

せん断 (砂)

一般報告

埼玉大学 小田匡寛

- 111 自然堆積砂の三軸圧縮試験による強度特性 (巻内・石山)
- 112 乱さない密な新潟砂の排水せん断特性(山崎・吉見)
- 113 ある洪積不かく乱砂質土の排水三軸圧縮変形・強度特性 (岡本・田中)
- 114 乱さない洪積砂の強度特性について (菊地・上田)
- 115 低拘束圧下の砂の三軸圧縮試験(坂元・龍岡・福島)
- 116 主応力方向回転時の砂の排水せん断に関する実験的考察 (金谷・石原・M. モンザデ・石田)
- 117 三次元応力下におけるしらすの非排水変形・強度特性 (春山・奈須・内田)
- 118 任意方向単純せん断試験における砂の応力・ひずみ挙動 (松岡・竹田・福武・宮林・森山)
- 119 平面ひずみ条件下の要素試験と模型実験における変形 (小林)
- 120 砂の $\phi_{PS} \sim \phi_{TC}$ 関係について (下辺)

本セッション10編の論文の分類と、各論文で取り扱われた内容を下表に要約する。

分類	講演番号	内容と結論
不かく乱砂の力学的性質(かく乱の影響)	111	$\phi_{und} < \phi_d$: 土の構造, 特に構造の不均一性の力学特性へ及ぼす効果。
	112	$\phi_{und} \approx \phi_d$: 土の構造かく乱の影響は, 負のダイレイタンスに現れる。
	113	不かく乱砂の力学的性質を豊浦砂のそれと比較検討。
	114	$\phi_{und} \approx \phi_d$: 不かく乱砂 = 大きさ E_{50} , 小さい負のダイレイタンス
一般応力条件下での砂の力学特性	116	中空ねじりせん断装置: 主応力回転の影響
	117	三主応力制御試験: しらすの inherent anisotropy
	118	二方向単純せん断試験: 主応力軸の回転とひずみ増分方向
	119	: すべり面と zero-extention 線
	120	平面ひずみ試験: 帰帰方程式
低拘束下の砂のせん断特性	115	低拘束下の三軸圧縮試験: ロードセルの試作, 自重メンブレン力の影響

砂のせん断に関する研究は、いよいよ精密化の度を増して止まるところを知らないかに見える。一方、砂質地盤を扱う現場はどうであろうか? N 値への信奉から脱皮して新しい時代を迎えたとは、残念ながらいえない現状である。この“研究”と“現場”の越えがたい距離感には、それなりの理由があって、ここで論ずべき事柄ではない。しかし、従来、研究者が不かく乱砂に対する研究を不当に見過ごし

てきたことに一因を求めることはできまいか? 室内における精密な研究は、乱さない天然の砂質地盤の実体に関する詳細な調査に裏打ちされて初めて意義深い成果にまとめられるように思われる。この意味において111~114の研究は大変に貴重であり、示唆に富んでいる。

111: 土の構造, 特に構造の不均質性に注目して, 不かく乱砂とそれと同密度に詰めたかく乱砂とを比較・検討している。しかし構造を表すパラメーターがいずれも力学試験の値から逆算されている。このために, 結論はいずれも否定できないが, 同時に積極的に肯定もできないように感じられる。

112: 不かく乱砂とそれと同密度に詰めたかく乱砂の排水三軸試験結果を比較し, 砂の初期構造を乱すことの影響について検討している。それによると, 乱れの影響は変形特性, 特に負のダイレイタンスに顕著に現れ, 静的排水強度に有為な効果を及ぼさないと結論している。この結論は, 非排水繰返し強度とも調和的であるとしている。今後, “初期構造の乱れ”が具体的にどのような内容を持つかが解明されれば, 乱した試料の実験結果の解釈や適用に一步を進めることになる期待される。

113: この研究は, 二種類の不かく乱砂の変形・強度特性を調べて, 乱した豊浦砂の結果と比較して, 不かく乱砂の特徴を明らかにしようとしている。天然の砂質地盤の力学的性質を, 乱したクリーンな砂の研究の延長線上で考えると, 重大な誤りに陥る危険性のあることをこの論文は示唆している。

114: この研究は, 不かく乱の洪積砂と, それと同密度に三つの方法で詰めたかく乱砂に対して通常の排水三軸試験を行って, 乱すことの力学特性に及ぶ影響を吟味している。乱すことの影響は, 111の研究と同様, 主に変形挙動に現れ, 排水強度への影響は小さいと報告している。すなわち, 乱さない試料の初期構造は変形に伴い逐次変化し, 最終的には乱した構造へと転化して行くらしい。

最近塑性論をベースにした土の力学への取組みが盛んである。物性論からの興味や複雑化した構成式の検証などを目的として, より一般的な応力条件下での土の挙動への関心が急速に高まっている。今回の報告でも, 平面ひずみ試験(119, 120), 三主応力制御試験(117), 中空ねじりせん断試験(116)などの外に, 二方向単純せん断試験も加わって多彩である。最も普及している三軸圧縮試験にも精度を高めるためには種々の問題点のあることが指摘されていて(115), 土質実験の困難さを痛感させられる。試験機の複雑化, 精密化は世の通例である。しかし“何のための実験”かを常に忘れないようにする努力が必要であって, “実験のための実験”に随しない配慮が肝要である。

115: 0.5 kgf/cm^2 以下の低拘束圧下の砂の変形・強度特性を解明する目的で、新しくロードセルの試作や自重・メンブレン力の補正について詳細に検討している。特殊せん断試験機開発の盛んな昨今、古典的な三軸試験の精度向上に努力している著者らに敬意を表したい。

116: 中空ねじりせん断試験により、主応力軸の回転による砂の塑性挙動を取り上げ、砂の異方的な硬化の様子を明らかにした。

117: しらすの三主応力制御試験から、しらすの初期構造異方性と中間主応力との相乗効果について言及している。せん断初期に構造異方性の影響が大きく、破壊に近づくとき中間主応力の影響が大きくなる。

118: 二方向単純せん断試験を用い、主応力方向の変化する応力経路で砂をせん断し、せん断応力とせん断ひずみ増分方向のずれについて観察し、そのずれに適当な解釈を試みている。

119: 砂のせん断試験ではしばしばすべり面が観察されるが、その力学的解釈についてはいろいろな議論があって定説がない。この研究はすべり面と zero-extension 線との関連性について議論しているが、ただ単なる角度の比較では新しい知見には至らないのではないかと危惧される。

120: 平面ひずみ試験の排水強度を三軸試験から予測しようとするもので、従来の実験値を整理して回帰式を導いている。

九州大学 橋口公一

121 模型砂地盤の孔内水平載荷実験(香川・石井)

122 模型砂地盤におけるプレッシャメーター試験(畠・太田・深川・中條)

123 N 値と粒度によるトンネル切羽の安定性の判定例(中村・高橋・小松田)

124 落し戸周辺砂層の変形について(高木・兵藤・西尾)

125 マルコフ・モデルの適用 その1(異方的な初期粒子構造をもつ粒状体への適用)(北村・川井田)

126 マルコフ・モデルの適用 その2(一般応力状態への適用)(北村・川井田)

127 マルコフ・モデルの適用 その3(応力比一定圧縮過程への適用)(北村・佐藤・川井田)

128 ファブリックテンソルによる誘導異方性の考察(佐武)

129 砂の弾性領域と AE 特性との関係について(谷本・田中・中西・籠谷)

このセッションでは9編の報告がなされたが、構成式や境界値問題に関する1,2のテーマを除いて、粒状体のミクロな考察(4編)から現場試験に関する考察(3編)へまたぐはなはだ広汎な枠組みにおけるセッションであった。

128は、粒子接触法線ベクトルによって規定されるファブリックテンソルが巨視的応力とべき関数の形で関係づけられると仮定し、本関係の妥当性をエポキシ製の丸棒の光

弾性実験により実証している。また、粒子間接触力によって定義・算定される(微視的定義に基づく)2種の応力の精度に関して、実測値との比較により検討している。つまり、対象領域内のすべての粒子間接触力により定義・算定される応力および対象領域の表面に作用する接触力のみに基づく応力の精度は、標本数の少ない後者においても、通常の粒子数を対象とする場合には前者とほとんど差異はみられず、いずれも妥当なものであると述べている。

125~127では、マルコフ過程を適用して導いた粒状体の構成式について豊浦砂による実測値と比較・対照しつつ試行錯誤的に修正を進めている。まず、125では、初期粒子接点角の分布を以前の三角形分布から五角形分布に一般化することを提案している。また、粒子の堆積方向を種々に変えて行った三軸試験結果に基づいて、粒子の落込みつまり粒子接触の消滅は変形仕事に対して両対数線型関係で表されることを見いだしている。126では、平均応力一定条件下の種々の比例負荷試験を行って、本関係の妥当性を実証している。127では、このモデルの応力比一定圧縮過程への適用について検討し、実測値とのかなり良い一致を得ている。しかるに、125, 126のせん断過程の場合とは異なる物質関数や定数が一部に用いられている。今後、負荷条件や変形条件によらない一般性のある理論としての発展が望まれる。なお、既往の粒状体微視的変形モデルのいずれについてもいえることであるが、このモデルにおいても応力がピークに達した後の軟化現象が表現されていない。この点についてもモデルの改良・発展を期待したい。

129では、アコースティック・エミッション(AE)特性を利用して、砂の降伏曲面を実験的に求めることを試みている。つまり、物質は塑性変形を生じる際に熱や音の形で消散エネルギーを生じるが、ここでは比較的精度良く実測可能と思われる音の発生に着目して、降伏応力の実測を行っている。実測結果によれば、排水と非排水の両条件において得られた降伏曲面は比較的良い一致を示しており、本測定法の妥当性がうかがわれる。過常、降伏応力は、応力-ひずみ曲線の折曲がりを目安に実測・決定されているが、これにはかなりの主観が伴う。一方、音響は塑性変形時のみ発生し、降伏応力の、より客観的かつ簡明な実測手法を提供しえると期待される。

122では、先に太田らが提案したプレッシャメーターによるヤング率、残留状態における内部摩擦角および非排水条件下の粘着力の算定式の妥当性をそれぞれ平板載荷試験結果によるFEM逆解析、一面せん断試験およびベーンせん断の各試験結果との比較により検討している。いずれも比較的良い一致がみられ、提案式の有用性が認められる。121では、大型円柱状供試体を作製し、その周囲に加える拘束圧を種々に変えて、円柱中央部の小孔に内圧を加えて、プレッシャメーター試験特性を調べている。特に、ヤング率、内部摩擦角、ダイレイタンシー角をJewell(ジュエル)

一般報告

らの方法によって検討しているが、この方法では圧縮側の体積ひずみを無視しているため、圧縮性の大きな材料の内部摩擦角やダイレイタンシー角を過大に評価する点、注意を要するとしている。

123では、 N 値から土の強度定数を決定する場合、従来、粘着力 c および内部摩擦角 ϕ のいずれかをゼロとみなして他方を決定する経験式が用いられているが、ここでは、粘性土分含有率をパラメーターとする c および ϕ の算定式を提案している。本提案は、 N 値によるこれらの強度定数の決定法を一般の c 、 ϕ 共有材料に拡張したものと評価しえよう。

124では、トンネル施工等に関連する落とし戸問題を実験的に究明している。砂槽内の垂直平面内に格子状に埋め込んだ鉛球が落とし戸に伴って移動する状況をX線撮影で観察し、砂粒子の鉛直変位は正規分布で表されること、沈下域の水平方向への広がりは落とし戸からの鉛直距離に比例することなどを実証している。

以上のように、プレッシャメーターや N 値による強度定数の決定法の改善、AEによる降伏面の実測、ファブリックテンソルと応力の関係等、個々の有用な成果が報告された。一方、本セッションのテーマは基礎と応用の両極に分かれ、これらに統一的成果を見いだすことは難しい。また、著者は、むしろ中間領域の構成式や境界値問題に多少の知識を得ているが、セッション進行の面からもプログラム編成の際に、これらに対する応分の配慮を願えれば幸いである。

東北大学 佐武正雄

130 準微視的観点からの粒状体の変形挙動に関する2, 3の考察 (飛田・柳澤)

131 微視的圧縮・せん断機構に基づいた粒状体の応力・ひずみモデル (松岡・藤井・中村)

132 三次元応力下の砂の構成式と回転応力径路・液状化解析への適用 (松岡・小山・山崎・松原・村井)

133 自然堆積砂の異方性とその応力～ひずみ関係(土岐・三浦(清)・三浦(均))

134 異方性砂の三次元非排水応力～ひずみ関係 (三浦・土岐・江幡)

135 ロスの変形式による粒状体のエントロピー (諸戸)

136 土の構成式における同定問題とその応用 (柴田・佐藤・プラダン テージB・S・平井)

137 一般応力条件下における砂の構成式 (柴田・佐藤・プラダン テージB・S)

138 キャップ型境界面を有する弾塑性境界面モデルによる砂の構成関係 (田中)

139 重ね合せ法則を用いた任意方向単純せん断試験の解析 (陳・松岡)

140 粒状体の Stress-Induced Anisotropy について (小田・田村・小西)

141 不飽和砂の力学特性に及ぼす含水量の影響 (中川・駒田・横森)

このセッションは、土の構成関係へのアプローチを主題としたものが集められているように思われる。理論・実験観察・応用のいずれかに主眼がおかれてはいるが、この三要素をカバーしようとする意図がいずれの発表にも感じられた。また、微視的考察、異方性の導入、応力状態・応力径路の一般化などによって、構成式の精密化、普遍化(更に液状化解析への応用など)がはかられている点が注目された。

130は、粒状体の塑性変形挙動を、微視的構造変化やダイレイタンシー特性を考慮し、平均化による巨視的変形速度テンソルを用いて解析し、複合硬化的な特性が得られることなどを示している。内容の整備により、研究の発展を期待したい。なお、stiff chain という用語について討議があった。131は、潜在すべり面上の σ_n 、 τ の変化方向を応力径路を示すパラメーターとして用い、微視的考察に従って潜在すべり面上の粒子の接触角分布や滑動方向を仮定することによって、種々の応力径路に対して適用できる応力・ひずみ関係の算式を導いている。計算値は実際の傾向と合致することが示されており、構成式としての定式化が望まれる。132は、著者の複合滑動面理論に、繰返しせん断の場合の接触角分布の変化特性を考慮して、繰返しせん断を含む一般的な応力径路に適用可能な構成式を提案し、 π 平面上の回転応力径路に対する実験値と計算値の対応を調べるとともに、液状化解析への応用を説明している。 π 平面上の回転応力径路における塑性ひずみ発生状況は、多くの示唆を含み極めて興味深い。133は、自然堆積砂のもつ(固有)異方性を電子顕微鏡による測定によって表現し、異方性を考慮した弾塑性モデルの構成式を提案して実験による変形特性とよく合致することを示している。134は、非排水条件下で、堆積による異方性を考慮した構成式を提案し、実験値との比較を示している。主ひずみ増分式において、降伏関数、塑性ポテンシャルは等方的とし、松岡の複合滑動面の概念によって異方性の導入を試みている。135は、単純せん断試験に対するWroth, C.P.(ロス)の理論を、著者の粒状体のエントロピーの概念によって考察したもので、 $e-kr$ を状態パラメーターとする最上の理論の妥当性にも言及している。136は、土の構成式における同定問題を取り扱い、具体例として、三軸試験に対する西, Cam Clayなど4種類のモデルの適用などを考察している。感応度分析によって、土質パラメーターの独立性が調べられるので、同定解析は単に実験値の分析ばかりでなく、構成式そのものの追求にも応用が可能と思われ、研究の発展が期待される。137、土質材料では、移動硬化も加味した複合硬化を考慮する必要があり、著者は、主応力空間の座標変換を応用し、また移動硬化パラメーターを合理的に決定する解析手法を提案している。この手法は、一般応力条件に

土と基礎, 32-10 (321)

適用できるので、排水・非排水または単調・繰返し载荷に適用し、実験値と計算値とを比較して考察している。138は、Dafalias, Y.F.(ダファリアス)らによる土の境界面モデルについて、液状化をも含む砂の広い範囲の挙動解析に適用できるような修正を提案し、計算例が妥当な形となることを述べている。第3不変量 J_3 の考慮等、研究の発展が期待される。139は、非線形なひずみ計算における累加法を検討し、単純せん断試験結果から、水平面内の任意方向のせん断に対する応力・ひずみ関係の算定を行った。各種のひずみ径路に対する解析値は実験値と良好な一致を示している。140は、粒状体の誘導異方性の表示として、従来の(金谷による)ファブリックテンソル N_{ij} のほかに、粒子形状や空隙形状を示す2階テンソル S_{ij} , V_{ij} を導入するとともに、変形過程におけるこれらのテンソルの変化の性状を示している。特に、ひずみの大きい軟化過程において、 V_{ij} の異方性が増大することなど興味ある知見を得ている。総合的な異方性を示すために、3種のテンソルの合成が提案されているが、その意味などについて討議があった。また、これらのテンソルの相関関係についても検討が望まれる。141は、不飽和砂の力学性質について考察し、飽和度の影響について、強度は飽和度の影響をほとんど受けず、変形性は飽和度の増大とともに増加し、その影響は降伏関数または硬化関数に現れることなどを指摘している。

以上、個々の発表について述べたが、それぞれ内容が深いものであったのに、討議時間が足りなかったことが残念である。全般的に、今後、構成式の研究としては、次に述べるような諸点に留意することが必要ではないかと思われる。(1)パラメーター、係数の選定、力学的な意味と独立性(相関性)を考慮し、精度を上げるためにも単に項数をふやすことをせず、有意性、合理性を追求する(例えば、繰返し応力の解析のための J_3 の導入など)。(2)構成式の条件、構成式は単に応力・ひずみ関係式というだけでなく、テンソル方程式、客観性などの条件の具備に注意し、また異方性の表現を正しく導入する。(3)適用性、適合性、力学的な考察から、応力範囲、応力径路などその式の適用性を明確に示す必要がある。また、適合性の判定や同定解析に対しても、合理的な解釈を与える新しい手法の発展が望まれる。

(財)電力中央研究所 松井家孝

142 自然堆積砂の力学特性に及ぼすサンプリング法の影響(谷澤・土岐・三浦)

143 砂の三軸圧縮および平面ひずみ圧縮における供試体形状効果(龍岡・後藤・福島・榎戸)

144 三軸供試体における砂の静的変形・強度特性について(後藤・龍岡・榎戸・滝沢)

145 K_0 圧密三軸試験における試験法の影響(大河内・林)

146 砂の三軸伸張試験における供試体の破壊型式につい

て(福島・田所・龍岡)

147 砂の平面ひずみ条件(側方変位拘束条件)に関する基礎的検討 その2(徳江・長谷川・佐々木)

担当した論文は6編であり、砂および粘性土のせん断試験において生ずる様々な誤差の要因ならびに力学特性に及ぼす影響について論じている。

142は、自然堆積砂のサンプリング時の乱れが力学特性に及ぼす影響について、ブロックサンプリング、ギプスサンプリング、鉛直・水平チューブサンプリングの4種のサンプリング法による供試体を用いて検討した。その結果は、ブロックとギプスサンプリングの間には大きな差は見られないが、鉛直・水平サンプリングの場合には、密度や構造変化への影響が大きく、力学特性への影響が顕著であることを指摘し、前2者の採取法を推奨している。しかし、地下深部からのサンプリングではチューブサンプリングによらざるを得ないので、この場合にどうすべきかの提言が欲しいところである。

143は、豊浦砂を用い、供試体の端面および側面摩擦の影響のほか、平面ひずみあるいは三軸試験における供試体高さ(または直径)の比 $(h/w)_i$ のとり方が ϕ および変形特性に及ぼす影響を検討した。平面ひずみ試験での応力測定に含まれる誤差に関し、境界面摩擦の最も小さいと判断されるデータを用いて、 $(h/w)_i$ が1.8程度の場合には小型・中型の差はほとんどないが、それが、0.96、0.48と小さくなるにつれて ϕ の値は大きくなる傾向を示し、5°以上の差となると述べている。すなわち、境界面の摩擦が大きいほど、また、 $(h/w)_i$ が小さいほど ϕ を大きく評価する結果となる。一方、三軸試験では逆に、 ϕ を小さく評価する結果となった。この原因は、ピーク強度以前に変形の非一様性が大きく影響していると推定している。

144は、豊浦砂についての等方圧密排水三軸試験時に生ずるひずみ測定時の誤差について論じたものである。この種の誤差には、上下端面に生ずる軸方向変位の誤差(Bedding Error)と側方変位に対する誤差がある。側方変位を測定してもMembrane Penetrationによる影響が大きく、排水量から求めた側方ひずみよりも誤差が大きい。一方、供試体高さの応力-ひずみ関係への影響は密な砂の場合に大きく、 E_{50} に関しては高さが高い場合には数倍の差となって現れることを指摘している。しかし、143、144に指摘された試験結果の差から、設計値決定にどのような考え方をとるべきかまでは言及されておらず、今一步のつっこみがほしいところである。

145は、水平堆積地盤から採取した沖積粘性土・砂質土の K_0 圧密試験について述べたものであり、予圧密により供試体の乱れをかなり軽減できること、軟らかい粘性土については供試体の高さを低くして試験期間の短縮を図るとともに、Lubricated endを用いることにより強度は高さの影響を受けないことを指摘している。

一般報告

146 は、三軸伸張試験時の供試体の一様性を確保するため、高さ×直径の寸法比(h/d)を変えて検討している。直径を一定($d=7.5$ cm)とし、高さを 15, 4, 2 cm と変えた試験により、理論上 $h/d \leq \tan \epsilon$, ($\epsilon=45^\circ - \phi/2$) で与えられる h/d の範囲では局所破壊が生ずることなくほぼ満足な結果を得ており、上式が一応の目安となることを確認している。

147 は、平面ひずみ条件を満たすためには側方変位に一定の限界があるとの観点で、試験装置の試作・改良過程で得られた結果を述べ、 $\delta_2 \leq 50/1000$ mm と $\delta_2 \geq 100/1000$ mm とでは応力-ひずみ関係、応力径路に差が生ずることを明らかにし、側方変位の限界値の提案を行った。

以上の発表に関し、村松(大成建設)より 145 の予圧密応力の設定の考え方について、また、大河内(基礎地盤コンサルタント)より 143, 144 に関し乱さない試料の強度試験の考え方についての質問がなされた。また、徳江(日大)より、平面ひずみ試験における $\epsilon_2=0$ の仮定の妥当性について、要素試験と現場との関連で検討したい旨の発言があった。

これらの発表は、諸種の誤差の要因を取り扱っているが、もう一歩進めて、設計値をどう定めたらよいか、そのためには含まれる誤差のどの要因を重視すべきか、避けられない誤差であれば設計値のもつ余裕をどうとるべきなのかなどについての示唆があれば、更に興味深い研究になったと思われる。

東洋大学 岩本相一

148 粒状材料のせん断機構の違いによる強度比較について(赤司・高田・江藤・山下・相場)

149 ロックフィルダム粗粒材料の室内三軸試験における粒度・密度・締固め度の影響(貞弘・上村・長瀬・新屋)

150 粗粒材の大型三軸試験のための供試体作製方法が試験結果に与える影響(酒向・石井・寄田・松本)

151 円礫材料のせん断特性(工藤・松井・国生・西・田中)

152 捨石材の超大型三軸圧縮試験による力学特性(荘司・石井)

153 SGI型単純せん断試験機の供試体変形・破壊に関する基礎的検討(徳江・栗津・木村)

154 粒子破碎を伴う砂と鋼材間の摩擦(上杉・小西・岸田・矢島)

155 高圧下の粘土混合砂の応力～ひずみ関係(本田・有本・日下部)

このセッションでの論文は、広い意味で試験方法に関するものを扱っていると言える。それは大きく分けて、試験機に関するものと供試体作成によるものである。

供試体作成を中心に分類すると、まず礫を扱った 148～152 とそれ以外のもの(主として砂)に分けられる。試験機に関するものは、148, 153, 154 などである。礫を扱っ

た論文に共通しているのは、ストレス・ストレインカーブでピーク強度が現れにくく、ダイレイタンス特性が収縮型で、 σ_3' の増加とともに ϕ_a が減少しているのだからほとんどの供試体が粒子破碎をしていると推定ができる。この傾向は、試料の粒径が大きいほど著しい。

興味をひいた一つの議論は、粗粒土の強度を定めるパラメーターは e_0 か D_r かという問題である。149 は初期間隙比 e_0 を一定にしておけば、ばらつきのないユニークな強度を得るとしているが、151 は D_r が強度を定めるとしている。この問題について、初期間隙比というあいまいなものより、 D_r の方がユニークな強度を与えるはずであるというもつともな意見があった。しかし、 D_r を誰もが納得のいく方法で決定するのは、これはこれで今後の課題であろう。

148 は三軸圧縮試験機、大型一面せん断試験機、単純せん断試験機、平面ひずみ試験機の各々で試験を行っている。礫については、大型一面せん断が最も大きな強度を与えること、試料の粒径が小さくなるにつれて、各試験の強度差が小さくなることなど、試料の最大粒径とそれに対する試験機の最適な大きさとの相関について一つの問題を提起していると思われる。149 も D_r の設定方法が最大の課題となろう。これについては、この研究発表会の池見の報告がある。

150 も粗粒材供試体の作成に関するものである。発表者らは、1層分の材料を3分割し、分割したそれをよく混合してまき出す方法を提案している。そしてこれがほかの方法、パイプレーション法・ランマーで突き固める方法、手で作成したものなどより大きな軸差応力と小さなダイレイタンスを示すとある。しかし、これらの各方法の強度差はかなり小さく、各種試験を数多く行って、それが単なる強度差でないことを示してほしい。

151 は発表者らの考察した方法での D_r により、 D_r 値と強度との1対1の対応がつくことを示している。砂礫混合体では $D_r=100\%$ 付近で砂礫混合物の強度は同じであるが、 D_r が減少した範囲では、砂分混合率の大きいものの強度が大きく、圧縮性も小さい。このことから筆者らの開発した D_r のみで強度と圧縮性を定めようとしている。152 は各地で使われている港湾の捨石材のストレス・ストレイン関係が、いわゆるロック材とどう違うかを目的としている。結果として、軸差応力が段階的に増加すると、粒子の破碎に連動する応力～ひずみ関係が、不連続な変化あるいは波が発生し、ダイレイタンスも収縮する一方であり、ピーク強度も現れず、著しい粒子破碎のみられるのがこの研究の特徴である。これらは、粒子自体がぜい性でもろく、粒度配合も悪く、更には材料の形状にも問題があると思われる。

153 は最近多用されるようになった SGI 型試験による砂の変形・破壊を直接見ることができないので、供試体内に鉛箔材を埋めて、その様子を調べたものである。結果とし

ては、緩い砂はともかく、中位の、あるいは密な砂では、はっきりしたせん断面が現れている。この方法はほかの試験機にも転用できるものと思う。154は砂と鋼材間の摩擦を調べるため、両者に単純せん断型の相対変位を与えたものである。変位と強度の関係は、砂と砂との間の場合と同じく、予想されるとおりである。この実験は、せん断による塑性仕事量の増加→粒子破碎率→摩擦係数の増加→更に塑性仕事量の増加という循環をしているように思える。蛇足であるが、鉄板の上で砂を回転させてみたらどうかと思う。155は豊浦砂とベントナイトを4:1の質量比で混合して、気乾状態で高圧三軸試験を行ったものである。粘土のみ、あるいは砂のみの試験結果は多いが、両者を混合したものについては少ない。結果はおおむね Roscoe (ロスコ)らのモデルと一致するようである。例えば、ストレス・ダイレイタンス特性が従来のものとどう違うか一考の余地があると思う。

総括

金沢大学 太田秀樹

111~155の発表をおおまかに分けると、i)基礎的な理論の展開、ii)室内で作成した砂の力学特性の追求、iii)乱さない砂のサンプリングと力学特性、iv)試験方法の追求、v)粗粒材の力学特性、vi)その他、となろう。i)が全体の1/3、ii)が約2割、iii)~v)がそれぞれ1割程度で続き、vi)が1割強である。粒状体の力学体系を構築して行くことが重要な研究テーマになっている。

過去20年間に粒状体の力学理論が格段の進歩をとげ、その成果はいよいよ実際問題への適用段階にまで達しつつあると考えられる。この段階で理論的な研究成果をまとめてみることは意味があると思われる。表一1は構成方程式をその導き方の基盤の相違によって2つに大別したものである。ごく限られた範囲のモデルだけしかその対象にできなかったのは筆者の不勉強のせいである。

構成式によって記述された土の力学特性が座標の回転に対して不変であるべきだとする客観性の原理を満たすために、構成式は等方関数でなければならない。これは構成式が最低限満たしていなければならない数学的条件である。異方性や応力履歴の影響を矢富・西原がいう基準テンソルで表現しようとする考え方と内部変数で処理しようとする考え方がある。クラックテンソルなどは前者に属する。内部変数の挙動を規定するために、後者の考え方では、あらたに何らかの構成仮定を必要とする。空間滑動面上での

表一1 構成式のなりたち

構成方程式 (応力-ひずみ関係, 強度)		
客観性 → 等方関数 (具備すべき要件)		
$E=F(\sigma, K_1, K_2, \dots)$	$E=F(\sigma, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \dots)$	
K_i : 基準テンソル (矢富・西原, 1984, S & F)	σ_{ij} : 内部変数	
初期構造 ↓ 構造異方性等 (本当の異方性)	初期応力 ↓ 誘導異方性等 (みかけの異方性)	応力履歴等の関数 ↓ 新たな構成則が必要 (内部 にかくされた構成則)
小田らによる研究 の流れ	関口, 太田らによる 研究の流れ	松岡, 中井, 岡らによる研究 の流れ, 移動硬化則

摩擦をとり上げるのはこのような構成則の1つの典型例であろう。移動硬化則もその1つである。

これらの理論的な展開のうち、いずれがよいのかは今のところ分からない。乱さない砂に対する研究の成果が蓄積されることによって、工学的な立場からの評価が可能になると思われる。他方、理論のすべてがその基盤を置いている実験事実の信頼性について深刻な疑問を提出しつつあるiv)の試験方法に関する研究成果がでてくるにつれて、従来の構成式理論の再検討が必要になるかもしれない。

砂に関する研究と粘性土に関する研究とを比較すると実際の地盤の力学的挙動と室内試験や理論との比較照合といった側面で大きな違いが感じられる。砂地盤の破壊や変形と室内試験や理論との対比は動的問題の分野では多く行われているが、静的な問題に対しては余り多くない。砂地盤での静的な問題がそれほど深刻な工学的障害になっていないからなのか、または現場の技術者の関心が大きくないのかよく分からないが、地下水がらみの砂地盤の安定問題など重要なテーマがあるように思われる。実際の砂地盤が本当のところどのように挙動しているかを把握しながら、室内試験・原位置試験および理論の改良を行っていくといったプロセスがぜひとも必要な段階にきていると思う。基礎構造物のより適切な設計・施工に構成式のような理論が役立つのは、まさに現場との対比という作業においてであると考えられる。今後このような実際の砂地盤の挙動とのからみで理論や実験が発展していくことが望まれる。

最後になったが、全く新しい試みを追求している研究がいくつかあった。直接的に実際問題に関係するかどうかは別として、このような研究から砂のせん断への新しいアプローチが生まれることを期待したい。辛抱強く継続的に研究が進められることが何より大事であろう。

せん断 (粘土)

一般報告

愛媛大学 中村忠春

156 繰返しせん断を受けた粘性土のせん断特性 (浜田・今井・安藤)

157 正規圧密粘性土の非排水せん断特性 (亀井・中瀬)