

文章编号: 1007-2993(2021)05-0299-07

# 袋装砂井在公路软基处理中的应用与分析

何陆灏 刘红军 刘克伦 何程铃 雷世旺

(五邑大学土木与建筑学院, 广东江门 529020)

**【摘要】** 以广东佛山某公路工程为依托, 依据现场监测数据, 分析了采用袋装砂井堆载预压法的软基段从堆载至恒载过程中, 地表沉降、分层沉降、深层侧向位移和孔隙水压力的变化规律, 并结合推算的工后沉降来评价该方法的处理效果。结果表明: 在堆载至第 210 d 时, 地表最大沉降量为 291 mm, 且地表最大沉降速率为 8.67 mm/d, 小于规范所限定的 10 mm/d; 软土分层沉降主要发生在深度 2~6 m 范围内的土层; 而软土侧向水平位移主要发生在深度 6 m 以上的土层中, 占到总位移量的约 95%; 在整个填土预压过程中综合孔压系数  $B$  最大值为 0.371, 小于规范限定的 0.4; 使用双曲线法对软土路基进行最终沉降及工后沉降推算, 其工后沉降控制在 34~64 mm 之间, 小于规范限定的 200 mm。研究成果可为本区域公路软土地基的设计和施工提供依据。

**【关键词】** 袋装砂井; 公路软基处理效果; 地表沉降; 分层沉降; 深层侧向位移; 孔隙水压力

**【中图分类号】** U 416.1

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application and Analysis of Bagged Sand Well in Soft Soil Foundation Treatment of Highway

He Luhao Liu Hongjun Liu Kelun He Chengling Lei Shiwang

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, China)

**【Abstract】** Based on a highway project in Foshan, Guangdong Province, the in-situ monitoring data with bagged sand well surcharge precompression method were acquired from heap load to dead load, and the variation of surface settlement, stratified settlement, deep lateral displacement and pore water pressure in the soft foundation section were analyzed. The treatment effect of this method combined with the calculated post-construction settlement was also evaluated. The results show that the maximum settlement of the surface is 291 mm when the soft foundation loaded by 210 days, and the maximum settlement rate of the surface is 8.67 mm/d, which is less than the 10 mm/d limited by the standard. The stratified settlement of soft soil mainly occurs in the soil layer with a depth of 2~6 m, and the lateral horizontal displacement of the soft soil mainly occurs in the soil layer with a depth of more than 6 m, accounting for about 95% of the total displacement. In the whole process of filling preloading, the maximum comprehensive pore pressure coefficient  $B$  is 0.371, which is smaller than the 0.4 limited by the standard. The final settlement and post-construction settlement of soft soil subgrade are calculated by hyperbolic method. The post-construction settlement is controlled between 34~64 mm, which is less than the 200 mm limited by the standard. The research results can provide the basis for the design and construction of highway soft soil foundation in this area.

**【Key words】** bagged sand well; treatment effect of highway soft foundation; ground surface settlement; layered settlement; deep lateral displacement; pore water pressure

### 0 引言

软土具有天然含水率大、渗透性差、压缩性高和抗剪强度低等缺点<sup>[1]</sup>, 因此在荷载作用下, 常出现土体不易排出孔隙水、土体易发生过大沉降变形和土

体易发生剪切破坏等状况。若工程中未采取妥当的措施, 将会诱发路基产生不均匀沉降、引发路基失稳破坏等降低公路使用寿命的情况。目前排水固结法<sup>[2]</sup>因具有经济和环保等优点, 在软基处理中得到了广泛

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目(2011-k5-36)

作者简介: 何陆灏, 男, 1995 年生, 汉族, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事道路与桥梁工程设计。E-mail: 289114109@qq.com

通讯作者: 刘红军, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为岩土工程与道路工程。E-mail: liuhongjun\_0821@163.com

应用。排水固结法主要有两种方式:堆载预压法<sup>[3]</sup>和真空预压法<sup>[4]</sup>,排水体主要采用袋装砂井<sup>[5]</sup>和塑料排水板<sup>[6]</sup>。本文主要研究堆载预压法,该法是通过袋装砂井作为竖向排水通道,在外荷载作用下使土体中的孔隙水通过袋装砂井及砂垫层排出,进而加快土体固结,达到加固地基的效果。

研究以佛山市高明大桥至富龙大桥公路工程为依托,选取采用袋装砂井堆载预压法处理软基的3个断面进行重点监测,主要监测项目有地表沉降、土体分层沉降、土体深层侧向位移、孔隙水压力等,通过对监测数据进行总结分析、归纳变化规律和推算工后沉降等方法来评价软基处理的效果。

## 1 工程概况及地质情况

### 1.1 工程概况

佛山市高明大桥至富龙大桥公路工程(第II合同段),即杨西大道北延线,路线长度9.02 km,桩号范围K27+780—K36+800。按照近期双向6车道+硬路肩、远期改造为主线双向6车道+辅路双向4车道断面布置,采用一级公路标准兼顾城市道路功能,主路设计速度80 km/h,辅路设计速度40 km/h。

### 1.2 地质情况

沿线地貌单元以冲淤积平原及剥蚀残丘为主,地表大多为农林耕地、鱼塘,局部水体较发育。研究区域为冲淤积平原,是珠江三角洲西岸平原地区,主要分布里程为沿线K27+800—K30+150、K31+450—K31+750、K32+000—K33+650、K33+900—K37+150。属第四系沉积第一阶地,地形大多较平坦,周围水系较发育。地面高程一般为3.0~11.0 m,上覆土层主要为第四系冲积、冲洪积相的黏性土、砂土等,厚度变化较大,局部鱼塘、河流、沟渠等低洼地段发育软土及饱和液化土等特殊土。根据勘察结果,沿线土层主要由人工填土(Q<sub>4</sub><sup>ml</sup>)、第四系全新统河流相冲积层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、第四系残积层(Q<sub>3</sub><sup>el</sup>)等组成。人工填土层(Q<sub>4</sub><sup>ml</sup>)为现有道路及其两侧填土;第四系全新统河流相冲积层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)以软弱—中软的粉质黏土、淤泥(淤泥质土)及透镜状粉砂等为主,局部厚度变化较大,空间相变较多;第四系残积层(Q<sub>3</sub><sup>el</sup>)由泥岩、粉砂质泥岩及砂岩等风化残积而成,局部厚度较大。在三个重点监测断面K35+000、K35+200和K35+400采集原状软土进行基本物理力学性质测试,测试结果见表1。

表1 软土层的基本物理力学性质表

断面桩号	含水率/%	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
K35+000	72.2	1.58	1.987	42.6	27.9	14.7	2.38	1.829	1.74	3.3	3.1
K35+200	70.4	1.65	1.954	41.4	26.4	13.8	1.99	1.944	2.21	4.5	3.9
K35+400	69.8	1.62	1.921	40.3	25.8	12.9	2.15	1.874	2.39	4.1	2.9

## 2 软基监测内容

### 2.1 监测仪器的布设

监测点布设的位置如图1所示,监测内容及方法有:

(1)地基沉降监测:分别在路堤的左中右处各埋设1个沉降板。采用几何水准测量法进行监测,随着路堤填高逐节加高沉降板测杆和保护套管,每节接管高度为50 cm,接测杆前后分别测量标高,以确定本期沉降量和下次测量前的初始标高。

(2)分层沉降监测:在路堤中心处布设1个观测点。采用磁环式沉降仪法<sup>[7]</sup>进行监测,在土体中垂直埋设竖管,在竖管上按一定间距埋设磁环,磁环与土体同步沉降,利用电磁测头测出磁环的初始位置和沉降后位置,二者之差即土层的分层沉降量。

(3)深层侧向位移监测<sup>[8]</sup>:在路堤两侧路肩处各布设2个观测点。采用滑动式测斜仪,将测斜探头慢慢放入孔内,依据探头轴线与铅垂线之间夹角的变

化,测出不同深度土层的水平变化量。

(4)孔隙水压力监测<sup>[9]</sup>:在路堤中心处布设1个观测点。将振弦式孔隙水压力布设于监测孔内,当被测水压荷载作用在孔隙水压力计上,将引起弹性膜板的变形,其变形带动振弦转变成振弦应力的变化,从而改变振弦的振动频率。此时只需接上频率测度仪即可读取当前频率,通过计算可得孔隙水压力值。

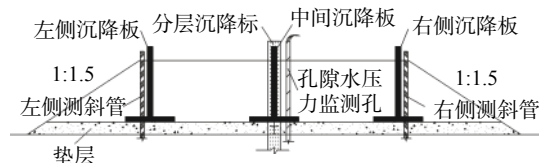


图1 监测仪器布置图

### 2.2 监测断面的选取

选取3个典型断面,处理方式均采用袋装砂井堆载预压,按正三角形布置,排水体直径50 cm,排水体顶面设置60 cm垫层,并铺设一层土工格栅;软土

层厚、路基填高与处理深度如表 2 所示; 现场情况如图 2 所示。

表 2 各断面处理情况

断面里程	软土层厚/m	路基填高/m	处理深度/m
K35+000	8.54	1.68	13.4
K35+200	8.24	1.59	12.6
K35+400	7.97	1.55	11.8



图 2 模型箱效果及现场实物图

### 3 软基监测结果

#### 3.1 地基沉降分析

地表沉降是软基沉降分析的基础, 其变化规律是控制公路路堤施工进度和安排后期施工的最重要的目标, 也是理论研究结果是否正确的最直接检验标准和加固效果的最直接反映。本工程段在采用薄层轮加法<sup>[10]</sup>进行填土施工时, 每层填土恒定为 40 cm 左右。在进行软基监测中, 每填筑一层观测一次, 若两次填筑间隔时间较长情况, 则每 3~4 d 观测一次。路堤填筑完毕后, 每 5 d 观测一次, 直至预压期完成。K35+000、K35+200 和 K35+400 断面的累计沉降时程曲线如图 3—图 5 所示。

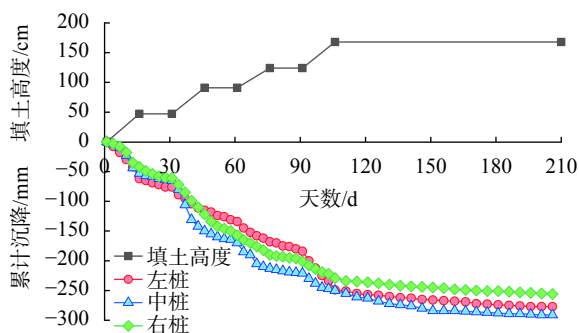


图 3 K35+000 沉降时程图

通过对上述曲线进行分析, 可得出以下结论:

(1) 地基的沉降与路基的填筑高度密切相关。总沉降量随着填筑高度的增加而相应地增加, 且均表现出一定的规律性。具体表现为: 在填筑堆载期间, 由于机械施工与堆载填土堆积等因素, 沉降曲线普遍出

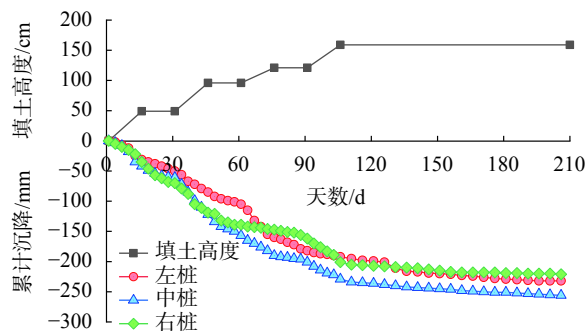


图 4 K35+200 沉降时程图

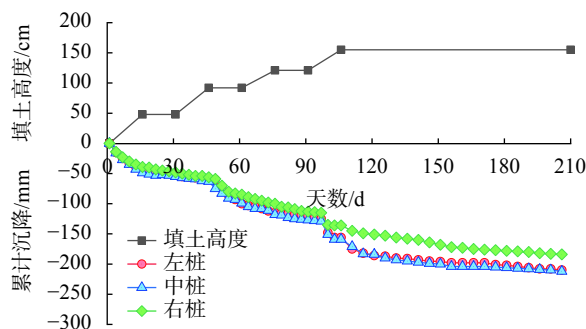


图 5 K35+400 沉降时程图

现明显下沉现象, 且变化较陡; 在恒载期间, 随着地基排水固结时间增长, 沉降变化较缓, 到后期渐趋平缓。另外, 在堆载至第 210 d 时, 3 个断面的各桩沉降量均超过 200 mm, 最大沉降量发生在 K35+000 段, 为 291 mm。

(2) 对比左中右三个沉降板的沉降过程, 可发现中间沉降板的沉降量一般都大于左右两侧的沉降板, 这符合附加应力的分布原理, 即在地面下同一深度的水平面上的附加应力不同, 沿力的作用线上的附加应力最大, 向两边则逐渐减小。

#### 3.2 地基沉降速率分析

沉降速率能直观地反映加载过程中路基沉降的快慢, 是控制路堤填土速度的重要指标之一。在施工期间同步进行沉降和稳定的跟踪观测, 严格控制填土速率, 控制标准为路堤中心沉降速率小于 10 mm/d。根据监测数据, 选取 3 处断面中沉降量最大的沉降板进行沉降速率分析, 沉降速率如图 6 所示。

通过对图 6 沉降速率曲线进行分析, 可得出以下结论:

(1) 施工填土采用“薄层轮加法”进行, 监测结果显示沉降速率均未超过 10 mm/d, 且现场均未出现整体滑移破坏情况。实践证明, 该方法增加了路堤施工的稳定性和科学性, 是一种经济适用、合理的科学施工方法。

(2) K35+000、K35+200 和 K35+400 断面的最大日沉降速率分别为 8.67 mm/d、5.67 mm/d 和 7.33

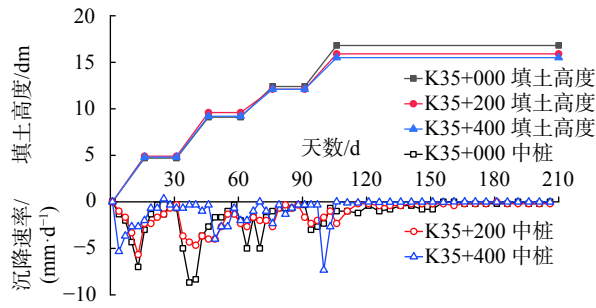


图6 沉降速率曲线图

mm/d,且均出现加载期。这说明沉降速率随着每级加载都有一个迅速增加过程,随后逐渐变缓收敛;在恒载后期,沉降速率逐渐趋于稳定。整个过程中曲线变化十分缓慢,直到曲线趋于水平,即沉降速率趋于0,这才表明整个路堤断面的沉降过程基本完成;同时也说明了袋装砂井发挥了良好的排水固结的作用,因此在施工过程中,严格控制堆载期的分级堆载大小与堆载速率有利于提高软土地基固结度,从而更好地控制路基沉降。

3.3 分层沉降分析

在袋装砂井堆载预压施工过程中,常依据分层沉降来判断各磁环土层之间的压缩量和分析压缩土层的范围。本项目每个观测点埋设4个磁环(编号:磁环1—磁环4),分别按照2m的间距由上往下埋设在淤泥层内,分层沉降监测成果如图7—图9所示,对监测成果图进行分析,如表3所示。

对图7—图9及表3进行分析,可得出以下结论:

(1)不同深度的淤泥层,其沉降变化具有一定的

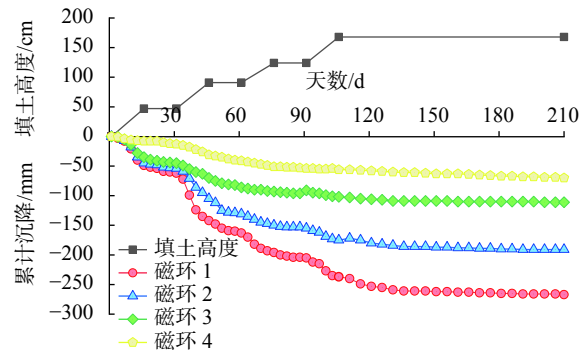


图7 K35+000 分层沉降时程图

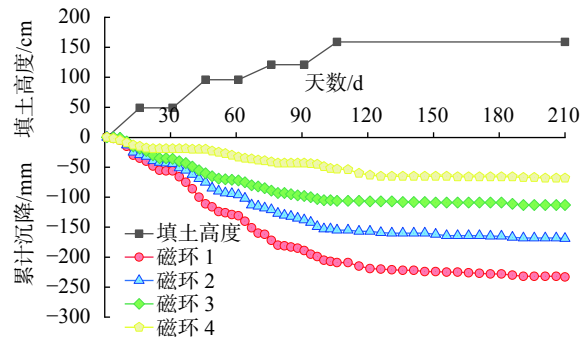


图8 K35+200 分层沉降时程图

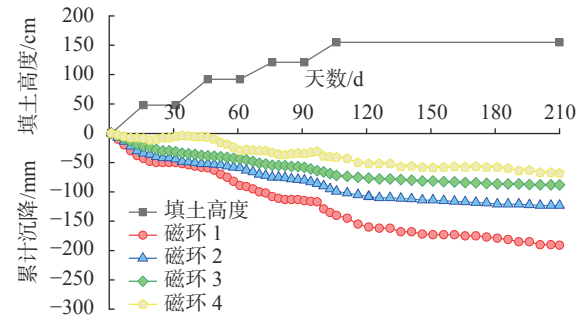


图9 K35+400 分层沉降时程图

表3 分层沉降分析表

断面里程	磁环编号	地表总沉降/mm	初始磁环距离/m	磁环下沉量/mm	磁环间压缩量/mm	磁环间单位压缩量/(mm·m <sup>-1</sup> )	占总压缩量比例/%
K35+000	①	291	2.0	267	24	12	8.2
	②		4.0	191	76	38	26.1
	③		6.0	111	80	40	27.5
	④		8.0	70	41	20.5	14
K35+200	①	256	2.0	233	23	11.5	8.9
	②		4.0	169	64	32	25
	③		6.0	113	56	28	21.8
	④		8.0	68	45	22.5	17.5
K35+400	①	213	2.0	191	22	11	10.3
	②		4.0	123	68	34	31.9
	③		6.0	88	35	17.5	16.4
	④		8.0	68	20	10	9.3

规律,具体表现在:堆载后,不同深度的沉降测点都发生了沉降;且监测磁环越接近地表,沉降量越大,监测磁环埋深越深,沉降量越小,即上部土层沉降量变化曲线均位于下部土层沉降量曲线的下方。其中K35+000、K35+200和K35+400断面的磁环①累计沉降分别为267 mm、233 mm和191 mm。其之间的差异是由于填土高度不同、软土层厚不同以及实际施工状态不同所引起,但总体差别不大。

(2)分层沉降磁环变化曲线图(见图7—图9)与地表沉降量曲线图(见图3—图5)的变化趋势相同,都是在堆载施工期间沉降较大,曲线变化较陡;在恒载期间沉降减缓,并显示沉降呈收敛状态。而且埋深越大的磁环,曲线收敛得越快。这也符合附加应力的分布原理,即在荷载分布范围内任意点沿垂线的地基附加应力随深度愈向下愈小。

(3)磁环间单位压缩量主要出现在“磁环①至磁环②”和“磁环②至磁环③”之间,即压缩量主要发生在深度2~6 m间的土层。而且地表以下至深度6 m范围内的压缩量占总压缩量约为70%,因此,从分层沉降的监测结果来看,埋深2~6 m范围内属于地基处理显著影响区域。

### 3.4 深层侧向位移分析

深层侧向位移能够反映不同深度土层的侧向变形情况,是判断控制填土速率、地基稳定状态的重要指标。若填土速率过快,则土体最大侧向位移迅速增大,曲线斜率增大;若在填土高度超过极限填土高度后,土体将从弹性变形阶段进入塑性变形阶段,侧向位移也会明显增加,曲线斜率变大,出现向上拐点。上述两种情况均说明路基有失稳的风险,此时应采取停载、卸载等措施。

所研究的断面均在路堤左右两侧布设监测点,监测频率为1次/5 d。由于篇幅有限,本文仅列举左幅监测数据进行分析,堆载期取15 d为一周期,恒载期取30 d为一周期,并根据监测结果绘制深层侧向位移曲线图(见图10—图12)。

通过对图10—图12深层侧向位移曲线分析,可得出以下结论:

(1)侧向水平位移值随深度逐渐减小,这符合附加应力的分布规律,即在荷载分布范围内任意点沿垂线的地基附加应力随深度愈向下愈小。各断面最终最大水平位移出现在深度0.5 m处,其数值分别76.58 mm、71.82 mm和62.50 mm;另外,水平位移主要发生在深度6 m以上的土层中,占到总位移量的约95%。

(2)在加载初期,土体位移量较大,位移速率较快;随着堆载的完成,位移速率快速减小。在填筑期间,各测点最大位移速率分别为4.62 mm/d、4.26 mm/d、3.99 mm/d,均未超过设计允许值5 mm/d。这也说明采用薄层轮加法进行填土施工,土体水平位移相对较

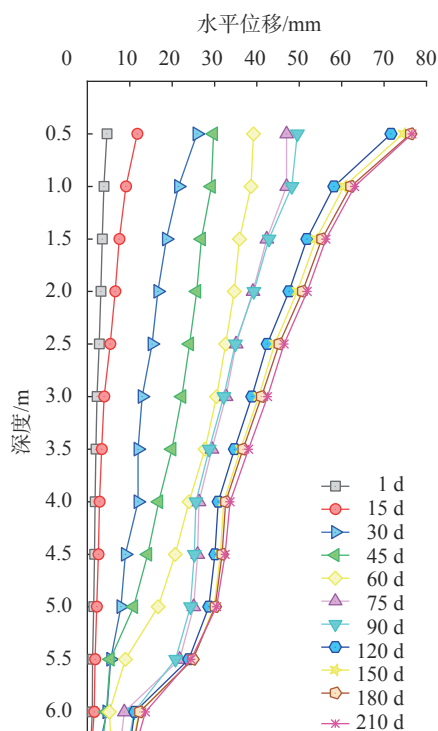


图10 K35+000 深层侧向位移图

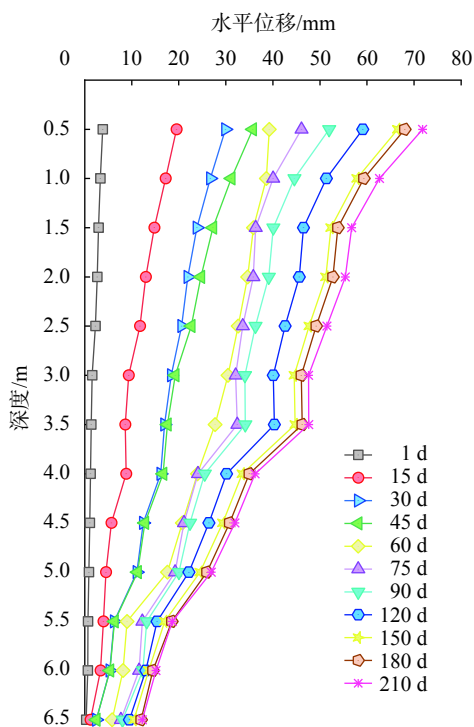


图11 K35+200 深层侧向位移图

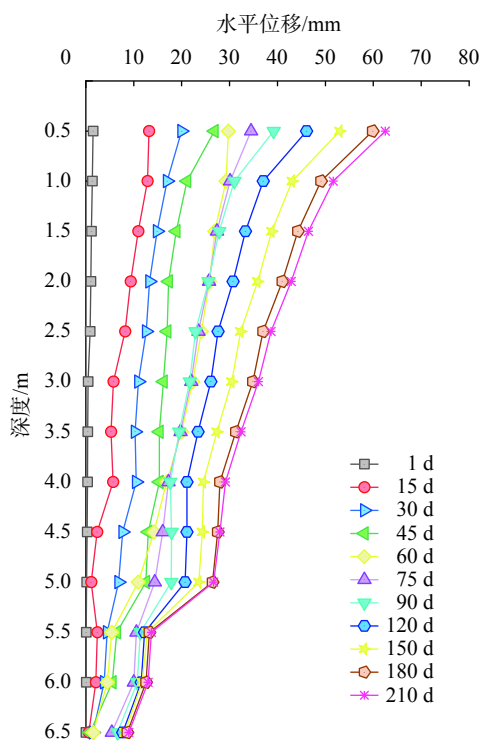


图 12 K35+400 深层侧向位移图

小,且未出现明显滑移现象,表明路堤处于稳定状态。

### 3.5 孔隙水压力分析

土体内孔隙水压力是反映土体固结程度的一个重要指标。通过在不同深度埋设孔隙水压力计对地基土孔隙水压力变化过程进行监控,从而判断地基土体是否处于稳定状态和判断地基强度的增长情况,以便有效指导路基填筑施工。在3处所监测断面路中沿地基不同深度埋设了4个孔隙水压力计,位置分别在地面以下2 m、4 m、6 m和8 m处。监测频率为1次/4 d(堆载期)、1次/6 d(恒载期)。堆载预压过程中监测到的孔隙水压力变化情况如图13—图15所示。

通过对图13—图15孔隙水压力变化曲线分析,可得出以下结论:

(1)从上一次加载到下一次加载的过程中,孔隙

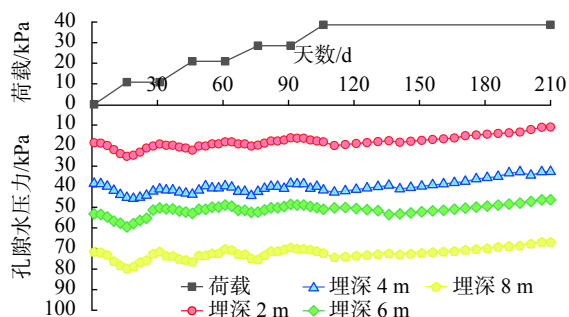


图 13 K35+000 孔隙水压力变化曲线图

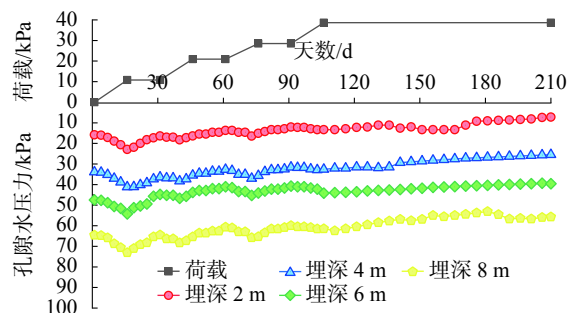


图 14 K35+200 孔隙水压力变化曲线图

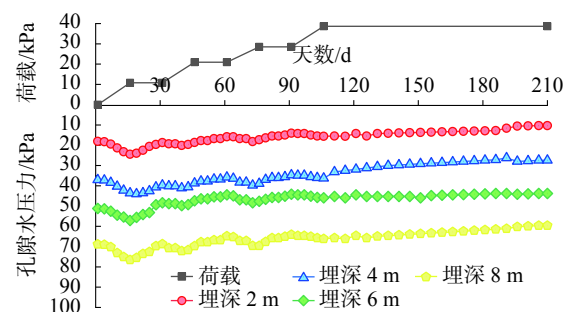


图 15 K35+400 孔隙水压力变化曲线图

水压力值都经历了增长→消散→增长→消散的过程,这说明附加总应力不断地在向有效应力转化,即在分级加载时,土体内孔隙水压力增大;停载一段时间后,超静孔隙水压力消散,测得的孔隙水压力在减小和回落;在恒载过程中,孔隙水压力随着时间的推移也在慢慢消散。此现象较好地反映土体中孔隙水压力随上部荷载变化而消散的规律。

(2)对不同深度孔隙水压力计监测结果进行分析,整个填土预压过程中综合孔压系数(即孔隙水压力增量和荷载增量之比)最大值为0.371,满足填土速率控制中要求综合孔压系数 $B$ 小于0.4的要求。

(3)随着固结时间的增长,孔隙水压力呈现迅速现象,且越接近排水面的孔隙水压力计,其变化越明显。这说明超孔隙水压力变化敏感度跟排水有关系,即越接近排水面变化越迅速,越远离排水面则越缓慢。

## 4 路基最终沉降量与工后沉降的推算与分析

目前,通过实测数据来预测沉降曲线拟合的方法有:双曲线法<sup>[11]</sup>、指数曲线法<sup>[12]</sup>、沉降速率法<sup>[13]</sup>、三点法<sup>[14]</sup>、泊松法<sup>[15]</sup>等。在这几种常用的方法中,双曲线法推算的工后沉降偏于保守,这在工程实际中比较有利,因而工程中常用双曲线法。在分析实测沉降数据发现,沉降量与时间有良好的双曲线关系,所以本工程采用双曲线法来推算最终沉降量以及工后沉降。

根据地表沉降观测的结果,按双曲线图解法来推算地表最终沉降量及工后沉降量,按照规范要求,

选取中桩作为推算对象。根据双曲线基本公式, 确定沉降量推算的基本步骤为: ①确定起点时间  $t_0$ , 本文取路基填方施工最后一级荷载加载后为起点时间; ②根据实测沉降数据绘制  $\Delta t-\Delta t/\Delta s$  曲线, 确定系

数  $\alpha$  与  $\beta$ ; ③计算  $s_{\infty}$ ; ④计算  $s_t, s_t$  取设计使用年限 15 年; ⑤根据公式进行拟合对比。经双曲线推算最终沉降及工后沉降如表 4 所示; 拟合曲线如图 10 所示。

表 4 双曲线法推算最终沉降量及工后沉降量

监测断面	堆载时间/d	实测沉降量/mm	推算结果				
			$\alpha$	$\beta$	$s_{\infty}/\text{mm}$	$s_{\text{工后}}/\text{mm}$	相关系数 $R^2$
K35+000	210	291	1.0000	0.0173	355.429	64.429	0.941
K35+200	210	256	1.0000	0.0288	290.714	34.714	0.902
K35+400	210	212	0.4167	0.0156	276.053	64.053	0.932

通过对表 4 与图 16 进行分析, 可得出以下结论:

(1) 根据双曲线计算结果, 可发现上述 3 处断面的工后沉降分别为 64.429 mm、34.714 mm 和 64.053 mm, 且均小于规范限定的 200 mm<sup>[10]</sup>。这表明: 在低路堤填筑中, 袋装砂井堆载预压法对于公路工程软土路基处理是可行和有效的。

(2) 上述推算的最终沉降量指在当前荷载下发生的, 可能与路面施工后的实际工后沉降相比并非绝对准确, 由于地质条件的复杂性、多变性、随机性, 例如观测工程沉降板受损破坏、造成数据间断都会给沉降推算结果带来一定的误差, 但从宏观上却能表明沉降量的相对大小及其发展趋势。如果要求实测数据精度较高, 则需要较长的预压时间, 对预压时间超过 6 个月的沉降计算结果较为理想。

(3) 采用双曲线法对 3 处断面进行工后沉降的推算, 其曲线拟和的相关系数  $R^2$  均大于 0.90, 这说明采用双曲线推算的结果与实测数据的关联度较大, 可信度较高。

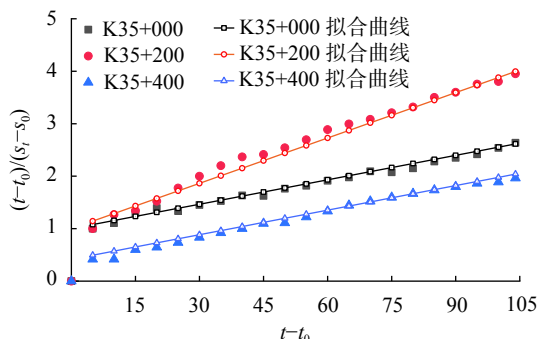


图 16 拟合曲线图

## 5 结论

以广东佛山某公路工程为例, 选取 3 处采用袋装砂井堆载预压法的断面进行研究, 得出以下结论:

(1) 在相接近的软土层厚度、处理深度与填土高

度下, 采用袋装砂井堆载预压法处理的地基, 地基的总沉降量随着填筑高度的增加而增加。且在分级加载期间, 沉降曲线斜率较陡; 但加载完毕后, 沉降曲线逐渐趋于平缓, 说明地基的沉降量是有限的, 符合地基的压缩沉降规律。

(2) 沉降速率较大值多发生在堆载期, 最大值为 8.67 mm/d, 小于规范限定的日沉降速率 10 mm/d; 而在恒载预压期间, 沉降速率明显减缓, 这说明了袋装砂井发挥了良好的排水固结的作用, 使得软土地基固结度提高。

(3) 所研究断面在深度 2~6 m 范围内的软土属于地基处理影响显著的区域(该范围内软土的压缩量占总压缩量约为 70%)。另外监测磁环越接近地表, 沉降量越大, 监测磁环埋深越深, 沉降量越小, 且分层沉降磁环变化趋势与地表沉降的变化趋势相同。

(4) 软土侧向水平位移主要发生在深度 6 m 以上的土层中, 占到总位移量的约 95%。另外, 在加载初期, 土体侧向水平位移量较大, 位移速率较快; 随着堆载的完成, 位移速率快速减小。因严格控制加载速率, 在进行填土施工未出现明显滑移现象, 表明路堤处于稳定状态。

(5) 对不同深度孔隙水压力计监测结果进行分析, 整个填土预压过程中综合孔压系数  $B$  最大值为 0.371, 小于规范限定的 0.4。另外, 从上一次加载到下一次加载的过程中, 孔隙水压力值都经历了增长→消散→增长→消散的过程, 这说明在分级加载时, 土体内孔隙水压力增大; 停载一段时间后, 超静孔隙水压力消散, 孔隙水压力在减小和回落; 在恒载过程中, 孔隙水压力随着时间的推移也在慢慢的消散。随着固结时间的增长, 孔隙水压力呈现迅减现象, 且越接近排水面越明显。

(下转第 311 页)