



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506517

引用格式:张吉坤,刘天宇,白晓宇,等.软弱地层中劲扩复合桩承载变形特性与承载力预测[J].科学技术与工程,2026,26(27):11846-11856.

Zhang Jikun, Liu Tianyu, Bai Xiaoyu, et al. Bearing and deformation characteristics of expanded stiffened deep-cement-mixing pile in soft strata and bearing capacity prediction[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11846-11856.

软弱地层中劲扩复合桩承载变形特性与承载力预测

张吉坤^{1,2}, 刘天宇¹, 白晓宇^{1*}, 银吉超¹, 闫楠¹, 张亚妹¹, 唐鑫²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266520; 2. 青岛中油岩土工程有限公司, 青岛 266071)

摘 要 为研究劲扩复合桩在软弱地层中的承载变形特性,并建立可靠的承载力预测方法,基于6根劲扩复合桩与3种常规混凝土桩型的现场静载对比试验,系统分析了该桩型的荷载-沉降规律、极限承载力及变形稳定性。试验结果表明:劲扩复合桩的荷载-位移曲线呈缓变型特征,沉降发展平稳,抗压极限承载力较设计预估值提升12%~15%;其中有效桩长9 m的劲扩复合桩极限承载力可达2 760 kN,高于25 m长钻孔灌注桩与23 m长预应力方桩,显示出“短桩高承”的显著优势。同时,该桩型在不同试桩中的最小沉降极差仅为2.65 mm,说明其在软弱土层中具备良好的承载一致性与变形稳定性。在承载力预测模型方面,对比指数函数、指-幂函数和双曲线模型的拟合效果后发现,指-幂函数模型的精度最高,可准确模拟劲扩复合桩从弹性阶段直至破坏全过程的荷载-沉降响应,尤其是在极限荷载附近的预测结果仍与实测值高度吻合,推荐作为劲扩复合桩承载力预测的首选模型;而双曲线模型在加载后期的预测中会呈现急剧下沉趋势,与实测的缓变特征不符,适用性较差。

关键词 劲扩复合桩; 现场试验; 荷载-位移曲线; 单桩极限承载力; 承载力预测

中图法分类号 TU473;

文献标志码 A

Bearing and Deformation Characteristics of Expanded Stiffened Deep-cement-mixing Pile in Soft Strata and Bearing Capacity Prediction

ZHANG Ji-kun^{1,2}, LIU Tian-yu¹, BAI Xiao-yu^{1*}, YIN Ji-chao¹, YAN Nan¹, ZHANG Ya-mei¹, TANG Xin²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Qingdao China Petroleum Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

[Abstract] To investigate the bearing deformation characteristics of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile in soft strata and establish a reliable predictive method for its bearing capacity, field comparative static load tests were conducted on six expanded stiffened deep-cement-mixing piles and three conventional concrete pile types, enabling systematic analysis of their load-settlement behavior, ultimate bearing capacity, and deformation stability. The test results show that the load-displacement curves of the expanded stiffened deep-cement-mixing piles exhibited a gradual-variation behavior with stable settlement development, and the ultimate compressive bearing capacity increased by approximately 12% ~ 15% compared with the design estimate. In particular, the expanded stiffened deep-cement-mixing pile with an effective length of 9 m achieved an ultimate bearing capacity of 2 760 kN, which is higher than those of the 25 m bored cast-in-place pile and the 23 m prestressed concrete square pile, demonstrating a pronounced short-pile, high-capacity advantage; meanwhile, the minimum settlement range among different test piles is only 2.65 mm, indicating good consistency in bearing performance and deformation stability in soft soil. Regarding predictive models for bearing capacity, the exponential-power function model demonstrates the highest fitting accuracy compared to the exponential function and hyperbolic models, accurately simulating the load-settlement response from the elastic stage to the entire failure process, with particularly high agreement near the ultimate load, and is recommended as the preferred model for predicting the bearing capacity of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile; in contrast, the hyperbolic model shows a sharp sinking trend in later-stage predictions, which is inconsistent with the measured gentle characteristics, indicating poor applicability.

收稿日期: 2025-09-09 修订日期: 2026-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(52478348, 52578415); 山东省自然科学基金(ZR2024ME224); 青岛市自然科学基金原创探索项目(24-4-4-zzj-180-jch); 山东省泰山学者项目(tsqn20230624)

第一作者: 张吉坤(1984—),男,汉族,山东烟台人,博士研究生,高级工程师。研究方向:桩基础与固废资源化。E-mail: zhangjikun1234@163.com。

*通信作者: 白晓宇(1984—),男,汉族,内蒙古呼和浩特人,博士,教授。研究方向:滨海岩土与基础工程。E-mail: baixiaoyu538@163.com。

[**Keywords**] expanded stiffened deep-cement-mixing pile; field test; load-displacement curve; ultimate bearing capacity of single pile; bearing capacity prediction

随着城市化进程的加快和基础设施建设规模的不断扩大,长江三角洲冲积平原等典型软弱地层中的工程地质条件对桩基技术提出了更为严苛的要求^[1-2]。此类场地普遍存在地层液化风险高、土体压缩性大、承载力低等特点,尤其是中等至严重液化的素填土与冲填土层广泛分布,使得传统桩型在承载性能方面面临严峻挑战^[3-4]。劲扩复合桩作为一种新型的桩基型式,由混凝土桩或型钢外包裹水泥土混合料、水泥砂浆混合料、低标号混凝土等固结体组成。芯桩与外包裹固结体共同承担上部荷载,其工作机理是:芯桩承担全部竖向荷载,利用水泥土的抗剪强度,将荷载由芯桩通过水泥土环传递到桩周地基土中。利用水泥土扩底改善桩端持力层条件,同时通过芯桩与水泥土体的界面咬合效应提升承载性能。

劲扩复合桩充分发挥了水泥土和混凝土各自的力学性能优势,具有较高的单桩承载力、良好的抗渗性与耐久性以及经济环保等优势^[5],可应用于桩基工程、基坑支护、软土地基处理等领域,受到了工程界和学术界的广泛关注。为了明确劲扩复合桩的承载特性,包华等^[6]对劲扩复合桩的单桩竖向承载力进行了理论设计研究,明确了承载力计算时的总极限侧阻力调整系数和总极限端阻力调整系数的取值范围。周威等^[7]进行了劲扩复合桩与混凝土灌注桩的对比试验,发现在同直径下劲扩复合桩的极限承载力为混凝土灌注桩 1.39 ~ 1.69 倍,并且劲扩复合桩的侧摩阻力计算值相较于预制桩与灌注桩的侧摩阻力经验值,其比值区间集中于 1.54 ~ 2.50。现阶段有关劲扩复合桩的研究内容较少。关于劲性复合桩,众多学者展开了一系列研究^[8-10],朱锐等^[11]、文磊等^[12]探究了劲性复合桩的承载力作用机制,认为劲性复合桩相较于传统钻孔灌注桩所展现的承载力优势,其关键机制在于水泥土硬化体与地基土接触界面性状的显著提升,并将劲性复合桩视为现有桩-土共同作用理论的重要补充与发展。李俊才等^[13]、钱于军等^[14]通过研究发现劲性复合桩具有摩擦桩的特性,其竖向荷载主要由桩侧摩阻力承担,桩端阻力只占竖向荷载的 10% 左右。在后续研究中,Zhou 等^[15]在模型试验中发现部分复合桩的桩端荷载均超过了桩顶荷载的 10%,说明桩端阻力的贡献不可忽视。周友飞等^[16]对软弱土地基中的劲性复合桩进行数值模拟,结果表明劲性复合桩的承载力随桩径和桩长的增大而

增大,但桩长超过 18 m 后其对承载力性能的提升有限,此外劲性复合桩的承载力为同尺寸纯水泥土桩的 3 倍。Wonglert 等^[17]通过室内试验和数值模拟明确了劲性复合桩的破坏形式,并得出桩芯的最佳长度和直径取决于土壤条件和桩身混凝土的强度。

目前,劲扩复合桩在软弱地层中的承载特性研究仍缺乏系统的现场试验数据,这制约了其工程应用与安全评价。为此,通过开展 6 根两种规格劲扩复合桩的竖向抗压静载试验,并结合 3 种常规混凝土桩型的对比试验,深入分析其荷载-位移响应、极限承载力及沉降发展规律。此外,选用指数函数、指-幂函数和双曲线函数 3 种常用模型对试验结果进行拟合,以确立适用于劲扩复合桩的极限承载力最优预测模型。研究成果可为软弱土地区劲扩复合桩的设计与应用提供试验依据与理论支持。

1 试验现场概况

1.1 工程概况

项目建设场地所在地貌类型属长江三角洲冲积、堆积平原,全境地表起伏甚微,形成历史不长,或为沙洲与陆地并接的新生土地,河道纵横、沟渠密布,是典型的长江三角洲地貌,次级地貌单元属于海岸滩涂区。场地原为海岸滩涂区,地势开阔,场地整平标高为 4.25 m。

场地在勘探深度范围内所揭露的地层,主要由场地浅部广泛分布的新近人工填土和第四系海陆相交互沉积层。勘探深度内分为 7 大层,大层内根据状态及成因的差异分为 14 个亚层。土层名称及主要原位测试数据如图 1 所示;桩基设计参数如表 1 所示。

该工程地质勘察报告显示:该场地液化等级为中等-严重,导致液化的地层主要为第①层素填土、第②层冲填土。液化土层分布于场地浅表层 3.00 ~ 8.40 m。根据建筑重要性,需对该两层土进行强夯加固处理,以降低或消除液化等级。地质勘察报告还显示:地下水对混凝土结构腐蚀性等级为微;地下水对钢筋混凝土结构中的钢筋在长期浸水条件下腐蚀等级为微,非长期浸水条件下腐蚀性等级为强。

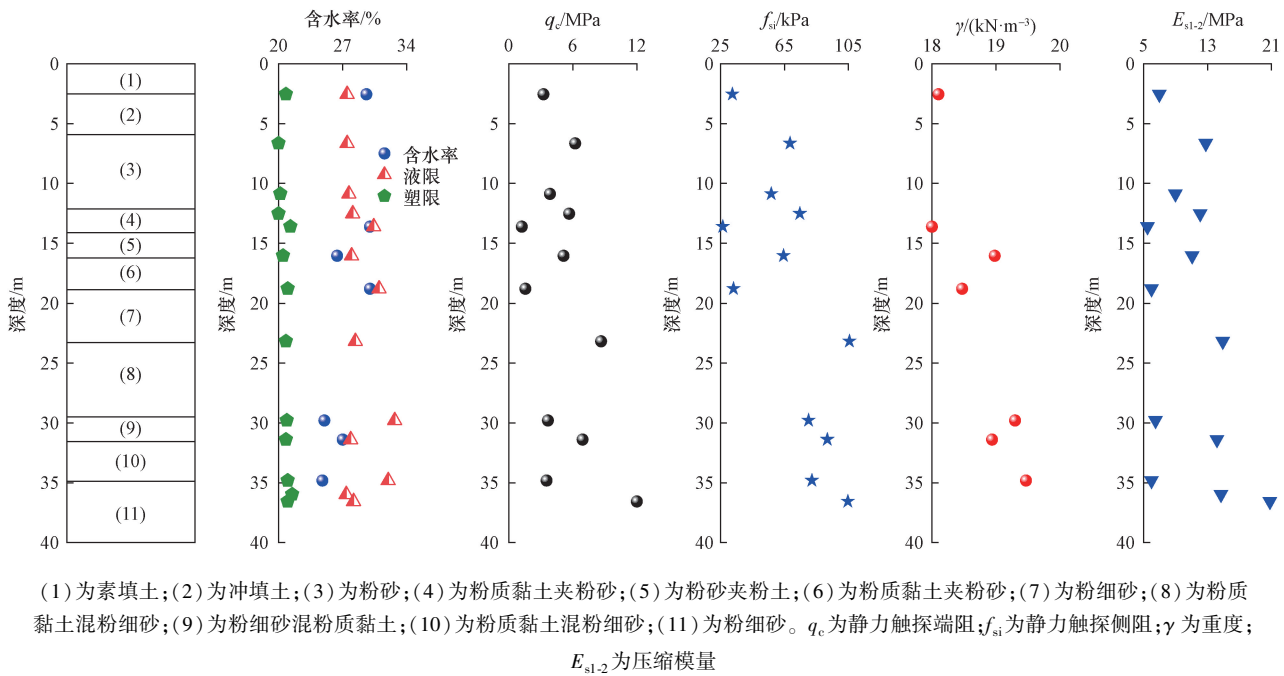
1.2 试桩设计参数

常规混凝土桩静载试桩检测桩型有 3 种,分别为预应力管桩、预应力实心方桩和钻孔灌注桩。其中预应力管桩的混凝土强度为 C80,数量 12 根;预

表1 桩基设计参数
Table 1 Design parameters of pile foundation

地层编号	地层名称	状态	混凝土灌注桩		混凝土预制桩		地基承载力	层顶埋深 平均/m
			q_{sik}/kPa	q_{pk}/kPa	q_{sik}/kPa	q_{pk}/kPa		
①	素填土	不均匀	20	—	22	—	75 ~ 170	0
②	冲填土	松散-稍密	25	—	27	—	75 ~ 160	2.54
③-1	粉砂	中密	50	600	52	1 500	160	6.66
③-2	粉砂	松散-稍密	30	—	32	1 100	110	10.86
③-3	粉砂	中密	50	—	52	1 500	150	12.53
④-1	粉质黏土夹粉砂	软塑-可塑	40	—	42	850	120	13.61
④-2	粉砂夹粉土	稍密	30	—	32	1 900	140	16.03
④-3	粉质黏土夹粉砂	软塑-可塑	42	—	44	1 000	130	18.80
⑤	粉细砂	中密-密实	60	900	62	3 000	180	23.18
⑥-1	粉质黏土混粉细砂	可塑	50	—	52	—	150	29.79
⑥-2	粉细砂混粉质黏土	稍密-中密	55	—	57	—	160	31.39
⑥-3	粉质黏土混粉细砂	可塑	50	—	52	—	140	34.81
⑦-1	粉细砂	中密	60	1 000	62	3 800	170	35.98
⑦-2	粉细砂	密实	80	1 200	82	3 800	210	36.57

注: q_{sik} 为桩侧第*i*层土的极限侧阻力标准值; q_{pk} 为桩端土的极限端阻力标准值; f_{ak} 为地基承载力特征值。



(1)为素填土;(2)为冲填土;(3)为粉砂;(4)为粉质黏土夹粉砂;(5)为粉砂夹粉土;(6)为粉质黏土夹粉砂;(7)为粉细砂;(8)为粉质黏土混粉细砂;(9)为粉细砂混粉质黏土;(10)为粉质黏土混粉细砂;(11)为粉细砂。 q_c 为静力触探端阻; f_{si} 为静力触探侧阻; γ 为重度; E_{st-2} 为压缩模量

图1 土层名称及主要原位测试数据

Fig.1 Soil layer names and main in-situ test data

应力实心方桩混凝土强度为C60,数量12根;钻孔灌注桩混凝土强度为C40,数量12根。按照设计要求,预应力管桩、预应力实心方桩和钻孔灌注桩的单桩竖向抗压静载试验桩的检测数量均为2×3根。各桩型设计参数如表2所示。

劲扩复合桩试验检测桩型有2种,分别为水泥土桩+预应力管桩、水泥土桩+预应力方桩。按照设计要求,两种桩型的单桩竖向抗压静载试验检测数量各为3根。劲扩复合桩示意图和桩位图如图2所示,劲扩复合桩设计参数如表3所示。

表2 3种常规混凝土桩型设计参数
Table 2 Design parameters of conventional concrete pile type

桩类别	直径 <i>d</i> 、 边宽 <i>b</i> /mm	有效 桩长/m	持力层
预应力管桩	<i>d</i> 400	23	⑤层
	<i>d</i> 500	23	⑤层
预应力实心 方桩	<i>b</i> 500	23	⑤层
	<i>b</i> 500	38	⑦-1,⑦-2层
钻孔灌注桩	<i>d</i> 600	25	⑤层
	<i>d</i> 600	41	⑦-1,⑦-2层

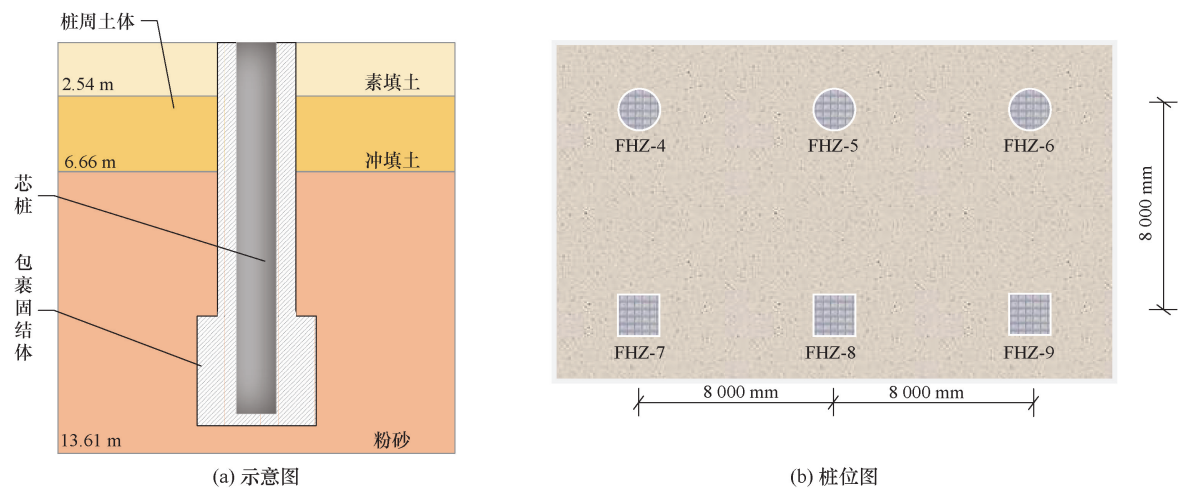


图2 劲扩复合桩示意图和桩位图

Fig.2 Schematic diagram and pile position diagram of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile

表3 劲扩复合桩设计参数

Table 3 Design parameters of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile

桩类别	直径 d 、边宽 b /mm	有效桩长/m	持力层
劲扩复合桩	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$	9	③-1层
	$d400$		
	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$	9	③-3层
	$b400$		

注: $D1\ 000$ 表示水泥土桩桩身直径1 000 mm; $D_b\ 1\ 200$ 表示水泥土桩扩底直径1 200 mm; $d400$ 表示芯桩直径400 mm; $b400$ 表示芯桩边宽400 mm。

1.3 试验方案

所有桩型均采用单桩竖向抗压静载试验,试验严格遵循《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[18],试验核心在于揭示水泥土扩底体与混凝土芯桩协同工作机制。试验采用锚桩反力装置,通过对称布置的4台5 000 kN液压千斤顶分级加载,反力系统由锚桩(间距 $3.5D$, D 为水泥土桩径)与钢梁框架构成。荷载测量采用0.25级压力传感器,位移监测选用4支50 mm量程的电子位移计,按方形布置于桩顶承台(距桩中心0.5 m),数据采集频率设定为1 Hz,确保捕捉荷载-位移曲线的非线性特征。

试验加载控制采用慢速维持荷载法:分级荷载取预估极限承载力的10%(即240 kN)逐级施加,初始荷载取分级荷载的2倍,即480 kN。加载至预估极限承载力的75%后,每级减半至120 kN,以精确判定破坏拐点。每级荷载施加后按第5、15、30、45、60 min测读桩顶沉降量,以后每隔30 min测读一次。沉降相对稳定标准:每一小时内的桩顶沉降量不超过0.1 mm,并连续出现两次(从分级荷载施加

后第30分钟开始,按1.5 h连续3次每30 min的沉降观测值计算)。当桩顶沉降速率达到相对稳定标准时,再施加下一级荷载。当出现以下情况之一时,即可终止加载。

(1)某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的5倍;注:当桩顶沉降能相对稳定且总沉降量小于40 mm时,宜加载至桩顶总沉降量超过40 mm。

(2)某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的2倍,且经24 h尚未达到相对稳定标准。

(3)已达到设计要求的最大加载量。

(4)当荷载-沉降曲线呈缓变型时,可加载至桩顶总沉降量60~80 mm。

2 试验结果及分析

2.1 荷载-位移曲线分析

荷载-位移曲线(Q - s 曲线)可以直观反映桩顶荷载与试桩沉降的动态关系,是评价桩基承载性能的核心依据。根据本试验结果,预应力管桩(GZ)、预应力方桩(FZ)、钻孔灌注桩(GZZ)和劲扩复合桩(FHZ)的单桩竖向抗压静载试验结果如表4~表7所示。各桩型静载试验代表性 Q - s 曲线如图3、图4所示。

从整体曲线形态来看,预应力管桩的 Q - s 曲线呈现出典型的陡降型特征。在加载初期,沉降随荷载增加呈近似线性增长,当荷载达到极限值后,沉降急剧增大,曲线出现明显拐点。这种特性表明,预应力管桩在软弱地层中承载力发挥受限,侧阻力与端阻力协同作用较弱,易因桩身材料强度或桩周土体破坏导致承载力突降。

表 4 预应力管桩单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

Table 4 Summary of vertical compressive static load test results of prestressed pipe pile single pile

桩型	桩号	桩直径/ mm	有效 桩长/m	桩身/桩土 破坏情况	最大加 载量/kN	累计沉 降/mm	抗压极限承载力/kN		
							预估值	检测值	统计值
I 型	GZ-3	400	23.0	桩土破坏	1 650	45.61	1 500	1 575	1 550
	GZ-6	400	23.0	桩土破坏	1 650	47.09	1 500	1 575	
	GZ-19	400	23.0	桩土破坏	1 575	48.43	1 500	1 500	
II 型	GZ-5	500	23.0	桩土破坏	2 300	45.46	2 000	2 200	2 260
	GZ-23	500	23.0	桩土破坏	2 400	51.56	2 000	2 300	
	GZ-24	500	23.0	桩土破坏	2 400	43.95	2 000	2 300	

表 5 预应力方桩单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

Table 5 Summary of vertical compressive static load test results of prestressed square pile single pile

桩型	桩号	桩边宽/ mm	有效 桩长/m	桩身/桩土 破坏情况	最大加 载量/kN	累计沉 降/mm	抗压极限承载力/kN		
							预估值	检测值	统计值
III 型	FZ-1	500	23.0	桩土破坏	2 772	43.65	2 520	2 646	2 640
	FZ-7	500	23.0	桩土破坏	2 646	45.12	2 520	2 520	
	FZ-20	500	23.0	桩土破坏	2 898	47.12	2 520	2 772	
IV 型	FZ-9	500	38.0	桩土破坏	5 472	46.14	4 560	5 244	5 010
	FZ-12	500	38.0	桩土破坏	5 016	43.73	4 560	4 788	
	FZ-22	500	38.0	桩土破坏	5 244	42.61	4 560	5 016	

表 6 钻孔灌注桩单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

Table 6 Summary table of vertical compressive static load test results of single pile of bored pile

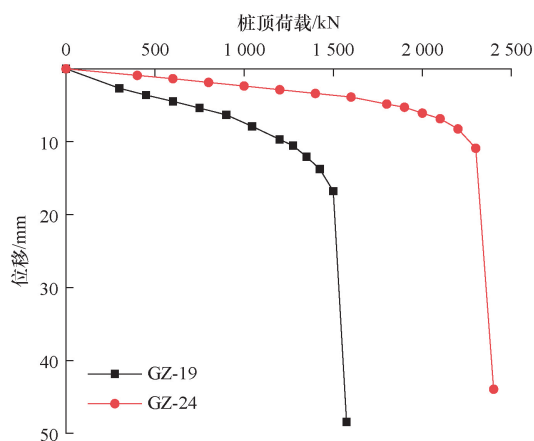
桩型	桩号	桩直径/ mm	有效 桩长/m	桩身/桩土 破坏情况	最大加 载量/kN	累计沉 降/mm	抗压极限承载力/kN		
							预估值	检测值	统计值
V 型	GZZ-1	600	25.0	桩土破坏	2 400	50.02	2 000	2 300	2 060
	GZZ-4	600	25.0	桩土破坏	1 900	47.74	2 000	1 800	
	GZZ-6	600	25.0	桩土破坏	2 200	41.78	2 000	2 100	
VI 型	GZZ-9	600	41.0	桩土破坏	3 705	43.63	3 900	3 510	3 640
	GZZ-10	600	41.0	桩土破坏	3 900	45.19	3 900	3 705	
	GZZ-11	600	41.0	桩土破坏	3 900	42.48	3 900	3 705	

表 7 劲扩复合桩单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

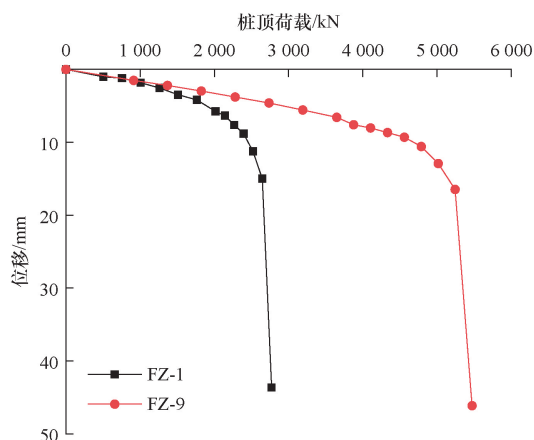
Table 7 Summary of vertical compressive static load test results of single pile of the expanded stiffened deep-cement-mixing piles

桩型	桩号	桩直径 d 、 边宽 b /mm	有效 桩长/m	最大加 载量/kN	累计沉 降/mm	抗压极限承载力/kN		
						预估值	检测值	统计值
VII 型	FHZ-4	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $d400$	9.0	2 880	43.10	2 400	2 760	2 760
	FHZ-5	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $d400$	9.0	2 880	42.18	2 400	2 760	
	FHZ-6	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $d400$	9.0	2 880	44.83	2 400	2 760	
VIII 型	FHZ-7	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $b400$	9.0	2 880	43.10	2 400	2 760	2 680
	FHZ-8	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $b400$	9.0	2 640	41.27	2 400	2 520	
	FHZ-9	$D1\ 000/D_b\ 1\ 200$ $b400$	9.0	2 880	44.02	2 400	2 760	

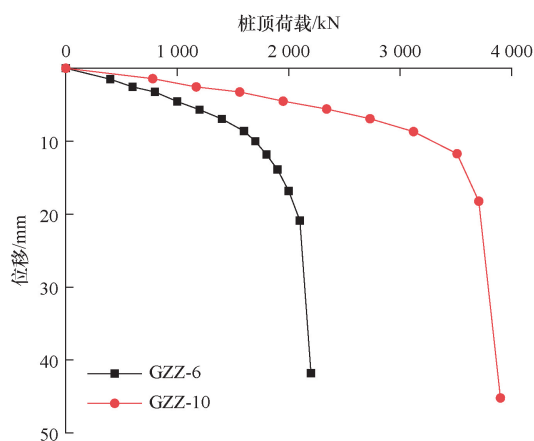
注: $D1\ 000$ 表示水泥土桩桩身直径 1 000 mm; $D_b\ 1\ 200$ 表示水泥土桩扩底直径 1 200 mm; $d400$ 表示芯桩直径 400 mm; $b400$ 表示芯桩边宽 400 mm。



(a) 预应力管桩



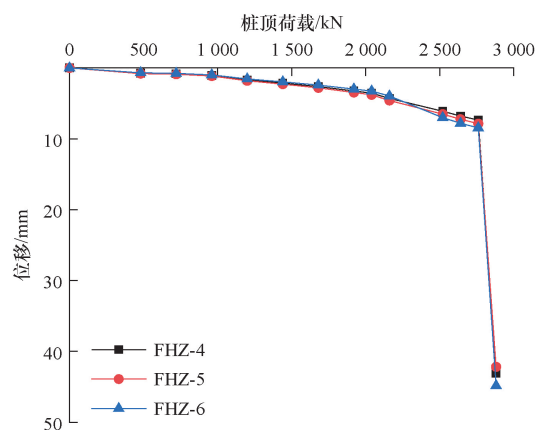
(b) 预应力方桩



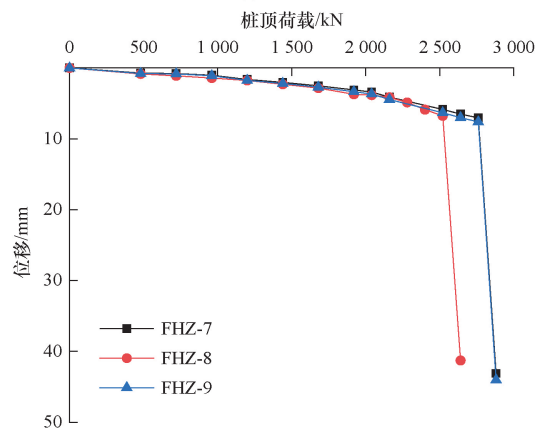
(c) 钻孔灌注桩

图3 不同类型试桩代表性 $Q-s$ 曲线Fig. 3 Representative $Q-s$ curves of different types of test piles

预应力方桩的 $Q-s$ 曲线曲率相比于预应力管桩较缓,在相同荷载等级下,其沉降量略小于预应力管桩,这得益于方桩较大的截面惯性矩带来的抗弯刚度提升。然而,曲线中后段仍呈现明显非线性特征,说明在软弱地层中,方桩的侧阻力发挥同样受限,且端阻力占比相对较高,导致沉降发展仍较为显著。



(a) VII型试桩



(b) VIII型试桩

图4 劲扩复合桩 $Q-s$ 曲线Fig. 4 $Q-s$ curves of the expanded stiffened deep-cement-mixing piles

钻孔灌注桩的 $Q-s$ 曲线形态介于管桩与方桩之间。作为非挤土桩,其承载力主要依赖桩侧摩阻力与端阻力的逐步发挥。曲线初期斜率较小,表明在低荷载阶段桩土相互作用充分;随着荷载增加,曲线斜率逐渐增大,反映出桩端阻力开始主导变形。但受限于软弱地层低强度特性,其极限承载力提升空间有限,且后期沉降发展较快。

通过对四类桩型的 $Q-s$ 曲线系统分析,可清晰揭示劲扩复合桩在软弱地层中的显著优势。试验结果表明,劲扩复合桩的 $Q-s$ 曲线呈现独特的变化规律:曲线初期斜率明显小于其他桩型,具有缓沉特点,并且在加载全过程中沉降发展较为稳定,即便在极限承载力附近,其沉降速率仍显著低于其他桩型,这表明在相同沉降量下劲扩复合桩可承担更大荷载^[14],这一特性源于劲扩复合桩独特的构造设计:通过桩端扩大头有效提升了桩端承载力。

进一步分析曲线参数,在初始加载阶段(0 ~ 800 kN)FHZ-4 与 FHZ-8 的沉降量仅为 0.76 mm 与 0.84 mm,显著低于同荷载级别的 GZ-19 的 5 mm 和

GZZ-6 的 3.18 mm。在极限承载力发展阶段,劲扩复合桩的缓变型特征更为显著。FHZ-4 加载至极限承载力 2 760 kN 时累计沉降 7.35 mm,最后三级荷载仅产生 1.2 mm 沉降增量,曲线未出现其他三种桩型在极限承载力附近典型的陡降特征,例如 GZZ-6 在极限承载力附近沉降量骤增约 7 mm。这种渐进式变形模式验证了芯桩-水泥土复合结构的协同工作机制;采用大直径固结体包裹芯桩,充分利用了水泥土料和混凝土芯桩的协同作用,提高了桩侧摩阻力和端阻力,避免了常规桩型因端阻力集中导致的突发性刺入破坏。

2.2 单桩极限承载力与沉降比较分析

将各类试桩的抗压极限承载力统计值与预估值汇总并进行比较分析,结果如表 8 所示。其中分别按《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008^[19]和《劲扩桩技术规程》T/CCES 41—2023^[20]预估常规混凝土桩和劲扩复合桩两类桩的单桩极限承载力。各类试桩的在抗压极限承载力作用下的沉降汇总如表 9 所示。

通过对表 8 的试验数据进行分析得出,各类桩型在极限承载力和沉降特性上存在显著差异。在单桩极限承载力方面,劲扩复合桩以 9 m 有效桩长实现 2 760 kN 的实测极限承载力,较设计预估值 2 400 kN 超出 15%,其实测值与预估值的比值也高于常规桩型,这也验证了周威等^[7]的试验结果。此外,该承载力值已超越其两倍多桩长的 V 形灌注桩与Ⅲ型预制方桩,凸显其“短桩高承”的核心特征,突破了传统桩型“以长度换承载力”的技术瓶颈。相比之下,在桩周面积和桩长相当时,PHC 圆管桩由于圆形截面对周围土体的挤压效应更好,其桩侧摩阻发挥更充分,桩顶沉降显著小于方形桩^[21]。已有研究还指出,在相同加载条件下,圆形桩的承载力增大速率和幅度最大,管桩次之,方桩最小^[22]。

表 8 各桩型极限承载力汇总与分析

Table 8 Summary and analysis of ultimate bearing capacity of each pile type

桩类别	桩型	桩直径 d 、 边宽 b /mm	有效桩长/m	抗压极限承载力		
				预估值/kN	实测统计值/kN	实测值/预估值
管桩	I 型	$d400$	23.0	1 500	1 550	1.03
	II 型	$d500$	23.0	2 000	2 260	1.13
方桩	III 型	$b500$	23.0	2 520	2 640	1.05
	IV 型	$b500$	38.0	4 560	5 010	1.10
灌注桩	V 型	$d600$	25.0	2 000	2 060	1.03
	VI 型	$d600$	41.0	3 900	3 640	0.93
劲扩桩	Ⅶ型	$D1\ 000/D_b1\ 200$	9.0	2 400	2 760	1.15
		$d400$				
	Ⅷ型	$D1\ 000/D_b1\ 200$	9.0	2 400	2 680	1.12
		$b400$				

注: $D1\ 000$ 表示水泥土桩桩身直径 1 000 mm; $D_b1\ 200$ 表示水泥土桩扩底直径 1 200 mm; $d400$ 表示芯桩直径 400 mm; $b400$ 表示芯桩边宽 400 mm。

表 9 各桩型极限承载力作用下沉降汇总与分析

Table 9 Summary and analysis of settlement under ultimate bearing capacity of each pile type

桩类别	桩型	桩直径 d 、 边宽 b /mm	有效 桩长/m	沉降值/mm	
				平均值	平均值/9.80
管桩	I 型	$d400$	23.0	11.97	1.22
	II 型	$d500$	23.0	10.45	1.07
方桩	III 型	$b500$	23.0	16.58	1.69
	IV 型	$b500$	38.0	—	—
灌注桩	V 型	$d600$	25.0	20.44	2.08
	VI 型	$d600$	41.0	—	—
劲扩桩	Ⅶ型	$D1\ 000/D_b1\ 200$	9.0	9.80	1.00
		$d400$			
	Ⅷ型	$D1\ 000/D_b1\ 200$	9.0	8.26	0.84
		$b400$			

由表 9 可见,沉降值方面,劲扩复合桩等大直径扩底桩型在承载力大幅提升的同时,往往伴随更小的桩顶沉降^[23],其在极限荷载作用下的最小平均沉降仅 8.26 mm,较沉降值最小桩型(Ⅱ型:10.45 mm)降低约 21%;较沉降值最大桩型(V 型:20.44 mm)降低约 60%。由此可见,劲扩复合桩在实现极限承载力高出常规桩型的同时,沉降量反而降低 21%~60%,这种“高强低沉”的特性说明水泥土扩底改良了桩端持力层的力学性能,如压缩模量、剪切强度等,同时也调整了桩端附加应力的分布,大直径桩身在竖向加载时对周围土体产生强烈的摩擦效应,充分激发了桩侧摩阻力。此外,由于水泥土桩施工过程中高压喷射气流的作用,可消除或减轻土层液化的影响,对桩周软弱土体进行扰动和置换,可显著提高桩周土体的密实度和强度,这种施工扰动效应也有利于提升承载性能。

结合表 4~表 7 以及表 8~表 9 可看出,劲扩复合桩沉降性能的稳定性优于常规桩型。其Ⅶ型三根试桩极限荷载下最小沉降极差仅 2.65 mm,低于

其他桩型,其中钻孔灌注桩V形三根试桩的极差高达8.24 mm。这种差异反映出劲扩复合桩工艺在软弱土地地区的强稳定性,而钻孔灌注桩在砂层中易受局部塌孔影响导致桩身几何缺陷。因此,从设计技术层面上用劲扩复合桩代替常规混凝土桩是可行的,设计时应控制桩端置于设计要求的持力层,同时外包水泥土层应延伸覆盖主要软弱土层,以通过“桩-水泥土-桩周土”相互约束进一步改善其承载性能。

3 劲扩复合桩单桩极限承载力预测

劲扩复合桩在竖向抗压静载试验中呈现的 $Q-s$ 曲线可直观反映桩体在破坏过程中的沉降特性与承载机制。然而当前工程实践中,受限于试验条件与安全风险,大量试桩未加载至完全破坏状态,其承载性能未能得到准确评估,为此,本章基于静载试验数据,引入预测模型对劲扩复合桩的荷载-沉降关系以及极限承载力进行预测,以期确定适用于该桩型的极限承载力预测方法,为设计优化提供理论支撑。

3.1 单桩极限承载力预测模型

常见的单桩竖向抗压承载力预测模型有指数函数模型^[24]、指-幂函数模型^[25]、双曲线函数模型^[26]等,本试验将采用以上三种预测模型对劲扩复合桩的单桩极限承载力和荷载-位移曲线进行预测。

(1) 指数函数模型表达式为

$$Q = Q_{\max} (1 - e^{-\beta s}) \quad (1)$$

式(1)中: Q 和 $Q_{\max}$ 分别为单桩所受承载力及实测极限承载力, kN; s 为单桩在某一时刻的位移量, mm; β 为沉降衰减因子, mm^{-1} 。

(2) 指-幂函数模型表达式为

$$Q = Q_{\max} \left[1 - \frac{1+k}{e^{as} + k} (bs + 1)^c \right] \quad (2)$$

式(2)中: a 、 b 、 c 、 k 均为拟合模型参数,其中 $c \geq 1$, 这里取 $c = 1$ 。

(3) 双曲线函数模型

$$Q = \frac{Q_{\max} s}{\alpha + s} \quad (3)$$

式(4)中: α 为位移调整系数。

3.2 预测结果分析

基于劲扩复合桩竖向抗压静载试验的实测值,进行以上三种函数模型的拟合对比,通过拟合曲线数据与实测值的对比分析,得到以上三种函数模型的预测精度,并分析上述函数模型在本试验条件下的适用性。在拟合过程中,将单桩极限承载力实测值作为极限承载力,得出三种函数模型预测值与实测

值的对比曲线如图5所示,各函数模型的计算参数如表10所示,各函数模型的极限承载力预测精度如表11所示。

根据图5和表11所示,三种模型曲线与实测数据均表现出较高的吻合度,尤其是在中低荷载阶段,拟合曲线与实测曲线高度吻合,均能准确模拟劲扩复合桩沉降缓慢、刚度稳定的变形特性,但在荷载接近极限状态阶段,三种模型的精度差异开始显现,预测精度受曲线形态特征与桩型刚度特性影响明显。

从整体误差表现看,指-幂函数模型的拟合精度最高,六根试桩的相对误差稳定在1.2%以内,并且在荷载接近破坏阶段时仍能保持与实测曲线趋势一致。例如,有效桩长9 m的FHZ-4~FHZ-6实测极限承载力均为2760 kN,指-幂函数模型预测值与实测值几乎重合,末期沉降阶段未出现明显高估或低估。在FHZ-8这根承载力略低的桩上,尽管实测值为2520 kN,但预测值与实测值差距不足1.5%,表明其更适应劲扩复合桩的荷载传递机制,表现出良好的稳定性与适应性。

指数函数模型的预测精度次于指-幂函数,其曲线在中低荷载段拟合效果良好,与指-幂函数相近,但在荷载接近极限承载力时普遍略低于实测值,平均低估幅度为1.5%~2.0%。这主要与指数函数末期渐近趋势有关,导致曲线在承载力上升阶段略显保守,对桩端阻力发挥的预测略有不足。

双曲线函数模型的整体拟合效果相对不如前两者,尤其在破坏阶段表现出陡降趋势,这与劲扩复合桩实测曲线缓沉的特征相矛盾。该模型在荷载初期与中期阶段往往高估承载力,表现为初始刚度偏大;而在极限承载力阶段,曲线斜率迅速增大并出现陡降趋势。这种不稳定性与模型在接近破坏时的简化假设有关,当桩端阻力释放与桩侧摩阻力衰减的同步性未被准确描述时,预测结果容易出现偏差。

从曲线形态分析,指-幂函数模型能兼顾初期刚度与末期破坏特征的平衡,既不会高估初期承载力,也不会提前进入破坏阶段,因而全程拟合精度最高;指数函数模型在初期与中期阶段表现优良,但末期略显保守;双曲线模型虽能体现非线性特征,但初期和末期均存在偏差。

综合上述分析,在软弱地基条件下,劲扩复合桩荷载-位移曲线的缓沉特性要求预测模型能够准确刻画从缓沉过渡到破坏阶段的全过程。指-幂函数模型在本试验条件下表现最优,参数稳定、拟合精度高,适用于不同桩长与承载力水平的预测,推荐

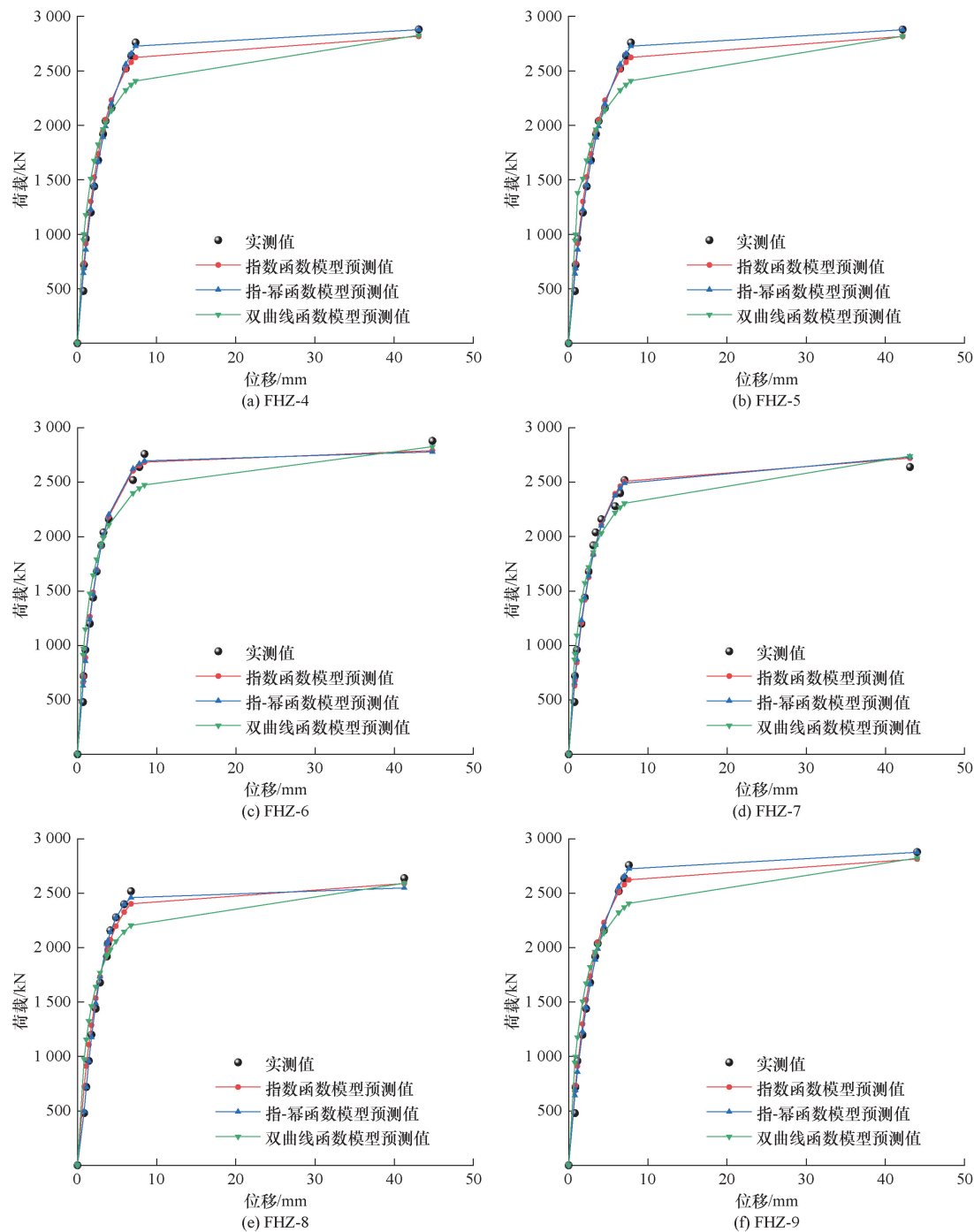


图5 劲扩复合桩 $Q-s$ 曲线与预测模型对比
Fig. 5 Comparison of $Q-s$ curve and prediction model of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile

表10 各函数模型计算参数
Table 10 Calculation parameters of each function model

桩号	指数函数模型	指-幂函数模型			双曲线函数模型
	β/mm^{-1}	a	b	k	α
FHZ-4	0.364 50	0.087 83	-0.130 60	-0.599 97	1.603 15
FHZ-5	0.341 62	0.089 06	-0.121 99	-0.565 60	1.709 50
FHZ-6	0.386 19	0.463 86	0.034 19	0.180 80	1.531 46
FHZ-7	0.361 77	0.309 41	-0.009 75	-0.177 09	1.646 69
FHZ-8	0.388 98	0.754 62	14.145 48	-0.940 96	1.474 92
FHZ-9	0.353 50	0.085 51	-0.126 06	-0.601 27	1.652 55

表 11 各函数模型极限承载力预测精度

Table 11 Prediction accuracy of ultimate bearing capacity of each function model

桩号	预测模型	相关系数	抗压极限承载力/kN			相对误差/%
			预估值	检测值	预测值	
FHZ-4	指数函数模型	0.990 81	2 400	2 760	2 816.3	2.04
	指-幂函数模型	0.995 62			2 760.2	0.01
	双曲线函数模型	0.928 89			2 931.6	6.22
FHZ-5	指数函数模型	0.990 93	2 400	2 760	2 816.3	2.04
	指-幂函数模型	0.995 73			2 760.2	0.01
	双曲线函数模型	0.928 91			2 932.6	6.25
FHZ-6	指数函数模型	0.993 67	2 400	2 760	2 791.0	1.12
	指-幂函数模型	0.993 85			2 779.2	0.70
	双曲线函数模型	0.947 20			2 923.3	5.92
FHZ-7	指数函数模型	0.990 08	2 400	2 760	2 721.5	1.39
	指-幂函数模型	0.990 15			2 732.4	1.00
	双曲线函数模型	0.956 00			2 845.2	3.09
FHZ-8	指数函数模型	0.979 89	2 400	2 520	2 590.8	2.80
	指-幂函数模型	0.996 41			2 550.2	1.20
	双曲线函数模型	0.893 34			2 686.5	6.61
FHZ-9	指数函数模型	0.990 96	2 400	2 760	2 815.7	2.02
	指-幂函数模型	0.995 62			2 760.2	0.01
	双曲线函数模型	0.929 49			2 931.4	6.21

作为首选模型。指数函数模型在中低荷载段精度较高,可用于工程设计初期的快速估算,但在末期承载力评估时应结合修正系数校正低估趋势。双曲线模型虽然在部分阶段能够体现曲线非线性,但在极限承载力预测上不稳定,尤其在高承载力短桩条件下易出现高估初期刚度、低估末期承载力的现象,因此不建议将双曲线函数模型用于劲扩复合桩的极限承载力预测。

4 结论

(1) 劲扩复合桩表现出缓变型荷载-沉降特性,其在极限状态下的沉降量显著小于常规桩型,降幅达 21% ~60%,同一桩型在不同试桩中的沉降极差最大仅 2.65 mm,说明该桩型对软弱地层不均匀性的适应能力较强,整体工程可靠性高,变形控制性能优越。

(2) 在软弱土地层中,劲扩复合桩展现出较高的单桩极限承载力,短桩可实现高承载力。以 9 m 的有效桩长,其极限承载力优于多数长桩传统桩型,突破了依靠桩长获取承载力的传统设计思路,显示出显著的技术经济性。

(3) 在极限承载力预测模型中,指-幂函数模型表现出最优的拟合效果,其相对误差远低于指数模型和双曲线模型,适用于未加载至破坏状态下的劲扩复合桩承载力可靠预测,为该桩型的理论建模与设计计算提供了有效工具。

参 考 文 献

[1] 孙彤彤,郭玉良,陈棣,等. MC 劲性复合桩在软土地区合理化

设计的试验研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(1): 101-108, 117.
Sun Tongtong, Guo Yuliang, Chen Di, et al. Experimental study on rationalization design of MC strength composite piles in soft soil area[J]. Building Science, 2024, 40(1): 101-108, 117.
[2] 刘松玉,周建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.
Liu Songyu, Zhou Jian, Zhang Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.
[3] 张乾青. 软土地基桩基受力性状和沉降特性试验与理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Zhang Qianqing. Test and theoretical study on bearing capacity behavior and settlement of pile in soft soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
[4] 董平,陈征宙,秦然. 砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 204-207.
Dong Ping, Chen Zhengzhou, Qin Ran. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 204-207.
[5] 高文生,梅国雄,周同和,等. 基础工程技术创新与发展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 97-121.
Gao Wensheng, Mei Guoxiong, Zhou Tonghe, et al. Innovation and development of foundation technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 97-121.
[6] 包华,刘金波,朱建新,等. 劲性扩体复合桩设计及工程应用[C]//桩基工程技术进展 2021. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 302-307.
Bao Hua, Liu Jinbo, Zhu Jianxin, et al. Design method and engineering application on expanded stiffened deep-cement-mixing pile [C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023: 302-307.
[7] 周威,包华,彭杰,等. 劲扩复合桩竖向抗压承载特性对比试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3696-3701.

- Zhou Wei, Bao Hua, Peng Jie, et al. Comparative experiment on the vertical compressive bearing characteristics of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3696-3701.
- [8] 李立业. 劲性复合桩承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Li Liye. Study on the bearing capacity of stiffened DCM pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [9] 邓亚光, 郑刚, 陈昌富, 等. 劲性复合桩技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 262-264.
Deng Yaguang, Zheng Gang, Chen Changfu, et al. Review of SCM composite column pile[J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 262-264.
- [10] 李立业, 刘松玉, 章定文, 等. 劲性复合桩承载力计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 43-47.
Li Liye, Liu Songyu, Zhang Dingwen, et al. Bearing capacity calculations of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 43-47.
- [11] 朱锐, 周峰, 陈廷柱, 等. 劲性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3577-3586.
Zhu Rui, Zhou Feng, Chen Tingzhu, et al. Soil squeezing effect and bearing mechanism of strength composite pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3577-3586.
- [12] 文磊, 刘钟, 马晓华, 等. 粉土地基中劲性复合桩抗压承载特性与荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 511-524.
Wen Lei, Liu Zhong, Ma Xiaohua, et al. Compressive bearing capacity and load transfer mechanism of stiffened deep cement mixing pile installed in silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 511-524.
- [13] 李俊才, 邓亚光, 宋桂华, 等. 素混凝土劲性水泥土复合桩承载机理分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 181-185.
Li Juncai, Deng Yaguang, Song Guihua, et al. Analysis of load-bearing mechanism of composite foundation of plain concrete reinforced cement-soil mixing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 181-185.
- [14] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 998-1001.
Qian Yujun, Xu Zhiwei, Deng Yaguang, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 998-1001.
- [15] Zhou M, Li Z, Han Y, et al. Experimental study on the vertical bearing capacity of stiffened deep cement mixing piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(5): 04022043.
- [16] 周友飞, 刘成龙, 吕海亮, 等. 复杂软弱土-砂土地基中劲性复合桩承载性能数值分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(19): 8187-8197.
Zhou Youfei, Liu Chenglong, Lü Hailiang, et al. Numerical analysis on bearing capacity of rigid composite pile in complex soft soil-sandy soil foundations[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8187-8197.
- [17] Wonglert A, Jongpradist P. Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 93-104.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [20] 江苏劲桩岩土科技有限公司. 劲扩桩技术规程: T/CCES 41—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
Jiangsu Jinzhuang Ground Technical Technology Co., Ltd., Technical specification for stiffened rigid pile with soil-cement column: T/CCES 41—2023[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023.
- [21] 陈焰明, 马燕燕, 徐艳萍, 等. 软土地区防洪堤工程中预制方桩和PHC管桩的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 986-989.
Chen Yanming, Ma Yanyan, Xu Yanping, et al. Comparative analysis of precast square piles and PHC piles for flood protection work in soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 986-989.
- [22] 陈东升, 周标和, 吴春燕, 等. 沉桩方式及桩型对湛江组结构性黏土中单桩承载力时效性的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12071-12077.
Chen Dongsheng, Zhou Biaohe, Wu Chunyan, et al. Influence of pile sinking mode and pile type on bearing capacity and timeliness of single pile in structural clay of Zhanjiang formation[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12071-12077.
- [23] 张琦, 李坤轩, 王俊林. 大直径扩底桩竖向承载力影响因素分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(5): 22-24, 29.
Zhang Qi, Li Kunxuan, Wang Junlin. Factors for vertical bearing capacity of large-diameter belled piles[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(5): 22-24, 29.
- [24] 赵春风, 李尚飞, 鲁嘉, 等. 完整指数函数拟合单桩荷载-沉降曲线的分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 486-492.
Zhao Chunfeng, Li Shangfei, Lu Jia, et al. Analysis of fitting loading-settlement curves of single piles by integrated exponential function[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(4): 486-492.
- [25] 孙晓云, 张涛, 王明明, 等. 基于改进指-幂混合函数模型的锚杆承载力预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1641-1649.
Sun Xiaoyun, Zhang Tao, Wang Mingming, et al. A revised model for predicting the bearing capacity of rock bolts based on mixed exponential and power function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1641-1649.
- [26] 胡焕校, 刘静, 祝世平. 全螺旋灌注桩单桩极限承载力的预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007(6): 1239-1244.
Hu Huanxiao, Liu Jing, Zhu Shiping. Prediction of single ultimate bearing capacity of screwed casting pile[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007(6): 1239-1244.