

地下综合管廊软土地基沉降曲线机理及预测

朱汉强¹, 王 振¹, 林法力²

¹浙江良和交通建设有限公司, 浙江 宁波

²台州学院建筑工程学院, 浙江 台州

Email: 2135464580@qq.com

收稿日期: 2021年8月2日; 录用日期: 2021年8月16日; 发布日期: 2021年8月31日

摘 要

针对软弱土地区管廊地基沉降预测问题, 为了更加有效可靠地预测软土地基沉降, 本文基于沉降量与沉降速率间的微分动力学关系, 构建出沉降曲线动力学预测模型。并将该模型与实测数据以及数值结果进行对比, 以验证该理论模型的有效性。针对某地区软土地区综合管廊地基沉降, 选用两种典型的沉降改变速率, 求解得到了指数曲线模型以及双曲线模型。构建观测数据偏差的平方和达到最小且最大优度的优化模型, 将上述两种模型与实测数据进行对比。结果表明: 指数曲线模型更适合应用于该地区地基沉降全过程的沉降预测。

关键词

地下综合管廊, 软弱土地基, 沉降预测, 沉降曲线机理

Settlement Curve Mechanism and Prediction of Soft Soil Foundation in Utility Culvert

Hanqiang Zhu¹, Zhen Wang¹, Fali Lin²

¹Zhejiang Lianghe Transportation Construction Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou Zhejiang

Email: 2135464580@qq.com

Received: Aug. 2nd, 2021; accepted: Aug. 16th, 2021; published: Aug. 31st, 2021

Abstract

For the problem of predicting the settlement of utility culvert foundations in soft soil areas, in order to predict the settlement of soft soil foundations more effectively and reliably, this paper con-

constructs a settlement curve dynamics prediction model based on the differential dynamics relationship between the settlement amount and the settlement rate. The model is also compared with the measured data and numerical results to verify the validity of the theoretical model. The exponential curve model and the hyperbolic model were obtained by solving two typical settlement change rates for the settlement of utility culvert foundations in soft soil areas. The optimization model is constructed to minimize the sum of squares of deviations from the observed data and to maximize the goodness, and the two models are compared with the measured data. The results show that the exponential curve model is more suitable for the settlement prediction of the whole process of foundation settlement in this area.

Keywords

Utility Culvert, Soft Soil Foundation, Settlement Prediction, Settlement Curve Mechanism

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

综合管廊作为能够容纳电力、通信、雨污水、燃气、热力等市政管线的公共设施，具有保障市政管线安全、提高地下空间利用率、美化城市环境、避免路面重复开挖等优点，是新型城镇化发展的需要[1] [2] [3]。在软土地区，投入运营的综合管廊因各种原因产生长期沉降，纵向呈现出沉降的不均匀性，这种长期沉降成为影响管廊结构运营安全的关键问题[4]。东南沿海地区分布的软弱土表现出高含水量、高压缩性、强度较低和透水性较低等较差的工程性质。在深厚软弱土地区建设综合管廊，往往需要选取适当的地基处理方案，以避免综合管廊在施工过程及正常运行后产生较大沉降。

国内外学者对地基沉降预测进行了深入的研究，也取得了丰硕的成果[5] [6] [7] [8] [9]。软基段沉降的预测方法虽多，但由于软土自身的复杂性，加上上部荷载与结构的影响，能够较准确预测的方法却很少，利用现有的观测资料预测长期沉降是一种相对理想的方法[10] [11] [12]。

为了可靠有效地预测深厚软弱土综合管廊地基沉降，以便于对该地区管廊建设以及运营维护提供理论支撑，本文基于沉降量与沉降速率间的微分动力学关系，构建出沉降曲线动力学预测模型。并将该模型与实测数据以及数值模拟结果进行对比，以验证该理论模型的有效性。最后运用该模型对该地区综合管廊地基沉降进行预测。

2. 沉降曲线机理模型

设 t 时刻沉降量为 $S(t)$ ，沉降量改变速率为 λ ，则 Δt 时段内沉降改变为

$$\frac{S(t+\Delta t)-S(t)}{S(t)} = \lambda\Delta t \quad (1)$$

即

$$\frac{S(t+\Delta t)-S(t)}{\Delta t} = \lambda S(t) \quad (2)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，离散方程(2)可化为：

$$\frac{dS}{dt} = \lambda S(t) \quad (3)$$

注意：这里隐含着沉降量关于时间的函数是连续可微的；如果沉降函数是不可微函数(关于时间)，可将方程(2)写作离散方程：

$$S(t + \Delta t) = (1 + \lambda \Delta t) S(t) \quad (4)$$

初始沉降量或者某个参考时刻沉降量为 S_0 ，即

$$S(t = 0) = S_0 \quad (5a)$$

如果沉降最终稳定于某个量，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = S_\infty \quad (5b)$$

当沉降量改变速率为 λ 为常数时，求解方程(3)与(5a)可得

$$S = S_0 e^{\lambda t} \quad (6)$$

事实上，沉降改变速率与土体性质、荷载水平以及往期沉降等因素有关，将沉降改变速率作为常数更多的是一种大尺度均匀化的预估，往往很难做到精确有效预测沉降量。目前最为常用的几种沉降曲线模型，均可以看作在沉降速率取不同的时间函数时上述微分动力方程的解。

当 $\lambda(t) = \frac{C_1 C_2^2 e^{-C_2 t}}{1 + C_1 C_2 e^{-C_2 t}}$ 时，求解方程(3)与(5b)可得泊松指数曲线模型：

$$S = \frac{S_\infty}{1 + C_1 e^{-C_2 t}} \quad (7)$$

其中， C_1 与 C_2 为拟合参数。

当 $\lambda(t) = \frac{\beta_1 \beta_2 t^{\beta_2 - 1} (\beta_2 t - t + 1)}{(\beta_2 t + 1)(\beta_2 \beta_3 t + \beta_1 t^{\beta_2} + \beta_3)}$ 时，求解方程(3)与(5b)可得双曲曲线模型：

$$S = \frac{\beta_1 t^{\beta_2}}{1 + \beta_2 t} + \beta_3 \quad (8)$$

常用的经典预测沉降曲线模型，均可看作由方程(3)与(5)构成的微分动力系统在不同沉降速率情形下的解。但是，上述曲线模型在预测沉降时或多或少的存在着误差，对于这些误差形成的原因，从理论上还没有形成一般定量的分析。由此可见，在预测长期沉降理论中的关键是确定沉降改变速率。此速率一般是随着时间变化而变化的，它往往很难根据有限的实测数据进行标定的，需要根据实测数据定时更新速率时间函数，以便于更加可靠有效地预测未来沉降。需要注意的是实测数据又依赖于当前软土地基以及管廊主体结构的形式而定。

3. 工程背景

本文以某市地下综合管廊一期工程管廊标准段为背景，管廊工程长约 12.3 km，需穿越 13 条河道 7 条道路；共设三舱，分别为综合舱、燃气舱和电力舱，拟容纳 220 KV 电缆、110 KV 电缆、10 KV 电缆、通讯电缆、给水管、中水管、燃气管等市政管线。路段地表水系纵横交错，河流多弯曲，受地势影响而形态各异。表部主要由海积的黏土组成，下部为巨厚的淤泥质土。场区地基土细分为 4 个工程地质层，主要为海积黏土、海积淤泥、淤泥质土等。场地地貌类型为海相淤积平原，淤泥、淤泥质软土厚度 20~30 m 不等，一般 20 m 左右，为典型的软土地基。土层性能见表 1。

Table 1. Soil properties
表 1. 土层性能

层级	土类型	层厚与埋深	性状
② _{1b} 层	淤泥质粉质黏土	层厚 2.40~7.80 m, 层顶埋深 0.60~1.90 m, 相应高程为 0.29~2.15 m	灰色, 流塑, 厚层状, 含粉土团块及有机质碎屑, 韧性中等, 岩芯干强度中等, 土质不均, 局部为淤泥质黏土。
② _{2b} 层	淤泥质黏土	层厚 6.90~11.50 m, 层顶埋深 5.00~11.00 m, 相应高程为-9.09~-3.98 m	灰色, 流塑, 鳞片状~厚层状, 偶含有机质及贝壳碎屑, 韧性高, 岩芯干强度高, 土质不均, 局部为淤泥。
② _{3a} 层	淤泥	层厚 1.90~7.50 m, 层顶埋深 15.50~20.30 m, 相应高程为-17.90~-14.45 m	灰色, 流塑, 鳞片状~厚层状, 偶含有机质及贝壳碎屑, 韧性高, 岩芯干强度高, 土质不均, 局部为淤泥质黏土。

4. 沉降预测

为了更好的预测该地区管廊地基沉降, 沉降改变速率选用 $\lambda(t) = \frac{\beta_1 \beta_2^2 e^{-\beta_3 t}}{1 + \beta_1 \beta_2 e^{-\beta_3 t}}$ 与 $\lambda(t) = \frac{\beta_1 \beta_2 t^{\beta_2 - 1} (\beta_2 t - t + 1)}{(\beta_2 t + 1)(\beta_2 \beta_3 t + \beta_1 t^{\beta_2} + \beta_3)}$, 对应的解分别为泊松曲线模型与双曲线模型进行沉降预测, 并将预测结果与实测数据进行对比。

指数曲线模型为

$$S = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 e^{-\beta_3 t}} \quad (9)$$

双曲线模型为

$$S = \frac{\beta_1 t^{\beta_2}}{1 + \beta_2 t} + \beta_3 \quad (10)$$

其中, S 为沉降量, t 为时间, $\beta_i (i=1,2,3)$ 为待定参数组。

根据实测数据 (t_i, S_i) , $(i=1,2,\dots,n)$, 寻找函数 $S(t, \beta)$ 使得函数在点 t_i 处的函数值与观测数据偏差的平方和达到最小, 并使得拟合优度达到最大。即

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n (S(t_i, \beta) - \bar{S}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (S(t_i, \hat{\beta}) - \bar{S}_i)^2 \\ \max R = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (S(t_i, \beta) - \bar{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{S}_i)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, R 为拟合优度。

图 1 表示指数曲线模型与实测数据对比, 拟合优度 98%。图 2 表示双曲曲线模型与实测数据对比, 拟合优度 95%。表 2 是两种曲线模型参数取值。结果表明两种曲线模型与实测数据基本都能较好的匹配, 而指数曲线模型呈现更加优秀的拟合优度。利用曲线模型对地基沉降进行预测时, 不同阶段的预测精度不同, 利用泊松曲线模型对地基沉降进行预测时, 在预测沉降的各个阶段相对于双曲线都有较高的预测精度, 因此, 对比来看, 对于该地区沉降预测模型选取指数模型更加符合实际。

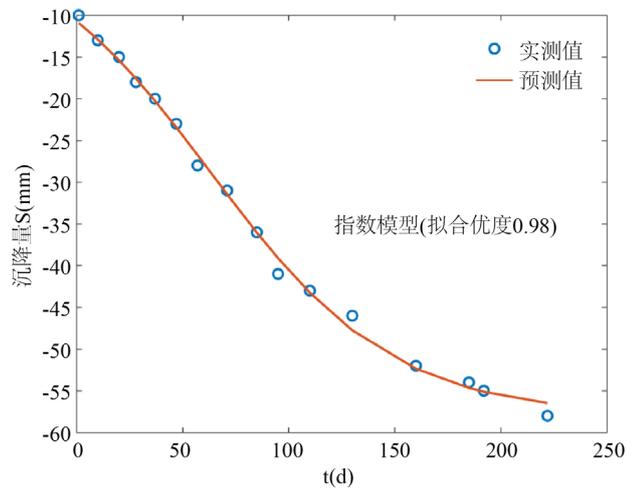


Figure 1. Comparison between exponential curve model and measured data

图 1. 指数曲线模型与实测数据对比

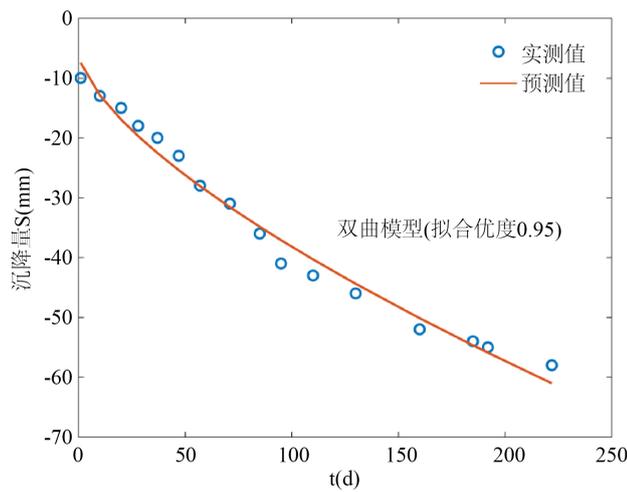


Figure 2. Comparison between hyperbolic curve model and measured data

图 2. 双曲曲线模型与实测数据对比

Table 2. Parameter values of prediction model

表 2. 预测模型参数取值

	β_1	β_2	β_3
指数曲线模型	-57.87	4.40	0.0233
双曲线模型	-2.36	1.68	-6.57

此外，根据指数曲线模型性质，可以得出：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 e^{-\beta_3 t}} = \beta_1 \quad (12)$$

由此可以求得最终沉降值为 β_1 。

5. 结论

本文基于沉降改变速率,建立了预测针对地下综合管廊这种结构形式软土地基沉降的常微分动力学模型。选取不同的改变速率,即可得到沉降预测曲线。针对某地区软土地区综合管廊地基沉降,选用两种典型的沉降改变速率,求解得到了指数曲线模型以及双曲线模型。构建了观测数据偏差的平方和达到最小且最大优度的优化模型,将上述两种模型与实测数据进行对比。具体结论如下:

- 1) 常用的经典预测沉降曲线模型,均可看作微分动力模型在不同沉降速率情形下的解;
- 2) 在预测沉降的各个阶段相对于双曲线都有较高的预测精度,因此,指数曲线模型更适合应用于该地区地基沉降全过程的沉降预测;
- 3) 根据指数曲线模型的极限值预测本地区综合管廊标准段地基最终沉降量约为 57.87 mm。

基金项目

本文得到浙江省建设厅项目(NO.2019K085)与浙江省自然科学基金一般项目(No. LY19E080008)支持。

参考文献

- [1] 黄发智,张超,刘军勇. 软土地区地下综合管廊建设综述[J]. 路基工程, 2018(6): 1-5.
- [2] 黄剑,王恒栋,王建. 软土地基综合管廊沉降控制、监测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 845-859.
- [3] 白海龙. 城市综合管廊发展趋势研究[J]. 中国市政工程, 2015(6): 78-81.
- [4] 白旭峰,张晶,苏晓果. 软土地区长期不均匀沉降对预制综合管廊的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2018(10): 92-93.
- [5] 张伟锋,陈盛原,韦未. 堆载作用下复合软土地基的沉降规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 729-740.
- [6] 任康,唐俊华,许四法,王哲,崔涵晟,袁静. 深厚吹填软土区复合地基沉降控制技术研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 121-125.
- [7] 雷华阳,张磊,许英刚,梁建文,巴振宁. 快速地铁列车荷载下软土地基沉降数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(z1): 45-48.
- [8] Zhang, G., Yue, X., Chen, J., Yang, J. and Wang, J. (2014) Support Vector Machine for Regression Model of Soft Soil Foundation Settlement. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, **52**, 147-153.
- [9] 刘汉龙,周密,陈育民,谢松兵,孙宏林. PCC 桩加固铁路软土地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3201-3207.
- [10] 于进江,程谦恭,贺宏武,李成辉,文华. 超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3323-3330.
- [11] 李翔宇,李新源,李明宇,聂俊霞,冯晓波. 基于实测数据的地铁隧道长期沉降预测模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 186-193.
- [12] Ter Martirosyan, A.Z. and Sidorov, V.V. (2021) Experience in Forecasting Long-Term Settlements of Energy Facilities Based on Monitoring Data Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1015**, Article ID: 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1015/1/012053>