

# 学会活動から

## 第41回地盤工学シンポジウム——軸圧縮試験の功罪／

### これに代わるもの——開催報告

地盤工学会調査部

#### セッション1 一軸圧縮試験の功罪(1)

座長 プラダン テージ (横浜国立大学)

- I-1 静的に締め固められた不飽和土の一軸圧縮試験  
西村友良・桃井 徹・豊田浩史・小川正二
- I-2 粘性土の非排水強度に関する初期および誘導異方性の測定とその評価  
正垣孝晴・茂籠勇人・丸山幹夫
- I-3 一軸圧縮試験による非排水強度異方性の測定と斜面安定解析への適用  
茂籠勇人・正垣孝晴
- I-4 一軸圧縮強さに対する圧縮速度の影響—有効応力による評価—  
清水正喜・高田 亮
- I-5 一軸圧縮強さの問題点とその評価方法の一考察  
田中政典・田中洋行・半沢秀郎
- I-6 一軸圧縮試験による非排水強度に及ぼす応力解放と有効応力の保持性について  
向谷光彦・羽山里志・直江芳隆
- I-7 一軸圧縮試験結果の評価方法について—サクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験の提案—  
遠藤大輔・三田地利之
- I-8 ACCESS System—地盤のローカル性と技術の地域格差の克服を目指して—  
浅田英幸・半沢秀郎・鈴木耕司
- I-9 一軸圧縮強度法 ( $q_u$  法) の根拠と問題点  
土田 孝

#### 【概要と討議内容】

I-1: 不飽和土の一次元圧縮中のサクシジョン力と間隙比変化の関係を検討することを目的としている。サクシジョンが同一でも不飽和土の一軸圧縮強さは間隙比に左右されることを指摘している。

I-2: 粘性土の構造異方性および誘導異方性が強度に及ぼす影響を調べるために、切出し角度を変化させた一軸圧縮試験、単純せん断試験、三軸試験を行っている。単純せん断強度は堆積面と最大主応力面とのなす角  $\beta=60^\circ$  の一軸圧縮強さ  $q_u/2$  にほぼ対応することを示している。「質疑」砂の場合は  $\beta=60^\circ$  付近に強度が最小になるが、粘性土の場合は  $\beta=90^\circ$  で最小となっている理由は? 「回答」一軸圧縮強さは2,3供試体の平均であり、乱れに対する品質のためと考えられる。

I-3: 一軸圧縮強さの構造異方性を考慮した斜面安定解析法を提案し、五つの軟弱地盤上の盛土の破壊例の解析でその妥当性を検討している。泥炭地盤では強度異方性の程度が大きいので、異方性に対する補正係数に注

意すべきであると指摘している。

I-4: サクシジョンを測定した一軸圧縮試験を行い、圧縮速度が  $q_u$  に与える影響について吟味している。一軸圧縮試験では排水条件を厳密に制御できないため、圧縮速度を大きくしても非排水条件が満足されているという保証がない事を指摘している。「質疑」一軸圧縮試験中にサクシジョンを測定すれば、有効応力経路より破壊線および  $\phi'$  を求めることができるのか? 「回答」非排水強度と供試体の残留有効応力から全応力的な破壊線は求められるが有効応力経路自体は考えない方がよいと思う。

I-5: 国内外のサンプラーで採取した試料について、一軸試験、ベーン試験、一面せん断試験を行い、結果を比較している。一軸圧縮強さはサンプリング技術や採取方法によって大きな影響を受けることを指摘している。

I-6: 一軸圧縮強さに及ぼす応力解放および pF 値の影響について実験的に調べている。供試体の残留サクシジョン (残留有効応力) が一軸圧縮強さに大きく影響を与えることを指摘している。

I-7: 供試体のサクシジョンを測定し、残留有効応力を用いて  $q_u$  値を補正し、原位置での強度の推定方法について述べている。「質疑」サクシジョンだけですべてのものをクリヤーできるのか? 「回答」サクシジョンからすべてが分かるとは思っていないがどの程度サクシジョンを測る方法が有効であるかについて調べている。

I-8: 地盤と技術のローカル性を考慮に入れた地盤調査、設計および施工管理法を提案している。事例解析より、 $q_u$  は強度を過小評価する (特に外国の粘土では) ため、コーン貫入試験と一面せん断試験を用いた地盤調査法を示している。

I-9:  $q_u$  法の根拠および問題点を整理し、この方法による粘土地盤の非排水強度決定という従来のやり方は見直される時期にきていることを指摘している。

【全体に対するコメント】「1」一軸試験のメリットを生かして、他の試験と共用すべきである。「2」一軸試験はこれに向けた土にしか適用してはならない。例えば、サクシジョンが有効土被り圧の10%しか残らない土では適用不可である。また、高い技術でサンプリングした土以外は適用できない。「3」適用できない土 (例えば中間土、過圧密粘土) に対して一軸試験を行うととんでもない結果になるが、そのほかはあまり否定する必要がないと思う。「4」設計基準に一軸試験で強度を決定

すると書いてある事に問題があるであろう。代わりに、非排水強度を求めて設計すると書いた方がよいと思う。「5」理屈にあった基準があってほしい。 $K_0$  圧密三軸試験や一面せん断試験等が基準化しつつあり、今後  $q_u$  法の基準も変わるであろう。

### 基調講演 「一軸圧縮試験の過去点描」

中瀬明男 (㈱日建設計中瀬土質研究所)

我が国で本格的に土質力学の知識を駆使して行った工事は、昭和27年の横浜港高島3号栈橋の建設であろう。この工事では、粘土の一軸圧縮強度の半分を非排水せん断強度とする方法が用いられた。その後の高度成長の時代には臨海部での建設が広範囲に行われたが、これらの仕事で遭遇する安定問題のほとんどが飽和粘土の短期安定問題であったため、一軸圧縮強度の半分を粘土の非排水せん断強度とする方法が広く採用された。

当時の港湾技術研究所は、調査と研究・設計の各グループがそろっており、重要な仕事では研究所の職員が自ら土質調査と試験を行っていたが、一軸圧縮試験に関しては試料の採取に伴う乱れが最も重要な問題とされ、乱れの少ない試料採取法の開発が進められた。この頃に、瀬戸内海の軟弱な海底粘土地盤上で、厳密な施工管理の下に干拓堤防が建設されたが、竣工直前に大規模な地盤破壊が生じた。破壊後の調査の結果、安定解析の方法と粘土のせん断強度の決め方には問題がなかったが、堤防の土の単位体積重量の値が実際と異なっていたことが原因と分かった。その後の港湾工事において四つの大規模な地盤破壊が生じたが、いずれの場合でも測定した一軸圧縮強度の平均値を用いた強度の深度分布を用いれば、破壊時の安全率は  $1 \pm 0.1$  の範囲にあることが分かった。測定強度の平均値を考慮する理由は、乱れによって強度は減少するのであるが、地盤の強度の異方性ならびに試験と実際のひずみ速さの相違を考慮すれば、一軸圧縮強度は安定解析に適用すべき地盤の土の強度を過大評価するからである。

粘性土の非排水せん断強度と乱れの関係については、多くの実験的研究が行われた。供試体の品質を区別するために、乱れの全くない理想試料、地盤中での拘束応力解放のみの影響を受けた完全試料、ならびに完全試料に種々の機械的乱れが加わった実際の採取試料の三つが定義された。完全試料は理想試料より数%の強度低下があるだけであるが、完全試料と比べた採取試料の強度低下の程度は、採取技術の良否によってはるかに大きいものであることが定量的に明らかにされた。粘性土が乱れを受けた場合に、強度低下の程度と比べて変形係数の低下の程度ははるかに著しい。これに着目した研究も行われ、個々の供試体の品質によって強度を補正する方法も提案されている。

乱れに関しては中間土の問題が常に内在し、粘土が砂に近づくに従って乱れの程度が大きくなる。ベーンせん断においても乱れが重要な問題であることは同じである。スケンプトンが報告した強度増加率と塑性指数の関係は

よく知られているが、低塑性の範囲でその値が過小であると指摘されてきた。しかし、中間土のベーンせん断における乱れを考慮すれば、彼の報告した結果は事実であることが確かめられている。

粘性土の非排水せん断強度の測定には、一軸圧縮試験に限らずいずれの場合にも乱れの影響が現れる。地盤中で発揮される真の強度は破壊の事後解析で求めるという考えもあるが、その場合には解析方法の詳細や強度以外の土の諸定数の値の採り方に大きく関係することを忘れてはならない。実際問題に対しては、確定した強度値に基づいた設計法を見いだせばよいとされるが、現在のところでは採取試料を原位置での拘束圧力の数倍の圧力で再圧密しなければ、確定した値とは言えないであろう。結局のところ、粘性土の非排水せん断強度は適用する設計法に組み込まれた設計パラメーターの一つというべきであろう。

### パネルディスカッション TC30 Coastal Geotechnical Engineering 国内委員会の動向

座長 土田 孝 (運輸省港湾技術研究所)

#### [TC30の活動の紹介 (座長)]

TC30は軟弱地盤における設計定数の決定法をテーマにJGSが中心となって1994年から活動を行っている。現在19名のメンバーの国・地域において、採用されている設計定数の決定法(試料のサンプリング方法、室内試験の種類と方法、原位置試験の種類と方法など)に関する調査を実施している。また、国際的によく知られているボスケナー粘土(英国)、ドラメン粘土(ノルウェー)、ルイスビル粘土(カナダ)、有明粘土(日本)について、地盤の調査試験方法に関する包括的な研究を実施している。

#### [TCメンバーによる話題提供と討議内容]

1.  $q_u$  法に替わる粘土地盤の実用的な強度決定方法  
土田 孝
2. アジアの海成粘土について得られた最近の知見  
半沢秀郎
3. 粘土地盤の強度と原位置試験  
三村 衛
4. 海外におけるサンプリングの現状と一軸圧縮試験  
田中洋行
5. 粘性土の室内繰返し(動的)試験とその結果の適用  
安原一哉

1. は現行の  $q_u$  法に替わって三軸試験による強度評価を提案する内容である。 $q_u$  法は、基本的に経験法であるため一般性がなく、常に乱れという定量化しにくい要素が含まれている。三軸試験で求めた強度は信頼性が高いが、実用的な方法として定着するためには、地盤工学会が試験条件や手順を見直し試験コストを低減させる必要がある。

2. では、アジア地域の建設工事の事例において採用された粘土地盤の強度評価方法の適用性が紹介された。海外の土では  $q_u$  法が地盤の強度を著しく過小に評価する場合がある。再圧縮法による一面せん断強度の強度が

## 学会活動から

最も信頼性があり、これに三成分コーンを組み合わせた強度評価法が実用的である。

3. では、原位置試験の解釈に関する最近の研究が紹介された。原位置試験の結果を正しく解釈するには境界値問題を正しく解いて試験時のメカニズムを明らかにしなければならない。最近、CPT に関して数値解析手法を応用して大変形時のコーン貫入過程を解析することが可能になっている。

4. では海外におけるサンプリングの現状が紹介された。東南アジアではウォッシュボーリングとシェルビークューブによるサンプリングが普通であり、日本の通常の不攪乱試料よりもはるかに品質の低い試料しか得られないというのが現実である。将来的にも日本の方法が国際的に普及するという状況は望み得ない。

5. では粘土の動的強度の適用性が紹介された。現在のところ粘土の動的強度は設計の中でそれほど考慮されていないが、震災調査によると動的な強度の不足により破壊や変形が生じたと考えられる場合がある。河川堤防の安定解析に動的強度を適用した例が示された。[質疑] 三軸試験による再圧縮法が提案されているが、シャンセップ法も同様の信頼性の高い強度を与えるのではないか。[回答]  $p_c$  の求め方にもよるが、シャンセップ法の強度は再圧縮の強度よりも小さくなる場合が多く、これは自然地盤の構造の影響と考えられる。[質疑] 粘土地盤のコーンファクターには鋭敏比が影響しているのではないか。[回答] 地盤内のひずみ分布などの解析結果を分析すると、鋭敏比がコーンファクターに及ぼす影響を明らかにすることが可能である。[質疑] 粘土地盤の静的安全率を1.3確保すると動的な強度に対して大丈夫といえるのか。[回答] 一概にはいえない。今後の研究課題であると思う。

## セッション II 一軸圧縮試験の功罪(2)

座長 斎藤 邦夫 (株式会社建設中瀬土質研究所)

- II-1 海外の粘土に対する一軸圧縮試験の適用  
田中洋行・田中政典・K. K. Hamouche
- II-2 CPT による鋭敏な有明粘土の原位置強度の決定  
甲本達也・大塚泰孝
- II-3 サンプラー内の乱れの異なる試料を用いた原位置の非排水強度の推定  
丸山仁和・正垣孝晴・三輪和美
- II-4 ボーリング孔内での原位置摩擦試験による強度定数とその特徴  
徐 光黎・前田良刀・落合英俊・安福規之・森田悠紀雄
- II-5 落下法で評価した粘土の鋭敏比  
中山義久・西田一彦・西形達明・井上啓司・和田 格
- II-6 粘土の短期安定解析用せん断強度決定法のまとめ  
半沢秀郎
- II-7 即時沈下と変形係数  $E_{50}$   
川浦文子・白子博明・外崎 明・H. J. Liao・赤石 勝
- II-8 一面せん断による中間土のせん断特性  
岡崎圭哉・水上純一・土田 孝
- II-9 火山灰質粘性土の定体積一面せん断試験

楊 俊傑・諸戸靖史

## 【概要と討議内容】

II-1: 海外の4箇所から、我が国の標準的なサンプリング方法で採取した試料について一軸圧縮試験を行い、その結果を三軸試験あるいは現場で実施したベーン試験等と比較し、その適用性を検証している。我が国の粘性土との本質的な性質の違いとも関連するが、一部の場合を除いて一軸圧縮試験から適切に非排水せん断強度を評価することは難しいことを明らかにしている。「質疑」ドラメン粘土の15 m 以深におけるベーン試験、一軸圧縮試験の信頼性に問題はないか。「回答」15 m 付近で過圧密比が変わり、圧密降伏応力が低下しているのに加えてサクシジョンの値が小さいことが、その理由である。

II-2: 鋭敏比を考慮したコーンの貫入機構を解析して、鋭敏粘土のコーン支持力係数を導いている。これと実際に行った鋭敏粘土に対するコーン貫入試験、練返し土のコーン支持力係数ならびに鋭敏比と塩分濃度についての既往データ等を総合し、非排水せん断強度の算定式を提案している。

II-3: 供試体中の有効応力が土中の平均有効応力あるいは完全試料に等しい時、その強度を原位置強度として、これを乱れの程度が異なる試料内の残留間隙負圧～一軸圧縮強度関係から外挿して推定しようと試みている。これを実証するため、乱れの程度が異なる供試体を用意し、間隙負圧の測定を伴う一軸圧縮試験を行っている。両推定方法の結果には良い対応が認められる。

II-4: ボーリング孔壁に垂直応力を作用させ、地盤の摩擦特性あるいは地盤反力係数を測定し得る装置の試作とその適用結果を述べている。二次堆積したしらす地盤に対し、同装置を用いて求めた摩擦特性は不攪乱試料の三軸試験結果と、また同一地点で実施した場所打ち杭の載荷試験から算定される摩擦力と共に比較的良好な対応を示すことを報告している。

II-5: 鋭敏比を評価する一方の基準は練返し試料の一軸圧縮強度である。本文では攪乱の程度を表す指標に落下エネルギーを導入し、これと不攪乱試料、落下攪乱させた試料の一軸圧縮強度、変形特性を対比させている。その結果、落下エネルギーは攪乱の程度を客観的に表し、攪乱の影響は変形に強く現れることを実験的に示している。

II-6: 粘土地盤の短期安定解析に入力するせん断強度の決定法として提案されている11もの手法を紹介し、三つにグルーピングした上で、各グループの特徴を対比させつつ適用性、問題点を簡潔に取りまとめている。結論として、著者らが提案する再圧縮法に基づく方法を推奨している。「質疑」UU 試験あるいはサクシジョンの測定を伴う試験結果は原位置強度として用いられるか。「回答」一軸圧縮試験、ベーン試験は経験に基づくものでサクシジョンを測定してもあまり意味はない。また、UU 試験は一軸圧縮試験と同じである。

II-7: 一軸圧縮試験から得られる土質パラメーターの一つが変形係数  $E_{50}$  である。この変形係数を道路土工

指針に適用して、幅22.2 m、高さ10 mの盛土を粘土-砂-粘土の互層から成る厚さ24 mの地盤上に載荷した時の即時沈下量を計算し、30 cmを得た。これはFEMやその他の解析値に比べ、3倍以上の値となり、過大な結果を与えることを報告している。「質疑」非排水のFEM解析も行っているが、解析上要素間の水の流れを許容しているのか？「回答」境界だけでなく、要素同士も含めて非排水である。「質疑」 $E_{50}$ には塑性的成分が含まれ、変形を過大に評価することになる。この点をどのように考えるか？「回答」 $E_{50}$ を用いた結果は参考程度であり、これで積極的に即時沈下を評価しようとするものではない。

II-8：宮古港に分布する中間土に対し、一軸圧縮試験をはじめ4種類のせん断試験を実施してせん断強度を比較した。その結果、一軸圧縮試験を除く3種類の試験結果は同様の値となったのに対し、一軸圧縮試験から評価したせん断強度はこれら試験の50%程度の値にとどまり、一軸圧縮試験の適用に問題のあることを結論している。「質疑」宮古の中間土で得られた応力経路から判断すると、砂と同様に設計すべきと考えるが、いかがでしょうか？「回答」応力経路がすべて指摘されたような挙動であれば、砂と同じように対応しなければならない。

II-9：火山灰質粘性土のセメンテーション効果を調べるため、圧密降伏応力を挟む領域の圧密圧力レベル下で定体積一面せん断試験を行った。圧密圧力が降伏応力を超え、正規圧密状態になるとセメンテーションは消失することを実験により確かめている。

### パネルディスカッション「土質関係の基準のあり方・国際化に備えて」

司会：日下部治（東京工業大学）

パネリスト：足立格一郎（芝浦工業大学）、田中洋行（港湾技術研究所）、菅原紀明（応用地質）、森田悠紀雄（基礎地盤コンサルタント）、塚田幸広（土木研究所）

足立：日本では一軸圧縮試験が多用されており、これは運輸省の影響力の大きさによるものであろう。しかし一軸圧縮試験は日本以外では使用されておらず、国内ではそうした認識は低い。サンプリングマニュアルの国際基準化作業の折、Jamiolkowskiはunconfined compression testであると揶揄した。その意味で発注者側の規制緩和を考えるべきである。また学会基準の $K_0CU$ は従前の $CK_0U$ と混乱するのではないかと、また用語の国際整合性はどうなっているかとの疑問を持っている。（用語の決定経緯について三田地利之北大教授から説明があった。）

田中： $q_u$ とペーンなどの他の試験法の強度との関係の不明確さ、サンプリング方法の質的格差、地域での適用土質の限界などがあるとの認識を持っているが、 $q_u$ による設計法の代替案が提案されてこなかったのではな

いか。現在の運輸省では $q_u/2$ を基準に示しているが、今後強度決定に関して多様性を認めるような規制緩和の方向が望ましい。（ $N$ 値、 $q_u$ の設計法から脱却できるほど問題意識が熟していない（塚田）、もっと民間技術者の技術力を信用すべきである（足立）との対照的意見がだされた。）

菅原：現場間隙水圧計測で信頼できるデータは極めて限られており、それを用いた解析結果比較の議論には疑問が残る。電気式間隙水圧計には問題があり、この記述が中心となっている現行の地盤調査法は十分ではない。我が国では野外の調査・計測手法に関する研究者が少ない実態を認識し、広く国際的な情報を調査し、対応しないとこの分野で国際的に取り残される心配がある。国際基準としては固定化せず常に柔軟な方向性を維持すべきだ。（土圧計測も同様で、計測器とともに設置法の問題も併せて検討すべきだ（塚田）。）

基準化・国際化の話題のまえに日下部が、ヨーロッパにおけるISO, CEN（ヨーロッパ標準化委員会）、ETC（国際土質基礎工学会、ヨーロッパ地区技術委員会）での土質試験法基準の動向、アメリカでの性能設計に基づく国際建築基準の制定の動きなどを説明した。さらに我が国の対応として、工業技術院、土木学会および地盤工学会での現状について情報が提供された。

森田：設計用の土質定数決定に関する基準類の問題点として、測定値よりも基準値が重視されている、土の地域性が無視されている、マニュアルエンジニアが増大している等が挙げられる。果たして土質定数の決定に関する基準の記述が必要なのかとさえ疑問に思う。設計計算法の問題点として、建築学会で採用しているように調査の実施頻度、精度に応じて必要安全率を変えられないか検討すべきである。とにかく安くできる設計が望まれている。（土木系の基準類にはもっと背景となる解説を付記すべきである（桑原、日本工業大学）。安全に、簡便に、を目指して検討中であるが、標準設計は示したい（田中）。 $N$ 値と他の土質定数と相関式などは、実務での手助けとして参考として残したい。 $F_s$ の変更は難しいが、調査の頻度、精度が向上すれば、結果として構造物の安全性が高まる（塚田）。コンサルタントは自己責任を覚悟して設計自由度を得るべきである（足立）などそれぞれ温度差のある意見が述べられた。）

塚田：基準の国際化については柔軟にかつ積極的に対応すべきで、情報収集・解析が必要で、そこに学会の役割を期待したい。測定法、解釈の国際統一、性能設計に着目した設計・施工法の基準化、新しい技術の積極的な導入などの視点が大切である。さらに欧米のみならず、アジアとの連携の大切さも指摘しておきたい。

最後に日下部が五つのキーワード、国際整合性、性能設計（多様な選択肢）、自己責任＋地域特性、経済性をまとめとして示して終了した。

（原稿受理 1997.4.3）