

地震作用下顺层岩质边坡动力响应的试验研究

艾 畅¹, 冯 春¹, 李世海¹, 赵安平²

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于相似理论建立顺层岩质边坡力学模型, 并介绍爆炸模型试验的设计思路及试验方法。以导爆索为爆源, 通过水下爆炸模型试验, 研究近场地震作用下原型边坡的变形破坏模式以及支护结构对边坡稳定性的影响。试验结果表明, 顺层岩质边坡的在近场地震作用下的破坏主要表现为节理岩体间的层间滑动, 破坏模式为应力波导致的滑移-拉裂破坏; 重力式挡墙的压应力峰值分布随着墙高的变化呈现先增大后减小的钟形分布; 结合汶川地震现场考察及试验结果发现, 支护结构对边坡稳定性起着重要作用。

关键词: 边坡工程; 顺层岩质边坡; 爆炸模型试验; 支护结构; 应力波

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)09-1825-08

EXPERIMENTAL RESEARCH ON DYNAMIC RESPONSE OF CONSEQUENT ROCK SLOPE UNDER SEISMIC LOADING

AI Chang¹, FENG Chun¹, LI Shihai¹, ZHAO Anping²

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

Abstract: Based on the similarity theory, a mechanical model of consequent rock slope is established. The design idea and method of the explosion model test are introduced. Using detonating cord as the explosive sources, the deformation and breakage pattern of the archetype slope under near field seismic loading are studied and the effects of the retaining structure are estimated with underwater explosion model test. The test results show that the major deformation pattern of consequent rock slope near field seismic is interlayer sliding in jointed rock mass. The breakage pattern is sliding and fracturing caused by elastic wave. The distribution of the peak compressive stress of the gravity retaining wall is changed in different heights and presents bell-shaped distribution, which increases at first and then decreases. Test results and the in-situ investigation in Wenchuan after earthquake show that the retaining structures play an important role in the stability of slope.

Key words: slope engineering; consequent rock slope; explosion model test; retaining structure; elastic wave

1 引言

顺层岩体在地震或爆破力等振动影响下, 边坡

往往产生滑动, 这种失稳的力学机制属于动力学问题^[1]。大理—瑞丽铁路(大瑞铁路)地处云南省西部地区, 该地区地震活动强烈, 沿线的高黎贡山越岭工段即位于高烈度地震多发区, 且存在大量高陡顺层

收稿日期: 2010-03-29; **修回日期:** 2010-05-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500); 国家自然科学基金重点项目(10632100)

作者简介: 艾 畅(1984-), 男, 2007年毕业于中国矿业大学力学与建筑工程学院工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事地震爆炸模拟方面的研究工作。E-mail: acjordan@163.com

岩质边坡。基于以上因素，拟对大理—瑞丽铁路沿线建设进行地震影响下的爆炸模型试验分析研究，以评估沿线边坡支护结构的安全性及边坡的稳定性。

目前国内外的地震模型试验方法主要有离心机振动台试验、振动台试验及爆炸模拟试验。离心机振动台试验^[2~6]由于离心力与重力保持等效，从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似及破坏机制相同，能够再现原型的特性。离心机振动台试验对模型尺寸的大小和精度要求较高，测量方法及其技术要求严格，无法模拟边坡在复杂地震波由远至近传播中的渐进失稳情况；以实际工程为原型的报道极少，且费用较高。振动台试验在无法保证重力相似的前提下，很难到达试验所需要的高频率。

爆炸模型试验方法^[7~9]是利用爆破地震波来模拟自然地震波，按边坡在爆破地震和天然地震作用下，达到相同的动力反应为依据，就有可能设计不同频谱、幅值和持续时间的爆破地震的地面运动，模拟对应于地震烈度的等价人工合成地震的地面运动。爆炸模型试验可较好地模拟地震波由远及近的渐进破坏过程，同时解决了振动台边坡模型试验遇到的相似律问题。

对于近场地震作用，以高能量脉冲运动为特征，包含方向性效应和竖直加速度较大的特点，使结构承受高能冲击，可近似认为是纵波(P波)为主要影响因素的瞬时冲击载荷作用^[10~12]。因此本文采用爆炸模型试验的方法进行高烈度地震的模拟，以导爆索为爆源，对边坡在近场地震作用下的动力响应进行分析，同时考察边坡支护在高烈度地震作用下的稳定性。

2 爆炸试验设计

2.1 量纲分析

对于模型试验，模型与原型之间应符合相似律的要求^[13]。根据量纲分析的基本原理，爆炸模型试验中，原型与模型之间应该满足的相似律为

$$\left. \begin{aligned} (aL/c_s^2)_m &= (aL/c_s^2)_o, (c/Lf)_m = (c/Lf)_o \\ (c_s t/L)_m &= (c_s t/L)_o, (v/c_s)_m = (v/c_s)_o \\ (\rho c_s v/\sigma_t)_m &= (\rho c_s v/\sigma_t)_o, (\rho c_s v/c)_m = (\rho c_s v/c)_o \\ (\varphi)_m &= (\varphi)_o \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： a 为坡体表面的特征加速度； L 为坡体的特征长度； c_s 为边坡的特征波速； f 为坡体表面振动响应的特征频率； t 为振动的持续时间； v 为振动的特征速度； σ_t 为特征抗拉强度； c 为特征黏聚力； φ 为特征内摩擦角；下标“o”，“m”分别表示原型与模型的相关参数。

2.2 典型边坡及模型材料选取

根据汶川地震调查，筛选出典型边坡——寿江大桥岩质边坡，该边坡共4层岩土层，从表面到基岩分别为细砂土层、砂岩块碎石层、煤层和砂岩基岩；层与层之间的交界面即为滑面，寿江大桥滑坡断面如图1所示。其主要破坏形式为层间破坏导致整体滑移。

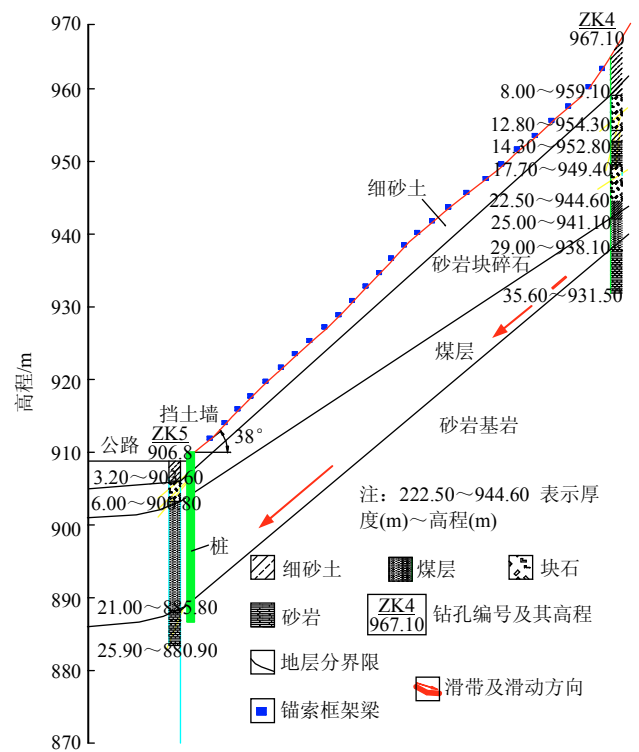


图1 寿江大桥滑坡断面图

Fig.1 Profile of consequent rock slope in Shoujiang Bridge

根据典型边坡地质岩性特点及模型材料制作的可行性，本试验边坡高度选定为40~60m，坡度为30°~45°，密度为2000~2200 kg/m³，S波波速为500~1500 m/s，P波波速为1000~3000 m/s，夹层界面的抗拉强度为0.5~5.0 kPa，黏聚力为5~30 kPa，内摩擦角为25°~40°。研究的地震烈度为VII~X(其相应的速度峰值为0.13~1.0 m/s，见表1)，频率为1~10 Hz，持续时间为10~30 s。

相似材料的选择需根据试验要求及特性^[14~17]

表 1 中国地震烈度表(节选自 GB/T 17742 - 1999)

Table 1 The seismic intensity scale in China(selected from code GB/T 17742 - 1999)

地震烈度	水平向地震加速度峰值/(m·s ⁻²)	水平向地震速度峰值/(m·s ⁻¹)
VI	0.63	0.06
VII	1.25	0.13
VIII	2.50	0.25
IX	5.00	0.50
X	10.00	1.00

进行选取; 本文采用几何缩比为 1 : 25, 顺层岩质边坡的块体、重力式挡土墙采用加气混凝土块进行模拟; 框架梁采用木制龙骨进行模拟(木质龙骨厚度较小, 以满足几何相似; 同时在龙骨各方向刻槽, 以进一步降低木质龙骨的抗拉强度, 以满足强度相似), 锚索采用细钢丝进行模拟以满足材料的几何相似。模型材料物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型材料物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of model material

模型材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	纵波波速/(m·s ⁻¹)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
加气混凝土	700	1 800	100	41

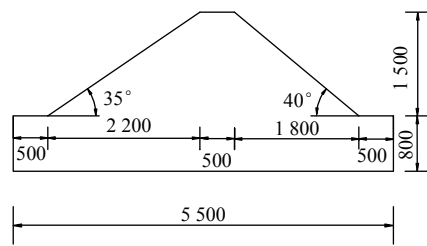
基于相似材料的力学参数, 顺层岩质边坡需要满足的相似律为

$$\left. \begin{aligned} (t)_m &= 0.08(t)_o, (v)_m = 0.5(v)_o, (\sigma_t)_m = (\sigma_t)_o / 16 \\ (c)_m &= (c)_o / 16, (\varphi)_m = (\varphi)_o, (a)_m = 6.25(a)_o \\ (f)_m &= 12.5(f)_o. \end{aligned} \right\} (2)$$

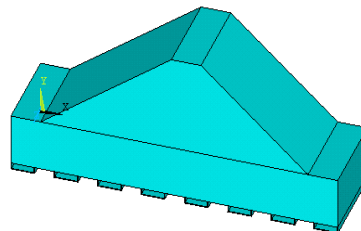
2.3 试验平台设计

本试验采用双坡试验平台进行试验, 平台侧视图及基本尺寸如图 2 所示。

在试验平台的底部放置等间距的槽钢; 槽钢置于预先浇注完成的基础槽内。试验时, 将基础槽内注满一定的水, 水位以超过试验平台底边线为准(总深度约为 11 cm); 试验为小药量爆炸试验(通过预备性试验, 找到了药量与地震烈度的对应关系, 药量 1~40 g, 基本可以模拟地震烈度 VII~X 的情况), 因此选用导爆索作为爆源; 将导爆索及起爆雷管缠绕于 $\phi 10 \text{ mm} \times 1.6 \text{ m}$ 的钢筋上, 并将钢筋穿入槽钢的内部并置于基础槽表面。钢筋的长度及导爆索的长度一般应大于 1.0 m(试验平台宽 1.5 m), 以保证爆炸应力波的二维特性。通过水下爆炸, 可以



(a)



(b)

图 2 双坡平台侧视图(单位: mm)

Fig.2 Schemes of double slope test platform(unit: mm)

模拟近场地震作用下纵波导致顺层岩质边坡的破坏。通过改变缠绕于钢筋上的药量及穿入槽钢的钢筋根数, 可以模拟不同的地震烈度及不同的地震波入射方向。

2.4 试验边坡设计

以汶川地震灾区寿江大桥顺层岩质边坡为原型, 边坡根据表层是否覆盖砂土分为无覆盖层, 小覆盖层及大覆盖层 3 类, 每一类的试验组次数如表 3 所示。覆盖层的目的在于考察边坡在不同剪出口的情况下, 破坏模式的区别。顺层岩块采用加气混凝土进行模拟, 材料的密度为 700 kg/m³, 块体与块体间采用水泥浆按照梅花型布置进行黏接, 块体的等效黏聚力为 300 Pa, 块体的内摩擦角为 41°~42°。各类型顺层坡体示意图如图 3 所示。

表 3 顺层岩质边坡不同类别试验组次和药量

Table 3 Different experimental group numbers and charges of consequent rock slope

类别	试验组数	每组次数/次	药量/g	覆盖区与无覆盖区的比例
无覆盖层	1	6	20~40	0 : 1
小覆盖层	1	6	1~20	1 : 5
大覆盖层	2	6	1~20	3 : 3

此三类模型中, 在厚度方向上分为 6 层, 每层厚度 6 cm, 在宽度方向上分为 5 层, 每层厚度 30 cm。需要 1[#]块体(60 mm×300 mm×600 mm)35 块, 2[#]块体(60 mm×300 mm×572 mm)5 块, 3[#]块体(60 mm×300 mm×391 mm)5 块, 4[#]块体(60 mm×300

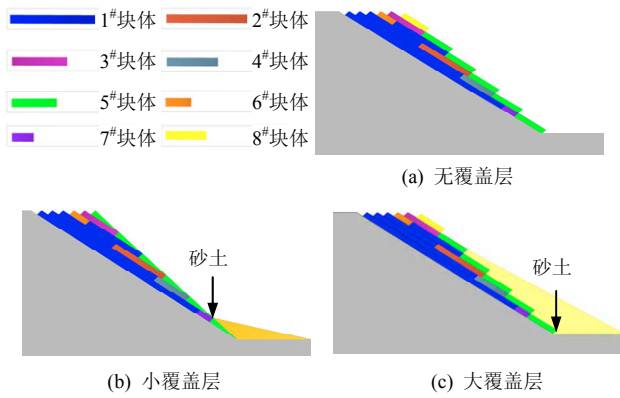


图3 各类顺层坡体示意图

Fig.3 Diagrams of different kinds of consequent slopes

mm×362 mm)5 块, 5#块体(60 mm×300 mm×319 mm)35 块, 6#块体(60 mm×300 mm×181 mm)5 块, 7#块体(60 mm×300 mm×153 mm)5 块, 8#块体(60 mm×300 mm×281 mm)5 块。

寿江大桥顺层岩质边坡原型如图4所示。该边坡底部为重力式挡土墙支挡, 整个表面为锚索框架梁支护。重力式挡土墙的材料为浆砌片石加水泥砂浆素面抹灰, 出露在马路以上部分, 其几何尺寸为1.3 m×6.0 m。锚索框架梁物理参数如表4所示, 均为钢筋混凝土结构。

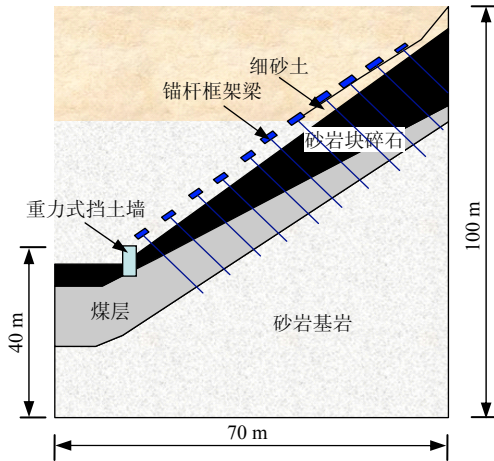


图4 寿江大桥顺层岩质边坡原型

Fig.4 Archetype of consequent rock slope in Shoujiang bridge

表4 锚索框架梁物理参数

Table 4 Physical parameters of cable anchor-frame beam

梁				锚索	
横向梁		纵向梁		锚头宽×高 (m×m)	数量 /个
长×宽×高 (m×m×m)	层数 /层	长×宽×高 (m×m×m)	层数 /层		
2.9×0.3×0.3	14	5.2×0.3×0.3	40	0.5×1.1	260

对寿江大桥顺层岩质边坡进行力学模型概化,

概化后的试验模型如图5所示。双坡试验平台的一侧设置支护结构, 另一侧无支护结构, 进行带支护结构及不带支护结构的对比试验。两侧坡体的立体图如图6所示。

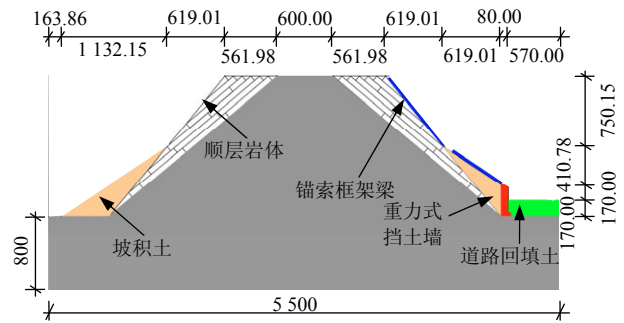


图5 顺层岩质边坡试验模型(单位: mm)

Fig.5 Experimental model of consequent rock slope(unit: mm)

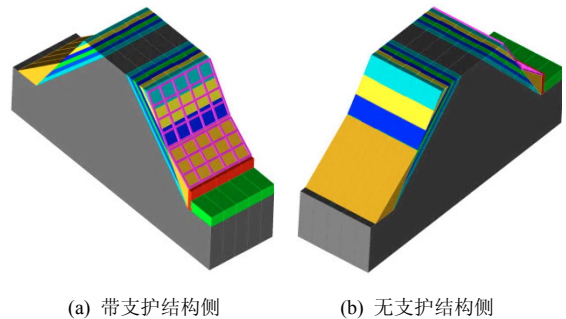


图6 两侧坡体含(无)支护结构边坡立体图

Fig.6 Sides of solid slopes with/without containing structures

2.5 传感器布置

试验共埋设 5 个加速度传感器(布设于坡体表面), 5 个 PVDF 压力传感器(布设于重力式挡墙侧面)。模型表面传感器布设示意图如图7所示。采用北京东方振动和噪声技术研究所的 DASP - V10 基础版系统进行数据采集及分析。

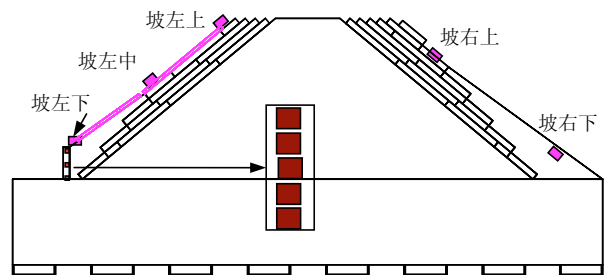


图7 模型表面传感器布设示意图

Fig.7 Sketch of sensor installation in the surface of model

3 试验现象及数据分析

3.1 试验现象分析

(1) 无支护结构——不同覆盖层范围的对比

爆炸波作用下, 无覆盖层、小覆盖层和大覆盖层顺层坡体的破坏模式如图 8 所示。

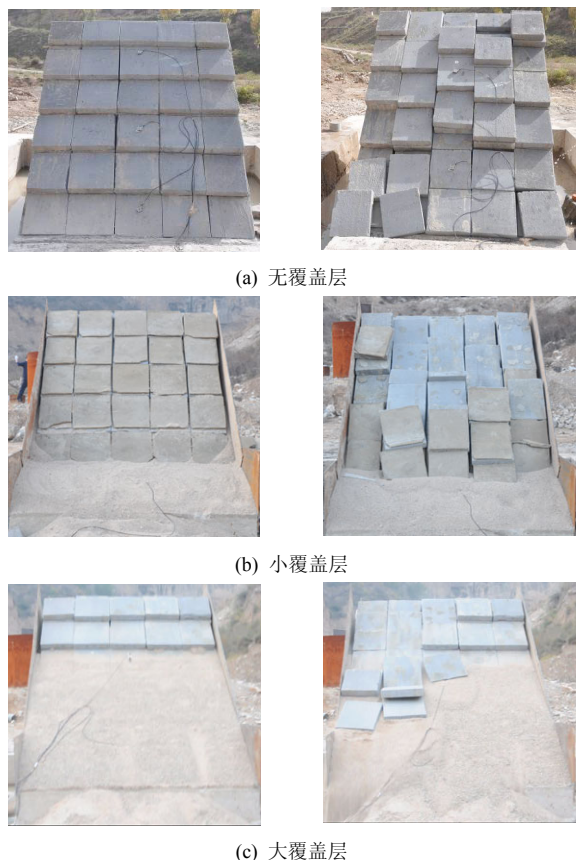


图 8 无覆盖层、小覆盖层和大覆盖层顺层边坡的破坏模式
Fig.8 Failure patterns of consequent slopes without or with shallow and thick overburden layers

由上述试验现象可以看出: 地震时, 在地震应力波的作用下, 顺层层间结构面出现拉伸破坏, 丧失黏聚力, 自身的内摩擦角也有所降低, 原本稳定的坡体随即出现大范围失稳下滑现象, 并最终冲切入坡脚沙土中。

对于顺层岩质边坡, 地震作用下的破坏模式是在顺层凌空面处的拉裂 - 滑移导致的整体剪出破坏, 且伴随着顺层块体的溃屈及表层风化块体的挤压破坏。顺层坡脚的覆盖层对边坡的破坏有较大的影响, 随着覆盖层厚度的增加, 顺层边坡的破坏位置逐渐上移。因此, 剪出口的位置直接影响着边坡的破坏形式。

(2) 有支护结构——支护效果对比

预应力锚索对存在剪出口的顺层岩质边坡具有较好的支护作用, 图 9 为第 1~3 组有/无支护结构边坡的破坏模式。上框架梁拆除后坡体的破坏模式如图 10 所示。

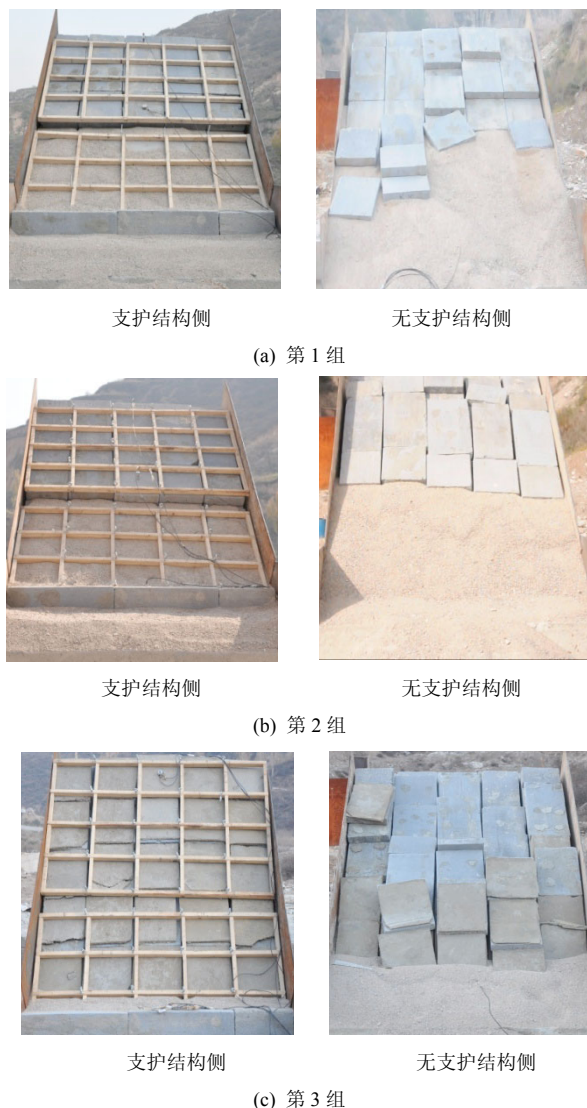


图 9 第 1~3 组有/无支护结构边坡的破坏模式
Fig.9 Failure patterns of slopes without/with retaining structures of groups Nos.1 - 3

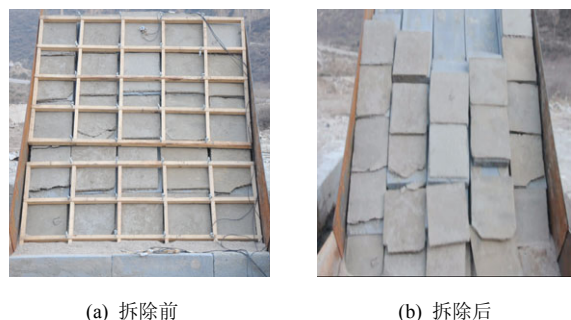


图 10 上框架梁拆除后坡体的破坏模式
Fig.10 Slope failure patterns before and after demolishing upper cable anchor-frame beam

由图 10 可看出, 地震力作用下, 顺层岩块之间的结构面已经出现破坏, 界面上的黏聚力及抗拉强度变为 0, 但由于锚索预应力的存在, 将顺层块体

紧固在斜坡上，待框架梁拆除，预应力释放，顺层岩块在自重作用下快速下滑。由此可见，预应力锚索框架梁对结构在地震作用下的稳定性起着重要作用，但可能存在的问题是，即便是在 40 g 药量(等效于地震烈度 XI 度)的情况下，带支护结构的边坡仍然没有明显破坏；而汶川现场调查结果也表明，在近场高烈度地震作用下，寿江大桥顺层岩质边坡仅有局部破坏，这就意味着，支护结构(锚索框架梁)可能过于安全。

3.2 试验数据分析

3.2.1 原型与模型加速度换算

由于无支挡结构侧的顺层块体会发生大的滑落，此处的加速度值选取的是支挡结构侧加速度传感器测得的峰值。根据原型与模型的换算关系，可得原型的加速度计算公式为

$$(a)_m = 2.6Q + 35.1 \tag{3}$$

$$(a)_o = 0.42Q + 5.62 \tag{4}$$

式中： Q 为药量。

从式(3)，(4)可以看出：当药量从 1 g 变化到 30 g 时，顺层坡体表面的加速度将从 38 m/s^2 变化到 110 m/s^2 (对应的地震烈度分别为 IX 和 XI)。这就证明，从烈度的角度来用爆炸进行地震作用的模拟是可行的。图 11 为坡体表面加速度随着药量的变化规律。

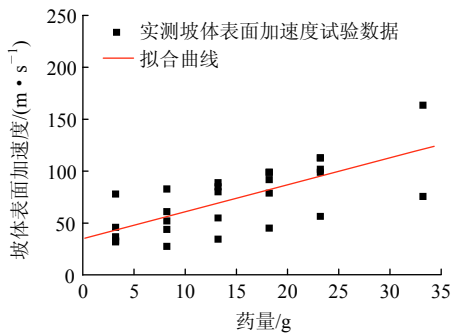


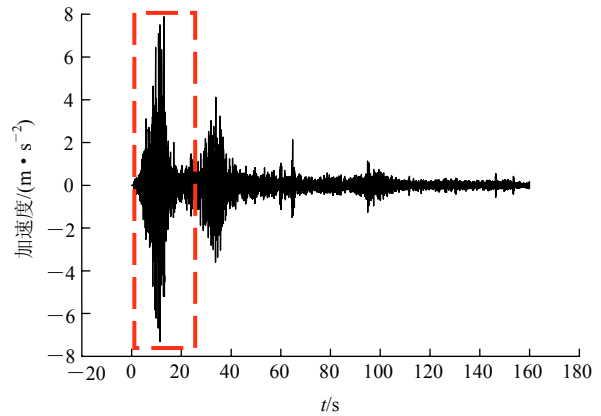
图 11 坡体表面加速度随着药量的变化规律

Fig.11 Change law of surface acceleration with different charges

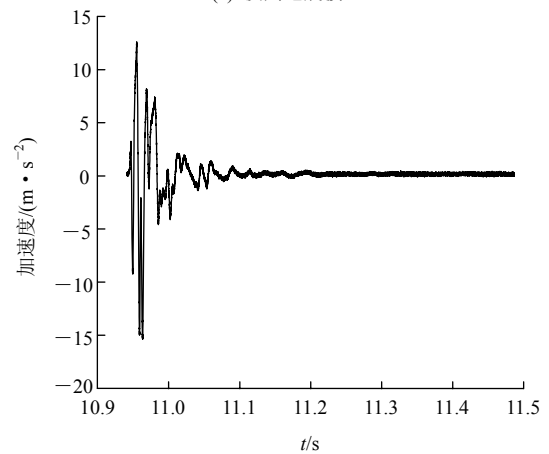
3.2.2 现场爆炸试验波与汶川地震波对比分析

图 12 为汶川地震波与试验波持续时间对比曲线。图 13 为汶川地震波与试验波主频对比曲线。

通过对比可以看出：爆炸试验波形图与汶川地震真实波形图相似；经相似律换算得到的试验波持时(约为 13.5 s)与汶川地震波主震持时(约为 20 s)很接近；经相似律换算得到试验波主频(约为 4.8 Hz)



(a) 汶川地震波



(b) 试验波

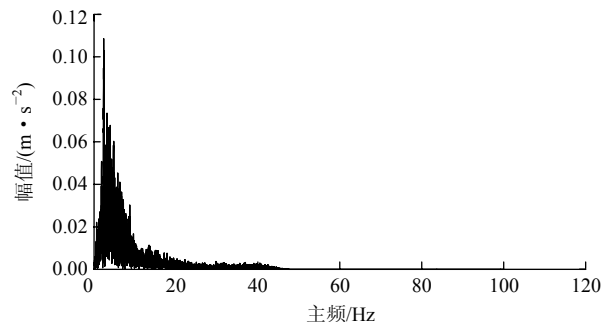
图 12 汶川地震波与试验波持续时间对比曲线

Fig.12 Comparison curves of durations of Wenchuan seismic wave and test wave

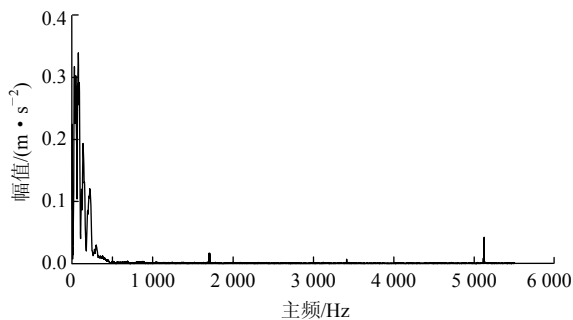
与汶川波主频(约为 5 Hz)也非常接近。持时、主频都相差不大，进而验证了用爆破模拟地震的可行性。

3.2.3 坡体表面法向及切向加速度的对比分析

对斜坡表面法向及切向加速度进行对比分析：通常情况下，天然地震波水平加速度明显大于竖直加速度；但本试验主要考虑地震近场作用下的动力响应，而在近场地震中，纵波(P 波)为主要影响因素，因此得出法向加速度比切向加速度大的结果，典型曲线如图 14 所示。



(a) 汶川地震波



(b) 试验波
图 13 汶川地震波与试验波主频对比曲线

Fig.13 Comparison curves of main frequency of Wenchuan seismic wave and test wave

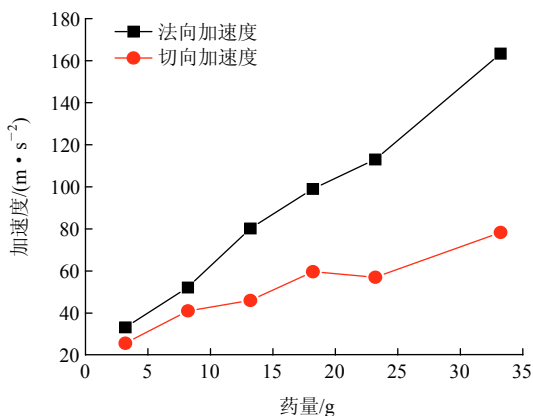


图 14 斜坡表面法向加速度及切向加速度曲线

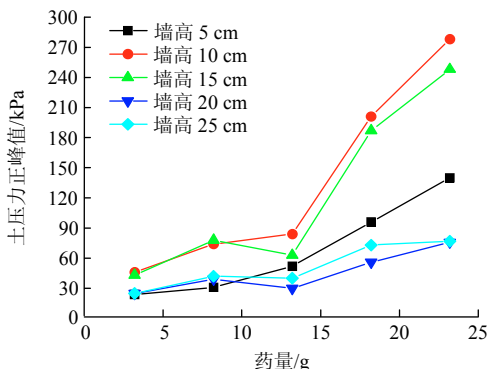
Fig.14 Curves of normal and tangential accelerations of slope surface

3.2.4 重力式挡墙上土压力的分布规律

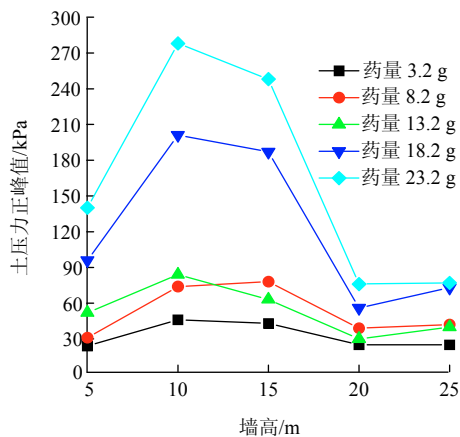
对挡土墙上的土压力正峰值进行分析, 挡土墙上的土压力正峰值随着药量的增加而逐渐增加, 且呈中部大两侧小的拱形分布(见图 15)。

4 结论与展望

(1) 破坏现象描述: 试验中, 顺层边坡的破坏主要表现为层间破坏导致的滑移, 这一现象与汶川地震现场调查相同的破坏现象相符。



(a) 土压力正峰值随着药量的变化



(b) 土压力正峰值随墙高的分布规律

图 15 土压力正峰值随药量和墙高的分布规律

Fig.15 Changes of positive peak values of soil pressures with different charges and heights

(2) 破坏原因分析: 对顺层边坡在地震作用下的破坏, 从试验现象可以看出, 应力波对界面间的拉伸破坏是破坏的主要因素: 在应力波作用下, 层间界面弱化, 黏聚力及内摩擦角降低, 导致坡体失稳; 顺层坡脚的覆盖层对边坡的破坏有较大的影响, 随着覆盖层厚度的增加, 顺层边坡的破坏位置逐渐上移。因此, 剪出口的位置直接影响着边坡的破坏形式。顺层边坡不是震坏的, 而是应力波作用下, 黏聚力及抗拉强度的丧失, 之后的运动过程是在自重作用下的结果。

(3) 药量与地震烈度的关系: 当药量从 1 g 变化到 30 g 时, 顺层岩质边坡坡体表面的加速度将从 38 m/s^2 变化到 110 m/s^2 (拟合公式为式(3)), 通过相似律换算, 对应的地震烈度从 IX 变化到了 XI; 爆炸试验波形图与汶川地震真实波形图相似, 持时、主频都相差不大, 因此利用爆炸对地震作用进行模拟是可行的。

(4) 重力墙上的压力分布规律: 重力式挡土墙上的压应力峰值随着墙高的变化呈现先增大后减小的钟形分布, 地震烈度越大, 这种分布越明显; 当药量从 1~30 g 变化时, 重力式挡土墙上的土压力变化范围为 30~400 kPa。根据挡土墙土压力的这一钟形分布规律, 可以对挡土墙的设计进行改进。

(5) 预应力锚索框架梁的作用: 预应力锚索框架梁对顺层岩质边坡有很好的支挡作用, 施加的预应力有助于顺层岩块之间的压紧贴实, 增加抗滑力; 在 40 g 高药量(等效于地震烈度 XI 度)的情况下, 带支护结构的边坡仍然没有明显破坏, 结合汶川地震现场考察结果, 支护结构(锚索框架梁)可能过于

安全。

(6) 试验的意义: 选线时应避免通过大型高陡顺层边坡密集区。如必须通过时, 需进行削坡处理, 并在坡面构建锚索框架梁防护体系。

(7) 展望: 对顺层岩块的黏接强度进行调整, 不同层理间的强度保持 300 Pa 不变, 同一层理间的强度改为 30 kPa, 以实现同一层理岩块的完整性; 对锚索框架梁中, 锚索材料的模拟在满足几何相似的前提下, 选用强度更为相似的材料进行试验, 细钢丝强度过高。

参考文献(References):

- [1] 陈从新, 黄平路, 卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 476 - 481, 486.(CHEN Congxin, HUANG Pinglu, LU Zengmu. Study of correlation between stability of consequent rock slope and obliquity of rock layer by simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 476 - 481, 486.(in Chinese))
- [2] NG C W W, LI X S, LAAK P A, et al. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uniaxial and biaxial earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(4): 305 - 318.
- [3] 王年香, 章为民. 混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 504 - 507.(WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Dynamic centrifuge model test for concrete face rock fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 504 - 507.(in Chinese))
- [4] 于玉贞, 邓丽军, 李荣建. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(6): 789 - 792.(YU Yuzhen, DENG Lijun, LI Rongjian. Centrifuge model test of seismic response behavior of a sand slope[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(6): 789 - 792.(in Chinese))
- [5] 苏 栋, 李相菘. 砂土自由场地震响应的离心机试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 166 - 170.(SU Dong, LI Xiangsong. Centrifuge modeling of seismic response of free sand ground[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 166 - 170.(in Chinese))
- [6] 吴俊贤, 倪至宽, 高汉棣. 土石坝的动态反应: 离心机模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 1 - 14.(WU Chunhsien, NI Chinkuan, KO Honyim. Seismic reaction of earth and rockfill dam: centrifuge modeling test and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 1 - 14.(in Chinese))
- [7] 尚守平, 余 俊, 王海东, 等. 爆破模拟地震研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 24 - 27.(SHANG Shouping, YU Jun, WANG Haidong, et al. Study on blasting vibration simulating earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(1): 24 - 27.(in Chinese))
- [8] 国胜兵, 潘越峰, 高培正, 等. 爆炸地震波模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 335 - 340.(GUO Shengbing, PAN Yuefeng, GAO Peizheng, et al. Numerical simulation of explosion seismic waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 335 - 340.(in Chinese))
- [9] 张敏政, 孟庆利, 刘晓明. 建筑结构的抗震模拟试验研究[J]. 工程抗震, 2003, (4): 31 - 35.(ZHANG Minzheng, MENG Qingli, LIU Xiaoming. A study of earthquake simulation test of building structures[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2003, (4): 31 - 35.(in Chinese))
- [10] TANIMURA S, MIMURA K, NONAKA T, et al. Dynamic failure of structures due to the great Hanshin-Awaji earthquake[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6 - 7): 583 - 596.
- [11] 张 磊, 石晓玲. 近场地震浅析[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(1): 193 - 194.(ZHANG Lei, SHI Xiaoling. Analysis of near field seism[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(1): 193 - 194.(in Chinese))
- [12] 周正华, 周雍年, 赵 刚. 强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 15 - 18.(ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, ZHAO Gang. Statistical analysis of peak ratios and response spectra of near-field accelerograms[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 15 - 18.(in Chinese))
- [13] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2007.(TAN Qingming. Dimension analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2007.(in Chinese))
- [14] 罗 晶, 郑占强, 肖 毅, 等. 地质力学模型试验中不同类型岩体的相似模拟研究[J]. 水电站设计, 2007, 23(4): 79 - 81.(LUO Jing, ZHENG Zhanqiang, XIAO Yi, et al. Approximate simulation study of different kind rock masses in geomechanics model test[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2007, 23(4): 79 - 81.(in Chinese))
- [15] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 805 - 1 808.(ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 805 - 1 808.(in Chinese))
- [16] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 842 - 1 847.(WANG Hanpeng, LI Shucai, ZHANG Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 842 - 1 847.(in Chinese))
- [17] 苏 伟, 冷伍明, 雷金山, 等. 岩体相似材料试验研究[J]. 土工基础, 2008, 22(5): 73 - 74, 80.(SU Wei, LENG Wuming, LEI Jinshan, et al. Test study of similar material in rock mass[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008, 22(5): 73 - 74, 80.(in Chinese))