

注入法により固化させた砂の異方的な圧裂引張特性

山口大学大学院 学生会員 ○徳永諭史 吉川直孝 山下智
山口大学大学院 正会員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一

1. はじめに 近年、ゆるい砂地盤の液状化対策などのため、さまざまな地盤改良工法が提案されており、その一つとして薬液注入工法が挙げられる。薬液注入工法により固化された地盤は、理想的には注入前の砂の構造異方性を維持したまま固結すると考えられる。自然堆積砂地盤において異方性の考慮の重要性は知られており、固化された砂においても異方性について検討し、安定計算に考慮することでより安全な設計を可能にすると考えられる。また、これらの改良土地盤において上載荷重あるいは地震時の破壊は引張クラックを伴う破壊挙動であることが報告されており、引張強度の検討も重要視され始めている。そこで本研究では、堆積させた砂試料に超微粒子セメント、水ガラス系薬液を浸透注入させ固結供試体を作製し、堆積面に対する載荷方向を変化させて圧裂引張強度を比較した。また、顕微鏡を用いて圧裂引張試験後の供試体の破断面の観察を行うことにより、砂の構造的な異方性を評価した。

2. 試料および実験概要 実験にはシリカ砂($\text{Silica}_{0.85-2.0}$, $\text{Silica}_{0.18-2.0}$)を用いた。砂試料及び固化材の粒径加積曲線を図1に示す。砂試料を空中落下法により砂の相対密度 $D_{rs} = 100\%$ となるように堆積させた後、超微粒子セメント(以下 MC)、水ガラス系薬液(以下 PR)を浸透注入させることにより固結供試体を作製した。また、注入後の供試体内のセメント質量を計測し、砂の質量との重量百分率で定義したセメント添加率 Q_c を求めた。養生条件は 20°C の恒温条件で MC 浸透砂が 14 日間、PR 浸透砂 28 日間とした。MC 浸透砂は注入時の水セメント比を $W/C = 500\%$ とした。図2にそれぞれの供試体の堆積面に対する載荷条件を示す。圧裂引張試験は直径 $d = 50\text{mm}$ 、厚さ $t = 20\text{mm}$ の円盤供試体を用いた。

3. 実験結果と考察

(1) 圧裂引張強度に与える異方性の影響：図3、図4に MC、PR 浸透砂それぞれの軸荷重と軸変位の関係を示し、図5に MC、PR 浸透砂の圧裂引張強度 σ_t と供試体の堆積面に対する載荷条件の違いの関係を示す。ここで、圧裂引張強度 σ_t は圧裂引張試験で計測された最大軸荷重 $P_{\max}$ を用いて式(1)より算出した。

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi dt} \quad \dots \dots (1)$$

ここで d は供試体直径、 t は供試体の厚さを指す。図3、図5の MC 浸透砂に着目すると、圧裂引張強度 σ_t は H-sample > N-sample > V-sample となり、供試体の堆積面に対する載荷条件の違いによる強度差が見てとれることから、強度異方性の存在が認められた。しかし図4、図5に着目すると、PR 浸透砂は MC 浸透砂と比べて圧裂引張強度が非常に小さく、載荷条件による強度差がほとんどみられない。顕微鏡を用いた観察により、MC 浸透砂において砂粒子の接点付近に固化材が多く付着しているのに対して、PR 浸透砂においては間隙が薬液でほぼ充填されている様子が観察された。このことは、間隙が薬液でほぼ充填されることで砂粒子の接点での引張抵抗よりも薬液自体の強度の影響が強く現れると推測される。このことから PR 浸透砂では異方的な特性が現れなかったと考えられる。

(2) 浸透注入により固化された砂の構造異方性：砂の異方性には砂粒子の長軸の卓越配列によるものと、砂粒子間の接点での法線ベクトルの卓越配列による

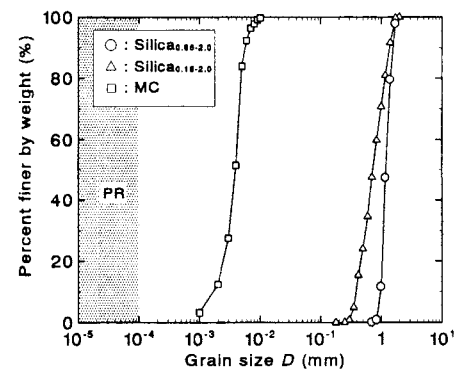


図1 砂試料及び固化材の粒径加積曲線

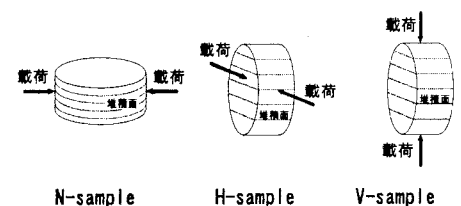


図2 圧裂引張試験における堆積面に対する載荷条件

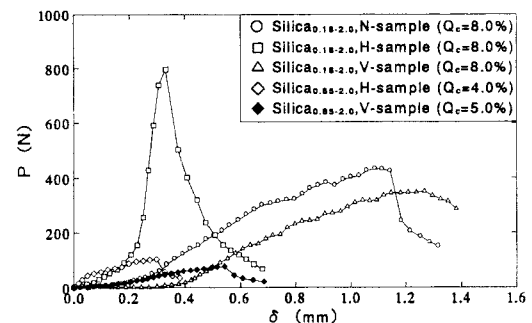


図3 MC 浸透砂の軸荷重と軸変位の関係

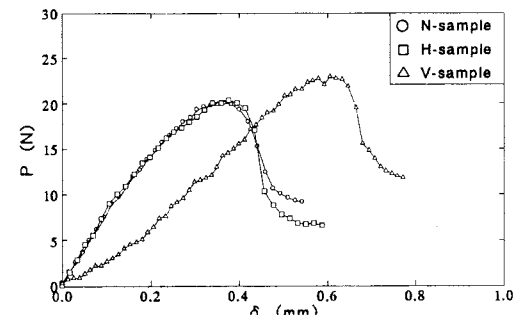


図4 PR 浸透砂の軸荷重と軸変位の関係

ものの二種類に識別できる。ここでは、砂粒子の長軸方向 θ を計測し、異方的な構造を評価することとした。図6に砂粒子の長軸方向 θ の計測方法を示す。顕微鏡を用いて供試体の破断面の写真を撮影し、画像解析ソフトを用いて砂粒子の長軸方向 θ を計測した。図6(a)(b)どちらも堆積面と平行方向を x 軸とし、 x 軸から反時計回りを正として砂粒子の長軸方向 θ を計測した。図7は砂試料がSilica_{0.85-2.0}であるMC浸透砂の砂粒子の長軸方向の頻度分布を極座標により表現したものと、その分布を2階の構造テンソルによって近似した結果である。以下に構造テンソルの算出方法¹⁾を示す。計測結果を用いて次式により、2階の構造テンソル H_{ij} を求める。

$$H_{ij} = \sum_{a=1}^M f^{(a)}(\theta) n_i^{(a)} n_j^{(a)} \quad (i, j = 1, 2) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 M : 区間幅の個数、 $f^{(a)}(\theta)$: 離散的な確率密度関数、 $n_1^{(a)} = \cos\theta$ 、 $n_2^{(a)} = \sin\theta$ である。この H_{ij} を変換則に代入して主値 H_{ij} を求める。ここで主値の差 $H_{11} - H_{22}$ が異方性の程度を示す。求めた主値 H_{ij} を次式により等方成分と偏差成分に分離する。

$$H_{ij} = H_0 \delta_{ij} + H_{ij}^d \quad \dots \dots \dots (3)$$

式(3)より求められた H_0 、 H_{ij}^d を用いて2階の構造テンソルによる砂粒子の長軸方向 θ の頻度分布を式(4)によって近似した。

$$f(\theta) = H_0 + H_{ij}^d n_i n_j \quad \dots \dots \dots (4)$$

以上より得られた $f(\theta)$ の分布は、図7(a)が円形なのに対して図7(b)がピーナツ形状を示した。また、図7(a)の主値の差が0.058であるのに対して、図7(b)の主値の差は0.348と高い値を示した。これより堆積面に対して鉛直面で見たときに砂粒子は堆積面に対し平行に卓越配列しており、堆積面に対して水平面で見たときは砂粒子の配列が等方的であることが示された。また、図8に予想される砂粒子の接触法線ベクトル分布を示す。砂粒子が定方向に卓越して配列する場合、その90°方向に砂粒子の接触分布が卓越するという報告²⁾がある。V-sampleの場合、堆積面が水平方向となるため、ピーナツ形状の長軸は鉛直方向を向く。またN-sampleは、図7(a)が堆積面に対して水平面の砂粒子配列を示していることより、接触法線ベクトル分布が等方的になると予想される。ここで、接触法線ベクトル分布は砂粒子の接触分布を表しており、引張応力の働く方向に接触法線ベクトルが卓越しているほど高い圧裂引張強度を示すと考えられる。これより、先ほどの圧裂引張強度の関係H-sample > N-sample > V-sampleが砂粒子の構造異方性に起因したものであることを示した。

4. まとめ 今回用いた固結材料において、①圧裂引張試験において、試料の間隙が薬液でほぼ充填される固化材を用いた場合、砂粒子の接触分布の特徴が消失するものと考えられる。②超微粒子セメントにより固化され空中落下により堆積した砂の圧裂引張強度は構造異方性に起因した強度異方性を示した。

[参考文献] 1)飛田善雄：構造テンソルによる異方性の表現，土と基礎，Vol.49，No.9，pp.77-83，1993
2)小田匡寛，風間秀彦：土と岩盤の構造異方性，土と基礎，Vol.41，No.9，pp.73-80，1993

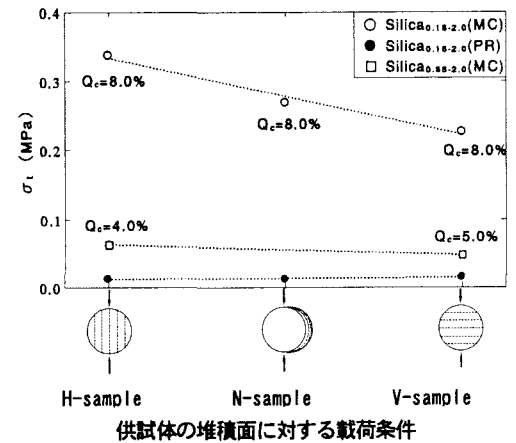


図5 圧裂引張強度にみる強度異方性

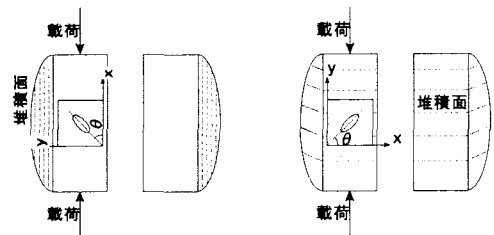


図6 砂粒子の長軸方向 θ の計測方向

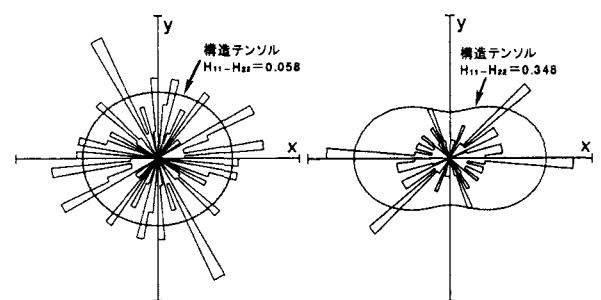


図7 砂粒子の長軸方向 θ の分布と構造テンソルによる近似

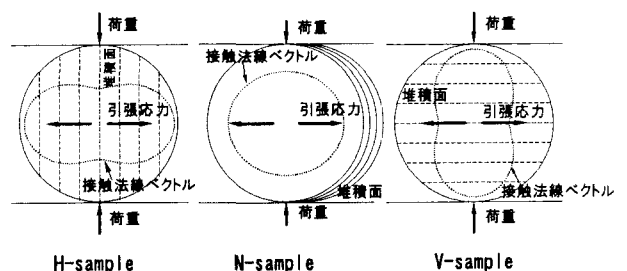


図8 予想される砂粒子の接触法線ベクトル分布と供試体に作用する引張応力の方向