる。

クイの破壊時の変形量を調べてみると、 $D=60.96$ 、 $t=0.95$  において、すべり面上下の相対変形量はすべり面における $y_s$ の和として表わされ、80cm以上のものは $C=0.1$ 、 $l_2=1.5/\beta$ 、 $l_1/l_2=0.2\sim 1.0$ で67cm~158cmである。それ以外はすべて土の変形とクイの変形が等しいものと考えられる。層厚を6 mにとると、 $f=24\text{cm}\sim 120\text{cm}$ となり、これに対するクイの変形量は $C=0.1$ 、 $l_2=1.5/\beta$ 、 $l_1/l_2=1.0$ の場合に、クイの破壊時の変形量が土の破壊時の変形量より大きくなる。この場合にはクイの抵抗としては、破壊時の抵抗力より割引した値を用いなければならない。他の断面のクイにおいても $C=0.1$ 、 $l_2=1.5/\beta$ のとき、クイの変形量が土の変形量より大きくなる。したがって $C=0.1$ の場合、 $l_2 \geq 2.0/\beta$ にな

るよう、クイを打ちこむべきである。他の場合はすべてクイの変形が小さく、土の変形とクイの変形は同じ形となると考えられる。

## 6. 提 案

### 6.1 クイの抵抗モーメントの計算法

さん橋などクイの存在する構造物の円形すべりの計算にクイの抵抗力を加える方法は 2.1, 5.1 に述べたようにすべりに対する地盤の抵抗モーメントにクイの抵抗モーメントを加えたものを抵抗モーメントとして安全率を計算することである。クイの抵抗力を図表より求めるには次のような順序で行なう。

(1) 埋めこまれたクイの諸元 ( $E, I$ ) および地盤強度から  $\beta$  を求める。

$\beta$  を計算で求めるには次式による。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}$$

$\frac{1}{\beta}$  を  $D, t, C$  の関係として図表化したものの 1 例を図-28 に示す。

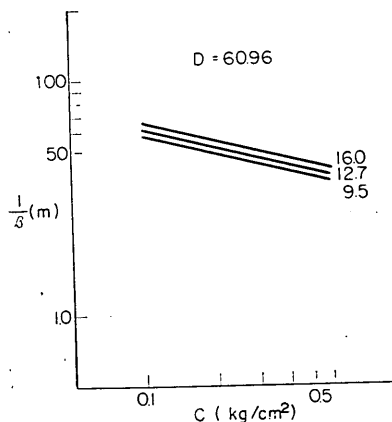


図-28  $C - \frac{1}{\beta}$  図

(2) クイの根入れ長とすべり面の位置を仮定し、 $l_1$  と  $l_2$  の値を求める。この場合  $l_1, l_2$  のうち大きい方を  $l_2$  とし小さい方を  $l_1$  とする。もし  $l_1, l_2$  とともに図-19の  $l_{cr}$  よりも小さい時はクイの抵抗力はゼロとする。 $l_1$  のみ  $l_{cr}$  よりも小さい時は抵抗力  $H = 9CDl_1$  とする。この値は図-19, 図-20より求めることができる。(短クイ)

$l_1, l_2$  とともに  $l_{cr}$  より大きい時は  $l_1\beta, l_2\beta$  および  $l_1/l_2$  を計算する、 $l_1\beta, l_2\beta$  がともに 2.4 より大きい場合には長くとして図-22より水平抵抗力  $H$  を求める。

以上の範囲に入らないものは中間クイである。中間クイの場合には  $l_1/l_2$  と  $l_2\beta$  より図-21より水平抵抗力  $H$  を求める。 $l_1/l_2$  が 0.4 より小さい場合には 5.2 の (S-L)-(M-L) の境界付近の検討を行ない (M-M) 図の最小の  $H$  の値と  $H = 9CDl_1$  の値の小さい方の値をとる。

(3) 円形すべりにおいては一般にすべり面をいくつか仮定するのですべり面がクイを切ると推定されるクイの各点について  $H$  を求めておくことが有利である。またクイがいくつかあり、すべり面と交わると推定される場合には各クイについて水平抵抗力を求めておく。

(4) 水平抵抗力はクイ一本の抵抗力であるから円形すべりにおいては法線方向単位巾当りのクイの本数を乗じたものがすべりに対する抵抗力となる。このことはクイの間隔の影響を無視して単純に加算したものであるが現在のところクイの間隔の影響について特に検討してないので上記の方法をとることとする。

(5) すべりに対するクイの抵抗モーメントの計算は 5.1 に述べた方法による。

### 6.2 計算例

例として川崎千島町第 6 パース横さん橋の円形すべりの計算を行なう<sup>2)</sup>。このさん橋の断面、地質および円形すべりの結果(クイの抵抗力を考慮しない場合)を図-29 に示す。

この円形すべりの計算は円弧の中心点を  $7 \times 7 = 49$  点のます目にとり、通過点を最後列のクイの A~D までの 4 点をとる、電子計算機を用いて計算したものである。計算では捨石、土留壁および裏込め石を地盤と同じ強度と仮定して地層が水平方向に表面まであるものとしている。計算結果では安全率  $F = 0.6$  で不安定な構造となっている。

次にクイ列の最後列にはすべり防止のために  $D = 71.21\text{cm}$ ,  $t = 12.7\text{cm}$  の鋼管クイを  $-17\text{m}$  まで法線方向に  $5\text{m}$  の間に 6 本の間隔で打ちこみ、更に最後列のクイと土留壁の間に  $+0\text{m}$  まで捨石を入れて補強した場合の計算をする。

又地盤強度として  $C = 1.5\text{t/m}^2$  の一様な粘土層と仮定

表-5

	$l_1$	$l_2$	$l_1/l_2$	$l_2\beta$	$H$	単位巾当りの $H$
A	5.33	8.0	0.66	1.28	32.4	38.9
B	4.33	9.0	0.48	1.44	30.4	36.5
C	3.33	10.0	0.33	1.61	30.3	36.4
D	2.33	11.0	0.21	1.77	22.4	26.9

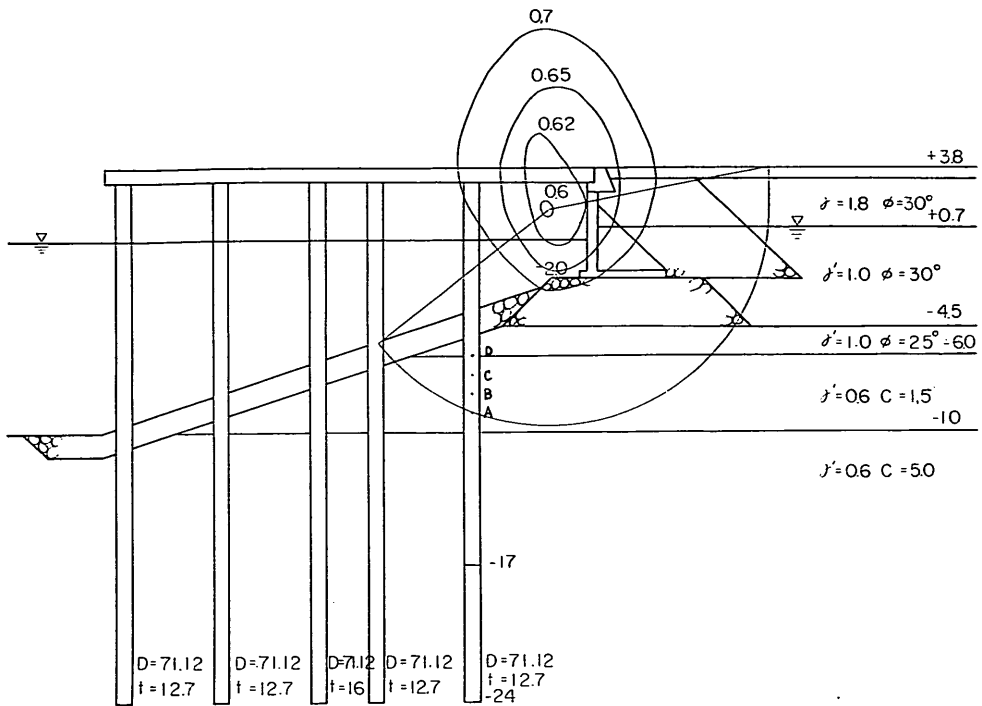


図-29 クイがない場合の安全率

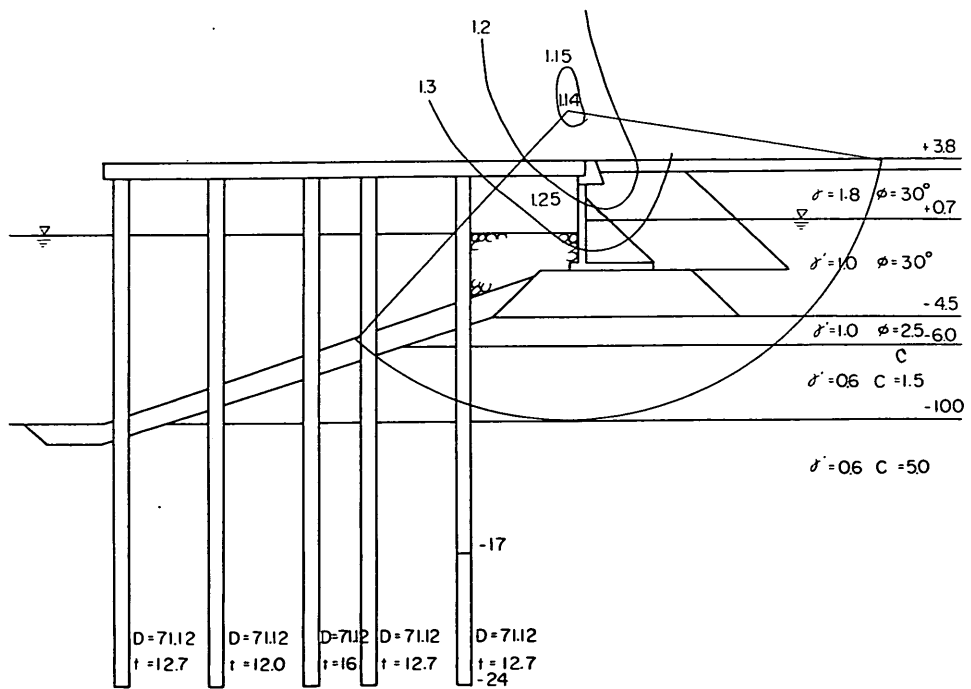


図-30 提案値における安全率

する。D, t, Cより $\beta=161(\text{m}^{-1})$ , A, B, C, D各点の $l_1, l_2, l_2/l_2, l_2B$ および $H$ の値を表-5に示す。

A, B, C, D各点の $H$ に各円弧の中心点まで鉛直距離を乗じて抵抗モーメント( $M_{rp}$ )を求め、地盤の抵抗モーメント( $M_r$ )に加算したものを抵抗モーメントとして安全率を計算する。この補強グイの抵抗を考慮した円形すべりの計算結果を図-30に示す、

安全率の最小値は図-30に示すように1.14となる。  
-10m以下の地層の粘着力 $C=5.0$ であることも安全側の要素である。

クイの抵抗を考慮しない場合の最小安全率を生じた中心点におけるクイを考慮した場合の安全率は1.25で約2倍となっている。

次に設計基準におけるクイの抵抗力によるすべりの検討を行なう。土圧の作用する範囲 $h$ は

$$h = l_{m1}/3 = \frac{\pi}{3\beta} = \frac{3.14}{3 \times 0.161} = 6.5\text{m}$$

となる。

この値はA~D各点の $l_2$ より小さいから土圧は $\frac{l_{m1}}{3}$ 全体にかかる。

受働土層 $P_P$ の合力は、

$$H = \sum P_P = \frac{1}{2} \gamma h^2 + 2Ch$$

ここで

$$\gamma = 0.6 \text{ t/m}^3$$

$$C = 1.5 \text{ t/m}^2$$

とすると

$$H = \frac{1}{2} \times 0.6 \times 6.5^2 + 2 \times 1.5 \times 6.5 = 32.5 \text{ t}$$

クイ中における $H$ は

$$H = 32.5 \times 0.7112 = 23 \text{ t}$$

クイは5mに6本打ってあるもので1mあたりの $H$ は

$$H = 23 \times \frac{6}{5} = 27.6 \text{ t}$$

となる。

この水平抵抗力( $H$ )に各円弧の中心とA, B, C, D各点の鉛直距離を乗ずることにより抵抗モーメント( $M_{rp}$ )が求まる。この抵抗モーメントに地盤の抵抗モーメントを加えて安全率を計算すると図-31のようになる。

最小安全率は1.00となり、この資料の提案値より小さめに出る。クイの抵抗を考慮しない場合の最小安全率を生じた中心点におけるクイを考慮した場合の安全率は1.07となる。

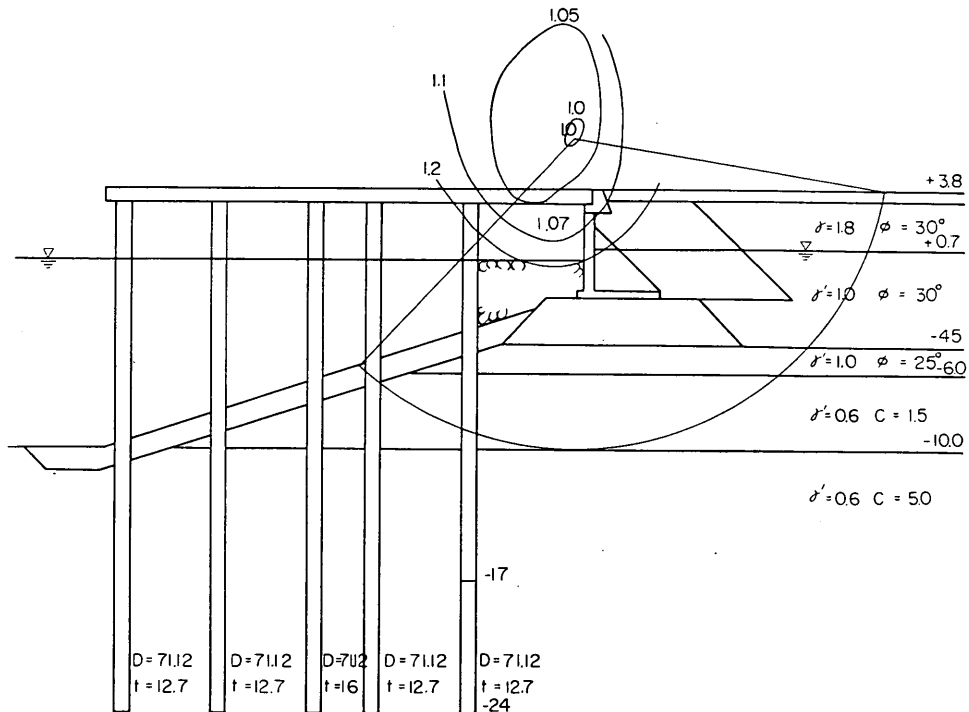


図-31 設計基準による安全率



## 7. 結 論

この資料では円形すべりに対するクイの影響として粘性土中に埋め込まれた鋼管グイの抵抗力の大きさをクイの曲げ強度と地盤の破壊時の抵抗力をもとにして、計算によって求めた。計算結果を考察することにより、次のような結論を導くことができる。

(1) クイの抵抗力の大きさはクイの諸元(くいの直径くいの肉厚)地盤強度、クイの根入れ長さおよびすべり面の位置より求めることができる。

(2) クイの抵抗力の大きさを求めるには  $l_1$ 、 $l_2$  が短くいか中間くいか長くいか判定し、それぞれの図表より求めることができる。

(3)  $l_1$ 、 $l_2$  とも短グイの場合にはクイは剛体として働き、曲げに対しては強いが変位が大きくなるので、クイの抵抗力はゼロとすべきである。

(4) 短グイと中間グイの境界付近では短グイの水平抵抗力と中間グイの水平抵抗力とを比較して小さい方の値を水平抵抗力とする。

(5) すべりをクイでとめようとする場合、クイの長さとして  $l_2$  は  $2.0/\beta \sim 2.4/\beta$  をとり、 $l_1$  は  $0.4l_2 \sim 1.0l_2$  の範囲になるようにするのが最も効果がある。

## 8. あとがき

この計算にはいくつかの仮定が設けられており、また検討されていない点もあるので、図表を用いる場合、次のような点に注意すべきである。

### (1) クイの間隔

クイの間隔の影響については特に検討されておらず、単純に平均的なものをとることにしている。間隔について検討することはクイのまわりの地盤の応力状態を検討し、その影響する範囲を決定しなければならない。

### (2) PC パイルの抵抗

PC パイルは最大曲げ抵抗力に達する場合、クイの変形が大きくなり、すべりに対するくいの抵抗は破壊強度より小さい値で抵抗することになり、クイの抵抗力としてはあまり期待できない。

(3) 砂質地盤におけるクイの抵抗については今のところ検討していない。砂質地盤の破壊反力は深さに比例して増大し、計算が複雑となる。<sup>9)</sup>

(4) 強度の異なっていくつかの地層にクイが埋め込まれた場合のクイの抵抗力の計算は複雑となるので一様な地盤と仮定する。

(5) すべり面におけるクイの変形および地盤の変形についてはなお今後の検討が必要と思われる。

(6) 本資料ではクイの抵抗力を計算により求めたものであり、機会があれば実験によって確かめておく必要があるものと思われる。

この資料にまとめられた計算のほとんどは港湾技術研究所計算室の電子計算機 TOSBAC3400 で行なったものである。

## 参 考 文 献

- 1) 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 京浜港設計計算書(その3) 昭和37.11.1 p. 3~7~p.3, 10
- 2) 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 京浜港設計計算書(千鳥町第6パース) 昭和40.2 p.31~65
- 3) 運輸省港湾局 港湾構造物設計基準 上巻 4.2.1  
(6) 矢板岸壁およびクイによる抵抗 昭42.4
- 4) 横山幸満 鋼杭の設計と施工 山海堂 昭和 38.3. 15 p.119~144
- 5) Bengt. B. Broms "Lateral Resistance of Pile in Cohesive Soils" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division Volume 90 No. SM2 March 1964 Part 1 p. 27~63
- 6) 石井靖丸 軟弱地盤工法 技報堂 昭和36.6.15 p.137~234
- 7) 久保浩一 杭の横抵抗の新しい計算法 港湾技術研究所報告 第2巻3号 1964.3
- 8) Jorgen Brinch Hansen "Earth Pressure Calculation" The Danish Technical Press. Copenhagen 1953
- 9) Bengt. B. Broms "Lateral Resistance of Pile in Cohesionless Soils" Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Volume 90 No. SM3 May 1964 Part 1

## 参 考 資 料

- 1) I J S 鋼管グイ J I S A 5525 1963 日本工業標準調査会審議
- 2) NC-PC パイル 日本コンクリート工業株式会社
- 3) 長谷川栄 粘土層中に打込まれた杭の抵抗について 昭和40.5
- 4) 長谷川栄 軟弱地盤中に打込まれた矢板壁の円弧状りに対する累算法 昭和40.4

(昭和42年3月31日受付)

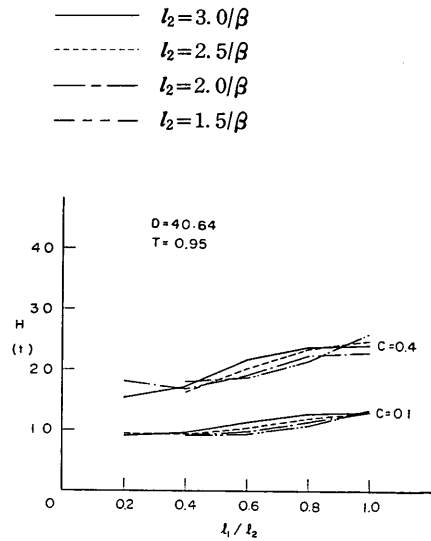
## 記 号 表

$A_1, \dots, A_n$  積分常数 2.2(1)

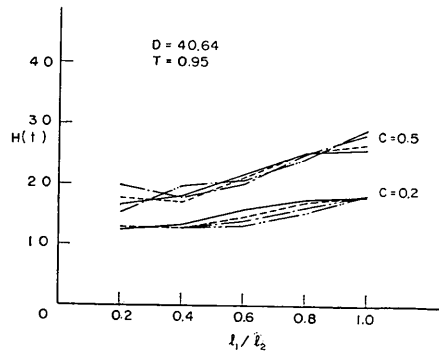
$B_1, \dots, B_n$	積分常数	2.2(1)
$C_1, \dots, C_n$	"	"
$D_1, \dots, D_n$	"	"
$C$	粘着力	2.2(2)
$D$	クイの直径	2.2(2)
$E$	クイのヤング係数	2.2(1)
$E_S$	地盤反力係数	2.2(3)
$F$	安全率	2.1
$H$	水平抵抗力	3.6(3)
$I$	クイの断面二次モーメント	2.2(1)
$M$	クイの曲げモーメント	3.6(1)
$M_{max}$	クイの最大抵抗曲げモーメント	3.8(1)
$M_S$	すべりモーメント	2.1
$M_r$	抵抗モーメント	2.1
$M_{rp}$	クイの抵抗モーメント	5.1
$h$	円弧の中心と $H$ の作用点までの鉛直距離	5.1
$l_1, \dots, l_n$	原点より各領域境界までの距離	3.6(2)【3.7(1)】
$l_{cr}$	短グイの限界長さ	4.1
$N$	標準貫入試験の $N$ 値	2.2(3)
$P$	地盤反力	2.2(1)
$q_u$	一軸圧縮強度	2.2(3)
$S$	クイのせん断力	3.6(1)
$t$	クイの肉厚	3.9
$x$	鉛直方向座標軸	2.2(1)
$y$	水平方向座標軸, クイのたわみ量	2.2(1)
$y_S$	すべり面におけるクイのたわみ量	3.8(6)
$y_1, \dots, y_n$	各領域のクイのたわみ	3.6(2), 3.8
$y_{cr}$	境界におけるクイのたわみ量	3.3 5.1
$z$	断面係数	3.9
$\beta$	$\sqrt[4]{\frac{E_S}{4EI}}$	2.2(1)
$\sigma_{cr}$	クイの許容応力	3.9
$\gamma$	粘土のせん断ひずみ	5.4
$\epsilon$	粘土の圧縮ひずみ	5.4
$S$ グイ	短グイ	3.5
$M$ グイ	中間グイ	3.5
$L$ グイ	長グイ	3.5
I 領域		3.8(3)(4)(5)
II "		"
$F$	地盤破壊	3.5
$NF$	地盤破壊のない場合	3.5

付 図

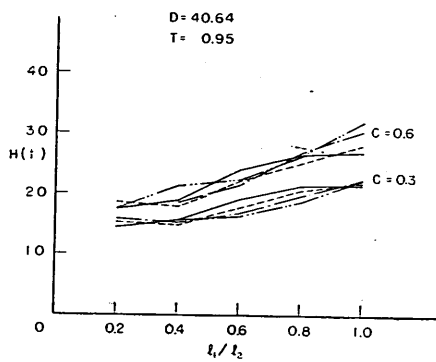
1 有限長のクイの抵抗力 ( $M-M$ )



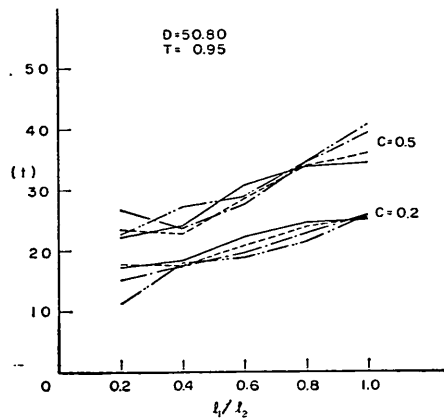
付図-1



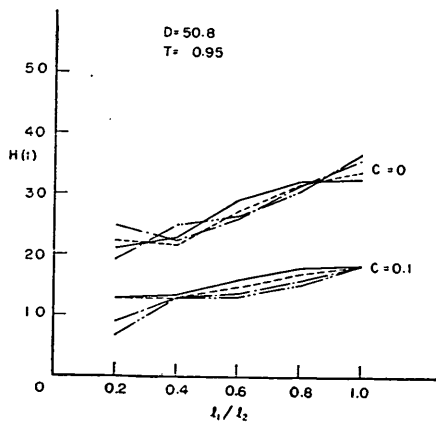
付図-2



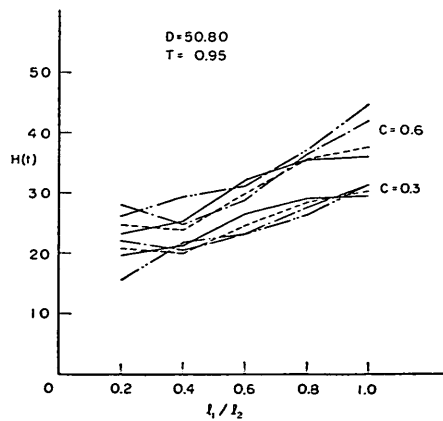
付図-3



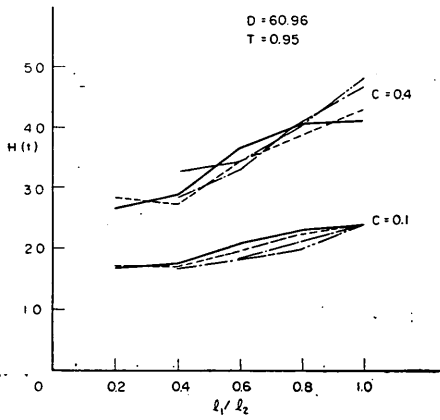
付図-5



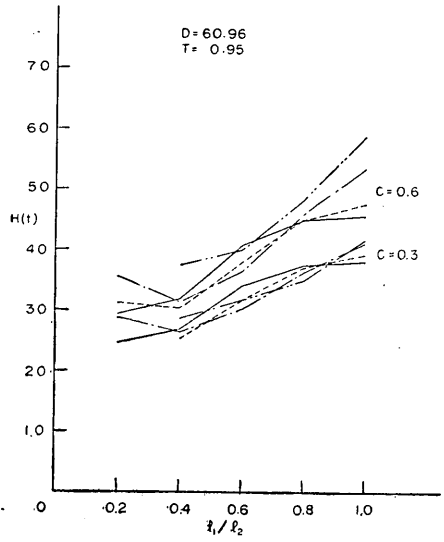
付図-4



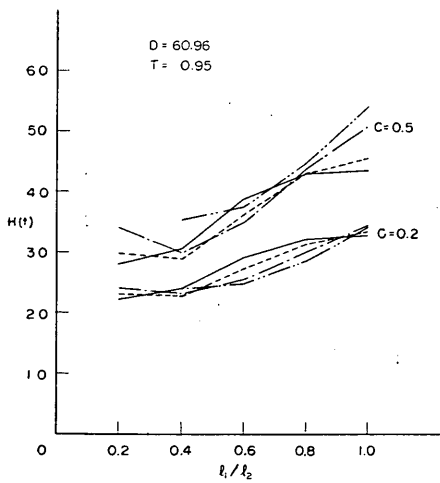
付図-6



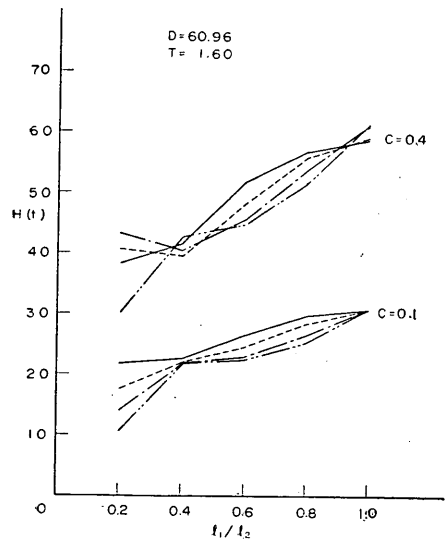
付図-7



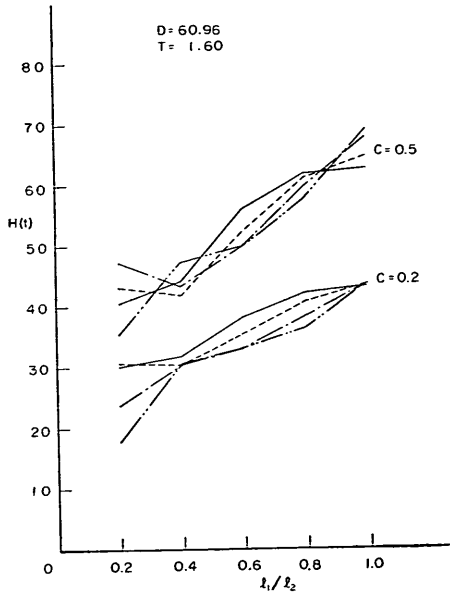
付図-9



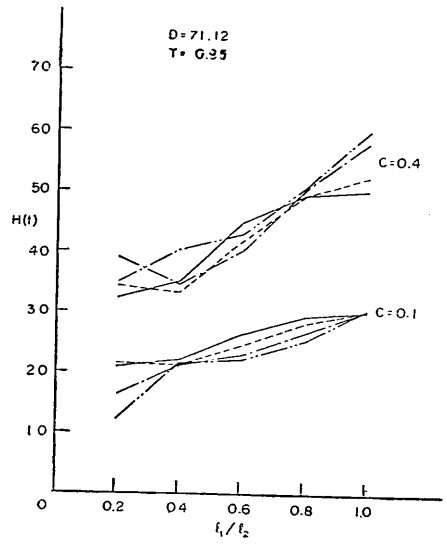
付図-8



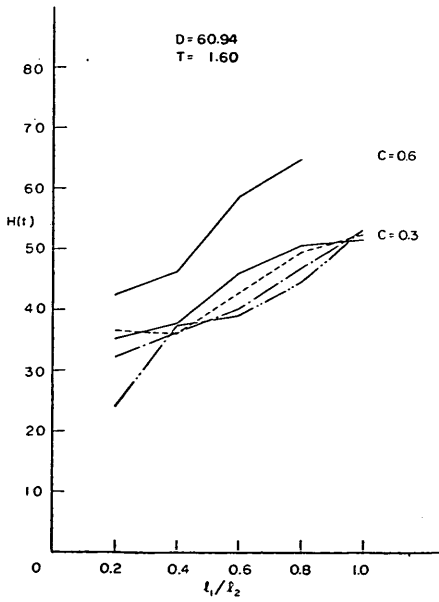
付図-10



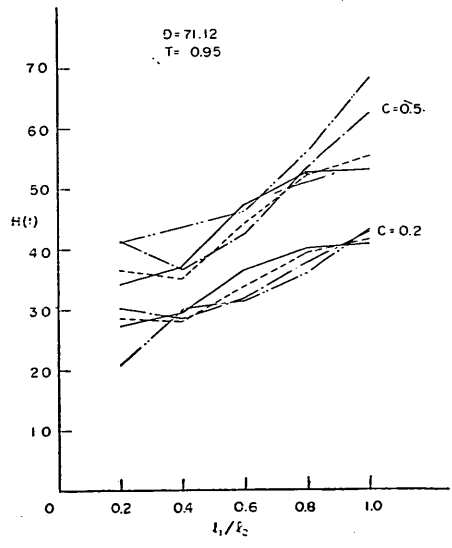
付図-11



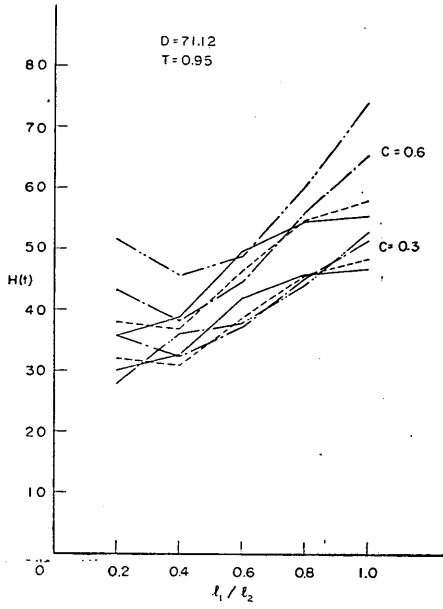
付図-13



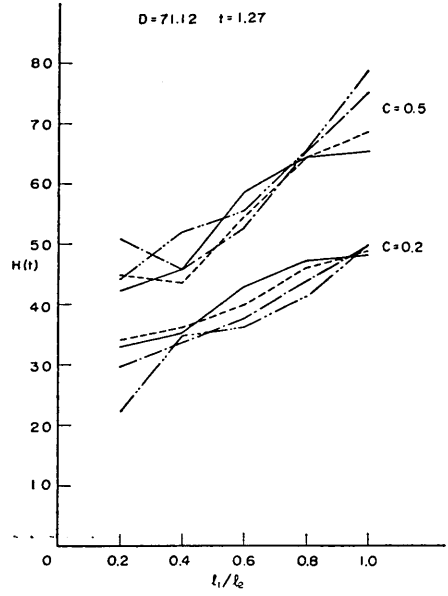
付図-12



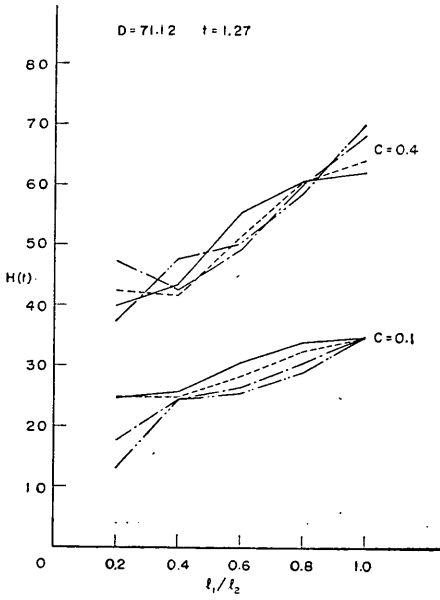
付図-14



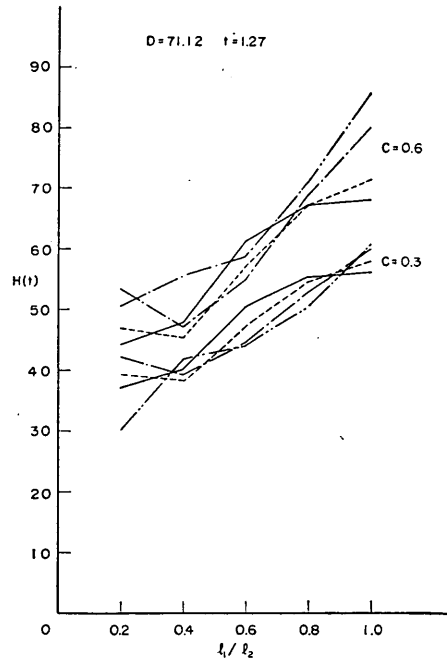
付図-15



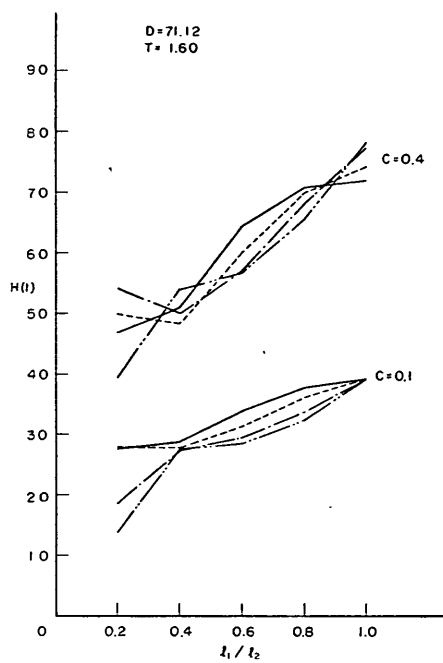
付図-17



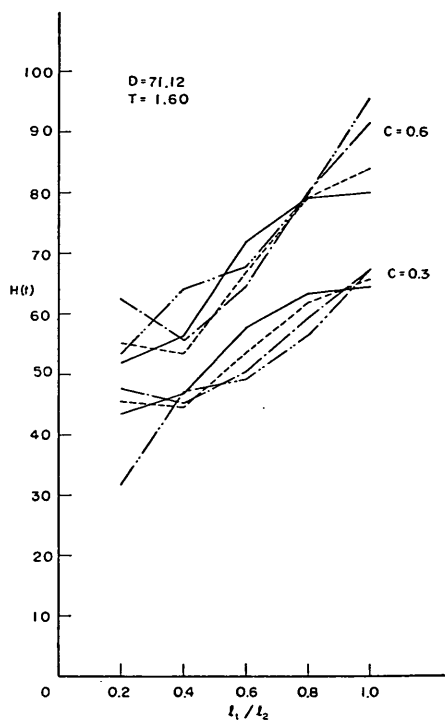
付図-16



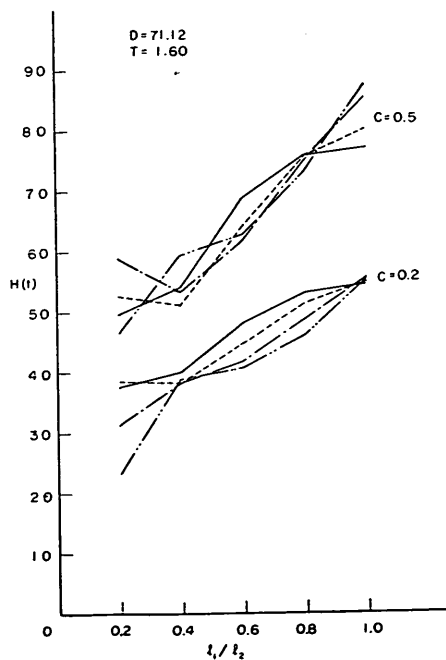
付図-18



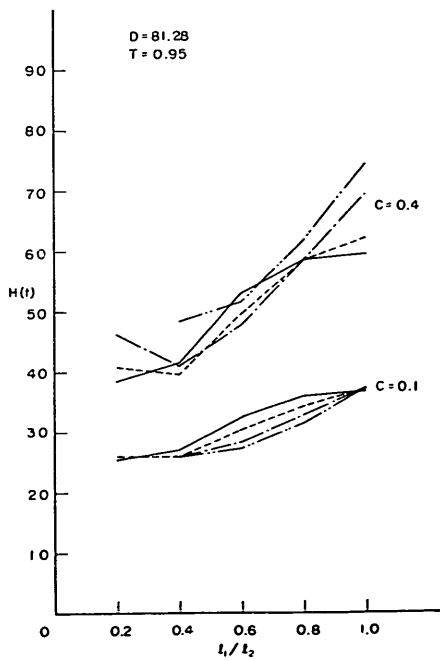
付図-19



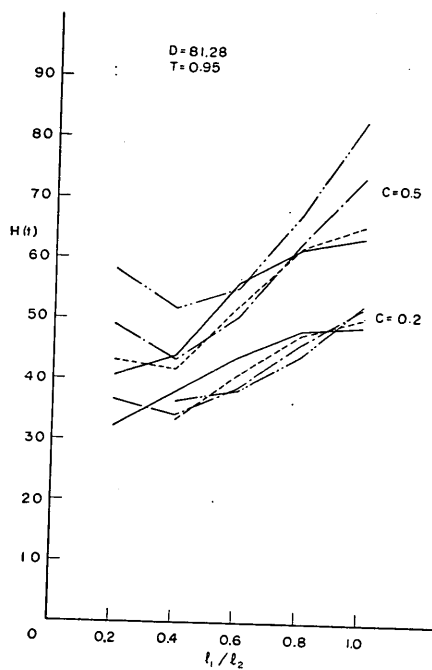
付図-21



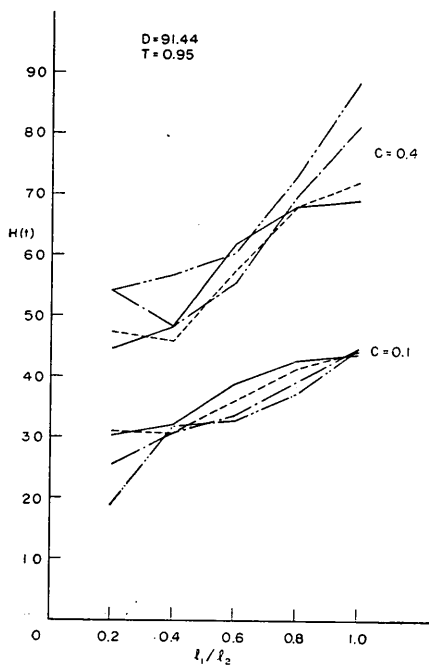
付図-20



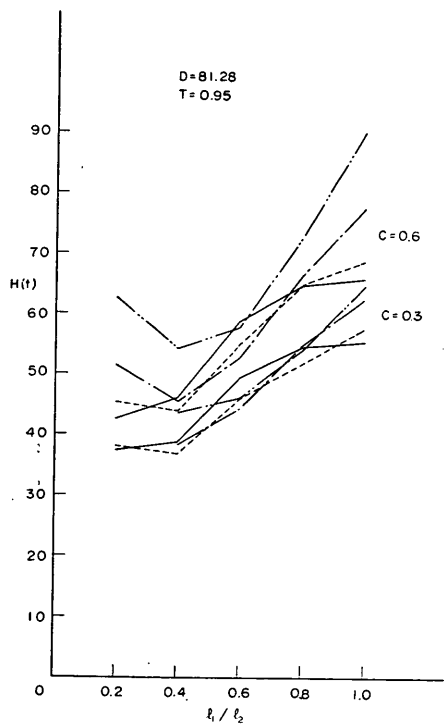
付図-22



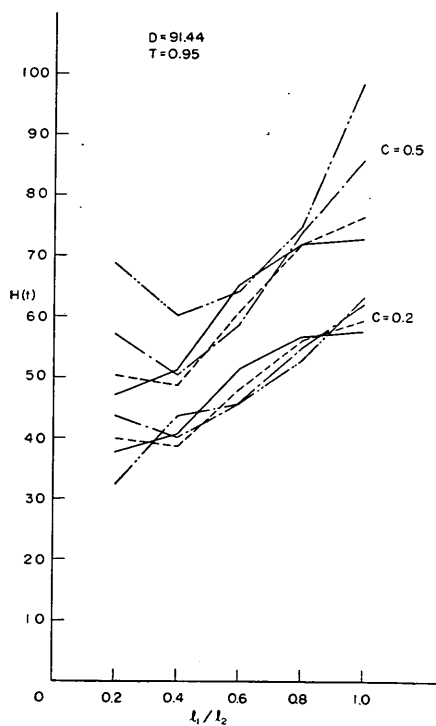
付図-23



付図-25

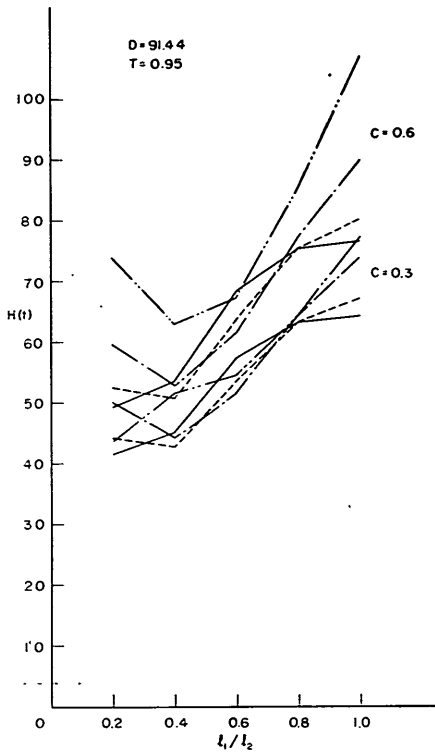


付図-24

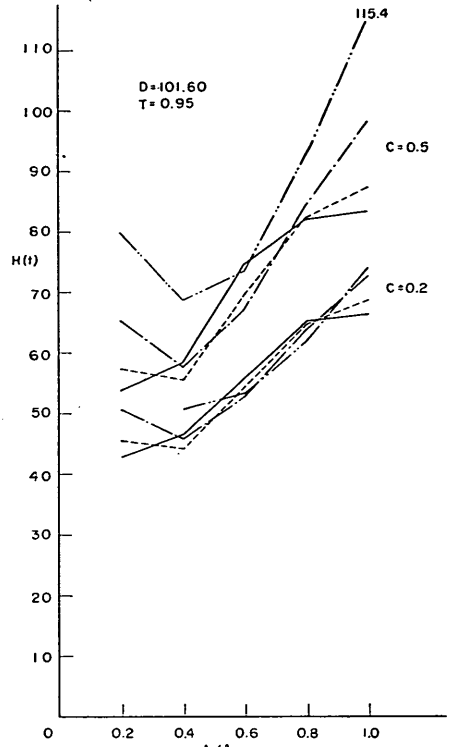


付図-26

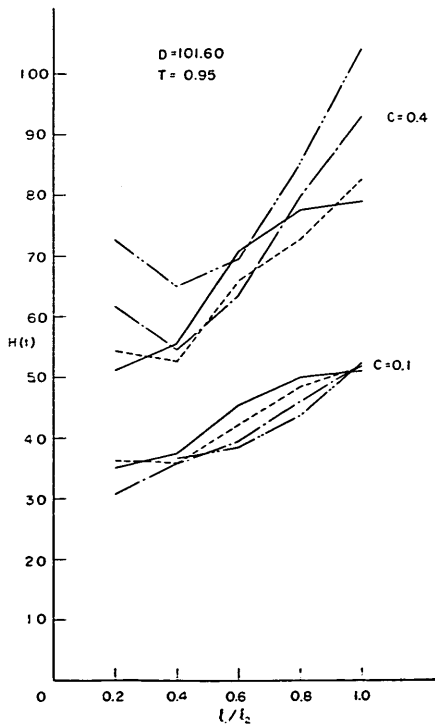




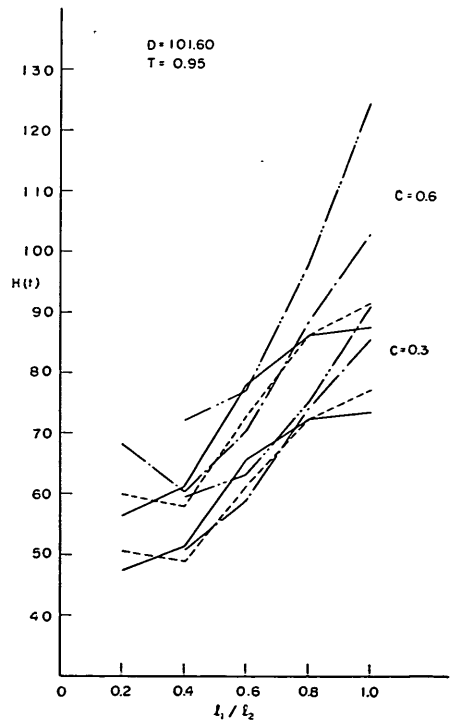
付図-27



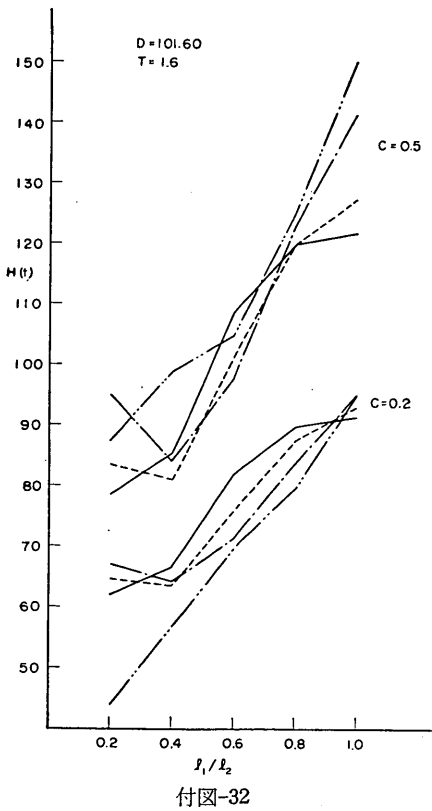
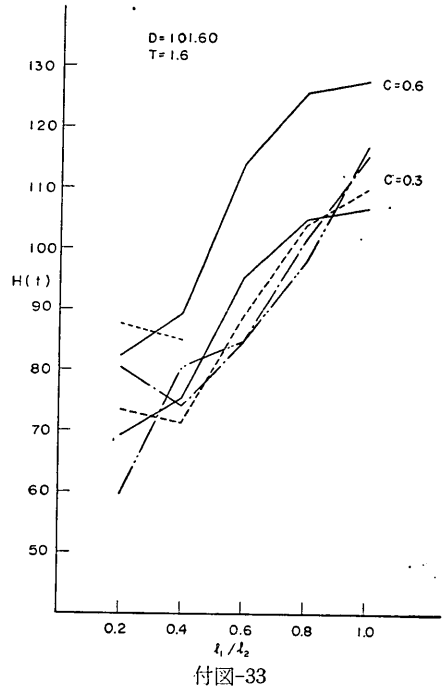
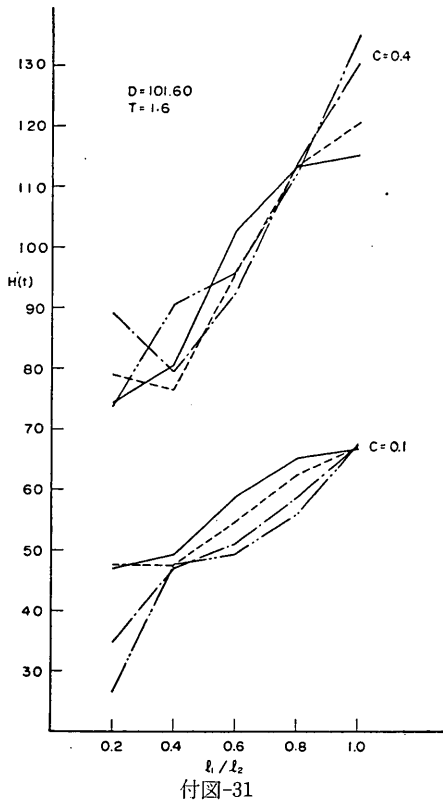
付図-29



付図-28



付図-30



港湾技研資料 No. 29

1967年6月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 第一印刷所  
東京都中央区湊町2-16