

Restoration der Zitadelle von Bam – neue Herangehensweisen

In den frühen Morgenstunden des 26. Dezembers 2003 erschütterte ein starkes Erdbeben das historische Bam und zerstörte große Teile der Stadt und vor allem der wunderschönen alten Zitadelle. Viele Menschen verloren dabei ihr Leben. Die meisten Lehmbauten der Kulturlandschaft von Bam wurden beschädigt oder vernichtet (Abb. 1).

Unmittelbar nach dem Erdbeben wurde das „Recovery Project of Bam's Cultural Heritage (RPBCH)“ durch die „Handicrafts and Tourist Organisation (ICHHTO)“ ins Leben gerufen, um die notwendigen Aufgaben für die Restaurierung der Zitadelle und der Kultur der Stadt zu bewältigen. RPBCH wurde dabei mit großen Problemen und technischen Herausforderungen konfrontiert.

Der Vortrag befasst sich mit dem in den Jahren nach dem Erdbeben Erreichten in Bezug auf den Erhalt und die Restaurierung von Denkmälern in Bam. Das Schwergewicht wird dabei auf die Vorbereitung und Durchführung der Planung gelegt. Diese Planung ist auch das Ergebnis effektiver und wertvoller nationaler und internationaler Zusammenarbeit.

Die Zitadelle von Bam nach dem Erdbeben im Dezember 2006

Stand der Renovierungsarbeiten vor dem Erdbeben

Die Zitadelle von Bam ist ein herausragendes Beispiel für die Lehmarchitektur in einer Festungsstadt und war einzigartig in ihrer Nutzung und Entwicklung über die vergangenen 2000 Jahre bis 1932. Die Anlage wurde mehrere Male repariert und saniert. In der Zitadelle wurden 1958 größere Renovierungen durchgeführt. Eine umfassende Sanierung begann 1973 mit verschiedenen Maßnahmen in den Bereichen Erhalt und Rehabilitation. Sofort nach dem Erdbeben wurde ein Aktionsprogramm mit Arbeitsplan erarbeitet, auf das später eingegangen wird.

Das Zerstörungsvolumen nach dem Erdbeben

Die ersten Untersuchungen errechneten eine Zerstörung, bzw. Schädigung der Zitadelle von mehr als 80%. Genauere Messungen ergaben später, dass ein 30%iger Totalschaden vorlag (Abb. 2).

Prioritäten für die Aufgaben

(Zeitplan und Rahmenbedingungen)¹

Nach der Gründung von professionellen Komitees wurden als nächste Schritte die folgenden Aufgaben anhand ihrer Priorität definiert:

- für 2003: *Noterhaltung*: Auflisten, Identifizieren und Analysieren der Risiken bei der dringenden Sicherung von Lehmbauten und Gebäudeteilen in der Zitadelle, die instabil sind;
- für 2004 bis 2005: *Kurzzeitplan*: Die Kriterien für das Management auf dem Gelände definieren für die fortlaufende Zusammenarbeit mit ICHHTO und nationalen und internationalen Akteuren; Vorarbeiten für einen übergreifenden Managementplan.
- für 2004 bis 2010: *Mittelfristiger Zeitplan*: Den Managementplan für Bam's Cultural Heritage erarbeiten und durchführen. Ein Konservierungsprogramm für die Lehmbauten in der Zitadelle ausarbeiten.
- für 2004 bis 2015: *Langfristiger Zeitplan*: Ziele festlegen für das gesamte Aufbauprogramm der Zitadelle und die Effektivität der eingeschlagenen Managementrichtung, basierend auf dem Generalplan. Einbeziehen wissenschaftlicher Erkenntnisse (national und international) über das Verhalten von Lehmbauten in erdbebengefährdeten Gebieten.

Bedingungen für die Ausarbeitung des Restaurationsplanes²

Studie aller Monumente

Zuerst muss jedes Gebäude aufgemessen und von Experten aufgezeichnet werden. In einem nächsten Schritt werden entsprechend den Bauaufnahmen Pläne angefertigt. In den vergangenen vier Jahren wurden so folgende Unterlagen produziert:

- 3D-Modell der Zitadelle in Kooperation zwischen dem MIE Institut in Japan und der Universität Teheran,
- 3D kartografische Mappen der Zitadelle vor der Zerstörung im Maßstab 1:500,
- gegenwärtiger Zustand des Gouverneursitzes, der Karawanserei, der Ställe und des Festungswalles. Fototechnische Aufnahmen.

Gruppenorganisation

Am Erhalt der Zitadelle von Bam arbeitet ein Team, das aus nationalen und internationalen Experten sowie erfahrenen Maurer-

The Restoration of Bam Citadel, Iran – new approaches

In the early morning of December 26th 2003 a strong earthquake shook the ancient City of Bam and caused heavy destruction in the city and the beautiful Bam Citadel. This tragic event caused the loss of many lives and destabilized and seriously damaged the earthen structures within the Bam Cultural Landscape (Fig. 1).

Immediately after the earthquake the Recovery Project of Bam's Cultural Heritage (RPBCH) established by the Iranian Cultural Heritage, Handicrafts and Tourist Organization (ICHHTO), in order to organize the required tasks for the rehabilitation of Bam Citadel and the culture of Bam City. The RPBCH faced different major issues and various technical challenges. This paper aims to describe the most recent findings in the field of conservation and restoration in the years after the earthquake.

In this paper the main focus is on describing the way to prepare and implement a restoration plan for any monument in Bam and its cultural landscape. The proposed restoration plan is the valuable achievement that has been obtained from national and international collaborations; those colleagues that supported us are highly respected, because of their scientific and effective recommendations.

Bam Citadel after the earthquake in December 2003

Level of restoration before the earthquake

Bam Citadel is an outstanding example of an earthen construction fortified town and was unique in its continuous occupation and development over at least 2000 years up until 1932. It has been repaired many times; around 1958 first repairs were executed within the Citadel. A comprehensive restoration of the Citadel was commenced in 1973 with a different emphasis on conservation measures ranging from preservation to reconstruction. The latest interventions, which were started shortly after earthquake, have been accompanied by the general strategy for implementation, as well as a program of actions carried out according to a schedule that will be mentioned later in this paper.

Level of demolition in Bam Citadel after the earthquake

The first evaluation indicated that more than 80% of Bam Citadel was damaged. To have better knowledge of the precise

extent of the demolition, a team tried to establish the percentage of possible destruction, which would lead to a fuller understanding of the structural behavior in the Citadel. According to the results about the 30% was destroyed by the earthquake (Fig. 2).

Tasks priority (timetable and framework)¹

The next steps (after establishing the professional committees) were to define the priority of the tasks as follows:

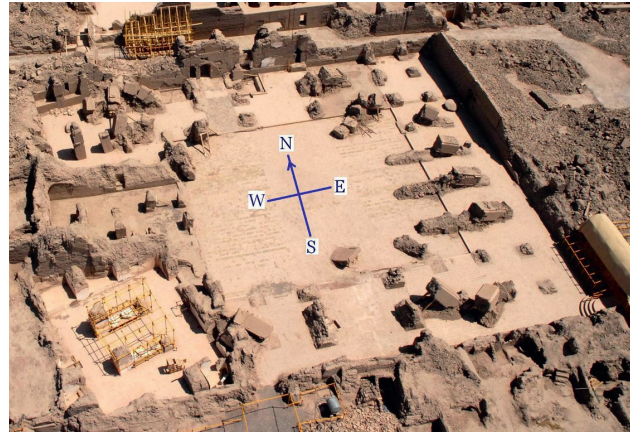
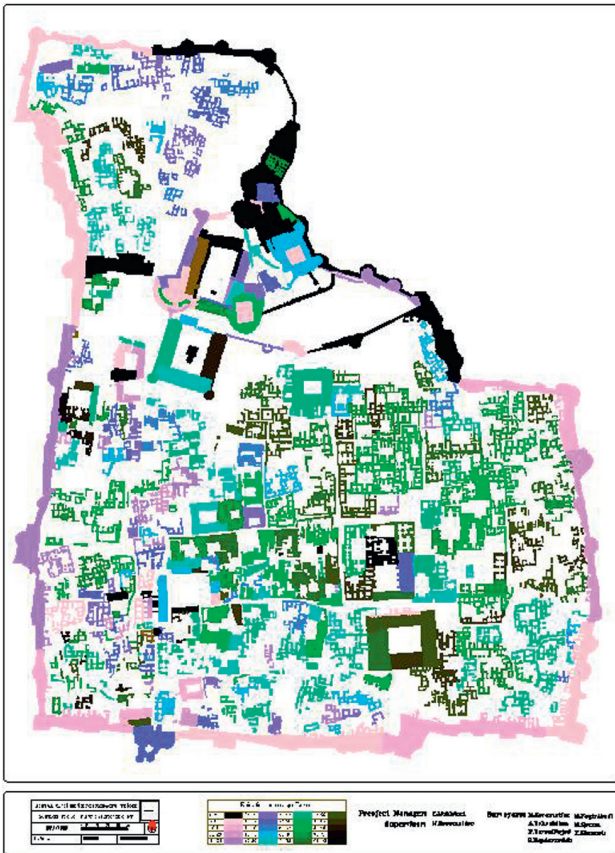
- *Emergency conservation (2003)*: to document, identify and analyze initial risks and implement emergency stabilization measures. Stabilize the parts that are weak and unstable (mostly in Bam Citadel).
- *Short-term plan (2004-2005)*: to define the criteria for management on site and to continue with the rigorous consultation process between ICHHTO and national and international parties and the groundwork for a Comprehensive Management Plan.
- *Mid-term plan (2004-2010)*: to develop and implement the Comprehensive Management Plan for Bam's cultural heritage. Developing a conservation program and obtain comprehensive analysis results for intervention in the adobe buildings of Bam Citadel.
- *Long-term plan (2004-2015)*: to assess the objectives of the Site Management Plan for Bam Citadel and the effectiveness of the policies within the management plan and its compatibility with the provisions of the General Master Plan. Contribution of a scientific investigation into the earthen architecture techniques adapted for seismic areas and for contemporary needs in a national and international context.

Requirements for preparing a restoration plan²

Study of the monuments

First of all, each structure has to be surveyed and a pathology plan must be drawn up by experts. The next step is to produce reliable cartographical documentation, achieved by different methods. The following maps have been produced during past 4 years:

- A 3D model of the Citadel in cooperation with the NII Institute (Japan) and the University of Tehran (Iran).
- 3D cartographic maps of the Citadel before demolition at the scale of 1:500.



lotprojekten umgesetzt. So konnten auch kleinere Teile des Gesamtvorhabens in Angriff genommen werden, wie z. B. das Sistani Haus Pilotprojekt. Diese Vorhaben beinhalten das Erarbeiten von Studien, Entwurf, Detailplänen, Kostenrechnung, Rahmenbedingungen und Zeitplan.

Das Monument im Detail

Die Pilotvorhaben werden von nationalen und internationalen Teams durchgeführt und stärken und verbessern die traditionellen Kenntnisse im Lehmbau auf der Basis eines Forschungsplanes. Folgende Pilotprojekte wurden in einigen Teilen der Zitadelle bereits durchgeführt oder sind noch im Gange:

Fertiggestellt:

- Restauration der Kasernen durch ICHHTO,
- Restauration der Ställe durch „Soil Engineering Services“ (SES-Iran),
- Restauration des Sistani Hauses durch die Architekturfakultät der Technischen Hochschule Dresden

Noch im Gange:

- Restauration des Basars durch MIE Universität in Japan,
- Restauration von Turm 1 mit Hilfe des italienischen Kulturministeriums,
- Restauration der Mirza-Naim-Schule durch die Universitäten Mailand und Padua,

meistern und Facharbeitern besteht. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen. UNESCO, ICOMOS, iranische und ausländische Universitäten arbeiten über ICHHTO mit dem RPBCH zusammen.

Plan für die Restaurierung

Wissenschaft, Geschichte und die Kultur sollten eine Rolle spielen beim Verstehen von statischem Gebäudeverhalten und bei der Beurteilung von möglichen Konsequenzen, die durch Änderungen in Bauplänen auftreten können. Eine Grundphilosophie unterliegt jeder Art von Konservierung. Renovierung und Stärkung sind nachhaltige Wege für das Überleben. Für die enormen Größen der Restaurierungsmaßnahmen in der Bam Zitadelle wurden Projektpakete geschnürt und in sogenannten Pi-

1a & 1b Die Bam Zitadelle vor und nach dem Erdbeben. Bam Citadel, before and after earthquake.

2 Karte mit der prozentuellen Auflistung der Schäden. Map showing the percentage of demolition.

3 Die zusammengebrochenen Säulen in der Jaame Moschee. General collapse of the columns in Jaame Mosque.



– Current status of the District of Governor, Caravanserai, the Stable and surrounding walls by photogrammetric techniques.

Team organization

Conservation of Bam Citadel was pursued vigorously by a team of national and international experts, experienced master masons and skilled laborers. Co-operation between governmental and non-governmental institutions and associations at national and international levels was essential. UNESCO, ICOMOS, Iranian and foreign universities and institutes are working with RP-BCH as well as ICHHTO.

Restoration plan

Science, history and culture should all play a part in the understanding of the structural behavior and evaluating the full significance and consequences of any alternatives in the original plan. Sometimes basic philosophy has clarified the type of conservation; reconstruction and strengthening is possibly the sustainable way to continue.

Lack of experience in the restoration of adobe structures including consideration of earthquake loads on the one hand and, on the other, providing effective strategies for starting the restoration process in Bam Citadel on a massive scale, has made it necessary to specify the type of package projects later called pilot projects. The pilot projects are the type of the projects that in-

clude a full restoration plan for a small part of a monument (for example the Sistani House pilot projects). These pilot projects have followed the studies, detail design, costing, frame works and time tables.

The monument in detail

The pilot projects are executed by national and international teams and supporting bodies to reinforce and improve traditional knowledge about adobe structures through a research plan. The following activities have been executed or are still in progress in some parts of Bam Citadel as pilot projects:

Executed projects:

- Restoration of the Barracks by ICHHTO,
- Restoration of the Stable by Soil Engineering Services, (SES) (Iran),
- Restoration of Sistani House by the Faculty of Architecture, Dresden University of Technology (Germany).

Projects in progress:

- Restoration of the Bazaar by Mie University (Japan),
- Restoration of Tower One by the Italian Ministry of Culture,
- Restoration of Mirza Naim School by the Universities of Milan & Padua (Italy),
- Test example for the retrofitting of masonry structures with natural fibers by Kassel University (Germany),
- Restoration of Tower 32 by Isfahan University (Iran).

4 Der Felsenuntergrund im Gouverneursdistrikt hat dynamisch anders reagiert, als der unter der Jaame Moschee. / The bed rock in District of Governor caused a different dynamic response compared with Jaame Mosque.

6 Die Integrität des Gebäudeträgerwerks bietet von sich aus genügend Widerstand gegen Erdbeben. / The integrity of the structure could provide sufficient resistance against earthquake loads.

5 Falsche Einbindung der Strebepfeiler in die Westwand der Karawanserei. Incorrect intervention: the buttress behind the west wall of the Caravanserai.

7 Zerfall und Schwächung der Adobekonstruktion in alten Bauteilen. Decay and weakness of adobe as an old construction material.



- Herstellen von Testproben für das Nachrüsten von Mauerwerksteilen mit Naturfasern, Universität Kassel,
- Restauration von Turm 32 durch die Universität Isfahan.

Pathologie³

Die Schäden an den historischen Gebäuden in Bam und dem kulturellen Erbe der Stadt können in 5 Teilen aufgelistet werden:

- Schäden, die durch die Dynamik des Erdbebens hervorgerufen wurden: Es besteht eine Beziehung zwischen der Erdbebendynamik und derjenigen in einer Gebäudestruktur (Abb. 3 und 4).
- Vorherige Eingriffe: Vorangegangene Renovierungsmaßnahmen bezogen sich mehr auf architektonische Details als auf die strukturelle Sicherheit der Bauten bei Erdbeben. Das zeigt sich z. B. bei der Trennung der Wände von den Strebepeilern in der Karawanserei (Abb. 5).
- Entwurfsfehler: Durch die lange Periode zwischen dem vorletzten und letzten Beben wurden keine Erdbebeneinflüsse auf Lehmbauten untersucht. Es gab ja auch in der Vergangenheit keine Möglichkeiten unter Laborbedingungen Erdbeben zu simulieren. So unterblieb eine Analyse von Baufehlern. Heute sind die strukturellen Voraussetzungen für erdbebensicheres Bauen bekannt (Abb. 6).
- Schwaches Material: Lehmsteine sind nicht stark genug gegen Belastung durch Erdbeben und/oder Wind (Abb. 7). Es müssen Steine mit besonderer Ausführung und spezifischen Formaten hergestellt werden. Die Kuppeln der Ställe im Nord-

osten der Zitadelle widerstanden dem Beben, nur die Wände kollabierten.

- Keine Fundamente: Die meisten Gebäude der Zitadelle wurden ohne Fundamente gebaut. Die ersten Lagen von Adobesteinen der Wände wurden direkt auf dem Boden aufgebracht und waren so ohne weiteren Halt den Elementen usw. ausgesetzt. Die Windgeschwindigkeit erreicht in Bam manchmal 130 km/h, was größere Auswirkungen hat auf Lehmbauten als andere Elemente oder Einflüsse (Abb. 8).

Verschiedene Möglichkeiten für eine Restaurierung

Beim Wiederaufbau der Bam Zitadelle wurde nach zwei unterschiedlichen Methoden verfahren:

In traditioneller Art und Weise (Abb. 9):

Unbewehrtes Mauerwerk überträgt Lasten direkt in das Fundament oder in die Fundamentwände. Bewehrtes Mauerwerk wird mit natürlichem Material wie Stroh (in Adobe) oder Holz- und Palmenabfall zur Verbesserung der Zugeigenschaften verstärkt.

Neue Verfahren (Abb. 10 und 11):

Neue Techniken sollten sehr vorsichtig angewendet werden. Bei falscher Nutzung können nicht umkehrbare Schäden angerichtet werden. Z.B. kann der Gebrauch von Fiberglas oder das Einspritzen von Zement in die Fugen nicht mehr rückgängig gemacht werden. Schon der Injektionsdruck kann dabei Risse hervorrufen. Solche Nutzungen geschehen oft ohne Materialkenntnisse

8 Von Termiten geschädigter Palmstamm, der in der Wand vom Kühlhaus als Zuelement verwendet wurde. / Termite effect, the decayed palm tree in the wall of Ice House (acting as a tensile element).

9 Untere Reihe: Traditionelle Sanierungsmethoden in der Bam Zitadelle mit RPBCB. Bottom row: Traditional method for restoration of the Barracks, Bam Citadel (by RPBCB).



Pathology³

The structural damage of historical buildings in Bam and its cultural heritage could be divided to five parts:

- Damage caused by dynamic earthquake loads; this kind of damage is dependent on the relationship between the dynamic aspects of earthquake loads and the dynamic aspects of a structure in the same fundamental period. For example the damage that occurred to Jaame Mosque (Fig. 3) and the different dynamic response in the District of the Governor (Fig. 4).
- Previous interventions: Previous measures have been more focused on the architectural form and area than on the response of the structure to the earthquake. For example, the separation of the walls and buttresses in the west part of Caravanserai (Fig. 5) could be considered.
- Incorrect design: With regard to the long repeat cycle of earthquakes in the Bam area and the lack of the instruments in the past, it was impossible to analyze the structural behavior in the event of an earthquake or to simulate the effect of an earthquake on the structures in the laboratory. The integrity of historical buildings, the valid forms of construction and the absence of connection between the load-bearing parts play a substantial role in reducing the degree of collapse in an earthquake (Fig. 6).
- Weak material: Adobe masonry is inherently weak against the lateral loads such as earthquake and wind. Another time the use of bricks with higher resistance specification would

provide a better response and avoid much of the damage that is likely occur during an earthquake (Fig. 7).

- The structure and some specific conditions: Form and shape can definitely have an effect on the seismic response of structures. The domes of the Stable in the north-east have worked well without damage, however the wall has collapsed. The north wall acts as a support for the structures beneath.
- Most of the building in Bam Citadel had been built without foundations. This means that the first layer of the adobes rested on the ground and formed the ground course. This weakness should have been eliminated by incorporating elements to resist vertical uplift.
- Natural factors, such as wind, termites, etc.: The wind speed in Bam sometimes reaches around 130 km/h, which intensifies the decay or is major natural factor. There are some places in the Citadel which show serious biological corrosion (Fig. 8).

Different types of restoration plan

Two main kinds of restoration methods have been applied in Bam Citadel:

Traditional Methods (Fig. 9):

Unreinforced masonry transfers common gravity loads and infrequent environmental loads, which usually contain a major lateral component, to the foundations and associated ground blocks. Reinforced masonry can be strengthened with a natural

¹⁰ Obere Reihe und links: Neue Sanierungsmethoden im Sistani Haus durch die Technischen Hochschule, Dresden.
Top row and left: New methods, Sistani House (by Dresden University of Technology, Germany).

¹¹ Untere Reihe: Neue Sanierungsmethoden im Stall mit Consulting Engineers, Iran.
Bottom row: New methods, the Stable (by SES, Consulting Engineers, Iran).



oder das Wissen von möglichen Nebeneffekten. In Bam wurden in den Ställen Geogitternetze verwendet mit Lehm als Fugenmaterial. Die Netze wurden alle 5 Adobelagen eingebracht oder auch um die Wände gewickelt. Alle 50 cm wurde so vertikal eine Verbindung zur Fundamentwand hergestellt.

Diagnose, Sicherheitsbewertung, Akzeptanz und Durchführung des Restaurationsplanes

Wichtige Elemente für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Adobes sind folgende:

- Identifizieren von geeigneten Lehm Böden für die Produktion hochwertiger Adobesteine,
- Festlegen der gewünschten Prozente für die Verbesserung der Adobesteine,
- Suche nach und Analyse von natürlichen Beimischungen zum Lehm, wie z. B. Palmfasern (Abb. 12).

Endgültige Herangehensweise

Basierend auf dem bisher durch die nationalen und internationalen Gruppen Erreichten wird folgende Herangehensweise für die Wiederherstellung der Lehmbauten der Bam Zitadelle definiert:

- Verschließen aller Risse von mind. 2 cm Stärke mit injiziertem Lehm, wie im Sistani Haus, Stall und Gouverneursdistrikt.
- Alle Zugelemente erneuern und verstärken mit oder ohne Endplatten, wie im Sistani Haus und Stallgebäude.
- Ein aus vertikalen und horizontalen Elementen bestehendes Rahmenwerk wie im Sistani Haus in die Wände einfügen. Die vertikalen Elemente bis zu 1,5 m tief in den Boden einlassen.
- Von außen Einfügen von Geogitternetzen in allen Bögen und Kuppeln, wie im Stall.
- Ersetzen aller geschädigten Adobesteine mit verstärkten Steinen in der Pyambar Moschee.

- Durch einfache Methoden das Gewicht der Wände im Gouverneursdistrikt reduzieren oder auch die Wanddicke vergrößern.
- Dort auch die Bodenplatte stabilisieren, um Mitschwingen zu verhindern.
- Im Sistani Haus mit Palmfasern verstärkte Adobe verwenden.
- Im Sistani Haus Bögen und Kuppeln mit Ringbalken verstärken.
- Gunifasern für die Stabilisierung von Adobes verwenden und ein Modell für Tests im Erdbebenlabor von Bam, das im Bau ist, produzieren.

Referenzen

- [1] Bam Declaration & Recommendation, International Workshop on Recovery of Bam's Cultural Heritage, 17-20 April 2004
- [2] Report, Comprehensive State of Conservation Report for the World Heritage Property of Bam and its Cultural Landscape, Dr Eskandar Mokhtari & Shirin Shad, 2008
- [3] Annual Report, Technical and Engineering Activities in Recovery Project of Bam's Cultural Heritage, Dr Eng. Mahmoud Nejati, 2008



material like straw (in the adobe unit), wood and palm (as tensile elements), etc.

New Methods (Figs .10, 11):

Doubtless, the new techniques should be used very carefully, since their effectiveness can produce irreversible damage. New techniques such as the insertion of fiberglass, grout injection, etc., are often irreversible and have been used without considering the possible negative side-effects or compromising the original overall concept. In Bam Citadel for the first time there has been new experience in supplementing the remains using new methods. Geo-grid and a natural grout have been used in the Stable. It was inserted between every five layers of adobe and in some parts it wraps around the wall to provide appropriate resistance against earthquake load. There are vertical elements every 50 cm. Careful control is very important here because the injection pressure may cause sudden cracking, especially in the roof area and domes. Another difficult problem is repairing the disjointed foundations, walls and roofs, not previously noted.

Diagnosis/safety evaluation, final approval and implementation of the restoration plan

The basic measures for retrofitting the mechanical properties of adobe include the following items:

- Finding a suitable soil deposit to produce high quality adobe.
- Earning the proper percentage for producing the retrofit adobe bricks.
- Searching for the natural additives to improve the mechanical properties of the adobe (for example palm fibers, Fig. 12).

Final approaches

In accordance with the national and international achievements of the professional teams, the following approaches to the restoration of the adobe structures in the Citadel should be considered:

- Strengthening and injection of cracks up to a maximum 2 cm wide, which was implemented in Sistani House, the Stable and District of the Governor.
- Strengthening by replacing the tensile elements, with or without endplates, replacing the elements through injection and post-tensioning the endplates. This method was used in Sistani House and the Stable.
- Positioning the vertical and horizontal elements inside the walls, such as in Sistani House; inserting the vertical elements 1.5 m below ground level to eliminate the uplift effect. Horizontal elements were connected to adjacent walls to avoid failure through earthquake loads.
- Integration of the outer surfaces like the arches and domes with the geo-grids, as in the Stable.
- Strengthening by replacement of deteriorated adobe bricks, as in Pyambar Mosque.
- Strengthening by simple measures such as reducing the weight of the structures or increasing the thickness of the walls, as in the Barracks or Pyambar Mosque,
- Strengthening the subsoil for stabilization and to avoid the effect of resonances, as in District of Governor.
- Use of adobe reinforced by palm fibers, as in Sistani House.
- Supporting the arches and domes in the structure with ring beams, as in Sistani House.
- Use of the natural fibers such as Guni to strengthen adobe construction and building a model to test in the Bam Earthquake Laboratory (under construction).

References

- [1] Bam Declaration & Recommendation, International Workshop on Recovery of Bam's Cultural Heritage, 17-20 April 2004
- [2] Report: The Comprehensive State of Conservation Report for the World Heritage Property of Bam and its Cultural Landscape, Dr Eskandar Mokhtari & Shirin Shad, 2008
- [3] Annual Report, Technical and Engineering Activities in the Recovery Project of Bam's Cultural Heritage, Dr Eng. Mahmoud Nejati, 2008