

堆積軟岩空洞掘削に伴う 空洞周辺岩盤間隙水圧挙動に関する解析的検討

富田 敦紀¹・蛭名 孝仁²・森川 誠司³・田部井 和人³・岸田 潔⁴・足立 紀尚⁵

¹正会員 工修 日本原燃株式会社 開発設計部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駱野附504-22)
E-mail: atsunori.tomita@jnfl.co.jp

²日本原燃株式会社 開発設計部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駱野附504-22)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

⁴正会員 工博 京都大学 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵フェロー会員 Ph. D 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)

余裕深度処分埋設施設の試験空洞掘削時に、空洞周辺岩盤中に埋設した多段式間隙水圧計による測定において、ベンチ1 側壁掘削時には計測器近傍の岩盤の間隙水圧が一時的に上昇し、ベンチ2 側壁掘削時には計測器近傍の岩盤の間隙水圧が一時的に低下する現象が認められた。これら軟岩特有の特徴的な間隙水圧挙動のメカニズムについて検討するため、三次元土・水連成有限要素法解析を実施し、これらの解析結果により間隙水圧の変動現象を定性的に再現した。

Key Words : test cavern, radioactive waste disposal, soft rock, pore water pressure, soil-water coupled analysis, three dimensional finite element analysis

1. はじめに

日本原燃株式会社では余裕深度処分埋設施設の基本設計を目的とした調査を実施しており、その一環として青森県六ヶ所村の敷地内で空洞の力学的安定性および掘削影響領域 (Excavation Disturbed Zone : EDZ) の把握を目的とした試験空洞の掘削を実施している。試験空洞は2004年10月に先進導坑の掘削を開始し、2005年6月に掘削工事が終了した。

この試験空洞掘削では各種の力学計測だけでなく空洞周辺岩盤内で多段式間隙水圧測定を実施している¹⁾。掘削中に得られた空洞周辺岩盤における間隙水圧挙動は、全体として掘削の進捗に伴い間隙水圧が漸減する傾向にあるが、間隙水圧計設置位置近傍を掘削した場合に限って、その掘削作業に連動するように一時的に間隙水圧が上昇したり、逆に低下したりする現象が認められた(3章参照)。この間隙水圧挙動の要因を、掘削による応力解放に伴う岩盤挙動と連成した間隙水圧挙動であると解釈し、そのメカニズムの妥当性を検証するために三次元土・水連成解析を実施した。

本論文は、上記間隙水圧挙動メカニズムを解析的に検討した結果を報告するものである。

2. 試験空洞の概要

試験空洞の全体レイアウトを図-1に示す。図-2は図-1に示すT-T'断面における地質断面図である。試験空洞周辺の主な地質は、新第三紀中新世の海成堆積岩からなる鷹架層で、試験空洞は軽石凝灰岩層内に位置している。この軽石凝灰岩層の平均的な透水係数は 3.0×10^{-8} m/secであり、試験空洞掘削前に実施したボーリング調査および計測坑掘削時の観察結果では、軽石凝灰岩層には、既存の割目はほとんど認められていない。

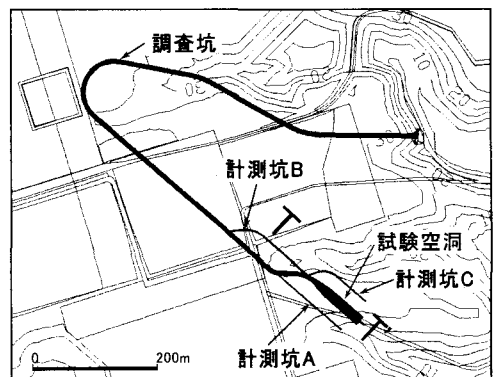


図-1 試験空洞の全体レイアウト

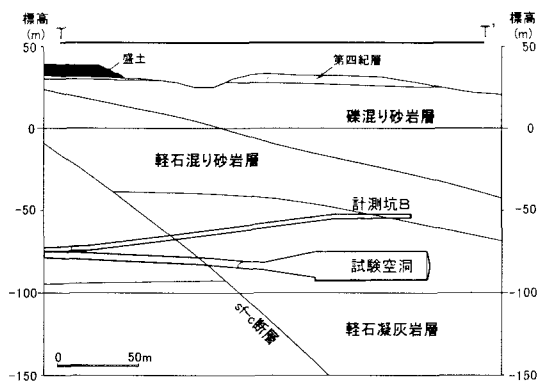


図-2 試験空洞位置付近の地質断面

試験空洞の縦断面図を図-3に、横断面図を図-4に示す。空洞形状は、幅 17.7 m、高さ 16.2 m の三心円形状で、空洞延長は 71.2 m である。なお、試験空洞の土被りは空洞天端位置で約 100 m である。試験空洞の掘削は自由断面掘削機等による機械掘削であり、掘削手順は先進導坑掘削後、アーチ部を切上げ、3 段(1 段：約 3 m)のベンチカット工法で施工した。また、各ベンチは中央部を先行掘削した後、側壁部の掘削を行った。

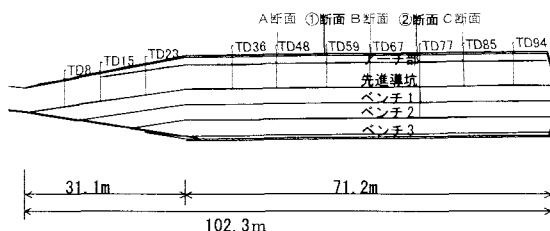


図-3 試験空洞の縦断面図

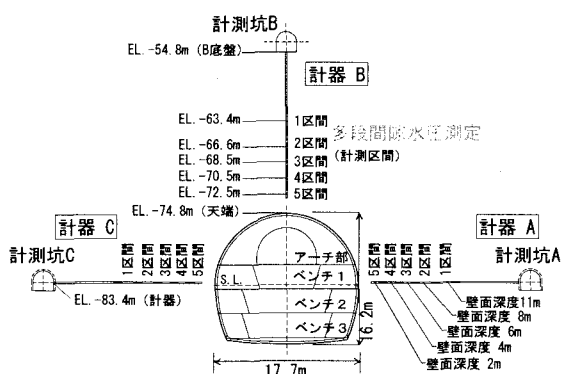


図-4 試験空洞の横断面図と間隙水圧測定区間の配置

岩盤補強工は、吹付コンクリート：300 mm、ロックボルト：アーチ部 4 m、側壁部 6 m、鋼製支保工（H 型钢：250×250×9×14、1 m スペーシング）である。

水理計測に関しては図-3に示す①及び②断面において、

多段式間隙水圧測定や各種透水試験などを実施しており、多段式間隙水圧計は、図-4に示すとおり、試験空洞掘削前に各計測坑から空洞上部と空洞左右に設置し、空洞壁面から 2 m、4 m、6 m、8 m、11 m の深度で計測している。

3. 空洞掘削時の特徴的な間隙水圧挙動

図-5および図-6は間隙水圧計測を行っている②断面(TD76)近傍の側壁を掘削した際の間隙水圧計測結果である。なお、詳細な間隙水圧変化を計測するため、計測頻度は 2 分間隔としている。

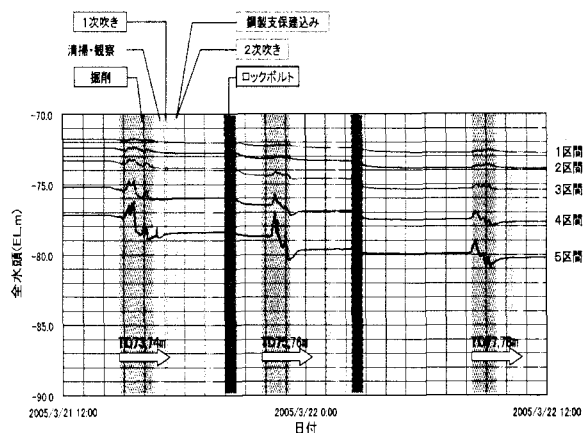


図-5 ベンチ1 側壁掘削時の間隙水圧挙動

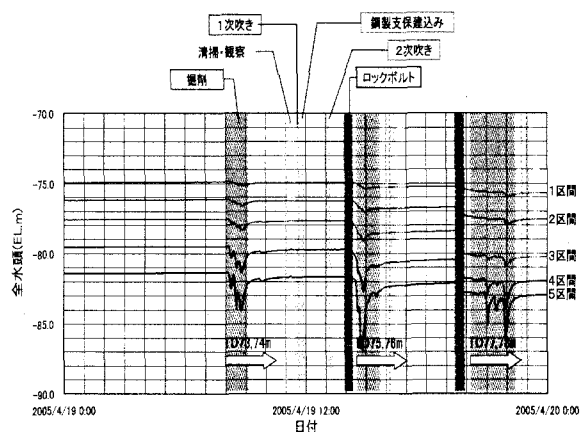


図-6 ベンチ2 側壁掘削時の間隙水圧挙動

図-5は ベンチ1 掘削時の計器C側の間隙水圧の経時変化であり、図-6は ベンチ2 掘削時の計器C側の間隙水圧の経時変化である。これらの図には、間隙水圧の経時変化だけでなく、その間の施工作業内容も併記する。

図-5と図-6から空洞掘削時の間隙水圧挙動に関して以

下に示すことが読み取れる。

- i) ベンチ1 側壁掘削時には掘削作業が開始すると間隙水圧が一時的に上昇し、掘削作業が終了すると再び元の間隙水圧に戻る傾向が認められる。間隙水圧の一時的な上昇量は、計測断面に対して掘削位置に近いほど、また掘削壁面に近いほど大きい。
- ii) ベンチ2 側壁掘削時にはベンチ1 側壁掘削時とは逆に掘削作業が開始すると間隙水圧が一時的に低下し、掘削作業が終了すると再び元の間隙水圧の値に回復する傾向が認められる。間隙水圧の一時的な低下量は、計測断面に対して掘削位置に近いほど、また掘削壁面に近いほど大きい。
- iii) ロックボルト施工時にもわずかであるが間隙水圧が低下する傾向にある。しかし、掘削とロックボルト施工時以外の作業時には間隙水圧はほとんど変化が認められない。

以上から、i)と ii)の現象については切羽の進行に伴って応力解放された岩盤の挙動が、岩盤内の間隙水圧分布に影響を与えたと予想される。iii)については、ロックボルト削孔中に地下水が流出し、空洞周辺岩盤中の間隙水圧に影響を与えたことが原因として考えられる。

本論文では i) と ii) の特徴的な挙動に着目し、岩盤と地下水の連成挙動を考慮できる土・水連成有限要素法解析²⁾を実施し、上記で推定した要因の妥当性を解析的に検証することとした。

4. 間隙水圧挙動メカニズムの検証

(1) 解析モデル

空洞の切羽進行に伴う間隙水圧挙動を的確にシミュレートするため、解析モデルは三次元とした。解析メッシュ及び境界条件を示した解析モデルを図-7に示す。解析領域は試験空洞を中心に空洞軸方向に 501 m、空洞横断面の鉛直方向に 236 m、水平方向に 250 mの範囲とした。現地での地下水位測定結果に基づき、解析では初期地下水位を地表面に設定した。初期鉛直方向有効応力は土被りに応じて設定し、初期水平方向有効応力は多軸ひずみ法による初期応力測定結果に基づいて設定した。

表-1は解析に用いた地山物性値の一覧である。本検討は、掘削作業による岩盤挙動と連動した間隙水圧の定性的挙動のシミュレートが目的であるため、岩盤は解析領域全体で様な透水性を有する弾性体とした。

解析にあたっては計器C側の水理計測②断面近傍における ベンチ1 側壁および ベンチ2 側壁の切羽掘削が進行する際の間隙水圧挙動を詳細に比較検討することとした。具体的には、表-2に示すとおり、計測坑、先進導坑、アーチ切上げならびに ベンチ1、ベンチ2 の中央部の掘削は、一括掘削でモデル化し、ベンチ1、ベンチ2 の側壁部掘削時は、実工事の施工サイクルを再現するために、実掘削作業と、それ以外の作業の時間を分けた解析ステップとした。特に、②計測断面前後の3 m 区間については、掘削作業と支保設置などの解析ステップを実施工サイクルの実績通りに設定した。

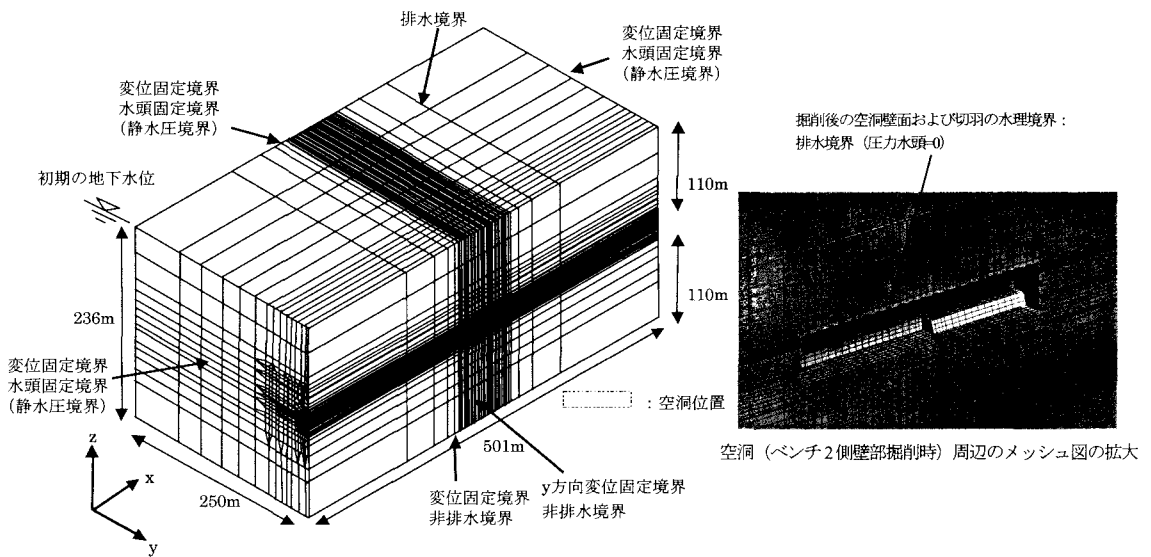


図-7 解析モデル

表-1 地山物性値

弾性係数	MPa	1,990
ポアソン比		0.17
透水係数	m/s	3.0×10^{-8}

表-2 解析ステップ

STEP	イベント	TD(m)	解析時間
1	初期地圧, 地下水位設定		-
2	計測坑掘削		218 日
3	先進導坑掘削		28 日
4	アーチ部切上げ	TD32~101	43.8 日
5	放置期間		29.2 日
5	ベンチ1中央部掘削	TD32~101	4 日
6	放置期間		6 日
7~26	ベンチ1側壁部掘削	TD32~72	12 日
27	ベンチ1側壁部1m掘削	TD73	0.8 時間
28	ベンチ1側壁部1m掘削	TD74	0.8 時間
29	ズリ出し, 洗浄・観察		0.5 時間
30	支保設置		4.8 時間
31	ベンチ1側壁部1m掘削	TD75	0.7 時間
32	ベンチ1側壁部1m掘削	TD76	0.7 時間
33	ズリ出し, 洗浄・観察		1.8 時間
34	支保設置		7.1 時間
35	ベンチ1側壁部1m掘削	TD77	0.8 時間
36	ベンチ1側壁部1m掘削	TD78	0.8 時間
37	ズリ出し, 洗浄・観察		0.5 時間
38	支保設置		3.9 時間
39~46	ベンチ1側壁部掘削	TD79~101	9.5 日
47	ベンチ2中央部掘削	TD32~101	5.5 日
48	放置期間		0.5 日
49~62	ベンチ2側壁部掘削	TD32~72	11.0 日
63	ベンチ2側壁部1m掘削	TD73	0.6 時間
64	ベンチ2側壁部1m掘削	TD74	0.6 時間
65	ズリ出し, 洗浄・観察		2.4 時間
66	支保設置		2.9 時間
67	ベンチ2側壁部1m掘削	TD75	0.6 時間
68	ベンチ2側壁部1m掘削	TD76	0.6 時間
69	ズリ出し, 洗浄・観察		0.4 時間
70	支保設置		4.0 時間
71	ベンチ2側壁部1m掘削	TD77	1.1 時間
72	ベンチ2側壁部1m掘削	TD78	1.1 時間
73	ズリ出し, 洗浄・観察		0.3 時間
74	支保設置		4.5 時間
75~79	ベンチ2側壁部掘削	TD79~101	2.3 日

(2) 解析結果

a) 間隙水圧の経時変化

図-8と図-9はベンチ1 掘削開始時からの全水頭変化量の経時変化について解析結果と計測値を比較したものである。これらの図から、本解析により、ベンチ1 側壁掘削時には、計測値と同様に一時的な間隙水圧の上昇が見られ、ベンチ2 側壁掘削時には間隙水圧の一時的な低下傾向を定性的に再現できたことが分かる。なお、間隙水圧の一時的な変動量は計測値に比べ解析結果の方がやや小さい値となっているが、全水頭の一時的な変動量は計測値、解析結果でも最大数m程度である。

b) 岩盤応力・ひずみの変化

図-10と図-11は計測器位置の真横を掘削した際の②断面(TD76)の平均有効主応力分布を示す。これらの図から、ベンチ1 側壁掘削時には、計測器位置において圧縮応力が集中し、ベンチ2 側壁掘削時には、ベンチ1掘削時に集中した応力が減少していることが分かる。さらに、計測器位置における有効応力とひずみ状態の変化を詳細に見るために、図-12と図-13に、空洞に最も近い5区間の計測器位置におけるベンチ1 掘削開始時からベンチ2 掘削終了時に至る岩盤での有効応力経路とひずみ経路を示す。

図-12の有効応力経路から、ベンチ1 側壁掘削時には、計測器付近の岩盤の平均有効応力が増加する傾向にあり、ベンチ2 側壁掘削時には、計測器付近の岩盤の平均有効応力は低下する傾向にあることが分かる。同様に図-13に示す5区間の計測器位置におけるひずみ経路から、ベンチ1 側壁掘削時には計測器付近の岩盤の体積ひずみは減少（収縮）する傾向にあり、ベンチ2 側壁掘削時には、計測器付近の岩盤の体積ひずみは増加（膨張）する傾向にあることが分かる。

このようなベンチ1 掘削時とベンチ2 掘削時における間隙水圧挙動の違いは、計測器と掘削箇所との位置関係によるものと考えられる。つまり、ベンチ1 掘削時には、間隙水圧計位置は空洞脚部の真横にあたり、掘削に伴って計測器付近の岩盤には圧縮応力が作用する形となり、その結果として間隙水圧が一時的に上昇したものと考えられる。ただし、排水条件となる掘削壁面にも近いため、直後に過剰間隙水圧が消散し、間隙水圧はすぐに元に戻ったものと考えられる。一方、ベンチ2 掘削時には、計測器は掘削位置の上部にあり、計測器付近の岩盤は掘削除荷に伴って、体積ひずみが増加（膨張）するため、間隙水圧が一時的に低下するが、周辺岩盤からはすぐに地下水が供給されるため間隙水圧はすぐに回復したものと考えられる。なお、図-12から、掘削に伴う全水頭の一時的な変化量は岩盤の有効応力に比べ非常に小さい（水圧換算で最大 0.04 MPa 以下）ことから、空洞の安定性に与える影響は小さいと考えられる。

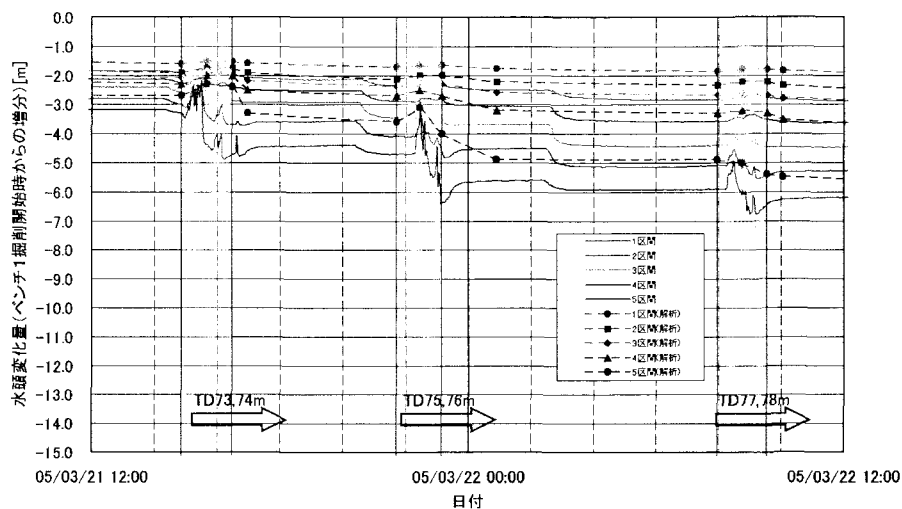


図-8 水頭変化量の経時変化 (ベンチ1側壁掘削時)

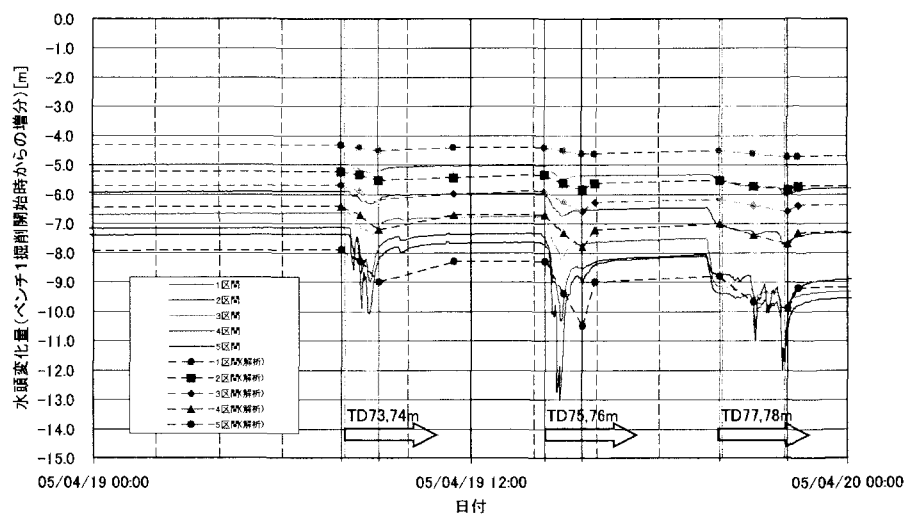


図-9 水頭変化量の経時変化 (ベンチ2側壁掘削時)

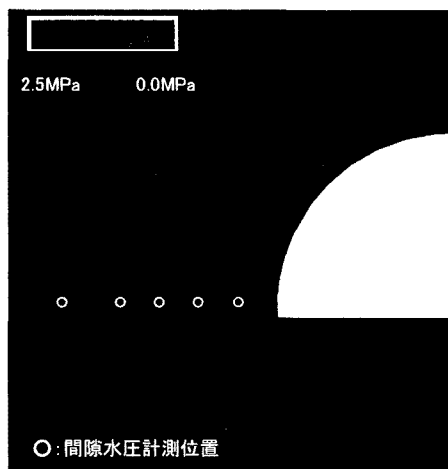


図-10 平均有効主応力分布 (ベンチ1: ②断面側壁掘削時)

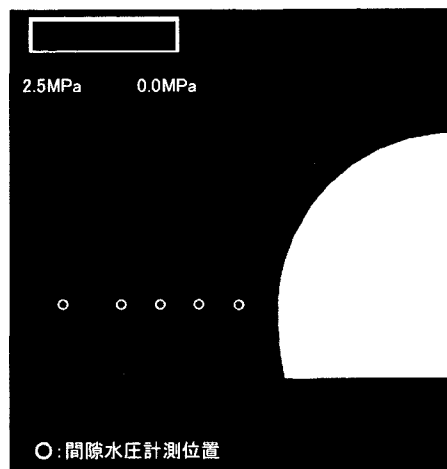


図-11 平均有効主応力分布 (ベンチ2: ②断面側壁掘削時)

5. まとめ

余裕深度処分施設施設試験空洞掘削時に周辺岩盤中に設置した多段式間隙水圧計で以下に示すような特徴的変動が認められた。

- i) ベンチ1 側壁部掘削時には、計測器近傍の間隙水圧が一時的に上昇する。
- ii) ベンチ2 側壁部掘削時には、計測器近傍の間隙水圧が一時的に低下する。

これらの間隙水圧の変化は三次元土・水連成有限要素法解析によって定性的に再現することができた。

このような掘削に伴う間隙水圧挙動は軟岩特有の挙動であると言え、より剛性が大きい硬岩の場合では、岩盤変形と間隙水圧の連成効果の影響が小さくなるため、間隙水圧の一時的変動量はより小さくなることが考えられる³⁾。一連の間隙水圧挙動を見ると空洞壁面近傍は非排水と排水の遷移状態であるが、より排水条件に近い状態であると言える。なお、空洞近傍の有効応力の値に比べ、間隙水圧の変動量はかなり小さいことから、間隙水圧挙動が空洞周辺の力学的安定性に与える影響は小さいものと考えられる。

参考文献

- 1) 山下正, 中田充彦, 守友常雄: 試験空洞掘削に伴う間隙水圧挙動の計測事例, 2005年地下水学会秋季講演会講演要旨, pp62-65, 2005.
- 2) 前川秀和, 前田憲一郎, 森川誠司, 村上武志, 太田秀樹: 未固結砂質地山における山岳工法トンネルの土・水連成弾粘塑性FEM解析, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp91-106, 2001.
- 3) 大津宏康, 大西有三, 亀村勝美: 間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察, 土木学会論文集, No.457/III-21, pp.87-96, 1992.

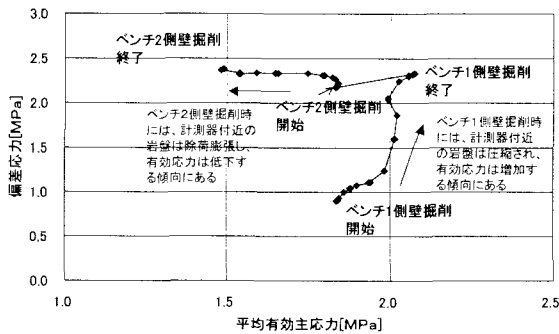


図-12 有効応力経路 (5 区間)

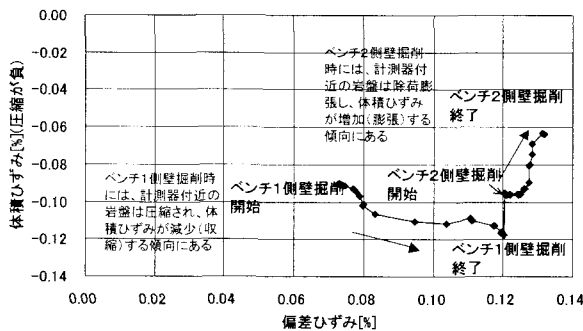


図-13 ひずみ経路 (5 区間)

A STUDY ON THE MECHANISM OF PORE WATER PRESSURE RESPONSE DURING CAVERN EXCAVATION IN SOFT ROCK

Atsunori TOMITA, Takahito EBINA, Seiji MORIKAWA, Kazuto TABEL, Kiyoshi KISHIDA and Toshihisa ADACHI

The aim of this paper is to study the mechanism of pore water pressure response in soft rock excavation. During the test cavern excavation for investigating the Excavation Disturbed Zone (EDZ) of the radioactive waste disposal cavern, pore water pressure responses near side-wall of cavern were shown as follows: i) At the 1st bench excavation, pore water pressures went up temporarily and then went back to ordinary state. ii) At the 2nd bench excavation, they went down temporarily and then went back to ordinary state. It is supposed that these pore water responses would be a problem proper to soft rock. The mechanism is proved by applying the three dimensional soil-water coupled finite element analysis.