

DOI: 10.11779/CJGE2018S1025

框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应数值分析

叶帅华^{1, 2, 3}, 时轶磊^{1, 2}, 龚晓南³, 陈长流⁴

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 中国移动通信集团甘肃有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 依托实际工程, 基于 Geostudio 岩土分析软件, 建立了框架预应力锚杆加固多级高边坡的动力分析模型。通过设置边界条件, 输入水平地震作用, 分析了边坡在地震作用下的位移响应、速度响应、加速度响应和锚杆轴力响应。结果表明: 水平地震作用下, 边坡内的位移、速度、加速度和锚杆的轴力等均随地震持时呈波动性变化。水平位移随时间变化显著且具有累积效应, 边坡水平位移远大于竖直位移。坡体临空面水平加速度幅值明显增大, 临空面对地震加速度具有放大效应。边坡总应力从坡底沿坡高递减, 在坡底总应力最大。预应力锚杆的自由段与锚固段轴力均随地震持时波动性变化, 自由段轴力较大, 锚固段轴力沿远离自由段方向递减。分析结果可为框架预应力锚杆加固多级高边坡的地震响应提供一定的依据。

关键词: 多级高边坡; 数值分析; 地震响应; 框架预应力锚杆

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0153-06

作者简介: 叶帅华(1983-), 男, 河南巩义人, 博士后, 副教授, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yeshuaihua@163.com。

Numerical analysis of earthquake response of multistage high slopes reinforced by frame structure with pre-stressed anchors

YE Shuai-hua^{1, 2, 3}, SHI Yi-lei^{1, 2}, GONG Xiao-nan³, CHEN Chang-liu⁴

(1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
4. China Mobile Group Gansu Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Based on the actual project and the Geostudio analysis software, the dynamic analysis model for a multistage high slope reinforced by frame structure with pre-stressed anchors is established. By inputting the horizontal seismic action and setting the boundary conditions, the responses of displacement, velocity, acceleration and axial force of anchors are analyzed. The results show that under the effect of horizontal earthquake, the displacement, velocity, acceleration and axial force of anchors of the slope have fluctuating change over the time of earthquake action. The horizontal displacement changes significantly and has an accumulation effect, and the horizontal displacement of slope is greater than the vertical one. The acceleration amplitude of slope surface increases obviously, which indicates that the surface of slope has an amplification effect on the earthquake acceleration. The total stress increases along the slope height, and it reaches the maximum at the bottom of slope. The axial forces of the free segment and anchorage segment fluctually change over the time, and the axial force of the free segment is larger, while that of the anchorage body gradually declines along the direction away from the free segment. The results can provide a reference for multistage high slopes reinforced by frame structure with pre-stressed anchors under earthquake action.

Key words: multistage high slope; numerical analysis; earthquake response; frame structure with prestressed anchor

0 引言

在现代工程建设, 尤其是在公路、铁路建设中, 遇到了越来越多的需要进行加固的多级高边坡工程。而中国又处于两大地震带——环太平洋地震带与欧亚

地震带之间, 是一个地震多发国家。地震作用是诱发

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508256); 甘肃省建设科技攻关计划项目(JK2015-5); 兰州市科技发展计划项目(2015-3-131)
收稿日期: 2017-06-11

边坡发生滑移或失稳破坏的主要因素之一。而边坡的失稳破坏又会带来诸多不便，并会造成巨大的经济损失。地震作用更会对多级高边坡的位移响应、速度响应、加速度响应以及应力响应产生较大的不良影响。因此在多级高边坡加固工程中考虑地震作用对边坡变形及内力的影响是很有必要的。

框架预应力锚杆加固边坡体系是通过预应力锚杆对边坡土体施加一定的预压应力，从而可变传统的被动支护为充分利用土体自身稳定性的主动支护^[1]，并且可有效控制边坡的变形，因此可应用于多级高边坡工程的加固之中。目前，对于地震作用下框架预应力锚杆加固边坡的研究虽然取得了一定的进展和突破，但还不很完善。尤其是对框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应的研究还较少涉及。朱彦鹏等^[2]提出了水平地震作用下框架锚杆支护边坡简化分析方法。董建华等^[3-5]提出了框架预应力锚杆边坡支护结构抗震简化计算方法以及动力计算方法和可靠度分析。郑颖人等^[6]提出了地震边坡的破坏机制。赵尚毅等^[7]提出了完全动力分析法采用强度折减法的方法求出边坡的动力安全系数，再通过输入实际地震荷载，模拟土体的动力特性。还有不少学者^[8-11]对边坡地震响应进行了数值分析。

尽管目前关于边坡地震响应分析的研究比较多，但多数都是对单级边坡的研究，对于多级边坡地震响应的分析还比较少，而对框架预应力锚杆加固多级边坡地震响应的分析更是比较欠缺。本文基于 Geostudio 岩土分析软件，依托实际工程，通过建立多级高边坡动力分析模型，分析框架预应力锚杆加固某四级深挖路堑边坡在地震作用下的动力响应，根据模拟结果可得出边坡的位移、速度、加速度、应力以及锚杆轴力随地震持时的变化规律。这对于今后研究框架预应力锚杆加固多级高边坡在地震作用下的动力响应和边坡体变形情况具有一定的指导作用。

1 边坡动力模型的建立

1.1 数值模型的建立

本文选取 39 m 的深挖路堑多级边坡建立有限元模型，该模型为四级边坡，各级坡的坡度均为 1:1。从坡底各级坡高分别为 10, 10, 10, 9 m，每级坡之间均设 2 m 宽的平台。采用框架预应力锚杆对该多级边坡进行加固，以控制边坡的变形，提高边坡抵抗地震作用的能力。边坡的有限元模型及监测点布置如图 1 所示，边坡各层土体物理力学参数如表 1 所示。

采用 Geostudio 岩土分析软件建立边坡有限元模型时，各层土体均设置为弹塑性材料，并采用

Mohr-Coulomb 强度准则，本文不考虑地下水和渗流的影响。模型侧边界设置为竖向约束，水平自由，底部边界设置为固定边界。本文模型中有限元网格尺寸设置为 1 m，形状均采用四边形。

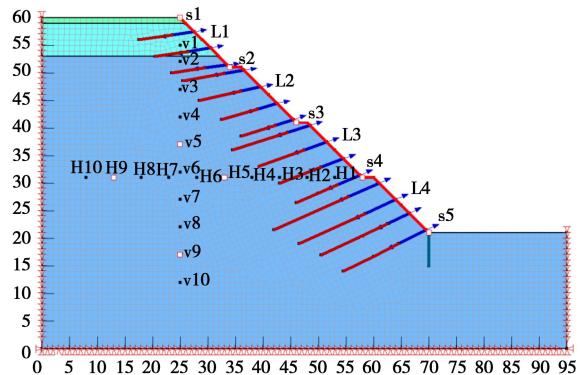


图 1 边坡有限元模型

Fig. 1 Finite element model of slope

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil mass

土层 名称	重度 γ ($kN \cdot m^{-3}$)	总弹性模 量 E/MPa	泊松 比 ν	黏聚 力 c	内摩擦角 ϕ (°)	界面黏结 强度
填土	17.5	5.0	0.30	20	22	50
粉质 黏土	17.0	5.0	0.30	16	20	45
卵石	22.0	8.0	0.25	0	35	200

1.2 地震作用的输入

对该有限元模型，设置材料的阻尼比为 0.1，并输入水平地震波。水平地震波的峰值加速度为 0.3g，峰值持时为 2.14 s，地震持续时间选取前 10 s。水平地震波的加速度时程曲线如图 2 所示。

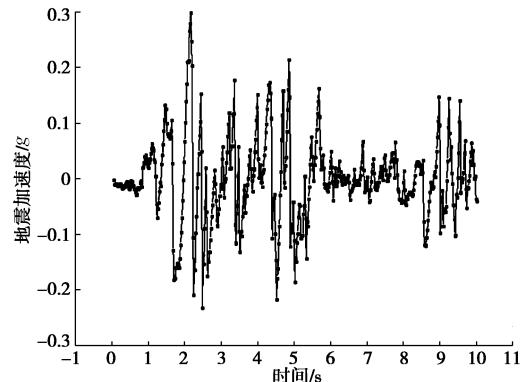


图 2 输入水平波的加速度-时间曲线

Fig. 2 Input horizontal wave acceleration-time curves

2 数值模拟结果分析

2.1 地震作用下边坡数值模拟分析

地震作用下，边坡体不仅会发生弹性变形，还会

发生不可恢复的塑性变形, 因此有限元模型的本构关系选用弹塑性模型。边坡土体会对地震波的传播产生一定的影响, 甚至会产生叠加效应而对边坡产生较大的影响。在各级边坡的坡顶设置监测点 $S_1 \sim S_5$, 在边坡内分别设置 10 个水平监测点和 10 个竖直监测点见图 1, 以观察在地震作用过程中, 各点处的位移、速度、加速度以及应力的变化情况。根据不同监测点处各观测量的动力响应情况, 分析多级高边坡在地震作用下的动力响应特性。

2.2 边坡体位移地震响应分析

边坡体的变形是影响边坡安全及其周围建、构筑物稳定和正常使用的重要因素。对边坡的加固很大程度上正是为了控制边坡不让其发生过大变形。为了研究多级高边坡在地震作用下的位移响应规律, 选取边坡体位移随时间的变化曲线进行分析。本文有限元模型仅选取 V_3 、 V_{10} 和 H_3 、 H_{10} 四个监测点进行位移分析, 所选四个监测点的水平、竖向位移随地震持时的变化曲线分别如图 3, 4 所示。

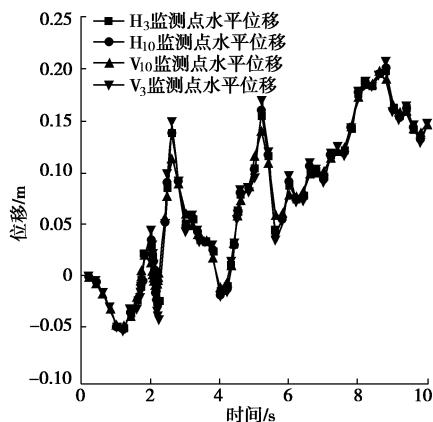


图 3 监测点水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curves at monitoring points

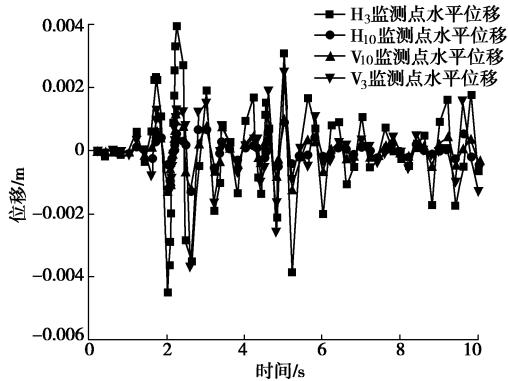


图 4 监测点竖向位移曲线

Fig. 4 Vertical displacement curves at monitoring points

由图 3, 4 可知, 各监测点在水平地震作用下的位移响应曲线基本一致, 只是幅值有所不同。边坡的水平位移随地震持时具有累积效应, 最终会发生较大的

水平位移而使边坡破坏。由图 3 中 V_3 、 V_{10} 位移变化曲线可知, 该两点的水平位移幅值分别为 0.207, 0.198 m, 接近边坡表面处的 V_3 监测点处的水平位移幅值大于 V_{10} , 说明水平位移在接近坡面处较大。图 3 中 H_3 、 H_{10} 监测点处位移幅值分别为 0.201, 0.199 m, 同一水平高度的水平位移变化不明显, 但接近坡面处的位移大于边坡内部位移。各监测点竖向位移与输入的地震加速度时程有较强的相关性, 位移随时间波动性明显, 幅值较小, 与水平位移相比可忽略。

坡面监测点 $S_1 \sim S_5$ 的水平、竖直位移随地震持时变化曲线分别如图 5, 6 所示。由图 5 可知, 不同级边坡坡脚监测点位移波动相似, 仅仅是幅值有所差异。水平位移较大且随地震持时有一定的累积效应。 $S_1 \sim S_5$ 的位移幅值分别为 0.209, 0.207, 0.202, 0.198, 0.197 m。水平位移沿坡高逐渐递增, 在坡顶 S_5 处水平位移幅值最大为 0.209 m。图 6 中坡面各监测点竖向位移幅值均较小, 与水平位移相比可忽略。

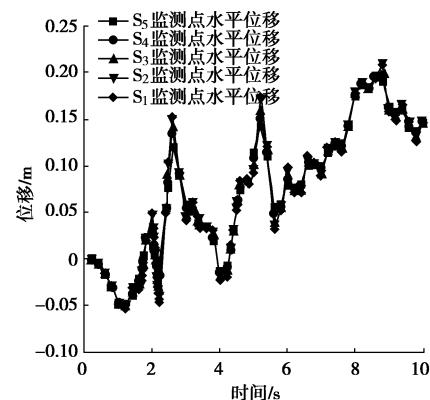


图 5 监测点水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves at monitoring points

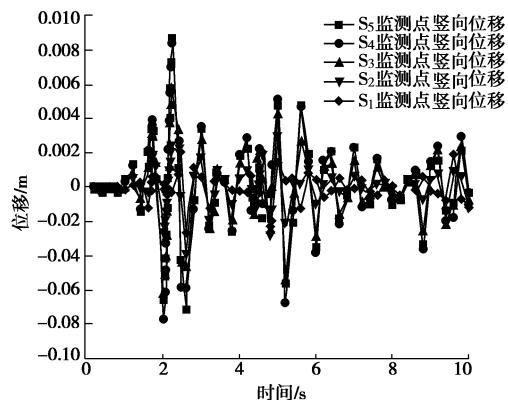


图 6 监测点竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement curves at monitoring points

2.3 边坡体速度地震响应分析

地震作用下, 边坡内各监测点的速度随地震持时不断变化, 且各监测点速度变化曲线具有较好的一致性, 因此本文选取 V_9 和 S_1 监测点的速度变化曲线进

行分析。 V_9 和 S_1 监测点的水平和竖向速度随时间变化曲线分别如图 7, 8 所示。

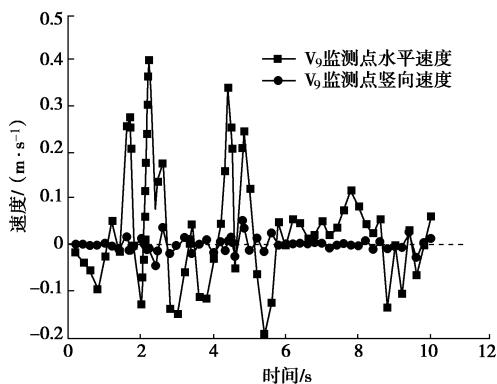


图 7 V_9 监测点水平、竖向速度曲线

Fig. 7 Horizontal and vertical velocity curves at monitoring point V_9

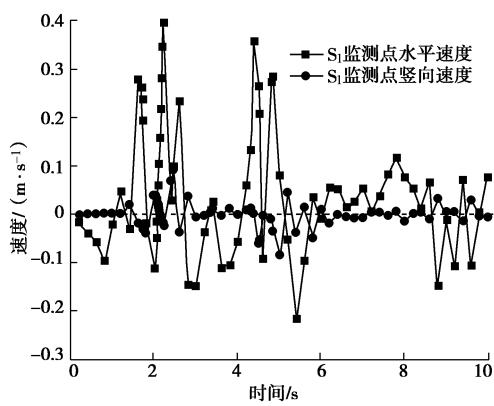


图 8 S_1 监测点水平、竖向速度曲线

Fig. 8 Horizontal and vertical velocity curves at monitoring point S_1

由图 7, 8 可知, 地震作用下边坡内各监测点的水平、竖向速度均随时间波动性变化, 水平速度波动性较大, 峰值也较大, 竖直方向速度基本呈直线分布, 峰值较小。对比图 7, 8 可知, V_9 和 S_1 监测点的水平速度峰值分别为 $0.401, 0.395 \text{ m/s}$, 边坡不同监测点处水平速度变化曲线及幅值变化不明显。坡面监测点 S_1 竖向速度幅值为 0.09 m/s 大于坡内监测点 V_9 竖向速度幅值 0.049 m/s , 且竖向速度幅值相对于水平速度稍有滞后。边坡各监测点水平方向的速度远大于竖直方向的速度, 这一规律也与边坡在地震作用下的位移变化规律相一致。

2.4 边坡体加速度地震响应分析

地震作用下, 边坡内各监测点的加速度具有相似的变化形式。因此本文仅选取 H_9 和 S_4 监测点的加速度变化曲线进行分析。 H_9 和 S_4 监测点的加速度变化曲线分别如图 9, 10 所示。

由图 9, 10 可知, 边坡体的水平、竖向加速度均随地震持时波动性变化。对比图 9, 10 曲线, H_9 和 S_4 监测点的水平加速度幅值分别为 $0.310g, 0.495g$ 。 S_4 监测点的水平加速度幅值大于输入的地震加速度幅值 $0.3g$, 而边坡内部质点 H_9 的加速度变化幅值与输入的地震加速度变化基本一致, 说明边坡的临空面对地震加速度具有一定的放大效应, 而边坡内部质点的加速度放大效应不明显。监测点的加速度变化曲线与输入的地震加速度曲线紧密相关, 无滞后性。竖直方向加速度变化不明显且小于输入的地震加速度, 因此各监测点的加速度仍以水平加速度为主。边坡体加速度幅值的变化也说明土体介质会对地震加速度的传播产生了较明显的影响。

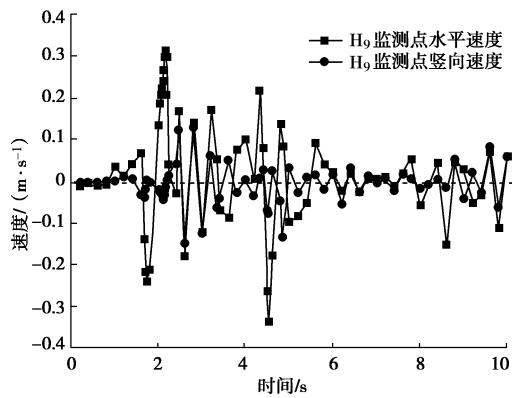


图 9 H_9 监测点水平、竖向加速度曲线

Fig. 9 Horizontal and vertical acceleration curves at monitoring point H_9

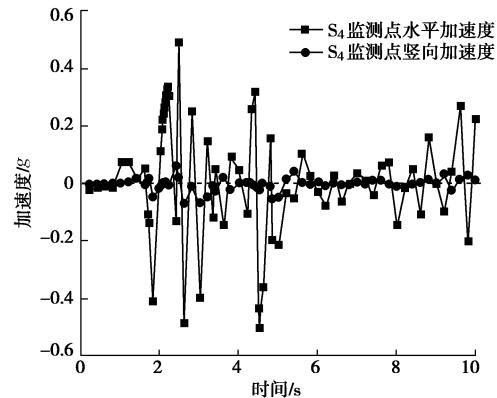


图 10 S_4 监测点水平、竖向加速度曲线

Fig. 10 Horizontal and vertical acceleration curves at monitoring point S_4

2.5 边坡体最大总应力地震响应分析

边坡体的最大总应力随地震持时变化曲线与速度、加速度响应相似, 各监测点应力具有相似的变化形式。因此本文选取各级边坡坡脚处监测点 $S_2 \sim S_5$ 的应力随时间的变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知, 第一级、第二级、第三级、第四级

边坡监测点的最大总应力幅值分别为 1230.46, 1017.55, 677.32, 449.65 kPa, 边坡体总应力幅值沿坡高变化明显, 坡脚 S₅ 监测点总应力最大为 1230.46 kPa。地震作用下边坡体的应力大小和方向随地震持时不断变化, 且各监测点应力幅值均较大。这就使边坡内土体的受力状况变的较为复杂, 引起边坡土体之间的作用力不断变化, 进而破坏土体的初始整体性, 引起土体之间较大的相对位移, 最终可能会导致边坡的整体性破坏。

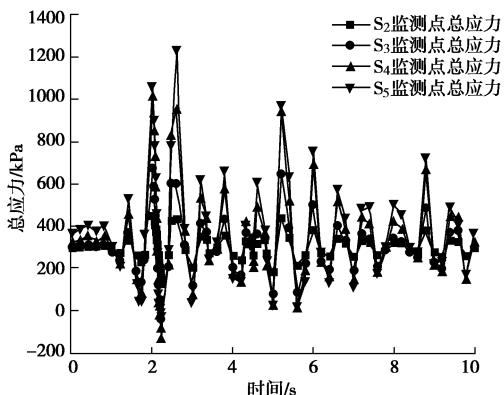


图 11 坡面监测点最大总应力曲线

Fig. 11 Curves of maximum total stress at monitoring points in slope surface

2.6 边坡内锚杆轴力地震响应分析

采用框架预应力锚杆加固技术加固多级高边坡, 可有效控制边坡体变形, 提高边坡抵抗地震作用的能力。锚杆轴力在地震作用过程中的变化规律对边坡的动力响应至关重要。预应力锚杆轴力由自由段传递至锚固段, 再由锚固段传递到边坡内部稳定土层中。地震作用下, 锚杆轴力随地震加速度时程将不断变化。由于该边坡加固所用锚杆较多, 而各锚杆轴力在同一地震波下变化规律相似, 因此本文仅选取各级边坡的第三道锚杆进行轴力分析。如图 12 为所选取的四道锚杆的自由段的轴力随时间变化曲线。图 13 为第一级边坡第三道锚杆的锚固段不同位置处的轴力变化曲线。

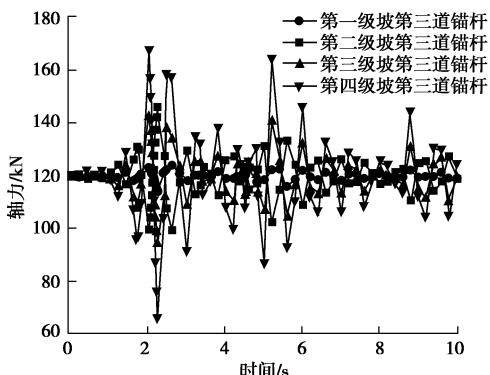


图 12 锚杆自由段轴力变化曲线

Fig. 12 Variation of axial force curves of free period of anchor

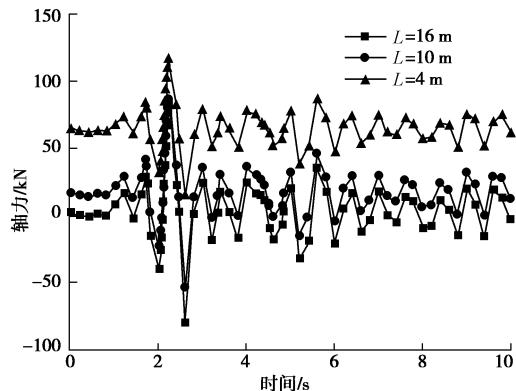


图 13 同一锚杆锚固段不同位置处轴力变化图

Fig. 13 Variation curves of axial force of reinforce period of anchor at different points

由图 12 可知, 地震作用下, 各道锚杆自由段的轴力均随地震持时波动变化。锚杆自由段施加的初始预应力值为 120 kN, 故轴力峰值较大, 且以初始预应力值为轴线随时间波动变化。所选取的第一级、第二级、第三级、第四级边坡内第三道锚杆的轴力幅值分别为 123.70, 146.17, 145.38, 167.33 kN, 地震作用下锚杆自由段轴力幅值沿坡高递增, 在坡顶附近轴力变化明显, 在距离坡顶稍向下位置处的锚杆轴力幅值达到最大, 最大值为 167.33 kN。坡顶处锚杆轴力波动性大, 增量较为显著, 这也说明地震加速度在坡体中传播时有放大效应。

由图 13 可知, 锚固段各点的轴力均随地震持时呈波动性变化, 但轴力幅值差异明显。在 L=4, 10, 16 m 处的轴力幅值分别为 117.0, 87.4, 53.79 kN, 自由段与锚固段连接处的轴力明显大于其他两点处的轴力, 在 L=16 m, 即锚固段顶点处轴力幅值最小, 说明锚固段轴力沿远离自由段的方向递减, 锚杆轴力通过锚固段传递到边坡内部的稳定土层中。

3 结 论

本文利用 Geostudio 岩土分析软件对某深挖路堑多级边坡进行了水平地震作用下的位移、速度、加速度以及锚杆轴力等量的动力响应进行了有限元模拟分析, 得出以下 5 点结论。

(1) 地震作用下, 边坡表面处的位移大于边坡内部位移。水平位移幅值较大, 且具有累积效应。随地震持时增加, 边坡永久性水平位移增大, 波动变化的坡体位移也是造成周围建筑物破坏的主要原因。

(2) 多级高边坡临空面的水平加速度幅值大于边坡内的加速度, 坡体的临空面对地震加速度具有放大效应。竖向加速度波动性变化幅值较小。边坡体的加速度与地震加速度具有同步性, 无滞后性。

(3)边坡体的最大总应力随地震持时波动性变化且幅值较大。最大总应力幅值沿边坡高度递减，在坡底处总应力最大。

(4)锚杆的自由段和锚固段轴力均随地震持时呈波动性变化。锚杆自由段轴力峰值较大，且沿坡高呈现出递增的规律，在距离坡顶稍向下位置处的锚杆轴力峰值最大。锚固段轴力沿远离自由段方向递减。

(5)通过对多级高边坡在地震作用下的有限元模型分析，得出的地震响应规律对于研究框架预应力锚杆加固多级高边坡具有一定的指导作用。

参考文献：

- [1] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周勇. 支挡结构设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (ZHU Yan-peng, LUO Xiao-hui, ZHOU Yong. Retaining structure design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 朱彦鹏, 叶帅华. 水平地震下框架锚杆支护边坡简化分析方法[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 27–32. (ZHU Yan-peng, YE Shuai-hua. Simplified analysis of slope supported with frame-anchors under lateral seismic loading[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 27–32. (in Chinese))
- [3] 董建华, 朱彦鹏, 马巍, 等. 框架预应力锚杆边坡支护结构抗震简化设计方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 38–46. (DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei, et al. Simplified seismic design method of frame supporting structure with prestressed anchors for slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 38–46. (in Chinese))
- [4] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 框架预应力锚杆边坡支护结构动力计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 250–258. (DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei. Study on dynamic calculation method for frame supporting structure with pre-stress anchors[J]. Engineering Mechanics. 2013, 30(5): 250–258. (in Chinese))
- [5] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 地震作用下框架预应力锚杆边坡锚固结构的动力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3135–3143. (DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei. Dynamic calculation method of frame prestressed anchors for slope stability under seismic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3135–3143. (in Chinese))
- [6] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714–1723. (ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qi. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714–1723. (in Chinese))
- [7] 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 Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety coefficient of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343–346. (in Chinese))
- [8] 薄景山, 徐国栋, 景立平. 土边坡地震反应及其动力稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 116–120. (BO Jing-shan, XU Guo-dong, JING Li-ping. Seismic response and dynamic stability analysis of soil slopes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 116–120. (in Chinese))
- [9] 言志信, 曹小红, 张刘平, 等. 地震作用下黄土边坡动力响应数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 610–614. (YAN Zhi-xin, CAO Xiao-hong, ZHANG Liu-ping. Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 610–614. (in Chinese)).
- [10] 谭儒蛟, 李明生, 徐鹏逍, 等. 地震作用下边坡岩体动力稳定性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3986–3992. (TAN Ru-jiao, LI Ming-sheng, XU Peng-xiao, et al. Numerical simulation of dynamic stability of slope rockmass under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3986–3992. (in Chinese))
- [11] 陈晓利, 李杨, 洪启宇, 等. 地震作用下边坡动力响应的数值模拟研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1899–1908. (CHEN Xiao-li, LI Yang, HONG Qi-yu, et al. Numerical simulation of earthquake effects on rock slope[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1899–1908. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)