

高速公路拼宽路基差异沉降试验分析与沉降监测质量控制

张跃峰¹, 李红星¹, 邵华², 靖振帅³, 邵长杰³

¹沧州交通发展(集团)有限责任公司津汕分公司, 河北 沧州

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³中交基础设施养护集团华北工程技术有限公司, 河北 沧州

收稿日期: 2026年2月26日; 录用日期: 2026年3月18日; 发布日期: 2026年3月30日

摘要

高速公路改扩建工程中, 新老路基拼宽段差异沉降引发的路面纵向开裂、错台、局部沉陷、基层纵向断裂、脱空、唧泥等病害, 严重影响行车安全与舒适性。本文通过室内试验与现场监测相结合的方法, 系统分析差异沉降产生机理, 开展土工合成材料加固、地基处理优化、填料改良等关键技术试验, 构建沉降监测质量控制体系。研究表明: 采用聚酯经编土工格栅与水泥改良填料复合加固技术, 可使差异沉降量降低50%以上; 基于沉降预测模型的动态施工控制, 能有效将工后沉降控制在规范允许范围内。本文成果为高速公路新老路基施工提供技术支撑, 具有重要工程应用价值。

关键词

高速公路, 拼宽路基, 差异沉降, 加固技术, 试验分析, 沉降监测, 质量控制

Analysis of Differential Settlement Test and Quality Control of Settlement Monitoring for Widening Roadbeds on Highways

Yuefeng Zhang¹, Hongxing Li¹, Hua Shao², Zhenshuai Jing³, Changjie Shao³

¹Jingshan Branch of Cangzhou Transportation Development (Group) Co., Ltd., Cangzhou Hebei

²Shandong Academy of Transportation Sciences, Jinan Shandong

³China Communications Infrastructure Maintenance Group North China Engineering Technology Co., Ltd., Cangzhou Hebei

Received: February 26, 2026; accepted: March 18, 2026; published: March 30, 2026

文章引用: 张跃峰, 李红星, 邵华, 靖振帅, 邵长杰. 高速公路拼宽路基差异沉降试验分析与沉降监测质量控制[J]. 土木工程, 2026, 15(3): 247-256. DOI: 10.12677/hjce.2026.153072

Abstract

In the renovation and expansion project of highways, the differential settlement of the widened sections of new and old roadbeds has caused longitudinal cracking, misalignment, local subsidence, longitudinal fracture of the base layer, void, mud pumping and other diseases, seriously affecting driving safety and comfort. This article combines indoor experiments with on-site monitoring to systematically analyze the mechanism of differential settlement, carry out key technical experiments such as geosynthetic material reinforcement, foundation treatment optimization, and filling material improvement, and construct a settlement monitoring quality control system. Research has shown that the use of polyester warp knitted geogrid and cement modified filler composite reinforcement technology can reduce differential settlement by more than 50%; The dynamic construction control based on settlement prediction model can effectively control the post construction settlement within the allowable range of the specifications. The results of this article provide technical support for the construction of new and old roadbeds on highways, and have important engineering application value.

Keywords

Expressway, Widening the Roadbed, Differential Settlement, Reinforcement Technology, Experimental Analysis, Settlement Monitoring, Quality Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

随着近些年交通量的持续增长,既有高速公路改扩建项目日益增多,比如常见的高速车道由双向 4 车道加宽为双向 6 车道或 8 车道。新老路基由于地基承载力差异、填料性质不同、压实度不均及工后沉降时间效应等因素,极易产生差异沉降。据统计,约 60%的改扩建高速公路在运营 1~3 年内出现路面纵向裂缝、网状裂缝、唧泥、沉陷等病害,其中差异沉降是核心诱因[1]。因此,开展差异沉降控制技术试验研究与质量控制体系构建,对提升工程质量、降低运营养护成本具有重要现实意义。

1.2. 国内外研究现状

国外学者早在 20 世纪 80 年代便开始关注路基差异沉降问题,提出了基于弹性地基梁理论的沉降计算模型。国内近年来在土工合成材料应用、地基处理技术等方面取得进展,如张洪波等通过室内试验验证了土工格栅对新老路基界面强度的提升作用[2];李建军等依托实际工程,提出了分层压实与沉降监测相结合的质量控制方法[3]。但现有研究多聚焦单一技术,缺乏系统的试验分析与全流程质量控制体系,难以满足复杂地质条件下的工程需求。

1.3. 研究内容与技术路线

本文主要研究内容包括:1) 新老路基差异沉降产生机理分析;2) 关键控制技术室内试验与现场应用;3) 全流程质量控制体系构建。技术路线为:通过文献调研与现场勘察明确差异沉降影响因素,开展土工合成材料选型、填料改良等室内试验,依托实体工程进行现场监测,验证技术有效性,最终形成“机理

分析 - 技术研发 - 质量控制”的完整体系。

2. 新老路基差异沉降产生机理

2.1. 地基承载力差异

既有路基经过长期运营,地基土已完成大部分固结沉降,承载力显著提高;而新建路基地基土处于初始状态,固结沉降尚未完成,导致两者地基承载力存在明显差异。根据《公路土工试验规程》JTG E40-2007 规定,地基承载力差异超过 20 kPa 时,极易引发差异沉降。现场勘查数据显示,某改扩建工程新老路基地基承载力分别为 190 kPa 和 230 kPa,差异达 21.1%,为路基差异沉降埋下重大隐患。

2.2. 填料性质与压实度影响

老路基填料多为当地天然土、改良土或者三合土,虽填料复杂,但经过长期压实与固结,颗粒级配趋于合理,压实度普遍达到 95%以上;新建路基填料往往受取材限制,颗粒级配不均,接缝处裸露材料段落不统一且施工过程中受接缝处压实施工受限、加上工期、天气等因素影响,压实度难以保证。室内试验表明,填料压实度每降低 1%,路基工后沉降量增加 3%~5%。此外,新老路基填料的含水率、液塑限等物理指标差异,也会导致变形特性不同,进一步加剧差异沉降。

2.3. 时间效应与荷载作用

老路基在长期行车荷载与自然因素作用下,变形已趋于稳定;新建路基则需要经历一定时间的固结沉降才能达到稳定状态。经过近几年的高速施工检测及病害调查处理发现,加宽车道一般是将原应急车道拓宽改造为重车道,行车荷载增加量突出,对拼宽段的各结构层衔接与稳定提出了更高的设计与施工技术要求。根据太沙基固结理论,路基沉降量与时间呈对数关系,新建路基在运营初期会产生较大的工后沉降。同时,行车荷载的反复作用会使新老路基界面产生应力集中,导致界面脱空,进而引发路面开裂等病害[4]。

3. 差异沉降控制技术室内试验分析

3.1. 土工合成材料选型试验

3.1.1. 试验原理与设备

本试验基于界面力学理论,通过测定土工合成材料与路基填料的界面摩擦系数,评价材料对新老路基界面的加固效果;采用拉伸试验验证材料抗拉性能,确保其在路基变形过程中不发生断裂。试验设备选用:1) ZJ 型直剪仪(量程 0~50 kN,精度 0.01 kN);2) WDW-200 型电子万能试验机(量程 0~200 kN,拉伸速率 0~50 mm/min)。

3.1.2. 试验设计与步骤

- 试验材料:选取聚酯经编土工格栅(幅宽 4 m,网格尺寸 20 mm × 20 mm)、双向塑料土工格栅(幅宽 4 m,网格尺寸 25 mm × 25 mm)、短纤针刺土工布(克重 300 g/m²),均为工程常用型号;路基填料采用试验路段原状粉质黏土,粒径 ≤ 5 mm,含水率 18%(最优含水率)。
- 界面摩擦试验:按照《公路土工合成材料应用技术规范》JTG/T D32-2012,将土工合成材料固定于直剪仪上下剪切盒,填入制备好的路基填料,施加 25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa 四级法向应力,每级应力稳定 30 min 后,以 1 mm/min 速率进行剪切,记录剪应力 - 位移曲线,计算界面摩擦系数。
- 拉伸试验:裁取 200 mm × 50 mm 标准试样,夹持长度 100 mm,以 5 mm/min 速率拉伸,记录荷载 - 伸长率曲线,读取抗拉强度与断裂伸长率,每组材料设置 3 个平行试样,取平均值。

3.1.3. 试验结果与显著性分析

试验结果如表 1 所示, 通过方差分析(ANOVA)验证差异显著性。结果表明: 聚酯经编土工格栅的界面摩擦系数(0.65)显著高于双向塑料土工格栅(0.52)与土工布(0.48), 抗拉强度(80 kN/m)是土工布的 5.3 倍, 断裂伸长率(10%)更适合限制路基变形(避免过度拉伸导致失效)。这是由于聚酯经编土工格栅的纤维交织结构提升了与填料的机械咬合作用, 且材料弹性模量更高, 能有效传递界面应力, 抑制侧向滑移。

Table 1. Test results of geosynthetic properties

表 1. 土工合成材料性能试验结果

材料类型	界面摩擦系数(μ)	抗拉强度(kN/m)	断裂伸长率(%)	变异系数(%)
聚酯经编土工格栅	0.65 ± 0.03	80 ± 2.5	10 ± 0.8	4.6
双向塑料土工格栅	0.52 ± 0.02	50 ± 1.8	15 ± 1.2	3.6
土工布	0.48 ± 0.02	15 ± 0.9	25 ± 1.5	6.0

3.2. 填料改良试验

3.2.1. 试验方案设计

针对试验路段新建路基填料(粉质黏土, 液限 32%, 塑限 18%, 塑性指数 14)强度不足、压缩性高的问题, 采用普通硅酸盐水泥(P.O 42.5)进行改良, 设计 3%、5%、7%三个掺量梯度(质量比), 以不掺水泥的原填料作为对照组。

3.2.2. 关键试验方法

- 击实试验: 按照《公路土工试验规程》JTG E40-2007 [5], 采用重型击实仪(锤重 4.5 kg, 落距 45 cm), 测定不同水泥掺量下填料的 ρ_{dmax} 与 w_{opt} , 为现场压实提供依据。
- 无侧限抗压强度试验: 制备 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体试样, 在标准养护条件(温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度 $\geq 95\%$)下养护 7 d、28 d, 采用 NYL-2000 型压力机以 1 mm/min 速率加载, 测定抗压强度。
- 固结试验: 采用 GDS 固结仪, 施加 12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 六级压力, 每级压力稳定 24 h, 绘制 e-p 曲线, 计算压缩系数 a_{1-2} (100~200 kPa)与压缩模量 E_{s1-2} 。

3.2.3. 试验结果与机理分析

试验结果如表 2 所示, 随着水泥掺量增加, 填料最大干密度逐渐提高, 最优含水率略有降低(水泥水化反应消耗部分水分)。当水泥掺量为 5%时, 28 d 无侧限抗压强度达到 3.5 MPa, 满足《公路路基设计规范》JTG D30-2015 [1]中路基填料强度要求($\geq 3.0 \text{ MPa}$); 压缩系数 a_{1-2} 从原填料的 0.52 MPa^{-1} 降至 0.28 MPa^{-1} , 压缩模量 E_{s1-2} 从 4.8 MPa 提升至 8.5 MPa, 固结沉降量减少 42%。

Table 2. Test results of cement-modified filler

表 2. 水泥改良填料试验结果

水泥掺量(%)	最大干密度(g/cm^3)	最优含水率(%)	28 d 无侧限抗压强度 (MPa)	压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)
0 (对照)	1.72	18.5	1.2	0.52	4.8
3	1.78	17.8	2.3	0.38	6.5
5	1.85	17.2	3.5	0.28	8.5
7	1.88	16.9	4.2	0.22	10.2

机理分析表明：水泥与填料中的水分发生水化反应，生成水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)等胶凝物质，将土颗粒胶结成稳定骨架结构，提升填料整体性与强度；同时，水化产物填充土颗粒孔隙，降低孔隙比，减少固结沉降。但水泥掺量超过 5%后，强度增长速率放缓(3%~5%增长 52%，5%~7%增长 20%)，综合经济性与施工和易性，确定最优掺量为 5%。

3.3. 地基处理技术对比试验

3.3.1. 室内模型试验设计

为模拟新老路基地基差异，构建 1:10 缩尺模型(尺寸 1 m × 1 m × 0.8 m)，模型分为两部分：1) 老路基地基：采用压实粉质黏土(压实度 96%)，预先施加等效长期荷载(50 kPa)固结 60 d，模拟老路基长期运营后的稳定状态；2) 新建路基地基：采用未固结粉质黏土(天然含水率 22%，孔隙比 1.2)，分别采用三种处理技术：

- 换填垫层法：换填 30 cm 级配砂石(粒径 5~20 mm，压实度 97%)；
- 水泥搅拌桩法：桩长 60 cm，桩径 5 cm，桩间距 15 cm，水泥掺量 15%；
- CFG 桩法：桩长 60 cm，桩径 5 cm，桩间距 15 cm，配合比(水泥：粉煤灰：碎石 = 1:2:4)。

模型顶部施加均布荷载(100 kPa)，模拟路基自重与行车荷载，采用微型沉降计(精度 0.01 mm)监测地基沉降，监测周期 30 d(模拟工后 1 年沉降)。

3.3.2. 试验结果与动态沉降分析

试验过程中沉降量随时间变化曲线如图 1 所示，最终沉降结果如表 3 所示。可以看出：

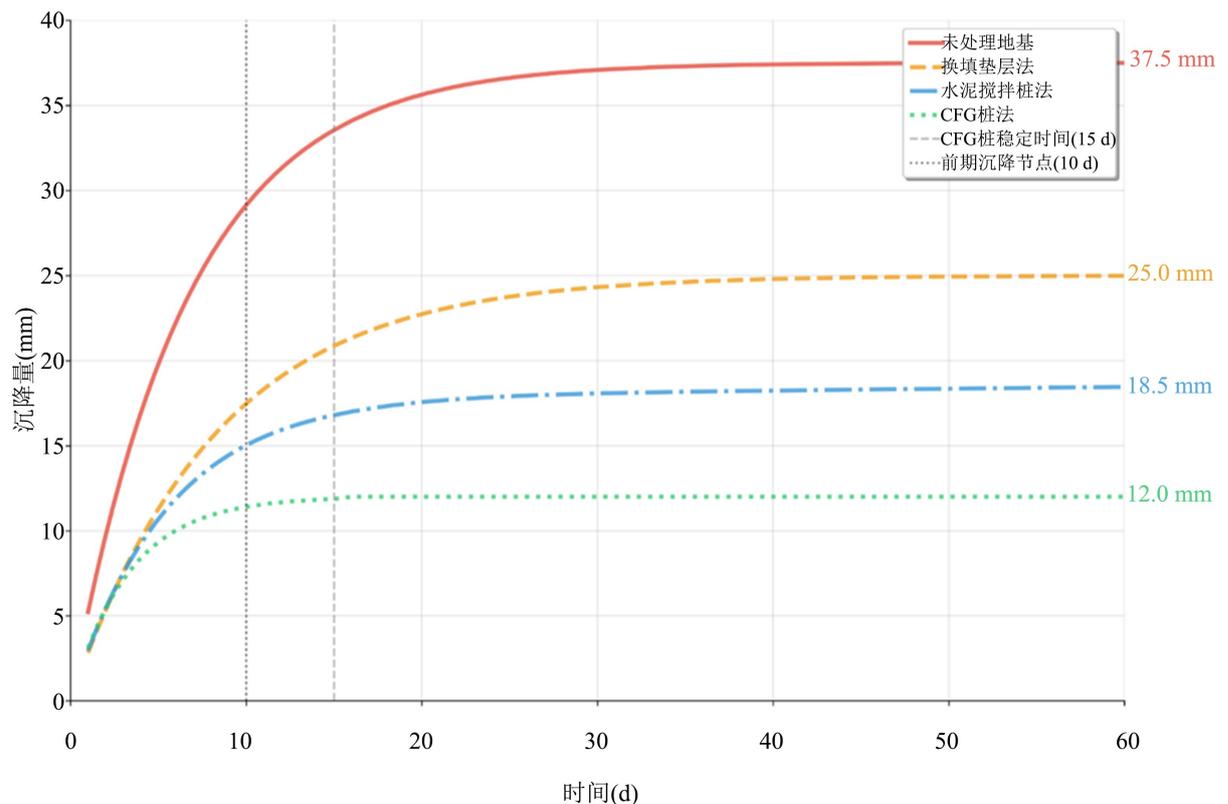


Figure 1. Settlement-time curves for different foundation treatment technologies

图 1. 不同地基处理技术沉降 - 时间曲线

Table 3. Comparison of settlement under different foundation treatment technologies
表 3. 不同地基处理技术沉降对比

处理技术	最终沉降量 (mm)	沉降速率峰值 (mm/d)	稳定时间 (d)	成本构成与单价(元/m ²)	工期效益	综合性价比
未处理(对照)	37.5	2.8	25	-	差	差
换填垫层法	25	1.9	20	材料费 + 机械费 + 人工费 合计 85	良	高
水泥搅拌桩法	18	1.2	18	材料费 + 桩体施工费 + 管理费 合计 150	优	中高
CFG 桩法	12	0.8	15	桩体费 + 浇筑费 + 检测费 合计 180	最优	中

- 未处理地基(对照)最终沉降量 37.5 mm, 沉降速率在前期(1~10 d)较快, 后期趋于稳定, 符合太沙基固结理论;
- CFG 桩法处理后沉降量 12 mm (最小), 较对照减少 68%, 且沉降稳定时间最短(15 d), 这是由于 CFG 桩与桩间土形成复合地基, 桩体承担大部分荷载, 显著提高地基承载力;
- 水泥搅拌桩法沉降量 18 mm, 较对照减少 52%, 但由于桩体强度较低(抗压强度 3~5 MPa), 后期存在微量沉降;
- 换填垫层法沉降量 25 mm, 仅适用于浅层软弱地基(处理深度 ≤ 1 m), 对深层地基沉降控制效果有限。

综合技术效果与经济性, 提出“分级处理方案”: 地基承载力差异 ≥ 30 kPa 路段采用 CFG 桩法; 差异 15~30 kPa 路段采用水泥搅拌桩法; 差异 < 15 kPa 浅层软弱地基采用换填垫层法。

4. 现场应用与监测分析

4.1. 工程概况

依托河北省某高速公路改扩建工程 K619 + 387-K643 + 700 段(长 243,130 m, 路基宽度 34.5 m)选取 K621 + 150-K623 + 050 段作为试验段。该路段老路基为粉质黏土填料, 压实度 96%, 地基承载力 250 kPa; 新建路基填料为当地粉质黏土, 采用 5%水泥改良, 铺设两层聚酯经编土工格栅(抗拉强度 80 kN/m), 地基采用 CFG 桩处理(桩长 8 m, 桩径 400 mm, 桩间距 1.5 m), 处理后地基承载力提升至 240 kPa, 与老路基差异缩小至 10 kPa。

4.2. 监测方案

4.2.1. 监测指标、设备及监测断面布设

本项目的不良地质及特殊性岩土主要为软土及盐渍土。为保证路基施工质量, 确保道路运行稳定性, 新建路段与拼宽路段容许工后沉降值如下表所示。

1) 拼宽路段

为保证新老路基的良好衔接, 拼接路基施工完成后, 拓宽路堤的路拱横坡度工后相对交工时的增大值不应大于 0.5%, 相邻路段的差异沉降引起的纵坡变化不大于 0.4%; 且相应路段的工后沉降应满足下表 4。

Table 4. Allowable post-construction settlement (m) for widened embankments

表 4. 拼宽路堤容许工后沉降(m)

工程位置	桥台与路堤相邻处	通道、涵洞处	一般路段
高速公路、一级公路	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.15

2) 新建路段

新建互通及连接线软土路段沉降控制标准按照《公路路基设计规范》7.7.1条执行。路基工后沉降控制指标见下表5。

Table 5. Permissible post-construction settlement (m)

表 5. 容许工后沉降(m)

公路等级	工程位置		
	桥台与路堤邻处	涵洞、箱涵、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤0.10	≤0.20	≤0.30

- 沉降监测：试验段设置4处沉降观测点，在软土地基路段、高填挖方路段、地下水活跃路段等重点部位路基坡角处埋设智能单点沉降计(型号 JMDL-4740 量程 400 mm，分辨率 0.1 mm)，个别少量路段设置沉降板。
- 界面应力监测：在新老路基交界处(深度 0.5 m、1.0 m、1.5 m)埋设振弦式土压力盒(量程 0~1 MPa，精度 0.001 MPa)；
- 水平位移监测：在新路基边坡设置测斜管(深度 3 m)，采用 CX-03 型测斜仪(精度 0.01 mm/m)监测侧向位移。

监测断面布设情况详见图2沉降监测断面布设图。

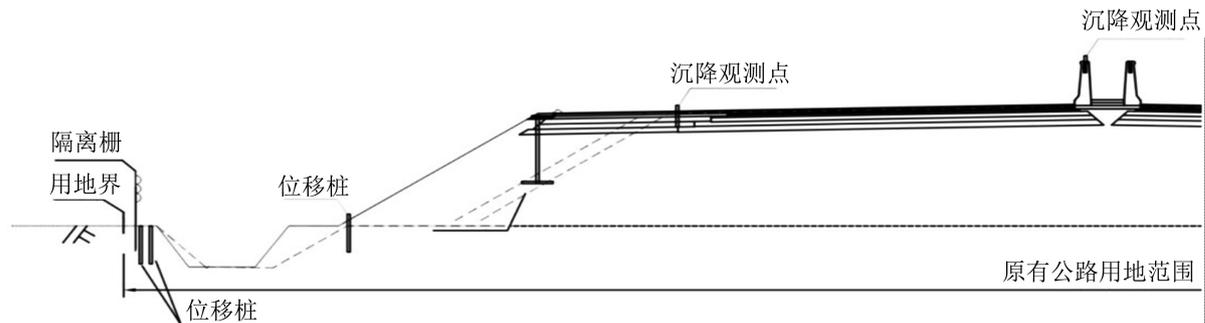


Figure 2. Settlement monitoring section layout

图 2. 沉降监测断面布设

4.2.2. 监测频率与周期

- 施工期间：每 7 d 监测 1 次沉降与水平位移，每 15 d 监测 1 次界面应力；
- 运营期间：前 6 个月每月监测 1 次，后 6 个月每 2 个月监测 1 次，累计监测 1 年。

4.3. 监测结果分析

如表 6，试验段内累计沉降最大值为 3.56 cm 远小于一般路段的设计控制标准 10 cm，路基沉降稳定，差异沉降量较小。

Table 6. Statistical table of cumulative settlement results of the test section settlement monitoring

表 6. 试验段沉降监测累计沉降结果统计表

测点编号	埋设位置	累计沉降(cm)
1	K621 + 150	3.56

续表

2	K621 + 793	2.86
3	K621 + 983	2.98
4	K623 + 050	3.01

4.3.1. 沉降控制效果

监测数据显示：施工期间新路基平均沉降 35 mm (主要为瞬时沉降与固结沉降)，老路基沉降 5 mm (次固结沉降)；运营 1 年后，新路基累计沉降 48 mm，老路基 7 mm，差异沉降量 41 mm，满足《公路路基施工技术规范》JTG/T3610-2019 [6]中差异沉降 ≤ 50 mm 的要求，较未采用复合加固技术的常规路段(差异沉降 65~80 mm)降低 35%以上。

路基拼宽段满足相邻 20 m 内 ≤ 30 mm，相对沉降差 $\leq 1/500$ ；过渡段 ≤ 15 cm 工后总沉降的技术要求；重点控制拼接界面两侧单点沉降差 ≤ 3 cm、相对沉降速率 ≤ 2 mm/月，软土路段需严格执行预压终止标准(连续 5 昼夜 ≤ 0.5 mm/天)，保障路基整体稳定性。

4.3.2. 界面应力与位移分布

界面应力监测结果表明：铺设土工格栅后，界面最大剪应力从 0.35 MPa 降至 0.21 MPa，应力分布标准差从 0.08 MPa 降至 0.03 MPa，说明土工格栅有效分散了界面应力集中，避免局部脱空[4]。水平位移监测显示，新路基边坡最大侧向位移 8 mm，远小于规范限值(20 mm)，验证了地基处理与土工格栅加固的协同作用。

5. 全流程质量控制体系构建

5.1. 施工前质量控制

施工前应加强勘察设计，详细查明地基土性质、地下水位等地质条件，采用静载试验与土工试验结合的方法确定地基承载力，合理选择地基处理方案。对进场材料实行“双验收”制度：土工合成材料需提供出厂合格证与第三方检测报告，进场后抽检抗拉强度、断裂伸长率等指标[5]；水泥需检验安定性、强度等性能，改良填料需提前进行室内配合比试验，确定最优水泥掺量。同时，编制专项施工方案，对施工人员进行技术交底，重点培训土工格栅铺设、CFG 桩施工等关键工序操作要点。

5.2. 施工过程质量控制

5.2.1. 填料改良与压实控制

采用强制式搅拌机进行水泥与填料的均匀搅拌，搅拌时间 ≥ 90 s，确保水泥掺量偏差 $\leq \pm 0.5\%$ ；采用分层压实工艺，每层松铺厚度 20 cm，采用 20 t 振动压路机碾压 6~8 遍，碾压速度 2~3 km/h，压实度采用灌砂法检测[6]，每 2000 m² 抽检 1 点，合格率需达到 100%。压实度阈值：黏性土 $\geq 96\%$ 、砂土 $\geq 94\%$ 、淤泥质土 $\geq 93\%$ 。

5.2.2. 土工格栅铺设控制

铺设前清理老路基表面浮土，确保界面平整(平整度偏差 ≤ 5 mm/m)；土工格栅采用搭接法连接，黏性土区搭接长度 ≥ 18 cm、砂土区搭接长度 ≥ 19 cm；采用 U 型钉(间距 50 cm)固定，避免铺设过程中产生褶皱；铺设完成后及时回填填料，夏季暴晒时间 ≤ 3 h、春秋季节暴晒时间 ≤ 4 h，避免长时间暴晒导致材料老化。

5.2.3. CFG 桩施工控制

采用长螺旋钻孔压灌桩施工工艺, 控制钻进速度 1~1.5 m/min (作业区偏差 $\leq \pm 0.1$ m/min)、拔管速度 0.8~1.0 m/min (作业区偏差 $\leq \pm 0.1$ m/min), 确保桩身连续完整; 桩长偏差 ≥ -3 cm (避免短桩)、桩径偏差 ± 2 cm, 核心区桩位偏差 ≤ 8 cm、普通区 ≤ 10 cm。施工完成后 7 d 采用低应变法检测桩身完整性(总桩数 10%), 核心区 I 类桩 $\geq 95\%$ 、普通区 $\geq 90\%$; 28 d 采用静载试验检测单桩承载力(总桩数 2%), 核心区 \geq 设计值 1.15 倍、普通区 ≥ 1.1 倍。

5.2.4. 动态监测与反馈

施工过程中实时监测沉降速率, 当沉降速率超过 5 mm/d 时, 暂停施工, 分析是否存在填料压实不足或地基处理缺陷, 采取补压、增设土工格栅等加固措施; 根据监测数据调整施工参数, 形成“监测 - 分析 - 调整”的动态控制闭环。在施工过程中实时监测沉降速率、水平位移, 按土质细分阈值, 详见下表 7。

Table 7. Settlement rate and horizontal displacement threshold under different soil types
表 7. 不同土质下沉降速率及水平位移阈值表

土质类型	沉降速率预警阈值	沉降速率控制阈值(作业区/辅助区)	水平位移预警阈值
黏性土	5 mm/d	1.2 mm/d/1.5 mm/d	3 mm/d
砂土/碎石土	6 mm/d	2.5 mm/d/3.0 mm/d	4 mm/d
淤泥质土	4 mm/d	0.8 mm/d/1.0 mm/d	2 mm/d

5.3. 工后质量控制

工后运营期间, 建立长期监测机制, 利用沉降预测模型(如双曲线模型、指数模型)预测工后沉降趋势, 当预测差异沉降接近限值时, 提前采取注浆加固等措施。前 6 个月每月监测 1 次, 6~12 个月每 2 个月 1 次, 采用双曲线模型 + 修正系数 α 预测工后沉降, 核心区工后沉降限值 ≤ 15 mm、普通区 ≤ 25 mm, 每 3 个月更新 1 次 α 值, 预测误差超 10% 时重新拟合。定期对路面进行巡查, 发现裂缝、唧泥等病害及时处理: 裂缝宽度 < 3 mm 时采用密封胶灌注, 宽度 ≥ 3 mm 时采用开槽灌缝 + 贴缝带加固; 完善排水系统, 每季度检测 1 次排水系统, 确保边坡排水速率 ≥ 5 L/s·m, 避免雨水渗入路基影响稳定性。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

本文通过系统的室内试验、现场应用与监测分析, 得出以下核心结论:

- 1) 新老路基差异沉降的主要诱因包括地基承载力差异(≥ 20 kPa)、填料压实度不均(差值 $\geq 1\%$)及时间效应导致的固结沉降差, 三者协同作用加剧路面病害;
- 2) 聚酯经编土工格栅(界面摩擦系数 0.65, 抗拉强度 80 kN/m)与 5%水泥改良填料(28 d 抗压强度 3.5 MPa)的复合加固技术, 结合 CFG 桩地基处理, 可使差异沉降量降低 35%以上, 界面应力集中系数降低 40%;
- 3) 构建的“施工前材料检验 - 施工过程参数控制 - 工后长期监测”全流程质量控制体系, 通过关键指标量化管理与动态反馈机制, 能有效将工后差异沉降控制在 50 mm 以内。

6.2. 展望

未来研究可进一步拓展: 1) 针对软土、岩溶等复杂地质条件, 开展新型复合地基处理技术(如 CFG

桩-土工格栅联合加固)试验,优化设计参数;2) 研发环保型填料改良剂(如工业固废基改良剂),降低工程成本与环境影响;3) 融合 BIM、物联网技术,构建智能化监测平台,实现差异沉降的实时预警与远程调控,为高速公路改扩建工程提供更高效的技术解决方案。

参考文献

- [1] 交通运输部. JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 张洪波, 王磊, 李明. 土工格栅对新老路基界面强度的影响试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 36-42.
- [3] 李建军, 刘刚, 赵伟. 高速公路改扩建工程路基质量控制技术[J]. 施工技术, 2021, 50(12): 89-92.
- [4] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [5] 交通运输部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 交通运输部. JTG/T 3610-2019 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.