第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
（社）土木学会　2007 年１月　論文番号 48

高温下における堆積軟岩の原位置クリープ試験計画

高倉　望[1*]・岡田哲実[2]・谷　和夫[3]・吉川和夫[1]・澤田昌孝[2]・竹田佳代[3]

[1]東急建設株式会社　技術本部　土木エンジニアリング部　（〒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（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
[3]国立大学法人横浜国立大学（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟）
* E-mail: takakura.nozomu@tokyu-cnst.co.jp

堆積軟岩を対象としたエネルギー貯蔵や廃棄物処分などの新規地下利用が期待されている．しかしながら，堆積軟岩は，硬岩に比べ長期の変形特性（クリープ特性）が顕著であり，また熱や水などの外部環境の変化に影響を受けやすい．そのため，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が望まれている．

そのような背景の下，本研究では，堆積軟岩の長期安定性評価手法を確立するため，泥岩層に構築した地下空間実験場内の GL－50 m 地点において，熱の影響を考慮したクリープ試験を実施する．本報は，その試験計画である．

Key Words : *sedimentary soft rock , in-situ creep test, long-term behavior, underground laboratory*

1. はじめに

地下発電所などに代表される大深度地下利用では，岩盤空洞の長期間にわたる安定性を評価し，設計・施工を行っている．従来は，硬質な岩盤に空洞が建設されることが多く，長期間の安定性は大きな検討課題にならなかった．しかし，今後は透水性が低い堆積軟岩を対象としたエネルギー貯蔵や廃棄物処分などの新規地下利用が期待されている．堆積軟岩で懸念されている問題点は，硬岩に比べ長期の変形特性が顕著であり，さらに熱や水などの外部環境の変化に影響を受けやすいこと[1)]である．

そこで本研究では，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的として，堆積軟岩中に構築した地下空間実験場のGL－50 m地点において熱の影響を考慮したクリープ試験（以下，ヒーター試験と呼ぶ）を実施し，長期計測技術と高温下の影響を考慮した長期安定評価手法の信頼性を向上する．

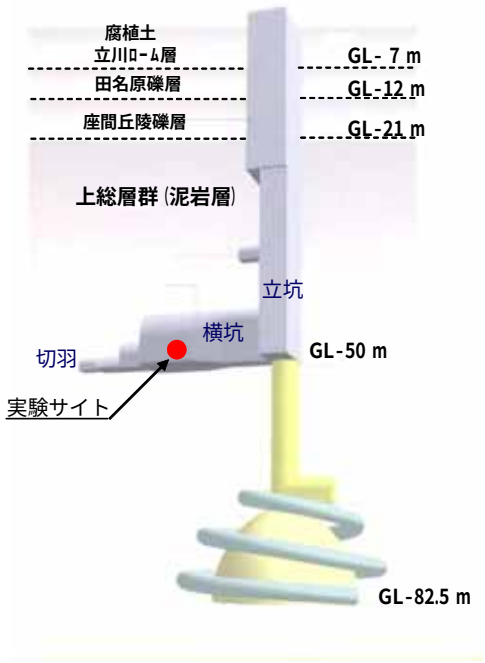


図 - 1　地下空間実験場の全景

2. 実験サイトの概要

当サイトは神奈川県相模原市郊外の田名地区に位置し，相模川から北方向へ約 500 m 離れた標高約 90 m の河岸段丘地である．**図 - 1** に地下空間実験場の全景を示す．

周辺の地層構造は，GL－7 m までのローム層，その下，層厚 5 m の田名原礫層と層厚 9 m の座間丘陵礫層，およ

びそれ以深の上総層群の泥岩層で構成されている．

泥岩層の力学・水理特性の代表値は，湿潤単位体積重量で約 20.0 kN/m^3，一軸圧縮強さで約 5.6 MPa，一軸圧縮試験で得られたヤング率（E_{50}）は，約 300 MPa，トランジェントパルス法で得られた透水係数は 2.37×10^{-10} ～ 3.45×10^{-11} m/sec，有効空隙率は約 35 %である [2]．

泥岩層内は，未固結な砂層やスコリア層が水平方向に幾層も介在し，破砕帯が N79W／81SE 方向に存在するなど特異な水みち特性を有している．

地下空間実験場の経緯は，1989 年 11 月に掘削を開始し，1992 年 9 月に GL－50 m まで掘削が完了．その状態を 2 年間維持し，その後，当時の通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度の一環として 1994 年 12 月から 1996 年 3 月にかけて，GL－82.5 m まで掘削し．1998 年 3 月に GL－50 m まで埋め戻している．

今回，ヒーター試験を実施する場所は，**図 - 1** の丸で示す GL－50 m の横坑側壁を幅 1.1～2.0 m，奥行き 3.65 m，高さ 1.9 m で人力掘削した馬蹄形空洞内である（**図 - 2** 参照）．掘削した空洞の底盤からは，浸み出る程度の湧水が観察されている．また，壁面観察から現時点で風化の影響は少ないと判断している．

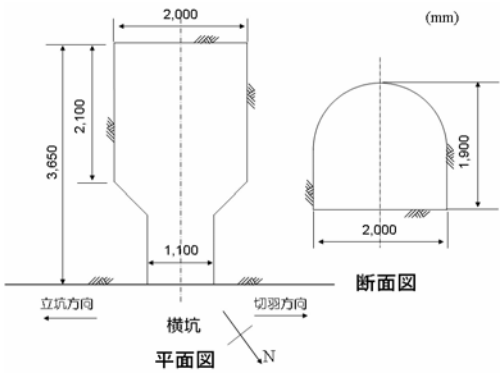


図 - 2　ヒーター試験を実施する空洞の形状

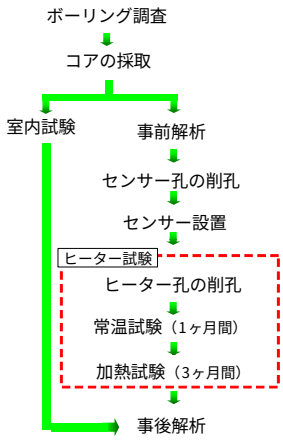


図 - 3　試験の流れ

3. 原位置ヒーター試験の概要

(1)　試験の流れ

図 - 3に試験の流れを示す．ボーリング調査は，試験サイト周辺の詳細な地質構造と熱力学特性を調べるためのコアの採取を目的とする．室内試験は，採取した泥岩の力学特性と熱力学特性を調べるために実施する[3]．

事前解析は，計測位置と計測センサーの仕様を決定するために実施する．解析手法は，澤田らが開発したクリープ現象をモデル化できる熱－水－応力連成解析[4]を用いる．　次に事前解析の結果をもとに計測位置を決定し，センサー孔を削孔して所定の位置に計測センサーを埋め戻す．計測項目，計測位置，使用する計測センサーについては，次節で詳細を述べる．

計測センサーの値が落ち着いたことを確認した後，加熱用の孔（以下，ヒーター孔と呼ぶ）を削孔して，水温18°Cの地下水に満たした状態で1ヶ月間ほど空洞を保持し，その後60°C，80°C，90°Cと3段階で加熱する．

試験中は，周辺岩盤の温度とひずみ・間隙水圧・土圧の経時変化を計測する．また試験後にヒーター孔周辺の損傷度を目視と弾性波探査で確認する．

最後に，室内試験で得られた熱物性値を用いてヒーター試験の結果を事前解析と同じ解析手法で評価する．

平成18年8月末現在，ボーリング調査，事前解析，センサー孔の削孔が完了し，室内試験を実施中である．

(2) 計測項目と計測位置

計測項目は，過去に実施されている硬岩を対象とした原位置ヒーター試験[5)6)] を参考にして，温度，g岩盤ひずみ（半径方向，周方向，鉛直方向），間隙水圧，土圧（半径方向），底盤変位の5項目とした．

図 - 4に事前解析から得られた温度のコンター図に計測位置を重ねて示す．解析は軸対称モデルである．温度のコンター図は，初期温度20 °Cの地盤に上面が断熱境界，側面と下面が固定境界で，ヒーターを90 °Cに加熱したモデルの定常解析の結果である．解析に用いた入力パラメータのうち応力と浸透に関わる値は，過去に当該サイトで得られた物性[7] を用いた．高温下での熱特性は，地層処分研究開発第2次取りまとめ[8] に記載された泥岩の値を参考にした．

深度方向の計測位置は，事前解析による温度分布を基に底盤から15 cm，35 cm，55 cm，75 cm，120 cm とする．水平方向の計測位置は，ヒーター孔周辺を密に配置すること，解析結果からヒーター孔壁から2 m離れた位置まで熱の影響があること，試験用地に制限があること，以上を考慮して孔壁から5 cm，10 cm，20 cm，40 cm，100 cm，180 cm の位置に配置する（**図 - 4**，**図 - 5**，**写真 - 1**参照）．また，センサー孔が他のセンサ孔に影響を与えないように同一放射線状には配置せず，千鳥状に配置する．

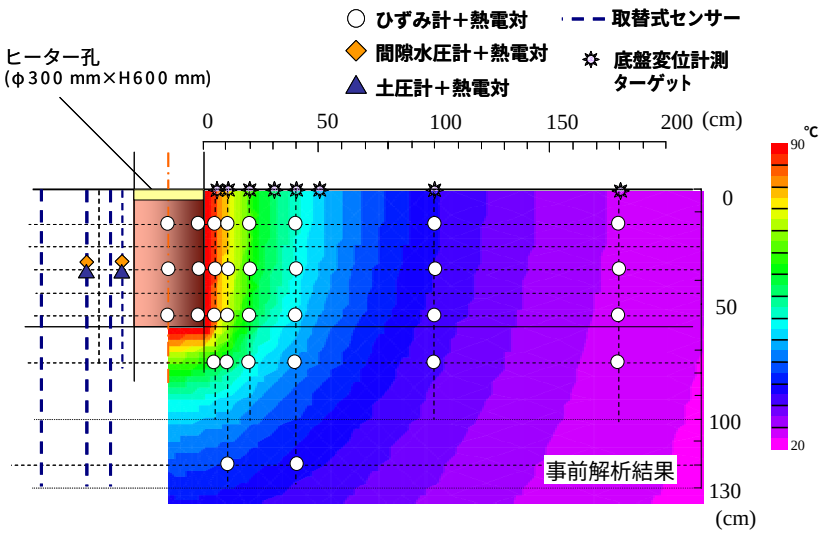


図 - 4　計測項目と計測位置　（断面図）

(3) 計測方法

今回の計測は，岩盤計測で従来用いられている埋込式のセンサー（以下，埋込式センサーと呼ぶ）と開発中の取替式センサーの 2 種類で計測する．以下にそれぞれのセンサーについて説明する．

a)　計測センサーの概要

・埋込式センサー

埋込式センサーとして用いるひずみ計と土圧計は，センサーに対する埋戻し材の影響を最小限に抑えるため，サンプリングした泥岩のコアに各センサーを貼り付け，再びそのコアをセンサー孔に投入する．その際に生じる孔壁とコアとの間隙は，当該地盤のヤング率に近いセメントペーストで埋め戻す．

間隙水圧計は，センサー部分の周辺を砂で覆い，その上を当該地盤と同等のヤング率を有する材料で埋め戻す．

熱電対は，各センサーの温度補正のためのデータを兼ねるため各種センサー近傍に取り付ける．

・取替式センサー

取替式センサーは，長期計測データの取得を目的として今回の研究でその性能を評価する．

センサーユニットの構造は，パッカーの外側に温度計，水圧計，電極などのセンサーを貼り付け，孔内でパッカーを膨らませて孔壁に密着させる．

取替式センサーを用いることで，ボーリング孔内の場を乱すことなく，温度，水圧，比抵抗などを同時に計測できる．また，パッカーを収縮させてセンサーユニットを回収することにより，破損ないし性能低下したセンサーを取り替えることが可能となる．

b)　計測データの収集

各種センサーから得られるデータは，データロガーに

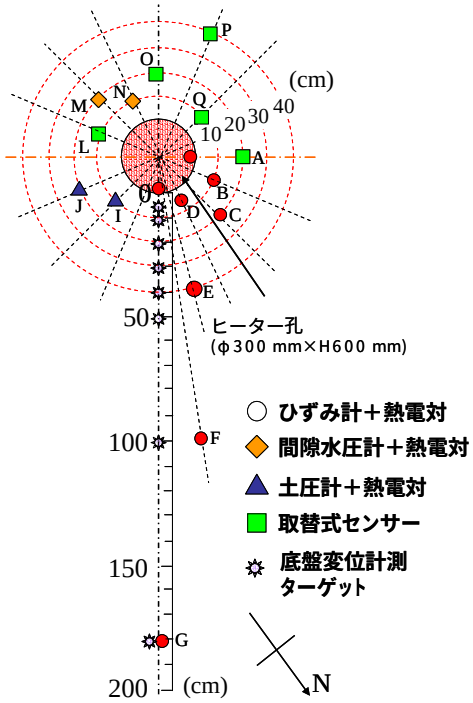


図 - 5　計測項目と計測位置　（平面図）

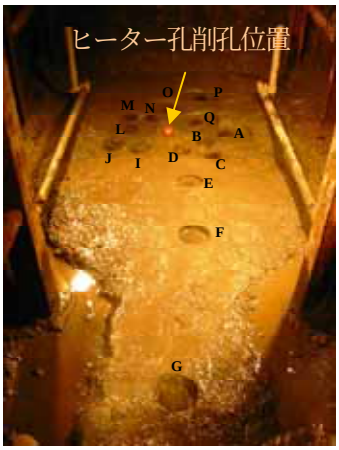


写真 - 1　センサー孔の削孔状況

取り込む．計測間隔は，ヒーター孔削孔中，削孔後，および各加熱段階に達する前後を密にして，それ以外は4から6時間とする．

(4) ヒーター試験

ヒーター孔を削孔後，1ヶ月間ほど水温18℃の地下水に満たした状態で長期岩盤挙動を計測する．次に，地下水に満たされたヒーター孔に投込み式ヒーター（容量 5 kw,坂口電熱株式会社製）を設置し，温度調節器を用いて±2℃の範囲で制御しながら，60℃，80℃，90℃と多段階に加熱する．計測期間は，加熱する3段階の合計で3ヶ月間程度とする．その際，ヒーター孔内の水温を一様にするために2台の撹拌機を用いる（**図‐6**参照）．さらに熱効率を高めるためにヒーター孔に断熱性の高い蓋を用いる．

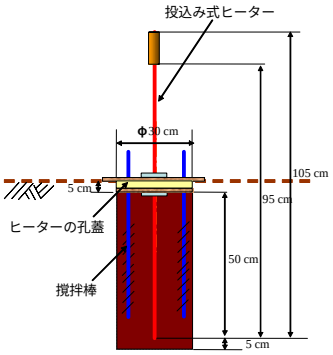
ヒーター孔周辺の空洞底盤は，厚み 20 cmの発泡スチロールで覆い，解析上の上面断熱境界を模擬する．

4．おわりに

将来，堆積軟岩にエネルギー貯蔵庫や廃棄物処分場などを建設する際，熱や水などの外部環境の不確実性に対して網羅的な検討が重要となる．

そこで，本研究では，堆積軟岩に構築した地下空間実験場のGL－50m 地点において熱の影響を考慮したクリープ試験を実施し，高温下の影響を考慮した長期安定性評価手法を評価する．

今回の研究で得られる知見は，エネルギー貯蔵や廃棄物処分などの坑道の設計や地下空洞の安全評価の基準・規制に反映できるものと考える．



図‐6 ヒーター孔の構造

参考文献

1) 土木学会岩盤力学委員会：熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして，pp.16‐35,丸善，2006.
2) 高倉望，大深度地下実験施設で実施してきた実験/観測の成果のまとめ，東急建設技術発表会論文集，27C-09，2001．
3) 岡田哲実，平賀健史，澤田昌孝，高倉望，吉川和夫，谷和夫：上総層群堆積軟岩の熱特性と高温下力学特性，第36回岩盤力学シンポジウム印刷中.
4) 澤田昌孝，岡田哲実，長谷川琢磨：高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発―緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築―，電力中央研究所 研究報告: N05028, 2006.
5) 例えば，繰上広志，千々松正和，小林晃，杉田裕，大西有三：グリムゼル試験場における熱‐水‐応力連成原位置試験の解析，土木学会論文集，No.757／III‐66, pp.127-137, 2004.
6) FOWG・ANDRA・BGR et al：*Mont Terri Project Programme Overview and Work Programmme of Phase 9*, p43, 2003.
7) 例えば，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.142-152, 1993.
8) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性‐地層処分研究開発第2次取りまとめ‐, JNC TN1400, 99-022, 1999.

PLANNING OF THE IN-SITU CREEP TEST IN SEDIMENTRE SOFT ROCKS UNDER HIGH TEMPERATURE

Nozomu TAKAKURA, Tetsuji OKADA, Kazuo TANI,
Kazuo YOSHIKAWA, Masataka SAWADA and Kayo TAKEDA

Research has been conducted on underground facilities for energy storage and waste disposal in sedimenttary soft rocks. One of the research topics is that the long-term mechanical behaviors of sedimentary soft rocks can be affected by various environmental factors such as temperatures or hydraulic conditions. Therefore, it is necessary to develop a method for evaluating the long-term stability of caverns in sedimentary soft rocks as influenced by changes in the external environment.

This report presents the plan of field creep test for the purpose to establish the evaluation method of long-term stability of caverns in soft rocks. A series of field creep test is performed to study the influence of high temperature in an underground facility at a depth of 50 meters.