

河川堤防土の三軸試験とジオ・ラボ中部への期待

名城大学 教授 小高猛司

1. はじめに

中部土質試験協同組合（ジオ・ラボ中部）が 2019 年に 40 周年の節目を迎えられましたこと、心からお祝い申し上げます。この記念誌に執筆する機会をいただきましたこと大変光栄に存じます。

2019 年は 10 月に来襲した台風 19 号によって中部以北の日本全国に甚大な被害が発生し、全国で 140 箇所以上の河川堤防が決壊しました。2018 年の平成 30 年 7 月豪雨では、27 箇所以上の河川堤防が決壊しています。もちろん河川堤防の決壊数だけで災害の大小が決まるわけではありませんけれども、私が河川堤防の研究を始める契機となった 2004 年の福井豪雨や台風 23 号の被害を上回るような災害が毎年のように発生する時代となったように思えます。そのような時代において自然災害から社会基盤を守るためには、地盤調査と土質試験がますます重要となっているはずなのですが、果たして世の中はそうなっているのか、不安に思うこともしばしばあります。そのようなご時世の中、ジオ・ラボ中部をはじめとする土質試験業界への期待を込めつつ、私が研究によく使う三軸試験をひとつの題材として、昨今の研究や今後の土質試験について、徒然なるままに書かせていただきたいと思います。

2. 河川堤防土の三軸試験との出会い

私と三軸試験との関わりは、2019 年にジオ・ラボ中部の顧問に就任されました浅岡顕先生の研究室の 4 年生生として卒業研究を始めたときに遡ります。博士課程を経て大学教員の職を得て以降、いくつかの大学を転々として現在の名城大学に赴任するまでの間、私は研究ツールとして一貫して三軸試験を使ってきました。しかし、三軸試験が地盤構造物を設計するために実務で使われているポピュラーな試験であることはほとんど意識になく、数値解析に用いるパラメータの設定であったり、複雑な現象のメカニズムの説明であったりと、本来の実務とはやや離れた立場で三軸試験を用いてきました。もちろん、難しい実問題の解明が目標なので実務と無関係とまでは言いませんが、コンサルタントやゼネコンの皆さんが照査や設計で使うために行う三軸試験とはやはり異なります。そのため、2009 年版の地盤工学会編「地盤材料試験の方法と解説」（いわゆる赤本）の三軸試験の部分の編集メンバーに名前を連ねていながらも、自分の研究で実施している三軸試験に関しては、学会基準の試験方法や試験条件などを気にしたことはほとんどなく、実務で行う三軸試験は別世界の試験とさえ思っていました。それとも関連して、三軸試験で求める強度定数 c , ϕ などは、試験条件で変わりうる見かけの数値であり、研究の題材として取り上げること自体がナンセンスとさえ思っていました。それもそのはずで、私が生まれた頃にはすでにカムクレイモデルは存在し、私が学生の頃にはカムクレイモデルをベースにした圧密変形解析コードが普及しかけており、私の博士論文でもやはりカムクレイモデルを使って浸透破壊を含む地盤の破壊を予測する数値解析の研究をしていたのですから、モールの応力円やそれから求める強度定数などは過去の遺物？であり自分とは無縁なものと思っていた。そのような世間知らずの私にも、ちょうど 40 才の 2006 年に名城大学に赴任して、河川堤防の強度特性に関する実務的な研究を始めたことによって転機が訪れました。

実務的な側面からの河川堤防土の三軸試験は、生涯の共同研究者となる畏友・李圭太氏（当時：建設技術研究所、現在：日本工営）に半ば強引にはじめさせられたという方が正確かもしれません。李氏とは、名城大学の前任校の京都大学時代の 30 代前半に、同時期に地盤工学会関西支部の総務幹事をやった縁で知り合いました。そのためかれこれ 20 年のお付き合いですが、一緒に研究を始めたのは、私が名城大学に赴任してからです。世間知らずだった私はずいぶん後になってわかったのですが、李氏は相当特殊な部類の建設コンサルタントであり、自身が関与する現場の地盤調査時には現場に張り

つき、ボーリングオペレーターにも遠慮せずに指示を出して陣頭指揮をします。そのようなエンジニアはよそにもいるかもしれませんが、李氏の特殊性はそれにとどまりません。現場で遭遇した自分が知りたいことや納得のいかないことなどを、業務と切り離れた自主研究で解決しようとしします。それにまんまと巻き込まれたのが、名城大学に赴任して、おそらく暇そうに見えた私です。最初は、李氏が当時業務で関与していた山陰地方の山間河川で採取した礫質土が、大量に実験室に運び込まれてきました。礫質堤体土の強度定数の適正な求め方が研究テーマになるわけですが、そもそも李氏の会社が請け負う本業務ではないので、研究資金があるわけでもありません。そのため、どのように研究をすすめるか考えた末に、厚かましくも頼らせていただいたのがジオ・ラボ中部です。最大粒径 50mm 程度の礫質土であったので、大型三軸試験をやらせてもらえないかと専務理事の坪田邦治氏に相談しました。今だからジオ・ラボ中部の組合員の皆さんに言えることですが、供試体は学生が作るの試験はすべて無償でお願いしますという、今思えば無茶苦茶な依頼です。しかし、快く引き受けていただき、しかも、密度や試験条件をいくつも変えて相当な数にのぼる大型三軸試験をやっていただきました。原粒度の大型三軸試験はジオ・ラボ中部で、粒度調整試料の小型三軸試験は名城大学で実施するという体制で沢山の試験を行い、河川堤防土の強度定数を三軸試験で求めるための粒度調整法や排水条件などについて、ジオ・ラボ中部の坪田邦治氏、加藤雅也氏と連名で論文をまとめました¹⁾。その論文は思いもかけずに 2011 年に平成 22 年度地盤工学会論文賞(和文部門)をいただくのですが、実はその前々年の 2009 年の地盤工学シンポジウムにて 2010 年の論文の前身となる論文を発表していたのですが、その論文も地盤工学シンポジウム論文賞(今はなくなりました)をいただきました。それが、ジオ・ラボ中部 30 周年記念誌にて私が紹介した研究です。もちろん、ジオ・ラボ中部と合同で受賞したことの報告を兼ねてここで紹介しているのですが、実は私にとってこれらの受賞は大きな驚きでした。正直なところ、三軸試験の結果をモールの応力円を描いて求めた強度定数がどうのこうのという論文に、私自身がそれほどの学術的な価値を見いだしていなかったもので、まさか他の誰かがそれを評価してくれるとは全く期待していませんでした。そのため、この論文賞をきっかけとして、私自身の中で実務に直結する研究についての考えが大きく変わるとともに、半ば強引にこの分野の研究に私を引きずりこんでくれた李氏の研究センスを改めて見直す機会となりました。

3. 河川堤防土の強度定数を求めるための適正な試験条件

河川堤防土の力学特性を検討する研究を一層進めるにあたって、結局は自分たちで試料採取からしなければならぬことに行き着き、私と李氏は、全国の河川堤防において機会ある毎に自前でのサンプリングをしました。2012 年に国土交通省の河川砂防技術研究開発公募・河川技術分野に採択されて、小高代表、李副代表の体制で 6 年間継続できたことが研究に弾みをつけました。表 1 は、私と李氏で現地調査を行った全国の河川堤防です。三軸試験用の試料採取を基本として、現場透水試験や物理探査も実施してきました。この表の現場の中には、国立研究開発法人土木研究所の石原雅規氏と共同で開削調査した事例が多くあります。その最初が 2013 年 12 月の千歳川での試料採取ですが、雪の舞う北海道の極寒の堤防開削面によじ登り、日没時間と戦いながら泥だらけで格闘して自ら試料採取した経験が、その後の我々の調査スタイルを決定づけました。それから現在に至るまで、調査できるところにはとにかく行って、自ら試料採取をしています。

数多くの河川堤防土の三軸試験を行い、強度定数を決定するための試験条件、試験方法について考えているうちに、実際に照査、設計する実務の現場においてすら、試験条件についての理解が十分でないことを痛感するに至りました。ただし、私たちも研究を進めるにつれて理解が進んできたことなので、仕方がないことなのですが、それにしても安易な試験条件の設定があまりに実務に蔓延してい

るように思います。端的な例が、粘性土は UU 試験や CU 試験、砂質土は CD 試験という仕分けです。これは河川堤防に限らず、盛土の設計でも使われる試験条件です。しかし、洪水時の河川堤防や豪雨時の盛土斜面のように、水が浸潤することによって有効応力が低下してすべり破壊が発生するような事例においては、細粒分の多さだけで c 材と判断して UU や CU 試験で強度定数を決定したのでは、過大な安全率を見込む危険側の評価につながります。一方、透水性の高い砂質土との前提で CD 試験をしたのでは、ゆる詰め砂であれば排水せん断中の高密度化によって過大な内部摩擦角を得ることになり、有効応力が低下しながら低ひずみレベルで発生する浸透時のすべり破壊においては、危険側の評価に結びつく可能性があります。

結論として、河川堤防土に対する適切な試験条件は、地盤工学会基準の条件に限定すれば、全ての土質において

$\overline{CU}$ 試験をすべきです。もちろん、全応力解析における $\overline{CU}$ 試験による強度定数で推定するせん断強さは排水せん断強さの代用ですが、せん断中に密度変化が生じる CD 試験とは異なり、実河川堤防の現状の排水せん断強さを評価するのに適しています。しかし、堤体の浸透時のすべり破壊は、低有効応力条件において発生するため、特に密詰め砂質土や砂礫土、あるいは過圧密傾向の強い粘性土の $\overline{CU}$ 試験は、高有効応力、高ひずみレベルで強度定数を決定することになり、危険側の判定につながる場合もあります。それを回避するために推奨するのは、 $\overline{CU}$ 試験において変相時の有効応力を用いて強度定数を決定する方法です。変相状態は元の土の構造が大きく変化する状態であり、堤防のすべり破壊は低有効応力、低ひずみレベルで発生することから、土の骨格構造が変化する変相状態でせん断強さを評価することは合理的です。ただし、粘性土堤体や礫質土堤体のせん断強さを過小評価する場合もあります。その解決には、一歩踏み込んだ新たな試験法である吸水軟化試験²⁾が有効です。

吸水軟化試験は、堤防法面付近での浸潤時の有効応力低下を模擬する特殊な三軸試験です。まず、排水せん断で所定の異方応力条件にした後、軸差応力を一定に維持して間隙水圧を徐々に上昇させて供試体を破壊に至らしめます。対象土の骨格構造が急激に変化しはじめる有効応力条件を精密に探索し、浸透条件下での破壊条件を正確に把握します。なお、破壊に至る直前まで、間隙水圧を上昇させても供試体内への吸水も軸ひずみの増加もほとんど発生しませんが、ある有効応力状態に到達した途端に急激に軸ひずみが発生して破壊に至ります。この吸水軟化試験は通常の砂質堤体土にももちろん適用すべきですが、特に粘性土や礫質土において大きな威力を発揮します。例えば、細粒分含有率が卓越した粘性土堤体土に適用すると、浸透時には粘着力が全く期待できなくなる土と、逆に c 材として評価してよい本当の粘性土を見分けることができます。一方、礫質土堤体はゆる詰めであることが多く、通常の $\overline{CU}$ 試験で得られる強度定数は非常に小さくなりますが、実際の礫質土堤防が法すべりを起こした事例は少なく評価が難しいのが実情です。しかし、吸水軟化試験では低有効応力条件下での礫質土固有のせん断強さを評価することが可能となります。学会基準の試験法ではありませんが、河川堤防の浸透すべり破壊を評価するための試験法として、実務での使用を推奨したいと思います。

4. ジオ・ラボ中部の技術者への期待

吸水軟化試験については、2019 年 10 月に台湾台北市で開催されました国際地盤工学会第 16 回アジ

表 1 実施してきた現地調査

島根県・高津川 (2007.9)	礫・砂
島根県・江の川 (2007.9)	礫・砂
鳥取県・小鴨川 (2008.9)	礫・砂
大阪府・淀川 (2012.2)	砂・粘
高知県・仁淀川 (2013.9)	礫
北海道・千歳川 (2013.12)	砂・粘
愛知県・庄内川 (2014.1)	砂・粘
島根県・斐伊川 (2014.3)	砂
和歌山県・紀の川 (2014.4)	礫
大阪府・大和川 (2014.8)	砂・粘
新潟県・信濃川 (2014.9)	礫
京都府・木津川 (2014.11)	砂
山梨県・釜無川 (2014.12)	礫
鹿児島県・川内川 (2015.1)	砂 (シラス)
宮城県・渋井川 (2015.11)	砂・粘
秋田県・子吉川 (2016.1)	礫・砂・粘
石川県・梯川 (2016.6)	砂・粘
岡山県・小田川 (2016.9)	礫・砂
熊本県・緑川、白川 (2016.11)	砂・粘
高知県・物部川 (2017.2)	礫
青森県・二ツ森川 (2017.2)	砂・粘
愛知県・犀川 (2018.2)	粘
岡山県・小田川 (2018.11,12,2019.3)	砂・粘
※礫：礫質土、砂：砂質土、粘：粘性土	

ア地域会議において、ジオ・ラボ中部職員の久保裕一氏が発表しました。ネイティブ仕込みの本格的な英語でのプレゼンに加えて、質疑応答にも堂々と英語で対応され、ジオ・ラボ中部のレベルの高さを海外でも示されました。久保氏にはこの数年にわたって名城大学の非常勤講師として学生指導に従事していただいておりますが、それだけではなく私の研究室においてはもはや欠くことのできないスタッフでもあります。久保氏には、吸水軟化試験をはじめとする河川堤防土の研究や粘性土の動的性質に関する研究において、現場調査も含めて参加いただいております。私が久保氏に研究パートナーをお願いしているのは、久保氏の向学心によるところがもちろん大ですが、久保氏のような土質試験エンジニアが、我が国の土質試験の最後の砦だと思っているからです。

現在の実務における土質試験は、発注者からいくつかの段階を経て依頼されます。その際、特に力学試験においては試験条件が提示されるのはもちろんですが、場合によっては一目で乱れが多いとわかる試料であっても、無理して試験結果を出すことが期待されることもあるでしょう。その際、職人としてはクライアントの依頼事項を忠実に叶えるようにベストを尽くされると思いますが、もし実施する試験条件や供試体が適切でなければ、土質試験のプロフェッショナルとしてクライアントに意見できる知識と経験が土質試験エンジニアには必要不可欠です。三軸試験のやり方や、試験条件の知識も十分ではない発注者や建設コンサルタントの方が増えている現状では、実際に土質試験をする試験業界の方々が土質力学の高度な知識を十分に持たなければなりません。結果のばらつきだけで土質試験の技能を規定し、試験業者が単なるテクニシャンとしての地位を確立しようとするのは、自らの首を絞める愚行以外の何者でもありません。ジオ・ラボ中部は、我が国の土質試験業のリーディングカンパニーとして、土質試験の真のプロフェッショナルを輩出し続ける使命があります。

5. 今後の土質試験の行方

現行の河川堤防の耐震性能照査指針では、FL 値の算出に用いる繰返し三軸強度比は N 値と細粒分含有率から算定しますが、これは土質試験の信頼性が低いと判断されているからに他なりません。すべての力学試験がこの例のように「実施しない」ことが推奨されるようになるとは思いませんが、土質試験がその信頼性を理由に縮小されていく時代が来ることは簡単には否定できません。河川堤防の現場ではありませんが、どう見ても乱れによって強度を過小評価しているのではないかと思える土質試験結果をよりどころとして、オーバースペックな対策工の設計がなされたり、試験条件を深く考えずに発注した土質試験結果で設計されたりした事例を見る機会もあり、土質試験に対する危機感はいちの中で増えるばかりです。地盤工学の高度な専門知識を持って、照査や設計の中身を熟知した上で土質試験を実施する土質試験エンジニアが、信頼性の高い土質試験結果を提供してゆくこそが、これからの世の中で重要になります。

ジオ・ラボ中部が 50 周年を迎える時には、土質試験エンジニアの地位がさらに向上し、付加価値の高い土質試験がなされている世の中であってほしいと願っております。

参考文献：

- 1) 小高猛司, 板橋一雄, 中島康介, 牧田祐輝, 李 圭太, 上村俊英, 坪田邦治, 加藤雅也: 河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp. 193-205, 2010.
- 2) Kubo, Y., Kodaka, T., Lee, K.-T., Ishihara, M. and Nakayama, Y.: Shear strength evaluations of river embankment soils under low confinement pressure using water absorption softening test, Proc. of 16ARC, JPN-048, 2019.