

### 3. 地盤材料 粘性土（強度）

大 向 直 樹

応用地質科

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（粘性土（強度））のセッションについて総括する。本セッションでは、自然堆積粘土の力学特性に関する7編の発表が行われた。発表は、主に自然堆積粘土の骨格構造の程度、微視的構造、異方性、ひずみ速度の影響に関する内容であった。

#### 2. 研究及び技術動向

近年、自然堆積粘土の力学挙動を把握するために、自然堆積粘土の構造に着目した研究がおこなわれている。

土の構造とは、土の生成あるいは堆積環境や、圧密・変形履歴などの物理化学的作用によって形成された土粒子の配列状態である。一般的に、自然堆積粘土は、練り返し粘土や再構成粘土に比べ、同じ応力状態で大きな間隙を維持している。また、この配列状態に特定の方向性（構造異方性）がある場合は、変形・強度特性や透水性などに異方性を示す。

本セッションでは、電子顕微鏡(SEM)観察により、自然堆積粘土の粒子の配列状態と残留強度状態や透水異方性について検討した報告があり、微視的構造の観察が力学挙動を把握するための有効な研究手法のひとつである

ことが示されていた。

また、自然堆積粘土の強度異方性やひずみ速度の影響に関する実験成果報告があり、このような自然堆積粘土に対する研究は非常に限られているため、今後のデータの蓄積により、さらなる自然堆積粘土の力学挙動の解明につながる成果が期待される。

さらに、自然堆積粘土の骨格構造の程度（構造、過圧密、異方性）を表現したSYSカムクレイモデルを搭載した水~土骨格連成有限変形解析により、東日本大震災時の変状被害のメカニズムを解明することを目的とした報告があり、今後発生する可能性のある大地震時の被災の軽減につながる成果が期待される。

#### 3. まとめ

粘性土に関する研究では、自然堆積粘土の乱れの少ない試料に対して高精度な室内試験を実施し、自然堆積粘土の力学挙動の解明を目的とした研究成果や自然堆積粘土の力学挙動をモデル化した数値解析による研究成果が多く報告されるようになってきている。このような研究成果は、自然地盤の挙動を高い精度で予測する際には非常に重要であり、今後もより一層の研究が期待される。

### 3. 地盤材料 粘性土（強度・動的）

山田 正太郎  
名古屋大学大学院 工学研究科

#### 1. はじめに

本セッションでは7編の発表があり、内容は多岐にわたった。各発表のキーワードを本文に記載の通りに列挙すると、150（塩分濃度，せん断強さ，粘着力），151（セメント添加粘土，粘着力，力学的性質），152（ため池，ベントナイト，安定解析），153（赤土，表層，せん断），154（遠心模型実験，粘性土，土砂投入），155（八戸ローム，高館ローム，動的変形特性），156（単純せん断試験，沈下，過剰間隙水圧）である。各発表の内容は相互に深い関連性を持つものではなかったため，以下では個々の研究内容について簡単に振り返る。

#### 2. 各研究の内容

メタンハイドレード収集時に生じる塩分の変化が土の物理・力学特性に与える影響について調べた発表(150)があった。また，セメント添加により自然堆積粘土が有する構造を人工的に与えようとする発表(151)があった。これらはいずれも土の骨格構造に関する研究という点で共通性を持っていた。

ため池堤体と遮水のために挿入されたベントナイトシートとの境界面のせん断強度について調べた発表(152)と，赤土の雨水による流出を対象に表面抵抗について調べた発表(153)があった。いずれも室内での計測を対象にした試験装置を独自に開発して行った研究であった。

海底などへ粘土を投入する際に，鉛直管を利用して投入することで浮泥化を防ごうとする発表(154)があった。鉛直管先端部に蓋のようなものを取り付けることで，浮泥化が生じにくくなるとの結論が示された。

八戸地方に堆積する二種類の火山灰質粘性土を対象にその繰返しせん断特性について調べた発表(155)があった。既往の実験式の適用性についての議論がなされた。

多方向繰返しせん断を受けた粘性土の沈下予測に関する発表(156)があった。独自に開発した実験装置にて，既往の研究にて提案している沈下予測式の精度について検討がなされた。東日本大震災以降，液状化後の沈下量の予測に関する研究が増えているが，この研究は粘性土を対象にしているという点と，多方向の繰返しせん断を与えているという点に特徴があったと思われる。

#### 3. まとめ

いずれの研究も，対象となる地盤工学的課題が明確な内容であったように思われる。個々の研究内容，研究成果は非常に興味深いものであった。一方で，このセッションに限らず，各地盤材料の力学特性に関するいずれのセッションにおいても構成式に関する研究など，一般性を持った内容の数が以前に比べて少なくなっているように感じた。いずれのスタンスの研究もバランスよく実施される必要があるように思われる。

### 3. 地盤材料 粘性土（変形）

杉山 太宏

東海大学 工学部

#### 1. はじめに

本報告は、地盤材料（粘性土（変形））に分類された8編の論文が対象である。当セッションの発表内容は、不攪乱粘土の「攪乱」による圧密特性（157～159）、圧密降伏応力のひずみ速度依存性（160）、不攪乱試料の乱れと品質評価法（161）、遮水材の透水性とせん断変形（162）、粘土のせん断帯（163）、弾塑性構成式（164）に関するものであった。なお、最後の論文が発表辞退のため、口頭発表は7編であった。

#### 2. 研究及び技術動向

粘性土の変形問題に関しては、これまでに室内試験・原位試験、現場実験、構成式の構築と数値解析などによる調査・研究が行われてきたことは周知のとおりである。これらの研究成果の一つとして、粘性土は「乱れ」を受けることによりせん断強度は低下し、圧密挙動・圧密特性が大きく変化することが知られている。原位置の強度・圧密特性を精度よく求めるために、試料採取に伴う機械的な乱れを低減する採取方法の開発や試料の乱れの程度を評価しようとする研究が行われている。No.161の発表は原地盤のS波速度、せん断弾性係数Gと室内試験結果の対比から試料の品質評価を試みたものである。一方で、「乱れ」による圧密・沈下挙動の変化を積極的に利用する“逆転の発想”の研究がNo.157-159である。原地盤を強制的に攪乱して乱すことにより、圧密特性を変化させて地盤の減容化を図ろうとするもので大変興味深いものであった。今回の発表では8種類の不攪乱試料に対して段階载荷とひずみ速度制御の圧密試験が行なわれ、攪乱の程度と物理特性の影響が調

べられた。既往の研究では、乱れを受けることにより圧密係数 $c_v$ が低下することが知られており、この報告でも同様の結果が示された。会場からは攪乱方法と $c_v$ 低下への対処方法に対する質問がなされ、これらの点を確認するために実地盤の試験施工を計画中であるとの回答で、土砂処分場（海面処分場）の確保が難しくなる中、喫緊の課題として実地盤での効果の検証を期待したい。No.162では廃棄物や除染土を処分する海面処分場の底面遮水材料として、海成粘土を主とした混合材料に対してせん断変形と透水係数の関係が調べられた。

そのほか、圧密降伏応力のひずみ速度依存性から堆積年代によって速度依存性が異なることを示した報告（No.160）、カオリン粘土と堆積岩中の小断層に生じたせん断破壊面の観察から、すべり面（せん断帯）の類似性についての考察が報告された（No.163）。

#### 3. まとめ

粘性土の変形をテーマとしたセッションであるが、圧密、透水、せん断、構成式と幅広い内容であった。この中から本報告では、一般には負の効果として捉えられる「乱れ」を地盤の減容化に活用しようとする研究について紹介した。過去の研究成果によって当たり前と思われていることが実は少し違っていたり、見方を変えることで新たな発見をすることがある。当該研究はその一事例と言えよう。実用化に向けた今後の研究が期待される。他の報告のほとんどは研究課題の解明に向けて基礎となる実験データの収集から課題が検討されており、更なるデータの蓄積によって研究の発展が望まれる。

### 3. 地盤材料 粘性土（物理化学）

三 上 武 子  
応用地質係

#### 1. はじめに

昨年に引き続き、本セッションの座長を担当させていただいた。研究発表の内容は、コンシステンシー特性に関するものが2編、ベントナイトを扱った研究が5編で、これらのうち3編が今年の続報と位置付けられるものであった。

#### 2. 研究および技術動向

##### 2.1 コンシステンシー特性に関する研究

液性限界は非排水せん断強さとの対応が良いが、塑性限界は必ずしもそうではなく、力学的な観点から説明することが困難である。コンシステンシー特性に関する2編は、いずれも塑性限界にある粘性土がどのような状態にあるのかを明らかにすることを目的とした研究であった。塑性限界とは飽和域から不飽和域に移行する過程とみなすことができることから、165ではサクシオンに着目した。ただし、土ひものサクシオンを測定することは困難であることから、塑性限界状態における $pF$ 値を調べ、母材となる粘土の種類が同じであれば $w_p$ 値が異なっても $pF$ 値はほとんど変わらないことを見出した。一方、166は粒子構造に着目し、粒子間距離と水分子の配向性をX線小角散乱法により調べた。塑性限界を超えて塑性状になると粒子間距離が急激に増加すること、塑性領域のみで水分子が配向し、固体あるいは液体ではランダムな状態であることが報告された。コンシステンシー特性は粘性土の工学的性質を支配する重要なパラメータでありながら、その試験法にはあいまいさがあるため（特に塑性限界試験）、試験の実施には熟練を要し、得られる試験値には試験者によるばらつきが大きい。これらの研究がさらに発展し、その成果が試験法に展開されてより明快な試験法となることで、試験値のばらつきが軽減されることに期待したい。

##### 2.2 ベントナイトに関する研究

ベントナイトは、海面処分場の遮水材や放射性廃棄物地層処分施設の緩衝材として使用されている。167、168は、ベントナイト混合土の遮水性能を調べるため、浚渫粘土に対して砂分の有無やベントナイトの種類・添加量を変えた一連の実験を行い、砂分含有率が80%を超えると遮水性能が低下することを明らかにした。170は遮水性能に加えて、セシウムに対する吸着性能や施工時の安定性についても検討がなされた。これは、海面処分場では、余水を生じさせないように処分場内の水位をあらか

じめ低下させて廃棄物を投入することから、遮水層に大きな揚圧力が作用して不安定となることが予想されるためである。ここでは、遮水材の単位体積重量を大きくして安定化を図るため、混合材として製鋼スラグが用いられたが、SEMの観察より、製鋼スラグ周辺に隙間が発生することから、大幅に透水係数が増加し、遮水性能を損なうこととなり、製鋼スラグの使用が適切でないことが示された。169は、放射性廃棄物地層処分施設を模擬した一次元自己シール性型試験から、ベントナイトの吸水特性を調べたもので、処分孔と緩衝材の間の隙間が大きくなるほど最大発生圧力が減少すること、試験終了時の供試体の飽和度が減少することを明らかにした。ただし、飽和度はいずれも100%を超えていることから、モンモリロナイト結晶層間の水の密度は大気圧環境下の水の密度より大きい可能性を述べている。高圧下での水の密度が $1\text{Mg/m}^3$ よりも大きいのではないかと指摘が昨年もなされたが、議論を前に進めるためにも検証する方法を考えないといけないのではないかと。171は隙間の充てん材として期待されているベントナイトペレットの製造方法に関する研究報告であった。隙間の充てん密度を高めるため、乾燥収縮によりペレットの高密度化を図る方法が採用されている。本報告では、送風温度と乾燥密度の関係について報告がなされたが、合理的な乾燥方法の確立に向けて、今後の展開に期待したい。

これら5編に対する討議では、試験条件に関する質問が多かった。たとえば、室内試験ではスラリー状の粘土にベントナイトを混合して供試体を作製するが、現地では現地発生土にそのままベントナイトを混合するのではないかと、練り混ぜ水には海水を使用しないと現地を模擬したことにならないのではないかと、ベントナイト混合直後に試験を行うと膨潤圧の影響で圧密沈下、透水係数を過小評価するのではないかなどで、現地での施工環境を考慮した実験条件の選定が必要であると痛切に感じた。

#### 3. まとめ

コンシステンシー特性に関する研究は、地味ではあるが粘性土の本質を探究するものであった。一方、ベントナイト関連の研究は、いずれも実務に直結する内容であった。放射性廃棄物処分に加えて除染土壌の処分など、ベントナイトの利用がますます促進されることが予想される。これらの研究がさらに発展して、ベントナイト遮水材・緩衝材の設計・施工管理に資する成果が得られることを期待する。

### 3. 地盤材料 中間土（強度・物理化学）

大 嶺 聖  
長崎大学

#### 1. はじめに

本セッションでは、172～179の8編の発表があった。いずれも中間土に分類されるものである。具体的な材料を列挙すると、砂質ローム（172, 173）、砂・シルト質地盤（174）、砂質火山灰質粘性土（175）、細粒分を含む砂質土（176）、粘土混じり砂（177）、細粒分を含む土（178）、粘性土質礫質砂（179）である。各材料について、様々な視点から報告が行われた。

#### 2. 研究及び技術動向

実務の設計では、細粒分含有率やコンシステンシー特性をもとに、砂、粘土および中間土の分類が行われている。しかしながら、実際の材料は多岐にわたり、中間土の特性は十分に明らかにされていない。

砂質ロームについては、乾燥密度と飽和度に着目したCBRの推定法が提案された。設計時に想定する飽和状態を考慮したもので、水浸後の強度低下が評価できると考えられる。

砂・シルト分を多く含む中間土の非排水せん断強度の評価法について、活発な議論が行われた。せん断中に体積が膨張傾向を示す土は非排水条件で大きなせん断強度が発揮される。そのため、間隙水圧が最大時の主応力差を簡易的に強度と見なすとの提案がなされた。これに対して、実際の地盤で非排水条件を満足するならば、非排水試験は強度を過大評価しているわけではないのかとの意見が出された。実務的な立場で様々な議論が行われたが、結論に至るまでにはいかなかった。

寒冷地では凍結融解による地盤材料の劣化が問題となる。アイスレンズのなす角を考慮するために、砂質火山灰質粘性土を用いた一面せん断試験による凍結融解の影響が報告された。凍結融解履歴は、強度よりも変形特性に影響を及ぼすことが示された。

| No. | 材 料       | キーワード               |
|-----|-----------|---------------------|
| 172 | 砂質ローム     | 飽和度, 締固め度, CBR 推定   |
| 173 | 砂質ローム     | CBR, 乾燥密度, 飽和度      |
| 174 | 砂・シルト質地盤  | 三軸試験, 非排水, 強度評価法    |
| 175 | 砂質火山灰質粘性土 | 一面せん断試験, 凍結融解       |
| 176 | 細粒分を含む砂質土 | 繰返し三軸試験, 液状化強度, 過圧密 |
| 177 | 粘土混じり砂    | 動的変形特性, 等価骨格間隙比     |
| 178 | 細粒分を含む土   | 最小間隙比, 最大密度試験法      |
| 179 | 粘性土質礫質砂   | 劣化, 活性度, スランプ試験     |

中間土の動的変形特性や液状化強度についても研究がなされている。砂が骨格を形成する領域では、等価骨格間隙比を導入することにより、砂・粘土混合土のせん断弾性係数と間隙比の間に一義的關係を見出すことが可能であるとの知見が示された。

一方、細粒分を含む土の最小間隙比の現行求め方の問題点の指摘やスランプ試験を代用した中間土の劣化判定試験などの新たな試験法の試みもなされている。

#### 3. まとめ

中間土の強度・物理化学特性について、様々な視点からの発表と討議が行われた。従来の土構造物の設計では、砂か粘土に分類する場合が多い。そのため、合理的な設計法を確立するためには、中間土としての考え方を示すことが重要である。今後ますますの発展が期待される。

### 3. 地盤材料 中間土（ガスハイドレート）

片岡 沙都紀  
神戸大学 大学院工学研究科

#### 1. はじめに

本セッションは、「ガスハイドレート」をテーマに地盤工学的な観点から調査・実験・解析に関する発表が計9編行われた。

#### 2. 研究及び技術動向

日本近海におけるガスハイドレートは、その賦存状態や周辺地盤の土質などから、南海トラフなどの海底下数100m以深の砂を主とする層に存在する深層型ガスハイドレートと、オホーツク海や日本海などの海底下表層数mの粘土層中に存在する表層型ガスハイドレートに分類することができる。本セッションでは計9編の発表があったが、その研究の多くは深層型ガスハイドレート賦存地盤を対象とした実験や解析であった。

深層型ガスハイドレートの研究事例としては、堆積土中の細粒分含有量がメタンハイドレート含有堆積土の強度にどのように影響してくるのかを検討したのから、メタンハイドレートを加熱法や減圧法などにより分解させた際の挙動を実験あるいは有限要素解析などを用いて検討するなど、その研究視点はさまざまであった。中でも、実際に南海トラフから採取したメタンハイドレートを含有した堆積土を高圧・低温下を維持した状態での三軸試験装置まで導き、強度試験を行えるような装置の開発に関する研究においては、開発に至るまでの研究者らの苦労をひしひしと感じ、非常に興味深く拝聴させていただいた。深層型を対象としたガスハイドレートに関しては、昨年3月に南海トラフにおいて、日本近海で初となるガスハイドレート層からのメタンガス産出の成功以来、これまで以上にその研究が急速に進められている。このような背景からも、これら研究事例が今後深層型ガスハイドレート生産の実務に反映されるようなものとなることを期待したい。

一方、表層型ガスハイドレートに視点をおいた研究に関しては、網走沖での新たな調査結果に関して発表がな

されていた。日本近海における表層型ガスハイドレートはこれまでも日本海東縁域等に広く分布していることは周知されていたが、今回対象とした網走沖では、水深800m以浅の海底下において、ガスハイドレートが賦存する一指標とされているガスフレアの噴出が、音波探査によって数多く確認されており、今後の本領域のガスハイドレート賦存を検討していく上で重要な結果が示されていたのではないかとと思われる。また、少々視点を変えた研究としては、淡水域と海水域でのガスハイドレート生成の相違点を検討する要素の一つに塩分濃度の有無を挙げ、塩分濃度が地盤の圧密や強度に及ぼす影響について検討されたものがあった。地盤工学の分野において、塩分濃度と土質特性との関連については、含有粘土鉱物によってその物性や強度に違いを生じることがこれまでも議論されてきているところであるが、ガスハイドレートの存在と塩分濃度との関連性を検討したという点で斬新さを感じた。加えて、表層型ガスハイドレートは粘性土層中に賦存していることから、例えば表層型ガスハイドレートが賦存するような海底下で、ガスハイドレートが地盤内で分解した場合には局所的に塩分濃度が低下する可能性を考えると、浅層中のガスハイドレート賦存地盤が塩分濃度の変化に与える地盤強度や物性等を検討していくことは今後展開していく上では重要な要素となっていくものと思われる。

#### 3. まとめ

本セッションは、「ガスハイドレート」という共通するキーワードをもとに展開された研究成果報告ではあったが、一言にガスハイドレートといっても、どの領域を対象としたものなのかによって課題はさまざまであることを、今回の9編の内容を通して改めて実感した。

最後に、セッションを展開していくにあたり90分という時間制約もあり、参加された皆様が討議にいささか消化不良となってしまった点が否めなく、座長の不徳の致すところと反省している。

### 3. 地盤材料 砂質土（強度）

仙 頭 紀 明

日本大学

本報告の対象は主に様々な砂質土、具体的には、珪砂系の均等な粒度の砂質土、細粒分を含む砂質土、火山灰質砂質土、洪積礫質土の強度・変形特性を取り扱った7編の論文である。

細粒分（非塑性）を含む砂の力学挙動については、細粒分含有率が増加すると、土骨格構造が変化し、その結果、ひずみ硬化型からひずみ軟化型の応力ひずみ挙動に変化する試験結果が示された。細粒分を含む土の力学挙動を議論する上で、初期状態を表す密度指標に相対密度が度々用いられるが、この指標はきれいな砂を対象としたものであり問題が多い。したがってそれに代わる合理的な指標を用いて比較・検討を行うことが定量評価のための前提となる。しかしながら、土の骨格構造を反映した密度指標は種々提案されているものの、いまだコンセンサスは得られておらず今後のさらなる議論が必要である。

火山灰質砂質土については、北海道および東北の土を対象とした2編の発表があった。前者は締固め度と非排水強度の關係に着目した研究である。締固め度が90%を超えていても十分な強度が得られないという研究成果が紹介された。これは締固め度の基準を守っていても、高品質な土構造物が構築できない可能性があることを示唆しており、合理的な管理指標の提案が望まれる。後者は、東日本大震災で被災した盛土斜面の地震時応力状態に着目した非排水繰返しせん断特性が調べられている。火山灰質砂質土は地域毎に特性は異なるものの、概して自然

含水比が高く締固めにより泥濁化する、粒子破碎が生じやすい、構築された土構造物は降雨や地震の被害を受けやすい等の共通した特徴があるため、設計・施工においては細心の注意が必要である。討議の中で、東北（宮城県山元町）の火山灰質土には細粒分にハロイサイトが含まれていたことが報告された。隣県の福島県でも流動性崩壊が生じた盛土の盛土材はハロイサイトを含む火山灰砂質土であった。このように火山灰質土の力学特性は物理的性質に加えて含まれる粘土鉱物の電気化学的性質の影響を受けることが考えられる。そのため、これらに配慮した力学特性を研究するとともに、施工上重要な留意点、具体的には盛土内排水処理方法等を広く発信していくことが重要な課題である。

礫質土については、原位置せん断摩擦試験により求めた強度定数と不攪乱試料を用いた三軸圧縮試験から得られる強度定数を比較して、原位置試験の妥当性を確認している。礫質土はサンプリングが困難なため乱れの少ない試料採取に多大なコストがかかることから、合理的な設計のためには原位置試験を積極的に活用することが望まれる。

その他にも日本ではあまりなじみのない風による砂質土の侵食、「風食」のメカニズム解明と風食予測モデルの提案を目的とした実験的研究があった。これまで流水による土の侵食のメカニズムと侵食予測モデルが数多く提案されているため、既往の研究との差異も踏まえた合理的な侵食予測モデルの提案が望まれる。

### 3. 地盤材料 砂質土（変形）①

太田 秀樹  
中央大学 研究開発機構

#### 研究発表のハイライト

筆者が座長を仰せつかった砂質土（変形①）のセッション（7月15日（火）第12会場 10:40-12:10）について、筆者なりに総括するのが本報告の目的である。本セッションでは196~203の8篇に関する講演があった。すべて締固めをテーマにしたものである。以下順を追って、そのハイライトと思われる部分を紹介したい。

196 処分場施設の埋立地底部盛土におけるまさ土の締固め特性と変形特性（その1）—室内試験によるまさ土の諸特性の検討—

鹿島建設 ○富樫昇 前田宗宏 小澤一喜 齋藤潤 加藤政彦 熊本県環境整備事業団 古田孝 甲斐秀康

197 処分場施設の埋立地底部盛土におけるまさ土の締固め特性と変形特性（その2）—試験施工による施工仕様様の選定—

鹿島建設 ○齋藤潤 小澤一喜 富樫昇 北本幸義 加藤政彦 熊本県環境整備事業団 古田孝 甲斐秀康

熊本県公共関与管理型最終処分場の建設にあたって、処分場底部を構成する盛土の沈下量に関して厳しい制限が与えられた。巧みな技術的配慮にもとづいた盛土施工を考案することによって、問題解決に当たった成果をまとめたのが、196・197の2篇である。196でアイデアの概要と現地発生土を用いた室内試験の結果が述べられている。室内試験の実施に当たって、当該現場がもつ特殊性を取り入れた工夫が施されている。その結果を現場で実証するために、フルスケールの試験施工が実施された。その試験施工から得られた知見を紹介したのが197である。

盛土の沈下量のある制限内に収めなければならないという、実際問題として極めて難しい問題にチャレンジした事例として注目に値する。施工方法の適否によって成否が最終的に左右されるのが、締固め工事独特の難しさである。永年にわたる技術的懸案を克服する可能性を示した研究成果であり、今後の締固め技術の発展に大きな影響をあたえるものと期待される。

198 締固めた砂・シルト・粘土混合土の物理的性質

神戸大学 ○小山 智也 堀田 崇由 片岡沙都紀 鉄道総合技術研究所 川尻 峻三 北見工業大学 川口 貴之 神戸大学 澁谷 啓

199 締固めた砂・シルト・粘土混合土の力学的性質

神戸大学 ○堀田 崇由 小山 智也 片岡沙都紀 鉄道総

合技術研究所 川尻 峻三 北見工業大学 川口 貴之 神戸大学 澁谷 啓

200 盛土材料の水浸沈下特性に及ぼす上載圧と初期含水状態の影響

神戸大学 ○岡本 健太 李 俊憲 澁谷 啓

201 砂礫盛土材の動的強度に及ぼす締固め度の影響について

神戸大学 ○李 俊憲 若本 達也 ロハニ タラニディ 澁谷 啓 片岡 沙都紀

202 せん頭粒度調整した砂礫盛土材料の動的強度と締固め度の関係

神戸大学 ○若本 達也 李 俊憲 ロハニタラニディ 片岡沙都紀 澁谷 啓

谷本喜一先生・軽部大蔵先生の時代から始まって現在にいたるまで、締固め土・不飽和土の研究分野において我が国の中心であり続けている神戸大学からの研究報告が、一連の発表198~202である。発表の題名から想像できるように、3つの内容から成り立っている。建設後何十年も経過した盛土の崩壊事例が、近年急増している。筆者が見聞きした範囲だけでも、崩壊原因が判明しているようで実はよく分からない部分が残っている事例が少なくない。従来から強度特性に焦点があたえられ続けてきた締固め土の研究であるが、今後は変形特性・沈下特性にも注目する必要があるだろう。古典的なテーマをもう一度、全面的に洗い直してみようとする意図が感じられるのが上記一連の研究である。将来どのように発展してゆくのか、思いがけない成果がうまれるかもしれないと思うと、実に楽しみな研究である。

203 フラクタル次元を用いた締固められた砂質土の粒度の評価

山口大学 ○縄田 宏 中田 幸男 兵動 正幸 吉本 憲正

これほど難しい研究課題は余りないのではないかと筆者が思うのが、土の締固めと土の粒度との関係である。アレコレと浮かび上がってくるイメージを、想像の域をこえて定量化しようとするとうる巨大な壁にぶつかる。最先端の概念を駆使して、この問題に挑戦しているのが203であろう。筆者がもつ時代遅れの視点から見ると、ずっと遠くに輝くまぶしいばかりの研究である。今後どのような展開をとげるのであろうか。

以上、筆者の理解不足を露呈する内容になってしまったが、座長としての報告を終えたい。

### 3. 地盤材料 砂質土（変形）②

橘 伸也

埼玉大学 大学院理工学研究科

#### 1. はじめに

地盤材料のうち、地盤材料—砂質土（変形）②のセッションでは、合計8編の研究が発表された。地盤材料、主として砂質土の力学挙動を表現するための構成モデルの高度化とその検証に関する研究が6編、材料不均質性に起因する分岐現象としての供試体の強度変化や変形形態に関する解析的研究が1編、粒状体の透水破壊現象にDEMとLBMを連成した解析手法によりアプローチする研究が1編あった。

#### 2. 研究及び技術動向

構成モデルの研究に関する発表において、共通したトピックとしてサイクリックモビリティの表現が挙げられる。サイクリックモビリティは、砂が繰返し負荷を受け液状化に至る過程で、その剛性が回復していく現象である。チリ地震やアラスカ地震、新潟地震以降、社会的に注目を浴びている現象であるが、半世紀が経った現在でも高精度に予測することは難しく、なお盛んに研究が進められている。東日本大震災で生じた液状化現象のメカニズムの解明に留まらず、近い将来に発生が予測されている南海トラフ地震や首都直下型地震など大型地震を見据えた地盤構造物の耐震設計のために極めて重要な課題である。サイクリックモビリティ現象を弾塑性論の範疇で表現する有用な手段として、回転硬化則の導入が挙げられる。204, 208, 211は、回転硬化を導入した構成モデルについて、それぞれのアプローチによって高精度化を試みているものであった。204の主題は、超弾性構成式の適用であり、土の弾塑性構成則に適用されることが多かった拘束圧依存の亜弾性構成式に替えて超弾性構成式を適用したときの効果についての発表であった。208は、乗算分解型の有限変形理論に基づく定式化が一つの特徴であるが、等方硬化則について塑性偏差ひずみの発生による硬化／軟化をも考慮し、拡張したモデルの適用性が検討されている。211は、Subloading  $t_{ij}$  モデルへの回転硬化則の導入を試みており、繰返し載荷中の弾性過程における土粒子のかみ合いの効果を発展則に考慮した構成モデルの精緻化への取り組みが紹介された。非排水繰返し載荷における所謂バタフライ形の有効応力経路や排水繰返し載荷において見られる載荷回数に伴う体積ひずみの定常化など、表現しようとする力学応答は複雑である。様々なアイデアを紡ぐことにより、ようやくそれらを記述する精緻な構成モデルが群雄割拠に生まれてい

るのが現状であると思う。

205～207は、同じグループからの一連の発表であり、二重硬化なる概念を導入した弾塑性構成式の提案とその適用性に関するものであった。二重硬化は、二つの負荷面を考えることにより応力状態に応じて複合的な塑性負荷を表現しようとするものであり、塑性論的にはKoiterの流れ則を彷彿させる概念であると見受けられた。二つの負荷面は、楕円型のCam-clay負荷面と円錐形のDrucker-Prager負荷面からなり、それぞれについて下・中・上負荷面を考えることにより（DPについては上負荷面なし）、地盤材料の多様な力学挙動を表現しようとしている。複雑さを伴うものの、土質や状態を限定せず一個の構成モデルによって多様な挙動を記述できることは魅力的であり、今後の展開が期待される。

209は、砂質供試体の破壊現象にアプローチする研究であり、供試体の初期非均質性が引き金となって生じる局所変形モードの遷移と応力-ひずみ関係に及ぼす影響を解析的に調べたものであった。非均質性の導入の程度や方向によって、供試体の破壊形態や強度が異なるということがこの研究の示唆するところであった。変形が進展して最終的に収斂するせん断帯の本数や角度とそのとき発現される強度との関係が明らかになると、なお面白いと思った。

210は、本セッションで唯一、個別要素法DEMを扱った研究であり、格子ボルツマン法LBMとの連成により、透水力を受ける粒状体の浸透破壊現象をシミュレーションした斬新な発表であった。動水勾配の増加とともに粒子間接触力が失われていく過程が応力鎖の変化として視覚的に示されフロアの興味を惹いていた。地盤構造物のマクロな変形もミクロレベルでの土粒子の運動に端を発することを考えると、特に現象の解明といった点で、この種の研究が今後ますます注目されるのではないかと思う。シミュレーション技術のさらなる発展を期待したい。

#### 3. まとめ

砂質土の変形について、主としてモデリングや解析手法についての多岐にわたる研究発表があり、いずれも練りに練ったアイデアを集約した日進月歩の研究であると感じた。

本セッションの研究・報告から、よりリアリティのあるモデルや解析手法の追求に挑む研究者の熱意が感じられ、今後ますますの進展が期待される。

### 3. 地盤材料 砂質土（変形）③

森 口 周 二

東北大学 災害科学国際研究所

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料—砂質土（変形）③のセッションについて総括する。本セッションでは、7編の発表があり、基本的には砂質土に関する内容ではあるが、砂質土の力学特性、粒子破碎の影響、火山性堆積物の物理・力学特性、月面地盤の弾性波速度、メタンハイドレードを含む地盤材料の力学特性、砂地盤の熱伝導性というように、その内容は多岐に渡るものであった。以下では、各発表内容の概略とそれに対する議論の内容について報告する。

#### 2. セッションの発表と議論

砂質土の力学特性に関する発表が4件あった。まず、粒子破碎が地盤材料の力学特性に与える影響に関する発表があった。事前に破碎させた土粒子を含む供試体と含まない供試体で強度の違いを確認するという内容である。実験結果に基づいて、破碎させた粒子を含む場合は、過剰間隙水圧が発生しやすく、強度が低下するとの報告があった。破碎した粒子の作成方法に関する質問があり、高圧の三軸試験を実施することにより作成しているとの説明があった。次に、豊浦砂を対象として、応力異方性を実験的に検討した研究成果が報告された。特に、圧縮と伸張の両領域において、載荷履歴を与えた豊浦砂に再載荷を与えた時のストレス-ダイレイタンス特性が受ける影響について検証したものである。議論の中で、一般的に地盤は様々な応力状態を経て現在の状態となっているため、応力履歴によって変化する地盤材料の強度を精緻に表現すべきであるという意見があった。続いて、有効応力の低下過程における飽和砂質土のせん断強度特性を実験的に検討した結果が報告された。平均有効応力一定および平均有効応力低下圧密排水三軸圧縮試験を実施し、特に有効応力の低下に伴う降伏点の変化に関して検討をしたものである。実験結果に基づいて、有効応力の低下過程においては、初期の有効応力比の違いによらず、ある応力比（実験で用いた稲城砂では1.1）に達したときに弾塑性変形が開始するとの報告があった。また、この情報は、有効応力低下過程における砂質土の材料定数の一つとして取り扱うことができる可能性があるとの説明があった。砂質土の力学特性に関するものの最後と

して、メタンハイドレードを含む砂質土の力学特性を実験的に評価した発表があった。平面ひずみ圧縮試験の結果を中心として、過去に実施された三軸試験結果を含めて力学挙動が考察された。基本的な性質として、メタンハイドレードを含む場合、強度が増すことについて議論が交わされ、メタンハイドレードを含むことにより粘着力が増加するようなイメージであるとの説明があった。

その他の発表として、3件の発表があった。まず、火山性堆積物の力学・物理特性に関する研究報告があった。対象とした材料は、2013年10月の台風26号の影響により泥流化した伊豆大島のものである。特に興味深いものとして、原位置の乾燥密度は最小密度試験で得られた乾燥密度より小さく、室内で再現出来ないほどゆるやかな堆積状況であるとの報告があった。このことについて議論が交わされたが、現状ではその特性が十分に把握できていないため、更に詳しく調べる必要があるとのことであった。次に、月面上の土の弾性波速度に関して検討した報告があった。月面模擬土を用いた室内弾性波試験結果に基づいて、月面の密度および土被り圧分布から月地盤表層における弾性波速度分布を推定したものである。推定式は月面上での実測値を精度よく再現することが報告された。最後に、砂質土の熱伝導性に関する発表があった。未凍土を対象として熱伝導試験と電気伝導試験を実施し、熱伝導率の水分依存性を検討したものである。体積含水率と熱伝導率の関係図に関する議論があり、勾配の変化点を利用することが効果的ではないかという意見があった。

#### 3. まとめ

冒頭に記載したように、本セッションで発表された内容は、非常にバラエティーに富むものであった。また、月面上の地盤やメタンハイドレードを含む地盤に関する研究成果などは、宇宙開発やエネルギー問題に寄与するものであり、近未来の地盤工学の中で重要となるテーマと考えられる。本セッションは、このような様々な研究成果を含む非常に面白いものであった。残念ながら、座長の力不足のため、これらの発表内容を総合的に考慮して統一的な方向性の下に議論が展開されるまでには至らなかったが、各発表の内容およびその後の質疑応答は、それぞれに興味深いものであった。今後、各研究が更に発展を遂げ、地盤工学に新しい知見を与えてくれることを祈念して、本セッションのまとめとする。

### 3. 地盤材料 砂質土（動的性質）①

松 丸 貴 樹

鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造  
(現東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻)

#### 1. はじめに

本報告では、砂質土（動的性質①）のセッションについて総括する。本セッションでは、合計7編の論文発表があった。初日の最終セッションということもあり、聴講者は多くないと高を括っていたが、非常に多くの方に聴講いただき、特にフロアーディスカッションの後半では活発な議論が交わされた。

#### 2. 研究及び技術動向

適切ではないかもしれないが、本セッションに投稿された論文を扱う研究分野で大別すれば、土の  $G \sim \gamma$  関係に関する動的変形特性に関するものと、地盤の液状化に関するものに区分された。また、研究のアプローチの方法としては、原位置での調査や室内土質試験によるものと、モデル化やモデルを使った解析によるものがおおよそ半分の比率であった。

前者については、従来の H-D モデルや R-O モデルでは大ひずみ大ひずみ領域での繰り返し載荷に対する挙動の表現の精度に難点があったが、少ないパラメータの追加で大ひずみ領域まで精度を確保するモデルの提案があった。また、数値計算上の計算時間増分への解の依存性を回避する手法として、陰的応力積分を用いる方法が提案され、計算時間増分の大きさに関わらず同一解が得られることが示されていた。これらは今後、実地盤や構造物を対象とした地震応答解析への適用が期待される。その他に、不飽和地盤の含水量と密度が地震時の地盤の沈下に与える影響の検討や、地震応答解析で用いる動的変形特性をどのような方法・境界条件で試験を行うか検討した事例が報告された。

一方、液状化に関連する研究では、礫質土の液状化に関する室内試験の報告があったが、本セッションで最もフロアーディスカッションが活発化したものであった。この論文では、既往の試験結果も含め、礫質土の多くの液状化試験結果も踏まえた整理がなされていた。フロアーからは、1995年兵庫県南部地震の際の礫質土の液状化は限定的なものであり、要素試験の結果ほどシビアなものとはならないのでは、との意見があった。ディスカッションを踏まえると、透水性の良い礫質土が室内土質試験で液状化に至るのは、要素試験自体が非排水状態で行われているからであり、実際の地盤で液状化の発生を予測するためには、礫質土の上下に位置する層との透水性の違いを考慮する必要があるとの結論に達した。今後は、地盤と構造物をモデル化した振動台実験や数値解析的な研究が必要であることを示唆しているのであろう。その他に、原位置での液状化強度を精度よく求めるためのサンプリングに関する研究や、設計実務でよく用いられるモールの応力円について考察を行った論文報告があった。

#### 3. まとめ

頻発する地震災害を受け、その挙動予測や対策工の検討のためには、詳細な数値計算による検討が不可欠であると思う。しかし、その精度を確保するためには質の高い調査・試験の実施することで地盤の動的挙動を的確に捉え、力学挙動を適切に表現できるモデル、精度の保証された計算手法を用いる必要がある。このセッションで発表いただいた論文は多岐にわたっているが、このような様々な地道なアプローチの積み重ねによって成し遂げられるものと期待される。

### 3. 地盤材料 砂質土（動的性質）②

國 生 剛 治

中央大学 理工学部

今年には液状化研究の紀元元年とも言える 1964 年新潟地震から 50 周年に当たる。近年の液状化物性研究はますます詳細を極める一方で、当初からの基本的問題についても未だ説明が十分でないものも多い。

液状化に関する要素実験による基本物性を扱うこのセッションの主要なキーワードを筆者の判断を交えてまとめると、「再液状化」[227,230]、「累積損失エネルギー」「累加せん断ひずみ」[226, 231] [234]、「排水強度増加」[228]、「地震波形影響」[229]、「液状化体積ひずみ・沈下」[231, 234]、「模型実験対応低拘束圧物性」[232, 233] となる。テーマはかなりばらついていて、まとめて議論を展開することは困難であるため、以下に個別対応で意見を述べる。

「再液状化」現象はかなり早い時期から 1968 年十勝沖地震や 1994 年三陸はるか沖地震などの余震現象で目撃され、そのメカニズムについて関心を集めてきた。それを調べる手段として振動台実験がしばしば行われてきたが、今回の発表のように要素実験によってもしばしば研究されている。最初の液状化により、土の固結作用を含めた粒子構造（ファブリック）が壊されることが大きな理由として考えられ、今回の発表もその点に着目したものと言える。一方、実地盤では不均質性により密度が平均的には増加しても減少する部分も現れるとの調査結果も出されており、全体像の把握についてはまだまだ研究が残されていると思われる。

「累積損失エネルギー」については、これまで液状化の発生を支配する物理量として応力が専ら使われてきたが、一方では損失エネルギーの方が優れていることが主に我が国で 1980 年代から実験的に示されてきた。損失エネルギーは水圧上昇や体積ひずみ（沈下量）と密接な

関係があるため、今後、ますますエネルギー的見方が重視されるようになると思われ大きな発展が期待される。なお内容に関わることではないが、[226, 231]では「ひずみエネルギー」と「損失エネルギー」の 2 つの用語の定義に基づいた適切な使い分けが望まれる。

「排水強度増加」については排水体積ひずみとせん断ひずみの間の増分比の設定条件によっては液状化強度の非常に大きな効果が得られるとの実験結果が示されている。今後、実際のドレーン系の液状化対策工法でのひずみ増分比を想定した場合、いわゆる排水効果以外に液状化強度増大効果を実設計にどの程度取り込めるかを示すことで、この研究の工学的重要性が決まることになる。

「地震波形影響」については、米国で最初に応力による液状化判定法が提案された時点から続くクラシックな課題である。波形ごとの特徴をどう捉えて、等価な繰返し数（通常は  $N_c=15$  または 20）の等価振幅の定常波に置き換えるかであり、新たな地震動が得られる度に従来との関係の適用性をチェックし必要に応じ修正していく必要があると言える。

「液状化体積ひずみ・沈下」については従来より最大せん断ひずみとの関係で評価されてきたが、累積ひずみや累積損失エネルギーなどとの関係に着目する研究がされており、評価値の精度向上が期待される。

「模型実験対応低拘束圧物性」については 1 G 模型振動台実験を対象に以前より研究例があり、それらとの比較検討が望まれる。特に極低圧下でのダイレイタンス特性が注目点であり、この点を調べるためにはかなり高度な要素試験技術が要求されるが、さらに研究の積み重ねが待たれる。

### 3. 地盤材料 軟岩・硬岩①

清 木 隆 文

宇都宮大学大学院 工学研究科

#### 1. はじめに

地盤材料（軟岩・硬岩①）のセッションについて総括する。本セッションでは、8編(報文 235~報文 242)の報告が行われた。その報告内容は軟岩や硬岩の力学的特性を知るための室内試験4編(報文 235, 236, 238, 239), 原位置試験2編(報文 241, 242), 不連続性岩盤の水理特性を知る室内試験と数値解析1編(報文 240), 原位置試験と室内試験を組み合わせた現場施工に関するものも1編(報文 237)など、対象となる軟岩, 不連続性岩盤, 硬岩などを対象に, 多様な手法を組み合わせ、岩石や岩盤の工学的な性質を明らかにすることが試みられていた。

#### 2. 研究及び技術動向

岩石や岩盤の力学的物性を知るためには、軟岩においては、その岩体そのものの物性を知ることが支配的である。一方で、硬岩においては、不連続面の幾何学的な配置とその状態を知ることが重要である。その意味では、軟岩の表面に針を貫入させて、一軸圧縮強さを推定することに代表されるように、試料表面の状態から全体の状態を推測する方法の精度向上が期待されるが、現在の換算式を天然の岩石試料のみから求める工夫が試みられている(報文 235)。また、硬岩中の透水特性を把握するためには、コンピューターの大幅な進歩に従って、その不連続面の形状をそのまま精緻に、数値計算で再現することも可能になったので、不連続面の幾何学的形状を間接的に知るための工夫として、 $\mu$ フォーカス X 線 CTなどを活用するための検討が始まっている(報文 240)。同様に不連続面のせん断強度特性を少ない供試体数で把握することが試みられている。

岩盤は室内試験と原位置試験との間で、供試体の寸法効果や内部構造の関係で、できるだけ大きな試料の実験が望まれるが、その三軸動的試験, 引張試験など, 室内試験で実施できることを原位置で供試体の採取に つても工夫して, 大型の供試体に対応させるなど, 岩石ではなく, 岩盤としての力学的な物性の評価手法も進歩してきた(報文 241, 242)。また, 原位置や室内で手軽に岩石の力学的特性を明らかにする研究も進められている(報文 239)。また, 炭鉱の石炭層からメタンガスを効率良く回収するために, 岩盤力学的視点からの石炭の品質と関連づける動きも興味深い(238)。

8編の発表の中で、軟岩材料の盛土の施工に関する研究(報文 237)に対して、施工後の軟岩の状態, 含水状態の確認方法に関する質問など、多く寄せられた。セッション参加者の興味を引いたことが伺われた。

#### 3. まとめ

軟岩と硬岩の工学的性質は、室内試験で求められるものと、不連続面を含んだ巨視的な性質など、原位置でしか求められないものもある。岩石表面から針や近赤外線などを用いて間接的に一軸圧縮強さなどの力学的な特性を得る方向の研究, 石炭などからメタンガスを取り出す際の評価手法の構築, 岩石材料を用いた盛土の施工管理。硬岩の不連続面を水みちとして考えた場合のその幾何学的構造の確認方法, 原位置での引張強さや動的性質との関連, 動的性質や引張応力下の性質などを原位置試験で求める方法など, その目的に併せての特性の把握と岩石材料の活用が望まれる。また, 原位置岩盤の動的な性質の掌握も課題で, 技術的な進歩が期待される。

### 3. 地盤材料 軟岩・硬岩②

西 村 強

鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

#### 1. 発表内容と岩に関するセッションの変遷

表-1 は、発表内容を表すキーワードである。研究手法は、室内実験を中心とするものが5件、数値解析を中心とするものが3件である。軟岩には、大別して、堆積岩のように続成作用による岩化が進行中のものと、風化岩や破碎岩のように硬い岩が劣化中のものがあるとされるが、250 のみが風化作用を意識した実験的研究である。243 は、放射性廃棄物処分場周辺の高温下における軟岩の挙動、244、245 は、トンネル掘削による周辺岩盤の安定性を対象としている。246、248 は、海洋底岩盤の形成とその力学特性を対象とするものである。さらに、247 は、粒状体解析法の係数決定法、249 は、地震時の斜面安定性評価を対象としている。幅の広い内容を含むので、本セッションのみを総括することは難しい。そこで、まず、岩に関するセッションの変遷について、手元にあった10回毎の総括を参考にして、まとめることにする。

第19回では、「岩の性質」という名称で、計30編の発表に対する総括がされている。総括者は、供試体レベルの研究が多く、構造物規模の研究が少ないことを意識されたか、不連続面の種類や広がり、構造物の規模の関連にも目を向けるべきであると指摘している<sup>1)</sup>。第29回では、「岩の性質」、「岩の工学的問題」の2つに分かれて、計37編に対する総括がされている。その総括文の中では、比較的長い時間スパンでみた岩石材料の劣化に伴う地盤構造物の安定性の問題と、不連続面に支配される岩盤内の透水の問題の重要性が指摘されている<sup>2,3)</sup>。第39回は、学会名称変更後の開催となる。ここでは、「軟岩・硬岩」の11編に、別途開催された岩盤透水に関するDSの6編を加えて、計17編の発表があった。総括者は、地盤材料の挙動に対する、新しい概念の導入、X線CTなどの利用などが見られると報告している。そして、マイクロメカニズムの視点から得られた成果を構造物設計に役立てる努力の必要性を指摘している<sup>4)</sup>

#### 2. まとめと今後

第39回発表会の総括文は、「軟岩・硬岩」と他の複数セッションを総合して、計51編について総括したものである。セッション構成の変化の影響であろうか、個別のセッション内でも多様な内容に触れることが可能になった反面、幅が広すぎて、なかなか深い部分の質疑が困難であった、と記している。本セッションでも、それは見

表-1 発表報文のキーワード

| 番号  | キーワード                             |
|-----|-----------------------------------|
| 243 | 軟岩, 温度依存性, 熱弾粘塑性構成式               |
| 244 | 軟岩, クリープ試験, 粘性, Isotach, ばらつき, 補正 |
| 245 | 軟岩, クリープ試験, 粘性, Isotach, ひずみ速度    |
| 246 | デコルマ, 分岐現象, 数値実験, せん断変形, 動的荷重     |
| 247 | ばね解析法, ばね係数, 弾性定数                 |
| 248 | 未固結シルト岩, 帯磁率異方性(AMS), 動的繰返し荷重     |
| 249 | 軟岩, 変形係数, 残留強度, 繰返し3軸, 履歴減衰率      |
| 250 | 圧裂強度, 一軸圧縮強度, 凍結融解, 風化            |

られたように感じる。異なるテーマ間に意識の違いがあり、なかなか、研究の意図が伝わりにくい部分もあったように思う。だから、従来のように個別のテーマで、という意味ではない。研究発表会は、貴重な情報交換の場であり、また、日ごろ触れることができない内容を聴くことができる場である。ただ、日ごろ触れることができない内容であるから、逆に、10分弱では呑み込めない。報文自体は、活字として残るものであり、当日参加できなかった会員に、専門的で高度な情報を伝えるものとして書かれるべきであるが、その場にいる全員が、そのようなレベルの情報の取得を欲してはいないと思う。それぞれの発表内容に知識を持たないものに向け、言わば、一般向けのプレゼンと質問への応答があれば、と思った。それは、決して、易しいことではない。発表者は、自身の研究を深化させて、聴衆に要点を伝える役目を負う。また、本セッションでは、研究を指導、総括される立場の方々に、進行の多くを助けて戴いた。大学院生世代など、若い方々からの活発な議論を期待したい。それを促すためにも、プレゼンは、一般向けを意識すべきではないかと思う。そして、過去の総括文にもあるように、得られた結論を実構造物規模の挙動予測に結び付ける視点を忘れてはならない、と改めて思った次第である。そうすれば、最新の機器による計測や高度な理論に基づく解析であっても、意識の共有が高まるように思う。

#### 参 考 文 献

- 1) 桜井春輔・西垣好彦・浜島良吉・日比野敏：岩の性質,土と基礎,Vol.32,No.10,pp.63~66,1984.
- 2) 芥川真一：岩の性質,土と基礎,Vol.42,No.12,pp.28,1994.
- 3) 京谷孝史：岩の工学的問題,土と基礎,Vol.42,No.12,pp.29,1994.
- 4) 梶尾正也：地盤材料；砂質土（強度特性,変形特性,骨格構造,せん断帯）,礫質土（変形・強度特性）,軟岩・硬岩（変形・強度,調査他）,地盤工学会誌,Vol.52,No.12, pp.57~58,2004.

### 3. 地盤材料 リサイクル材料①

藤川 拓朗

福岡大学 工学部

#### 1. はじめに

本セッションは、流動化処理土に関する発表が5編、気泡混合処理土および石灰安定処理土に関する発表が各1編、合計7編の報告がなされた。以下では、これらの内容について簡単に報告する。

#### 2. 研究及び技術動向

流動化処理土に関する発表は、付加価値を高めた流動化処理土の力学特性に関する内容(251~253)と品質管理に関する内容(254, 255)の二つに大別できる。前者は、シルト、粘土、コロイドを主たる原料とし、通常の流動化処理土よりもさらに流動性を高めた流動化処理土(251)、ビニール紐や古新聞紙等の繊維材料を混入させ靱性能を改善させた流動化処理土(252, 253)に関する内容であった。特に、繊維材料に関しては、繊維の材質や形状に関係なく、ある程度の補強効果を得られることが報告され興味深かった。繊維長や混入量は重要な影響因子であり、最適な条件が存在すると思われる。そのため、靱性能と繊維長や混入量の関係を定量的に評価していくことも重要であると感じた。また、いずれの研究についても長期的な検討が今後の課題になるといえよう。

後者は、流動化処理土の養生中の強度発現に着目し、

排水条件や加圧養生の違いが強度に与える影響(254)や、セルフレベリング性能に関し、粘度計を用いてフロー値との相関を調べ、降伏値推定の可能性を検証した研究内容が報告され(255)、いずれも非常に興味深い内容であった。

その他、気泡混合処理土(256)については、施工時の消泡に関する内容を中心に、気泡剤の種類や特徴をはじめ、現場での消泡に関する対策方法や新たな気泡剤の開発についての報告がなされた。また、石灰安定処理土(257)については、浚渫土の再利用に主眼を置き、消石灰の添加率に応じた利用用途について言及した発表であり、会場からは、改良効果を見るためにも他の含水比での検討も行っていくべきであるとのアドバイスもあった。

#### 3. まとめ

建設副産物や産業副産物の活用により、天然資源の使用を抑制し、リサイクルを進めていくことは、持続可能な開発に向けての重要な課題であることは論を俟たない。今後は、リサイクルの“促進”に向けた取り組みに主眼を置き、材料としての品質の確保をはじめ、安全性や耐久性を担保していくことが重要である。これらの研究成果が今後もさらに蓄積されていくことを期待したい。

### 3. 地盤材料 リサイクル材料②

佐藤厚子

土木研究所 寒地土木研究所

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料—リサイクル材料②のセッションについて総括する。本セッションでは、9編の論文発表があった。このうち、リサイクル材そのものの地盤工学的性質に関する論文が3編、リサイクル材そのものを改良する手法に関する論文が2編、残りの4編はリサイクル材を用いて他の材料を改良することに関する論文である。

#### 2. 研究及び技術動向

リサイクル材そのものの地盤工学的性質として、261は、災害廃棄物を減溶化するために燃焼処理されたときに発生する焼却主灰を建設資材として利用することを目的として、含水比と締固め度がせん断特性に与える影響をまとめたものである。焼却主灰は、水浸によりせん断強度が小さくなるが、締固め度が大きくなるとせん断強度が大きくなることがわかり、一般廃棄物と同等の性質を持つ材料であることを明らかにした。

264、266は石炭灰の中でも空隙が多く複雑な形状をしたクリンカアッシュについて地盤工学的性質を調べたものである。264は、クリンカアッシュの強度特性に対して粒子特性が影響するとして、粒子特性を透水係数から得られる形状係数に着目して、せん断試験を行った。この実験結果により、形状係数から残留強度を評価できることを明らかにしたものである。266は締固め度が繰り返しせん断強度に与える影響を検討したもので、締め固めることにより、比較対象として材料よりも高い繰り返しせん断強度が得られることを明らかにしたものである。

259は災害廃棄物を想定して、種類の異なる産業廃棄物を混合した材料による試験造成を行って、時間の経過による強度増加を確認している。これにより、固化材を使用せずに産業廃棄物のみで強度発現する材料があることを明らかにした。

260は産業廃棄物である汚泥と鉍滓を同比率で混合した材料について、種々の改良材を混合して、時間経過にともなうコーン指数の変化を求めたものである。その結果、産業廃棄物同士の混合材では発現強度は小さく目標強度を得られないが、改良材を混合することにより強度が大きくなることおよび、対象土に対する効果を発揮す

る改良材の特性を明らかにした。

258は伐採された竹廃材、262はPS灰、263は焼却主灰、265は鶏糞焼却灰を対象としたものであり、多種多様なリサイクル材を土質改良材として有効利用する方法を検討している。これらのうち、258は高含水比土の吸水材としての利用と、吸水材混合後さらに固化材による改良の効果を検討したものである。実験の結果、高含水比土に竹廃材を吸水材として混合することにより、固化材の使用料を大幅に低減できることがわかった。

262は、新たに考案した改良材(PS灰を主体として9種類の物質を混合)について、3種類の泥土の改良効果を経済性も含めて検討したものである。改良材は、強度発現が十分であり、経済的な効果が大きいと考えられる。

263は、焼却灰が粗粒であるため、流動化処理土に使用する場合には、泥土を混合する必要がある。検討により、泥土を作成する際の適切な湿潤密度を使用する細粒土ごとに設定できた。

265は、鶏糞処理として移行している焼却処理で発生する鶏糞焼却灰を泥土改良材とするための検討である。通常の焼却方法では、泥土の改良材とすることはできなかったが、燃焼条件を検討することにより、泥土改良材となりうるということがわかった。

#### 3. まとめ

リサイクル材には様々な過程で発生した材料があることから、これらを使用する場合、環境に影響を与えることが考えられる。さらに、現段階では、基準値を超えていない場合であっても、今後、時間の経過とともに、性状が変化することも考えられることから、環境に影響を与える項目に関して、継続的に調査を進めて確認していただきたい。

また、本セッションで報告された事例は、室内試験レベルでの実験例が多かったので、今後、経済性を考慮して、実際に有効利用する場合の効率的な施工法についてさらに検討を進め、早期の実用化を期待する。

今後、産業活動により発生量が増え続けると思われる様々な材料を有効利用するための技術の開発は重要なことである。環境豊かな国土創成のためにも、地盤工学分野の果たす役割は大きく、今後の成果が期待されるセッションであった。

### 3. 地盤材料 リサイクル材料③

末 政 直 晃

東京都市大学 工学部

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（リサイクル③）のセッションについて総括する。本セッションには、計6編の論文があった。そのうち、3編が石膏ボード、1編が石炭灰、2編が廃タイヤについて、それぞれのリサイクルに関する論文であった。他のセッションに比べて、割当論文が6編と少ないこともあって、質疑応答に十分な時間があり、活発な質疑応答がなされた。以下には、論文内容と質疑応答の概要を記載する。

#### 2. 研究及び技術動向

石膏ボードは、建築物の断熱・吸音材によく利用されていて、その生産量・廃棄量は年々増加している。これらは今後とも増加することが見込まれていて、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立が社会的要請となっている。しかしながら、これには解決すべき課題が多く残っていて、研究課題となっている。

廃石膏ボードは通常二水石膏の状態にあり、このままの状態では固結作用はなく、水中で泥濁化する。廃石膏ボードを加熱処理して生成される半水石膏は、加水によって比較的早期に固化する性質を有するが、生成過程で混入するフッ素の不溶化処理が必要なことから、固化強度がそれほど高くないことから、セメント系固化材と併用することが一般的となっている。

論文267は、廃石膏とベトアッシュ(石炭灰)を固化材とする改良体の力学・化学特性について検討したものである。農業クレーク堤体の改良を想定したものである。乾湿繰返し実験やフッ素溶出試験の結果が示されている。論文268も石炭灰を対象としたものであるが、供試体の乾湿繰返し試験を行ったものである。暴露試験結果と比較することで促進試験の確立を目指したものである。

廃石膏ボードと言っても、新築の際に廃棄物になったものと、古い家屋を解体したときの廃棄物に大別され、両者の性質は異なるようである。論文269では、このような新・旧石膏ボードの混合比率を変化させた実験を行っていて、新築ボードからの再生石膏が高い改良効果を発揮すること、再生石膏の改良効果のばらつきがこのような配合比率によっても影響されることを示している。

論文270は、半水石膏・二水石膏・セメントの配合率を変えた供試体に針貫入試験を行ったものであり、セメント添加の有効性と混合時間に対する注意を喚起したものである。論文では、二水石膏の固化が極めて早期であるため、混合時間が長すぎると、この結合を破壊することもあると指摘している。

論文271は、タイヤチップを混合した砂供試体のせん断特性を種々の条件下で実施した三軸試験の結果から検討したものである。弾性的で変形性が高いタイヤチップが砂骨格の一部に取り込まれると、供試体のダイレイタンス特性が大きく変化し、単調載荷時のせん断強度は低下するものの、繰返し載荷時には除荷時に有効応力の回復が見られるために液状化強度は増加するようである。ゴムが骨格の一部に取り込まれた際の挙動を明らかにするために、論文272ではアルミ・ゴム積層体実験を行うことにより、定式化を試みている。

#### 3. まとめ

リサイクル材料は、これまで我々が扱ってきた、土・粘土・砂・セメントなどの材料・試料と比べると、一部には同様な性質を呈する場合もあるが、かなり異なる面も持ち合わせているようだ。加えて、セメントのような工業材料とは異なり、リサイクル材料は生成の過程から既に性質に大きなばらつきを有している。本セッションに参加して、これらのことがリサイクル材料の実用化の大きな壁となっていることが実感できた。

セッションでは、試験において供試体を要素と見るかモデルと見るかの議論があった。コンクリート系の研究論文では、乾湿繰返し実験をモデル実験とみなしているものも多く、試験方法と結果の解釈について検討が必要な点もあった。

循環型社会の形成のためには、これらの研究の成果が期待される場所であるが、同じ材料を扱った論文でありながら、配合率の定義が異なっていたり、材料の性質が互いにつかめなかったり、内容把握に苦しむ点多々あった。リサイクル材料のような、比較的新しい分野において活発な議論を行うためには、関係する研究者間にリサイクル材料の評価・確認のための“共通言語”がまずは必要では、とセッション後に感じた次第である。

### 3. 地盤材料 補強土①

桑 野 二 郎

埼玉大学

#### 1. はじめに

本セッションは補強土①とはなっているが、補強材の引抜き特性のような通常のトピックに加え、地盤改良に関するもの、排水材の目詰まりといった、通常は補強土に分類されないものまで、幅広い内容が含まれている。

#### 2. 研究及び技術動向

先に述べたように、本セッションでは全体を通した流れは見られなかったため、ここでは順次紹介することとする。

273 と 275 は鋼製帯状補強土壁における盛土材として、砂質土の代わりに石炭灰の一種である軽量多孔質のクリンカアッシュの適用を考え、補強材と同材料との相互作用を検討したものである。273 では種々の材料のうち主に細粒分の異なるクリンカアッシュ盛土材に対し引抜き試験を実施し、通常の砂質土以上の引抜き抵抗が発揮されること、締固め度が高い程引抜き抵抗が高くなること、細粒分含有率が高い程引抜き抵抗は小さく、締固めによる抵抗増加率も低いことなどが示された。クリンカアッシュ自体の力学特性との相関に関し質問があり、その摩擦角が高い程引抜き抵抗も高くなるとの回答があった。275 ではクリンカアッシュと帯鋼補強材の摩擦特性について、応力条件がより明確になるということで、一面せん断試験装置を用いた試験結果が報告され、細粒分含有率が低い程せん断抵抗が高くなるなどの結果が示された。一面せん断試験結果は引抜き試験結果とほぼ整合しているとのことであったが、抵抗力が倍半分異なるのではないかとの質問に対し、引抜き試験では鉛直応力が低減した可能性があるとの回答があった。また、一面せん断試験における、リブ設置位置と供試体形状の影響について質疑があった。

274 も帯鋼補強材の摩擦特性に関するもので、まさ土を用いて、ピーク時および残留時の引抜き抵抗への締固め度の影響を調べている。同じ締固め度であれば湿潤側の引抜き抵抗は乾燥側よりも低下する、また残留状態に一旦達すると大きな引抜き変位が生じることなどが示された。試験結果の安定性について、応力制御試験の難しさが議論された。

276 は竹材を斜面補強に利用するための室内模型実験を実施し、敷設位置や敷設密度の影響を調べている。法肩に载荷を行ったところ、極限荷重は、竹材で補強する

と無補強の最大で 1.8 倍程度まで増加し、竹材は上部に敷設すると効果的であることなどが示された。竹材をなぜこのような使い方をするのかという質問に対しては、竹の産地の近くでの利用を考えているとの回答があった。また、補強材の品質にばらつきが出るのではないかという質問に対しては、1~2m 程度の農道盛土を想定しており、農機が通れば良く、また畔の法面としては植物が生えるまで持てばよいと考えている旨回答があった。

277 は、短繊維混合による液状化挙動に及ぼす細粒分含有率の影響について、非排水単調・繰返し三軸試験により検討した結果が報告された。水洗いしたまさ土に低塑性シルト質の細粒分を調整した試料を用いたところ、細粒分含有率が高いほど液状化強度が低くなる傾向があり、また短繊維の混合で液状化強度は増加するとの報告がされた。異なる種類の土を比較する場合の、液状化強度やせん断破壊をどう考えるべきかについて若干の議論がなされた。

278 はシリカ微粒子を土粒子間に注入することで地盤の密度を増加させ、液状化被害の軽減を図る地盤改良工法に関連して、室内での浸透注入試験を実施した結果を報告している。注入量とともに相対密度は増大するが、注入量が供試体の間隙体積を超えると密度増加が頭打ちになることなどが報告された。粒子の運搬は平均流速ではなく間隙内での実流速が影響すると思われるため、微粒子が均一に間隙を充填していくのか、また実地盤での施工の際の改良の確認などについて質疑があった。

279 は水酸化鉄による排水材の目詰まりメカニズムについて、材質や形状を変えることで垂直透水性がどのように変化するかを調べるとともに、顕微鏡を用いて水酸化鉄付着の状況を観察している。今回の実験の範囲内では、ステンレススプレーの使用などを試みたが、透水性保持の改善策には必ずしも結びついていなかったが、開口径の影響が大きいなど、今後につながる知見が得られていた。開口径の影響については、メンテナンスの観点から、はがれやすさに関する質疑でも取り上げられた。

#### 3. まとめ

本セッションでは、先に述べたように、幅広い内容が含まれており、このセッションのみでの傾向がどうかというようにまとめは容易ではない。いずれも「〇〇が××にどのように影響するか調べ、その結果△△とともに・・・だった(□□が最も影響が大きかった)」という

ことで、目的も結果もある程度はつきりしたものであった。しかし、そこで終わっている（満足している？）ものが多く、物足りなさも感じた。発表者は全て学生であったが、与えられたテーマについて、指示された条件で実験を行い、何か傾向が見られればそれで十分と思っているのではないかと感じられた。得られた結果はそれぞれ価値あるものであっても、社会に出て直接的に仕事の役に立つことはなかなか無いであろう。「見えない法則を

人は神秘と呼び、操れるものを怪しむ（松任谷由美：78<セブンティーン>）」という歌詞ではないが、単に見えるものに満足するのではなく、その先にあるものを見つけようとして欲しい。そのようなプロセスが、社会に出てからも活躍できる（怪しい？）力を身につけることにつながる。そのような趣旨のことを述べてセッションを閉じた。

### 3. 地盤材料 補強土②

河 村 隆

信州大学 工学部

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（補強土②）のセッションについて総括する。本セッションでは、8件の発表が行われた。その内訳は、ジオグリッドのクリープ強度の設計モデル（280）、軟弱地盤の支持力補強（281、282）、津波対策のための補強防潮堤（283）、補強土壁の維持管理（284、285）、補強土の凍上（286、287）に関するものとなっており、補強土と一括りにしても様々な内容の発表であった。

#### 2. 研究及び技術動向

補強土構造物に限らず、土木構造物の維持管理を日常的に実施するための簡易な計測技術の確立は非常に有効である。284では地中レーダー（Ground Penetrating Rader: GPR）によって補強土壁の天端の変状を計測する手法を、285ではデジタルカメラを用いた写真測量によって補強土壁の壁面形状を計測する手法を、いずれも提案し、試験施工された補強土壁における実測結果との比較について報告している。

284では、1995年に築造された実物大補強土壁の天端においてGPR計測を実施し、その計測結果と沈下計による補強領域天端の沈下の実測値を比較している。その結果、GPR計測によって補強領域天端における段差の位置や大きさを推測することが可能であることを示している。盛土内部の含水状態の変化、せん断変形の発生状況などを調べる方法もあるが、今回のGPR計測は補強土壁の舗装の下に隠れている補強領域自体の変形を測定することを目的としている。供用後長期間経過した補強土壁は、路面のオーバーレイなどのために、路面の下に隠れている補強領域天端の沈下などの変形が路面の変化からは把握できない場合が多い。そのような場合の一次スクリー

ニングとして、GPR計測の適用が提案されており、補強土壁の内部の補強領域の不等沈下を把握する有効な手段の一つになり得ることが確認されている。

285では、走行する車両の屋根に固定した2台のデジタルカメラを用いた写真測量による補強土壁の壁面形状の簡易計測方法の適用性について検討している。発表では、試験補強土壁から15m離れた地点を平行に走行する車両から測定した結果などについて報告があった。提案法は、1回だけの計測で壁面変状を把握することを目的としているのではなく、日常的に繰り返して計測を実施することにより、経時的な壁面の変化がどのように進行するかを求めることを目的としており、次の詳細な調査の実施を判断するための一次スクリーニングの一つとして考えている点が強調された。

道路の維持管理手法として、CCDカメラや非接触型レーザー変位計を利用した路面のひび割れや平坦性を測定するための路面性状測定車は既に実用化されており、80～100km/h程度の高速走行でも供用されている。GPR計測（284）、写真測量（285）で提案された技術も同様に走行中の車両から適用することができれば、一次スクリーニングとして大変有効であり、非常に高い将来性を有している。

#### 3. まとめ

補強土構造物の施工数は年々増加しており、その安定性、耐震性は、他の土構造物よりも高いことが認められている。簡便な維持管理手法として提案されたGPR計測（284）、写真計測（285）は、今後のデータの蓄積による適用性と測定精度の向上が望まれる。また、津波に対する補強防潮堤（283）や寒冷地における適用（286、287）など、補強土の新しい分野への適用も近年増加しており、今後の発展が望まれる。

### 3. 地盤材料 補強土③

小 竹 望

香川高等専門学校

#### 1. はじめに

地盤材料・補強土③のセッションでは8編の発表があった。すべて繊維補強に関わる研究で、うち7編が短繊維補強、1編が長繊維補強に関する発表であった。

#### 2. 研究及び技術動向

繊維補強土は、母材となる土質材料の弱点を繊維混合によって改良する複合材料である。繊維補強の原理を土粒子・繊維レベルで見ると、土の変形に伴って繊維と周辺土との間に摩擦あるいは付着力が発生し、その相互作用によって繊維に引張力が発生する。引張補強材として働く繊維は、土の変形と局所的な破壊を抑制するため、強度増加、靱性向上などの効果が発揮される。その補強原理は補強土技術における引張補強の原理と同様である。

繊維補強土は、従来から自然の土質材料に用いられてきた固化、高密度化等による土質安定処理の範疇に近い技術である。さらに、従来の改良に加えて繊維補強を施すことによって複合的な物性改良が可能となる。これを用いた構造体としては、通常の土質材料が有していない引張と曲げに対する抵抗力を土構造体に付与できる。

材料開発の観点から繊維補強土をみると、複合材料として普及しているコンクリート、プラスチック等の繊維補強と同様に土質材料開発が進展していると言える。その背景には、近年顕在化してきた土構造物の脆弱性への対応、社会資本としての長寿命化、環境配慮などの社会的要請がある。地盤・土構造物の性能強化に向けて、繊維補強技術による耐震性・耐侵食性等の強化を目的とする研究が進められている。

本セッションの発表でも上記の動向が現れている。繊維補強の目的と対象を挙げると、1)道路基礎地盤液状化時の変形抑制、2)基礎地盤改良体の強度増加・靱性向上、

3)道路路盤の補強、4)河川堤防の浸透破壊抑制、5)残土の性状改善、6)法面の安定について発表があり、繊維補強技術の多様な展開が印象的であった。また、補強対象とする土質材料はセメント固化土、粘性土、砂、礫と幅広く、使用されている繊維はPE、PVA等の合成繊維に限らず、天然繊維も含まれる。また、低利用資源や廃棄物の有効利用の観点から、網状製品等のリサイクル材が適用されている。

短繊維補強に関する発表の多くは適用性の検討段階にある。研究の主眼は、改良効果の検証と影響要因の評価であり、適用の目的・用途に応じて各種要素試験と模型試験が実施されている。なお、長年の実績を有する長繊維補強土の研究では、強度評価の見直しが報告された。

繊維補強土に関する研究課題として以下の事項が挙げられる。すなわち、1)土質材料に適した繊維の材質・寸法・形状の選定、2)目的・要求性能に応じた物性の評価方法、3)材料特性に適合した構造形式、4)改良効果の持続性を含む長期安定性、5)均質材料が得られる混合攪拌方法等である。本セッションにおいても概ね上記課題に沿った発表がなされ、多様な適用対象における繊維補強土の有効性が報告された。

#### 3. まとめ

繊維補強土は、複合材料ゆえ強度変形特性に与える影響要因が多く、一般化が難しい技術である。まずは個々の適用対象に応じた補強メカニズムの理解と、物性評価、最適配合等を追及していく必要があると思われる。一方、従来の土質材料に繊維補強を施すことは、材料と施工の両面でコスト増につながる。要求性能レベルに依るが、コスト増を凌ぐ性能の向上があれば土質材料・構造形式・施工法として成立可能と考えられ、今後の発展を期待したい。

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土①

赤 木 寛 一  
早稲田大学 理工学術院

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（改良土・軽量土①）のセッションについて総括する。本セッションでは、講演番号 296～303 までの 8 編の発表が行われた。

発表の内訳は、水ガラス系の溶液型注入材を用いたものが 3 編、セメント系の懸濁液型注入材を用いたものが 4 編、微生物による土壌の固結作用を利用したものが 1 編であった。研究の実施機関でみると、この種の研究では不可欠な大学、公的研究機関、民間会社との共同研究が 7 編、民間研究機関単独のものが 1 編であった。

近年、砂地盤の液状化対策を目的として浸透性に優れた溶液型注入材の適用が多く見られるようになってきた。しかしながら、設計地震動に L2 地震動を用いると、溶液型注入材では改良後の液状化強度が不足することから、大きな液状化強度が期待できるセメント系懸濁液型注入材を用いた研究が、講演番号 296, 297, 298, 302 である。また、液状化対策に薬液注入を適用する場合に、注入後、長期にわたる液状化強度の簡便な照査方法を検討した研究が講演番号 299、長期にわたる液状化強度の耐久性を担保するための薬液ホモゲルの長期にわたる体積変化特性を測定した研究が講演番号 300、港湾地域における貝殻などの炭酸カルシウムを多く含む砂地盤において適用可能な溶液型注入材に関する研究が講演番号 301 である。講演番号 303 は、注入による地盤改良に伴う環境インパクトの低減を目的とした微生物作用による土壌固結作用を実験的に研究している。

#### 2. 研究及び技術動向

個々の講演内容と討議の概要を、以下に取りまとめる。

講演番号 296 では、セメント系の極超微粒子注入材の現場での注入実験状況が報告されている。改良体の出来形は、対象地盤の土質に対応した形状になっている。

講演番号 297 では、同じ注入材の浸透状況を室内実験により確認している。セメント系微粉末の懸濁液を砂地盤に注入した時の浸透状況は、溶液型の注入材を注入した時とは異なって、懸濁物質が砂粒子骨格によって、いわば「ふるい分け」または「濾過」に類似した作用を受けることが予想される。このため、注入箇所からの懸濁型注入材の浸透状況は溶液型注入材で予想されるものとは大きく異なることになる。

講演番号 298 では、同じ注入材を用いて浸透させた固

結物の強度分布を調査している。前述のように注入材の分布が不連続になるために、その固結後の強度分布もきわめて不連続な結果となっている。

講演番号 299 では、各種の溶液型注入材により固結したサンドゲルの最長 8 年養生後の一軸強度とせん断波速度との関係を実験的に調査している。一軸強度はサンプルの弱点に支配されるのに対して、せん断波はサンプルの良質な骨格部分を伝搬することから、サンプル品質を評価管理の上ではせん断波速度がすぐれている可能性が指摘された。

講演番号 300 では、溶液型注入材で固結したサンドゲルの耐久性に密接に関係する、薬液ホモゲルの体積変化特性を実験的に調査したものである。メスフラスコを用いた測定よりも、ホモゲルの円柱供試体を利用した方がホモゲルの体積変化特性が適切に測定可能であることが示されている。

講演番号 301 では、貝殻やサンゴに由来する炭酸カルシウムを多く含む砂地盤で適用可能な溶液型注入材について調査し、ある程度の長期的な耐久性が期待できることを示している。

講演番号 302 では、前述の極超微粒子注入材よりやや粒径の大きい超微粒子注入材の砂地盤への浸透性を実験的、解析的に調査している。この場合も、極超微粒子注入材と同様に懸濁物質が砂粒子骨格によって、いわば「ふるい分け」または「濾過」に類似した作用を受けることが予想される。このため、注入箇所からの懸濁型注入材の浸透状況は溶液型注入材で予想されるものとは大きく異なるので、その浸透状況、一軸強度分布はきわめて不連続な結果となっている。

講演番号 303 では、砂粒子の固結材料として微生物の代謝作用による炭酸カルシウム生成を意図した実験的な検討を行っている。微生物による固化処理を行わない対照例として、注入材の浸透履歴を考慮したサンプルとした方が望ましいことが指摘された。

#### 3. まとめ

注入工法による地盤改良は、既設構造物直下地盤の液状化対策、都市部における各種の近接施工に伴う既設構造物防護などにきわめて重要な技術である。その設計にあたって、注入に伴う浸透メカニズムの把握、注入材による固結物強度のバラツキと特性の適切な評価が望まれる。

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土②

原 弘 行

山口大学大学院

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（改良土・軽量土②）のセッションにおいて発表された計8編の論文について総括する。本セッションで発表された論文は、すべて固化材にセメントを用いた改良土を対象としており、セメント改良土の材料特性に関する幅広い内容が含まれていた。

#### 2. 研究及び技術動向

このセッションは、研究内容が多岐に渡り、「礫分を多く含むセメント改良土の強度推定」、「セメント改良土の改良効果の阻害・劣化」、「セメント改良土の力学特性・物理特性」について議論されたセッションであった。

周知のように、セメントなどの固化材を用いた改良土は、母材となる土の粒度や含水比によって強度の発現傾向が大きく異なる。そのため、現在まで実務上有効な強度推定手法について鋭意検討されてきている。本セッションでは、礫分を多く含むセメント改良土の強度推定に関する発表が2編あった。新たな試みとして、原位置の締固めエネルギーは通常不明であるため、最大乾燥密度が得られる最適含水比のときの飽和度は締固めエネルギーに依らないことを利用して、乾燥密度と飽和度によって締固めたセメント改良土の強度を推定する手法に関する内容が紹介された。結論として、セメント改良礫質土の強度は間隙比、セメント礫比、飽和度の関数として表現できることが示され、ディスカッションの際は、砂や他の土質においても成り立つのかなどの議論がなされた。また、礫分含有率が一軸圧縮強さに及ぼす影響については閾値があり、それを超過したときに急激に強度に影響し始めるとの内容であった。礫質地盤は粒度分布の幅が広いうえ、セメントを添加するとさらに取り扱いが難し

い地盤材料となる。これらの研究は、今後の礫質地盤の新しい強度管理に資する研究内容であったと考える。

周辺環境の影響によるセメント改良土の耐久性や強度低下に関する内容の発表が2編あった。一方は、海水環境下で生じるセメント改良砂の短期的な劣化特性を、針貫入試験の結果から示したものであった。他方は、土中のアロフェンやフミン酸などに代表される固化阻害因子によってセメントの化学反応が十分に発揮できず、改良効果を阻害する影響を定量的に示したものであった。これらは、一度固まった後の劣化と改良効果の阻害という異なる現象を対象としていたが、最終的には、両者とも上記の問題に対応できる固化材の開発を見据えており、今後の進展が期待される。

セメント改良砂の引張り強度・変形特性についての研究発表や、鉄筋が配置された改良体を用いた室内試験により、改良体と鉄筋の付着強度・曲げ強度を調べた研究発表もみられた。鉄筋を含む改良体の強度は、既往のコンクリートの計算式を用いて同様に推定可能であるとの説明があった。

その他、一軸圧縮強さからせん断弾性係数を推定する内容の発表や、せん断波速度と一軸圧縮強さの関係を調べられた発表もあった。セメント改良土の強度が著しく大きくなると、せん断波速度が一軸圧縮強さに追いつかない傾向が確認され、その原因について議論が交わされていた。

#### 3. まとめ

本セッションで発表された8編の論文はセメント改良土の材料特性について、主に室内試験から研究されたものであり、大変興味深いものばかりであった。これらの研究が継続され、さらなるデータの蓄積が、今後、実務において役立つものに発展することが望まれる。

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土③

西 村 聡

北海道大学 大学院工学研究院

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（改良土・軽量土③）のセッションでの発表・討議内容について総括する。本セッションでは8編の発表があったが、「改良土・軽量土」のうち軽量土を直接扱ったものではなく、深層混合固化処理などを対象とした、より一般的なセメント改良土に焦点をあてたセッションとなった。多くの発表は、セメント改良土の力学的特性の発達と劣化に関するものであり、討議もこれらのトピックを中心に行われた。

#### 2. 研究及び技術動向

セメントによる土の固結力、およびその結果としての力学的性質（強度・剛性など）の発達と劣化という二つの側面について、それぞれここでは発表・討議された内容を総括する。

##### 2.1 改良効果の発達 —管理と予測—

セメント固化処理土の配合設計に際しては、最終的な力学的特性を予測・保証するとともに、施工性に配慮して、その発達をある程度管理することも重要な技術課題である。本セッションでは、配合時の水・セメント比の減少による排土削減という視点（講演番号312）、また地中連続壁造成の際のオーバーラップ部の品質保証という視点（講演番号313）などから、混入材による流動化や固化遅延を目指した試みが発表された。尿素的の混入により、低い水・セメント比でも十分な流動性を有する配合が可能であることや、リグニンスルホン酸と上白糖を混合したハイブリッド遅延剤の開発により、最終的な強度を大きく下げることなく遅延効果が得られることが報告された。これらの研究からは、パラメトリックな実験により提案する配合の有用性が提示されたが、一方で、さらなる配合比や新しい物質の試行により、さらなるトレードオフの解消や管理幅の拡大の余地があることも示された。

講演番号319では、事前混合処理土が仮置きから本施工へ再打設されるシナリオに対し、養生中に一度攪乱された改良土が再び水和固結する過程が示された。以上の研究を総括すると、セメント固化改良技術のさらなる高度化のため、最終的な強度だけでなく、それに至る過程の把握が精力的に研究されているといえる。一方で、講演番号316のように、これまで蓄積された膨大な配合試験データに基づき、養生後強度を支配する諸因子（土の分類・物理特性など）とその影響を統計的に模索する基

礎的研究も報告された。今回の分析は全体的・包括的なレベルで実施されたものであったので、それを今後どのような因子に特に着目して細分的・低階層的な分析を進めるのが有効であるか、研究の方向性についてフロアで討議が行われた。

固化処理土の品質保証手法については、講演番号318が一軸圧縮強度とせん断波速度の関係を、室内試験・原位置PS検層などに基づき報告している。せん断波速度の計測により一軸圧縮強度などの強度特性を推定する手法については従来より研究されているが、ここではその逆、つまり動的解析に必要となるせん断剛性を一軸圧縮強度から推定するというアプローチが興味深かった。礫質土など、室内試験に供する際に乱れが大きくなる土質が存在するという課題などについて、討議を通してフロアで問題意識が共有された。

##### 2.2 改良効果の経年劣化

地盤の物理化学環境の影響や、海水への暴露によるセメント改良土の力学的性質の劣化に関して3編（講演番号314・315・317）の発表があった。これらはいずれも有明粘土を中心に室内実験・現地測定を行ったものであった。固化体からのカルシウムの溶脱が、実験室での海水への暴露により明確に進行し、強度・剛性が著しく減少していく結果が示される一方、原位置ではそのような明確な劣化は生じていないことも報告された。この点に関する討議では、固化後の劣化が生じる土質とそうでないとされる土質（たとえば砂質土など）の違いや、実験室での暴露環境と実際の物質浸透・拡散環境の時間・空間スケールの相違などについて、さらなる理解を得る必要があることについて意見が出た。

講演番号315・317は、特に地盤環境の変化を視点に入れた研究であった。有明海沿岸低平地のような感潮地帯では、今後、気候変動による海水位の上昇などが、自然地盤のみならず固化改良地盤にもどのような影響を与えていくか、注目していかなければならないことを示している。

#### 3. まとめ

固化改良技術は、最終的な品質はもちろん、施工を通してどのようにその品質に至るかが重要な技術であり、またその品質の長期的な保証は今後の課題として残っている。これら課題に対し本セッションでは、材料特性の経時発展・劣化の側面から、精力的な研究が行われていることが示された。

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土④

菊池 喜昭  
東京理科大学 土木工学科

#### 1. はじめに

本報告は、地盤材料-(改良土・軽量土④)のセッションの総括である。本セッションでは9編の報告がなされた。内容は主として改良土の様々な特性について検討したものであった。それらは、生物を使った地盤の固化処理を想定した研究から、SCP改良地盤の特性にかかる論文まで多岐にわたっていた。

#### 2. 研究及び技術動向

表-1 に本セッションで報告された論文の一覧を示す。また、表-2には各報告で議論している主な課題を示した。このことから課題が多岐にわたっていることがわかる。このことは、改良土をめぐる話題が、従来の強度特性の議論の枠を破って広がりつつあることを意味しているものと思われる。

320 は、セメント系固化材の添加率と添加後の養生期間を変えることで混合された地盤材料の粒度をコントロールできるとしたもので、目的は異なるものの323のグループが以前より行ってきた、セメント処理土の反応がある程度進んだところで解砕するというところと作業的には似ているが、視点としては新しい。323 でも新しいテーマに取り組んでおり、つまりは、セメントで固化処理した地盤材料の加工の仕方にはいろいろな工夫の余地があるということであると思われる。

321 と 327 の論文はいずれも改良土の耐久性を議論したものである。人工的な地盤材料の耐久性の問題は必ず最後まで未解決のまま引きずる問題である。耐久性をどう評価するかといった研究は今後とも様々なアイデアで行われるべきであろう。

322 は微生物を用いた地盤改良工法を視野に入れた研究である。技術的にはまだ難しい問題を含んでいるようであるが、この種の研究から派生的に生まれる新しい発見が地盤工学を変えるのではないかと期待したい。

324 は、地盤改良用石灰で改良された地盤材料について広範なデータをもとに報告されたものである。この種の地道な成果の集積が実用にもたらす影響は大きいと思われる。

326 と 328 は、SCP 工法などの地盤改良がそもそも不均質な地盤を作成していることについて議論している。古くからある課題ではあるが、新しい手法、新しい考え方で問題解決の糸口を見出すことは重要なことである。

325 はグラウト材が空洞をどう充填するかという問題に取り組んだもので、数値解析によってどこまで推定できるか議論している。改良土によっては流動性を持たせて空洞を充填するという課題の解決を迫られるケースが多い。このような研究がその問題解決の力になることと期待される。

#### 3. まとめ

はじめに述べたように、このセッションの論文の扱うテーマは多岐に及んでいた。どのテーマも、今後のシーズとなるような内容を含んでいると思う。

多くの人が同じテーマにチャレンジすることも必要であろうが、新たな問題を解決するには、先見の明を持って新しい分野に取り組むことが重要であると思う。

このような取り組みがすべてうまくいくとは限らないし、思った通りの結果が出てもそれがそのまま正しいとは限らない。しかし、そういった研究について、学会の場で広く議論を戦わせることは、意義のあることであると思う。

表-1 本セッションで報告された論文

| No. | 登壇者  | タイトル                                   |
|-----|------|--|
| 320 | 早野公敏 | ほぐしを利用した液状泥土の新しい造粒方法の提案                |
| 321 | 原 弘行 | 海水中の Mg による石灰処理土の表面変質とその Ca 溶出抑制効果     |
| 322 | 白井佑季 | ウレアーゼ活性を利用した炭酸カルシウムの析出過程の X 線 CT による観察 |
| 323 | 北島 明 | 固化改良底泥土(砕・転圧盛土工法)の強度に及ぼす廃棄土混入の影響       |
| 324 | 若原千恵 | 地盤改良用石灰を用いた改良土の変形特性                    |
| 325 | 石井裕泰 | 可塑性グラウトの空洞充填挙動に関する室内実験と数値シミュレーション      |
| 326 | 小宮 龍 | SCP 改良効果に関する数値解析的検討                    |
| 327 | 滝浦駿介 | 加熱養生によるゲルの長期強度変化測定の実証                  |
| 328 | 原島 実 | 互層(複合)供試体による三軸圧縮試験                     |

表-2 各報告の主たる課題

| No. | 課題                                |
|-----|-----------------------------------|
| 320 | 液状粘土をセメント混合だけで造粒するにはどうしたらよいか      |
| 321 | 海水の影響によって石灰処理土が劣化するのなぜか           |
| 322 | ウレアーゼを添加することで炭酸カルシウムはどのように析出されるのか |
| 323 | 解砕期限を過ぎた固化土を有効利用するにはどうしたらよいか      |
| 324 | 石灰処理土の E50 と一軸圧縮強さの関係はどうなっているか    |
| 325 | 可塑性グラウトによる空洞重点予測手法の検討             |
| 326 | 液状化対策としての SCP の杭径が地震時の改良効果に及ぼす影響  |
| 327 | 薬液注入材の種類による長期耐久性の違い               |
| 328 | 互層地盤の層厚の違いがせん断・圧縮挙動に及ぼす影響         |

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土⑤

並 河 努  
芝浦工業大学 工学部

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（改良土・軽量土⑤）のセッションについて総括する。本セッションでは、セメント固化処理土の配合や養生条件が強度に与える影響に関する8編の研究が発表された。セメント固化処理土の場合、原位置の地盤状況もしくは用いる地盤材料により強度が大きく異なるため、固化処理土の開発当初より配合に関する研究は行われてきているが、いまだ未解明な点が多い。また、施工条件と拘束圧や地下水環境といった養生条件もセメント固化処理土の強度に大きな影響を与えるが、原位置での条件を室内で再現することが難しい。このため、施工条件や養生条件が固化処理土の強度に与える影響の解明も大きな課題として残っている。このような現存する課題に取り組んだ研究の成果が本セッションでは発表された。

#### 2. 研究及び技術動向

セメント固化処理土工法の場合、固化処理土の強度とともに施工性が重要となる。事前混合処理土の施工性では、フロー値で表現される流動性の管理と、材料分離が重要な管理項目となる。SGM 軽量土の原料土に10mm以下の礫分を用いる場合の、フロー値と材料分離に関しての実験結果が報告されたが、添加材を用いることにより、フロー値を管理値内に収めることができるが、10mm以下の礫分が20~40%を超えると材料分離が発生することが示された。そして本研究結果より、SGM 軽量土の原料土に今まで取り除いていた10mm以下の礫分を20%までは使用可能であることが示された。本研究に対し、礫分が多いとフロー値が低下する点に関して質疑がなされた。この傾向はコンクリートと異なるため、事前混合処理土とコンクリートの違いが認識された。

柱列式ソイルセメント地中連続壁工法の場合、固化処理土であるソイルセメントの強度確保とともに、施工時の芯材挿入が重要な項目となる。柱列式ソイルセメント地中連続壁工法における施工時のセメントスラリー注入量、気泡添加率、スラリーの水セメント比が、ソイルセメントの強度と流動性に与える影響に関しての実験結果が報告され、ソイルセメントの強度と流動性双方を満たすための掘削引揚げ時のセメントスラリー吐出量比率や、土の種類による水セメント比の最適値が提案された。

セメント固化処理土の養生条件と強度発現に関しては未解明な点が多く、特に室内と原位置での養生条件の違

いが強度発現に与える影響の解明は非常に重要である。現在の一般的な品質管理では、室内で養生した供試体を用いた一軸圧縮強さをもとに実施工でのセメント添加量を決定している。室内と原位置での養生条件の違いで強度が異なると、現行の品質管理手法では適切なセメント添加量を定めることができるとは言い難い。室内と原位置での養生条件の最も大きな違いとして拘束圧の違いがある。原位置での養生では土被り圧に相当する有効拘束圧が作用するが、室内での養生では有効拘束圧はほぼ0である。有効拘束圧による圧密（脱水）の効果により、原位置での養生の方が強度発現は大きいと考えられているが、有効拘束圧の強度に与える影響に関しては、未だ定量的な評価が行われていないのが現状である。セメント固化処理粘性土において養生中の有効拘束圧の変化が強度発現に与える影響を調べた実験結果が報告されたが、養生時の有効拘束圧が強度増加にプラスとなるかマイナスとなるかは、圧密降伏応力と有効拘束圧の関係により決まることが示された。また、非常に短い養生時間（数時間程度）でのセメント固化処理土の強度発現を調べた実験結果が報告された。

鋼構造物やコンクリート構造物と同様に、構造物の維持管理の観点から、耐久性の評価及び補修技術はセメント固化処理土工法においても重要な課題となってきた。海水暴露状態におけるSGM 軽量土の耐久性に関する研究が報告された。13年という長期間海水暴露されたSGM 軽量土の密度と強度が調べられ、健全部では時間の対数に比例した強度発現が見られ、13年間における劣化深さは26mm~57mmであることが示された。耐久性に関しては、劣化メカニズムに関して討議がなされ、劣化メカニズムから実験結果を解釈することの重要性が認識された。補修技術に関しては、HGS気泡混合土による道路盛土にクラックが発生した場合の補修方法について報告された。そして、裏込め充填材をクラックに充填注入することにより、クラックの補修が可能であることが示された。

#### 3. まとめ

セメント固化処理工法は開発期より半世紀近くが経過したが、本セッションの論文に取り上げられている養生条件の影響（室内での養生条件と原位置での養生条件の違い）、耐久性及び維持管理に関しては多くの課題が残されている。今後、これらの課題に対する独創的な研究が実施されることが期待される。

### 3. 地盤材料 改良土・軽量土⑥

一 井 康 二

広島大学大学院工学研究院

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（改良土・軽量土⑥）のセッションについて総括する。本セッションでは、最終日の最終セッションにもかかわらず、30人弱の聴講があり、活発なディスカッションが行われた。

セッションでは6編の発表があり、すべてがスラグの利用に関するものであった。水砕スラグが3編、製鋼スラグが3編であるが、議論の対象がほぼ共通していて、質の高いディスカッションであったといえる。

#### 2. 今後のスラグ材の研究発表に向けて

本セッションでは、今後のディスカッションにむけて建設的な提案があった。一言でいうと、梗概にスラグの素性（特に製鋼スラグの場合の化学組成）について説明を載せましょうという提案である。つまり、高炉スラグはどの溶鉱炉でも、スラグの脱硫能及び流動性の点から、ほぼ同じ組成となる。しかし、製鋼スラグの場合、同じ転炉でも製造する鋼種によってスラグ成分が異なる上、電気炉で鋼を造っても「製鋼スラグ」とよぶ。このように、製造鋼種やプロセスの違いで成分が異なる為、研究発表で報告される試験結果等を解釈するためには、その成分を知る必要がある。さらには、水砕スラグであっても、生産直後か時間経過後で性質が異なるため、やはりスラグの素性が記載されていることが望ましい。

口頭発表であれば質疑応答で詳細を把握することもできるが、時間の節約、さらに梗概のみが後に利用される際の誤解の防止につながる建設的な提案である。今後の研究発表への反映が期待される。

#### 3. 研究の動向

6編の発表をもとに、浅学非才の筆者が自分なりに把握できた現在の研究動向を、下記に箇条書きに記す。

##### (1) 土質改良材としてのスラグの利用

水砕スラグや製鋼スラグを、そのまま、あるいは津波堆積土等の悪条件の材料に添加して、建設資材としての利用を図ろうとする研究である。適切な配合と養生期間を確保すると、必要とするレベルをはるかに超えるような強度（一軸圧縮強度）を確保することができるという実験結果が複数の発表（発表番号 337 や 338）で示されている。

しかし、養生期間が必要なことから、用途が裏込め土等の初期強度が必要とされない用途に制限されるか、あ

るいは締固め等を併用することで初期強度を確保するといった対応が必要となる。今後、実際の利用形態を見据えたうえで、配合・養生等の詳細な議論や事例の提示が進むものと思われた。

##### (2) 固化メカニズムの解明と養生条件の影響

固化による強度増加、さらには硬化時の体積変化（膨張）等を議論するためには、メカニズムの解明が重要である。そのため、EPMA分析や熱重量分析を行った事例が報告された（発表番号 340）。実際の反応は養生条件（温度や海水利用の有無）にも影響されるため（発表番号 341）、今後、各種の条件下で作成した供試体や実施工事例からのサンプル供試体に対する同様の研究が進展すると思われる。

なお、発表番号 338 では、海水の利用により膨張が抑制されるとの報告（口頭発表のみで、梗概にはデータ記述なし）があり、画期的な実験結果であると、会場からのコメントがあった。これらのメカニズム等についても、同様の分析が進むことが期待される。

##### (3) 長期的性質の施工事例からの評価

スラグの特性としての自己修復能力に着目した研究があった（発表番号 342）。自己修復能力に限らず、固化特性等、時間とともに変化する性質については、大学の卒業論文や修士論文では対応しにくく、長期的な実験が必要である。このような課題については、実施工事例のサンプル等を用いた研究（例えば、発表番号 339）が有効であると期待でき、今後、既施工事例をもとにした研究発表が増えてくることを期待している。

##### (4) スラグ材の粒度の影響

発表番号 339 では、細かく破碎された製鋼スラグ（尾鋼スラグ）の利用が議論された。また、発表番号 338 でも、製鋼スラグ微粉末の添加の影響が議論された。固化のメカニズムを考えると、粒子の接触点が重要で、粒径は重要なファクターとなるとの指摘が会場からもあり、粒度分布が、強度増加や固化メカニズム等に及ぼす影響の検討が、今後もより詳細に行われていくと思われる。

#### 4. まとめ

スラグ材は、非常に特殊な材料であるが、環境負荷軽減に加えて硬化特性が期待できることから、今後の有効利用が期待されている材料でもある。拙い座長でしたが、活発に議論いただいた会場の皆様に深く感謝します。

### 3. 地盤材料 不飽和土（保水・浸透特性）

所 哲 也  
苫小牧工業高等専門学校

#### 1. はじめに

本報告では、不飽和土（保水・浸透特性）のセッションで発表された6編の論文について総括する。

#### 2. 研究及び技術動向

近年、集中豪雨により地盤災害が日本国内で頻発している状況を考えると、不飽和土の保水性および浸透挙動の解明は、解決が急がれる研究課題の1つであると言える。

本セッションの6編の内訳は、保水性試験に関する報告が3件、土壌水分計のキャリブレーションに関する報告が1件、河川堤防を対象とした土、水、空気の連成解析結果の報告が2件であった。まずは、保水性試験であるが、これまでに多数の保水性試験が提案されており、試験法も確立されているが、試験時間が膨大にかかるなどの欠点があり、近年、試験時間の短縮や精度の向上への取り組みがなされている。本セッションでは、試験時間の短縮の試みとして加圧法を応用した試験法に関する発表があり、得られた水分特性曲線について議論がなされた。また、走査電子顕微鏡を用い、土のミクロな構造に着目して土の保水性を評価する発表もあり、今後不飽

和土の力学、浸透特性の解明に先端技術が活用されていくであろうと思われる。

一方、これまでは保水・浸透特性とえば、間隙水の観点からの研究が先行していたが、近年、室内に限らず原位置においても透気性の評価がなされている。また、地盤内の間隙空気圧の計測などが進められており、間隙空気に着目した研究事例が多くみられるようになってきている。今後は、間隙空気の挙動を考慮した不飽和土の浸透挙動を解明することが重要となると考えられる。このような背景の中、本セッションでは、間隙空気を考慮した土、水、空気連成有限要素解析による、河川堤防を対象とした数値解析が報告され、保水性、透水性の違いが堤防の浸潤面に及ぼす影響が示された。保水性と比較して、不飽和土の透水性に関しては試験実施例が少ないため、今後不飽和透水係数の計測も必要性が高まると考えられる。

#### 3. まとめ

近年、異常気象による降雨による地盤災害が後を絶たない。室内試験、数値解析、および現地計測のそれぞれの手法が確立され、それらの技術が集積されて広く防災・減災対策に用いられることが期待される。

### 3. 地盤材料 不飽和土（変形・強度）①

清原 雄 康

八戸工業高等専門学校 建設環境工学科

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（不飽和土（変形・強度）①）のセッションについて総括する。本セッションでは、DLクレーやベントナイトをはじめとするシルト、粘土を材料にして、不飽和状態下での応力、水分、熱、空気圧を変化させた時の、変形、強度特性に関する実験や数値シミュレーション結果が報告された。いずれも災害対策、放射性廃棄物処分問題やエネルギー・環境問題などの観点から、将来の実践的な研究に結びつく背景を持ったものであった。

#### 2. 研究及び技術動向

不飽和土の力学挙動を解明するにあたって、有効応力の算出をどのようにするかで結果が左右される。特に Bishop ら<sup>1)</sup>の提案した有効応力式(1)に基づいた、限界状態や  $K_0$  状態での応力状態についての実験考察や、数値シミュレーションがなされていた。また、初期飽和度の異なる試料を想定して、全応力作用下での液相への空気の溶解を考慮した間隙圧挙動についての三相連成解析の報告もあった。

$$\sigma' = \sigma_n + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma'$ ：有効応力、 $\sigma_n$ ：基底応力、 $\chi$ ：寄与率、 $u_a$ ：間隙空気圧、 $u_w$ ：間隙水圧である。

式(1)中のサクシオン寄与率 $\chi$ が飽和度と等しいとする仮定を用いる例が多いが、Bishop ら<sup>2)</sup>の論文によると、そのような傾向にあるものの、飽和度と $\chi$ の関係は土質により異なると説明している。(図-1 参照)。飽和度と $\chi$ が等しいと仮定する場合、その妥当性について注意を払う必要がある。

さらに、本セッションでは放射性廃棄物処分問題やエネルギー環境問題の観点からの研究も報告された。温度変化を伴う等方圧密試験結果から、土の塑性挙動の起こりやすさについての報告や、蒸発、給水、湿度制御などにより、土中の水分を変化させた時のベントナイトやシルトなどの膨潤特性、収縮特性についての研究報告もなされた。放射性廃棄物の処理処分場の充填材においては、これら様々な要因をクリア出来る性能が要求される。性能評価のための測定方法についても、不飽和地盤工学的見知からの、さまざまなノウハウの蓄積が必要と思われる。

乾燥収縮挙動の経時変下など、外力ゼロ、あるいは一定状態下での、不飽和土の物理化学的現象、変形、強度

を数値解析で再現するといったこともメカニズム解明の一助になると思われる。

Alonso ら<sup>3)</sup>のグループでは、トンネル内の変形が拘束された状態下での、膨潤土の大規模な模型実験が行われている。海外での研究事例も参考にしていきたい。

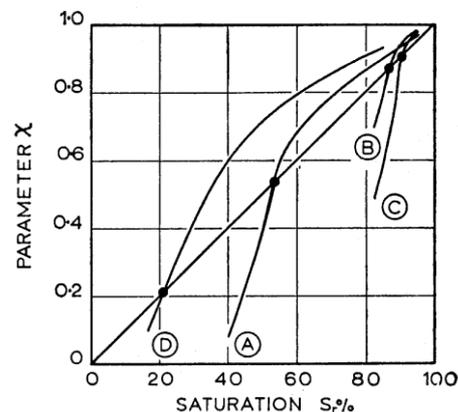


図-1 飽和度と $\chi$ の関係 (文献2)より抜粋)  
A:Talybont clay; B:Selsset clay; C:Mangla shale; D:Vaich moraine.

#### 3. まとめ

不飽和土の研究は、地盤防災、環境、農業、エネルギー問題などを考える際、不可欠な要素であるとともに、解決すべき課題がたくさんあることを再認識した。今後、より詳細かつ、より実用的な、さらなる研究が期待される。

#### 参考文献

- 1) Bishop, A. W. : The measurement of pore pressure in the triaxial test, *Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, pp.38-46, 1960.
- 2) Bishop, A. W. and Blight, G. E. : Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, *Geotechnique* 13, No.3, pp.177-197, 1963.
- 3) Alonso, E. E., Pinyol, N. and Hoffmann, C. : Highly expansive granular mixtures, *Proc. of the 6<sup>th</sup> international conference on unsaturated soils, UNSAT 2014, Sydney, Australia (Unsaturated Soils : Research & Applications)*, pp.15-29, 2014.

### 3. 地盤材料 不飽和土（変形・強度）②

小 山 倫 史  
関西大学

#### 1. はじめに

本報告では、地盤材料（不飽和土の変形・強度②）のセッションで発表された357～365の9編の発表論文について総括する。9編の内訳は、新しい引張強度試験法の提案（1編）、 $\mu X$ 線CTによる不飽和土の初期間隙比および水分量の分布の定量評価（1編）、不飽和土の力学特性に与えるサクシジョンの影響の評価（2編）、不飽和土の繰り返し载荷時の動的強度・変形特性の把握（3編）、不飽和土の構成モデルおよび力学試験のシミュレーション（2編）である。

#### 2. 研究及び技術動向

不飽和土の強度・変形特性に与えるサクシジョンの影響については、せん断前の飽和度、水分履歴、間隙比の把握が重要である。特に、浸透に伴うサクシジョンの低下などを評価する際は、初期状態および浸透後の状態が、地盤材料の水分特性曲線のどこに位置しているのかを明確にするとともに、せん断前の吸水／排水過程における間隙比の変化（特に、浸水コラプス現象）を十分考慮する必要がある。これらのことは不飽和土の繰り返し三軸試

験を実施する場合でも同様である。

不飽和土のモデル化においては、水分特性モデル（Van Genuchten式）に間隙比の変化の影響を考慮したもの（361）、不飽和土の繰り返し载荷によるヒステリシスを考慮した弾塑性構成モデル（ジャンプ硬化則下負荷面モデル）（365）が紹介され、その適用性が議論された。

一方、360では $\mu X$ 線CTを用いて不飽和土の初期飽和度・間隙比分布を定量的に評価している。不飽和土中には間隙や水分量が不均質に分布しており、これらを定量的に評価することは、サクシジョンやひずみ局所化の発生メカニズムを解明することに繋がると考えられる。今後、不均質に分布する間隙・水分量の定量評価とともに、これらの影響をどのように構成モデルに組み込むかが鍵になるものと思われる。

#### 3. まとめ

本セッションで発表された9編の発表論文は、いずれも不飽和土を用いた室内試験、要素試験に関するものであり、今後は、不飽和土の土質力学を降雨による斜面崩壊や地震時の安定性の問題などの実問題への適用を念頭においた研究が進められることを期待したい。

### 3. 地盤材料 特殊土

八 木 一 善

岩田地崎建設 技術部

#### 1. はじめに

本セッションでは、地盤材料の特殊土に分類された 9 編が発表されている。自然の地盤材料としては、有機質土（腐植土・泥炭）に関する発表 3 編、火山灰質土に関する発表 2 編、琉球石灰岩層未固結に関するものである。また、人為的に調整された材料や廃棄物関係のものとして、路盤材料（碎石）、ベントナイト混合土、繊維廃材の卓越した廃棄物材料に関して発表されている。

#### 2. 研究及び技術動向

有機質土および泥炭性地盤は、過去の大地震によって構造物が甚大な被害を受けており、動的強度—変形特性の解明は地盤工学的に重要である。圧縮性が強く、強熱減量や分解度、応力履歴などが動的強度—変形特性に影響するため、3 編の発表ではこれらに着目して、PS 検層、室内動的変形試験および地震応答解析による評価が行われている。このような評価結果の蓄積により、地震時の設計法が確立されることが期待されている。

次に、路盤材料の動的特性に関する発表では、液状化対策として実施された「締固め碎石層」に関して、室内試験と FEM 解析による評価の結果が示された。

琉球石灰岩の未固結部（砂礫状）と軽石に関する発表では、「破碎性土」であることに着目して、それらの一次元圧縮特性と単粒子破碎強度が報告されている。これらが粒子破碎性を示す大きな要因の一つとして、粒子の多孔質性（粒子内の間隙）がある。また埋設管の基礎材に用いた火山灰質土（火砕流堆積物の低溶結）に関する発表では、拘束圧と細粒分の影響に着目して、その変形特性が示された。火山灰質土の強度—変形特性は、拘束圧と非～低塑性の細粒分の影響を受けるためである。

放射性廃棄物処分施設で計画される Ca 型ベントナイト混合土に関する発表では、NaOH 溶液に浸漬した混合土の三軸試験の結果が報告されている。繊維廃材の卓越した廃棄物の強度—変形特性に関する発表では、破碎性土の場合と同様に、せん断特性における拘束圧依存性が示されている。

#### 3. まとめ

自然由来の特殊土の性質は多様であるが、豪雨や地震などによって被害が生じやすいことも知られている。その地盤工学的な評価の結果を蓄積していくことは、極めて重要である。