

固化盾构渣土路基长期变形特性及影响因素分析

沙庆华¹, 龙建平², 王良俊², 杨振忠³, 陈保国³

(1. 广东粤海粤东供水有限公司, 广东 揭阳 522000; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730; 3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为揭示固化盾构渣土高填方路基长期变形特性及土性参数影响, 文章基于有限差分软件建立数值模型, 研究固化盾构渣土用作路基填料的施工期和长期变形特性, 并探讨土性参数的影响规律。研究发现: 路基填筑完毕时, 路基地部和顶部中心位置的竖向位移分别达到 95.7 mm 和 168.7 mm, 路基地部和顶部两端位置的水平位移分别为 17.4 mm 和 4.5 mm。施工完成后 20 a 时, 路基地部和顶部中心位置的竖向位移增加到 108.9 mm 和 180.7 mm, 底部和顶部两端位置的水平位移分别为 28.9 mm 和 19.0 mm。路基边坡坡角和固化渣土粒径对路基水平位移有显著影响, 但对竖向位移无明显影响; 路基填土和地基土的弹性模量对路基土整体的竖向位移和水平位移均有较大影响。

关键词: 盾构渣土路基; 施工期; 长期; 变形特性; 影响因素; 数值模拟

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)04-0051-10

doi: 10.13402/j.gejs.2026.04.042

Analysis of long-term deformation characteristics and influencing factors for subgrade of solidified shield spoil

SHA Qinghua¹, LONG Jianping², WANG Liangjun², YANG Zhenzhong³, CHEN Baoguo³

(1. Guangdong Yuehai Yuedong Water Supply Co., Ltd., Jieyang 522000, Guangdong, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 611730, Sichuan, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: To reveal the long-term deformation characteristics and the influence of soil parameters of solidified shield muck used for high-fill subgrade, this article establishes the numerical model based on FLAC, investigating the period of the construction and long-term deformation characteristics and the influence of soil parameters of the muck after solidification when used as subgrade fill. The study found that, upon completion of the subgrade construction, the vertical displacements at the middle positions of the bottom and top of the subgrade reach 95.7 mm and 168.7 mm, respectively, while the horizontal displacements at the ends of the bottom and top of the subgrade are 17.4 mm and 4.5 mm, respectively. After 20 years of construction, the vertical displacements at the midpoint of the subgrade's bottom and top have increased to 108.9 mm and 180.7 mm, respectively, while the horizontal displacements at both ends of the bottom and top are 28.9 mm and 19.0 mm, respectively. The subgrade slope angle and the particle size of the solidified soil have the significant impact on the horizontal displacement of the subgrade, but show no notable effect on the vertical displacements; the elastic modulus of both the subgrade fill and foundation soil significantly influences the overall vertical and horizontal displacements of the subgrade soil.

Key words: subgrade of shield muck; construction period; long-term; numerical simulation; deformation characteristics; influencing factors.

收稿日期: 2025-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52578445)

作者简介: 沙庆华(1992—), 男, 工程师, 从事水利水电工程施工技术管理。

通信作者: 杨振忠(2001—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程领域方面的研究。

高填方路基在交通基础设施中广泛应用,但其长期运营期易因土体蠕变产生显著沉降,导致路面开裂、结构失稳等病害。尤其随着盾构隧道工程的激增,如何将工程渣土固化用于路基填料,实现资源化利用并保障路基长期稳定性,成为当前岩土工程领域的热点问题。王世容等^[1]针对路基沉降观测及填筑技术展开研究,阐述了沉降观测现状及沉降观测仪工作原理和构造特征。魏义仙^[2]对现场监测路基沉降数据与数值模拟结果进行对比,得到了高填方路基沉降变形随各因素的变化规律。鹿龙^[3]以乌干达 KASESE 公路改扩建工程为对象,研究不同路基高度以及是否有支挡结构对路基竖向沉降和侧向变形的影响。王凯等^[4]对复合路基沉降展开研究,探索长短组合桩复合地基的加固机理。蔡文霄等^[5]采用现场安装单点沉降计的方式得到高填方路基沉降规律。部分研究人员对路基长期受力变形展开预测和分析,袁伟^[6]通过数值模拟与现场试验,得到了路基的长期沉降规律。蔡文霄^[7]通过路基沉降监测与预测对比,得到软土路基变形规律。赵法勇^[8]通过数值模拟总结出路基施工期变形特性并对长期变形进行预测。

然而,但现有研究对填料蠕变特性及参数敏感性的研究尚不全面,缺乏盾构渣土固化用于路基填料的长期变形预测模型。本研究旨在揭示高填方盾构渣土路基长期变形特性及土性参数影响规律,重点探究路基坡角度数、渣土路基弹性模量、地基土弹性模量及固化渣土粒径 4 类关键参数对长期变形的影响。通过建立考虑蠕变的三维数值模型,探究施工期及施工完成后 20 a 内盾构渣土路基长期变形规律以及土性参数的长期影响规律,以期可为高填方路基工程提供借鉴。

1 固化盾构渣土路基施工期受力变形特性

1.1 施工期数值模型建立

利用有限差分软件建立工程尺度的三维数值模型,数值模型示意如图 1 所示。地基土按照两层考虑,第一层为厚度 20.00 m 的黏性地基土,第二层为厚度 20.00 m 的基岩。路基填土采用盾构隧道施工分离出的粒径为 20 ~ 74 μm 的渣土固

化制备而成的路基填土,固化前的盾构渣土主要成分为石英、方解石、钠长石和伊利石等,在“水泥 17% + 土壤固化剂 1%”的固化配比下,固化稳定后用于路基填土,厚度为 18.00 m,分层填筑,每层填筑厚度为 0.50 m。上部路面结构层分别为厚度为 0.50 m 的碎石砂砾垫层和 0.50 m 的水泥粉煤灰土基层;顶部为沥青路面层,厚度为 0.15 m。数值模型整体宽度为 150.00 m,坡角约为 39°,地基土两侧施加水平约束,模型底部施加水平和竖向约束,不考虑地下水的影响。

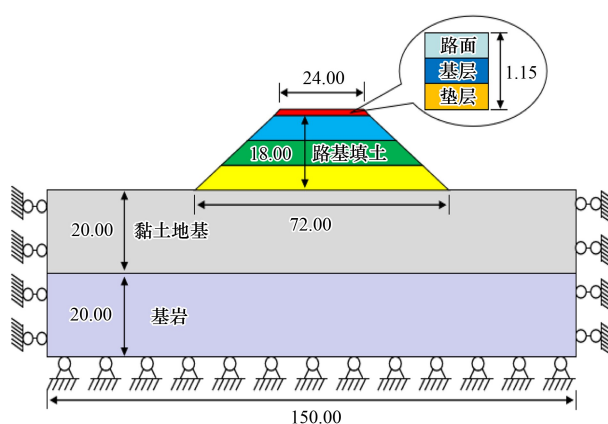


图 1 施工期数值模型示意 m

根据工程实际以及相关文献^[9-10],地基土、路基填土、垫层以及基层采用摩尔-库伦模型,路面采用线弹性模型,数值模拟所用材料参数如表 1 所示。各层填土之间以及填土与地基之间的接触面采用摩尔-库伦剪切界面模拟,不考虑黏结和膨胀,接触面的剪切刚度和法向刚度大约为接触面两侧较大刚度体刚度的 10 倍。

1.2 施工期变形特性分析

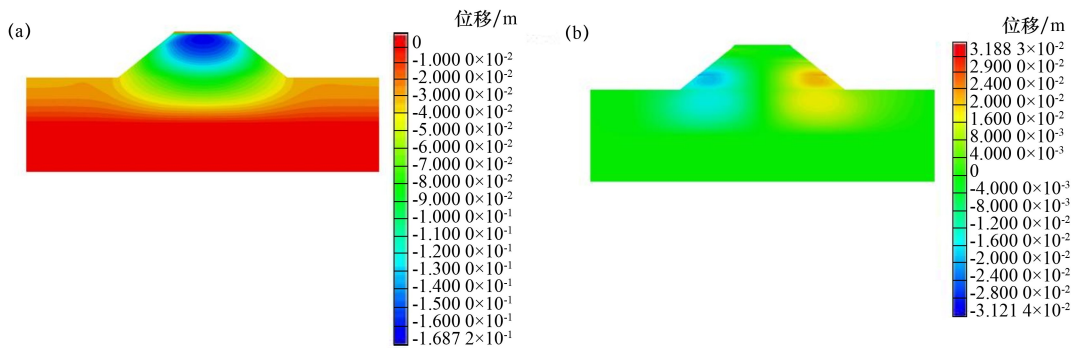
施工期结束后的位移云图如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,路基上部的中心区域竖向位移较大,达到 168.7 mm,路基下部及两端区域竖向位移较小,路基地底部中心处竖向位移为 95.7 mm。由图 2(b)可以看出,水平位移较大的区域主要分布在路基坡脚处以及坡脚对应的部分地基土区域,水平位移最大值为 17.4 mm。

1.2.1 施工过程中路基竖向位移

施工期路基地底部和顶部中心位置竖向位移随填土高度的变化规律如图 3 所示。随填土高度的增大,路基地底部和顶部的中间的竖向位移非线性

表 1 数值模拟材料参数

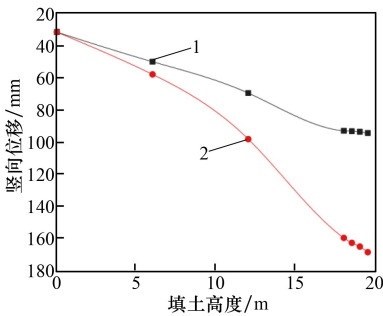
参数材料	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
路面	800	0.25	—	—	2 300
基层	150	0.25	126	34	2 200
垫层	70	0.32	0	31	2 200
路基填土	30	0.35	100	28	1 850
老黏土地基	22	0.30	36	26	1 900
基岩	30 000	0.22	1 × 10 ⁴	37	2 400



(a) 竖向位移云图; (b) 水平位移云图

图 2 施工期位移云图

增大,并于施工期结束时达到最大值,此时路基本底部和顶部中间的竖向位移分别为 94.5 mm 和 168.7 mm。受上部填土自重、填土性质、地基土性质等的影响,路基顶部竖向位移的变化趋势更为显著,且路基本底部和顶部中间位置的竖向位移差异随填土高度的增加而增大。



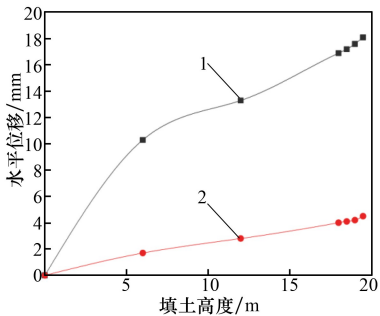
1—路基本底部; 2—路基顶部。

图 3 施工期路基本底部和顶部中间位置竖向位移

1.2.2 施工期路基水平位移

施工期路基本底部和顶部两端位置的水平位移随填土高度的变化规律如图 4 所示。随填土高度的增大,路基本底部和顶部两端位置的水平位移非线性增大,并于施工期结束时达到最大值,此时路基本底部和顶部两端的水平位移分别为 18.1 mm 和 4.5 mm。路基本底部两端的水平位移较路基顶部

两端的水平位移相比,变化趋势更为显著,且路基本底部和顶部两端位置的水平位移差异随填土高度的增加而增大。



1—路基本底部; 2—路基顶部。

图 4 施工期路基本底部和顶部两端位置水平位移

2 固化盾构渣土路基长期变形特性

2.1 长期数值模型

在施工期数值模拟结果的基础上,进行渣土路基长期变形特性数值模拟。基于实际工程,对高填方路基长期数值模拟考虑施工完成后 20 a 内的蠕变分析。根据文献 [11] 的研究发现,Burgers 模型可以合理地描述粒径为 20 ~ 74 μm 渣土的蠕变特性。Burgers 模型由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联而成,模型示意图如图 5 所示。

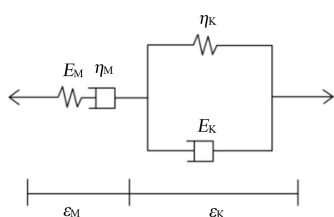


图 5 Burgers 模型示意

路基填土的长期蠕变参数如表 2 所示。

表 2 路基填土长期蠕变参数

$\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$K/$ MPa	$E_M/$ MPa	$E_K/$ MPa	$\eta_M/$ ($\text{Pa}\cdot\text{d}$)	$\eta_K/$ ($\text{Pa}\cdot\text{d}$)
1 850	33.3	346.5	207.6	1.157×10^{12}	5.787×10^{11}

注: ρ 为填土密度; K 为材料蠕变时所受到的应力; E_M 为 Maxwell 模型的弹性模量; η_M 为 Maxwell 模型的黏滞系数; E_K 为 Kelvin 模型的弹性模量; η_K 为 Kelvin 模型的黏滞系数。

2.2 长期变形特性分析

施工完成后 20 a 后的位移云图如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出施工完成后 20 a 路基上部中心位置的竖向位移较大,整体上随着路基深度的增加,竖向位移逐渐减小,坡脚处的竖向位移较小,第 20 a 时路基最大竖向位移达到 180.7 mm。图 6(b)中可以看出施工完成后 20 a 水平位移较大的区域集中分布在路基坡脚区域,而路基上部和路基整体的中间区域水平位移较小,第 20 a 时路基最大水平位移达到 41.1 mm。

2.2.1 长期竖向位移

施工完成后 20 a 内,路基本部和顶部中心位置竖向位移随时间的变化规律如图 7 所示。路基本部竖向位移主要受地基土性质影响,在工后竖向位移呈现先增大后稳定的趋势,从 0 ~ 20 a 内,

路基底部中心位置竖向位移从 95.7 mm 增加至 108.9 mm。在施工完成后 10 a 内,路基顶部中心位置竖向位移从 168.7 mm 增加至 180.3 mm,并于第 10 a 后趋于稳定,施工完成后第 20 a 的路基顶部中心位置的竖向位移达到 180.7 mm,较施工期结束时增加了 6.6%。由于路基土的蠕变,工后初期路基土会发生较为明显的沉降,此过程会使路基土趋于密实,故路基沉降量会逐年减小,直至土体达到稳定状态。

2.2.2 长期水平位移

施工完成后 20 a 内,路基本部和顶部两端位置的水平位移均随着时间逐渐增加,且二者之间的位移变化差异随着时间逐渐增大,如图 8 所示。在施工完成后 16 a 内,路基本部两端位置的水平位移逐渐增加,并于 16 a 后逐渐稳定,在第 20 a 的水平位移达到 41.1 mm。路基顶部两端位置的水平位移在施工完成后 0 ~ 14 a 内逐渐增加,于第 14 a 后趋于稳定,在施工完成后 20 a 时的水平位移为 16.9 mm。由于路基填土的性质,路基本部两端位置的水平位移远大于路基顶部两端位置的水平位移。

3 固化盾构渣土路基长期变形特性影响因素分析

建立与图 1 相似的数值模型,影响参数的取值除自变量外,其它参数与表 1 保持一致。分析渣土路基坡角、路基填土弹性模量、地基土弹性模量及固化渣土路基填料粒径,数值模拟工作依据“单因素控制变量法”原则进行设计,共设置 4 个主要工况组,所有模型均采用相同的边界条

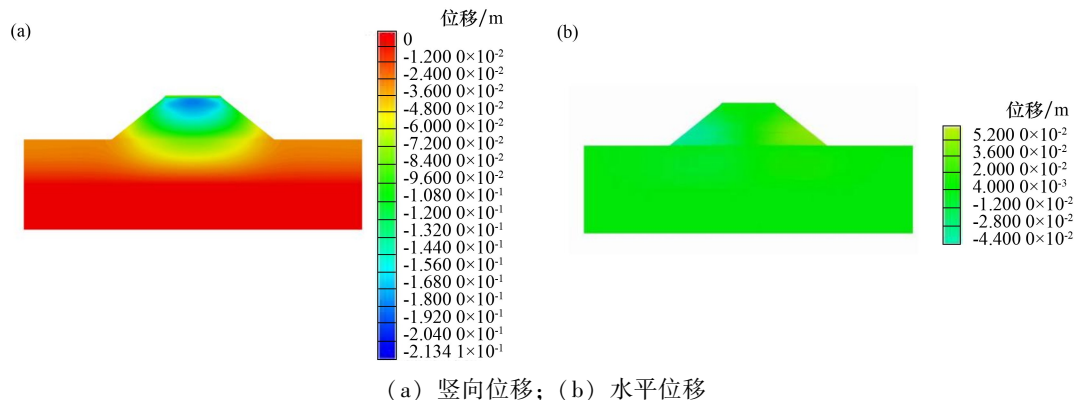
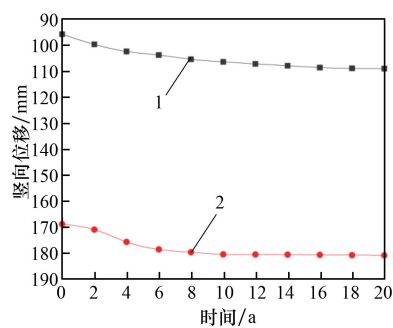
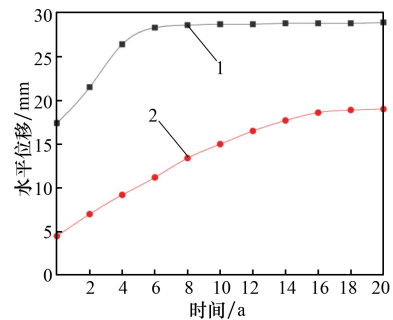


图 6 施工完成后 20 a 位移云图



1—路基底部；2—路基顶部。

图 7 长期路基竖向位移变化



1—路基底部；2—路基顶部。

图 8 长期路基水平位移变化

件、分层填土方式及时间效应模拟方法。

各组工况通过控制变量调整特定参数来探究高填方路基长期受力变形特性土体参数影响，具体而言：1) 路基坡角变化范围设定为 29°、34°、38.7°、44°和 49°；2) 路基填土弹性模量选取 30、60 MPa 和 90 MPa；3) 地基土弹性模量选取 30 ~ 150 MPa，以 30 MPa 为增量梯度；4) 固化渣土路基填料粒径分别选取 <4 μm、4 ~ 20 μm、20 ~ 74 μm、74 μm ~ 2 mm 和 2 ~ 4 mm。各工况参数设置详见表 3。

3.1 路基坡角

3.1.1 不同路基坡角下路基竖向位移

基于控制变量，使路基厚度和顶面宽度不变，改变路基底面宽度，以达到路基坡角的改变，路基坡角为 29°、34°、39°、44°、49°时对应的路基底面

宽度分别约为 92、80、72、64、58 m。不同路基坡角下路基底部和顶部中心位置竖向位移随时间变化规律如图 9 所示。图 9(a)中路基坡角改变时，路基底部中心位置竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同，且工后各个时间下的位移大小相近。路基坡角为 29°、34°、39°、44°、49°时，所对应的工后初期路基底部中心位置竖向位移分别为 92.8、94.5、95.7、95.1、95.0 mm，施工完成后 20 a 时的竖向位移分别为 106.8、106.7、108.9、106.8、107.2 mm。可以看出，路基坡角的改变对长期路基底部的竖向位移几乎无影响。

图 9(b)中路基坡角改变时，路基顶部中心位置竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同。路基坡角为 29°、34°、39°、44°、49°时，所对应的工后初期路基顶部中心位置竖向位移分别为 157.5、166.1、168.7、168.6、166.4 mm，施工完成后 20 a 时的竖向位移分别为 170.9、181.0、180.7、181.1、174.0 mm。可以看出，路基坡角时改变，路基顶部中间位置的竖向位移无规律性的变化。

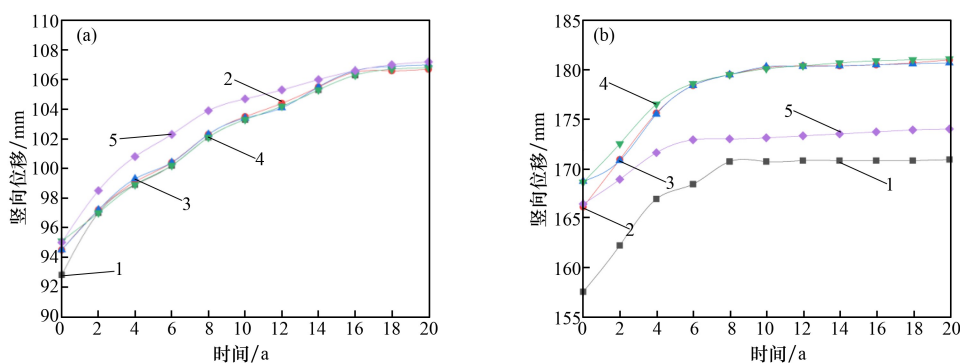
3.1.2 不同路基坡角下路基水平位移

不同路基坡角下路基底部和顶部两端位置水平位移随时间变化规律如图 10 所示。图 10(a)中路基坡角改变时，路基底部水平位移随时间变化的整体趋势大致相同，且随着坡角的增大，工后同一时间对应的路基底部两端位置的水平位移也越大。路基坡角为 29°、34°、39°、44°、49°时，所对应的工后初期路基底部两端位置的水平位移分别为 15.0、15.8、17.4、17.4、17.2 mm，施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 21.8、23.3、28.9、23.5、30.6 mm。

图 10(b)中不同路基坡角所对应的路基顶部水平位移随时间变化的整体趋势大致相同，且随着坡角的增大，工后同一时间对应的路基顶部两端位置的水平位移也越大。路基坡角为 29°、34°、

表 3 模拟方案

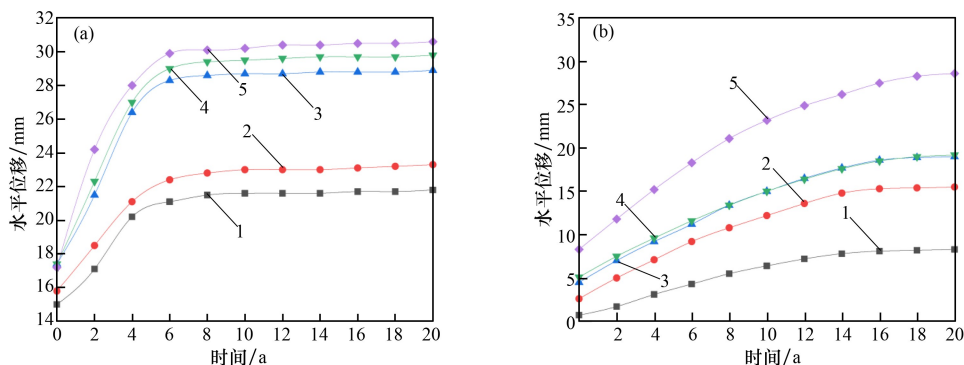
影响因素	参数
路基坡角/(°)	29、34、39、44、49
路基填土弹性模量/MPa	30、60、90
地基土弹性模量/MPa	30、60、90、120、150
固化渣土路基填料粒径	<4 μm、4 ~ 20 μm、20 ~ 74 μm、74 μm ~ 2 mm、2 ~ 4 mm



(a) 路基地部中心; (b) 路基顶部中心

路基坡角/(°): 1—29; 2—34; 3—39; 4—44; 5—49。

图 9 不同路基坡角下路基地部和顶部中心位置竖向位移变化规律



(a) 路基地部两端; (b) 路基顶部两端

路基坡角/(°): 1—29; 2—34; 3—39; 4—44; 5—49。

图 10 不同路基坡角下路基地部和顶部两端位置水平位移变化规律

39°、44°、49°时,所对应的工后初期路基顶部两端位置的水平位移分别为 0.7、2.6、4.5、5.1、8.3 mm,施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 8.3、15.5、19.0、19.2、28.6 mm。

3.2 路基填土弹性模量

鉴于一般路基填土弹性模量范围,分别选取 30、60、90 MPa 的路基填土进行数值模拟,从而进行不同路基填土弹性模量下路基竖向位移影响分析。

3.2.1 不同路基填土弹性模量下路基竖向位移

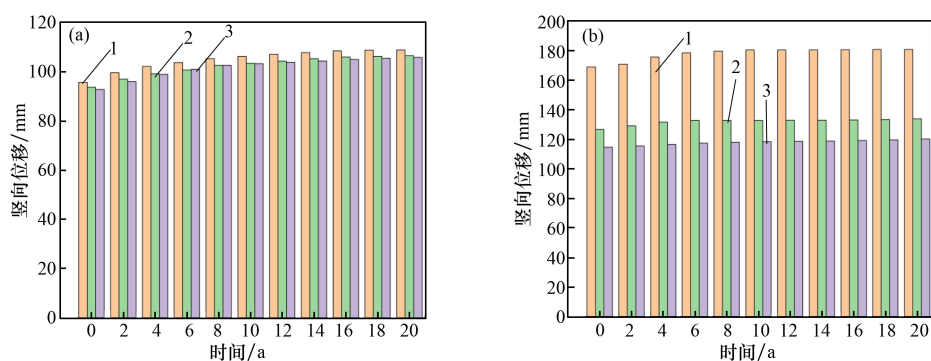
不同路基填土弹性模量下的路基地部和顶部中心位置竖向位移随时间变化规律如图 11 所示。图 11(a)中,路基填土弹性模量改变,路基地部竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同,且工后各个时间下的路基地部竖向位移大小相近。路基填土弹性模量为 30、60、90 MPa,所对应的工后初期路基地部中心位置竖向位移分别为 95.7、93.7、92.8 mm,施工完成后 20 a 时的竖向位移

分别为 108.9、106.5、105.8 mm。可以看出,路基填土弹性模量的改变对长期路基地部的竖向位移几乎无影响。

由图 11(b)可以看出,路基填土弹性模量为 30、60、90 MPa 时,路基顶部竖向位移随时间整体均呈现先增大后稳定的趋势,且随着路基填土弹性模量越大,路基顶部中心位置在工后同一时间的竖向位移越小;不同路基填土弹性模量下路基顶部中心位置的竖向位移随时间也越来越大。路基填土弹性模量为 30、60、90 MPa,路基顶部中心位置的竖向位移在工后初期分别为 168.7、126.6、114.6 mm,在施工完成后 20 a 时分别达到 180.7、133.8、120.1 mm。

3.2.2 不同路基填土弹性模量下路基水平位移

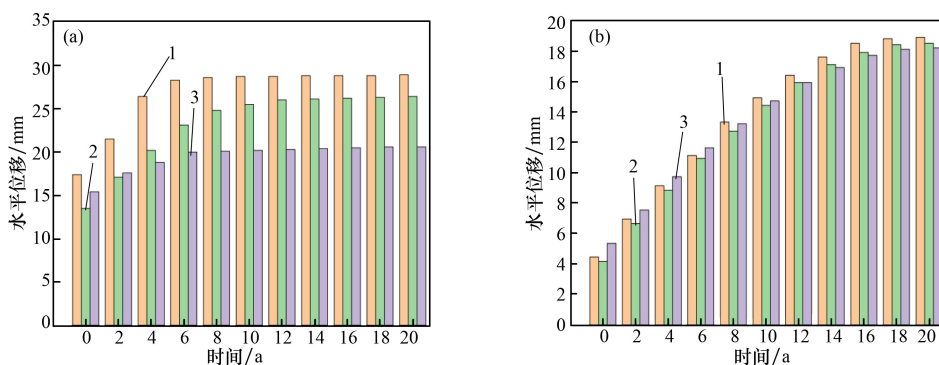
不同路基填土弹性模量下的路基地部和顶部两端位置水平位移随时间变化规律如图 12 所示。图 12(a)中,路基填土弹性模量改变,路基地部两端位置的水平位移随时间整体均呈现先增大后稳



(a) 路基底部中心; (b) 路基顶部中心

路基填土弹性模量/MPa: 1—30; 2—60; 3—90。

图 11 不同路基填土弹性模量下路基底部和顶部中心位置竖向位移变化规律



(a) 路基底部两端; (b) 路基顶部两端

路基填土弹性模量/MPa: 1—30; 2—60; 3—90。

图 12 不同路基填土弹性模量下路基底部和顶部两端位置水平位移变化规律

定的趋势,且随着路基填土弹性模量越大,路基底部两端位置在工后同一时间的的水平位移越小,水平位移变化量也越小。路基填土弹性模量为 30、60、90 MPa,所对应的工后初期路基底部两端位置的水平位移分别为 18.1、13.5、15.4 mm,施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 28.9、26.4、20.6 mm。

图 12(b) 中,不同路基填土弹性模量下的路基顶部两端位置的水平位移随时间变化趋势一致,且不同路基填土弹性模量下,工后同一时间的路基顶部两端位置水平位移量相近,路基填土弹性模量为 30、60、90 MPa,在施工完成后 20 a 时的路基顶部水平位移分别为 19.0、18.3、18.6 mm。路基底部两端位置的水平位移远大于路基顶部两端位置的水平位移。

3.3 地基土弹性模量

3.3.1 不同地基土弹性模量下路基竖向位移

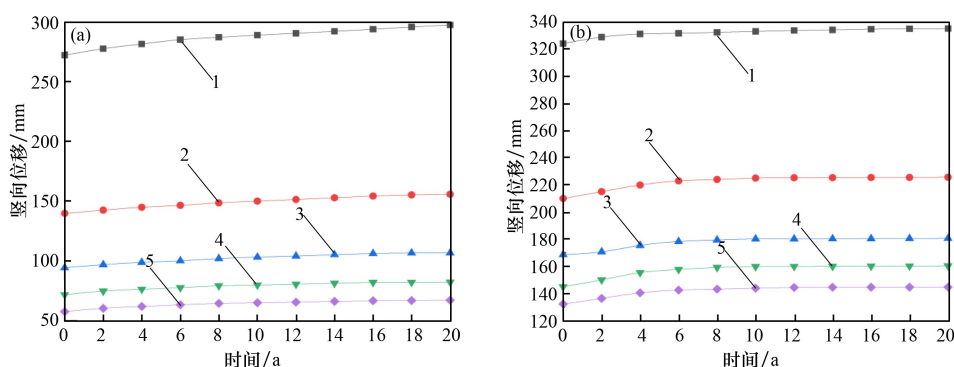
不同地基土弹性模量下的路基底部和顶部中心位置竖向位移随时间变化规律如图 13 所示。图

13(a) 中,地基土弹性模量改变,路基底部竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同,且随着地基土弹性模量的增大,工后同一时间对应的路基底部中心位置的竖向位移越小。地基土弹性模量为 30、60、90、120、150 MPa 时,所对应的工后初期路基底部中心位置的竖向位移分别为 272.2、139.8、95.7、71.8、57.7 mm,施工完成后 20 a 时的竖向位移分别为 297.5、155.9、108.9、82.3、67.2 mm。

由图 13(b) 可以看出,地基土弹性模量越大,对应的路基顶部中心位置的竖向位移越小。地基土弹性模量为 30、60、90、120、150 MPa,在施工完成后 20 a 时的路基顶部中心位置竖向位移分别为 335.2、155.9、180.7、160.4、144.8 mm。

3.3.2 不同地基土弹性模量下路基水平位移

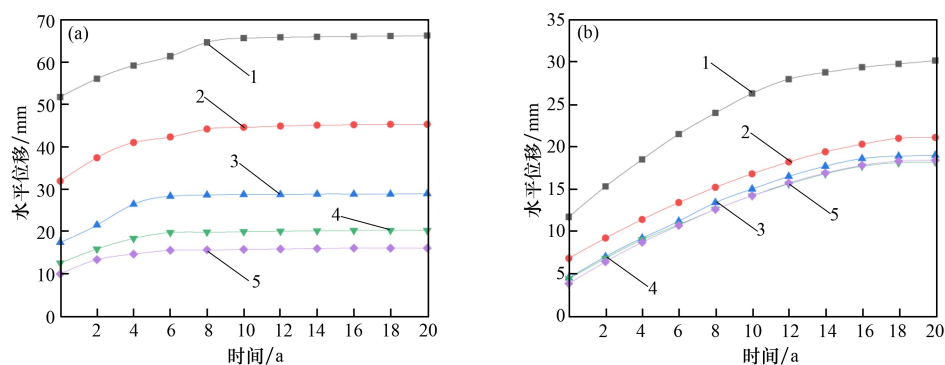
不同地基土弹性模量下的路基底部和顶部两端位置水平位移随时间变化规律如图 14 所示。图 14(a) 中,地基土弹性模量改变,路基底部水平位移



(a) 路基地部中心; (b) 路基顶部中心

地基土弹性模量/MPa: 1—30; 2—60; 3—90; 4—120; 5—150。

图 13 不同地基土弹性模量下路基地部和顶部中心位置竖向位移变化规律



(a) 路基地部两端; (b) 路基顶部两端

地基土弹性模量/MPa: 1—30; 2—60; 3—90; 4—120; 5—150。

图 14 不同地基土弹性模量下路基地部和顶部两端位置水平位移变化规律

随时间变化的整体趋势大致相同,且随着地基土弹性模量的增大,工后同一时间对应的路基地部两端位置的水平位移越小。地基土弹性模量为 30、60、90、120、150 MPa,所对应的工后初期路基地部两端位置的水平位移分别为 51.8、31.9、17.4、12.5、9.9 mm,施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 66.3、44.5、28.9、20.2、16.0 mm。

由图 14(b)可以看出,地基土弹性模量越大,路基顶部两端位置的水平位移越小。地基土弹性模量为 30、60、90、120、150 MPa,在施工完成后 20 a 时的路基顶部两端位置的水平位移分别为 30.2、21.1、19.0、18.2、18.4 mm。

3.4 固化渣土的粒径

对于不同粒径的固化渣土,需要选取不同配比的固化剂,使其强度达到路基填土的要求,固化渣土粒径的不同会直接影响固化后路基填土的黏聚力并且少量影响内摩擦角,进而影响路基填

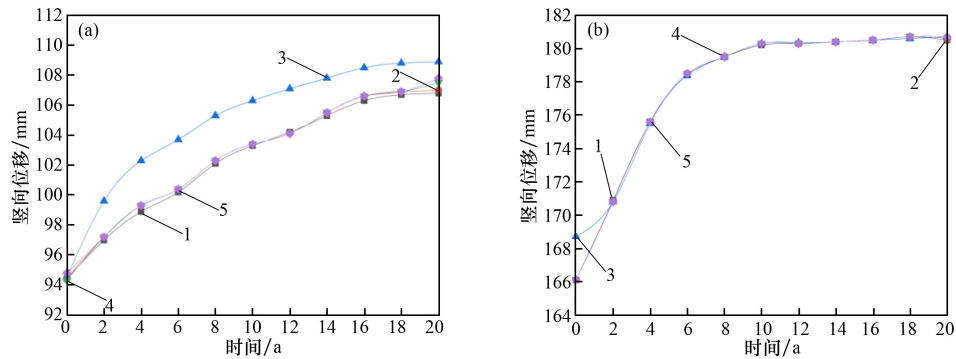
土的的无侧限抗压强度,因此以下通过分析不同粒径渣土固化后的黏聚力和内摩擦角对路基地部和顶部受力变形的影响,间接达到分析固化渣土路基填料粒径影响的目的。不同粒径渣土固化后的黏聚力和内摩擦角如表 4 所示。

3.4.1 不同固化渣土粒径下路基竖向位移变化对比

不同固化渣土粒径下的路基地部和顶部中心位置竖向位移随时间变化规律如图 15 所示。图 15(a)中,路基固化渣土粒径改变时,路基地部竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同,且工后各个时间下的路基地部位移大小相近。固化渣土路基填料粒径分别选取 $<4\ \mu\text{m}$ 、 $4\sim 20\ \mu\text{m}$ 、 $20\sim 74\ \mu\text{m}$ 、 $74\ \mu\text{m}\sim 2\ \text{mm}$ 和 $2\sim 4\ \text{mm}$ 时,所对应的工后初期路基地部中心竖向位移分别为 94.4、94.5、95.7、94.3、94.8 mm,施工完成后 20 a 时的竖向位移分别为 106.8、107.0、108.9、107.5、107.8 mm。可以看出,路基填料的固化渣土粒径的改变对长期路基地部的竖向位移几乎无影响。

表 4 不同粒径渣土固化后的黏聚力和内摩擦角

固化渣土粒径	固化配合比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
<4 μm	水泥 15% + 生石灰 5%	300	20
4 ~20 μm	水泥 15% + 生石灰 15%	200	24
20 ~74 μm	水泥 17% + 土壤固化剂 1%	100	28
74 μm ~2 mm	水泥 17% + 粉煤灰 15%	50	32
2 ~4 mm	水泥 20% + 粉煤灰 17.5%	20	36



(a) 路基地部中心；(b) 路基顶部中心

固化渣土粒径：1—<4 μm；2—4 ~20 μm；3—20 ~74 μm；4—74 μm ~2 mm；5—2 ~4 mm。

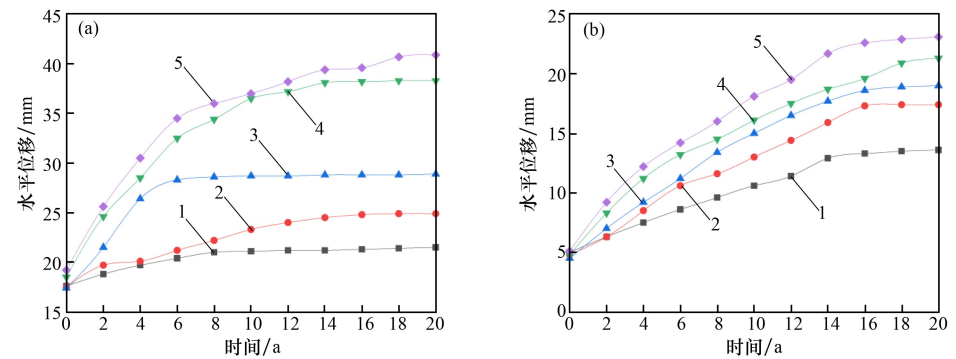
图 15 不同固化渣土粒径下路基地部和顶部中心位置竖向位移变化规律

图 15(b) 中，路基固化渣土粒径改变时，路基顶部竖向位移随时间变化的整体趋势大致相同，且工后各个时间下的路基顶部中心位置位移大小相近。固化渣土路基填料粒径分别选取 <4 μm、4 ~20 μm、20 ~74 μm、74 μm ~2 mm 和 2 ~4 mm 时，施工完成后 20 a 时的竖向位移分别为 180.5、180.5、180.7、180.6、180.7 mm。可以看出，路基填料的固化渣土粒径的改变对长期路基顶部的竖向位移几乎无影响。

3.4.2 不同固化渣土粒径下路基水平位移变化对比
不同固化渣土粒径下的路基地部和顶部水平

位移随时间变化规律如图 16 所示。图 16(a) 中，路基固化渣土粒径改变时，路基地部两端位置的水平位移随时间变化的整体趋势大致相同，且固化渣土路基填料粒径越大，所对应的路基地部两端位置的水平位移越大。固化渣土路基填料粒径分别选取 <4 μm、4 ~20 μm、20 ~74 μm、74 μm ~2 mm 和 2 ~4 mm 时，所对应的工后初期路基地部两端位置的水平位移分别为 17.6、17.5、17.4、17.5、18.5 mm，施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 21.5、24.9、28.9、38.3、40.9 mm。

图 16(b) 中，路基固化渣土粒径改变时，路顶



(a) 路基地部两端；(b) 路基顶部两端

固化渣土粒径：1—<4 μm；2—4 ~20 μm；3—20 ~74 μm；4—74 μm ~2 mm；5—2 ~4 mm。

图 16 不同固化渣土粒径下路基地部和顶部两端位置水平位移变化规律

基部两端位置水平位移随时间变化的整体趋势大致相同,且固化渣土路基填料粒径越大,所对应的路基顶部两端位置的水平位移越大。固化渣土路基填料粒径分别选取 $<4\ \mu\text{m}$ 、 $4\sim 20\ \mu\text{m}$ 、 $20\sim 74\ \mu\text{m}$ 、 $74\ \mu\text{m}\sim 2\ \text{mm}$ 和 $2\sim 4\ \text{mm}$ 时,施工完成后 20 a 时的水平位移分别为 13.6、17.4、19.0、21.3、23.1 mm。可以看出,路基填料的固化渣土粒径的改变对长期路基地部和顶部的水平位移影响较小。

4 结 论

通过建立考虑蠕变效应的三维数值模型,分析了固化盾构渣土路基施工期及施工完成后长期变形特性,并定量探究了土性参数等因素对路基长期变形的影响规律,得出主要结论如下。

(1) 路基地部和顶部中间位置的竖向位移随填土高度增加呈非线性增长,施工期结束时分别达 94.5 mm 与 168.7 mm;路基地部和顶部两端位置的水平位移也随填土高度增加而增大,施工期结束时分别达到 18.1 mm 与 4.5 mm。

(2) 施工完成后 20 a 路基地部和顶部中心位置的竖向位移分别增加到 108.9 mm 和 180.7 mm;施工完成后 20 a,路基地部和顶部两端位置的水平位移显著增大,分别达到 41.1 mm 和 19.0 mm。

(3) 路基坡角增大导致路基顶部和底部的水平位移显著增大,但对路基顶部和底部的竖向位移无明显影响;路基填土与地基土弹性模量提升可有效抑制路基竖向位移和水平位移;固化渣土

粒径增大加剧路基地部和顶部的水平位移,但对路基顶部和底部的竖向位移无明显影响。

参考文献:

- [1] 王世容,韦纯国.高速公路路基沉降观测及填筑施工技术探讨[J].交通科技与管理,2024,5(8):116-118.
- [2] 魏义仙.基于 FLAC3D 的高填方路基沉降变形因素分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(11):81-83.
- [3] 鹿龙.公路拓宽工程中路基差异沉降特性研究[J].鄂州大学学报,2024,31(2):109-112.
- [4] 王凯,冯传煌,杜文山,等.重载铁路软土区交叉式组合桩复合地基沉降特性研究[J].铁道勘察,2022,48(4):66-71.
- [5] 蔡文霄,郑晓军,朱彦鹏,等.基于单点沉降计的高填方路基沉降分析[J].甘肃科学学报,2018,30(3):83-87.
- [6] 袁伟.唐曹铁路软土路基沉降变形研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [7] 蔡文霄.高填方路基工后沉降监测及预测对比分析[D].兰州:兰州理工大学,2017.
- [8] 赵法勇.红砂岩路基变形预测与控制研究[D].西安:西安工业大学,2020.
- [9] 董立山,李文强,刘志胜.考虑黄土长期蠕变效应的路基沉降预测方法[J].公路,2022,67(8):1-7.
- [10] 万峰,李飞,代亚飞,等.沿海软土地区公路拓宽工程路基沉降规律及地基加固研究[J].路基工程,2025,(4):220-226.
- [11] 王者超,乔丽苹.土蠕变性质及其模型研究综述与讨论[J].岩土力学,2011,32(8):2251-2260.