

西海固地区黄土路基与地基全填方断面沉降特性分析¹

薛冰¹, 李哲¹, 范国堂², 刘路路³, 赵金朋⁴

(1.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2.中铁二十局集团市政工程有限公司, 陕西 西安 710016; 3.中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4.大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:【目的】探讨黄土路基填方体-地基系统在荷载作用下的变形传递过程及响应规律, 为黄土区全填方路基沉降预测模型构建与处治设计提供理论借鉴和实测支撑。【方法】以银昆高速公路固原段全填方黄土路基及地基为对象, 基于现场两个全填方断面的长期监测数据, 采用非线性最小二乘拟合与空间场差值分析方法, 分析了黄土路基-地基系统沉降变形的时程关系及沉降速率演化过程, 重点研究了沉降参数的变化规律及其物理含义, 探讨了黄土路基与地基沉降系统的耦合关系。【结果】①全填方路基沉降呈现层状递增特征, 路基底部的压缩变形显著大于天然下卧地层的, 二者交界面易发生沉降突变; ②沉降随时间演化整体符合指数函数衰减规律, 路基固结速率衰减较快, 而地基长期蠕变收敛更为缓慢; ③沉降横断面空间非对称性显著, 受“阴阳坡效应”及水分偏聚影响, 阴坡侧深部土体的局部变形量明显大于阳坡侧的。【结论】揭示了全填方路基与地基变形的协同关系、沉降和沉降速率的时空演化规律及其空间分布上的差异性。路基底部与地基的沉降主导了沉降系统稳定时间, 两者长期变形均符合指数规律, 且地基的缓慢衰减塑造了整体沉降时序。此外, 受荷载非均匀传递与自然环境的影响, 沉降场呈现出显著的空间异质性, 最终引发路表不均匀沉降。

关键词: 路基; 地基; 全填方; 沉降速率; 阴阳坡

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

黄土作为第四纪沉积物, 在我国及全球分布广泛, 具有显著的区域性与地质敏感性^[1-2]。在上覆荷载与自重应力长期作用下, 黄土高填方深部土体易产生明显的压缩固结变形, 导致路基与地基出现不均匀沉降^[3-5]。近年来, 随着交通基础设施持续向地形起伏剧烈的黄土沟壑区(如西海固地区)延伸^[6], 在地貌、地质成因、土体裂隙与水文演变等多重因素交织作用下, 填方路基沉降问题尤为复杂。已有研究表明, 高填方路堤变形多呈现初期速率大、后期衰减收敛的特征^[7]; 填筑厚度差异、原地貌起伏及水分偏聚则是诱发横向差异沉降的主要机制^[8]。

围绕黄土路基与地基沉降, 国内外已积累了相当数量的研究成果, 涵盖固结蠕变和动力响应等核心议题, 整体趋势是从经验性预测逐步转向机理与数据相耦合的分析框架^[9-12]。在沉降监测与演化规律方面, 李志雷等^[13]基于现场观测数据, 对比了对数、双曲线和指数 3 种几何模型对沉降

趋势的拟合能力。董立山等^[14]基于高斯理论曲线提出了考虑下伏土洞的黄土路基沉降预测理论方法, 指出黄土蠕变随时间的增长而增大, 增长速率渐趋于缓慢直至稳定。霍治澎和贺亚飞^[15]以住宅建筑沉降监测为背景, 综合规范法、有限元模拟等手段构建了推算最终变形量的函数模型。杨校辉等^[16]关注填方工程长期稳定性, 指出在工后长期沉降变形中, 填土沉降量与填土厚度呈线性增长, 填土厚度越大则工后沉降量越大, 但单位沉降比越小; 原地基沉降量和填土厚度呈对数增长关系。安征等^[17]采用 ABAQUS 软件对湿陷性黄土高填方强夯路基在施工及长期运营中的沉降规律进行了数值模拟, 计算表明强夯后总沉降值满足要求。彭晨^[18]整理试验路段观测资料表明, 黄土路基最终沉降量与填筑荷载高度之间存在显著正相关。赵壮福^[19]借助实测与仿真量化探讨了边界条件对变形的驱动作用, 发现沉降极值多集中于填筑体核心及深沟底部。在时空演化上,

收稿日期/Received: 2026-03-04

修回日期/Revised: 2026-05-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42477209)。

第一作者: 薛冰(2001—), 女, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究。E-mail:2024121098@chd.edu.cn。

通信作者: 李哲(1971—), 男, 副教授, 硕导, 博士, 从事公路岩土工程方面的研究。E-mail:ys10@gl.chd.edu.cn。

Wang Limin 等^[20]利用 InSAR 技术监测表明,最剧烈沉降发生于施工完成后的早期阶段,最大沉降速率达 32 mm/年。王方杰^[21]利用多层次位移监测技术,揭示了黄土路堤横断面呈“中轴大、边缘小”的典型非均匀沉降趋势。在沉降计算方法及预测模型方面,近年来亦取得系列进展。贾金青等^[22]考虑侧向刚柔边界约束对压实黄土变形的影响,通过压缩试验与理论推导,建立了黄土填方路基沉降计算方法,揭示了侧向边界条件对路基竖向压缩量的修正规律。于永堂和郑建国^[23]在分析典型工程沉降数据与演化规律的基础上,提出了收敛型和发散型两种新型预测模型。于永堂等^[24]进一步对 17 种回归预测模型进行系统评估,发现 MMF 模型与双曲线模型在预测精度、稳定性与适应性上表现最优,沉降数据越平稳预测效果越理想,且增大建模数据时间跨度可显著提升精度。在工程处治评价方面,姬腾腾^[25]依托公路项目表明,科学的地基预处理辅以严密的地下排导系统,是消除深部湿陷隐患、确保全填方路段长效服役的必要手段。

综上,已有研究大多数是针对特定处治地基或单一预测模型,对于西海固地区大厚度全填方路基的实测数据相对匮乏,对阴阳坡差异等复杂微环境诱发的断面不对称沉降机制,亦缺乏定量探讨。为此,本文依托银昆高速固原市寨科乡某全填方路基科研段,开展长期原位监测,对比分析路基与地基的变形协同关系,揭示沉降速率的时间演化规律与阴阳坡效应,以期为类似黄土工程的沉降预测与防治提供参考。

1 监测方案

1.1 依托项目概况

项目依托银昆高速公路 LJ09-3(里程桩号 K171+361~K171+398.23),该段位于固原市寨科乡黄土丘陵区,海拔 1 676.4 m,属典型黄土分布带。该段地形起伏大,路基以高-中填方路基为主,最大填方高度达 48.6 m,全断面采用天然黄土分层压实填筑,压实度 $\geq 94\%$ 。路基横断面宽 26.5 m,两侧边坡率 1:1.5。该段地基及填料以黄土为主,粉粒含量高、结构疏松、垂直节理发育,压缩性高、遇水易软化崩解。其气象环境为暖温带半干旱特征,表现为温差大且年均气温保持在 6.4~7.2℃;年均降水 384.2~435.2 mm,多集中

于 7—9 月且常伴暴雨,日最大降水量 133.4 mm;年均蒸发量高达 1 550~1 920.3 mm,6—9 月蒸发最强。试验所用黄土的基本物理性质指标如下:密度 ρ 为 1.76 g/cm³,干密度 ρ_d 为 1.62 g/cm³,含水率 ω 为 9.4%,液限 ω_L 为 9.2%,塑限 ω_P 为 24.8%。图 1 为试验场地所在区域。

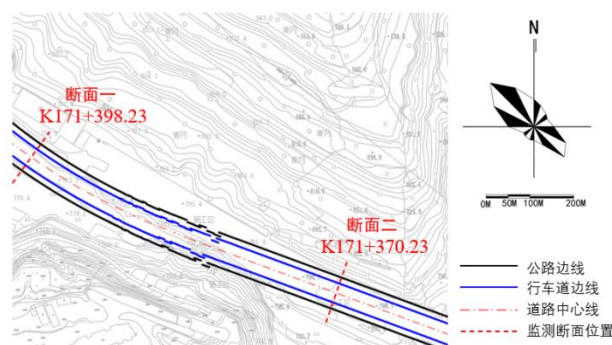


图 1 试验场地概况图

Fig. 1 General situation map of the test site

1.2 仪器与设备

现场测试仪器为 YT-DG-0220 型号单点沉降计,是一个不锈钢制造、耐水压,并具有先进的微处理技术,可在恶劣环境下测量土体沉降的传感器。单点沉降计由传感器本体、测杯、锚头、法兰盘等组成,钻孔后埋入土体内部,测量锚头与法兰盘之间的相对垂直位移变化,适用于西海固地区干湿交替、冻融循环的复杂气候条件^[26-27]。

现场采样频率为初期 7 d/次、中期 30 d/次、后期 90 d/次,覆盖施工期至运营期前两年。单点沉降计主要技术指标如下:量程为 200 mm,分辨率为 0.01 mm,使用温度范围为-40~70℃,仪器直径为 25 mm,适用的钻孔直径为 110 mm。

1.3 现场实施方案

根据现场具体情况,选取 2 个全填方黄土路基断面,里程桩号分别为 K171+398.23 和 K171+370.23^[28],具体位置位于图 1 试验场地,路基填筑高度 14.0 m,路基顶面宽度 26.0 m,底面宽度 50.5 m,51.5 m,边坡率为 1:1.5。

单点式沉降计在断面的左侧、中线及右侧沿竖向分 3 层布设。各断面取原地面以下 1.0 m 深度埋设首层地基处传感器,路基与地基接触面埋设第 2 层传感器,路基顶部埋设第 3 层传感器。各段面传感器埋设及标号示意图如图 2 所示。传感器埋设及数据读取如图 3 所示。

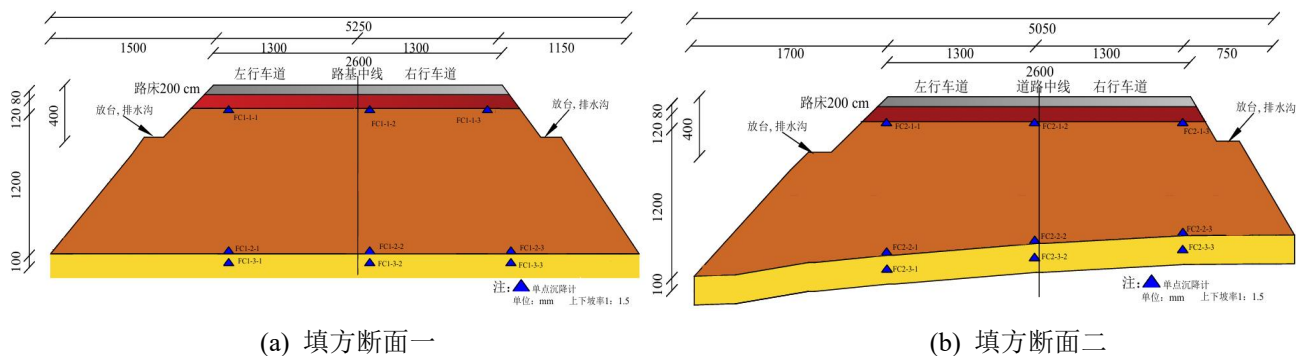


图 2 传感器埋设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor embedding



图 3 单点传感器埋设及数据读取

Fig. 3 Single-point sensor installation and data reading

2 结果分析

2.1 全填方段路基与地基沉降时程分析

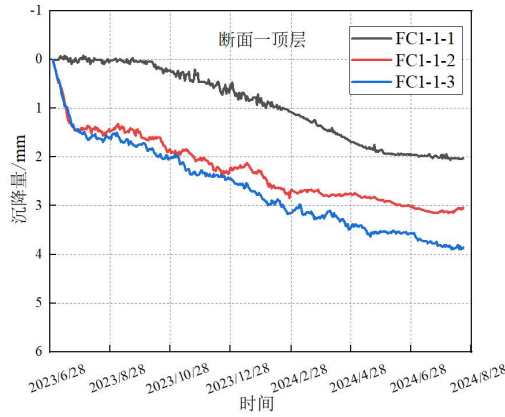
图 4 为全填方路基与地基的沉降量时程曲线。全填方路基的沉降特征如下：①路基顶部沉降量 (2.52~3.86 mm) 小于底部 (5.45~15.73 mm)，二者相差 2~4 倍，说明施工过程中底部土体的竖向变形和压实度逐渐增大。需要说明的是，传感器是按施工顺序从底部到顶部分层埋设的，所测值反映的是各层填筑过程中的竖向变形累积，因此底部土体的固结时间比顶部更长。②路基底部沉降曲线呈下凹—稳定型，经历了先快后慢、逐步收敛的过程，固结持续时间约 200~230 d。③路基顶部容易受到施工扰动影响，沉降曲线波动较大；如图 4(a)、图 4(c) 所示，断面二出现的反常“回弹”现象，主要原因是路面铺筑时重型机械碾压引起了土体侧向挤压隆起和浅部传感器微错位。④沉降不均性表现在横向和断面间两个方面：横

向上，从左路肩到中线再到右路肩，沉降量存在差异；断面间，相距 28 m 的两个断面实测极差为 1.5~3.5 mm。

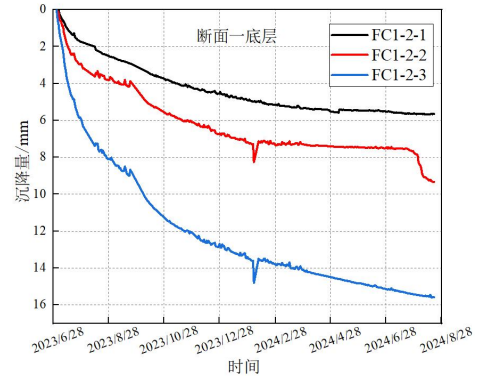
上述现象反映出填方体应力重分布与土体固结耦合作用的时空异质性：底部沉降主导长期稳定过程，顶部沉降记录施工扰动响应，断面间差异则源于地基承载力的空间变异与填筑工艺的控制精度。

两个断面的地基沉降均呈现“路中线最大 (FC1-3-2)、右侧次之 (FC1-3-3)、左侧最小 (FC1-3-1)”的规律，曲线形态相近 (图 4(e)、(f))，与路基沉降曲线的变形特征基本一致。

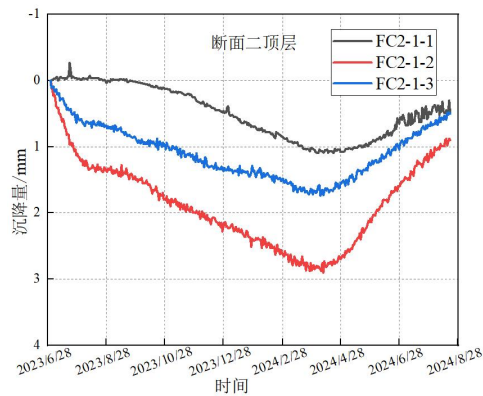
断面内存在明显的横向变形梯度：断面一各测点极差达 3.5 mm，而断面二各测点极差在 1.5 mm 以内；断面一地基沉降介于 3.2~6.9 mm，断面二介于 5.5~7.1 mm，表明断面二地基沉降相对均匀。两断面沉降最大值均接近 7 mm，整体变形过程基本相近。



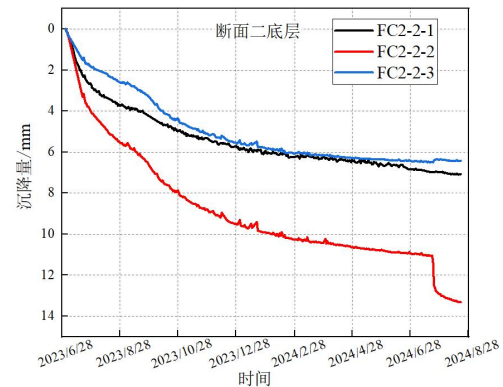
(a) 断面一路基顶层



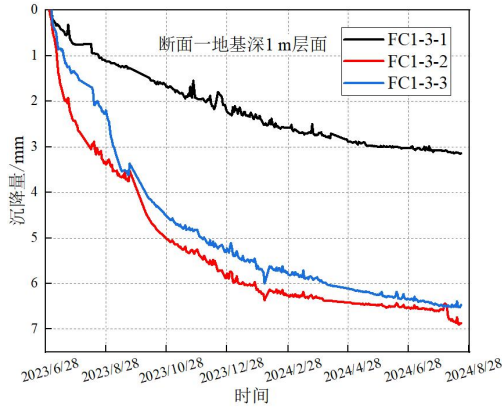
(b) 断面一路基底层



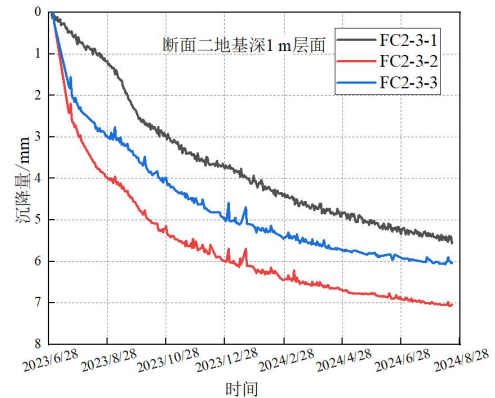
(c) 断面二路基顶层



(d) 断面二路基底层



(e) 断面一地基部分



(f) 断面二地基部分

图4 全填方路基与地基的沉降量时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of settlement for fully filled embankment and foundation

2.2 全填方路基与地基沉降拟合分析

2.2.1 函数关系建立

根据图4的变化趋势,选取式(1)作为拟合函数,以断面一为例,对路基层层和地基的沉降数据进行非线性最小二乘拟合,结果如图5所示。拟合结果表明,式(1)较好地描述了沉降发展的3个阶段,即初期快速固结、中期渐进压缩和后期缓慢收敛,拟合优度 R^2 都大于0.98,残差分布均匀、没有系统性偏差,说明该模型具有较好的预

测稳健性和物理可解释性。

$$y = M(x)e^{\left(\frac{-t}{N(x)}\right)} + P(x) \quad (1)$$

式中: y 为累计沉降值,mm; t 为自填方开始时间,d; x 为传感器位置距左边坡的水平距离,m; $M(x)$ 、 $N(x)$ 、 $P(x)$ 为与水平距离 x 有关的参数函数。

各参数的物理含义和实测现象基本一致 $M(x)$ 的峰值出现在路中线附近,与填方荷载中心重合,符合“应力集中→压缩响应增强”的力学逻辑;

$N(x)$ 在右侧坡脚处出现明显抬升，与现场勘察中观察到的局部含水率偏高、排水盲沟淤堵相吻合。

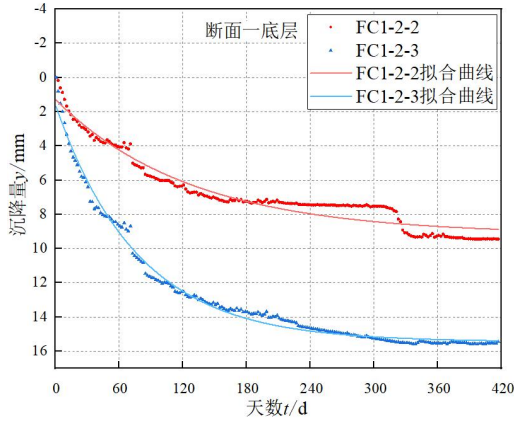


图 5 沉降量与时间关系拟合曲线

Fig. 5 Fitted settlement-time curve

2.2.2 参数讨论与分析

图 6 为各参数的拟合曲线。图 6(a)、图 6(b) 为 $M(x)$ 的拟合曲线， $M(x)$ 表征初始固结势能的空间梯度，反映土体在初始荷载下的压缩响应强度，其空间变化揭示了荷载沿横断面的非均匀传递机制。路基底部与地基的 $M(x)$ 参数方程可表达为：

$$M(x) = A_1x^2 + B_1x + C_1 \quad (2)$$

反映出黄土地基与填方黄土在初始荷载作用下的压缩响应规律相同，差异仅仅在于系数取值不同。

图 6(c)、图 6(d) 为 $N(x)$ 的拟合曲线， $N(x)$ 表征固结速率沿空间的衰减特性，与荷载扩散路径密切相关；其高值区对应固结进程滞后的边缘部位或存在夹层等受阻区域。 $N(x)$ 的参数方程可表达为：

路基底部

$$N(x) = -A_2x^2 + B_2x + C_2 ; \quad (3)$$

地基

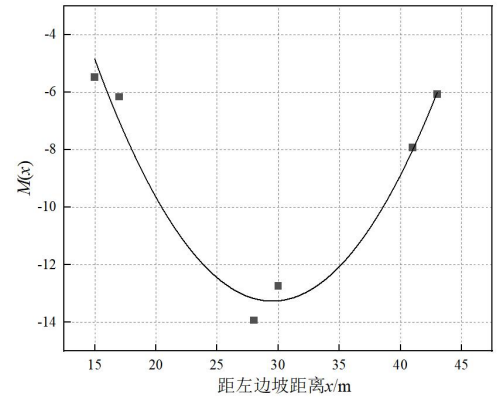
$$N(x) = A_3x^2 + B_3x + C_3 。 \quad (4)$$

$N(x)$ 在路基底层和地基中呈近似镜像对称的

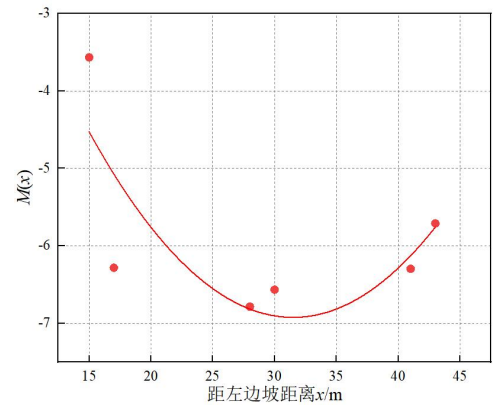
分布形态，说明填方荷载引起的固结响应在界面处发生了重构。路基底层以负曲率为主 ($-Ax^2$)，地基以正曲率为主 ($+Ax^2$)，暗示路基填方体和地基土体在界面两侧呈现方向性分异，二者的固结速率随空间位置的变化方向相反。

图 6(e)、图 6(f) 为 $P(x)$ 的拟合曲线， $P(x)$ 表征长期次固结沉降的基准偏移量，反映主固结完成后土体由蠕变效应引发的缓慢变形趋势；其空间分布与深层土体厚度、应力历史密切相关，高值区往往对应地质条件更复杂、结构性更强的地层。参数方程可表达为：

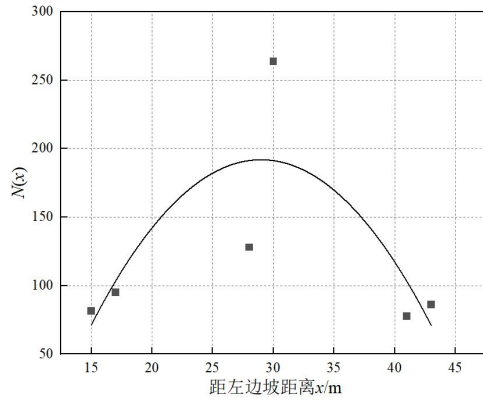
$$P(x) = A_4x^2 + B_4x + C_4 \quad (5)$$



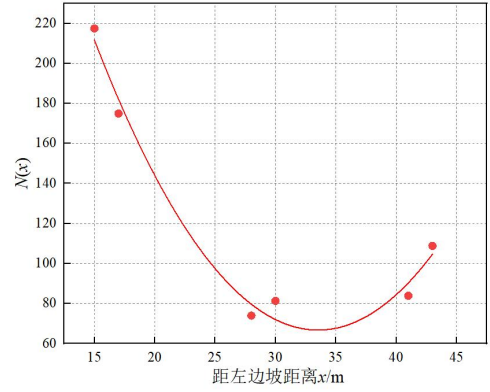
(a) 路基底层 $M(x)$ 拟合曲线



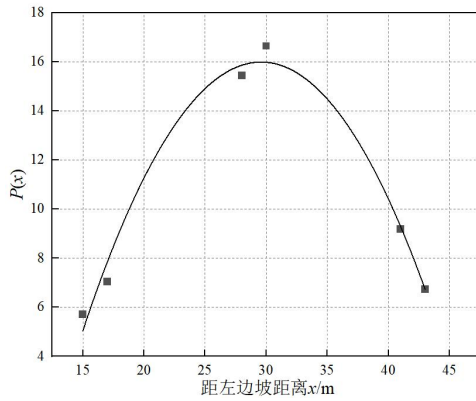
(b) 地基 $M(x)$ 拟合曲线



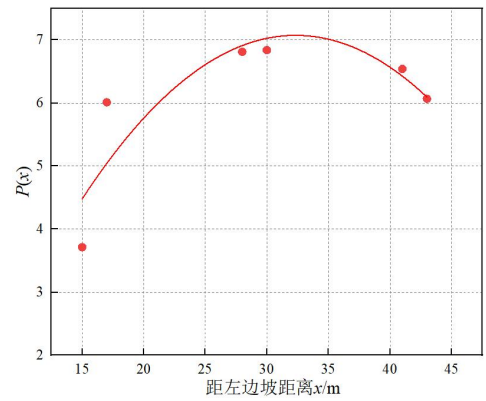
(c) 路基底层 $N(x)$ 拟合曲线



(d) 地基 $N(x)$ 拟合曲线



(e) 路基底层 $P(x)$ 拟合曲线



(f) 地基 $P(x)$ 拟合曲线

图 6 各参数拟合曲线

Fig.6 Fitted curves of various parameters

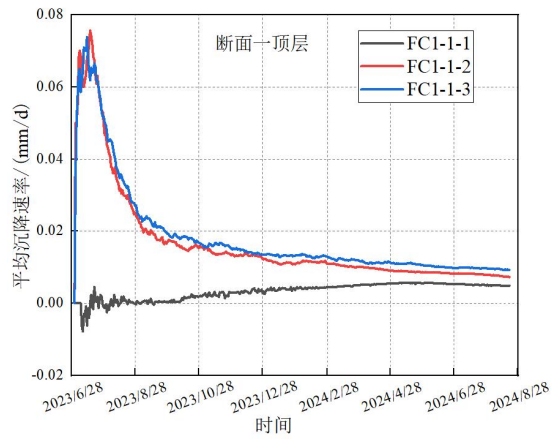
上述分析表明,黄土路基底部与地基的长期沉降变形均符合式(1),反映了黄土材料在荷载作用下的共性规律;人工填方土与原状地基土在 $M(x)$ 、 $N(x)$ 、 $P(x)$ 空间分布上具有差异,同时也体现了二者的相互作用关系。其中, $M(x)$ 主导瞬时压缩、 $N(x)$ 调控固结进程、 $P(x)$ 承载长期蠕变,三者共同刻画了黄土路基沉降由“量变启动”向“质变收敛”演化的全过程。

2.3 全填方段路基与地基沉降速率分析

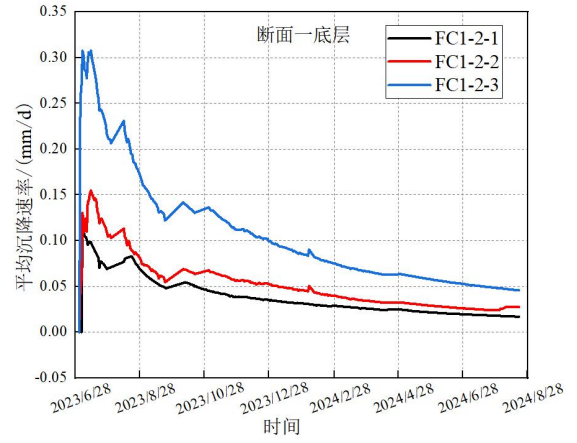
图 7 为全填方路基与地基的沉降速率时程曲线。两个监测断面的沉降速率均呈现以下特征: ① 总体呈“前期变化大、中期持续衰减、后期逐渐收敛”的演化过程; ② 路基顶部沉降速率明显小于底部; ③ 横向分布存在差异,部分断面呈“中部快、两侧慢”(图 7(c)、图 7(d)),部分则呈“一侧快、另一侧慢”,见图 7(a)、图 7(b); ④ 施工扰动引起的瞬时效应显著且具有空间非均匀性,见图 7(a)、图 7(c)中 FC1-1-1 和 FC2-1-1,这主要是因为路基成型期重型机械碾压引发的局部挤压隆起与侧向位移;后续随固结发展,异常测点速率逐渐回归并趋于零,沉降进入稳定阶段。

两个断面的地基沉降速率曲线形态与路基相似,如图 7(e)、图 7(f)所示,主要差异有以下几点: ① 路基底部的最大沉降速率大于地基,在断面一中,路基底部与地基的最大沉降速率分别为 0.320、0.138 mm/d;在断面二中,二者分别为 0.788、0.605 mm/d。② 地基沉降速率始终是中部(FC1-3-2)大于两侧(FC1-3-1、FC1-3-3),与路基横向分布的多样性不同,表明地基响应并非被动跟随路基变形,而是以自身压缩特性主导着整体沉降时序;③ 地基速率衰减更平缓,收敛时间也比路基长,断面一地基约 380 d 收敛,而对应路基底部只需约 260 d。这说明地基土体的固结周期更长、应力释放更慢,也与式(1)中 $P(x)$ 对沉降速率时序演化的主导作用相吻合。

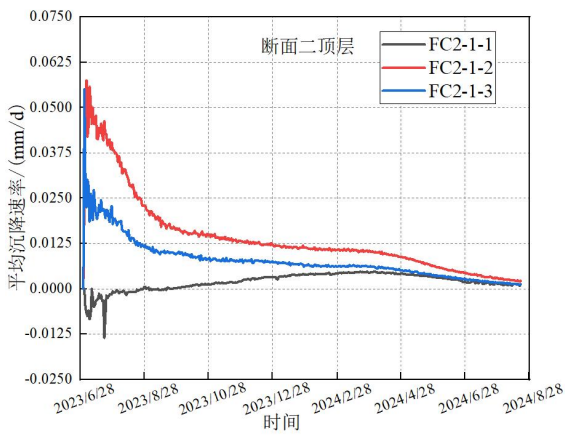
综上,沉降速率的时空演化规律可归纳为“三层嵌套响应”:第 1 层是施工扰动引发的瞬时弹性-塑性响应,表现为速率突变与空间非均匀性;第 2 层是土体固结主导的长期黏弹性响应,表现为速率衰减的时序差异与空间镜像特征;第 3 层是地质参数调控下的系统级响应,体现为不同断面间收敛时间、极值大小及横向梯度的显著分异。



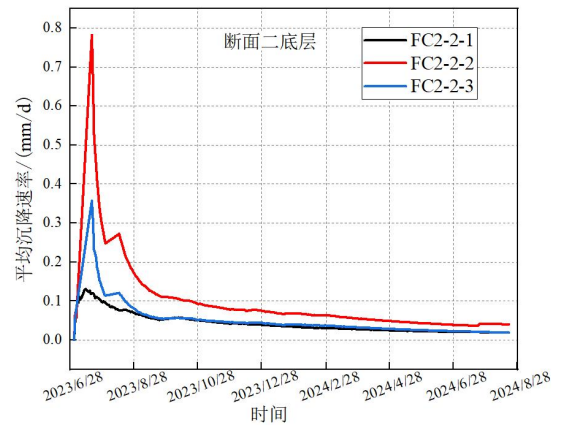
(a) 断面一路基顶层



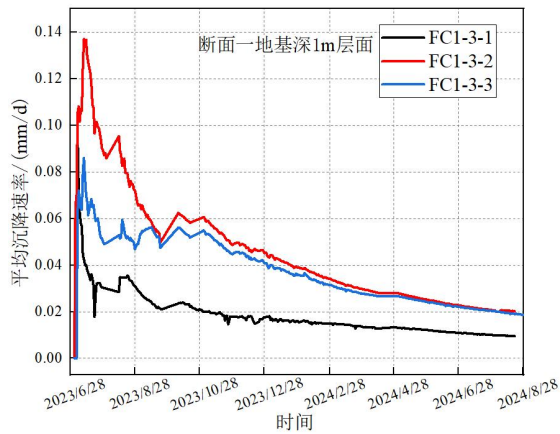
(b) 断面一路基层层



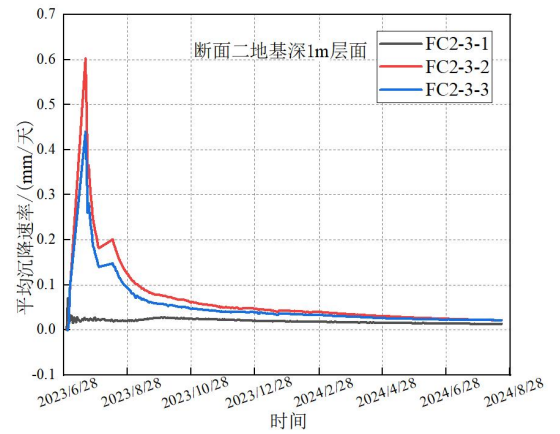
(c) 断面二路基顶层



(d) 断面二路基层层



(e) 断面一地基部分



(f) 断面二地基部分

图 7 全填方路基与地基的沉降速率时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of settlement rates for fully filled embankment and foundation

2.4 全填方路基及地基沉降速率拟合分析

2.4.1 函数关系建立

根据图 7 的变化趋势, 选取式(6)幂函数为拟合函数, 以断面一为例分析, 对路基层层与地基沉降数据开展非线性最小二乘拟合。

图 8 为沉降速率与时间关系拟合曲线, 拟合结果表明, 式(6)能够较好地刻画沉降速率发展的特征。

$$y = M(x)t^{N(x)} \quad (6)$$

式中 y 为平均沉降速率, mm/d。

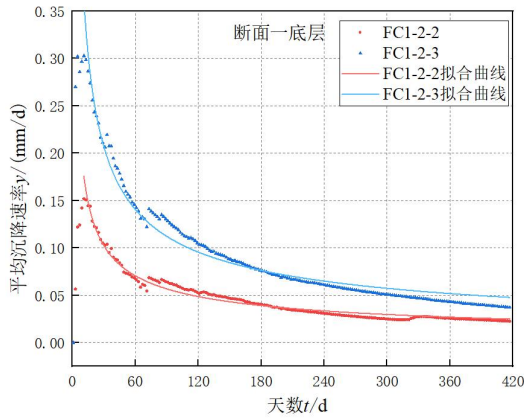


图 8 沉降速率与时间关系拟合曲线

Fig. 8 Fitted settlement rate -time curve

2.4.2 参数讨论与分析

图 9(a)、图 9(b)为 $M(x)$ 的拟合曲线, $M(x)$ 表征沉降速率的空间梯度, 反映土体在初始荷载下的速率响应强度。路基底部与地基的 $M(x)$ 参数方程可表达为:

$$M(x) = -A_1x^2 + B_1x + C_1 \quad (7)$$

反映出黄土地基与填方黄土在沉降速率的响应规律相同, 差异仅仅在于各自的响应系数取值不同。对比图 9(a)、图 9(b)可知, 相同位置处,

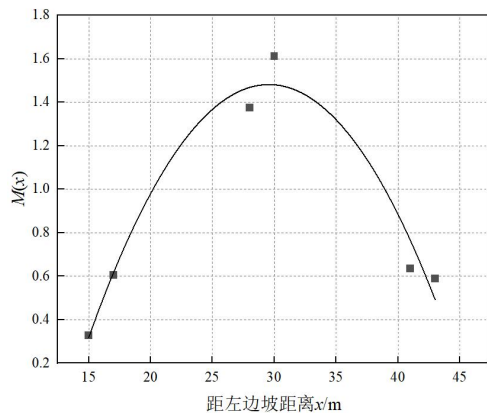
路基层层 $M(x)$ 明显大于地基, 约在 2 倍左右(路中线), 这反映出填方体沉降速率相对地基而言具有显著放大效应, 放大倍数接近 2 倍(路中线处)。

图 9(c)、图 9(d)为 $N(x)$ 参数拟合曲线, $N(x)$ 表征沉降速率的时间衰减特性, 其数值越小, 表明速率随时间下降越快。

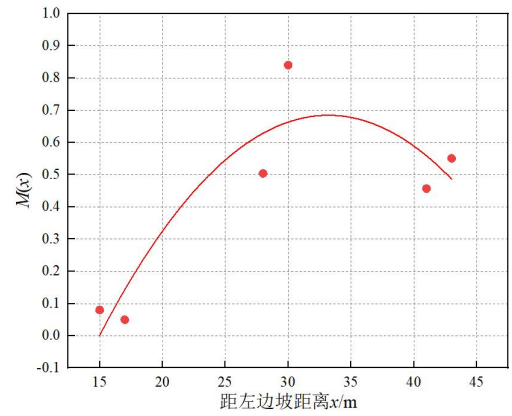
$$N(x) = A_2x^2 + B_2Bx + C_2 \quad (8)$$

$N(x)$ 曲线呈下凹型, 最低值位于路中线附近, 向两侧坡脚逐渐增大, 表明速率衰减能力在路基中心区域最强、边部较弱; $N(x)$ 空间峰值与填方高度正相关, 路中线处 $N(x)$ 随填高增加而增大, 说明高填方加剧了沉降速率的早期衰减; 此外, $N(x)$ 的空间差异还与土体含水率的动态变化、压实后孔隙比降低及水分在自重与荷载作用下的迁移等因素相关, 限于篇幅另文论述。

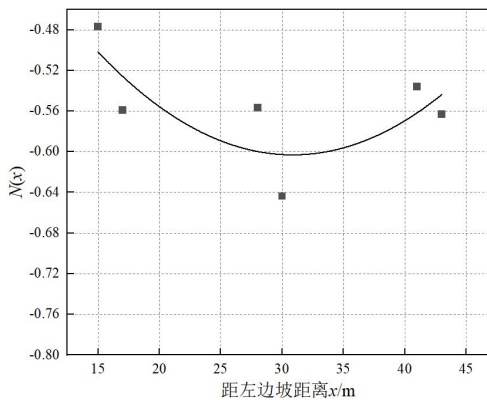
$N(x)$ 的空间不均匀性进一步说明, 黄土路基沉降演化具有非均匀的本质, 既表现在速率衰减的横向差异上, 也反映出荷载传递路径的不同。从图 9(c)、图 9(d)可以看出, 路基层层的 $N(x)$ 整体大于地基, 速率衰减更快, 固结启动早、发展快; 地基由于土体结构性更强、渗透性更低, 衰减更平缓, 稳定所需时间更长。



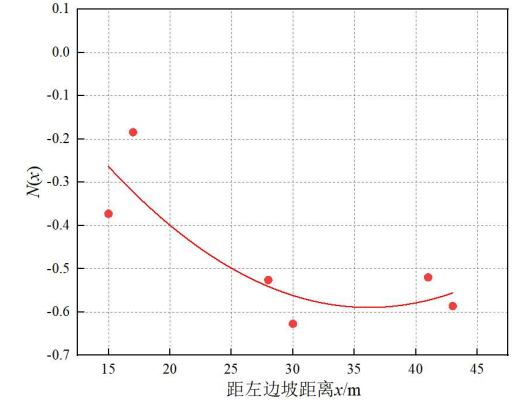
(a) 路基层层 $M(x)$ 拟合曲线



(b) 地基 $M(x)$ 拟合曲线



(c) 路基层层 $N(x)$ 拟合曲线



(d) 地基 $N(x)$ 拟合曲线

图 9 参数拟合曲线

Fig.9 Fitted curves of various parameters

2.5 沉降稳定时间与既有工程对比

为进一步明确本研究所揭示的沉降稳定时间节点的工程意义，将本文实测结果与近年同类黄土地区路基工程的沉降监测成果进行对比分析，相关参数汇总见表 1。

由表 1 可以看出，不同工程的沉降稳定周期存在显著差异。赵斐^[29]研究的银昆高速 LJ06 标工程经挤密桩处理后，沉降量虽为小于 3 mm，但 208 d 时沉降速率仍为 0.086 mm/d，尚未完全稳定。熊乾^[30]研究的西部某高铁工程中，经强夯处理的低填方路堤约 90 d 即趋于稳定，而螺杆桩和 CFG 桩复合地基区段(5.1~7.2 m)稳定周期延长至 130~170 d。

与上述经地基处理的工程相比，本文研究的全填方科研段未经地基加固，且填筑高度达 14 m，

在路基成型后约 380 d 趋于稳定，该周期显著长于采用挤密桩(>208 d)和强夯处理(<300 d)的路基区段。其原因在于：本工程为大厚度天然填方，下卧未处治地基与路基地部的固结—蠕变过程漫长，主导了整体沉降时序；同时，尽管西海固地区年均蒸发量(1 550~1 920.3 mm)远大于降水量(384.2~435.2 mm)，路基成型后的持续失水有利于基质吸力恢复与强度提升，但仍难以改变大荷载下天然黄土地基长周期固结变形的本性。

上述结果表明，对于西海固类似气候条件下的大厚度天然全填方路基，应重视其长时效沉降特征。建议在路基成型后预留约 12.5 个月(约 380 d)的自然沉降期，待监测数据确认稳定后方可铺筑路面结构层，这可为类似工程的工期规划与铺筑时机选择提供参考。

表 1 不同黄土路基工程沉降稳定周期对比

Tab.1 Comparison of settlement stabilization periods for different loess subgrade projects

工程项目	气候区	填筑高度/m	地基处理方式	沉降稳定时间/d	累计沉降量/mm	数据来源
银昆高速固原段 (全填方科研段)	暖温带半干 旱大陆性	14	天然全填方	380	7	本文
银昆高速 LJ06 标	半干旱大陆 性	—	翻压+素土挤密桩+ 水泥土挤密桩	>208	<3	知网
西部某高铁 DK597+107 断面		3.57	强夯($\geq 3\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$)	<300	12.13	
西部某高铁 DK583+953 断面	温带大陆性	7.2	螺杆桩复合地基(桩 长 16.5 m)	<130	16.95	知网
西部某高铁 DK635+586 断面		5.1	CFG 桩复合地基(桩 长 8 m)	<170	15.07	

备注：沉降稳定时间均以路堤填筑完成为起算点。

2.6 全填方路基沉降场分析

全填方路基沉降场具有明显的不均匀性与不对称性。2023 年 8 月至 2024 年 2 月间，高填方路基沉降量随时间持续增大；两个监测断面的最大沉降区均位于路基深部与原状地基的交界处而非表层，说明压缩变形是逐级发展的，地基与路基地部的持续变形是起到主导作用的。

在地基土性质一致的条件下，全填方路基沉降较大的区域无论位于一侧(见图 10)还是路中线附近(见图 11)，均与施工填筑过程密切相关。施工碾压及含水率配置造成了路基内部的初始不均

匀性——受天气、机械调度及人为操作等因素干扰，含水率调控与碾压均匀性难以完全达标，从而形成压实度与湿度的先天差异；路基成型后，在阴阳坡、冻融及荷载等长期作用下^[31]，路基内部的物理参数的非均匀化进一步加剧，最终在路基表面表现为不均匀的隆起或凹陷。这种空间异质性不仅影响路基的表观形态，更制约着结构安全与行车舒适性，是影响工程耐久性与运营品质的核心隐患。本研究揭示的异质性演化规律，可为后续沉降空间差值场模型构建及异质性时空演化路径研究提供实测素材。

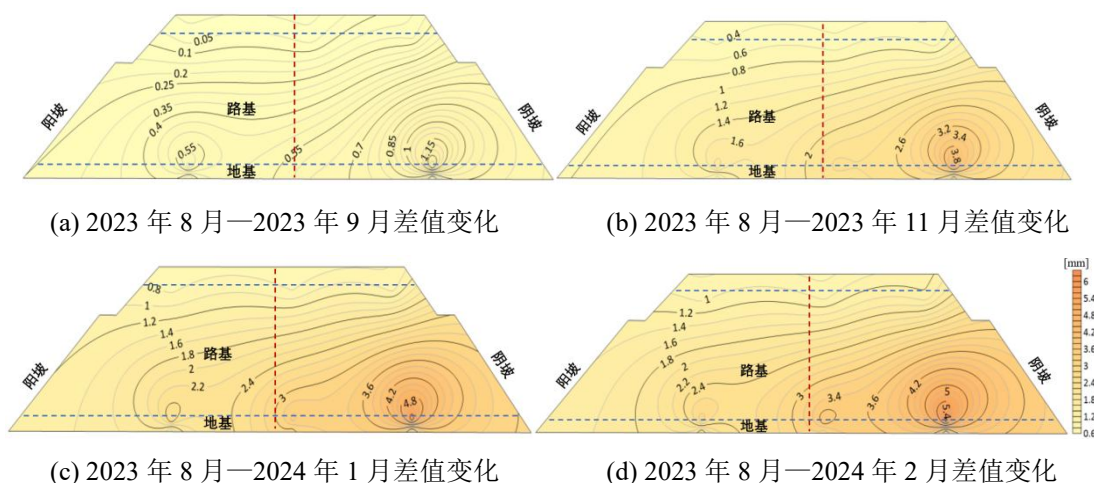


图 10 断面一沉降差值变化

Fig.10 Variation of settlement difference at section 1

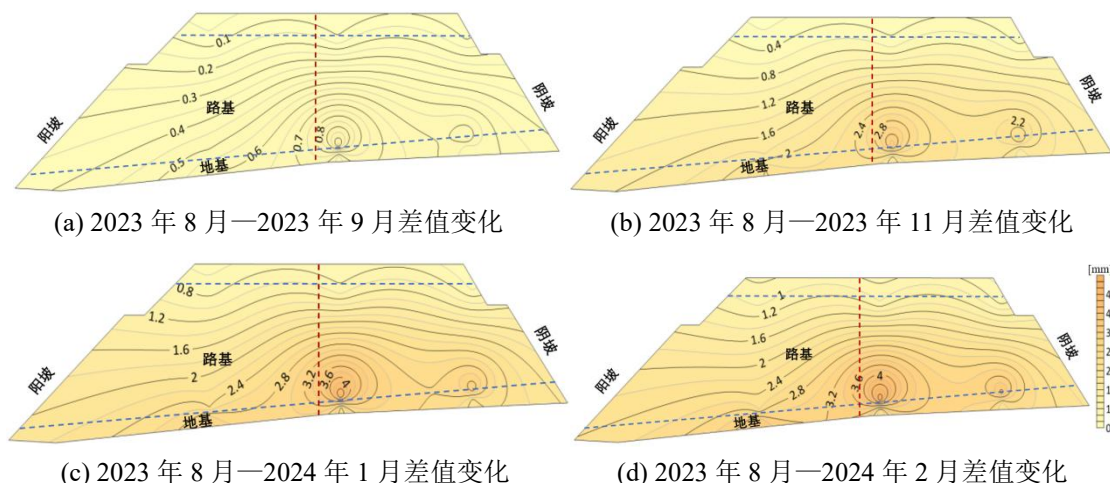


图 11 断面二沉降差值变化

Fig. 11 Variation of settlement difference at section 2

2.7 全填方路基与地基横向沉降分析

图 12 为全填方断面的路基横向变化图,由图 12 可以得出如下结论:

1) 全填方断面路基底部沉降大于地基沉降。横向曲线对比表明,全填方断面均呈现“路基底部沉降显著大于地基沉降”的规律。数据显示,断面一路基底部沉降峰值(偏右路肩)接近 15 mm,远超其天然地基的 6.5 mm;断面二路基底部沉降呈“V”型,中线峰值达 10 mm,亦大于其地基约 6 mm 的峰值。

究其原因,人工填土和天然土的结构稳定性存在差异。上部填方体依靠机械分层碾压成型,内部结构稳定性不及天然土层。在承受巨大的高

填方自重时,相对松散的路堤底部会产生比下卧天然地层更为剧烈的压缩。

2) 横断面沉降的空间差异与非对称性。由图 12 可见,常规荷载下高填方路基通常呈“中间大、两边小”的对称分布。图 12(c)、图 12(d)所示的断面二符合该规律,其路基底部及地基的沉降极值均位于中线附近;而断面一的沉降分布出现明显偏移。图 12(a)中 2024 年 2 月底部右侧路肩累积沉降已达 14 mm 左右,远大于中间及左侧,图 12(b)中地基沉降虽以中线最大,但右侧亦大于左侧。这种非对称变形印证了前文所述“阴阳坡效应”及水分偏聚会打破土体原有受力平衡,进而引发局部过大变形。

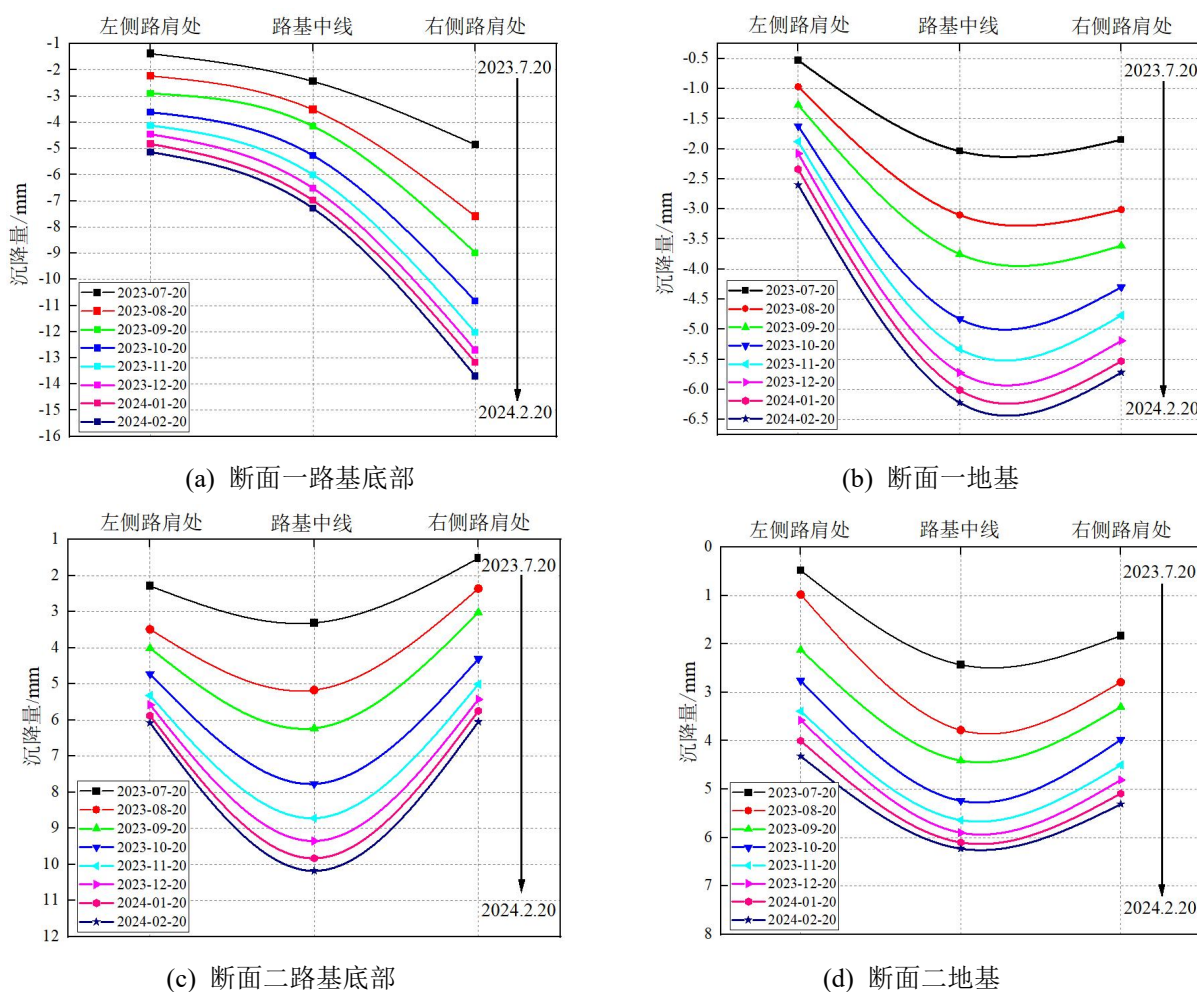


图 12 全填方断面水平沉降变化曲线

Fig.12 Horizontal settlement diagram of full fill section

3 结论

本文以银昆高速固原市寨科乡填方科研段 LJ09-3 的路基为例,开展了原位监测试验,采用非线性最小二乘拟合与空间场差值分析方法,分析了黄土路基-地基系统沉降变形的时程关系及沉降速率演化过程,重点研究了沉降系统的耦合关系和空间特征,得出如下结论:

1)路基底部与地基的沉降主导了路基填方体-地基系统的竖向变形稳定时间,反映的是填方体内部应力重分布、填土固结与地基土耦合作用的时空异质性。

2)黄土路基底部与地基的长期沉降变形规律均可采用指数函数表达,反映出黄土材料的在荷载作用下的共性规律。

3)人工填方土和原状地基土在多方面存在差异,该差异可通过参数 $M(x)$ 、 $N(x)$ 、 $P(x)$ 的空间分布形态上予以体现,填方荷载引起的固结响应过程及分布形式在路基-地基界面处发生显著分异,揭示了填方荷载沿横断面的非均匀传递机

制。

4)路基底部土体的最大沉降速率大于地基的最大沉降速率,地基沉降速率衰减过程更为平缓,收敛时间明显长于路基。表明地基作为承载体是以自身压缩特性与能力为内因,塑造并影响了填方体-地基系统的沉降时序格局。

5)全填方路基沉降场的不均匀性与不对称性源于填方体内部及其与地基交界处压缩固结变形的不对称性、渐进性与初始状态差异性;在荷载和自然环境长期作用下,路基内部物理参数进一步非均匀化,加剧了沉降场的空间异质性,最终在路基表面表现为不均匀的隆起或凹陷。

参 考 文 献

- [1] 张炜,张苏明.我国黄土工程性质研究的发展[J]. 岩土工程学报, 1995,17(6): 80-88. [Zhang Wei, Zhang Suming. Development of loess engineering properties research in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 80-88.]

- [2] PYE K. The nature,origin and accumulation of loess[J]. Quaternary Science Reviews,1995,14(7/8):653-667.
- [3] 王永强.高填方路堤沉降原位监测分析[J].交通世界,2023(33):40-42.[Wang Yongqiang. In-situ monitoring and analysis of high-fill embankment settlement[J].Transport World,2023(33):40-42]
- [4] Huo Zhipeng, Han Xukun, He Yafei. Prediction and engineering verification of building settlement in loess high-fill areas[J].Buildings,2026,16(3):638.
- [5] Ge Miaomiao, Li Ning, Zhang Wei, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(3):745-753.
- [6] 尤昌龙.高速铁路路基技术体系发展历程[J].中国铁路,2022(2):21-31.[You Changlong.Development history of high-speed railway subgrade technology system[J].China Railway,2022(2):21-31.]
- [7] 刘忠祥.山区高填方路堤沉降规律研究[J].黑龙江交通科技,2022,45(11):10-12.[Liu Zhongxiang. Study on the settlement law of high-fill embankments in mountainous areas[J].Heilongjiang Communications Technology,2022, 45(11):10-12.]
- [8] Wang Wei, Li Wei, Zhang Pengxiang, et al. Investigation of seepage behavior and settlement deformation mechanisms in loess embankment foundation systems in eastern Gansu Province[J].Applied Sciences, 2025,15(7):3789.
- [9] Derbyshire E. Geological hazards in loess terrain,with particular reference to the loess regions of China[J]. Earth-Science Reviews,2001,54(1/2/3):231-260.
- [10] Juang C H, Dijkstra T, Wasowski J, et al. Loess geohazards research in China: advances and challenges for mega engineering projects[J]. Engineering Geology,2019,251:1-10.
- [11] 权鑫,史红伟,蔡强国,等.室内模拟降雨情形下黄土坡面沉降程度的试验研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2021,49(2):98-106.[Quan Xin, Shi Hongwei,Cai Qiangguo,et al.Experimental study on loess slope settlement under indoor simulated rainfall conditions[J].Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition),2021,49(2):98-106.]
- [12] 郭泽锋.黄土高原地区路基不均匀沉降控制技术研究[J].交通世界,2025(17):104-106.[Guo Zefeng.Research on control technology for subgrade differential settlement in loess plateau areas[J].Transport World,2025(17):104-106.]
- [13] 李志雷,王伟,蔡旺.曲线拟合法在黄土路基沉降预测中的应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(5):952-955,962.[Li Zhilei, Wang Wei, Cai Wang. Application of curve fitting method in settlement prediction of loess subgrade[J].Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2023,47(5):952-955,962.]
- [14] 董立山,李文强,刘志胜.考虑黄土长期蠕变效应的路基沉降预测方法[J].公路,2022,67(8):1-7.[Dong Lishan,Li Wenqiang,Liu Zhisheng.A method for predicting subgrade settlement considering the long-term creep effect of loess[J].Gonglu,2022,67(8):1-7.]
- [15] 霍治澎,贺亚飞.黄土高填方区建筑沉降预测及工程验证[J].延安大学学报(自然科学版),2025,44(3):14-19,26.[Huo Zhipeng,He Yafei. Prediction of building settlement in high fill areas of loess and engineering verification[J].Journal of Yan'an University (Natural Science Edition),2025,44(3):14-19,26.]
- [16] 杨校辉,钱豹,郭楠,等.某黄土填方地基不均匀沉降影响因素及长期变形规律研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):207-212.[Yang Xiaohui,Qian Bao,Guo Nan,et al.Influencing factors of uneven settlement and long-term deformation law of a loess fill foundation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(S1):207-212.]
- [17] 安征,李玉斌.湿陷性黄土高填方强夯填筑路基沉降计算及边坡稳定性分析[J].建筑安全,2022,37(10):20-25.[An Zheng,Li Yubin.Settlement calculation and slope stability analysis of high-fill dynamic compacted subgrade in collapsible loess areas[J].Construction Safety,2022,37(10):20-25.]
- [18] 彭晨.宁夏湿陷性黄土路基沉降观测现场试验研究[J].交通科技,2022(3):50-53.[Peng Chen.Field experimental study on settlement observation of collapsible loess subgrade in Ningxia[J].Transportation Science & Technology,2022(3):50-53]
- [19] 赵壮福,朱彦鹏,叶帅华.黄土高填方地基沉降变形规律及影响因素分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):161-169.[Zhao Zhuangfu,Zhu Yanpeng,Ye Shuaihua.Analysis on settlement deformation law and influencing factors of loess high fill foundation[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(3):161-169.]
- [20] Wang Limin, Chai Shaoqiang, Sun Liang,et al. InSAR-based monitoring and analysis of settlement in high-filled road embankment and slope in loess region[J]. Frontiers in Earth Science,2025,13:1581761.
- [21] 王方杰.黄土路堤变形特性及沉降规律研究[D].西安:长

- 安大学, 2005.[Wang Fangjie. Study on deformation characteristics and settlement rule of loess embankment[D].Xi'an:Chang'an University,2005.]
- [22] 贾金青,刘路路,李哲,等.考虑侧向刚柔边界约束的黄土填方路基沉降计算方法[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):730-741.[Jia Jinqing,Liu Lulu,Li Zhe,et al.Settlement calculation method of loess fill subgrade considering lateral rigid-flexible boundary constraints[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(2):730-741.]
- [23] 于永堂,郑建国.黄土高填方场地工后沉降预测新模型[J].西南交通大学学报,2022,57(6):1268-1276,1292.[Yu Yongtang, Zheng Jianguo. New prediction model for post-construction settlement of loess high fill site[J].Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1268-1276,1292.]
- [24] 于永堂,郑建国,孙荣,等.黄土高填方场地工后沉降预测模型性能评估方法[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):39-48.[Yu Yongtang,Zheng Jianguo,Sun Mo,et al.Evaluation methods for performance of post-construction settlement prediction models in thick loess filled ground[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2023,34(4):39-48.]
- [25] 姬腾腾.陕北干线公路湿陷性黄土路基处理及效果监测[J].交通世界,2025(23):60-62.[Ji Tengting.Treatment and effect monitoring of collapsible loess subgrade of arterial highway in northern Shaanxi[J].Transportation World, 2025(23):60-62.]
- [26] Zhao Jinpeng, Jia Jinqing, Liu Lulu, et al. Research on moisture field evolution and settlement deformation mechanisms induced by infiltration at slope toe of high-fill loess subgrade based on model experiment[J].Transportation Geotechnics,2025:101817.
- [27] Zhao Jinpeng, Jia Jinqing, Liu Lulu, et al. Field experimental study on the temperature and humidity field and deformation evolution characteristics of a cut-fill subgrade in a high-altitude loess area[J].Canadian Geotechnical Journal,2026, cgi-2025-0691.
- [28] 赵金朋.高速公路G85陇东段黄土路基积水入渗室内模型试验及现场测试研究[D].西安:长安大学,2024.[Zhao Jinpeng.Indoor model test and field test study on water infiltration in loess subgrade of G85 Longdong section of expressway[D].Xi'an: Chang'an University,2024.]
- [29] 赵斐.公路湿陷性黄土路基处理效果评价研究[J].工程机械与维修, 2023(2):170-172.[Zhao Fei. Research on the treatment effect evaluation of highway collapsible loess subgrade[J]. Construction Machinery and Maintenance,2023(2):170-172.]
- [30] 熊乾.西部黄土地区高速铁路地基处理效果与沉降特性研究[J].科技创新与应用,2025,15(5):94-98.[Xiong Qian.Study on foundation treatment effect and settlement characteristics of high-speed railway in western loess area[J].Technology Innovation and Application, 2025,15(5):94-98.]
- [31] Zhao Jinpeng, Liu Lulu, Jia Jinqing, et al. Moisture evolution and instability mechanisms in high-fill loess embankment slopes subject to water infiltration from accumulated runoff following berm erosion[J].Transportation Geotechnics,2026:102161.

Analysis of Settlement Characteristics of Loess Subgrade and Foundation in Full-Fill Section of Xiji-Haiyuan-Guyuan Area

XUE Bing¹, LI Zhe¹, FAN Guotang², LIU Lulu³, ZHAO Jinpeng⁴

(1.School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.China Railway 20th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Xi'an 710016, China; 3.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: 【Objective】 To investigate the deformation transmission process and response behavior of the loess subgrade fill-foundation system under load, and to provide theoretical references and empirical support for the establishment of settlement prediction models and treatment designs for fully-filled subgrades in loess regions. **【Methods】** Focusing on the fully-filled loess subgrade and foundation in the Guyuan section of the Yinchuan-Kunming Expressway, this study

utilized long-term field monitoring data from two fully-filled cross-sections. By employing nonlinear least squares fitting and spatial field difference analysis, the time-history relationship of settlement deformation and the evolution process of the settlement rate of the loess subgrade-foundation system were analyzed. The research specifically focused on the variation patterns of settlement parameters and their physical significance, and explored the coupling relationship within the loess subgrade and foundation settlement system. **【 Results 】** ① The settlement of the fully-filled subgrade exhibits a characteristic of layered increment. The compressive deformation at the bottom of the subgrade is significantly greater than that of the natural underlying stratum, with abrupt settlement changes prone to occur at their interface. ② The overall evolution of settlement over time follows an exponential decay law. The consolidation rate of the subgrade decays relatively rapidly, whereas the long-term creep of the foundation converges more slowly. ③ There is significant spatial asymmetry in the settlement cross-sections; influenced by the "sunny-shady slope effect" and moisture accumulation, the localized deformation of the deep soil on the shady slope side is markedly larger than that on the sunny slope side.

【 Conclusions 】 This study reveals the synergistic deformation mechanism between the fully filled subgrade and foundation, as well as the spatiotemporal evolution and spatial distribution differences of settlement and settlement rates. Research shows that the stabilization time of the system is dominated by the settlement of the subgrade base and foundation, both of which follow an exponential law in long-term deformation, with the foundation's slow attenuation shaping the overall settlement sequence. Additionally, influenced by non-uniform load transfer and environmental factors, the settlement field shows significant spatial heterogeneity, eventually triggering differential settlement on the surface.

Keywords: subgrade; foundation; full-fill embankment; settlement rate; sunny slope and shady slope