

(仮) 既設ため池耐震照査に係る土質調査の事例

高嶺 哲夫¹・我那覇 忠男¹・與那嶺 昇¹・田場 邦男¹・宮城 正¹・〇城間 保¹

¹(株)ホープ設計 (沖縄県那覇市首里赤田町3丁目5番地)

キーワード：ため池等土構造物の耐震照査、原位置試験、繰返し載荷+単調載荷試験

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（東日本大震災、2011）では、東北から関東地方にかけて未曾有の、また、多種多様の被害が発生した。その中でも、東北3県（岩手、宮城、福島）では、ため池総数約12,500ヶ所の内、約2,000ヶ所が被災し、特に福島県内では3ヶ所のため池の決壊によって貯水が下流の住宅にまで達して甚大な被害が発生した。そのため国土強靱化事業により全国各地のため池を対象に耐震性能照査が進められているところである。沖縄県でも既存のため池を対象に耐震性能を照査し、耐震性能が確保されていないため池については、耐震補強の検討が実施されている。

本稿では、沖縄本島北部に位置する既設ため池に対してレベル2耐震性能照査に係る土質調査事例を紹介する。

2. 調査概要・目的

当該ため池は、過年度に簡易ニューマークD法を用いて、耐震照査が実施されたが、ため池堤体のすべり変形に伴う最大天端沈下予測量は許容沈下量を上回る結果となり、旧堤体材料の強度低下特性の評価が課題と

なった。そのため、本調査は、過年度土質試験結果及び本件にて実施した土質調査結果を基に、詳細ニューマークD法の耐震照査に必要なデータを得るため、農村工学研究所「ため池堤体材料の強度試験仕様書（案）」に基づいて実施した「繰返し載荷+単調載荷試験」について、その試験方法及び試験結果を報告する。

3. ニューマークD法

1) 定義

ため池等の土構造物の大規模地震時の耐震性を適切に診断・評価するためには、締固めの良否に伴う地震時による堤体土の強度低下を考慮する必要がある。ニューマークD法は、滑動変位量の算定法に加え、非排水繰返し載荷による経時的な強度低下特性を累積損傷度理論（地盤材料の累積ひずみ特性によりせん断剛性の低下を考慮し、繰返し荷重載荷時の地盤構造物の弾塑性変形を推測する理論）によって適切に評価して地震時のすべり変形を算定する手法である。

2) 種類

ニューマークD法には、①詳細ニューマークD法と、②詳細法を簡易化したSIPニューマークD法（以後、簡易ニューマーク

6. 耐震性能照査に必要な土質試験

1) 耐震性能照査に必要な土質試験項目

表-2 にレベル2地震動に対する耐震性能照査に必要な土質試験を示す。

凡例： 過年度実施
 本年度実施

表-2 耐震性能の照査に必要な土質試験項目²⁾

試験項目	試験規格	築堤材料	現況堤体	基礎地盤	備考
土粒子の密度試験	JIA A 1202	○	○	△	○：必ず実施する。 △：必要に応じて実施する。
粒度試験	JIA A 1204	○	○	△	
含水比試験	JIA A 1203	○	○	△	
液性限界・塑性限界試験	JIA A 1205	○	○	△	
現場密度の測定	JIA A 1214 他	—	○	—	
突固めによる土の締固め試験	JIA A 1210	○	○	—	
透水試験	JIA A 1218	○	○(現場)	△	
三軸圧縮試験	JGS 0524 他	○	○	△	
圧密試験	JIA A 1217	△	△	△	
繰返し三軸試験(変形特性)	JGS 0542	△	△	△	
「繰返し+単調載荷試験」	JGS 0541	△ ^{注)}	△ ^{注)}	△	
	JGS 0523	△ ^{注)}	△ ^{注)}	△	

注)：妥当な強度低下モデルがない場合に実施

表-2の土質試験のうち、地震時の非排水繰返し載荷による、ため池堤体材料の強度低下特性を求める試験は、「純単調載荷試験(三軸圧縮 CUB 試験)」と「繰返し+単調載荷試験」の2種類に分けられる。

2種類の土質試験のうち、「純単調載荷試験(三軸圧縮 CUB 試験)」は、過年度業務で実施されている。一方、「繰返し+単調載荷試験」は、当該ため池において地震時の繰返し荷重により強度低下が想定された(過年度の土質試験において盛土の締固め度D値90%以下であった)旧堤体材料を対象に行った(図-2参照)。

2) 試験方法

「純単調載荷試験(三軸圧縮 CUB 試験)」と「繰返し+単調載荷試験」の試験方法の概要を以下に示す。

①純単調載荷試験(三軸圧縮 CUB 試験)

「土の圧密非排水(CUB)三軸圧縮試験方法(JGS0523)」に準拠し、飽和した供試体に対して有効圧密応力が異なる複数の試験を実施することによって、繰返し載荷の影響のない状態の強度定数(内部摩擦角および粘着力)を求める(表-3に示す供試体No.1~No.3)。

②繰返し+単調載荷試験

本試験は、i)地震動によって生じる非排水繰返し載荷過程で増加する損傷を算出する試験(液状化試験：供試体4本)と、ii)損傷の増加に伴って継続的に低下する非排水強度を算出する(繰返し載荷+単調載荷試験：供試体4本)の2種類の試験で構成されている。

表-3 室内せん断試験一覧

	供試体 No	試験概要	σ'_c	SR	ε_D	取得する強度低下特性	
通常の三軸 Cub 試験	1	純単調試験(三軸 Cub試験)	σ'_c-1	-	-	ϕ_{cu}, C_{cu}	
	2		σ'_c-2	-	-		
	3		σ'_c-3	-	-		
液状化試験	4	繰返し+単調载荷試験	σ'_c-1 or σ'_c-2	SR-1	10%程度	SR-N関係	
	5			SR-2			
	6			SR-3			
	7			SR-4			
繰返し载荷+単調载荷試験	8		繰返し+単調载荷試験	σ'_c-1 or σ'_c-2 or σ'_c-3	SR ₂₀	ε_D-1	$\phi_{cuD}-\varepsilon_D$ 関係
	9					ε_D-2	
	10					ε_D-3	
	11	ε_D-4					

※ σ'_c : 有効圧密応力、SR : 繰返し応力振幅比、SR₂₀ : 20回の繰返し载荷で損傷ひずみ5%を生じる繰返し応力振幅比、 ε_D : 損傷ひずみ、N : 繰返し载荷回数、 ϕ_{cuD} : 損傷内部摩擦角

i) 繰返し载荷試験：液状化試験

「土の繰返し非排水三軸試験(JGS0541)」に準拠し、両振幅軸ひずみ DA=10%に達するまで繰返し载荷過程を継続することによって、20回の繰返し载荷で損傷ひずみ DA=5%を生じる繰返し応力振幅比 (SR₂₀) を求める (表-3 に示す供試体 No. 4~No. 7)。

図-3 に本試験結果の概略図を示す。

ii) 繰返し载荷+単調载荷試験

「土の繰返し非排水三軸試験 (JGS0541)」に準拠し、上記 i) の試験で求めた、SR₂₀

での応力比を供試体に作用させ、所定の両振幅ひずみ (1%、3%、5%、7%の4段階) が供試体に達するまで繰返し载荷を加える。供試体に所定の両振幅軸ひずみが生じた後、非排水条件を保ったままで直ちに、「土の圧密非排水 (CU b) 三軸圧縮試験方法

(JGS0523)」に準拠し、軸ひずみ 15%まで载荷を行う。これにより非排水繰返し载荷によって生じる損傷ひずみ ε_D と損傷後の内部摩擦角 ϕ_{cuD} との関係を求める (表-3 に示す供試体 No. 8~No. 11)。

図-4 に試験の概略を示す。

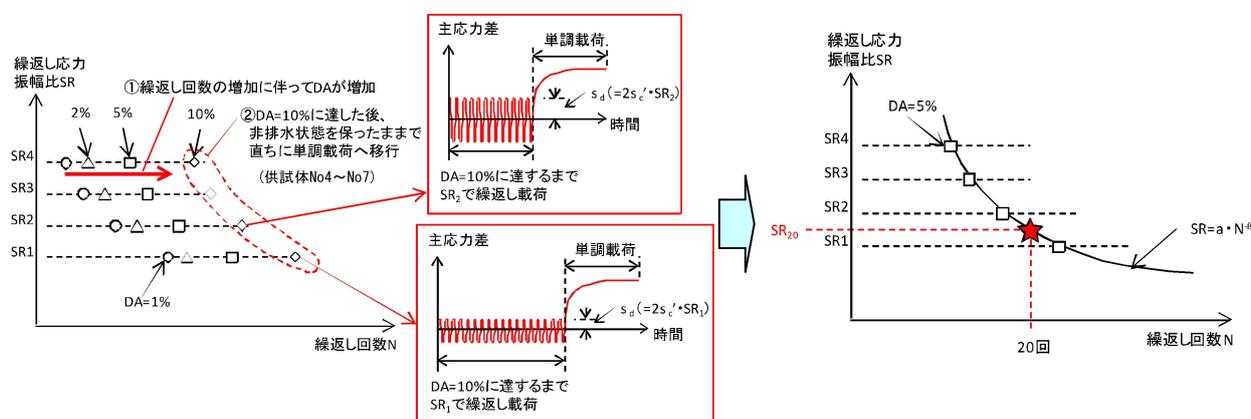


図-3 繰返し载荷試験 (液状化試験) の概略図

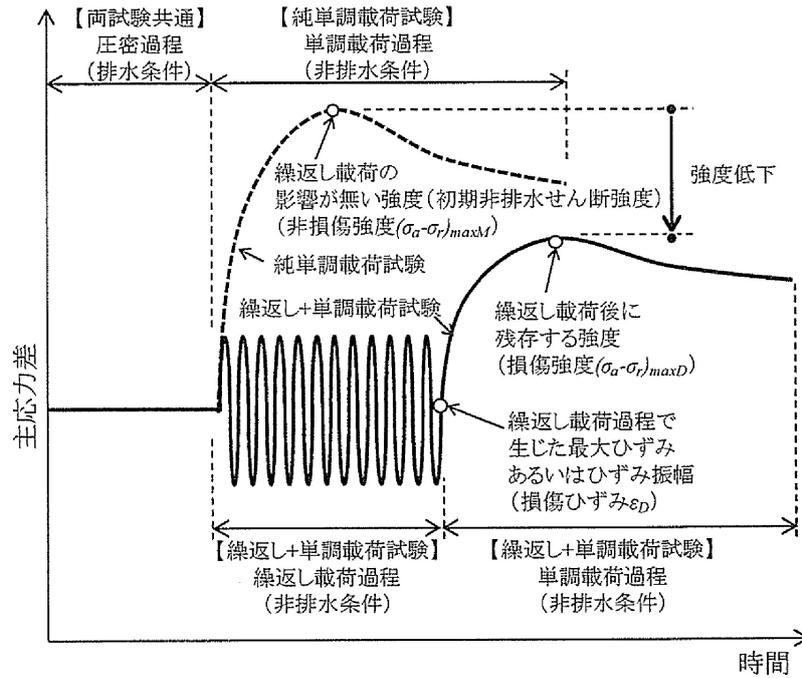


図-4 繰返し載荷+単調載荷試験概略図

7. 試験結果

1) 試験結果

試験結果は表-4 に示すとおりである。

表-4 室内せん断試験一覧

試料名 (深度GL-m)	繰返し載荷試験： 液状化試 SR ₂₀ (繰返し応力振幅比)	繰返し載荷 +単調載荷試験結果		せん断特性 (全応力)					
		両振幅 軸ひずみ DA(%)	圧縮強さ σ _a -σ _r (kN/m ²)	平時	地震時	粘着力 C (kN/m ²)	内部 摩擦角 φ (°)	粘着力 C _{mob} (kN/m ²)	内部 摩擦角 φ _{mob} (°)
旧堤体材料 (5.0~7.0)	-	0.0	245	51.00	17.00	-	-	-	-
	0.246	0.9	161	-	-	39.75	13.40		
		2.9	149	-	-	37.31	12.61		
		5.0	135	-	-	34.39	11.65		
		6.9	124	-	-	32.03	10.87		
	(0.355)	10.6	118	-	-	30.72	10.43		
	(0.315)	10.5	118	-	-	30.72	10.43		
	(0.258)	10.4	107	-	-	28.26	9.61		
(0.206)	10.0	115	-	-	30.05	10.21			

【試験結果概要】

- 純単調載荷試験 (三軸 C_{ub} 試験) の結果、圧縮強さ 245kN/m² が得られ、全応力で C=51.0kN/m² および φ=17.0° を呈す。
- 繰返し載荷(液状化)試験では、繰返し応力比 SR₂₀=0.246 が得られた。
- 繰返し載荷+単調載荷試験では、圧縮強さは、DA=1%で 161kN/m²、DA=3%で 149kN/m²、DA=5%で 135kN/m²、DA=7%で 124kN/m² を呈し、両振幅軸ひずみ

が大きくなるにつれ減少傾向を示す。



写真-2 繰返し+単調載荷試験状況写真

2) 強度低下特性

詳細ニューマークD法に用いる強度低下特性は、繰返し+単調載荷試験により得られた試験値より設定した。一方、過年度に実施された簡易ニューマークD法の耐震照査では、標準強度低下モデルに基づき堤体土の物理特性から設定された強度低下特性が用いられている。

図-5に両振幅軸ひずみと内部摩擦角 ϕ の関係を示す。

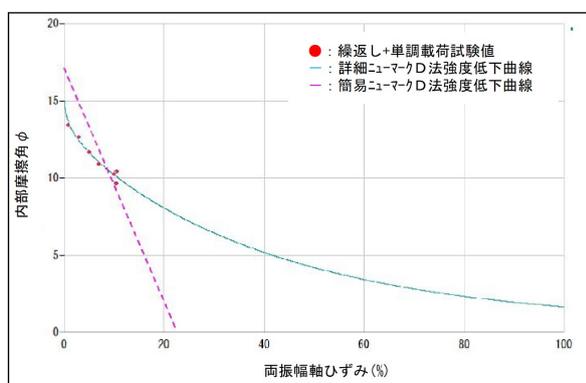


図-5 内部摩擦角強度低下特性

【強度低下特性の概要】

- 詳細ニューマークD法では、両振幅軸ひずみが40%付近まで、内部摩擦角は $\phi=5^\circ$ を維持する。一方、簡易ニューマークD法では、両振幅軸ひずみが22%で内部摩擦角は $\phi=0^\circ$ を示す。
- 図-5より、詳細ニューマークD法に

用いる強度低下特性の方が、両振幅軸ひずみの増大に伴う強度低下が小さい傾向が確認された。

8. まとめ

- ① 過年度に実施された簡易ニューマークD法では、滑動に伴う堤体天端の沈下量は、許容沈下量を上回る結果となったが、今回実施した詳細ニューマークD法では、許容沈下量を下回る結果となった。
- ② ため池の耐震性能照査（レベル2）における堤体土の強度低下特性を適切に評価するためには、土質試験（純単調載荷試験および繰返し+単調載荷試験）を行い、現地の土質を評価した強度低下モデルを作成することが必要である。
- ③ 簡易ニューマークD法による強度低下特性は、既往の土質データより作成した標準強度低下モデルに基づき堤体土の物理特性から推定したものである。更に簡易法は、土質データの蓄積が必ずしも十分ではなく、耐震性能照査において過大な設計となる場合がある。そのため、レベル2地震動に対する耐震性能照査の検討にあたっては、詳細ニューマークD法の解析手法を用いることが望ましいと考える。

<<引用・参考文献>>

- 1) SERID研究会：「詳細ニューマーク-D法SERID」によるため池等土構造物の耐震診断マニュアル（案），p42, 2021. 2
- 2) 農業農村工学会：土地改良事業設計指針「ため池整備」，p124～126, 2015. 5