

石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性 评价方法研究

石玉成, 蔡红卫, 徐晖平, 刘红玫

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以莫高窟为例探讨了挡墙加固型石窟围岩及其附属构筑物的地震稳定性评价方法, 认为对于大型的石窟群及其附属构筑物, 其地震稳定性评价宜采用以动力分析方法为主, 拟静力法为辅的双轨制方法, 并提出了具体的评价思路 and 理论分析方法。

关键词:石窟; 莫高窟; 地震稳定性评价; 拟静力法; 动力法

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)01-0083-07

0 前言

石窟大多依山而凿, 主要以群体的形式存在, 规模大, 延续的时间长, 一般都是十几个、几十个成群成组集中在一个区域, 更大的由几十个到几百个甚至上千个洞窟组成。鉴于不同时代的艺术和宗教的审美要求, 各个地区、各个时代都有不同的石窟形式。由于石窟特殊存在形式和其所具有的重要文化价值, 它的抗震防灾工作对于洞窟文物保护具有十分重要的意义。

石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性分析评价是石窟文物地震安全评估及防灾对策研究中的重要一环。在漫长的历史岁月中, 由于多种自然和人为因素的作用, 我国许多著名的大型石窟群都存在着严重的危及安全的病害, 如边坡失稳、岩块崩塌、洞窟崖壁开裂、窟顶崩坍剥落、窟龕岩体及石像风化严重等^[1], 亟待加固修缮。有些石窟地处地震频繁活动区^[2], 也需要进行抗震加固。对于一些石窟, 已经采取了不同形式的加固措施, 如60年代莫高窟的抢险加固工程是以重力挡墙的形式阻止石窟大面积的崩塌; 70年代麦积山石窟的加固, 采用的是喷锚加固与裂隙灌浆相结合的方式, 彬县大佛寺石窟、安西榆林窟等石窟的修缮加固也基本上采用了类似的方法; 龙门、云岗石窟在防止岩体崩塌的加固工程中, 则采用了化学灌浆粘结、补砌等方法。这些已加固了的石窟同样存在着抗震安全评价问题。本文主要以莫高窟为例, 探讨采用重力挡墙形式加固的石窟的地震稳定性评价分析方法。

1 地震稳定性评价中需考虑的若干重要因素

1.1 影响石窟围岩稳定性的主要因素

洞窟所在崖体的地震稳定性主要取决于4个方面的因素: (1)地震因素: 包括地震动强度、

收稿日期: 1999-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59708001); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000005

作者简介: 石玉成(1966-), 男(汉族), 副研究员, 主要从事地震工程研究

地震作用特点、地震动持续时间等;(2)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;(3)工程因素:主要是指洞窟的方位、分布方式(单洞或群洞及其布局关系)、和规模(高度、跨度及长度)、形态、施工方法(开挖顺序、一次成洞、分段开挖)、开挖工艺、围岩暴露时间以及使用时其它工程活动的影响等;(4)加固工程构筑物对石窟崖体的加固效果.其中,支撑地基条件和挡墙强度及持力状况尤为重要

这些因素的不同组合,将使不同区段的石窟崖体具有不同的震动破坏危险性.

1.2 挡墙加固型石窟的特点

西北地区的石窟大都属于砂岩、砾岩型石窟.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,拱顶呈覆斗形或人字形,部分有中心岩柱.洞室围岩无任何支撑和衬砌措施.以莫高窟为例,由于千余年的不断开凿,布满洞窟的崖面已“状若蜂巢”.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.部分区段的洞窟非常密集,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.从防止石窟大面积崩塌的角度考虑,对于这种开凿于半胶结弱质围岩直立边坡上的薄顶、薄底、薄墙、无衬砌密集洞群,采用重力挡墙的加固形式是一种比较可行的方法.

1.3 莫高窟加固工程特点

1.3.1 砌体结构特点

莫高窟整个加固工程设计可归纳为3个主要方面:(1)顶:采用梁柱结构用以支顶悬空的石窟.当支顶范围较小,如只支顶某一洞窟前室顶部,而下部又有岩石地基时,就采用这种结构形式.柱基础直接砌在岩石地基上,若柱高超过一层洞窟高度,则将柱砌在挡墙的上部.2个柱顶上面架设支顶梁,梁上再砌片石紧贴上部悬空的岩体.(2)挡: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.挡墙墙体厚重,且由下向上墙身断面逐层减小,故在每层洞窟地板高程设计向内收进的错台,并将其设计成人行走廊.挡墙在窟口留出窟门,在顶部成斜面收进,与山体自然相接.墙的内侧与岩体紧贴,当上部有外悬前室或危岩时,为不使下层洞窟受压,则从砌体内伸出悬臂梁,在悬臂梁上砌片石柱予以支承.(3)刷:对外悬过多的岩体或没有必要支顶的零星危石,采用削方的办法予以清除.

1.3.2 基础处理与沉降缝的设置

支顶结构物基础一般都坐落在基岩上,部分地段采用柱墩式深基础,用连续地基梁承托上部的挡墙砌体.当砌体较厚,基础位于基岩及可压缩性土上时,则在砌体中设计纵向沉降缝.沉降缝内侧的砌体位于基岩上,沉降缝外侧的砌体全部位于同一种土上,并采用延期封顶达到紧托悬崖的目的.当地基土变化较大时,每隔20~30 m设计横向变形缝作为伸缩及沉降缝.

以上几个方面的因素是在石窟地震稳定性评价中需要重点考虑的.

2 石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性评价方法

2.1 拟静力分析法

2.1.1 计算模型的建立

挡墙的横截面尺寸相对墙的纵向长度要小得多,而且在施工时每隔一定距离留有沉降缝,因此在计算时按平面应变问题处理.立柱则按实体尺寸计算.

地震稳定性验算分为强度验算和整体稳定性验算2种情况.进行强度验算时将挡墙看成在路面高程之上的弹性悬臂梁,分析在各种荷载组合情况下梁中的应力分布.在进行整体稳定

性验算时,将挡墙考虑为一刚性体,分析各种荷载组合情况下沿墙基底面的抗滑稳定性及绕墙趾点的抗倾倒稳定性.实际情况下,岩体中的裂隙下切深度是有限的,在计算中假定裂隙下切至墙基,这种假定忽略了未切穿岩体的作用,因而计算结果是保守的.计算中没有考虑洞窟挖空的影响,即假定洞窟是由岩体充填的.

2.1.2 墙体强度验算

假定墙体是道路高程上固结的悬臂梁,开裂岩体在道路高程上固结于下部岩体,墙体与岩体之间在垂直方向上允许相对滑动,墙体与岩体在水平方向上位移一致,墙顶及临空面为自由面.将墙体重力考虑为体力,其所受地震力仅考虑水平地震力,同时认为开裂岩体在裂隙位置完全自由,即与后方山体没有约束.

2.1.3 墙体整体稳定性验算

假定墙体为刚性体,其静荷载主要为重力,墙底正压力和摩擦力、墙前填土被动土压力、墙后岩体沿裂隙面的正压力及摩擦力、墙背与岩体间的正压力及摩擦力.将墙体及墙后开裂岩体所受地震力分为水平地震力和竖直地震力2种.水平地震力方向指向墙外临空方向,竖直地震力按水平地震力的65%考虑,且方向竖直向上,即最不利的组合情况.

$$\text{抗倾稳定系数 } K_1 = \text{抗倾力矩} / \text{倾倾力矩} \quad (\text{考虑沿墙趾倾倒})$$

$$\text{抗滑稳定系数 } K_2 = \text{抗滑力} / \text{滑动力} \quad (\text{考虑沿墙底面滑动})$$

$$\text{偏心比} = e/B$$

其中: e 为偏心距,向山体方向为负,向临空方向为正; B 为基底宽度.

2.1.4 荷载组合

荷载按静荷载及地震荷载组合.地震荷载分别按Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ3种烈度情况考虑.为单独验算支护构筑物自身的地震稳定性,考虑了有岩体作用(考虑支护墙与岩体共同稳定性)和没有岩体作用(仅考虑挡墙地震稳定性)2种情况.采用平面应变问题的有限元法计算墙体中的应力.先划分单元,形成刚度矩阵及荷载向量,然后求解节点位移和应变,最后求解节点应力.

2.2 动力分析方法

动力分析方法考虑岩体在节理裂缝处以及石窟和附属结构之间的动接触问题,通过接触面的相互约束建立整个系统的力的平衡.另一特点是在计算中引入时间因素,即考虑动态过程,可以模拟显示石窟岩体及其附属结构从破坏前到破坏后的整个非连续变形的动态过程,并充分考虑这一动态过程的作用特点.在具体的计算过程中可引入运动平衡方程.

石窟及附属工程构筑物体系地震稳定性数值模拟分析计算的基本假定与常规的二维有限元地震反应分析的假定相类似^[3].在动荷载作用下,有限元体系在时刻 $t + \Delta t$ 的运动平衡方程为:

$$M\ddot{u}_{t+\Delta t} + C\dot{u}_{t+\Delta t} + Ku_{t+\Delta t} = -M(\ddot{x}_g)_{t+\Delta t} \quad (1)$$

式中: M 为体系总质量矩阵; C 为体系的总阻尼矩阵; K 为体系的总刚度矩阵; $\ddot{u}_{t+\Delta t}$ 、 $\dot{u}_{t+\Delta t}$ 和 $u_{t+\Delta t}$ 分别为体系的节点加速度向量、速度向量和位移向量; $\ddot{x}_g$ 为作用于基底的地震加速度向量.

体系的总刚度矩阵可采用Rayleigh阻尼,即 $C = \alpha M + \beta K$,其中 α 、 β 为阻尼系数.运动平衡方程的求解可以采用Newmark隐式积分法^[4]或振型叠加法,采用Mohr-Coulomb屈服准则和材料的弹塑性本构关系,对超过屈服点的应力进行应力调整.在出现拉应力的地方,由该处的最大主应力和该处的抗拉强度相比较作出判断.

近几年来,动力接触问题越来越引起人们的重视,在许多有限元分析程序中都引入了接触单元^[5,6].洞窟和附属构筑物是2个刚性完全不同的结构体,它们之间的关系可视为接触关系.通过接触面单元、节理的动力冲击和接触性质可以在每个时间步结束时加以确定,这样就可以比较全面地分析岩体节理内部和接触面上的动力特性.

将挡墙与洞窟岩体视为边界上相互接触的2个物体 S_I 和 S_{II} ,见图1.对其中任一接触点 j ,取 S_I 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_j, t_j) 组成局部坐标系.设 S_I 和 S_{II} 上接触点对法向接触力为 F_{nij} ($i = I, II; j = 1, 2, \dots, k; k$ 为接触对象),切向接触力为 F_{tij} ($i = I, II; j = 1, 2, \dots, k$),相应的法向位移和切向位移分别为 u_{ij}, v_{ij} .

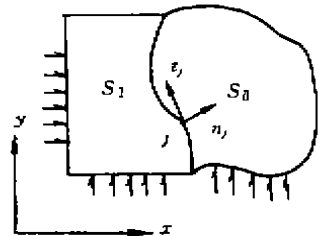


图1 接触面单元分析模型

Fig. 1 2-D mathematical model.

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

$$\begin{aligned} F_{nIj} + F_{nIIj} &= 0 \\ F_{tIj} + F_{tIIj} &= 0 \\ u_{Ij} &= u_{IIj} \\ v_{Ij} &= v_{IIj} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 滑动状态

$$\begin{aligned} F_{nIj} + F_{nIIj} &= 0 \\ F_{tIj} + F_{tIIj} &= 0 \\ u_{Ij} &= u_{IIj} \\ F_{tIj} &= \pm \mu F_{nIj} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦系数.

(3) 分离状态

$$F_{nIj} = F_{nIIj} = F_{tIj} = F_{tIIj} = 0 \quad (4)$$

为了更好地反映接触面的动力变形性质,可以把接触边界之间的间隙区域处理成虚拟的单元,可视作一种具有特殊的材料非线性的单元.接触面间隙应变可定义为:

$$\epsilon_i = \frac{l_i - l_{i0}}{l_{i0}} \quad (5)$$

式中: l_{i0} 为第 i 单元原始间隙, l_i 为第 i 单元当前间隙.

在不同接触状态下需要对接触面单元的刚度进行调整:

(1) 若 $\epsilon_i \geq 0$,则接触面间隙开裂,该处挡墙与石窟岩体继续分离.这时应调整接触面间隙单元的刚度,使之不致约束2个物体相互分离的运动,即弹性模量很小.间隙应力也比相邻单元中的应力小许多倍.

(2) 若 $-1 \leq \epsilon_i < 0$,则接触面间隙闭合.此时 $l_i < l_{i0}$,当 $\epsilon_i = -1$ 时,接触面间隙完全闭合.这时的间隙单元应该有足够的强度.其弹性模量与相邻单元的弹性模量较为接近,可以通

过多次迭代求得。

(3) 若 $\epsilon_i < -1$, 则表明接触面上2个物体已经相互嵌入, 而嵌入是不可能的。此时, 应使间隙单元的 ϵ_i 尽可能接近于 -1 。

对于莫高窟而言, 部分加固工段的支挡结构与石窟岩体接触面上用毛毡相连, 可视为接触面上无摩擦问题, 直接采用上述方法进行调整。但对于直接相连的加固工段, 则须考虑接触面上的摩擦问题, 此时需同时调节接触面单元的拉伸弹性模量 E 和剪切模量 G 。当接触面相邻单元处于滑动状态时, 可以根据库仑摩擦定律来调节 G 。

岩体内存在大量的节理, 岩石的变形特性在很大程度上取决于节理的力学特性。平行于崖面的纵向裂隙, 对洞窟安全影响最大, 可参照上述方法对裂隙的接触条件做出具体判断, 也可根据结构面不同的强度参数进行判断。对于数量大而尺寸较小的节理和裂隙的影响, 由于计算机的容量有限, 实际上难以逐一模拟, 在具体计算过程中可按照有限元的离散要求产生岩石单元和节理岩石单元, 首先研究节理的变形特性(剪切刚度和法向刚度)和几何参数(间距、贯通率等), 然后按照变形等效的方法调整其强度。

3 地震稳定性评价总体思路

对于莫高窟这样的大型石窟群, 其地震稳定性分析既要考虑斜坡岩体稳定性和洞群的围岩稳定性, 也要考虑附属工程构筑物的抗震性能。按拟静力法计算, 把支挡构筑物看成研究主体, 在假定危岩不存在的情况下, 即得到支挡构筑物自身的稳定性; 在假定危岩存在的情况下, 支挡构筑物的稳定性实际上就是支挡构筑物与其所支挡岩体所组成的复合体系的稳定性。地震稳定性则是将地震荷载作为特殊荷载叠加之后的稳定性问题。莫高窟的洞室极为密集, 洞顶、洞底和洞壁均较薄, 洞室差别很大, 无论在平面上还是在剖面上洞型都不相同。从严格意义上讲, 其洞室围岩稳定问题已超出传统岩体力学中洞室围岩稳定问题的范围, 已转化成洞室岩体的结构力学问题, 因此, 其稳定性分析应采用动力分析方法。

动力分析方法能反映石窟围岩与附属工程构筑物之间以及岩体裂隙的非连续特征, 能够模拟接触面和结构面在动荷载作用下的不同工作状态, 对其接触条件作出具体判断。动力分析方法能够给出各部位在地震作用下的稳定过程和破坏过程, 能够模拟不同的地震作用, 便于分析受力变形全过程中的各种问题和检验石窟的抗震性能。该方法还可用于反演计算, 根据石窟岩体的位移场和应力场等参数, 确定支挡方式和窟体防护重点。从理论上讲, 动力分析方法比静力分析方法更切合实际、更具有普遍意义。

震害调查结果表明, 通常洞口段在地震时最容易遭受破坏。90年代以来, 国外开展了一些地下结构的抗震试验, 但涉及工程上非常关心的洞口、洞门以及洞口山体稳定性的试验研究基本上还是一个空白。拟静力法和动力分析方法本身都存在着许多假定, 而影响动力分析计算结果的敏感性参数更多。采用本文所介绍的方法对敦煌石窟的计算结果表明, 有时二者会相差很大, 拟静力法在评价石窟岩体和附属构筑物的整体稳定性方面有一些优点, 而动力分析方法则能较为全面地考虑各种因素的影响, 揭示洞窟和附属构筑物不同部位的破坏特征和抗震薄弱环节。因此, 对于像莫高窟这样的具有重要经济价值和文化价值而自身结构又较为特殊的石窟, 采用拟静力法和动力分析方法互为补充、对比分析, 对于制定合理的抗震设计方案和窟体防护措施是很有实效的。

窟体及附属构筑物的地震稳定性评价思路可归纳为如下几个方面:

(1) 通过石窟环境工程地质条件调查、物探测试、室内试验, 查明洞窟地层的工程地质性

质,给出岩体的工程力学参数。

(2) 通过对裂隙分布、裂隙发展状况、支挡构筑物运行过程中变形情况的调查和分析,筛选出窟区崖体最危险的拟评价区段,选择洞窟密集、裂隙贯通性好、挡墙较高,即具有代表性的区段进行验算。

(3) 关于石窟文物抗震设防等级问题,除了以地震危险性分析结果为其重要依据外,还要结合历史上石窟本身的抗震实践、文物保护等级来进行。洞窟及其附属建筑物地震稳定性评价指标及具体阈值的确定应将数值模拟计算结果、震害经验以及实验分析三者结合起来考虑。

(4) 采用拟静力法将支挡构筑物作为评价主体,将裂隙切割的危险岩体作为边界条件,从支挡构筑物自身材料强度、整体抗倾稳定性和整体抗滑稳定性3个方面,综合评判岩体与支挡构筑物在正常工作状态下的稳定性,将地震力作为特殊荷载,考虑不同地震荷载作用下的整体地震稳定性。

(5) 合理模拟随机地震动荷载作用下,洞窟和附属构筑物之间以及岩体节理之间的“动接触”问题,采用动力分析方法给出石窟围岩和支挡结构的整体地震稳定性以及各部位在不同地震作用下的稳定过程和破坏过程。

在选择计算模型的过程中要考虑以下几个方面的因素:①洞窟疏密程度、洞窟壁体厚薄、岩体节理裂缝空间分布特征;②岩性、洞窟几何形状及窟群组合特征;③不同地震作用(强度、频谱特性等)特点;④支护结构;⑤支护结构地基条件类型;⑥没有支挡结构的情况及另设轻型支挡结构的加固方案;⑦洞窟和附属建筑物的接触关系;⑧支护工程施工年代。

(6) 对上述拟静力法和动力分析法计算所得结果进行对比分析,综合评价其地震稳定性,为洞窟保护提供安全可靠、经济合理的科学依据。

(7) 将上述计算的危险区段与其他区段进行类比,进而评价其他区段的地震稳定性。

4 结论

对于像敦煌石窟群这样一种由天然崖体和人工加固工程构筑物组合而成的洞窟的地震稳定性评价应采用以动力分析方法为主、拟静力法为辅的分析方法。拟静力法将支挡构筑物视作研究主体,将裂隙切割的危险岩体视为作用在加固构筑物上的荷载,地震荷载作为特殊叠加荷载,通过支挡构筑物自身材料强度、整体抗倾稳定性和整体抗滑稳定性,综合评判石窟的抗震安全性。动力分析方法将石窟与附属构筑物视作一个整体,将洞窟与附属构筑物在地震作用下的状态分为连续状态、滑动状态和分离状态3种形式,通过接触面的相互约束建立整个系统的力的平衡方程,以接触面上相应的切向和法向接触力及位移的关系来判定接触状态,根据接触状态调整接触面单元刚度。对于窟体本身的裂隙,建立约束节理单元,以应力和位移的形式设置约束条件。拟静力法在评价石窟岩体和附属构筑物的整体稳定性方面有一定的优点,而动力分析法则能较全面地考虑各种因素的影响,揭示洞窟和附属构筑物不同部位的破坏特征和抗震薄弱环节。2种方法相结合,考虑的因素比较周全,因而对于制定合理的洞窟抗震设计方案和窟体保护措施是有一定的实际意义的。

〔参考文献〕

- [1] SHI Yu-cheng, CAI Hong-wei. The main factors and mechanism effecting on the earthquake resistance stability of grottoes relics and countermeasures[A]. 12th World Conference on Earthquake Engineering Auckland New Zealand, 2000, 1351, 1~6.
- [2] 石玉成. 石窟防震减灾与文物保护[J]. 灾害学, 1998, 13(4): 90~94.
- [3] 刘玉海, 陈克新, 倪万魁. 地震工程地质学[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [4] D R J 欧文, E 辛顿. 塑性力学有限元理论与应用[M]. 曾国平等译. 北京: 兵器工业出版社, 1989.
- [5] Katona M G. A simple contact-friction interface element with application to buried culverts[J]. Int J Num And Meth In Geomech, 1983 371~384.
- [6] Zenz G, Ning L and Swoboda G. Blasting induced vibrations in discontinues rock[A]. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1991. 811~818.

METHODS FOR THE SEISMIC STABILITY EVALUATION OF SURROUNDING ROCK AND AUXILIARY STRUCTURES OF GROTTOES

SHI Yu-cheng, CAI Hong-wei, XU Hui-ping, LIU Hong-mei
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking Mogao grotto as example, the seismic resistance characteristics of retain wall type grotto is discussed. Methods for the seismic stability evaluation of surrounding rock and auxiliary structures of grottoes are studied. It is concluded that the method of dynamic analysis can be mainly used in seismic response analysis for large scale grottoes and its auxiliary structures, at the same time, results of pseudo-static analysis have to be used as reference. Furthermore, some thoughts and methods of evaluating seismic resistance ability of grottos are put forward.

Key words: Grottoes; Mogao grotto; Seismic stability evaluation; Pseudo-static method; Dynamic method