

文章编号:1673-9469(2023)01-0081-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.012

秦巴山区某填方边坡加筋土挡墙破坏机理研究

李浩然¹, 宋飞^{1*}, 吴博², 田涌泉¹, 徐翔¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054;
3. 中建五局土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对秦巴山区某填方边坡路基加筋土挡墙垮塌导致的坡顶道路围栏垮塌、坡脚房屋受损等问题。现场调查查明了加筋土挡墙的破坏特征, 结合数值模拟对加筋土挡墙破坏的诱发因素和形成过程进行了综合分析。结果表明: 加筋土挡墙的破坏特征主要为: 面板发生大面积垮塌, 其后的加筋填料仍保持较好的整体稳定性; 加筋土挡墙面板垮塌破坏主要是由于填方边坡阻隔了原始排水通道, 支挡结构中的“抗滑桩-挡土板-加筋土挡墙面板”形成相对隔水边界, 连续降雨和居民生活用水入渗后无法及时排出, 从而引起地下水水位升高, 静水压力增大所致。加筋土挡墙破坏的形成过程为: 静水压力增加—底部面板拉筋连接破坏—中上部面板受力增大—面板整体破坏。

关键词: 填方边坡; 加筋土挡墙; 静水压力; 数值模拟; 破坏机理

中图分类号: P642

文献标识码: A

Study on Failure Mechanism of Reinforced Earth Retaining Wall of a Fill Slope in Qinling-Bashan Mountain Area

LI Haoran¹, SONG Fei^{1*}, WU Bo², TIAN Yongquan¹, XU Xiang¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China;
2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shanxi 710054, China;
3. China Construction Fifth Engineering Division Corporation, Civil Engineering Co. Ltd, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: A reinforced earth retaining wall of a fill slope subgrade in Qinling-Bashan Mountains collapsed six years after its completion, resulting in the destruction of the road fence at the top of the slope and the damage of the houses at the foot of the slope. The failure characteristics of the reinforced earth retaining wall were found out through field investigations, and the inducing factors and formation process of the failure of the reinforced earth retaining wall were comprehensively analyzed combined with numerical simulations. The results show that the main failure characteristics of the reinforced earth retaining wall are the face slab collapses in a large area, and the reinforced filler behind the slab still maintains a good overall stability. The collapse of the reinforced earth retaining wall panel is mainly due to the fact that the fill slope blocks the original drainage channel, and the “anti-slide pile + retaining plate + reinforced earth retaining wall panel” in the retaining structure forms a relatively impermeable boundary, while the water infiltrated from continuous rainfall and domestic water cannot be drained in time, resulting in the rise of the groundwater level and of hydrostatic pressure. The failure process of the reinforced earth retaining wall is as follows: increasement of hydrostatic pressure, failure of bottom panel tie bar connection, increasement of upper and middle panel stress and overall failure of panel.

Key words: fill slope; reinforced earth retaining wall; hydrostatic pressure; numerical simulation; failure mechanism

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 陕西省2022年重点研发计划(2022SF-335); 榆林市地质灾害成灾规律与风险管控研究项目(SQZB2021-135)

作者简介: 李浩然(1998-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究。

* 通讯作者: 宋飞(1976-), 男, 江苏铜山人, 博士, 副教授, 主要从事工程地质方面的教学与科研工作。

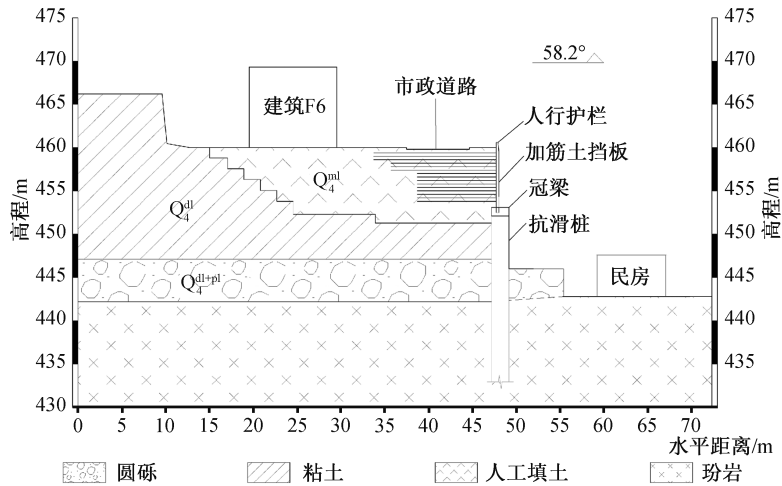


图1 填方边坡剖面图

Fig. 1 Profile of fill slop

随着我国城镇化建设的发展,土地资源利用日趋紧张。尤其是在山区工程建设时,形成了大量的填方边坡。为保证填方边坡的稳定性需采取一定的支挡结构措施。加筋土挡墙利用其优越的抗震性^[1]、良好的抗拉性能、较好的耐久性和较小的占地空间等优点,极大提高了边坡的完整性和稳定性^[2-3]。但由于施工难度相对较大、设计计算方法复杂,加筋土挡墙的失稳事故不断出现。因此,探究填方边坡加筋土挡墙的影响因素和破坏机理就显得尤为重要。

前人在对填方边坡加筋土挡墙变形破坏机理的研究中,通过原位测试、离心模型试验和数值模拟等方法研究了填方边坡加筋土挡墙在地下水作用下的土压力分布、填土沉降和拉筋伸长应变等问题^[4-7],分析了面板对加筋土挡墙力学性能的影响^[8-10],并对加筋土挡墙面板和拉筋连接力的计算方法进行了推导^[11]。但是,对于静水压力作用下加筋土挡墙的破坏过程和破坏机理的研究相对匮乏;主要原因是静水压力大多作用于岩质边坡中,加筋土挡墙所在边坡多为土质边坡,考虑静水压力的影响较少。

本文以秦巴山区某填方边坡加筋土挡墙破坏为例,通过现场调查地质条件和加筋土挡墙的破坏特征,基于边坡赋存环境的变化,分析其稳定性变化和变形情况,研究填方边坡加筋土挡墙在静水压力作用下的破坏过程和破坏机理,为防范加筋土挡墙破坏和破坏后的治理设计提供理论依据。

1 工程概况

1.1 工程概况

边坡场地位于秦巴山区一山前斜坡间沟口

处,坡顶道路施工后边坡高度约 20 m,填方高度 6 m,填方平均宽度 40 m,长 30 m。场地原始地貌为沟谷,表层为人工填土层,上部为厚度不均匀的粉质黏土层,中部广泛分布着约 5 m 厚的圆砾层,下部为中风化玢岩(图 1)。

填方边坡采用上部加筋土挡墙联合下部抗滑桩的工程措施进行支挡。其中加筋土挡墙高 6 m,填料使用粒径级配良好的碎石土,拉筋采用整体钢塑格栅,筋带厚 2 mm,垂直间距 0.4 m,长度 9~14 m 不等,加筋土挡墙面板采用预制混凝土面板拼接成,面板与钢塑格栅直接连接,面板间通过钢筋插销固定,顶部设置混凝土帽石约束面板;抗滑桩总长度 22 m,嵌固段长 10 m,桩间距 5 m,截面尺寸 1.5 m×2.0 m,填方边坡于 2015 年 1 月施工完成(图 2)。



图2 填方边坡施工后情况

Fig. 2 Post construction condition of fill slope

1.2 边坡破坏特征

2021年8月3日凌晨,该边坡加筋土挡墙面

板发生大面积垮落。垮落段平面形态近似倒梯形展布,下口宽 32 m,上口宽 46 m,高约 6 m(图 3)。加筋土挡墙面板破坏后,加筋土裸露,可见明显格栅筋带,表层土体散落,整体结构完整性好,填料湿润,含水率高。面板垮落导致坡顶道路围栏损毁、坡脚房屋受损,其他建筑未见明显变形迹象;下部抗滑桩及冠梁完整,经检测未发生变形。



图 3 加筋土挡墙面板垮落

Fig. 3 Collapse of reinforced earth retaining wall panel

2 加筋土挡墙破坏的原因分析

地下水是边坡变形破坏的最常见和最主要诱因,地下水通过物理化学作用和力学作用影响边坡的稳定性,主要表现为通过泥化、软化等物理作用和水解、溶蚀等化学作用,使岩土体重度增加、抗剪强度参数降低;通过静水压力、动水压力和饱和水加载效应,增加坡体下滑力,降低抗滑力^[12-14]。

经现场调查,加筋土挡墙面板发生垮落,面板与筋带的连接处破坏,格栅筋带内部完整性好,边坡整体稳定性和结构性较好。加筋土挡墙破坏前,面板出现浸润现象(图 4),破坏后加筋土挡墙填料湿润,可见明显地下水渗出。加筋土挡墙未发生破坏时边坡地下水渗流作用较弱,地下水对填方边坡稳定性的影响主要体现在静水压力和岩土体物理力学性质方面。

2.1 地下水变化因素

一般来说,地下水通过静水压力影响边坡稳定性的现象主要集中在岩质边坡中。本次研究区边坡主体为土质边坡,但填方边坡支挡结构中的“基岩-抗滑桩-挡土板-加筋土面板”组成了一个相对隔水边界,一方面影响了地下水的排泄,另一



图 4 加筋土挡墙面板浸润现象

Fig. 4 Infiltration of reinforced earth retaining wall panel

方面使得静水压力通过面板作用于加筋土挡墙,诱发加筋土挡墙的破坏。边坡地下水位不断动态变化,影响因素复杂,主要原因包括物质结构条件和环境条件因素。

2.1.1 物质结构条件因素

边坡加筋土挡墙填料采用粒径级配良好的碎石土,加筋土挡墙面板使用预制混凝土面板拼接而成。经现场调查发现,加筋土填料易于地下水入渗,加筋土挡墙面板排水设施不足,加筋土挡墙排水功效差。边坡建成后地下水来源不断增加,地下水易于入渗但很难排出,地下水不断积蓄,水位上升,在边坡内形成高地下水应力区,影响加筋土挡墙的力学性质和受力条件。

2.1.2 环境条件因素

填方边坡建成后,物质结构条件相对稳定,而环境条件则相对活跃不断变化。边坡地下水环境变化主要体现在地下水来源增加方面,经现场调查发现其原因复杂,主要包括以下方面:

(1)地形地貌:边坡为山前冲沟填方形成,坡顶填方区域地形两侧高、中部低,加筋土挡墙所在区域为集水廊道,易于地下水富集。

(2)气象条件:秦巴山区近几年多为丰水年,区域降水量普遍较大,尤其是 2021 年 6 月至 8 月间降雨集中,加剧了边坡地下水的富集,该区域 2021 年月降水量与近 10 年平均月降水量关系如图 5。

(3)人类工程活动影响:填方边坡建成后坡顶兴建道路和建筑,坡顶内侧小区生活用水排水不畅,生活排水水沟及池塘渗漏,大量地表水入渗;道路两侧绿化带、花池灌溉用水下渗;同时边坡南侧 180 m 有一处溢洪道积水严重,积水沿两侧沟壁

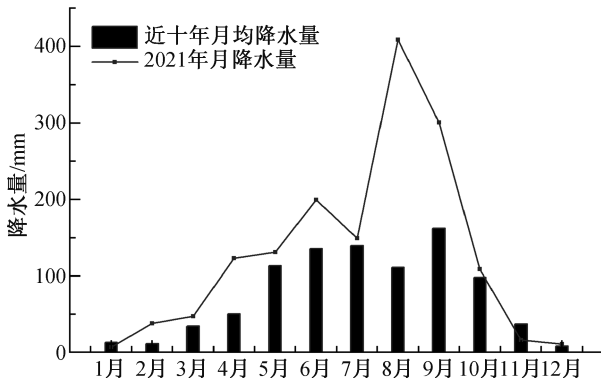


图5 2021年月降水量与近10年平均月降水量关系图

Fig. 5 Relation diagram of average monthly precipitation in 2021 and recent 10 years

入渗,增加了地下水来源。

2.2 地下水变化过程

边坡建成后地下水条件变化较大,边坡施工前地下水主要赋存在基岩内,施工完成3年后,边坡抗滑桩桩间挡板和冠梁间的缝隙内开始有地下水渗出,随后加筋土挡墙面板出现浸润,至边坡破坏前,面板浸润最高出现在冠梁以上5 m位置。

综合分析边坡地下水变化情况,边坡地下水变化主要包括4个阶段(图6):(1)地下水位初始阶段:边坡施工完成后,地下水位在基岩面高度;(2)地下水位上升阶段:填方边坡施工完成后,支挡措施与基岩直接相接,形成一个相对隔水边界,地下水排泄路径被堵塞,坡顶人类工程活动不断加剧,地下水来源增加,边坡地下水位不断抬升,地下水位抬升至冠梁以上5 m位置处;(3)地下水位下降阶段:加筋土挡墙破坏,面板垮落,隔水边界破坏,地下水得以排出,边坡地下水位逐渐降低;(4)地下水位稳定阶段:面板破坏后,边坡地下水位降低,最终稳定在冠梁高度位置。

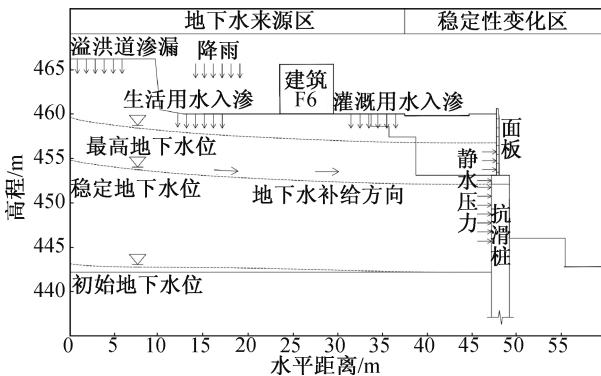


图6 地下水来源与水位变化关系图

Fig. 6 Relation diagram of groundwater source from water level change

3 加筋土挡墙破坏过程数值分析

为深入分析地下水环境条件变化对边坡稳定性的影响,探究地下水诱发填方边坡加筋土挡墙破坏机理,使用 Geostudio 软件中的 slope 模块和 sigma/w 模块计算不同地下水环境条件下边坡的稳定性和变形情况,对比潜在破坏面与位移区的变化情况,分析加筋土挡墙的破坏机理。

3.1 模型建立和参数选取

计算模型长 72.5 m,高 35 m,共划分 4 279 个单元,10 316 个节点,有限元计算单元为平面应变四边形单元^[15]。计算模型中,抗滑桩和加筋土使用软件加固荷载中的桩和土工织物表示,坡顶道路荷载使用附加荷载代替^[16],岩土体破坏服从摩尔-库伦材料模型,桩和加筋土面板为线弹性材料模型。边界条件设定为:左侧和右侧地面线以下边界为竖向滑动的水平约束,底面是水平和竖向都约束的铰结约束,坡面为自由界面。稳定性计算采用 Morgenstern-Price 法,计算模型见图 7,计算参数主要参考原始勘查设计报告,具体见表 1。依据边坡地下水条件的变化,选取 5 种工况,对边坡的稳定性及变形进行模拟计算(表 2)。

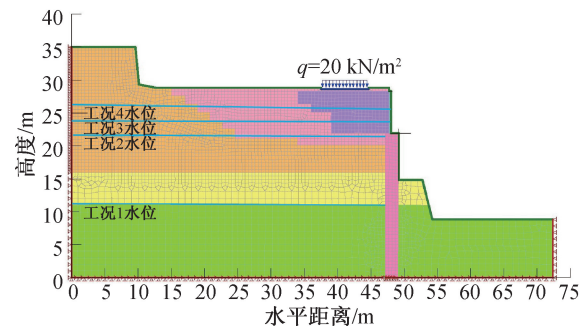


图7 边坡计算模型

Fig. 7 Slope calculation model

3.2 计算结果

边坡稳定性计算的主要参数为稳定性系数,变形分析参数为边坡 x 方向的位移,计算结果如表 3 所示,对计算结果变化情况进行分析。

稳定性计算结果:所有计算工况下,边坡均处于稳定状态,边坡潜在滑动面在加筋土范围内,潜在破坏面剪出口位于加筋土挡墙面板底部。地下水位在冠梁以下高度时,边坡稳定性系数不随地下水位变化;地下水位上升至加筋土挡墙范围内时,边坡稳定性系数随地下水位上升而减小;面板破坏后,地下水位下降,边坡稳定性系数增大。

表 1 数值计算基本参数取值表

Tab. 1 Value table of basic parameters for numerical calculation

地层	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 $/(^{\circ})$	粘聚力/kPa	天然容重 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗剪 强度/kN	抗拉 强度/kN	抗拔 强度/kPa
粘土	3.91	0.35	18	34	18.30	—	—	—
人工填土	6.92	0.32	24	25	18.70	—	—	—
加筋土	9.80	0.28	35	62	18.20	—	—	—
圆砾	50.00	0.10	40	0	20.00	—	—	—
玢岩	52 000	0.30	45	1 100	26.60	—	—	—
抗滑桩	31 000	0.20	—	—	25.00	2 000	—	—
加筋土面板	6.00	0.37	—	—	24.00	—	—	—
土工织物	—	—	—	—	—	—	60	60

表 2 数值计算工况表

Tab. 2 Working conditions of numerical calculation

工况	支护结构条件	地下水高度
工况一	支挡结构完整	与基岩面齐平
工况二	支挡结构完整	与冠梁齐平
工况三	支挡结构完整,面板浸润	冠梁顶 2 m 处
工况四	支挡结构完整,面板浸润	冠梁顶 5 m 处
工况五	加筋土挡墙面板破坏	与冠梁齐平

表 3 计算结果统计表

Tab. 3 Statistical Table of Calculation Results

工况	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五
X_{\max} 位移	0.04	0.06	0.10	0.14	0.08
稳定系数	1.593	1.593	1.581	1.520	1.584
稳定状态	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定

变形计算结果(图 8):边坡 x 方向最大变形集中在加筋土挡墙面板底部位置,位移最大值出现在地下水高度最大时; x 方向位移大小与地下水高度呈正相关,且地下水位在冠梁平面以上 0~2 m 高度时,位移变化速率最大;加筋土挡墙面板破坏后,地下水位下降至面板破坏前同一高度位置,此时边坡 x 方向位移大于面板破坏前 x 方向位移。

3.3 计算结果分析

对比稳定性计算和变形计算结果(图 9),两次计算结果耦合较好。分析得出边坡加筋土挡墙破坏特征如下:

(1)边坡整体始终处于稳定状态,加筋土挡墙破坏首先发生在面板底部,随地下水位上升,变形

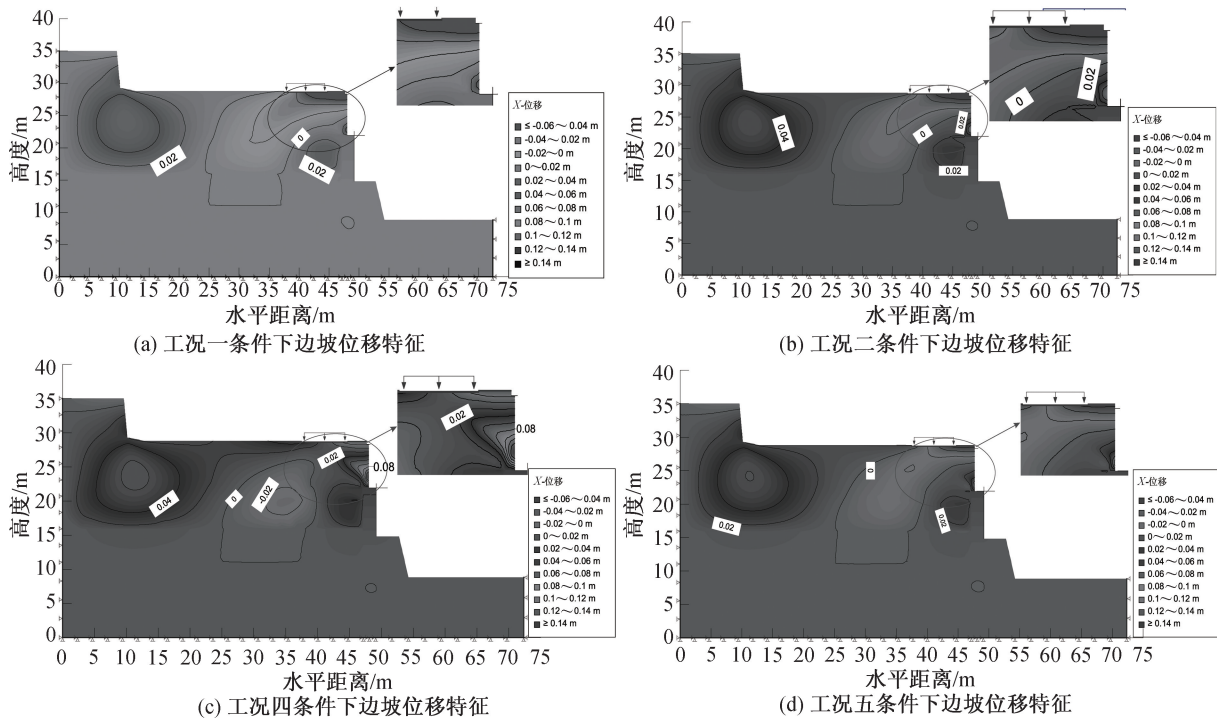


图 8 边坡 x 方向位移图

Fig. 8 X -direction displacement diagram of slope

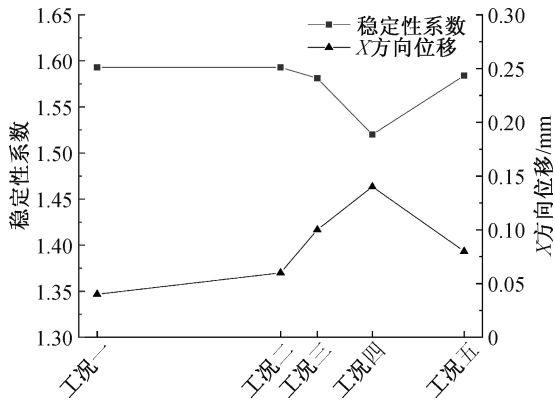


图9 稳定性与位移计算结果关系图

Fig. 9 Stability and displacement calculation results

逐渐向面板中上部扩展。

(2)地下水自基岩底部上升至冠梁平面过程中,边坡稳定性不变、位移变化小,主要原因是地下水未影响上部加筋土挡墙,且抗滑桩预留安全系数较大。

(3)地下水位在加筋土挡墙范围内变化时,边坡稳定性变化和位移变化速率较大,加筋土挡墙稳定性受地下水影响大,主要包括静水压力和泥化软化作用。

(4)边坡加筋土面板破坏后,地下水位下降至破坏前高度时,稳定性和位移相较于破坏前均变差,但差值不大,说明加筋土挡墙受静水压力影响较大,地下水对加筋土物理力学性质产生影响,但影响较小。

4 加筋土挡墙破坏机理分析

根据边坡数值模拟计算结果,综合破坏特征,该填方边坡加筋土挡墙破坏过程可分为四个阶段(图10):

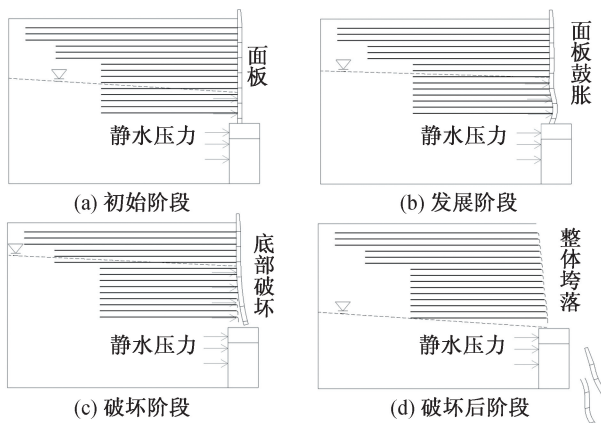


图10 加筋土挡墙破坏简图

Fig. 10 Failure diagram of reinforced earth retaining wall

(1)初始阶段:填方边坡形成隔水边界,地下水来源增加,加筋土挡墙面板开始受到静水压力。一方面加筋土挡墙面板、抗滑桩桩间挡板组成了相对隔水边界,边坡排水能力差;另一方面,该区域近年来降水量大且降水集中,边坡建成后坡顶陆续修建道路、建筑,人类工程活动愈发强烈,居民生活用水、灌溉用水下渗、溢洪道渗漏,边坡地下水富集,地下水位抬升。此时,加筋土挡墙面板主要受侧向土压力和拉筋拉力,随地下水位上升,静水压力作用于面板,加筋土挡墙中下部面板与拉筋连接处受力增大。

(2)发展阶段:加筋土挡墙面板底部受静水压力增大,面板底部开始变形,并通过钢筋插销将应力分散至面板中上部。加筋土挡墙面板采用预制混凝土面板拼接而成,面板与钢塑格栅直接连接,面板间通过钢筋插销固定。随底部面板与拉筋连接处受力增加,拉筋受力伸长,加筋土挡墙底部面板开始出现 x 方向变形,在面板间钢筋插销作用下,底部面板部分应力分散于中上部面板,带动上部中面板受力。

(3)破坏阶段:加筋土挡墙面板底部与拉筋连接破坏,中上部面板受力增加,最终破坏面贯通,面板垮落。随地下水位上升,面板受静水压力增大、位置上升,至中上部面板与拉筋连接处破坏,面板发生整体垮落,并带动坡顶人行横道破坏。边坡加筋土挡墙破坏模式为面板发生整体性垮落,面板与拉筋的连接处破坏,加筋土挡墙内部完整性好。

(4)破坏后阶段:加筋土挡墙面板破坏后,表层加筋土散落,拉筋裸露,地下水排出,水位下降。此时边坡处于临时稳定状态,边坡现状整体稳定性好,但面板破坏后,表层加筋土失去约束逐渐散落,若未及时处理,加筋土破坏逐渐向深处扩展,易诱发加筋土挡墙发生整体破坏。

总体来说填方边坡加筋土挡墙破坏的破坏机理为:静水压力增加—底部面板拉筋连接破坏—中上部面板受力增加—面板整体破坏。

5 结论

1)填方边坡加筋土挡墙破坏的主要特征为:面板发生大面积垮塌,其后的加筋填料仍保持较好的整体稳定性。

2)导致该边坡加筋土挡墙破坏的主要原因是集中强降雨引起地下水位抬升后产生的静水

压力。

3)加筋土挡墙破坏的四个阶段为:静水压力增加—底部面板拉筋连接破坏—中上部面板受力增加—面板整体破坏。

4)加筋土挡墙面板破坏后应及时治理以保证整体稳定性,治理方案应考虑保护加筋土挡墙原有的筋带结构并做好排水设施。

参考文献:

- [1] 任非凡,何江洋.加筋土结构动力特性研究现状综述[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(4):120-129.
- [2] 詹进飞.施工过程中填料压实对加筋土挡墙可靠性的影响[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [3] 陈建峰,汪嘉嘉,徐超.加筋土挡墙动力特性研究进展[J].灾害学,2011,26(3):52-55.
- [4] 张硕,裴向军,黄润秋,等.降雨诱发黄土高填方挡边坡失稳机理研究[J].工程地质学报,2017,25(4):1094-1104.
- [5] 任非凡,徐欢,黄强强.水平静-动荷载作用下加筋土挡墙变形破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1248-1257.
- [6] 陈建峰,张琬.采用K-刚度法设计的模块式加筋土挡墙数值模拟[J].岩土工程学报,2017,39(6):1004-1011.
- [7] 殷跃平,鄢毅,陈波,等.三峡库区巫山新城超高加筋挡墙变形破坏及修复研究[J].工程地质学报,2003(1):89-99.
- [8] 叶观宝,张振,邢皓枫,等.面板对路堤式加筋土挡墙力学特性的影响[J].岩土力学,2012,33(3):881-886.
- [9] 刘卫华,雷胜友,黄润秋,等.模块式加筋土挡墙面板与土工格栅之间的摩擦性质研究[J].岩石力学与工程学报,2006,(S1):3218-3223.
- [10] 牛笑笛,杨广庆,王贺,等.不同面板形式加筋土挡墙结构特性现场试验研究[J].岩土力学,2021,42(1):245-254.
- [11] 郭志华,黄方成,李斌,等.预制模块式面板加筋土挡墙面板连接稳定性研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2022,39(1):1-7.
- [12] 戴小军,吴晨威,蒋仕林,等.地下水与荷载联合作用的边坡稳定性数值分析——以重庆奉节电厂边坡为例[J].灾害学,2022,37(2):125-130.
- [13] 李德心,何思明,朱兴华,等.前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J].灾害学,2011,26(3):41-45.
- [14] 谢春庆,廖梦羽,廖崇高.西南某大面积高填方体局部破坏特征及原因分析[J].勘察科学技术,2015(6):27-32.
- [15] 刘英,于立宏,孙凯辉,等.清原抽水蓄能电站泄洪洞边坡破坏原因分析[J].水利规划与设计,2020(11):120-123.
- [16] 徐建军,王建光.边坡支护施工过程中锚固失效事故分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(1):63-66.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第 80 页)
- [2] 唐诚.关于我国地铁施工事故的研究[J].北方交通,2013(S2):90-92.
- [3] 段理文.TBM操作参数智能决策方法研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [4] YE C, LI Y, CUI P, et al. Landslide Detection of Hyperspectral Remote Sensing Data Based on Deep Learning With Constrains[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(12): 5047-5060.
- [5] 潘广源.深度信念网的无监督学习算法研究与应用[D].北京:北京工业大学,2016.
- [6] ZHOU C, GAO W, CUI S, et al. Ground Settlement of High-Permeability Sand Layer Induced by Shield Tunneling: A Case Study Under the Guidance of DBN[J]. Geofluids, 2020: 6617468.
- [7] 乔高乾,徐佩芬,龙刚,等.微动剖面探测法在城市轨道交通勘察中的应用及效果:以广州地铁十号线为例[J].科学技术与工程,2021,21(20):8582-8591.
- [8] 沈征难.盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J].现代隧道技术,2004(6):51-56.
- [9] 朱常宝.基于深度玻尔兹曼机的特征学习算法研究[D].北京:北京化工大学,2016.
- [10] DARABI A, AHANGARI K, NOORZAD A, et al. Subsidence Estimation Utilizing Various Approaches-A Case Study: Tehran No. 3 subway line[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31: 117-127.
- (责任编辑 王利君)