

DOI: 10.11779/CJGE202008001

# 振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究

刘松玉<sup>1, 2</sup>, 杜广印<sup>1, 2</sup>, 毛忠良<sup>3</sup>, 高常辉<sup>1, 2</sup>, 曾彪<sup>1, 2</sup>, 杨泳<sup>4</sup>, 章定文<sup>\*1, 2</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;  
3. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600; 4. 江苏盛泰建设工程有限公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 湿陷性黄土地基加固处理是中国西部开发建设工程项目中面临的问题之一, 且面广量大。振杆密实法技术处理湿陷性黄土地基, 采用自主研发的振杆密实设备, 以甘肃中兰铁路客专项目工程场地为依托, 提出了气动振杆密实法处理湿陷性黄土地基的施工工艺, 并对处理效果进行了测试评价。原位测试和室内试验结果表明: 处理后黄土为非湿陷性, 平均湿陷系数为0.003; 处理范围内土层锥尖阻力、侧壁阻力和标贯击数较处理前显著提高, 表波速提高15%左右, 且土层各项物理力学性能指标均有明显改善。结果表明振杆密实法是湿陷性黄土地基处理的一项全新技术, 具有节能环保、经济高效等优点, 在黄土地区有推广应用前景。

**关键词:** 振杆密实法; 湿陷性黄土; 室内试验; 原位测试; 湿陷性; 振动影响

**中图分类号:** TU472    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2020)08-1377-07

**作者简介:** 刘松玉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊地基处理、原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

## Field tests on improvement of collapsible loess by vibratory probe compaction method

LIU Song-yu<sup>1,2</sup>, DU Guang-yin<sup>1,2</sup>, MAO Zhong-liang<sup>3</sup>, GAO Chang-hui<sup>1,2</sup>, ZENG Biao<sup>1,2</sup>, YANG Yong<sup>4</sup>,  
ZHANG Ding-wen<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Nanjing 210096, China; 3. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China; 4. Jiangsu Shengtai Construction Engineering Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** The improvement of collapsible loess is one of the technical problems in the development and construction of western China. The collapsible loess covers a large area, and there are many ground treatment projects under construction. The vibratory probe compaction method is first proposed to treat collapsible loess. During the project of Zhongwei-Lanzhou high speed railway, the technology of pneumatic vibratory probe compaction method to treat collapsible loess is proposed by using the self-developed vibratory probe compaction equipment, and the treatment effect is evaluated. The results of the in-situ and laboratory tests show that the collapsibility of subsoil is eliminated after treatment, with an average collapsibility coefficient of 0.003. The cone resistance, sleeve friction and SPT blow counts in the treated soil are significantly higher than those before treatment. Moreover, the surface wave velocity of subsoil increases by 15% and its physical and mechanical properties are also significantly improved. The vibratory probe compaction method is effective for the treatment of collapsible loess. The new construction technique is energy-efficient, environment-friendly, fast in construction and low-cost, and it can be applied in loess areas.

**Key words:** vibratory probe compaction method; collapsible loess; laboratory test; in-situ test; collapsibility; vibration effect

## 0 引言

黄土覆盖中国西北、华北以及东北松辽平原等地, 具有分布广、层厚大和工程性质复杂的特征, 黄土的水敏性、大孔性、结构性、湿陷性和地震液化性等<sup>[1-2]</sup>, 对中国西部大开发战略的黄土工程建设带来了巨大挑战。工程实践中一般均需要对黄土进行加固处理, 目

前, 常用的处理湿陷性黄土地基的方法有强夯法、灰土挤密桩法、预浸水法、垫层法和化学加固法<sup>[3-6]</sup>等, 分析表明, 上述方法已在黄土地区的工程建设中得到

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977241)

收稿日期: 2019-10-15

\*通信作者(E-mail: zhangdw@seu.edu.cn)

表 1 处理前土层室内试验结果统计表  
Table 1 Laboratory test results of subsoil before treatment

土层	深度/m	统计项目	含水率/%	孔隙比	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%	塑性指数	直剪		压缩模量/MPa		湿陷系数
									内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	100~200 kPa	200~400 kPa	
① 0.0~4.5	平均值	9.200	1.001	1.35	25.0	16.0	9.0	23.200	11.500	5.900	7.500	0.021	
		标准差	0.918	0.029	0.019	1.431	0.525	0.908	0.611	1.320	1.325	1.477	0.004
② 4.5~7.3	平均值	10.900	1.043	1.32	25.9	16.2	9.6	23.500	10.700	6.500	8.200	0.016	
		标准差	1.172	0.030	0.021	1.028	0.378	0.653	1.154	1.498	1.301	1.094	0.003
③ 7.3~10	平均值	11.900	1.015	1.35	27.9	16.9	11.0	18.300	10.100	7.300	8.100	0.014	
		标准差	0.559	0.030	0.022	0.965	0.308	0.668	—	0.306	1.569	1.471	0.004

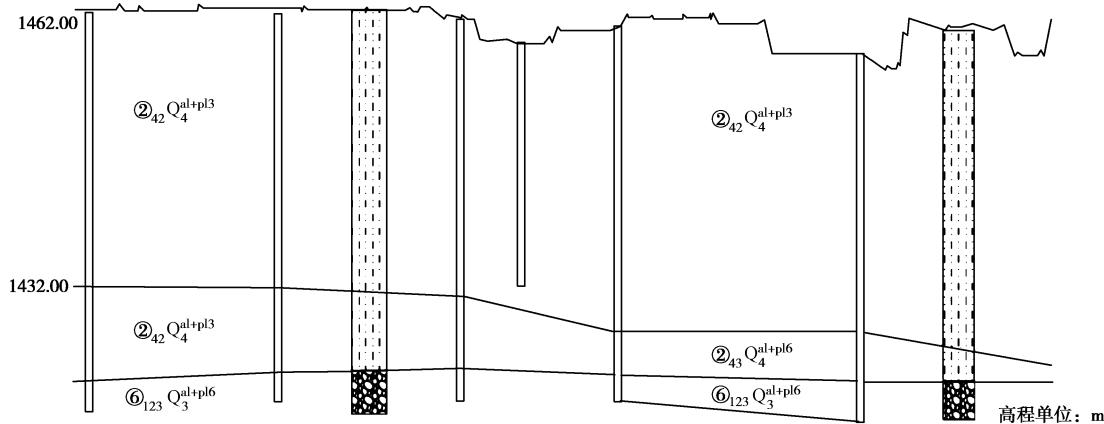


图 1 试验场地工程地质剖面图(局部)

Fig. 1 Engineering geological section of test site

了推广应用，并已形成相应的规范标准，但也存在各自的局限性。因此，研发经济、高效、环保的新型黄土地基处理技术对中国西北地区黄土工程建设具有重大意义。

振杆密实法是 20 世纪 90 年代发展起来的一种处理可液化地基的新方法，该方法使用一种类似国内沉管灌注桩的施工机械，将一根细长扁平的杆件以振动的方式沉入土中，通过沉杆过程中的垂直振动使杆件周围的土层发生剧烈振动，调整其上振动器频率来达到土-振杆系统的共振频率<sup>[7-8]</sup>，使振杆获得的能量能以最佳的方式传递到周围的土体，进而实现土体的密实。该方法无需额外的填料，且施工简单、方便，加固效果显著。东南大学采用自主研发的十字形振动翼<sup>[9]</sup>及施工设备<sup>[10]</sup>，在多个液化地基处理工程中得到了成功应用，取得了显著的社会经济效益<sup>[11-14]</sup>。然而，关于振杆密实法处理湿陷性黄土地基的相关理论与应用研究还未见报道。

本文结合中卫至兰州客运专线(中兰客专)项目，采用自主研发施工设备，对振杆密实法处理湿陷性黄土地基技术进行了现场试验研究，并对试验效果进行

了检测和评价。

## 1 试验场地概况

振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验段位于甘肃省白银市靖远县，为设计的中兰客专靖远北车站场坪区附近。场地地处黄河高级阶地，地形平坦、开阔，属于地震烈度Ⅷ度区。地面高程为 1463.610~1417.932 m，相对高差 45.6 m。根据勘察资料，场地内地层岩性主要为第四系全新统冲积层( $Q_4^{al+pl}$ )砂质黄土、第四系上更新统冲积层( $Q_3^{al+pl}$ )粗圆砾土、卵石土，如图 1 所示。其中，②<sub>42</sub> 砂质黄土( $Q_4^{al+pl3}$ )具自重湿陷性，湿陷系数  $\delta_s=0.015\sim0.087$ ，自重湿陷系数  $\delta_{zs}=0.015\sim0.089$ ，湿陷性土层厚 21.0~37.3 m；且②<sub>42</sub> 砂质黄土承载力较低，物理力学性质差，为松软土。

根据专项补勘结果，结合土性和物理力学指标，可将勘察深度范围内的土层分为 3 层，如表 1 所示。场地土层含水率随着深度的增加而逐渐增大，数值介于 7.9%~11.9%；干密度随深度也有增大的趋势，介于 1.32~1.35 g/cm<sup>3</sup>；孔隙比介于 1.001~1.038；内摩擦角和黏聚力随深度变化不明显，内摩擦角介于 18.3°~

23.7°, 黏聚力介于 9.9~11.5 kPa; 压缩模量为 5.1~7.3 MPa, 随深度整体上有缓慢增大的趋势。试验区黄土的湿陷系数随深度增加逐渐减小, 地表下 10.0 m 范围土层湿陷性等级为中等到轻微湿陷性。根据设计要求, 需要对 8.0 m 以上的黄土进行加固处理。

## 2 气动振杆密实法处理湿陷性黄土地基施工工艺

### 2.1 振杆密实法装备

研发的振杆密实法处理湿陷性黄土地基的装备如图 2 所示, 主要由振动锤、振动杆、控制系统和附属设备四部分组成, 其中附属设备包括行走机构、导向架、组合钻头、高压气泵、发电机、托盘机构、填土机构等。



图 2 湿陷性黄土地基处理施工装备

Fig. 2 Ground treatment construction equipment

采用 DZ-90KS 变频式防音型电动振动锤, 由激振器、减振弹簧和提升滑轮等组成。振动杆是由两根垂直相交、设有圆形通孔的钢板交叉连接成横截面呈十字型的振杆, 该振杆的四条直翼外侧边设有连续的凸形三角齿, 内侧边均布尖刺齿, 利于破坏土体结构, 减小沉杆阻力。此外, 振动杆下端钻头处沿环向布置 6 个喷气孔, 其喷射的高压气体能够辅助振动杆的下沉。控制系统分自动和手动两种操作模式, 其中自动操作模式只需设置处理深度、振动频率、喷气压力、起重机放线速度即可实现简便操控; 为了避免自动操作模式出现问题, 在施工过程中亦可利用手动操作模式进行调节。

### 2.2 气动振杆密实法施工工艺

针对湿陷性黄土的特点和黄土地区干旱缺水的环境条件, 通过现场工艺试验总结, 提出了边喷气边振动下沉的气动振杆密实法施工工艺(图 3), 主要包括

振点定位、高压喷气、振动下沉、留振、振动反插、振动提升、回填振压和圆板静压等过程。根据不同场地的施工条件和地质情况, 施工工艺可适当调整。

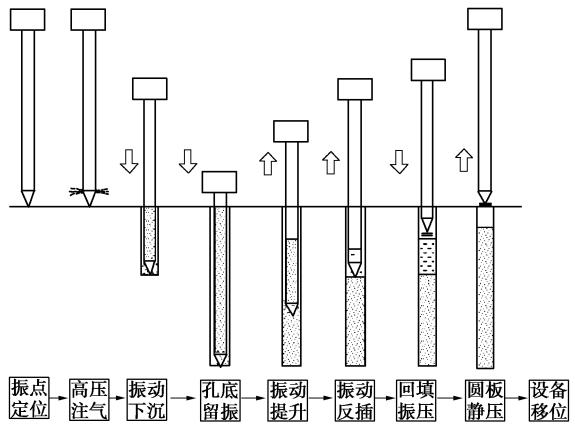


图 3 振杆密实法处理湿陷性黄土地基施工工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of vibratory probe compaction method for collapsible loess treatment

具体施工过程如下:

(1) 施工前准备: 整平场地, 清表; 根据施工图编制施工方案, 按照平面图布置振点位置; 对设备进行全面检查, 尤其是喷气孔是否通畅。

(2) 振点定位: 起重机悬吊振动杆通过行走机构移动到指定点位并对中。

(3) 高压喷气: 根据设计压力操作空气压缩机, 使喷气孔保持高压注气状态(图 4(a))。

(4) 振动下沉: 启动振动锤, 控制起重机放线速度使振动杆在振动锤高频振动和其自重作用下缓慢振入土中(图 4(b)), 直至 8.0 m(设计深度), 并留振 15 s。振动杆下沉过程中, 始终要观察振动杆的稳定性、垂直度和下沉深度。

(5) 振动提升: 起重机在振动锤工作状态下缓慢收线并将振动杆提升, 直至第一次反插深度 4.0 m 处。

(6) 振动反插: 喷气上拔至 4.0 m 时进行第一次反插, 反插至 6.5 m, 再次提升至 2.0 m, 反插至 5.0 m, 提至地面, 停止喷气。

(7) 回填振压: 振动杆提至地面后, 需对振孔进行回填, 回填前先在振动杆底端加上圆板, 再辅助填土机构, 边填土边振压(图 4(c))。

(8) 圆板静压: 回填振压结束后, 关闭振动锤, 利用振动锤与振动杆的自重作用将表层松散土体静压密实, 最后将振杆提至地表。

### 2.3 施工参数与测试内容

根据工艺性试振试验总结, 主要施工参数确定为: 振动频率为 16.0 Hz, 喷气压力为 0.8 MPa。正三角形布点, 振点间距 1.2 m, 处理深度根据设计要求为 8.0 m。



图 4 施工现场照片

Fig. 4 Photos of construction site

处理后在振点中心和三点形心处(图 5)分别进行挖探取样和原位测试,对处理后的黄土土层强度、湿陷性和承载力等进行评价。具体检测项目包括 10 d 龄期的室内土性基本参数测试、湿陷系数、静力触探试验(CPT)、标准贯入试验(SPT) 和瞬态瑞利面波测试。

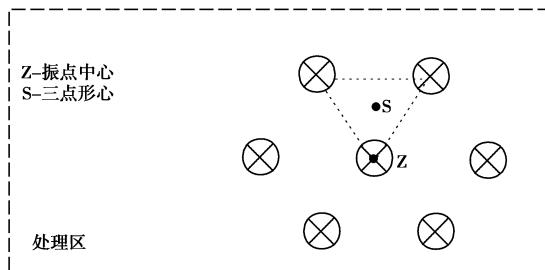


图 5 测点布置示意图

Fig. 5 Layout of test points

### 3 振杆密实法处理湿陷性黄土地基效果评价

#### 3.1 振后地表沉降

振杆密实法通过振动杆的高频振动和高压喷气作用破坏振点周围黄土的结构,引起振点附近下沉,形成振孔,如图 6 所示,单点振孔深约 2.5 m, 直径约 0.7 m。每个振孔经回填振压,试验区群点振后地表整体沉降 0.7 m 左右,如图 7 所示。

#### 3.2 土性基本参数变化分析

随机选取试验区内 3 个振点,采用洛阳铲分别在振点中心和三点形心处挖孔,人工下井每隔 1 m 取样一件,及时送往实验室检测。室内试验内容与结果如表 2 所示。



图 6 振孔的深度和直径

Fig. 6 Depth and diameter of vibration hole

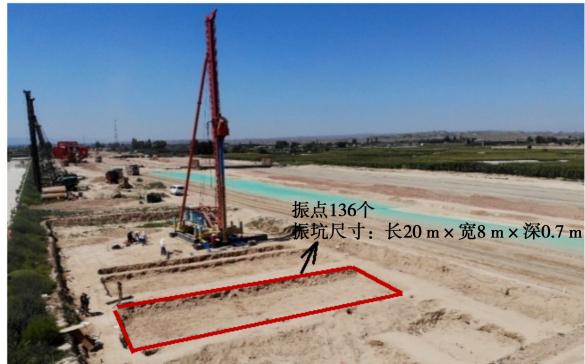


图 7 试验区地面沉降

Fig. 7 Ground subsidence in test area

表 2 处理前后土性基本参数变化

Table 2 Changes of soil properties before and after treatment

测试项目	土层	处理前	测试结果		
			测点位置	处理后	提高幅度/%
孔隙比	①	1.001	1.2-Z	0.775	-22.58
			1.2-S	0.799	-20.18
	②	1.043	1.2-Z	0.817	-21.67
			1.2-S	0.867	-16.87
干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	①	1.35	1.2-Z	1.53	13.33
			1.2-S	1.50	11.11
	②	1.32	1.2-Z	1.49	12.88
			1.2-S	1.45	9.85
压缩模量 (100~200 kPa) /MPa	①	5.9	1.2-Z	13.9	135.59
			1.2-S	11.3	91.53
	②	6.5	1.2-Z	11.9	83.07
			1.2-S	12.7	95.38
内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	①	23.2	1.2-Z	24.8	6.90
			1.2-S	29.2	25.86
	②	23.5	1.2-Z	24.3	3.40
			1.2-S	24.9	5.96
黏聚力/kPa	①	11.5	1.2-Z	14.2	23.48
			1.2-S	14.6	26.96
	②	10.7	1.2-Z	16.0	49.53
			1.2-S	12.2	14.02

由表 2 可知,振杆密实法处理后土层的物理力学指标均有明显改善。其中,孔隙比降低 16%~23%,干密度提高 9%~14%,压缩模量大幅提高,增幅在 83%~136%,内摩擦角和黏聚力也具有一定幅度的增加,土层密实度得到显著提高。

### 3.3 振后黄土湿陷性评价

振点间距 1.2 m 处理区黄土的湿陷系数随深度分布如图 8 所示。处理后土层湿陷系数较处理前有了一个数量级的降低, 湿陷系数平均值为 0.003, 均为非湿陷性黄土。8.0 m 以下一定范围内黄土的湿陷系数也有一定程度降低。振点中心和三点形心处各土层湿陷系数差异不明显。

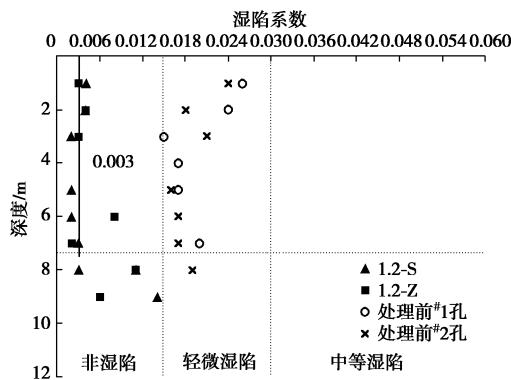


图 8 处理前后黄土湿陷系数随深度分布图

Fig. 8 Distribution of loess collapsibility coefficient with depth before and after treatment

### 3.4 原位测试

#### (1) 标准贯入试验

试验区标准贯入试验结果见图 9 所示, 土层①和②处理前平均标贯击数分别为 4.0 击和 5.7 击, 处理后分别为 11 击~13 击、12 击~13 击, 提高了 2 倍以上, 地基加固效果显著。振点中心处标贯击数略大于三点形心, 这是圆板振压在振点中心处土层施加了多次“冲击夯实”产生的效果。

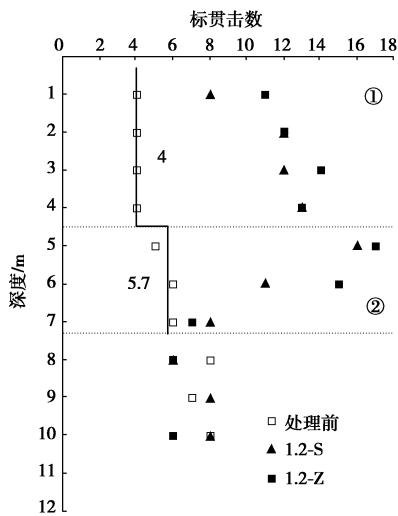


图 9 处理前后标准贯入试验结果对比

Fig. 9 Comparison of standard penetration test results before and after treatment

#### (2) 静力触探试验

采用双桥静力触探试验, 配套  $10 \text{ cm}^2$  双桥静探探头, 可同时测得锥尖阻力 ( $Q_c$ ) 和侧壁阻力 ( $P_s$ )。试

验结果如图 10 所示。

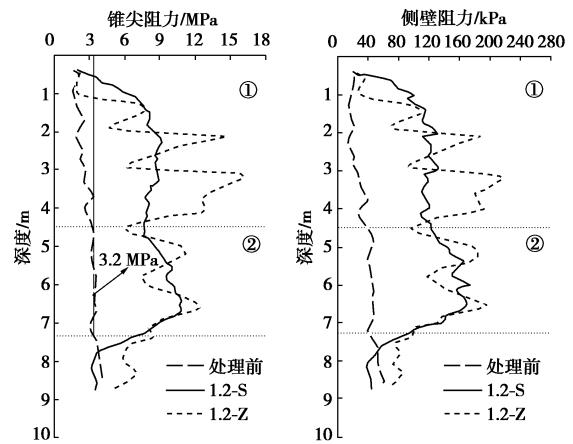


图 10 处理前后土层静力触探试验结果对比

Fig. 10 Comparison of static penetration test results before and after treatment

由图 10 可以发现, 振杆密实法处理后的土层锥尖阻力和侧壁阻力远大于处理前土层, 其中锥尖阻力均值都在 6.5 MPa 以上, 侧壁阻力在 100 kPa 以上, 较处理前提高 1 倍以上, 说明场地地基承载力显著提高。对比振点中心和三点形心处的土层发现, 三点形心处土层加固的均匀性较好, 而振点中心处土层有着更高的承载力, 但分层现象明显, 这主要是圆板振压和反插作用引起。

#### (3) 瞬态瑞利面波测试

采用 YL-SWS 面波仪对处理前后的场地进行了瞬态瑞利面波测试, 采用 12 个检波器, 道间距 1 m, 偏移距分别为 3, 5, 8 m, 测试现场如图 11 所示。

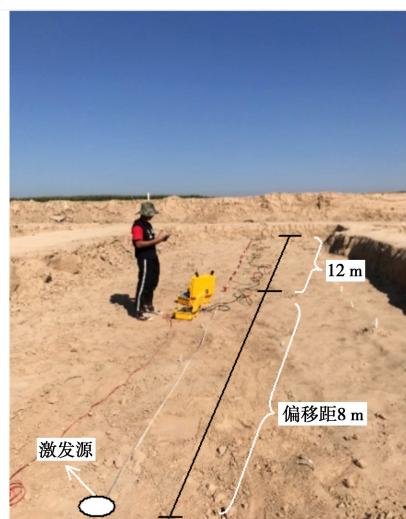


图 11 面波测试现场

Fig. 11 Photo of surface wave tests

面波测试结果如图 12 所示, 处理前土层波速随深度增加略有增大, 勘察深度范围内平均波速为 145 m/s。经振杆密实法处理后, 8.0 m 以上范围内不同深度土层的波速均有明显提高, 数值介于 166~176 m/s, 较处理前增加 15% 左右, 且超过处理深度(8.0~10.0 m)

的土层亦受到振杆密实影响，土层密实度得到改善。

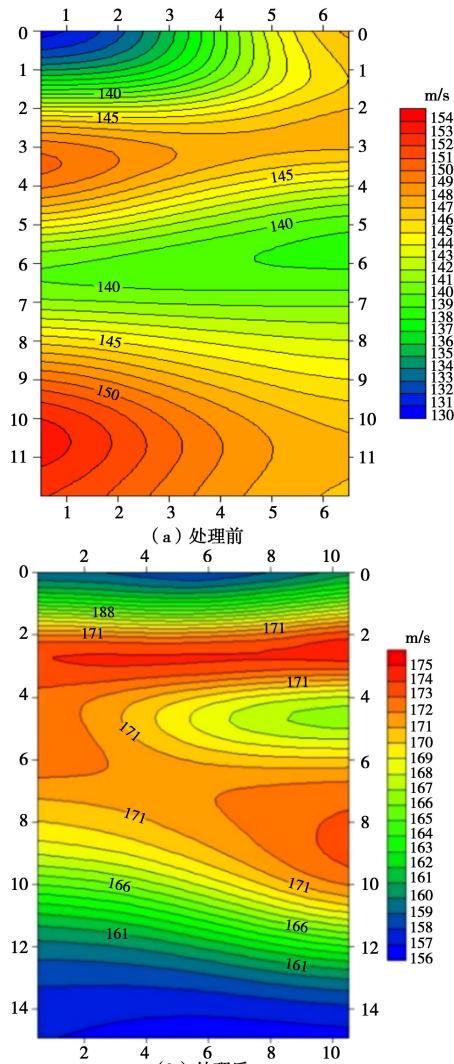


Fig. 12 Results of surface wave tests

## 4 环境振动影响分析及技术经济性评价

### 4.1 地面振动影响

图 13 为振杆密实法和强夯法在施工时地面最大振动速度与距离的关系。可以看出，随距振点距离增大，两种施工振动速度均逐渐衰减。根据 Moseley 等<sup>[15]</sup>建议的建筑地基允许最大振动速度(表 3)，以 10 mm/s 作为容许振动速度的界限指标，可以看出振杆密实法施工时施工安全距离为 10 m。对比强夯法<sup>[16]</sup>的振动影响范围发现，强夯法的施工安全距离约为 60 m，远大于振杆密实法。因此，认为振杆密实法对周围环境振动扰动小，施工安全性高。

表 4 两种湿陷性黄土地基处理方法经济性对比

Table 4 Economic comparison of two treatment methods for collapsible loess foundation

处理方式	处理面积/m <sup>2</sup>	间距/m	处理深度/m	桩数/个	总延米数	单价/(元/m)	其它费用/元	总价/元
灰土挤密桩	100	1.0	8.0	115	924	33.85	无	31277
振杆密实法	100	1.2	8.0	80	642	30	冲击碾压 回填土方 217 3760	23237

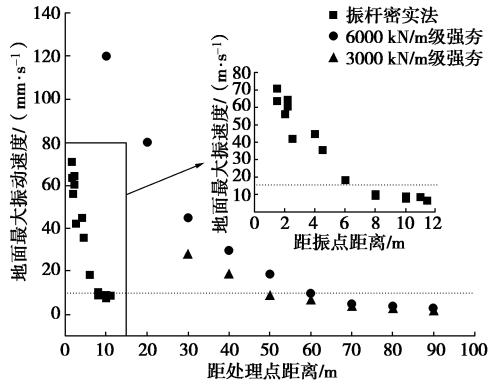


图 13 地面振动最大速度与施工安全距离的关系

Fig. 13 Relationship between maximum velocity of ground vibration and safe distance of construction

表 3 建筑地基允许最大振动速度<sup>[15]</sup>

Table 3 Maximum allowable vibration velocities of building foundation<sup>[15]</sup>

破坏类型	振动速度/(mm·s⁻¹)
结构破坏	40
轻微的建筑损伤	10
对居民造成干扰	2.5

### 4.2 技术经济性评价

灰土挤密法和强夯法因快速可靠、实践经验丰富等优点在湿陷性黄土地基处理中得到了广泛应用，但也存在填料会造成污染，造价偏高、处理深度有限、振动（尤其是强夯法）对周围环境影响大等因素而限制了其适用范围。在湿陷性黄土地基处理费用往往在整个工程中所占比例不容小觑。以试验现场附近的灰土挤密法为例，其采用正三角形布桩，桩间距为 1.0 m，桩径 0.4 m，处理深度为 8.0 m。参照施工投标价格及《建筑工程定额与预算》相关规定对振杆密实法和灰土挤密法处理湿陷性黄土地基费用进行对比分析，见表 4。

经计算，振杆密实法的总处理费用约为灰土挤密法的 73.3%。另外，振杆密实法无需石灰/水泥土置换部分地基土体，具有节能、低碳、环保等优点，在保证加固效果的同时又能较大幅度节省经济投入，具有较好的经济效益和社会效益。

## 5 结 论

本文在国内外首次提出采用振杆密实法技术处理湿陷性黄土地基，以中兰客专（靖远段）工程项目为依托，进行了现场试验研究，得到主要结论如下：

(1) 针对湿陷性黄土的特点，研发了振杆密实法

施工装备, 提出了气动振杆密实法施工工艺。

(2) 室内土性测试表明, 振杆密实法处理后各层黄土的湿陷系数大幅降低, 平均值 0.003, 均为非湿陷性黄土; 土层孔隙比降低 16%~23%, 干密度提高 9%~14%, 压缩模量提高 83%~136%, 内摩擦角和黏聚力也具有一定幅度增加, 黄土工程性质得到有效提高。

(3) 原位测试结果表明, 振杆密实法处理后的土层静力触探锥尖阻力、侧壁阻力和标准贯入击数远大于处理前土层, 其中 SPT 击数提高 2 倍以上, CPT 锥尖阻力均值达到在 6.5 MPa 以上, 地基承载力显著提高; 处理深度内土层的面波波速均有明显提高, 较处理前增加 15% 左右, 土层密实度得到有效提高。

(4) 振杆密实法施工引起的环境振动影响小, 试验场地的施工安全距离为 10 m。

(5) 与传统挤密法、强夯法等相比, 振杆密实法处理湿陷性黄土技术造价低, 工效高、节能、环保, 具有显著的经济效益和环境效益。

## 参考文献:

- [1] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学: B辑, 1987, 17(12): 1309~1316. (LEI Xiang-yi. The pore types and collapsibility of loess in China[J]. China Science: B, 1987, 17(12): 1309~1316. (in Chinese))
- [2] 王兰民, 袁中夏, 汪国烈. 饱和黄土地基液化的工程初判和详判指标与方法研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 1~8. (WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Guo-lie. Study on method for preliminary and detailed evaluation on liquefaction of loess sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 1~8. (in Chinese))
- [3] 李娜, 孙军杰, 王谦, 等. 黄土地基改性处理技术研究进展评述与展望[J]. 地球科学进展, 2017, 32(2): 209~219. (LI Na, SUN Jun-jie, WANG Qian, et al. Progress review and perspective problems on loess foundation reinforcement by means of modification treatment[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(2): 209~219. (in Chinese))
- [4] 屈耀辉, 苗学云. 3 种常用地基处理方法在黄土区高铁地基中的适用性研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 8~12. (QU Yao-hui, MIAO Xue-yun. Applicability of three common ground treatment methods for high speed railway subgrade in loess areas[J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 8~12. (in Chinese))
- [5] 张志强. 湿陷性黄土的地基处理方法探讨[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 2012, 45(A1): 186~188. (ZHANG Zhi-qiang. Discussion on foundation treatment methods of collapsible loess[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(A1): 186~188. (in Chinese))
- [6] 王银梅. 湿陷性黄土地基处理新途径的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 106~109. (WANG Yin-mei. A new improved method of foundation treatment for collapsible loess[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 106~109. (in Chinese))
- [7] MITCHELL J K. In-place treatment of foundation soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(1): 73~110.
- [8] MASSARSCH, K R, FELLENIUS, B H. Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2017, 1~10.
- [9] 刘松玉, 杜广印, 苗永红. 十字形振动翼, 200710020591.9[P]. 2008-12-24. (LING Song-yu, DU Guang-yin, MIAO Yong-hong. Cross Vibration Wing, 200710020591.9[P]. 2008-12-24. (in Chinese))
- [10] 刘松玉, 杜广印, 邵俐, 等. 共振法加固液化地基的操作方法, 201010119970.5[P]. 2010-7-28. (LING Song-yu, DU Guang-yin, SHAO Li, et al. Operational Approach on Liquefied Foundation Reinforced Method of Resonance Method. 201010119970.5[P]. 2010-07-28. (in Chinese))
- [11] 刘松玉, 程远. 共振法加固公路可液化地基试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 24~29. (LIU Song-yu, CHENG Yuan. Resonance compaction method for highway ground improvement at liquefaction site[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 24~29. (in Chinese))
- [12] 杜广印, 刘松玉, 任蓓蓓, 等. 十字形振动翼共振法在处理可液化地基中的应用[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊): 466~469. (DU Guang-yin, LIU Song-yu, REN Bei-bei, et al. Application of treatment on liquefied foundation using resonance compaction method[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(S0): 466~469. (in Chinese))
- [13] 程远, 韩杰, 朱合华, 等. 振杆密实法加固粉土地基效果试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 63~70. (CHENG Yuan, HAN Jie, ZHU He-hua, et al. Vibratory probe compaction effect on silty foundation treatment[J]. China Journal of Highway Transport, 2019, 32(3): 63~70. (in Chinese))
- [14] DU G Y, GAO C H, LIU S Y, et al. Evaluation method for the liquefaction potential using the standard penetration test value based on the CPTU soil behavior type index[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 1~8.
- [15] MOSELEY M P, KIRSCH K. Ground Improvement[M]. 2nd ed. Florida: CRC Press, 2004.
- [16] 李高. 强夯地基加固质量的实时振动监测方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. (LI Gao. Methodological Research on the Real Time Vibration Monitoring of Foundation Reinforced Quality by Dynamic Compaction[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))