

ほど大きな相違はないことが分かった。

184 は液体チッ素を貯蔵した模型タンク（外径 1.46m）を土槽（直径 4 m, 高さ 1.8m, 関東ローム）内に設置し、周辺地盤の凍結時の挙動について観測した。測定は温度、間隙水圧、地盤変位、土圧等について行い、温度に関しては、FEM による熱伝導計算との比較を、土圧については、二次元円筒モデルによる計算値との比較を行った。実験より以下のことが判明した。①凍結面前面の未凍土の間隙水圧は負圧となり、本実験で使用した関東ロームでは、少なくとも 0.24 kgf/cm^2 以上の負圧となる。②地盤の鉛直変位は凍結の進行とともに単調に増加する。一方、水平変位に関しては測定が凍結するまでは増加し、土槽の拘束効果によってその後減少する傾向がある。③地盤のひび割れは、最初にタンクから放射線状に直線的なひび割れが発生し、その後円周方向のひび割れが順次外側に発生する。

323 は凍上性の著しい試料土を用いて、模型タンクの凍結実験を行った。タンクく体の凍上と作用する土圧について測定値を得た。周辺地盤の凍結に伴って、未凍結層からの水分移動が生じ、凍結面への水分集積となって凍上が発生する。そこで、不飽和帯でのタンク周辺凍結面方向の水分移動量を推定した。テンションメーターによって水分張力の経時変化を測定した。それらの結果から得られる動水勾配と不飽和透水係数を用いて、凍結面への水分移動量を推定した。この推定値と凍上量で示された水分集積量とは

よい一致を示した。タンクに作用する土圧の経時変化もあわせて実測した。

問題点および将来の展望

論文の多くは設計のために必要な力学定数を求めるための研究であるが、土の熱的性質は複雑多様な要因に支配される土の物理化学現象であるため、定量的評価を与えるにはいまなお困難な段階である。この分野では理論や解析の結果を検証することが特に重要なことであるが、前述のように理論と現場で観測される土の挙動との間には不明な点が多く、理路整然とした説明が難しく、部外秘扱いになっている貴重なデーターも多いと思われる。今後は失敗例も含めた現場計測のデーターの公表、蓄積により、理論的考察の進展が望まれる。定量的に処理するためにはより高次の構造モデルを設定する必要があるが、実際問題に適用するに当たってはより単純なモデルのほうが望ましいという工学的意義も考慮していく必要がある。

討論およびその他

質疑応答が幾つかあったが、ここに特筆すべき討論はなかったように思える。筆者に急用ができたため、座長の高志先生がこのセッションの全部の運営にあたられた。終始活発になごやかな雰囲気で行われた運営に末筆ながら厚く御礼申し上げます。

岩の性質 第 1 日 午後の部 第 2 会場

京都大学 大西 有三

328 北海道電力高見発電所新設ダム工事仮排水路 1 号トンネル坑内崩落の岩盤の変質作用（土居）

327 礫質岩の一軸圧縮強度について（佐藤）

329 Endochronic 理論の岩質材料への適用について（大西・八嶋・吉田）

330 岩石の非整形試験片による強度推定について（中澤・山本・山田）

331 岩盤分離面の接触状態と垂直変形について（吉中・山辺・関根）

332 軟岩（軽石凝灰岩）の力学的特性について（田中・岡本・松井）

333 三軸応力下における珪藻質軟岩の工学的特性（宮北・前川・宮本・小川）

334 泥岩のストレス～ダイレイタンスー関係について（岡本・西・松井・大槻）

335 堆積軟岩の繰返し載荷時における挙動（大西・八嶋・川西）

336 軟岩の残留強度の時間依存性（足立・金谷）

337 三軸せん断試験時の堆積軟岩の透水特性について

（赤井・大西・李）

岩の性質の前半 11 編で発表された論文は岩石および岩盤の試験に関するもので、5 編が原位置ならびに室内試験について述べたものであり、残りの 6 編が室内三軸試験の結果を考察している。三軸試験については強度・変形特性を求める目的のものが大部分で、構成式の確立、ひいてはその数値解析への適用を目指して研究が進められている。

最近の動向

岩盤力学に関する国内外の雑誌の中で、最近よく目にするのが破壊力学 (Fracture Mechanics) に関する論文である。岩石というぜい性材料を考える場合、荷重や変位の増加に伴う進行性破壊すなわち材料内部に潜在するマイクロクラックとその伝達・伸展の度合を考察の対象外とするわけにいかない。破壊力学においてはクラックの伝達条件として J 積分という手法が用いられる。この積分は経路に独立に成立することから、クラック先端部において座標軸を適当に選べば計算が簡略化できる。J 積分のわく内に排水・非排水の条件を組み込み、その 2 つの相異なる条件の間で、ある一定の速度をもったクラックの伝達規準を定式化し、ゆっくりとしたクリープのようなせん断すべりから、

一般報告

地震時のような速いクラックの伝達に至るまでの幅広い範囲での進行性破壊現象を説明するという試みも行われている。しかしながら、現時点において破壊力学をそのまま岩の力学に持ち込むには多くの問題点が残っている。金属材料などの試験では切欠きという人工的な欠陥を表面に作るが、三軸試験用の岩石にしろ、長大な岩盤斜面にしろ初期せん断面がどこに生ずるか判断できないのが通例である。岩石の破壊が進行していく様子をとりえ、破壊の基本的メカニズムを把握することがこれからの研究となろう。フラクトグラフィーやAEによる破壊源探査などの実験技術を利用し、微視的な立場で材料の力学特性を検討する必要がある。

一方、巨視的立場から現象論的に岩石の力学挙動を把握しようとする試みは、この10年ほどの間に大きな成功を収めてきた。土質ならびに岩質材料の弾塑性挙動に着目したケンブリッジ理論あるいは限界状態理論 (Critical State Mechanics) はその代表的なものである。この理論は土質力学の分野で粘性土の挙動を説明するのに非常に有効であると認められていたが、近ごろでは軟岩に対してもひずみ軟化を考えない範囲では有効であると考えられ、試験結果の解釈、数値計算の構成式として重用されつつある。本セッションでも三軸試験のデータ解析にいくつかの論文がこの理論を用いている。ただし、この系列の理論は塑性論というかなり難しい (理解するのに時間をかけて勉強する必要のある) 方法論を利用しているため、もっと簡単な、例えば非線形弾性モデル的なものを用いて、大型計算機の特長による腕力で処理しようとする動きも見られる。以上の論議は岩石試料すなわち岩盤の一構成要素の特性についての研究であるが、それがそのまま岩盤挙動を十分説明できる状態にあるとは言えず、相変わらずその間のギャップは大きい。実際の岩盤構造物の設計規準を規定するという立場から見ると、そのギャップを埋めるべくプロトタイプに至るまでのモデル実験の実施が待ち望まれる。

不連続性岩盤の取扱いについては、確固たる方法論は提案されていない。地質学的な調査に基づいた綿密な考察に、指標 (Index) を用いた準力学的な手法を加味したものが実用的には多用されているのが現状である。その意味で原位置で簡単に岩盤特性が推定できる点載荷試験法などや、ボーリング孔を用いた試験装置、岩盤の分類などに関するより一層の研究開発が進められねばならない。

問題点および将来の展望

328 は著しく破碎を受けている輝緑岩質凝灰岩とチャートから構成された岩盤地帯でのトンネル天盤崩落の原因を究明しようとする作業を論じたものである。化学分析などを利用して変質岩の工学的性質を推定しているが、力学的な不安定性に対する検討はなされていない。力学的指標とトンネルの安定について考察ができれば汎用性も広がるの

で、今後の研究を期待したい。**327** と **330** は簡単な手法で岩の工学的性質を推定しようとするいわゆる指標 (Index) 試験について述べたもので岩の分類・特性化 (Characterization) に属する。**327** は角礫凝灰岩の一軸圧縮強度のばらつきを、含有する礫の状態を考察することにより再整理しようとしたものである。礫を定量的に同定する方法、他の岩種への適用性について検討が必要であろう。また、Deer (ディア) の図 (一軸圧縮強度と変形係数の関係) との対比などを加味すると利用価値が高くなると考えられる。**330** は点載荷試験の重要性が認識されつつある現在、興味ある内容を含んでいる。欧米諸国では点載荷試験の結果が一軸圧縮強度とどのような関係にあるかかなり明らかにされており、国際岩の力学会 (ISRM) から試験法とその解釈について規準が提案されている。我が国では十分な基礎データが蓄積されているとはいえず、今後の研究が待たれている。**330** では図表の整理に正規化されていない荷重がそのまま使われていて一般性を欠くので、試験を重ねて新しい整理方法を考案されたい。**329** は Endochronic (エンドクロニック) 理論という考えが岩質材料に適用できるかどうか考察したものである。この理論は繰返し荷重を受ける土質材料の挙動を解説するのに多用されつつあり、ダイレイタンシー項などの導入も容易であるため今後使用される可能性は大きい、ひずみ軟化を示す岩質材料への適用にはまだ工夫必要のように見受けられる。**331** は大谷石の円柱試料に分離面を入れ、その間に圧力測定フィルムという新しい圧力測定器を挟み、一軸状態で不連続面の接触状態や圧力分布を求めたものである。有限要素法などで計算が多く実施されているわりには、不連続面の力学挙動に不鮮明な部分が多い。不連続面内の応力分布を調べると同時に、面の粗さを定量化する手法を見つけ、せん断荷重のときの挙動にまで考察を広げることが課題となろう。**332**, **333**, **334** の研究対象はそれぞれ凝灰岩、珪藻質軟岩、泥岩と異なるが、三軸試験により力学特性、特に前述したケンブリッジ理論に基づく関係式を得ることを志向している。珪藻質軟岩の示す変形性には他の軟岩には決して見られない特異なものがあり興味深い。その特性を鮮明にするためにも、他の軟岩との対比を分かりやすく図表で示しながら論議していただきたいものである。**334** は過圧密粘土との相異点を中心に体積ひずみすなわちダイレイタンシーについて詳細な考察を行っていて、今後の研究への足がかりを示している。**336** では大谷石を用いて残留強度が時間的に変化するかどうか検討したところ、強度包絡線上を移動するため結果的には残留強度定数は変化しないという結論を得ている。最大強度が時間依存性を用い、包絡線が移動するのとは大きな違いがあるという興味ある報告となっている。**335** と **337** はいずれも繰返し載荷時の凝灰岩 (船生石) の挙動を検討したもので、前者はマイクロクラックの伝達・伸展に伴う構造変化をエネルギー論的に考察し、

後者は透水性を調べることにより内部構造変化を議論している。これらの論文はいわゆる微視的立場から岩石の破壊を研究しようとするもので、载荷のごく初期から非弾性変形が生じることに注意が必要であろう。AEなどの機器が入手できない場合の簡便法として、337の方法は意味がある。しかし、透水性は試料全体の平均値しか求められないので、局所的な挙動は全く不明になるという欠点を有する。

京都大学 谷本 親伯

338 ボーリング孔を利用したロックボルト引抜き試験

(忠岡・西村)

339 孔径変形計による岩盤の初期応力測定(瀬古・戸部

・堀井・黒田)

340 ボアホールジャッキによる岩盤の緩み測定例について(三木・宮川)

344 風化花崗岩の動的変形特性(その2)(山県・井上・石川・福田)

341 傾斜互層岩盤の原位置大型ブロックせん断試験の数値解析(川本・市川・伊藤・篠川・京谷)

342 破壊面を考慮した岩盤挙動の解析(木村・亀村・原田・里)

343 鏡像法を用いた三次元浸透流解析(木村・下茂・立石)

最近の動向

「岩の性質」の分野で担当した7編の発表論文を総括すると「原位置岩盤試験とその評価方法」ということになる。

岩盤に関連する土木構造物の大きな特徴は、現地一品生産主義であって、構造物およびその基礎は原位置での地盤の性状に大きく影響され、同一の物は存在しない。したがって、サンプリングにより得られた供試体について室内実験を実施し、これにより原位置地盤の性状がよく把握できることは極めて困難であり、原位置試験・調査が重要な意味をもつ。いわば、基礎実験や理想化された仮定のうえに成立する「理論」と工学としての「応用」とを関係づける役割を担っている。

また、工事前に計画または推定された事柄や性状が施工の進捗に伴って適正であったか、どうか順次確認され、合目的的に処理されねば工学としての意味を失ってしまう。ここに、不確定な因子を多く含む岩盤をどのように取り扱うかが、常に問題になるわけである。古くは、Terzaghi(テルツァーギ)も提唱しているように「観測施工法」が徐々にではあるが普及してきたのは好ましい傾向と考える。その反面、総括者が特に指摘したいことは、連続体を基本仮定とする数値解析法が非常に普及し、かなり複雑な境界条件を与えても、計算上では何らかの解答が得られるが、その解の工学上の妥当性を判断する眼の養成が必ずしも満足に行われなかったのではないかという点である。

研究者の多くは、室内試験を中心として思考を発展させ、調査者は義務づけられた調査項目を果たし、設計者はペーパーワークにより設計を行う。そして、施工者は築造する構造物の安全率をかなり幅広い範囲で(粗い精度で)しか取り扱えないのが一般的傾向であろう。ここに、改良されねばならないことが多々存在している。その中の一つとして、原位置試験は、基本仮定・供試体(理論あるいはインプットデーター)と原位置での挙動(応用あるいはアウトプットデーター)とを関連づける極めて重大な意義をもっている。一方、原位置調査や試験およびそれに基づく設計に関連する多くの報告の中で、調査・試験結果をどのように解釈して応用したかを感知し得るものは極めて少ない。複雑な計算技術や高度な試験機器の発展に伴い、応用に対する具体的な考え方が多数出現することが期待される。これは、新たに、地盤材料をどこまで抽象化できるかという大きな課題を提供することになる。

問題点・討議および将来の展望

原位置岩盤の不連続性に対する考え方やその表現法を再評価する時期に来ていると思われるが、発表論文のいずれもが岩盤を連続体として取り扱うことを条件としており、不連続性に直接関連する論文は見られなかった。

343を除き、いずれも岩盤の原位置試験に関するもので、特に338~340はボアホールを利用した試験法で、341~342は岩盤せん断試験に関するものである。

338は、トンネルの支保に用いられるロックボルトの引抜き試験に関連するもので、地中の所定深度で全面接着を行うという新しい工夫を行っている。引抜き試験は多数のトンネル現場で実施されているが、一般に引抜き耐力が何を意味しているのか、十分な説明が見受けられない。総括者には、ボルト・接着剤・地盤材料の3者間の材料試験を実施しているように思われるが、引抜き耐力が原位置でのロックボルトの支保効果とは1対1に対応していない。引抜き試験で地質が把握できるのではないかという説明は注目される。

339は、USBM式孔径変形計の使用例に関する報告で、不連続面を含む岩盤についても測定点を多くとり、対象となる岩盤全体を統計的处理により弾性体として表現すればよい、との説明があったが、どのような不連続性まで対応できるか、今後の実施例に注目したい。

340は、孔内載荷試験により得られる結果を中心に、ボアホールテレビによる直接的なき裂観察や弾性波探査による結果と対比させ、孔内載荷試験から、いわゆる「緩み領域」を推定する可能性を示唆したものであった。トンネル断面の補正に関する質問があったが、池田らによる経験式のうえで緩み域と $[D+H]$ (D :トンネル断面幅、 H :トンネル断面高さ)の値が比例的であることに従った旨回答があった。また、発破による緩みがどの程度影響するかと

一般報告

いうことに関連する質問もあったが、一般的によく使用される岩盤の「緩み」現象の定義が非常にあいまいで、正確な表現が必要ではなかろうか。

341 は、ブロックせん断試験を非線形の FEM により互層岩盤のブロック幅や層傾斜を考慮して数値解析したもので、直交異方性体、弾性互層体、非線形互層体としての 3 種の解析結果を対比し、それぞれかなり異なった結果を与えていることは興味深い。非線形互層体としての解析が原位置試験結果とよく一致しているとの補足説明があったが、この種の数値解析は、原位置試験結果との比較を欠いては、その意味が半減してしまう。

342 も、ブロックせん断試験に対する FEM 数値解析であって、あらかじめ想定された破壊面や弱面での挙動を応力遷移法により解析し、ブロックの浮上がりについても原位置試験に近い傾向を得ていることが報告された。

岩盤の変形解析において、塑性域での応力・ひずみ関係について、応力遷移法により強制的に降伏曲面に投影してゆくのは新たな応力・ひずみ関係を規定していることになり、この点に対する十分な説明が必要ではなかったかとの

指摘があった。

また、日本でよく実施される原位置せん断試験では、試験の経済性や便宜上から横坑内でせん断方向を水平面にとって実施されることが多いが、岩盤の異方性、弱面の方向を考慮すると、常に水平面として良いかどうか、過去多数実施された試験の中で、せん断面と不連続性の方向との補正を行った例は少ないと思われる。

343 は、他の発表論文の内容とは、若干異なっていたので、活発な討議はみられなかった。地下空洞に関連する地下水の流れを鏡像法を適用して三次元解析を行ったもので、FEM 結果とも良好な一致を見たとの報告であった。モデル化や計算手法の簡便さから、このような手法の普及も評価されるべきであろう。

344 は、本四架橋の動的応答に関連する貴重な現場測定結果の報告ではあるが、発表されたデータの種類の量が多過ぎ、いずれも断片的になってしまった点が残念である。

毎回痛感させられることは、時間的制約から討議が中途半端に終わってしまうことである。

地盤の応力と変形 第3日 午後の部 第4会場

運輸省 小林 正樹

200 有限要素法による非線形地盤解析モデルについて (大西・中村)

201 自己修正法によるひずみ軟化土の弾塑性解析 (松本・鈴木・吉清)

202 粘性土の地盤変形解析への 1 アプローチ (棚橋・伊勢田)

203 情報化施工における有限要素パラメーターの逆算について (荒井・錦見・太田)

204 泥炭地盤内増加応力に関する実験的考察 (佐々木・能登)

205 遠心力場における粘性土の局所載荷試験 (中ノ堂・木村・北詰)

206 モデル実験による正規圧密粘土地盤の圧密変形挙動 (山口・中ノ堂・北詰)

207 傾斜基盤を有する軟弱地盤の盛土による変形挙動 (座親・篠原・小野)

208 軟弱地盤上における護岸の計測管理について (第 1 報) (松岡・森平・田原・小笠原)

209 泥炭性軟弱地盤における河川築堤の変形—施工実績による沈下の推定法— (脇坂・高安・今井・本間)

210 橋台水平移動の予測法の一提案 (石原・森・宇都・冬木・桜井)

211 ケーソン沈下に伴う沈下防止杭の変形と周辺沈下に関する一考察 (寺尾・木上・伊藤・後藤)

212 砂地盤に建つ展望塔の沈下 (小泉・三原)

最近の動向

地盤の応力と変形の問題を解決しようとする、一般の土質力学の教科書に述べられているような方法では、全く無理と思われるものが多い。例えば、軟弱地盤上に盛土を建設した場合の沈下量を求めようとするためには、通常の一次元圧密解析法しか、教科書は情報を与えてくれない。しかし、一般の盛土に対して、一次元圧密の仮定は妥当でないことは広く認識されている。これまでは、一次元条件以外については、解析を行うのが困難であったが、近年の有限要素法の発達により、理論的にはどのような問題も解けることになり、有限要素法によって地盤の応力と変形の研究を行う動きが盛んとなっている。

しかし、有限要素法の適用に当たって最も問題となるのは、土の応力—ひずみ関係として、どのようなものを用いるかという点である。もしも、不適切な土の力学モデルを用いると、せっかく有限要素法を用いても無意味な結果が得られてしまうことになる。このような観点から有限要素法の過度の適用に対する批判も生じている。いずれにしろ、地盤の応力と変形の研究を進歩させるためには、現地での実測が最後の決め手となるわけであり、実測値の集積の必要性については、異論がないであろう。

問題点および将来の展望

今回発表があった 13 編の論文は、次のように分類するこ