

堆積軟岩の透水性を考慮した空洞安定性に関する解析的検討

岸田 潔^{1*}・坂田知也¹・富田敦紀²・細田 尚¹・足立紀尚³

¹京都大学 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²東電設計株式会社 地下環境技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

³財団法人地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

*E-mail: kishida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

堆積軟岩は、時間依存性、ダイレイタンス挙動、ひずみ軟化、異方性といった特性を示す材料である。堆積軟岩中に空洞を建設した場合、これらの特性が空洞の安定にどのように影響するのかは、十分に解明されていない。特に、掘削に伴う透水性の変化が空洞の安定にどのような影響を及ぼすのかは、未だ不明確である。本研究では、ひずみ軟化型弾塑性構成モデルを用いた流体-力学連成2次元有限要素解析により、堆積軟岩中の空洞の安定性に関する数値解析的検討を行う。実際には、ダイレイタンス挙動に関するパラメータと透水係数を変数とし、短期的な空洞安定性に関する数値解析を実施する。それにより、ダイレイタンス特性および透水性が堆積軟岩空洞にどのような影響を及ぼすのか検討を行う。

Key Words : soft rock, strain-softening, permeability, dilation, numerical analysis

1. はじめに

堆積軟岩は、時間依存性、ダイレイタンス挙動、ひずみ軟化、異方性といった特性を示す材料である。個々の特性に関しては、種々の研究が行われ、モデル化も行われている^{1),2)}。堆積軟岩を対象に廃棄物処分事業を実施した場合、処分空洞建設中および廃棄物埋設後の空洞の安定と廃棄物の移流・拡散問題が課題となる。筆者らは、堆積軟岩に空洞を掘削した際の安定性について、流体-力学連成2次元ひずみ軟化型弾塑性有限要素解析を実施してきた³⁾。解析結果で得られた掘削影響領域(EDZ)と実際に計測された種々の情報を比較することで、解析の有効性を確認してきた³⁾。一方、現地の計測では、空洞掘削後、空洞周辺の透水係数は、変化することが確認されている⁴⁾。

掘削に伴い堆積軟岩の透水性がどのように変化するかは、短期的・長期的な力学挙動や水理学挙動を論じるうえで必要不可欠なことである。一つは、せん断過程において堆積軟岩の透水性がどのように変化するかを確認することが必要である。さらには、それらの知見を含んで流体-力学連成解析を実施する必要がある。

本研究では、透水係数と透水係数の変化に起因するであろうダイレイタンス特性に影響するパラメータを変化させ、円形空洞の掘削解析を行い、それらのパラメータが、空洞掘削に伴う短期的な力学挙動にどのような影響を及ぼすのか、検討を行った。

タが、空洞掘削に伴う短期的な力学挙動にどのような影響を及ぼすのか、検討を行った。

2. 解析モデル

解析は、流体-力学連成2次元ひずみ軟化型弾塑性有限要素解析⁵⁾を実施した。構成関係は、足立-岡のひずみ軟化型弾塑性構成式を用い⁶⁾、中間主応力の概念を導入した破壊規準⁷⁾を用いた。解析対象は、図-1に示すように直径20 mの円形空洞とした。土被りは100 m、地下水位は地表面とし、側方境界に静水圧を与えた。空洞掘削開始後は、空洞周辺を排水境界とした。

モデル地盤の材料パラメータを表-1に示す。また、検

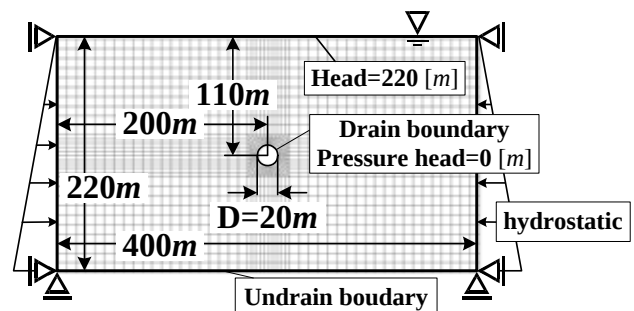


図-1 解析メッシュと境界条件

表-1 モデル地盤の材料パラメータ設定

単位体積重量 [kN/m ³]	20.0	$c_{\sigma b}$ [MPa]	6.40
ヤング率 E [MPa]	2.808×10^2	a	0.959
ポアソン比 ν	0.17	α	1.00
R_f	6.00	τ	0.09
G'	100	D_f	-0.85
C	0.04		

表-2 各ケースで設定した透水係数と b

Case	1	2	3	4
b [MPa]	0.33		3.30	
透水係数 k [cm/sec]	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-7}

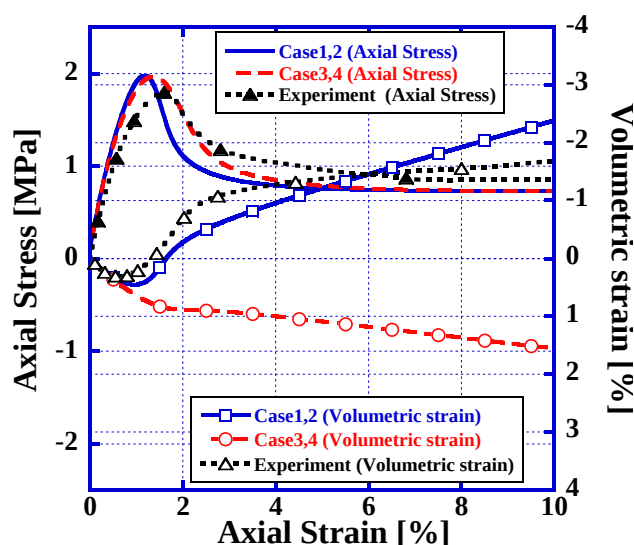


図-2 1要素の載荷試験解析結果と実験値

討した各ケースの透水係数とダイレイタンシーに関連するパラメータ b を表-2に示す。これらのパラメータを用いて、1要素による載荷試験（ひずみ速度0.01%/min）の有限要素解析を実施した。解析結果を図-2に示す。いずれにケースも軸差応力-軸ひずみ関係においては、ひずみ硬化-軟化挙動を示し、同じピーク強さおよび残留強度を示すことが確認できる。一方、体積ひずみ-軸ひずみ関係では、Case 1, 2では膨張挙動を、Case 3, 4では圧縮挙動を示すことが確認できる。 b 値を変化させることで、体積ひずみ挙動が異なるものとなる。また、図-2における実験値は軽石凝灰岩を用いた三軸CD試験（拘束圧0.1MPa、ひずみ速度0.01%/min）の結果である。Case 1, 2の結果と比較すると、上述のパラメータで堆積軟岩の挙動を概ね再現できていることが確認される。

3. 解析結果と考察

表-1, 2に示すパラメータを用い、図-1に示す円形空洞の掘削解析を行った。パラメータの設定は、文献3)を参

表-3 掘削解析ステップ

Time [min]	Action	Stress release ratio on excavating process [%]
0	Gravitational stress analysis	
100	Excavate the tunnel	0
200	Stress release on excavating process	1
300		2
400		3
...	...	...
4100		40
...	...	...
6100		60
...	...	...
10100	Finish the release	100

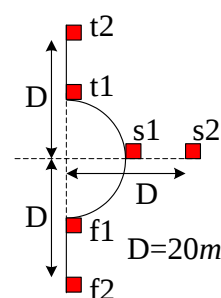


図-3 空洞周辺の着目要素

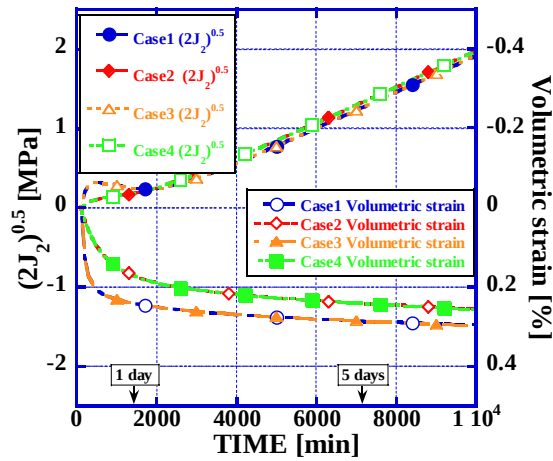
照した。解析のステップを表-3に示す。空洞は素掘り状態で、支保工に相当するものはインストールしていない。解析結果は、図-3に示す着目要素について結果を示し、議論を行う。

(1) 偏差応力と体積ひずみ

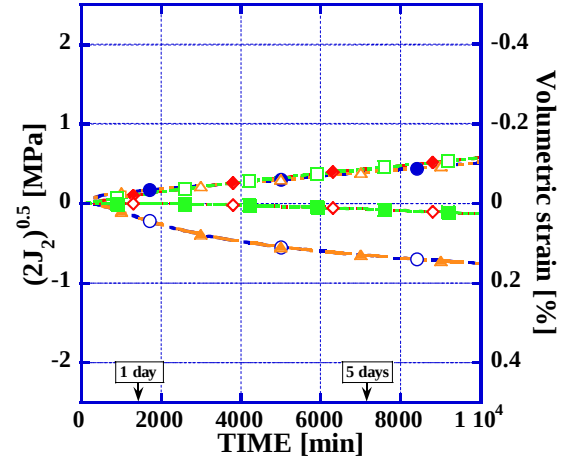
図-4に掘削に伴う偏差応力と体積ひずみの変化を示す。空洞周辺の要素(t1, s1, f1)では、偏差応力は徐々に増える傾向を示している。いずれの要素においても、2000 min までで、偏差応力の表れ方が異なる傾向がある。これは、Case 1 と 3 が同じで、Case 2, 4 が同じである。空洞周辺の応力状態には、体積ひずみに影響するパラメータ b 値より、透水係数の方が影響することが考えられる。また、掘削当初は応力の再配分が急激に発生し、透水係数が異なることで過剰間隙水圧の消散の速度が異なり、偏差応力に差異が出るものと考えられる。これらは、掘削ステップや速度にも影響されることが考えられる。

一方、空洞周辺要素の体積ひずみと掘削ステップの関係では、同様に Case 1, 3 が同じで、Case 2, 4 が同じであることが確認できる。体積ひずみの発現も透水係数に影響されることが確認できる。さらに、体積ひずみに関しては、偏差応力と異なり、掘削が進行しても体積ひずみが一致することは見られない。また、いずれも圧縮の体積ひずみが発生している。一方で、 b 値の差異による影響は明白ではない。

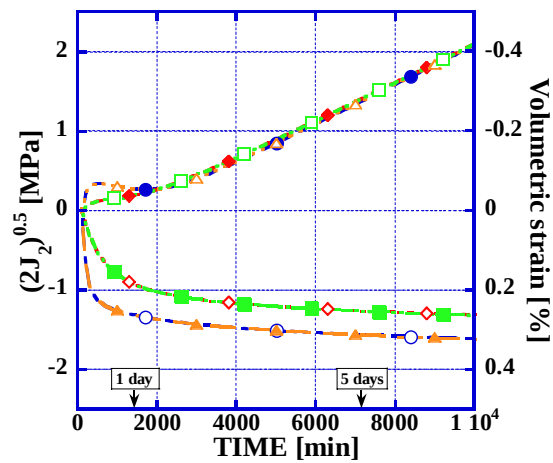
空洞から 0.5D 離れた要素(t2, s2, f2)では、パラメータの



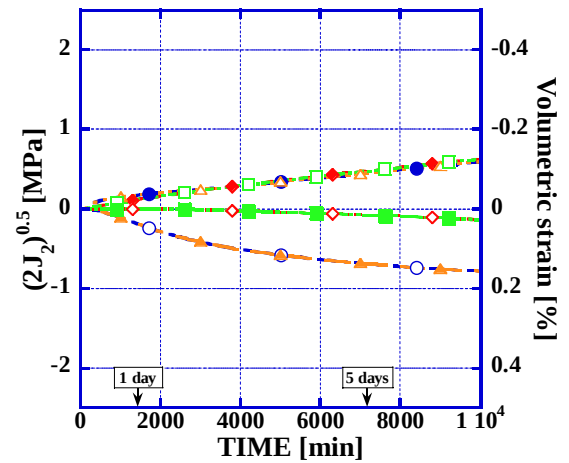
(a) Element t1



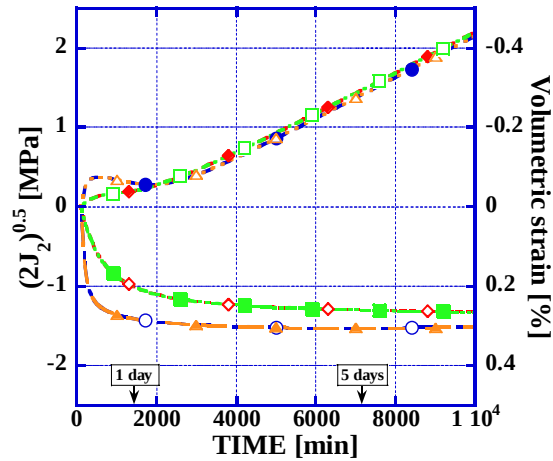
(b) Element t2



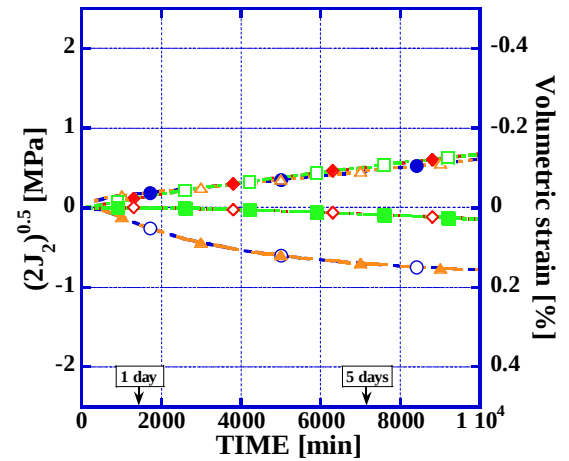
(c) Element s1



(d) Element s2



(e) Element f1



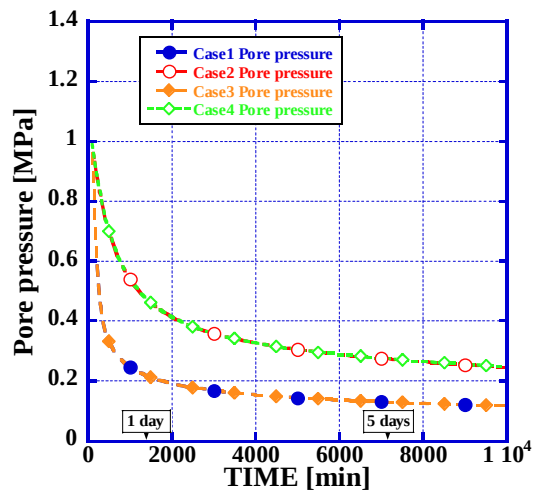
(f) Element f2

図-4 掘削に伴う着目要素の偏差応力，体積ひずみの変化

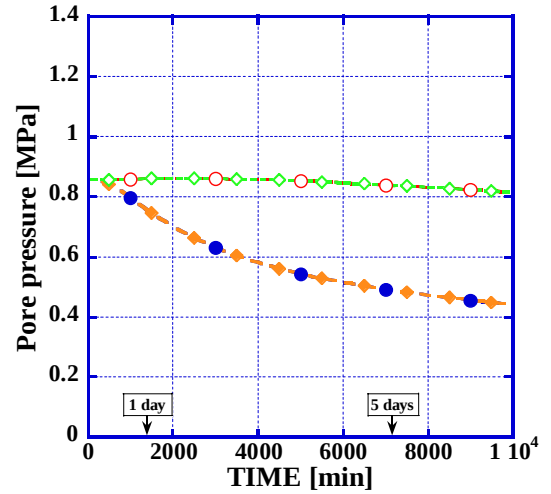
差異による偏差応力の差異は，認められない．一方で，体積ひずみの出現に関しては，Case 1, 3とCase 2, 4で異なることが確認できる．これらの差異は，透水係数であることから，体積ひずみの出現には透水係数が影響することが確認できる．

(2) 間隙水圧

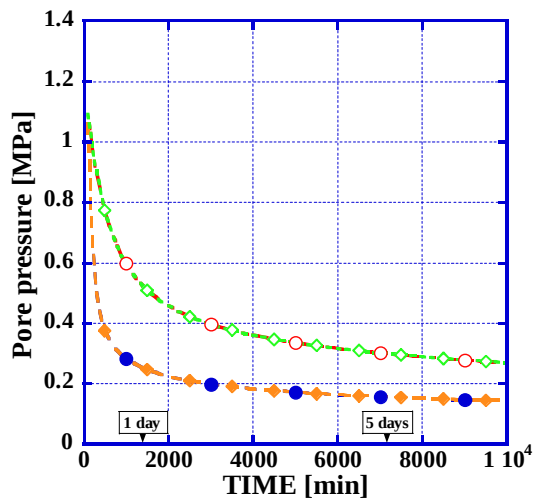
図-5に掘削に伴う着目要素の間隙水圧を示す．これらの結果も，Case 1, 3とCase 2, 4で異なることが確認できる．さらに，間隙水圧の掘削に伴う変化の履歴は，体積ひずみの変化傾向と類似することが確認できる．堆積軟岩においては，透水係数と体積ひずみに関連性があることが



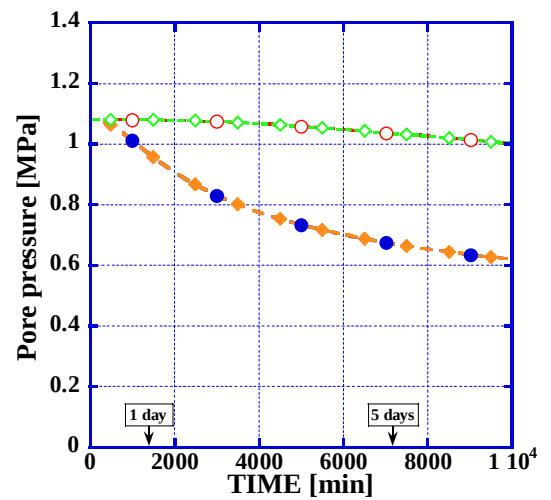
(a) Element t1



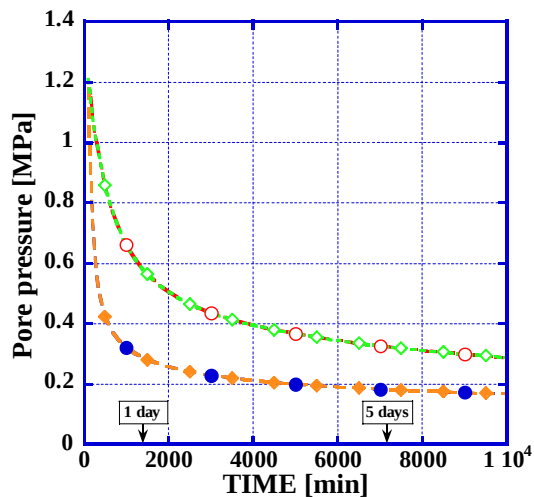
(b) Element t2



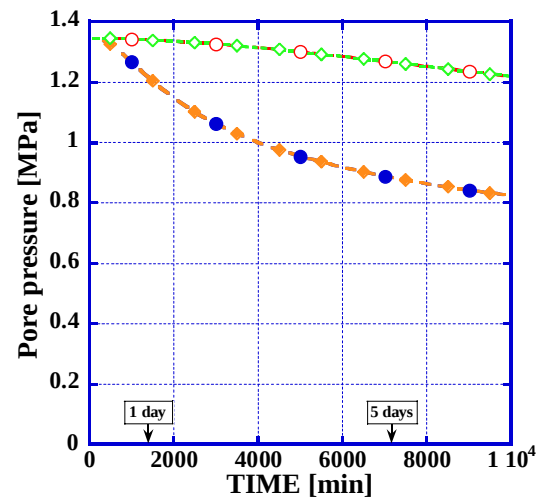
(c) Elements s1



(d) Element s2



(e) Element f1



(f) Element f2

図-5 掘削に伴う着目要素の間隙水圧分布

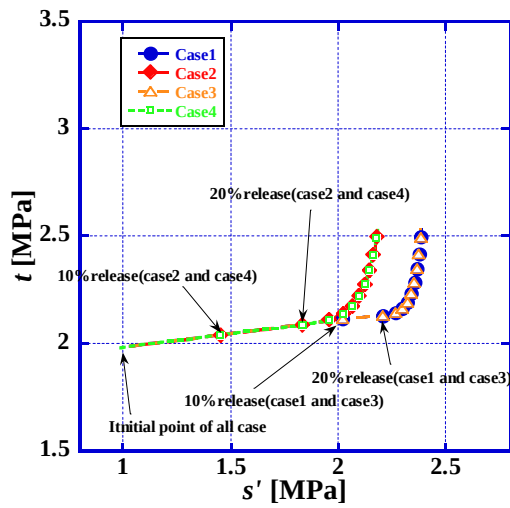
想定できる．

(3) 応力経路

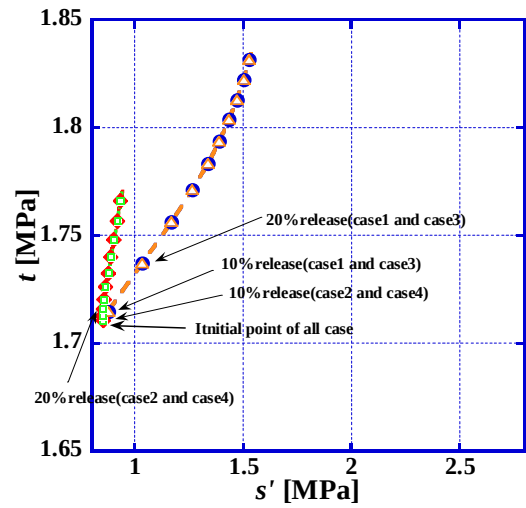
着目要素の $s'-t$ 空間 ($s' = (\sigma_1' + \sigma_3')/2$, $t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$) に

おける有効応力経路を図-6に示す．各有効応力経路は，初期状態から掘削開放率が10%毎にプロットで示す．

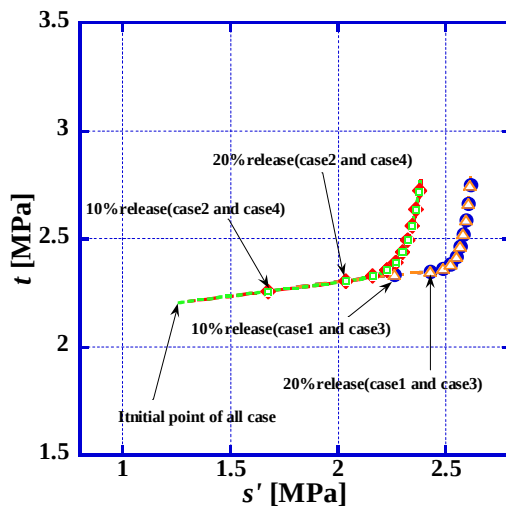
掘削開放率が40%まで，すなわち，図-4における4000 minまでは，空洞周辺での着目要素では，いずれのケー



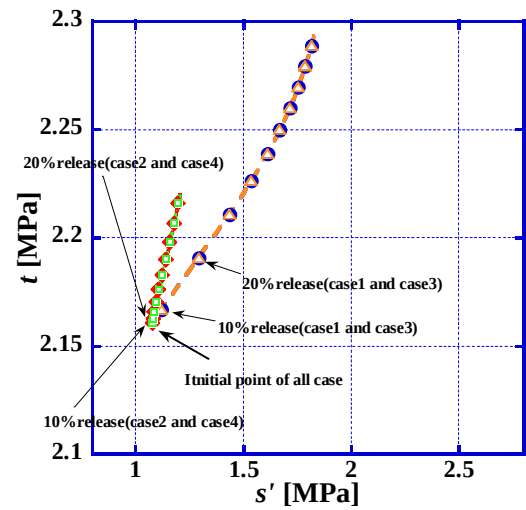
(a) Element t1



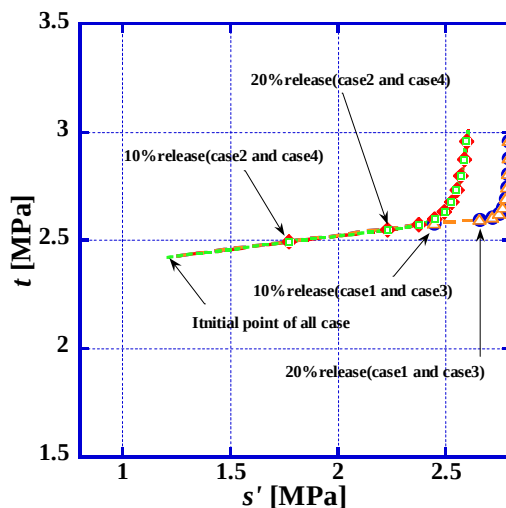
(b) Element t2



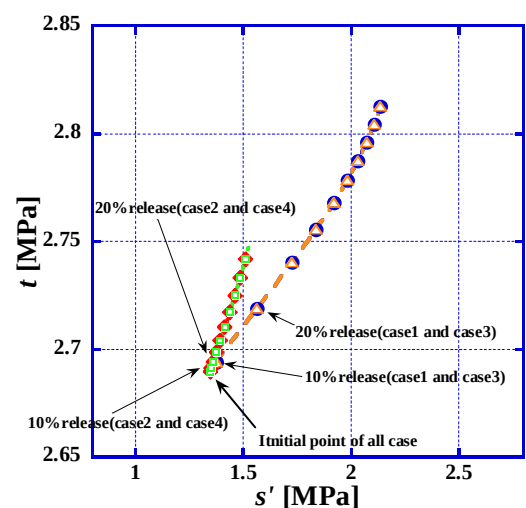
(c) Elements t1



(d) Element s2



(e) Element f1



(f) Element f2

図-6 掘削に伴う着目要素の有効応力経路

スも同じ有効応力経路を示している．図-4においては，1000 minまではケースにより偏差応力の発生に差異が見られるが，有効応力経路には差異は見られない．掘削初期段階では，偏差応力は急激変化するが，図-5より間隙

水圧も急激に変化しており，結果としては有効応力経路に差異が認められなかった．

掘削開放率が40%をすぎると，空洞周辺の着目要素では，有効応力経路に差異が見られる．Case 1, 3とCase 2, 4

で異なる傾向を示しており、図-4, 5で示す傾向と同じく、透水係数の差異が有効応力経路に影響を及ぼしておりことに相当する。

一方、空洞周辺から0.5D離れた着目要素では、いずれのケース・要素においてもモール円がスライドするような現象を示しており、破壊に至るような傾向は示していない。また、ここでもわずかではあるがCase 1, 3とCase 2, 4で異なる傾向を示しており、透水係数の影響が確認できる。

4. まとめ

本報告では、堆積軟岩中に空洞を掘削した場合、透水係数や体積ひずみに影響するパラメータの差異が空洞の安定にどのような影響を示すかについて、検討を行った。結果として、

- ・ 透水係数が差異が、偏差応力、体積ひずみ、間隙水圧および有効応力経路に影響を及ぼす。
- ・ 体積ひずみに影響を及ぼすパラメータの差異は、結果に影響を与えない。

という結論を得た。したがって、透水係数の設定や境界条件の設定は、堆積軟岩中の空洞掘削やその後の地下水流動問題を論じるうえで、非常に重要なパラメータであるといえる。また図-4, 5より、体積ひずみと間隙水圧は連動した変化挙動を示しており、今後体積ひずみと透水係数の関係を室内実験などを通じて確認する必要がある。

空洞掘削解析では、図-2に示すような体積ひずみの膨張傾向は見られなかった。これは、今回の解析の応力レベルが1要素の解析に比べて非常に小さいことなどが起因している可能性がある。ここでは、体積ひずみ発現のパラメータ b 値の影響がほとんどない結果になったが、

応力レベルや他の材料パラメータとの関係から、もう少し検討する必要があると考える。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究(B) No.15710058により行われた。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 岡二三生, 曾良岡宏, 小池真史: 軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 1–10, 1998.
- 2) 足立紀尚, 岡二三生, 小高猛司, 古林秀之, 尾崎仁美: 軟岩の変形・破壊挙動に及ぼす拘束圧の効果とひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文集, No. 666/III-53, pp. 117–126, 2000.
- 3) 大槻英夫, 田坂嘉章, 鈴木康正, 大森剛志, 岸田潔, 足立紀尚: 土・水連成ひずみ軟化型弾粘塑性モデルの拡張と堆積軟岩空洞掘削問題への適用, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会岩盤力学委員会, pp. 231–236, 2006.
- 4) 戸井田克, 渥美博行, 田仲俊行, 牧野卓也, 石田裕樹: 余裕深度処分試験空洞掘削に伴う掘削損傷領域(EDZ)の透水性評価, 日本地下水学会2005年秋季講演会講演要旨, pp. 40–45, 2005.
- 5) Zhang, F., Yashima, A., Ye, G. L., Adachi, T., and Oka, F.: An elastoplastic strain-hardening and strain-softening constitutive model for soft rock considering the influence of intermediate stress. *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 5, JGS, pp. 107–117, 2003.
- 6) Adachi, T. and Oka, F.: Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 57–70, 1982.
- 7) Nakai, T. and Matsuoka, H.: A generalized elastoplastic constitutive model for clay in a three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 3, pp. 81–89, 1986.

NUMERICAL STUDY ON STABILITY OF UNDERGROUND CAVERN CONSIDERING PERMEABILITY OF SOFT ROCK

Kiyoshi KISHIDA, Tomoya SAKATA, Atsunori TOMITA, Takashi HOSODA and
Toshihisa ADACHI

In excavating the underground cavern into the soft rock, it is not clearly known how the various permeability parameters with geological formation and the influence of excavation are affected to the stability of underground cavern and the seepage issues. Applying the elasto-plastic strain-softening model for coupled hydro-mechanics interactive problem, the numerical studies on the stability of underground cavern are discussed. In practical, the numerical analyses are performed considering permeability and b -value which controls with dilation. Then, the influence of permeability and volumetric strain to the stability of underground cavern is discussed.