

粘土凍土と鉄材との曲面凍着実験

(株) 精研 技術開発部 正会員 ○隅谷 大作
 (株) 精研 技術開発部 正会員 森内 浩史
 (株) 精研 技術開発部 正会員 上田 保司

1. はじめに 図1のような円形構造物を対象とする凍結工法を想定して、砂凍土と鉄材との曲面凍着実験¹⁾から、曲面での凍着維持条件を調べてきた。本報では、粘土凍土の曲面凍着実験を行い、砂凍土との違いを調べた。また、実験結果の解析から、幾つかの力学因子について、曲面での凍着維持に及ぼす影響を評価した。

2. 曲面凍着実験方法 図2に曲面凍着実験の模式図を示す。砂凍土の実験と同様、鋼管表面に凍着させた凍土を鉛直方向に圧縮し、破壊荷重 W_{max} と凍土の破壊モードを調べた。以下では、凍土の凍着位置を鋼管の鉛直中心軸と凍着右端とがなす角度 θ_F (凍着右端角度) で表す。試料土には藤の森粘土を用い、温度 -10°C 、鉛直変位速度 0.1mm/min の条件で実験を行った。

3. 実験結果 実験後の目視観察の結果、砂凍土の実験と同様、凍着破壊のみが生じる場合 (完全凍着破壊)、凍土のせん断破壊のみが生じる場合 (凍着非破壊)、凍着破壊と凍土のせん断破壊とが共存する場合 (部分凍着破壊) の3種類の破壊モードが確認できた。このうち、凍着非破壊と部分凍着破壊では、粘土凍土の荷重-変位曲線は砂凍土の場合と良く似た傾向であった。しかし、図3に示す完全凍着破壊の場合は両者が異なる曲線を示す場合があった。砂凍土では W_{max} に達した直後、ただちに鉛直荷重が0となる。一方、粘土凍土では W_{max} に達した直後、鉛直荷重は減少するが0とはならない場合があった。このとき、粘土凍土は鋼管と分離せず、付着していた。この原因として、粘土凍土は砂凍土よりも不凍水を多く含むので、凍着が破壊するとただちに再凍着することが考えられる。

図4に W_{max} 実験値と凍着右端角度 θ_F との関係を示す。比較のため、砂凍土の実験値¹⁾も併記した。粘土凍土の W_{max} は砂凍土に比べて小さい。また、砂凍土と同様、 θ_F が小さい鋼管頂部側で凍着非破壊、 θ_F が大きい鋼管端部側で完全凍着破壊が生じた。凍着非破壊が完全凍着破壊に変化する θ_F の境界は 40° 付近であり、砂凍土とほぼ同じ位置であった。

4. 実験結果の解析に基づく考察

4-1 解析手法 曲面における凍着破壊モードの判定には、砂凍土の曲面凍着実験から導いた凍着破壊判定式(1)を用いる。

$$\tau_{as,i} \times S_i - \sigma_{as,i} \times S_i - \Delta W_{e,i} \leq 0 \quad (1)$$

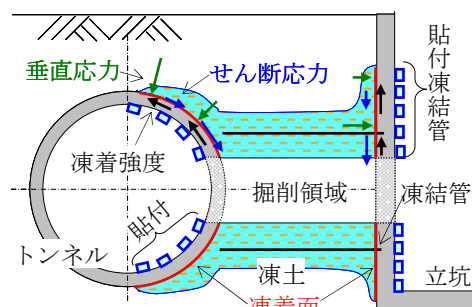


図1 凍結工法におけるトンネルと立坑との接続防護の例

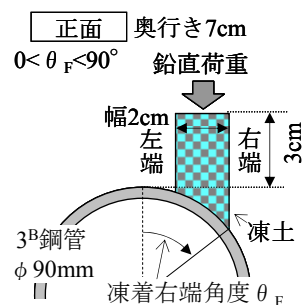


図2 曲面凍着実験の模式図

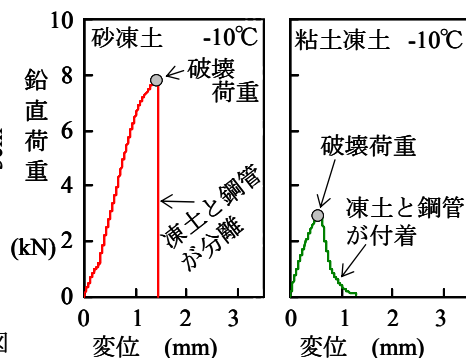


図3 完全凍着破壊モードにおける荷重-変位曲線の例

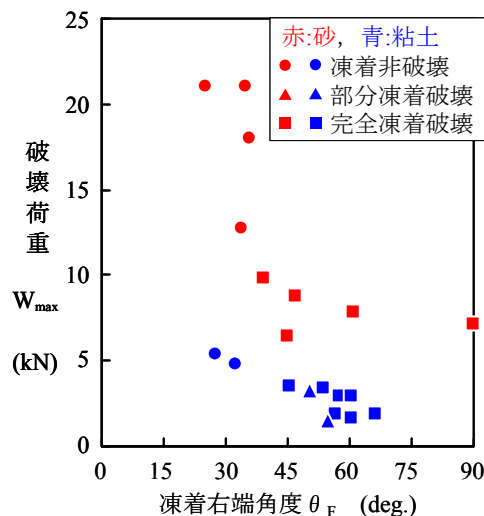


図4 破壊荷重実験値と凍着右端角度との関係

凍結, 凍土, 凍着, 曲面

〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2丁目11番16号 (株)精研 技術開発部 TEL:06-6768-5031 FAX:06-6768-1508

ここで、添字 i は凍土幅を n 等分割したときの i 番目の要素を表す． $\sigma_{as,i}$ は凍着面に沿ったせん断応力， S_i は凍着面積， $\Delta W_{e,i}$ は凍着を維持している要素が受け持つせん断力である．また， $\tau_{as,i}$ は凍着強度であり，凍着面への垂直応力 $\sigma_{an,i}$ による増加効果を取り入れた式(2)で表される²⁾． $\tau_{as,i} = \tau_a + \mu \cdot \sigma_{an,i} + R_\tau \cdot \sigma_{an,i} \cdot \tan \phi$ (2)
 ここで， τ_a は $\sigma_{an,i}=0$ 時の凍着強度， μ は凍土と鉄材との静止摩擦係数， R_τ は全凍着面積のうち凍土のせん断破壊を伴う面積の割合， ϕ は凍土の内部摩擦角である．式(1)が n 個の要素すべてで成り立てば，完全凍着破壊となる．ただし，本実験では凍着が破壊されずに凍土がせん断破壊する可能性もあるので，式(1)の凍着破壊の判定と同時に，式(3)のモールクーロン則に基づく凍土のせん断破壊の判定も照査し，両者の破壊荷重解析値のうちの小さい方を W_{max} 解析値とする．

表1 解析に使用した諸数値

		砂凍土	粘土凍土
粘着力	c (MN/m ²)	5.96	1.91
内部摩擦角	ϕ (deg.)	18	0
静止摩擦係数	μ (—)	0.52	0.55
凍着せん断強度	τ_a (MN/m ²)	1.5	0.44
凍土のせん断破壊比率	R_τ (—)	0	0

$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$ (3) ここで， τ は凍土のせん断強度， c は粘着力， σ_n は凍土のせん断破壊面への垂直応力である．

粘土凍土の実験に本解析手法を適用して， W_{max} 解析値と W_{max} 実験値とを比較した．表1に解析に使用した諸数値を示す．図5に実線で示す W_{max} 解析値は，○や□などで示した W_{max} 実験値に概ね一致することが確認できる．

4-2 凍土および凍着面の力学因子が凍着維持に及ぼす影響

式(1)～(3)における力学因子をそれぞれ変化させて解析を行い， W_{max} 解析値の変化から各因子が凍着維持に及ぼす影響を調べた．以下では粘土凍土の解析結果を主体に述べるが，砂凍土でも同様の解析結果が得られている．

図6(A)に τ_a の変化に対する θ_F と W_{max} 解析値との関係を示す．図中の青実線は粘土凍土の W_{max} 解析値である． τ_a が大きくなると，完全凍着破壊時の W_{max} 解析値は大きくなるが，破壊モードが変化する境界の θ_F (図中の☆) はほとんど変わらない．凍着強度は破壊荷重に影響を及ぼすものの，凍土の凍着位置と破壊モードとの関係には影響を及ぼさないことがわかる．

図6(B)に μ の変化に対する θ_F と W_{max} 解析値との関係を示す． μ が変化すると，完全凍着破壊時の W_{max} 解析値は変化し，上述した境界の θ_F (図中の☆) も変化する．凍結現場では，構造物表面の静止摩擦係数が大きいほど，凍着破壊は生じ難いと推察される．

図6(C)に粘着力 c の変化，図6(D)に内部摩擦角 ϕ の変化に対する W_{max} 解析値を示す．凍土がせん断破壊する凍着非破壊モードでは W_{max} 解析値は c および ϕ に依存するものの，完全凍着破壊時の W_{max} 解析値や境界の θ_F に変化は見られない．凍土のせん断特性は凍着維持に影響を及ぼさないことがわかる．

5. まとめ 粘土凍土の曲面凍着実験の結果，次のことが確認できた．(1)粘土凍土の方が砂凍土よりも破壊荷重は小さい．(2)曲面における凍着破壊判定式を粘土凍土にも適用できる．(3)凍土と構造物との静止摩擦係数が大きいほど，凍着破壊は生じ難くなる．(4)凍土のせん断特性は凍着維持に影響を及ぼさない．文献) 1)隅谷他(2007): 雪氷,69,pp.347-356.

2)上田他(2004): 雪氷,66,pp.497-503.

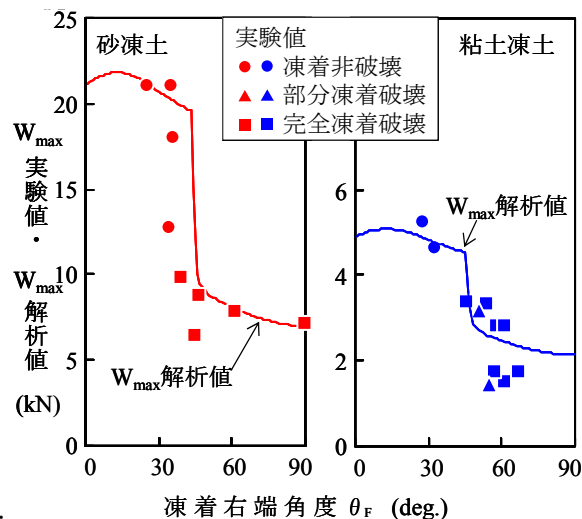


図5 破壊荷重解析値と実験値との関係

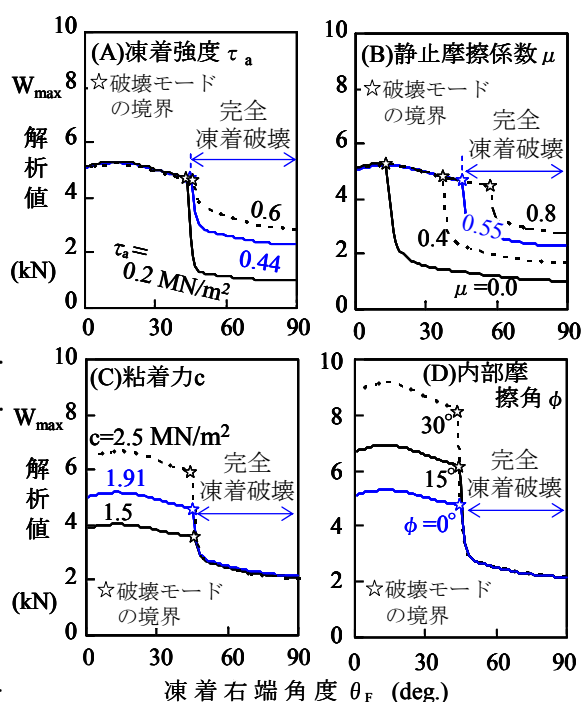


図6 粘土凍土の力学因子を変化させた破壊荷重解析結果