

文章编号: 1000-7598-(2005) 11-1834-03

# 孔内深层强夯法处理湿陷性黄土地基的一个实例

冯志焱<sup>1, 2</sup>, 林在贯<sup>3</sup>, 郑翔<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;  
3. 西北综合勘察设计研究院, 西安 710003)

**摘要:** 在湿陷性黄土地基中, 经常要求既消除黄土地基的湿陷性又提高地基的承载力, 而孔内深层强夯法(DDC)是一种相对较新的地基处理方法, 具有自身的特点和优势。通过对孔内深层强夯法处理的地基工程的桩体载荷试验、桩间土载荷试验和桩间土挤密效果的试验及其结果分析, 表明孔内深层强夯法能消除湿陷性黄土地基的湿陷性, 形成的复合地基能显著地提高地基承载力、改善地基土的承载性状, 是一种有效的地基处理方法。

**关键词:** 孔内深层强夯; 黄土; 湿陷性; 承载力

中图分类号: TU 472 文献标识码: A

## An example of treating collapsible loess by super down hole deep compaction

FENG Zhi-yan<sup>1, 2</sup>, LIN Zai-guan<sup>3</sup>, ZHENG Xiang<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest Institute of Design and Investigation, Xi'an 710003, China)

**Abstract:** In loess foundation engineering, it is often necessary both to eliminate the collapsibility and increase the bearing capacity. down hole deep compaction is a relative new foundation treatment method. The analysis of tests results, including in-situ single piles loading tests, loading tests on soils between piles and other tests, illustrates that the down hole deep compaction is an effective foundation treatment method to eliminate the collapsibility of loess, increase the bearing capacity and improve the behavior of composite foundations.

**Key words:** down hole deep compaction; loess; collapsibility; bearing capacity

## 1 引言

孔内深层强夯法, 又称 DDC (Down Hole Deep Compaction) 法或 SDDC (Super Down Hole Deep Compaction) 是一种有效的地基处理方法<sup>[1~3]</sup>。前者的主要特点是: 先用长螺旋钻头在场内地内钻成直径一般为 400 mm 的孔, 然后在孔内填入素土、灰土、建筑垃圾或其它材料, 并用 20~60 kN 的重锤夯实, 由下而上重复操作, 直至形成直径为 550~600 mm 的桩体, 并使桩间土挤密, 从而形成 DDC 桩复合地基, 后者则是在前者的基础发展起来的, 它是用重锤 (最大 150 kN) 夯击成直径约 1 500 mm 的孔, 并对桩周土挤密, 再在孔内填料并用重锤夯实, 形成直径最大可达 3 000 mm 的桩体。该法可用于处理杂填土、软弱土、湿陷性黄土和可液化土

地基。

湿陷性黄土孔隙比一般较大, 具有肉眼可见的大孔隙, 富含碳酸钙盐类, 是一种具有较强结构性的非饱和土。消除湿陷性是湿陷性黄土地基中的一项重要工作, 目前采用的地基处理方法主要有垫层法、强夯法、土或灰土挤密法、预浸水法和孔内深层强夯法。此外, 桩端进入非湿陷性土层的桩基础也是湿陷性黄土地基中经常采用的一种基础形式。地基处理的目的在于破坏湿陷性黄土的结构, 以便全部或部分消除地基的湿陷性。孔内深层强夯法在对孔内填料强夯过程中, 迫使孔内填料侧向挤出, 使桩周一定范围内的土体受到挤压、扰动和重塑, 同时, 强夯产生的巨大的夯击能量产生的波和动应力反复作用, 迫使土骨架产生塑性变形能, 从而提高土的密实度和抗剪强度, 改善土的变形特性, 所

形成的复合地基在消除黄土湿陷性的同时, 也大幅度提高了地基的承载力。较之土或灰土挤密桩, 孔内深层强夯法处理后的复合地基的承载力更高且均匀, 处理深度更深 (一般可达 25~30 m), 处理黄土湿陷性的效果更为理想<sup>[4]</sup>。因此孔内深层强夯法具有广泛的应用前景。

作为一种有效的地基处理方法, 孔内深层强夯法的应用已较为常见<sup>[4, 5]</sup>, 但对其进行深入研究的报道并不多见, 理论研究明显滞后于工程实践。因此, 通过现场测试研究孔内深层强夯法在消除湿陷性黄土地基的湿陷性、提高地基承载力、改善地基承载性状以及加固机理和效果, 具有一定的理论和实际意义。

## 2 工程概况

工程为西安市某粮库仓容扩建工程, 包括浅圆仓 8 个, 立筒仓 2 个, 工作塔 1 个, 其中浅圆仓、立筒仓 (均为构筑物) 高 22.8 m, 工作塔 (框架结构) 高 32.0 m。场地地貌单元属渭河南岸Ⅲ级阶地, 地基土在岩土工程勘察深度范围内的物理力学性质见表 1。

表 1 场地岩土工程条件

Table 1 The site engineering geological conditions

序号	土层名称	层厚 /m	$\omega$ /%	$e$	$I_L$	$a_{1-2}$ /MPa <sup>-1</sup>	$\delta_s$	$f_{ak}$ /kPa
①	植物层 (Q <sup>pd</sup> )	0.60~1.00						
②	黄土 (Q <sub>4</sub> <sup>2al+pl</sup> )	0.80~2.20	17.4	1.050	0.070	0.53	0.080	120
③	黄土 (Q <sub>3</sub> <sup>al+pl</sup> )	2.30~4.60	19.7	1.27	0.150	0.88	0.086	150
④	黄土 (Q <sub>3</sub> <sup>al+pl</sup> )	2.90~5.60	20.5	1.117	0.145	0.263	0.059	160
⑤	黄土 (Q <sub>3</sub> <sup>al+pl</sup> )	3.20~4.40	20.5	0.893	0.14	0.117		205
⑥	黄土 (Q <sub>3</sub> <sup>al+pl</sup> )	2.00						200

由于场地地基具湿陷性, 承载力也不能满足工程要求, 故采用孔内深层强夯法(SDDC)进行地基处理。设计成桩直径为 2.00 m, 桩心距 4.50 m, 排距 3.65 m, 等腰三角形满堂布置。浅圆仓部分为渣土桩, 设计有效桩长为 6.60 m (桩顶标高-2.40 m, 桩底标高-9.00 m)。立筒仓和工作塔部分为灰土桩, 立筒仓部分设计有效桩长 4.60 m (桩顶标高-5.40 m, 桩底标高-10.00 m), 工作塔部分设计有效桩长 2.20 m (桩顶标高-7.80 m, 桩底标高-10.00 m)。设计要求处理后桩间土湿陷性全部消除, 复合地基承载力: 对浅圆仓区域  $f_{ak} \geq 220$  kPa, 对立筒仓和工作塔区域  $f_{ak} \geq 350$  kPa。

## 3 试验及结果分析

为了检验经过孔内深层强夯法处理后复合地基

的承载力、消除湿陷性的效果等能否满足工程要求, 工程结束后进行了单桩桩体及桩间土的载荷试验、桩间土湿陷性和其它物理力学特性试验, 并根据相关要求评价。

### 3.1 静载荷试验

对复合地基承载力检验共进行 6 组载荷试验 (浅圆仓 4 组, 立筒仓 1 组, 工作塔 1 组), 每一组包括一个点桩体载荷试验和一个点桩间土载荷试验。复合地基桩心距为 4.50 m, 等效影响圆直径为 4.57 m, 因此做单桩复合地基载荷试验难度较大, 故采用单桩载荷试验与桩间土载荷试验, 分别求出单桩及桩间土的承载力, 然后按有关规定求得复合地基的承载力。载荷试验承压板使用 0.5 m<sup>2</sup> 的圆板和方板, 采用分级加载、慢速维持法进行。

浅圆仓部分 (渣土桩) 的单桩和桩间土载荷试验结果分别见图 1 和图 3。由图可见, 4 组试验点的  $p$ - $s$  曲线均未见明显的比例界限点, 故取  $s/d=0.01$ , 即  $s=7.07$  mm 所对应荷载为承载力特征值。

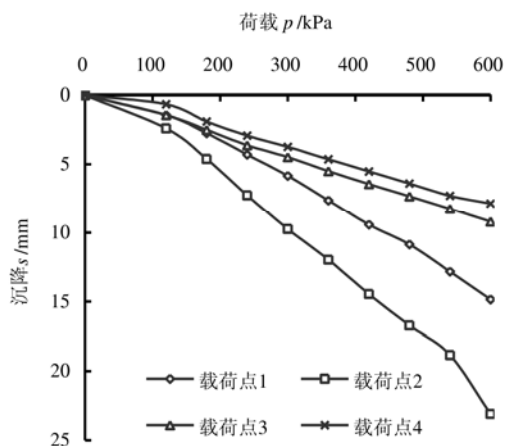


图 1 渣土桩单桩载荷试验  $p$ - $s$  曲线  
Fig.1 The  $p$ - $s$  curves of single pile in DDC

立筒仓和工作塔部分 (灰土桩) 的单桩和桩间土载荷试验结果如图 2 和图 3 所示。单桩载荷试验均未见比例界限点, 且在荷载为 1 600 kPa 时其沉降量分别只有 1.10 mm 和 2.08 mm, 相当于约 0.00 2d 和 0.002 7d, 对桩间土按同样的变形标准进行承载力特征值取值, 并据此确定复合地基的承载力特征值。显然, 对于这一部分地基来说, 实际的复合地基承载力要远大于该值。复合地基承载力按下式确定:

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中  $f_{spk}$  为复合地基承载力特征值 (kPa);  $f_{pk}$  为桩

体承载力特征值 (kPa);  $f_{sk}$  为处理后桩间土复合地基承载力特征值 (kPa)。

承载力的取值结果见表 2。由表可见, 经过孔内深层强夯法处理后的复合地基承载力较之处理前天然土层有很大提高, 可以满足工程的要求。表 3 对经过孔内深层强夯处理后桩间土承载力和处理前天然土层的承载力进行了比较, 结果表明经过孔内深层强夯法处理后, 桩间土的承载力有大幅度提高, 为处理前的 1.6~2.0 倍。

表 2 载荷试验取值结果

**Table 2 Bearing capacities from load tests**

载荷点部位	载荷点编号	承载力/kPa		
		$f_{pk}$	$f_{sk}$	$f_{spk}$
浅圆仓部分	1	378	237	278
	2	234	315	
	3	456	225	
	4	516	240	
立筒仓部分	5	1 600	80	357
工作塔部分	6	1 600	136	420

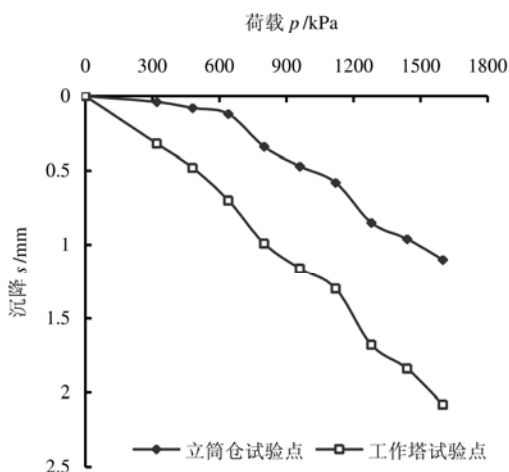


图 2 灰土桩载荷试验  $p-s$  曲线  
Fig.2  $p-s$  curves of single piles in DDC

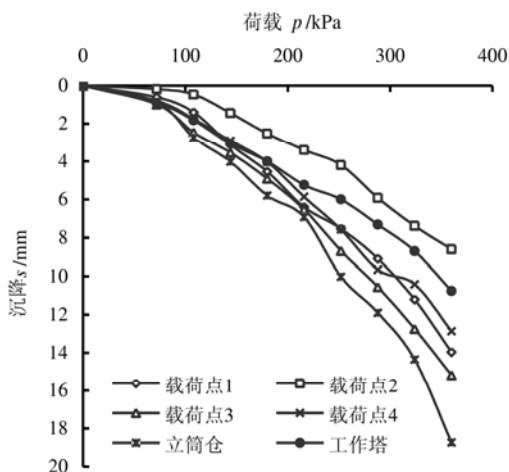


图 3 桩间土载荷试验  $p-s$  曲线  
Fig.3 The  $p-s$  curves of soil between piles

### 3.2 桩间土挤密效果

对地基孔内深层强夯法处理后, 共开挖探槽 20 个, 沿不同深度和距桩不同水平距离处共采取原状土样 224 个, 进行了湿陷性试验和干密度、孔隙比、压缩模量, 以确定经处理后的桩间土的湿陷性消除情况和挤密效果 (表 4)。试验结果表明, 除个别位于边桩位置的土样的湿陷系数大于 0.015 外 (占总数的 9%), 其余部位桩间土试样的湿陷系数均小于 0.015, 即不具湿陷性, 说明通过孔内深层强夯已消除了土层的湿陷性。

表 3 地基处理前后桩间土承载力对比

**Table 3 Comparison between bearing capacities of the foundation before and after treating**

处理方法	桩长	桩顶标高	处理前土层	处理后桩间土
	/m	/m	$f_{sk}$ /kPa	$f_{sk}$ /kPa
渣土桩	6.60	-2.40	120	254
灰土桩 1	4.60	-5.40	160	254
灰土桩 2	2.20	-7.80	160	321

注: 处理前地基土承载力为岩土工程勘察报告提供值, 处理后按  $s=0.01d$  所对应的荷载作为桩间土承载力特征值。

由表 4 还可以看出, 处理后桩间土的干密度提高 23%, 孔隙比减小 20%, 压缩模量为处理前的 5.2 倍, 说明经过孔内深层强夯处理后桩间土的挤密效果良好, 其压缩性大为降低, 承载性状更为均匀可靠。

表 4 处理前后桩间土有关指标对比

**Table 4 Comparison between related parameters of soil between piles before and after treating**

状态	干重度 $\gamma_d$ /kN·m <sup>-3</sup>	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_{s1-2}$ /MPa	湿陷系数 $\delta_s$
处理前	11.98	1.050	2.58	0.72
处理后	14.77	0.84	13.5	<0.015

## 4 结 论

通过对实际工程的试验研究, 得出以下结论:

(1) 孔内深层强夯法是一种有效的地基处理方法, 处理后形成的复合地基承载力可达到处理前天然土层承载力的 2 倍或更高。

(2) 孔内深层强夯法可起到对桩间土的良好挤密效果, 从而提高桩间土的承载力、降低土的压缩性, 大大改善地基的承载性状。

(3) 孔内深层强夯法可用于处理湿陷性黄土地基, 它可有效地消除黄土地基的湿陷性, 其处理深度较深。

值得注意的是, 桩的承载力发挥程度因场地的性质不同而异, 主要与土的渗透系数有关。另外, 施工时的压桩速度对承载力的时间效应也有较大影响, 有待进一步研究。

## 5 结 语

在饱和软土中静力压桩引起的考虑消散的单桩准三维超静孔隙水压力解析公式的基础上, 从超静孔隙水压力的消散和桩周土的固结出发, 结合桩土接触面的破坏形式, 给出了考虑时间效应的单桩承载力的解析解, 计算结果与实际测量结果基本一致。

### 参 考 文 献

- [1] Chow F C, Jardine R J, Bruzy F. Effects of time on capacity of pipe piles in dense marine sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(3): 254—264.
- [2] 王伟, 宰金珉, 王旭东. 沉桩引起的三维超静孔隙水压力计算及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 774—777. WANG Wei, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong. 3D calculation of excess pore water pressure due to driving pile and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 774—777.
- [3] 唐世栋. 用有效应力原理分析桩基承载力的全过程[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 1990.
- [4] Fleming, W G K, W K Elson. *Pile Engineering*[M]. 2nd edition. New York: Wiley & Sons, 1992. 118—122.
- [5] 叶为民, 黄雨, 唐益群, 等. 饱和软土中打入式预制桩单桩承载力的时效[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 367—369. YE Wei-min, HUANG Yu TANG Yi-qun, et al. Time-effect of bearing capacity of driven pile in saturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 367—369.
- [6] 陈文, 施建勇, 龚友平, 等. 饱和软粘土中静压桩挤土效应的模拟实验研究[J]. 河海大学学报, 1999, (3): 103—109. CHEN Wen, SHI Jian-yong, GONG You-ping, et al. Centrifugal model test of piles jacked in saturated clay[J]. **Journal of Hohai University**, 1999, (3): 103—109.
- [7] 王伟. 沉桩引起的超孔隙水压力的预测及其应用[硕士学位论文 D]. 南京: 南京工业大学, 2002.

上接第 1836 页

### 参 考 文 献

- [1] 史炳文, 唐业清. 孔内深层强夯技术的机理与工程实践[J]. 地基基础工程, 1998, 8(4): 2—17. SI Bing-wen, TANG Ye-qing. Technical mechanism and case history of down hole dynamic compaction[J]. **Foundation Engineering**, 1998, 8(4): 2—17.
- [2] 汤磊, 陈正汉. 两个地基处理工程实例对比分析[A]. 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会[C]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 559—562.
- [3] 顾欣, 邹立华, 马文祥. 孔内深层强夯(DDC) 振动试验研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2000, 19(1): 17—20. GU Xin, ZOU Li-hua, MA Wen-xiang. Experiment and study on vibration of down hole dynamic compaction[J]. **Journal of Lanzhou Railway University (Natural Sciences)**, 2000, 19(1): 17—20.
- [4] 何炳生. 孔内深层强夯在高耸构筑物冷却塔地基处理应用[A]. 中国土木工程学会中国工程建设标准化协会第四届联合年会[C]. 北京: [s. n.], 1998.
- [5] 葛希元. 孔内深层强夯挤密桩在公路工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001, (5): 65—66. GE Xi-yuan. The application of down hole dynamic compaction in highway engineering[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2001, (5): 105—106.