

傾斜アース・アンカーの引抜き抵抗に関する基礎的研究*

FUNDAMENTAL STUDIES ON PULLOUT RESISTANCE OF
INCLINED EARTH ANCHORS

勝 見 雅**・西 原 晃***

By Tadashi KATSUMI and Akira NISHIHARA

1. 緒 言

著者らは以前、水平地表面を有する地盤内に埋設された浅い鉛直アース・アンカー（以下単にアンカーという）を鉛直上方向に引き抜く場合について考究し、少なからざる成果を得た¹⁾²⁾。その後、このようにして得られた成果を傾斜アンカーに適用すべく研究を続けていたが、このほどまとまったので、本文ではこれらに関して論述する。

海洋構造物の基礎などに用いられるアンカーは必ずしも鉛直とは限らず、傾斜したアンカーとして使用される場合が少なくない。しかし、鉛直アンカーの引抜き抵抗に関しては従来から数多くの研究がなされているが、傾斜アンカーの引抜き抵抗に関する研究は傾斜アンカーの応用範囲が広いにもかかわらず数少ない。その主たる理由は、鉛直アンカーと異なり傾斜アンカーは軸対称でなく、したがって鉛直アンカーのように簡単に取り扱うことができない点にあらう。しかし、傾斜アンカーの引抜き抵抗に関する研究としては Harvey・Bunley³⁾、Mayerhof⁴⁾、Kanayan⁵⁾ などのものがある。Harvey らは傾斜アンカーのすべり線を、鉛直アンカーの Balla⁶⁾ のすべり線と同様、アンカー床板端から垂直に発達し地表面において地表面と $(\pi/4-\phi/2)$ の角度で交わる円弧と仮定しているが、実際の算定式誘導段階では、アンカー床板端と先に仮定した円弧すべり線と地表面との交点を結ぶ直線で近似させて式を誘導している。したがって、すべり線はかなり外側にでるにもかかわらず試算の結果計算値は実験値をかなり下回る傾向がみられる。Mayerhof はこのような非軸対称問題を取り扱う 1 つの方法としてアンカー床板に働く土圧を傾斜した擁壁の土圧を応用し

て求め、この土圧とアンカー床板の鉛直上方の土塊重量をもとに引抜き抵抗力を算出しようとしている。したがって彼はすべり面を考えていないことになり、主としてすべり面内の土塊重量とすべり面に働く各応力によって抵抗すると考えられるアンカーの支持機構とは異なる面がある。Kanayan は後掲 Table 1 に示す現地盤にアンカー床板の深さが 1 m、床板径 40、60、80、100、120 cm の 5 種類に対し、鉛直アンカー 17、傾斜アンカー 13、合計 30 個の引抜き実験を行っている。この実験結果は本研究に引用させていただいたので、また後でふれる。

著者らも数年来、鉛直アンカーの引抜き抵抗に関する研究と平行して傾斜アンカーも取り扱ってきたが⁷⁾⁸⁾、今回著者らは砂地盤を用いて傾斜アンカーの引抜き模型実験を行い、この実験結果をもとに 2 つの引抜き抵抗力算定式を提案した。1 つはより簡単な算定式で引抜き抵抗力のおおよその推測を行うという観点から、鉛直アンカーの引抜き抵抗力の算定式の 1 つである土すい体重量法¹⁰⁾の考え方を傾斜アンカーに適用したものであり、他の 1 つは模型実験の結果をもとに以前著者らが提案した鉛直アンカーの引抜き抵抗力算定式¹⁾²⁾を傾斜アンカーに適用してより実状に即するようにしたものである。さらにこれらの算定式によって計算した結果と著者らが行った模型実験の結果ならびに、Kanayan の現地盤における実験結果をも引用し、それらとの比較検討なども試みたので、これらに関して次節以降に論述する。

2. 室内模型実験

(1) 実験の概要

模型実験装置の概略は Fig. 1 に示すとおりである。同図にみる実験土槽 I は 1 000×800×500 mm の内寸法をもつ鋼製の箱で、その前面はアンカー基礎周辺地盤の挙動ならびに破壊形状が観察できるよう透明アクリル板

* 第 33 回土木学会年次学術講演会（昭.53.9.21）において一部を発表（講演番号 III-290）

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 学生会員 工修 京都大学大学院博士課程

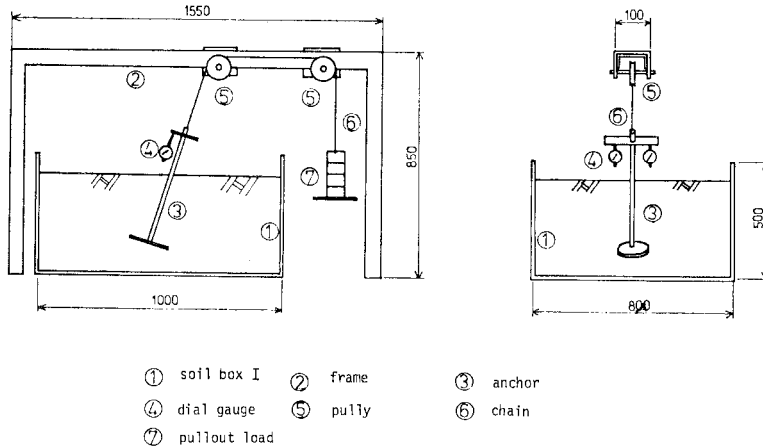


Fig. 1 Test setup and loading apparatus for model inclined anchor test.

Table 1 Characteristics of soil ground.

	Authors	Kanayan
water content w (%)	0.4	6.5
specific gravity G_s	2.65	2.65
unit weight γ (g/cm^3)	1.68	1.63
angle of internal friction ϕ ($^\circ$)	37	32
cohesion c (g/cm^2)	5	50

と取り替えられるようになっていいる。実験土槽Ⅱは主としてアンカー基礎周辺地盤を観察する目的で作製されたものであり、内寸法 $700 \times 100 \times 600 \text{ mm}$ の鋼製枠の前後両面に透明アクリル板が取り付けられている。実験に用いたアンカー床板は厚さ 4 mm 、直径は $2B=60, 90, 120, 150 \text{ mm}$ の4種類の鋼製円板でその中心に直径 8 mm の鋼棒が剛接されるようになっていいる。床板が剛接されたアンカー棒の上端にはチェーンがヒンジ結合され、載荷フレームの滑車を通して荷重が伝達されるようになっていいる。一方、模型地盤は鳥取砂丘砂の 2 mm ふるいを通過した Table 1 に示した土質工学的性質をもつ気乾試料を用いた。なお同表に示した c, ϕ の値は、別に三軸圧縮試験機、拘束圧の小さい改良型三笠式せん断試験機により求めた値である。

基礎体の埋設に際しては、アンカー基礎を所定の角度で設置したのち適当な層厚で上記砂試料を敷き、ほぼ一定の単位重量 $\gamma \cong 1.68 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるよう層ごとに MD V-300 型振動発生機によって振動締固めを行った。また実験土槽Ⅱを用いた実験では、すべり線の形状を観察する目的で黒色マジック補充用インクで着色した砂を 2 cm の層間隔で敷き、単位重量が同じく $1.68 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるようランマーを用いて締め固めた。着色砂についても無着色砂と同じ物理試験を行った結果、着色による物性値の変化は認められなかった。

引抜き実験は杭の載荷試験¹¹⁾の要領に準じた定荷重方式で行うことにした。すなわち、あらかじめだいた

予想される引抜き抵抗力の約 $1/15 \sim 1/20$ の荷重を1ピッチとして段階的に載荷した。各載荷段階においては、アンカーの変位量をアンカー軸頭部に取り付け付けたダイヤルゲージを用いて測定し、その変位増分が5分間で $1/100 \text{ mm}$ 以内におさまったときをもって次の荷重段階に進んだ。定荷重式載荷実験によると、厳密な意味での極限引抜き抵抗力を求めることはできない。なぜならば、実際の極限引抜き抵抗力はアンカーが完全に抜け上がる最終の荷重段階とそ

の前の荷重段階すなわちアンカーが保持することのできる最終荷重段階の間にあるからである。しかし実際の極限引抜き抵抗力とアンカーの保持できる最終荷重段階との差は一段階の荷重以下すなわち極限引抜き抵抗力の $1/15 \sim 1/20$ 以下であるので、本実験ではアンカーが保持することのできた最終段階荷重をもって極限引抜き抵抗とした。

(2) 実験結果とその考察

模型実験によって得られた結果は計算結果とあわせて後掲、4. の Table 2 に示す。傾斜アンカーの引抜き抵抗に関して最も興味深いことはアンカーの傾斜角が抵抗に及ぼす影響である。傾斜角による引抜き抵抗力の増減は Table 2 にみたように個々の実験によって多少異なり断言することはできないが、鉛直 ($\psi=0^\circ$) のときの引抜き抵抗力と傾斜したときのそれとの比 $Q_\psi/Q_{\psi=0}$ の平均値を図示した Fig. 2 をみればわかるように、全体的に傾斜が大きくなると引抜き抵抗力は増加する傾向を示す。増加の割合は、傾斜角が 30° ぐらいまでは大きく、 15° で鉛直アンカーの引抜き抵抗力の約 1.1 倍、 30° で約 1.25 倍となっている。傾斜角が 30° を超えると増

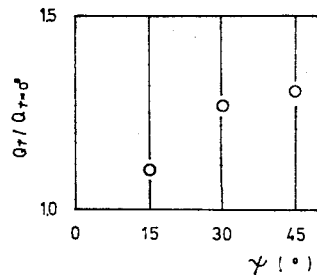


Fig. 2 Relationships between angle of inclination and ultimate pullout load.

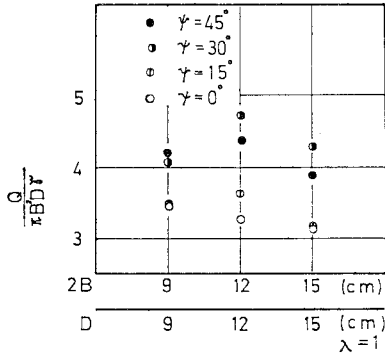
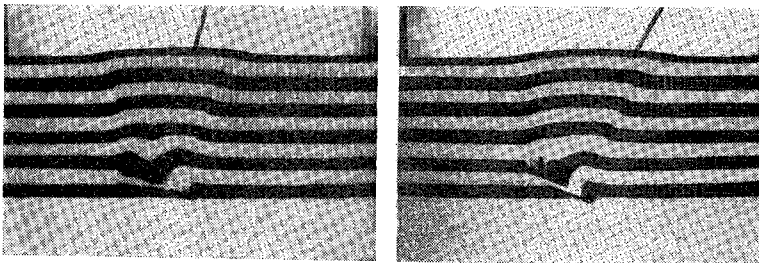


Fig. 3 Dimensionless value $Q/\pi B^2 D r$.

加の割合は急に小さくなり、45° で約 1.3 倍と 30° のときとさほど違わない。Kanayan⁹⁾ は、かなり粘着力を有する砂地盤における実験で、傾斜アンカーの引抜き抵抗力は鉛直アンカーのそれを上回って相当に増加し、傾斜角 30° では約 1.22 倍、45° になると約 1.49 倍にまで増加するという結果を得ている。これに対して Harvey³⁾ は気乾砂を用いた実験で、傾斜アンカーの引抜き抵抗力は鉛直アンカーのそれとさほど違わないという結果を得ている。著者らの実験結果は上記 2 者の結果の中間的な傾向を示し、これらの実験結果の相違は地盤の性質、特に粘着力の大きさによるものと考えられる。

次に、Fig. 3 は根入れ幅比 λ を一定にし、アンカー床板の径 $2B$ または根入れ深さ D を変えたときの無次元量 $Q/\pi B^2 D r$ を描いた図である。同図によれば鉛直 ($\psi=0^\circ$) の場合に比べて傾斜した場合には若干の変動がみられるが、 $2B$ あるいは D の値にかかわらず $\lambda (= D/2B) = \text{一定}$ ならば $Q/\pi B^2 D r$ はほとんど一定であるといえよう。粘着力をもたない砂地盤におけるこのような事実は、鉛直アンカーに関しては以前から知られており、この根入れ幅比に関する研究も数多くなされているが^{3), 4), 12)}、今回の実験結果から傾斜アンカーについても同様のことがいえる。実験結果を $Q/\pi B^2 D r$ に換算し、 λ に対して図示すれば、後掲 4. の Fig. 10 のようになり、 λ が大きくなるにつれて $Q/\pi B^2 D r$ は、かなりの割合で増加することがわかる。また、増加の割合は傾斜角



(a) $\psi=15^\circ$

(b) $\psi=30^\circ$

Fig. 4 Shapes of failure surface.

が大きくなるにつれて若干大きくなる傾向を示している。このことは前述の傾斜角による引抜き抵抗力の増加の傾向とともに、実際の傾斜アンカーの設計におけるアンカーの傾斜角ならびにその寸法と埋設深さの決定に1つめやすを与えるものと思われる。

一連の実験とは別に実験用土槽Ⅱを用いてアンカー基礎周辺地盤の破壊形状を観察したが、その結果は Fig. 4 にみられるとおりである。これらの写真によれば、アンカー床板端から伸びるすべり線は、ほぼ緩い円弧状の曲線であり、傾斜角が異なっても同様の形状を示している。

3. 傾斜アース・アンカーの引抜き抵抗力算定式の提案

(1) 土すい体重量法⁹⁾の適用

鉛直アンカーの引抜き抵抗力算定式の1つである土すい体重量法の考え方を傾斜アンカーの引抜き抵抗力の算定に拡張する。すなわち、アンカー軸と α の角をなす母線からなる倒立さい頭円すい体の土塊重量のアンカー軸方向成分をもって傾斜アンカーの引抜き抵抗力とする。

すべり線を Fig. 5 に示すようにアンカー軸と α の角をなす直線と仮定すれば、すべり面と地表面の交線は長円となる。Fig. 6 にみられるようにこの長円の長軸から時計方向に角度 θ 回転したアンカー軸を含む断

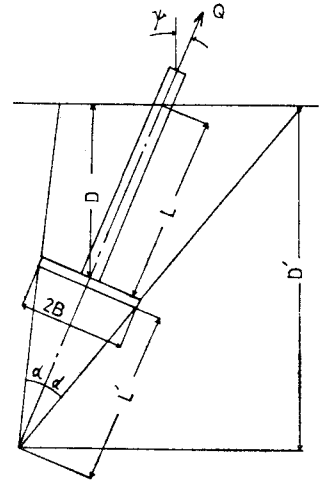


Fig. 5 A vertical cross section.

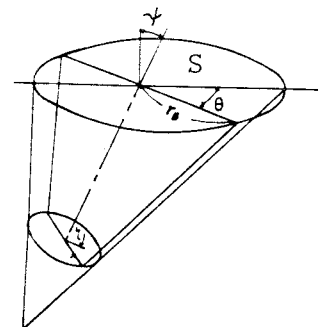


Fig. 6 Sketch of a slip surface.

面を考えれば、

$$r_\theta = \frac{L+L'}{\cos \eta / \tan \alpha - \sin \eta} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η はアンカー床板が水平面となす角であり、 $\sin \eta = \sin \psi \cos \theta$ 。したがって地表面の長円の面積 S は、

$$S = 2 \int_0^\pi \frac{1}{2} r_\theta^2 d\theta = \left(\frac{D}{\cos \psi} + \frac{B}{\tan \alpha} \right)^2 f(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$f(\theta) = \int_0^\pi \frac{1}{(\cos \eta / \tan \alpha - \sin \eta)^2} d\theta \dots\dots\dots (2)'$$

倒立さい頭円すい体の体積 V は、底面積 S 、高さ D' の円すい体の体積からアンカー床板を底面とし高さ L' の円すい体の体積を差し引いて得られるので、

$$V = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{D}{\cos \psi} + \frac{B}{\tan \alpha} \right)^3 \cos \psi \cdot f(\theta) - \pi B^3 \tan \alpha \right] \dots\dots\dots (3)$$

したがって、 V_a : アンカー柱体部の地中埋設部分の体積、 W_a : アンカー基礎の自重とすることにより、傾斜アンカーの引抜き抵抗力 R_e は次式となる。

$$R_e = \{ (V - V_a) \gamma + W_a \} \cos \psi \dots\dots\dots (4)$$

式 (2), (3) に含まれる係数 $f(\theta)$ は η が θ とともに変化するため、数値計算をせねばならず簡単な算定式とはいえない。そこで地表面に現われる長円の面積を一定の半径を有する円の面積で換算することにより算定式の簡略化を試みた。試算の結果、長円の面積 S は $\theta = 60^\circ$ のときの半径 r_{60} を有する円の面積によって近似的に換算できるようなのである。式 (4) を r_{60} を用いて書き換えれば傾斜アンカーの引抜き抵抗力 R_e として結局次式を得る。

$$R_e = \pi B^2 D \gamma F(\alpha, \psi, \lambda) - V_a \gamma \cos \psi + W_a \cos \psi \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\lambda (= D/2B)$ はアンカー基礎の根入れ幅比を表わし、

$$F(\alpha, \psi, \lambda) = \left\{ \frac{(2\lambda / \cos \psi + 1 / \tan \alpha)^3 \cos \psi}{(\sqrt{1 - 0.25 \sin^2 \psi / \tan \alpha} - 0.5 \sin \psi)^2} - \frac{1}{\tan \alpha} \right\} \frac{\cos \psi}{6\lambda} \dots\dots\dots (5)'$$

(2) Kötter の式を用いた方法

著者らは以前に、鉛直アンカーの引抜き抵抗力算定式を導くに際し、円弧すべり面を仮定し、そのすべり面に Kötter の式を適用した算定式が実験結果とよい対応を示すことを述べたことがある^{1), 2)}。ここでは全般せん断破壊を対象にしたその考え方を浅い傾斜アンカーに適用してより実際の破壊形状に近い算定式を誘導する。

a) すべり面の決定および土塊重量の算定
すべり線は以前仮定した鉛直アンカーのすべり線^{1), 2)}

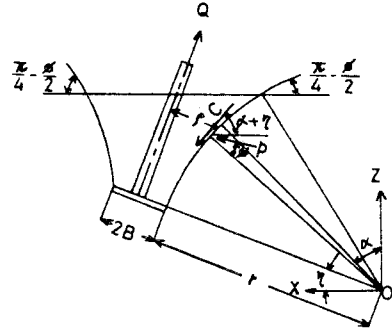


Fig. 7 Slip lines and stresses acting on a slip line

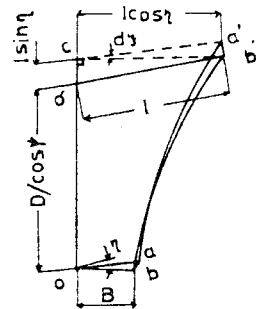


Fig. 8 A small element of soil mass in a slip surface.

と同様、床板端に垂直に始まり地表面と $(\pi/4 - \phi/2)$ の角度で交わる円弧と考える (Fig. 7 参照)。すべり面と地表面の交線は長円であり、アンカー軸を中心とし長軸方向から時計方向に角 ξ をとる。いま、Fig. 8 に示すような微小角 $d\xi$ に対する土塊を考えれば、求めようとする土塊は図中 $Oabb'a'O'$ でありその体積を dV とする。また $Oabb'a'c$ 、 $O'a'b'c$ の体積をそれぞれ dV_1 、 dV_2 とすれば $dV = dV_1 - dV_2$ 、Fig. 7 より $\rho = r[1 + B/r - \sin(\alpha + \eta)]$ であるから、

$$dV_1 = \int_{\pi/4 - \phi/2}^{\pi/2 - \eta} \frac{1}{2} \rho^2 d\xi r \sin(\alpha + \eta) d\alpha = \frac{1}{2} r^3 \left[\left(1 + \frac{B}{r} \right)^2 + 1 \right] \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \eta \right) - \left(1 + \frac{B}{r} \right) \left[\frac{1}{2} \cos(\phi - 2\eta) + \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \eta \right) \right] - \frac{1}{3} \sin^3 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \eta \right)] d\xi \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \tan^{-1}(\cos \xi \cdot \tan \psi) \\ r &= \frac{D \cos \eta / \cos \psi + B \sin \eta}{\sin(\pi/4 + \phi/2) - \sin \eta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)'$$

dV_2 は $ca'b'$ を底面とし高さ $l \sin \eta$ の三角すいの体積として近似的に求めることができる。すなわち、

$$dV_2 = \frac{1}{6} l^3 \cos^3 \eta \sin \eta d\xi \dots\dots\dots (7)$$

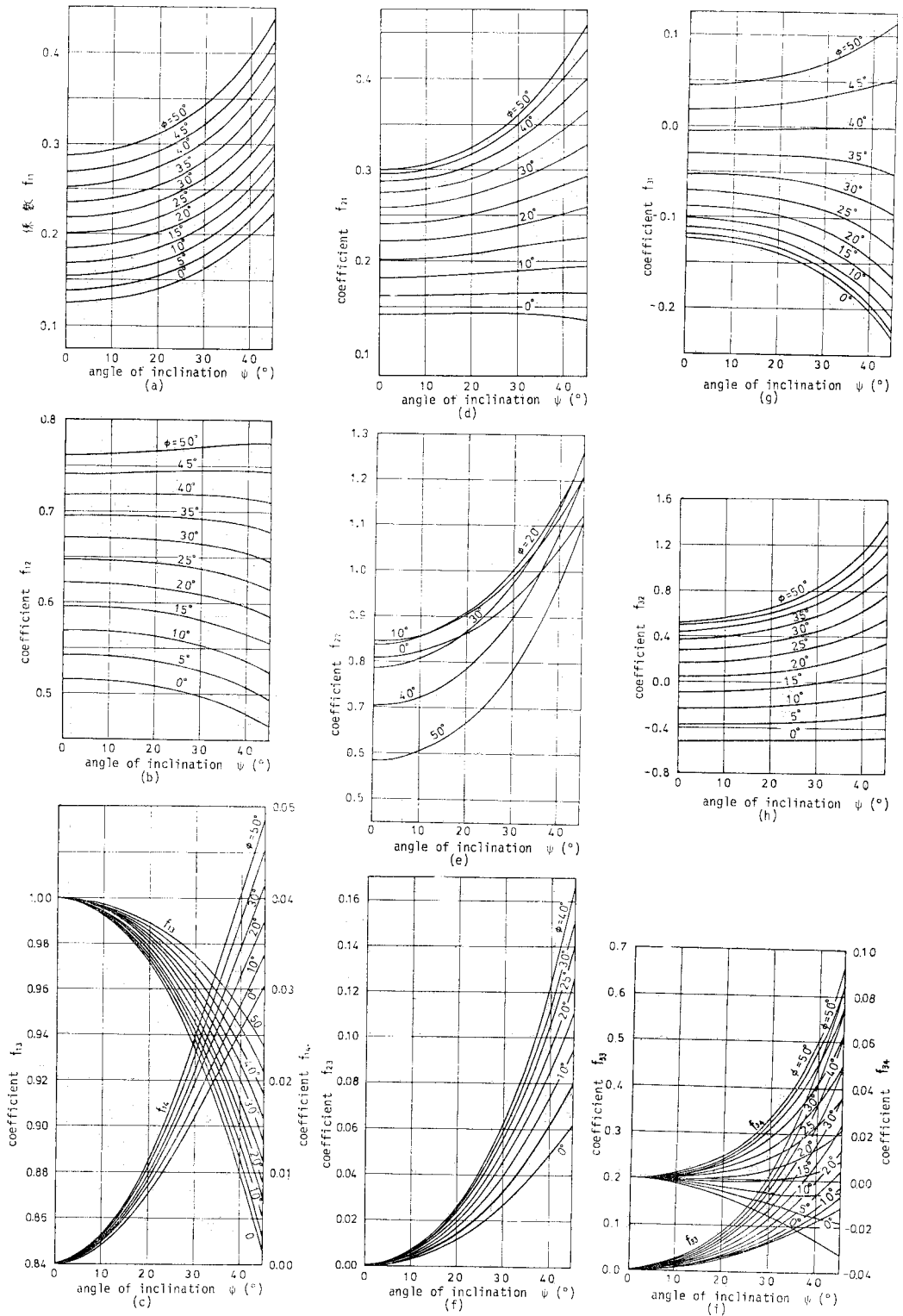


Fig. 9 Calculated diagrams.

Table 2 Experimental and theoretical results

$2B$ (cm)	D (cm)	λ	ψ (°)	Q (kg)	R_e (kg)	R_k^* (kg)	R_k (kg)	$\frac{R_e}{Q}$	$\frac{R_k^*}{Q}$	$\frac{R_k}{Q}$	$\frac{2B}{D}$ (cm)	λ	ψ (°)	Q (kg)	R_e (kg)	R_k^* (kg)	R_k (kg)	$\frac{R_e}{Q}$	$\frac{R_k^*}{Q}$	$\frac{R_k}{Q}$	$\frac{Q}{\pi B^2 D r}$
9	18	2.00	0	13.10	9.79	7.89	11.17	0.75	0.60	0.85	12	0.75	0	5.16	3.62	3.34	4.93	0.70	0.65	0.96	3.02
			15	14.33	12.00	8.24	11.70	0.84	0.58	0.82			7.45	4.19	4.97	3.49	5.21	1.19	0.83	1.24	2.45
			30	14.41	15.11	9.44	13.51	1.05	0.66	0.94			7.49	5.27	4.81	4.01	6.13	1.10	0.76	1.16	3.08
6	12	2.00	0	16.52	20.14	10.46	15.72	1.22	0.63	0.95	15	1.00	0	13.93	11.57	10.37	13.94	0.83	0.74	1.00	3.13
			15	3.93	2.90	2.34	3.80	0.7	0.60	0.97			6.89	15.09	10.82	14.63	1.08	0.77	1.05	3.14	
			30	3.45	3.55	2.44	3.98	1.03	0.71	1.15			6.05	19.07	18.03	17.02	0.95	0.65	0.89	4.28	
12	27	2.25	0	5.01	4.47	2.80	4.61	0.89	0.56	0.92	12	1.00	45	17.24	21.92	14.01	20.26	1.27	0.81	1.18	3.87
			15	6.00	5.96	3.10	5.44	0.90	0.47	0.82			11.58	5.93	5.31	7.59	0.79	0.71	1.01	3.29	
			30	35.16	30.00	23.66	30.57	0.85	0.67	0.87			6.85	7.72	5.54	7.98	1.00	0.72	1.04	3.37	
12	30	2.50	0	44.19	36.68	24.72	32.01	0.83	0.56	0.72	9	1.00	0	7.50	5.93	5.31	7.59	0.79	0.71	1.01	3.29
			15	44.41	62.82	31.43	42.38	1.41	0.71	0.95			8.66	10.77	9.23	6.35	9.31	0.86	0.59	0.86	4.72
			30	47.27	46.53	28.35	36.89	0.98	0.60	0.78			9.21	11.22	7.17	11.17	1.13	0.72	1.13	4.35	
9	27	3.00	0	38.52	53.27	24.40	33.63	1.38	0.63	0.87	12	1.25	0	3.32	2.50	2.24	3.32	0.75	0.67	1.06	3.45
			15	38.16	37.99	29.37	37.44	1.00	0.77	0.98			7.44	3.33	3.25	2.34	3.71	0.98	0.70	1.11	3.46
			30	53.19	46.34	30.70	39.21	0.87	0.58	0.74			9.33	3.91	3.89	2.68	4.34	0.99	0.69	1.11	4.06
9	30	3.33	0	54.27	59.16	35.22	45.13	1.09	0.65	0.83	12	1.50	0	10.16	8.94	7.78	10.83	0.88	0.77	1.07	3.56
			15	58.41	80.76	39.09	51.76	1.38	0.67	0.83			10.25	10.68	8.12	11.37	0.75	0.57	0.80	4.98	
			30	32.32	24.42	18.23	24.21	0.76	0.56	0.75			11.20	16.27	13.20	13.19	0.81	0.57	0.81	5.71	
9	30	3.33	0	38.41	38.34	21.89	29.18	1.00	0.57	0.76	12	1.50	0	16.70	12.76	10.80	14.69	0.76	0.65	0.88	4.88
			15	41.32	22.89	29.93	31.33	0.76	0.55	0.72			12.89	15.19	15.91	11.28	15.42	1.05	0.74	1.02	4.44
			30	50.33	38.16	23.94	36.08	1.14	0.63	0.83			13.54	18.27	19.62	12.91	17.82	1.07	0.71	0.98	5.34
9	30	3.33	0	43.41	49.50	27.54	36.08	1.14	0.63	0.83	12	1.50	0	21.41	25.24	14.35	20.81	1.18	0.67	0.97	6.26
			15	52.52	69.42	30.79	41.56	1.32	0.59	0.79			16.38	25.24	25.24	14.35	20.81	1.18	0.67	0.97	6.26
			30	52.52	69.42	30.79	41.56	1.32	0.59	0.79			16.38	25.24	25.24	14.35	20.81	1.18	0.67	0.97	6.26

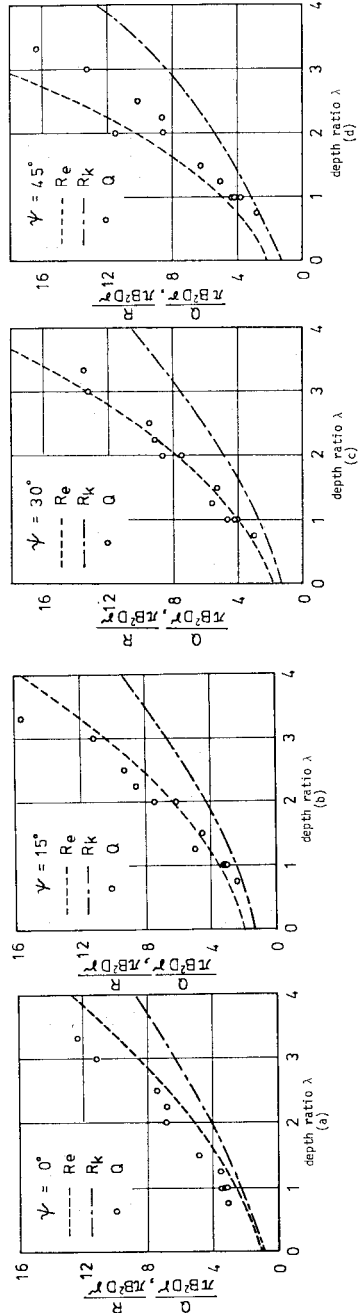


Fig. 10 Relationships between depth ratio and ultimate pullout load

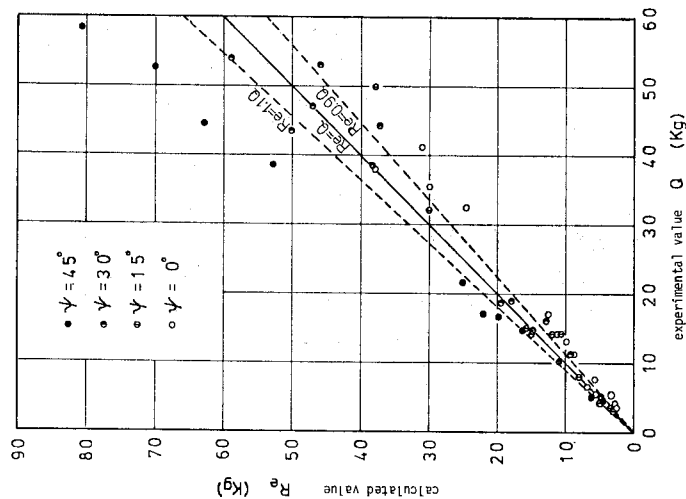


Fig. 11 Relationships between experimental and theoretical results.

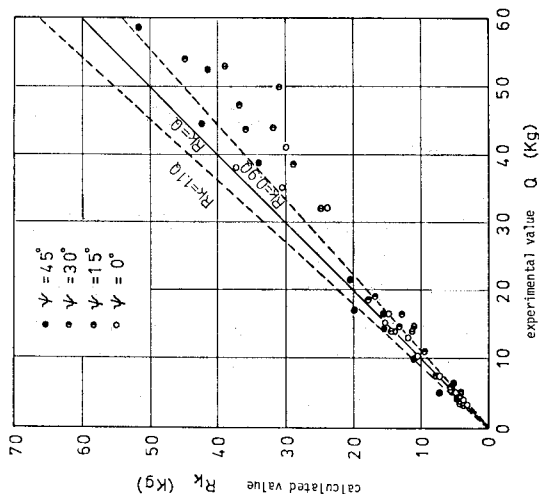


Fig. 12 Relationships between experimental and theoretical results.

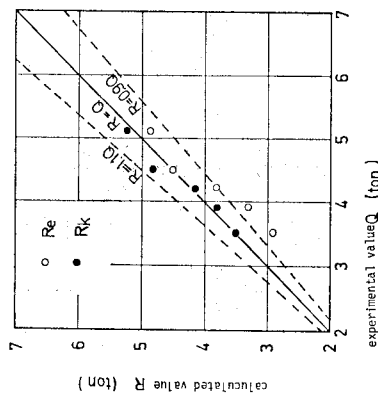


Fig. 13 Relationships between experimental and theoretical results.

Table 3 Relationships between experimental and theoretical results.

$2B$ (m)	D (m)	λ	ψ ($^{\circ}$)	Q (t)	R_e (t)	R_k (t)	$\frac{R_e}{Q}$	$\frac{R_k}{Q}$
			10	3.51	2.89	3.53	0.82	1.01
			20	3.87	3.31	3.76	0.86	0.97
0.8	1.0	1.25	30	4.16	3.80	4.17	0.91	1.00
			40	4.47	4.46	4.83	1.00	1.08
			45	5.07	4.85	5.29	0.96	1.04
Average							0.91	1.02

ここに、

$$l = \frac{B \sin(\pi/4 + \phi/2 - \eta)}{\sin(\pi/4 + \phi/2)} * \frac{+D\{1 - \cos(\pi/4 + \phi/2 - \eta)\}/\cos \psi}{-\sin \eta} \dots\dots\dots (7)'$$

したがって、土塊重量による引抜き抵抗力 R_1 は、

$$R_1 = r \cos \psi \left\{ 2 \int_0^\pi (dV_1 - dV_2) - V_a \right\} \dots\dots (8)$$

b) すべり面上に作用するせん断抵抗応力と粘着力による引抜き抵抗力の算定

Fig. 7 に示したすべり面上に作用するせん断抵抗応力 p を用いてすべり線上に沿う Kötter の式を書けば、いま考えている平面が鉛直となす角を ω とし、同図のように座標をとることにより次の式 (9) で表わされる。

$$\frac{dp}{d\alpha} + 2 \left(p \tan \phi + \frac{c}{\cos \phi} \right) = r r \cos \omega \sin(\alpha + \phi) \dots\dots\dots (9)$$

$\alpha = (\pi/4 - \phi/2)$ で $p=c$ なる境界条件のもとに式 (9) を解き、そのアンカー軸方向成分 $p_a = -p \cos(\eta + \phi + \alpha)$ とすべり面上に作用する粘着力 c の軸方向成分 $c_a = c \sin(\eta + \alpha)$ を求め、 p_a と c_a の和を全すべり面にわたって積分することにより、せん断抵抗応力と粘着力による引抜き抵抗力 R_2 が得られる。すなわち、

$$R_2 = 2 \int_0^\pi \int_{\pi/4 - \phi/2}^{\pi/2 - \eta} -r^2 \left\{ 1 + \frac{B}{r} - \sin(\eta + \alpha) \right\} \times \left[\left\{ K \exp(-2\alpha \tan \phi) + \frac{r r \cos \omega}{1 + 4 \tan^2 \phi} (2 \tan \phi \sin(\phi + \alpha) - \cos(\phi + \alpha)) \right\} \cos(\eta + \phi + \alpha) - \frac{c}{\tan \phi} \cos(\eta + \alpha) \right] d\alpha d\xi \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$K = r r \exp \left\{ 2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \tan \phi \right\} \left[\frac{c}{r r} \left(1 + \frac{1}{\sin \phi} \right) - \frac{\cos \omega}{1 + 4 \tan^2 \phi} \times \left\{ 2 \tan \phi \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (10)'$$

式 (8) の R_1 と式 (10) の R_2 を求めるに際しての積分は数値積分によらなければならない。本研究では、 ξ を $0 \sim \pi$ まで 180 分割して Simpson 法による数値積分を行い、その結果を次のように整理した。

$$R_s (\equiv R_1 + R_2) = \pi B^2 D r \left\{ F_1(\psi, \phi, \lambda) + \frac{2c}{B r} F_2(\psi, \phi, \lambda) + F_3(\psi, \phi, \lambda) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、係数 $F_1(\psi, \phi, \lambda)$, $F_2(\psi, \phi, \lambda)$, $F_3(\psi, \phi, \lambda)$ はそれぞれ土塊重量、粘着力、せん断抵抗応力に関する係数であり、

$$\left. \begin{aligned} F_1(\psi, \phi, \lambda) &= f_{11}(\psi, \phi) \lambda^2 + f_{12}(\psi, \phi) \lambda \\ &\quad + f_{13}(\psi, \phi) + f_{14}(\psi, \phi) / \lambda \\ F_2(\psi, \phi, \lambda) &= f_{21}(\psi, \phi) \lambda + f_{22}(\psi, \phi) \\ &\quad + f_{23}(\psi, \phi) / \lambda \\ F_3(\psi, \phi, \lambda) &= f_{31}(\psi, \phi) \lambda^2 + f_{32}(\psi, \phi) \lambda \\ &\quad + f_{33}(\psi, \phi) + f_{34}(\psi, \phi) / \lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

の形で表わされる。式 (12) 中の係数 $f_{11}(\psi, \phi) \sim f_{34}(\psi, \phi)$ の値を簡単に求めるために計算図表を作成し、それらを **Fig. 9** に示す。以上の係数を用いて傾斜アンカーの引抜き抵抗力 R_k は W_a をアンカー基礎の自重として次式で与えられる。

$$R_k = R_s + W_a \dots\dots\dots (13)$$

ついでこれらの計算図表の使用例について説明を加える。いま一例として、地盤の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、粘着力 $c = 0.01 \text{ kg/cm}^2$ 、単位体積重量 $r = 1.65 \text{ t/m}^3$ とし、アンカーの傾斜角 $\psi = 30^\circ$ 、直径 $2B = 1 \text{ m}$ 、深さ $D = 1 \text{ m}$ の傾斜アンカーの引抜き抵抗力を求める。**Fig. 9** より $\psi = 30^\circ$ で $\phi = 30^\circ$ のときの $f_{11} \sim f_{34}$ の値を読み取ると、 $f_{11} = 0.263$, $f_{12} = 0.675$, $f_{13} = 0.958$, $f_{14} = 0.021$, $f_{21} = 0.290$, $f_{22} = 0.975$, $f_{23} = 0.059$, $f_{31} = -0.065$, $f_{32} = 0.450$, $f_{33} = 0.135$, $f_{34} = 0.014$ となる。これらの値を式 (12) に代入して計算すると、 $F_1 = 1.913$, $F_2 = 1.344$, $F_3 = 0.534$ を得る。式 (11) より $R_s = 13.530 \times 10^3 \text{ kg} \approx 13.5 \text{ t}$ となり、いま $R_k = R_s$ とすると、Kötter の方法を用いた傾斜アンカーの引抜き抵抗力は $R_k \approx 13.5 \text{ t}$ が求められる。

4. 算定式による計算結果と実験結果との比較検討

計算結果との比較には、著者らが行った模型実験のほかに Kanayan による現場実験の結果¹¹⁾も引用して著者らが導いた算定式の適用性を検討した。なお引用した Kanayan の実験に用いた地盤の性状は前掲の **Table 1** に示してある。実験結果および計算結果は **Table 2** に示す。なお表中の実験値ならびに計算値は比較を容易にするためアンカー基礎の自重による抵抗を差し引いた値を示している。また Q は実験値、 R_e は土すい体重量法を適用した算定式 (以後算定式 (i) と称する) によって計算した結果であり、 R_k は Kötter の式を用いた算定式 (以後算定式 (ii) と称する) によって計算した結果、さらに R_k^* は R_k を算出するに際し $c=0$ として計算した結果を表わしている。算定式 (i) による計

算に際しては、 α として、鉛直アンカーの引抜き抵抗に関して JEC-127³⁾ の p. 54, 付 11 表の地盤の種類甲種の欄に与えられている値 $\alpha=30^\circ$ を用いた。

非粘性地盤においては実験結果は $Q/\pi B^2 D r$ によって無次元表示できることを鉛直アンカーに関してすでに述べた²⁾。また 3. で導いた各算定式の形をみればわかるように、粘着力を無視すれば計算値も $R/\pi B^2 D r$ で無次元表示できる。Fig. 10 はそれぞれの傾斜角に対して実験結果と計算結果を無次元表示して比較したものである。同図によれば、算定式 (i) による計算結果は実験結果と比較的良好な対応がみられるが、傾斜角が小さいうちは計算結果は実験結果を下回り、傾斜角が大きくなるにつれ実験結果より大きく算出される傾向を示している。算定式 (ii) による計算結果は全体的に実験結果を下回り、 λ が大きいほどその傾向は強まっている。

次に、算定式 (ii) に粘着力 $c=5 \text{ g/cm}^2$ を入れて計算した結果 R_k と実験結果の対応を Fig. 11 に示す。鉛直アンカーの場合にも述べた²⁾ ように実際の設計においては砂地盤のような非粘性地盤の粘着力は無視すべきであるが、算定式の良否を判断するうえではわずかな粘着力であっても考慮しなければならない。Fig. 11 によれば、傾斜角が 45° のとき若干大きめに算出されているものもあるが、全体として計算結果と実験結果は良好な対応を示している。Fig. 12 には比較する意味で、算定式 (i) による結果を示しているが、同図をみればわかるように算定式 (ii) に比べて計算結果と実験結果との間に多少ばらつきがみられ、また傾斜角 45° の場合はかなり危険側に算出されている。

Table 3, Fig. 13 には Kanayan による実験結果³⁾ と Kanayan が実験に用いたアンカー基礎の寸法と Table 1 に示した値を用いて算定式 (i) ならびに算定式 (ii) によって計算した結果を示してある。算定式 (ii) によって計算した結果は実験結果と非常によく対応しており、著者らが導いた算定式 (ii) の適用性が実証される。これに対し、算定式 (i) によって計算した結果は実験値よりも若干小さめに算出されている。このように算定式 (i) による計算結果は地盤によってその実験結果との対応が異なっているが、その算定式は従来の算定式ならびに著者らが導いた算定式 (ii) に比べてきわめて簡単であり、実際の設計にさきだつて傾斜アンカーの引抜き抵抗力のおおよその見当をつけるような場合には大いに役立つものと思われる。

5. 結 言

本文では以上のように、水平地表面を有する地盤内に埋設された浅い傾斜アンカーをアンカー軸方向に引き抜

く場合について模型実験を行い、その結果をもとに傾斜アンカーの抵抗力算定式を提案した。さらに Kanayan の現場実験の結果をも引用し、それらの結果と著者らの提案する算定式による計算結果との比較検討などを試みてきた。本研究において得られた成果は少なくないが、それらの主なるものを要約すると次のようである。

(1) 鉛直アンカーにおける土すい体重量法を適用した比較的簡単な算定式を提案し、この算定式による計算結果が実験結果と比較的良好な対応を示したことから、この方法は傾斜アンカーの引抜き抵抗力の値の推測などに大いに役立つものと思われる。

(2) さらに、鉛直アンカーの引抜き抵抗に関して Balla のすべり面を用い、彼が考慮していなかったすべり面に垂直な直応力の鉛直分力を考えた、いわゆる修正算定法^{1),2)}を傾斜アンカーに適用し、より実状に即した算定式を導くことができた。この算定式による計算結果は模型実験ならびに現場実験の結果と良好な対応を示したことから、傾斜アンカーの引抜き抵抗力の算定に寄与できるものと大いに期待される。

(3) (2) で述べた算定式は簡単ではないので実用設計に簡便に使用できることを目的に非常に簡単な計算図表を作成し、提示することができた。

(4) 粘着力のない土に対し、傾斜アンカーの引抜き抵抗力は鉛直アンカーの場合²⁾と同様アンカー基礎の根入れ幅比 $\lambda=D/2B$ を用いて論ずることができ、同一の λ に対して引抜き抵抗力はアンカー床板の面積 πB^2 を断面積、アンカー基礎の根入れ深さ D を高さとした円柱の体積 $\pi B^2 D$ に比例するものと考えられる。

謝 辞：数値計算の多くは鳥取大学工学部電子計算機 TOSBAC-3040/MODEL-21 によったことを付記するとともに、模型実験は当時の鳥取大学工学部土木工学科学生 中原修一¹³⁾氏（現在・日本道路 K.K. 勤務）に負うところが大きく、そのほか同土質研究室の各位の協力を得た。あわせて深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 勝見 雅・西原 晃：鉛直アンカーの引抜き抵抗力算定式の改良，第 13 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1157～1160，昭.53.6.
- 2) 勝見 雅・西原 晃：アース・アンカーの引抜き抵抗に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 276 号，pp. 65～76，昭.53.8.
- 3) Harvey, R.C. and E. Bunley: Behaviour of Shallow Inclined Anchorages in Cohesionless Sand, Ground Engineering, pp. 48～55.
- 4) Mayerhof, G.G.: Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles, Proc. of 8th ICSMFE, Vol. 2-1, pp. 167～172, 1973.
- 5) Kanayan, A.S.: Experimental Investigation of the Stability of Anchor Foundations, Foundation Engineering, pp. 387～392.
- 6) Balla, A.: The Resistance to Breaking out of Mus-

- hroom Foundation for Pylons, Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 569~576, 1961.
- 7) 西原 晃：アンカーの引揚げ抵抗力とその算定法に関する2,3の考察，鳥取大学工学部土木工学科卒業論文，pp. 1~14, 昭.51.2.
 - 8) 松島武夫：アース・アンカーの引抜き抵抗に関する基礎的研究，鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻修士学位論文，pp. 27~35, 昭.52.2.
 - 9) 西原 晃：アース・アンカーの引抜きならびに水平抵抗に関する基礎的研究，鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻修士学位論文，pp. 16~30, 昭.53.2.
 - 10) 電気学会：送電用鉄塔設計標準 JEC 127, pp. 54~57, 1965.
 - 11) 土質工学会：土質試験法解説（第2集），pp. 201~209, 昭.36.12.
 - 12) Baker, W.H. and R.L. Kondner : Pullout Load Capacity of Circular Earth Anchor Buried in Sand, Highway Research Record, 108, pp. 1~10, 1966.
 - 13) 中原修一：傾斜アース・アンカーの引抜き抵抗に関する基礎的研究，鳥取大学工学部土木工学科卒業論文，pp. 1~24, 昭.53.2.

(1978.7.11・受付)
