

新疆 G217 国道某滑坡三维地质力学物理模型试验研究

张晓光,夏克勤,傅荣华

(成都理工大学 环境与土木工程学院,成都 610059)

摘 要:根据近年来地质力学模型试验的相关资料,结合新疆 G217 国道某滑坡进行了三维地质力学物理模型的试验研究,用以分析滑坡的变形破坏机制。试验抓住造成滑坡的主要因素,根据所得的岩石力学参数及结构面参数,在几何条件、模型材料、结构面条件等方面都基本满足相似原理的情况下,对模型进行了河流下切、公路开挖等条件的模拟,测量观察边坡的卸荷回弹与层面的弯曲变形情况,利用所测数据分析论证滑坡的形成机制和影响因素。

关键词:滑坡;物理模型;相似材料;卸荷回弹;变形破坏机理;公路边坡

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)06-0033-04

Research on 3D Geomechanics Physical Model of a Slide on G217 Highway in Xinjiang

ZHANG Xiao-guang, XIA Ke-qin, FU Rong-hua

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: According to the information of the geomechanics physical model in recent years, a 3D geomechanics physical model of a slide on G217 highway in Xinjiang is made to research the mechanism of deformation and destruction. The key factors to make the slide is controlled to make the model be similar in geometry, material and fabric with the antetype, then simulate the infection of river, digging of road and so on, measure the data of the distortion of model, analyze the reason of the distortion and factors of the slide.

Key words: slide; physical model; similar material; unloading rebound; mechanism of deformation and destruction; highway slope

我国地质力学模型试验从无到有,技术不断进步,在相似材料、加载技术、量测技术等方面都取得了很大进展^[1],已由原来的机制模拟阶段发展到现在的精确加载与数字测量阶段,从而达到了模型试验的量化分析。

地质力学物理模型试验的优势在于:(1)此类模型是真实的实体构造,在基本满足相似原理的条件下,能真实地反映地质构造和工程结构的空间关系和力学关系,准确地模拟地质过程的演变,试验结果更直观。(2)通过物理模型试验,可以对各种数值分析结果进行一定程度上的验证,物理模型与数值分析相结合,可使判断结论更加符合实际,为采取相应的治理措施或人类工程活动提供依据^[2]。物理模型的局限性在于由于实际条件和技术的限制,某些因素的模拟无法实现(如某些小的地质结构无法根据相似原理在模型中实现等);另外模型制作较困难、费用高等不足。因此认为在做模型试验时,是否能够正确抓住地质原型的主要破坏条件并在模型中实现是地质力学物理模型试验能否成功的关键。

1 滑坡现状与成因机理分析

1.1 滑坡区工程地质概况

滑坡区地处 G217 国道南段,天山山脉南部的哈尔克山脊东部偏南。该区属中山河谷地貌,边坡较陡,河谷宽阔。滑坡区平均海拔 2 300 m,最低处海拔 2 110 m(卡尔脑河),最高处海拔 2 460 m,高差 350 m。滑坡发育在一个近 EW

走向的山脊南部坡体上。出露地层主要是下志留统依南里克组(S1),岩性以石英片岩、板岩为主。基岩岩层陡立,产状 175°~86°,岩层倾向、坡向基本垂直于公路的延伸方向;靠近坡面的岩体有部分弯曲折断,但岩体仍有很好的成层性,弯曲岩层产状 330°~360°~25°~40°;坡体中上部表层有灰黄色土层,厚度 0.5~1 m;中下部主要为碎、片石滑坡堆积物。滑坡区及其周围 200 m 范围内,没有断层通过。

1.2 滑坡现状与成因机理

滑坡所处边坡坡体下陡上缓,中下部坡角在 50°左右,中上部坡角在 40°左右。滑坡已被 6 条细沟切割,加上侧缘 2 条细沟,从而形成由 7 个小滑坡组成的滑坡群,中上部细沟切割较为明显,下部及前缘,由于已经滑塌,细沟界限不明显。中间 6 条细沟除最南端的切割比较深外,其余的沟都比较浅,大多在 4~8 m。滑坡前缘正处于卡尔脑河的凹岸,河谷呈宽浅“U”型,最宽处有 300 m,流水直接冲蚀滑坡的坡脚。滑坡详细形态如图 1 所示。

滑坡大体分为 3 部分,一部分是已经滑塌部分,由于河流的下切和公路的开挖,使公路上侧边坡滑塌;二部分为滑腔后壁到最后缘拉裂阶坎部分,此部分由于下部坡体的滑塌,失去前缘阻力后形成蠕滑;第三部分是蠕滑拉裂后壁陡坎以上部分,为老滑坡部分,此段由于弯曲折断,坡形上有滑动过的迹象,现仍为不稳定状态。滑坡前缘是碎块、片石堆

积,公路在滑坡前缘通过,公路外侧碎石边坡坡角在 45°左右 (图 2)。

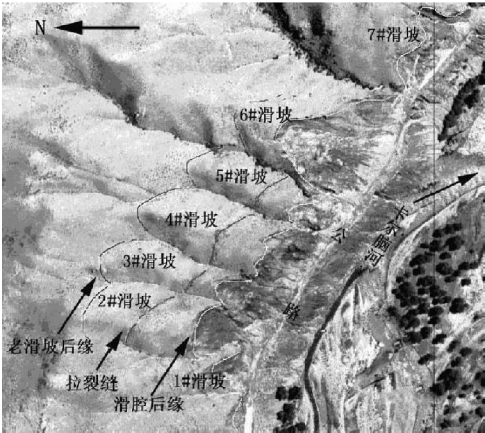


图 1 滑坡航空照片

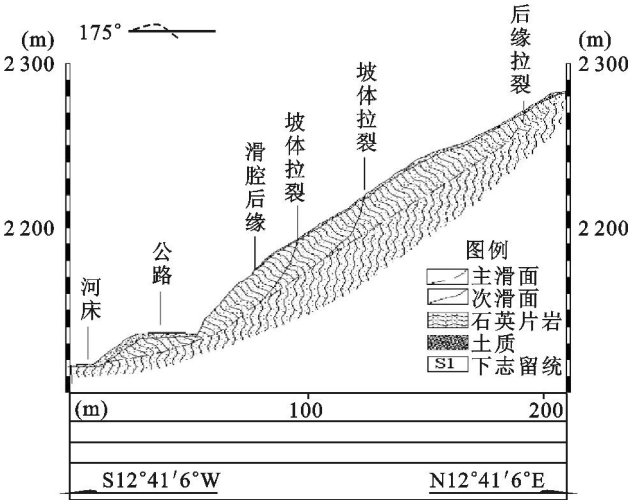


图 2 滑坡地质剖面图

从滑坡现状分析,初步判断滑坡形成的主要原因:直立顺层边坡受河流下蚀作用的影响,在自重力和构造应力作用下,坡体表面的直立岩层产生向临空面的卸荷回弹变形,弯曲折断,导致在坡面下方一定深度沿折断面形成滑动面;后期的公路开挖,使坡体失去前缘阻力后形成蠕滑,从而造成滑坡^[3]。下面通过物理模型试验来研究滑坡的形成机制。

2 模型设计

2.1 模型概述

在三维物理模型试验中要精确模拟范围内的所有地质条件是非常困难的。通过综合考虑,本次物理模型试验中主要考虑滑坡段的地形、岩体强度参数、结构面特征、河流下切以及边坡开挖等条件。抓住直立顺层边坡在河流下切和开挖过程的变形破坏是本此试验的关键。

2.2 相似条件

本次三维地质力学物理模型试验是一种破坏试验,需要在几何条件、力学参数等方面满足一定的关系,按相似原理^[4],模型与原型之间应该满足的主要相似关系为:

$$C_L = L_P / L_M; C = C_E = C_R = C_C = C_T = C_{C_L};$$
$$C_p = C_{C_L}^3; C = C_\mu = C_f = 1$$

式中: C ——相似系数; L ——几何尺寸; 下标 P, M 分别代表原型和模型; E ——弹性模量; R ——抗压强度;

C ——内聚力; T ——抗拉强度; γ ——材料的容重; ϵ ——应变; μ ——泊松比; f ——摩擦系数; p ——荷载力。

2.2.1 几何相似

根据试验条件和实际需模拟的滑坡范围,确定模型的几何尺寸 C_L 为 500,即 $C_L = L_P / L_M = 500$,模型的几何尺寸约为长 80 cm、宽 70 cm、高 70 cm,按 2 200 kg/m³ 计,则总重约 900 kg。

2.2.2 模型材料力学性质相似

模型材料的选择是整个试验成败的关键,也是模型试验过程中的重要环节。地质力学模型破坏试验要求原型与模型的容重基本相等 ($C = 1$),故在模型材料力学性质上本次试验考虑的相似条件为:

$$C = C_E = C_R = C_C = C_T = C_{C_L} = 500;$$
$$C_p = C_{C_L}^3 = 1.25 \times 10^3; C = C_\mu = C_f = 1$$

本次模型材料的选择是通过单轴极限压缩实验和剪切实验测定所配材料的相关数据,通过筛选确定材料组分和配合比^[5](表 1)。

表 1 模型材料的配合比(按质量比)

组分	重晶石粉	膨润土	石英砂	甘油	总计
配合比/ %	72.7	9.1	9.1	9.1	100
所需质量/ kg	800	100	100	100	1100

根据已知地质原型参数,由相似原理可得出理想模型材料参数,结合所配出的实际模型材料参数,进行对比,从表 2 可以看出,三者的泊松比无数为 0.25 ~ 0.3,所配制的模型材料在容重、干单轴抗压强度、变形模量、黏聚力、内摩擦角等参数,基本符合相似原理,并且该组材料用甘油作为粘结材料组分,挥发性小,性质稳定,可反复使用。

表 2 地质原型、理想模型、实际模型材料的参数对比

材料类别	比重/ (kN · m ⁻³)	干单轴 抗压强度 / MPa	变形 模量 / 10 ³ MPa	摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa
地质原型	22	17.6	1 ~ 3	30 ~ 35	1.2 × 10 ⁴
理想模型	22	0.0352	0.002 ~ 0.006	30 ~ 35	24
实际模型	22	0.0359	0.0036	30.5	24.26

2.2.3 结构面条件相似

产生弯曲变形破坏的主要原因除卸荷作用外,还由于岩体为直立的薄层岩层组成,故岩体结构面条件的模拟主要针对岩层的层面结构,层面的制作是本试验的难点与重点。本次试验采用两种不同的层面切割方法,在制作模型时,采用整体夯实,利用体积与质量的关系来控制材料比重,进而来控制材料的参数,第一次试验用细钢丝(0.5 mm)多次切割来模拟层面,第二次试验采用刀片(0.5 mm)多次切割来模拟层面。

2.3 试验设备

模拟试验的设备采用坡度试验台,主要由 4 部分组成:
(1) 承载框架。该框架由角钢焊制而成,强度大,可承载 2 000 kg 以上的模型材料。
(2) 提升系统。该部分是本试验台的最大特点,通过后方铰链提升,整个试验台可绕中部转动轴转动,以此来改变试验模型的倾斜角度。该特点针对模拟不同层面倾角的地

质体具有一定实际意义。

(3)加载系统。加载系统主要为千斤顶通过液压可对模型材料的不同方向施加压力。

(4)测量系统。测量系统可根据不同试验要求进行选配,主要分为位移测量配件和应力测量配件。

2.4 模型的加载与测量技术

本次模型试验中采用 $C = 1$,以模型的自重来模拟天然岩体的自重应力,考虑到滑坡区的地形、地貌及地质条件,结合该模型模拟范围,经概化处理,此滑坡模型的加载主要考虑来自滑坡体后方水平方向的地应力,其它 3 个水平方向设置挡板约束,使模型被动受力。按偏心受压公式计算:

$$P_{\max/\min} = N/F \pm M/W = N/F(1 \pm 6e/b)$$

式中: N , M ——作用在基础平面的法向载荷及弯矩, $M = Ne$; e ——荷载偏心距; W ——基础平面的抵抗矩,对矩形平面 $W = Lb^2/6$; b , L ——平面的长度与宽度。当 $e = b/6$ 时, $P_{\min} = 0$,压力呈三角形分布。

根据侧压力的计算公式 $\gamma h = P_{\max}$ 和千斤顶的系数计算可得,2 个千斤顶施加的荷载约为 1 MPa,改变 e 值和千斤顶加载数值可模拟构造应力荷载。

试验中的测量仪器采用百分表,测量模型坡面不同高程的水平 and 垂直方向位移。

3 试验步骤与测量结果分析

3.1 第一次模型试验

3.1.1 试验步骤

该模型试验的主要步骤为:(1)对水平 4 个方向约束,前后方向为木板,侧向为两块有机玻璃挡板;(2)充填模型材料,夯实至所需强度;(3)拆去两边有机玻璃挡板,用细钢丝对模型整体进行切割,模拟岩体的层面,共切割层面 42 层,之后模型两边再加上有机玻璃挡板;(4)模型施加荷载,本试验只对岩体后方加载来模拟水平侧压力,其它 3 个水平边界面,采用被动约束。(5)初始模型规模尺寸为走向长 90 cm,宽 65 cm,高 68 cm,分 4 次开挖来模拟河流下切,每次开挖

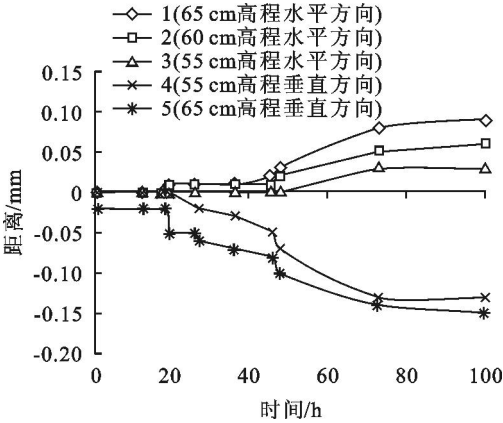


图 3a 模型表面各测点位移时间位移关系曲线

3.2.2 测量结果与分析

第二次模型试验采用 4 个水平百分表测量模拟河流下切后的临空面 4 个水平位置的位移,用一个百分表测量垂向沉降位移。测量结果整理后见图 3b 模型表面时间 (h) 位移 (mm) 曲线。

通过对此次模型试验结果观察和所测数据分析,可大致

约 20 cm,然后模拟公路开挖,最后再切割出横向细沟。(6)用百分表来测量开挖后临空面的高度为 65,60,55 cm 处的水平位移和高度为 65,55 cm 处的垂向位移。模型试验过程见图 3a,图 3b。

3.1.2 测量结果与分析

本次试验采用 3 个水平百分表测量模拟河流下切后的临空面不同水平位移,用 2 个百分表测量不同水平的垂向位移。测量结果整理后见图 3 模型表面时间 (h) 位移 (mm) 曲线。

从以上数据图形可以看出:

(1)随着边坡的不断开挖(模拟河流下切),坡体表面向临空方向倾倒变形;且变形规模不断增大。

(2)在不同水平,模型的变化情况不同。水平方向上,3 个水平的百分表测量高度依次为:65,60,55 cm,最大位移量依次为:0.09,0.06,0.03 mm。可以看出高水平位移大于低水平位移;垂直方向上,两个水平的百分表测量高度依次为:65,55 cm;最大位移量依次为:0.13,0.15 mm,看出上部垂向沉降位移大于下部垂向沉降位移,以上数据也证明了临空面的变化是一种弯曲变形。

(3)坡体横向细沟的切割 ($T = 70$ h 时)对坡体表面的变形量影响不大。

(4)在 5 次开挖(切割)过程中,可以发现模拟公路开挖 ($T = 45$ h 时)时边坡变形量最大,证明在整个模型边坡变形过程中,模拟公路开挖造成的影响最大。

3.2 第二次模型试验

3.2.1 试验步骤

第二次模型试验的主要步骤为:(1),(2),(4)同第一次试验;(3)用薄刀片在上方切割,来模拟岩体的层面;(5)初始模型规模尺寸为走向长 90 cm、宽 65 cm、高 68 cm,分 4 次开挖来模拟河流下切,每次开挖约 20 cm,然后模拟公路开挖;(6)用 5 个百分表来测量开挖后临空面的高度为 65,60,55,50 cm 处的水平位移和高度为 60 cm 处的垂向位移。

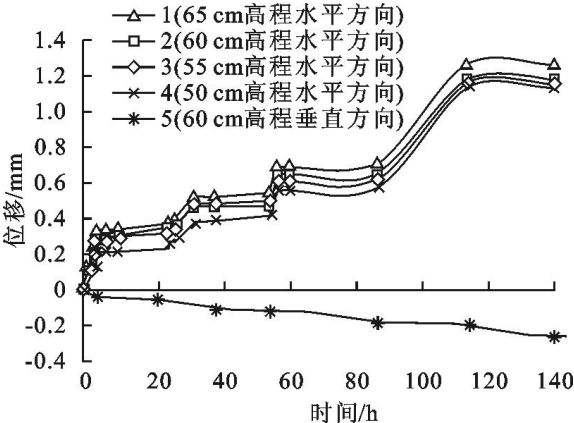


图 3b 模型表面时间 - 位移曲线

得出以下结论:

(1)从量测数据上可以发现,随着边坡的不断开挖(模拟河流下切),坡体表面存在向临空方向的倾倒变形;

(2)从位移曲线上可以看出,在模拟下切和公路开挖的 5 个阶段中,每一次下切初始阶段(分别为 0,4,22,55,80 h)都有一次比较大的变形,之后变形发展缓慢,证明在模拟河流下切新临空

面形成后,卸荷回弹作用是在短时间内发生的。

(3)在不同水平,模型的变化情况不同。4个水平的百分表测量4个高度:65,60,55,50 cm;最大位移量依次为:1.25,1.19,1.15,1.12 mm,从而可以看出高水平位移都大于低水平位移。

(4)在5次开挖过程中,可以发现公路开挖($T=80$ h)的模拟边坡变形量最大,从而证明在整个边坡变形过程中,公路开挖造成的影响最大。

4 结 语

以上两次模型试验,虽为验证同一边坡类型的变形破坏机制,但采用的层面制作方法不同,侧重点也不同。但从总体来看,通过对以上两次模型试验结果观察和所测数据综合分析,可得出以下结论:

(1)从量测数据上可以发现,随着模型的不开挖(模拟河流下切和公路开挖),坡体表面存在向临空方向的倾倒弯曲变形,模拟结果与理论分析一致,证明该边坡的破坏方式为倾倒弯曲拉裂型。

(2)时间上,从位移曲线分析,在模拟下切每个阶段中,每一次下切初始阶段,都有一次比较大的变形,之后变形发展缓慢;证明在模拟河流不断下切时,坡体表面卸荷回弹作用是在短时间内发生的。

(3)空间上,不同水平,模型的变化情况也不同。在水平方向,高水平位移大于低水平位移;在垂向方向,上部垂向位移大于下部垂向位移。证明坡体上部所受应力大于下部所受应力,上部首先发生变形破坏,且变形规模大于下部,在对该边坡采取治理措施时应予以注意。

(4)2次试验中,都反映出在开挖过程中,模拟公路的开挖时模型边坡变形量最大,从而证明在实际整个边坡变形过

程中,公路开挖造成的影响最大。

(5)对比2次试验的变形数据:第一次模型试验坡体表面最大变形量较小(水平方向0.09 mm,垂直方向0.13 mm);第二次模型试验,坡体表面最大变形量较大(1.25 mm,垂直方向0.26 mm)。分析原因为第一次试验采用钢丝切割层面,层面不光滑,有波状纹理;第二次试验用刀片切割层面,层面光滑,基本无纹理。因此可以推断层面性质对边坡变形的大小有很大的影响,即层面越平直、光滑,则开挖临空面的卸荷回弹、倾倒弯曲变形越明显。

(6)模拟坡体横向细沟切割对坡体表面变形量影响不大。

(7)模型变形在宏观上的表征并不明显,推测原因为蠕变破坏本身形成较缓慢所致,建议对该滑坡实行实地监测,采取有效治理措施。

参考文献:

- [1] 陈安敏,顾金才,沈俊,等.地质力学模型试验技术应用研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3785-3789.
- [2] 张林,费文平,李桂林,等.高拱坝坝肩坝基整体稳定地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):466-469.
- [3] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994:331-332.
- [4] 周维垣.高等岩石力学[M].北京:水利水电出版社,1990:404-408.
- [5] 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):1842-1847.

(上接第26页)

参考文献:

- [1] 杨明德,等.喀斯特流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,1998:2-9.
- [2] 戴洪刚,梁虹,黄法苏.喀斯特枯水、干旱、灾害初探:以贵州省为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2005,23(4):28-33.
- [3] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展,2001,20(3):227-233.
- [4] 贺中华,梁虹,黄法苏,等.岩溶地区枯水资源承载力概念与理论的讨论[J].水资源研究,2004,25(4):1-3.
- [5] 王在高,梁虹.岩溶地区水资源承载力指标体系及其理论模型初探[J].中国岩溶,2001,20(2):144-148.
- [6] 邓欢,郭纯清.岩溶地区水资源承载力与经济社会的可持续发展[J].桂林工学院学报,2004,24(1):32-35.
- [7] 酆建强,陆桂华,杨晓华.流域水资源承载力综合评价的多目标决策:理想区间模型[J].水文,2004,24(4):1-4.