

强夯法加固填土地基的效果检测与分析*

万长吉 王其善

(郑州工学院水环系)

摘 要: 河南某电厂是国家“七·五”重点工程, 厂区原地面起伏不平, 为了改造原地貌复杂多变的不良条件, 采用填土地基。为改善填土层的物理—力学性质, 提高地基的承载力, 消除 I 级非自重湿陷性黄土的湿陷性用强夯法加固地基。本文介绍了该工程强夯设计的基本要点, 强夯效果检测方法, 并根据试验资料分析了地基强持力层(超硬土层)形成的机理和消除黄土湿陷性的原因。通过多种检测方法证明, 用强夯法加固大面积填土具有效果好、费用低、进度快等优点, 是合理的加固措施。

关键词: 地基处理, 强夯, 分析。

中国图书分类号: TU47

河南某电厂是国家“七·五”重点工程, 占地 40 万 m^2 , 第一期装机容量为 40 万 kW, 厂区及生活区为人工填土的平坦地面, 填土前原地面起伏不平以垄岗地形为主, 微地貌单元变化复杂, 主要分布有第四系黄土状亚粘土、粘土及 I 级非自重湿陷性黄土, 第三系钙质泥岩及砂岩等。填土厚度一般为 4—13m, 最大厚度为 16m, 填土主要成分是黄土状亚粘土内含钙质泥岩团块及砂岩风化石。由于原地形地貌条件复杂岩性变化大, 填土厚度不同等问题, 需要对填土地基进行加固。在斗轮机房、点火油罐、食堂、俱乐部、综合楼单身楼及家属楼等建筑物地基采用强夯加固法, 到目前为止已加固填土地基 5 万 m^2 。

强夯加固软土地基是 70 年代初由法国梅纳尔公司首创的新方法, 目前已在我国普遍使用。强夯法用于加固大面积的填土地基, 在我省尚属首次。

我们与中国科学院武汉岩土力学研究所共同对强夯效果进行检测, 从 1989 年 11 月至 1990 年 11 月在现场对夯前及夯后地基进行勘探, 布孔 60 个其中取样孔 30 个, 标贯试验孔 30 个并进行大量的室内试验, 现场载荷试验及现场的物理—力学性质试验, 为设计和施工部门提供了必要的资料和数据。

* 收稿日期: 1991-01-07

1 强夯设计

1.1 强夯设计要求

该电厂填土地基加固和具体要求如下:

① 改善地基土层的物理—力学性质,根据不同建筑物要求使填土地基的承载力提高到 150—330KPa(15—33T/M²).

② 改善地基土层中部分 I 级非自重湿陷性黄土的湿陷性。由于目前对此类特种土的设计理论与计算方法尚不完善,处理措施亦不统一,强夯法是消除黄土湿性的有效方法之一,通过此次强夯加以检测和论证。

③ 使地基土层中第三系钙质泥岩风化层的膨胀性能加以控制。

1.2 强夯设计基本要点

① 为达到上述三项要求,综合考虑强夯机具的设备能力,建筑物类型及地基条件,设计单击能为 1000—3200KN·m,锤重为 10—16t,落距 10—20m。按建筑物对地基的不同要求采用不同的单击能。

② 每个场地的强夯分三遍进行,最初两遍用高夯击能,第三遍用中夯击能,最后平整场地采用低夯击能满拍。前后两遍之间的时间间隔取决于超孔隙水压力的消散程度,该电厂填土地基一般为 1.5—2 周。

③ 夯点间距:前两遍均按点距 4.2m,行距 2.1m,两遍的点位正好错开(即相间分布),第三遍按 2.1×2.1m 的方格布点。

④ 夯点的控制击数:强夯开始后应测量每击强夯的贯入度,贯入度的大小与填土厚度、密度、地下水埋深及单击能的大小有密切关系。对于条件相同的场地,各点的最后贯入度应基本保持一个近似值,并以此控制各点的击数,该电厂生活区的强夯一般为 7—8 击。检测证明,在填土厚度为 5—6m 时此击数为最佳击数。

2 强夯效果检测

为了检查强夯效果和取得有关参数,在生活区选择了一个有代表性的填土试验区,进行了夯前夯后土层剖面观察、土的物理—力学性质及载力的测试。在此试验区之外,又进行 33 个钻孔取样和标贯试验(取样和标贯均按每 0.5m 进行一次)和 12 个载荷试验。

2.1 夯前土层剖面

本区土层剖面为,上部 6 m 左右为填土,填土之下为第四系上更新统冲积黄土状亚粘土,系本区的老土。

填土以细粒土为主,粗粒不超过 5%,粗粒成份为钙质泥岩,属素填土。填土时经过分层碾压,但未能很好控制质量,少数地区填土的紧密程度不均一。

2.2 夯后土层剖面

试夯区夯后地面平均下沉约 70cm 左右,为检查强夯效果在试夯区挖试坑,不同深度的土层特征如下:

地表到 2m 深度范围内, 夯坑的坑壁呈圈层状, 坑口四周地面隆起约 25cm, 出现放射状的垂直裂缝通向地表, 坑底土层坚硬, 袖珍贯入仪不能贯入、用直径为 10cm 的大环刀取样十分困难。

表 1 土工试验成果简表

土样编号		取样深度(m) (地面起)	液 限 $W_L\%$	塑 限 $W_P\%$	塑性指数 I_p	天然密度 ρ g/cm^3
夯前	A0.3	0.0~0.3	23.8	12.9	10.9	1.90
	A0.5	0.5~0.7				1.99
	A1.7	1.7~1.9	33.5	16.7	16.8	1.90
	A2.5	2.5~2.7	25.5	12.9	12.6	1.95
	A3.6	3.6	32.0	16.9	16.0	1.81
夯后	B0.5	2.0	32.8	18.0	14.8	2.20
	B1~1.2	2.5~2.7	32.5	16.6	15.0	2.19
	B1.8~2.0	3.3~8.5				2.19
	B2.8~3.0	4.3~4.5				2.13
	B3.6	5.1	31.0	16.8	14.2	2.14~2.25
	B3.0~4.2	5.4~5.7				1.93

注: A: 夯前土样 夯后土样

续表 1

土样编号		孔隙比 e	最大干密度 ρ_d g/cm^3	最优含水量 $W_{opt}(\%)$	压实系数 ρ_d/ρ_{dmax}	压缩模量 E_s MPa	凝聚力 C KPa	内摩擦角 φ 度
夯前	A0.3	0.574~0.693	2.05	11.0	0.83~0.78			
	A0.5	0.489	2.05		0.86			
	A1.7	0.658	1.90	15.4	0.84			
	A2.5	0.664	1.98		0.80	20.9	134.0	23.0
	A3.6	0.696	1.94	12.8	0.82	16.4	89.0	21.5
夯后	B0.5	0.284	2.05	15.4	0.95			
	B1~1.2	0.679~0.456	2.05		0.93			
	B1.8~2.0	0.456	2.05		0.93			
	B2.8~3.0	0.449	2.05		0.90	18.1	94.1	32.8
	B3.6	0.406~0.394	2.05		0.93			
	B3.0~4.2	0.587	1.98		0.84	12.7	52.8	22.1

深度在 2 到 5m 范围内土层坚硬开挖困难, 土层致密均匀, 土样在大号环中易成饼状, 切削困难, 土层含水量随深度的增加而增大。在 5m 以下土的粘性增大, 坚硬程度略低于上部土层。

2.3 地基土的基本物理—力学特性

取夯前夯后不同深度的土样, 进行了一系列土工试验(见表 1)。

① 含水量和容重

从表 1 可以看出, 夯前的含水量变化较大, 从 11.2% 到 21.5%。夯前土层一些较大的硬土块及白色夹层, 其含水量较低, 约为 11.0%~13.0%; 而黄褐色亚粘土的含量同夯前相差不多, 但变化幅度为 12.7%~19.0%。

从密度指标来看, 夯后密度普遍比夯前密度明显提高, 但夯后土层在沿深度方向上干密度突然减少, 界线大约在地表以下 5.5m 处, 即在填土与老土的分界面附近见图 1。

② 孔隙比和孔容

在地表以下 2.0~5.1m 之间夯后地基土的孔隙比 $e=0.380\sim0.480$, 比夯前 $e=0.660\sim0.700$ 明显减少见图 2。

另外, 在深底 5.4~5.7m 范围内, 夯后土层的孔隙比 (e) 增加为 0.59。

可以看出, 干密度和孔隙比突变的部位均在填土与老土层的分界面附近, 说明强夯时冲击波通过该界面有明显地叠加现象。

夯后土层整个剖面上各部位的总孔隙体积都明显减少。孔容试验结果见表 2。

表 2 微孔隙分布表

样品编号		某孔径范围所占体积及百分比($\text{mm}^3/\text{克土}\sim\%$)								总孔容 ($\text{mm}^3/\text{克土}$)
		$> 3.7\mu$	%	$3.7\mu\sim 10^{-1}\mu$	%	$3.7\times 10^{-1}\mu\sim 3.7\times 10^{-2}\mu$	%	$3.7\times 10^{-2}\mu\sim 3.7\times 10^{-3}\mu$	%	
夯前	A0.3	20.5	18.0	21.0	18.5	35.5	31.3	36.6	32.2	113.6
	A0.5	11.0	10.0	20.5	18.6	33.0	30.0	44.5	40.4	109.0
	A1.8	11.5	12.3	36.0	27.8	17.5	18.7	38.6	41.2	93.6
	A3.6	19.0	16.0	28.0	23.9	26.0	22.2	44.0	37.6	117.0
夯后	B0.3	12.0	14.3	19.0	22.7	22.0	26.3	30.7	36.7	83.7
	B1.1	9.5	12.6	14.0	18.6	17	22.6	34.5	45.9	75.1
	B1.9	10.5	13.0	14.5	17.9	15	18.5	41.0	50.6	81.1
	B2.9	9.0	11.3	14.5	18.3	15.5	19.5	40.4	50.9	79.4
	B3.6	11.0	11.3	25.0	26.8	22.0	23.6	35.4	37.9	93.4
	B4.0	16.5	13.6	23.5	26.5	19.0	21.4	29.7	33.5	88.7

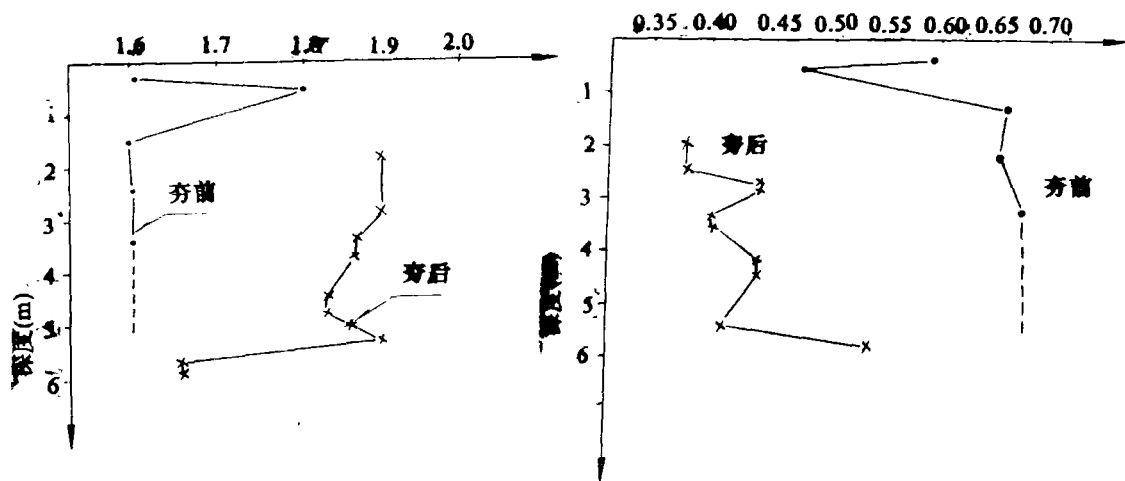


图 1 夯前夯后干密度随深度变化曲线

图 2 夯前夯后孔隙比随深度变化曲线

2.4 现场载荷试验

现场载荷试验是确定地基承载力的重要手段, 现仅将生活区夯前、夯后等七个试验点的试验成果列入表 4。

从表 3 可知, 地表以下 0.2m 到 3.0m 的试验深度内地基已形成了坚硬的持力层, 夯后土层的承载力除一个点为 223kPa 外, 其余各点均达到 330~490kPa 以上, 是夯前的 4~5 倍, 再次证明了强夯的效果。

表 3 载荷试验结果

	夯前	夯后						备注
		试夯区				食堂	单身楼	综合楼
深度(m)	地面下 1.0	坑底下 0.2	坑底下 1.5	坑底下 3.0	坑底下 0.4	坑底下 0.4	坑底下 0.7	按工民建范[R] 取值按 S/B=0.015 时的 P 值
变形模量 MPa	38.2	58.7	30.4	32.1	12.7	47.5	49.7	
承载力[R]kPa	93	> 330	490	490	228	633	627	

2.5 标准贯入试验

标准贯入试验是配合载荷试验确定地基承载力的又一原位试验, 同时也是确定强夯影响深度的有效手段之一。

统计所有标贯试验, 其结果是:

地面以下 2.0~4.0m, $N_{63.5} = 20 \sim 30$, 个别达 40—60 击;

4.0~6.0m, $N_{63.5} = 12 \sim 20$;

6.0~10.0m, $N_{63.5} = 8 \sim 10$;

10.0~15.0m, $N_{63.5}=7$, 与夯前值接近。

证明该电厂填土地基强夯的影响深度大致为 10m 左右。

参照规范换算 $N_{63.5}=30, 20, 12, 8$ 所对应的承载力分别为 600, 460, 300, 220kPa。很显然, 强夯后的填土地基是满足建筑物要求的。

3 检测资料分析

3.1 地基强持力层形成机理

综合上述各种检测资料可以看出, 在地表以下 2--5m 左右的范围内强夯效果最佳, 并形成 3m 左右厚的超硬土层。其标贯击数 $N_{63.5} > 20 \sim 30$, 个别可达 40--60; 最大干密度为 2.05g/cm^3 ; 压缩模量 $E_s = 18.1 \sim 18.5\text{MPa}$, 成为对建筑物十分有利的强持力层。

强持力层的形成是由多种因素决定的, 其中冲击波应力迭加效应是主要原因之一。日本专家土谷认为: 每次夯击的影响深度大致等于夯击点间距, 对夯点的集中夯击, 则改良深度增加。该电厂强夯设计高能夯击点间距为 4.2m, 行距为 2.1m, 低能夯击点间距为 $2.1\text{m} \times 2.1\text{m}$, 每遍夯击数次。由于应力迭加, 故在地表下 2--5m 左右的范围内形超硬土层 (见图 3, 图 4), 再次证明该电厂的强夯设计和施工是合理的。

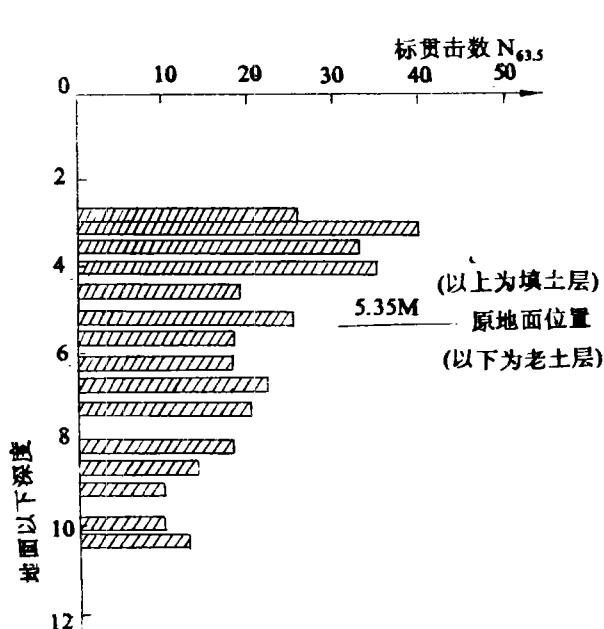


图 3 14# 钻孔标贯试验成果

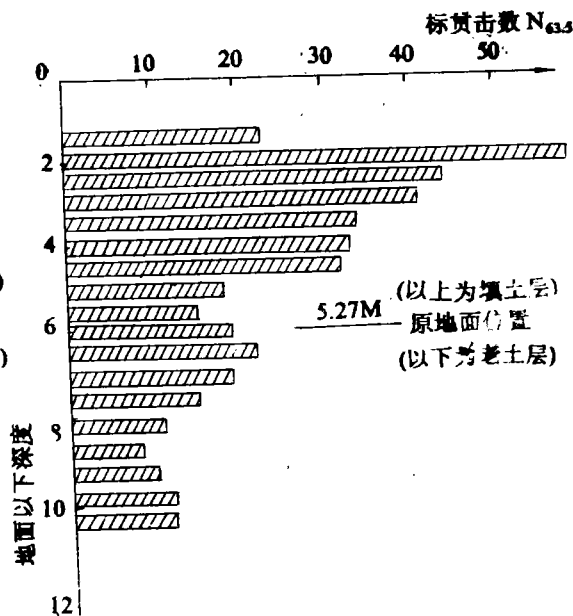


图 4 16# 钻孔标贯试验成果

另外, 在生活区一般填土厚度为 5--6m 左右, 由于老土层与填土层的密度、成分差别较大故在接触带形成分界面。因此, 夯击时冲击波在该分界面所形成的反射波和折射波也会在上部造成应力迭加, 有助于强持力层的形成。

在地表处, 由于冲击波的一部分形成表面波, 消散部分能量, 强夯后沿表面产生应力

释放,故表层的强度低于强持力层。

3.2 消除黄土湿陷性问题

根据强夯后的土层观察资料和土工试验、孔容试验等资料得知,湿陷性黄土大孔隙结构已被破坏,垂直节理消失,土的干密度均超过 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$ 以上,土体已被压密,总孔容已明显降低,水的渗入作用受到阻碍,黄土湿陷性已被消除。

强夯消除黄土湿陷性的主要原因,是破坏黄土的湿陷结构,土的干密度增大到 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上,为此必须有足够的夯击能和夯击次数。该电厂生活区采用两遍高能夯击,每遍夯击数一般 7—8 次,其单击能为 $320\text{吨}\cdot\text{m}$,已足以使土体大孔隙结构破坏,此结论与文献[1]相同。

4 结 论

根据上述检测结果及其分析,可以得出以下几点结论:

- 4.1 强夯加固大面积填土地基的方法是有效的、经济可行的。
- 4.2 强夯后地基土质明显改善,影响深度一般为 10m 左右,但效果最佳是在 2—5m 左右的深度范围内,并已在基础之下形成 3m 左右的超硬层,可作为各类建(构)筑物的良好持力层。
- 4.3 强夯后的地基容许承载力大幅度提高,变形性能也得到改善,已能满足结构设计的要求。
- 4.4 填土抗剪强度参数 c , ϕ 值也大大提高,原地面以下的老土层在强夯影响深度范围内的力学性质也得到改善。
- 4.5 原状土中 I 级非自重湿陷性黄土的湿陷性已被消除,钙质泥岩的膨胀性得到控制。

参 考 文 献

- (1) 冯广第等. 用强夯法消除黄土的湿陷性一例. 全国第三次工程地质大会论文选集. 成都科技大学出版社. 1988 年
- (2) 福冈正己. 王玉琴译. 最近软弱地基处理方法. 中国铁道出版社. 1988 年

(下转 55 页)

本文中的方法已在《公路工程网络计划管理》软件中得以实现。

Network Planning Generated by Computer

Shu La

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: This thesis presents the method of generating network planning and the process of dealing numerically with the source data.

Keywords: network planning, generate.

(上接 50 页)

Examination and Analysis on the effectiveness of the Method of Powerful Tamping in Strengthening earth fill foundation

Wan Changji Wang Qisan

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: The construction of He-pi power plant in Henan Province is one of the important projects of the National Seventh Five-Year Plan. The topography of the plant ground surface is undulated. Thus the earth fill foundation of large size is used in order to convert the undulation into level ground. The thickness of the earth fill is from 4 to 13 meters, the maximum is sixteen meters. Most of the buildings of the plant are laid on the earth fill. The earth fill foundation is strengthened by the method of powerful tamping. By this method it can improve the physico-mechanical properties of the soil of the earth fill, can raise the bearing capacity of the earth foundation and can eliminate the collapsibility by soaking of the foundation of catalogue I of non-dead weight collapsible loess.

In this paper the main points of design and the methods of examination of the effect of the powerful tamping, and the mechanism of the formation of the strong-strength layer (i.e. the super-hard pansoil) and the causes of the elimination of the collapsibility of loess by soaking are introduced.

It is confirmed by many different examination methods that using powerful tamping to strengthen the earth-fill foundation of large size has the advantages of good effect, low cost and high speed in construction. Really it is a reasonable strengthening measure.

Keywords: ground treatment, Powerful tamping, analysis.