

DOI: 10.7672/sgjs2025180092

山区高速公路超高填方路基监测及路面铺筑 时间推测研究*

范利民¹, 张武桥², 方 鸿², 谭 伟²

(1. 中交第三公路工程局有限公司, 湖北 武汉 430030;

2. 湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410114)

[摘要] 为了研究山区高速公路超高填方路基沉降变形特征,依托湖南某高速公路超高填方路基工程,制订了针对超高填方路基的监测方案并开展了监测工作,最后对路基坡面位移和沉降量进行分析。基于路基实测沉降数据,采用指数曲线法预测后期沉降曲线,并根据沉降预测曲线推测了路面铺筑时间。结果表明:路基累积位移量<4mm的测点数占总数的54.17%,只有少部分测点位移较大,坡面整体位移较小;路基各测点存在一定沉降,但整体变化趋势基本一致,最终沉降量逐渐趋于平缓,表明路基沉降稳定;采用指数曲线法可较好地拟合沉降数据并预测后期沉降趋势,可作为路面铺筑时间确定的初步依据。

[关键词] 高速公路;高填方;路基;监测;沉降;指数曲线法

[中图分类号] U416.1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0092-06

Monitoring of Super-high Fill Subgrade and Speculation of Pavement Paving Time of Expressway in Mountain Area

FAN Limin¹, ZHANG Wuqiao², FANG Hong², TAN Wei²

(1. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430030, China;

2. Hunan Communications Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to study the settlement and deformation characteristics of super-high fill subgrade of expressway in mountainous area, this paper relies on the super-high fill subgrade project of a expressway in Hunan Province, formulates the monitoring scheme for super-high fill subgrade and carries out the monitoring work. Finally, the displacement and settlement of subgrade slope are analyzed. Based on the measured settlement data of subgrade, the exponential curve is used to predict the later settlement curve, and the pavement paving time is inferred according to the settlement prediction curve. The results show that the number of measuring points with cumulative displacement less than 4mm accounts for 54.17% of the total, only a few measuring points have large displacement and the overall displacement of the slope is small. There is a certain settlement at each measuring point of the subgrade, but the overall change trend is basically same, and the final settlement gradually tends to be gentle, indicating that the subgrade settlement is stable; The exponential curve can better fit the settlement data and predict the later settlement trend, which can be used as a preliminary basis for the determination of pavement paving time.

Keywords: expressway; high fill; subgrade; monitoring; settlement; exponential curve method

0 引言

山区高速公路由于地形起伏较大、坡度较陡、地质条件复杂多变等不利因素,加之大量隧道洞碴、挖方料需要处理,通过采用高填方路基甚至超高填方路基方式来保障线形合规^[1-2]。在施工期,

* 湖南省交通科技项目(202238);中交三公局科技创新项目(3GS-GX-0699-2022-0002)

[作者简介] 范利民,高级工程师,E-mail: 17373199052@163.com

[收稿日期] 2024-09-18

高填方土石混填路基的沉降难以控制,稳定性难以保证,填筑完成后往往需等待数月(通常跨越雨季)来确定沉降稳定性,直接影响整个项目总体进度和工程质量,一旦路基沉降不稳定便铺筑路面极易引起路面结构破坏^[3-4]。因此,对山区高速公路高填方路基沉降进行监测,并对监测结果进行科学分析,更好地预测后期沉降,以此来正确控制路面铺筑速率,合理确定路面施工时间至关重要。

当前,基于实测数据探讨沉降量与时间序列关系,并采用数学模型对沉降发展趋势进行预测,因其科学实用性在工程领域内得到普遍应用,主要方法包括曲线拟合法^[5-6]、灰色模型法^[7-8]、神经网络法^[9-10]等。其中,朱彦鹏等^[5]选用图解法、双曲线法、指数曲线法和幂多项式拟合法拟合路基实测数据进行预测,并着重讨论了每个预测方法的适用性;胡习阳等^[7]以张桑高速公路为依托,采用3种灰色理论模型对其典型路基断面沉降进行了预测研究,并根据拟合结果判断不同阶段下最合适的预测模型;刘晓剑等^[9]运用GRU神经网络对湖南某高速公路工程路基沉降进行预测,并分析了该模型可靠性。然而针对超高填方路基及路基填方和路面铺筑阶段受施工影响较大情况下的沉降预测研究相对较少。

因此,本文依托湖南省某山区高速公路项目,总结高填方路基监测原则及要求,在路基顶面和坡面设置监测点并对其进行监测,整理了路基坡面位移和沉降数据,以期分析路基稳定性,并建立了预测路基沉降趋势的数学模型,为相同地质条件下的高速公路建设和维护提供一定指导。

1 工程概况

湖南省某新建高速公路沿线多为丘陵山区,地形起伏大,沿线分布有多处高填方路堤。其中,某路段原方案为建设大桥,综合考虑项目地方道路使用、弃渣处理、环境保护等方面因素,需将该处大桥变更为路基,如图1所示。路堤左侧最大填方边坡高度为86.3m,采用8级放坡形式,其中第1,3级边坡坡率为1:1.5,第2,4级边坡坡率为1:1.75,第5~8级边坡坡率为1:2.0,故属于典型的高填方路基甚至超高填方路基。本路段路基填料为土石混填料,路基填筑时的压实质量难以控制,在施工期间易造成路基边坡滑坡、垮塌等问题^[11-12]。项目所在区域属亚热带季风性湿润气候区,雨量充沛,年均降雨量接近1500mm,其中4—6月为雨季,工后沉降和稳定性控制难度较大。

为了保证超高填方路堤施工质量,避免出现由

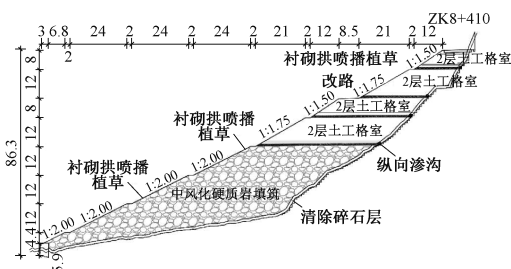


图1 高填方路基剖面(单位:m)

Fig.1 Profile of high fill subgrade(unit: m)

于路基沉降变形引发的路面开裂等问题,整个路基填筑结束后,开展了严格的路基坡面水平位移及沉降监测工作。并且研究了针对超高填方路基监测方案的制订,其中包括监测目的、监测内容、测点布设及埋设,总结了高填方路基监测要求。

2 超高填方路基监测

2.1 监测目的

本文超高填方路基变形监测目的是依据监测结果指导施工,正确控制路面铺筑速率。此外,可掌握土石混合料填筑路基的沉降与变形规律,分析路基稳定性,为今后同地质条件的高速公路建设提供有益参考。

2.2 监测内容及原理

根据上述监测目的,本文监测内容包括高填方路基坡面位移与路基顶面沉降监测。其中,路基坡面位移监测使用测量机器人,定期监测各测点位移量,分析坡面(边坡表面)变形情况;路基顶面沉降监测则使用精密水准仪,每隔一定时间且在相近外部条件下,对设置监测点位的区段开展水准测量,采集路基顶面垂向位移数据,分析路基沉降情况。

本文设计了路基边坡表面位移自动化监测系统,选用的测量机器人型号为TrimbleS7,测角精度为1",测距精度在棱镜模式下为 $1\text{mm}+2\times 10^{-6}D$ (D 为用全站仪测量的目标点(棱镜)至仪器中心直线距离,单位为km)。测量机器人有着高精度测角、测距特点,同时集成了测量目标自动识别技术,从而满足本项目自动化变形监测过程中准确照准监测点及精确测量需求。

测量机器人作业的原理是假设 M 和 N 分别为仪器设站点和稳定区域范围内的后视定向基准点,已知上述点位的三维坐标,完成设站后自动照准监测点 P 进行监测,获取斜距 S 、水平角 α 及竖直角 β ,由式(1)~式(3)计算得到监测点三维坐标(X_p, Y_p, Z_p)。

$$X_p = X_M + S\cos\beta\cos\alpha \tag{1}$$

$$Y_p = Y_M + S\cos\beta\sin\alpha \tag{2}$$

$$Z_p = Z_M + S\sin\beta \tag{3}$$

2.3 测点布设

本文监测点布设涉及坡面位移监测点和路基顶面沉降监测点选取。坡面位移监测点埋设在边坡平台处,并根据边坡稳定性理论和现有资料分析,布设在可能的滑移面与地面的切面位置,同一监测断面的边桩埋设在同一横轴线上。路基坡面自上而下(第 1~8 级),在各级平台上共布置 24 个坡面三向位移监测点,测点纵向间距为 10~20m。且在路基顶面共布置 5 个沉降监测断面,合计 10 个沉降监测点(F1~F10),断面纵向间距约为 30m。监测基准点布置于测区以外测站处,整个高填方路基的测点布置方案如图 2 所示。

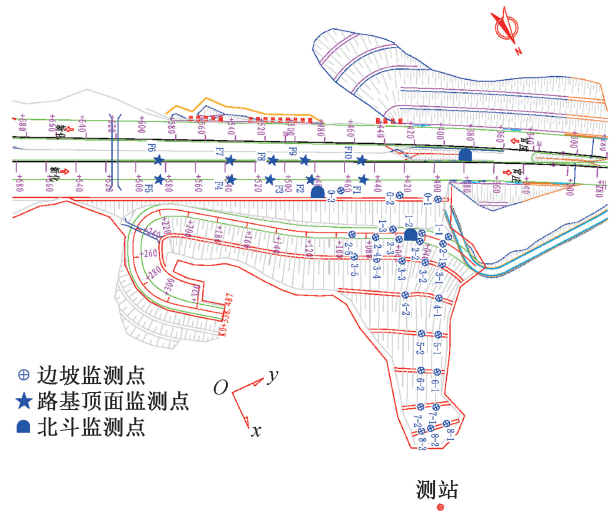


图 2 总体监测方案
Fig. 2 Overall monitoring scheme

2.4 测点埋设

用于水平位移的基准桩埋设在变形区以外的坚固地基上或永久建筑物上。每 3 个月应对其进行校核,基准桩与路堤坡趾距离一般 $\geq 20\text{m}$,设置在土质坚硬便于长期保存和使用的地点,并埋设混凝土标石。

基准点使用边长为 20cm 的钢筋混凝土预制桩,埋设时保证打入硬土层 $\geq 2.0\text{m}$,在软土地基中打入深度 $\geq 10\text{m}$ 。桩周顶部 50cm 使用现浇混凝土进行固定,并在上面现浇 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}\times 0.2\text{m}$ 监测平台,桩顶露出平台 15cm,在其顶部预埋钢筋作为固定测头^[13]。

坡面测点则采用 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 1\,500\text{mm}$ C25 混凝土预制桩,桩顶预埋小段钢筋作为测头,一般预埋棱镜。桩周上部 50cm 用混凝土浇筑固定。顶面测点采用同样的方式,但在桩顶埋入测钉便于监测,如图 3 所示。

本文变形测量等级及精度要求按 GB 50026—



图 3 路基测点
Fig. 3 Subgrade measuring points

2020《工程测量标准》^[14]规定执行,如表 1 所示。

表 1 监控量测精度要求
Table 1 Monitoring measurement accuracy

变形测量等级	requirements			mm
	垂直位移测量		水平位移监测	
	变形点高程中误差	相邻沉降变形点高程中误差	变形点点位中误差	
四等	± 2.0	± 1.0	± 12.0	

因此,本文对路基坡面进行了位移量监测,并根据监测数据分析了路基边坡稳定性。同时,也进行了路基顶面沉降监测,并根据累积沉降量随时间变化趋势总结了路基变形规律,且基于监测数据对工后沉降进行预测分析,以此估测路面铺筑时间。

3 监测结果与分析

3.1 路基坡面位移

由于第 1~4 级坡面位移量和位移速率相对较小,一直处于相对稳定状态,本文选取累积位移量相对较大的第 5~8 级边坡的 9 个测点作为研究对象,整理了坡面位移监测数据并绘制了路基坡面位移变化曲线和位移变化速率曲线,如图 4 所示。进一步分析曲线变化趋势,如图 4a,4b 所示,第 8,7 级坡面的初始水平变形较大, $>8\text{mm}$ 。这主要归因于该路堤为填石路堤,最初优化压实工艺为羊足碾+2 遍静压+22t 振动压路机动压,但压实效果不理想。然而,在监测开始约 3 个月后,水平变形趋于稳定,仅出现轻微波动。

如图 4c,4d 所示,第 6,5 级坡面各监测点的水平变形相对较小,在监测的前 7 个月内保持在 2.5mm 以内,这是因为在第 8,7 级施工后基础上进行了强夯增强补压。但在 2023 年 5 月初,第 6,5 级监测点出现了位移增幅最大,而后位移速率趋于平缓。其原因之一是此时正处于雨季,雨水下渗会增加边坡土壤自重,导致边坡向路基外侧移动;而另一个原因是第 5,6 级坡面上有钻探作业干扰,在一定程度上影响了边坡稳定性。

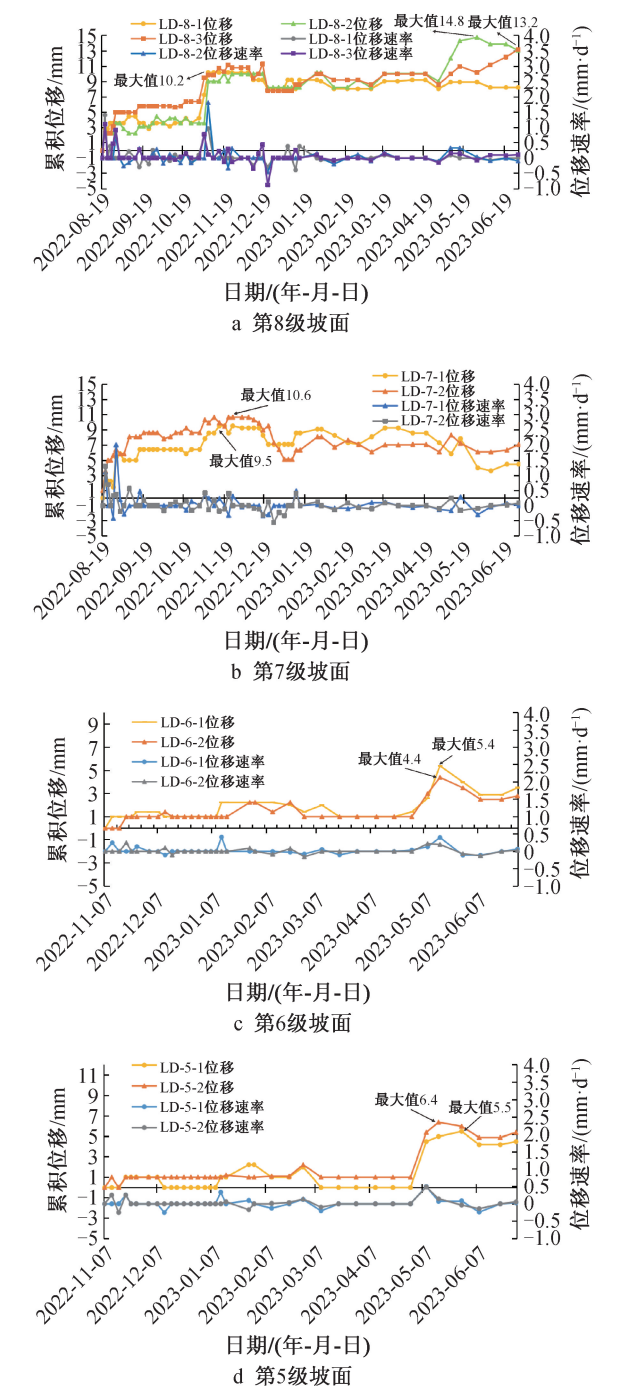


图4 第5~8级坡面位移与位移变化速率曲线

Fig.4 The displacement and displacement change rate curves of the 5~8 grades slope

此外,由图4可看出,第5级坡面最大变形速率为1.2mm/d,第6级坡面最大变形速率为0.6mm/d,第7级坡面最大变形速率为1.8mm/d,第8级坡面最大变形速率为1.8mm/d,总体上都满足GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》^[15]中规定连续3d≤2mm/d的要求,这表明各级坡面均处于稳定状态。

最后,本文整理了近1年各测点的累积位移量,

得到24个测点路基坡面累积位移量,如图5所示。其中,累积位移量<4mm的测点数达到54.17%,即大多数测点的路基坡面位移均保持在4mm以内。这表明只有较少部分测点位移较大,坡面整体位移较小,在后续监测过程中需重点关注位移明显区域。

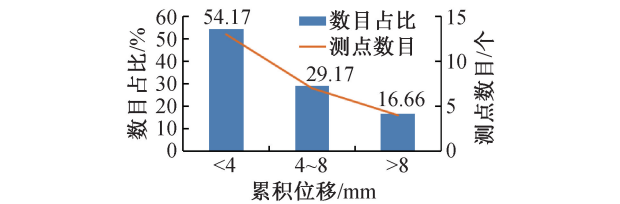


图5 各测点路基坡面累积位移量

Fig.5 The cumulative displacement of subgrade slope at each measuring point

3.2 路基顶面沉降

本文整理了几个月路基顶面各测点累积沉降量,如图6所示。根据数据分析,结合现场施工进度,在路基填筑完毕初期,路基顶面各测点存在一定沉降,虽与实际沉降量有一定差异,但整体变化趋势基本保持一致,这是由测点所受影响因素相同导致。其中,F1处累积沉降量最大,达到56mm;而F7处累积沉降量最小,仅有9mm。此外,临坡一侧监测点累积沉降量较大,靠山一侧监测点累积沉降量较小,其原因是路基填筑高度较高,在施工车辆反复碾压作用下,路基发生了一定压缩变形,并经历5月以来区域的频繁降雨,路基产生沉降。

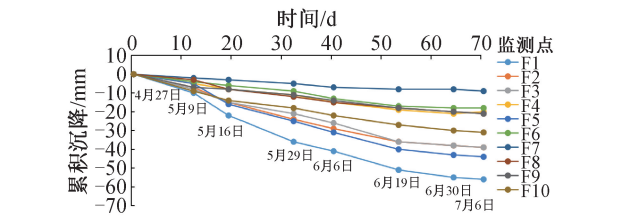


图6 路基顶面各监测点累积沉降量随时间变化曲线

Fig.6 The cumulative settlement curves of different monitoring points on the top surface of the subgrade with time

但进入6月中旬后,各测点的累积沉降量逐渐趋于平缓,表明路基顶面沉降稳定。因此,本文采用成长曲线拟合法对后期进行沉降预测。其中,F1-F10断面和F2-F9断面属于高填段,故2个断面在后续数据分析中得到重点关注,其余断面位于普通路段。

基于实测沉降数据,采用指数模型进行非线性拟合^[16-18],对后期路基沉降进行预测。并利用拟合优度 R^2 评价预测曲线拟合效果, R^2 越接近1代表拟合效果越好,能更好地预测数据发展趋势。其拟合曲线方程如下:

$$S_t = Ae^{-Bt} + C \tag{4}$$
式中: S_t 为 t 时刻沉降量; A, B, C 为需求解的拟合参数。

本文选取断面 F1-F10 和断面 F2-F9 采集的 0~70d 实测沉降数据进行预测,各测点拟合参数结果和拟合优度如表 2 所示。由表 2 可看出,各测点沉降数据的拟合优度均>0.988 3,代表每个指数函数模型能较好地拟合实测数据。

Table 2 Fitting results of settlement monitoring points				
拟合参数	测点编号			
	F1	F2	F9	F10
A	83.996 14	59.864 16	36.178 36	42.719 04
B	0.017 73	0.017 03	0.011 81	0.018 10
C	-81.993 65	-58.447 24	-36.871 83	-43.106 46
R ²	0.990 5	0.990 3	0.988 3	0.996 0

目前,路基沉降速率达到何种程度可铺筑路面并无明确规范条文,可参照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》^[19],即软土地基路面铺筑应在连续 2 个月监测的沉降量≤5mm 时开展,实际工程中许多技术人员也将此作为路基沉降稳定的判别依据。本文参照该规范,结合上述预测数据和曲线,各测点第 140 天沉降量与第 200 天沉降量相差为 4.596 2,3.531 3,3.515 3,2.245 2mm,其值均<5mm,满足规范要求,如图 7 所示。因此,推断该路段铺设路面要求的时间约为第 200 天进场,按此计划施工单位做好相关施工准备。

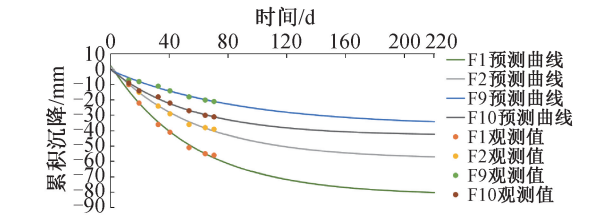


图 7 路基顶面沉降预测结果与监测值对比
Fig.7 The comparison between the predicted and monitoring results of the settlement on the top surface of the subgrade

综上所述,各级路基坡面位移量和位移速率变化趋势相对稳定,反映出坡面处于一个相对稳定状态;路基顶面沉降受工程施工和降雨等因素影响,其值在前期较大,但一段时间后沉降逐渐趋于稳定;结合各测点的预测曲线,正式进场前进行了加密监测,实测值与预测曲线相吻合,满足规范要求,以此估测路面铺设时间有益于施工单位提前做好施工组织。最终,路面铺设过程中未出现开裂现象。目前,项目已通车半年,运营状态良好。

4 结语

1)通过整理路基坡面各测点位移量和位移速率数据可知,位移量<4mm 占比 54.17%,认为只有较少部分位移较大,坡面整体位移较小;且总体变形速率符合规范要求,表明各级坡面处于稳定状态。

2)由路基各测点沉降数据统计分析可知,前期各测点沉降较明显,这可能受前期施工和频繁降雨等因素影响,但各测点整体变化趋势基本一致。在进入 6 月中旬后,累积沉降量逐渐趋于平缓,表明路基顶面沉降稳定。

3)采用指数函数能较好地预测各测点沉降趋势,拟合相关性优良,并结合沉降标准估测了路面铺筑时间。施工单位根据估测时间有序组织施工,铺设过程中路面未出现开裂现象,目前项目已通车半年,运营状态良好。

参考文献:

[1] 卢世杰,王海峰,韩微微.公路高填方路堤稳定性监测设计探讨[J].路基工程,2022(3):18-22.
LU S J, WANG H F, HAN W W. Discussion on stability monitoring design of high fill embankment [J]. Subgrade engineering, 2022(3):18-22.

[2] 李兴,李晓彤.某高速公路高填方路基沉降变形特征研究[J].路基工程,2023(6):202-207.
LI X, LI X T. Study on settlement deformation characteristics of high fill subgrade along a highway [J]. Subgrade engineering, 2023(6):202-207.

[3] 杨壮.山区高填方土石混填路基变形及稳定性研究[D].西安:长安大学,2021.
YANG Z. Study on deformation and stability of high-fill soil-rock mixture roadbed in mountain area [D]. Xi ' an: Chang ' an University, 2021.

[4] 荣智,李浩.基于回弹模量法施工的公路路基工后沉降监测[J].施工技术,2020,49(S1):1316-1319.
RONG Z, LI H. Post-construction settlement monitoring of highway subgrade based on resilient modulus method [J]. Construction technology, 2020,49(S1):1316-1319.

[5] 朱彦鹏,陈琰娇.兰永公路软土地基处理后的沉降预测研究[J].路基工程,2017(1):1-6.
ZHU Y P, CHEN Y J. Research on settlement prediction of consolidated soft soil foundation of Lanzhou-Yongjing Highway [J]. Subgrade engineering, 2017(1):1-6.

[6] 袁定辉,尹利华,张超,等.基于曲线拟合的路基沉降预测方法的稳定性分析[J].路基工程,2020(5):74-78.
YUAN D H, YIN L H, ZHANG C, et al. Consistency analysis of methods for subgrade settlement prediction based on curve fitting [J]. Subgrade engineering, 2020(5):74-78.

[7] 胡习阳,曾志雄,符梁,等.张桑高速公路路基沉降预测方法研究[J].公路工程,2018,43(4):278-282.
HU XY, ZENG ZX, FU L, et al. Study on prediction method of subgrade settlement of Zhangjiajie-Sangzhi Expressway [J]. Highway engineering, 2018,43(4):278-282.

[8]

JIN S J, ZHANG D S, SHU Z, et al. Grey model theory used in prediction of subgrade settlement [J]. Applied mechanics and materials, 2011, 105-107: 1576-1579.

[9]

刘晓剑,金可云,温勇兵. 基于 GRU 神经网络的软土地区公路路基沉降预测方法 [J]. 公路与汽运, 2023 (2): 62-67.
LIU X J, JIN K Y, WEN Y B. Prediction method of highway subgrade settlement in soft soil area based on GRU neural network [J]. Highways & automotive applications, 2023 (2): 62-67.

[10]

MA S X. Forecast of highway subgrade settlement based on improved BP neural network [J]. Scientific research and reviews, 2020 (2): 589-598.

[11]

陈思远,武小菲,姜宏,等. 陡坡地段土石混填路基压实特性研究 [J]. 路基工程, 2022 (4): 57-63.
CHEN S Y, WU X F, JIANG H, et al. Study on compaction characteristics of soil-rock mixed subgrade in steep slope [J]. Subgrade engineering, 2022 (4): 57-63.

[12]

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.
GAO F Z, CHEN S Y, ZHANG J Y. On settlement characteristics of red-bed earth-rock mixture subgrade under vehicle loads [J]. Subgrade engineering, 2023 (5): 49-55.

[13]

王新国,王家强,李大鹏. 公路崩塌体路基处理及变形监测方法 [J]. 土工基础, 2015, 29 (6): 96-101.
WANG X G, WANG J Q, LI D P. Remediation of highway embankment collapses and deformation monitoring [J]. Soil engineering and foundation, 2015, 29 (6): 96-101.

[14]

中国有色金属工业西安勘察设计院有限公司,中国有色工程有限公司. 工程测量标准: GB 50026—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Non-ferrous Metals Industry, China ENFI Engineering Co., Ltd. Standard for engineering surveying: GB 50026—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.

[15]

重庆市设计院,中国建筑技术集团有限公司. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Chongqing Architectural Design Institute, China Building Technique Group Co., Ltd. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[16]

魏道凯,寇海磊. 高速公路高填方路基沉降变形数据拟合与预测研究 [J]. 公路工程, 2018, 43 (1): 251-255.
WEI D K, KOU H L. Study on fitting and prediction of settlement deformation data of high fill roadbed in expressway [J]. Highway engineering, 2018, 43 (1): 251-255.

[17]

谢杰辉,牛富俊,彭智育,等. 滨海高速公路软基变形规律及沉降预测应用 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49 (4): 97-107.
XIE J H, NIU F J, PENG Z Y, et al. Deformation law and settlement prediction application of soft soil subgrade in coastal expressway [J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2021, 49 (4): 97-107.

[18]

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 Z L, WANG W, CAI W. 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.

[19]

中交第二公路勘察设计院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Second Highway Consultant Co., Ltd. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

(上接第 61 页)

[6]

熊斌,虞志钢,马明,等. 下穿上跨既有交通线路钢箱梁桥顶推施工 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (S1): 3138-3141.
XIONG B, YU Z G, MA M, et al. Top push construction of steel box girder bridge across existing transportation lines [J]. Building structure, 2022, 52 (S1): 3138-3141.

[7]

李传习,陈卓,董创文,等. 横向四滑道步履式顶推宽幅钢箱梁局部应力分析 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (4): 72-79.
LI C X, CHEN Z, DONG C W, et al. Analysis on local stress of wide steel box beam constructed by transverse four-slide walking-type incremental launching method [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2019, 36 (4): 72-79.

[8]

易善德,王德怀,文定旭,等. 双向超宽变腹板钢箱梁顶推施工 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (S1): 112-117.
YI S D, WANG D H, WEN D X, et al. Construction technology of bidirectional extra-wide steel box girder with variable web [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2021, 38 (S1): 112-117.

[9]

张鸿,张永涛,周仁忠. 步履式自动化顶推设备系统研究及应用 [J]. 中外公路, 2012, 32 (4): 123-125.
ZHANG H, ZHANG Y T, ZHOU R Z. Research and application of walking automatic pushing equipment system [J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32 (4): 123-125.

[10]

汪学进,薛志武. 基于 ANSYS 的钢槽梁顶推施工过程分析与研究 [J]. 中国港湾建设, 2020, 40 (3): 8-12.
WANG X J, XUE Z W. Analysis and research on incremental launching construction process of steel groove beam based on ANSYS [J]. China harbour engineering, 2020, 40 (3): 8-12.

[11]

叶贵如,沈利栋,张治成,等. 梁拱组合体系拱桥整体顶推中的应力测试与分析 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (2): 64-69.
YE G R, SHEN L D, ZHANG Z C, et al. Stress measurement and analysis in overall incremental launching construction of beam-arch composite arch bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2011, 28 (2): 64-69.

[12]

杨增权. 大跨曲线钢槽梁顶推施工关键技术 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (3): 56-62, 72.
YANG Z Q. Key technology of long-span curved steel trough beam incremental launching construction [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2021, 38 (3): 56-62, 72.