

Die Stabilisierung der gefährdeten Grottendecke des Dafosi

Einleitung

Die gefährdeten Felspartien der Grottendecke waren stets das zentrale Problem bei der deutsch-chinesischen Zusammenarbeit beim Dafosi-Projekt. Die Weiterführung von Konservierungsmaßnahmen in der Grotte erforderte zunächst eine erfolgreiche Sicherung der Decke. Deutsche und chinesische Wissenschaftler haben, gestützt auf gründliche Untersuchungen, in enger Zusammenarbeit einen Maßnahmenplan beschlossen, dem die chinesische Zentralbehörde in Beijing (Nationales Büro für Kulturgüter) nach eingehender Prüfung zugestimmt hat.

Mitgewirkt haben die Kollegen Prof. Ge Xiurun von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften für Bodenmechanik in Wuhan, Huang Kezhong vom Institut für die Konservierung von Kulturgütern des Nationalen Büros für Kulturgüter, Prof. Gudehus, Wu Wei und Zou Yazhou von der Universität Karlsruhe sowie Prof. Snethlage vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege.

Das Technische Zentrum für die Pflege der Kulturgüter in Xi'an ist auf chinesischer Seite für das Projekt Dafosi zuständig und hatte die Aufgabe, bauliche Sicherungsmaßnahmen umzusetzen. Die Ingenieurfirma Nordwest Bau für Festgesteine GmbH wurde ausgewählt, da sie praktische Erfahrungen vorweisen konnte und über die entsprechenden Vorrichtungen für die Durchführung der Sicherungsarbeiten verfügt. Herr Dipl.-Ing. Zhang Wei beaufsichtigte die Baustelle.

Der Vertrag für die Felssicherung wurde am 28.4.1995 unterschrieben. Die Arbeit begann am 8.5. und wurde am 30.6. abgeschlossen. Das ganze Projekt dauerte somit von der Vertragsunterzeichnung bis zum Abschluß der Arbeiten insgesamt 65 Tage. Es wurden 123 Mörtelanker, 26 Stahlklammern und 50 Druckausgleichsscheiben angefertigt sowie zwei Sandanker erprobt. Die Sicherung wurde an der Grottendecke, am Halsbereich des Buddha Amitabha und des Bodhisattva Mahasthamaprapta sowie drei Stellen an der Nordwand durchgeführt.

Vor Beginn der Bauarbeiten wurden große Abweichungen zwischen dem ursprünglichen Vermessungsplan und der Grottendecke per se festgestellt. Aufgrund dieser Abweichungen war es schwierig, Anker an den geplanten Stellen anzubringen. Es wurde deswegen kurzfristig beschlossen, erneut einen Deckenplan mit der Lage der Risse anzufertigen, um die Ankerpunkte genau bestimmen zu können (Abb. 1).

Im Juni traf Herr Zou Yazhou aus Deutschland in Xi'an ein und half bei der Arbeit der Ankersicherung. Zwei Restauratoren vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, Herr Erwin Emmerling und Herr Rupert Karbacher, kamen anschließend ebenfalls nach Xi'an und trafen Vorkehrungsmaßnahmen zur Sicherung gefährdeter Ornamente. Es wurden u.a. Felsteile und Reliefs befestigt, die abzufallen drohten, und gelockerte Lehm-schichten auf der Oberfläche der Skulpturen gesichert. Diese Vorkehrungsmaßnahmen erwiesen sich als erfolgreich. Sie haben die wertvollen Partien an der Grottendecke so weit abgesi-

The Stabilizing of the Endangered Grotto Ceiling of Dafosi

Introduction

The endangered rock segments of the grotto ceiling have always been one of the focus points of the German – Chinese project on Dafosi. The extension of the conservation measures in the grotto initially required successful securing of the ceiling. Based on thorough investigations, the German and Chinese scientists have decided to work according to a plan of measures which has been agreed to by the Chinese central authority in Beijing (National Bureau for Cultural Goods).

The scientists involved were Prof. Ge Xiurun from the Chinese Academy of Science for Soil Mechanics in Wuhan, Mr. Huang Kezhong from the Institute for Conservation of the National Bureau for Cultural Goods, Prof. Gerd Gudehus, Mr. Wu Wei and Mr. Zou Yazhou from the University of Karlsruhe as well as Prof. Rolf Snethlage from the Bavarian State Conservation Office.

On the Chinese side, the Technical Centre for the Preservation of Cultural Property in Xi'an was responsible for the Dafosi project. The Technical Centre also had the assignment to carry out structural securing measures. An engineering company (Northwest Construction for Hard Rocks Ltd.) was chosen, since it proved to have practical experience and could provide the necessary apparatus for accomplishment of the securing work; Dipl. Engineer Zhang Wei supervised the building site.

The contract for the rock securing was signed on April 28, 1995. The work began on the May 8, and was completed on the June 30. Consequently, the whole project lasted a total of 65 days from the signing of the contract to the termination of the work. 123 mortar anchors, 26 steel pegs and 50 pressurized discs were manufactured, and two sand anchors were tested. The securing work was carried out on the grotto ceiling, the necks of the Buddha Amitabha and the Bodhisattva Mahasthamaprapta as well as at three places on the north wall.

Before the start of the work, large deviations between the original measuring plan and the grotto ceiling were established. Because of these deviations, it was difficult to put in the anchors at the planned positions. For this reason it was quickly decided to draw up a new ceiling plan with the position of the fissures, so that the anchorage points could be determined accurately (fig. 1).

In June Mr. Zou Yazhou arrived in Xi'an from Germany and helped with the work of anchor securing. Two restorers from the Bavarian State Conservation Office, Mr. Erwin Emmerling and Mr. Rupert Karbacher, also came to Xi'an and took precautionary measures to secure endangered ornaments. For example, rock parts and reliefs which threatened to fall off were reattached and loosened clay layers on the surface of the sculptures were secured. These precautionary measures proved to be successful. They have secured valuable sections of the grotto ceiling so that these could not be further damaged by the vibration of the drillings.

大佛窟顶部危崖锚杆加固工程概况

引言

顶部危崖一直是 大佛寺合作研究期间双方关心的问题，它牵扯到下一步的研究工作和保护工程能否顺利进行，因此就危崖加固问题中德双方专家密切合作，进行了周密的调查、研究、分析，制定了切实可行的方案，并得到中国国家文物局的认可。

对这项工作的研究先后做出贡献的有武汉中国科学院岩土力学研究所的葛修润教授，中国国家文物局文物保护研究所的黄克忠先生，德国卡尔斯鲁大学古德

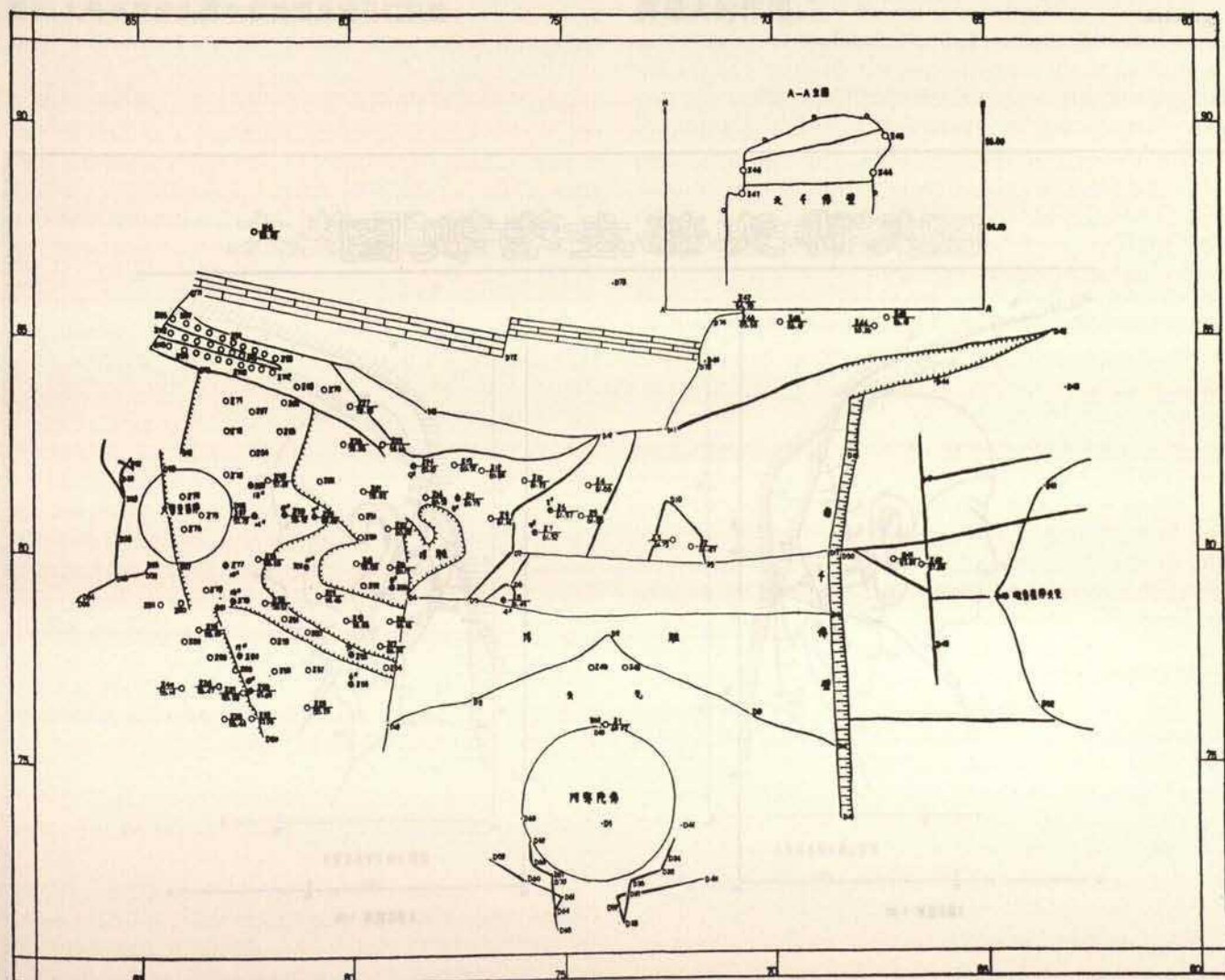
胡思 (Gudehus) 教授及吴伟、邹亚洲三位先生，我们的合作伙伴巴州文物局的施奈特拉格 (Snehtlage) 教授等当然都功不可没。

中国西安文物保护技术中心作为大佛寺合作保护的 中方机构，负责危崖加固的具体实施工作。我们经过考察，选择具有实际工程经验和设备的西北有色岩土工程有限责任公司承担施工任务。中心由张炜工程师现场负责。

Abb. 1. Plan der Grottendecke mit den Ankerpunkten

Fig. 1. Map of the grotto ceiling with anchor positions

图 1. 大佛寺石窟加固钻孔分布顶仰视图



chert, daß diese nicht durch die Erschütterungen der Bohrungen weiter beschädigt wurden.

Durchführung der Arbeiten

Die deutschen und chinesischen Fachleute bestimmten aufgrund der gemeinsamen Untersuchungen die genaue Lage der Anker, deren Anzahl möglichst gering gehalten wurde.

Die Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung und der tatsächlichen Ausführung sind:

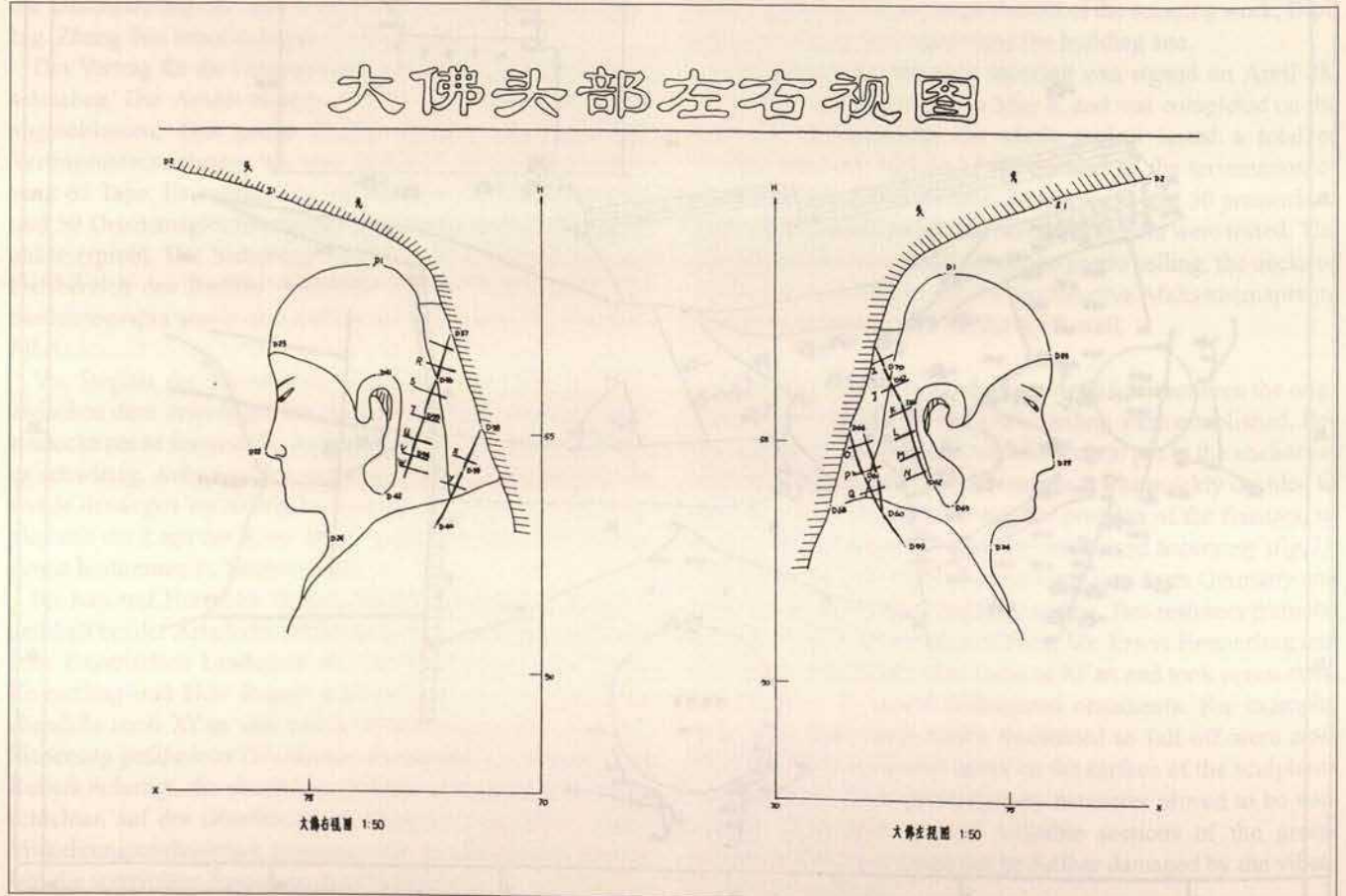
1. Ursprünglich sollten ausschließlich lange Zementanker eingesetzt werden. Die Enden der Anker sollten 10 mm im Fels versenkt werden. In der Praxis wurden Anker mit Schraubgewinde verwendet, die durch Stahlplatten und Muttern gesichert wurden.
2. Zur Fixierung des großen Risses an der nordöstlichen Ecke wurden - anders als ursprünglich geplant - kurze Anker, verschweißt mit einer $\text{Ø } 6$ Bewehrung aus Stahlgewebe.
3. Die Nordwand der Tausend Buddhas sollte ursprünglich zur Stabilisierung durchbohrt werden. Dabei sollte die Stahlplatte an einem Ende durch eine Mutter fixiert und am anderen Ende festgeschraubt werden; der Hohlraum in der Mitte mit Holz verkeilt werden. Bei der tatsächlichen Ausführung wurden jedoch an einem Ende Mörtelanker und am anderen Ende Reibungsanker verwendet.
4. Im Kopf des Bodhisattva Mahasthamaprapta wurden drei $\text{Ø } 22 \times 4100$ mm große Mörtelanker schräg in die Felsen eingesetzt.

Development of the Work

The German and Chinese experts determined on the basis of the in situ examinations the exact position of the anchors, whose number was kept as low as possible without losing their effectiveness. The variation between the original planning and the actual accomplishment can be summarized would be presented as follows:

1. Originally, only long cement anchors were to have been inserted. The heads of the anchors should have been sunk 10 mm into the rock mass. In practice anchors with revolving heads, which were screwed tight with steel plates and nuts were used.
2. To secure the large fissure on the northeast corner, short anchors, different than originally planned, soldered with a $\text{Ø } 6$ reinforcement out of steel netting were used.
3. Originally, the north wall of the Thousand Buddhas was to have been drilled right through to make it more stable. In addition to the steel plate, with one end screwed tight to the other end by means of a nut, wooden wedges were to have been used in the cavity. What was actually done to stabilize the wall of the Thousand Buddhas was that at one end mortar anchors were used and at the other end rolling anchors.
4. At the head area of the Bodhisattva Mahasthamaprapta, three $\text{Ø } 22 \times 4100$ mm mortar anchors were set at an angle into the rock in order to fasten the head securely.

2



本次加固工程于95年4月28日签订合同，5月8日开工，6月30日全部竣工，前后历时65天。累计完成砂浆锚杆123根，骑马钉26件，压力压变片50件，并进行了两根砂锚杆试验。加固的部位有：窟顶、阿弥陀佛颈部、大势至菩萨颈部、北壁危崖等3处。

在施工开始前，测量放线时发现原测绘图与实际窟顶出入较大，因此很难按准确位置布置锚杆。所以临时决定重新实测崖顶仰视平面及裂缝位置图，以利准确定位(图1)。

六月初德方邹亚洲先生到达西安，协助进行锚杆加固工作。随后以艾默林先生为首的数位巴州文保局文物修复专家到达西安，为锚杆加固工程进行前期准备，包括销钉有危险的岩石，剥落的雕塑，粘接翘起的石层，雕刻表面等。这些工作卓有成效，保证了在锚孔钻进阶段不致因震动损坏窟顶有价值的部分。

中德双方专家在现场研究的基础上，为每一根锚杆确定位置，保证做到尽量少设锚杆。并使每一根锚杆发挥最大的作用。

◁ Abb. 2. Kopf des Großen Buddha mit Lage der Stahlklammern

Fig. 2. Head of the Great Buddha with positions of the steel anchors

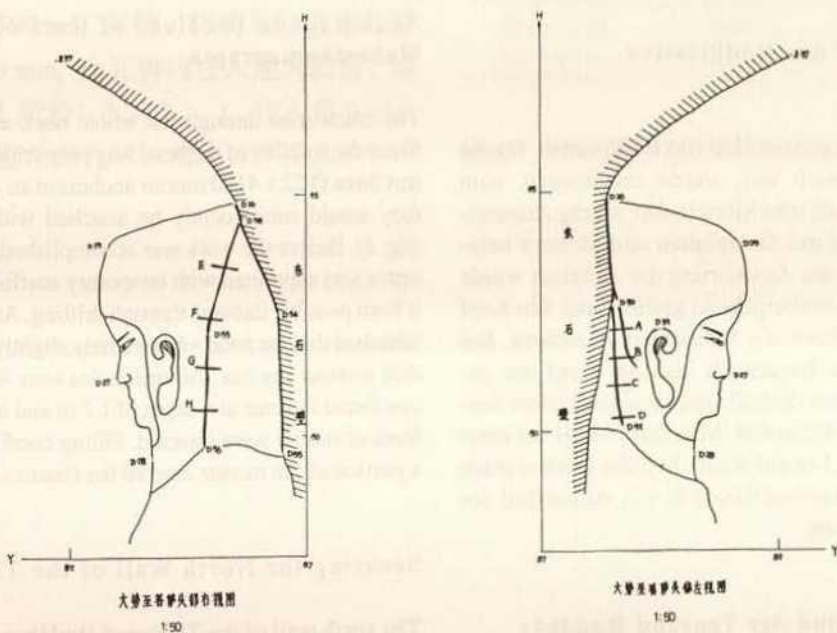
图2. 大佛头部左右视图及骑马钉位置

Abb. 3. Kopf des Bodhisattva Mahasthamaprapta mit Lage der Stahlklammern

Fig. 3. Head of the Bodhisattva Mahasthamaprapta with positions of the steel clamps

图3. 大势至菩萨头部左右视图及骑马钉位置

大势至菩萨头部左右视图



Ausführung der Verankerung

Nach Montage der Bohrmaschine wurde die Bohrstange zunächst vertikal gegen die Felsplatten gerichtet, dann entsprechend dem Verlauf der Risse der exakte Bohrwinkel eingestellt. Es wurden eine $\varnothing 42$ Bohrstange und ein $\varnothing 48$ YG8 legierter Bohrkopf verwendet. Die Positionen der Anker sind in Abbildung 1 dargestellt.

Mörtelinjektionen

1. Das Mischungsverhältnis des Mörtels betrug: Sand: Kalk: Wasser: Zement = 1 : 1 : 0,4 : 0,2.
2. Der Mörtelanker mit einer hohlen Stange zur Entlüftung und das Injektionsrohr wurden in das Bohrloch eingesetzt.
3. Die Mörtelmasse wurde in das Injektionsrohr eingefüllt.
4. Das Injektionsrohr wurde an das Ankerloch dicht angeschlossen. Die Injektionspumpe preßte den Mörtel in das Ankerloch ein. Das Mörtelvolumen pro Anker betrug 3,2 l; der Füllungskoeffizient $K = 1,1$.
5. Die Injektionspumpe wurde entfernt. Die Stahlplatte wurde angelegt und festgeschraubt.
6. Stahlplatte, Mutter und Ankerkopf wurden zweimal lackiert.

Anbringung von Stahlklammern am Kopf des Buddha

Die Positionen der Stahlklammern wurden entsprechend der Lage der Risse an planen Oberflächen festgelegt (Abb.2). Der Buddhakopf wurde vorübergehend mit einem Gerüst gestützt. Mit einem vibrationsfreien Bohrer $\varnothing 50$ wurden 450 mm tiefe Löcher gebohrt und anschließend Vierungen in den Fels zur Aufnahme der Klammern gestemmt. Die Vierungen sind jeweils 50 mm breit und 40 mm tief. In die Löcher für die Klammerschenkel wurde Zement gegossen; im Mischungsverhältnis: Zement-Wasser 3 : 1; Injektionsvolumen: 0,65 l. Anschließend wurden die Stahlklammern eingesetzt.

Verankerung am Kopf des Bodhisattva Mahasthamaprapta

Der Riß verläuft durch den ganzen Hals des Bodhisattva. Da die Stabilität des Kopfes kritisch war, wurde entschieden, vom Scheitel her drei $\varnothing 22 \times 4100$ mm Mörtelanker schräg einzusetzen, die dann anschließend mit Stahlplatten und Muttern befestigt wurden (Abb.3). Vor der Ausführung der Arbeiten wurde der Kopf des Bodhisattva vorübergehend gestützt, um den Kopf vor eventuellen Schäden durch die Bohrungen zu sichern. Bei einer Probebohrung wurde festgestellt, daß der Kopf nur geringfügig vibrierte. Es konnte deshalb ohne Risiko gebohrt werden. Alle Bohrlöcher sind 4,2 m tief. Man traf jeweils bei einer Tiefe von 1,2 m und von 2,1 m auf Risse. In jedes Loch wurden 13 l Mörtel injiziert; Füllungskoeffizient $K = 2$, da ein Teil des Mörtels in die Risse eindrang.

Sicherung der Nordwand der Tausend Buddhas

Die Nordwand der Tausend Buddhas ist durch zwei Risse gespalten und die Steinblöcke sind dadurch versetzt. Die Wand

Construction of the Anchorage

After fastening the drilling machine, the drill rod was first of all adjusted vertically against the rock slabs, then was adjusted to the exact drill angle according to the fan shaped fissure that had developed. A $\varnothing 42$ drill rod and a $\varnothing 48$ YG 8 alloy drill head were used. The positions of the anchors are depicted in figure 1.

Injections of mortar

1. The mixture proportions of the mortar are: sand : lime : water : cement = 1 : 1 : 0.4 : 0.2.
2. The mortar anchor, fitted with a hollow rod for ventilation and with an injection pipe, was inserted into the drill hole.
3. The prepared mortar mass was filled into the injection pipe.
4. The injection pipe was hermetically sealed as it was connected to the anchor hole. The injection pump pressed the mortar into the anchor hole. The volume of mortar for each anchor came to 3.2 litres; the filling coefficient $K = 1,1$.
5. The injection pump was removed. The steel plate was laid and subsequently screwed tight.
6. The steel plate, the nut and the anchor head were painted twice.

Fixing of the steel pegs to the Buddha's head

The positions for the steel pegs were determined on the basis of the location of the fissures, where the surface is flat (fig. 2). The Buddha's head was supported temporarily with a scaffold. With a $\varnothing 50$ vibration-free drill, a 450 mm deep hole was drilled; subsequently notches were cut into the rock, in each case connecting, the two holes for the shank of a peg. The notches are each 50 mm wide and 40 mm deep. Cement glue was poured: in the holes for the peg shank, the mixture proportion: TA - 801 cement glue powder to water 3:1. Injection volume: 0.65 litre. Subsequently the steel pegs were inserted.

Anchorage to the Head of the Bodhisattva Mahasthamaprapta

The crack runs through the whole neck area of the Bodhisattva. Since the stability of the head was very critical, it was decided to insert three $\varnothing 22 \times 4100$ mortar anchors at an angle from the hair line; they would subsequently be attached with steel plates and nuts (fig. 3). Before the work was accomplished, the head of the Bodhisattva was supported with temporary scaffolding in order to protect it from possible damage through drilling. At a test drilling it was established that the head vibrated only slightly. It was thus possible to drill without any risk. All drill holes were 4.2 m deep. In each case one found fissures at a depth of 1.2 m and at 2.1 m. In each hole 13 litres of mortar were injected. Filling coefficient $K = 2$, since only a portion of the mortar entered the fissures.

Securing the North Wall of the Thousand Buddhas

The north wall of the Thousand Buddhas is split by two fissures and the stone blocks have therefore shifted. The wall is in danger of collapsing. Originally it was planned to drill through the wall with steel rods. This was not possible, as almost all drill

其余工程与设计有区别处为:

1. 原全长胶结锚杆, 外端沉入岩体内 10 mm, 改为螺丝端杆, 加钢板用螺母紧固。
2. 东北角大裂缝加固改为短锚杆加焊 $\phi 6$ 钢筋网。
3. 北千佛壁由原穿透岩壁, 一端螺母紧固, 另一端用铁件稳定千佛壁, 中央夹木块的方案, 改为一端为砂浆锚杆, 另一端用钢筋, 抗骨锚杆稳定千佛壁。
4. 大势子菩萨头顶部斜向布置三根 $\phi 22 \times 4100$ 砂浆锚杆, 以稳定其头部。

关天危崖加固的几个方面:

一. 锚杆施工:

施工时, 将钻机定位后, 以钻杆垂直岩层层面裂缝面, 并遵照承载拱扇形布置原理, 调整钻孔角度。钻机用 $\phi 42$ 钻杆, $\phi 6$ YG8 合金钻头钻孔。

二. 注浆:

1. 砂浆配比, 砂: 灰: 水: 107 胶 = 1:1:0.4:0.2。
2. 将装有排气胶管的锚杆插入孔内。
3. 将浆配匀装入注浆管中。
4. 将注浆管插入锚孔口, 密封, 然后用注浆机将砂浆压入锚孔中, 注浆量 3.21, 充盈系数 K1.1。
5. 排除注浆机, 套入垫板用螺母紧固。
6. 将孔口垫板, 螺母, 锚杆头二度刷漆。

三. 骑马钉施工:

骑马钉施工见图 2; 根据裂缝和颈部平整情况, 确定骑马钉位置; 对佛头进行临时可靠支撑; 用 $\phi 50$ 无震钻机钻孔, 深 450 mm, 深槽, 将骑马钉两脚孔贯通, 槽宽 50、深 40 mm, 向孔脚内注入建筑胶粉, 其配比为: TA-801 胶粉: 水 = 3:1, 注入量 0.651; 插入骑马钉, 并用胶粉将孔口, 槽内抹平压实。

四. 大势至菩萨头顶锚杆施工。

1. 大势至萨颈部裂缝已贯通, 头部处于临界稳定状态, 故决定从头顶斜向施工三根 $\phi 422 \times 4100$ 砂浆锚杆, 并用垫板, 螺母紧固 (图 3)。
2. 施工前, 对大势至菩萨头部用架管临时支撑, 以确保钻孔时头部安全。
3. 试钻时, 观测头部受震情况。经测试, 其受震十分微弱, 钻孔是安全的, 可以正式钻孔。
4. 孔深均为 4.2 m, 其中在钻到 1.2 米和 2.10 米时分别遇到裂缝两条。
5. 注浆, 每孔实注浆 131, 充盈系数 $K = 2$, 其原因是部分砂浆渗入裂缝之中所致。
6. 砂浆配隔比同前。

五. 北千佛壁加固:

北千佛壁被 两条裂缝断开错位, 其势甚危。原设计将锚杆穿透北壁, 实际上无法穿过, 因钻孔位于拱形门上实体部位。仅一孔是调整孔位后刚好从拱形门洞上穿出。

因此将锚杆改为砂浆锚针, 一头加焊铁件, 抗滑锚杆以稳定千佛壁。本处共施工 9 根砂浆锚杆, 4 根抗滑锚杆。

六. 砂锚杆, 仅供实验用。

根据崖顶加固后的效果看,

1. 本工程设计是合理的, 是符合实际的。
2. 施工工艺是合理的, 质量是好的。
3. 窟顶今后不会发生大块岩石脱落, 危及佛身。
4. 由于构造裂缝发育以及岩石层理发育, 风化仍未得到控制, 今后局部的, 小面积的风化离层剥落仍会发生。

结论: 加固后窟顶岩体是稳定的。

war einsturzgefährdet. Ursprünglich war geplant, die Wand zu durchbohren. Dies war nicht durchführbar, denn fast alle Bohrlöcher hätten sich in dem Felsabschnitt über der Türöffnung befunden und nur ein Loch hätte man knapp über der Türöffnung bohren können. Daher wurden anstelle von Stahlstangen neun Mörtelanker eingesetzt, die jeweils an einen Ende mit Eisenbesätzen verschweißt sind. Außerdem wurden vier Reibungsanker zur Stabilisierung der Felswand der Tausend Buddhas verwendet.

Schlußbewertung

Die Sicherung der Grottoendecke und der Köpfe der beiden Buddhafiguren war wegen der großen Gefährdung unabdingbar. Die Ausführung verlief plangemäß und wurde handwerklich gut ausgeführt. Die Grottoendecke ist so weit gesichert, daß keine größeren Platten mehr abfallen können. Da die Ribbildung jedoch grundsätzlich nicht gestoppt werden kann, besteht die Möglichkeit, daß sich künftig kleine Gesteinsschichten ablösen könnten.

(aus dem Chinesischen übersetzt von Shing Soong-Müller)

holes would have been made in the rock area over the door opening and only one hole could have been drilled just above the door opening. Therefore, instead of steel rods nine mortar anchors were inserted, each of which has iron cladding welded to one end. In addition four rolling anchors were used to stabilize the rock wall of the Thousand Buddhas.

Final Assessment

The securing of the grotto ceiling and the heads of both Buddha figures was of extreme importance because of the great danger. The work was carried out according to plan and was well performed by the craftsmen. The grotto ceiling is so well secured that no further rock slabs can fall off. Since the formation of fissures cannot be stopped the possibility still remains that in the future small rock layers could loosen.

(translated from German to English by Katharin Mahrla)