塑料排水板施工对软土性状的影响

吴承章
（浙江省电力建设总公司，温州，325000）

丁利　王立忠　李彬
（浙江大学岩土工程研究所，杭州，310027）

提　要　本文以温州发电厂 2#、3#煤场工程为背景，通过现场十字板试验，分析塑料排水板的施工扰动和打桩对软粘土的强度和灵敏度的影响；并从软粘土的强度与深度的关系出发，讨论了十字板剪切强度的回归方程、排水板的排水固结效果、堆载计划中应考虑的问题以及施工中机械的选择。

一　工程概况

温州发电厂二期工程拟建 2#、3#煤场，所在场地极其软弱。2#煤场堆煤面积 80m×150m，3#煤场堆煤面积 100m×190m，加上排水碎石垫层总堆高达 13.8m，最大荷载达 156kPa。煤场地基采用塑料排水带排水固结法处理，排水板三角形布置，间距 1.2m，处理深度 20m。

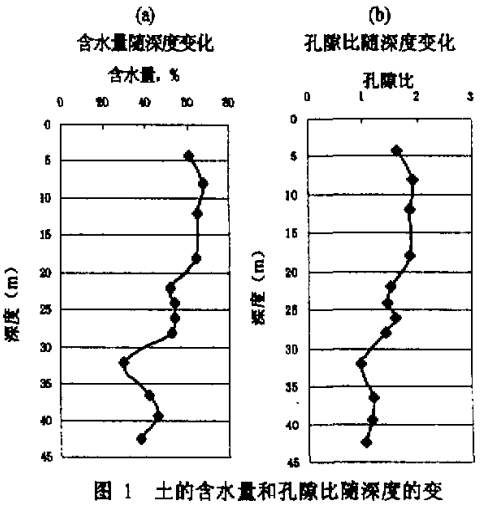


图 1　土的含水量和孔隙比随深度的变

根据静力触探和十字板试验结果，煤场地基从上至下依次为硬壳层，(2-1)淤泥，(2-2)淤泥，厚度分别约为 1.5m，13m，14m，其下为(3-1)层淤泥质粘土。图 1 反映 2#煤场 1#钻孔土体含水量和孔隙比随深度的变化。可以看到，含水量和孔隙比沿深度方向逐渐变小，2-1、2-2 层土含水量大致在 50%～60%，孔隙比在 1.5～2 之间。

本工程具有软土深厚、土质极差、荷载大、沉降及侧向位移大等特点。针对上述情况，项目组对温州发电厂的软弱原状土进行了一系列的现场测试和室内土工试验。本文重点探讨塑料排水板的施工扰动对软粘土的强度和灵敏度的影响。本次试验研究的成果对沿海区域软弱地基上的建筑工程具有一定的指导意义。

二 塑料排水板的施工扰动影响

1. 施工扰动对软粘土的强度和灵敏度的影响

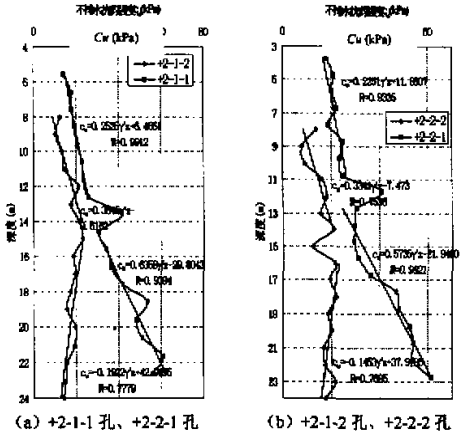
十字板试验由于设备简单、操作方便，因而在软基工程中应用广泛。本工程排水板三角形布置，十字板试验点布置在三角形中心。排水板施工前做一次试验，施工后一周内在邻近孔位进行第二次十字板试验。

根据一些试验堤坝的资料说明，用十字板强度比破坏时的实际强度高，其原因有二，一是试验时剪切速率远高于堤坝破坏时的速率，其次是由于土的各向异性产生的，从不同的方向剪切，强度可以相差 50%（Bjerumm，1966）。Mesri 在 Bjerumm 建议的基础上，将十字板强度设计值取

$$c_u = \mu_0 S_D \tag{1}$$

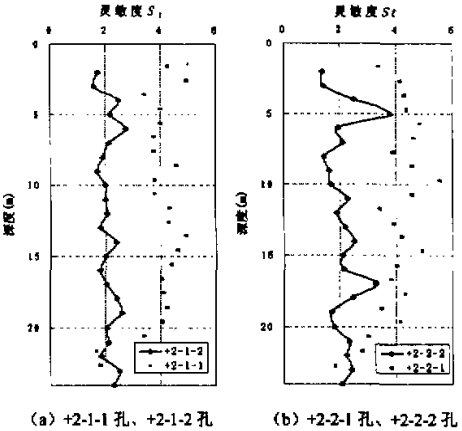
式中 μ_0 为折减系数，S_D 为十字板峰值强度。《工程地质手册》(1992)[3]指出：一般认为十字板强度测得的不排水抗剪强度是峰值强度，其值偏高，长期强度只有峰值强度的 60%~70%，结合温州地区经验，本文取折减系数为 0.6。

图 2(a)、(b)分别为 2#煤场 1 号位置和 2 号位置排水板施工前后的十字板强度变化情况。+ 2-1-1，+2-1-2 是排水板施工前布置的测点；+ 2-2-1，+2-2-2 是排水板施工后布置的测点。图 3(a)、(b)分别为 2#煤场 1 号位置和 2 号位置排水板施工前后的灵敏度变化情况。



(a) +2-1-1 孔、+2-2-1 孔　(b) +2-1-2 孔、+2-2-2 孔

图 2　2#煤场淤泥层的设计不排水抗剪强度随深度变化曲线及回归曲线



(a) +2-1-1 孔、+2-1-2 孔　(b) +2-2-1 孔、+2-2-2 孔

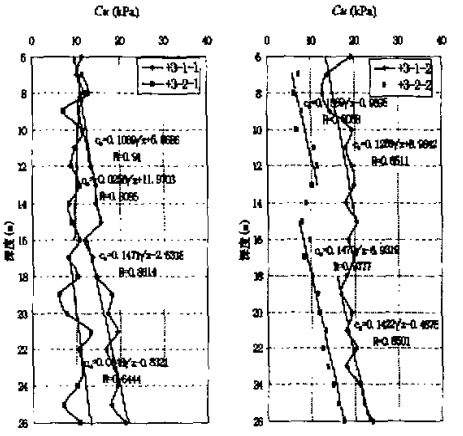
图 3　2#煤场淤泥层的灵敏度随深度变化曲线

本工程中，2#煤场的 2-1 土层在塑料排水板施工之后十字板强度平均值减少 11.8kPa，接近 50%的原始强度，其中 2-1 孔减少 7.5kPa，2-2 孔减少 13kPa。(2-2)层淤泥十字板强度减少量是上小下大的趋势，而且减少量最大值达 48kPa 左右，排水板施工扰动对十字板强度的影响相当显著。2#煤场排水板施工采用振动式沉管桩桩架改装的插板机，施工振动大，相应扰动也大。

从2#煤场排水板施工前后强度对比情况可以看出，强度降低不仅在排水板深度20米范围内，其下3~4m范围的沉降降低也十分明显。(2-1)和(2-2)土层的交界范围(深度11～15m)十字板强度有所转折，而(2-2)土层扰动后的十字板强度反而随深度降低。从灵敏度图可以看出排水板施工前灵敏度在4左右，而排水板施工扰动后软土灵敏度降低到2。

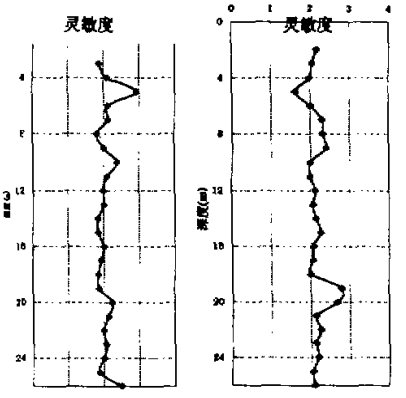
Akagi(1981)[1]试验分析分析了砂井施工扰动对土体十字板强度的影响，指出砂井施工引起原位土体十字板强度下降 20%~40%。施建勇(1996)[2]报道了砂井施工导致软土十字板强度下降20%~50%。

根据十字板试验结果，对于灵敏度高的结构性软土，土体在排水板施工后承载力将大为降低。在设计堆载计划时，应充分考虑到这种施工扰动的影响，否则将引发安全问题。



(a) +3-1-1 孔、+3-2-1 孔　　(b) +3-1-2 孔、+3-2-2 孔

图4　3#煤场淤泥层的设计不排水抗剪强度随深度变化曲线及回归曲线



(a) +3-1-1 孔　　(b) +3-1-2 孔

图5　3#煤场淤泥层的灵敏度S_t随深度变化曲线

图4(a)、(b)分别为3#煤场1号位置和2号位置排水板施工前后的十字板强度变化情况。+ 3-1-1，+3-1-2 是排水板施工前布置的测点；+ 3-2-1，+3-2-2 是排水板施工后布置的测点。

图5(a)、(b)分别为3#煤场1号位置和2号位置排水板施工前的灵敏度变化情况。

图4表示3#煤场十字板强度随深度的分布规律，3#煤场的十字板强度明显低于2#煤场的值，这里可能有两方面的原因，一是3#煤场土质确实略差于2#煤场，但更重要的原因由于3#煤场原为桩基的制作场地，因而该煤场的斗轮机基础桩基到最后才施打(比2#煤场的斗轮机桩基施工推迟约3个月)，而3#煤场的十字板试验是紧跟桩基施工后进行的。因此，3#煤场的十字板强度仅为2#煤场十字板强度的一半左右，而且相应灵敏度S_t也仅为2左右(2#煤场软土的灵敏度约为4)，也就是说3#煤场软土在施工排水板之前已受到斗轮机桩基施工扰动。这里应该指出的是3#煤场软土的十字板强度折减系数仍为0.6，而实际扰动土应该略高于这个系数。由于这个参数难以准确确定，而且为了便于对比，故本文仍取0.6

的折减系数。

2. 十字板剪切强度的回归方程

为便于对比，本文将十字板强度随深度变化写成(2)式

$$c_u = m \cdot \gamma' z + b \tag{2}$$

在排水板施工之前，2-1 层、2-2 层淤泥十字板强度随深度分布各有特点。2#煤场三个孔的分布可用下式表示(参数为各孔平均值)。

2-1 层淤泥：$c_u = 0.2746\gamma' z + 8.8\ \text{kPa}$ (3)

2-2 层淤泥：$c_u = 0.6047\gamma' z - 25.9\ \text{kPa}$ (4)

表 1 为 2#煤场十字板强度的深度回归方程。

表 1　2#煤场各测孔十字板剪切强度的回归方程

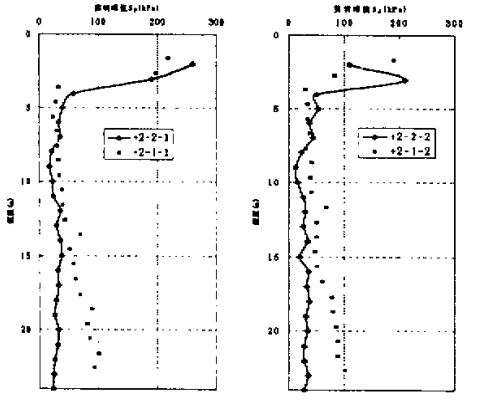
孔号	土层名称	土层重度 γ (kN/m³)	不排水抗剪强度 c_u (kPa)	相关系数 R
+2-1-1	2-1	16.0	C_u=0.2525 $\gamma' z$ +6.4661	R=0.9912
	2-2	16.4	C_u=0.6358 $\gamma' z$ -29.8043	R=0.9394
+2-2-1	2-1	16.0	C_u=0.3845 $\gamma' z$ -9.6162	R=0.8725
	2-2	16.4	C_u= - 0.1922 $\gamma' z$ +42.9195	R=0.7779
+2-1-2	2-1	16.0	C_u=0.2251 $\gamma' z$ +11.8807	R=0.9335
	2-2	16.4	C_u=0.5735 $\gamma' z$ -21.9460	R=0.9621
+2-2-2	2-1	16.0	C_u=0.3341 $\gamma' z$ -7.473	R=0.7536
	2-2	16.4	C_u=-0.1453 $\gamma' z$ +37.9195	R=0.7695
+2-1-3	2-1	16.0	C_u=0.3461 $\gamma' z$ +8.1575	R=0.9816
	2-2	16.4	/	
+2-2-3	2-1	16.0	C_u=0.3613 $\gamma' z$ -8.0748	R=0.6888
	2-2	16.4	C_u=-0.1609 $\gamma' z$ +40.281	R=0.8972

表 2 为 3#煤场十字板强度的深度回归方程。

表 2　3#煤场各测孔十字板剪切强度的回归方程

孔号	土层名称	土层重度 γ (kN/m³)	不排水抗剪强度 c_u (kPa)	相关系数 R
+3-1-1	2-1	16.0	C_u=0.1069 $\gamma' z$ +5.8686	R=0.91
	2-2	16.4	C_u=0.1471 $\gamma' z$ -2.6318	R=0.8614
+3-2-1	2-1	16.0	C_u= - 0.0256 $\gamma' z$ +11.9703	R=0.8085
	2-2	16.4	C_u=0.0848 $\gamma' z$ -0.8321	R=0.6444
+3-1-2	2-1	16.0	C_u=0.1256 $\gamma' z$ +8.9842	R=0.6511
	2-2	16.4	C_u=0.1422 $\gamma' z$ -0.4875	R=0.8501
+3-2-2	2-1	16.0	C_u=0.1589 $\gamma' z$ -0.9698	R=0.8058
	2-2	16.4	C_u=0.1470 $\gamma' z$ -6.9319	R=0.9777
+3-1-3	2-1	16.0	C_u=0.1677 $\gamma' z$ +2.0352	R=0.8721
	2-2	16.4	C_u=0.1353 $\gamma' z$ -0.9463	R=0.7825

3. 塑料排水板的排水固结效果



(a) +2-1-1 孔、+2-2-1 孔　　(b) +2-1-2 孔、+2-2-2 孔

图 6　2#煤场淤泥层的剪切峰值 S_D 随深度变化曲

从 2#、3#煤场的十字板强度排水板施工前后的对比情况发现，在深度 5m 以下的软土扰动作用比较明显，而深度 5m 以上的土体十字板峰值强度反而升高。这主要是由于排水固结引起的，由于场地先堆铺 0.5m 厚的砂垫层，排水板施工后一周内，由于砂垫层荷载及施工机械的来回走动，砂垫层中的积水较为明显，这说明土体的排水固结较为明显，尤其是排水条件良好的上层土体，因而导致上层土体十字板强度增长。

4. 堆载计划中应考虑的问题

从十字板强度的降低来看，打塑料排水板后的地基承载力将大为降低，深度 5m 以下的 2-1 层天然地基承载力相应降低约 50%。设计堆载时应考虑施工扰动的影响。当然施工扰动的影响可以通过时效得以一定的恢复，比如 2#和 3#煤场的十字板强度差别，可以主要归结为强度的时效恢复，这种恢复在本工程中历时达 2~3 个月。

三　结　语

1. 塑料排水板施工导致土体强度降低近 50%，这是由于施工中采用振动式插入，这种施工方式对结构性软土的强度影响较大。在设计堆煤过程中，荷载大小的确定应充分考虑排水板施工对原状土强度的扰动影响。

2. 排水板的排水效果较为明显，尤其是上部土体在砂垫层和施工荷载作用下，排水效果较为理想，在较短的时间内，上层土体强度有所提高。

3. 对灵敏的结构性软土，在选用排水板施工机械时，有条件情况下尽量采用静压式，以减少土体的扰动。

4. 施工扰动导致土体强度降低，灵敏度降低，这种降低可以通过时效得以恢复。该时效在本工程中约 2~3 个月。

参考文献

[1] T. AKAGI. E ffect of Mandrel-Driven Sand Drains on Strength. Proceeding of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. June, 1981.

[2] 施健勇，赵维炳等：《砂井施工对软粘土扰动的影响》，载《河海大学学报》，Vol. 25. No. 2. Mar, 1997。

[3]《工程地质手册》编写委员会：《工程地质手册》，中国建筑工业出版社，1992。