

III-137 温度分布を持つ凍土梁の曲げ強度特性について

(株) 精 研 正 小林 進 正 松岡 啓次 伊豆田 久雄

1. 緒言 凍土の力学特性は、これまで均一な温度の試料で数多く調べられている。しかし地盤凍結工法においては、凍結管列を中心に温度分布を持つ凍土壁が造成される。このような温度分布を持つ凍土の力学特性を把握する為に模型実験を行った。得られた結果を示すと共にFEM解との比較を行った。

2. 実験方法 試料土は、凍土の力学特性の判っている豊浦標準砂を用いた。供試体は、水飽和させた後に -10°C で急速凍結し直方体(10cm×10cm×37cm)に整形したものである。低温室内で図-1で示すように中央面に2.5cmおきに埋め込んだアルミ管($\phi=0.4\text{cm}$)に冷却したブラインを循環し、また上下両端面をヒーターで加熱しながら一定のマイナス温度に保ち、側面を防熱して供試体内に温度分布を持たせた。供試体の乾燥密度及び含水比の平均値は、それぞれ $1.59\text{g}/\text{cm}^3$ 、22.6%であり水飽和状態であった。曲げ試験は、三等分点载荷方式¹⁾で行い、下面の歪速度は $0.15/\text{min}$ である。

3. 実験結果 1)端面温度の影響 管列平均温度 θ_c と端面温度 $\bar{\theta}_h$ の平均である凍土内平均温度 $\bar{\theta}$ 一定(-10°C)条件で、 $\bar{\theta}_h$ と θ_c を変化させた時の荷重-たわみ曲線の例を図-2に、端面温度 $\bar{\theta}_h$ と降伏荷重 P_p 及び最大荷重 $P_{\max}$ の関係を図-3に示す。荷重-たわみ曲線のうちたわみに対して荷重が比例して増加する領域である最初の直線部分においては、端面温度による違いは見られないが、破断時のたわみ量は、 $\bar{\theta}_h=-2^{\circ}\text{C}$ で大きくなっている。図-3に示すように P_p 及び $P_{\max}$ の値は端面温度に依存しなかった。

2)凍土内平均温度の影響 端面温度一定($\bar{\theta}_h=-2^{\circ}\text{C}$)で凍土内平均温度を変化させた時の荷重-たわみ曲線の例を図-4に示す。温度均一梁¹⁾と同様に平均温度の高いものは弾性的領域の後に歪硬化が長く続く弾塑性的変形を示すが、温度が低くなると降伏後直ちに破断する脆性的破壊になる傾向が見られる。平均温度と P_p 及び $P_{\max}$ の関係を図-5に示す。平均温度の低下に伴い降伏荷重は単調に増加していくが、最大荷重は平均温度が -10°C 以下で変化しない傾向を示した。図中に温度均一梁の値も示したが、凍土内平均温度が同じ

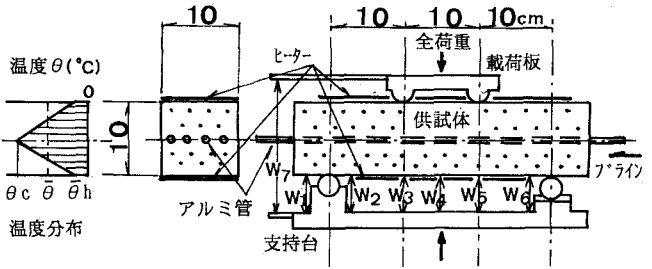


図-1 温度分布梁曲げ試験装置模式図

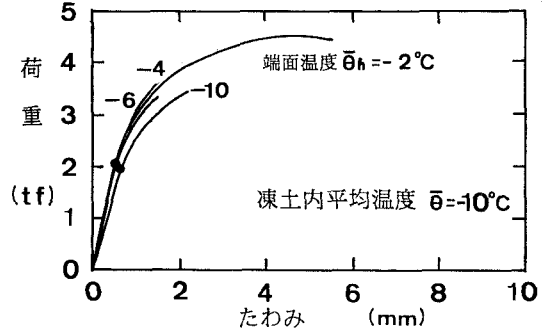


図-2 荷重-たわみ曲線(凍土内平均温度一定)

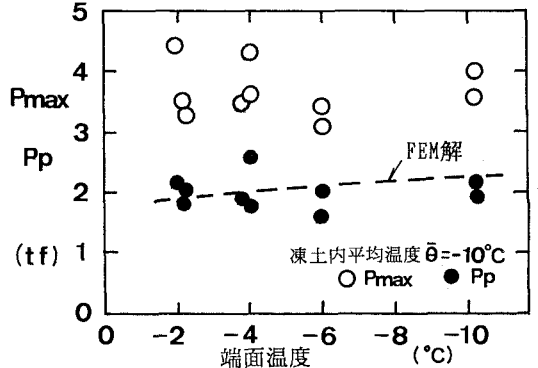


図-3 端面温度と降伏荷重・最大荷重の関係

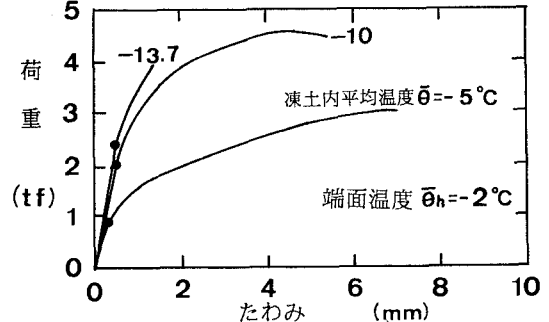


図-4 荷重-たわみ曲線(端面温度一定)

温度分布梁と温度均一梁では違いは見られなかった。

4. 有限要素法による解析 凍土の弾塑性モデルを図-6に示す。解析は最大主応力が降伏応力以内($\sigma_t \sim \sigma_c$)であれば弾性とし、それ以外ならば塑性とする弾塑性解析法²⁾である。降伏応力は圧縮と引張では異なるが、降伏前後の弾性率は各々同じとした。凍土の降伏応力 σ_t, σ_c 及び弾性率 E_e, E_p は、温度の関数であり、4温度の温度均一梁の曲げ試験、及び一軸圧縮試験から求め、表1に示す。

温度均一梁のW4(図-1)の荷重-たわみ曲線の実験結果とFEM解を図-7に示す。 -5°C は少しずれているが、それ以外はほぼ一致しており、表1の妥当性も確認できた。温度分布梁の荷重-たわみ曲線の実験結果とFEM解を図-8に示す。凍土温度は実測した管列平均温度 θ_c と端面温度 θ_h を用いその間を直線分布とした。計算は荷重 $P < 2\text{tf}$ で良く合っているが、 $P > 2\text{tf}$ では少しずれている。計算では $P = 0.8 \sim 2\text{tf}$ で載荷点及び支持点付近で圧縮降伏が生じ、 $P = 2.5\text{tf}$ 付近から徐々に下端部で引張降伏が発生する。図-3の降伏荷重が $P_p = 2\text{tf}$ であったのと良く対応している。 $P = 2.5\text{tf}$ 付近から塑性域が増加すると共に、たわみも大きくなる。圧縮降伏のみの $P = 2\text{tf}$ と引張降伏が増加した $P = 3\text{tf}$ の時の降伏した要素を図-9に示す。

5. 結言 凍土内に温度分布をつけた梁の曲げ試験により次の結果を得た。1) 凍土内平均温度が一定の場合、端面温度の変化による強度の相違は見られなかった。2) 管列温度が異なっても凍土内平均温度が同じ温度分布梁と温度均一梁の間の強度の違いは認められなかった。3) 弾塑性モデルから求めた計算値(FEM解)は、温度均一梁、温度分布梁とも荷重-たわみ曲線及び図-3, 5に示す降伏荷重(引張降伏が始まる荷重)が概ね合っており、解析で用いた弾塑性モデルの妥当性を確認した。

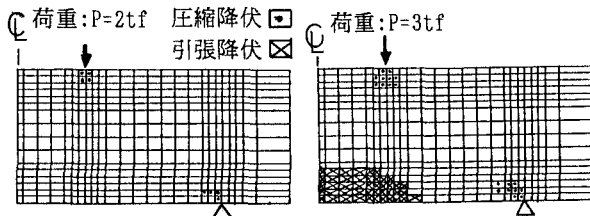


図-9 荷重変化による要素の圧縮・引張降伏状況(FEM解)

文献 1)伊豆田他;雪氷,50巻,1988,P25-32

2)川本他;地盤工学における有限要素解析,培風館,1985

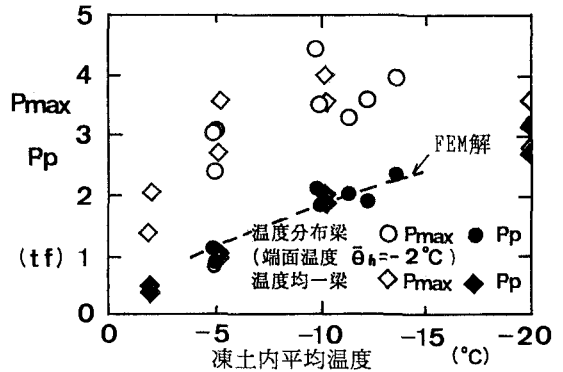


図-5 凍土内平均温度と降伏荷重・最大荷重の関係

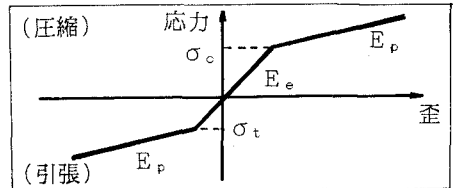


図-6 弾塑性モデル

表1 凍土の材料定数

引張降伏応力	$\sigma_t = 13.0 \cdot (-\theta)^{0.623}$
圧縮降伏応力	$\sigma_c = 19.3 \cdot (-\theta)^{0.678}$
弾性率	$E_e = 2595 \cdot (-\theta) + 3050 \quad (-0 \sim -10^\circ\text{C})$
"	$E_e = 820 \cdot (-\theta) + 20800 \quad (-10 \sim -30^\circ\text{C})$
塑性率	$E_p = 380 \cdot (-\theta) + 300 \quad (-0 \sim -30^\circ\text{C})$

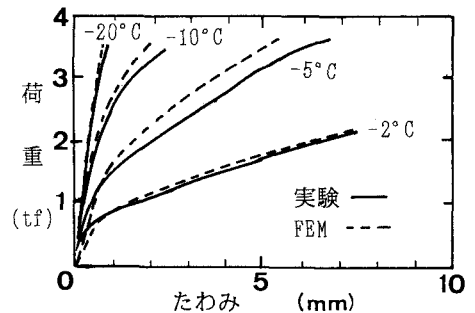


図-7 温度均一梁の荷重-たわみ曲線

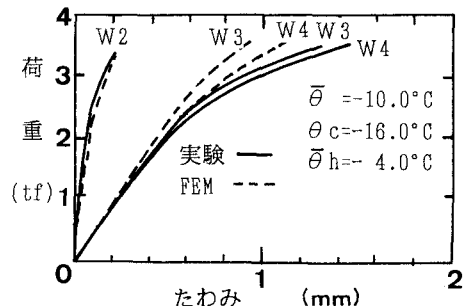


図-8 温度分布梁の荷重-たわみ曲線