

玄武岩纤维固化剂改良软土强度性能研究

吴仍武¹, 张 涛¹, 李林贵¹, 郑卫强²

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广州 510420; 2. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013)

摘 要: 针对滨海地区软土路基拓宽改造问题, 通过室内试验和数值分析, 探讨了玄武岩纤维固化剂对滨海软土强度性能的改良效果。系统分析了固化后软土的力学性能变化规律, 并构建了新旧路基-地基相互作用模型, 研究了路基模量、行车荷载等因素对新旧路基差异沉降的影响规律。研究表明: 0.3%的玄武岩纤维掺量可显著提升软土强度并抑制收缩变形。同时, 构建的新旧路基-地基相互作用模型显示, 加宽宽度增加会加大路基顶面沉降, 但固化填料使最大差异沉降较普通填料降低约42.9%。此外, 行车荷载会加剧沉降, 尤其在新旧路基结合处, 而固化土路基填料在不同行车荷载下最大差异沉降降低34.0%~42.1%。研究结果可为该领域的研究提供参考。

关键词: 软土路基; 固化改良; 玄武岩纤维; 强度性能; 数值分析; 差异沉降

中图分类号: TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0107-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.016

Research on the Improvement of the Strength Performance of Coastal Soft Soil by Using Basalt Fiber Curing Agent

WU Rengwu¹, ZHANG Tao¹, LI Lingui¹, ZHENG Weiqiang²

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: This study addresses the problem of expanding soft soil subgrades in coastal areas. Through laboratory tests and numerical analyses, it explores the enhancing effect of basalt fiber solidifiers on the strength of coastal soft soils. The research analyzes the mechanical behavior of solidified soft soils and develops a new-old subgrade - ground interaction model. This model investigates the impact of ground compression modulus and traffic loads on differential settlement between new and old subgrades. Results show that a 0.3% basalt fiber content significantly boosts soft soil strength and reduces contraction deformation. The model also indicates that increasing the expansion width increases the subgrade surface settlement, but the maximum differential settlement of the solidified fill is about 42.9% lower than that of the conventional fill. Furthermore, traffic loads exacerbate settlement, particularly at the new-old subgrade junction. However, the maximum differential settlement of the solidified subgrade is reduced by 34.0% to 42.1% under different traffic loads.

Key words: soft soil subgrade; solidification improvement; basalt fiber; strength performance; numerical analysis; differential settlement

项目来源: 江西省地下工程风险数字化管控研究中心开放基金项目 (JXDFJJ2024-006)。

作者简介: 吴仍武 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 公路工程施工监理工作。

收稿日期: 2025-07-30

岩土力学

0 引言

广澳高速公路南沙至珠海段改扩建工程是京港澳高速 G4 的关键组成部分。该工程处于沿海地带,而软土往往呈现水分含量高、压缩性高、强度低且透水性不佳等特点。这使得在软土地基上实施既有路堤的拓宽改造工程时,面临诸多严峻挑战,如地基沉降、不均匀沉降以及边坡稳定性问题等。

针对以上问题,相关学者在软土固化改良方面进行了研究。李宝建等^[1]采用矿渣基聚合物联合水泥加固海相软土,发现矿渣替代部分水泥可显著提升无侧限抗压强度;王宇峰^[2]开发新型固化剂 GSR-2 改良滨海软土,证实其掺量达 15% 时力学性能最优;李泽良等^[3]提出水泥-偏高岭土-石膏协同固化体系,发现脱硫石膏掺量 10%~15% 时固化土峰值应力最大;曾晖等^[4]以矿渣-粉煤灰为基材,确定最优参数组合使砂性软土抗压强度显著提升;蒋新彧等^[5]利用矿渣与粉煤灰制备地质聚合物进行了固化软土;张顶飞等^[6]创新采用矿渣-电石渣地质聚合物,证实其固化土在抗压强度、水稳性及抗冻融性上均优于水泥固化土;何俊等^[7]对比碱渣-矿渣-电石渣与水泥固化土的抗侵蚀性能,发现碱渣-矿渣-电石渣固化土的强度劣化最显著;朱晨俊等^[8]、万峰等^[9]通过广澳高速扩建工程验证水泥搅拌桩可有效控制软土路基沉降,提高地基承载力;朱敏捷等^[10]提出板墙组合式固化地基,阐明固化墙通过限制软土侧向变形降低沉降速率;王永辉等^[11]通过冻融循环试验验证了石灰改良黏性土在季冻区的耐久性,表明回弹模量降低小于 35%,显著优于未处理土;赵秀绍等^[12]探讨了水泥与红黏土复合改良千枚岩土的力学特性,发现复合改良能显著提高无侧限抗压强度和变形模量,并增强水稳性,实现协同增效;张艺等^[13]通过室内试验和现场测试证明粉土改良膨胀土能有效抑制胀缩潜势,提高 CBR 值,确定最佳粉土掺量为 40%;邓彩虹等^[14]提出了完善盐胀变形理论体系和统一溶陷率控制标准的建议;张军辉等^[15]指出固化技术能降低特殊土的液限和塑性指数,提升强度和耐久性,并呼吁关注长期路用性能研究。

聚焦于沿海区域软土,研究玄武岩纤维固化剂对软土地基承载能力的提升效能。在不同的添加量

和混合比例条件下,对玄武岩纤维固化剂改良软土进行了室内试验研究,试验内容包括无侧限抗压强度测试和直剪试验,以深入探讨软土经固化处理后的力学行为。同时,构建了新旧路基相互作用的理论模型,并利用 Geo-studio 软件分析了在不同压缩模量和交通荷载影响下新旧路基的沉降差异,旨在为沿海区域软土地基加固提供创新技术方案。

1 工程背景及试验概况

1.1 工程概况

研究对象为广澳高速公路改扩建工程 K10+950 至 K10+980 段。现有路面宽度为 33.50 m。扩建后的路基将采用十车道的整体式路基断面,路面宽度拓展至 49.50 m。主道路面的结构从下到上依次为:0.15 m 厚的垫层、0.20 m 厚的底基层、0.40 m 厚的水稳基层、0.12 m 厚的沥青柔性基层、0.16 m 厚的沥青面层。路堤边坡的坡度为 1:1.5。工程改扩建区域普遍存在软弱地基,工程地质条件较为复杂,耕植土和淤泥质砂的工程性质较差。在承受自重应力固结、交通荷载等各类荷载作用时,广澳高速公路扩建路段新旧路基衔接位置易因地基沉降、水平位移和不均匀沉降而使路基出现开裂。标准截面如图 1 所示。

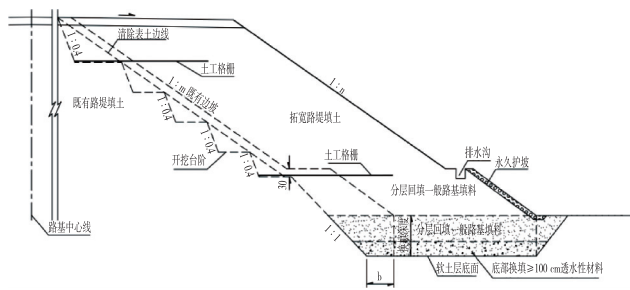


图 1 扩建路基截面

Fig. 1 Expansion of roadbed section

1.2 试验材料与方案

1.2.1 软土

软土试样取自施工场地地面以下 5 m 深处,地下水位 1.5 m。通过室内土工试验,测得土样的天然含水量 68.5%~72.3%,土颗粒相对密度 2.72,液限 72.8%,塑限 33.3%,塑性指数 39.5,有机质含量 4.2%。由图 2 可知,土样为高液限有机质黏土,工程性质差。

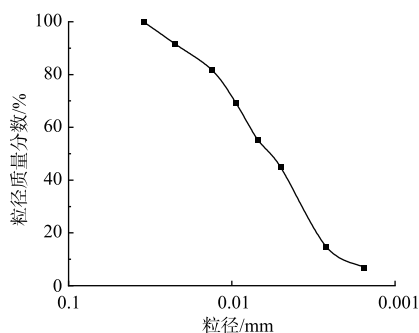


图2 软土的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve of soft soil

1.2.2 GS 固化剂与玄武岩纤维

玄武岩纤维基本性能参数：密度范围为 $2.8 \sim 3.3 \text{ g/cm}^3$ ，抗拉强度 0.41 N/tex （单位线密度抗拉强度），弹性模量 100 GPa ，几何尺寸为长度 6 mm 、直径 $17 \mu\text{m}$ ，耐高温性能优异，耐受温度区间为 $260 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

GS 固化剂整体呈灰白色，相较于水泥，其密度较轻，细度与凝结时间与水泥相近，但强度较高。其技术性能指标如下，物理参数：密度 $\geq 2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，细度（筛余量） $\leq 10\%$ ，安定性（煮沸法膨胀值） $\leq 5 \text{ mm}$ ；凝结特性：初凝时间 $\geq 0.75 \text{ h}$ ，终凝时间 $\leq 15 \text{ h}$ ；力学性能：胶砂试件 7 d 抗压强度 $\geq 17 \text{ MPa}$ ， 28 d 抗压强度 $\geq 32.5 \text{ MPa}$ 。

1.2.3 试样制备及设备

对制成的固化土圆柱形样品进行无侧压抗压强度试验。试样规格为 $39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ （直径 $\times$ 高度），加载速率控制在 1.2 mm/min ，连续记录荷载-位移曲线直至试件破坏。

1.2.4 含水率及抗压强度试验方案

为减少试验量，设置 10% 的固化剂掺入比，在不同含水率下制样，各含水率试样养护 3 d 后开展无侧限抗压强度测定，试验结果如图 3 所示。

强度测试结果显示： 20% 、 25% 、 30% 、 35% 、 40% 含水率下无侧限抗压强度分别为 447 、 486 、 413 、 387 、 314 kPa 。固化剂的水化和胶结效果在含水率为 25% 时达到最佳，此时的强度也最高；而 20% 含水率因水分不足抑制水化反应，导致强度衰减。基于施工拌合可行性、早期强度需求及强度峰值条件，确定 25% 为后续研究的最优含水率控制值。

设定 GS 固化剂掺量为 6% 、 8% 、 10% 、 12% ，

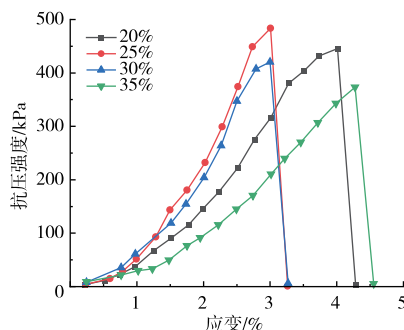


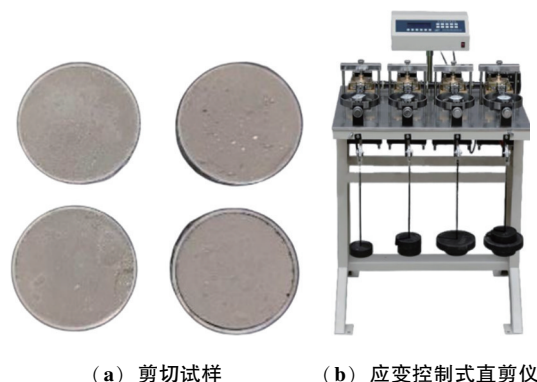
图3 不同含水率破坏结果

Fig. 3 Failure results at different water contents

玄武岩纤维掺量为干土质量的 0 、 0.1% 、 0.2% 、 0.3% 、 0.4% 、 0.5% ，养护龄期为 3 、 7 、 14 、 28 d 。试样在 25% 含水率下制备，试验共设计 4 （GS 掺量） $\times 6$ （纤维掺量） $\times 5$ （龄期） $= 120$ 组工况。每组工况制备 3 个平行试样以消除偶然误差。

1.2.5 抗剪强度测定试验

采取不固结快剪试验，试验变量为：纤维掺量（ 0 、 0.1% 、 0.3% 、 0.5% ）、养护龄期（ 7 、 14 、 28 d ）及竖向应力（ 100 、 200 、 300 kPa ）。其中竖向应力上限设定为 300 kPa ，基于实际工程荷载通常 $\leq 400 \text{ kPa}$ 及设备操作可行性；GS 固化剂掺量固定为干土质量的 12% ，含水率控制为 25% ，纤维通过外掺法添加。试样与设备图如图 4 所示。



(a) 剪切试样

(b) 应变控制式直剪仪

图4 剪切试样与设备

Fig. 4 Shear specimens and equipment

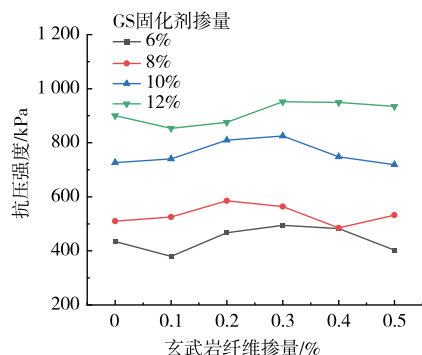
2 试验结果分析

2.1 无侧限抗压强度分析

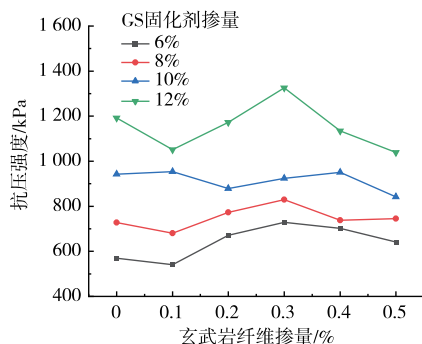
由图 5 可知，随着养护时间的延长，所有配比试样的强度均增强。除 6% GS 掺量下未添加纤维及添加 0.1% 纤维的试样外，其余组合在 1 d 龄期时强度

岩土力学

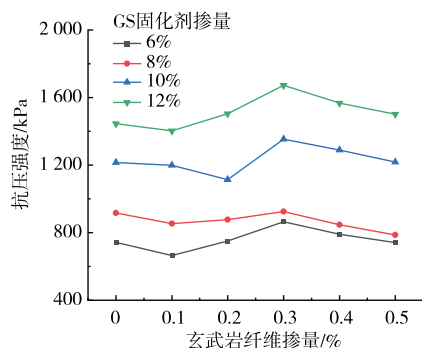
均超过 300 kPa; 其中 12% GS 掺量组早期强度突破 600 kPa, 证实该体系具备快速硬化特性。不同 GS 掺量下纤维掺量效应存在显著差异: 6% GS 组中, 0.1% 纤维导致各龄期强度衰减, 0.2% 掺量时恢复至基准水平, 0.3% 掺量达强度峰值, 此后继续增加纤维用量则引发性能衰退; 8% GS 组在 0.1% 纤维掺量下多数龄期强度降低, 0.2% 掺量时 1 d 强度持平但 3~14 d 强度回升, 而 28 d 强度仍低于基准; 10% 与 12% GS 组在 0.1%~0.2% 纤维掺量区间出现强度谷值, 0.3% 掺量实现强度最大化。



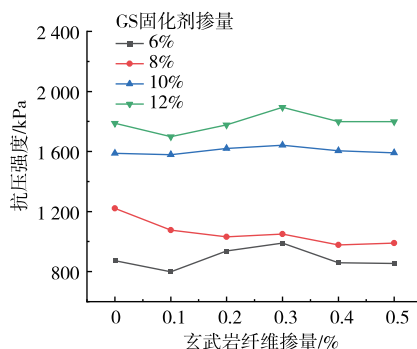
(a) 3 d



(b) 7 d



(c) 14 d



(d) 28 d

图 5 试样抗压强度变化曲线

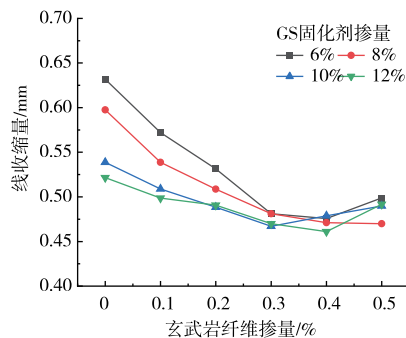
Fig. 5 Pressure strength variation curve of the sample

尽管 GS 掺量影响具体强度变化路径, 0.3% 纤维掺量始终产生最优增强效果。这一现象归因于纤维在土壤中形成空间网状结构, 通过增强土壤颗粒间的摩擦力和限制相对位移来提高黏结力; 低掺量时纤维分散不均造成局部应力集中, 高掺量则因纤维团聚削弱界面锚固作用, 导致力学性能下降。

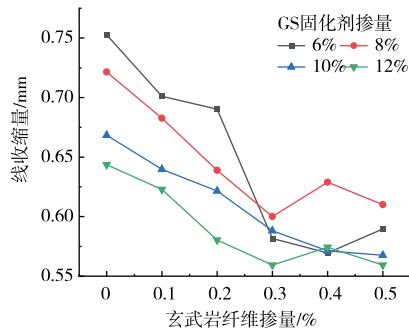
2.2 土样收缩特征分析

由图 6 可知, 随养护龄期增长, 所有试样收缩变形持续增加, 其中前 7 d 龄期收缩速率显著高于后期 (14~28 d)。相较未掺纤维试样, 0.3% 纤维掺量使线缩率降至最低值, 低于或高于此掺量均导致收缩增大。该规律与纤维改良水泥固化土的单调递减趋势不同, 表现为 0.1%~0.5% 掺量区间内存在收缩阈值。

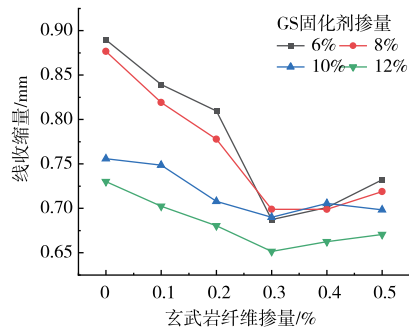
值得注意的是, 相同纤维掺量下, 提高 GS 固化剂掺量可显著抑制收缩变形。例如在 0.3% 纤维掺量、1 d 龄期时, 12% GS 掺量组较 6%、8%、10% GS 组线缩量分别降低 28.3%、17.5% 和 10.8%。结果表明: 玄武岩纤维对 GS 固化土收缩的抑制效果弱于水泥体系, 可能源于 GS 体系自身收缩本征值较低, 导致纤维改性空间有限。



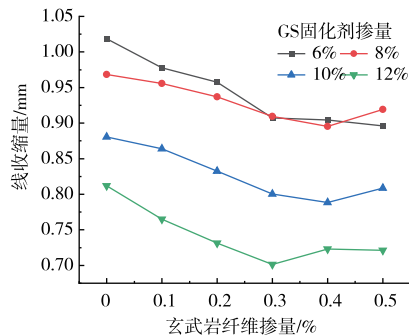
(a) 3 d



(b) 7 d



(c) 14 d

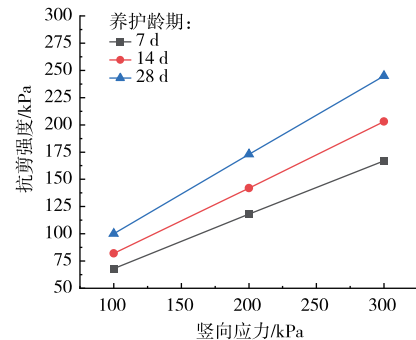


(d) 28 d

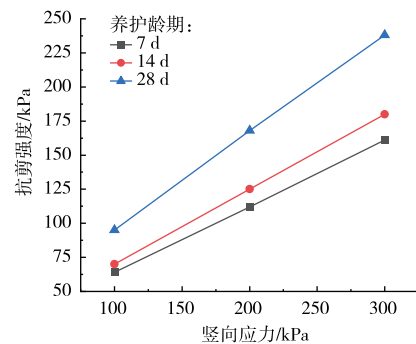
图6 养护龄期对试样线性收缩量变化曲线
Fig. 6 Linear shrinkage variation curve of samples during maintenance period

2.3 剪切强度分析

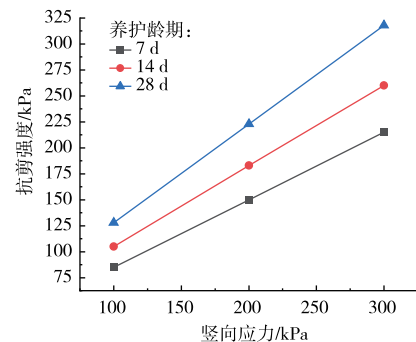
由图7可知,在等效养护龄期、竖向应力及纤维几何参数条件下,纤维改良GS固化土的抗剪强度随纤维掺量增加呈单峰变化趋势,峰值出现在0.3%掺量工况。纤维长度6 mm、养护龄期28 d、竖向应力300 kPa时,0.3%纤维掺量组抗剪强度达318 kPa,较未掺纤维基准组(245 kPa)显著提升29.8%;而0.1%与0.5%掺量组分别达到238、260 kPa,较基准组分别降低2.9%和提升6.1%。此现象表明,纤维分散度对界面黏结效应的影响存在最优掺量阈值。



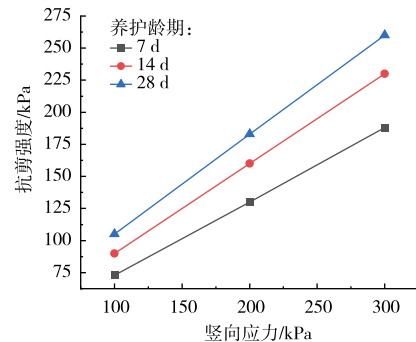
(a) 未掺



(b) 掺量 0.1%



(c) 掺量 0.3%



(d) 掺量 0.5%

图7 纤维掺量对抗剪强度的影响

Fig. 7 Influence of fiber content on shear strength

3 路基差异沉降分析

3.1 计算模型建立

运用 Geo-studio 软件对固化土拓宽高速公路路基的差异沉降进行模拟与分析,研究地基压缩模量以及行车荷载对此类差异沉降所产生的具体影响。基于广澳高速公路工程,建立尺寸为长度 59.0 m、高度 28.0 m 的模型,选择了半边路基作为计算模型。原有路基的宽度为 8 m,而新路基的宽度增加到了 16 m,两者的高度均为 8 m,路堤的边坡比例为 1:1.5。在新路基的开挖与填筑施工中,均采用台阶法施工工艺以保障施工质量与稳定性。模型底部边界施加固定约束边界条件,左右边界设为约束 X 轴横向位移与弯矩约束,其余方向不做约束。计算模型如图 8 所示。

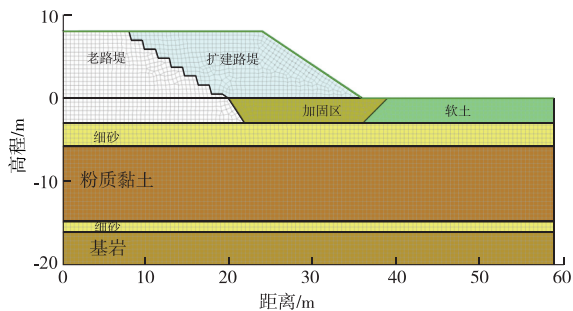


图 8 有限元计算模型
Fig. 8 Finite element calculation model

3.2 模型参数选取

根据室内试验玄武岩纤维掺量 0.3% 的试验结果,结合路基边坡的宏观定性分析,并参考相关工程成果^[16-17],综合确定路基边坡稳定性物理力学指标,计算模型均采用 Mohr-Coulomb 模型,相关参数取值,见表 1。

表 1 路基数值模拟参数
Table 1 Roadbed numerical simulation parameters

材料类型	弹性模量 /MPa	压缩模量 /MPa	泊松比 μ	容重 / (kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
旧路基	35	10.0	0.33	18.0	22.0	27.0
新路基	35	10.0	0.33	17.5	21.0	25.0
GS 固化土路基 (加固区)	98	31.2	0.28	18.3	75.0	35.0
软土	8	3.5	0.35	16.8	15.0	18.0
基岩	500	250.0	0.27	25.0	100.0	35.0
细砂	25	19.0	0.30	16.0		31.8
粉质黏土	30	20.0	0.30	21.4	8.0	23.0

3.3 工况设计

设置四组基础工况分析沉降响应:G1 工况采用天然软土地基且无行车荷载,作为自重作用下的沉降基准;G2 工况维持天然地基但施加 38 kPa 行车荷载,量化荷载引起的附加沉降;G3 工况实施新路基全断面 GS 固化土置换且无荷载,揭示固化土自重固结特性;G4 工况在全断面固化土地基上施加 38 kPa 行车荷载,探究加固体系在荷载耦合作用下的综合变形机制,相应工况见表 2。

表 2 模型计算工况
Table 2 Model calculation conditions

工况 编号	加固方案	行车荷载 /kPa	地基压缩 模量/MPa	研究目标
G1	无加固	无荷载	3.5	自重沉降基准
G2	无加固	38	3.5	荷载作用下 天然地基沉降
G3	全断面置换固化土	无荷载	31.2	固化土自重 压缩特性
G4	全断面置换固化土	38	31.2	荷载下加固效能

3.4 结果分析

3.4.1 G1 与 G3 工况对比分析

在 G1 和 G3 工况下,对加宽路面宽度分别为 14、15、16 m 的情况进行对比分析。如图 9 所示,路基拓宽幅度的增大与路基顶面沉降量的逐级递增存在正相关关系。距旧路基中线 0~8 m 的区间内,各类拓宽尺度下的路基顶面沉降增幅较微弱;而当测量点位于旧路基中线 8~16 m 的横向范围时,拓宽宽度参数对路基顶面沉降的影响权重显著提高。路基顶面沉降的演变进程遵循先平缓上升、后趋于平缓的非线性模式,整体沉降曲线呈现近似波浪形。沉降曲线的最大斜率稳定地出现在新旧路基的交界处,同时在路基外侧边缘观测到沉降的最大值。对比试验数据显示,采用固化土作为路基填充材料时,其沉降特性演变规律与传统路基填料高度一致,但沉降总量得到有效控制,降幅明显,同时新旧路基间的差异沉降数值亦显著降低。

对于普通填料,当加宽宽度从 14 m 增加至 16 m 时,最大差异沉降从约-12 cm 增加至约-14 cm;而固化填料的差异沉降则从约-7 cm 增加至约-8 cm。在相同加宽宽度下,固化填料的差异沉降值明显低于普通填料。例如,在加宽宽度为 16 m 时,普通填料的差异沉降约为-14 cm,而固化填料

的最大差异沉降约为-8 cm。这充分说明固化土路基填料在降低新旧路基结合处的差异沉降方面具有显著优势。

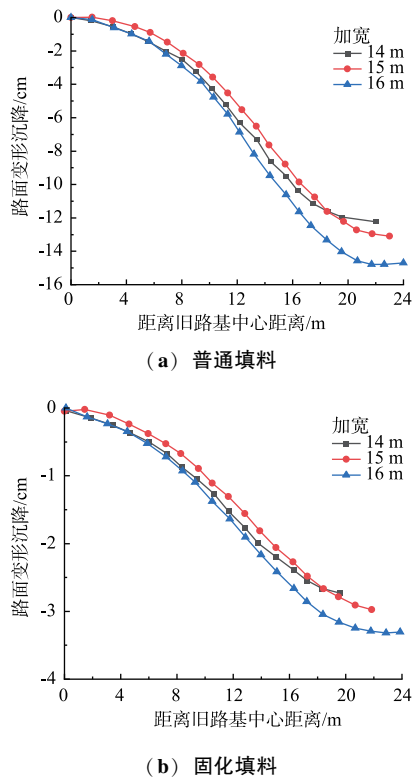


图9 加宽与路基顶面沉降曲线
Fig.9 Widening and subgrade settlement curve

3.4.2 G2与G4工况对比分析

在G2和G4工况下,分别设置荷载作用于旧路基与荷载同时作用于新旧路基进行对比分析。由图10可知,在旧路基上施加荷载后10 m以内,两种荷载工况下的路面沉降均有所减少;在10~16 m区间内,荷载同时作用新旧路基时,路基顶面沉降明显增大。这说明交通荷载对路基顶部的沉降有显著影响。

对比传统路基填料和固化土路基填料的顶部沉降变化规律,两者的沉降趋势大致相同。然而,采用固化土材料能显著降低路基顶部沉降,并且减小沉降差异。对于传统路基材料,在三种不同荷载工况下的最大差异沉降值分别为6.00、6.84、6.29 cm;使用固化土材料时,三种不同工况下的最大差异沉降值降至3.96、4.73、5.98 cm。这说明不同交通荷载对路基顶面的最大差异沉降有显著影响,并且固化土路基材料在减少最大差异沉降方面显示出明显的

优势。

此外,从图10中还可以观察到,在无荷载作用时,普通填料和固化填料的路基顶面沉降曲线较为平缓。而当施加行车荷载后,尤其是在新旧路堤上同时施加荷载时,沉降曲线的下降幅度更大,且固化填料的沉降量显著低于普通填料。这进一步验证了固化土路基填料在实际行车荷载作用下的优越性。

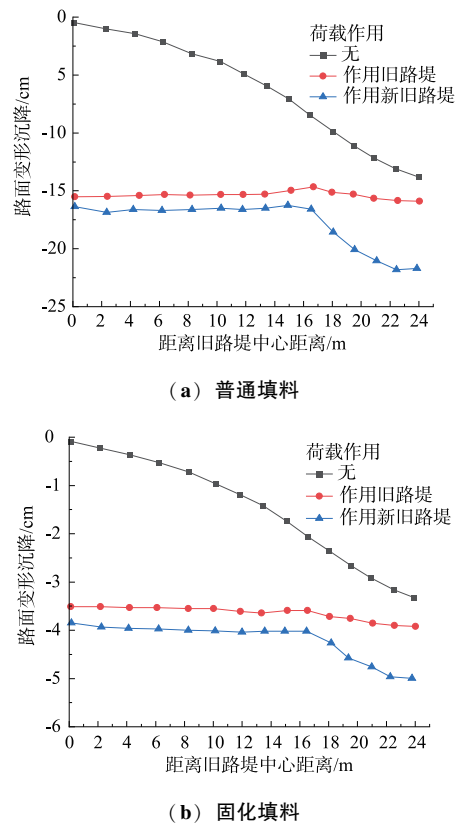


图10 行车荷载下路基顶面沉降对比
Fig.10 Comparison of roadbed settlement under traffic load

4 结论

通过试验测试和数值模拟方法,探讨了玄武岩纤维固化剂对沿海软土改良效果的影响,评估了其力学性能和沉降差异,以阐明玄武岩纤维固化剂在改善沿海软土性能方面的有效性。主要结论如下:

(1) 0.3%的玄武岩纤维掺量使固化土的无侧限抗压强度提升约37%,抗剪强度提升29.8%,同时线缩量降至最低,表明玄武岩纤维固化剂能显著提升软土强度并抑制收缩变形。

(2) 路面宽度增加会导致路基顶面沉降增大。在相同加宽宽度下,固化填料的沉降量显著低于普通填料。

岩土力学

通填料降低约 42.9%。对于普通填料,加宽宽度从 14 m 增加至 16 m 时,最大差异沉降从约 -12 cm 增至约 -14 cm;而固化填料则从约 -7 cm 增至约 -8 cm。

(3) 行车荷载会加剧路基顶面沉降,尤其在新旧路基结合处。普通填料在三种荷载工况下的最大差异沉降分别为 6.00、6.84、6.29 cm;而固化土路基填料分别为 3.96、4.73 和 5.98 cm,最大差异沉降绝对值降低约 34.0%~42.1%。

参 考 文 献

- [1] 李宝建,傅赛,段冰,等. 海相软土固化强度试验及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (增刊1): 176-180.
- [2] 王宇峰. 固化剂改良滨海地区软土力学性能试验研究[J]. 工程勘察, 2025, 53 (7): 9-13.
- [3] 李泽良,陈虹序,周峰,等. 水泥-偏高岭土-石膏协同固化软土力学特性及机制[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46 (6): 674-685.
- [4] 曾晖,刘通飞,汤嘉艺,等. 新型复合固化剂固化软土力学性能试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 59-62.
- [5] 蒋新彧,征西遥,吴俊,等. HNO_3 和 H_2SO_4 侵蚀作用下地质聚合物固化软土的抗酸性能研究[J]. 岩土力学, 2025, 46 (3): 851-866.
- [6] 张顶飞,刘涛,郝琪,等. 固废地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32 (6): 1582-1596.
- [7] 何俊,龙思昊,朱元军,等. 侵蚀方式和环境对固化软土力学性质的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58 (9): 1857-1865.
- [8] 朱晨俊,温小栋,吴佳育,等. 基于 MICP 技术的海上风电场滩涂软土固化试验研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (11): 467-476.
- [9] 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.
- [10] 朱敏捷,蔡勇,周晋杭,等. 板墙组合式软土固化地基沉降特性与设计参数优化[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44 (5): 1149-1157, 1230.
- [11] 王永辉,杨超越,王延宁. 季冻区石灰改良黏性土路基的耐久性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (34): 14787-14795.
- [12] 赵秀绍,程安,赵林浩,等. 千枚岩复合改良土单轴压缩力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (3): 171-180.
- [13] 张艺,李永强,章定文,等. 粉土改良膨胀土的路用性能与现场试验[J]. 岩土力学, 2023, 44 (10): 2942-2952.
- [14] 邓彩虹,郝广延,吴勇刚,等. 粗颗粒盐渍土工程特性与路基改良方法研究进展[J]. 公路, 2025, 70 (6): 25-31.
- [15] 张军辉,陈莎莎,顾凡,等. 工业废弃料在路基改良中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36 (10): 1-16.
- [16] Zhang Hongda, Zhang Chenda, Zheng Weiqiang, et al. Analysis of the stability of a high fill slope under different gradients and precipitation conditions[J]. Applied Sciences, 2024, 14 (17): 7590-7590.
- [17] 陈锦华. 固化土加宽高速公路路基差异沉降试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.