

# 强夯法处理湿陷性黄土地基评价

贺为民<sup>1, 2</sup>, 范建<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 通过强夯法处理湿陷性黄土后的现场静载荷试验与静力触探原位测试数据对比分析, 得到强夯地基承载力特征值  $f_{ak}$  与静力触探锥尖阻力最小平均值  $q_c$  的关系式。在此基础上, 依据设计要求建立采用静力触探法定量评价强夯地基承载力的方法和标准, 利用静力触探原位测试数据对该强夯地基承载力进行定量评价, 发现强夯地基软弱层并确定软弱层区的分布范围。采用探井取土样及土工试验对该强夯地基湿陷性进行定量评价, 并发现 2 个探井中地基土剩余湿陷量较大; 分析软弱层的成因并采取石灰砂桩等补强处理措施, 消除强夯地基隐患。采用静力触探法, 依据承载力标准较精确地划分强夯有效加固深度和影响深度; 采用土工试验法, 按照消除湿陷性标准确定强夯有效加固深度, 发现两者确定的强夯有效加固深度存在差异。

**关键词:** 土力学; 强夯; 静载荷试验; 静力触探; 地基承载力特征值; 有效加固深度; 湿陷性黄土

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4095 - 07

## EVALUATION OF COLLAPSIBLE LOESS SUBGRADE TREATED BY DYNAMIC COMPACTION

HE Weimin<sup>1, 2</sup>, FAN Jian<sup>2</sup>

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou, Henan 450002, China*)

**Abstract:** Through analyzing the data of the static loading tests(SLT) and the cone penetration tests(CPT), which are on the collapsible loess subgrade treated by dynamic compaction, the corresponding formulae of the characteristic value of dynamic subgrade bearing capacity  $f_{ak}$  and the minimum mean value of cone resistance  $q_c$  are obtained. Accordingly, after method and standard of quantitative evaluation of dynamic subgrade bearing capacity are established on the basis of design requirement, and the dynamic subgrade bearing capacity is quantitatively evaluated using the CPT. Weak layers are found and areas with weak layers are determined in the dynamic subgrade. The collapsibility of dynamic subgrade is quantitatively appraised by the test method of soil samples from the investigation wells, and larger remnant collapses are found in 2 investigation wells in the dynamic subgrade. The cause of formation of weak layers is analyzed and lime piles are considered to eliminate the potential dangers in the areas with weak layers. Effective reinforcement depth and influencing depth after dynamic compaction are accurately decided using the CPT on the basis of subgrade bearing capacity standards, the effective reinforcement depth after dynamic compaction is also decided using soil test method on the basis of remnant collapse standards, and the difference of effective reinforcement depths between both methods is found.

**Key words:** soil mechanics; dynamic compaction; static loading test(SLT); cone penetration test(CPT); characteristic value of subgrade bearing capacity; effective reinforcement depth; collapsible loess

**收稿日期:** 2006 - 10 - 16; **修回日期:** 2007 - 01 - 26

**作者简介:** 贺为民(1965 -), 男, 硕士, 1987年毕业于成都地质学院物探专业, 现为博士研究生、高级工程师、注册土木工程师(岩土), 主要从事岩土工程勘察检测和地质灾害评估治理方面的研究工作。E-mail: heweimin54@yahoo.com.cn

# 1 引言

强夯法在处理地基尤其是加固大面积软弱地基方面由于具有加固效果显著、设备简单、节省劳力、节约材料、施工期短、施工费用低等优点而应用范围极为广泛<sup>[1]</sup>，强夯加固效果的评价可分为预测性和检测性评价<sup>[2]</sup>。其中，预测性评价是指在施工前根据选定的施工参数和地基条件评价处理效果的理论和方法，它是强夯施工设计的理论依据，在这方面的研究成果<sup>[2~5]</sup>较多，但仍需工程实践进一步检验。检测性评价是对强夯后地基进行检测与评价，是检验地基处理是否达到设计和规范要求、保证工程安全的必备工序。就湿陷性黄土强夯地基而言，检测性评价的核心内容是强夯地基承载力、有效加固深度和湿陷性，目前在这方面的成果<sup>[6~9]</sup>也不少，但基本上仍然是依靠静载荷试验来定量评价强夯地基承载力，而采用静力触探、动力触探和标准贯入试验等检测方法大都是仅对强夯效果作出定性评价，或是借用当地勘察天然地基时的经验关系来估算强夯地基承载力。本文以豫西电厂冷却塔强夯地基为例，建立了采用静力触探法评价强夯地基承载力的定量方法和标准，主要依据静力触探检测成果对该强夯地基承载力进行了定量评价，发现强夯地基软弱层并确定了软弱层区的分布范围，较精确地划分了强夯有效加固深度和影响深度；采用土工试验法对强夯地基湿陷性进行了定量评价，发现局部湿陷性消除程度不够。该强夯地基不足之处均及时采取了相应补强处理措施，消除了地基隐患，确保了建筑物的安全。本文还得出了一些有益的结论，对类似工程具有一定借鉴作用。

## 2 工程及工程地质概况

### 2.1 工程概况

豫西电厂位于河南省洛阳市东北部，其检测点及软弱层分布情况如图 1 所示。淋水区半径为 55 m，环基区半径 77 m，基底高程为 130.3 m。地基土为湿陷性黄土，采用强夯法进行地基处理。设计要求淋水区地基承载力特征值不小于 200 kPa，环基区地基承载力特征值不小于 300 kPa，并消除地基土的湿陷性。

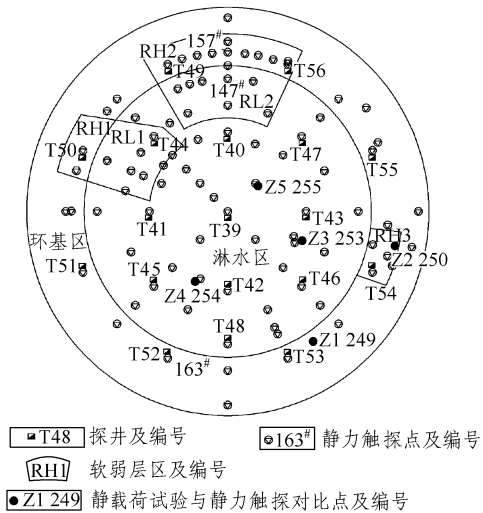


图 1 检测点及软弱层区分布图  
Fig.1 Distribution of checkpoints and areas with weak layers

### 2.2 场地工程地质概况

场地地形高低不平，局部有沟渠。勘察时地面已基本整平(高程为 134.0 m)，表层为 2.5~6.2 m 厚的素填土(粉质黏土)；下覆黄土状粉质黏土，层底埋深为 13.1~18.0 m，湿陷性中等，最大湿陷深度为 13.6 m，主要物性指标见表 1。该场地为非自重湿陷性黄土场地，地基的湿陷等级为 II 级(中等)。地下水水位埋深 19.0 m。

### 2.3 强夯施工设计概况

冷却塔地基强夯主夯点直径为 2.5 m，夯点东西向排间距为 4.3 m，SN 向排间距为 5.0 m，梅花型

表 1 场地黄土的主要物性指标  
Table 1 Main physical indices of loess

统计分类	含水量 /%	容重 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	干容重 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	压缩系数 / $\text{MPa}^{-1}$	湿陷系数	
									200 kPa	300 kPa
最大值	21.0	18.8	15.9	0.969	30.3	19.7	11.5	0.27	0.051	0.068
最小值	14.7	15.6	13.8	0.710	26.3	17.6	8.9	0.09	0.005	0.012
平均值	18.4	17.4	15.0	0.819	28.3	18.1	10.5	0.18	湿陷性轻微~中等	湿陷性中等~中等

布点。夯击能为 8 000 kN·m，单点夯击 20 击，最后 2 击夯沉量小于 5 cm 为停锤标准，主夯分 2 遍进行，隔行夯击。复夯夯击能为 4 000 kN·m，单点夯击 10 击，最后 2 击夯沉量小于 5 cm 为停锤标准，一遍完成。拍夯夯击能为 3 000 kN·m，单点夯击 6 击，夯印搭接 1/4，隔行分 2 遍进行。

自强夯起夯面高程 132.3 m 起算，勘察资料表明，场地最大湿陷深度为 11.9 m，为了消除湿陷性，要求强夯加固深度也要达到 11.9 m。本次强夯主夯点夯击能设计为 8 000 kN·m，主要依据下述两点并结合经验考虑：第一，林宗元<sup>[1]</sup>中表 1.4 - 2 认为，当单点夯击能为 7 000~8 500 kN·m 时，消除湿陷性黄土层的有效深度预估值对于全新世及晚更新世黄土为 9~12 m；第二，依据修正的 Menard 公式<sup>[2]</sup>，估算强夯影响深度  $H$ ：

$$H = \alpha \sqrt{wh/10} \tag{1}$$

式中： $wh$  为夯击能(kN·m)， $\alpha$  为修正系数。当  $\alpha = 0.5$  时，估算强夯影响深度  $H = 14.1$  m。

### 3 强夯地基原位测试数据对比分析

#### 3.1 静载荷试验

静载荷试验按规范<sup>[10]</sup>中附录 J 的要求进行，在豫西电厂强夯地基上共做了 14 组静载荷试验，其中 Z1~Z5 位于该冷却塔强夯地基内(见图 1)，Z6~Z14 位于其他建筑强夯地基上。静载荷试验承压板直径  $d$  均为 1.0 m，其  $p-s$  曲线见图 2。这些  $p-s$  曲线基本无明显拐点，亦无明显的比例界限，可取相对变

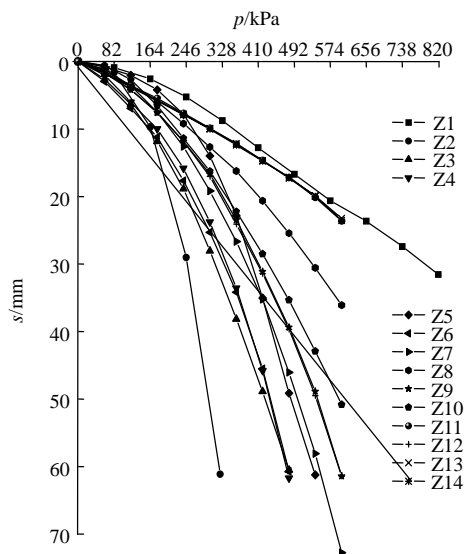


图 2 强夯地基静载荷试验  $p-s$  曲线

Fig.2 Curves of  $p-s$  of the SLT on dynamic subgrade

形  $s/d = 0.010$  所对应的压力作为其承载力特征值  $f_{ak}$ 。

#### 3.2 静力触探试验

静力触探按规范<sup>[11]</sup>中 10.3 条等要求进行，在上述 14 组静载荷试验点上均进行了双桥静力触探原位测试。与静载荷试验对比分析时，静力触探锥尖阻力取载荷板下 2 m 深度内最小平均值  $q_c$ ，其与上述对应点静载荷试验确定的强夯地基承载力特征值  $f_{ak}$  对比结果见表 2。其中，静力触探锥尖阻力最小平均值  $q_c$  是指在某一深度区间(如某一土层)内锥尖阻力的最小值与平均值之和的一半。

表 2 静载荷试验与静力触探数据对比结果

Table 2 Comparative results of data of SLT and CPT

静载荷试验编号	$f_{ak}/kPa$	静力触探编号	$q_c/MPa$
Z1	353	249	8.0
Z2	164	250	2.5
Z3	155	253	3.0
Z4	180	254	3.0
Z5	254	255	5.0
Z6	214	256	4.0
Z7	162	257	4.5
Z8	260	258	5.0
Z9	212	259	4.0
Z10	224	260	3.8
Z11	300	261	6.5
Z12	216	262	4.0
Z13	300	263	6.3
Z14	297	265	7.0

#### 3.3 静载荷与静力触探测试数据对比分析

$f_{ak}-q_c$  关系曲线见图 3。

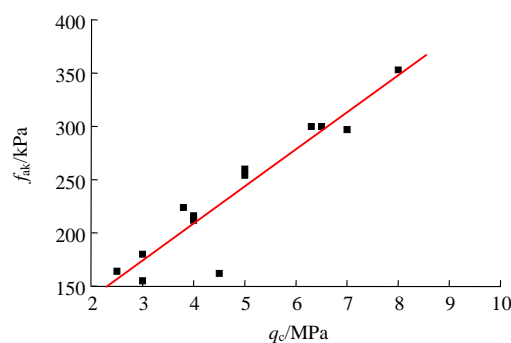


图 3  $f_{ak}-q_c$  关系

Fig.3 Relation curve between  $f_{ak}$  and  $q_c$

由图 3 可见， $f_{ak}$  与  $q_c$  基本上呈线性关系，并可

拟合出其关系式为

$$f_{ak} = 34.8q_c + 69.4 \quad (R = 0.936\ 47) \quad (2)$$

### 4 地基承载力及强夯加固深度评价

#### 4.1 检测点布置

冷却塔地基强夯处理面积为 18 617 m<sup>2</sup>, 依据规定(试行)<sup>[12]</sup>, 检测时布置探井 18 个, 静力触探孔 57 个(见图 1)。检测时场地地面高程为 132.3 m, 探井深度为 14 m, 静力触探孔深度为 17 m。为了确定强夯地基内软弱层的分布范围, 又局部加密了静力触探检测孔(孔深 10 m)。在对软弱层区进行了石灰砂桩补强处理后又采用静力触探法(孔深 10 m)进行了地基检测。

#### 4.2 强夯地基承载力及强夯加固深度评价

强夯地基夯后土层从上至下可分为强加密带、加密带和影响带。强加密带的土层完全失去原有结构, 土粒重新排列, 极为密实, 呈薄层状, 承载力大幅度增大, 土的湿陷性完全消除。加密带的土层也失去原有结构, 薄层状不明显, 承载力有明显提高, 土的湿陷性也消除。影响带土体的原始结构明显, 一般消除不了湿陷性。根据冷却塔强夯地基的设计要求和式(2), 采用  $q_c$  值可建立本场地强夯地基静力触探分层和承载力定量评价标准(见表 3)。依据每层静力触探锥尖阻力最小平均值  $q_c$  的大小可将地层划分为①层(强加密带和加密带)和②层(主要为下卧的原状土层)。考虑到①层局部存在软弱层, 还划分出了①-1, ①-2, ①-3 三个亚层。

表 3 强夯地基静力触探分层和承载力定量评价标准  
Table 3 Divided layers and evaluation standard of dynamic subgrade bearing capacity using CPT

层号	$q_c$ /MPa	$f_{ak}$ /kPa	承载力设计要求	
			淋水区	环基区
①	$\geq 6.7$	$\geq 300$	满足	满足
①-1	$< 2.0$	$< 140$	不满足	不满足
①-2	2.0~3.8	140~200	不满足	不满足
①-3	3.8~6.7	200~300	满足	不满足
②	$< 3.5$		不满足	不满足

在表 3 中, 对环基区而言, ①-1, ①-2 及 ①-3 层均为软弱层, ①层与其下卧层(一般为①-3, ①-2 或②层)的分界线埋深即为按承载力标准

确定的强夯有效加固深度; 对淋水区而言, ①-1 和①-2 层为软弱层, ①-3 或①层与其下卧层(一般为①-2 或②层)的分界线埋深即为按承载力标准确定的强夯有效加固深度, 而②层顶界面埋深即为环基区或淋水区的强夯影响深度。

根据上述分层方法和标准, 对强夯地基内每条静力触探测试曲线逐一进行了土层划分, 并按式(2)逐一定量计算了①, ①-1, ①-2, ①-3 层的承载力特征值  $f_{ak}$ 。以上分析表明, 淋水区和环基区大部分区域强夯地基承载力基本满足设计要求。其代表性静力触探测试曲线如图 4 所示, 为 163#静力触探孔, 位于环基区, 显然, 在该孔处按承载力标准确定的强夯有效加固深度为 9.4 m, 而强夯影响深度为 10.8 m。

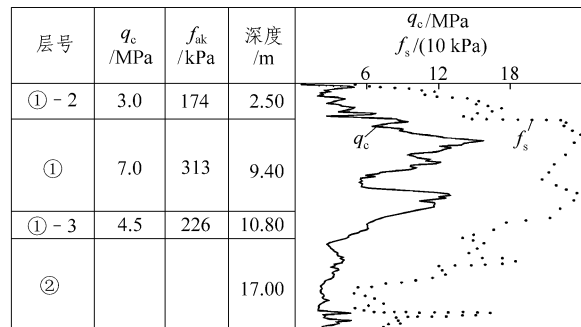


图 4 正常区静力触探测试曲线  
Fig.4 Test curve of the CPT at normal areas

在强夯地基的西北部和东部, 检测发现有较多条静力触探测试曲线存在①-1, ①-2 或①-3 层等软弱土层, 依据这些静力触探点的分布划出了 3 片共 5 个软弱层区(见图 1)。其中, RH1 与 RL1 相连, RH2 与 RL2 相连, 它们的分界线为淋水区边界。RH1, RH2 和 RH3 位于环基区, RL1 和 RL2 位于淋水区。其代表性静力触探测试曲线如图 5 所示, 为 147#静力触探孔, 位于淋水区, 在该孔处的强夯效果差, 距设计要求相差大。

除软弱层区外, 淋水区强夯有效加固深度为 7.5~10.2 m, 环基区强夯有效加固深度为 5.3~9.4 m。本场地强夯有效加固深度界面起伏较大, 这与场地地质条件和施工质量的差异有关。

#### 4.3 夯后出现软弱层区原因分析及对策

对软弱层区分析发现, 该区原场地存在坑洼沟渠, 施工时正值雨季, 因抢工期强夯前填土很湿。

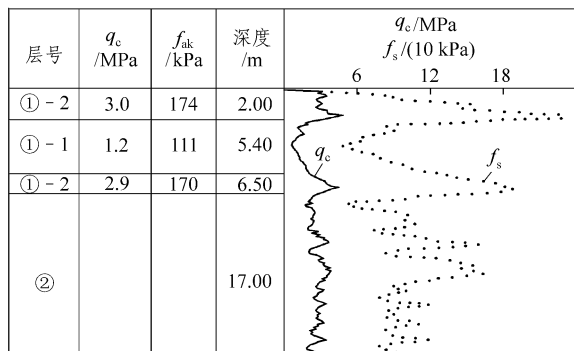


图 5 软弱层区静力触探测试曲线  
Fig.5 Test curve of CPT at weak areas

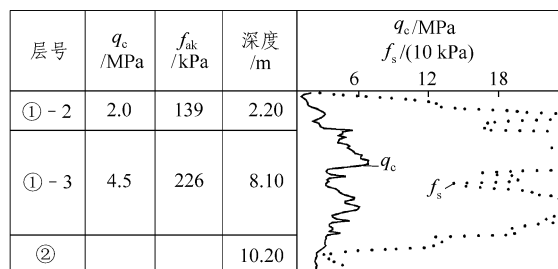


图 6 桩间土静力触探测试曲线  
Fig.6 Test curve of CPT of soils between lime piles

填土主要为粉质黏土, 经推土机简单碾压后就开始进行强夯施工, 因采用的夯击能高, 首次夯沉量可达 5~6 m。造成强夯效果差的主要原因是粉质黏土含水量高、渗透性差、孔压高、消散慢, 强夯动力作用过大等, 强夯施工工艺也没有采用郑颖人等<sup>[13]</sup>针对软黏土提出的“先轻后重、逐级加能、少击多遍、逐层加固”的夯击方式和合理的排水体系。

考虑到软弱层区范围较小, 软弱层内粉质黏土含水量在短时间内不易大幅下降以及强夯设备已退场等因素, 经设计方研究决定采用石灰砂桩对软弱层区进行补强处理, 形成石灰桩复合地基。一方面是利用石灰的吸水膨胀, 使地基土含水量降低和挤密桩间土, 从而提高桩间土的承载力; 另一方面是利用石灰桩桩身具有的一定强度, 依靠桩体的置换作用来达到地基加固的目的<sup>[1, 14]</sup>。

石灰砂桩孔径为 180 mm, 桩间距为 1.0 m, 正方形布置, 成孔深度为 7.5 m, 桩身材料为生石灰与中砂(灰砂比为 4:1), 孔口用素土夯实封口。

#### 4.4 石灰砂桩补强处理及评价

石灰砂桩完成 28 d 后, 仍采用静力触探对桩间土进行了检测, 其代表性静力触探测试曲线如图 6 所示, 为 419#静力触探孔位于环基区。结果表明,  $q_c$  值有所增长, 地基承载力有所提高, 淋水区强夯地基软弱层区地基承载力已基本满足设计要求, 但环基区强夯地基软弱层区地基承载力仍达不到设计要求。同时考虑到 T49, T56 探井剩余湿陷量较大, 对环基区中 RH2 软弱层区又进行了灰土挤密桩补强处理, 同时整个环基基础还采取了相应结构措施。

### 5 强夯地基土湿陷性评价

强夯处理后探井土样的湿陷性试验和湿陷量的

计算均依据规范<sup>[10]</sup>进行, 测定湿陷系数的试验压力, 淋水区内土样在基底下 10 m 以内取 200 kPa, 10 m 以下取 300 kPa; 环基区内土样在基底下 10m 以内取 300 kPa, 10 m 以下取 400 kPa。强夯处理后在探井深度(14 m)内地基土的主要物性指标见表 4。

表 4 强夯处理后黄土的主要物性指标  
Table 4 Main physical indices of loess after dynamic compaction

深度/m	取值类型	干容重 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比	湿陷系数		
				200 kPa	300 kPa	400 kPa
0.0~12.0	最大值	19.1	0.781	0.008	0.010	
	最小值	15.2	0.422	0.001	0.002	
	平均值	17.5	0.552	(湿陷性已消除)		
7.0~14.0	最大值	17.0	0.889	0.017	0.035	0.022
	最小值	14.3	0.597	0.002	0.003	0.003
	平均值	15.4	0.759	(湿陷性轻微~中等)		

淋水区(见图 1)中 T39, T40, T42, T44, T45 等 5 个探井土样的湿陷系数均小于 0.015, 地基土的湿陷性已被完全消除; 其余 5 个探井地基土还存在剩余湿陷量(见表 5), 但均小于 5 cm, 可按一般地区的规定设计<sup>[10]</sup>。

表 5 强夯后淋水区剩余湿陷量  
Table 5 Remnant collapse of the cooling ground after dynamic compaction

探井编号	湿陷范围/m	湿陷量/cm
T41	11.3~12.3	2.00
T43	12.0~13.0	0.75
T46	12.0~13.0	1.00
T47	10.0~11.0	1.70
T48	2.3~3.3	2.70

从表 5 中可以看出, T48 探井仅在浅部 2.8 m 处有一个湿陷土样(一个土样代表 1 m 厚土层), 这可能是拍夯施工有纰漏的结果。由于勘察探井量较少及本场地黄土湿陷深度有起伏, 完全消除湿陷性的探井下部土样可能是强夯加固的结果, 也可能是下部土样本身就不具有湿陷性。但从表 5 可以粗略确定强夯在淋水区消除湿陷性的有效加固深度为 10.0~12.0 m。

环基区(见图 1)中 T50, T54 等 2 个探井土样的湿陷系数均小于 0.015, 地基土的湿陷性已被完全消除; 其余 6 个探井地基土还存在剩余湿陷量(见表 6)。其中只有 T49, T56 两个探井地基土的剩余湿陷量大于 5 cm, 且位于 RH2 软弱层区, 应做补强处理。

表 6 强夯后环基区剩余湿陷量

Table 6 Remnant collapse of the ring ground after dynamic compaction

探井编号	湿陷范围/m	湿陷量/cm
T49	7.0~11.0	9.40
T51	11.0~12.0	1.00
T52	10.5~12.5	3.00
T53	9.3~10.3	1.60
T55	11.3~13.3	1.80
T56	8.0~13.0	5.15

同样地, 由表 6 可以粗略确定强夯在环基区消除湿陷性的有效加固深度为 7.0~11.3 m。

对比表 1, 4, 5 和 6 可知, 强夯消除黄土湿陷性的效果是明显的, 但采用相同的强夯施工工艺消除不同基底压力下的黄土湿陷性的程度是有差异的。

## 6 结 论

(1) 由于场地工程地质条件或施工质量的差异, 强夯地基特别是较大面积的强夯地基均匀性较差, 仅靠少量(但符合有关规范要求数量)的静载荷试验来评价强夯地基承载力是不够可靠的。而在可靠的静载荷试验与静力触探数据对比的基础上, 采用静力触探法来定量评价强夯地基承载力是可行

的。

(2) 与静载荷试验相比, 静力触探不但具有成本低廉、测试快捷、抽检样本较大、代表性强的优点, 而且可以连续反映静力触探测试深度范围内的地基土力学性能及其变化情况, 能较精确地确定强夯有效加固深度和影响深度, 易发现软弱层和确定软弱层区的分布, 能及时探明地基隐患, 避免事故发生。

(3) 强夯有效加固深度随设计要求和评价方法标准的不同而不同。冷却塔强夯地基采用静力触探法按承载力标准确定的强夯有效加固深度界面与采用土工试验法按消除湿陷性标准确定的强夯有效加固深度界面起伏变化均较大, 这还与场地地质条件和施工质量的差异有关。

(4) 强夯施工应避开雨季, 若在土体很湿等条件不具备时为赶工期而强行施工, 或者施工工艺与加固土性不相适应时, 必然造成不良的加固后果, 反而费时费力。

## 参考文献(References):

- [1] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.(LIN Zongyuan. Handbook to harness geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.(in Chinese))
- [2] 史光金, 常 璐, 龚晓南, 等. 软弱地基强夯加固效果评价的研究现状[J]. 地基处理, 1998, 9(4): 3 - 11.(SHI Guangjin, CHANG Lu, GONG Xiaonan, et al. Present situation of research on evaluation of improving soft ground with dynamic compaction[J]. Ground Improvement, 1998, 9(4): 3 - 11.(in Chinese))
- [3] 孔令伟, 袁建新. 强夯后地基土变形模量与承载力的反演计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 153 - 157.(KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Back-calculation of modulus of deformation and bearing capacity for foundation after dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 153 - 157.(in Chinese))
- [4] 费香泽, 王 钊, 周正兵. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437 - 441.(FEI Xiangze, WANG Zhao, ZHOU Zhengbing. Experimental research on dynamic compaction of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 437 - 441.(in Chinese))
- [5] 孔位学, 陆 新, 郑颖人. 强夯有效加固深度的模糊预估[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 807 - 809.(KONG Weixue, LU Xin, ZHENG Yingren. Fuzzy predetermination of effective reinforcement depth of

- dynamic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 807 - 809.(in Chinese)
- [6] 王志勇. 强夯地基的几种检测方法[J]. 岩土工程界, 2000, 3(11): 40 - 41.(WANG Zhiyong. Several test methods of dynamic consolidation ground[J]. Geotechnical Engineering World, 2000, 3(11): 40 - 41.(in Chinese))
- [7] 苏冰. 洛阳石化总厂化纤工程 46 000 m<sup>2</sup> 地基强夯处理[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 221 - 226.(SU Bing. Treatment on 46 000 m<sup>2</sup> foundation of chemical fibre project of SINOPEC Luoyang Petrochemical Complex with dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 221 - 226.(in Chinese))
- [8] 张忠苗, 杨什生, 辛公锋, 等. 强夯法处理软弱粉土地基试验研究[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 148 - 154.(ZHANG Zhongmiao, YANG Shisheng, XIN Gongfeng, et al. Experimental research on dynamic compaction for treatment of soft silt foundation[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(2): 148 - 154.(in Chinese))
- [9] 马学宁, 唐勇军, 杨有海, 等. 强夯法处理湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 26 - 29.(MA Xuening, TANG Yongjun, YANG Youhai, et al. Study on treatment of collapsible loess using dynamic compaction method[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University(Natural Sciences), 2006, 25(3): 26 - 29.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50025 - 2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50025 - 2004 Code for building construction in collapsible loess region[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021 - 2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021 - 2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. DL5024 - 93 火力发电厂地基处理技术规定(试行)[S]. 北京: 中国电力出版社, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL5024 - 93 Ground treatment technical regulation of fire power station[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.(in Chinese))
- [13] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18 - 22.(ZHENG Yingren, LU Xin, LI Xuezhi, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 18 - 22.(in Chinese))
- [14] 陈善雄, 张国成. 石灰桩的工程特性与动测评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增): 610 - 614.(CHEN Shanxiong, ZHANG Guocheng. Engineering properties and dynamic quality determination of quicklime pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supp.): 610 - 614.(in Chinese))