

アーチ凍土の力学的挙動について（その2） —モデル実験結果とフレーム解析との比較—

（株）精研 正会員 ○森 保史* 北川 貴由*

（株）精研 正会員 伊豆田 久雄**

1. はじめに

トンネルなどの数多くの構造物の変形や応力照査では、一般にフレーム（骨組み）解析が用いられている。アーチ凍土のモデル実験から得られた実験値¹⁾を、フレーム解析による計算値と比較検討した。このことにより、アーチ凍土の降伏荷重や変形などを予測する際の、フレーム解析の妥当性を検証した。

2. 解析モデルと凍土の強度

端部の拘束条件を固定（水平及び鉛直変位せず、回転もしない）とし、載荷を4点等荷重として、フレーム解析（富士通エフ・アイ・ピー：FREMING Ver10）を用いて、アーチに生じるモーメント、軸力、変位を計算した。図1にフレーム解析のモデル図を示す。

解析で用いた粘土凍土（-12℃）の強度に関する物性値を表1に示す。曲げ強度 σ_{max} 、曲げ降伏強度 σ_p は、圧密しない粘土凍土で曲げ試験を行った過去の文献²⁾から引用した。一軸圧縮強度 σ_{10} は、アーチ凍土と同様に圧密せずに作製した円柱型供試体（ $\phi 50$ mm, H100 mm）を用いた試験から決定した。降伏強度 σ_y は σ_{10} の65%とした。文献³⁾にある値から判断しても、今回の σ_{10} 、 σ_y は妥当な値であった。

3. 実験結果と解析結果との比較

1) 荷重 W ～鉛直変位 δv 曲線：フレーム解析を用いて、比例限界荷重 W_p

時点までの W ～ δv 曲線の勾配に一致する変形係数 E を求めた。図2に例として、Aシリーズの実験で得た W ～ δv 曲線に、フレーム解析による勾配を示す。なお、平均変形係数は 750 MN/m^2 であったが、文献⁴⁾の粘土凍土（-12℃）の変形係数 $E=500 \text{ MN/m}^2$ に比べて少し大きい値であった。

2) 応力 σ 分布：応力 σ_{in} 、 σ_{out} と軸力 N 、モーメント M の間には「 $\sigma_{in} = N/A + M/Z \cdots (1)$ 」「 $\sigma_{out} = N/A - M/Z \cdots (2)$ 」が成り立つ（ A :断面積、 Z :断面係数）。また、これらより σ と M の関係は「 $M = 1/2 \cdot (\sigma_{in} - \sigma_{out}) \cdot Z \cdots (3)$ 」となる。この時、 $M > 0$ ならば内に凸の曲げ、 $M < 0$ ならば外に凸の曲げとなる。

荷重 W を、実験から得られている W_p の平均値としたフレーム解析から求められた軸力、モーメントから(1)、(2)式を用いて、比例限界荷重 W_p 時にアーチ凍土内に発生する応力分布を求めた。図3に例として、Cシリーズ（ $W_p=70 \text{ kN/m}^1$ ）における応力分布について、実験結果と併せて示す。 σ_{in} 分布は「W型」、 σ_{out} 分布は「M型」となり、実験から得られた応力の分布形状¹⁾とほぼ一致した。また、頂部、端部では σ_{out} が σ_{in} よりも大きいことから、(3)式より、内に凸（正曲げ）のモーメントが発生し、肩部では逆に σ_{in} が σ_{out} よりも大きいことから、外に凸（負曲げ）のモーメントが発生していることも分かった。

<キーワード> アーチ凍土、フレーム解析、モデル実験、変形挙動、凍結工法

連絡先 * 〒112-0002 東京都文京区小石川 1-12-14 (株) 精研 東京支店 凍結本部 TEL 03-5689-2355

** 〒542-0066 大阪府中央区瓦屋町 2-11-16 (株) 精研 凍結本部 TEL 06-6768-5039

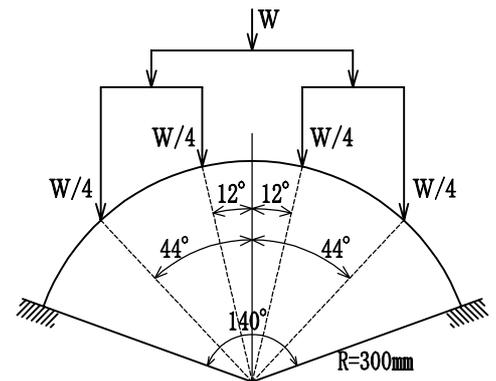


図1 フレーム解析モデル

表1 凍土の強度

		(N/mm^2)
曲げ強度	$\sigma_{max}^{2)}$	5.71
曲げ降伏強度	$\sigma_p^{2)}$	2.98
一軸圧縮強度	σ_{10}	4.52
一軸圧縮降伏強度	σ_y	2.94

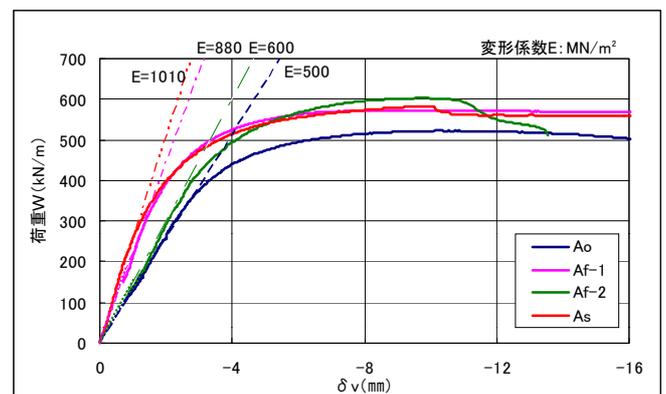


図2 荷重 W ～頂部鉛直変位 δv 曲線(Aシリーズ)

3) 比例限界荷重 W_p , 最大荷重 W_{max} :

実験から得られた W_p , W_{max} を、フレーム解析結果と比較する。

フレーム解析では、図3からもわかるように、端部外面($\alpha=70^\circ$), 肩部内面($\alpha=50^\circ$), 頂部外面($\alpha=0^\circ$)の3部位で大きな圧縮応力が発生している。なお、図中のフレーム解は、各部位を直線で結んだものである。一方、実験において W_{max} 後に引張クラックが目視観察されたのは、頂部内面の部位であった(ただし、端部付近で圧縮降伏や破壊が起きている粘土凍土では目視観察することは難しい)。したがって、以下の W_p または W_{max} を計算する部位は、これらの4箇所とした。

フレーム解析から求まる、アーチ凍土の各部位の応力が表1の σ_y または σ_p に達する荷重を W_p , σ_{max} または σ_{10} に達する W_{max} としている。 W_p , W_{max} それぞれにおける、実験値とフレーム解析値の比較を図4(a), (b)に示す。ここで、図中にはフレーム解析で最も低い荷重(いずれかの部位の凍土が降伏するときの荷重)を「○」で示した。

W_p においては、頂部での引張降伏を除くと、フレーム解はいずれの部位の降伏であっても、実験値とほぼ合っていた。従って、アーチ凍土の比例限界(降伏)荷重を予測する際に、フレーム解析を用いることは妥当であることが分かった。一方、 W_{max} に関しては、最も低い荷重レベルのフレーム解は、実験値よりも小さかった。この理由としては、 W_p よりも大きな W では部分的に、凍土に塑性が起こるために、アーチ凍土内の応力分布が解析とは異なることなども考えられるが不明な点も多い。なお、フレーム解の方が実験値よりも小さいので、フレーム解で最大荷重を予測することは安全側にあると考えられる。

4. 終わりに

アーチ凍土のモデル実験から得られた実験値¹⁾とフレーム解との比較を行った。その結果、1) アーチ凍土の変形係数は文献値に比べると少し大きい値となった。2) アーチ凍土内の応力分布形状は、フレーム解は実験結果と一致した。すなわち、モーメント分布のモードは、フレーム解析と実験で一致していることがわかった。また、3) フレーム解析から求まるアーチ凍土の比例限界荷重 W_p は、実験結果とよく合っていた。以上のことから、フレーム解析を用いてアーチ凍土の比例限界(降伏)荷重や変形を予測することは妥当であることが検証された。

文献: 1) 森保史ら: アーチ凍土の力学的挙動について(その1) - 粘土凍土におけるモデル実験結果 -, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004. 2) 伊豆田久雄ら: 凍土の曲げ条件下における変形挙動と強度特性, 雪氷, Vol.50, No.1, pp25~pp32, 1988. 3) 高志勤ら: 均質な粘土凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.315, pp83~93, 1981. 4) 生頼孝博ら: 析出氷晶を含む凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究, 雪氷, Vol.45, No.1, pp1~12, 1983.

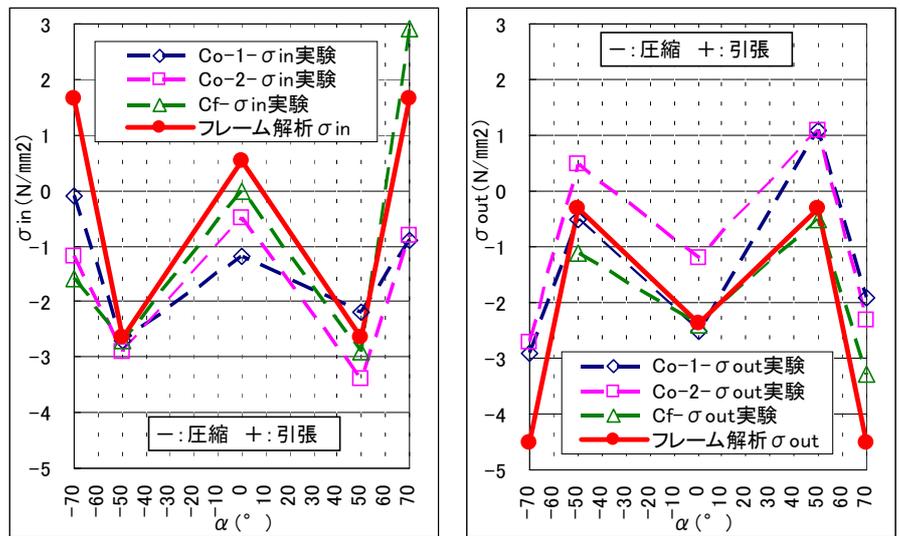


図3 W_p 時の応力 σ_{in} , σ_{out} 分布の比較(Cシリーズ)

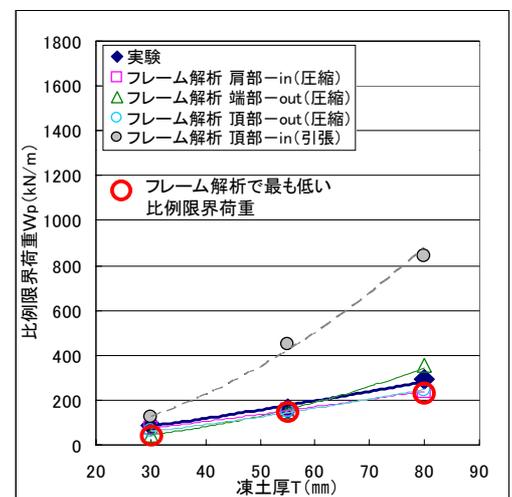


図4(a) W_p : フレーム解析と実験比較

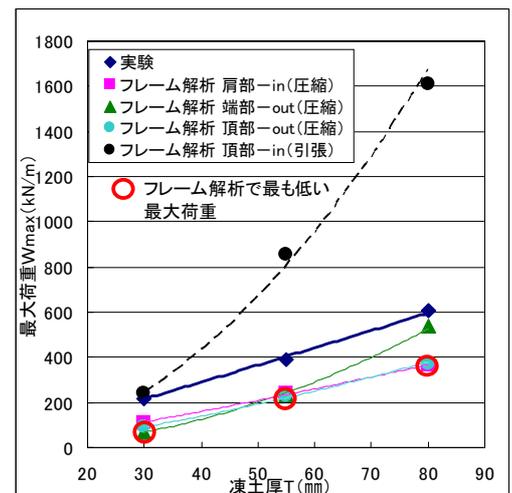


図4(b) W_{max} : フレーム解析と実験比較