

アースアンカーに関する実験的研究

松 本 進

(受理 昭和 53 年 5 月 31 日)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EARTH ANCHOR METHOD

Susumu MATSUMOTO

This paper describes the results of experiments on the earth anchor method applied to ocean civil structures. And discusses the results of studies on the mechanical characteristics and ultimate strength of the earth anchor body which is embedded especially into shallow-modle sand.

1. 緒 言

近年、アースアンカー工法は構造物を地盤に定着させる目的でかなり普及してきており、我国でもこの種の施工件数は年々増加している。

この様なアースアンカー (Earth Anchor) は岩盤を対象としたロックアンカー (Rock Anchor) から出発したもので、当初は崩壊性の小さい土丹、固結性粘性土を対象としていたが、最近ではアンカー用の削孔機とそれに対応する削孔法が開発され、土砂を対象としたアースアンカー、とりわけ山止め用タイバックアンカーを中心とした仮設アンカーが急増してきた。また、アースアンカーは仮設用として用いられるばかりでなく、建設物・橋脚・橋台・擁壁等の定着として、さらには各種鉄塔、護岸および海洋構造物等の定着と多様な方面に永久構造物として適用されつつある。

最近急速に進展してきたアースアンカー工法はその歴史がかなり短いため、今後解決すべき問題点が数多く残されている。中でも、アンカーの設計に際し、アンカーの引抜き抵抗力は経験的に得られた土のせん断抵抗力をもとに算出されていて、未だその算定方法は完全には確立されていない。

本研究は、海洋における浮構造物、あるいはシーバースのような永久構造物を海底に定着させる方法として、アースアンカー工法を適用した場合に生じる種々の問題の中で、特に砂層地盤を取り上げ、アースアンカーの力学的性状を検討すると共に、極限引抜き抵抗力の算定法をも検討したものである。

2. 使用材料および実験方法

2-1. 使用材料

実験に用いた砂は南港産の海砂で、比重2.42、吸水量1.3%、粗粒率2.43程度のものである。なお図-1には参考のために同砂の粒度分布曲線を示す。

グラウト用として用いたセメントは比重3.15程度のアサノ製普通ポルトランドセメントである。グラウトの配合は $w/c=50\%$ のもので、フロー値は 15 ± 2 秒、圧縮強度は材令3日で 92 kg/m^2 程度のものであった。なお、圧力注入される通常の施工法の代りに本実験では膨張剤 (アルミニウム粉) を使用セメント量の0.00025%用いた。

2-2. 供試体の製作

図-2は木製の模型地盤型枠を示したもので、砂をこの型枠の中に詰め、1層の高さを15cmにして5層になるまで、断面形状が立方体 ($160 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) で重さ7.8kgの手製のコンクリートランマーで丁寧に締固めた。なお、締固めの程度は模型地盤に応じて締固め回数で適宜変えた。

次に、アンカー体の製作にあたっては、外径48mmの塩化ビニールパイプを型枠の中に鉛直に設置しておき、その囲りに砂を詰め上記の方法で所定の高さまで締固めた後、この塩化ビニールパイプを引抜くことによって、まず注入孔を製作した。さらにこの注入孔の中心に引張材として径が6mmの丸鋼鉄筋をたて込み、その後この注入孔にグラウチングを行ない、アンカー

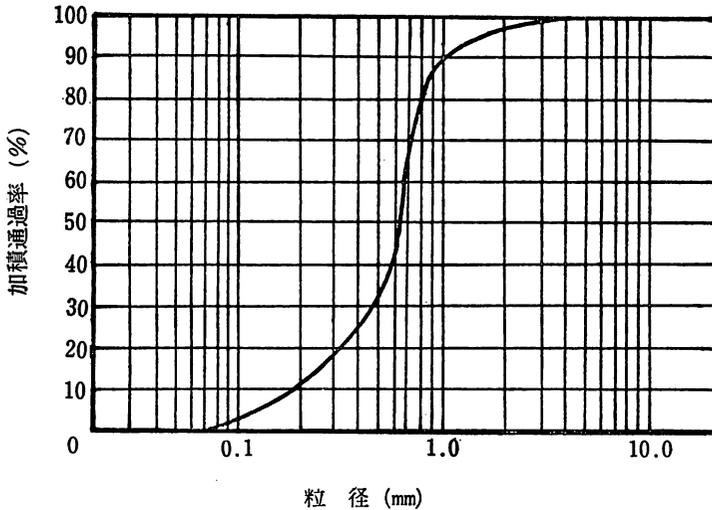


図-1 実験砂の粒度分布

体を作製した。なお、アンカー体の長さは実験の都合上約 50 cm, 60 cm および 70 cm の 3 種類とした。

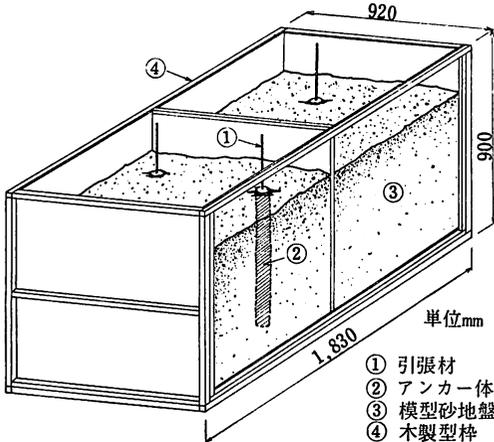


図-2 模型地盤型枠

2-3. 実験方法

図-3は実験方法の概要を示したもので、アンカー体を引抜く方法としては、アンカー体より出した鉄筋の先端をテストフレームに固定させたセンターホールジャッキ（容量20t）および中空式のロードセル（容量5t）の中を通してナットで止め、センターホールジャッキを介して引抜いたものである。この場合、引抜き力についてはロードセルで計測を行ない、引抜き量についてはダイヤルゲージで行なった。なお、引抜き速度は2mm/min程度とし変位制御とした。計

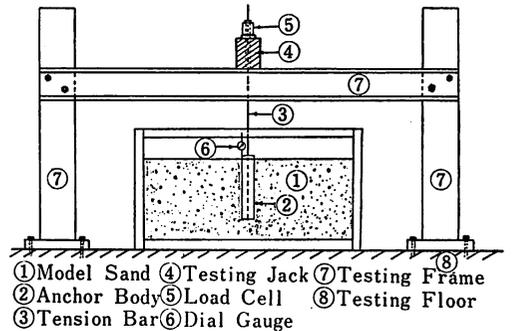


図-3 実験方法

測の仕方は引抜き量をダイヤルゲージでみながらその読みが10mmまでは0.5mm毎に、20mmまでは1.0mm毎に、30mmまでは2.0mm毎にロードセルで引抜き力を計測した。荷重の方法としては最大引抜き荷重を超える引抜き変位が生じると、一旦除荷を行なった。さらに再荷を行ない次の最大引抜き荷重を越える引抜き変位が生じると除荷を行ない、この様な方法で順次荷重を行ない、計4回の繰返し荷重を行ったものと一度目の荷重で破壊まで至らしめたものの2種類である。

その他、引抜き試験の結果模型地盤の表面にキレツが生じるので砂の表面に白色ポルトランドを薄く敷き、そのキレツの詳細な観察を行なった。また、引抜き試験後地盤の砂の性状を調べるためにコアカッターで表面よりの深さ10, 30, 50 cmの点の砂を採取して、湿

潤密度，含水比および間ゲキ比を求め，さらに一面セン断試験を行なうことにより粘着力および内部摩擦角をも求めた。

3. 結果および考察

本実験では模型地盤を使用したため寸法等に制約をうけ，アンカー長は比較的短く，実験ではアンカー長は42 cm～63 cmの範囲で3種類にした。実験に使用した砂の力学性状を変えるため締固めの程度を3種類程に変化させた。この場合の間ゲキ比は75%～81%，含水比は10%～12%程度のもとなった。また，載荷の方法としては単載荷と繰返し載荷の2種類で行なった。以上の実験結果から，アースアンカーの引抜き特性ならびに極限引抜き抵抗力について取りまとめると以下のことがいえると思われる。

3-1. 引抜き特性

アンカーが引抜き力を受けると地盤内部でセン断破壊が起り，この破壊が地盤表面にキレットとして現われる。この様なキレットの発生状況は砂の力学性状やアンカー長とある程度のある関係があるものと考えられる。

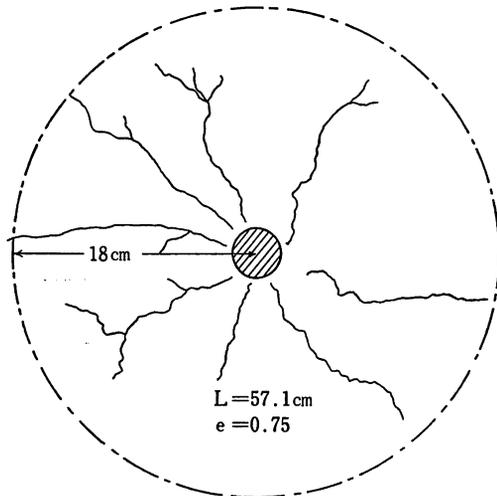


図-4 砂地盤面に生じたキレットの一例

図-4はアンカーの引抜き試験により模型地盤の表面に発生したキレットの一例を示したものである。このキレットの発生状況を詳細に観察してみると，まず数本のキレットが放射線状に発生し，荷重の増大に伴いこのキレットは伸長し，キレット幅もまた拡幅してくる。引抜

表1 キレットを取り囲む最小円の半径の実測値

間ゲキ比	アンカー長 L	キレットを取り囲む最小円の半径
0.81	62.0 (cm)	17.0 (cm)
	53.0	14.0
	43.0	13.0
0.75	57.1	18.0
	46.4	19.0
	38.5	17.5

き量が15 mm程度に達した時点でキレットの伸度・拡幅はほぼ停止することが認められた。この様なキレットの状況がアンカー長ならびに砂の間ゲキ比によってどの様に異なるかを検討してみると表-1はそれぞれの条件において，キレットを取り囲む最小円の半径 (cm) の実測値でまとめたものであって，同表よりキレットを取り囲む最小円の大きさはアンカー長にはほぼ関係せず，地盤の間ゲキ比が小さい場合には大きく表われる傾向が認められた。

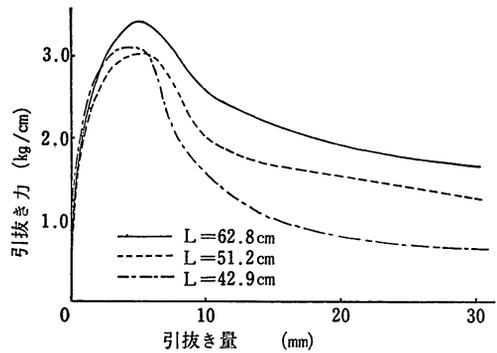


図-5 引抜き特性に及ぼすアンカー長の影響

図-5は同一地盤においてアンカー長が異なる場合のアンカーの単位長さ当りの引抜き力と引抜き量の実測値の一例を示したものである。同図より極限引抜き力に達するまでの変形性状はいずれの場合も引抜き力の増大に伴い引抜け量も増大し，引抜け量が5 mm程度になると極限引抜き力に到達し，この極限引抜き力はアンカー長が大きい程大きくなっていることが認められる。引抜け量が5 mm以上になると引抜け力は低下し，15 mm以上になると引抜き力はそれぞれに一定の値に収れんしている様に思われる。

一般には同一地盤であればアンカー長の大小にかか

ならず、単位引抜き力に対する引抜き量の変位関係は同様であると考え易いのであるが、実験した限りにおいては上記の事実は認め難かった。この原因としては地盤内部のせん断破壊様式の多少の相違によるものと考えられる。すなわち、極限引抜き力に到達するあたりにおける地盤の破壊面は後述している様にせん断破壊面が対数らせん曲線と直線とから成るため、この直線部で受け持つせん断抵抗力と対数らせん部で受持つ抵抗力の割合がそれぞれにおいて異なるからだと考えられる。また、極限引抜き力を超え、引抜き量が15mm程度になると前記した様に砂の表面に発生したキレツの拉幅・進展も終り、アンカーと地盤とのせん断抵抗力のみが引抜き力となるので、変位曲線は一定値になるものと考えられる。

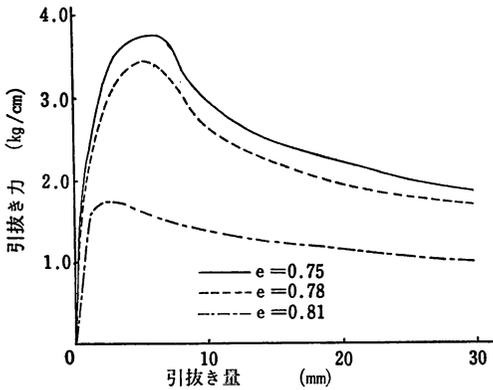


図-6 引抜き特性に及ぼす間ゲキ比 (e) の影響

図-6はアンカー長がほぼ同一のもので地盤の性状が異なる場合の単位当りの引抜き力と引抜き量の実測の一例を示したものである。同図より (1) 良く締った地盤程、極限引抜き力は大きい、(2) 極限引抜き力に相当する引抜き量は良く締った地盤程大きい、(3) 引抜き変位曲線の性状は地盤の性状にかかわらず全体的には同様であること等が認められる。このことから、地盤のもつ物理性質の中で、特に間ゲキ比 (e) は極限引抜き力ならびに変形性状に大きな影響をもっていると考えられる。

さらに、図-7および図-8はアンカーに繰り返し引抜き力を加えた場合の変形性状を示した実測値の一例を示したものである。同図より、アンカーに引抜き力を加え除荷するとわずかに弾性的に復元するもののほとんどは永久変形となり、さらに荷重をすると引抜き力の最大は履歴を受けた荷重までほぼ復元することが

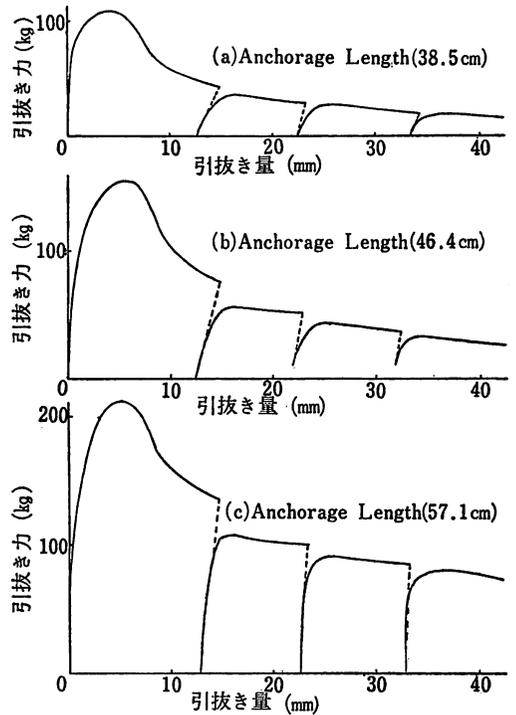


図-7 引抜き特性に及ぼす繰返し荷の影響 (e=0.75)

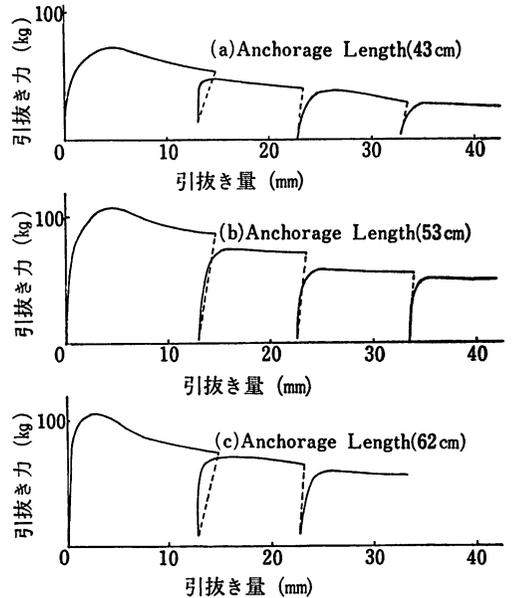


図-8 引抜き特性に及ぼす繰返し荷の影響 (e=0.81)

認められる。この様な数回の繰返し荷を受けたアンカーの変形性状は単一荷の変位曲線の内側に含まれ

るようであることが認められる。また、この場合アンカー長が変わっても以上述べた性状はほぼ同様であることが認められる。

3-2. 極限引抜き力について

(1) 理論値の算定

アースアンカーは、構造物に作用する力と引張り材を介してアンカー体から地盤に力が伝達される方式により、①現在最も汎用されている支持方式で図-9 (a) に示すように、アンカー体の周面摩擦抵抗によってアンカー体に伸用する引抜き力を支持させる周面摩擦支持方式、②図-9 (b) に示すように、アンカー体の一部あるいは大部分を局部的に大きく削孔し、アンカー体と土の摩擦というより、アンカー体の断面に働く受動土圧（支圧）によってアンカー引抜き力に抵抗させる支圧型支持方式、および③図-9 (c) に示すようにアンカー体の前面の支圧抵抗力とアンカー体周面摩擦抵抗力によって引張り力を支持させる複合型支持方式の三つに基本的には分類される。

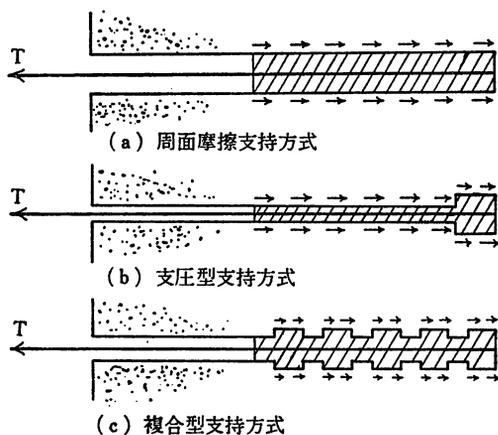


図-9 アースアンカーの支持方式

現在、アースアンカーの設計に際し極限引抜き抵抗力の算定法は理論的には確立されていない実情である。したがって、アースアンカーの極限引抜き抵抗力を求めるには上記した3つの基本型を基礎にして考える必要があると考えられる。一般に、周面摩擦支持方式のアンカーについては Habib がその計算式を提案しており、またクイの支持力公式やフーチングの引揚抵抗力の式等がアースアンカーの極限引抜き抵抗力を算定するのに十分に役立つものと考えられる。

本研究で解析に用いた理論を述べると以下の様である。アンカーに引抜き力を加えると地表面下のある点から、図-10 に示すように地盤内にセン断破壊が生じる。このセン断破壊面は春山氏の実験観察によると、フーチングを引揚げる際に生じる対数らせんと直線による破壊面に近似すると報告されている⁸⁾。そこで、本論文では、地盤のセン断破壊の生じた点以浅では松尾氏のフーチング引揚げ抵抗力算定式を⁴⁾⁵⁾⁶⁾、それ以深では従来からアンカー設計に用いられている P. Habib の提案した式を併用することにより、浅いアンカーにおけるセン断破壊を考慮した引抜き力の理論値を算定することとした。

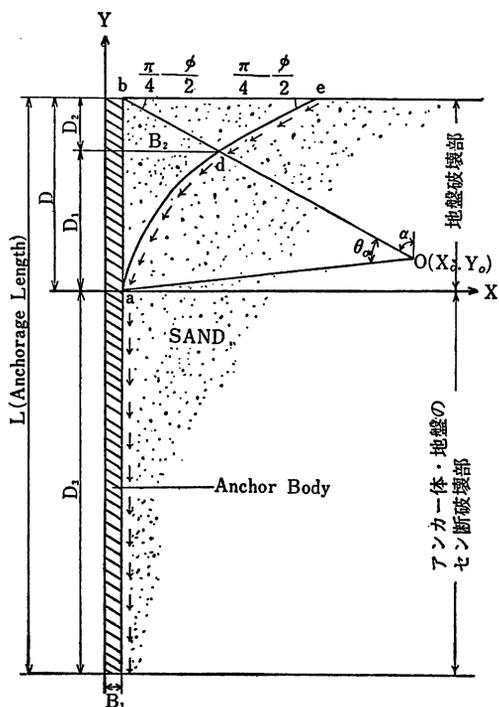


図-10 アースアンカー破壊の仮定

セン断破壊面は、対数らせん曲線の θ_0 が破層地盤の場合、 $\theta_0 = 60^\circ$ で近似されることおよび地表面にあらわれたキレットを取り囲む最小円の半径より決定された面である。破壊面が決まると次に示す式により極限引抜き抵抗力 R を求めることができる。

$$R = R_A + R_B + G \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 R_A ：セン断破壊面発生点以浅の引抜き抵抗力 (kg)

R_B ; セン断破壊面発生点以深の引抜き抵抗
抗力 (kg)

G ; アンカーの自重 (kg)

また, (1) 式に示した R_A および R_B は次式によって求めた.

$$R_A = K_1 \alpha + K_2 C \quad \dots\dots (2)$$

$$R_B = \pi B_1 \int_0^1 (C + K_0 \gamma z \tan \phi) dz \quad \dots\dots (3)$$

ここに, γ ; 砂の単位体積重量 (kg/cm³)

C ; 砂の粘着力 (kg/cm²)

ϕ ; 砂の内部摩擦角 (°)

B_1 ; アンカー体の半径 (cm)

L ; アンカー体長 (cm)

D ; セン断破壊発生点の深さ (cm)

K_0 ; 砂の静止土圧係数

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

なお, (2) 式において K_1, K_2 は松尾氏によって解析されたもので, 非常に複雑なため, ここでは省かせて頂く. また, 砂の粘着力 C および内部摩擦角 ϕ については一面セン断試験により得られた値を用いた.

(表-2 参照)

表2 実験砂の物理的性状

間ゲキ比	0.75	0.74	0.81
湿潤単位体積重量 g/cm ³	1.56	1.53	1.50
含水比 %	11.30	11.52	10.85
乾燥単位体積重量 g/cm ³	1.40	1.37	1.36
飽和度 %	36.91	36.36	33.09
粘着力 kg/cm ²	0.142	0.110	0.059
内部摩擦角 °	94.60	43.00	41.10

(2) 結果および考察

従来のアンカーの引抜き力が, アンカー体と地盤とのセン断抵抗力 (周面摩擦抵抗力) のみにより算定されているのに対し, フーチングの引揚げによる破壊面を考慮して理論値算定を行なったことにより, セン断破壊面発生点以浅の引抜き抵抗力 R_A が極限引抜き抵抗力 R に占める割合がどれ程か興味のあるところである.

結果は表-3に示すとおりであって, アンカー長が短く, 間ゲキ比が小さくなる程, R_A の R に占める割合は大きくなっている. これは, アンカー長の短いアンカーの場合に, 地盤のセン断破壊を考慮することが重要なことを示している. また, 間ゲキ比の小さい地盤で R_A の R に占める割合が大きいのは, 砂の粘着

表3 R_A の R に占める割合

L	e		
	0.75	0.78	0.81
60 cm	45.3%	42.7%	36.2%
50 cm	56.9	44.0	32.0
40 cm	58.8	59.5	35.6

なお, L: アンカー長, e: 間ゲキ比

力が大きいのでセン断破壊面に沿って生じるセン断抵抗力が大きくなり, また, 図-11に示すように間ゲキ比が小さければセン断破壊面が大きくなることによると考えられる.

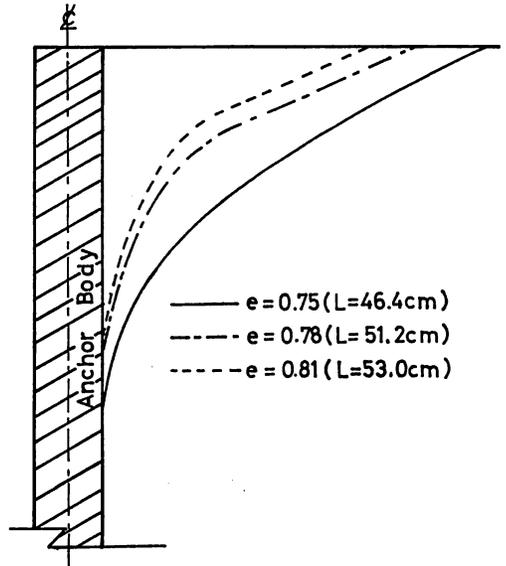


図-11 間ゲキ比の相違による破壊面

表4 実測値と理論値との比較

		e		
		0.75	0.78	0.81
L=60 cm	実測値 (kg)	213.3	213.3	105.8
	理論値 (kg)	219.6	186.3	109.3
	理論値と実測値の比 (%)	103.3	87.3	103.3
L=50 cm	実測値 (kg)	155.0	155.0	106.7
	理論値 (kg)	193.8	147.8	84.8
	理論値と実測値の比 (%)	125.0	95.4	79.5
L=40 cm	実測値 (kg)	100.0	135.0	72.5
	理論値 (kg)	160.6	135.7	68.3
	理論値と実測値の比 (%)	160.6	100.5	94.2

表-4は、理論値と実測値の比較を示したものである。なお、理論計算において用いた粘着力および内部摩擦角は表-2に因ったものである。これによると理論値と実測値の比はほぼ90~110%の間にあるが、中に数個、理論値と実測値の合わない値がある。これは理論値では砂の粘着力 C が非常に支配的であるのに対し、一面せん断試験で得られる粘着力は、一般に言われているようにデータのばらつきが大きく、正確な粘着力を求めることが本実験でも困難であったためによると思われる。しかし、9個の理論値のほとんどは実測値に近い値を示し、図-12に示すように、理論値を横軸に、実測値を縦軸にとってプロットした図を描いてみると、理論値はほぼ45°の直線付近にあり、実測値と一致していることが確かめられた。

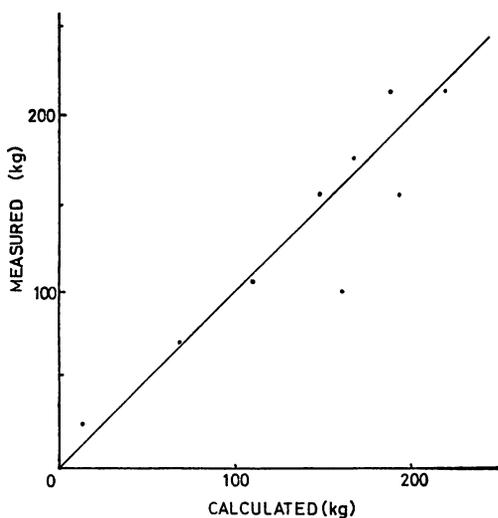


図-12 実測値の比較

としてアースアンカー工法を適用した場合の問題点の幾つかを検討したものである。実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

- (1) アースアンカーが引抜き力を受けた場合の変形状ならびに極限引抜き抵抗力はアンカー長および地盤の性質によって影響を受けやすい。
- (2) 極限引抜き抵抗力の算定に当ってはせん断破壊面を地表面下のある点から浅では対数らせんとし、以深では直線とすれば計算値と実測値がかなり適合することが確かめられた。

本研究は昭和51年度および昭和52年度の卒業研究において取り上げたものであって、春山清隆氏（現日本グラウト工業勤務）ならびに原口寛氏（現国鉄勤務）に負う所が極めて多く、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：アースアンカー工法
- 2) 荒木和彦・岡崎正弘：アースアンカー工法，土木技術30巻5号
- 3) 土質工学会：土質工学ハンドブック
- 4) Minoru Matsuo: STUDY ON THE UPLIFT RESISTANCE OF FOOTING (I), (II) SoILS AND FOUNDATIONS VOL. VII, NO. 4, 1967. VOL. VIII, NO. 1, 1968.
- 5) 松尾 稔：送電用鉄塔基礎の引揚抵抗力について，土木学会論文集第105号（昭39. 5）
- 6) 松尾 稔・新城俊也：粘性土中の基礎の引揚抵抗力に関する研究，土木学会論文集第137号
- 7) 井上広胤：砂の直接せん断に関する研究，土木学会論文集第101号（昭39. 1）
- 8) 春山清隆：アースアンカーに関する実験的研究，鹿児島大学卒業論文（昭42. 3）

4. 結 言

本研究は海洋構造物を海底砂地盤に定着させる方法