

文章编号:1671-8879(2015)01-0061-07

交通荷载作用下锚固公路边坡动力响应

言志信^{1,2}, 刘 灿^{1,2}, 彭宁波^{1,2}, 史 胜^{1,2}, 贺 香^{1,2}

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部
重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:锚杆支护边坡在交通振动下的设计主要采用拟静力的方法,无法考虑锚杆和边坡在交通振动下的影响。通过分析交通振动,借助有限差分软件 FLAC3D,对锚固公路边坡在交通振动作用下进行动力响应分析。通过对某处半山腰的盘山公路路面施加竖直向下的交通振动,研究锚杆支护公路边坡响应位移、锚杆响应轴力、坡体内响应加速度的变化。研究表明:在交通荷载振动下,未支护边坡随着振幅的增加,坡体位移量增加,增加范围在 10^{-2} mm 以内,振动影响整个坡面范围,锚杆支护后的边坡位移增加范围在 10^{-3} mm 以内,振动影响在距路面竖直距离 8 m 以内;锚杆轴力最大值出现在距路面较近的位置,在距路面 0~8 m 内,响应锚杆轴力较大,超过此范围锚杆轴力在 100 N 以内变化;公路以下坡面各层锚杆轴力最大值出现在埋深 6~7 m 范围内,公路以上坡面出现在埋深 2~3 m 处;随着埋深的增加,坡体内响应加速度迅速衰减,且响应垂直加速度的衰减幅度要略大于水平加速度的衰减幅度。

关键词:道路工程;锚杆支护公路边坡;交通振动;动力响应;数值模拟

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Dynamic response of anchoring highway slope under dynamic loads

YAN Zhi-xin^{1,2}, LIU Can^{1,2}, PENG Ning-bo^{1,2}, SHI Sheng^{1,2}, HE Xiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Environment and Disaster in Western China Attached to the
Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Currently, the design of bolting slope in traffic vibration is mainly base on pseudo-static method. This method can not consider the effect of traffic vibration on anchor and slope. After analyzing the traffic vibration, this paper did research on the dynamic response of anchoring slope under traffic vibration by means of the FLAC3D soft. Through loading vertical downward traffic vibration on the surface of an anchoring highway slope, this paper studied the dynamic response displacement of soil, the response axial force of bolts, and the response acceleration of soil. The research show that under the traffic vibration, the displacement of slope without bolts will increase with the increase of vibration amplitude, and its increment is in 10^{-2} mm. The vibration influences the whole face of slope. After anchoring the slope, its increment is in 10^{-3} mm and the vibration influence sphere is within 8 m high from the road vertically. The max axial force of

收稿日期:2014-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41372307);甘肃省建设科技攻关项目(KJXM2014-42,JK2013-20);

云南省交通厅科技项目(云交科 2010(A)06-b)

作者简介:言志信(1961-),男,湖南株州人,教授,博士研究生导师,E-mail:yzx10@163.com。

bolts appears around the road, in the distance of 0 to 8 m from the road, when the response axial force is larger, and the axial force beyond the distance will vary in the 100 N. Under the road, the max bolts axial force is in the 6-7 m depth. Above the road, the max bolts axial force is in the 2-3 m depth. With the increase of burial depth, the soil vibration in the slope reduces rapidly. And the response vertical acceleration reduces a little faster than the response horizontal acceleration. 4 tabs, 10 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; anchoring highway slope; traffic vibration; dynamic response; numerical analysis

0 引言

随着公路、铁路等交通设施的大量建设,边坡数量增加,边坡的稳定性和加固问题更加突出,从而使得边坡锚杆支护在边坡加固中获得广泛应用。锚固公路边坡长期处于交通荷载的振动环境之中,在交通荷载反复作用下,岩土体和锚固系统发生疲劳破坏,致使锚固边坡弱化^[1]。刘飞禹等研究了交通荷载作用下软基加筋道路变形机制及动力响应,未提及对边坡的影响^[2];姚海林等研究了交通荷载作用下 kelvin 地基上不平整路面的动力响应,也没有研究路边边坡的动力响应;Hardy 等假设交通附加动力为正弦方程,并研究了对路面的影响,但是未涉及路面以上边坡的动力响应问题^[3];Jones 等采用 Fourier 变换研究了矩形荷载、条形荷载作用下的地基响应,但是交通荷载不仅为矩形和条形荷载的形式^[4-5]。可见交通荷载下锚固边坡的动力特性鲜有研究^[6-8]。为此,本文以某处位于半山腰的盘山公路路堑边坡为例,采用有限差分软件 FLAC3D 的动力模块进行数值模拟,研究锚固岩质路堑边坡的动力响应,获得其动力响应规律,为边坡设计和施工提供理论和技术支撑。

1 交通荷载

汽车与公路的相互作用是一个复杂过程,交通振动对周边建筑设施和其内部构造的影响是通过地面振动波的传播产生的。汽车行驶时速范围大、轮胎阻尼随机性强、路面不平整情况等因素均会对作用力产生影响,荷载大小的瞬时性和空间分布的随机性,使得荷载的准确确定非常繁琐、困难^[9],如图 1 所示。为了方便起见,本文采用蔡汉成等基于樊秀峰等的研究成果,汽车作用在路面的动荷载反力 F 类似于正弦波,计算中以正弦波作为输入荷载,正弦波表达式为^[10-13]

$$F=F_m\sin(2\pi t/T)$$
 (1)

式中: F_m 为动反力幅值; T 为周期。

由于汽车施加于公路的是一种随机荷载,它随车重量和速度等的变化而变化,为了简化计算,峰值取 40~90 kN^[10],简化后的交通荷载曲线如下页图 2 所示。为此,本研究基于简化后的荷载施加在盘山公路模型上进行数值分析及研究。

图 2 中简化后的荷载图形与图 1 实际监测图形不同,研究是取振动峰值分别为 40、50、60、70、80、90 kN 的交通振动荷载,研究边坡的动力响应。由于在计算中简化了各个振幅的交通荷载,在计算中取具有代表性的峰值进行计算,故计算结果具有一定的代表性。此振幅范围涵盖了大部分机动车辆,具有很好的代表性。

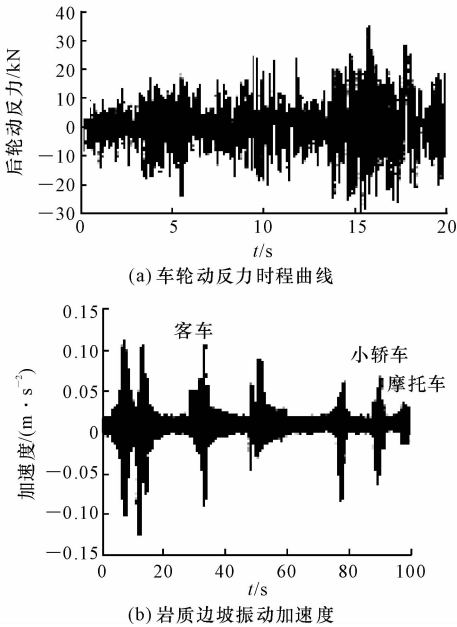


图 1 车辆后轮反力及岩质边坡响应加速度
Fig. 1 Vehicle rear wheel reaction and response acceleration of rock

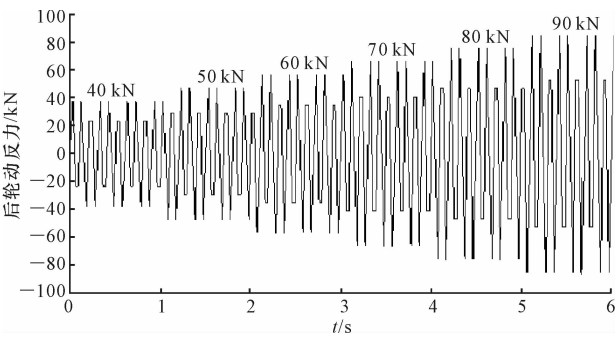


图2 输入模型的简化交通荷载
Fig.2 Simplified traffic loads of imported model

2 数值分析模型

2.1 数值分析模型

某处于半山腰的公路岩石边坡,坡高为 48 m,坡角为 45°,其数值模型采用 ANASYS 建模导入 FLAC3D 中计算,如图 3 所示,在路面上下坡面坡脚和坡肩处各设置数个监测点。2 m 宽的单元岩石边坡采用平面应变假设,岩石为均质、连续的弹塑性材料,遵从摩尔-库伦强度准则,锚杆采用 cable 单元,边坡等级为 2 级,重要性系数为 1.0。

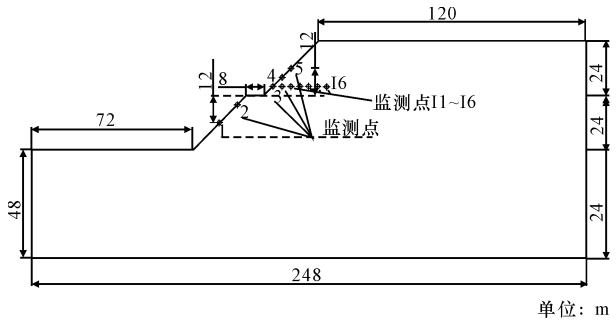


图3 边坡计算模型及监测点

其中岩石采用遵循摩尔-库伦强度准则的实体单元,并且为均质连续的弹塑性材料。锚杆采用 FLAC3D 中提供的 cable 单元。岩石的物理力学参数如表 1 所示,锚杆的物理力学参数如表 2 所示。

表 1 边坡岩土体参数

Tab.1 Parameters of soil in the slope				
密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量 E/MPa	泊松 比 ν	粘聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$
2 200	2 000	0.32	100	35

2.2 边坡稳定性计算及支护方案设计

边坡未支护时的静力安全系数为 1.05,处于欠稳定状态,边坡静力状态塑性图如图 4(a)所示。边坡处于 7 度抗震设防地区,设防地震加速度峰值为 1.5 m/s^2 。通过在模型底部输入调整后的 7 级地震

Kobe 波,得到了边坡塑性图(图 4(b))。从塑性区分布图可以看出边坡需要进行支护。最终边坡设计剖面如图 5 所示。采用全长粘结锚杆,锚杆竖向间距 4 m,横向间距 4 m,设计参数如表 2 所示,锚杆长度如表 3 所示。边坡表面喷射 100 mm 厚的素混凝土防止岩体风华。支护后算例边坡拟静力安全系数为 1.6,处于稳定状态,满足规范要求。

表 2 锚杆物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of bolts				
弹性模 量/GPa	锚筋直 径/mm	粘结强度/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	粘结刚度/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	锚孔直 径/mm
20	30	10	20	50

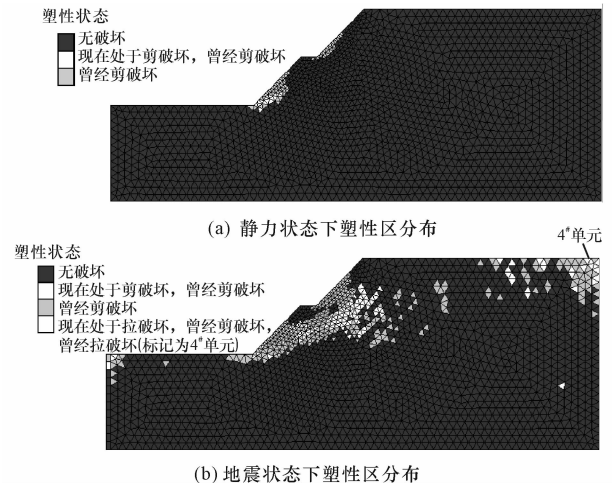


图4 边坡塑性区分布

Fig.4 Plastic areas in slope

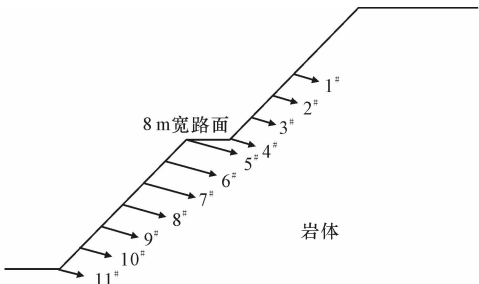


图5 边坡锚杆支护设计剖面图

Fig.5 Designed cross-sectional view of anchored slope

表 3 各层锚杆长度

Tab.3 Length of anchor bolt in each layer			
锚杆层编号	锚杆长度/m	锚杆层编号	锚杆长度/m
1#	5	7#	10
2#	6	8#	5
3#	7	9#	5
4#	8	10#	5
5#	9	11#	5
6#	10		

2.3 模型边界条件设置

在动力分析中,因边界上存在波的反射,会对动力分析的结果产生一定影响,使得模型边界的设置和处理成为关键问题之一。FLAC3D 在动力分析中提供了静态边界(黏性边界)和自由边界。本文中边坡模型的边界条件设定为:公路路面和坡顶为自由边界;左侧和右侧边界施加水平方向的位移约束,同时施加粘滞边界条件;模型底部设置水平和垂直方向位移约束,并施加粘滞边界条件。自由边界施加后,程序自动在模型主体网格周围生成一圈自由场网格,如图 6 所示。模型大小至少应满足静力条件下的计算精度,计算模型为:坡脚到左端边界的距离为坡高的 1.5 倍,坡顶到右端边界的距离为坡高的 2.5 倍,上下边界总高为坡高 2 倍^[14]。先进行静力计算,再进行动力计算。交通振动荷载竖直向下施加于公路路面。施加 40 kN 振幅交通振动波后检测坡脚处检测点的振动加速度,检测到岩体振动波形图 7 类似于图 1,说明交通振动波已经加载,边界条件设置正确。

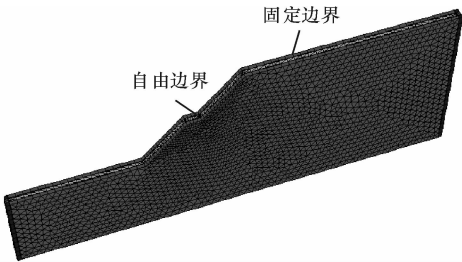


图 6 自由边界施加后的模型
Fig. 6 Model with free-field boundary

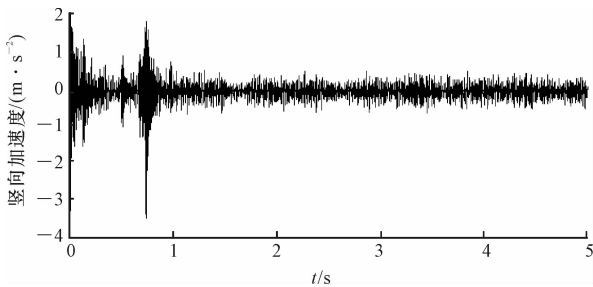


图 7 监测波形
Fig. 7 Form of wave

3 不同振幅交通荷载作用下锚杆支护边坡响应分析

3.1 交通振动对坡体位移的影响

目前,还没有比较成熟和公认合理的方法评价交通荷载作用下边坡稳定性,但边坡稳定性与坡体位移有关,坡面位移可以在一定程度上反映边坡动力稳定性。

为此,在边坡坡面上选取 5 个监测点,位置如图 3 所示,检测边坡位移的变化,研究交通振动对锚杆支护边坡的动力响应的影响。

边坡在各种振幅交通振动波下的响应分析,主要分析坡面上监测点位移和加速度值在锚杆支护下的前后变化。为了探讨交通振动波振幅的影响,将每种波的输入振幅分别调整为 40、50、60、70、80、90 kN。计算选取 5 个监测点,其监测点在锚杆支护前后的竖直方向位移,如表 4 所示。

表 4 监测点响应位移
Tab. 4 Response displacement of soil

工况 序号	交通波 振幅/kN	竖直位移/mm									
		监测点 1		监测点 2		监测点 3		监测点 4		监测点 5	
		未支护	支护	未支护	支护	未支护	支护	未支护	支护	未支护	支护
1	40	11.99	2.460×10^{-3}	30.18	5.824×10^{-3}	37.23	3.580×10^{-3}	46.94	1.916×10^{-3}	53.24	3.383×10^{-3}
2	50	12.02	2.468×10^{-3}	30.22	7.263×10^{-3}	37.25	4.444×10^{-3}	46.97	1.933×10^{-3}	53.28	3.422×10^{-3}
3	60	12.07	2.498×10^{-3}	30.25	8.703×10^{-3}	37.28	5.300×10^{-3}	47.00	1.922×10^{-3}	53.31	3.436×10^{-3}
4	70	12.13	2.540×10^{-3}	30.28	1.014×10^{-2}	37.31	6.108×10^{-3}	47.04	1.896×10^{-3}	53.36	3.429×10^{-3}
5	80	12.18	2.582×10^{-3}	30.32	1.156×10^{-2}	37.34	6.966×10^{-3}	47.08	1.875×10^{-3}	53.40	3.417×10^{-3}
6	90	12.26	2.690×10^{-3}	30.37	1.297×10^{-2}	37.37	7.877×10^{-3}	47.12	1.780×10^{-3}	53.45	3.335×10^{-3}

从表 4 可以看出,锚杆支护边坡的加固作用是有效的,锚杆支护使坡体位移从 10^{-2} m 降到了 10^{-6} m,显著降低了坡体位移量,有效起到了加固作用。研究得出,未支护边坡在交通荷载作用下的坡体位移量与交通荷载振幅的变化(40~90 kN)的关系,在公路向下坡面随着振幅的增加而逐渐增大,但增大量也在 10^{-2} mm 数量级上,变化不是很大。

研究振幅为 40 kN 和 90 kN 这 2 种情况下监测点 4 的位移量得出,振幅增大量为 125%,位移增大量为 0.45%。总体得出,未支护边坡在交通荷载振幅变化下,随着振幅的增大,位移微弱增大,但增大量在 10^{-2} mm 数量级上。交通荷载对未支护边坡影响整个边坡坡面范围。支护后的边坡位移量随着振幅的增大而增大,当振幅增量由 40 kN

增大到 90 kN 时,在公路向下坡面距路面竖直距离为 12 m 的监测点 1 位移量相应的从 2.460×10^{-3} mm 增加到了 2.690×10^{-3} mm,增幅为 9.35%;距路面竖直距离为 4 m 的监测点 2 增幅为 112.70%;在公路向上坡面上距路面 4 m 的监测点 3 增幅为 120.03%,但是分别距坡面 8 m 和 12 m 的监测点 4 和 5 出现了位移量减小的现象。通过对比锚杆未支护前的各个工况计算结果,说明交通

荷载对坡体的影响范围减小。锚杆支护能有效地减小交通荷载的影响范围,使其控制在 8 m 内的范围。

3.2 交通振动对锚杆的影响

此边坡在静力条件下是基本稳定的,但当边坡处于地震时是不稳定的,如图 2 所示。锚杆在静力条件下受力很小^[15-16]。不同振幅的交通振动下,监测到锚杆轴力如图 8 所示。

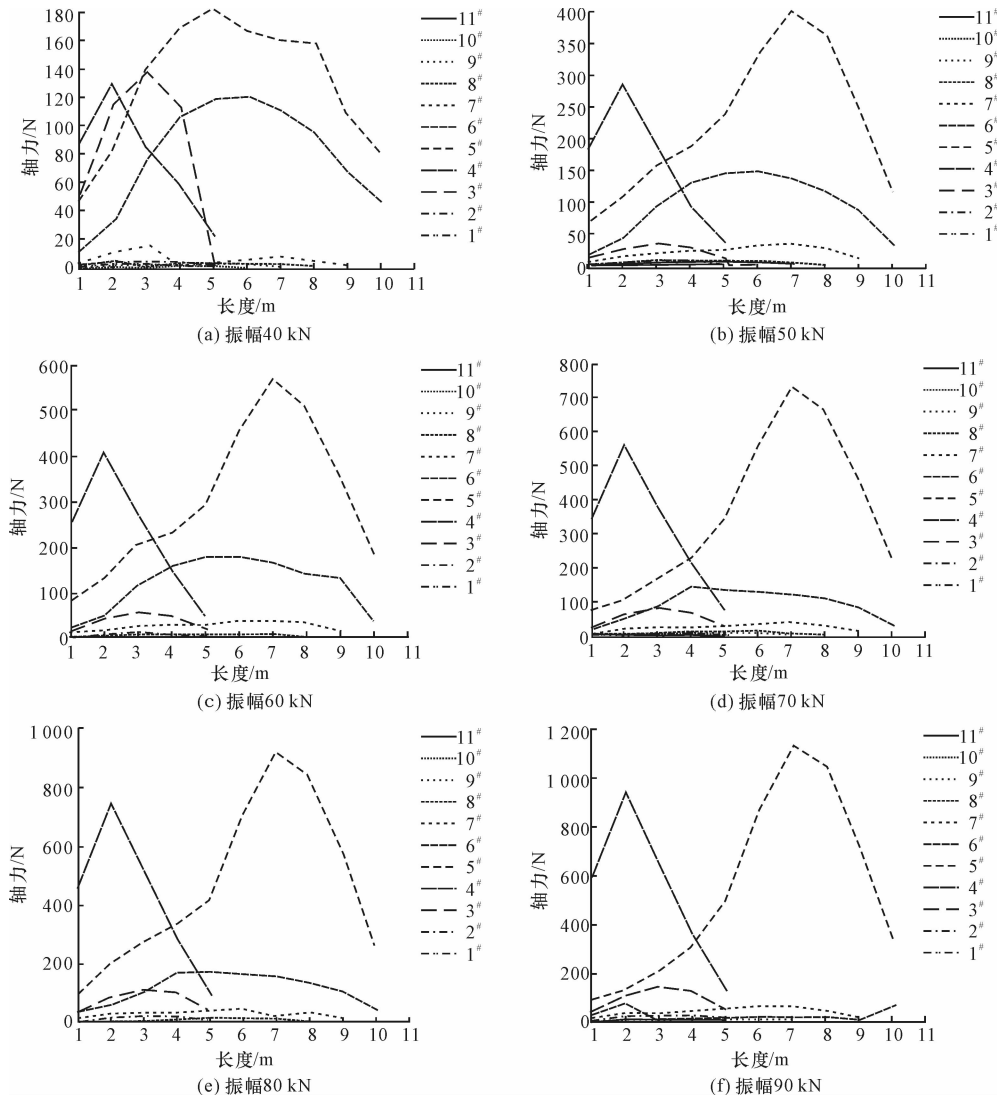


图 8 不同锚杆层的锚杆轴力变化
Fig.8 Changes of anchoring bolt force

从图 8 可以得出,锚杆最大轴力发生在锚固在路面的第 5 层锚杆上。随着振幅的增加,最大锚杆轴力从 180 N 增加到 1 141 N,且最大值出现在锚杆埋深 6~7 m 处。研究得出,距路面竖直距 0~8 m 内,锚杆轴力较大,竖直距离超过 8 m 后,锚杆轴力在 0~100 N 内变化。锚固在公路向上坡面上的锚杆轴力最大值出现在埋深为 2~3 m 处。

3.3 交通振动对坡内响应加速度的影响

为监测坡内动力响应,在距公路路面竖直距离为 4 m 的位置,从坡面向内水平方向设 6 个监测点 (I1—I6),每 4 m 设 1 个。计算后提取各个监测点的水平和竖直峰值加速度,如下页图 9 所示。

从图 9 可以明显看出,各个监测点的最大水平和垂直加速度随着距坡面水平距离的增大而减小,

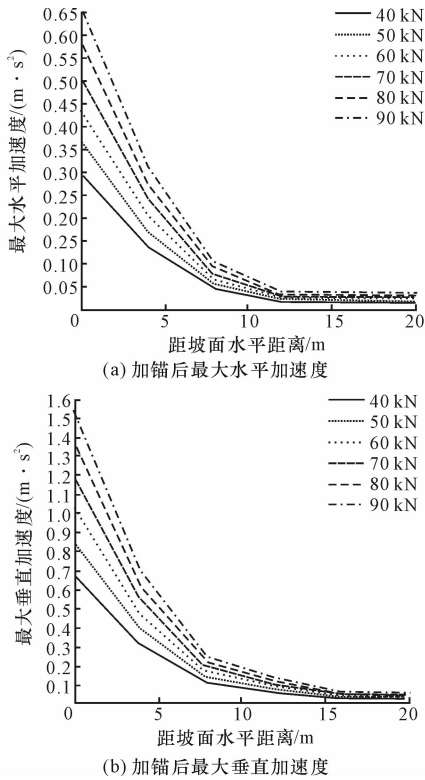


图9 坡内不同荷载下最大加速度与监测点距坡面关系
Fig.9 Relationship between the max acceleration and

the distance from slope surface to monitoring points in slope
直至衰减为较小值。交通荷载越大,曲线的斜率越大,即距离交通振动源越近的点响应越剧烈,距离交通荷载源越远的点响应越小。随着距交通荷载源距离的增加,响应加速度迅速衰减。同时研究响应水平加速度衰减幅度:交通荷载最大振幅为90 kN时,监测点在坡面时响应最大水平和垂直加速度分别为0.290 4 m/s^2 和0.683 6 m/s^2 ,此时位于坡内距坡面20 m处的监测点响应加速度分别为0.016 31 m/s^2 和0.027 19 m/s^2 ,衰减幅度分别达到了94.4%和96.0%。由此可见坡体在交通振动的作用下,随着埋深的增加,坡体内单元响应加速度衰减较快,且响应垂直加速度的衰减幅度要略大于水平加速度的衰减幅度。同时研究得出在埋深达到10 m以后,响应振动加速度衰减消失。

通过对比京津塘高速公路K89+600路段的交通振动响应^[17],验证数值计算结果。在距路肩不同距离处的4个测点,各测点同步测量,同时记录20 min内的最大振动级,如图10所示。对比得出,随着距离的增加振动快速衰减,且近距离衰减梯度较大。此结论与数值计算结果基本一致。

4 结 语

(1)未支护边坡在交通荷载振动下,随着交通振

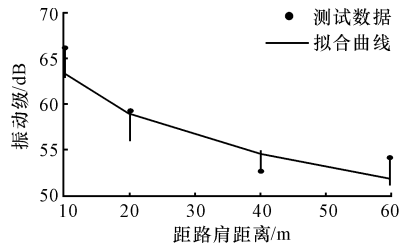


图10 京津塘高速公路距路肩不同距离处的振动
Fig.10 Vibration of different off-shoulder distances of
Jing-Jin-Tang freeway

幅在40~90 kN变化,振幅增大,坡体位移增大,但是变化量在 10^{-2} mm的数量级上,且影响整个坡面。锚杆支护后的边坡在交通荷载振动下,随着振幅的增大,位移量增大,增大量在 10^{-3} mm数量级上,且支护后交通振动影响范围控制在8 m范围内。

(2)锚杆支护边坡在交通振动下,锚杆轴力最大值出现在锚固在路面的锚杆中,且在距路面竖直距离0~8 m内锚杆轴力较大,超过8 m后锚杆轴力在100 N以内变化。公路以下坡面,锚杆最大轴力出现在埋深6~7 m处,公路以上坡面,锚杆最大轴力出现在埋深2~3 m处。

(3)在交通振动作用下,锚杆支护边坡随着埋深的增加,坡体内响应加速度衰减,且响应垂直加速度的衰减幅度要略大于水平加速度的衰减幅度。

参考文献:

References:

- [1] 敬少群,吴云,乔学军,等. GPS时间序列及其对昆仑山口西8.1级地震的响应[J]. 地震学报,2005,27(4):394-401.
JING Shao-qun, WU Yun, QIAO Xue-jun, et al. GPS time-series and its response to Ms=8.1 Kunlunshan earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(4):394-401. (in Chinese)
- [2] 刘飞禹,蔡袁强,徐长节. 交通荷载作用下软基加筋道路变形机制研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):129-134.
LIU Fei-yu, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Mechanisms of reinforced pavements on soft clay under traffic loading[J]. Rock and Mechanics, 2009, 30(1):129-134. (in Chinese)
- [3] Hardy M S A, Cebou D. Importance of speed and frequency in flexible pavement response[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(3):46-52.
- [4] Jones D V, Petyt M. Ground vibration in the vicinity

- of a rectangular load on half-space[J]. Journal of Sound and Vibration,1993,166(1):141-159.
- [5] Jones D V, Petyt M. Ground vibration due to a rectangular harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration,1998,212(1):61-74.
- [6] 张友葩,高永涛,王杰林. 动荷载下边坡的失稳分析[J]. 北京科技大学学报,2003,25(2):110-116.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WANG Jie-lin. The analysis of slope instability under dynamic load[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2003,25(2):110-116. (in Chinese)
- [7] 金亮星,李 建. 高速铁路路堑岩质边坡的动力响应分析[J]. 振动工程学报,2008,21(4):354-358.
JIN Liang-xing, LI Jian. Dynamic response analysis of cutting rock slope under high speed train vibration load[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21 (4):354-358. (in Chinese)
- [8] 简文斌,胡志忠,樊秀丽,等. 边坡对循环荷载的动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2562-2567.
JIAN Wen-bin, HU Zhi-zhong, FAN Xiu-li, et al. Study on dynamic response of slope under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(12):2562-2567. (in Chinese)
- [9] 叶四桥,唐红梅,李 明. 汽车荷载对滑坡稳定性的影响分析[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(5):106-109.
YE Si-qiao, TANG Hong-mei, LI Ming. Analysis of the influence on stability of slope under traffic load [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5):106-109. (in Chinese)
- [10] 蔡汉成,言志信,王群敏,等. 交通荷载作用下边坡动力响应数值分析[J]. 西北地震学报,2010,32(3):220-225.
CAI Han-cheng, YAN Zhi-xin, WANG Qun-min, et al. Numerical analysis of slope dynamic response under traffic loads[J]. Northwestern Seismological Journal,2010,32(3):220-225. (in Chinese)
- [11] 樊秀峰,简文彬. 交通荷载作用下边坡振动特性分析[J]. 岩土力学,2006,27(增1):1197-1201.
FAN Xiu-feng, JIAN Wen-bin. Analysis dynamic vibration response of slope under traffic loads[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(S1):1197-1201.
- [12] 叶四桥,唐红梅,肖盛燮,等. 汽车荷载对滑坡稳定性影响分析[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(5):106-109.
YE Si-qiao, TANG Hong-mei, XIAO Sheng-xie, et al. Analysis on effect of traffic loads on landslide stability [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5):106-109. (in Chinese)
- [13] 蒯行成,吴朝辉,李永红. 车辆振动瞬态分析及动荷载[J]. 中南公路工程,2004,29(3):41-44.
KUAI Xing-cheng, WU Zhao-hui, LI Yong-hong. Transient analysis of vehicle vibration and dynamic loads[J]. Journal of Central South Highway Engineering,2004,29(3):41-44. (in Chinese)
- [14] 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]. 岩土力学与工程学报,2009,28(8):1714-1723.
ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. 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)
- [15] 言志信,张学东,张 森,等. 地震作用下边坡的共振响应研究[J]. 工程抗震与加固改造,2011,33(1):6-11.
YAN Zhi-xin, ZHANG Xue-dong, ZHANG Sen, et al. Study on seismic resonance effect of slope[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(1):6-11. (in Chinese)
- [16] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其他地质力学模式[J]. 岩土力学与工程学报,2009,28(6):1240-1248.
HUANG Run-qiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(6):1240-1248. (in Chinese)
- [17] 王彦琴,魏显威. 高速公路交通振动特性研究[C]//中船第九设计研究院有限公司. 第十一届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集. 北京:中船第九设计研究院有限公司,2009:246-248.
WANG Yan-qin, WEI Xian-wei. A study on the character of highway traffic-induced vibration[C]//Ninth Ships of He Design Institute Ltd Edit 11th National Noise and Vibration Control Engineering Conference. Beijing: Ninthships of He Design Institute Ltd, 2009: 246-248.