

# 塑料排水板堆载预压处理深厚软基的试验研究

王 祥<sup>1,2</sup> 周顺华<sup>1</sup> 顾湘生<sup>2</sup>

(1. 同济大学, 上海 200331; 2. 铁道第四勘察设计院, 湖北武汉 430063)

**【摘要】** 以广珠准高速铁路软土路堤试验塑料排水板堆载预压法处理深厚软基的测试结果为基础, 对用该方法处理深厚软基的沉降、孔隙水压力、土压力、土工格栅受力及深层水平位移等方面的变化规律进行了分析。

**【关键词】** 塑料排水板; 堆载预压; 深厚软土地基; 准高速铁路

**【中图分类号】** TU 472.6

## Experimental Study on the Deep and Thick Soft Ground Treated with Prefabricated Vertical Drains Combination with Heaped Preloading

Wang Xiang<sup>1,2</sup> Zhou Shunhua<sup>1</sup> Gu Xiangsheng<sup>2</sup>

(1. Tongji University, Shanghai 200331 China;

2. The Fourth Survey and Design institute of China Railway, Hu bei Wuhan 430063 China)

**【Abstract】** Taking the results of the test on the soft ground treated with prefabricated vertical drains on the Guangzhou-Zhuhai Quasi-High-speed Railway for example, a series of problems about the deep and thick soft ground are analyzed, such as the change of the settlement of the soft ground, pore water pressure, soil pressure, deformation of the geogrid, horizontal displacement in the deep soil.

**【Key Words】** prefabricated vertical drains; heaped preloading; deep and thick soft ground; Quasi-High-speed Railway

### 0 引言

采用堆载加塑料排水板穿透处理软基, 其效果已得到公认。但对于珠江三角洲广泛分布的深厚软土(厚度达 30 m 以上), 如果要穿透处理整个软土层, 从理论上讲是可以有效降低工后沉降的, 从而满足使用要求。但在施工上有很大困难, 那么采用悬挂式塑料排水板堆载预压处理, 可否达到预期的处理效果及变化规律如何, 值得加以研究。为了寻求经济合理的深厚软土地基处理方法, 铁四院在珠海斗门开展了高应力水平的软土路堤现场填筑试验研究, 塑料排水板加堆载预压是该试验的处理方法之一。本文以广珠准高速铁路软土路堤试验塑料排水板处理的典型 4<sup>#</sup> 断面为主, 辅以其它塑料排水板处理断面的测试结果为例进行分析。

### 1 试验及工程地质概况<sup>[1]</sup>

广(州)珠(海)准高速铁路及珠海港支线穿越广泛沉积第四系松软地层的珠江三角洲平原地带, 全线软土路堤长达 50.3 km。软土试验路堤位于珠海斗门县白蕉镇, 北距斗门干道 700 m 左右, 南邻通往

新白蕉镇公路约 200 m。试验路堤范围选择在 DK122+(366.02~690 m) 的直线地段, 路堤长 323.98 m, 路基面宽 12 m, 设计路堤高约 6.4 m(含预压土高 1.4 m)。试验工作于 1995 年 11 月开始, 1996 年 10 月完成预压土填筑, 在预压荷载作用下观测至 1997 年 12 月, 历时 2 年零 2 个月。

试验路堤地处三角州平原地区, 地势平坦, 场地及周围遍布渔塘、稻田。其地层上部为第四系近代滨海相特征显著的海相混合沉积的松软层, 下部为寒武系八村群砂页岩。地质纵断面表明, 地层土质分布较均匀, 层位稳定。第四系海陆相沉积层自上而下为: ①黏土: 褐黄色, 软塑, 厚 2 m, 表层 0.4 m 为种植土; ②软黏土: 浅灰—深灰色, 流塑, 厚 12 m, 层中交互沉积有许多薄层粉砂。属中等灵敏性黏土, 其中 2~9 m 深的土层为正常固结土, 9~14 m 深的土层为欠固结土, OCR 约为 0.6; ③淤泥: 深灰色, 流塑, 厚约 12 m, 底部普遍为一层厚 1~2 m 的粉砂层, 为欠固结土, OCR 约为 0.6; ④淤泥: 深灰色, 流塑, 厚 5.5~17 m, 中间厚, 两端薄; ⑤细砂、中砂夹黏土:

棕黄色,松散一中密,厚 2~7 m,中部薄,两端厚。

试验场地上覆软土层地下水属孔隙潜水,地下水埋深 0~0.2 m,其下砂层含水层无承压性。

试验断面土层物理力学指标统计见表 1,试验断面位置及处理方式见表 2。

观测内容分四大类:变形观测、孔隙水压力观测、土压力观测、土工格栅受力变形观测。①变形观测:分为水平向和竖直向。深层水平变形观测主要在坡脚处理设测斜管,测定地基在路堤堆载作用下不同深度的水平位移值。地表水平位移观测由埋设在距坡脚 2~8 m 处的边桩完成。竖直变形观测有三种,第一种为在路堤左、右和中心位置的地表面埋设沉降板测定地基的沉降;第二种是埋设深层沉降磁环,一般沿地基中心每隔 2~3 m 埋设一个磁环,

测定处理区与下卧层的压缩情况及分层压缩情况;第三种为边桩,兼测竖向位移。②孔隙水压力观测:在不同深度的软土中埋设钢弦式孔隙水压力计,观测路堤在施工期和预压期中孔隙水压力的变化情况,用以指导施工,分析土体在不同时期的固结情况。③土压力观测:通过埋设于土工合成材料下及地基不同深度处的土压力盒,测定基底及地基深处的应力分布变化情况。④土工布受力变形观测:通过埋设于土工布上的柔性传感器,测定土工布在施工期及预压期的受力变形情况。

多数观测元件埋设在试验观测断面的中间位置,以一个观测断面为一组,形成一套可供分析比较的测试系统和数据。代表性的 4<sup>#</sup>断面的观测元件布置示意图见表 3、图 1。

表 1 试验断面土层物理力学指标统计

深度 $h/m$	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	竖向固结系数	径向固结系数	固结快剪		快剪	
							$C_v/(10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$C_h/(10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$c_{cu}/\text{kPa}$	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	$c_u/\text{kPa}$	$\varphi_u/(^{\circ})$
0~14	54.50	16.7	1.501	22.6	1.34	1.79	1.385	1.930	15.1	17.7	8.86	3.56
14~26	64.53	16.1	1.823	25.0	1.20	1.29	1.183	1.234	11.0	14.4	7.92	1.23
26~43	51.10	16.6	1.600	25.3	1.12	1.92	4.554		32.0	11.9	11.0	2.71

表 2 试验断面位置及处理方式

断面号	断面位置	中心实际填高 $p/m$	埋沉降板断面软土厚度 $H/m$	处 理 方 式
3 <sup>#</sup>	DK122+(470~510)	8.54	33.5	二层土工布,塑料排水板深 20 m,间距 1.2 m
4 <sup>#</sup>	DK122+(510~555)	8.26	35.9	二层土工布,塑料排水板深 20 m,间距 1.0 m
5 <sup>#</sup>	DK122+(555~600)	8.38	40.2	三层土工布,塑料排水板深 22 m,间距 1.0 m
6 <sup>#</sup>	DK122+(600~645)	8.05	38.0	一层土工布及 5 m(宽)×2 m(高)反压护道,排水板深 20 m,反压护道下排水板深 16 m,间距 1.0 m
7' <sup>#</sup>	DK122+(645~667.5)	7.81	32.0	二层土工格栅,塑料排水板深 20 m,间距 1.0 m
7 <sup>#</sup>	DK122+(667.5~690)	8.23	31.4	二层土工网,塑料排水板深 20 m,间距 1.0 m

注:中心实际填高含路堤填筑施工中的沉降,塑料排水板采用正三角形布置

表 3 测试元件布置一览表

断面号	沉降板 /个	深层沉降环 /个	孔压计 /个	压力盒 /个	测斜管 /个	边桩 /个
3 <sup>#</sup>	3	9	8		2×20	12
4 <sup>#</sup>	3	9	8	3	2×24	9
5 <sup>#</sup>	3	9	8		2×24	9
6 <sup>#</sup>	3	9	8	3	2×20	10
7' <sup>#</sup>	3	9				4
7 <sup>#</sup>	3	9	8		2×20	4

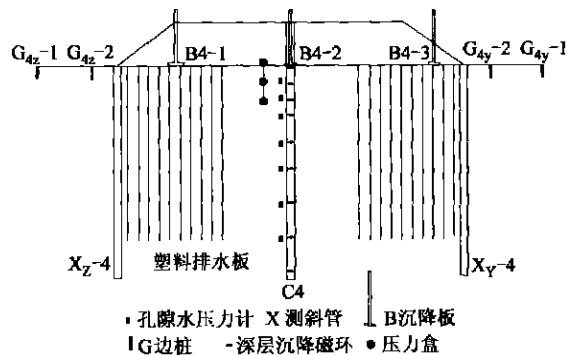


图 1 4<sup>#</sup>断面的观测元件布置示意图

## 2 主要观测成果分析

### 2.1 沉降成果分析<sup>①</sup>

由图2可知,沉降速率与填筑速率是相适应的。填筑速率大时,沉降发生的较快;填筑速率较小时,沉降发生得慢。由于填筑时间较长,各断面填筑期间的沉降量较大。至预压期约10个月,各断面的实测沉降占最终沉降的比例高达90%左右。由此可知,采用塑料排水板堆载预压处理深厚软土地基,其排水固结效果相当显著。

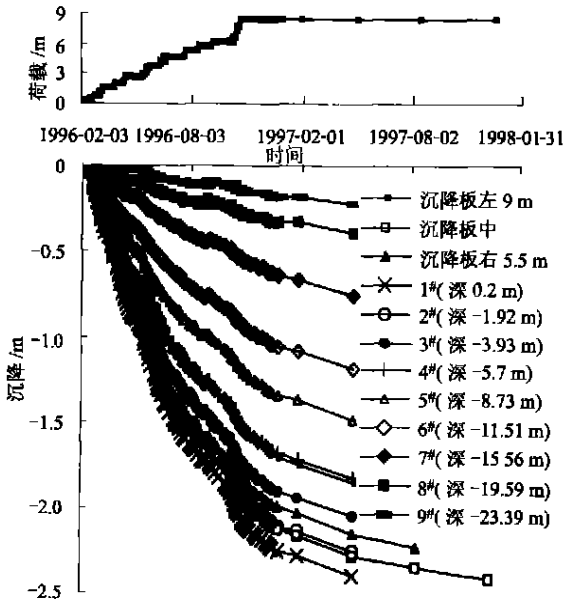


图2 4#断面 P-t-s 曲线

由深层沉降的实测结果可知,地基土体的变形主要发生在处理区,下卧层的压缩只占地表沉降的一小部分,这也说明塑料排水板对加速地基固结的作用是很明显的。

图3为下卧层沉降与总沉降比值变化曲线。由图中可知,随着预压期的延长,下卧层的沉降占总沉降的比例逐渐上升,过大的下卧层沉降对控制工后沉降不利。因此,对工后沉降要求较高的深厚层软土路堤,如要加速沉降,在条件允许的情况下,可考虑采用超载预压或适当加大塑料排水板的处理深度

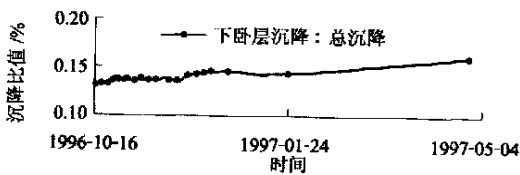


图3 下卧层沉降与总沉降比值变化曲线

(在压缩层厚度内)。

### 2.2 孔隙水压力分析(4#断面的观测结果)

从孔隙水压力变化过程可知,加荷时孔隙水压力升高,停止加荷时孔隙水压力逐渐消散,规律较明显。预压约3个月,4#试验断面的固结度已高达82.1%,这亦说明采用塑料排水板处理深厚软土效果非常显著<sup>[2]</sup>。

图4为孔隙水压力沿深度分布曲线(附加应力采用 Boussinesq 理论计算而得)。从图中可知,填筑到位时,处理区不同深度的孔隙水压力均远小于由 Boussinesq 理论计算的附加应力,这说明由于加荷时间较长且排水通道较好,孔隙水压力在加荷过程中并没有一直累加,而是在叠加过程中消散得也比较快。相比而言,下卧层的孔隙水压力在加荷过程中有所叠加,如25m处的最大孔隙水压力值约为附加应力值的一半。

0~15m深度土体的孔隙水压力消散很快,至预压约3个月时,该部分土体的孔隙水压力已消散至零,这除了塑料排水板的排水效果较好外,还与该处土体中存在有许多微薄的粉砂层有关。25m深处测点的孔隙水压力消散得比20m处的快,是因为25m左右土体有一厚约1~2m的粉砂层,这种连通的粉砂层比塑料排水板的排水效果更佳。

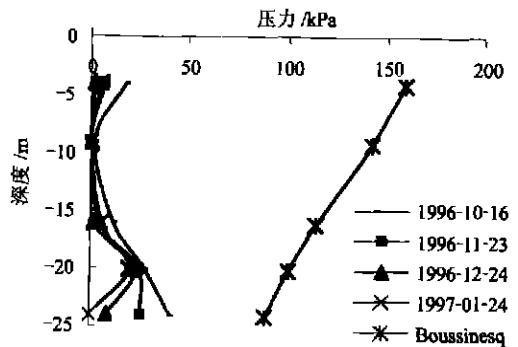


图4 孔隙水压力沿深度分布曲线

### 2.3 固结参数分析

利用实测的孔隙水压力和沉降资料反算地基土的固结系数,已越来越多地被工程所利用。根据研究可知<sup>[3]</sup>,对地基土固结影响较大的为竖向与径向固结系数,亦即可以认为与固结参数 $\beta$ 相关。 $\beta$ 值的反算有多种方法,常用的有孔隙水压力三点法、孔隙水压力二点法、沉降速率法、沉降三点法等<sup>[4,5]</sup>。

表4为上述各种方法推算的 $\beta$ 值,从中可以看

①王 祥·广珠准高速铁路软土路堤填筑试验塑料排水板处理段的沉降分析·铁路地质与路基·2000.19~24

出,沉降三点法与沉降速率法推算的结果较为相近,这可能与两者均假定后期沉降以指数函数的形式发生有关。由孔隙水压力推算出的 $\beta$ 值与沉降法推算出的 $\beta$ 值相差较大,由孔隙水压力推算的 $\beta$ 值大多比沉降法推算的 $\beta$ 值大,因此两者计算的固结度是不相同的,亦即由孔隙水压力推求的固结度与沉降推求的压缩度是有差别的<sup>[6~8]</sup>。大多数的推算结果都比理论计算结果小,这表明塑料排水板的非理想性对其固结影响较大<sup>[9]</sup>。

表 4 各种方法推算  $\beta$  值

断面号	① $\beta$ 值/ $d^{-1}$	② $\beta$ 值/ $d^{-1}$	③ $\beta$ 值/ $d^{-1}$	④ $\beta$ 值/ $d^{-1}$	⑤ $\beta$ 值/ $d^{-1}$
3#	0.024 2	0.009 6	0.003 5	0.004 3	0.020 4
4#	0.023 9	0.005 0	0.006 1	0.002 4	0.047 0
5#	0.017 6	0.004 3	0.009 1	0.005 5	0.045 8
6#	0.013 6	0.016 0	0.013 5	0.012 0	0.047 0
7#			0.003 9	0.003 7	0.047 0
7#	0.023 0	0.004 5	0.009 2	0.002 1	0.047 0

注:①、②、③、④、⑤分别代表孔压三点法推算值、孔压二点法推算值、沉降速率法推算值、沉降三点法推算值、理论计算值

#### 2.4 土压力盒应力变化规律(4#断面的观测结果)

以离地表最近的 647# 压力盒测试结果为例作一分析。647# 土压力盒应力变化曲线见图 5。

从图 5 中可看出,在填筑荷载较小时(90 kPa 以内),土压应力随荷载的增大而增大,基本与实际填筑荷载大小一致,稍大于填筑荷载,可能与压力盒的刚度大造成应力集中有关<sup>[10]</sup>。至填筑荷载较大后,土工布逐渐拉紧而受力,从而使路堤中心荷载逐步向两侧传递,路基所受应力逐渐均匀,土压力盒所受应力占总荷载的比重逐渐减少。这说明基底为柔性体,且能与地基软土的变形相互协调。同样说明,土工布的初始应力状态对发挥其强度有较大的影响,如果在铺设土工布时就对其两端进行预拉锚固,就能使其强度提早发挥,从而尽早及更大程度地发挥其均化应力的作用。离心试验也证实了锚固对发挥土工织物抗拉强度的重要性<sup>[11]</sup>。在京珠高速公路中采用预应力土工布也获得了较好的效果<sup>[12]</sup>。

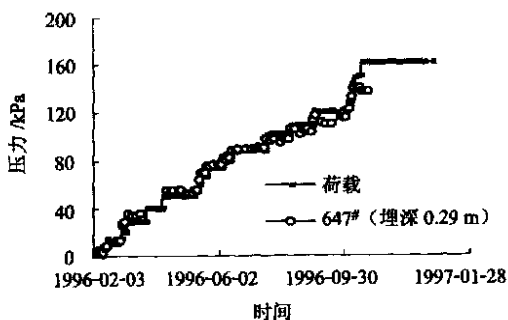


图 5 647# 土压力盒应力变化曲线

填筑至设计标高时,土压力盒应力值为 138 kPa,而上部荷载为 161.1 kPa。由此可以得出,二层土工布可使作用在地基上的总荷载减少 14.3 % 左右。这个结果与其他研究者得出的结果是接近的<sup>[13,14]</sup>。

#### 2.5 土工布受力变形分析(5#断面观测结果)

柔性传感器元件布置按未加固地基滑弧检算最危险处重点埋设并集中在一侧测试。相同位置的测试元件测出的三层土工布的受力过程见图 6。

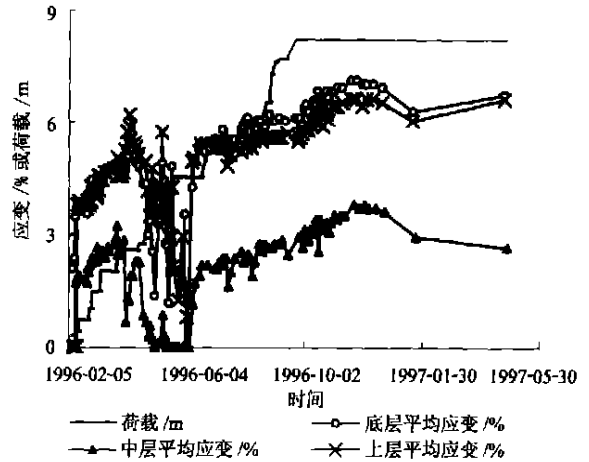


图 6 相同位置的元件测出的土工布的受力过程

从图中可以看出,在填筑开始时,土工布存在一个突然受力的过程。在填筑荷载较小(极限高度内)时,土工布的受力变形并不稳定,存在与土体的互相调整问题。至土工布拉紧后,其抗拉强度的发挥随路堤填高增高而增大。至快速填筑时,土工布的变形速率也增加较快;进入预压期后,土工布的受力变小,至预压三个月后,上、底层土工布的受力变形增加,而中间层土工布的变形减小,三层土工布的应力得到新的调整。由此可知,在施工过程中,各层土工布的变形并不协调。

上层、底层的土工布受力比较接近,其最大应变分别是 6.70 % 和 7.18 %,而中间层的应变较小,仅为 3.81 %,均发生在填筑完成后约一个月时。土工布的强度发挥依次为:底层应变 > 上层应变 > 中间应变。但三者的应变均与设计峰值(设计值为 25 %)相去甚远,三层土工布共同发挥的拉力为 35.6 kN/m,仅为设计抗拉强度的 24 %,尤其是中间层发挥的强度更小,因此土工布用到二层即可。由此结论同时参考相邻铺设两层土工布断面的路堤填筑情况,在广珠准高速铁路修改设计中应用,减少一层土工布,从而节省投资近千万元<sup>[15]</sup>。

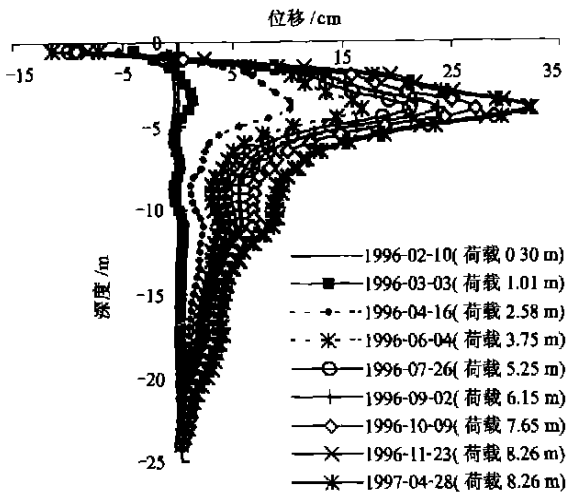


图7 路基水平位移变化过程线

2.6 深层水平位移分析(4#断面右侧测斜管) 路基土体深层水平位移变化过程线见图7。

从中可以看出,水平位移随深度的变化形状如一

抛物线,在地表浅处位移很小,甚至出现负值(内移);在极限填高(约3.7 m左右)以内,最大水平位移(深4 m处)与附近土体位移差异不明显,进入极限填高后,差异越来越显著;最大水平位移深度在填筑初期略有下移,其后一直在地表下4 m处,水平位移的影响深度约为20 m。由于铺设了二层土工布,改善了地基底的应力分布,填筑结束后,水平位移速率收敛很快,预压一个月后,水平位移已基本稳定。预压约6个月后,最大水平位移值为32.34 cm,填筑期内的最大水平位移量为总最大水平位移量的88.7%。

从表5可知,各断面水平位移的主要发生范围约在20 m以内,4#断面最大水平位移最大,主要原因可能是该断面只有二层土工布调整应力,最大水平位移深度一般为4~5 m之间。由于整个加荷期较长,故加荷期间的平均位移速率较小,未出现失稳状态。进入预压期约6个月后水平位移变化很小,甚至内移,说明此时地基土应力得到进一步调整,土体处于收敛稳定状态。

表5 水平位移及其速率变化表

断面号	最大水平位移			主要发生范围/m	水平位移						
	出现时间	位移/cm	深度/m		加荷中			预压约1个月		预压约6个月	
					位移/cm	最大速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	平均速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	位移/cm	平均速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	位移/cm	平均速率/(mm·d <sup>-1</sup> )
4#	1997-04-28	32.34	4.0	0~20.0	29.35	0.218	0.118	32.23	0.078	32.34	0.000 7
5#	1997-04-28	26.91	4.5	0~14.5	24.78	0.282	0.098	26.80	0.058	26.91	0.000 7
6#	1996-11-23	17.05	4.5	0~15.0	15.84	0.140	0.064	17.05	0.034	16.54	-0.003 3
7#	1996-11-16	16.62	5.0	0~11.0	13.84	0.169	0.065	16.62	0.099	16.56	-0.000 4

3 结论

在本试验段的条件下,得如下结论:

1)从沉降发生过程可得出,采用塑料排水板处理对加速地基固结作用明显。广珠准高速铁路软土厚度大,未处理的软弱下卧层可能引起较大的持续发展的工后沉降,这对工程是个隐患,在设计与施工时应引起重视。

2)从孔隙水压力变化过程可得出,采用塑料排水板加堆载预压处理软基排水固结效果非常显著,与沉降分析得出的规律相吻合。软土中的薄层砾砂对加速固结很有利,要充分加以利用。从固结参数的分析可知,超长塑料排水板有一定程度的非理想性作用。

3)路堤基底为柔性体,且能与地基软土的变形相互协调。土工布的初始应力状态对发挥其强度有较大的影响。

4)各层土工布之间的变形并不协调,其应力应变均很小,总共发挥的抗拉力为35.6 kN/m,仅为设计抗拉强度的24%。尤其是中间层发挥的强度

更小,因此土工布用到二层即可。由此在广珠线修改设计,减少了一层土工布,节约投资近千万元。

5)最大水平位移深度发生在地表下4~5 m,水平位移的主要影响范围约为0~20 m。加荷期间的平均水平位移速率较小。进入预压期约6个月后,水平位移基本处于收敛状态。

致谢:参加本软土路堤试验研究的人员还有杜文山、李小和、陈明德、陈占、吴东、李燕君、肖汉英、杨正发等,对他们的辛勤工作表示衷心的感谢!

参考文献

- 杜文山,李小和,陈明德等.深厚层软土路堤控制后期沉降加固方法的研究.铁道第四勘察设计院主编.软土地基试验研究文集.武汉:中国地质大学出版社,2001.313~359
- 王祥.软基处理中孔隙水压力变化规律及固结分析.路基工程,2001(2):6~9
- 地基处理手册编写委员会主编.地基处理手册(第二版).北京:中国建筑工业出版社,2000.55~140

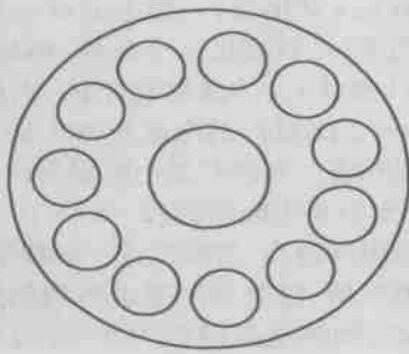


图5 石墨棒布置剖面图

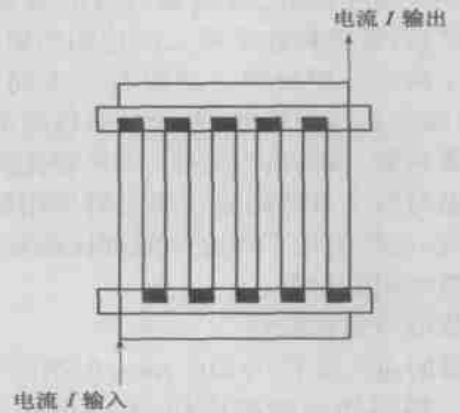
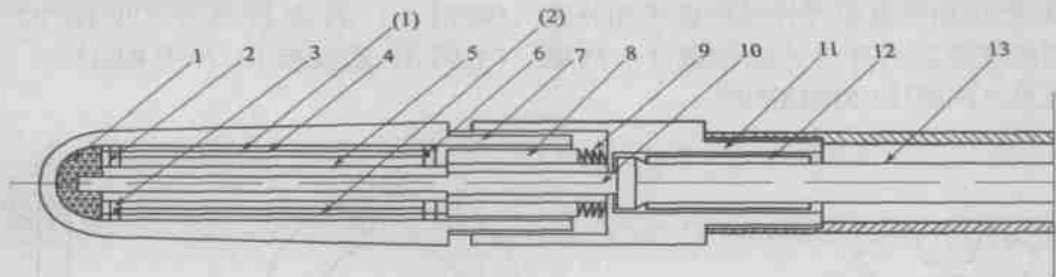


图6 加热电阻结构平面展开示意图



1—电极座;2—石墨板;3—绝缘板;4—石墨棒;5—绝缘套;6—联结板;7—外壳;  
8—压环;9—压簧;10—电极杆;11—接头;12—绝缘套;13—压杆;(1)、(2)—石墨棒  
图7 热熔器新式结构示意图

## 参 考 文 献

- 1 王诚训编著·电炉用耐火材料·北京:冶金工业出版社,1996.5~25
- 2 立德编著·特种耐火材料·北京:冶金工业出版社,2000.2~19
- 3 李圣华编著·石墨电极生产·北京:冶金工业出版社,1997.6~13
- 4 黄启震,傅征蔚主编·炭素工艺与设备(第5卷)·北京:冶金工业出版社,1989.63~70
- 5 W·C·Moner 著,吴光琳等译·新式钻岩技术·北京:地质出版社,1986.102~120
- 6 M·N 奥齐西克著,俞昌铭主译·热传导·北京:高等教育出版社,1984.88~469
- 7 陈晨等·热熔钻进过程中温度在土体中传递规律的研究·岩土钻掘技术在资源、环境和工程建设中的应用与发展研讨会论文集·2001.10

收稿日期 2004-06-15

(上接第176页)

- 4 JTJ017-96 公路软土路堤设计与施工技术规范
- 5 孙更生,郑大同·软土基础与地下工程·北京:中国建筑工业出版社,1984.414~430
- 6 折学森·软土地基沉降计算·北京:人民交通出版社,1998.10~77
- 7 沈珠江·软土工程特性与软土地基设计·岩土工程学报,1998,20(1):100~111
- 8 魏汝龙·从实测沉降过程推算固结系数·岩土工程学报,1993,15(2):12~19
- 9 王祥·影响塑料排水板加固效果几个因素的分析·岩土工程技术,2002(1):33~37
- 10 门福录·岩土力学研究观点、方法若干问题之我见·岩土工程学报,2001,23(3):380~383
- 11 丁金华,包承纲·软基和吹填土加筋堤的离心模型试验及有限元分析·土木工程学报,1999,32(1):21~25
- 12 郭大华·土工合成材料在公路软基处理中的应用与设计·土木工程学报,2001,34(3):84~89
- 13 徐少曼,洪昌华·考虑加筋垫层的堤坝下软基稳定分析法·土木工程学报,2000,33(4):88~92
- 14 徐少曼,康进王·堤坝下软基预应变土工织物加筋效果分析·见魏道堃等主编·区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集·北京:原子能出版社,1996.120~125
- 15 李小和·广珠铁路深厚软土路堤试验与设计·路基工程,2001(1):32~35

收稿日期 2004-05-26