

反倾互层岩质边坡开挖物理模拟试验研究

蔡国军, 裴 钻

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059)

摘 要:反倾互层边坡在岩层倾向与边坡坡向组合上存在特殊性, 边坡开挖对反倾向边坡稳定性有一定影响。结合西南某大型水电站边坡开挖实际, 通过选取其主剖面, 利用物理模拟研究方法中的底摩擦试验, 对这个问题进行了探讨, 对给出直观确定合理开挖坡比, 以及确定开挖松弛区范围的方法都具有重要意义。

关键词:反倾向边坡; 底摩擦试验; 边坡开挖; 松弛区

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)05-0126-05

Physical Modeling Research on Consequent Antidip Rock Slope Induced by Slope Excavation

CAI Guo-jun, PEI Zuan

(National Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Antidip rock slopes have their particularity in terrain tendency. There are some effects on the stability consequent antidip rock slope by cutting. Based on one high steep dipslope in one hydropower station, by choosing the main section of the slope and using the experiment of basal contract friction in physical simulation methods, this problem is synthetically analyzed. The result will be devoted to confirm the angle of slope excavation and determine relaxation region.

Key words: antidip rock slopes; the experiment of basal contract friction; slope excavation; relaxation region

在组成边坡的岩体中, 以层状结构类型最为常见。其中又可分为由顺坡外岩层结构构成的顺向坡和反倾内层结构的反向坡两类^[2]。随着人类工程活动的日益频繁及范围的扩大, 不可避免地出现了与反倾向边坡有关的工程地质问题。我国大型工程建设中的反倾边坡变形失稳问题突出特点是变形过程的时效性和失稳破坏的突发性。其岩体中一般不存在有利下滑的贯通性天然结构面, 需要自身在外动力作用下, 生成滑移边界, 故其从变形到失稳破坏经历很长时间, 涉及的变形范围较大, 积蓄的能量也较多, 其下滑时的规模也相当可观^[3]。

物理模拟研究方法应用于边坡岩体的稳定性分析, 具有两个突出的意义: 一是能够直接观测和记录研究对象的变形破坏演变过程; 二是可以通过实验应力分析获得研究对象的变形演变过程中各阶段的应力分布状态, 但对反倾向岩质边坡的物理模拟研究还不多。特别是在不同开挖坡比条件下利用物理模拟反倾边坡的变形失稳模式以及影响范围的研究还少有报道。

该水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅鲁江干流水能资源最富集的中、下游河段五个梯级水电开发的第一级。坝址位于普斯罗沟与手爬沟间 1.5 km 长的河段上。拦河大坝为混凝土双曲拱坝, 坝高 305 m, 水库库容 77.6 亿 m³, 电站总装机容量 3 600 MW, 年发电量

166.2 亿 kW · h。本次试验研究依据左岸 1 885 m 以上开挖工程边坡稳定性分析及支护对策研究。为了解在开挖条件下边坡卸荷岩体的变形失稳模式、以及可能的影响范围, 特别是确定合理的开挖坡比, 选主剖面 V-V 剖面进行了物理模拟试验。采用底摩擦试验模拟反倾边坡的在不同开挖坡比条件下的变形和破坏, 直观地显示了边坡变形、破坏的演变过程, 便于分析变形过程中由变形引起地应力重分布情况及松弛区范围。试验过程中, 首先, 按开挖坡比 1:0.5 (综合坡度 58°) 进行了开挖过程的模拟试验; 然后进行了综合坡度为 53°, 63° 的对比模拟试验。

1 边坡的基本特征

该水电站 V 号山左岸 1885 m 以上开挖边坡的坡体结构属反倾坡。做机制模拟试验, 其地质剖面简化图见图 1。左岸边坡基本工程地质条件: 边坡主要由 3(3) 粉砂质板岩夹变质砂岩、3(4) 厚——具厚层状变质砂岩夹板岩、3(5) 粉砂质板岩、3(6) 厚层状变质砂岩层组成。岩层产状 N15~35°E/NW/30~45°。自然边坡坡度 40~50°。微地貌上, 砂岩一般呈陡壁, 板岩呈缓坡。其中, 3(6) 层砂岩陡壁形态较完整。该反倾边坡的变形破坏有其特殊的地质环境和岩体力学环境条件; 地质环境条件方面主要受控于特殊的河谷地形, 边坡上部板岩砂岩的互层分布; 岩体力学环境方面主要

收稿日期: 2006-04-06

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金资助项目 (GZ2005-07)

作者简介: 蔡国军 (1982-), 男, 助理实验师, 硕士研究生, 主要从事岩土力学实验研究。

受控于互层状岩层力学特性的显著差异性,边坡岩体结构及高陡边坡河谷地应力场的作用。该段反倾向边坡的上述地质环境、岩体力学环境不同,其变形破坏也有其特殊性。其中各岩级的岩体物理力学参数如下表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数

岩级	岩性	模量/ MPa	内聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	泊松比	容重/ (MN· m ⁻²)
Ⅲ2	板岩	35000	0.9	45.57	0.23	0.0270
	砂岩	50000	0.9	45.57	0.2	0.0267
Ⅲ1	板岩	35000	1.5	46.94	0.23	0.0270
	砂岩	50000	1.5	46.94	0.2	0.0267

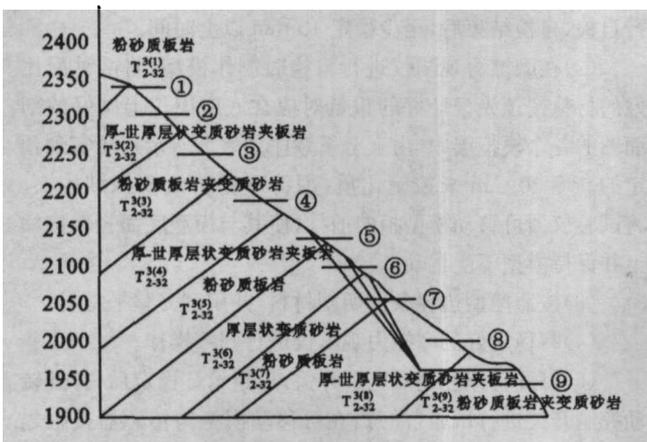


图 1 底摩擦模型简化图

2 模拟原理及设备

2.1 物理模拟原理

物理模拟以相似原理为基础,建立研究对象和模拟试验之间的相似关系,从而保证模型试验中出现的物理现象与原型相似。模拟与研究对象相似,需要在几何条件、受力条件和摩擦系数方面满足一定的关系。

几何条件:研究对象原型和模型所有对应长度之间的比值必须是相同的。下标 R 表示模型中的数值与原型中对应数值的比值。严格的几何相似要求:

$$x_R = y_R = z_R = l_R; l_R = \frac{(\delta_l)_m}{(\delta_l)_p}$$

式中: δ_l ——任意长度。

受力条件:在相应时间和相应点处,作用在研究对象上和模型相应单元上的力应为统一比值。这里的力是指重力、压力、摩擦力等,与他们有关的物理性质包括密度、弹性等。则有:

$$\gamma_R = \frac{(\delta_\gamma)_m}{(\delta_\gamma)_p}; \sigma_R = \frac{(\delta_\sigma)_m}{(\delta_\sigma)_p}; f_R = \frac{(\delta_f)_m}{(\delta_f)_p}$$

但是,在大多数情况下,尤其当研究对象比较复杂时,要满足全部受力相似的条件时不可能,其中某些条件必须简化,因为有些条件并不适用,而有些条件所起的作用相对于另一些条件来说可以忽略不计。

几何条件相似系数: $l_R = \frac{(\delta_l)_m}{(\delta_l)_p}$

受力条件相似系数: $\gamma_R = \frac{(\delta_\gamma)_m}{(\delta_\gamma)_p}; \sigma_R = \frac{(\delta_\sigma)_m}{(\delta_\sigma)_p}$

摩擦系数相似系数: $f_R = \frac{(\delta_f)_m}{(\delta_f)_p}$

式中: l ——几何尺寸; γ ——材料的密度; σ ——应力; f ——摩擦系数; 下标 p, m 分别代表原型和模型,上述相似系数间由下式确定: $\sigma_R = \gamma_R \cdot l_R \quad f_R = 1$

满足上述条件的试验模型一般为机制模型。

2.2 底摩擦试验模拟原理及设备

底摩擦法是以摩擦力在摩擦方向上的分布与重力场相似的性质,利用模型和底面之间的摩擦力来模拟模型体积力(重力)。其原理如图 2 所示:将研究对象的剖面制成模型平放在环形活动橡胶带的平直段上并使原剖面的深度方向与 x 方向一致,沿 x 方向转动橡胶带,模型随之移动,在橡胶带转动方向有一固定框架,当模型受到这一固定框架阻挡时,在模型与橡胶带接触面上每一点就形成摩擦阻力 F :

$$F = (P + \gamma_m \cdot d) \cdot \mu$$

式中: P ——作用于模型法向单位面积上的压力; γ_m ——模型材料的容重; d ——模型的厚度; μ ——模型与橡胶带接触面活动摩擦系数。

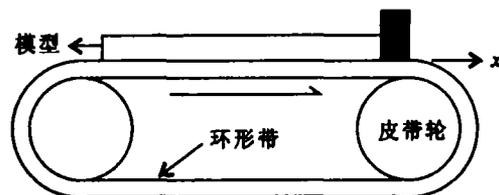


图 2 底摩擦模型试验原理示意图

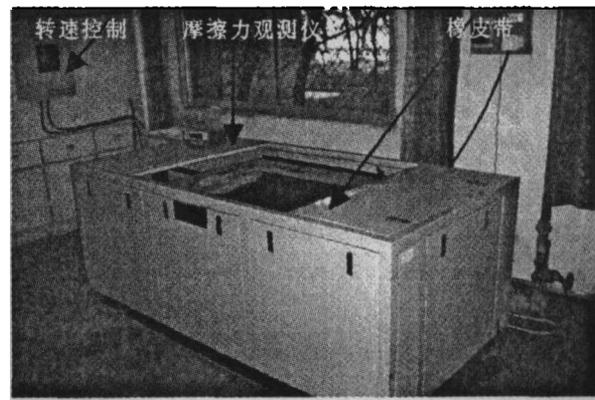


图 3 自动化底摩擦试验仪

根据圣维南原理,当模型足够薄时,认为摩擦力均匀作用在整个厚度上,相当于原型物体在天然状态下受到的重力作用的状态。其特点是试验可根据情况随时停下来,以便观察试验过程的各个细节,这也是其他许多方法所不能及的。试验时,通过转动模型边坡持续受到坡体应力的作用,同时用间断拍照和详细素描的方式记录模型边坡变形发展的全过程。

此处试验所采用的设备是由成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室和四川大学根据底摩擦试验的基本原理,联合研发的一套全自动化底摩擦试验设施(见图 3)。该设施的最大优点是:橡皮带转由图中所示的转速控制器控制,根据需要可随时调控转速,且增减速比较均匀,不出现转速骤增骤减而使摩擦力变化剧烈的不稳定现象,模型所受到的摩擦力,可通过图中所示的可移动模型框

上的杆件传递给力传感器,因此,可随时获得摩擦力数据,以便于随时调控橡皮带转速来控制其稳定,从而保证摩擦力分布与重力场条件相似,减少了烦琐的计算。

3 模型建立

3.1 模型材料

试验选择模型材料,重点考虑了互层岩体弹性模量比例相似,其次考虑摩擦系数、应力应变关系相似几方面。且根据不同部位边坡岩体性质及岩体结构面等,采用不同的配比,以满足相似性要求。本次试验选用的材料是由重晶石粉、石英砂、石蜡油。配比方案根据前有经验 60 : 30 : 10,并结合本次实际情况进行配比和土工试验,最终选取比较合适的配比方案。

3.2 模型建立

对于所研究的左岸 V-V 剖面,左岸缆机平台(EL1 960 m)尺寸 221.5 m×25 m,总体布置方向为 N28°E。选取 EL 1 900 m 以上的边坡。先取边坡剖面原型高为 443 m,取边坡剖面原型长为 540 m,但受到模型框宽度限制,最大模型长度为 80 cm,并使其一边界受框缘约束,简化模型边界条件与实际情况相似。采取几何条件相似系数 $C_R = 1/700$ 。

表 2 模型材料土工试验成果表

试样编号	配比重晶石 : 石英砂 : 石蜡油	密度 / (kN · m ⁻³)	内聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	弹性模量 / kPa
模型料 1	60.5 : 30.5 : 9	2.77	2.9	34.2	535
模型料 2	60 : 32 : 8	2.78	4.4	33.5	898
模型料 3	59.5 : 31.5 : 9	2.72	5.1	32.5	399
模型料 4	60 : 30 : 10	2.73	1.2	34.2	370

由于研究对象边坡结构复杂,材料的选用不可能完全满足实际需要,选用两种配合模型材料进行砂岩和板岩的模拟。其配比,根据摩擦系数相似系数 $f_R = 1$ 的前提条件,首先对重晶石、石英砂和液体石蜡油同配比混合,并施加同样的外力适当压实制作试样。分别对其物理力学性质进行试

验,然后选合适的几组测其内聚力、内摩擦角以及弹性模量,结果见表 2。最终选用模型料 1 和 2 两种配比进行本次物理模拟试验研究。将模型料 1 模拟板岩;将模型料 2 模拟砂岩。主要是考虑到模型料 2 与模型料 1 的弹性模量比值与工程实际比较接近。

另外,根据以上简化建模并结合原型与模型之间的相似系数关系,确定试验过程中的摩擦力保持在 66~70 N。

4 试验过程与现象分析

4.1 试验方法

使用自动化底摩擦仪进行实验。步骤如下:

(1)将摩擦力观测仪电源接通,并打开开关,让观测仪进行自检,自检结束后,至少稳定 10 min 以上时间。

(2)在摩擦力观测仪进行自检时制作模型,将两种配比好的材料按预先设计好的重量对应底摩擦仪上画好的剖面图的各个模拟层中(由上至下顺序如表 3 所示),压实到预定的高度 10 mm 来控制比重,用特殊锡箔纸模拟结构面。将试验仪器可移动模型柜向前推,使其与模型底面轻轻接触上并保持模型不受扰动。

(3)按照原型边界条件切割材料,并用刮刀整平材料。

(4)将稳定好的摩擦力观测仪进行归零操作。

(5)打开转速控制器电源开关,见指示灯稳定后,打开转动控制开关进行试验(注意:在可移动模柜与传感器接触之前,转速一定要控制在极其微小的情况下,待二者接触后使模型稍微向前推移,消除了模型底面与底摩擦仪的底带间的粘结力,方可提速)。

(6)在转动过程中对模型的变形破坏过程进行观测,并可以随时将转速减小到零。对模型在不同开挖条件下的变形破坏现象进行摄像和描述,然后继续转动,直至模型有明显变形或破坏,试验时间控制在 11~12 h,试验终止。

通过以上步骤便可以得到模型在不同开挖坡度条件下的逐次变形破坏的发生、发展过程。

表 3 底摩擦仪上剖面图各层号数据

模拟层号	层位	面积/cm ²	体积/cm ³	模型质量/g	模拟层号	层位	面积/cm ²	体积/cm ³	模型质量/g
①	3(1)	18.8	18.8	52.2	⑥	3(6)	401.3	401.3	1115.6
②	3(2)	147.2	147.2	407.9	⑦	3(5)	238.6	238.6	661.7
③	3(3)	271.1	271.1	750.8	⑧	3(4)	460.4	460.4	1279.6
④	3(4)	385.7	385.7	1072.4	⑨	3(3)	184.3	184.3	510.6
⑤	3(5)	430.3	430.3	1191.9					

4.2 试验过程、现象及结果初步分析

针对 V-V 剖面,根据前面所述,进行简化制模。试验开始后,结合实际情况,分 3 种情况:即按 CII 标中的开挖坡比(综合坡度 58°),进行开挖过程的模拟;其次,进行综合坡度为 53°,63°两种的对比模拟试验。每种情况又分 2 步:即施工开挖前和施工开挖后。具体过程及分析评价如下:

(1)按坡度 58°考虑开挖模拟试验。试验前准备好的模型如图 4 所示(施工开挖前),试验开始后,经过一段时间的观测,可以观察到整个模型向皮带转动方向稍有压密现象;除此之外,没有发现任何破坏迹象产生。由此可见,在重力场作用下,边坡在施工开挖前基本处于稳定状态,基本不会

出现大的变形破坏。

在此基础上,对图 5 中的模型进行沿 58°角施工开挖,开挖根据现场实际情况进行平台式分步开挖,按高度大致四步开挖:step1:从开口线挖至 2 070 m;step2:从 2 070 m 挖至 2 030 m;step3:从 2 030 m 挖至 2 000 m;step4:挖至 1 960 m,开挖后的模型如图 4 所示。

一段时间,发现有摩擦力减小,加一个平板在模型材料上增加压力从而增加底摩擦力使摩擦力稳定在 66~70 N。2 h 后发现在第⑥模拟层上,离开挖面顶部垂直距离 60~70 mm 处出现有 3 条裂纹,裂纹长 5~10 mm,裂纹延伸方向与岩层面近乎垂直;随后在离开挖面顶部垂直距离约 95 mm

处,发现有一条裂纹,裂纹长约 8 mm。随着时间的增加,上述几条裂纹有扩展,附近有 2~3 条微裂纹,不是很明显。

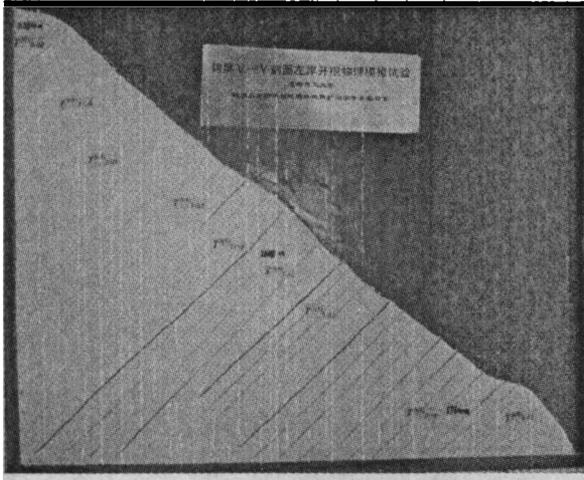


图 4 开挖试验前的最初模型

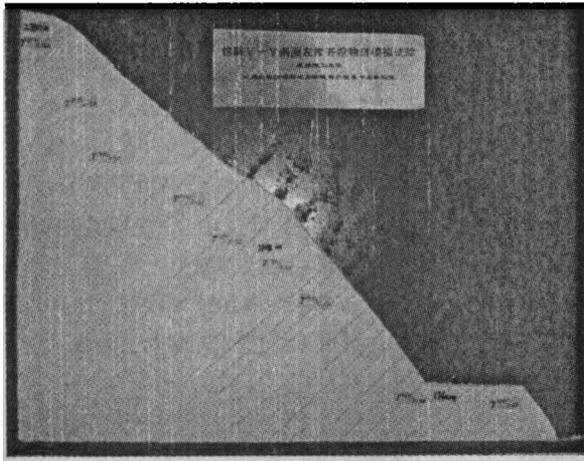


图 5 沿 58°角施工开挖后的模型图

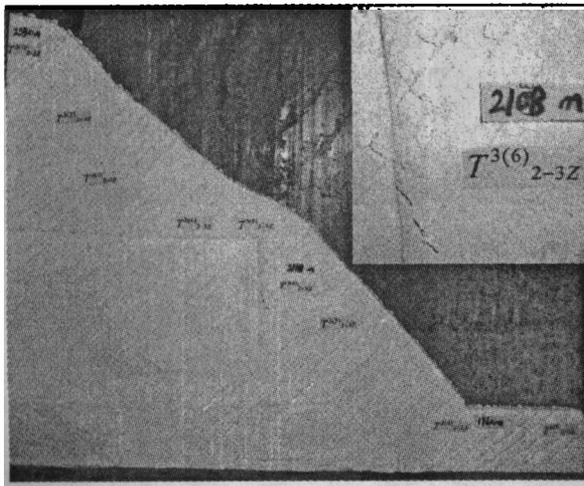


图 6 沿 58°角施工开挖的边坡总变形图

在 4 h 后发现在第⑦、⑧模拟层上出现有 2~3 条裂纹,裂纹长约 10 mm,裂纹延伸方向近乎垂直于岩体层面;在 8 h 后,以上裂纹都有发展,并且在离开挖底边界 20~30 mm 处有 2 条长约 5 mm 的裂纹,在第④模拟层上也出现一条裂

纹,在 4 h 后发现在第⑦、⑧模拟层上出现有 2~3 条裂纹,裂纹长约 10 mm,裂纹延伸方向近乎垂直于岩体层面;在 8 h 后,以上裂纹都有发展,并且在离开挖底边界 20~30 mm 处有 2 条长约 5 mm 的裂纹,在第④模拟层上也出现一条裂纹。在试验 11~12 h 时,结束试验。沿 58°角施工开挖的边坡变形破坏情况见图 6;

整体上看,相似材料上第⑥、⑦、⑧模拟层较大面积上有裂纹发育。

(2)按坡度 53°考虑开挖模拟试验。试验前准备好最初模型,对模型进行沿 53°角施工开挖,开挖根据实际情况进行平台式分步开挖,按高度大致四步开挖。

一段时间后,在离开挖面 35 mm 处,第⑥模拟层上出现有一条长约 12 mm 的微裂隙,随时间增加裂隙明显增大。并向周围扩展(该裂缝周围有微小裂纹散布)。8 h 以后,发现坡体后缘与模型柜接触面有稍微脱离迹象;在开挖前缘有 5 条较明显的裂纹,垂直开挖面 40 mm 左右,裂纹长 5~12 mm,裂纹约垂直于岩体层面。10 h 以后至试验结束时发现上述的离开挖面 35 mm 处,第⑥模拟层上的裂纹与周围一裂纹连通了,发展为长约 60 mm 的裂缝。其周围的其他裂纹也都加深了,出现裂纹范围较大。在开挖的面上有 2 条斜向下的裂缝,长约 10 mm,与坡面夹角 30°左右,其中一条位置在第⑦模拟层中部位置;另一条在第⑧模拟层中部。模型整体有压缩变形,其中剖面顶部发现变形量最大,约有 65 mm。在开挖面上的变形在开口线位置稍大,约有 22 mm,而在缆机平台开挖点的变形约为 5 mm。

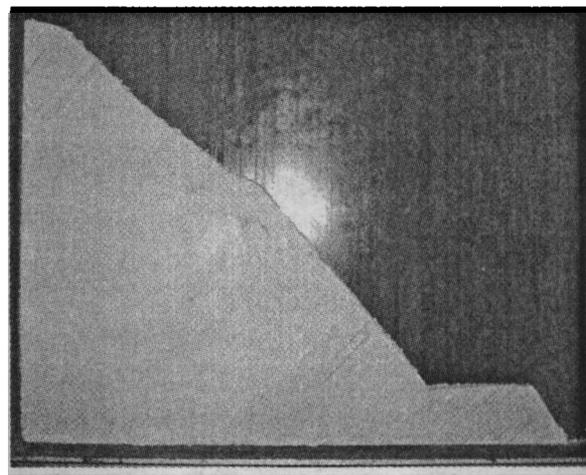


图 7 沿 53°角施工开挖的边坡最终总变形图

在试验历时 11~12 h 时,结束试验。沿 53°角施工开挖的边坡变形破坏情况见图 7。

(3)按坡度 63°考虑开挖模拟试验。对最初模型进行沿 63°角施工开挖,开挖根据实际情况进行平台式四步开挖。

再过一段时间后,2 h 内,没有发现有裂纹出现。4 h 后,在离开挖面 32 mm 处,第⑤模拟层上出现有一条长 10 mm 左右的微裂隙,随时间增加裂隙轻微增大。该裂缝周围有 1 条微小裂纹。8 h 以后,发现在开挖角点缆机平台开挖面附近 20 mm 左右,有 2 条微裂纹,裂纹长度约 10 mm,裂纹约垂直于岩体层面。10 h 以后至试验结束时发现开挖斜

面上,坡体后缘顶上与模型框接触面有稍微脱离迹象,在离开挖斜面垂直距离 95 mm 左右有 1 条稍大裂隙,长约 30 mm;在第⑥模拟层开挖面上有 1 条斜裂纹,长约 10 mm,与剖面成 30°左右夹角。在第⑧模拟层中间,离开挖面垂直距离约 31 mm 处有 2 条长约 8 mm 的微裂纹;整体裂纹分布面积不大。模型整体有压缩变形,其中剖面顶部发现变形量最大,约有 58 mm。在开挖面上的变形在开口线位置稍大些约有 13 mm,而在缆机平台开挖点的变形约为 7 mm。

在试验历时 11~12 h 时,结束试验。沿 63°角施工开挖的边坡变形破坏情况见图 8。

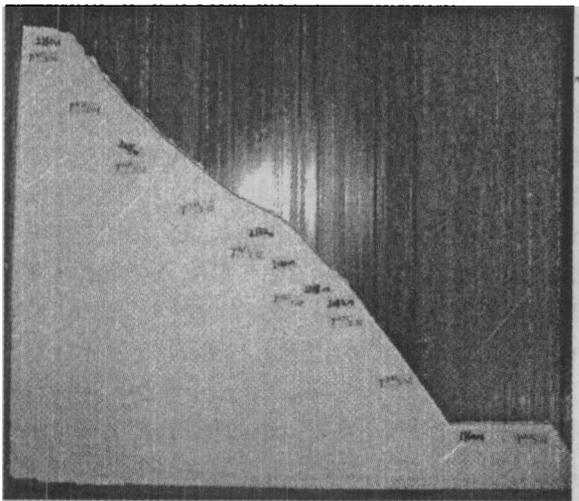


图 8 沿 63°角施工开挖的边坡最终总变形图

5 结果初步分析

由该边坡 V-V 剖面进行的物理模拟获得如下成果:

(1)边坡施工开挖前,试验过程中未发现明显破坏现象,说明边坡整体上处于基本稳定状态。

(2)边坡施工开挖后,在模拟重力场作用下,裂纹主要分布在第⑥、⑦、⑧三个模拟层上,即在 3(6)层的厚层状砂岩条块中下部、3(5)层的粉砂质板岩条块、3(4)层的厚-巨厚层状变质砂岩夹板岩条带上。

(3)开挖坡度在 53°、58°以及 63°三种情况下,随着上部开挖开口线位置的降低,裂纹分布面积有减少趋势,可能是因为开挖坡度变大,使得开挖面长度变短,影响的部位面积变少。

(4)在开挖后坡体后缘已与模型框架接触面有稍微脱离,可能是由于边坡施工开挖,坡体前缘减压所致。

(5)沿坡度在 53°下开挖,大裂隙出现在第⑥模拟层即 3(6)层的厚层状砂岩条块中部;沿坡度 58°下开挖,大裂隙出现在第⑥模拟层即 3(6)层的厚层状砂岩条块中下部;沿 63°下开挖,大裂隙出现在第⑧模拟层即 3(4)层的厚-巨厚层状变质砂岩夹板岩条带中,而且随开挖角度的增大,大裂隙长度有变小趋势且离开挖面的距离变大,影响范围下降。

(6)边坡变形失稳模式属倾倒-拉裂。拉裂缝多出现在开挖面开口线附近和开挖面底部附近。边坡变形控制因素为岩体自重应力,其表现为岩层在自重作用下向河谷方向发生弯曲(倾倒)。但由于软硬相间的特殊岩体结构,岩体在自重作用下较差,岩层产生较强压缩变形,使得上覆较硬岩体弯曲折断而发育切层张裂,张裂缝只切穿较硬岩层。

本次在 3 种不同开挖坡比条件下模拟试验所反映出的边坡变形和破坏,为施工中采用合适的开挖坡比提供了重要的依据(缆机平台内边坡开口线位置不宜过高,建议采用坡比为 1:0.5 也即坡度为 63°),并为施工中及时支挡,以及设计中采取得当的加固处治施工提供了重要的依据。

6 讨论与结论

采用底摩擦试验模拟边坡的变形和破坏,直观地显示了边坡变形、裂纹发展演变过程以及裂纹分布位置及面域,便于分析边坡变形过程中的应力分布及由变形引起地应力重分布情况,本次试验采用了不同的模拟材料配比反应岩体的特性,在不同开挖坡比的条件下观察起变形特征。这对于判断边坡的稳定性,研究边坡的变形破坏机制以及采取正确的边坡处治措施,都具有较高的指导价值。

参考文献:

- [1] 徐进. 斜坡变形破坏几种基本地质力学模式的物理模拟研究[D]. 成都:成都理工大学,1987.
- [2] 张卓元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [3] 黄润秋,许强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [4] 成都理工大学环境与土木工程学院. 国道 108 线广元段缓倾角层状边坡变形破坏机制及防治措施研究[M]. 2001.