

超高重力式挡墙在岩溶地基高填方边坡工程中的应用

舒富民, 王双, 黄青富, 杨彪, 刘宏, 胡刚, 邱存家

Application of ultra-high gravity retaining walls in high fill slopes on karst developed foundations

SHU Fumin, WANG Shuang, HUANG Qingfu, YANG Biao, LIU Hong, HU Gang, and QIU Cunjia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用

Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes

程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 侯赠, 陈娜 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 143-154

基于LBM-DEM细观数值模拟的水力诱导覆盖型岩溶地面塌陷发育过程分析

Analysis of the formation process of the covered karst ground collapse induced by groundwater changes based on the coupled LBM-DEM numerical simulation at micro scale

陶小虎, 叶明, 龚建师, 王赫生, 胡晓雨 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 124-131

三峡库区典型岩溶岸坡危岩体失稳模式和长期稳定性分析

Analysis of failure modes and long-term stability of dangerous rock mass on typical karst bank slope in the Three Gorges Reservoir area

胡雷, 张鹏, 黄波林 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 64-73

露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析

Open-pit mine slopes stability analysis based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation model

李志国, 徐涛, 刘永杰, 赵立春, 徐勇超, 杨天鸿, 郑小斌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 116-123

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground

于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85-92

探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用

Application of the ground-penetrating radar technology in detection of soil properties of the high cutting and filling slopes in collapsible loess area

王韵, 王红雨, 李其星, 亢文涛 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 102-110



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401014

舒富民, 王双, 黄青富, 等. 超高重力式挡墙在岩溶地基高填方边坡工程中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 118-128.

SHU Fumin, WANG Shuang, HUANG Qingfu, et al. Application of ultra-high gravity retaining walls in high fill slopes on karst developed foundations[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 118-128.

超高重力式挡墙在岩溶地基高填方边坡工程中的应用

舒富民¹, 王双¹, 黄青富², 杨彪¹, 刘宏³, 胡刚⁴, 邱存家¹

(1. 民航机场建设集团西南设计研究院有限公司, 四川成都 612000; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650205; 3. 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室(贵州大学), 贵州贵阳 550003; 4. 重庆机场集团有限公司, 重庆 401120)

摘要:重庆武隆机场南端西侧岩溶发育、地形陡峻, 采用了高路堤与超高重力式挡墙相结合的高填方边坡方案。挡墙基础发育 3 处岩溶, 面积占挡墙的 45% 以上, 全填充, 最大深度超过 30 m, 属于典型的特殊复杂地基。为了解决岩溶地基不均匀性强、承载力低、边坡及挡墙稳定性问题突出等难题, 采用开挖一定深度的岩溶充填物并回填混凝土方案。通过理论计算详细分析了不同换填深度下高边坡及高挡墙的破坏模式、稳定性、应力及变形规律, 确定了合理的岩溶换填深度。研究表明: 采用一定深度的岩溶换填方案可有效改善岩溶地基的不均匀性, 降低挡墙应力集中效应, 减小挡墙及高填方变形, 大幅提高挡墙及边坡稳定性。现场监测表明: 高挡墙及高边坡工后水平和竖向位移均小于 4 mm, 变形曲线收敛, 边坡及挡墙稳定性良好。研究成果对于复杂山区高填方工程规划设计及施工具有重要的参考意义。

关键词: 超高重力式挡墙; 岩溶; 破坏模式; 高填方边坡; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: P642.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2025)03-0118-11

Application of ultra-high gravity retaining walls in high fill slopes on karst developed foundations

SHU Fumin¹, WANG Shuang¹, HUANG Qingfu², YANG Biao¹, LIU Hong³, HU Gang⁴, QIU Cunjia¹

(1. Southwest Design and Research Institute Co. Ltd. of China Airport Construction Corporation, Chengdu, Sichuan 612000, China; 2. China Power Construction Group Kunming Survey and Design Research Institute Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650205, China; 3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China; 4. Chongqing Airport Group Co. Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: This paper presents a high fill slope solution for the steep and karst-developed terrain at the southern end, west side of Wulong Airport in Chongqing, where a combination of high embankment and ultra-high counterweight retaining wall was adopted. The foundation of the gravity retaining wall includes three karst formations, covering more than 45% of the total area. These karst areas are fully filled and have a maximum depth exceeding 30 m, making them typical examples of special and complex foundations. To address challenges such as strong non-uniformity, low bearing capacity of the karst foundation, and instability of slopes and retaining walls in karstic foundations, a solution involving the excavation of karst infill to a certain

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-04-29

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3003301); 中国民用航空局安全能力建设资助项目(2023-202); 中国民航机场建设集团有限公司 2023 年内部科研项目

第一作者: 舒富民(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事机场规划设计及研究工作。E-mail: Shufm@qq.com

通讯作者: 王双(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事机场岩土工程咨询设计及研究工作。E-mail: wshnju@126.com

depth and backfilling with concrete was adopted. Through theoretical calculations, this paper comprehensively analyzes the failure modes, stability, stress, and deformation of the high slope and retaining wall with varying concrete replacement depths, ultimately determining a suitable replacement depth. The research results show that the adoption of a certain depth of replacement can effectively improve the non-uniformity of the karst foundation, reduce stress concentration effect on the retaining wall, decrease the deformation of the retaining wall and high embankment, and significantly enhance the stability of the retaining wall and slope. Field monitoring indicates that the horizontal and vertical displacements of the high retaining wall and high slope after construction are both less than 4mm, with deformation curves converging, demonstrating good stability of the slope and retaining wall. The research findings have significant reference value for the planning, design, and construction of high-fill slope projects in complex mountainous areas.

Keywords: ultra-high gravity retaining wall; karst; failure mode; high fill slope; stability; numerical simulation

0 引言

我国山区高填方机场具有平整范围大、跨越的地质单元多、周边限制因素多、地形地貌及地质条件复杂、施工环境恶劣、土石方量巨大、挖填高度大、填料性质复杂且可选余地小等特点^[1-2],因此高填方是我国山区机场建设的重要特点。高填方边坡是机场的临空面,其稳定性是高填方机场成败的关键^[3],是山区机场建设最为重要的核心技术问题之一。

重力式挡墙依靠墙体自重来抵抗土体侧压力,可采用浆砌块石或混凝土结构,具有就地取材、施工简单、经济性好、耐久性好、可靠性高、能显著节约土石方及征地面积等优势^[4-5],是最为常用的边坡支挡结构^[4,6],但对于填方边坡其高度一般不超过 10 m^[7]。随着我国经济社会的发展,超高重力式挡墙在市政、水利、港口等行业中逐渐得到应用,例如贵阳某市政道路采用 22 m 高的重力式路肩墙^[8],深圳市检察院培训基地采用了 22 m 高的扶壁式钢筋混凝土路肩墙^[9],涪陵货运港采用了高约 30 m 的重力式路肩墙^[10],宜兴抽水蓄能电站采用了 92.3 m 高堆石边坡加 45.9 m 高钢筋混凝土挡墙相结合的混合坝型^[11-13]。然而,超高重力式挡墙在岩溶发育场地高填方工程中尚无应用案例报道。

岩溶发育场地工程地质及水文地质条件复杂,溶沟、溶槽、落水洞、地下溶洞、溶蚀裂隙等喀斯特地貌发育,岩体较为破碎,基覆界面起伏大,岩溶充填物及覆盖层物质组成及力学性质极不均匀,是典型的特殊不良地基^[14-16],对各类构筑物及场地稳定性造成较大影响^[15-19]。山区机场高填方边坡高度高、填筑面积大,填方荷载大且作用复杂,对支挡结构强度及稳定性要求高^[3,20-21]。超高混凝土挡墙强度高,能承受较大的土压力,但其自重大、重心高、对沉降敏感,对地基强度及均匀性、墙身材料强度等要求高^[12-13]。因此,在岩溶发育

场地采用超高重力式挡墙进行高填方边坡支挡,可能存在地基承载力不足、不均匀沉降量大、墙身强度不足、边坡深部抗滑稳定性及挡墙稳定性问题突出等技术难题,技术难度大、风险高,限制了其工程应用。

重庆武隆仙女山机场南端西侧高填方区地形陡峻、岩体较破碎、地下水较丰富,覆盖型岩溶广泛发育,岩溶面积大、深度深,是典型的岩溶发育场地。受坡脚天然气管道限制,项目采用了最大高度为 49.5 m(含岩溶混凝土换填高度)的超高重力式路堤墙方案,挡墙高度在国内外尚未见报道。为了解决深厚岩溶对高挡墙及高边坡稳定性的影响问题,通过物探、钻探及施工地质调查等方式详细查明了岩溶发育情况,通过数值模拟分析了不同岩溶换填深度下边坡破坏模式、边坡及挡墙稳定性、挡墙应力及变形等,确定了合理的岩溶换填深度。目前武隆机场已通航 3 年多,高挡墙及高边坡运行状态良好。理论及实践表明,采用局部换填方案改善了岩溶地基不均匀性,降低了挡墙应力集中效应,大幅提高了挡墙及边坡稳定性,解决了超高重力式挡墙在岩溶发育场地中的应用难点。研究成果对于高填方工程项目规划、高挡墙设计及施工、岩溶发育场地地基处理具有较大的参考价值。

1 工程概况

1.1 机场概况

武隆机场飞行区等级为 4C,跑道长 2 800 m,机场标高为 1743.69 m。机场土石方填方量约 $21.51 \times 10^6 \text{ m}^3$,挖方量约 $19.40 \times 10^6 \text{ m}^3$,最大垂直填方高度约 65 m,填方边坡最大高度约 107 m,是典型的高填方机场。

机场位于大娄山期二级剥夷面上,总体地势南高北低,东高西低。南端和西侧紧靠台地边缘,为中等起伏台地地貌。受流水深切切割的影响,沟谷两侧坡度较大,地形陡峻。研究区位于机场跑道南端西侧,为一条“V”

字型冲沟上(图 1),纵向平均坡度约 25°,两侧沟壁坡度 40°~75°,地形条件复杂。边坡坡顶垂直填方高度最大约 57 m,在距离坡顶约 127 m 处有一条大致与跑道平行的天然气管线,边坡不具备放坡和反压条件,高填方边坡稳定性问题非常突出。经综合比选,采用超高重力式挡墙加高路堤方案。

1.2 高边坡概况

重力式挡墙地面以上最大净高为 41.2 m,总高度最大 49.5 m(含岩溶换填),墙身呈折线形,见图 2(a),顶宽 2.0 m,南侧墙体长 58.8 m,北侧长 73.3 m,采用 C25 混凝土结构。挡墙结构与衡重式挡墙类似,但中下部因地形制宜,根据各处地形、基岩及岩溶情况不断变化,结构形式较为复杂。由于挡墙高度大,对地基承载力及均匀



图 1 研究区地形地貌全景图

Fig. 1 Panoramic view of the study area's topography

性要求高,对岩溶充填物采用开挖一定深度后回填混凝土,并与墙身整体浇筑的地基处理方案。挡墙中部设一道排水廊道和一排泄水孔。

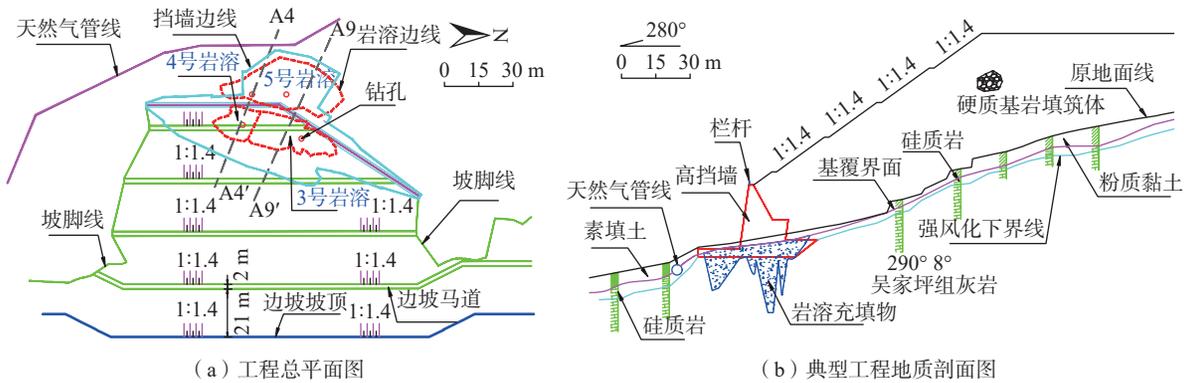


图 2 工程总平面图及典型工程地质剖面图

Fig. 2 General plan and typical geological profile of the engineering

挡墙后高填方边坡最高为 65.71 m,按 1:1.4 的坡比自然放坡,每 15 m 高设置 2 m 宽马道,见图 2(b)。路堤范围内清除覆盖层至强风化基岩,再开挖抗滑台阶提高基覆界面强度。填料采用中风化灰岩或硅质岩破碎料。填筑区周边及墙趾处设截排水沟,马道上设一道混凝土种植槽兼做截水沟。

2 工程地质条件

2.1 地层岩性

武隆机场区域上位于仙女山背斜北西翼,岩层呈单斜状,走向北东-南西,缓倾北西,倾向 260°~300°,倾角 5°~12°。场区基岩为二叠系上统吴家坪组,以灰岩和硅质岩为主,薄-中厚层,发育 N35°E 和 N55°W 两组陡倾节理,倾角多在 70°以上。根据勘察资料及现场调查,强风化灰岩和硅质岩体结构破碎,中风化岩体结构为破碎-较破碎。

研究区基岩以灰岩和硅质岩为主,局部可见黏土岩

夹层,产状为 290°∠8°,薄-中厚层,强风化厚约 5 m,岩体破碎,岩块强度高。硅质岩和黏土岩等相对隔水层出露地带发育股状流水,流量随季节变化较大,有利于岩溶发育^[16,22]。场区覆盖层厚 0~11.3 m,包括耕植土、粉质黏土、碎石土以及天然气管线施工形成的素填土,性质差,见图 2(b)。

2.2 岩溶发育情况

挡墙基础范围发现有 5 处岩溶,其中 1 号和 2 号岩溶体积很小,基础开挖即可清除,对工程无影响。3—5 号岩溶位于挡墙基础中部,上部被第四系土覆盖,为覆盖型岩溶。岩溶整体形态呈椭圆形,尺寸分别为 42 m×15 m、19 m×15 m、54 m×21 m,投影面积分别为 463 m²、171 m²、802 m²,岩溶占挡墙基础面积的 45% 以上,见图 2(a)。

为了查明岩溶形态及深度,对 3—5 号开展了钻探和物探,钻孔及物探典型剖面位置见图 2(a)。3 号岩溶区钻孔深 17 m,上部 9.1 m 为岩溶充填物,其下为破碎

灰岩; 4号岩溶区钻孔深 27.5 m, 表层 3.2 m 为充填物, 3.2~9.1 m 为破碎灰岩, 9.1~27.5 m 为充填物, 钻探未探明岩溶基底; 5号岩溶区设置 2 个钻孔, 30 m 深钻孔全为充填物, 未探明岩溶基底, 32 m 深钻孔上部

27.6 m 为充填物, 其下为基岩; 各岩溶充填物均为浅黄色含砂碎石土, 含水量高, 强度较低。物探结果综合分析表明(图 3), 上述 3 个岩溶形状不规则, 底部埋深预计超过 35 m, 深部有岩溶通道互相连接。

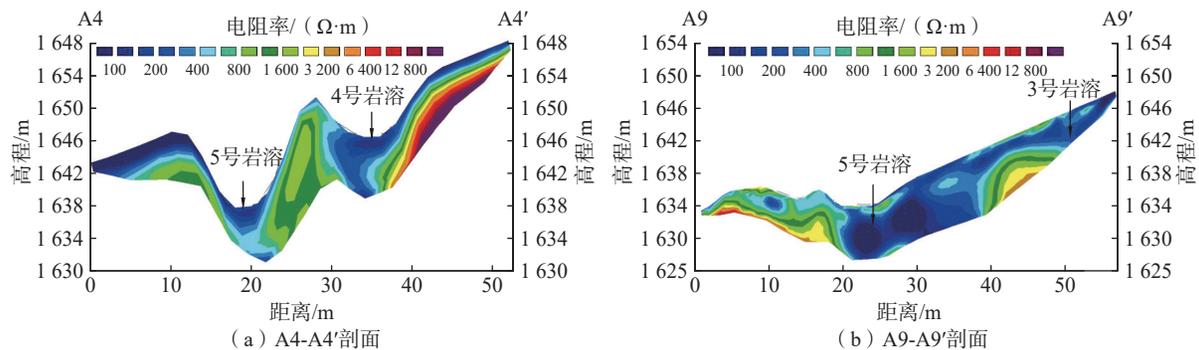


图 3 高密度电法剖面图

Fig. 3 Profiles determined by high-density electrical technique

现场施工中开挖发现(图 4), 岩溶发育区覆盖层较厚, 基岩埋深 5~9 m。岩溶类型主要为溶槽、溶沟及溶蚀裂隙, 呈长条形展布, 各岩溶通过溶蚀裂隙、溶洞等通道连接。溶沟、溶槽最大深度超过 20 m, 侧壁近直

立, 溶腔尺寸随深度增加呈现逐渐减小趋势。岩溶沟槽长轴大致呈 N30°E 方向, 与场区陡倾节理方向基本一致, 岩溶受岩体结构面控制。溶蚀沟槽内填充含水量高的浅黄色含砂碎石土, 岩溶之间基岩顶部结构破碎。



图 4 挡墙基础岩溶开挖图

Fig. 4 Excavation pictures of the karst for foundation of the retaining wall

3 理论分析

3.1 计算方法

3.1.1 计算软件及参数

本工程地质结构复杂, 挡墙结构与普通重力式挡墙有明显不同, 填料、基岩及其结构面、挡墙结构及材料、岩溶、不同材料界面特性等都对边坡及挡墙稳定性产生影响, 传统的极限平衡法难以准确确定破坏模式及稳定状态, 需要开展数值模拟。

数值模拟采用 Optum G2 软件, 是一款集极限分析和有限元分析于一体的岩土分析软件, 具有操作简单、

网格自动化程度高、支持有限元极限分析、收敛性强等特点, 在复杂地质条件及复杂支挡结构破坏模式分析、可靠度计算等方面具有优势^[23]。Optum G2 可考虑基岩层面、不同材料接触面(包括挡墙与基岩、岩溶充填土、填料, 基岩与填料等)力学性质, 是本工程理想的分析软件。LI 等^[24]、YANG 等^[25]分别分析了武隆机场填料、填料与基岩界面力学特性, 相关参数参照选取; 基岩及结构面参数按经验参考《工程岩体分级标准》^[26]选取, 岩溶充填物参数选自勘察报告; 挡墙与不同材料接触面参数参照 GEO 软件帮助文档选取; 各计算参数见表 1。

表 1 数值模拟计算参数
Table 1 Summary of simulation model parameters

岩土性质	本构模型	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
填料	摩尔库伦	22.5	50	35	60	0.30
高挡墙	线弹性	24.0	-	-	28 000	0.20
岩溶充填物	摩尔库伦	18.2	20	13	10	0.32
灰岩	摩尔库伦	26.5	200	40	10 000	0.25
灰岩层面	摩尔库伦	-	60	25	-	-
节理面	摩尔库伦	-	20	35	-	-
挡墙-灰岩接触面	摩尔库伦	-	0	35	-	-
挡墙-填料接触面	摩尔库伦	-	0	30	-	-
挡墙-岩溶充填物接触面	摩尔库伦	-	0	15	-	-
填料-灰岩接触面	摩尔库伦	-	45	35	-	-

3.1.2 计算剖面及分析内容

根据工程实际情况,选取岩溶发育范围大、宽度宽(总宽约 40 m)、岩溶深度深(最深约 35 m)、挡墙总高度最高(含岩溶换填的总高度为 49.5 m)、溶沟溶槽发育(共计 4 条)的剖面进行计算,详见图 2(b)及图 5。填筑体底部覆盖层需全部清除,因此按照第四系土清除后的原地面进行建模。模型设置位移边界条件,即底部为完全固定边,两侧为半固定边(水平方向固定、竖向可自由变形)。

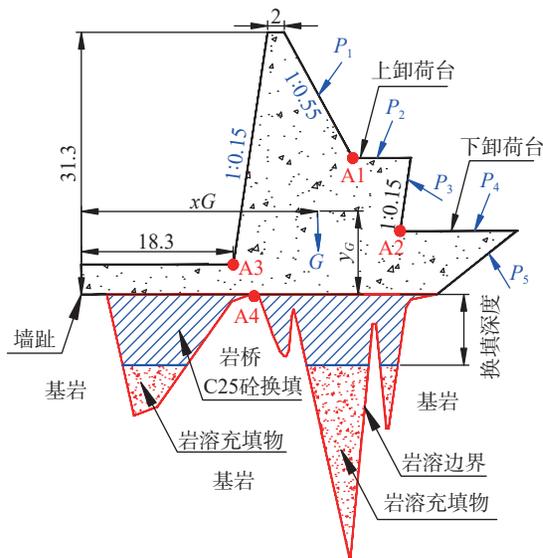


图 5 挡墙结构及岩溶处理示意图(单位: m)

Fig. 5 Diagram of retaining wall structure and karst treatment (unit: m)

数值模拟内容包括不同岩溶换填深度(图 5)下边坡破坏模式、边坡整体稳定性、应力及变形,并提取挡墙墙背土压力计算挡墙稳定性。需要特别注意的是,填土为粗粒土,沉降大部分在施工过程中完成;采用的岩土本构模型属于理想弹塑性模型,不能考虑蠕变效应,

因此填筑体变形计算结果仅供参考。

3.1.3 挡墙稳定性计算

当岩溶换填深度较大时,由于换填深度范围内回填的混凝土与挡墙一起整体浇筑,受溶槽间岩桥的阻挡(图 5),挡墙不具备沿基底发生滑移的条件(沿填筑体及挡墙底可能发生的深部抗滑稳定性在整体稳定性中考虑),因此不需要验算挡墙抗滑移稳定性。

挡墙高度高,承受的土压力大,需要验算抗倾覆稳定性。墙背由 5 个面组成,第 i 面承担的土压力为 P_i (图 5), P_i 到挡墙墙趾的水平、竖向距离为 x_i 、 y_i 。挡墙自重为 G , 其到挡墙墙趾的水平、竖向距离为 x_G 、 y_G , 则挡墙抗倾覆稳定性按式(1)计算:

$$K = \frac{Gx_G + \sum P_{iy}x_i}{\sum P_{ix}y_i} \quad (1)$$

3.2 破坏模式及整体稳定性

经典塑性力学上下限解可在不引入任何假定的前提下,通过上下限逼近边坡安全系数真实解^[27]。通过对模型网格单元细分和基于剪切耗散的自适应加密,可较为准确地确定边坡破坏模式和整体安全系数。针对不同的岩溶换填深度(0~31 m)分别进行了模拟和分析。

3.2.1 破坏模式

当岩溶换填深度较浅时,边坡潜在破坏面由圆弧和多段折线组成,破坏模式较为复杂。圆弧面位于填筑体内部,折线面由基岩主动破裂面、基岩层面、挡墙底边(即挡墙与岩溶充填物之间界面)以及挡墙前被动破裂面组成,墙前被动区、挡墙底边界、基岩层面相对较为薄弱见图 6(a)和图 6(c)。此外,墙背下卸荷台边缘处存在第二破裂面,与已有研究一致^[28]。

当岩溶换填深度大时,边坡潜在破坏面为填筑体内部的圆弧面见图 6(b),破坏模式较为简单。岩溶换填

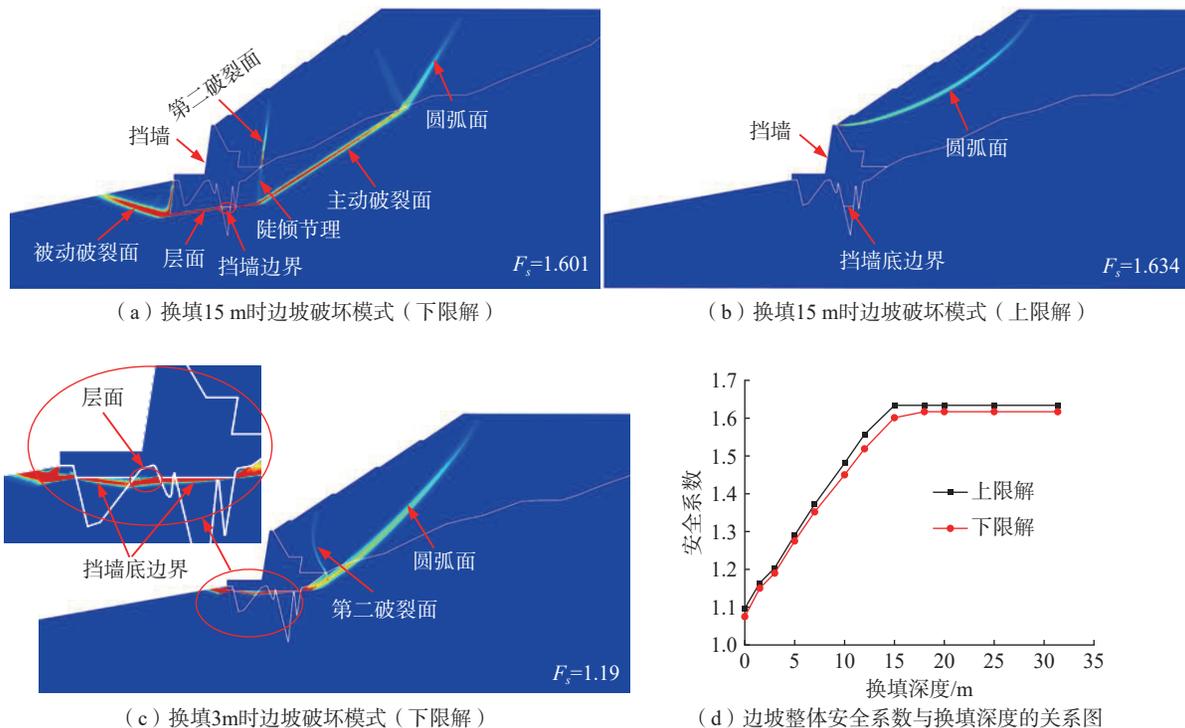


图6 不同换填深度下边坡破坏模式及整体稳定性

Fig. 6 Slope failure modes and overall stability under different replacement depths

深度的增加可有效消除基岩层面、岩溶等薄弱带存在的安全隐患,有利于边坡稳定性。经计算,当换填深度为15 m时,下限解对应的破坏模式为圆弧和多段折线组成,上限解为圆弧面,换填深度大于15 m时上下限解对应的破坏面均为沿着填筑体内的圆弧面。

3.2.2 整体稳定性

有限元上下限解计算表明,当换填深度低于15 m时,随着岩溶换填深度的增加,边坡整体安全系数大致呈线性增加;换填深度大于15 m时,安全系数不再变化,见图6(d)。上述结果与破坏模式分析结果一致,即换填深度大于15 m时,边坡最危险滑面为墙后填筑体内部的圆弧面,与挡墙无关,因此安全系数不会变化。

当换填深度不小于7 m时,边坡安全系数上下限解均大于1.35,可满足民航规范要求^[29],因此岩溶换填深度不应小于7 m。

3.3 应力应变分析

采用弹塑性模型对边坡及挡墙应力进行了有限元分析(应力以拉为正、压为负),典型换填深度下的应力及塑性应变结果见图7所示,关键点(位置见图5)应力随换填深度的变化规律见图8(a)。

面坡坡脚处(A3点)是挡墙压应力的主要集中点,见图7(a)左、图7(b)左,随着换填深度的增加最大压应力逐渐减小。换填深度小于10 m时,压应力降低迅速;

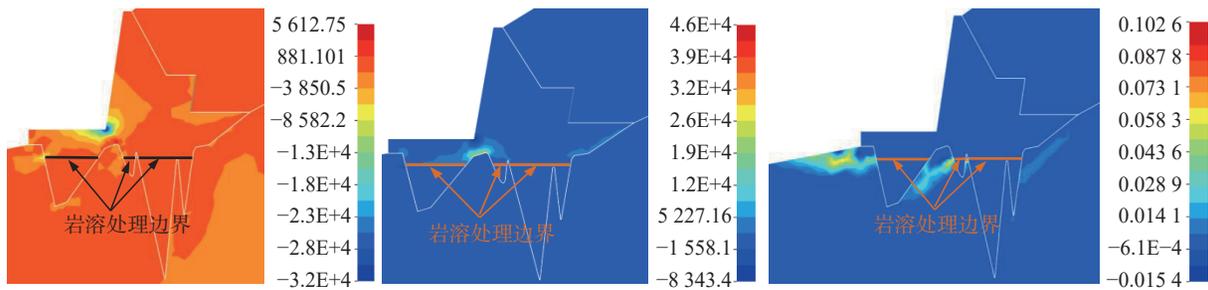
大于10 m时呈缓慢下降趋势。换填深度大于5 m时,最大压应力小于20 MPa,混凝土强度满足要求。

换填深度浅时,拉应力的主要集中点在挡墙基底溶槽之间的基岩接触区域见图7(a)中。由于岩溶充填物强度低,能承受的荷载很小,挡墙基底受力特点类似于多点竖向固定的简支梁,简支点需承受较大的弯拉应力。从体积塑性应变图也可看出,岩溶之间的基岩顶部出现大片塑性变形区域,与挡墙受力特点一致,见图7(a)右。当换填深度较大时,挡墙基础埋深大、与基岩接触面积大,应力通过基岩扩散后,挡墙底附加应力小,其受力与普通衡重力式挡墙类似,因此拉应力集中点出现在卸荷台转角处,见图7(b)中。

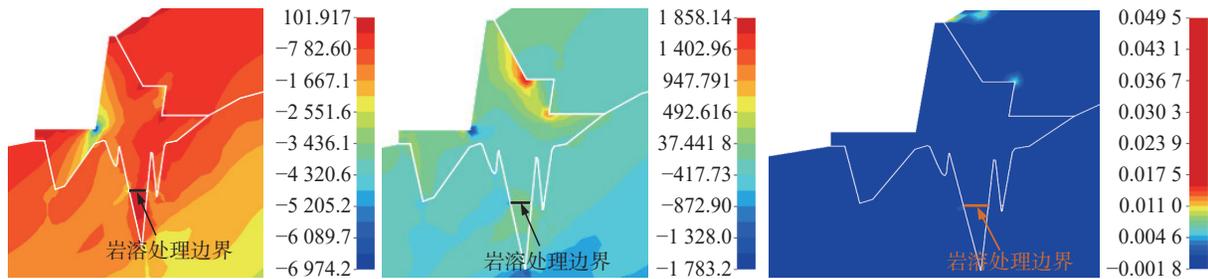
挡墙换填深度与上、下卸荷台(A1、A2处)小主应力关系曲线可知,见图8(a),随换填深度增加卸荷台拉应力呈现增加趋势。这是由于随换填深度增加挡墙自重加大,限制了土体变形,土压力逐渐增加所致。经计算,换填深度大于7 m后,上卸荷台拉应力趋于稳定,稳定值约1.86 MPa, C25混凝土抗拉强度满足要求。

岩溶之间的基岩(A4)应力分析表明,随换填深度增加其应力逐渐减小,见图7及图8(a),有利于地基稳定性。

体积塑性应变计算表明,岩溶换填深度浅时,地基发生大面积塑性应变,见图7(a)右,地基稳定性差。



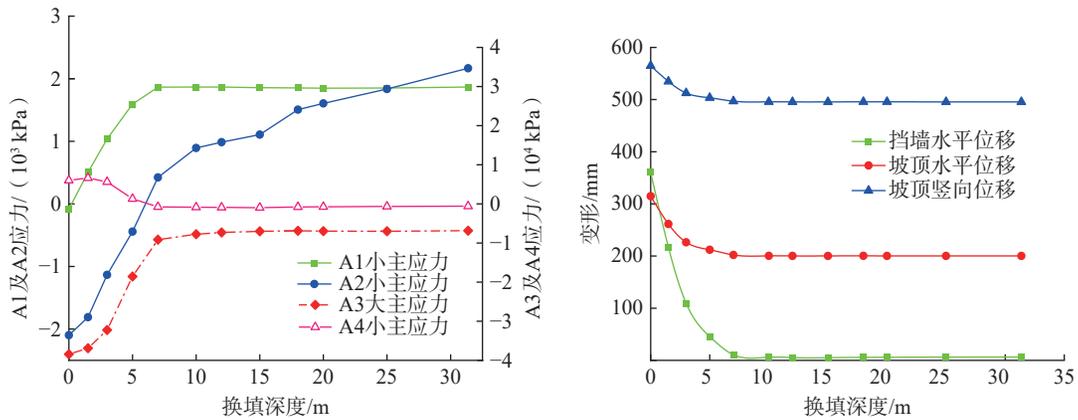
(a) 换填3 m时的挡墙大主应力(左)、小主应力(中)及体积塑性应变(右)等值线图



(b) 换填15 m时的挡墙大主应力(左)、小主应力(中)及体积塑性应变(右)等值线图

图 7 挡墙应力及塑性应变等值线图(应力单位: kPa)

Fig. 7 Contour maps of the retaining wall stresses and plastic strains (stress unit: kPa)



(a) 换填深度与关键点应力关系曲线

(b) 换填深度与关键点变形关系曲线

图 8 换填深度与关键点应力及变形关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between replacement depths and stresses/deformations of key points

换填深度加大后, 仅在局部尖角处出现塑性变形, 见图 7(b)右。

3.4 变形分析

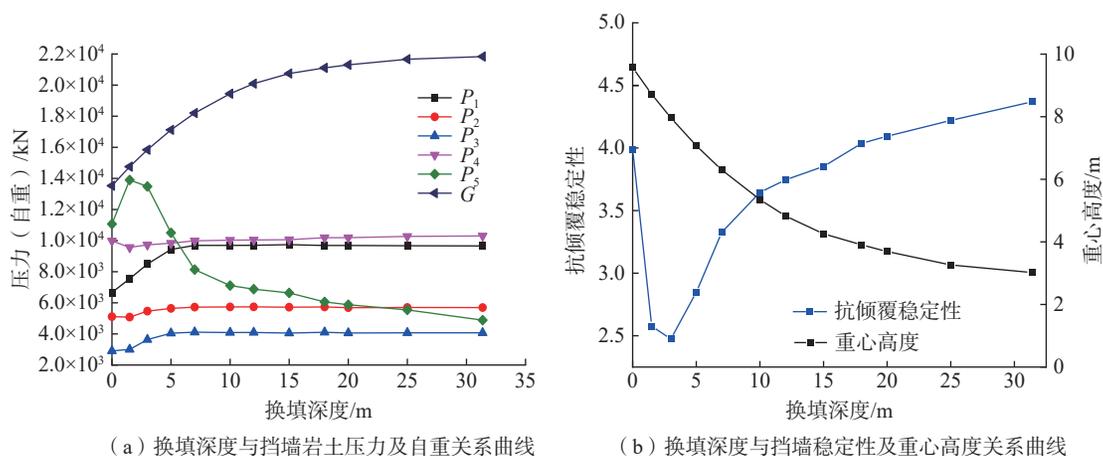
挡墙水平位移、边坡坡顶变形与换填深度的关系见图 8(b)。随换填深度增加, 挡墙水平位移、坡顶变形均逐渐减小, 与经验及应力分析结果一致。当换填深度大于 7 m 时, 挡墙及坡顶水平位移、坡顶竖向位移趋于稳定, 稳定值分别约为 6 mm、20 cm、50 cm。

3.5 土压力及挡墙稳定性

挡墙及地质条件复杂, 采用有限元计算挡墙土压力。由于换填深度增加导致挡墙自重增加, 加之埋深加

大后地基水平抗力增加, 挡墙水平位移逐渐减小, 限制了土体变形, 因此墙背与填土接触面的土压力整体呈现增加趋势, 见图 9(a)。当换填深度不小于 7 m 时, 随换填深度增加, 挡墙位移趋于稳定, 见图 8(b), 因此土压力也趋于稳定, 见图 9(a)。

P_5 为墙背与基岩接触面压力, 当不换填时挡墙水平位移很大(约 36 cm), 主要受力点位于挡墙中前缘, 岩石压力较小; 当换填深度较小时, 挡墙水平位移大幅降低, 由于岩溶充填物能承受荷载小, P_5 所在面作为支撑面承担较大的压力, 因此 P_5 呈现增加趋势; 随着换填深度进一步增加, 岩溶侧壁支撑作用逐渐加大, 岩石压



(a) 换填深度与挡墙岩土压力及自重关系曲线

(b) 换填深度与挡墙稳定性及重心高度关系曲线

图9 换填深度与挡墙受力及挡墙稳定性关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between replacement depths and retaining wall forces and stability

力逐渐减小,因此 P_5 随后呈减小趋势。

根据土压力计算成果,对挡墙进行了抗倾覆稳定性计算,见图9(b)。由图可知,挡墙稳定性随换填深度增加呈现先减少后增加趋势。岩溶不换填时,挡墙水平位移大,土压力小,因此抗倾覆稳定性较大;换填深度小幅增加后,挡墙水平位移大幅降低,土压力增加较快,因此挡墙稳定性降低;换填深度进一步增加后,挡墙水平位移及土压力趋于稳定,但挡墙自重逐步增加,因此抗倾覆稳定性逐渐增加。经计算,挡墙抗倾覆稳定性均大于1.5,满足规范要求^[7],抗倾覆稳定性不是控制性因素。

此外,随换填深度的增加,挡墙基础埋深加大,重心高度(图5中 y_G)逐渐降低,降低幅度呈先快后慢的趋势,见图9(b)。降低重心高度可进一步提高挡墙基础受力的均匀性,提高挡墙稳定性,降低偏心荷载对挡墙的不利影响。

4 岩溶处理方案及实施效果

4.1 岩溶处理方案

根据理论计算,岩溶换填深度不小于7 m时,挡墙变形较小,边坡整体安全系数、挡墙抗倾覆稳定性、挡墙及地基强度均能满足规范要求,因此岩溶换填深度不宜小于7 m。

考虑到岩溶地基的不确定性,按照换填深度不低于10 m进行控制。当岩溶深度低于10 m时开挖至岩溶槽底,大于10 m时开挖10~20 m,岩溶上下尺寸变化小时开挖深度取大值。开挖至设计标高后,若底部仍存在充填物应灌浆处理以提高承载力。考虑到基岩岩体较破碎,对挡墙基础固结灌浆、岩溶边壁及基础设短锚钉的构造加强措施,锚钉与墙身连为一体。岩溶区域

底部设置3 m厚底板,配双层钢筋网,进一步增加基础整体性。考虑到挡墙转角处存在明显的应力集中,特别是墙背卸荷台存在拉应力集中,在墙面附近配置钢筋,并在转角处对配筋适当加强。

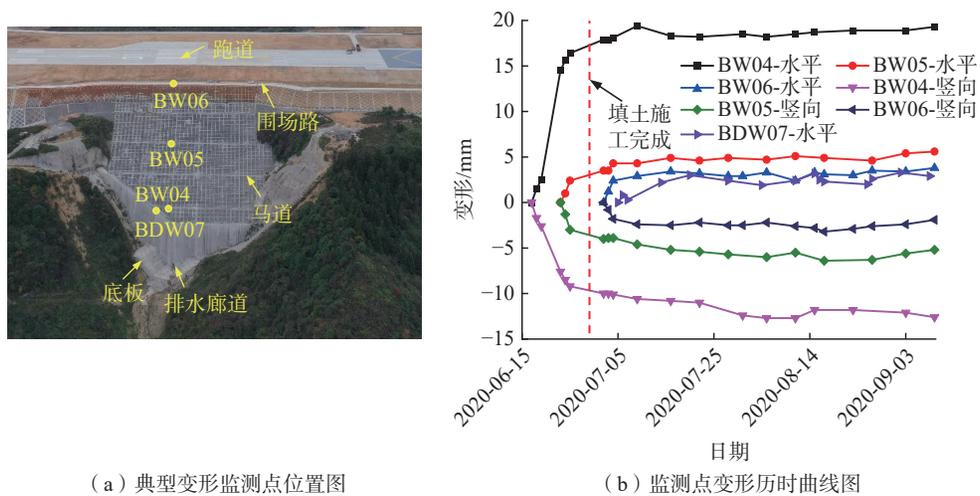
4.2 施工过程

项目从2018年1月初开始施工,2019年5月中旬挡墙基础开挖与岩溶处理(含岩溶混凝土回填)基本完成。挡墙上部结构于2019年6月13日开始施工,2020年6月12日完成全部混凝土浇筑。墙身混凝土浇筑过程中,墙后土石方也逐步回填,2020年6月29日,墙后高填方边坡回填完成。

4.3 变形监测及运行情况

挡墙修建完成后,在墙顶布置了12个变形监测点,在填方边坡坡面布置了3个监测剖面共计8个监测点。此处选取边坡高度最高的BW04—BW06剖面及挡墙变形较大的BDW07点作为代表进行分析,各点位置如图10(a)所示。边坡监测从2020年6月16日开始,至2020年9月9日结束;高挡墙有三个监测点于2020年6月16日开始监测,其余开始于2020年7月5日,至2020年9月9日结束;各点变形监测成果如图10(b)所示。

监测结果表明:(1)在高填方边坡施工过程中,边坡变形增长较快;填筑体施工完成后,边坡变形较小,变形曲线很快趋于收敛,表明填筑体固结在填筑完成后很快完成。(2)填筑体最大水平位移约19.4 mm,最大沉降量约12.7 mm,填筑体施工完成后水平及竖向位移最大值均不大于4 mm,变形量及变形速率很小,边坡稳定性良好。(3)填筑体施工完成后,BDW07水平位移最大值为3.3 mm,变形曲线收敛良好,高挡墙稳定性良好;



(a) 典型变形监测点位置图

(b) 监测点变形历时曲线图

图 10 监测点位置图及其变形时程曲线

Fig. 10 Map of monitoring point locations and their deformation time-history curves

挡墙变形有轻微的上下波动, 预计是不同时间温差导致, 与已有研究一致^[1]。(4)高挡墙所有 8 个变形监测点数据表明, 挡墙最大水平位移为 3.3 mm, 最大竖向位移为 3.9 mm, 与数值模拟结果基本吻合。

目前机场已通航 3 a, 在此期间武隆机场对高挡墙区域进行了持续的现场巡查, 未见任何不良迹象, 高边坡及高挡墙状态良好。

5 结论

(1)高挡墙范围内广泛发育覆盖型岩溶, 面积占挡墙基础的 45% 以上, 以溶槽、溶沟及溶蚀裂隙为主, 长轴与场区陡倾结构面方向基本一致。岩溶最大深度大于 30 m, 全填充, 侧壁陡倾, 基岩地层顺倾、岩体较破碎, 地基极不均匀, 高挡墙及高边坡稳定性问题极为突出。根据工程实际采用超高重力式路堤墙及岩溶地基局部混凝土换填方案, 可有效解决项目重大工程技术难题。

(2)岩溶处理深度浅时, 边坡潜在破坏面由填筑体内部的圆弧面、岩体主动破裂面、墙底与岩溶充填物的接触面、基岩层面及墙前被动破坏面组成, 且墙后出现第二破裂面, 破坏模式复杂。处理深度大于 15 m 时, 边坡潜在破坏面为墙后填筑体内的圆弧面, 破坏模式简单。

(3)岩溶处理深度不小于 7 m 时, 随换填深度的增加, 墙背土压力、挡墙及填土变形、卸荷台拉应力及面墙脚压应力均趋于稳定, 边坡整体安全系数满足规范要求, 挡墙及地基应力不超材料强度, 因此建议岩溶换填深度不小于 7 m。

(4)当岩溶换填深度较大时, 岩溶换填混凝土、岩溶间基岩与高挡墙形成统一的整体, 极大提高了边坡及挡墙稳定性, 实现了岩溶地基溶沟溶槽的合理化利用及不良地质有效防治。

(5)工程监测显示, 填筑体施工完成后边坡及高挡墙水平及竖向位移最大值均小于 4 mm, 变形曲线迅速收敛。监测及运营实践表明, 边坡及挡墙稳定状态良好, 岩溶局部换填方案可有效解决超高重力式挡墙在岩溶发育场地中的应用难点。

参考文献(References):

- [1] 王双, 王睿, 邱存家, 等. 某机场高填方边坡变形机理及支护设计研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26 (增刊 1): 248 - 253. [WANG Shuang, WANG Rui, QIU Cunjia, et al. Research on deformation mechanism and support design of high fill slope in an airfield [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26 (Sup 1): 248 - 253. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邱存家, 胡勇生, 王双, 等. 孔内深层强夯桩处理软弱地基试验 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(12): 70 - 73. [QIU Cunjia, HU Yongsheng, WANG Shuang, et al. Test of treating soft foundation with deep dynamic compaction pile in hole [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technical Edition, 2018, 14(12): 70 - 73. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 廖鸿, 徐超, 杨阳. 某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 113 - 121. [LIAO Hong, XU Chao, YANG Yang. Optimal design of the high geogrid-reinforced slope at the airfield of an airport [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 113 - 121. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 刘许锋. 重力式挡土墙设计与计算在公路工程中的应用 [J] . *建筑技术开发*, 2017, 44(12): 110 - 111. [LIU Xufeng. Application of gravity retaining wall design and calculation in highway engineering [J] . *Building Technology Development*, 2017, 44(12): 110 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邵龙潭, 刘士乙, 李红军. 基于有限元滑面应力法的重力式挡土墙结构抗滑稳定分析 [J] . *水利学报*, 2011, 42(5): 602 - 608. [SHAO Longtan, LIU Shiyi, LI Hongjun. Analysis of stability against sliding for gravity retaining wall structure based on finite element slip surface stress method [J] . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 602 - 608. (in Chinese with English abstract)]
- [6] VARGA R, ŽLENDER B, JELUŠIČ P. Multiparametric analysis of a gravity retaining wall [J] . *Applied Sciences*, 2021, 11(13): 6233.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S] . Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]
- [8] 张彦伟, 宋星光. 贵阳首个超高重力式挡土墙施工技术 [J] . *山西建筑*, 2011, 37(35): 141 - 143. [ZHANG Yanwei, SONG Xingguang. On construction technique of the first super-high gravity retaining walls in Guiyang [J] . *Shanxi Architecture*, 2011, 37(35): 141 - 143. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 朱向东. 超高挡土墙结构设计 [J] . *建筑结构*, 2010, 40(7): 109 - 111. [ZHU Xiangdong. Structure design of a super-high retaining wall [J] . *Building Structure*, 2010, 40(7): 109 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 左莎, 吴丙贵. 超高挡土墙结构技术分析与经济比较 [J] . *水运工程*, 2002(11): 29 - 31. [ZUO Sha, WU Binggui. Technical analysis and economic comparison of ultra-high retaining wall structures [J] . *Port & Waterway Engineering*, 2002(11): 29 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王柳江, 赵志杰, 刘斯宏, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析 [J] . *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 358 - 365. [WANG Liujiang, ZHAO Zhijie, LIU Sihong, et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station [J] . *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(4): 358 - 365. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杨健, 刘斯宏, 杨建洲. 宜兴抽水蓄能电站高重力挡墙稳定性综合评价 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊2): 4439 - 4445. [YANG Jian, LIU Sihong, YANG Jianzhou. Comprehensive evaluation of stability of high gravity retaining wall in Yixing pumped storage power station [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup 2): 4439 - 4445. (in Chinese)]
- [13] 江松笙, 康海冬. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝高挡墙土压力分析 [J] . *岩土力学*, 2006, 27(S2): 125 - 131. [JIANG Songsheng, KANG Haidong. Analysis of pressures on high retaining wall earth pressure of main dam of upper reservoir in Yixing pumped storage power station [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(S2): 125 - 131. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲. 岩溶区建筑场地桩基平均入岩高程预测 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 119 - 125. [CAO Xianfa, LIU Zhikui, LI Hailing. An analysis of the average entering-rock height of grouped piles at building sites in a Karst terrain [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 119 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 肖鸿斌, 金耀岷. 深埋串珠状溶洞的超高层基础设计案例分析 [J] . *中国岩溶*, 2023, 42(2): 382 - 390. [XIAO Hongbin, JIN Yaomin. Case study on super high-rise foundation design of the deep-buried beaded Karst cave [J] . *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 382 - 390. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 姜巽, 曹聪, 刘智, 等. 歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件 [J] . *水文地质工程地质*, 2023, 50(5): 181 - 191. [JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, et al. Development and formation conditions of Karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain Area [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 181 - 191. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王忠忠, 庄卓涵, 胡飞跃, 等. 广州北部丘陵区岩溶塌陷形成条件与易发性评价 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(4): 163 - 172. [WANG Zhongzhong, ZHUANG Zhuohan, HU Feiyue, et al. Formation conditions and susceptibility assessment of Karst collapses in the northern hilly area of Guangzhou City [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(4): 163 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘自强, 马洪生, 牟云娟. 节理裂隙发育岩溶地基数值模拟稳定性分析 [J] . *中国岩溶*, 2022, 41(1): 100 - 110. [LIU Ziqiang, MA Hongsheng, MOU Yunjuan. Numerical simulation analysis and evaluation of stability of the Karst foundation with developed joints and fissures [J] . *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 100 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 钟祖良, 王南云, 李滨, 等. 采动作用下上硬下软型缓倾岩质高边坡变形机理试验研究 [J] . *中国岩溶*, 2020, 39(4): 509 - 517. [ZHONG Zuliang, WANG Nanyun, LI

- Bin, et al. Experimental study on the deformation mechanism of upper-hard and lower-soft gently dipping rock on high slopes under the mining effect [J] . *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 509 – 517. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 马昊, 黄达, 肖衡林, 等. 江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 88 – 94. [MA Hao, HUANG Da, XIAO Henglin, et al. A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei Airport [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 88 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 马翔, 赖国泉. 某山区机场高填方滑坡变形特征分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(4): 16 – 23. [MA Xiang, LAI Guoquan. Analysis on deformation monitoring of a high fill landslide in a mountain airport [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(4): 16 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陶小虎, 叶明, 龚建师, 等. 基于 LBM-DEM 细观数值模拟的水力诱导覆盖型岩溶地面塌陷发育过程分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 124 – 131. [TAO Xiaohu, YE Ming, GONG Jianshi, et al. Analysis of the formation process of the covered Karst ground collapse induced by groundwater changes based on the coupled LBM-DEM numerical simulation at micro scale [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 124 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ZHOU Hang, LIU Hanlong, LI Xueyuan, et al. Plasticity solution for the limit vertical pressure of a single rigid pile with a pile cap in soft soil [J] . *Computers and Geotechnics*, 2020, 117: 103260.
- [24] LI Shiqi, YANG Zhongping, TIAN Xin, et al. Influencing factors of scale effects in large-scale direct shear tests of soil-rock mixtures based on particle breakage [J] . *Transportation Geotechnics*, 2021, 31: 100677.
- [25] YANG Zhongping, LI Shiqi, JIANG Yuanwen, et al. Shear mechanical properties of the interphase between soil-rock mixtures and benched bedrock slope surfaces [J] . *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(5): 04022047.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S] . 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218 —2014 [S] . Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)]
- [27] 汪小刚, 林兴超. 基于刚性块体离散的边坡稳定极限分析法 [J] . *岩土工程学报*, 2022, 44(9): 1587 – 1597. [WANG Xiaogang, LIN Xingchao. Limit analysis method for slope stability based on discretization of rigid blocks [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(9): 1587 – 1597. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 李志浩, 肖世国. 地震条件下悬臂式挡墙主动土压力的极限分析方法 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 79 – 87. [LI Zhihao, XIAO Shiguo. Limit analysis method of active earth pressure on cantilever retaining wall subjected to earthquake [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 79 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 中国民用航空局. 民用机场岩土工程设计规范: MH/T 5027—2013 [S] . 北京: 中国民航出版社, 2013. [Civil Aviation Administration of China. Design code for civil airport geotechnical engineering: MH/T 5027-2013 [S] . Beijing: Civil Aviation Press of China, 2013. Self service filling. (in Chinese)]