

交通荷载作用下黏性土地层盾构渣土路基受力变形特性

龙建平¹, 赵 刚², 肖 东¹, 胡 宇³, 陈保国³

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000 ;2. 广东粤海粤东供水有限公司,
广东 揭阳 522000;3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:将固化后盾构渣土用作路基填料具有极大的应用潜力,可有效缓解环境污染并产生显著的社会效益。为探究黏性土地层固化盾构渣土用作路基填料的可行性,文章分析了黏性土地层盾构渣土的基本性质,利用有限元软件建立固化土路基模型,分析了交通荷载作用下固化土路基的受力变形特性。结果表明:交通荷载作用点处路基浅部受到的影响最大,应力响应最为显著,并随深度的增加应力大小及应力变化速率迅速衰减。交通荷载作用下,路基沉降值随荷载循环次数增加而增大,且不同结构层的沉降速率均呈现随循环次数增加而降低的趋势;当路基内部应力达到屈服状态时,塑性区在路基基层集中出现,并随循环次数增加向路基深部及坡脚方向扩展。本文研究成果揭示了长期交通荷载作用下固化土路基的受力特性与变形规律,可为盾构渣土路基的长期稳定性预测提供理论依据。

关键词:黏性土地层; 盾构渣土; 固化土路基; 受力特性; 变形特性; 交通荷载

中图分类号:U416;X799.1

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0026-09

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.039

Mechanical characteristics and deformation of shield muck in cohesive soil strata under traffic loads

LONG Jianping¹, ZHAO Gang², XIAO Dong¹, HU Yu³, CHEN Baoguo³

(1. Sinohydro BUREAU 7 Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China;

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

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

Abstract: The utilization of solidified shield muck as roadbed filling material holds significant potential, which can effectively mitigate environmental pollution and generate social benefits. To explore the feasibility of using solidified cohesive soil from shield muck as roadbed fill, a finite element model of the solidified soil roadbed was established to analyze its stress-deformation characteristics under long-term traffic loading. The results indicate that traffic loads exert the greatest influence on the roadbed at and beneath the loading points, inducing the highest stress response, which decays in magnitude and rate of change with increasing depth. Under traffic loading, roadbed settlement increases with the number of load cycles, while the settlement rates of different structural layers all exhibit a decreasing trend with repeated cycles. When the internal stress state of the roadbed reaches yield, plastic zones concentrate in the base layer and extend toward deeper roadbed layers and the slope toe as the number of cycles increases. The stress characteristics and deformation patterns under long-term traffic loads derived from the study can provide preliminary evidence for predicting the long-term stability of solidified shield muck subgrade.

收稿日期: 2025-10-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52578445)

作者简介: 龙建平(1978—),男,高级工程师,从事盾构施工技术研究。

通信作者: 胡 宇(2001—),男,硕士研究生,从事地质勘探与盾构渣土利用方面的研究。

Key words: cohesive soil strata; shield muck; stabilized soil roadbed; mechanical properties; deformation characteristics; traffic loads

地下轨道交通的盾构渣土规模庞大, 截至 2023 年, 仅广东省地下轨道交通总里程达 1 100 余公里; 以盾构刀盘直径 6 000 mm 估算, 其产生的渣土总量约 3 000 余万立方米。但是当前我国盾构渣土资源化利用率不足 10%, 且资源化利用途径仍在探索阶段^[1-3]。如果不能得到合理的处理, 将会造成严重固废污染, 甚至引起泥石流灾害^[4-5]。

路基填料是盾构渣土资源化利用的重要途径之一, 众多学者对其可行性及渣土改性开展了研究。WANG 等^[6]利用电石渣与粉煤灰按特定比例混合掺入渣土, 改良渣土物理力学性能并验证了其用于路基填筑的可行性; GUPTA 等^[7]将粉煤灰、水泥、高分子纤维等掺入盾构渣土中, 并对固化土试样作公路土工试验, 验证所用固化剂的显著固化效果, 并根据试验结果建立了强度预测方程; 张华^[8]通过掺砂方法, 显著降低了同一固化配方下固化土的界限含水量, 并保持其优异的路用性能。研究表明经固化剂改良的盾构渣土, 可达到路基填料的物理力学性能要求, 具备大规模投入道路工程的潜力。

上述研究表明盾构渣土用于路基填料具有可行性, 然而, 交通荷载下盾构渣土路基的长期稳定性尚不明确。针对交通荷载下路基受力变形特性, 邹敏等^[9]通过有限元模拟研究镍铁渣-黏土路基在交通荷载下的动力响应特性, 并分析了路基成分对动力响应特性的影响; 陈笑寒^[10]结合动三轴试验与有限元模拟, 探究交通荷载下路基变形, 总结出路基变形的时程规律; 王仕传等^[11]利用有限元软件建立加筋土路基模型, 揭示了加筋土减小路基动偏应力, 进而减小路基塑性变形的机理。以上研究均在不同程度揭示了交通荷载下路基受力变形特性, 并指向了相近的规律与趋势。

然而, 关于交通荷载作用下的固化盾构渣土路基受力变形特性研究鲜见, 对其动力特性的分析亟待深入系统研究。本文首先对黏性土地层盾构渣土特性进行分析, 然后利用有限元软件对黏性土地层盾构渣土固化后用作路基填料进行建模分析, 研究交通荷载下其动力响应特性, 以期为固化后的盾构渣土路基设计提供参考价值。

1 黏性土地层盾构渣土特性与渣土路基问题

1.1 黏性土地层原状渣土特性

黏性土地层盾构渣土是一类渗透性差、含水率敏感性高, 且压缩性强、黏性与可塑性高的工程渣土。黏土盾构渣土直接应用于道路工程时, 因其高含水率、软弱静力性能及动力特性易引发路基显著沉降、差异沉降及塌陷等工程危害。为具体探究黏土盾构渣土特性, 取粤东某引水工程原状泥水盾构渣土作室内试验分析。分别取适量原状盾构渣土, 开展颗粒粒径分析试验、界限含水量试验与击实试验, 结果如图 1~3 所示。

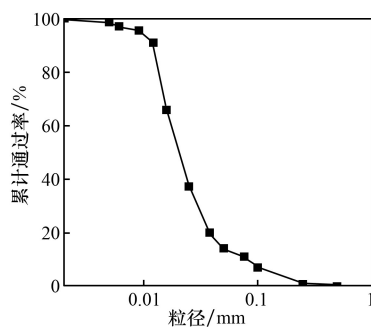


图 1 粒径分布曲线

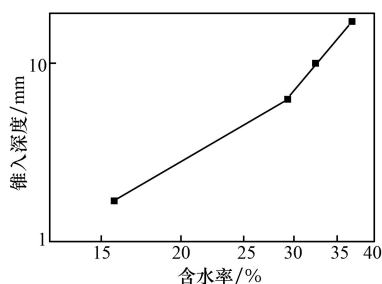


图 2 锥贯入深度与含水率关系

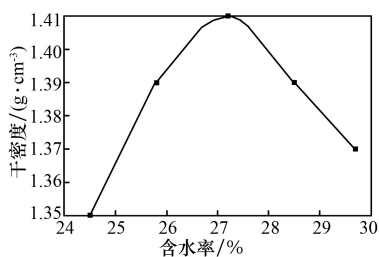


图 3 击实试验

试验数据表明, 本工程盾构渣土是一类级配不良、含水率高的黏土。由图 1 可知, 该粤东引水工程原状盾构渣土的颗粒粒径主要分布在 0.01 ~

0.1 mm 间, 占比近 85%, 不均匀系数为 1.77, 曲率系数为 0.75。这表明该土样为黏性土, 且属级配不良。由图 2 可知, 根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123), 锥沉入度 17 mm 对应土体含水量为液限, 液限含水量的 60%~70% 可估算为土体塑限, 可知原状土的液限为 36.9, 塑限为 23.9, 塑性指数为 13。由图 3 可知, 击实试验所得原状土的最佳含水率为 27.2%, 对应原状渣土最大干密度 1.41 g/cm³。

1.2 固化渣土特性

通常固化后的渣土相较原状土的含水率更低、液塑限更低且颗粒分布更致密。在力学性能方面抗压强度更高、压缩性更小且渗透性改善, 可广泛应用于各类工程填土中; 同时, 基于原状土含水率高的特性, 浇筑固化土时可原位固化或场拌后回填, 便于填土施工, 减少成本。

表 1 给出了部分固化渣土物理性质试验结果。在原状土样本 1 中, 固化剂水泥用量由零增加时, 固化土试样密度增加, 界限含水率降低, 同时不均匀系数增大; 在原状土样本 2 中, 水泥质量分数由 6% 增加到 12% 时, 原状土密度变化微小, 界限含水率略微增大, 增幅约 11%。这表明水泥的使用与否在较大程度上影响固化土的密度、界限含水率与颗粒级配等物理性质, 而水泥质量分数在一定范围内(本例为 6%~9%) 的改变对固化

土物理性质的影响较小。

根据试验结果和既有研究资料^[12-14], 表 2 给出了部分固化渣土力学性能参数。随着水泥用量的增加, 其无侧限抗压强度、加州承载比与回弹模量均随之增加。同时, 较长的水泥养护龄期有效提高了固化土的抗压强度。

1.3 固化渣土路基典型问题

固化渣土一般应用于基层以下的路床、路堤等结构层中。受原状渣土物理力学特性影响, 固化渣土路基易因颗粒分布不均导致不均匀沉降, 且固化渣土路基随原状土性质与固化剂配方等因素的差异表现出或好或坏的长期动力特性^[3]。此外, 实际浇筑过程中, 固化渣土路基的早期强度增长缓慢, 相较于水泥浇筑等需要更长的养护龄期, 在道路工程应用中会延长工期增加成本。

2 黏性土地层固化盾构渣土路基数值模型

2.1 数值模型与边界条件

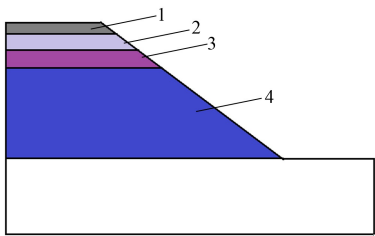
利用有限元软件建立工程尺度的二维路基模型, 模型分层示意如图 4 所示。模型自上而下分为沥青面层、基层、底基层、公路路基与地基土层。沥青面层被视为纯弹性材料, 基层至路基采用内置的 Clay Plastic 模型, 地基土层则采用 Mohr-Coulomb 模型。其中, 沥青面层层厚取 0.2 m, 基层与底基层层厚均取 0.3 m, 公路路基层取厚度为

表 1 固化土物理性质参数

原状土样本编号	固化土试样	密度/(g·cm ⁻³)	界限含水率(液限/塑限)	不均匀系数	曲率系数	级配情况	固化水泥质量分数/%
1	1	1.83	39.7/24.9	13.75	0.730	级配不良	0
	2	1.92	33.5/21.5	68.50	0.846	级配不良	6
	3	1.72	44.5/27.3	—	—	—	6
2	4	1.75	46.0/31.5	—	—	—	9
	5	1.78	49.2/31.7	—	—	—	12

表 2 固化渣土力学性能参数

试样	无侧限抗压强度/MPa			加州承载比	回弹模量/MPa	固化水泥质量分数/%
	7 d	14 d	28 d			
1	1.37	2.13	2.86	—	—	3.1
2	1.57	1.72	1.98	—	—	3.7
3	1.25	1.62	1.72	17.06	347	2.0
4	1.51	1.66	1.89	49.34	501	4.0
5	1.73	2.17	2.70	67.27	638	6.0



1—沥青面层 0.2 m; 2—基层 0.3 m;
3—底基层 0.3 m; 4—路基层 5 m。

图 4 路基几何模型分层示意

5 m, 设置坡度为 1.5; 考虑到对称性, 模型中路基顶面 10 m, 坡度 1:1.5, 高度为 5 m; 地基取长度为 40 m, 高度为 10 m 的矩形土体区域。

为准确模拟交通荷载下的路基沉降, 在模型底面边界施加竖向约束, 模型左侧对称面施加水平约束, 右侧地基部分设置水平约束。

荷载采用循环荷载, 设置轮胎接触压力为 180 kPa, 荷载周期 0.1 s, 振幅设置为轴载的 10%, 设置循环次数 20 000 次。荷载函数表达式为

$$f(t) = 180 + 18\sin(t - t_0) \tag{1}$$

式中: t 为荷载作用时间, s; t_0 为初始相位对应的时间偏移, s。

2.2 材料本构模型与参数

路基采用 Clay Plastic 模型(模拟软件内置修正剑桥模型)用于模拟其在屈服面以内的应变行为, 其屈服面方程为

$$\frac{1}{\beta^2} \left(\frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\tau}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \tag{2}$$

式中: p 为平均有效应力, kPa; τ 为广义剪应力, kPa; a 为前期固结压力对应的平均有效应力, kPa, 反映土体的固结历史, 是屈服面在 p 轴上的特征值; M 为临界状态应力比, 只与土体的内摩擦角相关, 无量纲; β 为屈服面形状参数, 控制椭圆的扁率、修正剑桥模型的硬化参数之一, 无量纲。

其中, 塑性体积模量对数(无量纲)表示土体单位应力变化对数值的增长值下塑性应变的增长值; 应力比(无量纲)为修正剑桥模型中偏应力 - 正应力空间的临界状态线斜率, 表示临界状态下切应

力随单位正应力的变化值; 初始屈服表面尺寸为初始状态下土体临界状态线与屈服面交点对应的正应力值, 可利用截距孔隙值($e - \ln p$ 空间中固结曲线在 $\ln p = 0$ 处土体的孔隙率值)计算; 饱和状态屈服表面尺寸为土体饱和时对应的屈服面尺寸, 表征土体饱和对其塑性行为的影响。

本文路基参考相似原状土固化土强度指标^[12-14], 采用 PO 42.5 水泥 12% + 粒化高炉矿渣 8% + 水玻璃的固化方案, 参数数值如表 3 所示, 沥青路面与地基土参数如表 4 所示。

3 盾构渣土路基长期受力特性

3.1 压应力与剪应力空间分布规律

长期交通荷载下路基压应力分布如图 5 所示。路基表面在作用点处应力值出现最大值, 达到 270 kPa, 接近路面处荷载值; 应力分布以荷载作用点为中心, 压应力向路基深部扩散; 同时, 压应力值随应力区扩散半径的增大而减小。路基深部在相邻作用点压应力扩散下, 两点中心较深部扩散区交汇, 形成 U 形应力分布区。

长期交通荷载下路基剪应力分布如图 6 所示, 路基内剪应力在路基基层底面至路基地基层顶面附近产生最大值, 最大处可达 84 kPa; 路基内剪应力主要分布在荷载作用点铅垂线的两侧, 应力区自剪应力最大处向路基周围扩散, 具有向路基坡脚处延伸的趋势。

3.2 路基不同结构层动应力响应特性

3.2.1 不同结构层压应力分布规律

路基基层与底基层压应力分布如图 7 所示。在路面基层内, 基层顶面作用点处直接受交通荷载作用, 具有最大的压应力值 284 kPa, 接近设置的交通荷载幅值。压应力沿铅垂方向迅速衰减, 作用点下基层底面处压应力迅速衰减至 141 kPa, 较顶面衰减 143 kPa, 衰减速率达 480 kPa/m; 水平方向上, 路基基层内应力分布以作用点为中心呈现中间大两边小的趋势, 且相邻作用点间应力

表 3 路基材料参数

体积模量对数		泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)	流动应力比	饱和状态 屈服尺寸	截距孔隙	应力比	初始 孔隙度
塑性	弹性							
0.001	0.000 4	0.25	2 400	1	1	1.5	1	0.2

表 4 沥青层及地基材料参数

材料	密度/(g·cm ⁻³)	杨氏模量/kPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
沥青面层	2.4	1.5×10 ⁶	0.3	—	—
地基土	1.7	7.0×10 ³	0.2	20	20

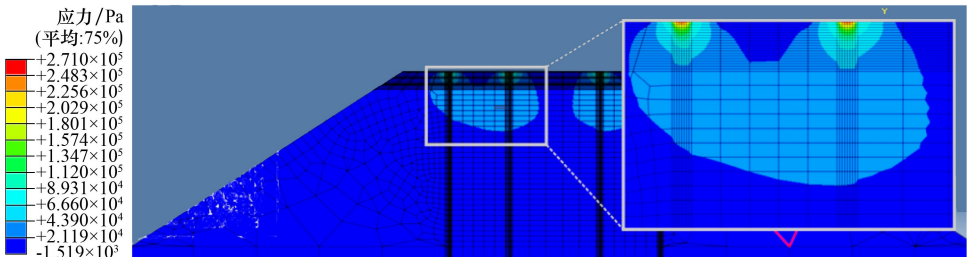


图 5 长期交通荷载下压应力分布云图

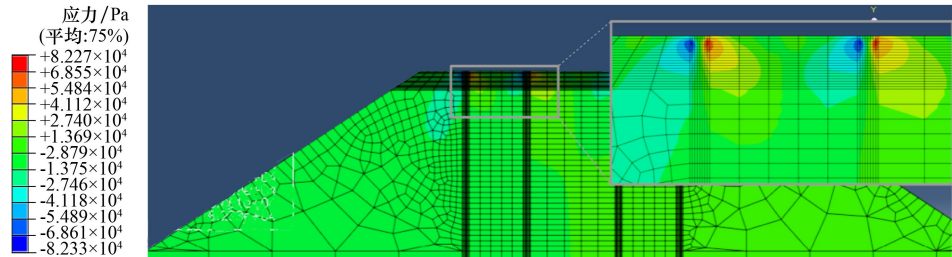


图 6 长期交通荷载下剪应力分布云图

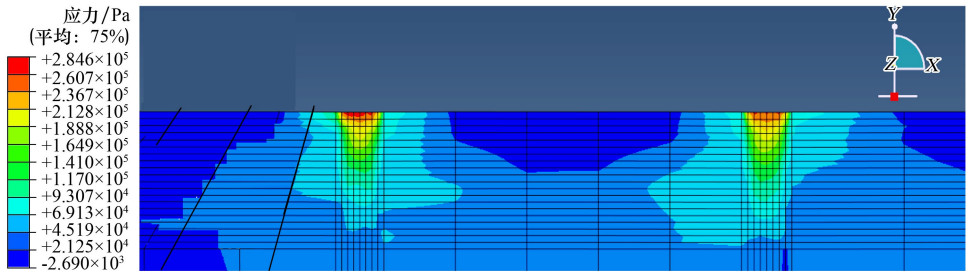


图 7 路基层与底基层压应力分布云图

区出现耦合现象。

路面底基层内，压应力沿铅垂方向衰减，底基层顶面传递自上层应力状态，具有最大压应力 141 kPa，底基层底面处压应力衰减至 35.6 kPa，较顶面衰减 105.4 kPa，衰减速率达 350 kPa/m；水平方向上，底基层内已产生联通的压应力分布区，水平分布规律与路基层相似。

路基层范围内(0.6 ~ 5.6 m 深度)，压应力沿深度缓慢衰减。路基层顶面与上层底基层底面应力状态相同，具有最大压应力 35.6 kPa，路基层底面处附加压应力则接近 0 kPa，衰减 35 kPa，衰减速率达 7 kPa/m。由于应力扩散效应，由荷载引起的压应力扩散区仅分布在路基浅层 2 ~ 3 m 深度内，如图 8、9 所示。

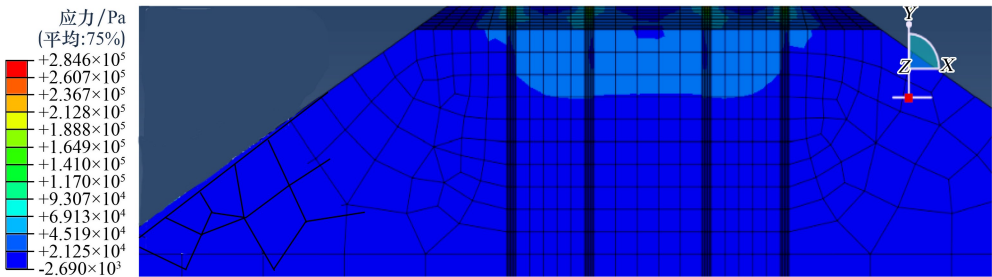


图 8 路基层压应力分布云图

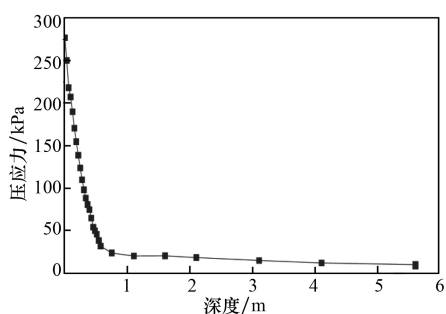


图 9 荷载作用点下压应力随深度变化曲线

3.2.2 不同结构层剪应力分布规律

路基层与底基层剪应力分布如图 10 所示。在路面基层内, 剪应力在荷载作用点以下 0.15 m 处产生最大值, 达到 65.9 kPa, 且各个剪应力最大值点分布于荷载作用区域两侧边缘; 基层顶面处产生剪应力 44.1 kPa, 底面处产生剪应力 55.0 kPa, 垂向剪应力分布呈现中间大、两侧小的规律。水平方向上, 剪应力自荷载作用区域边缘向两侧扩散, 在每个轮载区域呈现马鞍形分布规律。

在路面底基层内, 剪应力沿铅垂线衰减, 在底基层顶面具有最大值 55.0 kPa, 底面处产生最小值 33.2 kPa, 衰减 21.8 kPa, 衰减速率达 73 kPa/m。水平分布上与路面基层具有相似规律。

路基结构层内(0.6 ~ 5.6 m 深度), 剪应力沿深度缓慢衰减, 在路基顶面具有最大值 33.2 kPa, 底面趋于 0 kPa, 衰减速率达 6.6 kPa/m。水平分

布上, 路基内剪应力分布与路面基层相似。在整体空间分布上, 路基层内剪应力自最大值点出发, 向路基坡脚处及路基荷载区域间延伸; 由于空间分布及应力间相互影响, 在路基荷载区域间剪应力区延伸较浅, 扩展范围仅在路基浅部 0.5 m 左右范围内, 在靠近边坡区域, 剪应力扩展范围较深, 最远竖向延伸至路基深度 3 m 处, 水平延伸至荷载区域以外 2 m 处, 如图 11、12 所示。

4 盾构渣土路基长期变形特性

4.1 路基各结构层动应变响应特性

4.1.1 不同结构层长期沉降规律

路基的动应变由弹性应变与塑性应变组成, 其中塑性应变是造成路基永久沉降的因素, 会随着加载时间与加载次数累积。为研究不同结构层长期沉降规律, 在路面基层(0.15 m 深度)、路面底基层(0.45 m 深度)、路基浅部(2.3 m 深度)、路基深部(3.8 m 深度)各设置一监测点。

不同结构层随荷载次数增加的沉降变化曲线如图 13 所示。在交通荷载下, 路基不同结构层随荷载循环次数增加具有相同的沉降规律。其沉降值均随荷载次数的增加而增加。随着荷载循环次数增加, 在荷载循环增加初期, 路基沉降基本呈线性增加, 循环次数到达一定值后, 路基沉降速率大幅衰

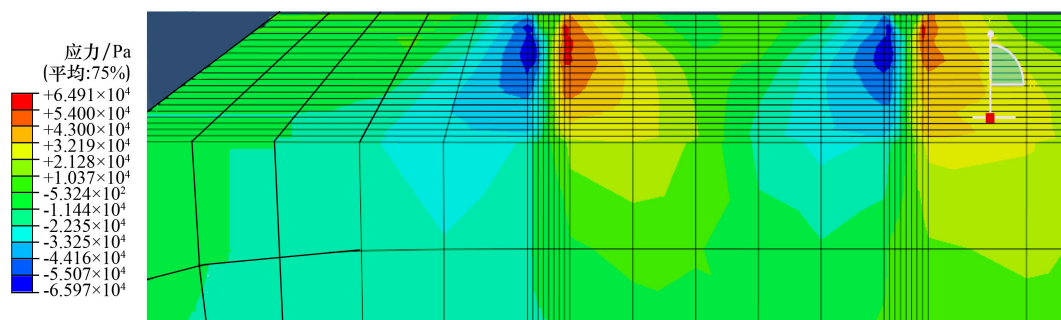


图 10 路基层与底基层剪应力分布云图

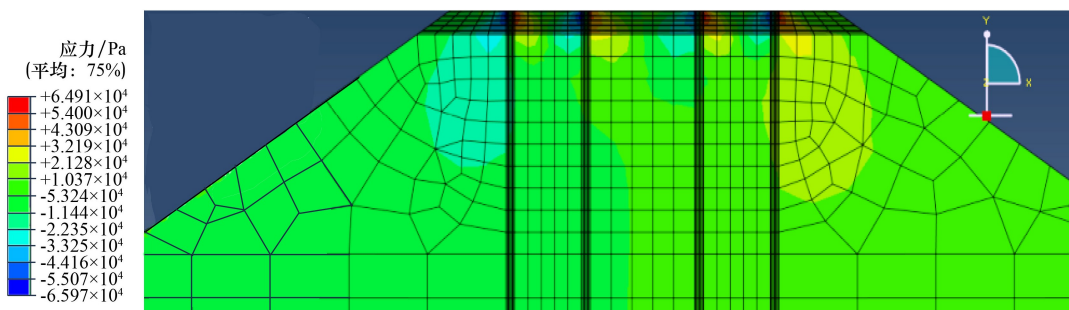


图 11 路基层剪应力分布云图

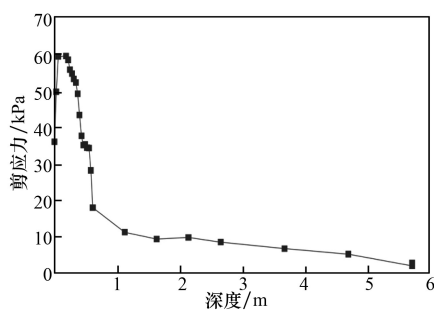
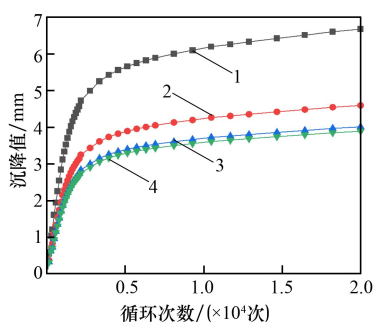


图 12 荷载作用点下剪应力随深度变化曲线



1—路基基层；2—路基底基层；
3—路基浅部；4—路基深部。

图 13 不同结构层长期沉降规律

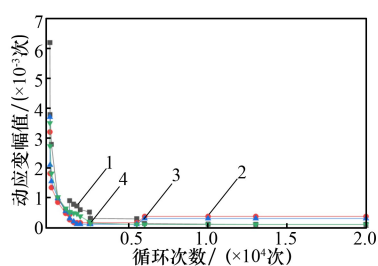
减,进入缓慢稳定的安定期。循环次数达 20 000 次时,路面基层顶面最大沉降值为 6.67 mm,底基层顶面沉降值为 4.59 mm,路基浅部沉降值 4.01 mm,路基深部沉降值 3.59 mm。

循环荷载初期阶段为路基快速沉降期,此时路基土中孔隙率较大,竖向压力对路基沉降增长占主导地位,路基土体中孔隙在垂向荷载压力下逐渐压密。荷载循环次数到达一定值后,土体密实度较高,此时垂向交通荷载的压实作用难以产生较大的沉降,路基土垂向应变增量逐渐趋于稳定,路基沉降增长进入安定阶段。如果应力水平较高,循环荷载可能会使路基产生疲劳效应,路基土体中出现微小的结构缺陷,使压密土体得以进一步沉降,甚至引起路基破坏。

4.1.2 动应变幅值变化规律

不同结构层动应变幅值变化曲线如图 14 所示。各结构层的动应变幅值均随荷载作用次数增大而迅速衰减,并逐渐趋于较低的稳定值。

由于直接受动荷载作用,基层变化幅值最明显,初始动应变幅值为 6.25×10^{-3} ,经 100 次循环后迅速衰减至 2.79×10^{-3} ,1 000 次循环后缓慢衰减至 0.55×10^{-3} ;后动应力幅值缓慢降低,当



1—路基基层；2—路基底基层；
3—路基浅部；4—路基深部。

图 14 不同结构层动应力幅值随荷载次数变化

循环次数超过 2 500 时,其幅值几乎不变化,保持在 0.1×10^{-3} 左右。

底基层处,初始动应变幅值为 3.21×10^{-3} ,经 100 次循环后衰减至 1.34×10^{-3} ,1 000 次循环后缓慢衰减至 0.47×10^{-3} ;循环次数达到 2 500 时,应力波反射影响效果减弱,基层动应力幅值约为 0.37×10^{-3} ,并在后续保持不变。

路基浅部,初始动应变幅值为 3.7×10^{-3} ,经 100 次循环后迅速衰减至 1.55×10^{-3} ,1 000 次循环后缓慢衰减至 0.55×10^{-3} ;循环次数达到 2 500 时,基层动应力幅值约为 0.3×10^{-3} ,并趋于稳定。

路基深部,初始动应变幅值为 3.50×10^{-3} ,经 100 次循环后衰减至 1.81×10^{-3} ,1 000 次循环后缓慢衰减至 0.63×10^{-3} ,经 2 500 次循环后衰减至 0.1 并保持稳定。

由此可见,各个结构层沉降值随深度增加而减小,动应变幅值随深度增加而相应减小,且路基作用范围内深度越深,应力波反射效果越弱。

在循环荷载作用下,不同路基结构层整体呈现相似的动应变幅值衰减规律,在荷载作用初期,路基动应变幅值由较高值迅速衰减,在荷载次数超过一定值后,衰减速率迅速下降,直至稳定。

路基各结构层在荷载循环初期,动应变幅值具有较大的初值。经过一定循环后,路基密实度增加,土体阻尼值逐渐增大,动应变幅值随之迅速衰减,在土体接近最大密实度时接近于零。

4.2 路基坡脚水平位移随荷载作用次数变化规律

路基坡脚处水平永久位移随荷载作用次数变化曲线如图 15 所示。路基坡脚处在前 2 000 次循环内永久水平位移急剧增加,从初始的 0 mm 增长至 0.3 mm;在 2 000 次循环后,坡脚处永久水平

位移增长速率迅速降低, 增长至 6 000 次循环时永久位移增长至 0.32 mm, 增长 0.02 mm, 此后坡脚永久水平位移趋于稳定。

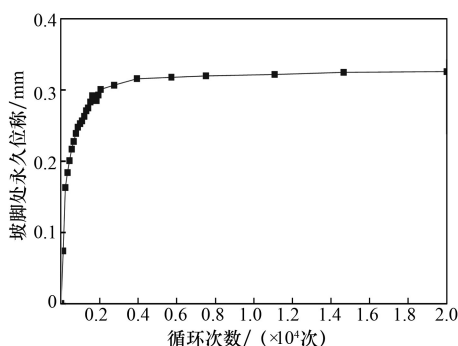


图 15 坡脚永久水平位移随荷载次数变化

4.3 路基塑性区随交通荷载作用次数变化规律

循环次数 100、1 000、10 000、20 000 次路基内塑性区分布如图 16 所示。与剪应力分布云图对比可知, 塑性区最初在剪应力最大处出现, 并迅速向路基表面与路基深部扩展。循环次数小于 1 000 时, 路基进入塑性变形增长快速发展期, 塑性应变增长较快。之后路基塑性应变逐渐进入安定状态, 塑性区范围几乎不随循环次数增长。

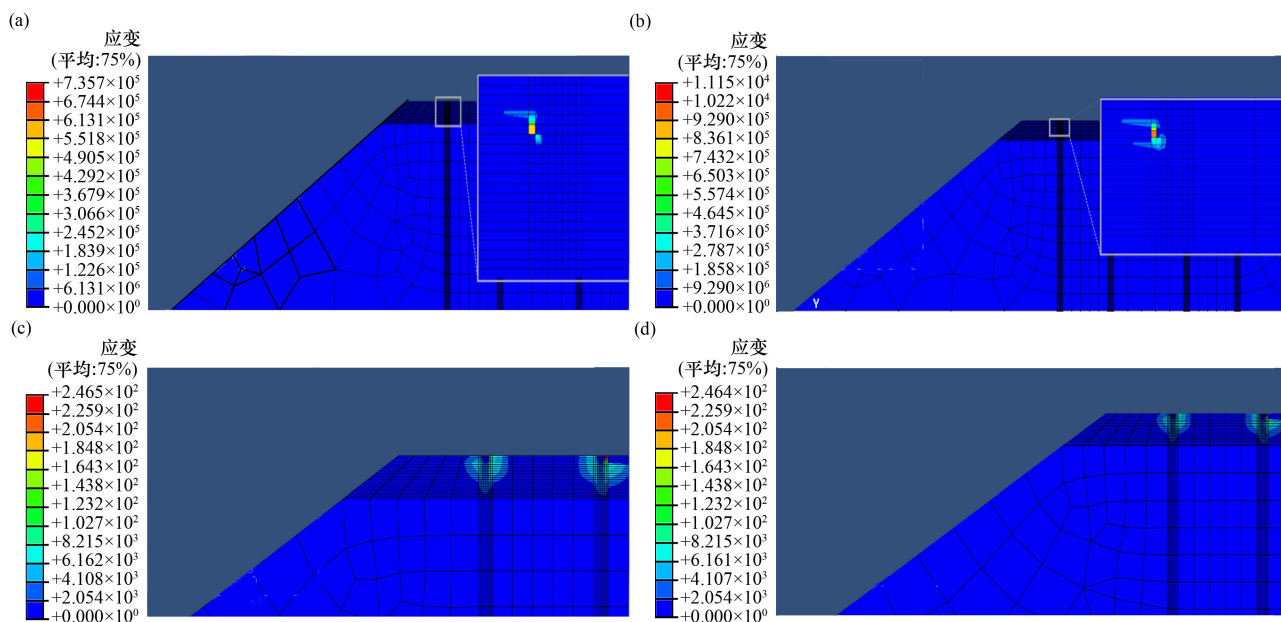
在交通荷载作用下, 路基底基层中具有最大的剪应力值分布。在累积循环荷载作用下, 这一层面的剪应力值最先突破路基材料的屈服值, 最先产生塑性变形区。随着交通荷载的持续作用,

最大剪应力值点塑性应变值逐步增加, 并以其为中心, 其辐射区域内相继出现塑性应变, 且具有向边坡坡脚方向延伸的趋势。

5 结论与建议

(1) 交通荷载产生的压应力最大值出现在路面基层荷载接触面处, 其应力扩散区以最大值点为中心向路基深部和水平方向延伸, 相邻荷载接触面应力扩散区耦合为 U 型面; 剪应力最大值出现在路面基层荷载区域下 0.15 m 深度。随着深度增大, 附加应力逐渐减小, 受界面剪切作用影响, 其应力扩散区以最大值点为中心向路基深部与水平方向延伸。

(2) 路基沉降值随荷载循环次数增加而增大, 且不同结构层的沉降速率均出现随循环次数增加而降低的趋势; 循环次数达 20 000 次时, 路面基层沉降值达 6.67 mm, 路面底基层沉降值达 4.59 mm, 路基浅部沉降值达 4.01 mm, 路基深部沉降值达 3.59 mm。本研究对应的应力水平下, 路基土塑性应变增量逐渐减小, 路基土进入安定稳定性状态, 不同结构层动应变幅值均随循环次数增加快速下降并逐渐趋于稳定。但是, 对于更高应力水平的循环荷载作用, 路基土的安定性状态值得进一步研究。



荷载作用次数/次: (a) 100; (b) 1 000; (c) 10 000; (d) 20 000

图 16 路基塑性区随荷载次数扩展

(3) 坡脚处路基水平位移随循环荷载次数增加而增大, 20 000 次循环时最大水平位移达 0.34 mm; 坡角脚处水平位移的增长速率由初始值迅速衰减, 后进入安定状态时增长速率逐渐趋于 0。

(4) 固化土路基内部塑性区首先在剪应力最大点出现, 后续向荷载区域边界线两侧延伸, 当循环次数超过 1 000 次时, 固化土路基进入安定状态, 其塑性区几乎不再扩展。

(5) 本文以数值模拟为手段研究黏性土地层盾构渣土在长期交通荷载下的受力特性与变形规律, 得出盾构渣土用于路基填料长期稳定性。由于目前尚无盾构渣土用于路基填料的长期稳定性的试验研究案例, 因此本文模拟结果尚需后期进一步开展现场试验验证, 明确盾构渣土用于路基填料时长期交通荷载作用下的稳定性。

参考文献:

- [1] 任昕彤. 建筑垃圾源头减量城市规划策略研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
- [2] 李存健, 刘伟. 长江超长盾构隧道渣土资源化利用研究[J]. 交通科技, 2025(3):90-94.
- [3] 刘顿, 李嘉芳, 陈雷, 等. 盾构渣土在道路工程中资源化利用与性能分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增刊1):175-182.
- [4] 陈蕾. 复杂环境下固化污染土工程再生利用适用性及耐久性研究[R]. 苏州:苏州大学, 2023.
- [5] 陈观连. 地铁盾构渣土合理化处置探讨[J]. 中外建筑, 2019(1):206-207.
- [6] WANG J Z, FAN Y, XIONG X X, et al. Stabilization of shield muck treated with calcium carbide slag-fly ash [J]. Buildings, 2023, 13(7):1707.
- [7] GUPTA D, KUMAR A. Strength characterization of cement stabilized and fiber reinforced clay-pond ash mixes [J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2016, 2(4):32-45.
- [8] 张华. 富水地层盾构渣土用作路基填料的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(1):75-78;128.
- [9] 邹敏, 尹平保, 贺伟. 交通荷载下镍铁渣-黏土路基动力响应特性分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(06):71-75;80.
- [10] 陈笑寒. 交通荷载作用下煤矸石路基变形响应特性分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(4):9-12.
- [11] 王仕传, 凌建明. 交通荷载作用下加筋土路基残余变形减小的机理分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1):115-120.
- [12] 杨涛, 李幸孺, 刘帅磊, 等. 固化渣土材料力学性能试验与微观机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(3):848-856;867.
- [13] 龙蛟. 盾构渣土复合固化剂研制及固化土体力学特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2021.
- [14] 王宇杰. 流态固化土水泥基复合固化剂研究与应用[D]. 太原:太原理工大学, 2023.

《工程建设》期刊投稿系统启用通告

为适应期刊发展需要, 提升投稿及稿件处理效率, 本刊自 2026 年 1 月 1 日起正式启用网上采编系统。即日起, 所有来稿请通过以下官方网站投稿与查询:

采编系统网址: <https://gcjs.cie-cn.com>。

投稿流程说明:

- 1) 首次使用请先完成作者注册;
- 2) 注册成功后以作者身份登录;
- 3) 按系统页面提示完成投稿及相关操作。

请广大作者通过上述系统进行投稿、查稿等事宜, 感谢您的支持与配合!