

8-25-2019

Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation

GAO Shengxiang

CUMT Geotechnical Engineering & New Technology Development Co. Ltd., Xuzhou 221008, China

XU Qiang

Southwest Pipeline Branch of PetroChina Co. Ltd., Chengdu 610041, China

MA Hongyu

CUMT Geotechnical Engineering & New Technology Development Co. Ltd., Xuzhou 221008, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

GAO Shengxiang, XU Qiang, MA Hongyu, et al. (2019) "Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 21.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.020

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/21>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation

Authors

GAO Shengxiang, XU Qiang, MA Hongyu, WU Shenglin, WU Kang, LIU Peng, and WU Zehui

文章编号: 1001-1986(2019)04-0131-07

高填方对红黏土地基力学性质影响及坡体稳定性

高盛翔¹, 徐强², 马洪玉¹, 吴圣林^{1,3}, 吴康¹, 刘鹏¹, 吴泽辉¹

(1. 徐州中国矿大岩土工程新技术发展有限公司, 江苏 徐州 221008; 2. 中国石油天然气股份有限公司西南管道分公司, 四川 成都 610041; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 以云南安宁市一高填方边坡为例, 通过勘察、监测等手段, 在查明红黏土分布特征的基础上, 对填土前后红黏土的物理力学性质变化进行分析, 应用数值模拟软件对坡体稳定性进行研究。结果表明, 填方工程施工前后, 红黏土地基物理力学指标呈现出先降低后增强的特征, 致使填土边坡的稳定性呈现出先降低后提高的趋势; 坡体上部的地裂缝是在地基土、原地形、填土厚度不均的不利组合下, 由于填方体、地基土固结引起坡体的不均匀变形所致, 坡体整体稳定。研究成果对于红黏土地基的高填方边坡工程设计、红黏土地基物理力学指标对坡体稳定性的影响、施工过程中不均匀变形量控制、坡体上部裂缝病害研究具有一定的参考价值和指导意义。

关键词: 红黏土; 高填方边坡; 坡体稳定性; 坡体裂缝; 数值模拟; 云南安宁

中图分类号: P642.22; TU446 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.020



Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation

GAO Shengxiang¹, XU Qiang², MA Hongyu¹, WU Shenglin^{1,3}, WU Kang¹, LIU Peng¹, WU Zehui¹

(1. CUMT Geotechnical Engineering & New Technology Development Co. Ltd., Xuzhou 221008, China; 2. Southwest Pipeline Branch of PetroChina Co. Ltd., Chengdu 610041, China; 3. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: This paper takes a highfill slope in Anning in Yunnan Province as a case, using investigation, monitoring and other methods, on the basis of the distribution characteristics of red clay, the physical and mechanical properties of red clay before and after filling were analyzed, then the stability of slope was studied by numerical simulation software. The results show that the physical and mechanical indexes of the red clay foundation decrease first and then increase before and after the fill project, the stability of the fill slope shows the trend of decrease first and then increase. The ground fissures in the upper part of the slope resulted from the uneven deformation of the slope body were caused by the filling body and the foundation soil consolidation under the unfavorable combination of the foundation soil of the original topography and the uneven thickness of the filling soil, and the slope body is stable in general. Research result has certain reference value and guiding significance to the highfill slope project design of red clay foundation, the study on the influence to slope stability by physical and mechanical index of red clay foundation, the control of inhomogeneous deformation during the construction, crack hazard in the upper part of slope.

Keywords: red clay; highfill slope; slope body stability; slope crack; numerical simulation; Anning City in Yunnan Province

红黏土是覆盖于碳酸盐岩系之上的高塑性黏土, 是红土的一个亚类, 是碳酸盐类岩石经过红土化作用后所形成, 我国的红黏土主要分布在南方, 以贵州、广西和云南最为典型。红黏土的主要成分为高岭石、伊利石和绿泥石, 其黏土矿物具有稳定

的结晶格架, 加之其稳固的团里结构及结合水, 使得红黏土具有较好的水稳定性、结构强度及力学特性, 常作为天然地基使用^[1]。但由于分布不均、裂隙发育以及胀缩性等特点, 常常引起地基的不均匀变形, 边坡失稳等工程问题^[2]。

收稿日期: 2018-02-06

第一作者简介: 高盛翔, 1983 年生, 男, 河南新乡人, 硕士, 高级工程师, 从事地质工程及岩土工程研究. E-mail: cumtgsx@163.com

引用格式: 高盛翔, 徐强, 马洪玉, 等. 高填方对红黏土地基力学性质影响及坡体稳定性[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 131-137.

GAO Shengxiang, XU Qiang, MA Hongyu, et al. Study on slope stability and the effect of highfill on the mechanical properties of red clay foundation[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 131-137.

随着中国西部发展，大型工程逐渐增多，在山谷、沟壑区域往往存在高填方的情况，高填方区域的地基土在受到上部较大荷载下，其物理力学性质在填筑过程中会逐渐发生改变，填方体以及地基土体的不均匀变形可能引起高填方坡体失稳，导致高填方工程失败^[3-4]。目前针对红黏土区域的高填方工程，国内外学者开展了大量的研究工作，工作多是针对高填方区域填筑期间的不均匀沉降、工后沉降、堆填边坡的稳定性等方向展开^[5-8]。研究表明，高填方填筑体的变形由地基土和填筑体变形构成，填筑体变形量为主要变形量，填筑体的变形速率随着填筑体高度的增加而逐渐减缓^[8-9]。填筑体变形整体分为施工期变形和工后变形 2 个阶段，变形时间可持续几十年，主要变形量发生在施工期间，工后变形主要以缓慢的蠕变变形为主^[10-13]。堆填边坡的稳定性计算多以填方体本身为研究对象，采用有限元法、极限平衡法等方法进行评价^[14-15]，较少考虑原始地表、填方体地基土分布不均、地基土在填方后物理力学指标变化对填方体稳定性的影响。因此，研究红黏土地基的不均匀分布及其物理力学性质在填筑后的变化对坡体稳定性的影响、填方体堆填时间的控制、填方体上部裂缝病害的防治具有重要意义^[16]。

本文以云南安宁市一高填方边坡为例^[10-11]，根据现场勘察、试验、监测、检测成果，对填土前后红黏土地基物理力学性质的变化进行分析，建立三维地质模型对潜在滑动面进行预测，对典型断面坡体稳定性进行分析，为今后在红黏土区域高填方的边坡工程设计、施工、监测提供参考。

1 研究概述

1.1 工程概况

在建项目位于山前缓坡地带，整体坡度较小，根据原坡度，自上而下分为 1 955~1 957 m(1995—1957 平台)，1 948~1 950 m(1948—1950 平台)，1 944~1 946 m (1944—1946 平台)3 个平台进行填筑，每个平台设不同罐组，如图 1 所示。

该平台整体分为 3 个阶段回填，最外侧为加筋土边坡，根据施工场地周围的建筑材料及气候条件，填筑体采用全风化白云岩掺水泥及混合料掺水泥进行分层碾压。根据规范要求，填筑体施工采取 0.25 m 的碾厚度进行分层碾压，碾压后的填土压实系数为 0.94~0.97，整个填筑工程历时 6 个月。回填工程施工顺序如图 2 所示。

在建场地自西向东，填筑体厚度逐渐增大，1944—1946 平台的最大回填厚度约 30 m。

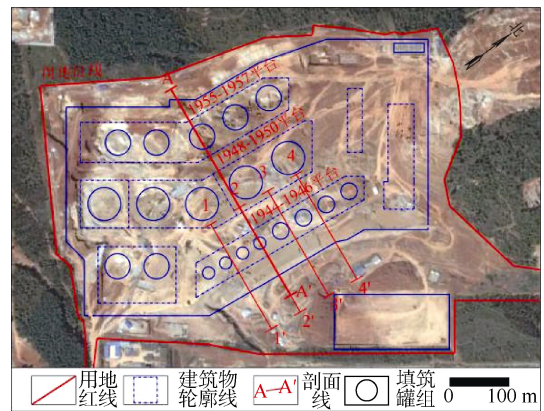


图 1 建设场地平面布置示意图

Fig.1 Planar layout of construction site

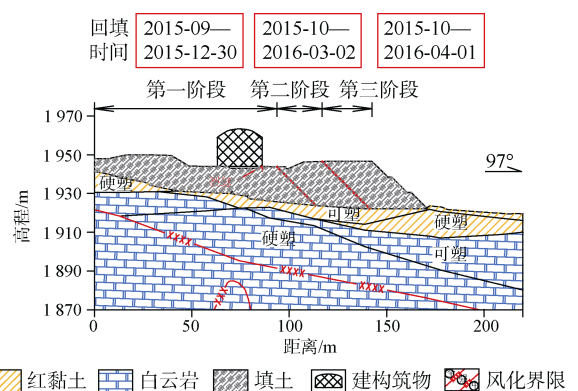


图 2 回填时序剖面图(1—1')

Fig.2 Time series profile(1—1') of backfill

1.2 工程地质及水文地质条件

研究区岩土体自上而下由填土、第四系残坡积层(Q₄^{cl+dl})红黏土、震旦系上统陡山沱组(Z_{6d})白云岩组成，根据各层工程地质性质，将研究区岩土体划分为 8 层，研究区工程地质剖面如图 3 所示。

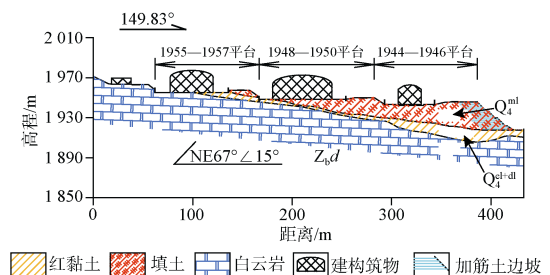


图 3 工程地质剖面图(A—A')

Fig.3 Engineering geological profile(A—A')

研究区域内地下水类型主要是松散层孔隙水及碳酸盐溶洞裂隙水。

根据已有勘察资料，结合场地地下岩土体层位，在评价区内共布置 6 个地下水水位监测孔(图 4)，对评价区域地下水进行分层监测，其中，T1、T2、T3 监测层位为填土及填土底界面处，孔深 27.0 m；H1 监测层位为红黏土，孔深 32.0 m；H2 监测层位为全

风化白云岩, 孔深 44.0 m; B1 监测层位为强风化—中风化白云岩, 孔深 51.0 m, 通过在雨季对研究区域地下水的监测, 监测期间孔内未见地下水。

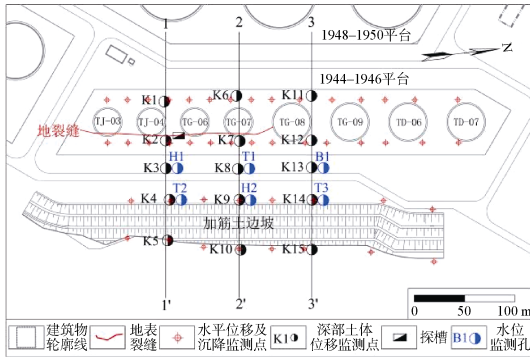


图 4 监测孔工作量布置图

Fig.4 Layout of the observation boreholes workload

1.3 坡体裂缝特征

加筋土边坡回填至设计标高后, 罐区东侧出现了一条长约 195 m, 方向与边坡走向呈近乎平行的地裂缝(图 4)。裂缝最宽处可达 4 cm, 探槽显示该处裂缝最大深度小于 2 m, 且裂缝随深度逐渐尖灭。

2 填土与红黏土分布特征

2.1 填土分布特征

评价区域原始地形为缓坡梯田, 坡体自上而下共有 4 级台坎, 呈“圆弧”状, 较大一级台坎从罐区中部穿过, “圆弧”台坎中心与地付罐组区中心重合, 评价区域原始地形与地付罐组区位置关系见图 5 所示。

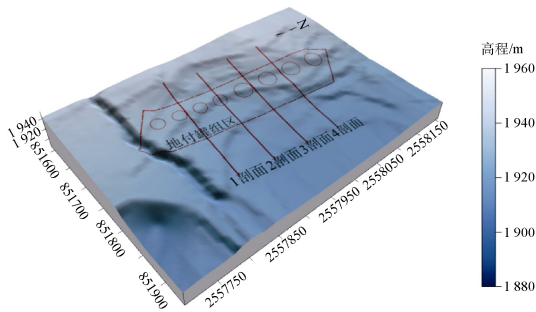


图 5 原始地形三维效果图

Fig.5 Three-dimensional rendering of original terrain

施工后地形如图 6 所示。通过对比回填前后地形特征, 填土厚度自西向东, 自南向北逐渐增大, 填土最大厚度为 29.4 m, 位于研究区东北侧。

2.2 红黏土分布特征

研究区高填方边坡下伏地基土为红黏土, 其物理力学性质、分布厚度对坡体的稳定性有着较大影响。综合已有勘察资料, 通过对钻孔所揭露的红黏土与白云岩(全风化)分界面高程进行插值, 建立红黏土底板三维趋势图, 如图 7 所示。

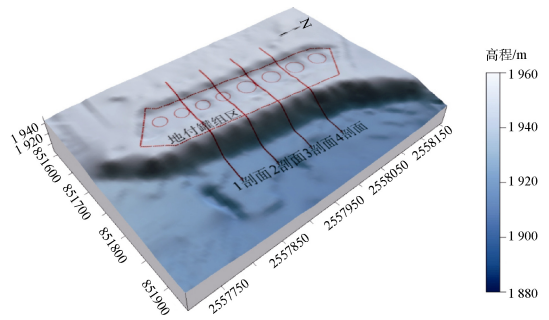


图 6 现状地形三维立体图

Fig.6 Three-dimensional map of current terrain

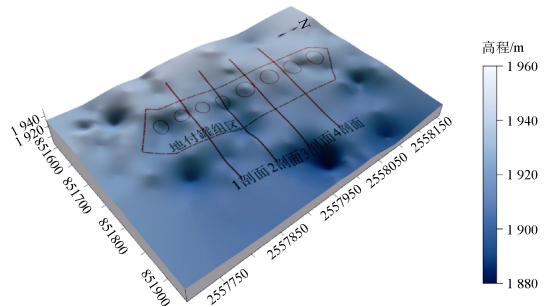


图 7 红黏土底面三维效果图

Fig.7 Three-dimensional rendering of the bottom of red clay

基岩面高低起伏不平, 整体呈现西高东低的趋势, 溶蚀坑分布较多, 3—3'剖面东侧位于最深溶蚀坑区域(图 7)。受基岩面起伏影响, 研究区域红黏土厚度相差较大, 通过对钻孔所揭露的红黏土厚度进行插值, 绘制红黏土厚度等值线, 见图 8a。

研究区域内的红黏土总厚度整体自西向东逐渐增大, 北侧红黏土平均厚度较小, 2—2'剖面东侧所在区域的红黏土厚度最大。坡顶地裂缝出现于红黏土厚度变化较大区域。

根据勘察资料, 红黏土可塑状态在纵向、横向分布上无明显规律性, 可塑、硬塑交替分布。可塑红黏土厚度较大区域主要分布在地付储罐区域的中部, 2—2'剖面从可塑红黏土厚度最大区域穿过(图 8b)。

3 红黏土地基力学性质变化规律

评价区域勘察时序共分为 2 次勘察、3 个时段, 第一次勘察为边坡填土前对场地的详细勘察, 第二次勘察为填方体施工至设计标高, 坡体上部出现裂缝后进行的边坡稳定性专项勘察, 第二次勘察按时间分为 2 个阶段。

在详勘期间, 评价区域周边进行了大量的勘察工作, 通过边坡稳定性专项勘察钻孔与附近已有详勘钻孔资料对比发现, 地下岩土体的物理力学特征在详勘与专项勘察中发生了变化, 其中, 可塑红黏

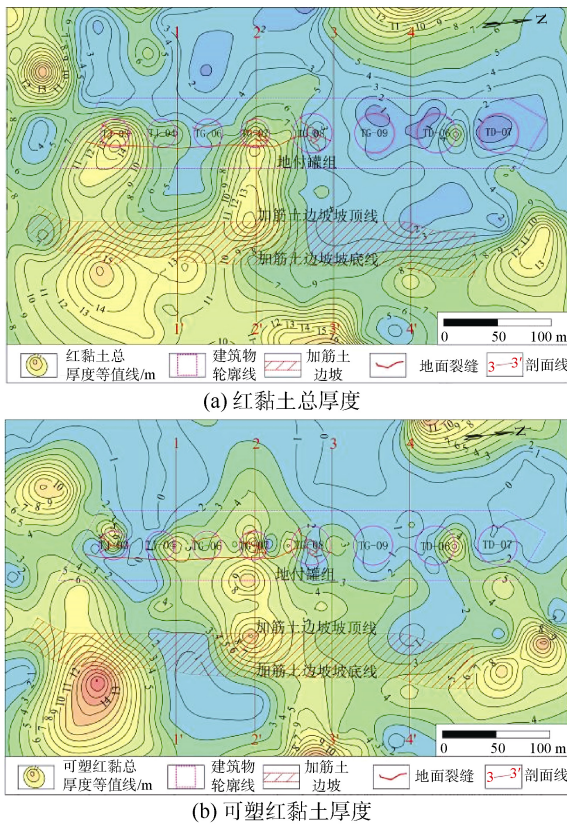


图 8 红黏土及可塑红黏土厚度等值线图

Fig.8 Contour map of total thickness of red clay and plastic red clay

土的指标变化最为明显。详勘期间所揭露的可塑红黏土在专项勘察中已变为硬塑状态，边坡稳定性专项勘察中所揭露的红黏土均为硬塑状态，未表现出明显的可塑、硬塑分界，其物理力学指标随回填时间发生了一定的变化，见表 1。

通过对比 2 次勘察 3 个时段所取红黏土的土工试验指标，随着时间的推移红黏土物理力学性质发生了改变，孔隙比、含水量降低，饱和度提高；压缩系数降低、压缩模量提高，黏聚力、摩擦角先降低后增加。

结合评价区的施工特点及变形特征，分析填筑体地基土发生变化的主要原因是由于在堆填过程中，地基土的上覆荷载逐渐增大，导致地基土产生了排水固结，从而使土体表现出含水量降低，压缩模量提高的特征。

在填筑过程中，由于施工工期较短，上覆加荷速度较快，地基土发生了一定的剪切破坏，致使其强度指标在施工过程中发生了一定的降低，但随着填筑工程的完成，地基土土体结构的恢复，加之土体逐渐完成固结过程，其强度逐渐恢复并有所提高。

表 1 红黏土土工试验结果对比表

Table 1 Contrast table of geotechnical test results of red clay

勘察阶段	红黏土	饱和度/%	含水率/%	孔隙比	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	摩擦角/ $(^\circ)$
详勘	可塑	84.14	35.47	0.95	0.30	8.15	45.75	11.18
	硬塑	82.52	32.90	0.95	0.25	11.42	55.32	12.62
专项勘察第一阶段	可塑	92.15	34.10	0.86	0.25	8.57	35.03	9.83
	硬塑	91.71	34.53	0.89	0.24	9.38	39.02	10.14
专项勘察第二阶段	可塑	95.88	33.52	0.82	0.21	9.98	51.02	11.06

4 坡体稳定性

评价区高填方边坡最大堆填高度为 29.40 m，地基土工程地质性质不均，在高填方荷载作用下，地基土工程地质性质发了一定的变化，堆填方土体内部的应力、应变随着堆填量的增加也逐渐发生改变。

针对高填方边坡特点，采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 和 Slide 软件模拟了整个填土过程，对边坡稳定性进行了计算。模拟过程中，分别按设计阶段和工后阶段 2 个阶段建立计算模型，在选用的岩土体物理力学参数上，分别按详细勘察阶段和边坡稳定性专项勘察阶段岩土体的物理力学参数进行计算。

4.1 坡体滑动面模拟计算

采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 软件对填土各时间点工况进行模拟，建立三维地质模型，通过计算坡体内的最大剪应变增量以预测滑坡裂缝及滑面的位置。

从预测结果图 9 可知，剪应变增量出现区域紧邻储罐右侧，1-1'、2-2'剖面剪应变增量及分布范围均明显大于 3-3'、4-4'剖面。图 9 所反映的剪应变增量出现位置与坡顶裂缝位置一致，在坡体内发生剪切破坏区域未贯通，未形成潜在滑动面。

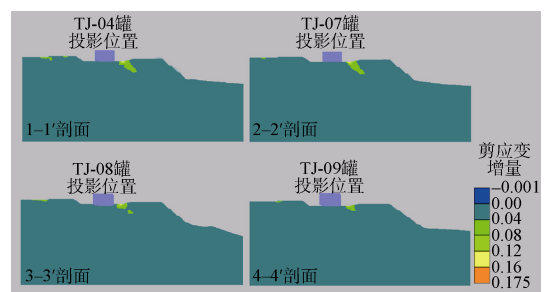


图 9 剪应变增量云图

Fig.9 Cloud map of shear strain increment

4.2 坡体稳定性系数计算

坡体稳定性计算采用 Slide 软件对 4 个工程地质

剖面进行计算, 设计阶段坡体稳定性岩土体参数采用详勘报告中建议的参数; 工后阶段计算参数按边坡稳定性专项勘察阶段(一、二阶段)中岩土体的物理力学参数进行计算(表 1)。

根据软件计算结果(图 10、表 2)可知, 设计阶段与工后阶段在一般工况条件下, 坡体稳定。2—2'剖面稳定性系数整体上小于 1—1'、3—3'、4—4'剖面所在区域, 根据填土与红黏土分布特征可知, 各剖面上覆填土厚度差异较小, 且填土压实度较为均一, 对坡体整体稳定性影响较小, 2—2'剖面下伏红黏土厚度明显大于 1—1'、3—3'、4—4'剖面所在区域, 因此, 致使 2—2'剖面稳定性系数降低的主要原因是其下伏有较厚的红黏土。

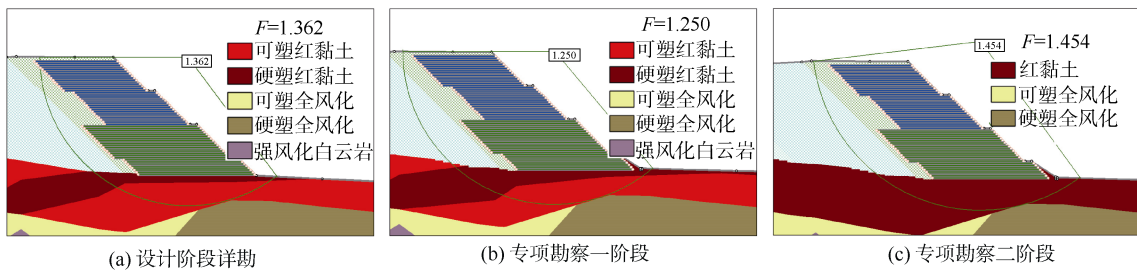


图 10 剖面 2—2'边坡稳定性计算图

Fig.10 Slope stability calculation of section 2—2'

表 2 边坡稳定性系数 F 计算结果汇总表

Table 2 Calculation results of slope stability coefficient

计算剖面	稳定性系数 F		
	详勘参数	专项勘察第一阶段	专项勘察第二阶段
1—1'剖面	1.495	1.292	1.499
2—2'剖面	1.362	1.250	1.454
3—3'剖面	1.474	1.326	1.464
4—4'剖面	1.571	1.383	1.533

根据动探检测结果(图 11), 填土压实度在深度上表现为上部小于下部; 在区域上表现为罐区基础区域填土压实度最大, 加筋土区域次之, 罐区与加筋土之间区域最低的特征, 符合设计罐区填土压实系数大于边坡区域的设计要求。

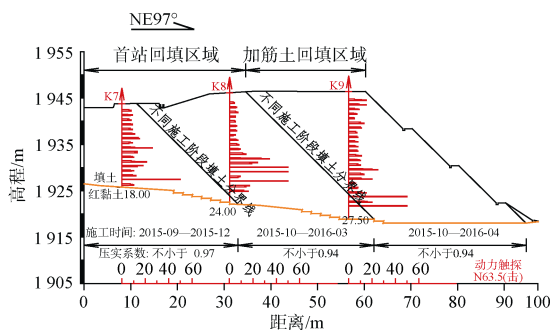


图 11 评价区动探曲线剖面图(2—2')

Fig.11 The dynamic curve profile(2—2') of evaluation area

在时间梯度上, 填土边坡的稳定性呈现出先降低后提高的趋势, 分析其原因是由于填土边坡的基底红黏土物理力学性质指标随着其上覆填土厚度的逐渐增加发生了先降低后增加的特征。

5 坡体开裂原因分析

5.1 原位测试、监测与检测

勘察期间, 对填土进行动探试验以检测填土的密实度; 对填方体下伏红黏土地基进行标贯试验以检测现状下红黏土的状态; 在地面布置了沉降和水平位移监测点, 并在孔内安设了测斜管, 对坡体进行变形监测; 对罐区桩体进行小应变检测以判断桩体的完整性。

红黏土区域的标贯试验表明, 红黏土地基土性质在填筑施工期间发生了较大变化, 由填筑前的可塑状态变为填筑后的硬塑状态。

现有监测成果显示, 坡体整体变形以沉降为主(图 12), 最大位置出现在加筋土边坡顶部边缘区域, 坡脚外侧一定范围内仍有沉降变形, 未有隆起变形发生, 深部土体在填土范围内有略微的变形(图 13), 变形量较小, 现有监测成果未发现坡体内部有大的滑移变形。

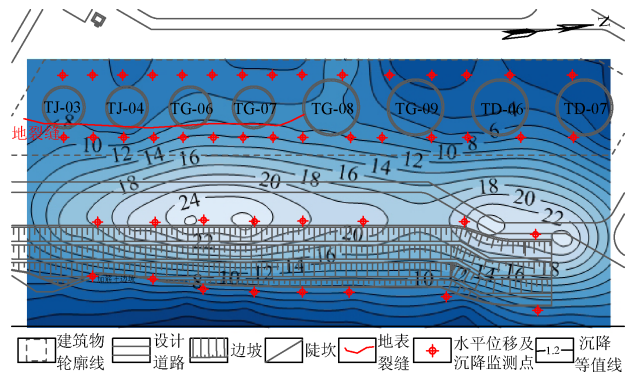


图 12 研究区累计沉降等值线(单位: mm)

Fig.12 Contours of the cumulative settlement of the study area

罐区桩身完整性检测过程中未发现桩身断裂、裂缝等缺陷特征, 桩身完整性好, 均为 I 类, 所测桩均可以作为工程桩使用(图 14)。

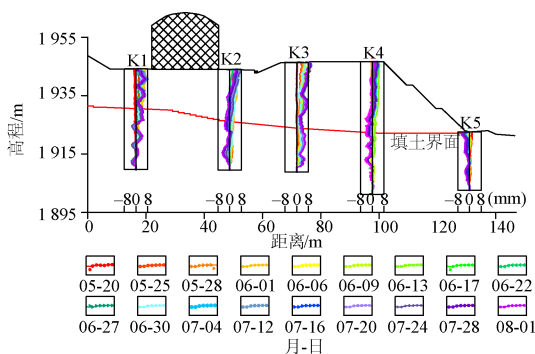


图 13 深部土体侧向位移图(法向)(1—1')
Fig.13 Deep soil lateral displacement(normal)

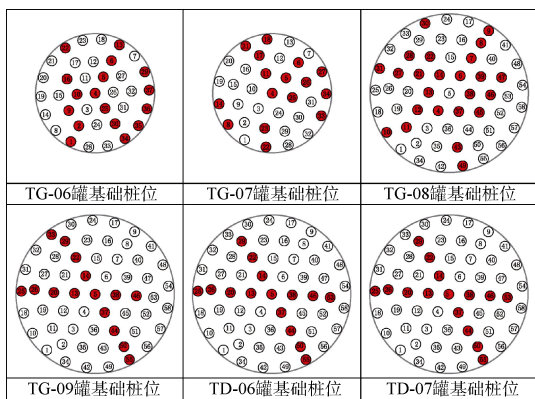


图 14 桩基完整性检测桩位
Fig.14 Location of pile foundation integrity testing

5.2 开裂原因分析

通过对评价区域的勘察及监测，现状条件下，填方体影响深度内的岩土体物理力学性质良好；裂缝自出现至勘察结束期间未发现有明显扩大趋势，填方体整体变形量较小，坡脚稳定；紧邻裂缝的桩基完整性较好，裂缝出现后未对坡体稳定性产生进一步的影响。Slide 软件计算结果显示坡体稳定，综合勘探、监测、检测、数值计算结果，判断现状下坡体稳定。

通过对已有勘探资料的统计分析，坡顶裂缝出现于红黏土厚度变化较大区域，且该位置正与原地貌陡坎位置一致。

FLAC^{3D} 软件模拟结果显示，坡体剪应变增量集中的位置及各指标量值均与裂缝出现位置及延伸方向特征一致。

综上，评价区域下伏基岩面起伏不平，红黏土厚度及性质变化较大，原始地形在罐区东侧形成自然陡坎，加之分阶段回填土厚度不均，进一步加大了评价区域地基土的不均匀变形量。地付罐区基础附近地面裂缝是在地基土、原始地貌、填土不均的不利组合下，由于填土后引起的填土与地基土固结引起的坡体不均匀沉降从而在坡体内部产生拉应力所致。

6 结论

a. 基底土层性质的变化与填方密切相关。在填方的重力作用下基底土层发生压密固结，导致孔隙比降低、压缩模量提高、饱和度提高，但是填方的快速加载也扰动了基底土层，导致抗剪强度降低，随着填方作用时间的延长，基底土层强度逐步恢复提高。

b. 评价区域内的红黏土总厚度整体由北向南、自西向东逐渐增大；可塑红黏土分布在地付储罐区域的南北、东西方向上，其厚度呈现出中间厚、两侧薄的分布特征，地付罐区裂缝出现位置正位于红黏土厚度变化较大区域。

c. 地付罐区基础附近地面裂缝是在地基土、原始地貌、填土不均的不利组合下，由于填土后引起的填土与地基土固结引起的坡体不均匀沉降，从而在坡体内部产生拉应力所致。

d. 根据 FLAC^{3D} 和 Slide 软件对整个填土工况进行模拟计算，坡体内未形成连续滑动面，综合勘探、监测、检测、数值计算结果判断坡体稳定。

e. 针对红黏土地区的高填方边坡，查明不同性质红黏土的分布特征，对差异沉降进行预测，以采取有效的工程措施，减小不均匀沉降对坡体稳定性的影响。对于高填方边坡，应根据基底岩土体性质，按设计要求时间进行填筑，不可擅自缩短填筑时间，谨防基底岩土体在快速荷载作用下，土体发生塑性变形引起坡体失稳破坏。

参考文献

- [1] 李健,孙德安,陈波,等. 浙西饱和红黏土的物理力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 51-57.
LI Jian ,SUN De'an ,CHEN Bo ,et al. An experimental study of the physical and mechanical behavior of the saturated lateritic clay in western Zhejiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 51-57.
- [2] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161.
KONG Lingwei, CHEN Zhenghan. Advancement in the techniques of special soils and slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 45(5): 141-161.
- [3] 臧亚君. 贵州省荔波机场高填方地基稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [4] 钟娅. 昆明新机场西试验区红黏土地基处理及高填方填筑工程研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [5] 张井泉. 高填方边坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [6] 孙紫轩. 高填方机场边坡稳定性影响因素分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.

- [7] 李群善. 康定机场北段高填方边坡稳定性及场道沉降变形研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
- [8] 王成锋. 山区机场高填方体沉降变形控制与评价[D]. 贵阳:贵州大学, 2008.
- [9] 曹光翎. 山区机场高填方工后沉降变形研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- [10] 吴泽辉. 红黏土基底高填方边坡变形及稳定性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2017.
- [11] 高盛翔,葛华,蒋斌松,等. 云南成品油管道安宁高填方边坡变形规律研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 892-900.
GAO Shengxiang, GE Hua, JIANG Binsong, et al. Study on the deformation law of the anning high-fill slope in Yunnan refined oil pipeline[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 892-900.
- [12] 徐明,宋二祥. 高填方长期工后沉降研究的综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 786-789.
XU Ming, SONG Erxiang. Review of long-term settling of high fills[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(6): 786-789.
- [13] 董琪,段旭,李阳,等. 黄土沟壑高填方工后12个月沉降变形规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 89-95.
DONG Qi, DUAN Xu, LI Yang, et al. Subsidence deformation law of high embankment after 12 months in loess ravine[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 89-95.
- [14] 张登武. 西南某机场边坡稳定性分析及综合治理研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
- [15] 赵波,许宝田,阎长虹,等. 人工堆山边坡稳定性数值分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 859-864.
ZHAO Bo, XU Baotian, YAN Changhong, et al. Numerical analysis of slope stability for artificial landscape hill[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 859-864.
- [16] 方薇,杨果林,余敦猛. 武广客运专线红黏土变形特性的研究[J]. 铁道工程学报, 2008(9): 13-20.
FANG Wei, YANG Guolin, YU Dunmeng. Research on the red clay deformation characteristics of Wuhan-Guangzhou passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(9): 13-20.
- [17] 董红娟,栾春雪. 基于FLAC^{3D}的红黏土边坡处治研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(5): 160-163.
DONG Hongjuan, LUAN Chunxue. Study of red clay slope treatment based on FLAC^{3D}[J]. Coal Technology, 2016, 35(5): 160-163.
- [18] 谷复光. 吉林省某路段高填方路基沉降分析与研究[D]. 长春:吉林大学, 2011.
- [19] 姚仰平,祁生钧,车力文. 高填方地基工后沉降计算[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 1-10.
YAO Yangping, QI Shengjun, CHE Liwen. Computational method of post-construction settlement for high-fill embankments[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(3): 1-10.
- [20] 徐则民,黄润秋,许强,等. 九寨黄龙机场填方高边坡静力稳定性分析[J]. 地球与环境, 2005, 33(增刊1): 290-295.
XU Zemin, HUANG Runqiu, XU Qiang, et al. Three-dimensional finite element analysis of some high fill slope stability[J]. Earth and Environment, 2005, 33(S1): 290-295.

(责任编辑 张宏)