

ため池堤体改修における地盤調査の在り方

キタイ設計(株)・(株)アスカソイルコーナー 奥野日出

1. はじめに

老朽ため池は全国に21万箇所あり、この内整備の必要なため池は2万程度あると言われている(全国土地改良事業団体連合会,1999)。また平成15年度発生した台風に伴う豪雨によるため池堤体の決壊被害は近畿圏だけでも数千箇所におよび、今後は灌漑目的以外の利活用も加え、改修事業が増進されることが大いに予想される。

本稿では、堤体の部分改修や決壊補修において、筆者が近畿圏のため池堤体46箇所の地盤調査を行った分析・評価の見解より、堤体の安全かつ合理的な実施設計を行う上での地盤調査の在り方について述べる。

2. 堤体の安定形状と着目すべき土質構成について

ここでは、河川法の定義に基づくものではなく便宜的に、堤高15m以上を「アースダム」、15m以下を「ため池堤体」と呼び、アースダムの構造は傾斜型、中心型遮水等のゾーン型に設計されるが、旧ため池堤体では均一型とゾーン型とに区分される。

この区分は図-1に示すため池堤体46箇所の堤高と頻度より、明らかなゾーン型構造は堤高9m以上が5箇所、6mが1箇所あり、他は均一型が大半を占め、嵩上げにより水平方向に複層をなしているものが2箇所あった。

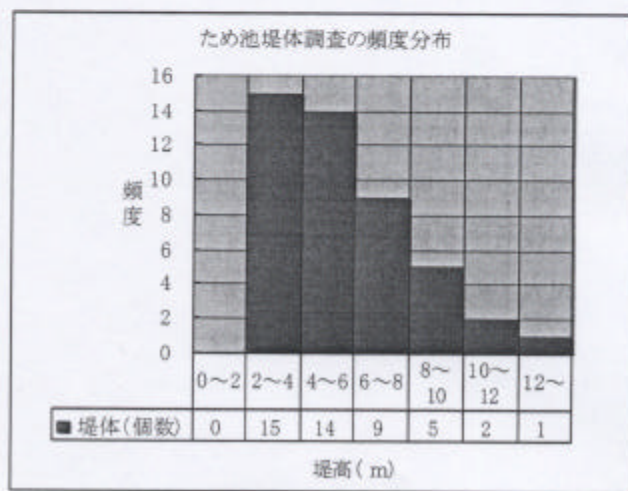


図-1. ため池堤体の堤高と頻度

均一型堤体は遮水性を重視した粘性土材料(以下「C材」と呼ぶ。)のみで築造され、特に堤高の低い堤体に多い。またC材堤体において法面変状の見られない健全度の高い堤体は堤高5m以下でしかも数多くあり、明らかに法面変状の見られた堤体は堤高6m以上で2箇所、すべり崩壊のあったところは堤高10mで1箇所あった。

このことは技術仕様のなかった旧堤体の築造時では人力によるため、規模の小さい堤体が多かったことや嵩上げ技術が不十分であったことから堤高の高い堤体を築造することが困難であり、また嵩上げ時に変状や崩壊が生ずることもあったのではないかと考えられる。

一方、堤高15m以上となるアースダムの築造においては通常C材均一型の設計を行うことはなく、礫・砂を主体とする粗粒土材(以下「φ材」と呼ぶ。)をランダム部に用いる。また堤高

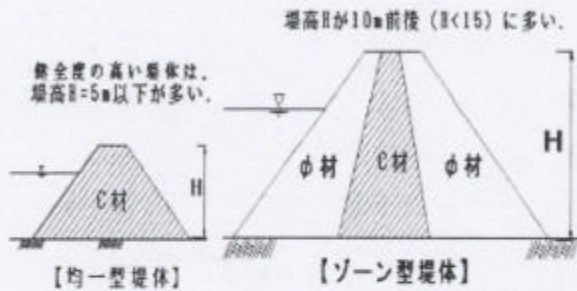


図-2. 堤体の構造と堤高との関係

10 m前後のため池堤体でも先に示した調査結果より、アースダムの設計仕様に準じてゾーン型を用いていた(図-2)。

すなわち、堤体の土質構成と堤高との関係により、旧堤体構造の目安や安全度が把握できると考えられ、このことを堤体の地盤調査及び土質試験結果と法面安定解析から次に考察する。

3. 旧堤体の調査結果と法面安定解析^{1), 2), 3), 4), 5)}

(1) 地盤調査及び土質試験の結果

C材からなる均一型堤体は堤高5m前後の小規模なものが数多く調査箇所約75%を占め、土質試験を行った箇所についての粒度組成、コンシステンシーの特性は図-3に示される。

尚、C材は液状化地盤の判定において、「細

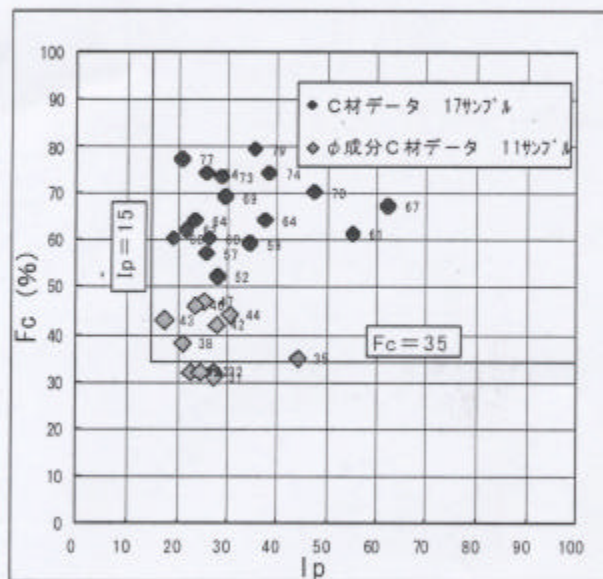


図-3. ため池堤体土質のFc, Ip分布

粒分含有率 $F_c > 35(\%)$ であっても塑性指数 $I_p < 15$ なら液状化対象土質とする。」の逆を便宜上採用してφ材と区分し、また概ね $F_c > 50(\%), I_p > 15$ の土質をC材、 $50 > F_c > 35(\%), I_p > 15$ のそれをφ成分を含むC材と細区分している。²⁾

またC材試料の透水性については、ひび割れや漏水箇所を除いた健全部において現場及び室内透水試験結果から透水係数は $k < 1 \times 10^{-5}(\text{cm}/\text{sec})$ を示し、堤体の止水機能は満足されている。

(2) 円形すべり面法による法面安定解析

図-3に示したC材堤体の中から変状の認められない健全な箇所での安定解析結果について述べる。

解析事例は堤高2~5m常時満水時の条件にて図-4に示すように、前法面(貯水側)と後法面(堤外側)について行った。

解析する際の地盤定数は、堤体から不攪乱試料を採取して三軸圧縮試験(CU条件)を行い、浸潤面下のせん断定数を下記のように定めた。

・Ccu法(全応力表示)を用いる場合

間隙水圧を含んだせん断強度で粘着力 C_{cu} (kN/m^2)、内部摩擦角 $\phi_{cu} = 0$ を用いる。

ここに、 C_{cu} は地中内応力分布を考慮する(図-4)。

・C'・φ'法(有効応力表示)を用いる場合

間隙水圧を排除したせん断強度で粘着力 C' (kN/m^2)、内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$) を用いる。



図-4 堤体浸潤面下の応力(σ)分布図⁵⁾

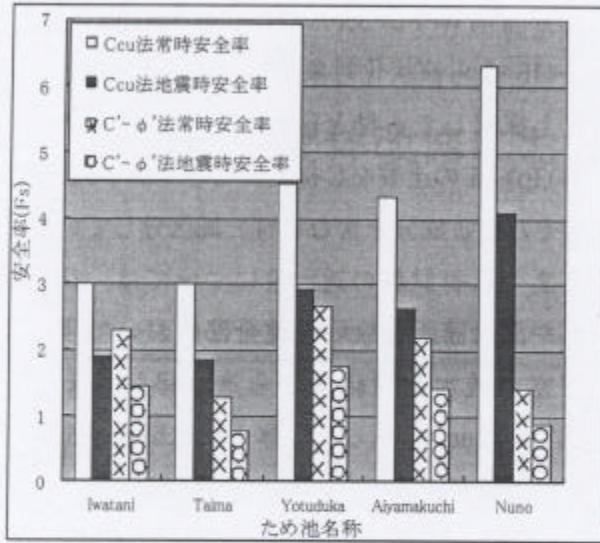


図-5. C材堤体前法面のCcu法, C'-φ'法の比較検討図

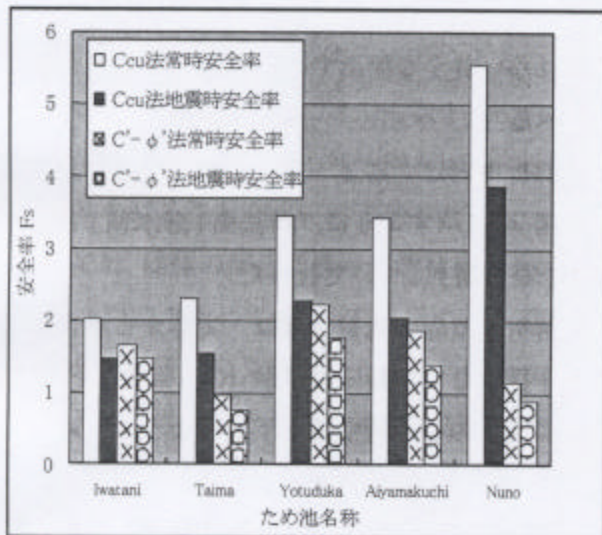


図-6. C材堤体後法面のCcu法, C'-φ'法の比較検討図

また浸潤面上では不飽和せん断強度 C_u, ϕ_u を用いた。

尚, 円形すべりスライス法の計算式は「土地改良事業計画設計基準, 設計ダム」及び「土地改良事業計画設計指針, ため池整備」を参照されたい。

解析結果は図-5, 図-6 に示すとおりであり, 各堤体では近況地震(阪神・淡路1995年, 鳥取県西部2000年)の影響を受けたことに対しても健全度を保っていることから, 最小安全率を得るすべり面において地震時安全率 F_{se} が1以上とならねば現況と矛盾し, また合理的な改

修設計に繋がらない。

図-5, 図-6より, 最も低い安全率が得られる堤体(Taima)の結果をみると, Ccu法の場合($C_u=33.6 \text{ (kN/m}^2\text{)}, C_{cu}=12.5 \sim 30.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$)は, 前法面で $F_{se}=1.83$, 後法面では $F_{se}=1.55$ となり, 現況評価と矛盾することはない。

一方, 同堤体におけるC'-φ'法の場合($C'=1.3 \text{ (kN/m}^2\text{)}, \phi'=31.8 \text{ (}^\circ\text{)}$)では, 前法面 $F_{se}=0.77$, 後法面では $F_{se}=0.73$ となる。しかも後法面は平常時においても $F_s=0.99$ となり, C'-φ'法では健全度を保っている堤体に対してすべりを起こす結果となっている。

また解析結果全般にC'-φ'法では, Ccu法よりも低い安全率を得ており, この結果を実施設計に用いると, 地震時安全率 $F_{se}>1.2$ をクリアするまで法面勾配を緩くしなくてはならず, 施工量が増えて不経済となると共に前刃金や押さえ盛土等の施工が加わると堤体断面が元よりも大きくなるため, 敷地境界や確保すべき貯水量にも問題が生じることになろう。

(3) C材堤体の限界高さについて⁵⁾

粘性土法面に関する限界高さは, Taylorの安定図表に示されようによく知られている。

筆者らはこのTaylor理論を応用して, 次式(1)に示すC材堤体の健全度を把握するための安全強度比 F_{sc} を定義した。

$$F_{sc} = C_{cu} \cdot (N_s/H) / \gamma_{sat} \quad (1)$$

ここに,

F_{sc} : 安全強度比

$C_{cu} \text{ (kN/m}^2\text{)}$: 堤高 $1/2H$ の有効土被り圧に対する非排水せん断強度

N_s : 安定係数(Taylorの安定図表で斜面先破壊に対応, $\phi=0$)

$H \text{ (m)}$: 堤高

$\gamma_{sat} \text{ (kN/m}^3\text{)}$: 堤体の飽和単位体積重量

である。

また(1)式において、 N_s/H は安全強度比 F_{sc} に及ぼす重要なパラメーターとなり、堤高 H が高いほど F_{sc} が小さくなるため、いかに材質の良いC材を用いて良好な締固め施工を行ったとしても法面安定に対する限界高さが求まると考える。

次に図-6に示したCcu法による円形すべり面法から得られた最小安全率 F_s, F_{se} と安全強度比 F_{sc} を安定係数/高さ比(N_s/H)との関係について図-7に示す。

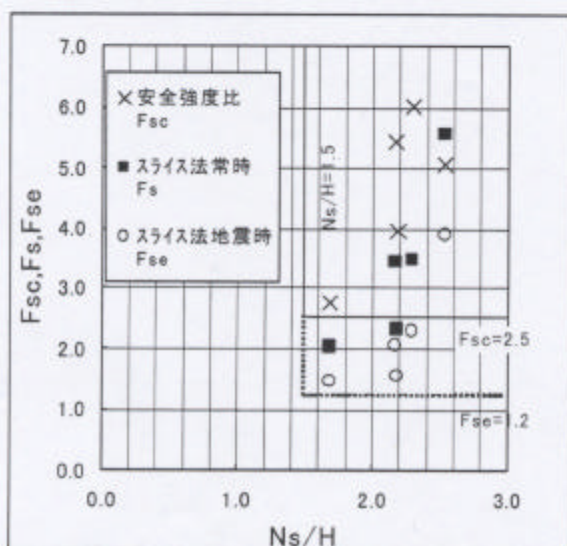


図-7. C材法面の安定係数/高さ比(N_s/H)と安定解析結果(F_s, F_{se}, F_{sc})との関係

図-7に示す堤体では堤高5m以下であり、 $N_s/H > 1.5$, $F_{sc} > 2.5$ となり、また円形すべり計算では地震時安全率 $F_{se} > 1.2$ が得られる。

従って、堤体断面の形状(H, N_s)と地盤定数 C_{cu}, γ_{sat} の入力により F_{sc} を求めれば、Ccu法による F_{se} の目標安全率が得られるかどうかを把握することができる。

一方、 $N_s/H < 1.5$, $F_{sc} < 2.5$ の時は堤高が5m以上となり、また強度不足も考えられ、 F_{se} の目標安全率が得られないことや堤体に変状が見られたりすることがあり、また過去にすべり

崩壊を起こしたことがあるのかも確かめる必要がある。

ちなみに、筆者が調査した堤高10mのC材堤体ではすべり崩壊の履歴があり、 $F_{sc} = 2.34$ ($C_{cu} = 75$ (kN/m²))となった。また、高さ8mのC材盛土法面においても $F_{sc} = 1.38$ ($C_{cu} = 27.5$ (kN/m²))となり、築後3年でクリープすべり崩壊を観察した。

以上のように、C材均一型堤体においては堤高に着目して調査、試験を行い、(1)式を併用した法面安定解析を行うことが望まれる。

4. 今後の地盤調査の在り方について

(1) 調査位置の選定と調査深度について

堤体改修設計を行うには調査ボーリングが必要であり、その位置と調査深度は図-8のようにため池整備指針に示されている。すなわち、前法面1、堤頂部2、後法面3の位置で基礎地盤は層厚5mあるいは堤高としている。

以下には調査位置やその深度が法面安定解析や設計を行う上で不都合にならないよう、留意すべき点を幾つか述べる。

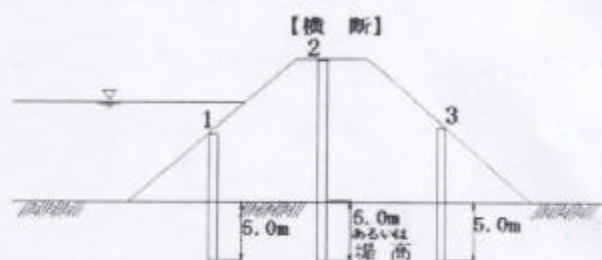


図-8. 調査ボーリングの位置選定

・調査位置について (堤体の土質構成の把握)

旧堤体は必ずしも均一型とは限らず堤高に着目しなくてはならない。特に堤高が5m以上の場合は、嵩上げやゾーン型の可能性があることから、図-8のとおり1,3位置のボーリング調査は法面中央から離さないことが望ましく、か

つその調査を省いてはならない。

・調査深度について(基礎地盤の把握)

ため池整備指針ではN値20以上の支持地盤を把握することを原則としているが、層厚5mの調査で支持地盤がなかったり、不透水層の深度に達しないこともあり、解析・設計条件が満たされる深度まで調査を延長することが必要である。

(2) サンプリングについて(地盤定数の把握)

堤体の均一型、ゾーン型構造に従い、各々の地盤定数の把握に必要なサンプリングを各ボーリング地点で行う必要があるが、C材、 ϕ 材共に大礫による採取が困難な場合を除き、不攪乱試料を採取することが望まれる。

また基礎地盤についても同様と言える。

(3) 漏水箇所や底樋、余水吐け付近の調査について

底樋、余水吐け付近は肉眼で分からない漏水箇所もあり、調査ボーリングの孔内を利用して、現場透水試験を行い透水性を把握する必要がある。

(4) 安全かつ合理的な実施設計のために

ため池堤体改修時の整備指針では、堤体の土質に関わりなく、堤体の完成直後以外は有効応力表示による解析手法(C'- ϕ '法)に基づいている。¹⁾

C'- ϕ '法は法面の長期安定性を評価する上で安全性の高い手法として地すべり斜面などの安定解析に広く一般に用いられているが、C材から構成される法面においてC'- ϕ '法を用いてすべり計算を行うと、健全な堤体法面での平常時安全率が1以下となり不合理な改修設計に導かれることや限界高さが考慮されないため、設

計時には危険な法面評価を招く恐れがあると判断される。⁵⁾

そこで筆者は、下記の土質区分の目安に従い、均一型旧堤体の地盤定数を設定することを提案する。⁴⁾

・ $F_c > 50(\%)$, $I_p > 15$ の場合(C材堤体対象)

せん断強度定数は圧密・非排水条件で求めた粘着力 C_{cu} (kN/m^2)、内部摩擦角 ϕ $cu=0$ を用いる。

また、前式(1)を用いて安定係数/高さ比(N_s/H)から安全強度比 F_{sc} を求めておくことを進める。

尚、調査解析結果より、堤高が5m以下の場合には限界高さの観点から健全度の高い安全率が得られている。

・ $35 > F_c > 5(\%)$ の場合(C成分を含む ϕ 材堤体対象)

せん断強度定数は圧密・排水条件で求めた粘着力 C' (kN/m^2)、内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$)を用いる。

・ $50 > F_c > 35(\%)$, $I_p > 15$ の場合(ϕ 成分を含むC材堤体対象)

この土質区分は良好な締固め状態であれば遮水性があり、せん断強度がC材よりも大きく得られるため、堤高が5mより高い堤体であっても変状やすべり崩壊がみられないことが多い。

しかしながら、法面安定解析時のせん断強度定数を C_{cu} 法($cu=0$)、C'- ϕ '法のいずれを用いても現況と妥当性のある結果が得られないことが多い。

筆者は、 ϕ 成分を含むC材堤体の安定解析では応力-ひずみ曲線の微小レラクゼーションの発生状況を考慮して C_{cu} 法($cu=0$) + $\Delta\phi'$ 法と名付けた解析式³⁾を提案しているが、公用

には至っていない。

従って、現時点で変状やすべり崩壊のない堤体では、 C_{cu} 法 ($c_u=0$)、 $C'-\phi'$ 法のいずれかを代用して安全側に設計することが望まれる。但し、限界高さを前式(1)により判定しがたいため、抑え盛土のない嵩上げ改修は避けるべきと考える。

謝辞：本技術寄稿を作成するにあたり、ご指導を賜りました大阪府立大学大学院生命環境科学研究科小山修平教授に厚く感謝申し上げます。

<引用文献>

- 1) 土地改良事業設計指針「ため池整備」：平成12年2月農林水産省監修社団法人農業土木学会発行
- 2) 奥野日出, 他2名(2003)：老朽ため池堤体の改修に関する合理的設計手法の提案, 全国地質調査業連合会技術e-フォーラムさいたま講演会, 論文No.87
- 3) 奥野日出, 小山修平(2004)：老朽ため池堤体の改修に関する合理的設計手法の提案その2, 平成16年度農業土木学会大会講演会(札幌), p.434-435
- 4) 奥野日出, 小山修平(2005)：老朽ため池堤体の改修に関する合理的設計手法の提案その3, 平成17年度農業土木学会大会講演会(岐阜), p.870-871
- 5) 奥野日出, 小山修平(2005)：主として細粒土から構成された盛土斜面の安定解析手法の提案, 平成17年度地盤工学会研究発表会(北海道), p.1359-1360

