



高真空击密法加固吹填软土地基试验研究

刘成军¹, 王浩²

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 大连港口设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 高真空击密法是一种快速加固软土地基的新技术, 它是通过数遍的高真空压差排水, 并结合数遍合适的变能量击密, 达到降低土层的含水率、提高密实度和承载力、减少地基工后沉降和差异沉降量的目的。为验证该工法在本工程吹填土质中的适用性, 在汽车堆场区进行了典型试验。试验检测结果表明, 地基容许承载力、地基沉降、地基回弹模量等各项指标均达到了设计要求, 处理效果明显。对大连大窑湾港区类似工程具有参考价值。

关键词: 高真空击密法; 地基处理; 吹填; 软土

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0160-06

Experimental research on high-vacuum densification method in reinforcing hydraulic fill soft soil foundation

LIU Cheng-jun¹, WANG Hao²

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. Dalian Port Design & Research Institute Co., Ltd., Dalian 116001, China)

Abstract: High-vacuum densification method is a new technology for rapid reinforcement of soft soil foundation, by which we are capable of reducing the water content of the soil, improving the compactness and bearing capacity and reducing the amount of settlement and differential settlement of the foundation after construction through several times of high-vacuum differential pressure drainage and several times of appropriate variable energy densification. To validate the applicability of this method in the project, we carry out typical tests in the car yard area. The test results reveal that the allowable bearing capacity, foundation settlement, foundation modulus of resilience and other indicators all meet the design requirements, and the treatment effect is obvious. It may serve as reference for similar projects at Dayaowan port area of Dalian.

Keywords: high-vacuum densification method; foundation treatment; hydraulic fill; soft soil

1 工程概况

大连汽车码头汽车物流中心项目位于大连港大窑湾港区的湾底区域。本工程场地主要作为商品车停车场, 最大使用荷载为 40 kPa。

场区已吹填形成陆域, 现状场地高程 5.4 ~ 8.1 m, 吹填区面积 $21.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。场地内上部为充填土, 物理力学性质较差, 难以满足本工程使用要求, 必须对场地进行地基处理。为了找到经济合理的地基处理工法, 确定具体技术参数, 拟在本工程汽车堆场区内划定一试验区进行高真空

击密法试验, 从而为大面积设计、施工提供依据, 确保大面积施工的工程质量。

场区内主要软弱土层如下。①₂冲填土: 吹填形成, 饱和, 流-软塑, 土质均匀局部混砂、砾, 夹薄砂层, 层厚 4.3 ~ 10.6 m, 平均厚度 8.48 m。该层吹填土为软弱土, 具有含水率高、压缩性强、承载力低的特性, 工程性质较差。②₂淤泥质粉质黏土: 饱和, 软塑, 混少量砾, 层厚 0.7 ~ 2.7 m, 平均厚度 1.65 m。典型土层分布剖面见图 1, 各图层物理力学指标见表 1。

收稿日期: 2015-09-29

作者简介: 刘成军 (1979—), 男, 工程师, 从事港口、海岸工程设计及项目管理工作。

表1 各土层物理力学指标

土层编号	土层名称	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(t/m^3)$	天然孔隙比 e_0	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	先期固结压力 P_c/kPa	容许承载力 f/kPa
① ₋₂	冲填土	52.7	1.70	1.465	1.047	2.84	28.5	不计
② ₋₂	淤泥质粉质黏土	39.4	1.77	0.822	0.751	3.14	55.2	100
③	粉质黏土	24.5	2.01	0.687	0.284	6.78		180

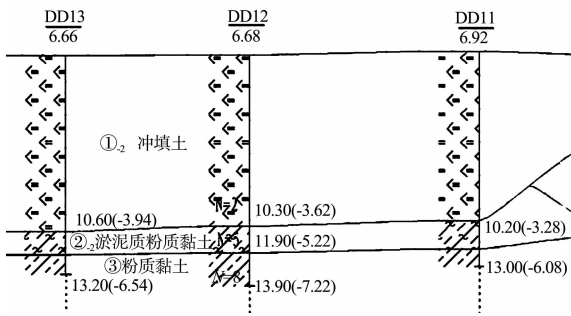


图1 典型土层分布 (单位: m)

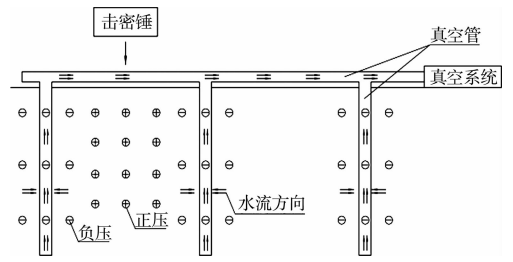


图2 高真空击密法原理

地基处理须解决以下问题:

1) 工后沉降及不均匀沉降: 场地内吹填层欠固结, 厚度分布不均, 压缩变形大, 工程性质较差; 需要对吹填土层进行加固处理, 改善土性, 施工阶段预先消除加固土层的部分沉降, 减小工后沉降及不均匀沉降。

2) 承载力: 通过地基处理提高土体密实度和强度, 继而提高地基承载力以满足场地使用要求。

地基处理后应满足以下使用要求: 加固后商品车停车场区域地基容许承载力为 60 kPa; 30 a 内使用期的残余沉降小于 400 mm; 地基回弹模量大于 40 MPa。

2 高真空击密法

2.1 基本原理

高真空击密法(HVDM)软地基处理方法(国家发明专利号 ZL01127046.2)是一种快速加固软土地基的新技术, 它是通过数遍的高真空压差排水, 并结合数遍合适的变能量击密, 达到降低土层的含水率、提高密实度和承载力、减少地基工后沉降和差异沉降量的目的。通过快速高真空排水—击密多遍循环这2道工序的有机结合、相互作用, 形成高真空击密法的独特机理(图2)。

该工法巧妙地解决了软土超孔隙水压力消散及强夯容易使软土形成弹簧土等关键问题, 通过人为在土层中制造超过一个大气压的压差来快速消散超孔隙水压力, 使软土中的水即时排出。由于采用高真空排水, 击密效果大大提高, 从而使被处理土体形成一定厚度的超固结硬壳层, 该硬壳层使表层荷载有效扩散, 减少了因荷载不均匀产生的不均匀沉降。

针对上部荷载的使用要求, 高真空击密法通过对每遍的高真空强排水参数、击密参数等的控制, 形成一定厚度的抗变形的超固结硬壳层来满足承载力和变形要求。

该工法具有造价低、工期短、质量可控的优点。

2.2 特点

1) 对饱和土夯前先进行高真空排水, 属于主动排水, 可有效减小土的饱和度、提高夯击效率, 同时减小产生的超孔隙水压力。

2) 渗透系数较小的软土, 在适当夯能的作用下出现微裂缝, 可增加土的渗透性能, 其产生的超孔隙水压力在再一次真空压差的作用下可进一步增强排水效果。为此, 本工法提出实施第2、第3遍高真空排水, 甚至夯击与排水同时进行的排水工序。多遍高真空击密排水最终以达到降低饱和软土含水率为目标。

3) 由于第2次高真空作用,使第1遍强夯产生的超孔隙水压力快速消散,使两遍强夯间隙时间大大缩短,与普通强夯法相比,工期不但不增加,反而大大缩短。

4) 本工程经过地基处理后,上部较差的软弱地基形成理想的硬壳层,从而满足堆场的使用要求。

2.3 创新

提出真空动力排水固结方法,为实现快速可靠的高压力差排水核心技术奠定基础。该法通过在软土中插入竖向真空管,然后抽真空产生负压,同时在真空管之间实施适当能量强夯使软土产生超孔隙水压力的正压,既提高正压又减小负压来双向加大压力差,两种措施匹配叠加,可形成超过一个大气压(最高达 150 kPa)的高压力差,克服软土初始水头梯度的限制,使得仅靠真空预压不能流动的孔隙水得以排出。

与传统真空预压、强夯工法相比,该工法由于产生了较大的压力差,带来了3点突破:

1) 渗透性较低的土通常排水比较困难,由于形成较大的压力差,使渗透性较低的软土能够排出水,相同条件下与传统真空预压相比排水效率更高,从而缩短了工期。

2) 对于饱和软土进行强夯很容易形成弹簧土,由于形成较大的压力差,使土体中的水强制排出,这样就扩大了强夯的应用范围,使饱和软土不宜强夯成为过去。

3) 根据规范规定,对于饱和软黏土通常2遍强夯之间的间隔时间至少需要3~4周,由于高真空击密形成的压力差,加快了超孔隙水压力的消散,缩短了软土2遍击密间隙时间,间隙时间从规范的不小于3~4周缩短为5~10 d,大大缩短了工期。

3 施工方案

3.1 方案简述

试验区面积 $3.12 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。首先挖除多余土方将场地整平,然后对表层软土换填形成 2.0 m

厚的施工垫层。其中表层 0.8 m 采用开山石渣,下层 1.2 m 利用场区内多余的弃土。施工垫层完成后打设排水板,采用 B 型塑料排水板,间距为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,正方形布置,排水板板端打设至 ①₂层冲填土层底。最后布置真空管,进行抽真空强夯击密施工。

3.2 工艺流程及施工工序

高真空击密法施工工艺流程见图 3。

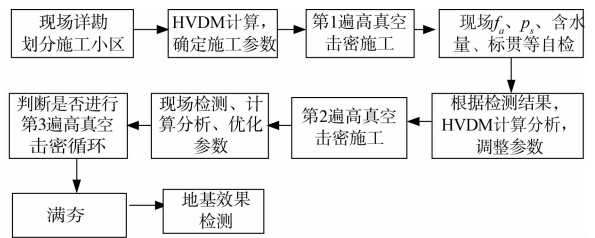
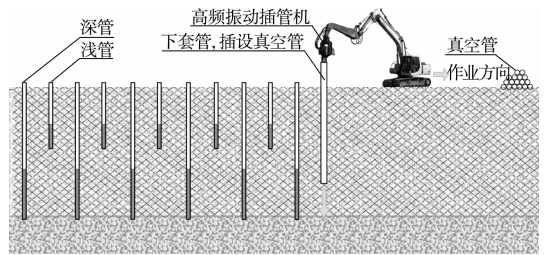
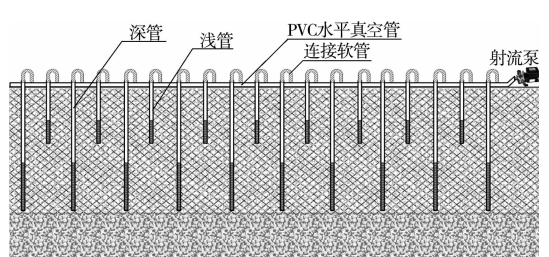


图 3 高真空击密主要施工工艺流程

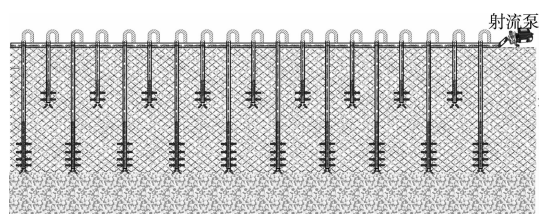
高真空击密法地基处理主要施工工序见图 4,每遍高真空击密指图 4c)与图 4d)所示的真空排水和强夯都完成 1 遍。



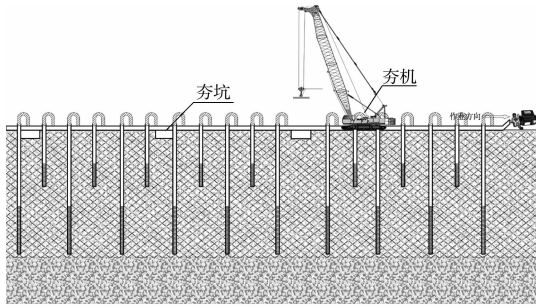
a) 第1步: 打设真空管



b) 第2步: 连接真空排水系统



c) 第3步: 真空排水



d) 第4步: 强夯

图4 主要施工工序

3.3 高真空击密技术参数

1) 在处理区外围设封管: 封管离处理区域边线 4 m, 封管长 6 m 和 4 m, 点距 1.75 m, 间隔布置; 2) 区内布设真空管: 从边距 2 m 开始布设真空管, 管长 6 m 和 4 m, 深管与浅管间隔布置, 排距 3.5 m, 点距 1.75 m; 3) 真空抽水: 保持真空度在 $-40 \sim -60$ kPa, 排水时间 5 ~ 7 d, 通过第 1 遍强排来降低土体的含水率; 4) 第 1 遍击密: 撤掉单排管进行第 1 遍点夯, 夯锤直径 2.2 m, 夯点间距 $3.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$, 能量 $1\,500 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 4 ~ 8 击; 5) 第 2 遍高真空排水、第 1 遍击密结束的区域立即连接好高真空排水系统, 进行第 2 遍高真空排水, 排水

时间 5 ~ 7 d; 6) 第 2 遍击密: 撤掉双排管后进行第 2 遍击密, 击密间距为 $3.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$, 能量提高到能量 $2\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 4 ~ 8 击; 7) 进行 2 遍排水和击密后进行满夯, 能量 $1\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 锤印搭接 $1/3 \sim 1/4$, 每点 2 击; 8) 振动碾压整平。稳压 1 遍, 振动碾压 2 遍, 场地整平至设计高程。

3.4 施工期检测

针对本工程特点, 主要通过多种监测与检测项目来实现信息化过程。主要测试项目有: 地下水位观测、沉降观测、静力触探测试。

1) 水位观测。

高真空击密试验前埋设地下水位观测管, 在试验期间进行地下水位观测。试验区至少设置 3 组水位观测孔, 水位管长度 6 m, 每天观测 1 次。地下水位观测的目的是了解真空击密过程中地下水位的变化特征, 优化真空系统的设计参数。

埋设要求: 抽真空之前必须将水位管口用密封膜封住, 防止空气进入外界大气通过管口进入水位管, 导致所测水位与实际不符。

水位变化曲线见图 5。

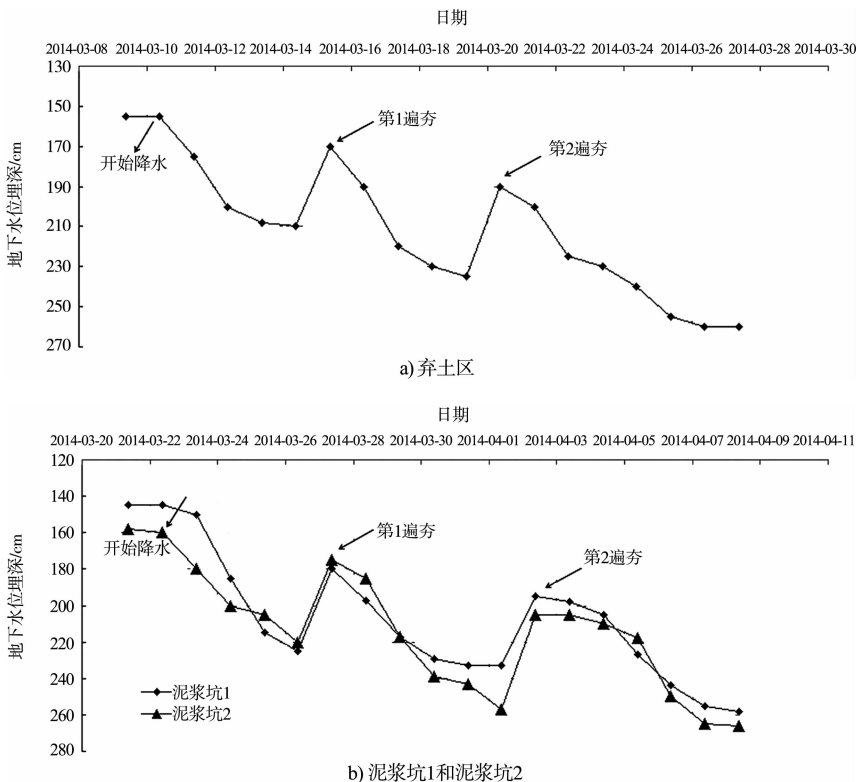


图5 地下水位变化曲线

由图5可见,经高真空主动降水后,地下水位可降低到2 m以下,满足起夯面水位要求。

水位降低至预定水位后进行击密,击密后地下水位有一定的回升,说明击密使得孔隙水压力增减,击密能量传递到深层土体。击密后经高真空降水一段时间后,水位继续下降。

由图5可知,本试验区所采用的方法可以有效地降低地下水位,在排除孔隙水的同时结合击密能量的作用,可实现对深层软土的有效固结,从而提高软土的性能、减小工后沉降。

2) 沉降观测。

在试验区布置 10 m × 10 m 的地面沉降测点方格网,测量处理前和每遍处理后的地面平均沉降情况。以动态了解土体加固效果和夯实情况,及时调整击密工艺和参数。处理前后方格网高程测量结果见表2。

表2 地表沉降观测成果

阶段	各阶段各区平均高程/m			整体平均 高程/m	本次沉降/ cm
	一区	二区	三区		
插板前	6.60	6.39	5.81	6.26	
击密前	6.45	6.27	5.66	6.13	14
2遍击密后	6.14	5.98	5.52	5.88	25
回填开山石满夯前	6.64	6.53	6.18	6.45	
满夯后	6.57	6.51	6.07	6.38	7

由表2可知,2遍点夯后场地平均沉降量25 cm,回填开山石后再进行满夯平均沉降约7 cm,高真空击密过程中总体沉降为32 cm,换填碎石素填土及插设排水板沉降约14 cm,测量施工总沉降约46 cm。

3) 静力触探测试。

试验区布置6个静力触探测试点。

每遍击密处理之前,满夯后14、28 d在同一位置进行测试,静力触探试验孔深8 m。

选取有代表性的试验点,在各阶段的 P_s 曲线进行对比。静力触探曲线见图6。

从图6可见,地基处理前后,表层6 m深度范围内平均静探值由1.56 MPa提高到2.22 MPa,

提高幅度约42%。地基处理后冲填土提高效果较明显。

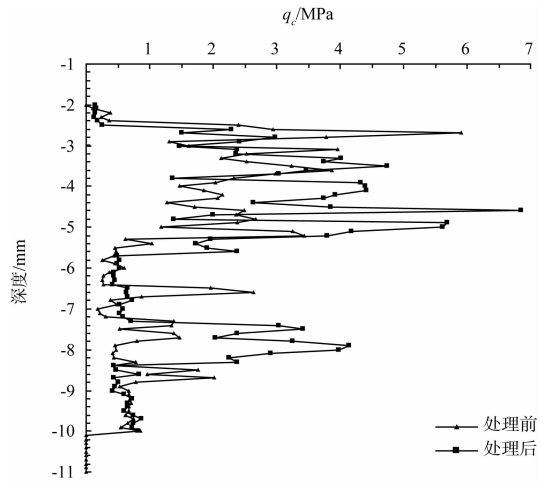


图6 2#静力触探对比曲线

4 处理后效果检测

4.1 载荷板试验检测

高真空击密法地基处理结束满足约28 d的休止期后,为进一步检测地基处理效果,由第三方检测单位对试验区进行了载荷板试验检测,共6个点,检测点位置由检测单位随机确定,采用2 m × 2 m 方形承载板。

检测结果表明,荷载与沉降基本上为直线关系,无明显拐点或陡降段,在250 kPa的试验荷载内既没有出现屈服极限也无比例界限,表明高真空击密法处理后的场地浅层6 m深度范围内平均容许承载力不小于60 kPa,满足设计要求。荷载-沉降实测数据见表3,代表性测点荷载与沉降关系曲线见图7。

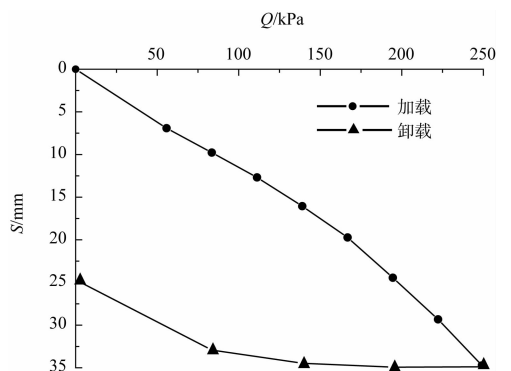


图7 CZ6 荷载-沉降曲线

表3 荷载-沉降实测数据

荷载级别	荷载/kPa	CZ1 沉降/mm		CZ2 沉降/mm		CZ3 沉降/mm		CZ4 沉降/mm		CZ5 沉降/mm		CZ6 沉降/mm	
		加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载
0	0	0	14.29	0	9.71	0	16.21	0	13.74	0	14.29	0	24.69
1	55.75	7.39		5.90		7.31		5.46		7.94		6.92	
2	83.50	9.08	22.01	7.81	14.72	8.49	20.40	6.83	20.55	10.33	20.97	9.77	32.92
3	111.25	11.31		9.10		10.76		8.47		12.65		12.68	
4	139.00	12.90	22.59	10.34	15.72	13.13	27.62	10.67	22.45	14.96	23.38	16.06	34.47
5	166.75	15.01		11.74		16.22		13.44		17.25		19.72	
6	194.50	17.23	22.61	13.21	15.85	19.96	28.32	16.64	22.41	19.56	24.68	24.45	34.93
7	222.25	19.89		14.47		24.15		19.24		21.96		29.32	
8	250.00	22.64		15.85		28.44		22.11		24.75		34.89	

4.2 残余沉降核算

试验结束后, 在实验区布置 SK1 ~ SK4 共计 4 个钻孔点, 根据其室内试验结果计算工后沉降, 各孔位的工后总沉降分别为 95、22、143、98 mm, 其中 SK3 孔处处理后总沉降量最大为 143 mm (表4)。本工程设计要求使用年限内残余沉降小于 400 mm, 满足设计要求。

表4 SK3 孔处沉降计算

土层分布	取样编号	取样埋深/m	层厚/m	压缩模量/MPa	分层沉降/mm	土分类
冲填土	T1	3.7	0.7	3.62	9	淤泥质粉质黏土
	T2	5.2	1.5	2.59	28	淤泥质粉质黏土
	T3	6.7	1.5	4.26	17	粉质黏土
	T4	8.2	1.5	6.51	11	粉质黏土
淤泥质粉质黏土	T5	10.7	2.5	2.70	44	黏土
粉质黏土	T6	12.2	1.5	3.46	21	黏土
	T7	13.7	1.5	5.68	13	粉质黏土
工后总沉降					143	

注: 使用荷载为 40 kPa, 沉降系数为 1.2。

4.3 回弹模量检验

为进一步检测地基处理效果, 由第三方检测单位对试验区进行回弹模量检测。通过现场载荷试验实测不同等级载荷下的载荷板沉降数据, 当荷载达到试验设计等级待沉降稳定后, 按每 2 级卸载 1 次, 待稳定后记录场地回弹, 直到卸除全部荷载。根据实测的载荷沉降回弹数据, 绘制荷载-沉降-回弹关系曲线。基于卸载回弹曲线所发生的回弹量大小, 计算场地的回弹模量。检测结果显示, 各测点的回弹模量均大于设计要求的 40 MPa。

5 结论

经过高真空击密法处理后, 各项参数均能满足设计要求。

1) 根据载荷板试验检测的结果, 高真空击密法处理后的场地浅层 6 m 深度范围内平均容许承载力不小于 60 kPa, 满足设计要求。

2) 经过工后沉降计算, 4 个孔位的工后总沉降分别为 95、22、143、98 mm。本工程设计要求使用年限内残余沉降小于 400 mm, 满足设计要求。

3) 根据回弹模量的检测结果, 处理后各测点的地基回弹模量均大于 40 MPa。满足设计要求。

本工程采用的高真空击密法主要优势是: 施工垫层及补偿沉降所需的材料可就地取材, 外排土及换填量较少, 具有工期短、造价低、质量可控和环保节能等优点。对于本工程吹填的高含水率、高压缩性的场地, 高真空击密法无疑是最佳的地基处理方法。

参考文献:

[1] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
 [2] 楼晓明, 徐士龙, 朱亚娟. 高真空击密法加固大面积钢才堆场地基[C]//中国土木工程学会. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集, 2007: 97-100.
 [3] 李中山. 高真空击密技术在曹妃甸通岛公路路基工程中的应用[J]. 公路交通技术, 2009(4): 4-6.
 [4] 武亚军, 张孟喜, 徐士龙. 高真空击密法吹填土地基处理试验研究[J]. 港工技术, 2007(1): 43-46.

(本文编辑 郭雪珍)