

文章编号: 1000-7598-(2002) 05-0661-06

软土路基真空联合堆载预压位移监测与分析

童 中¹, 汪建斌²

(1. 广州市政工程监理有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广东省航务工程总公司岩土公司, 广东 广州 510230)

摘 要: 详细介绍了广肇高速公路 K54+350~K54+560 段软弱路基的工程地质特征及真空联合堆载预压位移监测布设。通过对监测沉降数据以及测斜数据的分析, 认为真空联合堆载预压法处理本段软弱路基是成功的, 在类似工程中应用是可行的。

关 键 词: 软弱路基, 真空联合堆载预压; 监测

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A

Monitoring and analysis of displacements of soft soil embankment with jointed vacuum-preloading treatment

TONG Zhong¹, WANG Jian-bin²

(1. Guangzhou Municipal Supervising Company, Guangzhou 510060, China;

2. Guangdong Navigational General Company, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The monitoring design has been discussed in detail about soft soil embankment (segment K54+350~K54+560 , Guang-Zhao expressway) which is treated by jointed vacuum-preloading method . The rich inspection results have been obtained. Through analyzing the obtained data, it is shown that the jointed vacuum-preloading treatment method is successful; and it can be adopted in the similar engineering cases.

Key words: soft soil embankment; jointed vacuum-preloading treatment; monitoring

1 前 言

广肇高速公路沿线分布有大量的软土地基, 该路段软土不仅有高含水量、大孔隙比、低强度、小渗透性的共性, 还具有高有机质含量, 纵横向不均匀分布的特性, 其有机质含量远高于规范的规定值。广肇高速公路软土的性质决定了该路段软基在施工期路堤的稳定及工后的沉降控制的难度。为确保广肇高速公路建设的安全和质量, 经交通厅、业主及设计单位同意, 决定部分路段采用更先进、更有效的工艺——真空联合堆载预压法进行加固。

真空联合堆载预压法是在真空预压的基础上辅以常规的堆载预压, 是两种加固手段的叠加。K54+350~K54+560 路段软基处理总长 210 m, 宽 34~48 m, 填土高度为 5~8 m, 真空预压共 9 200 m²。

2 工程地质条件

根据原位测试及钻探资料, 勘探深度内土层自上而下分为 3 层: ①人工填土, 厚度约 2.0~3.2 m, 由路基工作垫层和砂垫层组成, 局部为耕植土。②淤泥层, 呈褐灰、深灰或黑色, 流塑, 局部为淤泥质亚粘土或泥炭土, 普遍含腐殖质, 并含大量腐植木屑或木条。本层全场分布, 层顶埋深 2.0~3.2 m, 层厚 8~11 m 左右, 力学强度低, 孔隙比大, 含水量高, 压缩性高; 尤其是其有机质含量高达 10%~30%, 为真空预压处理的主要软土层。③砂质粘性土, 呈灰白色, 可塑, 含大量石英颗粒, 粘着感强, 全场分布。以上各层, 其空间展布情况见图 1 (K54+450 断面工程地质剖面图); 淤泥层的空间展布及厚度变化见图 2; 其力学指标参见表 1。场区内袋装砂井打设 13.0 m 深, 各区域基本穿过淤泥层。

表 1 淤泥物理力学性质指标表
Table 1 Mechanical properties of silt

项目	含水量 $w/\%$	湿密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩模量 E_{s1-2}/MP	比贯阻力 P_s/MP	十字板 C/kP
最小值	121.6	1.23	3.065	1.60	0.7	0.040	3.78
最大值	203.0	1.39	4.913	2.95	1.0	0.983	6.46
平均值	157.0	1.31	3.899	2.23	0.9	0.332	5.26
数据个数	7	7	7	7	7	332	4

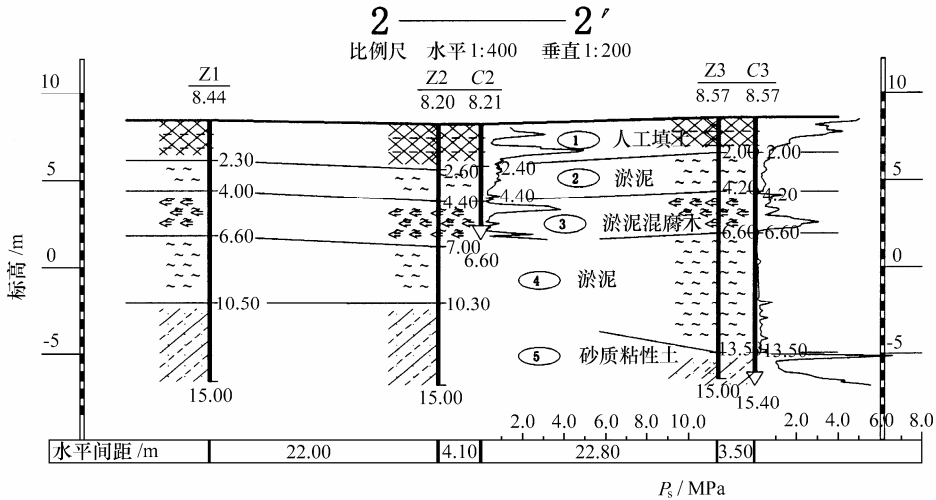


图 1 K54+450 断面工程地质剖面图
Fig. 1 Engineering geological profile of K54+450

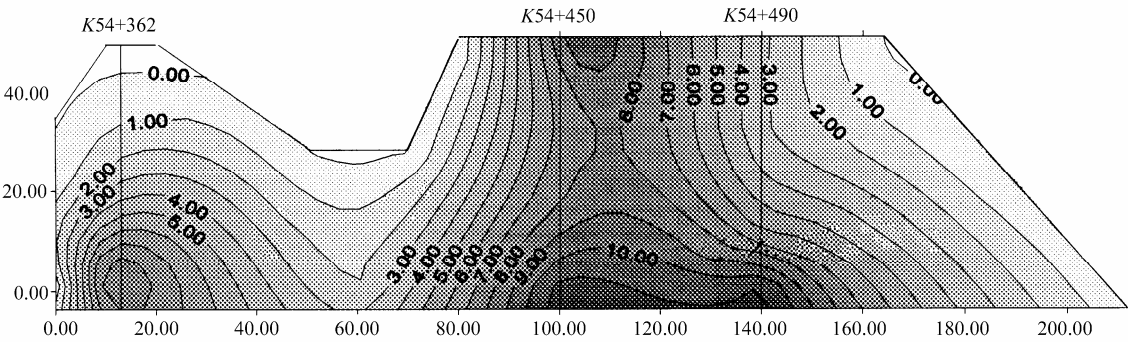


图 2 K54+360~K54+560 淤泥层厚度等值线
Fig.2 Contours of depths of silt layers in segment K54+360—K54+560

从等值线图和 K54+450 剖面图可以看出该场地的淤泥层分布具有如下特点：

(1) 受地形地貌控制。全场淤泥层厚分布极不均匀，周围有 3 个鱼塘，受局部沉积影响，在临近鱼塘的 K54+450~K54+490 一线右侧有大片深厚淤泥呈灯泡体分布，此外在 K54+450 左侧以及 K54+362 断面的右侧也分布有较厚淤泥层。全场在纵向和横向上都有挖方区域，在挖方区没有淤泥分布。根据实地钻孔和静探资料，淤泥层最厚处达

11.50 m（钻孔 Z4），位于 K54+490 右侧；淤泥层厚度超过 3 m 的主要分布在场地中部（K54+430~K54+510）和 K54+362 监测断面的右坡脚局部地段；淤泥层分布详见图 2。

(2) 主监测断面 K54+450 的淤泥层厚表现为两头厚中间薄：左坡脚淤泥层厚 10.40 m（Z5），右坡脚淤泥厚达 11.40 m（Z3），路基中部的层厚 7.7~7.9 m（C2，Z2）。从软基加固效果考虑，断面中部淤泥层较薄，而且埋深也不大，加之路基中线处

附加应力最大, 均有利于淤泥的固结加固。

(3) K54+490 监测断面的淤泥分布的总体特点是从左至右淤泥逐渐加厚。断面左侧厚度薄, 约 3m; 断面中心处淤泥厚 4 m 左右; 右侧淤泥厚达 11 m。

(4) K54+362 监测断面左侧临近挖方区, 淤泥较浅, 仅 1 m 左右; 右侧临近鱼塘, 淤泥厚达 8 m。

此外, 就真空预压施工条件而言, 本场地左后侧和前侧都是挖方区, 开挖出的风化和半风化层含大量尖锐的碎石, 对真空膜的密封十分不利, 加上左右两侧临近鱼塘, 机械施工难度加大, 这些都对施工提出了更高要求。

3 监测仪器埋设

根据本段处理区场地地貌地质特征, 尤其是考虑到淤泥层的空间展布情况, 在 K54+362、K54+410、K54+450 及 K54+490 处布置了 4 个监测断面, 其中 K54+450 断面为主监测断面, 其它断面只做沉降监测。监测系统的平面布置见图 3。K54+450 监测仪器埋设断面图见图 4。沉降板在铺膜后抽真空前埋设, 其它仪器则在铺膜埋管前埋设, 为取得孔压、分层及测斜数据稳定值, 相应仪器必须在离抽真空的 3 d 前埋设。

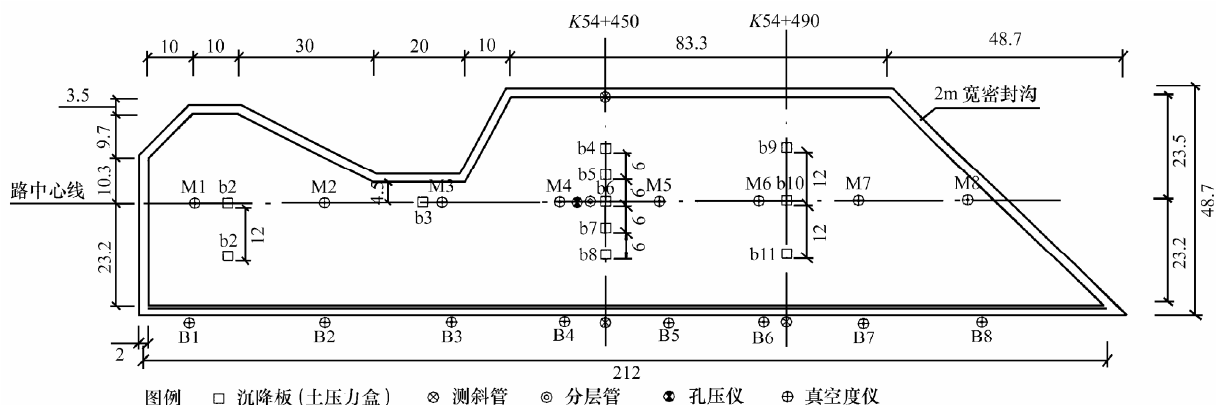


图3 K54+360~K54+560 真空预压处理监测仪器平面布置图

Fig.3 The layout of monitoring equipments installation in segment K54+360—K54+560

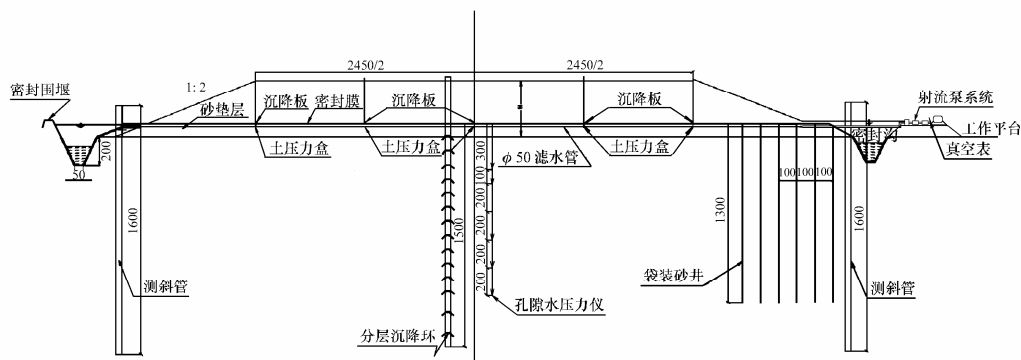


图4 K54+450 监测仪器埋设断面图

Fig.4 Profile of monitoring equipments installation of K54+450

(1) 表面沉降监测 在路中、路肩: K54+362 断面布置沉降观测点 2 个; K54+410 断面 1 个; K54+450 断面 5 个; K54+490 断面 3 个。共布置 11 个测点。

(2) 土压力盒的布置 土压力盒均布置于表面沉降板位置, 真空膜下, 仅在 K54+450 断面布设了 4 个。

(3) 孔隙水压力仪的布置 孔隙水压力仪 6 个, 布置于 K54+450 断面中心位置不同深度。

(4) 分层沉降管的布置 分层沉降管一套, 布置在离 K54+450 断面中心左侧 40 cm 处。

4 资料分析

4.1 沉降特征简析及沉降推算

表 2 列出了各沉降测点的累计沉降量及邻近 5 次日的沉降速率。该表数据显示, 场区沉降的最大特征是累计沉降量相对大、差异沉降明显。这些特

征缘于场区特殊的地质条件,即场区淤泥层厚度分布极不均匀,纵向、横向均存在填挖交界。

面沉降量最小,仅 178 mm; K54+450 断面沉降量最大,达 3 m 以上;另一方面体现在路基在横向上同一断面不同沉降测点之间,整体上看,在路基横向上,沉降量从路基左侧向路基右侧逐步增大。

结合图 2 淤泥层厚度分布等值线不难发现,沉降在路基纵向和横向的差异正好与淤泥层厚度在纵、横向上的差异相一致,即淤泥层最厚地带分布在 K54+450 断面附近;而在 K54+410 附近淤泥层最薄(实际上该处沉降测点位于挖方区域);同时整体上淤泥层厚度自路基左侧向路基右侧逐步增大。这种淤泥层厚度与沉降的对应关系反映出淤泥层厚度对沉降的控制性影响。

沉降的差异性一方面体现在路基纵向上不同的监测断面沉降量相差较大,各断面中, K54+410 断

与广肇高速公路其它条件类似的软基路段相比,本段处理区的累计沉降量明显要大,主要缘于处理区软土淤泥层特殊的物理力学性能。本段淤泥层平均含水量达 157%, 平均孔隙比为 3.899; 实地钻探结果表明,在淤泥层中混有大量的腐木及其它植物碎屑,这些腐木及其它植物碎屑,进一步提高了土体整体的孔隙比,而高孔隙比和高含水量是决定场区沉降量大的根本因素。其次,是与场区采用了真空联合堆载预压的处理方法有关,真空联合堆载预压特殊的作用机理,加快了淤泥层的排水固结,使场区在预压期内能够完成大部分沉降。

表 2 各沉降测点最近 5 次沉降速率及最近累计沉降量
Table 2 Settlement rates and recent cumulative settlement

断 面	测点 位置	至 2001/03/21 累计沉降量/mm	2001/01/08 沉降速率/mm · d	2001/01/18 沉降速率/mm · d	2001/02/05 沉降速率/mm · d	2001/02/19 沉降速率/mm · d	2001/03/21 沉降速率/mm · d
K54+362	中	1427	0.18	0.20	0.17	0.07	0.07
	右	1746	0.18	0.20	0.17	0.14	0.03
K54+410	中	178	0.18	0.10	0.06	0.00	0.00
	左 1	3073	0.73	0.70	0.39	0.50	0.22
	左 2	3155	0.73	0.70	0.39	0.50	0.24
K54+450	中	3327	0.91	0.70	0.33	0.64	0.24
	右 1	3381	0.73	0.90	0.44	0.57	0.36
	右 2	3313	0.73	0.80	0.44	0.57	0.38
K54+490	左	1290	0.36	0.30	0.28	0.29	0.05
	中	1917	0.73	0.40	0.50	0.14	0.22
	右	2504	0.91	0.70	0.67	0.57	0.36

4.2 沉降推算

沉降及最终沉降量的计算目前尚无准确的定量公式,大量的工程实践表明,利用部分实测沉降曲线来推算沉降及最终沉降更为可行。通常,推算最终沉降的方法有 3 种:即三点法、双曲线法及指数法。根据以往经验,在广东软土路基利用实测资料进行推算,采用双曲线法推算的结果与实际较为接近,本文亦采用双曲线法进行推算。双曲线法是利用实测沉降-时间关系曲线,采用双曲线函数进行拟合,进而推算沉降的数学方法,其公式纯属经验公式^[1],根据双曲线法推算沉降模式,对场区全部沉降测点进行了相关沉降推算。以 K54+362(中)测点为推算算例(图 5)。推算起始时间 t_0 为 2000 年 11 月 27 日,对应的 $S_0 = 1\,404\text{ mm}$,推算终点时间 t 为 2001 年 3 月 21 日,对应的 $S_t = 1\,427\text{ mm}$ 。计算

得到系数 $A = 1.832\,52$, $B = 0.027\,32$,线性相关系数 $R = 0.992\,98$,最终沉降量为 $1\,441\text{ mm}$, t 对应的工后沉降 14 mm ,固结度为 99%。

综合分析各点资料,可得如下几点认识:

(1) 以恒载时间 2000 年 11 月 27 日为推算起点,在线性拟合求解系数为 A 、 B 时,线性相关系数普遍在 0.9 以上,说明沉降发展趋势符合双曲线规律;

(2) 根据 2000 年 12 月~2001 年 2 月的月沉降量统计表明,月沉降速率的衰减较快;

(3) 至推算终点时间即 2001 年 3 月 21 日,所有测点的工后沉降均小于 10 cm ,其对应固结度在 97% 以上,说明场区经真空联合堆载预压后,软土固结排水大部分已经完成,真空联合堆载预压处理效果明显,真空预压处理是非常成功的;

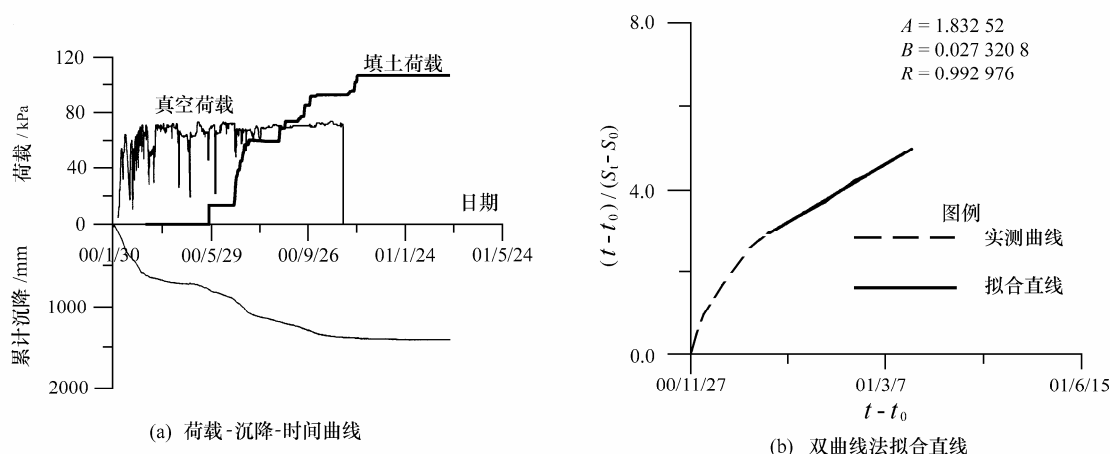


图5 K54+362(中)沉降-荷载-时间曲线及系数 A 、 B 求解图
Fig.5 Settlement-load-time curve and calculation sketch of coefficient A , B

(4) 至2001年4月,所有测点推算月沉降量均低于10 mm。推算月沉降速率的衰减相对较快,这与实测月沉降速率的衰减较快相一致,说明推算沉降发展趋势与实测沉降发展趋势基本一致。推算成果具较高的参考意义。

4.3 测斜成果分析

场区原设测斜管3个,因填土施工,其中两个管已于2000年6月份破坏,仅剩有K54+450断面右侧1管,测斜管管口距地面282 mm,管长15 m,管底打穿淤泥层底(13.5 m)至砂质粘性土中。本文即以该测斜管观测资料对场区位移做一简要分析。

图6为位移深度曲线与C3静力触探曲线对比图;图7为位移随荷载变化的时程曲线图。

位移和静探的深度坐标均已修正,统一指钻孔Z3位置距离地面深度。结合图资料分析,位移具有如下特征:

(1) 在近地表附近(0~2 m左右)侧向位移均指向场地内(负值),即使在6月27日开始填土至10月8日恒载以来,侧向位移方向仍然指向场地内,并且有不断扩大的趋势,越近地表,侧向位移越大,扩大趋势越明显。这主要是由于在近地表区域内,受抽真空影响较大,抽真空引起的向内的侧向附加应力大于堆载引起的向外的侧向附加应力,侧向位移的大小和方向主要由场地的抽真空状况决定。

(2) 在深度2 m以下的区域,填土后位移方向发生倒转,由向内转为向外。这是由于沿深度方向,真空引起的侧向附加应力衰减比堆载引起的侧向

附加应力快,故附加应力场在水平方向上指向场地外。

(3) 在深度4.2~6.6 m范围内,由于该层位置淤泥夹杂有大量的腐木和植物根茎,相当于对淤泥加筋,强度提高,因此该位置的侧斜曲线相应出现较大波折。

(4) 最大侧向位移出现在深度约7 m处。从曲线系的形态看,自6.6 m淤泥混腐木层以下侧向位移突然增大,在深7 m处达到最大。该处曲线系的间距也达到最大,说明位移速率也相应达到最大值。该处位移达到最大可能有两个方面的原因,①自6.6 m以下淤泥层较上层淤泥(2.0~4.2 m)更均匀,强度更低。在6.6 m界面以下尽管总的来看侧向附加应力比上部小,但所处土层强度的突然降低仍然导致位移突然增大。②从侧斜管的受力模式看,侧斜管全长15 m,下端打入砂质粘性土中,可以认为下端固定,受力模式相当于悬臂梁,再加之地表人工填土层较硬,因此完全有可能在管的中部变形达到最大。在7 m以下部分的侧斜曲线出现收敛的形态,最后尖灭于13 m深处。这主要是由于越接近于底部固定端,变形越小;另外,越往下,上部抽真空和堆载引起的附加应力越小,导致测斜管变形也越小。

(5) 从图7位移、荷载时程曲线图可看出,在填土荷载加载之前的纯真空预压时段,位移时程曲线向负的方向即坡内方向累计增加;但当填土荷载加到一定程度后(约20 KPa),位移时程曲线则向正的方向即坡外方向缓慢递减。在填土恒载期,位移时程曲线又向负的方向累计增加。位移时程曲线

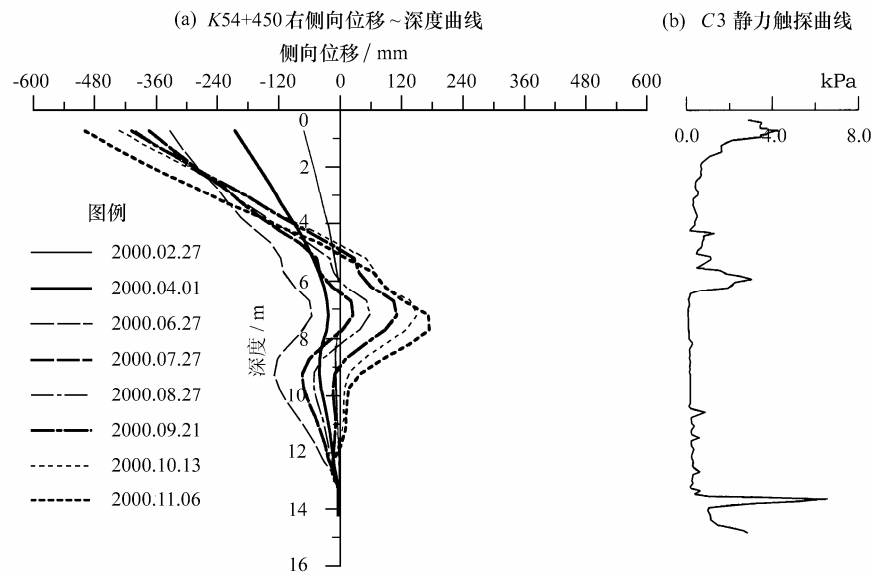


图 6 K 54+450 (右) 位移深度曲线与静力触探曲线对比图
Fig.6 Horizontal displacement-pst-depth curve of K54+450

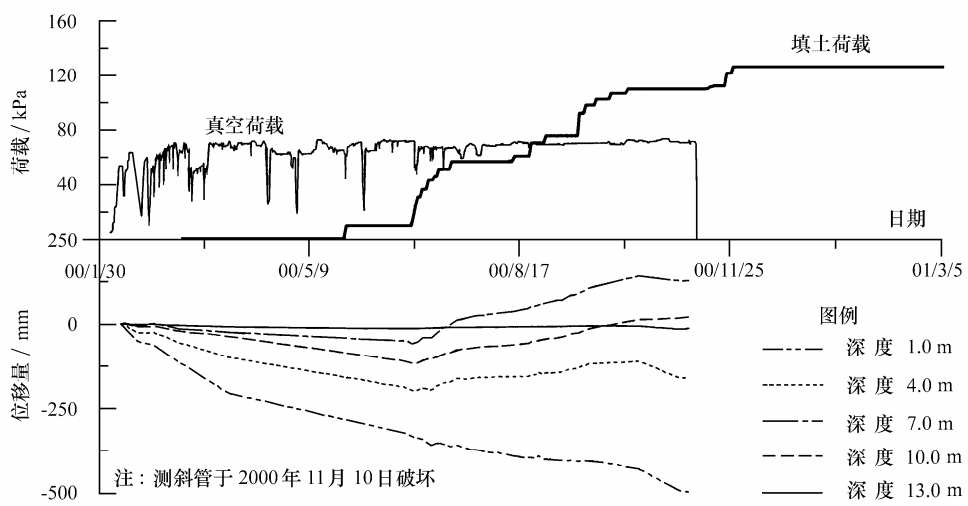


图 7 K 54+450 (右) 位移-荷载-时程曲线图
Fig.7 Horizontal displacement-load-time curve

的这种变化规律, 显然受控于真空荷载和填土荷载的相互作用, 即填土荷载产生的土体应力促使土体向外位移。真空荷载产生的土体应力促使土体向内位移; 两种应力的综合效应则决定了土体最终位移方向。

5 结 论

基于上述分析, 作者认为:
(1) K54+350~K54+560 段软弱路基采用真空

联合堆载预压处理是非常成功的;
(2) 淤泥层厚度与沉降的对应关系反映出淤泥层厚度对沉降的影响非常明显;
(3) 真空联合堆载预压法在类似工程中应用是可行的。

参 考 文 献

[1] 胡中雄. 土力学与环境岩土工程 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.