

凍結土の強度およびせん断パラメーター

中央大学 学生会員 ○浅木 優弥
中央大学研究開発機構 正会員 石井 武司
中央大学 正会員 齋藤 邦夫

1. はじめに

軟弱地盤を克服する技術の一つに凍結工法がある。同工法は地盤内に冷媒を供給し、間隙水を凍らせて地盤強度の増大を図る。しかし、海水が浸入するような沖積地盤の塩分濃度は海側で高く、地盤の凍結強度は場所によって変化することが考えられる。

そこで、本報告では海水の塩分濃度が約 3% であることから、間隙水の塩分濃度 C を $0\% \leq C \leq 3\%$ に設定して、凍結強度特性に及ぼす塩分濃度の影響を調べた。また、凍結土がモール・クーロンの破壊規準に従うと仮定して、せん断パラメーターについて検討を試みた。

2. 実験方法

2.1 材料と供試体作製方法

用いた試料は硅砂 7 号である。粒度分布を図 - 1 に、物性値を表 - 1 に示す。塩分には NaCl を用いた。

一軸圧縮試験供試体の形状は直径 5cm、高さ 10cm の円柱形とした。供試体作製には紙製のモールドを使用した。高さ 10cm のモールドに 4cm のカラーを装着し、モールド内に塩分濃度を調整した NaCl 水溶液を注ぐ。次に、目標の相対密度となるように計量した試料を 5 回に分けて振動を与えながら投入する。さらに、モールド上部より 2cm の高さになるまで試料を投入し、カラーを外して上部をすりきる。これを約 -20°C の低温槽で 7 日間凍結させた。凍結日数に関しては、事前の実験で 7 日目以降の時間経過による強度変化が小さいことを確認している。

割裂試験には、上記の手順で作製した供試体を、凍結後に高さ 5cm で切断した直径 5cm、長さ 5cm の円柱供試体を用いた。

2.2 せん断試験方法

a) 一軸圧縮試験

一軸圧縮装置に供試体を設置し、室温状態で載荷速度 1mm/min にて載荷した。このとき、図 - 2 に示すように供試体の上下に断熱用の緩衝材と冷却した磨きステンレス板を設置した。載荷時の変位と荷重を変位増加 0.05mm ごとに自動記録した。

b) 割裂試験

横に倒した供試体を図 - 3 に示すように治具で固定し一軸圧縮装置に設置した。

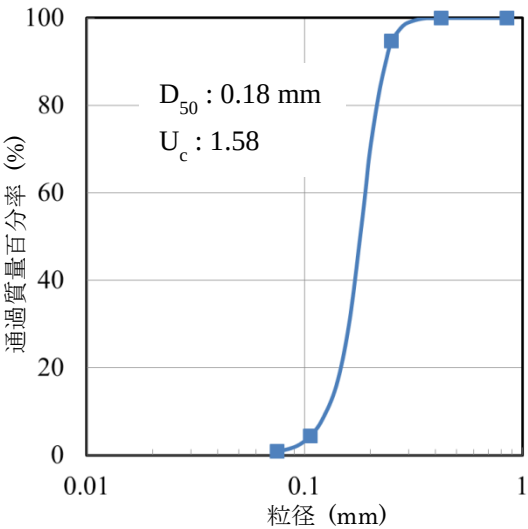


図 - 1. 硅砂 7 号の粒度分布

表 - 1. 硅砂 7 号の物性値

土粒子密度 $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
2.639	1.092	0.636

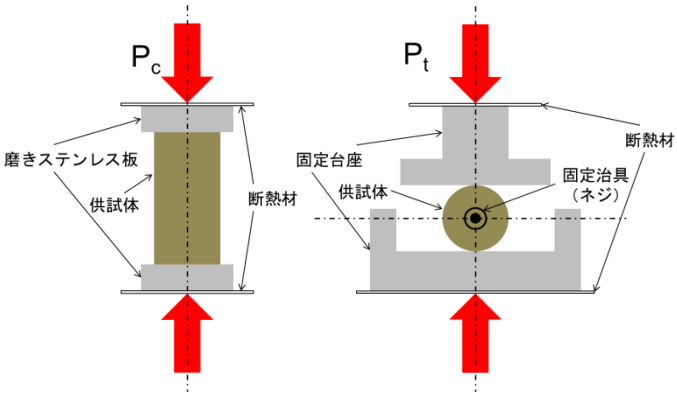


図 - 2. 一軸圧縮試験

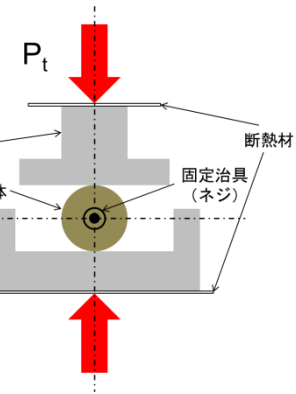


図 - 3. 割裂試験

キーワード 凍結工法, 凍結土, 塩分濃度, 内部摩擦角

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL : 03-3867-0530 E-mail : a14.njpj@g.chuo-u.ac.jp

一軸圧縮試験と同様に室温状態で載荷速度 1mm/min にて載荷し、載荷時の変位と荷重を変位増加 0.05mm ごとに自動記録した。

割裂試験の方法はコンクリートの割裂引張強度試験方法¹⁾によった。それによれば、引張強度 f_t は載荷荷重 P を次式に代入することで得られる。

$$f_t = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times L} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 d は供試体の直径、 L は供試体の長さである。

2.3 実験条件

平均室温 21.5℃の室内にて実験を行った。供試体の相対密度 D_r は 60% を目標とし、実験開始前における供試体の表面温度は -18.0℃～-19.0℃ となるようにした。塩分濃度 C は $C=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.5, 3\%$ の 6 通りとした。また、1 つの濃度につき一軸圧縮試験および割裂試験を 4 回以上ずつ行った。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験結果より代表的な応力～ひずみ曲線を図-5 に示す。一軸圧縮試験では、応力～ひずみ曲線におけるピーク強度を一軸圧縮強さ q_u とした。なお、試験装置からの熱の移動を防ぐ必要があるため、供試体と試験装置の間には断熱材を設置した。そのため、原点付近のひずみは、断熱材のひずみも含むので過大に評価される。よって、応力～ひずみ曲線において原点から $q_u/2$ 点における区間は $q_u/2$ 点での傾きを用いて直線で補正した。

3.2 塩分濃度と一軸圧縮強さの関係

図-6 に一軸圧縮試験より得られた一軸圧縮強さと塩分濃度の関係を示す。

各塩分濃度で平均一軸圧縮強さを比較すると、 $C=0\%$ と $C=0.75\%$ での差は約 3047kN/m² であるのに対し、 $C=0.75\%$ と $C=3\%$ での差は約 1079kN/m² であった。 $C=0\%$ から 0.75% にかけて塩分濃度の増加にともなって凍結土の強度が大きく低下している。これは、供試体の間隙水内に塩分が入り込むことで間隙水の凝固点降下が生じ²⁾、凍結時に不凍水として液体の状態であることが原因と考えられる。

3.3 塩分濃度と変形係数の関係

前述の断熱材による影響を考慮して、応力～ひずみ曲線の $q_u/2$ 点における接線の傾きを変形係数 E_{50} とした。変形係数と塩分濃度の関係を図-7 に示す。

変形係数も一軸圧縮強さと同様に $C=0\%$ から $C=0.75\%$ にかけて大きく低下する。それより塩分濃度の高い領域では、強度の低下は小さい。

次に変形係数と一軸圧縮強さの関係を図-8 に示す。塩分を含まない凍結土ではばらつきはあるが概ね



一軸圧縮試験

割裂試験

図-4. 試験後の $C=3\%$ 供試体

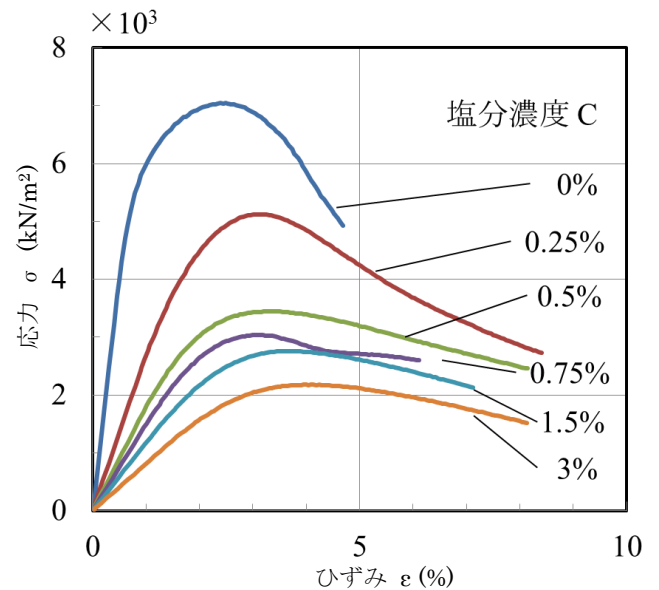


図-5. 一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線

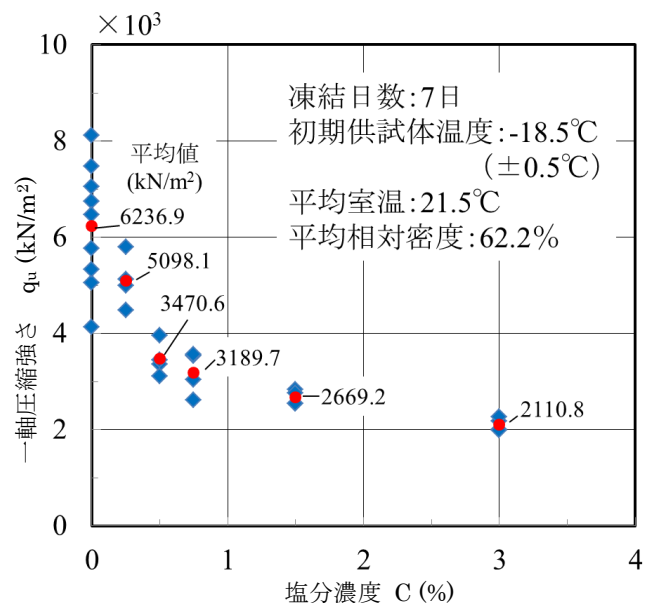


図-6. 一軸圧縮強さと塩分濃度の関係

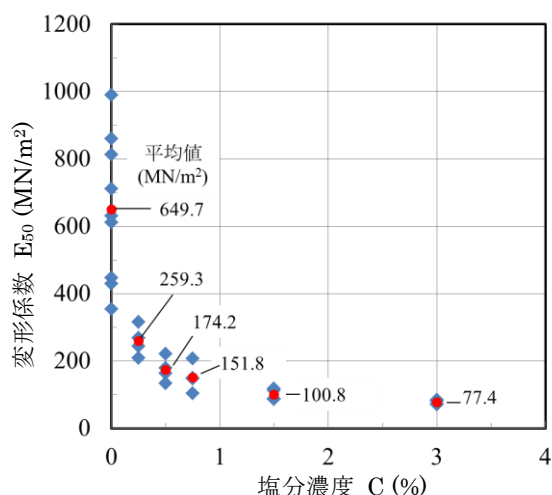


図 - 7. 変形係数と塩分濃度の関係

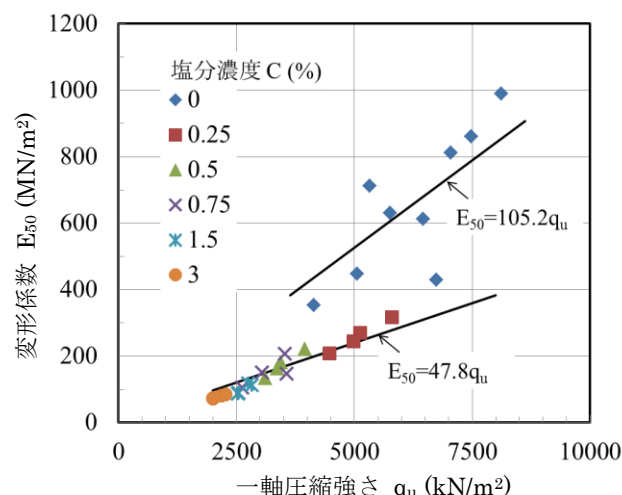


図 - 8. 変形係数と一軸圧縮強さの関係

$E_{50} \div 100 q_u$ の関係にあり、塩分を含む凍結土ではほぼ $E_{50} \div 50q_u$ の線形関係にある。間隙水の塩分が変形に大きな影響を与えることが分かる。

3.4 塩分濃度と引張強さの関係

図-9 に割裂試験より得られた荷重と変位の関係を、図-10 に割裂試験より得られた引張強さと塩分濃度の関係をそれぞれ示す。

$C=0\%$ から 0.75% にかけて塩分濃度の増加にともなって強度が大きく低下する。それよりも塩分濃度の高い領域では、強度低下は小さく、一軸圧縮試験と同様の関係が認められた。

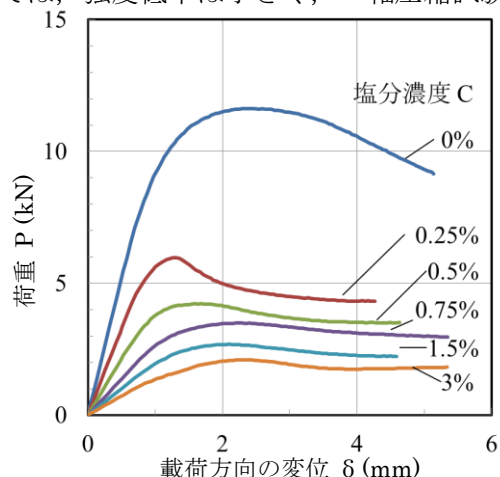


図 - 9. 割裂試験の荷重～変位曲線

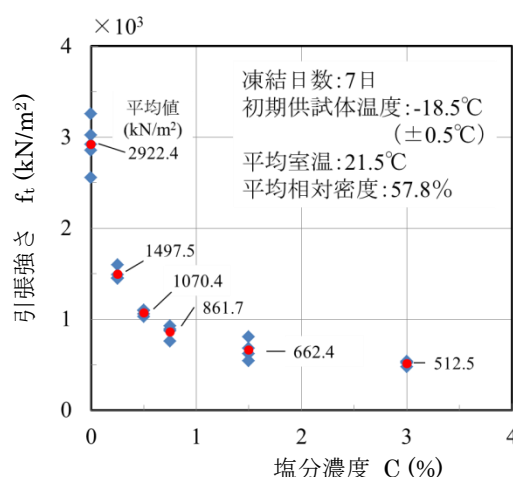


図 - 10. 引張強さと塩分濃度の関係

3.5 一軸圧縮強度と引張強度の比較

割裂試験結果から各塩分濃度における引張強さの平均値を求め、その値と一軸圧縮試験の各結果を比較した。平均引張強さと一軸圧縮強さの比を図 - 11 に示す。

塩分濃度が増加するにしたがって、 $f_t \div 0.25q_u$ の比例関係に近づく。

3.6 塩分濃度とせん断パラメーターの関係

凍結土がモール・クーロンの破壊規準に従うと仮定する。一軸圧縮強度と引張強度より図-12 のように破壊規準を描くことができる。そこから粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を求めることができる。図中の破壊基準は、赤い円で示した各試験結果の平均値より求めた。

各濃度における平均引張強さと一軸圧縮試験結果を用

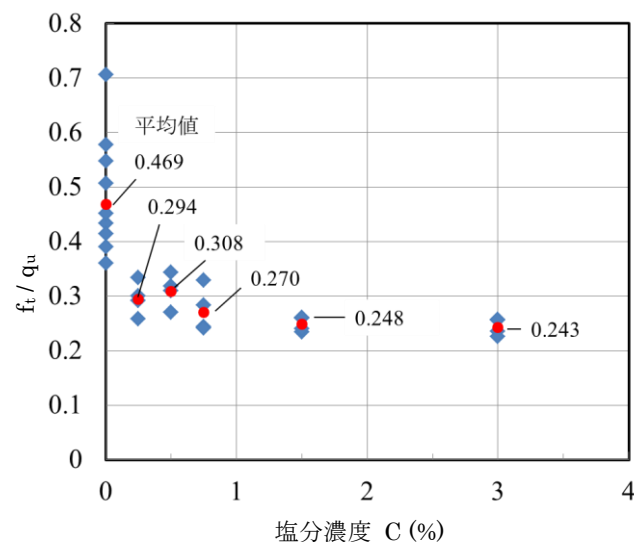


図 - 11. 一軸圧縮強さと引張強さの比

いて粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求めた。粘着力および内部摩擦角と塩分濃度の関係をそれぞれ図-13, 図-14 に示す。参考として珪砂7号の三軸試験より求めた内部摩擦角を図-14 中に点線で示す。²⁾

$C=0\%$ を除いておおよそ内部摩擦角 $\phi=35^\circ$ 付近に存在することがわかる。また、破壊規準より幾何学的に次式が与えられる。

$$\tan \phi = \frac{q_u/2 - f_t/2}{q_u/2 + f_t/2} \quad \text{-----} \quad (2)$$

これを整理すると以下のようにになる。

$$\tan \phi = \frac{2}{1 + f_t/q_u} - 1 \quad \text{-----} \quad (3)$$

すなわち、内部摩擦角は f_t/q_u に反比例することが分かる。図-11 より塩分濃度が増加するにしたがって $f_t \propto q_u$ に近づくと考えれば、塩分濃度の増加によって凍結土の内部摩擦角は一定の値に収束すると考えられる。

内部摩擦角とすべり線の角度の関係式 $\theta = \pi/4 + \phi/2$ より、 ϕ に 35° を代入してすべり線の角度 θ を求めると、 $\theta = 62.5^\circ$ となる。一軸圧縮試験後にそれぞれのすべり線の角度について分度器を用いて計測した結果どれも約 60° となったことからこの結果が妥当であると確認した。

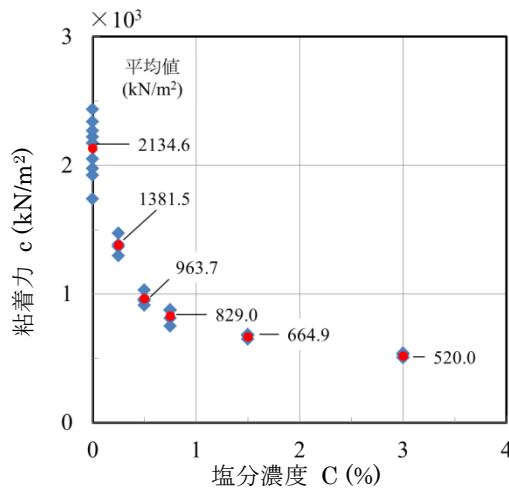


図-13. 粘着力と塩分濃度の関係

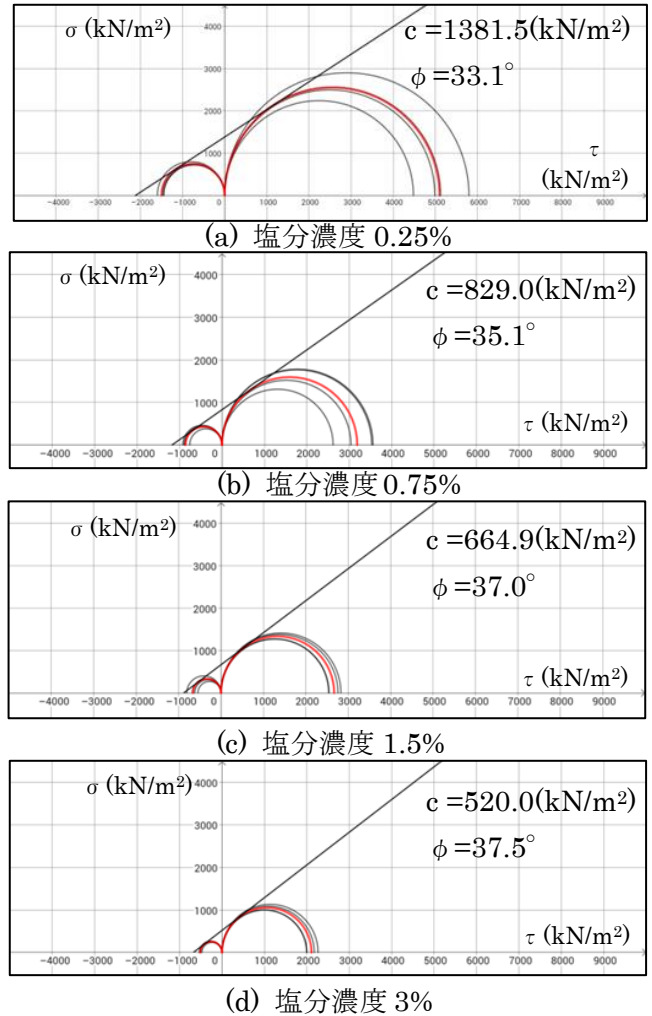


図-12. 各塩分濃度の破壊規準

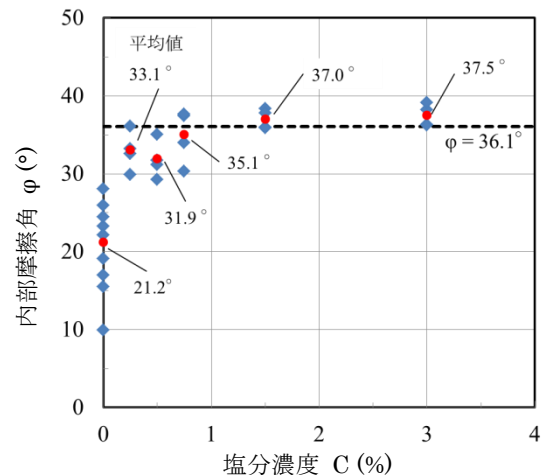


図-14. 内部摩擦角と塩分濃度の関係

4. まとめ

塩分濃度の異なる凍結土に対して一軸圧縮試験および割裂試験を行った。得られた結果は次の通りである。

- 1) 一軸圧縮強さ、引張強さはともに塩分濃度 $C=0\%$ から 0.75% にかけて大きな強度低下が認められた。
- 2) 変形係数は、塩分濃度 $C=0\%$ では $E_{50} \doteq 100 q_u$ 、それ以外では $E_{50} \doteq 50 q_u$ であることが得られた。
- 3) 引張強度と圧縮強度の関係は、塩分濃度の増加にともない $f_t \doteq 0.25 q_u$ に近づく。
- 4) 内部摩擦角 ϕ は 35° 付近となり、実際に計測したすべり線の角度と一致した。

参考文献

- 1) 日本工業規格 JIS A 1113 : 2006.コンクリートの割裂引張強度試験方法。
- 2) 高志勤・生頼孝博・山本英夫・岡本純：砂凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.302, pp.79-88, 1980。
- 3) 高橋彬：クロマイトサンドのせん断特性，第35回土木学会関東支部技術研究発表会，III-014, 2008。