

DOI: 10.11779/CJGE2023S20019

不同地震强度下新型装配式锚索框架梁加固边坡 抗震性能分析

戴 轩¹, 马云祥¹, 魏少伟^{2,3}, 魏培勇^{2,3}, 霍海峰¹, 蔡德钩^{2,3}, 李 朝¹

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;
3. 北京铁科特种工程技术有限公司, 北京 100081)

摘 要: 装配式预应力锚索框架梁作为一种新型边坡加固方式, 其抗震性能目前仍缺乏研究。针对采用“十字梁”与“一字梁”组合加固边坡, 以实际工程为背景, 建立了非线性动力时程分析数值模型。将 El Centro 波作为地震动输入, 通过调幅分析了不同地震强度的影响规律。研究表明, 装配式框架梁加固后边坡的滑坡体与基岩水平位移差明显降低, 峰值加速度对滑坡体内测点水平位移的影响主要体现在残余变形阶段, 边坡的震后永久位移随峰值加速度的增加而增加, 且增速逐步加快; 在不同峰值加速度下, 边坡加速度的响应均出现一定的滞后作用, 当峰值加速度较大时, 边坡的加速度响应长期处于剧烈波动状态, 加固后加速度放大系数最高可达 8.0; 地震时预制一字梁的梁底应力最大值明显大于预制十字梁, 当峰值加速度为 0.4g 时, 一字梁梁底有拉裂风险。

关键词: 装配式锚索框架结构; 边坡加固; 非线性动力分析; 抗震性能

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0147-06

作者简介: 戴 轩(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程和机场工程等方面的教学和科研工作。E-mail: tianjindaixuan@126.com。

Seismic performance analysis of frame beams-reinforced slope under different earthquake intensities

DAI Xuan¹, MA Yunxiang¹, WEI Shaowei^{2,3}, WEI Peiyong^{2,3}, HUO Haifeng¹, CAI Degou^{2,3}, LI Zhao¹

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. Beijing Tiekong Special Engineering Technological Development Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: As a new slope reinforcement method, the prefabricated prestressed anchor cable frame has been used in engineering. However, its seismic performance still needs to be studied deeply. Based on a practical project, a nonlinear dynamic time history numerical model is established for the reinforcement of slope by the combination of “cross beam” and “straight beam” using El Centro waves as the ground motion input. The influence rules of different earthquake intensities are analyzed through amplitude modulation. The results show that the horizontal displacement difference of the slope after the reinforcement of the frame beams decreases significantly. The influences of the peak acceleration on the horizontal displacement of the slope are mainly reflected at the residual deformation stage. The permanent displacement of the slope after earthquake increases with the increasing peak acceleration, and the growth rate is gradually accelerated. Under different peak accelerations, the slope acceleration response has a certain lag effect. When the peak acceleration is large, the slope acceleration response is in a state of drastic fluctuation for a long time. After reinforcement, the acceleration amplification coefficient can reach 8.0, and gradually decreases with the increase of earthquake intensity. The maximum stress at the bottom of the prefabricated cross beams is obviously smaller than that of the prefabricated straight ones. When the peak acceleration is 0.4g, the bottom of the frame beams has the risk of cracking.

Key words: prefabricated anchor cable frame; reinforced slope; nonlinear dynamic analysis; seismic performance

0 引 言

预应力锚索结构源于传统的岩土锚固技术, 现常

基金项目: 中国民航大学科研启动基金项目 (2020KYQD39)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: 752929275@qq.com)

用于边坡加固、边坡抗震等工程领域^[1]。目前,现浇式预应力锚索框架在中国工程领域得到广泛应用,然而其存在施工过程复杂、施工周期长、安全风险高、施工成本较高、支护时效性差、质量不易控制等问题^[2]。采用装配式框架梁则能够较好地解决上述问题,当梁身设置预应力筋时,可大幅增加框架梁的刚度,相比于现浇法具有较大的优势。

预制装配式框架梁结构起源于日本^[3],此后该技术被多项工程开展试点应用^[4-5],然而由于其工程材料、应用要求、技术条件与中国差异较大,没有形成完整的设计理论和方法,因此未大规模推广使用。目前针对锚索框架结构加固边坡的研究主要为现浇梁,且在理论分析方法^[6]、设计计算方法^[7]、边坡稳定性分析^[8-9]、现场试验研究^[10]等方面形成了一套完整的研究体系。近年来,魏少伟等^[11]针对预制梁推导了解装装配式锚索框架梁内力的理论解,并提出了其结构设计与施工流程^[12],然而其主要针对装配式框架梁的设计理论方法,并未考虑其在边坡抗震方面的应用效果。

在边坡抗震性能方面,多种分析方法被应用于评估地震时加固边坡的稳定性,如理论分析、振动台试验、数值模拟等。董建华等^[8]建立坡后土体动力计算模型,研究了极限状态方程和稳定性可靠度边坡抗震设计理论,并用 Monte Carlo 法验证了其正确性。Cao 等^[13]分别输入 El Centro 波和汶川波开展振动台试验,分析了不同加速度下边坡在地震和降雨作用下的响应及动态破坏模式。Ye 等^[14]基于土体动力学和结构动力学原理,研究了边坡在水平地震作用下的动力响应,建立了预应力锚索框架梁加固边坡在地震作用下的边坡响应理论模型。Niu 等^[10]开展了一系列数值模拟研究,研究了不同方向地震波下框架梁加固边坡的动力响应特征。然而上述研究大多针对现浇式框架梁,装配式框架梁作为一种更经济、更节省工期的边坡加固方式,其在地震下加固边坡的动力响应特点尚不明确,尚待深入研究,且上述研究大多仅考虑边坡在地震下的响应,未对框架梁结构的影响做进一步探讨。

本文首先提出了装配式预制“一字梁”与“十字梁”组合加固边坡的加固体系,并将其应用于实际工程,在此基础上建立精细化有限差分数值分析模型。采用动力时程分析方法,研究采用装配式锚索框架梁加固边坡在不同地震强度下的响应,以对新型装配式框架梁的动力学特点开展深入研究。

1 工程概况及数值分析模型

本研究针对的新型装配式锚索框架结构如图 1 所示。框架梁结构采用预应力混凝土结构,根据其平面

形状分为“十字梁”与“一字梁”。预制梁采用变截面结构,中部截面尺寸为 400 mm×600 mm,边缘截面尺寸为 400 mm×400 mm。为验证装配式锚索框架梁结构的加固效果,在蒙自-屏边高速公路开展了现场试验段施工,加固断面的边坡地质情况如图 2 所示,本工程相关情况可参见文献^[15]。

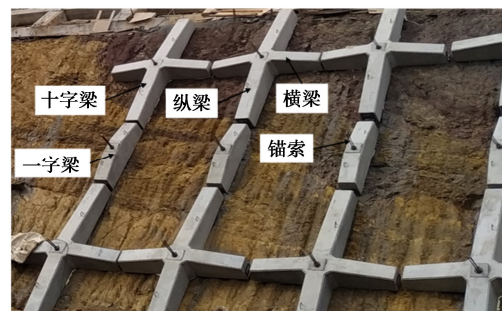


图 1 新型装配式锚索框架梁现场试验

Fig. 1 Site photos of prefabricated beams

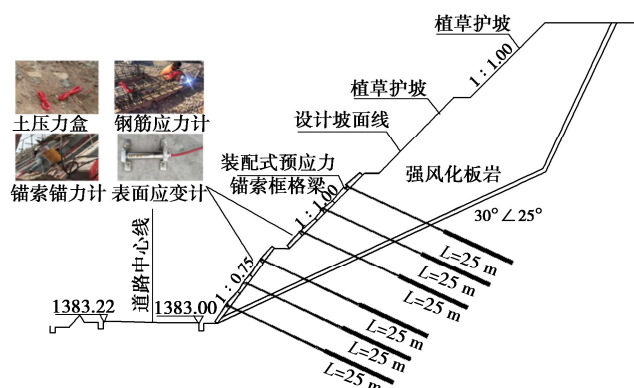


图 2 边坡地质剖面

Fig. 2 Geological section of slope

所建立的数值分析基本模型及测点分布如图 3 所示。模型宽度 85 m,模型垂直边坡方向取 9 m,自下而上分别为一至四级边坡,坡高均为 10 m,一级边坡坡度为 1:0.75,二至四级坡度为 1:1。基岩采用实体单元进行模拟,本构模型为 Mohr-Coulomb 模型。基岩与滑坡体的界面为滑面,其采用接触面模拟,基岩及滑面强度参数如表 1 所示。取值来源于工程勘察报告和室内试验的结果,同时参照《工程岩体分级标准》^[16]中的推荐值。数值模拟中锚索参数如表 2 所示。

表 1 模型中岩体与框架结构的物理力学参数

Table 1 Parameters of mechanical property used in numerical model

材料	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ MPa	泊松 比	黏聚 力 c / kPa	内摩擦 角 φ / ($^{\circ}$)
强风化板岩	27.8	80	0.3	60	28
滑面	—	2	0.3	45	23
预制梁	25.0	34175	0.2	—	—

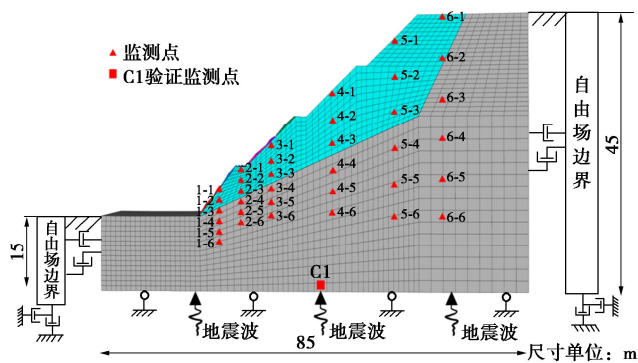


图 3 有限差分数值分析模型及其测点分布

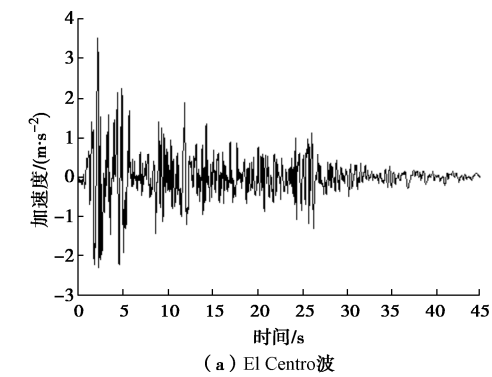
Fig. 3 FLAC model and monitoring points

表 2 预应力锚索数值模拟参数

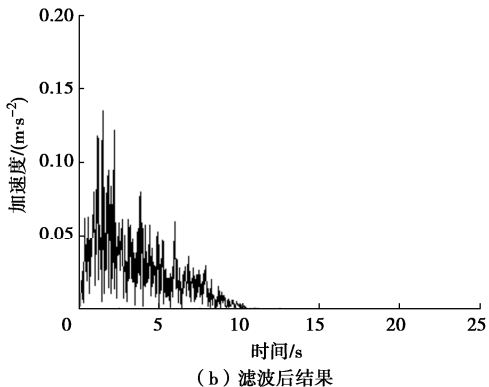
Table 2 Simulation parameters of prestressed anchor cable

参数	取值	参数	取值
等效锚索直径/m	2.67×10^{-2}	水泥浆剪切刚度/Pa	3.28×10^9
横截面积/m ²	5.6×10^{-4}	水泥浆黏结强度/(N·m ⁻¹)	1.47×10^6
锚索弹性模量/(N·m ⁻²)	2.00×10^{11}	注浆孔直径/m	0.15
屈服强度/N	9.16×10^5	水泥浆外圈周长/m	0.471

数值模拟步骤如下：①生成地层，形成初始地应力；②施工路堑边坡，边开挖边施工预应力锚索、生成装配式预制梁，施加预应力，计算至平衡；③在模型底部输入不同峰值加速度的 El Centro 地震波，以分析边坡及框架梁自身的地震响应，如图 4（a）所示。



(a) El Centro波



(b) 滤波后结果

图 4 输入地震动及其处理

Fig. 4 Input seismic waves and filting

地震动力学分析中，可能出现输入加速度时程曲线积分后最终地震速度和位移不为零的现象，因此需要进行基线校正^[14]，此外考虑到地震波高频部分对于模拟精度的影响以及高频在岩土介质中的快速衰减，将输入地震动进行滤波处理，滤波后的加速度频谱如图 4（b）所示。

2 地震强度对装配式框架梁的影响

为明确利用新型装配式锚索框架梁结构加固边坡在不同地震强度下的响应规律，将 El Centro 波进行调幅，分别对峰值加速度进行调幅为 0.1g，0.2g，0.3g，0.4g 并输入分析模型，分析加固后边坡与框架梁加固体系的动力响应。

2.1 边坡位移响应对比分析

输入地震波 6 s 时，预制梁加固边坡的位移模式对比如图 5 所示。可以看出，预制梁加固后边坡的位移模式与无支护条件有很大不同。当未设置支护时，滑坡体在地震作用下将出现整体位移；而采用预制梁支护后，一二级边坡变形被约束，导致边坡最大变形出现在第三级边坡，且各级边坡的差异变形明显，锚固加固起到了较好的效果，总体上地震过程中的滑体位移与基岩位移差异也明显降低。

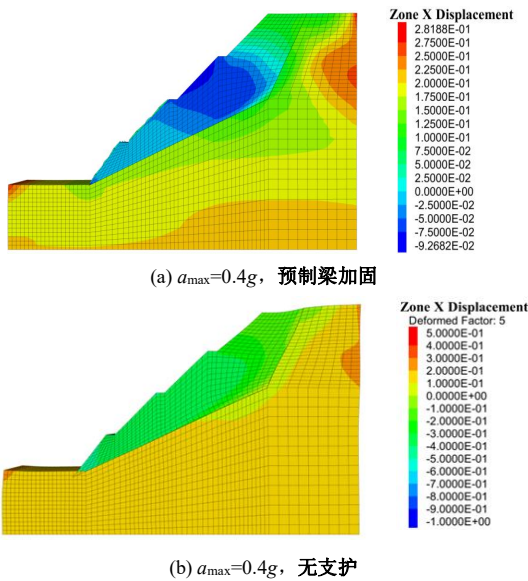


图 5 预制梁加固边坡效果对比分析（单位：m）

Fig. 5 Comparison of reinforcement effects using prefabricated beam on slope deformation

峰值加速度对于滑坡体测点和基岩测点的影响阶段不同，不同峰值加速度下滑坡体内测点水平位移时程曲线对比如图 6 所示，其中 1-1 测点位于一级坡表面，4-1 测点位于三级坡表面（见图 3）。可以看出，对滑坡体内测点而言，峰值加速度的影响在地震动输入 15 s 后较为显著，随着峰值加速度的增加，滑坡体测点的水平位移显著增大，37.5 s 后的残余水平变形不断增

大,且其趋势随着峰值加速度的增加而变得更为明显;一级边坡测点(1-1)的时程曲线上下振荡幅度相对三级边坡(4-1)较小,该现象在输入地震波后10 s内和37.5 s后的残余水平变形阶段较为明显;同时,在同峰值加速度下,一级边坡水平位移峰值及残余水平变形要小于三级边坡,此现象说明,对于多级边坡来讲,往往底部坡被加固,而出现更大位移的为紧邻加固边坡的上部边坡。

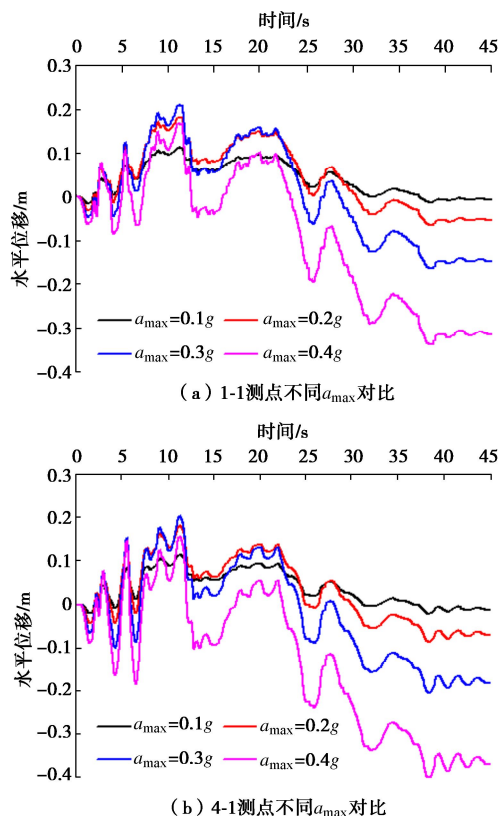


图6 不同峰值加速度下滑坡体内测点水平位移时程曲线对比
Fig. 6 Comparison of time-history curves of horizontal displacement at measuring points in landslide under different peak accelerations

图7为不同峰值加速度 a_{\max} 对边坡永久位移的影响,可以看出峰值加速度对于边坡永久位移的影响逐步加快,但不同测点边坡永久位移随峰值加速度增加的趋势存在差异。在 a_{\max} 较小时,测点6-1的残余变形相对于其余测点较大,随着峰值加速度 a_{\max} 的变大,未加固区域的最低一级边坡残余变形逐步增加(测点4-1),最终超过其余测点。总体上看,4-1测点(三级坡)永久位移受加速度的影响是最为显著的,当 a_{\max} 超过0.3g后,该点永久变形迅速增加,边坡抗震性能也迅速下降,因此可以将加固边坡上部边坡的变形测点作为其地震响应的重要观测点。布设在一级边坡坡面和坡顶处的测点1-1、2-1在各峰值加速度下的边坡永久位移较为一致,这是由于装配式框架梁对边坡的约束作用,使得被加固边坡呈现出较好的整体性,能够较好地控制边坡的不规则变形。

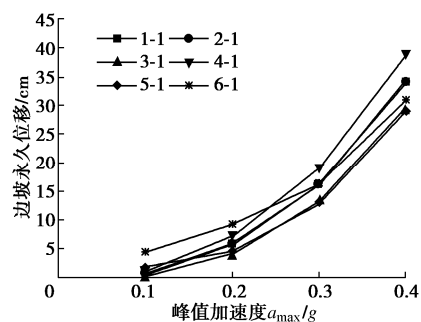


图7 不同峰值加速度对边坡永久位移的影响

Fig. 7 Influences of different peak accelerations on permanent displacement of slope

2.2 边坡加速度响应对比分析

不同地震波峰值加速度下的典型测点加速度时程曲线如图8所示,图中基岩为1-3测点,滑体为4-3测点。可明显看出,当峰值加速度较小时(0.1g),基岩测点与滑体测点的加速度时程曲线具有一致性,在0~12 s时边坡加速度的响应程度最为剧烈,最大值在12 s出现,随后虽出现多个较小峰值,但仍呈现下降趋势。由于能量的耗散以及岩体性质的差异,滑体峰值加速度要小于基岩。然而随着加速度的增加,装配式框架梁与边坡产生剧烈相互作用,装配梁反射地震波效应明显,地震加速度放大效应明显,且加速度时程曲线的波动十分剧烈。输入地震波的峰值加速度是在3 s到来的,而当 a_{\max} 为0.1g时,峰值加速度在12 s出现,随着 a_{\max} 的增加,峰值加速度将在20 s后出现,这说明装配式框架梁加固边坡的峰值加速度响应存在滞后效应。当峰值加速度较小时,边坡加速度的峰值仅在地震后初期较为明显,后期边坡逐渐趋于稳定;当峰值加速度较大时,边坡滑体长时间处于波动状态,且边坡加速度的最大峰值在时间上分布不集中。

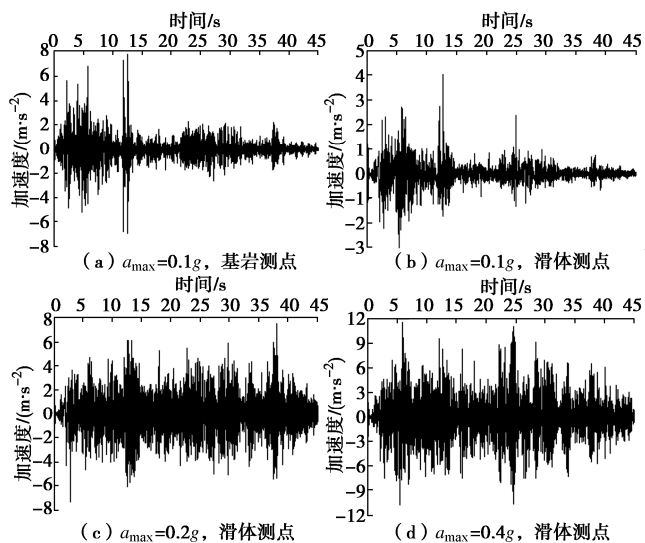


图8 不同峰值加速度下加速度时程曲线对比

Fig. 8 Comparison of time-history curves of acceleration under different peak accelerations

由上述分析可知, 加固后的边坡对于地震动具有放大效应, 即滑体测得的加速度将明显大于输入的加速度, 放大的倍数可以用加速度放大系数表征。不同峰值加速度下加速度放大效应如图9所示, 总体上加速度放大系数为2.0~6.0, 最大可达8.0, 且滑面附近的测点加速度放大系数明显升高, 随着输入地震波峰值加速度的增大, 测点的加速度放大系数有降低趋势。

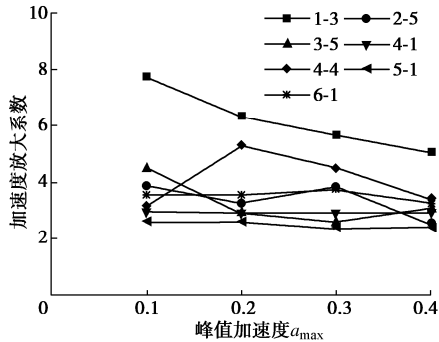


图9 不同峰值加速度下加速度放大效应

Fig. 9 Amplification effects of acceleration under different peak accelerations

2.3 框架梁内力变化对比分析

不同峰值加速度下框架梁底部拉应力时程曲线如图10所示, 梁底拉应力受峰值加速度的影响较为明显, 同一级边坡上的预制十字梁与一字梁的受影响程度存在差异。十字梁梁底应力在达到峰值加速度后的波动程度较小, 且随峰值加速度的增大其增幅度也较低, 梁底应力最大值均出现在12 s前后, 随后逐渐趋于稳定, 当峰值加速度增大为0.4g时, 其梁底应力最大值也仅为1.4 MPa, 远低于C40混凝土的抗拉强度, 因此该框架梁受力性能较好。而一字梁的梁底应力峰值呈现多峰值的特点, 且随地震波加速度的增加而迅速增加, 当峰值加速度为0.4g时, 其梁底拉应力最大值达到3.2 MPa, 接近混凝土的极限拉应力3.4 MPa, 由于梁底应力在输入地震波作用下多次达到该值, 在疲劳荷载作用下梁底可能开裂。总体上, 地震作用下对于同一级边坡的十字梁受力性能优于一字梁, 这是由于十字梁内预应力筋的数量较一字梁多, 且横梁使其整体性更好所致。

不同峰值加速度下装配梁梁底最大拉应力对比如图11所示, 梁底拉应力随输入地震波的峰值加速度几乎线性增加, 一字梁(第二排、第五排)梁底拉应力普遍大于十字梁, 且梁底应力随峰值加速度增加速率也较十字梁快。十字梁的梁底应力在各峰值加速度下都远小于极限拉应力, 相较于一字梁更为安全; 当峰值加速度较小时($a_{\max}=0.1g$), 十字梁的梁底应力均为负值, 此时十字梁梁底受压, 体现出较好抗震性, 而一字梁在各峰值加速度下, 均为受拉状态。

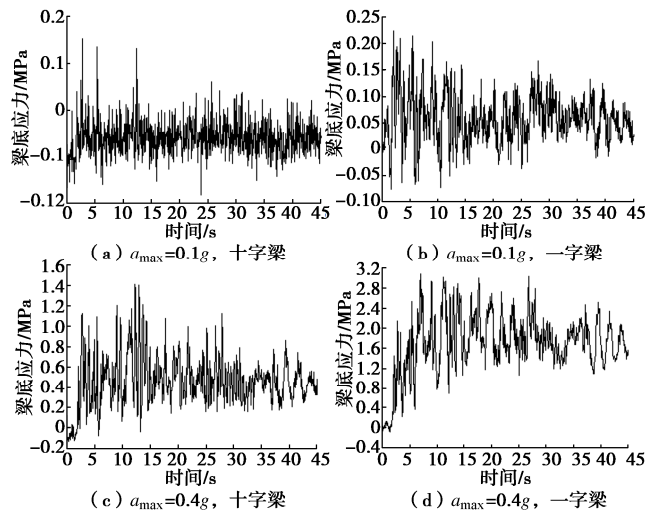


图10 框架梁梁底应力时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of tensile stress-time curves at bottom of beam

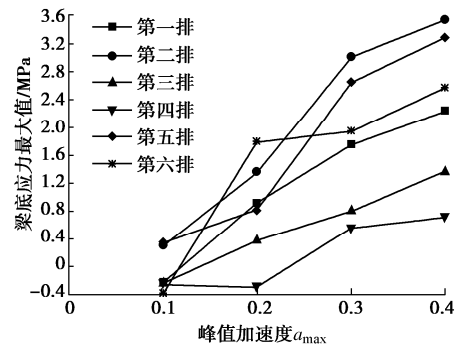


图11 不同峰值加速度下框架梁底最大应力对比

Fig. 11 Comparison of maximum tensile stresses at bottom of frame beam under different peak accelerations

3 结 论

针对采用新型装配式锚索框架梁结构加固边坡的具体工程实例, 采用非线性动力学分析方法研究了不同地震强度下锚索-预制梁体系加固边坡的动力学响应。

(1) 采用预制框架梁锚索加固后的边坡, 其滑坡体的水平位移与基岩的位移差显著降低, 框架梁加固边坡呈现了较好的整体性; 边坡的震后永久位移随峰值加速度的增加而增加, 且增速逐步加快, 总体上, 紧邻加固边坡的上级边坡的永久位移受地震强度的影响最为明显。

(2) 边坡内滑坡体与基岩测点在不同峰值加速度下的加速度响应存在差异。在不同峰值加速度下, 边坡加速度的响应均出现一定的滞后作用, 当峰值加速度较小时, 边坡加速度的峰值仅在地震后初期较为明显, 后期逐渐趋于稳定, 当峰值加速度较大时, 边坡滑坡体加速度时程曲线波动剧烈。

(3)同一级边坡上的预制十字梁与一字梁在地震作用下力学性能差异明显,一字梁的梁底应力在输入地震波后不仅数值大,波动也更明显,梁底应力随地震波加速度的增加速率也较十字梁更快,当地震动峰值加速度较大时梁底存在拉裂风险。

本文基于具体工程,采用非线性时程动力学分析方法研究了新型装配式框架梁在地震过程中的力学响应,开展振动台试验,明确其破坏模式是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] ZHANG J J, NIU J Y, FU X, et al. Failure modes of slope stabilized by frame beam with prestressed anchors[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, **26**(6): 2120-2142.
- [2] ZHANG J H, ZHOU Q W, LI F, et al. Case study of field application of prefabricated anchoring frame beam structure in slope supporting projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2022, **148**(9): 50208.
- [3] 刘 华. 预制混凝土格构锚固体系的设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (LIU Hua. Study on the PC Frame Anchor System and the Design Method Research[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [4] CHEN Z Y, WANG Z, XI H, et al. Recent advances in high slope reinforcement in China: case studies[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, **8**(6): 775-788.
- [5] ZHU H W, XIANG Q, LUO B, et al. Evaluation of failure risk for prestressed anchor cables based on the AHP-ideal point method: an engineering application[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, **138**: 106293.
- [6] YIN J H. Comparative modeling study of reinforced beam on elastic foundation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(3): 265-271.
- [7] 张军辉, 周勤伟, 黎 峰, 等. 框架梁锚固边坡支护结构研究进展综述[J]. *中外公路*, 2023, **43**(3): 17-23. (ZHANG Junhui, ZHOU Qinwei, LI Feng, et al. Review of research progress of frame beam anchored structure in slope supporting[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, **43**(3): 17-23. (in Chinese))
- [8] 董建华, 董旭光, 朱彦鹏. 随机地震作用下框架锚杆锚固边坡稳定性可靠度分析[J]. *中国公路学报*, 2017, **30**(2): 41-47. (DONG Jianhua, DONG Xuguang, ZHU Yanpeng. Reliability analysis on stability of slope reinforced by frame with pre-stress anchors under random earthquake action[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, **30**(2): 41-47. (in Chinese))
- [9] DENG D P, ZHAO L H, LI L. Limit-equilibrium analysis on stability of a reinforced slope with a grid beam anchored by cables[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(9): 6017011-6017013.
- [10] NIU J Y, ZHANG J J, CHEN F Y, et al. Experimental and numerical investigation on the seismic response of slope reinforced by frame beam and anchor cable[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, **15**(5): 1-19.
- [11] 魏少伟, 包秀明, 姚建平, 等. 基于铁木辛柯梁理论解的装配式预应力锚索框架梁受力特征分析[J]. *铁道建筑*, 2021, **61**(11): 78-81. (WEI Shaowei, BAO Xiuming, YAO Jianping, et al. Mechanical characteristics analysis of prefabricated prestressed-anchor-cable frame-beam based on timoshenko-beam theoretical solution[J]. *Railway Engineering*, 2021, **61**(11): 78-81. (in Chinese))
- [12] 魏少伟, 蔡德钧, 姚建平, 等. 装配式预应力锚索框架结构设计施工关键技术[J]. *铁道建筑*, 2022, **62**(2): 15-24. (WEI Shaowei, CAI Degou, YAO Jianping, et al. Design and construction key technology of prefabricated prestressed anchor cable frame structure[J]. *Railway Engineering*, 2022, **62**(2): 15-24. (in Chinese))
- [13] CAO L C, ZHANG J J, WANG Z J, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of the slope subjected to earthquake and rainfall[J]. *Landslides*, 2019, **16**(8): 1467-1482.
- [14] YE S H, FANG G W, ZHU Y P. Model establishment and response analysis of slope reinforced by frame with prestressed anchors under seismic considering the prestress[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, **122**: 228-234.
- [15] 王新红, 秦 川, 魏培勇, 等. 装配式锚索框架在边坡支护工程中的应用[J]. *铁道建筑*, 2023, **63**(2): 134-138. (WANG Xinhong, QIN Chuan, WEI Peiyong, et al. Application of fabricated anchor cable frame in slope support engineering[J]. *Railway Engineering*, 2023, **63**(2): 134-138. (in Chinese))
- [16] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. (Standard for Engineering Classification of Rock Mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese))