

## 第7回国際土質力学・基礎工学会議に出席して

村 山 朔 郎

### SOME TOPICS ON THE SEVENTH CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING

By *Sakuro* MURAYAMA

#### Synopsis

In this paper, some topics collected at the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering held in Mexico City on August 1969 is reported. Besides, some state-of-the-art reports presented to the Conference are introduced relating to the macroscopic or engineering behavior of soils.

#### 1. は し が き

国際土質力学・基礎工学会議は4年ごとに開かれることになっているが、その第7回大会が1969年8月24日～30日の1週間にわたり Mexico City で開催された、会場は National Medical Center の中にある Congress House で、ここには9つの講堂があり、最大のものは2,000人を収容できる。この会議には、約40カ国から約2,000人が参加して盛況であった。日本からは約30名、当研究所からも山口、柴田、村山が出席の機会を与えられたので、ここに、3人に代って、会議の様子などを報告する次第である。

#### 2. Mexico City の地盤

Mexico City (人口約700万人) は、熱帯に位置しているが、海拔 2,000 m の高原にあるため、夏も涼しい。しかし、8～11月の間は毎日きまって午後にはスコールがある由で、今回の会議中も夕方近くになるとにわか空が曇り大雨に見舞われる日が続いた。

Mexico City の土質的な特徴は、市の谷を埋めている軟弱粘土 (soft clay) にあるともいえる。そのために地下水汲上げによる地盤沈下や、基礎の支持力不足に起因する建物の沈下が非常に目立っている。特に、古い建物は基礎工学が発達していないときに構築されたので被害も著しく、国立劇場 (Palacic de Bella Artes) やグァダルーペ寺院 (Villa de Guadalupe) はこの代表例として挙げられる。

すなわち、国立劇場は1940年の着工で建物底面積は  $81.5\text{m} \times 119\text{m}$ 、自重だけで平均  $12\text{t/m}^2$  の接地圧を与えるものであるが、工事最中に  $4\text{cm/月}$  の沈下を示し、完成に近づくにつれ重量が増したためさらに沈下量がふえて  $4.3\text{cm/月}$  となり、工事をやりなおして1934年まで竣工できなかった。この地盤は、地表下約  $18\text{m}$  のところにやや硬い粘土層があり、劇場は杭基礎をもった古い寺院をこわした上に建築された由である。沈下対策として注入などの地盤改良工事を行なって漸く  $1.1\text{cm/月}$  の沈下速度までに改良し、なお改良をつづけたが、今日すでに  $3.5\text{m}$  も沈下して、道路面と大差ができ階段も破損している。

Guadalupe 寺院は、16世紀はじめ信仰深い羊飼いのインディオの前に聖母マリアが現われたという奇蹟を記念して建てられた寺院で、Guadalupe の聖母はメキシコ人の信仰の中心となっているが、建物が不同沈下のため傾斜しているのはいたましい。この不同沈下は、軟弱粘土層の厚さに不同があるためで、境内ではその厚さは  $5\sim 50\text{m}$  の差があり、粘土層の底が峯状になって尾根の線が本殿を横切っている。そして最

大沈下量はすでに 2.4 m に達している。現在、対策を進めつつあったが、境内のある建物は、すでに対策工事を済ませていて、建物直下に打った鋼杭に基礎を受けかえるとともに、将来鋼杭に不同沈下が生じたときのことを考慮して支持点を調整するように工夫をしていた、

### 3. Executive Committee

筆者は、日本の National Committee からはからずも正代表者に指名されたので、大会の始まる2日前の8月22、23日に理事会に出席した。その模様は国際会議として重要なことが多いので、簡単に報告する。

従来、この理事会は本会議の間に行なう程度のものであったが、今回は国際土質力学会(Int. Society for Soil Mech. and Foundation Eng.)の定かんの改訂や第7回大会の運営を従来と大きく変えたことなどに関して、2日にわたる会議となった。この理事会は、国際学会の会長 Bjerrum 博士(ノルウェー・国立土質力学研究所長)と地域代表6人および各 National Committee の正副代表2人(投票権は正代表のみ)で構成されている。現在加盟国は42カ国であるが、中華人民共和国やローデシヤなど2、3の国の欠席で、38カ国が出席していたようである、2日間の会期中、毎朝9:00から夕方17:00まで、昼食と午前、午後2回の各15分の coffee break のほかは連続の会議というきびしいものであった。

議事に先立つ報告承認の最大のものは、今回の大会の運営方針の大変更である。この運営方針は、前大会(Montreal 大会)のときに多くの人々の意見があったので、それを入れて Advisory Committee を作って組織委員会に助言したものである。この委員会の構成は会長、前会長、地域代表で作られ、決定された事項は次の6項目である。

1) 大会で行なう Main Session は土質力学、基礎工学の重要事項の中、さらに限られた少数の重要課題だけに限定する。

2) 従来は提出論文をまとめて報告する General reports があったがそれを廃止し、それに代えて Main Session のテーマとなった重要事項に関して最近の進歩を展望する lecture を行なう。

3) Proceedings に登載する paper を厳選して、登載数を少くする。

4) その代わり、会期中に誰でも参加できる Specialty Session を作り、課題の提起のあった人が Organizer となり、その Session の運営、出版その他は Organizer に委す。学会としては Proceeding に各 Specialty Session の概要だけを掲載する。

5) 大会の Opening Session で行なっていた Introductory lecture をやめる。

6) Closing Session をやめる。

このような重大な方針の変更の結果、Main Session は Montreal の前大会では6課題を9 Session で行なったのを、今回は5課題5 Session として1 Session に半日をかけることとした。

理事会では、国際学会の定かん、内規の全面的な改訂がはかられ、それらの案を逐条審議した。この案は出発前に日本にも送られてきたので、予め国内の意見をきいて参加することができた。日本からの意見の中には、多数の国から賛同を得たものも少くなかった。しかし、現用の英・仏の公用語に関する条項では、英語だけにしたいというオーストラリアの提案があり、日本の予めきいた意見もこの主旨に賛成するものが多いことをのべたところ多数の反対演説が長々と続き困惑した。会長も困られ決定をのぼそうとしたが、やがて午後の休憩時間となったのでオーストラリアの意見もきいて提案を引き下げ、ようやくおさまったようなこともあった。反論の中には公用語の数も減らすどころかむしろ増加すべきであるというものまであった。

その他理事会で決った重要事項は、(1) 1969—1973年の会長をイリノイ大学の Peck 教授に決めたこと、(2) 1973年の第8回国際会議の開催国は、インド、スウェーデン、ソ連が立候補の予定であったが、インドは中止し、残り2国が招待の提案を説明した。投票の結果ソ連・モスクーで開かれることに決定した。(3) 2年後に行なう理事会の開催地についても立候補した都市(メルボルン、バンコック、ブタペスト、ブエルトリコ)について投票を行ない、メルボルンを選んだ。オーストラリアの地域大会はこの理事会につづいて行なわれる由で、その時期は1971年8月10—17日になりそうである。

なおアジア地域の大会も2年後に開催されるが、この予定に関しアジア地域の代表者で打合せ会をたびたび開いた。この地域の加盟国は、日本、イスラエル、インド、中華人民共和国（欠席）、東南アジア（国ではないが1つの National Committee として扱われている唯一のもの。マレーシア、タイ、シンガポール、香港、フィリピンなどの研究者、技術者が入会している）で、相談の結果、アジア地域大会は1971年7月下旬頃にバンコックで開催される予定となった。

#### 4. Main Session のことなど

大会中、初日午前は開会式、午後は Main Session-1 があり、残りの4日は午前は Main Session だけを、午後は Specialty Session と学術見学が併行で進められた。Main Session は2,000人入の大講堂で全員が参加し、Specialty Session は各室に分れて行なわれた。見学先は地下鉄工事、トンネル工事、地盤沈下、メキシコ大学の実験室であった。また昼の休憩時間や会議後には、学術や技術の映画が上映され、工事、工法、機械などの紹介があり、中でも興味を引いたのはアポロ11号の月着陸と月の土質状態の報告が NASA に関係している Scott と Mitchell 両教授から映画とスライドにより報告されたことであった。また会場には展示会が催されていた。最終日の土曜日には Teotihuacan のピラミッドの遺跡の見学旅行もあった。

Main Session については、前述のように paper の内容と量を規制したため論文の基準が非常に厳重となった。たとえば、paper の応募規定によると、Session-1 の paper は continuum mechanics, statistical approach, plasticity and yield surface, rate process, testing procedure の5項目に制限され、その内容の規準の例としては、「実験は理論的根拠をもって解析されたものに限り、何かの条件のもとで行なった実験を単に実験式で示した程度のものは受けつけない」とか、Session-4 のトンネル土圧の例では、「支保工の受ける荷重や変形は地山の土の力学的特性ならびに施工過程から解析的に帰納されたものとし、単なる理論だけのもの、測定だけのものは望ましくない」といった調子である。paper 数はこの方針に基づいたため前回の大会では218編（日本への割当9編）であったのが、今回はその70%の142編に減少され、わが国へは6編の割当という減り方となり、かなり狭い門となった。主な国と割り当て数をのべると、米国・17、英国・9、フランス・9、ソ連・8、カナダ・7、日本・6、オーストラリア・6、ドイツ・5、インド・5で、1編だけの国は15カ国であった。この割当数にしたがって、各国内委員会が paper を提出した。

Main Session の進め方は、研究の現状の展望について長い lecture があり（この内容はすでに Proceedings に出版されている）、その後数名の panel member が補足や自己の意見を述べたりして討論するようにされた。Session-1 では、予め登録されたものが floor discussion を行なった。以下に Main Session の内容を項目別に述べる。

Session-1; 土の応力-変形-時間関係、強度特性。一般報告者 R. F. Scott (U. S. A.)。

1) 土に対する連続体の力学、2) 砂質土の挙動に対する統計論的取扱い、3) 塑性力学でいう Yield Surface、4) Rate Process、5) 試験法。これを lecture のときは、1) Micro 的取扱い、2) 連続体の力学、塑性力学としての取扱い、3) 巨視的な取扱いに大別して述べている。すなわち Micro の取扱いは、土の微粒子の物理化学的性質（電気二重層など）と粒子間力の相互関係から Macro の土の性質を説明するもの、連続体の力学・塑性力学の Yield Surface は力の力学モデルを仮定して、力学的・数学的に進む手法である。また、巨視的取扱いは、従来から行なっている土の応力・変形・破壊・time effect, temperature effect などで、問題点やそれに関する研究が紹介された。

Session-2; 粘性地盤上の基礎。一般報告者 V. F. B. de Mello (Brasil)。

1) 圧密した飽和粘土の沈下特性、特に圧密応力附近の沈下特性、2) 沈下量の予測と沈下記録との比較、二次圧密、3) 不等沈下、4) くい、ピアの荷重-沈下-時間関係、施工条件との関係、5) 時間効果を考慮したくいの負摩擦力。

Session-3; アースダム、ロックフィルダム。一般報告者 S. D. Wilson (U. S. A.)。

1) 基礎の変形を考慮したダム材料の荷重・変形特性, 2) 力の変面変形を考慮した安定解析, 安全率の意味, 3) 特殊問題をもつダムやユニークな設計実例, 4) ダム基礎の深層処理, 5) ダムの築堤に際する施工規制 (応力分布, 間げき水圧)。

Session-4; 深い掘削, トンネル。一般報告者 R. B. Peck (U. S. A.)

1) 深い掘削時の根切り底面での安定性, 2)  $c-\phi$  地盤を深く掘削したときの応力変化と変形の解析と実際, 3) 軟弱地盤中のシールド工法の適用条件, 4) トンネル支保工の受ける土圧と変形。

Session-5; 自然斜面と盛土堤体基礎。一般報告者 A. W. Skempton (England)

1) 地すべりの分類, 2) 切り取り, 自然斜面の崩壊に関する time effect, 3) 進行性破壊, 4) クリーブ性移動の記録, 5) 対策。

この panel discussion では, 全応力法と有効応力法による安定解析の比較が多く事例について話し合われた。

Specialty Session は会期中の4日間の午後, 同時にいくつもの部屋に分れて18課題, 22 Session が開催された。形式はいろいろのようであったが, 話題提供をして discussion をするようなもの, 論文の発表形式のものなどで, この新方式の実施結果については, いずれ検討して次回の参考に供することになっている。しかし, 会議の合間, 立話で聞いた意見には, Specialty Session の課題が Main Session の一部と重複していることや, Specialty Session が多すぎて十分聞けず, また似たものがあるので課題に統制をしてほしいと希望していた人もいた。

なお, Specialty Session の課題を挙げると, 土の動的問題, 間げき水圧, 粘土の物理化学的性質, 圧密理論, 土のサンプリング法, 現場試験, 土質試験法, くい負摩擦係数, 安全率, 道路および滑走路, 土へのアンカー工法, ベントナイト隔壁工法, 特殊土 (Loess, Expansive soil, Lateritic soil) など基礎的なものから応用的なものまで多方面にわたっていた。

## 5. 一般報告の抜萃

各 Main Session における一般報告は, すべて State-of-the-art report であった。ここでは全論文の半ばが集中した Session-1 の報告のうちの主要部分を抜萃して紹介する。

土の応力~ひずみ~時間と強度の問題を整理すると3つに分類できる。それは, 1) micro 的扱い, 2) 連続体の力学としての扱い, 3) 巨視的な扱いである。そして研究の現状はその大半が第3番目の範囲に属するので, 以下に巨視的な土の挙動についての現況を要約する。

### 5.1. 試験法と試験機

ある理論が提唱された場合に, それを検照するための試験としては, 土供試体中に発生する応力・ひずみは様であることが望ましい。また実際の構造物によって地盤中に生じる応力状態を実験室で再現するためには, 一般的な三次元応力状態を与えられるものでなければならぬ。さらに土は異方向性材料であるから, 供試体にかかる応力の方向も自由に換えられるべきである。このような諸条件を完全に充たす試験機はまだできていないが, 新らしい着想や改良が重ねられて急速の進歩をみていることは確かである。

現在最も広く用いられているのは三軸圧縮試験機であるが, この試験で得た結果の適用範囲については, 余り明確ではないようである。例えば近年注目されてきている端面拘束の問題にしても, このために不均一な応力, ひずみ状態が生じるならば, 本来の応力~ひずみの関係とは相当にかけ離れたものが観測されるであろう。この端面拘束の影響を消すために, 供試体と載荷キャップ・底板との間を滑らかにする試みがなされており, それによれば直径4", 高さ8"という標準寸法 (すなわち高さと直径の比が2:1) では端面拘束の影響は殆んど無視できるが, 試料高をそれよりも太短かくするともはや無視できないという結論である。

一般的な三次元応力状態を再現する試みは Kjellman 以来, 多くの人達によって続けられている。そして土の変形, 体積変化, 強度などがそれぞれ独特の試験法によって測定されているが, 供試体中に生じる応力・ひずみの一様性を考慮すると, 通常の三軸試験機以上に問題点を含んでいるようである。

## 5.2. 変 形

土は非常に複雑な材料であるから、その応力とひずみの関係もまた複雑なものとなり、理論的に説明するのは至難の業といわねばならぬ。その場合に、まず最も簡単化したモデルから出発するのが通常かと思われるが、それは理想化された均質、線形弾性体が微小変形を受けるものとされる。そして解決のステップとしては線形非等方性→非線形等質性→非線形非等方性（いずれも弾性体）と進めていくことができよう。しかし、大変形を対象とすればさらに複雑となり、破壊点に近づいてエネルギーの内部消散があると剛塑性理論が必要となる。

等方材料に対する線形微小変位の弾性論では、体積変化とせん断変形はそれぞれ独立に起り、したがって重ね合せの仮定を含んでいるが、この仮定の妥当性は余り検照されていない。土の等方圧密試験は工学的な意味は殆んど無いが、上述の仮定を検照するためには重要な意味を持っており、平均有効主応力を一定に保持する試験もこの目的をもっている。

土は多くの場合異方向性材料であるから、自然土に対する等方性の仮定もまた疑わしい。さらに応力、変形が加えられると異方向性を増大するので、応力履歴の研究も重要である。三次元応力状態や、変形が拘束された条件下での挙動を調べるために、中空円筒供試体による三軸試験や平面変形試験などが行なわれている。また動的弾性係数の研究もかなり行なわれている。

高圧下における砂質土の変形問題も注目されてきており、圧力が高くなるほど粒子の破碎が顕著になり、ダイレイタンシー効果が減少するのである。また主応力軸の回転の問題も扱われており、例えば繰り返したカオリン粘土についての実験によれば、主応力軸の回転は、強度や間げき水圧係数に顕著な影響を与えるとのことである。

## 5.3. 砂の破壊・降伏

砂質土に対する興味の中心は yield surface にあるように思われる。主応力空間において工学上の対象となる通常の応力範囲では、破壊面は平均有効主応力に対して線形とみなしうるが、 $10 \text{ g/cm}^2$  程度の低応力下では、線形からはずれて曲面となる。そして極端な低応力下では、砂の有効内部摩擦角は非常に大きな値となる。一方、高圧下（粒子が破碎する圧力の目安として  $100 \text{ psi}$  が高圧の下限）では、圧力が増すほど傾斜がゆるくなる曲面となるので、内部摩擦角は徐々に減少する。また高圧下では初期間げき比の影響が消えて破壊面が一つに収斂するのも興味ある現象である。

中間主応力の大小が破壊面の形状に与える影響については多くの研究があるが、必ずしも一致した結果は得られていない。

砂の強度に与える因子としては、粒子を構成する鉱物の種類、粒度組成等がある。電子顕微鏡写真によれば試料中のせん断領域は、粒子径の10~20倍であり、一旦せん断域が発生すると通常の方法によるひずみ測定法は余り信用のおけないものとなる。

飽和砂の液化現象は、間げき比、拘束圧、繰り返し応力あるいはひずみの大きさに支配されることが判っている。特に注意をひくのは密な砂でも何回か繰り返し載荷しているうちに液状化を誘発することである。この現象については試験機の種類によってその様子が非常に異なるので、この疑問を解くことが大切と思われる。

## 5.4. 粘土、不飽和土の破壊・降伏

粘土の破壊面の決定については、砂と比べるとデータの数が少ないようである。しかし種々の応力状態下の粘土の変形、間げき水圧、強度などを調べた結果によれば、内部摩擦角は三軸圧縮と伸張試験では等しく、中間主応力によってその値が増加することが判明している。Roscoe らの Cambridge 派の応力~ひずみ理論は着実に発展されて、応用面でも擁壁に作用する主働、受働状態における土中の応力、ひずみを推定することが可能となっている。

自然の粘性地盤では、その力学的性質がランダムに変動していることが多いので、試験結果を整理して設計値を出す場合に、確率論的な手法を取り入れる研究もなされている。北欧やカナダにおける quick clay

と称する超鋭敏粘土,あるいは London clay にみられる亀裂性の粘土についての報告にもみるべきものが多い。

地震時の地盤中における応力とひずみの関係は,通常非排水試験でえられる関係と大巾に異なるものではない。そして繰り返し載荷をうける土の挙動についての研究は,Seed らによる多年の成果に代表される。

斜面のすべり解析とか自然地盤での載荷試験を通じて,色々な方法で求めた粘土の強度と,実際の土塊のすべり破壊との関連性の解明,ベーンとかコーン等の原位置試験法の調査,研究もなされている。ピートのような有機質土については,砂や粘土ほどには多くないが,データが集積されつつある。

低含水比の自然地盤,道路用盛土やアースダムでは不飽和土が対象となり, U. S. Bureau of Reclamation において広範囲な調査が行なわれた。もちろん,米国以外の人達による研究も活発であり,不飽和度の体積変化や強度に対して,有効応力の原理適用の可否が問われている。

### 5.5. 強度の異方向性

自然地盤の強度は,異方向性をもつために,安定解析ではその影響を無視できないことがある。このような非排水強度の異方向性はベーン試験によって求めることができ,その結果によれば,せん断断面上の初期有効垂直応力によってきまるといえる。また Norwegian Geotechnical Institute ではせん断面が水平となり角度を変えうる大型直接せん断試験(原位置)を行ない,ベーン試験等との比較を試みている。

一方カオリン粘土を用いた室内実験によれば,非排水強度に異方向性が認められても有効応力表示の強度パラメーターには,実際上の差異は認められず,間げき水圧係数に異方向の影響がみられた。過圧密粘土による試験でも,強度の異方向性は主として間げきに起因するものと結論されている。

### 5.6. 圧 密

粘土の圧密に関する研究の大勢は,クリープ的挙動(二次圧密)の解明に向っている。それは地盤中での圧縮は一般に三次元応力状態のもとでおこるために,体積クリープと偏差クリープが同時に生じ,室内試験の結果から地盤の二次圧密量を推定するには非常に難しい問題があるからである。試験法にしても,通常の oedometer test では主として体積ひずみが観測されるのに対して,三軸での異方向圧密試験では,偏差クリープ量が大部分を占めることになる。

室内実験の成果としては,球形の粘土試料に等方圧力を加えたときに,先行荷重をこえると二次圧密量が顕著になること,正規圧密粘土で載荷に小休止を与えると,みかけの先行荷重が増加すること等が判明している。また圧密係数を間げき水の消散速度から求めるのは正しい方法とはいえず, Terzaghi 理論より計算した透水係数は小さすぎるなど,等が報告されている。地盤の圧密速度を推定するための室内試験は,特に鋭敏な粘土では,非常にゆっくり載荷すべきことも注意されている。

現場での沈下測定記録が数多く報告されているのは近年の特徴である。その結果,死荷重に比べて活荷重が大きい地盤では二次圧密量が予想よりもはるかに大きくなること,基礎地盤の sampling には特に注意しないと盛土沈下量の推定を誤ることなどが述べられている。ピートのような有機質土では,二次圧密量が大きく,しかも長年に渡って持続するようである。

### 5.7. 時間 効 果

斜面すべり破壊の事例をみると,破壊までの期間はまずまずであり,複雑な機構によっていることが想像される。応力の載荷時間と粘土の強度推移についての成果はあるが,時間効果を生じさせる原因がまだ完全には判っていないのでそれを直ちに設計計算や安定解析にとり入れる段階にはきていない。時間効果の原因として,一応考えられる事項は発生する間げき水圧の大小,および粘土の粘性抵抗がある。rate process theory は粘土の経時変形について有力な知識を提供してくれるが,室内実験の場合でも破壊時間(材料の寿命)を推定することは難しい。まして自然地盤では境界条件が単純でなく,現象の複雑さは比較にならない。実斜面の変位や破壊記録の集積がまたれるゆえである。

土の時間効果には creep のほかに,過剰間げき水圧の推移なども見逃すことはできない。これに関連し

て層状地盤に盛土をしたときの間げき水圧分布の変化と支持力の推移を調べた報告もある。

### 5.8. 温度効果

温度の影響は、土の他の挙動に比べれば余り注意が払われていないようである。数種類の土について、間げき水圧に及ぼす温度の影響を調べた例によると、 $1^{\circ}\text{F}$ の変動により間げき水圧は初期有効応力の0.75～1.0%の変化をする。このことは実験室で温度コントロールをする必要のあること、および実験室で測定する土の挙動が現場のものとかげ離れる可能性のあることを示している。粘土の体積変化と間げき水圧はGouy-Chapmanの二重層理論における反撥力と関係しており、粒子が平行配列している粘土では温度の影響はこの二重層理論で説明できるであろう。

また温度が上昇するほど弾性係数（力学モデルのバネ常数）は減少し、強度も低下する。実際問題として、温度変化は斜面のcreep量に影響するし、あるいは建物の床と地盤の温度が異なるときは地盤の膨張、収縮をひき起し、thermo-elasticな問題が生じる。

## 6. む す び

土質力学、基礎工学の国際会議は回を重ねるにつれ盛大になってきた。そのため一方では会が大きくなりすぎて十分な研究交換の場にふさわしくないとか、出席者が多くて開催国の経済負担が重くなりすぎるなどの批判を今回の会場でも聞かれた。しかし漸新な研究の熱心な発表に直接接したり、いわゆる廊下談議を通していろいろの人の話を聞いたり、日頃文献を交換している人々と直接議論できるまたとない機会を得たことを思えば特に遠隔の国にいるわれわれにはその効果は決して少くなかったと思われる。

今回の出席によって土質力学の重要性に思いを新たにし、その進展に一層努めたいと思う。

なお5.の一般報告の抜萃については柴田徹教授に資料を調成していただいたのでここに謝意を表する次第である。