

基于有限元数值模拟的风积沙台背稳定性 研究与实践

马永智¹, 徐腾飞^{2,3}

(1. 宁夏海平高速公路管理有限公司, 宁夏 中卫 755208; 2. 宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750001;

3. 宁夏交建交通科技研究院有限公司, 宁夏 银川 750004)

摘要: 沙漠地区优质筑路材料匮乏, 乌玛公路沙漠段箱涵台背采用风积沙填筑, 为评价风积沙台背稳定性, 采用ABAQUS有限元数值模拟方法, 分析风积沙台背的竖向沉降与应力分布特征, 并以传统砾石填料和新型轻质陶粒混凝土填料作为对照组开展研究。结果表明, 三种填料最大竖向沉降、台后土压力及侧边反力的大小排序为砾石>风积沙>陶粒混凝土, 说明采用轻质填料是提高台背稳定性的有效措施, 在资源匮乏的沙漠地区, 风积沙可作为优良的台背回填材料, 其沉降值可降低至砾石类材料的50%左右, 且涵台与填土应力水平可减少10%以上; 通过风积沙台背实体工程观测可得, 其最大沉降值11 mm与数值模拟所得沉降11.46 mm的相对误差仅为4.2%, 进一步表明风积沙台背具有良好的稳定性。

关键词: 沙漠公路; 风积沙; 台背回填; 台背沉降; 数值模拟

中图分类号: U412.36; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0306-05

Research and Practice on Stability of Aeolian Sand Platform Backs Based on Finite Element Numerical Simulation

MA Yongzhi¹, XU Tengfei^{2,3}

(1. Ningxia Haiping Expressway Management Co., Ltd., Zhongwei 755208, China; 2. Ningxia Communications Construction Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 3. Ningxia Jiaojian Transportation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Yinchuan 750004, China)

Abstract: The high-quality road construction materials are scarce in the desert area, and the box culvert platform back in the desert section of Uma Highway is filled with aeolian sand. In order to evaluate the stability of the aeolian sand platform back, ABAQUS finite element numerical simulation method is used to analyse the vertical settlement and stress distribution characteristics of the aeolian sand platform back, and the research is conducted on the traditional gravel filler and the new lightweight ceramsite concrete filler for comparison. The results show that the maximum vertical settlement, platform-back soil pressure and side reaction force of three kinds of fillers are in the order of gravel > aeolian sand > ceramsite concrete, indicating that the use of lightweight filler is an effective measure to improve the stability of the platform back. In the resource-scarce desert areas, the aeolian sand can be used as an excellent backfill material for the back of the platform, and its settlement value can be reduced to about 50% of the gravel materials, and the stress level between the culvert platform and the filler can be reduced by 10% or more. The relative error between the maximum settlement value of 11mm and the settlement of 11.46mm obtained through numerical simulation can be observed through the actual engineering on the back of the aeolian sand platform, which is only 4.2%, further indicating that the back of the aeolian sand platform has good stability.

Keywords: desert highway; aeolian sand; backfill of platform back; settlement of platform back; numerical simulation

0 引言

乌玛高速公路青铜峡至中卫段是我国首条穿越沙漠腹地的高速公路, 项目具有大温差、干旱少雨的

自然环境特点以及优质筑路材料资源稀缺、供料困难的工程环境特征, 为工程实施带来严峻挑战^[1-3]。其中, 桥涵构筑物台背回填工程因体量较小, 往往易被施工人员忽视, 加之工程作业面狭小, 机械压实困难, 常导致台背回填质量难以满足要求^[4-5]; 同时, 涵体结构对周围填料的约束效应会引发多向应力叠加, 这种复杂的力学相互作用易导致界面分离现象,

收稿日期: 2025-04-00

作者简介: 马永智(1984-), 男, 学士, 高级工程师, 从事公路建设管理工作。

使接触面产生裂缝,显著削弱填料层间应力传递效率,诱发非均匀沉降变形。在长期服役过程中,差异沉降的持续累积造成路面平整度的降低,形成跳车现象,更会引发车辆冲击荷载的几何级数增长,对道路安全高效运营构成严重威胁^[6-7]。综上,沙漠公路台背回填工程的质量控制工作成为不容忽视的重要内容。

基于此,研究依托乌玛沙漠高速公路建设项目,以乌玛公路 A9 标 YK165+475 处钢筋混凝土箱涵台背为研究对象,基于 ABAOUS 有限元计算软件,开展沙漠公路风积沙台背稳定性研究。

1 工程概况

乌(海)至玛(沁)高速公路青铜峡至中卫段工程起终点桩号为 K141+850~K183+160.348,项目北起石嘴山市、经过银川市、吴忠市、终点中卫市,全长 41.31 km。其中 A9 合同段(K154+600~K171+800)有近 10 km 处于沙漠腹地,项目沿线设置涵洞数量较多,但优质筑路材料匮乏,基于降本增效的绿色工程建设目标,项目因地制宜提出风积沙台背回填技术方案,并分别在乌玛高速公路 A9 标 YK165+475、YK166+066、YK166+200 三道钢筋混凝土箱涵处开展风积沙台背回填技术研究。

2 计算模型的建立

2.1 本构模型的选取

有限元方法的基本思想是将连续的研究区域分解为有限且相互连接的结合体,进而分析其应力与应变,其中材料的应力—应变关系也叫本构关系^[8-9]。

在本研究中,普通砂砾土与风积沙均呈现典型离散介质体系特征,在初始加载域即表现出非线性本构响应,符合连续介质力学中的多尺度变形机理,其应变演化包含可恢复弹性分量与累积塑性分量,这要求考虑应力路径依赖性的弹塑性数值模型。已有研究表明,Drucker-Prager 准则通过引入广义剪应力不变量,有效规避了 Mohr-Coulomb 准则在 π 平面处屈服面曲率突变引发的数值收敛障碍。该模型将静水压力项与偏应力张量第二不变量耦合,符合岩土材料压缩-剪切耦合破坏机理。基于此,本研究选择 Drucker-Prager 模型作为回填土体的本构模型^[10-12]。

2.2 数值模型的建立与网格划分

本研究依托乌玛高速公路 YK165+475 混凝土箱涵风积沙台背实体工程,建立三维实体模型。根据现场勘测及台背断面示意图可得,箱涵台背回填范围为:自基底向两侧分别拓展 11 m,填土坡度为 1:2,横坡经开挖处理为台阶状,箱涵顶部覆盖填土厚度 50 cm。由于整体结构呈对称形式,故以其中一侧为研究对象构建模型,模型单元采用三维实体单元 C3D8R,单元网格划分见图 1。

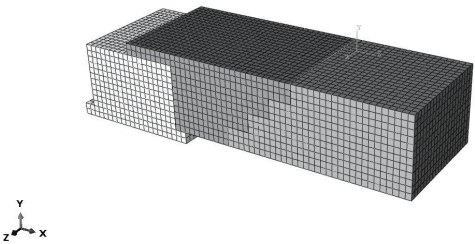


图1 模型单元网格划分示意图

2.3 荷载及边界条件的选取

台背填料竖向位移场呈典型双相介质特征。其总位移量可分解为工后主固结变形分量与次生蠕变分量,其中工后主固结变形占其竖向变形的绝大部分,故在计算中可采用饱和土本构模型进行数值模拟^[13];同时,因交通荷载的应力影响较小,且影响范围在路面 2 m 以内,故不考虑交通荷载的作用,台后填料所受荷载主要为自身重力。

同时,为了便于计算结果收敛,除模型顶面外,分别对其他面进行约束,其中底面设为固端约束,与路基交接面约束 x 方向位移,其他面约束 x、z 方向位移^[14-16]。

2.4 技术参数选择

为详尽研究风积沙材料作为台背填料的稳定性,拟选用传统砂砾填料和轻质陶粒混凝土填料作为对照组,以对比不同台背回填材料的沉降量及应力分布特征。各材料力学性能见表 1^[17-19]。

表1 各材料力学性能指标

材料	弹性模量 E/Pa	容重 $\gamma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比 ν
桥台	2.5×10^{10}	24 000	—	0.17
风积沙	2.0×10^7	17 000	25	0.31
砂砾土	1.2×10^7	20 000	32	0.30
陶粒混凝土	3.8×10^7	10 000	—	0.15

3 数值模拟结果与分析

3.1 台后填料竖向沉降分析

通过模拟计算,三种不同材料的台后填料竖向

沉降分别见图2~图4。

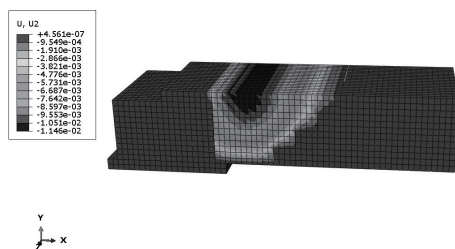


图2 风积沙台背竖向沉降分布图

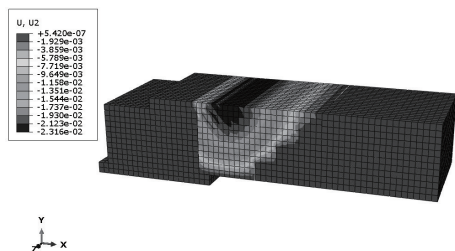


图3 砂砾台背竖向沉降分布图

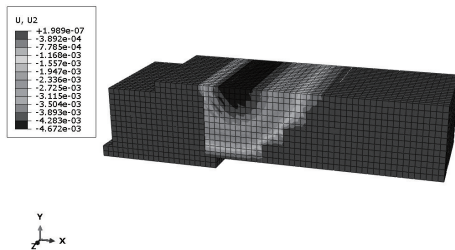


图4 陶粒混凝土台背竖向沉降分布图

从模拟计算结果可得,三种不同材料的箱涵台背均表现出不同程度的竖向沉降,且最大竖向沉降均出现在顶面,同一水平高度处台背填料的沉降规律大致表现为:远离箱涵与路基处沉降较大,靠近箱涵或路基处沉降量逐渐减小,总体上呈U型分布,这是因为在假定路基沉降稳定的前提下,路基及箱涵处的填料会受到一定的刚性作用而减少沉降。

对比三种不同填料的最大沉降可得,新型轻质陶粒混凝土填料的最大竖向沉降最小,仅为0.467 cm;风积沙填料次之,为1.146 cm;砂砾填料的最大沉降值2.316 cm在三者中最大,这是因为在模拟中,台背所受荷载为自身重力,故填料的容重成为台背沉降的关键影响因素之一,轻质填料能大幅降低台后填料荷载,削弱台背的工后沉降^[20-21]。

3.2 台后填料土压力分析

通过模拟计算,三种不同材料的台后填料土压力分布分别见图5~图7。

为更直观地展示填土与涵台所受土压力分布,仅选取涵台与填土模型作为分析对象,由试验结果可得,不同填料的台后土压力均随着深度的增加逐渐增大,并在涵台底部出现最大压力值;另外,不同

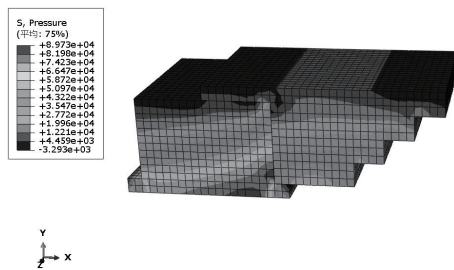


图5 填料为风积沙的土压力分布图

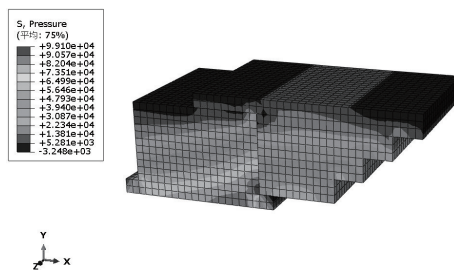


图6 填料为砂砾的土压力分布图

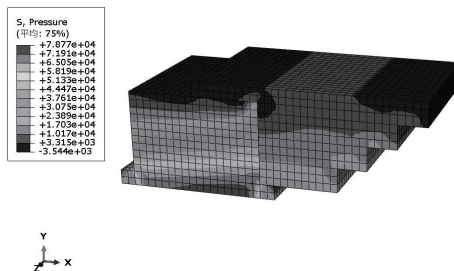


图7 填料为陶粒混凝土的土压力分布图

填料的台背模型在涵台顶部以及靠近路基顶部的土压力为负值,即产生拉应力,这是因为在模拟中将箱涵及路基材料设定为刚性所致。

对比三种不同填料对台背的最大土压力可得,风积沙填料、砂砾填料和陶粒混凝土填料对涵台的作用力最大值分别为 8.973×10^4 Pa、 9.910×10^4 Pa和 7.877×10^4 Pa,即三种填料的土压力大小排序为:砂砾>风积沙>陶粒混凝土,该结果表明,填料重度对台后土压力大小的影响显著,重度低的填料能有效降低台后应力水平,增加涵台与填土的稳定性^[22]。

3.3 台后填料侧边的反力分析

通过模拟计算,三种不同材料的台后填料侧边的反力分布分别见图8~图10。

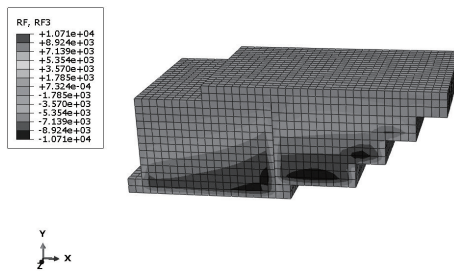


图8 填料为风积沙的侧向土压力分布图

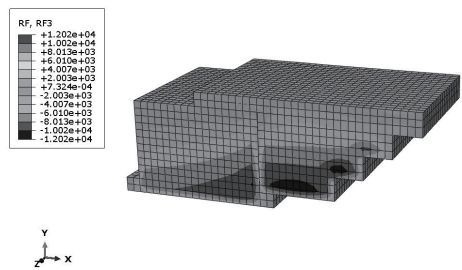


图9 填料为砂砾的侧向土压力分布图

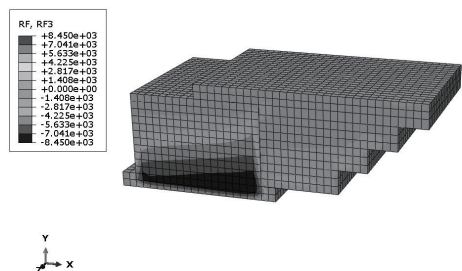


图10 填料为陶粒混凝土的侧向土压力分布图

从试验结果可得,不同填料所产生的侧向土压力分布存在相近的趋势,即回填材料的下部侧向土压力更大,风积沙、砂砾土和陶粒混凝土填料的^{最大侧向土压力均位于填料底部,分别为 1.071×10^4 Pa、 1.202×10^4 Pa 及 8.450×10^3 Pa,三种填料的侧向土压力大小与台背土压力呈现出相同的规律,此处不做赘述。}

综上可得,台后回填材料的容重是影响台后土压力、侧边反力及竖向沉降的主要因素之一,回填材料的重度越大则土压力、侧边反力及竖向沉降越大,可见采用轻质填料在降低台后应力水平与台背竖向沉降方面具有显著优势^[23-25]。针对沙漠地区资源匮乏的工程环境特征,应用风积沙作为箱涵回填材料也能取得良好的效果,其沉降值可以降低至砂砾类材料的 50 % 左右,且涵台与填土应力水平可减少 10 % 以上,台背稳定性良好。

4 实体工程观测验证

因数值模拟存在一定的局限性,为进一步验证风积沙台背的稳定性,开展了风积沙台背实体工程建设与沉降观测试验^[26]。

风积沙物理特性显著区别于传统土壤和砂石,其颗粒均匀、级配单一且黏聚力低,压实成型困难。风积沙台背修筑过程中,需设置包边土约束风积沙的侧向流动,并采用洒水静压+振动碾压工艺分层压实;同时,因风积沙不具有保水性,需精准控制表层含水率达到最佳含水率以降低颗粒摩擦进而保证台背压实度。风积沙台背施工完成后,采用堆载预

压方法对风积沙台背沉降值进行观测。

图 11 为风积沙台背堆载预压过程中的沉降观测结果,由图可得,在 34 d 的沉降监测过程中,K165+475 与 K166+066 两处台背的最终沉降值均稳定在 11 mm。其中,K165+475 段在观测周期前半段即完成主要沉降过程,于第 19 d 达到峰值;而 K166+066 区段则呈现渐进式沉降特征,整个沉降周期持续四周时间后才进入稳定状态。对比分析表明,实际工程中的沉降值 11 mm 与数值模拟所得沉降 11.46 mm 的相对误差仅为 4.2 %,该结果一方面验证了数值模型的可靠性,更从工程实践角度证实采用风积沙填筑的台背结构具有良好的稳定性。同时,台背与相邻路基采用同质填料的设计方案,一定程度地降低了因材料界面差异引发的不均匀沉降风险^[27];且风积沙具备优异的排水性能,可为台背提供良好的抗水损能力^[28-30]。此外,在传统筑路资源匮乏的沙漠地区,资源化利用风积沙可显著降低工程造价。表 2 为不同材料的含运费材料成本,由表 2 可得,就地取材采用风积沙作台背回填材料,较砂砾材料成本降低 45 元/m³,较陶粒混凝土成本降低 200 元/m³,经济效益显著。

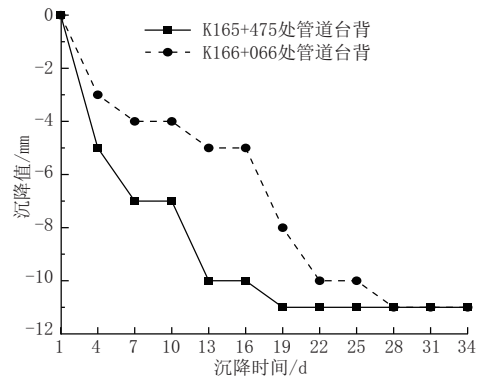


图11 风积沙台背沉降量观测结果

表 2 各材料含运费成本

材料	风积沙	砂砾	陶粒混凝土
含运费成本/(元·m ⁻³)	0	45	200

5 结 语

本文运用 ABAOUS 有限元数值模拟方法,分别分析了风积沙、砂砾及新型轻质陶粒混凝土材料在台背回填工程中的竖向沉降与应力水平,并开展了风积沙台背实体工程沉降观测试验,主要结论如下:

(1)无论采用何种台背回填材料,台背竖向沉降均出现在顶面,且越靠近箱涵或路基处沉降量越小;台背台后土压力与侧向土压力均随着深度的增加逐

渐增大,并在涵台底部出现最大值;

(2)三种填料最大竖向沉降、台后土压力及侧边反力的大小排序为砂砾>风积沙>陶粒混凝土,即回填材料的重度越大则土压力、侧边反力及竖向沉降越大,故台背填料的容重是影响台背稳定性的主要因素之一,采用轻质填料是提高台背稳定性的有效措施;

(3)在资源匮乏的沙漠地区,风积沙可作为优良的箱涵回填材料,相较于传统砂砾类材料,其沉降值可降低50%左右,且涵台与填土应力水平可减少10%以上;

(4)风积沙台背实体工程的最大沉降值11 mm与数值模拟所得沉降11.46 mm的相对误差仅为4.2%,进一步表明风积沙台背稳定性良好。

参考文献:

- [1] 宁夏回族自治区首条沙漠公路通车[J]. 交通企业管理, 2022, 37(1): 19.
- [2] 缙永涛,吴永祥,彭波,等. 乌玛高速公路腾格里沙漠段防护体系典型断面风沙活动特征[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 279-289.
- [3] 安志山. 乌海—玛沁高速公路腾格里沙漠段沙害形成机理及防治[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [4] 赵静. 高速公路桥涵台背回填施工工艺质量控制措施[J]. 低碳世界, 2024, 14(9): 127-129.
- [5] 张亚男,张文俊,刘广波. 公路工程桥涵台背回填土沉降主控因素分析研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(9): 124-126.
- [6] 葛折圣,黄晓明,张肖宁,等. 公路桥涵台背回填材料研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2007(4): 67-73.
- [7] 廖云朋. 公路桥头跳车的成因和防治措施分析[J]. 运输经理世界, 2024(8): 122-124.
- [8] 尚晓江,邱峰,赵海峰,等. ANSYS结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [9] 张波,盛和太. ANSYS有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 王维,马丽英. 基于Drucker-Prager模型的振动压实有限元分析[J]. 公路, 2018, 63(2): 40-45.
- [11] 梁治旺,林淋,蒋进. ABAQUS中两种本构模型工程适用性分析[J]. 天津建设科技, 2020, 30(3): 64-67.
- [12] 闫明雷. 桥台背回填加筋土的有限元分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2006.
- [13] 陈刚. 高等级公路桥台跳车处置技术[J]. 山西建筑, 2010, 36(22): 279-280.
- [14] 张华,张文颢,徐晨,等. 红层软岩高填方路堤工后沉降数值模拟[J]. 路基工程, 2022(6): 146-151.
- [15] 李浩霖,李斌,柯凯艳. 基于数值模拟的填方路基沉降规律研究[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(7): 11-14.
- [16] 赵慧清. 泡沫轻质土在桥台背回填中的应用分析[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(5): 49-52.
- [17] 高燕希,易勇,许建武. 台背回填受力和变形的ANSYS数值模拟及分析[J]. 公路与汽运, 2008(6): 98-100.
- [18] 葛折圣,黄晓明,张肖宁,等. 陶粒粉煤灰混凝土在桥涵台背回填中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006(11): 2076-2079; 2084.
- [19] 冯蕾. 桥台背回填受力及变形性能的有限元分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2005.
- [20] 贺传宇. 公路桥涵构造物路基台背回填方法[J]. 中华建设, 2022(7): 157-158.
- [21] 杨国宇. 轻质泡沫混凝土技术在公路桥台台背回填中的应用研究[J]. 中国水泥, 2024(10): 91-93; 96.
- [22] 林上顺,林友炜,黄福云,等. 往复位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 116-125.
- [23] 胡家盛. 泡沫轻质土在桥梁台背回填的应用[J]. 江苏建材, 2023(5): 35-37.
- [24] 魏功槐. 气泡轻质土在路基台背回填中的应用效果分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(3): 248-250.
- [25] 邓宗伟,冷伍明,聂如松,等. 高速铁路桥台台背土压力试验与空间土压力计算分析[J]. 中国铁道科学, 2006(6): 37-41.
- [26] 王金国,孙跃轩,杜洋,等. 沙漠公路风积沙台背回填技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(7): 67-69.
- [27] 李世芳. 风积沙在公路桥涵台背回填中的应用研究[J]. 路基工程, 2008(2): 145-146.
- [28] 李瑞杰,李学丰. 风积沙路基工程特性和稳定性防护研究综述[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊1): 105-114.
- [29] 郑木莲,荆海洋,陈旺,等. 天然风积沙基本特性及火山灰活性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 163-171.
- [30] 牟献友,谷攀. 国内风积沙工程特性研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 307-310.