

鳥取県西部地震で液状化した噴砂試料を用い、これまで一般に液状化しにくいとされてきた細粒土についての液状化強度特性を調べたもので、両報告において同じ相対密度の豊浦標準砂の液状化強度よりも小さいとの実験結果が示されている。**202**と**209**では試料作成方法の違いによる液状化強度について、**205**では異方圧密下での過圧密比について、**207**では細粒分含有率の度合いについて、**208**では初期圧密における異方性について、さらに**203**では不攪乱試料の乱れの影響についてそれぞれ液状化強度に与える要因の影響の度合いを室内試験の結果から求めている報告である。これらは、基準化された室内試験で求められた液状化強度の結果解釈において重要な影響要因の感度分析事例であり、貴重な検証データとなり得る。一方、**206**は液状化後の地盤を流体としての挙動と考え、地盤の粘性係数を算定する目的で中空ねじりせん断試験を実施している報告であり、近年液状化に伴う流動のメカニズム解明において一つの柱となっている研究である。**204**は要素試験における繰返し載荷時の時刻歴や応力-ひずみ挙動を有効応力解析により求めている報告である。いずれも、砂質土を対象とした「液状化」というキーワードを基に地盤の動的強度特性に影響を及ぼす要因の抽出と度合いについての報告がなされ、これらの体系化が新たな課題になっていることが明らかとなったセッションであった。

**液状化 2 (210～220) :** **210**は韓国の Joomunjin 砂と豊浦標準砂の液状化強度および動的変形特性を比較したものである。**212**は不攪乱試料の繰返し変形特性について述べたもので、砂質土の過剰間隙水圧とせん断ひずみが、試料や拘束圧によらず一義的な関係になることが示された。**215**ではしらすの細粒分が繰返し載荷時の流動的な変形を誘発し、初期せん断応力による液状化強度の増加を妨げるという結果が示されている。**213**は不規則波の時間スケール、**214**は  $K_0$  値と試験方法（繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験）、**216**は過圧密履歴、**219**はせん断方向（多軸単純せん断）が土の動的挙動に及ぼす影響について述べられている。これらは基準化された室内試験で再現しきれない応力条件、載荷条件下の土の挙動について述べており、室内試験結果の実務への適用に関して有益な知見であると思われる。本セッションでは以上の動的特性に影響を及ぼす要因についての報告に加えて、**211**と**217**で液状化強度推定法が提案された。**211**は、流動限界を定義

して砂質土の物理的特性を複合的に評価し、液状化強度を推定する方法である。**217**は繰返し載荷時のひずみの発達形態から液状化に対する土の粘り強さを評価し、試験結果を補正する方法である。また、本セッションでは、液状化後の土の力学特性についても報告があった。**213**は不規則波載荷時の最大軸ひずみと液状化後の微小抵抗領域の関係について、**218**は液状化後の変形特性について、**219**と**220**は液状化後の体積変化特性について述べられている。

**微小ひずみ (221～231) :** 近年、三軸試験において、微小ひずみにおけるせん断弾性係数  $G$  またはヤング率  $E$  の測定技術および精度が向上している。本セッションでは、動的測定方法として BE（ベンダーエレメント）、起振子と加速度計、静的測定方法として LDT（局所変位計）による方法が多数の研究で用いられ、精度の高いデータが得られている。研究の焦点はデータの評価に移ってきていると思われる。**222**は砂の液状化過程における S 波速度を調べ、**225**と**226**は、室内試験で得られたデータの精度について、原位置試験のデータとの比較により検討しており、BE による測定の問題点とデータの解釈について質問があった。**227**～**231**は変形特性に影響を与える要因について検討している。**227**、**229**、**230**は堆積構造異方性の影響、**228**と**231**は応力履歴の影響についてそれぞれ検討したもので、水平、鉛直方向のヤング率  $E_h$  と  $E_v$  の大小関係、BE の近傍で S 波と P 波が複雑に交錯する影響、いわゆる near field effect などについて討議があり、興味深い内容であった。特に、**229**の中で  $G_{vh}$  と  $G_{hv}$  がほぼ一致しているのは注目に値する。

**221**と**223**は三軸装置の開発に主眼を置き、前者は不飽和砂の液状化抵抗と P 波速度、後者は S 波および P 波速度についてそれぞれ検討したもので、適用できる供試体の寸法等について質問があった。**224**は中空ねじり装置を用いて大型供試体に LDT を適用し、せん断弾性係数等について検討している。これは新しい試みであり、今後より精度の高いデータが得られるものと期待される。

最後に、本総括をまとめるにあたり、森川嘉之氏（独立行政法人港湾空港技術研究所）および永瀬英生氏（九州工業大学）から貴重なメモをいただきました。末筆ながらここに感謝の意を表します。

### 3. 地盤材料；砂質土（せん断・締固め、粒子破碎・クリープ、変形強度・DEM、変形強度・解析、せん断試験法）

#### 総 括

愛媛大学 酒井 俊典

本部門は 5 セッション 46 編の発表があった。発表された論文は実験と数値解析に関するものに大別することができる。さらにそれらを内容別に分類すると表 1 のようになる。実験のうち動的試験は 2 編あり、**232**は中空ねじり試験機の繰返し載荷実験より、せん断ひずみ増分が線形関係となることを示したもので、**233**は繰返し三軸試験における応力制御とひずみ制御の比較検討を行ったものである。**232**の発表に対しひずみ制御でのコントロールの扱いについて質問が出された。近年話題となっている砂質土の粒子破碎に関する発表は 9 編あり、**237**は破碎性土の集合体としての地盤のマクロな挙動と、物理的、力学的性質との関係について検討を行ったものである。**245**は低拘束圧下での地すべり土における粒子破壊特性の検討を行ったもので、低拘束圧下で

も粒子破碎の影響が考えられることを述べている。**243**、**244**は一面せん断試験機、中空ねじりせん断試験機を用い、粒子破壊の評価を行ったもので、前者では一面せん断試験機によっても粒子破碎の評価を行えることを、後者では主応力回転場で粒子破碎が顕著となることを述べている。**239**、**240**では、破碎性火山灰土の細粒分がせん断強度に及ぼす影響について検討を行い、細粒分が大きく影響することを述べている。**241**はまさ土の締固めによる組成鉱物の破碎特性を調べたもので、特定の鉱物の破碎が顕著であることを述べている。**234**、**246**では粒子破碎の拘束圧依存性について検討を行い、**246**では内部摩擦角と粒子表面積とに相関が見られることを述べている。現在、種々の材料において粒子破碎に関する研究が盛んに行われているが、今後、破碎性の評価を統一的行うことが必要であると考えられる。時間依存性に関するクリープについての発表は 3 編あり、**247**では大型一面せん断試験機を用いたクリープ試験の適用性の検討を、**248**、**249**では三軸非排水

表—1 研究内容の分類 (46編)

| 項 目  | 小 分 類   | 発表<br>件数 | 内 容                                                                                         |
|------|---------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実験   | 動的試験    | 2        | 液状化・動的特性 (232, 233)                                                                         |
|      | 粒子破碎    | 9        | 破碎特性 (237, 243, 245), 細粒分の影響 (239, 241)                                                     |
|      | 変形強度    | 6        | 構造異方性 (238, 242), 粒子形状と内部摩擦角 (252), 各種せん断試験法の強度定数 (262), 鋼材と摩擦特性 (275, 277)                 |
|      | 三軸試験    | 4        | 定ひずみ経路試験 (235), 三軸非排水せん断クリープ特性 (248, 249), 不飽和砂のサクシジョン (253)                                |
|      | 一面せん断試験 | 4        | 一面せん断クリープ特性 (247), せん断帯内部粒子の観察 (254), 不飽和土のせん断特性 (271), 原位置一面せん断試験 (274)                    |
|      | 中空ねじり試験 | 1        | 降伏特性の検討 (261)                                                                               |
|      | 試験機の提案  | 6        | 不均一応力場試験機 (263, 270), 二面せん断試験機 (276), 定拘束圧単純せん断試験機 (278), 大型三主応力制御試験機 (279), 中空ねじり試験機 (280) |
| 数値解析 | 連続体     | 9        | 構成式の拡張と適用 (236, 264, 266, 272), 移動硬化則 (256), 上負荷面カムクレイモデル (267), 繰返し载荷 (265, 268, 269)      |
|      | 粒状体     | 5        | 等価介在物法(255), 個別要素法(257, 259, 260), パーコレーション (258)                                           |

条件において载荷, 除荷重, 伸張の各種条件におけるクリープ特性を示している。この発表で, 粘性土のクリープ特性と, 砂質土, 特に乾燥砂のクリープ特性との関係についての質問があった。また, 圧縮のメカニズムを考える場合, 間隙を減少させる圧縮なのか (粒子破碎を伴う) せん断によるものなのか, 明確な区別について評価する必要があると考える。変形強度のうち, **238, 242**は構造異方性について検討を行ったもので, **238**では支持地盤の側方流動挙動への影響を, **242**では粒子破碎特性と構造異方性との関係について検討を行っている。**252**は砂粒子を単純化した粒子に見立て, この単純化した粒子形状により砂の内部摩擦角を推定できることを示している。今後, 破碎性砂における評価とつながることを期待した。**262**は, 各種せん断試験において, 断面積補正とダイレイタンス補正を行うことで, 強度定数は試験法に関係しないことを示したものであるが, もともと異なる試験法を統一的に評価することには疑問があるとの意見が出された。**275, 277**は鋼管杭の周辺摩擦力の評価を, 一面せん断およびリングせん断試験機を用いて評価したもので, これらの発表に対し, 実地盤における鋼材の錆の影響について考慮すべきとの意見が出された。三軸試験機に関するものとして, **235**は定ひずみ経路試験から求めた砂の主応力比-主ひずみ比の関係, **253**は不飽和砂の力学特性に及ぼすサクシジョンの影響を検討したものであった。一面せん断試験機に関するもののうち, **271**は不飽和土のせん断強度パラメータを, **274**は原位置一面せん断試験と室内試験との比較を行ったものであった。また, **254**はせん断帯内部の粒子の動きを画像計測によって測定するもので, 計測手法についての質問が出された。せん断帯の発生, 発達の評価手法として今後の発展に期待したい。一面せん断試験は, 試験方法の単純さ, 簡便さのため見直されてきており, 研究的, 実務的に利用率が増えてきている。**272**では, FEM 解析により上下せん断箱の隙間とせん断帯との関係を調べ, その適用性について評価を行っている。この発表に対し, 変形領域がレンズ状でないことに対する質問がなされたが, 今後, 一面せん断試験機の適用性について実験, 解析の両面からその評価が行われることを期待する。**261**は多重移動降伏曲面の考え方に基礎をおき, 平均主応力と中間主応力一定下で, 主応力

の方向が鉛直軸に対し, 種々異なる条件における降伏挙動を, 中空ねじりせん断試験を用い実務的に調べたものであり, 微小変形から大変形までの降伏挙動が異方的であることを明らかにしており, 結果の解釈を含め今後の展開が期待される。試験機の提案に関するものとしては, **263, 270**の不均一応力場におけるせん断挙動と応力伝播のメカニズムの検討を行ったもの, **276**の一面せん断試験機の試作, **278**の定拘束圧下でのせん断特性を調べるものなどがあった。**278**の発表はユニークな単純せん断試験機の開発で, 今後の発展を期待した。**279, 280**は大型試験機の提案で, **279**は中間主応力载荷装置を取付けた三主応力制御三軸試験機について, **280**は内外径比を大きくし, レーザー変位計によって半径方向変位を直接計測できる中空ねじりせん断試験機についての発表であった。

数値解析に関する発表では, 近年, 計算技術の進歩により, 個別要素法 (DEM) などの不連続体の概念の導入が盛んに行われている。**255**は等価介在物法による応力場逆解析をアルミ棒積層体の落し戸実験について検討を行ったもので, **258**はパーコレーションを考慮した混合土の変形特性について検討を行ったものである。これらは新しい手法として今後の発展に期待したい。**257**は DEM において使用する円形要素の改善のため, 転がり摩擦を導入することで強度特性を説明しようと試みたものである。**259, 260**は要素試験から求められる異方的な変形挙動の原因を, 粒子レベルの解析によって説明したものである。DEM 解析は着実に進歩している印象はあるが, この解析では似て非なる結果が出てくる可能性もあるとの指摘があり, 現場や実験室レベルで本質的な挙動を見抜き, その結果を解析にいかに正確に評価できるかが求められるものと考え。連続体としての地盤材料の力学挙動に関する発表は 9 編あり, **236**は定ひずみ経路試験から求まる主応力と主ひずみ比の関係に基づいて, 砂の応力ひずみ関係をモデル化したもので, **264**は構成式の拡張あるいは改善を目的に, 二重負荷モデルの弾塑性マトリックスの導出方法の合理化を示したものである。**256**はひずみ増分方向に対する応力経路依存性を実験, 解析で検討したもので, Conjugate 型の移動硬化則を導入することで実測されたひずみ増分方向を表現できることを示している。**266**は砂の修正ひずみエネルギー硬化-軟化弾塑性モデルを用いた FEM 解析を補強地盤の支持力解析に適用したものである。**267**は上負荷面カムクレイモデルに基づき, 砂の構造と過圧密性の解釈が述べられた興味深いものであった。**265, 268, 269**は繰返し载荷に関するもので, **265**は多曲面モデルに基づく液状化後のよりよい評価を行うことを目的とするものであり, **268**は排水条件下の繰返し载荷特性を表現するため硬化限界面の概念を用いたものである。**269**は累積損失エネルギーを用いて液状化に対する材料の靱性の評価を試みたものであった。

砂質土においては, 粒子破碎, 時間依存, 不連続体の粒子間のつながり, せん断帯の発生・発達メカニズムなど解明すべきことがまだまだ数多く残されている。今後さらなる研究が進み, これらの問題が有機的に結合し, 要素試験, 原位置・モデル実験, 数値解析が結びつき, 効率的なシミュレーションが可能になることを期待したい。

最後に, 本総括は電力中央研究所の金谷守先生, 九州大学の安福則之先生, 大阪市立大学の大島昭彦先生から貴重なメモをいただき取りまとめたものである。末筆ながら感謝の意を表する次第です。