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[†]

谷 本 親 伯* 岸 田 潔*
小 沼 栄 一** 森 邦 夫***

The Salinization and Slaking of Egyptian Mokattam Limestone

by

Chikaosa TANIMOTO*, Kiyoshi KISHIDA*, Eiichi ONUMA**
and Kunio MORI***

The Great Sphinx-Giza, Egypt was carved out of Middle Eocene limestone formations. The upper part of the statue, including the neck and the head, consists of soft and marly formations (named Maadi Formation). They are highly porous and cavernous showing the evidence of having been greatly affected by water erosion. At present, the Great Sphinx as one of the most important World Heritages is being seriously subjected to aggressive deterioration of limestone members.

Since it was not possible to employ any specimen sampled from the immediate site of the Sphinx, it was tried to investigate the process of deterioration of marly limestone in terms of Mokattam Limestone (called Pyramid Stone) which is considered to be a little older than Maadi Formation. In the present study the process of recrystallization of salt substance on limestone surface and the transportation of salt and water through micro-pores were observed for the period of three months. The electron microscopic scanning was used to illustrate the pore-size, pore distribution and recrystallization of salt. The same test as described in this paper is recommended to be applied to the Maadi Formation for the feasibility study on the preservation of the Great Sphinx.

Key words : Mokattam limestone, Salinization, Slaking, Strength, Seismic velocity, Pyramid stone, Great Sphinx

1 緒 言

エジプトの古代遺跡の中で最も有名なものの一つに、カイロ市西方ギザ地区にある大ピラミッド群が挙げられる。その中でも、クフ王の後継者であるカフラー王のピラミッド建造時代に併せて造られたものと考えられている大スフィンクスは、世界的に有名な文化遺産の一つである。その大きさは、高さ約 21 m、基底部の幅約 15 m、前脚を除く胴体部の長さ約 55 m であり、地層が明瞭に確認できることから自然の地盤をそのまま削って造られたものと考えられている。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で確認されるモカタム層の石灰岩に比べ、少し年代が若く、ぜい弱である。約 200 年前のナポレオン遠征時までは、頭部のみ露出し、胴体部は砂に埋もれていた。そのため、本来風化されるはずのものが、長期間の保存状態におかれ現在にいたっている。ところが、200 年前から、全身を掘り起こされたむき出しの状態なので、著しい風化を受けて損傷が激しくなっている。それゆえに、現在、風化・劣化¹⁾に対する修復・保存方法の確立が必要となってきた。

筆者らは、エジプト産堆積岩(特に石灰岩)の風化・劣化の原因を以下のように考えてきた。まず、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³⁾が認められ、向斜軸が存在する。したがって、若い材令の石灰岩層には、褶曲運動による潜在的き裂が多数発生しているに加えて、含有されている塩分が、新たな水分の侵蝕に浸されると溶出し、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。第二に、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。そして最後に、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ものと考ええる。スレーキングとは、風化現象の一つで固結力の低い軟岩にみられる現象で、岩石が乾燥と湿潤を受けた場合に、岩石の構造(結合力)が破壊されバラバラになる現象のことを言う。

このように、エジプトの遺跡は厳しい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、エジプト産堆積岩のさまざまな風化・劣化に対する特性を解明することは、スフィンクスなどの古代遺跡を保存していく上で重要なこととなる。本論文で

† 原稿受理 平成 6 年 10 月 12 日 Received Oct. 12, 1994

* 正 会 員 京都大学工学部土木工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

** 正 会 員 秩父小野田(株)中央研究所 〒285 佐倉市大作, Central Res. Lab., Chichibu-Onoda Co., Ltd., Ohsaku, Sakura, 285

*** (株)熊谷組 〒162 東京都新宿区津久戸町, Kumagai Co., Ltd., Sinjuku-ku, Tokyo, 162

は、遺跡地区を遠く離れたモカタム層からピラミッドを構成するのと同種のエジプト産堆積岩（石灰岩）を採取し、マーディ層（スフィンクス）で発生すると考えられる塩分の再結晶化、スレーキング特性、力学特性に関する実験を行い、エジプト産石灰岩の風化および劣化特性についての考察を行う。

2 塩分析出実験

2・1 供試体の化学分析と物性

塩分析出実験を行う前に、化学分析により供試体（モカタム層）の成分を調査した。Table I に示すように、主成分がカルサイト（92.7%）で、ドロマイトは1.8%であった。供試体の NaCl の量は 0.079% である。岩石の物性として、単位体積重量 19.40 kN/m^3 、一軸圧縮強度 18 MPa 、透水係数については、トランジェントパルス法⁴⁾を用いて行い、層理面直交方向 $1.6 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ および平行方向 $3.6 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ という値を得た。

Table I. Chemical composition of Mokkatam Limestone.

Heat loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
43.0	2.3	1.0	0.7	52.5	0.4	0.08	0.05
Total	S	Cl	Dolomite ¹⁾	Calcite ²⁾	NaCl ³⁾		
100.03	0.04	0.048	1.8	92.7	0.079		

Note 1) Assumed that all MgO form Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

2) Assumed that CaO of Calcite (CaCO_3) is 51.9%, a remainder which total quantity, 52.5%, of CaO is subtracted by 0.6% of CaO corresponding to Dolomite.

3) Assumed that all amount of Cl form NaCl.

2・2 塩分析出実験

供試体にも塩分が含まれているが、実際の石灰岩表面での析出状況を想定すると、塩分を供給する岩石ブロックは、小さくとも 0.5 m^3 以上であり、水分が岩石内部から表面へ移動する限りは、塩分の供給源は減少することはない。そこで、 $35 \times 35 \times 105 \text{ mm}$ の角柱供試体を2等分し、1個を蒸留水、もう1個を食塩水（濃度 NaCl $0.79 \text{ g/100 ml H}_2\text{O}$ ）に下端面を浸し、上端面を扇風機により通風状態に露出した。容器から溶液が蒸発したり、また、供試体の側面から蒸発がないよう、ビニールシート、ビニールテープ、パラフィンを用いて密封した。なお、供試体は、層理面が水平になるよう設置され、容器内の圧力が大気圧を保持するようピンホールを設けた。Fig. 1 に示すとおりである。

2・3 塩分析出実験結果

試験当初に次のことが判明した。まず、水面と水分蒸発面が近いと蒸発面が湿った状態となって結晶が成長しにくくなるため試料をできるだけ水中より引き上げた。塩分結晶は細長く成長し、強く風を当てると簡単に飛散するため、風を弱くした。

この状態を3ヶ月間継続した結果、得られた塩分析出状態がFig. 2 に示すものである。再結晶層の厚みは食塩水で5 mm、蒸留水で1 mmであった。なお、今後食塩水および蒸留水を使用した試験をそれぞれ Test A および Test B と呼ぶことにする。

Fig. 1. Experimental set-up of separating salt.

Fig. 2. Accumulation of salt after 3 months.

つぎに、電子顕微鏡（日立製作所製電解放射形走査顕微鏡 S-4100）を用いて、塩分の析出した表面を観察した。Fig. 3(a)~(f) および Fig. 4(a)~(f) に Test A および Test B の結果を示す。Fig. 3 および Fig. 4 に共通して、(a)~(c) に供試体表面に析出した塩分の結晶を異なる倍率（80、200 および 5000 倍）にて示した。

Test A（食塩水）および Test B（蒸留水）ともに NaCl の結晶が顕著に認められ、特に前者の場合は石灰岩の空隙から押し出されてきたように明瞭な針状の結晶を見せている。一方、Test B（蒸留水）の場合は、針状結晶は認められないが、石灰岩中の空隙を通過した溶液が表面で蒸発し、通過してきたとみなされる空隙の開口部付近に析出していることが明瞭に分かる。5000 倍の倍率で観察すれば、Test A および Test B ともに析出したものが NaCl であることは瞭然である。

さらに、塩分の供給された空隙を確認するため、表面に析出した塩分を24時間水浸し溶解させ、エタノール中で軽く超音波洗浄した後、同一箇所を観察したものが Fig. 3 および Fig. 4 の (d)~(f) である。

Test A の方が Test B に比べ、表面の凹凸が著しく（(d) 倍率 $\times 100$ ）、(d) および (f) に共通して、空隙のサイズも Test A の方が Test B に比べかなり大きい。いずれも、食塩水の通過により、石灰岩表面が溶解したためと考えられる。当然、再結晶による表面の劣化が促進されることも容易に推定される。

参考のため、炭酸カルシウムの溶解度は、大気中にて 25°C の場合、蒸留水に対して、 $0.0052 \text{ g CaCO}_3/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ 、また、食塩水に対して、 $0.0112 \text{ g CaCO}_3/\text{NaCl } 1 \text{ g}$ を含む $100 \text{ ml H}_2\text{O}$ である。

Fig. 3. Separating of salt in Test-A, in which medium is water with NaCl of 0.079%.
((a)~(c): in separating; needle like NaCl crystal is growing, (d)~(f): surface after scrapping salt off.)

Fig. 4. Separating of salt in Test-B, in which medium is purified water.
((a)~(c): in separating; needle like NaCl crystal is growing, (d)~(f): surface after scrapping salt off.)

3 スレーキング特性試験

スレーキングとは、固結力の低い軟岩に認められる現象で、岩石内部の微細なき裂や空隙中を水分が移動することにより発生する劣化である。一般に、ギザ台地はきわめて乾燥した砂漠地帯とみなされるが、実は地下水位が高く、温度の低下する夜間は結露によりスフィンクス表面が湿潤状態となるとともに、朝から昼にかけて温度が上昇すると表面の結露水のみならず、地下の水分も地表面から蒸発している。クフ王のピラミッド南側のポートピットで地下1mでの湿度を測定したところ、94.5%の湿度を測定した。石灰岩が極めて多孔質なため、地下

水の蒸発を促進しているが、地表では一見乾燥しているとみなされてしまう。一日の温度変化が著しいため、石灰岩表面で乾燥・湿潤の繰返しが日夜発生し、これがスレーキングを促進させているというのが著者らの推察である。ここでは、水浸時の静的なスレーキング試験として土木学会「軟岩の試験・調査の指針」に示されている簡易スレーキング試験を改良した静的スレーキング試験と ISRM Suggested Methods に示されている「耐スレーキング性試験」の2種類のスレーキングに関する試験を行い、エジプト産石灰岩のスレーキング特性の把握を行う。

Table II. Shape and state showing different stage of slaking⁵⁾.

Classification	0	1	2	3	4
Shape
State	no change	micro cracking	disintegrated, not argillaceous	disintegrated into fine particles, partly argillaceous	completely argillaceous

Table III. Climatic condition.

Temperature	3~42°C
Humidity	10~100%
Temperature of rock surface	2~55°C
Temperature in rock	4~42°C
Wind velocity	24.6 m/sec max.
Annual precipitation	12.7 mm

Table IV. Dimension of Limestone specimens.

Specimen No.	Dimension (mm)	Weight (gf)	Weight of unit volume (gf/cm ³)
1	35.00×35.00×35.00	89.27	2.082
2	35.00×35.00×35.00	88.61	2.067
3	35.10×35.05×35.00	88.69	2.060
4	35.00×35.00×35.05	93.21	2.171

3・1 静的スレーキング試験

簡易スレーキング試験の目的は、「岩石試料のスレーキングの性質を乾燥させた岩石の浸水によって生じる形状変化から求めるもので、スレーキングに関する性質の概略の判定に用いるために適用する」と規定されている⁵⁾。手順は、60°C 24 時間炉乾燥した 3 cm 程度の立方体、円柱体あるいはそれに類似の形状の岩石試料を水浸させ、試料の崩壊状況（形状変化）を 1, 2, 4 および 24 時間ごとに目視観察し、その形状とあらかじめ決められている形状（Table II）と比較し、スレーキングの程度を判定するものである。この試験の特徴は、水浸した岩石試料を目視観察することで、定性的な“スレーキングのしやすさ”を非常に簡便に知ることができる。一方で、目視による評価であるためあいまいさがふくまれ、定量的な評価はされにくい。また、60°C 24 時間乾燥することが、実際にその岩石が原位置におかれている状況との関連性があまり考慮されていないのが現状である。

そこで本研究では、試験方法と判定方法を改良して試験を行った。試験方法は、50°C 6 時間炉乾燥、2°C 6 時間水浸の乾湿のサイクルを複数回繰り返し、乾燥後および水浸後の質量変化の計測を行い、スレーキング特性の定量化を行った。これは、Table III に示すように、エジプトの平均的気象条件を考慮にいれて決めたサイクルである。乾燥と水浸の間あるいは水浸と乾燥の間は、一定温度の状態（20°C）に 2 時間放置することにより急激な温度変化を防いだ。また、0, 5, 10, 20, 40 の各サイク

ルにおいて点荷試験および弾性波速度の測定を行った。

供試体は、モカタム層石灰岩を約 3.5 cm の立方体に整形したものを用いた。採取した状態を保つため整形には水を用いずに行った。供試体の諸元を Table IV に示す。

上述したサイクルを 40 回繰返した質量変化の結果を Fig. 5~8 に示す。湿潤状態では、いずれの供試体も変動はあるもののほぼ一定の状態であるとみなせる。一方、乾燥状態では、いずれの供試体においても 15~20 サイクルまでは質量の減少が確認でき、その後はほぼ一定の値となる傾向がある。

ここで、質量の減少する理由について考える。目視観察の結果から、供試体にはわずかであるがき裂が現われることが確認できた。Table II に示す指標から、スレーキングの区分は 1 であると考えている。乾湿のサイクルを繰返すことにより、供試体の表面がもろくなり欠損が生じ、質量が減少したものと考えているが、目視による観察なのでそれだけが質量減少の理由とは考えにくい。そこで、各サイクルごとに湿潤状態の質量から乾燥状態の質量を差し引き、供試体が含む含水の量を表したのが Fig. 9 である。これによると、サイクルを繰返すのに伴い、いずれの供試体も含水量は増加する傾向にある。モカタム層の石灰岩は、比較的粒子の結合性が弱く、電子顕微鏡の観察によると非常に多孔質であることが確認されている⁷⁾。乾湿のサイクルを繰返すことにより、空隙が拡大され保水量が増加したと考えられる。したがって、内部構造も

(a) Specimen No. 1 (dry condition, Egypt Limestone).

(b) Specimen No. 1 (wet condition, Egypt Limestone).

Fig. 5. Weight loss in static slaking test (specimen No. 1).

(a) Specimen No. 2 (dry condition, Egypt Limestone).

(b) Specimen No. 2 (wet condition, Egypt Limestone).

Fig. 6. Weight loss in static slaking test (specimen No. 2).

(a) Specimen No. 3 (dry condition, Egypt Limestone).

(b) Specimen No. 3 (wet condition, Egypt Limestone).

Fig. 7. Weight loss in static slaking test (specimen No. 3).

(a) Specimen No. 4 (dry condition, Egypt Limestone).

(b) Specimen No. 4 (wet condition, Egypt Limestone).

Fig. 8. Weight loss in static slaking test (specimen No. 4).

Fig. 9. Change of water content in static slaking test.

Fig. 10. Change of strength in static slaking test.

変化したことが質量の減少の一因であると考え。

Fig. 10 に点荷荷試験の結果から換算式を用いて求めた一軸圧縮強度を示す。供試体による結果のバラツキはあるが、サイクルが進むに従い強度の低下するのが確認できる。

また、Fig. 11 および Fig. 12 に供試体 No. 1 および No. 2 の弾性波速度測定結果を示す。いずれの供試体においても、3 方向（層理面直交方向と層理に対し水平な 2 方向）で測定を行った。層理面の直交方向の弾性波速

度は、水平方向より遅いことが確認できた。これは、先に述べた透水係数と相関性がある。また、乾燥状態の方が湿潤状態より速度が速いことが確認できる。いずれのケースも 20 サイクルまでは、速度の低下が確認でき、乾燥状態の質量変化と相関性がある。表面のきわだった変化がないことから、内部の空隙の開口に伴う速度の低下であると考え。

3・2 ISRM 式スレーキング試験

ここでは、先に述べた水浸時のスレーキング試験と異

(a) Specimen No. 1 (dry condition).

(b) Specimen No. 1 (wet condition).

Fig. 11. Change of P-wave velocity in static slaking test (specimen No. 1).

(a) Specimen No. 2 (dry condition).

(b) Specimen No. 2 (wet condition).

Fig. 12. Change of P-wave velocity in static slaking test (specimen No. 2).

なり、動的な状態でスレーキングさせる試験を行う。試験装置、試料の作成方法、試験方法、耐スレーキング性指数の求め方などは、ISRM 指針の「耐スレーキング性試験法の指針」に規定されている。この試験は、乾湿の繰返しを行う間に、供試体に運動を与えることによって岩石試料のぜい弱化・劣質化に対する抵抗性を評価するものである。

Fig. 13. Equipment for ISRM slaking test.

Fig. 14. Result of slaking test by the ISRM suggested method.

供試体は、エジプト産石灰岩（モカタム層）と比較のため滋賀産石灰岩（丹波層群）を用いて行った。試験試料は、400～600 g の岩石を直径 30 mm 程度の岩塊 10 に分け、角がないように球状に整形したものを用いて行った。

試験は、Fig. 13 に示すような試験装置を用いて行う。試験装置には、ふるい目 2.00 mm の標準金網からなる円筒状の容器があり、その容器に供試体を入れ、20 rpm の速度で 10 分間回転させる。水槽には、蒸留水が満たされている。回転された供試体は、その後 110℃ で 6 時間炉乾燥を行い、残留重量を測定する。この手順を繰返しなが、次式によって耐スレーキング性指数 I_{an} を求める。

$$I_{an} = \frac{C - D}{A - D} \quad (1)$$

ここで、 I_{an} : 耐スレーキング性指数（乾湿 n 回繰返し）

A: 初期重量（試料＋容器）

C: 最終の乾燥重量（試料＋容器）

D: 容器の重量

試験結果を Fig. 14 に示す。この図には、比較のために行った滋賀産石灰岩の結果も一緒に示す。この図から、エジプト産石灰岩の方が滋賀産石灰岩よりスレーキングされやすいことが明らかである。この試験は、静的な簡易スレーキング試験と異なり、水中で回転させているため、摩擦や衝突による岩石表面の破壊構造の程度を調べていることになる。したがって、結合力の弱いエジプト産石灰岩は結合力の強い（一軸圧縮強度の高い）滋賀産石灰岩よりスレーキングしやすいことになる。

4 結 言

始新世に成層したモカタム層の石灰岩について、その

岩石内部から細かい間隙を通過して、塩分が水分とともに移動する現象を確認した。大スフィンクスの風化についても、同様の現象が発生していると推定できるが、その修復・保存に対する対応策を見出すには、原位置から採取した試料を用いて、定量的な把握を行わねばならない。石灰岩表面での塩分の再結晶化と塩分の存在とは別に、未固結石灰岩のスレーキング試験を実施した。静的なスレーキング試験では、従来の目視観察による評価では、き裂がわずかにはいる程度であるが、質量変化を測定すると、確実に減少している傾向にある。湿潤状態での質量は変化せず、含まれている水の量が増えていることから、内部の空隙が大きくなっているものと考ええる。また、乾湿のサイクルの進行に伴い、強度および弾性波速度の低下が確認できた。このことから、内部の空隙が開口して結合力が低下していることが確認できる。また、ISRM 方式のスレーキング試験を実施した。滋賀産石灰岩に比べかなりスレーキングしやすいことを確認した。

なお、実験の実施に当たっては京都大学工学部4年生平塚丈晴君（現在(株)全日本空輸）の協力を得た。記して謝意を表す。また、研究費の一部は文部省科学研究費（課題番号06452269）の補助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) S. Yoshimura, C. Tanimoto and S. Tonouchi, Studies in Egyptian Culture, No. 9, 41 (1992) Waseda University.
- 2) 谷本親伯, 京都大学公開講座テキスト No. 13, p. 1 (1993).
- 3) Geology of Egypt (1981).
- 4) W. F. Brace, J. B. Walsh and W. T. Frangos, Journal of Geophysics Research, **73**(6), 2225 (1968).
- 5) 土木学会岩盤力学委員会, “軟岩の調査・試験の指針(案)”, 64 (1991).
- 6) ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Test (J. A. Franklin, U. W. Vogler, J. Szlavins, J. M. Edmond and Z. T. Bieniawski eds.), International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abst., **16**, 141 (1979).
- 7) C. Tanimoto, S. Yoshimura and J. Kondoh, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abst., **30**, 1545 (1993).
- 8) 山口梅太郎, 西松裕一, “岩石力学入門”, 182 (1991) 東京大学出版会.