

# 卵石层地基上开口 PHC 管桩的应用分析

丁小伟<sup>1</sup>, 高军程<sup>2</sup>, 李胜利<sup>1</sup>

(1. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054; 2. 万科企业股份有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 陕西石川河 I 级阶地, 地表以下约 15 m 深存在厚度 10~13 m、工程力学性质较好的卵石层, 如何有效利用该层良好的承载潜力是设计面临的问题。在某项目的基础设计中, 参考已有的试验研究成果及工程经验, 分析开口 PHC 管桩在卵石层中的端阻力承载性状, 通过原位静载试验验证, 在相应的沉桩条件下, 中短开口管桩沉入卵石层中可形成土塞效应, 当桩端沉降量达到桩径的 4.9%~6.9%时, 卵石层的实际极限端阻力较规范值提高 1.49~1.93 倍, 管桩的竖向抗压承载力提高 27%~46%。建筑物封顶后的沉降观测结果验证管桩方案可行, 避免了素土桩作业造成的环境污染, 节省了造价和工期, 具有良好的社会效益和经济效益。

**关键词:** 开口管桩; 土塞效应; 卵石层端阻力; 静载试验; 沉降观测

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0481-07

## Application analysis of open-ended PHC pipe pile on pebble layer foundation

DING Xiaowei<sup>1</sup>, GAO Juncheng<sup>2</sup>, LI Shengli<sup>1</sup>

(1. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. China Vanke Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** Grade I terrace of the Shichuan River in Shaanxi Province has a pebble layer with a thickness of 10-13 meters and good engineering mechanical properties at a depth of about 15 meters below the surface. Effectively utilizing the good bearing potential of this layer is a design challenge. In the foundation design of a specific project, referring to existing experimental research and engineering experience, the tip resistance bearing behaviors of open-ended PHC pipe piles in the pebble layer were analyzed. Through in-situ static loading tests, it was verified that under corresponding pile driving conditions, the settlement of medium and short open-ended pipe piles in the pebble layer can form a soil plug effect. When the pile end settlement reaches 4.9%-6.9% of the pile diameter, the actual ultimate tip resistance of the pebble layer increases by 1.49-1.93 times compared to the standard value, the vertical bearing capacity of the pipe pile increases by 27%-46%. The settlement observation results after completion of the building construction verify that the pipe pile scheme is feasible, avoiding environmental pollution caused by the soil pile foundation scheme, saving cost and construction period, and having good social and economic benefits.

**Key words:** open-ended pipe pile; soil plug effect; tip resistance in pebble layer; static loading test; settlement observation

## 0 引言

陕西关中地区黄土层厚度较大, 地基承载力较低, 20 层以内的中高层建筑, 因其荷重相对较小, 地基处理可选择钢筋混凝土灌注桩、PHC 管桩、CFG 桩或水泥土挤密桩复合地基等多种方式。在富平县石川河沿岸, 地表十几米厚的湿陷性黄土下面, 存在厚度较大、分布连续均匀、工程性能良好

的卵石层, 但除 PHC 管桩外, 上述其他方式均无法充分利用卵石层的承载潜力, 浪费资源。

文献<sup>[1-2]</sup>对砾卵石层上 8 根直径 400 mm、长度 16~21 m 的管桩进行破坏荷载试验, 得出当桩端沉降量为桩直径的 6%~15.36%时, 桩端卵石层的极限端阻力能充分发挥, 其值可达到 20 000~24 160 kPa, 表明砾卵石层的实际端阻力比规范<sup>[3]</sup>值有大幅提高。

资料显示<sup>[4]</sup>, 开口管桩沉入的过程中, 桩端土涌

入管内形成土塞，桩端周围土体在不断的挤密作用下产生较大的水平应力、竖向应力和剪应力，在桩底端周围形成力学性状复杂、强度较高的应力集中核心区，使桩端阻力大幅提高。DE NICOLA 等<sup>[5]</sup>对砂土中管桩的研究结果表明，越密实的土质沿桩端内壁的竖向应力越高，形成的有效土塞高度越小，较容易产生闭塞作用。内壁侧摩阻力 $Q_0$ 与土塞自重 $G$ 之和并不小于桩端土塞端阻力 $Q_p$ 时，桩继续下沉而土塞与桩内壁不再相对滑移，桩端处于完全闭塞状态，土体被阻止进入管内，开口桩呈现类似闭口桩的特性<sup>[6-7]</sup>，此时管内向下的合力与向上的力相等（见图1）。因此，桩的竖向承载力由外壁侧摩阻力 $Q_1$ 、桩壁端阻力 $Q_2$ 及土塞端阻力 $Q_p$ 组成<sup>[8-9]</sup>（见图2），规范<sup>[3]</sup>中公式5.3.8-1隐含了桩壁和土塞取相同的极限端阻力标准值，其中对土塞端阻力折减后使用，即将 $Q_2+Q_p$ 之和视为桩端阻力。

因此，推测在沉桩时，利用控制桩端刺入卵石层的沉降量达到两个作用：一是保证桩端有效土塞高度，使桩端呈闭塞状态；二是激发出卵石层的端阻潜力。桩就可能获得较高的承载力，达到利用卵石层的效果，本工程静载试验结果与上述分析基本吻合。

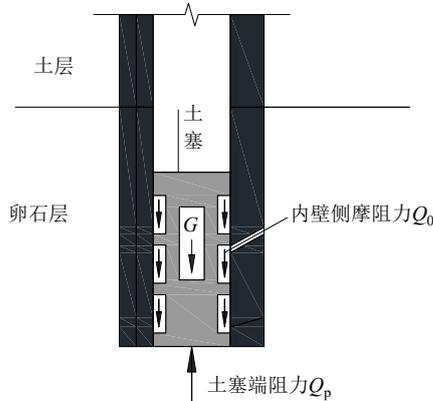


图1 土塞示意图

Fig. 1 Illustration of soil plug

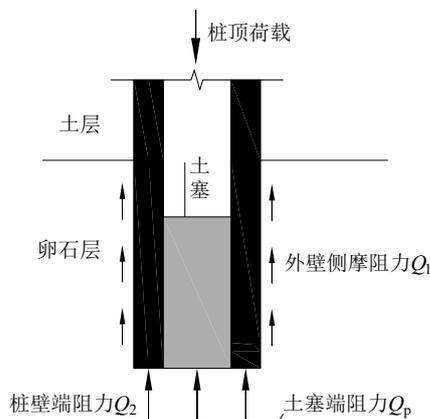


图2 桩端阻力示意图

Fig. 2 Illustration of pile tip resistance

## 1 工程和地质概况

本工程用地面积16万 $m^2$ ，总建筑面积38万 $m^2$ ，包括18栋18层、20栋7~10层的住宅楼，高度为21.3~52.8 m，1层地下室与大底盘车库连通，住宅楼为剪力墙结构，平板式筏基埋深为-6.2 m，抗震设防烈度为7度，场地类别为II类，基础设计等级为乙级。

场地位于石川河I级阶地，勘探深度35 m内未见地下水，无不良地质作用。典型地质剖面图见图3，各土层物理力学参数见表1。其中④、⑤卵石层稳定，分布连续，主要粒径为20~60 mm，中密~密实，重型动探击数 $N_{63.5}$ 分别为15.3、22.2。

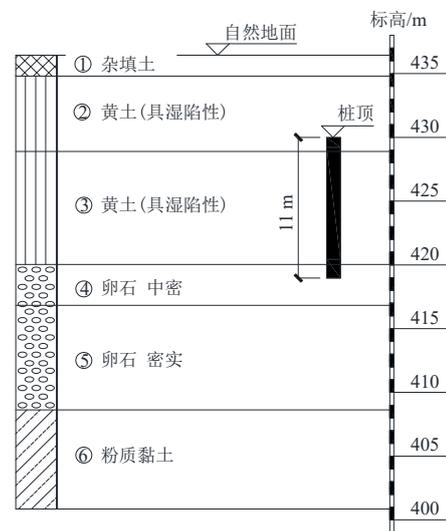


图3 典型地质剖面图

Fig. 3 Typical geological profile

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil layers

土层	厚度/ m	$E_{si}/$ MPa	$q_{sik}/kPa$		$q_{pk}/$ kPa	
			自重	非自重		
②黄土	5.7	11.5	负摩阻力 40	饱和状态	32	—
③黄土	8.9	12.3		饱和状态	38	—
④卵石	3.2	30.0	250		11 000	
⑤卵石	8.3	45.0	300		11 000	
⑥粉质黏土	13.7	11.3	—		—	

注： $E_{si}$ 为压缩模量； $q_{sik}$ 为极限侧阻力标准值； $q_{pk}$ 为极限端阻力标准值。

## 2 地基方案分析确定

### 2.1 原地基方案

18层楼采用素土挤密桩消除湿陷性，再施工直

径 400 mm、长 16.5 m 的 CFG 桩,正方形满堂布置,间距为 1.8 m; 7~10 层楼采用直径 550 mm、长 10 m 的水泥土挤密桩,等边三角形满堂布置,间距为 0.9 m; 地库采用直径 550 mm、长 7 m 的素土挤密桩,等边三角形满堂布置,间距为 0.9 m。上述方案中以地基土坚硬不利于沉桩为由,未考虑 PHC 管桩,且含有大量土方作业,污染环境。

2.2 PHC 管桩方案

本工程基底以下约 10 m 深为④卵石层,是良好的预制桩持力层。文献<sup>[1-2]</sup> 研究显示,砾卵石层中长度约 10 m 的预制桩,其端阻力占桩承载力的 70% 以上,所以充分发挥端阻潜力是关键因素。暂定本场地卵石层的实际极限端阻力标准值  $q_p = 20\ 000\ \text{kPa}$ ,参考工程应用经验<sup>[10-11]</sup>,选用可利用土塞效应的 PHC 开口管桩,并通过静载试验获得实际极限端阻力和相应的沉桩参数,用于工程桩施工。由于黄土厚度不大、侧阻力占比较小,选择不处理湿陷性。工程桩选用 11 m 长的 PHC (500) AB-125 和 PHC (400) AB-95 管桩,经过初步估算,单桩竖向极限承载力标准值分别可取 4 800 kN、3 300 kN,对应的特征值为 2 400 kN、1 650 kN。扣除湿陷可能引起的承载力损失量后用于桩基方案:

(1) 18 层楼: 基底荷载标准值合计 153 400 kN,筏板基础,采用 11 m 长的 PHC (500) AB-125 管桩,剪力墙下布桩,共 120 根,见图 4。

(2) 7~10 层楼: 基底荷载标准值合计 91 500 kN,筏板基础,采用 11 m 长的 PHC (400) AB-95

管桩,共 106 根,见图 5。

(3) 地库: 框架柱底轴力在 1 900~2 400 kN,采用 11 m 长的 PHC (400) AB-95 管桩,外墙基础下单排布桩,柱基础下布双桩,设双向拉梁,采用 0.25 m 厚整片防水板将承台基础连成整体。

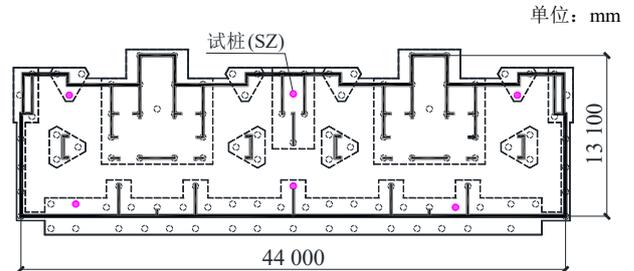


图 4 18 层楼 PHC 管桩布置图

Fig. 4 PHC pipe piles layout of 18 storeys building

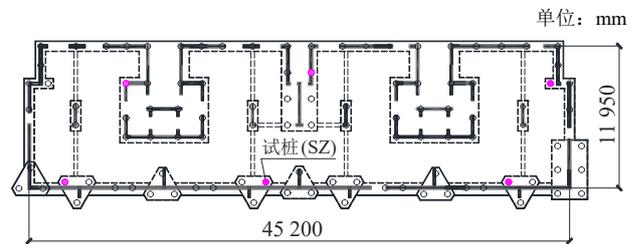


图 5 7~10 层楼 PHC 管桩布置图

Fig. 5 PHC pipe piles layout of 7-10 storeys building

将全部住宅楼和地库的 PHC 管桩方案与原方案指标进行对比(见表 2), PHC 管桩节约造价 1 860 万元,节约工期 780 d,本方案通过了专家论证会评审,并提出进行现场原位静载荷试验验证,选择安全可靠的施工工艺和参数。

表 2 方案指标对比表

Table 2 Comparison of scheme indicators

类别	建筑面积/万 m <sup>2</sup>	方案	造价/万元	工期/d	PHC 管桩节约量	
					造价/万元	工期/d
18 层楼	21.1	CFG 桩	2 208	620	—	—
		PHC 管桩	1 583	240	625	380
7~10 层楼	10.6	水泥土桩	1 829	542	—	—
		PHC 管桩	794	230	1 035	312
地库	4.1	素土桩	562	127	—	—
		PHC 管桩	362	39	200	88
合计	35.8	—	—	—	1 860	780

3 静载试验结果分析

开挖至基底标高后,相应场地各布置 6 组 11 m 长的 PHC (500) AB-125 (SZ1~SZ6) 和 PHC (400)

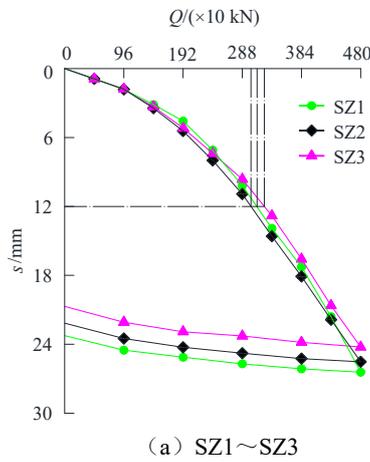
AB-95 (SZ7~SZ12) 开口管桩。前期采用锤击沉桩法,分别选用 50 号和 62 号柴油锤,遵循重锤低击原则,以贯入度控制为主、桩端标高为辅,将最后三阵(10 击/阵)的每阵贯入度 20~40 mm 作为收锤主控标准,结合地质剖面图及现场实测,判断桩已

进入卵石层约  $1.0D \sim 1.5D$  ( $D$  为桩外径)，土塞相对静止，桩端已处于闭塞状态，施工现场见图 6。

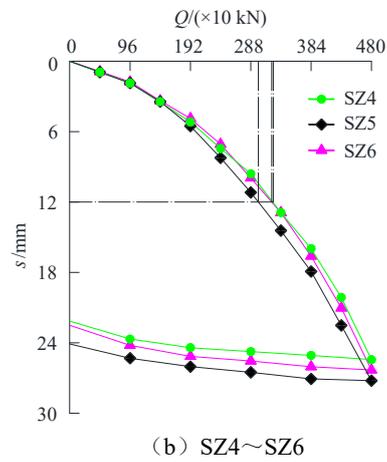


图 6 施工现场

Fig. 6 Construction site



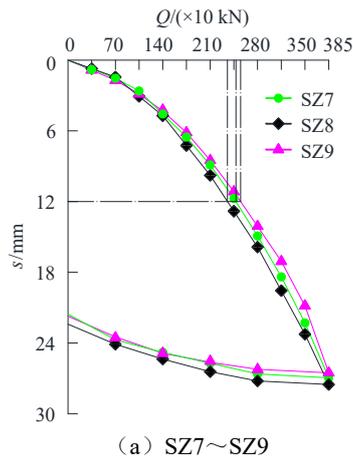
(a) SZ1~SZ3



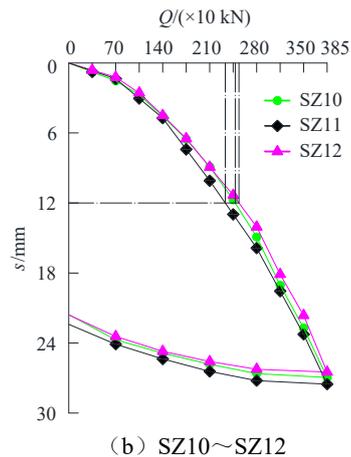
(b) SZ4~SZ6

图 7 PHC(500)AB-125  $Q-s$  曲线

Fig. 7  $Q-s$  curves of PHC(500)AB-125



(a) SZ7~SZ9



(b) SZ10~SZ12

图 8 PHC(400)AB-95  $Q-s$  曲线

Fig. 8  $Q-s$  curves of PHC(400)AB-95

按照规范<sup>[3]</sup>中的公式 5.3.8-1，增加端阻力提高系数  $\alpha_p$ ，计算单桩竖向极限承载力标准值：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \alpha_p q_{pk} (A_j + \lambda_p A_{p1}) \quad (1)$$

式中： $Q_{sk}$  为总极限侧阻力标准值，kN； $Q_{pk}$  为总极

在休止时间满 15 d 后，按照规范<sup>[12]</sup> 规定进行静载试验，6 组 PHC(500)AB-125 管桩在加载至终止荷载(4 800 kN)时，沉降量为 24.24~27.22 mm，为桩直径的 4.9%~5.4%，卸载后残余沉降量为 20.71~24.09 mm；6 组 PHC(400)AB-95 管桩在加载至终止荷载(3 850 kN)时，沉降量为 26.71~27.52 mm，为桩直径的 6.7%~6.9%，卸载后残余沉降量为 21.56~22.40 mm。两类桩的  $Q-s$  曲线(图 7~8)呈平缓变形，无明显拐点出现，桩身完整性为 I 类，卸载后桩身有反弹，说明承载力尚有潜力。两类桩的单桩竖向抗压承载力特征值分别不小于 2 400 kN 和 1 925 kN。其中 PHC(400)AB-95 管桩留有富余量，设计特征值取 1 650 kN。后期改为静压法沉桩，此处不做详细展开。

限端阻力标准值，kN； $u$  为桩身周长，m； $q_{sik}$  为桩周第  $i$  层土的极限侧阻力标准值，kPa； $l_i$  为桩周第  $i$  层土的厚度，m； $q_{pk}$  为极限端阻力标准值，kPa； $A_j$  为空心桩桩端净面积， $m^2$ ； $A_{p1}$  为空心桩敞口面积， $m^2$ ； $\lambda_p$  为桩端土塞效应系数，取 0.8。

根据参考文献<sup>[2,13]</sup>的试验结果,黄土中桩侧摩阻力发挥极限值所需的桩土间相对位移一般为7~12 mm(桩径的2%~3%),侧摩阻力的发挥均先于端阻力,预制桩在天然黄土中的实际极限侧阻力标准值最高约为 $q_{sik}=90$  kPa。据此分析,本工程静载试验中,当沉降量 $s=12$  mm时,对应的加载量约为终止荷载的60%~70%(见图7~8),继续加载时桩侧摩阻力几乎不再增加,加载增量主要由桩端阻力承担,所以承载力提高的原因归于桩端阻力的贡献。取规范值<sup>[3]</sup>较高值 $q_{pk}=11\ 000$  kPa,依据式(1)、图4和表1,当 $\alpha_p=1$ 时计算出 $Q_{uk}$ 的规范值,并用 $Q_{uk}$ 的静载试验值反算 $\alpha_p$ 和卵石层的极限端阻力(见表3),可见相比规范计算结果,静载试验值 $Q_{uk}$ 的增幅为27%~46%, $q_{pk}=16\ 419\sim 21\ 270$  kPa, $\alpha_p=1.49\sim 1.93$ ,此时,桩端承载力分担加载荷载的63%~70%,桩端阻力发挥所需要的桩端位移量为桩直径的4.9%~6.9%,与文献<sup>[1-2]</sup>中预制桩的试验结果基本吻合。

表3 静载试验分析结果

Table 3 Analysis results of static loading test

桩型	类别	$Q_{uk}/kN$	$Q_{uk}$ 增幅/%	$q_{pk}/kPa$	$\alpha_p$
PHC(500)	规范值	3 790	—	11 000	—
AB-125	试验值	4 800	27	16 419	1.49
PHC(400)	规范值	2 627	—	11 000	—
AB-95	试验值	3 850	46	21 270	1.93

## 4 PHC管桩桩基础设计

### 4.1 桩基计算

由于场地未做湿陷性处理,桩的承载力应考虑因湿陷性引起的损失,即在自重湿陷性场地扣除桩侧负摩阻力,在非自重湿陷性场地采用饱和状态下的桩侧正摩阻力。以自重湿陷性黄土为例,管桩刚度大,桩端卵石层坚硬,故桩的沉降变形很小,一旦桩侧土浸水发生湿陷性沉降,就会对桩产生向下的拽拉力,故在预先扣除桩侧负摩阻后<sup>[3,14]</sup>,得出PHC(500)AB-125和PHC(400)AB-95桩的有效特征值分别为1 650 kN、1 055 kN。

以18层楼为例,JCCAD计算得出,荷载标准组合下桩的平均竖向力 $N_k=1\ 310$  kN、最大竖向力 $N_{kmax}=1\ 570$  kN,地震作用和荷载标准组合下桩的平均竖向力 $N_{Ek}=1\ 392$  kN、最大竖向力 $N_{Ekmax}=1\ 670$  kN,基桩竖向承载力特征值 $R=1\ 650$  kN。

标准组合下: $N_k < R, N_{kmax} < 1.2R=1\ 980$  kN。

地震效应下: $N_{Ek} < 1.25R=2\ 062$  kN,  $N_{Ekmax} < 1.5R=2\ 475$  kN。

采用实体深基础法<sup>[3]</sup>计算沉降量的平均值为66 mm,参考西安地区高层建筑实例的统计结果<sup>[15]</sup>,群桩基础沉降量的实测值近似为计算值的1/5~1/3,预估实际沉降量约为13.2~22.0 mm。另外依据本地工程经验,实际沉降量约为试桩中平均竖向力 $N_k$ 值对应沉降量的6倍,试桩荷载1 310 kN对应的沉降量为3.32~3.44 mm,预测实际沉降量为19.9~20.6 mm。桩端持力层以下不存在承载力低于桩端持力层承载力1/3的软弱下卧层<sup>[3]</sup>,其它单体建筑和地库的桩基计算均满足要求。

### 4.2 工程措施

按照标准<sup>[14]</sup>做好建筑物及管道的使用和围护,防止基底下湿陷性黄土浸水。通过以下措施减少桩基所承受的水平地震剪力:保证基槽回填土的施工质量,要求压实系数不小于0.95;管桩顶部设置2 m长填芯钢筋混凝土,钢筋锚入筏板,增加桩顶与筏板连接节点的强度。

## 5 沉降观测结果

在建筑物四周均匀设置沉降观测点,在主体施工出地面时开始首次观测,施工期间每完成1层观测1次,封顶后每季度观测1次。至2019年中期,6栋18层楼在封顶后2个季度、4栋10层楼在封顶时的观测结果均显示,累计沉降量较均匀且逐渐减小并趋于收敛,沉降速率小于0.04 mm/d<sup>[16]</sup>,表明达到稳定状态,实际沉降观测数据小于计算预估(见表4)。

表4 沉降观测结果

Table 4 Results of settlement observation

类别	楼号	沉降量/mm				沉降速率/(mm/d)
		累计平均	最大	最小	差异	
18层楼	1	8.94	9.31	8.41	0.90	0.03
	2	8.26	9.07	7.44	1.63	0.02
	3	8.18	9.87	4.96	4.91	0.03
	4	8.90	9.56	8.29	1.27	0.02
	5	10.69	11.64	8.78	2.86	0.03
	6	11.10	13.73	9.30	4.43	0.04
10层楼	19	3.74	4.73	2.30	2.43	0.02
	20	4.32	5.43	3.65	1.78	0.04
	21	7.65	8.68	6.80	1.88	0.02
	22	7.31	8.47	5.97	2.50	0.03

## 6 结 论

本工程桩基设计充分利用了卵石层的端阻潜力,节约了造价和工期,避免了大量土方作业对环境的污染,获得了良好的经济效益和社会效益,有以下几点结论:

(1) 开口 PHC 管桩以卵石层为持力层时,考虑桩端土塞效应以及卵石层端承潜力的增幅,观测沉降量结果验证是可行的。

(2) 桩端沉降量为桩直径的 4.9%~6.9%时,卵石层的实际极限端阻力为 16 419~21 230 kPa,提高系数  $\alpha_p=1.49\sim 1.93$ 。

(3) 选择锤击或静压沉桩法,通过试桩确定施工参数,保证桩端沉入卵石层约  $1.0D\sim 1.5D$  时,都可达到提高桩承载力的效果。

(4) 黄土厚度不大时,可不处理湿陷性,桩竖向抗压承载力扣除因湿陷性引起的损失量。

(5) 本工程基于静载试验  $Q-s$  曲线的宏观分析,参考闭口桩的承载性状简化设计,为卵石层上开口管桩的应用积累了实践经验,但对土塞力学性状和桩土界面侧摩阻力的细观分析尚需深入研究。

### 参考文献

- [1] 刘俊龙. 砾卵石层中预制桩的承载性状研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1280-1284, 1298.  
LIU Junlong. Research on bearing capacity behavior of precast concrete piles in gravel stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1280-1284, 1298.
- [2] 苏振明. 预应力管桩荷载传递特性[J]. 建筑科学, 2005, 21(1): 88-93.  
SU Zhenming. Research of load transfer characteristics of PHC pipe piles[J]. Building Science, 2005, 21(1): 88-93.
- [3] 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.
- [4] 詹永祥, 姚海林, 董启朋, 等. 砂土中开口管桩沉桩过程的颗粒流模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 283-289.  
ZHAN Yongxiang, YAO Hailin, DONG Qipeng, et al. Study of process of open-ended pipe pile driven into sand soil by particle flow simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 283-289.
- [5] DE NICOLA A, RANDOLPH M F. The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand[J]. Géotechnique, 1997, 47(4): 841-856.
- [6] 周健, 王冠英. 开口管桩土塞效应研究进展及展望[J]. 建筑结构, 2008, 38(4): 25-29, 7.  
ZHOU Jian, WANG Guanying. Development and expectation on soil plug in driving or jacked open-ended pipe piles[J]. Building Structure, 2008, 38(4): 25-29, 7.
- [7] 周健, 陈小亮, 周凯敏, 等. 静压开口管桩沉桩过程模型试验及数据模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3839-3846.  
ZHOU Jian, CHEN Xiaoliang, ZHOU Kaimin, et al. Model test and numerical simulation of driving process of open-ended jacked pipe piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3839-3846.
- [8] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995: 75-80.  
Compilation Committee of Pile Foundation Engineering Manual. Pile Foundation Engineering Manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995: 75-80.
- [9] 刘国辉. 土塞对管桩单桩竖向承载力计算的影响[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
LIU Guohui. Influence of soil plug on the vertical bearing capacity of the single pipe pile[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [10] 丁小伟. 敞口 PHC 短管桩在砂层地基中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(10): 26-30.  
DING Xiaowei. Application of open PHC short pipe pile in sand foundation[J]. Coal Engineering, 2022, 54(10): 26-30.
- [11] 丁小伟, 高军程, 李胜利. 西安地区砂层地基上 PHC 管桩和 CFG 桩的应用分析[J]. 地基处理, 2023, 5(6): 498-505.  
DING Xiaowei, GAO Juncheng, LI Shengli. Application analysis of PHC pile and CFG pile on sandy ground in Xi'an area[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(6): 498-505.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社

