

软土地基公路扩建工程力学响应机制与 多阶段沉降协同控制研究

王树奎¹, 秦 波², 朱 磊¹

(1. 东北林业大学 工程咨询设计研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 黑龙江农垦建工路桥有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:控制新老路基差异沉降是高速公路拓宽工程的核心难题。为揭示拓宽过程中路基的力学响应及沉降演化规律,本文基于 Abaqus 建立了有限元模型,系统分析了新旧路基相互作用机制及施工全过程沉降特征。研究结果表明:1)台阶开挖导致的旧路基坡脚瞬时沉降为 0.84 cm,主要由边坡卸荷回弹引起;新路基填筑及固结产生的累计沉降达 7.02 cm,且沉降峰值位于新拓宽区域;2)台阶高度对沉降响应的影响有限,其主要工程意义在于增强结合面抗剪强度及咬合作用;台阶尺寸受高宽比(约为 1:2)及开挖稳定性控制,建议标准值取 0.5 m,优化区间宜控制在 0.5~1.0 m;3)铺设玻璃纤维土工格栅可显著抑制路基沉降,使新路基最大沉降量降低 11.47%。本文研究成果可为高速公路改扩建工程中的差异沉降控制及施工参数优化提供理论依据和技术支撑。

关键词:公路扩建工程;软土地基;新老路基;差异沉降控制;台阶法开挖

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)06-0030-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.06.063

Research on mechanical response mechanisms and coordinated control of multi-stage settlement in expansion project of highways constructed on soft soil foundations

WANG Shukui¹, QIN Bo², ZHU Lei¹

(1. Engineering Consulting Design and Research Institute Co., Ltd., Northeast Forestry University,

Harbin 150036, Heilongjiang, China; 2. Heilongjiang Agricultural Reclamation Construction

Engineering Road & Bridge Co., Ltd., Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: Controlling the differential settlement of new and old roadbeds is a core challenge in highway widening projects. To reveal the mechanical response and settlement evolution patterns of the subgrade during widening, a finite element model based on Abaqus is established and the interaction mechanism between new and old subgrades and the settlement characteristics throughout the construction process are systematically analyzed. The research results show: 1) The instantaneous settlement at the old subgrade slope foot caused by bench excavation is 0.84 cm, mainly caused by slope unloading and rebound; The cumulative settlement caused by the new roadbed filling and consolidation reaches 7.02 cm, with the settlement peak locating in the newly widened area; 2) The impact of bench height on settlement response is limited; its main engineering significance lies in enhancing the shear strength and interlock effect of the joint surface; bench dimensions are controlled by the height-to-width ratio (about 1:2) and excavation stability. It is recommended to set the standard value at 0.5 m, with the optimization range controlled between 0.5~1.0 m; 3) Laying fiberglass geogrids can

收稿日期: 2025-11-26

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划资助项目(KJQN202503821)

作者简介: 王树奎(1980—),男,高级工程师,从事公路工程方面的研究。

significantly suppress subgrade settlement, reducing the maximum settlement of new subgrades by 11.4%. The research results can provide theoretical basis and technical support for differential settlement control and construction parameter optimization in expressway reconstruction and expansion projects.

Key words: highway expansion project; soft soil foundation; new and old roadbeds; differential settlement control; bench excavation; bench excavation

近年来,随着高速公路交通量持续增长,现有高速公路的通行能力已难以满足当今社会发展和交通出行的需求,高速公路拓宽工程迫在眉睫^[1-3]。在拓宽过程中,新老路基的相互作用机制、施工力学响应特征以及差异沉降控制是工程控制的重点。

针对新老路基沉降控制问题,何振华^[4]以黏土地基高速公路扩建工程为背景,分析了开挖台阶尺寸及铺设层数对沉降的影响机制;马国栋^[5]对比了土工格栅及土工格室的控沉效果,证实前者加筋性能更优;张梅意^[6]利用 SPSS 探究了岩土体参数敏感性,指出土体容重对沉降的影响最为显著;黄博^[7]依托高液限路基工程,利用有限元法揭示了昌樟高速扩建期间黏土路基的变形规律;凌侨锋^[8]则基于深圳某市政道路,建立了有限元模型,发现随着加宽宽度增加,老路中心与新路坡脚沉降均呈增大趋势,且新路最大沉降点逐渐远离老路中心线。

尽管上述研究针对不同工况下的沉降控制技术进行了有益探索,但结合工程实际可知,现有高速公路扩建工程常穿越软土区域。软土地基高含水率、低渗透性等特点,使得新旧路基结合部的力学响应与沉降控制问题愈发突出。为应对这一挑战,亟须深入探讨软土地基条件下新旧路基的相互作用机制,系统分析施工阶段的沉降演化规律与变形控制途径。本文以典型软土地基高速公路扩建工程为依托,采用数值模拟方法,分析

新旧路基结合部的力学响应特征及施工沉降行为,以期类似地质条件下的改扩建工程提供理论参考与技术支持。

1 有限元模型

1.1 高速公路路基有限元模型

基于 Abaqus 软件建立双向四车道高速公路扩建工程的有限元模型。原有公路顶面宽度为 28 m,在道路两侧分别加宽 7 m,加宽后顶面总宽度达到 42 m。加宽前后路基边坡坡度均为 1.0:1.5,路基高度设定为 5 m。地基土体自上而下依次为 3.5 m 厚素填土层、5.5 m 厚淤泥质粉质黏土层以及 11 m 厚岩层。其中岩层按场地工程地质条件可等效为中风化泥质砂岩(局部夹砂质泥岩),节理裂隙较发育但整体完整性较好;风化程度为中风化~强风化过渡带,在数值模型中作为相对刚性持力层处理。为有效削弱边界效应对地基沉降计算结果的干扰,模型中地基土体长度取 120 m,高度取 20 m。高速公路路基有限元模型如图 1 所示。模型边界条件设置如下:约束地基土体两侧边缘在 x 方向的位移,路基表面不设限;地基地部(模型底边界)设置为 $U_x = 0$ 、 $U_y = 0$ (U_x 、 U_y 分别为水平、竖直方向位移)的固定位移边界,如图 1 中底部边界所示,以模拟持力层约束。

模拟过程中,先对原有路基施加初始地应力,并进行初始应力平衡分析;平衡完成后对旧路基边坡进行台阶法分步开挖。台阶设置的目的在于

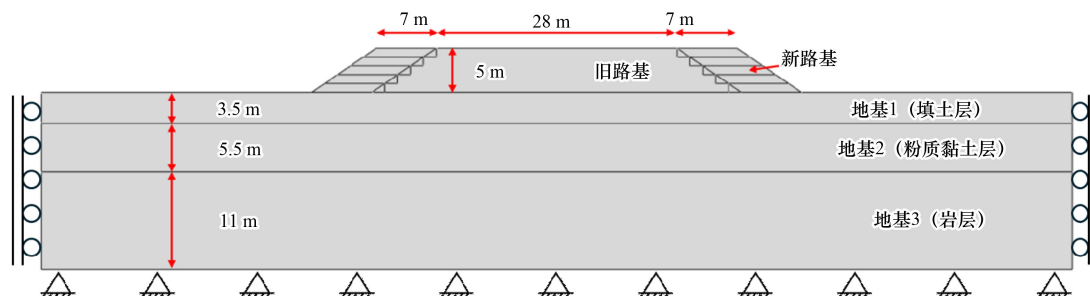


图 1 高速公路路基有限元模型

增大新旧路基结合面的抗剪咬合能力与整体稳定性,基准工况取台阶高度 0.5 m、台阶宽度 1.0 m (高宽比约为 1:2),并按 0.5 m 逐级开挖至设计标高。旧路基开挖完成后,开始对新拓宽路基进行分层填筑。考虑现场填筑碾压通常以 0.3~0.4 m 为一压实层,在有限元中采用“分期填筑”的等效处理:每一分期填筑高度取 0.5 m,可视为若干压实层的等效叠加;待该期固结基本稳定后再进行下一期填筑,以此类推直至填筑完成。因此,新路基填筑共设置 10 期填筑分析步(总高度为 5 m),以更合理地表征施工分期与沉降演化过程。模型分析步设置及开挖示意如图 2 所示。

1.2 本构关系及单元选择

采用摩尔-库仑弹塑性本构模型对土体的非线性力学行为进行模拟。该模型通过凝聚力与内摩擦角等参数有效表征土体的剪切破坏特征,能够较好地反映软黏土的应变软化行为以及填土材料的硬化响应。各类土层所采用的材料参数如表 1 所示。需要说明的是,表 1 中的“模量”参数优先采用工程勘察报告给出的压缩模量或变形模量,并在 Abaqus 中按线弹性等效为弹性模量输入,以保证沉降计算的可比性与工程合理性;岩层作为相对刚性持力层,其等效模量取值显著高于路基填土与软土层。

模型单元类型选用 CPE4R 平面应变四节点减积分单元,该单元适用于模拟摩尔-库仑材料的应力-应变响应,具有较好的收敛性与计算稳定性。

为提高沉降模拟的精度,单元尺寸设为 0.5 m,模型总计划分单元数共计 12 232 个。

2 有限元结果分析

2.1 施工全过程沉降演化特征

首先对施工全过程中的地基沉降变化进行分析。在地应力分析步完成后,道路地基的最大沉降为 10-9 量级,表明初始地应力已基本达到平衡状态。随后对路基开挖及拓宽填筑全过程进行模拟,其最大沉降变化过程如图 3 所示。

在第一步台阶法开挖阶段,最大沉降出现在原有路基坡脚位置,沉降值为 0.84 cm,主要由边坡卸载引起的局部变形所致。进入新路基分层填筑阶段后,随着填筑荷载的持续施加及地基土体的逐步固结,沉降显著增大。此阶段的沉降主要由新填土区域的固结变形所引起,沉降区域逐步向新路基方向集中。随着填筑高度的不断增加,新路基累计固结沉降亦逐步增大。最终,在新路基填筑完成后,地基最大沉降达到 7.02 cm,沉降峰值主要分布于新拓宽区域。

为进一步分析施工全过程中道路表面的沉降演化特征,选取路面为观测剖面,对其不同阶段的沉降变化进行监测。图 4 为台阶法开挖完成后以及新路基填筑完成后新旧路面沉降曲线的对比结果。由图 4 可知:路面中心区域沉降变化较小,整体保持稳定。在台阶法开挖阶段,旧路面两侧边缘区域出现一定沉降,最大值为 0.31 cm。随着

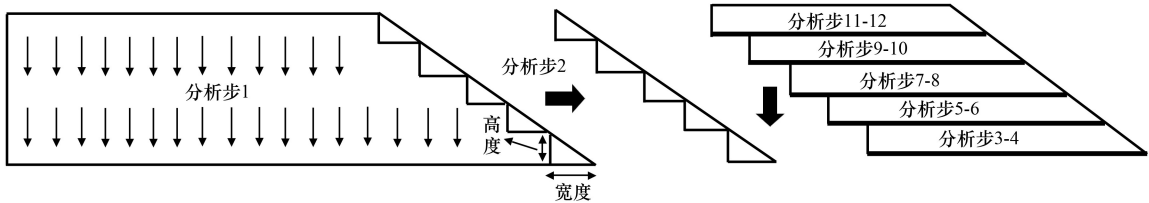


图 2 台阶开挖示意

表 1 新老路基与地基土层物理力学材料参数

土层	密度/(g·cm ⁻³)	等效弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
旧路基	1.90	50.00	0.30	12.40	17.9
新路基	1.80	40.00	0.30	8.60	15.1
素填土层	1.92	10.40	0.30	12.50	15.7
粉质黏土层	1.72	6.43	0.40	9.87	16.2
岩层(中等风化泥质砂岩)	1.94	300.00	0.25	200.00	35.0

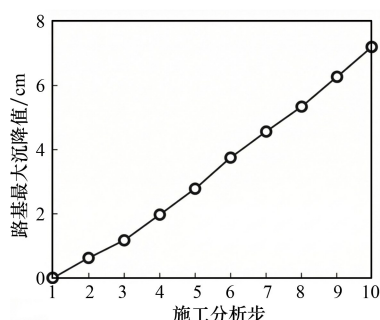
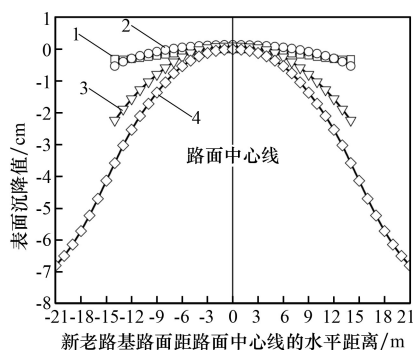


图3 施工全过程路基沉降变化曲线



1—台阶开挖旧路基。新路基填筑高度/m: 2—2; 3—4; 4—5。

图4 新老路基填筑施工过程位移沉降曲线

新路基分层填筑的推进,当填筑高度达到2 m时,施工对旧路基的影响仍较为有限,此时旧路面两端的最大沉降值为0.53 cm。当填筑高度增至4 m,即施工后期,旧路基边缘受堆载影响沉降进一步加剧,最大沉降值达2.20 cm。新路基填筑并完成固结后,受施工期间持续堆载作用影响,其表面出现明显沉降,最终新路基路面两端的最大沉降位移达到6.80 cm,表明新填区域地基固结变形显著。

2.2 施工全过程剪切应力响应

图5为旧路基开挖及新路基填筑施工过程中路基最大剪应力的变化过程。由图5可知:在初始地应力平衡条件下,地基的最大剪应力为22 kPa。台阶法开挖完成后,受削坡作用影响,局部结构释放了部分约束,应力重新分布,导致路基的最大剪应力有所减小。随着新路基填筑的推进,新填土对坡脚部位形成一定的反向压载效应,从而进一步抑制剪切应力的集中发展,使得最大剪切应力持续下降。当填筑高度不断增加,新路基边坡逐步成形,其内部逐渐发展出明显的土拱效应;同时,填方区与原地基之间的刚度差

异使得局部应力场发生重新分布与调整。此阶段,路基最大剪切应力呈现出缓慢回升趋势。最终,在新路基填筑完成后,由于新旧路基坡度统一为1.0:1.5,边坡整体趋于稳定,应力重新集聚,最大剪切应力恢复至22 kPa。

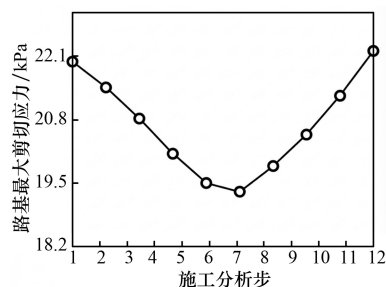


图5 施工全过程路基最大剪切应力变化曲线

为明确最大剪应力的空间位置,结合剪应力云图(图6)可知:开挖阶段最大剪应力主要集中于旧路基坡脚及台阶转角处,该处受卸载引起的应力重分布影响,剪切带容易在台阶折角附近形成;进入填筑阶段后,最大剪应力逐步向新旧路基结合部(台阶面与原地基接触区)及新路基坡脚附近迁移,反映出新填土堆载对结合部与坡脚区域的剪切控制作用。当填筑高度增加时,新填土体内部在自重与堆载作用下形成由上部向两侧及下部传递的主压应力路径,并在刚度相对较大的旧路基与持力层之间产生“荷载转移-应力重分配”现象,即土拱效应:部分竖向荷载通过拱形受压区向两侧/下部更刚性的介质传递,使得拱顶下方的竖向应力有所降低、拱脚(通常位于新旧路基交界及坡脚邻近区)处应力提高,从而解释了填筑后期剪应力的缓慢回升与局部集聚。

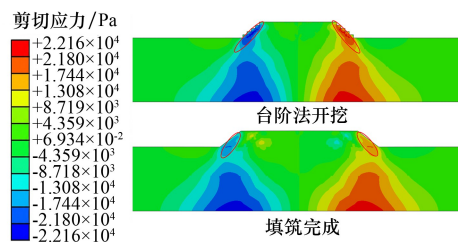


图6 施工过程剪切应力变化云图

3 施工参数优化

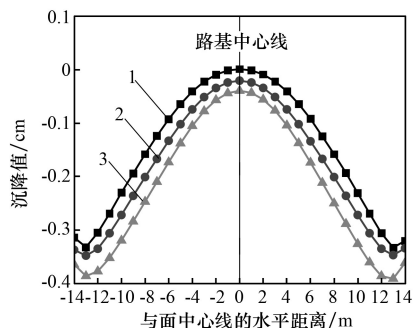
在路基改扩建工程中,台阶开挖尺寸与土工格栅等施工参数之间的协同作用对地基沉降控制及应力重分布具有显著的调节效应。为深入探讨

关键施工参数对路基变形与稳定性的影响机制,结合数值模拟结果,系统分析其作用机理与优化路径,为施工方案的参数选取与工程调控提供理论依据与实践指导。

3.1 台阶开挖高度对路基沉降的影响

鉴于施工可操作性、开挖扰动范围及边坡稳定控制等因素的制约,工程中台阶尺寸通常需满足特定的几何比例关系(高宽比一般约为 1:2),因此台阶高度不宜任意放大。为评估台阶高度变化对沉降响应的敏感性,在保持路基总填筑高度为 5 m 不变的前提下,设置台阶高度为 0.5、1.0、1.5 m 开展对比计算。其中,0.5 m 为工程推荐基准值;1.0、1.5 m 用于参数敏感性分析,其工程适用性需结合相应开挖宽度、占地条件与稳定控制要求进一步校核。最后一级台阶高度根据填筑至设计高程的要求进行相应调整。

图 7 为不同台阶高度开挖条件下旧路基表面沉降的分布曲线。由图 7 可知:随着台阶高度增大,旧路基最大沉降呈小幅上升趋势,且最大沉降主要出现在路基两侧边缘区域。当台阶高度为 0.5 m 时,最大沉降值为 0.32 cm;当台阶高度增至 1.0 m 时,最大沉降值为 0.34 cm,较前者增加约 6.3%;当台阶高度进一步增至 1.5 m 时,最大沉降值为 0.38 cm,较 1.0 m 工况增加约 11.8%。总体而言,旧路基最大沉降随台阶高度变化的增幅有限,表明沉降对台阶高度的敏感性较低。鉴于台阶设置主要服务于衔接面抗剪稳定与受力路径优化,且其几何尺寸受高宽比(约 1:2)、开挖量及边坡稳定等工程约束影响,台阶高度不宜以“提高效率”等目标作为放大依据。综合沉降响应



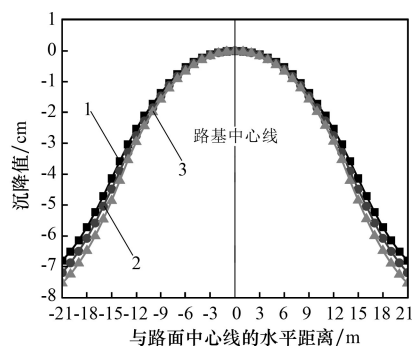
台阶高度/m: 1—0.5; 2—1.0; 3—1.5。

图 7 不同台阶高度下台阶开挖完成后旧路基沉降曲线

与工程可实施性,建议台阶高度取 0.5 m,必要时可在 0.5~1.0 m 区间内优化选取。

图 8 为新路基台阶填筑完成后其表面沉降的变化规律。由图 8 可知:不同台阶高度(0.5、1.0、1.5 m)对应的新路基沉降曲线具有高度一致的变化趋势,沉降量随填筑深度的增加逐渐累积,并在路基地部区域达到峰值。具体而言,当台阶高度由 0.5 m 增加至 1.5 m 时,新路基的最大沉降值分别为 6.8、7.2、7.5 cm,增幅分别为 0.4、0.3 cm,对应的相对变化率为 5.9%、4.2%。上述结果说明,在工程可实施的台阶高度范围内,新路基沉降对台阶高度变化同样不敏感,台阶高度的调整不会显著放大沉降风险。

结合沉降响应与工程可实施性分析可知:台阶参数优化应以增强新旧路基衔接面的咬合与抗剪稳定性、改善局部荷载传递为主要目标,其几何尺寸受高宽比(约 1:2)以及开挖扰动范围和边坡稳定控制条件约束,台阶高度不宜以“减少填筑分层次数”为依据进行放大。更合理的做法是在满足变形控制与稳定要求的前提下,将台阶高度控制在 0.5~1.0 m 的工程常用区间,并与土工格栅等加筋参数协同优化,以实现沉降控制与衔接区稳定性的兼顾。



台阶高度/m: 1—0.5; 2—1.0; 3—1.5。

图 8 不同台阶高度下路基填筑完成后路基沉降曲线

3.2 土工格栅对路基沉降的影响

通过对比分析设置与未设置土工格栅条件下路基的沉降与受力特性,探讨土工格栅对新路基填筑施工过程中地基变形的影响机制。土工格栅是一类由高分子材料(如聚丙烯、聚乙烯)、玻璃纤维或金属构成的网格状结构材料,具有优良的抗拉性能,广泛应用于高速公路路基等结构中。

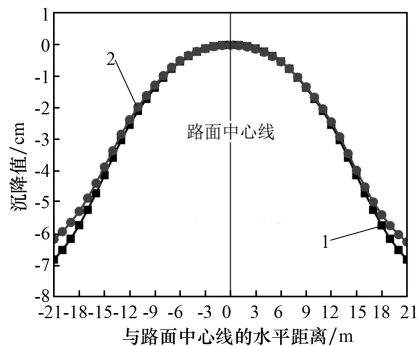
其主要功能在于有效分散集中荷载、抑制土体颗粒的侧向移动, 从而增强地基整体稳定性, 形成较为稳定的加筋土复合体。

本文重点研究玻璃纤维土工格栅对填筑沉降的抑制效应。在完成台阶法开挖后, 分别建立设置与未设置玻璃纤维土工格栅的数值模型, 随后进行新路基填筑, 分析不同工况下路基沉降的差异性。由于土工格栅厚度较小, 本文将其简化为具有一定厚度的均质层状材料。土工格栅本构模型同样采用摩尔-库仑准则进行描述, 其物理与力学参数如表 2 所示。

表 2 土工格栅加强后附近土体物理力学参数

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松比	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
2.6	0.25	85	20	37

图 9 为设置与未设置土工格栅两种工况下新路基的沉降曲线。由图 9 可知: 铺设土工格栅对控制路基沉降具有积极作用。在未设置土工格栅时, 新路基的最大沉降值为 6.80 cm; 设置土工格栅后, 最大沉降值降低至 6.02 cm, 降幅为 0.78 cm, 相对减少约 11.47%。这一降幅表明, 土工格栅通过加筋作用有效优化了路基内部的应力分布, 从而在一定程度上减少了总沉降并抑制了差异沉降。此外, 考虑到土工格栅材料成本较低(占工程总造价不足 3%)且施工便捷, 该措施在软土地基或高填方路段中展现出良好的技术经济效应, 可作为一项有效的优化措施予以选择性地应用。



1—未添加土工格栅; 2—添加土工格栅。

图 9 不同台阶高度下路基填筑完成后路基沉降曲线

4 结 论

(1) 旧路基坡脚在台阶法开挖过程中产生瞬

时沉降值 0.84 cm, 主要由边坡卸荷回弹引起的局部变形所致; 而新路基填筑与固结引起的累计沉降值达 7.02 cm, 且沉降峰值主要分布于新拓宽区域。

(2) 台阶高度变化对沉降响应的影响总体有限: 在保持总填筑高度不变的条件下, 旧路基最大沉降值仅由 0.32 cm 增至 0.38 cm, 表明沉降对台阶高度敏感性较低。台阶设置主要用于增强新旧路基衔接面的咬合与抗剪稳定性, 其尺寸受高宽比(约为 1:2)及开挖稳定条件约束, 不宜任意放大; 综合工程可实施性, 建议台阶高度取 0.5 m, 并可在 0.5~1.0 m 范围内优化。

(3) 设置玻璃纤维土工格栅后, 路基最大沉降值从 6.80 cm 下降至 6.02 cm, 降幅为 0.78 cm(约为 11.47%)。这表明土工格栅能增强局部土体刚度、优化应力分布, 尤其在高填方或软弱地基等特殊工况下效果显著; 结合其低成本与施工便捷性, 该措施具备较高的工程推广价值。

参考文献:

[1] 王宗斌. 高速公路改扩建新旧路基结合部沉降及稳定性计算方法研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(8):176-179.

[2] 周小舟. 绿色公路设计在高速公路改扩建工程中的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(12):88-90.

[3] 张阿玲, 马云, 梁亚平, 等. 高速公路改扩建中桥梁中央分隔带混凝土护栏加劲结构研究[J]. 公路, 2024, 69(12):342-347.

[4] 何振华. 高速公路改扩建黏土路基加宽差异沉降控制技术[D]. 西安:西安理工大学, 2021.

[5] 马国栋. 基于拓宽路基不均匀沉降仿真的控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.

[6] 张梅意. 改扩建公路路基填料差异性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.

[7] 黄博. 高液限黏土路基改扩建差异沉降及处治方法的数值模拟[D]. 长沙:长沙理工大学, 2017.

[8] 凌侨锋. 市政道路改扩建工程中新老路基沉降差异性研究[J]. 江西建材, 2024(9):234-236.