

# 西宁机场高填方边坡稳定性对邻近铁路的影响分析

王文良<sup>1</sup>, 武俊东<sup>2</sup>

<sup>1</sup>民航机场建设集团西北设计研究院有限公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>民航机场规划设计研究总院有限公司西北分公司, 陕西 西安

Email: wujd060701@126.com

收稿日期: 2021年8月19日; 录用日期: 2021年9月16日; 发布日期: 2021年9月23日

## 摘要

本文对青海西宁机场高填方边坡稳定性对邻近铁路安全运行的影响因素进行了分析, 重点从平面距离、高边坡稳定性、高填方沉降变形、高填方施工工艺以及邻近铁路侧排水等几个方面, 论述了避免或减小影响铁路运行安全的措施, 在确保铁路安全的前提下, 保障了机场工程的顺利实施。

## 关键词

高填方, 边坡稳定性, 公铁并行, 强夯, 加筋土边坡

# Analysis of the Effect of High Filling Slope Stability on Adjacent Railways at Xining Airport

Wenliang Wang<sup>1</sup>, Jundong Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Airport Construction Group Northwest Planning & Design Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Northwest Branch of China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: wujd060701@126.com

Received: Aug. 19<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, the factors affecting the safe operation of adjacent railways are analyzed by the sta-

**bility of high-filling square slopes at Xining Airport in Qinghai. This paper focuses on the aspects of plane distance, high slope stability, high filler settlement deformation, high fill construction process and adjacent railway side drainage. The measures to avoid or reduce the impact on the safety of railway operation are discussed. Under the premise of ensuring railway safety, these measures ensure the smooth implementation of the airport project.**

## Keywords

**High Fill, Slope Stability, Parallel Highway and Railway, Dynamic Compaction, Reinforced Soil Slope**

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. 引言

目前,我国正处于民航业快速发展阶段,从全国机场布局规划来看,位于山区的机场数量正逐步增加,一些山区机场还面临改扩建。鉴于机场对场地要求较高[1],而山区机场多存在高填方边坡,其稳定性对于机场本身以及周边构筑物及设施影响较大。

铁路作为另一种重要的基础设施,是国家交通网的重要组成部分,因其行驶速度快,对地基变形的要求非常严格,铁路周边设施的稳定性或施工不到位使铁路铁轨产生变形,都将会影响铁路的正常运营甚或发生安全事故。现有研究多针对高边坡自身的稳定性,而较少研究其稳定性对周边设施安全或正常运行的影响。尤其对于铁路等重要设施,更是缺少该方面的深入研究。

本文结合青海西宁机场高填方边坡对邻近兰青铁路的影响分析,综合边坡稳定性分析、边坡地基处理施工、公铁并行运行要求等因素,最终确定了采用加筋土边坡方案,为同类工程设计提供参考。

## 2. 工程概况

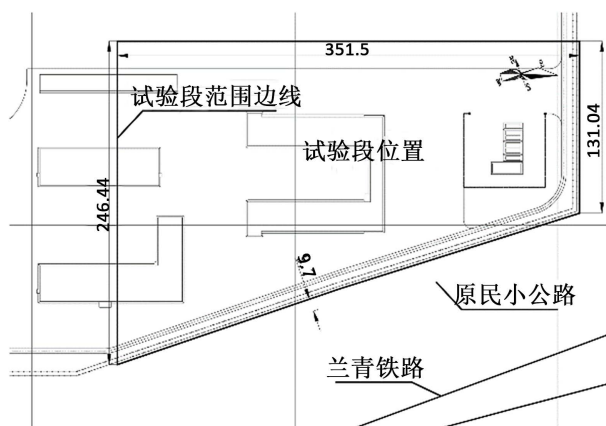
该工程为青海西宁机场改扩建工程高填方试验段工程,机场飞行区指标为4E,试验段位于机场跑道东端南侧的低洼区域,地势总体上西北高,东南低处于湟水河北岸三级阶地。试验段工程填方高度约38m,放坡区域为原民小公路,公路南侧为兰青铁路,铁路等级为I级,采用路堤形式,该段有涵洞三座(4.0m框架涵、2.0m盖板涵、5.0m框架涵),铁路设计时速160km/h,并预留200km/h条件。由于民小公路位于填方边坡位置,影响了试验段工程的实施,但因改迁难度较大,试验段工程工期紧张,对民小路采取了临时改线的方案,将公路向铁路侧改移,改移长度约890m。

民小路改移段按二级公路标准建设,道路路基宽度12.0m,设计速度40km/h,行车道宽度3.75m。经与铁路主管部门进行多次沟通后,公路与铁路间距按照满足《公路铁路并行路段设计技术规范》(JT/T 1116-2017) [2]中公铁并行等级III级进行考虑,如表1所示。改移后公路路肩与铁路路肩最近距离为25.9m,公路路肩与10kV铁路专用电线杆最近距离为15.1m,满足公铁并行等级III级最小值25m要求,并保证电力电杆3m范围内不得侵入的规范要求,试验段及原民小公路平面如图1所示,与公路、铁路相对位置如图2所示。本次按照铁路主管部门和机场建设单位的意见及要求,开展高边坡方案设计。

**Table 1.** Parallel distance between highway and railway (m)

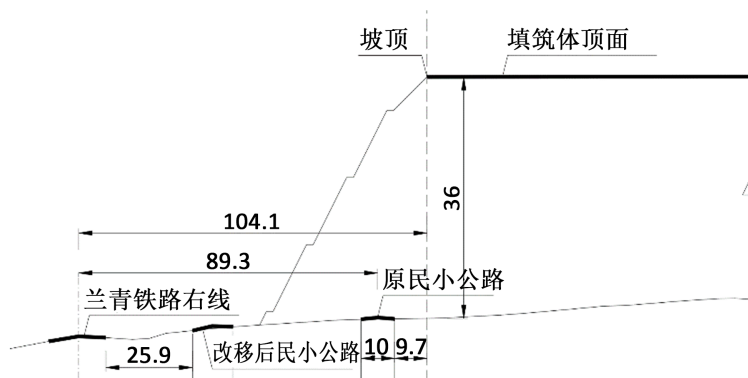
**表 1.** 公铁并行间距(m)

项目	公铁并行等级				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
一般值	50	40	35	25	20
最小值	35	30	25	15	10
极限值	20	15	15	10	5



**Figure 1.** Layout plan of test section

**图 1.** 试验段平面分布图



**Figure 2.** Relative position of filling body to highway and railway

**图 2.** 填筑体与公路、铁路相对位置图

### 3. 工程地质条件

根据地勘报告等资料, 场地土层在控制深度内自上而下依次为①-1 层杂填土( $Q_4^{ml}$ )、②层黄土状土( $Q_4^{al+pl}$ )、④层卵石( $Q_3^{al+pl}$ )、⑤层泥岩(N)组成, 简述如下:

①-1 层杂填土( $Q_4^{ml}$ ): 杂色, 干燥, 松散, 成分主要由粉土组成, 含少量砂砾石及建筑生活垃圾, 主要分布于民小公路两侧, 分布厚度 1.8~3.5 m 不等。

②层黄土状土( $Q_3^{al+pl}$ ): 稍湿~湿, 局部饱和, 稍密, 成分主要由粉土组成, 含粉质黏土及砾砂互层, 属中压缩性土, 整个场地均有不同分布。依据湿陷性可进一步分为②-1 层湿陷性黄土状土( $Q_3^{al+pl}$ )及②-2 层非湿陷性黄土状土( $Q_3^{al+pl}$ )。②-1 层层顶埋深 0.0~3.6 m, 平均厚度 12.4 m; ②-2 层层顶埋深 14.5~18.0 m,

平均厚度 3.6 m。

④层卵石(Q<sub>4</sub><sup>1al+pl</sup>): 稍湿~饱水, 稍密~中密。含有少量粘粒, 其余为中粗砂, 含有大量漂石, 局部夹粉砂薄层或透镜体。砾卵石成分以石英岩、砂岩及浅色变质岩为主, 层顶埋深 5.0~19.5 m, 平均厚度 3.3 m。

⑤-1 层强风化泥岩(N): 可塑 - 硬塑, 泥质结构, 层状构造, 水平层理, 节理裂隙发育, 遇水极易软化, 局部夹石膏岩薄层。层顶埋深 10.2~20.1 m, 平均厚度 6.2 m, 属中压缩性土。

⑤-2 层中风化泥岩(N): 坚硬, 泥质结构, 层状构造, 节理裂隙较发育, 局部夹少量石膏岩薄层, 岩芯多呈长柱状, 少量呈短柱状及碎块状, 该层场地范围均有分布, 层顶埋深 16.5~52.5 m, 揭露厚度 5.0~12.0 m (未揭穿)。

场地赋存有第四系孔隙潜水, 水位埋 14.0~18.0 m, 地下水由北向南以地下径流形式排泄于湟水河, 含水层主要为砾卵石层, 不具承压性。场地标准冻土深度为 1.05 m。

场地湿陷等级为 II 级~III 级严重自重湿陷。抗震设防烈度 7 度, 设计基本地震加速度值为 0.10 g, 设计特征周期值为 0.45 s, 为场地属抗震一般地段。地基土主要物理力学指标如表 2 所示。

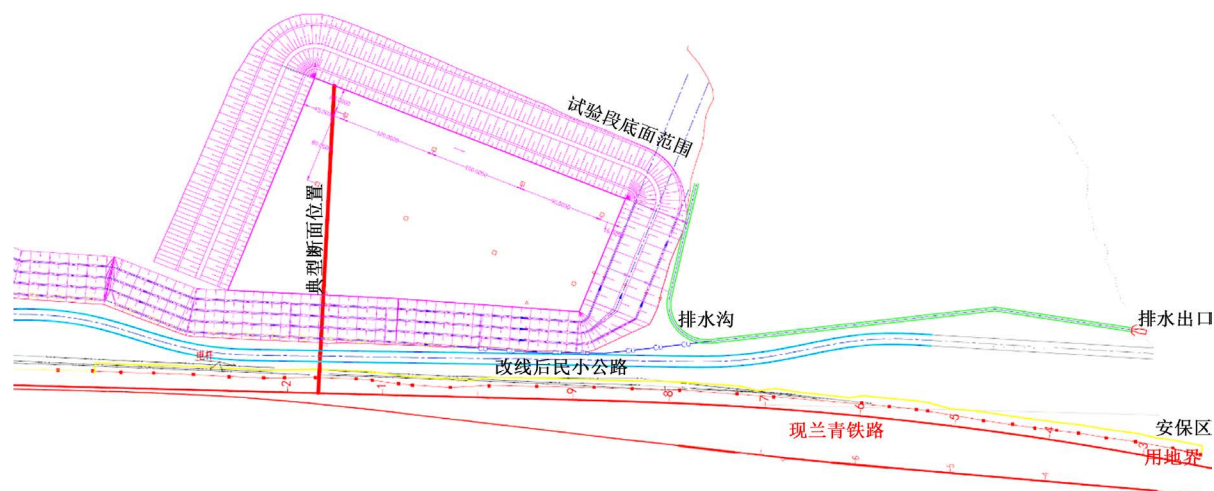
**Table 2.** Recommended values of main physical and mechanical indexes of foundation soil

**表 2.** 地基土主要物理力学指标建议值

地层	天然重度 (KN/m <sup>3</sup> )	压缩模量 (MPa)	变形模量 (MPa)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 φ (°)	承载力特征值 f <sub>ak</sub>
②-1 层湿陷性黄土状土	16.7	10.69	/	14.8	20.6	160
②-2 层非湿陷性黄土状土	17.7	8.25	/	14.8	20.6	160
④层卵石	21.5	/	29.8	0	38	450
⑤-1 层强风化泥岩	19	8.22	/	/	/	230
⑤-1 层中风化泥岩	24	/	0.353 × 10 <sup>4</sup>	/	/	400

#### 4. 边坡设计方案

民小公路局部改线后试验段区域平面布置如图 3 所示。填方边坡采用分级放坡形式, 由于距离改线后民小公路较近, 上部 5 m 设一级平台, 采用 1:2 坡率自然放坡; 其下每 10 m 高设 1 级平台, 坡率 1:1, 直至原地面; 平台宽度 2~5 m。坡脚距离改线后民小公路西侧边线 3~5 m, 典型断面如图 4 所示。



**Figure 3.** Layout plan of adjusted Minxiao highway

**图 3.** 民小公路改线后平面布置图

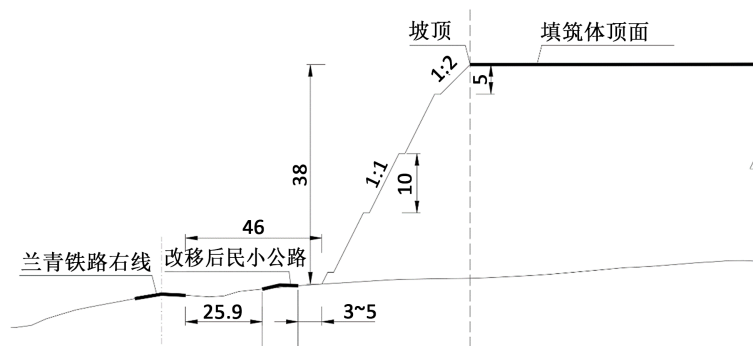


Figure 4. Typical section diagram  
图 4. 典型断面示意图

## 5. 高填方对铁路安全的影响分析

根据机场工程、民小公路以及兰青铁路的平面位置，虽然在采取对民小公路进行局部改线，调整机场高边坡设计方案为加筋土形式后，在平面上基本满足了铁路工程相关规范要求，但是机场工程高填方边坡的稳定性是否会对铁路的正常运行产生不利影响，以及影响程度仍是需要重点考虑的问题。

### 5.1. 需考虑的影响因素

结合边坡与铁路的相对位置及场地实际情况，机场高填方对铁路运行安全的影响主要从下面几个方面考虑。

- 1) 填筑体、公路等设施距离铁路的最小距离；
- 2) 高边坡的稳定性对铁路的影响；
- 3) 高填方沉降变形对铁路的影响；
- 4) 填方及地基处理施工工艺对铁路的影响；
- 5) 高边坡邻近铁路侧排水方案对铁路的影响。

### 5.2. 影响因素分析

#### 5.2.1. 平面距离

民小公路改线后，根据典型断面图中可知，公铁并行间距符合规范《公路铁路并行路段设计技术规范》(JT/T 1116-2017) [2]要求。

#### 5.2.2. 高边坡稳定性

根据《民用机场岩土工程设计规范》(MH/T 5027-2013) [3]中关于边坡稳定性控制指标的要求，填方边坡的稳定性控制标准如表 3 所示。

Table 3. Control standard of filling slope stability

表 3. 填方边坡稳定性控制标准

分析项目	计算工况	需满足安全系数
填筑体与地基整体稳定性	正常条件下	1.35
	暴雨或连续降雨条件下	1.15
	地震条件下	1.05

根据场地工程地质条件(见第 2 部分)，采用表 2 中各土层相关参数，经计算，采用自然放坡方式时，

三种工况条件下边坡安全系数均不满足要求。为此, 经多种方案比选后, 确定边坡采用加筋土边坡形式, 除最上部 5 m 范围外, 其余部分均采用高强有纺土工布作为加筋材料, 边坡表面采用 TBS 植草进行坡面防护。典型断面图如图 5 所示。

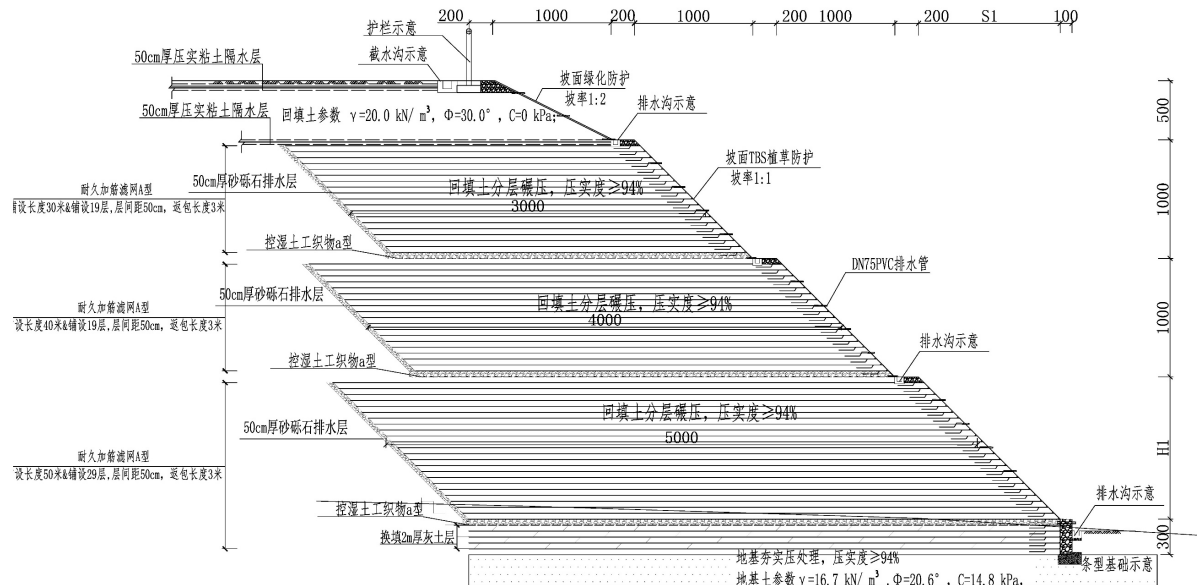


Figure 5. Typical section of reinforced soil slope  
图 5. 加筋土边坡典型断面图

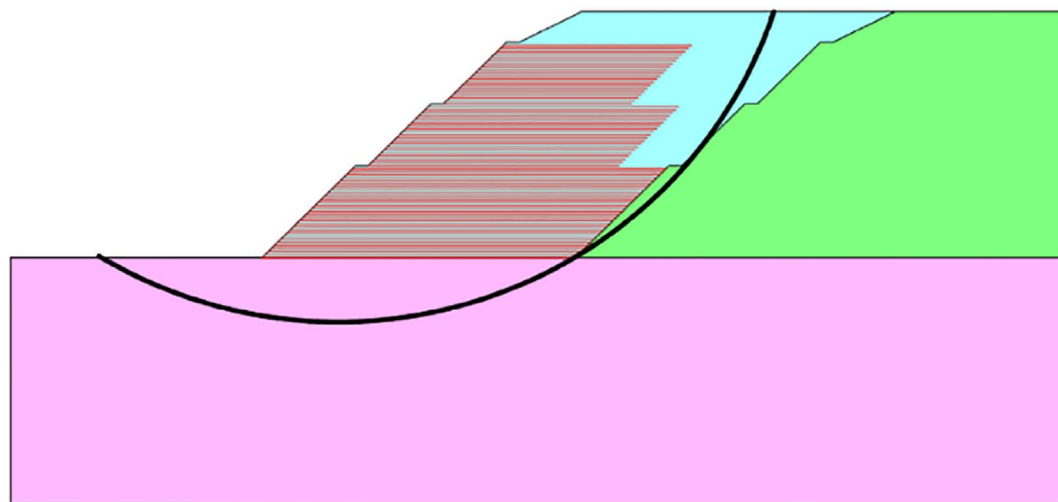
另外, 结合边坡稳定性验算情况, 对边坡地基进行处理, 综合考虑造价、施工难易程度及距离兰青铁路较近等因素, 边坡地基处理采用对周边影响较小的水泥土挤密桩法。地基处理范围为坡脚外 5 m 至坡脚内约 50 m 的区域, 靠近坡脚约 25 m 宽采用水泥土挤密桩, 其余仅设置 1.0 m 厚水泥土垫层。水泥土挤密桩桩径 0.4 m、正三角形布桩、桩间距 1 m、桩长为 10 m, 清除 0.5 m 厚虚桩头后在桩顶设 0.5 m

正常工况圆弧稳定及直线楔体稳定分析的临界结果

圆弧稳定分析(毕肖普圆弧)

最小安全系数=1.36

临界圆弧:  $X_c = 142.16[m], Y_c = 182.61[m], R = 73.04[m]$ , (Number of slices used = 58)



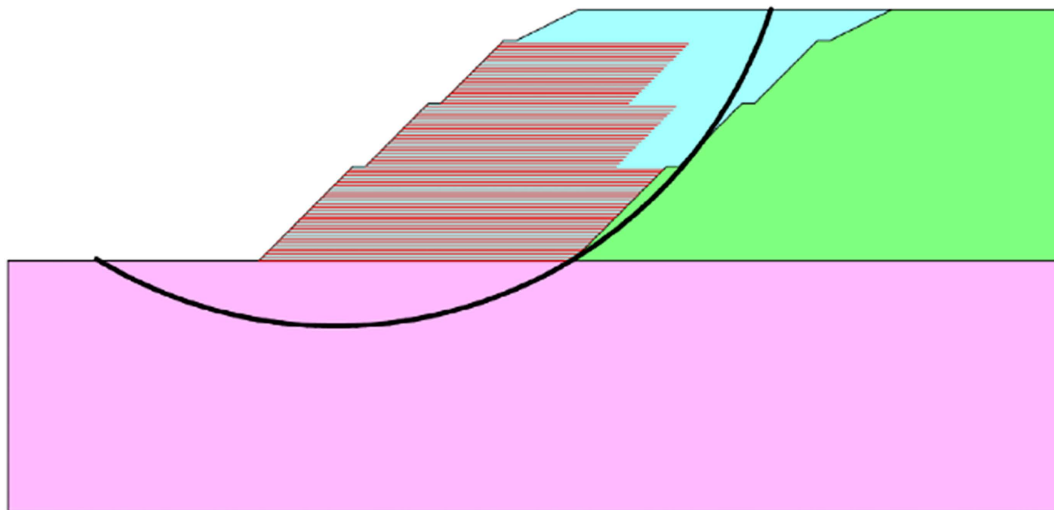
(a)

地震工况圆弧稳定及直线楔体稳定分析的临界结果

圆弧稳定分析(毕肖普圆弧)

最小安全系数=1.18

临界圆弧:  $X_c = 142.16[m]$ ,  $Y_c = 182.61[m]$ ,  $R = 73.04[m]$ , (Number of slices used = 58)



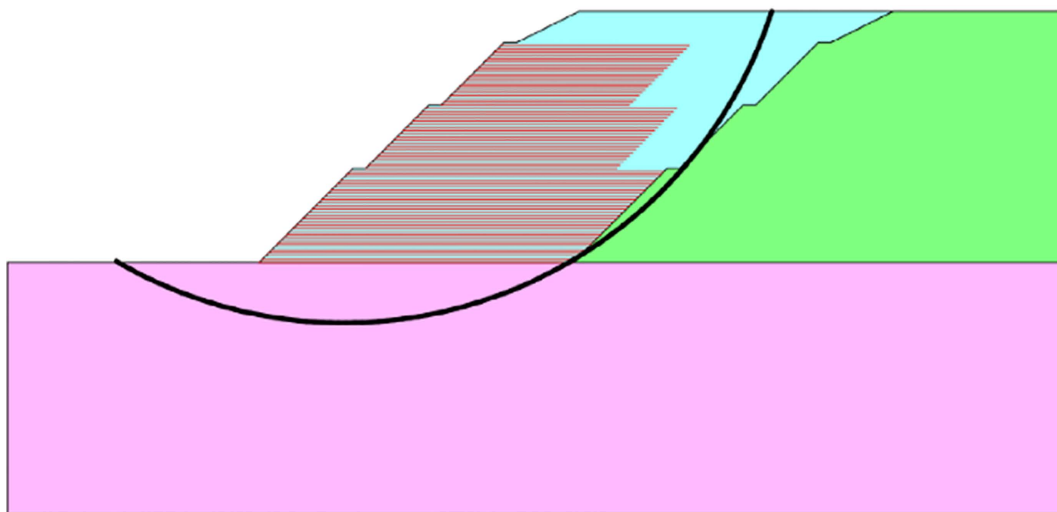
(b)

暴雨工况圆弧稳定及直线楔体稳定分析的临界结果

圆弧稳定分析(毕肖普圆弧)

最小安全系数=1.22

临界圆弧:  $X_c = 143.51[m]$ ,  $Y_c = 181.97[m]$ ,  $R = 71.56[m]$ , (Number of slices used = 60)



(c)

Figure 6. Checking calculation results of slope stability

图 6. 边坡稳定性计算图

厚水泥土垫层。

采取上述措施后,重新对高边坡稳定性进行检算,采用各项参数为:填土: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,综合  $\varphi = 30^\circ$ , 高强有纺土工布最大抗拉强度  $100 \text{ kN/m}$ ; 地基:人工填土  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 16^\circ$ ; 黄土状土  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 33^\circ$ ; 卵石土  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 10 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 25^\circ$ 。

经计算,设计边坡稳定安全系数:一般工况  $K = 1.36 > 1.35$ ,地震工况  $K = 1.18 > 1.05$ ,暴雨或连续

降雨条件下  $K = 1.22 > 1.15$ , 均满足规范和设计要求, 如图 6 所示。

### 5.2.3. 高填方沉降变形

为减小填筑体工后沉降, 缩短项目工期, 并降低其可能对相邻铁路产生的不利硬性, 除加筋土边坡区域外, 每填高 4 m 采取满夯补强措施, 能级采用 100~200 t·m, 夯痕压叠 1/3, 每夯点击数 3 击。强夯后碾压整平进行后续填筑。

由于该工程填方高度普遍较大, 且填料压实较为困难, 从该机场前期工程的使用效果来看, 除需严格控制分层碾压的密实度并进行强夯补强外, 还需采取其他措施以加强填筑体的整体性。参照《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32-2012) [4]的相关要求和近期的一些成功的机场工程建设经验, 为加强填筑体的整体性, 减少因不均匀沉降而引起的道面病害, 考虑在填方体内每填高 4 m 设置一层土工格栅, 土工格栅设置于满夯补强整平后土面。

根据填方高度、地层特性(压缩模量等), 利用分层总和法分别对填方沉降进行计算, 计算结果如下: 填方中心, 地层总沉降 315.100 mm, 填料预留沉降 38.40 mm; 填方坡脚, 地层总沉降 108.782 mm; 铁路中心沉降 0.93 mm。经铁路安全评估单位分析, 认为对铁路影响甚微。

### 5.2.4. 填方及地基处理施工工艺

因距离铁路较近, 强夯施工引起的振动可能会影响到铁路的运行安全, 为了评价强夯施工振动特性, 评估强夯振动对兰青线的影响并指导后续强夯施工, 机场建设指挥部委托第三方, 在强夯试验区进行强夯振动测试, 根据《试验段工程强夯振动测试分析报告》结论, 不同强夯能级、不同填土压实系数条件下防护要求对应的安全防护距离见表 4。

**Table 4.** Safety protection distance of dynamic compaction vibration (m)

**表 4.** 强夯振动安全防护距离(m)

压实系数	强夯能级(kN·m)	安全振动速度(cm/s)		
		1	2	3
0.93	1000	30	19	15
0.95	1000	50	22	16
0.93	2000	44	24	18

经与铁路安全评估单位进行对接, 认为在填方坡脚距铁路路肩最小距离不小于 44 m, 填方强夯补强夯击能采用 2000 kN·m 时, 震动波对铁路影响较小, 强夯可以实施。因此, 在采用 2000 kN·m 分层进行强夯施工时, 要求强夯边缘距离兰青铁路防护栅栏最小距离应不小于 35 m。

另外, 为了确保铁路运行安全, 在距离铁路栅栏最近(35~50 m)处强夯施工时, 设置深 2~3 m 的减震沟槽, 并在铁路防护栅栏外设置了测试点, 测试强夯质点振动速度, 最大速度不得大于 2 cm/s。如测试振动速度大于 2 cm/s, 则立即停止施工, 向远离铁路方向调整强夯范围。在强夯施工过程中未发生超过允许值的情况。

### 5.2.5. 排水方案

结合现场实测地形, 综合考虑, 与铁路相关的排水方案如下:

试验段东侧雨水收集后, 汇入东侧填方坡脚沟(浆砌片石梯形明沟结构, 沟底宽 1.2 m, 沟深 1.5~3.0 m, 沟壁边坡系数  $m = 1$ ); 试验段南侧雨水收集后, 汇入南侧填方坡脚沟(钢筋混凝土矩形明沟结构, 沟宽 1.0 m, 深度 1.0~2.07 m); 填方坡脚沟末端交汇后, 由排水沟引出, 最终经排水出口汇入场区东侧天然冲沟



内, 经穿铁路涵洞汇入下游河流。经测算, 试验段边坡雨水 50 年一遇流量约为  $0.502 \text{ m}^3/\text{s}$ , 经安全评估邻近铁路侧排水方案可行, 基本不会对铁路造成影响。

## 6. 结论

通过分析研究, 确定了西宁机场高填方边坡稳定性对邻近铁路、公路安全的影响因素, 并结合实际条件对各影响因素进行有针对性的分析, 从满足填筑体、公路等设施距离铁路的最小距离, 提高边坡的稳定性, 减小高填方沉降变形, 采用对铁路运行安全影响较小的地基处理方案以及邻近铁路侧合理的排水方案等方面, 制定了切实可行的措施, 既确保了机场高填方边坡工程的顺利实施, 又保障了兰青铁路的运行安全, 为后续类似工程提供了重要参考。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. 民用机场飞行区技术标准(MH5001-2013)及其第一修订案[S]. 北京: 中华民用航空局, 2013.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 公路铁路并行路段设计技术规范(JT/T1116-2017) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [3] 中华人民共和国行业标准. 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.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 公路土工合成材料应用技术规范(JTG/T D32-2012) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.