

未来地震灾害对敦煌莫高窟 及其附属建筑物的影响

石玉成

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文从莫高窟抗震防灾的角度出发,阐述了其赋存的地震地质环境以及历史地震对石窟文物的影响,分析研究了影响洞窟及其附属建筑物地震稳定性的各种因素,在此基础上对洞窟及其附属建筑物的震害预测方法进行了初步探讨。

主题词: 地震灾害 震灾预测 莫高窟 附属建筑物 抗震性能

1 引言

敦煌莫高窟是历史留给我们的丰富而珍贵的文化遗产,至今已有 1 600 多年的历史了。历史上该洞窟曾多次遭到地震袭击,并有不同程度的破坏。目前,中国正处于第 5 个地震高潮期,开展石窟寺地震防灾、文物保护工作,使其免遭地震破坏,最大限度地减轻地震灾害,乃是关系到弘扬中华民族灿烂文化的重大课题。1988 年联合国教科文组织派出的中国遗产考察团在考察报告中曾提出有关敦煌莫高窟的保护问题^[1],其中第 80 条认为:“考虑到材料的不同强度和振动方式不同,我们注意到在严重地震发生时,这种加固方法(按:指 60 年代莫高窟的加固工程)有可能被证明是不明智的。”它同样提出了有关莫高窟防震减灾问题。对于未来地震对石窟文物的灾难性影响,有关部门尚未给予足够的重视。本文针对莫高窟自身的特点和所处的特定环境,就其抗震防灾及文物保护中的一些基本问题进行了分析和探讨,其目的旨在推动地震科学在文物保护领域的应用和发展。

2 区域地震地质背景

莫高窟位于东经 $95^{\circ}00'$, 北纬 $40^{\circ}00'$, 地处敦煌盆地的边缘,在大地构造位置上处于阴山东西复杂构造带(阴山带)和祁吕—贺兰山字型构造体系(祁吕系)西翼反射弧西部外缘和阿拉善弧南缘复合部位。莫高窟遗址所在的敦煌盆地,是一个由石板山、阿尔金山和鹰嘴山所围限的山间断陷盆地(图 1)。受北截山和南截山分隔,敦煌盆地可进一步划分为北部的狭义敦煌盆地,南部的阿克塞盆地和玉门—踏实盆地。受北截山断裂及阿尔金山断裂控制,盆地呈北东向狭长展布。北截山断裂从莫高窟南 1 km 左右的三危山山前通过,左行斜向逆冲,造成前震旦系(A_{nZ})逆冲到中更新世(Q_2)之上,阿尔金山断裂是阿尔金断裂带的组成部分。阿尔金断裂带是中国西部最大的剪切—挤压型断裂带,走向北东东,总长约 2 000 km,左行剪切,为区域性深大断裂带。以阿尔金断裂带为界,敦煌盆地位于塔里木地块的东南边缘,与祁连断褶带邻

接。受阿尔金山断裂及北截山断裂活动的影响,第四纪以来盆地内部近山处断陷,远山处形成

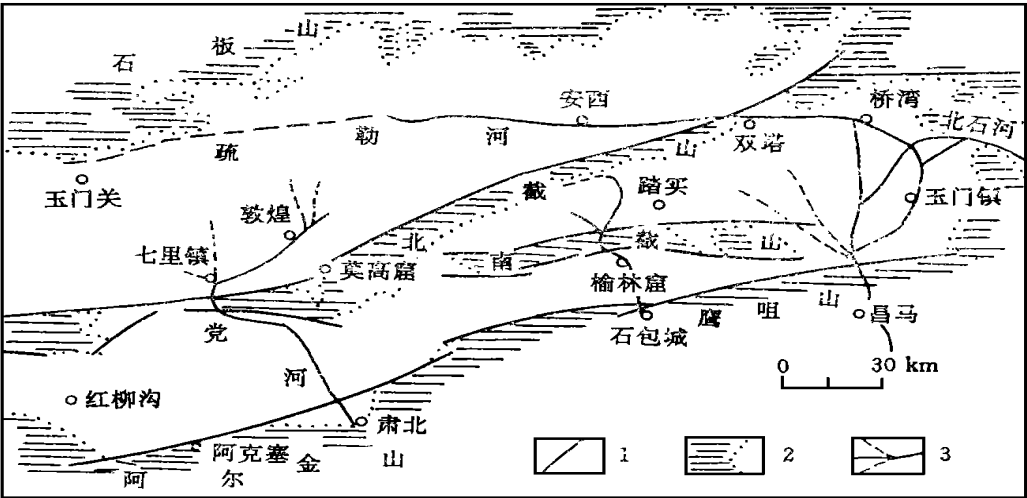


图 1 莫高窟及其附近地区地质构造略图

Fig. 1 Geological structures in Mogao Grottoes region.

1 断层; 2 前第四纪地层; 3 水系

拗陷,盆地南部山区抬升遭受剥蚀

3 历史地震对莫高窟的影响

莫高窟所在地区是属于地震活动较频繁的地带。据敦煌地区的历史地震记录与访问资料,自公元 417 年以来,可查考的地震现象有 15 次,从 1927 年至今的 67 年中,共发生过有感地震 13 次。其中 1927 年、1932 年和 1952 年的地震较强烈,地震动衰减到敦煌地区的地震烈度为 6 - 7 度。1927 年 5 月 23 日在古浪发生 M_s 7.9 地震,其震中烈度达 XI 度,相距 750 km 的敦煌“悬物微动”,莫高窟第 196 洞窟顶顺岩层层理一块 $2.0 \times 1.5 \times 0.25 \text{ m}^3$ 的晚唐壁画被震落,并将佛龕上高约 2.5 m 的塑像砸坏。1932 年 12 月 25 日昌马 M_s 7.7 地震,其震中烈度为 X 度,相距 350 km 的敦煌城“栋宇轧轧有声”。以上两次地震在敦煌微震延续时间约有 2 - 3 分钟。1952 年 1 月 23 日三危山 M_s 5.4 地震,距莫高窟仅 40 余公里,震中烈度为 VII 度,莫高窟第 211 洞窟顶一块 $0.4 \times 0.25 \times 0.03 \text{ m}^3$ 的初唐壁画又被震落^[2]。近 40 年来,在莫高窟遇到的地震有感现象达 5 次。1988 年、1989 年莫高窟附近连续发生有感地震,但烈度均在 VI 度以下。此外,莫高窟毗邻地区地震活动亦较为活跃,例如,1951 年 12 月 27 日和 1952 年 2 月 6 日在相隔不远的肃北地区曾分别发生过 6.0 级和 5.3 级地震。进入 80 年代以来,莫高窟周边地区曾多次发生过 4.0 级以上的地震。

通过考古方法,对崖面原状的研究发现,石窟开凿初期各洞窟原来都有前室。现存洞窟中,早期部分窟前室崩坍,主室多暴露在崖面上。至于崩坍与地震是否有直接关系,由于缺乏资料,不能臆断。但是,洞窟岩体的脆弱状况经受不起较大地震的冲击是肯定的,而莫高窟又属于地震多发区,这应引起我们的充分重视。

4 影响洞窟及附属建筑物地震稳定性的主要因素

4.1 地震载荷大小

预测一个地质体或一个工程结构的地震稳定性,首先必须科学地估计它可能受到的地震威胁,研究地质条件的影响及其抗震性能。目前,对于核电站、大坝、海洋平台以及其它各种重要工程,通过地震危险性分析方法确定其地震荷载。文物既不同于一般的工业与民用建筑,也不同于其它重要工程,它具有永久保存价值,一旦毁于地震,即使修复重建,其文物价值亦不复存在。因此,关键是如何确定作为设防标准的年超越概率。

4.2 环境工程地质条件

4.2.1 岩性对石窟的影响

从现场实际考察来看,崖顶缓坡段为戈壁组砂砾石层(Q_3^l),酒泉组半胶结砾岩(Q_2^{pl-al})构成了崖面的主体。这样,酒泉组地层岩体的物质成分、组织结构、胶结程度和风化程度等特性直接影响着洞窟的稳定性。崖面出露的酒泉组地层主要为砾岩、含砾石英砂岩及细砾岩。砾岩级配良好,分选性差,岩体质量中等。砂岩主要以细粒为主,级配良好,略有分选,岩体强度较高。细砾岩级配良好,分选性差,胶结物以钙质为主,岩体质量较好,尤其是构成底层洞窟的厚层细砾岩胶结程度相对较高,这也是洞窟在没有支护衬砌的条件下能够长期保持稳定的一个重要因素。

4.2.2 岩体的完整性

岩体是否完整,岩体中各种节理、片理、层理、断层等结构面的发育程度(即结构面的组数、密度和规模),结构面的产状、组合形态及其与洞壁的关系对洞室稳定性影响极大。洞窟群岩体中主要存在 4 组地质不连续面:

(1)平行崖面的近直立纵向裂隙。该组裂隙是对洞窟安全影响最大的一种,分布范围广,延伸长,以 096 窟到 015 窟之间的地段最为严重,多切过洞身,甚至深切到底层洞窟洞顶。实际调查结果表明,部分地段的裂缝自 60 年代加固工程之后仍在发展之中。

(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,下部张开约 1–5 mm,大致呈波状顺崖面向上延伸 2–5 m 即行消逝,裂面粗糙,其危害相对要小一些。

(3)斜切崖面的陡倾构造裂隙。该组裂隙是在构造节理的基础上发展起来的,在洞窟开挖之前即已存在。裂隙面平直,闭合,无充填,其走向、倾向、倾角与其南部三危山新构造运动所产生的逆断层的走向、倾向、倾角大致吻合。该组裂隙的危害不如纵向裂缝严重,但有切割岩体的作用,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。

4.2.3 地形地貌的影响

由于石窟开凿于岩石陡壁中,因此陡壁的高度、石窟所在山体的大小、石窟上部岩体山坡坡度大小等地形地貌问题对石窟的稳定性就极为重要。莫高石窟开凿于大泉沟左岸二级台地内侧边缘崖壁上,崖壁高约 25–30 m,并呈 80° – 90° 之直立崖面,崖顶为坡度约 30° – 35° 的平缓斜坡,这种特殊的地形地貌条件,加之洞窟密集、隔墙与顶板过薄等原因,使岩体的整体性质遭到破坏,因而常常在石窟上部形成悬崖、危石,时有崩塌掉块产生,这种病害尤以 60 年代加固工程之前最为严重。

4.2.4 水文、气象环境

敦煌莫高窟地处戈壁沙漠腹地,空气干燥,雨量稀少,温度变化剧烈,风沙活动强烈,是典型的大陆性气候。据记载,年平均降雨量仅 30 mm 左右,而年蒸发量 4 200 mm。窟外最高气温

为 44.1°C , 最低气温为零下 27.6°C ^[3]。干燥的气候有利于石窟的保护, 但莫高窟是一个多风地区, 频繁的风沙活动对洞窟崖面有强烈的风蚀和剥蚀作用, 防沙治沙问题已引起文物保护单位的高度重视

本区地下水埋藏很深, 对洞窟保护无不良影响。当地唯一的地表水——大泉沟河流水量很小, 仅对底层洞窟有轻微入渗作用。

4.3 洞窟几何形状及窟群组合特征

洞窟的埋深、几何形状、跨度、高度、洞窟立体组合关系及间距、施工方法、围岩暴露时间, 对围岩应力的性质影响很大。

莫高窟有文物价值的洞窟密集在南区。洞窟分前室和后室(主室), 前、后室岩墙以小孔口—甬道贯通。后室为方底、直墙, 覆斗形或人字形拱顶, 部分有中心岩柱。拱顶结构呈近似拱形, 有利于地层压力的传递和洞室围岩稳定。洞室围岩无任何支护、衬砌措施。洞室长一般为 4–10 m, 少数达 15–20 m, 宽度和高度约 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、底板岩层厚 0.5–1.5 m, 部分洞室仅 0.1–0.3 m, 例如, 在 428 窟及 303 窟南北一带都是早期洞窟的集中地段, 在隋代往往在大窟之间有限的崖面上开凿小窟, 使相邻两窟之间的岩体留下很薄的间壁, 削弱了岩体的强度, 此外上下层洞窟之间也相互妨碍, 如 290–289 窟下层的 44 窟的前室很深很宽, 290–289 窟之间的墙壁成为 44 窟 8 m 跨度前室顶板中部的集中荷载, 这是造成 290–289 窟前部塌毁的直接原因, 类似的情况还有很多。总之, 莫高窟这种开挖在半胶结弱质砾岩直立边坡上的薄顶、薄底、薄墙、无衬砌密集洞群, 是窟体稳定性分析评价中需加以考虑的一个重要因素。

4.4 洞窟与附属建筑物的关系

现场调查结果表明, 60 年代修建的浆砌块石挡墙及洞门墙, 经过 20 多年的使用和检验, 证明对洞窟的加固和抗震作用是有效的, 但仍有少数砌体发生位移、开裂和沉降现象。未来地震对洞窟及其附属建筑物的影响, 与支挡结构本身的工作状态有密切的关系。

(1) 支撑地基条件: 由于加固工程分期分段进行, 支挡墙、柱基础部分放置在洞前冲洪积砂砾石层上(如 272 窟、057 窟、481 窟), 部分放置在酒泉组砾岩上(如 435 窟、292 窟、041 窟), 地基不均匀沉降恶化了支挡建筑物的工作状态; 同时, 相对松散的冲洪积砂砾石层对上部结构的地震加速度有放大作用。这些均属抗震不利因素。

(2) 挡墙持力状况: 附属建筑物的效果好坏取决于其持力状况, 即挡墙与洞窟岩体是否紧密接触。现场调查表明, 不少地段存在着挡墙与围岩接触不良现象。例如, 285 窟砌体没有紧贴崖面, 60 窟北壁挡墙砌体已下沉 3 mm, 314 窟洞门墙已与岩体分离 3 mm。波速测试结果也说明了这一点, 164 窟、276 窟等地段, 地震波从激发点而未传到接收点, 说明挡墙与围岩间有较大裂缝阻止了波的传递。这样, 由于附属建筑物与洞窟岩体事实上的分离, 震时附属结构已不再有支挡或支撑洞窟的功能。今后应采取一定的防范措施, 增加接触缝间的韧性, 消除抗震薄弱环节。

5 洞窟及附属建筑物震害预测方法

为制定抗震减灾对策而开展的震害预测工作主要是针对工业与民用建筑、工业设备、地下管网等, 它们可以根据震害经验及理论分析方法进行震害预测, 技术手段较为成熟。但像莫高窟这样, 在砾石层岩体上开凿如此密集的洞窟, 现在又有附属建筑物与之共同工作形成一个复杂的体系而言, 则是一个完全不同的研究对象。为了简便直观, 本文只讨论二维问题。

5.1 数学模型

将挡墙与洞窟岩体视为在边界上相互接触的两个物体 S 、 S_I (图 2),对其中任一接触点 j ,取 S 物体上该点外法线方向作为 n 方向,然后逆时针方向旋转 90° ,作为其 t 方向,以 (n, t_j) 组成局部坐标系. 设 S 、 S_I 上接触点对法向接触力为 F_{nij} ($i=I, II; j=1, 2, \dots, k; k$ 为接触点对数),切向接触力为 F_{tj} ($i=I, II; j=1, 2, \dots, k$),相应的法向位移和切向位移分别为 u_{ij} , v_{ij} .

根据挡墙与洞窟岩体之间的实际情况,选定其可能接触区,这种可能接触区可以是连续的,也可以是间断的,而且在每一可能接触的区段内允许包含若干分离点,因此在可能接触区内的任何接触点对在动荷载作用下,均只能处于下述接触状态中的某一种: 连续状态. 滑动状态或分离状态. 各种接触状态下的接触面的连接条件可以表述为:

(1)连续状态:

$$\left. \begin{aligned} F_{nIj} + F_{nIIj} &= 0 \\ F_{tIj} + F_{tIIj} &= 0 \\ u_{Ij} &= u_{IIj} \\ v_{Ij} &= v_{IIj} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

(2)滑动状态:

$$\left. \begin{aligned} F_{nIj} + F_{nIIj} &= 0 \\ F_{tIj} + F_{tIIj} &= 0 \\ u_{Ij} &= u_{IIj} \\ F_{tIj} &= \pm \mu F_{nIj} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

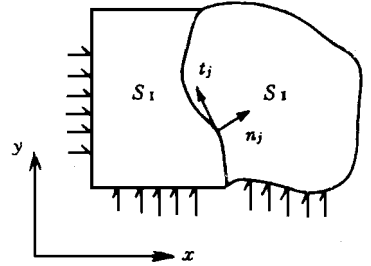


图 2 二维数学模型

Fig. 2 2-D mathematical model

式中 μ 为摩擦系数.

(3)分离状态:

$$F_{nIj} = F_{nIIj} = F_{tIj} = F_{tIIj} = 0 \quad (5.3)$$

对于图 2 所示系统,两个物体的刚度方程式分别为:

$$\left. \begin{aligned} [K_I] \{u\} &= \{P_I\} + \{R\} \\ [K_{II}] \{u_{II}\} &= \{P_{II}\} + \{R_{II}\} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

式中, $[K_i]$ 为 S 物体的整体刚度矩阵 ($i=I, II$); $\{P_i\}$ 为 S 物体的整体外载荷向量; $\{R_i\}$ 为 S 物体的接触力向量; $\{u_i\}$ 为 S 物体的节点位移向量

5.2 求解方法

接触问题可以归结为确定积分界限问题^[4],在数学计算中通过迭代过程可以解决.

(5.4)式中, K_I 、 K_{II} 可由虚功原理求得, P 、 P_{II} 即为输入地震动所产生的惯性力. 由于接触力 $\{R\}$ 、 $\{R_{II}\}$ 未知,因此方程式 (5.4)中,未知数多于方程数,无法直接求解,必须补充对应接触点对的接触连接条件(即 5.1式 - 5.3式),为此,可首先假定各接触点对的接触状态,并代入相应的接触定解条件,再求解方程式 (5.4),从而可以求得:

$$\left. \begin{aligned} \{u^*\} &= [K_I^*]^{-1} \{P^*\} \\ \{u_{II}^*\} &= [K_{II}^*]^{-1} \{P_{II}^*\} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

式中 $[K_i^*]$ 表示将接触连接条件代入后形成的修改后的刚度矩阵 ($i=I, II$); $[P_i^*]$ 表示将接触连接条件代入后形成的修改后的载荷向量,其中也包含了接触力.

在求解过程中,首先根据求出的节点位移,再用求节点力的方法求出接触点对上的接触力

向量。然后,根据接触点对上的位移和接触力向量,依次按接触判定条件判断各点对接触状态是否和假定接触状态相符,如不相符则应重新修改接触状态,把接触定解条件代入(5.4)式,经反复迭代直到该次计算前后接触状态完全吻合为止。

洞窟及其附属建筑物地震稳定性评价指标的合理选择及具体阈值的合理确定是一个很关键的问题,有关该问题的解决以及洞窟和附属建筑物震害机制的数值模拟的详细结果,作者将在另文中论述。

6 结语

(1)莫高窟所在的敦煌盆地是塔里木地块东南缘的山间断陷盆地,历史上莫高窟曾多次遭到地震的袭击。如何科学地估计未来地震灾害的影响,正确制定合理的抗震设防概率水准,是文物保护、抗震防灾基础研究所面临的重要而迫切的实际问题。

(2)地震载荷大小、环境工程地质条件(岩性、岩体的完整性、地形地貌、气象水文环境等)、洞窟几何形状及窟群组合特征、洞窟与附属建筑物的关系是影响洞窟及附属建筑物地震稳定性的主要因素。

(3)如何合理模拟洞窟与附属建筑物在地震作用下共同工作的特点是进行震害预测工作的关键,本文将其视之为“接触问题”。在模拟分析过程中,除了保证各相互接触物体内部变形协调性以外,还要考虑各接触物体之间在接触边界上变形的协调性。

(4)加强对敦煌莫高窟运营现状及其发展趋势的监测,是一项极其重要的基础性工作。建议有关部门对崖体的裂隙、密集洞窟的相互关系及变化情况、现有附属建筑物的加固作用和自身位移以及抗震的薄弱环节处进行长期监测,并采取相应的防治措施。

本文是敦煌莫高窟抗震防灾研究的一个阶段性小结,文中所涉及的一系列问题,以后将会得到进一步的研究和深化。

参考文献

- 1 联合国教科文组织中国遗产考察团.中国遗产考察报告,1988.
- 2 谢毓寿、蔡美彪.中国地震历史资料汇编.北京:科学出版社,1986.
- 3 (日)三浦定俊、西浦忠辉.敦煌莫高窟的气象观测.敦煌研究文集.兰州:甘肃民族出版社,1993.
- 4 K J巴特, E L威尔逊.有限元分析中的数值方法.北京:科学出版社,1985.

(下转第 72页)

TYPE-III EXTREME-VALUE DISTRIBUTION AND ITS APPLICATION TO ANALYSIS OF ANNUALLY LARGEST MAGNITUDES OF EARTHQUAKES

Xu Renping

(Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051)

Fu Huimin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract

In this paper, based on Type-III extreme-value distribution, the method of parameter estimation is given and point estimation and interval estimation of earthquake prediction are discussed. The prediction accuracy will greatly be improved and the theoretical basis for medium term and long term earthquake prediction is provided.

Key words Trend prediction, Magnitude, Magnitude distribution, Type-III extreme-value distribution

(上接第 47 页)

EFFECT OF FUTURE EARTHQUAKES ON THE DUNHUANG MOGAO GROTTOES AND THEIR SUBSIDIARY BUILDINGS

Shi Yucheng

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

Abstract

From the angle of earthquake disaster mitigation of the Mogao Grottoes, this paper expounds their seismogeology background and effects of historical earthquakes on them, gives the factors influencing the seismic stability of Mogao caves and their subsidiary buildings, and theoretically puts forward the preliminary prediction method for earthquake damages of the caves and their subsidiary buildings.

Key words Earthquake damage, Seismic damage prediction, Mogao Grottoes, Subsidiary building, Aseismic property