

基于 Gompertz 成长曲线的真空预压 软土沉降规律分析

吴起星, 胡 辉

(暨南大学 力学与土木工程系, 广东 广州 510632)

摘要: 对真空预压软土沉降变化规律进行分析, 发现其与社会经济预测中的 Gompertz 成长曲线变化规律相似。引入 Gompertz 成长曲线模型, 采用 3 段估计法求解模型参数; 同时, 结合具体工程实例, 对真空预压软土的表面累计沉降数据进行拟合和分析, 并与双曲线模型和指数曲线模型进行比较。研究结果表明, Gompertz 成长曲线模型拟合曲线与实测曲线吻合良好, 采用该模型进行真空预压软土沉降变化规律分析是可行的, 并可根据所反映出的沉降发展变化趋势, 作出沉降预测, 计算工后沉降及确定卸荷时间。与双曲线模型和指数曲线模型比较, Gompertz 成长曲线模型适应性较好, 趋势预测准确性高。最后指出应用 Gompertz 成长曲线模型进行分析时应注意抽真空的连续性、实测时间序列数据能等分成 3 组及保证实测沉降数据已进入弹塑性阶段等问题。

关键词: 土力学; 软土; 真空预压; 沉降; Gompertz 成长曲线

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3600 - 07

LAW ANALYSIS OF SOFT SOIL SETTLEMENT TREATED BY VACUUM PRELOADING BASED ON GOMPERTZ GROWTH CURVE

WU Qixing, HU Hui

(Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract: After the law of settlement change analysis of soft soil treated by vacuum preloading method, it is found that the law is similar to that of Gompertz Growth Curve used in socioeconomic prediction. Based on practical engineering examples, the values of parameters of Gompertz Growth Curve by three-segment estimation method are achieved, and the Gompertz Growth Curve Model is established to analyze the settlement data of soft soil treated by vacuum preloading method and compared with Hyperbolic Model and Index Curve Model. The analytical results of engineering practice indicate that the effect of fitting curves by using this method is good and this method is reasonable to analyze the law of settlement change of soft soil treated by vacuum preloading method. It also can be used for predicting soft soil settlement, calculating post-construction settlement and unloading time decision. Compared with Hyperbolic Model and Index Curve Model, Gompertz Growth Curve Model has good adaptability and precision in trend forecast. Last, some problems such as continuing evacuation, three equal segment measured data and elastic-plastic deformation of soil, are pointed out during application of Gompertz Growth Curve Model.

Key words: soil mechanics; soft soil; vacuum preloading; settlement; Gompertz Growth Curve

收稿日期: 2006 - 05 - 18; **修回日期:** 2006 - 07 - 19

作者简介: 吴起星(1972 -), 男, 硕士, 2002 年于广西大学岩土工程专业获硕士学位, 现为讲师、博士研究生, 主要从事土工试验、原位测试及地基基础等方面的教学与研究工作。E-mail: wqx510632@126.com

1 引言

近年来,随着珠江三角洲地区经济和社会的进一步飞速发展,各地蓬勃兴建港口、高速公路以及物流堆场等,这些工程往往会遇到软基如何处理的难题。珠江三角洲软土是工程建设中遇见的最软的软土之一,具有承载能力低、受荷后变形大、时间效应明显、与建筑物共同作用能力强等特性^[1]。软土地基如何在较短时期内提高其承载力、降低工后沉降成为工程技术人员共同关注的问题。真空预压法是解决这个问题的有效方法之一,其最早由瑞典皇家地质学院 W. Kjellmam 教授于 1952 年提出,经过半个多世纪的曲折发展,现已有安全可靠的密封材料、抽真空装置及较为成熟的施工工艺等。目前,膜下真空度已能达到 80~95 kPa; 历时 40~70 d,固结度可达 80% 以上,软基承载力能显著提高,最大单块处理面积达 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ ^[2, 3]。因此,在珠江三角洲软基处理中真空预压加固法得到广泛应用,其可节省工期、节约资源、减少安全隐患、满足环保要求、减少工后沉降、提高承载能力等,为社会创造极大的经济效益^[4~7]。

沉降问题是真空预压法加固软土地基过程中最为关心的问题,直接影响到工程质量和建设周期,也是评价加固效果、判别卸荷的指标之一。因此,探讨真空预压软土沉降机制、沉降规律及其预测方法具有重大的经济效益和社会效益。

2 真空预压加固原理及沉降变形规律

真空预压法^[2~8]是在需要加固的软土地基表面先铺设砂垫层,然后埋设垂直排水通道(塑料排水板或袋装砂井),再在砂垫层面铺设一封闭薄膜使其与大气隔绝,薄膜四周埋入土中(设置密封沟),通过砂垫层内埋设吸水管,用真空装置进行抽气,使其形成真空,增加地基的有效应力。真空预压加固原理如图 1 所示。当抽真空时,在砂垫层、垂直排水通道先后形成压差($p_a - p_n$),在此压差作用下,土体中的孔隙水不断由排水通道排出,从而使土体固结。该方法主要有以下几个特点:

(1) 真空度沿塑料排水板(或砂井)向下传递及

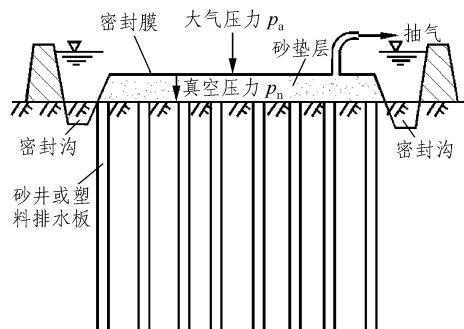


图 1 真空预压加固原理图

Fig.1 Consolidation mechanism of vacuum preloading

向土体中扩展,孔隙水压力降低,在水平方向增加一个向着负压源的压力,使四周土体都向预压区移动,促使土体进一步压密,故真空预压可一次快速施加、节省时间、缩短工期。

(2) 真空预压法在土体加固过程中,在真空吸力的作用下使土中的封闭气泡排出,从而使土的渗透性提高,固结过程加快。

(3) 真空预压法加固软基,由于地基周围的土体是向着加固区移动的,有利于加固区内土体密实度的提高和地基承载力的增加。

(4) 对于填土路堤,可利用填土作为堆载,联合真空预压法一起加固软土地基,因而技术可行、经济效益好。

软土地基的总沉降一般包括瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三部分。瞬时沉降指在荷载作用下由于土体的剪切变形所引起的,并在荷载作用下立即发生的。固结沉降是由于孔隙水的排出而引起土体体积减小所造成的。次固结沉降则是由于超孔隙水压力消散后,在恒值有效应力作用下土骨架的徐变所致。

结合前述真空预压加固法特点,可见在抽真空期间,软土地基沉降主要是固结沉降。在真空预压作用下,大量现场沉降观测资料表明,软土沉降变形是一个随时间逐渐增加的过程,但最终会趋于一个稳定值。这个沉降变形过程基本经历发生、发展、稳定和极限状态 4 个阶段,即为一个成长过程。为此,可引入经济预测和技术预测中常采用的成长曲线来研究分析真空预压软土的沉降变形过程。

3 Gompertz 成长曲线分析模型

3.1 Gompertz 成长曲线模型建立

Gompertz 成长曲线模型建立^[9-12], 即将所研究的预测目标(沉降)用一个定量指标 s 表示, $\frac{ds}{dt}$ 表示 s 的变化速度, $\frac{ds}{sdt}$ 表示 s 的增长率。设 s 的增长率与 $\ln \frac{k}{s}$ 成正比, 则有

$$\frac{ds}{sdt} = R \ln \frac{k}{s} = R(\ln k - \ln s) \quad (1)$$

式中: R 为比例系数; k 为参数, 且有 $k > 0$, 为某一极限值。

求解该微分方程式(式(1)), 可得到描述这类事物成长变化过程的曲线:

$$s = ka^{b^t} \quad (2)$$

式中: a, b 均为待定参数。

对式(2)两边取自然对数, 则有

$$\ln s = \ln k + b^t \ln a \quad (3)$$

美国数学家兼统计学家 B. Gompertz 首先使用这一曲线, 故称之为 Gompertz 成长曲线。利用一时间序列求出上述 3 个待定参数, 即可建立基于 Gompertz 成长曲线方程, 从而可对今后的沉降 s 进行预测。

3.2 Gompertz 成长曲线模型特点

Gompertz 成长曲线模型具有如下 4 个特点:

(1) 不通过原点。当 $t = 0$ 时, $s = ka \neq 0$, 故不通过原点。事实上, 软土在外荷作用下会发生瞬时沉降, 可视为突变现象, 即由于初始沉降的存在, 决定曲线拟合不通过原点是可理解的。

(2) 当 $0 < a < 1, 0 < b < 1$ 时, 曲线呈右偏的“S”型曲线符合软土地基沉降变形的发展机制。

(3) 有界性。当 $0 < a < 1, 0 < b < 1$ 时, 当时间 t 趋近于无穷大时, s 趋近于 k , 相当于软土地基的最终沉降量。

(4) 良好的适应性。如对于同样的 $k = 1.5, a = 0.2$, 通过调节参数 b 可模拟相当大范围的曲线, 当 $b = 0.50$ 和 $b = 0.95$ 时, 其 Gompertz 成长曲线如图 2 所示, 可见其具有良好的适应性。

3.3 Gompertz 成长曲线模型参数估计

Gompertz 成长曲线待定参数 k, a 和 b 的估计方法有多种, 本文将采用 3 段估计法求 Gompertz 成长曲线模型的参数。

将数据列($t_i, \ln s_i$)依次分为 3 组, 每组含有的数据个数相同(设为 r), 对 3 组数据分别求和, 可分别

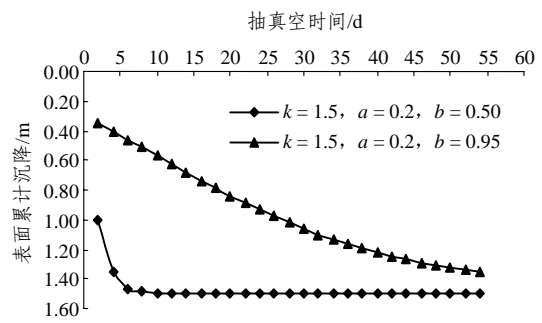


图2 Gompertz 成长曲线
Fig.2 Gompertz Growth Curves

记为如下:

$$s_1 = \sum_{i=1}^r \ln s_i = \sum_{i=1}^r (\ln k + b^i \ln a) = r \ln k + b \frac{1-b^r}{1-b} \ln a \quad (4)$$

$$s_2 = \sum_{i=r+1}^{2r} \ln s_i = \sum_{i=r+1}^{2r} (\ln k + b^i \ln a) = r \ln k + b^{r+1} \frac{1-b^r}{1-b} \ln a \quad (5)$$

$$s_3 = \sum_{i=2r+1}^{3r} \ln s_i = \sum_{i=2r+1}^{3r} (\ln k + b^i \ln a) = r \ln k + b^{2r+1} \frac{1-b^r}{1-b} \ln a \quad (6)$$

式中: r 为每组数据所含的数据个数。

求解式(4)~(6), 可得

$$b = \sqrt[r]{\frac{s_3 - s_2}{s_2 - s_1}} \quad (7)$$

$$a = \exp \left[(s_2 - s_1) \frac{b-1}{(b^r - 1)^2} \right] \quad (8)$$

$$k = \exp \left[\frac{1}{r} \left(s_1 - \frac{s_2 - s_1}{b^r - 1} \right) \right] \quad (9)$$

4 工程应用分析

依据上述理论, 本文对珠江三角洲地区多处真空预压软土表面沉降资料进行 Gompertz 成长曲线沉降模型分析, 并与工程实践中常用的双曲线模型、指数曲线模型^[13, 14]进行比较分析。下面将以南沙港区软基处理 k4 区及新垦万环西道路扩建工程真空预压试验段的现场沉降资料为例, 分别进行说明。

4.1 实例一

广州港南沙港区软基处理 k4 区, 位于珠江口伶仃洋喇叭湾湾顶, 虎门外珠江右岸, 龙穴岛围垦区。根据地质勘察资料, 揭露的主要地层情况如下: (1) 灰色淤泥: 饱和, 流塑, 厚约 11.9 m; (2) 灰黄色黏性土混砂: 可塑, 厚约 1.8 m; (3) 灰色淤泥质黏土: 饱和, 软塑, 厚约 4.5 m; (4) 黄灰色中粗砂混黏性土: 稍密~中密, 厚 1.30~4.90 m; (5) 灰色粉质黏土: 可塑; (6) 黄色粗砾砂: 密实。

该 k4 区软基处理的对象主要是厚约 20 m 的软土, 总面积约 26 015 m²。为使软土在较短时期内得到固结, 有效降低地下水位, 提高承载力, 采用真空预压法进行加固处理。在该 k4 加固区内均匀布置 10 个表面沉降板, 监测平面布置图如图 3 所示, 在整个真空预压期间进行表面沉降监测, 以了解不同区域的沉降和差异沉降。该场区从 2005 年 7 月 9 日开始抽真空, 2005 年 10 月 9 日停抽, 历时 92 d。

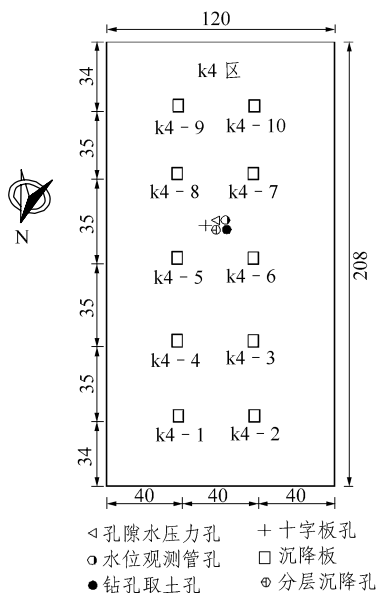


图 3 监测平面布置图(单位: m)

Fig.3 Arrangement plan of monitoring (unit: m)

本文对 k4 区 10 个表面沉降测点的沉降数据采用 Gompertz 成长曲线沉降模型进行拟合分析, 同时也采用双曲线模型、指数曲线模型进行比较分析, 记偏差 $e_i = \text{实测值} - \text{拟合值}$, 各测点实测值与拟合值的数理统计比较见表 1; k4 区表面沉降实测曲线与拟合曲线比较见图 4。

由图 4 和表 1 可知, Gompertz 成长曲线沉降分析模型与真空预压软土沉降实测数据拟合质量较高, 特别是实测曲线拐点以后的数据, 相对误差均在 5% 以内。由此可见, Gompertz 成长曲线沉降分析模型能基本反映真空预压软土表面累计沉降随时

表 1 各测点沉降实测值与拟合值比较

Table 1 Comparison of measured values and predicted values on soft soil settlements

沉降板 编号	预测模型	偏差 e_i 平均值 /m	偏差 e_i 标准差	偏差 e_i 最小值 /m	偏差 e_i 最大值 /m	计数 n	后 10 点 相对误差 最大值/%
k4-1	Gompertz	0.004	0.019	-0.059	0.052	26	1.91
	双曲线	0.002	0.011	-0.031	0.032	26	0.61
k4-2	指数曲线	-0.006	0.026	-0.114	0.013	26	1.03
	Gompertz	0.003	0.016	-0.049	0.040	26	2.86
k4-3	双曲线	0.001	0.009	-0.019	0.028	26	1.03
	指数曲线	-0.005	0.022	-0.098	0.007	26	0.95
k4-4	Gompertz	0.003	0.013	-0.038	0.034	26	4.86
	双曲线	0.001	0.008	-0.007	0.026	26	3.12
k4-5	指数曲线	-0.005	0.021	-0.087	0.009	26	1.76
	Gompertz	0.004	0.021	-0.064	0.055	26	2.63
k4-6	双曲线	0.002	0.011	-0.031	0.035	26	0.64
	指数曲线	-0.011	0.038	-0.160	0.011	26	0.69
k4-7	Gompertz	0.001	0.017	-0.051	0.047	26	1.48
	双曲线	0.002	0.013	-0.026	0.027	26	1.48
k4-8	指数曲线	0.002	0.016	-0.054	0.029	26	0.65
	Gompertz	0.002	0.014	-0.040	0.034	26	2.66
k4-9	双曲线	0.001	0.007	-0.009	0.023	26	0.96
	指数曲线	-0.003	0.016	-0.069	0.011	26	1.46
k4-10	Gompertz	0.000	0.011	-0.028	0.029	26	1.96
	双曲线	0.000	0.007	-0.015	0.014	26	0.82
k4-11	指数曲线	0.004	0.009	-0.017	0.028	26	0.65
	Gompertz	0.001	0.015	-0.042	0.043	26	1.29
k4-12	双曲线	0.000	0.008	-0.018	0.016	26	1.47
	指数曲线	0.005	0.012	-0.011	0.045	26	0.77
k4-13	Gompertz	-0.001	0.014	-0.034	0.040	26	0.71
	双曲线	-0.001	0.012	-0.033	0.018	26	1.75
k4-14	指数曲线	0.012	0.012	0.000	0.052	26	1.93
	Gompertz	0.000	0.040	-0.093	0.084	26	2.78
k4-15	双曲线	-0.002	0.024	-0.052	0.035	26	2.40
	指数曲线	0.005	0.027	-0.056	0.046	26	2.34

间的变化规律。真空预压软土沉降实测值与 3 种模型的拟合值之间的偏差 e_i 的平均值、标准差、极值及后 10 点相对误差等差别并不明显。因此, Gompertz 成长曲线沉降分析模型可与工程实践中常用的双曲线模型、指数曲线模型一样, 作为一种新的预测模型应用于工程实践。

4.2 实例二

新垦万环西道路扩建工程真空预压试验段在既有道路右侧, 长约 150 m, 宽约 20~25 m, 低于既有道路部分 2.0~2.5 m。地质资料揭露表明该段自

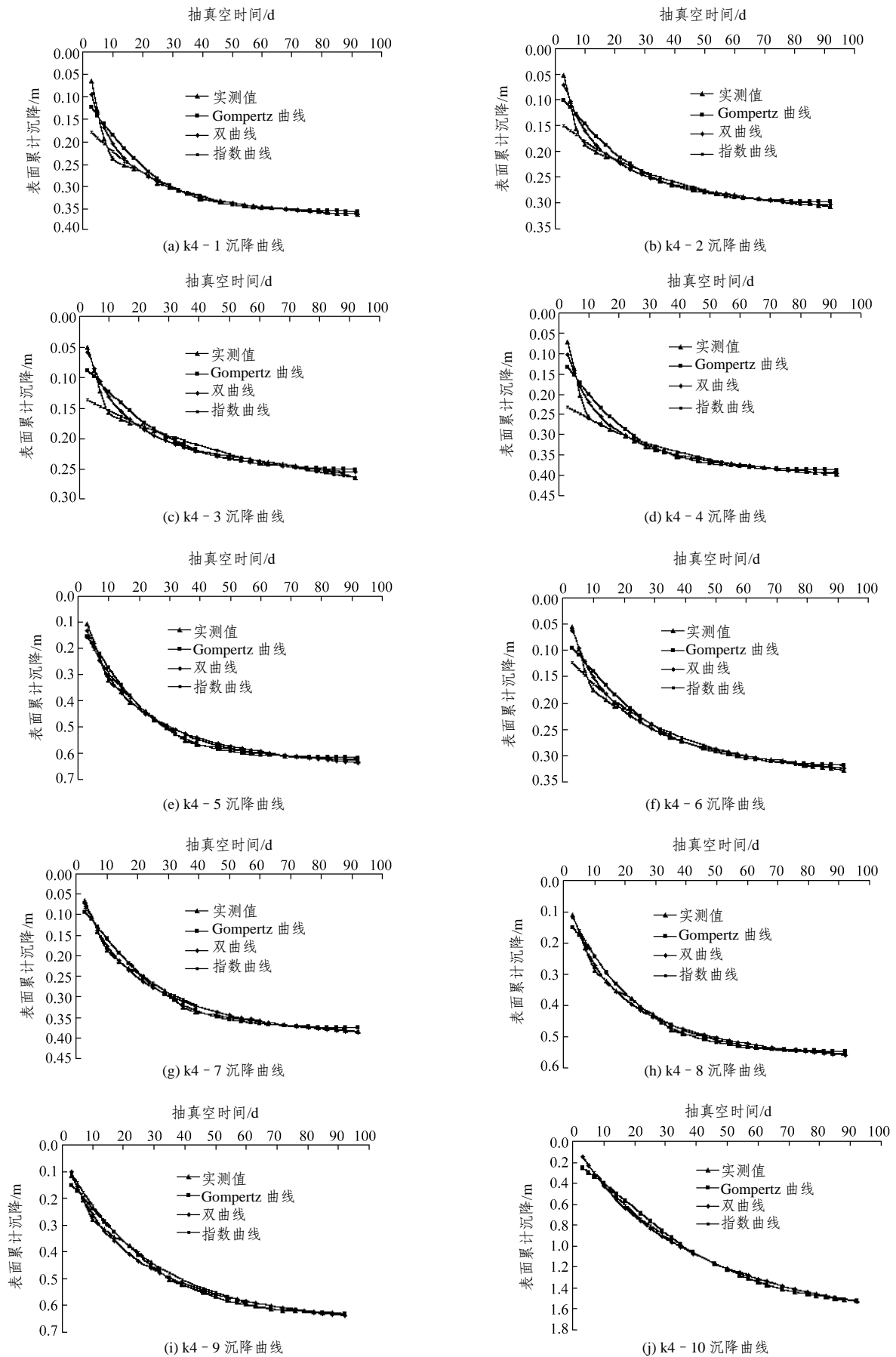


图4 k4区表面沉降实测曲线与拟合曲线比较

Fig.4 Comparison of measured curves and fitting curves on soft soil settlements in section k4

上而下主要地层为厚约 2.3 m 的填土、厚 22~24 m 的淤泥质土、厚约 2.3 m 的中砂及第四系残积层及花岗岩基岩。真空预压处理的对象为高压缩性淤泥质土，塑料排水板在平面上呈梅花形布置，间距 1.2 m，施工深度 22~23 m；因场地条件限制，在靠近既有路面一侧 5 m 宽度范围内塑料排水板的施工深度比正常情况短 7~9 m。密封沟开挖约 2.5 m 深，将真空膜直接踩入淤泥质土层中。

表面沉降监测点设置 3 块沉降板，布置在试验段中间的同一直剖面上，分别记为板 1(靠既有道路侧)、板 2(中间)及板 3。该场区从 2005 年 6 月 26 日开始抽真空，2005 年 12 月 4 日停抽，历时 161 d。

对该 3 个表面沉降监测点的实测沉降数据采用 Gompertz 成长曲线沉降模型进行分析，同时也采用双曲线模型、指数曲线模型进行比较分析，各测点沉降实测值与预测值比较见表 2；真空预压试验段表面沉降实测曲线与拟合曲线比较见图 5。

表 2 各测点沉降实测值与预测值比较

Table 2 Comparison of measured values and predicted values on soft soil settlements

沉降板 编号	预测模型	偏差 e_1 平均值 /m	偏差 e_1 标准差	偏差 e_1 最小值 /m	偏差 e_1 最大值 /m	计数 n	后 10 点 相对误差 最大值/%
板 1	Gompertz	-0.013	0.060	-0.183	0.104	51	4.53
	双曲线	-0.004	0.077	-0.143	0.095	51	8.41
	指数曲线	0.010	0.050	-0.090	0.114	51	3.75
板 2	Gompertz	-0.017	0.078	-0.257	0.116	51	3.67
	双曲线	-0.005	0.090	-0.176	0.106	51	7.57
	指数曲线	-0.006	0.071	-0.223	0.096	51	3.95
板 3	Gompertz	-0.019	0.090	-0.284	0.129	51	2.57
	双曲线	-0.001	0.077	-0.131	0.103	51	6.83
	指数曲线	-0.051	0.118	-0.395	0.050	51	4.24

由表 2 和图 5 可知，Gompertz 成长曲线沉降分析模型与真空预压软土沉降实测数据拟合后部分较好，前部分较差。查阅相关施工日志，发现 2005 年 7 月 16~29 日期间停止抽真空，即抽真空开始后第 20~33 天没有抽真空，后面基本上连续抽真空。因此，抽真空的不连续性是引起 Gompertz 成长曲线模型拟合值与实测值误差较大的原因，同时也说明非连续时间变化的变量采用 Gompertz 成长曲线模型分析是不合适的。对于后 10 个数据的比较，相对误差均在 5% 以内，拟合质量是可靠的。因此，Gompertz 成长曲线沉降分析模型的变化趋势与实测值是统一的，还是能基本反映真空预压软土表面

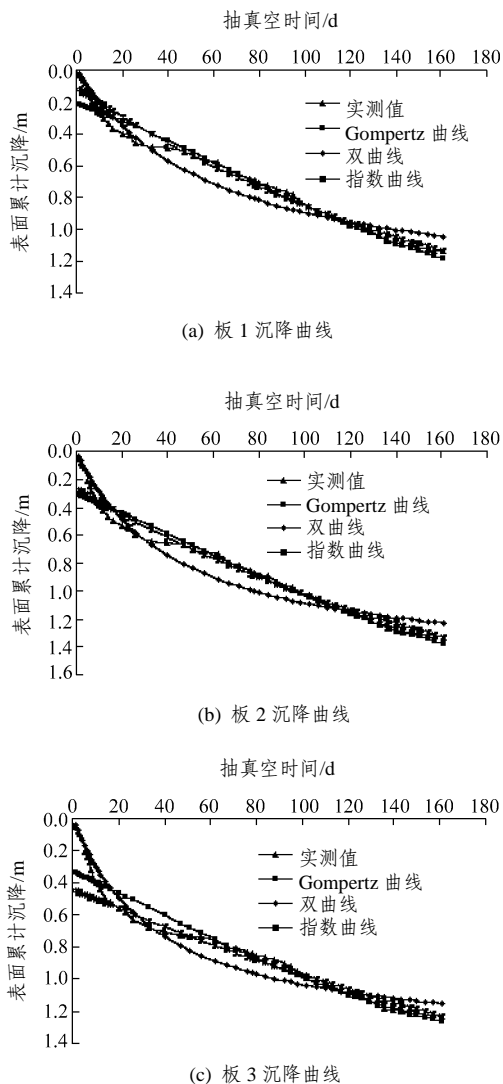


图 5 真空预压试验段表面沉降实测曲线与 Gompertz 成长拟合曲线比较

Fig.5 Comparison of measured curve and fitting curve on soft soil settlement treated by vacuum preloading method in test section of expansion project of Wanhuanxi Road

累计沉降随时间的变化规律及发展趋势。

由图 5 和表 2 中 Gompertz 模型与双曲线模型、指数曲线模型比较可知，Gompertz 模型和指数曲线模型拟合值与实测沉降数据吻合较好，而双曲线模型较差；实测值与拟合值的后 10 点相对误差比较中，Gompertz 模型较指数曲线模型优。

比较实例一和实例二可知，针对不同的真空预压软土表面沉降数据，Gompertz 成长曲线沉降分析模型均可得到比较好的拟合效果，不但形式上与实测曲线相吻合，而且在末端与实测值很靠近。由此可见，真空预压作用下导致的软土沉降变化规律与 Gompertz 成长曲线变化规律相似，可利用 Gompertz

成长曲线沉降分析模型对其进行拟合和分析, Gompertz 成长曲线模型提供了预测后续沉降的一种新方法。

5 结 语

本文依据真空预压软土沉降变形规律, 引入 Gompertz 成长曲线模型, 对多组真空预压软土表面实测沉降资料进行拟合和分析, 并与工程实践中常用的双曲线模型和指数曲线模型进行比较, 得到如下 4 点结论:

(1) Gompertz 成长曲线模型可较好地拟合真空预压软土的表面沉降实测数据, 并能反映沉降发展变化趋势, 进而作出预测, 计算工后沉降, 确定卸荷时间。

(2) 与双曲线模型和指数曲线模型比较, Gompertz 成长曲线模型适应性较好, 趋势预测准确性高。

(3) 软土地基沉降预测是一个极其复杂的问题, 各种预测模型都有其局限性, 应采用多种模型进行预测, 从中选出最优模型。

(4) 运用 Gompertz 成长曲线模型分析真空预压软土沉降时, 应注意抽真空的连续性、实测时间序列数据能等分成 3 组及保证实测沉降数据已进入弹性阶段等问题。

参考文献(References):

- [1] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137 - 141.(Chen Xiaoping, Huang Guoyi, Liang Zhisong. Study on soft soil properties of Pearl River Delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 137 - 141.(in Chinese))
- [2] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理与托换技术(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.(Ye Shulin, Ye Guanbao. Ground Treatment and Underpinning Technology(Third Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.(in Chinese))
- [3] 龚晓南. 地基处理技术发展及展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.(Gong Xiaonan. Development and Prospects of Ground Treatment Technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.(in Chinese))
- [4] 董志良, 胡利文, 张功新. 真空及真空联合堆载预压法加固软基的机制与理论研究[J]. 水运工程, 2005, (9): 83 - 91.(Dong Zhiliang, Hu Liwen, Zhang Gongxin. Mechanism and theoretical research on vacuum and vacuum-load consolidation of soft ground[J]. Port and Waterway Engineering, 2005, (9): 83 - 91.(in Chinese))
- [5] 曾令浓. 高速公路真空预压加固机制及沉降计算研究[J]. 大众科技, 2005, (9): 108 - 109.(Zeng Lingong. Research on consolidation mechanism and settlement calculation of vacuum preloading of the expressway[J]. Popular Science News, 2005, (9): 108 - 109.(in Chinese))
- [6] 李 军, 臧少慧. 南沙地区真空预压法加固软土地基效果分析[J]. 水运工程, 2005, (9): 101 - 105.(Li Jun, Zang Shaohui. Effect analysis of soft ground consolidation using vacuum preloading method in Nansha region[J]. Port and Waterway Engineering, 2005, (9): 101 - 105.(in Chinese))
- [7] 焦淑贤. 真空预压法在广州南沙港区特殊地基上的应用[J]. 水运工程, 2003, (10): 55 - 58.(Jiao Shuxian. Application of vacuum pre-loading method on special groundwork in Nansha port area of Guangzhou Port[J]. Port and Waterway Engineering, 2003, (10): 55 - 58.(in Chinese))
- [8] 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. Soft Soil Consolidation Technology Using Vacuum Drainage Preloading Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.(in Chinese))
- [9] 赵明华, 吴建宁, 陈昌富, 等. 基于 Gompertz 生长曲线的高填石路堤沉降规律分析[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2): 115 - 118.(Zhao Minghua, Wu Jianning, Chen Changfu, et al. Analysis of high rockfill embankment settlement on the basis of Gompertz Growth Curve[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(2): 115 - 118.(in Chinese))
- [10] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 322 - 325.(Zai Jinmin, Mei Guoxiong. Forecast method of settlement during complete process of construction and operation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 322 - 325.(in Chinese))
- [11] 赵明华, 杨明辉, 刘 煜, 等. 软土路基固结沉降机制及其预测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 16 - 20.(Zhao Minghua, Yang Minghui, Liu Yu, et al. Study on the developing and forecasting of the settlement in soft clay roadbed[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(4): 16 - 20.(in Chinese))
- [12] 李一智. 经济预测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.(Li Yizhi. Technology of Economic Forecast[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.(in Chinese))
- [13] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.(Chen Xize. Soil Mechanics and Ground Foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范(JTJ017 - 96)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Specification for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground(JTJ017 - 96)[S]. Beijing: China Communications Press, 1997.(in Chinese))