

地震荷载下莫高窟围岩动态损伤特性研究

付长华^{1,2}, 石玉成^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要:本文以敦煌莫高窟为研究对象,阐述了地震荷载下洞窟围岩动态损伤的影响因素;采用动力有限元法,从地震动特性入手,分析研究了地震作用对洞窟围岩及其附属构筑物可能造成的损坏,为石窟文物地震安全评估及防灾对策研究提供了依据。

关键词:地震动;莫高窟;围岩;动态损伤特性

中图分类号:P315.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2004)03-0266-08

0 引言

敦煌莫高窟位于甘肃省河西走廊的最西端,是中国著名佛教石窟之一,以其规模之大、文物价值之高而闻名于世,最早被列为世界文化遗产。它也是强度较低的砾岩型石窟群的典范,以密集的建设方式和复杂的结构为特点。因其位于青藏高原北缘,新构造活动强烈,地震较为频繁,所以开展对石窟的抗震防灾研究意义十分重大。本文重点探讨在地震荷载下石窟围岩及其附属构筑物的动态损伤特性,为石窟的文物保护工作提供借鉴。

1 地震荷载下莫高窟围岩及附属构筑物动态损伤的影响因素

洞窟所在崖体的地震稳定性主要取决于环境工程地质条件、工程因素、加固工程的效果和地震因素四个方面^[1,2,4]。

1.1 环境工程地质条件

包括岩性、岩体结构及裂隙分布、岩体力学性质(抗拉、抗剪强度等)、地形地貌、水文气象环境等。

莫高窟所在崖体及其下伏地层可划分为下更新统玉门组(Q₁)、中更新统酒泉组(Q₂)和上更新统戈壁组(Q₃),岩层均为近水平产状。洞窟分布于中更新统酒泉组砾岩中。莫高窟崖体地层分为四个工程地质岩组,由上往下依次编号为A、B、C和D(图1)。A岩组中无洞窟分布;B岩组中除有个别高层洞窟的顶部伸入外,亦无完整洞窟分布;C组和D组是洞窟的分布层位。崖体上洞窟分四层排列,一层(底层)洞窟分布在D组,二、三、四层洞窟基本上分布在C岩组层位中。各工程岩组力学参数见表1。

莫高窟崖体上主要发育四种类型的裂隙:(1)平行崖面的近直立卸荷裂隙(图2)。系崖壁形成后崖边岩体在重力长

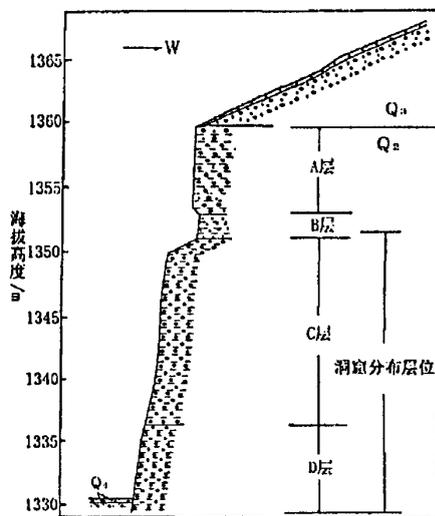


图1 莫高窟实测地层剖面图

Fig. 1 Strata sector of Mogao grottoes.

收稿日期:2004-07-25

基金项目:科技部社会公益研究专项(2002DIB20062)资助;中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20040067

作者简介:付长华(1978-),男(汉族),湖南邵阳人,硕士,主要从事岩土工程与工程地震研究工作

期作用下向临空方向卸荷回弹而形成,是对洞窟安全影响最大的一种,分布范围广,延伸长。(2)垂直崖面的横向裂隙。仅有一小部分断续出现于洞窟顶部或洞窟的一侧及其前后室的壁画上,一般细而短,危害相对较小。(3)斜切崖面的陡倾构造裂隙。裂隙面平直、闭合、无充填,其产状与其南部三危山新构造运动所产生的逆断层的产状大致吻合。该组裂隙有切割岩体的作用,能助长崩塌的形成。(4)水平裂隙。沿酒泉组地层层面发育,主要分布于洞窟区的南段,在崖面上呈一水平线断续显示。该组裂隙在洞室拱顶附近出露时比较有害。

表1 各岩组力学参数

工程地质岩组	弹性模量 E/MPa	泊松比 (ν)	密度 $\rho / [g \cdot cm^{-3}]$	抗压强度 $/MPa$	抗拉强度 $/MPa$	内聚力 C/MPa	内摩擦角 (ϕ)
Q ₃	100	0.30	2.30	-	0.20	0.10	50°
A	200	0.28	2.30	9.50	0.36	0.20	65°
B	87	0.30	2.20	12.6	0.54	0.10	50°
C	300	0.27	2.35	8.60	0.47	0.25	67°
D	500	0.26	2.40	15.8	0.67	0.30	70°
挡墙	1000	0.25	2.40	-	1.50	0.45	75°

1.2 工程因素

莫高窟属砾岩型石窟,洞窟群位于半胶结砂砾岩直立边坡上,洞窟分前室和后室(主室),前后室以甬道贯通。后室为方底、直墙,拱顶是覆斗形或人字形,部分有中心岩柱,洞室围岩无任何支撑和衬砌措施。洞室长一

般4~10 m,少数达15~20 m,宽高约3~8 m,部分小洞仅1~1.5 m见方。洞窟群系不同时代开挖,基本成层状排列。洞室间隔墙及顶、底板岩层较薄,其厚度仅为0.5~1.5 m,部分洞室仅0.1~0.3 m。

1.3 加固工程构筑物对石窟崖体的加固效果

目前,莫高窟整个加固工程主要体现为两种加固方式:(1)支顶:对于悬空的岩体如大跨度的石窟前室,用钢筋混凝土或石砌墙柱予以支撑,顶托;(2)挡墙:建造浆砌块石或混凝土重力挡墙以抵抗岩体的侧压力,防止崖体向外滑移和倾倒(图3)。挡墙力学参数见表1。

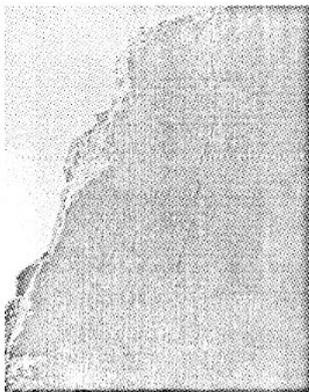


图2 崖面卸荷裂隙

Fig. 2 Unloading crack on precipice.

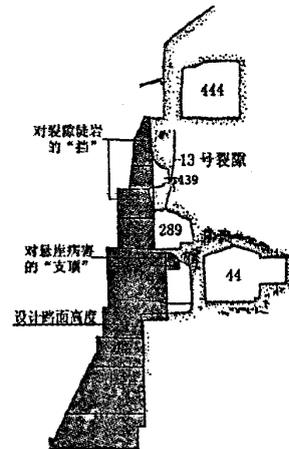


图3 地质病害挡墙加固处理示例

Fig. 3 An example of reinforcement.

1.4 地震因素

在各种地震动参数中,只考虑具有不同工程意义的地震动峰值加速度、频谱(特征周期)和持时三个方面的因素。

(1)窟区地震荷载的确定。通过对莫高窟150 km半径范围内的地震活动环境和地震构造环境综合研究的基础上,采用考虑时间、空间非均匀性的概率分析方法,给出了莫高窟地震危险性分析结果(见表

2)。其中50年超越概率为63.5%、10%及2%风险水平下的地震烈度,分别代表第一水准烈度(众值烈度)、第二水准烈度(基本烈度)和第三水准烈度(罕遇烈度)^[3]。

(2) 地震动输入。基于窟区地震危险性分析结果,在石窟围岩动态损伤计算过程中,输入峰值加速度稍作调整,分别设定为0.1 g和0.2 g代入计算,以进行对比分析。

为了满足研究需要,选用了4条具有不同工程意义的地震动时程,分别根据图4所示的标准反应谱曲线拟合而得,特征周期分别考虑0.25 s、0.4 s、0.55 s三种情况,总的持续时间为16 s或28 s,以充分反映未来可能的地震动特点(图5)。

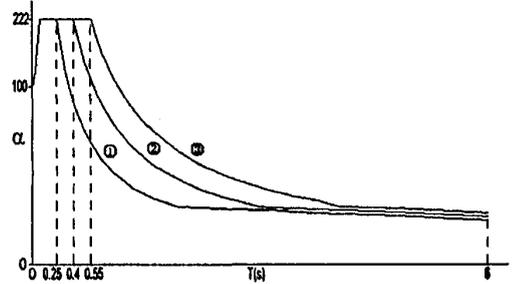
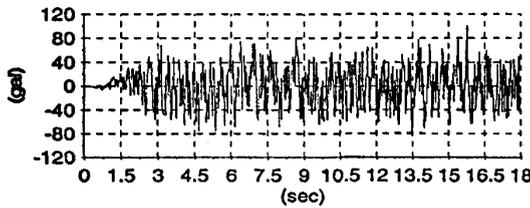


图4 不同特征周期的标准反应谱曲线

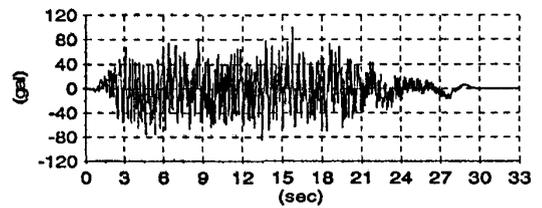
Fig.4 Normal response spectrum curve of different T_g .

表2 敦煌莫高窟地震危险性分析结果

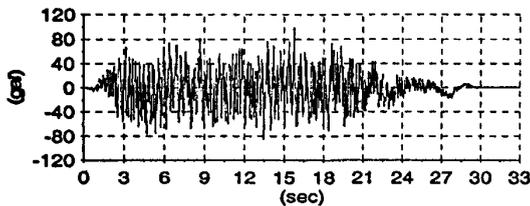
超越概率(50年基准期)	63.2%	10%	2%
烈 度/度	5.4	6.9	7.5
基岩峰值加速度/g	0.038	0.103	0.194



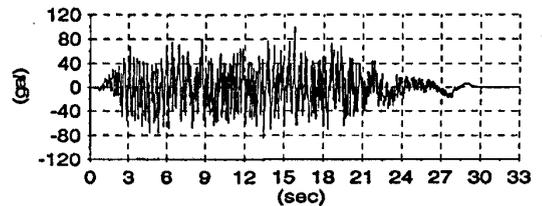
(a) $T_g=0.4s$, 持时 16s



(b) $T_g=0.25s$, 持时 28s



(c) $T_g=0.4s$, 持时 28s



(d) $T_g=0.55s$, 持时 28s

图5 地震动加速度时程曲线

Fig.5 Curve of Ground motion acceleration time history.

2 有限元分析原理和方法

2.1 分析原理

根据经典弹性理论的假定,将莫高窟围岩视为理想的线弹性体,在具体的计算过程中引入运动平衡方程:

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = -m\ddot{x}_g \tag{1}$$

式中: M 为体系的总质量矩阵; C 为体系的总阻尼矩阵; K 为体系的总刚度矩阵; u 、 \dot{u} 和 \ddot{u} 分别为体系的节点加速度向量、速度向量和位移向量; \ddot{x}_g 为施加到结构上的地震动加速度向量。运动平衡方程的求解采用 Newmark 隐式时间积分法。

体系采用 Rayleigh 阻尼,即 $C = \alpha[M] + \beta[K]$,其中 α 为质量阻尼系数, β 为刚度阻尼系数,根据振型

分解方法由选定的两个振型阻尼比和相应的自振频率表示:

$$\alpha = 2\left(\frac{\zeta_i}{\omega_i} - \frac{\zeta_j}{\omega_j}\right) / \left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2}\right), \quad \beta = 2(\zeta_j \omega_j - \zeta_i \omega_i) / (\omega_j^2 - \omega_i^2) \quad (2)$$

式中, ζ_i 和 ω_i 分别为第 i 振型的阻尼比和自振频率。计算中假定 $\zeta = 0.05$, 根据振型分析结果, 采用两种“贡献”较大的与振型相应的自振频率和阻尼比来计算 α 和 β 值。

莫高窟崖体内发育的裂隙, 为数不多, 但规模较大, 用有限元对其进行数值模拟。为了准确地反映裂隙结构面对对围岩稳定性的影响, 将裂隙考虑成一种具有特殊力学性质的薄层结构单元, 计算分布于其上的应力大小。挡墙和岩体之间接触紧密, 也考虑成一种薄层结构单元。

2.2 计算模型

实体模型宽 60 m, 高 55 m, 右边与山体相连, 左边取地表至地下深度 16m 处。洞窟分布密集, 分上下四层, 相隔距离很小。在上层洞窟左边发育有莫高窟崖体上规模最大的裂隙; 挡墙伸入洞室并对最底层洞窟加以支顶; 洞窟尺寸相差较大, 洞型多样化, 体现了莫高窟洞窟的基本形状特征, 即方底、直墙, 拱顶呈覆斗型或人字型。有限元计算模型见图 6, 假定模型左右两侧受水平方向位移限制, 底边受垂直方向位移限制, 崖面为自由边界, 载荷以地震动加速度时程方式水平方向输入。

3 莫高窟围岩动态损伤特性分析

3.1 位移场的综合分析

在地震水平左右往复激振下, 洞窟围岩随之发生的位移呈现时空上的规律变化。由位移等值线图(图 7)来看, 位移场的分布不因洞窟的有无和结构的改变而发生变化, 表现出严格受边坡地形控制以及边界条件约束的特点。总的说来, 随着坡体高度增加位移增大; 同高度上越临近坡面位移越大; 上层洞窟位移大于下层洞窟。最大位移位于最上层洞窟近坡面的边角处, 最小位移位于最下层洞窟背坡面的边角处。这说明对莫高窟所在岩质边坡而言, 其上分布的洞窟的数量与结构不能成为边坡位移形变大小的主要控制因素。

(1) 不同 PGA 对位移大小的影响。通过计算 PGA 等于 0.1 g 和 0.2 g 两种情况下结构的位移反应, 可以看出地震动加速度大小变化不改变洞窟围岩位移场的形态, 但对其大小的影响是显著的。随着地震动峰值加速度的增大, 围岩发生的位移增大(图 7(a)、(b))。

(2) 不同特征周期对位移大小的影响。由位移等值线(图 7(c)、(d)、(e))可知, 在相同峰值和持时作用下(PGA=0.1 g, 持时为 28 s), 特征周期增大, 结构位移响应都随之增加。说明随着长周期成分的增加, 坡体对地震动的反应加大。

(3) 不同持时对结构位移大小的影响。在 0.1 g 加速度峰值、0.4 s 特征周期的地震动载荷下, 28 s 持时条件下结构发生的最大位移略大于在 16 s 持时条件下发生的最大位移(图 7(a)、(d)), 说明持时对洞窟围岩体系的变形有轻微的增强作用, 但没有本质上的差别。因为作为一个弹性体系, 两个不同持续时间的地震动过程所引起体系的地震反应过程是相同的, 尽管可能因为出现加速度峰值的时刻不同, 或者出现较大峰值加速度的可能性增加而引起结构瞬时反应也增加, 但平均反应基本不变。

3.2 应力场综合分析

应力是反映岩体受力状态、判断岩体是否损伤破裂的最直接证据^[5]。在洞窟的周围, 尤其是洞窟之间很薄的隔壁处, 形成了压应力、拉应力和剪应力的高度集中区, 是围岩易发生破坏的地方。

(1) 地震动的不同工程特性对应力分布的控制。计算结果(表 3、图 8)显示: 地震动峰值加速度增大, 围岩相同位置处应力值增加。相同持时条件下(28 s), 随着特征周期加长, 最大应力值增加, 应力集中区的范围扩大; 相同特征周期条件下, 持时增大, 最大拉应力值略有增加, 集中涉及的范围变化不明显。

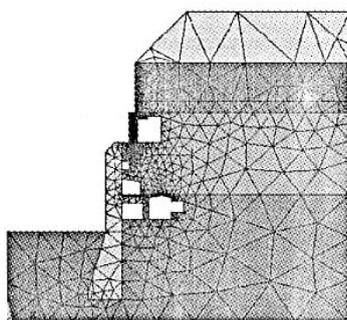
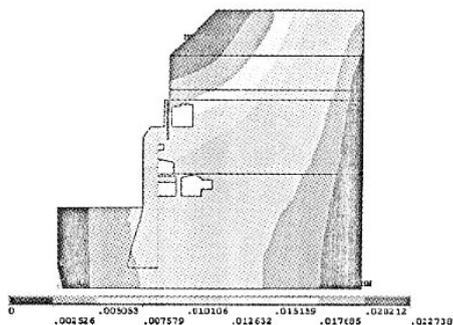
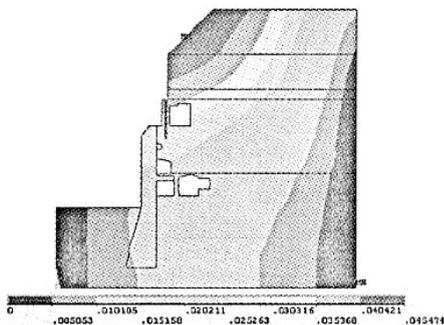


图6 有限元计算模型

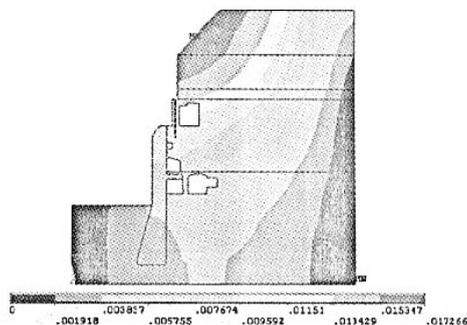
Fig.6 Finite element calculation model.



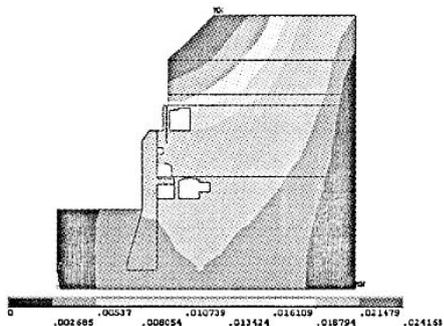
(a) 持时为16s, $T_g=0.4s$, $PGA=0.1g$



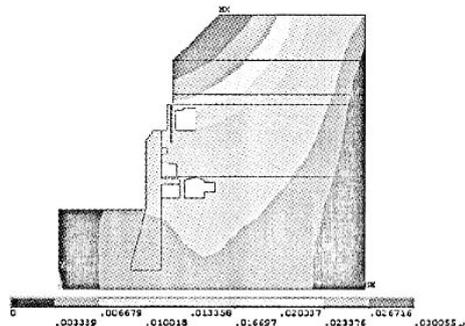
(b) 持时为16s, $T_g=0.4s$, $PGA=0.2g$



(c) 持时为28s, $T_g=0.25s$, $PGA=0.1g$



(d) 持时为28s, $T_g=0.4s$, $PGA=0.1g$



(e) 持时为28s, $T_g=0.55s$, $PGA=0.1g$

图7 位移等值线图(单位:m)

Fig.7 Displacement Isoline (Unit: m).

表3 相同PGA(0.1g)、不同 T_g 和持时条件下最大拉、剪应力值

T_g , 持时	$S1_{max}/MPa$				Sxy_{max}/MPa
	0.4s, 16s	0.25s, 28s	0.4s, 28s	0.55s, 28s	0.55s, 28s
结果	0.89	0.68	0.96	1.17	0.33

注: $S1_{max}$ 最大拉应力; Sxy_{max} 最大剪应力

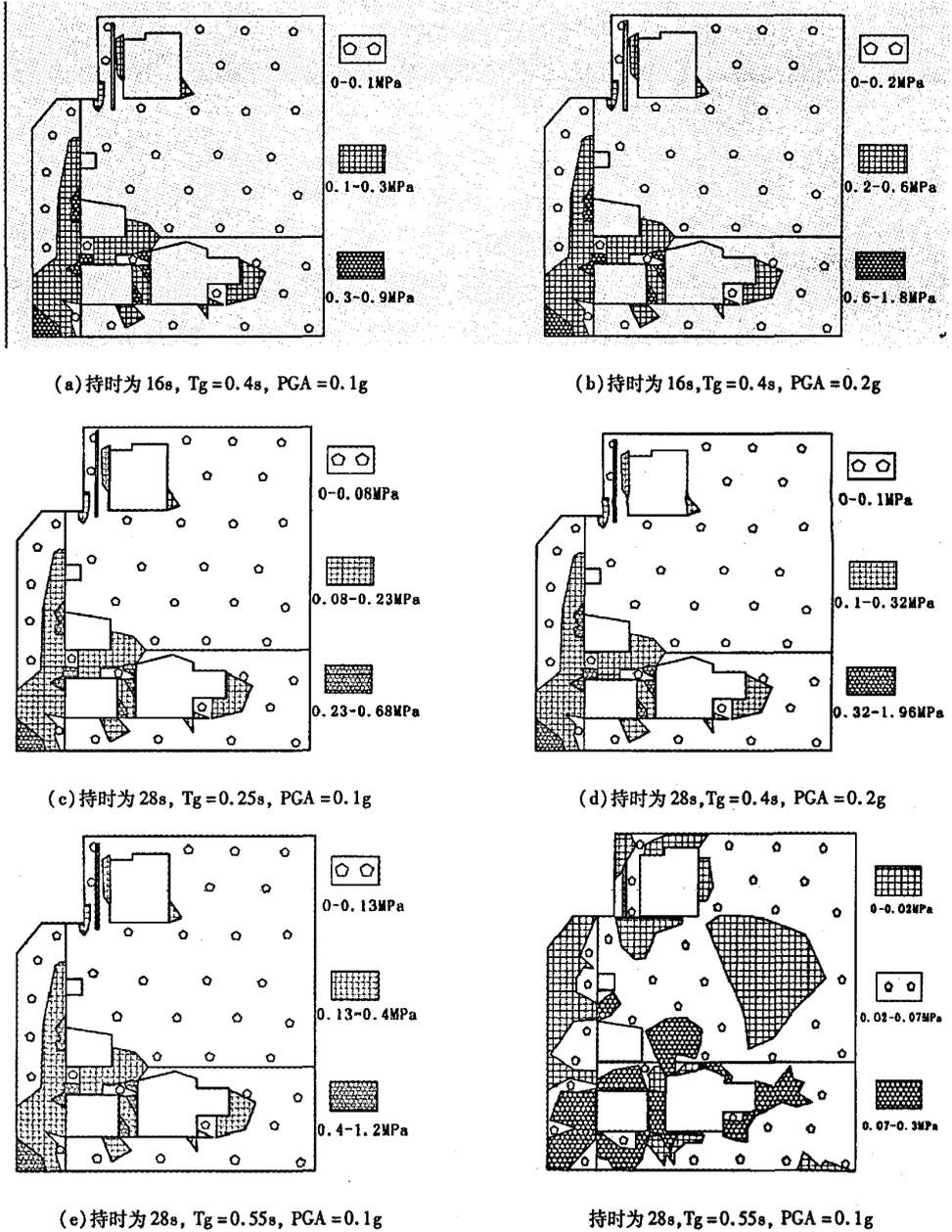


图8 拉应力等值线图

Fig. 8 Isoline of haul stress.

图9 剪应力等值线图

Fig. 9 Isoline of shear stress.

(2) 洞窟结构对应力分布的控制。模型计算所得结果显示:洞窟绝对尺寸越大,其周围岩体出现应力最大值的的可能性增大,应力集中区的范围越大,一般在洞窟顶部及底部边角处应力最大;洞窟跨高比越大,所受的影响越小,围岩越稳定。

由于洞窟分布非常密集,在地震作用下,容易形成高应力区,由于围岩抗拉和抗剪强度较低,常常是围岩损伤起始的地方,对围岩稳定性不利。

3.3 地震荷载下洞窟围岩损伤与否的判断

在 50 年超越概率为 10% 风险水平下的地震烈度 ($PGA=0.1g$) 条件下,以地震动持时为 28 s, $T_g=$

0.55 s为例,将模型的拉应力、剪应力分别和围岩抗拉强度、抗剪强度进行对比,以判定地震载荷下围岩动态损伤与否(表4)。

表4 最大拉、剪应力值和相应抗拉抗剪强度对比统计

$S1_{max}/MPa$	Sxy_{max}/MPa	$S3/MPa$	抗剪强度/MPa	抗拉强度/MPa
1.17	0.33	0.04	0.60	1.50

注: $S3$ 最大剪应力处的压应力

此剖面上最大拉应力值为 1.17 MPa, 出现在挡墙突入洞窟支顶洞窟的部位, 小于围岩的抗拉强度, 因而是稳定的; 最下层洞窟之间很薄的隔墙内拉应力最大可达 0.6 MPa, 接近围岩抗拉强度, 虽不能引起

损坏, 但危险性较大。最大剪应力出现于同一部位, 但也未能引起破损。裂隙由于其不抗拉和不抗剪性质, 而导致该处拉应力和剪应力值均超出其抗拉和抗剪强度, 发生破损。

4 结论

通过对不同频谱和不同持时作用下, 石窟围岩的位移场和应力场分布特征的研究, 揭示了不同工程特性的地震动对石窟围岩动态损伤的影响: 地震动峰值加速度越大, 洞窟的位移和应力值明显增大; 反应谱特征周期越长, 持时越长, 围岩位移变形越大, 应力值增加, 应力集中区的范围扩大, 围岩损伤的可能性增加, 稳定性降低。

通过对洞窟围岩位移场的整体分布特征的分析, 揭示了坡体位移不受洞窟数量和结构影响, 严格受边坡地形的控制: 坡体高度增加, 位移增大; 同高度上, 越临近坡面, 位移越大。上层洞窟位移大于下层洞窟。这说明就莫高窟所在岩质边坡而言, 其上分布的洞窟的数量与结构不是边坡位移形变大小的主要控制因素。

应力分布与洞窟结构密切相关, 在洞窟的周围, 尤其是洞窟之间很薄的隔壁处, 形成了压应力、拉应力和剪应力的高度集中区, 是莫高窟围岩容易发生破坏的地方。洞窟尺寸越大, 洞窟分布越密集, 洞窟间围岩厚度越小, 越容易导致损伤破坏。

根据岩体强度准则, 判定了在 0.1 g 的峰值加速度地震动条件下, 莫高窟整体是稳定的, 但由于裂隙的不抗拉不抗剪的特性, 石窟围岩会沿此出现拉裂或剪裂破坏, 甚至发生崩塌; 窟顶和边角处容易形成应力高度集中, 导致围岩局部开裂或掉块。

[参考文献]

- [1] 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平, 等. 石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性评价方法研究[J]. 西北地震学报, 2002, 22(1): 83-89.
- [2] 王旭东, 张明泉, 张虎元, 等. 敦煌莫高窟洞窟围岩的工程特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 756-761.
- [3] 石玉成. 未来地震灾害对敦煌莫高窟及其附属建筑物的影响[J]. 西北地震学报, 1996, 18(3): 42-47.
- [4] 石玉成, 张杰. 敦煌莫高窟主要病害及防治对策[J]. 西北地震学报, 1997, 19(2): 81-87.
- [5] 牟会亮, 杨志法, 伍法权. 石质文物保护的工程地质力学研究[M]. 北京: 地震出版社, 2000.

RESEARCH ON DYNAMIC DAMAGE CHARACTERISTICS OF COUNTRY ROCK OF MOGAO GROTTOS UNDER EARTHQUAKE LOADING

FU Chang-hua^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000)

Abstract: In this paper, taking Mogao Grottoes in Dunhuang, Gansu province, as the research object, the influence factors of dynamic damage for country rock of the grottoes under earthquake loading are explained. Using dynamic FEM, and based on the characteristics of ground motion caused by earthquake, the damage to the country rock and the subsidiary structures in earthquake is analyzed. The result could be used in the assessing earthquake security of historical relic grottoes and preventive measures.

Key words: Ground motion; Mogao grottoes; Country rock; Dynamic damage characteristics