

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230718002

# 静载作用下新疆戈壁砾石土高填方路基 稳定性分析\*

高鹏举, 丁建文, 孙 帅, 魏 霞

(东南大学交通学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 为了研究荷载作用下戈壁砾石土填筑路基的变形规律,以新疆乌鲁木齐机场改扩建工程中路基填筑采用的戈壁砾石土填料为研究对象,采用室内模型试验对荷载作用下新疆戈壁砾石土高填方边坡的变形破坏特征展开了探讨,并结合三维有限元方法分析了填料压实度和边坡坡比对边坡安全系数的影响,得到了静载加压下以及土工格栅加固之后的高填方边坡位移荷载曲线。研究表明:边坡竖向位移最大值发生在荷载下方靠近坡面一侧;边坡水平位移最大值出现在坡肩处;土工格栅的加入使得同等荷载下的土体变形减小约61%。戈壁砾石土填料压实度变化会影响土体黏聚力 $c$ 值,从而影响边坡的安全系数;压实度小于86%或者大于92%时,安全系数趋于稳定变化;压实度介于86%~92%时,边坡的安全系数增长显著。

**关键词:** 道路工程; 边坡稳定性; 模型试验; 戈壁砾石土; 高填方边坡; 数值模拟

**中图分类号:** U416.1<sup>+4</sup>    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1448-09

## Stability Analysis of High-fill Subgrade of Xinjiang Gobi Gravel Soil under Static Loading

GAO Pengju, DING Jianwen, SUN Shuai, WEI Xia

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In order to study the deformation characteristics of the embankment subgrade made of Gobi gravel soil under load, this study chose the Gobi gravel soils used in the embankment filling of the Urumqi International Airport expansion project as the research object. Indoor model tests were conducted to explore the deformation and failure characteristics of high embankment side slopes of Xinjiang Gobi gravel soil under load. Additionally, a three-dimensional finite element method was applied to analyze the effect of compaction degree and side slope ratio on the slope safety factor. The displacement-load curves of the high embankment side slopes under static load and after reinforcement with geogrid were obtained. The results indicated that the maximum vertical displacement of the slope occurred beneath the load near the slope surface. The maximum horizontal displacement of the slope occurred at the slope shoulder. The inclusion of geogrids reduced the soil deformation by about 61% under the same load. The compaction degree of Gobi gravel soil affected the soil cohesion ( $c$  value), thus

\* 收稿日期:2023-07-18;修回日期:2023-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51978159)资助

作者简介:高鹏举(1998—),男,硕士研究生。主要从事高填方路基边坡稳定性研究。E-mail:220213558@seu.edu.cn

通信作者:丁建文(1975—),男,教授,博导,博士。主要从事路基处理和土体固化研究。E-mail:jwding@seu.edu.cn

affecting the slope safety factor. When the compaction degree was less than 86% or greater than 92%, the safety factor of the slope tended to stabilize; when the compaction degree was between 86% and 92%, the safety factor increased significantly. The research findings provide a reference for the expansion of Urumqi Airport and similar engineering projects.

**Keywords:** road engineering; slope stability; model test; Gobi gravel soil; high-fill slope; numerical simulation

## 0 引言

随着国家西部大开发和“一带一路”战略的实施,我国山区机场的建设也因此进入高速发展阶段。目前,国内外对高填方路基边坡稳定性的研究方法主要分为物理模型试验法<sup>[1-2]</sup>、数值模拟法<sup>[3-7]</sup>、理论计算法<sup>[8-9]</sup>和经验公式法<sup>[10]</sup>。张磊等<sup>[2]</sup>用模型试验和数值模拟的方法研究了削坡作用下的填方边坡破坏过程,得到了上覆荷载作用下的边坡应力应变关系。F.Song等<sup>[11]</sup>用模型试验验证其提出的评价加筋边坡稳定性新方法。R.Bathurst等<sup>[12]</sup>运用模型试验研究了荷载作用下土工格栅的加固效果,认为加固后的土体承载力能提升1.6~2倍。羊晔等<sup>[13]</sup>利用室内小比例模型试验,在8种工况下研究了土工格栅加筋高速公路路基不均匀沉降,结果表明将土工格栅布置在中部和上部位置能明显抑制路基的不均匀沉降。马坤等<sup>[14]</sup>利用大型模型试验研究了路基边坡在降雨入渗条件下的变形机理。现有文献对高填方边坡的承载力、变形和稳定性的研究已有一定基础,但是针对新疆地区特殊戈壁砾石土高填方边坡具体工程表现的研究还较为匮乏,对不同土体压实度的高填方边坡稳定性研究还不够深入。

新疆乌鲁木齐机场作为国家门户枢纽机场,为适应新的发展需要,拟增建一条跑道与一座航站区,场区填方最大高度约为40 m,属于高填方路基<sup>[15]</sup>。该地区由于独特地形和气候因素形成了大量的粗粒土-戈壁砾石土,室内试验研究发现,戈壁砾石土颗粒粒径相差较大,级配良好,适合作为路基填料,但是由于其天然含水率和最佳含水率较低,土颗粒间的黏性较小,很容易发生浅层失稳,并可能导致深层失稳。

目前已对戈壁砾石土的室内试验指标<sup>[16]</sup>进行了研究,对其具体的工程表现还不够了解,因此本文利用模型试验对某一压实度下土工格栅加筋和不加筋作用下的戈壁砾石土高填方边坡的土体变形和应力分布进行了研究,利用有限元分析模型对

这一结果进行了验证,并深入研究了不同压实度和坡比的高填方边坡稳定系数变化规律,探究戈壁砾石土高填方边坡的实际工程表现和合理结构形式,为戈壁工程提供一定的理论价值。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用戈壁砾石土取自乌鲁木齐八钢料场,为乌鲁木齐机场扩建工程路基的主要填料来源之一。该地区为洪积、冲积形成的戈壁滩,具有大量的大粒径卵石和砂土颗粒,除少量破碎外,没有明显棱角,磨圆度较高,且砂土中卵石分布较均匀,没有明显分层现象。戈壁砾石土中粒径差距较大,其中以粒径为20~40 mm的卵石居多。戈壁砾石土的颗粒级配曲线如图1所示,可以看出,戈壁砾石土级配曲线整体平缓,颗粒粒径分布较为均匀,级配良好。其中粗颗粒( $d > 5$  mm)含量大于70.7%,是良好的骨架结构,细粒( $d < 0.075$  mm)和细砂(0.075~0.25 mm)含量较少,小于2.49%,定义为无黏性粗粒土<sup>[17]</sup>。由级配曲线计算得到其不均匀系数 $C_u$ 为39.3,曲率系数 $C_c$ 为2.55。根据《公路土工试验规程 JTG 3430—2020》<sup>[18]</sup>的分类标准,戈壁砾石土归属于级配良好砾(GW)。

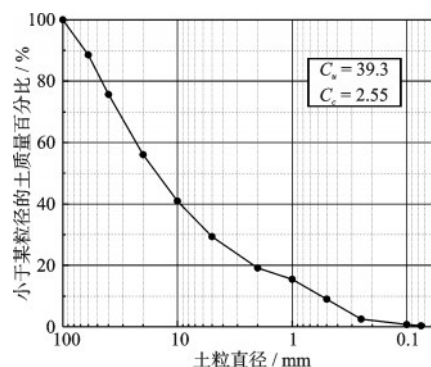


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve

## 1.2 试验仪器

此缩尺模型试验采用1:50比例缩小,边坡坡比为1:1.0,实际边坡的填筑高度为40 m左右,坡体高度在20 m左右,试验中所用的填筑材料与实际填筑材料一致。根据 $\pi$ 定理进行无量纲相似比计算,其中 $\lambda_L$ 、 $\lambda_g$ 、 $\lambda_p$ 为基本量纲,经过换算得到的各变量相似关系和相似常数见表1。模型箱采用角钢焊接而成,尺寸为1000 mm×1000 mm×1000 mm,模型箱正面是18 mm厚的透明有机玻璃板,其余四面是10 mm厚的钢板,为预防在加压过程中有机玻璃板发生外凸变形等其它变形或破坏,在有机玻璃板面加焊角钢。玻璃板面上粘贴刻度尺,用来观测地基土变形情况,加载分为多级,每级大小为1 t,加载同时观测土体沉降与边坡位移,每级荷载间隔1 h。模型箱如图2所示。

表1 模型试验相似常数

物理量	相似关系	相似常数
长度	$\lambda_L$	50
加速度	$\lambda_g$	1
密度	$\lambda_p$	1
应变	$\lambda_\epsilon=1$	1
应力	$\lambda_L\lambda_g\lambda_p$	50
位移	$\lambda_L$	50
荷载	$\lambda_L\lambda_g\lambda_p$	50
黏聚力	$\lambda_L\lambda_g\lambda_p$	50
内摩擦角	$\lambda_\phi$	1

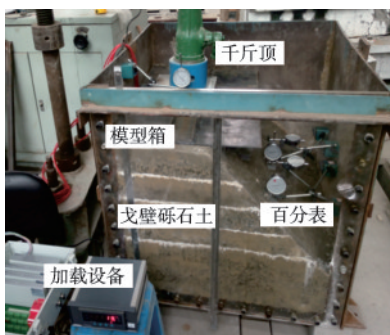


图2 模型箱  
Fig.2 Model box

## 1.3 试验步骤

图3为缩尺模型试验示意图。在新疆戈壁砾石土坡面不同高度处布置三个位移测量点(点A、B、C),三点高度差均为10 cm。点A位于千斤顶正下

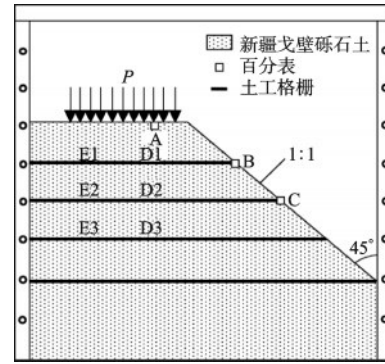


图3 模型箱示意图

Fig.3 Schematic diagram of the model box

方,点B、C位于边坡上,其中点A只安置垂直方向的百分表,点B、C同时安置水平和垂直方向的百分表。通过千斤顶施加不同大小的荷载,记录各百分表读数获取边坡不同位置处的竖向和水平位移值,分析土体变形破坏特征。

静载加压试验具体试验步骤如图4所示。土工格栅加固试验在静载加压试验的基础上于每一层填料中使用土工格栅进行加筋(图5),并在图3所示



图4 试验步骤

Fig.4 Diagram of the test procedure



图5 土工格栅和应力计

Fig.5 Geogrid and strain gauge

的D和E断面1-3层土体中放入应力盒监测其竖向应力变化情况,其余步骤同静载加压试验。土工格栅的具体布置方案以及材料参数见表2。

表2 土工格栅布置方案  
Table 2 Geogrid layout plan

缩尺比	间距/m	长度/m	摩擦力/ kPa	承载力/ kN	安全 系数
1:50	5	30	75	180	1.5

## 2 试验结果分析

### 2.1 静载加压结果分析

静载加压试验结果如图6所示。可以看出:

(1)在荷载持续加载过程中,边坡土体发生连续变形,各位置处竖向位移和水平位移量随荷载增大而增大,且增幅逐渐增大。根据一级公路、高速公路填筑路堤地基承载力的规范要求,对填筑高度大于16 m的路堤,要求其地基承载力应不小于170 kPa,因此所得结果满足规范所需的承载力要求。

(2)边坡竖向位移量由坡顶向下逐渐减小,A处

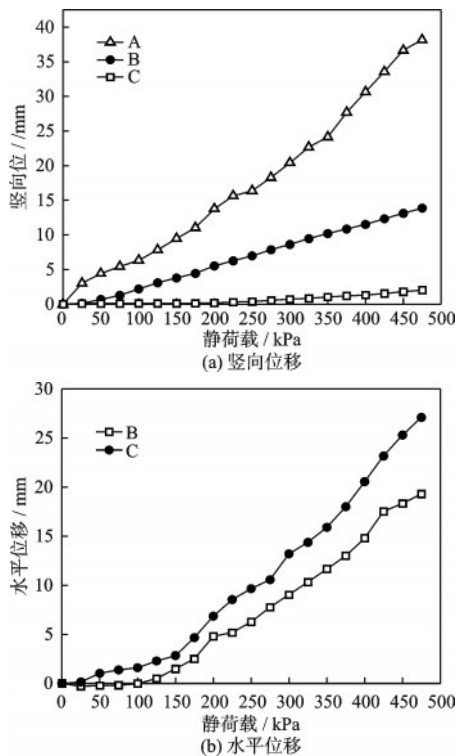


图6 静载加压试验结果

Fig.6 Results of static load testing

竖向位移量最大,最终达到38.155 mm,B处竖向位移量最终为13.866 mm,而C处竖向位移最小,仅为A处的5.28%。另外,沿坡顶从上往下,断面面积不断扩大,相同大小的荷载对土体产生的竖向应力减小,引起的竖向位移量也随之减小。

(3)边坡水平位移量则由上向下逐渐增大,B处水平位移在刚开始加载时位移变化较小,当荷载超过150 kPa时,水平位移增长速率加快,在加载至475 kPa时累计达19.301 mm;而C处水平位移从加载开始至结束,每级荷载下水平位移增量都较大,累计达27.099 mm,约为B处水平位移1.4倍。分析认为,在施加荷载的过程中,竖直向下的力对点B、C产生弯矩作用,点C处产生的力矩大于B处,因而荷载对C处水平方向受力变形的影响程度大于B处。

### 2.2 土工格栅加筋结果分析

#### 2.2.1 荷载-位移曲线

本节在静载加压试验的基础上,使用土工格栅对高填方边坡进行加固处理,所得结果如图7所示。

由图7(a)可以看出,边坡总体沉降较小,即使当荷载达到30 t时,坡体也没有发生明显的沉降破

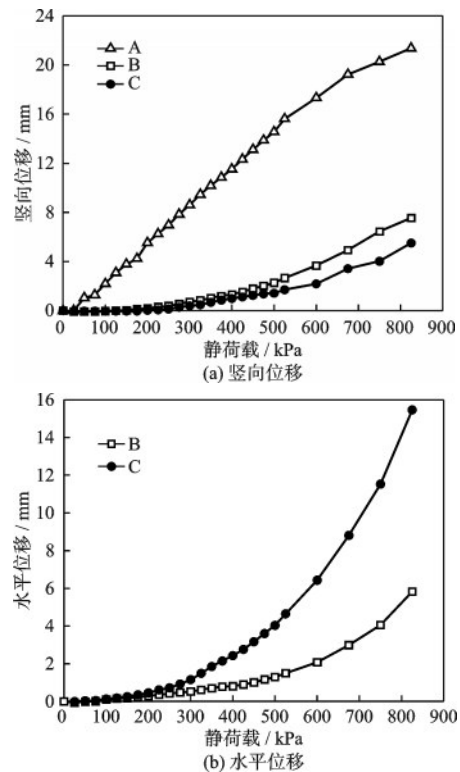


图7 土工格栅加固试验结果

Fig.7 Geogrid reinforcement test results

坏现象,最大沉降仅为 20 mm 左右,最大沉降点位于 A 点,边坡临空面所在的 B 点和 C 点竖向沉降整体较小,沉降仅为 7 mm 左右,远小于 A 点沉降,加筋后的土体沉降明显减小。坡体顶部 A 处沉降情况最明显,荷载作用使得土体挤密,发生沉降变形,而顶部为荷载的集中作用点,沉降最为明显。

由图 7(b)可以看出,坡面各处的水平位移均较小,其中位于第二层 C 点位的水平位移较大,而第一层的 B 点位水平位移并不明显,故第二层可能为较薄弱的位置,为滑动面的坡脚处。

对比土工格栅加固前后,C 点位置处的水平位移和 A 点位置处的竖向位移变化情况,如图 8 所示。可以看出,土体达到破坏时的荷载相较于加固前提升接近 80%,破坏时的土体变形较加固前有明显的改善,未加格栅试样产生同等级沉降量对应的荷载是 300 kPa,说明添加土工格栅能够显著提高土体承载能力。

土体的荷载-位移曲线虽有明显的正相关,但实际产生的位移较小,边坡也未发生明显的破坏和裂缝,需要进行有限元数值模拟试验进一步验证边坡静载加压下的变形破坏规律。

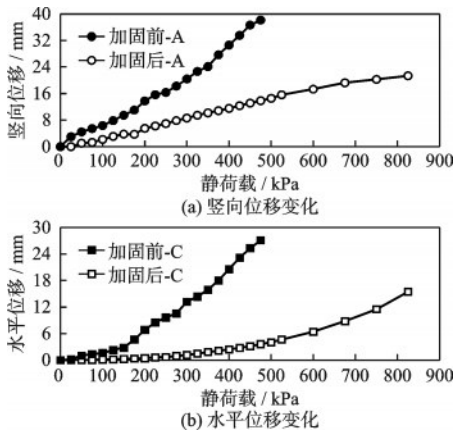


图 8 加固前后竖向位移和水平位移变化情况对比  
Fig.8 Comparison of vertical and horizontal displacement changes before and after reinforcement

### 3.2.2 应力-深度曲线

图 9 所示为加载过程中,不同荷载等级作用下,D、E 两个典型断面的应力大小随深度的变化情况。

由于荷载的集中作用以及加载板和坡顶接触问题,坡面不同位置分配承担的应力有所不同,其在加载过程中的变化曲线也有所区别,土体中应力分布因为荷载作用集中而分布不均匀,同一点位处于中间的土体实测应力值较大。各个断面的应

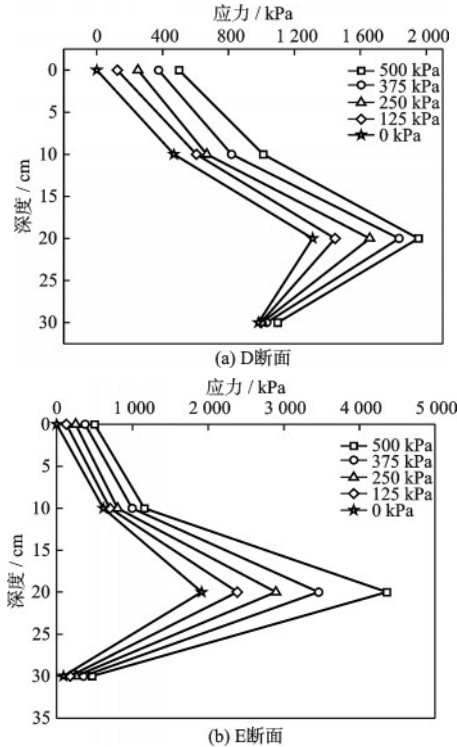


图 9 不同荷载下应力随深度变化情况  
Fig.9 Stress variation with depth under different loads

力大小随深度呈现出先增大后减小的趋势,各断面应力最大点均位于坡腰处,埋深为 0.2 m,D 断面应力最大值为 1 953 kPa,位于 D2 测点,相较于同等荷载等级下 D1 测点的应力 1 010 kPa 增长了约 93%,E 断面应力最大值为 4 363 kPa,远大于埋深 0.1 m 和 0.3 m 的 E1 和 E3 测点应力,相较于 D 点最大应力值也增加了约 123%。土体竖向应力出现这种分布规律与临空面一侧位移有关,从横向来看,D 断面靠近滑坡面,土体发生侧向位移导致土中竖向应力减小,而 E 断面的土体侧移较小,因此土中应力较大;从纵深来看,无论是哪种荷载状态下,第二层土体的应力最大,应力从坡顶到坡底先增加再减少,这与第二层土体水平位移始终最大的表象一致。

## 3 数值模拟论证

由于模型试验尺寸效应的影响,实际边坡尺寸和模型边坡尺寸相差较大,可能会导致试验结果存在一定的偏差,而且进行一次模型试验所需的砾石土填料较多,填筑和压实过程不易控制,且试验周期较长,不便于多工况的模拟,因此采用有限元分析软件对试验结果进一步验证和泛化分析。

### 3.1 有限元模型建立

采用有限元软件Plaxis3D进行数值计算,结合室内模型试验方案进行建模,如图10所示。模型尺寸为60 m×40 m×40 m,与边坡实际填筑高度相符,坡比设置为1:1.0,坡底高程为20 m。为了得到更精确的结果,对局部进行细化划分。因此整体模型网格划分疏密程度为“细”划分,将坡面位置土体进行网格加密。所建模型网格划分为28 107单元,节点数为46 567。材料模型选用摩尔-库伦模型,土体物理力学参数见表2,土工格栅选用plaxis3D自带的geogrid模组,其需要输入的参数主要为轴向刚度EA,模型中取值为1.2E5,单位为kN/m。

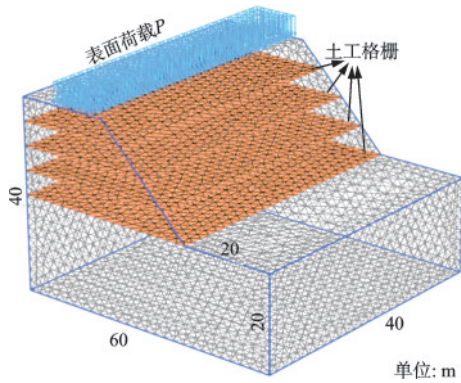


图10 有限元模型

Fig.10 Finite element model

模型试验的荷载为分级加载,每级荷载大小为1 t,即25 kPa。未加土工格栅时静载最大值为475 kPa,施加土工格栅之后,静载最大值为825 kPa。为了使所建模型符合实际,模型中的表面荷载与模型试验每级荷载保持一致。

表3 土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of soil

土体	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	含水 率/%	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/kPa	弹性模 量/MPa	泊松 比
新疆戈壁 砾石土	22.91	5.0	36.5	5	21.48	0.25

### 3.2 计算结果对比分析

由于模型试验为缩尺比例,而数值模拟为实体比例,根据模型的相似常数关系比,荷载相似常数与位移相似常数一致,因此,为了能够在同等条件下比较两者的变形规律,数值模拟工况中的荷载取

值与模型试验施加荷载相一致。

图11和图12为普通静载作用下的模型计算结果,图13为经过四层土工格栅加固之后的计算结果。图11(a)为竖向位移云图,可以看出在静载加压下,高填方边坡竖向位移基本呈现从上到下逐渐减小的分布规律,最大值发生在坡顶,一是静载加压在坡顶,直接受到荷载作用易产生沉降,二是坡面一侧为临空面,当受到竖向荷载时,靠近坡面一侧土体内部颗粒间摩擦力较小,易发生沉降。图11(b)为水平位移云图,坡面位置水平位移量最大,越往填方内部水平位移量越小。计算结果验证了文献[22]提出的结论,高填方边坡沿坡顶-坡脚弧线方向存在潜在滑动面。

加固前后数值模拟与实测结果对比如图12、13所示,其反映了在不同静载加压下,高填方边坡竖向沉降和水平位移的变化规律。

与模型试验结果对比发现,两种方法得到的边坡位移随荷载变化曲线基本吻合,总体能较好地反映在静载作用下新疆戈壁砾石土高填方边坡的变形规律,验证了有限元模型的合理性。

从图12(a)、图13(a)可以看出,土体中发生的竖向位移随着荷载等级的增大而增大,在土体未发

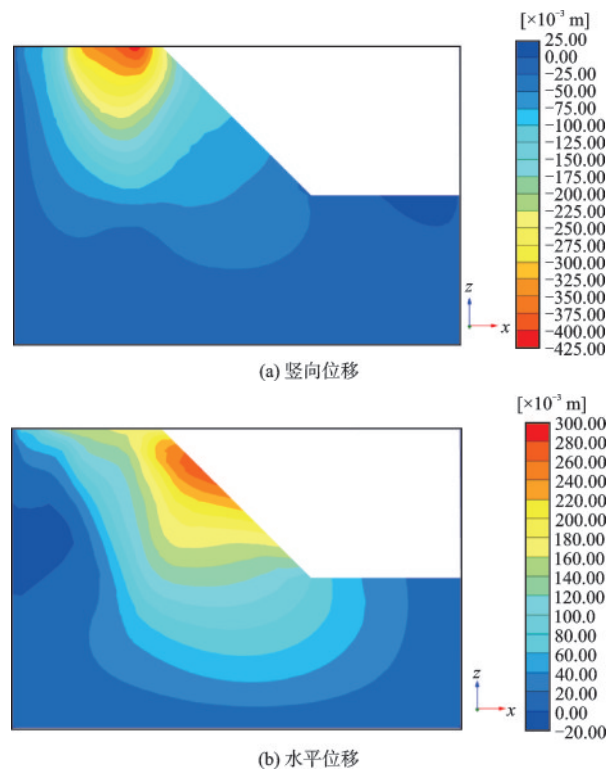


图11 计算结果云图

Fig.11 Calculation result cloud diagram

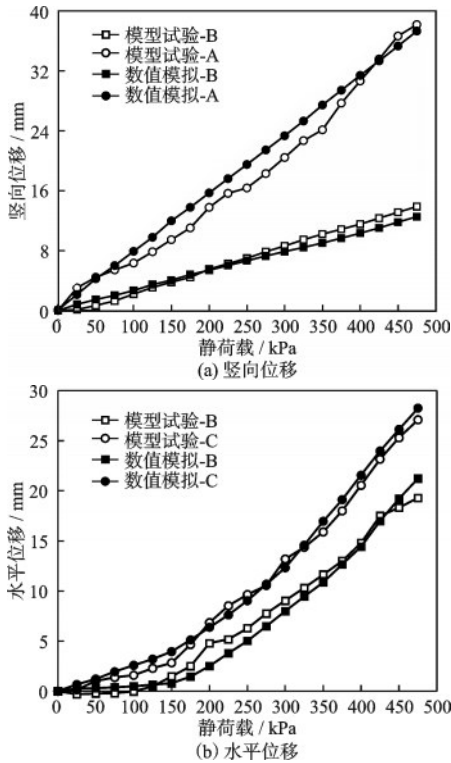


图 12 加固前模拟与实测结果对比

Fig.12 Comparison of simulated and measured results before reinforcement

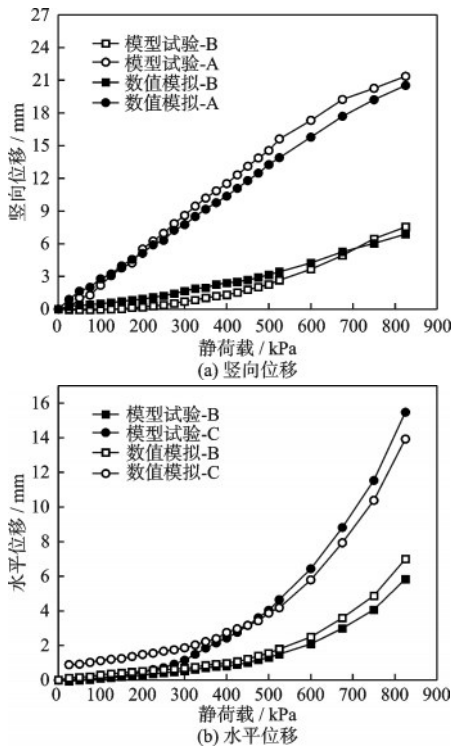


图 13 加固后模拟与实测结果对比

Fig.13 Comparison of simulated and measured results after reinforcement

生破坏以前,坡顶以下土体的竖向位移与荷载呈线性关系,而坡面位置处的土体竖向位移与荷载为非

线性关系。

从图 12(b)、图 13(b)可以看出,坡面位置处的土体水平位移随荷载的增大而逐渐增大,总体呈非线性关系,当荷载达到一定程度时,土体就会发生破坏,水平位移急剧增大。导致这种现象的原因是临空面一侧没有约束,当荷载达到一定程度时,坡体会产生滑移,导致附近土体位移增加。

### 3.3 高填方边坡稳定性影响因素

影响高填方边坡变形的因素很多,可分为自然因素和人为因素,自然因素包括地质水文条件、地形地貌与土的种类性质,人为因素包括施工方法,荷载作用形式等。其中,边坡坡比<sup>[23]</sup>和填料压实度是高填方路基边坡的控制指标,对边坡稳定性有较大影响。

利用已建有限元模型,分别选取压实度 $K^{[21]}$ 为 82%、84%、86%、88%、90%、92%、94%、96% 时,计算坡比 $\alpha$ 为 1:1.0、1:1.5、1:1.7、1:2.0、1:2.2 条件下高填方边坡的安全系数,结果如图 14 所示。可以看出:填料压实度与边坡坡比对于高填方边坡稳定性都有影响,随着坡比与压实度的增加,边坡安全系数提高;边坡坡比为 1:1.0 时,压实度达到 96% 的戈壁砾石土填方边坡安全系数不超过 2.0,而当边坡坡比下降到 1:1.5 或者 1:2.0 时,安全系数能够达到 3.0 甚至以上。由此可以看出,边坡坡比在一定程度上能够决定边坡安全系数的上限值;压实度处于 86%~92% 时,安全系数随压实度的增加变化明显,而当压实度小于 86% 或者大于 92% 时,安全系数比较稳定。这与土体在不同压实度下的黏聚力 $c$ 有较大的关系,戈壁砾石土的压实度会影响黏聚力 $c$ 的大小,从而影响边坡的稳定性。

根据试验结果<sup>[20]</sup>,当土体压实度为 86% 时,黏聚力 $c$ 为 32.93 kPa,当压实度增加到 92% 时,黏聚力增加到了 119.05 kPa,而当压实度从 92% 增加到 98% 时, $c$ 只增加了 30 kPa,因此在 86%~92% 压实度区间内的安全系数变化较大。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[19]</sup>中对高填方路基边坡安全系数的规定,要求安全系数 $F_s$ 取值不应小于 1.45,从图中看出当压实度大于 86% 以后,5 种坡度下的边坡安全系数均符合规范要求取值,当边坡坡比为 1:1.0 时,满足安全系数要求的最小压实度为 86%,而当边坡坡比为 1:1.5 时,82% 的压实度也能满足安全系数要求,因此,合理的设计坡比和填料

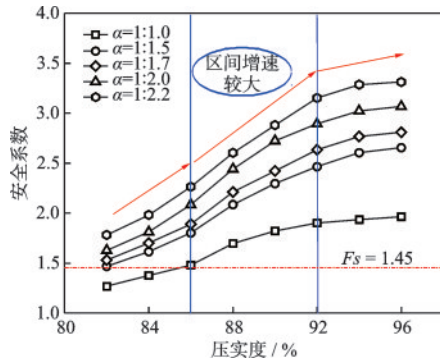


图 14 不同压实度、坡比与安全系数关系

Fig.14 Relationship between different compaction degree, slope ratio, and safety factor

压实度能够较好地提高边坡的稳定性并且控制土方方的用量,在工程运用中建议选择86%~92%压实度进行填筑。

## 4 结 论

依托新疆乌鲁木齐机场改扩建工程,对高填方路基拟采用的戈壁砾石土填料进行了室内模型试验和数值模拟计算,研究了戈壁砾石土高填方边坡稳定性,主要结论如下:

(1)戈壁砾石土高填方边坡在荷载作用下水平位移从填料内部到边坡临空面逐渐增大。由于边坡临空面没有侧向约束条件,荷载作用下的土体水平位移不断增大直至率先破坏,最大破坏点位于坡肩处;破坏形成的滑坡面后方土体由于挤压会出现应力集中现象,而滑坡面上应力较小。

(2)分层加筋后的高填方边坡水平位移和竖向位移得到有效控制。土工格栅的加入能够抑制滑坡面的扩张,对土体内部的竖向位移抑制效果在61%左右,而对水平向的变形发展控制效果相对较弱。

(3)边坡坡比决定边坡安全系数取值范围,而戈壁砾石土压实度决定安全系数的变化规律。当压实度小于86%时,土体稳定性差;压实度在86%~92%时,土体强度会有明显增长,边坡稳定性变化显著;当压实度大于92%时,土体趋于稳定,边坡安全系数不再明显变化。工程实际的边坡坡比取值建议为1:1.5~1:2.0,压实度在86%~90%。

## 参考文献:

[1] 郑建国,曹杰,张继文,等.基于离心模型试验的黄土

高填方沉降影响因素分析[J].岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 560-571.

Zheng J G, Cao J, Zhang J W, et al. Analysis of influencing factors of loess high fill settlement based on centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 560-571. (in Chinese)

[2] 张磊,施斌,魏广庆.基于BOTDA的削坡作用下边坡破坏过程模型试验研究[J].防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 698-705.

Zhang L, Shi B, Wei G Q. Experimental study of slope damage process model under slope cutting action based on BOTDA[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 698-705. (in Chinese)

[3] 仇文岗,孟凡胜,何昌杰,等.岩溶区空间变异性边坡建筑荷载作用下稳定分析[J].防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 316-323.

Zhang W G, Meng F S, He C J, et al. Stability analysis of slope with spatial variability under building load in karst area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 316-323. (in Chinese)

[4] 朱才辉,李宁.基于黄土变形时效试验的高填方工后沉降研究[J].岩土力学, 2015, 36(10): 3023-3031.

Zhu C H, Li N. Study on post-filling settlement of high filling based on loess deformation aging test[J]. Geotechnics, 2015, 36(10): 3023-3031. (in Chinese)

[5] 单军杰,刘汉龙,肖杨,等.考虑颗粒破碎特性的机场高填方变形与稳定性分析[J].土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 17-22.

Shan J J, Liu H L, Xiao Y, et al. Deformation and stability analysis of airport high fill considering particle crushing characteristics[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2020, 42(2): 17-22. (in Chinese)

[6] 刘康琦,刘红岩.地震作用下土石混合体边坡稳定性分析研究[J].防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 224-230.

Liu K Q, Liu H Y. Stability analysis of soil-rock mixture slope under earthquake action [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 224-230. (in Chinese)

[7] 金磊,曾亚武,程涛,等.土石混合体边坡稳定性的三维颗粒离散元分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 41-50.

Jin L, Zeng Y W, Cheng T, et al. Three-dimensional

- particle discrete element analysis of slope stability of soil-rock mixture [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 41-50. (in Chinese)
- [8] 李修磊, 李金凤. 考虑渗滤液作用的填埋场边坡组合破坏稳定分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 1-9.  
LI X L, Li J F. Stability analysis of landfill slope combination damage considering leachate action [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 1-9. (in Chinese)
- [9] Sowers G F. Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montreal, Canada: [s.n.], 1965: 561-565.
- [10] 贾亮, 贺世开, 朱彦鹏, 等. 高填方路堤工后沉降监测试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 15-19, 25.  
Jia L, He S K, Zhu Y P, et al. Experimental study on settlement monitoring after high fill embankment [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2017, 34(3): 15-19, 25. (in Chinese)
- [11] Song F, Chen R Y, Ma L Q. A new method for the stability analysis of geosynthetic-reinforced slopes[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(11): 2069-2078.
- [12] Bathurst R, 陶连金. 加筋边坡在坡顶荷载作用下的极限承载能力[J]. 岩土工程学报, 2004, 27(2): 194-197.  
Bathurst R, Tao L J. The reinforced slope is under the action of the top load of the slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 27(2): 194-197. (in Chinese)
- [13] 羊晔, 刘松玉, 邓永锋. 加筋路基处治不均匀沉降模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 703-706, 711.  
Yang Y, Liu S Y, Deng Y F. Experimental study on uneven settlement model of reinforced subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 703-706, 711. (in Chinese)
- [14] 马坤, 张永谋, 吴红刚, 等. 基于多传感器数据融合分析的路堑滑坡模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 653-663.  
Ma K, Zhang Y M, Wu H G, et al. Experimental study of landslide model in cutting based on multi-sensor data fusion analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2022, 42(4): 653-663. (in Chinese)
- [15] Wan X, Ding J W, Ouyang Y X, et al. Triaxial testing and numerical simulation on high fill slopes of gobi gravel soils in Urumchi[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, 50(6): 3220-3236.
- [16] 张煌, 邓松, 万星, 等. 乌鲁木齐机场戈壁砾石土填料的工程特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1301-1307.  
Zhang H, Deng S, Wan X, et al. Experimental study on engineering characteristics of Gobi gravel soil filler at Urumqi airport [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1301-1307. (in Chinese)
- [17] 年迪, 杨三强. 戈壁砾石类土动态回弹模量测试及预估模型[J]. 交通科技, 2022(4): 88-93.  
Nian D, Yang S Q. Test and estimation model of dynamic springback modulus of Gobi gravel-like soil [J]. Transportation Technology, 2022(4): 88-93. (in Chinese)
- [18] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [19] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [20] 邓松. 新疆戈壁砾石土工程力学特性与高填方边坡稳定性分析[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
Deng S. Mechanical characteristics of Gobi gravel soil engineering and stability analysis of high fill slope in Xinjiang[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [21] Mokwa R L, Trimble N R. Permeability of coarse-grain soil from void space and pore distribution [M]. GeoCongress: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems, 2008: 428-435.
- [22] 涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等. 机场高填方边坡填筑过程的变形演化规律分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1442-1450.  
Tu Y L, Liu X R, Zhong Z L, et al. Analysis of deformation evolution law of airport high fill slope filling process [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1442-1450. (in Chinese)
- [23] 高礼. 路堑边坡处治措施综述及应用[J]. 中国公路, 2018(5): 108-109.  
Gao L. Review and application of cutting slope treatment measures [J]. China Highway, 2018(5): 108-109. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)