

## 土の引張強度に及ぼす含水比の影響

## Influence of Water Content on the Tensile Strength of Soils

村上雄亮 Yusuke MURAKAMI (広島大学大学院工学研究科)  
 一井康二 Koji ICHII (広島大学大学院工学研究院)  
 河野真弓 Mayumi KAWANO (元広島大学大学院工学研究科)

土の引張強度は、従来の設計において考慮されることがなく、重要視されていない。しかし、実際の被災事例では被災の有無や被災形態に土の引張強度が関係していると考えられる例も存在しており、土の引張強度を考慮することは重要である。そこで本研究では、土の引張強度を測定することを目的とし、新たな土の引張試験法である“モーメント法”を提案した。そして、提案手法により得られた引張強度の妥当性を確認し、さらに含水比変化による土の引張強度の変化を検討した。また、サクシオンと引張強度の関係を実験的に計測できることを示した。

キーワード：引張強度，含水比，サクシオン

(IGC : D06)

## 1. はじめに

土の引張強度は、従来の設計において考慮されることがなく、研究対象として重要視されていない。しかし、実際の被災事例では2004年10月の新潟県中越地震による谷埋め道路盛土のように、被災の有無や被災形態に土の引張強度が関係していると考えられる例も存在しており、土の引張強度を考慮することは重要である。

これまで、土の引張試験方法として、直接法や間接法による様々な手法が提案されてきた。それら既往の引張試験の概略と問題点を示す。間接法である割裂引張試験は円柱の供試体を横置き、上下から力を加えることで供試体が破壊した時の力を測定し、間接的に引張強度を測定する手法である。しかし、この手法では軟弱土の場合に試料を成形することが難しい。直接法である引上げ引張強度試験は土試料を直接引き上げてクラックが入るまでに必要な荷重を測定し引張強度とする手法である<sup>2)</sup>。しかし、この手法では土試料を適切な形に成形することが難しい。同じく直接法である8字型モールド引張試験は8の字に成形されたモールドに土試料を詰めて、片端を固定し、もう一端のモールドをスライドさせクラックが発生したときの荷重を測定することで引張強度を求める手法である<sup>3)</sup>。しかし、この手法ではモールドを動かす際の摩擦力の影響に注意が必要で、さらに土粒子サイズが大きい場合に試料を作成するのが難しい。以上のように、それぞれの手法には難点が多く存在する。

そこで本研究では、新たな直接法として土の引張試験法である“モーメント法”を提案した。そして、提案手法の

妥当性を検討した後、含水比変化による土の引張強度の変化を検討した。さらに、土の引張強度の値に影響を及ぼす要因の一つとして、サクシオンと土の引張強度の関係を検討した。

## 2. モーメント法の概要

図-1のように蝶番を中心にして割裂することのできる箱を作成した。箱に試料を充填し、片端を固定し、もう一端をジャッキに乗せて下げることができるようにする。その際に降下する支点の荷重の変化をロードセルで測定する。また、ジャッキの変位も計測する。ジャッキを下げていくことによって、ロードセルにかかる荷重の値は変化する。これは、ジャッキを下げることによって土試料に引張応力が作用して、ロードセルにかかる荷重が小さくなるためと考えられる。蝶番を中心にしてモーメントの釣り合い式を立て、土の引張応力 $f_t$ を式(1)により算出する。

$$f_t = \frac{2}{B \cdot h^2} \left( \frac{mgl}{2} - \Delta f \cdot a \right) \quad (1)$$

なお、 $f_t$ ：土の引張応力(N/m<sup>2</sup>)、 $\Delta f$ ：ロードセルにかかる荷重(N)、 $B$ ：供試体の幅(m)、 $h$ ：供試体の高さ(m)、 $l$ ：供試体の長さ(m)、 $a$ ：蝶番からロードセルまでの水平距離(m)、 $m$ ：供試体の質量(g)、 $g$ ：重力加速度(m/s<sup>2</sup>)とする。ここで、土試料に作用する引張応力は破断面に一様に作用すると仮定している。この仮定の妥当性は検証が必要である。なお、本方法では土層の左右両端及び、下面の境界に摩擦をなくすなどの特別な配慮はしていない。

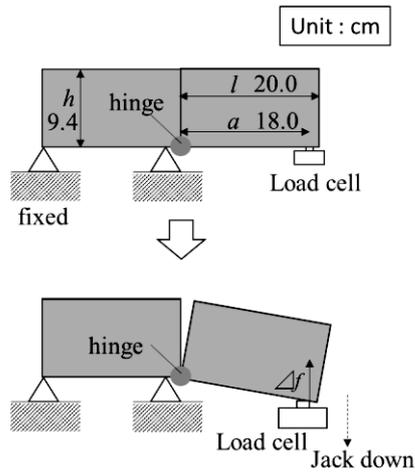
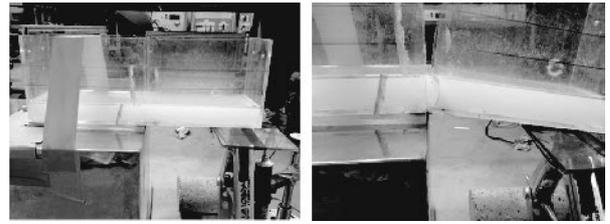
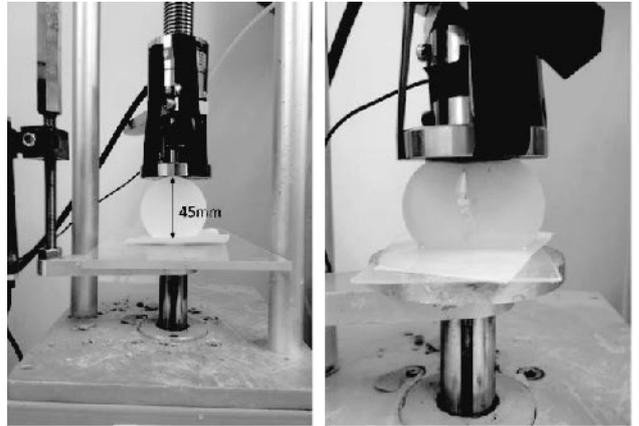


図-1 モーメント法の概要図



(a) モーメント法



(b) 割裂引張試験

図-2 実験の様子

### 3. 寒天供試体によるモーメント法の妥当性の検証

モーメント法によって得られる引張強度の妥当性を検討するため、加工がしやすく、均一な強度が得られる寒天を使用してモーメント法と割裂引張試験を行った。図-2に寒天を用いた、モーメント法と割裂引張試験の実験の写真を示す。図-3にモーメント法による引張試験の結果、図-4に割裂引張試験の結果を示す。どちらもピーク値が明瞭で、引張強度を算定することができた。

表-1に引張強度をまとめた結果を示す。表-1のように、モーメント法により得られた引張強度は、割裂引張試験で求められる引張強度の値より小さくなった。割裂引張試験では荷重の増加とともに載荷板に接触している部分が面となり、拘束効果を発揮する。拘束された面により挟まれた供試体の部分は一軸圧縮のような状態となり、引張強度は過大評価となるという報告<sup>4)</sup>がある。このことから割裂引張試験で求めた引張強度は、本来の引張強度よりも過大評価になっていると考えられる。

既往の研究では、割裂試験による引張強度と引上げ引張試験での引張強度との比較が既に行われており、その結果を図-5に示す。図中に示す含水比約29%から約32%間において、割裂試験による引張強度は引上げ引張試験での引張強度の平均で約1.3倍であった<sup>4)</sup>。そして、表-1で示すように割裂引張試験とモーメント法での引張強度も同程度の違いであり、モーメント法で求めた引張強度は引上げ引張試験機により求まる引張強度とほぼ同程度であると推定できる。

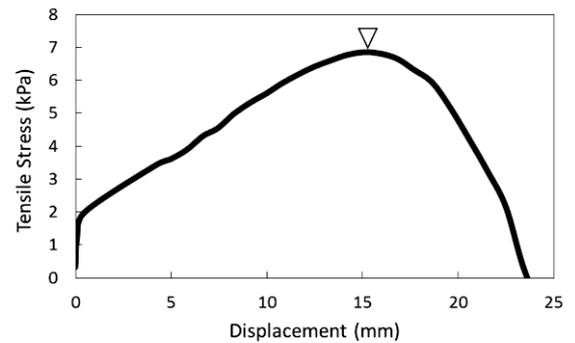


図-3 モーメント法によるジャッキの支点の変位と引張応力の関係

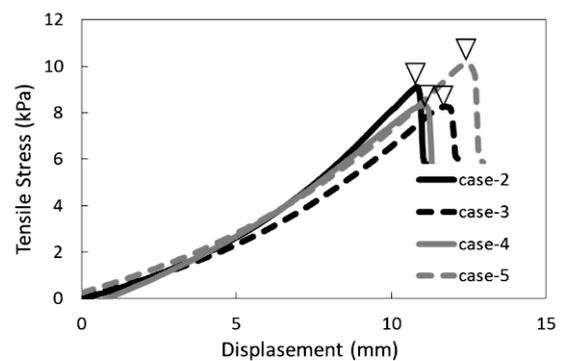


図-4 割裂引張試験による垂直変位と引張応力の関係

表-1 割裂引張試験とモーメント法の比較

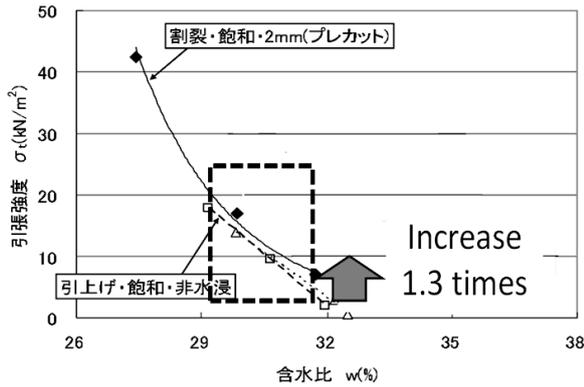


図-5 割裂引張強度と引上げ引張強度の比較<sup>4)</sup>に加筆

Experimental method	Tensile strength (kPa)	Average (kPa)
The Moment method	6.86	6.86
Splitting tensile test	9.12	8.95 (1.3 times)
	8.25	
	8.31	
	10.1	

#### 4. モーメント法による土の引張強度の測定

含水比を変化させた供試体に対して、モーメント法により土の引張強度を求めた。表-2 に実験ケースを示す。空気乾燥状態の土試料を目標含水比になるように加水を行い、静的締固め法を用いた。締固めは3層に分けて行い、大小の締固め用円盤で締固めた。土試料はまさ土と豊浦砂を使用し、共に相対密度が50%となる間隙比になるように締固めた。サンプリング等による確認はサンプリング時のバラツキの問題があるため行わなかったが、隅角部の微小な領域を除いて、均一な供試体が作成できたと考えている。表-3 にまさ土と豊浦砂の物性値、図-6 にまさ土と豊浦砂の粒径加積曲線を示す。図-7 の(a)に case-7, case-8. (b)に case-13, case-14 での支点の変位量と式(1)により求めた引張応力との関係を示す。それぞれの2ケースから同含水比では同じ挙動を示すことが見てとれる。図-7 では引張応力にピークが生じている。このピークの値が土の引張強度であると考えられる。ピーク後に残留強度が存在している理由は未解明であるが、クラック発生直後に微小な土が崩落しているため、クラック直下のヒンジ可動部が細粒分で埋まりヒンジ可動部の抵抗が発生した影響などが考えられる。この時の実際の試料の例を図-8 に示す。土試料に明瞭なクラックが生じていることが見てとれる。このクラックの奥行き方向の形状を明瞭に把握することは難しいが、側面からの観察ではほぼ垂直にクラックが生じている。(ただし、図-8(c)では撮影位置が斜め横のため垂直性は確認できない。) また、供試体奥行き方向には図-8(b)のように若干の弧を描きつつもほぼ平面性を保ったクラ

ックである。そして破断面がやや曲面を有することの影響については補正係数の提案等、今後の課題である。また、これに対応して、図-9 にまさ土と豊浦砂の引張強度と含水比の関係を示す。今回の実験条件では、含水比が約10%の時に引張強度が最大となった。引張強度と含水比の関係については、土中のサクシヨンの値も計測するなどの検討をしていくことが望まれる。

また、図-10 に供試体に引張亀裂が生じた際のジャッキの変位と含水比の関係を示す。引張応力がピーク値となるときのジャッキの変位はほぼ2-4mmであり、試料の含水比の影響を受けない。

表-2 実験ケース

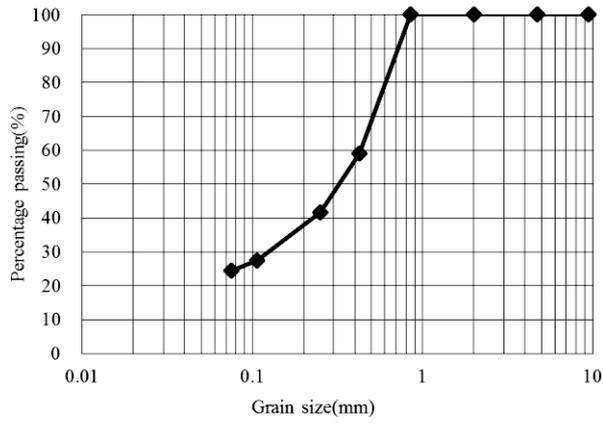
case	soil	void ratio	target water content (%)	water content (%)
case-1	Masado	0.95	5.0	4.48
case-2			5.0	4.49
case-3			7.5	7.01
case-4			7.5	7.30
case-5			10.0	9.56
case-6			10.0	10.13
case-7			12.5	11.95
case-8			12.5	11.93
case-9	Toyoura sand	0.76	5.0	4.75
case-10			5.0	4.29
case-11			7.5	6.86
case-12			7.5	6.33
case-13			10.0	9.05
case-14			10.0	9.29
case-15			12.5	10.78

表-3 土試料の物性値

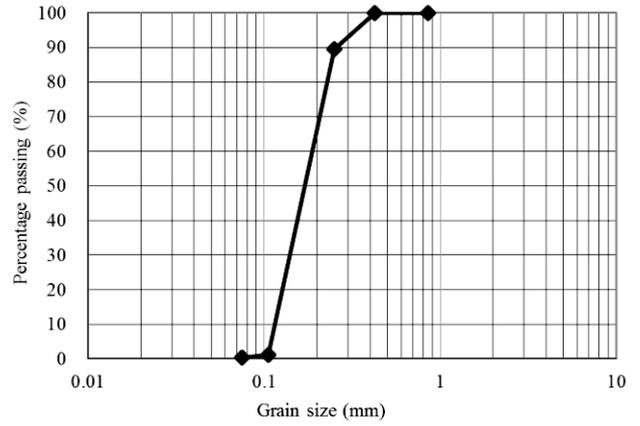
(a) まさ土

(b) 豊浦砂

$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.58	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.67
$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.19	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.37
e max	1.23	e max	0.93
e min	0.68	e min	0.59

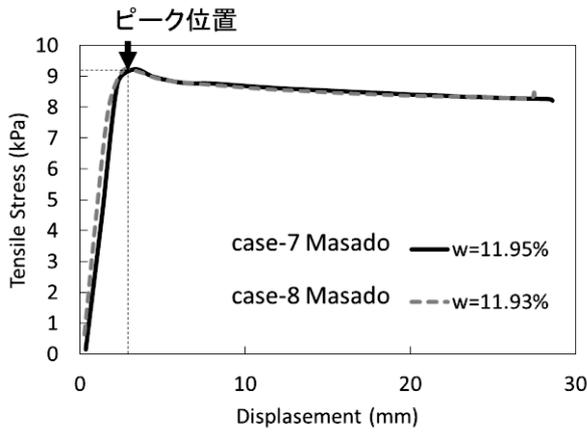


(a) まさ土

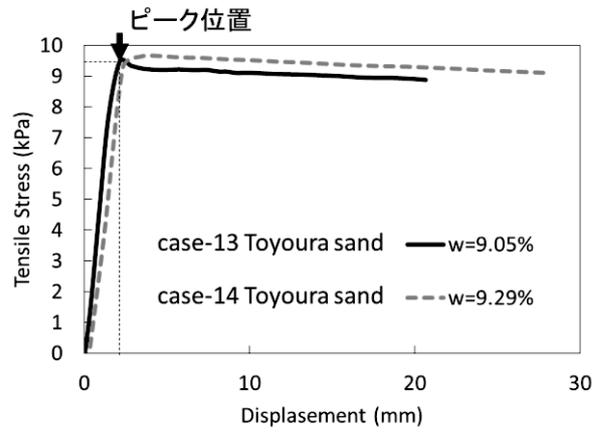


(b) 豊浦砂

図-6 土試料の粒径加積曲線

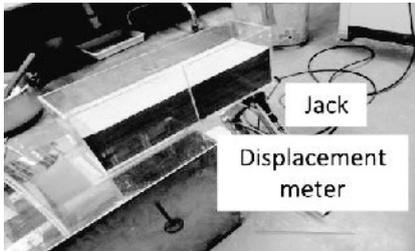


(a) case-7, case-8

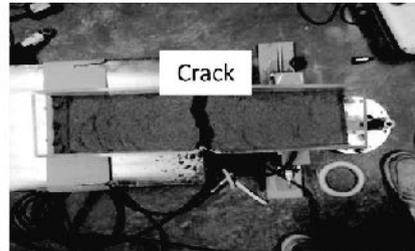


(b) case-13, case-14

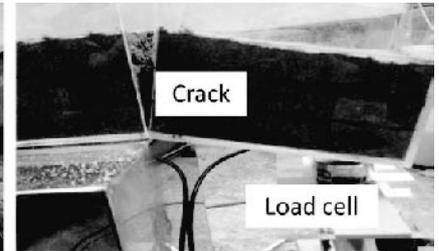
図-7 ジャッキの支点の変位と引張応力の関係



(a) 実験前



(b) 実験後の上から見た写真



(c) 実験後の横から見た写真

図-8 実際の試料の例

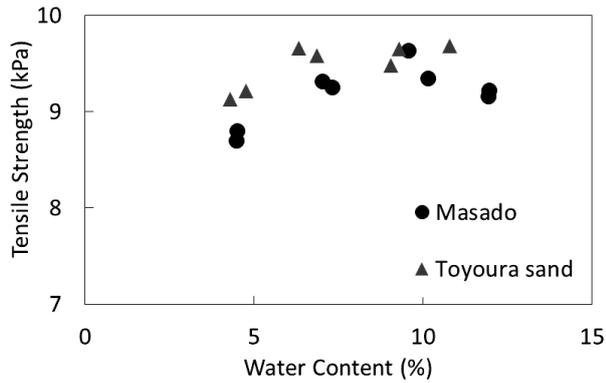


図-9 含水比と引張強度の関係

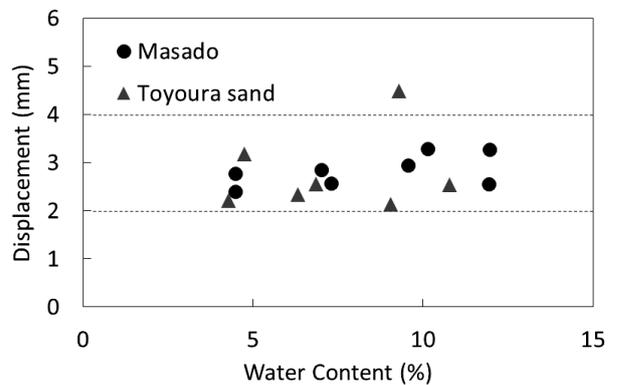


図-10 含水比とジャッキの支点の変位の関係

5. サクションと土の引張強度の関係

図-11 に示すように土試料内にテンシオメーターを挿入することにより、土試料の引張強度を測定すると同時に、サクションを計測することができる。表-4 に実験ケースを示す。空気乾燥状態の土試料を目標含水比になるように加水を行い、供試体を作成した。土試料は4章と同じく、まさ土と豊浦砂を使用し、共に相対密度が50%となるように締固めた。図-12 に土試料内にテンシオメーターを挿入した様子の写真を示す。なお、作成時の感覚からはこのテンシオメーターの存在のため締固めが不均一になりやすい。その影響かどうかは確認できないが、測定された引張強度は図-11 に示したのものよりもやや小さい値となった。

この点は今後の課題である。

図-13 にサクションと含水比の関係を示す。図-13 より、含水比が低下するとサクションは上昇することが確認できた。特に、まさ土では case-2 (含水比 7.09%) を境に急激にサクションが上昇した。含水比が大きい範囲ではサクションの変化が緩やかであった。また、図-14 にサクションと引張強度の関係を示す。サクションが一定値(豊浦砂で 3kPa, まさ土で 4kPa)を超えるとサクションが大きいほど引張強度は低下するという関係になっている。これは土中の水分がある程度以下に減少すると、水がいきわたらなくなり、メニスカスの形成されない土粒子接点が増加することによる影響<sup>9)</sup>であると考えられる。著者らの知る限りでサクションと引張強度の関係が述べられた例はなく、この結果の妥当性は今後の更なる検証が必要であるが、

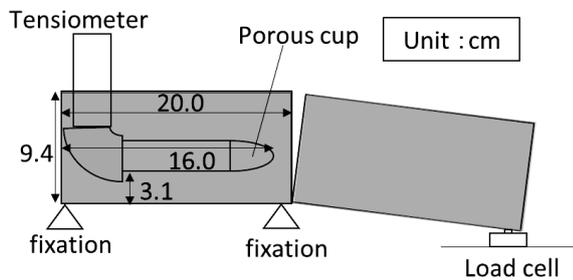
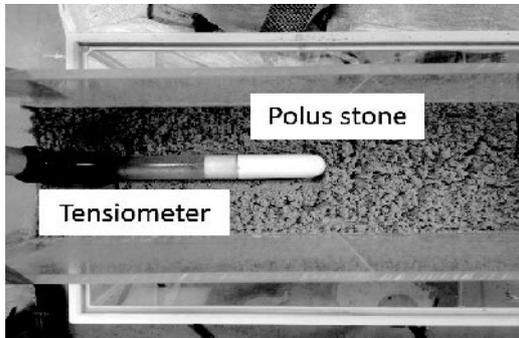


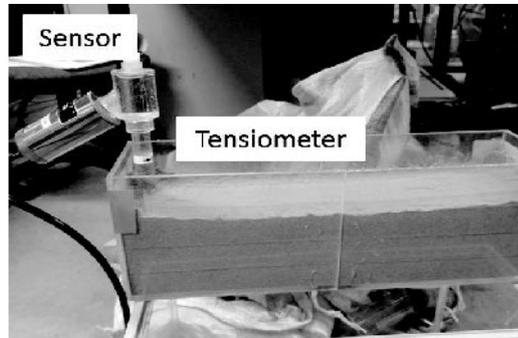
図-11 実験の概要図

表-4 実験ケース

case number	soil	void ratio	target water content (%)	water content (%)
case-1	Masado	0.95	5.0	5.02
case-2			7.5	7.09
case-3			10.0	9.72
case-4			12.5	13.41
case-5	Toyoura sand	0.76	5.0	4.65
case-6			7.5	7.17
case-7			10.0	8.52
case-8			12.5	11.79



(a) 供試体内のテンシオメーター



(b) 実験前

図-12 土の引張強度とサクションの測定

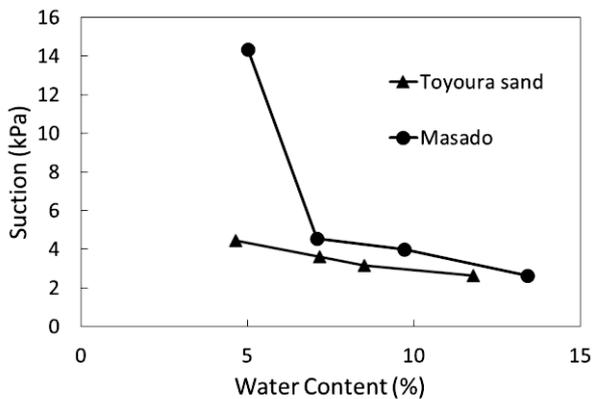


図-13 サクションと含水比の関係

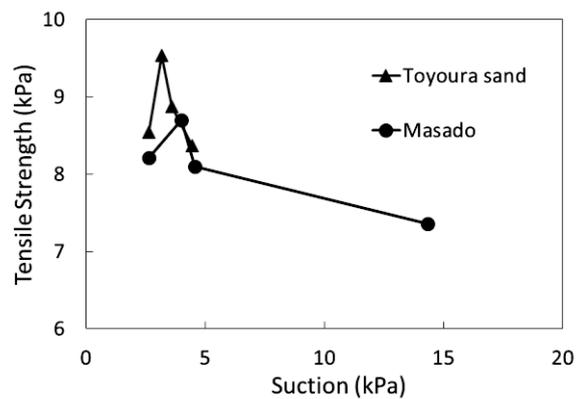


図-14 引張強度とサクションの関係

固め曲線が上に凸の曲線となり、ある締固めエネルギーに対してサクシオンによる結合力が発揮されるうえで最も効果的な含水比があるように、サクシオンが引張強度に寄与するうえで最も効果的な含水比があることが推測できると考えている。

## 6. 結論

本研究では、新たな土の引張強度測定試験の提案と検討を行い、土の引張試験を行った。得られた結果のまとめを以下に示す。

- (1) 土の引張強度を測定するための新たな手法である“モーメント法”を提案した。そして寒天を用いて、割裂引張試験との比較を行い、モーメント法の妥当性を確認することができた。
- (2) モーメント法による土の引張強度測定試験では、含水比変化による土の引張強度の変化を測定することができた。また今回の実験の条件では、含水比が約10%で引張強度が最大となった。
- (3) 土試料内にテンシオメーターを挿入することで、土の引張強度を求めると同時に、サクシオンを計測することができた。サクシオンと土の引張強度の関係を検討した結果、含水比が低下するとサクシオンが上昇するが、一定以上にサクシオンが上昇すると、引張強度が低下する結果となった。

今後の課題として、今回の実験条件として含水比が約5%から13%での範囲のみであるため、さらに広範囲での含水比の変化について検討を行うことが挙げられる。また、モーメント法による土の引張強度の算出を行う仮定として、土試料に作用する引張応力は破断面に一樣に作用すると仮定している。この仮定の妥当性は検証が必要である。

## 参考文献

- 1) 大塚悟：土構造物の被害。(参照 2013.12)  
<http://coastal.nagaokaut.ac.jp/~jisin/report/1-03.pdf>
- 2) 日本工営株式会社：土の引張強度測定装置および土の引張強度測定方法, 出願日 2009.8. (参照 2013.12)  
<http://www.ekouhou.net/土の引張強度測定装置および土の引張強度測定方法/disp-A,2011-47792.html>
- 3) Tamrakar,S.B., 豊澤康雄, 伊藤和也：新しく開発した土の引張強度試験装置(関東ロームの引張強度と一軸圧縮強度の比較), 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.251-252, 2004.7.
- 4) 山口嘉一, 佐藤弘行, 林直良, 吉永寿幸, 下村幸男, スレンソッキアン, 藤澤久子, 秋田洋, : コア材料の割裂引張強度と直接引上げ引張強度の検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 論文 NO.III-004, 2009.9.
- 5) 石原研而: 第 2 版土質力学, 丸善株式会社出版, 38p, 2007.

(2014 年 6 月 23 日 受付)