

エジプト大スフィンクス修復・保存調査への 電気探査の応用

谷本 親伯¹・國井 仁彦²・大友 謙³・小宮 国盛⁴

¹正会員工学博士 大阪大学大学院教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

²正会員 工学修士 (株)ニュージェック 取締役 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

³正会員 工学修士 (株)ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

⁴正会員 日本振興(株) 取締役調査事業部長 (〒590-0535 泉南市りんくう南浜 3-2)

世界の貴重な文化遺産であるエジプトの大スフィンクスは、現在著しい風化・劣化が進んでいる。筆者らは、大スフィンクスの修復・保存のため風化・劣化の原因となる地質・気象・岩盤と大気間の水収支等を解明するため、種々な現地調査を実施している。本論文では、遺跡の風化・劣化調査への電気探査(比抵抗法)の適用について検討した。その結果、比抵抗の時間変化から、岩盤内の水分の分布および移動が把握できた。

Key word : Great Sphinx, weathering of limestone, electrical prospecting, monitoring, Finite Element Method.

1. 緒言

考古学における物理探査の利用は、1929年イギリスのCrawfordによる写真判読に初まり、1946年イギリスのClark他による電気探査、1974年頃の磁気探査さらに、1982年の電磁レーダー法の火山灰地における遺跡調査と種々の方式が用いられてきた¹⁾。

これらの方法は地表付近の表土と遺跡の境界面または埋設金属等の調査であり、発掘調査前の予備調査と位置付られ、非破壊的な調査としての期待が高まりつつある。坂山によれば遺跡調査に用いられる各物理探査手法の現地への適用性については、以下のように述べられている²⁾。

電気探査は、地表電極を多数使用するため作業性に問題があるが、測線に沿った比抵抗断面を把握することができ、対象に応じた十分な探査深度が得られる。

電磁探査は、電気探査と比較すると地表に電極を設置する必要がないことから作業性がよく、地下浅部の平面的な探査に適している。また、地下に金属物のような良導体がある場合は電磁誘導現象により異常が検出しやすい。しかし、地表に低比抵抗層が存在する場合には、探査深度が浅くなる。

電磁レーダー法は、反射面の起伏の変化や反射体の分布を直接的に把握することができる。適用できる深度は通常2m以浅であるが、粘土地盤などのように電磁波の

減衰の大きい地盤では十分な探査深度が得られない^{3), 4)}。

一方、今回の修復・保存調査のように、岩盤を対象として、風化・劣化の原因調査のために電気探査を用いた例は見当たらない。

1995年1月19日～1995年1月23日の期間で実施した第1次調査のなかで、電気探査測定班は電気探査が現地で適用できるかどうかの予備調査を実施した。

予備調査の結果、スフィンクス地点の岩盤の比抵抗はスフィンクスの北側の測線で平均約140Ωm、南側の測線で平均約40Ωmと極めて低い比抵抗を示すことがわかった。

図-1に示すように、岩石の比抵抗は亀裂の状態、狭在物の有無、風化の程度等により、同一岩種であっても広い範囲の比抵抗値を示し、石灰岩では、図-1によれば、数Ωm～数千Ωmの値である⁵⁾。

一方、測定時の留意点として、地表面は乾燥しているため接地抵抗が高くなる可能性があり、長時間の計測には電極に工夫がいることが想定された。

また、過去のアメリカの調査隊の調査結果から、電磁レーダー法の探査深度に限界があることが報告されていた⁶⁾。

1995年7月22日～1995年8月6日の期間で実施した第2次調査では、第1次調査の結果をうけて、遺跡の風化・劣化の原因を地下水分の移動と考え、その水分量

の変化を連続的な測定により把握し、気象データ等と対比しつつ、水分の移動と広がりについて検討を行った。

また、調査方法の選定にあたっては、電気探査（比抵抗法）が既往の電磁レーダー法より深部の測定が可能であること、同一測線に対して連続モニタリングが自動的にできる等の点で有効と考え、電気探査（比抵抗法）を用いる事とした。また、接地抵抗の低減をめざし、現地に適応する電極を新たに開発した。

解析方法は、文献 17) で開発し、さらに発展させた 3 次元有限要素法を用いた。その理由は、スフィンクスピット内は 3 次元的影響が考えられ、また地下に遺跡が存在する可能性があったことと、今後 3 次元的な計測を行う可能性があることの 2 点である。

1997 年 6 月 2 日～1997 年 6 月 23 日の期間で実施した第 3 次調査では、第 2 次調査で得られた比抵抗の日変化と地中の水分量の変化を検証するため、比抵抗測定のための測線の中央部に埋設した温湿度センサの時系列データと比抵抗測定結果を用いて、比較・検討を行った。

2. 大スフィンクスの現状

約 4500 年前、エジプト・ギザに建造された大スフィンクスは、近隣のピラミッド群とともに世界の貴重な文化遺産である。この大スフィンクスは、ピラミッド建造時に石灰岩ブロックを産出した台地を掘削してできたものである。比較的地質年代の若い始新世の海成石灰岩層を刻んだもので、約 200 年前、ナポレオンのエジプト遠征時には首まで砂に埋まっていた。

全身が掘り出された現在、著しい風化・劣化が認められ、これを維持・管理するエジプト考古庁をはじめ、関係諸機関では現状のまま放置することはきわめて危惧的な状況であるとの懸念が高まっている。

大スフィンクスの風化・劣化調査は、各国の調査隊で実施され、例えば、アメリカのルイスビル大学では岩石学的、および地質学的見地から、石灰岩の耐久性および風化・劣化のシステムについて検討されていた^{7)~11)}。

筆者等は、大スフィンクスの風化・劣化に対して、石灰岩の耐久性のみならず地質構造および岩石力学的見地から、現状の分析および将来の対策について検討し、多面的な学術調査の必要性を提案してきている^{12)~14)}。

3. 大スフィンクス保存調査

(1) 地質概要

大スフィンクスは、ゆるく傾斜した堆積地盤を削ったものであり、その大きさは、高さ 20m、底部の幅 15m、胴体部の長さ 55m であり、前脚を含めて 74m である。南北約 30m、東西約 100m のピット内に位置する。

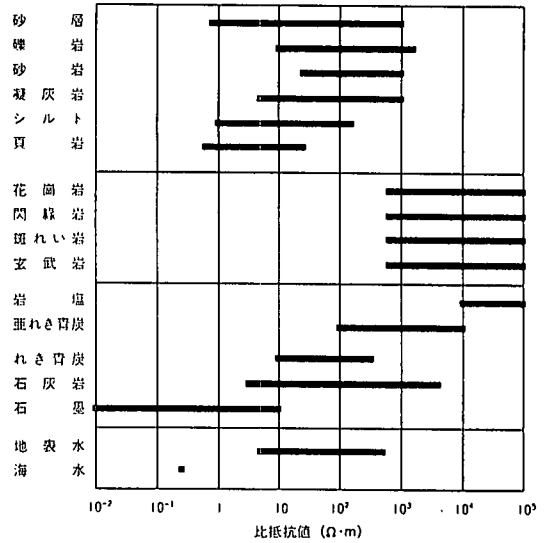


図-1 岩石の比抵抗値⁹⁾

大スフィンクスの材質は始新世のマーディ層と呼ばれる石灰岩であるが、ピラミッドの表面や内部の空洞部の天井や壁面に使用されたモカラム層の石灰岩に比べ、少し年代が若く脆弱である。

約 7～8 千万年前より海底で生成され始めた石灰岩は、5 千万年前頃地殻変動により隆起し、陸地になった。生成期間が短く構成粒子の結合力も弱い。ギザ台地には明瞭な褶曲運動による潜在的亀裂が多数発生していることに加えて、含有される塩分が、新たな水分の浸食により溶出し、次に水分が消失すると石灰岩層の多数の微細な空隙の中で再結晶化し、これに伴う膨張現象が内部破壊を促進している¹⁵⁾。

(2) 自然環境

一般に、ギザ台地はきわめて乾燥した砂漠地帯と考えられているが、観測結果から地下水位が高く、また冬期の早期では気温が 0℃近く、湿度がほぼ 100%であることがわかっている。そして、日中の気温の上昇とともに大気中の湿度は 30～40%位に低下する。そして、日没後気温が低下し、大気中の水分は霧となり、地下からの水分が地表面に漂い高湿度状態に戻り、岩盤表面および、スフィンクス表面にも結露が見られる。日夜、乾燥・湿潤状態が繰り返されている。

地表面付近では拘束圧がほとんど 0 になることから、亀裂や空隙は開口する傾向が助長され、伸展した亀裂や空隙の連結により表面から薄片状に剥離を繰り返す。特に、スフィンクスの首の部分でこの現象が著しい。

次にギザ台地は、広大な台地であることから、強風が吹くことが多い。スフィンクスの形状から頭部周辺で渦流を発生し、浮流する砂と共に表面を研磨する状態となる。

最後に、ギザ台地の地下水面の高さとエジプトの寒暖の激しい一日の気温変化から、地表面や地表近くではスレーキング現象が起こっていると考えられる。

このように、エジプトの遺跡は厳しい自然環境条件下にある石灰岩などの堆積岩を基盤とする岩石構造物である。したがって、岩石材料のさまざまな風化・劣化に対する特性と、風化・劣化の原因となる気象・地下水挙動および水収支を解明することは、スフィンクスなどの古代遺跡を修復・保存していく上で重要である。

(3) 調査の概要

本修復・保存調査では、大スフィンクスの風化・劣化の原因状況およびそのメカニズムを解明し、今後の修復・保存に貢献するため以下の現地調査を実施した。

- I) 地質踏査および鉱物分析
- II) 自然環境調査 (気温, 温度, 日射量, 風向, 風速 等)
- III) 熱赤外線映像法 (大スフィンクス表面温度計測)
- IV) 水収支計測
- V) 電気探査

以下に、非破壊調査の一つである比抵抗法電気探査を用いて、大スフィンクスの風化・劣化の主要因と考えられる地盤内の水分変化について検討した結果について述べる。

4. 大スフィンクス修復・保存調査への比抵抗法電気探査の応用

(1) 調査の目的および内容

大スフィンクスの風化・劣化の主たる原因は、塩類の溶脱、スレーキングなどが挙げられている。これらの風化・劣化現象では岩盤の内外を移動する水分が重要な役割を果たしている。そのため、大スフィンクスの風化・劣化現象を解明するためには、岩盤内の水分の分布および岩盤内の水分の移動量の日変化、季節変化、年変化さらに長期的経年変化を調査することが必要である。

上記の必要性から、大スフィンクス修復・保存調査の一項目として、比抵抗法電気探査を用いることとした。

比抵抗法電気探査を用いた主な理由は次の4点である。

- I) 岩盤の含水状態と比抵抗との間に密接な関係がある¹⁰⁾。
- II) 測定が比較的容易でかつ、繰り返し測定が可能である。
- III) 以前にギザ地区で実施された電磁波法では、数mまでの探査深度しかなく、今回はさらに深部の岩

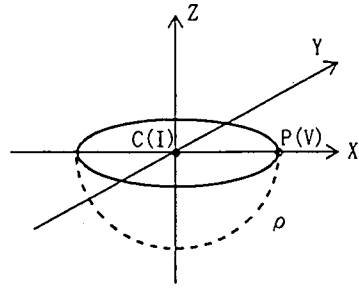


図-2 点電流源まわりの半球面上の電位

盤状況の把握を目指した。

- IV) 大スフィンクス及びその周辺はすべて遺跡であり、非破壊調査のみ許可されている。
- V) 解析は3次元有限要素法を用いた。本来、地下構造が3次元であっても、従来は2次元(準3次元)で行われている。一方、筆者らは3次元解析コードを開発し¹¹⁾、3次元の測定も考慮した解析を目指している。

(2) 比抵抗法電気探査の概要

図-2に示すように、均質等方の半無限媒質の表面に点電流源Cがあり、点電流源Cから電流I(A)がすべての方向に流れ出しているものとする。媒質の比抵抗を ρ (Ω m)とすると、Cを中心として、半径r(m)の半球面上の電位Vは、

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

で表される。したがって、媒質の比抵抗 ρ は、

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \quad (2)$$

また、媒質表面の複数の点電流源を C_1, C_2, \dots, C_n とし、それぞれの電流を I_1, I_2, \dots, I_n とする。

点Pの電位Vは、重ね合わせの原理から、 C_1 P間の距離を r_1 とすると、

$$V = \frac{\rho}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i} \quad (3)$$

で表される。したがって、媒質の比抵抗 ρ は次式で求められる。

$$\rho = \frac{2\pi V}{\sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i}} \quad (4)$$

比抵抗法電気探査は、一対の電流電極を用いて大地に電流を流し込み、他の一対の電位電極を用いて電位差を

測定し、これらの値から媒質の比抵抗を探索する方法である。電流電極と電位電極の配置方法によって、Wenner法、Eltran法（Dipole-dipole法）、Schlumberget法等の四極法と、二極を遠方に設置する二極法等がある。

四極法は4つの電極間隔を一定あるいは広げながら電極系（4本の電極）を測線上で移動することにより、測線方向および深度方向の比抵抗の分布を探索する方法である。

今回の測定は、ピット内に制限されたため、遠電極の設置が困難であり、一対の電流電極と一対の電位電極を一直線上に等間隔に配置する4極法を採用し、Wenner法とEltran法の2種類の電極配置を用いて最小電極間隔1m、SS測線のみ0.5mで自動測定を行った。

(3) 電気探査結果の解析

a) 測定方法

今回実施した電気探査（比抵抗法）の測線の配置を図-3に示す。また、写真-1に示すようにスフィンクスピット底面は平坦である。

N測線、S測線、SS測線およびNS測線は地下の比抵抗構造を求めるための測線で、地表から深度12m付近までの範囲を対象として測定を行った。

一方、SC測線における48時間連続測定は、地表から深度5mまでの範囲を対象とした比抵抗の時間変化、すなわち地下の水分量の変化を求めるための測定である。今回は同一測線上で約2時間間隔、合計48時間の繰り返し測定を行った。

次に、測定に用いた電極は、ピット内の地盤が早期に湿潤状態にあることから、電極接地部分の環境の変化を最小限にとどめ、さらに接地面積（φ10cm程度）を確保し、接地抵抗を下げるため、地盤上にアルミホイールを敷き、スポンジで押さえる構造とした。

b) 解析概要

地表で計測された比抵抗は地下構造個々の比抵抗（以下、真の比抵抗と呼ぶ）ではなく、複雑な地下構造すなわち地下構造の形状、および真の比抵抗値と地形の影響、電極特性の影響を反映した包括的な値（以下、見掛け比抵抗と呼ぶ）である。

したがって、真の比抵抗の分布を求めるためには、地形の影響、電極特性および推定した地下構造をモデル化し、順解析により見掛けの比抵抗を求め、解析値と測定値を比較することにより、測定値と一致するような地下構造モデルを決定する必要がある。

筆者らは、二極法電気探査結果のインバージョン手法について以前に報告した¹⁷⁾。しかし、今回は調査範囲がピット内に制限されたため、遠電極を必要としない四極法を用いた。

四極法電気探査の見掛け比抵抗から真の比抵抗を求め

る方法は、以下の通りである。

まず、Wenner電極配置で測定した見掛け比抵抗から、電極配置固有の地下構造に対する応答特性を考慮しながら地下の真の比抵抗分布を推定し、次に、この比抵抗地下構造モデルの順解析から求めた見掛け比抵抗（解析値）と測定値を比較しながら比抵抗地下構造モデルを逐次修正する方法を用いた。

さらに、Wenner電極配置によって決定した比抵抗地下構造モデルを用いて、もう一方の電極配置（Eltran電極配置）による見掛け比抵抗（解析値）を求めて、Eltran電極配置による測定値との比較により比抵抗地下構造モデルの検証を行った。

測線は2次元であっても、測定した電位は地形や地下の遺跡等による3次元の影響を受ける可能性も考えられたことから、順解析には3次元有限要素法を用いたが、地形はピット内が平坦かつ測線に近接する構造物がないことから、平面としてモデル化を行った。図-4(a)に有限要素法のモデル図を示す。図-4(b)は解析結果と測定結果の見かけの比抵抗値である。推定した比抵抗地下構造モデルの順解析から求めた見掛け比抵抗（解析値）と測定値はよく一致し、推定した比抵抗地下構造モデルは地下の真の比抵抗を反映していると考えられる。

c) ピット内の地質分布

スフィンクス地点の石灰岩層はメンバーIとメンバーIIに大別できる。

ピット底面およびピット壁面の地質観察から、ピットの南東部分はメンバーIIと呼ばれる地層の露頭が存在し、その走向はN60°E、傾斜は6°Sである。メンバーIIの下方は不整合面を挟んでメンバーIの露頭が存在し、ピット底面の大部分はメンバーIに属する。また、スフィンクスの胴部は大部分がメンバーIIに属している。

メンバーIは、灰色、塊状の造礁性石灰岩（bioherm limestone）、いわゆる珊瑚礁そのものであり、メンバーII中の硬質石灰岩（biomicrite）と同様に硬質である。

メンバーIIは、硬質石灰岩、中硬質石灰岩および軟質石灰岩の互層からなり、硬質石灰岩は化石に富み、海水中での沈殿により直接堆積したものであり、緻密で風化耐久度は高く透水性は低い。一方、軟質石灰岩は風化耐久度が低く、泥質で湿気を帯び、水分の流動を示す褐鉄鉱の縞がよく発達し、層内亀裂も発達している。

d) 比抵抗分布

前項で述べた方法で、実測の見掛け比抵抗分布から真の比抵抗分布を推定し、スフィンクス南側のS測線およびSS測線について検討を行った。S測線およびSS測線の比抵抗断面を各々図-5(a)および図-5(b)に示す。（カラーページ参照。）

電気探査による比抵抗分布と地質観察結果の対比から以下のことがわかった。ここで、測線位置は図-3に示す

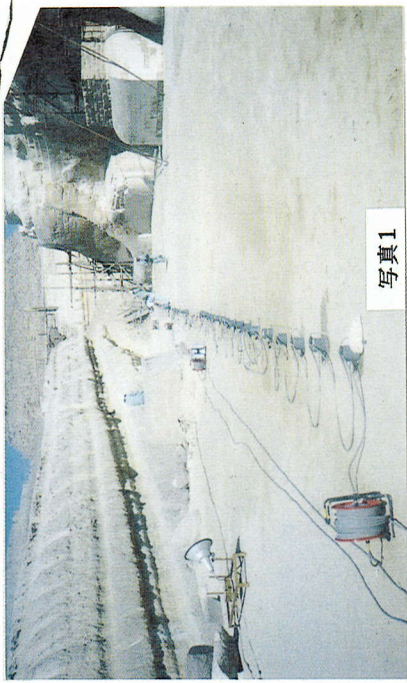
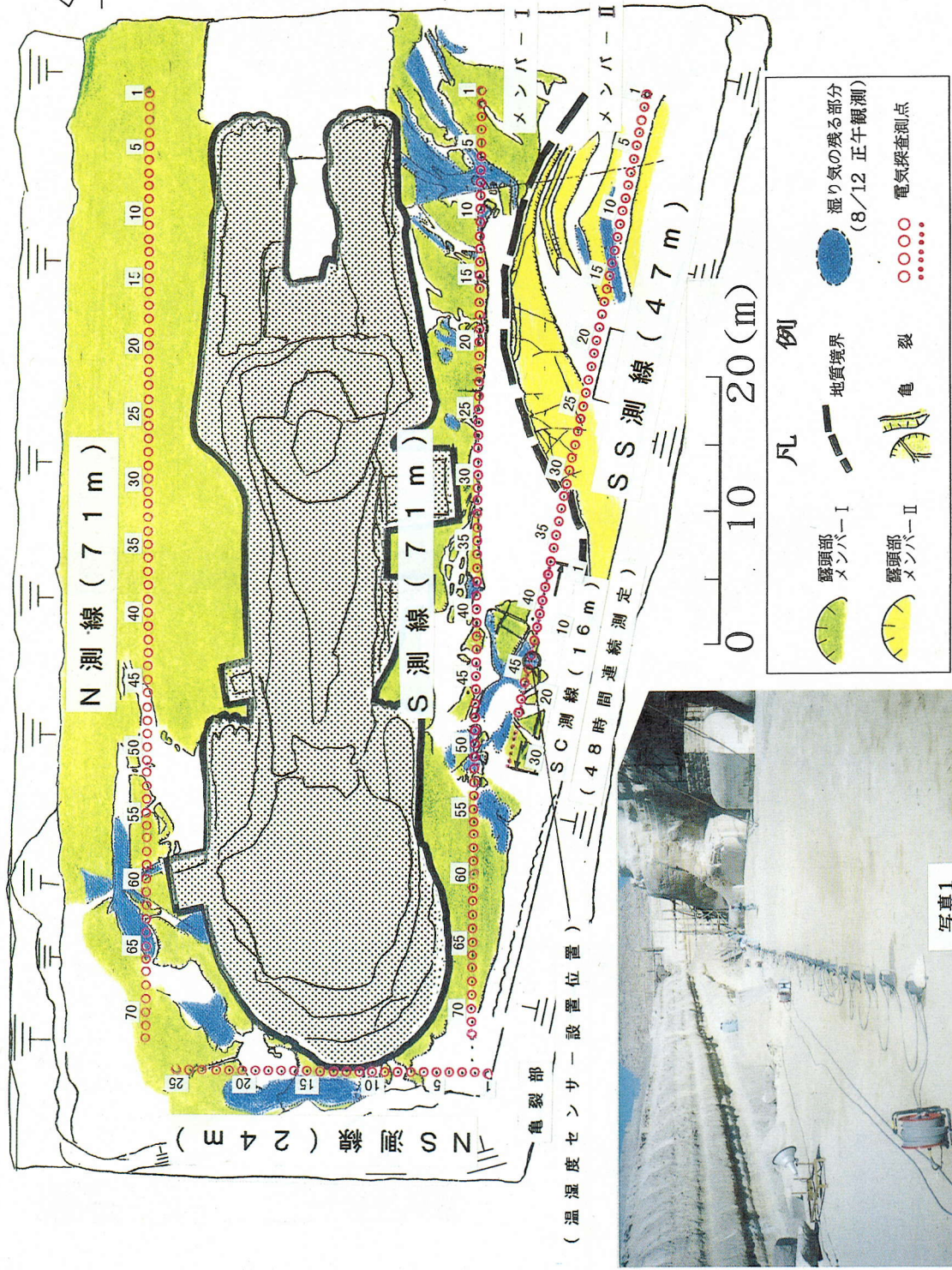


写真1

図-3 スフィングスピット内の測線配置および地質区分

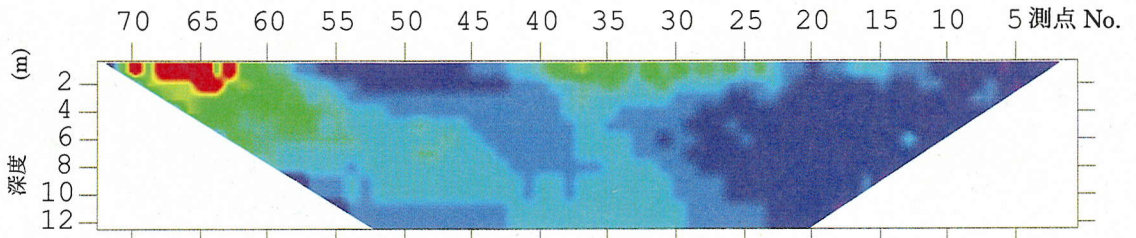


図-5(a) 比抵抗断面 (S 測線)

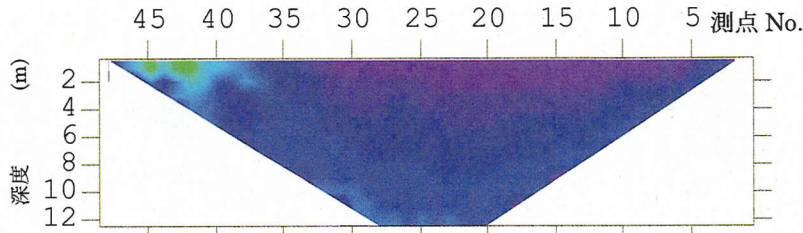


図-5(b) 比抵抗断面 (SS 測線)

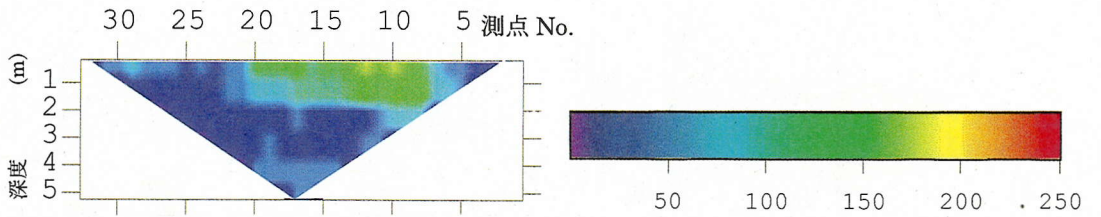
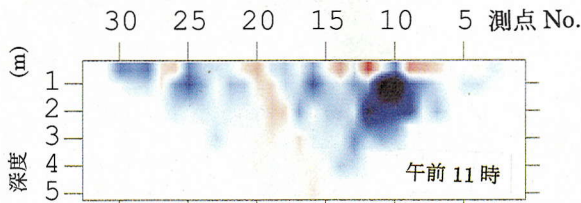
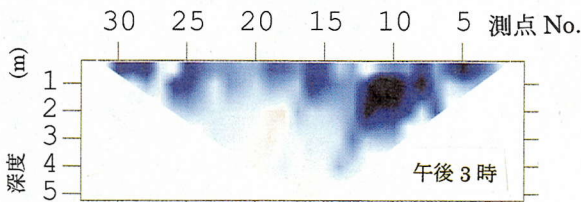


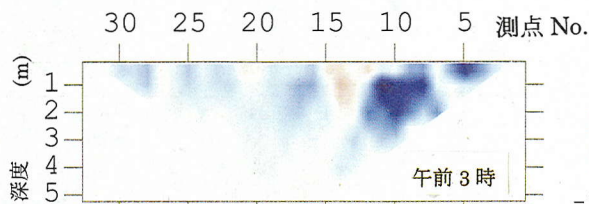
図-5(c) 比抵抗断面 (SC 測線) (午前7時)



午前11時



午後3時



午前3時

$$\text{変化率(\%)} = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0}$$

ρ_i : i時の比抵抗値

ρ_0 : 基準時(午前7時)の比抵抗値



図-6 見掛比抵抗の変化率分布 (SC 測線)

(%)

とおりである。

- ① S測線は、メンバーI上の測線であるが、S測線の比抵抗断面の測点45から測点55の細かい亀裂部を挟んで東側へ傾斜する構造が見られる。
- ② SS測線は、メンバーIとメンバーIIを通る測線であり、メンバーIの地層内(測点1~32)では全体的に低い比抵抗を示す。
- ③ S測線では、砂で覆われた部分(測点25~40)の表層付近で100Ωm以上の高比抵抗、一方岩盤のき裂部(測点45~55)で100Ωm以下の低比抵抗を示す。

一方、北側のN測線では、砂で覆われた部分で100Ωm以上の比抵抗を示し、メンバーIの亀裂部の亀裂の多い部分で低い比抵抗を示し、南側測線と同じ傾向である。

e) 比抵抗の時間変化

地下の水分量の変化を把握するための48時間測定に用いる測線の選定にあたり、以下の点に留意した。

まず、昼間の日射量が多いスフィンクスの南側に測線を設置した。次に、地質構造を考慮してスフィンクスを横断するNS方向の連続性の亀裂が存在し、岩盤の亀裂部と砂部の両方を含む測線とした。

また、地表付近の水分量の微妙な変化にも対応できるように、電極間隔は他の測線の半分の50cmピッチとした。

SC測線(48時間測定)断面の比抵抗分布を図-5(c)に示す。

この断面の比抵抗分布の時間変化を見るために、午前11時、午後3時および翌日の午前3時の見掛け比抵抗から、第2日目の午前7時の見掛け比抵抗に対する変化率を求めた。

変化率は次式で定義する。

$$\text{変化率 (\%)} = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0}$$

ここに ρ_i : i時の見掛け比抵抗値

ρ_0 : 基準時(第2日目の午前7時)の見掛け比抵抗値

変化率の分布を図-6に示す。見掛け比抵抗値を用いたため、地下の真の比抵抗とは多少異なるものの、以下の傾向が見られた。

- ① 比抵抗の変化率の時間変化に着目すると、比抵抗の減少範囲が午前11時から午後3時にかけて広がり、午後3時から翌朝3時にかけて縮小する。
- ② 比抵抗の変化率が10%以上の範囲は測点10、測点15および測点25付近に存在するが、午前3時には測点10付近以外は消滅する。一方、測点10付近を除く深度2m以深の範囲は比抵抗の変化が小さい。
- ③ 地表観察結果(図-3)を参照すると、測点10付近

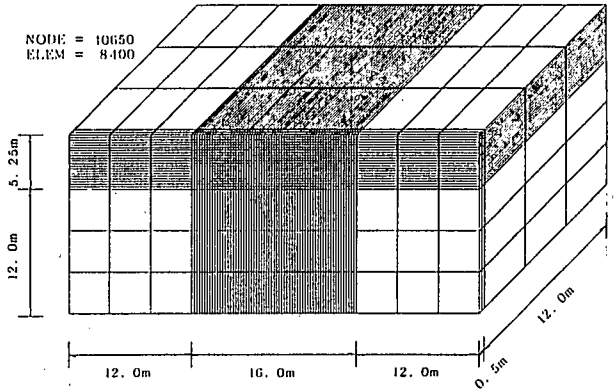


図-4(a) 有限要素モデル

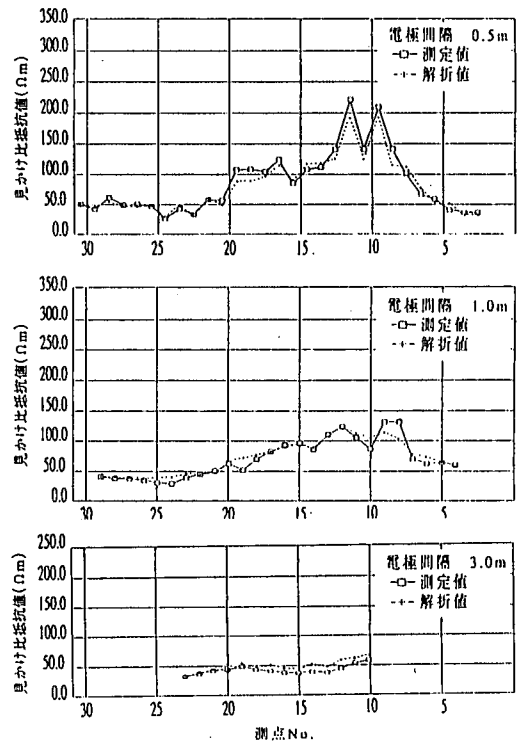


図-4(b) 見掛け比抵抗の比較(測定値/解析値)

は砂で覆われた部分、測点16付近は亀裂、測点20付近は岩盤の露頭と対応し、露頭では比抵抗の変化が小さいことが分かる。

5. 地中の水分量と比抵抗

(1) 地中の水分量測定

図-3に地中水分量の測定地点を示す。測定地点は、48時間比抵抗測定の見掛け比抵抗測線(SC測線)の中央部で、スフィ

ンクスを東西に分別する大きな亀裂部にあたり、この亀裂周辺は最も風化が進行している部分の一つである。

測定位置は、風によって運ばれてきた砂が亀裂上に20cm以上の深さに堆積している。水分量の測定を行うにあたり、測定地点の砂を深さ15cmまで除去し、温湿度センサを水平に設置して再び砂をかぶせた。

センサの設置深度は-15cm、-10cm、-5cm、-1cm、-0.3cmとし、また地表面直上の+0.5cm、+1.5cm、+50.5cmにも温湿度センサを設置した。センサ配置の概略図を図-7に示す。

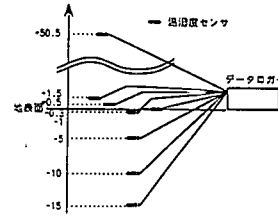


図-7 温度センサ設置概略図

(2) 温度の時間変化

図-8に各設置位置ごとの温度の時間変化を示す。

比抵抗法電気探査と同時に別途実施した温度の時間変化についての詳細は文献18)に示しているが、-15cm～+50.5cmの範囲で温度の日周期の変化が見られる。地表面(-1cm)の温度は一日のうちで23°Cから50°Cまで変化し、変動幅が大きいのにに対し、深度が深くなるにしたがい、温度変化の幅は小さくなる。

また、深度が深くなるにしたがってピーク時間が遅れる傾向が見られ、-5cmで2時間、-10cmで3時間、-15cmで5～6時間程度の遅れが生じている¹⁸⁾。文献18)によれば、大気中の温度は風速によって変動しており、-1cmの温度変化も、ほとんど大気中の気温とほぼ同様の変化を示し、その影響が及んでいることが認められる。

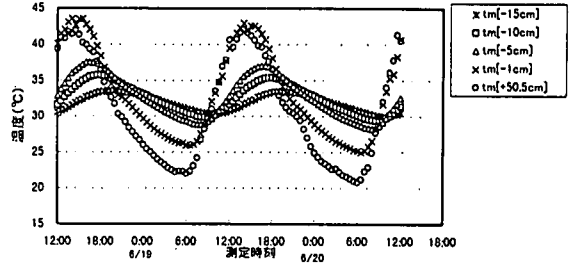


図-8 温度の時間変化

(3) 相対湿度の時間変化

図-9に各設置位置ごとの相対湿度の時間変化を示す。

-5cmおよび-10cmでは湿度が全体的に増加傾向にあるが、これはセンサを設置してからの経過時間が短く、土壌中の湿度状態が十分に安定していなかったためである。ただし、6月20日には湿度の増加はほとんど無くなっており、これ以降大幅に変化することはない。

地表面下では、-1cmでは大気中と同様に明確な日周期をもつて変化する。一方、-5cm以深では、相対湿度は1日を通して顕著な変化を示さない。

以上から、地表面のごく表層部の相対湿度は大気中の湿度状態と密接な関係を持ち、日周期的な乾湿を繰り返すのに対して、表層部以深では、大気中の湿度状態の影響は小さくなり、日変化はほとんどなくなる。

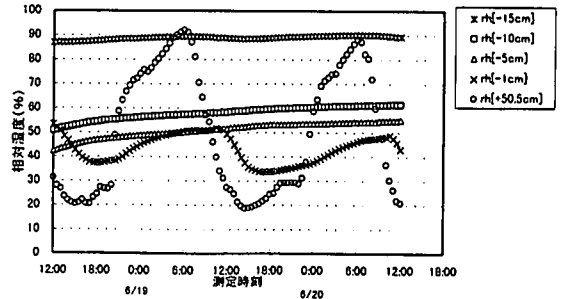


図-9 相対湿度の時間変化

(4) 絶対湿度の時間変化

図-10に各設置位置ごとの絶対湿度の時間変化を示す。

絶対湿度は、-5cm以深ではサインカーブ的ななめらかな日周期的な変化を示し、絶対湿度は-15cmで最も高く、-10cm、-5cmと浅くなるにしたがって低くなる。一方、振幅は-15cm、-10cm、-5cmの順に大きくなる。

ピークの時間は-5cmで16時ごろ最大となり、8時ご

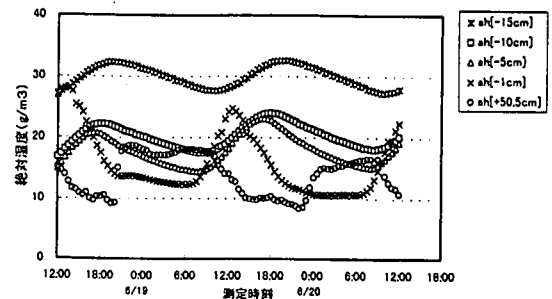


図-10 絶対湿度の時間変化

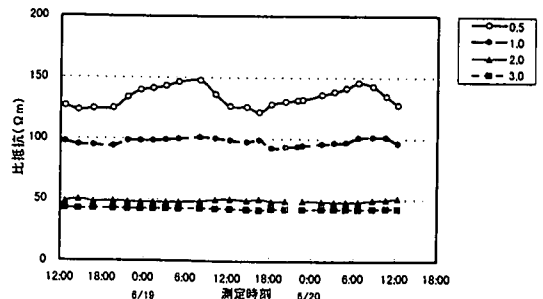


図-11 見掛け比抵抗の時間変化(き裂部)

る最小となるのに対し、-15cm ではピークが 2 時間程度遅れる傾向がある。

(5) 絶対湿度と比抵抗

一般的に、岩盤の比抵抗は岩盤を構成する岩石自体の比抵抗と岩盤内の間隙および間隙内に含まれる水や粘土等の狭在物の比抵抗により決まる。

スフィンクス地点付近の井戸で採取した水の比抵抗は 11~12Ωm と非常に低い値を示した。岩石自体の比抵抗に比べて水の比抵抗が低いことから、岩盤内の比抵抗の変化は岩盤内の水分量を示す指標と考えられる。

図-11 に 48 時間連続測定時の中央部（温湿度センサ設置地点周辺）の電極間隔 0.5m, 1m, 2m および 3m の見掛け比抵抗の時間変化を示す。見掛け比抵抗の時間変化と絶対湿度の時間変化の比較から、以下のことが言える。

- ①見掛け比抵抗値は午前 8 時ごろ最大値を示し、午後 4 時~6 時ごろ最小値を示す日周期的な変化を示す。一方、絶対湿度は-10cm のセンサの場合、午前 8 時ごろ最小値を示し、午後 6 時ごろ最大値を示す。また、-15cm のセンサの場合、-10cm の場合より約 2 時間程度遅れを示す。
- ②地中の水分が増加すると比抵抗は低下すると考えられることから、見掛け比抵抗値は、地中の水分の増減を示していると考えられる。
- ③見掛け比抵抗値は電極間隔を広げるほど地下深部の影響を受けると考えられる。図-11 から、比抵抗値は電極間隔が広がるほど低い値を示す。このことは、絶対湿度が-5、-10、および-15 cm の順に高くなることと対応し、地中の深部ほど水分が多く含まれることを示している。見掛け比抵抗値は電極間隔が 2m 以上になると、40Ωm 付近の値に収束している。

(6) 地中の水分量分布の考察

図-12(a)および図-12(b)に各々見掛け比抵抗分布の最小値と最大値を示す。

測定結果（●印）は電極間隔 2m 以上では約 40Ωm で一定の値を示し、電極間隔 1m 以浅で増加し、電極間隔 0.5m では 121~147Ωm の値を示す。

この見掛け比抵抗の分布から地下の真の比抵抗分布を推定するため、地盤を水平二層および水平三層構造モデルを仮定し、3次元有限要素法で解析検討を行った。

まず、水平二層構造を仮定した場合に得られる見掛け比抵抗（△印）は電極間隔 1m 以深で測定値とよく対応するものの、電極間隔 0.5m で測定値より大きくなる。このことは表層付近に低比抵抗層が存在することを示唆している。

次に、表層付近に低比抵抗層が存在する水平三層構造

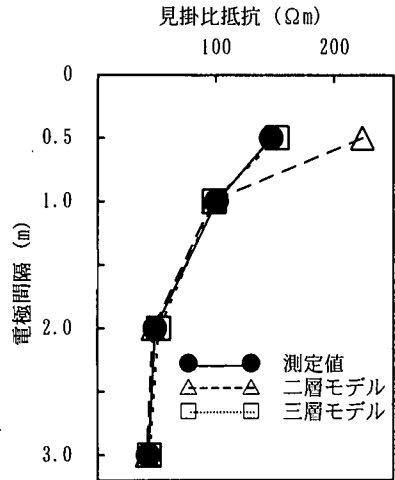


図-12(a) 見掛け比抵抗分布（最大値）

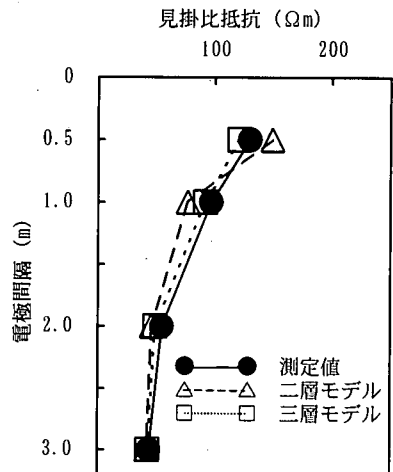


図-12(b) 見掛け比抵抗分布（最小値）

$\rho_1 = 130$	$\rho_1 = 100$	$d = 0.25m$
$\rho_2 = 280$	$\rho_2 = 280$	
$\rho_0 = 40$		$d = 0.25m$

(単位 Ωm)

図-13 比抵抗構造モデル

モデルを仮定した。このモデルから得られる見掛け比抵抗分布（□印）は、図-12(a)、図-12(b)ともに測定値とよく一致した。

これらの水平三層構造モデルを図-13に示す。

測定結果と計算モデルとの比較検討から以下の知見が得られた。

- ①測定結果から、電極間隔 2m 以深の比抵抗が一定値

を示すが、解析結果からその深度は地表から 0.5m と推定される。

②測定結果と計算モデルの対比から、表層付近に低比抵抗層が存在し、その深度は地表から 0.25m と推定される。また、その比抵抗値は測定値の最小値と最大値に対応して 100~130Ωm と推定される。

③地表から 0.25m の間に低比抵抗層が存在し、比抵抗が 100~130Ωm の間で変化することは、地中に埋設した温湿度センサの測定結果にもとづく地中の絶対湿度の分布および地表での結露およびその分布の地下への浸透ともよく対応している。

地中の水分の変化がどの範囲にまで及んでいるか、季節的な変化があるのか、この傾向がピット内全体について言えるのかどうかについては、今後の調査により解明していく予定である。

6. 結 言

大スフィンクスの修復・保存の問題は、厳しい自然環境条件下にある石灰岩などの堆積岩を基礎とするエジプトの岩石構造物共通の問題であり、世界的文化遺産をいかに守っていくかという全世界的問題である。したがって、岩石材料のさまざまな風化・劣化に対する特性、風化・劣化の原因となる気象・地下水挙動等の自然環境の多方向からの調査・研究が望まれる。

今回の比抵抗法電気探査の調査は、大スフィンクス地点の基礎岩盤の地質構造の把握と大スフィンクスの風化・劣化の一因と考えられる岩盤内の水分の移動を把握するため、4 測線での比抵抗断面の推定と同一測線での 48 時間連続測定を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

①大スフィンクスのピット底面の岩盤内の比抵抗分布から、岩盤内の比抵抗は大きく 2 つの部分に分かれ、地質班で調査を行ったメンバー I 層とメンバー II 層と対応づけられる。

②同一測線での 48 時間連続測定の結果から、同一場所での比抵抗の日変化が見られ、気象データにもとづく大気中の水分の移動とも相関がある。

すなわち、部分的に大スフィンクス内の水分と大気中の水分は日周期で移動を繰り返し、この水分の移動が、寒暖の激しい気温変化とともに大スフィンクスの風化・劣化の一因となっていると考えられる。

今後、さらに詳細検討を行うとともに、広域の水の移動、水分の年周期の変化および、岩石材料の風化・劣化特性等の把握を行い、修復・保存のための検討を行っていく必要がある。

謝辞：限られた期間、酷暑のなか現地計測に協力をいた

だいた舛屋直氏他電気探査班各位、地質調査を担当された岩田修一氏、および岩盤温度調査に労苦のあった穴戸皓一氏他、各位に深甚の謝意を表する。

さらに、修復・保存調査に対し常に暖かい激励をいただき、電気探査の実施にあたり、格別の御理解を示されたニュージェック錦織達郎氏に心より謝意を表する。

参考文献

- 1)西村康：考古学における物理探査の利用の現状，物理探査，Vol.44, No.6, pp.404-411, 1991.
- 2)坂山利彦：各種物理探査による追跡調査例，物理探査，Vol.44, No.6, pp.412-418, 1991.
- 3)西田道夫：地中レーダーの現況，測量，Vol.40, pp.67-74, 1990.
- 4)渡辺広勝：地中レーダーによる追跡調査，写真測量とリモートセンシング，Vol.32, No.4, 1993.
- 5)物理探査学会：図解物理探査，pp.216, 1989.
- 6)Ali Hassan：地球環境の変化と世界遺産の継承，京都大学公開講演会，1996.5.
- 7)Bandyopadhyay,J.K., Yerrapragada,S.S. and Gauri,K.L. : Artificial Neural Networks and Durability of Sphinx Limestone, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.174-177, 1995.
- 8)Chowdhury,A.N. , Punuru,A.R. and Gauri,K.L. : Weathering of Limestone Beds at the Great Sphinx, Environ. Geol. Water Sci., Vol.15, No.3, pp.217-223, 1990.
- 9)Gauri,K.L., Chowdhury,A.N., Kulshreshtha,N.P. and Punuru,A.R. : Geologic Features and Durability of Limestones at the Sphinx, Environ. Geol. Water Sci., Vol.16, No.1, pp.57-62, 1990.
- 10)Punuru,A.R., Chowdhury,A.N., Kulshreshtha, N.P. and Gauri,K.L. : Control of Porosity on Durability of Limestone at the Great Sphinx, Egypt, Environ. Geol. Water Sci., Vol.15, No.3, pp.225-232, 1990.
- 11)Yerrapragada,S.S., Tambe,S.S. and Gauri,K.L. : Fractals, Pore Potential, and Sphinx Limestone Durability, Rock for Erosion Control, ASTM STP1177, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.38-45, 1993.
- 12)谷本親伯：大スフィンクス崩壊の危険，一岩盤力学を中心とした学術調査の役割一，土木学会誌，Vol.79, No.1, pp.8-13, 1994.
- 13)谷本親伯：古代エジプト追跡と断層，第 35 回構造強度に関する講演会，S-13~S-22., 1993.
- 14)Tanimoto,C., Yoshimura,S. and Kondo,J. : Long Term Stability of the Underground Cavern for the Pharaoh and the Deterioration of the Great Sphinx, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.7, pp.1545-1551, 1993.

- 15) 谷本親伯, 岸田潔, 小沼栄一, 森邦夫: エジプト産モカタム層石灰岩の塩害とスレーキング特性, 材料, Vol.44, No.502, pp.862-868, 1995.
- 16) 谷本親伯, 岸田潔, 吉津洋一, 國井仁彦, 大友謙: 岩盤内不連続面の分布性状と比抵抗特性, 第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.281-285, 1995.
- 17) 國井仁彦, 大友謙, 谷本親伯: 岩盤調査への比抵抗法電気探査の適用における基礎的問題, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.11-21, 1997.
- 18) 谷本親伯, 中島伸一郎, 上田敏雄: エジプト, 大スフィンクス地点における水収支-大スフィンクス修復・保存第 3 次調査結果, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.395-400, 1998.

(1998. 2. 2 受付)

APPLICATION OF ELECTRICAL PROSPECTING TO THE RESTORATION SURVEY OF THE GREAT SPHINX IN GIZA, EGYPT

Chikaosa TANIMOTO, Kimihiko KUNII, Yuzuru OHTOMO and Kunimori KOMIYA

At present, the Great Sphinx as one of the most important World Heritages is being seriously subjected to a remarkable weathering and deterioration. Aiming at contributing to the restoration work for the Great Sphinx, authors are carrying out site investigation in order to clarify water budget between the bedrock and the air where weathering and deterioration are taking parts. In this paper, the application of the electrical prospecting (resistivity method) was illustrated. As a result, the distribution and the daily cyclic change of the moisture in the bedrock were confirmed by monitoring the electric resistivity of the rock at the site.