

锚杆抗滑桩加固边坡工程动力稳定性分析^①

赖 杰¹, 李安红², 郑颖人^{1,3}, 刘红卫⁴, 刘 云⁵

(1.后勤工程学院 军事土木工程系,重庆 400041; 2.中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031;
3.重庆市地质灾害防治工程技术创新中心,重庆 400041; 4.香港科技大学土木工程系,香港 999077;
5.重庆工业职业技术学院 建筑与环境工程系,重庆 401120)

摘要:锚杆抗滑桩加固边坡具有良好的抗震性能,目前这方面的研究资料还不多。结合大理西站边坡工程,应用拟静力法、时程分析法以及新近提出的有限元强度折减动力分析法对锚杆抗滑桩加固边坡进行动力稳定性分析。本文描述不同方法的计算特点和计算过程,比较不同的计算方法的异同点,分析锚杆抗滑桩的抗震性能与边坡的动力稳定性,以确保工程安全。研究成果可供类似工程设计参考。

关键词:锚杆抗滑桩;边坡;有限元强度折减动力分析法;动力稳定性

中图分类号: TU411; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0924-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0924

Dynamic Stability Analysis of Slopes Reinforced by Anchor Anti-slide Pile

LAI Jie¹, LI An-hong², ZHENG Ying-ren^{1,3}, LIU Hong-wei⁴, LIU Yun⁵

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041, China;

4. Civil Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China;

5. College of Architecture and Environment Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

Abstract: The seismic performance of anchor anti-slide pile is strong, however, dynamic research data on this topic are scarce. The pseudo-static method, time-travel analysis method, and strength reduction dynamic analysis method were adopted to study the dynamic stability of this support form through an actual project conducted at a railway station in Dali. This study describes the entire application process and reveals the differences in these methods. In addition, the dynamic stability of this slope and the seismic performance were studied to ensure the safety of this slope. These research results can provide a reference for similar projects.

Key words: anti-slide pile; slope; strength reduction dynamic analysis method; dynamic stability

0 引言

抗滑桩由于其布置灵活、抗滑能力强、施工方便等特点已经在工程中得到广泛运用。当遭遇较大滑

坡时,由于单一抗滑桩受力主要由其锚固段承担,往往导致桩身截面尺寸过大、受力不尽合理,需要进行加强处理及适当的优化。在抗滑桩及坡面增设部分

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家重点研究发展计划(973)项目(2011CB710603, 2011CB013600);国家自然科学基金(51378496);重庆自然科学基金院士专项(CSTC2013jcyjys0002)

作者简介:赖 杰(1986—),男,四川内江人,博士在读,主要从事边坡稳定性分析和数值模拟。E-mail:513516059@qq.com

通讯作者:李秀地(1970—),男,安徽宿州人,副教授,主要从事防灾减灾及防护工程研究。E-mail:lixidiuip@163.com

锚杆(锚索)能有效地改善桩体及滑体的受力状态,提高结构体的承载能力,控制坡体的变形。同时,由于其能同时发挥锚杆(锚索)及抗滑桩地支护作用,其抗震性能更佳,已经在我国的汶川等多次地震中得到实践验证^[1]。目前已有大量的学者开展锚杆抗滑桩的研究,其中李寻昌,曾云华^[2-3]开展了锚杆抗滑桩的室内模型试验,研究了桩侧地层抗力的分布规律;郑颖人等^[4-5]利用有限元强度折减法开展了抗滑桩支挡边坡的结构内力计算,并进行了振动台实验验证;张俊^[6]提出了一种嵌固桩模型,并运用被动土压力法、滑移线法和弹性楔体法探讨了滑坡推力的分布,最后通过实验进行验证;Poulos H G^[7]将边界元法引入到锚杆抗滑桩的分析之中,得到了结构内力及相应的安全系数。

以上的研究主要集中在锚杆抗滑桩静力作用上,动力方面研究涉及较小。我国是一个地震多发的国家,支挡结构设计不仅需要满足静力分析要求,也需要满足地震作用下的动力分析要求。本文结合某一大型边坡工程,应用拟静力法、时程分析法以及新近提出的有限元强度折减动力分析法对锚杆抗滑桩支护边坡进行动力稳定性分析;描述不同方法的计算特点和计算过程,比较不同的计算方法的异同点,分析结构的抗震性能与边坡的动力稳定性。

1 运动方程及阻尼系数的确定

对边坡的动力分析常采用时域分析方法,节点的运动微分方程为:

$$Mu'' + Cu' + Ku = -MIu_g'' \quad (1)$$

其中, u'' 、 u' 、 u 为 t 时刻质点的加速度、速度及位移; M 、 C 、 K 和 u_g'' 分别代表整个物体的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和地震加速度; I 为单位矢量。当采用 Rayleigh 阻尼时,式(1)中的阻尼矩阵 C 与质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 成线性关系:

$$C = aM + \beta K \quad (2)$$

式中: a 、 β 均为阻尼系数,与 i 阶阻尼比 ξ_i 及 i 阶圆频率 ω_i 满足下式:

$$a + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \quad (3)$$

从式(3)可以得到:

$$\xi_{\min} = (a\beta)^{1/2}, \omega_{\min} = (a/\beta)^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{或: } a = \xi_{\min}\omega_{\min}, \beta = \xi_{\min}/\omega_{\min} \quad (5)$$

其中, $\xi_{\min}$ 为临界阻尼比; $\omega_{\min}$ 为临界圆频率。对于岩土材料而言临界阻尼比主要在 $2\% \sim 5\%$ ^[8],临界圆频率则通过临界频率 $f_{\min}$ 得到。

本文通过提取岩土材料的频率与速度谱关系得

到临界频率(图 1),即调整 $f_{\min}$ 使得 $f_{\min} \sim 3f_{\min}$ 包含动力的主要能量,此时的 $f_{\min}$ 即为临界频率^[9]。在进行数值模拟时可以通过对岩土材料进行无阻尼自由振动计算得到材料的临界频率 $f_{\min}$,最终得到瑞利阻尼系数 α 、 β 。

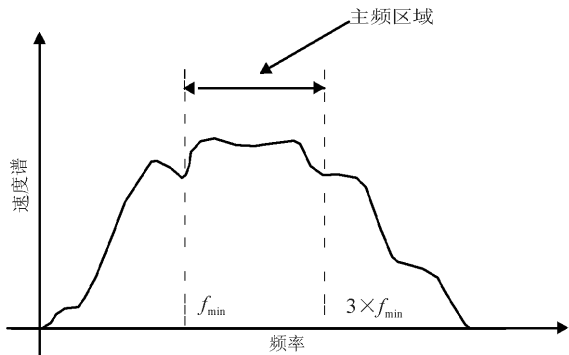


图 1 频率与速度谱关系图

Fig.1 Relationship between frequency and velocity spectrum

2 动力作用下的强度折减动力分析法

和静力作用下的边坡破坏机制不同,由于地震荷载的往复性,边坡体更易发生受拉破坏,因此需考虑岩土体的抗拉强度。本文在进行动力计算时采用了抗拉破坏的摩尔—库伦准则,其中剪切屈服的摩尔库伦准则可以写成:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (6)$$

拉伸屈服准则:

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (7)$$

与剪切、拉伸屈服对应的塑性势函数为:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (8)$$

$$g^t = -\sigma_3 \quad (9)$$

其中, c 、 ϕ 、 σ^t 分别为材料的黏聚力、内摩擦角和抗拉强度; ψ 为膨胀角。 $N_\phi = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$, $N_\psi = (1 + \sin\psi)/(1 - \sin\psi)$ 。

在进行强度折减动力法分析时不仅需要对抗土体的抗剪强度参数 c 、 ϕ 进行折减,同时也要对抗拉强度参数 σ^t 进行折减,直至破坏。

$$c' = c/\omega, \phi' = \arctan(\tan\phi/\omega) \quad (10)$$

$$\sigma^{t'} = \sigma^t/\omega \quad (11)$$

式中 c' 、 ϕ' 、 $\sigma^{t'}$ 为折减后相应的强度参数。采用强度折减动力分析法进行边坡的动力安全性分析时,主要从三个方面对边坡是否失稳进行综合判断:(1)看破裂面是否贯通(拉剪破裂面);(2)看监测点的位移是否发生突变,考虑地震荷载随时变化,监测点的位移也随时发生变化,因此与静力问题不同,地震中

的单一时刻发生突变并不能判断边坡破坏,但是地震完后的最终位移发生突变,仍然可以作为破坏的判据;(3)分析地震结束后,监测点位移及受力是否收敛,若不收敛表明此时边坡已经失稳破坏,例如收敛时最终位移能收敛到某一值不变,而不收敛时则位移无限增大。

3 工程实例

为了更好地对锚杆抗滑桩加固边坡工程的动力稳定性问题进行阐述,本文结合了大理西站边坡工程。该工程场地属漾江中生代褶断区之洱海深(大)断裂西侧,受区域构造影响,区内次级断层及褶皱构造较发育,岩层节理、裂隙发育,岩体较破碎。场地上覆第四系滑坡堆积(Q_4^{del})及冲洪积(Q_4^{al+pl}),上更新统冲积(Q_4^{al})粗角砾土、碎石土、块石土及粉质黏土;下伏基岩为下元古界沟头箐岩群石门关岩组(Pt_1s^2)混合岩夹花岗片麻岩。地层岩性分述如下:

碎石土(Q_4^{del}):颜色杂,以灰黄色为主,稍密—中密,潮湿,碎石占 50~60%, $\Phi 60\sim 200\text{ mm}$,含少许块石,花岗片麻岩质。

粉质黏土(Q_4^{al+pl}):灰黄、褐黄色,硬塑状,土质不均,夹约 30%花岗片麻岩质碎石角砾。

块石土(Q_4^{al+pl}):灰白、灰黄色,稍密—中密,潮湿,块石占 70~80%, $\Phi 200\sim 400\text{ mm}$,花岗片麻岩质,余为粉质黏土及碎石充填。

混合岩夹花岗片麻岩(Pt_1s^2):灰、灰白色条痕,条带状,局部糜棱岩化,具构造眼球体,常见变粒岩残留体,夹伟晶岩脉及磨棱岩条带,粗粒变晶结构,块状构造,夹花岗片麻岩,片麻岩呈细粒—中粒变晶结构,片麻状构造,节理裂隙较发育。各岩土层的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土体材料参数					
Table 1 Geotechnical material parameters					
岩土类型	容重 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模量/MPa	体积模量/(MPa)	摩擦角/ $^{\circ}$	黏聚力/kPa
碎石土	2 100	16.5	35.8	40	3
粉质黏土	1 900	4.44	13.33	15	20
块石土	2 200	19.23	41.66	45	5
片麻岩	2 400	1.48e3	2.88e3	45	1 600

开挖前滑坡处于稳定静止状态,但路基开挖后破坏其平衡状态,而产生新的滑动,因此需要进行支护处理。经初步设计决定采用的支挡形式如图 2 所示。

由于抗滑体主要由黏聚力很低的碎石土组成,岩土体的破坏主要由内摩擦角决定,研究表明^[9]对

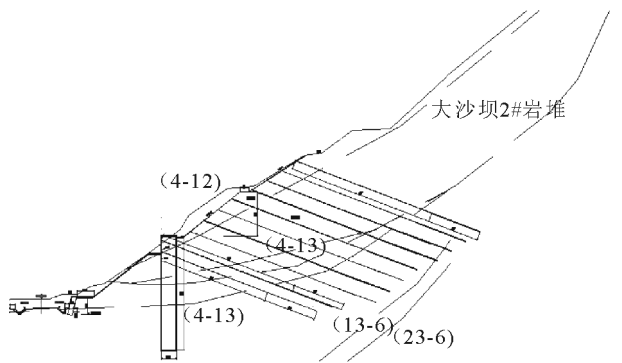


图 2 加固后的支护方案
Fig.2 Reinforced support program

于碎石土而言其动有效内摩擦角同静内摩擦角相等,不受振动频率及循环次数的影响,故而取静力下的内摩擦角即可。

3.1 动力模拟的基本情况

在进行动力分析时,岩体材料为弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 强度准则,边界条件采用 FLAC 软件中的自由场边界(相当于无限域边界场),从而达到模拟地震时无限场的条件,阻尼采用瑞利阻尼。输入 Taft 波、Linghe 波(Linghe, 1995 年,NS 向)和 Qiqi 波(Qiqi, 1997, NS 向),这三种地震波进行比较,它们经过滤及基线校正后的波形如图 3 所示:

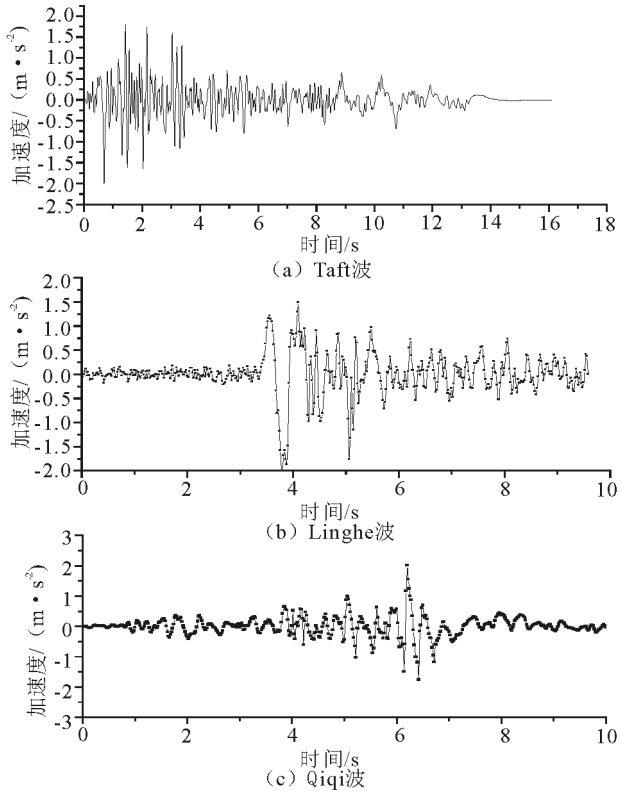


图 3 计算输入的加速度曲线

Fig.3 Input seismic acceleration-time curve on rock slope

进行数值模拟时,在不同高度坡面位置设置位移、加速度监测点 A~G,具体位置及网格划分如图 4 所示。在进行新增锚索抗滑桩前的相关计算时,主要是将抗滑桩的参数赋值为相应的土体参数,以此来模拟无支护的情况。在模拟新增锚索抗滑桩之后的相关计算只需将桩体的参数换回来,锚杆采用 Flac3D 中的锚杆单元进行模拟,锚索的预应力为 400 kN。

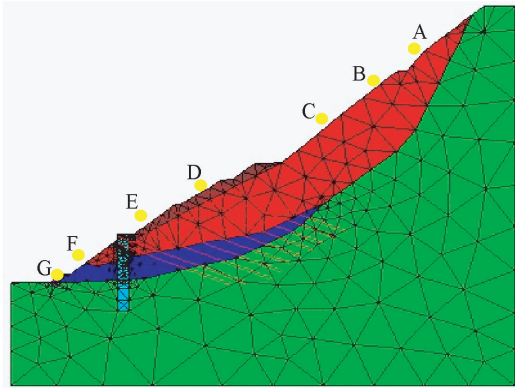


图 4 数值计算边坡示意图

Fig.4 Slope diagram of numerical calculation

3.2 静力稳定性计算

在运用上述三种计算方法进行边坡动力稳定性分析时,应首先满足边坡静力稳定的要求。故采用强度折减法进行边坡支护前的稳定性计算,材料参数如表 1 所示,数值模拟时将抗剪强度参数不断的折减直到边坡破坏为止。

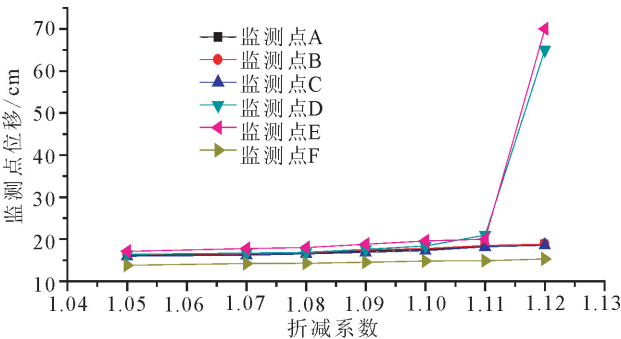


图 5 折减系数与监测点位移关系(未支护)

Fig.5 Relationship between reduction coefficient and the monitoring point displacement (unsupported)

图 5 为开挖后尚未支护时监测点与折减系数关系曲线。当折减系数为 1.12 时监测点 D、E 位移发生突变,可判断该边坡开挖后在未支护的情况下安全系数为 1.11,边坡处于基本稳定状态,但达不到设计要求,需要进行加固处理。同理,按此方法得到

在锚杆、抗滑桩共同支护后边坡的安全系数为 1.58。

3.3 动力稳定性计算

3.3.1 拟静力法

目前,地震作用下边坡稳定性分析主要采用拟静力法,即将地震荷载简化成惯性力,将动力问题转化成静力问题,主要是通过设置水平和垂直方向的地震系数的取值来模拟地震作用。该法只与地震波峰值大小有关,与波形无关。本文的地震作用主要是通过式(12)将地震动惯性力施加到土体上^[11-13]。当地基本地震烈度为Ⅷ度,输入的地震波峰值为 $a_h = 0.2\text{ g}$,再结合毕肖普法进行稳定分析(见式(12)~(14))。

$$F_i = a_h \xi G_{E_i} a_i / g = \xi G_{E_i} a_i k_h \quad (12)$$

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} \{ c'_i b'_i + [(1+k_v)W_i - u_i b_i + (X_i - X_{i-1}) \text{tg} \phi'_i] \}}{\sum (1+k_v) W_i \sin \beta_i + \sum (Q_i + k_h W_i) e_i / R} \quad (13)$$

$$m_{ai} = \cos \beta_i + \text{tg} \phi'_i \sin \beta_i / F_s \quad (14)$$

其中 a_h 为水平拟静力加速度(大小为地震波峰值); g 为重力加速度; ξ 为地震作用效应的折减系数,一般取 0.25; a_i 为动态分布系数,该系数与地震动的放大效应有关,本文取 $a_i = 1$; $k_h = a_h / g$ 为水平地震系数。当还考虑竖向地震时,竖向地震系数 k_v 取 $0.5 k_h$ 。 W_i 为土条自重; β_i 为土条底部与水平向的夹角; F_s 为安全系数。对于锚索预应力通常是将其处理为作用在土条上的集中荷载。

本文采用 GeoStudio 中的 Slope/W 模块进行模拟,该模块里面有锚杆单元,通过输入水平、竖直拟静力加速度来模拟地震作用,同时还有自动搜索滑面的功能。经拟静力法结合条分法得到的边坡地震安全系数只与地震荷载大小有关,经计算得到边坡的动力安全系数为 1.36,满足设计要求。

3.3.2 时程分析法

该法考虑了一定的动力效应,也是目前比较先进的方法。本文在进行模拟时采用时程分析的思路:主要通过输入 Taft 波、Linghe 波、Qiqi 波三种地震波进行动力计算,在计算中提取几个不同时刻的动力作用应力场(此时并没有重力场),将提取出来的动应力场再加上原边坡的重力场,再结合强度折减法或者条分法进行极限分析得到此时刻的安全系数。实际上,按该时刻的动力计算其实已经转化为静力计算,静力作用下该法与条分法计算计算结果基本一致^[14],但更为方便。本文采用这种方法考虑上述三种波型对大理西站滑坡进行数值模拟。以

Taft 地震波为例,将地震动峰值时刻的边坡的动应力场施加到静力场中,经计算得到边坡在地震动峰值时刻的稳定系数,这一时刻的稳定安全系数最小,以此时刻的动力安全来评价边坡的动力稳定性显然偏于保守,其中 Taft 地震波的动力安全系数为 1.14,Linghe 波为 1.21,Qiqi 波为 1.23。

3.3.3 强度折减动力分析法

应当指出,传统边坡稳定性计算都采用剪切破坏面,而地震作用下破坏面既有拉裂破坏,又有剪切破坏,形成了拉-剪破裂面。Li X P 等^[15]首次显示了地震作用下的拉-剪破裂面,这被汶川地震中许多边坡出现拉裂破坏所证实,作者通过振动台实验也验证了这一现象^[15]。强度折减动力分析法计算完全在动力下进行,输入的地震荷载是动力的,破坏面是在动力作用下得到的拉-剪破坏面,计算过程不做任何假定,也是在动力下进行的,因而计算较为准确,并能充分反应动力效应。输入上述三种地震波,通过抗剪、抗拉强度折减直到边坡动力失稳破坏为止。仍以 Taft 波为例,得到各监测点位移曲线和折减系数-位移关系曲线,如图 6、7 所示。

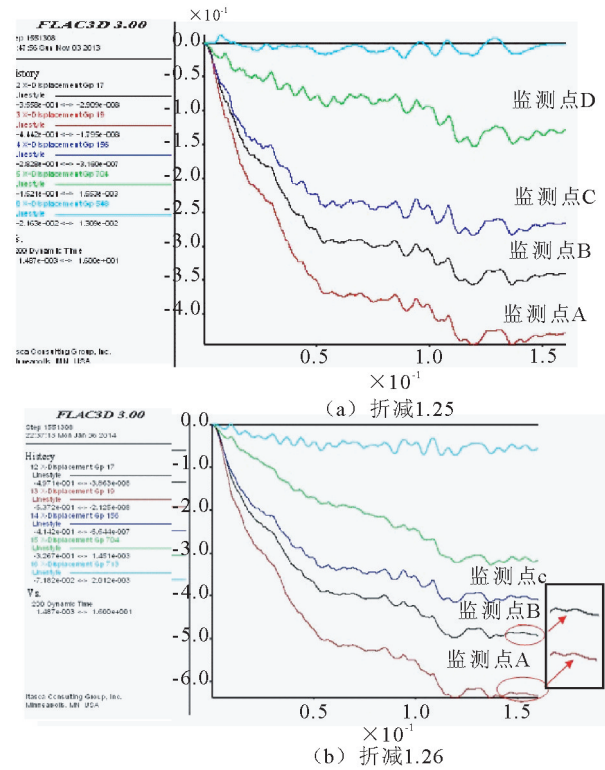


图 6 监测点不同折减系数下的位移时程曲线
Fig.6 Displacement time-history curves of monitoring points under different reduction coefficient

从图 6 各监测点的位移时程曲线可以看出,当

折减系数为 1.25 时,监测点的最终位移曲线接近水平,稍微向上倾斜,存在一定的弹性回弹,表明此时边坡还是稳定的;当折减系数为 1.26 时,监测点在震后的位移曲线向下,位移不断增大,不再收敛,此时边坡已经发生破坏。

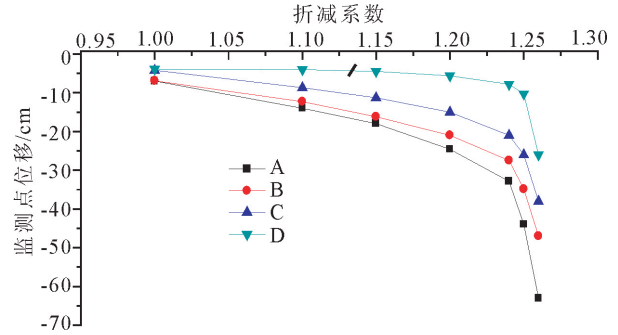


图 7 监测点折减系数-位移关系曲线
Fig.7 Relationship between reduction coefficient and displacement of points

从监测点折减系数与位移关系曲线(图 7)可以看出,当折减系数为 1.25 时监测点位移发生突变,位移增大很多,也验证了边坡安全系数应为 1.25。

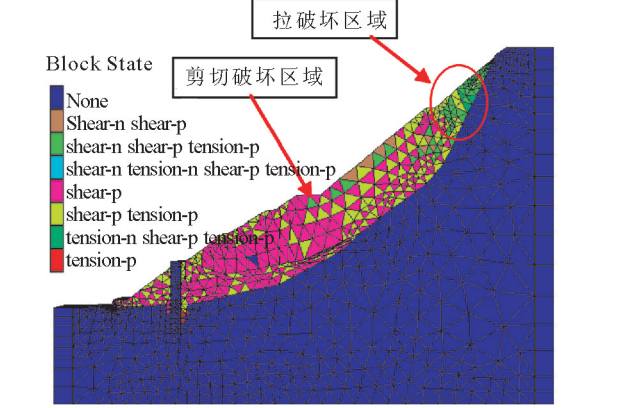


图 8 Taft 地震波对应边坡拉剪破裂状态
Fig.8 Tension-shear state of slope after inputting Taft wave

图 8 为 Taft 地震波在震后对应边坡拉剪破裂状态,图中红色代表拉破坏单元,绿色代表受拉-剪破坏单元,粉色及咖啡色代表受剪破坏单元。从图中可以看出,坡体顶部主要为拉-剪破坏和拉破坏,坡腰以上为剪破坏与拉-剪破坏、坡腰以下主要是受剪破坏,由此可以判断出坡顶部分出现受拉破坏,坡顶以下滑面出现剪切破坏,组成了拉-剪破坏面。图 9 显示了剪切破裂面的位置,剪切破裂面上部沿着分界线滑动,然后逐渐脱离分界线,最终在抗滑桩的顶部滑出(图中黑线所示)。但在应变增量云图中无

法显示受拉破裂面,图中受拉破裂面(黑线所示)是依据单元的破裂状况画出的,这和文献[16]及汶川地震现象一致。

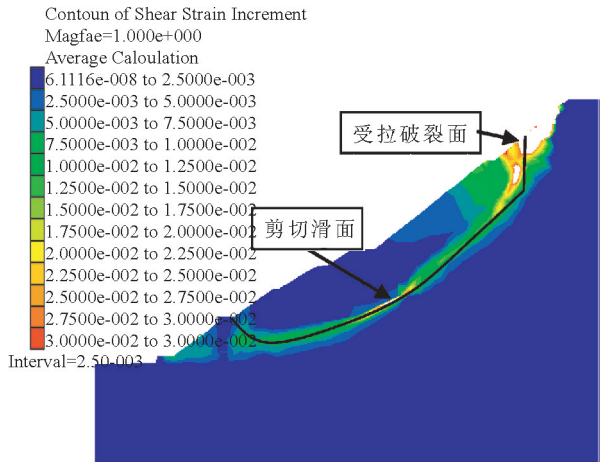


图 9 地震后的剪切增量云图(折减系数 1.26)
Fig.9 Shear increment image after earthquake (the reduction coefficient is 1.26)

从边坡震后的剪切增量云图表明(图 9),当折减系数为 1.26 时滑体的剪切塑性区已经贯通,滑体沿着该分界线向下滑动(图示黑线位置),在抗滑桩的顶部滑出,最终的破坏形态为圆弧破坏。

综上所述,边坡在 0.2 g 峰值 Taft 地震波安全系数应为 1.25。同理,按上述方法得到 Linghe 波对应的安全系数为 1.28,Qiqi 波为 1.29。不同计算方法得到的动力安全系数如表 2 所示。表 2 表明采用强度折减动力分析法比时程分析法安全系数增大 4.9%~9.6%,更切合实际情况,也满足设计要求。

表 2 不同计算方法动力安全系数结果
Table 2 Dynamic safety factors calculated by different methods

方法	地震波类型		
	Taft 波	Linghe 波	Qiqi 波
拟静力法		1.36	
时程分析法(最小安全系数法)	1.14	1.21	1.23
强度折减动力分析法	1.25	1.28	1.29
最小安全系数法与作者方法的差值	9.6%	5.7%	4.9%

4 结论

(1) 通过不同的计算方法可以看出,采用预应力锚索和抗滑桩支挡的边坡工程能够满足动力、静力下的稳定性要求,支挡效果良好。

(2) 拟静力法将动力问题完全转化为静力问题,基本上是一个经验公式。时程分析法一般不考虑受拉破坏,尽管较之拟静力法有很大的改进,可以

考虑地震作用时间的效应,但在进行安全系数计算上最终将动力问题转化为静力问题,得到的安全系数未能充分考虑地震的动力效应,使得结果存在一定误差。采用强度折减动力分析法计算考虑了地震边坡的拉—剪破坏面,计算安全系数时全部采用动力分析,能充分反应地震的动力效应。

(3) 不同的地震波对边坡的动力响应并不相同,对应的安全系数也不一样,因此在进行抗震设计时应多输入几种地震波,计算相应的动力安全系数,避免工程存在潜在的危险因素。

参考文献(References)

[1] 周德培,张建经,汤涌.汶川地震中道路边坡工程震害分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):565-576.
ZHOU De-pei,ZHANG Jian-jing,TANG Yong.Seismic Damage Analysis of Road Slopes in Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(3):565-576.(in Chinese)

[2] 李寻昌,门玉明,何光宇.锚杆抗滑桩桩侧地层阻力分布模式的试验研究[J].岩土力学,2009,30(9):2655-2659.
LI Xun-chang,MEN Yu-ming,HE Guang-yu.Test Research on Strata Resistance of Pile Side of Anchor Anti-slide Pile[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(9):2655-2659.(in Chinese)

[3] 曾云华,郑明新.预应力锚索抗滑桩的受力模型试验[J].华东交通大学学报,2003,20(2):15-18.
ZENG Yun-hua,ZHENG Ming-xin.Force Distribution Rule of Retaining Pile with Prestressing Cables[J].Journal of East China Jiaotong University,2003,20(2):15-18.(in Chinese)

[4] 郑颖人,赵尚毅.用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3552-3558.
ZHENG Ying-ren,ZHAO Shang-yi.Calculation of Innerforce of Support Structure Forlandslide/Slope by Using Strength Reduction Fem[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(20):3552-3558.(in Chinese)

[5] 叶海林,郑颖人,李安洪,等.地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(2):251-257.
YE Hai-lin,ZHENG Ying-ren,LI An-hong,et al.Shaking Table Tests on Stabilizing Piles of Slopes Under Earthquakes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(2):251-257.(in Chinese)

[6] 张俊,陈志新,门玉明.锚杆抗滑桩嵌固深度研究[J].东北大学学报:自然科学版,2008,29(11):1637-1640.
ZHANG Jun,CHEN Zhi-xin,MEN Yu-ming.Study of Built-in Depth of Anchored Piles Against Landslide[J].Journal of Northeastern University:Natural Science,2008,29(11):1637-1640.(in Chinese)

[7] Poulos H G,Hull T S.Effect of Seafloor in Stability on Off-shore Pile Foundations[J].Canadian Geotechnical Journal,1991,(28):729-737.

- [8] Biggs J M. Introduction to Structural Dynamics [M]. New York: McGraw-Hill, 1964
- [9] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 1-50.
ZHANG Jian-min. New Advances in Basic Theories of Sand Dynamics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 1-50.
- [10] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions (version 3.0) User's Manual [R]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc, 2003.
- [11] 中交水运规划设计院, 交通部第一航务工程勘察设计院. 水运工程抗震设计规范 (JTJ 225-98) [S]. 福建: 厦门大学出版社, 2004.
China Communication Planning and Design Institute for Water Transportation, China Communications First Design Institute of Navigation Engineering. Code of Earthquake Resistant Design for Water Transport Engineering (JTJ 225-98) [S]. Fujian: Xiamen University Press, 2004. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国交通部. 公路工程抗震设计规范 (JTJ 044-89) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications of Earthquake Resistant Design for Highway Engineering (JTJ 044-89) [S]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国建设部. 核电厂抗震设计规范 (GB50267-97) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. A Nuclear Power Plant Seismic Design Specification (GB50267-97) [S]. Beijing: China Standard Press, 1998. (in Chinese)
- [14] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of Strength Reduction Fem Application of Strength Reduction Fem [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineerin, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese)
- [15] LI X P, SIMING H E. Seismically Induced Slope Instabilities and the Corresponding Treatments; the Case of a Road in the Wenchuan Earthquake hit Region [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(1): 96-100.
- [16] 叶海林, 郑颖人, 杜修力, 等. 边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 128-135.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, DU Xiu-li, et al. Shaking Table Model Test and Numerical Analysis on Dynamic Failure Characteristics of Slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 128-135. (in Chinese)