

熱・応力・浸透連成場における凍結融解現象の数値解析とその岩盤構造物への適用

西松建設
埼玉大学工学部
埼玉大学工学部

○正会員
正会員

小出 祐毅
山辺 正
高崎 啓太

1. はじめに

地盤内に低温熱源が存在する場合、間隙内部の水は相変化し、ときには地盤構成材料を破壊に至らせる¹⁾。本研究では、比較的均質な岩質材料が実験室内で低温環境におかれた時に内部に含まれる水の相変化を考慮した熱・応力・浸透連成場の数値解析により、それら複雑な変形挙動を検討する。次に作成した解析コードを斜面や地下空洞など岩盤構造物における凍結現象に適用し、その有用性を確認する事を目的とした。

2. 熱・応力・浸透連成場

地盤内の凍結融解現象は図-1に示されるように熱移動・変形挙動・間隙水の移動などが複雑に連成したものであり、特に間隙内部の水分の凍結が大きく影響する。凍結融解現象における地盤の挙動を解析するためには、基本法則としての運動量保存則、質量保存則、エネルギー保存則を連立させる連成場における数値解析が必要となる。

室内凍結融解試験においては、縦横30cm厚さ10cmの白浜砂岩供試体の中央に直径4.6cmのボアホールを開け銅パイプを挿入し、内部に-20℃の不凍液を循環させて連成場を実現し凍結融解を繰り返した。実験および解析に用いた白浜砂岩と水の物性値を表-1に示す。

図-2は室内凍結融解試験を、時間経過による温度とひずみの変化で表したものである。凍結過程においては、0℃付近を境に収縮ひずみから、間隙水の凍結膨張による引張ひずみへと移行している。その後、他の地点における凍結膨張の影響を受け、再びひずみが収縮方向へ移行する。融解過程では-15℃から0℃に至るまで、間隙内の氷は水へと相変化する事で収縮し、0℃以上になると岩質部分の温度上昇に伴い膨張する。しかし凍結開始時の温度にまで回復してもひずみの値は0に戻ることはなく、凍結融解を繰り返すことで残留ひずみが蓄積されることがわかる。これは、凍結融解により熱源付近が塑性域に達した結果である。

3. 室内実験を模擬した解析

相変化を考慮した弾塑性解析コードを開発し、室内凍結融解試験の供試体1/4断面の熱源付近のみ模擬した30要素メッシュ、1/4断面全体を模擬した78要素メッシュ、熱源付近を細かく分割した84要素メッシュの3つを使用して解析を実施した。図-3、4は実験値と3つのメッシュでの解析結果の比較である(熱源より2cm地点)。30要素では解析領域が狭いため実験の温度低下を

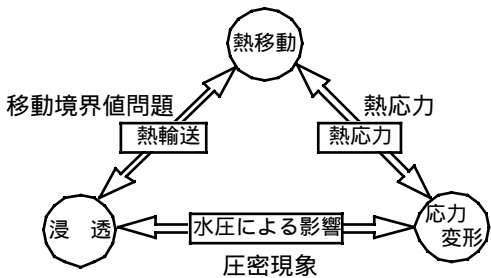


図 - 1 連成場における相互作用の概略図

表 - 1 岩質材料および水の物性値

材料物性		固相部分	液相部分
弾性定数 E (MPa)	(< 0)	応力依存	***
		応力依存	9.00E+03
ポアソン比 ν	(< 0)	0.37	***
		0.37	0.35
密度 ρ (kg/m³)	(< 0)	2.41E+03	1.00E+03
		2.41E+03	9.17E+02
熱伝導率 Kt (W/m・K)	(< 0)	2.21E-01	5.86E-01
		2.21E-01	2.30
比熱 Cv (J/kg・K)	(< 0)	7.53E+02	4.19E+03
		7.53E+02	1.88E+03
間隙率 n	%	13.0	
飽和度 Sr	%	100	
飽和透水係数 k	cm/sec	1.42E-08	
水の圧縮率 Cp	1/MPa	4.90E-04	
固相の熱膨張率 α	1/	1.30E-06	
液相の熱膨張率 β _T	1/	温度依存	
粘着力 C	MPa	温度依存	
摩擦角 φ	degree	31	

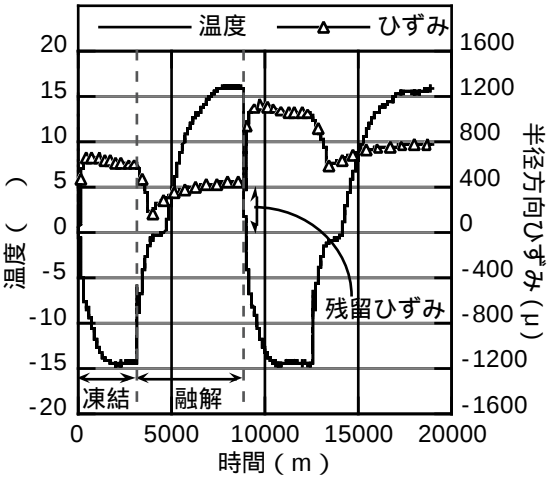


図 - 2 室内凍結融解試験

うまく表現できず、78要素ではメッシュの粗さのためか残留ひずみが評価できていない。84要素では熱源付近のメッシュを細かくすることで凍結時の膨張ひずみ、融解時の収縮ひずみ、凍結融解を繰り返すことによる残留ひずみの蓄積など他のメッシュに比べ、実験値をより近似できたと考えられる。ひずみの絶対量に関しては検討の余地があり今後の課題である。

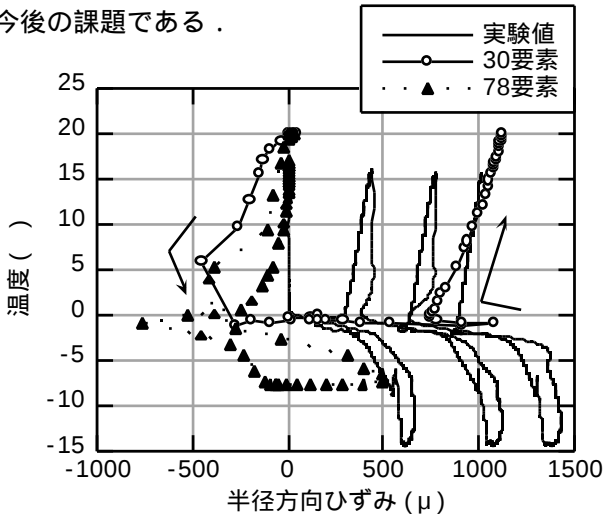


図-3 30, 78要素による実験との値比較

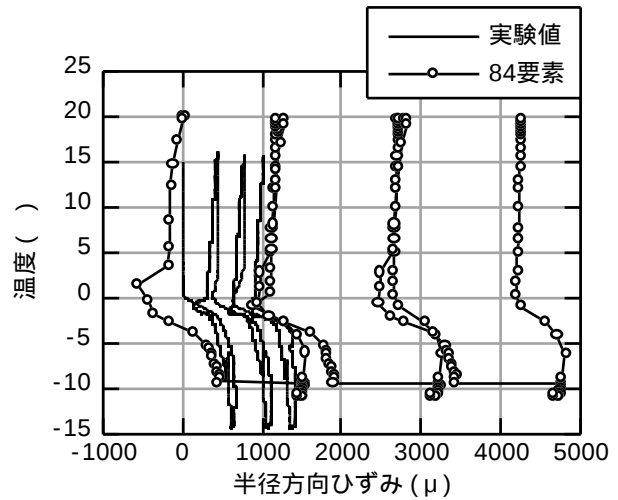


図-4 84要素による実験値との比較

4. 岩盤構造物への適用性

開発した解析コードの岩盤構造物への適用性を検討するため、斜面と地下空洞を模擬した解析メッシュを作成し斜面の地表面に - 20℃、空洞の表面に - 20℃ - 162℃ の温度を与える条件で解析を実施した。図-5は凍結開始から1000分後の斜面上部の温度分布図であり、凍結前線が地下約18cmまで達していることが確認できた。また0℃あたりを境に凍結膨張と考えられる鉛直方向への変位の増加を確認できた。図-6は地下空洞メッシュの各温度条件による凍結から750分後のせん断応力分布図である。温度条件が - 20℃ では温度低下が小さな範囲でしか確認できず、凍結も確認できなかった。空洞上部、下部に見られるせん断応力の集中は自重によるもので温度低下の影響ではないと考える。これに対して - 162℃ では - 20℃ より広範囲での温度低下が確認でき空洞表面の凍結も確認できた。以上の検討により、 - 20℃ 以下の物性値については、詳細な検証が必要であるが、空洞周辺に凍結膨張によると考えられるせん断応力の集中を確認することができた。

5. まとめ

相変化を考慮した熱・応力・浸透連成解析において、解析メッシュを見直すことで実験値により近い温度低下や凍結時の膨張、融解時の収縮を表現でき、凍結融解を繰り返すことによる残留ひずみの蓄積についても確認できた。岩盤構造物への適用に関して、要素数の増加や熱源の広範囲化によって、解析時間が増大するなどの課題もあるが凍結膨張やそれによるせん断応力の発生を表現できた。

参考文献 1) N. M. Krishna, T. Yamabe and R. Yoshinaka : Simulation of a , Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol.36 No.5, pp. 563 - 580, 1999.

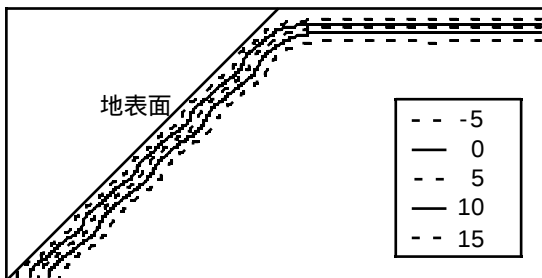


図-5 凍結開始から1000分後の斜面上部の温度分布図



図-6 凍結開始から750分後の空洞周辺のせん断応力分布