

基于灰色理论的真空堆载预压分层沉降预测

赵鹏洲 印长俊

(湘潭大学土木工程与力学学院,湖南湘潭 411105)

【摘要】 对真空堆载预压加固处理的软土地基,用灰色理论模型预测地基的分层沉降,结果表明:对于土层分布均匀的地基,verhulst 模型能较准确地预测分层沉降,误差在 10% 以内。对于土层分布不均匀的地基,verhulst 模型预测误差较大,进行残差修正,修正的 verhulst 模型能较准确地预测分层沉降。用不同点数预测地基的分层沉降,同实测沉降数据对比发现、对于土层均匀或不均匀的软土地基,在已知真空影响范围外土层的沉降时,灰色模型就能较准确地预测分层沉降。

【关键词】 软土地基;verhulst 模型;分层沉降;预测

【中图分类号】 TU 472.3

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2011.01.004

Study on Layered Settlement Prediction of Soft Soil Foundation Which Reinforced by Vacuum Preloading Based on Gray System

Zhao Pengzhou Yin Changjun

(Civil Engineering and Mechanics college, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

【Abstract】 Gray Theory is used to predict layered settlement of soft soil foundation, which reinforced by vacuum-surcharge preloading. The result shows that: Verhulst model can accurately predict layered settlement of well-distributed soil, with error of less than ten percent, but for uneven soil of foundation, the error of Verhulst model compared greatly, so the Verhulst model was modified, modified Verhulst model can accurately predict layered settlement of uneven soil of foundation. Then predict the layered settlement of foundation by different points of real datas, compared with the measured datas found that, when the settlement which out of the vacuum affected is known, Gray Model can accurately forecast the layered settlement of ground.

【Key words】 soft soil foundation; verhulst model; layered settlement; foreca

0 引言

在软土地基上修建高速铁路,沉降控制是影响通车后运行质量、行车安全的关键因素,实际工程中由于土性指标的分散、土的本构关系中不确定因素、沉降的时间效应等原因,地基沉降不易准确计算,因此在工程实际中多利用现场已测到的初期沉降资料,预测地基沉降^[1-2]。

灰色系统通过对部分已知信息的生成、开发,提取有价值的信息。已有研究成果表明,灰色系统理论提出的数据生成法,可以有效软化系统的随机性,发掘数据的现实规律。在地基沉降预测中,选择适当的灰色模型,可以获得较高精度的预测数据。本文探讨利用灰色 GM(1,1)模型、verhulst 模型预测真空堆载预压地基的分层沉降^[3-7]。同时用不同点实测沉降数据进行分层沉降预测,寻求灰色模型分层沉降预测的最大深度。从而建立了真空堆载预压地基分层沉降的灰色模型。

1 软土地基灰色模型计算程序

灰色模型是以灰色模块为基础,以微分拟合法

所建立的模型。

1.1 GM(1,1)模型

GM(1,1)模型为 1 个变量 1 阶方程的灰色模型:已知 n 个等距时间序列数据

$$X^{(0)} = [X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)] \quad (1)$$

为强化序列中潜在的规律,一般需要将 $X^{(0)}$ 做一次累加(AGO)生成变换:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j) \quad (2)$$

根据具体模型构造参数矩阵 B 与 Y_N

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(1) + x_1^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n)) & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$Y_N = [x_i^{(0)}(2), x_i^{(0)}(3), \dots, x_i^{(0)}(n)]^T \quad (4)$$

作最小二乘法计算 GM(1,1)模型中的参数列 β

$$\beta = [a, u] = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (5)$$

对 $X^{(1)}$ 建立白花形式微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (6)$$

将参数列 β 的各个分量代入所构造的白花形式微分方程(5),建立时间响应函数:

$$x^{(1)}(t) = \left\{ x^{(1)}(0) - \frac{a}{u} \right\} e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

1.2 verhulst 模型

灰色 verhulst 模型是在 verhulst 理论的基础上,利用灰色系统建模只需要小样本的优势及其特定的建模方法而形成的,是描述一个系统趋向饱和状态的模型。其白花形式微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u(x^{(1)})^2 \quad (8)$$

参数矩阵 B 和 Y_N 为

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) \cdots (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) \cdots (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots \\ -z^{(1)}(n) \cdots (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y_N = [x_i^{(0)}(2), x_i^{(0)}(3), \dots, x_i^{(0)}(n)]^T \quad (10)$$

$z^{(1)}$ 为 $x^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列

建立 verhulst 模型的时间响应函数:

$$x^{(1)}(t) = \frac{ax^{(1)}(0)}{ux^{(1)}(0) + (a - ux^{(1)}(0))e^{at}} \quad (11)$$

1.3 精度检验

采用后验差检验法对模型进行检验,后验差比计算式为:

$$c = \frac{s_2}{s_1} \quad (12)$$

小误差概率为:

$$p = p\{|e_k - \bar{e}| < 0.6745s_1\} \quad (13)$$

其中, s_1 、 s_2 分别为原始序列和残差序列的均方差, e 为残差,计算式为:

$$s_1^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{x^{(0)}(k) - \bar{X}^{(0)}\}^2 \quad (14)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{e_k - \bar{e}\}^2 \quad (15)$$

$$e = X^{(0)} - \hat{X}^{(0)} \quad (16)$$

用灰色模型预测,当预测数据精度不符合要求时,进行残差修正,建立修正模型来提高预测精度。

2 工程实例

某高铁地处太湖湖积平原,为提高软土地基稳

定与变形计算精度,指导施工,控制工后沉降,选择地质和工程情况有代表性的地段提前修筑试验路堤。通过实验比较,掌握本地软土地基特征和变形规律,为高铁正线设计和施工提供依据。试验段地基表层为粘土,厚 0.76~3.6 m,其下为淤泥质粉质粘土,含少量腐殖质,厚 3.2~16.5 m,下卧层为粉质粘土,地基土物理力学指标见表 1。由表 1 可见,试验段地基的含水量及孔隙比较大,特别是第②层淤泥质粉质粘土层,含水量和孔隙比分别达到了 44.4% 和 1.23,属于典型软土。

表 1 试验段的土性指标表

地基土层	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然孔隙比 e	液限 $w_{L}/\%$	塑限 $w_{p}/\%$	塑性指数 I_p
粘土①	31.9	19.2	0.89	40.9	19.7	21.2
淤泥质粉质粘土②	44.4	17.8	1.23	35.8	19.9	15.9
粉质粘土③	35.0	18.8	0.97	33.2	19.8	13.4

试验段采用真空堆载联合预压加固处理,加固深度 14.5~18.5 m,本文以此试验段两个监测断面的地基沉降为例,运用灰色模型对地基进行分层沉降预测^[8-10]。

2.1 GM(1,1)模型和 verhulst 模型预测地基分层沉降

选取试验段 1 号、2 号观测断面进行地基分层沉降预测,1 号断面沿深度设置 13 个沉降观测点,2 号断面沿深度设置 12 个沉降观测点。根据已测得的上层土 10(9)点的沉降值,分别用 GM(1,1)模型和 verhulst 模型预测底层 3 点的沉降,并与实测值进行比较,见图 1、图 2。

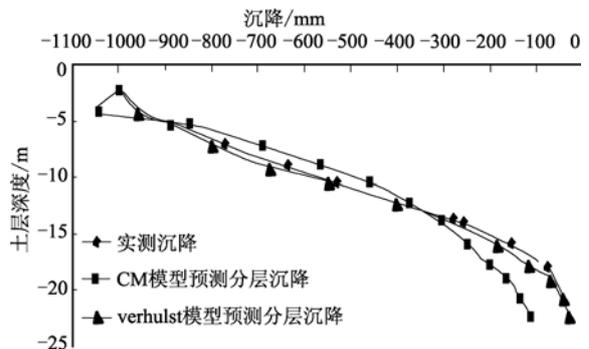


图 1 1 号断面沉降-土层深度曲线

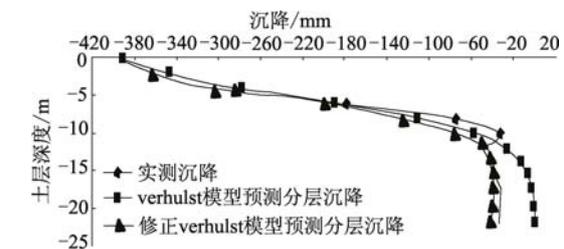


图 2 2 号断面沉降-土层深度曲线

根据后验差检验法判断 1、2 断面模型的预测精度,见表 2、表 3。

表 2 1 号断面灰色模型预测精度指标

项目	C	预测精度	P	预测精度
GM(1,1)模型	$0.27 < 0.35$	好	$1 > 0.95$	好
Verhulst 模型	$0.05 < 0.35$	好	$1 > 0.95$	好

表 3 2 号断面灰色模型预测精度指标

项目	C	预测精度	P	预测精度
verhulst 模型	$0.18 < 0.35$	好	$1 > 0.95$	好
修正 verhulst 模型	$0.16 < 0.35$	好	$1 > 0.95$	好

土层分布比较均匀地基的沉降与土层深度曲线见图 1,由图可见 GM(1,1)模型预测误差比较大,而 verhulst 模型能较准确地预测分层沉降,误差控制在 10% 以内。图 2 为土层分布不均匀地基的沉降与土层深度曲线,由图可见 verhulst 模型预测误差明显增大,采用修正残差的 verhulst 模型提高预测精度,结果表明,修正 verhulst 模型能较准确地预测不均匀土层地基的沉降,预测精度较高。

1、2 号断面灰色模型的预测精度指标见表 2、表 3,由表可见 1、2 号断面所用灰色模型的预测精度都很好,对比图 1、图 2 两种模型的分层沉降预测误差,可知根据预测精度指标 C、P 好坏进行沉降预测可能导致较大误差,因此预测时应结合预测精度指标和工程实际评判模型的预测精度。

2.2 不同点数对分层沉降的影响

由 2.1 可知,土层分布均匀的地基,verhulst 模型就能较准确地预测分层沉降,对于土层分布不均匀的地基,修正的 verhulst 模型能较准确预测分层沉降,因此使用 verhulst 模型和修正 verhulst 模型,用不同的点数对试验段 1、2 断面的沉降进行预测,见图 3—图 5。

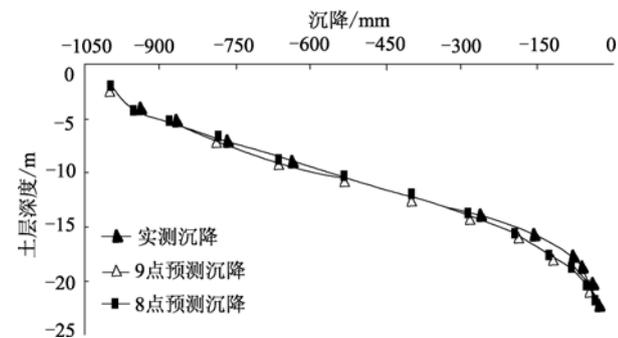


图 3 1 号断面 verhulst 模型预测的沉降-土层深度曲线

由图 3、图 4 可见,已知 8 个点、9 个点的沉降数据,verhulst 模型能较准确地预测其余点沉降,当用

7 点数据预测时,预测的沉降与土层深度曲线和实测沉降相差较大,最大误差达到 77%,因此对于分布均匀的地基,verhulst 模型根据已知 8 点最多预测 5 层分层沉降。

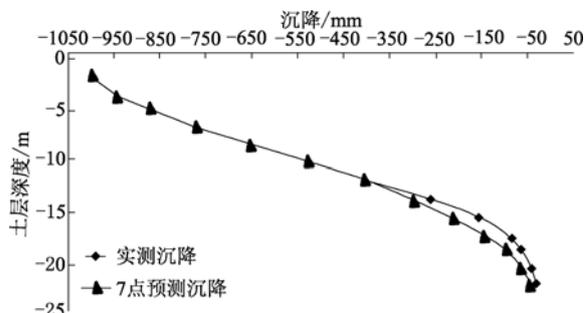


图 4 1 号断面 verhulst 模型预测的沉降-土层深度曲线

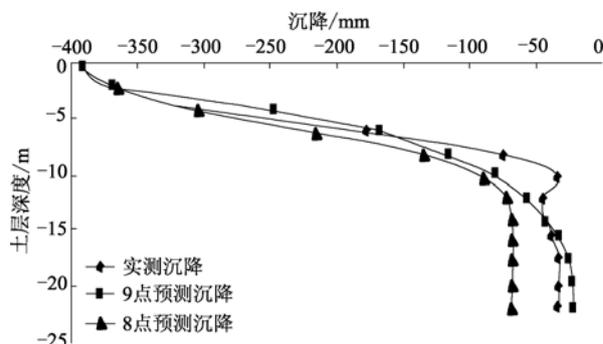


图 5 2 号断面修正 verhulst 模型预测的沉降-土层深度曲线

由图 5 可见,8 点预测的沉降与土层深度曲线严重偏离实测沉降数据曲线,最大误差达到 110%,所以对于不均匀分布地基,修正 verhulst 模型根据已知 9 点最多预测 3 层分层沉降。

真空堆载预压加固处理软土地基时,排水板底以下土层主要在上覆荷载作用下发生固结沉降,对比模型的最大预测层数发现,已知真空影响范围外土层的沉降时,模型能较准确地预测底层沉降。

3 结论

运用灰色理论对某高铁地基实测沉降数据进行分层沉降预测,通过与实测数据比较分析,有如下结论:

1) 对于土层分布均匀的地基,verhulst 模型能较准确地预测分层沉降,误差在 10% 以内;对于土层分布不均匀的地基,verhulst 模型的预测误差较大,建立残差修正的 verhulst 模型进行预测,结果表明,修正 verhulst 模型能较准确地预测不均匀土层地基的沉降,预测精度较高。

2) 在已知真空影响范围外土层的沉降时,土层分布均匀的地基使用 verhulst 模型能较准确地预测 5 层分层沉降,对于土层分布不均匀地基,使用修正

verhulst 模型能较准确预测 3 层分层沉降。

3) 预测精度指标 C 、 P 是基于实测数据曲线和模拟数据曲线的吻合程度对预测精度进行评价,土层分布、黑白信息数量等影响并未考虑。预测时根据 C 、 P 优劣评判预测精度可能导致较大误差,因此预测时应结合预测精度指标和工程实际综合评判模型的预测精度。

4) 在实际沉降监测工程中,可用灰色理论预测深层次土层的沉降,减少埋设和测量的工作量,降低监测费用。同时通过深层预测值和监测值的对比,还可判断测点的好坏,提高监测的精度。

参 考 文 献

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] 张仪萍,张土乔,龚晓南. 沉降的灰色预测[J]. 工业

- 建筑,1999,29(4):45-48.
- [4] 宰金珉,梅国维. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学,2000,21(4):322-325.
- [5] 罗战友,龚晓南,杨晓军. 全过程沉降量的灰色 verhulst 预测方法[J]. 水力学报,2003(3):29-32.
- [6] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [7] 潘林有,谢新宇,罗 昕,等. 软土地基实测沉降的拟合和预测[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(11):1474-1475.
- [8] 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.
- [9] 曾 超,肖 锋,唐仲华. 应用灰色模型(GM)预测软土路基沉降量[J]. 安全与环境工程,2002,3(9):17-19.
- [10] 柳立峰,姜德义,王庆珍,等. 基于灰色理论的公路沉降预测研究[J]. 重庆交通大学学报,2007,12(26):80-81.

收稿日期:2010-10-15

(上接第 12 页)

由桩的桩身轴力图(见图 2 和图 3)和摩阻力图(见图 4 和图 5)可以看出:

1) 桩身轴力的传递规律是沿桩身自上至下衰减,其衰减的快慢与桩周土体的侧摩阻发挥水平有关。当荷载较小时,力作用在桩身上产生的变形就小,不能很好地调动桩周土体的摩阻力,从桩顶到桩端轴力衰减的速率较小;当桩顶荷载逐步加大时,桩与周围土体之间产生相互滑动的趋势逐步增大,桩侧摩阻被充分调动起来乃至达到极限侧摩阻,此时轴力衰减就快,呈现出明显的非线性特征。

2) 桩轴力在自桩顶处开始慢慢衰减,虽衰减的幅度不同,但到了桩底荷载基本衰减完毕,桩端基本不承担荷载,属于摩擦型桩。

3) 从 SZ01 桩的摩阻力图中可以看出,开始加载时主要由上部土层的摩阻力发挥作用,随着荷载的增大,下部土层也逐渐发挥作用。当荷载加到最后一级时,桩侧摩阻力还没有稳定的迹象,说明侧摩阻力还没有发挥到极限,还有承担更多荷载的能力。

4) 比较实测桩身侧摩阻图和地勘报告给出的极限侧摩阻力可以看出,压浆极大地改善了桩周土体的侧摩阻力,特别是对于砂层和角砾层,其压浆后的摩阻力提高了 5 倍以上。

5 结 论

1) 后压浆能大幅度提高桩周砂层和角砾层的

侧摩阻,从而很好地改善基桩的承载性能,在后压浆设计和施工中应合理利用这些地层。

2) 分布式光纤检测很好地揭示了荷载作用下桩身轴力变化和桩周摩阻力的发挥过程,是研究桩受力作用机理的一个有效实测手段。

3) 后压浆工艺对于改善泥浆护壁钻孔灌注桩的固有缺陷、提高桩的承载力和控制沉降有十分显著的作用;且与常规成桩工艺相比,它有降低施工难度、节省工期和造价的优点,具有良好的技术和经济效益。

参 考 文 献

- [1] 沈保汉. 后压浆桩技术—泥浆护壁钻孔灌注桩桩端压力注浆工艺[J]. 工业建筑,2001,31(6):72-75.
- [2] 肖大平,杨焕玲. 北京地区灌注桩后压浆技术应用实例[J]. 建筑技术,1998,29(3):161-162.
- [3] 杜 峰. 武汉国际会展中心后压浆钻孔灌注桩施工[J]. 施工技术,2003,32(1):16-18.
- [4] 陈 进,段 建. 灌注桩后压浆技术及其工程应用[J]. 西部探矿工程,2006(125):33-34.
- [5] 黄生根,张晓炜,曹 辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学,2004(2):63-65.

收稿日期:2010-10-20