

マニホールド法による二酸化炭素貯留サイトの流体-変形連成弾塑性地震応答解析

Hydraulic-Mechanical Coupling Analysis of a Carbon Dioxide Capture and Storage Site on Stability Evaluation under Earthquake Motion by Numerical Manifold Method

佐々木猛¹⁾, 堀川滋雄²⁾, 楠瀬勤一郎³⁾, 橋本涼太⁴⁾

Takeshi Sasaki, Shigeo Horikawa, Kinichiro Kusunose and Ryota Hashimoto

1) 工博 サンコーコンサルタント(株) (〒126-8622 東京都江東区亀戸1-8-9, E-mail: sasakit@suncoh.co.jp)

2) サンコーコンサルタント(株) (〒126-8622 東京都江東区亀戸1-8-9, E-mail: horikawa@suncoh.co.jp)

3) 理博 産業技術総合研究所 (〒305-8567 茨城県つくば市1-1-1中央第7, E-mail: k.kusunose@mail1.accsnet.ne.jp)

4) 博士(工) 京都大学 准教授 (〒165-8530 京都市西京区京都大学桂, E-mail: hashimoto.ryota.6e@kyoto-u.ac.jp)

The authors' conducted a hydraulic-mechanical coupling analysis using the Numerical Manifold Method (NMM) with the introduction of the Drucker-Prager's elastic-plastic yield criterion to study stability problems in the seismic response of a carbon dioxide capture and storage (CCS) site models.

Key Words : Hydraulic-Mechanical Coupling, Numerical Manifold Method, Earthquake response

1. はじめに

(1) 貯留サイトの選定と我が国特有の課題

地球温暖化対策の一つとして、温室効果ガスの発生源となっている火力発電所や製鉄所などから排出されるCO₂を分離・回収して地中（深部塩水帯水層）へ貯留する技術（以下CCS : Carbon dioxide Capture and Storage, 図-1）について述べる。CCSは、貯留するCO₂の漏洩問題の研究が重要となっている。日本列島は4枚のプレートの収斂域に位置し、世界でも有数の地震国である。貯留した後に予期しない巨大地震が発生した場合の貯留層や遮蔽層へ与える影響予測が重要となる。

(2) 貯留サイトの選定

CCSサイトは図-1のように陸域や沿岸海底に存在する泥岩と砂岩の互層状の地盤で、二酸化炭素は地表から約1000m程度の泥岩層（キャップロック）直下の砂岩層に液体状（超臨界状態）で圧入される。圧入された二酸化炭素は約1000年程度漏洩なくその場所に安定して存在することが必要条件となる[1]。

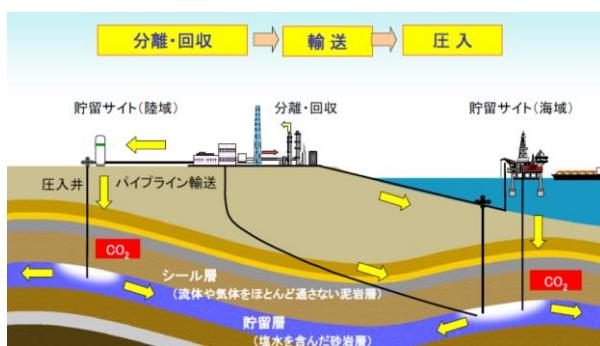


図-1 CO₂地中貯留のイメージ[1]

(3) 地震時の安定性評価手法

貯留層に対する強震動の影響について、例えば東北地方太平洋沖地震のような長周期の強い運動が深部流体飽和層に対して与える地盤変形とそれに伴う間隙水圧の影響について地盤の安定性評価が重要となる。筆者らはマニホールド法（以下NMM）を用いて変形-水圧連成を考慮した強振動時のCO₂貯留サイトの安定性評価法を開発してきた[2]。

2. NMMによる変形-流体連成解析

(1) 不連続面を含む変形-水圧連成解析手法

NMM(Numerical Manifold Method)は不連続性も考慮可能な連続体の解析手法である。基盤ブロックの局所的な変形の大きな動きや剛体の回転も扱え、褶曲構造にも対応可能な手法である[3]。

(2) NMMの基本方程式

NMMによる変形-水圧連成を考慮した解析では式(1)で表される地盤（固体）の力の釣り合いと。

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\sigma_{ij}\epsilon_{kk} + \alpha_B\delta_{ij}P_s \quad (1)$$

式(2)で表されるDarcyの法則に基づく流体の連続条件をNMM要素について解析領域全体で重ね合わせ連立方程式として解かれる[4]。

$$\zeta = -\alpha_B\epsilon_{kk} + P/M + q_N(P_s - P_l)S \quad (2)$$

ここに、 σ_{ij} ;個体の応力テンソル、 P_s ;個体の流体圧力、 ζ ;流体の体積ひずみ、 ϵ_{ij} ;個体のひずみテンソル、 μ, λ ;Lameの定数、 δ_{ij} ;Kroneckerのデルタ、 α_B ;Biotの連成係数、 M ;Biotの統計性係数、 P_J ;不連続面（断

層) の流体圧力, q_N ; 固体部分と断層の流体収支係数である.

(3) ニューマークの β , γ 法による時間積分

式(3)は, Hamiltonの運動方程式を流体圧力は中心差分, 時間積分の動的応答式はニューマークの $\beta=0.5$ と $\gamma=1.0$ を用いたマトリックスの変形-水圧連成方程式を表している.

$$\begin{bmatrix} [\tilde{K}] & [C] \\ [A] & [[\tilde{H}] + [E]] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{\Delta p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\alpha F\} + [C]\{p_t\} \\ \{\Delta Q\} + \left[[E] - \frac{\Delta t}{2} [\tilde{H}] \right] \{p_t\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに, $\{\Delta u\}$: 個体の変位増分, $\{\Delta p\}$: 流体の圧力増分, Δt : 時間増分, $\{\alpha F\}$: 地震加速度, $\{p_t\}$: 流体圧力, $\{\Delta Q\}$: 流量の各ベクトル.

$$[\tilde{K}] = \frac{2}{\Delta t^2} [M_s] + \frac{1}{\Delta t} [\tilde{C}] + [K_s] + [K_c] \quad (4)$$

$[M_s]$: 個体の質量, $[\tilde{C}]$: 個体の粘性減衰, $[K_s]$: 個体の剛性, $[K_c]$: 不連続面の接触の各マトリックス.

$$[C] = - \int_{\Omega} \alpha_B \rho_f C(\psi) + S_r [N_{K,j}^s] [N_L^p] d\Omega \quad (5)$$

$C(\psi) = \partial S_r / \partial p_w$: 流体の飽和-不飽和特性に関する勾配, $[\rho_f]$: 流体の密度, S_r : 流体の飽和-不飽和特性, $[N_{K,j}^s]$: 個体の変位分布関数の勾配, $[N_L^p]$: 流体の圧力分布関数の各マトリックス.

$$[A] = \int_{\Omega} \alpha_B \rho_f S_r [N_K^p] [N_{L,j}^s] d\Omega \quad (6)$$

$[\tilde{H}]$: 個体の変形が流体圧力に影響するマトリックス.

$$[\tilde{H}] = \frac{2}{\Delta t^2} [M_f] + \frac{\Delta t}{2} ([H] + [H_{rs}] + [\bar{H}]) \quad (7)$$

$[M_f]$: 流体の質量, $[H]$: 流体の透水性, $[H_{rs}]$: 不連続面と個体の流量収支, $[\bar{H}]$: 圧力安定化の各マトリックス.

$$[E] = \int_{\Omega} (-\rho_f C(\psi) - \theta \rho_f \rho_f g \beta_p) [N_{K,j}^s] [N_L^p] d\Omega \quad (8)$$

$[E]$: 流体の飽和-不飽和特性マトリックスである.

3. 地盤の強度・変形特性

(1) Drucker-Pragerの降伏基準

本解析はDrucker-Pragerの降伏基準[7]に基づく弾塑性構成則を導入した. (9)式に降伏関数を示す.

$$F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = 0 \quad (9)$$

$$J_1 = \sigma_{ii}, \quad J_2 = S_{ij} \quad (10)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{3(3 + \sin^2 \varphi)}}, \quad \bar{\sigma} = c\{3(1 - 2\alpha^2)\} \quad (11)$$

ここに, $\sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: 主応力の合計, S_{ij} : 偏差応力, φ : 個体の内部摩擦角, c : 個体の粘着力である.

(2) 局所安全率

Drucker-Pragerの局所安全率は式(12)で与えられる.

$$S = \frac{k - \alpha J_1}{\sqrt{J_2}} \quad (12)$$

ここに,

$$k = \frac{3c \times \cos \varphi}{(9 + 3 \sin^2 \varphi)} \quad (13)$$

4. 解析モデルと入力物性

(1) 解析モデル

解析モデルでは深さ1700m, 幅2000mの7層区分, 図-2に示す水平構造と図-3に示す褶曲構造を仮定した. 境界条件は下端を固定境界, 左右端は粘性境界, 上面は排水境界とした. モデルの上面をEL.0mとし, 下端をEL.-1700mとした. Cap-Rock(Layer-4-泥岩層)は-740mから-840mである. CO₂貯留層(Layer-8-砂岩層)の上面はEL.-840m, 褶曲モデルである[5,6].

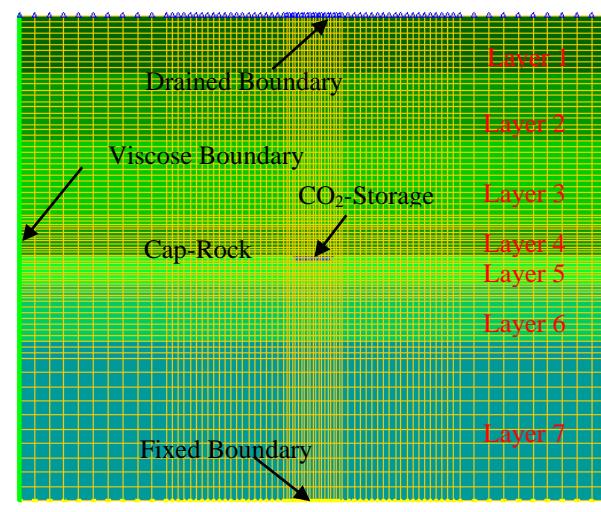


図-2 水平構造モデル

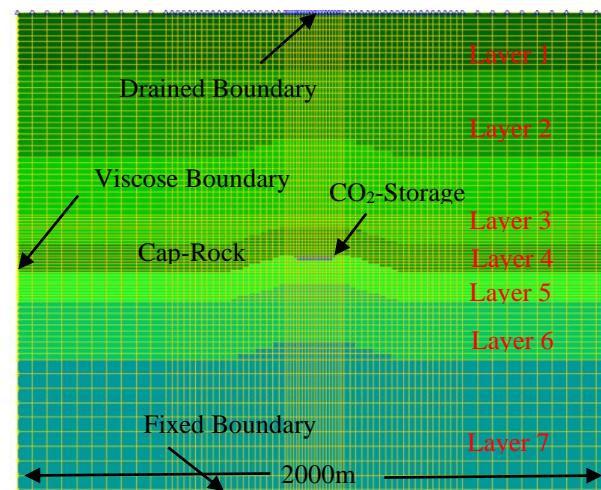


図-3 褶曲構造モデル

(2) 入力物性

表-1に入力物性を示す[8]. Cap-RockはLayer-4, CO₂貯留層はLayer-8である.

表-1 入力物性値

Layer	E (kN/m ²) (*10 ⁶)	ν	γt kN/m ³	k (m/sec)	c kN/m ² (*10 ³)	ψ (Deg.)
1	0.52	0.479	19	1.0 *10 ⁻⁵	0.2	5.0
2	2.36	0.443	19	1.0 *10 ⁻⁵	0.8	22
3	6.75	0.367	20	1.0 *10 ⁻⁹	0.6	4
4	8.09	0.357	21	1.0 *10 ⁻⁹	2.7	31
5	10.63	0.319	22	1.0 *10 ⁻⁶	0.8	11
6	7.64	0.407	22	1.0 *10 ⁻⁶	2.2	15
7	14.59	0.382	23	1.0 *10 ⁻⁷	2.1	24
8	8.08	0.319	20	1.0 *10 ⁻⁶	0.8	11

ここに, E ; 弾性係数, ν ; ポアソン比, γt ; 単位体積重量, k ; 透水係数, c ; 粘着力, ψ ; 内部摩擦角.

(3) 入力加速度

図-4に入力加速度を示す. 地震波形は(K-NET小千谷(新潟県中越地震(2004)))で得られた波形を重複反射理論(SHAKE)により深度50mまで引き戻し, その波形を底面から入力して地表面で600gal程度になるようにし, さらにその最大加速度を50%に調整して入力している.

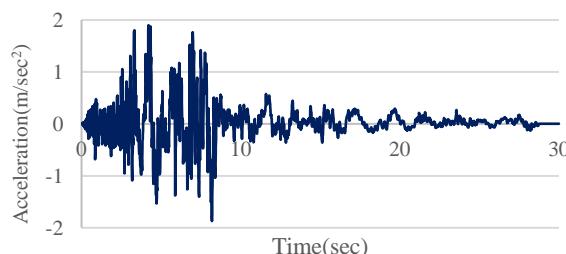


図-4 入力加速度(K-NET, Ojiya, 2004)

4. 解析結果

(1) 加速度応答

図-5, 図-6は水平モデル, 褶曲モデルのCap-Rockの加速度応答を示す. 弹性解析と弾塑性解析の比較では, 応答の大きさが前半の主要振動ではほぼ同じであるが, 後半

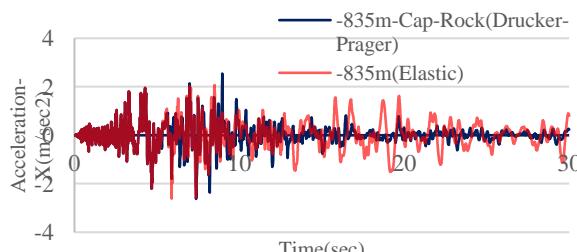


図-5 水平モデル(Cap-Rock)

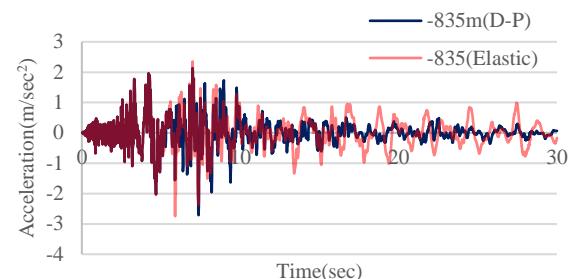


図-6 褶曲モデル(Cap-Rock)

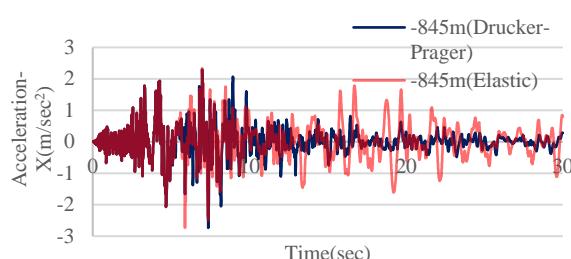


図-7 水平モデル(CO2-Storage)

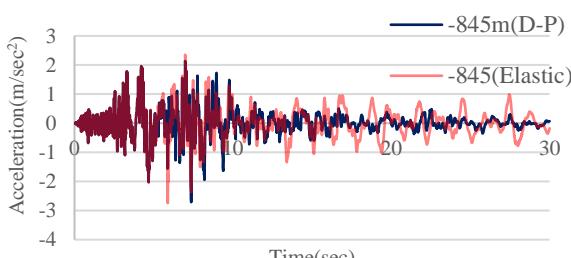


図-8 褶曲モデル(Cap-Rock)

の振動収束域では弾性モデルの振幅が大きくなっている. これは解析領域内に塑性領域が発生することにより弾性係数が低下することがその要因である. 図-7, 図-8は水平モデル, 褶曲モデルのCO₂貯留層の加速度応答を示す. 両者ともCap-Rockの場合とほぼ同様の応答を示している. 後半の振動収束域では水平モデルが褶曲モデルより応答の振幅が大きい.

(2) 間隙水圧応答

図-9, 図-10は水平モデル, 褶曲モデルのCap-Rockの間隙水圧応答である. 弹性解析が弾塑性解析より応答が大きく, また, 水平モデルの応答が褶曲モデルよりやや大きくなっている.

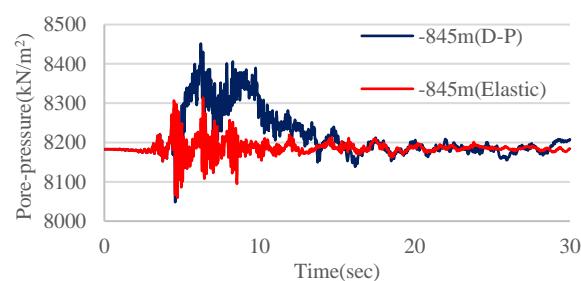


図-9 水平モデル(Cap-Rock)

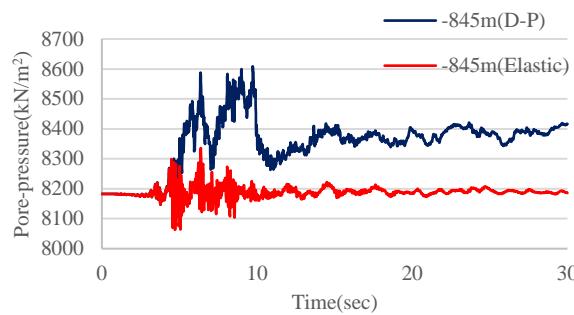


図-10 褶曲モデル(Cap-Rock)

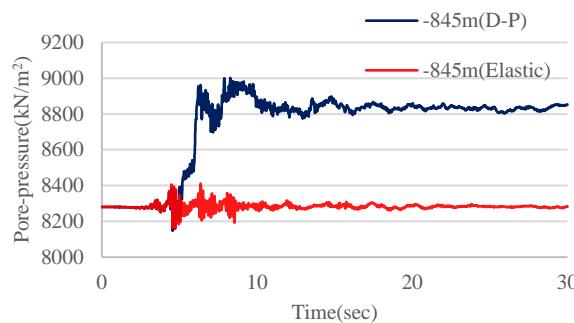


図-11 水平モデル(CO₂-Storage)

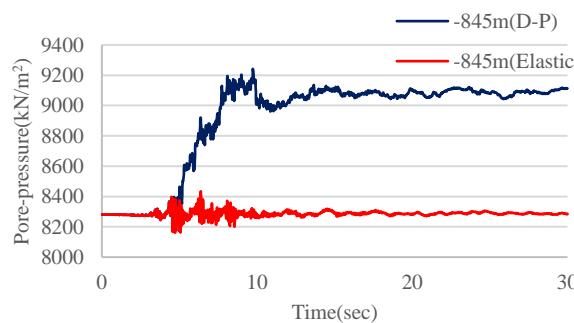


図-12 褶曲モデル(CO₂-Storage)

図-11, 図-12は水平モデル, 褶曲モデルのCO₂貯留層の間隙水圧応答である。弾塑性解析の間隙水圧の上昇が継続的ですぐに低下しない傾向を示している。

(3) 局所安全率応答

図-13, 図-14は水平モデル, 褶曲モデルのCap-Rockの局所安全率応答である。なお、図中赤線は全応力(個体応力+流体圧力)、図中青線は有効応力(全応力・流体圧力)の安全率を示す。全応力の安全率が有効応力の安全率よりもかに大きく図面からスケースアウトしている。この傾向は地盤の深度が大きくなるほど顕著である。したがって、深度の大きい場所では有効応力の安全率評価が必要である。図-15, 図-16は水平モデル, 褶曲モデルのCO₂貯留層の局所安全率応答である。両者とも主要地震動の区間で安全率が1.0(=塑性)に達している。水平モデルと褶曲モデルの比較では、水平モデルの方が褶曲モデルと比較して全応力の安全率がやや小さくなっている。本弾塑性解析では要素の応力状態が降伏面上に達した場合、降伏面をover-shootした応力はreturn-mapping法[9]により降伏面上に収束させている。

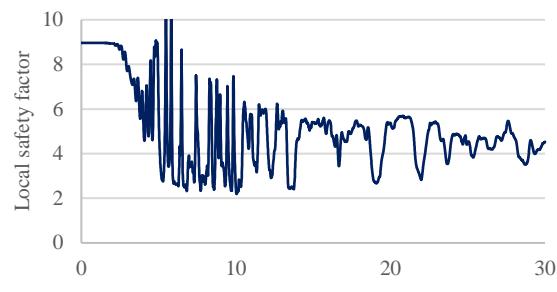


図-13 水平モデル(Cap-Rock)

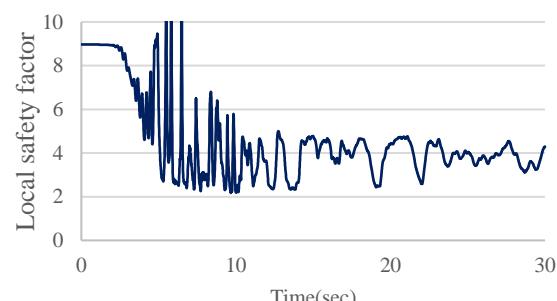


図-14 褶曲モデル(Cap-Rock)

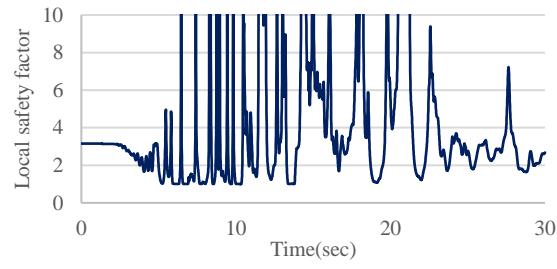


図-15 水平モデル(CO₂-Storage)

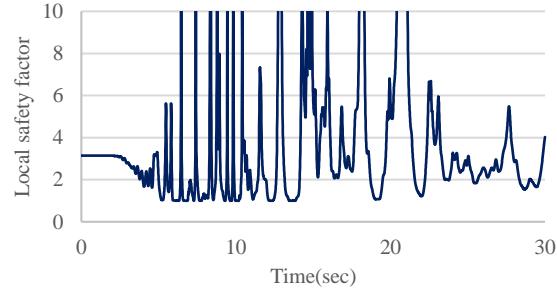


図-16 褶曲モデル(CO₂-Storage)

(4) 局所安全率の解析領域分布

図-17, 図-18は水平モデル, 褶曲モデルの有効応力による局所安全率分布(8sec)である。ここに1.0がNMM要素の降伏(塑性状態)に達していることを示す。両者ともCap-Rock(Layer-4)は弾性状態であるが、CO₂貯留層の一部が降伏に達している。このことにより、弾塑性解析の間隙水圧応答が弾性解析よりも大きくなっていると思われる。これは、NMM要素が塑性状態になると要素の透水性が低下し、図-13, 図-14に示すように間隙水圧が上昇するもの

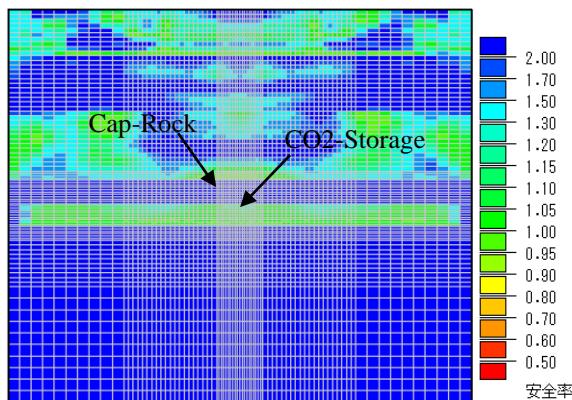


図-17 水平モデルの局所安全率分布 (8sec)

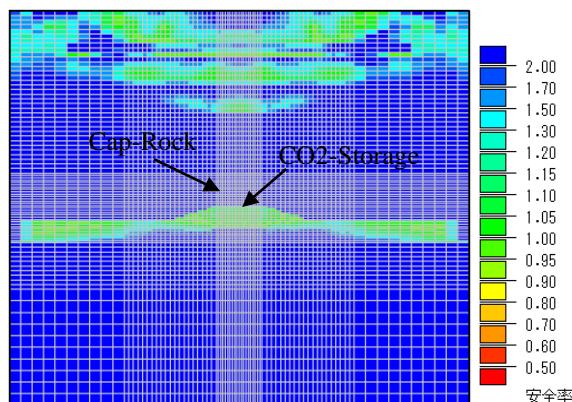


図-18 褶曲モデルの局所安全率分布 (8sec)

参考文献

- [1] 堀川滋雄, 佐々木猛, 薛自求, 中島崇裕 : 長岡CCSサイトにおける地震時安定性, 地盤工学学会誌, Vol.63, No.10, Ser.No.693, pp.36-39, 2015.
- [2] Sasaki, T., Horikawa, S., Kusunose, K., Hashimoto, R.: Seismic response in the hydraulic-mechanical coupling analysis of a CCS site model by NMM, *15th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation*, KL8, pp.52-61, 2021.
- [3] Ryota, Hashimoto, Yuzo, Ohnishi, Takeshi, Sasaki, Shigeru, Miki, ; Stability analysis of underground space with discontinuous planes using a four node iso-parametric element manifold method with rigid body rotation, *Tunneling and Underground Space Technology Special Issue*, Volume 92, 103047, Elsevier, 2019.
- [4] Ghaboussi, J., Wilson, E. L. and Isenberg, J., : Finite element for rock joints and interfaces, *J. Soil Mech. Eng.* 5, pp.419-442, 1973.
- [5] Shigeo, Horikawa, Takeshi, Sasaki, Tsutomu, Hashimoto, Kinichiro, Kusunose, Ryota, Hashimoto,: Earthquake response analysis of CO₂ storage site using hydraulic-mechanical coupled analysis by NMM, *AGU Fall Meeting*, S15B-0252, 2021.
- [6] Shigeo Horikawa, Takeshi, Sasaki, Tsutomu, Hashimoto, Kinichiro, Kusunose, Ryota, Hashimoto,: Earthquake response analysis of CO₂ storage site using hydraulic-mechanical coupled analysis by NMM, *16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies GHGT-16*, 2022.
- [7] Drucker. D., C., and Prager, W.: Soil mechanics and Plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 157, 1952.
- [8] 堀川滋雄, 佐々木猛, 橋本励, 楠瀬勤一郎, 橋本涼太 : 変形・水圧連成解析による CO₂貯留サイトの強振動時安定性評価, 応用地質学会年次講演会, No.30, 2022.
- [9] Scherzinger, W., M.: A return mapping algorithm for isotropic and anisotropic plasticity models using a line search method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 317, 15, pp. 526-553, 2017.

と思われる。

5. 結論と今後の課題

本稿では、地球温暖化対策技術の一つとして考えられている二酸化炭素地中貯留に関する地盤の地震時の安定性検討をNMMによる流体-変形連成弾塑性応答解析の定式化と想定されるモデルについて実施した。この結果、地下1000m前後に存在するCO₂貯留層の地震時安定性評価では有効応力解析が必要であることを示した。また、貯留層の周辺要素が塑性化すると流体の透水性が低下し、間隙水圧の上昇が継続する結果が得られた。当研究プロジェクトでは、現在、深部地盤の大きな拘束圧による変形と透水特性の室内試験を実施中である。また、地盤中には断層などの不連続面が存在することが多くこれらの安定性への影響検討も重要である。今後はこれらの結果を解析に導入し、実際のサイト選定に適用する予定である。