

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230914002

# 振杆密实法在高烈度区液化地基处理中的应用研究\*

徐昊天<sup>1</sup>, 苟志孝<sup>2</sup>, 王正伟<sup>2</sup>, 戴梁<sup>1</sup>, 章定文<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏南京 211189; 2. 新疆路桥建设集团有限公司, 新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要:**喀什地区地处我国最西部,地震烈度高,戈壁荒漠分布广泛,区域内土壤在地震作用下极易发生液化。以喀什地区G314喀什过境段公路工程为依托,分别采用振杆密实法和碎石桩加固高烈度可液化场地,通过静力触探(CPT)和标准贯入试验(SPT)评价加固效果,研究叠加效应对加固效果的影响和振动前后土体水平应力的变化,证明十字翼形振杆密实法技术处理高烈度区(Ⅷ度区)戈壁滩可液化地基具有良好的适用性。原位测试结果表明:(1)振杆密实法加固后,土体的锥尖阻力、侧壁摩阻力和标贯击数显著增加,土体的密实度达到中密状态,抗液化水平提高,可液化土层的水平应力显著增加;(2)三点形心处的加固效果相较于其他位置有明显提升;(3)处理深度越深,振杆密实法处理效果相较于碎石桩提升越显著。振杆密实法加固高烈度区戈壁滩可液化地基效果明显,消除液化效果优良、加固深度大、造价低,具有良好的推广应用前景。

**关键词:**地基处理; 振杆密实法; 高烈度区; 标准贯入; 静力触探

**中图分类号:** TU416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1439-09

## Study on the Application of Vibrating Rod Compaction Method in the Treatment of Liquefied Foundation in High Intensity Area

XU Haotian<sup>1</sup>, GOU Zhixiao<sup>2</sup>, WANG Zhengwei<sup>2</sup>, DAI Liang<sup>1</sup>, ZHANG Dingwen<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Xin Jiang Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The Kashgar region, located in the most western part of China, is characterized by high seismic intensity and extensive presence of the Gobi desert. The soil in this region is prone to liquefaction under the action of earthquakes. The study used the G314 Kashgar transit section highway project as a basis, adopting the vibrating rod compaction method and gravel piles to reinforce high-intensity liquefiable sites. The reinforcement effect was evaluated by static cone penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT). The study examined the impact of the superimposed effect on the reinforcement and the change in horizontal stress of the soil before and after the vibration, demonstrating the good applicability of the cross-wing vibrating rod compaction method for treating liquefiable foundations in the Gobi desert of high-intensity areas (VIII-degree areas). The in-situ test results showed

\* 收稿日期:2023-09-14;修回日期:2023-12-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078129)资助

作者简介:徐昊天(1999—),男,硕士研究生。主要从事地基处理研究。E-mail:220213362@seu.edu.cn

that : (1) After reinforcement using the vibrating rod compaction method, the cone tip resistance, side-wall friction resistance and standard penetration number of the soil increased significantly. The compactness of the soil reached a medium density state, the liquefaction resistance improved, and the horizontal stress of the liquefiable soil layer increased significantly. (2) The reinforcement effect at the centroid of the three-point layout was significantly improved compared with other locations. (3) The deeper the treatment depth, the more significant the treatment effect of vibrating rod compaction method was compared with the gravel pile. The vibrating rod compaction method has proven effective in reinforcing liquefiable foundation of the Gobi desert in high intensity area, effectively eliminating liquefaction, offering deep reinforcement, low costs, and good prospects for widespread application.

**Keywords:** foundation treatment; vibrating rod compaction method; high intensity area; standard penetration; static cone penetration

## 0 引 言

新疆喀什地区地处天山地震带的南端,是现今全球构造活动最为强烈的地震构造区之一<sup>[1]</sup>。20世纪以来,喀什地区发生7级以上地震5次,6.5~7.0级地震17次,是我国地震发生最频繁的地区之一<sup>[2]</sup>。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)<sup>[3]</sup>划分,喀什地区绝大多数地区地震设防烈度为Ⅷ度区。杨海芳<sup>[4]</sup>对破坏性地震的震害资料进行整合研究,将6.5~7.9级地震的Ⅷ度及以上烈度区定义为高烈度区。国内对于高烈度地区的研究主要集中在上部结构,对于地基基础的研究甚少。工程通常采用标准贯入试验、静力触探试验以及剪切波速测试<sup>[5]</sup>等判别场地液化水平。《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB—55002—2021)<sup>[6]</sup>规定液化地基应根据工程抗震设防规范,结合相应情况采用对应的抗液化措施。在《中国地震动参数区划图》中,我国Ⅷ度区约占国土总面积的18%<sup>[7]</sup>,地基和路基的液化防治成为了突出问题。

喀什地区内广泛分布戈壁荒滩,且地震作用会引起饱和砂土或粉土发生液化,土颗粒骨架产生体积变形,造成地基承载力丧失,地基不均匀沉降,地表喷砂冒水和地面开裂等<sup>[8]</sup>。工程实践中需对液化地基进行处理,传统的地基处理方法有强夯法、碎石桩法和换填法等。上述方法已在低烈度区工程中取得了广泛应用,但往往存在需要填料,造价高,施工时间长,处理深度有限及安全性低等局限性,在工程中经常受限。而振杆密实法无需填料,施工便捷、操作简单,加固效果显著。

振杆密实法是一种新兴的处理可液化地基的方法,其加固地基的理论基础以K. R. Massarsch<sup>[9]</sup>提出的能量传播理论为代表,加固原理源于振动能量的传递,改变土体条件。其施工工艺类似沉管灌注桩,将一根中间有圆孔的扁杆以振动的方式沉入土中,通过振动锤带动振杆,使周围土体发生剧烈震荡,通过调节振动机频率实现土-振杆系统共振,将能量以最佳的方式传递到周围土体中,从而达到最佳的振动密实效果<sup>[10]</sup>。K. R. Massarsch等<sup>[11]</sup>和P. Krogh等<sup>[12]</sup>对振动密实过程进行研究,发现各测点土层的垂直振速均小于水平振速,同时水平应力的增加会引起土体发生预固结效应。程远<sup>[13]</sup>在振杆密实法处理可液化粉土地基研究中对此进行了验证,并分析了振杆密实法加固粉土后土体强度随时间的变化规律,指出粉土在完成固结排水后物理力学性质仍持续提高。K. R. Massarsch等<sup>[14]</sup>对振杆密实法自由排水条件下的有效应力路径进行分析,发现在竖向循环振动荷载作用下,水平应力增量有显著提升。振杆密实法的振动杆有多种形式,包括Terra-Probe、振动棒、振动翼、Y形振动翼、双Y形振动翼以及十字形振动翼<sup>[13]</sup>。近年来,国内外振杆密实法对可液化地基处理工程应用增多,在可液化地基和湿陷性黄土地基处理工程中取得了显著效果<sup>[15-20]</sup>。

本文在已有研究基础上,针对喀什地区G314线喀什过境段公路工程高烈度区、戈壁荒滩地层等特点,采用振杆密实法加固地基,开展振杆密实法处理高烈度戈壁滩可液化地基现场试验,并对加固效果进行了评价。

# 1 现场工程概括

振杆密实法处理可液化地基试验段位于新疆维吾尔自治区喀什地区疏附县工业园规划葡萄园。该场地位于山前冲洪积扇—冲积平原区,沿线大部分

地段地形平坦,地势开阔,地层主要为第四系松散堆积物,区域内基本地震动峰值加速度为0.30g,地震基本设防烈度为Ⅷ度。本线路局部段落地下水较浅,水位埋深1.0~2.7 m,地表水丰富。试验段工程地质条件如图1所示,其中②粉土(Q<sub>4</sub><sup>pl</sup>)和④<sub>1</sub>细砂(Q<sub>4</sub><sup>sl</sup>)在地震作用下会发生土体液化,为可液化土层。

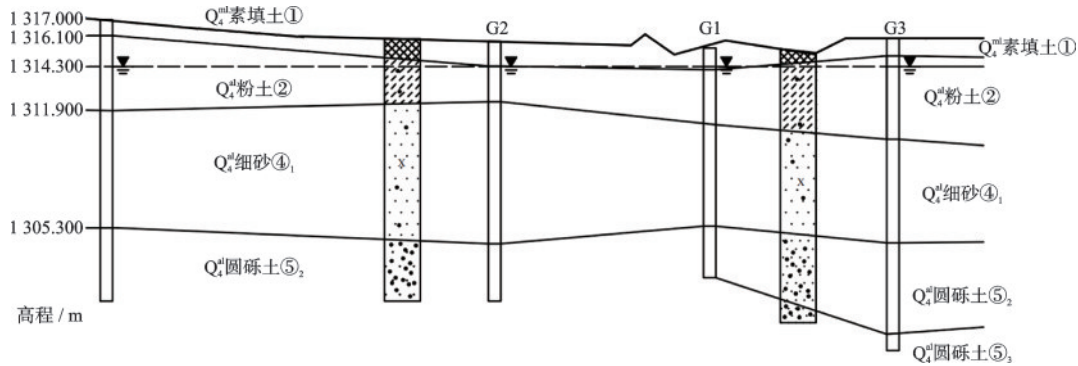


图1 试验区域工程地质剖面图(局部)

Fig.1 Engineering geological profile of the test area (partial)

试验前对试验段进行了补充勘察,包括标准贯入试验(SPT)及室内黏粒含量测试, SPT孔位为G1, G2和G3,并根据《公路工程抗震规范》(JTGB02)<sup>[21]</sup>进行液化评价,液化判别标准贯入锤击数临界值的计算公式如下:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (1)$$

式中,  $N_{cr}$ 为修正的液化判别标准贯入锤击数临界值,  $N_0$ 为液化判别标准贯入锤击数基准值;  $d_s$ 为标准贯入点深度;  $d_w$ 为地下水位埋深;  $\rho_c$ 为黏粒含量。

地基处理前标准贯入试验孔位G1~G3的液化判别结果见表1,其中  $N_{63.5}$ 为实测标准贯入锤击数。因试验段内基本地震动峰值加速度为0.30g,基本设防烈度为Ⅷ度,故  $N_0$ 取15。经计算试验区在0~12.5 m深度范围内为严重—中等液化,根据设计要求,需要对11.2 m以上的土进行加固处理。

## 2 振杆密实法施工工艺及参数

### 2.1 施工设备

振杆密实装置为东南大学自主研发的十字形振动翼及施工设备<sup>[22-23]</sup>,如图2所示,主要由振动锤、十字形振动翼、控制系统和附属设备组成。振杆横截面直径为60 cm,是由两个宽为60 cm且表面均匀分布圆孔的金属板材垂直相交焊接而成,呈十字

表1 地基液化判别

Table 1 Foundation liquefaction assessment

孔号	$d_w/m$	$d_s/m$	$N_{63.5}$	$\rho_c/\%$	$N_{cr}$	液化指数	液化判别
G1	1.83	2.0	7	8.86	8.00	11.5	中等液化
		3.5	11	8.86	9.31		
		5.0	14	11.50	9.32		
		6.5	16	11.50	10.47		
		8.0	14	3.00	22.76		
		9.5	14	3.00	25.01		
G2	1.50	11.0	14	3.00	27.26	19.3	严重液化
		2.0	15	14.60	6.46		
		3.5	10	5.26	12.46		
		5.0	15	5.26	14.16		
		6.5	10	5.26	15.86		
		8.0	16	3.00	23.25		
G3	1.50	9.5	12	3.00	25.50	8.7	中等液化
		11.0	14	3.00	27.75		
		12.5	23	3.00	27.50		
		2.0	11	8.86	8.29		
		3.5	12	8.86	9.60		
		5.0	11	11.50	9.58		
G3	1.50	6.5	11	11.50	10.73	8.7	中等液化
		8.0	15	3.00	23.25		
		9.5	16	3.00	25.50		
		11.0	19	3.00	27.75		
		12.5	31	3.00	27.50		

形,振杆外侧设有连续的凸状半圆齿,能更有效地向土体传递振动能量。

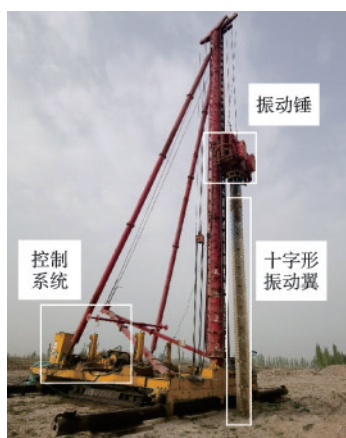


图2 地基处理施工设备

Fig.2 Construction equipment used in foundation treatment

## 2.2 施工工艺

针对高烈度区、戈壁荒滩地层特点,通过现场工艺试验总结,振杆密实法施工工艺主要包括:振点定位、振动下沉、留振、振动提升等过程。根据场地条件和地层变化,施工工艺可进行适当调整,施工流程如图3所示。

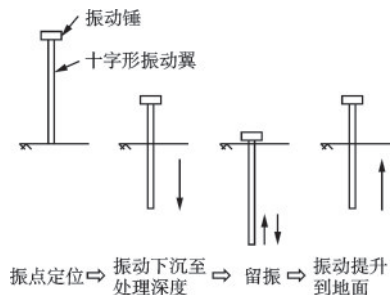


图3 振杆密实法施工流程

Fig.3 Construction process of vibrating rod compaction method

(1)振点定位:根据设计要求,在平整好的施工场地放置点位,通过行走机器运送起重机悬吊振动杆到指定点位并对中。

(2)振动下沉:调节振动锤的频率为17 Hz(施工前测定的加固区土体自振频率),启动振动机器,严格控制起重机下沉速度,操作控制系统让振杆在振动锤高频振动下缓慢振入待处理土壤中,直至11.2 m(设计深度),振动下沉时注意振杆的垂直度以及下沉速度。

(3)留振:振杆达到设施深度后,留振20 s,使土体振动挤密。

(4)振动提升:在振动机器工作状态下,起重机

控制回收速率缓慢收线,将振动杆提升至地表,然后关闭振动机器,对振动形成的孔进行回填压实,完成振杆密实法单孔施工。在需要加强处理的深度可以进行留振处理。

## 2.3 施工参数及试验内容

测点布置示意如图4所示。根据现场地质条件以及前期试验结果总结,主要的施工参数为:振动频率为17 Hz,梅花形布点,振孔间距为1.8 m,根据设计处理深度为11.2 m。在试验区内也采用碎石桩处理可液化地基,同样采用梅花形布置,碎石桩间距 $s_a$ 为1.8 m,碎石桩直径为0.8 m,加固深度和振杆密实法一致,为11.2 m。

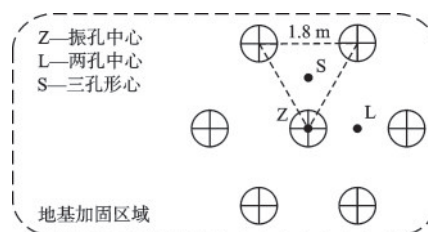


图4 测点布置示意

Fig.4 Schematic diagram of measuring point layout

地基处理前,对试验段进行原位测试。地基处理完成后,在处理后的振点中心(Z)、两点中心(L)和三点形心(S)处分别进行原位测试,对处理后的可液化地基的承载力进行评价。原位测试试验包括土体的黏粒含量测试、28 d龄期的静力触探试验(CPT)和标准贯入试验(SPT)。

## 3 可液化地基处理效果评价

### 3.1 地面沉降

振杆密实法是通过振动锤带动振杆运动,把能量传递到土体中,破坏土体结构,土颗粒在重新排列组合的过程中引起地表沉降。如图5所示,处理后单孔直径 $D$ 约为0.6 m,与振杆直径相近。振后孔内发生排水现象,振孔四周有明显塌陷,试验区经过整平后地表沉降约为0.2 m,有效地提高了土体的密实度。实验前测定场地土体的孔隙率,并计算2 m以下平均相对密实度为0.49,振动完成后根据沉降估算相对密实度为0.64,提升约30.6%,说明振杆密实法可以有效提高土体的密实程度,在高烈度地区加固可液化地基效果明显。

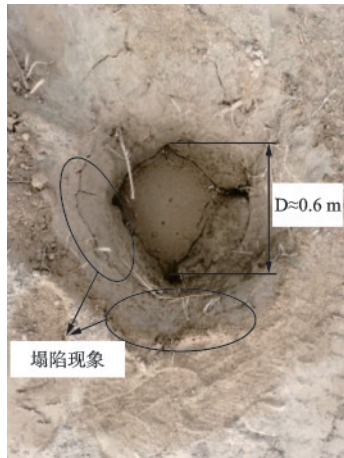


图5 振杆密实法处理后的孔

Fig.5 Hole after treatment with vibrating rod compaction method

### 3.2 标准贯入试验分析

标准贯入试验采用63.5 kg的标准贯入锤以规定的落距自由落下,反复击打,记录贯入深度10 cm的锤击数,将连续30 cm所需的锤击数定为标准贯入试验实测锤击数。

处理区标准贯入试验结果如图6(a)所示。通过振杆密实法处理后,标贯击数有显著增加。试验结果表明,两孔中心、三孔形心和振点中心处的标贯击数增幅均超过1倍,当处理深度大于5 m时,地基加固效果尤为明显,最大增幅为3.43倍。三点形心处土层的标贯击数的变化规律与两点中心基本一致,但是在深度6~9 m处增加更明显,三点形心处的标贯击数略大于振点中心和两孔中心,因为振动波的叠加作用,三点形心处受到来自三个方向不同的扰动,振动效果叠加,加固效果明显。根据土层黏粒含量测试结果以及《公路工程抗震规范》(JTG B02)中可液化场地液化判别公式及液化等级公式进行计算,结果见表2,检测孔位分别为振点范围内、两点中心和三点形心处的SPT孔位。计算结果表明,Ⅷ度区相较于Ⅶ度区,液化判别标准贯入锤击数基准值从10提高到15,处理前此处判定为中等液化,处理后判定为不液化,证实振杆密实法处理高烈度地区可液化地基效果显著。

处理区标准贯入试验结果和碎石桩处理结果如图6(b)所示,液化判别结果详见表3,碎石桩处理区SPT检测孔位为三点形心处。在处理深度5 m以内,振杆密实法处理后的标贯击数和碎石桩相差不大;当深度超过5 m,振杆密实法处理后的标贯击

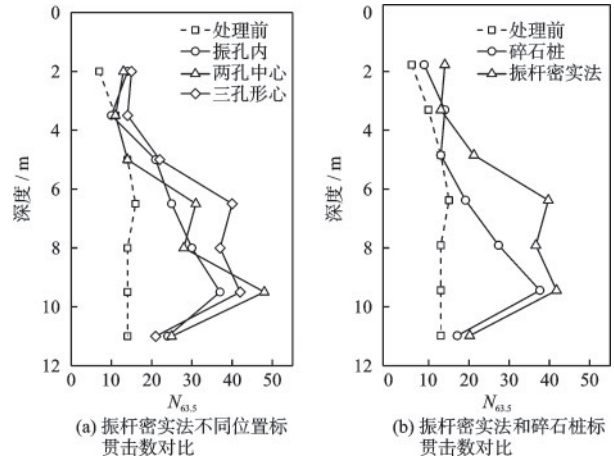


图6 标准贯入试验结果

Fig.6 Standard penetration test results

表2 振杆密实法处理后液化判别

Table 2 Liquefaction assessment after vibrating rod compaction method

孔号	$d_w/m$	$d_s/m$	$N_{63.5}$	$\rho_c/\%$	$N_{cr}$	液化判别	
振孔内	1.90	1.86	2.0	14	16.05	5.90	不液化
			3.5	10	20.74	6.05	
			5.0	21	18.60	7.29	
			6.5	25	5.74	14.75	
			8.0	30	5.56	16.64	
			9.5	37	10.09	13.58	
两孔中心	1.86	1.86	11.0	24	7.54	17.13	不液化
			2.0	13	16.05	5.93	
			3.5	11	20.74	6.07	
			5.0	14	18.60	7.31	
			6.5	31	5.74	14.79	
三孔形心	1.90	1.86	8.0	28	5.56	16.68	不液化
			9.5	48	10.09	13.61	
			11.0	25	7.54	17.16	
			2.0	15	16.05	5.90	
			3.5	14	20.74	6.05	
三孔形心	1.90	1.86	5.0	22	18.60	7.29	不液化
			6.5	40	5.74	14.75	
			8.0	37	5.56	16.64	
			9.5	42	10.09	13.58	
三孔形心	1.90	1.86	11.0	21	7.54	17.13	不液化

表3 碎石桩处理后液化判别

Table 3 Liquefaction assessment after gravel pile treatment

孔号	$d_w/m$	$d_s/m$	$N_{63.5}$	$\rho_c/\%$	$N_{cr}$	液化判别	
三孔形心	1.93	1.86	2.0	10	15.84	5.92	不液化
			3.5	15	10.25	8.58	
			5.0	14	5.20	13.75	
			6.5	20	11.59	10.36	
			8.0	28	8.38	13.53	
			9.5	38	10.09	13.55	
三孔形心	1.93	1.86	11.0	18	7.45	17.20	不液化

数明显高于碎石桩,在6.5 m处,前者的处理效果相较于后者提升了100%。计算结果表明两者均完全消除了土层的液化,但是在Ⅷ度区内,振杆密实法加固可液化地基的效果相较于碎石桩有明显提升。

### 3.3 静力触探试验分析

静力触探试验采用自动式双桥静力触探设备,同时测得锥尖阻力和侧壁阻力。处理前后土层静力触探试验结果如图7所示。

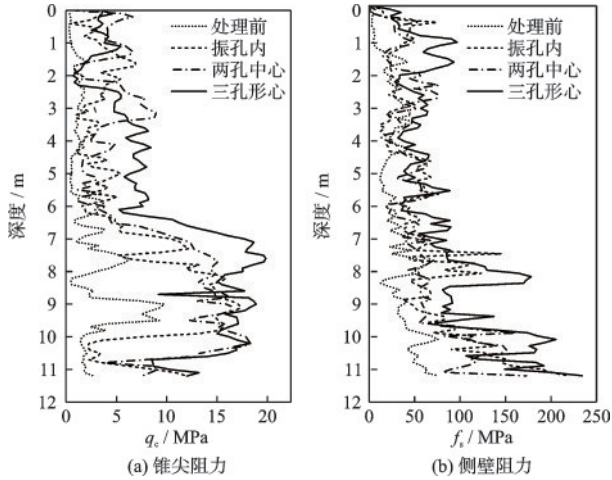


图7 处理前后土层静力触探试验结果对比

Fig.7 Comparison of cone penetration test results before and after treatment

静力触探的结果可以反映土体的密实程度,在加固深度范围内土层的锥尖阻力和侧壁阻力越大,土层密实度和强度越高。采用十字翼形振杆密实法处理高烈度区戈壁滩可液化地基后得到的锥尖阻力和侧壁阻力均大于处理前。土层的锥尖阻力均值为8.05,较处理前提升了300%,侧壁阻力较处理前提升了200%,说明地基承载力和土体密实度显著提高,与标准贯入试验结果相吻合。振孔中心、两点中心和三点形心处静力触探结果表明,由于振动波在三点形心的叠加作用,三点形心处土体的加固效果好于另外两处。

《公路工程地质原位测试规程》(JTG 3223—2021)<sup>[24]</sup>5.5.18节中液化临界贯入阻力公式如下:

$$q'_c = q_{c0} \alpha_1 \alpha_3 \alpha_4 \quad (2)$$

式中, $q_{c0}$ 为 $d_w=2\text{ m}$ , $d_u=2\text{ m}$ , $\alpha_4=1$ 时,可液化土层的临界贯入阻力,其中 $d_w$ 为地下水位埋深, $d_u$ 为上覆非液化土层厚度; $\alpha_1$ 是地下水埋深修正系数; $\alpha_3$ 是上覆非液化土层厚度修正系数; $\alpha_4$ 是黏粒含量百分比修正系数。

Ⅷ度区相比于Ⅷ度区,可液化土层的临界贯入阻力更高。依照公式(2)计算得到该试验场地双桥探头触探液化临界贯入阻力约为6.2 MPa,处理后的地基除部分表层外,其他深度均达到设计要求。十字翼形振杆密实法处理区与碎石桩处理区的三点形心处土层静力触探试验结果如图8所示。可以看出,处理后振区的锥尖阻力有明显提升,在处理深度3 m以内,两种方法处理后得到的锥尖阻力相差不明显;在处理深度3~5.5 m之间,碎石桩处理效果和与处理前相差不大,振杆密实法加固效果明显优于碎石桩法;5.5~7 m,试验结果基本相同;处理深度7 m以下,振杆密实法处理后的锥尖阻力相对于碎石桩法处理后明显提升约30%~100%。振杆密实法处理后的效果受到上覆压力影响,随着深度增加,振杆密实法的处理效果更好,且相较于碎石桩的侧向挤压作用,振杆密实法还会对周边土体提供循环剪切作用,使土颗粒由高势能向低势能转变,更有利于土体加固。表层土的静力触探指标相对略高,这是由于压路机碾平导致表层土体密实度有较大提高。

振动密实前后的水平应力变化可以用侧壁阻力比 $f_s$ 表示,侧壁摩阻力又取决于静止土压力系数 $K_0$ 、垂直有效应力 $\sigma'_v$ 以及有效内摩擦角 $\varphi'$ <sup>[25]</sup>,振动密实后与振动前的土压力系数 $K$ 的比值与超固结比 $OCR$ 之间存在经验公式<sup>[26]</sup>。整合得到超固结比的公式为:

$$OCR^\beta = \frac{K_{01}}{K_{00}} = \frac{f_{s1} \tan \varphi'_0}{f_{s0} \tan \varphi'_1} \quad (3)$$

式中, $\beta$ 为经验应力指数,取0.48<sup>[27]</sup>;  $K_{00}$ 、 $K_{01}$ 为处理前、后的静止土压力系数; $f_{s0}$ 、 $f_{s1}$ 为处理前、后的侧壁摩阻力; $\varphi'_0$ 、 $\varphi'_1$ 为处理前、后的有效内摩擦角。

土层的应力变化由侧壁阻力比和有效摩擦角估算,结合室内试验,处理后有效内摩擦角有所提升,但是数值变化较小,故受到内摩擦角的影响较小。处理前后侧壁摩阻力比如图8(c)所示,图中垂直虚线是侧壁摩阻力比为1时,在2 m范围以内的土层,振杆密实法处理后土层的侧壁阻力比处于3~10,碎石桩处理后则处于1~10,处理后土层的水平应力明显增加,振杆密实法加固效果明显好于碎石桩;在2~4.5 m范围内,侧壁阻力比均在1.5左右,结合前期勘察结果,此处为不液化土层,水平应力增加不明显;在4.5~8 m内,两种方法处理后的

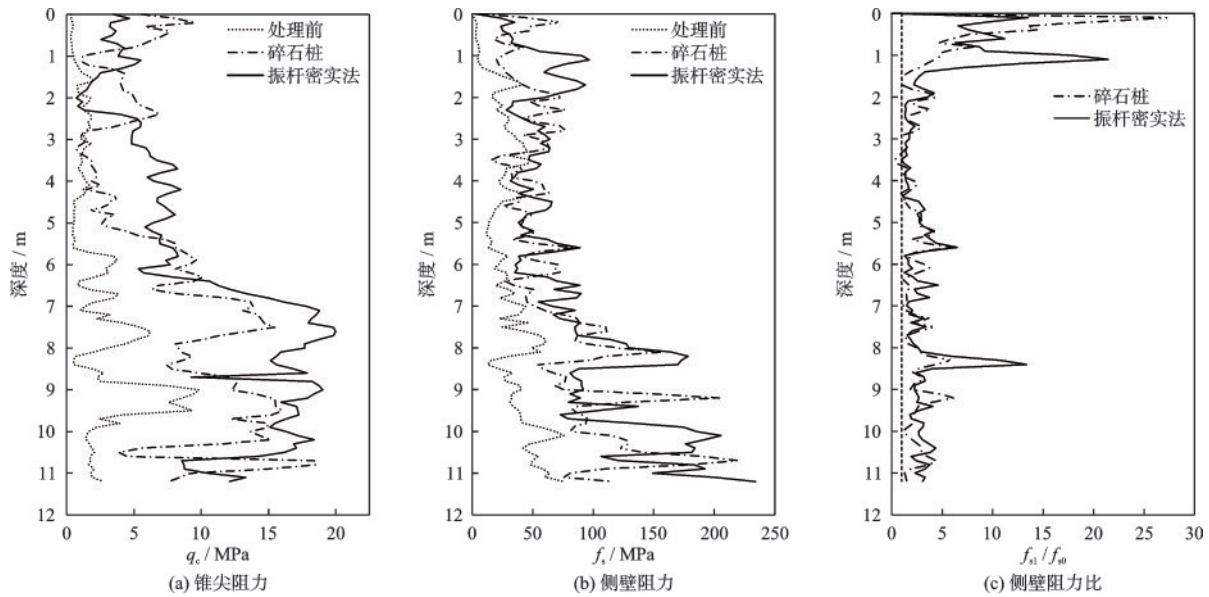


图8 振杆密实法和碎石桩处理结果对比

Fig.8 Comparison of results between vibrating rod compaction method and gravel pile treatment

侧壁阻力比都处于1.5~4,土层水平应力增加相对稳定,加固效果相差不大;在8 m以下范围内振杆密实法处理后土层侧壁阻力比在4左右,而碎石桩在3左右,且随着深度增加,振杆密实法相较于碎石桩对水平应力增加更明显。振杆密实法处理后土层OCR值均高于碎石桩处理后的土层,其超固结效果明显较好,在Ⅷ度区内,振杆密实法对水平应力的影响明显高于碎石桩,加固效果更优良。

#### 4 经济效益分析

该工程处理戈壁滩可液化地基技术主要包括碎石桩法和振杆密实法。碎石桩法因实践经验丰富、操作方便等优点被广泛应用,但其存在明显的不足,如无法控制成桩质量,对周边环境有较大影响以及各种人为因素等,且施工造价相对较高<sup>[28]</sup>。根据国家建筑工程的投标报价和《建筑工程定额与预算》有关条款,分别对碎石桩和振杆密实法在加固地基中的费用进行预算,总价格见表4,其中L为累计处理深度。

从表4可以看出,每100 m<sup>2</sup>的处理区中,振杆密实法的处理总价格约为碎石桩的65%。另外,振杆密实法处理可液化地基时无需填料,具有更安全、节约、便捷等优点,且处理深度越深加固效果越好。因此振杆密实法在保证加固效果的同时又能节省造价,具有良好的经济效益。

表4 两种地基处理方法经济性对比

Table 4 Economic comparison of two foundation treatment methods

地基处理方法	加固面积A/m <sup>2</sup>	桩间距s <sub>a</sub> /m	加固深度	数量	累计处理深度L/m	单价/(元·m <sup>-1</sup> )	总价/元
碎石桩	100	1.8	11.2	57	638.4	39	24 897.6
振杆密实法	100	1.8	11.2	48	537.6	30	16 128

#### 5 结论

在已有研究基础上,采用振杆密实法处理高烈度区戈壁滩可液化地基,并与碎石桩进行对比,以新疆喀什地区G314线工程项目为依托,进行现场试验,主要得到以下结论:

(1)原位测试结果表明,振杆密实法加固地基

后,锥尖阻力、侧壁阻力以及标准贯入击数相较加固前有显著增加,其中锥尖阻力较处理前提升100%~300%,标准贯入击数增幅超过1倍;深度越深侧壁阻力提升越明显;振杆密实法处理深度超过5 m,完全消除液化,加固效果明显。

(2)振杆密实法处理高烈度区可液化地基在三点形心处原位测试结果相较于振孔中心和两点中心有较明显提升,由于三点形心处受到来自三个方

向的振动,振动波在此处进行叠加,此处土体的密实度得到了有效提升,且水平应力增量相较碎石桩有较大提升。

(3)振杆密实法处理高烈度戈壁滩可液化地基有良好的适用性,能够有效地提高处理后地基的抗液化性能。与碎石桩相比,振杆密实法处理高烈度戈壁滩可液化地基效果更明显,且造价低、对环境影响小、效率高,具有显著的经济效益和环境效益。综上所述,振杆密实法适用于Ⅷ度区液化地基处理工程。

### 参考文献:

[1] 陈建波.新疆地震构造特征研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2008.  
Chen J B. Study on the characteristics of seismotectonics in Xinjiang[D].Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)

[2] 闫军辉,延军平.新疆喀什地区地震活动趋势——基于可公度方法的研究[J].自然灾害学报,2011,20(6): 177-180.  
Yan J H, Yan J P. Trend of seismicity in Kashi area of Xinjiang: a commensurability-based research [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 177-180. (in Chinese)

[3] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

[4] 杨海芳.基于构造特征的高烈度区判定方法研究[D].北京:中国地震局地震预测研究所,2018.  
Yang H F. Study on the method of determining high seismicintensity region based on tectonic characteristics [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA,2018. (in Chinese)

[5] 肖诗豪,张洁,葛一荀,等.基于剪切波速的土体液化概率判别法[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4): 490-497.  
Xiao S H, Zhang J, Ge Y X, et al. Probabilistic evaluation of soil liquefaction potential based on shear wave velocity[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 490-497. (in Chinese)

[6] 建筑与市政工程抗震通用规范:GB-55002—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.

[7] 吴琪,徐雨,陈国兴.我国近20年11次地震的土壤液化灾害回顾[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5): 961-975.  
Wu Q, Xu Y, Chen G X. Review of soil liquefaction

manifestation and its consequences for 11 earthquakes in China over the last 20 years[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 961-975. (in Chinese)

[8] 潘霞,许成顺,徐佳琳,等.饱和砂土循环液化模式影响因素试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3): 635-642.  
Pan X, Xu C S, Xu J L, et al. Experimental study on influencing factors of circulating liquefaction model of saturated sand soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2021, 41(3): 635-642. (in Chinese)

[9] Massarsch K R. Deep soil compaction using vibratory probes[M]. Philadelphia: ASTM International, 1991.

[10] 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-Ground Improvement, 2017, 170(3): 149-158.

[11] Massarsch K R, Broms B B. Soil compaction by Vibrowing method [C]//Proceedings: the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Helsinki: [s.n.], 1983: 275-278.

[12] Krogh P, Lindgren A. Dynamic field measurements during deep compaction at Changi Airport, Singapore [R]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 1997.

[13] 程远.振杆密实法加固可液化地基理论与应用研究[D].南京:东南大学,2013.  
Cheng Y. Theory study and engineering application on vibratory probe compaction method for ground improvement at liquefaction site[D].Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese)

[14] Massarsch K R, Wersäll C, Fellenius B H. Horizontal stress increase induced by deep vibratory compaction [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2020, 173(3): 228-253.

[15] 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 S Y, Cheng Y. Resonance compaction method for highway ground improvement at liquefaction site [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 24-29. (in Chinese)

[16] 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 Y, Han J, Zhu H H, et al. Vibratory probe compaction effect on silty foundation treatment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 63-70. (in Chinese)

- [17] Gallon A. Time-dependent change of properties in hydraulic fill after MRC-compaction [R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1996.
- [18] 程远,刘松玉,朱合华,等.振杆密实法加固液化地基施工扰动与影响因素试验[J].中国公路学报,2016,29(9):38-44.  
Cheng Y, Liu S Y, Zhu H H, et al. Experiment of construction disturbance and factors influencing vibratory probe compaction effect on liquefaction site treatment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 38-44. (in Chinese)
- [19] 刘松玉,杜广印,毛忠良,等.振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(8):1377-1383.  
Liu S Y, Du G Y, Mao Z L, et al. Field tests on improvement of collapsible loess by vibratory probe compaction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1377-1383. (in Chinese)
- [20] 曾彪,章定文,刘松玉,等.振杆密实法处理湿陷性黄土施工参数确定现场试验[J].岩土工程学报,2021,43(增2):229-232.  
Zeng B, Zhang D W, Liu S Y, et al. Experimental study on construction parameters of collapsible loess foundation treated by vibrating rod compaction method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(sup2): 229-232. (in Chinese)
- [21] 公路工程抗震规范:JTGB02—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [22] 刘松玉,杜广印,苗永红.十字形振动翼:中国,ZL200710020591.9[P].2008-12-24.
- [23] 刘松玉,杜广印,邵俐,等.共振法加固液化地基的操作方法:中国,ZL201010119970.5[P].2010-7-28.
- [24] 公路工程地质原位测试规程:JTG 3223—2021[S].北京:人民交通出版社,2021.
- [25] Mayne P W, Kulhawy F H. K<sub>0</sub>-OCR relationships in soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(6): 851-872.
- [26] Massarsch K R, Fellenius B H. Use of CPT for design, monitoring and performance verification of compaction projects[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing. Madison, WI, USA:Omnipress, 2014: 3-50.
- [27] Massarsch K R, Fellenius B H. Evaluation of vibratory compaction by in situ tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(12): 05019012.
- [28] 欧阳芳,周永毅,王志佳,等.包裹碎石群桩动应力响应振动台模型试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(5):1062-1070.  
Ouyang F, Zhou Y Y, Wang Z J, et al. Study on dynamic stress response of geosynthetic encased stone columns by shaking table model tests[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5):1062-1070. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)