

真空预压软土路基沉降预测*

陈新建^{①②③} 赵法锁^{①②③} 张发明^④ 蒯志要^⑤

(①长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室 西安 710054)

(②国土资源部岩土工程开放实验室 西安 710054)

(③长安大学地质工程与测绘学院 西安 710054)

(④河海大学地球科学与工程系 南京 210098)

(⑤中交第一航务工程局有限公司 天津 300456)

摘要 采用6~30d实测数据,分别采用双曲线拟合法、指数曲线拟合法和泊松曲线拟合法对真空预压法处理软土路基沉降进行预测,计算结果表明指数曲线拟合法预测的结果与实际沉降量较为接近,收敛性也最好,可用于指导施工。

关键词 软土路基 沉降 曲线拟合 预测

中图分类号:P642 文献标识码:A

FORECAST OF SOFT SOIL SUBGRADE BY VACUUM PRELOADING

CHEN Xinjian^{①②③} ZHAO Fasuo^{①②③} ZHANG Faming^④ KUAI Zhiyao^⑤

(①Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054)

(②The Public Lab of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources Xi'an 710054)

(③College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054)

(④College of Earth Science and Engineering, Hohai University Nanjing 210098)

(⑤First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300456)

Abstract With the measured data on the soft soil subgrade settlement, the curve fitting methods, hyperbolic method, exponential curve method and poisson-curve method, were respectively taken to fit and forecast the soft soil subgrade settlement in Yangtze River floodplain, which were treated by the vacuum preloading. The results show that the exponential curve method is the best way to calculate and estimate the settlement. More importantly, the exponential curve method can be used to forecast the soft soil subgrade settlement and to guide the subgrade construction.

Key words Soft soil, Subgrade settlement, Curve fitting method, Forecast

* 收稿日期: 2010-05-16; 收到修改稿日期: 2010-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872185).

第一作者简介: 陈新建, 主要从事地质工程教学与研究。Email: chenxj2010@163.com

1 引言

目前各种沉降计算方法,尤其是对软土沉降计算,对压缩土层剖面、荷载条件以及在计算模型等方面都作了简化,沉降计算结果与实测资料往往有较大的差异。折学森等分析了排水板、砂井等处理软土路基的实测沉降并进行了大量有益的探索^[1,2],南京水利科学研究院等对真空处理软土路基机理等进行了深入分析^[3~13]。由于真空预压软土路基沉降计算,不能真实预估沉降过程,因此利用沉降实测数据来推算路基的沉降量具有很重要的现实意义。

2 实测沉降分析

2.1 工程背景

工程位于长江河漫滩地区,路基中均有数米厚的软土层,具有高含水量、大孔隙、低密度、低强度、高压缩性、低透水性等特点。采用真空预压处理该软土路基,试验段全长 270m、宽 30m。真空预压处理方案为塑料排水板真空预压法,塑料排水板打设间距为 1.5m×1.5m,梅花形布置,打设深度为 8m,膜下真空度≥80kPa,真空预压期为 45d。

路基土层自上而下依次为:素填土层(厚 0.6~2.7m)、亚黏土层(3~20m)、粉细砂层(厚 25~33m)、粗砾砂层(厚 3.8~4.4m)。场地内地下水类型主要为潜水,主要分布在素填土层中,该层透水性较强,赋水性一般,实测稳定水位埋深在 0.5~2.5m 之间。

2.2 实测沉降数据分析

试验段路基中线实测沉降数据如表 1 所示,实测曲线图如图 1 所示。

表 1 K4mm, WK330 断面的路中表面沉降实测数据/mm

Table 1 Measured data on the subgrade settlement

天数	1	2	3	4	5	6	7
沉降量	8	58	89	92	110	127	143
天数	8	9	10	11	12	13	14
沉降量	154	155	167	175	177	183	186
天数	15	16	17	18	19	20	21
沉降量	188	190	191	193	194	200	202
天数	22	23	24	25	26	27	28
沉降量	202	203	204	208	208	209	209
天数	29	31	33	35	37	40	42
沉降量	211	214	215	217	219	219	219

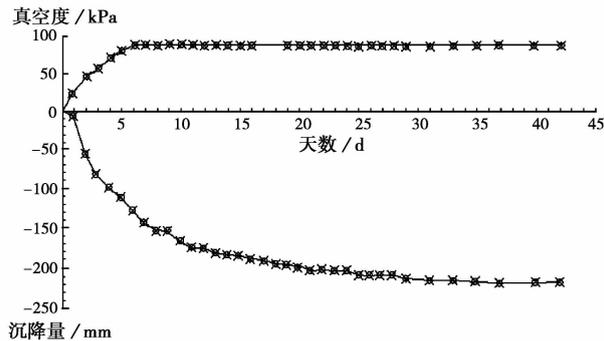


图 1 K4+330 断面路中表面沉降时程曲线

Fig. 1 Settlement-time curve of the subgrade

试验段路基实测沉降数据表明,路基沉降随真空压力增加而显著增加,达到一定值后初始沉降依然较大,稳定预压一段时间后沉降速率减慢。

3 曲线拟合预测沉降

3.1 双曲线拟合

双曲线拟合法是用双曲线来拟合沉降-时间关系,从沉降-时间曲线的拐点(t_0)开始拟合, t 时刻的沉降量可由式(1)获得。

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b \cdot (t - t_0)} \quad (1)$$

式中: S_0 为 t_0 时刻对应沉降量; S_t 为 t 时刻对应沉降量; a 、 b 为系数,由实测值得求。

变换式(1)可得下式(2):

$$\frac{t - t_0}{S_t - S_0} = a + b \cdot (t - t_0) \quad (2)$$

取真空度到 80kPa 时的第 6d 为 t_0 , 对应的 S_0 为 127mm; 采用 6~30d 实测数据绘制 $(t - t_0)/(S_t - S_0)$ 和 $(t - t_0)$ 的直线关系图,可得到 $a = 0.063$ 、 $b = 0.009$,将 a 和 b 值代入(1)式,即可得到任意时刻的沉降量值拟合曲线,对路基沉降进行预测,推算最终沉降量为 0.238m。

3.2 指数曲线拟合

指数曲线拟合法将土体沉降与时间的关系曲线用指数曲线进行拟合。谢康和、曾国熙^[14]提出地基平均固结度的理论解:

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

其中, α 、 β 分别为参数,随排水情况不同而取不同值。

而根据平均固结度定义,有

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

式中, S_t 为 t 时刻的实测沉降; S_d 为瞬时沉降; S_∞ 为最终固结沉降。

忽略次固结沉降时,由式(3)和式(4)可得 t 时刻的固结沉降量为:

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

令 $a = \alpha(S_\infty - S_d)$, 可得

$$S_t = S_\infty - ae^{-\beta t} \quad (6)$$

用三点法试算法来计算指数曲线拟合法中的参数,从 $S-t$ 实测曲线的恒载段上取三点 (s, t) , 且符合 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = \Delta t$ 。代入式(6)可得到三个方程,可以解得

$$\beta = \frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \right) \quad (7)$$

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

$$a = \frac{1}{3} \left[(S_\infty - S_1) e^{\beta t_1} + (S_\infty - S_2) e^{\beta t_2} + (S_\infty - S_3) e^{\beta t_3} \right] \quad (9)$$

将式(7)、(8)和(9)分别代入式(6),即可算得 t 时刻的固结沉降量 S_t 。

采用 6~30d 实测数据,取 $\Delta t = 12$ d 时,即 $t_1 = 6$, $t_2 = 18$, $t_3 = 30$, $S_1 = 127$, $S_2 = 193$, $S_3 = 213$, 可得 $\beta = 0.099494$, $a = 172.0251$, $S_\infty = 221.6957$ 。对路基沉降进行预测,推算最终沉降量为 0.222m。

3.3 泊松曲线法拟合

泊松曲线表达式为:

$$S_t = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (10)$$

式中: S_t 为 t 时刻的预测沉降量; k, a, b 为待定参数; t 为时间。

可以用三段法来计算式(10)中的参数,

$$b = \frac{\ln \frac{y_1 - y_2}{y_2 - y_3}}{r} \quad (14)$$

$$k = \frac{r}{y_1 - \frac{(y_1 - y_2)^2}{(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)}} \quad (15)$$

$$a = \frac{(y_1 - y_2)^2 (1 - e^{-b}) k}{[(y_1 - y_2) - (y_2 - y_3)] e^{-b} (1 - e^{-rb})} \quad (16)$$

采用 6~30d 实测数据,取 $r = 8$,求得 $b = 0.149$ 、 $k = 213.3842$ 、 $a = 0.647$ 的值代入式(10),即可求得 t 时刻的固结沉降量。对路基沉降进行预测,推算最终沉降量为 0.213m。

3.4 三种预测方法的结果比较

采用 6~30d 实测数据,分别运用双曲线拟合法、指数曲线拟合法和泊松曲线拟合沉降预测,对三种曲线拟合方法所预测的结果进行比较(图2)。

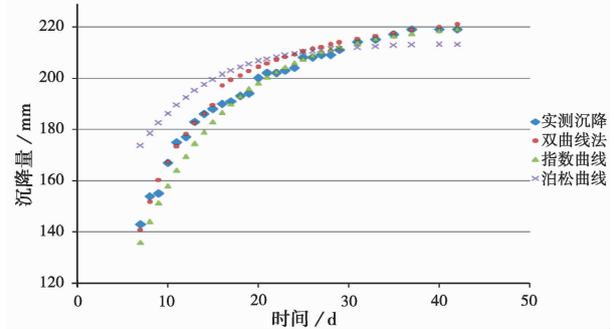


图2 预测曲线与实测曲线比较

Fig. 2 Comparison of forecast and measured curves

由图2可以看出,指数曲线法预测结果与实测沉降相比误差最小,双曲线拟合法次之,而泊松曲线拟合法与实测数据相差最大。同时指数曲线法后期的收敛性也与实测沉降曲线最为接近。

4 结论

在采取同样的沉降数据用于拟合曲线的情况下,对真空预压法处理软土路基沉降进行预测,指数曲线拟合法预测的结果能较好地与实际沉降量一致,收敛性也最好,因而推荐使用指数曲线拟合法来预测沉降量,指导施工。

参考文献

- [1] 折学森. 软土路基沉降计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
She Xuesen. Settlement Calculation of the Soft Soil Subgrade. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [2] 朱小林, 软土岩土工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1994.
Zhu Xiaolin. Geotechnical Manual for Soft Soil. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [3] 南京水利科学研究所. 真空排水预压的理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2000.

- Nanjing Hydraulic Research Institute. Theory and Practice of Vacuum Drainage Preloading. Beijing: China Waterpower Press, 2000.
- [4] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, **35**(2): 7~10.
Gong Xiaonan, Cen Yangrun. Mechanism of vacuum preloading. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, **35**(2): 7~10.
- [5] 李时亮. 真空预压加固软土地基作用机理分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 479~482.
Li Shiliang. Analysis of action mechanism of treating soft foundation with vacuum preloading. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 479~482.
- [6] 董志良, 胡利文, 张功新. 真空及真空联合堆载预压法加固软土的机理与理论研究[J]. 水运工程, 2005, **9**: 83~91.
Dong Zhiliang, Hu Liwen, Zhang Gongxin. Mechanism and theoretical research on vacuum and vacuum-load. Port & Waterway Engineering, 2005, **9**: 83~91.
- [7] 梅国雄, 徐锴, 宰金珉, 等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1168~1172.
Mei Guoxiong, Xu Kai, Zai Jinmin, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1168~1172.
- [8] Shang J Q, Tang M, Miao Z. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land; a case study[J]. Can. Geotech. J., 1998, **35**: 740~749.
- [9] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003, 20~21.
- Cen Yangrun. Experiment and Theory on Soft Foundation under Vacuum Preloading. Hangzhou: Zhejiang University, 2003, 20~21.
- [10] 胡珩. 真空预压法加固机理研究[J]. 华南港工, 1997, **8**(4): 42~46.
Hu Heng. Study on the improvement mechanism of vacuum extraction. South China Harbour Engineering, 2008, **111**(2): 59~62.
- [11] 明经平, 赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005, **372**(1): 1~6.
Ming Jingping, Zhao Weibing. Study on groundwater level in vacuum preloading. Port & Waterway Engineering, 2005, **372**(1): 1~6.
- [12] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Lou Yan. Vacuum Drainage Preloading Soft Technology. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [13] 高海江. 真空预压法加固软土地基试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006, 20~21.
Gao Haijiang. Field Test Study on Reinforcing Soft Foundation with Vacuum Preloading Method. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] 谢康和, 曾国熙. 等应变条件下的砂井地基固结解析理论[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(2): 3~17.
Xie Kanghe, Zeng Guoxi. Consolidation theories for drain wells under equal strain condition. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(2): 3~17.