

文章编号:1671-8879(2017)02-0001-08

基于三点修正双曲线法的建筑垃圾填筑 路基沉降预测

王海英,常 肖,阮 祺,吕东源

(长安大学 道路施工技术 with 装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了推广建筑垃圾在高速公路路基填筑中的再应用,保证高速公路修筑和运营质量,以西咸(西安—咸阳)北环线建筑垃圾填筑路基试验段为工程依托,在分析现场实测数据的基础上,研究建筑垃圾填筑路基的沉降特点;然后以计算结果误差平方和、拟合系数、最终沉降量的预测值为评判标准,研究双曲线法、三点法的详细计算步骤,针对西咸北环线建筑垃圾填筑路基沉降观测数据存在波动的特点,对比分析每种方法的优缺点及适用性;并基于三点法的选点思路,在现场实测沉降曲线上选择 3 个适当的点作为预测样本,对双曲线法进行修正,提出一种精准预测建筑垃圾填筑路基沉降的三点修正双曲线模型,对比现场实测数据与三点法、双曲线法的预测结果,研究三点修正双曲线法在建筑垃圾填筑路基沉降预测中的预测成效、适用性和优势;为避免人为选点误差,进一步提高三点修正双曲线法的预测精度,对比不同时间起点 t_1 、时间间隔 Δt 的沉降预测结果,探求三点修正双曲线法的选点限制范围。研究表明:建筑垃圾填筑路基具有沉降量小、沉降波动大的特点;三点法和双曲线法不能简单、有效、准确地对建筑垃圾填筑路基沉降进行预测,三点修正双曲线法克服了实测数据波动造成的影响,与现场实测曲线吻合良好,对建筑垃圾填筑路基的沉降预测效果优于三点法和双曲线法;三点修正双曲线法的预测精度受选点的影响很大,选点不合适会出现误差平方和过大、最终沉降值预测不准确等情况;当 Δt 相同时,随着 t_1 增大,预测精度和拟合性都在降低,当 t_1 取为路基填土期完成,稳定期开始时,预测精度最高;当 t_1 相同, Δt 较小时,预测值曲线偏离实测曲线,误差较大, Δt 越大,沉降预测曲线越接近现场实测曲线,因此建议 Δt 不少于 60 d;为避免出现预测异常,模型中选取的 3 个点 S_1 、 S_2 、 S_3 要能反映实测曲线的发展趋向,应满足 $S_1 < S_2 < S_3$ 且 $S_3 - S_2 < S_2 - S_1$ 。本研究为建筑垃圾填筑路基的沉降预测提供了参考算法,具有一定的工程应用价值。

关键词:道路工程;建筑垃圾填筑;路基沉降预测;三点修正双曲线法;选点限制范围

中图分类号:U416 文献标志码:A

Subsidence prediction of construction waste subgrade filled based on three-point modified hyperbolic method

WANG Hai-ying, CHANG Xiao, RUAN Qi, LU Dong-yuan

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to promote the reuse of construction waste in highway subgrade filling and

收稿日期:2016-10-20

基金项目:陕西省交通运输厅科技项目(13-48X)

作者简介:王海英(1971-),女,河北故城人,副教授,工学博士,E-mail:whyang@chd.edu.cn.

ensure the quality of highway construction and operation, relied on the project of construction waste filling subgrade test section in North Loop of Xi'an to Xianyang Highway and based on the analysis of on-site measured data, subsidence characteristics of subgrade filling by construction waste were studied. Sum of squared error of calculated results, fitting coefficient and final subsidence of predicted values were taken as evaluation criteria, detailed calculation steps of hyperbolic method and three-point method were studied. According to the fluctuation characteristics of observation data collected in the construction project, advantages, disadvantages and applicability of each method were compared and analyzed. Based on selecting points ideas of three-point method, three appropriate points were selected as predicted sample in on-site measured subsidence curve to modify hyperbolic method, and a three-point modified hyperbolic method was provided to accurately predict the subsidence of construction waste subgrade filling. By comparing the on-site measured data, the prediction results of hyperbolic method and three-point method, the prediction effect, applicability, advantages and disadvantages of three-point modified hyperbolic method in subsidence prediction of construction waste filling were studied. In order to avoid the error created by artificial selecting points and further improve prediction accuracy of three-point modified hyperbolic method, the limited range of selecting points were explored by comparing the prediction results of different starting times t_1 and time interval Δt . The results show that construction waste subgrade filling has the characteristics of small subsidence value and relatively large fluctuations. Three-point method and hyperbolic method cannot simply, effectively and accurately predict the subsidence of construction waste subgrade filling, while three-point modified hyperbolic method can not only overcome the influence caused by fluctuation of the on-site measured data, but also has good agreement with the on-site measured curve. Its prediction performance is better than the other two methods. The prediction accuracy of three-point modified hyperbolic method is highly affected by the selecting points, sum of squares error is too large and prediction of final subsidence value is not accurate with improper collocation. When time interval is same, accuracy and fitness of the prediction reduces with the increase of starting point. When the starting time t_1 is selected after subgrade filling period completed and before its stable period began, prediction accuracy is the highest. With the same starting time t_1 and smaller time interval Δt , the predicted value deviates from the on-site measured curve and the error is bigger. On the contrary, the larger the time interval, the closer the subsidence prediction curve is to the on-site measured curve. Therefore, the time interval Δt is suggested to no less than 60 d. In order to avoid the abnormal prediction, the selected points S_1 , S_2 , S_3 should reflect the development trend of the on-site measured curve, which should meet $S_1 < S_2 < S_3$ and $S_3 - S_2 < S_2 - S_1$. The research provides a reference algorithm for subsidence prediction of construction waste subgrade filling, which has certain engineering application value. 3 tabs, 5 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; construction waste filling; subgrade settlement prediction; three-point modified hyperbolic method; limited range of selecting point

0 引言

建筑垃圾是指对各种基础设施进行拆除、维修或建造过程中产生的弃料、弃土、渣土及其他废弃物^[1]。随着城镇化和城市化建设的快速发展,建筑垃圾排放量呈现逐年上涨的趋势。目前,中国仍采用传统的露天堆放或填埋等方式处理建筑垃圾,不仅加重了扬尘、雾霾,造成环境污染,而且随着建筑垃圾中污染物质的挥发和渗透,会对地表、地下水造成不同程度的影响。另一方面,随着大规模基础设施的增加,建筑业对砂石骨料的巨大需求导致乱采滥挖现象不断发生,对山体和河道等自然生态环境造成了严重破坏,也给城市管理带来了巨大压力^[2]。如果把处理过的建筑垃圾作为再生资源进行利用,不仅能保护环境,减少石料的开采,而且能实现公路建设的可持续发展。近年来,虽然建筑垃圾已逐步被用于公路路基建设中,但在使用过程中还存在开裂、局部沉陷、失稳、滑坡等问题^[3]。其中,路基沉降问题尤为严重,目前中国还未对建筑垃圾填筑路基沉降的起因和原理形成深刻的认识^[4-5]。

路基沉降预测算法大致有总合分层法、基于 Biot 固结原理的数据算法、基于实测数据的线性回归算法 3 种^[6-10]。其中总合分层法和基于 Biot 固结原理的数据算法的预测结果与实测结果因工程条件的不同差异较大。基于实测数据的线性回归算法主要包括三点法、Asaoka 法、指数曲线、双曲线、泊松曲线、S 曲线、扩充曲线和多类拼合模型。董辉等指出在应用 Asaoka 法对路基沉降进行预测过程中,要进行时间均分,其计算过程繁琐,同时预测效果过分依赖时间间隔的选取^[11];Kanayama 等在基于拓展双曲线法进行路基沉降预测时得出,当荷载突然增大时预测结果会出现很大的误差^[12-13];Fuenkajorn 等结合双曲线法对沉降进行预测、分析,并验证了双曲线法在路基沉降预测中的适用性和可靠性,但同时指出必须采用填土完成后采集的沉降值来进行预测,因此需满足恒载的长期性^[14-15];金亮星等采用泊松曲线法对软土地基沉降进行预测,得出泊松曲线法具有实用性好、精度较高等优点,但该算法需要进行时间等分,计算量过大^[16];董川等应用三点法分析某道路软基的实测数据,并指出三点法须选择填土完成的 3 个时间点,并要求间距尽量宽,因此人工选点会干预其精确度^[17-18];肖衡林等对某填方路堤进行预测,并指出如果不限定沉降时间,时间对数模型预测的沉降量无法收敛,这与实际情况不符,泊

松模型有收敛值,但存在收敛速度过快的问题^[19]。可见,各类模型具有其相应的使用边界和限度,但目前中国尚无涉及建筑垃圾填筑路基沉降预测的理论算法。因此,针对建筑垃圾能否作为路基填料,如何有效地预测和限制建筑垃圾填筑路基的沉降量,已引起道路工程界的广泛关注。

基于此,本文以西咸(西安—咸阳)北环线建筑垃圾填筑路基段为工程依托,在对比分析各种预测算法的基础上,将三点法和双曲线法相结合,推算得到三点修正双曲线模型,并探求选点的合理范围,以推广建筑垃圾在填筑路基方面的应用。

1 工程概况与实测数据

西咸北环线高速公路建设项目首次大规模地把建筑垃圾应用在路基填筑、特殊地基处理、路面处理、小型预制构件和临建设施中,共消化建筑垃圾 5.70×10^6 t,路体填筑建筑垃圾约 3.20×10^6 m³。经过对西咸北环线高速公路沿线的调研,研究 LJ-2 建筑垃圾填筑路基试验段 AK0+980 断面的实际沉降监测数据,该断面由 2014 年 3 月 23 日开始填土,2014 年 6 月 20 日填土完毕,填土层厚 550 mm,沉降观测从 2014 年 3 月 21 日开始,到 2015 年 2 月 28 日为止,累计沉降值为 21.2 mm。

0~90 d 为填土期,沉降变化量大,而沉降速率逐渐减小;填土完毕时间大于 30 d 后为稳定期,路基沉降变化量越来越小,实测曲线接近平稳,沉降实测曲线如下页图 1 所示。

由图 1 的沉降实测数据可知,建筑垃圾填筑路基试验段的沉降值具有监测数据精度高、沉降量小、相对波动率高的特点。例如 2014 年 3 月 31 日的沉降值为 11.4 mm,下一期观测时间为 2014 年 4 月 10 日,沉降值为 13.1 mm,相差 1.7 mm,相当于累积沉降值的 12.98%。因此,对建筑垃圾填筑路基段沉降的预测算法应既能精确预测沉降趋势,又能避免数据波动带来的影响。

2 三点修正双曲线法的建立

2.1 双曲线法

双曲线法采用双曲线函数模拟地基沉降发展趋势,其基本方程为^[20-21]

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (1)$$

式中: S_0 为 t_0 时刻的沉降值; S_t 为 t 时刻的沉降值;

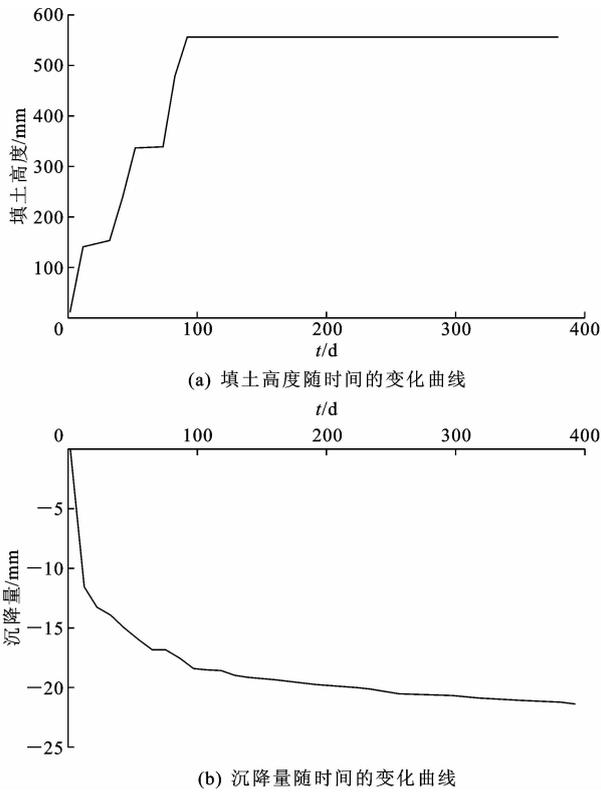


图1 AK0+980断面沉降实测曲线

Fig. 1 Subsidence measured curves of section of AK0+980

α, β 均为未知系数。

将式(1)改写为

$$\frac{t-t_0}{S_t-S_0} = \alpha + \beta(t-t_0) \quad (2)$$

由式(2)可知, α, β 分别为 $\frac{t-t_0}{S_t-S_0}$ 与 $(t-t_0)$ 关系曲线中的截距和斜率, 因此能够用图解法的一阶线性拟合求出系数 α, β 。将解得的 α, β 代入式(1), 能够求出任意时刻 t 的路基沉降值 S_t 和最终沉降值 $S_{+\infty}$ 。

2.2 三点法

三点法又称固结度对数配合法, 以一维固结方程为理论基础, 即^[22-23]

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (3)$$

式中: U 为地基平均固结度。

根据实测沉降数据, 得出 t 时刻的平均固结度为

$$U = \frac{S_t - S_d}{S_{+\infty} - S_d} \quad (4)$$

式中: S_d 为瞬时沉降量。

结合式(3)、式(4)可以得到

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

式(5)中有 4 个未知量 $\alpha, \beta, S_t, S_{+\infty}$, 其中 α 可

取一维固结理论的近似值, 即 $\alpha = 8/\pi^2$, 这样, 式(5)中只有 3 个未知数。从实测的沉降曲线中选取 3 个点 $(t_1, S_1), (t_2, S_2), (t_3, S_3)$, 要求时间间隔 $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$, 并使 Δt 尽量大, S_1, S_2, S_3 分别为 t_1, t_2, t_3 时刻的沉降值。将这 3 个点代入式(5)得到三元一次方程组, 解方程组得到 $\beta, S_t, S_{+\infty}$, 代回式(5)可求得任意时刻 t 的沉降值 S_t 。

2.3 三点修正双曲线法

在双曲线法中引入三点法的选点思想, 对双曲线法进行改进, 得到三点修正双曲线法。具体方法为在实测沉降曲线上取不同时刻的 3 个点 $(t_1, S_1), (t_2, S_2), (t_3, S_3)$, 并要求 $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$, 见图 2。

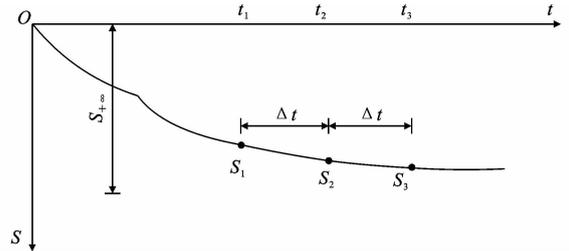


图2 三点修正双曲线法选点原理

Fig. 2 Points selecting principle of three-point modified hyperbolic method

设 $t_1 = t_0$, 用双曲线模型计算选定的 3 个点, 可得

$$\frac{t_2 - t_1}{S_2 - S_1} = \alpha + \beta(t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$\frac{t_3 - t_1}{S_3 - S_1} = \alpha + \beta(t_3 - t_1) \quad (7)$$

联立式(6)、式(7)可求得

$$\alpha = \frac{2\Delta t(S_3 - S_2)}{(S_3 - S_1)(S_2 - S_1)} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{2S_2 - S_3 - S_1}{(S_3 - S_1)(S_2 - S_1)} \quad (9)$$

把 α, β 的计算值代入式(1), 可得出任意时刻的沉降预测值

$$S_t = S_1 + \frac{(t-t_1)(S_3 - S_1)(S_2 - S_1)}{2\Delta t + (2S_2 - S_3 - S_1)(t-t_1)} \quad (10)$$

当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 可得最终沉降值

$$S_{+\infty} = S_1 + \frac{(S_3 - S_1)(S_2 - S_1)}{2S_2 - S_3 - S_1} \quad (11)$$

3 不同算法预测值与实测数据对比

3.1 双曲线法预测结果

采用双曲线模型对填土完成后的沉降观测数据进行预测, 取 $t_0 = 90$ d, $S_0 = 18.2$ mm, 对其进行一阶线性拟合可以求得 $\alpha = 52.1683, \beta = 0.1394$ 。

将 α, β 值代入式(1)求解,有

$$\begin{cases} S_t = 18.2 + \frac{t-90}{52.1683 + 0.1394(t-90)} \\ S_{+\infty} = 18.2 + \frac{1}{0.1394} = 25.3736 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

3.2 三点法预测结果

采用三点法计算时首先要选择 3 个实测点,本文选择填土完成后的沉降实测数据,依次为:2014 年 6 月 20 日, $t_1 = 90 \text{ d}$, $S_1 = 18.2 \text{ mm}$; 2014 年 10 月 10 日, $t_2 = 200 \text{ d}$, $S_2 = 19.8 \text{ mm}$; 2014 年 12 月 30 日, $t_3 = 310 \text{ d}$, $S_3 = 20.8 \text{ mm}$ 。把这 3 组数据代入式(5)可以得到任意时刻的沉降值为

$$S_t = 23.32 - 6.7815e^{-0.003122t} \quad (13)$$

3.3 三点修正双曲线法预测结果

将上述 3 组数据代入式(8)、式(9)可得 $\alpha = 52.8846$, $\beta = 0.1442$, 则任意时刻沉降值为

$$S_t = 18.2 + \frac{t-90}{52.8846 + 0.1442(t-90)} \quad (14)$$

表 1 双曲线法、三点法及三点修正双曲线法的预测结果对比

Tab. 1 Comparison of prediction results among hyperbolic method, three-point method and three-point modified hyperbola method

类别	双曲线法	三点法	三点修正双曲线法
计算参数 α, β	$\alpha = 52.1683, \beta = 0.1394$	$\alpha = 0.8106, \beta = 0.01355$	$\alpha = 52.8846, \beta = 0.1442$
计算模型	$S_t = 18.2 + \frac{t-90}{52.1683 + 0.1394(t-90)}$	$S_t = 23.32 - 6.7815e^{-0.003122t}$	$S_t = 18.2 + \frac{t-90}{52.8846 + 0.1442(t-90)}$
相关系数 R	0.9956	0.9943	0.9962
误差平方和 I_{SSE}/mm^2	4.8751×10^{-4}	9.7165×10^{-4}	4.1682×10^{-4}
最终沉降值 $S_{+\infty}/\text{mm}$	25.3736	23.3200	25.1348

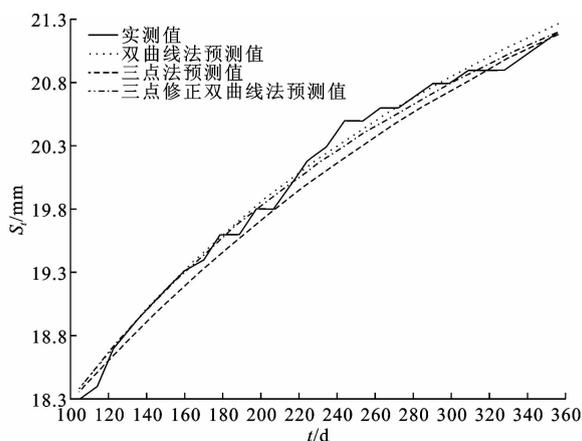


图 3 双曲线法、三点法及三点修正双曲线法的预测曲线对比

Fig. 3 Comparisons of prediction curves among hyperbolic method, three-point method and three-point modified hyperbolic method

(1) 三点法预测结果的误差平方和大于双曲线法和三点修正双曲线法,且预测的最终沉降值小于双曲线法和三点修正双曲线法,说明三点法的预测精度低,不适用于建筑垃圾填筑路基的沉降预测。

3.4 预测结果对比

对于沉降量值小、数据相对波动率高的建筑垃圾填筑路基,各种算法能否精准预测至关重要。通过对比不同算法与实测数据间的误差平方和、拟合系数,来评价各算法的预测精度。其计算如下^[24-25]

$$I_{SSE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i - X_i}{X_i} \right)^2 \quad (15)$$

$$R = C(\bar{X}, \bar{Y}) (\sqrt{D(\bar{X})} \sqrt{D(\bar{Y})})^{-1} \quad (16)$$

式中: I_{SSE} 为误差平方和 SSE 的计算参数; X_i 为实测沉降数据, Y_i 为沉降预测模型输出的预测沉降值; R 为相关系数; \bar{X}, \bar{Y} 分别为实测沉降数据和预测沉降值的平均值; $C(\bar{X}, \bar{Y})$ 为实测沉降数据与预测沉降值的协方差; $\sqrt{D(\bar{X})}, \sqrt{D(\bar{Y})}$ 分别为实测沉降数据和预测沉降值的方差。

三点法、双曲线法及三点修正双曲线法的预测结果对比见表 1, 预测曲线与 AK0+980 断面沉降实测曲线对比情况见图 3。由表 1 和图 3 可知。

(2) 双曲线法预测结果的误差平方和较小, 相关系数较高, 表明其具有一定的精确度和拟合性, 比较适于建筑垃圾填筑路基的沉降预测。

(3) 三点修正双曲线法预测结果的误差平方和最小, 相关系数最大, 说明其拟合性最好, 预测精度最高。

(4) 三点修正双曲线法与双曲线法计算的最终沉降值接近, 但大于三点法计算的最终沉降值, 这说明该算法和双曲线法对最终沉降值的预测比三点法理想。

总之, 三点修正双曲线法拟合性好、精度高, 且只采用实测值中的 3 个点, 规避了数据的波动, 对于建筑垃圾填筑路基的沉降预测是可行的。

4 三点修正双曲线法的选点特性

为了避免人为选点造成的误差, 进一步提高三点修正双曲线法的预测精度, 需要探讨时间间隔 Δt 、时间起点 t_1 对相关系数 R 、误差平方和 SSE 以及最终沉降值 $S_{+\infty}$ 的影响, 以确定合理的 $\Delta t, t_1$ 取值范围。

4.1 时间间隔 Δt 对预测结果的影响

当 t_1 相同时(取填土完成日期至 2015 年 2 月 28 日, $t_1=90$ d), 变动 Δt , 运用三点修正双曲线法进行计算, 预测结果见表 2, 预测曲线与 AK0+980 断面沉降实测曲线对比见图 4, 分析可知:

(1) t_1 相同, Δt 较小时, 预测曲线偏离实测曲线, 误差达到预测值的 20 倍, Δt 越大, 沉降预测曲线越接近实测曲线。

(2) 当 $\Delta t=54$ d 时, 分析得到的最终沉降值为 4.600 1 mm, 这是由于 β 为负数, 取点不合适造成的结果, 所以选点时应满足 $S_1 < S_2 < S_3$, $S_3 - S_2 <$

$S_2 - S_1$, 否则就会出现计算结果异常的情况。

(3) 当 $\Delta t > 54$ d 时, 预测结果中 α 、 β 不会出现负值, 误差平方和较小, 预测曲线与实测曲线最为吻合, 所以建议时间间隔 $\Delta t > 54$ d。

4.2 时间起点 t_1 对预测结果的影响

分别以 2014 年 6 月 20 日(填土完成日期, $t_1=90$ d)、2014 年 7 月 10 日($t_1=110$ d)、2014 年 7 月 30 日($t_1=130$ d)、2014 年 8 月 20 日($t_1=150$ d)作为时间起点, 取 $\Delta t=110$ d 进行计算, 对比分析时间间隔固定, 取不同时间起点时, 三点修正双曲线法的预测结果, 如表 3 和图 5 所示。

表 2 Δt 不同时预测结果对比

Tab. 2 Comparison of prediction results with different Δt

$\Delta t/d$	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	α	β	相关系数 R	误差平方和 I_{SSE}/mm^2	$S_{+\infty}/mm$
36	18.2	18.9	19.3	37.402 6	0.389 60	0.984 3	$2.322 1 \times 10^{-2}$	20.766 7
54	18.2	19.0	19.9	71.470 6	-0.073 53	0.959 2	$7.372 8 \times 10^{-2}$	4.600 1
72	18.2	19.3	20.3	62.337 7	0.043 29	0.987 0	$7.855 1 \times 10^{-3}$	41.300 1
90	18.2	19.6	20.6	53.571 4	0.119 00	0.995 1	$1.174 2 \times 10^{-3}$	26.603 4
110	18.2	19.8	20.8	52.884 6	0.144 20	0.996 2	$4.168 2 \times 10^{-4}$	25.134 8

表 3 t_1 不同时预测结果对比

Tab. 3 Comparison of prediction results with different t_1

t_1/d	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	α	β	相关系数 R	误差平方和 I_{SSE}/mm^2	$S_{+\infty}/mm$
90	18.2	19.8	20.8	52.884 6	0.144 2	0.996 2	$4.168 2 \times 10^{-4}$	25.134 8
110	18.4	20.0	20.9	49.500 0	0.175 0	0.996 0	$4.593 1 \times 10^{-4}$	24.114 3
130	18.9	20.3	21.0	52.381 0	0.238 1	0.994 6	$5.299 8 \times 10^{-4}$	23.099 9
150	19.2	20.5	21.2	59.230 8	0.230 8	0.990 0	$6.693 3 \times 10^{-3}$	23.532 8

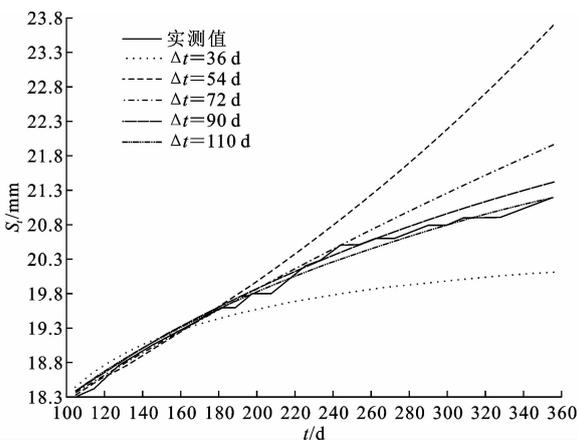


图 4 Δt 不同时预测曲线与实测曲线对比

Fig. 4 Comparison between prediction curves and measured curve with different Δt

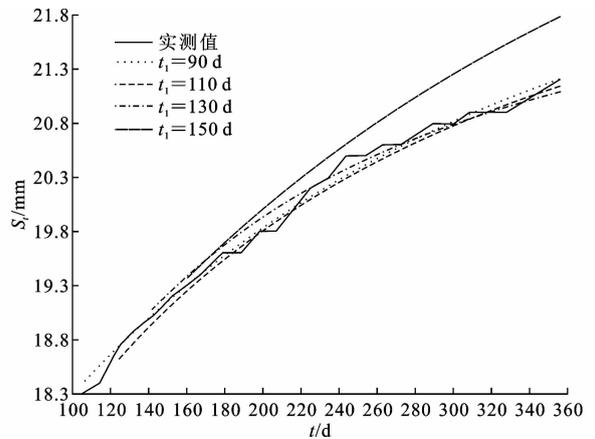


图 5 t_1 不同时预测曲线与实测曲线对比

Fig. 5 Comparison between prediction curves and measured curve with different t_1

由表 3 和图 5 可得以下结论。

(1) 时间起点 t_1 不同, 可导致预测最终沉降值产生很高的偏差率, 其变动范围为 23.099 9 ~ 25.134 8 mm, t_1 越大, R 越小, 误差平方和越大, 说

明当时间间隔相同时, 随着时间起点的增大, 预测精度和拟合性都在降低。

(2) 若观测时间足够长时, 建议时间起点选在填土完毕稳定期开始的时间。

5 结 语

(1)通过分析三点法和双曲线法的预测结果可知,三点法的预测精度受选点影响很大,选点不合适时会出现误差平方和过大、最终沉降值预测不准确的情况。建立预测模型时要尽量选取稳定期的样本值,这样拟合曲线才能有效反映后期沉降规律,这也是大多曲线拟合算法的共同点;用双曲线法推算沉降量时,需要应用满载后期的观测数据,以避免应用填土期数据引起的预测异常。

(2)由三点法、双曲线法、三点修正双曲线法的预测结果与实测数据对比可知,三点修正双曲线法能够克服数据波动率高的影响,计算所得相关系数接近理想值,误差平方和小,预测曲线与沉降实测曲线吻合良好。使用三点修正双曲线法对建筑垃圾填筑路基进行沉降预测优于三点法和双曲线法。

(3)通过分析不同时间起点 t_1 、时间间隔 Δt 对预测结果的影响,得到三点修正双曲线法的合理选点范围,选点时应选择能反映实测曲线发展趋势的3个点,且 $S_1 < S_2 < S_3$, $S_3 - S_2 < S_2 - S_1$ 。若观测时间足够时,应优先选择路基填土期完成,稳定期开始的时间点作为预测日期开始点,且要求 $\Delta t \geq 60$ d。选点限制范围给选点提供了理论依据,在避免人工选点误差的同时,有效提高了预测精度。

(4)三点修正双曲线法比三点法、双曲线法更适用于沉降量小、相对波动大的建筑垃圾填筑路基。今后可以开展其他具有同类沉降趋势特性,而工作因素和地质条件不同的路基沉降预测,并建立相应的函数关系,使该预测算法得到推广。

参考文献:

References:

- [1] 李少康. 建筑垃圾在公路路基中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2014.
LI Shao-kang. Research on the application of construction waste in highway subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [2] 樊兴华,唐 娴. 建筑垃圾填筑高速公路路基施工技术[J]. 工业建筑,2014,44(4):111-114.
FAN Xing-hua, TANG Xian. Construction technology of building rubbish in highway subgrade[J]. Industrial Construction, 2014, 44(4): 111-114.
- [3] 牛永宏,郭滕滕,王 鑫. 建筑垃圾回填路基施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(9): 49-52.

- NIU Yong-hong, GUO Teng-teng, WANG Xin. Research on construction technology of roadbed back-filling with construction waste[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(9): 49-52.
- [4] WADDEL P. Design, prediction and monitoring of deep fill settlement[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2013, 166(4): 343-356.
- [5] 许兴旺,李肖伦. 湿陷性黄土地区客运专线路基沉降观测分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 233-236.
XU Xing-wang, LI Xiao-lun. An observation and analysis of passenger dedicated line subgrade in collapsible loess zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 233-236.
- [6] NAZIR R, SUKOR N, NIROUMAND H, et al. Performance of soil instrumentation on settlement prediction[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2013, 50(2): 61-64.
- [7] 王丰胜. 基于理论和实测的路基沉降混合预测方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(4): 34-38.
WANG Feng-sheng. Mixed prediction method of embankment settlement based on theory and practical survey[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 34-38.
- [8] CHAI J C, MIURA N, KIREKAWA T, et al. Settlement prediction for soft ground improved by columns[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2010, 163(2): 109-119.
- [9] 张 欣. 沉降预测的方法和适用性研究[J]. 交通建设与管理, 2015, 10(4): 81-84.
ZHANG Xin. Subsidence prediction method and the applicability study [J]. Transportation Construction and Management, 2015, 10(4): 81-84.
- [10] 张成良. 两种预测软基沉降方法的对比分析[J]. 路基工程, 2013(4): 179-181.
ZHANG Cheng-liang. Contrastive analysis on two methods predicting settlement of soft foundation[J]. Subgrade Engineering, 2013(4): 179-181.
- [11] 董 辉,马一跃,聂志红,等. 戈壁土路基后期沉降预测方法及误差分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012, 34(1): 48-53.
DONG Hui, MA Yi-yue, NIE Zhi-hong, et al. On prediction method and accuracy of post-construction settlement for the Gobi roadbed on Lanxin Passenger Line[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2012, 34(1): 48-53.
- [12] KANAYAMA M, ROHE A, VAN PAASSEN A, et al. Using and improving neural network models for

- ground settlement prediction [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(3): 687-697.
- [13] 王小刚, 陈善雄, 余飞, 等. 拓展双曲线法在铁路客运专线路基沉降预测中的应用[J]. *铁道标准设计*, 2010(2): 39-42.
WANG Xiao-gang, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Application of extended hyperbolic method in prediction of subgrade settlement for railway passenger dedicated line[J]. *Railway Standard Design*, 2010(2): 39-42.
- [14] FUENKAJORN K, ARCHEEPOHA S. Estimation of cavern configurations from subsidence data [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(1): 53-61.
- [15] 钟国坤, 赵小芹. 双曲线法在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(27): 6804-6807.
ZHONG Guo-kun, ZHAO Xiao-qin. Application of hyperbolic method in soft soil ground settlement prediction for expressway [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(27): 6804-6807.
- [16] 金亮星, 李小刚. 泊松曲线法在填海造地道路软基沉降预测中的应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2013, 10(5): 52-56.
JIN Liang-xing, LI Xiao-gang. Application of Poisson curve method in the prediction of road soft foundation settlement for land reclamation [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2013, 10(5): 52-56.
- [17] 董川. 填海造地工程中的软基沉降预测研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2011, 8(3): 51-56.
DONG Chuan. Reclamation engineering forecasting methods of soft soil comparative study [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2011, 8(3): 51-56.
- [18] 肖长生, 王守林, 金亮星. 经验分析法在软基沉降预测中的应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2012, 9(3): 72-76.
XIAO Chang-sheng, WANG Shou-lin, JIN Liang-xing. Application of experience analysis method in the prediction of soft ground settlement [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2012, 9(3): 72-76.
- [19] 肖衡林, 李丽华, 郭小川, 等. 山区高填方路堤沉降预测方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(1): 154-161.
XIAO Heng-lin, LI Li-hua, GUO Xiao-chuan, et al. Settlement predicted method of high filled embankment in mountain area [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(1): 154-161.
- [20] 刘广南. 高速铁路线下工程沉降评估与数据分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LIU Guang-nan. Data analysis and subsidence assessment of high-speed railway project [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [21] 胡振南. 双曲线法在路基沉降预测中的应用研究[J]. *公路工程*, 2011, 36(3): 145-148.
HU Zhen-nan. Study of the hyperbolic method in prediction of roadbed settlement [J]. *Highway Engineering*, 2011, 36(3): 145-148.
- [22] 朱润霞. 基于智能计算的高速铁路路基沉降预测系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
ZHU Run-xia. Research of high-speed railway subgrade settlement prediction system based on intelligent computing [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [23] 肖俊. 重载铁路路基沉降预测及稳定性分析 [D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
XIAO Jun. The settlement prediction and stability analysis for the subgrade of heavy-haul railway [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [24] 龚风华. 武广客运专线过渡段沉降分析与控制 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
GONG Feng-hua. Settlement analysis and control of the transition of the Wuhan-Guangzhou Passenger Line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [25] 虞先溢, 赵红. 客运专线路基沉降评估标准与指标控制 [J]. *高速铁路技术*, 2013, 4(3): 47-51.
YU Xian-yi, ZHAO Hong. Subgrade settlement evaluation & index control in passenger dedicated line [J]. *High Speed Railway Technology*, 2013, 4(3): 47-51.