

(17) 熱-水-応力連成試験設備を用いた掘削前後の載荷試験について

動力炉・核燃料開発事業団 正会員 ○茂呂吉司

動力炉・核燃料開発事業団 杉田裕

動力炉・核燃料開発事業団 菅野毅

Laboratory-scale test on coupled thermo-hydro-mechanical process in engineered barrier system (COUPLE),

Yoshiji MORO, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

Yutaka SUGITA, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

Takeshi KANNO, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

Abstract

Geological isolation system for high-level radioactive waste (HLW) in Japan is based on multibarrier concept composed of engineered and natural barriers. Engineered barriers are composed of vitrified radioactive waste confined within a canister, overpack and buffer material. Evaluation of heat transfer and water up-take behavior in engineered barrier system is a major issue for a safety assessment of engineered barrier system. So it is important to observe and understand change of strain and stress in near field due to the effect of ground pressure, swelling pressure and thermal stress, change of permeability of the rock with disturbed zone, change of temperature distribution, and micro structure of disturbed zone of surrounding rock mass. And in order to observe and develop a model of coupled thermo-hydro-mechanical (T-H-M) process with these observations, Laboratory-scale test on coupled thermo-hydro-mechanical process in engineered barrier system (COUPLE), based on a pit disposal concept, was designed and constructed at PNC Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) in September, 1993.

At the first stage of COUPLE, loading tests were carried out in November, 1993, and stress distribution was observed.

At the second stage of COUPLE, after excavation of pit, loading tests were carried out in April, 1994. And disturbed zone was observed.

This paper presents the results of the tests and the current state.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価において、処分場近傍のニアフィールドの熱、水理、応力等の条件を明確にする観点から、人工バリア及び周辺岩盤における熱-水-応力の連成現象を定量的に評価することが重要である。平成3年度動力炉・核燃料開発事業団報告書[1]では、ニアフィールドの熱、水理、応力については、個別現象の評価に留まっており熱-水-応力連成現象評価については今後の課題となっている。このため、今後作成する動力炉・核燃料開発事業団第二次取りまとめに向けて、熱-水-応力連成モデルを開発・確認し、連成効果を定量的に評価する必要がある。

動力炉・核燃料開発事業団では、緩衝材中の熱-水-応力連成現象については、緩衝材大型試験 (Big-Ben) においてデータを得るとともに、モデルの開発・確認を実施した[2]。熱-水-応力連成試験設備 (以下、COUPLEと呼ぶ) では、試験対象領域を周辺岩盤を含むニアフィールドまで拡張し、地下深部の処分環境下における地圧の作用、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧力の発生、廃棄体の発熱による熱応力等が周辺岩盤のゆるみ域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響を評価することを目的としている。

本研究では、対象試験岩体への模擬処分孔掘削前後の観測孔の孔径変化及び孔径変化から得られた応力分布、岩体中の間隙水圧変化、載荷荷重の違いによる弾性波速度の変化及びAE(Acoustic Emission)カウント数の変化などを報告する。合わせて、掘削前後の載荷試験を応力解析した結果についても報告する。

2. 試験の概要

2.1 試験装置

COUPLEの試験設備の縦断面図を図-1に示す。又、設備の水平断面図を図-2に示す。図の様に、たて3.2m、横3.2m、高さ1.56m、厚さ0.5mの鉄枠を地中に埋設し、載荷時の反力枠として用いる。その反力枠に一方6本ずつ、水平2方向、合計12本の油圧ジャッキを取り付け、たて1m、横1m、高さ1.47mの試験岩体を図-2に示す位置に設置し、加圧板を介在させて載荷する。最大載荷荷重は一方あたり2250ton(約15.3[MPa])である。載荷時に載荷板と岩体の間にはフラットジャッキを介在させ、載荷荷重が均一に岩体にかかるようにした。

岩体の周囲の温度を一定に制御するため、載荷板の外側を水槽とし、循環装置を用いて恒温水を循環させた。循環水は、室温から50℃まで制御可能である。また、水槽によって、試験岩体への水の供給も全面から行なえるようにした。

試験中に測定する項目と計測機器を表-1にまとめる。応力は、試験岩体に観測孔を掘削し(直径36mm)、内側に、差動トランス(変位計)を3つ、水平3方向の孔径変位が測定できるように設置した。水平3方向の孔径変位と弾性係数からその地点における応力を算出した。変位は試験岩体の水平方向の変位を測定した。測定方法は、試験岩体に水平方向の観測孔を掘削し、内側に固定点を設け、固定点間の変位を測定した。AEと弾性波の計測データはPersonalComputerに集積し、変位、温度の測定データはWorkStationに集積した。

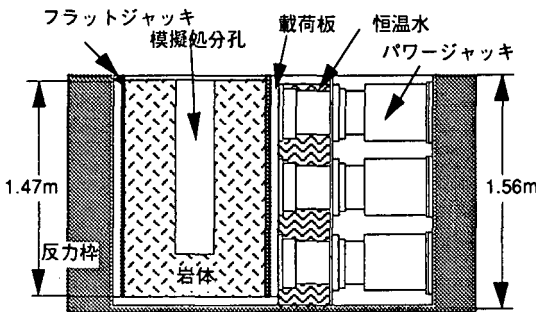


図-1 COUPLE の縦断面図

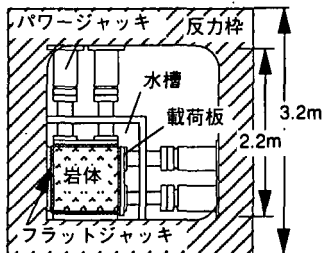


図-2 COUPLE の水平断面図

表-1 測定項目と計測機器

測定項目	計測機器
応力	差動トランス型孔径変位計
変位	差動トランス型変位計
温度	シースT型熱電対
間隙水圧	ひずみゲージ式圧力センサ
弾性波	圧電型セラミック振動子
AE	圧電型セラミック振動子

2.2 試験岩体

今回は、試験岩体として凝灰岩を用いた。載荷試験を実施する前に、岩石の物理特性を調査する目的で、一軸圧縮試験、三軸圧密試験(周変位制御、軸変位制御)および圧裂引張試験を実施した。ヤング率およびポアソン比は、破壊強度の50%応力における接線ヤング率およびポアソン比とした。内部摩擦角は、一軸圧縮試験、三軸圧密試験および圧裂引張試験の結果をモールの応力円表示することにより求めた。三軸圧密試験の試験結果を図-3に、各種試験より得られた物性値を表-2に示す。

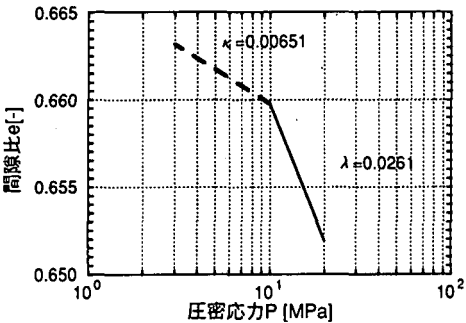


図-3 圧密応力と間隙比の関係

表-2 試験より得られた物性値

項目	値
ポアソン比 ν	0.2
ヤング率 E	2310[MPa]
初期間隙比 e	0.67
内部摩擦角 ϕ	33°

2.3 機能試験

機能試験においては、健全な実岩体の内部状況を把握し、掘削前の初期状態を捉えるために異なる荷重条件で載荷試験を実施した。

まず、試験岩体をCOUPLEに設置後、水槽部分に水を張り、恒温水循環装置により、試験岩体の温度境界を25℃一定に保った。次に、試験岩体に埋設した間隙水圧計を用いて試験岩体の飽和を確認し、熱電対によって岩体内部の温度分布を確認後、表-3の載荷荷重条件(応力の境界条件)にしたがって試験を実施した。載荷荷重方向は図-4、表-3に示すようにPxとPyを組み合わせた6条件とした。

表-3 載荷荷重条件

載荷荷重 [MPa]		Px		
		2	4	6
Py	2	Case 1	Case 2	Case 4
	4	-	Case 3	Case 5
	6	-	-	Case 6

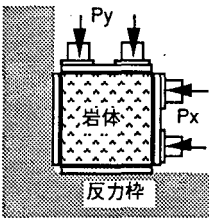


図-4 載荷方向

2.4 模擬処分孔掘削

機能試験終了後、実岩体中央に直径25cmの模擬処分孔を掘削した。掘削は岩体をCOUPLEに設置したまま、水槽の水を抜き、載荷荷重を $P_x=P_y=0$ [MPa]として実施した。掘削終了後、水槽に水を入れ、恒温水循環装置によって水温を一定(25℃)に保ちながら、岩体を飽和させた。飽和させる過程においても、熱電対、間隙水圧計を用いて、温度、水圧分布を測定した。

2.5 掘削載荷試験 (ゆるみ域の特性の変化の観察)

模擬処分孔掘削後、湛水して飽和させ温度境界を一定(25℃)に保ち、その状態で、載荷を行ない、模擬処分孔周辺に発生しうるゆるみ域を観察し、そのゆるみ域が岩体の水理特性や物理特性に与える影響を観察した。測定項目は応力、変位、温度、弾性波速度、AEカウントである。

試験では塑性域の評価を簡便なものにするために塑性域が処分孔の中心軸に関して対称に発生することが望ましいので、表-4に示す載荷荷重条件を設定した。

表-4 載荷荷重条件

試験ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
載荷荷重 [MPa]	Px=Py=							
	3	4	5	6	7	8	9	15

3. 試験結果と考察

3.1 機能試験

機能試験の結果のうち、弾性波トモグラフィーを図-5に示す。図-5は載荷荷重 $P_x=P_y=6$ [MPa](Case6)時の弾性波トモグラフィーである。荷重状態が $P_x=P_y=6$ [MPa]

の状態までは、載荷荷重が等方、異方の如何にかかわらず試験岩体は弾性挙動を示したと考えられ、載荷荷重の増大に伴い、若干弾性波速度が上昇した。これは、載荷に伴って岩体の密度が高まった為と考えられる。AE測定においてはほとんどAEは発生しなかったことから載荷に伴う破壊も生じなかったと考えられる

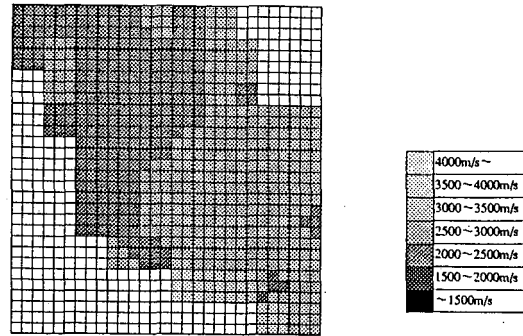


図-5 弾性波トモグラフィー (Case6)

3.2 掘削載荷試験

掘削載荷試験のうち、弾性波トモグラフィーとAE測定結果を示す。図-6は載荷荷重 $P_x=P_y=9$ [MPa](Case7)時の弾性波トモグラフィーで、図-7は同じ状態でのAEの発生分布図である。図-6より、模擬処分孔周辺で、著しく弾性波速度が低下したところが見られる。また、図-7においても、ほぼ同位置で、AEの発生が見られる。この段階では、破壊や亀裂の進展は観察されなかったが、載荷荷重を $P_x=P_y=13$ [MPa]まで上昇させた時点で、図-6、図-7とほぼ同位置の地点で破壊が観察された。これは、応力の観測用の孔と模擬処分孔の間で発生した破壊で、載荷条件が等方であったにもかかわらず、応力が集中し破壊が発生したものと考えられる。AE測定、あるいは弾性波トモグラフィーそれぞれ単独のデータからは破壊の発生を評価することは難しいが、AE測定と弾性波トモグラフィーを総合的に検討すると、破壊の発生する位置を可視前の段階で、定性的に予測できたこととなる。

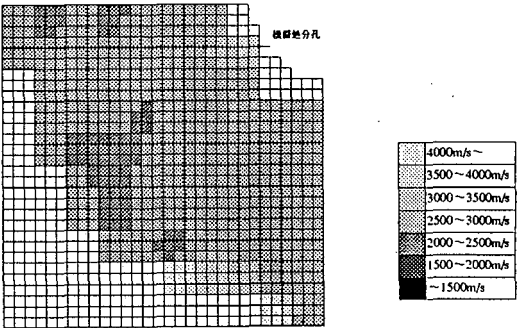


図-6 弾性波トモグラフィー (Case7)

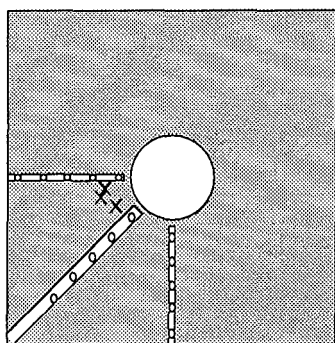


図-7 AE発生分布図 (岩体の水平断面図、Case7)

4. 解析

今回の解析はCOUPLEの機能試験と掘削荷重試験の試験結果との比較に主点を置いた。解析には熱-水-応力連成解析コードTHAMES[3]に修正カムクレイモデル[4]を導入したものを用いた。

4.1 物性値

今回解析に用いた物性値は各種試験結果およびそれらから算出したものを用いた。修正カムクレイモデルに必要な物性値は圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ 、定数 $M(=q/p'$ 、 p' :平均有効主応力、 q :偏差応力)、定数 $\Gamma(=1+e+\lambda \ln(p')$ 、 e :間隙比)である。

λ 、 κ は図-3に示す圧密終了時の排水量と圧密圧力の傾きを用いて求めた。圧密降伏応力 P_c については降伏が開始する圧力の近傍で10.2[MPa]と仮定した。 M 、 $\Gamma-1$ については $M=6\sin\phi/(3-\sin\phi)$ 、 $\Gamma-1=e+\lambda \ln P_c$ に各種試験から得られた $\phi=33^\circ$ 、 $e=0.67$ 、 $\lambda=0.0261$ 、 $P_c=10.2$ [MPa]を代入してそれぞれ求めた。これらの結果と解析に用いた物性値を表-5に示す。

表-5 解析に用いた物性値

項 目	値	項 目	値
ポアソン比 ν	0.2	$\Gamma-1$	0.731
ヤング率 E	2310[MPa]	圧縮指数 λ	0.0261
初期間隙比 e	0.67	膨潤指数 κ	0.00651
内部摩擦角 ϕ	33°	圧密降伏応力 P_c	10.2[MPa]
M	1.33		

4.2 解析条件

解析は2次元平面ひずみモデルで試験体の水平断面の4分の1モデルを用いた。まず、掘削前に行なった荷重試験で測定された変位、応力測定からパラメータのキャリブレーションを行なった。掘削前のメッシュ図を図-8に示す。境界条件は図に示す通りで、温度固

定境界では固定温度を25℃に、水位固定境界では水位を75cmとした。また、荷重荷重は2[MPa]の等方荷重を設定した。

4.3 解析結果と考察

掘削前の解析結果を図-9に示す。同図はヤング率を表-5に示した値、5倍、10倍を用いた解析結果と実測の岩盤の変位量と比較したものである。ヤング率を5~10倍に変化させると実測結果と解析結果が良く合うことがわかる。

また、図-10に実測値と始めに設定したヤング率で求めた計算値の応力分布を示す。実測値の応力はCOUPLEの試験岩体中に $\phi 36$ mmの孔を穿孔し、その孔径変化量を応力に換算したものである。同図によると、実測値は計算値よりもかなり小さくなっている。応力のその換算式は等方に応力が作用している無限領域内に穴がある場合の理論解であり、孔径の変化を妨げる力は考慮されていない。一方、計算では計測孔は考慮せずに岩体のひずみから算出している。従って、対象としている現象が異なっており、簡単に比較することは難しい。

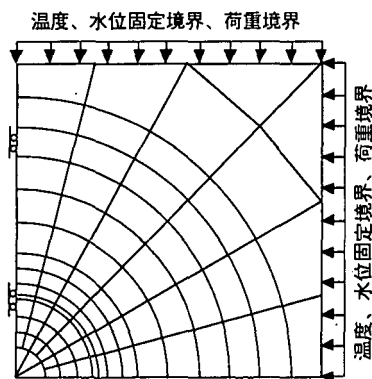


図-8 掘削前のメッシュ図と境界条件

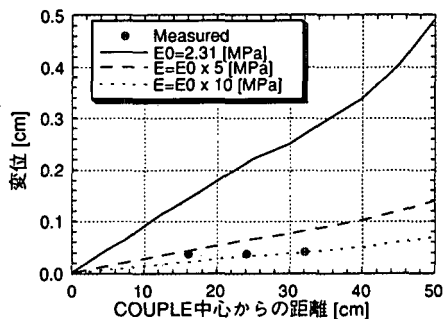


図-9 変位の比較図

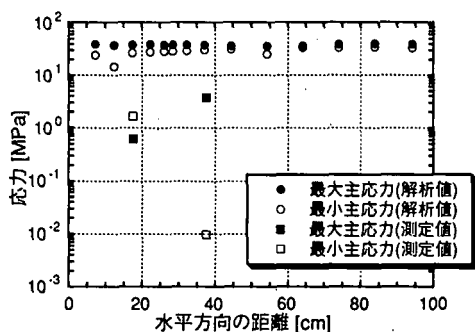


図-10 応力分布の比較図

図-11、12に掘削後の解析結果について示す。それぞれの図中の2は塑性となったことを示す指標である。図-11は載荷荷重が7[MPa]と2[MPa]の場合である。図から分かるとおり、模擬処分孔周辺に7[MPa]を載荷した軸方向に塑性域が発生している。図-12は載荷荷重が $P_x=P_y=7$ [MPa]の場合である。この結果では、模擬処分孔周辺部のみに塑性域が発生している。

以上から、2方向で異なる大きさの荷重をかけると、載荷荷重の大きい軸方向に塑性域が発生し、2方向で同じ大きさの荷重をかけると、模擬処分孔周辺のみに軸対称な塑性域が発生することが分かった。掘削載荷試験では、載荷荷重13[MPa]位から、AEの発生が頻繁になった。試験では塑性域の評価を簡便なものにするために、塑性域を処分孔の周り一様に発生させようとしたが、観測孔近傍のみに応力集中に起因する破壊が生じた。解析では観測孔を考慮に入らなかったため、応力集中は発生せず、等方の荷重状態で一様な塑性域が発生した。しかし、試験結果を評価する上では、観測孔を考慮した解析をする必要がある。さらに、軸差荷重が大きければ、せん断破壊に起因する塑性域は広域に分布することも表現できた。

5. まとめ

機能試験においては、COUPLEの設備の性能を確認し、試験岩体の初期状態が確認できた。掘削載荷試験において、模擬処分孔周辺に均一なゆるみ域は発生せず、また観測できなかった。解析においては、孔径変位を応力に変換する際に弾性係数が問題となり、岩の圧密特性が把握されていなかったため、ゆるみ域の計算が表現できなかった。これらの解析結果は十分な基本物性に基づいたものではなく、塑性域の発生領域の分布や破壊の発生の有無などはあくまで定性的な推察に過ぎない。今後、カムクレイモデルを用いて塑性域の発生や破壊の発生を推察するには対象試験岩体の圧密特

性を十分に把握する必要がある。以上を鑑みて、今後は岩の弾性係数の再確認、圧密特性データの取得などを実施し充分把握したのち、緩衝材とヒーターを用いた連成試験を今後実施する予定である。

6. 参考文献

- [1] 動力炉・核燃料開発事業団、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度、1992。
- [2] Y.Moro, T.Fujita, K.Hara and K.Amemiya, Full-scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process in Engineered Barrier System, Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering, pp.781-788, 1993.
- [3] Ohnishi, Y., Shibata, H., Kobayashi, A., Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, edited by Tsang, C.F., pp.679-697, 1989.
- [4] A.M.Britto and M.J.Gunn, Critical state soil mechanics via finite elements : Ellis Horwood, pp.52-81, 1987.

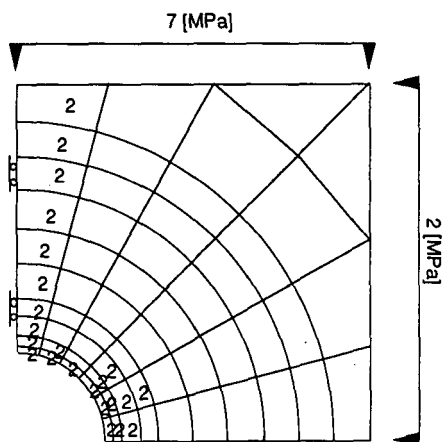


図-11 載荷荷重が 7[MPa] と 2[MPa] の場合

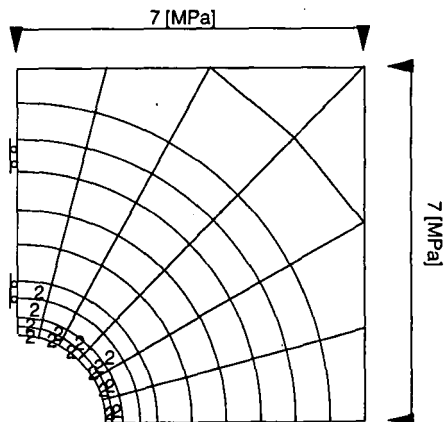


図-12 載荷荷重が 7[MPa] と 7[MPa] の場合