DOI：10.11779/CJGE2024S20040

移动射流加固吸力式沉箱基础承载特性试验研究

毛 龙[1]，朱文波[*2,3]，杨嘉毅[1]，李勇海[1]，邓会元[4]，程丹莲[2,3]

（1. 中铁四局集团有限公司，安徽 合肥 230022；2. 东南大学南通海洋高等研究院，江苏 南通 226010；3. 东南大学土木工程学院，江苏 南京 211189；4. 中交公路规划设计院有限公司，北京 100032）

摘 要：吸力式沉箱基础基础因其尺寸范围广、极限水深大、经济性好、施工便捷等优势，受到了广大工程师青睐。然而软黏土中吸力式沉箱基础水平与竖向承载力较低，尚未形成一套有效的吸力式沉箱基础承载力提升技术。为了有效提高吸力式沉箱基础承载力，创新性提出了移动射流加固技术及劲性复合吸力式沉箱基础形式。通过吸力式沉箱基础移动射流加固试验以及加固后模型试验，研究加固后吸力式沉箱基础水平与竖向承载特性。试验结果表明：加固后的沉箱模型水平承载力是未加固沉箱模型的 2.5～3.5 倍，加固后的沉箱模型竖向抗拔承载力是未加固沉箱模型的 3.5～5.0 倍，可以看出加固后沉箱基础水平与竖向承载提升较为明显。通过后移动射流加固技术，不仅提高桩土接触面积同时提升桩周土体强度，移动射流管道布置越多，浆液包裹越好，包络线面积越大，荷载玫瑰越均匀，承载力差异较小。在移动射流管道布置时需考虑射流参数、土体特性等因素，移动射流管道布置需满足相邻破土半径搭接要求。通过对移动射流加固吸力式沉箱基础承载特性的初步探究，为吸力式沉箱基础移动射流加固技术工程应用以及劲性复合吸力式沉箱基础理论分析提供参考。

关键词：吸力式沉箱基础；承载力提升；移动射流技术；软黏土

中图分类号：TU443 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-4548(2024)S2-0226-06

作者简介：毛 龙（1988— ），男，高级工程师，主要从事岩土以及地下结构方面的研究工作。E-mail: 543302226@qq.com。

Experimental study on bearing characteristics of reinforced suction caisson foundation with mobile jet technology

MAO Long[1], ZHU Wenbo[2,3], YANG Jiayi[1], LI Yonghai[1], DENG Huiyuan[4], CHENG Danlian[2,3]

(1. China Railway Fourth Division Group Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. Advanced Ocean Institute of Southeast University, Nantong 226010, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 4. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: The suction caisson foundation has been favored by many engineers due to its advantages such as wide size range, large ultimate water depth, good economy and convenient construction. However, the horizontal and vertical bearing capacities of suction caisson foundations are relatively low in soft clay. There is still no effective method to improve the bearing capacity of the suction caisson foundations. In order to effectively improve the bearing capacity of the suction caisson foundations, the mobile jet reinforcement technology and the form of rigid composite suction caisson foundation are innovatively proposed. The bearing characteristics of a suction caisson foundation reinforced by the mobile jet technology are studied through the model tests. The results shwo that the horizontal bearing capacity of the rigid composite suction caisson foundation is about 2.5～4.0 times higher than that of the ordinary caisson. The uplift bearing capacity of the rigid composite suction caisson foundation is about 3.5～5.0 times higher than that of the ordinary caisson. The propesed method increases the contact area between the pile and the soil and enhances the strength of the soil around the pile. The cement slurry evenly wraps around the caisson and the grouting effects are satisfactory. The jet parameters and soil characteristics need to be considered in the design of the new suction caisson foundation. It can provide reference for the engineering application of the mobile jet reinforcement technology and the theoretical analysis of the rigid composite suction caisson foundation.

Key words: suction caisson foundation; improvement of bearing capacity; mobile jet technology; soft clay

0 引 言

吸力式沉箱基础因其尺寸范围广、极限水深大、

基金项目：国家自然科学基金项目（52208333，51878160，52378328）；中国交建集团揭榜挂帅项目（2023-ZJKJ-01）

收稿日期：2024-06-22

*通信作者（E-mail: 101300143@seu.edu.cn）

经济性好、施工便捷等优势，受到了广大工程师青睐。然而软黏土中吸力式沉箱基础基础承载力较低，尚未形成一套有效的吸力式沉箱基础承载力提升技术。本文创新性地提出吸力式沉箱基础移动射流加固技术与劲性复合吸力式沉箱基础基础形式。由于该概念首次提出，通过吸力式沉箱基础移动射流加固试验以及加固后模型试验，研究加固后吸力式沉箱基础承载特性，为吸力式沉箱基础加固提供技术支撑。

国内外学者自吸力式沉箱基础基础出现以来，先后进行了大量研究工作，为后续的研究积累了宝贵经验。Deng 等[1]、戴国亮等[2]通过模型试验、有限元以及理论分析对不同加载模式、长径比、排水条件下的吸力式沉箱基础基础的抗拔承载力进行了研究，提出了吸力式沉箱基础基础抗拔破坏模式、承载力组成以及抗拔承载力计算方法，然而在软黏土地基上吸力式沉箱基础竖向和水平承载力较低。同时 Andersen 等[3]进行了吸力式沉箱基础基础在循环荷载作用下的模型试验，得出吸力式沉箱基础基础循环后的极限承载力是静极限承载力的 60%～90%，侧壁摩擦力及底部反向承载力均有所降低。此外，朱文波等[4]进行了吸力式沉箱基础基础长期抗拔承载力试验，结果发现，静荷载比越大抗拔承载力降低越多。因此，排水条件下吸力式沉箱基础基础承载力有限，且长期工作荷载以及循环荷载会进一步降低吸力式沉箱基础基础承载力。然而目前却很少涉及吸力式沉箱基础基础承载力提升技术的研究。目前关于基础提升技术主要有两种，一是改变桩的结构型式增加基础与土体接触面积；二是改变基础周围土体强度。对上述两种方法已有不少相关研究成果，在异型桩研究方面：Martin 等[5]、钱德玲[6]、钱永梅等[7]研究了支盘桩盘间距、盘形式、盘直径、盘高度和盘数量等对桩基承载力影响，给出了支盘最优布置形式，建立了挤扩力学模型，揭示了挤扩支盘桩提高承载力的机理。实践证明，异型桩可有效增加桩基与土体接触面积，承载力得到了一定提升。但承载力提升能力有限，且施工工序较为繁多，导致经济性不佳，在吸力式沉箱基础中难以运用。在后压浆方面：Fleming[8]、Thiyyakkandi 等[9]、Joer 等[10]、Mullins 等[11]研究了后压浆桩承载变形特性、桩端与桩侧承载力提升机制以及砂土层中桩端后压浆桩的荷载传递机理。王卫国等[12]、戴国亮等[13]、万志辉等[14]提出了组合压浆技术，给出了桩侧阻力与桩端阻力增强系数。但后压浆技术在软黏土中效果不佳。

综上所述，软黏土中吸力式沉箱基础基础竖向与水平承载力较低，对于如何有效提高吸力式沉箱基础基础承载力的研究较少。文中创新性提出了吸力式沉箱基础移动射流加固技术，同时开展加固后劲性复合吸力式沉箱基础基础承载特性试验研究，探明加固后劲性复合吸力式沉箱基础基础承载机理，为吸力式沉箱基础移动射流加固技术与劲性复合吸力式沉箱基础基础工程应用提供参考。

1　模型试验

1.1　移动射流加固技术

吸力式沉箱基础移动射流加固技术如图 1 所示。该技术主要是在吸力式沉箱基础侧壁布设移动射流管道，通过负压下沉将吸力式沉箱基础与移动射流管道安装到位。然后将管道内的射流喷嘴不断往上移动旋喷，利用高压水泥浆切割软黏土，使浆液与软黏土混合胶结后形成水泥土加固体，达到改良吸力式沉箱基础周围土体强度目的，实现水泥土与吸力式沉箱基础之间有效黏结与荷载传递。

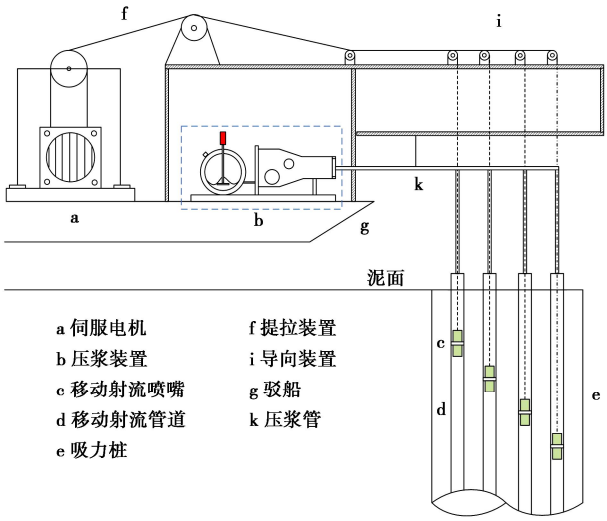


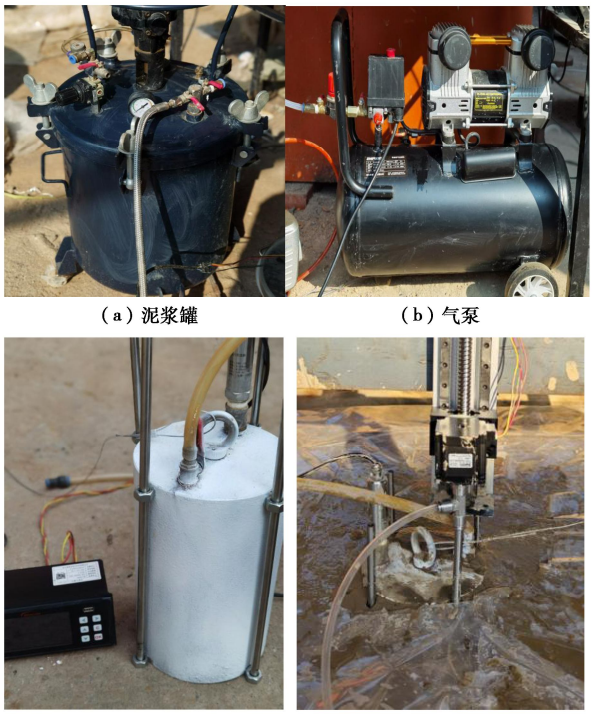
图 1 移动射流加固技术

Fig. 1 Mobile jet reinforcement technology

同时将加固后的吸力式沉箱基础定义为劲性复合吸力式沉箱基础基础，来有效地提高吸力式沉箱基础承载力，进而扩大劲性复合吸力式沉箱基础基础在锚固基础中的应用。因此，文中通过吸力式沉箱基础移动射流加固试验以及承载力模型试验，研究加固后吸力式沉箱基础承载特性，为吸力式沉箱基础加固提供技术支撑。

1.2　移动射流加固试验

试验设备主要包括模型箱、射流系统和喷嘴移动系统。射流系统包括泥浆罐，气泵，流速控制器等。射流系统可以控制浆液射流强度，喷嘴移动系统可以控制喷嘴的移动速度。首先将射流管道布置在沉箱模型四周，并通过导向管进行定位。然后通过伺服电机控制射流管道上下移动以及射流管道旋转切割土体。移动射流加固试验如图 2 所示。



（a）泥浆罐 （b）气泵

（c）泥浆罐 （d）气泵

图 2 移动射流加固试验

Fig. 2 Mobile jet reinforcement tests

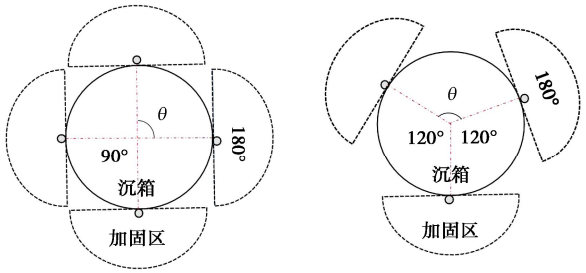
移动射流管道在沉箱模型布置形式如图 3 所示。第一种布置形式沿沉箱周围分别对称布置4个,每个移动射流管道相距 90°。第二种布置形式沿沉箱周围分别布置 3 个，每个移动射流管道相距 120°。射流管道底部开有 1.2 mm 孔洞，然后通过伺服电机控制射流管道上下移动以及射流管道旋转切割土体，射流管道从低往上进行切割，射流管道每隔 30 s 提升 20 mm。通过破土试验射流参数如表 1 所示。

表 1 移动射流参数

Table 1 Parameters of mobile jet

C_u/kPa	W_c/%	P/Pa	Q/(L·min^{-1})	t/mm	r/cm
5.93	41.9	70	0.78	1.2	9.7

注：C_u 不排水强度；P 压强；Q 流量；t 喷嘴直径；r 加固深度。



（a）加固模式1 （b）加固模式2

图 3 加固模式

Fig. 3 Reinforcement modes

1.3 加固前后沉箱模型试验

模型试验中，模型箱尺寸（长×宽×高）为 1.2 m×1.2 m×1.2 m，模型箱采用单面排水方案，即通过模型箱底部进行排水，见图 4。将含水率为 50%～60%的泥浆一次性倒入模型箱中，在泥浆顶部铺盖土工布并用塑料膜密封，进行真空预压以及堆载预压处理。在预压过程中定期在土层不同位置进行十字板剪切试验，当土层沿深度的不排水强度达到 6～10 kPa 时，停止对土层预压处理。

图 4 模型试验

Fig. 4 Model tests

为了研究加固后沉箱基础在不同加载角度下沉箱加固效果，加载分为竖向加载与水平加载。竖向加载角分别为 0°，30°，45°，60°，90°。对于 CM2 水平加载角每隔 60°进行一次试验。对于 CM3 水平加载角每隔 45°进行一次试验。具体参数见表 2。对于移动射流加固前后吸力式沉箱基础模型采用分级加荷方法施加荷载，一般控制在沉箱模型极限承载力的 8%～10%，每级加载第 1 h 内分别在 5，10，15，30，60 min 测读 1 次，以后每 30 min 测读 1 次。当每级加载每小时位移量变化小于 0.01 mm 时，施加下一级荷载，用力传感器测量荷载大小，用位移传感器测量位移时程。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

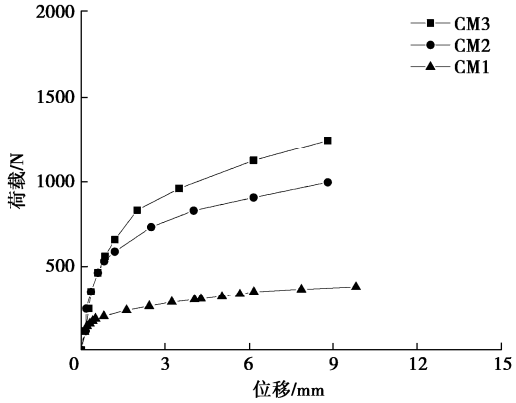
编号	模型	管道	φ_1/(°)	φ_2/(°)
1	CM1	0	每隔 30	0
2	CM2	3 个	每隔 30	每隔 60
3	CM3	4 个	每隔 30	每隔 45

注：φ_1 为竖向加载角；φ_1 为水平加载角。

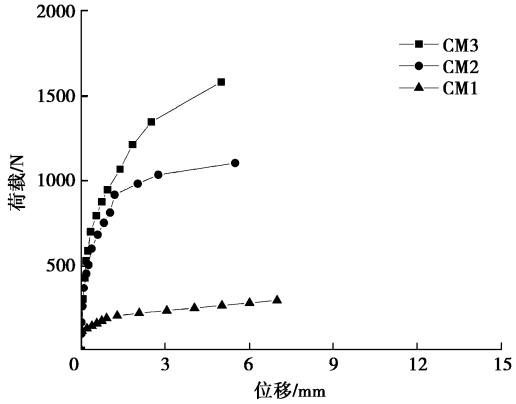
2 试验结果

图 5（a）为 3 种沉箱模型水平加载条件下荷载位移对比曲线。可以看出 CM2 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 2.67 倍，CM3 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 3.80 倍。图 5（b）为 3 种沉箱模型竖向加载

条件下荷载位移对比曲线。可以看出 CM2 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 3.75 倍，CM3 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 5.14 倍。可以看出加固后沉箱基础水平与竖向基础承载提升较为明显。



（a）水平荷载

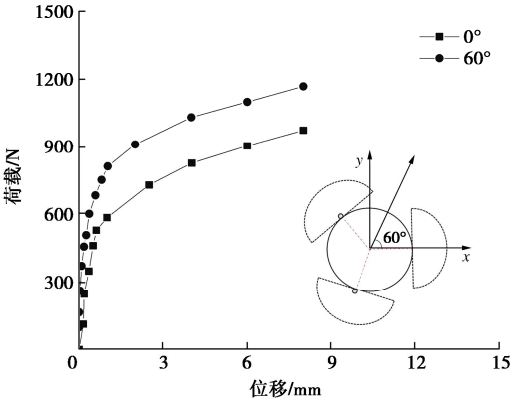


（b）竖向荷载

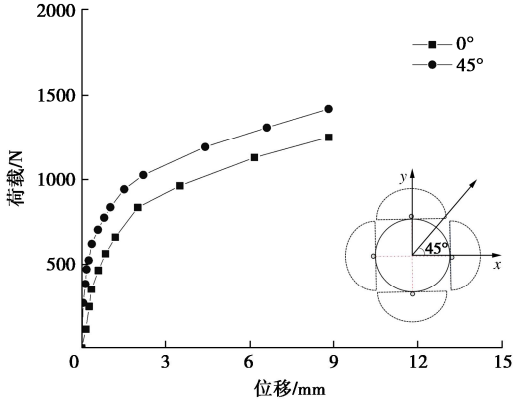
图 5 荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

图6为水平方向不同加载角度加固后沉箱模型荷载位移曲线对比结果。可以看出CM2在60°加载时，其承载力要高于0°加载，其原因为60°加载时，加载方向加固截面积较大。对于CM3加固模式，其加固范围正好可将沉箱包裹，因此在不同荷载水平角度条件下，其承载力差别不大。



（a）CM2

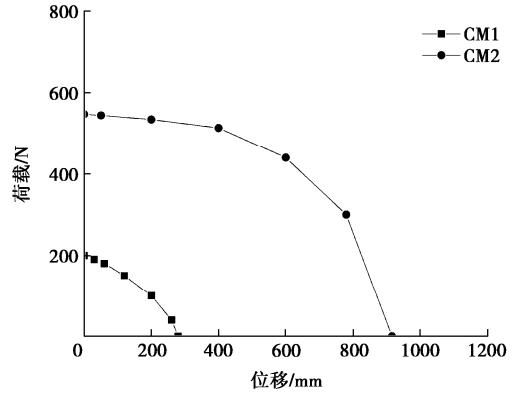


（b）CM3

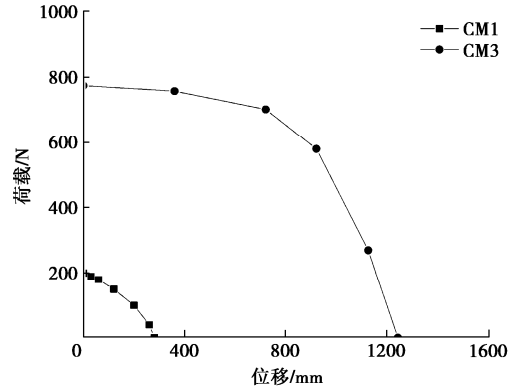
图 6 荷载位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

图7为沉箱模型加固前后包络线图。可以看出加固后沉箱模型包络线面积远大于未加固沉箱包络线面积，因此通过移动射流加固后吸力式沉箱基础水平与竖向承载得到极大提高。图8为沉箱水平不同方位加载条件下沉箱模型荷载玫瑰图。可以看出CM2荷载玫瑰图在不同加载角度条件下，承载力有所差异，这是因为3根移动射流管道加固范围并不能完全包裹沉箱。CM3荷载玫瑰图在不同加载角度条件下，承载力差异较小，这是因为四根移动射流管道加固范围几乎可以包裹沉箱模型，因此在不同加载方向下，其荷载差异较小。



（a）CM2



（b）CM3

图 7 包络线

Fig. 7 Envelope curves

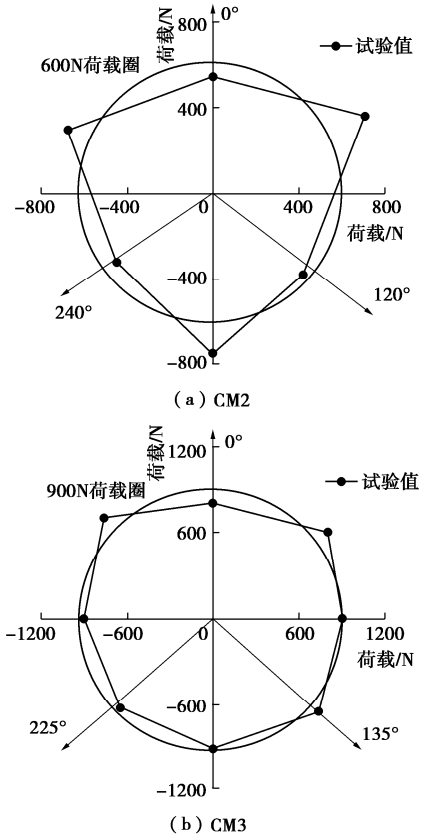


图 8 荷载玫瑰图

Fig. 8 Rose diagrams of load

3 结 论

软黏土中吸力式沉箱基础基础竖向与水平承载力较低，对于如何有效提高吸力式沉箱基础基础承载力的研究较少。文中创新性提出了吸力式沉箱基础移动射流加固技术，同时开展加固后劲性复合吸力式沉箱基础基础承载特性试验研究，探明加固后劲性复合吸力式沉箱基础基础承载特性，为吸力式沉箱基础移动射流加固技术与劲性复合吸力式沉箱基础基础工程应用提供参考，主要得到以下3点结论。

（1）CM1未加固沉箱模型水平极限荷载为205 N，加固后CM2沉箱模型水平极限荷载为548 N，CM3水平极限荷载为785 N。CM2沉箱极限承载力是CM1沉箱极限的2.67倍，CM3沉箱极限承载力是CM1沉箱极限的3.8倍，可以看出加固后沉箱基础水平承载提升较为明显。

（2）未加固沉箱模型竖向极限荷载为 243 N，CM2 竖向极限荷载为 912 N，CM3 竖向极限荷载为 1257 N。CM2 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 3.75 倍，CM3 沉箱极限承载力是 CM1 沉箱极限的 5.14 倍。可以看出加固后沉箱基础竖向基础承载提升较为明显。

（3）通过后移动射流加固技术，不仅提高桩土接触面积同时提升桩周土体强度，移动射流管道布置越多，浆液包裹越好，包络线面积越大，荷载玫瑰越均匀，承载力差异较小。在移动射流管道布置时需考虑射流参数、土体特性等因素，破土半径需满足搭接要求。

参考文献：

[1] DENG W, CARTER J P. A theoretical study of the vertical uplift capacity of suction caissons[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2002, **12**(2): 342-349.

[2] 戴国亮, 朱文波, 郭 晶, 等. 软黏土中吸力桩基础竖向抗拔承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊 1): 119-126. (DAI Guoliang, ZHU Wenbo, GUO Jing, et al. Experimental study on vertical pull-out bearing characteristics of suction pile foundation in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 119-126. (in Chinese))

[3] ANDERSEN K H, LAURITZSEN R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(5): 540-555.

[4] 朱文波, 戴国亮, 王博臣, 等. 吸力式沉箱基础底部土体卸荷蠕变及其长期抗拔承载特性研究[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(3): 669-670. (ZHU Wenbo, DAI Guoliang, WANG Bochen, et al. Unloading creep of soft clay and long-term uplift bearing characteristics of suction caisson foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(3): 669-670. (in Chinese))

[5] MARTIN, R E, DESTEPHEN R A. Large diameter double underreamed drilled shafts[J]. Geotechnical Engineering, 1983, **109**(8): 1082-1098.

[6] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 371-375. (QIAN Deling. Study on loading transfer law and FEM simulation of squeezed branch pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 371-375. (in Chinese))

[7] 钱永梅, 尹新生, 钟春玲, 等. 挤扩多盘桩的土体极限承载力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(4): 568-570. (QIAN Yongmei, YIN Xinsheng, ZHONG Chunling, et al. Ultimate bearing capacity of soil about push-extend multi-under-reamed concrete pour pile[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, **37**(4): 568-570. (in Chinese))

（下转第 241 页）

Chinese))

[12] 王　锋. 基于 SSA-LSTM 模型的软岩隧道变形特征智能预测及应用研究[J]. 现代隧道技术, 2024, **61**(1): 56-66. (WANG Feng. Study on intelligent prediction of the deformation characteristics of soft rock tunnel based on SSA-LSTM model and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, **61**(1): 56-66. (in Chinese))

[13] 洪宇超, 钱建固, 叶源新, 等. 基于时空关联特征的 CNN-LSTM 模型在基坑工程变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 108-111. (HONG Yuchao, QIAN Jiangu, YE Yuanxin, et al. Application of CNN-LSTM model based on spatio-temporal correlation characteristics in deformation prediction of foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 108-111. (in Chinese))

（编校：胡海霞）

（上接第 230 页）

[8] FLEMING W G K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. Civil Engineering, 1993, **97**(2): 88-93.

[9] THIYYAKKANDI S, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Measured and predicted response of a new jetted and grouted precast pile with membranes in cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(8): 1334-1345.

[10] JOER H A, RANDOLPH M F, GUNASENA U. Experimental modeling of the shaft capacity of grouted driven piles[J]. Geotechnical Testing Journal, 1998, **21**(3): 159-168.

[11] MULLINS G, WINTERS D, STEVEN D. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesioniess soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(4): 478-487.

[12] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1817-1826. (WANG Weidong, LI Yonghui, WU Jiangbin. Field loading tests on large-diameter and super-long bored piles of Shanghai Center Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1817-1826. (in Chinese))

[13] 戴国亮, 万志辉, 龚维明, 等. 基于沉降控制的组合后压浆灌注桩承载力计算研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(12): 2172-2181. (DAI Guoliang, WAN Zhihui, GONG Weiming, et al. Calculation of bearing capacity for combined post-grouting bored piles based on settlement control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2172-2181. (in Chinese))

[14] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 超厚粉细砂地层组合压浆桩压浆效果试验[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(3): 59-67. (WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Experiment on grouting effects of combined grouting piles under extra-thick fine silty sand layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(3): 59-67. (in Chinese))

（编校：黄贤沙）