

斜 面 と 掘 削

さい とう みち たか
齊 藤 迪 孝*

1. ま え が き

土質力学において破壊あるいは安定の問題は変形沈下の問題とならんで二分野を形成するが、後者が圧密理論および弾性理論を軸として、土の微小要素を積み上げて、地盤の挙動を一応論理的に説明し得る段階にまで達しているのに対し、前者はこのような手法を全く拒否している格好で、微小要素の積み上げによって解明するにはあまりにも難解で、遠く及ばないと言う感じがする。そのために、スベリ面と言う分離面を導入して、それで区切られた土塊の安定を考えるという方法を採用している。これは一見前近代的手法のように見えるが、土の力学特性の複雑さのために現状では止むを得ないことであるが、しかしこれは限界設計と同じ近代的手法の一つである。ひるがえって考えると、土質力学の前身の土圧論がたどって来た道が全くこの方法そのものであり、土圧論の手法の直系と言ってもよいのではなからうか。

斜面の安定は正しくこの前者の場合であって、一方ではスベリ面の形とその位置を問題とし、他方では土の力学特性と、間ゲキ水圧を含めた状態変化を探究し、安定の度合を予測することが要求される。

掘削は土留め工にかかる土圧とその支持方法、ならびに周辺地盤の変形沈下の予測が主要問題である。

フィルダムは広い範囲にかかわりをもっているが、ここでは主としてダム斜面の安定と変形ならびに透水についてのみ触れることとする。

いずれの場合もそれぞれ理論なり手法なりがあり、またその対象となる地盤や土構造物の土質特性によって結果が左右されるのであるから、この両者が常につり合っていることが望ましく、また見方を変えれば、一方が進歩すれば他方もそれに応じて進展することが期待されよう。

このような観点から国際会議40年の流れを見ると、解析手法では有効応力解析の確立、電算機の導入、確率論の適用など、土質特性では土質の細分、検査の重視、負の間ゲキ水圧の測定、泥水工法の利用など、また両者合わせての各種工法の判定資料の増加など、著しい進展が見られる。なお、これらの成果はすべて国際会議で発表されるわけではなく、むしろその中間の時期に学会誌や機関誌、あるいは

は特定会議報告などにすぐれた論文がのることが多いので、それらを併せて通覧する必要があると思われる。

それにしても、国際会議初期の議事録を見て感心することは、土質力学の揺籃期にありながら、あるいはそのために、対象現場をよく観察し、考察し、独自の解析法を試行している例がいくつも見られるが、そのような論文に出会うと、あたかもいつの間にか見失った宝石を意外な時期に意外な場所で再び見つけたような感動に打たれるのである。

関連する文献は非常に多いので、引用文献として記載することはやめ、著者名の後に発表年を〔 〕で示したものは国際会議議事録、()で示したものはそれ以外の文献によるものをあらわすこととし、検索の便に供することにした。

2. 斜面の安定解析方法

2.1 解析理論の進展

スベリ面の形については、大部分のものが第1回の国際会議までに出そろっていたようである。

クーロン系の土圧論の考え方では、粘性土の鉛直斜面の極限高さの解を最初に与えたのは Coulomb(1773)であって、これは鉛直擁壁に及ぼす土圧の計算で、粘着力を考慮した土圧が0になる極限の条件として得られたものである。この考え方を傾斜斜面に適用したのが Français(1820)で、いずれも平面スベリを考えている。

曲面スベリを最初に観察記録したのは Perronet(1788)であるが、曲面スベリ面を用いて解析を行なったのは Collin(1846)が最初である。しかし、彼の認めた曲面はサイクロイド状のもので、計算式はそのまま円形に適用し得るものであるが、円弧スベリ面を最初にはっきり打ち出したのは Petterson(1916) および Hultin(1916)である。この解析は分割法によるものであるが、このころは摩擦角があらゆる種類の土の強度を代表するものと考えられていたもので、スベリ面には摩擦反力のみが働くものとし、これと分割面に水平に働く反力とが分割片の自重とつり合い、力の多角形が閉じるという条件から所要の摩擦角を求めた。この計算法に粘着力を最初に導入したのは Fellenius (1927)であって、分割面反力は考慮に入れている。

Krey(1924)は側面反力を無視して、分割片の自重が直接その下端を区切るスベリ面に作用するとし、Terzaghi

* 工博 (株)応用地質調査事務所取締役技師長

(1929)は分割面反力はなく、滑動に対する抵抗モーメントの不足分はスベリ面における粘着力が受け持つとして式を表わした。これが現在広く行なわれている分割法の略算方法とほぼ同じものである。

ランキン系のものでは、無限長斜面について Résal(1910)が斜交座標を用いて微分方程式をたて、図式で変型亜サイクロイド曲線の解を得たが、その後 Frontard(1922)がその積分を行なうことに成功した。また、Caquot(1934)は別の安定解析法を提案した。円以外の曲面スベリ面では、対数らせん形を Rendulic(1935)が提案している。

スベリ面における条件から求める方法としては、スベリ面において極限平衡条件が成立するとして、Kötter(1903)は粘着力のない場合について、応力とスベリ面の曲率との関係式を導いた。

応力関数を用い、弾性論によって応力分布を求め、安定を検討する方法は Brahtz(1936)によって提案されたが、これは第1回国際会議の年であるが、発表は第2回国際大ダム会議でなされたものである。これはその後 Clover と Cornwell(1941), Bennett(1951), Samsioe(1955)と続くものである。

第1回国際会議では、Frontardの解について Terzaghi[1936]が反ばくし、その矛盾を指摘した。すなわち、スベリ面の上方では主働土圧によるスベリ、下方では受働土圧によるスベリが生じ、その中間では平面スベリが起これと考えるのであるが、主働、受働の両領域では鉛直方向に対する共役応力の大きさに著しい差があり、平面スベリの区間では自重とスベリ面における抵抗とがつり合っているの、共役応力の差を打ち消す力は働き得ない、すなわち過渡領域となり得ないというわけである。Frontard(1936)は第2回国際大ダム会議でこれに対する修正を提案したが、矛盾は解消されたわけではなく、この論議はこれで結着がついたことになる。

Jáky[1936]はスベリ面における条件から求める Kötterの方法を粘着力のある土の場合に拡張して、関係式を誘導してこの会議に発表した。この方法はさらに後に Carrillo(1942)が中立応力のある場合にも拡張して関係式を求めた。後に第5回国際会議で発表された Rodriguez[1961]および Kopacz[1961]の論文も Kötterの式をとり上げているが、いずれも間ゲキ水圧を考慮しておらず、重大な誤差を生じると指摘されている。

分割法の発展とともに図式解法が注目され、中でも Taylor(1937)の摩擦円法の古典解析が最も有名であるが、その概要が第1回国際会議に討議として出されている。円弧スベリ面分割法で分割側面の抵抗を考慮し、間ゲキ水圧を導入した Bishop(1954)の論文はこの系統の解析の標準版と見なされている。円弧スベリ面で無次元解析を行なう Janbu(1954)の論文はあまり知られていないが、注目すべきものであろう。

複合スベリ面を用いた最初の論文は Janbu(1954)のもので、ヨーロッパ地域会議に討議として発表されたものである。

2.2 有効応力解析法の登場

上述のように、今まで多くの計算方法が提案され、整理されて、1930年ころには円弧スベリ面解析が一般に用いられるようになり、土質パラメーターとしては c , ϕ がとり上げられたが、間ゲキ水圧についてはまだ考慮されていなかった。そして戦時中、全く途絶えた外国文献が戦後再び入手できるようになって、初めて知った最大の驚きは、間ゲキ水圧に対する認識とともに、有効応力が主役の座を占めていることだった。しかしこれはすでに1936年までにその重要さが認識されており、第1回国際会議で Terzaghi[1936]は間ゲキ水圧を入れてスウェーデン式分割法を修正することを述べており、May(1936)は第2回国際大ダム会議にアメリカ開拓局(USBR)でそれを用いた方法を発表している。このとき生じた二つの重要な進展は、土のせん断強度を有効応力パラメーターで表現する必要を認識すること、それに続いて室内現場双方において間ゲキ水圧を測定するという関心である。アースダム設計の日常手法に有効応力安定解析と間ゲキ水圧の室内および現場における測定を結合したのは、USBR が最初であると言われている。

しかし、一般にはまだこのような認識は少なく、斜面安定解析にはイギリスの提案した $\phi=0$ 法が広く採用されて来たし、これは戦後の重要な貢献の一つといえることができた。ロッテルダムにおける第2回国際会議以降も、この方法は片や Skempton(1948)や Hansen と Gibson(1949)らの理論的考察、片や実際のスベリの事例により、さらに支持を受けるようになった。事例としては、イギリス、スウェーデン、アメリカ、ニュージーランドなどからの報告があり、 $\phi=0$ 法はよく適合するという事例がいくつも示されている。

しかしその一方、この方法に疑問をもっている人も何人かいた。一軸とか非排水三軸とかベーンで得られたせん断強度は、粘土が破壊するとき含水量を変化させなければ、摩擦抵抗は含まれないと考えている人が多く、したがって $\phi=0$ 解析は垂直応力によって生じる抵抗が含まれないために、安全側の設計になると考えている。しかし、そうでもない粘土もあるので、慣習的な解析法で安全とされた斜面が実際にすべった例も多くあり、 $\phi=0$ 法を拒否する人がアメリカに多くいた。

非常に高い安全率なのにすべったものはヒビワレ粘土であったというが、これは Terzaghi[1936]や Skempton[1948]が指摘したように、かたいヒビワレ粘土は時間とともに強度が減少するので、通常の方法で試料採取し、試験をし、その値を用いて解析することはできないものである。これとは逆に、Cadling と Odenstad(1950)の報告では、鋭敏粘土の一軸圧縮試験で得られた低い安全率は試料のかく

乱によるもので、実際は安全率をもっと高くってよいものだという。

これらの互いに相反する多くの事実は、一方では土によって異なるということから、 $\phi=0$ 法の適用限界を求める必要が出てくるし、他方ではこのことは解析法と試験法とがつり合っていないことを示すもので、この解析法に見合った試験法、あるいはこの試験法に見合った解析法をさがさなければならないことになる。そして、第3回国際会議の一般報告者 Bjerrum[1953] は、最も論理的な接近法は有効応力に関して安定解析を行なうことではないかと提案している。

それでは、その後の進展状況を一般報告者の言を借りて述べて見よう。Walker[1957]によると、間ゲキ水圧の考えが導入されてから、二つの対立する方法が提案されたが、どちらも問題を本当に攻めることを避けたものであったという。その一つは間ゲキ水圧を小さくするような構築方法をとることであり、他のものは間ゲキ水圧効果はせん断強度の内部摩擦成分に影響するだけであるから、唯一の信頼は粘着強度に置くべきであるという考えである。この2番目の行き方が多くの人の支持をうけたが、経験を重ねると、粘着強度そのものが十分な信頼を置けるものではないことがわかって来た。粘着強度は時の経過とともに変わり得るいろいろの現象の結果のように思われ、含水量によっても変わり、飽和過圧密粘土の間ゲキ水圧に張力を作用することや、不飽和土の毛管応力が粘着効果を生じるし、土粒子間のかみ合せが粘着効果を生じるという指摘もある。それゆえ、第2の方法に基づいて、斜面の設計に粘着効果を避けるとなると強度は何も残らないことになる。この困難に打勝つために、安定解析のいろいろの手法が提案された。それらは人工の盛土の斜面を安定に設計することは可能であるが、自然の土の構造をもった斜面を評価するには何の役にも立たないものであった。それで安定と不安定の条件の区別をするためには、観測に頼る外はないということになった。これは間ゲキ水圧の観測だけでは駄目で、破壊を生じるか、あるいは破壊直前の限界平衡に近い状態になった場合に、せん断強度パラメーターを求めて解析を行ない、どの程度の安全率になるかによって適否を判定することが必要である。このような考え方で進められた研究成果、特に Bishop, Bjerrum, Skempton らの業績により、有効応力解析法の有効性が確認されたのが、1960年デンバーで行なわれた粘性土のせん断強度についての研究会議の時であったと思われる。ここで Bishop と Bjerrum(1960) はつぎのように言っている。

有効応力解析法は如何なる安定問題の解析にも一般に有効な方法であり、特に全応力法ではっきりしないような安定の傾向を明らかにするのに有効である。その実際への適用は、間ゲキ水圧が知られているか、あるいは筋の通った精度で推定される場合に限られる。それは、間ゲキ水圧の

現場測定が可能な場合、間ゲキ水圧が地下水条件または流動パターンで支配されると見られる長期安定の問題、および非圧縮性の土での水位低下の場合などである。

このつぎの年に行なわれた第5回国際会議の一般報告で、Trollope[1961] は、現時点でなされる原則的結論は、有効応力パラメーターを用いたスベリ円法は、斜面安定解析の最も満足すべき方法として残る、と言っている。

これによって $\phi=0$ 法が役に立たなくなったわけではなく、飽和粘土に急速載荷あるいは除荷をするような場合は、いぜん $\phi=0$ 法が原則として有効であることには変わりはない。一方、間ゲキ水圧が不確かな場合は、有効応力解析を行なっても、その信頼度は低いと言わざるを得ないのである。

2.3 安全率の考え方

安全率について明確な定義が要求されるようになったのは、粘着力と内部摩擦角とが同時に使われるようになってからである。それまでは土のもっている粘着力と安定に必要な粘着力との比、あるいは土の内部摩擦係数と安定に必要な内部摩擦係数との比で、簡単に表わしていた。どちらも無視できない場合、最も普通に用いられているのは Fellenius(1927) の提案した Fellenius 方式と呼ばれるもので、粘着力、内部摩擦抵抗のいずれについても同じ値の安全率を採用することである。その後提案された Ohde(1943) の方式、および Casagrande(1948) の抵抗包絡線法による方式は表現の方法は異なるが、いずれも Fellenius 方式と同じものになる。Fröhlich(1950) の提案する直接法と言うのは、土のもつ粘着力および摩擦抵抗を減少させるのではなく、双方とも十分働かせるものと考えて求める方法である。Bishop(1954) が安定解析に用いた安全率も Fellenius 方式と同じである。

国際会議に安全率の論文が現われたのは第5回からで、Fröhlich[1961] は仮想衝撃力を加えて極限平衡にもって行く方法、de Beer と Lousberg[1961] は作用線を変えないで荷重合力を増大させる方法と荷重の大きさを変えないで作用線を平行移動させる方法の2通りを提案している。この場合、後者の方が不明確さが少ない点で、前者よりよいと思われる。

第6回国際会議では、Langejan[1965] が安全率の定め方に確率理論を用いることを提案し、Londe と Sterenberg[1965] は現在の安全率はスベリの生じないときには矛盾するとし、スベリ面上の応力分布が最も重要なので、将来は弾塑性平衡の条件を用いて進めることができるとしている。

第7回国際会議では Biernatowski[1969] が適切な設計安全率と土質特性の数量的な信頼度との関係に確率論を適用することを論じている。これは安全率の単なる定義ではなく、その数値のもつ意義を明らかにしようとするもので、従来と違った動きと見ることができよう。

一方ダム の安定解析では、Patrick[1948] や Bennett(1

951)のように、弾性理論を適用し、基盤上のどの点でも応力が土の強度をこえないことを条件にする方法が用いられているが、余ほどゆるい傾斜でなければ、この条件を満足させることはむづかしい。たとえば Bishop(1952)によると、円弧スベリ面法で安全率が1.8より小さい斜面では、どこかに応力超過が生じると言っている。したがって、この方法は一般の斜面では非現実的な方法と考えられよう。

2.4 斜面の長期安定

この問題の解明は、過圧密のロンドン粘土の斜面の現場観測に長年取り組んだSkempton, Henkel らを中心とする努力の結晶とも言うべきものであろう。この問題は第5回国際会議で主要な討議テーマとして取り上げられたが、その後第4回ランキン講義での Skempton (1964) の見解がその方向を決定づけたと言えよう。

長期安定解析に $\sigma' = 0$ 法を用いると言うのは Skempton [1957] の現場実証の裏付けのある観測から得られた経験的なものであるが、第5回国際会議に出された Henkel [1961] および Šuklje と Vidmar [1961] の論文でもこの仮定は支持されている。それは土のセン断時の挙動に重要な意味をもつもので、粘土は応力解放で膨張し、十分な自由水が供給されなければ、間ゲキ水は張力を生じる。さらにもう一つの重要な要素は Roscoe その他 (1959) の言う粘土のセン断時の限界間ゲキ比に関する証拠であって、この概念によれば、過圧密粘土はセン断時に膨張し、そのためにまた水の張力の発生に役立つと言うものである。それゆえ、間ゲキ水張力が時間とともに消滅することは、長期間後の不安定に到るセン断強度の減少を説明する重要な要素であると結論されよう。

安定解析においてこれと同等の重要な考慮は、時とともに斜面のセン断応力が増大する可能性のあることである。それは Trollop と Morgan (1959) がすでに述べたように、基盤の様でない動きのために、粒状土に生じ得るものであるし、斜面掘削に伴うふくれ上りがこの増加応力を生じるに必要な変形条件を提供することも考えられる。Nonveiller と Anagnosti [1961] の解析した変形の型も同様にセン断応力の増加に役立ち得るものである。

それゆえ強度減少と応力増大が時とともに安定が失われ

る役をするものと考えられよう。

もう一つ別の要素として、特に急斜面で重要な引張り力のあり得ることが考えられる。このような力の存在は長い間認められているし、Šuklje と Vidmar [1965] の論文でも非常に深い引張りき裂が述べられている。粘土中にそのような力が存在する場合には、間ゲキ水の張力によってかなりの程度抵抗し得ると考えられよう。断続的な水の吸収による間ゲキ水の張力の解放は次第に斜面が劣化するのを助けることになる。

土の斜面中のあり得る応力状態をまとめたものを図一1に示す。一番外側の曲線 AB は Sokolovsky [1957] の言うアーチ形状である。線 AC は粘性土の乾燥状態時の安息角に類似のものであり、この線以下の傾斜では粒子間に引張り力は働かないが、この線より急な斜面では粒子間の引張り応力が平衡を保つために必要となる。乾燥粘性土が自然に存在することはあり得ないので、線 AC が何らかの物理的意味をもつかどうか疑わしい。粘性土の最終の安息角は AD で表わされる。それは透水が表面 AD に平行に生じ、浸潤線が AD と一致する場合である。AD よりも急な斜面の破壊機構は引張り破壊で始まり、それによって生じた引張りき裂に地下水が流下するにつれて、強度の逐次低下が続き、ついには EFA のような面に沿って破壊が生じる。自由水が連続的あるいは断続的に供給されるならば、この過程は最終斜面 AD に到るまで繰り返されよう。AD よりもゆるい斜面は、基盤の変形が過度でなければ崩壊することはなさそうである。斜面の長期的な安定について、このような見方もあるのではないか、と言うことである。

3. 実斜面の挙動

斜面と一口に言っても、自然斜面あり、切取り斜面あり盛土斜面ありで、それぞれ崩壊あるいは不安定の様相が異なり、取扱い方が違うわけである。

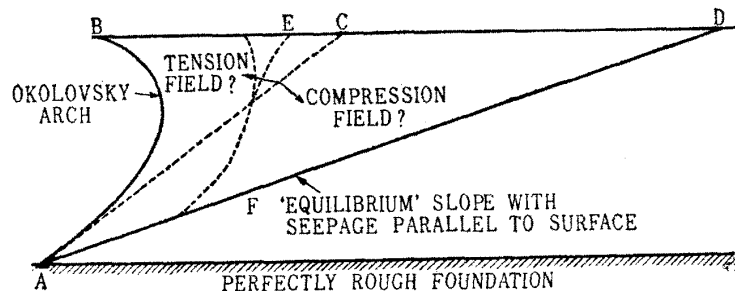
3.1 土質特性と崩壊経過

第1回国際会議で Terzaghi [1936] は自然粘土を三つに分けて考えることを述べている。

a) Soft, intact clay.—この intact というのは、「節理や割目のような分離面のない」という意味であるから、これを訳すと「分離面のない軟粘土」ということになる。多くの場合、粘土はこの分類に入るが、深さとともに強度が増すわけでもなく、含水比は不規則なので安定解析にあたって不明の点が多い。セン断試験の結果は三軸圧縮試験で得られたものと一致する。

b) Stiff, intact clay.—分離面のない硬質粘土。この種の粘土はあまり多くない。セン断試験の結果は、三軸圧縮試験で得られたものと一致しないようである。

c) Stiff, fissured clay.—硬質ヒビワレ粘土。この種の粘土では、雨の水は割目に集まり、粘土は膨張し、



図一1 斜面中のあり得る応力状態

割目の側面はなめらかになり、せん断抵抗は試験室での無圧力の場合と同じ、すなわち、クーロンの式の“ c ”にまで下がる。

この粘土の区別は重要であって、室内試験の結果がそのまま使えるものと使えないものがあるわけで、その後の欧米の研究はこの区別をわきまえたうえで進められているが、わが国ではあまり関心がないように見えるのは、どうしたことだろうか。試験結果が現実と合わないからと言って、すべりの逆算だけですませてしまうのではなく、本腰を入れて取り組む必要があるように思われる。

第2回国際会議では、ゆるい構造の細砂の自然斜面の流動スベリが Peck[1948], Ward[1948], Senour と Turnbull[1948], Koppejan ら[1948] によって述べられているのは、ちょっと珍しい一致である。いずれも液状化によるもので、限界密度の存在が考えられる。すなわち、軸差応力、あるいはせん断応力の増大とともに、砂は最初容積を減少し、その後増大するが、容積減少に伴う間ゲキ水圧の増大がゆるい砂の場合は破壊するに到するという。容積が減少から増大に転じる点が限界密度を与え、この限界密度は室内試験で定められるが、内部摩擦角が 37° 以下の砂は限界密度以下にあるという。地震動のような繰返し応力によって生じる液状化は、斜面の流動スベリとは異なった出現様相であるのに、限界密度で判定しようとしたところに、初期のころの液状化に対する思考の混乱が生じたと言えよう。ともかく、この時期に各国からこれだけ多くの類似のスベリが報告されたのは驚きであるが、当時の関心の所在を示すものであろう。

もう一つ特記すべきはヒビワレ粘土の斜面のスベリである。これは巨視的な構造をもっており、かたい粘土の多面体から成っていて、多くの鏡肌が見られる。前述のように、水が割目に入ると、軟化が進行し、せん断強度が激減して、切取り後数十年もたってスベリを生じることがある。ヒビワレ粘土の斜面のスベリについては、第2回国際会議以後毎回発表され論じられている。

Cassel[1948]はこのような粘土の斜面を通常の一軸圧縮試験で設計する危険を強調しており、Skempton[1948]はロンドン粘土の軟化の時間標尺を経験に基づいて示している。パナマ運河の多数のスベリが Binger[1948]によって報告されているのも注目に値する。Toms[1953]は南イングランドの大きい地スベリについて述べている。十分な調査で地質条件を明らかにし、間ゲキ水圧を測定し、 $\phi=0$ 法で解析を行なったが、測定した強度と逆算強度は合わなかった。それはこの粘土がひどく過圧密されており、そのために膨張と割目を生じていたためと思われる。その後のヒビワレ粘土に関する論文には、Skempton と DeLory[1957], Henkel[1957] などがあり、過圧密粘土はその後イギリスのみにとどまらず、ユーゴスラビアの Šuklje と Widmar[1961], イタリアの Esu と Calabresi[1969],

アメリカの Focht と Sullivan[1969], トルコの Peynircioglu[1969] もとり上げている。これらの中には自然斜面のスベリもあるが、切取りによって応力緩和が生じ、割目が開き、水が中に入って軟化が進むと言う経過から、切取りの方がスベリを促進するので、切取りがより多く取り上げられているのは注目に値しよう。

この問題の解明に画竜点睛の役割をするデータが第8回国際会議の際に Bishop[1973] から紹介された。それは Vaughan と Walbancke(1973) の業績で、硬質ヒビワレ粘土の切取り斜面が構築後かなり後れて崩壊するのは、ヒビワレ中の間ゲキ水が張力をもっているために、それが消滅するのに時間がかかることを実測で示したものである。図-2がその結果をまとめて示したもので、掘削前の間ゲキ水圧、掘削直後の間ゲキ水圧、および長期間後の予測間ゲキ水圧の断面が示されている。掘削直後は10~15mの深さの負の間ゲキ水圧であるのが長期後の水圧は大部分が正に変わっているのがわかる。この水圧を実測するために、掘削9年後に特殊の間ゲキ水圧計を埋設したが、大部分はまだ負のままで、最大-7mの水圧をもっていた。この測定値は、大型試料の試験で得た数値を用い、圧密または膨張理論で求めた曲線に近い位置に来て、この考え方の妥当なことが証明された。

土質特性によるものとしては、クイッククレイのスベリがある。Bjerrum ら[1969]によると、スベリの実相が大分わかって来た。クイッククレイの本体は、粘土の深さが中くらい、あるいは小さい所で、基盤岩からの地下水の強い上向きの浸透で、溶脱が強く行なわれた所に生じる。重要な発見は、溶脱の継続は最終的には化学的風化によって鋭敏度の減少とせん断強度の増大をもたらすことである。それゆえ、たとえばチェックダムを作って流水による侵食を防ぐと、クイッククレイのスベリの危険は短期的にも大いに減じられ、長期的には事実上取り除かれることになろうと言うものである。

相当期間安定であった斜面が崩壊に到るには、土質の力学特性の変化でなければ、雨水の浸透が最大の原因であると言えよう。盛土中への雨水の浸透は Terzaghi[1936] の論文に示されているが、これは一般論としての考え方であって、現実の斜面は構成がもっと複雑で不明の点が多いが、この方面の論文が意外に少ないのはどうしたわけであろうか。わずかに Vargas と Pichler[1957], Barata[1969], da Costa Nunes[1969] などの論文が見られるだけであるが、現在の土質力学体系の中に位置づけするのがむづかしいためであろうか。

盛土斜面の安定は、斜面そのものよりは、盛土地盤のスベリ破壊の問題であることが多い。第1回国際会議に Yen[1936]は上海港のふ頭や造成地の堤防の四つのスベリの模様とその対策を述べているが、これは盛土荷重による地盤のスベリが主なようである。彼の解析法は、実際のスベリ

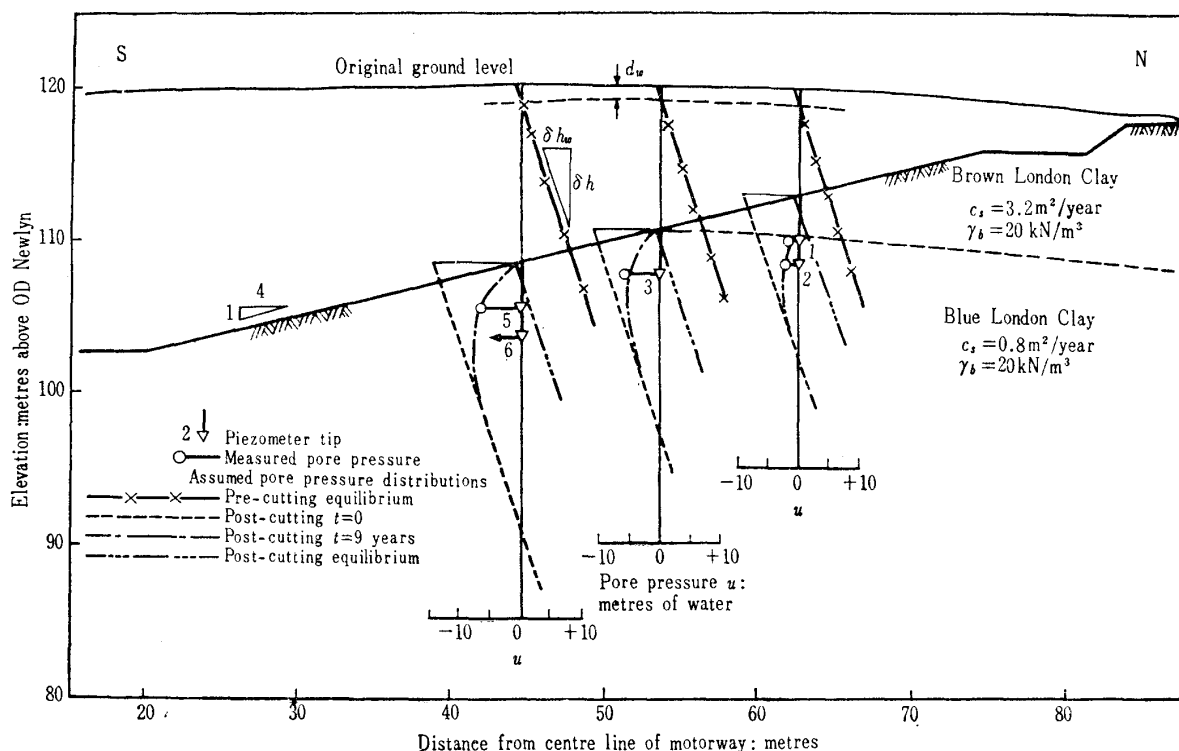


図-2 ロンドン粘土の切取りにおける間ゲキ水圧の測定

に合わせた曲面スベリ面を用い、分割法ではあるが、スベリ面における摩擦反力の水平分力の総和で安定、不安定を判断する独得の方法を用いた。この当時は円弧スベリ面の分割法、いわゆるスウェーデン式解法がほぼ定着しかけたところであったが、それでも他の方法を考えて使う人もいたことを示すもので、このように現実をよく観察し、現場に適した解析法を考案するなど創意に満ちた思考は尊重されてよいと思われる。

実際の盛土で、有効応力による解析でスベリを予測した最初の例が、Harty[1953]によって述べられている。アイルランドで高さ 8.5m のアースダムが貯水の目的で細砂の上の粘土シルトタイ積上に1928年に構築された。1948年にダムの下流側でスベリが生じたので、その後安定のための調査が行なわれた。おそらくスベリはダムの下流側、ノリ尻の下の方の砂の高間ゲキ水圧のために、粘土タイ積物の強度が減じて生じたものであろう。ベーン試験に基づいてスベリの解析が行なわれたが、測定値は非常にばらついたので結論は出せなかったようである。Petersonら[1957]は不適当な地盤での盛土を述べている。土の強度の平均値を用い、 $\phi=0$ 法または有効応力法で安定解析を行なったが、代表的な安全率は得られなかった。最小強度を用い、有効応力法でかなり良い関係が得られた。それゆえ、安全率を2以上にするか、または最小値を用いて有効応力法で解析するのがよいのではないかと結んでいる。また、アメリカ開拓局の技術者は、粘着力を無視しても、間ゲキ水圧を考慮に入れるならば、盛土の安全率は最小1でよいと長年主

張してきたと Walker[1957] は言っている。

第5回国際会議は有効応力解析法が一般に認められ、定着化して来た時期なので、この時期に発表された Ishii 外[1961]の締切り堤のスベリや、Marsland[1961]の洪水時の河川堤防のスベリなどは、有効応力で解析したらどうかということが正面に出されている。

3.2 斜面の動きと観測

斜面のスベリ、あるいは崩壊のように、安定の限界が問題になるような場合の外に、斜面の動きそのもの、あるいは長期挙動がとり上げられるようになってきた。これは時間とともに土の変形が増大することと、時間とともに土の強度が減少することの二つがからみ、いわゆるクリープの問題であって、最後には破壊に到るクリープ破壊の法則性につながるものである。

Goldstein と Ter-Stepanian[1957]はクリープによる強度減少とクリープ現象の理論研究を行ない、さらにクリープ速度の決定式を展開した。これに続いて Goldstein ら[1965]は粘土の強度と斜面安定に関する粘土のレオロジー的特性を論じ、Ter-Stepanian[1961]は現場でクリープ変形を観測する方法を開発し、二つのレオロジー特性、すなわち、発生せん断係数と流動係数を現場で決定することを可能にした。

地スベリ観測もこの部類に属し、Fukuoka[1953]の茶臼山地スベリでは、観測井による移動測定 Fukuoka と Taniguchi[1961]の基之助谷地スベリでは孔内傾斜計などを活用した。Šuklje と Widmar[1961]の長期クリープに

よる地スベリ観測, Kézdi[1969] のダニューブ川沿いの大きい地スベリの観測, de Beer[1969] の硬質ヒビワレ粘土の切り取りでの移動崩壊観測, Peynircioglu[1969] のイスタンブール近くの地スベリの長期観測, Focht と Sullivan[1969] のテキサスにおける移動観測, Ter-Stepanian と Goldstein[1969] の多層地スベリの観測と解析など, 毎回国際会議に何かが見られる。また少し異色のものは, Pietkowski と Czarnota-Bojarski[1965] のスベリの運動速さの計算, Saito[1965, 1969] の地スベリ発生時期の予測などがある。

外に斜面の動きとして地震動に関するものに Finn と Byrne[1969] の斜面の地震応答解析, Prakash ら [1969] の斜面安定の地震解析が見られるが, いずれも理論解析であって, 斜面の実振動, あるいはそれによる破壊などの対比はなされていない。

4. 掘削と仮土留め

ここでは鉛直掘削面を何がしかの仮設構造物で支持する場合の力・変形関係について述べる。このような構造物に対しても古典的土圧論が長い間適用されていたが, 土圧理論と観測値との間の矛盾が次第に明らかになってきた。また, 降雨の浸透と地下水の凍結の影響が大きく認識されるようになったし, 間ゲキ水の揚圧力がシルトや粘土の中でも十分に作用することがわかってきた。

4.1 アンカー矢板壁

1906年にデンマークのオールボルグで構築されたふ頭は, 通常の土圧論によると, 下端自由支持の矢板の計算では到底もたないのが, 現在でも自立している。これはアンカーと前面地盤との間のいわゆる中間スパンで, 主働土圧が減少するため, それは矢板のタワミによる土圧の再分布, すなわちアーチ作用によるものと言われている。このことは Stroyer(1935~6) の実験でも支持されており, Ohde(1938)の理論解析でも示されている。このことは第1回国際会議で Legget[1936] によって討議されているが, その本格的な研究は Tschebotarioff(1949, 1951) および Rowe(1952) などの模型実験により進められ, Terzaghi(1953) の評価によって定説が形作られたと言えよう。

実験は隔壁が可とう性であると同時に, アンカーが働けるものとして行なわれた。アンカーを固定した場合は, 土圧分布は直線形とは大いに異なり, アンカー付近に応力集中が生じると同時に, 中間スパンでは応力が減少する。アンカーをゆるめると, 全土圧は変わらないが, 土圧分布は三角形となる。これは Tschebotarioff, Rowe の両者は一致する。Rowe はさらに可とう性を大幅に変えて実験を行ない, 隔壁の曲げモーメントの実測値と, 自由下端の条件で求めた計算値との比は, 前面掘削深さやタイロッドの高さや上載荷重を変えても一定であるが, 隔壁の可とう性を増すとこの比が急速に減少することを見いだした。以上のように, Tschebotarioff の実験は Rowe のものと一致す

るが, モーメント減少の一部を行なっているにすぎないし, その簡易計算は Rowe のものに比して, タワミ性の少ない壁に対して安全側でないことになる。これらの結果から Terzaghi は Rowe の設計法を採用した。ここに従来ほとんど無視して来た可とう性を係数としてとり入れたことは, 一段と信頼性を増したことになる。これに関連して, Packshow と Lake(1952) の Rowe の方法と在来法の設計の比較や, Verdeyen と Roisin(1952) のアンカー工法のもっと詳細な取扱い法の論文が発表され, また Duke(1952)の実物測定もあるが, その結果はあまり明確でない。第3回国際会議には, Feld[1953] と Lea[1953] の隔壁の破壊例が出されている。

4.2 切バリ開削

切バリ開削の方は矢板とは異なって, 実測から進められたようである。砂地盤の切バリ開削は, 古くは Meem(1908), Moulton(1920) の観測があり, その後 Spilker(1937) はベルリンの地下鉄で, また Klenner(1941) はミュンヘンの地下鉄で観測を行ない, Ohde(1938)の理論解析, Taylor(1941)の模型実験, Terzaghi(1941)の理論ならびに実験によって, その体系が次第に形作られてきた。

粘土地盤では, シカゴにおける Peck(1943) の観測によって, 土圧の台形分布の骨格が形作られてきたが, Tschebotarioff(1951) の実験による三角形分布と真正面から対立することになり, 現在に到るまでその対立は続いている。

実工事における観測としては, テームズ川河口での Skempton と Ward(1952) のものがあり, その測定計器については Cooling と Ward[1953] が第3回国際会議に発表している。シカゴ地下鉄の観測は, Peck の後にまた Wu と Berman(1953) が行なっている。

これらのデータから, 等価土圧係数が大きくなるほど, 合力の作用点は下がり, 液体圧の場合, すなわち $K_e=1$ のときは, 底面から $1/3$ の位置にくる。それで一般報告者の Skempton [1953] はつぎの関係を提案している。

$$K_e=1-4c/\gamma H$$

$$y/H=0.278+\frac{0.055}{K_e}$$

ここに, y は合力の作用点の底面からの高さである。

粘土中の掘削で土圧に耐える切バリを働かせれば安定かというと, まだ問題が残る。粘土の強度に比して掘削が深くなると塑性領域が広がってくる。それで Peck [1973] は技術の現状の中で, 安定数 $N=\gamma H/S_u$ と地盤の安定状態の関係を示している。すなわち

$N>5\sim6$ の場合, 地盤の安定が破壊される危険がある。

$N<4$ の場合, 地盤は変形も少なく, 安定である。

$N=4\sim6$ の場合, 地盤は破壊しないが, 相当量

の変位を生じる。

Rodriguez と Flamand[1969] はメキシコシティの地下鉄工事で、安定数 $N \approx 8$ の条件のところで間ゲキ水圧を電気浸透工法で処理して掘削を安定させた。

4.3 泥水工法その他

泥水で支持されたトレンチ内に地下壁を構築する工法は1938年にミラノ市で Veder によって考案され、1948年に最初の現場実験が行なわれたという。第3回国際会議に Veder[1953] はその論文を発表したが、当時は誰の注目も受けず、見過ごされた形であった。第5回国際会議に施工方法の異なる工法が現われた。すなわち、Chadeisson[1961] は衝撃式掘削、Barbedette と Berra[1961] は回転式掘削の方法を発表したが、これに関連して Veder の前の論文が見直されることになった。その後 Piaskowski と Kowalewski[1965] の泥水工法の論文も出されている。

その他の工法で注目すべきは Tsytoich と Khakimov [1961] の凍結工法で、重要な進歩がうかがわれる。

5. フィルダムの変形と間ゲキ水圧

アースダムの技術は土質力学以前に経験によって一応でき上がっていたが、Proctor(1933)の実験的論拠によって、大土量運搬による唯一の工法だった水締めダムに代わって、転圧ダムの指針が与えられ、材料に工法に大変化を生じるに到った。ダム研究の主流は3年ごとに開かれる国際ダム会議に最もよく見られるが、土質国際会議にも何がしかの論文が提出されるので、その面からの進展を見ることにする。

5.1 スペリ、沈下、変形

第1回国際会議で Middlebrooks[1936] はフォートベックダムのスペリを述べ、第2回には Banks[1948] は構築中のダムのスペリに関連して沈下と横移動の観測を行なった。Gould[1953] は転圧盛土の圧縮性について多くのダムの観測を行ない、転圧時の含水量と圧縮性の関係を調べた。沈下の長期観測も行なわれ、Finzi と Niccolai[1957] は5年間、Baroncini と Croce[1957] は25年間観測を継続している。また、Scherrer[1965] はダム基礎地盤の沈下の観測と計算値とを比較しているし、Sowers ら[1965] は14のロックフィルダムの沈下速度を求め、破碎岩の圧密試験結果と比較している。Gilg[1965] は150m 高さのアースダムの構築中に生じた締固めの問題と、その後の変形を取り扱っている。彼はダムに水を入れたり空にしたりした場合の水平変位とその他の点の沈下を4年間にわたって測定したが、この短い期間にダムは安定し、水平変位はほぼ弾性変形と認められるようになった。また、ゾーン式ダムの各ゾーン間、およびダムと基盤との間の相互作用が問題になる。これには実測が必要であるが、これは近年始まったばかりで、結論は出ていない。圧縮性および応力変形特性が大幅に変わる材料間の境界面での応力の受渡しが重

要である。そして、ペンシルバニアの Muddy Run ダムでは、雲母片岩の圧縮性ロックフィルの本体部と不透水性のコアの間に、数フィートの相対沈下を生じたと第7回国際会議の一般報告者 Wilson[1969] は言っている。

このように多くの観測値が得られているが、一般に通用する法則性を見いだすことは、まだむづかしいのではないだろうか。

5.2 浸透流、間ゲキ水圧、急速水位低下

第1回国際会議にはダムの浸透水流の論文がいくつか見られるが、この手法は有効応力解析に必要となってくるものである。電流と水流の相似性から Taylor と Vaidhianathan[1936] は電気模型による水流の解析を行なった。同様の解析を Habib[1953] は3次元沈下水流について、また Bernell と Nilsson[1957] は非定常流について行なった。

第2回国際会議では間ゲキ水圧が重要なテーマとして取り上げられているのは、その年代からいって当然のことであろう。Rufenacht[1948] はダム転圧中に発生する間ゲキ水圧の予測を経験的仮定で行ない、圧密理論で合理的に求めようとする試みもしているが、その結果が妥当かどうか明らかでない。Proctor[1948] は流線網で間ゲキ水圧を求めることを強調している。Hilf[1948] は土中の空気を考えに入れ、空気の圧縮性に対するボイルの法則と、空気の溶解度に対するヘンリーの法則とを組み合わせて、圧密後の空気圧の増大を見いだした。一方、ピエゾメーターを埋設してブルドン管で10年間測定した記録が Walker と Daehn [1948] から発表されている。

転圧中のダムに発生する間ゲキ水圧については、特にアメリカ開拓局では精力的に観測が行なわれ、ヨーロッパでも多くのダムが建設され、設計に関する土質力学的問題が研究された。これらのうち最も注意を引くのは Bishop (1952)のもので、構築中および急速水位低下の際の間ゲキ水圧の近似的設計値を求めることに成功した。また、その結果の概略を Bishop[1957] は第4回国際会議に発表している。ダムの間ゲキ水圧の測定はその後 Nonveiller[1957]、Margason と Symons[1969]、Richards と Chan[1969] などによっても行なわれている。

ダム建設とともに急速水位低下の解明が問題となってきたが、この解決に実測よりは実験と理論解析が多く用いられているのは、今までのものと大分異なる点である。Glover ら [1948] は急速水位低下の影響を純理論的に求めているが、重力流の場合より大きい間ゲキ水圧は生じないという通常用いられている方法が妥当なことを見だしている。Browzin[1961] は均質ダムでの急速水位低下の非定常流を解析で求め、Shuk と Gomez Villa[1965] は砂中の水位低下の排水速度を実験で求め、Poorooshasb と Forati [1969] は透水膜の概念を導入して、水位低下後の排水の解析を行なっている。

6. 第9回国際会議に対する期待

従来ヨーロッパと北アメリカを持回りの格好で開いていた国際会議を、それ以外の地域で開催するのは、大いに意義のあることで、開催国の研究業績や技術水準、あるいは特殊な土質事情を世界中の人びとに知っていただくのに絶好の機会といえよう。特にわが国は言葉の障害や地域の隔絶などのために、実状は欧米にはもちろん、近隣諸国にもあまり知られていないのではないだろうか。したがって、第9回国際会議に対する期待としては非常に大きいものがあるが、私はこの機会をわれわれの反省と前進の場とすることを提案したい。

最初に言いたいことは、私達は世界の潮流に乗っていないのではないかと、言うことである。最近はおびたしい文献が海外から入って来る。全部に目を通していてもまれにはあろうが、あまり多すぎてとても目を通せないと言うのが、多くの人の実状であろう。それで他の人が外国文献を読んで、感じたことを書いたものを又読みして、わかったような気になる。断片的な知識ばかりで一貫性がない。したがって、研究の進歩や技術の発展についての遠い見通しがたたないということになる。あるいは、外国文献にヒントを得て研究を進める。その成果を外国語で発表する。これで世界の潮流に乗ったと思ったら大違いである。誰も自分の論文に注目してくれない。参考文献にも引用されない。そのわけは、外国文献から得たヒントで押し進められる範囲は知れたもので、大抵は二番煎じにすぎないのであって、主要先進国で内容が文献に発表されるころには、その話は一段落がついていて、つぎの新しい段階に入っていると見なければならないであろう。二番煎じが通用するのはせいぜい国内だけである。深い洞察力で長い見通しをたてて行なう研究、これが主要先進国のたゆまざる前進の原動力となっているのではないだろうか。

たとえば、有効応力解析法について先に記述したが、これが高く評価されるようになってから使うのはやさしいが、これがその評価に値することを実証するのは、大変な仕事だと思う。Bjerrum が第3回国際会議で、斜面の安定解析は多くの人が全応力法でよく合うと言っているが、これに疑いをもっている人達もおり、有効応力法の方が論理的ではないかと提案したのが1953年であった。つぎの国際会議ではまだ思想の混乱が続いていて、この方法の判定がつかず、1961年の第5回国際会議になって、やっと有効応力法がいかなる安定問題の解析にも一般に有効であると言うことが認められたわけである。

ここに二つの問題がある。一つは、Bjerrum が有効応力解析に強い印象を受けたのは、1951年に前任地のチューリッヒ工科大学からノルウェー土質工学研究所に所長として赴任する途中、イギリスのインペリアルカレッジに立ち寄ったときであって、そのときすでに Skempton や Bishop

らは有効応力法の研究を進めていたわけであるが、1953年の第3回国際会議に彼らが発表したのはいずれも全応力法でよく合うという論文であり、1957年のロンドンでの第4回国際会議でも有効応力法が良いのだということは言っていないのである。それで、1961年のパリでの第5回国際会議で有効応力法の評価がきまったといっても、その10年前にすでにその見通しをたてて、研究を進めていたというわけで、心憎いばかりではないか。

もう一つの問題は間ゲキ水圧そのものであって、その数値がある程度確実なものでなければ、解析を行なっても画餅にすぎないものである。それは前に書いたとおり、有効応力解析法が適用できるのは、間ゲキ水圧の現場測定が可能な場合、間ゲキ水圧が地下水条件または流動パターンで支配されると見られる長期安定の問題、および非圧縮性の土での水位低下の場合の三つである。推定が確実でない場合には実測が必要となるが、負圧をも含めた広範な測定を満足する間ゲキ水圧計がわが国で市販品として入手できるだろうか。一部で研究は行なわれているものの、空気侵入を防止し得るポーラスストーンを備え、脱空気水を用い、長期観測で信頼し得る測定値が得られる保証のある間ゲキ水圧計の入手と使用は、わが国ではむづかしい事情にあるのではないだろうか。それゆえ、形だけ有効応力解析法に切り替えても、現状ではわずかな満足感をくすぐるだけで、実効はないのではなからうか。

第2の例は硬質ヒビワレ粘土中の間ゲキ水の張力の測定である。これは驚嘆すべき研究成果であって、硬質ヒビワレ粘土の特性を解明したこと、この種の粘土の切り取りではヒビワレ中の間ゲキ水が張力を生じ、この消滅に長時間かかることと見通しをつけたこと、間ゲキ水の張力を測定し得る間ゲキ水圧計を完成したこと、の三つの条件がそろって、初めて達成し得たものと言えよう。硬質ヒビワレ粘土については、わが国ではほとんど関心をもっていないのではないだろうか。しかし、多くの地スベリで逆算による計算値と試験値が合わないのが普通であるが、もう少し土質というか、岩質というか、その力学特性特に長期挙動についてもっと考えて見る必要があるのではないだろうか。洪積粘土はもちろんのこと、第三紀層や中生層にも類似のものがあるし、またヒビワレだけに注目せずに、わが国の土そのものをよく観察し、それに適合した試験法を考えて、力学特性を解明して行くことが必要ではないだろうか。

間ゲキ水圧計については、Bishop が Selset ダムの基礎地盤に入れるのに、従来のものは不備なのを発見しその原因を探究する中、水から分離した空気がポーラスストーンを通して測定室に集積し、測定値を誤らせることがわかったので、ポーラスストーンの規格を定め、これを防止した。その改良型が文献に現われたのが1961年で、テーパーのついた先端チップがそのときは何を考えているのかわからなかった。これは押込むためのものではなく、この形に粘土

を削って密着させるためのものであった。この改良から図一1に示した Edgwarebury の自動車道路 MI の切取りで、切取り9年後にまだ残っている負の間ゲキ水圧を測定するまでに、12年が経過している。これらを合わせて考えると、長い見通しをもって問題点を疑視し、一つ一つデータを積み上げて予期した成果を収めたもので、単発的な思いつきでは到底達成されない高度の知的産物であると言える。これも心憎いばかりである。

われわれの論文が外国人の目にとまらない理由に二つある。一つは外国人に読める言葉で書かないからである。これはどうしようもない。できるだけ英独佛など、外国人に読みやすい言葉で書くように努力することが必要である。ただ、それだけでは駄目である。論文の内容が研究成果が人目をひくに足るほどの新しいものか、最高水準のものであるべきである。現在の学問体系、技術体系にプラスする何物かでなければならない。外国人の業績の二番煎じやトレース研究では、無視されるのが当然であろう。研究技術内容の充実で外国人の注目を引き、外国人の論文に引用されるようになって、やっと世界の潮流に乗ったと言えるのではない。

国際会議での見聞は、映画にたとえればフィルムの一コマである。一コマずつの場面は理解できても、動きはわからない。コマを続けて動かして見て、初めて動きがわかるのである。研究の流れは動きで見る必要があるのではない。

以上のような反省をこの機会にして、その実現に努力したいと思うのである。

つぎは前進のための提案であるが、斜面に関する限り災害の最大のもは降雨による崩壊である。これは毎年必ず発生し、その度に各方面で災害調査が行なわれ、何がしかの原因指摘がなされ、復旧対策が講じられるが、肝心の降雨と崩壊をつなぐ現象の解明は推定ですませているのはなぜだろうか。土のせん断強度が定められ、間ゲキ水の役割が

明らかにされて来た現在では、たとえ自然地盤の不均質が大きく前途に立ちふさがっているにしても、降雨がどのような経路で斜面内に浸透し、間ゲキ水圧がどのような経過をたどって上昇するかが予測できれば、安定あるいは崩壊の限界がきめられるのではないだろうか。推定を実証に変えるのが調査であり、観測であるからには、ロンドン粘土の斜面崩壊の実証的解明に40年近くを費やして、やっと明りが見えてきたことを思えば、斜面の降雨災害の解明に20～30年をかけるつもりで観測を行なってもよいのではないだろうか。

もう一つ前進的提案としては、わが国の特殊土に対する認識である。土質力学は普遍的な一般法則を打ち出すとは言っても、各国ともそれぞれ異なった土質を対象とする以上、その土質に見合った力学法則を見いだすべく努力している。スカンジナビアのクイッククレイやイギリスのロンドン粘土などがその例であるし、圧密理論の基礎実験に使われたのはイスタンブール郊外の黒海粘土、ウィーン粘土、ボストン青粘土などのシルト質粘土であるが、その力学特性表現をそのまま無批判にわが国のチュウ積軟弱粘土にあてはめているために、二次圧密の処理に苦慮しているのであって、むしろオランダの泥炭土のように、二次圧密を正當に評価する方がよくあてはまるのかも知れないと思われる。同じようなことがわが国の特殊土、特に火山灰から生成した土について言われる。これこそわれわれ自身が解決しなければならない問題で、外国で得られた法則性をそのままもって来るのではなく、わが国の特殊土に合致する法則性、特に力学特性を見いだすことが必要ではないだろうか。

このようなわが国の特殊事情に根をおろした研究成果はそれなりに評価され、世界の土質体系に組み入れられて行くもので、そのまま世界の潮流に乗り得るものと言えるのではないだろうか。

(原稿受理 1976. 7. 23)

※

※

※