

DOI: 10.11779/CJGE2021S2029

# 砂土中水泥土复合管桩震动响应试验研究

王安辉<sup>1, 2</sup>, 章定文<sup>\*2, 3</sup>, 张艳芳<sup>1</sup>

(1. 中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210023; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189;

3. 道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学), 江苏 南京 211189)

**摘要:** 为揭示水泥土加固对预制混凝土管桩震动响应的影响, 开展了可液化砂土中水泥土复合管桩群桩基础的振动台模型试验。结果表明: 采用水泥土加固可使群桩基础周围土层中超孔压比的减少达 23.3%; 地基液化前, 水泥土加固场地的加速度响应低于未加固场地, 而液化后未加固场地的加速度衰减更为明显; 水泥土复合管桩工况中桩顶结构的侧向位移和筏板沉降较未加固的管桩工况均大幅减少, 水泥土加固深度越大则减少幅度越明显; 水泥土加固可有效抑制其加固深度范围内桩身截面弯矩的增长, 但不同水泥土加固深度下桩身出现动弯矩峰值的位置不同。

**关键词:** 砂土; 水泥土复合管桩; 震动响应; 振动台试验

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0121-04

**作者简介:** 王安辉(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事交通岩土与桩基工程方面的研究工作。E-mail: wanganhui@cscec.com.

## Seismic responses of pipe piles improved with cement-treated soil in sand

WANG An-hui<sup>1, 2</sup>, ZHANG Ding-wen<sup>2, 3</sup>, ZHANG Yan-fang<sup>1</sup>

(1. China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210023, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education (Southeast University), Nanjing 211189, China)

**Abstract:** To reveal the effects of cement-treated soil reinforcement on the seismic resistance of precast concrete pipe piles, the shaking table tests on pipe-pile groups improved with cement-treated soil in liquefiable sand are carried out. The results illustrate that the excess pore pressure ratios of soils around the piles are reduced by about 23.3% due to the cement-treated soil reinforcement. Before liquefaction, the acceleration responses of the soils around the piles improved with cement-treated soil are lower than those of the unimproved piles. However, the attenuation of acceleration in the pipe pile tests is more obvious after soil liquefaction. The lateral displacement of the pile-head and the settlement of the raft in case of the pipe piles improved with cement-treated soil are greatly reduced due to the presence of cement-treated soil. Moreover, the larger the depth of cement-treated soil, the more significant the decrease in lateral displacement and settlement. The cement-treated soil can effectively restrain the increase of bending moment of the piles in the range of cement-treated depth. However, the location of the maximum moment in the piles is different under various depths of cement-treated soil.

**Key words:** sand; cement-improved pipe pile; seismic resistance; shaking table test

## 0 引言

水泥土复合管桩是在水泥土桩中插入高强度的预制混凝土管桩形成的一种新型复合材料桩<sup>[1-2]</sup>。水泥土复合管桩施工速度快、施工机械化程度高, 既能避免预制混凝土桩打桩过程中产生的挤土效应, 也不会出现钻孔灌注桩施工过程中产生的泥浆排放等问题, 已被工程实践证实为软弱地基处理中经济有效、施工方便的新桩型。

近年来, 不少学者对水泥土复合管桩的竖向与水

平承载特性及其破坏模式开展了系列研究<sup>[1-4]</sup>。目前, 有关水泥土复合管桩震动响应的研究成果仍很少, 仅有极少数学者对其开展了相关研究, 如 Taghavi 等<sup>[5]</sup>通过离心振动台试验发现水泥土加固可减少桩-土体系的加速度和位移响应, 从而提升软土地基中混凝土

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078129); 江苏省自然科学基金项目(BK20210051)

收稿日期: 2021-08-15

\*通信作者(E-mail: zhang@seu.edu.cn)

桩的抗震性能。

由于地震液化导致的桩基震害问题一直是岩土工程界关注的焦点问题。目前，针对可液化土层中水泥土复合管桩地震响应问题的相关研究尚未见报道。为此，本文开展了可液化砂土中水泥土复合管桩群桩基础的振动台模型试验，对砂土-桩基-上部结构的动力响应进行测试与分析，探究水泥土加固对可液化土中预制混凝土管桩震动响应的影响机制。

## 1 振动台模型试验设计

### 1.1 试验设备与相似比设计

模型试验利用重庆大学岩土工程实验室的 ANCO 振动台系统开展，振动台配备有尺寸为  $0.95\text{ m} \times 0.85\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高) 的叠层式钢制剪切土箱。原型水泥土复合管桩的芯桩为 PHC 管桩，其外径为 400 mm，壁厚为 95 mm，长为 9 m，外部水泥土桩的桩径为 1000 mm。为减少边界效应的影响，本次试验确定模型的几何尺寸相似比 1 : 20。模型管桩采用有机玻璃管材料制作，确定试验模型的弹性模量相似比 1 : 20。模型水泥土桩采用水泥、砂和水拌和浇筑而成，确定试验模型的密度相似比 1 : 1，而模型管桩需要通过设置配重使其密度相似比满足 1 : 1。模型试验中其余各物理量的相似比可根据 Buckingham  $\pi$  定理计算得到，如表 1 所示。

表 1 振动台模型试验相似比

Table 1 Similitude laws of shaking table tests

物理量	计算公式	相似比
几何尺寸 $S_l$	选定	1 : 20
密度 $S_\rho$	选定	1 : 1
弹性模量 $S_E$	选定	1 : 20
应力 $S_\sigma$	$S_\sigma = S_E \cdot S_l^3$	1 : 20
应变 $S_\epsilon$	$S_\epsilon = S_\sigma / S_E$	1 : 1
弯矩 $S_M$	$S_M = S_E \cdot S_l^3$	1 : 160000
上部自重 $S_p$	$S_p = S_E \cdot S_l^2$	1 : 8000
线位移 $S_s$	$S_s = S_l$	1 : 20
时间 $S_t$	$S_t = S_l \cdot S_\rho^{0.5} \cdot S_E^{-0.5}$	0.224
加速度 $S_a$	$S_a = S_E / (S_\rho \cdot S_l)$	1 : 1

### 1.2 模型地基制备

模型地基土层自下而上依次为 100 mm 非液化砂土层、420 mm 可液化砂土层和 30 mm 干砂覆盖层。中部的可液化砂土层和上部的干砂覆盖层选用被广泛用于研究液化问题的福建标准砂。底部的非液化砂土层为桩端持力层，采用粒径为 0.5~2.5 mm 的中粗砂制备。

模型地基制备前，先在剪切土箱内部铺设一层塑料薄膜，以防止砂土地基中的水向外渗漏。底部的非液化砂土层采用砂雨法制备，并压实至 80% 相对密实度。中部的可液化砂土层采用水沉法制备，其相对密

实度大致为 40%。可液化砂土层制备完成后静置 2 h，然后通过砂雨法制备相对密实度为 40% 的干砂覆盖层。

### 1.3 模型桩基与结构制备

本次试验原型为嵌固于筏板中的 6 根管桩（复合桩）组成的  $2 \times 3$  群桩基础，桩间距为  $6.25d$  ( $d$  为管桩直径)。模型管桩的桩径  $d$  为 20 mm，壁厚为 5 mm，桩长  $l$  为 450 mm。试验所用模型筏板采用有机玻璃进行制作，其尺寸为  $310\text{ mm} \times 175\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  厚)。各个模型管桩与筏板之间通过有机玻璃专用胶进行溶化连接，以模拟桩基与筏板的刚性连接。为确保模型管桩与原型的密度相似比为 1 : 1，在每根有机玻璃管空心部分灌入细铁砂以达到设置配重的目的。根据相似比确定群桩模型的上部覆重总质量为 60 kg，本次试验通过在模型筏板上粘贴铁块来简化模拟上部结构的惯性效应。

本次试验共设计 3 种工况，分为未加固的管桩工况（工况 1）、加固深度为 225 mm 的水泥土复合管桩工况（工况 2）和加固深度为 450 mm 的水泥土复合管桩工况（工况 3）。对于工况 2 和 3，水泥土桩的直径  $D$  均为 50 mm，桩长  $L$  分别为 225 mm 和 450 mm。水泥土桩采用 10% 水泥掺量的水泥胶砂制作而成，经测定水泥土试样的 3 d 平均抗压强度为 0.28 MPa。3 种模型桩的实物图如图 1 所示。试验模型布置示意图见图 2。



图 1 模型桩实物图

Fig. 1 Photo of model piles

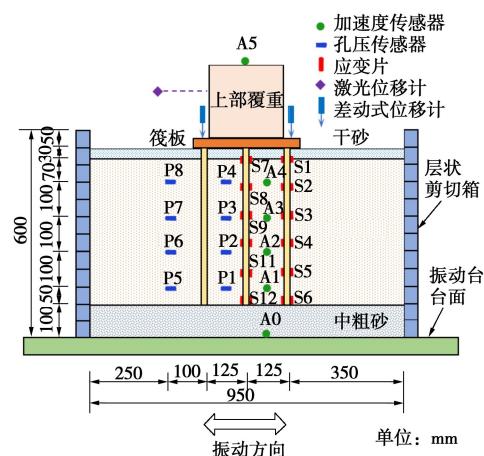


图 2 试验模型和传感器布置图

Fig. 2 Layout of models and sensors

### 1.4 传感器布置与地震波选取

3 组试验工况采用完全相同的传感器布置形式, 如图 2 所示。本次试验所采用的地震波为正弦波, 沿模型箱底部水平方向输入。正弦波频率为 5 Hz, 持时为 10 s, 加载时程曲线见图 3。

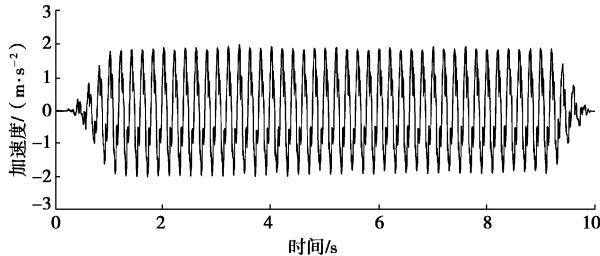


图 3 输入加速度时程曲线

Fig. 3 Time histories of input acceleration

## 2 试验结果与分析

### 2.1 超孔压比响应

3 种工况下超孔压比峰值对比结果如图 4 所示, 可以看出 3 种模型场地的最大超孔压比均达到或超过 1.0, 可认为模型地基已达到液化状态。值得注意的是, 工况 2 中超孔压比峰值较工况 1 减少 4.3%~14.9%, 而工况 3 中超孔压比峰值较工况 1 减少 15.7%~23.3%, 且在水泥加固深度范围内, 超孔压比减小幅度更为明显。这表明水泥土加固场地更难以液化, 且场地液化程度随水泥土加固深度的增加而减小。产生这种现象的原因在于水泥土的刚度明显高于地基土体的刚度, 在地震作用下, 水泥土将分担更多的地震循环剪应力, 导致土体循环应变相对减少, 从而有效抑制其周围土体中超孔压的发展。

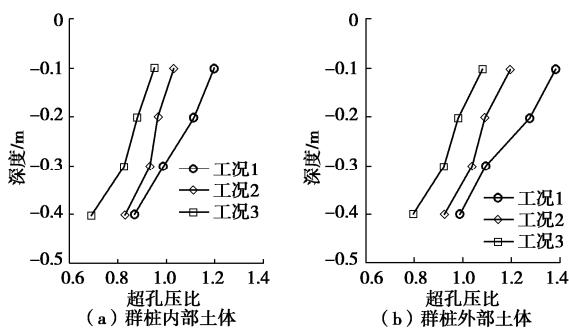


图 4 不同埋深处超孔压比峰值对比

Fig. 4 Comparison of peak excess pore pressure ratios at different depths

### 2.2 加速度响应

3 种工况下不同高度处加速度峰值放大系数如图 5 所示。由图 5 (a) 可知, 地基液化前, 尽管 3 种工况中各位置处加速度放大系数均大于 1.0, 但水泥土复合管桩工况的加速度放大系数均明显低于未加固的管桩工况, 且在水泥土加固深度范围内, 土体的加速度降低幅度尤为显著。这是因为水泥土复合管桩群桩基

础的刚度较大, 对周围土层的约束也较大, 从而降低了桩周土体及上部结构的震动反应<sup>[6]</sup>。

图 5 (b) 为地基液化后加速度峰值放大系数。由图可知, 浅部砂层的加速度放大系数均明显小于 1.0, 这是因为浅部砂层接近或达到完全液化状态, 加速度值发生了明显衰减。相比水泥土加固场地, 未加固场地的加速度衰减幅度更为明显, 这是因为水泥土加固降低了模型地基的液化程度, 进而抑制了由于液化导致的加速度衰减。

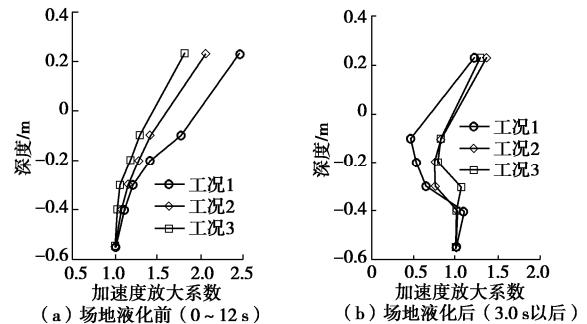


图 5 不同高度处加速度放大系数对比

Fig. 5 Comparison of acceleration amplification factors at different heights

### 2.3 侧向位移与沉降响应

3 种工况下桩顶结构的侧向位移时程曲线如图 6 所示。与未加固的管桩工况相比, 两种水泥土复合管桩工况的侧向永久位移均大幅减少。当水泥土加固深度为 225 mm 和 450 mm 时, 桩顶结构的侧向永久位移较预制桩工况分别减少 40.0% 和 72.2%。

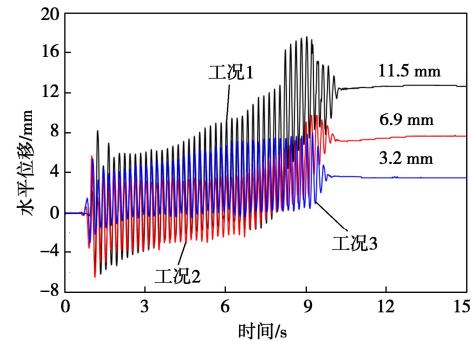


图 6 上部结构的侧向位移时程曲线

Fig. 6 Time histories of lateral displacement of superstructure

图 7 为位移计测得的筏板两侧沉降时程曲线。对比 3 种工况可知, 未加固的管桩工况中筏板沉降最大, 加固 225 mm 的水泥土复合管桩工况次之, 加固 450 mm 的水泥土复合管桩工况最小。具体而言, 工况 2 和工况 3 中筏板平均沉降相比工况 1 分别减少 37.6% 和 84.1%。

值得说明的是, 在水泥土复合管桩工况中, 尽管浅部砂层达到液化状态, 但桩顶结构的侧向位移和筏板沉降并未出现明显的放大, 仍远低于未加固的管桩工况, 表明水泥土加固显著改善了群桩基础的抗震性能。

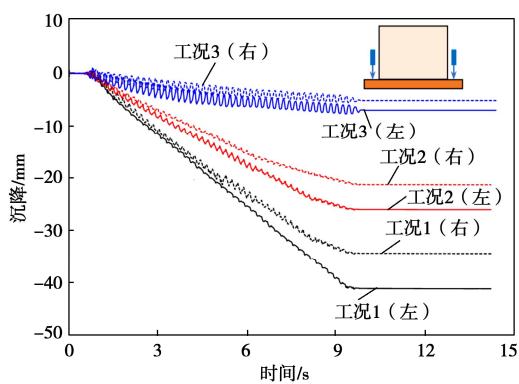


图 7 筏板沉降时程曲线

Fig. 7 Time histories of settlement of raft

## 2.4 弯矩响应

根据材料力学中梁的经典弯曲理论, 桩身截面弯矩可通过桩身的应变和抗弯刚度计算求得。3 种工况下桩身各截面最大弯矩分布见图 8。

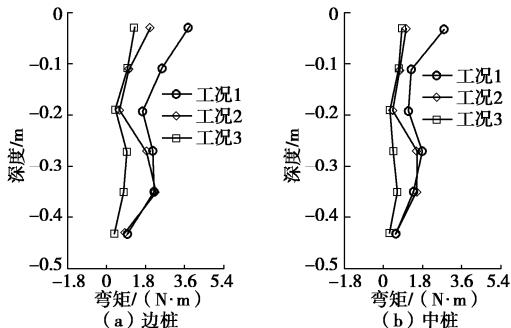


图 8 桩身各截面最大弯矩分布

Fig. 8 Distribution of maximum moment along pile

由图 8 可以发现: 当水泥土加固深度为管桩桩长的一半时, 桩身上半部分的弯矩大幅减少, 但其下半部分的弯矩变化幅度较小; 当水泥土加固深度与管桩桩长相同时, 整个桩长范围内的桩身弯矩均显著降低。以上结果表明水泥土加固可有效抑制其加固深度范围内桩身截面弯矩的增长。对于工况 1 和 3, 桩身最大弯矩值均出现在桩头, 而工况 2 中桩身最大弯矩则出现在水泥土和砂土的交界面附近。其主要原因在于工况 2 中水泥土和砂土的交界面处发生明显的刚度突变, 因此该交界面附近因动应力集中而产生较大的弯矩响应。

## 3 结 论

本文利用振动台模型试验, 研究了可液化砂土中水泥土复合管桩群桩基础的震动响应, 通过对超孔隙水压力、加速度、水平位移与沉降、动弯矩等物理量的测试与分析, 得到的主要结论如下:

(1) 采用水泥土加固可有效抑制群桩基础周围土层中超孔压的发展, 使其超孔压比的减少达 23.3%, 因此, 相比未加固场地, 水泥土加固场地的液化程度明显较轻。

(2) 土体液化前, 群桩基础场地对加速度响应表现出明显的放大效应, 而液化后加速度发生明显的衰减。对于水泥土复合管桩基础而言, 水泥土的存在可有效降低其周围土层对地震动的放大效应, 且会抑制因土层液化导致的加速度衰减。

(3) 在地震作用下, 采用水泥土加固对于限制管桩群桩基础的位移和弯矩的发展起到重要作用, 且水泥土加固深度越大, 此效应表现越明显。从变形和承载力两方面的评价结果可知, 水泥土加固可有效提高群桩基础的抗震性能。

## 参 考 文 献:

- [1] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(5): 1061 – 1075.
- [2] WANG A H, ZHANG D W, DENG Y G. A simplified approach for axial response of single precast concrete piles in cement-treated soil[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1491 – 1501.
- [3] FARO V P, SCHNAID F, CONSOLI N C. Laterally loaded field tests of flexible piles in bonded residual soil reinforced with top cement treated sand layers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2018, 171(3): 174 – 182.
- [4] 王安辉, 章定文, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性  $p-y$  曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 381 – 389. (WANG An-hui, ZHANG Ding-wen, XIE Jing-cheng.  $p-y$  curves for lateral bearing behavior of strength composite pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 381 – 389. (in Chinese))
- [5] TAGHAVI A, MURALEETHARAN K K, MILLER G A. Nonlinear seismic behavior of pile groups in cement-improved soft clay[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 99: 189 – 202.
- [6] KHANAL P C. Seismic Ground Improvement of Soft Soil Sites with Compacted Soil-Cement Panels and Deep Soil Mixing Panels[D]. Fullerton: California State University, 2015.

(编校: 黄贤沙)