

Die numerische Simulation und Analyse des 3D FE-Modells von Dafosi

Aufgabenstellung und Ziele

Das Hauptziel der numerischen Simulation und der Analyse des 3D FE-Modells von Dafosi liegt darin, den Spannungszustand und darauf aufbauend die Stabilität der Grotte und der Buddhafiguren zu untersuchen und zu bewerten.

Die Entstehung der an den Buddhafiguren beobachteten Risse sowie die am Gewölbe eingetretenen Schäden haben sicherlich einerseits mit den primären Gesteinseigenschaften, deren Klüftung und mit dem Fortschreiten der Verwitterung zu tun, andererseits hängen diese Schäden aber auch damit zusammen, daß bereits bei der Aushöhlung der Grotte ungünstige Spannungsverteilungen an der Felswand und den Buddhafiguren entstanden sind. Die numerische Simulation ermöglicht neue Einsichten in die Verteilung dieser Spannungen, so daß mit ihrer Hilfe die Entstehung der gefährlichen Risse an den Buddhafiguren besser verstanden werden kann.

Da das Ausmaß des numerischen Modells von Dafosi riesig ist, zudem die grundlegenden felsmechanischen Parameter meist unbekannt sind, wurde die Lösung des Problems auf der Grundlage von Erfahrungen aus anderen geologischen Projekten mit Hilfe eines linearen Ansatzes gesucht. Eine der Aufgaben war es, den möglichen Einfluß der ständigen Verwitterung und Abtragung der Felsen zu berücksichtigen. Dies kann als die Veränderung felsmechanischer-tektonischer Parameter zusammengefaßt werden, so daß die Lastverteilung zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Grotte mit der heute bestehenden, durch Verwitterung und Abtragung beeinflussten, verglichen werden kann. Auf diese Weise können die kritischen Felspartien, an denen künftig Risse entstehen könnten, und Maßnahmen zur Stabilisierung gefunden werden.

Die Gesteine, Sandstein und Tonsteinlagen, zeigen eine schichtweise Lagerung. Da sich die Klüfte kreuzen, die Tonsteinschichten äußerst dünn sind und gleichzeitig die anisotropen mechanischen Parameter fehlen, werden diese Faktoren bei der numerischen Analyse nicht in Betracht gezogen. Außerdem gibt es beträchtliche Schwierigkeiten, in einem solch umfangreichen numerischen Modell bestimmte vorhandene Risse zu simulieren. Deshalb werden in der folgenden Analyse nur die isotropen, kontinuierlichen Schichtelemente berücksichtigt.

Beim Aufbau des numerischen Modells von Dafosi sind deshalb besonders folgende Punkte zu beachten:

1. Es werden nur die Verteilung der wesentlichen Gesteinsschichtungen und deren mechanische Eigenschaften berücksichtigt.
2. Die Felswände im Innern der Grotte und die Buddhafiguren sollen aufgrund der vorhandenen Schäden in typische Verwitterungszonen eingeteilt werden.
3. In dem numerischen Modell soll die Gestalt der Felswände möglichst naturgetreu wiedergegeben werden. Die Verbindungsstellen zwischen den Buddhafiguren und der Felswand sind möglichst genau zu simulieren.
4. Die Spannungsverteilung an der Felswand und der Buddhafigur wird vom Tunnel hinter der Buddhastatue beeinflusst. Die Beschaffenheit des Tunnels unmittelbar nach der Gra-

The Numerical Simulation and Analysis of the 3D FE Model of Dafosi

Introduction and goals

The main goal of the numerical simulation and analysis of the 3D FE model of Dafosi is to examine and evaluate the state of stress and to follow up with structural stabilizing of the grotto and the Buddha figures. The formation of noticeable cracks in the Buddha figures, as well as the damage to the ceiling, is primarily connected with the structure of the stone, the crevices, and the continual erosion. On the other hand these damages are also connected to the original excavation of the grotto, where unfavourable stress distributions in the rock walls and the Buddha figures occurred. The numerical simulation permits a new understanding of the distribution of these stresses, so that the formation of the most dangerous cracks in the Buddha figures can be better understood.

Since the size of the numerical model of Dafosi is immense, and furthermore the basic rock mechanical parameters are mostly unknown, the solution to the problem was found with help of a linear approach, based on experience from other geological projects. One of the tasks was to take into consideration the possible influence of the permanent weathering and erosion of the rocks. This can be summarized as the change of rock-mechanical and tectonical parameters, so that the weight distribution at the time the grotto was finished could be compared with the weight distribution of today which is influenced by weathering and erosion. As a result, the critical rock sections, where cracks may form in the future, and possible measures to stabilize the rock might be found. The sandstone and claystone rocks show a characteristic layering. Because these cracks cross each other, the claystone layers are extremely thin and at the same time the anisotropic mechanical parameter of these layers are missing, these factors are not taken into account by the numerical analysis. In addition, there are considerable difficulties using such an extensive numerical model to simulate existing cracks. Thus, in the following analysis, only successive isotropic element layers are considered.

For the construction of the numerical model of Dafosi, the following points were especially taken into account:

1. Only the distribution of the main stone layers and their mechanical properties are considered.
2. The inner rock walls of the grotto and the Buddha figures should be divided up into typical weathering zones based upon existing damages.
3. The shape of the rock walls in the numerical model should be reproduced as true to life as possible. The connecting areas between the Buddha figures and the rock walls should be simulated as precisely as possible.
4. The stress distribution in the rock walls and the Buddha figure is influenced by the tunnel behind the Buddha statue. The nature of the tunnel after the excavation of the grotto, its present features after its partial collapse and also future rock erosion should be considered in the graduation of the FE grid.
5. The sediment deposits on the floor of the grotto are to be taken into consideration.

大佛寺石窟及佛像 三维有限元数值模拟和分析

任务和目的

大佛寺三维有限元数值模拟和分析的主要目的在于采用数值分析方法研究石窟和佛像的应力状态,从而为洞窟围岩和佛像的稳定性评估和加固治理提供重要依据。

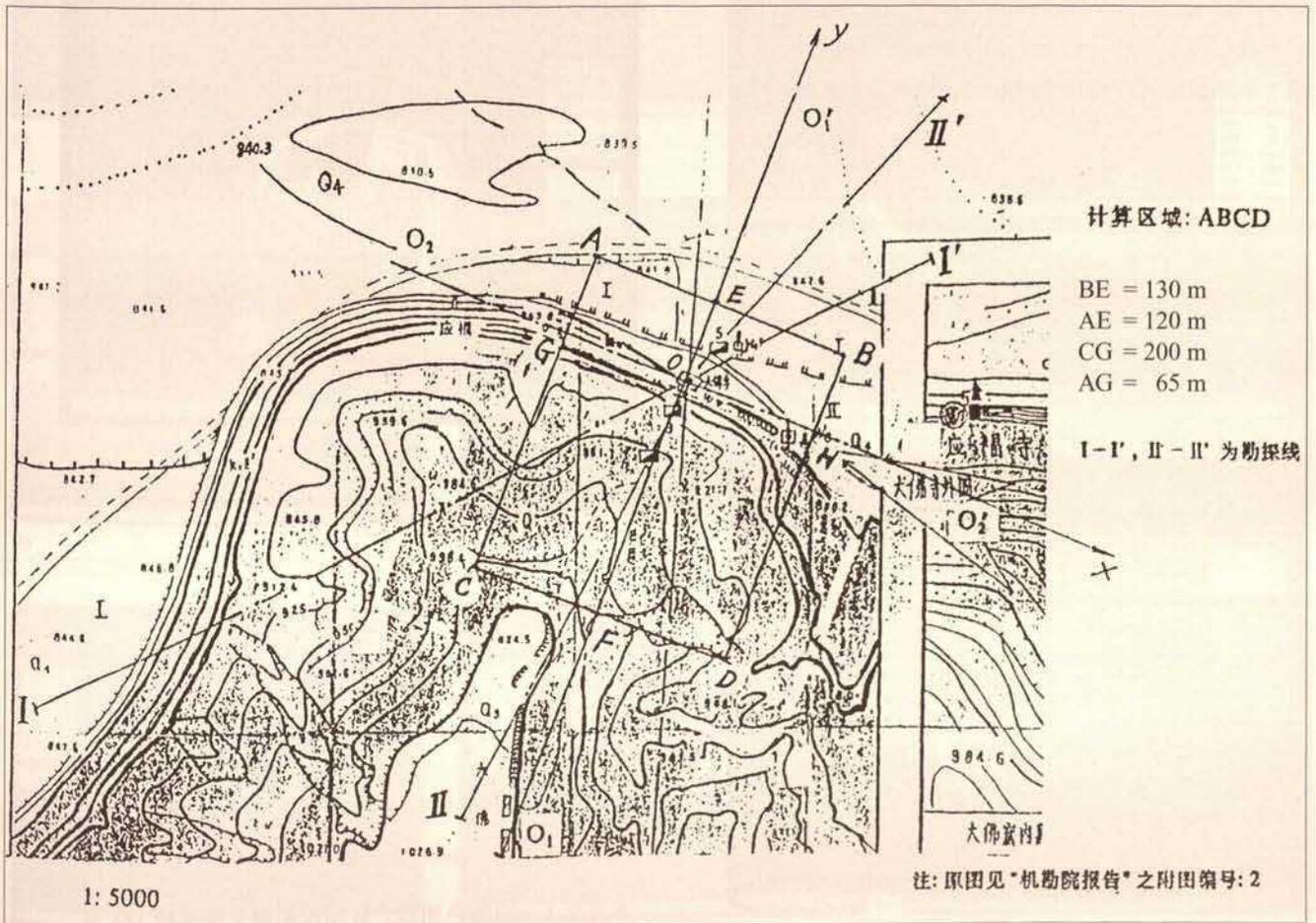
佛身上的裂缝的产生,窟顶的岩块的冒落,一方面固然与不良的岩性,风化情况和原生节理,裂隙的展布情况有关,另一方面乃是石窟开挖以后在洞壁和佛身上形成的不利的应力分布所致,用数值模拟方法能比较好地了解到应力分布情况,对于佛像产生不良裂缝的原因能作出更好的解释。

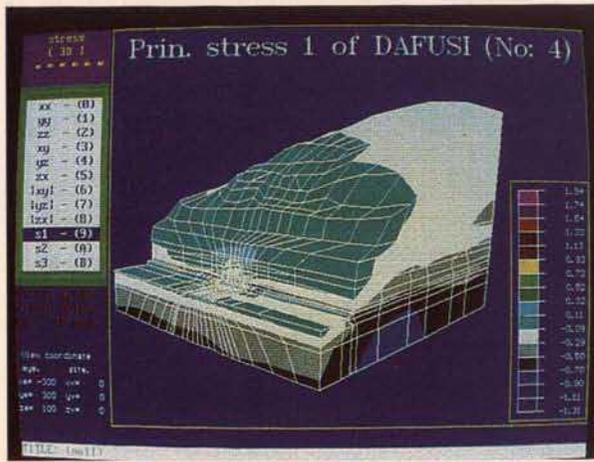
由于大佛寺数值模型规范巨大,而一些岩石力学基本参数确又十分匮乏,考虑到其他岩体工程方面的经验,对大佛寺而言我们拟采用多种不同的线性问题的求解与对比作为主要的途径。在这些线性分析算例中我们可以将由于长时间的岩石风化,剥蚀情况作为一种状态来考虑他们的影响,这可以归结为岩石力学参数的变化、岩石剥蚀的洞形变化等,从而能比较石窟刚开挖后和经过长期风化剥蚀后的受力情况的变化,并找出容易产生裂缝的部位及原因以及加固治理的原则。

Abb. 1. Lage der Koordinatenachsen x und y im Felsmassiv von Dafosi, Berechnungsgebiet ABCD

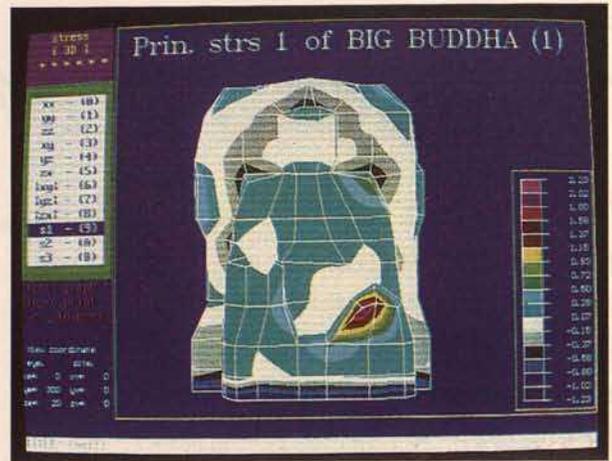
Fig. 1. Position of coordinate axes X and Y in the rock mass of Dafosi, area of calculation ABCD

图 1. 佛寺数值分析计算在平面图上的范围计算区域: ABCD; BE = 130 m; AE = 120 m; CG = 200 m; AG = 65 m

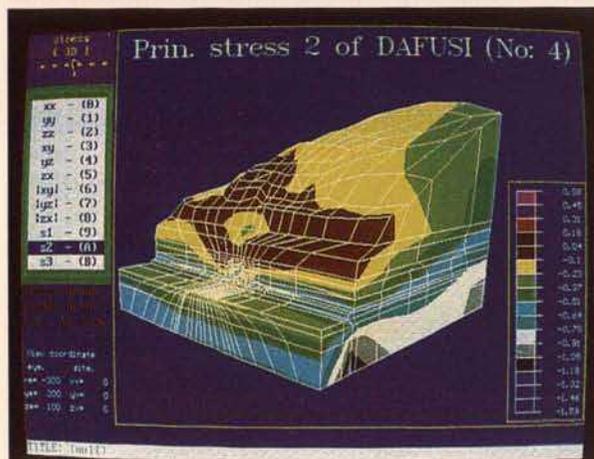




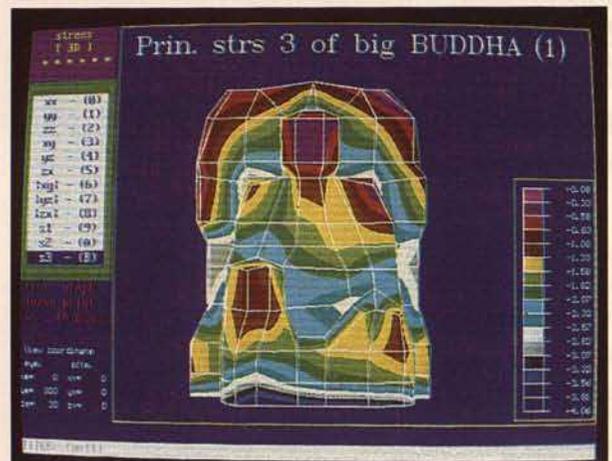
1



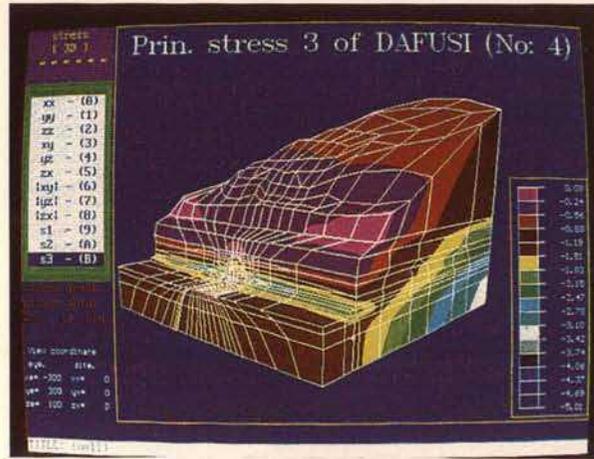
5a



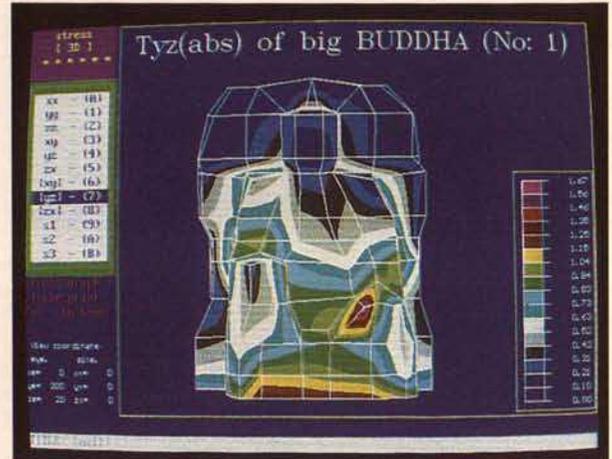
2



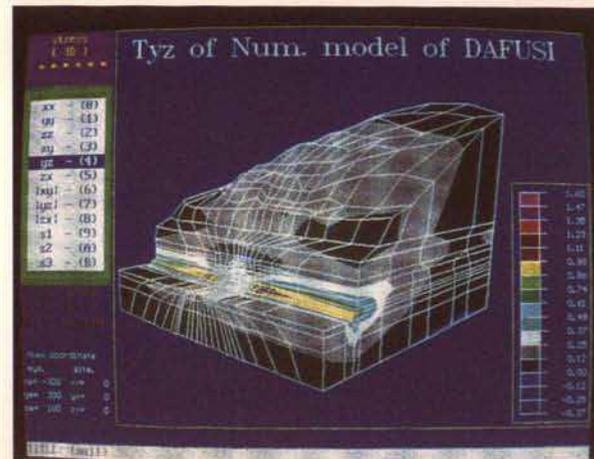
5b



3



5c

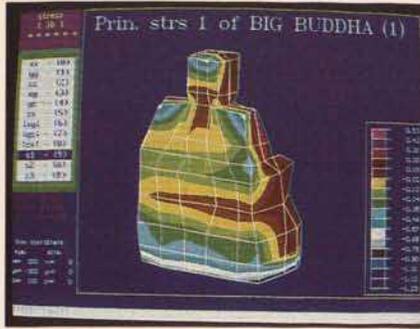


4

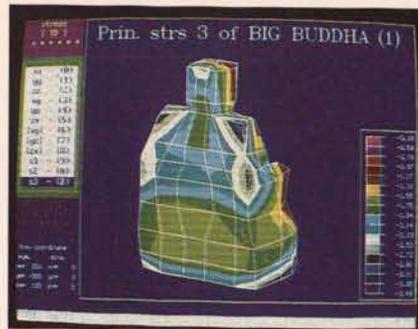
Zur Erläuterung dieser und der nächsten Farbtafeln siehe S. 180

For explanation of color plates see p. 180

本页及下一页彩色图版之详细说明释文请见第 181 页



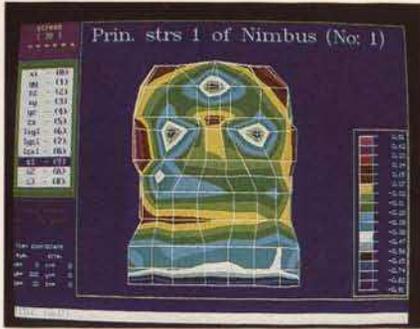
6a



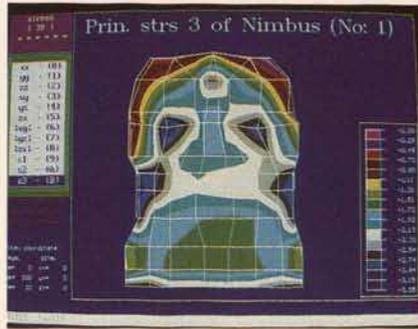
6b



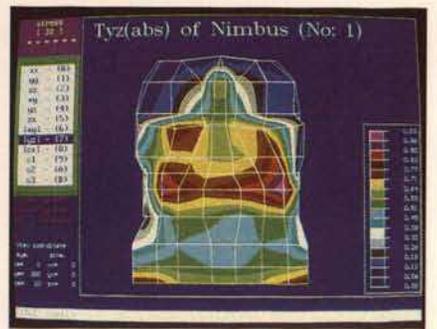
6c



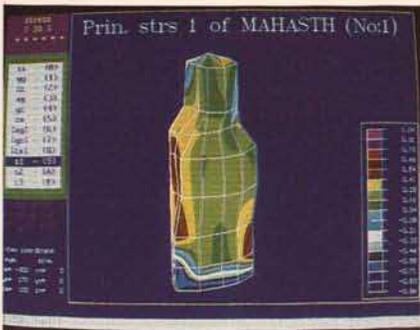
7a



7b



7c



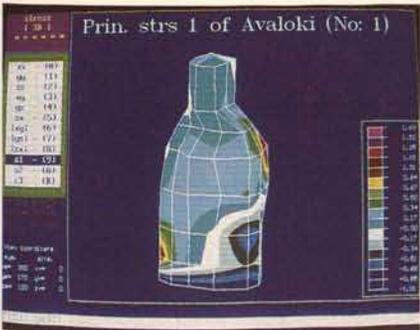
8a



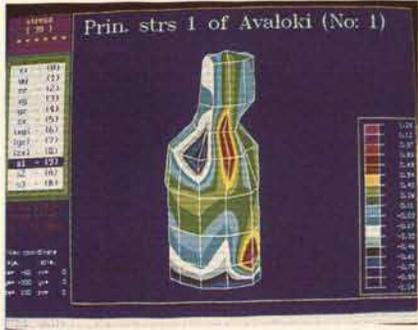
8b



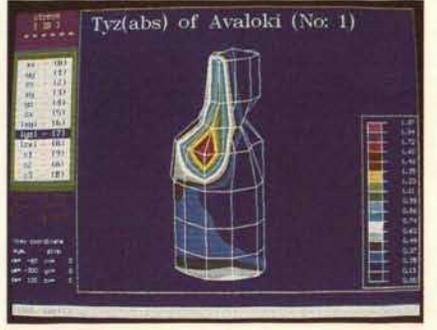
8c



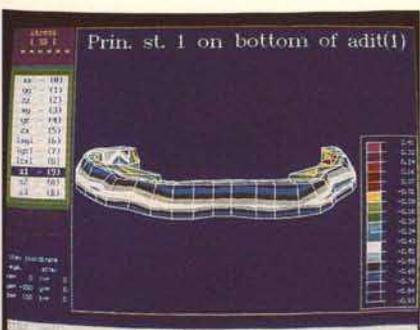
9a



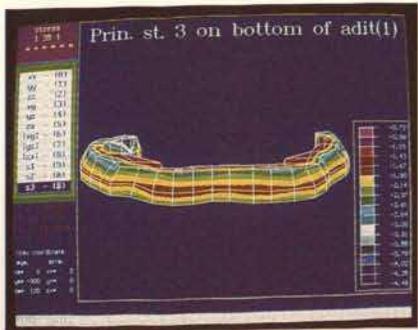
9b



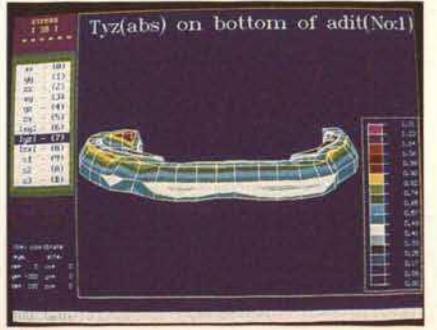
9c



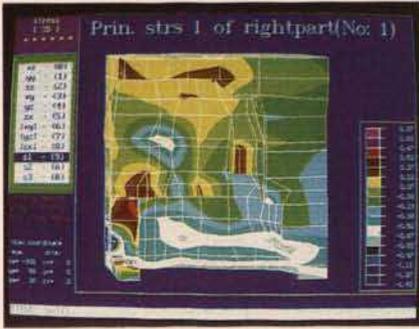
10a



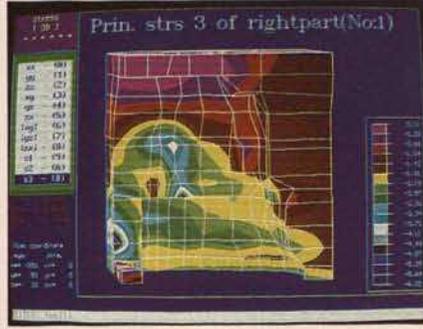
10b



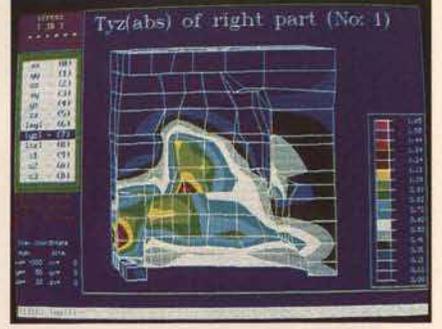
10c



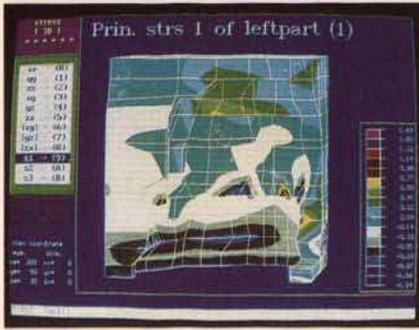
11a



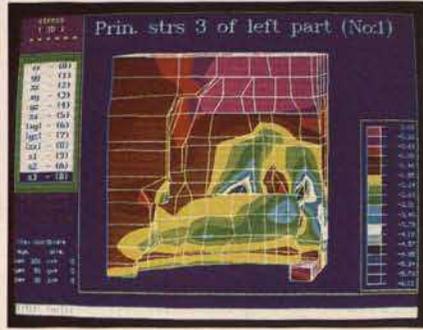
11b



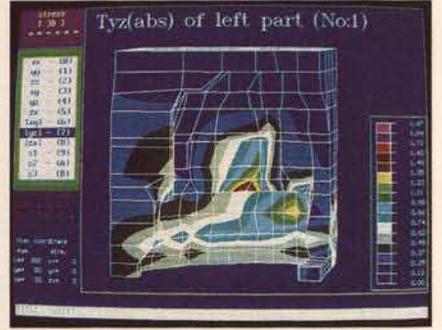
11c



12a



12b



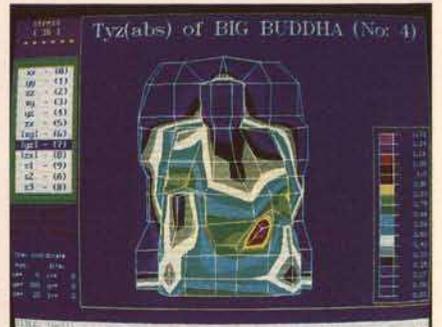
12c



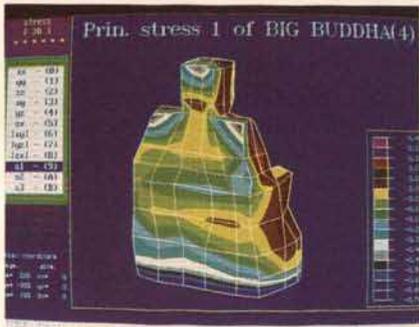
13a



13b



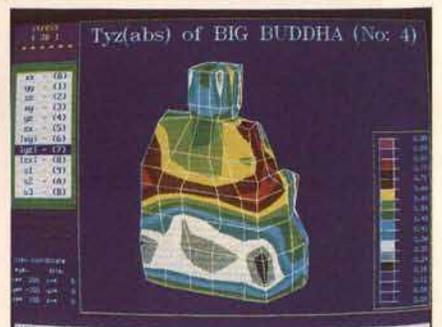
13c



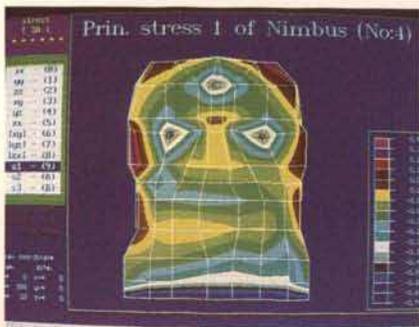
14a



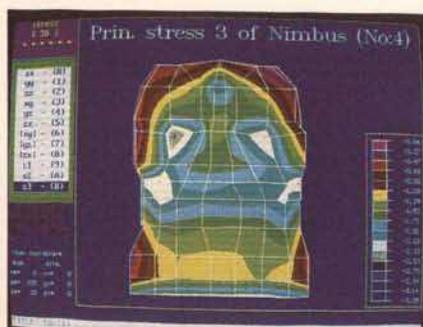
14b



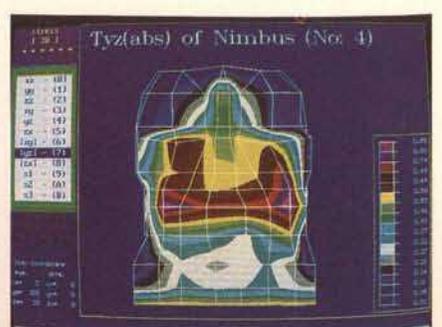
14c



15a



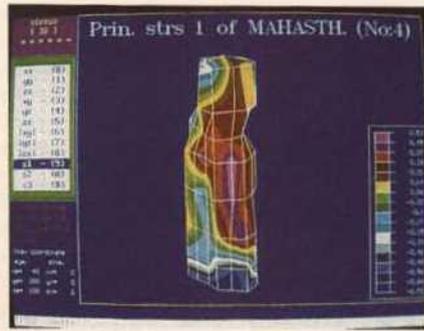
15b



15c



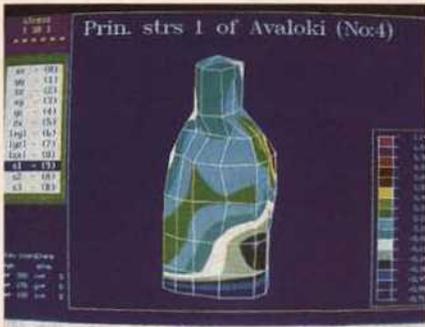
16a



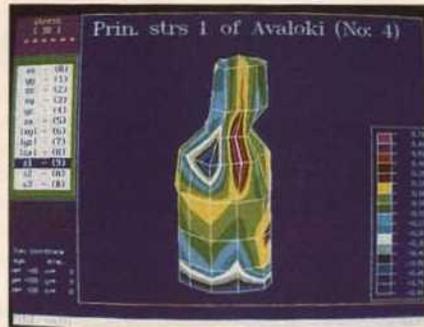
16b



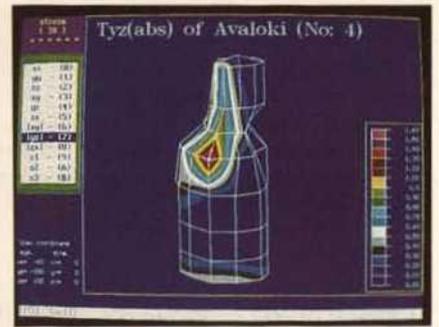
16c



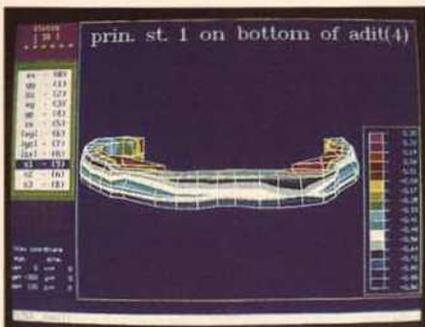
17a



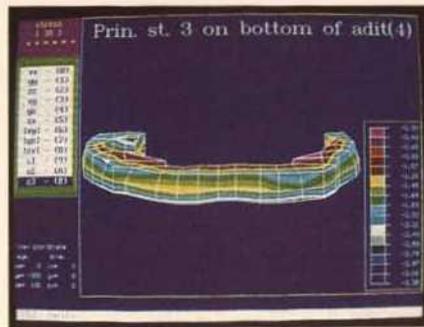
17b



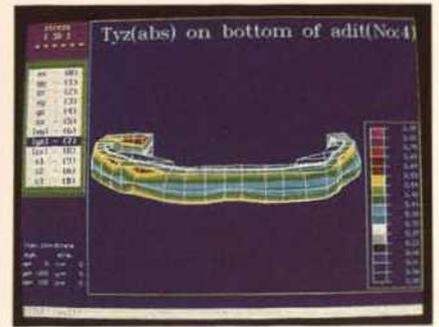
17c



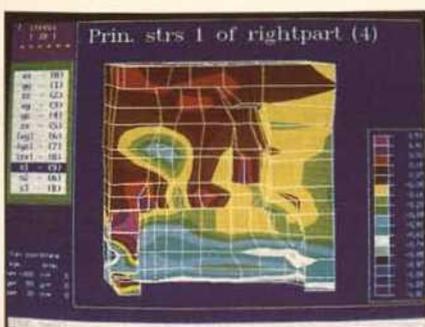
18a



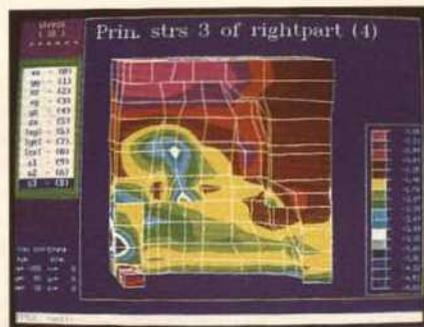
18b



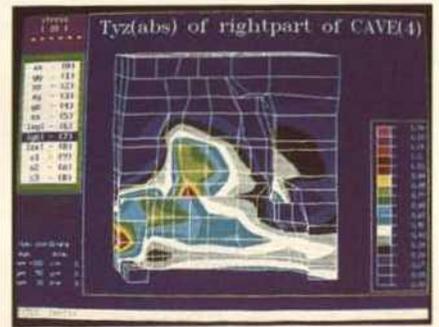
18c



19a



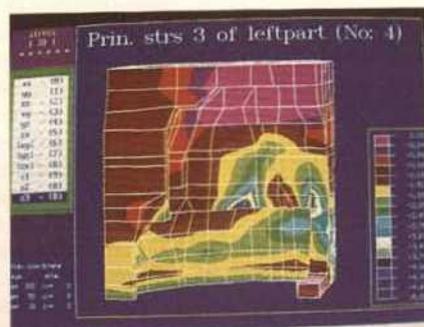
19b



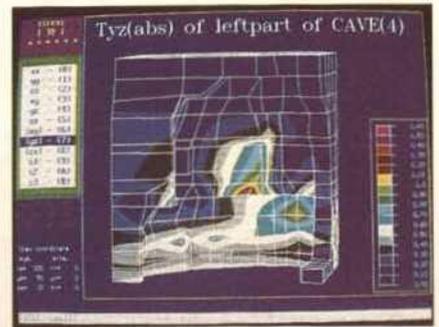
19c



20a



20b



20c

Bildunterschriften für die Farbtafeln XIV, XV, XVI, XVII

- 1 Die Verteilung der Spannung σ_1 im Gesamtmodell Dafosi.
- 2 Die Verteilung der Spannung σ_3 im Gesamtmodell Dafosi.
- 3 Die Verteilung der Spannung σ_3 im Gesamtmodell Dafosi.
- 4 Die Verteilung der Spannung $|\tau_{yz}|$ im Gesamtmodell Dafosi.
- 5 Die Spannungsverteilung auf der frontalen Oberfläche des Buddha Amitabha in der Grotte Dafosi (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 6 Die Spannungsverteilung auf dem Rücken und der Oberfläche der rechten Seite des Buddha Amitabha (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 7 Die Spannungsverteilung auf dem Nimbus des Buddha Amitabha in der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 8 Die Spannungsverteilung auf dem Bodhisattvas Mahasthamaprapta in der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 in der Front, b: die Hauptspannung σ_3 im Rücken und in der rechten Hälfte, c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$ im Rücken und in der rechten Hälfte.
- 9 Die Spannungsverteilung auf dem Bodhisattvas Avalokiteshvara in der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 in der Front, b: die Hauptspannung σ_1 im Rücken und in der linken Hälfte, c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$ im Rücken und in der linken Hälfte.
- 10 Die Spannungsverteilung im Tunnel in der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 11 Die Spannungsverteilung in der rechten Hälfte der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 12 Die Spannungsverteilung in der linken Hälfte der Grotte (Konzept 1). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 13 Die Spannungsverteilung auf der frontalen Oberfläche des Buddha Amitabha in der Grotte Dafosi (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 14 Die Spannungsverteilung auf dem Rücken und der Oberfläche der linken Seite des Buddha Amitabha (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 15 Die Spannungsverteilung auf dem angrenzenden Bereich zwischen dem Rücken und dem Nimbus des Buddha Amitabha (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 16 Die Spannungsverteilung auf dem Bodhisattvas Mahasthamaprapta in der Grotte (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 in der Front, b: die Hauptspannung σ_1 im Rücken und in der rechten Hälfte, c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$ im Rücken und in der rechten Hälfte.
- 17 Die Spannungsverteilung auf dem Bodhisattvas Avalokiteshvara in der Grotte (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 in der Front, b: die Hauptspannung σ_1 im Rücken und in der linken Hälfte, c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$ im Rücken und in der linken Hälfte.
- 18 Die Spannungsverteilung im Tunnel in der Grotte (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 19 Die Spannungsverteilung in der rechten Hälfte der Grotte (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.
- 20 Die Spannungsverteilung in der linken Hälfte der Grotte (Konzept 4). a: die Hauptspannung σ_1 , b: die Hauptspannung σ_3 , c: die Scherspannung $|\tau_{yz}|$.

Figure captions for the color plates XIV, XV, XVI, XVII

- 1 The distribution of the stress σ_1 in the complete model of Dafosi.
- 2 The distribution of the stress σ_3 in the complete model of Dafosi.
- 3 The distribution of the stress σ_3 in the complete model of Dafosi.
- 4 The distribution of the stress $|\tau_{yz}|$ in the complete model of Dafosi.
- 5 The stress distribution on the front surface of the Buddha Amitabha in the Dafosi grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 6 The stress distribution on the back and the surface of the Buddha Amitabha in the Dafosi grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 7 The stress distribution on the nimbus of the Buddha Amitabha in the Dafosi grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 8 The stress distribution on the Bodhisattva Mahasthamaprapta in the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 in front, b: the main stress σ_3 in the back and in the right half, c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$ in the back and in the right half.
- 9 The stress distribution on the Bodhisattva Avalokiteshvara in the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 in the front, b: the main stress σ_3 in the back and in the left half, c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$ in the back and in the left half.
- 10 The stress distribution in the tunnel in the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 11 The stress distribution in the right half of the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 12 The stress distribution in the left half of the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 13 The stress distribution on the front surface of the Buddha Amitabha in the Dafosi grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 14 The stress distribution on the back and the surface of the Buddha Amitabha in the Dafosi grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 15 The stress situation on the joining area between the back and the nimbus of the Buddha Amitabha (concept 4). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 16 The stress distribution on the Bodhisattva Mahasthamaprapta in the grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 in the front, b: the main stress σ_1 in the back and the right half, c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$ in the back and right half.
- 17 The stress distribution on the Bodhisattva Avalokiteshvara in the grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 in the front, b: the main stress σ_1 in the back and the left half, c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$ in the back and the left half.
- 18 The stress distribution in the tunnel in the grotto (concept 1). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 19 The stress distribution in the right half of the grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.
- 20 The stress distribution in the left half of the grotto (concept 4). a: the main stress σ_1 , b: the main stress σ_3 , c: the shearing stress $|\tau_{yz}|$.

彩色图版十四、十五、十六、十七

- 1 体区域 σ_1 应力着色图
- 2 体区域 σ_2 应力着色图
- 3 体区域 σ_3 应力着色图
- 4 体区域 $|\tau_{yz}|$ 应力着色
- 5 佛寺石窟阿弥陀佛正表面的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 6 佛寺阿弥陀佛后背和右侧表面的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 7 佛寺阿弥陀佛背光的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 8 佛寺大势至菩萨的应力分布 (一号方案); a: 正面的主应力 σ_1 , b: 右半侧及后背的主应力 σ_3 , c: 右半侧及后背的 $|\tau_{yz}|$
- 9 佛寺观世音菩萨的应力分布 (一号方案); a: 正面的主应力 σ_1 , b: 左半侧及后背的主应力 σ_1 , c: 左半侧及后背 $|\tau_{yz}|$
- 10 佛寺石窟通道的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 11 佛寺石窟右半壁的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 12 佛寺石窟左半壁的应力分布 (一号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 13 佛寺石窟大佛正面的应力分布(四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 14 佛寺石窟大佛后背和左半部表面上的应力分布 (四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 15 佛寺石窟的大佛背部和背光联结部位的分布 (四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 16 佛寺石窟大势至菩萨的应力分布 (四号方案); a: 正面的主应力 σ_1 , b: 右半侧及后背的主应力 σ_1 分布, c: 右半侧及后背部的剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 17 佛寺石窟观世音菩萨的应力分布 (四号方案); a: 正面的主应力 σ_1 , b: 左半侧及后背的主应力 σ_1 分布, c: 左半侧及后背部的剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 18 佛寺石窟通道的应力分布(四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_3 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 19 佛寺石窟右半壁应力分布 (四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_2 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$
- 20 佛寺石窟左半壁应力分布 (四号方案); a: 主应力 σ_1 , b: 主应力 σ_2 , c: 剪应力 $|\tau_{yz}|$

- bung der Grotte, seine möglichen gegenwärtigen Merkmale nach dem teilweisen Einsturz und künftige Felsablösungen sollen bei der Einteilung des Rasters berücksichtigt werden.
5. Die Sedimentablagerungen auf dem Boden der Grotte sind zu berücksichtigen.
 6. Die Gestalt der Buddhastatuen ist sehr kompliziert. Deshalb soll bei der Simulation dieser Statuen das gesamte Gebilde betont werden, wobei insbesondere die Maße von Kopf, Hals und das Profil der Statuen sowie die Verbindungsstelle mit dem Nebengestein relativ präzise simuliert werden sollen.
 7. Angesichts der großen Bruchfläche am nördlichen Teil der Decke wird dieser Teil nicht in das numerische Modell einbezogen.

Der Aufbau des numerischen 3D FE- Modells

Das primäre Spannungsfeld der Erdkruste

Die numerische Analyse setzt voraus, das primäre Spannungsfeld des Gebirges, in dem sich die Grotte befindet, richtig zu simulieren. Unterlagen über Messungen des Spannungsfeldes in der Erdkruste in diesem Gebiet fehlen aber bisher. Die Abbildung 1 zeigt deutlich, daß direkt vor der Grotte das Flußbett des Jinghe mit einer Schwemmterrasse verläuft und daß die Grotte Dafosi vom Gebirge zur Flußbettzone vorspringt. Auch wenn das regionale Spannungsfeld der Formation topographisch gesehen existiert, müßte es während des langen geologischen Zeitraums weitgehend abgebaut sein. Infolgedessen kann hier die Eigenschwerkraft des Gebirges als Modell des primären Spannungsfeldes der Erdkruste zur Berechnung und Analyse herangezogen werden.

Die Dimension des numerischen Modells

Wie die Abbildung 2 zeigt, gilt die Mittellinie des Tunnels, der vom Eingang der Grotte zur Buddhastatue führt, als Koordinatenachse Y, und die Blickrichtung, der sich der Buddha Amitabha zuwendet, als deren Richtung, auch Richtung „des angenommenen Nordpols“ genannt. Sie weicht ca. $26^{\circ} 41'$ vom Nordpol (in Uhrzeigerichtung) ab; die Achse X verläuft horizontal in O-W-Richtung, die Z-Achse vertikal nach oben. Den Vermessungsdaten vom Umriß der Felswand und der Buddhastatuen entsprechend, wird der Achsenschnittpunkt (d.h. X, Y, Z = 0) 20.5 m vom Inneren des Eingangstors der Grotte entfernt (siehe Abb. 2) in Höhe des Steinbodens (d.h. der Ablagerung) festgesetzt.

Bei der Errichtung des numerischen Modells der Grotte Dafosi werden nicht nur die Grotte, die Buddhastatuen und das angrenzende Nebengestein, sondern auch ein hinreichend großer Ausschnitt des Bergmassivs berücksichtigt, in dem sich die Grotte befindet, damit die Genauigkeit der Rechnung und der Analyse gewährleistet sind.

Auf dem Grundriß (Abb. 1) zeigt die Dimension der Berechnung ein Quadrat ABCD, das annähernd symmetrisch zur Achse Y liegt. Die Länge der X-Richtung $|CD| = 250$ m, die Länge der Y-Richtung $|AC| = 265$ m, die Länge der Flußbettzone $|AG| = 65$ m. Der Umfang der Berechnung in der Richtung der Achse Z (Abb. 3) beträgt im Bereich ABCD von $Z \approx 45$ m durch die Erdoberfläche bis zur höchsten Stelle des Bergmassivs $Z \approx 160$ m. Die Auswahl dieser Dimension macht es deutlich, daß die Maße für das Gesamtmodell die entsprechenden Längen in der Grotte (20-30 m) um fast das Zehnfache übertreffen, womit das Volumen des im Modell berücksichtigten Berg-

6. The form of the Buddha figure is very complicated. That is why in the simulation of the statues the image of the whole figure should be portrayed. Especially the size of the head and the neck and the profile of the statue, as well as the areas where it is connected with the rock, should be simulated as precisely as possible.
7. The large broken surface on the north part of the ceiling will not be taken into consideration in the numerical simulation.

The construction of the 3D FE model

The primary stress field of the earth's crust

The numerical analysis requires the primary stress field of the rock, where the grotto is found to be simulated correctly. Documents referring to the measurements of the stress field of the earth's crust in this area do not exist yet. Figure 1 clearly shows the river bed of the Jinghe forming a terraced dyke directly in front of the grotto. It can be also seen that the grotto Dafosi juts from the rocks to the river zone. Even if a regional stress field of the formation exists in a topographical way, it should have been extensively reduced over the lengthy geological time period. Consequently, in this case the gravity of the rocks can be used to calculate and analyse the primary stress field of the earth's crust.

The dimension of the numerical model

The center line of the tunnel, as shown in figure 2, which runs from the entrance of the grotto to the Buddha statue, is called the coordinate axis Y, and the direction the Buddha Amithaba faces is the direction known as "the accepted north pole". It deviates approx. $26^{\circ} 41'$ from the north pole (in a clockwise direction); the X axis runs in a horizontal east-west direction, the Z axis is directed vertically upward. The corresponding measurement data of the contours of the rock walls and the Buddha statues are established by the axis intersection (i.e. X,Y,Z = 0) which is 20.5 m away from the inner entrance gate of the grotto (see fig. 2) at the floor level (i.e. the sediment).

Not only the grotto, the Buddha statues and their bordering rocks are taken into consideration for the setting up of the numerical model of the Dafosi grotto, but also a sufficient area of rock mass where the grotto is found, in order to guarantee the accuracy of the calculation and the analysis.

The dimension of the calculation shows a square ABCD on the ground plan (fig. 1), which lies approximately symmetrical to the Y axis. The length of the X direction $CD = 250$ m, the length of the Y direction $AC = 265$ m, the length of the river bed area $AG = 65$ m. The extent of the calculation in the direction of the Z axis (fig. 3) ranges from $Z \approx -45$ m through the earth's surface to the highest point of the rock mass $Z \approx 160$ m. It is clear from the selection of this dimension, that the measurement for the whole model exceeds the corresponding lengths in the grotto by almost tenfold, whereby the volume of the model's rock mass exceeds the volume of the grotto even by 200-fold.

In the geological section diagram from (fig. 3)', the stone layers in the area of calculation, $Q_3, Q_{1-2}, N_2, K_1, Z^2$ etc. can be simplified and appear as horizontal layers. The height of the surface of the rock mass, the Z value, is established as a result of using the regional topographical map (1:5000).

在本地区的砂岩, 页岩是层状岩类, 但由于交叉层理发育, 页岩层又极薄, 同时又缺乏各向异性的力学参数, 因此在数值分析中我们忽略这一因素。在如此规模宏大的数值模型中同时要模拟某些裂缝的存在也会有较大的困难。因此在本分析中仅采用各向同性连续介质单元。

在建立大佛寺石窟的数值模型时应特别注意如下几点:

1. 应考虑主要岩层在石窟所在山体中的分布, 并模拟其主要岩石力学性质。
2. 洞窟内壁及佛像应按照风化带划分为几个区域。
3. 在建立数值模型时应尽量反映石窟内壁实际形态, 对石质佛像与洞壁的接合部位应予以精确的模拟。
4. 佛像背后的通道, 对洞壁和佛身的应力分布有影响。在网格划分时应考虑三种基本状态: 即石窟刚开挖完毕时的通道特征, 当前经垮落后的通道特征和通道继续塌垮, 继续扩大的情况。
5. 石窟底板上的淤积层。
6. 由于佛身本身的形态十分复杂, 对佛像本身的模拟应着重于总体形态, 特别是头部、颈部和身体轮廓尺寸以及与围岩的连接部位的尺寸应予以比较确切的模拟, 对细小部位应允许适当简化。
7. 考虑到北壁岩体与整个洞壁间存在有大规模的间断面, 在本次计算中将不予纳入数值模型。

大佛寺石窟数值模型及建立方法

关于初始地应力场的考虑

石窟所在区域的山体初始应力场的正确模拟十分重要, 但目前该地区尚无地应力场的现场实测资料, 从图 1 可以看出, 石窟正前方是泾河河床及冲积阶地区域, 大佛寺源山体向河床区域凸出。即使存在区域构造应力场, 在漫长的地质年代中可能已经基本释放。所以将山体的自重应力场做为初始地应力场模式, 以进行计算分析。

石窟数值模型的范围

如图 2 所示, 以进石窟甬道的中心线为 Y 轴, 以阿弥陀佛所面向的方向为 +Y 轴方向, 也称为“假设北极”方向, 它与磁北极方向偏离(顺时针向)约 $26^{\circ}41'$, X 轴水平, 东西走向, Z 轴垂直向上。因考虑到与石窟内的窟壁, 佛像外形轮廓测量数据相一致,

故将三轴的起点(即 X, Y, Z = 0) 定为距进窟甬道内门为 20.5 米处(图 2), 而目前窟内底板的高度(即淤泥层)为 Z = 0。

在建立大佛寺石窟的数值模型时不仅要模拟石窟、佛像和邻近围岩, 而且也要包括石窟所在区域有足够大范围的山体, 以保证计算分析的准确性。

计算范围在平面图(图 1)上是关于 Y 轴近似对称的方形区域 ABCD, 其中 X 向长度 $|CD| = 250$ 米, Y 轴向长度 $|AC| = 265$ 米, 河床区域选取长度 $|AG| = 65$ 米。在高程即 Z 轴方向(图 3)的范围是: 区域 ABCD 范围内, 由 Z = -45m 处至地形表面及山体最高处(Z ≈ 160 米)为止。该范围的选取, 表明在 X, Y, Z 轴方向的外围尺寸部分已超过窟内相应方向最大线性尺寸(20 ~ 30m)的 3 倍以上, 至于其中外围部分山体的体积则已超过佛窟体积的 200 倍。

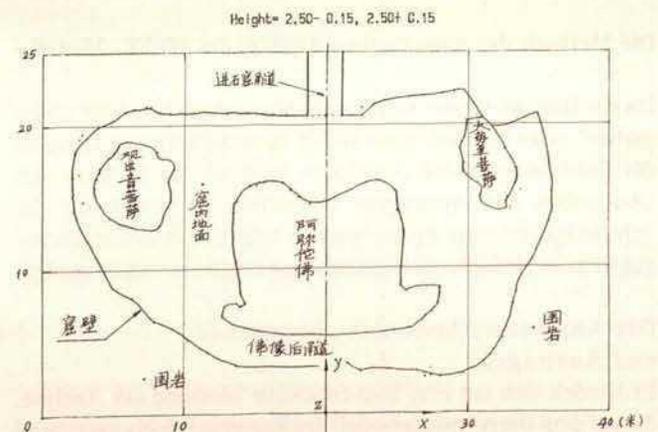
方法

从引用文献 1 中 I, II, III 的地质剖面图(图 3)来看, 计算区域内的几种岩层如 Q_3 , Q_{1+2} , N_2 , K_1Z^2 等均可简化为水平层。至于山体表面的高程 Z 值, 则可根据 1:5000 的区域地形图来确定(图 3)。

Abb. 2. Das Koordinatensystem im horizontalen Schnitt bei der Höhe Z = 2,5 m

Fig. 2. The coordinates system in the horizontal section at a height of Z = 2,5 m

图 2. 标系统及 Z = 2.5 m 高程的水平剖面图



massivs das Volumen der Grotte sogar um das 200fache übertrifft.

Im geologischen Schnittbild (Abb. 3)¹ können die Gesteinsschichten im Berechnungsgebiet, Q_3 , Q_{1+2} , N_2 , K_1 , Z^2 usw., vereinfacht als horizontale Schichten angesehen werden. Die Höhe der Oberfläche des Bergmassivs, der Z Wert, wird aufgrund der regionalen topographischen Karte (1 : 5000) festgelegt (Abb. 3).

Die Vermessungsdaten von Grotte und Buddha-Statuen

Im Hinblick auf die komplizierten Oberflächenkonturen der Buddhastatuen, der Felswände und des Tunnels in der Grotte haben Gudehus und Neidhardt² zusammen mit dem Technischen Zentrum für die Erhaltung von Kulturgütern der Provinz Shaanxi an diesen Stellen die 3D Koordinatenwerte mit einem Raster von < 20 cm Maschenweite ausgemessen. Das numerische Modell basiert auf diesen Daten, mit deren Hilfe das FE-Raster in der Grotte eingeteilt wird.

Insgesamt handelt es sich um die Koordinaten (X , Y , Z) von 6700 Vermessungspunkten an der Oberfläche der inneren Wand und der Statuen in der Grotte, die aus unterschiedlichen Beobachtungspunkten gewonnen wurden. Die Koordinatendaten dieser Punkte sind bereits in ein einheitliches Koordinatensystem umgerechnet, und die Dichte des Vermessungsrasters entspricht den Anforderungen an die Präzision der Oberflächenwiedergabe. Um diese Daten in vollem Maße zur Geltung zu bringen, werden folgende Methoden benutzt:

1. Die Vermessungsdaten werden durch Koordinatentranslation in das oben genannte Koordinatensystem übertragen.
2. Eine bestimmte Höhe, wie zum Beispiel $h = 10,0$ m, wird ausgewählt. Dieser h -Wert wird mit den Z -Koordinaten aller Punkte verglichen. Eine bestimmte Toleranz, z.B. $\epsilon = 0,15 \sim 0,20$ m wird zugelassen; wenn $|Z-h| < \epsilon$, wird die Höhe dieses Punktes annähernd als h betrachtet. Diese Punkte werden ausgewählt und unter einem bestimmten Maßstab wie 1 : 100 durch ein Zeichengerät gezeichnet. Auf diese Weise entsteht eine Zeichnung von Konturpunkten der Höhe h .
3. Mit Hilfe von dort gemachten Photos und Vermessungsvideos können diese Punkte nach einer bestimmten Reihenfolge verbunden werden, so daß ein horizontaler Schnitt der Konturen der Felswand und Buddhastatuen in der Grotte von der Höhe h entsteht (Abb. 2). Auf diese Weise sind 50 horizontale Schnitte im Abstand von ca. 50 cm angefertigt worden. Diese horizontalen Schnitte stellen systematisch und präzise die geometrischen Konturen der ganzen inneren Felswände und Statuen in der Grotte dar.

Die Methode der numerischen Analyse des 3D FE- Modells

Da der Bau der Grotte und der Buddhastatuen heute als „Ausgraben“ einer unterirdischen Höhle betrachtet werden kann, ist der Entstehungsprozeß der Grotte auch als ein Problem von „Ausgraben und Austragen“ anzusehen. In Anbetracht der Schwierigkeit in der Praxis wurden folgende Änderungen zugunsten des einfacheren Berechnungsverfahrens vorgenommen.

Die Analysemethode mit „Ausgraben und Austragen“

Es handelt sich um eine konventionelle Methode der Analyse, die auf dem Berechnungsmodell des Spannungsfelds ausgehend

The measuring data of the grotto and Buddha statues

In view of the complicated contours of the surface of the Buddha statues, rock walls and the tunnel in the grotto, Gudehus & Neidhardt² together with the Technical Centre for the Preservation of Cultural Property of the Province of Shaanxi have measured the 3D coordinate values with a grid of < 20 cm mesh width. The numerical model is based on these data, which helped to graduate the FE grid within the grotto.

Altogether, the model contains the coordinates (X , Y , Z) of 6700 measuring points obtained from the surface of the inner wall and the statues in the grotto at different observation points. The coordinate data of these points are converted into a standardized coordinate system and the density of the measuring grid corresponds to the precision required for the recording of the surfaces. In order to use this data to its best advantage, the following methods are used:

1. The measurement data are transferred by coordinate translation into the above mentioned coordinate system.
2. A certain height, for example $h = 10.0$ m is selected. This h value is compared to the Z coordinate at all points. A certain tolerance, e.g. $\epsilon = 0,15 - 0,20$ m is allowed; if $Z - h < \epsilon$, the height of this point is accepted approximately as h . These points are selected and drawn in a certain scale such as 1:100, using a drawing device. In this way a drawing results from the contour points of the height h .
3. With the help of photos and videos taken at the scene, these points can be connected in a certain sequence, so that a horizontal section results which shows the contours of the rock wall and Buddha statues in the grotto at the height h . In this way, 50 horizontal sections are drawn up at a vertical distance of 50 cm. These horizontal sections represent systematically and precisely the geometrical contours of the whole inner rock wall and statues in the grotto.

The method of the numerical analysis of the 3D FE model

Since the building of the grotto and the Buddha statues can be regarded as an underground cave, it can be termed as an “excavation”. Therefore the creation of the grotto can be viewed as a problem of “excavation and unloading.” In view of the difficulties in practice, the following alterations were made in favour of a simpler procedure.

The analysis method “excavation and unloading”

It concerns the conventional method of analysis, which is based on the calculation model of the stress fields, assuming the net weight of the mountain mass before the excavation work began. After the primary stress field of the earth's crust has been calculated, the “excavation and unloading” is calculated on this basis, i.e. rock that was excavated to form the grotto and the statues is regarded as “unloaded elements.” The “unloading” is calculated in a way that the equivalent nodal force of the unloaded element is exerted on the corresponding nodal point of the inner wall and the statues, in order to determine the stress situation within the walls and statues of the grotto. In general, this analysis method is very useful, nevertheless, it appears to be difficult to apply for the complex grotto of Dafosi. The main difficulty lies in the fact that the area of the excavated rock must be calibrated into the same grid as the walls and statues.

石窟及佛像的测量数据

石窟 (也就是我们最关心的区域) 内的佛像、窟壁、甬道等外形表面轮廓十分复杂,为此德国 Gudchus 与 Neidhart² 和陕西省文保中心在现场测出了这些外形轮廓的三向坐标值,其测量密度网格在 <20cm 之内。数值模型建立在这些数据基础上,并划分出了石窟内的有限元网格。

测量数据给出石窟内壁及佛像表面测量 (X, Y, Z) 坐标上 6700 个点,且分多个观察点观察,这些点的坐标数据都已换算到统一的坐标系,其测量网格密度亦符合精度要求。为充分利用这些数据,我们采用如下几点方法:

1. 将测量的数据进行坐标平移,转换到前述的坐标系中来。
2. 选取某一个高程,例如 $h = 10.0 \text{ m}$, 将所有的点的 Z 坐标与 h 值进行比较,给出一个容许误差,例如 $\epsilon = 0.15 \sim 0.20 \text{ m}$, 如果 $|z - h| < \epsilon$, 则我们近似将此点的高程看为 h, 并将这些点挑选出来,以一定的比例如 1:100 用绘图机绘制出来,得到一张 h 高程的轮廓点 (离散点) 图。

3. 参考现场所摄的照片及现场观测映像我们可以将这些点用一定的次序连接起来,即得到一张 h 高度的窟内窟壁及大佛等的外形轮廓水平剖面图 (见图 2), 用这方法,我们共画出垂直高度相隔 50 cm 左右水平剖面图 50 张,这些水平剖面图有系统并准确地构成了整个石窟内壁连同佛像一起的几何轮廓。

有限元三维数值分析方法

建造石窟和佛像可以看作是一个地下洞室的开挖问题,因此可以将石窟的形成过程看作为一个开挖卸载问题,但是考虑到实际操作上的困难,我们作了如下变动以便作更简便的计算步骤。

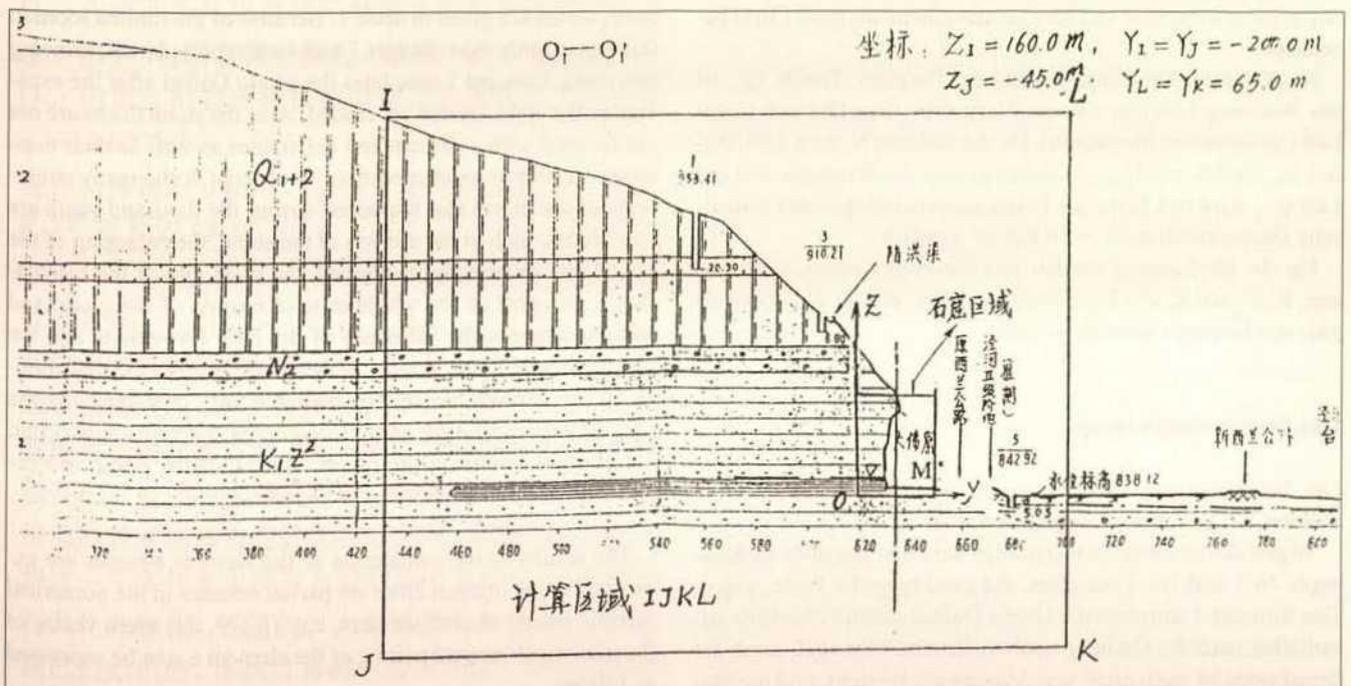
开挖卸载的分析方法

这是一种常规的分析方法,按此方法首先建立在石窟、佛像等未开挖时该区域的山体自重应力场的计算模型,经计算初始地应力场以后,在此基础上进行开

Abb. 3. Geologisches Schnittbild, Gesteinsschichten im Berechnungsgebiet $Q_3, Q_{1+2}, N_2, K_1, Z^2$

Fig. 3. Geological section diagram, stone layers in the area of calculation $Q_3, Q_{1+2}, N_2, K_1, Z^2$

图 3. 佛寺数值分析计算在垂直剖面上的范围 (注: II-II' 以勘探线近似代替范围对称线 $O_1 - O_1'$); 注: 原图见 "机勘院报告" 之附图编号: 4



vom Eigengewicht des Bergmassivs vor dem Ausgraben der Grotte basiert. Nachdem das primäre Spannungsfeld der Erdkruste ausgerechnet worden ist, wird das „Ausgraben und Austragen“ auf dieser Basis berechnet, d.h. die gemäß der Gestalt der Grotte und der Statuen ausgegrabenen Felsen werden als die „ausgeladenen Elemente“ betrachtet. Das „Austragen“ wird so berechnet, daß die äquivalente Knotenkraft auf die entsprechenden Knoten der inneren Wände und der Statuen ausgeübt wird, um den Spannungszustand der Wände und Statuen in der Grotte zu ermitteln. Im allgemeinen ist diese Analyseverfahren sehr nützlich, für das „Ausgraben“ der komplizierten Grotte Dafosi scheint sie jedoch schwer durchführbar. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, daß der Bereich der ausgegrabenen Felsen auch in dasselbe Raster eingeteilt werden muß wie die Wände und Statuen.

Die Methode des äquivalenten Auftragens

Wird die Grabung beim Grottenbau als ein elastisches Problem betrachtet, müßte der primäre Spannungszustand der Grotte in der Entstehungszeit, der aus dem Berechnungsmodell „Ausgraben und Austragen“ resultieren würde, mit dem Berechnungsergebnis gleichwertig sein, das durch Auftragen des Eigengewichts des Bergmassivs mit Grotte und Statuen erhalten wird, abgesehen vom nichtlinearen, kurzzeitigen Einfluß der Massen, als die Grotte und Statuen ausgemeißelt wurden. Diese letztere ist eine Berechnungsmethode, die als das Modell von „Aufbau und Auftragen“ bezeichnet wird.

Die Auswahl der felsmechanischen Parameter bei der 3D FE-Analyse

Die Gesteinsschichten, auf die sich das Gebiet dieses numerischen Modells bezieht, sind K_1Z^2 , N_2 und Q_{1+2} . Wie oben bereits erwähnt, ist K_1Z^2 ein hellbraunroter, teils hellroter mittelkörniger Sandstein, gemischt mit Konglomerat und dünnen Tonsteinschichten, aus der Lohe-Formation der Zhidan-Gruppe der Kreide. Die Tonsteinschicht zeichnet sich durch ihre niedrige Strukturfestigkeit aus und verwittert leicht. Sie verläuft im mittleren und unteren Bereich der Grotte und wird im numerischen Modell separat betrachtet und hier vereinfachend als K_1Z^2 (Ton) bezeichnet.

N_2 gehört zur Sanzhima-Schicht des Pliozäns, Tertiär. Q_{1+2} ist der Wucheng-Löß (im unteren Pleistozän, Quartär) und Lishi-Löß (im mittleren Pleistozän). Da die Schicht N_2 dem Löß ähnlich ist, wird N_2 mit Q_{1+2} zusammengelegt. Als Raumgewicht des Löß Q_{1+2} wird mit Hilfe der Erkundungsunterlagen der statistische Durchschnittswert = 19 KN/m³ gewählt.

Für die Berechnung werden hier die zwei Gesteinsformationen, K_1Z^2 und K_1Z^2 (Ton), berücksichtigt, die für die Topographie des Gebirges bedeutend sind.

Das Berechnungskonzept

Die Berechnungen sind unter vier Situationen durchgeführt worden, die in Tabelle 1 angegeben sind.

Wegen des beschränkten Umfangs wird hier nur über die Konzepte Nr.1 und Nr. 4 berichtet, die zwei typische Fälle zeigen. Das Konzept 1 simuliert die Grotte Dafosi, deren Felswände unmittelbar nach der Grabung noch nicht verwittert sind. Auch der Steinboden ist noch nicht von Ablagerung bedeckt, und die Sta-

The method of equivalent loading

If the excavation at the grotto's construction is regarded as an elastic problem, the primary stress situation of the grotto at the time of its creation, which is a result from the calculation model "excavation and unloading", would have the equivalent result as that obtained by loading up the net weight of the mountain mass together with the grotto and its statues, disregarding the short-term non-linear influence of the masses during the time when the grotto and statues were being carved out. This latter calculation method is regarded as the model for "building and unloading".

The selection of the rock mechanical parameters for the 3D FE analysis

The stone layers which refer to the area of this numerical model are K_1Z^2 , N_2 and Q_{1+2} . As already mentioned, K_1Z^2 is a light red-brown, partly light-red, middle-sized grain sandstone, mixed with conglomerate and thin claystone layers from the Lohe formation of the Zhidan group of Cretaceous age. The claystone layers are identified by their low structural stability and erode easily. They run in the middle and lower areas of the grotto and are regarded separately in the numerical model and are identified here as simply K_1Z^2 (clay).

N_2 belongs to the Sanzhima layer of Pliocene, Tertiary. Q_{1+2} is the Wucheng loess (lower Pleistocene, Quaternary) and Lishi loess (middle Pleistocene). Since the layer N_2 is similar to loess, it is collectively known as N_2 with Q_{1+2} . With the help of the report from the initial survey¹, as the density of loess Q_{1+2} the statistical average of = 19 KN/m³ is chosen. Two stone formations are considered for the calculation, K_1Z^2 and K_1Z^2 (clay), which are important for the topography of the mountain range.

The calculation concept

The calculation was carried out assuming four different situations, which are given in table 1. Because of the limited room in this report, only the concepts 1 and 4 are reported here, showing two cases. Concept 1 simulates the grotto Dafosi after the excavation; the walls are not yet eroded. Also the stone floors are not yet covered with sediment and the statues as well as their niches are still in good condition. In concept 4, the many alterations of the grotto that happened during the thousand years are considered, such as the erosion of the stone, the enlarging of the tunnel etc. As already mentioned, the main aim of the calculation is to report on the whole state of erosion of the grotto and statues, whereby the influence of the rock formations and the crevices are left out. In spite of the simplification the distribution of the stresses can be demonstrated very precisely, and the conclusions, indicating where foreseeable damage could occur, are of great benefit in the future. The following points are explained for an understanding of the calculation.

The results of the calculation of the element stresses are expressed as the integral from six partial stresses in the numerical integral points of each element, e.g. $\{\sigma\}^{e,g}$, the stress vector of the numerical integral point g of the element e, can be expressed as follows:

挖卸载计算，即参照石窟开挖、雕像完成以后的形状，将被挖去的岩石单元视作为卸载单元，用等效节点力施加在洞壁和佛像的相应节点上进行卸载计算，以得到洞壁及佛像本身的应力状态。这样的分析方法通常是可取的，但对于大佛寺如此复杂的“开挖”问题则是十分难于操作，最主要是在于建立数值模型时必需将被挖掉的岩石部分也划分为相应的单元网格。

等效的加载方法

如果忽略开挖石窟和佛像等这一短时期内岩石的非线性性质的影响，将建窟时的开挖问题作为一个弹性问题来看待，则采用开挖卸载计算所得的建窟初期的应力状态应与山体中包含有石窟及佛像并采用自重加载计算后的应力计算结果等介。后者则是一种“建造加载”模式计算法。

三维有限元分析中岩石力学参数的选用

本数值模型所在区域所涉及的地层为 K_1Z^2 、 N_2 和 Q_{1+2} 。

K_1Z^2 为下的白垩系志丹群洛河组的浅棕红色、浅紫红色块状中粒砂岩夹砾岩和极薄砂质泥岩。泥页岩层强度低，易风化，分布高程大致与石窟的中、下部位的高程相当，所以在数值模型中将此岩性单独划分出来，为方便起见简称 K_1Z^2 （页）。

N_2 为第三系上新统三趾马层。

Q_{1+2} 为第四系早更新统午城黄土和中更新统离石黄土。由于 N_2 层与黄土接近，故将 N_2 与 Q_{1+2} 合并。

Q_{1+2} 的黄土的容重则根据勘探资料按统计平均后取 $\gamma = 19 \text{ KN/m}^3$ 。

在作山体地形分析时，必须考虑两类重要岩石地层： K_1Z^2 与 K_1Z^2 （页）。

计算方案

四种的计算条件如表 1：

限于篇幅问题，本文仅报告出表 1 中所列 1 号和 4 号两种典型情况的方案，第一号方案是模拟大佛寺石窟刚开挖后岩壁尚未严重风化，底板上亦无淤泥层，而佛像的背光或佛身完好无损时情况。而第四号方案则将这一千多年来大佛寺石窟状态的主要变化，例如岩石风化和软化，通道的扩大等因素考虑在内。正如前面已经指出的，本次计算的主要目的是了解石窟及佛

tuen sowie deren Nimbren sind noch in gutem Zustand. Im Konzept 4 werden die wesentlichen Veränderungen der Grotte seit über eintausend Jahren, wie Verwitterung der Gesteine, die Vergrößerung des Tunnels u. a. in Betracht gezogen. Wie bereits erwähnt, liegt das Hauptziel der Berechnung darin, den gesamten Belastungszustand der Grotte und der Statuen zu ermitteln, wobei der Einfluß der Gesteinformationen und der Klüfte außer acht gelassen wird. Das Ergebnis kann jedoch trotz dieser Vereinfachungen die Verteilung der Spannungen sehr differenziert wiedergeben und ist deswegen für die Erklärung, an welchen Stellen vorhersehbare Schäden auftreten, von großer Bedeutung. Zum Verständnis der Berechnungsergebnisse sind folgende Punkte zu erklären:

Das Ergebnis der Berechnungen der Elementsspannungen wird als Integral von sechs Teilspannungen in den numerischen Integralpunkten der jeweiligen Elemente ausgedrückt, d.h. $\{\sigma\}^{e,e} = \{\sigma_x^{e,e}, \sigma_y^{e,e}, \sigma_z^{e,e}, \tau_{xy}^{e,e}, \tau_{yz}^{e,e}, \tau_{xz}^{e,e}\}$, der Spannungsvektor des numerischen Integralpunkts g des Elements e kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\{\sigma\}^{e,e} = \{\sigma_x^{e,e}, \sigma_y^{e,e}, \sigma_z^{e,e}, \tau_{xy}^{e,e}, \tau_{yz}^{e,e}, \tau_{xz}^{e,e}\}$$

Aus diesen sechs Spannungsteilkräften können die Hauptspannung in diesem Punkt

$$\{\sigma\}^{e,e} = \{\sigma_1^{e,e}, \sigma_2^{e,e}, \sigma_3\}$$

sowie deren Richtung \cos zum Koordinatensystem ausgerechnet werden. Die einfachste Methode wäre, das Vektorbild der Spannung zu zeichnen. In der Tat ist dieses Vektorbild aber kaum lesbar, da die numerischen Integralpunkte so dicht nebeneinander liegen und sich möglicherweise überlappen, daß eine Unterscheidung unmöglich ist. Auch wenn ein Vektor gezeichnet ist, bleibt es schwer, dessen Richtung und Größe zu erkennen. Deshalb wird in den folgenden Abbildungen nur die Spannungsgröße der Oberfläche eines Bereichs gezeichnet, wobei die Spannungsrichtung vernachlässigt wird. Auf diese Weise entstanden die hier gezeigten Monitorbilder der Elementspannungen.

1. Die Zugspannungen sind positiven, die Druckspannungen negativen Zahlenwerten zugerechnet.
2. Um die Zahlenwerte auf den Spannungsverteilungsbildern abzulesen, muß der Maßstab auf demselben Bild herangezogen werden. Gleiche Farben können auf unterschiedlichen Bildern unterschiedliche Größen bedeuten.
3. Das Spannungsverteilungsbild auf dem Nimbus der Buddha-statue bezieht sich auf die Verbindungsfläche zwischen dem Rücken und dem Nimbus der Statue.
4. Die Spannungsverteilung auf dem Steinboden des Tunnels hinter der Buddhastatue ist auf dem Spannungsverteilungsbild des Tunnels dargestellt. Das Bild zeigt deutlich die Ausdehnungsrichtung des Tunnels. Der Streifen, der bei der Seitenwand im diesen Bild zu sehen ist, bezieht sich auf die Spannungsverteilung des Gesteins, das unter dem Steinboden des Tunnels angeschnitten ist.
5. Um die Spannungsverteilung der Innenwände in der Grotte zu zeigen, werden hier die Bilder der linken (westlichen) und rechten (östlichen) Felswand benutzt. Die Buddhastatue ist aus dem Bild herausgenommen, um es anschaulicher zu machen.
6. Die Deformation ist für unsere Berechnungen unbedeutend, denn die elastische Deformation entstand bereits unmittelbar nach der Fertigstellung der Grotte und hat deshalb in diesem Zusammenhang keine praktische Bedeutung.

$$\{\sigma\}^{e,e} = \{\sigma_x^{e,e}, \sigma_y^{e,e}, \sigma_z^{e,e}, \tau_{xy}^{e,e}, \tau_{yz}^{e,e}, \tau_{xz}^{e,e}\}$$

From these six partial stress forces, the main stress in this point

$$\{\sigma\}^{e,e} = \{\sigma_1^{e,e}, \sigma_2^{e,e}, \sigma_3\}$$

can be calculated, as well as its angle cosinus to the coordinate system. The simplest method would be to draw the vector graph of the stress. Indeed, this vector graph is almost unreadable, since the numerical integral points lie so close to each other, and possibly overlap, so that it remains difficult to identify the directions and magnitudes. Therefore, in the following illustrations, only the stress values of the surface of an area are drawn, whereby the direction of the stress is omitted. In this way, the coloured graphs of the element stresses are constructed.

1. The tensile stresses correspond to positive values, the compressive stresses to negative values.
2. In order to read the values of the stress distribution in a graph, the scale which is related to the same graph has to be used. The same colours could mean different values in different graphs.
3. The stress distribution graph on the nimbus of the Buddha statue refers to the connecting area between the back and the nimbus of the statue.
4. The stress distribution in the stone floor of the tunnel behind the Buddha statue is represented on the stress distribution graph of the tunnel. The graph shows clearly the direction of the widening of the tunnel. The band in the graph, to be seen on the side wall, refers to the stress distribution of the rock, which cuts under the stone floor of the tunnel.
5. To show the stress distribution of the inner walls of the grotto, representations of the left (west) and right (east) rock walls are used. The Buddha is taken out of the graph to make the graph clearer.
6. The deformation is unimportant for the calculations, because the elastic deformation occurred already after the completion of the grotto and therefore has no practical value in this connection.

First analysis of results

The illustrations which show the results of the calculation of concept 1 and concept 4 clearly demonstrate the distribution of the stresses in the grotto and in the three statues. Based on the following regularities, it should be here especially pointed out:

The distribution of the stresses in the whole model of Dafosi (*color plate XIV, 1-4*), clearly shows the appearance of tensile stresses in a Y direction, vertical to the slope edge, which are responsible for the loosening of large slabs of stone (*color plate XIV, 1*). In the X direction, parallel to the slope edge, weak compressive stresses are identified, which run towards the opening of the grotto (*color plate XIV, 2*), while in the Z direction increasing compressive stress from the top to bottom appears (*color plate XIV, 3*). Shearing stresses exist in the whole model, especially in the bends of the terrain, at the base of the rocks (*color plate XIV, 4*).

In both concepts, 1 and 4, tensile stress is shown to be in the neck and face, as well as in the area under the ear of the Buddha Amitabha, ranging between 0.1 to 0.25 MPa (*color plate XIV, 5*). The shearing stress in the neck and shoulder area is major, rea-

像的总体受力状态，而忽略了层状，裂缝等的影响。即使有这些简化，其结果仍然能勾画出应力分布的总体轮廓，具有重要意义。

对于应力计算结果有几点说明如下：

计算出的单元应力结果乃以单元内部数值积分点处的六个应力分量来表示，即第 e 号单元的第 g 号数值积分点，其应力矢量 $\{\sigma\}^{e,g}$ 可以表示为：

$$\{\sigma\}^{e,g} = \{\sigma_x^{e,g}, \sigma_y^{e,g}, \tau_z^{e,g}, \tau_{xy}^{e,g}, \tau_{yz}^{e,g}, \sigma_{zx}^{e,g}\}$$

由这六个应力分量，可以计算出该点处的主应力 $\{\sigma\}^{e,g} = \{\sigma_1^{e,g}, \sigma_2^{e,g}, \sigma_3^{e,g}\}$ 及其与 XYZ 坐标系统的方向余弦，最简单的方法是画应力矢量图，但事实上这是无意义的，因为数值积分点的密度大，互相之间可能相互重叠严重而无法分辨，矢量即使是画出来也难于判断其方向、大小。故于后列数图仅画区域表面的应力大小，忽略掉应力方向。下列单元应力着色

图乃依此法制成：

1. 拉应力为正取值，压应力为负取值。
2. 每张应力分布图上取值范围应参看同一张图片上的应力值标尺。不同图片上出现的同样颜色可能代表不同的量值。
3. 大佛背光上的应力分布图，系指大佛背部与背光联结面上的应力分布图。
4. 佛像背后的通道底板上的应力分布表示在通道应力分布图上。该图明显表示出了通道的延伸方向。图中侧壁所见的条纹指通道底板以下被切开折岩体的应力分布。
5. 石窟内壁的应力分布我们分别采用左、右两壁岩墙表面的应力分布图来表示。图中已将相应的佛像移去以免影响观感。
6. 变形情况对我们的研究并不重要。因石窟开挖完毕以后的弹性变形即已产生，没有什么实用的意义。

Konzept	Sediment	Tunnel	Nimben und Sockel der Buddhafiguren	Verwitterung der Felswände
1*	ohne	original	keine Schäden	keine
2	ohne	original	keine Schäden	ja
3	mit	original	keine Schäden	ja
4**	mit	ausgeweitet	Schäden	ja

Tabelle 1. Die Berechnungskonzepte

* Zustand der Grotte unmittelbar nach der Fertigstellung

** Gegenwärtiger Zustand

Concept	Sediment	Tunnel	Nimbus und Base of Buddha Figures	Erosion of the Rock walls
1*	without	original	no damage	no
2	without	original	no damage	yes
3	with	original	no damage	yes
4**	with	expanded	damage	yes

Table 1. The calculation concepts

* Condition of the grotto immediately after construction

** Present condition

方案号	淤泥层	甬道	背光佛底座	石窟壁风化和软化
1*	无	原型	无缺损	无
2	无	原型	无缺损	有
3	有	原型	无缺损	有
4**	有	已扩大	缺损	有

表 1. 计算方案表

* 代表石窟刚开挖后的情况

** 代表当前的情况

Erste Analyse der Ergebnisse

Die Abbildungen, welche die Rechnungsergebnisse der Konzepte 1 und 4 wiedergeben, demonstrieren deutlich die Verteilungen der Spannungen in der Grotte und in den drei Statuen. Auf folgende grundlegende Gesetzmäßigkeiten soll hier besonders hingewiesen werden:

Die Verteilung der Spannungen im Gesamtmodell Dafosi (Farbtafel XIV, 1-4) zeigt deutlich das Auftreten von Zugspannungen in Y-Richtung senkrecht zur Hangkante, welche für das Ablösen großer Gesteinsplatten verantwortlich sind (Farbtafel XIV, 1). In X-Richtung, parallel zur Hangkante, lassen sich die schwachen Druckspannungen erkennen, die auf die Öffnung der Grotte zulaufen (Farbtafel XIV, 2), während in Z-Richtung die im Fels von oben nach unten zunehmenden Druckspannungen abzulesen sind (Farbtafel XIV, 3). Scherspannungen sind im Gesamtmodell vor allem im Bereiche des Geländeknicks am Fuße des Felsens vorhanden (Farbtafel XIV, 4).

In beiden Konzepten 1 und 4 zeigen sich Zugspannungen sowohl im Hals, im Gesicht als auch im Bereich unter dem Ohr des Buddha Amitabha, deren Größe zwischen 0.1 bis 0.25 MPa schwankt (Farbtafel XIV, 5). Die Scherspannungen im Hals- und Schulterbereich sind sehr groß und erreichen 0.4 bis 0.7 MPa. Die Zugspannungen in den anderen Bereichen sind eher niedrig. Der Hals, die Schulter sowie der Bereich unter dem Ohr der Buddhastatue sind genau die Stellen, an denen mehrere Risse entdeckt wurden. Es zeigt sich somit, daß die Verteilung der Zug- und Scherspannung in diesen Partien der Buddhastatue der eigentliche Grund für diese Risse ist. Auf der Rückenseite und dem Nimbus der Buddhastatue ist der Umfang der Zugkraftzone im Halsbereich deutlich zu sehen (Farbtafel XIV, 6, 7).

Aus dem Verteilungsbild der Hauptspannung σ_1 der rechten Hälfte und der Rückenseite des Bodhisattva Mahasthamaprapta (Farbtafel XV, 8; Farbtafel XVI, 16) ist klar zu erkennen, daß die Zugspannung am Kopf bzw. im angrenzenden Bereich zwischen Kopf und Nimbus sowie am Ohr sehr groß ist und eine Größe von 0.2 bis 0.37 MPa erreichen kann. Im Bereich der Schulter ist die Zugspannung sogar noch größer. Sowohl die beobachteten Risse im Gesichts- und Halsbereich dieses Bodhisattva als auch die besonders breiten Risse am Kopf und an der Verbindungsstelle zwischen der rechten Hälfte des Kopfes und dem Nimbus stimmen mit dem Ergebnis der numerischen Analyse überein.

Im Kopf- und Schulterbereich des Bodhisattva Avalokiteshvara herrschen Zugspannungen vor (Farbtafel XV, 9; Farbtafel XVII, 17). Zur Zeit zeigen diese Partien noch keine Risse, was wahrscheinlich neben dem Betrag der Spannung selbst auf die bessere Qualität des Gesteins zurückzuführen ist.

Im Bereich des Tunnels ist dort mit einer ziemlich großen Scherspannung zu rechnen, wo der Steinboden des Tunnels an die Wandmauer angrenzt (Farbtafel XV, 10; Farbtafel XVII, 18). Unter diesem Spannungszustand kann die Verwitterung der Tonsteinschichten beschleunigt werden, wobei hier noch zusätzlich Wasser aussickert, was zur stetigen Aufweitung des Tunnels führt.

Aus den Bildern, die die Verteilung der Spannung im linken bzw. rechten Gewölbe der Grotte zeigen, ist die hohe Scherspannung über den zwei Bögen zu erkennen, deren Größe 1.3 bis 1.4 MPa erreicht (Farbtafel XVI, 11, 12). Zusätzlich existiert in manchen Teilbereichen noch eine Zugspannung. Dieser Spannungszustand kann leicht zum lokalen Absturz von Gesteinsplatten führen, da das Gestein geschichtet und durch Klüfte zerteilt ist. Es hat sich bestätigt, daß die Stelle, an der Teile von der

ching 0.4 to 0.7 MPa. The tensile stress in other areas is not as great. The neck and shoulder as well as the area below the ear of the Buddha statue are the exact locations where cracks have appeared. This shows that the distribution of the tensile and shearing stresses are the cause of the cracks in these parts of the Buddha statue. The extent of the area of tensile force in the neck area is clearly seen on the back side of the nimbus of the Buddha statue (*color plate XV, 6, 7*).

From the distribution graph, for the main stress 1 of the right half and the back side of the Bodhisattva Mahasthamaprapta (*color plates XV, 8; XVI, 16*) it is clearly identified, that the tensile stress in the head, in the joining area between head and nimbus, as well as at the ear is very strong and can reach a magnitude of 0.2 to 0.37 MPa. The tensile stress is even stronger in the shoulder area. The results of the numerical analysis harmonize with the visible cracks in the face and neck area of this Bodhisattva, as well as with the wide cracks in the head and connection between the right half of the head and the nimbus.

Tensile stresses dominate in the head and shoulder area of the Bodhisattva Avalokiteshvara (*color plates XV, 9; XVII, 17*). No cracks have appeared in these parts at the moment, probably due to the better quality of the stone rather than the amount of stress.

In the tunnel area, where the stone floor of the tunnel meets the rock wall, a rather large shearing stress is measured (*color plates XV, 10; XVII, 18*). The erosion of the claystone layers can be accelerated under this stress situation, where in additional seepage water contributes to the widening of the tunnel.

In the left and right vault of the grotto shown on the graph the distribution of the stress over the arches is identified as strong shearing stress reaching a magnitude of 1.3 to 1.4 MPa (*color plate XVI, 11, 12*). In some partial areas, a tensile stress exists as well. This stress situation can easily lead to localized stone slabs falling away, since the stone is layered and parted by crevices. It has been verified that the places where parts of the ceiling have collapsed concur with the locations where major tensile and shearing stresses dominate in the simulation calculation. It becomes clear, then, that the situation of the whole stress distribution is one of the most important factors contributing to the stability of the grotto. By and large, one can say that the grotto is not in a bad condition, however, measures should be taken in time to secure loosened parts.

When comparing both concepts 1 and 4, the stress situation of the Buddha statues has not yet been greatly affected by the widening of the tunnel behind the Buddha statue (*color plate XVI, 13*).

The magnitude of the tensile stress in the neck area of the Buddha statue is noticeable, being weaker in concept 4 than in concept 1 (*color plate XVI, 14*). This phenomenon can be explained as follows: The Buddha statue can be seen as a simple pillar. A change of the stress in the rock walls of the grotto has occurred as a result of the widening of the tunnel through erosion of the damp rock, especially in the lower area of the Buddha statue. The force which was directed from the Buddha statue to the floor, has decreased, leading to a reduction of the tensile stress in the neck area of the Buddha statue.

初步分析

一号方案和四号的的计算结果的照片清楚地显示了大佛寺石窟及三尊大佛的应力分布规律。在本报告中只就总体的规律性作初步分析如下:

大佛寺整体模型应力分布图(彩色图版十四, 1-4)明确显示出垂直於岩壁的Y轴方向出现拉应力,导致岩板脱落(彩图十四, 1),而与岩壁平行的X轴方向则出现向洞口伸展的压应力(彩图十四, 2),Z轴上显示岩石由上至下渐增的压应力(彩图十四, 3),在整体模型应力分布图中,剪应力则主要在岩脚相应结点部位出现(彩图十四, 4)。

一、四两个方案都表明,在阿弥陀佛颈部及脸部耳朵以下部位都有拉应力存在,其量级在0.1~0.25 MPa左右(彩图十四, 5),而在颈部、肩部等处的剪应力大至0.4~0.7 MPa的量级。其他部位的拉应力都不大。大佛耳朵以下,颈部,肩部也正是目前发现有多条裂纹的位置。这表明大佛这些部位的特殊的拉、剪应力分布正是裂纹发生的内在原因。大佛背部与背光上可以清楚地看到颈部拉力区的范围(彩图十四, 6, 7)。

大势至菩萨右侧及背部 σ_1 主应力分布图(彩图十五, 8; 彩图十六, 16)可以清楚地看出:菩萨头部,特别是头部与背光联结部位,和脸部耳朵附近部位拉应力可大至0.2~0.37 MPa量级,肩部局部拉应力更大。大势至菩萨左侧脸颈部裂纹、头顶和右半个头部与背光相联结处明显大裂纹与数值分析结果十分吻合。

在观音菩萨的头部及肩部等也有拉应力(彩图十五, 9; 彩图十七, 17)。目前佛像这些部位尚未发生开裂。这表明除了应力条件外,岩质好坏也是很重要的。

从通道应力分布的情况来看,在通道底板与边墙交界部位,其剪应力相当大(彩图十五, 10; 彩图十七, 18)。这样的应力状态,再加上水的渗漏,会加速页岩的风化,导致通道底部的不断扩大。

从石窟左右两壁表面上的应力分布图像来看在窟顶左、右两拱座上方的部位,剪切应力大至1.3~1.4 MPa(彩图十六, 11, 12)。局部位置还有拉应力区存在。这样的应力状态很容易导致窟顶有局部的冒落和掉块,特别对于层状岩体,当再加上裂隙的切割时,更容易造成局部垮塌。从目前已查明的窟顶垮塌的位

位置来看与数值模型计算所显示的拉剪应力大的位置是相当吻合的。这也表明石窟总体的应力分布情况是决定石窟稳定性的重要因素之一。而当前石窟的总体情况并不算很坏,但局部松动区域应及时采取加固措施。

通过一、四两个方案的对比,可以看出,通过多年的风化,佛像背后通道岩壁的垮落,对佛身的应力尚未引起重大的变化(彩图十六, 13)。

特别是大佛等颈部的拉应力的量值在第四方案中比第一方案要小一些(彩图十六, 14)。这个现象可以作如下解释:佛像可以作为石窟壁的某种支柱,通道的扩大,佛像下部岩石的软化使石窟围岩的应力状态有所变化。通过佛身向石窟底部传透的力有所减少,这就导致佛像颈部拉应力有所减少,大佛背光应力分布则近乎不变(彩图十六, 15)。

石窟围岩,特别是顶部的拉应力区有所扩大。从一方案与四方案,通过左、右两壁情况对比可以看出,四方案窟顶部位的拉应力区有较大的扩大(彩图十七, 19, 20),特别是通道的 σ_3 ,拉应力 σ_1 以及 τ_{yz} 均大幅增加,故对于石窟的稳定性相当不利。

长期风化和软化以及岩石的剥蚀对佛像的安全情况显然十分不利。裂缝之产生会导致局部小区域的应力集中,因此对佛身上的裂缝,窟壁和窟顶岩石松动的区域均须及早采取加固措施。并且要从减少风化,减少地下水渗漏,改善窟内局部的气候条件等多方面采取有效措施,加强保护大佛寺石窟的安全。

大佛寺石窟及佛像的三维有限元数值模拟分析能从宏观上给出石窟的总体应力分布,计算分析所表明的拉应力,剪应力大的区域,也正是石窟和佛像发生裂纹及其他损害的位置。这表明计算得出的应力分布比较符合实际。

引用文献

- 1 电部勘察研究所(1991):《陕西省彬县大佛寺石窟环境地质条件及病害的勘察与研究》,1991年10月(约8万字)。
- 2 Gerd Gudehus, Thomas Neidhart(1996): Zur geotechnischen Stabilität der Dafosi-Grotte(大佛寺石窟地质稳定性),文见本报告集中。

Decke abgestürzt sind, recht gut mit dem Ort übereinstimmt, an dem in der Simulationsrechnung die größeren Zug- und Scherspannungen herrschen. Dadurch wird auch klar, daß der Zustand der gesamten Spannungsverteilung einer der wichtigsten Faktoren ist, die zur Stabilität der Grotte beitragen. Was die Grotte im großen und ganzen betrifft, kann man nicht von einem schlechten Zustand sprechen; die Maßnahmen, lose lokale Partien zu befestigen, sollten aber auf jeden Fall rechtzeitig getroffen werden.

Durch den Vergleich beider Konzepte 1 und 4 ist zu erkennen, daß die Aufweitung des Tunnels hinter der Buddhastatue den Spannungszustand der Buddhastatue noch nicht erheblich beeinträchtigt hat (Farbtafel XVI, 13).

Auffällig ist die Größe der Zugspannung im Halsbereich der Buddhastatue, die im Konzept 4 kleiner als die im Konzept 1 ist (Farbtafel XVI, 14). Dieses Phänomen kann folgendermaßen erläutert werden: Die Buddhastatue kann vereinfacht als eine Art Pfeiler verstanden werden. Durch die Aufweitung des Tunnels und die feuchtebedingte Erweichung der Felsen im unteren Bereich der Buddhastatue entsteht eine Veränderung der Spannungen in den Felswänden der Grotte. Die Kraft, die von der Buddhastatue auf den Boden der Grotte geleitet wird, hat abgenommen, was zu einer Reduzierung der Zugspannung im Halsbereich geführt hat.

Die Spannungsverteilung im Nimbus des Großen Buddha ist dagegen annähernd unverändert geblieben (Farbtafel XVI, 15).

Die Zone der Zugspannungen an den Felswänden und im Gewölbe haben sich vergrößert. Durch Vergleich zwischen den Konzepten 1 und 4 stellt sich heraus, daß die Zugspannung im Bereich des Gewölbes bis heute (Konzept 4) stark zugenommen hat (Farbtafel XVII, 19, 20). Insbesondere sind σ_3 , die Zugspannung σ_1 und τ_{yz} sehr gewachsen, was für die Stabilität der Grotte ungünstig ist.

Für die Sicherheit der Buddhastatue sind langfristige Verwitterung, Erweichung der Gesteine und Abtragung nachteilig. Die Entstehung der Risse kann zur Konzentration der Spannung in einem kleinen lokalen Bereich führen. Infolgedessen müssen frühzeitig entsprechende Maßnahmen getroffen werden, die Risse an der Buddhastatue, auch die lockeren Felsplatten an den Felswänden und im Gewölbe zu befestigen. Außerdem müssen

wirksame Schritte unternommen werden, das Sickerwasser abzuleiten, um das lokale Klima in der Grotte zu verbessern und damit die Sicherheit der Grotte Dafosi zu gewährleisten.

Die numerische Analyse des 3D FE-Modells der Grotte Dafosi und der Buddhastatuen hat gezeigt, daß es möglich ist, die makroskopische Verteilung der gesamten Spannungen in der Grotte zu simulieren. Die Bereiche, die in der Analyse größere Zug- bzw. Scherspannung aufweisen, sind genau diejenigen Stellen, an denen an den Buddhastatuen Risse und Schäden aufgetreten sind. Die hier berechnete Verteilung der Spannung dürfte deshalb mit der Realität gut übereinstimmen.

(aus dem Chinesischen übersetzt von Chen Ganglin)

Anmerkungen

- 1 *The Study and Survey of Environmental and Geological Situation and Deterioration of Dafosi Cave in Binxian*, Hrsg. The Institute of Survey of the Technical and Electrical Ministry. Xi'an, Oct. 1991 (sog. 80000-Zeichen-Bericht).
- 2 GERD GUDEHUS, THOMAS NEIDHARDT, *Zur geotechnischen Stabilität der Grotte des Großen Buddha von Dafosi* (Beitrag in diesem Arbeitsheft).

Danksagung

Bei dieser Arbeit haben uns Herr Zhang Tinghao, Vizeminister für Kulturgüter der Provinz Shaanxi; Herr Wang Changsheng, Direktor des Technischen Zentrums für Denkmalpflege der Provinz Shaanxi; Herr Hou Weidong, dessen Vizedirektor; Herr Zhen Guangquan, Chefingenieur; weiterhin Herr Ma Tao, Ingenieur; Herr Qi Yang, Ingenieur und Herr Bai Chongbin, Ingenieur, zahlreiche wichtige Hinweise und Hilfe gegeben. Ihnen sind wir zu Dank verpflichtet.

Auch deutsche Experten haben diese Untersuchung unterstützt. Wir danken Herrn Prof. Gerd Gudehus, Herrn Prof. Rolf Sneathlage und Herrn Dipl.-Restaurator Erwin Emmerling recht herzlich. Besonderen Dank schulden wir dem Forschungsinstitut des Ministeriums für Maschinen und Elektrotechnik, das uns wertvolle Unterlagen über die geologische Erkundung zur Verfügung gestellt hat. Insbesondere danken wir Herrn Prof. Gudehus und Herrn Dr. Thomas Neidhart für die Überlassung der Vermessungsdaten, die uns eine große Hilfe waren.

The stress distribution in the nimbus of the Great Buddha has, in comparison, almost remained the same (*color plate XVI, 15*).

The zone of tensile stress in the rock wall and in the vaults has increased. By comparing concept 1 and 4, it emerges, that the tensile stress in the area of the vaults has greatly increased even to this present date (*concept 4, color plate XVII, 19, 20*). Especially σ_1 and σ_2 and τ_{yz} have increased, which is unfavourable for the stability of the grotto.

Long-term weathering and erosion of the stone are detrimental to the security of the Buddha statue. The formation of cracks can lead to a concentration of stress in a small localized area. As a result, appropriate measures must be taken early to repair the cracks in the Buddha statue and also to secure loosened slabs of the rock walls in the vaults. Therefore, effective steps must be taken to drain the water seepage, in order to improve the atmosphere in the grotto, thereby ensuring the safety of the Dafosi grotto.

The numerical analysis of the 3D FE model of the Dafosi grotto and the Buddha statues has shown that it is possible to completely simulate the macroscopic distribution of stresses in the grotto. The areas which show greater tensile or shearing stresses are precisely those places where cracks and damage have occurred on the Buddha statues. The calculated distribution of the stress corresponds well with these facts.

Notes

- 1 The Institute of Survey of the Electrical Ministry (1991): *The Study and Survey of Environmental and Geological Situation of the Dafosi Cave in Binxian Xi'an*, Oct. 1991 (so-called 80 000 Characters Report).
- 2 GERD GUDEHUS, THOMAS NEIDHARDT (1996): *The Geotechnical Stability Problems of the Dafosi Grotto*. Contribution in this publication.

Acknowledgement

During this work, many have given important advice and help: Mr. Zhang Tinghao, Deputy Minister for Cultural Goods of the Province of Shaanxi, Mr. Wang Changsheng, Director of the Technical Centre for Preservation of Cultural Property of the Province of Shaanxi, Mr. Hou Weidong, his Deputy Director, Mr. Zhen Guangquan, Chief Engineer, furthermore Mr. Ma Tao, Engineer, and Mr Bai Chongbin, Engineer. We owe them a debt of gratitude.

Also German experts have supported this investigation. Many thanks go to Professor Gudehus, Professor Snethlage, and Mr. Emmerling. Special thanks go to the Research Institute of the Technical and Electrical Ministry, for putting valuable documents regarding the preliminary geological survey at our disposal. Especially, we would like to thank Professor Gudehus and Dr. T. Neidhardt for providing measurement data, which has been a big help to us.

(translated from German to English by E. W. Mahrla)

致谢

本工作得到陕西省文物局张廷皓副局长,省文保中心王长生主任,侯卫东副主任,甄广全总工的指导与帮助和马涛、齐扬、白崇斌等工程师的帮助,我们向他们深表谢意。

本项研究工作得到德方专家组的大力支持,本报告作

者向 Gudehus 教授、Snethlage 教授、Emmerling 先生等表示衷心感谢。我们要特别感谢机电部勘察研究所提供的宝贵的勘查和地质资料。德方 Gerd Gudehus 教授、Thomas Neidhart 博士为我们提供了测量数据,这对我们是很大的帮助,在此一并致谢。