

土 木 研 究 所 資 料

第 167 号

弱い地層をはさんでいる基盤の
支持力算定に関する一試案（その一）

昭和41年4月

建設省土木研究所

“弱い地層をはさんでいる基盤の支持力 算定に関する一試案（その一）”

昭和41年4月
安江朝光*

要 旨

構造物をつくる時、それを支持する基盤（地盤、岩盤など）の性状を詳細に調査、検討して、それにふさわしい設計、施工がなされなければならない。従来の支持力論では、基盤を等方性としている。しかし、基盤は元来自然物であり、層状になっていたり、断層、節理などがあつたりして異方性であることが多い。最近、構造物が大型化し、また山岳地域の開発が進むにつれて第三紀層などの軟岩を基盤とする構造物も多くなり、基盤を異方性として力学的に取扱うことが検討されるようになった。本文は、このうち弱い地層をはさんでいる基盤を対象として、3つの仮定を設けて、Terzaghiの支持力論を準用した検討方法を提案し、それによる計算例を示したものである。

* 地質化学部地質研究室

目 次

1. ま え が き	1
2. 弱い地層をはさんでいる基盤の支持力	2
〔1〕 基盤と弱層の境界上の一点において、 すべり線が弱層へのり移る可否の検討	4
〔2〕 D T を通る対数螺旋の中心 O の決定	9
〔3〕 各領域における力の条件	10
(a) 深さに関する力	11
(b) 深さに関係しない力	12
〔4〕 支持力の算定	15
〔5〕 支持力算定の例	15
3. あ と が き	22

1. ま え が き

土木構造物をつくる時、基盤（地盤、岩盤など）がどのくらいの支持力を有しているかが調査、検討されなければならない。支持力に関する理論は非常に多いが、おおよそに次の3つの種類に分けられる。

- (a) 想定したすべり面に沿う滑動を論ずるもの（重力ダムにおけるHennyなど）

すべり面を想定し、この面について、 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ （ τ ；せん断強度、 c ；結合力（粘着力）、 ϕ ；せん断抵抗角）なるCoulombの式を用いて面に沿うせん断強度を求め、次に構造物及び水圧などから生ずることの面に沿うせん断力を求め、

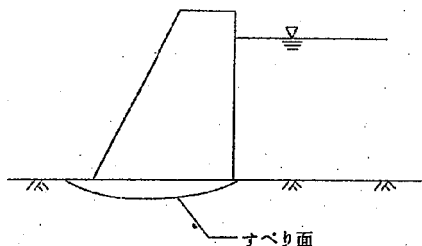


図 - 1

両者を比較する事により構造物の安定を論ずるもの。（図-1参照）

- (b) 完全塑性体または剛塑性体的な支持力論（Prandtl, Reissner, Terzaghi など）

完全塑性体の表面を滑らかなPunchによって押すとき生ずるすべり線網を図-2に示すように与え、これをもとにして載荷された半無限体にまさに連続したせん断面が形成されようとする瞬間における極限応力を求めるものである。すなわち、そのせん断面（すべり面）に沿うせん断抵抗が、すべり基盤の自重をも含めた外的荷重によって発生するせん断応力に等しくなった時を対象としており、このいわゆる極限つりあい状態では、上記のせん断抵抗が全く消費されてしまうと考える。（図-2参照）

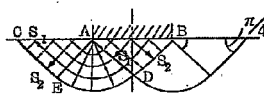


図 - 2

(c) 弾塑性的な支持力論 (Frölich, 星基など)

弾性体の表面に刚性板により荷重を加えると、両端の直応力は無限大になるから、一般の基礎も両端から塑性域が始まると考えられる。この塑性領域は両端より順次荷重の増加につれて成長し、やがて中央で融合するに至る。この時まだ載荷面下に弾性域が存するが、さらに荷重を増せば弾性域は小さくなって終には $\gamma_M = 0$ になる。この時の荷重をもって Frölich は限界支持力とした。(図-3 参照)

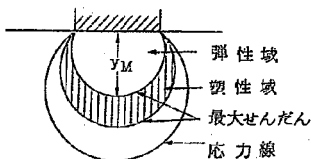


図 - 3

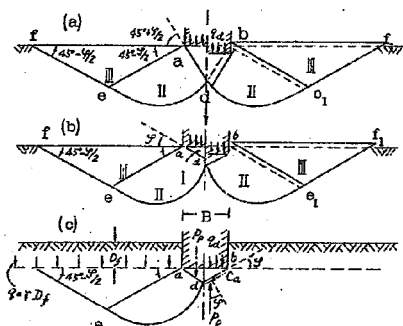
これらの理論はいづれも基盤が等方性であると言うところから出発してい

る。(もっとも(a)の場合は便宜的に方向による σ 及び μ の差を与えるものもある。)しかし基盤は元来自然物であり、層状になっていたり、断層、節理などがあつたりして異方性であることが多い。

本文は、このうち弱い地層をはさんでいる固結度の低い岩盤(第三紀層などのいわゆる軟岩)を対象とし、(b)の Terzaghi などの支持力論を単用した試みについて述べたものである。Terzaghi の支持力論自体も現在ではまだ若干問題点を残し、またこれの固結度の低い岩盤に対する適用については、現在、現場実測データの集積の段階であるが、本文では土質力学の分野では、Terzaghi の支持力論自体は問題がないという立場から出発している。

2. 弱い地層をはさんでいる基盤の支持力

いま基礎の近くに、まわりよりもせん断強度の小さな地層があれば、Terzaghi が与えた図-4をもとに考えれば、図-5における点Dより地表へ延びるすべり線は、ある点Tよりこの弱層へ乗り移ることが予想される。点Tよりすべり線が弱層に乗り移ったとすると、すべり線はDTGとなる。基盤、弱層ともそのせん断強度(τ)が Coulomb の式に従うとし、



- (a) 基礎底面がなめらかなとき
 (b) 基礎底面があらいつき
 (c) あらい底面で土かぶりがあるとき

図-4 連続フーチングの下地盤内における弾性平衡状態

基礎において $\tau = C + \sigma \tan \phi$ (1)

弱層において $\tau = C' + \sigma' \tan \phi'$ (2)

σ ; 垂直応力, C ; 結合力 (粘着力), ϕ ; せん断抵抗角
 で表わされるものとする。(ただし, $C > C'$, $\phi > \phi'$ とする)

図-5 にもとづいて, 弱層のある基礎の支持力を考える。まず Terzaghi の支持力論を準用して, すべり線に沿って, I, II, 及び III の領域に分けて, 次の仮定を設け, 領域 II における均合いから支持力を求める。(図-6 参照)

仮定(1) まず載荷面の両端 A 及び B より, 直線すべり線 AD 及び BD が生じ, 楔状部分 ABD は剛体化され, $AD = BD$ の二等辺三角形となり, $\angle BAD = \angle DBA = \phi$ で与えられる。

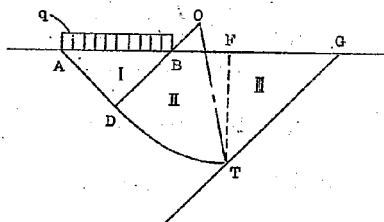


図 - 6

仮定(2) 直線すべり線 BD と点 D において, $90^\circ + \phi$ なる角をなすすべり線が D より生じ, 弱層の T 点へ至る。D T 間のすべり線は,

$r = DO \cdot e^{\alpha \cdot \tan \phi}$ で表わされる対数螺旋とすると、この中心(O)はDBの延長上にあることになる。この曲線上では、法線方向に角 ϕ をなす方向は中心Oを向いているから、この曲線上での反力は常に中心Oを向くことになる。

仮定(3)面FTにおけるすべり線の方法は、 $\angle DTG$ に内接する円のT'に対応する点での接線方向とする。

図-7において、DTとGTのなす方向を θ とすると、 $\alpha = \theta/2$ 従って $\alpha = \theta/2$ となる。すべり線の方法はDTと $\theta/2$ の角度をなす。

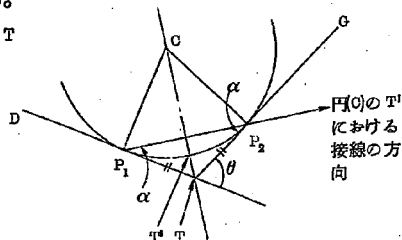


図 - 7

(1) 基礎と弱層の境界上の一点において、すべり線が弱層へのみ移る可否の検討

半無限基礎に等分布帯状荷重(q)が作用した時、点Nにおける主応力は Jacob によって次の如く与えられている。(図-8参照)

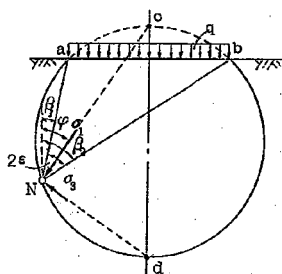


図-8 等分布帯状荷重を受ける半無限基礎内の応力

$$\sigma_1 = \frac{q}{\pi} (2\epsilon + \sin 2\epsilon) \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_2 = \frac{q}{\pi} (2\epsilon - \sin 2\epsilon) \dots\dots\dots(4)$$

基礎の自重による応力を考慮すると上式は

$$\sigma_1 = \frac{q}{\pi} (2\epsilon + \sin 2\epsilon) + K_1 \cdot \gamma z \dots\dots\dots(5)$$

$$\sigma_2 = \frac{q}{\pi} (2\epsilon - \sin 2\epsilon) + K_2 \cdot \gamma z \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 r ; 基盤の単位体積重量

z ; 表面よりの深さ

K_1, K_2 ; 定数 (土質における土圧係数に相当するもの)

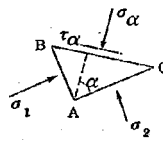
一方、任意の点において、主応力が与えられている時、この点を通る任意傾角の面 BC 上の応力 $\sigma_\alpha, \tau_\alpha$ は次式で与えられる。

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \dots\dots\dots (7)$$

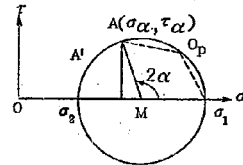
$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha \dots\dots\dots (8)$$

これより、 $\sigma_\alpha, \tau_\alpha$ は図-9に示す如く、 $OM = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ なる M 点を中心とし、半径

$(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ ($\sigma_1 > \sigma_2$ とする) の円 (いわゆるモールの応力円) 上にある事が分る。



(a)



(b)

図 - 9

ここで、面 BC の方向はこれの法線が σ_1

の方向から、反時計まわりに測った角であり、 τ_α は微小三角形 ABC を反時計まわりに回転せしめる向きに働くときを正とする。基盤中のある点が、破壊に達したとすると、この点の応力状態はモールの応力円を用いると、モール円と(1)式の破壊条件式によって示される直線とが接した

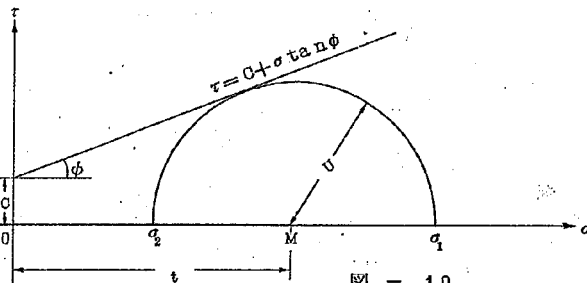


図 - 10

時の状態で示される。図-10において、いま

t ; 破壊に達した時の横軸において原点よりモール円の中心までの長さ(すなわち $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$)

u ; 破壊に達した時のモール円の半径(すなわち $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$)

とすると、

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 2t \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2u \quad \dots\dots\dots(10)$$

上載荷重によって生ずる応力のみを考えると、(3)、(4)式を(9)、(10)式に代入して($q = q_d$ (破壊時))

$$t = \frac{2qd}{\pi} \cdot \varepsilon \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$u = \frac{qd}{\pi} \cdot \sin 2\varepsilon \quad \dots\dots\dots(12)$$

また破壊に達した時のモール円の幾何学的な関係より次式が求まる。

$$u = c \cos \phi + t \sin \phi \quad \dots\dots\dots(13)$$

(11)、(12)式を(13)式に代入して

$$qd = \frac{c \cdot \pi \cdot \cos \phi}{\sin 2\varepsilon - 2 \cdot \varepsilon \cdot \sin \phi} \quad \dots\dots\dots(14)$$

(14)式を(11)、(12)式に代入して

$$t = \frac{2 \cdot c \cdot \varepsilon \cdot \cos \phi}{\sin 2\varepsilon - 2 \cdot \varepsilon \cdot \sin \phi} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$u = \frac{c \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \cos \phi}{\sin 2\varepsilon - 2 \cdot \varepsilon \cdot \sin \phi} \quad \dots\dots\dots(16)$$

次に、図-10に弱層での破壊条件 $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ を入れると、図-11のようになる。

図-9、図-10及び図-11から、モール円で 2α が、図-11の斜線で示された範囲では、破壊条件は、 $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ で規定されることが分かる。

さていま、弱層の存在による応力のみだれがないと仮定すれば(実際

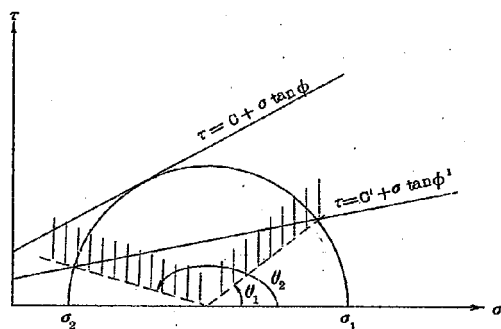


図 - 11

は模型実験などによって応力のみ
だれが調べられている⁽⁶⁾，図-
12において σ_1 からの弱層の反
時計廻りの方向を ω とすると，弱
層の方向での応力は図-9で
 $\alpha = \omega - 90^\circ$ に対応する。基礎
でのせん断強は $\tau = c + \sigma \tan \phi$
で，弱層では $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$
であるから，図-11において，

$$\theta_1 < 2(\omega - 90^\circ) < \theta_2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

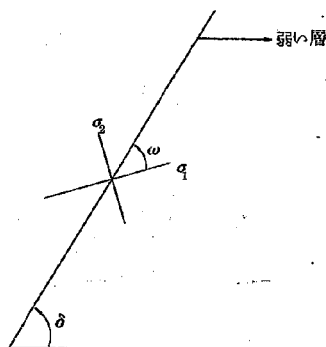


図 - 12

整理して

$$90^\circ + \frac{\theta_1}{2} < \omega < 90^\circ + \frac{\theta_2}{2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

の範囲に ω があれば，すべり線は弱層に乗り移るものと考えられる。時
計廻りの方向についても同様のことが言えるから，結局図-13におい
て，斜線の範囲に弱層があれば，すべり線は弱層に乗り移るものと考え
られる。 θ_1, θ_2 は次式で与えられる。(図-11参照)

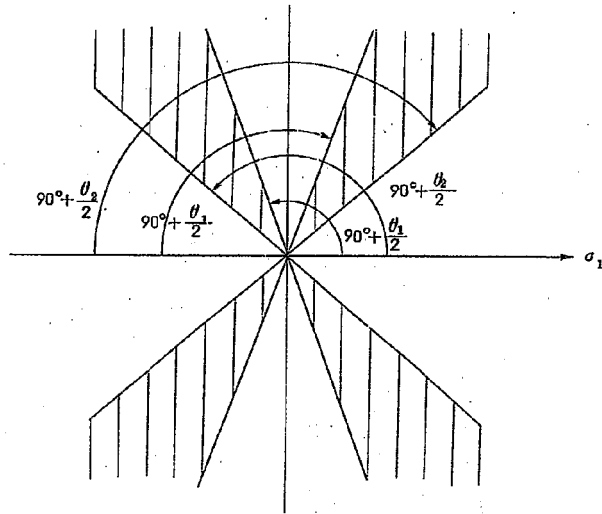


図 - 13

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x_1 - t} \dots\dots\dots (19)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\pi - \frac{y}{t - x_2} \right) \dots\dots\dots (20)$$

そこで,

$$x_1 = \frac{t - c' \tan \phi' + \sqrt{u^2 - c'^2 + \tan^2 \phi' (u^2 - t^2)} - 2c' \cdot t \cdot \tan \phi'}{1 + \tan^2 \phi'}$$

$$x_2 = \frac{t - c' \tan \phi' - \sqrt{u^2 - c'^2 + \tan^2 \phi' (u^2 - t^2)} - 2c' \cdot t \cdot \tan \phi'}{1 + \tan^2 \phi'}$$

$$y = c' + \frac{\tan \phi'}{1 + \tan^2 \phi'} \cdot (t - c' \tan \phi' - \sqrt{u^2 - c'^2 + \tan^2 \phi' (u^2 - t^2)} - 2c' \cdot t \cdot \tan \phi')$$

t 及び u はそれぞれ式 (19) 及び (20) で与えられる。

実際問題を取扱う際には、与えられた基盤の強度定数 (c, ϕ) と θ (図-8参照) より、(10)及び(16)式によって破壊時のモール円を求めて図示し、これに弱層での強度を表わす条件式 $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ を入れて、 θ_1, θ_2 を図上で求めるのが簡便である。

(2) DTを通る対数螺旋の中心Oの決定

前述のように、図-14において、DTは対数螺旋とし、この中心OはDBの延長上にあるとしたが、この中心Oは次の方法で求められる。

図-14において、三角形ODTについて考える。

$$\angle DOT = \alpha, \angle ODT = \beta,$$

$$\angle DTO = \gamma \text{ とし、また } \alpha, \beta,$$

$\gamma < 90^\circ$ とすると、幾何学的

な関係から

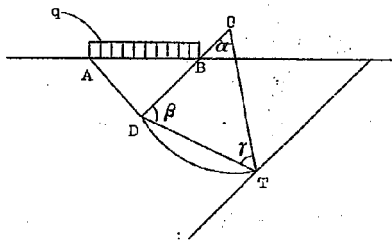


図 - 14

$$DT = OT \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\} + OD \cos \beta \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{DT}{OT} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad \dots\dots\dots (22)$$

また対数螺旋であるから

$$OT = OD \cdot e^{\alpha \cdot \tan \phi} \quad \dots\dots\dots (23)$$

(21), (22), (23)より、DT, OT, OD を消去すると

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\} + e^{-\alpha \cdot \tan \phi} \times \cos \beta$$

となる。角 α, β, γ の内どれか1つが 90° より大きい場合は、(21),

(22)式はそのまゝ成立しないが同様な手順によって求めて整理すると、結局次のようになる。

$$(i) \beta \geq 90^\circ$$

$$e^{-\tan \phi \cdot \alpha} \{1 - \cos^2 (180^\circ - \beta)\} = \cos \alpha - \cos (180^\circ - \beta) \times \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\}$$

$$(ii) \beta < 90^\circ$$

$$(1) \alpha \geq 90^\circ$$

$$e^{-\tan \phi \cdot \alpha} \left\{ \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\} - \cos \beta \cdot \cos (180^\circ - \alpha) \right\} = \cos \beta - \cos (180^\circ - \alpha) \times \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\}$$

$$(ii) \alpha < 90^\circ$$

$$(a) \alpha + \beta \geq 90^\circ$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \cos \{180^\circ - (\alpha + \beta)\} + e^{-\tan \phi \cdot \alpha} \times \cos \beta$$

$$(b) \alpha + \beta < 90^\circ$$

$$e^{-\tan \phi \cdot \alpha} \{ \cos \alpha - \cos \beta \times \cos (\alpha + \beta) \} = 1 - \cos^2 (\alpha + \beta)$$

(24)式は α , β , ϕ を含んでいるが、この内 β は図上で $\angle ODT = \angle ADT$ を求めることによって、また ϕ は基盤のせん断抵抗角として与えられるから、(24)式を解いて α を求め、これより $r = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ であるから、Tより $\angle DTG = r$ としてOT直線を引きDB線との交点を求めれば、この点が対数螺旋の中心Oとなる。

(24)式より α を求める方法として、 α を 1° より始めて、 $2^\circ, 3^\circ, \dots$ と 1° ずつ大きくして(24)式に入れ、左辺-右辺の差が最小になる時の α を選び出すと言うプログラミングを作り、電子計算機によって求める方法をとった。

(3) 各領域における力の条件

Terzaghiの方法に従って、考察する種々の力を深さに関係するものと、関係しないものとに分ける。(1) (図-15参照)

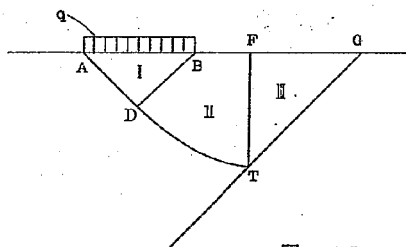


図-15

(a) 深さに関する力

この場合は, $\alpha = 0$, $\phi \neq 0$, $r \neq 0$ となる。(r ; 単位体積重量)

(i) 領域Ⅲにおける力

三角形 FTG に作用する力は

1. 自重 W ; FTG の重心を通り鉛直に作用する。
2. 面 GT における反力 R'_{GT} ; 大きさ未知, 方向面 GT に直角の方向に角度 ϕ' をなす。
3. 面 FT に作用する力 R'_{FT} ; 大きさ未知, 仮定(3)より DT と GT のなす角の $1/2$ の方向

この3つの力による力の三角形を作り, R'_{FT} 及び R'_{GT} の大きさを求める。(図-16 参照)

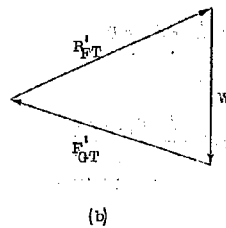
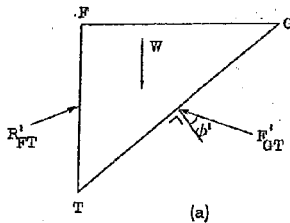


図 - 16

(ii) 領域Ⅱにおける力

領域 $BDTF$ に作用する力は

1. 面 FT に作用する力 R'_{FT} ; 面 FT において, F より $2/3 (FT)$ の深さの点に作用し, 大きさは R'_{FT} と同じで方向は反対
2. 自重 W ; $BDTF$ の重心を通り鉛直に作用する。
3. 面 DT における反力 R'_{DT} ; 方向は対数螺旋の中心 O を向いている。
4. 面 BD に作用する力 R'_{BD} ; BD 上点 B より $2/3 (BD)$ の点より鉛直方向に作用する。

—— 図-17 において ——

(i) 領域Ⅲにおける力

三角形FTGに作用する力は

1. 面GTに作用する力 C_{GT} ; 大きさ $C' \times GT$, 方向面GTの方向
2. 面GTに作用する反力 F_{GT}' ; 大きさ未知, 方向面GTに直角の方向に角度 ϕ' をなす
3. 面FTに作用する力 R_{FT}' ; 大きさ未知, 仮定(3)よりDTとGTのなす角の $1/2$ の方向

この3つの力による力の三角形を作り, R_{FT}' 及び F_{GT}' の大きさを求める。(図-19 参照)

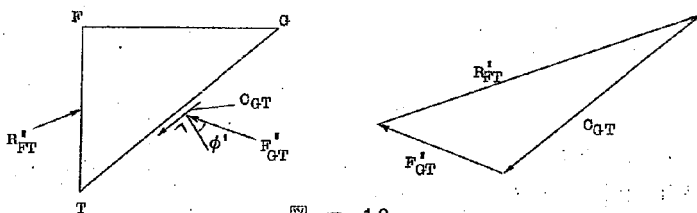


図 - 19

(ii) 領域Ⅱにおける力

領域BDTFに作用する力は

1. 面FTに作用する力 P_{FT}' ; 面FTにおいて, Fより $1/2$ (FT)の深さの点に作用し, 大きさは R_{FT}' と同じで方向は反対
2. 面DTに沿う結合力(粘着力)による力 C_{DT}
3. 面DTにおける反力 F_{DT}' ; 方向は対数螺旋の中心Oを向いている。
4. 面BDに沿う結合力(粘着力)による力 C_{BD}
5. 面BDに作用する力 R_{BD} ; 点BよりBD上 $1/2$ (BD)の点より鉛直方向に作用する。

DTに沿う結合力(粘着力)によるモーメントの総和は(図-20参照)

$$dM_c = r \cdot C \cdot ds \cdot \cos \phi = r \cdot C \cdot \frac{r d\alpha}{\cos \phi} \cos \phi = C r^2 d\alpha$$

$$= C r_0^2 e^{2\alpha \tan \phi} d\alpha$$

$$M_c = \int_0^{\alpha_1} dM_c = \frac{C}{2 \tan \phi} (r_1^2 - r_0^2) \dots \dots \dots (7)$$

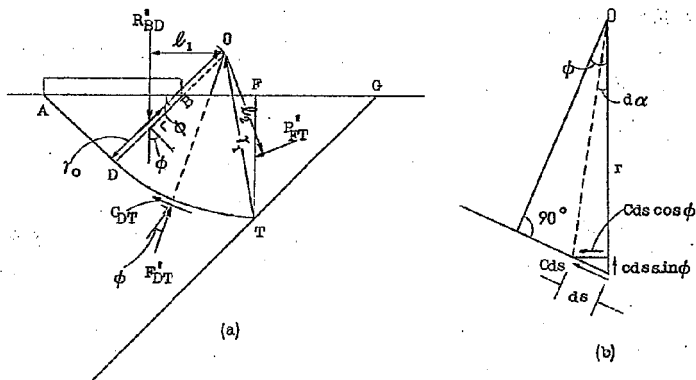


図 - 20

図-20において、O点に関するモーメントの和が零であるとすれば、時計まわりのモーメントを正にして

$$-R_{BD}^* \cdot l_1 + F_{PT}^* \cdot l_2 + \frac{C}{2 \tan \phi} (r_1^2 - r_0^2) = 0$$

従つて

$$R_{BD}^* = \frac{F_{PT}^* \cdot l_2 + \frac{C}{2 \tan \phi} (r_1^2 - r_0^2)}{l_1} \quad \dots\dots\dots (20)$$

(iii) 領域 I における力

領域 D'DB に作用する力は (図-21 参照)

1. 面 BD における反力 F_{BD}^* ; 大きさ R_{BD}^* に等しく方向は反対
2. 面 BD に沿う結合力 (粘着力) による力 C_{BD} ; 大きさ $C \times BD$
3. 荷重 ; 大きさ $q_d \times \frac{B}{2}$, 鉛直に作用する。

3つの力の鉛直方向の力の均合いより

$$q_d \times \frac{B}{2} - \frac{B}{2} \times C \cdot \tan \phi - F_{BD}^* = 0$$

従つて

$$q_d \times \frac{B}{2} = F_{BD}^* + \frac{B}{2} \times C \cdot \tan \phi \quad \dots\dots\dots (21)$$

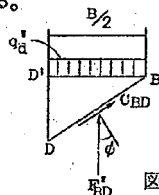


図 - 21

(4) 支持力の算定

実際の基盤では、 $c, \phi, r \neq 0$ であるから

(a)-(iii)での q_d と(b)-(iii)での q_d' を加えたものが、極限時でも荷重分布を等分布とした時の載荷面にかかる極限荷重強度である。

$$q_d = q_d' + q_d'' \text{ とすると}$$

総荷重 Q_d は $Q_d = q_d \times B$ となる。従って

$$Q_d = 2(F_{BD}' + F_{BD}'') + B \cdot C \tan \phi - r \left(\frac{B}{2}\right)^2 \tan \phi \dots\dots\dots (30)$$

で与えられる。これが巾 B の連続載荷面（フーチング）の単位長さ（1m）当りの極限支持力となる。

(5) 支持力算定の例

載荷面の巾 $B = 5 \text{ m}$, 基盤の密度 $r = 2 \text{ t/m}^3$,

載荷面端 B より弱層までの距離 $d = 10 \text{ m}$,

弱層の角度 $\theta = 45^\circ$ （水平に対して）

基盤の結合力（粘着力） $c = 10 \text{ Kg/cm}^2$, せん断抵抗角 $\phi = 35^\circ$,

弱層の結合力（粘着力） $c' = 5 \text{ Kg/cm}^2$, せん断抵抗角 $\phi' = 15^\circ$,

上述の条件が与えられている時の支持力を求める。

(i) すべり線が弱層に乗り移る点 T の決定

図-22のように、弱層に沿って、1, 2, …… , 15 の点を設け図解法によって求める。（表-1参照）

基盤の破壊時モール円は点9について求めると図-23の如くなる。

また点9について弱層へのすべり線ののり乗りの可否を検討するためのものは図-24に示される。表-1より、のり乗る可能性のあるのは点1, 3, 9, 10, 11, 13, 15であるが、この内、 q_d' （弱層部においてモール円が破壊条件式に接した時に対応する上載荷重）が最小なる点、即ち点9からのり乗りが始まるものと考えられる。点5～点8では、のり乗らないのであるが、点9において弱層が破壊状態に達したら応力の再配分によってすべり線は点9→点1へと弱層に沿って逐次生じて行くものと考えられる。

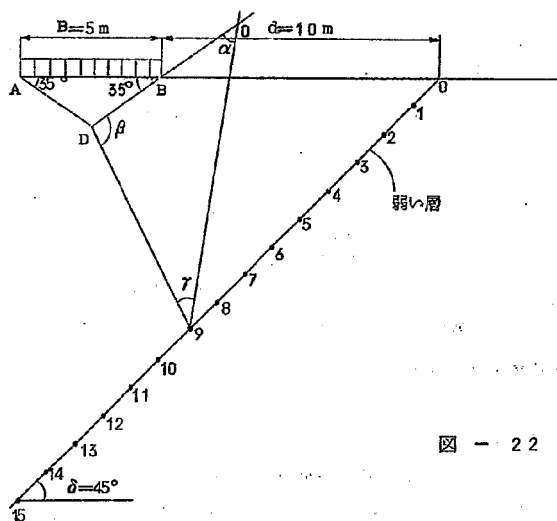


図 - 22

表 - 1

No	2° 度	基礎の破壊時モーメント (図-10.11 参照)				θ_1 度	θ_2 度	α 度 弱層の 方向度	のり の 果 り に 対 応 す る 可 否	弱層の破壊 に対応する Q_d kg/cm ²
		Q_d kg/cm ²	t kg/cm ²	u kg/cm ²						
1	2.5	1402.0	1950	1950	45.8	1644	50.4	可	467.62	
2										
3	9.2	379.8	1937	1930	46.0	1644	53.9	可	128.17	
4										
5	18.3	196.5	2000	1967	46.0	1645	80.8	否	65.57	
6										
7	25.9	145.5	2100	2021	45.9	1646	99.0	否	47.43	
8	26.9	140.4	2086	2020	45.9	1646	107.2	否	45.82	
9	27.1	139.4	2100	2020	45.9	1644	115.0	可	45.49	
10	26.5	142.0	2092	2017	45.4	1644	121.5	可	46.48	
11	25.0	149.1	2062	2004	45.5	1645	127.5	可	48.98	
12										
13	21.5	169.8	2024	1980	45.1	1644	137.0	可	56.27	
14										
15	18.5	194.5	2000	1962	45.6	1642	144.1	可	64.87	

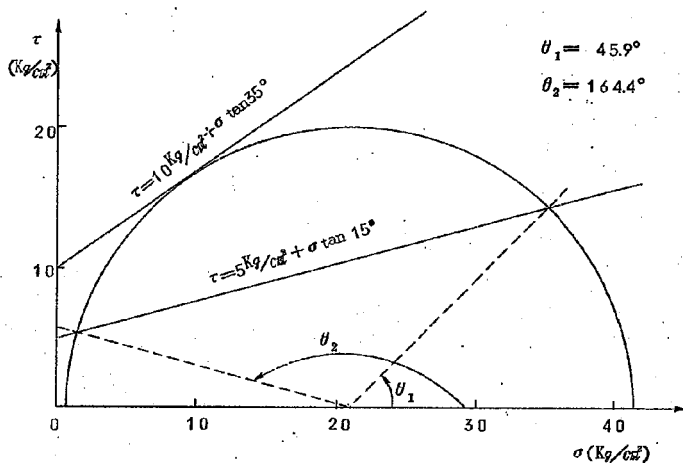


図 - 23

(II) 対数螺旋の中心 O の決定

のり乗り点 T が点 9 であるとする、図-22 より $\beta = \angle BDT = 9^\circ$ が求まる。また $\phi = 35^\circ$ であるから、電子計算機によって(4)式の左辺-右辺が最小になる α を求めると、 $\alpha = 47^\circ$ になる。
 $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta) = 34^\circ$ となるから、T より $\angle DTO = 34^\circ$ となる TO 直線を引き DB の延長との交点を求めるとこれが点 O になる。

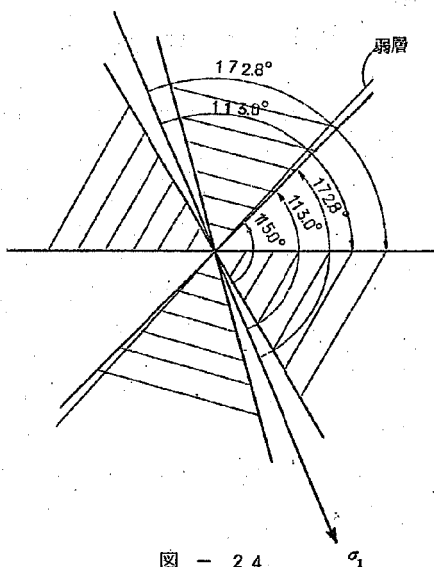


図 - 24

(iii) 支持力の算定

(a) 深さに関係する力

$$C=0, \phi \neq 0, r \neq 0$$

① 領域Ⅲ (図-25 参照)

1. W ; 大きさ $40.5 \text{ m} \times 2 \text{ t/m} = 81.0 \text{ t/m}$, 鉛直方向
2. R_{GT}^I ; 弱層の垂線に対して 15° をなす方向
3. R_{FT}^I ; 水平に対して 9.75° の方向

この3つの力による力の三角形を作り, R_{FT}^I 及び R_{GT}^I の大きさを求める。
(図-25)

図-25 より R_{FT}^I
= 201.5 t/m を得る。

② 領域Ⅱ (図-26 参照)

1. R_{FT}^I ; 大きさ 201.5 t/m ,
方向 R_{FT}^I と反対
2. W ; 大きさ $20.933 \text{ m} \times 2 \text{ t/m} = 41.87 \text{ t/m}$
作用点 (重心)

$$G = \frac{\sum s \times x}{\sum s} = 2.11 \text{ m}$$

3. R_{DT}^I ; 方向は対数螺旋の中心を向いている。
4. R_{BD}^I ; 点BよりBD上 $\frac{2}{3}$ (BD) の点より鉛直方向に作用する。

図式より

$$\begin{aligned} R_{BD}^I &= \frac{R_{FT}^I \cdot \ell_2 - W \cdot \ell_3}{\ell_1} \\ &= \frac{201.5 \times 7.96 - 41.87 \times 2.96}{4.22} \\ &= 350.71 \text{ t/m} \end{aligned}$$

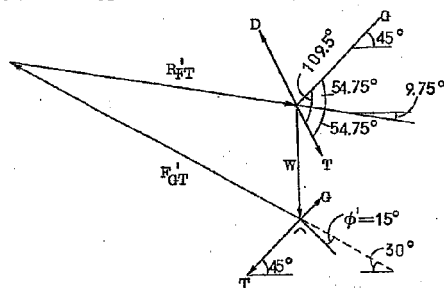


図 - 25

No.	面積 s	$x \cdot m$	$s \times x$
1	0.983	0.25	0.246
2	4.500	1.00	4.500
3	6.950	2.00	13.900
4	8.500	3.00	25.500
Σ	20.933	6.25	44.146

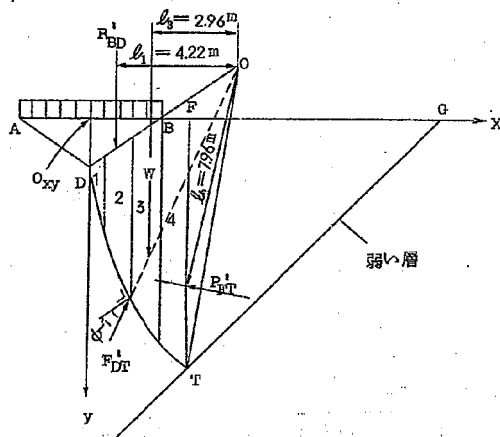


図 - 26

③ 領域Ⅰ

1. F_{BD}^I ; 大きさ 3507.1 t/m , 方向 B_{BD} の反対
2. W ; 大きさ $\frac{1}{2} \gamma \left(\frac{B}{2} \right)^2 \tan \phi = 4.38 \text{ t/m}$, 鉛直方向
3. 荷重 ; 大きさ $q_d^I \times \frac{B}{2}$, 鉛直方向

図式より

$$q_d^I \times \frac{B}{2} = 3507.1 - 4.38 = 3463 \text{ t/m}$$

④

(b) 深さに関係しない力

$$c \approx 0, \phi \approx 0, r = 0$$

① 領域Ⅲ (図-27 参照)

1. C_{GT} ; 大きさ $50 \text{ t/m} \times 9 \times \sqrt{2} = 636.3 \text{ t/m}$
2. F_{GT}^I ; 弱層の垂線に対して 15° をなす方向
3. R_{FT}^I ; 水平に対して 9.75° の方向

この3つの力による力の三角形を作り, R_{FT}^I 及び F_{GT}^I の大きさを求める。(図-27)

図-27より, $R_{FT}^I = 1796.5 \text{ t/m}$ を得る。

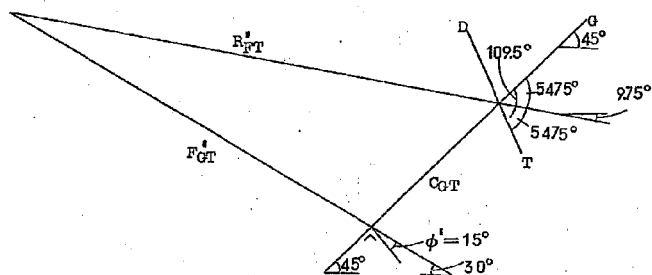
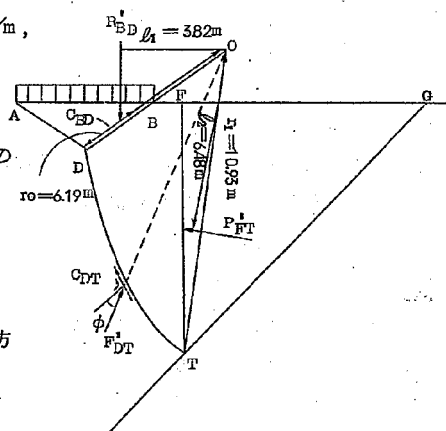


図 - 27

② 領域II (図-28 参照)

1. P_{FT}^* ; 大きさ 179.65 t/m ,
方向 R_{FT}^* と反対
2. C_{DT} ;
3. F_{DT}^* ; 方向は対数螺旋の
中心 O を向いている。
4. C_{BD} ;
5. R_{BD}^* ; 点 B より BD 上
 $\frac{1}{2}(BD)$ の点より鉛直方
向に作用する。



②式より

$$\begin{aligned}
 R_{BD}^* &= \frac{P_{FT}^* \cdot l_2 + \frac{C}{2 \tan \phi} (r_1^2 - r_0^2)}{l_1} & \text{図 - 28} \\
 &= \frac{179.65 \times 6.48 + \frac{100}{2 \times 0.70021} (10.95^2 - 6.19^2)}{3.82} \\
 &= 4564.2 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

③ 領域 I

1. F_{BD}^i ; 大きさ 4564.2 t/m , 方向 R_{BD}^i の反対
2. C_{BD} ;
3. 荷重; 大きさ $q_d^i \times \frac{B}{2}$, 鉛直方向

④式より

$$\begin{aligned} q_d^i \times \frac{B}{2} &= F_{BD}^i + \frac{B}{2} \cdot C \cdot \tan \phi \\ &= 4564.2 + \frac{5}{2} \times 100 \times 0.70021 \\ &= 4739.3 \text{ t/m} \end{aligned}$$

従って総荷重 Q_d は (30)式より

$$\begin{aligned} Q_d &= q_d \times B \\ &= 2 \left(q_d^i \times \frac{B}{2} + q_d^i \times \frac{B}{2} \right) \\ &= 2 (346.3 + 4739.3) \\ &= 10171 \text{ t/m} \end{aligned}$$

巾 $B = 5 \text{ m}$ の連続載荷面 (フーチング) であるから, 単位面積当りの荷重は $10171/5 = 2034 \text{ t/m}^2$ となる。

Terzaghi は Q_d を次式で与えている。(1)

$$Q_d = 2B (C N_c + r D_f N_q + r B N_\gamma) \dots\dots\dots (31)$$

ただし巾を $2B$ としている。

N_c, N_q, N_γ は Terzaghi が与えた図より読み取ると次の如くなる。

	N_c	N_q	N_γ
$\phi = 15^\circ$	12.7	5	1.5
$\phi = 35^\circ$	57.5	41	2.5

(31)式より基礎に弱層がなければ,

Q_d は D_f (根入れ) $= 0$ であるから,

$$\begin{aligned} Q_d &= 5 (100 \times 57.5 + 2 \times 0 \times 41 + 2 \times 2.5 \times 2.5) \\ &= 28813 \text{ t/m} \end{aligned}$$

また弱層ばかりである場合は,

$$\begin{aligned} Q_d &= 5 (50 \times 12.7 + 2 \times 0 \times 5 + 2 \times 2.5 \times 1.5) \\ &= 3210 \text{ t/m} \end{aligned}$$

また, 基礎に弱層がない場合について, 対数螺旋の中心 O が B にあると

し、 $B_T = BD \cdot e^{\tan \phi \times \angle DBT}$, $\angle ABD = \phi$, $\angle GBT = 45^\circ - \phi/2$, の条件より T を決め、 FT 面に作用する F_{FT}^i , F_{FT}^o の方向を水平として、本文で基礎に弱層がある場合に述べたと同様な図解法で Q_d を求めると、
 $Q_d = 28595 \text{ t/m}$ となる。(図-29 参照)

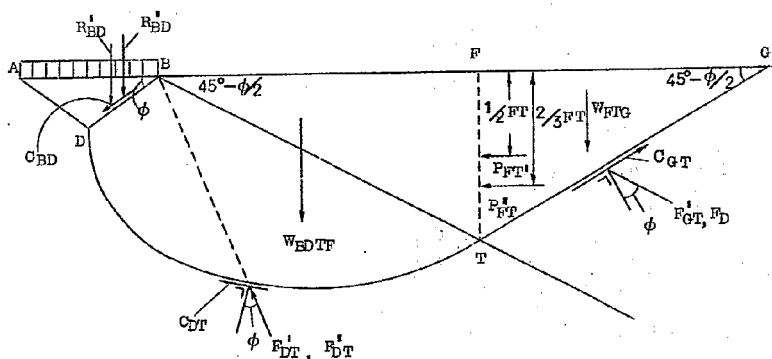


図 - 29

3. あとがき

前述のように Terzaghi の支持力論を準用して、すべり線が弱層にのり移った時の支持力を求めたが、この方法には次のような問題がある。

(1) まず弱層があった時、実際の現象としてすべり線が弱層にのり移るかと言うことである。——弱層があってもそれに連続性がなく局部的であったり、また連続していても非常に地層が薄いものであれば、のり移らないのではないだろうか。従ってのり移するためには弱層がある厚さを持ってかなりの規模で連続していると言う条件が必要ではないだろうかと考えられる。また実際の地層は凹凸があり厚さも強度も変化するから、この影響も考慮しなければならない。これらの問題の究明には第1に現場試験が必要でその補足手段として模型による室内試験が考えられる。

(2) Terzaghi の支持力論を準用したが、これが固結度の低い岩(第3紀層などのいわゆる軟岩)など、従来土質力学で取扱われていたもの以外のも

のに対して適用し得るかと言う点である。——この問題も現場での実測データの集積を待たねばならない。ただ粘性土のようなものは破壊時の変位が大きいに対して、軟岩などでは比較的小さいから破壊現象を応力状態からだけでなく、変位の要素も入れて考えるべきであるとするややはり問題を残しているのではないだろうか。今後はもう一つの支持力論の流れである Frölich の理論の適用も検討してみたい。

(3) 基盤と弱層の境界上の一点において、すべり線が弱層へのり移る可否の検討方法について——本文では、弱層の存在による応力のみだれがないと仮定したが実際は模型実験などによっても応力のみだれが報告されている。⁽⁶⁾ この問題についても今後検討が必要で実際問題をより適切に解決するための補正、修正がなされなければならない。

(4) 仮定1(まず載荷面の両端、A及びBより直線すべり線AD及びBDが生じ、楔状部分ABDは剛体化され、 $AD = BD$ の二等辺三角形となり、 $\angle BAD = \angle DBA = \phi$ で与えられる)について——等方性の場合土質力学で広く使われている仮定であるが、弱層があると載荷面ABは不等沈下すると推定されるから二等辺三角形とはならないと考えられる。現場及び室内試験などから何らかの答が出るまではこの仮定は一応使用しても良いのではないだろうか。

(5) 仮定2(直線すべり線BDと点Dにおいて $90^\circ + \phi$ なる角をなす、すべり線がDより生じ、弱層のT点へ至る。DT間のすべり線は $r = DO \cdot e^{\alpha \tan \phi}$ で表わされる対数螺旋とすると、この中心(O)はDBの延長上にあることになる)について——この仮定は最も問題となる点であってこの仮定がどの程度実際問題に適用し得るかによって本文で試みた支持力算定法の妥当性が決まるとも言えよう。問題点は2つあって1つはまずDT間を1つの中心を持つ対数螺旋としてもよいかどうかと言うことである。本文では弱層の方向に関係なく、のり移る点の位置から対数螺旋を求めているが、すべり線は本来連続するものであり、従って弱層の方向が関係すると考えられる。実際は弱層のある部分から塑性領域が広がり(図-30参照)、上載荷重がある大きさに達した時に、この領域の一部分にDよりのすべり線が連続すると考えられ、このすべり線は複合曲線(2種以上の曲線がつらなったもの)ではな

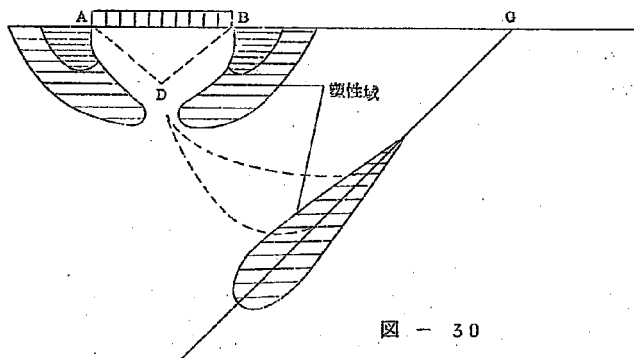


図 - 30

いだろうか。

2 番目の問題は対数螺旋の中心が DB の延長上にあるとしたことである。等方性の場合 BD は 1 つのすべり線でありもう 1 つのすべり線はこれに交角 $90^\circ + \phi$ でまじわることが明らかにされているので本文はこれを準用したが、弱層がある場合は実験等による検討が必要であろう。Terzaghi は等方性の場合対数螺旋の中心 O を B にあるとしている。BD の延長上に中心を有する対数螺旋は無数にあり、また基盤と弱層の境界において、すべり線が弱層へのり移り可能な点はある範囲内で任意に選定できるから与えられた条件に対して弱層へのり移り点 T を如何にして決めるかが重要な問題となる。本文の実例では、弱層部においてモール円が破壊条件を示す直線に接した時に対応する上荷荷重が最小になる点をのり移り点 T としたが、次の方法がより妥当と考えられる。即ち、図-31 において、のり移る点を 1, 2, …… n と種々変えて支持力を求め、その内最も小さな支持力を求める支持力とする trial method である。この方法を用いて、弱い地層をはさんでいる基盤の支持力算定法について検討して、次の機会に発表したい。どの様な方法でも、弱層がない等方性の基盤について Terzaghi の支持力式で支持力を求め、弱層がある場合と比較することはぜひ必要である。

(6) 仮定 3 (面 FT におけるすべり線の方法は、 $\angle DTA$ に内接する円の T に対応する点での接線方向とする) について —— 載荷面からの水平距離

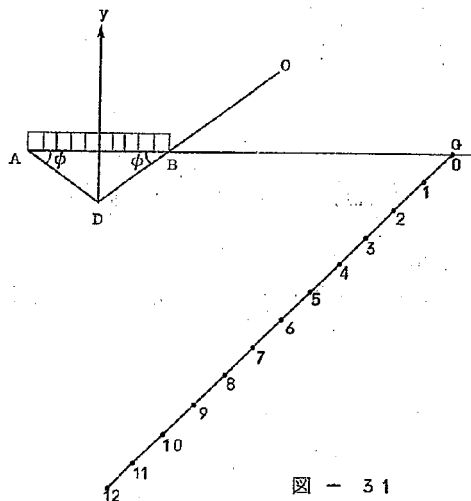


図 - 31

及び深度によって応力状態も当然異なるから一律に上述の如き仮定を設けるだけでは不十分で、今後何らかの補正が必要であると考えられる。

以上弱い地層をはさんでいる基礎の支持力算定について Terzaghi の理論を準用して考察したが、この種の問題は従来あまりなされておらず、本文も大胆な仮定による所が多い。従って初歩的な誤りをおかしているかも知れず、もしあればご指摘をお願いする次第である。

参 考 文 献

- 1) K. Terzaghi, "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley And Sons, 1959
- 2) A. Nadai, "Theory of Flow and Fracture of Solids", MacGraw-Hill Book Co., 1950
- 3) V.V. Sokolovski, "Statics of Soil Media", Butterworths Scientific Publications, 1960
- 4) Dr. Leopold Müller, "Der Felsbau", Ferdinand Enke

Verlag Stuttgart, 1963

- 5) F. Ishii, R. Iida, S. Kishimoto, "A Method discussing the Safety of Foundation Bedrock", Proc. of 1st Int. Congress on Rock Mechanics, 1966 Lisboa 投稿済み
- 6) 林 正夫, "ひびわれ性基盤, 斜層基盤の応力伝播の特性およびアーチダムの基盤の滑り破壊安全率の分布に関する考察", 岩盤研究会第一回岩盤力学シンポジウム, 1962
- 7) 赤井浩一, "土の支持力と沈下", 山海堂, 1964
- 8) 最上武雄, 渡辺隆, 山口柏樹, "土質力学", 共立出版株式会社, 1959