

DOI: 10.11779/CJGE20230317

水泥土加固桩水平循环承载性能足尺试验研究

杨松松^{1,2}, 章定文^{1,2}, 曾彪^{1,2}, 张爱军³, 成朝恒³, 何凌⁴

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 交通运输部综合交通运输理论交通运输行业重点实验室(南京现代综合交通实验室), 江苏 南京 211100; 3. 宿迁市高速公路建设指挥部, 江苏 宿迁 223800; 4. 南京交通工程有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要:选取宿迁典型饱和粉土地,采用水泥土搅拌桩加固钻孔灌注桩桩周土,开展灌注桩水平循环加载足尺试验。探究水泥土加固试验桩(TPI)和未加固试验桩(TPU)在循环水平荷载作用下的滞回特性、弯矩、刚度退化、位移延性、水平承载力与残余变形能力。试验结果表明:TPI比TPU桩的弯矩减小47%,屈服位移减小41%,水平承载力提升150%,有效刚度提升240%,等效黏滞阻尼比提升233%,桩的开裂荷载提升150%,屈服荷载阶段桩体的残余变形能力减小17%。水泥土搅拌法不仅可以限制桩侧粉土液化,增加桩基础的耗能及位移延性,而且可以显著的降低桩头水平位移和弯矩的发展。从抗震性能的角度分析,水泥土搅拌桩加固既有桩基,有效抑制了加固范围内地基土刚度衰减,增强了桩-土结构的总耗能、等效黏滞阻尼系数与变形恢复能力,提高桩基础在大变形阶段的抗震性能。

关键词:钻孔灌注桩;足尺试验;水泥土搅拌桩;水平循环加载;抗震性能

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1453-09

作者简介:杨松松(1994—),男,博士研究生,主要从事桩基抗震方面的研究工作。E-mail: 18435167584@163.com。

Full-scale tests on horizontal cyclic bearing capacity of cement-soil-improved piles

YANG Songsong^{1,2}, ZHANG Dingwen^{1,2}, ZENG Biao^{1,2}, ZHANG Aijun³, CHENG Chaocheng³, HE Ling⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry of Comprehensive Transportation Theory (Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory), Ministry of Transport, Nanjing 211100, China; 3. Suqian Expressway Construction Headquarters, Suqian 223800, China; 4. Nanjing Transport Engineering Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: The cement-soil mixing columns are used to improve the surrounding soils of drilled cast-in-place piles in a typical saturated silt site in Suqian City. The full-scale horizontal cyclic loading tests on the cast-in-place piles on site are conducted. The hysteresis characteristics, bending moment, stiffness degradation, displacement ductility, horizontal bearing capacity and residual deformation capacity of test piles in improved soil (TPI) and those in unimproved soil (TPU) under horizontal cyclic loading are explored. The test results show that the bending moment of TPI piles decreases by 47% and the yield displacement decreases by 41% compared to those of TPU piles. The horizontal bearing capacity of TPI piles increases by 150%, the effective stiffness increases by 240%, and the equivalent viscous damping ratio increases by 233%. The cracking load of the piles increases by 150%, and the residual deformation capacity of the piles during the yield load stage decreases by 17%. The cement-soil mixing method can limit the liquefaction of silt at pile side, increase the energy consumption and displacement ductility of pile foundation, and significantly reduce the development of horizontal displacement and bending moment of pile head. From the perspective of seismic performance, strengthening the existing pile foundations with cement-soil mixing piles can effectively suppress the stiffness attenuation of the foundation soils within the reinforcement range. The cement-soil-reinforced piles enhance the total energy consumption, equivalent viscous damping coefficient and deformation recovery capability of the pile-soil structure. Therefore, the seismic performance of pile foundations during large deformation is improved.

Key words: cast-in-place pile; full-scale test; cement-soil mixed pile; horizontal cyclic loading; seismic performance

0 引言

桩基础具有较好的竖向承载性能,被广泛应用于桥梁、码头和高层建筑等工况。在一些特殊地层中,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078129);综合交通运输理论交通运输行业重点实验室(南京现代综合交通实验室)开放课题(MTF2023009);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_0268)

收稿日期: 2023-04-12

例如砂土、饱和粉土地层在地震过程中有发生液化的可能，土体液化会导致桩侧土体抗力迅速降低，使桩头产生较大的水平位移从而影响上部结构的安全^[1-2]。大量的研究表明^[3-5]，地基液化导致地基刚度处于最小值，地震过程中桩基础可能发生严重开裂甚至断裂。Finn 等^[6]采用离心模型试验分析了液化场地桩基础的动荷载响应规律。研究表明强震动引起土体液化会导致桩头位置产生较大的弯矩，从而导致桩基础发生剪切破坏。为了解决这一问题，在桩基础抗震设计中通常采用增大桩径来增强桩基抗剪能力，但这会显著增加成本。同时，既有桩基础的水平承载力不足也是当前桩基抗震面临的重要挑战。

水泥土搅拌法是一种原位土加固技术，广泛用于改善各种土木基础设施在地震中的水平位移和竖向沉降^[7-9]。Zhang 等^[10]采用振动台试验研究了液化地基中群桩局部水泥土加固的抗震效果，研究表明加固区桩体弯矩大幅减小。章定文等^[11]采用振动台试验分析了劲芯复合桩的抗震性能，研究表明水泥土可以提高桩侧土抗液化性能。Liu 等^[12]通过离心模型试验研究表明软黏土中使用水泥土加固桩侧土是提升基础水平承载性能的有效方法。Fleming 等^[13]采用现场缩尺试验研究了水泥土加固桩的水平循环承载特性。结果表明，加固桩的水平承载力提高了 42%，有效弹性刚度增加了 600%，等效黏滞阻尼比提高了 650%。综上所述，水泥土加固桩周土是一种高效、低成本的土体改良技术，可提高既有桩基础或者新建桩基的水平承载与抗震性能不足问题。因模型试验条件及相似比难以完全满足等限制，振动台试验无法满足应力状态相似的要求，导致试验结果无法真实反映桩体的受力特征^[14]。所以，开展饱和粉土地水泥土加固桩的足尺拟静力试验，以分析地震荷载大变形条件下水泥土加固桩的抗震性能提升情况。特别是详细分析了水泥土加固对桩的水平承载性能、位移-荷载滞回曲线、等效黏滞阻尼、桩体弯矩、有效割线刚度及残余变形的影响规律。

表 2 土体物理性质与力学参数

Table 2 Physical properties and mechanical parameters of soils										
层号	土层名称	土层厚度 h/m	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s
1-1	素填土	2.5	28.6	18.7	17.2	0.4	10.7	11.4	0.29	0.015
1-2	黏土	3.5	23.4	18.3	16.2	0.3	9.9	12.3	0.23	0.012
2-1	粉土	8.9	25.4	19.2	8.5	0.2	10.0	19.4	0.16	0.007
2-2	粉土夹粉质黏土	4.8	22.0	19.8	8.5	0.4	9.6	24.1	0.13	0.009
2-3	黏土	7.5	26.9	19.1	21.6	0.2	45.0	11.1	0.25	0.013
2-4	中细砂	17.7	18.1	19.4	—	—	2.8	26.7	0.11	0.008

1 试验概况

1.1 桩基概况

为了分析液化场地水泥土加固桩周土对提升钻孔灌注桩抗震性能的影响，本试验共设计两组灌注桩试件。一组为采用高压旋喷桩加固的试验桩（TPI），另一对照组为不采取加固措施的试验桩（TPU）。灌注桩主筋采用 HRB400 级钢筋，桩体纵向受力钢筋布置方式为 32@16，配筋率为 0.73%。箍筋的布置方式为 $\phi 8@100$ ，纵向受力钢筋采用焊接的形式进行搭接处理，同时每节钢筋笼纵向受力钢筋错缝焊缝。TPI 与 TPU 桩除有水泥土加固外，其余参数均一致。桩身采用 C30 水下混凝土浇筑，桩长 39.8 m，桩径 1.5 m，桩顶与地面平齐。表 1 为灌注桩受力筋的力学参数。

表 1 钢筋力学参数

Table 1 Mechanical parameters of steel bars			
试验桩纵向受力钢筋	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限抗拉强度/MPa
HRB400	456.7	206.6	661.5

1.2 试验场地地质条件

试验场地位于宿迁泗洪县饱和粉土地段，根据现场钻孔取芯结果，场地土层均匀分布。岩土工程勘探地表以下 40 m 范围内土层分布情况与力学参数指标。试验场地地下水位埋深为-2.5 m。采用室内三轴不排水试验获得土体总应力强度指标。表 2 为地表至地下 40 m 深度范围桩周土体的力学参数。

1.3 桩周水泥土加固方案

灌注桩施工 28 d 后，采用高压旋喷桩对桩周土进行喷水泥浆加固处理。水泥土加固范围为 3D (4.5 m) \times 3D (4.5 m) \times 7D (10.5 m)。水泥土桩的喷灰量为 60 kg/m，相邻水泥土桩搭接长度为 0 m。加固场地沿桩周依次打设 72 根水泥土桩。待水泥土桩施工 28 d 后对其进行现场钻孔取芯，对取芯样进行完整度及水泥土均匀性进行检查，并对水泥土试样进行室内无侧限抗压强度测试，水泥土桩芯样的无侧限抗压强度为 1.45 MPa，水泥土加固灌注桩如图 1 所示。

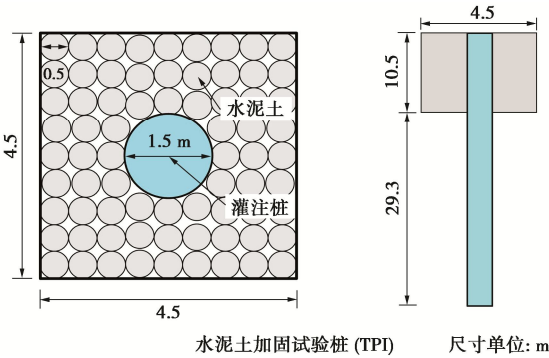


图 1 水泥土加固示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cement-soil reinforcement

1.4 水平循环加载试验

图 2 为 TPU 与 TPI 试验桩的现场水平循环加载加载足尺试验。水平循环加载试验根据规范要求, 采用荷载-位移混合控制方式进行加载试验^[15]。图 3 为两试验桩详细的水平循环加载曲线。水平循环试验的详细流程可参见文献^[16, 17]。



图 2 水平循环加载足尺试验

Fig. 2 Horizontal cyclic loading full-scale tests

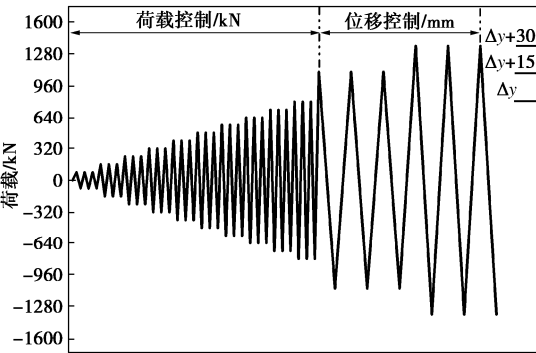


图 3 水平循环加载曲线

Fig. 3 Horizontal cyclic loading curves

图 4 为两试验桩水平循环加载示意图。因桩顶与地面平齐, 水平加载试验从地表向下开挖 1.5 m。采用液压千斤顶提供水平推力, 液压千斤顶最大载荷为 1800 kN, 4 台液压千斤顶均处于同一水平线上。钢筋应变计焊接到主筋上测量钢筋应变, 桩顶附近位置弯矩变化明显, 因此桩体埋深 0~15 m 位置, 应变计间

距为 3 m, 桩体以下位置应变计间距为 5 m。桩顶安装位移传感器, 实时记录加载过程桩头水平位移。在距离地面 7 m 位置的 TPU 与 TPI 桩侧同一水平位置安装孔压计, 记录水平循环加载过程饱和粉土层中孔隙水压力变化规律。

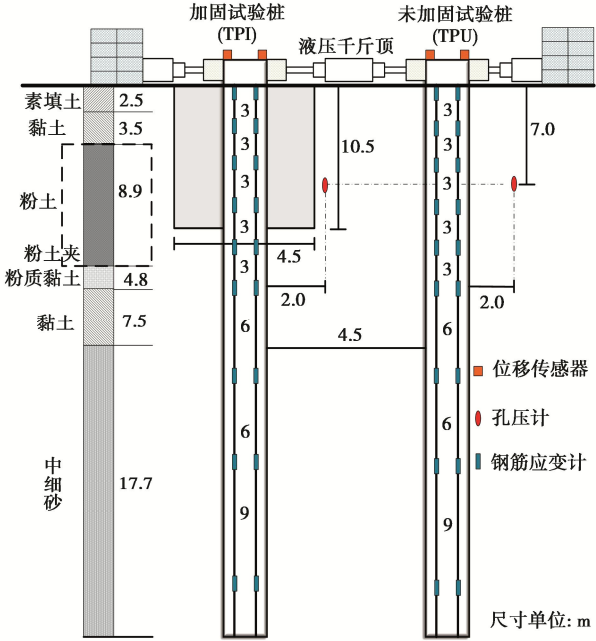


图 4 TPU 与 TPI 桩体加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading of TPU and TPI piles

2 试验结果及分析

2.1 水平位移

图 5 为 TPU 与 TPI 桩第一次水平循环正向加载下桩头的荷载-位移曲线。从图 5 中可以看到相同荷载下 TPI 桩的水平位移明显小于 TPU 桩, 而且 TPU 桩的荷载-位移曲线中首先出现拐点, 说明 TPU 桩首先屈服。在位移控制荷载阶段, 相同的水平位移下 TPU 桩体的荷载大小基本保持不变, 说明桩侧部分土体因大变形发生塑性破坏, 导致 TPU 桩的承载力迅速降低, 但 TPI 桩体的荷载仍呈现增大趋势。水泥土加固桩周土, 提高了灌注桩的水平承载性能。

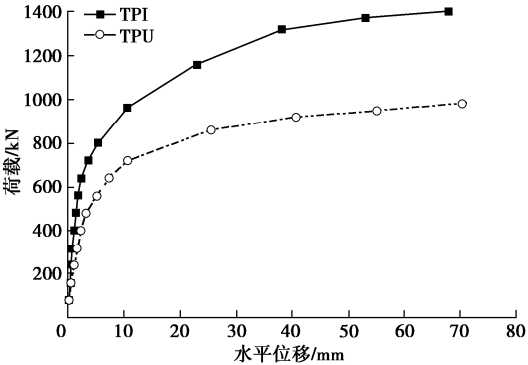


图 5 首次循环加载荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves under first cyclic loading

2.2 超孔压变化规律

图 6 为循环加载过程中饱和粉土超孔压比的变化规律。从图 6 中可以看到 TPU 桩在循环加载过程中饱和粉土的超孔压比随加载次数以及加载水平位移的增大而逐渐上升。这是因为在循环大变形加载阶段, 桩侧饱和粉土承担了部分剪应力, 导致饱和粉土产生较大的剪应变, TPU 桩侧孔隙水压短时间内无法消散, 孔隙水压逐渐累积导致桩侧粉土液化, 桩侧土强度与土抗力迅速降低。TPI 桩因桩侧水泥土的刚度明显高于桩周未加固土, 水平循环加载过程水泥土分担部分循环剪应变。桩侧水泥土的存在抑制了桩周土体液化, 可避免因饱和粉土液化引起桩基础水平承载力降低问题。

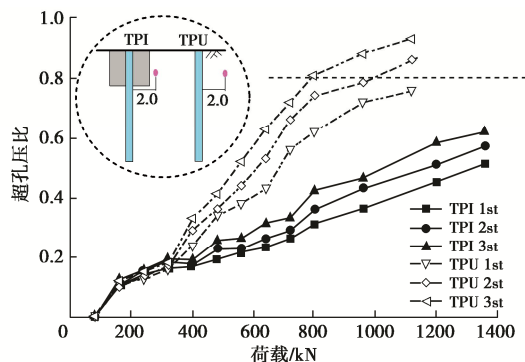


图 6 峰值超孔压比变化曲线

Fig. 6 Variation curves of peak excess pore pressure ratio

2.3 弯矩变化规律

通过钢筋应变计可以测得水平循环加载过程中桩两侧纵向受力钢筋的压、拉应变, 桩弯矩 M 表达式为^[18]

$$M = \frac{(\sigma_t + \sigma_c) \cdot I_z}{b_0} \quad (1)$$

式中: I_z 为桩截面惯性矩; b_0 为拉、压应变测点的距离; σ_t 和 σ_c 分别为同一截面测点的拉应力、压应力。

图 7 为每级荷载加载下 TPU 与 TPI 桩的弯矩变化规律。从图 7 中可以看到各级荷载作用下 TPI 与 TPU 桩身弯矩均随埋深先增大后又逐渐减小。其中 TPU 桩的最大弯矩出现在距离地面 9 m 位置, 随着荷载继续增大桩的最大弯矩位置逐渐下移。这是因为荷载持续增大, 浅层土体已经发生了明显的液化和塑性破坏, 为了抵抗该水平力需更调动更深范围土体提供桩侧土抗力。TPI 桩体的弯矩发展规律与 TPU 桩相同, 但 TPI 桩的最大弯矩出现在距离地面 6 m 位置, 说明水泥土加固可以限制桩体弯矩发展, 调动浅层范围土体产生足够的桩侧土抗力。对比 TPU 与 TPI 桩体的弯矩响应规律可以发现, TPI 桩体的截面弯矩均小于 TPU 桩。当水平荷载为 800 kN 时, TPI 的最大弯矩约为 TPU 的 53%。当加载水平为最大荷载 1200 kN 时, TPI 桩的最大弯矩约为 TPU 桩的 75%。综上可知, 水泥土加

固桩可以减小桩体弯矩 25%~47%。因此, 采用水泥土加固桩侧土能够控制桩身弯矩发展, 提高地震大变形期间桩的抗剪能力并减小桩头水平位移。

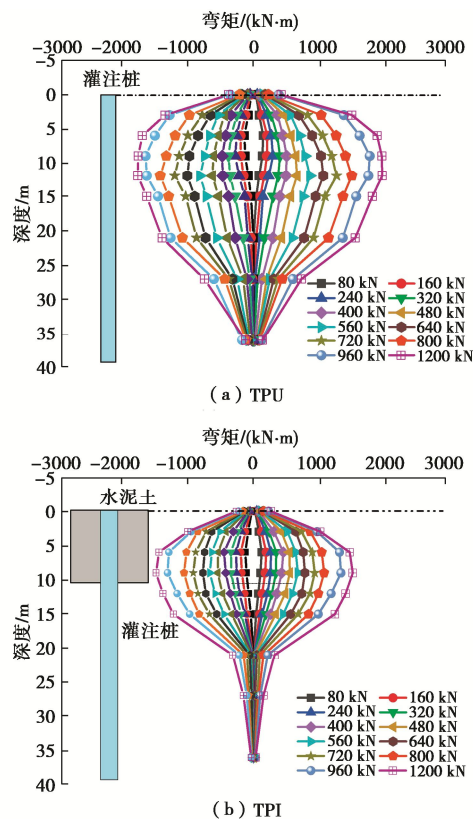
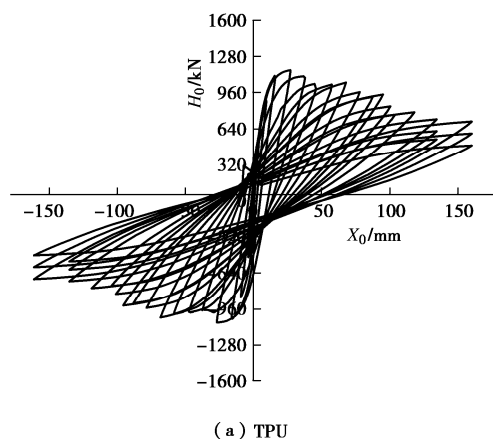


图 7 TPU 与 TPI 弯矩曲线

Fig. 7 Curves of bending moment of TPU and TPI piles

2.4 滞回特性及耗能性能

滞回曲线可综合反映低周期水平循环荷载作用下桩-土相互作用及受力变形特征。根据水平循环加载过程中 TPI 与 TPU 桩的荷载-位移关系绘制桩的荷载-位移滞回曲线 (H_0-X_0), 如图 8 所示。两试验桩的滞回曲线首先经历荷载与位移弹性增长阶段。然后, 桩体在大变形加载过程中逐渐屈服。接着试验桩屈服产生较大的塑性变形。最后, 桩体荷载随位移增加而骤降, 桩体结构发生破坏。



(a) TPU

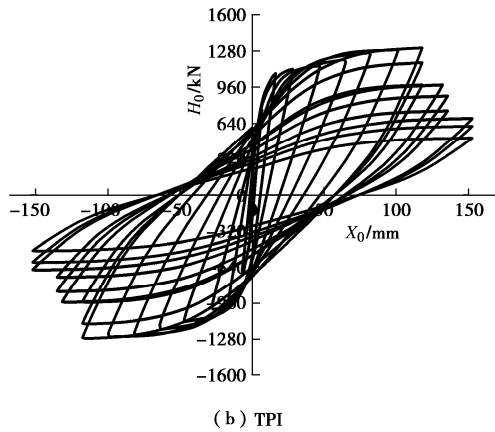


图 8 TPU 与 TPI 滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of TPU and TPI piles

图 9 为 TPU 与 TPI 桩开裂荷载、屈服荷载及极限荷载的滞回曲线对比图。从图 9 中可知, 弹性阶段内 TPI 桩的斜率更大, 屈服荷载阶段桩的滞回曲线更加饱满, 滞回曲线所包围的面积更大, 说明 TPI 桩的耗能性能更强。极限荷载阶段, TPI 与 TPU 桩的滞回曲线接近, 这是因为两试验桩的配筋率完全相同。分析各级加载-卸载阶段两试验桩的滞回曲线可知, 小荷载阶段 TPI 与 TPU 桩的 3 次循环加载曲线基本重合, 随着荷载继续增大, TPU 桩的第 2、3 次循环加载曲线峰值点明显小于第 1 次循环加载曲线, 桩-土系统相互作用共同刚度明显下降, 这是因为桩-土在经历首次循环加载时桩侧局部饱和粉土液化, 完成第 1 次循环加载后沿着桩身一定范围内的土抗力显著降低; 在后续的循环加载过程中液化层附近土体对桩的侧向约束作用进一步降低, TPU 桩的第 2、3 次加载的滞回曲线与首次加载滞回曲线差异较大, 滞回圈所包围的面积随循环次数的增加而逐渐减小。TPI 桩因水泥土抑制了桩侧及附近影响范围粉土液化, 在循环加载过程中桩侧土体对桩的约束作用并未随循环次数的增加而明显减弱。所以, TPI 桩体在第 2 次和第 3 次循环加载曲线与第 1 次加载曲线差异较小。TPI 桩因桩侧水泥土强度较高, 同时在加载过程可调动更大水平范围桩侧土发挥效用, 进而桩侧土水平抗力得以提高。水泥土加固桩基础不仅可提高桩基础的耗能特性, 同时也可避免循环加载过程饱和粉土液化引起的桩侧土体强度与抗力不足问题。

试验桩的耗能可以根据单个滞回曲线包围的面积进行计算分析。单个滞回曲线所包围的面积越大, 说明试验桩的耗能能力越强。采用等效黏滞阻尼系数可反映试验桩消耗地震动能量的能力。桩试件的等效黏滞阻尼比 ζ_{eq} 的表达式为^[17]

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $S_{(ABC+ADC)}$ 为图 10 中滞回曲线所包围的面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 为三角形 OBE 与 ODF 的面积之和。

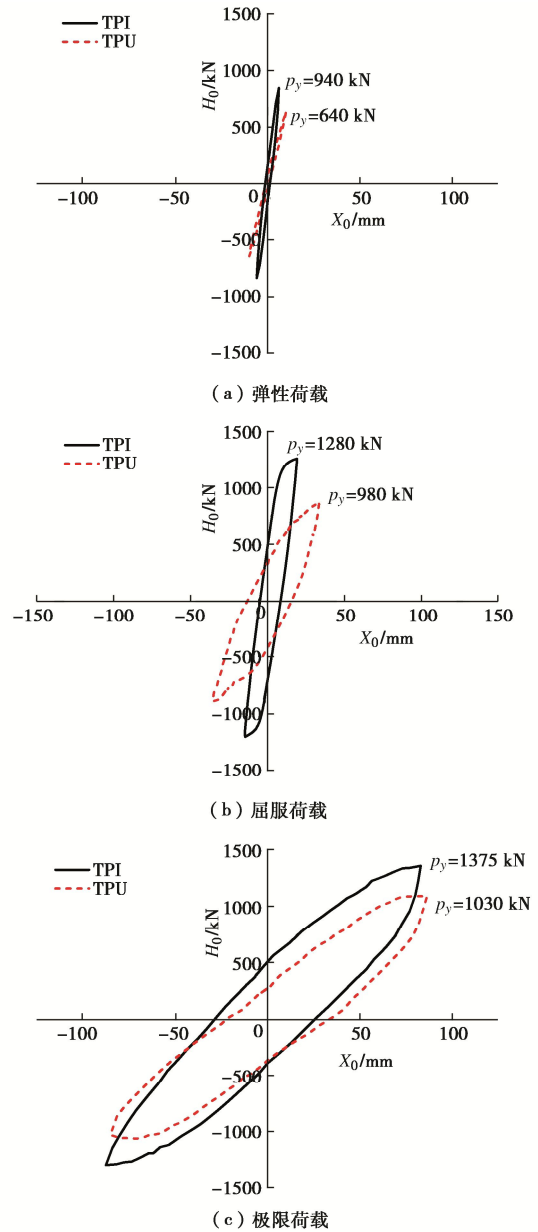


图 9 TPU 与 TPI 滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of TPU and TPI piles

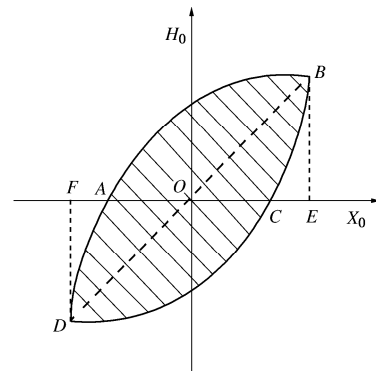


图 10 桩的滞回曲线

Fig. 10 Hysteresis curves of test piles

图 11 为 TPI 与 TPU 桩的等效黏滞阻尼比 ζ_{eq} 变化曲线。从图 11 中可知 TPU 与 TPI 桩的等效黏滞阻尼比均随桩顶位移的增大而增大。这说明灌注桩试验本身具有良好的抗震性能。荷载控制加载阶段, TPI 桩的等效黏滞阻尼系数为 35%, TPU 桩的等效黏滞阻尼系数为 15%。TPI 桩比 TPU 桩的等效黏滞阻尼比提高了 233%。进入位移控制加载的大变形阶段, 桩体的等效黏滞阻尼比随着桩头位移增大而进一步增大, 桩体在大变形加载过程中调动更深范围土体发挥作用, 桩-土系统的等效阻尼比随加载位移的增大呈现不断增长趋势。水泥土加固桩侧土, 提高了桩-土系统的等效阻尼比, 增加了结构消耗地震动的能力。TPI 桩的等效黏滞阻尼比在 3 次加载过程中差异不大, 但 TPU 桩在 3 次加载过程阻尼比呈现减小的趋势, 这是因为 TPU 桩在大变形阶段桩侧饱和粉土逐渐液化, 桩侧土抗力不足, 在同等级荷载下等效黏滞阻尼比出现了衰减现象。综上可知, 水泥土加固桩周土, 提高了桩-土结构的总耗能与等效黏滞阻尼比。根据两试验桩的总耗能和等效黏滞阻尼比变化规律可知, TPI 桩的抗震性能明显优于 TPU 桩。

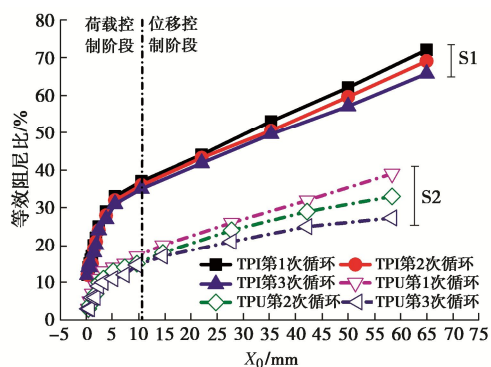


图 11 等效黏滞阻尼比变化曲线

Fig. 11 Variation curves of equivalent viscous damping ratio

2.5 骨架曲线与刚度退化

图 12 为两试验桩的骨架曲线。从图 12 中可知, 开裂荷载阶段, TPU 与 TPI 试验桩的荷载-位移近似线性关系, 但 TPI 桩荷载-位移曲线斜率明显大于 TPU 桩, 这说明桩-加固土系统相互作用刚度更大。图 12 中给出了两试验桩抗震性能设计的控制指标及其对应的位移 (参数确定详见 2.6 节)。随着桩身开裂, 桩体纵向受力钢筋开始发挥作用。此阶段, TPU 与 TPI 桩体的荷载-位移关系呈现近似的线性关系。TPU 桩在加载位移达到 29 mm 后, 桩体进入塑性变形阶段, 随加载位移的增加荷载基本保持不变。当桩头水平位移达到 73 mm 后, TPU 桩的水平承载力达到最大值, 继续增加桩头水平位移时, 桩体承载力逐渐下降。结合 2.2 节可知, 位移控制荷载大变形加载阶段, TPU 桩

侧土体逐渐液化, 桩-土结构出现了明显的应变软化。继续增大加载位移时, 桩体纵向受力钢筋逐渐屈服, 桩体水平承载性能显著下降直至破坏。

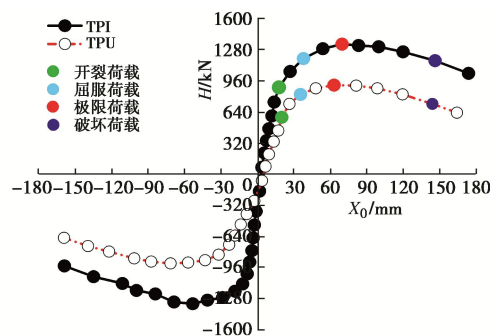


图 12 骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves

TPI 桩在加载位移达到 17 mm 后, 骨架曲线进入塑性阶段。当桩头位移达到 60 mm 进入稳定阶段, 此阶段桩体水平承载随桩头位移增加缓慢增长。桩-加固土结构既没有出现应变软化也没有应变硬化。当荷载继续增加时, 桩身纵向受力钢筋逐渐屈服。对比两试验桩的骨架曲线可知, TPI 与 TPU 桩体均出现了较为明显的屈服阶段, TPI 桩体的屈服阶段范围明显大于 TPU 桩, 这说明 TPI 桩的塑性变形能力更强。TPU 桩在加载大变形阶段因桩侧饱和粉土液化, 桩土结构出现了明显的硬变软化, 但 TPI 桩则可避免因桩侧土液化引起的承载力降低问题。同时, TPI 桩在荷载下降段的单桩抗侧移刚度更大, 说明水泥土加固桩则需更大的水平循环位移加载后才会发生破坏。

割线刚度代表桩-土系统相互作用共同刚度。根据割线刚度随荷载的变化曲线可以反映两试验在循环加载过程桩-土系统的刚度退化情况。试验桩每级荷载对应的割线刚度 K 的表达式为^[15, 17]

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (3)$$

式中: $+F_i$, $-F_i$ 分别为第 i 级正、反向的加载峰值荷载; $+X_i$, $-X_i$ 分别为第 i 级加载正、反向的峰值位移。每级加载的割线刚度随荷载的刚度变化曲线, 如图 13 所示。从图 13 可知, TPU 与 TPI 的刚度退化规律大致相同。开始加载时, TPI 桩的刚度为 165 MN/mm, TPU 桩的刚度 75 MN/mm。TPI 刚度相比于 TPU 试件提升了 240%。在荷载控制阶段, 随着桩头水平循环荷载增大, TPI 桩侧土体产生塑性变形, TPU 桩侧饱和粉土液化引起土体塑性变形及土抗力降低, 两试验桩的刚度产生明显的退化现象, 但 TPU 桩的刚度退化更为显著。在位移控制荷载阶段, 大变形条件下因 TPU 桩侧饱和粉土承担较大的循环剪应变, 导致桩粉土液化范围增加, 桩侧土抗力进一步降低, 桩体受拉

表 3 加荷特征点与位移延性系数

Table 3 Characteristic points of loading and ductility coefficient of displacement

试件	加载方向	试验桩荷载/ kN				试验桩位移/ mm				位移延性系数 μ_{Δ}
		开裂荷载	屈服荷载	极限荷载	破坏荷载	弹性位移	屈服位移	极限荷载对应的位移	极限位移	
(TPU)	正向 1st	645	980	1020	867	9.80	29.4	77	156.5	5.30
	反向 1st	635	980	1040	885	9.90	29.8	75	158.3	5.30
	均值 1st	640	970	1030	876	9.85	29.6	76	157.4	5.30
(TPI)	正向 1st	960	1280	1390	1130	6.80	17.4	68	149.5	8.60
	反向 1st	940	1250	1360	1156	6.90	17.2	66	143.3	8.30
	均值 1st	950	1265	1375	1143	6.85	17.3	67	146.4	8.45

侧钢筋逐渐屈服。此阶段桩体刚度迅速降低。值得注意的是, TPI 桩在 3 次循环加载过程试件的刚度变化不大,但 TPU 桩在 3 次循环加载过程因桩侧粉土液化,试件刚度逐渐降低,导致同等级循环加载过程中出现明显的刚度衰减现象。TPI 桩则可以避免水平循环加载过程桩体刚度衰减。限于足尺低周期水平循环荷载试验的局限,难以使试验场地完全液化,但在一定程度上可以反映两试验桩在 seismic 荷载大变形条件下抵抗大变形的能力,研究结论可为高烈度区可液化场地桩基抗震加固设计提供参考。

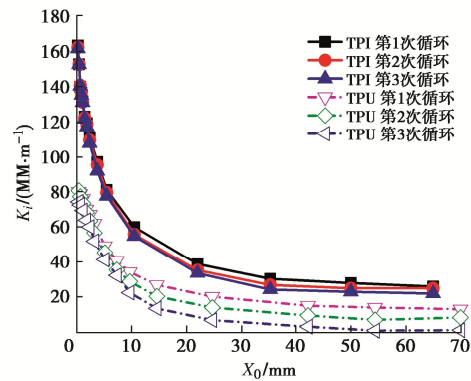


图 13 试验桩刚度退化曲线

Fig. 13 Degradation curves of stiffness of test piles

2.6 承载能力及延性系数

试验桩的荷载位移梯度曲线可以反映试件水平位移随荷载的变化规律并确定桩体的开裂荷载 H_{cr} 。图 14 为两试验桩每级循环加载的首次正向水平力-位移梯度曲线。桩试件水平力-位移梯度曲线上的第一个拐点为桩体的开裂荷载 H_{cr} 。从图 14 中可知, TPU 与 TPI 桩的开裂荷载分别为 635, 950 kN。与 TPU 桩相比, TPI 桩的开裂荷载提高了 150%。桩周水泥土加固显著提高了桩体的开裂荷载。

位移延性系数 μ_{Δ} 可描述试验桩的延性性能,其表达式为

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4)$$

式中: Δ_u 为桩试件的极限位移; Δ_y 为桩试件的屈服

位移。位移延性系数为构件极限位移与屈服位移的比值,可综合反映桩基础在屈服后的塑性变形能力。表 3 详细给出了 TPU 与 TPI 试验桩的位移延性参数。从表 3 中可知,TPU 与 TPI 桩平均屈服位移分别为 29.6, 17.3 mm。与 TPU 桩相比, TPI 桩的屈服位移减小了 41%。与 TPU 桩相比, TPI 桩的开裂荷载增长 150%,屈服荷载增长 138%,极限荷载增加长 120%。由此可知,水泥土加固桩周土增加了桩侧土体强度,同时扩大了桩侧土的水平影响范围,提高桩的屈服荷载和极限荷载。依据规程^[19]对桩基础抗震性能的要求,桩基础的位移延性系数应大于 3。TPU 与 TPI 桩的平均水平位移延性系数分别为 5.3, 8.45,两试验桩均满足最低的位移延性要求。与 TPU 桩相比, TPI 桩的水平位移延性系数提高了 159%。采用水泥土加固桩侧土,可提高桩的水平承载与位移延性,减小同等级荷载下桩体位移,增加桩体在大变形条件下的位移延性系数。水泥土加固桩周土,增强了桩-土系统的抵抗水平变形的能力。

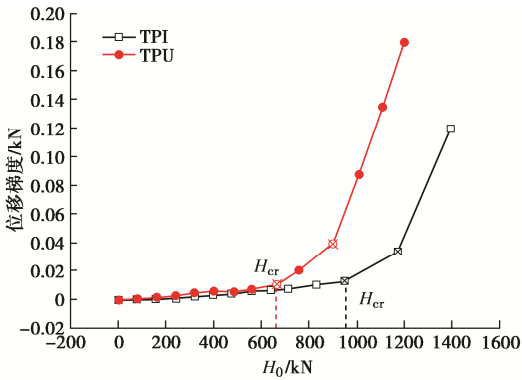


图 14 试验桩荷载-位移梯度曲线

Fig. 14 Load-displacement gradient curves of test piles

2.7 残余变形能力

为了研究 TPU 与 TPI 桩水平循环加载的水平位移特性,将桩头水平位移分为残余位移(u_{res})与可恢复位移,其计算方法可参考文献[20]。图 15 为两试验桩正向加载阶段残余位移/循环位移与循环位移的归一化曲线。从图 15 中可知,在荷载控制阶段 TPI 与 TPU

桩的残余位移曲线变化规律一致,两桩的残余位移占比均小于 10%,桩-土结构表现出良好的水平变形恢复能力。位移控制荷载阶段,两试验桩的残余位移占比逐渐增大,且均出现了较大的不可恢复位移。当两试验桩达到极限荷载对应的水平位移时,TPU 桩的残余位移占比 52%,TPI 桩的残余位移占比为 35%。当桩体达到极限位移时,TPI 桩比 TPU 桩的残余位移减小了 17%,说明 TPI 桩具有更好的水平变形恢复性能。

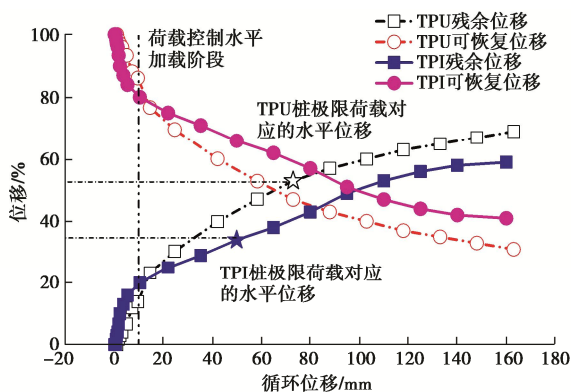


图 15 残余位移与可恢复位移的归一化曲线

Fig. 15 Normalized curves of residual displacement and recoverable displacement

3 结 论

针对饱和粉土地层足尺灌注桩的水平循环加载试验,分析了有无水泥土加固桩在水平循环大变形条件下的水平承载与抗震性能,得到以下 4 点结论。

(1) TPI 相比于 TPU 桩在弹性阶段的水平承载力提高 50%,开裂荷载提高 137%,弯矩降低 25%~47%,屈服荷载提高 138%和极限荷载提高 120%。水泥土改良桩周土有效抑制了桩体弯矩与水平位移发展,提高了桩的水平承载性能。

(2) TPI 的滞回曲线更加饱满,试件消耗地震动的能力更强。桩体骨架曲线依次呈现线性增长、缓慢增长、屈服以及逐渐破坏加载阶段。TPI 桩的骨架曲线明显位移 TPU 桩上方,屈服荷载与极限荷载明显大于 TPU 桩,这说明水泥土加固桩抵抗塑性变形的能力更强。

(3) TPI 桩因桩侧水泥土刚度明显高于桩周土,水平循环加载过程中水泥土可以分担更多的循环剪应力,从而限制了桩周土体超孔压的发展,避免桩侧饱和粉土液化引起的刚度退化。水泥土加固桩侧土可以提高桩-土的割线刚度 240%,且避免同等级加载过程桩-土的刚度衰减。

(4) 荷载控制阶段 TPI 与 TPU 桩的等效黏滞阻尼系数分别为 35%, 15%。与 TPU 桩相比, TPI 桩的

阻尼比提高 233%,残余变形降低了 17%,水平位移延性系数提高了 159%。TPI 桩可减小同等级荷载下的桩头水平位移,提高桩-土结构整体的耗能与变形恢复能力。

参考文献:

- [1] 王青桥, 韦 晓, 王君杰. 桥梁桩基震害特点及其破坏机理[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(2): 167-173. (WANG Qingqiao, WEI Xiao, WANG Junjie. Characteristics and mechanisms of earthquake damage of bridge pile foundation[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(2): 167-173. (in Chinese))
- [2] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化场地-群桩基础-结构体系动力响应分析: 大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2173-2181. (XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Dynamic response analysis of liquefied site-pile group foundation-structure system: large-scale shaking table model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2173-2181. (in Chinese))
- [3] 王 睿, 张建民, 张 嘎. 液化地基侧向流动引起的桩基础破坏分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 501-506. (WANG Rui, ZHANG Jianmin, ZHANG Ga. Analysis of failure of piled foundation due to lateral spreading in liquefied soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 501-506. (in Chinese))
- [4] ZHUANG H Y, FU J S, YU X, et al. Earthquake responses of a base-isolated structure on a multi-layered soft soil foundation by using shaking table tests[J]. Engineering Structures, 2019, 179: 79-91.
- [5] 陈 正. 液化土中高桩基础水平动力阻抗分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (CHEN Zheng. Analysis of Horizontal Dynamic Impedance of Elevated Piles in Liquefied Soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [6] FINN W D L, FUJITA N. Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9/10/11/12): 731-742.
- [7] KITAZUME M, MARUYAMA K. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(3): 323-340.
- [8] TOKIMATSU K, MIZUNO H, KAKURAI M. Building damage associated with geotechnical problems[J]. Soils and Foundations, 1996, 36: 219-234.
- [9] DEGHANBANADAKI A, AHMAD K, ALI N. Experimental investigations on ultimate bearing capacity of peat stabilized

- by a group of soil-cement column: a comparative study[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(2): 295-307.
- [10] ZHANG F, OKA R, MORIKAWA Y, et al. Shaking table test on superstructure-foundation-ground system in liquefiable soil and its numerical verification[J]. *Geotechnical Engineering: Journal of Southeast Asian Geotechnical Society*, 2014, **45**(2): 294-206.
- [11] ZHANG D W, WANG A H, DING X M. Seismic response of pile groups improved with deep cement mixing columns in liquefiable sand: shaking table tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, **59**(6): 994-1006.
- [12] LIU C Y, SOLTANI H, MURALEETHARAN K K, et al. Cyclic and seismic response of single piles in improved and unimproved soft clays[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(6): 1431-1444.
- [13] FLEMING B J, SRITHARAN S, MILLER G A, et al. Full-scale seismic testing of piles in improved and unimproved soft clay[J]. *Earthquake Spectra*, 2016, **32**(1): 239-265.
- [14] 许成顺, 贾科敏, 杜修力, 等. 液化侧向扩展场地-桩基础抗震研究综述[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, **41**(4): 768-791. (XU Chengshun, JIA Kemin, DU Xiuli, et al. Review on seismic behavior of pile foundation subjected to liquefaction induced lateral spreading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, **41**(4): 768-791. (in Chinese))
- [15] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [16] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [17] 刘畅, 刘彦坡, 郑刚, 等. 软土地区钻孔灌注桩抗震性能试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(2): 360-369. (LIU Chang, LIU Yanpo, ZHENG Gang, et al. Experimental study on seismic behavior of bored cast-in-situ pile in soft soil area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(2): 360-369. (in Chinese))
- [18] 王安辉. 软弱地层中劲芯复合桩的水平承载性状与抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020. (WANG Anhui. Study on Horizontal Bearing Behavior and Seismic Performance of Stiffened Composite Piles in Weak Strata[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese))
- [19] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 229-231. (LI Zhongxian. Theory and Technique of Engineering Structure Experiments[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004: 229-231. (in Chinese))
- [20] 栾阳. 地震作用下桥梁桩箱复合基础振动台试验与动力分析[D]. 南京: 东南大学, 2021. (LUAN Yang. Dynamic Analysis of Bridge Unconnected Piles-Caisson Foundation Using Shake Table Tests[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊为全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊和中国科技核心期刊。本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”“Scopus 数据库”等国际数据库收录。本刊官网(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章,“中

国知网”“万方网”“维普网”全文收录本刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)