

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.026

缓倾软硬岩互层边坡变形破坏机制模型试验研究

宋娅芬^{1,2}, 陈从新¹, 郑允¹, 夏开宗¹, 欧哲¹, 夏天游¹, 周意超¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.中盐勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘 要:以宜巴高速公路沿途彭家湾软硬岩互层边坡为工程依托,依据地质分析及相似理论建立缓倾软硬岩互层边坡室内模型,采用开挖试验及和注水软化试验来模拟实际中的工程开挖(或河谷下切)和雨水浸润软化过程,研究缓倾软硬岩互层边坡的变形破坏机制。结果表明:在开挖及雨水软化两种工况下,该类软硬岩互层边坡的变形模式都是前期的滑移拉裂变形和后期的整体蠕滑变形,破坏模式是以深部软层为滑动面的整体滑移;硬岩层与软岩层的变形情况略有不同,硬岩层以整体蠕滑变形为主,而软岩层以滑移拉裂变形为主;深部软岩层的状态变化对边坡的整体稳定性影响非常关键;工程开挖(河谷下切)及雨水入渗都会对该类缓倾软硬岩互层边坡的稳定性有重要影响,开挖导致的临空面及微裂隙是滑坡发生的基础,水是滑坡发生的条件和诱因。

关键词:缓倾软硬岩互层;模型试验;开挖;注水;变形破坏机制

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 02 - 0487 - 08

Model experimental study of deformation and failure mechanism of low-angled slopes with interbedding of soft and hard rocks

SONG Ya-fen^{1,2}, CHEN Cong-xin¹, ZHENG Yun¹, XIA Kai-zong¹, OU Zhe¹, XIA Tian-you¹, ZHOU Yi-chao¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. CNSIC Survey and Design Institute Co. Ltd., Changsha, Hunan, 410014)

Abstract: A lab model experiment of low-angled slope with interbedding of soft and hard rock is designed on the basis of geological analysis and similarity theory. The lab test is based on Peng Jiawan slope at Yi-Ba highway which has interbedding of soft and hard rocks with low dip angle. In the model tests, slope excavation tests are used to simulate the engineering excavation (or valley incision); and the water injection softening processes are used to simulate the rainfall infiltration. The results show: under both excavation and rainfall infiltration conditions, the deformation modes of the slope are sliding-tension at first and overall creep-slippage in the latter; and the failure mode is overall slip failure along the sliding zone of deep soft rock. Strictly speaking, the deformation of hard rock strata differs from the deformation of soft rock strata. Hard rock deforms mainly in sliding-tension but soft rock deforms mainly in overall creep-slippage. Changes of the condition of deep soft rock affect the total stability of the interbedding slope mostly. Both excavation and rainfall infiltration would lead to decline of stability of the slope. The free surfaces and micro-fissures induced by excavation are the basis triggering slope failure, and the rainfall provides incentives to the slope failure.

Key words: low-angled slope with interbedding of soft and hard rocks; model experiment; excavation; water injection; deformation and failure mechanism

1 引 言

软硬岩互层岩质边坡是指由强度差异较大的两组或两组以上岩体成互层状结构组成的边坡,广泛分布在西南、西北、华中华南^[1],尤其是红层、变质岩、煤系地层等分布的地区。由于软岩与硬岩的岩性差异较大,边坡的差异风化越加明显,而该类

边坡的地质构造条件又往往比较复杂,软岩会发展成严重影响边坡稳定的软弱岩层^[2],在外界地质营力(如河谷下切,降雨入渗等)的作用下导致大量大规模崩塌地质灾害的发生,如宣汉天台乡滑坡^[3],重庆鸡尾山滑坡^[4]、青海高原龙穆尔沟红层滑坡^[5]等,造成的社会经济损失非常严重。迄今,随着西部大开发战略的实施,对山区高速公路的需求越来越

收稿日期: 2013-10-12

基金项目: 西部交通科技项目(No. 2009353342540)。

第一作者简介: 宋娅芬,女,1989年生,硕士,主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: yafensong1103@163.com

通讯作者: 陈从新,男,1962年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性、地面沉降、岩石渗流等方面的研究工作。E-mail: cxchen@whrsm.ac.cn

越大，不可避免地会途经红层、变质岩等软硬岩互层边坡分布的地区，软硬岩互层边坡稳定性也已成为了工程界急待解决的一大难题。

目前，对软硬岩互层边坡的研究工作已逐渐开展，然而对其破坏机制的研究主要是定性分析和有限元数值模拟。吉随旺等^[6]、程强等^[7]定性研究了近水平红层变形破坏机制；刘宏等^[8]对软硬岩互层边坡危岩体失稳破坏模式进行了分析总结；胡斌等^[9]、董金玉等^[10]综合地质调查及数值分析对软硬岩互层的崩塌形成进行了相关研究；丁秀丽等^[11]应用三维数值分析对软硬岩互层边坡岩体的蠕变效应进行了分析研究。采用物理模型试验的方法对其进行直观系统的研究尚少，刘汉香^[12]、李果^[13]通过物理模拟试验，研究了软硬岩互层边坡的地震动响应特性及随着振动强度的加强，水平及竖向响应强度减弱的规律；吴红刚等^[5]研究了青海高原红层滑坡随着红层岩体强度两次衰减而引发的历史演化过程；张桂民等^[14]针对软硬互层盐岩变形破坏受倾角、夹层及界面影响的规律的室内模拟试验研究。这些已有的研究更多侧重于对软硬岩互层边坡的地震动响应及岩体材料等方面，缺乏对互层边坡变形破坏模式的系统深入的试验研究。边坡变形破坏模式是边坡稳定性分析研究的基础^[15]，深入研究软硬岩互层边坡的变形破坏机制能更好地分析该类边坡的稳定性影响规律，为该类边坡的处置和优化设计提供重要的指导意义。

为此，本文依托于宜巴高速公路沿线典型软硬岩互层边坡，采用物理模型试验方法对该类边坡在工程开挖（河谷下切）及降雨入渗这两种工况下的变形破坏机制进行相关研究，探讨缓倾软硬岩互层边坡变形破坏的一般规律，为同类边坡的研究提供借鉴依据。

2 工程区地质概况

宜巴高速公路项目区位于鄂西山区，地处秦岭山脉东南麓，地貌单元为鄂西构造剥蚀低中山区。工程项目所处的地质条件复杂多变，沿线有 20 多处属于侏罗系砂岩、粉砂岩、泥岩互层的软硬岩互层型滑坡。本试验以其中最为典型的彭家湾古崩滑坡为试验原型。

彭家湾古滑坡位于凉台河大桥西段及王家屋场大桥及其间路基段，呈一不对称“钟”型，前缘至后缘纵向长约 1 540 m，前缘横向宽约 1 470 m，前缘陡坡直抵凉台河河谷，河谷底标高为 450~480 m，河谷狭窄，宽约 10~75 m，谷底相对平坦。该古滑坡体下伏地层为侏罗系下沙溪庙组（J_{2x}）长石石英砂岩及泥质粉砂岩互层夹紫红色粉砂质泥岩的不等厚互层，岩层顺坡缓倾，岩体综合产状为 36°16'。组成边坡的岩层层面较清晰，地表以下 0~33.6 m 为第四系残坡堆积体，堆积体以下 0~16.0 m 为强风化带，岩性为灰、黄灰色薄层至厚层细砂岩，16.0~37.4 m 为中风化带，岩性为紫红色泥岩、砂质泥岩，37.4~63.2 m 为中风化带，岩性为黄灰、绿灰色块状中粒长石石英砂岩，63.2~93.4 m 为微风化带，岩性为紫红色泥岩间夹灰紫色细砂岩，93.4~100.2 m 为微风化带，岩性为块状长石石英砂岩，下部为巨厚层紫红色泥岩层（见图 1）。

古崩滑坡地处凉台河中段，河流由 NNE 向 SSE 方向流动。河流多年平均流量为 8.34 m³/s，属山区雨源性河流，水量季节性变化剧烈，水位暴涨暴跌。地下水主要有第四纪松散堆积物孔隙水、基岩裂隙水两种。覆盖层孔隙发育，渗透性强，贮水性能差，在钻探过程中漏水现象严重，但持续的强降雨使土体含水率剧增甚至饱和；基岩裂隙水主要赋存于砂

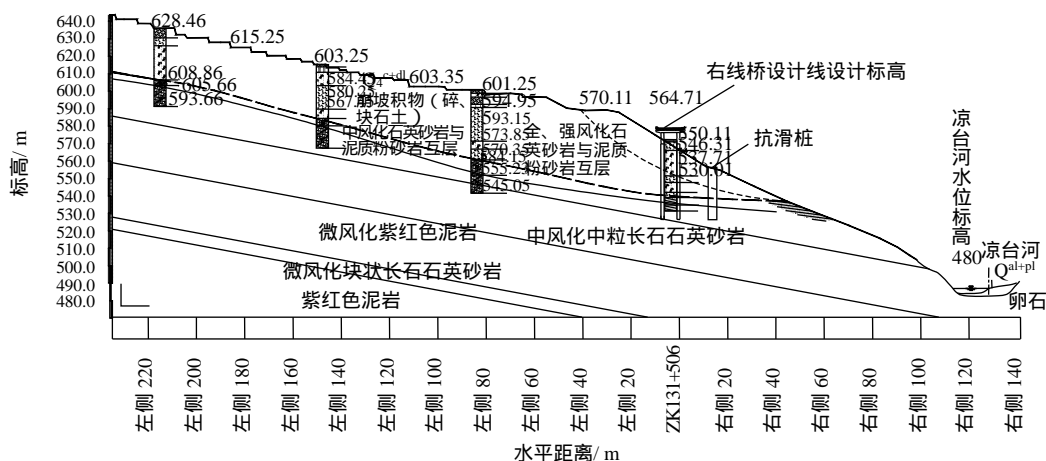


图 1 宜巴高速沿途彭家湾软硬岩互层边坡典型地质断面图
Fig.1 Typical geology section of Peng Jiawan slope at Yi-Ba highway

岩、泥质粉砂岩与泥岩互层结构中，由于泥质砂岩及泥岩岩性较差，裂隙发育明显，为地下水贮存提供了一定的空间。该类地下水主要由大气降水、上覆盖层孔隙水入渗补给，在前缘河谷地带以点状或线状排泄^[16]。

3 模型试验设计

3.1 相似比设计

拟进行框架式二维模型试验，根据框架尺寸和滑坡原型的实际情况，确定模型试验的几何相似比 $C=1:126$ ，试验模拟的原型范围长为 176 m，高为 176 m，宽为 25 m。根据相似比确定若干原则及本试验的模拟范围确定相似常数，选取 $C_l=126$ ， $C_\gamma=1.64$ 。由相似判据可得

$$\left. \begin{aligned} C_\sigma &= C_\gamma C_l = 207 \\ C_\mu &= C_\epsilon = C_f = C_\phi = C_{\epsilon^o} = C_{\epsilon^c} = C_{\epsilon^t} = 1 \\ C_\sigma &= C_E = C_C = C_{\bar{\sigma}} = C_{R^t} = C_{R^c} = C_\tau = 207 \\ C_\delta &= C_l = 126 \\ C_t &= \sqrt{C_l} = 11 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： C_σ 为应力相似常数； C_l 为几何相似常数； C_γ 为重度相似常数； C_μ 为泊松比相似常数； C_ϵ 为应变相似常数； C_f 为摩擦系数相似常数； C_ϕ 为内摩擦角相似常数； C_{ϵ^o} 为残余应变相似常数； C_{ϵ^c} 为单轴极限压应变相似常数； C_{ϵ^t} 为单轴极限拉应变相似常数； C_E 为弹性模量相似常数； C_C 为凝聚力相似常数； $C_{\bar{\sigma}}$ 为边界应力相似常数； C_{R^t} 为抗拉强度相似常数； C_{R^c} 为抗压强度相似常数； C_τ 为抗剪强度相似常数； C_δ 为位移相似常数； C_X 为体积力相似常数； C_t 为时间相似常数^[17]；各参数值见表 1。

表 1 各相关相似常数值

Table 1 Modeling constants of similar material test

C_σ	C_ϵ	C_f	C_E	C_C	C_ϕ	C_μ	C_τ	C_δ	C_X	C_t
207	1	1	207	207	1	1	207	126	1	11.2

3.2 相似材料设计

模型所用试块由重晶石粉、不同粒径石英砂、石膏、水和甘油按一定比例制成^[18]，表 2、3 为经大量配比试验所确定的原型坡体材料^[19]与模型材料的代表性物理力学参数及相应的试验配比。表 3 中 类相似模块模拟砂岩， 类相似模块模拟泥岩。由此可见，所选模拟坡体的相似材料基本上能满足相似判据，可以用来模拟砂岩及泥岩。

表 2 边坡岩石与模型材料的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of slope rocks and similar materials

岩类名称	重度 / (kN/m ³)	抗压强度 σ_{cm} / MPa	相似模块	重度 / (kN/m ³)	抗压强度 σ_{cm} / MPa
砂岩	26.7	28	类	15.96	0.14
泥岩	27	12	类	16.16	0.06

表 3 模型坡体材料配比

Table 3 Material ratios of slope models

相似模块	重晶石粉：石英砂：石膏：水：甘油
类	0.36: 0.469: 0.060: 0.090: 0.013
类	0.68: 0.220: 0.023: 0.064: 0.013

3.3 试验方法及过程

基于现有试验条件，本次试验将模拟彭家湾古滑坡，试验原型中长为 176.4 m，高为 176.4 m 的软硬岩互层边坡，由几何相似系数对应到模型上的尺寸为 140 cm × 140 cm，用加工成统一规格的模块垒砌成。加工的 类岩样模块尺寸为 20 cm × 5 cm × 3 cm，依据配比将各成分混合均匀，采用专门模具加工制作。模型框内框长为 1.4 m，高为 1.8 m，宽为 0.3 m，前后无遮挡，模块养护好之后，即可在该模型框上按照绘好的模型体制作图砌筑成型。

用百分表进行位移观测。在模型体背面的开挖线附近及各岩层共布置了 15 个百分表测点(见图 2、3)。其中靠近地表面部位布置了 3 个百分表测点测量地表面的下沉及横向位移，开挖线附近布置了 6 个测点，模型体中布置了 6 个测点，每个测点都量测竖向位移和水平向位移。

开挖试验：拟用此开挖来模拟研究现场工程开挖或河谷下切对软硬岩互层边坡的影响特征。开挖共分为 4 级，按图 2 所示进行开挖，每级开挖完成后分别间隔 1、2、3、12 h 进行百分表读数，开挖完成后继续进行一定频率的测度至读数稳定。

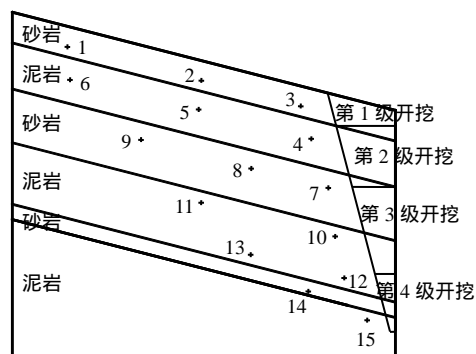


图 2 模型位移测点布置图

Fig.2 Layout of displacement measuring points in model slope



图3 百分表安装图
Fig.3 Dial gauge installation

注水软化试验：拟用此注水来模拟研究降雨入渗对软硬岩互层边坡的影响特征。开挖试验完成后，对模型体的第2、4岩层（软岩层）进行注水软化试验。试验采用点滴式注水法。整个注水过程分为两个阶段，第1个阶段是对第2岩层（上部软岩层）的中部注水，每天以平均200 ml/块的水量点滴入软岩层中，每隔2 h进行一次百分表读数，至横向百分表读数不再变化时停止；第2个阶段是对第4岩层（深部软岩层）中部注水，方法同上，至坡体失稳停止。

4 试验结果分析

4.1 开挖试验结果分析

根据开挖试验结果，绘制模型试验中百分表测得的各点时间-位移曲线，见图4，图中各曲线编号对应为各百分表的编号。

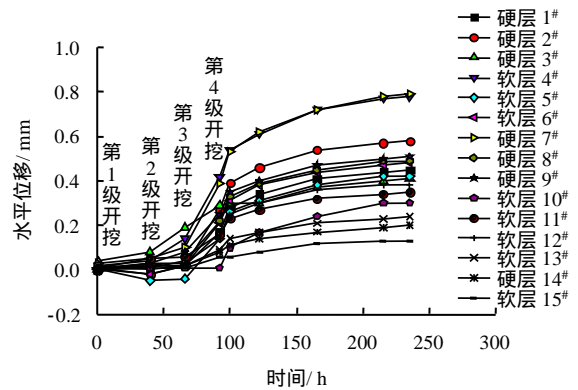
由图4可以得到以下规律：

(1) 滑移拉裂变形发展明显，随着开挖地进行，坡体前端逐渐失去支撑，临空面附近的坡体会向外滑移拉裂。临空面附近的硬层3#、软层4#、硬层7#分别在第1、2级开挖和第3级开挖后位移明显加速增长。坡体前缘硬层7#与其同层中部测点8#的位移差为0.3 mm，换算到实际边坡中为37.8 mm，7#所在硬层与其下方软层最大的位移差为0.49 mm，换算到实际边坡中为61.74 mm，位移差都非常明显，在这两岩层之间存在潜在滑动面。

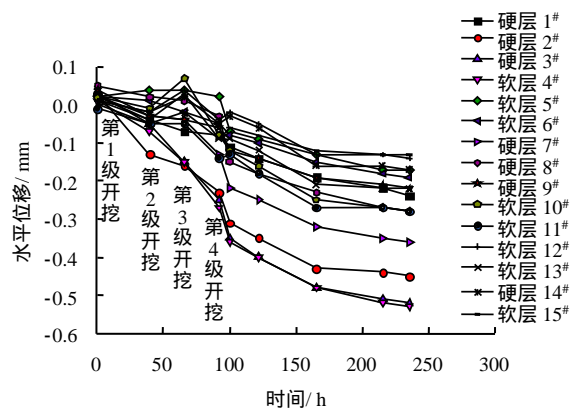
(2) 开挖试验中边坡的变形为卸荷变形与蠕滑变形，变形模式为开挖过程的滑移拉裂变形及开挖完后边坡的整体蠕滑变形。第1、2级开挖后，临空面附近坡体卸荷变形稍大，坡体整体的卸荷变形较小；自第3级开挖开始，坡体的卸荷变形出现整体性的加速增大并持续到第4级开挖后的一段时间，而后坡体整体发生蠕滑变形，变形持续增大，但速率逐渐变小直至最后趋于稳定，如图4所示。

(3) 深部厚层软岩的开挖扰动对边坡的稳定性影响最大。第3级开挖属于深部软岩开挖，开挖后（见图4），坡体发生明显整体性的加速变形，而其余级别开挖的此类现象不明显；且前缘测点与中部测点的位移差增量最大，拉裂缝发展，即第3级开挖后坡体受到的稳定扰动最大。

(4) 软岩层是否会发展为滑带与其埋深相关，埋深大于某一临界值时，软岩层才可能发展成为滑带。图4所示第3级开挖后，边坡的位移增长明显加速，该级开挖的主体部分是深部软岩，而浅部软岩（第2级开挖）开挖后，大部分测点的位移增长均不明显。试验结束时，浅部软岩层附近测点的位移差较小，深部软岩层附近测点的位移差相对较大，其最大位移差换算到实际中约为61.74 mm，即在该深部软岩层处存在潜在滑动面。因此，软岩层埋伏到一定深度后才可能发展成滑带。



(a) 开挖阶段各测点水平位移-时间曲线图



(b) 开挖阶段各测点竖向位移-时间曲线图

图4 开挖试验模型的时间位移曲线

Fig.4 Curves of times vs. displacements of excavation test models

4.2 注水软化试验结果分析

根据注水软化试验结果，绘制模型试验中百分表测得的各点时间-位移曲线，见图5，图中各曲线

编号对应为各百分表的编号。

由图 5 及破坏形态 (见图 6), 可以得到以下规律:

(1) 注水软化试验中, 前期发生了一定的滑移拉裂变形, 后期发生整体蠕滑变形, 边坡已经失稳, 破坏模式为以深部软岩层为滑动面的整体滑移。从

位移-时间曲线图上可以看出, 以软化层为临界, 其上方的测点 (1#~12#) 位移远大于下方测点 (13#~15#) 的位移, 水平向位移差最小值达 3.57 mm, 对应到实际边坡中为 449.5 mm, 且坡体后缘已脱离模型框架 (如图 6(b)), 缝隙非常明显。

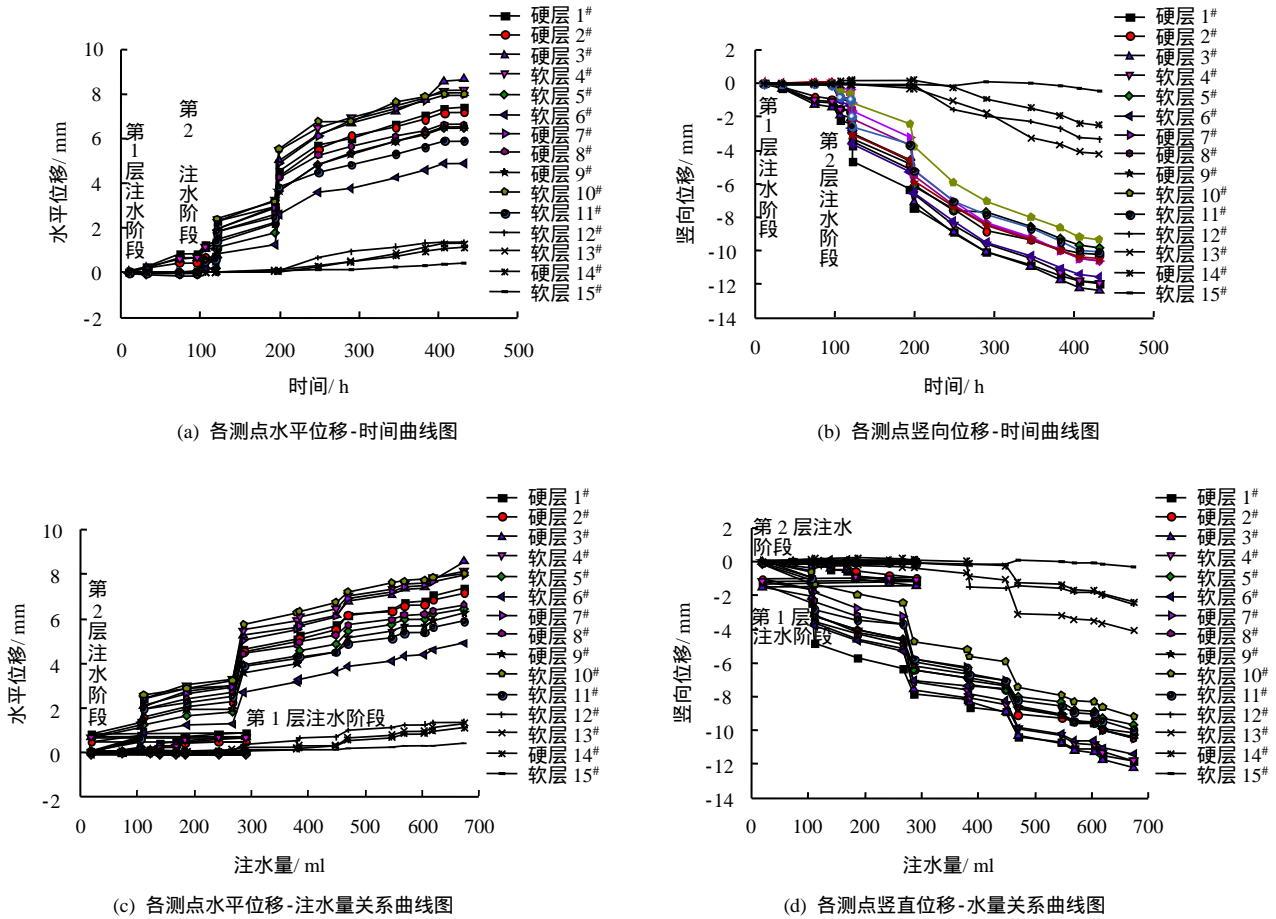


图 5 注水试验模型的位移随时间及-注水量曲线

Fig.5 Curves of displacements vs. times and water-injection of injection test models

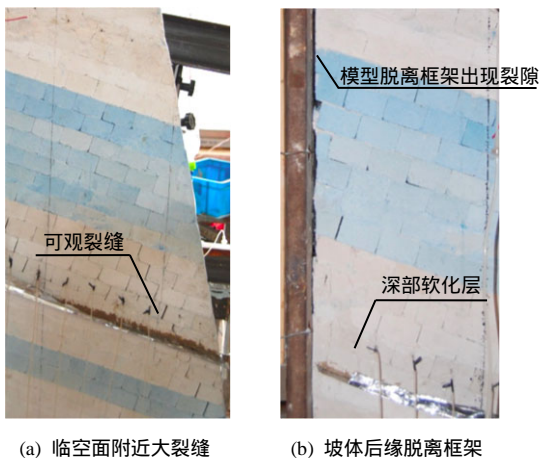


图 6 试验模型的破坏形态

Fig.6 Failure modes of test models

(2) 软硬岩层发生的变形情况不同。图 5(a)、(b) 所示, 软岩层测点的位移曲线分布分散, 如同层软层 10#与 11#测点的位移差为 2.11 mm, 试验中在该处发现有非常明显的拉裂缝; 硬岩层测点的位移曲线分布相对集中, 如同层硬层 7#与 8#测点的位移差为 1.33 mm。即, 软岩层的滑移拉裂变形特征非常明显, 硬岩层虽也有一定的滑移拉裂变形, 但不明显, 整体蠕滑变形是它的主要变形模式。

(3) 深部软岩层的软化导致了边坡的失稳破坏。图 7 描绘了两注水阶段典型时刻测点发生的水平位移连线图 (为方便观察, 位移均放大 5 倍), 从该图可以明显地看出, 虽然两个阶段的软化过程都是以软化层为滑动面发生了滑移拉裂变形, 但第 2 阶段

的软化所导致的变形更快且更显著。第2阶段自119.5 h时刻开始,坡体测点位移以近平行的趋势显著增长,可判定坡体发生了整体蠕滑。同时,试验过程中可以发现,坡体表面广泛分布有裂缝,且坡体后缘脱离模型,出现裂隙,且裂隙达3 mm,换算到实际边坡中为378 mm,非常可观。试验最后的破坏是以该深部软化层为滑动面发生的整体滑移。这说明了软岩层上覆岩层越厚,自重应力越大,软岩层软化导致的变形越大,对边坡的稳定性越不利。

(4) 在第2阶段软化试验开始后,发生了两次非常明显的位移突变。第1次发生在注水119.5 h时,坡体的变形开始加速,在2 h(即121.5 h)后逐渐稳定下来,在坡体前缘发现了明显的拉裂缝(如图6(a)所示),这表明了临空面附近的坡体由于侧向无约束,变形发展更显著,会率先发生局部破坏。第2次发生在注水196 h时,坡体的变形再次剧增,在3 h(即199 h)后逐渐稳定下来,在试验中发现模型体后缘自软化层起的以上部分开始脱离框架(如图6(b)所示),这表明第2软化层以上坡体产生了整体滑移变形。

(5) 坡体变形与注水量呈正相关关系。两个注水阶段都是随着水量的增加,坡体的变形总是逐渐增大的,但并非持续稳定增长,而是在水量达到一定值时,变形会发生突然增大,再随着水量的增大缓慢增加。每次变形的突增都伴随着裂缝的明显产生及扩展。

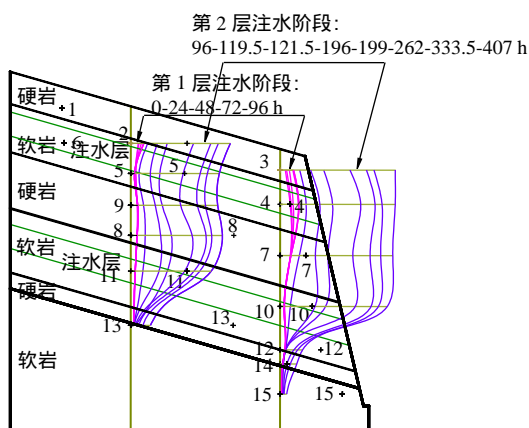


图7 注水过程模型测点水平位移连线图

Fig.7 Curves of horizontal displacement's connection of model during water-injection test

4.3 开挖及注水软化试验综合分析

开挖与注水软化试验的变形模式均为前期的滑移拉裂变形及后期的整体蠕滑变形。故在工程开

挖(河谷下切)及雨水浸润工况下,该类缓倾软硬岩互层边坡的变形可分为两个阶段:前期的滑移拉裂变形,后期的整体蠕滑变形。

受开挖扰动影响,坡体卸荷损伤,岩体内部产生大量微裂隙,为雨水入渗提供良好通道,并向临空面方向产生变形;降雨后雨水通过裂隙快速渗入到坡体内部,使软岩软化,强度降低,坡体变形加大,软化层以上坡体发生整体蠕滑,边坡发生整体滑移破坏^[20]。其中,滑动面出现在深部软岩层处。

开挖及雨水这两个因素在坡体的变形发展过程中均起到了重要作用,以雨水浸润作用为主。以软层4#测点为例,开挖试验结束时的位移是0.78 mm,注水后发生破坏性裂缝时的位移值是3.08 mm,开挖及注水导致的位移所占的比例分别为25.3%和74.7%;发生了整体蠕滑后某时刻的位移为6.46 mm,开挖及注水导致的位移所占的比例分别为12.1%及87.9%。所以,工程开挖(河谷下切)对该类缓倾软硬岩互层边坡的影响相对较小,一般不会致其发生破坏,雨水浸润才是导致最终滑坡发生的直接主要原因。

5 结论

(1) 该类缓倾软硬岩互层边坡在开挖及雨水软化作用下的变形模式为前期的滑移拉裂变形及后期的整体蠕滑变形;发生的破坏模式为以深部软岩层为滑动面的整体滑移。

(2) 该类缓倾软硬岩互层边坡的软岩层与硬岩层在河谷下切和雨水浸润作用下发生的变形情况有一定程度的不同,软岩层以滑移拉裂变形为主,硬岩层以整体蠕滑变形为主。

(3) 工程开挖(河谷下切)及雨水入渗都会对该类缓倾软硬岩互层边坡的稳定性有重要影响,开挖导致的临空面及微裂隙是滑坡发生的基础,水是滑坡发生的条件和诱因。在两种工况下,边坡的整体稳定性受深部软岩层的状态变化影响更显著,软岩层较硬岩层易受外界干扰,遇水强度衰减剧烈,且上覆岩层越厚,软岩层变形越大,边坡的整体稳定性越低。

(4) 通过本文的研究可知,对该类缓倾软硬岩互层边坡的安全防护应重点在现场的排水防护工程,尤其是深部厚层软岩的安全排水防护。

参考文献

- [1] 李廷勇, 王建力. 中国的红层及发育的地貌类型[J]. 四川师范大学学报, 2002, 25(4): 427 - 431.

- LI Ting-yong, WANG Jian-li. Red beds and geomorphology types in China[J]. **Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)**, 2002, 25(4): 427 - 431.
- [2] 宋玉环. 西南地区软硬互层岩质边坡变形破坏模式及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [3] 黄润秋, 赵松江, 宋肖冰, 等. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J]. **水文地质工程地质**, 2005, (1): 13 - 15.
- HUANG Run-qiu, ZHAO Song-jiang, SONG Xiao-bing, et al. The formation and mechanism analysis of Tiantai landslide, Xuanhan County, Sichuan Province[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2005, (1): 13 - 15.
- [4] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. **工程地质学报**, 2009, 17(4): 433 - 444.
- XU Qiang, HUANG Run-qiu, YIN Yue-ping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(4): 433 - 444.
- [5] 吴红刚, 马惠民, 侯殿英, 等. 青海高原“龙穆尔沟”红层滑坡变形机制的地质分析与模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(10): 2091 - 2102.
- WU Hong-gang, MA Hui-min, HOU Dian-ying, et al. Geological analysis and model experimental study of deformation mechanism of Ditch-Moore red bed landslide at Qinghai plateau[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2091 - 2102.
- [6] 吉随旺, 张悼元, 王凌云, 等. 近水平软硬互层斜坡变形破坏机制[J]. **中国地质灾害与防治学报**, 2000, 11(9): 49 - 52
- JI Sui-wang, ZHANG Zhuo-yuan, WANG Ling-yun, et al. The mechanism of deformation and failure for the slope composed of nearly horizontal competent and incompetent intercalated rock mass strata[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2000, 11(9): 49 - 52.
- [7] 程强, 周永江, 黄绍楦. 近水平红层开挖边坡变形破坏特征[J]. **岩土力学**, 2004, 25(8): 1311 - 1314.
- CHENG Qiang, ZHOU Yong-jiang, HUANG Shao-bin. Distortion and failure character of excavation slope in approximate level red beds[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1311 - 1314.
- [8] 刘宏, 宋建波, 向喜琼. 缓倾角层状岩质边坡小危岩体失稳破坏模式与稳定性评价[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(8): 1606 - 1611.
- LIU Hong, SONG Jian-bo, XIANG Xi-qiong. Failure model and stability evaluation of small instable rocks distributed in low-angled stratofabric rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1606 - 1611.
- [9] 胡斌, 黄润秋. 软硬岩互层边坡崩塌机理及治理对策研究[J]. **工程地质学报**, 2009, 17(2): 200 - 205
- HU Bin, HUANG Run-qiu. Collapse mechanism and treatment measures of slopes with interbeddings of soft and hard rocks[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(2): 200 - 205.
- [10] 董金玉, 杨继红, 伍法权, 等. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(1): 151 - 157.
- DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, WU Fa-quan, et al. Research on collapse of high cutting slope with horizontal soft-hard alternate strata in Three Gorges reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 151 - 157
- [11] 丁秀丽, 付敬, 刘建, 等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(19): 3411 - 3418
- DING Xiu-li, FU Jing, LIU Jian, et al. Study on creep behavior of alternatively distributed soft and hard rock layers and slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3411 - 3418.
- [12] 刘汉香. 软硬岩组合型斜坡地震响应的大型振动台模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [13] 李果. 强震条件下层状岩体斜坡动力失稳机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [14] 张桂民, 李银平, 杨长来, 等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(9): 1813 - 1820.
- ZHANG Gui-ming, LI Yin-ping, YANG Chang-lai, et al. Physical simulation of deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded salt rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1813 - 1820.
- [15] 边亚东, 张玉国, 常利武. 边坡变形破坏模式识别系统的实现[J]. **岩土工程技术**, 2006, 20(3): 121 - 123.
- BIAN Ya-dong ZHANG Yu-guo CHANG Li-wu. Realization of slope failure pattern recognition system[J].

- Geotechnical Engineering Technique**, 2006, 20(3): 121 - 123.
- [16] 中科院武汉岩土力学研究所. 软硬岩互层型滑坡(边坡)失稳机理与处治技术研究进展报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011.
- [17] 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): 3505 - 3511.
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 Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3505 - 3511.
- [18] 卢增木. 顺层岩石高边坡的稳定性研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [19] 夏开宗, 陈从新, 鲁祖德. 考虑水力作用的顺层岩质边坡稳定性图解分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2985 - 3040.
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LU Zu-de. Analysis of stability diagram of rock bedded slope under hydraulic pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 2985 - 3040.
- [20] 谢瑾荣, 周翠英, 程晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 197 - 210.
XIE Jin-rong, ZHOU Cui-ying, CHENG Ye. Method of seepage-softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 197 - 210.
-
- 上接第 380 页**
- [2] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟, 等. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 441 - 445.
ZHOU Cui-ying, LIU Zuo-qiu, SHANG Wei, et al. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 441 - 445.
- [3] 肖世国. 边(滑)坡治理中 h 型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146 - 2152.
XIAO Shi-guo. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2146 - 2152.
- [4] 孙勇. 滑坡面下双排抗滑结构的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2971 - 2977.
SUN Yong. Research on calculation method of double-row anti-sliding structure under sliding surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2971 - 2977.
- [5] 刘鸿. 双排抗滑桩计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [6] 祁斌, 常波, 吴益平. 双排抗滑桩滑坡推力分配影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 359 - 363.
QI Bin, CHANG Bo, WU Yi-ping. Analysis of factors affecting distribution of landslide thrust force for double-row anti-slide piles[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(3): 359 - 363.
- [7] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 237 - 244.
YANG Bo, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 237 - 244.
- [8] 唐芬, 郑颖人, 杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3162 - 3168.
TANG Fen, ZHENG Ying-ren, YANG Bo. Thrust share ratios and optimization design for two-row anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 3162 - 3168.
- [9] 邓夷明. 双排抗滑桩抗滑机制的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [10] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2668 - 2673.
SHEN Yong-jiang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Distribution of landslide thrust on cantilever double-row anti-sliding piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 2668 - 2673.
- [11] 陈曦. 双排抗滑桩滑坡推力计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [12] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例(第 2 版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.