

# 粘土のような低引張強度材料に対する評価手法の開発

地盤工学研究室 飯塚 啓人  
指導教員 豊田 浩史  
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。したがって、引張応力の定量的な評価は重要であるが、低引張強度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。既往の直接引張試験方法<sup>2)</sup>は、専用の型枠に適した供試体形状を用いる必要があり、現状主流とされる間接引張試も含めて、自然な引張破壊挙動を捉えることは難しい。

これまでに私たち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<sup>3)</sup>を行い、様々な作製方法の供試体に対して適用が可能であることが示された。本研究では、当該試験方法の実用化に向けた基礎的な検討として、試験条件を変更に伴う試験結果への影響から再現性を確保するために必要な試験条件の検討を行う。さらに、検討した試験条件のもとで供試体性状が引張強度特性に与える影響を検討すると共に、既往研究で示された他試験における引張強度特性と比較を行う。

## 2. 試験方法及び検討事項

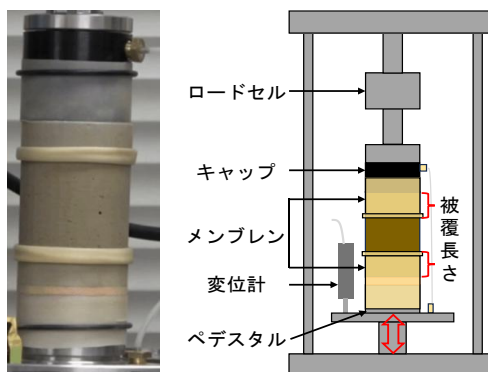
### 2.1 試験概要及び試験手順(検討事項1：試験条件が与える影響)

図1に本試験機の概略図と設置状態の供試体を示す。本試験機は三軸試験機の加圧版（ポーラスストーンを内蔵したキャップ及びペ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、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。これにより、供試体は円柱形状を保持したまま引張力を受けることができる。

試験手順は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いる。まず、供試体設置として、供試体をペDESTAL上に設置し、圧縮側に6N(約3kPa)の荷重を作用させる。そして、メンブレンを20mm@2で被覆し、供試体端部とキャップを密着。その後、真空レギュレーターにより50~60kPaの真空圧を手動で載荷。そして、1.08mm/minで単調載荷を行い、引張応力を測定する。

表1 試験条件の比較項目

	真空圧力 [kPa]	被覆長さ [mm]	初期接着確認 [N] (kPa)	メンブレン 端部の処理	載荷速度 [mm/min]
基本条件	50	20@2	6(3)	捲き状態	1.08
比較①	30/40/60	20@2	6(3)	捲き状態	1.08
比較②	50	10@2/30@2	6(3)	捲き状態	1.08
比較③	50	20	2(1)/10(5)	捲き状態	1.08
比較④	50	20	2(1)	捲き無し	1.08
比較⑤	50	20	6(3)	捲き状態	0.04/2.34



引張試験装置及び引張試験方法、特許第7699362号、  
登録日2025年6月19日  
(特願2024-021901、出願日2024年2月16日)

図1 直接引張試験機の概略図

また、試験条件が与える影響の検討として、結果に影響を与える可能性がある要素を5つ選定し、最適な条件を設定することで基本条件の策定を行った。表1に検討した試験条件の一覧を示す。なお、本稿では真空圧力（比較①）及びメンブレンの被覆長さ（比較②）について検討を行う。

## 2.2 供試体作製方法(検討事項2：供試体性状が与える影響)

本研究では笠岡粘土と水を混ぜ合わせたスラリー(含水比約63%)を、φ150mmの鋼製モールド内で段階的に圧密し、直径50mm、高さ80mmに成型した一次元圧密試料を使用した。また、供試体性状が与える影響の条件の検討として、供試体性状を調整するために、圧密時に設定する真空圧の差圧(DP)を基本条件の250kPaの他150kPa、350kPa、400kPaに設定して供試体を作製した。各作製条件における供試体物性値の一例を表2に示す。また、DP150においては、通常で質量で作製した供試体(DP150-1)とスラリー作製の際に質量を調整して作製した供試体(DP150-2)に分けて試験を実施した。

表2 供試体の物性値

サンプル名	含水比 w[%]	間隙比 e	乾燥密度 $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	引張強度 $\sigma_t$ [kPa]
DP150-1a	48.1	1.35	1.15	12.7
DP150-1a	46.6	1.30	1.18	15.7
DP150-2a	41.7	1.16	1.26	21.9
DP150-2b	41.5	1.22	1.22	21.3
DP250-a	38.2	1.09	1.30	38.0
DP250-b	38.4	1.12	1.28	36.3
DP350-a	34.6	0.97	1.37	47.4
DP350-b	34.6	0.98	1.37	46.2
DP400-a	35.9	0.97	1.38	55.0
DP400-b	36.2	0.97	1.37	47.6

## 3. 試験結果

### 3.1 試験条件が与える影響の検討

図2に基本条件として真空圧力50kPa、比較対象として真空圧力30、60kPaでの試験結果と破壊面の例を示す。真空圧力30kPaのケースにおいて、軸応力30kPa付近で停滞した後に破断する挙動を示した。また、真空圧力30kPaのケースを除くと、軸応力はいずれも35kPa付近で収束する傾向を示した。一方で、真空圧力30kPaの場合には、軸応力の増加が停滞する挙動が確認された。このことから、供試体の引張強度が作用させた真空圧力を上回る場合には、設定した真空圧力以上の荷重は供試体に作用せず、結果として持続荷重により破壊に至っている可能性がある。そのため、本来の引張強度を適切に評価できないと考えられる。以上より、作用させる真空圧力は供試体の引張強度を十分に上回る値に設定する必要があるといえる。

図3に基本条件としてメンブレン被覆長さ20mm@2、比較対象として被覆長さ10mm@2、30mm@2での試験結果と破壊面の例を示す。図4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、荷重変形特性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以上再現性のある試験条件だといえる。また、被覆長さが過度に短い場合は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。

また、本検討に用いた供試体33本の内、約8割が図2に示した破壊面の例のように供試体中央部付近に破壊面を形成した。このことから、本試験方法は特殊な供試体形状を使用せずに安定した破壊挙動を可能にしたといえる。

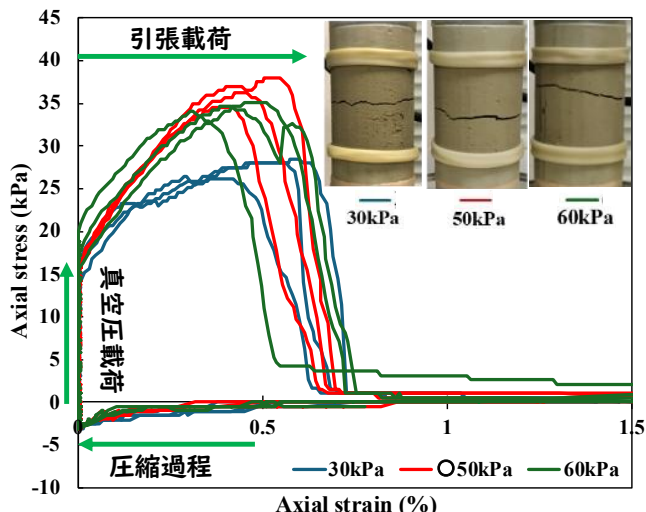


図2 比較①：真空圧力の変更

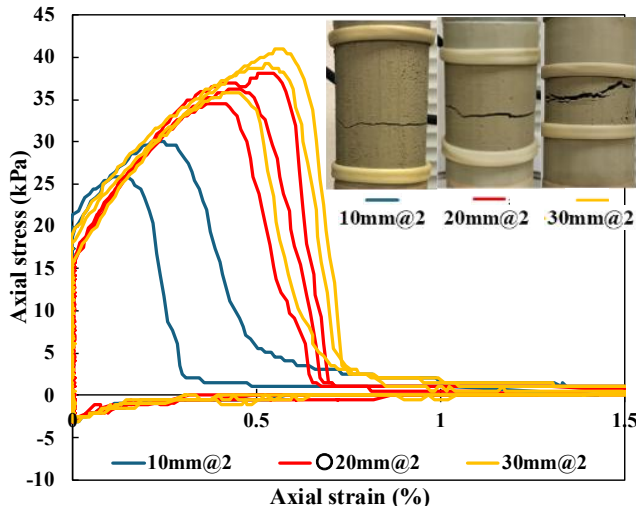


図3 比較②：メンブレン被覆長さの変更

### 3.2 供試体性状が与える影響の検討

図4に各供試体における直接引張試験の結果と破壊面の例を示す。DP250の試験結果と比較してDP150は低い引張強度を示した。また、全体的に延性的な荷重変形特性を示した。特にDP150-1では、他の供試体と比べて、破壊に至るまでの軸ひずみが非常に大きく破壊後も延性挙動を示した。DP350及びDP400においては引張強度が増加し、ピーク強度取得後は他の供試体よりも脆性的な荷重変形特性を示した。これは、供試体性状の変化によるピーク強度増加に伴う、亀裂発生時の応力開放によるものと考えられる。

図5には、本試験で得られた笠岡粘土の乾燥密度と引張強度の関係及びNahlawiら<sup>2)</sup>が行った、玄武岩質粘土供試体及びWilsonら<sup>4)</sup>が行ったカオリナイトに対する直接引張試験で得られた乾燥密度と引張強度の関係を示す。笠岡粘土においては、乾燥密度増加に伴い引張強度が増加する傾向を示した。他の材料においても同様の傾向を示した。材料ごとの物性値が力学的パラメータ与える影響を調査することで、相対的な力学的特性の検討が可能になった。

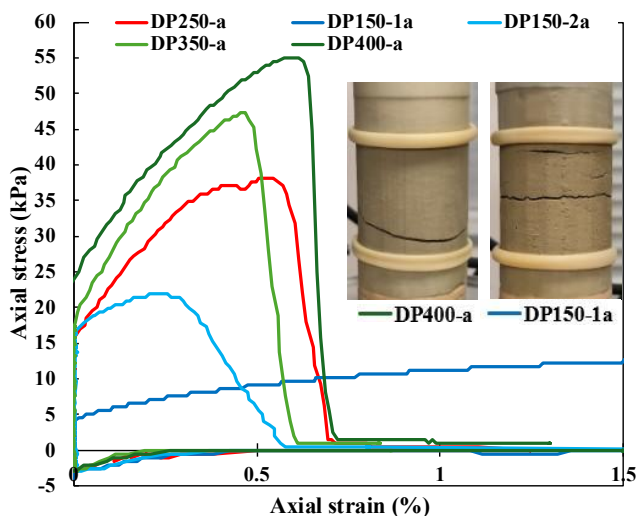


図4 供試体性状と荷重変形特性の比較

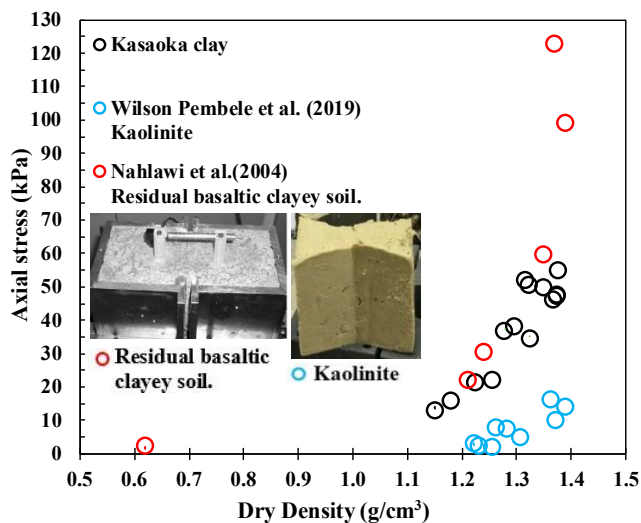


図5 乾燥密度と直接引張強度の関係<sup>2)4)</sup>

#### 4. 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。そして、試験の内約 8 割が供試体中央部に破壊面を形成し、安定した破壊挙動を示した。

供試体性状が引張強度特性に与える影響の検討を行った結果、試験の結果から供試体性状の変化により、直接引張強度及び荷重変形特性に影響が確認された。特に、引張強度が高い供試体ほど脆性的な荷重変形特性を示した。また、乾燥密度の増加に応じて、直接引張強度は増加する傾向が確認された。他の既往研究と比較しても、逸脱することもなく同様な傾向を示したため、試験方法の妥当性を確認できた。

今後の展望として、引張力載荷時における地盤材料の亀裂進展特性をより詳細に解明することが重要である。特に、局所的な応力変化や時系列に伴う亀裂進展挙動を把握するためには、供試体表面の変形挙動を定量的に評価できる手法の導入が有効であると考えられる。具体的には、DIC 解析を用いてひずみ分布を可視化・解析することにより、亀裂の発生位置および進展過程と応力状態との関係について調査を行う。

また、本研究で対象とした笠岡粘土に加え、他種類の粘土や砂を用いた供試体についても試験を実施し、材料物性の差異が荷重-変形特性および引張強度に及ぼす影響を体系的に整理する必要がある。特に、含水比の変化に伴う引張強度の変動は材料特性に強く依存すると考えられることから、多様な材料に関する実験データを蓄積し、物性値に応じた引張強度の変化傾向と他の力学パラメータとの関連性を総合的に検討することが求められる。さらに、間接引張試験では正確な評価が困難とされる高含水比供試体に対して本試験法を適用し、その妥当性を検証することで、試験適用範囲の明確化および既往試験法との差別化を図る必要がある。

#### 参考文献

- 1) Xu, J. J., Tang, C. S., Cheng, Q., Xu, Q. L., Inyang, H. I., Lin, Z. Y., & Shi, B. Investigation on desiccation cracking behavior of clayey soils with a perspective of fracture mechanics: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 1-30. (2022).
- 2) H. Nahlawi, S. Chakrabarti and J. Kodikara, A Direct Tensile Strength Testing Method for Unsaturated Geomaterials, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 4(2004)
- 3) 飯塚啓人, 福原涼斗, 高田晋, 福元豊, レゴックバオ, 中西晃, 柳浦良行, 新保泰輝: 脆弱固体材料の直接引張試験における実験条件の影響, 第 60 回地盤工学研究発表会, [23-10-3-04], 2025.
- 4) Wilson Pembele, Yilin Gui and Ross Stirling, Laboratory Tensile Strength Testing of Clay Soils using Direct Measurement, 7th Asia-Pacific Conference On Unsaturated Soils, 198-204, (2019)