

地熱貯留層探査技術フィールド実証試験

—山川地熱地域における3次元弾性波探査について—

Demonstration Experiment of Geothermal Reservoir Exploration Techniques:
Three-Dimensional Seismic Survey in the Yamagawa Geothermal Field福田 真人¹、*青木 直史²、新部 貴夫²、佐藤 馨²、阿部 進²Masato Fukuda¹, *NAOSHI AOKI², Takao Nibe², Kaoru Sato², Susumu Abe²

1.独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、2.株式会社地球科学総合研究所

1.Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 2.JGI, Inc.

国内の地熱貯留層の多くは縦型の断裂系と称される高傾斜の断層からなり、地熱資源開発の初期段階ではその位置や構造形態を詳細に把握することが重要となる。しかしながら、地下構造の探査は不確性を伴うため、想定していた位置に地熱貯留層が存在しないといったリスクが存在している。独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源が地熱発電技術研究開発事業として実施する地熱貯留層探査技術開発では、弾性波特性をを用いた断裂系探査技術と他の探査データの総合解析手法により、地熱貯留層の位置や形状を高精度で捉える技術の開発を行っている。平成27年度にはフィールド実証試験として、鹿児島県山川地熱地域において弾性波探査が実施された。

山川地熱地域は阿多カルデラ (Matumoto, 1943) 内部に位置する地熱地帯にあたり、地熱発電が1995年 (平成7年) より行われている。貯留層はフラクチャーネットワークが形成された比較的透水性の良い地層より構成されており、特に優勢な貯留層は生産領域中央に貫入した石英安山岩の周辺に分布することが判明している。実証試験では石油分野において掘削効率率の向上に多大な貢献を果たしている3次元弾性波探査が実施された。調査エリアは約36km² (東西約8km、南北約4.5km) であり、データ収録は有線テレメトリー方式と独立型の探鉱器を併用し、振源にバイブレーターを用いて実施されている。本実証試験の目的は地熱貯留層の詳細構造把握に弾性波探査が有効であることの実証に加え、取得データにおいて受発振点の間引きテストを実施し、国内の地熱地域の多くが位置する山岳部での弾性波探査における課題である疎なデータ取得配置の影響を掌握し、費用対効果に優れるデータ取得配置を提案することにあつた。本調査におけるデータ取得配置は間引きテストを想定し、山川発電所を中心とする約12km² (東西約4 km、南北約3 km) のエリアの受発振点密度が高められているほか、受発振点間隔10mによる東西8 kmの稠密2次元測線の抽出が可能なデザインが採用されている。

取得データは、総受振点数が4,989点、総発振点数が3,262点であった。受振測線は全体の62.8%に当たる3,134点で有線式システムが、残りの37.2%に当たる1,855点で独立型探鉱器が使用されている。センサーはジオフォンが使用された。発振作業は大型バイブレーター (18t) と中型バイブレーター (7.4t) をそれぞれ4台導入して行われた。調査地域の平野部では農耕が盛んであり、区画整理により網目状に整備された農道は発振点の確保に寄与した一方、埋設管が設置されている区域では状況に応じ出力や台数が制限された。大型バイブレーターは全体の30.2%に当たる988点で使用され、残りの69.8%に当たる2,274点で中型バイブレーターが使用されている。振源周波数の低周波数側への拡張を目的にMaximum Displacement Sweep (MDスイープ) を採用し、大型バイブレーターでは3-60Hz、中型バイブレーターでは4-60Hzの発振が行われた。スイープ長は16秒、標準スイープ回数(または4回/点)としたが、同時に解析が行われる屈折法データの品質向上を目的とする高エネルギー発振 (8または12回) が、全発振点の19%に当たる622点 (屈折法77点を含む) で設定されている。

データ解析が現時点 (平成28年2月) で進行中であり、中間成果として通常処理フローに基づく反射法重合記録とともに屈折トモグラフィ解析結果が得られている。これら解析結果には当地域での活発な火山活動を反映した複雑な地質構造が描き出されており、既往データとの高い整合性も示されている。今後は間引きテストを通じて直交配置、並行配置などの3次元測線と2次元測線の比較を実施するほか、次期はFull Waveform Inversionやアトリビュート解析等の高精度解析とともに、坑井情報や重力・MT等の他の探査データとのとの総合解析の実施などが検討されている。

キーワード：地熱、山川、断裂、フラクチャー、3次元、地震探査
 Keywords: Geothermal, Yamagawa, Fault, Fracture, 3D, Seismic



電気探査と浸透の3次元シミュレーションによる浸透部の推定

Estimating of infiltration path using 3D simulation of groundwater flow and resistivity survey

*井上 敬資¹、中里 裕臣¹、久保田 富次郎¹、古江 広治²、吉迫 宏¹、紺野 道昭¹、正田 大輔¹

*Keisuke Inoue¹, Hiroomi Nakazato¹, Tomijiro Kubota¹, Koji Furue², Hiroshi Yoshisako¹, Michiaki Konno¹, Daisuke Shoda¹

1.国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、2.鹿児島県農業開発総合センター

1.National Agriculture and Food Research Organization, 2.Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development

Resistivity survey is a useful method for noninvasively imaging continuous water flow in soil because water saturation increases electrical conductivity. Several methods have been applied to determine the water flow in soil by monitoring the resistivity change that is associated with variation in water saturation or water salinity. A change in resistivity before and after infiltration provides a 3-D image of the water flow; however, a detail distribution of resistivity sometimes cannot be obtained because of the inherent limitation of the observation data (i.e., number of measurements, time represented, and measuring sensitivity). However, a resistivity change is caused by the water flow in soil, and the water flow is governed by the seepage phenomenon; therefore, a method that uses data from resistivity surveys and seepage analyses would be effective. Thus, a water flow model was developed, which compared the water content converted from resistivity survey data as well as water content simulated from hydraulic models. This method provide both an image of the water flow and the properties of the hydraulic conductivity; however, if the number of measurements is low, the resistivity obtained from inversion remains uncertain because of spatially varying resolution. Comparing water content values obtained from resistivity surveys with those from water flow simulations includes a 3-D inversion uncertainty. However, according to the coupled approach, the observed resistivity data are directly used for determining the hydrological properties. In this method, water content simulated from water flow analysis is converted to a resistivity model, and a resistivity survey is conducted using this model to interpret the results. The simulated resistivity data are compared with the field observations to estimate the water flow hydraulic properties. This method can reduce the spatial uncertainty of the 3-D invasion because the resistivity model is constrained by the seepage analysis data. One dimensional hydraulic properties were inverted from 1-D water flow simulations, whereas, using 2-D hydraulic properties were inverted via Bayesian and multi-criteria inversion and via neural networks. However, few studies investigated 3-D hydraulic properties using 3-D water flow simulation and 3-D resistivity survey data. Inversion of 3-D hydraulic properties is best but it is difficult because reconstructing the 3-D conditions is complex, and there are many unknown parameters. In this study, we propose an easy the method to estimate hydraulic properties of the shallow soil layer, which is responsible for many hydraulic problems in the field. To evaluate this method, numerical and field experiments ware conducted. In the numerical experiment, the resistivity survey provides an image of the preferential flow; however, the infiltration locations are unclear. Assuming that high hydraulic conductivity zones exist somewhere, an analysis of saturated-unsaturated seepage is conducted for several water-flow models with different locations of high hydraulic conductivity. Subsequently, a resistivity survey is implemented based on the water content that was simulated by seepage analysis. The high hydraulic conductivity location of the model that provides the minimum errors corresponds to the high hydraulic conductivity location of the numerical field model. In the field, resistivity is measured during groundwater recharge

experiment in a pyroclastic plateau. This resistivity survey provides an image of the preferential flow; moreover the high hydraulic conductivity location of the model that provide the minimum errors corresponds to filling water range, whereas that of the model that gives the maximum errors corresponds to no filling water range. These results indicate that estimating high hydraulic conductivity locations using simulations of the groundwater flow and resistivity survey is possible. This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 25850170.

キーワード：高透水路、浸透解析、電気探査

Keywords: infiltration path, groundwater flow, resistivity survey

トンネル地山の連続した亀裂の状態を考慮した変形係数に関する検討

Case study on a newly modulus of deformation considering a continuous state of crack in the tunnel ground

*岡崎 健治¹、山崎 秀策¹、倉橋 稔幸¹

*KENJI OKAZAKI¹, SHUSAKU YAMAZAKI¹, TOSHIYUKI KURAHASHI¹

1. 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

1. Civil Engineering Research Institute for cold region

トンネルの数値解析や地山分類の見直しにおいては、より地山の状態を反映させた物性値による評価が必要となる。そのため、施工時に切羽から水平方向へ先進ボーリング調査を行う場合があり、速度検層によるP波速度、孔内载荷試験による変形係数、コアの室内試験によるP波速度等によって、掘削箇所直近の物性値が求められている。ボーリング孔内とコアのP波速度には、測定方法や対象範囲の違いによる影響を含むほか、亀裂の有無による影響が関与しており、コアに対する地山のP波速度の割合は、亀裂の状態を考慮した係数として求められ、物性値の補正に用いられている。また、変形係数は、载荷箇所周辺に限定した値であるが、ボーリング孔内全長を連続的に測定した速度検層によるP波速度を用いることで、地山の状態により近い変形係数として求めることができる。

本報告では、北海道で建設された火山岩を地山とする国道トンネルにおける孔内のP波速度、コアのP波速度、コアのS波速度から孔内のS波速度を算出したほか、求めた孔内のS波速度、孔内のP波速度、コアの湿潤密度から動せん断係数と動ポアソン比を計算して孔内の動弾性係数を求めた。この動弾性係数は、すでに、孔内のS波速度を求めた段階で、コアと地山の亀裂の影響を考慮した値となっており、地山の変形係数に該当する値である。この孔内の動弾性係数を孔内载荷試験による変形係数、コアのP波とS波速度から求めた動弾性係数と比較した。

その結果、速度検層から算出した動弾性係数は3,000~36,000MPaであり、室内試験から算出した動弾性係数300~68,000MPaよりも小さい値を示した。また、孔内载荷試験による変形係数400~10,000MPaより大きな値を示した。この違いは、測定対象や範囲内における亀裂や地盤の状態の違いを反映していると考えられる。また、孔内の弾性波速度は、孔内の動弾性係数との間に、孔内载荷試験による変形係数よりも明瞭な比例関係が認められたことから、より連続した地山の状態を示す値として求められたと思われる。

キーワード：トンネル、地山分類、変形係数

Keywords: tunnel, ground classification, modulus of deformation

堤防の地表面不整形性が波動伝播に与える影響
Effects of surface irregularity of embankment
on wave propagation

*宮永 隼太郎¹、山中 浩明¹、地元 孝輔¹

*Shuntaro Miyanaga¹, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹

1.東京工業大学大学院総合理工学研究科

1.Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Phase velocity of surface wave, mainly Rayleigh wave, generated by artificial sources is used in the surface-wave exploration method to estimate a shallow S-wave velocity structure. It has been often used in soil surveys in, for example, river embankment, landfill and residential land. A horizontal layered model with the flat Earth's surface is assumed in data analysis of the method. However, the appropriateness of the assumption has not been sufficiently discussed for its application for a site which has surface and subsurface complex irregularities.

In this study, we investigate effects of surface irregularity on characteristics of surface-wave propagation through numerical experiments based on a finite-difference method to understand its applicability. First, we conducted 3D simulations of wave propagation in shallow soil models with and without surface irregularity considering realistic cases, such as embankment. Then, we derived frequency-dependent phase velocity from synthetic waves obtained on the surface of the models. We also examined effects of slope of embankment and a velocity contrast between surface layers and basement on the surface-wave phase velocity.

The effects of the 3D shape of surface topography are significantly identified in the surface-wave characters in the models with a high velocity contrast between surface layers and basement, when the model has a steep slope on a side of the embankment. In the embankment models, scattered wave generated in the upper surface and the base of the embankment was observed. The estimated phase velocity for the surface wave differs from those of the horizontally-layered model indicating difficulty to deduce a true velocity model. However, the phase velocity for the model having a low velocity contrast is similar to those in the horizontal model even in the models with steep slopes. It is concluded that effect of surface irregularity on the surface wave propagation is small in sites with a low velocity contrast with regardless of surface irregularity.

キーワード：地表面の不整形、位相速度、表面波探査、S波速度

Keywords: surface irregularity, phase velocity, surface-wave exploration, S-wave velocity

解釈テンプレートを利用した河川堤防の統合物理探査の解釈例

An interpretation result of the integrated geophysical survey at river levee using interpretation template

*小西 千里¹、斎藤 秀樹¹、茂木 透²

*Chisato Konishi¹, Hideki Saito¹, Toru Mogi²

1.応用地質株式会社、2.北海道大学

1.OYO Corporation, 2.Hokkaido University

河川堤防の安全性はボーリングデータを基に作成された堤体土質図や基礎地盤の土質断面といった既往資料と、特定の位置で実施された安全性照査結果をあわせて評価されている。しかしながら、ボーリングの位置では土質が既知であってもボーリング孔の間隔は1km程度であり、その間の土質分布はあくまで解釈者の推定に頼っているのが現状である。一方で、物理探査は直接的に土質を求めることはできないが、ある物性値をたとえば10m程度の分解能で把握することが可能である。したがって、物理探査によってボーリング孔間の土質を概略的にでも推定することができれば、たとえば照査断面位置を決める際の重要な情報になると考えられる。河川堤防の統合物理探査では、表面波探査によりS波速度断面、牽引式電気探査により比抵抗断面を求め、それらをクロスプロットして解釈することで、堤体および基礎地盤の土質を縦断方向に評価している。今回、物理モデルにもとづく解釈テンプレート（小西ほか，2016）を利用し、クロスプロットから概略の土質を推定した結果とその検証結果について報告する。

物理モデルを仮定することで土質区分用の解釈テンプレートが作成できるが、作成した解釈テンプレートの妥当性は、探査結果だけでは判断がつかない。そのため、原則的には、物理探査測線上にあるボーリング位置で既知の土質区分との比較、解釈テンプレートの調整を行った後に、概略の土質分布断面図を推定する。今回、このようにして得られる土質推定結果を検証するために、物理探査の測線付近にある複数のボーリングを解釈用と検証用とに分け、解釈用のボーリングデータだけを用いて、解釈を行った後、検証用のボーリング位置で結果の妥当性を検証した。

物理探査結果から推定した土質分布図からは、解釈用の2本のボーリング孔の間に粘性土がやや深く分布している状況が推定された。一方、解釈用のボーリング孔間にある検証ボーリング位置でも粘性土が確認され、またその深度も周囲よりもやや深くなっていることが明らかとなった。このことから、物理探査結果から推定した概略土質断面が妥当であることが示された。これはすなわち、物理探査結果によって数少ないボーリング孔のデータを補間することで概略の土質断面を正しく作成できることを意味している。

キーワード：解釈テンプレート、統合物理探査

Keywords: interpretation template, integrated geophysical survey

千歳川堤防開削地点での統合物理探査

Integrated Geophysical surveys in levee excavation sites on the Chitose river, Central Hokkaido

*茂木 透¹、重藤 迪子¹、高井 伸雄²、岡崎 健治³、倉橋 稔幸³、大日向 照彦⁷、堀田 淳⁴、稲崎 富士⁵、北 高穂⁶

*Toru Mogi¹, Michiko Shigefuji¹, Nobuo Takai², KENJI OKAZAKI³, Toshiyuki Kurahashi³, Teruhiko Obinata⁷, Jun Horita⁴, Tomio INAZAKI⁵, Takaho Kita⁶

1.北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、2.北海道大学大学院工学研究院、3.寒地土木研究所、4.㈱ジオテック、5.土木研究所、6.TK海陸調査事務所、7.北海道開発局

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Engineering, Hokkaido University, 3.civil Engineering Research Institute for Cold Resion, 4.Geo-Technical Research Co.Ltd., 5.Public Work Reserch Institute, 6.TK Ocean Land Investigation Ltd., 7.Hokkaido Regional Development Bureau

北海道中部にある千歳川では、樋管を新設するために北島地区および晩翠地区で堤防開削が行われた。高密度電気探査と表面波探査が、開削前に天端と高水位面で縦断方向に行われた。また、開削地点を横断においても比抵抗トモグラフィとS波トモグラフィが行われた。開削後、開削面において、小さい電極間隔による比抵抗マッピングと小間隔の表面波探査が行われ、開削面において直接比抵抗とS波速度が測定された。

地表探査による比抵抗構造やS波速度構造は、開削面での直接測定により得られた比抵抗やS波の分布により検証された。これらの探査により堤体や基礎地盤での不均質構造が示された。開削面から採取された試料の土質試験により得られた粒度分布と比抵抗とを比較することにより、堤体内の透水ゾーンが検出され、その基礎地盤への延長も示された。

キーワード：統合物理探査、堤防探査

Keywords: Integrated Geophysical Survey, Levee Survey