

凍結工法のための凍土試験体系とデータベースの構築

Constructing Test Frameworks and a Database Regarding Artificial Ground Freezing

辻 良 祐 吉 田 輝 照 井 秀 幸¹⁾
田 口 翔 太²⁾ 相 馬 啓³⁾ 長 田 友 里 恵³⁾

要 約

地盤凍結工法は、その高い安全性と止水性から高水圧下における地盤改良工として、これまで多くの現場に適用されてきた。凍結工法の設計には各種の凍土物性値が必要であり、そのうち最も基本となる凍土単体の強度には、一軸圧縮強さ、曲げ引張強さおよびせん断強さの3種類があるが、凍土試験によるこれらの評価方法は体系化されておらず、特に、せん断強さの評価方法が確立していないのが現状である。また、凍土と地中構造物の境界面の凍着強度の評価方法についても同様である。そこで、筆者らはこれらの一連の強度評価手法を体系化し、その妥当性を室内試験により検証した。さらに、当手法を活用して、設計に即座に使用できる凍土物性のデータベースを構築しているため、その一部を紹介する。

目 次

- I. はじめに
- II. 凍土単体の強度評価
- III. 凍着強度の評価
- IV. おわりに

I. はじめに

地盤凍結工法は、薬液注入工法やセメント系固化工法などの一般的な地盤改良工法に比べ高コストであるが、止水性は最も確実な工法である。海外ではアメリカ、旧ソ連で1930年代から適用されており、日本でも1962年に初めて実工事に適用されて以来、600件を上回る施工実績を有しており、近年、土木工事の多様化や大深度化に伴い、凍結工法へのニーズは以前にも増して高まっている。

凍土の設計では、Fig.1に示すように①凍土単体の強度・変形特性、②材料間の凍着特性、③凍結膨張特性といった各種物性値が必要となる。このうち、①凍土単体の強度については、Table 1に示す設計標準値¹⁾が使用されることが多い。しかしながら、この標準値は土質が「粘性土」、「砂質土」の2種類しか示されておらず、実務においてどのような値を採用すれば良いか不明確である。このため、可能な限り現場採取

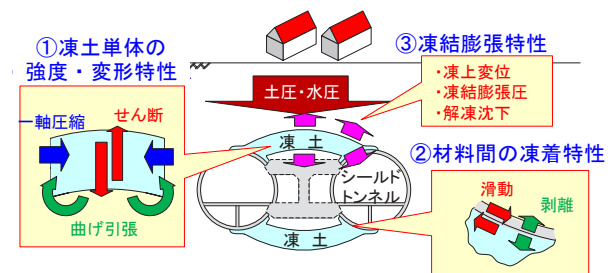


Fig.1 凍結工法の設計に必要な物性値
(Needed Physical Property for Design of the Artificial Ground Freezing)

Table 1 従来の設計強度の標準値¹⁾ (単位: kg/cm²)
(Conventional Standard Value of Design Strength)

土質	-10℃			-20℃		
	一軸圧縮	曲げ引張り	せん断	一軸圧縮	曲げ引張り	せん断
粘性土	20~40	15~20	15~20	45~60	20~30	20~30
砂質土	40~70	20~30	20~35	60~100	30~45	30~50

試料を用いた凍土試験を行って Table 1 の各強度（一軸圧縮強さ、曲げ引張強さ、せん断強さ）を評価することが望ましいが、その方法は体系化・標準化されていない。

1) 東北支店 Tohoku Branch
2) 鹿島道路株式会社 Kajima Road Co., Ltd.
3) ケミカルグラウト株式会社 Chemical Grouting CO.,LTD.

キーワード: 凍結工法, 凍土物性データベース, 凍結強度, 凍結膨張率, せん断強度, 凍着強度

Keywords: the artificial ground freezing, database about the characteristics of frozen soil, strength of frozen soil, frost heaving rate, shear stress, adfreeze strength

また、凍土と地中構造物の境界面の安定性評価には、前記②材料間の凍着強度が必要となる。これには凍着引張強さ（剥離強さ）と凍着せん断強さ（滑動強さ）があるが、いずれの試験法も標準化されていない。

以上の背景の下、筆者らは、凍結工法の設計に必要な凍土の単体強度および凍着強度の一連の試験手法および評価手法を体系的に構築し、その妥当性・有用性を室内凍土試験で検証した。さらに、凍土試験が実施できないケースも多い現実を踏まえ、開発したこれら手法を使用して各種条件で凍土試験を行い、凍土物性のデータベースを構築しているため、その一部を紹介する。

なお、凍土の設計では、通常ピーク強さ q_u (q_{upeak}) ではなく降伏強さ q_{uy} が用いられており、Table 1 も降伏強さ相当値となっている。本報でもなるべく降伏強さを用いたが、データ整理上、ピーク強さに依らざる得ない場合もあるため、実験データについてはピーク強さ q_u が降伏強さ q_{uy} であるか明記した。なお、 q_{uy} は各試験で得られた軸応力～軸ひずみ関係に基づいて、圧密降伏応力の算出に用いられるキャサグランデ法²⁾を参考に、以下の手順で求めた (Fig.2 参照)。

- ① 応力～ひずみ曲線の曲率最大点 a を求める。
- ② a 点における接線 A と、 a 点を通り X 軸に平行な直線 A' の二等分線 A'' を求める。
- ③ 応力～ひずみ曲線の初期直線部分 (弾性範囲) を延長した直線 B と直線 A'' の交点の応力を q_{uy} とする。

II. 凍土単体の強度評価

1. 設計に用いる強度

凍土の設計では、前述したように凍土単体について 3 種類の強度 (一軸圧縮強さ、曲げ引張強さ、せん断強さ) に対して応力照査を行う必要がある。これら 3 種類の強度のうち、一軸圧縮強さ・曲げ引張強さはそれぞれ一軸圧縮試験³⁾、曲げ試験⁴⁾で求めることができる。一方、せん断強さは、拘束圧 (垂直応力) がゼロの状態のせん断強さ、すなわち粘着力に相当する (以下ではこのことを明確にするために非拘束せん断強さと記す) が、非拘束せん断強さは試験で直接求めることが難しいため、従来、三軸圧縮試験で得られるモール円の破壊包絡線を拘束圧ゼロの点まで外挿して求められてきた。しかしながら、凍土の三軸圧縮試験は複雑で実務向きでないうえ、これで求める非拘束せん断強さは外挿値である。そこで、筆者らは、これに代わる実用的で信頼性の高いせん断強さの評価方法を提案した。

2. 非拘束せん断強さの評価方法の提案

Fig.3 は凍土の一軸圧縮強さ q_u (C 点)、曲げ引張強さ σ_{bt} (T 点；一軸伸長強さ σ_t に等しいと仮定) および非拘束せん断強さ τ_{f0} (S 点) の幾何学的関係を表した概念図である。凍土の破壊規準線を勾配 $\tan \phi$ (ϕ : 内部摩擦角) の直線 (Mohr-Coulomb 規準) と仮定すれば、非拘束せん断強さ τ_{f0} は、「 q_u

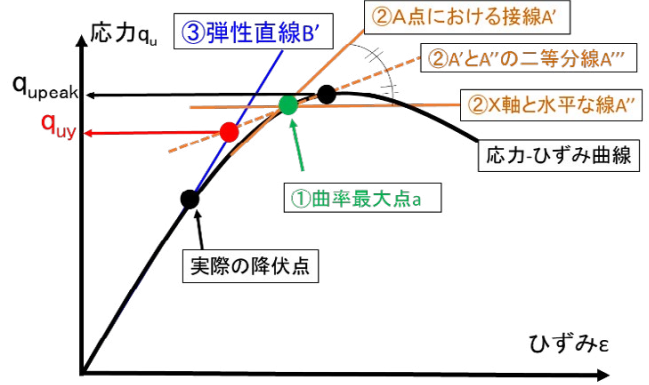


Fig.2 一軸圧縮降伏強さ q_{uy} の算出方法
(Determination of Unconfined Compression Yield Strength)

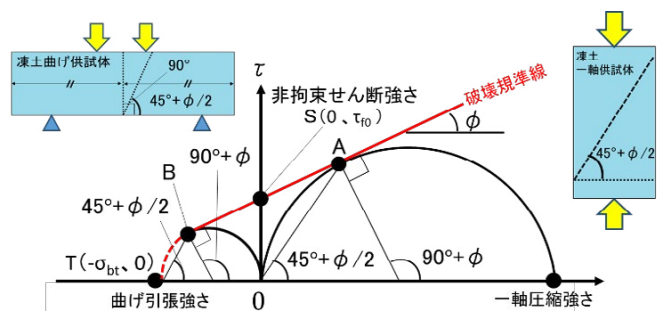


Fig.3 各強度の関係と破壊規準線
(Relationship of Each Strength and Failure Criterion)

を直径とする一軸圧縮破壊時の Mohr 応力円」と「 σ_{bt} を直径とする曲げ引張破壊時 Mohr 円」の両者に接する破壊規準線の縦軸切片であり、(1)、(2) 式で表される。ただし、 q_u 、 σ_{bt} はいずれも絶対値とする。

$$\tan \phi = \frac{q_u - \sigma_{bt}}{2\sqrt{q_u \cdot \sigma_{bt}}} \quad \dots (1)$$

$$\tau_{f0} = \frac{\sqrt{q_u \cdot \sigma_{bt}}}{2} \quad \dots (2)$$

なお、曲げ試験において曲げクラックが鉛直 (クラックの傾斜角: 90°) に生じる場合は純曲げ引張と見なされるが、実際には傾斜して生じる場合もあり、後者は純曲げ引張破壊とせん断破壊が複合していると考えられる。そこで、破壊時の引張縁応力 σ_{bt} を直径とする Fig.3 の引張側の Mohr 応力円において、せん断破壊 (クラックの傾斜角: $45^\circ + \phi/2$) となる B 点と純曲げ引張破壊 (クラックの傾斜角: 90°) となる T 点を結ぶ円弧 B-T 上のいずれの点でも破壊すると仮定し、破壊規準線は B 点より引張側では、円弧 B-T (Fig.2 の赤破線) であると考えられる。

3. 妥当性の検証

(1) 検証方法

式(2)による非拘束せん断強さ τ_{f0} の評価が適切であることを確認するために、Fig.4 に示す傾斜型一面せん断試験⁵⁾ (以下、単にせん断試験と記す)を実施して、破壊規準線を式(1)、(2)による直線と仮定することの妥当性を検証した。試験は、傾斜角 θ のスリットで上下に分割された鋼製円筒型枠の内側に円柱供試体をセットし、型枠ごと軸方向に圧縮して、スリット沿いに強制的にせん断破壊させるものである。このとき、スリットにより強制的に生じるせん断面(滑り面)内の応力分布が一様で、かつ、このせん断面以外で破壊しないとすれば、せん断面の応力状態(直応力 σ 、せん断応力 τ)は、Fig.3 の原点から直線 $\tau = \sigma \cdot \tan\theta$ 上を右上に移動し、これが破壊規準線との交点 D (直応力 σ_f 、せん断応力 τ_f) に達した時点でせん断破壊する。D 点の直応力 σ_f 、せん断応力 τ_f は、スリット付き供試体の見掛けの一軸圧縮破壊時 Mohr 応力円(原点を通り、直径は見掛けの一軸圧縮強さ q_u') 上にあることから、 q_u' とスリット傾斜角 θ を用いて、それぞれ(3)、(4)式で表せる。

$$\sigma_f = q_u'/2 + (q_u'/2) \cdot \cos 2\theta \quad \dots (3)$$

$$\tau_f = (q_u'/2) \cdot \sin 2\theta \quad \dots (4)$$

なお、見掛けの一軸圧縮強さ q_u' は $\theta = 45^\circ + \phi/2$ の場合に最小となり、このとき破壊時 Mohr 円は D 点で破壊規準線に接する。

以上のように、せん断試験で求めた D 点が Fig.2 の方法で求めた破壊規準線上に位置しているかどうかを確認することで、破壊規準線の妥当性を検証した。スリット傾斜角 θ は、 45° および 60° の 2 種類とした。

(2) 検証結果

試料として Table 2 に示す君津砂を使用し、凍土の一軸圧縮試験、曲げ試験およびせん断試験 ($\theta = 45^\circ, 60^\circ$) を実施した。一軸圧縮試験およびせん断試験の供試体は直径 50mm×高さ 100mm の円柱形、曲げ試験は高さ 40mm×幅 40mm×長さ 160mm の角柱形とし、試料の含水比を調整し、乾燥密度が 1.65g/cm^3 となるように、静的に締め固めて作製した。鉛直方向の載荷速度は一軸圧縮試験およびせん断試験では 1.0mm/min 、曲げ試験では 0.4mm/min 、供試体本数は 3 本ずつとし、試験温度は -20°C とした。

試験結果の一例を Fig.5 に示す。なお、当図の各種強さはすべてピーク強度である。図中の円は q_u および σ_{bt} の 3 供試体の平均値を用いてそれぞれ描いた一軸圧縮破壊時および曲げ引張破壊時の Mohr 応力円であり、両者の共通接線が(1)、(2)式による破壊規準線である。せん断試験における破壊時応力状態 (Fig.4 の D 点) はほぼ上記の破壊規準線

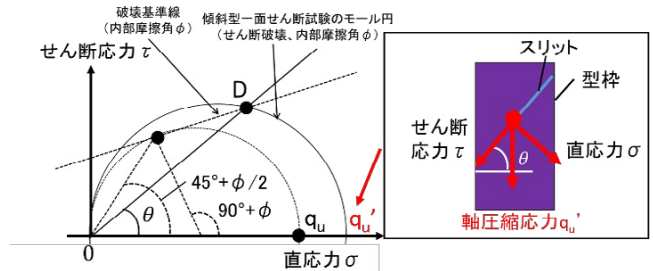


Fig.4 傾斜型一面せん断試験 (Inclined Shear Test)

Table 2 試験材料 (Material for Test)

試料名	表記	細粒分含有率 $F_c(\%)$	土粒子密度 (g/cm^3)	最大乾燥密度 (g/cm^3)
君津砂	F_c0	0.2	2.72	1.63
混合土	$F_c5 \sim F_c75$	5.1~75.1	2.70~2.65	1.66~1.94
木節粘土	F_c90	89.9	2.62	1.58

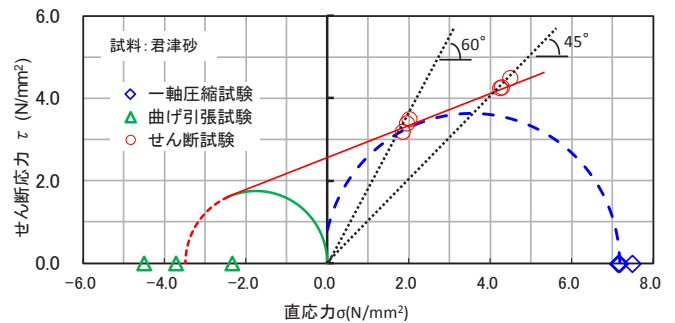


Fig.5 試験結果例 (Test Results)

沿いに分布しており、(1)、(2)式は破壊規準線として妥当であることが確認された。したがって、凍土単体の強度試験としては、一軸圧縮試験と曲げ試験を行えば、一軸圧縮強さ q_u と曲げ引張強さ σ_{bt} から、非拘束せん断強さ τ_{f0} と、必要に応じて内部摩擦角 ϕ を求めることができ、せん断強さに拘束圧依存性を考慮することが可能となる。

4. 凍土単体の強度への影響因子

前述のように、凍土単体の強度試験としては一軸圧縮試験と曲げ試験のみを行えば良く、設計に必要な凍土単体の強度を包括的に取得することができる。しかしながら、実際には時間的制約や試料採取の制約などから凍土試験を行えない場合が多い。筆者らは、そのような場合に現地土の条件に応じて凍土の設計強度を Table 1 よりも高い信頼性をもって決定できるよう、新しい設計体系とデータベースを構築している。

Table 3 試験水準
(Test Condition)

試験温度(°C)	目標 F_c (%)	目標 ρ_d (g/cm ³)	試験数量
-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
-5, -30, -40		1.40, 1.60, 1.80	3(温度) × 6(F_c) × 3(ρ_d) × 3供試体

凍土の強度は温度 T 、土の粒度（その指標は、例えば細粒分含有率 F_c ）、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r 、凍結前強度および塩分濃度などの影響を大きく受けるとされている^{6), 7)}。以下では温度 T 、土の細粒分含有率 F_c 、乾燥密度 ρ_d 、および飽和度 S_r が一軸圧縮強さに及ぼす影響に絞って、データベースの一部を紹介する。

(1) 試験方法

使用した試料の物性を Table 2 および Fig.6 に示す。これらは君津砂、木節粘土、混合土であり、混合土は君津砂と木節粘土を所定の比率で混合して、 F_c を 5, 25, 45, 75% に調整した。試料名の表記の数字は細粒分含有率 F_c を示す。

上記の試料を用いて、Table 3 に示す条件で一軸圧縮試験を行い、試験温度 T 、細粒分含有率 F_c 、乾燥密度 ρ_d および飽和度 S_r が一軸圧縮強さ q_{uy} に及ぼす影響を調べた。

T 、 F_c および ρ_d の影響を評価するための試験では、含水比を事前に調整した試料を、 ρ_d が Table 3 に示す目標値となるようにモールド（直径 50mm × 高さ 100mm の円柱形）内で静的に締め固めて作製した。これを試験温度に設定した冷凍庫で 24 時間以上凍結させて一軸圧縮試験に供した。載荷速度は、鉛直変位速度 1.0mm/min（ひずみ速度 1.0%/min）とした。なお、試験温度 -10°C と -20°C については従来の設計標準値と比較するため、 ρ_d をほかの温度より多く設定し、 ρ_d の影響を詳細に分析した。なお、供試体の飽和度 S_r は 100% を目標にしたが、一軸圧縮試験後の実測値は $S_r=88.6\sim 100\%$ であった。

S_r については、凍結工法は地下水位以深（飽和度 $S_r=100\%$ ）の地盤が対象だが、砂質土は採取時に S_r の低下が避けられない場合が多く、やむを得ず S_r が低い供試体を用いて凍土試験を行う場合がある。不飽和凍結供試体の強度を飽和条件の値に補正するには、 S_r と一軸圧縮降伏強さ q_{uy} との関係が必要となるが、参考となる文献は多くないため、試験を行い両者の関係を定量的に評価する必要がある。今回実施した試験では、Table 2 の君津砂を使用し、 ρ_d が Table 4 に示す目標値となるように S_r を変化させた供試体を上記の試験と同様の方法で作製し、同様の試験方法で一軸圧縮試験を行った。試験温度は $T=-10, -20, -40$ °C の 3 通りとした。

(2) 試験結果

(a) 乾燥密度の影響

乾燥密度 ρ_d と一軸圧縮降伏強さ q_{uy} の関係を調べた例として、試験温度 $T=-20$ °C の結果を Fig.7 に示す。Fig.7 に示すように、 q_{uy} は ρ_d に影響を受けないことが見て取れる。この傾向はほかの温度においても同様であった。

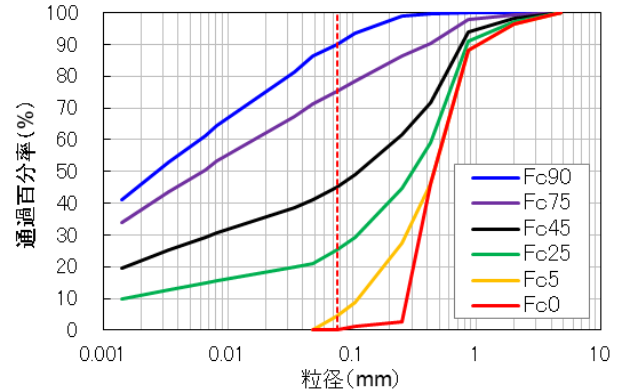


Fig.6 粒径加積曲線
(Particle Size Accumulation Curve)

Table 4 試験水準
(Test Condition)

試験温度(°C)	目標 ρ_d (g/cm ³)	目標 S_r (%)	1試料当り試験数量
-10, -20, -40	1.65	60, 80, 100	飽和度3水準 × 温度3水準 × 3供試体

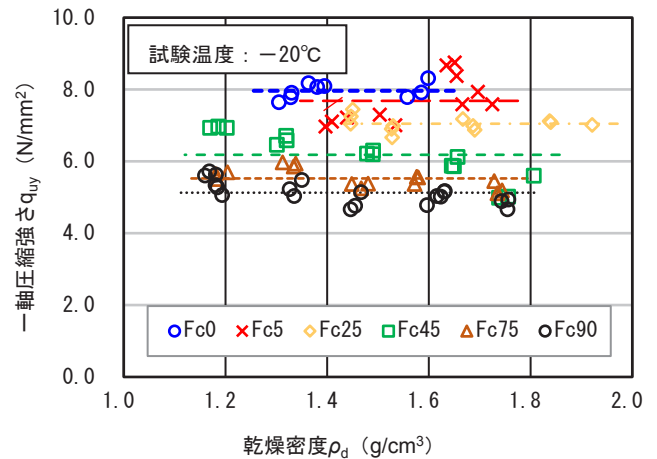
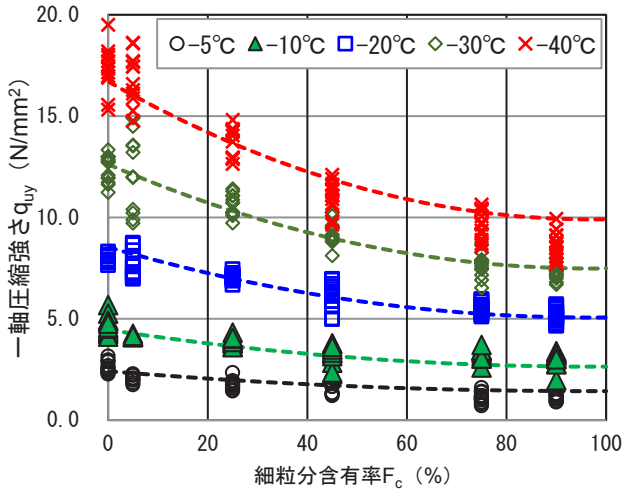


Fig.7 温度別の ρ_d と q_{uy} の関係
(Interaction ρ_d with q_{uy})

(b) 細粒分含有率と温度の影響

各温度 T における細粒分含有率 F_c と一軸圧縮降伏強さ q_{uy} との関係を Fig.8 に示す。 q_{uy} と F_c および q_{uy} と T の間には高い相関があることが確認できる。すなわち、各温度とも F_c の増加に伴い、 q_{uy} が減少する傾向が共通しており、かつ、各 F_c において T の低下に伴い、 q_{uy} が増加している。そこで、 F_c



(Coefficient of (5) Equation)

Fig.8 F_c と q_{uy} の関係
(Interaction F_c with q_{uy})

a	b	c	d	e
-0.0252	0.229	0.0007	-0.136	16.2122

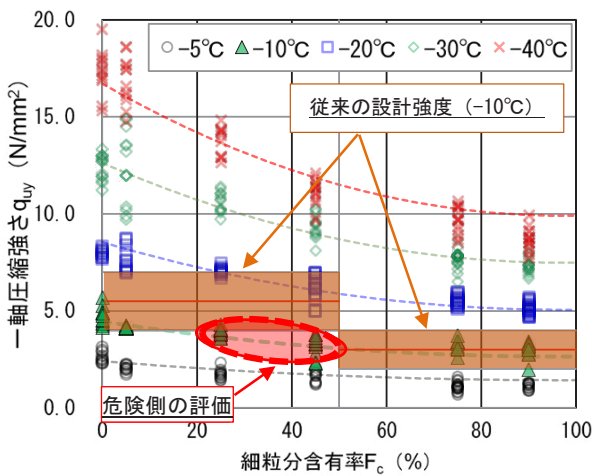


Fig.9 従来の設計強度との比較
(Comparison with Conventional Design Strength)

と T から q_{uy} を推定するために、(5) 式に示す変数分離型の相関式 (f, g は関数) を仮定した。

$$q_{uy} = f(T) \cdot g(F_c) = (a \cdot T + b) \cdot (c \cdot F_c^2 + d \cdot F_c + e) \quad \dots (5)$$

ここに、q_{uy}, T (<0), F_c の単位はそれぞれ N/mm², °C, % とする。

また、Fig.8 のデータに対する回帰分析によって求めた係

数 a, b, c, d, e の値を Table 5 に示すとともに、温度別の回帰式 (q_{uy} と F_c の関係) を Fig.8 中に破線で示した。回帰式は試験結果を概ね良好に再現できており、F_c と T から q_{uy} の概略値を推定できることがわかった。ただし、係数 a, b, c, d, e の値は材料によって変動する可能性がある。

なお、Fig.9 には、F_c ≥ 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 (Table 1 参照) を Fig.8 に重ねて示している。これを -10°C の試験結果と比較すると、F_c = 25~50% の範囲では従来の設計強度は試験結果より明らかに大きく、危険側であることが分かる。

(c) 飽和度の影響

Fig.10 に試験結果を示す。一軸圧縮強さ q_{uy} は飽和度の増加に伴って、増加していることがわかる。S_r, q_{uy} および T との間には高い相関が認められる。すなわち、各温度 T において S_r の増加に伴って、q_{uy} が線形的に増加し、S_r が一定のとき q_{uy} は T の低下につれ増加した。そこで、q_{uy} と S_r および T の回帰式として変数分離型の (6) 式を仮定する。

$$q_{uy} = h(S_r) \cdot j(T) = (p \cdot S_r + q) \cdot (r \cdot T + s) \quad \dots (6)$$

ここに、h, j は関数、q_{uy}, S_r および T (<0) の単位はそれぞれ N/mm², %, °C である。

Table 6 に今回の試験結果 (T = -10, -20, -40°C) に対する回帰分析によって同定した (6) 式の係数 p, q, r, s の値を示す。また、Fig.11 に Fig.10 の結果および (6) 式による算定結果 (破線) を示した。(6) 式は試験結果 (T = -10, -20, -40°C) を良好に再現できており、Fig.11 には今回の試験とは別に様々な乾燥密度 (ρ_d = 1.32~1.65g/cm³) の君津砂を用いて T = -30°C で実施した一連の一軸圧縮試験結果も併せてプロットしており、T = -30°C における回帰式と概ね整合していることがわかる。つまり、(6) 式を用いれば、係数 p, q, r, s

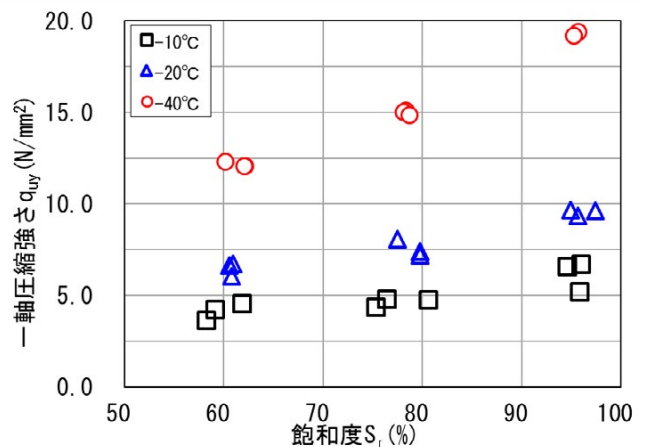


Fig.10 S_r と q_{uy} の関係
(Interaction S_r with q_{uy})

Table 6 (6)式の係数
(Coefficient of (6) Equation)

p	q	r	s
0.053	0.295	-0.088	0.117

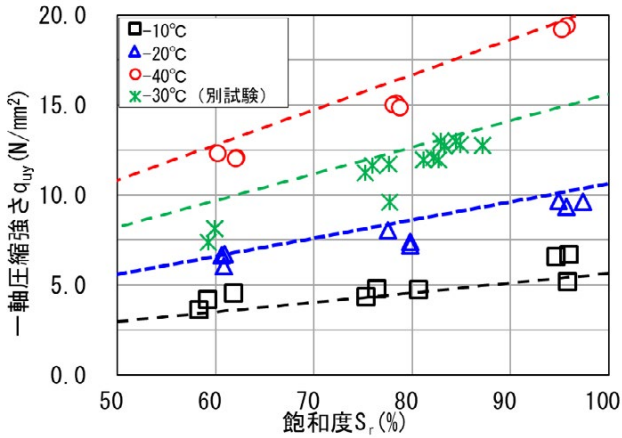


Fig.11 試験結果と相関式
(Test Result and the Relation Equation)

の値は材料によって変動する可能性があるが、各種の材料およびTにおいて、 q_{uy} の $S_r=100\%$ 相当値を推定できる。

Ⅲ. 凍着強度の評価

1. 凍着強度の概要

Fig.1のように地下空間での掘削防護として地中構造物と一体化した凍土を用いる場合、凍土と地中構造物の境界面の凍着（凍結による付着）を確保する必要がある。凍土単体の強度は、前章で述べたように一軸圧縮強さ、曲げ引張強さ、

非拘束せん断強さの3種類を考慮するが、凍着強度は一軸圧縮が破壊モードとして存在しないため、凍着曲げ引張強さ（剥離）と凍着せん断強さ（滑動）の2種類のみである。

しかしながら、凍着引張強さ・非拘束凍着せん断強さとも、設計に利用できる既往のデータは極めて少ない。そこで、筆者らは、凍土単体の強度試験と同様に、凍着曲げ引張強さ・非拘束凍着せん断強さを一括評価する手法と、その試験方法（以下、凍着試験と記す）を確立した。なお、本章（Ⅲ）における凍着曲げ引張強さおよび凍着せん断強さ（非拘束凍着せん断強さを含む）はピーク強さとした。

2. 凍着強度の評価法の提案

Fig.12に提案する凍着試験の体系を示す。前記2種類の凍着強度のうち、凍着曲げ引張強さ σ_{bta} は、凍土と異種材料（地中構造物の材質すなわち鋼、コンクリートやシールド裏込め材など）からなり中央部に鉛直方向の界面を持つ複合供試体を用いた曲げ試験により求めることができる（T点）。一方、前章で述べた傾斜型一面せん断試験において、傾斜角 θ の破壊面より上方が凍土、下方が異種材料の複合供試体を用いれば、せん断破壊時（拘束圧あり）の応力状態（D点）が得られる（ただし、凍着面のせん断強さは、通常、凍土のせん断強さより小さいため、スリット付き型枠は不要である）。D点の求め方は凍土単体の場合と同様である。D点を通り、曲げ引張破壊時のMohr応力円（直径O-T、OはFig.10に示した座標の原点である）に接する直線を凍着に関する破壊規準線とすれば、その縦軸切片が非拘束凍着せん断強さ τ_{f0a} となる。

なお、Fig.12中に示すように、仮に、曲げ試験の凍着面傾斜角を $\alpha=45^\circ+\mu/2$ （ μ は凍着面の摩擦角）とすれば、凍着面でせん断破壊が生じ、その応力状態はO-Tを直径とするMohr円上のB点であると仮定した。すなわち、凍土単体と同様に、円弧B-Tを破壊規準線の一部と仮定した。

3. 妥当性の検証

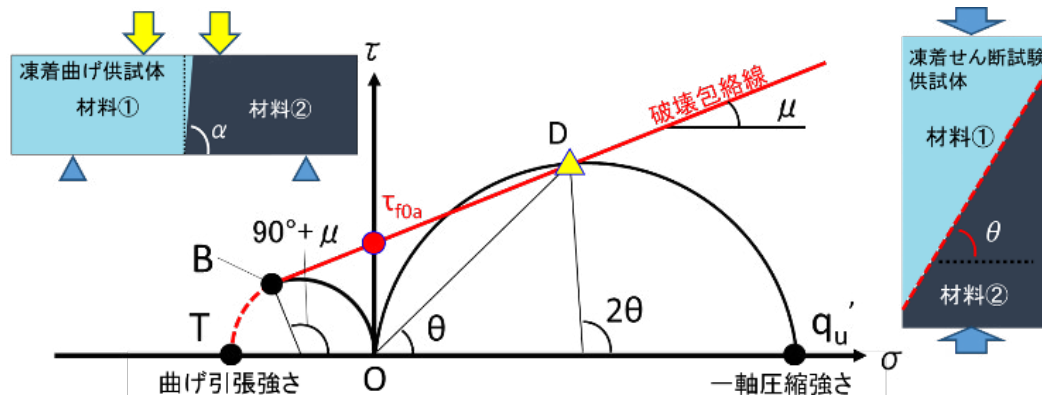


Fig.12 凍着傾斜型一面せん断試験と凍着曲げの併用による凍着せん断強度の求め方
(Method of Obtaining Adfreeze Shear Strength by Using the Adfreeze Shear Test and the Adfreeze Bending Test)

(1) 検証方法

凍土と異種材料の複合供試体を用いて、曲げ試験（凍着面傾斜角 $\alpha=90^\circ$ ）と傾斜型一面せん断試験（ $\theta=45^\circ$ ）を実施し、Fig.12の方法で破壊規準線（直線）を求めた。さらに、異なる傾斜角（ $\theta=60^\circ$ ）で傾斜型一面せん断試験を行い、後者によるD点と破壊規準線との整合性を検証した。

供試体の材質（凍土および異種材料）の組み合わせは各種検討しているが、ここでは、シールド裏込め材と砂質地山との界面を想定し、両者からなる複合凍結供試体を用いた。使用材料の詳細および供試体作製方法については文献⁸⁾を参照されたい。傾斜型一面せん断試験の供試体は直径 50mm×高さ 100mm の円柱形とした。曲げ試験は高さ 40mm×幅 40mm×長さ 160mm の角柱供試体とした。鉛直方向の荷重速度は傾斜型一面せん断試験では 1.0mm/min、曲げ試験では 0.4mm/min とし、各試験とも同一条件で3回ずつ試験を行った。試験温度は -5°C 、 -10°C 、 -20°C とし、供試体を24時間以上、試験温度で凍結させて試験に供した

(2) 検証結果

Fig.13 および Table 7 に試験結果を示す。Fig.13 に示す実線は、前述の方法、すなわち傾斜型一面せん断試験（ $\theta=45^\circ$ ）の破壊応力状態であるD点を通る曲げ引張試験のモール円（直径 O-T）の接線として求めた温度別の破壊規準線である。傾斜型一面せん断試験（ $\theta=60^\circ$ ）によるD点は、概ねこの破壊規準線上に位置していることから、破壊規準線としての妥当性が確認された。以上から、凍着強さに関しては、曲げ試験（ $\alpha=90^\circ$ ）を行って凍着曲げ引張強さ σ_{bta} を求めるとともに、少なくとも1種類の傾斜角 θ による傾斜型一面せん断試験を行えば、破壊規準線と非拘束凍着せん断強さ τ_{f0a} を決定できる。また、必要に応じて凍着面の摩擦角 μ （ $=\tan^{-1}K$ ；Kは破壊規準線の傾き）を定め、凍着せん断強さの拘束圧依存性を取り入れた設計を行うことが可能となる。

IV. おわりに

凍土設計に用いる凍土の強度評価のために筆者らが確立した試験方法と、有効性について述べた。凍土試験は標準化が遅れていた分野であり、特に、従来、定義が曖昧にされがちであった凍土のせん断強さを破壊規準線を介して一軸圧縮強さ・曲げ引張強さと関連付けて体系化したことや、実務でニーズの大きい凍着強度の評価方法を確立できたことは大変意義があると考えられる。これらの試験方法を、凍結工事の実務とともに凍土の強度・変形特性に及ぼす諸要因の更なる解明に活用していきたい。

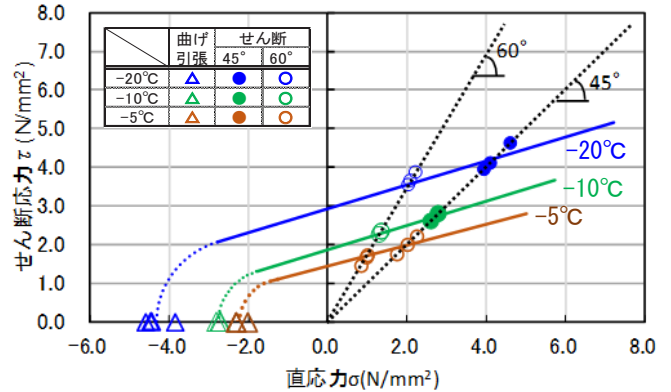


Fig.13 試験結果
(Test Result)

Table 7 試験結果
(Test Result)

試験温度T ($^\circ\text{C}$)	内部摩擦角 μ ($^\circ$)	凍着せん断強度 τ_{f0a} (N/mm^2)
-5	17.8	1.56
-10	12.3	2.39
-20	18.3	3.24

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，1982，pp.44-45.
- 2) 地盤工学会；地盤材料試験の方法と解説，地盤工学会，2009，pp.447-448.
- 3) 地盤工学会；地盤材料試験の方法と解説，地盤工学会，2009，pp.542-552.
- 4) JIS R 5201-2015 セメントの物理試験方法
- 5) 吉田輝，辻良祐，田口翔太，永谷英基，長田友里恵，相馬啓，西村稔；凍土の一軸圧縮・曲げ引張・せん断強さの一括評価－凍土設計データベースの整備－（その1），第53回地盤工学研究発表会，2018，pp.885-886.
- 6) 土質工学会編；土の凍結-その理論と実際-第一回改訂版，土質工学会，1995，pp.45-51.
- 7) 石山和雄；地盤凍結工法，理工図書株式会社，1996，pp.129-135.
- 8) 辻良祐，照井秀幸，吉田輝，長田友里恵；凍土-地中構造物間の凍着強さの試験方法の提案，第52回地盤工学研究発表会，2017，pp.450-451.

Constructing Test Frameworks and a Database Regarding Artificial Ground Freezing

*Ryohsuke Tsuji, Teru Yoshida, Hideyuki Terui¹⁾,
Shota Tagich²⁾, Hajime Souma³⁾ and Yurie Osada³⁾*

Artificial ground freezing has been applied to many sites as a digging protection work under high water pressure because of its high safety and water blocking properties. Although various physical property values are required for the design of the freezing method, the testing method has not been standardized with respect to the shear strength of the frozen soil and the frost bond strength between materials. For this reason, in this study we examined the behavior in consideration of a non-standardized test method. Furthermore, the relationship between the physical properties of the soil and the strength of the frozen soil was examined, and a database of frozen soil physical properties that can be used immediately for design was constructed.