第九篇

夯实水泥土桩法、桩锤冲桩法处理地基

第一章　夯实水泥土桩法处理地基

第一节　夯实水泥土桩法形成复合地基

一、基础与桩之间不设置褥垫层

如图 9－1－1 所示，土层Ⅰ为较软弱土层，土层Ⅱ为坚硬土层，土层Ⅱ的压缩模量 $E_{Ⅱ}$ 远远大于土层Ⅰ的压缩模量 $E_{Ⅰ}$。图 9－1－1a 中基础直接作用于桩和桩间土上，桩穿透土层Ⅰ，桩端落在土层Ⅱ上。由于桩端落在坚硬土层中，复合地基沉降主要由桩的压缩变形控制。通常桩的压缩模量远大于桩间土，其压缩变形很小。相应桩间土的变形很小，桩间土的承载能力很难发挥，荷载基本由桩承担。

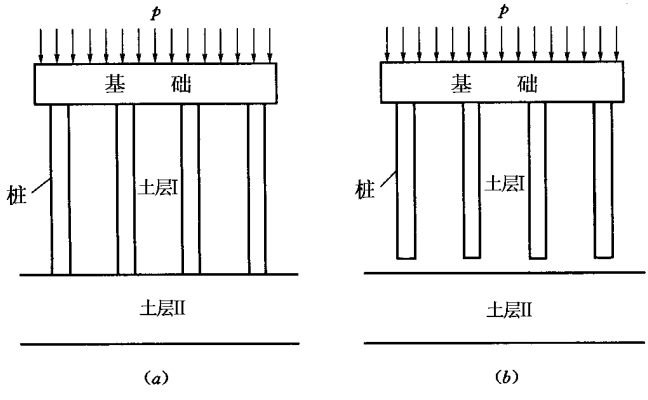


图 9－1－1　基础直接作用于桩上

为了发挥桩间土的承载能力，也可人为缩短桩长，使桩端落在土层Ⅰ中，形成悬浮桩，如图 9－1－1b 所示。此时，桩的沉降加大，桩间土的变形有所增加，其承载力有所发挥，但即使如此，桩间土的承载能力也不能充分发挥，其受力特性与桩基础相类似。参照《建筑桩基技术规范》，摩擦桩的桩间土承载能力发挥系数为 0.11～0.48，显然，桩间土强度的发挥程度很低。因此，基础直接作用在桩和桩间土上，无论桩端是否落在好土层上，桩间土的承载能力都不能充分发挥。更重要的是，在图 9－1－1b 中，桩端落于土层Ⅰ，端阻效应大大削弱，导致复合地基的承载力显著降低，这尤为不合理。

二、基础与桩和桩间土之间设置一定厚度的褥垫层

如图 9－1－2 所示，基础与桩和桩间土之间设置一定厚度散体粒状材料组成的褥垫层，则受力情况与图 9－1－1 所示的情况就有很大的不同。

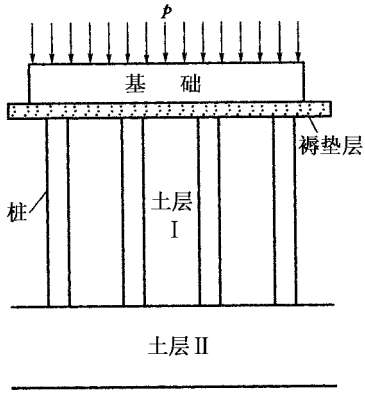


图 9－1－2　基础与桩顶之间设置褥垫层

在荷载作用下，由于桩的模量远大于土的模量，桩间土表面变形大于桩顶变形，桩向褥垫层刺入，伴随这一变化过程，粒状散体材料不断调整补充到桩间土表面上，基础通过褥垫层始终与桩间土保持接触，桩间土始终参与工作，桩间土承载能力可得以发挥。

可见，基础下是否设置褥垫层，对复合地基受力影响很大。基础下不设置褥垫层，复合地基承载特性与桩基础相似，在给定荷载作用下，桩承受较多荷载，随时间增加，桩发生一定的沉降，一部分荷载逐渐向土体转移，桩承担的荷载随时间的增加而有所减少，土承担的荷载随时间的增加而有所增加。桩间土承载力发挥依赖于桩的沉降，如果桩端落在坚硬土层上，桩的沉降很小，桩上荷载向土上转移数量很小，桩间土承载能力难以发挥，不能成为复合地基。

基础下设置褥垫层，桩间土承载力的发挥就不单纯依赖于桩的沉降，即使桩端落在好土层上，也能保证荷载通过褥垫作用到桩间土上，使桩土共同承担荷载。

第二节　夯实水泥土桩特点

夯实水泥土桩是用人工或机械成孔，选用相对单一的土质材料，与水泥按一定配比，在孔外充分拌和均匀制成水泥土，分层向孔内回填并强力夯实，制成均匀的水泥土桩。

水泥土桩桩体强度一般由两部分组成。其一为水泥的胶结强度；其二为土体的密实强度，它是由土体的密度增加而引起的。

搅拌水泥土桩由于其桩体密度较天然地基密度增加甚微，所以水泥土桩的强度增量主要取决于水泥的胶结作用。

一、拌合均匀程度高

夯实水泥土桩是将水泥和土料在孔外充分拌合，拌合的均匀程度远远高于现场搅拌的水泥土。所以夯实水泥土的现场强度和相同水泥掺量的室内强度，在夯实密度相同的条件下是相等的。

二、桩体强度增量大

由于成桩是将孔外拌合均匀的水泥土混合料回填孔内并强力夯实，桩体强度与天然土强度相比，有一个很大的增量。这一增量既有水泥有胶结强度，又有水泥土密度增加产生的密实强度。

基于以上的主要差异，相同水泥掺量下，夯实水泥土桩的桩体强度为搅拌水泥土桩的 2 ~ 10 倍。

三、水泥土最大干密度和最优含水量

以粉土为例，不同掺入比 S_n（S_n 为掺入的水泥质量与干土质量之比）的水泥土最大干密度 $\rho_{\max}$ 和最优含水量 ω_{opt} 见表 9 – 1 – 1。夯实水泥土桩的最大干密度接近或等于土料的最大干密度，最优含水量略大于土料的最优含水量。

表 9－1－1　不同掺量比下水泥土的最大干密度及最优含水量

土　料	S_n	ρ_{max} (g/cm³)	ω_{opt} (%)	备　注
粉　土	1:5	1.82	17	采用土样击实仪
	1:6	1.82	17	
	1:7	1.82	17	
	1:8	1.82	16	
	天然土	1.82	16	

第三节　夯实水泥土桩桩体强度分析

一、桩体强度与水泥掺量的关系

不同土质材料、不同水泥掺入比 S_n 和不同龄期桩体强度如图 9－1－3 所示。由图 9－1－3 可知，水泥掺入比 S_n 越大，则桩体强度越高。对粉土和粉质粘土，不同掺入比的试验曲线比较靠近，而对砂土水泥掺入比对桩体强度的影响是显著的，S_n = 1:5 比 S_n = 1:8 的 28 天强度高了近 1 倍。这是因为砂土夯实引起的密实强度分量很小，主要是水泥的胶结作用。而粉土、粉质粘土夯实引起的密实强度起重要作用，水泥掺量的影响不显著。

二、不同养护条件下的水泥土桩桩体强度

不同土质材料(砂土和粉土)、不同掺入比 S_n，在空气中、水中、先在空气再在水中养护得到的不同龄期的试块强度见表 9－1－2。

从表 9－1－2 可以看出，对于砂土，当掺入比 S_n 大时，养护条件的变化对桩体抗压强度影响不大，龄期影响是主要的；掺入比 S_n 小时，28 天龄期后，增加养护时间，强度增加不大；水下养护比空气中养护强度有所降低。

表 9－1－2　　不同养护条件下水泥土桩的桩体强度

土　性	S_n	f_{cu}(28d)(MPa)			f_{cu}(90d)(MPa)		
		空　气	水　下	先空气再水下	空　气	水　下	先空气再水下
细　砂	1:5	7.2	7.2	6.9	13.6	13.6	11.5
	1:7	5.9	3.6	4.1	6.6	4.3	4.2
粉　土	1:5	6.6	5.0	5.1	7.1	5.6	6.0
	1:7	5.3	4.2	3.8	6.9	5.0	4.8

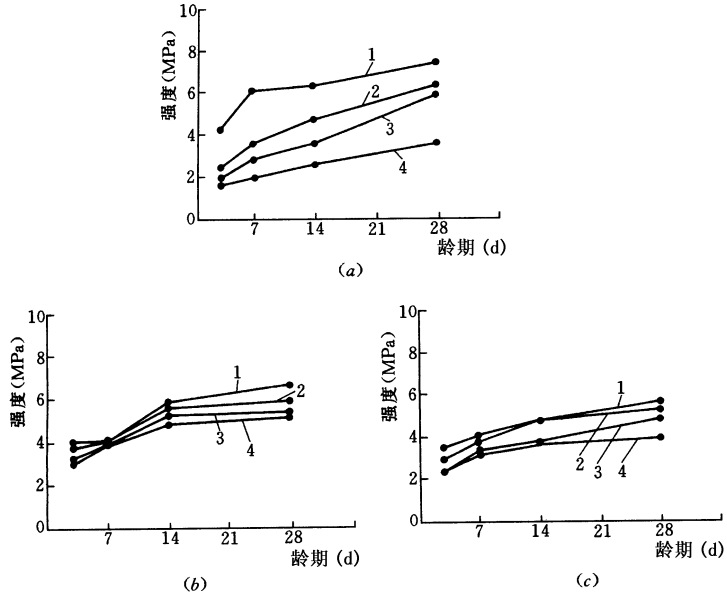


图 9－1－3　不同养护期的夯实水泥土强度

(a)砂土；(b)粉土；(c)粉质粘土

1－S_n = 1:8；2－S_n = 1:7；3－S_n = 1:6；4－S_n = 1:5

三、不同水泥品种对水泥土桩强度的影响

表 9－1－3 是不同水泥品种、不同养护条件下水泥土试块强度。从表 9－1－3 中可以看出，425 号普通硅酸盐水泥的试块强度较高。在工程中尽量选用这种水泥。

表 9－1－3　　不同水泥品种下的水泥土强度　　单位：MPa

细砂（S_n = 1:5）					
养护条件 / 水泥品种	潮湿 28 天	水下 28 天	先潮湿后水下 28 天	潮湿 3 个月	水下 3 个月
普硅 425 号	7.2	7.2	6.9	13.6	13.6
矿渣 425 号	6.1	4.8	5.5	7.8	7.8
矿渣 325 号	3.8	3.5	3.0	6.5	5.1
粉土（S_n = 1:6）					
养护条件 / 水泥品种	潮湿 28 天	水下 28 天	先潮湿后水下 28 天	潮湿 3 个月	水下 3 个月
普硅 425 号	5.8	5.1	5.3	8.8	6.5
矿渣 425 号	4.5	3.4	3.8	6.7	4.5

四、桩体的抗冻性

我国有相当大的地域处在寒冷地区，夯实水泥桩在冬季施工时，桩体强度会不会受影响，是需要弄清的一个问题，表 9－1－4 给出了不同冻结时间、不同养护期水泥土的无侧限抗压强度。从表 9－1－4 中可以看到，冻结对夯实水泥土桩的强度影响不大，对强度起控制作用的是龄期。

表 9－1－4　　冻结时间、养护期对水泥土强度的影响

编号	养护时间（d）	冻结时间（d）	冻后再养护时间（d）	密度（g/cm³）	含水量（%）	干密度（g/cm³）	无侧限抗压强度（MPa）
1	7	0	0	1.989	16.8	1.703	3.52
2	0	1	7	1.971	14.7	1.719	3.56
3	0	2	7	2.001	16.9	1.711	3.19
4	0	3	7	1.999	16.9	1.710	3.16
5	1	1	7	2.007	16.5	1.723	3.20
6	3	1	7	2.000	16.0	1.724	3.59
7	7	1	7	1.983	15.4	1.719	4.35

注：成样条件：S_n = 1:7，冻结温度 －15℃，水泥土混合后立即成样。

五、放置时间对水泥土强度的影响

水泥和土按一定配比拌和后，放置不同时间，控制相同的夯实功成样，做无侧限抗压强度试验，试验结果如图 9－1－4 所示。

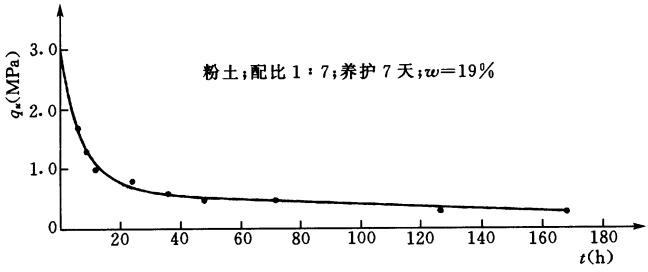


图 9－1－4　无侧限抗压强度 q_u 与拌和后不同间隔时间 t 的关系曲线

在 15h 以内无侧限抗压强度随放置时间的变化率很大。工程中水泥土的放置时间以不超过 2h 为宜。

六、桩体应力应变曲线

三轴试验的桩体应力应变曲线如图 9－1－5 所示。由于桩体强度比搅拌水泥土桩高得多，故破坏主应力差与围压 σ_3 关系不大。

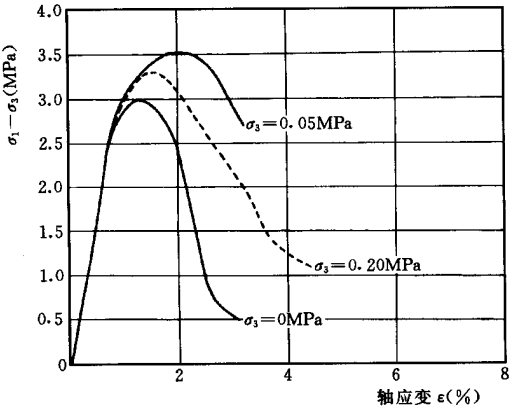


图 9－1－5　三轴试验的桩体应力应变曲线

第四节　夯实水泥土桩适用范围及成桩工艺效应

一、夯实水泥土桩的适用范围

在目前的施工工艺下，夯实水泥土桩适用于处理地下水以上的淤泥质土，人工填土、粉土、粘性土地基。长螺旋钻成孔一般不大于 10m，人工洛阳铲成孔不宜超过 6m，桩径一般为 350～600mm，并通过褥垫层与桩和基础相联系。

二、不同成桩工艺的复合地基效应

夯实水泥土桩施工多用排土成孔，此时复合地基只有置换作用 对松散填土可采用挤土成孔工艺，此时复合地基既有置换作用又有挤密作用。

第二章　柱锤冲扩桩法处理地基

第一节　概　述

一、柱锤冲扩桩法概念

重锤夯实是利用起重机械将夯锤提升到一定高度，然后自由落下，重复夯击基土表面，使地基表面形成一层比较密实的硬壳（表层），从而使地基得到加固。本法具有起吊使用轻型设备，易于解决，施工简便，费用较低等优点；但布点较密，夯击遍数多，施工期相对较长，同时夯击能量小，孔隙水难以消散，加固深度有限，当土壤含水量稍高，易夯成橡皮土，处理较困难。由于使用常规设备，施工简单，仍不失为一种常用的简单、经济的浅层地基处理方法。适于地下水位 0.8m 以上、稍湿的粘性土、砂土、饱和度 $s_r \leqslant 60$ 的湿陷性黄土、杂填土以及分层填土地基的加固处理。但当夯击对邻近建筑物有影响，或地下水位高于有效夯实深度时，不宜采用。重锤表面夯实的加固深度一般为 1.2～2.0m。湿陷性黄土地基经重锤表面夯实后，透水性显著降低，可消除湿隐性，地基土密度增大，强度可提高 30%；对杂填土则可以减少其不均匀性，提高承载力。

二、机具设备

1.夯锤　用 C20 钢筋混凝土制成，外形为截头圆锥体（图 9－2－1），锤重为 2.0～3.0t，底直径 1.0～1.5m，锤底面单位静压力宜为 15～20kPa。

2.吊钩　采用自制半自动脱钩器(图 9－2－2),以减少吊索的磨损和机械振动。

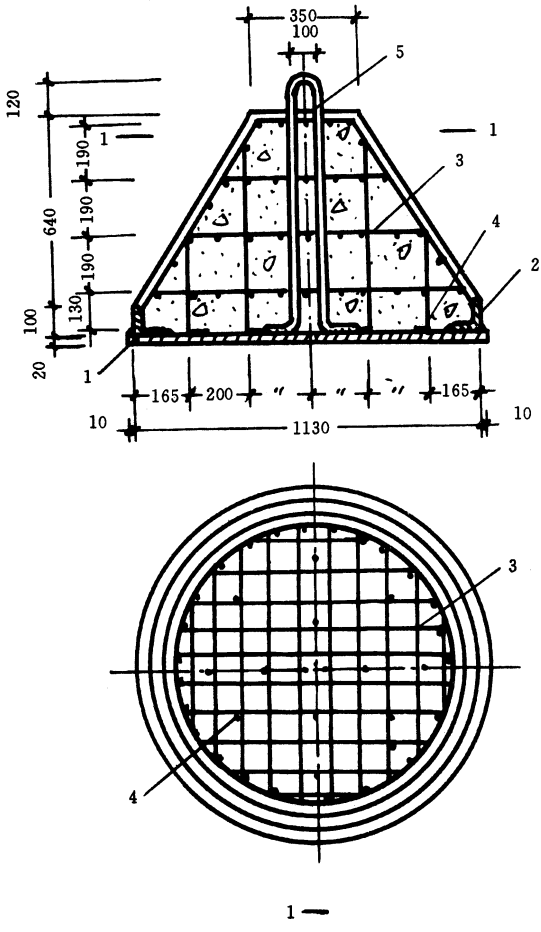


图 9－2－1　混凝土夯锤

1－15～20mm 厚钢板;2－100×100mm 角钢;3－φ8mm 网格 100×100mm 钢筋网;4－φ10mm 锚钉;5－30mm 吊环

3.起重机　可采用配置有摩擦式卷扬机的履带式起重机、打桩机、悬臂式桅杆起重机或尤门式起重机等。其起重能力:当采用自动脱钩时,应大于夯锤重量的 1.5 倍;当直接用钢丝绳悬吊夯锤时,应大于夯锤重量的 3 倍。

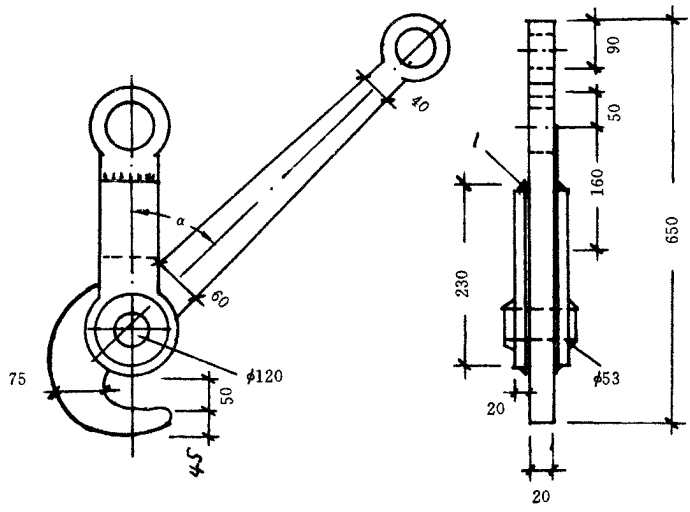


图 9－2－2　吊钩构造

1－焊缝；α－起重时夹角控制在 39.4°内

第二节　柱锤冲扩桩法施工及其质量控制

一、施工工艺

1.施工前应进行试夯，确定有关技术参数，如夯锤重量、底面直径及落距、最后下沉量及相应的夯击遍数和总下沉量。最后下沉量系指最后二击平均每击土面的夯沉量，对粘性土和湿陷性黄土取 10～20mm；对砂土取 5～10mm；对细颗粒土不宜超过 10～20mm。落距宜大于 4m，一般为 4～6m。夯击遍数由试验定，通常取比试夯确定的遍数增加 1～2 遍，一般为 8～12 遍。土被夯实的有效影响深度，一般约为重锤直径的 1.5 倍。

2.夯实前，槽、坑底面的标高应高出设计标高，预留土层的厚度可为试夯时的总下沉量再加 50～100mm；基槽、坑的坡度应适当放缓。

3.夯实时地基土的含水量应控制在最优含水量范围以内，一般相当土塑限含水量 ±2%。现场简易测定方法是：以手捏紧后，松手土不散，易变形而不挤出，抛在地上即呈碎裂为合适；如表层含水量过大，可采取撒干土、碎砖、生石灰粉或换土等措施；如土含水量过低，应适当洒水，加水后待全部渗入土中，一昼夜后方可夯打。

4.大面积基坑或条形基槽内夯实时，应一夯挨一夯顺序进行（图 9－2－3），即第一遍按一夯挨一夯进行，在一次循环中同一夯位应连夯两下，下一循环的夯位，应与前一循环错开 1/2 锤底直径的搭接，如此反复进行，在夯打最后一循环时，可以采用一夯压半夯的打法。在独立柱基夯打时，可采用先周边后中间或先外后里的跳打法（图 9－2－3b、9－2－3c）。为了使夯锤底面落下时与土接触严密，各次夯迹之间不互相压叠，而是相切或靠近。压叠易使锤底面倾斜，与土接触不严，功能消耗，降低夯实效率。当采用悬臂式桅杆式起重机或龙门式起重机夯实时，可采用图 9－2－3d 顺序，以提高功效。

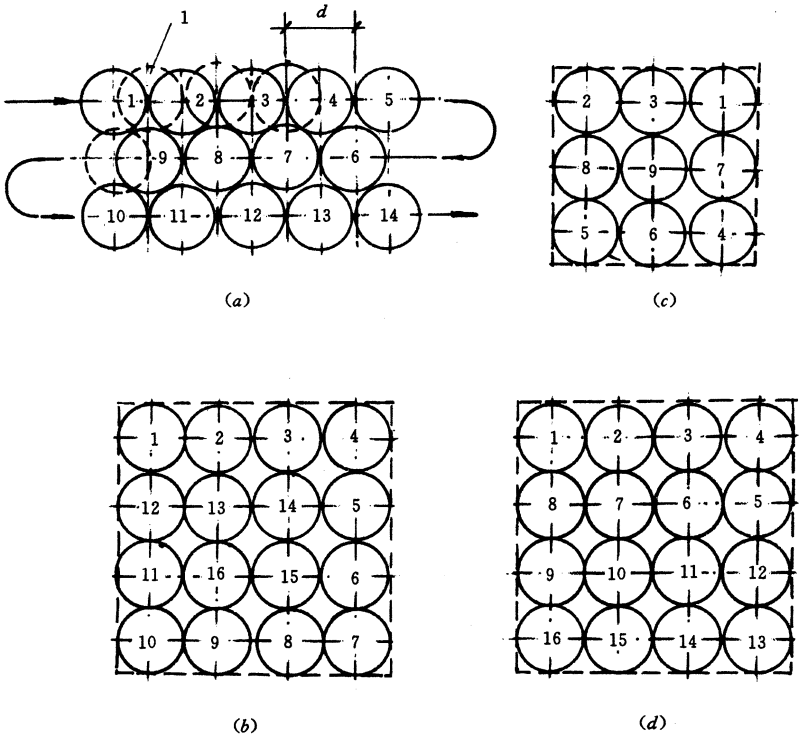


图 9－2－3　重锤夯实顺序

（a）一夯挨一夯顺序；（b）先周围后中间顺序；（c）跳打法顺序；（d）排夯顺序

1－重叠夯；d－重锤直径

5.基底标高不同时，应按先深后浅的程序逐层挖土夯实，不宜一次挖成阶梯形，以免夯打时在高低相交处发生塌坍。夯打作到落距正确，落锤平稳，夯位准确，基坑的夯实宽度应比基坑每边宽 0.2～0.3m。基槽底面边角不易夯实部位应适当增大夯实宽度。

6.重锤夯实填土地基时，应分层进行，每层的虚铺厚度以相当于锤底直径为宜。

夯实层数不宜少于2层。夯实完后，应将基坑、槽表面修整至设计标高。

7.重锤夯实在10～15m以外对建筑物振动影响较小，可不采取防护措施，在10～15m以内，应挖防震沟等作隔震处理。

8.冬季施工，如土已冻结，应将冻土层挖去或通过烧热法将土层融解。若基坑挖好后，不能立即夯实，应采取防冻措施，如在表面覆盖草垫、或锯屑或松土保温。

9.夯实结束后，应及时将夯松的表层浮土清除或将浮土在接近最优含水量状态下重新用1m的落距夯实至设计标高。

二、工程典例

某厂主厂房为三跨单层装配式钢筋混凝土结构，跨距分别为18m、24m、30m，柱距为6m，部分为12m、18m，厂房内有5t、5t、30t天车，柱埋深1.85～3.5m，地下设备基础埋深为3～6m，处于Ⅰ级湿陷性黄土地基上，地下古墓、洞穴较多，为防止地基浸水后湿陷破坏，采用重锤夯实作表层处理。

(一)地质概况

厂房位于黄河冲积阶地上，土质主要由大孔性黄土状粉质粘土构成。自地面由上而下为：褐色粉质粘土，大孔较多，结构松散，含少量白色条纹，厚度为1.9～3.2m；褐色粘土，大孔较少，结构较紧密，有腐朽植物遗迹，厚为2.4～5.1m；淡黄色粉质粘土，大孔较多，结构较密，厚度为1.0～1.5m；深红色粘土，大孔较多，结构紧密，含少量僵石，埋藏厚7～8m。各土层的主要物理力学性能见表9－2－1。

表9－2－1　　各土层的主要物理力学性能

层次	力学性质 / 土类	含水量 %	孔隙比	塑限	压缩系数	相对湿陷系数
1	褐色灰粉质粘土	10～24 15.5	0.73～1.04 0.867	13～21 15.4	0.006～0.052 0.0264	0.001～0.09 0.033
2	褐色粘土	14～34 26.4	0.51～1.17 0.975	15～25 19.3	0.006～0.058 0.021	–
3	淡褐色粉质粘土	10～23 21.0	0.81～0.96 0.91	14～19 16.2	0.006～0.031 0.0127	0.001～0.067 0.025
4	深红色粘土	18～26 21.3	0.65～1.07 0.838	14～24 17.8	0.005～0.021 0.0104	–

注：表中数据分子为波动范围，分母为平均值。

(二)施工参数

施工前先通过试夯,确定施工参数为:锤重 1.57t,落距 3.7～3.8m;每夯打一遍后下沉量如图 9－2－4 所示,据此确定－4m 以上地基预留 200mm 高土层;－5.5m 下者则预留 300mm 高土层,最后下沉量 10～20mm 的夯打遍数为 4～5 遍。为检验夯实

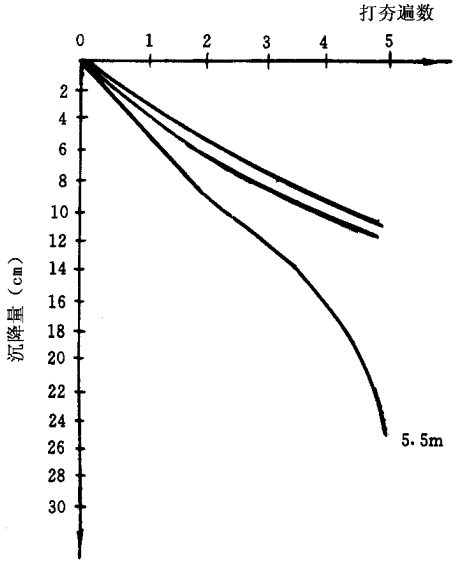


图 9－2－4　夯实沉降量与击数的关系

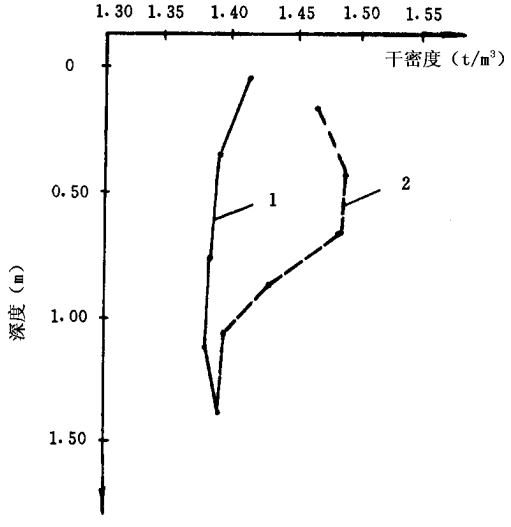


图 9－2－5　重锤夯实前后土的干密度沿深度变化曲线
1－夯实前;2－夯实后

后土的影响深度,曾进行了夯前夯后土壤的原位干密度测试,其变化曲线见图 9－2－5,由图知重锤夯实的影响深度在 1.4m 范围以内,在 0.1m～0.65m 范围内加固效果显著。

(三)施工

起重设备采用过 15t 履带式起重机和悬臂式桅杆赶重机,两种设备均可满足要求,后者移动较慢些,但适应性强,较为经济、实用。夯锤如图 9－2－1 所示,锤底为圆形,采用自动脱钩器脱钩,夯实采用一夯挨一夯打法;土壤的含水量控制在 20～22%,亦即土的最优塑性指数 +2 时的含水量,不宜过小或过大,过小时适当晒水湿润,过大时易出现反浆或橡皮土应自然晾干或换土;遇雨或基坑积水,采取晾干或掺部分吸水材料(如石灰粉、干碎砖等)拌和均匀后,再行夯实。

(四)效果及评价

该工程柱基、设备基础地基全部采用重锤夯实处理,使地基强度提高 30%左右,基底 1.5m 范围内的湿陷性消除,经 5 年沉降观测柱基下沉量在 7.08～10.29mm 之间,满足使用要求。该工程投产已 10 年、未发现厂房和设备基础不均匀下沉出现裂缝、倾斜等情况,表明加固效果良好。

三、施工质量控制

1.重锤夯实地基试夯的密实度和夯实深度必须达到设计要求。

2.重锤夯实地基的最后下沉量和总下沉量必须符合设计要求;夯后总下沉量不应小于试夯总下沉量的 90%。

3.夯击检查点数 独立基础每个不少于 1 处,基槽每 30m 不少于一处,整片地基每 50m^2 不少于 1 处。检查后如不合格,应进行补夯,直至合格为止。

根据经验,采用锤重 2.5～3.0t、锤底直径 1.2～1.4m、落距 4～4.5m,锤底静压力为 20～25MPa,消除湿陷性土层厚度为 1.2～1.75m,对非自重湿陷性黄土地区,采用重锤表面夯实的效果明显。