

湿陷性黄土地区挖填方场地稳定性 关键技术研究

韦涛¹, 范旭¹, 赵有龙¹, 崔艺璇^{2*}

¹中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 天津

²东南大学土木工程学院, 江苏 南京

Email: *18406508495@163.com

收稿日期: 2021年1月21日; 录用日期: 2021年2月13日; 发布日期: 2021年2月23日

摘要

湿陷性黄土沟壑区场地建设中存在挖填方设计、边坡稳定性及黄土水敏性处理等关键课题。依托某湿陷黄土场地项目并根据已有工程经验和文献,总结了黄土沟壑区平山造地中的六个要素,结合黄土水敏特性,为地基处理、边坡设计、排水设计确定处理目的与处理思路,将繁杂工程问题归类整理,并进行技术方案设计。同时针对几种湿陷性挖填方场地的处理方法:换土垫层法、夯实法、挤密法、预浸水法与桩基法等,进行施工流程、造价、耗时及处理效果的对比;并整理本工程坡形设计方案,包括合理设置坡率和放坡平台,以及三维立体排水的工程经验,为后续同类工程提供借鉴。

关键词

湿陷性黄土, 边坡设计, 黄土沟壑, 地基处理

Research on Key Technology of Stability of Excavated and Filled Site in Collapsible Loess Area

Tao Wei¹, Xu Fan¹, Youlong Zhao¹, Yixuan Cui^{2*}

¹Oil Production Services Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin

²School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: *18406508495@163.com

Received: Jan. 21st, 2021; accepted: Feb. 13th, 2021; published: Feb. 23rd, 2021

*通讯作者。

文章引用: 韦涛, 范旭, 赵有龙, 崔艺璇. 湿陷性黄土地区挖填方场地稳定性关键技术研究[J]. 土木工程, 2021, 10(2): 109-116. DOI: 10.12677/hjce.2021.102012

Abstract

Key issues such as excavation and filling design, slope stability, and water sensitivity of loess exist in the construction of the collapsible loess gully area. Relying on a collapsible loess site project and the existing engineering experience and literature, the six elements in the land reclamation in the loess gully area were summarized, combined with the water sensitivity of the loess, to determine the treatment objectives and process for foundation treatment, slope design, and drainage design. According to this model, we classified and sorted out complicated engineering problems, and designed technical solutions. Simultaneously, for several collapsible excavation and filling site treatment methods: soil replacement cushion method, punning method, compaction method, pre-soak method, and pile foundation method, etc., the construction process, cost, time-consuming and treatment effect are compared; and this paper summarizes the slope design scheme of our project, including the reasonable setting of slope rate and grading platform, as well as the engineering experience of three-dimensional drainage, to provide a reference for subsequent similar projects.

Keywords

Collapsible Loess, Slope Design, Loess Gully, Foundation Treatment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 黄土挖填方整体设计

1.1. 引言

在大多数工程建设中,对挖填方的研究主要集中在常规土体场地的路基及机场建设项目。公路、铁路规划中,路基的设计对低高度边坡填方做过系统的研究,但仅为简化的平面应变问题,作用外力沿长度方向基本不发生变化。机场建设与挖填方造地都属于三维体系,两者在湿陷场地处理、建筑安全等级等方面有所不同,会带来不同的地基沉降、边坡稳定性及地下水分布。湿陷性黄土地区三维挖填方的平山造地工程项目,结合黄土特点对土方填筑、坡面防护及水处理等设计重点的研究空白较多。

本文基于某湿陷性黄土区煤层气开采项目,在其所处的黄土沟壑区平山造地形成的集输气井站场地,对工程地质环境及面临的技术难题进行分析,同时对相应的处理方式进行总结。

1.2. 场地设计

1.2.1. 场地技术难点

黄土区域的气候多为半干旱大陆性季风气候,夏季雨量集中,全年水资源分布十分不协调。暴雨天气多集中在7月和8月,占全年降雨量的80%,6月和9月占18%。干旱严重和降雨集中的气候环境,造成水热资源分布不协调,使得黄土沟壑区场地表面产生结构性裂缝与湿陷性沉降。

在山高坡陡的沟壑区挖填方造地时,由于地形地貌复杂,很难精确查明大面积场地的水文地质情况、历史滑坡、河道和采空区等。同时湿陷性黄土在浸水、增湿时会发生强度骤降和变形突增,其结构性及在水、力作用下的变化尚未有成熟的工程应用体系[1]。在降雨及工业用水入渗后,挖填方造地项目的复

杂历史地貌和黄土自身的不利性质会发生内外联动破坏，这些问题是前期工程技术处理中需要消除的隐患。

1.2.2. 场地整体设计

根据已有的工程剖面图(见图 1)，结合延安新区平山造地、吕梁机场填方造地等工程经验，将类似的湿陷性黄土沟壑区填方造地的工程要素概括为“三面两体”，在地基处理、边坡设计及土方填筑等工程技术环节都包括这些要素的综合处理[2]。图一对这些要素进行具体说明。

三面主要指临空面、交界面和地基填筑面。临空面包括场地周围挖方平整坡面和填方形成的边坡面，也包括一部分削山形成的场地地基面。临空面最先受到外部降雨的侵蚀，因此排水和防冲刷设计是这部分工程的重点。交界面的稳定性是三维挖填方场地稳定性最重要的控制因素。交界面包括挖填方交界面，原始地基土体与填筑土体的交界面，在实际施工过程中又包括接坡面、挖填方搭接面等细节部位。搭接处的不均匀沉降及挖填方施工裂缝形成的潜在渗水通道都是此类工程的技术重难点。地基填筑面主要指大面积填方形成的新平面，控制填方沉降变形是首要任务，根据地面上部建筑等级的不同，填方的沉降要求不同。

根据挖填方的施工步骤，也产生了填方体和挖方体两部分土体。填沟造地工程因造价等问题，大都取用原场地挖方扰动土作为填料，由于原状土和重塑土在工程性质上有很多不同，需要根据不同地基土的性质进行坡型设计和地基处理设计。按常见场地组成，挖方体的强度影响着临空面边坡的稳定性，填方体的变形影响着造地地面的稳定性。

在沟壑区三维挖填方施工中，三面两体五部分要素自身的变形和相互影响是工程问题产生的根本原因，以此作为排查依据，在设计过程中将复杂环境问题转化为这几类控制因素进行方案制定。如在本工程中，填方造地面下埋众多输气管线，上部有蓄水池、集气井装置，场地的不均匀沉降会产生附加剪力，剪坏装置发生渗漏。因此与不均匀沉降问题相关的填方体、挖填方交界面、挖方边坡临空面、地基表面承载力等环节要进行严格技术控制。

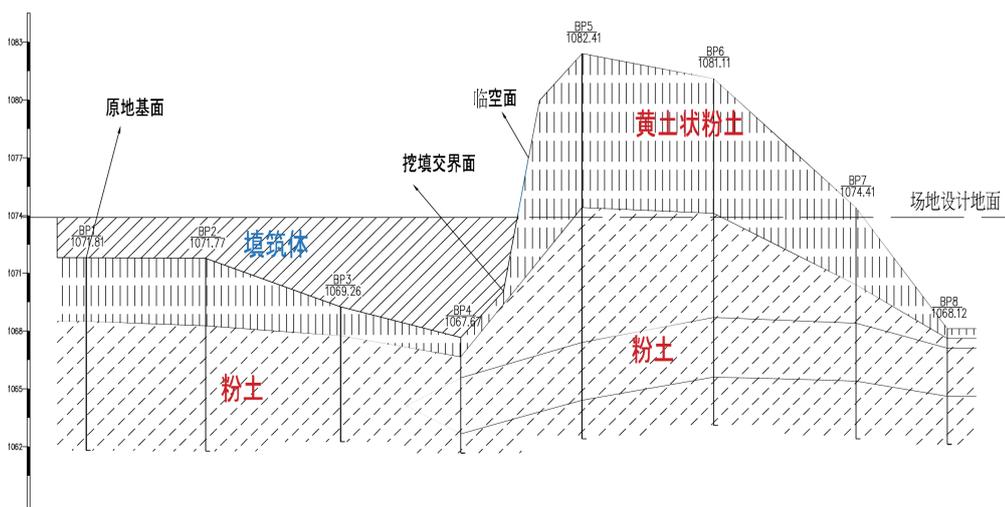


Figure 1. Topography and composition factors of the original excavated and filled site

图 1. 挖填方原场地地形及组成因素

在湿陷性黄土场地中水对工程的影响是不能忽略的。场地环境水包括地表水和地下水，地下水来源于沟壑区原始沟渠的出露水及地下含水层；地表水主要是区域降雨，也包括施工及场地运营中的生产生

活用水。在具有湿陷性的黄土区域，黄土内部大孔隙节理作为下渗通道，使得黄土内部土体遇水软化，结构强度丧失，同时水压力的增大使挖填方坡体下滑力增大，造成坡体稳定性下降[3]。多项研究表明，当有上覆荷载作用时，水力共同作用会加速黄土的湿陷进程，使强度丧失更快，短时间发生变形。渗流湿陷发生后黄土内部会形成新的渗透通道，难以根治。本项目运行中因湿陷产生的裂缝及塌坑，在压硬化处理后仍会反复发生雨后塌陷与管涌。

根据场地整体控制的六个要点：三面两体及两种环境水，对影响场地稳定性的关键要点进行分析，有利于在设计中将工程细节问题，繁杂问题归类整理，使地基处理、边坡设计、防排水设计及工程监测更加精细可控。

1.3. 工程勘测要点

现场勘察是进行场地评价的一个关键步骤，一般勘测包括常规工程测量，原场地勘察，水文地质勘察等。湿陷性黄土场地岩土工程勘察时，由于黄土的湿陷及水敏特性，不仅需要常规勘察，也需要评价黄土的湿陷性及场地中水的影响范围。

高填方场地需根据拟建场地范围收集挖填方原场地地形，土石方开挖平面，填方施工规划图，并确定拟建场地不同工程建设分区。根据工程地质、水文勘测结果以及地面建筑物级别，确定场地边坡和地基变形控制等级。勘测一般分为初步勘察和详细勘察阶段，场地工程的勘探线应沿地形坡向、沟谷、场地分区等布置，勘测报告根据三面两体，以临空面、交界面、填筑地基面为框架绘制勘察结果。

针对特殊黄土需采用钻探和原位测试等确定黄土的湿陷性、抗剪强度、承载力水平。对水文变化敏感的黄土场地，需查明原场地地下水供给来源、排泄方式，并在前期施工设计阶段提出地下水及地表处理方案。湿陷评价如有条件，应进行现场浸水试验确定湿陷系数、起始湿陷压力及湿陷变形量。湿陷性黄土性质的室内试验测定，需要通过钻探及槽探取原状未扰动土样。本区域黄土物理性质测定结果如表1所示。

Table 1. Measurement table of physical properties of collapsible loess in the project site
表 1. 本项目场地湿陷性黄土物理性质测定表

岩土名称	统计项目	质量密度 ρ (g/cm ³)	天然含水量 ω (%)	土粒比重 G_s	液限 ω_L (%)	塑限 ω_p (%)	天然孔隙比 e	直剪		压缩系数		湿陷起始压力 P_{sh} (kPa)	湿陷系数 δ_s
								内摩擦角 φ_q (度) (快剪)	粘聚力 C_q (kPa) (快剪)	α 0.1~0.2 (1/MPa)			
粉土	平均值	1.73	12.1	2.70	22.4	13.5	0.754	17.4	13.2	0.158	-	0.008	
	最大值	1.73	11.9	2.70	21.4	12.9	0.962	17.9	13.8	0.290	184	0.038	
	最小值	1.54	7.2	2.70	20.5	12.3	0.706	14.6	10.9	0.140	91	0.027	
	平均值	1.64	8.9	2.70	21	12.6	0.794	16.3	12.5	0.216	123	0.032	

2. 岩土工程设计

2.1. 地基处理

湿陷性黄土场地地基处理主要包括垫层法、强夯法、挤密桩法、预浸水法以及注浆加固法等。每种方法能处理的土层湿陷厚度和湿陷程度存在差异，需进行经济技术对比后综合确定。本文根据常见地基处理措施，总结了主要的三种处理流程：地基处理→防水措施→结构措施。并对不同的地基综合处理方法从处理效果、经济效益、施工难度等方面进行了总结分析。

地基处理措施：主要指利用各种方法消除黄土的湿陷性或穿透湿陷性土层将荷载传递到承载力强的土层中。防水措施：主要防止降雨及施工生产用水渗透进入地基。在场地坡面及四周布置三维排水系统，土体内部通过埋设排水管、排水涵道或在沟壑区下埋盲沟，场地表面布设降雨排泄网疏导水流并通过表面硬化减少水流聚集与下渗。结构措施：对黄土上部构筑物及基础进行柔性设计，增加建筑物对黄土地基不均匀沉降的适应性；为场地表面设置易于排水的表面坡度。

从处理深度、施工技术、工程造价及耗时方面，对几种不同湿陷性黄土地基处理方法对比分析如下。

换土垫层法是通过挖除地基设计深度内的湿陷性黄土，换填灰土或非湿陷性素土，并进行分层夯实。这种方法处理的厚度为 1~3 m，是处理浅层黄土湿陷的传统方法。施工简便且效果明显，但不适用于大面积的填方造地工程，面积越大工程性价比越低。

压实法根据施工机械分为碾压、夯实和振动压实。强夯是当前地基加固中最为普遍的方法，施工前应进行原位十字板剪切试验、触探试验及室内含水量、液塑限、粒度成分测定，其处理厚度一般为 3~12 m。但强夯目前尚无完整可靠的设计计算方法，且施工前后需要进行大量试验，施工过程中噪声、振动问题突出，在建筑和人口密集区使用受限，加固范围较小(小于 5000 cm²) [4]时经济性低。

挤密法是在确定好位置的桩孔中填入灰土(或素土)并分层夯实或者直接注浆挤密，在成孔及夯实填料的加固施工中对周围土体施加横向荷载，挤密桩间的土体，通过增加土体的密实度改善甚至消除土层的湿陷性，提高湿陷性黄土地基承载能力。其处理厚度一般为 5~15 m。

预浸水法是提前让土体通过浸水发生湿陷变形，消除施工投产后土层的湿陷性，适用于土层厚度较大且湿陷性很强的黄土场地。预浸水过程较为耗时，只有工期长的情况下才能实现。同时预浸水法的水量大，浸水饱和后湿陷性消除但因含水率较高土体承载力下降，上部 6 m 左右的土体仍需进行处理。

桩基法使用各种桩型穿透建筑物下部的湿陷性土层，把上部结构的荷载经桩基传导到下部承载力较好的持力层上。设计中需要注意，在湿陷性黄土土层中不考虑桩的摩擦力，应在桩的承载能力上减去桩的负摩擦力。桩基的承载力强，但湿陷黄土层深厚时无法控制湿陷变形且费用较高。

湿陷性黄土地基处理的实践归纳起来有以下三种思路：第一种是初步消除基础下部土层的湿陷性。这种方法在土层 10 m 内较薄时使用，主要有强夯、换填垫层及普通挤密桩。当土层深厚时采用预浸水处理。通过物理措施改善黄土的湿陷性。第二种是穿透湿陷黄土层传力于深部的持力层。工程上最常采用的是灌注桩形式的桩基，相对来说比较安全可靠，通常在场地的重点构筑物下部运用此种处理方法。第三种是设置隔水措施，防止湿陷性黄土浸水。利用灰土、PVC 和 PE 膜等隔水材料在地表进行隔水处理。在承载力要求不高时可简单隔水，大型工程中需结合其他措施综合处理。

消除场地黄土的湿陷性要具体问题具体分析，综合建筑物的基础承载力要求、外界降雨环境、工期和经济技术指标，分析构筑物上部荷载后进行选择。

2.2. 坡形设计

2.2.1. 稳定性设计

坡形设计包括边坡稳定性设计及坡型优化。挖填方形成的边坡临空面应首先满足工程安全系数要求。进行边坡稳定性分析时，规范建议采用天然含水率或塑限含水率的抗剪强度来确定最危险滑动面。稳定性分析前，应对边坡的可能破坏方式及相应破坏方向、范围等做出判断。边坡的破坏包括岩土体强度造成的破坏和结构面造成的破坏，要根据不同的破坏形式对边坡进行整体、局部抗滑稳定和抗倾覆稳定分析。叱干晓敏[5]基于简化 Bishop 法，提出一种考虑黄土结构强度的边坡稳定判别方法，得出不同含水率下的临界坡高及坡角。在降雨频率较高的地区，坡角设计值应适当折减，边坡稳定安全系数应适当提高。湿陷性黄土在降雨下渗时土体饱和度及含水率会增大，土体抗剪强度下降，同时引起地下水位上

涨,并在相对隔水层以上出现暂时性地下水,导致边坡失稳乃至出现滑坡事故[6]。

复杂工程边坡采用圆弧滑动平衡分析时,无法细化局部的应力及其安全系数变化,需要进行具体部位的数值模拟分析。当原始边坡的稳定性系数不能满足要求时,要采取加固措施。常用措施的原理分为:增加土体的强度、减小和平衡下滑力。在场地地形和填料不受限制的场地,可布设抗滑平台、设置反压平台以及最大限度减缓坡比;受到限制时,可通过增加原场地的地基强度、布置加筋土、挡土墙等来保证边坡稳定性[7]。填筑材料不能使用未经过处理的原位黄土。

边坡形式应在稳定分析的基础上进行比较,满足规范中边坡和临时边坡设计值的同时,根据填料的性质、工程地质条件结合当地工程经验合理确定。

2.2.2. 坡型优化

对 20 m 以上的高陡边坡[8],坡面设计时要分级台阶状填筑并逐级进行放坡处理,以防止黄土边坡面应力不均匀产生裂缝,加剧地表水的入渗。边坡设计应充分考虑地下水、地表降雨和施工用水,在施工和使用阶段均布置相应的临时排水措施,防止失稳及滑坡的出现。大型边坡应每隔一定高度设置坡面马道,在马道水平面及边坡斜面垂直方向设置立体排水网。边坡坡度沿每级马道逐步放缓,如图 2 所示。

已有研究证明,边坡的坡角是坡体最危险部位,坡角处应进行地基处理消除湿陷性影响,同时为防止坡角处土体应力失效难以提供水平支撑力,需在坡角的一定范围内夯实加固并设置构造性挡土措施来抵抗水平变形。

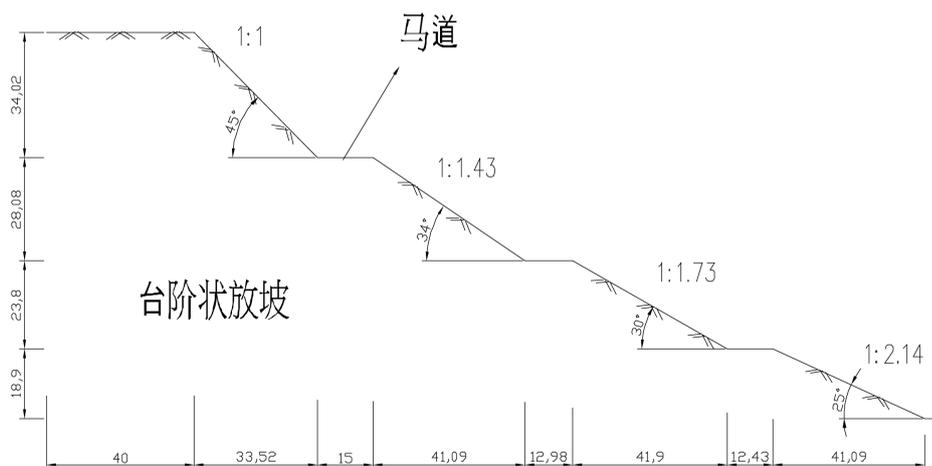


Figure 2. Slope optimization design diagram

图 2. 放坡优化设计示意图

2.2.3. 接坡面设计

对挖填方交界面处理的目的是保证填筑体和原地基土体形成均匀、稳定的整体,并通过对局部交界面的加密处理,解决表面地基处理难以控制交界面变形的问题。与填方区土体压实后随时间发生工后沉降变形不同,挖方区土体会发生卸载回弹,因此产生了挖填交界面的差异变形,使其成为工程的薄弱结构面。挖填过渡区一般采用台阶状开挖原边坡地基土,将接坡台阶的原状土夯实后,在填筑的下一级工作面再次对交界面区域进行网格夯实,强夯的能级、间距及交界面的高差要根据实际边坡结构与土体性质进行设计。

边坡开挖时要在垂直方向分层,水平方向分段同步阶梯状施工。要使场地运碴、排水、挖掘互不干扰,保证开挖的顺利进行。边坡工程施工前应熟悉边坡的危险地质状况和边坡破坏表现,了解支护物和

构筑物的结构,制定监测方案并提前确定应急预案,建立信息反馈制度。当监测到结构变形较大,甚至达到预警值时,要及时调整施工方案[9]。

2.3. 排水设计

黄土的水敏性与湿陷性对场地稳定性影响极大。施工和使用期间应布置三维立体排水系统,进行地下水疏导及工程表面排水。地下排水要预埋排水管道,水位较高时应进行井点降水,防止地下水位上升引起沉降。沟底排水应沿场区黄土沟壑走向设置树枝状的主盲沟、支盲沟、次盲沟,出露的泉眼处和渗漏点处均设置排水支盲沟,盲沟由土工布包裹砾石及涵管组成,可使地下水渗入排出而阻止泥土进入[10]。

地面防排水可采用灰土或混凝土封水,设置地面坡度,增加重点构筑物的高程。在场地内外部周边布置排水沟,采用钢筋混凝土防水沟并设置一定的管沟坡度。慎用水泥管,在预计差异沉降大的地方采用柔性接头。预留降水井位置,若地下水位上升可采取降水措施。

3. 工程监测

黄土边坡的滑坡变形具有典型的阶跃性特点[11],为了确保施工期的安全施工,应进行边坡安全监测。边坡监测的要点部位是正在开挖的边坡结构面以及开挖线上部的岩土体,要实时掌握边坡内部应力和外部变形情况,同步评估边坡的稳定状况。施工结束后,需要监测的项目有地表水平、垂直位移及裂缝变形,应力监测主要包括孔隙水压和土压力,另外对湿陷性黄土影响较大的地表水雨量、地下水位也需要进行监测;有支挡结构的边坡要监测其内部的变形和应力。

填筑地基在施工前后需对地表总沉降、分层沉降以及水平位移进行监测,在湿陷性黄土区域需要重视对水的监测,主要包括土体内部孔隙水土压力,地下水位及盲沟的出水量。在边坡及场地平面施工填筑时,每一层的填筑施工前后应监测一次,遇到降雨时,需要增加监测频率[12]。

4. 结论

湿陷性黄土沟壑区山高坡陡,地形地貌复杂。此区域的场地建设中面临挖填方平山造地稳定性问题及黄土水敏性引起的土体破坏问题。本文梳理总结了黄土沟壑区平山造地中的六个要素,根据这些要素确定了地基处理、边坡设计、排水设计的处理目的与处理思路,借助这种思路将设计中的繁杂工程问题归类整理,并进行技术方案确定,其中不涉及具体的参数设计计算。同时针对湿陷性挖填方场地的处理措施:换土垫层法、夯实法、挤密法、预浸水法与桩基法等,进行施工流程、造价、耗时及处理效果的对比。并提供本工程坡形设计以及三维立体排水的工程经验,为后续同类工程提供借鉴。

参考文献

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001(1): 3-13.
- [2] 曹杰, 张继文, 郑建国, 梁小龙, 刘智, 李攀. 黄土地区平山造地岩土工程设计方法浅析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 109-112.
- [3] 李同方, 霍艾迪, 梁燕, 高思宇, 何思佳, 金诚, 段羿呈. 浅谈水力侵蚀对黄土高原浅层滑坡形成的影响[J]. 自然科学, 2020, 8(4): 227-232.
- [4] 卢明礼. 关于强夯处理地基的适用范围探讨[J]. 建材与装饰, 2017(46): 222-223.
- [5] 叱干晓敏. 考虑含水率变化对黄土结构强度影响的边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(5): 173-176.
- [6] 李忠社, 彭立志, 梁润娥. 降雨入渗黄土边坡的稳定性分析及评价[J]. 水资源研究, 2013, 2(6): 429-433.
- [7] 周海鹰, 张文正, 余超, 朱建峰, 周钰倪, 罗艺. 山地填方高边坡数值分析优化设计[J]. 汉斯土木工程, 2020, 9(12): 1276-1282.
- [8] GB 51254-2017. 高填方地基技术规范[附条文说明] [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

- [9] GB 50330-2013. 建筑边坡工程技术规范[附条文说明] [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [10] GB 50025-2018. 湿陷性黄土地区建筑标准[附条文说明] [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 钟少波. 三峡库区黄土坡滑坡变形监测分析与思考[J]. 测绘科学技术, 2016, 4(2): 60-67.
- [12] GB 50007-2011. 建筑地基基础设计规范[附条文说明] [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.