DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.06.001

软土地基工后小荷载作用下不同沉降 预测模型对比分析

韩善鹏¹, 付伟², 张军辉^{1*}, 林晨¹

(1.长沙理工大学交通运输工程学院,湖南长沙 410114; 2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北武汉 430056)

摘要:沉降变形是软土地基施工中须重点关注的问题,针对在实际工程中软土地基填筑后仍有小荷载施加情况,以云 南省昭通市昭阳西环高速高填方段沉降监测数据为依托,分别采用双曲线法、三点法和星野法3种沉降预测方法对填 方地基的沉降进行预测、对比和分析,总结出各模型的拟合特点。对比拟合曲线和现场实测沉降曲线发现:路基加载 会造成3种方法的沉降预测误差较大;3种预测方法中,采用n-1级填筑后间歇期及n级填筑后间歇期的数据作拟合 时,效果不如采用恒载期的数据,对于双曲线法和三点法,拟合选用的数据点时间间隔越长,预测效果越好;对于星野 法,采用恒载期的数据拟合效果更佳。

关键词:路基工程;沉降预测;双曲线法;三点法;星野法中图分类号:U416文献标志码:A

Comparison Analysis of Different Settlement Prediction Models under Small Post-Construction Load on Soft Foundation

HAN Shanpeng¹, FU Wei², ZHANG Junhui^{1*}, LIN Chen¹

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: Settlement deformation is a key concern in soft foundation construction. Since there is still a small load applied after the filling of soft foundation in the actual project, based on the settlement monitoring data of the high-fill section of Zhaoyang West Ring Expressway in Zhaotong City, Yunnan Province, three settlement prediction methods, namely the hyperbolic method, the three-point method, and the Hoshino method, were used to predict, compare, and analyze the settlement of the fill foundation, and the fitting characteristics of each model were summarized. By comparing the fitting curves and the actual settlement curves, it was found that the loading on the roadbed will cause large errors in the prediction of settlement for the three methods; when the three prediction methods use the data of n - 1 level post-fill interval and n level post-fill interval for fitting, the effect is not as good as using the data of constant load period; for the hyperbolic method and the three-point method, longer time interval of the data points chosen for the fit indicates better prediction effect; for the Hoshino method, a better fit is achieved by using data from the constant load period.

Keywords:soft foundation; settlement prediction; hyperbolic method; three-point method; Hoshino method

0 引言

在高速公路建设中,软土地基的沉降是影响道

路质量的关键问题^[1],所以软土地基上高路堤的稳定 和沉降需要重点关注。公路施工过程中,为了控制 施工进度,指导后期的施工组织与安排,同时保证路

收稿日期:2023-11-30(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);中交建集团青年科技创新项目(编号:2021-ZJKJ-QNCX16);长沙理 工大学研究生创新项目(编号:CX2021SS122)

作者简介:韩善鹏,男,硕士研究生.E-mail:hsp98@qq.com

^{*}通信作者:张军辉,男,博士,教授.E-mail:zjhseu@csust.edu.cn

基的稳定与使用,需要对路基的最终沉降量进行预测^[2]。目前,软土路基沉降与时间关系模型的建立即 沉降发展预测方法主要有3类:①利用土的本构模 型,采用Biot固结理论的有限元分析方法,但此方法 由于选用的本构模型和工程实际情况存在差异,预 测结果较差^[3];②采用经典的分层总和法推算沉降 发展,而分层总和法需要通过三轴试验获得其力学参 数,受扰动、试样尺寸等因素影响,与现场实际往往不 符^[4];③利用现场监测数据通过回归分析推测沉降与 时间的关系^[5],主要有双曲线法、指数法、三点法、星野 法、ASAOKA法和灰色预测法等。目前,在实际工程 中,完全依靠理论方法进行沉降预测行不通,需要利 用现场监测数据预测沉降的经验方法^[6]。

曲线预测法是根据地基沉降前期的观测数据推 测沉降过程中任意时刻沉降量及最终沉降量的一种 经验方法。近年来,指数曲线模型^[7]、双曲线模型^[8]、 星野法^[9]等沉降预测方法在工程上运用较为广泛^[10]。 李承霖等[11]通过计算原始观测数据,发现双曲线和 指数曲线对地表沉降数据预测效果良好。这3类预 测方法都是利用加载完成后恒载阶段的沉降观测数 据进行分析,并可以利用长时间的监测数据得到较 准确的结果。软土地基上的路堤一般是分级填筑 的,同时为了软土路基的稳定,在分级填筑间有较长 的施工间歇期^[12]。然而在实际工程中,很难在路基 填筑完成后留出较长的恒载时间作为沉降数据观察 期,往往在填筑过程中便需要确定是否采取预压等 措施进一步控制工后沉降及路面铺筑时间。由于传 统预测方法恒载期的限制,为适应工程需要,当填筑 荷载变化不大,对后续沉降影响较小时,也常将该段 时间内的沉降数据作恒载处理[13],但这种近似处理 对以上3种沉降预测方法的预测效果产生的影响尚 不明确,需要对其展开研究。

该文针对路基填筑后仍存在小荷载的情况,根 据现场监测数据对3种预测方法进行拟合,并与现场 实测曲线对比分析小荷载情况对3种方法预测效果 的影响。实际工程中采用双曲线法、三点法和星野 法进行沉降预测时,对如何选择数据点进行拟合提 供一定参考。

1 软土路基现场沉降监测

单点沉降计是当前使用较为广泛的沉降监测设

备之一,项目采用单点沉降计进行路基基底沉降的 测读。为保证数据的可靠性,埋设方案根据现场实 际钻探情况进行调整,测量绝对沉降的单点沉降计 深度根据深入基岩0.5m或硬土层2m以上为原则进 行调整。后续将单点沉降计连接至采集模块和无线 收发模块,可以实现远程读取现场数据。通过远程 读取到的现场沉降数据,绘制出该沉降观测点的填 高-沉降-时间曲线,如图1所示。





从图1可知:① 在路堤填筑前期,随着上覆荷载 的增加,路基沉降发展迅速,填筑后期相比前期,相 同荷载变化量下,路基沉降变化量显著减小,说明土 体强度随着填筑过程有所提高;② 路基填筑期内,尤 其是填筑前期的沉降速率大于间歇期的沉降速率, 说明软土对荷载变化十分敏感。

2 3种预测方法预测效果对比

该文依托云南省昭通昭阳西环高速K5+810断 面的现场监测数据,采用3种沉降预测方法进行拟合 时,拟合的时间起点及拟合时间段分别选用*n*-1级 填筑后间歇期的数据,*n*-1级填筑后间歇期及*n*级填 筑后间歇期的数据,*n*级填筑后间歇期的数据的3类 数据点^[14],通过对比采用不同数据点拟合得到的曲 线与实测沉降曲线,具体分析3种预测方法的预测效 果,通过拟合精度*R*²反映拟合方法在短期内的沉降 预测效果,而长期的预测效果以均方根误差*e*_{RMSE}作 为判断标准^[15]。

2.1 双曲线法预测

该方法属于经验方法,假定路堤沉降速率变化 符合双曲线基本特征,任一时刻沉降量可表示为^[16]:

$$S_{t} = S_{0} + \frac{t - t_{0}}{a + b(t - t_{0})}$$
(1)

$$S_{\infty} = S_0 + \frac{1}{b} \tag{2}$$

式中: S_t 为t时刻的路基沉降量; S_{∞} 为 $t=\infty$ 时路基沉降量; S_0 为t=0时路基的沉降量; a_0 为参数。

双曲线法具体可按下述步骤进行:

(1)选取满载后的某时刻沉降值作为S₀,该时刻为t₀。

(2) 根据沉降曲线,获得to后不同时刻沉降值。

(3)以(t-t₀)为横坐标,以(t-t₀)/(S_t-S₀)为纵
 坐标,拟合一条直线,该直线的斜率为b,截距为a。

(4) 将参数 a、b代入式(1),即可推算任意时刻的沉降量。

双曲线法一般要求有满载后恒载期的数据,但 由于实际工程的需要,在荷载变化不大,对沉降影响 相对较小时,经常当作恒载处理。为研究双曲线法 在恒载及荷载变化不大时的预测效果,将to作为初始 时间起点,求解参数时所用的(t,Si)称为拟合数据 段,按求解参数时使用的沉降数据段时间与加载时 间的关系分为3类:第一类为时间起点及拟合时间段 均采用n-1级填筑后间歇期的数据;第二类为时间起 点及拟合时间段采用n-1级填筑后间歇期及n级填 筑后间歇期的数据;第三类为时间起点及拟合时间段 采用n级填筑后间歇期的数据,并将拟合结果与实际 沉降曲线展开对比分析。下文中预测起始时间指的 是代入预测公式的最小时间,选择在时间起点附近。

对K5+810断面的沉降曲线进行预测,第n级填 筑荷载为4kPa,路基填筑前荷载为275.5kPa,约占 1.45%(下同)。使用双曲线法时的时间起点、拟合时 间段等信息如表1所示。

表 1 双曲线法预测取值 Table Values predicted by hyperbolic method

序县	时间起	拟合时间	时间间	加载时	0	数据类型	
1. 3	点/d	段/d	隔/d	间/d	CRMSE		
1	225	$229 \sim 245$	20	265	8.901 4	第一类	
2	225	$250 \sim 261$	36	265	2.061 1	第一类	
3	225	$275 \sim 295$	70	265	2.991 2	第二类	
4	225	$295 \sim 315$	90	265	1.020 2	第三类	
5	269	$295 \sim 305$	36	265	5.758 8	第一类	
6	269	$295 \sim 315$	46	265	2.219 3	第一类	
7	269	$310 \sim 330$	61	265	0.778 7	第二类	
8	269	330~350	81	265	0.991 7	第三类	
9	269	295~330	61	265	1.049 7	第三类	

具体的拟合效果及预测结果如图2、3所示。

从图 2(a)、(b)可以看出,初始时间起点至拟合 数据段终点间的预测与实际沉降基本一致,但后期 预测效果较差,约在预测起始时间 180 d后,沉降误 差已经达到了 15 mm;从图 2(c)、(d)可以看出:随着 时间间隔的增大,预测效果明显比第 1 组好;从图 2 (e)、(f)可知:在拟合数据段终点过后约 85 d,与实测 数据的差值约4 mm, e_{RMSE}值达到了 2.991 2,其数据 的时间间隔大于第 2 组,但预测效果反而不如第 2 组,说明虽荷载变化不大,但同时采用加载前后的数 据仍对双曲线法的预测效果产生了影响;从图 2(g)、 (h)可知:在拟合数据段终点过后 105 d,与实测数据 的差值约为 3 mm, e_{RMSE}值为 1.020 2,说明在荷载相 对变化不是很大时,增大时间间隔,可以抵消由加载 引起的预测误差。

从表1及图3可以看出:采用满载后的恒载数据 进行预测时,时间间隔越长,预测效果越好。通过与 表1及图2的对比可以得知:采用*n*-1级填筑后间歇 期的某个时间作为时间起点,当时间间隔足够长时, 以*n*级填筑后间歇期的数据,当拟合时间段较长时和 完全采用第*n*级填筑后间歇期的数据预测的效果相 近,如表1中的第4组数据以及第9组数据。整体而 言,完全采用第*n*级数据预测的效果明显好于采用 *n*-1级数据的预测效果,因此在工后存在小荷载的 情况下,双曲线法的预测效果仍会受到加载的影响。

综上,在后续仍有加载的情况下,单独以n-1级 填筑后间歇期沉降数据作为时间起点和拟合数据, 在时间间隔较短的情况下,预测误差较大,无法满足 工程需求。而采用n-1级填筑后间歇期的某个时间 作为时间起点,以n级填筑后间歇期的数据作为拟合 数据段可以达到一定的预测效果,但需要较长的时 间间隔。总体来看,双曲线法具有较大的波动性,尤 其是时间间隔会对预测效果产生较大影响。建议在 使用双曲线法预测沉降时,尽量保证有足够多的恒 载或近乎恒载数据,以确保时间间隔较长,否则误差 较大。

2.2 指数曲线法(三点法)预测

由太沙基理论以及《建筑地基处理技术规范》 (JGJ 79—2012)^[17]有关预压法的条文说明,土体*t*时 刻的固结度*U*_t为:

$$U_t = 1 - \alpha \mathrm{e}^{-\beta t} \tag{3}$$



图2 双曲线法预测结果(第1~4组数据)

Figure 2 Prediction results of hyperbolic method (data of Groups 1–4)





Figure 3 Prediction results of hyperbolic method (data of Groups 5-9)

在路基中常取 α=8/π²,根据平均固结度的定义, 在忽略次固结的前提下,平均固结度为:

$$U_t = \frac{S_t - S_d}{S_\infty - S_d} \tag{4}$$

式中:S_a为瞬时沉降,S_∞为不考虑次固结沉降的最终沉降。

$$S_t = (S_{\infty} - S_d)(1 - \alpha e^{-\beta t}) + S_d \tag{5}$$

从实测值的 *S*~*t* 曲线上取 3 点(*t*₁,*S*₁)、(*t*₂,*S*₂)、(*t*₃,*S*₃),要求这 3 个点的时间间隔相等,即满足:

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2$$
 (6)

将 (t_1, S_1) 、 (t_2, S_2) 、 (t_3, S_3) 分别代人式(4)得到 S_1 、 S_2 、 S_3 的表达式,并联立求解,可得:

$$\beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \right) \tag{7}$$

$$S_{\infty} = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)}$$
(8)

$$S_d = \frac{S_1 - S_{\infty}(1 - \alpha e^{-\beta t})}{\alpha e^{-\beta t}} \tag{9}$$

将所求的 $\beta_{S_{\infty}}, S_{d}$ 代入式(5),即可预测任意时 刻的沉降量。

三点法预测沉降的具体步骤为:

(1) 在沉降-时间曲线图上选取恒载(或荷载变 化不大)下的3个点(t₁,S₁)、(t₂,S₂)、(t₃,S₃)。

(2) 根据公式计算 β 、 S_{∞} 、 $S_{d_{\circ}}$

(3) 根据公式计算 S_t。

三点法的预测精度显然与选取的3个点的时间 间隔有很大关系,一般来说,时间间隔较大时,预测 精度较高。以K5+810断面的沉降数据曲线为例,对 三点法的预测效果进行分析,以第225天作为₄,分别 间隔15d、22d、30d、38d取值,三点法时间间隔取值 及具体预测结果如表2和图4所示。表中的*e*_{RMSE}为 采用₆到第400天之间的实测曲线和预测曲线间的 拟合优度。

表 2 三点法时间间隔取值 Table 2 Values for time intervals of three-point method

序号	时间间 隔/d	t_1/d	t_2/d	t_3/d	加载时 间/d	总时间 间隔/d	$e_{\rm RMSE}$	最终沉 降/mm	数据类型
1	15	225	240	255	265	30	3.759 2	490.62	第一类
2	22	225	247	269	265	44	7.743 1	582.50	第二类
3	30	225	255	285	265	60	$5.058\ 2$	500.74	第二类
4	38	225	263	301	265	76	1.801 1	465.65	第二类
5	15	270	285	300	265	30	3.738 2	436.05	第三类
6	30	270	300	330	265	60	1.295 1	446.48	第三类

需要说明的是,图4中预测起始时间指的是代入拟 合公式计算的最初时间,而不是采用的3点时间之后, 从严格意义上来说,预测应该是基于拟合采用的数据 点之后的推测,即to之后代入拟合公式求得的沉降值。

根据3个点与加载时间的关系将数据分为3类: ① 3个点均在加载前;② 3个点之间的间隔包括了加 载时间;③ 3个点均在加载时间之后。由第3组和第 6组可以看出:在相同的时间间隔下,两者的 e_{RMSE}值 分别为5.0582和1.2591,说明选取第二类数据对三 点法预测效果影响较大。由第2、3、4组数据可以看 出:随着时间间隔的增大,由加载引起的对预测效果 的影响逐渐减弱。由第1、5组数据表明:选用第一类 和第三类数据点的预测效果差别不大。

综上,在后续有小荷载施加(1.45%)的情况下,

应尽量选用第一类和第三类数据点作拟合,若因恒载时间不够,无法选取第一类和第三类数据,而选取 第二类作为三点求解时,需保证3点之间的时间间隔 足够长。

2.3 星野法预测

星野法^[18]是基于太沙基固结理论得出的固结度 U和时间t的平方根成正比的关系,通过对在现场获 取的实测沉降值研究,认为包括剪切变形沉降的总 沉降量和时间平方根成正比。其基本计算公式为:

$$S_{t} = S_{t} + \frac{AK\sqrt{t - t_{0}}}{\sqrt{1 + K^{2}}(t - t_{0})}$$
(10)

式中:t₀、S_i分别为拟合计算起始点参考点与瞬时沉降 值;K为影响沉降速度的系数;A为求t→∞时最终沉 降值的系数。



图4 三点法预测结果

Figure 4 Prediction results of three-point method

式(10)可改写为:

$$\frac{t-t_0}{\left(S_t-S_t\right)^2} = \frac{1}{A^2 K^2} + \frac{1}{A^2} (t-t_0)$$
(11)

具体应用时,从实测沉降数据中选取几组假定的(t₀,S_i)和实测沉降数据点(S_i,t),从中选取拟合效 果最好的一组,进而用图解法求出系数K和A。

星野法预测沉降的具体步骤为:

(1) 假设一组 $(t_0, S_i)_{\circ}$

(2) 在时间-沉降曲线图上选取实测沉降点(S_t,t)。

(3) 根据公式拟合直线,求解系数K和A。

(4) 若拟合效果较好,则将假设的(t₀、S_i)以及求 解所得的系数K、A代入预测公式,便可预测不同时 刻的沉降值。

(5) 若拟合效果不佳,调整(t₀、S_i),重复步骤
(2)~(4),直到(t₀、S_i)的假定合适。

相较于双曲线法、三点法,由于星野法中的(to、 S_i)不是通过计算或者拟合确定,而是需要试算确定, 存在偶然性。下面基于K5+810断面的现场沉降数 据进行沉降预测计算。以不同的时间间隔为变量, 研究不同时间段下星野法的预测效果,结果如表3、 图5、6所示。

根据选择的拟合时间段不同,拟合数据可分为3 类:① 完全加载前;② 加载前和加载后;③ 完全加载 后。从第1~5组的预测结果可以看出:相同起点下, 选择前两类数据拟合时,随着拟合时间段的变长, ermse值从2.3630增大到了4.4528,说明沉降预测效 果随拟合时间段的延长而变差。通过第8~10组数 据对比可以看出:采用第三类数据进行拟合时,时间 间隔越长,沉降预测的效果越好。由第2组和第7组 的结果可以看出:在相同时间间隔下,包含加载后数 据的那一组 e_{RMSE}要更大,说明加载会对预测结果造 成误差。星野法对后续加载是敏感的,因此在后续 有较小的荷载波动时,星野法的拟合数据选择应符 合两个要求:①采用前两类数据作为拟合数据段时, 时间间隔不宜过长;②尽量采用恒载期的数据,避免 采用第二类作为拟合数据,否则将造成较大误差。

表 3 不同时间段下星野法预测结果 Table 3 Prediction results of Hoshino method during different time periods

序号	时间段/d	时间间隔/d	$e_{\rm RMSF}$	加载时间/d	K	А	数据类型
1	225~250	25	2.363 0	265	0.065 4	476.520 8	第一类
2	225~260	35	3.160 6	265	0.063 3	484.579 3	第一类
3	225~270	45	3.280 5	265	0.063 1	485.639 0	第二类
4	225~280	55	4.118 2	265	0.061 9	490.274 5	第二类
5	225~290	65	4.452 8	265	0.0617	491.456 1	第二类
6	270~300	30	3.226 3	265	0.066 0	475.832 2	第三类
7	235~270	35	3.645 7	265	0.062 5	488.012 6	第二类
8	270~320	50	1.567 6	265	0.071 9	458.059 5	第三类
9	270~330	60	1.287 3	265	0.073 2	454.745 7	第三类
10	$270 \sim 340$	70	0.954 0	265	0.074 7	451.183 7	第三类
$2 12 \\ 2 10 $	v=4.258 63×10	$0^{-6}x+0.001\ 06$	dee a		180 2	时 20 260 3	间/d 600 340
2 08 - 2 06 -	$R^2=0.$.998			380 390		加载
2 02 - 2 00 -	ra ^{ada} aa	2 ⁹⁷		量/mm	410		实测 -●-三点
1 98 -	r ^{ed^du}			数	120		



图5 星野法预测结果(第3、4组数据)

Figure 5 Prediction results of Hoshino method (data of Groups 3–4)





3 结论

通过依托工程现场实测数据,针对工后具有小 荷载(现有荷载的1.45%)施加的情况,选用了不同数 据点对双曲线法、三点法、星野法进行拟合,对比分 析实测沉降曲线和由实测数据拟合得到的沉降预测 曲线,得出以下结论:

(1)双曲线法、三点法和星野法3种沉降预测方 法都对路基加载敏感,并且仅采用恒载期数据拟合 的效果相比,同时使用了加载前和加载后数据拟合 的效果更接近实测沉降曲线。

(2)对于双曲线法和三点法,时间间隔越长,预 测效果越佳。当采用第二类数据(同时使用了加载 前和加载后数据)时,需要更长的时间间隔才能达到 与第一类和第三类数据相同的预测效果。

(3)对于星野法应遵循两个原则:①采用第一 类和第二类数据作为拟合数据段时,时间间隔不宜 过长,采用第三类数据点拟合时,时间间隔越长,预 测效果越佳;②尽量采用恒载期的数据进行拟合,避 免采用第二类数据拟合,否则会造成较大的误差。

参考文献:

References:

- [1] 苏卫卫,雷明轩,刘国田,等.柔性石笼护坡在湖区软土 路基的适用性研究[J].中外公路,2023,43(2):11-15.
 SU Weiwei, LEI Mingxuan, LIU Guotian, et al. Study on applicability of flexible gabion revetment in soft soil subgrade in lake district[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):11-15.
- [2] 周焕云,黄晓明.高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交 通运输工程学报,2002,2(4): 7-10.
 ZHOU Huanyun, HUANG Xiaoming. Summary of forecasting methods of expressway settlement on soft ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2002,2(4): 7-10.
- [3] 赵明华,刘煜,曹文贵. 软土路基沉降变权重组合S型曲线预 测方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(9): 1443-1447.
 ZHAO Minghua,LIU Yu,CAO Wengui. Study on variable-weight combination forecasting method of S-type curves for soft clay embankment settlement[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(9): 1443-1447.
- [4] 童立元,涂启柱,刘松玉,等.基于孔压静力触探测试的改进分

层总和法在软基沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学,2011 (增刊2):679-682.

TONG Liyuan, TU Qizhu, LIU Songyu, et al. Settlement prediction of soft ground by modified layerwise summation method based on piezocone tests[J]. Rock and Soil Mechanics,2011(sup 2):679-682.

- [5] 陈善雄,王星运,许锡昌,等.铁路客运专线路基沉降预测的新 方法[J]. 岩土力学,2010,31(2): 478-482,488.
 CHEN Shanxiong, WANG Xingyun, XU Xichang, et al. New method for forecasting subgrade settlement of railway passenger dedicated line[J]. Rock and Soil Mechanics,2010, 31(2): 478-482,488.
- [6] 于永堂,郑建国.黄土高填方场地工后沉降预测新模型[J/OL].西南交通大学学报,[2022-11-26].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210526.1307.004.html.

YU Yongtang,ZHENG Jianguo.New models for prediction of post-construction settlement of loess deep filled grounds [J/OL].Journal of Southwest Jiaotong University[2022-11-22].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210526.1307. 004.html.

[7] 陈善雄,王星运,许锡昌,等.路基沉降预测的三点修正指数曲 线法[J]. 岩土力学,2011,32(11): 3355-3360.

CHEN Shanxiong, WANG Xingyun, XU Xichang, et al. Three-point modified exponential curve method for predicting subgrade settlements[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(11): 3355-3360.

[8] 杨涛,李国维,杨伟清.基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预 测[J]. 岩土力学,2004,25(10):1551-1554.

YANG Tao, LI Guowei, YANG Weiqing. Settlement prediction of stage constructed embankment on soft groundbased on the hyperbolic method[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(10): 1551-1554.

 [9] 谌博.路堤沉降与稳定观测数据处理方法对比分析[J].公路 工程,2013,38(2):145-147,169.
 CHEN Bo. Comparative analysis of embankment settlement

and stability observation data processing methods[J]. Highway Engineering,2013,38(2): 145-147,169.

[10] 应宏伟,黄兆江,葛红斌,等.基于分级加载工况的沉降曲线拟
 合法及工程运用[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51
 (2):300-305.

YING Hongwei, HUANG Zhaojiang, GE Hongbin, et al. Curve-fitting method for settlement based on staged loading condition and its engineering application[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021,51(2): 300-305.

[11] 李承霖,王家鼎,谷天峰.西北地区高填方地基沉降的预测模

型研究及分析[J]. 西北地质,2022,55(1): 225-235.

LI Chenglin, WANG Jiading, GU Tianfeng. A study on the prediction model of high filling foundation settlement in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 225-235.

[12] 李世昌,余飞,郭建华. 分级填筑路堤沉降期控制研究[J]. 公路,2021,66(1): 37-43.

LI Shichang, YU Fei, GUO Jianhua. Research on settlement period control of stage filling embankment[J]. Highway, 2021,66(1): 37-43.

- [13] 谢欣.湖南省高速公路路基沉降预测方法研究[D].长沙:中南大学,2006.
 XIE Xin. Study on prediction method of subgrade settlement in expressway, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University,2006.
- [14] 林晨.基于实测数据的软土路基沉降预测及预压设计方法 研究[D].长沙:长沙理工大学,2022.
 LIN Chen. Research on settlement prediction and preloading design method of soft soil subgrade based on measured data[D]. Changsha: Changsha University of

Science & Technology, 2022.

- [15] 杨三强,段士超,刘娜,等.黄土质高填方路基沉降变形与预测
 [J].河北师范大学学报(自然科学版),2020,40(5): 454-460.
 YANG Sanqiang, DUAN Shichao, LIU Na, et al. Settlement deformation and prediction of loess high fill subgrade[J].
 Journal of Hebei University (Natural Science Edition),2020, 40(5): 454-460.
- [16] 张军辉,黄湘宁,郑健龙,等.河池机场填石高填方土基工后沉 降离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(4):773-778. ZHANG Junhui, HUANG Xiangning, ZHENG Jianlong, et al. Centrifugal model tests on post-construction settlement of high embankment of Hechi Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(4): 773-778.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013.
- [18] 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 Jiehui,NIU Fujun,PENG Zhiyu,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.