

築堤安定計算における粘土層せん断強度の測定について

竹 中 準 之 介*

1. まえがき

軟弱粘土上にできる築堤の安定計算において、常に問題になるのは粘土層のせん断強度の決定である。築堤の安定においてスベリ面の形に関する問題とか、いわゆる long-term stability の解析における三軸試験の取扱いか、粘土層の長時間の間の物理的、化学的变化など各種の問題があるが、軟弱粘土層上の築堤の安定解析においては、それらの問題は余り関係がなく、undrained tests によって求められたせん断強度 C_u を用いて $\phi=0$ 法により解析される。その理由は軟弱粘土チュウ積層の地層であるためチュウ積地周辺部以外においては大抵 10~20 cm の厚さをもった比較的均質な地層であるためである。このような粘土層上の築堤はスベリ発生するさい、粘土中のせん断は undrained の状態で発生するものである。

このためせん断強度の測定は現位置試験として vane test, 室内試験では一軸圧縮試験が広く使われてきた。

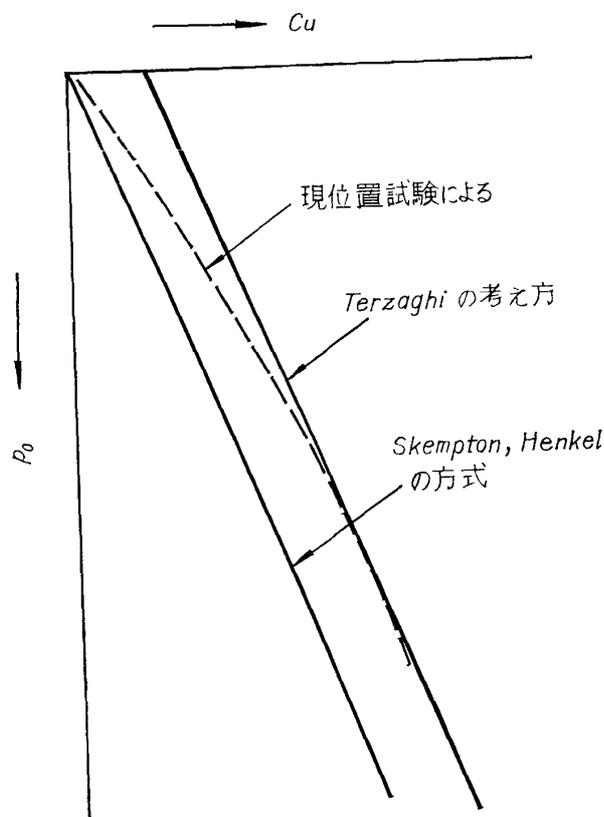


図-1

* 大阪市立大学理学部

しかしこれらの undrained test において両者の値が一致せず、vane test の方が大きい値を示す場合が多い。

せん断強度の決定は軟弱粘土の場合非常にむづかしいものであるので、Skempton, Henkl らは PI より C_u/P_o を求める関係を提案している。この関係は現在かなり正確な C_u の推定法として認められているが、 P_o の小さい場合については Terzaghi の考え方と違っている。

(図-1 参照)

軟弱粘土においては P_o は常に小さい場合が多いので、この点の究明は重大な意味をもっている。筆者は現位置における軟弱粘土のせん断強度を測定し、これらの問題に関する、2,3 の結果をえたのでここに報告し、諸兄の御批判を仰ぎたい。

2. 原位置試験と q_u の関係

1) 従来の研究について

原位置試験と q_u との関係は、vane test において多くの測定結果が発表されている。第4回国際会議の一般報告において、ヨーロッパ、アメリカの各研究者の一致した結果は、軟弱で鋭敏な粘土の場合は、vane test による C_u が q_u より求めたものより 2~3 倍大きいということが報告されている。もちろんヨーロッパの文献においても、粘土がある程度の強度をもっている場合は、vane test より求めた C_u は q_u より求めたものとよく一致している。

これらのことから、この原因は軟弱粘土の試料採取時の攪乱の影響が大部分であるということがわかる。日本においてはヨーロッパのように極端な reaching をうけた鋭敏比の高い粘土は、チュウ積粘土層にほとんどないので、軟弱な粘土の場合でも、vane test より求めた C_u は、 q_u のその 1.5 倍程度になるくらいである。

図-2 は筆者が行なった vane test と $q_u/2$ の測定結果を示したもので、vane test の方がわずかに大きい C_u の値を示している。そして一軸強度より求めた C_u は、上層部において強度低下のいちじるしいことが分る。

Bishop, Offer らは自分で設計した vane gear により、イギリス西海岸のチュウ積軟弱粘土層の現場せん断強度を測定し、その結果と q_u ならびに三軸圧縮試験 (undrained test) を比較している。この地帯は築堤のスベリがたえず発生し、Taylor, Skempton, Golder などがスベリの安定解析を行なっている。これらの安定解析

報 文 · 論 文

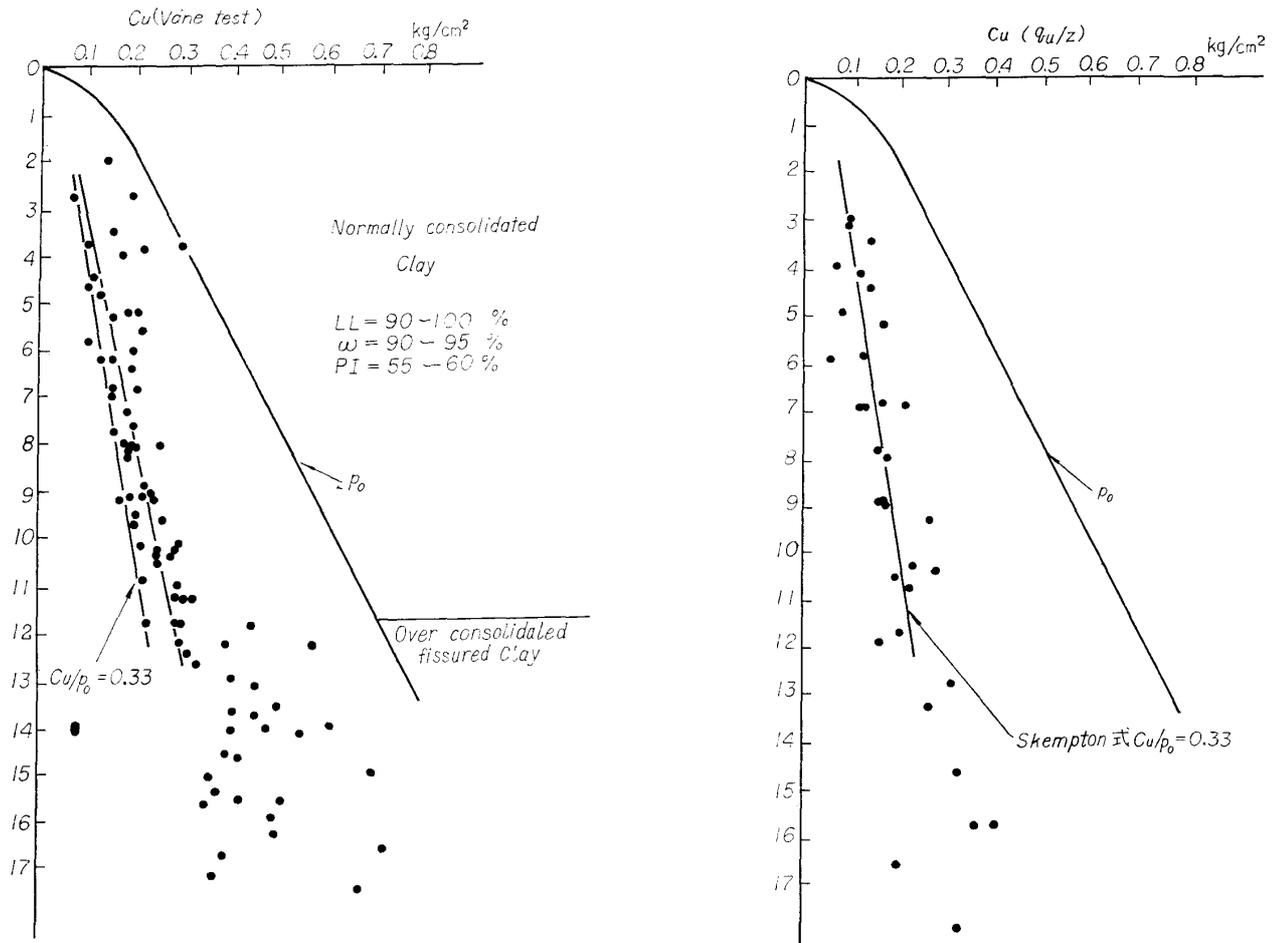
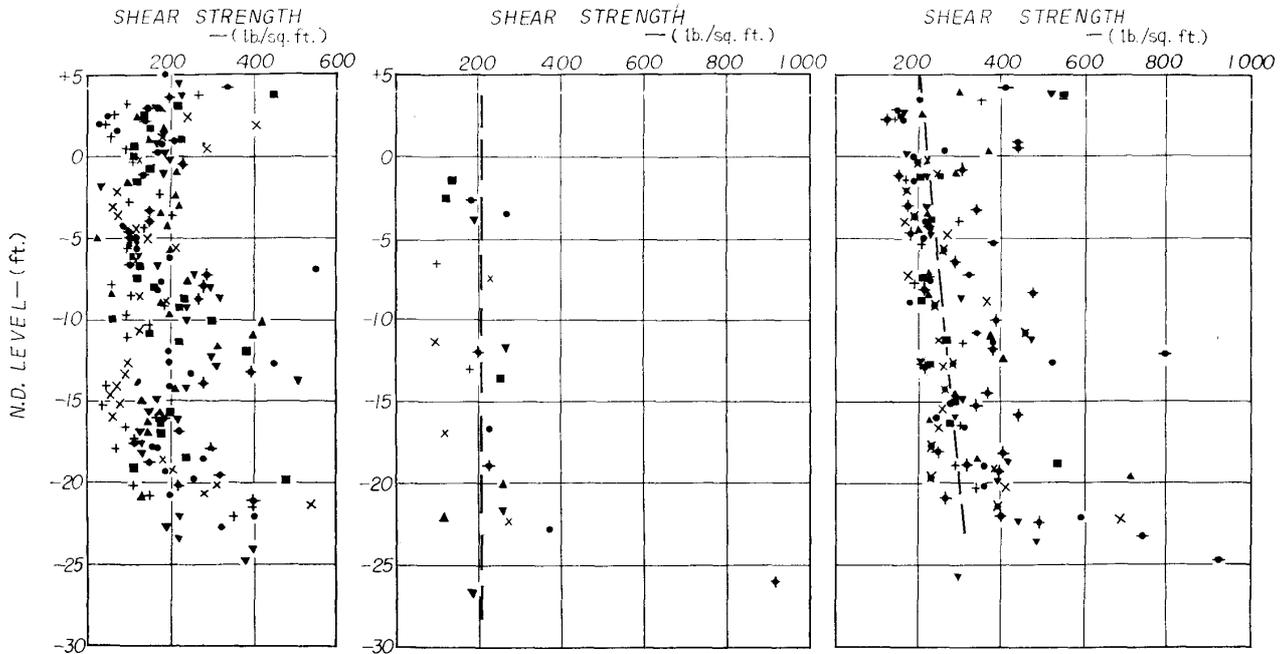


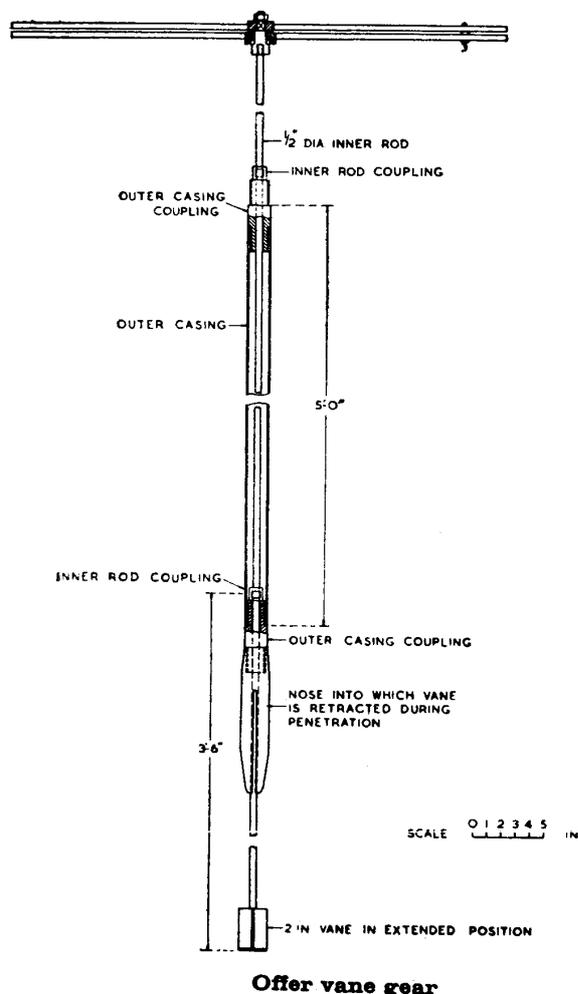
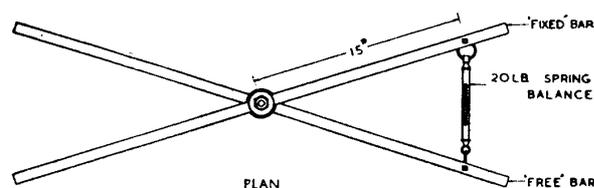
図-2



UNCONFINED COMPRESSION TESTS. UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TESTS. VANE TESTS.

BISHOP TESTS } BOREHOLE No. 4 ◆ BOREHOLE No. 5 ✕
 BOREHOLE No. 3 • BOREHOLE No. 4 +
 OFFER TESTS { BOREHOLE No. 5 ✕ BOREHOLE No. 6 ■
 BOREHOLE No. 7 ▲ BOREHOLE No. 8 ▼
 — — — — — BOREHOLE No. 9 ◆
 STRENGTH ASSUMED IN ANALYSIS.

図-3



Offer vane gear
図-4

の結果はそれぞれじゃっかんの相違があるが、これは現場のセン断強度の測定自体に問題があるようである。

Bishop, offer らの測定結果と、offer の使用した vane gear を参考までに 図-3、図-4 に示した。図-3 の結果によれば一軸圧縮試験による C_u の測定は非常に誤差が多く、 q_u の値から C_u を決定することの困難さをよく示している。また vane test に較べて q_u より求めた C_u は vane test の場合の 1/2 であることが分る。これらの結果より Golder はスベリ解析を行ない下のような結果をえた。

$\phi=0$ analysis: vane test results $F=1.3$

$\phi=0$ analysis: undrained triaxial test results
 $F=1.0$

c, ϕ analysis: drained triaxial test results

$$F=1.3$$

そして結論として、vane test results の $\phi=0$ analysis をとっている。これらの理由は本報告の末尾結論において述べる。

2) Vane test について

vane test は軟弱粘土層の現場セン断強度の測定に非常に有効な方法である。しかしながら現在日本で一般に使用されている vane test の機械はその構造上余程経験のある技術者でないかぎりたいてい誤差を生じ易い。それは2つの原因による。

この種の vane test は羽根がボーリング孔底より 1 m 弱しか押込めないののでボーリング掘さく時のかくらんされた部分をテストすることがよくある。とくに深い部分のテストには掘さく後のロッド引上げと vane の下げおろしに時間がかかりその間にボーリング孔底が砂質沈殿物で実際よりも浅くなるためである。

第2の原因は砂質沈殿物の沈殿前に vane が下げられると測定中にロッド下部が沈殿物でとりまかれて見かけ上セン断強度が大きくなるためである。これらの状態は 図-5 の模式説明図により説明される。

このような間違いを防止するために 5 m 程度のケーシング外管をもった 図-4 offer 式の vane gear によらなければならない。

しかしながらボーリング孔を利用するかぎり vane の羽根を大きくすることができないので、粘土層中のごくわずかの植物片とか貝殻とかによって測定値が大きくなることもある。そのみならず、挿入時の攪乱の影響も小さい羽根ほど大きいであろう。したがって、海底粘土層のような軟弱粘土層の精密な vane test を行なうためにはなるべく大きい羽根の vane test を行なったほうがよいであろう。このため筆者は 図-7 に示すような大型 vane により軟弱粘土の現場セン断強度を測定し、後述の cone test との比較試験を行なった。

この vane は 5 m のケーシング外管によりロボットの摩擦の影響なしに、海底下 5 m までのセン断強度を連続的に押込むことにより測定できる。

3) Cone test

vane test は測定が連続的でなく、ボーリング作業を必要とするので作業が煩雑である。その点で cone test による C_u の測定は優れた方法である。cone test の cone 押し込み抵

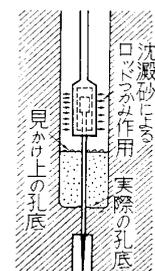


図-5

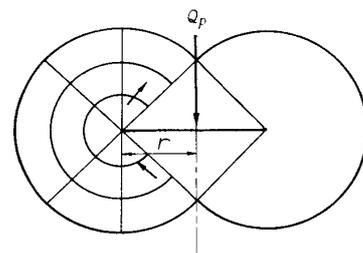


図-6

報 文・論 文

抗 q_c と粘土層の C_u の関係は図-6 に示した破かい面で計算される。

いま cone の代りに幅 $2r$ の strip plate を考えると、この plate の土中の押し込み抵抗 q_p は

$$\begin{aligned} q_p &= (3\pi + 2)C_u \\ &= 11.42 C_u \end{aligned}$$

となる。

また strip plate のかわりに円板を押し込む場合を考えると、円板の場合は粘土の変形時の拡がりに必要な、hoop stress が作用するので、円板下部のスベリ抵抗は strip plate の場合に較べて、大きな抵抗が作用する。しかし円板が土中に充分深く入っている場合は円板上半部において hoop stress は相殺するように働くので結局

$$\begin{aligned} q_c &= (3\pi + 2)C_u \\ &= 11.42 C_u \end{aligned}$$

となり、strip plate と同結果になる。この点地表面支持力の場合と異なるので注意しなければならない。また軟弱粘土においては円板の場合も 90° 円錐の cone も同じ q_c と C_u の関係をもっていることは図-6 から分る。

以上は円板、円錐、何れも押し込みロッドの直径が無視できる程度に細い場合であるが、もし押し込みロッドが円

板または円錐の直径に等しい場合には

$$\begin{aligned} q_c &= (5/2\pi + 2)C_u + P_0 \\ &= 8.85 C_u + P_0 \end{aligned}$$

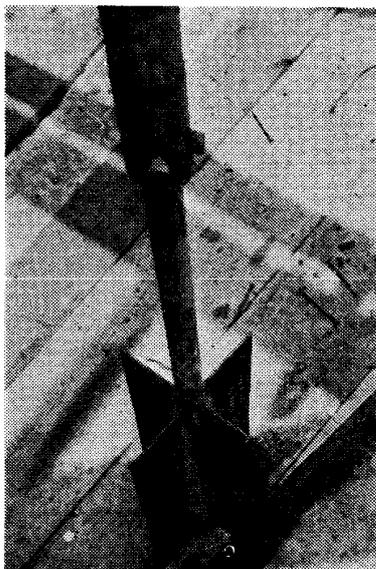
となり、 C_u との比例常数も異り P_0 。そのうえ土かぶりの影響をうけるようになるので注意しなければならない。

軟弱粘土のせん断強度の測定にはロッドに較べて円錐の径を大きくした方が正確な結果がえられるし、土かぶり圧の影響もうけないので結果の整理がしやすい。筆者は図-7 (D) のロードセルに (b) の状態の cone を取付け試験を行なった。

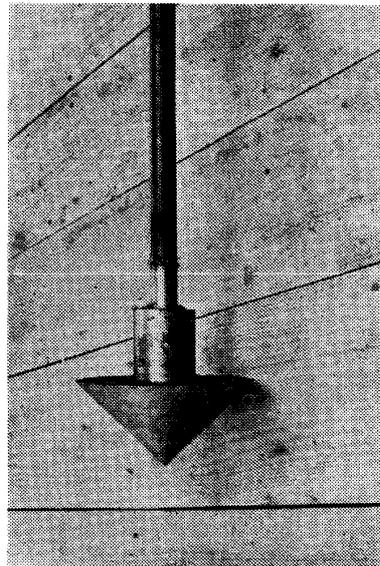
cone test と大型 vane test の比較試験においては

$$q_c = 10 C_u$$

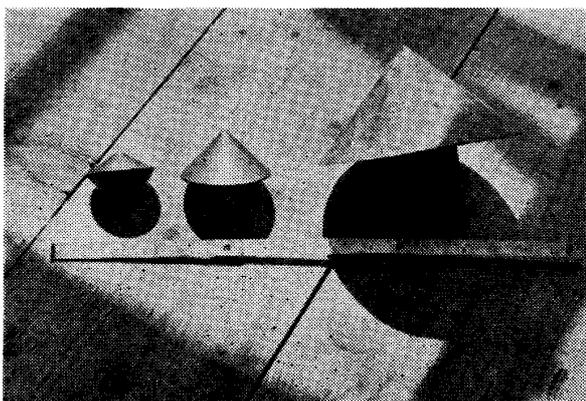
という結果が得られた。この関係は前式の 11.42 に比較して小さい値を示している。この原因はロッドの径を無視できないためよりも、粘土の鋭敏比によるものと推定される。cone は連続圧入中 cone 上半部の粘土は攪乱されて強度低下を生じ、その中で破かいスベリが発生するから C_u が全面に作用すると仮定した値よりも小さくなるのは当然である。実験を行なった地域の粘土層の cone test による鋭敏比は $S_t = 2$ であるので以下のこと



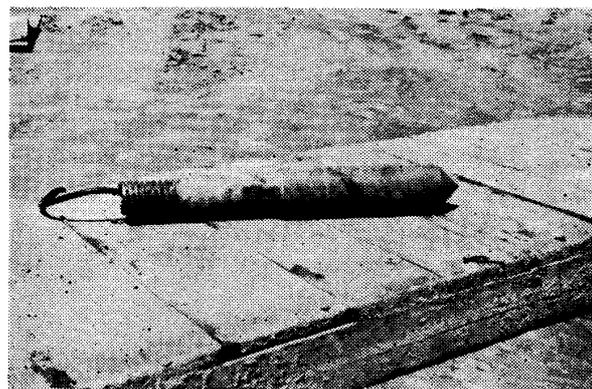
(a) vane 200 mm × 400 mm



(b) cone 200 mm ϕ

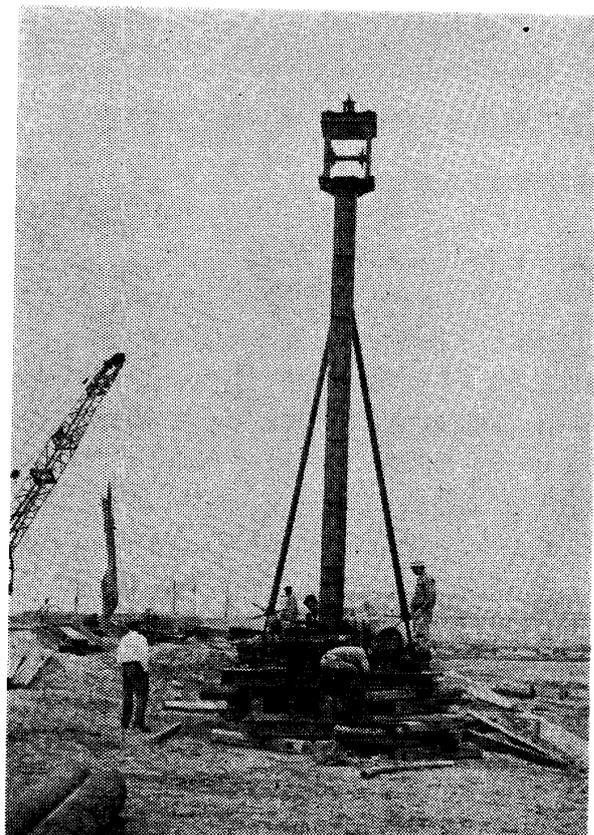


(c) 各種 cone 先端

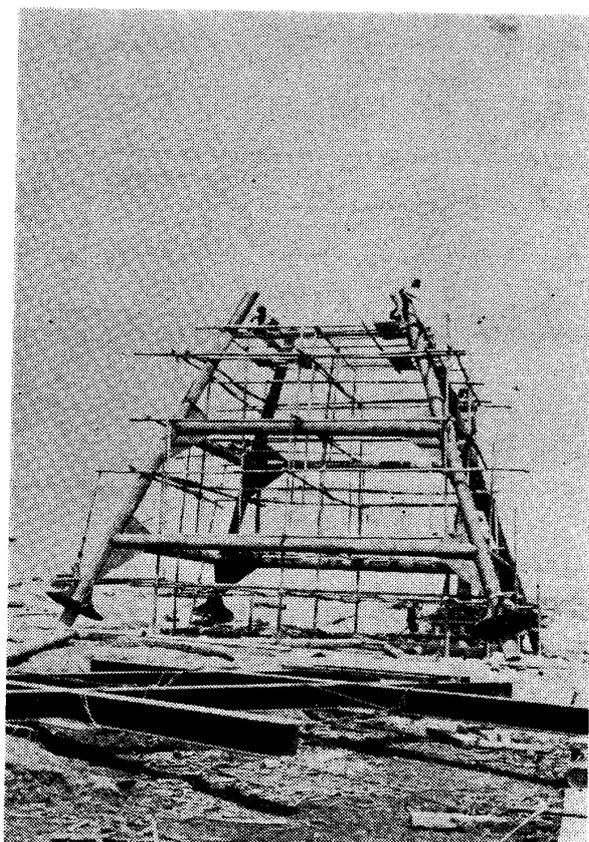


(d) 先端抵抗測定用ロードセル

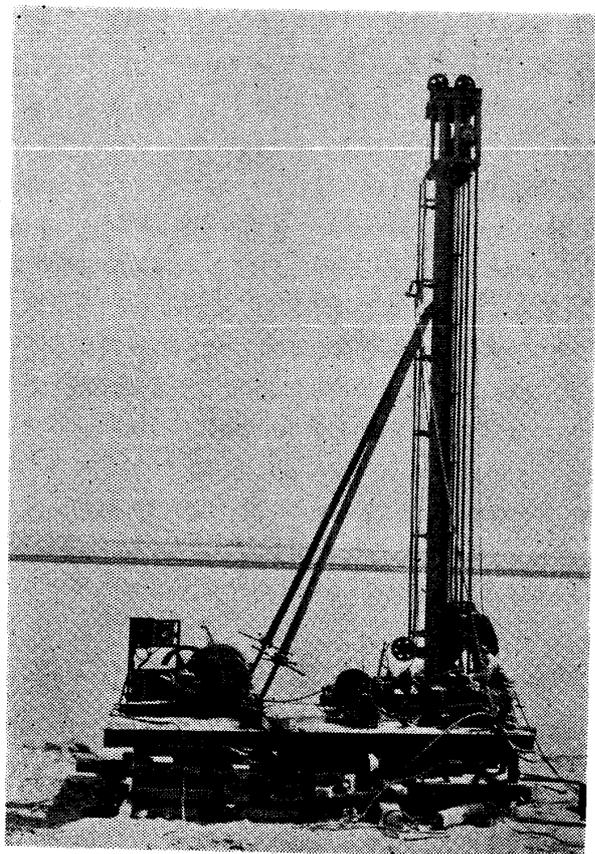
図-7



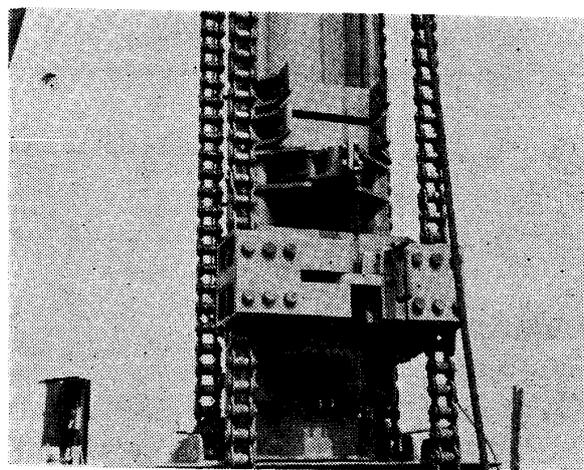
(a) cone test 機



(b) 試 験 用 足 場



(c) 同 上



(d) cone test 押込部

図-8

報 文・論 文

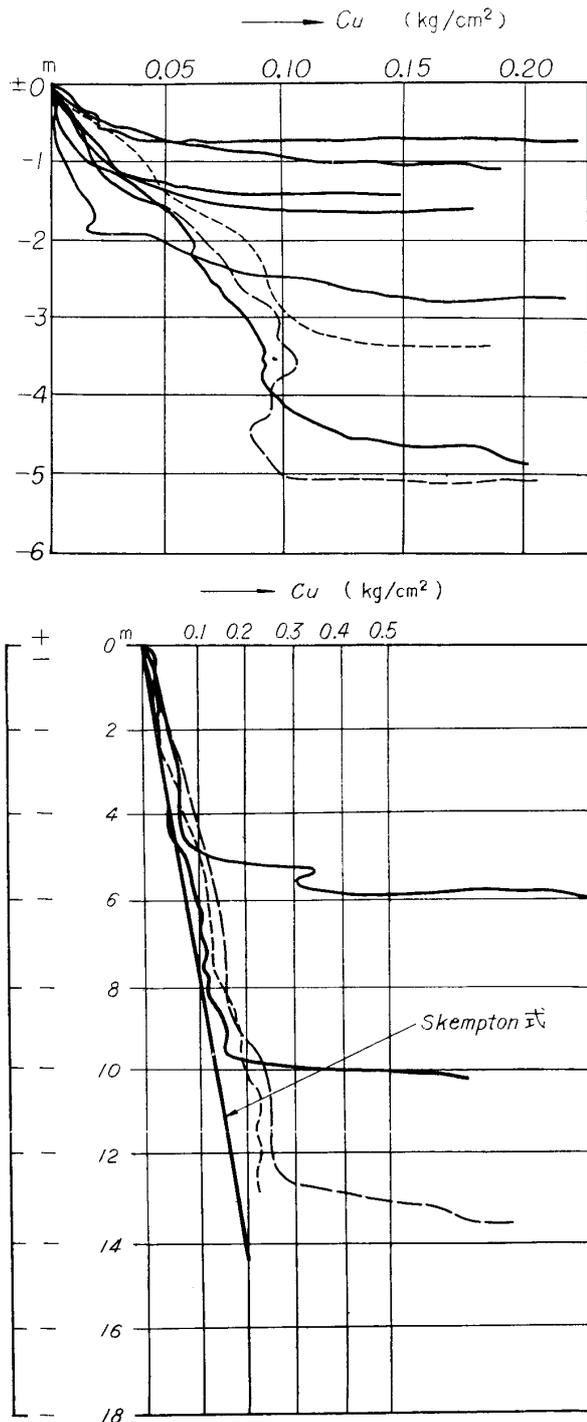


図-9

が推定される。

$S_f > 2$ の粘土において $q_c < 10 C_u$

$S_f < 2$ の粘土において $q_c > 10 C_u$

この場合の鋭敏比 S_f は vane test または cone test より求めた鋭敏比であることに注意しなければならない。

上記の結果にもとづき、海底軟弱粘土層の cone test 結果より求めた粘土の現場せん断強度を 図-9 に示した。図-9 の示す結果によると粘土層のせん断強度は深さ(有効土かぶり圧 P_o) に対し一ように増加し、強度の偏差は余り大きくないことが分る。この点において q_u の試

験とか vane test に比較して、cone test の結果はせん断強度決定に優れた方法であることが分った。

3. 現場せん断強度とスベリ安定計算

1) 現場せん断強度

以上の各地、各種の現場せん断強度 C_u の測定結果より総合すると Skempton, Henkel の C_u/P_o 法は軟弱粘土とくに $P_o=0$ に近い状態では小さすぎるようである。しかし Terzaghi のように $P_o=0$ のときに C_{uo} があるという考えも実的に余り意味がない。Skempton, Henkel の C_u/P_o 関係は日本のチュウ、洪積粘土においてよく一致した関係が認められるので、筆者は 図-1 点線で示したような C_u/P_o があるものと推定している。軟弱粘土の $P_o=0$ に近い状態の粘土のせん断強度測定は非常に困難な測定であるので、資料がまだ充分そろっていないが、今後とも測定を続け完全な結論に達するよう努力したい。

2) 現場せん断強度のスベリ解析への応用について

$\phi=0$ 法により現場せん断強度 C_u を使用する円弧スベリ計算において安全率が大きすぎてと断定するのは早計である。前述の Golder は $\phi=0$ 法で一軸圧縮強度 q_u を用いた結果が $F=1$ であるというのは偶然の一致に過ぎないと述べている。一般にスベリは progressive failure の過程をとることが多く、スベリ面全体に現場せん断強度が100%作用することはないからである。これはスベリの範囲が大きくなるほどその傾向が強くなる。そこで progressive failure factor というものを考えて安全率にこの factor を剰じたものが1になるときがスベリの限界を示すものとしている。

事実軟弱粘土層上の砂質土による築堤や盛土の場合、図-10に示したような破かいをすることが多い。この形は large swedish landslips における retrogressive slide によく似ている。スウェーデンのこの種のスベリは大きいために全体が1つの剛体のようにスベるのでなくブロック状に割れるようなスベリである。丁度軟弱粘土上の盛土の場合でも軟弱粘土と盛土の剛性の相異によりほとんどのスベリがブロック状に割れる。このようなスベリは全く progressive に起るものであるので決してスベリ面上に C_u が 100% 作用するものではない。

一方軟弱粘土上の小規模の剛性物体、例えばタンク、

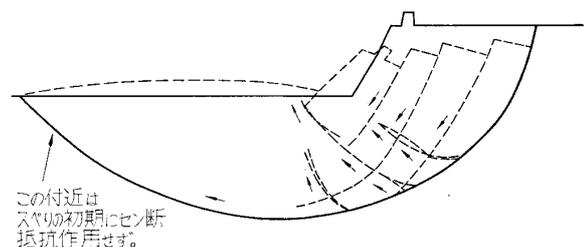


図-10

サイロのようなもの、転倒に関する安全率は現場セン断強度をそのまま使用して差支えない。

したがって現位置における正確な undrained shear strength を求める問題とスベリの安定計算を行なう問題は全く性質の異った問題である。そしてスベリに対する

討 論

齊藤（国鉄鉄道技術研究所）

ヒズミ面の測定はどうやって押さえられましたか。

竹中（発表者）

築堤破壊実験として行なったものがないので、スベリ面の直接測定はやっておりません。そこでスベリ後のヒズミ面の測定をレベルで行いますと、地盤のふくれ上りが場合によってはひじょうに先まで延びていることがあります。この部分はほとんどセン断変形がありませんので地中のスベリ面を線で表わすことができないことがよくあります。その結果スベリ面が非常に先の方までのびているように見えることが多いようです。

齊藤（国鉄鉄道技術研究所）

スベリ破壊後のコーンテストによる強度測定はされましたか。

竹中（発表者）

コーンテストを行いますと、ある程度スベリ面のところでセン断強度が低下していなければならないのですが、私が測定した 2~3 の例ではスベリ発生後 5 日後の測定結果でスベリ面らしいものはありませんでした。測定はスベリの築堤側に近い部分とスベリの先端の付近で行いましたが、スリップゾーンと思われるようなものは見当りません。これらの結果はまた別の機会に発表する予定であります。

宮原（農林省農業土木試験場）

コーンでやりました場合に、上の方で強度が特に弱くなったということは。

竹中（発表者）

全体が弱くなるように思います。

宮原（農林省農業土木試験場）

ある面では、強くなる。

竹中（発表者）

図-10 の右側のクラックやスベリの錯ソウした部分では変化があるが、左側の方はほとんど変化がないだろうと思います。

宮原（農林省農業土木試験場）

私が午前中にお話したことと関連があるのですが、私たちがやりました実験ではスベリ面のかなり先の方でキ裂がみられたのですが。

竹中（発表者）

安定計算の問題は現実のスベリの現象を正確に分析した上でなければ議論できない問題であろう。

最後にこの研究にあたり八幡製鉄株式会社堺建設本部の御援助を賜った事ならびに鹿島建設株式会社の方々の御協力に対し心より感謝致します。

モデルテストではスケールが小さいので相似律の関係から、粘土の攪乱による強度回復が充分であればキ裂が発生してよいわけです。同様に日活国際会館のケーソン刃先のスベリの場合には急沈下するときのスベリがハッキリ石灰の柱のずれとして表われています。このようにスケールの小さいスベリでしかも粘土が剛なもので加圧されると全面セン断が起り易いでしょう。このような場合と大きい築堤のような場合は軟弱粘土中のセン断面の発生状態は余程違うものと考えられます。

宮原（農林省農業土木試験場）

実は私も現場で実際にケーソンについてやったことがありまして、いろいろの方法でスベリ面の確認を、——たとえば石灰分を入れたりして——やってみたのですがあまりうまく行きませんでした。

竹中（発表者）

私もスベリの断面を集めましたが、いつも困りましたのはスベリの先の方が全然わからないことでした。

宮原（農林省農業土木試験場）

もう一つ質問したいのですが、コーンの形で 60° と 90° との比較はいかがでしたか。

竹中（発表者）

小型のでは出ませんし、大型のは 60° を作ろうと思っていたのですが先端加工に時間がかかって、残念ながら測定期間に間に合わなかったののでやっておりません、先程の円板の理論から行きて 60° より 90° の方がいいだろうということから、90° しかやっていないんですが。

宮原（農林省農業土木試験場）

実は私のところも大平君がやってみたんですが、載荷板下部が剛性な場合クサビ形のプリズム効果というようなものが考えられます。ところが、上がベンディングする場合角度が明確に出ないのでちょっと困ったのですが、90° よりもう少しとがっている場合が多かったような気がします。

竹中（発表者）

これは一軸圧縮試験の破壊スベリの傾きが 45° よりたっているということと同じことで、応力がある軸に平行でなくて分散しているときにおこります。コーンテストのコーン先端を 90° にしたのはむしろ粘土の破壊を強制的に理想状態に近くなるようにするためにしたもので

討 論

す。

宮原（農林省農業土木試験場）

角度を云々しましたのは角度と径の問題はたしかにあるわけですが、実際に調査をやりますとコーンの径に対してロッドの径が小さい場合、たとえば半分位ですと軟弱地盤層だけのときはいいんですが、途中で狭雑物などがありますと戻すときに全然抜けなくなるんですが。

竹中（発表者）

そういうことがありまして、**図-7**、**図-8**にあるような大型の機械を製作しました。そしてヴェンテストとの関係を求めておきますと、あとは同じような地盤で、新しく決めて調査をしなくても、その関係を使っていけばいいだろうということによってやっております。

宮原（農林省農業土木試験場）

実は、私たちがそういうことをやっているわけです。ボーリングテストをなるべく減らそうという意味で、貫入試験をやるわけですが、軟らかいというだけの場合にはどうしても、コーンは大きい方がいいし、砂層が介在しまして、その層が薄いということが推定される場合にはそれを抜きたいと思ってやりますと、今度はあと回収にひまがかかると。潮がやってきたりしますと作業がますます困難になるというような次第で、角度をもう少し 60° とかいう形の手頃のものがあるんじゃないかということで、お聞きしたわけです。

大平（農林省農業土木試験場）

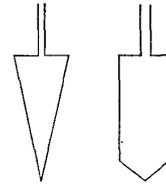
図-6 についてお伺いいたします。先端角が小さくなりましたときに、スベリ面の中心が下の方に下りて来ないと実際と合わないという点、問題にならないでしょうか。

中森（大阪市港湾局）

産業試験的なスベリ面について、実は私、前に考えたことがあるんですが、一番太いところの断面積のはしにモーメントの中心が行ってまいりますけれどもそうしますと先端角が細くなった時にスベリ領域がうんと広がって来るわけなんです。そうしますと実際とよく合わないということが懸念されますが、その点いかがなものでしょうか。

竹中（発表者）

理論的に **図-6** のようなスベリ面が発生するのは先端角が 90° 以上の鈍角のときであって、 90° 以下の鋭角のときは **図-6** の関係は成立しません。コーンの先端が非常に鋭角になり細長いコーンになると、コーン周囲部に働く切線摩擦力的によって、コーンの押込抵抗は大きくなるでしょう。この相違は先端角が 60° と 90° の場合実用的には殆んど差異はないようです。そして公端角が非常に小さくなって細長いコーンになると**図**のようなこれと等価な円錐を考えてやると、ひじょうに先端がとがった



場合と同じことになると思います。

中森（大阪市港湾局）

このとき私よくわからないのですが、先端角が細つたときに、このスベリの中心が下に落ちて来ます。これはちょっといい方が悪いのですが、角はそれに従いましてスベリ面の傾斜が違って来るのだらうと思います。

竹中（発表者）

おそらく、こういう場合は円弧ではなくて細長い円筒形のセン断領域で破かいがおきて、コーンの圧入はこのセン断抵抗に抗して圧入されると考えた方がよいでしょう。

中森（大阪市港湾局）

ありがとうございます。コーンの面というのはなめらかな面と考えていいわけでしょうか、それともそこにはセン断抵抗が当然働くと考えた方がいいのでしょうか。

竹中（発表者）

これはコーンの円錐部分の機械的仕上げに関係なしに粘土のセン断力は 100% 近く作用するものと考えてよいでしょう。支持力論で取扱ら支持板のスムーズとかラフとかいうのは思考実験上の問題であって現実の物体はすべてラフと仮定できるものです。ただしあくまでも正規荷重をうけた軟粘土であるという条件下においてのことです。

中森（大阪市港湾局）

その場合に、そこに溝とか、そういうものをきざんでより完全にセン断力を働かせるという考慮をした場合はどうでしょう。

竹中（発表者）

たしかに三笠君が土と物体との一面セン断でやったのはほとんど変らなかった。変らなかったということは、コンクリートや鋼においては粘土との摩擦面はラフと考えていいと思います。

中森（大阪市港湾局）

もう一つ別の問題ですが、ベンテストが大きく出るという理由の一つに軸心がかたむいているような場合に、セン断面といいますか周辺面が円筒型にならなくて、より大きな面であるということは考えられませんか。

竹中（発表者）

軸心が傾くということは、実は昨日のサンプリングの時に、その実測の結果あったのですが、特にロッドが非常に長くなって二次とか三次の坐屈した場合、三次坐

屈をしたときでもその傾斜角度が 10^{-2} ラジアン程度であってほとんど問題にならないぐらい小さな角度です。だからベーンテスターで取付けが曲っていなければ吊り下げられた状態で垂直に入って行くと考えていいんじゃないかと思います。

中森（大阪市港湾局）

ボーリングの穴が真っすぐの下っている場合はそれでいいと思いますけれども、傾いて下っているような場合は考えなければいけませんかと思いましたが。

竹中（発表者）

そういうような場合はケーシングあるいはボーリング孔に対し相対的にベーンロッドが傾斜していなければよいのですが、ボーリング孔は軟弱地盤中では余り曲らないものです。

山田（国鉄鉄道技術研究所）

図-2 と 図-9、これは大体同じような地盤でやられたデータですか。

竹中（発表者）

図-9 は大阪堺港の沖の方で、図-2 は宇部の干拓地であって、場所は違っていますが、粘土の土性としてはどちらも含水比ならびに LL, PL が殆んど同じです。

山田（国鉄鉄道技術研究所）

図-1 のコーンでやられたところでサンプリングがなされて、一軸圧縮強度などのテストはおやりになりましたか。

竹中（発表者）

海上でして、水深が満潮面から約 11 メートルぐらいになりますので、乱さない試料が船の上からですとちょっと取れないような状態でありましたので、ここではま

だやっております。

山田（国鉄鉄道技術研究所）

ベーンと q_u ではベーンの方が大きくなるということでしたが、これは摩擦角の影響を考えますと、たとえば一軸圧縮強度をやる場合に、三軸のアンドレインテストみたいに、有効荷重まで再圧密さしておいてそのままの状態ですると値が近くなって行くような気がするんですけども、そういうことは……。

竹中（発表者）

摩擦角がありますと、むしろ一軸強度の方が強くなってくるのではありませんか。

山田（国鉄鉄道技術研究所）

ですから有効荷重に相当するような荷重を加えて一軸試験を。

竹中（発表者）

これはおそらく内部摩擦角の影響ではなくて、サンプリング時のカクランの影響が大部分ではないかと思えます。粘土の試料を有効荷重まで再圧密を行い、三軸的にアンドレインテストを行いますと、理論的に考えれば同じ有効荷重をうけている地中でのベーンテスターより大きくならなければならないはずですが、事実コーンテストとベーンテストを同一地点で行いますと土質が小レキ細砂交りであって、内部摩擦角がわずかにある土中においてはコーンの押込み抵抗は非常に大きくなります。コーンテストとベーンテストの測定値が一致するのは $\phi=0$ 法が充分満足される土質の場合だけに限られます。そしてコーンテストの場合は内部摩擦角の影響が非常に大きくなりますが、三軸圧縮試験、一軸圧縮試験の場合もやはり同様に大きくならなければならないと思います。