

凍土の一軸圧縮降伏強さと細粒分含有率および乾燥密度との関係

鹿島建設(株) 正会員 ○田口翔大 辻 良祐 永谷英基 吉田 輝
ケミカルグラウト(株) 正会員 長田友里恵 相馬 啓
北海道大学 正会員 西村 聡

1. はじめに

凍結工法は、その高い安全性と止水性から高水压下の掘削防護工として必要不可欠の技術であり、これまで多くの現場に適用されてきた。凍結工法における凍土の設計強度は砂または粘性土の標準値¹⁾が用いられることが多いが、両者の中間的な土質材料については利用可能なデータが少ない。そこで筆者らは、各種地盤材料を対象として、体系的な凍土試験を行うことで凍土物性値のデータベース化を進めており²⁾、その検討の一環として凍土の強度に対する影響因子の検討を行っている。本報では、凍土の強度特性への細粒分含有率（以下、 F_c とする）と乾燥密度（以下、 ρ_d とする）の影響について検討したので報告する。

2. 試験材料

試験材料を表-1 に示す。 F_c をパラメータとして凍土の設計強度について考察が行えるように、君津砂と木節粘土を所定の比率で混合して F_c を 0%~90%の間で変化させた混合土を準備した。過去の知見に基づく凍土強度のイメージ図を図-1 に、各材料の粒径加積曲線を図-2 に示す。なお、材料の表記の数字は F_c の値を示す。

表-1 試験材料の物理的性質

試料名	表記	土粒子密度 (g/cm^3)	最大乾燥密度 (g/cm^3)	細粒分含有率 F_c (%)
君津砂	F_c0	2.719	1.634	0.2
混合土	$F_c5 \sim F_c75$	2.703~2.652	1.658~1.938	5.1~75.1
木節粘土	F_c90	2.619	1.575	89.9

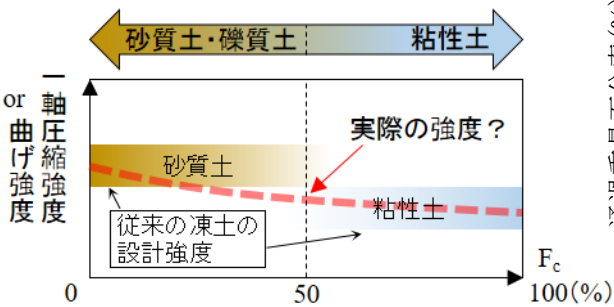


図-1 凍土強度のイメージ図

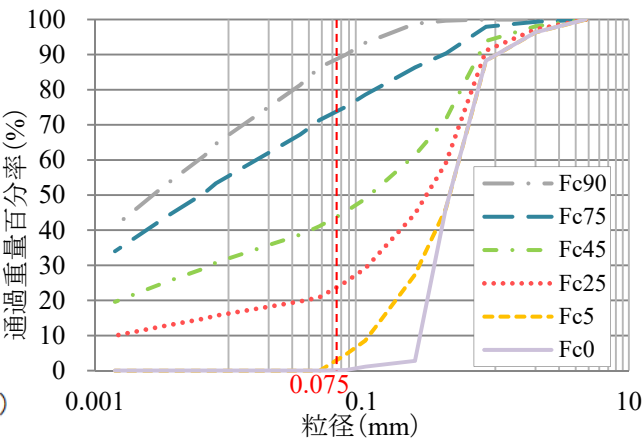


図-2 粒径加積曲線

3. 試験方法

試験方法および試験水準を表-2 に示す。試験は一軸圧縮試験と曲げ試験の2種類を実施したが、本報では一軸圧縮試験の結果を報告する。試験方法や供試体の作製方法の詳細は既報²⁾を参照されたい。試験温度は、近年開発された液化CO₂凍結工法による凍結温度(-45℃程度)を考慮し³⁾、-5、-10、-20、-30、-40℃の5水準で試験を行った。なお、従来の設計強度が示されている-10℃と-20℃については ρ_d の水準を増やし、詳細な分析が行えるように配慮した。供試体は全て飽和度（以下、 S_r とする）を100%とすることを目標に作製を行った（ S_r の実測値 88.6%~100%）。また、試験から得られた強度については、既報で報告している飽和度の補正⁴⁾は未だ検討段階であることから、補正は行わずに評価した。

表-2 試験方法および試験水準

試験温度	目標 F_c (%)	目標 ρ_d (g/cm^3)	供試体数(個/試験方法)
-10, -20	0, 5, 25, 45, 75, 90	1.20, 1.35, 1.50, 1.65, 1.80	2(温度) × 6(F_c) × 5(ρ_d) × 3供試体 = 180
-5, -30, -40		1.40, 1.60, 1.80	3(温度) × 6(F_c) × 3(ρ_d) × 3供試体 = 162

キーワード：凍結工法，凍土，強度特性，細粒分含有率，乾燥密度

連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL. 042-489-6559

4. 試験結果

(1) 一軸圧縮降伏強さと乾燥密度

一軸圧縮降伏強さ（以下、 q_{uv} とする）⁴⁾のうち、 -20°C 条件下の q_{uv} と ρ_d の関係を図-3に示す。図より、 q_{uv} は ρ_d に影響を受けないことが見て取れ、この傾向は他の温度においても同様に確認できた。

(2) 一軸圧縮降伏強さと細粒分含有率

各温度の q_{uv} と F_c の関係を図-4に示す。これによると、 q_{uv} と F_c および凍結温度（以下、 T とする）には高い相関があることが確認できる。また、便宜上、 $F_c \geq 50\%$ を粘性土、 $F_c < 50\%$ を砂質土として従来の -10°C の設計強度¹⁾を図に重ねて示しているが、図中の○で示すように、 $F_c 50\%$ を砂質土と粘性土の閾値として設定すると、従来の設計強度を危険側で使用する可能性が示唆された。

(3) 一軸圧縮降伏強さと温度、細粒分含有率の関係

図-4において、 q_{uv} と F_c の関係性が各温度で類似していることから、式(1)に示す変数分離型の相関式（ g 、 h は関数）を仮定する。

$$\begin{aligned} q_{uv} &= g(T) \cdot h(F_c) \\ &= (a \cdot T + b) \cdot (c \cdot F_c^2 + d \cdot F_c + e) \quad \cdots (1) \end{aligned}$$

q_{uv} 、 T (< 0)、 F_c の単位はそれぞれ N/mm^2 、 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\%$ とし、表-3に示す定数 a 、 b 、 c 、 d 、 e （今回の試験結果から回帰分析を行って推定）を用いて推定した各温度の q_{uv} と F_c の関係を図-4に破線で重ねて示す。図-4に示すように、提案式は試験結果を概ね良好に再現できており、地下水位下の飽和した地盤であれば凍結温度と細粒分含有率で凍土の強度が推定できる可能性が示唆された。

5. まとめ

凍土の強度に関して、細粒分含有率 F_c と乾燥密度 ρ_d について着目し試験を実施したところ、以下の知見が得られた。

- ① 凍土の強度（一軸圧縮降伏強さ、曲げ引張強さ）は、乾燥密度 ρ_d にほとんど影響を受けない。
- ② 今回得られた知見とこれまでの検討結果から、地下水位下における凍土の各強度（一軸圧縮降伏強さ、曲げ引張強さ、せん断強さ）は、凍結温度（ T ）と細粒分含有率（ F_c ）に大きく依存し、その強度は、以下の関数式で示せる可能性がある。

$$\sigma = g(T) \cdot h(F_c) = (a \cdot T + b) \cdot (c \cdot F_c^2 + d \cdot F_c + e)$$

（ σ ：凍土の各強度、 $a \sim e$ ：定数）

- ③ 従来の設計基準強度で評価する際、対象とする土質が砂質土か粘性土かどうかを決定する判断材料として、細粒分含有率 F_c を調査する事でより安全側の設計が行える。

なお、今回得られた上記知見の普遍性を確認するため、今後も様々な土質材料を対象に凍土の強度特性の影響要因についての検討を継続して行っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会：地盤凍結工法—計画・設計から施工まで—、技報堂、pp.44-45、1982。
- 2) 吉田ら：凍土の一軸圧縮・曲げ引張・せん断強度の一括評価—凍土設計データベースの整備、第53回地盤工学研究発表会、2018。
- 3) 相馬ら： CO_2 気液混合流体による地盤凍結工法の開発、トンネル工学報告集、第26巻、2016.11。
- 4) 辻ら：凍土の飽和度が一軸圧縮強さに及ぼす影響—凍土設計データベースの整備（その4）、第54回地盤工学研究発表会、2019。

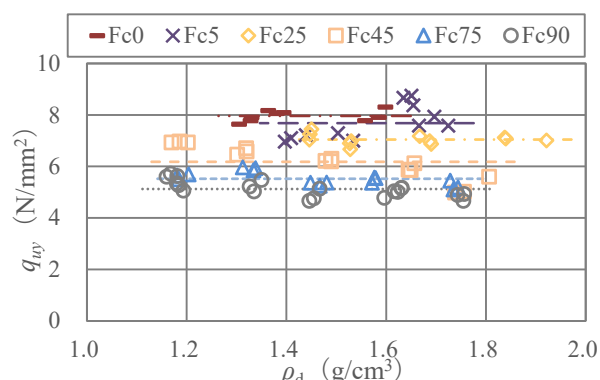


図-3 q_{uv} と ρ_d の関係（ -20°C ）

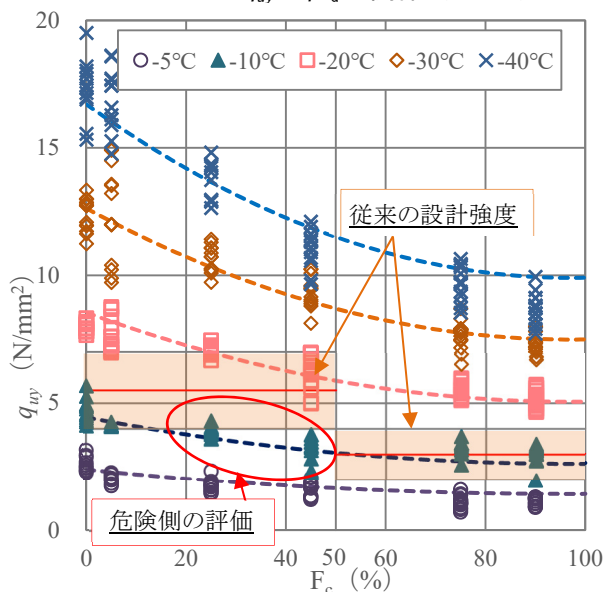


図-4 q_{uv} と F_c の関係

表-3 試験結果から推定した定数

項目	a	b	c	d	e
値	-0.0252	0.0229	0.0007	-0.136	16.2122