

· 地基与基础 ·

某砂泥岩互层缓倾长大顺层边坡稳定性分析



李剑伟, 何 勇, 杨堉果, 田文丰, 林 锐

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 宜宾志诚港港区大道为长大顺层边坡, 岩体为砂泥岩互层, 岩层倾角 16° , 其稳定性问题和处治措施对于港区建设尤为重要。针对施工中发现的边坡变形破坏特征, 结合地质调绘、钻探、孔内电视、室内试验、邻近工程经验等, 对边坡破坏机理以及稳定性进行了分析。分析结果表明, 软硬岩互层、不利的顺层地质结构、坡体自重应力、层间结构面性质差、坡脚开挖及降水等因素是诱发该砂泥岩互层缓倾长大顺层边坡失稳的主要原因。采用抗滑支挡措施处理后, 该边坡稳定性得以保证。

关键词: 顺层边坡; 砂泥岩互层; 破坏机理; 稳定性分析

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0143-07

Stability analysis of gently inclined long bedding slope with sandstone-mudstone interbedding

LI Jian-wei, HE Yong, YANG Yu-guo, TIAN Wen-feng, LIN Rui

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: The main road of the Zhicheng port area in Yibin Port is a long bedding slope with sandstone-mudstone interbedding, and the rock inclination is 16° . Its stability and treatment measures are particularly important for the construction of the port area. According to the deformation and failure characteristics of the slope found in construction, this paper analyzes the failure mechanism and stability of the slope through geological mapping, drilling, borehole television utilization, laboratory tests, and experience in similar engineering. The analysis results show that soft and hard rock interbedding, unfavorable bedding geological structure, gravity stress of the slope, poor properties of interlayer structural plane, slope toe excavation, and precipitation are the main reasons for the instability of the gently inclined long bedding slope with sandstone-mudstone interbedding. After the anti-slide retaining measures are taken, the stability of the slope is guaranteed.

Keywords: bedding slope; sandstone-mudstone interbedding; failure mechanism; stability analysis

随着经济建设的快速发展, 在西南地区铁路、公路、水运等交通基础设施建设中出现了大量人工开挖的岩质边坡, 岩质边坡失稳是工程建设中较为常见的工程地质问题。

当开挖边坡的坡面和层状岩体的层面走向、倾向一致时, 一般将这种边坡称为顺层岩质边坡。实际工程设计中, 常将开挖坡面和岩层面两者走

向夹角小于 30° 且倾向接近的边坡定义为顺层边坡^[1]。因其顺倾向的岩层结构, 在自重作用下, 岩体具有顺岩层面向下滑动的趋势, 加之部分岩体工程特性及岩体力学方面性质差, 此类边坡是最易发育重大地质灾害的一类边坡^[2]。大量工程实践研究表明, 层状岩质边坡的破坏以顺层滑动最为普遍。1963 年意大利瓦伊昂水库左岸巨型岩

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 李剑伟 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册土木(岩土)工程师, 从事岩土工程勘察设计工作。

质顺层滑坡，滑坡体约 2 亿~3 亿 m³，造成 3 000 多人死亡；1980 年 7 月成昆铁路铁西滑坡，中断行车 40 d，造成巨大经济损失，仅工程治理费就达 2 300 万元；1989 年 7 月华蓥山溪口镇滑坡，造成 221 人死亡；2001 年 5 月重庆武隆县城发生大面积山体滑坡，造成 79 人死亡、7 人受伤。

基于基岩顺层边坡的特殊性质，在公路、铁路等线路工程建设中，一般会采用平纵线性组合避免长大顺层边坡。由于受地形、地理位置、规划等因素制约，宜宾志诚港港区大道在左侧边坡开挖后将形成长达 988.742 m 的缓倾砂泥岩互层长大顺层边坡，边坡稳定性分析对工程安全、造价等影响极大，此类长大顺层软岩边坡在以往的研究中较为少见。本文对建设中的宜宾志诚港进港大道左侧砂泥岩互层缓倾顺层边坡稳定性进行了分析，并给出相应工程建议措施，为类似缓倾软岩长大顺层边坡稳定性分析与勘察设计提供参考。

1 工程概况

宜宾临港经济技术开发区港区大道(前段)道路工程位于长江左岸，拟建左侧顺层边坡全长 988.472 m，设计路面中心高程为 279.20~284.50 m、宽度为 40.0 m，路段内左侧最大挖方高度约 41.1 m，坡顶为拟设市政道路。

边坡岩体为侏罗系中统上沙溪庙组(J₂s)砂岩、粉砂质泥岩，呈单斜产出，粉砂质泥岩与砂岩不等厚互层，局部含泥岩及泥质粉砂岩，岩性不均匀，相变大，渐变、突变、尖灭现象普遍。地表岩体完整性较差，深部岩体相对完整，岩层产状 140°∠16°，自然斜坡坡度 15°~20°。

工程区断裂不发育，区域稳定性良好，地震动峰值加速度为 0.10g，地震动反应谱特征周期为 0.40 s，对应地震基本烈度为Ⅶ度。

该段边坡自 2017 年 2 月开始施工，进入 2017 年 5 月下旬，施工现场降雨逐渐增多，边坡多处出现裂缝、挤出变形、垮塌等现象，见图 1。边坡安全性受到严重考验，需要采取可靠方法进行治理。



图 1 变形的边坡岩体及岩坡裂缝

2 顺层岩质边坡破坏机理分析

近年来，国内许多学者在顺层岩质边坡失稳破坏机理方面进行了大量的研究。徐邦栋^[3]应用地质力学理论对顺层滑坡的发生机理进行研究；张倬元等^[4]研究了岩体结构类型对应的变形破坏模式，提出了顺层岩质边坡破坏机制的蠕滑-压致拉裂、滑移-弯曲、弯曲-拉裂、滑移-拉裂等多种模式；邓荣贵等^[5]分析了顺层岩质边坡的平面破坏形式下不稳定岩层的临界长度；卢海峰等^[6]进行了巴东组红层软岩顺层边坡的破坏机制分析；刘钧^[7]提出了顺层边坡溃屈破坏的临界斜坡长度和边坡的破坏位置函数解；李维光等^[8]进行了顺层边坡的破坏机理以及稳定性分析与研究。大量的研究表明，顺层边坡的破坏形式主要表现为溃屈和剪切破坏。

在前人大量研究成果的基础上，针对宜宾志诚港港区大道的顺层边坡变形破坏特征，对其产生破坏的原因与机理进行分析。

1) 软硬岩互层的岩体结构。工程区砂泥岩地层软硬相间，砂岩岩质相对较硬、渗透性较好，泥岩岩质较软、渗透性较差，特别是在“上砂下泥”结构面附近，由于粉砂质泥岩相对隔水，易使结构面进一步软化，成为潜在的滑动破坏面，形成易滑地层。

2) 不利的顺层地质结构。在多期次的构造运动和褶皱作用下，水平岩层逐渐弯曲、倾斜，形成了倾向长江的顺层边坡。据统计，自然斜坡坡度 15°~20°的斜坡为滑坡多发地形，工程建设中层状岩体中的顺层岩质边坡开挖导致的滑坡破坏屡见不鲜。

3) 坡体自身的自重应力。山洪、泥石流、斜

坡变形灾害等山地灾害的物理本质是水土物质在斜坡(坡面或沟床)上的运动,其核心是由重力平行于运动斜面的分力所驱动。岩土体本身具有向下运动的位能,一旦坡体中维持自身稳定性的边界条件发生变化,在自重应力的作用下,坡体可能产生向下运动。

4)层间结构面性质差。在构造运动和褶皱作用下,相对较软岩层间发生层间错动,在剪切作用下,形成层间破碎带。在长期的渗透水和风化作用下,层间剪切破碎带逐渐软化,力学性质差,对坡体稳定性影响大。

5)坡脚开挖导致应力释放。原生坡体在坡脚进行开挖之后,由于应力释放与卸荷回弹,导致坡体内的应力发生重分布,在坡体表层一定范围内形成应力调整区,并在坡体一定深度内形成拉张裂缝,在前缘临空的条件下,为边坡变形与破坏提供了条件。

6)降水作用。本文研究的边坡发生变形破坏时正值降水较为集中的时间,降水顺着坡表的裂缝进入坡体内,一方面加大了坡体的自重,另一方面由于雨水的长期浸润作用、大幅降低结构面的抗剪强度,成为导致该顺层边坡发生变形破坏的重要因素。

本文研究的顺层边坡岩体结构为软硬岩互层,特别是“上砂下泥”结构面附近容易成为潜在的滑动破坏面、边坡开挖之后形成临空面,由于自重应力的作用,使其天然具有向下运动的位能,同时开挖导致坡体内应力发生重分布与调整,受施工期间持续降雨的影响,降雨顺着地表裂缝进入坡体,加大了坡体的自重,同时进一步软化结构面、大幅降低其抗剪强度,在坡体内的抗滑力矩小于下滑力矩后,边坡产生蠕变,随着雨水的进一步下渗与软化结构面,边坡蠕滑变形加速,产生剪切破坏。综合分析,该边坡破坏模式为滑移-拉裂破坏。

3 软弱结构面及抗剪强度

软弱结构面的确定及抗剪强度参数的选取,对稳定性计算尤为关键,对于确定边坡的稳定性

系数以及后续安全可靠、经济合理地治理边坡起着至关重要的作用。本文采用工程地质分析、孔内电视、室内试验、参数反演、邻近工程经验类比等多种方式研究顺层边坡中的软弱结构面确定及抗剪强度参数选取,确保选取的参数基本吻合现场实际情况,以利于正确地分析边坡稳定性和后期边坡治理工作。

3.1 工程地质分析

对开挖边坡面揭露的软弱结构面进行了调查、统计与分析,坡面出露软弱结构面主要以岩屑夹泥型为主,其次为岩块岩屑型及泥夹岩屑型,而目前发生变形、失稳的边坡滑面以岩屑夹泥型为主,见图 2。



图 2 开挖坡面揭露的岩屑夹泥型软弱结构面

3.2 孔内电视测试成果分析

考虑到该段边坡的重要性,防止由于钻探工艺的局限性而漏掉勘察重要软弱结构面,在边坡钻孔中选取了有代表性的断面进行孔内电视测试。

从孔内电视成果资料来看,软弱结构面普遍存在,以岩块岩屑型及岩屑夹泥型为主,见图 3,偶见裂隙、薄层泥化夹层,但多数软弱结构面延伸较短,渐变、突变、尖灭现象普遍。

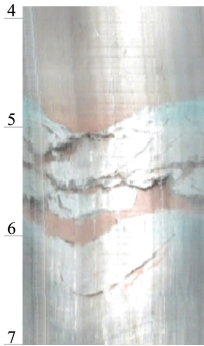


图 3 岩屑夹泥型孔内电视成果

根据孔内电视成果资料揭示，左侧边坡软弱夹层按组成物质的差异分为岩块岩屑型、岩屑夹泥型、泥夹岩屑型和泥型 4 种类型。以岩屑夹泥型为主要表现形式，在砂岩内部、粉砂质泥岩内部及砂泥岩界面处均有分布，延伸普遍较长，而以发育于砂泥岩界面处的贯通性最好；泥型主要分布于浅表层的粉砂质泥岩内部，延伸较长；其余类型延伸一般较短。综上，导致该顺层边坡发生变形破坏的软弱结构面主要为岩屑夹泥型，且延伸较长，具备进一步发生变形破坏的条件。

3.3 类似性质软弱结构面参数类比

水利水电勘测设计单位在四川地区红层软弱结构面中做了大量的试验及研究，部分公路勘察设计单位也在红层顺层边坡中做了一些原位大剪试验研究。根据工程区软弱结构面的特点和边坡条件，类比水电工程及公路工程中类似性质软弱结构面的原位大剪测试成果进行统计分析，结果见表 1。由于涉及项目区域较广，表 1 中结构面的参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 值，特别是 c 值分布区间较大，对本项目仅具有一定的借鉴意义。

表 1 水电、公路工程类似软弱结构面成果		
工程名称	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
四川岷江老木孔航电工程	22.40	6
	21.30	7
四川嘉陵江金银台航电枢纽	16.70	7
陈家珍	22.90	8
梁平至万县高速公路	19.85	43
丰都至忠县高速公路	17.51	68
	16.21	53
	14.47	52
平均值	18.92	31
标准值	16.80	13

3.4 室内试验

根据现场开挖揭露的边坡情况，在不同断面

对应的位置选取岩屑夹泥的软弱结构面进行室内重塑试验，室内试验成果见表 2。

表 2 室内试验成果		
取样位置	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
K0+318.6	10.4	15.8
K0+380.0	10.1	17.7
K0+426.7	9.2	14.5
K0+485.4	9.1	17.7
K0+690.0	11.2	15.8
K0+716.5	10.4	15.8
平均值	10.1	16.2
标准值	9.4	15.2

3.5 抗剪强度参数反演

抗剪强度参数反演结合现状稳定性评价进行，具体计算时滑面根据岩层倾角，以坡面实际变形位置为前缘剪出口，后缘为现场调查的拉裂缝位置。

结合 K0+400—K0+500 段左侧边坡的变形状态及特征，利用 K0+450 断面对岩屑夹泥型软弱结构面参数进行反算，并利用 K0+430、K0+470 断面对参数进行校核，计算结果见图 4 和表 3。

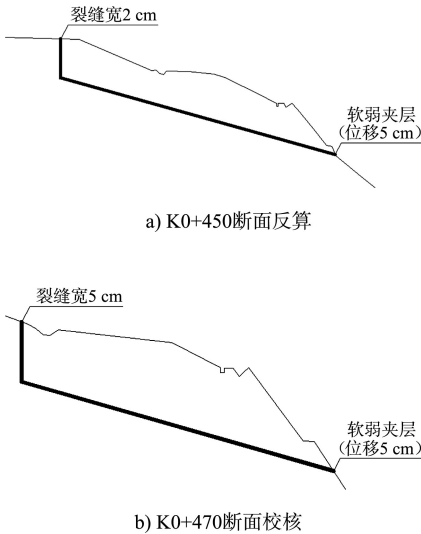


图 4 反算及校核断面计算简图

表 3 K0+450 断面以及复核断面计算结果

断面编号	天然		饱和		稳定系数		稳定状态		现场符合性	
	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	天然条件	连续降雨	天然条件	连续降雨	天然条件	连续降雨
K0+450	16	10.1	15.2	9.7	1.058	1.003	基本稳定	欠稳定、变形状态	符合	符合
K0+430	16	10.1	15.2	9.7	1.096	1.038	基本稳定	欠稳定、变形状态	符合	符合
K0+470	16	10.1	15.2	9.7	1.073	1.017	基本稳定	欠稳定、变形状态	符合	符合

结合 K0+710—K0+760 段左侧边坡的变形状态及特征, 利用 K0+730 断面对岩屑夹泥型软弱结构面参数进行反算, 并利用 K0+720、K0+740 断面对参数进行了校核, 计算结果见表 4。由于该

段边坡变形破坏严重, 后缘拉张明显, 裂缝最大宽度可达 0.7 m、深达 1.2 m, 暴雨条件下裂缝充水明显, 故计算中考虑了水压力的影响, 后缘裂隙充水高度按滑面到裂隙底部的高度 3.8 m 考虑。

表 4 K0+730 断面以及复核断面计算结果

断面	天然		饱和		稳定系数		稳定状态		现场符合性	
	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	天然条件	连续降雨	天然条件	连续降雨	天然条件	连续降雨
K0+730	16	10.1	15.2	9.7	1.430	0.936	稳定	不稳定、失稳状态	符合	符合
K0+720	16	10.1	15.2	9.7	1.466	0.938	稳定	不稳定、失稳状态	符合	符合
K0+740	16	10.1	15.2	9.7	1.494	0.975	稳定	欠稳定、滑动状态	符合	符合

3.6 抗剪参数的选取

根据工程区软弱结构面的特点、边坡条件、室内试验成果统计, 类比水电工程及公路工程中类似性质软弱结构面的原位大剪测试成果, 综合提出岩屑夹泥型软弱结构面参数为: 天然抗剪强度 $c=14.0\text{ kPa}$ 、 $\varphi=16.5^{\circ}$, 饱和抗剪强度 $c=10.0\text{ kPa}$ 、 $\varphi=15.5^{\circ}$ 。

4 稳定性计算

对于发生顺层滑移的边坡, 一般采用极限平衡法进行稳定性分析, 采用 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》^[11] 中的平面滑动面计算公式。

4.1 边界范围的确定

边坡开挖稳定性分析分为整体稳定性和局部稳定性 2 种工况, 其计算边界范围确定原则为: 1) 整体稳定性评价时, 由于软岩内结构面工程性质较差, 为确保安全, 滑面根据岩层倾角以开挖坡脚为前缘剪出口, 后缘为滑面与坡顶场平高程位置的交线或与坡顶地面线的交线; 2) 局部稳定性评价时, 滑面根据岩层倾角, 以开挖坡面上最不利的砂泥岩界面为前缘剪出口, 后缘为滑面与坡顶地面线的交线。

4.2 计算工况的确定

降雨往往对边坡的稳定性具有重要的决定意义, 在连续降雨状态下坡体易形成饱水, 结构面软化, 抗剪强度降低, 对该段边坡的计算应考虑连续降雨工况; 工程区地震动峰值加速度为 $0.1g$, 相应地震烈度为Ⅶ度, 故应考虑地震工况。综上所述, 计算采用的工况有天然工况、地震工况(地震综合影响系数 $K=0.25$) 和连续降雨工况。

4.3 稳定性计算

根据设计初拟, 该段顺层边坡在 K0+000—K0+550 段考虑设计 3 种比选方案: 方案 1 按建筑边坡考虑, 同时考虑 K0+000—K0+550 段坡顶附加荷载, 按常规坡比挖方; 方案 2 按建筑边坡考虑, 同时考虑 K0+000—K0+550 段坡顶附加荷载, 对坡顶至场平段削方减载; 方案 3 按市政道路考虑, 坡顶建筑退至边坡影响范围外, 不考虑 K0+000—K0+550 段坡顶附加荷载, 按方案 1 挖方坡比进行挖方。由于 K0+550—K0+988.742 段挖方高度较小, 将直接按建筑边坡进行设计。

整体稳定性计算时同时考虑 K0+000—K0+550 段坡顶规划道路及仓库所施加的附加荷载, 根据设计提供, 在坡顶规划场平位置外侧 $0\sim30\text{ m}$

范围内按 市政道路考虑 15 kPa 的附加荷载，在 30 m 以外范围按仓储建筑考虑 50 kPa 的附加荷载。整体稳定性计算与局部稳定性计算结果见表 5。

表 5 K0+000—K0+550 段稳定性计算结果

整体或局部	断面编号	天然条件			连续降雨			地震		
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
整体	K0+43.3	1.266	1.266	1.268	1.131	1.131	1.131	1.159	1.159	1.159
	K0+56.6	1.261	1.261	1.263	1.128	1.128	1.128	1.155	1.155	1.155
	K0+106.6	1.268	1.268	1.270	1.133	1.133	1.133	1.162	1.162	1.162
	K0+160.0	1.161	1.170	1.161	1.057	1.063	1.057	1.061	1.069	1.061
	K0+212.3	1.146	1.161	1.149	1.048	1.059	1.048	1.050	1.064	1.05
	K0+262.3	1.145	1.167	1.145	1.046	1.061	1.046	1.047	1.066	1.047
	K0+312.3	1.143	1.166	1.146	1.046	1.063	1.046	1.047	1.07	1.047
	K0+362.3	1.161	1.171	1.161	1.057	1.064	1.057	1.061	1.07	1.061
	K0+412.3	1.161	1.169	1.165	1.059	1.065	1.059	1.064	1.072	1.064
	K0+462.3	1.181	1.181	1.181	1.070	1.071	1.070	1.079	1.079	1.079
局部	K0+506.9	1.232	1.232	1.238	1.111	1.111	1.111	1.132	1.132	1.132
	K0+160.0	1.599	1.698	1.599	1.348	1.418	1.348	1.471	1.563	1.471
	K0+212.3	1.277	1.437	1.277	1.138	1.250	1.138	1.168	1.315	1.168
	K0+262.3	1.220	1.336	1.220	1.098	1.179	1.098	1.115	1.222	1.115
	K0+312.3	1.276	1.775	1.276	1.137	1.487	1.137	1.167	1.626	1.167
	K0+362.3	0.983	1.249	0.983	0.875	1.061	0.875	0.915	1.165	0.915
	K0+412.3	1.254	1.292	1.254	1.122	1.149	1.122	1.146	1.181	1.146
	K0+506.9	1.294	1.294	1.294	1.150	1.150	1.150	1.183	1.183	1.183

注：根据 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》要求，对一级边坡工程稳定安全系数在天然状态下可取 1.35，在连续降雨工况下可取 1.15，在地震工况下可取 1.15。根据 CJJ 194—2013《城市道路路基设计规范》要求^[12]，对快速路、主干路稳定安全系数在天然状态下可取 1.25，在连续降雨工况下可取 1.15，在地震工况下可取 1.08。

综上可知，整体稳定性评价时，左侧边坡按方案 1 开挖后在天然工况下处于基本稳定状态、在连续降雨工况下处于欠稳定—稳定状态、在地震工况下处于欠稳定—稳定状态；按方案 2 开挖后 K0+000—K0+550 段在天然工况下处于基本稳定状态、在连续降雨工况下处于基本稳定状态、在地震工况下处于基本稳定—稳定状态；按方案 3 开挖后 K0+000—K0+550 段在天然工况下处于基本稳定—稳定状态、在连续降雨工况下处于欠稳定—基本稳定状态、在地震工况下处于欠稳定—稳定状态。局部稳定性评价时，左侧边坡按方案 1 开挖过程中局部稳定性在天然工况下处于不稳定—稳定状态、在连续降雨工况下处于不稳定—稳定状态、在地震工况下处于不稳定—稳定状态(不稳定状态位于 K0+362.3 断面)；按方案 2 开挖过程中 K0+000—K0+550 段局部稳定性在天然工况

下处于基本稳定—稳定状态、在连续降雨工况下处于基本稳定—稳定状态、在地震工况下处于稳定状态；按方案 3 开挖过程中 K0+000—K0+550 段局部稳定性在天然工况下处于不稳定—稳定状态、在连续降雨工况下处于不稳定—稳定状态、在地震工况下处于不稳定—稳定状态(不稳定状态位于 K0+362.3 断面)。

根据对应的稳定安全系数要求计算剩余下滑力，文中不再详细列出，建议设计根据对应的剩余下滑推力对坡体采取抗滑桩、框架锚索等措施进行预加固处理，同时在布置支护措施时应验算局部稳定的支护强度。

总体来看，连续降雨对于边坡的稳定性影响极大，因此必须加强坡体的截排水措施。根据工程造价、施工难易程度及对土地利用的要求等情况进行综合比较后选择设计方案 2。采用抗滑桩、

框架锚索、截排水等措施进行处置后的顺层边坡稳定性得以保证, 至今运行良好。

5 结论

1) 该边坡破坏模式为滑移-拉裂破坏, 软硬岩互层、不利的顺层地质结构、坡体自重应力、层间结构面性质差、坡脚开挖及降水等因素是诱发该砂泥岩互层缓倾、长大顺层边坡失稳的主要原因。

2) 结合开挖情况、孔内电视成果资料, 边坡发生变形、失稳的软弱层面以岩屑夹泥型为主。

3) 采用室内试验、参数反演、工程类比等, 得到该边坡岩屑夹泥型软弱层面综合取值为: 天然抗剪强度 $c = 14.0\text{ kPa}$ 、 $\varphi = 16.5^\circ$, 饱和抗剪强度 $c = 10.0\text{ kPa}$ 、 $\varphi = 15.5^\circ$ 。

4) 砂泥岩互层顺层边坡整体稳定性评价时, 为保证安全, 以开挖坡脚为前缘剪出口为宜。局部稳定性评价时, 可根据岩层倾角以开挖坡面上最不利的砂泥岩界面为前缘剪出口进行计算。

5) 对于类似条件长大砂泥岩互层顺层边坡, 应采用抗滑桩、框架锚索等措施进行预加固处理, 严格实施分段施工, 采取动态设计和信息化施工, 高度重视截排水措施。边坡开挖过程及建成后, 应加强边坡动态监测工作, 保证施工以及运营安全。

参考文献:

[1] 李安洪, 周德培, 冯君, 等. 顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[2] 刘云飞. 基于变形的顺层边坡稳定性评价及其预加固方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

[3] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.

[4] 张倬元, 王兰生, 王士天. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[5] 邓荣贵, 周德培, 李安洪, 等. 顺层岩质边坡不稳定岩层临界长度分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 178-182.

[6] 卢海峰, 陈从新, 袁从华, 等. 巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3569-3577.

[7] 刘钧. 顺层边坡溃层问题的计算方法[J]. 水文地质工程地质, 1997(6): 37-41.

[8] 李维光, 张继春. 爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 29(5): 426-430.

[9] 冯振, 金福喜, 龚裔芳. 红砂岩顺层边坡监测及变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4078-4086.

[10] 崔鹏, 邓宏艳, 王成华, 等. 山地灾害[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.

[11] 重庆市城乡建设委员会. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[12] 同济大学. 城市道路路基设计规范: CJJ 194—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 90 页)

[4] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[5] 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司. 长江干线通航标准: JTS 180-4—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[6] 长江航道规划设计研究, 中交天津港航勘察设计院有限公司. 院航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

[7] 李一兵, 王育林. 弯曲航道过河建筑物跨度的计算方法探讨[J]. 水道港口, 1997(4): 16-22.

[8] 邓年生, 王炳奇. 弯曲航道平面尺度研究[J]. 水运工程,

2004(2): 74-78.

[9] 长江重庆航运工程勘察设计院, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 长江上游朝天门—涪陵段航道整治工程初步设计[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2020.

[10] 刘虎, 徐艳军, 艾万正. 天然弯曲河道跨河建筑物跨度确定方法[J]. 水运工程, 2017(2): 67-70, 82.

[11] 陈明栋, 王多银. 探讨跨江桥梁通航净空尺度和通航安全保障措施[J]. 水运工程, 2001(4): 42-43, 48.

(本文编辑 王璁)