

含泥化夹层反倾岩质边坡动力响应的大型振动台试验^①

范 刚, 张建经, 付 晓

(西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031)

摘要:针对含泥化夹层反倾岩质边坡制作相似比为 1:30 的试验模型进行大型振动台试验, 研究泥化夹层饱水前(天然含水状态)和饱水状态下边坡的加速度和位移响应规律, 探讨边坡的破坏模式。试验结果表明: 泥化夹层饱水后坡面水平向加速度放大系数小于饱水前; 泥化夹层饱水前和饱水后随着相对高度的增加, 坡面水平向加速度放大系数呈现非线性增加的趋势, 其整体上大于坡体内部的加速度放大系数; 坡面位移从下至上在泥化夹层饱水前, 呈现出非线性增长特性; 饱水后位移呈先增大后减小, 临近坡肩处坡面最大, 坡面呈现鼓出形态。泥化夹层饱水前, 在幅值为 0.3 g 的地震波作用下坡体仅出现坡肩局部掉块; 饱水后, 输入地震动幅值 ≥ 0.4 g 时, 坡体先出现坡肩的局部掉块, 随后坡体沿中上部的饱和泥化夹层滑动剪出, 与此同时, 坡体中上部出现纵向裂隙并与水平裂隙贯通, 坡顶被震碎。

关键词: 泥化夹层; 反倾边坡; 大型振动台; 放大系数; 位移

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0422-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0422

Large-scale Shaking-table Test to Study Dynamic Responses of Anti-inclined Rock Slopes Interlayered with Silt

FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: A 1:30 scale model of an anti-inclined rock slope interlayered with silt was constructed, and a large-scale shaking-table test was performed to study the dynamic responses (acceleration and displacement) when the moisture content of silt layers change. The results are as follows: the horizontal amplification coefficients on the slope face after the silt layers became saturated were less than those before saturation; the coefficients increased with slope height in a nonlinear fashion; the coefficients on the slope face were larger than those in the slope body; before saturation, the displacement of the slope face increased in a nonlinear fashion with an increase in height; the displacement of the upper slope face (relative height between 0.6 and 0.9) was larger than those in other sections; after saturation, the displacement first increased and then decreased with increasing height, maximum displacement occurred near the top of the slope; and the slope displayed a bulging shape. Before saturation, slope failure occurs when the amplitude of the seismic wave is 0.3 g. After saturation, when the amplitude is no less than 0.4 g, first, slope failure occurs at the shoulder, then the slope slides and shears out from the upper levels, and simultaneously, longitudinal cracks appear and intersect with the horizontal fractures. The top of slope is left shattered.

Key words: siltized interlayer; anti-inclined slope; large-scale shaking-table; amplification coefficient; displacement

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013318800020)

作者简介: 范 刚(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程抗震方面的研究. E-mail: fg113112@126.com

0 引言

层状边坡在工程建设中十分常见,通常认为相对于顺层边坡,反倾边坡的稳定性较高,因此以往层状边坡的研究大多针对顺层边坡,反倾边坡的研究较少。但是,近些年工程实践中发现,反倾岩质边坡对工程整体稳定性和工程进度具有较大的影响,例如龙滩水电站左岸边坡^[1]、锦屏一级水电站左岸边坡^[2]等。鉴于此,研究者们开始从数值分析、模型试验、理论推导等方面对反倾岩质边坡开展研究。程东幸等^[3]利用数值模拟,基于变形曲线对不同范围内边坡与岩层走向夹角的变形特征进行了定性描述;左保成等^[4]利用室内模型试验研究了反倾边坡层面强度参数和岩层厚度对反倾边坡稳定性的影响规律;韩贝传等^[5]从边坡倾倒的变形特点出发,分析了倾倒变形的力学机制,并研究了结构面间距及力学参数对变形的影响;黄秋香等^[6]借助内、外观测成果对一具有软弱夹层的反倾岩坡进行了研究,对其变形特征和变形机制进行了分析。2008 年汶川地震诱发了大量的边坡失稳,其中不乏反倾边坡。此后反倾边坡在地震作用下的动力响应特征成了研究热点。余业^[7]利用离散元软件分析了反倾边坡在地震波作用下的放大效应以及坡体内应力场的变化规律;杨国香等^[8]采用物理模型试验,研究了强震作用下反倾层状结构岩质边坡动力响应特征及破坏过程。

综上所述,针对反倾岩质边坡的研究虽然已经有了一些静力和动力方面的研究成果,但关于含泥化夹层反倾岩质边坡动力响应特征的研究还很鲜见,开展相关研究具有十分重要的意义。地震作用下倾角越大的反倾边坡,其抗滑稳定性越强,本文研究岩层倾角为 8° 的反倾岩质边坡。

本文以某 60 m 高边坡为原型,设计制作一个含泥化夹层的反倾高陡岩质边坡,并进行大型振动台试验。

1 试验概述

1.1 试验模型介绍

试验设备采用中国核动力设计研究院大型振动台,该振动台拥有 6 个自由度,台面尺寸 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$,最大负载 600 kN,水平向最大位移为 $\pm 150\text{ mm}$,垂向最大位移为 $\pm 100\text{ mm}$;满载时水平向最大加速度为 1.0 g ,垂向为 0.8 g ,空载时水平向最大加速度为 3 g ,垂向为 2.6 g ,频率范围为 $0.1 \sim 80\text{ Hz}$ 。

试验模型由提前预制的模块分层砌筑而成,模

块由相似材料按照重晶石:砂子:石膏:水 = $1:0.2:1:0.2$ 的比例搅拌压实制成,模块间用黏结材料进行粘接,黏结材料由相似材料按照重晶石:砂子:石膏:水 = $1:0.2:1:1$ 的比例现场配制而成。试验边坡模型底面尺寸为: 170 cm (长) $\times 128\text{ cm}$ (宽),高为 250 cm ,坡角 72° 。试验中,在模型与模型箱之间的接触面粘贴 10 cm 厚的泡沫材料,模拟吸波材料,以降低模型箱对输入波的反射和折射。在每个试验模型内部均设置 6 个泥化夹层,泥化夹层模拟材料由原型坡泥化夹层取样之后在室内重塑得到。在每个泥化夹层内预埋了留有密集出水口的小直径 PVC 管,用于对其进行注水饱和。PVC 管上的出水口用纱布包裹住,防止出水口被泥土堵住。以底层泥化夹层为例,PVC 管的布置如图 1 所示。注水前泥化夹层的含水量保持与野外取样场地一致,注水时若每一个泥化夹层在坡面的所有出露位置均有水渗出即认为坡体内部泥化夹层已经饱和,在下文的分析中,泥化夹层饱水前即表示泥化夹层处于天然含水状态。模块及泥化夹层模拟材料的物理力学参数如表 1 所示。

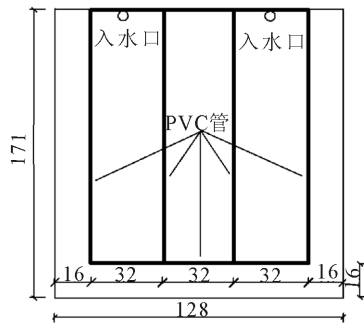


图 1 注水管道的布置(单位:cm)

Fig.1 Layout of the water injection pipeline

根据相似理论^[9],选取几何尺寸、质量密度和地震加速度作为控制量,选取几何尺寸相似比为 30,推导得到本试验各物理量的相似比分别为:密度为 1,加速度为 1,弹性模量为 30,时间为 5.48,位移为 30,频率为 0.183,内摩擦角为 1,黏聚力为 30。

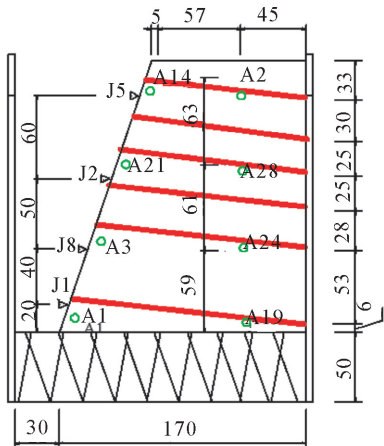
1.2 试验模型及测点布置

试验中布置的测试元件为三向加速度计和激光位移计。三向加速度计水平方向和垂直方向的灵敏度分别为 173.46 mV/g 和 192.08 mV/g ;激光位移计的灵敏度为 500 mV/mm 。加速度传感器布置在坡体内部和坡面附近,同时也布置在模型与底座交接面上,作为计算边坡加速度放大系数的参照点;位移计通过刚性支架固定在模型箱上,用于测试坡面

不同高度处的位移。试验中的测点布置如图 2 所示。

表 1 材料参数

模块							泥化夹层		
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/MPa	μ	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\omega/\%$
2.4	375	35°	1.2	0.16	0.05	3.2	12°	0.75	8.8



图中：A为三向加速度计；J为激光位移计

图 2 试验测点布置(单位:cm)

Fig.2 Layout of the measure points (unit:cm)



图 3 试验模型全貌

Fig.3 The test model

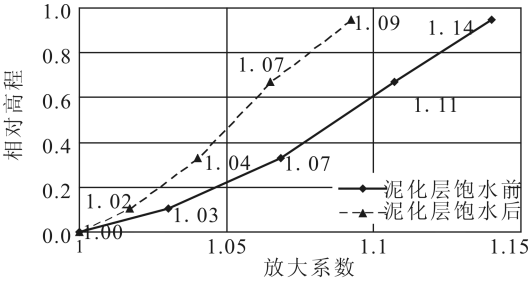
1.3 加载工况

本次进行了泥化夹层饱水前和饱水后两个台次的试验,加载方向为水平向和垂直向,加载波形为汶川地震清屏波(代号 QP)和 El Centro 波(代号 El)。泥化夹层饱水前施加了加速度峰值分别为 0.1、0.15、0.21 和 0.3 g 的上述两种地震波;饱水后施加了幅值为 0.1、0.15、0.21、0.3、0.4 和 0.6 g 的上述两种地震波。在每一幅值地震波加载前均对模型进行幅值 0.1 g 的白噪声扫描。

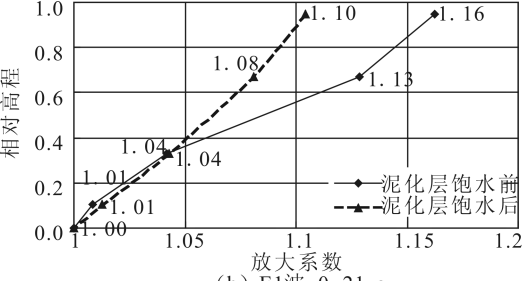
2 试验数据分析

含泥化夹层反倾岩质边坡具有岩层倾向和边坡

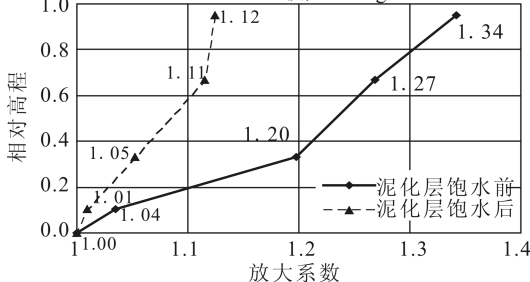
坡面倾向相反的结构特征,影响其破坏模式的主要为水平向的动力响应特征。因此,本文仅仅分析地震荷载下含泥化夹层反倾高陡岩质边坡水平向的动力响应特征。



(a) E1波, 0.1 g



(b) E1波, 0.21 g



(c) E1波, 0.3 g

图 4 坡面水平向加速度放大系数

Fig.4 Horizontal acceleration amplification coefficients on the slope surface

2.1 泥化夹层饱水状态对加速度响应的影响

以输入 El Centro 地震波为例,研究泥化夹层含水状态对反倾岩质边坡坡面水平向加速度放大系数的影响规律(图 4)。

从图 4 可以看出,泥化夹层水平方向加速度放大系数饱水后小于饱水前。这种现象的出现一方面是由于饱水后的泥化夹层对地震波的吸收增强,耗能作用增强,降低了坡体的动力响应;另一方面受坡

体反倾的结构特征,虽然泥化夹层饱水后层面间的抗滑强度降低,但是岩层受后缘坡体自重的影响不能发生水平向的运动,动力响应并不会比泥化夹层饱水前有所增强。

同时可以从图 4 中看出,随着相对高度的增加,坡面水平向加速度放大系数呈现非线性增加,坡体中上部的放大系数增长幅度大于坡脚,坡肩的放大系数最大,这与汶川地震震害灾害调查及振动台试验中发现的坡肩岩体抛射破坏现象相符。同时值得注意的是,随着输入地震动幅值的增大,坡面加速度放大系数增大,这种增大也不是线性的,而是呈增加幅度逐渐增大的趋势。

2.2 坡面与坡体内部加速度响应差异性分析

为探究含泥化夹层岩质边坡坡面和坡体内部的加速度放大效应的差异性,以汶川地震清屏波为输入波进行研究,分析泥化夹层饱水前、后坡面和坡体内部的加速度放大效应(图 5)。

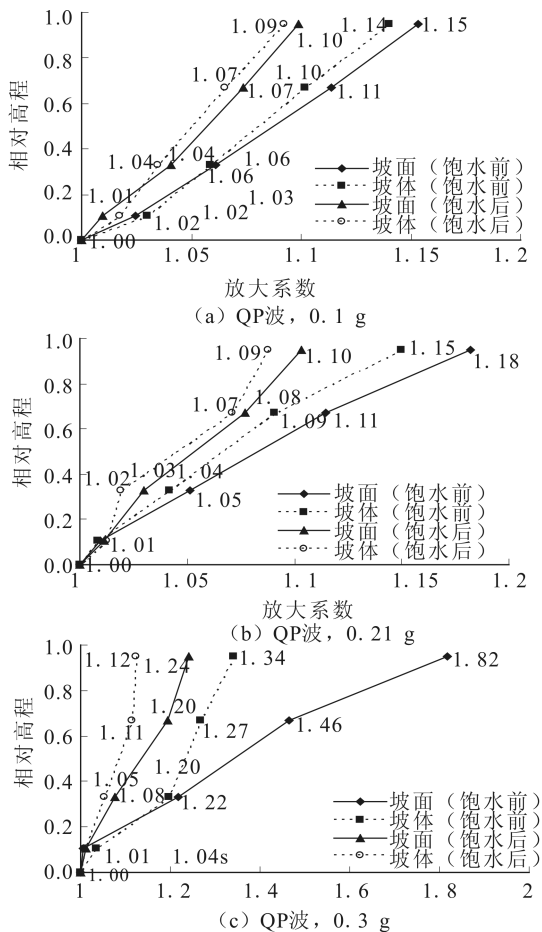


图 5 坡面与坡体内部水平向加速度放大系数

Fig.5 Horizontal acceleration amplification coefficients on slope surface and slope body

从图 5 中可以看出,泥化夹层饱水前和饱水后,

坡面的加速度放大系数整体上大于坡体内部的加速度放大系数,且表现出趋表效应,这与震后现场调查发现的反倾岩质边坡表层震松垮塌现象相符。同时可以发现,随着相对高度的增加,坡面与坡体内部的加速度放大系数之间的差距逐渐增大。

汶川地震清屏波作用下泥化夹层饱水前、后坡面的加速度放大系数与 2.1 节中的分析具有相同的变化规律,两者相互验证了本文分析的可靠性。值得注意的是,在上文 2.1 节和 2.2 节中加速度放大系数均随着输入地震动幅值的增加而增加,出现这种现象是因为本文分析采用的地震动幅值最大为 0.3 g,而在幅值为 0.3 g 的地震波作用下岩质边坡尚未进入非线性阶段,坡体表现出线性特性。

2.3 坡面位移响应特征

试验中利用高精度激光位移计对坡面的位移进行监测,两种地震波作用下泥化夹层饱水前、后坡面的位移如图 6、图 7 所示。

从图 6 中可以看出,泥化夹层饱水前,随着相对高度的增加,坡面位移呈现出非线性单调增长趋势,而且随着输入地震动幅值增大,这种非线性特性表现得更加明显。从曲线的斜率不难看出,坡体上部(相对高度介于 0.6 到 0.9 之间)的坡面位移增长幅度大于坡体其他位置的增长幅度。

从图 7 中可以看出,随着相对高度的增加,坡面的位移先增大后减小,临近坡肩处坡面位移最大,出现这种现象的原因可能为:泥化夹层饱水后,坡体被饱和的泥化夹层分割成几个相对独立的岩层,这几个岩层在静力作用下有向坡体后缘下滑的趋势。在地震荷载作用下,坡体中上部岩层受到上下岩层的挤压后沿饱和的泥化夹层向临空面剪切滑出,而坡顶岩层在惯性力作用下有向坡体后缘下滑的趋势,坡脚岩层受到基岩底座的横向限制,因此坡顶岩层和坡脚岩层的位移均小于坡体中上部岩层的位移。试验结束后观察坡体,发现坡面呈鼓出形态,这与实际监测数据相符。观察图 7 中各个曲线的间距可以发现,随着输入地震动强度的增大,坡面位移增长的幅度逐渐增加,坡面位移的增长和输入地震动强度的增长呈现出非线性特性。

3 边坡破坏过程

试验中对每一级动力荷载施加后坡体的破坏现象进行拍照记录,并进行仔细比照。可以发现在泥化夹层饱水前,输入地震动幅值为 0.1 g 和 0.21 g 时,坡体未出现破坏现象;当输入地震动幅值达到

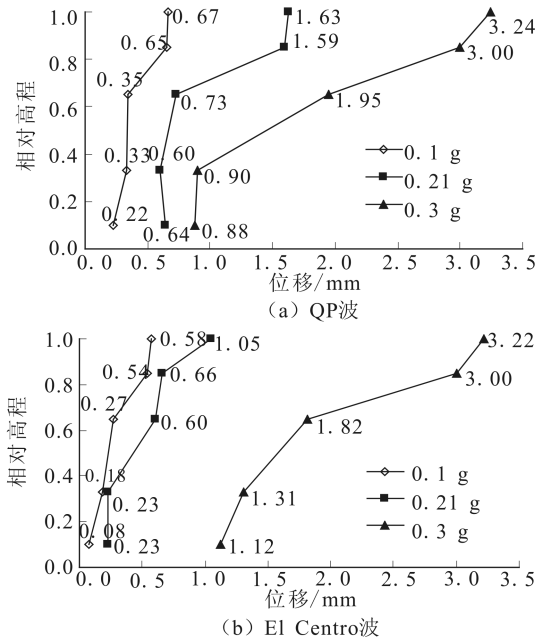


图 6 泥化夹层饱水前

Fig.6 Before saturation of the silt layer

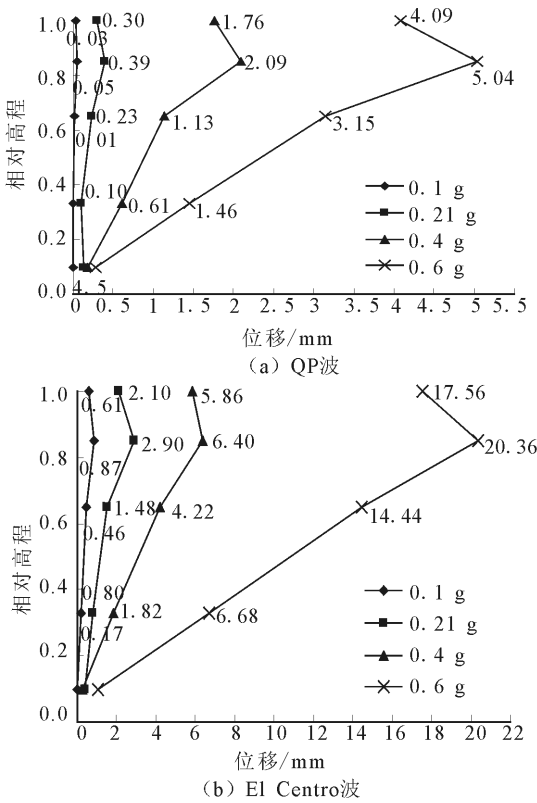


图 7 泥化夹层饱水后

Fig.7 After saturation of the silt layer

0.3 g 时,坡肩开始出现局部掉块,坡体未出现其他明显的破坏现象。泥化夹层饱水后,当输入地震动幅值达到 0.4 g 时,坡肩开始出现局部掉块,坡体中上部泥化夹层处出现水平向微裂隙(图 8)。当输入

地震动幅值达到 0.6 g 时,坡体中上部的水平向裂隙进一步发展,上部坡体向坡面方向滑出,坡面外观呈鼓出形态。坡面沿岩块间接触面出现纵向裂隙,并与水平向裂隙贯通(图 9);中部泥化夹层被挤出(图 10);坡顶被震碎(图 11)。综上所述,可以发现含泥化夹层反倾岩质边坡的破坏过程为:泥化夹层处于天然含水状态时,0.3 g 地震作用下仅出现坡肩局部掉块;泥化夹层饱水后,强震下坡体先出现坡肩的局部掉块,随后坡体沿中上部饱水后的泥化夹层滑动剪出,与此同时,坡体中上部出现纵向裂隙并与水平裂隙贯通,坡顶被震碎。



图 8 坡体中上部出现的微裂隙

Fig.8 The micro-cracks on the middle and upper section of slope

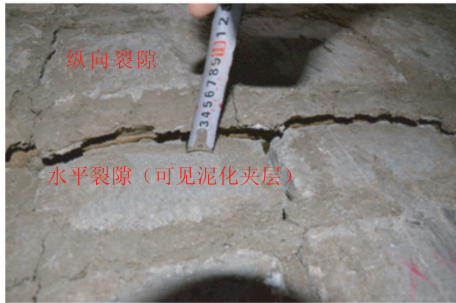


图 9 坡体中上部的水平和纵向裂隙

Fig.9 Horizontal and vertical cracks on the middle and upper section of slope



图 10 坡体中部泥化夹层被挤出

Fig.10 Siltized layer was squeezed out on the middle part of slope



图 11 坡顶被震碎

Fig.11 The top of slope is shattered

4 结论与讨论

通过以上分析,可以得到以下结论:

(1) 泥化夹层饱水后水平方向的加速度放大系数小于饱水前;随着相对高度的增加,坡面水平向加速度放大系数呈非线性增加。

(2) 坡面的加速度放大系数整体上大于坡体内部,且表现出趋表效应。

(3) 泥化夹层饱水前,随着相对高度的增加,坡面位移呈现出非线性单调增长特性;坡体上部(相对高度介于 0.6~0.9 之间)的坡面位移增长幅度大于坡体其他位置的增幅。泥化夹层饱水后,随着相对高度的增加,坡面的位移先增大后减小,临近坡肩处坡面位移最大,坡面呈现鼓出的形态特征。

(4) 泥化夹层处于天然含水状态时,幅值为 0.3 g 的地震波作用下仅出现坡肩局部掉块;泥化夹层饱水后,输入地震动幅值 ≥ 0.4 g 时,坡体先出现坡肩的局部掉块,随后坡体沿中上部饱水后的泥化夹层滑动剪出,与此同时,坡体中上部出现纵向裂隙并与水平裂隙贯通,坡顶被震碎。

本文从宏观上研究了泥化夹层的存在对反倾岩质边坡动力响应特性的影响,受试验条件所限,并未研究泥化夹层厚度、起伏度等因素对边坡动力特性的影响。根据已有的研究成果可知,动力作用下泥化夹层的动力特性会发生较大的变化,必然引起边坡整体的动力特性的变化,这一变化的影响机制还有待进一步研究。

参考文献(References)

[1] 苏立海.反倾层状岩质边坡破坏机制研究[D].西安:西安理工大学,2006.
SU Li-hai.Study on Losing Stability Mechanism of Flare Rock Slopes[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2006.(in Chinese)

[2] 程东幸,刘大安,丁恩保,等.反倾岩质边坡变形特征的三维数值模拟研究——以龙滩水电站工程边坡为例进行三维变形特征分析[J].工程地质学报,2005,13(2):222-226.
CHENG Dong-xing,LIU Da-an,DING En-bao,et al.Three-dimension Numerical Simulation of Deformation Characteristics of Toppling Rock Slope——Case Study for A Slope at Longtan hydropower Station[J].Journal of Engineering Geology,2005,13(2):222-226.(in Chinese)

[3] 程东幸,刘大安,丁恩保,等.层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J].岩土工程学报,2005,27(11):1362-1366.
CHENG Dong-xing,LIU Da-an,DING En-bao,et al.Analysis on Influential Factors and Toppling Conditions of Toppling Rock Slope[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(11):1362-1366.(in Chinese)

[4] 左保成,陈从新,刘小巍,等.反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3535-3541.
ZUO Bao-cheng,CHEN Cong-xin,LIU Xiao-wei,et al.Modeling Experiment Study on Failure Mechanism of Counter-tilt Rock Slope[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,24(19):3535-3541.(in Chinese)

[5] 韩贝传,王思敬.边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析[J].工程地质学报,1999,7(3):213-217.
HAN Bei-chuan,WANG Si-jing.Mechanism for Toppling Deformation of Slope and Analysis of Influencing Factors on It[J].Journal of Engineering Geology,1999,7(3):213-217.(in Chinese)

[6] 余业.反倾岩质滑坡成因机制及动力响应研究——以汶川地震透发罐罐滑坡为例[D].成都:成都理工大学,2011.
YE Yu.Research on Formation Mechanism and Dynamic Response of Counter-tilt Rock Slopes——Taking the Guantan Landslide Induced by Wenchuan Earthquake as Example[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2011.(in Chinese)

[7] 杨国香,叶海林,伍法权,等.反倾层状结构岩质边坡动力响应特征及破坏机制振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2214-2221.
YANG Guo-xiang,YE Hai-lin,WU Fa-quan,et al.Shaking Table Model Test on Dynamic Response Characteristics and Failure Mechanism of Anti-dip Layered Rock Slope[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,31(11):2214-2221.(in Chinese)

[8] 黄秋香,汪家林.某具有软弱夹层的反倾岩坡变形特征探索[J].土木工程学报,2011,44(5):109-114.
HUANG Qiu-xiang,WANG Jia-lin.Study of the Deformation Characteristics of an Anti-dip Slope with Soft Internal Layers[J].China Civil Engineering Journal,2011,44(5):109-114.(in Chinese)

[9] 徐挺.相似方法及其应用[M].北京:机械工业出版社,1995.
XU Ting.Similar Methods and Application[M].Beijing:China Machine Press,1995.(in Chinese)