

反射スペクトル計測による地盤材料の状態評価に関する基礎的研究

Fundamental Study on the Evaluation of Geomaterials' Condition Using Reflectance Spectrum Measurement

河 井 克 之
Katsuyuki Kawai

中 島 晃 司
Koji Nakashima

澤 野 命
Mikoto Sawano

吉 田 英 昭
Hideaki Yoshida

1. はじめに

地盤材料は、生成年代や場所によってその特性が異なり、時間的・空間的局所性を有している。一方で、自然斜面や人工の地盤構造物は、自然環境にさらされ、常に自然災害リスクを含んでいるため、行政や道路管理者は管理区間の地盤材料に関する知識とともに、それに応じた維持管理が求められる。さらに、熱海の土石流災害を契機に、2023 年から新しい盛土規制法が施行され、それまで管理されていなかった宅地や道路以外の盛土構造物に対しても安全管理が必要となったことで、点検作業の効率化や省力化が喫緊の課題となっている。しかし、地盤構造物の状態評価については、点検する技術者の経験に基づく知識・技術レベルに大きく依存し、かつ定性的判断も多い。現在は、このような一次点検は目視によるところが大きい。しかしながら、目視による点検においては点検者の経験や技術レベルによって、判定結果が異なってくる。他業界と同様、地盤構造物を維持管理していくうえでも担い手不足が問題となっている。本研究では、人が経験的に視認している情報を定量化することを目的とし、地盤構造物の状態量と反射スペクトル特性の関係性について検討する。

2. 反射スペクトル撮影

2.1 反射スペクトル

我々が認識する物体の表面情報である形や色は光によってもたらされている。光は波長によって異なる色を有しているが、これらは混ざり合う事で異なる色となって認識される。赤(R)、緑(G)、青(B)それぞれの光を足し合わせると異なる色彩をつくることができる。この3色によってあらゆる色彩を再現できるため、光の3原色と呼ばれている。この場合、光を足し合わせるため加法混色と呼ぶ。加法混色は光が重なるほど明るい色となり、すべての混色がなされると白色光となる。表色系は基本的にこの加法混色の割合で表される。もう一つの色彩の表現に、加法混色とは逆に光の減法によって混色を行う減法混色が挙げられる。例としてカラー印刷に用いられるシアン(C)、マゼンダ(M)、イエロー(Y)は、それぞれ赤(R)、緑(G)、青(B)の補色でありその波長帯の光を吸収し、それ以外の光を反射する。このインク割合を変化させることで反射光が混色され、我々が色彩を認識することになる。すべての光が吸収されると黒色になる。本研究では地盤材料や地盤構造物の表面情報を取得するが、それは反射スペクトルを得ることを指すため、減法混色の考え方に基づいている。

2.2 ハイパースペクトルカメラ

物質は光が当たると、一部が吸収され残りを反射する。物質によりこの吸収する光は異なるため、この反射特性を利用し反射光から物質を特定することが可能である。本研究では、この反射される光を波長ごとに分類して取得できるハイパースペクトルカ



図-1 ハイパースペクトルカメラ SPECIM IQ

メラ SPECIM IQ (Spectral Imaging 製) を使用した (図-1)。詳細な性能は表-1 に示す。人間にとっての可視光は、個人差があるもののおおよそ 380 nm~800 nm とされている。これに対して、今回用いた SPECIM IQ は 400 nm~1000 nm の範囲からデータを得ることができるため、可視光~近赤外の一部のデータを活用することができる。撮影画像は、付属ソフトである perClass_Mira¹⁾ によって分析を行う。このソフトウェアは、画像内で任意の波長ごとにクラス選択を行うことができるだけでなく、波長ごとの演算によって NDVI などの指数の画像内分布も得ることができる。反射スペクトルの波長ごとの強度は光源にも依存するため、基本的には画角内に既知の反射率を有する反射板を収めて撮影し、物質の反射スペクトルは反射率という形で取得する。反射板の劣化を考慮し、現場では上質紙を基準とした撮影を行うため、予め基準反射板 (パーマフレクト社製) との比較により上質紙の反射率を求めた (図-2)。その際、撮影条件が反射率に及ぼす影響を検討した。撮影は暗室内で行い、基準反射板と上質紙に等しく光が当たるようにカメラの左右に光源を配した。まず、光源の影響を検討するために、光源としてハロゲンライトと白色 LED ライトを用意した。図-3 に上質紙を撮影した結果を示す。写真内の黒実線で囲まれた範囲を基準とし赤実線 (ハロゲン光源下)、青実線 (LED 光源下) 内の反射率を算出した。撮影時の光量などが異なるため反射率の絶対値に差はあるものの可視光領域 (800nm 以下) ではスペクトル傾向は一致している。しかしながら、長波長帯では LED 光源下では不連続なスペクトル特性が得られている。これは LED 光源内に長波長域の光量が少ない、場合によっては欠落しているため不連続になっていると考えられる。そのため長波長域のスペクトル特性を得るためにはハロゲン光源が必要であると言える。次に撮影角度の影響について検討する。図

表-1 SPECIM IQ 仕様

撮影方法	ラインスキャン
波長範囲	400-1000nm
スペクトルバンド数	204
画角	31°×31°
空間分解能	5Mpix (1280×960)



図-2 撮影風景

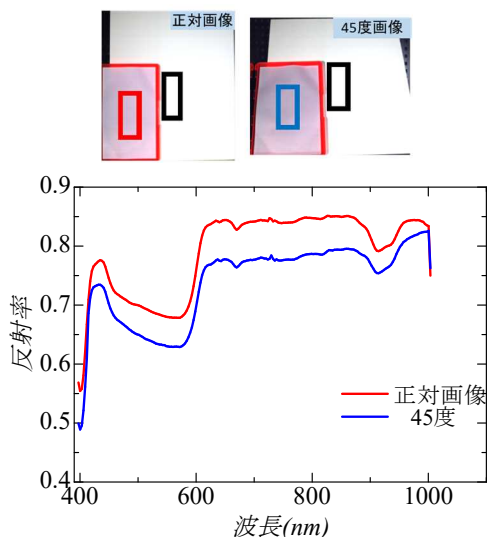


図-4 撮影角度の違いによる反射スペクトル

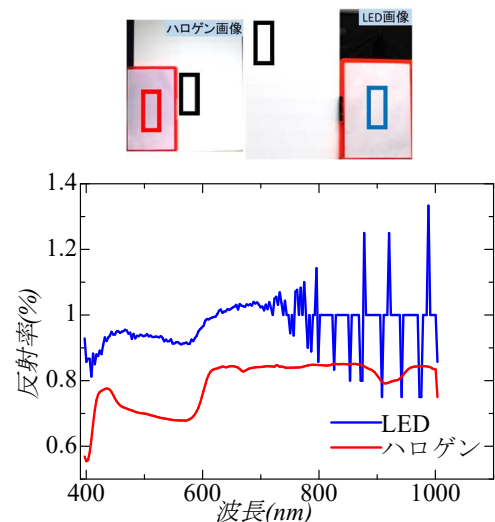


図-3 光源の違いによる反射スペクトル

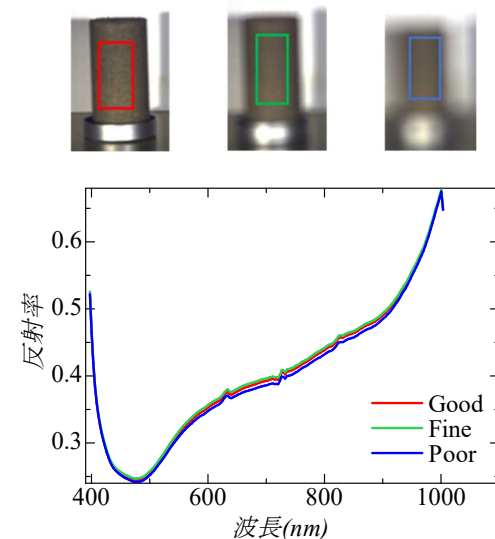


図-5 ピントの良否による反射スペクトル

-4 はハロゲンライトを光源として撮影対象となる基準反射板、上質紙を、正対、45 度傾斜させて撮影した。反射量が正対の方が大きくなることは明らかであるが、反射率においても正対撮影の方が少し大きく表れている。このことは、法面の様な傾斜面を撮影する場合に、反射板を法面と同じ角度になるように撮影しても、正対撮影とは異なる反射率が得られることを意味している。また、撮影対象に対するピントの良否の影響についても調べた。ピントについては波長帯毎の反射率が大きく異なるものとして締固め試料について行った。図-5 に得られた反射率を比較する。その結果、ここで示す様に反射率を算出する範囲が撮影対象物表面である程度均一であれば、大きな差異が生じないことが分かる。

3. 供試体気乾試験と反射スペクトル特性

一般的に、地盤材料は水を含むと黒色や焦げ茶色に近い色彩へと変色する。これは土骨格間隙に水が侵入し、乱反射する量が減り、光をより吸収すると説明されている。近年、この反射スペクトル計測による地盤材料の含水率を推定する試みがいくつかなされている²⁾³⁾⁴⁾。ここでは、含水比の異なる供試体を気乾状態で静置し、含水比変化を計測するとともにスペクトル撮影を行った。

3. 1 試験方法

市販の真砂土(図-6 に粒度分布を示す)を含水比調整し、直径 5cm、高さ 10cm のモールド内で所定の乾燥密度になるように 3 層に分けて締固めた供試体を用意する。この供試体を自然乾燥させる過程で、定期的にハイパースペクトル撮影(暗室内、ハロゲンライト光源)を行った。ここでは、初期含水比 9, 11, 13(%)の含水比、乾燥密度 $1.92\text{g}/\text{cm}^3$ の供試体を用意した。撮影時には、供試体質量を計測し、質量変化により含水比を計測した。前章で示した様に、撮影環境によって反射スペクトル特性に差異が生じるため、図-7 に示す様にカメラ、撮影対象および光源を配置し、暗室内で撮影を行った。

3. 2 試験結果

図-8 に、供試体作製後の含水比変化を示す。図中のプロット部で含水比計測とハイパースペクトル撮影を行っている。初期含水比の異なる供試体は乾燥の初期段階は同じ速度で含水比が減少していき、一定の含水比に達すると含水比減少量が著しく落ちるのが分かる。図-9 は、撮影画像の例として、供試体作製直後と 1 週間経過後を示している。1 週間経過後の試料の方が全体的に白っぽくなっているのが分かる。図中の白矩形内を基準反射板の、赤矩形内を供試体の表面反射スペクトルとして供試体の反射率を求めた。乾燥期間中の反射スペクトル特性を供試体ごとに図-10 にまとめて示す。すべての供試体で経過時間(乾燥)とともに、全波長帯領域で反射率が大きくなっている。供試体直後の反射率は調

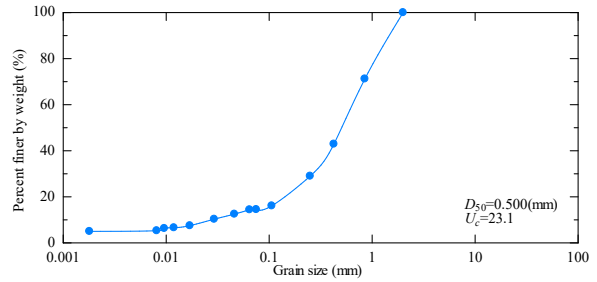


図-6 真砂土の粒径加積曲線

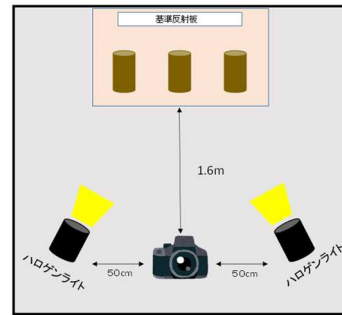


図-7 供試体気乾試験概要

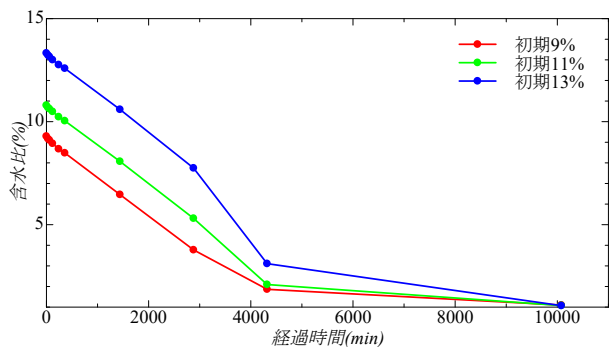
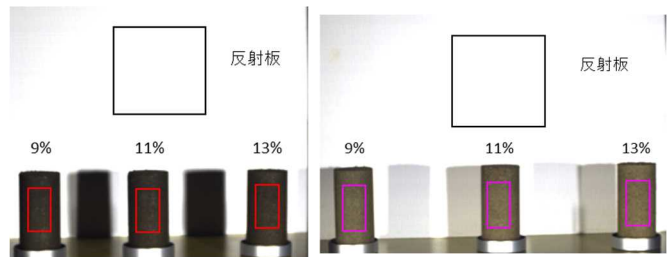
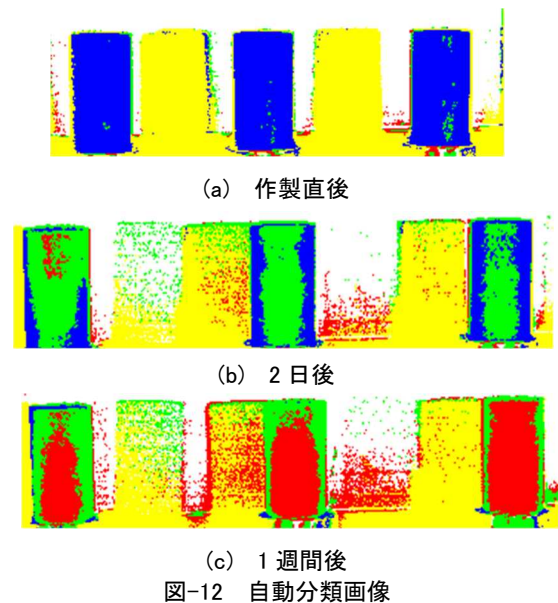
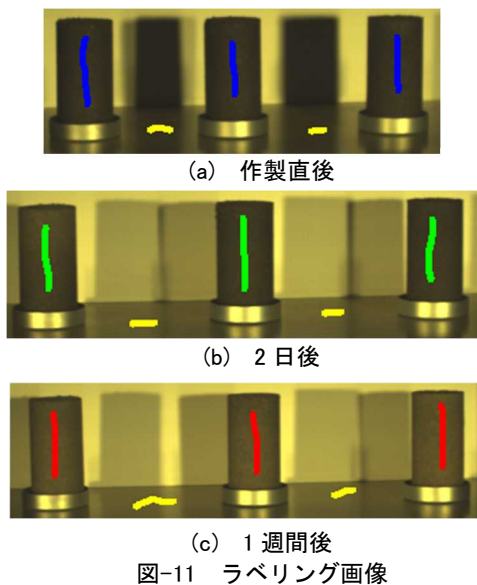
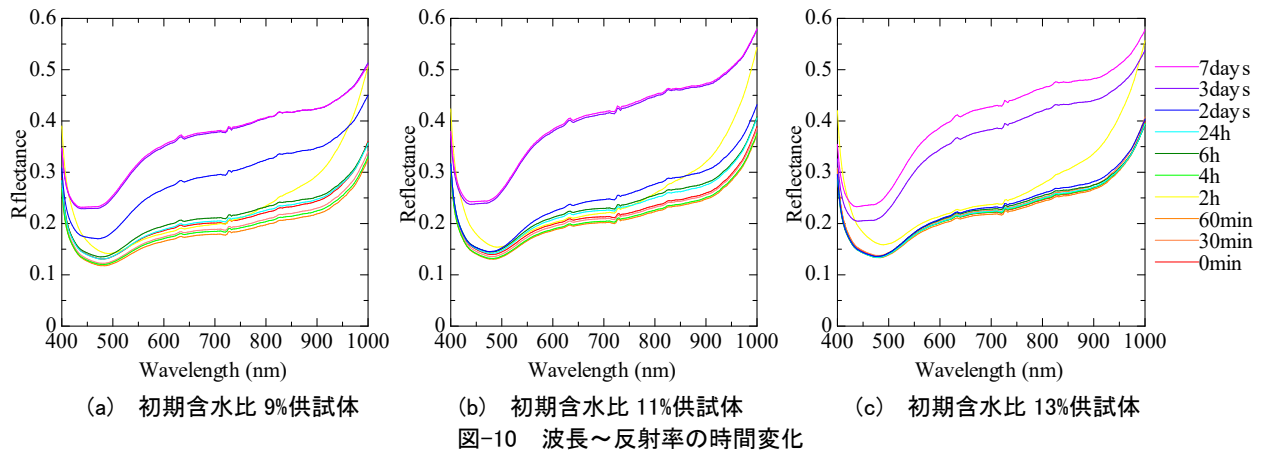


図-8 気乾時間～含水比関係



(a) 供試体気乾試験概要 (b) 1 週間後撮影画像

図-9 供試体気乾試験撮影画像



整含水比の低いものほど小さくなっており、1週間後の乾燥状態ではほぼ等しい反射率となっており含水比との相関が高いことが分かる。ただし、2日経過後の反射率上昇傾向が供試体の初期含水比によって異なっている。初期含水比 9%の供試体では上昇割合が大きく、1週間後の反射特性に近くなっているのに対し、初期含水比 13%供試体では、3日後の反射率でも定常状態には至っていない。この比較結果を考慮して図-8の含水比変化を見ると、含水比 5%を下回る頃から大きく反射率が上昇していくものと予想される。図-11は、供試体作製直後、2日後、1週間後の撮影画像に反射スペクトル特性毎にラベリングを行ったものである。画像中の青実線、緑実線、赤実線部に反射スペクトル特性と類似の反射スペクトルを有する領域が自動的に画像分類される。黄実線部は土供試体と異なる部分として供試体を置いている台表面を指定している。図-12は、ラベリングによって自動分類された画像である。青→緑→赤の順で乾燥していることを示すが、2日後の初期 9%供試体では一部赤色でラベリングされている箇所があること、1週間後画像ではその供試体間の差が小さくなり、むしろ初期 13%供試体の方が、乾燥領域(赤)が大きくなっていることが分かる。これは、図-8の含水比変化と一致した挙動となっている。

4. 地盤工学の実務におけるハイパースペクトルカメラの適用

4. 1 河川堤防断面撮影による土質構成判定

河川堤防は改修の度に異なる地盤材料で補修され複雑な内部構造を有しているのが一般的である。開削工事が行われる際に、その土質構造を知ることができ、その断面スケッチが重要となる。ここでは、宮城県柴田町の阿武隈川で樋管工事のための開削断面にて反射スペクトル解析による土質分類を行う。図-13は、撮影を行った範囲の通常画像であり、

図中には予め地盤調査によって土質分類がなされた境界を破線で示している。土質毎に代表的な点として図中プロット箇所の反射スペクトル特性を図-14に示す。青線の粘性土層、緑・橙線の礫質土層、赤・黄線の砂質土層の順に反射率が大きくなっている。これは、土中に含まれる有機物含有量や水分量などによって反射率に違いが表れていると考えられる。動植物や微生物の遺体が分解された、いわば腐植があった有機物は土中に残存し、土が黒・茶色となる要因となる。図-13①Bc中に腐植により黒く変色したと思われる領域が確認できるが、それが図中、水色線の反射率が最も低い結果として反映されている。また、供試体気乾試験で示した様に土は含水比が高いほど反射率を低下させることが分かっている。特に、粘性土は礫・砂質土と比べ透水性が低く、保水性が高いために、反射スペクトル曲線にも影響したと思われる。ここで、分類された粘性土・砂質土・礫質土にラベリングを行い、それを基に自動分類させた結果を図-15に示す。正面の樋管下部の粘性土、礫質土の違いも表現できており、まずまずの妥当な結果を得た。このようなデータを教師データとして撮影画像データを蓄積し、機械学習を重ねれば、より確度の高い自動分類が可能であると考えられる。



図-13 土質境界とスペクトル取得領域

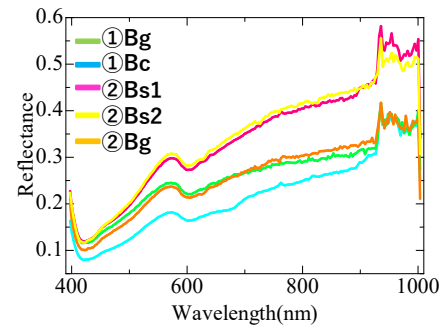


図-14 土質毎のスペクトル特性

4. 2 宙水試験盛土法面撮影

先述したように、土の含水率は反射スペクトルの違いとなって現れる。土の保水性は地盤構造物表面の植生やその生育状況にも影響を及ぼすため、間接的に植生の繁茂状況から含水率を推測することも可能である。そこで、宙水の生成・消散過程を観察するために神戸空港内に造られた試験用盛土で反射スペクトルを計測した。盛土は高さ 4.4m、法肩から法尻までの水平距離 30m、天端幅 4m で、異なる材料を用いた層構造となっており(図-16)、法面近傍の a 層も中央を境に異なる含水比 16 %, 10 % に調整された材料で同じ乾燥密度になるように締め固められている。試験盛土は 2022 年 9 月に竣工し、約 1 年間自然の

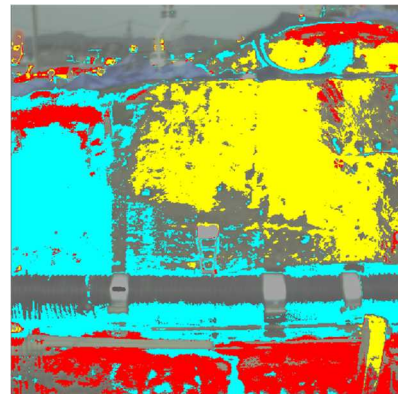


図-15 自動分類画像

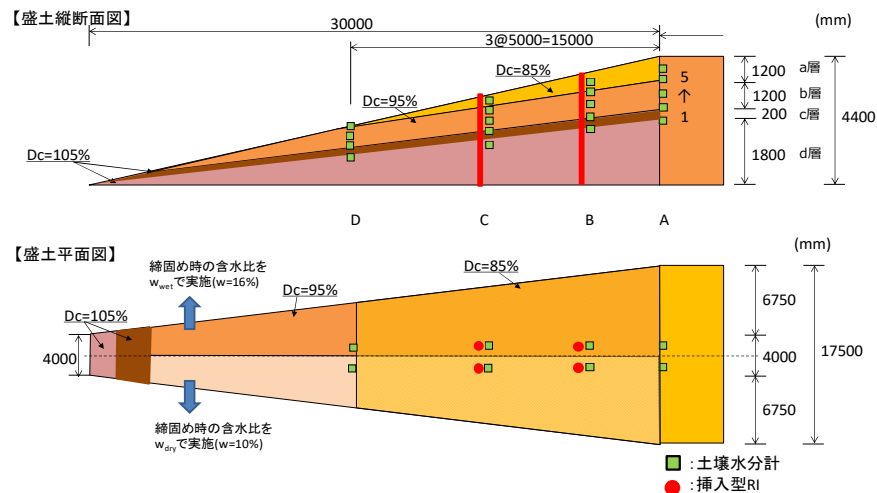


図-16 宙水試験盛土概要

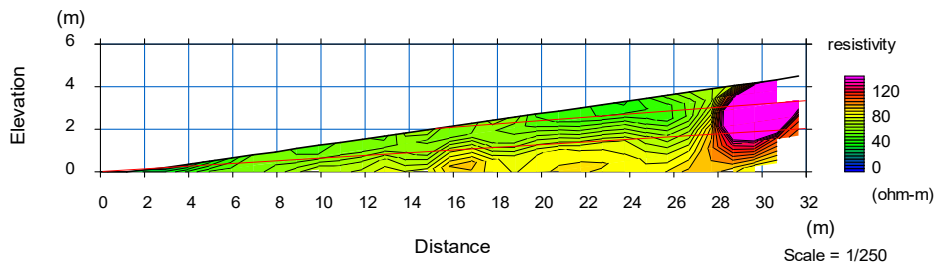


図-17 5月23日の電気比抵抗分布

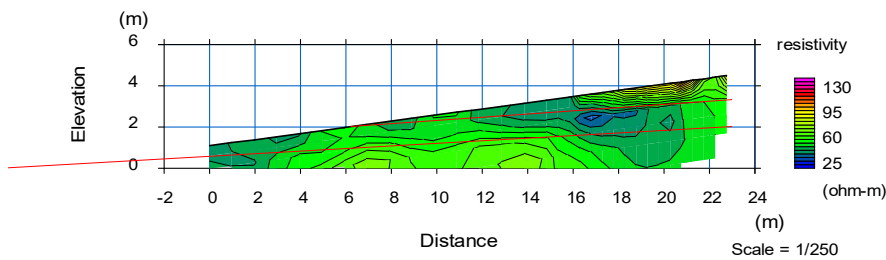


図-18 7月5日10時の電気比抵抗分布

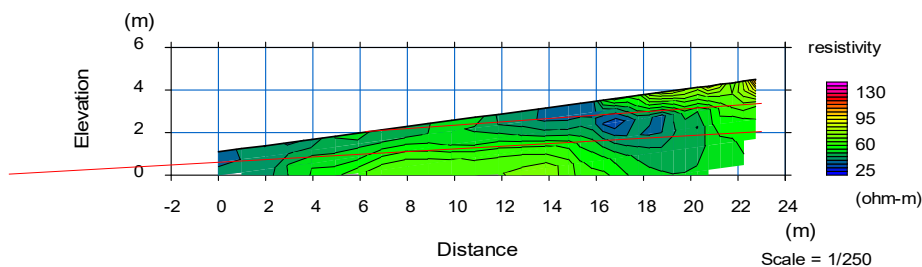


図-19 7月6日10時の電気比抵抗分布

気象下で、降雨と宙水生成条件について調べるとともに、2023年7月5日、6日には、法面上部半分に総雨量として20mmに相当する散水を2回/日×2日間行う散水試験を実施した。図-17は、5月23日の電気探査結果例である。図中には盛土の土層境界を赤線で示している。探査前数日の降雨記録はなく、全体的に電気比抵抗が高い結果となっている。図-18は散水試験初日の1回目散水直後である。図-17と比較すると、朝から小雨があった影響もあり、法面近傍の比抵抗が小さくなっている。図-19は、散水試験2日目の結果であるが、前日夕方から夜にかけて15mm程の降雨があり、同様に散水1回目直後ではあるものの、より深い位置まで比抵抗の小さい、含水率の高いと推測できる領域が広がっていると同時に、難透水層のd層上部に宙水が形成され滞留しているように見える。

図-20～図-23は、順に散水試験前、7月6日2回目散水直後、1時間経過後のNDVI解析を示したものである。NDVIとは正規化植生指数と呼ばれる指数であり、次式で示される。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

ここで、*NIR* および *RED* はそれぞれ近赤外線領域、赤色領域の反射率である。植生が光合成に用いる葉緑素は熱に弱い。そのため熱線を含む赤外線領域を反射する性質があり、より活性度の高い植生ほどNDVI値が高くなる。ここでは、近赤外線領域として750-1000nm、赤色領域として610-700nmの波長帯を抽出した。一般的に正規化植生指数は-1～+1の範囲を示し、値が大きいくほど葉緑素の働きが活発であることを示す。画角内の地盤材料と植生以外の領域を明瞭とするために、NDVIの表示領域を設定し、NDVI値が大きくなるにつれて紫色から黄色を示すようになり、表示領域以下を黄緑色、表示領域以上を水色で示した。この盛土では、宙水生成層に沿って植生が繁茂する傾向が視認できることからNDVI分布を示したが、植生がまばらなため、NDVI値として含水率を推測するまでもないが、裸地の部分（NDVI画像内白線内）にも

NDVI 値に変化が表れている。1 時間後の NDVI 値が最も低い結果となっているが、これは、散水により湿潤状態であった土の乾燥が進行したことが原因であると考えられる。そこで、白線で囲んだ植生のない部分の反射スペクトル特性の時間変化を図-24 に示す。散水直後からの時間とともにスペクトル曲線が上昇していく傾向は、供試体気乾試験と同じあることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、ハイパースペクトルカメラを用いて地盤材料および地盤構造物表面に現れる反射スペクトル特性について検討し、その結果下記のような結論を得た。

- (1) 撮影条件が反射スペクトル特性に与える影響として、光源および撮影対象との位置関係やピント調整の影響を調べた。その結果、撮影条件の違いは無視できないことが分かった。実務で同じ光源下での撮影は難しいことから、画角内での相対的な反射率特性を評価する必要があると言える。
- (2) 供試体気乾試験では、含水率の低下によって反射スペクトル強度が高くなっていく傾向が観測できた。含水率～反射スペクトル強度関係の定量的評価には至っていないものの、含水率低下傾向に変化がある含水比周辺で大きく反射スペクトル強度が上昇することが分かった。含水比の異なる供試体では、ひとつのスペクトル曲線ではなく、経時変化として表すことで試料の保水特性を反映した結果を得ることができるのではないかと考える。
- (3) 実務への適用に当たっては、河川堤防のように明確に土質構造の異なる構造物ではオートラベリングによりある程度の土質分類が可能なること示された。教師データとして画像を集めることで、より確度の高い結果が期待できる。
- (4) 地盤構造物の含水率は植生の生育状況として間接的に推測できると考える。本研究では、実物大盛土の植生状況と含水状態を関連付けようとしたものの、十分な植生の繁茂状況でないため検証は不十分だった。しかしながら、地盤構造物の裸地部の含水状態変化は反射スペクトル特性に現れることが分かった。

参 考 文 献

- 1) perClass 社 HP: <https://www.perclass.com/apps/perclass-mira> (2024.8.11)
- 2) 村瀬颯太, 綱井裕史, 小峯秀雄, 王海龍, 伊藤大知: 近赤外および中赤外光を用いた土の含水比の定量評



図-20 実験盛土と撮影範囲



図-21 散水前の通常画像と NDVI

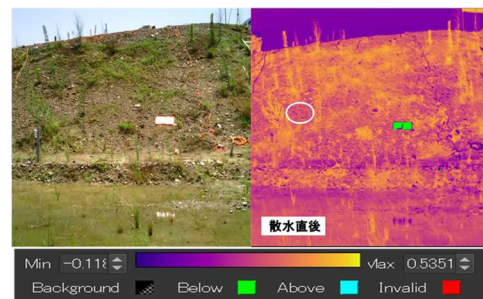


図-22 散水直後の通常画像と NDVI

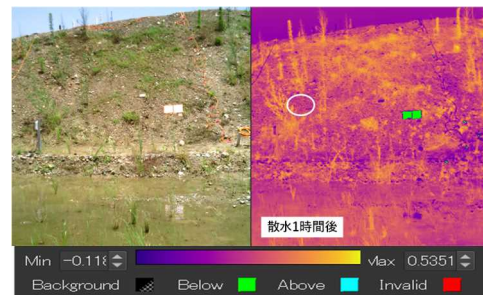


図-23 散水 1 時間後の通常画像と NDVI

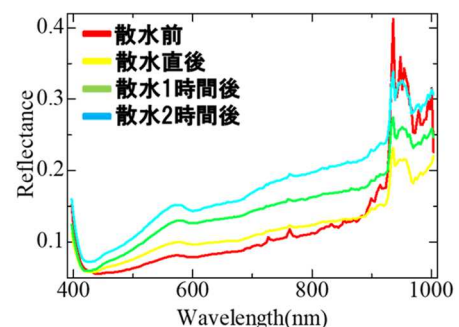


図-24 時間毎の反射スペクトル特性

価の試み, 第 58 回地盤工学研究発表会講演概要集, 12-11-3-01, 2023.

- 3) 山下慧, 熊谷丈瑠: 近赤外線吸収スペクトルを利用したスメクタイトの定量評価技術の開発, 第 78 回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-400, 2023.
- 4) 吉野修, 黒田卓也: 近赤外線を用いた含水比測定装置の開発-現場屋外用装置の開発と手法の確立-, 第 78 回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-404, 2023.

著 者

河井 克之	所員, 博士(工学), 地盤工学
中島 晃司	近畿大学, 博士(工学), 地盤工学
澤野 命	東洋建設, 修士(工学), 地盤工学
吉田 英昭	近畿大学大学院, 修士(工学), 地盤工学