

第 5 部 門 土 圧 , 岩 圧

いち はら まつ へい
市 原 松 平*

第 7 技術部会 (第 5 部門, 土圧, 岩圧) は, 9 月 13 日の 15 時から 17 時までの 2 時間にわたって行なわれた。

総括報告者 (General Reporter) はチェコスロバキヤの Brno 工科大学の Mencl 教授であった。議長 (Chairman) としてはプログラムではソビエットの Sokolovski が予定されていたが, 欠席のためにオランダの V. Mierio が代って議長を勤めた。また, パネルメンバー (Panel Member) はデンマークの Brinch Hansen, イギリスの W.H. Ward, その他 2 名がなり, パネルディスカッション (Panel Discussion) に続いて 1 人 4 分以内の講演をするフロアディスカッション (Floor Discussion Member) は, 高木俊介氏の他 8 名であった。

以下において筆者は, この部会を最も高所から見わたしている総括報告者の報告を中心にして述べて行こうと思う。この報告の随所には, 提出された全論文 (16 編) の内容が簡潔に説明されている。以下に示す 1. と 4. は主としてディスカッションの提案事項を説明したものであり, 2. と 3. は論文集に掲載された論文の説明である。

総括報告者は冒頭において次のように述べた。「この部門では土圧と一緒に岩圧をも取り扱っている。土圧に関する書物は年々増加の傾向にあるにもかかわらず, この部門に提出された論文の数は, 前回のパリー会議 (21 編) に比較すると減少している。この理由は前回のパリー会議で討論された『土圧の一般的性質に関する問題』がまだ回答されていないためであると考え。しかしながら提出された論文の中には, パリー会議で討論された事項を追求しているように考えられる論文も見受けられる」と述べた後で「あとのディスカッションを挑発するために, 土圧, 岩圧に関する問題点を厳密に指摘したい」と結んでから, 以下に示す各項の説明を行なった。

1. 壁体に作用する土圧の基本的問題

(1) 塑性論の解の土圧への適用性について

構造物の安定を検討する際に, われわれは主動土圧, 受働土圧を取り扱うが, この場合の土圧は古典塑性論による解を用いた土圧式を使用している。ところが土質力学や岩盤力学で取り扱う土や岩は, 古典土圧論の原理とは異なった性質をもっている。その一つとして, 土や岩

はせん断変形時にダイレイタンスーという現象を起こしたり, 容積収縮を来したりする性質をもっているということがあげられる。これらの性質は土や岩では最も重要であると考えられながら, 従来の土圧論では, それがいまだ考慮されていない現状である。

かつて, Dr. Bjerrum (1961) がパリー会議のパネルディスカッションでこの点を指摘したが, そのときには皆の注目を引くまでには至らなかった。しかしながら斜面の安定問題において斜面のスベリを考えると, 薄いスベリ面 (剛体スベリ) でスベるものか, それとも大きな塑性領域 (ランキン式スベリ) が起こるものかは, 実にこのダイレイタンスーの影響によるものであると考えられる。

また, 擁壁問題については, 静止土圧から主動土圧まで壁が変位するときの変位量は, 土が密であるほど大であるが, セン断試験による応力ヒズミの関係はこれとちょうど相反し, ゆるい土を用いた方が密な土を用いた場合よりも最大の応力を出すまでの変位量は大である。この不思議な事実も多分ダイレイタンスーで説明されるものと考えられる。

この点について, P.W. Rowe (1963, A.S.C.E. Jour. S.M. and F. Division, SM 3) の論文が注目される。Rowe の論文が討議されたときに, それは批判を浴び, また最小エネルギーという懐疑的な仮定が含まれてはいたが, この論文は, 土圧を最小ポテンシャルエネルギー理論の見地から研究するために, 近代塑性論が全面的に必要なことを述べている点で, きわめて興味深いものである。ダイレイタンスーがどのように土圧に影響するものであるかについての他の例としては, 今回提出された Arthur と Roscoe (5/1) の測定があげられよう。この研究では, モデルテストによって砂粒のせん断ヒズミを研究し, その結果をもとに, 受働土圧に達するまでのヒズミはせん断試験によるヒズミに比べてきわめて小さい値であることを強調している。

古典塑性論による破壊機構と比較した場合に, 土の挙動に関する二番目の差として, 土塊の変形はせん断のみによって起こるのではなくて, 土塊の有するタワミの性質 (flexibility) によっても起こるものであるということがあげられる。

粘土ならびにアースダムのタワミ性については Leonards と Narain (1963, A.S.C.E. j. S.M. and F. D.,

* 名古屋大学工学部, 工博

第 5 部 門

SM 2) によって研究され、土は引張りキ(亀)裂さえ許せば非常に大きくたわむことができることが、この研究から明らかにされた。

以上のことを考えて、総括報告者は、次のことを討議事項として出提した。すなわち、土塊や岩塊のせん断破壊と普通の塑性論(古典塑性論)におけるそれとを比較した場合にどのような差があるか、またその差を考慮する価値があるものかどうか、さらに近代塑性論の方法を用いて上述した土の特色を取り扱うことができるかどうか、という点である。

(2) 極限設計

土圧を受ける構造物の安定、斜面の安定、支持力の問題において、われわれは極限設計を行なっている。この極限設計は土の全般に関することで、この土圧の技術部会でこれを論ずるのはおかしいかも知れないが、これらの極限設計では土圧がその基本をなすものであるから、あえてこの問題をここで取り上げたい、と前置きしてから総括報告者は次の見解を述べた。

各国の極限設計の仕様書から考えて、これには二つの方法がある。そのうちの第1の方法を分析すると、次の(a)、(b)の二つに分けられる。以下にこれらを順を追って簡潔に説明しよう。

(a) 構造物に作用する荷重(active load)に対しては、予定以上の荷重が作用すると考えて overloading の係数を乗じ、解明されていない項目には ignorance (未解明)の係数を乗じ、さらに厳密な意味における安全係数を乗ずる(作用荷重を大にする)。構造物に作用する抵抗荷重(passive load)に対しては、低減率を乗ずる(抵抗荷重を小に見積る)。強度のパラメーターの意味をもつ c と $\tan \phi$ に対しては、長期における強度減少を考慮して正確に計算する。以上のもとで正しい静的計算を行なう。

(b) 作用荷重(active load)には overloading の係数を乗ずる。また抵抗荷重には低減率を乗ずる。 c と $\tan \phi$ を ignorance の係数と安全係数で除して、 c と $\tan \phi$ の値を小にする。以上のもとで正しい静的計算を行なう。

(a)、(b)の両方法は差がほとんどない。ただ(a)方法は、実際の c と $\tan \phi$ とを計算に用いる関係上、実際に近いスベリ面が計算から得られる。両方法とも構造物の安全度(たとえば破壊に抵抗する力ないしモーメントと破壊を起こそうとする力、あるいはモーメントの比)が得られるが、両方法とも受働土圧に関する問題、すなわち抵抗土圧は外力に応じて生じ、その極限が受働土圧で表わされるという根本的な問題に相反している。

第2の方法は次のようにして計算する方法である。たとえば、受働の問題(支持力、受働土圧)を計算する場

合には、作用外力に overloading の係数を乗ずる。このときもし破壊に抵抗する外力があれば、それに低減係数を乗ずる。次に c と $\tan \phi$ の値は、長期間における強度減少を考慮して求める。そして最後に正しい静的計算から得た支持力、受働土圧を ignorance の係数と厳密な意味における安全係数で除した値をもって設計値とする。なお、主働の問題(主働土圧、斜面の安定)を計算する場合にも、安定な高さを求めれば計算方法は上記受働の場合と同じである。

このようにして求める第2の方法の長所は、合理的な計算方法を用いれば経済的な設計が得られるという点であり、また短所は、第1の方法と同じように受働土圧の考え方と根本的に相反している点である。

以上のように各構造物の設計計算法を統一することについては、異論を唱える者もいるとは思いますが、現場で実際の立場に立っている人には有益であると考えられるとの見解から、総括報告者はこのことを討議事項として提出した。

極限設計に関するパリー会議の討論では、矢板壁の支承の降伏(アンカーの降伏、ならびに根入れ部の土の降伏)は主働土圧分布に大きな影響を与えるということが確認され、また Tschebotarioff (1962) によってそのことが発表されてから種々の計測によるすぐれた再調査ならびに解析が行なわれてきた。そして変形と土圧との関係は今回の会議の論文でも論ぜられている。

Verdeyen と Nuyens (5/13) は矢板壁の控え板のまわりの土の崩壊機構を模型によって調べ、控え板の引張り抵抗の測定結果を示した。その論文において、控え板の長さが異なる場合には、控え板前後の土の崩壊機構が変化することを追求したことは興味深い。

また Hueckel ら (5/15) はモデルテスト(板の大きさ $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)により控え板の表面に作用する受働土圧分布を研究したが、これはロンドン会議に提出した控え板の抵抗に関する模型実験ならびにその後(1961)発表した論文に対する補足である。この論文においては、板の埋設の深さを変え、砂の密度(海岸砂を使用)を変えて実験し、(i)土圧の分布形状は引張荷重の大きさによって本質的には変化しない。(ii)極限土圧分布については、古典土圧論によるものとは、鉛直ならびに水平分布ともに異なっている。また極限土圧の大きさを古典的な方法で板の表面に分布させると、古典土圧による値と5%の差がある、ということなどを示している。

(3) 裏込め土が粘土である場合の剛性壁の安定

これは基本的な重要度をもっている第3番目の問題としてあげられる。

1930年代にすでに Terzaghi が粘土の土圧が作用す

る剛性壁では、非常にのろいが、着実に進行する壁の傾斜が起ることを指摘した。そのとき以来、粘土の長期間の強度について研究され、パリー会議では、これについての多数の報告が提出された。それらを要約すると次のことがいえよう。すなわち実用的見地からみれば、標準せん断試験による値よりも最大 30% 割引いた値で設計すれば安全である。この値で設計した場合、剛性壁の変位がたとえ対数的の減少、すなわち移動が止まらないということがあっても差しつかえない。しかし、最近の Suklje と Vidmar (1961) および Vidmar (1963) による粘土の土圧に関する研究からすれば、35% の割引が必要であることがわかる。

ここで、粘土の土圧を解析するためには Relaxation せん断試験の必要性が生じてくるものと考えられる。そこでこの試験を行なったところ、粘土では標準せん断試験のわずかに 30% の強度しか得られない (Mencl, 1964) という注目すべき結果が得られている。しかしながら、上述したように、設計ではこの値は、標準せん断試験の 70% でよいと考えられる。

結局、技術者が設計に際して考慮するに足りない程度の、長期間におけるわずかな壁の変位をも許そうとしないならば、上記の値 (標準せん断試験値の 30% を割引いた値) よりもっと少ない強度 (30%) で設計しなければならない、ということからこの点を考えて、総括報告者は、粘性土の主働土圧の信頼すべき計算法を、この会議の討議事項とした。

(4) 既存構造物の観察

可トウ (撓) 性の壁に作用する土圧は難解であるので、パリー会議では既存の壁に作用する土圧を測定することの重要性が強調された。そしてこれに関しては、新しい興味ある結果が遠藤正明 (1963, Proc. I.C. on S.M. and F. Hungarian Academy of Science) によって報告されている。

これは掘削中とその後の土留め壁としての 7~9 m の矢板背後の土圧を計測したものであり、その結果は Tschebotarioff の結論した値とよく似ている。

なお、可トウ性の壁のより進歩した設計法についてということが討議事項として取り扱われた。

2. とくに興味ある問題

この会議に投稿された諸論文によって、次の四つの問題が解明されている。

(1) 振動を受けている砂の主働土圧

地震工学会において大きな関心の的であるこの問題に対して、市原の論文 (5/6) がその解明の指針を与えている。市原は入念に作られた大規模な装置によって実験し、次の結果を得ている。すなわち、低振動数の振動に

おいて壁を変位させれば、土圧係数は減少するが、合力の着力点は壁高の下から 1/3 より上の方に位置し、壁摩擦角としては静的状態にみられるもののわずかに 25% が得られた。

(2) 高い Crib Wall の崩壊

平面的にみて、外部に凹形をなした高さ 10.2 m の Crib Wall (ワク壁) の破壊機構についてチェボタリオフ (5/12) が論じたもので、平面的にみて凹形のワク壁は凸形のワク壁よりも破壊を起こしやすいと結論している。この理由として壁が沈下して外部に変形を起こすときに、裏込め土の中間主応力が減少し、その結果この裏込め土の強度の減少が破壊に役かうことになるためであると述べ、実用のための規定を示している。

(3) 埋設管に作用する土圧

この分野に属するもので大きな興味を引く論文が三つある。

まず、Habib と Luong (5/3) は薄い可トウ性の管の挫屈による破壊の危険性を解析し、理論式と実験結果とを比較している。

次に、埋設管とこれを取りまく土との相互作用については、Luscher と Höeg (5/8) が研究している。この相互作用は、(1) 管への土圧の再分配、(2) パイプの変形に対する土の拘束、(3) 土のアーチング作用に分けられる。これらの各相互作用を実験的に確かめ、埋設管の耐荷能力に及ぼす影響について述べ、耐荷能力の増大法を示している。この論文で特筆すべきことは、土のアーチング作用は埋設管に到達する載荷重の一部を減少させるのに役立ち、アーチングの概念は垂直スベリ面による従来の考え方よりも一層パイプへの土圧軽減に役立っていると述べていることである。

最後に、Malisher (5/9) は盛土中に埋設される円形断面の管水路に作用する土圧 (鉛直と水平)、ならびに管の各断面の曲げモーメントの計算法を、盛土の施工法を変えた種々の場合に対して示している。そしてこの論文では、管の可トウ性、支持地盤の変形特性、地震作用、間ゲキ水圧を考慮して計算した便利な公式を与え、また公式中の係数を表に示して、最後に計算例まで掲載している。

(4) 地下爆発の効果

Vesić (5/15) は地中での核爆発によって作られた穴の大きさや形を支配する種々の要素の考察を土圧問題として取り扱い、実際の爆発と模型実験による観察にもとづいて合理的な解析法を示している。とくに、爆発によって生じるくぼみの半径を正しく、かつ簡単に古典的な土質力学で計算している。これは、爆発のメカニズムを単純化し、動的現象を静的に取り扱っているにもかかわらず、計算値は核爆発の観測値と非常によく一致している。

第 5 部門

3. 測定技術

投稿された論文中には、新しくかつ巧みな測定方法を用いて行なった実験の結果が多数示されている。その中の一つとして Arthur と Roscoe (5/1) の論文があげられる。この前の論文において Arthur と Roscoe (1964, *Geotechnique*, Vol. 14) は、X線で測定したヒズミをもとにして、土中応力を計算する方法を紹介しているが、今回の論文ではX線技術を用いて実験を行ない、土ソウ(槽)内の砂のヒズミを計測して、次の重要な結果を得ている。

(i) 側壁の摩擦は土ソウ内のヒズミ、したがって応力を決定する重要な要素ではない。

(ii) 土ソウの剛な側壁によって横方向のヒズミがまったく許されない平面ヒズミは、実際の場合では、無限に長い基礎の場合に最もよく似ている。

(iii) 有限の大きさ($B \times L$)をもつ基礎は、二次元模型(剛な側壁を有する土ソウ)では明らかにすることはできない。これを二次元模型で実験するときには、土ソウの側壁の剛性を基礎板の大きさ($B \times L$)と土の圧縮性を考慮して決定しなくてはならない。その理由は基礎の破壊時に、有限の大きさを有する基礎板では中間主応力の減少が、土のせん断強度とヒズミに重要な影響を与えるためである。この場合にはまた Coulomb-Mohr の破壊原理は成立しない。

土圧計のすぐれた解析は Hamilton (1960, National Research Council of Canada, No. 109) によって行なわれた。また、可トウ性の矢板壁(模型壁)に作用する線荷重による土圧分布については、Verdeyen と Roisin (5/14) が実験している。その結果は、矢板壁の可トウ性のために、分布形状が Terzaghi (1954, *A.S.C.E.* Vol. 119) の提唱した式とは異なっている。そのために彼らは Terzaghi の線荷重による矢板岸壁の土圧分布式を修正している。

この論文の結果の一部はパリー会議(1961)にも提出されている。

4. 壁体ならびにトンネルに作用する岩圧

総括報告者は次のことを強調した。

「岩盤力学のうち岩圧に関する限りでは、その計測と計測技術の開発が非常に興味ある課題になっている。

1964 年までにアメリカで行なわれた岩盤力学の七つの国際会議では、この課題の発展に大きく寄与している。

また、ヨーロッパでは、国際岩盤力学会議の活動ならびに第 8 回国際大ダム会議において岩圧について論ぜられ、多くの出版物が出ている。したがって、この分野で

の活動を広い視野のもとに立って述べることは至難ではあるが、岩圧問題を土質力学的に考察することは非常に役立つ、ということをご皆さんにお知らせしたい。と述べ「そうすることによって、前回のパリー会議の申し送り事項(パリー会議論文集, Vol. 3, p. 165)を私たちは継承したことになる」と付け加えた。

(1) 柔らかい地盤中のトンネル

この分野に関する問題は、土質力学の考え方と解析の方法とを用いて研究されなくてはならない。この部門に対しては、次の三つの投稿があった。

Ward と Thomas (5/16) はロンドンクレイ中のトンネルの覆工(lining)に作用する土圧の測定と測定結果の考察を示した。彼らは覆工の変形は数多くのセグメントの変形を計測して求めており、そして非常に多くの Vibrating Wire Strain Gauge を用いて 3 種類のセグメント(鉄製 2, 鉄筋コンクリート製 1)の変形(断面の曲げモーメントも求められる)を 6 年間にわたって計測し、その結果を示している。その結果から、変形は建設後 2~3 カ月間に急速に発達し、その後も徐々に継続して、垂直方向の直径が減少し、水平方向が増大するような変形をする、と述べ、さらにまた、セグメントの外を押す土圧はかなりに均一で、変形の増大とともにその値は、水圧的に作用する上載圧力(土カブリ粘土荷重による鉛直土圧)に接近してくることを述べている。また、この論文には、この種の計測における注目すべき計測方法が述べられている。

Sutherland (5/11) は海底トンネルからシャフトを土カブリ砂 6 m を通して、海底まで押し上げる力を計測するために、モデルテストで解を求めた。それによると、密な砂では、公式による値よりもより大きなシャフトの押し上げ力を必要とすることがわかり、モデルテストによる解と、その後に行なった実際の場合の値とがよく一致したことを述べている。

以前に Rocha (1957, 第 4 回国際土質力学会議論文集, Vol. 1) が、土質力学における模型の利点を述べたが、Sutherland のこの研究は、次元的に類似した模型を用いれば、理論的に解が求められない問題を解く上において、土質力学では非常に有益であるということを実際に示した点だけでも注目に値する。

Bent Hansen と Nielsen (5/4) の論文では、柔らかい粘土中のトンネルの挙動を予想するために、理論土質力学がいかに役立つかをすぐれた方法で示している。なお、この論文において示されている圧密理論の新しい解法は、非常に興味深いものである。

(2) 岩のせん断強度

総括報告者はここで次のように述べている。土質力学の考え方が岩盤力学のそれに影響を及ぼすのは、このセ

ン断強度の分野である。ところが岩層中に移動が起こったならば、ダイレイタンスの作用がセン断強度にかなりの影響を有する、ということを岩盤力学者はわかっていない (Mencl, 1963)。また、このダイレイタンスは、岩のアーチング作用や、岩に急激な破壊を起こす応力集中の発生などにも一役かっているのである。さらにまた、岩が固結しているといった有益な効果にも、このダイレイタンスが大きく貢献しているのである。

なお、非常に深い位置における岩の挙動が、浅い位置におけるそれと異なるのは、ダイレイタンスの消失によるものであり、この現象はちょうど高压の作用下における砂の挙動とよく似ている。ちなみに、砂は高压のもとでダイレイタンスという現象を失う (Vesić, 1963) ということがわかっている。

(3) 模型実験理論

岩盤力学の問題は複雑であるために、模型を使用することがいまも盛んに行なわれている。Oberti と Fumagalli (5/10) の寄稿は、その研究のすぐれた方法を示している。この論文では次元解析により岩の模型として土を使用している。しかしながら、土の力学的挙動を岩のそれとまったく同じであるとするには、両方の材料の力学的性質について十分に理解しておく必要がある。これについて総括報告者は、チェコスロバキヤの鉱山学会で行なった実験で成功した例について述べた。なおここで、土と岩との力学的挙動の類似性についてが、討議事項として提出された。

(4) 現場実験

岩の応力と変形に関する野外計測は、岩の力学的挙動を理解する上に非常に役立つものである。そしてすでに鉱山やトンネルにおいて、これらの計測が成功している。

前述した Krsmanović と Buturović (5/7) はトンネルの覆工に弱い岩によって作用する岩圧を各覆工の区域ごとに 10~12 個のジャッキを用いて 650 日間にわたって計測し、その結果を示している。それによると、覆

工の変形や破壊の状態から判断して、また実験結果からみて、岩圧は最初に覆工の両側面に作用し、時間が経過するにつれて、頂部の岩圧が増大してゆくということがわかった、と述べている。このことから総括報告者は、適当なときにトンネル断面の頂部覆工の背後の空ゲキ中にグラウティングを行なうことは、トンネルにかなり有効的であるという意見を述べた。

5. 討 論 事 項

討論事項を一括して要約すると次のようになる。

(1) 土塊や岩塊のセン断破壊と普通の塑性論 (古典塑性論) で取り扱っているセン断破壊とを比較した場合に、どのような差があるか。また、その差を土圧論で考慮する価値があるかどうか。近代塑性論を用いるとすれば、土塊、岩塊におけるダイレイタンスの現象とタワミ性とを土圧論、岩圧論に取り入れるには、どのような方法を用いればよいか。

(2) 限界安定状態がある場合に、それらのものの設計計算に均一性 (設計計算を同じ型で行なうこと) を求めることは、実用的な価値があるかどうか。またあるとすれば、どのような案が推薦されなくてはならないか。

(3) 土圧問題における土の強度低下現象について、粘性土の主働土圧計算法について。

(4) 可トウ性の壁のより進んだ設計法について。

(5) 土と岩の力学的挙動の類似性、ならびにその類似性が岩圧の解析法に及ぼす影響について。

なお、フロアーディスカッションの際に、米国陸軍の研究所の高木俊介博士が次のような注目すべき発言を行なったのでここに付記しておく。すなわち “近代塑性論で土圧を解明する場合には、応力の主軸の方向とヒズミの主軸の方向とを一致させずに、ある角度を考えて計算しなくてはならない。また、土の特性を入れて近代塑性論で土圧を解明するためには、現在の数学を変えなくてはならない”。

(1965.11.29)

※ ※ ※