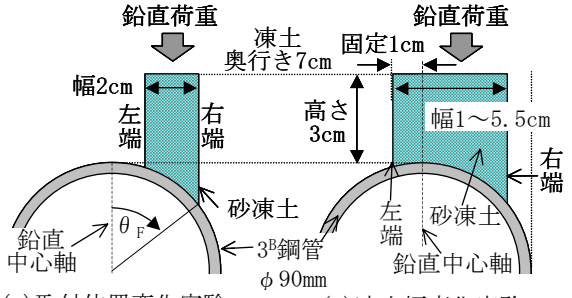
凍着曲面における砂凍土の凍着せん断実験と解析

（株）精研　技術本部　　正会員　○隅谷　大作
（株）精研　技術本部　　正会員　　上田　保司
（株）精研　技術本部　　正会員　　生頼　孝博

１．はじめに　凍結工法では，凍土と構造物との凍着面が曲面となるケースがよくあるが，その場合の凍着維持条件は不明である．本報では，砂凍土と鋼管とを用いた凍着せん断実験を行い，実験中の凍着面で発生する応力を解析することにより，凍着曲面における凍着維持条件を調べた．

２．実験方法および結果　曲面凍着せん断実験の模式図を図１に示す．(a)の実験では，凍土の幅を 2cm で一定とし，鋼管表面の取付位置を変化させた（以下，取付位置変化実験[1)]）．(b)の実験では，凍土左端の位置を固定し，鋼管の鉛直中心軸を跨いで凍土を取り付け，凍土の幅を 1～5.5cm の間で変化させた（以下，凍土幅変化実験）．試料土は豊浦硅砂，実験温度は-10℃，変位速度は 0.1mm/min である．



(a)取付位置変化実験　　(b)凍土幅変化実験

図1　曲面凍着せん断実験模式図

図２に，鉛直中心軸と凍土右端との角度 θ_F と最大荷重 W_{max} とで整理した取付位置変化実験結果を示す．θ_F が 35° 以下では凍土のせん断破壊のみが生じ，凍着切れは一切生じなかった(図中の○)．逆に，θ_F が 35° 以上では凍土のせん断破壊は生じず，凍着面全域で凍着が切れた(図中の□)．凍土のせん断破壊が生じる場合の W_{max} は，凍着切れが生じる場合よりも大きかった．

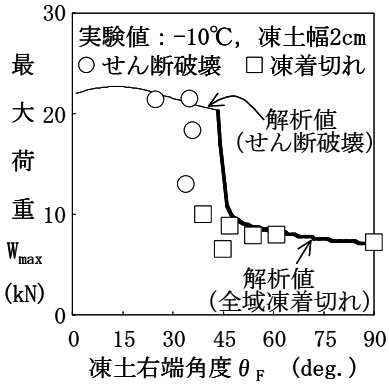


図2　θ_F と W_{max} の関係
（取付位置変化実験）

図３に凍土幅変化実験の結果を示す．凍土幅が増加するに伴って，W_{max} は増加した．また，すべての実験で，凍土のせん断破壊が生じた．ただし，写真１に示すように，凍土幅が約 3.5cm 以上では部分的な凍着切れを伴った．その場合でも，凍着面全域が凍着切れすることはなかった．なお，両実験での凍土のせん断破壊面の角度(47～60°)は，-10℃の豊浦硅砂凍土の内部摩擦角 ϕ[2)]から決まる角度(54°)を範囲内に含む．

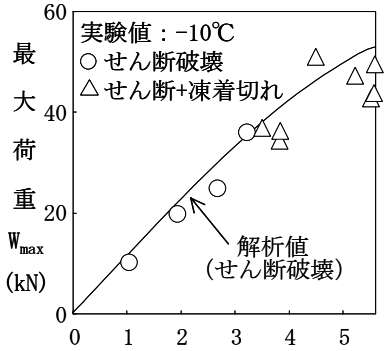


図3　凍土幅と W_{max} の関係
（凍土幅変化実験）

３．応力解析法　図４に示すモデルを用いて，凍着曲面で発生するせん断応力と凍着せん断強度の関係を調べた．せん断応力や凍着せん断強度は，曲面上の位置で大きさが異なる．そこで，凍土幅を均等に n 等分すると，i 番目の要素のせん断応力 $\sigma_{\tau,i}$ は式(1)で表される．

$$\sigma_{\tau,i} = W_i \cdot \sin\theta_i / \Delta S_i \quad (1)$$

W_i は鉛直荷重，ΔS_i は凍着面積である．また，W_i は，式(2)で表される．ここで，ε_i は凍土の鉛直ひずみ，W は全鉛直荷重，H_i は凍土高さである．h は鉛直方向の凍土の変位であり，本実験では凍着面の位置によらず一定である．

$$W_i = W \cdot \varepsilon_i \Big/ \left(\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k\right) = W \cdot \left(\frac{h}{H_i}\right) \Big/ \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{h}{H_k}\right) \quad (2)$$

次に，凍着せん断強度 $\tau_{f,i}$ は，先行研究[3)]から式(3)で表される．τ_0 は凍着面への垂直応力 $\sigma_{n,i}$ が作用しないときの凍着せん断強度，μ は鋼管

$$\tau_{f,i} = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_{n,i} + R_\tau \cdot \sigma_{n,i} \cdot \tan\phi \quad (3)$$

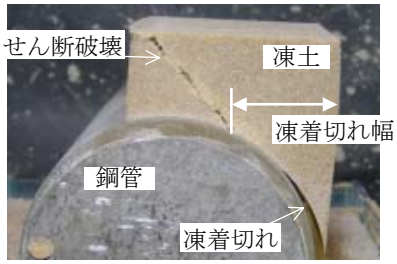


写真1　凍土幅変化実験後の破壊状況の例

凍結，凍土，凍着，曲面，実験，解析

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

と凍土との静止摩擦係数，R_τは全凍着面積のうちの凍土のせん断破壊を伴う部分の割合である．

式(1)の$\sigma_{\tau,i}$が式(3)の$\tau_{f,i}$を下廻れば，要素ｉにおける凍着は維持される．ただし，凍着面の一部で凍着切れが生じると，本来その部分が受け持つべきせん断荷重を，残りの健全な領域で受け持つことになる．このことから，要素ｉの凍着維持条件は式(4)となる．

$$\tau_{f,i}\cdot\Delta S_i-\sigma_{\tau,i}\cdot\Delta S_i-\Delta W_{e,i}\geqq 0 \quad (4)$$

ここで，$\Delta W_{e,i}$は他の要素の凍着切れに伴って健全な要素ｉが受け持つせん断荷重である．凍着切れした要素では，本来受け持つべき荷重のうちの鋼管と凍土との摩擦力で抵抗できる分のみを受け持って，残りの荷重が他の健全な要素に振り分けられるものとすると，$\Delta W_{e,i}$は式(5)で表される．ここで，ｊは凍着切れした要素，Ｓは実験前の全凍着面積，S_eは凍着切れした面積である．

$$\Delta W_{e,i}=\left[\sum_j\left\{\left(\tau_{f,j}-\mu\cdot\sigma_{n,j}\right)\cdot\Delta S_{e,j}\right\}\right]\cdot\Delta S_i/\left(S-S_e\right) \quad (5)$$

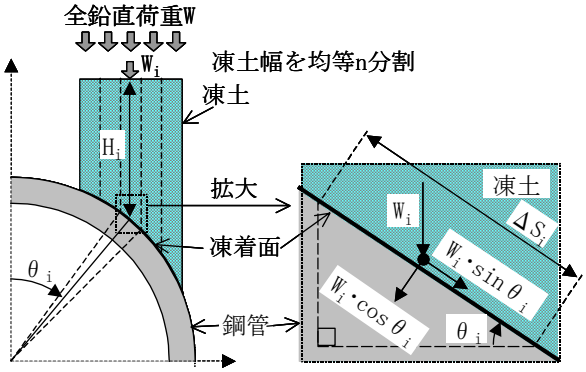


図4　凍着曲面の応力解析モデル

全鉛直荷重Ｗを逐次増加させつつ，上記の手法による凍着面応力と凍土のせん断破壊面応力とを同時に解析し，凍着面全域で凍着切れが生じるか，もしくは凍土のせん断破壊が生じる時点の荷重をW_{max}とした．

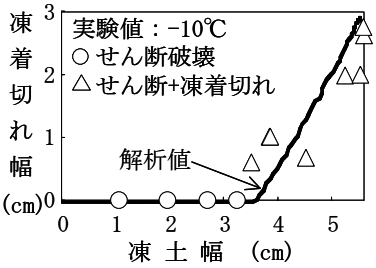


図5　凍土幅と凍着切れ幅の関係（凍土幅変化実験）

４．解析結果

(a)実験結果との比較　図２に示した取付位置変化実験について，凍土のせん断破壊が生じる場合のW_{max}解析値を細線，凍着面全域で凍着切れが生じる場合のW_{max}解析値を太線で示す．解析値が，実験値と概ね一致することから，本解析手法の妥当性が確認される．

図３の凍土幅変化実験についても，W_{max}解析値は実験値と一致した．図５に，凍土幅変化実験の最大荷重時における凍着切れ幅と凍土幅の関係を実線で示す．解析結果は実験結果と一致しており，凍土幅が3.5cm付近で部分的に凍着が切れ始め，凍土幅の増加に伴い凍着切れ幅も増加する．

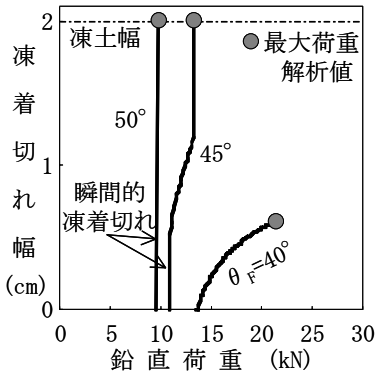


図6　鉛直荷重による凍着切れ進行状況の例（取付位置変化）

b)凍着切れの進行状況　凍着が切れる実験の場合について，鉛直荷重増加に伴う凍着切れの進行状況を解析した．凍着切れは凍土右端部から発生する結果であった．図６に示す取付位置変化実験では，θ_F=50°のように凍土を鋼管端部に近づけて取り付けると，凍着が切れた瞬間，凍着面全域に凍着切れ範囲が広がる．θ_F=40°のように凍土を鋼管頂部に近づけて取り付けると，荷重増加に伴って，凍着切れ幅は増加するが，瞬間的な凍着切れは生じない．このため端部に取り付けるよりも安全である．次に，図７に示す凍土幅変化実験では，図中の5cmの場合のように凍土幅が大きいと，瞬間的に大きな範囲で凍着切れが発生し，その後は，荷重増加に伴い緩やかに凍着切れ範囲が広がる．同図中の4cmの場合のように凍土幅が小さくなると，瞬間的な凍着切れが生じることはなく，荷重増加に伴い緩やかに凍着切れ範囲が広がる．ただし，凍土幅に関係なく，凍着面全域で凍着が切れる前に，凍土のせん断破壊が生じて最大荷重に至る．

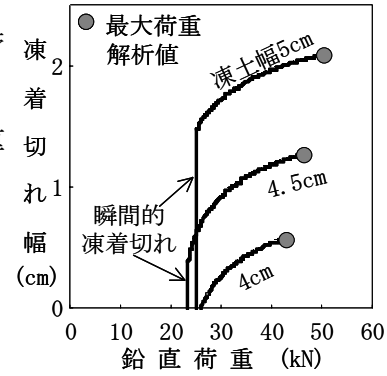


図7　鉛直荷重による凍着切れ進行状況の例（凍土幅変化）

５．まとめ

凍土幅が一定の場合，凍土取付位置が鋼管頂部に近いと，凍土のせん断破壊が生じ，鋼管端部に近いと，凍着面全域で凍着切れが生じる．さらに，鋼管の鉛直中心軸を跨って凍土を取り付けた場合，凍土幅が大きいと部分的な凍着切れが生じる場合もあるが，凍着面全域で凍着が切れることはなく，凍土のせん断によってのみ破壊が生じることがわかった．

（文献）1)隅谷他(2004)：雪氷予稿集, p. 203．2)小林他(1989)：雪氷予稿集, p. 149．3)上田他(2004)：雪氷, 66巻2号, pp. 497-503.