

陈亚光.宝兰客专天水市王家墩滑坡地震稳定性分析[J].地震工程学报,2019,41(6):1607-1614.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1607

CHEN Yaguang.Stability Analysis of Wangjiadun Landslide in Tianshui City under Earthquake Load[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1607-1614.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1607

# 宝兰客专天水市王家墩滑坡地震稳定性分析

陈亚光

(中铁十七局三公司,河北 石家庄 050000)

**摘要:**天水市秦安县王家墩滑坡为宝兰客专沿线巨型古滑坡群,宝兰客运专线秦安隧道穿其而过。以王家墩滑坡为研究对象,围绕工程中静、动力抗滑稳定性问题,通过室内试验、现场调查对影响王家墩古滑坡稳定性的地质构造、场地工程条件等内在因素进行分析评价,在此基础上通过有限元动力分析,对王家墩古滑坡在地震载荷下的动力响应进行分析,明确地震荷载作用下,王家墩古滑坡失稳影响因素、地震荷载与滑坡失稳破坏间的关系。采用动力有限元法和强度折减法相结合的方法,开展动力抗滑稳定性分析方法研究;采用位移突变的方法来确定边坡动力失稳及动力安全系数,分析结果表明:地震作用时的水平推力对王家墩古滑坡的稳定性有很大影响,表现为上部坡体的整体滑移和隧道入口段黄土堆积层局部失稳滑塌;在天然状态下坡体处于稳定状态,在遭遇未来该区域中强地震作用时,该斜坡会发生失稳,黄土斜坡的整体滑动最容易出现在第三阶坡体,沿着塑性应变最大的滑移面整体滑移;给出了坡体动力稳定性安全系数  $F_s = 0.92$ 。

**关键词:**地震荷载;王家墩滑坡;强度折减法;稳定性;动力安全系数

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1607-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1607

## Stability Analysis of Wangjiadun Landslide in Tianshui City under Earthquake Load

CHEN Yaguang

(The 3rd Company of the 17th Bureau of China Railway, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

**Abstract:** The Wangjiadun landslide in Qin'an County of Tianshui City passes through the Qin'an tunnel and is a giant ancient landslide group along the Baoji-Lanzhou PDL. This study selects the Wangjiadun landslide to assess the static and dynamic anti-sliding stability problems in the project. Internal factors such as geological structure and site engineering condition, which affect the stability of the Wangjiadun ancient landslide, are evaluated through laboratory tests and field investigation. The dynamic response of the Wangjiadun ancient landslide under seismic load is analyzed by dynamic finite element method. The dynamic anti-sliding stability is studied using the combination of dynamic finite element method and strength reduction method. Displacement

收稿日期: 2019-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472297); 南京工业大学引进人才科研启动经费项目

第一作者简介: 陈亚光(1986-), 男, 工程师, 主要从事结构工程与抗震工程。E-mail: 452086984@qq.com。

mutation is employed to determine the dynamic instability and dynamic safety factor of the slope. Results show that the horizontal thrust of the earthquake has a great influence on the stability of the Wangjiadun ancient landslide. The effect is represented by the overall slip of the upper slope and the collapse of the loess deposit in the entrance section of the tunnel. In the natural state, the slope is in the stable state. In the event of strong earthquakes in the region in the future, the slope will be unstable. The overall sliding surface of the loess slope is most likely to occur in the third slope body, along with the sliding surface with the maximum plastic strain. The safety factor  $F_s$  is 0.92.

**Keywords:** seismic load; Wangjiadun landslide; strength reduction method; stability; dynamic safety factor

## 0 引言

宝鸡至兰州客运专线是中国“四纵四横”客运专线网的重要组成部分,也是连接郑州至宝鸡客运专线、兰新铁路第二双线的国家干线铁路。沿线通过区域地貌单元多样,地质情况复杂多变,不良地质极为发育。铁路通过天水市秦安县时,受站位、客运专线技术标准及地形控制,需要通过王家墩巨型古滑坡群,线路以隧道形式通过<sup>[1-2]</sup>。该线路位于秦岭北缘深大断裂带内,北侧为凤凰山断裂,其南为东泉断裂,中央是籍河、渭河断陷谷地。其主要断裂自第三纪以来都有不同程度的活动,并控制着周边的地质、地貌环境。区内以差异升降与间歇性运动为主,形成南、北隆起,中间凹陷的现代河谷地貌景观。作为该区段的重要隧道之一的秦安隧道,位于天水市秦安县,隧道地处天礼盆地低中山丘陵区西北部,地面高程一般为1 228~1 620 m,相对高差300~400 m,通过区地形起伏较大,沟深坡陡,隧道进口端下穿王家墩滑坡前缘,出口位于叶堡,上跨天饯公路,均离秦安县较近,交通便利。该工程地段所属区地震动峰值加速度为0.2g,地震动反应谱特征周期为0.45 s,地震基本烈度为Ⅷ度,属于高烈度地区。据不完全统计,沿线规模较大,将对客专产生重大影响的滑坡有210余处<sup>[3]</sup>。因隧道穿越地区的边坡稳定性直接影响着隧道工程的安全性及铁路的安全运营。除隧道内部的结构设计需抵抗地层应力以维护隧道安全及空间利用外,保证隧道洞口上方的边坡稳定性尤为重要<sup>[4]</sup>。因此,该地区的边坡稳定性研究具有十分重要的现实意义。

目前边坡稳定性分析的常用方法可分为基于有限元强度折减理论的各类数值方法以及基于极限平衡理论的各类条分法<sup>[5-6]</sup>。本文将动力有限元法与强度折减法相结合,以王家墩巨型古滑坡为研究对象,在详细的室内实验、现场调查及数值模拟分析的

基础上,对该古滑坡进行了地震动荷载作用下的稳定性分析。在计算分析中,建立一种合理有效且能反映该古滑坡地震动力特性的分析方法,求解动力稳定安全系数,作为边坡整体稳定的评价指标用于指导实际工程。

## 1 王家墩古滑坡场地条件及特征

王家墩巨型古滑坡群位于天礼盆地低山丘陵区西北部、秦安县城北侧葫芦河西岸。葫芦河在秦安县城形成秦安小盆地,王家墩滑坡地处于秦安小盆地北侧边缘,自然山坡高陡,地面高程1 210~1 710 m,冲沟发育,呈长条状,滑体前端已覆盖在一级阶地上,滑体的自然坡度为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,滑体上多已被开辟为耕地,种有大量果树,受秦安站位客运专线技术标准及地形控制,隧道无法绕避王家墩滑坡<sup>[1]</sup>。

### 1.1 场地条件

王家墩滑坡滑带位于第三系泥岩中,滑体前端(舌部)在一、二级阶地形成堆积体。

一级阶地地层结构为:表层为滑体(黏质黄土、泥岩)堆积层,厚5~15 m不等;其下为一级阶地冲积黏质黄土、粉质黏土等,厚3~5 m;下部普遍分布一层冲积砂层、细圆砾土等,厚1~6 m;底部为第三系泥岩和花岗岩,其中花岗岩只在滑坡区北侧局部有出露。基岩顶面高程一般在1 200~1 210 m。

二级阶地地层结构为:表层为滑体(黏质黄土、泥岩)堆积层,厚度差异大,5~60 m不等,滑体物质以泥岩为主,间杂黏质黄土,相互揉皱明显,泥岩中可见较多擦痕、摩擦镜面等;其下为二级阶地冲积粉质黏土,厚度差异较大(5~40 m)该粉质黏土以青灰色为主,未见擦痕、摩擦镜面,属静水沉积产物;二级阶地下部普遍发育一层冲积砂层、细圆砾土等,厚1~10 m;底部为第三系泥岩,泥岩顶面高程一般在1 220~1 230 m。

根据钻探揭示,滑坡区三级阶地残留的范围较小,勘探揭示其地层结构与二级阶地很类似,砂砾层

厚度一般 2~5 m,基座基岩面高程约为 1 242 m<sup>[1]</sup>。王家墩滑坡分区平面如图 1 所示。

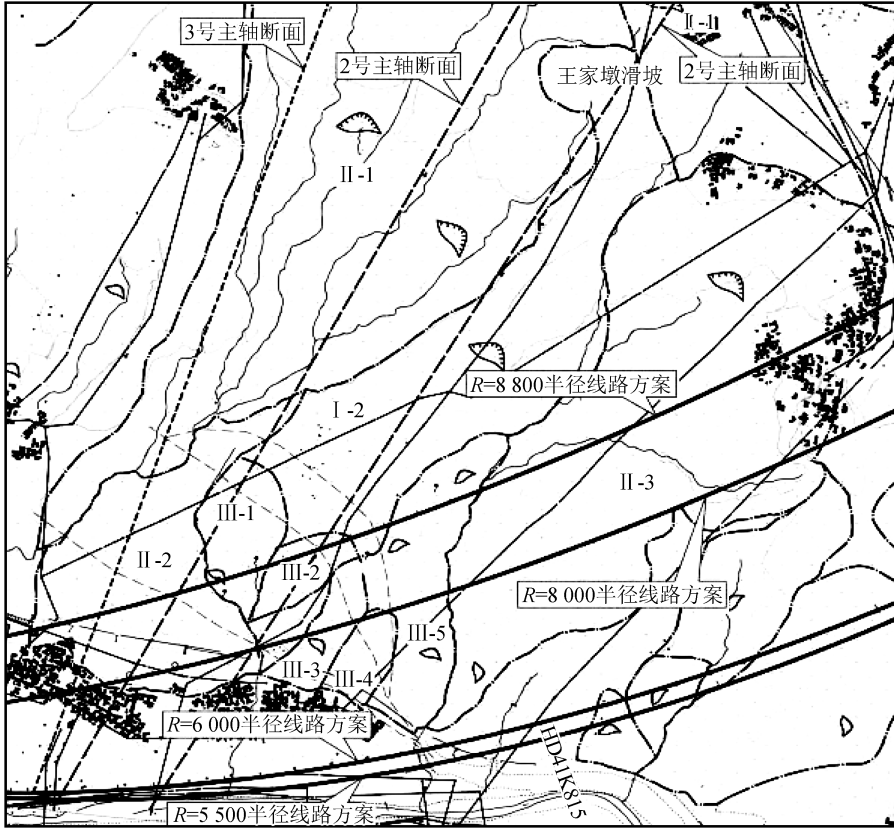


图 1 王家墩滑坡分区平面图

Fig.1 Distribution plan of Wangjiadun landslide

### 1.2 滑坡特征

图 2 为秦安隧道进口端典型黄土斜坡剖面图, 图中标出了主要岩土材料的分布,不同的地段与高程对应了上述场地岩土条件。

图 2 为秦安隧道进口端典型黄土斜坡剖面图,

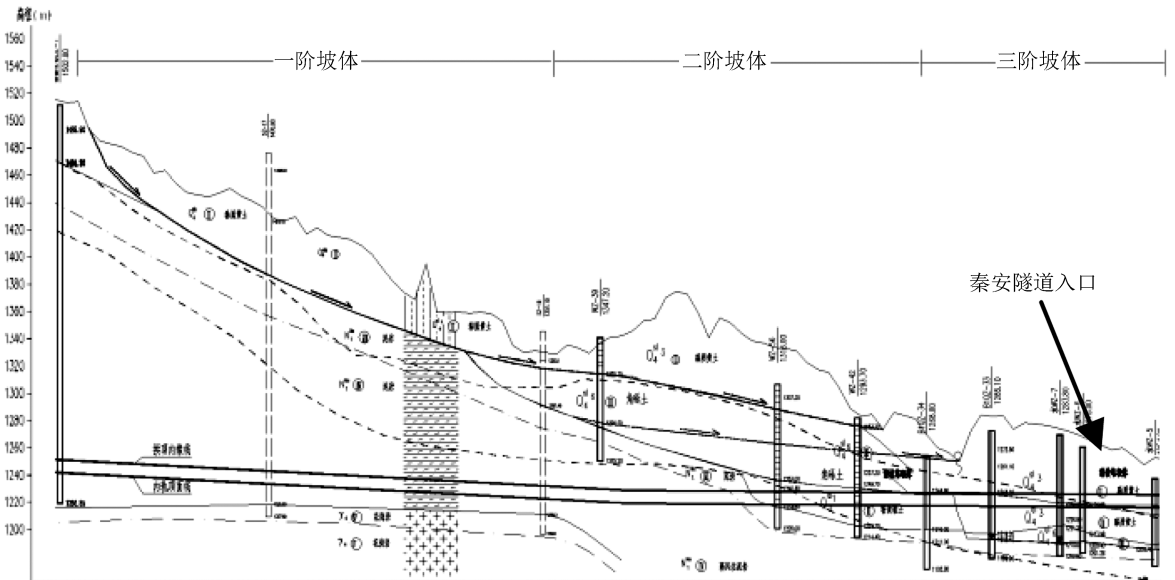


图 2 秦安隧道进口端典型黄土斜坡剖面图

Fig.2 Sectional view of typical loess slope at the entrance end of Qin'an tunnel

如图2所示,根据该黄土斜坡的坡度差异,可以人为将斜坡划分为三阶坡体组成。其中,一阶坡体覆盖层为黏质黄土层,下伏泥岩层;二阶坡体黄土层与下伏基岩中夹有厚度约20~40 m的角砾层。三阶坡体上覆土层为古滑坡松散堆积体,强度较低。根据当地的工程地质勘察,该斜坡覆盖土层厚度约为10~58 m。该黄土斜坡所处地段坡度大,土层厚度不一,条件复杂;如遭遇暴雨或地震作用,将会对其稳定性造成不利影响。

## 2 室内试验研究

为了获得秦安隧道边坡土体物理力学性质,在秦安隧道进口端位置对该地区典型黄土进行了现场取样(见图3),并将黄土试样带回中国地震局黄土地震工程重点实验室进行土体力学试验分析。利用WF-12440型动、静三轴扭剪仪,对土体进行静强度试验分析,得到该地区典型黄土的抗剪强度参数。该试验为进一步开展科学合理的边坡稳定性数值分析提供了必要的依据。



图3 现场取土

Fig.3 Earth borrowing site

### 2.1 实验设备、试样和试验方法

WF-12440型动三轴扭剪仪是由英国WF公司生产的一种全程序化控制动、静三轴扭剪仪,可实现常规及复杂应力条件下的土体动、静力学试验。该仪器主要技术参数见表1。

表1 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters

荷载施加方式	气动作动器
压力室及反压施加方式	气转水系统
实心试样尺寸	Φ50×100 mm
最大竖向荷载	±10
最小可测载荷	1 N
应变测量精确度	10 <sup>-5</sup> (0.001%)
孔隙水压力最大值和精度	1 MPa, 0.1 kPa
反压最大值和精度	1 MPa, 0.1 kPa
试样体积变化最大值和精度	100 cc, 0.1 cc

试验按照SL237-1999《土工试验规程》进行。试验前首先将土样加工成直径为50 mm、高度为100 mm的圆柱体试样。静三轴试验进行固结不排水剪切(CU),试验时压力室加载(即周围压力 $\sigma_3$ )等级分别为100、150和200 kPa。在上述各级周围压力 $\sigma_3$ 作用下,对试样施加轴向压力进行剪切直至破坏,剪切速率均为0.9 mm/min。试验结束后,根据摩尔-库仑理论,绘制应力莫尔圆并确定其强度包线,从而求得抗剪强度指标 $C$ 、 $\varphi$ 值。

### 2.2 试验结果分析

根据试验结果,利用最小二乘法计算土样的黏聚力 $C$ 和内摩擦角 $\varphi$ 值,如图4所示。

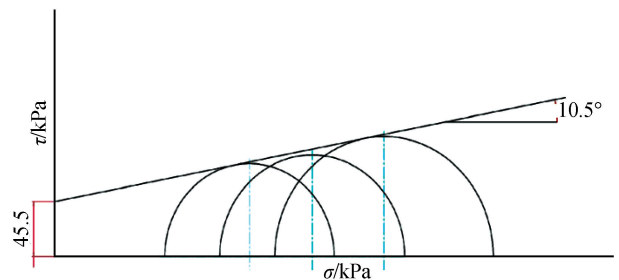


图4 典型黄土试样固结不排水剪强度包线

Fig.4 Consolidated undrained strength envelopes of typical loess samples

通过对该区典型黄土的实验分析可以得到,该地区黄土斜坡黏质黄土的抗剪强度指标为:黏聚力为45.5 kPa,内摩擦角为10.5°。

## 3 有限元稳定性分析原理与方法

### 3.1 有限元与强度折减法

采用有限元法与强度折减法相结合的方法,有限元强度折减理论则侧重于岩土体应力-应变即破坏机理的分析<sup>[10]</sup>,对边坡静力和地震力作用下的动态响应进行研究。将边坡材料的抗剪强度参数:黏聚力 $c$ 和摩擦角 $\varphi$ 进行折减(折减系数 $R$ )得到一组新的 $c'$ 和 $\varphi'$ 值,作为新的材料强度参数重新输入原模型进行有限元动力分析,直到边坡达到失稳状态为止,此时将边坡处于稳定极限状态下的折减系数 $R$ 定义为动力稳定安全系数 $F_s$ 。其中, $c'$ 和 $\varphi'$ 值由式(1)和式(2)求得,且在折减过程中材料的弹性模量 $E$ 和泊松比 $\lambda$ 为常数。屈服准则采用Mohr-Coulomb破坏准则<sup>[11]</sup>。

$$c' = \frac{c}{R} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{R}\right) \quad (2)$$



### 3.2 边坡失稳判据

采用强度折减法进行边坡稳定性分析时,边坡失稳判据是最为关键的问题之一,目前较为成熟的边坡失稳判据主要有 3 种:(1)有限元计算不收敛;(2)坡体或坡面的位移发生突变;(3)潜在滑移面塑形应变区贯通。

在动力有限元分析计算中控制收敛是一个极其复杂的过程,往往会受各种因素的影响,数值计算不收敛未必是由边坡达到临界失稳状态所引起。因此,计算不收敛判据会给岩体边坡的动力稳定性分析带来许多可能性;位移突变判据不需要严格的收敛性控制,且位移判据可以对应动力时程的分析结果,具有应用方便、直观等优点,可以认为适合于动力响应下的稳定性分析;塑形应变区贯通判据由于缺乏客观的判断指标,更多得依赖人为的主观判断,因此,只是边坡失稳的必要条件,但可以作为位移突变判据的辅助判据。

## 4 王家墩古滑坡动力稳定性分析

### 4.1 边坡二维计算模型

根据设计和施工方提供的勘探资料和现场考察,建立简化的二维有限元斜坡计算模型。有限元网格划分模型如图 5 所示。模型的边界尺寸为:水平方向 1 900 m;模型高度 500 m;边坡坡面垂直高度 460 m。在网格划分中,坐标取向沿高度方向为 Y 正方向,沿长轴方向为 X 方向。

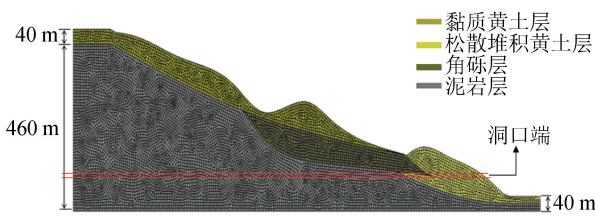


图 5 隧道口黄土斜坡示意图

Fig.5 Schematic diagram of the loess slope at the tunnel entrance

模型土体均采用四边形四节点平面应变单元划分,节点总个数为 10 121,单元总个数为 8 941。模型中的黄土层单元和角砾层单元均采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,泥岩层单元采用理想弹性模型。模型土层划分由现场工程地质勘察结果划定,模型共划分为两层黄土层,一层角砾层,一层泥岩层。图中两条平行红线的中间部分即为秦安隧道通过区域,由于模型高度远大于隧道高度,且隧道主要通过段为泥岩和花岗岩发育地段,所以,隧道对黄土斜坡的稳定性可忽略不计,主要考察黄土斜坡的稳定性对隧道入口段的影响。

### 4.2 边坡模型的物理力学参数

有限元计算模型各层土样的弹性模量基于该黄土斜坡场地钻孔波速测试资料(图 6),通过式(3)将等效剪切波速进行换算,得到土层的弹性模量。

$$E = 2\rho v_s^2(1 + \mu) \tag{3}$$

式中: $r$  为土体密度; $v_s$  为等效剪切波速; $\mu$  为泊松比; $E$  为土体弹性模量。在换算中,黄土的泊松比取 0.28。有限元模型计算参数详见表 2 所列。

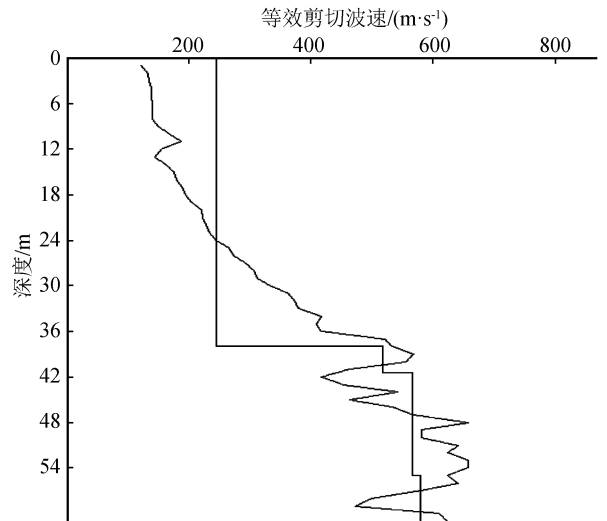


图 6 研究区内典型钻孔波速测试成果图

Fig.6 Wave velocity test results of typical borehole in the study area

表 2 有限元模型各层材料参数

Table 2 Material parameters of each layer of the finite element model

土性描述	泊松比 $\mu$	密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /MPa	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$
粘质黄土	0.38	1 800	288	45.5	10.5
松散堆积黄土	0.42	1 600	160	21	20.0
角砾	0.34	1 900	605	30	14.0
泥岩	0.25	2 200	1 320		

### 4.3 荷载及计算参数选取

为了合理考虑该斜坡的稳定性,在计算中,主要

考虑隧道边坡在自重作用下的安全系数以及在极限安全状态下受地震荷载作用时,黄土边坡的加速度

放大效应及位移、应变状态。

在静力状态下,考虑到原型自身所受的重力作用。在计算过程中,对模型施加重力荷载,模型底部固定,侧面水平方向约束。

在动力状态下,考虑模型受外部动力荷载的作用。在计算过程中,从模型底部施加水平向地震荷载,方向为从左到右输入,模型左右边界采用黏弹性边界条件,底部为人工边界。因秦安县距离天水市 41 km 左右,该地区的地震活动受兰州—天水地震带活动影响。在斜坡动力响应数值计算中,地震荷载采用超越概率为 10% 的天水人工拟合地震波。该地震动时程如图 7 所示,地震峰值加速度为 244 gal,以中高频成分为主,地震卓越频率为 2.59 Hz。

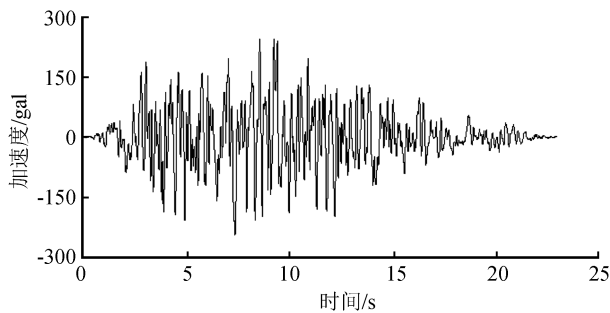


图 7 地震动荷载

Fig.7 Earthquake load

因为边坡的静力及动力安全系数的求解是一个综合而复杂的过程,本文考虑采用特征点的最大水平位移响应突变来分析求解边坡的整体静力/动力稳定安全系数。

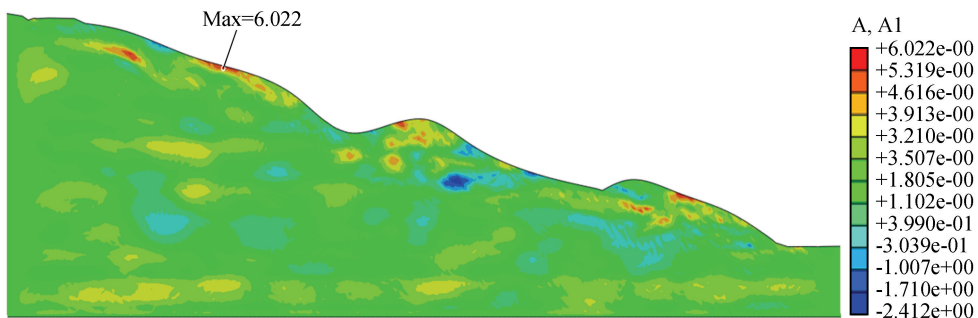


图 9 边坡水平加速度响应分布图

Fig.9 Response profile of horizontal acceleration of a slope

响应值最大为 602 gal,对比输入时程曲线的峰值加速度为 244 gal,放大系数约为 2.5,如图 10 所示。

#### (2) 边坡位移响应分析

图 11 为静载和动载分别作用下,边坡的最大位水平位移响应矢量图。可以看到,在静力荷载作用下,边坡主要为第一阶坡体剪出变形,边坡整体主要受力为

#### 4.4 边坡静力安全系数计算

在静力作用下,通过有限元强度折减法,获得了边坡在强度折减后的失稳状态。综合考虑该斜坡水平位移和坡度的影响,分别于各阶坡面上位移最大位置各选取一个特征点(节点 566,节点 327,节点 374)进行安全系数的分析计算,如图 8 所示。可以看出,静力作用下模型的安全系数  $F_s = R = 1.10$ ,处于相对稳定的状态。

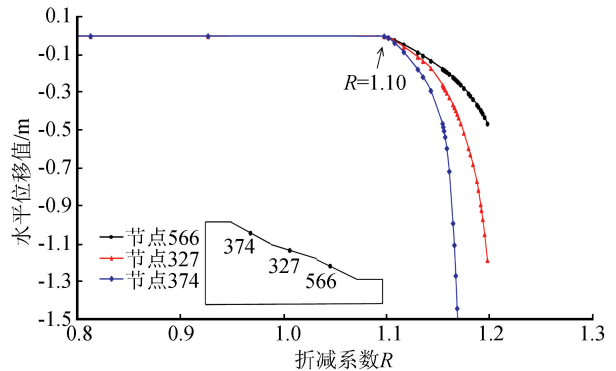


图 8 特征点安全系数曲线分析

Fig.8 Curve analysis of safety factors at different feature points

#### 4.5 边坡动力响应分析

进行动力有限元法计算时,首先施加自重、结构荷载、地面超载等静力荷载,其计算结果作为模型的初始应力状态。

##### (1) 边坡加速度响应分析

如图 9 所示水平加速度在从坡底向上传递至坡顶的过程中有明显的放大效应,坡顶土体的加速度

压力和水平下滑推力;在地震力作用下,边坡一、二、三阶坡体均产生较大水平位移,边坡整体受水平力影响呈现剪切响应。这表明,地震动荷载作用于边坡时,最不利于边坡稳定的是指向坡外的水平力分量。

#### 4.6 边坡动力稳定性评价

根据式(1)、式(2),将黄土边坡材料的抗剪强度

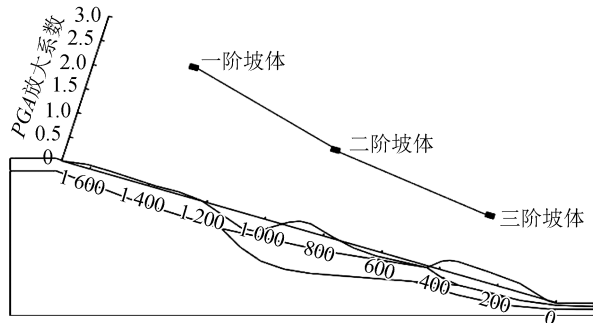
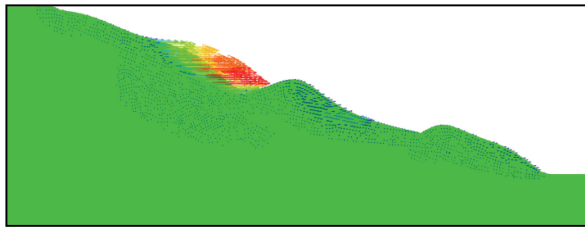
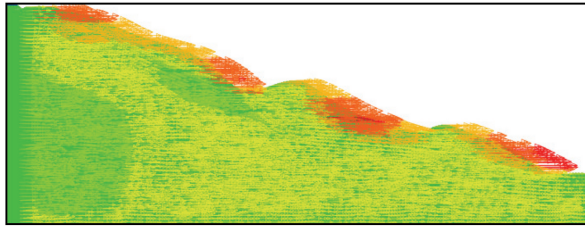


图 10 三个坡体的 PGA 放大倍数  
Fig.10 PGA magnification of three slopes



(a) 静载作用



(b) 动载作用

图 11 静、动荷载下边坡位移矢量图变化比较

Fig.11 Comparison of vector changes of slope displacement under static and dynamic loads

同时折减,在各折减系数下进行动力有限元法计算,分析边坡在 seismic 荷载作用下的动力响应,获取边坡坡面各特征点的最大水平位移  $H_{max}$  随强度折减系数  $R$  的变化规律(图 12)。在达到某一折减状态前,各点的水平位移最大值  $H_{max}$  随强度折减系数  $R$  变化近似为斜率很小的线性变化,当  $R$  达到一定值

时,位移值产生突变,曲线变陡,说明最大水平位移值的变化率明显增大,随之边坡达到稳定极限状态,曲线转角处的折减系数  $R$  可定义为临界值。临界值  $R$  可以取两端曲线的切线的交点。分析结果表明,边坡底部(三阶坡体)临界值  $R=0.92$ ,边坡中部(二阶坡体)临界值  $R=0.93$ ,边坡顶部(一阶坡体)临界值  $R=0.945$ ,最后特征点的平均值作为边坡在 seismic 荷载作用下的稳定性安全系数  $F_s=R=0.92$ 。

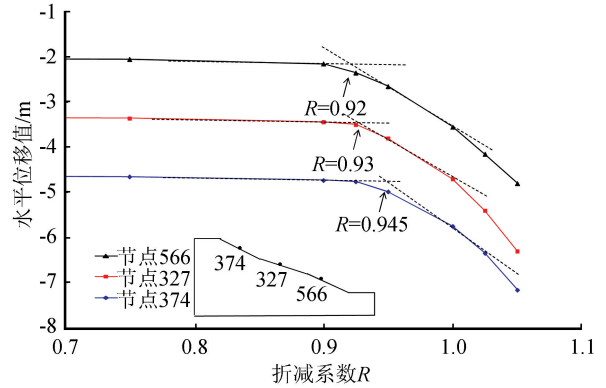


图 12 地震荷载下坡面特征点最大水平位移与折减系数  $R$  的关系曲线

Fig.12 Relationship curve between maximum horizontal displacement and reduction factor  $R$  of feature points on the slope under seismic loads

边坡在临界状态下 ( $R=0.92$ ) 的等效塑性应变区的分布如图 13 所示。可以看到该状态下,边坡等效塑性应变区开展明显,滑动面贯通于一、二、三阶坡体之间,位于黄土层和角砾层之中;对于黄土层,则更多的塑形区集中于边坡底部(即三阶坡体),这说明地震力作用下,边坡底部黄土层会发生局部失稳,引起土体倾覆,导致隧道口的垮塌或堵塞等不利影响。因此对隧道洞口的土体,应采取保护措施,保证土体的整体稳定性。隧道洞口边坡防护常采用混凝土格梁、喷混凝土浆、岩钉、地锚或混合式工法等。

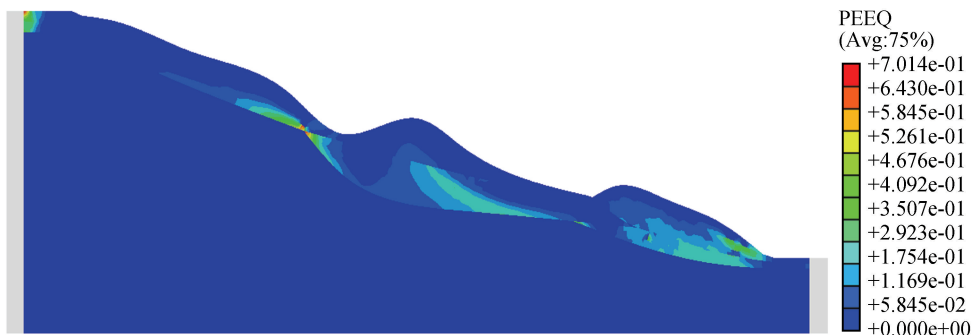


图 13 动力稳定极限状态下的边坡塑性区

Fig.13 Slope plastic zone under dynamic stability limit state

本文经过滑坡稳定性计算,综合考虑边坡高度及隧道洞口处理措施等综合因素,边坡治理措施采用以下方法:(1)沿滑坡体两侧自然山体分别设置排水沟;(2)三阶坡体上方,即隧道洞口上方高程 30 m 以上的滑坡体全部清除,30 m 以下滑坡体采用阶梯式平台,在平台种植灌木并在坡脚设置抗滑桩;(3)二阶坡体采用预应力锚索加固坡体;(4)一阶坡体采用挂网喷浆,避免高空土体坠落堵塞洞口。

## 5 结 论

(1) 通过对王家墩古滑坡群的室内试验及现场调查分析,影响该古滑坡稳定性的主要因素为上覆黄土的大空隙、架空空隙结构等特征、地形地貌特征,以及人类工程活动、地震载荷的施加。

(2) 地震力作用下,水平加速度在从坡底传递至坡顶的过程中有明显的放大效应,坡顶土体的加速度放大系数约为 2.5。另外边坡产生较大水平位移,边坡整体受水平力影响呈现剪切响应。

(3) 在地震力作用下,黄土斜坡的整体滑动最容易出现第三阶坡体,沿着塑性应变最大的滑移面整体滑移。同样值得注意的是,一阶坡体和二阶坡体虽未形成贯通滑移面,由于土体强度的降低,将会出现松散土体在地震荷载作用下的局部下滑。

(4) 该古滑坡在天然状态下处于稳定状态,在遭遇未来该区域中强地震作用下,该斜坡会发生失稳,表现出上部坡体的整体滑移,入口段上部黄土堆积层整体或局部的失稳滑塌。该情况将会导致隧道口的垮塌或堵塞等不利影响,在实际施工中应注意在隧道入口段采取加固补强措施。

## 参 考 文 献 (References)

[1] 王旭.宝兰客运专线王家墩滑坡勘察及地质选线[J].铁道勘察,2011,37(2):95-99.  
WANG Xu.Landslide Survey at Wangjiadun on Baoji-Lanzhou Passenger Dedicated Line as Well as Its Geological Route Selection[J].Railway Investigation and Surveying,2011,37(2):95-99.

[2] 吴红刚,陈小云,艾挥.隧道-滑坡斜交体系变形机理的模型试验研究[J].铁道工程学报,2016,33(9):19-23,75.  
WU Honggang,CHEN Xiaoyun,AI Hui.Research on the Deformation Mechanism Model Test of Tunnel-Landslide Skew System[J].Journal of Railway Engineering Society,2016,33(9):19-23,75.

[3] 单留毅,宝(鸡)兰(州)客运专线天水至定西段不良地质地段选线[J].铁道勘察,2010,36(3):53-56.  
SHAN Liuyi.Route Selection of Tianshui-Dingxi Section with Unfavorable Geological Conditions on Baoji-Lanzhou Passenger Dedicated Line[J].Railway Investigation and Surveying,2010,36(3):53-56.

[4] 林坤霖,黄崇仁,木越正司等.隧道洞口边坡防护工法新选择[J].隧道建设,2014,s(34):256-263.  
LIN Kunlin,HUAGN Chongren,KIGOSHI SHOJI.New Choice Of Slope Protection Methods at Tunnel Entrance[J].Tunnel Construction,2014,s(34):256-263.

[5] 郑明新,胡国平,钟亮根.高铁隧道洞口段边坡蠕滑机理分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(7):17-21.  
ZHENG Mingxin,HU Guoping,ZHONG Lianggen.Influence Analysis on Creeping Mechanism for the Portal Section Slope of High-speed Railway[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,46(7):17-21.

[6] 陈祖煜.土质滑坡稳定分析—原理方法程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003,533-560.  
CHEN Zuyu.Soil Slope Stability Analysis-Theory,Methods and Programs[M].Beijing,China WaterPower Press,2003,533-560.

[7] ZIENKIEWICZ O C,HUMPESON C,LEWIS R W.Associated and Non-associated Visco-plasticity in Soil Mechanics Geotechnique[J].1975,25(4):671-689.

[8] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.  
ZHAO Shangyi,ZHENG Yingren,SHI Weimin,et al.Analysis on Safety Factor of Slope by Strength Reduction FEM[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(3):343-346.

[9] 邓楚键,何国杰,郑颖人.基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2006,28(6):735-739.  
DENG Chujian,HE Guojie,ZHENG Yingren.Studies on Drucker-Prager Yield Criteria Based on M-C Yield Criterion and Application in Geotechnical Engineering[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(6):735-739.

[10] 吕庆,孙红月,尚岳全.强度折减有限元法中边坡失稳判据的研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(1):83-87.  
LÜ Qing,SUN Hongyue,SHANG Yuequan.Slope Failure Criteria of Shear Strength Reduction Finite Element Method [J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2008,42(1):83-87.

[11] 王欢,车爱兰,葛修润,等.岩质高边坡动力稳定性评价方法与应用[J].上海交通大学学报,2011,45(5):706-710,715.  
WANG Huan,CHE Ailan,GE Xiurun,et al.Application of the Method for Seismic Stability of High Rock Slope[J].Journal of Shanghai Jiao Tong University,2011,45(5):706-710,715.