

セン断抵抗を中心とした土質力学の諸問題

ほしの
星 埜かのう
和*

この表題を決めましたのが実はだいぶ以前のことで、第1回の研究発表会の講演としてふさわしくないような中身になるかも知れませんが、お許しを願いたいと思います。一つの話題を提供するというような意味で、今まで行なわれて来たことを一つ整理して、私の個人的な考え方を申上げてみたいと思います。どういうところに問題点があるかということの結論ですが、このセン断抵抗という問題は、土質力学のすべてを支配するといってもいいような根本問題で、簡単に結論の出るようなものでもありません。

土質工学会の中にありますセン断試験法委員会も、もう長いことやっておりますが、結論らしいものをサッパリ出しませんので、いろいろと非難されております。しかし、この種の試験法を JIS 規格のようなもので決めるということは、外国でもなかなかできておりませんし、すべての問題が解決するまで待っていれば、永久にそういうものはできないほど本質的なものを含んでいると思われまふ。やっていると、だんだん枝葉に走って行くような傾向がみられないでもなく、これも注意をしなければならぬことかと思ひます。いろいろな面での問題点があり、理屈の上でこういうことがよろしいということでも、それが実際に実行できるか、今までどれぐらいのレベルで実際の測定が行なわれているかなども考慮に入れなければならないという考え方で、最近は一斉試験をお願いし、各地にもいろいろご迷惑もかけました。その結果を見ましても、また問題点がいろいろ出てきて、土質力学の理論的な問題というよりも、むしろ計器の精度の問題、製造上の問題などにすべて絡んでくるような状況です。

もともと、私が土質のことに関係したのは 30 年ぐらい前であり、その当時から比べて、一体どれだけセン断抵抗に対するわれわれの知識がふえているかということ振返ってみても、必ずしもそう楽観は許さないと思われます。私が初めて土質のことをやることになりましたとき、山口昇先生にご意見をお伺いしたことがあります。その時先生が言われたことは、モールダイヤグラムを書いて c, ϕ を決めるのに、圧縮試験と引張り試験

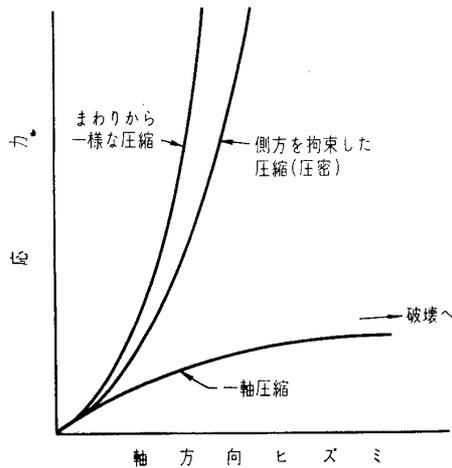
をやれば、二つのモール円が書けるので、それから c, ϕ を求めてはどうかというセッションがありまして、私もその気になり、いろいろと考えてみました。結局、そのことはうまくいかなかったと思います。今日考えますと、それだけでは問題が解決しないし、土の引張り試験は非常にむずかしいわけでありまふ。その当時の教科書などには、引張り試験をやる方法が書いてあったと記憶しております。それは、ちょうどモルタルの引張り試験のようなもので、両方にコブを作っておいて引張り試験をやるのが可能であるように書いてあるわけだ。実際にやってみましても、決してそれがうまくいくわけはありません。それから c, ϕ らしきものが出るというようなことはちょっと考えられないのですが、おそらく山口先生も、そのことに相当疑問を感じておられまして、こういうことをやってみたらどうかというセッションをなさったのではないかと思っております。

それ以来、この土の力学の問題について私なりにいろいろと考えを変えて来ました。実験室の中でまず手はじめにやりましたことは締固め試験であります。今日からみると、はなはだ初歩的なことではありますが、それとセン断試験なり力学試験とを組み合わせると締固め効果というものを判定しようというようなことを試みまふ。わが国でやりました割合に早いほうではないかと思っております。

そのような実験結果から、土のセン断抵抗というようなものがどうあるべきか、いろいろな試験条件、あるいは現地の条件などによってどう変わるか、またそれに関連して支持力問題などを少しつづいたわけでありまふ。土の変形というものが与える試験条件、たとえばまわりから一様な圧縮を加えると、これは一番単純な応力条件ですが、そのように全く静水圧的に加える条件のときにどう変形をするかというカーブが普通どんな本でも書いてあります(図一1)。それから、それに割合近い条件で一軸的な圧密をする時に横方向の変形はなく、軸方向にどう変形をするかということも多くの圧密試験などでデータが出ています。いずれにしても破壊方向にはゆかないで、だんだん圧密ないし圧縮が進んで固まってゆき、変形しにくくなるわけですが、その二つの曲線

* 東京大学教授 工博

特別講演



図一 応力と軸方向ヒズミの関係

まわりから一様な圧縮を加えたとき、および側方を拘束した圧縮(圧密)のときは、軸方向ヒズミはだんだん生じにくくなり土は固まっていくが、一軸圧縮のときは軸方向ヒズミは増大しつづけて、破壊の方向に進む。これらの曲線間の相互関係を明らかにすることは、きわめて重要と思われる。

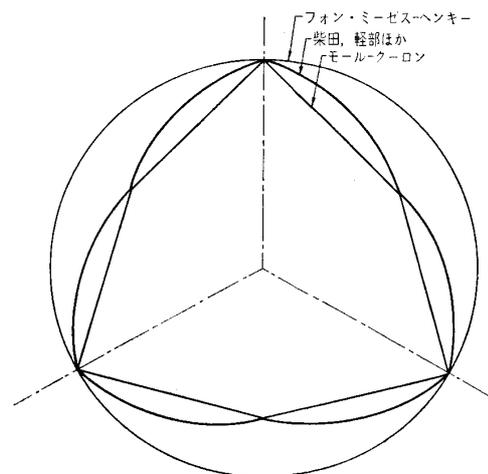
の相互的な関係はどういうものであろうかと考えるとき、弾性理論から最初のコウ配が出るというようなことがいわれるわけで、その弾性理論を最初のところに適用すると、これはもう動かすべからざる事実であるかのごとく私どもは習って来、またそう信じていたわけです。

それから、普通の一軸圧縮試験をやりますと変形の方法はむしろ逆になり、だんだんと破壊の方向へ進んでしまう。ストレスストレインカーブを書きますと、前の二つは上へ立ってきますが、一軸圧縮試験では逆方向に向いて破壊のほうに進んでしまう。これらの三つの間の関係、これだけを考えても共通して説明できるような理論というのは、ごく初期のところの弾性条件のところだけであり、それから先については、実はまだそのころはなんにも説明するものはなかったように記憶しています。それらの間のもっと複雑な条件がいろいろ基礎支持力の問題などを考える場合には起こってくるわけで、それらを弾性理論から始まって説明しようというのが、われわれ最初の立場であったわけであり、ほかになんにも拠るべきものがなかったわけであり、

そこで、弾性理論というものを前提にして、破壊に至るまでの経過を説明するようなものを何とか組み立ててみたいということで、たとえば金属の関係の本とか、岩の関係の本とかを読みますと、もうすでにその当時三軸試験なども行なわれていたと思います。金属についてたくさんの破壊の理論などが出ていることがわかりました。その中で、いわゆるフォン・ミーゼスの破壊理論というのが実験の結果からみて、非常によく合うというデータが出ていたわけです。このフォン・ミーゼスは、もうすでにご承知のように、三つの主応力を全く対等に考えるわけであり、破壊の時に、やはり中間主応力は

それなりの働きをするんだと、こういう説明になるわけで、中間主応力がぜんぜん働かないというモール・クーロンの考え方よりは、すぐれた考え方であるという気がしまして、これを基本に考えて土に持ってくることを試みました。ただ、土の場合には、いろいろな条件が違いますので、いわゆる破壊面と申しますか、せん断が起こる面に直角方向の応力が関係するという式もいろいろあるわけで、それを土のほうに持ってきて、その間にエネルギーのようなものの考え方を入れて何とか説明をつけてやると、ある程度形がついてきて、先ほどのカーブをある程度追跡ができる。それで、これを破壊まで持って行ってしまうということ、大変乱暴なことではたけけれども、その間にいくつかの、結局は四つ位の定数をもちこみ、式の上での追跡を試みたわけであり、

しかし最近、ことに戦後三軸試験機が試作され、いろいろなタイプのものが使われ、研究されるようになりました。この方面では柴田・軽部の両氏が特殊な中間主応力のいろいろ変えられる三軸試験機をお作りになって、そのデータを出しておられます。これと同じようなことを外国の人(カークパトリック、コールマンの討議参照)がやっておりますが、大体同じような結論が出ております。破壊の条件としてはモール・クーロンに非常に近いが、少し違っているというような線が出ております(図二)。これもすでにご承知のことと思います。したがって、私が最初考えたようなフォン・ミーゼスの破壊曲線は現実には適用できないことがはっきりしています。したがって、私が従来考えてきましたような理論は、ここで修正されなければいけない。場合によっては否決されなければいけないという立場に追い込まれたわけであ



図二 破壊条件を示す包絡線図

正八面体面上の応力比 τ_m/σ_n をプロットしたもので、フォン・ミーゼス-ヘンキーではこの比が一定、モール-クーロンでは中間主応力の影響がない。

柴田・軽部ほかは中間主応力が影響するが、モール-クーロンに近いことを示す。この線は τ_m が一定で σ_n のみが増加する場合にほぼ一致している。

ります。これをどう考えてゆくかということが、さしあたって私個人の考えております非常に大きな問題であります。ぜんぜんフォン・ミーゼスの考え方は成り立たないと考えるか、あるいはそれが何らかの形で調和されるものであるかというようなところに一つの大きな問題点があるのではないかと思っています。実際われわれが三軸試験機を使って破壊試験をやる場合に、私どもが理論で取扱うような破壊の仕方をするわけではないわけです。理論の破壊というのはどんなものかと申しますと、スベリ面ができて破壊するというような考え方で、実は少し矛盾するわけで、試験体の変形の状態を、一様な応力分布のもとに、一様なヒズミをするという条件を入れており、これは実際にはかなえられていないわけです。必ずどこか局部的な大きな応力が起こり、そこが破壊を始め、破壊が進んで最初の状態ではどこかにスベリ面ができるか、あるいは全体が膨れ出すか、その膨れ出す条件というのが、試料の上下の部分とまん中辺では違っています。これは目で見て明らかであります(図-3)。

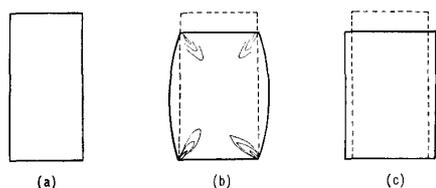


図-3 三軸試験における供試体の変形と破壊を示す図

(a) に示す供試体に軸圧を加えたとき、多くは(b)のように変形して、局部的にスベリ面が生じ、ついにはせん断破壊に至るが、そのときまだ破壊していない部分やむしろ圧密を起こしている部分などが共存している。応力、ヒズミ、体積変化、間ゲキ圧などが一様に分布していないことは明らかである。測定はその一部あるいは平均的なものを求めているにすぎない。フォン・ミーゼスの条件は(c)に示すように応力、ヒズミが一様分布していることを前提としなければあてはまらないであろう。ただ(b)のような変形破壊をする場合でも、供試体内部の一部、それがたとえばスベリ面の上にあっても、まわりの応力、ヒズミ、を考えると、フォン・ミーゼスの条件が成立することはありえないことではない。

三軸試験で求められる応力-ヒズミ関係は、ごく初期のまだ破壊が起こらない範囲でのみ正しいといえる。

そこで、モール・クーロンの破壊条件はスベリ面のようなどころでの条件であって、実際には少し違っている。その違い方にもいろいろ問題があるわけです。なぜ違うかということを確認しなければいけないわけですが、破壊というものが、そのように起こるということはフォン・ミーゼス理論の中には入っていないように思われます。そこで、両方が矛盾するものか、あるいは、何らかの形でつながっていくものであるかというところが一番の根本になる点ではないかと思われます。これはいろいろな研究においても、従来やかましくいわれているところでもあります。間ゲキ圧を測定して有効応力を計算で出すといっても、今の破壊の条件というものが、スベリ面における破壊条件であって、試料全体が破壊してい

るとは考えられない。局部の破壊の条件が全体を支配してしまうんだということになると、破壊していない部分で起こっていることとコミにして計っているわけです。体積変化や上下のヒズミを計るとかいて、その計り方の精度を問題にしてもスベリ面で極端に大きな変形を起こして、変形というより目で見てもスベリ面がわかるぐらいですから、粒子と粒子とは全く初期の位置からはずれて動いてしまった状態と思われます。そういったものと、まだジワジワと破壊の前の状態で動いているところとを全部コミにして計って、ヒズミはいくら、体積変化はいくらというようなことは実はあまり現象的には意味がないように考えられるわけであります。したがって、将来はやはりこのスベリ面付近でどういうことが起こるのかをはっきりさせて行く方向にわれわれの研究が進んでゆかなければいけないというふうに思っている次第であります。

間ゲキ圧の測定にしても、われわれはスベリ面における間ゲキ圧を計っているかどうかということにはかなりの疑問があり、その可能性は今のところほとんどないのではないかと思われます。砂の場合、割合に一様な間ゲキ圧にするのはゆっくりした試験によって可能だと思われれます。それでもスベリ面では変形がどんどん進んでいるような状態が多いわけで、運動状態にあるようなスベリ面のところで体積変化なり、間ゲキ圧なりがわれわれが測った平均的な値あるいは試料の上下で測った値と直接つなぎ、それで言々ということはかなり乱暴だという気がします。

最近いろいろな形でせん断試験の研究が画的に進んでいるということを申してよろしいと思います。中間主応力の影響などについても、かなり決定的なことがいえるようになって来ております。イギリスのヘンケルあたりがやりました実験結果からは粘土がオーバーコンソリデートされた時の変形状態、間ゲキ圧の発生状態というようなものもかなりきれいなデータが出ており、これらは私どもが現象をいろいろ考えてゆく上にきわめて重要な資料であると思われれますが、ただいまのような本質的な問題になると、やはり疑問を感ぜざるを得ません。もちろん工学的な意味からいって、平均値で十分役に立つ場合があるわけですし、また当分そういうものの測定が進歩する見込みがないとすれば、われわれはいろいろな推理を加えながら実際の問題を処理してゆくよりしょうがないという立場に追い追まれるわけであります。この前柴田・軽部両氏のご発表になりましたデータを拝見しましても、比較的初期の応力状態といえますか、たとえばまわりから一様に圧縮する場合には、かなり先のほうまで簡単な法則を立てると追跡することができ、間ゲキ圧の測定でも、体積変化の測定でもかなりの精度をもっ

特別講演

て予測できます。これは一番簡単な場合ですが、そういったセン断的な力が加わる場合でも、比較的初期の部分については弾性理論がそのまま適用できない面があるけれども、それを多少修正するならばある程度追跡することができる。しかも初期のころには大体中間主応力の影響はほかの応力と対等にそれに加わっていると考えてよいようなデータになっていると思います。したがって、初期のころには三つの主応力を対等に扱って考えてゆくと、私が提案したいのは正八面体応力という考えで、それに対してどういふ変形と体積変化が起こるかという分析をしていかなければいけないと考えるわけです。またそういう方向に進んでいることは確かだと思われまふ。大体人々の考えることはある時点に至りますと、同じようなことを思いついて、それがにわかにならぬとゆくといったようなことが見られるように思います。最近の三軸試験結果の表示は、いわゆるレンドリックダイアグラムというふうなもので、全く私が考えている正八面体応力の表示と同じといってもよく、ただスケールがちょっと違っております(図-4)。レンドリックダイアグラムを $1/\sqrt{3}$ すると、いわゆるスペースダイアゴナルが3主応力の等しい場合の応力の大きさを表わし、それに直角方向が正八面体面におけるセン断応力を現わして、そういう図をみんな最近では使い出しております。主応力を

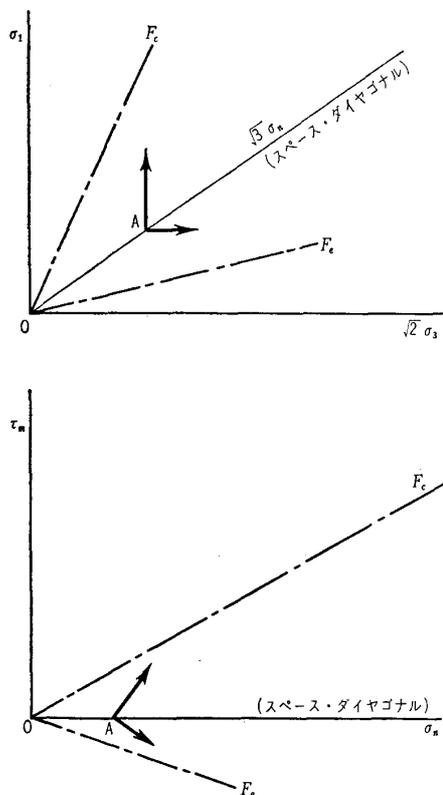


図-4 レンドリック応力図と正八面体応力図との関係

レンドリック応力図を $1/\sqrt{3}$ 倍して座標軸をまわすと正八面体応力図になる。正八面体応力図は体積変化やセン断ヒズミと関連させて用いることができ、応力-ヒズミ関係の物理的意味をはっきりさせる利点がある。

先に考えて、それから出発すると、主応力の物差をそのままとった図がいわゆるレンドリックダイアグラムになるわけです。これを正八面体応力のほうに切り換えて考えると、 $1/\sqrt{3}$ にして、そのままの縮尺で書き、間ゲキ圧の影響でもなんでも、そのままの物差で入れていけばよいわけですから、はなはだ使いよい形になります。もう一步進むとおそらく正八面体応力でみなさんがお考えになるようになるものと思います。

初期の状態では、3主応力が同じような働きをして土が変形をする、ヒズミを起こすという状態から、だんだんと破壊のほうに近づくにしたがって、モール・クーロンの条件に移してゆき、あるところで、おそらく最初からそういう傾向が認められるかと思ふけれども、スベリ面が発生します。発生する前には、おそらくその付近におけるヒズミはどんどん大きくなる。簡単に申しますと、こんな図(図-3 参照)を書いたらいいかと思ふますけれども、はじめは比較的一様に応力が試験体の中に分布していて、3主応力とも同じような分担割合でヒズミを起こさせる、どれも差はないといったような状態から、どこか変形とヒズミの大きなところが出てきて、最初に破壊が起こり、だんだんと広がってゆく。そうするとストレス・スレーンカーブの、それが一番最初から起こるのか途中からかわかりませんが、最初のへんは比較的3主応力が平等に働くという考え方で説明ができます。これから先は、ある部分はまだその継続で、3主応力が同じウェイトを持っているのかも知れませんが、ある部分においてはもうすでに破壊が起こってしまっている。そうすると、この条件がモール・クーロンで支配されることになり、最後にはこれがすべてその破壊の条件を支配するというようになって、一番最後の条件はモール・クーロンで支配される。このことはヘンケルあたりがやっております試験データからも確認ができるわけですし、柴田・軽部両氏の試験もやはりそういうふうになっております。したがって、どの部分も初めと同じような条件で変形して行き、局部的な変形破壊が、もし起こらないような試験法を考案することができたとすると、どういふ結果になるであろうかということが、非常に興味のあることだと思われまふ。今のところ、そういうことがほとんどできないのですから、最終的には、どこかで局部的な破壊を引き起こさざるを得ない。また実際の現象は、必ずといっていいように、どこかに局部的な応力集中が起こって破壊が進んで行くわけです。実際現象を説明するとき、最終的な状態だけを考える場合は、今のいろいろな試験結果から結論づけまふすと、モール・クーロンよりも実際には少し中間主応力の影響が出るような形になっておりますが、それは無視しても安全側にあるわけですから、モール・クーロンでよいのでは

ないかと思ひます。その中間段階において、たとえば破壊強さの半分ぐらいのところまでは、あまりこういう影響を考えないでもいいというようなことがわかれば、この辺までは、3主応力を平等に考えたような思想で間ゲキ圧や体積変化を計算したりしてもいいように思われます。しかしながら、その限界をどこにとるかは、非常に大きな問題です。たとえば半分にしかとれないということになると、設計のできないものがたくさん出てきて、それでは困る、もう少し高いところまでなにか法則がわかるようなことを考えなくてはいかんということになると、もっとつき進んだ研究をして行かなければいけないと思ひます。

そこで、実際に応力状態と変形状態とをつきつめて行けば破壊の現象がつかまるかという、これはきわめて素朴な疑問ですが、スベリ面の発生条件といったようなものは一体どういうものかということを知らなければなりません。コンクリートの供試体などでははっきり加圧面に接する隅角部からスパッとこわれるようなものが見られますが、土の場合には必ずしもそうではなく、スベリ面がはっきり確認できない場合もあり、変なところにスベリ面ができると、全体が膨れ出すような形でこわれたり、いろいろなこわれ方をします。それが本質的なも

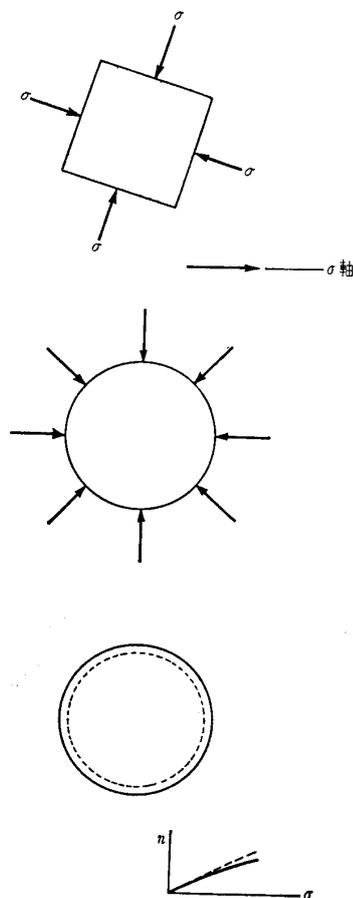


図-5 一様な圧縮(液圧) σ をうけたときの、応力分布と体積変化 n の関係を示す図

土が均質なときはヒズミはすべての方向に一樣に起こり、圧縮がすすむにつれて体積変化は生じにくくなる。

のであるか、あるいは荷重のかけ方が狂っている、方向が曲っている、モーメントが加わっているとかいったようなことが、そういうことに影響するのか、その辺のことは、はなはだあいまいな状況にあるように思ひます。

スベリ面のことについては20年か30年近く前に最上先生あたりも相当関心を持たれて、いろいろと考察をしておいでになり、発表はなかったかと思ひますが、われわれ、その中身をいろいろ聞いて議論したこともありますが、はなはだわかりにくく、どちらかという、われわれ、実用的にはスベリ面というものははじめから仮定してしまい、安定を計算するというようなことをやっておるわけですが、いろいろ条件がむずかしい場合には実験をやってみて、土圧の問題にしても大体この辺にスベリ面が出るんだということから議論を始めてしまい、なぜそこにスベリ面ができるかということの説明は、はなはだあいまいだと思ひます。これが実は非常に本質的な問題じゃないかと思ひます。これが実は非常に本質的な問題じゃないかと思ひます。スベリ面ができないような変形というものはい体可能かどうかということも、大きな問題として、スベリ面ができない場合に、ものがこわれるというのは、どういふこわれ方であろうかということも考えてみなければならぬ。それで、応力が生じて、その試験体なり、土体の一部が破壊していくという場合に、まわりから一樣な圧縮、たとえば球みたいなもの、あるいは二次元の場合なら円形面を考えるとかしますと、このまわりに一樣な圧縮が加わる場合はこの試料がホモジニヤスで、方向性を持たないということであれば、同じ円なり球面ですと小さくなっていくと考えられますが、せん断が加わると、形が変わって行きます。純粋せん断といわれるのは、面積あるいは体積が変わらないという条件下で変形していくということになります。純粋せん断で実際にはダイレイタンスーがあるということはわかっており、そういうものを無視して考えれば、せん断が加わると、こういう方向に圧縮と引張りが加わっているというふうにご考慮してよろしいかと思ひます。そのときの変形の状態は、大体長円に近いような形つぶれて行くと思ひます。これはゴム膜のようなものにマルを書きまして引張ると、全体としての変形は、まことに不規則な形になるが、小さくそれを区切ってみると、細かく書いた円はそれぞれ長円に近い形になるので、極限としては長円つぶれていくと思ひます。この長円も、変形の非常に多いところまで拡張するということになりますと、対数ヒズミみたいなものを考えれば、ずっとどこまでも伸びていくと思ひますが、そのときに純粋的なせん断変形であって、その面積あるいは体積は変わらないという形でいくと、どこまでもつぶれていくわけですが、どこか、そのつぶれ

特別講演

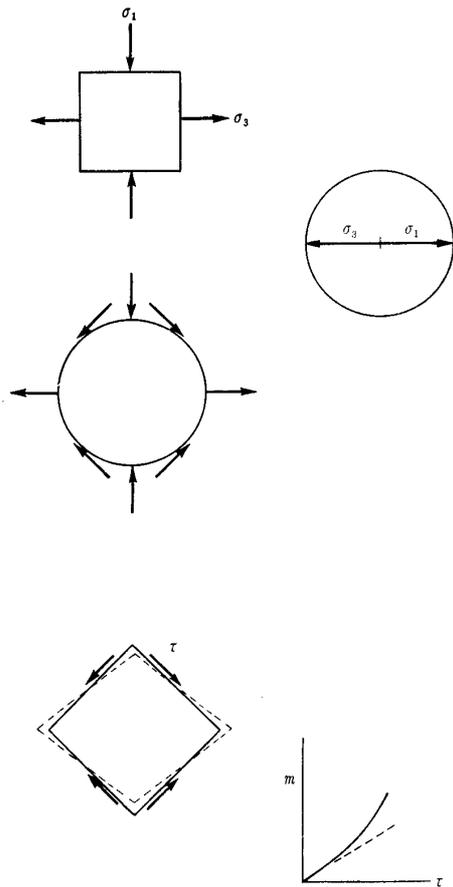


図-6 純粋なせん断 ($\sigma_1 = -\sigma_3$) をうけたとき (二次元) の応力分布と変形の関係を示す図

主応力軸と等角で交わる面上ではせん断応力 τ のみが生ずる。この増加とともにせん断ヒズミ m は増大し、ついには破壊する。

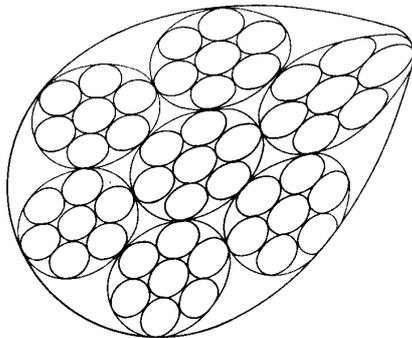


図-7 局所的な大きい変形の生じ方を示す図

ゴム膜の上に大きな円をかき、それに内接する小円を順々にかいてゆく。その一部を引張って、局所的な変形を与えると、大きな円は不規則にひずむが小円ほど長円に近い変形をする。スベリ面のまわりでもスベリが起こるまではこれに近い変形が起こっていると推定されるが、長円的な変形からスベリ面の発生には直接つながらない。その過渡的な経過はまだほとんどわかっていないといつてよからう。

途中の段階で、だんだん変形がしやすくなってこわれてしまう。そのこわれ方は、どんどんつぶれていくだけである角度を持った方向にスベリ面が発生するという条件が、この中へひとつも入ってこないわけです。ですからそこにわれわれが考えていることに連続性がなく、破壊が起こるといふことは、微小部分を考えても、これに、

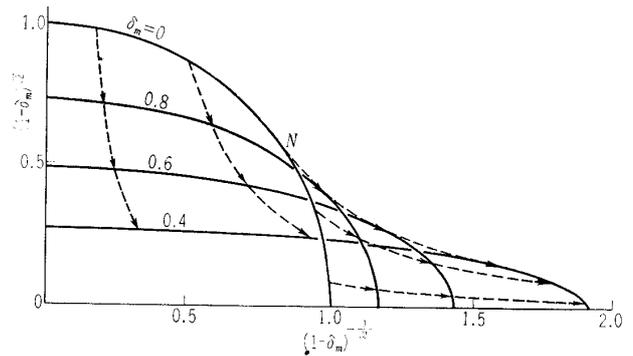


図-8 三軸圧縮条件のとき、せん断応力によって微小球面が長円体に変形してつぶれてゆく過程を示す図。このとき体積変化は生じないものとしている。

なにかある角度を持った方向にスベリ面が発生しなければいけないわけですが、それぞれの場所における応力状態というものを考えただけでは、このスベリ面の発生ということとは出てこないことになります。

そこで、このスベリ面の条件というのは、もうちょっと全体としての供試体の形を考慮に入れなければ、どの辺からスベリ面が発生してくるかというようなことはいえない。もっと実際問題で考えてみますと、荷重がかかって、スベリ面が発生すると (図-9)、われわれはかたんに、ここで主応力方向がどうだから、それから何度になったところにスベリ面ができるといったようなことをいってしまいますけれども、はじめの応力の分布を計って、主応力方向を決めて、それからスベリ面を出すということは、スベリ面の位置を決めるといふときに方向は決まるかも知れませんが、スベリ面がどうしてここに出るかということの説明にはならないように思います。

結局、やはり実際にこういう模型を作って、こんなふうにするべから、この辺がすべるんだろうといったようなことで実際の問題を処理しているにすぎないと極言してもよいように思います。こういう場合、これだけの応力条件から二つのスベリ面がかりに考えられるとして

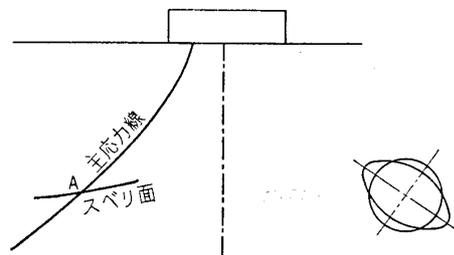


図-9 载荷された地盤内の応力、ヒズミ、スベリ面の関係
地盤内の一点 A における主応力線とスベリ面はある角度で交わる。可能なスベリ面は二つあるが、そのうちの一つだけが実際にスベリを起こす。なぜか。A 点の応力-ヒズミ状態を考えただけでは説明ができない。

A 点を中心とした微小円板 (二次元平面変形) または微小球面 (三次元) を右図のようにとりだしてみると、ヒズミは主応力軸に対称に生じ、長円形となってつぶれてゆくが、スベリ面が生ずるといふ条件は、この点だけをとり出して考えたのでは出てこない。

も、このうちのどっちがすべるかは、なかなか説明がつかないように思われます。応力条件だけを考えていくと、主応力方向にたいしてつぶれて行き、広がって行くということがあります。このうちのスベリ面が二つ可能だとしても、このうちのどっちが実際には発生してない。まあ、先ほど竹中先生からお話がありましたように、顕微鏡でみれば両方発生しているということになるかも知れませんが、実際にわれわれが目で確認できるのは、こういうスベリ面、こういう方向しかないというようなことが、まだ説明できる段階にきておらないように思われるわけです。この辺が、今後、十分つきつめていく必要がある点ではないかと個人的に考えているわけでご批判をいただければ幸いです。

それから、まだまだ土質関係で、将来研究していかなければならない問題は、われわれが考えている変形とか破壊の問題は多い。応力のパス、経過といいますか、これは単純に一方向的にふえるというような場合を取扱うことが多いわけですが、実際の荷重条件は、元へ戻ったりまた加わったりというようなことを繰返し、そのときに弾性的な性質を土は絶対に示さないといってもよいわけですから、この場合に、どういうことが起こるのかを、もう少し大ぜいの人がやるべき問題ではないかと考えます。

さらに進んで参りますと、時間的に繰返しの非常に多い場合というようなことになり、動的な外力を受けた場合の変形ならびに破壊の問題につながっていくわけであり、これは耐震工学上非常に重要な問題であり、今いくつかの学会が一緒になって耐震工学の研究グループを作っておりますが、その中で、始終土質の知識がはなはだもって遅れている、そこにいちばんの弱点がある、というふうにいわれるわけで、新潟地震を契機にそういうことがとくにやかましくいわれるようになりました。上部関係が下部に比べましたらいちじるしく進んでいるのに比べて、いかにも下部が遅れております。先ほど三野局長のお話の長大橋の計画の中にも、やはり下部構の問題が非常にあいまいなファクターをたくさん含んでおり、まだあまり土質屋さんが、決定的な意見をいう段階になってないのではないかと、少し情けない気がします。その一つ前の段階にしても、深い海底から信頼のできるサンプルをとるボーリングの技術にもいろいろ問題があるようにも伺っております。それらも、われわれ土質技術者として当然十分な発言をし、提案をするいいチャンスではないかと思われませんが、まだまだ遅れているというふうに始終ほかからいわれます。

それから、土質を非常にホモジニアスなもの、一様性のあるものというふうに考えて、取扱っていることが多いわけです。実際の地層は非常に複雑な成層条件をして

いるのが普通ですが、それに目をつぶってしまうと、細かい層はみんな無視してしまっていて、ここからここまでは同じとして勘定するというようなことをやっております。それもたしかに、うまい方法でしょうが、非常に極端な場合も多く出てきます。そういう場合に、やはり地層ごとに違う方向性を無視してはほんとうのことがいえないという場合がだんだん多くなってきております。それがとくにはっきりしますのが岩の力学といわれているもので、これにつきましても、ダム の崩壊などと関連して、最近非常にやかましい問題になったことはご存知のとおりであります。やはり、ほかの学会などとも共同いたしまして岩の力学研究委員会、あるいはシンポジウムのようなものが、今かなり盛んに行なわれております。外国では、今年はじめに岩の力学の第1回の国際会議というのがヨーロッパで開かれました。そういう関心が非常に高まり、土質の国際会議でも岩の問題を、このごろはかなりのスペースをさいて議論しているようになっております。

この岩の問題は、土にきわめて近い親類筋、あるいはもう少し大きな見方をすれば土の一部にすぎないといってもよいと思われるぐらい近い問題をたくさん含んでおりまして、われわれの従来持っております土質の知識を、そこへ導入するだけでも相当な成果があると思われ、土質の分野に岩の異方性を取入れた研究を導入し、おたがいに一つになってやるということに相当大きな成果が期待できるのではないかと考えられます。

この面でも土質関係の人に、岩の関係の人が相当期待をしているわけですが、残念ながらいささか不勉強ではないかと思われるフシがあります。岩の力学委員会を学会の中に作っていただき、研究をお願いしておりますが、異方性材料といったような問題だけではなく、地質学的な知識というものを十分この中に入れていかなければいけないのは当然と思われ、その地質学の知識を入れるということになると、外国文献はそのまま使えないことが非常に多く、日本独特の岩、あるいは岩の歴史が違う場所場所によっての特性があるということになり、やはりわが国独自の岩の力学といえますが、エンジニアリングジオロジーといったようなものにつながってくると思います。そういう方向の研究というものが、やはりもうちょっと進んでいかなければいけないように思われます。これは土質工学会として十分関心を持つべき問題であると思われ、

たいへん時間をとりましたが、セン断試験法委員会のことについて、少し触れたいと思います。今までいろいろなことをやりまして、疑問と思われる点を幾分でもつきつめるという方向に進んでまいりました。直接セン断試験についてもいろいろ実験をやり、これは主として都

特別講演

立大学の井上さんあたりのデータがものをいってるかと思えます。試験機の構造によって c , ϕ といわれるものが相当大きな違いを見せますし、構造上、わが国で今使われているものは必ずしもいいとは思われないというような結論が出ているわけでありませぬ。

このことはすでにご承知のことと思いますが、三軸試験につきましても、委員のそれぞれの職場で一斉試験をまずやり、それでどういうことが起こるかということを確認してみたわけですね。相当大きなバラツキがあり、そのバラツキの原因をたくさんの方から、一つ一つチェックしてみるのには容易ではないわけですね。まず個人差というものがあるのではないかとということで、一つの試験機を使いまして、それぞれの試験所、研究所関係の人が別々に試験をしたところが、個人差というものには比較的少ないということがわかりました。結局、誤差の非常に大きな原因は、どうも機械の特性のほうにあるのではないかとこのように考えられてきました。

そのほかに、使う試料にもいろいろ問題があるわけですが、これは、いわゆる標準砂を将来のことも考えて使うということに一応決定をいたしました。これは全国一斉の試験をお願いしたときに出てきたことですが、果たして標準砂というのは全国同じようなものであろうかという、非常に疑問を感じるようなデータが出てきたわけですね。たとえば真比重を測るとかなり違ったものがあり、フルイ試験では、その結果がまるで違っているものが出てくるわけですね。一体、同じ標準砂といっただけなのに幅があるものであろうかというようにこのことにも疑問を感じたわけですね。

フルイ試験のやり方につきましても、委員の中の方が2, 3 実験をして下さいましたところ、フルイのかけ方、人がかけるか、機械がかかるかというようなこと、それから時間、標準砂ぐらいですと、せいぜい5分とか10分というような時間でフルイ分けをおやりになると思いますがけれども、そんなものでは十分ふるいきれないで、2時間ぐらいの間はまだ変化しているということがわかってきたわけですね。

一体、試料が違っているのか、試験方法がまずいのかというようなことが、実は全国一斉試験をやったところではなはだ疑問になったわけですね。かりに試料は一樣だとしても、それを成型して試験体を作るところにたくさん問題があるわけですね、ある程度作り方を指定しましたが、それでも非常に幅があります。理屈から考えまして、初期の間ゲキ比というものをベースにして試験結果を整理しようということをご提案して、みなさんにもそれをご承認いただいてやっておるわけですが、初期間ゲキ比というものを計算して出すのに、技術上の問題、たとえば、体積を測るといったこともありますが、

真比重が違っていたり、締固めのやり方が違っていると相当違うということになります。それにしても、さっと砂を入れたという条件で試験するよう指定しておきましても、その値が相当な幅を持つわけですね。その中には計算違いというようなこともあり、多少修正もして、少しはまとまりましたが、それにしても、その幅はいちじるしく大きいものであります。

このようなことがあるのでは、われわれは同じ試料について同じような試験をしたということにはなかなかいえないのではないかとこのように、試料はできるだけ取扱いやすいものというので、いろいろ探しております。人工産の材料がよかろうということで、ガラスビーズなどを使って今実験をやっていただいておりますが、これも決してそう簡単なものではありません。ガラス玉を空中に置いておきますと、いつの間にか少しずつ固まってくるというような性質がありまして、なぜそうなるのかよくわかりません。

われわれ委員の間でやりました結果では、試験機の特性というものがあるようだから、全国一斉の試験をお願いしてみようと、相当権威のあるところをお願いしたわけですが、ちょっとショッキングな結果になりました。特例的と思われるものをいくつか除きましても、初期間ゲキ比に対して、セン断抵抗角（いわゆる摩擦角といわれるもの）をプロットしますと、間ゲキ比がだんだん小さくなると、つまりよく締まってまいりますと、摩擦角が高くなるという傾向は出ますが、この幅が、ひいき目にも $\pm 2^\circ$ はあり、セン断抵抗角は 40° 前後のところですから、1割はラクに違うということになるわけですね。私ども委員の中でやりましたデータをそれに重ねてみますと、大体この幅の中に入っておりますが、いくら、これよりは範囲が狭く、むしろ少し下側の辺に出ていると思えます。それもやはりひいき目に見て $\pm 2^\circ$ ぐらいの幅があるわけですね。

それらの結果から、三軸試験の機器の特性を支配するようなファクターがあることがわかってまいりました。それを一つ一つ調べてみようということで、現在やっておりますのは、結局計器に問題があるのではないかとこのように、検定をみなさん十分しておられますかというようなことを調べてみますと、もう何年にも前に買ったまま安心して使っておられる方が多い。いわゆるブルドン管は、われわれの試験目的にはそのままでは使えないものようですね。もともとは、本来普通に売っておりますブルドン管は、そういう細かい測定をするためのものではなく、大体圧力が 2 kg とか 5 kg ぐらいだから大丈夫だとかといったような、安全確保のためぐらいに使われているものようですね。精度からいっても、計量法で、これはよろしいという、判が押してあっても、わ

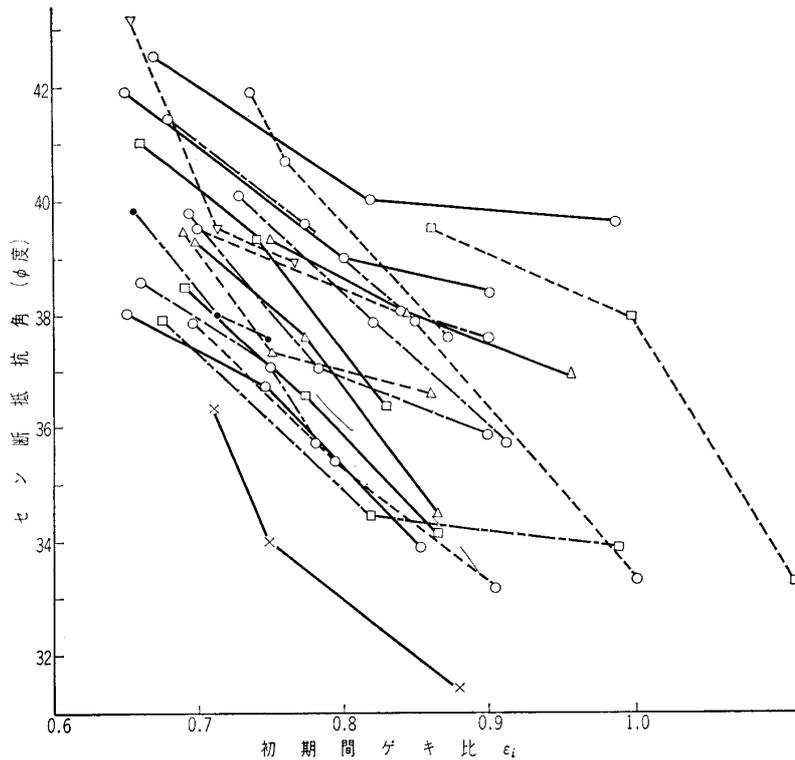


図-10 全国一斉試験結果を示す図(セン断試験法委員会資料による)

乾燥標準砂を用いて三軸試験を行なった結果から、初期間ゲキ比 e_i に対してセン断抵抗角をプロットしたものであるが、例外的なものを除いても、セン断抵抗角のバラツキは±2度ぐらいある。このバラツキは初期間ゲキ比の測定からくるものもあると思われる。初期間ゲキ比が減少するとき、セン断抵抗角が増す傾向はあきらかであるが、その傾きもかなりバラバラである。

われわれの測定にはどうも工合が悪い。ことに低いところではどうしても誤差が多くなりがちで、ふつう側圧を0.5kgの辺で計るということになると、非常にバラツキがありますから、低いところでの値が粘着力のほうに大きく影響するわけです。どうしても十分な補正をするか、自分で目盛りをしてやるか、あるいは低いところは水銀マンオメーターのようなものを使うべきであろうというようなことがだんだんとわかってまいりました。

それから、もう一つプルベイングリングですが、これも、はなはだもって頼りがないといえますか、やはり構造上好ましくないものがあります。プルベイングリングとダイヤルゲージとは組み合っているわけですが、プルベイングリングとダイヤルゲージとの相対的な関係は、きちっと固定していないといけないわけです。なにかほかに固定するようなものがくっついていて、それで機械類に取りつけるようなものは、そこに少しでもガタが出てくるともうぜんぜん違った答を示すというようなことが出てまいりますので、これも十分お気をつけにならな

いといけないと思われま。大体、土質屋さんには、機械を買ったらメーカーさんを全面的に信用しているのではないかと思いますけども、実は、それで機器の精度がどうも進歩しないというふうな面も考えられます。

もちろんそのほかにもたくさん問題はありますが、きわめて基本的な面においてすでに問題があるわけですし、その辺をやかましくいって、できないことはないはずですよ。おそらくわずかのお金で検定などもできると思いますし、計量法でも年にいっぺんは検定するのがあたり前だということになっているんだそうなんです。少なくともそれにあわせてわれわれはやるべきではないかと思うわけです。話題を提供すると申しましたが、はなはだ雑ぱくなお話を申し上げましたが、時間になりましたのでこれで終わります。

参考文献

- 1) 星埜和：土の突固め試験に基づく土質適性の判定ならびに施工基準設定の方針について、土木試験所報告 63号, 1941-10, (または土木学会誌 27巻2号, 1941-2)
 - 2) 星埜和：土のような塑性材料の変形と破壊についての基本理論, 土木学会論文集 3号, 1949-3 (または Proc. 2nd Intern. Conf. S.M.F.E. Ie-10, Vol. 1, 1948)
 - 3) 星埜和：基礎の支持力論, 第1報 土木試験所報告 75号, 1944-2. 第2報 土木試験所報告 77号, 1944-6. (または基礎の支持力論 コロナ社1946-12)
 - 4) 星埜和：土の力学における塑性の基本理論と三軸試験への適用, 土木学会論文集 21号, 1954-12.
 - 5) HOSHINO, K: A General Theory of Mechanics of Soils. Proc. 4th Intern. Conf. S.M.F.E 16/7 Vol. 1, 1957.
 - 6) HOSHINO, K: An Analysis of the Volume Change, Distortional Deformation and Induced Pore Pressure of Soils under Triaxial Loading, Proc. 5th Intern. Conf. S.M.F.E. 1961.
 - 7) 柴田徹, 軽部大蔵：粘土の強度に与える中間主応力の影響, 第19回土木学会年次学術講演集 III-29, 1964.
 - 8) Henkel, D.J: The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays, ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960.
 - 9) 星埜和：土のせん断強さ, 土木学会誌 49巻1号, 1964
 - 10) Kirkpatrick, W.M: The Condition of Failure for Sands, Proc. 4th Intern. Conf. S.M.F.E. 1957.
 - 11) Coleman, M.J.D.: Discussion on Soil Properties and their Measurement. Section 1. Proc. 5th Intern. Conf. S.M.F.E. 1961.
- (1966.11.22, 第1回土質工学研究発表会特別講演から)