

ボアホールカメラを用いた切土法面の安定性検討事例

興亜開発株式会社 ○加納 秀斗, 高橋 幸伸

1. はじめに

日本の国土は山間地が大半を占め、道路・鉄道等の線形構造物の計画に際し、切土孔が必然的に多用されることとなり、法面保護工が問題となる。法面保護工には大きく分けて「植生工」と「構造物工」があり、土質や周辺環境によって工法を選択する必要がある。

今回紹介する調査地では、隣接する法面において、切土法面にほぼ平行な鏡肌を伴う表層崩壊の危険性のある不連続面が確認され、工法変更が行われた。このような観点から、今回調査を行った切土計画地においても同様な不連続面の有無が懸念された。

地下岩盤における不連続面の状況や方向性を確認するには、一般的にボーリングコアの観察に依存している。しかし、ボーリングコアの観察のみで原位置での岩盤状態（特に亀裂の方向）を詳細に把握することは容易ではない。そのため本調査において、ボーリング調査に加え、ボアホールカメラによる孔内観測を行い、切土法面の安定性検討を行うこととした。本事例ではボーリング調査を2つの切土法面のそれぞれ上下2か所、計4か所で行い、4か所すべてでボアホールカメラによる孔内観測を行った。今回の調査事例をボアホールカメラについて焦点を当てて紹介する。

2. ボアホールカメラによる孔内観測方法

(1) ボアホールカメラの概要

ボアホールカメラ観測は、ボーリング孔内の岩盤の様子を360度展開画像として、詳細に観察することを可能にする。観察された不連続面の走向・傾斜情報を正確に取り、統計的解析手法により、不連続面の特徴や傾向を把握することができる。

(2) 観測装置・方法

ボーリング孔内に360度全方向の撮影が可能な小型CCDカメラを挿入し、調査対象区間のボーリング孔壁の状況を連続撮影する。

孔壁画像はケーブルで測定器に伝送され360度展開画像として表示される。現場においてはこの360度展開画像を直接確認しながら、ボーリング孔内の状況を把握するとともに、測定データの良否を判断する。図-1に孔内測定の概要図を、図-2にプローブの詳細図を示す。

プローブ内には、3方向のフラックスゲート型磁気センサーと傾斜センサーが内蔵されており、プローブの回転に伴う方位を自動的に補正することができる。撮影された360度展開画像は、測定器のハードディスクに記録される。

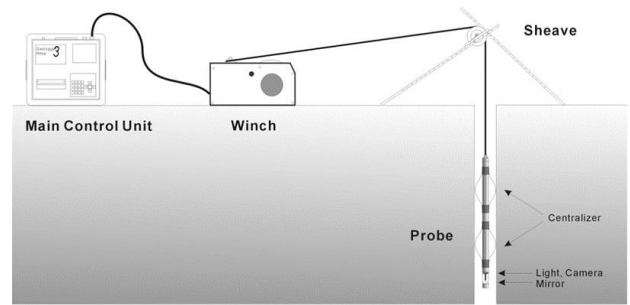


図-1 孔内測定の概要図

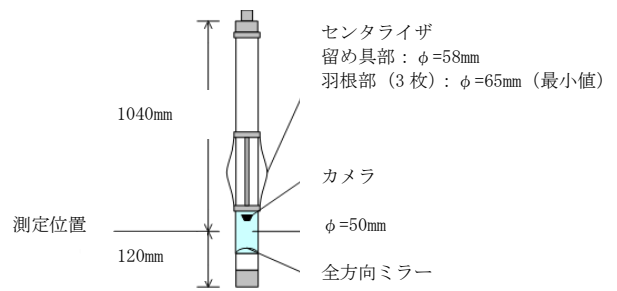


図-2 プローブの詳細図

(3) 解析方法

ボーリング孔内に現われた不連続面を、コンピュータ上で360度展開画像として表示し、測定区間全ての不連続面で任意のサインカーブをフィッティングさせ、走向と傾斜を読み取り、データとして記録する。このデータをもとに、ステレオネット図、ローズダイアグラム図、亀裂見かけ分布図、岩盤ゆるみ状態図、傾斜角度別の分散図、亀裂間距離傾度図をそれぞれ作成する。

孔壁に現れた不連続面を360度展開画像で見た場合と統計的解析手法で最も一般的なステレオネット図を作成する場合に、シュミットネットにステレオ投影をする時の概念図を図-3に示す。

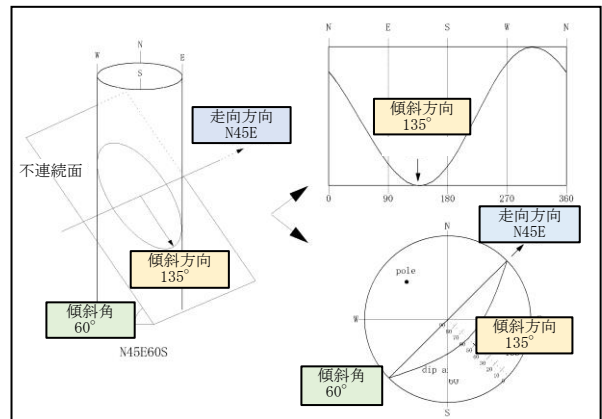


図-3 360度展開図とステレオネット概念図

3. 観測結果

ボアホールカメラ観測は4孔で行った。調査地の地層は片麻岩で構成され、その多くは強風化していた。そのため、各孔で118～367個の不連続面が観測され、不連続面の走向・傾斜にはある程度の指向性が存在していた。図-4に不連続面と切土法面の関係を、図-5にボアホールカメラによる観測例を示す。

4孔全体を見ると、傾斜角度30～50度程度の、NE方向に傾斜する不連続面が卓越していると言える。

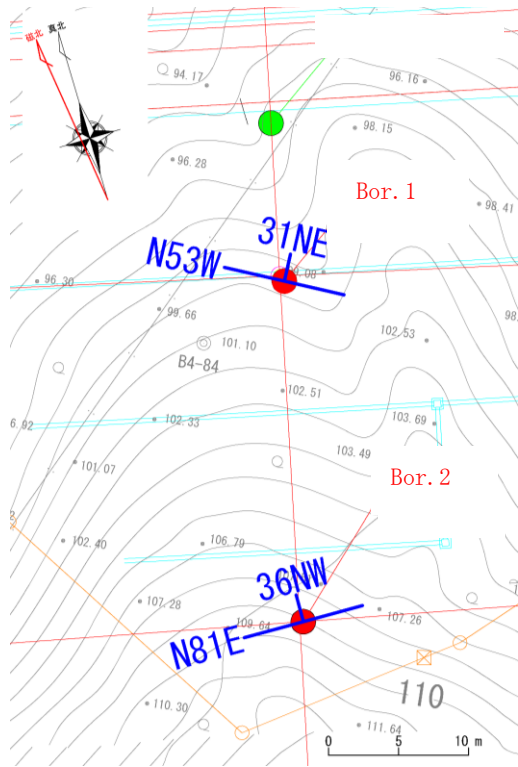
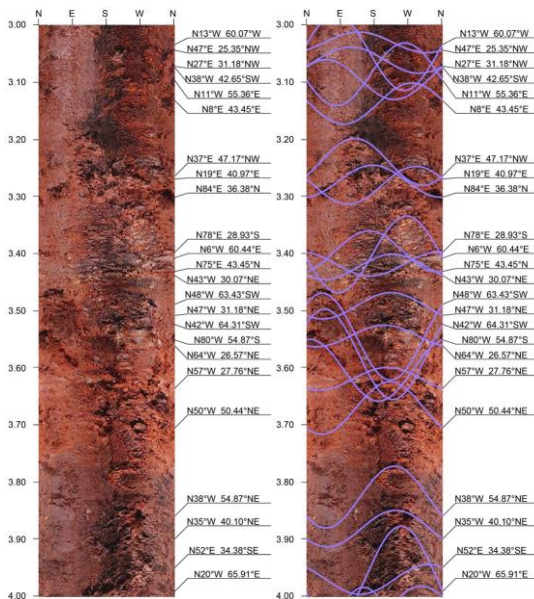


図-4 卓越する不連続面の走向・傾斜と切土法面の関係



左：不連続面明示なし、右：不連続面明示あり

図-5 ボアホールカメラによる観測例 (Bor.1 GL-3.00～-4.00m)

4. 考察

堆積岩を原岩とする変成岩では、層理に由来する片理と呼ばれる粒径や堆積物の色調の違い等により水平で平行な縞模様が見られる。片理は数百万～数億年の間に受ける続成作用により未固結の堆積物から硬い岩盤へと変化していく。さらに、その間にプレートテクトニクスによる地殻変動などの変成作用を受け、更には圧縮・引張り作用を受けることにより水平であったものが変形し傾斜した片理となる。この片理が現況斜面と同じ方向に傾斜している場合を流れ盤、逆方向に傾斜している場合を受け盤とよぶ。片理面は、その上下で粒径や構成鉱物が異なることから、面に沿って剥離しやすく、特に流れ盤となっている場合にはしばしば斜面崩壊の素因となる。本調査地の計画法面自体の走向・傾斜は磁北（電子国土 Web より調査地近傍での偏角は、7° 40' 西側）基準で N69° W・40° NE となる。これに対し、ボアホールカメラで観測された4孔全体の不連続面の卓越方向は、傾斜角度30～50度程度で、NE方向の傾斜が卓越していると言える。したがって、全体として流れ盤方向で、計画法面勾配に近い不連続面が卓越していると判断される。

切土後についても調査地の法面でクリノメータを用いて走向・傾斜を計測したが、結果は走向が N83W～N46W、傾斜が25N～50N となり、ボアホールカメラ観測による結果と同様に流れ盤方向で、法面勾配に近い傾向の不連続面が卓越すると判断された。その結果を踏まえ、隣接の法面と同様に、鉄筋挿入工+法枠工の対策工が施されることとなった。

5. 観測時の留意点

ボアホールカメラ観測による方位は磁北基準であり、これを図示する場合は真北との補正が必要となる。したがって、調査地の偏角を確認しておく必要がある。また、地下水が深での観測は水が濁っていると難しくなる。そのため、地下水を汲み上げるか、ミョウバンを溶かした水を孔内に入れて地下水の濁りを沈殿させる方法をとる必要がある。ミョウバン水によって濁りを沈殿させる場合、半日程度以上を要するため留意が必要である。さらに、孔内に入れるプローブの直径が50mm程度あるため、φ66mmの孔径では孔壁に引っかかる可能性がある。

6. まとめ

ボーリングコアの観察では、亀裂面や片理の傾斜角は把握できても、その方向までは不明であり、流れ盤・受け盤の判定までは困難である。しかし、今回行ったボアホールカメラによる孔壁観測を行うことにより、その方向性まで把握することが可能となり、よりの確に斜面の安定性を評価することが可能となる。あまり行われていない手法ではあるが、今後同様の業務があればボアホールカメラの使用を提案していきたい。

光学式孔径計測技術の傾斜孔への適用

株式会社レアックス ○三代 雅崇, 白 祥志
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 木村 駿

1. はじめに

光学式孔径計測技術はボアホールカメラで撮影した画像をもとに、ボーリング孔の360度全周の距離データを得る技術¹⁾である。本技術はリアルタイムで視覚的に断面形状を把握できる特長がある。さらに、機械式アームを用いた従来のキャリパー検層とは異なり、原理的に孔壁に非接触で測定するため、鉛直孔だけでなく傾斜孔にも適用できる可能性がある。本稿では、この技術（以下「光学式キャリパー」と称す）を傾斜孔に適用した事例について紹介する。

2. 測定方法と結果

(1) 測定原理と特徴

光学式キャリパーは、壁面に垂直に照射したレーザ光の反射を方位センサー内蔵の魚眼型ボアホールカメラで撮影し、方位情報とレーザ光の出現位置をもとに、定方位の距離データに変換するものである（図-1）。従って、孔内水の有無に関わらず、レーザ反射を視認できる孔内環境であれば、孔壁に非接触で孔径や孔形状を視覚的に把握できる。

主要スペックを表-1に示す。

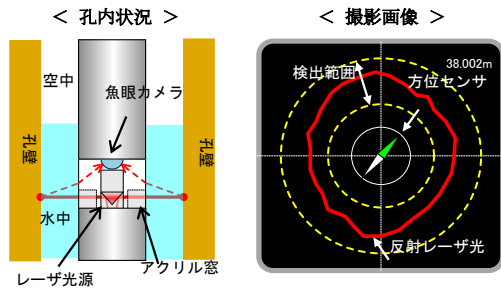


図-1 光学式キャリパーの解析概念図

表-1 主要スペック

項目	仕様	
共通	動作環境	0°～40℃
	観察条件	空中または清水（耐水圧600m）
	カメラ	超広角小型カメラ（魚眼レンズ、視野角180°）
	センサー	方位センサー/重力センサー
	プローブ外形/重量	φ60mm, L=1080mm, 4.7kg（孔径計測時）
孔内観察モード	適用孔径	φ65～φ250mm
	側方照明 展開画像 動画機能	白色LED（調光機能付き）、※孔径計測時は消灯 作成可。円周方向解像度360/720pixel デジタルズーム・パン・チルト機能
孔径計測モード	適用孔径	φ65～φ400mm
	レーザ光源	赤色レーザ（波長655nm）、リチウムイオン電池（連続稼働2時間）
	取得データ	周方向:1度ごと（360データ）、深度方向スパン:1.5,10mm
	距離解像度/精度	0.5～2mm（孔径によって漸増）/平均孔径誤差2%以下（試験値）

(2) 測定対象孔の概要と測定方法

北海道天塩郡幌延町にある幌延深地層研究センターの350m試験坑道6で掘削したボーリング孔において、透水試験で用いるパッカー位置の選定にあたって概略孔径の変化を把握するため、光学式キャリパー測定を実施した。

ボーリング孔の傾斜角は-15度、孔径86mm、掘削長は約13mである。

測定はプローブにロッドをつなぎ、水平押し込み機により孔底から測定した（図-2）。

なお、同一孔にてボアホールカメラ（BTV）観察と孔曲がり計測も実施した。



写真-1 測定状況写真

(3) 測定結果

図-3に測定結果を示す。ここで示した平均径は、360度の不等距離データの二乗平均平方根である。

測定の結果、裸孔区間は計画孔径86mmに対し平均径は90mm程度であったが、ケーシング直下の深度1.6～1.8m区間及び、孔底付近において平均径が100mm以上に広がっていた。また、深度5.4～5.8m区間では平均径の微増、深度8.7～12.3m区間において平均径の不規則な変動が確認された。孔口付近のケーシング区間においては、ケーシングの内径102mmに対し、平均径が119mmと広がりが確認された。

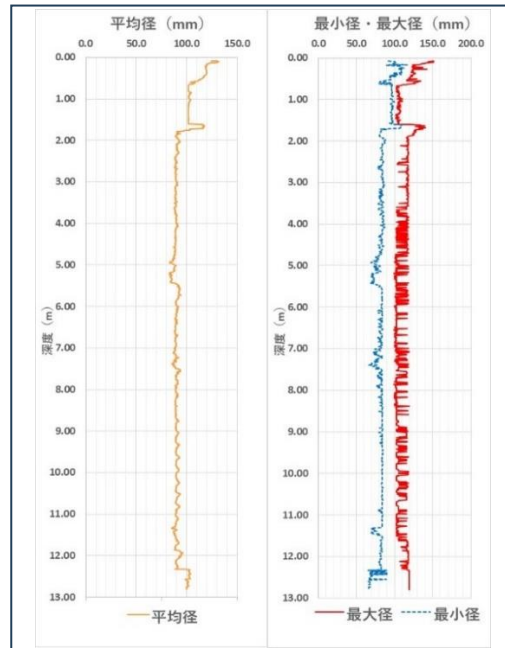


図-2 測定結果

3. 結果の解釈

(1) 深度 0.0~0.6m 区間(孔口)

深度 0.0~1.6m 区間は内径 102mm のケーシングが挿入されているが、深度 0.0~0.6m 付近において、平均径 119mm の広がり が確認された (図-3)。要因としては、孔口ではロッドのたわみが原因でプローブが傾斜したと考えられる。プローブの姿勢がボーリング孔に対し斜めになることで、孔壁面にレーザー光は垂直に照射されず、実際の距離よりも離れることで、数値が大きき算出される (図-4)。

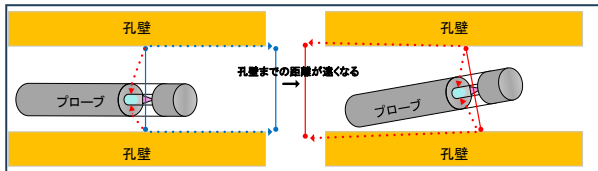


図-3 プローブの傾斜とレーザー照射角度の関係

(2) 深度 1.6~1.8m 区間

図-5①より深度 1.6~1.7m の裸孔区間は平均径 116mm、最大径は平均 134mm と広がっている。BTV 画像を見ると、深度 1.6~1.7m 区間は一度ケーシングを挿入した跡が見られる。

また、図-5②より深度 1.7~1.8m 区間は、平均径が 101mm、最大径は平均 129mm と広がっている。測定結果より作成した断面スライス図から深度 1.6~1.8m 区間において孔の上側が拡大していることが分かる。BTV 画像でも、深度 1.6~1.8m 付近にかけて孔壁の上側が拡大している様子が確認された。

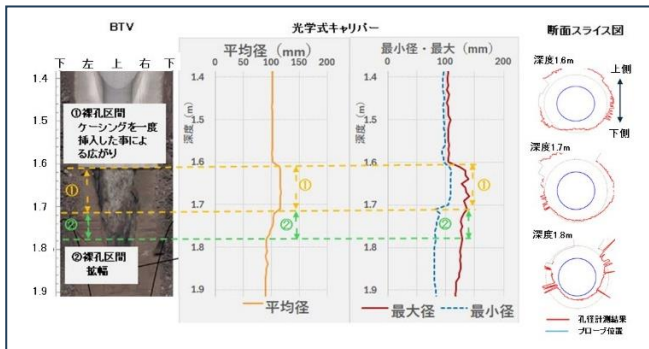


図-4 深度 1.6~1.8m BTV 画像との比較

(3) 深度 5.4~5.8m 区間

図-6①より深度 5.4~5.8m にかけて平均径が 92mm と微増している。この時、孔曲がりデータを確認すると深度 5~7m 区間で方位角、傾斜角共に数値の変動が大きくなっている (図-6②)。このことから、孔曲がりの影響により、プローブが孔内で姿勢を崩し、平均径が微増した可能性がある。

(4) 深度 8.7~12.3m 区間

図-6③より深度 8.7~12.3m において平均径が 85mm~93mm の範囲で不規則に変動している。BTV 画像を確認すると、深度 8.7m 以深は孔の下側にスライムが堆積し (図-7)、スライムが抵抗となりプローブの姿勢が傾くことで不規則に平均径が変動すると考えられる。

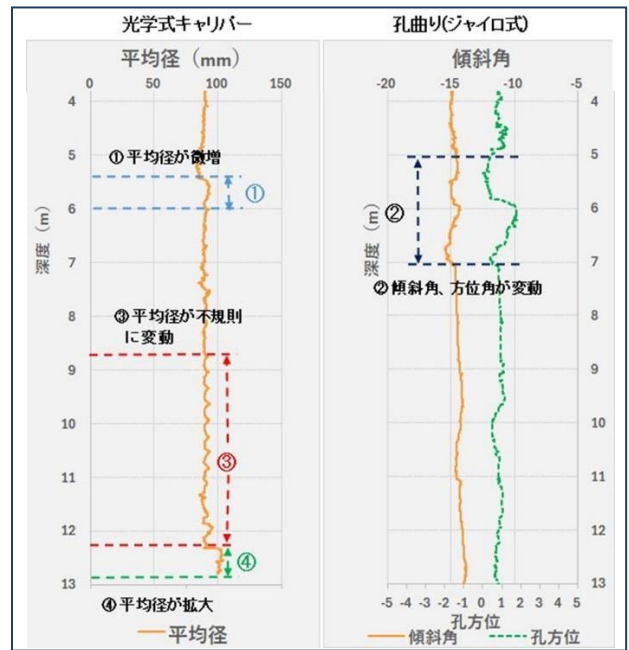


図-5 深度 4~13m 測定結果と孔曲がりの比較

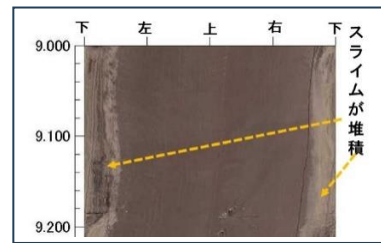


図-6 BTV 画像 スライム堆積状況

(5) 深度 12.3~12.8m 区間(孔底)

図-6④より深度 12.3~12.8m 孔底付近において平均径が 102mm と拡大している。取得した孔壁までの距離データを確認すると、解析可能なデータが少ないことから、孔底に堆積したスライム等が原因でレーザー光が正常に照射されていないと考えられる。

4. まとめ

(1) 光学式キャリパー測定により、孔径の変化や広がり の方向性を把握することができた。この結果の妥当性は、同時に観察した BTV 画像により評価できる。したがって、光学式キャリパー測定は、鉛直孔はもとより傾斜孔においても孔径の概略評価に有効といえる。

(2) 傾斜孔への適用にあたり、プローブの姿勢が測定結果に影響を及ぼすことが示唆された。今後、測定精度を上げるため、BTV と同様にセントラライザーのような治具が有効であると考えられる。

なお、本報告には、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (JPJ007597) (地層処分施設施工・操業技術確証試験)」の成果の一部を使用している。《引用・参考文献》

1) 石井啓滋・白祥志・立野直樹 (2021) : ボアホールカメラを用いた孔径計測技術の検証と活用事例, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 2021, pp. 157-158

空中地温探査の研究開発～解析手法の検討～

(株) みすず総合コンサルタント ○石関 剛史, 阿部 健
土尻川砂防事務所 堀 健人

1. はじめに

「1m 深地温探査¹⁾」を代表とする従来の流動地下水調査法の応用手法として研究・開発している空中地温探査は、1m 深地温探査と一定の整合性が確認されたものの、不整合箇所も認められるなど課題が残された(阿部ほか, 2023)。本論では、前回からの課題である①不整合箇所の原因究明及び②結果の再現性を目的として、前回の赤外線画像の再解析、新規空中地温探査の解析及びノイズのフィルタリング等から課題解決を試みたものである。

2. 対象地の概要

新規に実施した対象地は、長野県土尻川砂防事務所管内の地すべり防止区域「戸谷の腰地区」で、長野市中心部より西方約12kmに位置する。

戸谷の腰地区は A～H までの多数の地すべりブロックで分けられており、このうち A1ブロックと C1・C2ブロックを対象とした。地質は新第三紀鮮新世のスレーキングを起こしやすい砂岩泥岩基盤を素因とし、基盤上部は粘性土よりなる風化土及び崩積土が堆積する。ブロック全体で地下水位が浅く湧水点を多数認めることから、多量の地下水を誘因とする地すべり機構であると考えられる。したがって、地すべり対策を講じるうえで地下水流入経路の把握が重要と考えた。

3. 探査方法と解析手順

探査方法は(阿部ほか, 2023)と同条件とした。

(1) 飛行計画: 対地高度 140～150m, 撮影間隔 3.0 秒, 飛行速度 3.0m/s. 広範囲に及ぶため、3度の飛行を行った(図-1)。



図-1 UAV 飛行計画図

(2) 計測データの整理: 撮影した熱画像は3成分(X, Y, Z)の数値データ化した。各成分はX, Yが公共座標, Zを温度値とした。温度値の数値化は、カラー画像のRGBを256階調に変換することで求めた。

(3) 補正手順: ①地温データ取得と同時に空中写真のオ

ルソ画像を取得し、地温の地況分類を行った。地況は「地下水調査法¹⁾」を参考に、裸地・草地等に区分し、さらに日向・日陰で細分化した。

②地況毎の地温の正規分布曲線を作成し、現地に設置した温度計による実測値を基準とした有意水準片側5%の棄却域を設定した。

③棄却後の地温データを基に地況毎の補正係数を求め、対象地全体の地温の平準化を行った。

(4) 図化: 補正した地温データを段彩図化し、既往平面図に重ね合わせることで解析資料とした。

4. 探査結果

空中地温探査と1m 深地温探査についてそれぞれ作成した地温分布図(段彩図)を図-2～4に示す。探査は2021年1月に1m 深地温探査, 同年3月に空中地温探査, 2024年3月に空中地温探査を実施した。

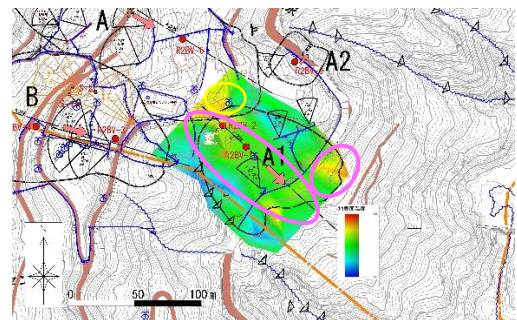


図-2 2021年1月 1m 深地温探査図

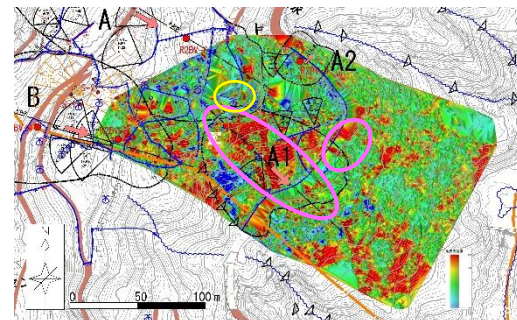


図-3 2021年3月 空中地温探査図

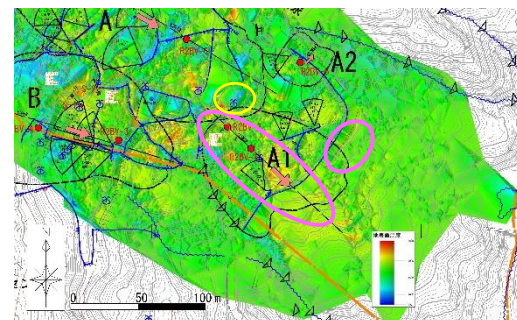


図-4 2024年3月 空中地温探査図

探査は3月に実施した。調査地は高地であるため気温は低く、地下水流動域は高温を示す赤色等の暖色系の色彩で表現されると判断した。

1m 深地温探査と空中地温探査の比較では、整合箇所を桃色線で示し、不整合箇所を黄色線で示した。1m 深地温探査にて A1測線上で認められた暖色系は空中地温探査でも確認できるため整合がみられた。一方で、A1ブロック頭部では1m 深地温探査が暖色系を示すのに対して、空中地温探査では寒色系を示す不整合な結果となった。また、2021年の空中地温探査と2024年の空中地温探査は概ね類似の結果が得られた。

5. 考察

(1) 課題①: 不整合箇所の原因の考察

(阿部ほか, 2023) について、1m 深地温探査と空中地温探査の不整合箇所の原因を考察した。

1) 測点密度の影響

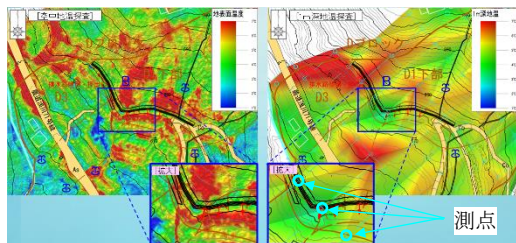


図-5 空中地温探査と1m 深地温探査比較図³⁾

1m 深地温探査は通常10m×10m 間隔に測点を設け、段彩図を作成する。観測ピッチを細かくする方法もあるが、図化した際に微細な表現をすることが困難である。一方で最小10cm 程度の点群データとして取得する空中地温探査は、測点密度から詳細な温度差を捕捉することができる。(阿部ほか, 2023) では、この測点密度の影響が、図化した際の不整合を招いたと考えられる (図-5)。

2) 林地の影響

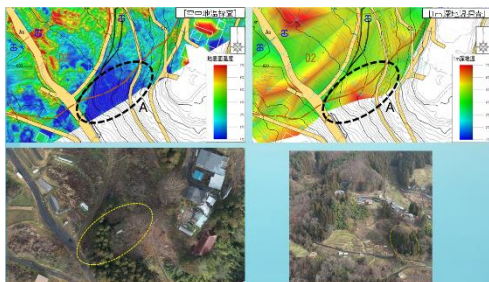


図-6 空中地温探査と1m 深地温探査比較図³⁾

(阿部ほか, 2023) では、空中地温探査は寒色、1m 深地温探査では暖色を示し真逆の結果が得られていた。これは林地(スギ林)の影響と考えられる(図-6)。冬季でも枝葉の残るスギは日影を形成し、空中地温探査では日中長期間に渡って日影の影響を受けたことで、地表面温度が冷えた状態にあったと考えられる。

(2) 課題②: 結果の再現性

本論で示した空中地温探査は2021年と2024年に実施した。探査時期と気象条件を揃えたことで、段彩状況は類似の結果が得られたと判断する。

したがって、探査時期・気象条件・解析手法を揃えることで、結果の再現は可能であると考えられる。

2021年と2024年でみられる違いは、1) 解析時に地況補正と日照条件の細分化の有無、2) 3年の間に対策工事が実施されたことの2点が挙げられる。対策工事後は一部で温度が寒色域へと変わり、地下水の流動が変化したことを示した。

6. 今後の課題

1m 深地温探査と空中地温探査の不整合箇所の原因を特定したことで、次の課題が挙げられた。

①不整合の解消方法: 日照の影響を強く受ける本探査は、林地の影響が極めて大きい。林地のみを対象とした補正方法や、林地のみ地上から温度計測をする等の異なるアプローチが必要と考える。

②地況区分の定量化: 地況区分は、探査と同時に撮影した空中写真画像と現地調査を踏まえた総合的な判断で区分している。すなわち現地を歩いた人間でないと適切な地況区分ができないこと表示しており、また区分は当人の感覚に委ねられている。AI の画像解析を導入するなど、定量的な地況区分ができる方法を検討する。

③対策工事との対比: 対策工事前後の地温の変化・地下水排除工の排水量の確認等、地温探査結果と対策工事が整合しているか検討する。

④結果の再現性: 探査時期・気象条件・解析手法を揃えることで結果の再現性がみられた。一方で、夏季・冬季や早朝・夕方・夜間等の異なる条件下でも再現性が得られるのか検討する必要がある。

⑤UAV 飛行条件: 山間部で実施した本探査は、飛行中に電波強度が減衰し自動航行が停止するアクシデントに数度見舞われた。衛生の影響を受けるため、現在の環境では現場の制約を受ける恐れがある。

空中地温探査は広域の地温を簡便に探査できる手法だが、地況の影響を受けるため従来の探査手法と所々で異なる結果が得られている。これらの課題を解決し、実用化に至れるよう継続して研究していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 竹内篤雄 (2013): 地下水調査法 1m 深地温探査, 古今書院.
- 2) 阿部健, 石関剛史, 高橋甚一 (2023): UAV 撮影による赤外線熱画像を利用した空中地温探査の試み, 全地連技術フォーラム2023論文集, 論文 No. C0104.

ボアホールジャッキ試験を用いた変形係数と初期応力の解析

川崎地質株式会社 ○相澤 穂高, 大泉 涼

1. はじめに

(1) 背景

トンネル等の地下構造物を設計・施工する際には、岩盤の変形係数や初期応力を把握することが重要である。これらの情報は設計・施工の安全性や経済性に直結するため、精度の高い測定が求められる。従来、初期応力を測定する方法は、水圧破碎法や円錐孔底ひずみ法等が適用されてきた。そこで、坑道内での作業性や測定の簡便性に優位性のあるボアホールジャッキ試験により、変形係数と初期応力を取得する手法を開発した。

(2) 目的

川久保ほか(2020)¹⁾、川久保(2022)²⁾では、ボアホールジャッキ試験を用いた新しい初期応力測定手法が提案されており、従来の手法よりも効率よく初期応力を評価できることが示されている。また、川久保ほか(2022)³⁾において、異方性理論を用いた変形係数の解析法が提案されている。これらの研究を基に、当社保有のボアホールジャッキ試験機(KKTシステム)を改良して適用することで、初期応力を測定する技術を構築した。

本論では、KKTシステムを用いた変形係数と初期応力の測定および解析手法について、実際に現場で測定したデータとその解析結果とともに報告する。

2. 変形係数・初期応力の測定および解析

(1) 測定手法

ボアホールジャッキ試験は、JGS3532 2012に適用される地盤の変形係数を測定する、等変位方式の孔内载荷試験である⁴⁾。この試験に適合するKKTシステムにジャイロセンサーを搭載したことにより、どのような方向のボーリング孔においても、

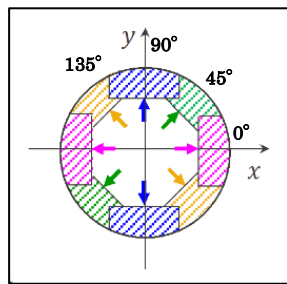


図-1 4方向の载荷

载荷方向を方位・傾斜・回転の3つの要素で設定できるシステムに改良した。現場測定では、所定の深度までゾンデを降下させた後、ゾンデの上部に搭載したジャイロセンサーで载荷方向を設定し孔内载荷試験を行う。载荷方向については、同じ深度において、0°、45°、90°、135°の計4方向計測することを基本とする(図-1)。

(2) 解析手法

①初期応力の解析

測定したデータから初期応力 p_0 を推定する。岩盤をボーリングで削孔した時には、岩盤に加わる応力の影響で孔壁は変形する。そのため、試験開始直後は、ボーリング

掘削前の初期状態に戻る段階といえる。一定の圧力を加えると、初期状態に戻り、変位と圧力のグラフの傾きは概ね一定になる(図-2)。この状態は、岩盤に作用している応力に対抗し、変形している段階である。グラフの傾きが直線に変化する点が、初期応力と载荷圧力が等しいと言える。4方向の初期応力 p_0 を求めることで、岩盤の最大・最小主応力と作用角度を求めることができる。

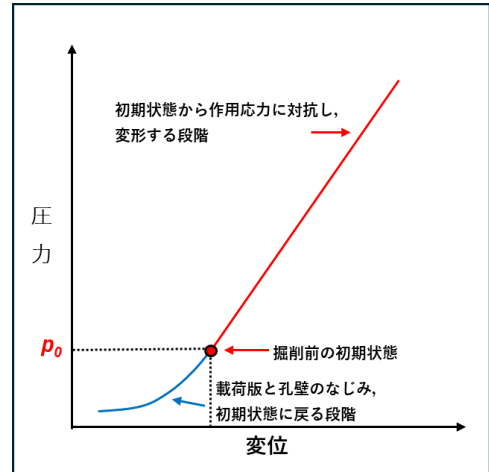


図-2 初期応力 p_0 イメージ

解析には以下の式を用いる¹⁾。

$$p_0 = A_1(\alpha)\sigma_1 + A_2(\alpha)\sigma_2 \quad \dots\text{式-1}$$

ここに、

p_0 : 初期応力, A_1, A_2 : 応力感度係数,
 σ_1, σ_2 : 岩盤の最大・最小主応力, α : σ_1 の作用角度

②異方性理論を用いた変形係数の解析

孔内载荷試験を岩盤で複数回行ったとき、変形係数や弾性係数のデータに差がみられることがあり、解析ではこれらのデータの差はばらつきとして処理されてきた。

しかし岩盤は、層理、片理、節理などの構造的な異方性を持つ場合が多い。4方向で変形係数を測定し、異方性解析することで変形係数測定の精度向上が見込まれる。解析には以下の式を用いる³⁾。

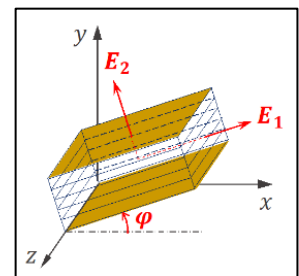


図-3 異方性パラメータ

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta u} = \frac{1}{r} \cdot \Psi(E_1 \cdot E_2 \cdot \varphi) \quad \dots\text{式-2}$$

ここに、

K : 地盤反力係数, Δp : 圧力増分, Δu : 変位増分,
 r : ボーリング孔半径,

$\Psi(E_1 \cdot E_2 \cdot \varphi)$: E_1, E_2, φ によって得られる関数(図-3)

3. 解析結果

宇都宮市周辺に分布する新第三紀中新世大谷層（火山礫凝灰岩、大谷石）を対象に、当社保有のKKTシステムを用いて2度の変形係数と初期応力の測定を行った。その解析結果を下記に示す。

(1) 2023年12月

GL-22.35m, 23.25m, 24.00mの3深度で試験を実施した。試験の結果を図-4に示す。変形係数の異方性解析において、 E_1/E_2 はいずれの深度も1.2程度と小さい値を示した。応力については、最大・最小主応力の方向にやや差がみられるものの、概ね北西-南東方向が最大主応力であるという結果が得られた。

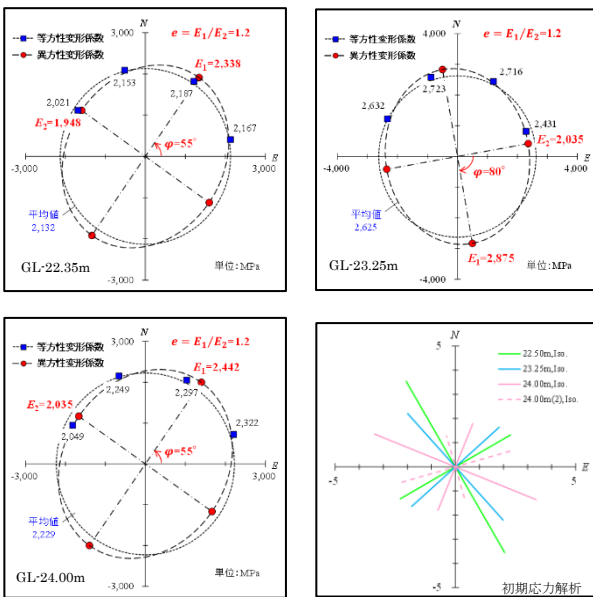


図-4 変形係数・初期応力解析 (2023年12月)

(2) 2024年4月

試験は GL-25.8m, 26.6m の2深度で実施した。図-5に試験の結果を示す。

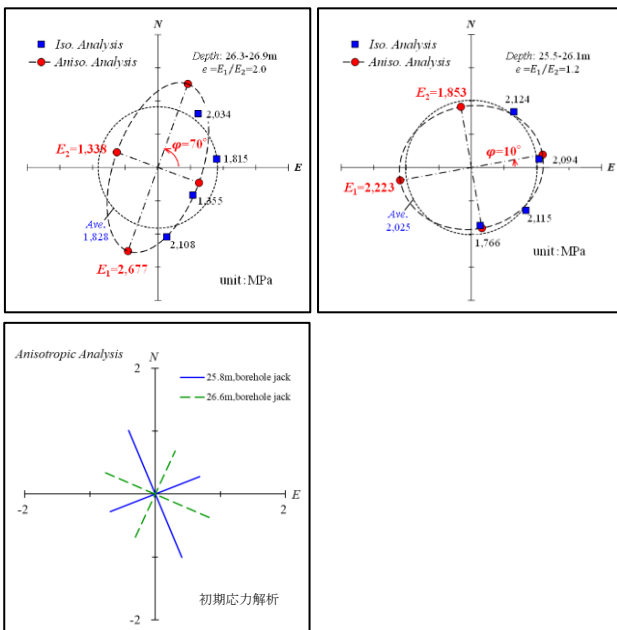


図-5 変形係数・初期応力解析 (2023年12月)

変形係数については、GL-26.6mのデータについては E_1 、 E_2 の差が大きい結果となったが、GL-25.8mのデータでは大きな差がみられなかった。応力については、2023年12月のデータ同様に、概ね北西-南東方向が最大主応力であるという結果が得られた。

4. 今後の展望、EDZの評価

ボアホールジャッキ試験を用いた初期応力の測定では、従来の手法より効率的に初期応力 p_0 を測定することが可能になった。異方性変形係数の測定・解析と合わせることで、大深度トンネルの地山評価や地層処分における地下坑道でのEDZ評価への適用が期待される(図-6)。今後も、大深度での計測が可能なKKTシステムの開発や、変形係数・初期応力測定に関する測定・解析手法の研究を続けていく予定である。

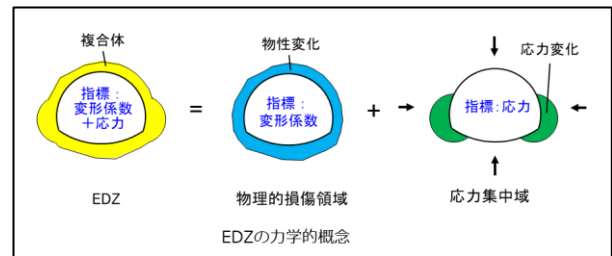


図-6 EDZの評価

5. 謝辞

本手法による原位置試験および解析において、安藤ハザマの川久保昌平氏には多大なご指導を賜りました。ここに感謝申し上げます。

《引用・参考文献》

- 川久保昌平, 村上祐治, 長澤寛和, 谷和夫: ボアホールジャッキ試験による新たな岩盤初期応力の評価理論の提案, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 76, 2020.
- 川久保昌平: ボアホールジャッキ試験による岩盤応力測定法, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, III-03, 2022.
- 川久保昌平, 大野宏和, 松井裕哉, 富樫陽太, 谷和夫, 加藤猛士: ボアホールジャッキ試験による異方性岩盤のヤング率解析法, 地盤工学ジャーナル, 17巻(2022)3号, 2022.
- 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説—二分冊の2—, 第8編 載荷試験, pp. 661-696, 丸善, 2013.

現場 CBR 試験を活用した砂礫箇所での路床土支持力比調査事例

株式会社キタック ○五十嵐 光

1. はじめに

CBR 試験は、舗装設計における設計 CBR や路盤・路床材の修正 CBR を求める際に実施される土質試験である。本事例は、拡幅予定の道路の現道部及び拡幅部にて CBR 試験を実施したものである。当初は、乱さない施工が予定されており、乱した場合に対象土質の強度低下が予想されていた現道部の路床について、乱さない土の CBR 試験実施が想定されていた。しかし、路床の土質が砂礫であり、乱さない土の CBR 試験では、試料を採取する際に、カッターモールドを押し込み採取するため、礫がモールドに衝突し、採取が困難であることがわかった。

そこで、本事例では、現場 CBR 試験を活用した。現場 CBR 試験では、現場にて乱さない試験を実施する事が可能なため、乱さない試料の採取が困難な箇所において活用できる。本発表は、幅員が狭い拡幅予定箇所において、現場 CBR 試験及び締め固めた土の CBR 試験を活用した事例について報告するものである。CBR 試験の適用条件を表-1 に示す。また、粘性土及び砂質土の室内・現場 CBR の関係を図-1 に示す。

表-1 CBR 試験方法及び適用条件²⁾

試験方法		適用条件
室内CBR試験	締め固めた土の CBR試験	自然含水比の資料を用いて、道路舗装の設計に用いる設計CBRを求める場合。 最適含水比に調整した試料を用い、盛土材料や路盤材料などの材料規格である修正CBRを求める場合。
	乱さない土の CBR試験	現場の条件が乱されことなく施工でき、かつ土の強度が極端に低下することがわかっている場合。
現場CBR試験		現場の条件が、土を乱すことなく施工でき、かつ土を乱すことによって強度が極端に低下することがわかっている場合。乱さない状態の試料採取が困難な粗粒材を対象とする場合。

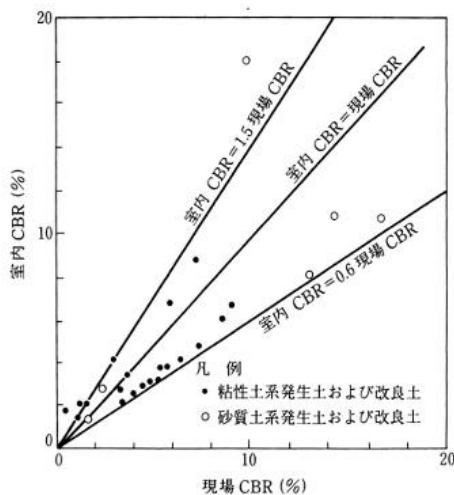


図-1 室内 CBR と現場 CBR の関係¹⁾

2. 試験機の概要及び使用材料

(1) 現場 CBR 試験

礫分を多く含み、乱さない土の CBR 試験の試料採取が困難な箇所において、現場 CBR 試験を日本工業規格 (JIS A 1222) に準じて活用した。

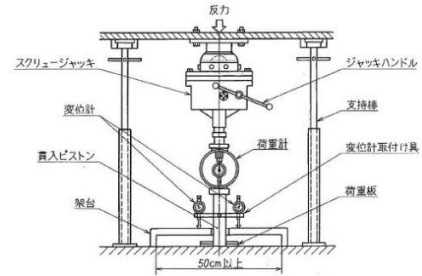


図-2 現場 CBR 試験機の概要¹⁾

(2) 締め固めた土の CBR 試験

現道部に隣接する拡幅予定箇所 (山林部) の路床予定箇所にて、締め固めた土の CBR 試験を日本産業規格 (JIS A 1211 : 2020) に準じて活用した。

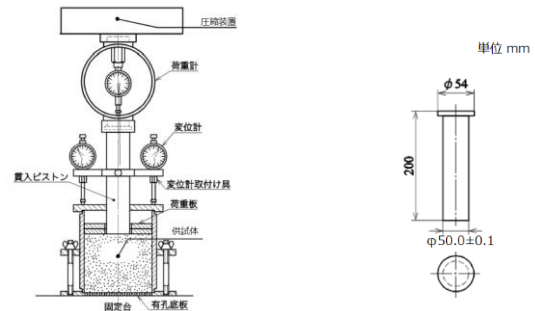


図-3 CBR 試験機の概要²⁾ 図-4 貫入ピストンの例²⁾

(3) 使用材料及び試験箇所

使用材料は、砂礫である。現場 CBR 試験は、現道部下部の路床について実施した。締め固めた土の CBR 試験については、隣接する拡幅予定の箇所 (山林) の路床予定深度についてそれぞれ3箇所 (CBR1~3) 実施した。対象地付近には黒雲母花崗岩が分布し、真砂土化が進行している箇所も認められている。



写真-1 現場 CBR 試験実施状況及び路床部の土質

3. 試験結果と考察

現場 CBR 試験結果及び、室内 CBR 試験結果を表-2 に示す。今回は、CBR1、CBR2、CBR3という同様の傾向の土質である3箇所について、現場 CBR 試験及び、締め固めた土の CBR 試験を実施し、いずれの箇所についても、現場 CBR の値の方が大きく出るといった結果が得られた。

現場 CBR 試験は、乱されてない現道部の路床について、実施している。締め固めた土の CBR 試験は、拡幅部の同様の土質の試料を締め固め、4日間水浸した最も路床条件が悪い状態を想定した試験結果であるため、1.で述べた通り、乱した場合に対象土質の強度低下が予想されていた調査箇所については、土質の傾向に即した結果が得られていると考えられる。

本事例では、乱さない土の CBR 試験を実施したい現道部について、礫が多いため試料採取が困難である事を考慮し、現場 CBR 試験を活用して、礫の多い箇所においても乱していない現況路床の CBR の測定が出来たが、CBR1箇所については、同様の傾向の土質でありながら、現場 CBR 試験では、CBR 値 30.6%、締め固めた土の CBR 試験では、CBR 値 1.2%と約30倍という非常に大きな差が見られた。それぞれ、現道部、拡幅部であるため、完全に同様の試料とは言えない点と、現場 CBR 試験時の含水比は10.6%であったのに対し、締め固めた土の CBR 試験時の貫入試験後含水比は21.7%であり、含水比が大きく違うという点がみられた。一概に比較できるとは言えないと考えるため、今後も、他の土質含めデータを拡充しながら、考察していく必要があると考えられる。

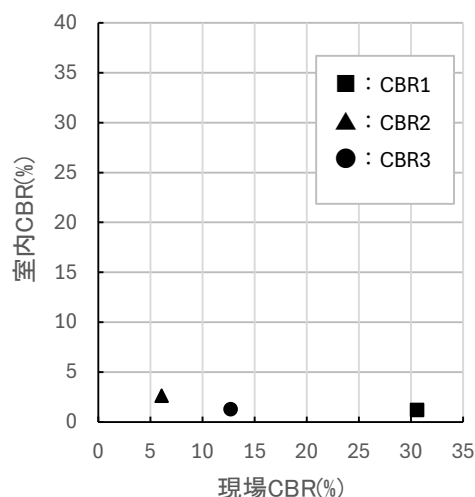


図-5 各箇所における CBR 試験結果

表-3 現場 CBR の概略値¹⁾

路床土の種類	現場CBR(%)
粘土、シルト分が多くしかも含水比の高い土 含水比の高い火山灰質粘性土	3未満
粘土、シルト分が多くても含水比が比較的低い土 含水比の高い火山灰質粘性土	3~5
砂混じりの粘性土	3~7
粘土混じりの砂質土 含水比が低い砂混じりの粘性土	7~10
砂質土	7~15
粒度分布のよい砂	10~30

表-2 CBR 試験結果

試料名	土質	試験方法	CBR値(%)	含水比(%)	貫入試験後含水比(%)
CBR1 (拡幅部)	砂礫	室内CBR	1.2	-	21.7
CBR1 (現道部)	砂礫	現場CBR	30.6	10.6	-
CBR2 (拡幅部)	砂礫	室内CBR	2.6	-	18.2
CBR2 (現道部)	砂礫	現場CBR	6.1	25.4	-
CBR3 (拡幅部)	砂礫	室内CBR	1.1	-	19.4
CBR3 (現道部)	砂礫	現場CBR	12.7	8.8	-

4. まとめ

今回の活用事例については、乱した場合に対象土質の強度低下が予想されていた材料について、近隣箇所の現道部にて現場 CBR 試験、拡幅部について締め固めた土の CBR 試験を実施し、現場 CBR の方が値が大きく出るといった結果が得られた。

今回の事例では、拡幅予定箇所であったため、現場 CBR 試験を活用する事が出来たが、未舗装の場所であり、路床予定箇所の深度が深い場合等は、現場 CBR 試験を活用できない場合もあるため、礫が多い箇所全てに適用できる試験とは言えない。また、今回は地点も少なく、一概に比較できる結果ではないが、このデータも含めながら、今後の現場・室内 CBR 試験結果について関連性を検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 地盤調査の方法と解説 (2013) : 公益社団法人地盤工学会, pp. 723-735.
- 2) 地盤材料試験の方法と解説 [第一回改訂版] (2020) : 公益社団法人地盤工学会, pp. 413-428

【CO73】

福島県内で実施した TRT と TCP による見かけ熱伝導率について

新協地水株式会社 ○幸田 英顕, 原 勝重, 藤沼 伸幸

国立研究開発法人産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター 富樫 聡, 石原 武志

1. はじめに

地中熱利用は、省エネルギーによって脱炭素に寄与する有力な手段であり、その利用のためには地下水の流れの影響を含む地盤の見かけ熱伝導率を求めることが重要である。見かけ熱伝導率は、熱応答試験 (TRT) ¹⁾ やケーブル方式熱応答試験 (ケーブル TCP) ^{2), 3)} などの方法によって求めることができる。2022 年度は、福島県内の 2 地点において同一地点同一孔で時季を変えて TRT を複数回測定することにより、見かけ熱伝導率が測定期間内に大きく変動する地点とあまり変動しない地点があることを確認した ⁴⁾。筆者らは、2022 年から 2023 年にかけて見かけ熱伝導率が大きく変動した福島県鏡石町 (K2 地点) において、地中熱を空調に利用する機会が多い低気温時と高気温時の見かけ熱伝導率の違いの有無や季節的な地下水変動の影響を確認するため、2023 年 6 月から 2024 年 1 月にかけて同一孔の時季を変えた TRT およびケーブル TCP を概ね深度 GL-20~30m において実施して見かけ熱伝導率 (λa) を求めた結果について報告する。

2. 方法

図-1 に示すように、B-1, B-2, P-1, P-2 は地中熱交換器であり、B-No. 3, B-No. 4 は機械ボーリングを行い TCP 測定用のロッドを設置した。2023 年度は TRT を 2 孔 (B-1, P-1), ケーブル TCP を 2 孔行った。TRT は、温水循環試験を実施した。TRT 装置は NPO 法人地中熱利用促進協会から発行された TRT 装置認定申請の手引き ⁵⁾ に則った認定装置である。また、ケーブル TCP は $\phi 66\text{mm}$ で掘削したボーリング孔 B-No. 3 孔と B-No. 4 孔に $\phi 40.5\text{mm}$ の測定用ロッドを設置して、測定にはヒーターケーブルとセンサー間隔 1.00m の温度センサーケーブルを使用し、加熱試験と回復試験を行った。熱応答試験と別に観測孔を 2022 年

に 2 ヶ所 (観測孔 No. 1, No. 2), 2023 年に 1 ヶ所 (観測孔 No. 3) 設置して地下水観測を行った。自記水位計によって 2022 年 9 月から観測孔内の水位を計測した。

3. 結果

図-2 に K2 地点の B-No. 3~B-No. 4 間および B-No. 3~B-No. 2 間の地層断面図を示す。GL-20~25m まで粘性土主体で礫混じり砂をはさみ、それ以深は、風化凝灰岩である。表-1, 図-3 ⁶⁾ に TRT, ケーブル TCP の見かけ熱伝導率および観測孔の水位を示す。TRT の結果では、KB1 孔は他の 3 孔よりも見かけ熱伝導率は大きな値を示している (最大値 8.7, 最小値 3.1)。その他の 3 孔の見かけ熱伝導率は、最大値 3.4 (KB2, 2022 年 9 月), 最小値 1.0 (KP2, 2023 年 1 月) である。見かけ熱伝導率は 4 孔ともに大幅に変動しており、測定のたびに見かけ熱伝導率は低下した。2023 年の中間期および夏季に行った TRT では、前年の測定結果と比べて、見かけ熱伝導率の低下の幅は小さかった。

ケーブル TCP の結果は加熱時の各深度の平均値である。TCP-No. 3 孔では最大値 1.6, 最小値 1.3, TCP-No. 4 孔では最大値 1.6, 最小値 1.4 となり、全体としては変動が

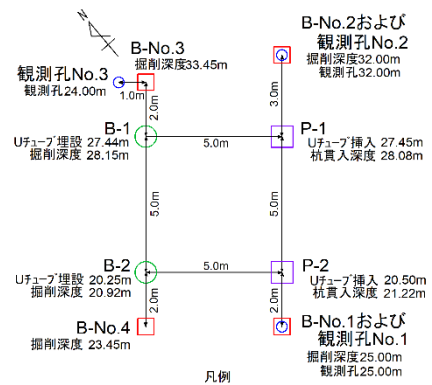


図-1 平面位置図

〈凡例〉

地層名	記号	深度 (GL-m)			N値
		B-No. 2	B-No. 3	B-No. 4	
盛土	Bn	0.00~1.60	0.00~1.25	0.00~0.75	2, 3, 7
ローム	Lm	1.60~3.65	1.25~2.50	0.75~2.00	2, 3, 4
第1粘性土層	Dc1	3.65~8.70	2.50~8.85	2.00~7.40	0~32
第1砂質土層	Ds1	8.70~13.45	8.85~13.00	7.40~13.25	4~41
第2粘性土層	Dc2	13.45~25.00	13.00~19.45	13.25~19.25	3~13
第2砂質土層	Ds2	-	19.45~23.95	19.25~23.00	4~41
風化凝灰岩	Tf-w	25.00~32.05	23.95~33.45	23.00~23.34	20~50以上

図-2 地層断面図 (K2 地点 B-No. 3~B-No. 4, B-No. 3~B-No. 2)

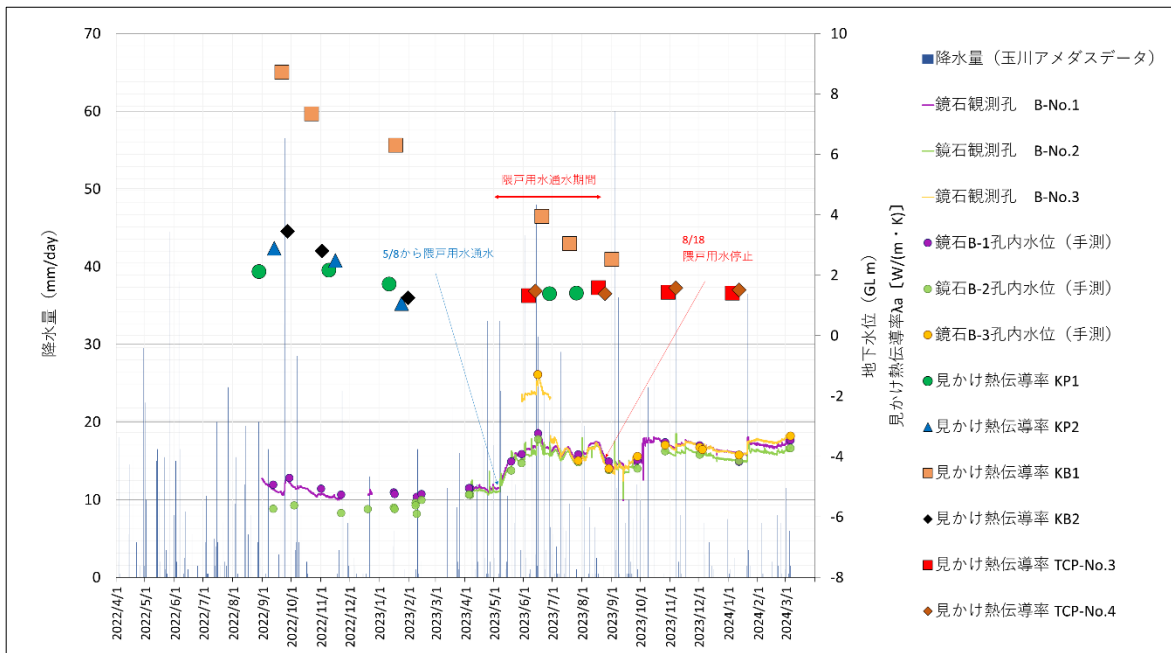


図-3 見かけ熱伝導率および観測孔水位(K2地点)⁶⁾

表-1 加熱時の見かけ熱伝導率 λ a[W/(m・K)]

年度	方法	試験孔	番号	中間季	夏季	中間季	冬季
				(5~6月)	(7~9月)	(10~11月)	(11~2月)
2022	TRT	P-1	KP1		2.1	2.1	1.7
		P-2	KP2		2.9	2.4	1.0
		B-1	KB1		8.7	7.3	6.3
		B-2	KB2		3.4	2.8	1.2
2023	TRT	P-1	KP1	1.4	1.4		
		B-1	KB1	4.0	3.1	2.5	
	TCP	B-No.3	TCP-No.3	1.3	1.6	1.4	1.4
		B-No.4	TCP-No.4	1.5	1.4	1.6	1.5

小さかった。一方、深度によっては、見かけ熱伝導率は時季によって変動しており、概ね観測孔の水位である GL-4 ~6m 程度は大幅に変動した (図-4)。観測孔内の水位は、自記水位計による測定を開始した2022年9月から GL-5m 程度であったが、2023年5月に1m 程度上昇し、その後の付近の農業用水の通水停止時に0.5m 程度の水位が低下しており、農業用水通水時に水位が高くなっている。

4. まとめと今後の課題

複数孔の年間を通した見かけ熱伝導率の比較および地下水観測によって、同一孔でも見かけ熱伝導率が大きく変動する箇所や深度があることを確認した。見かけ熱伝導率が時季により変化する要因として地層状況・地下水状況(地下水位の変動・地下水流動)の影響が考えられる。また、試験地周辺の造成や注水などの工事による人為的な影響による見かけ熱伝導率の変動も考えられる。今後の地中熱利用設備の計画にあたり、より適切な設計を実施するためには見かけ熱伝導率の時季的な変化の把握や、測定箇所周辺の工事等の人為的な影響の考慮が重要である。また、TRT とケーブル TCP、鋼管杭を使用した TRT のように複数の方法を選択肢として見かけ熱伝導率を推

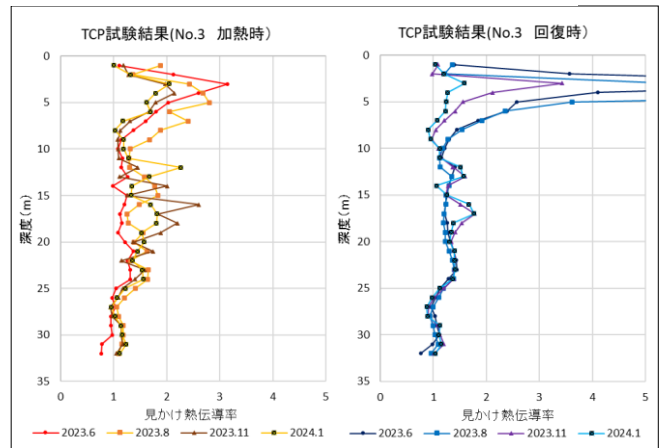


図-4 ケーブル TCP 試験結果(No.3)

定することが必要であると考えている。

《引用・参考文献》

- 1) NPO 法人地中熱利用促進協会編：一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書，2018.8, p1-11.
- 2) 神宮寺元治，竹原孝，山口勉，国松直(2002)：貫入試験装置を用いた原位置地盤熱伝導率探査法，日本地熱学会誌，第24巻，第4号，p349-356.
- 3) 石原武志，富樫 聡，シュレスタ ガウラブ，内田洋平(2023)：地質調査孔を用いたケーブル方式熱応答試験の有効性実証，日本地熱学会誌，第45巻，第2号，p103-119.
- 4) 幸田 英顕，原 勝重，藤沼 伸幸(2023)：福島県内で測定した見かけ熱伝導率の季節変動について，全地連技術フォーラム2023論文集，論文No. C049.
- 5) NPO 法人地中熱利用促進協会編：TRT 装置認定申請の手引き，2019.10, p1-9.
- 6) 気象庁アメダス：観測地点「玉川」(最終閲覧日2024.3.6), <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsd1/index.php>