

(50) 不連続性岩盤の熱・流体・応力の連成解析

埼玉大学大学院 学生員 ○福原俊一
情報数理工学研究所 正会員 中井仁彦
埼玉大学工学部 正会員 浜島良吉

The coupled analysis of heat transfer, seepage flow and stress
in discontinuous rock masses

Syunichi FUKUHARA, Saitama University
Yoshihiko NAKAI, Info. and Math. Sci. Lab, Inc.
Ryokichi HAMAJIMA, Saitama University

Abstract

In rock masses, discontinuities of faults, joints, etc. exist and exert large influences on the mechanical property of rock masses. In the coupled problems of heat transfer, seepage flow and stress in discontinuous rock masses in this study, analysis was made on the stress balance using the modified virtual displacement method and on the mass conservation and energy conservation laws using the integral finite difference method. The analytic method makes possible the analysis using arbitrary polygonal elements via the Voronoi division and also the coupled analysis considering the openings and slides of rock mass joints. It also makes possible the analysis which treats middle- or small-scale joints as a constitutive law within the element.

1. まえがき

近年石油の地下備蓄や放射性廃棄物の地層処分、或いは高温岩体発電に伴う水圧破碎に見られるように、岩盤の力学的・水理学的・熱的性質を把握することが重要な課題となっている。一般的に岩盤には断層、層理、節理といった地質不連続面が存在し、岩盤の力学特性及び浸透・熱移動などの諸現象に対して大きな影響を及ぼしている。そこで本報告では、飽和領域を対象として、不連続性岩盤における応力・変形挙動、浸透流、熱移動現象を支配する方程式を相互作用の影響を考慮する形で誘導し、応力のつり合い式には修正仮想変位法^{1) 2)}、質量保存・エネルギー保存式には積分差分法³⁾を用いて離散化を行い、解析例として、自然対流問題⁴⁾、引張り破壊問題⁵⁾を扱い、その解析結果を示す。

2. 定式化

離散化された方程式は次のように表され、式(1)が応力のつり合い式、式(2)が質量保存式、式(3)がエネルギー保存式である。これらの式を時間に関して差分化すると、3つの時間発展方程式系が得られる。

$$-[\mathbf{K}]\left\{\frac{d\bar{u}}{dt}\right\} + [\mathbf{L}]\left\{\frac{dp}{dt}\right\} + \left\{\frac{dP_d}{dt}\right\} + [\mathbf{TU}]\left\{\frac{dT}{dt}\right\} = -\left\{\frac{dF}{dt}\right\} - \{C\} \quad (1)$$

$$[\mathbf{RL}]\left\{\frac{d\varepsilon}{dt}\right\} + [\mathbf{H}]\{p\} + [\mathbf{PE}]\left\{\frac{dp}{dt}\right\} + [\mathbf{TE}]\left\{\frac{dT}{dt}\right\} = \{\bar{f}\} - \{CE\} \quad (2)$$

$$[\mathbf{TL}]\left\{\frac{dp}{dt}\right\} + [\mathbf{TR}]\{T\} + [\mathbf{TS}]\left\{\frac{dT}{dt}\right\} = \{TG\} \quad (3)$$

ここで、式中のマトリックス、ベクトルは次のようである。ただし、下付き添え字 s は地盤についての量、 w は水についての量、 nm は要素境界面における量を意味し、 V = 要素体積、 S_{nm} = 要素境界面積、 d_{nm} = 要素重心点間距離、 Σ は要素についての重ね合わせ、 $\Sigma_{(b)}$ は要素境界についての重ね合わせをそれぞれ表している。

$$\{\bar{u}\} = \{\{u\}, \{\varepsilon\}\}$$

$\{u\}$ = 要素剛体変位ベクトル

$\{\varepsilon\}$ = 要素内ひずみベクトル

$\{p\}$ = 要素内圧力ベクトル

$\{T\}$ = 要素内温度ベクトル

$\{P_d\}$ = 要素間圧力ベクトル

$[K]$ = 剛性マトリックス

$$[L] = \sum ([m] - [D^{ep}] \frac{[m]}{3K_s}) \times V$$

$$[TU] = \sum \frac{\beta_s}{3} [D^{ep}] [m] \times V$$

$$\{C\} = \sum [D^{ep}] \{c\} \times V$$

$$[RL] = \sum ([m]^T - \frac{[m]^T [D^{ep}]}{3K_s}) \times \rho_w V$$

$$[H] = \sum (b) \rho_{w,nm} \frac{k_{nm}}{\mu_{w,nm}} \times \frac{S_{nm}}{d_{nm}}$$

$$[PE] = \sum (\frac{1-\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_w}$$

$$- \frac{1}{(3K_s)^2} [m]^T [D^{ep}] [m]) \times \rho_w V \quad [m] = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$$

$$[TE] = \sum (-\phi \beta_w - (1 - \phi) \beta_s$$

$$+ \frac{1}{3K_s} \frac{\beta_s}{3} [m]^T [D^{ep}] [m]) \times \rho_w V$$

$$[CE] = \sum \frac{[m]^T [D^{ep}] \{c\}}{3K_s} \times \rho_w V$$

$$\{\bar{f}\} = \sum (G^{in} - G^{out})$$

$$- \sum (b) \rho_{w,nm} \frac{k_{nm}}{\mu_{w,nm}} \rho_{w,m} g_{nm} \times S_{nm}$$

$$[TL] = \sum \left\{ (1 - \phi) \frac{\rho_s C_s}{K_s} T + \frac{\rho_w C_w}{K_w} T \right\} \times V$$

$$\{TG\} = \sum \dot{e}$$

$$[TR] = \sum (b) \left\{ \lambda_{nm} \frac{1}{d_{nm}} + \rho_{w,nm} C_{w,nm} \frac{k_{nm}}{\mu_{w,nm}} \left(\frac{p_m - p_n}{d_{nm}} + \rho_{w,nm} g_{nm} \right) \right\} \times S_{nm}$$

$$[TS] = \sum \{ (1 - \phi) \rho_s C_s + \phi \rho_w C_w$$

$$- (1 - \phi) \rho_s C_s \beta_s T - \phi \rho_w C_w \beta_w T \} \times V$$

$[D^{ep}]$ = 弾塑性マトリックス

3. 自然対流問題

飽和領域における線形弾性地盤が変形、地下水浸透、熱移動の現象に対してどのような反応をするかを調べ、地盤内に高温な熱源が存在する場合の地盤の温度変化が地盤の挙動に及ぼす影響について考察する。解析に用いた物性値を図1に、解析メッシュを図2に示し、また境界条件及び初期条件は、図2に示す通りであり、右端の水位を最上端に固定し、図2中の点線の部分が100℃、右端が10℃で一定に保たれ、初期条件は上面に水面があるとときの静水圧分布を用い、領域の初期温度は10℃とする。図3は要素番号8にお

間隙率 ϕ	0.444
透水係数 K	$1.0 \times 10^{-7} (m/s)$
固相の弾性係数 E	$9.807 (MPa)$
固相のポアソン比 ν	0.333
固相の熱膨張率 β_s	$5.0 \times 10^{-6} (/^{\circ}C)$
固相の比熱 C_s	$1046.75 (J/kg^{\circ}C)$
液相の熱膨張率 β_w	$5.0 \times 10^{-4} (/^{\circ}C)$
液相の比熱 C_w	$4187.0 (J/kg^{\circ}C)$
平均熱伝導率 λ	$1.424 (W/m^{\circ}C)$

図-1 自然対流問題に用いた物性値

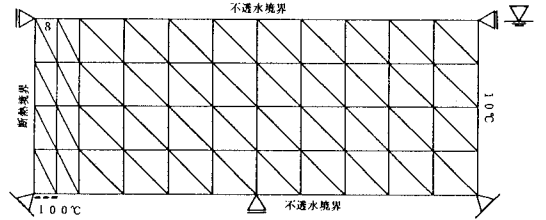


図-2 自然対流問題に用いたメッシュ

ける地表面近くの圧力水頭の変化を示している。温度上昇により圧力水頭が上昇するが、時間の経過に伴いピークに至り ($t = 10^8 sec$)、その後消散し始め、定常状態では地表面近くの圧力水頭は初期状態に戻る。図4は $t = 10^8 sec$ における流速分布である。本解析手法では、要素境界垂直方向のみで流速を算定するが、熱源付近で流速が最大になり、熱源から離れるに従い水平方向の流れが卓越するという自然対流現象が見られる。図5は地盤内の温度分布を示したもので、(a)は $t = 4 \times 10^9 sec$ 、(b)は $t = 4 \times 10^{10} sec$ (定常状態) のものに相当する。図6は $t = 10^8 sec$ における地盤の変形状態を示したものであり、同時刻における要素内主応力状態を示した図7と見比べてみると、熱源近くがかなりの引張り場になっており、遠ざかるに連れてその引張り場が弱くなり、右端近くでは圧縮場になっていることがわかる。その影響から熱源上方では鉛直上向きの変位が生じ、地盤が盛り上がった状態になっていることがわかる。これらのことから、地盤の応力・変形挙動は温度変化にかなりの影響を受けることがわかる。

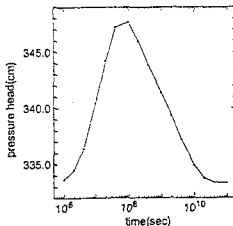


図-3 要素番号 8 における圧力水頭変化図

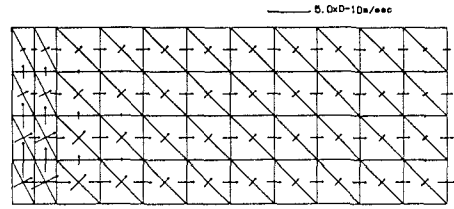
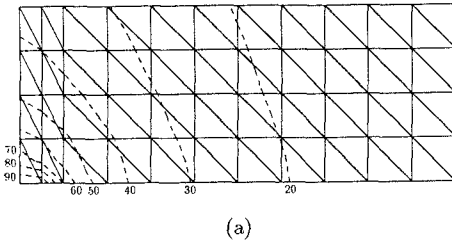
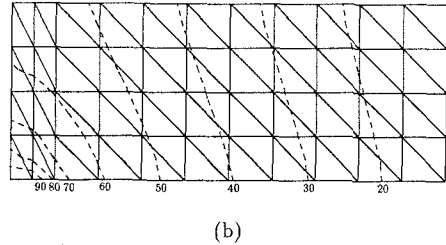


図-4 流速ベクトル図



(a)



(b)

図-5 温度分布図

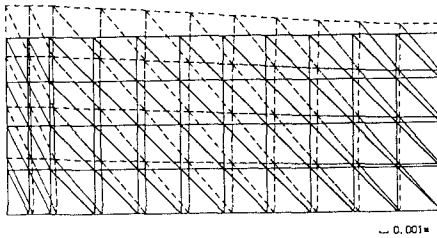


図-6 変形図

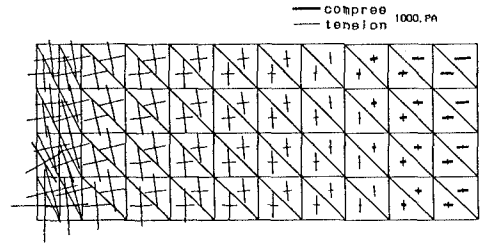


図-7 主応力図

4. 引張り破壊問題

引張り破壊問題として、LPG(-4.2°C)を直接空洞内に供給する低温貯蔵方式を考える。こうしたLPG岩盤内貯蔵における熱応力による空洞の安定性については、既に稲田、岡林、塩尻、石塚⁴⁾によってなされ、石塚は岩盤物性の温度依存非線形性を考慮し、特に凍結膨張の効果が大きいこと、さらに初期地山応力が空洞周辺の熱応力、破壊領域に大きな影響を与えることを明らかにしている。凍結膨張が生じる場合は、生じない場合の5倍以上の破壊領域となることを示している。また深度が浅く初期地山応力が小さい場合には、凍結領域(0°C 以下の領域)外部にも引張り破壊領域が広がり、LPGが外部にも漏洩する可能性があることを示している。しかしこれらの計算に対しては、熱伝導率については初期値のままで解析を行っている。引張り亀裂が生じれば当然熱伝導率は著しく低下或いはゼロに近くなると思われ、また亀裂発生方向により熱分布が著しく異なってくる可能性がある。本解析手法では、亀裂進展に伴う亀裂面での熱伝導率を変化させることにより、より現実に近い解析が可能となり、本報告では引張り破壊が生じた亀裂面については熱伝導率をゼロとした。また、岩盤中の水が凍結する際に発生する潜熱が空洞周辺の温度分布、熱応力に与える影響は、LPG岩盤内貯蔵で対象とする岩盤の間隙率が小さい(2.0% 程度)ためほとんど生じない。そのため、潜熱の影響は考慮しないことにした。解析例として、石塚らが行った菊馬実証プラントを考えることにする。石塚らは、図8に示すように、含水飽和状態における弾性係数、引張り強度、せん断強度、熱膨張率の温度依存材料物性を与えている。特に含水飽和状態では、 0°C から -10°C 付近で最大の凍結膨張を示すことから、この温度領域における材料物性の非線形性が図8からも顕著である。また低温化における花崗

岩のポアソン比，密度，比熱，熱伝導率は大きな温度依存性を示さないことが確認されている。掘削によって生ずる空洞周辺のゆるみ領域では岩盤の劣化により強度の低下，変形性の増加，またゆるむことにより不飽和状態となるため、ゆるみ領域の岩盤物性は温度依存性はなく、凍結膨張は生じないとした（石塚らと同様にゆるみ領域は空洞から2 mとする）。岩盤の初期温度を16℃，LPG貯蔵温度を−42℃とし、空洞のプレクーリングは16℃から−42℃まで3カ月で2次曲線で低下させ、その後は壁面温度を−42℃で一定とした。なお地表面と外部大気との間は断熱、貯蔵期間は30年間とした。解析に用いた物性値を図9に、解析メッシュを図10に示し、図11に岩盤の温度依存性と材料非線形性を考慮した解析手順を示す。

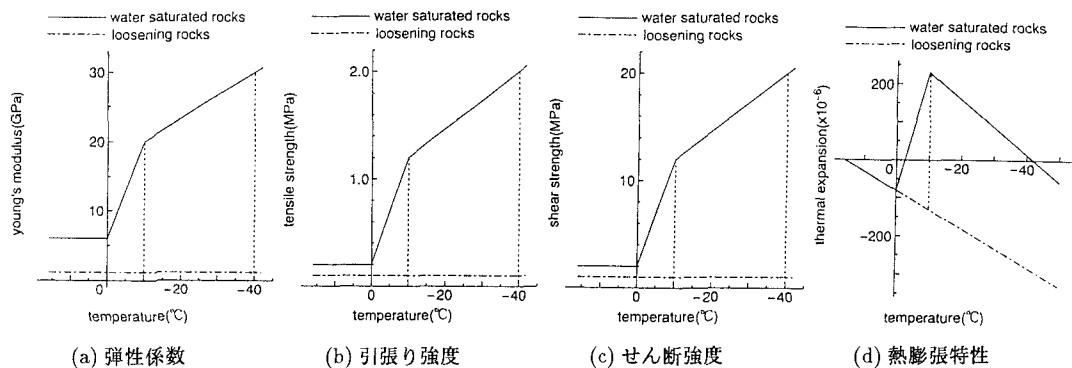


図-8 低温時における岩盤物性の温度依存性

内部摩擦角 ϕ	45.0(°)
ポアソン比 ν	0.3
密度 ρ_s	2500.0(kg/m ³)
比熱 C_s	753.0(J/kg℃)
熱伝導率 λ_s	2.33(W/m℃)

図-9 引張り破壊問題に用いた物性値

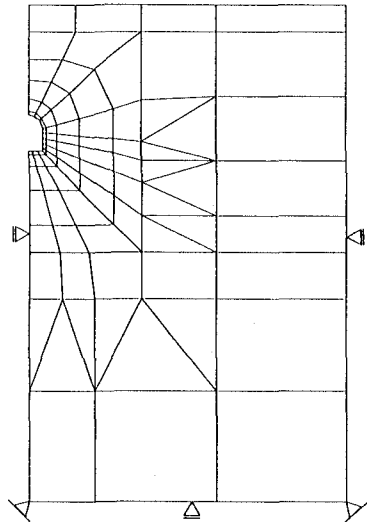


図-10 引張り破壊問題に用いたメッシュ

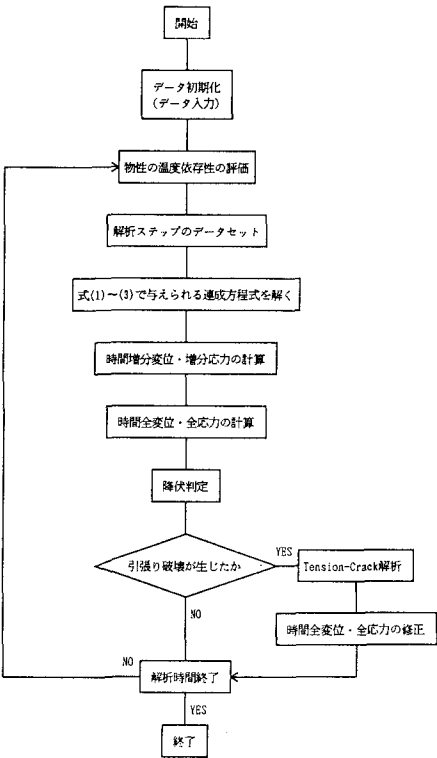


図-11 解析フローチャート

空洞深度 60 m の場合について検討し、凍結膨張の影響を調べるため凍結膨張が生じる場合と生じない場合についても検討した。得られた結果のうち 10 年後と 30 年後について、破壊領域を図 12 に、凍結領域を図 13 に示す。凍結膨張が生じる場合は、石塚らの結果と同様に、10 年を経過すると凍結領域外部の非凍結領域にも破壊領域が広がり、30 年になると初期地山応力の小さい空洞天端方向に大きく破壊領域が広がる、という結果になった。凍結膨張が生じない場合は、10 年から 30 年の間に破壊領域は広がらず凍結領域内にとどまる、という結果になった。また引張り破壊が生じた亀裂面については熱伝導率をゼロとしたため、凍結領域の結果において、凍結膨張が生じる場合と生じない場合とで大きな差が見られた。

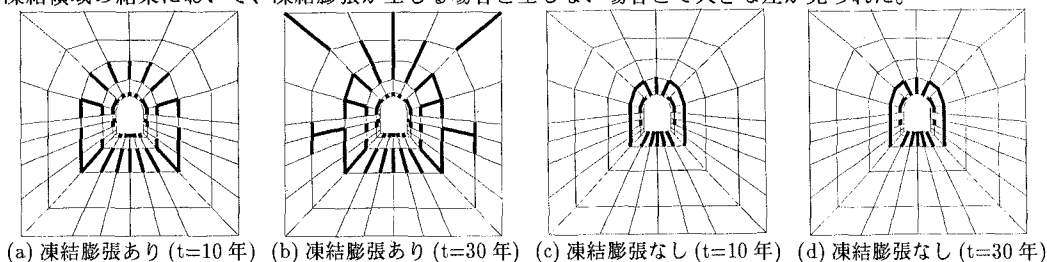


図-12 破壊領域

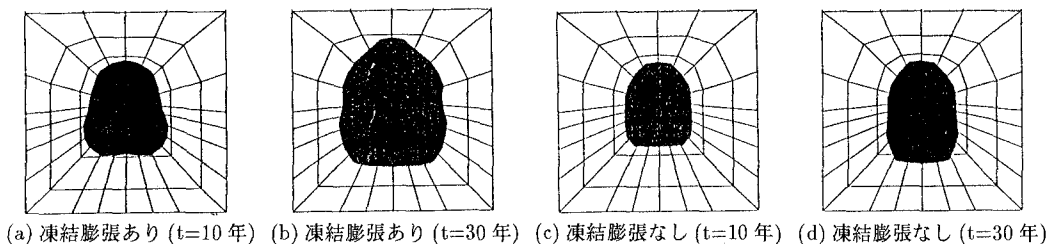


図-13 凍結領域

5. 結論

本報告では、応力・変形挙動、水の流れ、熱移動現象といった地盤に影響を及ぼす要素間の相互作用を知るために、応力のつり合い式、質量保存式、エネルギー保存式を連立させることにより、まず自然対流問題として、飽和領域における線形弾性地盤の応力・浸透・熱移動連成問題に対して解析を行い、その解析結果から、弾性地盤の変形は温度変化による熱応力の影響を受け、温度は弾性地盤の変形にはほとんど影響を受けない、ということがわかった。次に引張り破壊問題として、LPG 岩盤内貯蔵空洞の安定性について解析を行い、その解析結果から、石塚らと同様に、凍結膨張が生じ初期地山応力が小さい場合には 10 年以上経過すると、LPG が漏洩する可能性があるという結果が得られた。本報告では、亀裂進展に伴う亀裂面での熱伝導率を変化させて解析を行ったが、それにより凍結領域（温度分布）が破壊領域により大きく異なってくるということがわかった。この離散化手法により、任意多角形要素を用いた岩盤内亀裂の開口、せん断による滑りを考慮した連成解析が可能であり、中小規模の亀裂群に対しても、これを要素内構成則として考慮することができるため、不連続性岩盤を対象とした様々な分野で今後さらに発展させて行きたい。

参考文献

- 1) 羽生, 福原, 浜島:土木学会第 47 回年次学術講演会, 1992.
- 2) 福原, 羽生, 浜島:土木学会第 47 回年次学術講演会, 1992.
- 3) R.Hamajima etc.: Analysis of stress, water flow and heat transfer in fractured rocks, 6th Int. conf. on num. meth. in geomech., Innsbruck 1988, pp.803~808.
- 4) 大西, 柴田, 小林:有限要素法における応力-浸透-熱移動連成解析手法, 土木学会論文集, 第 370 号, pp.151~158, 1986.
- 5) 石塚, 木下, 奥野: LPG 岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性の検討, 土木学会論文集, 第 370 号, pp.243~250, 1986.