

基于分级加载的软土路基越级沉降预测方法^{*}赵勇¹, 孟雄¹, 沙龙², 林晨³

(1. 昭通昭阳绕城高速公路投资开发有限公司, 云南 昭通 657000; 2. 昭通市交通建设工程质量安全监督局, 云南 昭通 657000; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为预测路堤填筑过程中下一级荷载作用下地基沉降, 提出一种基于分级加载的软土路基越级沉降预测方法。先基于软土地基沉降实测数据, 根据三点法反算软土层的固结计算参数, 再结合分级加载固结度理论得到最终固结沉降拟合公式, 并基于不同时刻的沉降差推导沉降预测公式; 最后结合工程实例, 通过对实测沉降的分析、预测, 验证越级沉降预测方法的实际应用效果。结果表明, 该方法可在软土路基填筑过程中预测加载后地基的沉降量, 与传统的曲线拟合方法相比具有明显优势, 能指导实际工程施工。

关键词: 公路; 软土路基; 沉降预测; 分级加载

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0071-04

软土具有含水量高、抗剪强度低、压缩性高、承载力低、灵敏度大等特性^[1], 在外部荷载作用下, 表现为承载力低、不均匀变形大、变形稳定历时长, 易引起路基失稳及过大工后沉降。路基工后沉降过大, 易引起路面开裂、桥头跳车等工程问题^[2], 影响行车舒适性和安全性, 加大道路、结构物、车辆的破损概率。对软土路基的沉降过程进行预测, 对于提高施工效率、选择最佳路面结构层施工时间、缩短工期等极其重要。

基于现场实测沉降资料对后期沉降进行推算是目前沉降预测研究的主要方向之一, 主要包括 Asaoka 法、双曲线法、泊松曲线法、指数曲线法等曲线拟合方法及神经网络、灰色模型等动态预测方法。Asaoka 法在固结度较小时即能达到较好的预测效果, 但其预测结果与时间起点、时间间隔有较大关联^[3]。泊松曲线法采用泊松模型进行路基沉降预测, 建模所需实测数据不能太少, 实测点数据越多, 预测曲线越逼近实测曲线, 预测精度越高^[4]。双曲线法是一种纯经验的曲线配合方法^[5], 由于计算简便, 在各工程领域都有应用^[6-7]。上述方法一般只适用于现有荷载下的沉降预测。为保证路基的稳定, 路基荷载实际上是逐级施加的^[8], 沉降是填筑过程、填土荷载等许多因素综合作用的结果, 路基后续填筑会对路基沉降产生影响, 导致预压方案设计、预抛高高度计算等需要越级的沉降预测问题无法得到

解决。本文针对现有沉降预测方法的不足, 参考改进高木俊介法, 提出一种基于分级加载的越级沉降预测方法, 并结合云南昭通市昭阳西环高速公路典型软基处理工程, 通过与曲线拟合预测方法预测结果及实测数据的对比分析该方法的应用效果。

1 分级加荷时软土地基的固结度计算与固结参数反算

1.1 改进高木俊介法

高速公路路基填筑是逐级加载的。大量工程应用结果表明, 逐级加载条件下, 固结度计算采用改进高木俊介法更符合实际情况。多级等速加载条件下, 固结时间 t 时地基平均固结度计算公式为:

$$\bar{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (1)$$

式中: \bar{U}_t 为 t 时刻多级等速加载修正后的平均固结度; \dot{q}_i 为第 i 级荷载的加载速率; $\sum \Delta p$ 为各级荷载的累加值; T_i 、 T_{i-1} 分别为第 i 级荷载加载的起始和终止时间, 计算第 i 级荷载加载过程中某时间 t 的固结度时, T_i 改为 t ; $\alpha = 8/\pi^2$ 、 $\beta = \pi^2 C_v / (4H^2)$; C_v 为固结系数; H 为土层厚度。

1.2 固结参数反算方法

采用指数曲线法(三点法)计算固结参数 β 。土

^{*} 基金项目: 云南省交通运输厅科技创新示范项目(云交科教便[2021]48号)

层平均固结度的理论解为:

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中: U 为瞬时加载条件下土层的固结度。

在路基填筑间歇期沉降曲线上取 3 个时间间隔相等的时刻 t_1, t_2, t_3 , 即 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, 在上述 3 个时刻土层的固结度分别为:

$$U_1 = 1 - \alpha e^{-\beta t_1} \quad (3)$$

$$U_2 = 1 - \alpha e^{-\beta t_2} \quad (4)$$

$$U_3 = 1 - \alpha e^{-\beta t_3} \quad (5)$$

由式(3)~(5)可得:

$$\frac{1-U_1}{1-U_2} = e^{-\beta(t_1-t_2)} \quad (6)$$

$$\frac{1-U_2}{1-U_3} = e^{-\beta(t_2-t_3)} \quad (7)$$

根据固结度的定义:

$$U = \frac{S_t - S_d}{S_\infty - S_d} \quad (8)$$

式中: S_t 为 t 时刻的沉降; S_d 为瞬时沉降; S_∞ 为最终沉降。

由式(6)~(8)可得固结参数 β 的计算公式:

$$\beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \right) \quad (9)$$

式中: S_1, S_2, S_3 分别为 t_1, t_2, t_3 时刻的沉降。

利用固结度理论计算不同时间的固结度, 固结参数的取值是关键。传统的改进高木俊介法中 β 的取值存在一定争议^[9], 因为实际上土体固结参数是不断变化的。但无论是三点法还是改进高木俊介法都是基于一维固结理论提出的, β 的物理含义在两种方法中相同, 且三点法反算固结参数 β 的过程十分简便, 在工程中应用广泛。因此, 本文以采用三点法反算得到的固结参数作为代入改进高木俊介法的固结参数。

2 考虑填筑过程的软土路基越级沉降预测

2.1 基于分级加载的沉降表达式

根据改进高木俊介法, 在前 n 级荷载作用下, t_1, t_2 时刻地基的固结度分别为:

$$U_{t_1 p_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_1} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (10)$$

$$U_{t_2 p_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} -$$

$$\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_2} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (11)$$

路基填筑期间路基的沉降主要包括瞬时沉降和主固结沉降, 则 t_1, t_2 时刻的沉降分别为:

$$S_{t_1} = S_d + S_{cp} U_{t_1 p_i} \quad (12)$$

$$S_{t_2} = S_d + S_{cp} U_{t_2 p_i} \quad (13)$$

式中: S_{cp} 为总固结沉降。

将式(10)、式(11)分别代入式(12)、式(13), 并用式(13)减去式(12), 消去瞬时沉降, 得到不同时刻的沉降差表达式:

$$S_{t_1} = S_d + S_{cp} \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_1} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (14)$$

$$S_{t_2} = S_d + S_{cp} \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_2} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (15)$$

$$\frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{S_{cp}} = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_2} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] - \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_1} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (16)$$

对式(16)化简, 得到最终固结沉降表达式:

$$S_{cp} = \frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{\frac{\alpha}{\beta} (e^{-\beta t_1} - e^{-\beta t_2}) \left[\sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right]} \quad (17)$$

总固结沉降实际上为恒定值。因此, 使 t_2 为恒定值时, 以 t_1 为自变量, 可拟合出一条水平直线, 水平直线对应的值即为最终荷载下主固结沉降完成值。从式(17)来看, 最终主固结沉降随设计总荷载的增大而增大。上述求解方式与三点法类似, 不同的是, 本文方法考虑了加载历程的影响。

上述拟合方法的本质是通过给定的 β 值, 使通过拟合公式计算的沉降变化符合实际数据的变化, 而 β 值的不同必然导致不同时刻的固结度不同, 由于实际上土体参数随着填筑过程而变化, 反算所得总主固结沉降与实际总主固结沉降存在差别, 但后续实例计算结果(见 3.2 节)表明不同 β 值对预测总沉降的影响较小。

2.2 越级沉降预测公式

计算出 β 和 S_{cp} 后,分下述情况计算沉降值:

(1) 等载情况下,根据前述过程,在没有荷载变化时, t_0 时刻的实测沉降为 S_0 ,则 t_0 以后任意时刻 t 的沉降为:

$$S_t = S_{t_0} + \frac{\alpha}{\beta} S_{cp} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} (e^{-\beta t_1} - e^{-\beta t_2}) (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] \quad (18)$$

式中: S_{t_0} 为预测起始点的沉降。

(2) 后续继续施加荷载的情况下,不同时刻路基沉降可表示为(忽略后续瞬时沉降的情况):

$$S_{t_0} = S_d + S_{cp} \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_0} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (19)$$

$$S_t = S_d + S_{cp} \sum_{i=1}^{n+k} \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (20)$$

式中: k 为后续加载级数。

用式(20)减去式(19),得到路基任意时刻的沉降:

$$S_t = S_{t_0} + \frac{\alpha}{\beta} S_{cp} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} (e^{-\beta t_1} - e^{-\beta t_2}) (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] + S_{cp} \sum_{i=n+1}^{n+k} \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} [T_i - T_{i-1} - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_2} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}})] \quad (21)$$

3 工程实例验证

3.1 工程概况

为验证软土路基越级沉降预测方法的有效性,依托云南昭通市昭阳西环高速公路工程开展研究。该项目 K5—K6 段地基条件差,填筑高度大,施工中对软土地基上高填断面进行沉降观测,基于实测沉降数据预测路基的后续沉降量,判断路基状态,从而保证路基的施工质量。采用单点沉降计检测路基沉降,配合采集模块、无线收发模块实现沉降数据的无线采集和传输,得到全填筑过程的时间—加载—沉降曲线。试验段地表下 2~12 m 范围内分布大量淤泥质软土,地基采用长 12.0 m、桩径 0.5 m、桩间

距 1.6 m 的水泥搅拌桩进行处理。为便于分析,将填筑间歇期较短且填筑速率基本一致的填筑进程进行合并,路基土采用 10 级加载。现场加载和沉降曲线见图 1。

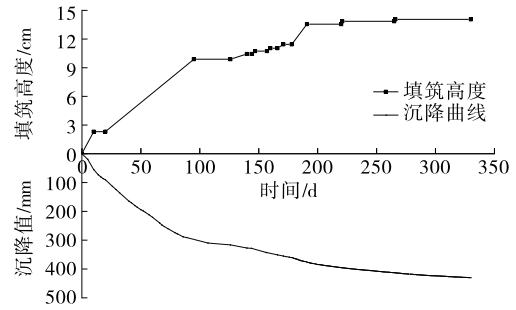


图 1 路基填筑—沉降曲线

由图 1 可知:该断面路基承受荷载大、填筑时间长,且受施工进度要求的影响,填筑施工过快。在这种情况下,对路基沉降进行监控,实时了解路基的工作状态及可能产生的影响十分必要。

3.2 计算参数分析

按式(9)反算地基土的 β 值,选取多个点进行多次计算,取平均值,计算得 $\beta = 0.0108$ 。

按式(17)利用最小二乘法进行拟合。式(17)是在 t_1 、 t_2 之间没有加载的前提下推出的,且 t_1 、 t_2 之间的时间间隔越长,效果越好。考虑到总固结沉降实际上为恒定值,使 t_2 为恒定值时,以 t_1 为自变量,可拟合出一条水平直线,水平直线对应的值即为最终荷载下主固结沉降完成值,采用 245~255 d 的数据作为 t_1 ,以第 262 d 的数据作为 t_2 ,对数据进行拟合,得 $S_{cp} = 211.6887$ mm(见图 2)。

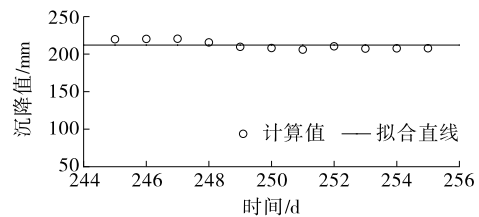


图 2 最小二乘法拟合结果

通过改变 β 值分析最终主固结沉降不同是否影响剩余沉降预测,结果见表 1。由表 1 可知:尽管拟合所得最终主固结沉降差别很大,差值甚至达到 500 mm,但预测的总沉降值(未考虑次固结沉降,下同)差别不大,最大约 10 mm。原因在于 β 值较大时,拟合所得最终主固结沉降较大,其固结度也较大; β 值较小时,拟合所得最终主固结沉降较小,其固结度也较小。两者均是通过相同时间内产生相同

的沉降差的公式拟合得到的,且在施工后期沉降基本收敛,两者的最终剩余沉降差别不大。综上,最终主固结沉降不同对剩余沉降预测准确性的影响较小,关键是 β 和最终主固结沉降要一一对应。

表1 不同 β 值时总沉降预测结果

β 值	最终主固结沉降/mm	总沉降/mm
0.010 8	211.688 7	450.48
0.012 0	221.026 8	447.67
0.015 0	249.886 5	443.18
0.017 0	272.580 0	441.49
0.025 0	385.580 0	440.12
0.030 0	472.611 0	441.77
0.040 0	707.138 0	449.47

3.3 沉降预测

将 β 和 S_{cp} 值代入式(18)和式(21),计算沉降预测值。在实际工程中,为满足工程需要,在荷载相差不大的情况下,常用双曲线法进行越级沉降预测。为验证本文方法的预测效果,利用双曲线法进行预测,并与本文方法进行对比,结果见图3。

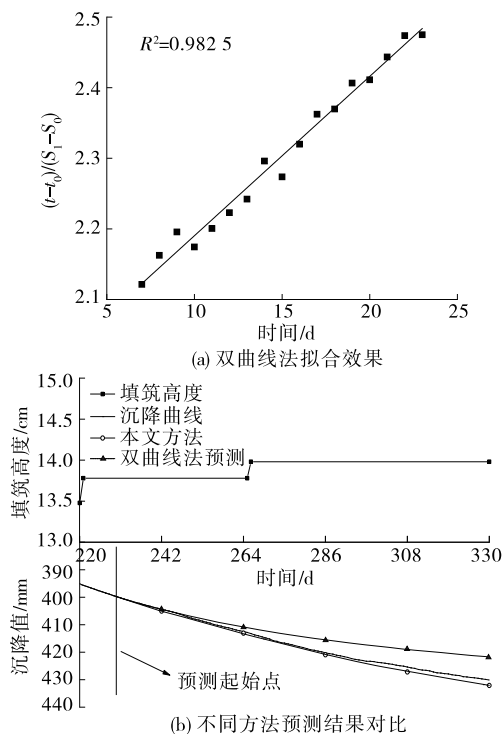


图3 不同方法沉降预测结果对比

由图3可知:双曲线法的拟合效果良好, $R^2=0.9825$;本文方法的总体预测效果优于双曲线法,

双曲线法在前期的预测效果较好,但加载后其预测值偏小。这是因为随着路基荷载的增大,沉降发展,根据前一级荷载拟合所得的参数并不能反映这一变化过程,随着时间的推移,预测误差逐渐增大。

4 结语

根据分级加载情况下计算地基固结度的改进高木俊介法,本文提出一种越级沉降预测方法,根据不同填筑间歇期的实测沉降数据得出计算参数,计算过程简便,能预测下一级荷载作用下的沉降,且相较于传统预测方法其预测结果更准确。但由于未考虑计算参数的变化,反算得到的总主固结沉降与实际值存在一定差距。实际计算发现,尽管不同 β 值下反算的总固结沉降相差较大,但对剩余沉降和最终沉降量预测的影响不大。可采用越级沉降预测方法预测软土路基填筑过程中地基沉降。

参考文献:

- [1] 张军辉,黄晓明,缪林昌.连云港软粘土工程特性研究[J].公路交通科技,2006,23(2):10-14+18.
- [2] 顾绍付,刘维正,徐林荣,等.基于AHP-Fuzzy的营运高速公路深厚软基病害处治技术适用性评价方法[J].铁道科学与工程学报,2020,17(7):1710-1719.
- [3] HAO J,DONG J.Study on application of Asaoka method on settlement prediction of pile foundation for high speed railway bridges[C]//10th Asia Pacific Transportation Development Conference.2014.
- [4] 冯震,祝海涛,熊仲华.泊松模型预测路基沉降[J].华东地质学院学报,2003,26(4):364-366.
- [5] 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.
- [6] 王明毓,孙浩,刘锐.核岛地基沉降去噪方法及预测技术[J].核动力工程,2018,39(3):56-61.
- [7] YU F,LI S C,DAI Z J,et al.Stability control of staged filling construction on soft subsoil using hyperbolic settlement prediction method:A case study of a tidal flat in China[J].Advances in Civil Engineering,2020,2020:1-11.
- [8] 张仪萍,曹国强,李涛,等.分级加载条件下沉降预测方法[J].中国公路学报,2005,18(1):30-33.
- [9] 窦汉林.软基堆载预压处理中平均固结度计算探讨[J].中国农村水利水电,2006(8):119+121.

收稿日期:2022-03-01