

土の応力・変形・強度特性

しば 柴 田 徹*

おお 太 田 秀 樹**

せき 関 口 秀 雄***

1. まえがき

きたる東京会議では、主部会(1)で土の応力・ヒズミと強度特性がとりあげられ、また専門分科会の中では、サンプリング(2)、原位置試験によるパラメーターの決定(5)および構成式(9)が討議される予定である。

これら諸課題に触れたレビューをするにあたり、まず第2節では20年間の流れをふり返ってみる。昭和30年ごろから今日まで、この分野におけるわが国の進歩は、欧米諸国に互してめざましいものがあるが、これには数多くの独創的な先達の影響を見逃すわけにはいかない。

つぎに第3節では、過去2回の国際会議で行なわれた総括報告を中心とした話題を紹介し、4節では最近のトピックスと思われるいくつかの事項を述べる。さらに第5節においては、土の力学特性として一般に認められてきた実験事実をいくつか列挙し、それらが理論の構成・検証のうえで果たしてきた役割りを探ることにする。

2. 過去20年間のながれ

2.1 コロラド会議のころ

土質力学は、戦後における土木事業の激増とともに急速な進歩を遂げたといわれている。そして戦後20年間の最も大きな進歩は、いうまでもなく土の強さに関する研究成果であり、1950年代の後半までに、土の強度特性は土質力学の分野で常に主要な研究テーマであった。

これらの成果を概観するには、1960年コロラド大学で開かれた「粘性土のせん断強度に関する会議」の論文集が適当であろう。この会議では Skempton, Bishop, Henkel らを中心とするインペリアル・カレッジ・グループ、また Bjerrum を中心とする NGI (Norwegian Geotechnical Institute) グループの人々によって、有効応力表示の強度パラメーター c' , ϕ' が、土質力学の中心的概念にまで高められ、かつ Terzaghi の教えをうけた人々の実務的な研究成果(1940~1960年)が象徴的に示されているからである。

ところで、Newmark は会議の冒頭でつぎのように語っている。“破壊条件に関する知識は過去20年の間ほとんど変わっていない。多分いくつかの新しい理論が出現したのであるが、それにしても20年前と同じように、実際問題に適用できるほどにはなっていない”と。実は1950年代の土の強度に関する研究は、その特性をいかに正確には握るかといった点に主眼がおかれ、インペリアル・カレッジと、NGI で性能のよい三軸試験機を作る努力が重ねられ、より信頼のおける実験結果が相次いで発表されていたのである。

それにもかかわらず、Newmark のお小言を頂戴せねばならないとは、一体どのような理由によるのであろうか。その解答として、Newmark 自身がやはり開会の辞で“破壊に対する明確な定義がないのが一因である”と語っている。なるほど彼が指摘したとおり、土の強度・圧密特性などに対し、より正確な実験に基づくデータが集積されてきてはいたが、実際の構造物を設計する際の計算法が、Terzaghi の教科書を半歩も出ていなかったのは事実であろう。

コロラド会議が開催されているころ、すでに幾人かの人達は着々と「破壊に対する明確な定義」を追求していた。彼らに共通した点は、1950年代の実験結果をさらに高精能の装置によりチェックするだけでなく、それに理論的な解釈を加えようと試みたことであった。そして1960年代の初めに、このような理論の組立てに成功したのは、外国では、Roscoe, Rowe, Scott らに代表される人々であった。

Roscoe は、まだ学位も持たない一介の講師であったが、誰よりも朝早くから夜遅くまで仕事に没頭し、かつ弟子達が必要とする研究費を調達するために奔走していた。当時インペリアル・カレッジでは、Bishop や Henkel が三軸試験機の改良に打ち込んでいたのに対し、Roscoe は単純せん断試験機の開発に力を注いでいたようである。その装置を用いて Wroth は Hvorslev の c_e , ϕ_e を追求し、後のケンブリッジ理論の主要な概念である状態限界曲面や極限状態線の考えを造りあげたし、また Schofield は流れ則 (Drucker, 1951) を土のせん断特性の説明に使ってみようと模索していた。

同じころマンチェスターの少壮教授であった Rowe は、表面エネルギー補正式の組み立て方に疑問を感じ、エネル

* 工博 京都大学教授 防災研究所

** 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

*** 工博 京都大学助手 防災研究所

ギー補正をした ϕ' の物理的な意味を厳密に考えようとしていた。彼はきわめて正確な実験を試み、その当時としては最も高度なテクニックを用いて一連の実験を行なっている。おそらく他の大学に比べて、研究費が潤沢ではなかったであろうから、実験装置にしても並々ならぬ苦労があったと想像される。

誇り高いスコットランドの家系に生まれた Scott は、グラスゴー大学を卒業後アメリカに渡った。不屈の冒険心を持ち、南極で倒れた父の影響をうけてか、凍土の研究などをしてきたが、1950年代の終わりごろ、それまでになかったような土質力学の本を書くことを決心したと伝えられる。彼はその著書に5年の歳月を投入したが、その中で最も力をそそいだのは、球の集合体が示す力学的挙動であった。その粒状体に関する研究成果は論文として公表せず、著書を通じて世に問うたわけである。

2.2 Rowe と Roscoe

土の応力・ヒズミ関係について、いち早く世界の研究者の目に触れる形で成果を公表したのは Rowe であった。1962年の論文は多くの反響を呼んだが、その翌年には Roscoe を中心とするグループが流れ則を応用したヒズミ硬化を持つ弾塑性理論を発表している。このグループの1963年の公表はかなり多彩であり、Roscoe, Poorooshasb, Schofield, Thurai Rajah, Calladine らが続々と論文を出している。この中で、流れ則を応用した理論は Schofield を中心として組み立てられたものであり、最も重点が置かれた降伏曲面の選択は Calladine のアイデアから生まれたものである。

このように、ほとんど時を同じくして発表されたいくつかの応力・ヒズミ関係の理論は、多くの人々の品定めをうけたのであろうが、当時のレベルで構成式の条件を満たしていたのは、Roscoe を中心とするケンブリッジ・グループの理論であったと考えられる。しかし、Drucker の流れ則を土に適用した最初の論文は Drucker, Gibson, Henkel らであったし、1963年にはオランダの De Jong がすでにノン・アソシエートな流れ則を土に適用しているので、理論上の新鮮さのみを評価するのはあたらない。しかもケンブリッジ・グループの理論で用いられている概念の多くは、すでに戦前に Haefeli が定性的に組み立てたものと類似である。

一方 Rowe の理論にしても、1963年に彼がそれを用いて擁壁の解析を行なったところ、Gibson と Morgenstern, Roscoe と Schofield, Schott, Trollope と Parkin らから痛烈な批判が寄せられ、彼はそれらに対して長文の回答を書かなければならなかった。これらの人々が指摘したように、Rowe の理論はいろいろな意味で不完全であったが、その後、同じマンチェスター大学で構造関係の仕事をしてきた Horne が1965年にそれをもっと厳密な形で組み立て直したのである。

さてマンチェスターの粒状体理論とケンブリッジの塑性理論とは、それぞれ異なった観点に立っているが、両者はその発端と結論においてよく似た特徴をもっている。まずマンチェスター理論は表面エネルギーの補正に対し、またケンブリッジ理論は Hvorslev のパラメーターに対する考察からスタートしたらしい。つまり両理論とも、元来は土の応力・ヒズミ関係を目指して研究がはじめられたのではなく、1950年代の主たるテーマであった土の強度に関する議論を、より厳密に展開しようという意図から出発したように見受けられる。

つぎにマンチェスター理論とケンブリッジ理論の結論にみられる共通点は、いずれもヒズミ増分が、応力状態で規定されるスカラー量のコウ配として与えられることである。いかえれば、ヒズミ増分比は、応力レベルできまるポテンシャルを持つということになる。

以上が両者の共通点であるが、これらの理論を導くにあたって、Henkel, Parry らによる実験的研究が重要な役割りを果たしたであろうことは想像に難くない。

2.3 わが国の事情

土の応力とヒズミに関して欧米で着々と研究が進められているころ、わが国でもいくつかの先駆的な仕事生まれつつあった。最上が粒状体の力学特性を記述するための試みを開始したのは、今から30年以上も昔のことであったが、当時から粒状体の間ゲキ分布とエントロピーの概念が芽生えていたようである。そして粒状体の破壊状態に対する理論の組立てに成功したのは、前出の Scott とほぼ同じ時期であったろう。これらの成果は、東京会議の特別講演で説明される予定である。

一方、村山は粒子間接触面の角度を確率分布として取り扱う独自の研究を積み重ねてきた。粒子間スベリの結果として生ずるマクロな変形を、確率の概念で処理する手法を生みだした経過は定かではないが、結論の一つとして、Kondner 流の双曲線近似の応力・ヒズミ関係を誘導することができた。なお1940年代の後半から、粘土のクリープ研究に憑かれ、初めて rate process 理論を土に適用する道をひらいた。

また星埜は、1950年ごろに土が弾性から塑性を経て降伏するまでの経過を統一的に説明できる基礎理論を発表している。当時わが国にはまともな三軸試験機がまだ一台もなかったため、その後三軸のデータがとれるようになってから、理論の手直しを迫られたとしても止むをえない事情があったと思われる。

つぎに、1961年パリ会議から1973年モスクワ会議までの10数年間、この分野で日本から提出された論文リストを表一1に示す。しかしながら、論文集の類は定期的な国際会議以外にも多数あるので、表一1はあくまで一つの側面に過ぎないことを断わっておかねばならない。

表一 主部会1関係に提出された論文

会議名	著者	題名
第5回 パリ (1961)	網千・門田 斉藤・上沢 星 塾 村山・柴田 山口	飽和粘土の三次元圧密 土のクリープ破壊 三軸試験における変形と間ゲキ水圧の解析 粘土のレオロジー特性 粒状体の塑性流動におけるヒズミ増分と体積変化
第6回 モントリオール (1965)	赤井・足立 河上・小川 柴田・軽部	有効応力からみた飽和粘土の一次元圧密と強度 繰返し応力をうける締固め土の変形と強度 正規粘土の力学特性に及ぼす中間主応力の影響
第7回 メキシコ (1969)	柴田・軽部 村山 最上	粘土のクリープ速度と強度 偏差応力をうける土の応力・ヒズミ・時間関係 粒状体の力学特性
第8回 モスクワ (1973)	市原・松沢 龍岡・石原 三笠・高田 村山・松岡 山内・村田 吉見・大岡	平面ヒズミ試験の土圧問題への適用 砂の応力経路とダイレイタンシー特性 土質力学における遠心力模型試験の意義 土のせん断機構に関する微視的研究 火山灰土“シラス”のぜい性破壊 単純せん断試験のためのリングネジリ装置

2.4 最近の動き

幾多の先駆者達が提案した理論から予見される様々の現象を実験的に検証したうえで、さらに理論を改良または新しい理論を組み立てようとする動きが1965年ごろから顕著になってきている。それらの中でも、応力・ヒズミ関係を用いて境界値問題を解くことに最終目標を置こうとする認識が強くなっている点が注目される。この傾向は計算機を用いた数値解析手法の開発をうながし、また後述するモスクワ会議での Lambe の総括報告にみられるように、実用的な土の構成式に含まれるパラメータの決定法を重視する立場をとらしているのである。

3. メキシコ・モスクワ会議から

前節に引き続き、近年における研究動向を探るための参考として、メキシコ会議（1969）とモスクワ会議（1973）で行なわれた総括報告の内容を要約して紹介しよう。

3.1 メキシコ会議

Scott による講演の内容は、i) ミクロ的方法、ii) 連続体の力学・塑性力学としての扱い、および iii) マクロ的方法の三種に大別される。まずミクロ的方法は、土粒子間に存在する物理化学的な相互作用を調べて、土の工学的性質を説明しようとするものであり、連続体の力学は土の力学モデルを仮定して、力学的・数学的アプローチを主眼とする。またマクロ的方法は、従来から行なわれているように土の応力・変形、破壊、時間効果、温度効果など工学上の主要課題を対象とするものである。

(1) 試験法と試験機：ある理論が提唱された場合に、それを検証するための試験としては、発生する応力やヒズミは一樣であることが望ましい。また地盤中に生ず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ず、供試体に加わる応力

の方向も自由に変えられるべきである。このような諸条件を完全に満たす試験機はまだできていないが新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。

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、供試体中に生ずる応力やヒズミの不均一性を考慮すると、通常の三軸試験機以上に問題点を含んでいると考えられる。

(2) 変形・圧密：これを理論的に説明しようとする場合に、まず最も単純化したモデルから出発するのが通常かと思われるが、それに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。しかし大きな変形を生じて破壊が近づくと、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には、体積変化とせん断変形はそれぞれ独立に起こり、重ね合わせの仮定を含んでいるが、この仮定の妥当性はあまり検証されていない。土の等方圧密試験は、上述の仮定を検証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。

土は非等方性材料であるから、自然土に対する等方性の仮定もまた疑わしい。さらに応力や変形が加えられると非等方性が助長されるので、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。

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、ダイレイタンシー効果が減少する。また主応力軸の回転の問題も扱われており、主応力軸の回転は強度や間ゲキ水圧係数に顕著な影響を与えるとされている。

つぎに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）の解明に向かっている。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、先行荷重を越えると二次圧密量が顕著になること、正規圧密粘土で荷重に小休止を与えると、見かけの先行荷重が増加することなどが判明している。また圧密係数を間ゲキ水圧の消散速度から求めるのは正しい方法とはいえ、Terzaghi 理論より計算した透水係数は小さ過ぎること、などが報告されている。

近年、現場での沈下測定記録が数多く報告されているのは注目に値する。その結果、死荷重に比べて活荷重が大きい地盤では、二次圧密度が予想よりもはるかに大きくなること、基礎地盤の試料採取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。

(3) 破壊・降伏：砂質土に対する興味を中心は破壊面 (yield surface) の形状にあるように思われる。すなわち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、低応力下では、線形からはずれて曲面となる。一方、高圧下では、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ゲキ比の影響が消えて、破壊面が一つに収れん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。

粘土の破壊面の決定については、砂に比べるとデータの数が少ないが、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 らの応力・ヒズミ理論は着実に発展されて、応用面でも主働・受働状態における擁壁裏込め土中の応力や変位量を推定することが可能となっている。

斜面のスベリ解析とか自然地盤での載荷試験を通じて、いろいろな方法で求めた粘土の強度と、実際の土塊のスベリ破壊との関連性の解明、原位置試験法の調査・研究もなされている。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、不飽和土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。

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り、このような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る。一方室内実験によれば、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、間ゲキ水圧係数に異方向性の影響がみられる。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ゲキ水圧に起因するものと結論されている。なお自然の粘性地盤では、その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、確率論的な手法をとり入れる研究もなされている。

(4) 時間・温度効果：斜面スベリ破壊の事例をみると破壊までの期間はまちまちであり、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わかっていないので、それをただちに設計計算や安定解析にとり入れる段階ではない。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ゲキ水圧の大小、および粘土の粘性抵抗がある。rate process 理論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んである。

土の時間効果にはクリープのほかに過剰間ゲキ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ゲキ水圧分布の変化と支持力の推移を調べた報告もある。

温度の影響は、土の他の挙動に比べれば、あまり注意が払われていない。しかし間ゲキ水圧や体積変化にはこの影響が無視できないので、実験室での温度コントロールは慎重に行なう必要がある。また、温度が上昇するほど弾性係数は減少し、強度も低下する。温度変化は斜面のクリープ量に影響するし、建物の床と地盤の温度が異なるときは地盤の膨張、収縮をひき起こして問題が生ずることがある。

3.2 モスクワ会議

総括報告には、Lambe によって地盤の変形と安定性を予測するための土質パラメーターというテーマが選ばれている。

(1) 予測の2本柱：基礎構造物や地盤の変形と安定性を予測することは、土質技術に携わる者にとって切り離すことのできない問題であり、予測の順序はおおよそつぎのようなステップで行なわれる。すなわち地盤条件の単純化→現象のメカニズム解明→解析手法と土質パラメーターの選択と処理→予測。

まず地盤の諸性質は縦横に複雑な変化をして均一ではないので、これをできるだけ単純化してモデルに置き換える。つぎに現象のメカニズムであるが、これはたとえば変形や間ゲキ水の流れが一次元か二次元かを明らかにすることを指している。ついで解析法とそれに必要な土質パラメーターを選び、それらの結果として変形量や安全率が求められる。以上のプロセスの中で方法とデータが重要な2本柱であり、そのいずれを欠いても満足な予測は期待できない。

(2) 室内試験と原位置試験：予測に用いるべき土質パラメーターの求め方には大別して三種類のものが考えられる。一つはわれわれが経験から得た知識を生かして間接的に推定する方法であり、他は直接に室内試験か原位置試験で求めるものである。このうち、間接的な方法とは、たとえば砂の圧縮性と N 値との関係、透水係数と有効径 D_{10} の関係、正規圧密粘土に対する c/p 比と PI の関係などをを用いるものである。

さて問題は予測に用いる土質パラメーターを求める場合に、室内試験と原位置試験のいずれに頼るべきかという点である。いうまでもなく、土質力学の発展史上で室内試験の果たしてきた役割は非常に大きいし、また今後も土の応力・ヒズミ・時間といった基本的性質の究明には欠かせないと考えられる。しかし実際問題としては土質パラメーターの決定を室内試験のみに頼っていたのでは精度の高い予

測はできない。近年のすう勢として、ベーンやコーン試験あるいはプレシヤメーターのような原位置試験が進歩を遂げ、その結果が積極的に土構造物の解析に用いられているのである。

室内試験と原位置試験の長所短所をここであらためて比較列挙する必要はないと思うが、後者は深さ方向にほぼ連続的に土質パラメーターを測定することができ、したがって交錯した地盤条件をもれなくは握できる点が強みである。そして原位置試験によって短期間に多数のデータがとれると、地盤のモデル化や土質パラメーターを選定するに際して確率論が有効な手段となるであろう。

上述のように、近年は室内よりも原位置試験が重視される傾向にあるが、原位置試験の場合はその種類によって測定値に差が現われることや、試験結果をもとにした予測値と現場の動態観測値との比較例が少ないことなど、多くの問題が残されている。このような意味において、原位置ベーン強度に補正係数をかけて地盤支持力の安全率を推定する Bjerrum の方法は高く評価され、この種の研究の発展が強く望まれるのである。

(3) 展望：実験室における研究の現況と将来を考えると、その見通しについては、われわれの仲間同志でも意見が分かれるところである。極端なグループは、室内実験の結果に基づいた研究はすでに頭打ちになっており、実験装置を新しいタイプに改良したところで新しい発見は期待できないと主張する。一方、別のグループは室内実験にもまだ進歩の余地が残されていて、特に土の力学挙動に与える応力・ひずみ状態、応力経路、クリープ、ヒズミ速度などは調べる価値があると考えている。

総括報告者の仕事はその大半が研究室と現場との橋渡しに向けられてきた。この立場からみると、実験的・理論的な基礎研究はやはり継続して行なわねばならない。土質工学がいかに進んだとはいえ、予測と合わない現象はいくらかもあり、土が主役となる複雑な現象をよりよく理解する必要を認めるからである。しかし1970年代に大きな発展を期待できる分野があるとすれば、それは現場に直結した研究から生まれるに違いないと信じている。とりわけ原位置で土の基本的なパラメーター（側方応力、間ゲキ圧、セン断強さ、変形係数）を調べる問題が最優先的に登場するであろうと想像している。

(4) 討論の概略：総括報告者が提案した四つのトピックについて、討議が行なわれた。すなわち i) 地盤の変形・支持力を予測するために有効な原位置試験法、ii) 軟弱地盤上の盛土の安全率に関する Bjerrum の方法にみられるような、原位置試験に基づく予測法、iii) 遠心力・荷重装置のような模型試験の有用性、iv) 土質工学の諸問題に対する統計確率論的手法の適用などである。

i) の原位置試験として話題に上がったのはプレシヤメーター、ベーン、静的コーンおよび平板荷重試験であり、こ

れら各種試験から求まる土質パラメーターの特徴、相互関係、FEM への適用などが述べられた。中でも間ゲキ水圧の測定を同時に行なおうとするケンプリッジの改良プレシヤメーター、Menard 自身が報告した繰返し荷重による砂地盤の液状化予測、あるいはプレシオメーターを用いた圧密速度の推定法などが注目を引いた。

ii) の軟弱地盤の支持力に関しては、Bjerrum の方法を支持する解析結果の報告と、その方法は特別の地盤条件にのみ適用可能であり一般性を持たないとする意見とに分かれた。いずれにしても、今後さらに地盤破壊と原位置強度データの集積が望まれるとともに、複雑な層状地盤の取扱いについて新しい提案が期待される。

4. 最近の話題

4.1 土の構造と挙動

電子顕微鏡やX線回折などの技術の進歩により、土の構造についての情報が得られるようになったこともあって、微視的構造から土の挙動を説明しようとする動きが活発になってきている。

(1) 粒状土：砂の粒子形状と骨格構造について小田は定量的な観察をし、砂の初期構造が強度・変形特性に及ぼす影響を調べて、砂の力学性を支配する基本的パラメーターについて論じている。つぎに、砂の変形に伴う構造の変化を連続的に観察し、構造特性の指標として一つのインデックスを提案し、それと砂の力学性とを結びつけることを試みている。さらに大きな変形を受けた砂について同様な観察を行ない、変形の各領域に対応するミクロな構造の存在を示し、上述のインデックスと主応力比との関係をモデルで説明しており、この小田による一連の成果は海外からも注目されている。

一方、松岡は粒子接点角の確率分布の変化特性、粒子間力の伝達特性などを調べ、土粒子の滑動面上の応力・ヒズミ間の基本関係式を誘導している。さらにこの滑動面の概念を3次元に拡張して、相異なる主応力下の応力・ヒズミ関係式を導いている。なおこの松岡モデルは、軟弱地盤の側方流動に関する FEM 解析に適用して、良い結果を得たと報告されている（柴田・松岡）。

(2) 粘性土：砂に比べて比表面積の大きい粘土では、土粒子表面の物性が支配的となるので、ミクロな構造とマクロな力学挙動との関係を究明するには、さらに難しい問題を含んでいる。

モスクワ会議の提出論文に限ってみると、Vialov らは粘土構造の損傷度（構造欠陥の占める面積と試料の全断面積の比）および配向度（セン断方向に配向している粒子の占める面積と試料の全断面積との比）という指標を導入している。そしてこれらの指標が、クリープ中に時間とともに連続的に変化するという実験事実に基づき、粘土の変形と破壊に関する理論を展開している。また Ter-Stepanian

らはせん断クリープ中に生ずる粘土構造の変化や粘土粒子の再配列に着目し、クリープ過程をせん断強度の動員過程と破壊過程に分類してクリープ特性の説明を行なっている。さらに超音波速度の測定から粒子間のボンドの経時変化や粒子配置の異方性を調べた報告もみられる。

わが国では松井がマイクロロジーの立場から、粘土の流動機構に関する一連の研究を行なっている。これは、rate process 理論を応用して、粘土・水系の微視的機構と一般的な巨視的挙動とを関連づけようとするもので、興味深い成果が得られつつある。

4.2 室内試験

(1) 試験装置：一般的な三主応力下の土の挙動を再現できる多軸試験装置 (true triaxial device) が用いられている。現在までに開発されている多軸試験装置は、中空円筒型のもののほかに、立方体供試体に板を介して載荷するもの、ゴム膜を介して圧力で載荷するもの、最大主応力をピストンで、中間主応力をゴム袋によって、最小主応力をセル内の液圧で載荷するものなどに分類できる。

また普通の三軸試験で、ゴム膜を使うと不利な点があるので、ゴム膜をやめて液体パラフィンで加圧する新しい方法 (NGI) のほか、自記装置やコンピューターを利用したデータ自動処理装置への関心も高まっている。

(2) 遠心力模型試験：この試験は実地盤と模型で同じ土質材料を用いて相似則が満足され、しかも遠心加速度を加えれば実物と同じ自重効果が期待できるという利点がある。そのために、この装置による小型模型実験の結果から、実地盤や土構造物の挙動を定量的に推定することが可能となり、また変形や破壊のタイプを調べる有効な方法としてその利用は徐々にふえるすう勢にある。特に英国とソ連で多く活用されているが、わが国では大阪市立大 (三笠ら) と東工大 (山口ら) の成果が注目される。しかし地盤の挙動を予測し、設計に使える土質パラメーターを求めるという目的からすれば、他の室内試験と同列には比較できずネガティブな意見も出されている。

4.3 原位置試験

原位置試験機や試験法の問題点、測定結果の解釈および実際問題への適用、試験機・試験法の改良などについていろいろな角度から検討が加えられている。

(1) 標準貫入試験：以前は N 値と土の力学的諸性質との相関性を、あまり深い意味を考えずに調べた時期があった。しかし最近では計測技術の進歩もあって貫入機構が解明されるようになり、精度の高いデータの集積と相まって、土質調査における N 値の位置づけが改めて問われている。たとえば貫入抵抗に占めるスプーン周面摩擦と先端抵抗の比率が土質によって大きく変わるといふ試験結果 (Schmertmann) や、乱さない砂の内部摩擦角と N 値の比較 (竹中・西垣) などは、この試験に対する評価を高めるための資料を提供したものといえよう。

(2) 現場ベーン試験：ベーンそう入時の試料のかく乱や試験開始までの放置時間、回転速度、ベーンの形の影響などの問題があり、試験結果の統一的解釈に難点がある。しかし FEM による応力・ヒズミ分布の解析を応用して、この試験の精度向上が検討されている。また以前から、現場ベーン強度を用いて推定した地盤支持力は盛土などの短期破壊の実情と合わないことが指摘されていた。つまり粘土地盤では計算された安全率が高くても実際には破壊するケースが少なくないということで、北欧諸国では多くの事例を集積して解析した結果、粘土の塑性指数に応じた低減率をベーン強度にかけて設計に用いるための図表を提案している。この低減率の妥当性については、方々の国で目下検討中である。

(3) プレシヤメーター：わが国では横方向 K 値測定機とよんだりしているが、地盤や基礎の耐震設計に関連してよく用いられるようになった。そして周辺地盤のかく乱を少なくし、種々の測定器を備えた改良型がいろいろ試作されている。たとえばケンブリッジ型は、中空円筒管の先端に回転カッターを取り付け、ロード・セルとプレシヤメーターを備えたもので、これにより間ゲキ水圧や K_0 値の測定法、あるいは非排水時の応力・ヒズミ曲線を求める手法などが調べられている。また最近では振動プレシオメーターの試作 (森ら) も報告されている。

4.4 原位置非排水強度

粘土地盤の $\phi=0$ 安定解析に用いる原位置非排水せん断強度 c の評価に関して、現行の方法は多分に経験的で、実情に合わない点がみうけられる。より正確な原位置 c 値の評価法が議論されるゆえんであるが、これに影響する主要な因子としては、(i) サンプリング時のかく乱、(ii) 試験種別、および (iii) ヒズミ速度の三つといわれている。Ladd らはこれらの影響を考慮に入れた新しい評価法を提案し、かつ種々の粘土の安定問題に適用して良い結果を得たと述べている。

(1) サンプリング時のかく乱：サンプリングの際、応力解放によって生じた負の間ゲキ水圧は、いわゆる完全な試料の間ゲキ水圧の40%程度以下になるのが普通であり、有効応力が減少して非排水強度は低下する。この性質は採取された試料のかく乱度を判定し、室内試験から原位置強度を推定するための手法にとり入れられるようになった。

たとえば奥村の提案では、完全なサンプリング時とかく乱をうけたときの残留有効応力との比をかく乱比とし、一つの粘土ではこのかく乱比がわかると乱れによる強度低下比もきまるといふ性質を利用している。

(2) 試験種別と c/p ：土の圧密非排水せん断試験は、圧密による強度増加率 c/p の値を知ることを主目的として行なわれる。そしてこの値を室内のせん断試験から求めるに際しては、現場に対応した応力や変形状態が室内で再現できることが望ましい。それは対象とする現場の状態が変化

に富むうえに、採用したセン断試験の種類（三軸圧縮、伸張、単純セン断、平面変形など）によって c/p 値も変わるからである。

ところで各種の試験の中で、通常われわれがよく行なう試験は三軸圧縮であるから、これを基準にしてその他の試験から求まる c/p をそれぞれ比較しておく、実用上に便利である。この種のデータはかなり集積されて、昨年（第20回土質工学シンポジウム——一軸および三軸圧縮試験法とその応用——）論文集中にまとめられている。

(3) ヒズミ速度の影響：粘土の非排水強度は、破壊までの期間を短縮するほど強くなる現象がある。このような時間効果を室内で調べるには、通常のセン断試験における載荷速度を変えて強度と破壊時間の関係を求めてもよいし、また一定荷重を破壊まで持続させるクリープ破壊試験を行なってもよい。

従来の成果としては、粘土の強度は数日間で70~80%程度に減少することがわかっており、これは地盤が時間をかけてゆっくり破壊するとき、急速破壊に比べて小さい抵抗しか期待できないということにつながる。たとえば Duncanらはサンフランシスコ湾泥中に生じた斜面崩壊を解析し、考えうる原因を総チェックしているが、それによると、クリープ強度低下の可能性が最も大きかったと報告している。

(4) c 値のバラツキ：同一の粘土地盤について多数の c 値を測定すると、その結果はかなりばらつくのが普通である。これはサンプリングや試験法に関する技術上の欠陥に起因することも多いが、本来、土自体が持っている物理的・力学的な不均質性に由来している。

松尾らの研究によれば、現場 c 値のひん度分布の形は正規分布で近似できることが確かめられている。このことから、地盤の c 値を確率変量としてとらえ、平均値と標準偏差、あるいは変動係数で表わすのが妥当であると主張している。

4.5 有限要素法の適用

FEM が土質工学分野に適用される理由は、土の非線形な構成関係、その時間依存性、降伏条件に加えて、元来が複雑な地盤や土構造物の条件などが解析に導入できることにある。したがって初期のころは均一な砂や粘土に対する解析を対象としていたが、次第に実状に近い問題が手がけられるようになり、現在までに基礎、斜面、築堤、掘削などの応力・変形、動的な応答、粘性挙動、波動伝ば、非定常浸透さらには力学試験の解析など、実に広範囲な諸問題が取り上げられている。

しかし地盤の問題に FEM を適用するに際しては、たとえば土の構成関係や地盤内の初期応力状態などにあいまいな部分を残しているので、解析結果をそのまま盲信することのないように注意が喚起されている。

(1) 応力・ヒズミモデル：土に固有のダイレイタンス

や圧密をとり入れた各種の理論モデルが提案されてきている。しかしここ10年ほどの間、FEM 解析に用いられた応力・ヒズミ関係式は20種を越えている現状からすれば、土のモデルに関する議論は今後ともに続けられるといわざるをえない。

これら多数の構成関係の中で比較的よく使われてきたのは、Duncan-Chang の非線形モデルであろう。これはよく知られているように、応力・ヒズミを双曲線近似し、8個のパラメーター（粘着力、摩擦角、弾性係数に関する3個、ポアソン比に関する3個）より構成される。しかしこのモデルは土のダイレイタンスや中間主応力の影響などが考慮されていない欠点のために Lade-Duncan の弾塑性モデルのほうが優先される傾向にある。なおケンブリッジ・モデルを適用した FEM 解析の例もいくつか報告されている。

(2) 静止土圧係数：FEM においては、地盤内の初期応力状態を適確には握することも、重要で慎重を要する課題である。工事施工前の地盤内応力は単純ではなく、その推定を誤ると FEM 計算結果は施工後の予測手段としての価値を失うからである。

水平な半無限地盤では、有効土カブリ圧と静止土圧係数 K_0 を用いて水平有効応力が算出できる。そして、この K_0 の値は弾性論より、ポアソン比 ν を用いて求めることが多いが信頼性に乏しい。 K_0 は地盤のタイ積過程や地殻変動の影響で変化し、正規圧密状態の土では0.5程度らしいが、過圧密土では1.0をはるかに越えるものもあって、選択が容易でない。

今後は K_0 値に関する理論的研究（山口）の発展や、原位置横方向 K 値試験の活用などが望まれる。

5. 土の特性とモデル化

1960年代後半に続々と登場してきた新しい土の構成関係は、土の力学特性として広く認められた実験事実を頭におきながら組み立て、かつ検証されてきたわけである。まず、いずれにも共通して受け入れられた仮説は、(i)有効応力の原理、(ii)状態量としての間ゲキ比の重要性、(iii)摩擦法則、および(iv)等方性であろう。

(i)の有効応力の原理は、1950年代後半までにほぼ確立されていたが、特に Henkel による一連の三軸試験で不動のものになったと考えてよい。最後の(iv)は理論の組み立てやすさから出てきたものであり、明らかに現実の土とは異なっている。以下これらの仮説がどのような形で構成式にとり入れられているかを概観してみる。

5.1 異方圧密

間ゲキ比と応力の関係として、古くから知られているのは図-1に示すような $e \sim \log p$ の直線関係である。この直線性はごく近似的なものであるが、理論上は完全な直線と仮定されることが多い。さらに圧密過程で載荷、除荷、再載荷を繰り返したとき、粘土がヒズミ硬化を持つ弾塑性

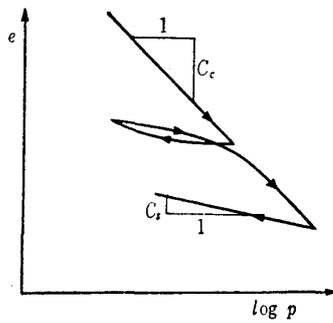


図-1 圧密と膨潤曲線

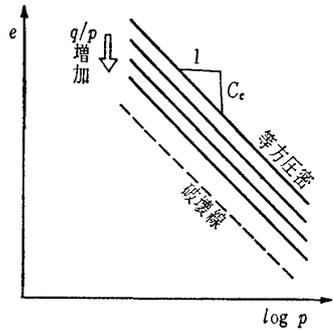


図-2 正規粘土の異方圧密

材料として挙動する現象も認められている。ケンブリッジ系の理論では、正規圧密曲線と膨潤曲線の傾き C_c , C_s が主要なパラメータとなっているが、かりに主応力比を一定に保ちながら圧密を行なうと、それらは図-2に示すような平行線群として表わされる。そしてこの関係は Walker・Raymond, Lewin・Burland, 三田地・北郷などによって実験的に確かめられている。

また正規圧密粘土の破壊状態が、図-2中の破線で示すように平行線群の一つとなることも、割合古くから認められている。これらの関係は、Henkel が示した有効応力の原理を、別の方法で表現したとも解釈できる。図-2のような異方圧密時の間ゲキ比と応力との関係は、三軸圧縮状態 ($\sigma'_a \geq \sigma'_r$) だけでなく、伸張状態 ($\sigma'_a \leq \sigma'_r$) でも成立することが八木・西川、軽部らによって確かめられている。なお、正規粘土の破壊状態線がほぼケンブリッジ理論に従うことは Roscoe ら, Bishop らなどがあらためて実験的に確認している。

しかし過圧密粘土でもこの関係が成立するかどうかについては否定的なデータが多い。さらに砂質土に対して調べた結果 (El-Sohby) によれば、 $e \sim \log p$ の直線関係はある程度成り立つが、主応力比を大きくすると粘土の結果 (図-2) とは異なった挙動を示すようになる。つまり過圧密粘土や砂質土では、ケンブリッジ理論がうまく適合しないといえる。

この点に関して、Wroth・Bassett は“ α -test”なる仮想実験を想定し、さらに砂の直接せん断試験による実験式を導入して、平衡時の砂の構成式を誘導している。また、足

立・東木は Wroth・Bassett の研究を拡張し、新たな Swelling line を用いて過圧密粘土の構成関係を提案し、三軸実験による検証をしている。

5.2 ダイレイタンスー

圧密だけでなく、せん断によってもその体積を増減させるダイレイタンスー特性は、土のような粒体の集合である材料に特有の性質とされている。このようなダイレイタンスー特性を直接調べるには、圧密が生じないように平均有効主応力を一定に保ちながら、応力比を増減させて実験するのがよい。

これまでに知られているダイレイタンスー特性を、体積ヒズミ v と応力比 q/p ($q = \sigma'_1 - \sigma'_3$, $p = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$, ただし $\sigma'_2 = \sigma'_3$) を座標軸として示したのが図-3である。PI の高い正規圧密粘土では①のような、また PI の低い正規圧密粘土では①'のようなコウ配 D の直線関係が得られる (柴田など)。しかしこれらの実験では、排水にける時間の長短が少なからず問題となり、たとえば①の直線関係を得るためには、通常の三軸供試体で一載荷段階あたり 2~3 週間をかける必要がある。シルト質の多い正規圧密粘土やゆるい砂では②のカーブになることが多く (松岡, 龍岡・石原), 密な砂や、過圧密比の大きい粘土では体積膨張が卓越し、③の曲線になる (たとえば村山)。

理論との関連で図-3をみると、簡単にいってしまえばダイレイタンスー特性が図-3中の①になればケンブリッジ理論が正しく、また、②, ③になればマンチェスター理論が正しいといったように、図-3のカーブに関する議論はつきない。たとえばオリジナルなケンブリッジ理論 (1963) では正規粘土に対して①の直線が予見されるが、三軸試験の結果は①'のカーブとなることが多い。これを修正した Burland の理論や、それをさらに修正したものなど多岐な発展をみせている。

しかしダイレイタンスー特性が①か①'かといった議論は、前にも触れたように、その実験が行なわれた時間のファクターを考える必要がある。その理由は、同じ土でもきわめてゆっくり実験をすれば①に近くなり、また通常のスPEEDで行なうと①'になる傾向がみられるからである。

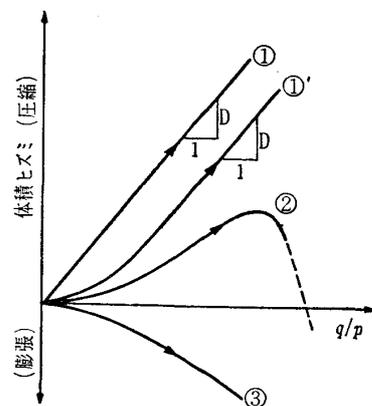


図-3 ダイレイタンスー

このことは砂についても同じで、たとえば Rowe は破壊に近くなると変形が落ち着くのに数日を要すると述べている。同様の例は Henkel が Weald clay に対して行った2度にわたる一連の実験からも推し測ることができる。

以上のように、時間効果がからむため議論が混み入ってくるが、筆者らは種々の土を用いた実験結果から判断して、たとえきわめてゆっくり実験を行なったとしても、土がシルトまたは砂質土の様相が強くなるほど①の直線からはずれて①'や②のようにになると考えている。砂に対しての時間効果を検討した例はあまり聞かないが、これは予想以上に大きいのではないかと想像している。今後はダイレイタンシーに及ぼす時間効果の究明が必要であろう。

5.3 圧密とダイレイタンシー

前述したように、有効主応力比一定の条件下での間ゲキ比～応力関係は圧密特性として、また有効平均主応力一定の条件下での間ゲキ比～応力関係はダイレイタンシー特性として、それぞれある程度の実験的背景もあり土の構成関係を導くうえで妥当な仮定として用いられる。ケンブリッジとマンチェスター理論においても、これら二つの体積変化特性のいずれか一方を利用しているとみることができる。ところが両理論の結果だけから考えれば、ケンブリッジ理論は圧密・ダイレイタンシー両特性を含んだ形になっているのに対し、マンチェスター理論ではダイレイタンシーに重点がかかっている、構成式としては不完全な体裁になっている。

以上の議論は多分に圧密とダイレイタンシーを分けて考えているが、これらをして分離せずに土の応力と間ゲキ比の関係から、構成式を導くことができる。このような手法によって、太田はケンブリッジ理論と同一の結果が得られることを示しているし、Frydman らのグループはこれを砂に応用している。また龍岡・石原も一連の実験をもとに、構成関係の理論を組み立てている。

しかし、いずれにせよ時間効果を含めた厳密な実験や、新しい理論が近い将来に出されるものと期待される。

5.4 摩擦法則

砂、粘土を問わず、土の力学特性を支配するのは粒子間の摩擦であるという考え方は、きわめて受け入れやすいものである。事実、圧密・ダイレイタンシー両特性が q/p あるいは τ/σ といった形で表現されていることからそれはずけるであろう。

しかし、Rowe の理論に対する最も強い批判が、摩擦現象への過大な評価に対して浴びせられたことは記憶にとどめておいてよい。すなわち、土のせん断抵抗が単に土粒子間摩擦だけによるものではなく、たとえば粒子の回転や、小さな粒子集団の回転にも関係しているという考え方は、Rowe に対する批判者達だけではなく、マンチェスター系の Barden などは粒子の回転に関するかなり詳しいデータを持っているそうである。また Lee は応力・ダイレイタ

ンシー式が必ずしも実験値とよい適合を示さないかもしれないという個人的な考え方を示している。つまり、三軸試験の端部摩擦をゼロにしても砂供試体の内部状態はきわめて不均一であり、Rowe 理論の検証が試料全体の平均値を用いたためにうまくいったに過ぎないのではないかという意見である。土粒子間摩擦の扱いに対して再考を促しているように感じられるがいかがであろう。

5.5 等ヒズミ線

正規圧密粘土を非排水状態でせん断すると、図-4中の実線カーブのような有効応力径路を描くが、これらはほぼ相似形になることが知られている。そしてこの図上に等軸ヒズミの点をプロットすると、それらはほぼ原点を通る直線群(破線)になり、破壊線もその一部に含まれる形となる。この性質を利用して Roscoe・Pooreooshasb は、排水せん断時の応力・ヒズミの関係が予測できると述べている。

一方、正規圧密粘土に対する Roscoe らの実験によれば、非排水せん断時の等ヒズミ線と、側圧一定の排水せん断時のものとは明らかに異なっている。しかし龍岡はゆるい砂に対する実験から等ヒズミ線が応力径路によらず、現在の応力状態だけできまると報告している。このように砂と粘土との差が、圧縮性の差に帰因するや否やの考察は興味深く感じられる。いずれにしても、等ヒズミ線の存在を仮説として構成式を導いた理論はいくつかあろう(たとえば赤井・足立ら)が、多くの場合、理論によって等ヒズミ線の形状を予見できるかどうか、またそれが実験値と妥当な範囲で一致するかどうかという形で利用されている。

ところで図-4の有効応力径路は、圧密圧力を変えてセ

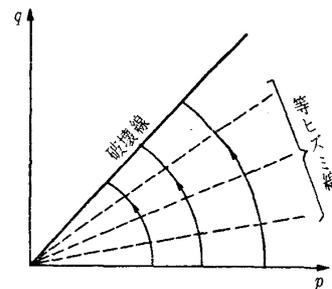


図-4 ストレス・パスと等ヒズミ線 (せん断速度一定)

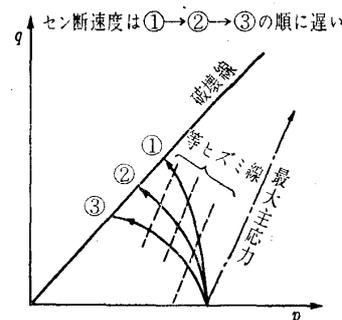


図-5 ストレス・パスと等ヒズミ線 (せん断速度変化)

ン断速度をそろえたときの結果を示すものであったが、つぎに圧密圧力を同じにしてセン断速度を変えるといかなる挙動が観察されるであろうか。図-5はそれに対する答えであって、セン断が速く行なわれるほど有効応力径路の立ち上がり急になり、かつ等ヒズミ線は最大主応力軸にほぼ平行な直線群となることを示している。このような特性に注目して、上記の赤井・足立らは正規粘土の応力・ヒズミ・時間関係を導いた。ただし図-5にみられる傾向はLoの主張(軸ヒズミと間ゲキ水圧の一義性)あるいは応力緩和中には間ゲキ水圧が不変とする実験結果と表裏の関係を表わしているが、これに対してはいくつかの反論が寄せられている。

なお等ヒズミ線を変形係数の応力依存性という観点から

解釈している研究もある。Kondner による双曲線表示, Janbu によるヤング率の拘束圧依存性, Kulhaway らのヤング率とポアソン比の応力依存性に関する研究などはその例である。

5.6 降伏条件

降伏という言葉は弾性限界を示す条件を意味するのであろうが、土の構成式に関する限りそれほど単純ではない。弾性・非弾性の定義すら共通の場に立っていないのが現状であり、土の構成式を追究している研究者の数だけ、弾性・非弾性の定義があるといっても過言ではない。

さて土の降伏現象の例としては、圧密降伏応力を越えると過圧密から正規圧密状態へ移行する現象がよく知られている。また弾性状態の例としては、砂を平均有効応力一定

表-2 提案されている降伏条件

提案者	降伏条件	備考
Roscoe, (1963) Schofield, Thurairajah	$\frac{q}{p} = -M \ln \frac{p}{p_y}$	$q = \sigma_1' - \sigma_3'$ p_y : 硬化パラメーター $p = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ M : 定数
Poorooshasb, Holubec, Sherborne (1966)	$\sigma_1'/\sigma_3' = \text{一定}$	
Cole (1967)	$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} = \text{一定}$	
Roscoe, Burland (1968)	$\frac{p}{p_0} = \frac{M^2}{M^2 + (q/p)^2}, q = \text{一定}$	p_0 : パラメーター
太田 (1971)	$\pm \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_m'} - k \right) + \frac{\lambda - k}{(1 + e_0)\mu} \ln \frac{\sigma_m'}{\sigma_{my}'} = 0$	τ_{oct}, σ_m' : 八面体応力, k : 異方圧密時の応力比 $\frac{\lambda - k}{(1 + e_0)\mu}$: 定数, σ_{my}' : 硬化パラメーター
Calladine (1971)	$\left\{ \frac{p + q \cdot (c^2 - 1/3) - g \cdot \bar{\sigma}_i}{1 - g} \right\}^2 + \left\{ \frac{q \cdot s \cdot c}{\mu \cdot g} \right\}^2 = \bar{\sigma}_i^2$	μ, g : パラメーター $c = \cos \bar{\Psi}_i$ $\bar{\Psi}_i$: スベリ面と最大主応力面とのなす角 $s = \sin \bar{\Psi}_i$
Poorooshasb (1971)	$\frac{q}{p} + m \ln p = \text{一定}$	m : 定数
Lade (1972)	$\frac{p^3}{I_3} = \text{一定}$	I_3 : 応力の第3不変量
橋口 (1972)	$p \cdot g \left(\frac{r}{p}, \sin 3\theta \right) = \text{一定}$	$\sin 3\theta = -\sqrt{6} (s/r)^3, S_{ij}$: 偏差応力 $r = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ij}}, s = \sqrt[3]{S_{ij} \cdot S_{jk} \cdot S_{ki}}$
Goldscheider, Gudehus (1973)	$c_1 \frac{I_2'}{p^2} + c_2 \frac{I_3'}{(I_2')^{3/2}} = \text{一定}$	c_1, c_2 : パラメーター I_2', I_3' : 偏差応力の第2, 第3不変量
佐武 (1973)	$\sqrt{\left \frac{\sigma_1' - \sigma_2'}{\sigma_1' + \sigma_2'} \right ^2 + \left \frac{\sigma_2' - \sigma_3'}{\sigma_2' + \sigma_3'} \right ^2 + \left \frac{\sigma_3' - \sigma_1'}{\sigma_3' + \sigma_1'} \right ^2} = \text{一定}$	
松岡・中井 (1974)	$\sqrt{\frac{p \cdot I_2 - 9 I_3}{9 I_3}} = \text{一定}$	I_2, I_3 : 応力の第2, 第3不変量
小川・三井・竹牟礼 (1974)	$\frac{I_2'}{p^2} + n \frac{I_3'}{p^3} = \text{一定}$	n : パラメーター

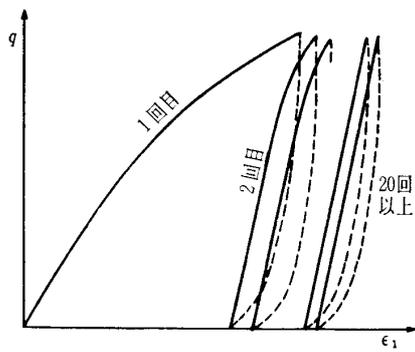


図-6 砂の排水繰返しセン断

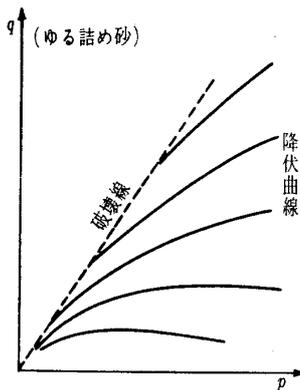


図-7 砂の降伏曲面

の条件のもとで繰返しセン断すると、ある繰返し回数以上では図-6のような閉じたヒステリシスループが得られ、もはやセン断ヒズミは累積しないことが明らかにされている(村山)。

しかしこれらの例は、限定された条件下の特性であるから降伏曲面の形を知るために、Lewin・Burland, Yong・McKyes, 軽部, 龍岡・石原らはストレス・プローブ試験を行なっている。図-7はゆるい砂に対して求めた降伏曲面群の例(龍岡・石原)である。また最近 Wood は三主応力を独立に制御して、八面体セン断応力が一定になるような circular stress path を用い、興味ある研究を行なっている。

この辺で従来提案されている降伏曲面の式をまとめると表-2のようであり、これらはみな比較的よく似た形状の曲面になる。このような降伏曲面の類似性を別の言葉で表現すると、多くの土はマンチェスター理論でいう stress dilatancy plot によってくるということになる。なおこれら降伏曲面は土の変形特性に及ぼす時間効果を無視している。この点に着目して、いわゆる動的降伏曲面の考えが Chaplin や前記の赤井・足立らによって提案されている。

5.7 主軸の方向

土が変形していく過程で応力、応力増分、ヒズミ増分の各テンソルの主軸が一致するかどうかという点は構成式を考えるうえで重要である。Roscoe らは単純セン断試験機を用いて砂のセン断過程中的の応力、応力増分、ヒズミ増分

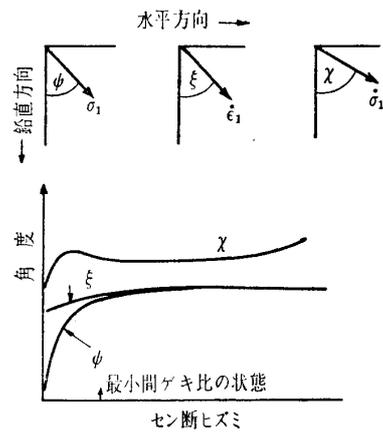


図-8 主軸の一致性

テンソルの主軸方向の回転を調べた。

その結果、たとえば図-8のように単調に増加する応力に対して、試料が最小間ゲキ比になるまでのごく初期のセン断過程以外は、応力とヒズミ増分の各主軸方向が一致することが示されている。これは砂が塑性体としての挙動をすることと同義とも考えられ、同様の研究は小田・小西によっても進められている。

6. あとがき

ここ10~15年ほどの間に、土の力学的な挙動を支配する基本的なファクターが明らかにされ、それらを実際の土構造物や地盤の変形・破壊の予測に適用するための努力が払われてきた。ところが土質工学上の諸問題は、新しい知見をあまり顧慮することなく、1960年以前に樹てられた設計原理に基づいて処理しているのが現状である。

東京会議に予定された総括報告者の顔ぶれから察すると、おそらくその間のギャップを埋めるために、支配的な土質パラメーターの選択と評価がなされ、かつその成果を実際の設計にとり入れる手法が議論されるであろう。そのためには豊富な実績——理論的根拠をもって現場データを解析した経験など——がものをいうに違いない。

このレポートをまとめるにあたって、筆者らは過去に開催された国際会議をはじめ、各種の論文集にあらためて眼を通し勉強する機会をもつことができた。そして、ある期間をおいて再読あるいは再々読すると、その都度新鮮な示唆を与えてくれる論文がいくつかあることを知らされた。と同時に、主観を混じえずにこの種のレビューをすることの難しさも痛感させられた。随所に目立つ不備な点をお許しいただきたい。

降伏条件(表-2)の出典

- 1) K. H. Roscoe, A. N. Schofield & A. Thurairajah: Yielding of Clays in States Wetter than Critical, Géotech., Vol. 13, No. 3, pp. 211~240, 1973.
- 2) H. B. Poorooshasb, I. Holubec & A. N. Sherbourne: Yielding and Flow of Sand in Triaxial Compression; Part 1, Canadian Geotech. J., Vol. 3, No. 4, pp. 179~190,

- 1966.
- 3) E. R. L. Cole: The Behaviour of Soils in the Simple Shear Apparatus, Ph. D. Thesis, University of Cambridge, 1967.
- 4) K. H. Roscoe & J. B. Burland: On the Generalised Stress-Strain Behaviour of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity (J. Heyman & F. A. Leckie編), pp. 535~609, Cambridge University Press, 1968.
- 5) 太田秀樹: Analysis of Deformations of Soils Based on the Theory of Plasticity and its Application to Settlement of Embankments, 京大工博学位申請論文, 1971.
- 6) C. R. Calladine: A Microstructural View of the Mechanical Properties of Saturated Clay, Géotech., Vol. 21, No. 4, pp. 391~415, 1971.
- 7) H. B. Poorooshasb: Deformation of Sand in Triaxial Compression, Proc. 4th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, pp. 63~66, 1971.
- 8) P. V. Lade: The Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soils, Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1972.
- 9) 橋口公一: 摩擦性塑性体の降伏について—硬化塑性法則—, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 105~108, 1972
- 10) M. Goldscheider & G. Gudehus: Rectilinear Extension of Dry Sand—Testing Apparatus and Experimental Results, Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1—1, pp. 143~149, 1973.
- 11) 佐武正雄: 粒状体の降伏条件に関する一提案, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 91~92, 1973
- 12) 松岡元・中井照夫: Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soil under Three Different Principal Stresses, Proc. JSCE, No. 232, pp. 59~70, 1974.
- 13) 小川正二・三井澄夫・竹牟礼修: 砂の力学的性質への中間主応力の影響に関する実験的研究, 土木学会第29回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 49~50, 1974
- (原稿受理 1976. 5. 31)

土質工学会発行

土質基礎工学ライブラリー

シリーズ既刊 11巻

A5判 布クロス上製本

送料1冊 240円

	ページ数	会員特価	定価
1 軟弱地盤の調査・設計・施工法	310ページ	2,300円	3,000円
2 軟弱地盤における工事実施例	225ページ	1,700円	2,200円
3 掘削のポイント(第1回改訂版)	399ページ	3,800円	4,900円
4 土質調査試験結果の解釈と適用例	306ページ	2,300円	3,000円
5 建設工事における土質工学の実用例	376ページ	2,800円	3,600円
6 鋼グイ(鋼グイ研究委員会報告)	376ページ	2,800円	3,600円
7 土と基礎実用数式・図表の解説	443ページ	3,300円	4,300円
8 掘削にともなう公害とその対策	305ページ	2,200円	2,900円
9 土と構造物の動的相互作用	567ページ	4,200円	5,500円
10 日本の特殊土	356ページ	3,200円	4,200円
11 土留め構造物の設計法	360ページ	3,300円	4,300円
12 軟弱地盤における工事実施例—その2—	225ページ	(8月発刊予定)	

発売:(社)土質工学会 ☎03-502-6256~9

〒105 東京都港区西新橋1-13-5 東亜別館