堆積軟岩の原位置加熱実験(フェーズⅢ)

池野谷 尚史1*・岡田 哲実2・高倉 望1・澤田 昌孝2・平野 公平3・谷 和夫4

 ¹東急建設株式会社 土木総本部 土木技術部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14)
²財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
³株式会社セレス (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 (財) 電力中央研究所内)
⁴国立大学法人横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
*E-mail: ikenoya.takafumi@tokyu-cnst.co.jp

放射性廃棄物処分等の新規地下利用の対象として期待されている堆積軟岩であるが、長期の変形特性が 顕著であり、熱や水などの外部環境の変化に影響を受け易い特徴を有している。そこで外部環境の変化を 考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立を目指し、堆積軟岩中に構築した深度50mの地下空間 実験場において岩盤に最高90℃の熱を負荷した時の熱源周辺のひずみ、温度、間隙水圧等を長期間に亘り 計測し、熱-水-応力連成解析コードの検証を行ってきた。

本論では、新たに開発した100℃以上の熱を岩盤に負荷できる実験装置の概要ならびに本装置を用いた 原位置加熱実験結果について報告する.

Key Words : radioactive waste disposal, thermal characteristics, in-situ test, rock mass, soft rock

1. はじめに

一般に割れ目の少なく透水性の低い堆積軟岩は, エネ ルギー貯蔵や廃棄物処分等の地下利用の対象として注目 されている.しかし,堆積軟岩は結晶質岩と比較して長 期の変形特性が顕著であり,熱や水等の外部環境の変化 に影響を受け易い.そこで筆者らは外部環境の変化を考 慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立を目指 し,堆積軟岩中に構築した地下空間実験場において,高 レベル放射性廃棄物処分で想定されている処分孔竪置き 方式の約1/8モデルの空洞を掘削し,原位置加熱実験を 実施し,現象の解明、原位置での計測技術の確立および 熱-水-応力連成解析コードの検証を行っている.これ までは,高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体の温 度を想定し,最高90℃の熱を負荷する実験を行ってきた が,想定を超えたケースとして,100℃以上の熱を負荷 できる加熱装置を開発した.

本稿では、新たに開発した装置の概要ならびに本装置 を用いた原位置加熱実験結果について報告する. 実験を実施した地下空間実験場は、神奈川県相模原市 郊外の田名地区に位置し、相模川から約500m離れた標 高約90mの河岸段丘にある.

周辺の地層構造は、G.L.-7mまではローム層であり、 その下の層厚約5mの田名原礫層と層厚約9mの座間丘陵 礫層およびそれ以深の上総層群泥岩層(堆積軟岩)で構成されている.泥岩層の物性値は、湿潤単位体積重量が



図-1 地下空間実験場

2. 実験概要

(1) 実験サイト



図-2 原位置加熱実験装置(左:フェーズⅠ・Ⅱ,右:フェーズⅢ・Ⅳ)

約20.0kN/m³,一軸圧縮強さが約5.6MPa,ヤング率 (E_{50})が約300MPa,ひずみレベルが0.001%以下のヤン グ率(E_{max})で約3,200MPa,変水位透水試験で得られた 透水係数が約1.0×10⁸m/s,有効間隙率が約35%等である¹⁾. また,泥岩層は概ね均質であるが未固結な砂層やスコリ ア層が水平方向に幾層も挟在するなど特異な水みち特性 を有している.

原位置加熱実験は,GL-50mの横坑内にある幅 1.1~2.0m,奥行き3.65m,高さ1.9mの馬蹄形横坑(多目的 実験室)において実施した.多目的実験室の位置を図-1 に示す。

(2) 開発した加熱装置

実験に用いた加熱装置を図-2に示す.フェーズ I, II の実験では、処分孔を模擬した空洞に満たした地下水を 投込み式ヒーターによって加熱し、熱源としていた.し かし、この方法では、熱源の温度が最高でも100℃に制 限されてしまう.また、熱源周辺に埋設したひずみゲー ジの反応や性能を確認するため、簡易プレッシャーメー タ試験を実施していたが、その際には投込み式ヒーター を除去し、地下水を排水した上でプレッシャーメータ試 験の加圧装置を設置する必要があった.このため、加熱 実験の途中ではプレッシャーメータ試験を行うことがで きなかった.そこで、これらを解決するための新しい加 熱装置を開発した.

高さ64mm,外径29.5mm,厚さ9mmの鋼管の側面およ び底面の外側にラバーヒーターを貼り付け,側面のラバ ーヒーターの外側には直径約300mmのシリコンパッカー を巻いた.ラバーヒーターとシリコンパッカーの間には 引火点177℃のグリセリンを注入してあり,これを介し て膨張圧を負荷することによって孔壁にシリコンパッカ ーを密着させる.また,熱効率をあげるため,鋼管の側 面および底面の内側には断熱材を貼り付けた.

加熱の媒体として水からグリセリンに変更したことで、 熱源の温度を100℃以上に設定することが可能となった. また、加熱と加圧を同時に行うことができるため、加熱 中でのひずみゲージの反応や性能の確認や、高温下での 力学特性を把握することを目的とした簡易プレッシャー メータ試験の実施も可能となった.

(3) 実験方法

地下空間実験場内の多目的実験室底盤に直径300mm, 深さ600mmの空洞(ヒーター孔)を掘削し,孔内には新 しい加熱装置を設置した.熱源の周辺には深さ1.0~1.5m の計測孔を配置し,ひずみ,温度等の計測を行った.計 測センサの配置を図-3に示す.上段がセンサの平面配置, 下段が深さおよびヒーター孔からの離隔である.



今回は、新しい加熱装置の確認実験と位置付け、ヒー ターの加熱温度は60℃および90℃の2段階に設定し、昇 温と保温の期間は図-4に示す通り、それぞれ2日間に設 定した.

3. 実験結果

(1)加熱状況

孔壁温度の経時変化を図-4に示す.温度の計測は地表 面より深さ10, 30, 50cmの装置側面にて行った.

フェーズ I, IIの加熱方法と異なり,加熱・減熱時の 速度が制御できるため,一定の速度で温度が変化してい る事が分かる.設定温度60℃では38~41℃,設定温度 90℃では55~63℃でほぼ定常状態となっており,いずれ の段階においても深さ50cmの位置での温度が最も低い. ヒーター孔内には約18℃の地下水が常時供給されている ことによる影響と思われる.また,装置側面のシリコン パッカーは約50kN/m²で孔壁に密着させているが,装置 下端でシリコンパッカーを鋼管に固定しており,この付 近では密着が完全ではないため,孔内に浸出する地下水 の影響が大きかったものと推察される.これを受けて, 次回の実験ではヒーター孔内の地下水を常時排水するこ ととした.

全体的には、設定温度60℃では約20℃,設定温度90℃ では約30℃低い温度での加熱となっている.温度の調整 はラバーヒーター本体の温度によって行っており、その 外側にあるグリセリン、シリコンパッカーの熱の伝導効 率が十分ではなかったと思われる.そのため、設定温度 を高くするか、装置外側面の温度によって加熱温度の調



整を行う必要がある.

(2) 周辺岩盤の温度

周辺岩盤の温度の経時変化を図-5に示す.熱源温度の 上昇にしたがって岩盤温度も上昇している事が確認でき る.ヒーター孔に最も近接しているD孔(離隔5cm)で は約50℃まで温度が上昇した.一方,ヒーター孔から遠 いF孔(離隔80cm)やG孔(離隔160cm)では温度変化が ほとんど見られない.今回の実験では保温期間が2日間 と,これまでよりも短い期間で設定したため,熱が伝導 するには十分ではなかったと思われる.なお,フェーズ IIでは設定温度の各段階における保温期間は1週間また は1ヶ月間としており,G孔においても温度変化が確認 されている³.また,フェーズIにおける知見では,熱 源の設定温度40℃の場合,G孔での岩盤温度の上昇量は 約40日間で1℃に収束している³.

設定温度90℃で2日間保温した時点での周辺岩盤の温 度コンタを図-6に示す. ヒーター孔を中心として,温度 の上昇している領域が同心円状に分布している事が分か る.今回の実験では,地表面を断熱材で被覆していない ため,地表面付近の岩盤温度は実験室内の気温の影響を 受けている.また,図-5でも示したように,保温期間が



短いために温度の上昇している領域が十分に拡大せず, ヒーター孔から離れるにつれて急激に岩盤温度の低下す る様子が確認できる.

図-6 周辺岩盤の温度コンタ

80 (°C)

(3) 周辺岩盤のひずみ

10

周辺岩盤のひずみの経時変化を図-7に示す. 圧縮が正, 引張が負である. ヒーター孔を中心軸とした円筒座標系 のひずみを計測しており,変化の傾向は図-5に示した岩 盤温度のそれと同一である. 全ての方向で引張方向のひ ずみが生じており,その大きさは最大で約400µが計測さ れている. 温度上昇量が約35℃であるのに対し,泥岩の 線膨張係数が約10µ℃であるから,これまでの実験同様 に熱膨張によるひずみが主であると考えられる. また, D孔の周方向ひずみに見られるような加熱停止後の残留 ひずみはフェーズⅡでも確認されたが,その原因につい ては現在検討中である.

したがって、これまでの実験結果とも整合しているこ とから、本実験より得られた計測値は妥当であると判断

4. まとめ

50

100

130

(cm)

堆積軟岩中に構築した深度50mの地下空間実験場にお いて、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている処分 孔竪置き方式の約1/8モデルの空洞を掘削し、原位置加 熱実験を実施した.本実験では、想定を超えたケースと して100℃以上の熱を負荷するための加熱装置を新たに 開発・適用した.その結果、以下の知見が得られた.

- ① 新しい装置により加熱を行う場合、ヒーター孔内に浸出する地下水によって、孔壁の温度が低下してしまうため、地下水を常時排水する必要がある。また、加熱温度の調整はラバーヒーター本体ではなく、装置側面の温度を用いて行う必要がある。
- ② ひずみセンサや温度センサは埋設されてから3年近 くが経過しているが、その計測値は妥当な値であ ると判断できる.

参考文献

- 1) 越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫: 立坑掘削と原位置試 験による堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.143-152, 1993.
- 2) 池野谷尚史,岡田哲実,高倉望,澤田昌孝,平野公平,谷 和夫:堆積軟岩の原位置加熱実験(フェーズII),第40回 岩盤力学に関するシンポジウム,2011.
- 3) 池野谷尚史,岡田哲実,高倉望,澤田昌孝,平野公平,谷 和夫:高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験(フェーズI),第37回岩盤力学に関するシンポジウム,2008.



IN-SITU HEATING TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCK (PHASE III)

Takafumi IKENOYA, Tetsuji OKADA, Nozomu TAKAKURA, Masataka SAWADA, Kouhei HIRANO and Kazuo TANI

Various researches have been conducted on high level radioactive waste geological disposal in sedimentary soft rocks. It is noted that the long-term mechanical behaviors of sedimentary soft rocks can be affected by various environmental factors such as temperatures or hydraulic conditions. Therefore, insitu heating test was conducted in an underground cavern at a depth of 50m for the purpose of improving thermo-hydro-mechanical coupled analysis code.

This report presents the test equipment developed for heating bedrock above 100° C and the test result using this new test equipment.