

乾燥地の遺跡修復と地盤工学的問題点

—イラン、チョガ・ザンビール遺跡を例として—

Geotechnical Problems on the Conservation of Ancient Heritages in Arid Area

渡 辺 邦 夫 (わたなべ くにお)

埼玉大学地圏科学研究センター 教授

尾 崎 哲 二 (おさき てつじ)

国際航業特地域環境エンジニアリング事業部 主任技師

1. はじめに

現在、世界各地で遺跡の修復・保全が進められている。西アジアや中央アジアを見ても、アフガニスタン、パルミアン遺跡、イラン、バム城砦遺跡、カザフスタンの古代都市オトラルなどの修復が進められ、タジキスタンの仏教遺跡アジナ・テパ修復やイランのメソポタミア時代遺跡、チョガ・ザンビールの第二期修復が始まろうとしている。これらの遺跡はパルミアンの石窟遺跡を除いて、土を主体とし、水や藁（スサ）あるいは石灰や石膏などのセメント物質を混合して作られた材料（以下、複合土材料と略記する）で主に作られている。そのため、これらの遺跡の修復・保全は、最新の地盤工学や環境工学の技術を結集して取り組むべき問題である。まず、遺跡の存在してきた自然環境の中で、

① 複合土材料の鉱物組成や構造が長い時間の中でどのように変化し、結果として強度などが増加して行くか、透水性はどうか、

② 降雨に対して複合土材料がどのように長期劣化してゆくか、そのメカニズムはどうなっているか、

などを把握しておかねばならない。その上で、将来的に起こることが想定される劣化要因の進行を防ぎ、長期的な健全性を持つ修復・保全方法を選択して適用しなければならない。これは大変難しい作業である。

しかし一方で、修復・保全のための調査や研究は、自然環境下で長期健全性を持つ複合土材料の開発にも結びつけることができる。つまり、これからの地盤工学の一つの発展方向に多大に貢献しうるものという。この観点から、地盤工学技術者としても、世界の遺跡の修復・保全の動向に一層、注意し、参加していくことが大事と考える。従来、日本では遺跡修復は考古学や歴史学の分野の課題と考えられてきた傾向がある。しかしながら、遺跡は複合土材料の長期健全性を調べる上で極めて貴重な情報を持っている。また前述したように、遺跡の修復・保存では高度な地盤工学の技術が必要とされている。

本論文はこのような問題意識を持ってイラン、チョガ・ザンビール遺跡の第一期修復・保全プロジェクト（ユネスコ日本信託基金）の中で行った、日干しレンガの性質の研究結果を取りまとめたものである。

2. チョガ・ザンビール遺跡

チョガ・ザンビール遺跡は紀元前1300年頃に、ウンタシュ・ナビルシュ王によって建てられた神殿都市である¹⁾。この都市は紀元前約640年にアッシュール・パニバル王により破壊されるまで続いた。場所はイラン南西部の古代都市スーサの南東約40 km に位置し、デズ川から約1.5 km 離れた丘陵地帯にある。都市は3重の周壁を持ち最も外側の周壁に囲まれた範囲は約2.5 km × 2 km に達する。この都市の中心部にインシュシナク神を主神としたジググラト（聖塔）がある。このジググラトは一辺約100 m の方形の敷地に中心の高さ約50 m まで日干しレンガを積み重ねた大構造物であったと推定されている。現在は、写真—1に見られるように、頂上部が削り取られ25 m 程の高さとなっている。ジググラトは、本体は日干しレンガで構成されているが、外壁が2 m ほどの厚さの焼成レンガ層で被覆され、降雨の直接的な浸透を防いでいた。ジググラトは例えばウル、ウルクのような古代メソポタミア地域の都市でも多く作られたがチョガ・ザンビールのジググラトはそのうち最も保存状態が良いものである。

チョガ・ザンビール遺跡にはジググラトの他、地下王墓、貯水池などの重要構造物がある。いずれも、天然アスファルトで焼成レンガ壁の目地の止水をするなど極めて高度な技術が使われている（写真—2、写真—3）。

このような高度な技術がこの遺跡の随所に使われていることから、複合土材料、とりわけ日干しレンガの長期健全性についても高い技術を用いて作られたことが考えられる。それを調べる事が研究の一つの目的である。

3. 日干しレンガ試料の採取と工学的性質

本研究では、とくにジググラトの破壊した頂上部およびジググラトを取り囲む最も内側の周壁から日干しレンガ試料を採取した。図—1に試料採取場所および試料番



写真—1 チョガ・ザンビールのジググラト

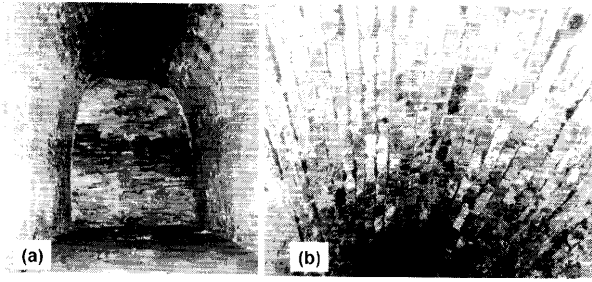


写真 2 (a)地下王墓と(b)アーチ天井のアスファルトによる止水状態

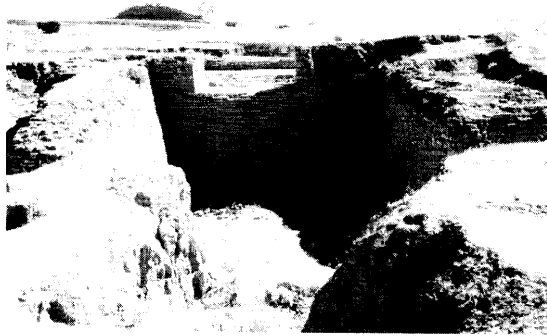


写真 3 貯水池。後方にジググラトが見える

号を併せて示す。このほか、砂質の地山からも試料を採取した。この図に見られるように、MB-1 と MB-2 はジググラトの頂上部から採取されたものである。MB-1 は表面を構成する日干しレンガであり、MB-2 は目地をはさんで第二層のレンガである。一般に表層の日干しレンガほど、降雨浸透に伴う物質溶脱や蒸発に伴う塩析析出などの影響を受けている。その影響を見るために第一層と第二層から試料を採取した。

表 1 に試料物性を示す。これらの量の中で最も測定が難しいものは透水係数である。日干しレンガの透水係数を測定した例としてはおそらく最初に近い。これは後述するように、日干しレンガが極めてスレーキングを起こしやすく、水で飽和させる過程で急速に崩壊することによるものである。今回の測定では試料をモールドに入れ、上下方向の崩壊をポーラス板で押さえて測定した。確かに、測定精度には問題が残るが、今回一つのデータ例として報告するものである。今後は、透気試験から透水係数を推定する方法が必要と考える。

図 2 は、試料の粒度分布である。図中の Sandy soil は、図 1 に示されるジググラト周辺の砂質土である。この図から、周壁の日干しレンガ試料 MB-3 とジググラトの目地モルタル MB-4 は同様な、図中ではほぼ直線的な分布となっていることがわかる。これに対し、ジググラトを構成する日干しレンガ MB-1、MB-2 の分布がそれらとは大きく異なっている。MB-1、MB-2 の粒度分布はほぼ MB-3、MB-4 と地山砂質土の中間になり、このことから、MB-3 や MB-4 を作った土と地山を混合してジググラトの日干しレンガを作ったと考えることができる。このように日干しレンガの材料特性は一つの

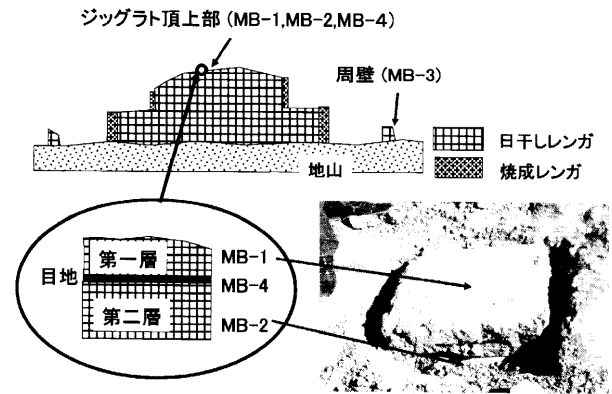


図 1 試料採取地点および試料番号

表 1 試料の物性

Sample	Soil particle Density (g/cm ³)	Density (g/cm ³)	Water content (%)	Void ratio	Hydraulic conductivity (cm/s)
MB-1	2.706	1.750	1.4	0.563	3.43E-5
MB-2	2.732	1.707	2.6	0.642	1.39E-5
MB-3	2.750	1.813	5.1	0.594	4.10E-6
MB-4	2.761	1.848	2.4	0.530	-

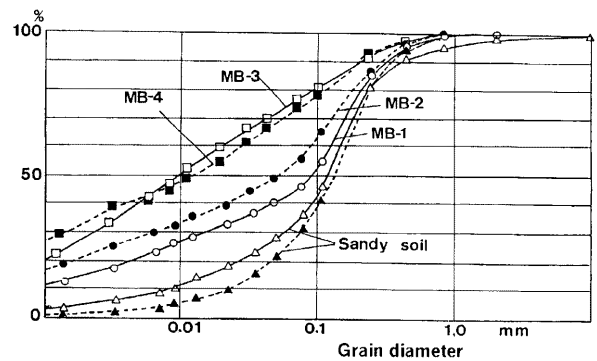


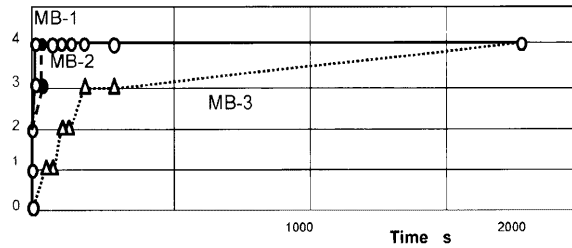
図 2 粒度分布

遺跡を見ても一様ではない。

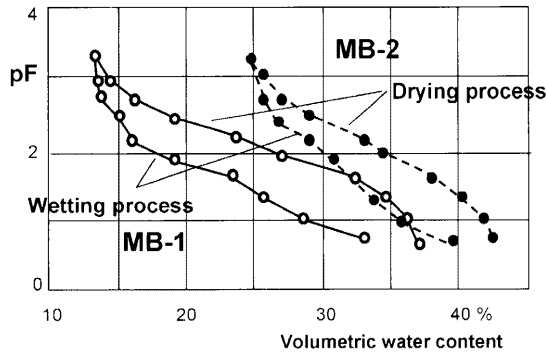
図 3 に、日干しレンガのスレーキング特性を示す。この図から日干しレンガが極めてスレーキングを起こしやすい性質を持っていることがわかる。この性質は、チョガ・ザンビールに限らず、日干しレンガに一般的に見られる。図から、MB-1、MB-2 では 1 分以下でスレーキング・インデックス 4 の状態、つまり完全に崩壊した状態になる。この性質のため、前述したように透水係数測定が困難となる。周壁の日干しレンガ MB-3 はジググラトの MB-1、MB-2 に比べてスレーキングをやや起こし難いような性質を持っている。図 1 に見られるように、ジググラト本体の日干しレンガは周囲が焼成レンガによって被覆されることにより降雨浸透を防いでいる。一方、周壁は元々の厚さが 1~2 m と薄く、焼成レンガの被覆が困難である。つまり、周壁の日干しレンガは耐水性がジググラトのものより耐水性を向上しておく必要がある。このことから、図 3 に見られるように周壁の日干しレンガが相対的にスレーキングを起こし難い性質を持つことは合理性が高いといえる。

論文

Slaking index



図—3 日干しレンガのスレーキング特性



図—4 水分特性曲線

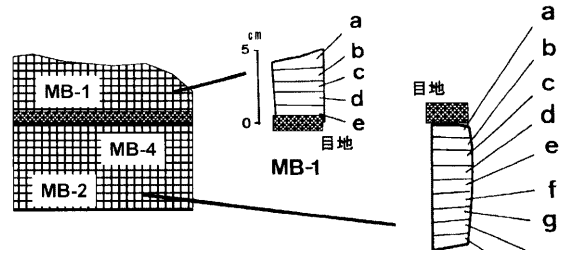
スレーキング試験では、乾燥した試料を水中に入れ、急速に水で飽和させる。一方実際の降雨状態では、ゆっくりと水が浸透してゆくことになる。このため、降雨に伴う不飽和浸透を把握することが重要となる。そのため、MB-1 と MB-2 について、水分特性曲線を調べた。図—4 にその結果を示す。この図からまずヒステリシス特性が認められる。さらに二つの試料の水分特性に大きな違いが見られ、表層の MB-1 の水分特性曲線が MB-2 に比べて大きく左側に移動していることがわかる。その差は、pF 値の大きい範囲で顕著である。このことは、pF 値の大きい、換言すれば小さな空隙が減少していることを示している。これは、降雨浸透とその後の蒸発に伴って生ずる塩析出によって表層の微小間隙が埋められることによるものと考えられる。

このように、水理的性質を調べることによって日干しレンガの長期的な微小構造変化を検討することができる。したがって水分特性曲線測定試験は、複合土材料の長期変化を評価する上で重要な試験であると言える。

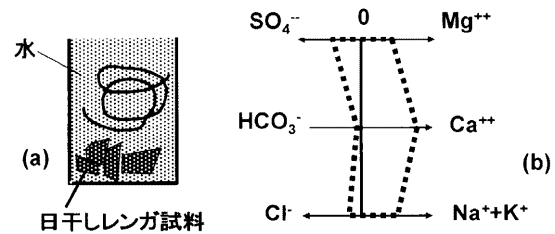
4. 日干しレンガから溶解する成分の分析

問題は、なぜ耐水性に違いがあるのかを調べることである。このため、後述するような化学分析を行って検討した。化学分析では、MB-1、MB-2 のサンプルを図—5 に示すように小片に分断し各々について調べた。

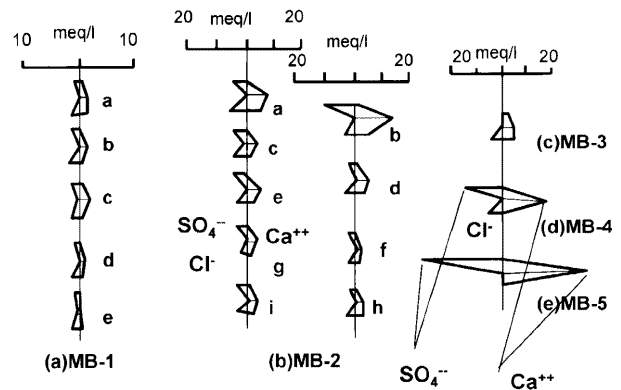
図—6 は試験方法を模式的に示したものであり、水溶液の分析結果をヘキサダイアグラムで表示した。図—7 に結果を示す。図中、MB-5 は焼成レンガ壁の目地であり、ほぼ石膏より成る。そのため、Ca と SO_4 イオンが



図—5 試料の分割



図—6 試験方法とヘキサダイアグラム表示



図—7 分析結果

多いパターンが読み取れる。日干しレンガ壁の目地も同様にそれらのイオンが多く、また、Cl イオンも多いパターンとなっている。MB-1、MB-2 も全体的に見て MB-4 と同様なパターンを示す。一方、周壁の日干しレンガは Ca や SO_4 が少ないパターンである。このことが、スレーキング試験に見られた耐水性に関係していると考えられる。 SO_4 イオンの起源として、日干しレンガに混入された石膏とも考えられるが、地山に含まれていた黄鉄鉱起源の可能性もあり、今後の研究が必要である。

いずれにせよ、日干しレンガがその機能を考えて注意深く作られた可能性がわかった。それらをさらに詳しく調べることで複合土材料の耐久性を向上させることも可能と考える。このように、遺跡の修復を行うことは、地盤工学の研究の発展につながるものであり、積極的な参加が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Roaf, M.: Cultural atlas of Mesopotamia and the ancient near east, Fact on File, pp. 143~144, 1990.

(原稿受理 2000.12.28)

ABSTRACT

TSUCHI-TO-KISO JGS Ser. No. 566, Vol. 53, No. 3

Theme: Geotechnical Problem on Oversea Construction Projects**—Preservation of Natural and Cultural Assets—****Conservation of Historical Sites and Geotechnical Engineering in Overseas****Yoshinori Iwasaki**

This paper presents general trends of geotechnical engineering for preservation of monuments and historic sites in recent years based upon the experiences of the author by himself.

The activity of conservation for large monuments has become a corporative work among interdisciplinary fields and UNESCO becomes a coordinating position among various countries to perform the conservation. The author shows the geotechnical engineering is the key principle to understand the soils and foundations for the structural stability of these monuments at Borobudur, Angkor and Bamiyan. He also extends the role of the geotechnical engineering from the foundation of structures to more wider such area of ground settlements caused by pumping underground water and water environment as geo-environmental problems.

Summarized Activity of Osaka University Dunhuang Mission**Chikaosa Tanimoto and Keigo Koizumi**

Osaka University has been sending a mission to Dunhuang Mogao Caves in China twice an year since 1999. The purpose of the periodical missions is to investigate the geology of Dunhuang Area, groundwater, micro-environment in caves, rock weathering and slope stability. Mogao Caves and their wall paintings, registered as the World Heritage in 1987, have been suffering from wind erosion, salinization and structural instability. In addition, the geographical nature is specified by the aggressive tectonic movement from the south. Surveys of geology, fault systems and possible groundwater network have been successfully carried out through field works and satellite image analyses. Micro-environmental survey and electric resistivity measures in the major caves with more than 100 sensors are clarifying the process of efflorescence and deliquescence step by step, but still the detailed joint systems in the Quaternary conglomerate surrounding caves are needed to be clear.

Role of Geotechnical Engineering on Restoration of Angkor Complexes**Takeshi Nakagawa, Yasushi Akazawa,
Juichi Nakazawa, Yoshinori Iwasaki and
Mitsuharu Fukuda**

This report focuses on the geotechnical aspects of An-

gkor restoration project that JSA have wholly concerned for about decade started two years after the world heritage registration of Angkor ruins was allowed in 1992. During its investigation and preservation of decade, the field measurement and in-situ test proved the behavior of stone tower components change seasonably subjected to ground behavior and ground water as well as the structure of the foundations were figured out. And the mixture testing with original soil and slaked lime concluded a suitable blend ratio to hold the stable compacted foundation. Also, it leads to a reasonable controlling procedure for compacting.

Hanchiku Fill Ruins in Ancient China**Katsutada Onitsuka**

The Yoshinogari burial mound (Funkyu tomb, around B.C. 50) which is the oldest fill construction in Japan has a high compaction density by a kind of an ancient fill construction method Hanchiku. In China there are many Hanchiku fill ruins including the Du-Tun (burial mound) in the south area of Changjiang River which is considered to be the direct root of the Yoshinogari burial mound. The paper considers the Hanchiku fill ruins in ancient China from the dawn of history to the end of Qin dynasty (B.C.206) in the view of Geotechnical Engineering and shows conservations of some fill ruins.

Geotechnical Problems on the Conservation of Ancient Heritages in Arid Area**Kunio Watanabe and Tetsuji Ozaki**

Preservation of ancient earthen structures, which are mainly constructed with mud brick and/or clay lump, is an important subject in the field of soil mechanics. The physical and chemical properties of mud bricks forming the ziggurat and a peripheral wall of the Choga-zanbil temple, Islamic republic of Iran, were investigated as a fundamental study for planning the conservation works. The resistance from the decay occurred by the water infiltration was also estimated by the slaking test. It was found that the mud brick of the peripheral wall is more resistant from the decay than those of ziggurat.

Study on Conservation of Historical Brick Building in Thailand**Takeshi Ishizaki, Nobuaki Kuchitsu,
Tadateru Nishiura and Shigeo Aoki**

Many Asian historic brick buildings and monuments suffer from surface deterioration due to salt efflorescence and microorganisms. Water vaporizes on the surface of brick buildings at the beginning of the dry season and water is induced to flow out from the drying surface and salt crystallizes near the surface. This crystallization pres-