

DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2016.06.16

基覆边坡动力响应的模型试验研究

张青波¹, 李世海²

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 竖向地震动对地震边坡稳定性有很大影响, 基于此, 设计了基覆边坡的模型试验(水下爆炸振动), 对界面光滑无支挡结构(A坡)、界面光滑有支挡结构(B坡)及界面粗糙无支挡结构(C坡)三种类型基覆边坡概化模型的破坏模式和竖向加速度响应特征进行了研究。利用加速度比这个无量纲量描述测点加速度响应的主要特征, 在此基础上对比分析三种结构的基覆边坡的破坏模式、加速度响应特征和桩板墙的土压力分布。结果表明: 三种边坡的表层松散土体均产生碎屑流状的下滚滚动, 且C坡最明显, A, B坡沿交界面错动且在覆盖层顶部可以看到明显的下错现象; A坡动力稳定性最差, C坡最好, 加固设计中应优先考虑加固滑面; 爆炸试验中桩板墙上的动土压力峰值出现在1/3墙高处。

关键词: 基覆边坡; 动力响应; 模型试验; 水下爆炸; 坡体结构; 破坏模式; 动土压力

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8825(2016)06-0072-05

0 引言

地震作用是诱发山体崩塌滑坡的一个重要因素。2008年汶川大地震触发了超过56000处滑坡^[1]。震后, FC Dai等^[2]通过地质调查归纳出一种断层运动直接触发滑坡的地质模型。

殷跃平^[3]认为汶川地震滑坡经历了地震抛掷—撞击崩裂—高速流滑的作用过程。为了从本质上认识和掌握强震诱发地质灾害的成因机理, 必须对强震条件下斜坡的动力响应规律有充分的认识和了解^[4]。

国内有关学者使用振动台试验对不同岩性组成、不同几何形状、不同输入参数条件下的单面及双面边坡进行了系统的研究^[5-10], 分析了各类边坡的破坏模式和响应加速度峰值的地形放大效应等。

董金玉等^[11]进行了顺层边坡模型的大型振动台试验, 对不同输入参数下的加速度峰值分布及破坏特征进行了研究。

艾畅^[12]、赵安平^[13]等利用爆破振动试验, 研究了近场地震作用下顺层边坡和基覆边坡的破坏模式

及支挡结构对边坡稳定性的影响。

汶川大地震记录中的竖向振动峰值接近甚至超过了水平振动峰值, 边坡动力稳定性分析中必须考虑竖向地震动的影响。

王秀英等^[14]利用汶川大地震的地震动记录加速度峰值数据和收集整理的崩滑点数据, 分析了加速度峰值和滑坡灾害程度之间的相关性。Shin Aoi等^[15]则由强震记录资料指出了地震动记录中竖向加速度的不对称性, 并提出了“蹦床模型”来解释强地面垂直加速度的不对称现象。

描述地震动的参数很多, 上述研究都是用水平或竖向加速度响应峰值作为响应分析的主要对象。然而物理试验或者地震动记录的加速度响应时程曲线十分复杂, 仅仅通过加速度峰值并不能反映质点运动的全部特征。

当前地震触发滑坡形成机制的研究成果, 多数停留在推断或“概念模型”阶段, 需要进一步开展现场调研与物理、数值模拟来验证^[4]。

本文利用模型试验(水下爆炸振动)对基覆边坡在近源动荷载作用下的破坏模式和竖向加速度响应特征进行了研究, 再现了竖向地震动的不对称现象, 首次利用蹦床模型分析了竖向加速度响应的典型特征, 并采用加速度比这个无量纲量描述测点响应的主要特征, 在此基础上, 对比分析三种结构基覆边坡的破坏模式、加速度响应特征和桩板墙的土压力

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731506); 铁道部科技研究开发计划项目(2008G028-D-2)

作者简介: 张青波(1986-), 男, 河北保定人。工程师, 博士, 主要从事路基工程设计与研究工作。E-mail: qingbo-4494@163.com。

分布。

1 试验方案

主试验台由钢筋混凝土底座、槽钢及水池构成。C40 钢筋混凝土底座用于模拟现场边坡的复杂基岩体；槽钢置于试验槽底部，用来放置炸药。考虑地震波产生的动土压力远大于静土压力，经过量纲分析，试验原型与模型的无量纲量应相等，包括： $\frac{v}{C}$ ， $\frac{aL}{C^2}$ ， $\frac{Lf}{C}$ ， $\frac{Ct}{L}$ ， $\frac{\rho Cv}{\sigma_t}$ ， $\frac{\rho Cv}{c}$ ， φ 。其中： a 为特征加速度； L 为特征长度； C 为特征波速； f 为特征频率； t 为特征时间； v 为特征速度； σ_t 为特征抗拉强度； c 为特征黏聚力； φ 为特征内摩擦角。主试验台坡高 1.5 m，坡度 40°^[11-12]。

不同基覆边坡结构示意图，见图 1。

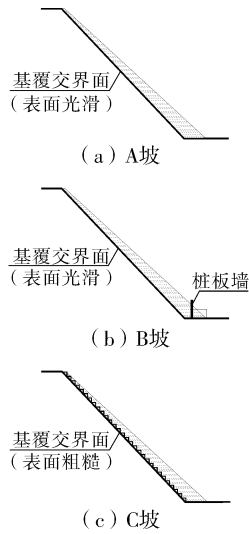


图 1 不同基覆边坡结构示意图

对图 1 中三种结构的基覆边坡进行爆炸荷载试验，三种模型的覆盖层材料均为工程沙(平均粒径 1~2 mm)，覆盖层厚度相同(顶部 5~10 cm)，单一坡面形态，覆盖层表面坡度 32°~35°。

A 坡基覆交界面光滑、坡脚无支撑结构。

B 坡基覆交界面光滑、坡脚有桩板墙支撑结构，其中桩、板采用混凝土浇筑而成，桩尺寸为 6 cm×6 cm×40 cm(有 4 cm 伸入平台预留桩孔中)。板尺寸为 2 cm×24 cm×150 cm，板顶部与桩齐平，试验时在平台表面铺设覆盖层至高出桩底部(≥11 cm)。

C 坡基覆交界面粗糙(试验前通过在基覆交界面上随机粘贴粒径为 2~5 cm 的碎石实现)、坡脚无支撑结构。

本文重点关注竖向地震加速度对基覆边坡破坏过程的影响，加载位置选择在模型底部，加载点及

测量点位置示意，见图 2。

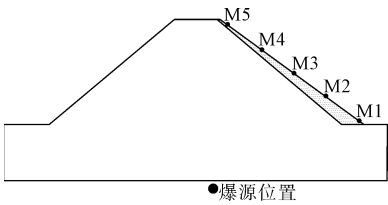


图 2 加载点及测点位置示意

炸药在槽钢内爆炸后，水池中的水中产生冲击波，自试验台底部向上传播，导致覆盖层产生破坏。模型试验不关心地震波的产生和传播至覆盖层之前的传播过程，以覆盖层加速度响应峰值作为评判原型地震烈度的依据，试验采用逐级加载方式，正常情况下分八级加载。各级加载药量，见表 1。

表 1 逐级加载药量

级数	雷管/个	导爆索/m
1	2	0
2	4	0
3	1	1
4	1	1
5	1	3
6	1	4
7	1	5
8	1	6

注：导爆索药量约 5 g/m，雷管药量约 0.8 g/个。

在边坡覆盖层表面均匀布置 5 个加速度传感器，由下到上编号 M1~M5(图 2)。试验过程中，利用高速摄像机记录边坡覆盖层表面的正面破坏情况，且在正面均匀布设 6×5 个跟踪元件。B 坡跟踪元件布置情况，见图 3。

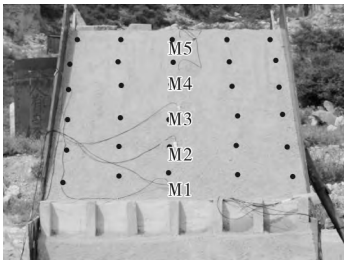


图 3 B 坡跟踪元件布置情况

按照几何相似常数为 25，本试验的原型及模型参数，见表 2。

表 2 支撑结构几何相似参数

名称	桩				板	
	长	宽	高	间距	厚	高
原型	1.50	1.50	9.00	6.00	0.50	6.00
模型	0.06	0.06	0.36	0.24	0.02	0.24

2 试验结果分析

2.1 基覆边坡表面破坏情况

基覆边坡的破坏模式受坡体结构和覆盖层材料特性的影响显著。不同基覆边坡结构破坏示意,见图4。

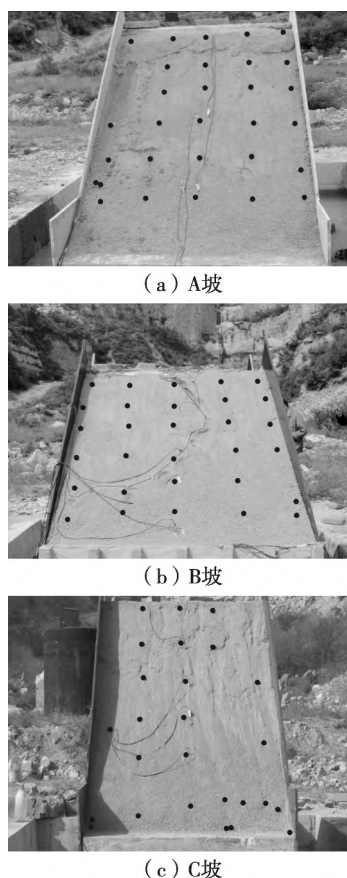


图4 不同基覆边坡结构破坏情况

由图4可知: A, B 坡结构面较光滑, 覆盖层顶部可以看到明显的下错现象。B 坡试验过程中的正面观察到的破坏过程为:

- (1) 中上部少量碎屑流;
- (2) 中上部碎屑流, 顶部错动;
- (3) 和 (4) 中部碎屑流;
- (5) 中上部碎屑流, 顶部明显错动;
- (6) 中上部明显碎屑流, 顶部错动, 产生中上部分裂缝;
- (7) 部分碎屑流, 左侧坡体下滑, 裂缝增大并向下游延伸, 滑体区域形成;
- (8) 碎屑流, 滑体进一步滑动。由于 C 坡基覆交界面进行了粗糙处理, 试验过程中基本看不到覆盖层任何部分沿交界面的下滑。三种坡试验中的一个共同破坏现象是表层松散土体在动力作用下产生碎屑流状的下滚滚动, 其中 C 坡的碎屑流现象较 A,

B 坡更加明显, 大量跟踪元件在试验过程中产生下滑、滚动。

2.2 坡面测点的加速度响应

以 A 坡第 7 次试验(1 个雷管 + 5 m 导爆索) M3 测点的竖向加速度时程曲线为例, 描述测点响应的主要特征, 规定以向下为正, 见图 5。

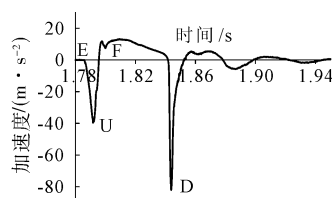


图5 A 坡第 7 次试验 M3 测点加速度时程曲线

从图 5 中可以看出: 竖向加速度时程曲线具有明显的不对称性, 同地震监测到的加速度曲线^[15]一致, 日本学者 Shin Aoi 提出了蹦床效应模型解释地震中地表竖向运动的不对称特性。据此可对测点运动初期的加速度曲线特征分三个阶段进行解释:

- (1) 在爆炸荷载作用下, 基岩给覆盖层一个冲击荷载, 覆盖层质点获得一定的初速度向上运动;
- (2) 由于材料性质的差异基覆材料在交界面处分离, 时间 1.80 ~ 1.84 秒之间测点的加速度基本同重力加速度相等;
- (3) 覆盖层在重力作用下经过一定时间落到基岩上受到第二次冲击。

爆炸产生的能量在传播过程中逐渐耗散, 加速度曲线幅值逐渐减小, 对称性逐渐增强直至到达静力平衡状态。

分析可知, 图 5 曲线中 EUF 的面积表征了试验过程中监测点的初始速度大小。试验结果统计分析表明: 初始速度的大小基本随药量增大而增大, 其中 A 坡测点的初始速度值为 0.03 ~ 0.29 m/s, B 坡测点的初始速度值 0.02 ~ 0.30 m/s, C 坡测点的初始速度值为 0.03 ~ 0.30 m/s。其中, B 坡测点初始速度, 见图 6。

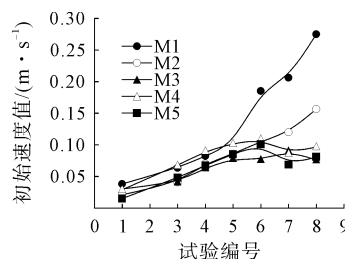


图6 B 坡测点初始速度

试验中自由落体时间远大于冲击荷载作用时间, 因此可用 U, D 两点的时间差表征自由落体的周期,

用 E, F 两点时间差表征冲击作用时间脉宽。试验结果统计表明: 周期随药量的增大而逐渐增大, A 坡测点为 19 ~ 55 ms, B 坡测点为 19 ~ 53 ms; C 坡测点值为 10 ~ 63 ms。其中, B 坡测点周期, 见图 7。

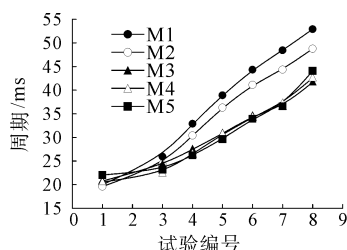


图 7 B 坡测点周期

以往的动力边坡响应分析中, 多以加速度峰值作为统计指标, 但试验记录加速度响应时程曲线是十分复杂的, 典型加速度时程曲线(图 5)表明, 使用整个试验过程中的加速度峰值是不能描述响应曲线特征的。结合蹦床效应模型及对试验数据统计分析, 本文进一步提出了 1 个无量纲量作为描述加速度响应曲线特征的指标: 加速度比 \bar{A} , 其计算式为

$$\bar{A} = \frac{a_p}{a_v} \quad (1)$$

按式(1)对试验监测到的加速度时程曲线进行处理, 得到不同测点加速度比变化曲线, 见图 8。

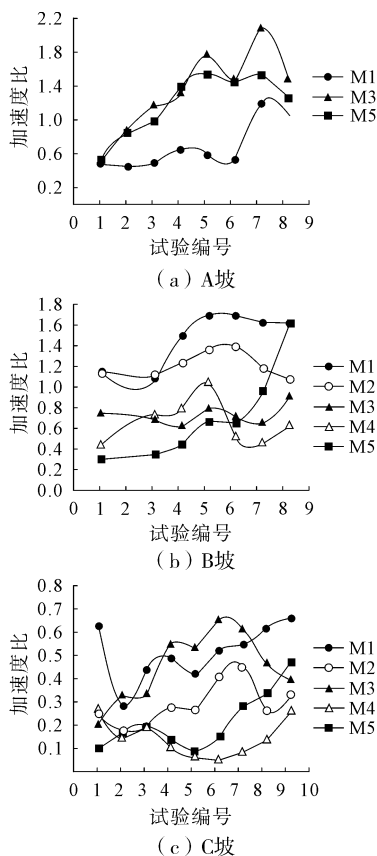


图 8 不同边坡测点加速度比的变化曲线

由图 8 可知: 随着药量的增加, 加速度比整体也呈现增大的趋势, 试验前期坡体受损小, 响应规律趋势性好, 试验后期坡体产生的破坏较严重, 响应变化也较为复杂。

B 坡测点 4 位于滑体内部, 测点 5 位于裂缝处。测点 1, 2, 3, 4 的变化趋势均为先增大后减少再增加, 且测点 4 在第 5, 第 6 次试验中正好由最高点迅速降到低点, 说明加速度比在一定程度上能够反映边坡破坏状态。

对比三种坡体结构的不同测点的加速度比的分布情况可知, A 坡上部大于下部、B 坡下部大于上部、C 坡变化复杂, 表明加速度比的分布在一定程度上也能反映坡体结构特征。

试验中不同测点的响应值具有一定的离散性, 为从宏观上衡量坡体结构对加速度响应的影响, 将一次试验中所有测点的统计值进行平均, 再代入式(1)进行计算, 求得三种坡体结构在不同加载等级时的平均加速度比变化曲线, 见图 9。

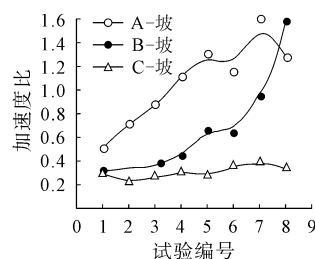


图 9 不同结构的平均加速度比的变化曲线

由图 9 可以看出: 加载幅值越大, 边坡破坏越严重, 加速度比越大, 因此可以用加速度比作为衡量坡体的动力稳定性的一个定量参数, 即动力响应加速度比越大, 边坡的动力稳定性越差。

A, B 坡的加速度比基本随药量的增大而增大, 同等加载水平下 C 坡的加速度比最小, A 坡的加速度比最大。

从破坏现象和加速度比响应综合来看, A 坡动力稳定性最差, C 坡动力稳定性最好, 因此在进行边坡支护设计时, 应将边坡加固成 C 坡的形式, 即优先考虑加固滑面, 其次考虑加固坡脚。

2.3 桩板墙背后土压力的分布

试验过程中对桩板墙的土压力进行了监测, 为便于统一分析不同试验中的土压力分布特征, 对动土压力值进行了归一化处理, 即用各点动土压力峰值除以所有点的峰值中的最大值得到动土压力相对值。

不同试验中动土压力相对值沿墙高的分布情况, 见图 10。

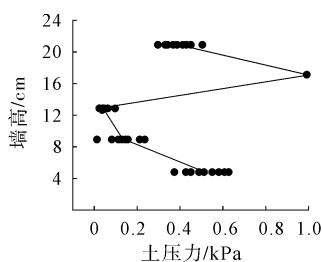


图10 桩板墙动土压力分布

模型试验中,挡土墙上的动土压力峰值由墙顶到墙底呈现倾斜的“Z”形分布,即:由墙顶向下逐渐增大,到 $H=17\text{ cm}$ 处出现峰值,此处距墙顶的距离约为 $1/3$ 墙高,峰值点以下动土压力峰值随深度增加迅速减小,到 $H=13\text{ cm}$ 处达到最小值, $H=13\text{ cm}$ 到墙底之间的动土压力峰值随深度增加又逐渐增大。

3 结论

本文采用水下爆炸逐级加载的方式,对不同结构形式的基覆边坡的破坏模式和动力响应进行了研究,得出以下结论:

(1) 基覆边坡的破坏模式受坡体结构和覆盖层材料特性的影响,表层松散土体在动力作用下产生碎屑流状的下滚滚动是基覆类动力边坡的破坏共性,A,B坡覆盖层顶部可以看到明显的下错现象,C坡的碎屑流现象较A,B坡更加明显。

(2) 坡体结构对基覆边坡的竖向加速度响应有重要影响。从破坏现象和加速度比大小衡量不同结构坡体的动力稳定性,A坡最差,C坡最好,设计应优先考虑加固滑面。

(3) 试验中,桩板墙上的动土压力峰值出现在 $1/3$ 墙高处。

(4) 试验结果有助于认识动力边坡破坏及结构受力形式,但由于地质体的初始状态较难测量,地震荷载的具体形式不可预见,试验结论有待今后工程实践的进一步检验。

参考文献(References):

- [1] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40 (4): 883-895.
- [2] Dai F C, Tu X B, Xu C, et al. Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May, 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Geomorphology, 2011, 132 (3/4): 300-318.
- [3] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 29-38.
Yin Y P. Features of landslides Triggered by the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (1): 29-38.
- [4] 李为乐, 伍霁, 吕宝熊. 地震滑坡研究回顾与展望 [J]. 灾害学, 2011, 26 (3): 103-108.
Li W L, Wu J, Lv B X. Research on landslide triggered by earthquake: review and prospect [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26 (3): 103-108.
- [5] 冯文凯, 许强, 黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊1): 3124-3130.
Feng W K, Xu Q, Huang R Q. Preliminary study on mechanical mechanism of slope earthquake-induced deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S1): 3124-3130.
- [6] 许强, 陈建君, 冯文凯, 等. 斜坡地震响应的物理模拟试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41 (3): 266-272.
Xu Q, Chen J J, Feng W K, et al. Study of the seismic response of slopes by physical modeling [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2009, 41 (3): 266-272.
- [7] 肖锐铨, 许强, 冯文凯, 等. 强震条件下双面坡变形破坏机理的振动台物理模拟试验研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (6): 827-843.
Xiao R H, Xu Q, Feng W K, et al. Shaking table simulation experiment on deformation-failure mechanism of double-sides slope in condition of intense earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (6): 827-843.
- [8] 刘汉香, 许强, 范宣梅, 等. 地震动强度对斜坡加速度动力响应规律的影响 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (5): 1357-1365.
Liu H X, Xu Q, Fan X M, et al. Influence of ground motion intensity on dynamic response laws of slope accelerations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (5): 1357-1365.
- [9] Huang R Q. Slope motion response and failure under strong earthquakes: recording, monitoring and modeling [M]//Ugai K, Yagi H, Wakai A. Earthquake-Induced Landslides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 59-73.
- [10] Xu Q, Liu H X. Topographic effect on seismic slope behavior in a shaking table test [M]//Ugai K, Yagi H, Wakai A. Earthquake-Induced Landslides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 529-536.
- [11] 董金玉, 杨国香, 吴法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (10): 2977-2983.
Dong J Y, Yang G X, Wu F Q, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (10): 2977-2983.
- [12] 艾畅, 冯春, 李世海, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (9): 1825-1832.
Ai C, Feng C, Li S H, et al. Experimental research on dynamic response of consequent rock slope under seismic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (9): 1825-1832.
- [13] 赵安平, 冯春, 李世海, 等. 地震力作用下基覆边坡模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (2): 515-523.
Zhao A P, Feng C, Li S H, et al. Experimental research on seismic failure mode and supporting for slope of bedrock and overburden layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (2): 515-523.
- [14] 王秀英, 聂高众, 王登伟. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (1): 82-89.
Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. Research on relationship between landslides and peak ground accelerations induced by Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (1): 82-89.
- [15] Aoi S, Kunugi T, Fujiwara H. Trampoline effect in extreme ground motion [J]. Science, 2008, 322 (5902): 727-730.

(下转第102页)

Experimental Study on Workability of New Grouting Material for Foam Light Soil of Goaf under Highway Engineering

ZHAO Aili¹, TANG Chengyao¹, LIU Junyong^{1,2}

(1. CCCC First Highway Consultants Co. , Ltd. , Xi'an 710065 , China; 2. Shanxi Key Laboratory of Road Disaster Prevention and Reduction , Xi'an 710065 , China)

Abstract: The workability and its impact factors are determined for a new grouting material for foam light soil made by foaming modification of cement and flying ash grout commonly used for grouting in the goaf by internal experimental study. The study result shows that , under the condition of the same solid phase ratio , the fluidity of grout decreases with the decrease of water solid ratio; the liquidity of new material decreases with the increase of foam solution content; as the water solid ratio decreases and the foam solution content increases , the new material's separation rate reduces gradually; under the condition of the same solid phase ratio , the setting time of foamed light soil is shortened with the decrease of water solid ratio (water cement ratio) ; the water solid ratio (water cement ratio) has significant effect on the setting time of foam light soil. Finally , the range of the mixing ratio was proposed for of the new grouting material meeting the application property.

Key words: goaf under highway engineering; foam light soil; new grouting material; workability; water solid ratio

(上接第 76 页)

Experimental Research on Dynamic Response of Bedrock and Overburden Layer Slope

ZHANG Qingbo¹, LI Shihai²

(1. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation , Tianjin 300251 , China;
2. Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

Abstract: Vertical ground motion has great influence on the stability of seismic slopes. The model test for bedrock and overburden layer slope was designed (underwater explosion vibration) to study the failure mode and vertical acceleration response property of three types of bedrock and overburden layer slope generalization including the slope with smooth interface named A-Slope , the slope with retaining structure named B-Slope and the slope with rough interface named C-Slope. The acceleration ratio is dimensionless quantities description measuring point as main characteristic , on this basis , the comparison analysis on failure mode , acceleration response property , slab-pile wall soil pressure distribution of three structures of bedrock and overburden layer slope were performed. The comparison analysis indicated that the debris flow and rolling of loose soil was observed in every slope test of all three types , and it is the more obvious in the C-Slope tests. A-Slope and B-Slope were displaced along the intersection. The fracture at the top of slope can be clearly observed in the A-Slope and B-Slope tests. The dynamic stability of A-Slope was the worst one and C-Slope was the best one. Reinforcing the sliding surface should be considered firstly in seismic bedrock and overburden layer slopes. The peak value of dynamic soil pressure was observed at the third upper part of slab-pile retaining wall.

Key words: bedrock and overburden layer slope; dynamic response; model test; underwater explosion; slope structure; failure mode; dynamic soil pressure