

初期せん断応力によるため池堤体土の非排水繰返し強度特性の変化

山口大学大学院 学生会員○神山 惇
山口大学大学院 正会員 鈴木素之
ケイズラブ 正会員 河内義文
長野工業高等専門学校 正会員 松下英次

1. はじめに 農林水産省¹⁾によると、日本全国には約21万箇所のため池が存在し、なかにはかならずしも十分に維持管理がなされていないものがある。また、多くのため池は老朽化が進み、なかには漏水やはらみだし等の変状が生じているものがある。そのような中、平成23年の東北地方太平洋沖地震において、福島県の藤沼ダムが決壊し、下流域に甚大な被害をもたらした。これより、平成25年度より全国各地でため池に対する豪雨および地震に対する一斉点検が実施されている。

地震時における堤体盛土の強度評価の一つとして、非排水繰返し三軸試験が実施されるケースがある。通常、ため池の堤体盛土斜面には、静的な初期せん断応力だけでなく、水の浸透や長年月の時間経過に伴う劣化・損傷あるいは年代効果によるセメンテーションといった様々な作用を受けている。これらは堤体土の強度特性の変化に与える重要な要因であると考えられるが、現在までに検討がなされていない。そこで、本研究では非排水繰返し三軸試験により、物理特性の異なる再構成堤体土試料に対して、初期せん断応力が堤体土の非排水繰返し挙動および強度特性に与える影響を調べた。

2. 土試料および試験方法 本試験に用いた堤体土試料は山口県内に存在する3箇所のため池A、C、Eから採取したものである（以下、堤体土A、C、Eと称す）。表-1に各堤体土試料の物理特性を示す。試料は細粒分を含む砂質土あるいはシルトである。堤体土AおよびCは塑性指数 $I_p=15$ 程度の低塑性であり、堤体土Eは非塑性（NP）である。また、比較試料として豊浦標準砂を用いた。供試体サイズは直径5cm、高さ10cmであり、採取した不攪乱試料と同一の初期状態量となるように突固め・再構成した。三軸試験における背圧は200kPaとした。二重負圧法により供試体を飽和し、圧密前の間隙圧係数B値が0.95以上であることを確認した。初期せん断応力がない（初期せん断応力比 $\sigma_s/2\sigma'_c=0$ 、 σ'_c ：軸差応力、 σ'_c ：有効拘束圧）場合、 $\sigma'_c=50$ kPaで圧密した。初期せん断応力がある（ $\sigma_s/2\sigma'_c=0.3$ ）場合は等方圧密後に有効側圧 σ'_1 ならびに有効軸圧 σ'_3 を制御し、排水条件で $\sigma'_c=50$ kPaの下で、所定の初期せん断応力 $\sigma_s=\sigma'_1-\sigma'_3$ を過剰間隙水圧が発生しないように作用させた。圧密終了後、周波数0.1Hzで両振幅軸ひずみ ε_{DA} またはピーク軸ひずみ $\varepsilon_p=10\%$ に達するまで非排水繰返し载荷を行った。

3. 試験結果と考察 図-1、図-2にそれぞれ初期せん断応力が無い場合と有る場合の堤体土Eにおける有効応力経路を示す。ここで用いた応力のパラメータとしては、平均有効主応力 $p'=(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3$ 、 $q=\sigma'_1-\sigma'_3$ である。また、同図に既往の静的三軸試験の結果²⁾から得た破壊線を示している。 $\sigma_s/2\sigma'_c=0$ の場合、有効応力は繰返し载荷初期に著しく減少し、その後も減少を続け最終的に液状化に至った。一方、 $\sigma_s/2\sigma'_c=0.3$ の場合の挙動は $\sigma_s/2\sigma'_c=0$ の場合と同様であるが、最終的には有効応力を一定に保ったまま定常状態に至っている。

図-3は $\sigma_s/2\sigma'_c$ と繰返しせん断強度比 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ の関係を示したものである。ここに、 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ は繰返しせん断応力比 $(\sigma_d/2\sigma'_c)$ と繰返し回数Nの関係においてN=20回で ε_{DA} または $\varepsilon_p=5\%$ に至る繰返しせん断応力比である。また、同図には、

表-1 土試料の物理特性

ため池	採取深さ (m)	土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_P(\%)$	塑性指数 I_p	細粒分含有率 $F_c(\%)$	地盤材料の分類名
A	1.00~2.00	2.711	44.6	30.1	14.5	74.4	シルト (低塑性限界)
C	2.00~3.00	2.638	40.3	23.6	16.7	36.1	細粒分質様砂
E	8.00~9.00	2.691	44.5	NP	NP	40.5	細粒分質砂
豊浦砂	—	2.639	—	—	—	0	砂

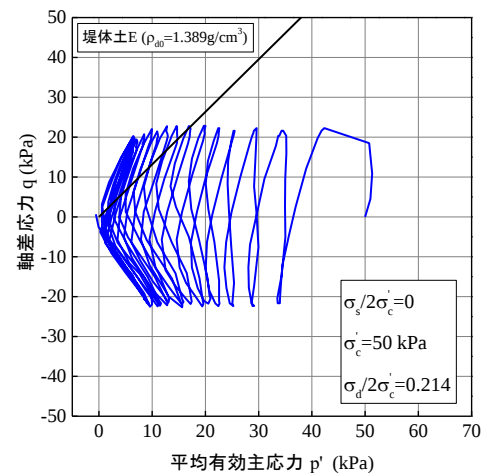


図-1 有効応力経路（堤体土E： $\sigma_s/2\sigma'_c=0$ ）

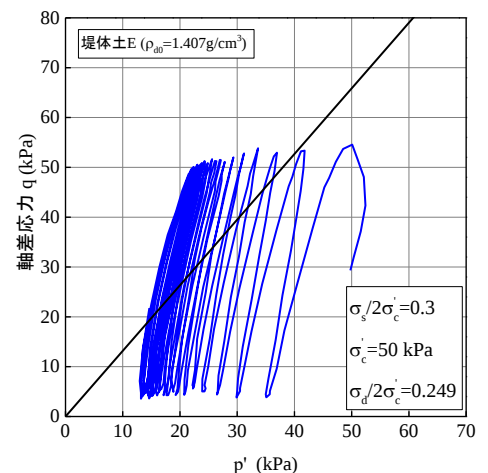


図-2 有効応力経路（堤体土E： $\sigma_s/2\sigma'_c=0.3$ ）

兵動ら³⁾が砂と粘土の混合土に対して行った結果も示している。兵動ら³⁾は、初期せん断応力の作用下においては、細粒分含有率 $F_c=29.4\%$ 以上の試料では、繰返しせん断強度が低下するが、 $F_c=29.4\%$ 未満では増加する。また、塑性指数 $I_p=15$ 付近で繰返しせん断強度は最大となり、その後、 I_p の増加に伴い強度は低下すると報告している。本研究においては、初期せん断応力を作用させることによって、繰返しせん断強度は堤体土 A では低下し、堤体土 C, E では増加した。堤体土 A は、 $I_p=14.4$ 、 $F_c=74.4\%$ であるため、繰返しせん断強度は低下したと考えられる。一方、堤体土 E の試料は $F_c=40.5\%$ にもかかわらず、NP であるため、繰返しせん断強度は増加したと考えられる。堤体土 C は $I_p=16.7$ 、 $F_c=36.1\%$ で、兵動ら³⁾が報告した初期せん断応力下で繰返しせん断強度が増加する傾向を示す土の物理特性に近い数値であるため、繰返し強度が顕著に増加したと考えられる。

図-4、図-5 にそれぞれ I_p および F_c と $\sigma_d/2\sigma'_c=0.3$ における $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{s,N=20}$ と $\sigma_d/2\sigma'_c=0$ における $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ の差 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{s,N=20}-(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ との関係を示す。なお、図には兵動ら³⁾のデータも引用した。同図より、 I_p の増加に伴い、初期せん断応力下の繰返し強度は低下する傾向にあることがわかる。また、 I_p が低いほど繰返し強度は高くなることがわかる。また、 F_c が低いほど繰返し強度が増加することがわかる。兵動ら³⁾が用いた土試料は、 F_c の増加に比例して I_p も増加しているが、本研究で用いた堤体土は F_c と I_p に相関は見られなかった。これは、含有する粘土鉱物の違いに起因すると考えられる。堤体土に関しても、 F_c 、 I_p 、 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{s,N=20}-(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ との間に良好な関係がみられた。以上より、初期せん断応力の影響を考慮したため池堤体土の繰返しせん断強度の評価には、細粒分含有率だけでなく、塑性指数も重要な物理指標になるといえる。

4. 結論 本研究で得た結論を以下に示す。

- 1) 初期せん断応力が無い場合では、非塑性細粒分を含む堤体土 E のみ液状化が発生した。一方で、初期せん断応力作用下では、いずれの堤体土も液状化は発生せず、有効応力を一定に保ちながら定常状態に至る有効応力経路を示した。
- 2) 今回使用した堤体土 A では、 $I_p=14.4$ 、 $F_c=74.4\%$ であるため、初期せん断応力を受けると、繰返しせん断強度は低下した。また、堤体土 E では、 $F_c=40.5\%$ であるものの非塑性であるため、繰返しせん断強度は増加した。一方、堤体土 C は $I_p=16.7$ 、 $F_c=36.1\%$ で、兵動ら³⁾が報告した初期せん断応力を受けた場合の繰返し強度が増加する土の物理的性質に近い数値であるため、繰返し強度が顕著に増加したと考えられる。
- 3) 初期せん断応力の影響を考慮したため池堤体土の繰返しせん断強度の評価には、細粒分含有率だけでなく、塑性指数も重要な物理指標になりうるといえる。

謝辞 本研究は、山口県の協力のもとで実施された。関係各位に謝意を表す。

参考文献 1) 農林水産省 web ページ http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/ (2016/1/24 アクセス) 2) 神山惇, 鈴木素之, 河内義文, 松下英次: ため池堤体土における不攪乱および攪乱試料の強度特性比較, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015.9. 3) 兵動正幸, 金鐘根, 福本圭祐, 山田卓, 吉本憲正: 初期せん断応力を受ける砂粘土混合土の非排水繰返しせん断挙動, 土木学会論文集 C, Vol62/No.1, 240-245, 2006.3.

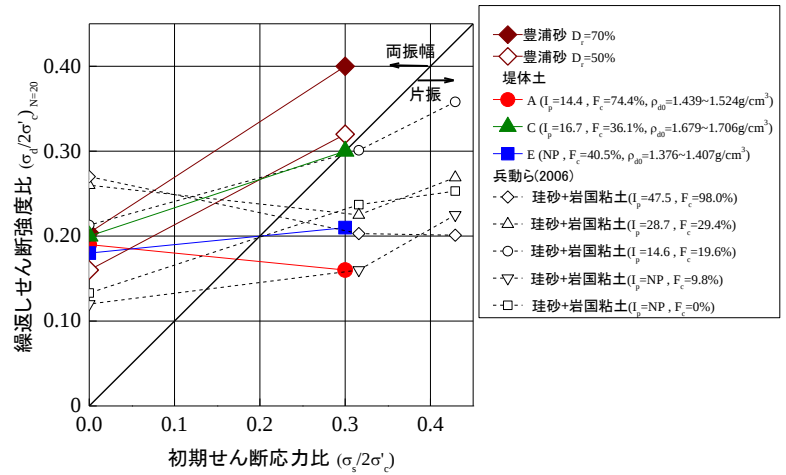


図-3 初期せん断応力比と繰返しせん断強度比の関係

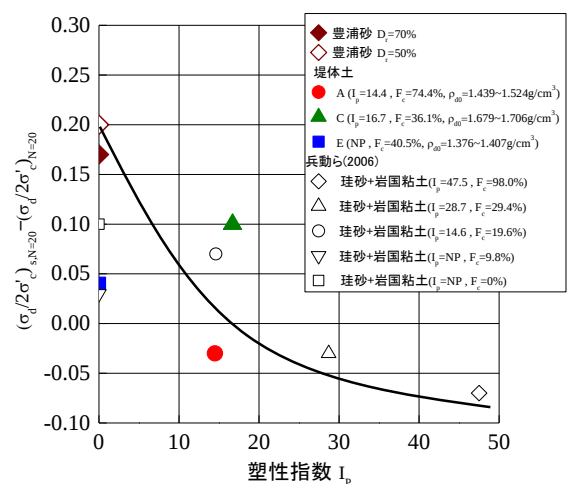


図-4 I_p と $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{s,N=20}-(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ の関係

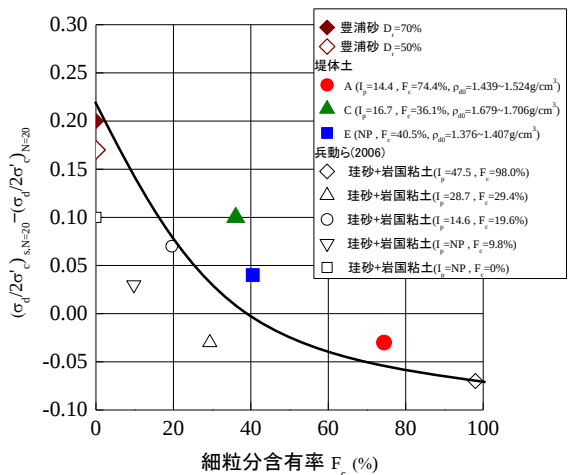


図-5 F_c と $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{s,N=20}-(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ の関係