

複数の試験方法による締固め土の亀裂を伴う破壊特性の検討

環境防災研究室 修士2年 堀越 晟冶
 福元 豊
 大塚 悟

1. はじめに

近年、発生している地震や豪雨、風化による盛土崩壊のような破壊現象では、内部の亀裂の発生・成長していることが考えられる。亀裂の存在は、地盤工学的影響だけでなく、環境的な問題を引き起こす可能性もあり、これについて評価する必要がある。しかし、土の破壊現象は複雑で解明していないことが多いのが現状である。また、評価にあたって数値計算等を用いて解析を行うことも多く、技術も高度化してきている中で、締固め土の破壊に対する評価に数値解析モデルを用いるための破壊特性やそれについて調べる標準的な方法は確立されていない。そこで本研究では、締固め土の破壊特性試験方法の検討および、締固め土固有の特徴を調べることを目的とし、試験を行った。

2. 締固め土の破壊特性試験

本研究では、破壊特性として亀裂進展挙動・引張強度・破壊靱性の3点に着目し試験を行った。亀裂進展挙動の評価には割裂引張試験、引張強度の評価には割裂引張試験と直接引張試験、破壊靱性の評価には、割裂引張試験と三点曲げ試験を用いた。使用した試料は、石川高専で行われた締め固めた粘土の一軸圧縮試験の検討¹⁾で用いられた材料と同じ物性値を有する青粘土とした。それぞれ試験方法が確立されたものではないため予備的に笠岡粘土²⁾でも試験を行った。亀裂の変形モードは3つに分かれており図-1に示す。

2.1 割裂引張試験

締固め土供試体による割裂引張試験は実施例が少なく方法も定められていないため、本研究では日本工業規格に定められた岩石に対する圧裂引張試験³⁾を参考とした。青粘土を0.425mmのふるいに通した後最適含水比より乾燥側である18%に調整し、高さ100mm、直径50mmのモールドに3層100回で突き固め、供試体を作製した。その後、高さ25mm、直径50mmに成形し、ドリルにて供試体中央に長さ約15mm、幅約1mmの初期亀裂を与え、0.0167mm/sの荷重速度で試験を行った。試験装置概略図を図-2(a)に示す。

2.2 直接引張試験

直接引張試験は、割裂引張試験による割裂引張強度と直接引張強度の比較・検討のために行った。直接引張試験はコンクリートのような硬さのある材料で用いられるが、土のような脆弱な材料における直接引張試験方法は、端部を掴むことができないため、別の方法として、端部を真空で吸い付け引っ張る真空チャック方式を用いた新しい試験方法で試験を行った。供試体寸法は高さ80mm、直径50mm

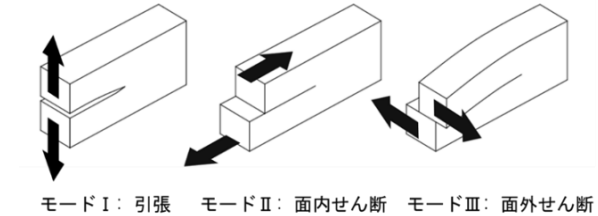


図-1 破壊モード

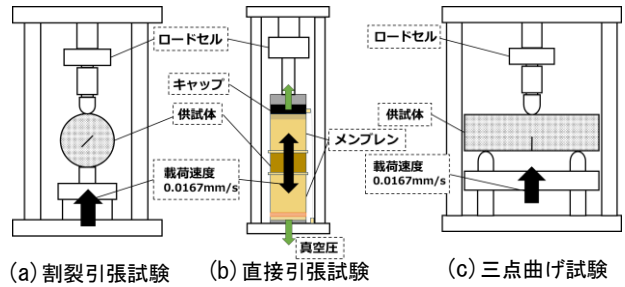


図-2 試験装置概略図

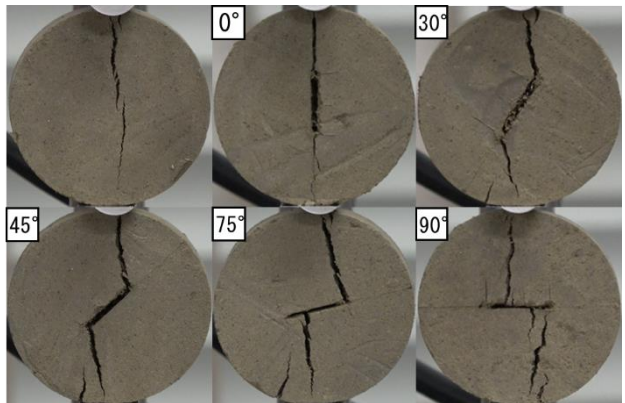


図-3 亀裂角度別の亀裂進展の様子

とし、0.0167mm/sの荷重速度で試験を行った。突き固めは真空圧をかける際の問題から、上下からそれぞれ150回とした。試験装置概略図を図-2(b)に示す。

2.3 三点曲げ試験

三点曲げ試験は、割裂引張試験により求めた破壊靱性値と三点曲げ試験より求めた破壊靱性値の比較・検討のために行った。三点曲げ試験方法に関しては、Wang et al.⁴⁾を参考に試験を行った。供試体寸法は長さ180mm、高さ37.5mm、厚さ20mm、亀裂長さ17mmとし、0.0167mm/sの荷重速度で試験を行った。試験装置概略図を図-2(c)に示す。

3. 試験結果

3.1 亀裂進展挙動

亀裂進展挙動は、図-3より初期亀裂なしと初期亀裂角度 $\beta=0^\circ$ では亀裂に対して直角方向に引張応力が作用し、

モードI: 引張による破壊がみられた。β=15°~45°では初期亀裂端部より載荷面へ亀裂が進展したのに対し、β=60°~90度では初期亀裂端部からの亀裂だけでなく、端部よりやや中央よりの箇所から亀裂の進展がみられた。これよりβ≥60°では初期亀裂周辺において、モードII: 面内せん断よりもモードI: 引張の方が優位となってきていると考えられる。

また、初期亀裂角度による引張強度の低下量について、締固め土の結果と既往研究⁵⁾による岩石状材料の結果を図-4に示す。これを見ると、締固め土では0°よりも15°で更に引張強度が低下し30°で15°と同程度かやや強い程度となっている。これは岩石状材料と似た傾向となっている。しかし、締固め土は45°以降引張強度は上昇していき90°が最も強いのにに対し、岩石状材料では45°で最も強度が低下しており、90°でも30°と同程度の強度となり異なった傾向を示した。これは締固め土の亀裂進展による破壊が、供試体の硬さや変形量の違いといった点から、岩石やコンクリートのような硬い材料とは異なっており、それが亀裂角度45°以上の時に顕著となることを表している。

3.2 引張強度

割裂引張試験と直接引張試験より得られた引張強度の結果について青粘土の結果を図-5、予備的に行った笠岡粘土の結果を図-6に示す。今回新しい機構を用いて試験を行った直接引張試験だが、青粘土も笠岡粘土も各試験ケースの値はばらつきが少なく、試験の再現性はあると考えられる。また、青粘土では割裂引張試験より得られた亀裂なし供試体の引張強度は30kPa、直接引張試験より得られた引張強度は16kPaと割裂引張試験の結果の方が高い値となった。どちらも引張強度を求めたものであるが、締固め土の割裂引張試験は亀裂進展挙動の結果で供試体の変形が大きくみられたため、本来の引張強度よりも大きく出ている可能性があり、直接引張試験の方が、締固め土の引張強度を得るのに有用だと考える。また、予備的に行った笠岡粘土と青粘土を比較すると笠岡粘土の方が安定しており、亀裂発生後の破壊も明確に確認できたため、粒径の小さい笠岡粘土の方が直接引張試験に適している可能性が示唆された。

3.3 破壊靱性

三点曲げ試験供試体の亀裂は0°のため、割裂引張試験の0°供試体より得られたピーク荷重での応力拡大係数と比較すると、割裂引張では $3\text{kPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 、三点曲げでは $5\text{kPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ となり、差がみられたが土の破壊靱性はとても小さいため、概ね結果は一致したとみなした。

割裂引張試験より得られた値から算出した応力拡大係数と亀裂進展挙動の関係については紙面の都合により割愛する。

4. まとめ

亀裂進展挙動は単に亀裂に対して引張応力が作用し破壊するβ=0°を除くと、β=60°を境に亀裂進展挙動の違

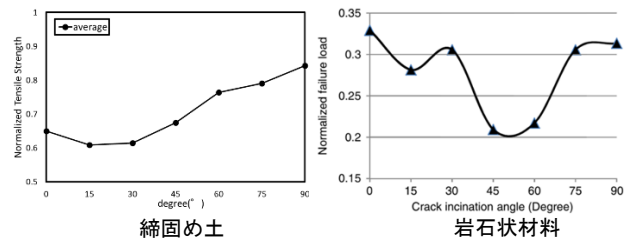


図-4 初期亀裂角度による引張強度低下量

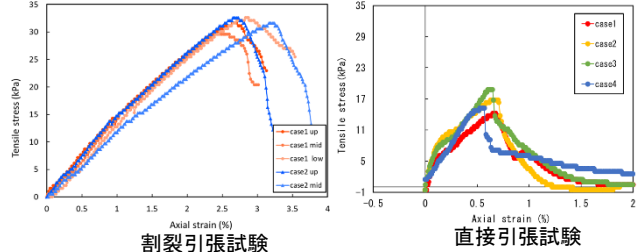


図-5 青粘土の割裂引張試験と直接引張試験比較

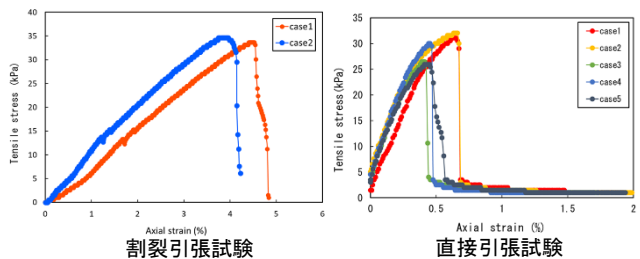


図-6 笠岡粘土の割裂引張試験と直接引張試験比較

いが見られた。亀裂端部より亀裂が進展し破壊するケースと亀裂端部ではない箇所から亀裂が発生し破壊するケースに分かれた。また亀裂角度による引張強度の変化については岩石状材料やコンクリートといった硬い材料とは異なった傾向がみられ、締固め土特有の挙動が得られた。引張強度に関しては供試体に亀裂が存在することで引張強度は低下し、亀裂なし供試体に対し16%~39%の低下が起こった。モードI: 引張モードが主にみられたβ=75°, 90°でも引張強度が低下していることから、亀裂なしの引張による破壊とは異なり、せん断応力が大きく影響していることがわかる。このことから締固め土の評価を行う上で、亀裂の有無及び亀裂角度は重要な要素であるといえる。また、各試験で得られた結果はばらつきも少なく試験自体の再現性は得られたが、こういった材料までこの試験方法が適応できるのか検討する余地がある。また、割裂引張試験よりも直接引張試験の方が締固め土の引張強度を求めるのに適していた。

参考文献

- 1) Taiki Shimbo, Chisato Shinzo, Ukyo Uchii, Ryota Itto, Yutaka Fukumoto : Effect of different water contents and initial crack lengths on the mechanical properties and failure modes of pre-cracked compacted clay under uniaxial compression, Engineering Geology, Vol.301, 106593, 2022.
- 2) 鈴木麻里子, et al. "砕石脱水ケーキの物理特性と力学挙動に関する一考察." 農業農村工学会論文集 88.2 (2020): 179-184.
- 3) 地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説—二分冊の2—, 丸善出版株式会社, 2009, pp901
- 4) Jun-Jie Wang, Jun-Gao Zhu, C.F. Chiu, Hui Zhang: Exoerimental study on fracture toughness and tensile strength of a clay, Engineering Geology, Vol.94, 2007.
- 5) Abdolhadi, G., Hamid, R.N., Vahab, S., Mir, R.H.: Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials, Arab J Geosci, 2013, 6:4435-4444.