



泥浆固化土路基在循环荷载作用下的累积沉降特性 模型试验与数值模拟

陈 锋,俞 峰,陈 鑫,姚楚仪

(浙江理工大学, a. 基础结构技术研究所; b. 全省城市基础设施绿色与数智更新重点实验室, 杭州 310018)

摘 要: 为解决废弃泥浆资源化利用过程中泥浆固化土路基的沉降问题,采用模型试验与三有限元分析相结合的方法,分析泥浆固化土与粉质黏土路基在静载及循环荷载作用下的变形响应、应力扩散规律及累积塑性沉降演化规律。结果表明:泥浆固化土在静、动加载下均表现出较高的刚度与较低的变形水平;与粉质黏土相比,泥浆固化土的静载瞬时沉降降低约45%,循环荷载下累积塑性沉降减少约37%~39%。泥浆固化土路基呈现“表层集中、快速衰减”的应力扩散规律,可有效减弱深部土体应力集中,降低不均匀沉降风险。循环荷载作用下,泥浆固化土路基沉降演化呈阶段性和非线性特征,累积变形增长速率持续低于粉质黏土;经模型试验验证的三有限元模型能够较好再现沉降发展趋势,可用于路基结构与荷载参数的扩展分析。参数敏感性分析表明,泥浆固化土路基累积塑性沉降的主导因素为路基高度与荷载幅值,边坡坡率与荷载频率影响次之。研究结果可为泥浆固化土路基的结构设计与沉降控制提供试验和数值依据。

关键词: 泥浆固化土;路基工程;交通循环荷载;模型试验;数值模拟

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)09-0690-13

引文格式: 陈锋,俞峰,陈鑫,等. 泥浆固化土路基在循环荷载作用下的累积沉降特性模型试验与数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(5):690-702.

Reference Format: CHEN Feng, YU Feng, CHEN Xin, et al. Model test and numerical simulation on cumulative settlement characteristics of slurry-solidified soil subgrade under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026,55(5):690-702.

Model test and numerical simulation on cumulative settlement characteristics of slurry-solidified soil subgrade under cyclic loading

CHEN Feng, YU Feng, CHEN Xin, YAO Chuyi

(a. Institute of Foundation and Structure Technologies; b. Zhejiang Key Laboratory of Green, Digital and Intelligent (GDI) Renovation for Urban Infrastructures, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To address the settlement control problem of slurry-solidified soil subgrade in the resource recycling process of waste engineering mud, this study analyzed the deformation response, stress diffusion law, and evolution law of cumulative plastic settlement of both slurry-solidified soil and silty clay subgrades under static and traffic cyclic loading, using a combination of model tests and three-dimensional finite element analysis. The results show that the slurry-solidified soil exhibited higher stiffness and lower deformation level under both static and dynamic loading. Compared with silty clay, the instantaneous

收稿日期: 2025-12-04 网络出版日期: 2026-03-30

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C03142);浙江省建设科研项目(2024K133)

作者简介: 陈 锋(1998—),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事固废资源化利用方面的研究。

通信作者: 俞 峰, E-mail: pokfulam@zstu.edu.cn

settlement of slurry-solidified soil under static loading was reduced by approximately 45%, and the cumulative plastic settlement under traffic cyclic loading was decreased by approximately 37% to 39%. The slurry-solidified soil subgrade presented a "surface-concentrated and rapidly attenuated" stress diffusion law, which could effectively mitigate the stress concentration in deep soil and reduce the risk of differential settlement. Under cyclic loading, the settlement evolution of the slurry-solidified soil subgrade showed staged and non-linear characteristics, and the growth rate of cumulative deformation was consistently lower than that of the silty clay subgrade. The three-dimensional finite element model validated by the model test could well reproduce the settlement development trend, and could be used for the extended analysis of subgrade structural parameters and loading parameters. The parameter sensitivity analysis revealed that the dominant influencing factors for the cumulative plastic settlement of the slurry-solidified soil subgrade were subgrade height and load amplitude, followed by slope gradient and loading frequency with weaker influences. The research findings can provide experimental and numerical reference for the structural design and settlement control of slurry-solidified soil subgrades.

Key words: slurry-solidified soil; subgrade engineering; cyclic traffic loading; model test; numerical simulation

0 引 言

随着中国城镇化和基础设施建设的快速推进,轨道交通、地下空间及深基坑工程规模持续扩大,由此产生的盾构渣土和钻孔灌注桩泥浆数量急剧上升,部分城市年产量已达数百万立方米^[1-2]。若此类固废缺乏有效处置与资源化利用,不仅占用大量土地资源,还会加剧泥浆堆场压力、水体污染及生态破坏等问题,对城市可持续发展造成严重影响^[3]。工程泥浆具有含水率高、颗粒细、液限高、天然强度低等典型软黏土特征,无法直接用于道路工程填筑。如何将其从待消纳的废弃物转化为可工程化利用的路基材料,已成为岩土与道路工程领域亟须突破的重要方向^[4]。

在“无废城市”建设与“双碳”目标背景下,固化稳定化技术已成为实现工程泥浆资源化利用的重要途径。针对高含水率工程泥浆的工程适用性问题,已有学者从固化材料体系与材料性能演化规律等方面开展了大量研究。Deng 等^[5]以矿渣、钢渣及脱硫石膏等工业固废为胶凝材料,对高含水废弃泥浆进行固化处理,并通过强度与渗透性能试验评价其工程性能,发现该类固废基复合胶凝材料能够有效提升泥浆固化土的结构稳定性。李洪珍等^[6]在桩基废弃泥浆中掺入复合固化剂,显著改善了泥浆固化土的强度、刚度及体积稳定性,使该材料具备作为路基填料再利用的基本条件。Jiang 等^[7]通过无侧限抗压试验与 SEM 微观分析,探究工业废弃硅灰掺合料对水泥固化软土力学性能与微观结构的影响,发现适量硅灰能够促进水泥水化、生成更多 C—S—H 凝胶,进而通过孔隙填充效应实现固化土强度提升。

Wang 等^[8]通过 SEM、XRD 与 MIP 等微观测试手段,阐明了 C—S—H/C—A—H 凝胶生成、孔隙结构演化及颗粒重构等内在过程,为探索固化泥浆强度的形成机制提供了微观依据。吕絮等^[9]还针对泥浆固化土的抗冻融性能展开研究,证实了其在合理配比条件下替代天然土用于路基工程的可行性。总体而言,现有研究在工程泥浆的材料改性方法、固化土静力学性能评价两个方面形成了较为丰富的研究成果,但现有成果多聚焦于材料尺度的室内试验,与道路路基实际服役工况的系统衔接仍显不足。特别是针对交通循环荷载作用下泥浆固化土路基的动力响应特性、应力扩散规律、长期累积塑性沉降演化机制等问题,目前仍缺乏系统性研究,而这些问题正是制约泥浆固化土在路基工程中规模化应用的关键瓶颈。

道路路基在全服役周期内持续承受车辆循环荷载,其变形与破坏模式并非单一受控于土体静力承载强度,而是由循环荷载引起的应力重分布、动应力幅值变化及累积塑性变形发展等多因素共同主导。围绕交通荷载作用下的路基动力响应问题,已有学者进行了探索。耿大新等^[10]通过小比例路基模型试验,分析了加载幅值与频率对路基内部动应力分布的影响;Jiang 等^[11]采用有限元方法研究了交通荷载作用下路基沉降与裂缝自上而下扩展的演化过程;Li 等^[12]通过室内模型试验,对比分析了单阶段与多阶段循环加载条件下铁路路基的土压力响应与沉降特征。针对不同类型路基,高福洲等^[13]、刘萌成等^[14]和 Wu 等^[15]分别针对红层土石混填路基、钙质砂路基及软土路基,采用模型试验或数值模拟方法分析了交通荷载条件下的动力响应规律。上述研究对象主要集中于天然土体或常规填筑材料。与之

相比,由高含水软黏土经固化形成的泥浆固化土在宏观结构特征、颗粒胶结方式及孔隙形态等方面均存在显著差异,其在交通循环荷载作用下的应力扩散规律、沉降演化模式及疲劳损伤特性,可能与传统路基填料存在显著区别。目前,针对泥浆固化土路基,系统考虑荷载幅值、循环次数、加载频率、固化配比及初始含水率等因素对路基动力响应与长期沉降行为影响的研究仍较为匮乏。

针对上述不足,本文以泥浆固化土路基与杭州地区粉质黏土路基为研究对象,探究其在交通循环荷载下的沉降演化与应力扩散规律。首先,通过模型试验静载阶段,获取两类路基的瞬时沉降规律与等效变形模量特性;其次,通过模型试验循环荷载阶段,获取固定循环次数下不同荷载幅值工况中两类路基的累积塑性沉降规律与应力扩散特征;再次,基于试验结果建立并验证三维有限元模型;最后,利用该模型开展几何结构参数与荷载参数的扩展分析,并结合归一化处理与参数敏感性分析方法量化各因素对累积塑性沉降的影响程度。研究结果可为揭示泥浆固化土路基循环荷载作用下的变形规律、明确

其与天然填料路基的性能差异提供理论支撑,同时为工程泥浆资源化利用与路基结构设计提供试验和数值依据。

1 模型试验方案与试验结果

1.1 试验材料与方案

1.1.1 试验材料

试验所用泥浆固化土取自浙江省台州市某工程现场废弃泥浆,经固化剂处理后制备。所用固化剂为一种环保型复合材料,主要由矿粉、磷石膏、硅灰、硅酸钠及水泥组成。制备过程中,按 20% 的掺量将固化剂加入废弃泥浆,充分搅拌 3 min,混合均匀后立即浇筑至模型箱内成型。该掺量在前期试验研究及相关文献常用掺量范围的基础上确定,能够在满足强度与变形控制要求的前提下提升材料利用效率^[16]。地基土选用杭州市典型土层中的粉质黏土。两类材料的基本物理力学参数见表 1,表中参数均由室内土工试验与力学试验实测获取;本文参考长三角地区粉质黏土工程研究中的典型参数范围,取粉质黏土泊松比为 0.25^[17-18]。

表 1 试验材料力学参数

材料	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
泥浆固化土(养护 7 d)	18.5	0.30	60	28.7	79.0
粉质黏土	15.8	0.25	6	17.0	3.6

试验共设置两组对比试验,试验地基均采用粉质黏土,路基层则分别采用同类粉质黏土(Silty Clay,后文简称 SC)和养护 7 d 的泥浆固化土(Slurry-solidified Soil,后文简称 SS)。

1.1.2 试验方案

模型试验各物理量相似常数见表 2。综合考虑试验场地条件与尺寸效应影响,选取几何相似比 $C_l=1:5$ 。模型材料与原型一致,故取容重相似比 C_γ 、弹性模量相似比 C_E 、泊松比相似比 C_μ 均为 1。由量纲分析推导可得:应变相似比 $C_\epsilon=1$,位移相似比 $C_u=1:5$,应力相似比 $C_\sigma=1$,集中力相似比 $C_F=C_\sigma\times C_l^2=1:25$ 。

表 2 模型试验各物理量相似常数

物理量	变量	单位	量纲	相似关系式	相似常数
几何尺寸	l	m	L		$C_l=1:5$
容重	γ	kN/m ³	FL ⁻³		$C_\gamma=1$
弹性模量	E	MPa	FL ⁻²		$C_E=1$
泊松比	μ				$C_\mu=1$
应变	ϵ				$C_\epsilon=1$
位移	u	m	L	$C_u=C_l$	$C_u=1:5$
应力	σ	MPa	FL ⁻²	$C_\sigma=C_E\times C_\epsilon$	$C_\sigma=1:1$
集中力	F	kN	F	$C_F=C_\sigma\times C_l^2$	$C_F=1:25$

模型箱采用钢-透明亚克力板组合结构(图 1),净空尺寸为 1.50 m×0.50 m×1.30 m;顶部设置可移动反力架;加载系统由伺服电缸驱动,最大出力为 5.0 kN。本文采用的道路结构模型参考了浙江省常见软土地质条件及工程实践,重要参数见表 3。该地区广泛分布粉质黏土,工程中常规采用的沥青混凝土面层-水泥稳定碎石基层形式,是《高等级公路沥青路面设计规范》(DB33/T 896—2024)给出的典型路面结构。为简化模型并聚焦分析路基与地基的响应特征,本模型未设置面层与基层,并依据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)采用 40°荷载扩散角等效换算荷载。交通荷载的多轴与移动特性通过集中荷载结合扩散角的等效方式予以考虑,重点模拟车辆荷载对路基产生的控制性竖向应力效应。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),原型工程设计累计当量轴次取 1.0×10^6 次。参考无机结合料稳定类材料疲劳特性,取疲劳指数 $m=10$,应力缩放系数 $k=1.5$,由疲劳寿命相似关系 $N_{\text{model}}=N_{\text{prototype}}\times k^{-m}$,计算得出模型加载次数为 13168 次。该处理方式符合路基长期变形受循环次

数与应力幅值控制的力学逻辑,已被广泛应用于路基动力模型试验研究中。需要说明的是,本文未对循环荷载作用过程采用严格的时间相似比进行缩放,而是保持加载频率不变,利用等效循环次数表征原型长期服役历程中的时间效应。通过循环次数的相似换算,可在模型尺度下合理再现原型在长期交通荷载作用下的累积塑性沉降与应力演化特征。对应模型应力为 10.0 N/cm^2 ,约为材料屈服强度的 19.8% 。在该应力水平下,材料应力-应变关系近似线性,未出现明显不可逆变形特征,表明材料处于弹性工作阶段。对照组粉质黏土路基亦采用相同加载次数。

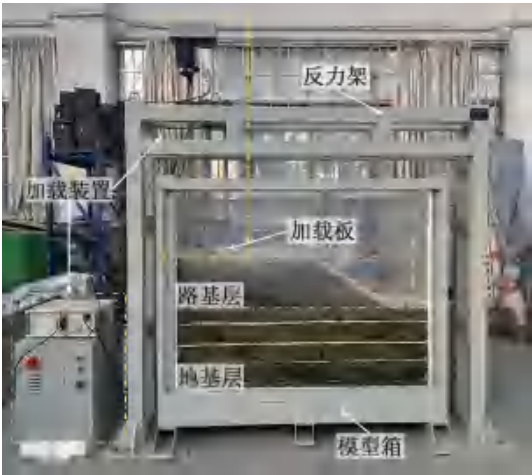


图 1 模型试验路基结构示意图

表 3 本文采用的道路结构模型重要参数

结构层	类型	原型厚度/ cm	模型厚度 (1:5)/cm
面层	密集配沥青混合料	15	3
基层	水稳碎石	60	12
路基	泥浆固化土/粉质黏土	150	30
地基	粉质黏土	250	50

按标准轴载 100 kN 并结合 C_l 与 C_F ,计算得到模型加载力为 4.0 kN 。基于荷载逐层扩散计算,确定加载板面积为 608.2 cm^2 ,对应方形边长约 25 cm 。模型与原型接触压力误差小于 3% ,满足试验精度要求,不同轴载对应模型荷载见表 4。

表 4 不同轴载对应模型的荷载

轴载/kN	模型力/kN	原型压力/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	模型压力/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)
60	2.4	3.95	3.84
80	3.2	5.26	5.12
100	4.0	6.58	6.40
120	4.8	7.89	7.68

在路基深度 $1、3、5、10、15\text{ cm}$ 和 25 cm 处埋设 6 层土压力盒(图 2),用于监测循环荷载作用下的应力扩散规律;路基表面竖向位移由加载系统内置位移传感器采集,并以首轮加载结束状态为基准计算累积塑性沉降。

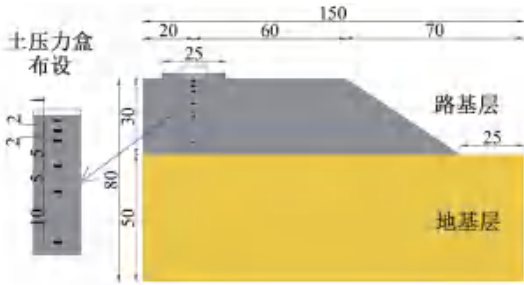


图 2 试验模型及土压力盒布置图(单位:cm)

地基采用粉质黏土分 3 层压实,总厚度 50 cm ,压实度不小于 95% ,底部铺设 2 cm 厚中粗砂垫层。地基表面立模并预设 2% 横坡后,将泥浆固化土分两层浇筑,每层厚度 15 cm ,采用插入式振捣棒振捣密实并平整。对照组粉质黏土路基分 3 层填筑,每层厚度 10 cm ,压实标准与地基一致。

试验前完成传感器标定,施加 0.1 kN 预压以消除接触间隙,同时将此状态设定为整个试验过程中测量沉降的位移基准。静载试验阶段以 0.8 kN 为级差加载至 2.4 kN ,每级持荷至沉降稳定后,卸载至 0.1 kN 的基准状态,以测量该级荷载产生的塑性沉降(不可恢复位移)与弹性沉降(可恢复位移)。循环荷载试验阶段依次施加 $2.4、3.2、4.0\text{ kN}$ 和 4.8 kN 的 4 Hz 正弦波荷载,加载频率参考了典型车辆荷载作用下路基振动特性、相关规范建议的频率范围以及既有模型试验研究的常用取值^[19-20]。每级循环荷载开始前及结束后,均将荷载卸回至 0.1 kN 的基准状态,用以精确测量自试验开始以来的累积塑性沉降。每级加载至 13168 次或实测累积塑性沉降达 3 mm 时终止。当出现沉降突变、贯通裂缝或系统异常时停止试验。

1.2 试验结果与对比分析

1.2.1 静载作用下瞬时沉降特性对比

为深入剖析变形机制,本文引入等效变形模量指标。两种路基瞬时沉降与静载关系散点图如图 3 所示。从图 3 中可以看出:在低荷载水平($0.8、1.6\text{ kN}$)下,SC 路基与 SS 路基的瞬时沉降量差异较小,对应的等效变形模量接近,表明两类材料在低应力条件下均处于结构响应初期阶段;随着荷载水平提高,SC 路基的沉降增速明显加快,而 SS 路基的沉降增长幅度相对受限,反映出两者等效变形模量随荷载演化呈现出不同的响应特征。

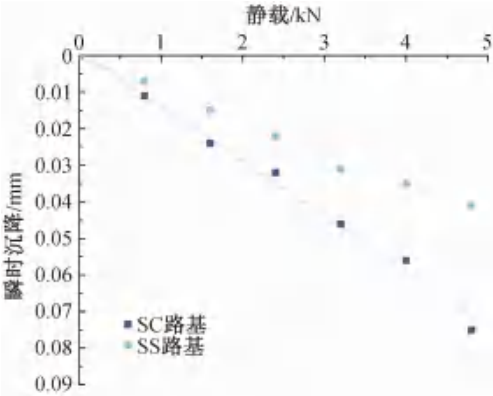


图 3 瞬时沉降与静载关系散点图

在 4.8 kN 荷载下, SC 路基的瞬时沉降为 0.075 mm, 而 SS 路基仅为 0.041 mm, 后者较前者降低约 45%; 当荷载从 1.6 kN 提升至 4.8 kN, SC 路基沉降增幅达 213%, 而 SS 路基仅为 173%。上述结果表明: SC 路基的等效变形模量随荷载增加表现出明显下降趋势, 材料刚度对荷载水平具有高敏感度; 相比之下, SS 路基在高荷载条件下仍能保持相对较高且稳定的等效变形模量, 其抗压变形能力更强。

该模量差异本质上是由两类材料内部结构的承载机制决定的: a) SC 路基主要依赖颗粒接触与孔隙

排水过程承担外荷载。随着应力水平升高, 孔隙压缩伴随颗粒重排, 材料刚度随之降低; b) SS 路基中胶结产物不仅填充了孔隙, 更构筑了连续的承载骨架。该骨架能够有效分担外部应力, 延缓模量衰减及快速压缩阶段的出现, 使其表现出更高的线性抗压能力。

进一步分析可见, SS 路基的静载-瞬时沉降曲线整体斜率较小, 且在荷载超过 3.2 kN 后沉降增长明显趋缓, 表明其等效变形模量在高荷载区间内保持相对稳定, 材料响应逐步由“压缩主导”向“结构控制主导”转变。相比之下, SC 路基在相同荷载水平下已接近结构调整充分发展的阶段, 其等效模量显著降低, 表现出更强的非线性压缩特征。

综上所述, SS 路基在静载作用下表现出较小沉降, 并非单纯取决于荷载量值, 更源于其较高的等效变形模量及较低的荷载敏感度。胶结增强、孔隙压缩受限及骨架稳定性提升的共同作用, 使 SS 路基形成较高的变形模量, 表现出更优静载变形控制能力。

1. 2. 2 循环荷载下累积塑性沉降特性对比

在本文试验条件下, 路基变形以塑性变形为主, 本文未对弹性与塑性变形进行单独区分。图 4 分别

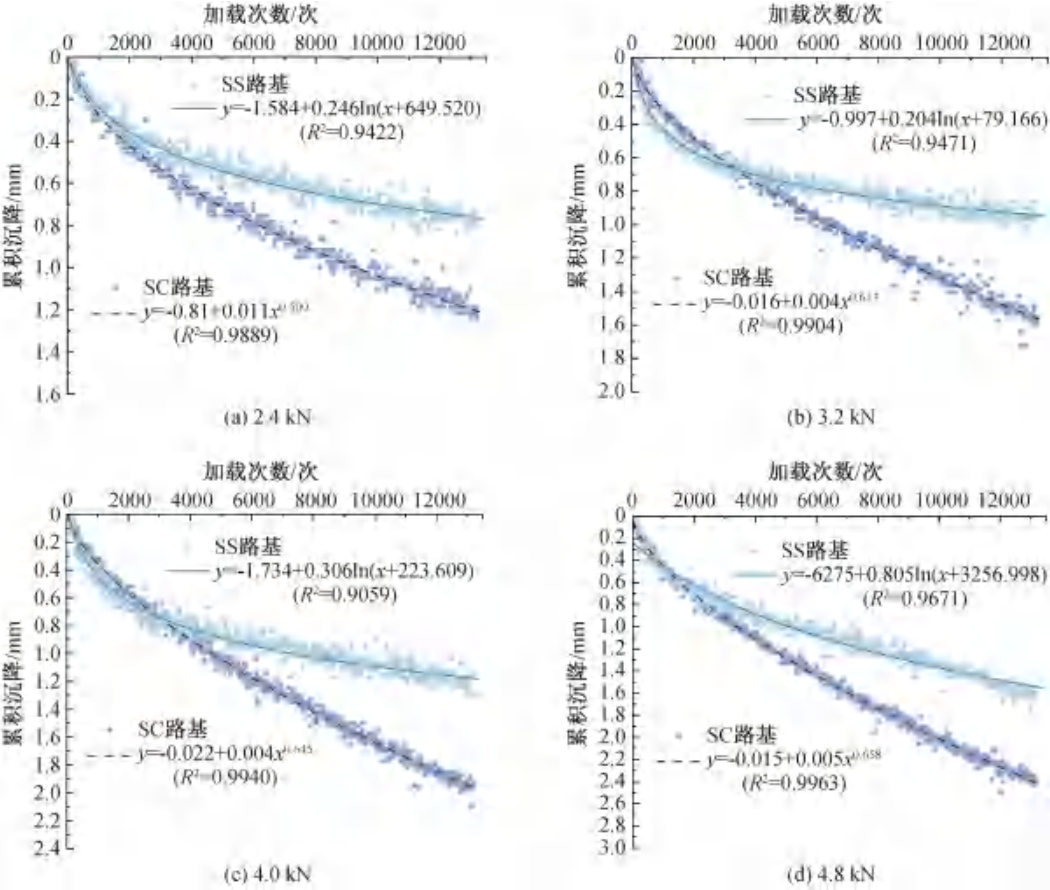


图 4 累积塑性沉降与加载次数关系散点图

展示了两种路基在 2.4、3.2、4.0 kN 和 4.8 kN 等 4 级荷载下,经 13168 次循环加载后的累积塑性沉降演变过程。总体来看,两类路基的沉降均随循环次数增加而持续发展,但其增长速率与演化形态存在明显差异。SC 路基沉降在整个加载阶段内持续增长,虽增长速率逐渐降低,但在本文循环次数范围内尚未出现明显收敛趋势;而 SS 路基在加载初期沉降增长较快,随后增长速率迅速减缓,沉降曲线逐步趋于平缓,呈现出分阶段收敛的特征。这表明两类材料在循环荷载作用下的变形发展模式存在本质差异。

为定量表征循环荷载作用下沉降演化规律,本文基于试验数据,采用 Origin 软件内置的非线性最小二乘拟合方法,对沉降-循环次数关系进行函数形式识别。拟合结果显示,SC 路基沉降发展规律可采用幂函数形式($y=a+b \cdot x^c$)描述,而 SS 路基沉降曲线更适宜采用对数函数形式($y=a+b \cdot \ln(x+c)$)表征。相关研究指出:幂函数模型通常适用于描述以颗粒重排和孔隙压缩为主导的渐进累积变形过程^[21];而对数模型则多用于反映结构性材料在循环荷载作用下“初期快速发展、后期趋于稳定”的沉降演化特征^[22]。本文所得规律与上述研究结论具有较好一致性。各荷载等级下的拟合曲线及对应关系式与决定系数 R^2 已在图 4 中给出,结果显示两类材料在各级荷载下均具有较高拟合优度,表明所选函数形式能够合理反映其累积变形特征。

依据拟合曲线获得的最终累积塑性沉降量分析,在各级荷载下 SS 路基的沉降均显著低于 SC 路基。具体而言,荷载由 2.4 kN 增至 4.8 kN 时,SC 路基的累积塑性沉降从 1.209 mm 增至 2.409 mm,而 SS 路基仅从 0.762 mm 增至 1.542 mm,降幅约为 37%~39%。随着荷载水平提高,两类路基的沉降差异进一步增大,表明在较高应力条件下,SS 路基仍能维持相对较高的结构完整性和等效刚度;相比之下,SC 路基在高荷载作用下沉降速率明显加快,表现出累积变形持续发展的特征。

依据沉降发展形态分析,SS 路基的沉降曲线收敛速度明显快于 SC 路基,达到沉降增长明显减缓阶段所需的循环次数更少。该现象可能与固化材料在循环荷载下较早完成内部结构调整有关,即微裂隙闭合与骨架调整主要集中于加载初期,随后沉降增长速率迅速降低,逐步进入相对稳定的发展阶段;相比之下,SC 路基在相同加载次数范围内,其沉降仍随循环次数持续增长,推测其内部颗粒重排与孔

隙压缩过程尚未充分完成,表现出稳定阶段出现相对滞后的现象。这一差异反映的是两类材料沉降演化阶段性特征的不同,而非其最终是否达到稳定状态的根本差别。

综上所述,在本文循环加载次数与荷载水平范围内,SS 路基表现出更高的等效刚度、更强的抗循环荷载变形能力以及更快的沉降收敛趋势。从机制角度推测,其优势主要体现在以下方面:a)固化胶结物的形成有助于构建相对稳定的骨架,增强材料抵抗变形的能力;b)胶结产物填充孔隙,在一定程度上限制了颗粒重排与累积变形的发展;c)在循环荷载作用下材料结构保持能力强,使沉降演化更早表现出增长速率减缓的特征。上述“胶结增强-孔隙受限-结构保持”的综合效应,可在一定程度上解释 SS 路基在交通循环荷载条件下表现出的较优变形控制能力。

1.2.3 内部动力响应与工作区深度对比

工程实践与相关研究中通常采用竖向动应力衰减至表面动应力 10%时所对应的深度作为路基工作区深度的判断依据,该指标可直观反映交通荷载在路基结构中的应力传播与扩散范围^[23]。图 5 展示了两种路基内部动应力沿深度的衰减规律。根据实测数据,采用线性插值法在相邻测点间估算了工作区深度,该方法假设在局部深度范围内动应力随深度近似线性变化。

图 5 显示,SC 路基的工作区深度随荷载从 2.4 kN 增至 4.8 kN 时,由 144.1 mm 增大至 173.2 mm,呈明显增加趋势,表明其应力影响范围较深且对荷载变化较为敏感。这主要由 SC 材料的低刚度特性决定。在高应力水平下,SC 材料的切变模量迅速下降,应力扩散角显著减小,使动应力难以在浅层有效耗散并向深部传播,最终造成工作区深度随荷载的增加而明显扩展。

相比之下,SS 路基的工作区深度变化范围仅为 43.5~46.3 mm,较相同荷载下的 SC 路基平均减小约 70%。固化过程显著提升了泥浆的初始刚度与切变模量,使得竖向动应力在浅层即可快速扩散并衰减。与此同时,SS 路基阻尼比更高,能够在应力传播初期有效耗散动能,限制应力向深部传递,使其工作区深度保持在较浅范围。

综上所述,在本文荷载水平范围内,SS 路基不仅有效限制了动应力向深部传播的范围,而且其应力衰减特性对荷载变化不敏感,表现出较为稳定的动力响应行为。该稳定动力响应的形成原因可从响

应特征角度归纳为以下 3 个方面:a)较高的初始刚度显著增大了应力扩散角,使动应力在路基浅层区域衰减更为充分;b)较大的阻尼特性有利于动能在传播初期被快速耗散,减弱应力向深部传递;c)等效

刚度随荷载变化幅度较小,使应力扩散模式保持稳定。上述“浅层承载-快速衰减-扩散稳定”的动力响应特征,有利于降低深部结构应力水平及长期变形风险。

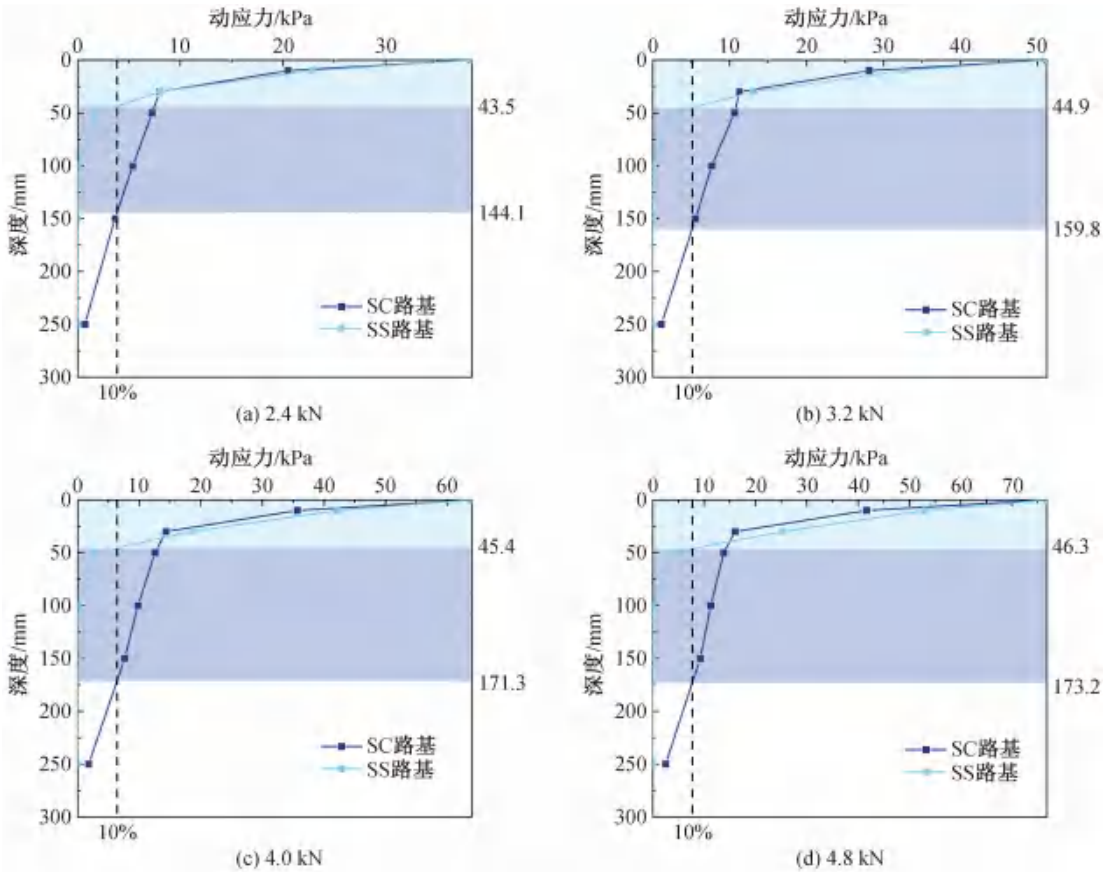


图 5 不同荷载条件下路基内部动应力沿深度衰减曲线

2 数值模拟与试验验证及参数分析

2.1 有限元模型的建立

为合理描述土体的屈服特性及应力依赖性行为,本文选用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)模型作为土体的本构模型,并在 ABAQUS 有限元软件中实现^[24-25]。本文依据表 1 试验数据设定模型力学参数。模型试验中施加的循环荷载水平低于材料屈服强度,路基整体变形以弹性响应为主并伴随有限塑性累积,该受力条件下,Mohr-Coulomb 本构模型可准确表征土体在循环荷载作用下的剪切屈服特征,目前已被广泛用于交通荷载条件下路基动力响应的同类数值分析中。

建立的路基-地基 ABAQUS 有限元模型如图 6 所示,采用四面体单元进行网格划分以保证计算精度。模型中路基层与地基层之间设置为面面摩擦接触,接触行为采用库仑摩擦模型,摩擦系数取 0.35。该取值参考粉质黏土与固化土接触界面的常用经验

范围,并结合室内直剪试验测得的内摩擦角进行折减确定,可合理反映两层土体之间的相对滑移约束特征。模型边界条件设定为:地基层底部采用完全固定约束,模型边界约束对应方向的水平位移。

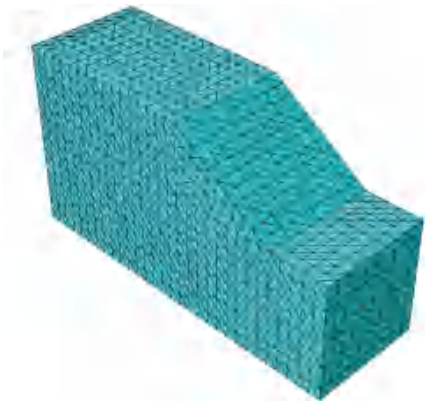


图 6 路基-地基有限元模型及网格划分

加载工况与模型试验保持一致,采用“先静载、后循环荷载”的分步加载模式。静载阶段,在加载面上逐级施加与试验对应的静压力(每级 0.8 kN),并

计算得到静载作用后的路基位移场;循环荷载阶段,施加与试验参数一致的正弦波循环荷载,计算循环荷载作用下的累积位移响应。为验证模型在循环荷载条件下对路基动力响应的预测精度,选取不同荷载等级下的累积塑性沉降发展过程作为对比指标,将数值模拟结果与模型试验实测结果进行对比分析。

经模型试验验证后,有限元模型可用于路基结构几何参数与荷载条件的扩展分析,分析重点聚焦于交通循环荷载下泥浆固化土路基累积塑性沉降的

宏观力学响应的预测。有限元建模及参数扩展分析的整体技术流程如图 7 所示:首先基于模型试验数据建立有限元模型,完成几何建模、网格划分、材料参数输入及边界条件设置;随后通过初始应力平衡计算与循环荷载数值计算获得路基力学响应,结合与试验结果的对比分析及误差量化计算完成模型验证;最终基于验证后的模型开展几何参数与荷载参数的多工况扩展分析,结合归一化处理与参数敏感性分析方法,量化各关键因素对路基累积塑性沉降的影响程度。

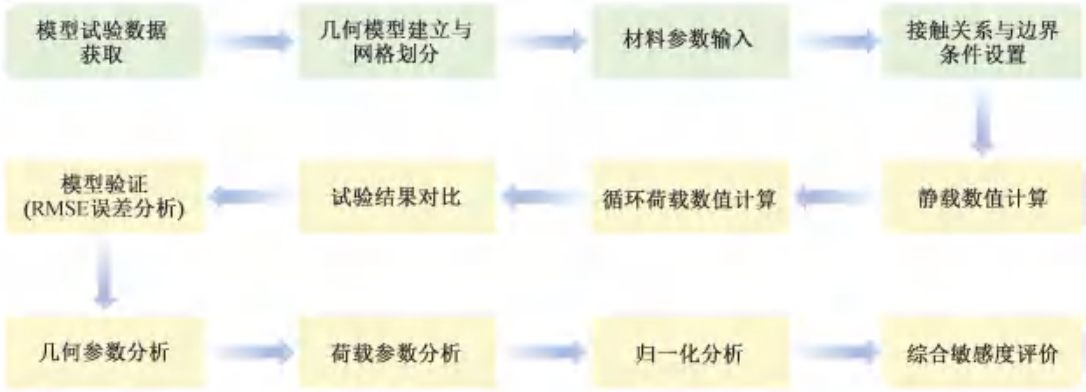


图 7 有限元建模与参数扩展分析流程示意图

2.2 模型验证与结果对比

2.2.1 静载响应对比验证

为检验有限元模型在静载条件下对路基力学响应的模拟能力,将 SC 路基与 SS 路基的数值模拟荷载-沉降关系与模型试验结果进行对比分析。图 8

给出了两种路基的瞬时沉降与静载关系的模拟与试验结果。模拟曲线与试验曲线变化趋势一致,能够较为准确地反映材料刚度差异及加载全过程中的变形特征,表明所建立的模型在静载分析中的适用性较高。

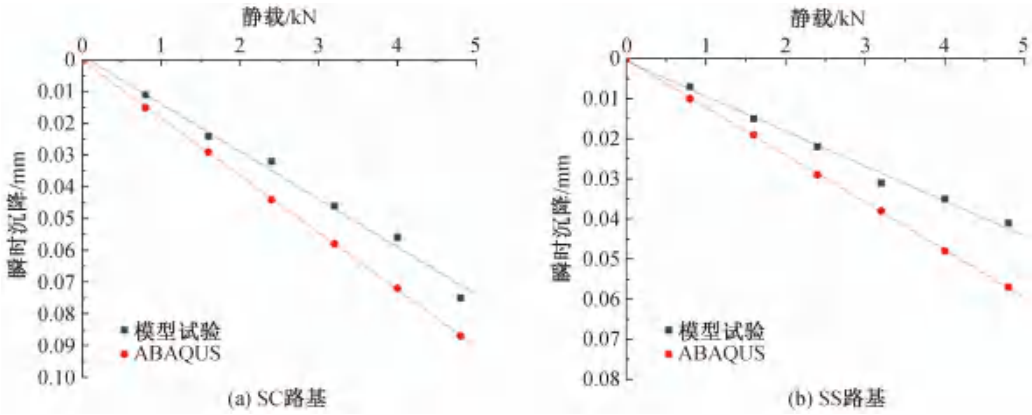


图 8 模型试验与数值模拟静载试验结果关系散点图

在相同荷载水平下,试验与模拟结果均表明 SS 路基的沉降显著小于 SC 路基。例如,在 4.8 kN 荷载下,SS 路基试验沉降为 0.041 mm、模拟值为 0.057 mm;SC 路基试验沉降为 0.075 mm、模拟值为 0.087 mm。两类路基沉降曲线斜率存在明显差异,反映了不同材料刚度特性对沉降响

应的影响。

总体来看,模拟值在各荷载级下均略高于试验值(SC 路基试验值为 0.011~0.075 mm,模拟值为 0.015~0.087 mm),但偏差范围稳定且变化趋势一致。该差异可能主要来源于有限元模型中边界条件的简化与界面接触理想化处理,使模型

整体刚度略有高估,但不影响模型对静载响应特征的合理再现。

综上所述,静载对比分析表明:a)有限元模型能够准确反映 SS 路基与 SC 路基在静力刚度与瞬时变形响应方面的差异特征;b)模拟与试验结果偏差较小且变化趋势一致,验证了模型参数选取的合理性;c)SS 路基较小沉降的特征与其较高初始刚度与结构稳定性有关,这一材料特性也体现在后续累积变形与长期动力响应分析中。

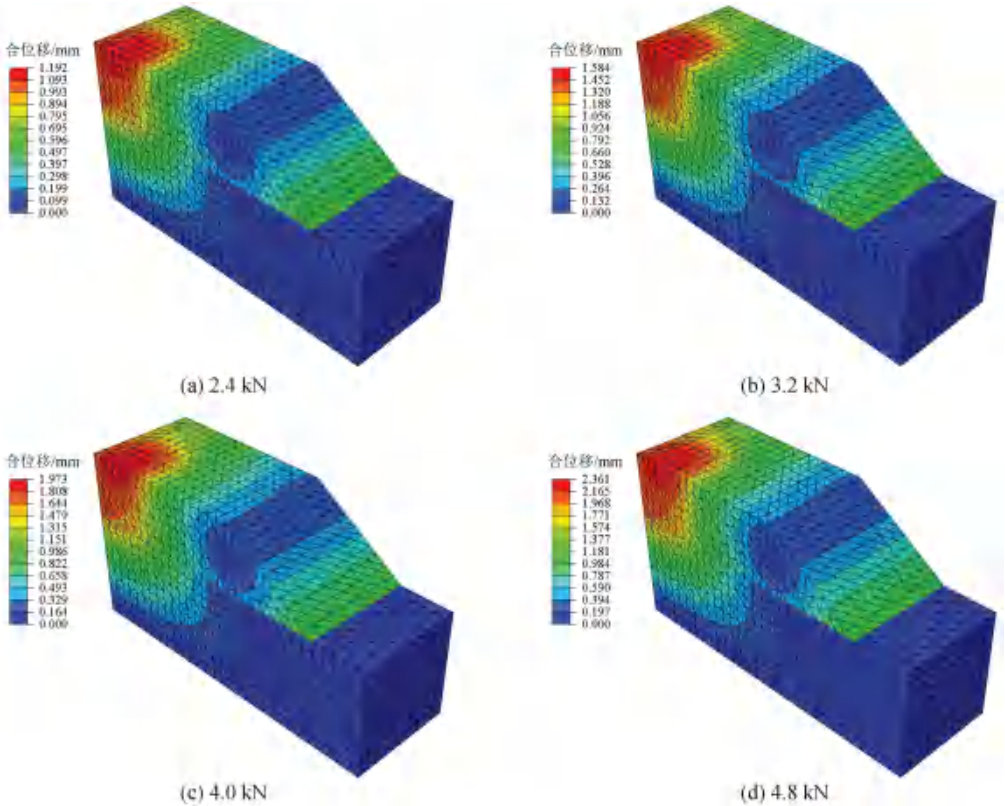


图 9 SC 路基 ABAQUS 循环荷载试验合位移场云图

结合图 4、图 9 和图 10 的对比结果,可从以下 3 个方面验证模型在循环荷载模拟中的可靠性:

a)能够反映不同材料路基的变形差异。在 2.4~4.8 kN 各级循环荷载下,模拟与试验均表明 SC 路基的累积塑性沉降显著大于 SS 路基。例如在 4.8 kN 荷载下,SC 路基试验与模拟沉降分别为 2.409 mm 与 2.361 mm,而 SS 路基仅为 1.542 mm 与 1.590 mm,表明模型能够正确反映不同材料路基在循环荷载作用下的沉降差异。

b)模拟精度较高。模拟与试验的荷载-沉降关系整体吻合。SC 路基在各荷载下的模拟值(1.192~1.973 mm)均与试验值(1.209~1.963 mm)较为接近;SS 路基的模拟值(0.802~1.590 mm)也与试验值(0.762~1.542 mm)保持良好一致。模拟值整体

2.2.2 循环荷载响应对比验证

图 9 与图 10 分别展示了 SC 路基与 SS 路基在不同循环荷载等级下的合位移场云图,用以评估两类材料在循环荷载作用下的空间变形模式。由图 9 与图 10 可见,两种路基的最大沉降均集中于加载板正下方,模拟结果与试验中位移监测点所指示的位置一致。这种空间分布一致性表明,有限元模型不仅能够精准复现路基的整体沉降水平,也能准确捕捉变形场的形态与应力扩散规律。

略高于试验值,但误差稳定且变化趋势一致,表明模型参数选取具有合理性。

c)能够捕捉循环荷载作用下的变形发展趋势。模拟与试验均表明,两类路基的累积塑性沉降随荷载等级增加而增大,且 SC 路基的增长速率始终高于 SS 路基,表明模型能够合理反映不同材料在循环加载条件下的变形发展规律。

综上,循环荷载对比验证表明:a)模型在空间变形模式、累积塑性沉降幅值及其增长趋势上均与试验保持良好一致性;b)模型能够合理反映不同材料路基在循环荷载作用下的变形差异;c)所建立的有限元模型具有较好的动力响应模拟能力,可为参数敏感性分析提供可靠的数值基础。

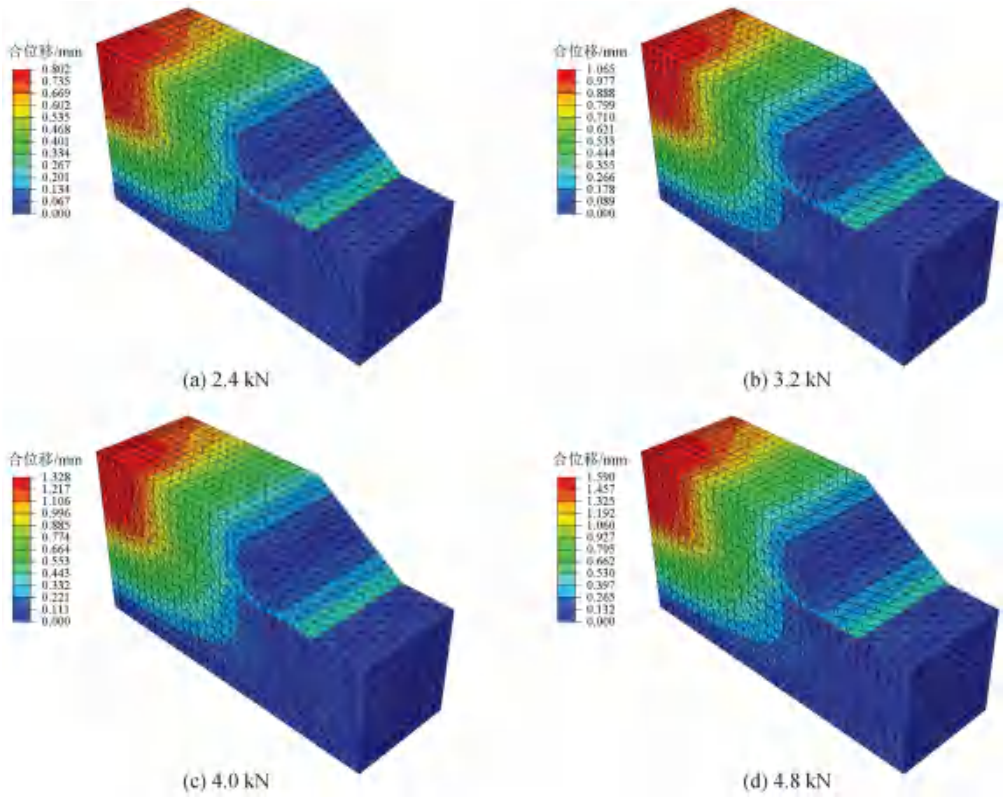


图 10 SS 路基 ABAQUS 循环荷载试验合位移场云图

2.2.3 数值-试验误差量化分析

为定量评价有限元模拟结果与模型试验数据之间的一致性,本文采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为误差衡量指标^[26],其计算公式如式(1)所示:

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^s - y_i^e)^2} \quad (1)$$

式中: e_{RMS} 为均方根误差, y_i^s 和 y_i^e 分别为第 i 个测点的数值模拟结果与试验实测结果, n 为对比数据点数量。

按式(1)计算后可得,在静载条件下,SC 路基与 SS 路基沉降的 e_{RMS} 分别为 0.0110 mm 与 0.0096 mm,误差量级远小于对应沉降值,表明有限元模型能够较为准确地反映两类材料在小变形阶段的刚度差异与沉降响应特征。在循环荷载条件下,SC 路基与 SS 路基的 e_{RMS} 分别为 0.0658 mm 与 0.1020 mm,相对于 1~2 mm 量级的累积塑性沉降而言,整体误差水平较低,且未随荷载等级显著放大。

综合静载与循环荷载两类工况的对比结果可以看出,数值模拟与试验数据在沉降幅值、增长趋势及材料差异方面均保持良好一致性,误差分布较为稳定。上述结果进一步验证了有限元模型在宏观沉降响应预测方面的可靠性,为后续开展路基结构参数与荷载参数影响分析提供了量化依据。

2.3 泥浆固化土路基沉降影响参数敏感性分析

在完成有限元模型验证后,采用控制变量法开展参数敏感性分析,明确 SS 路基累积塑性沉降的主要影响因素。通过改变单一参数并保持其他条件不变,研究路基几何参数及荷载条件对 SS 路基累积塑性沉降发展的影响规律。基准工况取路基高度 8 m、边坡坡率 1:1.5、荷载幅值 80 kN、荷载频率 4 Hz,该组合代表常规中等填方及交通荷载水平。

2.3.1 几何参数影响

a) 路基高度。图 11(a)给出了不同填方高度条件下 SS 路基顶面中心沉降变化。从图 11(a)可以看出,沉降随填方高度增加呈明显非线性增长趋势。当高度由 6 m 增至 8 m 时,沉降由 27.22 mm 增至 43.52 mm;当高度进一步增至 10 m 和 12 m 时,沉降分别增至 56.65 mm 和 95.42 mm,表明在 10 m 以上区间沉降增长速率明显加快。随着填方高度增加,路基自重附加应力不断累积,基底应力逐渐接近土体屈服状态,塑性变形比例提高,沉降增长速率进一步增大。

b) 边坡坡率。图 11(b)为不同边坡坡率条件下 SS 路基的沉降变化。随着坡率由 1:1 逐渐放缓至 1:2,顶面中心沉降由 46.43 mm 降至 41.68 mm,总变化幅度不足 5 mm。相较于路基高度,边坡坡率对顶面沉降的影响较小。

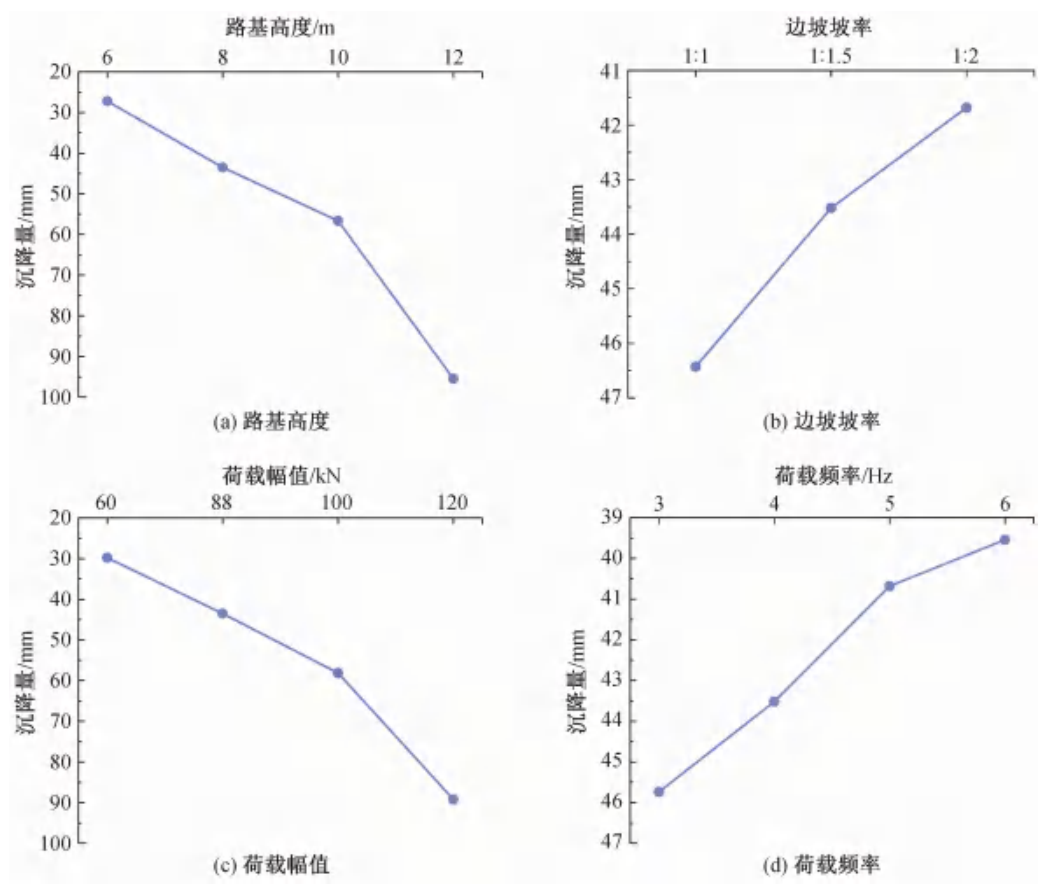


图 11 SS 路基累积塑性沉降与几何参数、荷载参数的关系曲线

2.3.2 荷载参数影响

a) 荷载幅值。图 11(c)展示了不同荷载幅值下 SS 路基的沉降变化。随着荷载幅值由 60 kN 增至 120 kN,路基沉降由 29.78 mm 增至 89.21 mm,整体呈明显的非线性增长趋势。其中 120 kN 工况沉降约为 60 kN 工况的 3 倍。荷载幅值的提高将显著提高循环动应力水平,使单次循环产生更大的塑性应变增量,加速沉降累积发展。

b) 荷载频率。图 11(d)为不同荷载频率下 SS 路基的沉降变化。在 3~6 Hz 范围内,沉降随频率增加略有减小,由 45.74 mm 降至 39.54 mm,总体变化幅度约 6 mm。这表明在该频率范围内,荷载频率对沉降的影响较小,其敏感性明显低于荷载幅值。

2.3.3 无量纲统一分析与参数敏感性量化评价

各影响因素的量纲及取值范围不同,直接比较沉降变化量难以反映其相对影响程度。为提高可比性,对参数与 SS 路基沉降响应进行归一化无量纲处理^[27]。定义归一化参数 X 和归一化沉降 Y ,其计算公式分别如式(2)–(3)所示:

$$X = P/P_0 \tag{2}$$

$$Y = S/S_0 \tag{3}$$

式中: P 为参数取值, P_0 为基准工况值, S 为对应工况 SS 路基累积塑性沉降值, S_0 为基准工况 SS 路基沉降值(43.52 mm)。

根据归一化结果绘制各因素的 X - Y 关系曲线,如图 12 所示。从图 12 可以看出:路基高度与荷载幅值曲线斜率明显大于边坡坡率与荷载频率,并在取值区间内呈现较为显著的变化趋势,表明两者对 SS 路基沉降响应更为敏感;相比之下,边坡坡率与荷载频率曲线变化较为平缓,其对沉降响应的调控作用相对有限。

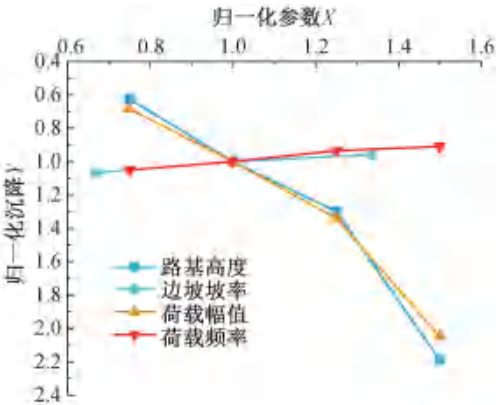


图 12 归一化处理后 SS 路基累积塑性沉降与影响参数的关系曲线

为进一步量化各因素影响程度,引入区间相对敏感系数 S_i ,用于反映单位参数变化所引起的 SS 路基沉降相对变化幅度^[28],计算公式如式(4)所示:

$$S_i=(\Delta S/S_0)/(\Delta P/P_0) \tag{4}$$

其中: ΔS 为该参数变化区间内 SS 路基累积塑性沉降最大差值, ΔP 为该参数变化区间的最大差值, S_0 和 P_0 分别为基准工况下的 SS 路基沉降值与参数值。

相对敏感系数计算结果如表 5 所示,由表可知, SS 路基累积塑性沉降影响程度从大到小依次为路基高度、荷载幅值、边坡坡率、荷载频率。该排序结果与归一化曲线变化趋势保持一致,表明两种分析方法具有良好一致性。

表 5 SS 路基累积塑性沉降相对敏感系数计算结果

因素	敏感系数
路基高度	2.09
边坡坡率	0.19
荷载幅值	1.82
荷载频率	0.16

综合上述分析可知:路基高度与荷载幅值对 SS 路基累积塑性沉降响应最为敏感,是影响 SS 路基长期沉降发展的主导因素;边坡坡率与荷载频率的影响相对较弱,在常规工程取值范围内不构成主导因素。上述结果从宏观响应层面揭示了循环荷载作用下 SS 路基的沉降演化规律,可为工程设计中路基结构参数优化与沉降演化规律分析提供理论依据。

3 结 论

本文围绕泥浆固化土路基在交通荷载作用下的力学特性与沉降机制,采用模型试验与三维有限元分析相结合的方法,系统开展了泥浆固化土路基动力响应与沉降演化规律研究;通过泥浆固化土路基与粉质黏土路基的对比研究,揭示其在静载以及循环荷载下的变形与应力扩散规律,并形成了可复用的路基动力性能评价与预测方法,主要研究结论如下:

- a) 泥浆固化土在静、动加载下均表现出较高的刚度与较低的变形,其结构性与胶结效应显著抑制了瞬时沉降与累积变形。与粉质黏土路基相比,泥浆固化土路基在静载作用下的瞬时沉降降低约 45%,在循环荷载作用下的累积塑性沉降量减少约 37%~39%,这在机制上解释了泥浆固化土路基动力稳定性的优势。
- b) 泥浆固化土路基呈现“表层集中、快速衰减”

的应力扩散规律,表明荷载应力主要在浅层范围内扩散并逐渐耗散,避免了应力向深层土体的过度集中,使得路基各区域的变形更为协调,降低长期不均匀沉降的风险。

c) 泥浆固化土在循环荷载下的沉降演化具有明显阶段性和非线性特征,累积变形增长速率持续低于粉质黏土。经模型试验验证的有限元模型能够较好再现沉降发展趋势,表明该模型在宏观沉降响应预测方面具有可靠性,可作为开展结构参数与荷载参数扩展分析的有效工具。

d) 参数敏感性分析表明,泥浆固化土路基累积塑性沉降对不同因素的响应强度存在明显差异,各因素影响程度排序为路基高度、荷载幅值、边坡坡率、荷载频率,其中路基高度与荷载幅值为影响沉降发展的主导因素。

综上所述,泥浆固化土路基在交通循环荷载作用下具有较高刚度、较低累积塑性沉降及稳定的应力扩散特征,表现出良好的动力稳定性,具有作为交通路基填料替代材料的应用潜力。未来研究可结合更大尺度模型试验与现场监测,并考虑环境因素及多场耦合作用,以进一步完善泥浆固化土路基动力响应的预测方法。

参考文献:

[1] 孟凡伦. 高含水率盾构废弃泥浆固化及强度特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 152-159.

[2] 边汉亮, 吕文瑞, 吴振宇, 等. 复合絮凝-碳化固化处理工程废弃泥浆试验研究[J/OL]. 复合材料学报, 2025-09-17. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250916.005>.

[3] Qin X H, Zhou Z Q, He B, et al. Characteristics of waste mud treated by construction waste-slag based flocculation-solidification combined method[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130699.

[4] Han C, Xie H P, Bai B, et al. Experimental study on mechanical properties of marine mud slurry treated by flocculation-solidification-high pressure filtration combined method[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(12): 2270.

[5] Deng J X, Zhang D, Yuan H H, et al. Strength and permeability performance of excavated waste mud stabilized with ternary industrial byproducts[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 29441.

[6] 李洪珍, 吴书新, 陈晨, 等. 基于桩基废弃泥浆的流态固化土力学性能及耐久性性能研究[J]. 中外公路, 2025, 45(5): 35-45.

[7] Jiang N, Wang C M, Wang Z P, et al. Strength characteristics and microstructure of cement stabilized soft soil admixed with silica fume[J]. Materials, 2021, 14(8): 1929.

[8] Wang Q, Zhang R B, Guo J W, et al. Study on mechanical properties and microstructure of metakaolin-slag-calcium carbide residue synergistic solidifying waste engineering mud [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137135.

[9] 吕絮, 刘俊伟, 高嵩, 等. 钻井废弃泥浆固化土力学特性试验分析[J]. 材料导报, 2024, 38(7): 124-129.

[10] 耿大新, 杨泽晨, 王宁, 等. 交通动荷载引起的公路路基应力响应试验研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 1-7.

[11] Jiang X J, Huang W, Luo S, et al. Numerical analysis of the effects of subgrade settlement on top-down cracking in epoxy asphalt pavement[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(10): 3308-3320.

[12] Li L H, Zhu S S, Gui Y L, et al. Experiment on the performance of high-speed railway subgrade with tire debris mixed filling [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 45: 101226.

[13] 高福洲, 陈思远, 张俊云. 交通荷载下红层土石混填路基沉降特性研究[J]. 路基工程, 2023(5): 49-55.

[14] 刘萌成, 石佳弘, 戴鹏飞. 行车荷载作用下压实钙质砂路基累积沉降数值模拟[J]. 中国公路学报, 2025, 38(7): 146-155.

[15] Wu T Y, Jin H X, Guo L, et al. Predicting method on settlement of soft subgrade soil caused by traffic loading involving principal stress rotation and loading frequency[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 152: 107023.

[16] 余静, 俞峰, 陈鑫, 等. 工业固废-水泥协同固化工程弃土配比优选[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2168-2176.

[17] 孟瑞军. 杭州淤泥质粉质黏土小应变硬化土模型参数试验及工程应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(2): 303-315.

[18] 孔令荣, 魏建华, 李想. 上海湖沼平原地区邻近建筑堆填土处理方案研究[J]. 地基处理, 2024, 6(S1): 39-45, 59.

[19] Wang H, Wang N, Yang G Q, et al. Model test and numerical simulation research of reinforced soil retaining walls under cyclic loads[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15643.

[20] Zhang S H, Cao H Y, Xu S, et al. Mechanical responses of subgrade with natural hard crust through an accelerated laboratory loading test on pavements model[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02449.

[21] Huang J, Lu X S, Hu H X. Creep subsidence prediction algorithm considering the effect of stress history for subgrades [J]. Frontiers in Materials, 2023, 10: 1284068.

[22] Liu J, Wang Q, Yu Q B, et al. Dynamic behavior of remolded saline soil under dual symmetric factors: cyclic loading and freeze-thaw cycles[J]. Symmetry, 2025, 17(10): 1691.

[23] 唐楚轩, 刘杰, 冯一诺, 等. 交通荷载作用下非饱和风积沙路基动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(S1): 194-202.

[24] Jia F, Dong F T, Ma S N, et al. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation [J]. Construction and Building Materials, 2024, 419: 135378.

[25] Juneja G, Sharma R K. Numerical study on the behaviour of geocell-reinforced sand layer overlying soft clay subgrade[J]. Indian Geotechnical Journal, 2023, 53(2): 422-436.

[26] 陈伟航, 罗强, 王腾飞, 等. 基于 Bi-LSTM 的非等时距路基工后沉降滚动预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(4): 683-691.

[27] 高晓红, 李兴奇. 多元线性回归模型中无量纲化方法比较[J]. 统计与决策, 2022, 38(6): 5-9.

[28] Ma Y, He X H, Guan Y, et al. Sensitivity analysis of foundation soil physical-mechanical properties on pile foundation stability[J]. Buildings, 2025, 15(21): 4001.

团队介绍

俞峰教授团队长期致力于“双碳”目标背景下的桩基工程、地下空间开发与固废资源化利用研究。在国家级、省部级等 40 余项科研项目的支持下,团队以“绿色低碳”为导向,围绕固废资源化利用、地下空间开发与高性能桩基三大方向开展了系统性研究。团队成功研发了工业废渣基系列固化剂,可替代高能耗水泥,为隧道、基坑、路基等工程提供绿色低碳解决方案,显著降低土木工程碳排放,助力构建绿色施工体系;与企业合作开发了端部敞口、异形截面、螺锁连接等多种新型预制桩,提出了以土塞率为关键指标的承载设计新方法,有力促进了城市土地集约利用与地下工程工业化发展。目前,团队已发表学术论文 120 余篇,获授权发明专利 27 项、实用新型专利 21 项,其中 12 项成果已实现转化应用。团队将持续聚焦行业前沿,为推动土木工程绿色化、智能化发展贡献力量。

(责任编辑:康 锋)