

# 土のような脆弱固体材料に対する直接引張試験方法の実用化にむけた検討

環境防災研究室 福原 涼斗  
指導教員 福元 豊

## 1. はじめに

土構造物に発生する引張亀裂の多くは引張応力に起因し、地盤工学的及び環境的観点から重大な影響を及ぼす<sup>1)</sup>。従って、引張応力の定量的な評価が必要になるが、脆弱固体材料である土に対して直接的に引張を与える試験方法は十分に確立されていない。既往の試験方法では、供試体形状が中央部で縮小しているため、自然な引張破壊挙動を捉えることが難しい<sup>2)</sup>。

以上を踏まえ、昨年度までの研究では、円柱形状の供試体に対して真空圧を利用した直接引張試験方法に関する検討を実施した。そして、様々な方法で作製された供試体に対して適用が可能であることが示された<sup>3)</sup>。本研究では、試験方法の実用化に向けた基礎的な検討として、再現性を確保するために必要な試験条件を検討した。また、供試体作製方法による影響についての検討も実施した。

## 2. 直接引張試験

### 2.1 試験機の機構

図1に本試験機の概略図を示す。本試験機は三軸試験機の加圧版（キャップ及びペDESTAL）に真空供給機構を備えたものである。

供試体の固定化は、供試体にメンブレンを被覆し、その内部に真空圧を作用させることで行う。この操作により、真空状態が形成され、供試体とメンブレンが密着し、メンブレンは引張力を与える型枠として機能する。このような方法により、供試体は円柱形状を維持した上で引張を与えることができる。

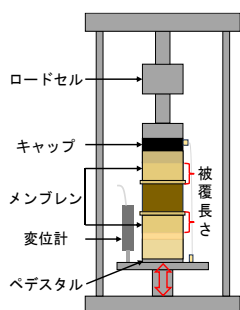


図1 直接引張試験機の概略図

### 2.2 試験手順

試験は、供試体設置、真空圧载荷、引張载荷の順に行った。まず、供試体設置に関しては、供試体をペDESTAL上に設置し圧縮側に数 N の荷重を作用させた後、メンブレンを被覆した。これは、供試体端部とキャップを密着させ適切に荷重を測定するために行った。

真空圧に関しては、メンブレンの被覆後に真空レギュレーターで手動により载荷を行った。なお、本研究では軸変位のみを測定しているため、この段階では計測上ひずみは変化しない。

引張载荷に関しては、真空圧を供給後、任意の速度で単調载荷した。

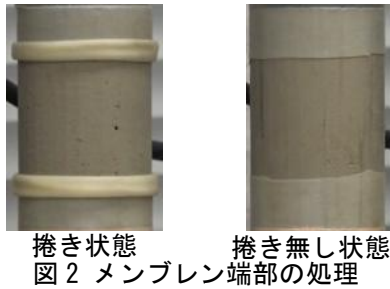
## 3. 検討事項

### 3.1 試験条件が及ぼす影響

試験結果の再現性を確保するために、試験条件が結果に及ぼす影響についての検討を行った。本研究では、結果に影響を与える可能性がある要素を5つ選定し、それぞれに条件を設定することで基本条件とした。そして、各条件を変更した際の結果を基本条件下で試験した結果と比較し、試験条件の影響を評価した。表1には、設定した基本条件の具体的な数値と、変更を加えた項目を赤字で示している。なお、事前に繰り返し実施した検討結果に基づき、最も安定した結果が得られると予想される条件を基本条件として採用した。ここで、メンブレン端部の処理とは、図2に示すような状態を示す。

表1 基本条件とその変更点

	真空圧 [kpa]	メンブレン被覆長さ [mm]	接着確認のための圧縮力 [N]	メンブレン端部の処理	载荷速度 [mm/min]
基本条件	50	20	6	捲き状態	1.08
比較①	30 40 60	20	6	捲き状態	1.08
比較②	50	10 30	6	捲き状態	1.08
比較③	50	20	2 10	捲き状態	1.08
比較④	50	20	6	捲き無し状態	1.08
比較⑤	50	20	6	捲き状態	0.04 2.34



### 3.2 供試体作製方法による影響

本研究では、供試体作製方法による影響を検討するため、図3に示すように、スラリー状態から圧密して作製した供試体（以下、スラリー供試体）及びスラリー供試体とは異なる方法で作製した圧密供試体（以下、非スラリー供試体）を用いた。なお、これらの供試体は笠岡粘土<sup>4)</sup>を用いて作製した。

供試体の作製方法としては、まず、スラリー供試体に関しては、笠岡粘土と水を混ぜ合わせて作製したスラリーを鋼製モールド内で圧密応力を段階的に加えたものを成形して作製した。成形の際は、直径50mm、高さ80mmになるように切削した。この供試体の特徴としては、比較的均質に作られている点であり、3.1で述べた試験条件の検討ではこの供試体を用いた。含水比については平均37%となるよう作製した。

非スラリー供試体は、スラリー試料の半分の含水比に調製したものを鋼製モールド内に投入し、一定圧力で一次元圧密して作製した。特徴としては、スラリー供試体に比べると、外観で確認できる空隙量が多いことである。試験条件は基本条件から真空圧のみを50kpa及び60kpaに変更し、試験を行った。また、供試体寸法はスラリー供試体と同一とした。さらに、含水比については、平均31%となるよう作製した。

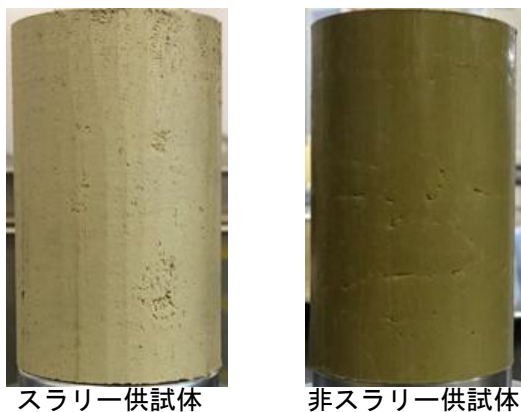


図3 供試体の状態

## 4. 試験結果

まず、破壊面の状態を示す例として、基本条件で行った3ケースの結果を図4に示す。理論上、破壊面は供試体中央部に生じるが、それぞれ異なる位置に形成された。

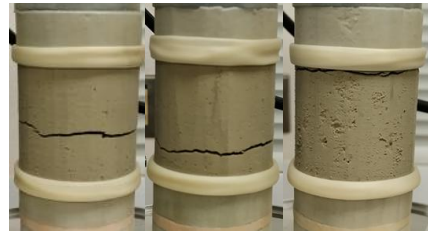


図4 基本条件の破壊面

### 4.1 試験条件が及ぼす影響

#### 4.1.1 真空圧

図5より、真空圧力30kpaのケースでは軸応力が停滞する傾向を示した。また、変形曲線は30kpa付近で停滞していることから、圧力が供試体の強度に比べて低いとこのような挙動になると考えられる。

40kpa以降の結果から、スラリー供試体は35kpa程度の引張強度に収束することが考えられる。しかし、ピークひずみや変形曲線のばらつきが40kpa及び60kpaでみられるため、適切な圧力範囲が存在すると考えられる。

引張載荷開始点を確認すると、比較的集中していることがわかる。このことから、供試体端部を真空状態にするために必要な圧力は一定の値に収束すると考えられる。

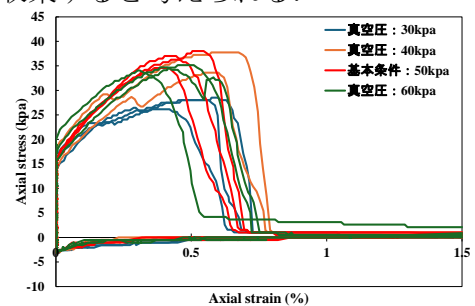


図5 比較①: 真空圧

#### 4.1.2 メンブレンの被覆長さ

図6より、被覆長さ10mmのケースでは、他のケースに比べると引張強度が低下し、変形曲線のばらつきがみられた。一方、30mmのケースは、基本条件と同様の傾向を示した。以上の結果から、供試体高さ80mmに対して被覆長さ20mm以上が再現性のある試験条件だといえる。被覆長さが過度に短い場合、真空圧力の作用範囲が減少し、引張能力が低下することが考えられる。

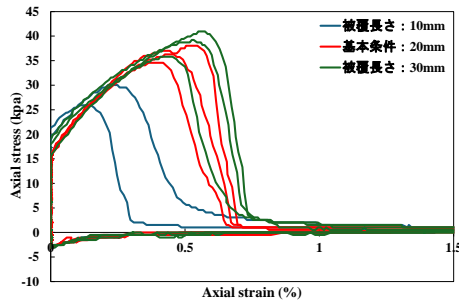


図6 比較②:被覆長さ

#### 4.1.3 接着確認のための圧縮

図7より、キャップと供試体の接着確認のために2Nの圧縮を作用させたケースでは、全ケースで真空圧力載荷過程における強度低下が生じた。これは、接着不良により、供試体端面に不均一な真空圧力が作用したことや、真空状態にするための圧力が増加したことが原因であると考えられる。また、10Nのケースでは、変形曲線のばらつきが生じた。このことから、接着確認のための圧縮力は6N程度が再現性のある試験条件だといえる。

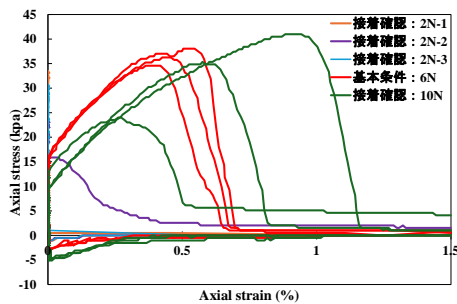


図7 比較③:接着確認のための圧縮

#### 4.1.4 メンブレン端部の処理

図8より、メンブレン端部の捲きが無いケースは、変形曲線に複数のパターンが確認された。この結果から、端部の処理が試験結果に影響を与えることがいえる。本研究では測定可能な要素が限定されているため詳細な検討は困難であるが、再現性の観点からは端部を捲いた状態が適切であると考えられる。

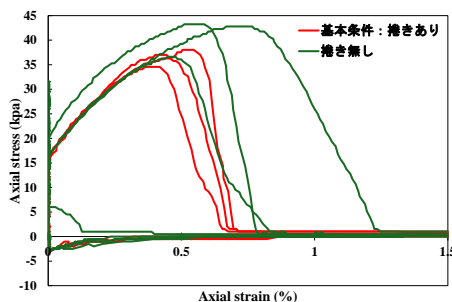


図8 比較④:メンブレン端部の処理

#### 4.1.5 載荷速度

図9より、載荷速度2.34mm/minのケースでは、他のケースと比較すると、延性的な挙動を示した。一方、0.04mm/minのケースは基本条件と同様の傾向を示した。以上の結果から、標準的な載荷速度である1mm/min程度の速度が再現性のある試験条件であることが考えられる。

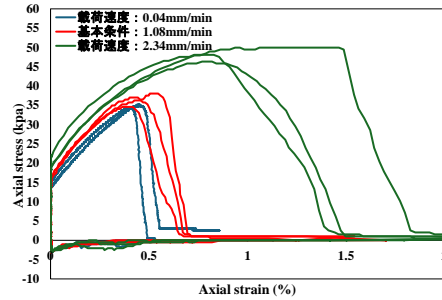


図9 比較⑤:載荷速度

#### 4.2 供試体作製方法による影響

図10より、非スラリー供試体の引張載荷開始点を確認すると、スラリー供試体に比べ高いことがわかる。これは、空隙が多いことで、真空圧力の漏気が生じやすくなり、真空状態にするための圧力が増加したと考えられる。このことから、スラリー供試体においても真空圧力の載荷範囲が拡大する場合、真空圧載荷過程で既に亀裂が生じていることが考えられる。

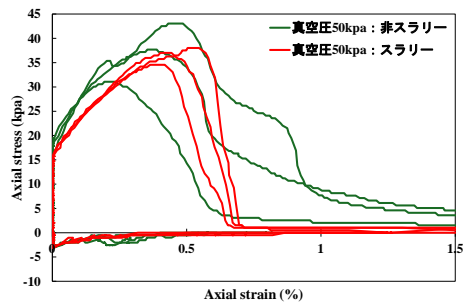


図10-1 真空圧:50kpa

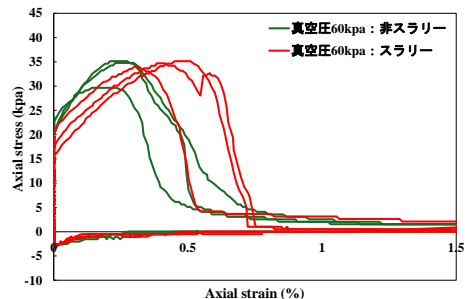


図10-2 真空圧:60kpa

図10 供試体作製方法による影響

## 5. まとめ

試験条件の検討を行った結果、真空圧力は、供試体の強度よりも高く設定することが有効であり、適切な圧力範囲が存在することが確認された。メンブレンの被覆長さについては、供試体高さ 80mm に対して 20mm 以上の被覆長さを確保することで安定した結果が得られた。キャップと供試体の接着確認については、6N の条件で再現性のある結果が得られ、過小では接着不良を引き起こすことが確認された。また、メンブレン端部については、捲いた状態の方が再現性のある結果を示し、端部の処理が試験結果に影響を与えることが確認された。さらに、載荷速度については、1mm/min 程度の条件において再現性のある結果が得られた。

供試体作製方法による影響については、供試体表面及び内部の空隙が結果に影響を及ぼすことが分かった。特に空隙が多い供試体では、真空圧力の作用範囲が拡大する傾向となった。これにより、供試体の性状が真空状態の形成に影響を及ぼす可能性があることが分かった。

## 参考文献

- 1) Xu, J. J., Tang, C. S., Cheng, Q., Xu, Q. L., Inyang, H. I., Lin, Z. Y., & Shi, B. (2022). Investigation on desiccation cracking behavior of clayey soils with a perspective of fracture mechanics: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 1-30.
- 2) Stirling, R. A., Hughes, P., Davie, C. T., & Glendinning, S. (2015). Tensile behaviour of unsaturated compacted clay soils—A direct assessment method. *Applied clay science*, 112, 123-133.
- 3) 福原涼斗, 堀越晟治, 原澤由展, 福元 豊, 高田 晋, Le Ngoc Bao, 中西 晃, 柳浦良行, 新保泰輝: 土のような脆弱固体材料に対する新しい直接引張試験方法の提案, 地盤工学研究発表会, Vol.59, [23-5-2-08], 2023.
- 4) 鈴木麻里子, 齊藤裕仁, 松家武樹, 松下晴彦, & 井上一哉. (2020). 碎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), I\_179-I\_184.