

山地城市路基边坡的动力稳定性分析

幸 芊, 刘 剑, 刘 玉, 王声迅, 史剑飞, 洪兆远
(中机中联工程有限公司, 重庆市 400074)

摘 要: 为提高山地城市道路工程的防灾减灾能力, 解决路基边坡抗震设计中多采用拟静力法带来的无法考虑地震作用对场地和建筑的影响等局限性, 依托芦山地震雅安某灾后重建项目, 研究并梳理了考虑地层、支护结构、建筑地基和环境条件的边坡动力弹塑性数值分析方法和流程, 并研究了采用基于连续-离散耦合数值方法在上述场景中的应用。研究结果表明: 基于连续-离散耦合数值分析方法可用于基岩地层上覆明显松散土体的路基边坡动力弹塑性分析; 小直径锚拉桩支护方案的动力稳定性优于大直径悬臂桩支护方案, 为类似工程提供了参考; 动力作用下, 锚拉桩能有效抑制临近建筑的位移发展。

关键词: 边坡支护; 动力响应; 动力稳定性; 抗震设计; 离散元法

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0033-06

Dynamic Stability Analysis of Roadbed Slopes in Mountain Cities

XING Qian, LIU Jian, LIU Yu, WANG Shengxun, SHI Jianfei, Hong Zhaoyuan
(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the disaster prevention and mitigation capability of urban road projects in mountainous areas, and to solve the limitations brought by the proposed static method, which is mostly used in the seismic design of roadbed slopes, such as the inability to take into account the effects of seismic actions on the site and building, relying on a post-disaster reconstruction project in Ya'an after the Lushan Earthquake, the numerical analysis methods and processes of dynamic elastic-plastic numerical analyses of slopes that take into account the ground stratum, the supporting structure, the building foundation, and the environmental conditions are researched and studied by using the continuous-discrete coupling-based numerical method in the above scenario. Through the study and analysis, the following conclusions are drawn: the continuum-discrete coupling-based numerical analysis method can be used for the dynamic elastic-plastic analysis of roadbed slopes with apparently loose soil overlying bedrock strata; the dynamic stability of the small-diameter anchored tension pile support scheme is better than that of the large-diameter cantilevered pile support scheme, which provides a reference for the similar projects; the anchored tension piles can effectively inhibit the development of the displacement of the neighboring buildings under the dynamic action.

Keywords: slope support; dynamic response; dynamic stability; seismic design; discrete element method

0 引 言

近年来,建设韧性城市受到越来越多关注,提高城市韧性、增强抗风险能力,正成为现代城市建设管理的重大课题。对于山地城市而言,在地震作用下,山地城市的道路工程作为城市的生命线,要求既能承受住地震本身的灾害,还要能够承受住地震引发的次生灾害。而山地城市的道路建设较容易形成高陡的路基边坡,路基边坡的抗震设计往往是保证道路生命线的关键。

对于路基边坡的抗震设计,现行设计规范主要以拟静力法为主。拟静力法是将地震力按照经验简化成水平作用力施加到边坡及支挡结构上,通过静力分析,计算出边坡的稳定性和支挡结构的承载力。拟静力法的局限性在于假设边坡一直受到不变的水平地震力作用,这与实际不符,无法考虑地震作用的时空效应,且无法考虑地震作用对边坡场地和周边建筑环境的影响。为解决上述计算方法的问题,学者们提出了拟动力法,拟动力法在拟静力法的基础上采用正弦波来模拟地震波在岩土体中的传播。饶平平^[1]利用拟动力法计算了抗滑桩加固边坡地震稳定性。蒋青江^[2]将拟动力法与严格条分法结合,用来计算边坡的动力稳定性,并与拟静力法进行了比较。

收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 幸芊(1981—),男,硕士,正高级工程师,从事桥梁与隧道工程设计与研究工作。

山地城市的道路路基边坡除考虑边坡自身的稳定和支挡结构的承载力外,还需要考虑边坡对场地环境的影响。例如在道路工程中形成的路堑边坡上存在既有建筑物,边坡的形成改变了建筑物的场地环境,处于边坡边缘的建筑受地震放大效应的影响很大,同时位于边坡上的建筑基础也可能因地震作用产生的边坡塑性变形而发生次生灾害。上述问题由于复杂的地质环境和边界条件,一般采用考虑地层和结构的弹塑性动力数值模型进行分析。弹塑性动力数值模型可将地震作用通过时程函数进行输入,得到边坡及支护结构的真实动力响应。许多学者应用该方法在滑坡动力响应分析^[3-4]、岩质边坡动力稳定分析^[5-6]、弧形抗滑桩加固边坡^[7]等方面进行了研究。

针对锚固边坡的动力分析,吴善百等^[8]从锚固界面地震动剪切作用、锚固岩质边坡地震动特性及评价方法、岩体结构面和锚固体等参数敏感性方面系统梳理了锚固边坡的动力特征。

另一方面,叶海林等^[9]提出了强度折减动力分析法,并在滑坡抗滑桩抗震设计中进行了应用研究。赖杰等^[10]则将该方法与拟静力法、时程分析法在锚杆抗滑桩支护边坡的动力稳定性分析方面进行了比较。

综上,当前国内外学者就边坡的动力稳定分析方面进行了大量研究,但是针对山地城市道路边坡引起周边建筑、环境发生改变,进而在地震作用下的综合影响及分析方法方面研究还比较少。本次正是基于上述边坡弹塑性动力数值分析研究基础上,以芦山地震灾后重建四川雅安市政道路工程某路基边坡为例,利用综合地层-支护结构-建筑地基的数值模型模拟道路边坡形成后的整体动力稳定性,优选合理的支护结构方案,以期类似工程提供参考。

1 工程概况

工程位于四川省雅安市雨城区,属于芦山地震灾后借助世界银行贷款恢复重建项目中的外环路工程。该工程也是构建雨城区城市救灾生命线的重要一环。

外环路某段因路基开挖形成高度约22 m的路堑边坡。边坡上存在多处既有民房,民房为砖混结构,基础形式为浅基础。为减少拆迁,边坡需直立开挖并进行支护。工程实景如图1所示。

该区域工程地质条件如下:场地内分布地层为第四系上更新统冲洪积层(Q_3^{al})卵石和白垩系上统灌口组(K_2-Ms)泥岩;卵石为松散卵石,粒径40~



图1 工程实景照片

120 mm,含量占总重的45%~55%,卵石母岩成分为白云岩、闪长岩及石英岩,磨圆度较好,呈强~中风化状,亚圆形,颗粒间大多相互不接触,粒间由黏性土及砂土充填,黏土呈软塑~硬塑状,干强度高,韧性中等,无摇振反应;泥岩为紫红色,主要由黏土矿物组成,泥质结构,薄层状构造,结构面较清晰,岩芯较完整。工程典型地质剖面如图2所示。

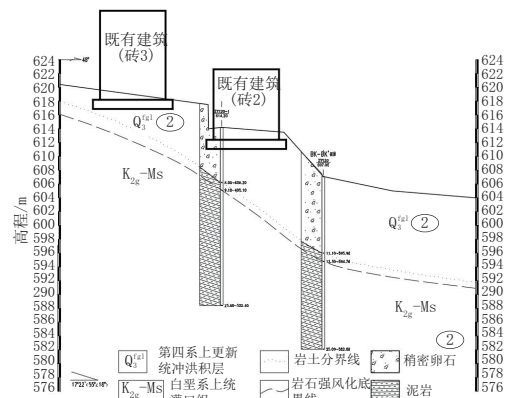


图2 典型地质剖面图

比较图1和图2可以看出,外环路外侧既有民房处于坡度 30° ~ 45° 的坡地上。有研究表明:动力作用下,边坡坡度小于 45° 时,坡体无明显高程动力放大效应^[11];而工程建设后,上述民房则大部分位于直立边坡的坡顶及附近区域,高程动力放大效应明显。边坡主要破坏模式为上部卵石层沿岩土分界面滑动。作为地震灾后重建项目,边坡支挡结构的方案选择需考虑在满足自身结构安全的同时还要尽可能减小地震作用对坡顶建筑物基础的影响。

由于边坡需要直立开挖,为保护既有民房,只能采用桩板挡墙方案。在此基础上有2个比选方案:(1)桩径2.5 m悬臂式抗滑桩方案;(2)桩径2 m抗滑桩+预应力锚索支护方案。

2 方案动力弹塑性数值分析比较

2.1 基于连续-离散耦合数值分析方法的应用

为比较2个方案的抗震性能,建立动力弹塑性分

析数值模型。考虑到边坡的破坏模式为上部卵石层的滑动破坏,同时坡顶建筑基础位于卵石层上,卵石层的动力响应是数值分析的重点部位,故采用基于连续-离散耦合数值分析方法。该分析方法的主要特征如下^[12]:

- (1)连续介质数值方法中单元间需共节点,适用于小变形情况,当变形较大时,易导致刚度矩阵无法求解。离散元法中单元体可分离,不受变形量限制。
- (2)将连续介质和离散元法进行耦合,特定区域采用离散元模拟,基岩或变形量小部分采用连续介质法,可兼顾实际的计算需要。

现通过 UDCE 程序建立数值分析模型如下:将边坡泥岩部分按连续域进行模拟,划分网络、赋予参数。将边坡卵石层部分按离散域进行模拟,采用程序内置的“voronoi”多边形,多边形的结合面的属性反映了卵石土中黏土的属性。“voronoi”多边形需先进行参数标定,通过模拟三轴压缩实验调整多边形的参数,使得模拟实验的结果与地勘结果平均值一致,获取离散域的细观参数。将连续域与离散域通过耦合边界实现连接。然后施加静力边界,进行初始应力场计算。完成后,在该模型基础上进行动力分析:首先去除静力边界,然后施加动力边界。模型两侧采用自由场边界,模型底部则采用黏滞边界。

在进行支挡结构方案比选中,为简化分析,参照拟动力法思路,使用正弦函数模拟动力输入,地面峰值加速度选用 0.1g。支护结构抗滑桩采用“beam”单元,锚索采用“cable”单元。完成模型建立后,施加局部阻尼,参考相关文献,阻尼系数取 0.15^[13]。最后进行动力分析,比较 2 种方案的动力响应。分析流程如图 3 所示,数值模型如图 4 所示,岩土体地质参数如表 1 所示。

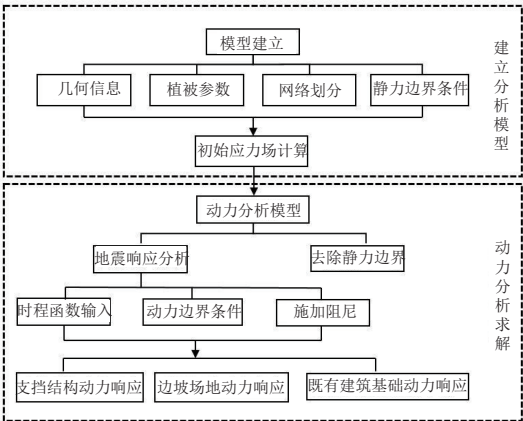


图 3 边坡动力弹性数值分析流程

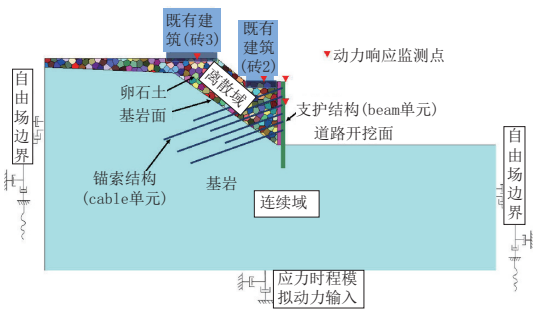


图 4 边坡动力弹性数值分析模型

由于模型底部是静态边界,只能输入应力时程,故将地震加速度时程进行积分得到速度时程,通过公式(1)、(2)转换应力时程施加到底部边界上。

$$\sigma_n = -2(pC_p)v_n \tag{1}$$

$$\sigma_s = -2(pC_s)v_s \tag{2}$$

式中: σ_n 为施加在静态边界上的法向应力; σ_s 为施加在静态边界上的切向应力; v_n 为法向速度; v_s 为切向速度; C_p 为纵波波速; C_s 为横波波速; p 为地基岩土体容重。

表 1 岩土体地质参数表

名称	变形模量/ MPa	泊松比	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	C / kPa	$\varphi / (^\circ)$
稍密卵石	28	0.36	21	9	35
泥岩	1 500	0.33	23.5	180	30

2.2 计算结果分析比较

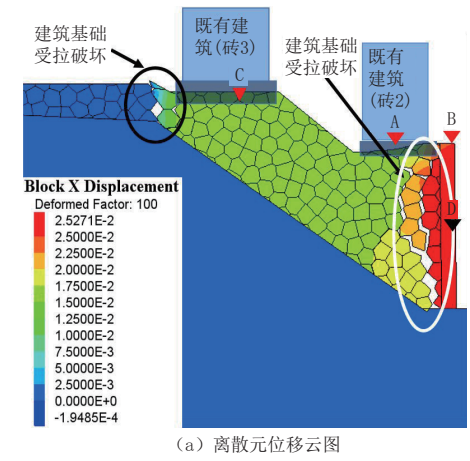
2.2.1 场地变形比较

分别选择既有建筑(砖 2)和既有建筑(砖 3)的基础底部为监测点 A、D,选择抗滑桩顶和桩中部为监测点 B、C。图 5 展示了较大直径悬臂桩方案在动力作用下的各监测点的位移发展情况:在监测时间段末,既有建筑(砖 2)基础和抗滑桩顶的最大位移达到 2.5 cm,且位移处于发展中,在时间步长内未收敛。从离散元位移云图可看出既有建筑基础下有明显张裂情况。

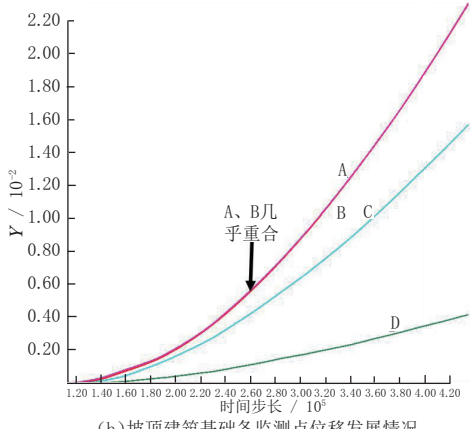
图 6 所示为较小直径锚拉桩方案在动力作用下的各监测点的位移发展情况:既有建筑(砖 2)基础最大位移 6 mm,桩顶最大位移 5.5 mm,且各监测点的位移均已收敛。从离散元位移云图可看出既有建筑基础周边没有明显张裂的情况。

2.2.2 建筑基础塑性区发展比较

图 7 所示为 2 种设计方案既有建筑基础等效剪应变情况。较大直径悬臂桩方案在动力作用下,既有建筑基础周边出现明显塑性区,而较小直径锚拉桩方案的塑性区范围显著减小。较大直径悬臂桩方案的整体等效剪应变大约为较小直径锚拉桩方案的



(a) 离散元位移云图



(b) 坡顶建筑基础各监测点位移发展情况

图5 悬臂桩方案(方案一)位移计算结果

等效剪应变的2倍。

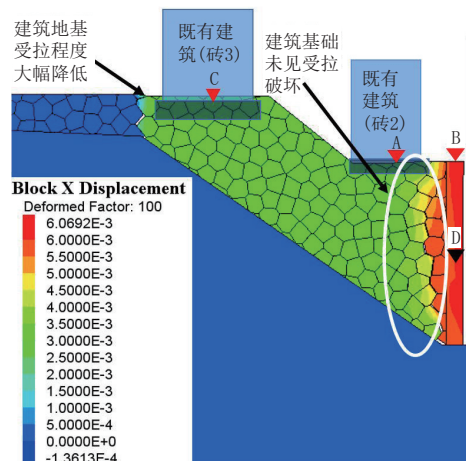
2.2.3 动力放大效应比较

PGA放大系数为数值模型测点加速度峰值与输入加速度峰值的比值^[14],是反映监测点动力放大效应的指标。图8反映了2种支护方案的PGA数据比较。其中监测点1、2位于既有建筑(砖2)的基础前后侧位置,监测点3位于桩顶,监测点4、5位于既有建筑(砖3)的基础前后侧位置,监测点6位于抗滑桩中部位置。可以看出悬臂桩方案的动力放大效应普遍大于锚拉桩方案,且遵循随高程增大PGA相应放大的趋势。进一步说明采用悬臂桩方案会引起更加明显的动力放大效应,增加风险。

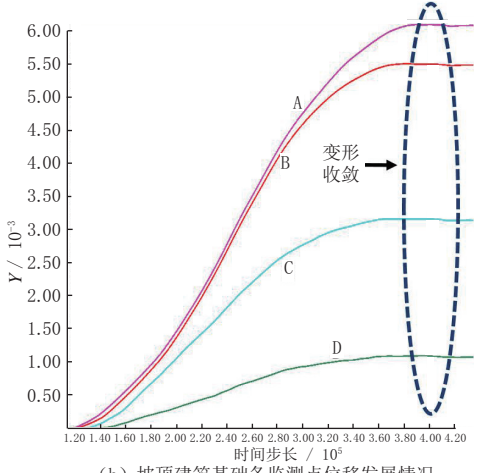
3 工程设计简介

通过2.2章节的比较分析,可以看出小直径锚拉桩方案的动力稳定性更优于大直径悬臂桩方案。该工程选择此方案为设计方案。

抗滑桩采用直径2 m、间距4 m布置,桩顶设置1 m高的冠梁,从桩顶冠梁以下设置锚索,竖向间距4 m,并采用长短束交错布置的方式以改善锚固区的受力状况。锚索采用15根一束的D15.2高强钢绞线,锚

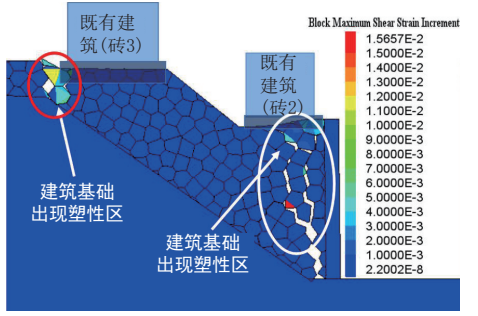


(a) 离散元位移云图

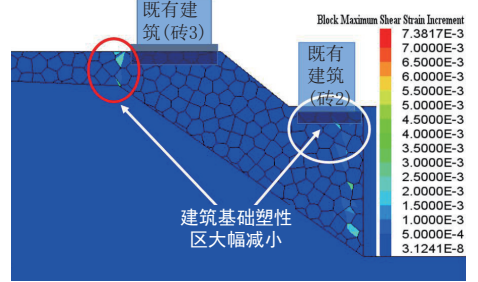


(b) 坡顶建筑基础各监测点位移发展情况

图6 锚拉桩方案(方案二)位移计算结果



(a) 抗滑桩方案边坡等效剪应变发展图示



(b) 锚拉桩方案边坡等效剪应变发展图示

图7 建筑基础最大剪应变计算结果比较

固段长度15 m。设计典型剖面图详见图9。采用逆作法施工,即现实施抗滑桩,桩内预埋预应力锚索的管道,开挖路基时,开挖至一排锚索位置即可实施锚

塑性分析;

(2)小直径锚拉桩支护方案的动力稳定性更优于大直径悬臂桩支护方案,为类似工程提供了有益参考;

(3)动力作用下,锚拉桩能有效抑制临近建筑的位移发展,对坡体上方的建筑,这种作用则大幅减弱。

另一方面,路基支挡结构是一种线性分布的空间结构。如果沿道路方向延伸长度足够长,地震输入和动力响应就存在非一致性,结构纵向连接的薄弱环节就会突显。可参照长隧道非一致地震响应模拟多尺度动力耦合方法^[15],而该方法在路基支挡结构上的应用还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 饶平平,童磊磊,师昀巍.基于拟动力法的抗滑桩加固边坡地震稳定性分析[J].世界地震工程,2020,36(1):189-196.
- [2] 蒋青江,邓亚虹,杨楠,等.基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J].地震工程学报,2023,45(3):716-723.
- [3] 李玉瑞,吴红刚,冯君,等.四川攀枝花机场12#滑坡动力响应数值模拟分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):26-31.
- [4] 匡义,裘仕博,陈一新,等.基于FLAC3D的地震作用下边坡动力稳定分析[J].水利规划与设计,2023(5):61-69.
- [5] 王通,刘先峰,侯召旭,等.碎裂状顺层岩质边坡地震动力响应与破坏模式[J].工程科学与技术,2023,55(2):39-49.
- [6] 李其在,周癸武,梁栋才,等.基于离散元法的抗滑桩加固顺倾节理岩质边坡抗震性能研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):52-62.
- [7] 陈行,陈文字,宋兴海,等.地震作用下弧形抗滑桩加固边坡的动力响应及稳定性分析[J].安全与环境工程,2020,27(4):79-86.
- [8] 吴善百,王亮清,吴琼,等.地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望[J].地球科学,2022,47(12):4456-4468.
- [9] 叶海林,郑颖人,黄润秋,等.强度折减动力分析法在滑坡抗滑桩抗震设计中的应用研究[J].岩土力学,2010,31(增刊1):317-323.
- [10] 赖杰,李安红,郑颖人,等.锚杆抗滑桩加固边坡工程动力稳定性分析[J].地震工程学报,2014,36(4):924-930.
- [11] 卢海军.岩质高边坡开挖爆破动力响应规律及控制措施研究[D].昆明:云南大学,2016.
- [12] 常晁瑜.强震作用下黄土斜坡流滑机理及动态演化[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.
- [13] 黄俊辉.库区消落带顺层岩质边坡动力响应特征及稳定性研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [14] SONG Danqing, CHE Ailan, CHEN Zhu, et al. Seismic stability of a rock slope with discontinuities under rapid water draw down and earthquakes in large-scale shaking table tests[J]. Engineering Geology, 2018(245): 153-168.
- [15] 禹海涛,袁勇.长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J].中国公路学报,2018,31(10):19-35.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

