

有明粘土の応力ひずみ特性と斜面破壊挙動との関連性

Relation between Stress-strain Characteristics and Slope Failure Behavior of Ariake Clay

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)
佐賀大学教授 理工学部都市工学科根上 武仁 (ねがみ たけひと)
佐賀大学大学院工学系研究科システム生産科学専攻山本 一春 (やまもと かずはる)
松江市都市建設部公園緑地課

1. はじめに

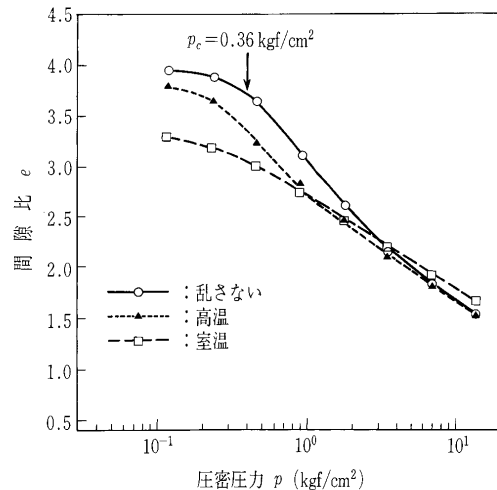
自然堆積粘性土の乱さない試料と、これを練り返して再圧密した試料の力学的特性は大きく異なる。これは、乱さない試料と練返し再圧密試料の土構造が著しく異なるためであると考えられている。一方、練り返した粘性土を高温状態で再圧密すると、乱さない試料と似た力学的性質を持つ試料が得られる¹⁾。著者らは既に、軟弱な有明粘土の乱さない試料と、練り返した試料を高温および室温で再圧密したものを対象として、間隙径分布測定および電子顕微鏡による観察を行い、微視的土構造の差異について報告している²⁾。そこで本研究では、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験、さらに遠心力荷試験機を用いた斜面の破壊試験^{3),4)}を行い、先に報告した微視的土構造と基本的な力学的性質である応力ひずみ特性、さらには斜面のすべり破壊挙動との関連性について検討する。

2. 有明粘土試料

今回の実験に用いた試料は、佐賀県小城郡芦刈町の深度約2 mより採取したものである。物理的性質は表-1に示すとおりである。再圧密試料は、この有明粘土を自然含水比状態で十分に練り返し、425 μmふるい通過分を縦25 cm×横12 cm×高さ20 cmの再圧密容器につめ、約80°Cの高温状態および20°Cの室温状態で再圧密したものである。以後これらをそれぞれ高温再圧密試料および室温再圧密試料と呼ぶ。なお、練返し再圧密試料は、実際の土被り圧とほぼ等しい圧密荷重0.20 kgf/cm²

表-1 有明粘土の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.661
自然含水比 w_n (%)	154
液性限界 w_L (%)	123
塑性指数 I_p	71
塩分濃度 (%)	0.9
粒度組成 (%)	
細砂	0.9
シルト	38.6
粘土	60.5

図-1 各試料の e - $\log p$ 曲線

まで約2週間かけて段階的に荷重して作成した。圧密試験結果は図-1に示すとおりである。初期間隙比は、乱さない試料が最も大きく、ついで高温試料、室温試料の順となった。

3. 有明粘土における応力ひずみ特性

今回の一軸圧縮試験および三軸圧縮 (CU) 試験は、直径3.5 cm×高さ8.8 cmの供試体について実施した。図-2は、それぞれ乱さない試料・高温再圧密試料・室温再圧密試料の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ曲線を示したものである。図-2より、乱さない試料および高温再圧密試料の応力ひずみ曲線は、ひずみ軟化傾向

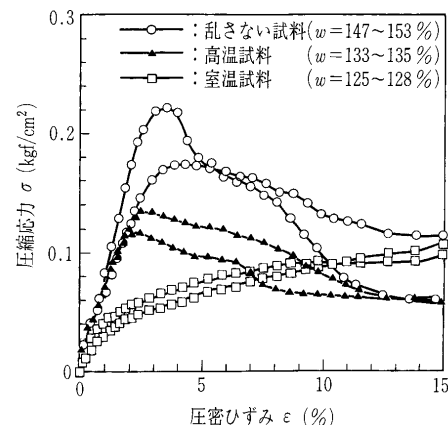
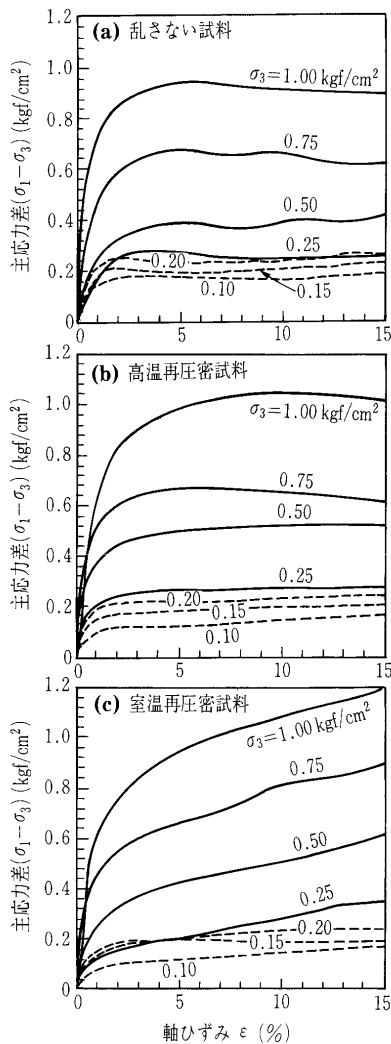


図-2 各試料の一軸圧縮応力-ひずみ曲線

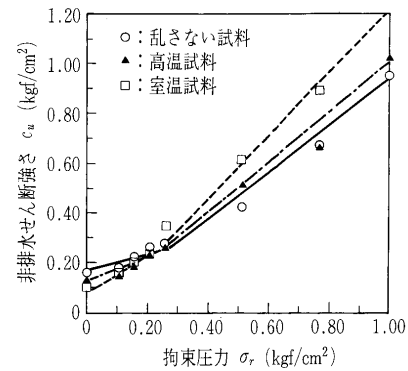
を示しているのに対し、室温再圧密試料の場合はひずみ硬化傾向を示している。

図—3 (a)～(c)は、それぞれ乱さない試料・高温再圧密試料・室温再圧密試料の三軸圧縮 (CU) 試験より得られた応力ひずみ曲線を示したものである。図—3 (a), (b)から分かるように、乱さない試料と高温再圧密試料は、ひずみの増加とともに強度が増加し、ほぼ最大強度を保ったまま破壊に至る、ややひずみ軟化型の応力ひずみ特性を示した。図—3 (c)に示すように、室温再圧密試料の場合は一軸圧縮試験の場合と同様に、ひずみ硬化傾向を示している。一軸圧縮試験結果と三軸圧縮試験結果から得られた各供試体の応力ひずみ曲線は、乱さない試料と高温再圧密試料がひずみ軟化傾向を示し、室温再圧密試料はひずみ硬化傾向を示した。

図—4 は三軸圧縮試験から得られた非排水強さ c_u と拘束圧力 $\sigma_r (= \sigma_3)$ の関係を示したものである。拘束圧力の増加に伴う非排水せん断強さの増加割合の大きさは、室温再圧密試料・高温再圧密試料・乱さない試料の順となっている。これは、拘束圧力の増加によって室温再圧密試料・高温再圧密試料・乱さない試料の順に密度が高くなりやすいためであると考えられる。



図—3 各試料の三軸圧縮試験における応力ひずみ曲線



図—4 拘束圧力とせん断強さの関係

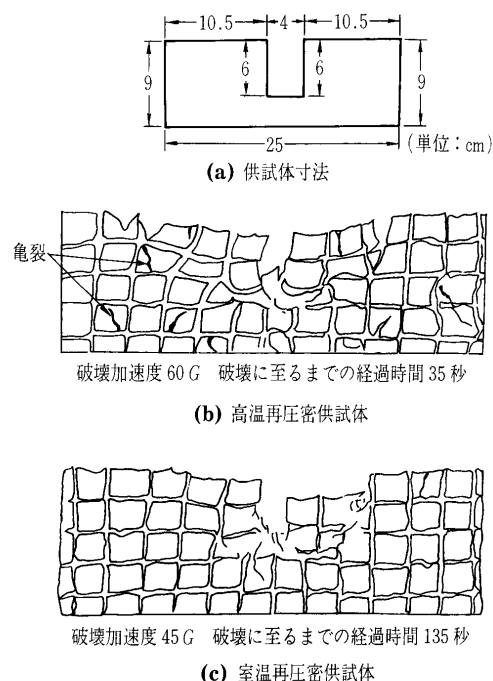
4. 遠心力模型斜面の破壊挙動

4.1 遠心力載荷試験

今回使用したのは、回転半径75 cm、公称加速度15～200 Gの遠心力載荷試験装置である。一連の実験では、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験から求めた強度定数を用いて、Taylor (テイラー) の図表から斜面の限界高さを算出し、相似則の式から模型斜面の破壊時の遠心加速度 (以下、破壊加速度と記す) を予測して遠心力載荷試験を行い、斜面の破壊状況を観察した。模型切土斜面の作成方法についてはいくつかの報告があるが^{5),6)}、本研究ではあらかじめ斜面を切り出しておく簡便な方法をとった。この模型切土斜面に対し、破壊が起こるまで遠心力を載荷した。乱さない試料については、遠心力を載荷すると作成した模型切土斜面から脱水が認められた。そこで、乱さない試料を用いて模型切土斜面を作成する場合は、斜面破壊試験を行う前にあらかじめ水平な模型地盤を作成し、所定の遠心力を載荷して排水が終了するまで自重圧密を施した。この排水終了後の水平模型地盤から斜面を切り出した。再圧密試料から作成した模型切土斜面は、遠心力を載荷しても脱水を生じなかったため、自重圧密の手順は省略して斜面を切り出した。遠心力載荷試験を行う際には模型斜面と容器間に働く摩擦に注意せねばならない。そこで、この摩擦を軽減するために、模型斜面と容器側面の間に寒天膜を設けて斜面破壊試験を行った^{3),4)}。なお、模型斜面の傾斜角は45°とした。

4.2 遠心力載荷による模型斜面の破壊挙動

口絵写真—1は乱さない試料から作成した模型斜面の破壊状況である。これより、底部破壊が生じてすべり面が容器内におさまらず、斜面が落ち込んだ形となっていることが分かる。口絵写真—2は高温再圧密試料から作成した模型斜面の破壊状況である。底部破壊が生じ、すべり面以外の数箇所に亀裂が発生している。口絵写真—3は室温再圧密試料から作成した模型斜面の破壊状況を示したものである。高温再圧密供試体の場合と同様に、明確な底部破壊が生じているが、亀裂はほとんど発生していない。乱さない供試体と高温再圧密供試体の場合は、すべり面を除く数箇所に亀裂が確認できた。これに対して室温再圧密供試体の場合は、亀裂はほぼ見られなかった。



図—5 練返し再圧密供試体の模型掘削地盤破壊状況

図—5は、高温再圧密試料と室温再圧密試料から作成した模型掘削地盤の供試体寸法と、破壊状況および破壊加速度、破壊に至るまでの経過時間を示したものである。破壊に至るまでの経過時間は、高温再圧密供試体は35秒、室温再圧密供試体は135秒であり、高温再圧密供試体の方が約1/4と短い。つまり、高温再圧密供試体の模型掘削地盤は室温再圧密供試体に比べて、より脆性的な破壊傾向を示している。今回の一連の試験結果は、乱さない供試体や高温再圧密供試体は、模型切土斜面に亀裂が入ってからすべり破壊を起こすまでの時間が短いに対し、室温再圧密供試体のすべり破壊は比較的ゆっくりと進行する傾向を示した。

5. 微視的な土の構造と力学的特性の関連性

各試料から遠心力模型斜面を切り出す際に違いが観察された。室温再圧密試料は、ワイヤーソーのワイヤー部分に粘土が絡み付いて試料がべたべたとした様相を示し、切断片は取り除き難く、供試体の成形が困難であった。これに対して乱さない試料および高温再圧密試料の場合は、含水比が高いにもかかわらず切断面はなめらかで、試料のべたつきが少なく、比較的容易に供試体を成形できた。これは、室温再圧密試料が乱さない試料とは異なり、土粒子やその集合体間に働くセメンテーションが発達していないため、これらの土粒子やその集合体が再配列を起こしやすいためであると考えられる。

著者らは既に有明粘土の乱さない試料・高温再圧密試料・室温再圧密試料の間隙径分布測定および電子顕微鏡による微視的土構造の観察結果について報告している²⁾。この中で、微視的土構造の概念図を示している。今回の一連の試験結果は、拘束圧力と非排水強さの関係と先に報告した概念図を用いて次のように説明できる。図—6および図—7の黒い部分は、土粒子あるいはその集合体

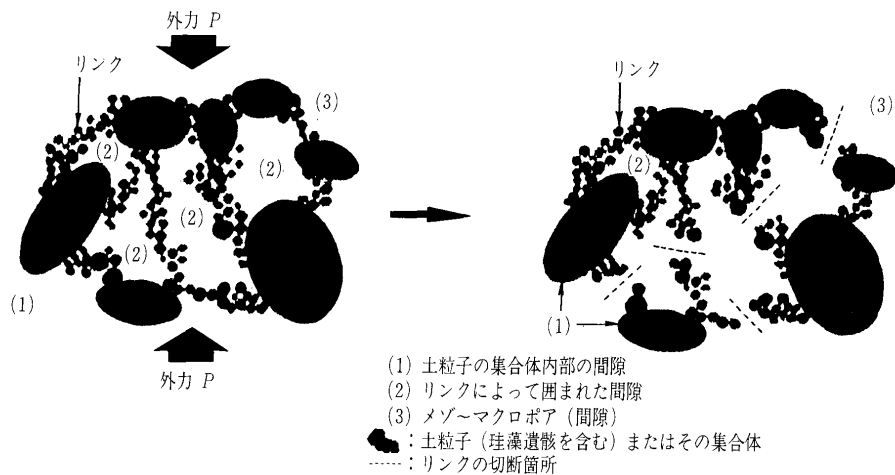
を示している。乱さない試料では図—6に示すように、リンクが切断されて破壊が生じる。圧密圧力と非排水せん断強さの関係を示した図—4と併せて考察すると、乱さない試料の強度増加の割合は再圧密試料よりも小さいことから、土粒子あるいはその集合体の再配列が生じにくいと推測される。すべり面以外の箇所にも多数の亀裂が確認されたのは、試料の不均一性のためであろう。練り返した試料を再圧密する際に高温状態とすると、試料の間隙水中のイオン増加が認められることが報告されている⁷⁾。これより、高温再圧密試料では、高温履歴を受けることで間隙水中のイオンが増加し、結果として土粒子あるいはその集合体の凝集性が強くなって一部にリンクが形成されると考えられる。このため、外力を受けると、土粒子やその集合体の再配列が生じることに加えて、図—7(a)に示すようにこのリンクが切断される。図—4と併せて考察すると、高温再圧密試料では土粒子あるいはその集合体の再配列が生じやすく、乱さない試料よりも高密度化しやすい。同様に図—4から判断すると、室温再圧密試料は乱さない試料や高温再圧密試料よりも土粒子あるいはその集合体間の凝集性が小さくリンクが極めて少ない。このために、図—7(b)に示すように土粒子あるいはその集合体間の再配列が容易に起こって高密度化しやすくなると考えられる。

つまり、乱さない試料では土粒子やその集合体相互の結合力が強いので、土粒子やその集合体の再配列が起こりにくく、ピーク強度に達すると土粒子やその集合体の再配列が急激に生じてひずみ軟化型の傾向を示す。これに対して、練返し再圧密試料は土粒子やその集合体相互の結合力が弱く、土粒子やその集合体の再配列が生じやすいため密度が高くなりやすく、応力ひずみ曲線はひずみ硬化傾向を示す。また、模型切土斜面の破壊挙動において、乱さない供試体と高温再圧密供試体は最初に亀裂が生じてからすべり破壊に至るまでの時間が比較的短く、脆性的に破壊が生じたのに対し、室温再圧密供試体は前者に比して破壊が緩やかに進行した。各供試体の破壊状況と合わせて考えると、斜面の破壊挙動は各試料の応力ひずみ特性と対応すると考えられる^{4),8)}。

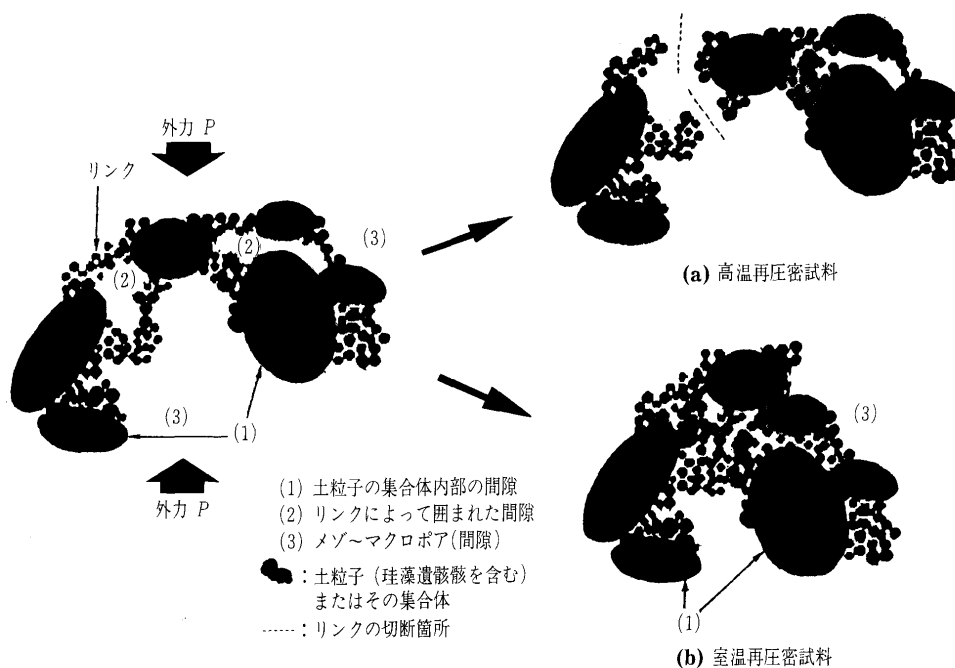
6. まとめ

以上をまとめると次のようである。

- ① 乱さない試料は土粒子やその集合体相互の結合力が強いので、ある強度に達すると土粒子やその集合体の再配列が急激に生じて強度が急速に低下する。このため、脆性的な破壊挙動を示すと考えられる。
- ② 高温再圧密試料は、練返しによってリンクが切断され、乱さない試料に比して土粒子やその集合体の再配列が生じやすい。しかしながら、温度効果によって部分的に再生されたリンクが外力によって破壊されるため、脆性的な破壊挙動を示すと考えられる。
- ③ 室温再圧密試料は、土粒子やその集合体間の結合が弱く、ひずみの増加に伴って土粒子やその集合体の再配列が生じやすい。このため、ひずみ硬化傾向を示す



図—6 乱さない試料の微視的土構造の変化



図—7 練返し再圧密試料の微視的構造の変化

と考えられる。

- ④ 各供試体の斜面が破壊に至るまでの経過時間と、破壊状況を併せて考えると、斜面の破壊挙動はその試料の応力ひずみ特性と対応する。

参考文献

- 1) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J.: Effect of aging marine clay and its duplication by high temperature consolidation., 土質工学会論文報告集, Vol. 33, No. 4, pp. 133~147, 1991.
- 2) 鬼塚克忠・根上武仁: 有明粘土の乱さない試料および再圧密試料の微視的構造, 土と基礎, Vol. 46, No. 4, pp. 17~20, 1998.
- 3) 鬼塚克忠・山本一春: 応力-ひずみ特性が有明粘土斜面の破壊挙動に及ぼす影響, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 498~499, 1995.

- 4) Onitsuka, K. and Yamamoto, K.: Stability of cut slopes in Ariake clay, Centrifuge 94, Singapore, pp. 605~610, 1994.
- 5) 寺師昌明・藤井斉昭: 遠心模型実験の基本システムと計測システム, 土と基礎, Vol. 36, No. 1, pp. 79~86, 1988.
- 6) 神田政幸・竹村二郎・末政直晃・木村 孟: 二次元遠心模型掘削装置の開発, 第47回土木学会年次学術講演概要集Ⅲ, pp. 8~9, 1992.
- 7) 小泉和宏・坂上麻子・永野賢司・杉田信隆: 高温環境で再圧密された粘土の化学特性と微視的構造について, 高温環境と土-粘土の微視構造から廃棄物の地中処分問題まで—シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp. 101~106, 1997.
- 8) Kitazume, M. and Terashi, M.: Effect of soil stress-strain characteristics on slope failure, Centrifuge 94, Singapore, pp. 611~616, 1994.

(原稿受理 1999.1.7)