

凍結工法における凍土と異種材の凍着強度の評価法の提案

鹿島建設(株) 正会員 ○吉田 輝 辻 良祐 永谷英基 佐藤一成 那須郁香
ケミカルグラウト(株) 正会員 相馬 啓 長田友里恵
北海道大学 正会員 西村 聡

1. はじめに

凍結工法は、確実な止水性を有する地盤改良工法であり地下水圧の高い大深度などで広く利用されている。仮設構造部材としての凍土の設計では、凍土自体の検討に加えて、凍土と異種材（鋼、コンクリート、凍結したシールド裏込め材など）の界面（凍着面）の健全性に対する検討が必要となる。筆者らはこれまでも凍着曲げ引張強度（剥離強度）と、確立された試験法のない非拘束凍着せん断強度（滑動強度）について、室内試験による実用的な評価法を提案してきたが¹⁾、今回、これを理論的により明確な方法に改良したので報告する。

2. 凍着強度の評価法

今回提案する凍着強度の評価法を図-1で説明する。前提として、凍土と異種材の強度は界面に比べて十分大きいものとする。実施する試験は、水平からの傾斜角 $\alpha=90^\circ$ の界面を有する角柱状の凍土-異種材複合供試体を用いた曲げ試験¹⁾と、任意の傾斜角 θ ($45\sim 60^\circ$ 程度)の界面を有する複合供試体を鉛直方向に一軸圧縮して界面をせん断破壊させる傾斜型一面せん断試験¹⁾の2種類である。まず、凍着曲げ引張強度 σ_{bta} を曲げ試験（2点荷重方式）から求める。

$$\sigma_{bta} = P\ell / (bh^2) \quad \cdots \text{式(1)}$$

ここに P : 荷重点2点（スパン3等分点）の合計最大荷重, ℓ : スパン長, b : 供試体奥行, h : 供試体高さである。供試体下縁での界面の破壊時応力状態を点 $T(-\sigma_{bta}, 0)$ とすれば、点 T と原点 O を直径の両端とする円が供試体下縁の破壊時 Mohr 応力円である。次に、傾斜型一面せん断試験における見掛けの一軸圧縮強度 $q_u' = P/A$ (P : 最大荷重, A : 界面の水平面への投影面積) から、界面の破壊時応力状態である点 $D(\sigma_D, \tau_D)$ を求める。

$$\sigma_D = (q_u'/2)(1 + \cos 2\theta) \quad \cdots \text{式(2-1)}; \quad \tau_D = (q_u'/2)\sin 2\theta \quad \cdots \text{式(2-2)}$$

点 D は、原点 O と点 $C'(q_u', 0)$ を直径の両端とする傾斜型一面せん断試験の破壊時 Mohr 円と、原点 O を通り横軸と角 θ をなす直線（界面の応力経路）の交点である。今回、点 D から前記の曲げ試験による破壊時 Mohr 円に接する直線を引き、この接点を $B(\sigma_B, \tau_B)$ とするとき、円弧 $T-B$ と線分 $B-D$ を凍着に関する一連の破壊規準線として提案する。その直線区間 $B-D$ の勾配 K 、縦軸切片である非拘束凍着せん断強度 τ_{f0a} 、および端点 $B(\sigma_B, \tau_B)$ は以下ようになる。ここに、 $\mu = \tan^{-1} K$ （界面の摩擦角）である。

$$K = \{ \tau_D(\sigma_D + \sigma_{bta}/2) - (\sigma_{bta}/2)\sqrt{\sigma_D^2 + \tau_D^2 + \sigma_D\sigma_{bta}} \} / \{ \sigma_D(\sigma_D + \sigma_{bta}) \} \quad \cdots \text{式(3-1)}$$

$$\tau_{f0a} = \tau_D - K\sigma_D = (\sigma_{bta}/2) \{ \tau_D + \sqrt{\sigma_D^2 + \tau_D^2 + \sigma_D\sigma_{bta}} \} / (\sigma_D + \sigma_{bta}) \quad \cdots \text{式(3-2)}$$

$$\sigma_B = (\sigma_{bta}/2) \{ -1 + \cos(90^\circ + \mu) \} \quad \cdots \text{式(4-1)}; \quad \tau_B = \tau_{f0a} + K\sigma_B = (\sigma_{bta}/2) \sin(90^\circ + \mu) \quad \cdots \text{式(4-2)}$$

今回提案する方法では、仮に曲げ試験を界面傾斜角 $45^\circ + \mu/2 \leq \alpha < 90^\circ$ で実施した場合の破壊時 Mohr 円を、 $\alpha = 90^\circ$ の場合と同一と仮定している。これにより、 $45^\circ + \mu/2 \leq \alpha \leq 90^\circ$ の場合の供試体下縁での界面の破壊時応力状態は、引張破壊からせん断破壊への遷移区間である円弧 $T-B$ 上となり、円弧 $T-B$ は純粋なせん断破壊を示

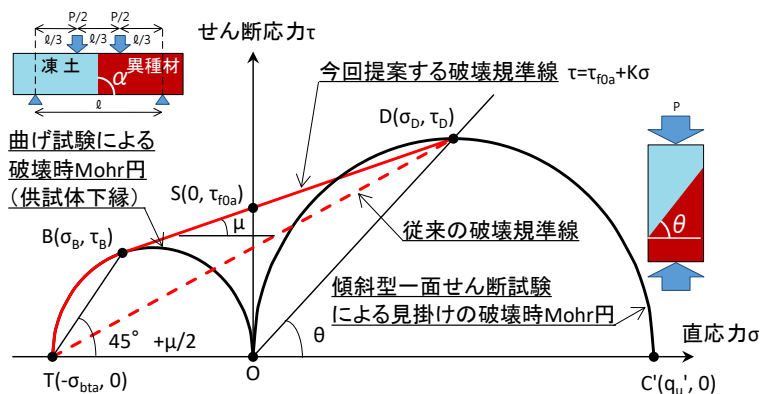


図-1 凍着に関する破壊規準線および凍着強度の求め方

キーワード：凍結工法, 凍土, 凍着強度, 試験, 破壊規準線

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 042-489-6484

す線分 B-D に滑らかに接続するため、線分 T-D を破壊規準線とする従来の方法より破壊規準線の物理的意味が明確である。前記の仮定は、凍土単体の曲げ試験において、破断面の向きが鉛直に対して明らかに傾斜していても、式(1)から機械的に求めた曲げ引張強度は破断面がほぼ鉛直の場合とほとんど変わらない、という筆者らの経験に基づいている。なお、一般に凍土単体の設計強度（一軸圧縮、曲げ引張および非拘束せん断）には降伏強度相当値が用いられるが、本試験法における q_u' 、 σ_{bta} および τ_{f0a} は最大強度（ピーク強度）とする。

3. 妥当性の検証

シールド裏込め材と砂地山の界面を想定して実施した、砂凍土－凍結裏込め材複合供試体の試験結果¹⁾を用いて、従来の方法と今回の提案方法を比較した。この試験では、試験温度 -20、-10、-5℃において、曲げ試験（ $\alpha=90^\circ$ ）と傾斜型一面せん断試験（ここでは $\theta=45, 60^\circ$ の2種類）を1つの試験条件につき3回ずつ実施した。試料の詳細および供試体作製方法¹⁾は割愛するが、曲げ試験は高さ 4cm×奥行 4cm×長さ 16cm の角柱供試体（スパン長 12cm）、傾斜型一面せん断試験は直径 5cm×高さ 10cm の円柱供試体を用い、鉛直方向の載荷速度は曲げ試験で 0.4mm/min、傾斜型一面せん断試験で 1.0mm/min とした。

比較結果を図-2 に示す。図中のプロットは供試体ごとの点 T($-\sigma_{bta}, 0$)および点 D(σ_D, τ_D)であり、点線の円弧は各温度での σ_{bta} の平均値を用いて描いた図-1 の円弧 T-B である。実直線が今回提案する破壊規準線の直線部分で、温度ごとに6点（ θ の水準数 2×試験数 3）の点 D を前記円弧に接する直線で近似して求めた。一方、破直線が従来の破壊規準線であり、温度ごとに3点の点 T と6点の点 D、合計9点のデータを直線近似して求めた。従来の破壊規準線を試験結果（点 D）と比較すると、 $\theta=45^\circ$ で危険側、 $\theta=60^\circ$ で安全側となる傾向が認められ、勾配が過大であると推察されるが、今回提案する破壊規準線の直線部分は、 $\theta=45, 60^\circ$ とともに試験結果に整合的であり、従来の破壊規準線よりも適切と考えられる。図-2 の全ての破壊規準線（直線部分）の勾配 K と縦軸切片（非拘束凍着せん断強度 τ_{f0a} ）の値を表-1 に示す。今回提案した破壊規準線の直線区間における摩擦角 μ は、従来法より 10° ほど小さくなった。また、今回提案する破壊規準線の μ および τ_{f0a}/σ_{bta} の値は温度によらず概ね一定であり、円弧部分を含め各温度でほぼ相似形となった。

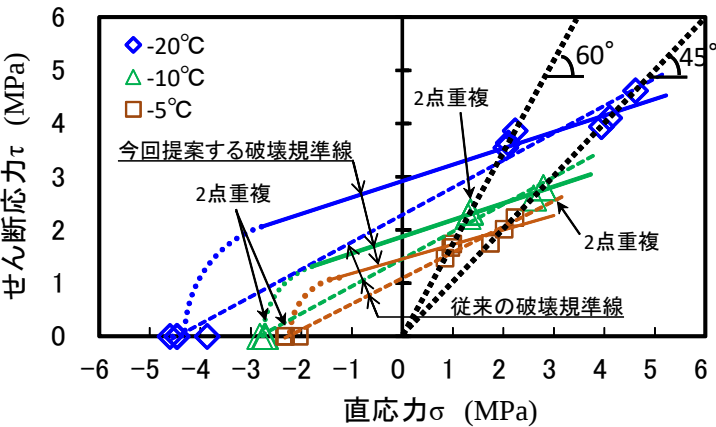


図-2 従来および今回提案の破壊規準線の比較

表-1 従来および今回提案の破壊規準線（直線部分）の特性値

温度 (℃)	σ_{bta} (絶対値) (MPa)	従来の破壊規準線				今回提案する破壊規準線			
		K	μ (°)	τ_{f0a} (MPa)	τ_{f0a}/σ_{bta}	K	μ (°)	τ_{f0a} (MPa)	τ_{f0a}/σ_{bta}
-20	4.31	0.513	27.2	2.29	0.530	0.308	17.1	2.92	0.677
-10	2.75	0.513	27.2	1.46	0.529	0.314	17.4	1.87	0.681
-5	2.23	0.484	25.8	1.09	0.491	0.272	15.2	1.46	0.654

4. まとめ

今回の提案により、凍土－異種材間の凍着曲げ引張強度 σ_{bta} と非拘束凍着せん断強度 τ_{f0a} を一対の曲げ試験（界面傾斜角 $\alpha=90^\circ$ ）と傾斜型一面せん断試験（任意の界面傾斜角 θ ）から評価する際の、従来の方法の理論的曖昧さを解消した。本稿では提案の妥当性を評価するために2通りの界面傾斜角 θ による傾斜型一面せん断試験結果を示したが、実際の運用では1つの θ で十分である。今回提案する方法では、凍着面の摩擦角 μ も得られるため、図-1 の区間 T-B-D の範囲内で凍着せん断強度の拘束圧依存性を取り入れた設計が可能である。

参考文献 1) 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，0367，pp.731-732，2017 年 7 月。