

黄土中灌注桩竖向承载力试验分析

Test study on vertical bearing capacity of cast-in-place pile in loess

高广运 王文东 吴世明
(机械部第四设计研究院,河南洛阳,471039) (浙江大学土木系,杭州,310027)

文 摘 本文根据豫西地区湿陷性黄土场地 40 余根人工洛阳铲成孔灌注桩浸水前后竖向承载力的现场试验结果,分析了桩的竖向承载性状,浸水前后侧阻力的变化规律及影响因素。提出了利用土的物理指标确定饱和状态灌注桩竖向承载力的方法,并列出了参数表。据此计算群桩承载力与载荷试验结果较一致。

关键词 人工洛阳铲成孔灌注桩,湿陷性黄土,浸水饱和,竖向承载性状,侧阻力,群桩。

中图法分类号 TU 473.11

作者简介 高广运,男,1961 年生,1983 年毕业于合肥工业大学,1985 年在同济大学岩土工程进修班学习,1992 年在湖南大学获岩土工程硕士学位,1995 年起为浙江大学土木系在职博士研究生。现为机械部第四设计研究院教授级高工,从事岩土工程勘察、设计、检测与研究。

Gao Guangyun Wang Wendong

(The 4th Design and Research Institute, Ministry of Machinery Industry, Luoyang)

Wu Shiming

(Dept. of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract On the basis of the in-situ test data of more than forty piles artificially drilled by Loyang spoon and cast-in-place in West Henan collapsible loess before and after immersion, the paper analyzed the vertical bearing behavior and law of variation in skin friction and other influencing factors. According to indices of the loess, a method for determining vertical bearing capacity of the pile in saturated loess is presented. A table of calculating parameter is compiled. The computed values of bearing capacity of pile groups agree with results of loading tests.

Key words cast-in-place pile artificially drilled by Luyang spoon, collapsible loess, immersion saturated, vertical bearing behavior, skin friction, pile groups.

1 引 言

豫西地区广泛分布非自重湿陷性黄土,工程建设中常根据建筑物荷载大小和黄土的湿陷等级及分布情况采用桩(墩)基等进行地基处理^[1]。人工洛阳铲成孔干作业非挤土灌注桩,具有施工速度快、质量好、造价低、无环境干扰等优点,常用于工业与民用建筑工程。

黄土中桩基应按浸水饱和状态设计^[2-3],桩静载试验费时费力,而浸水载荷试验则更困难。为此对豫西非自重湿陷性黄土场地 40 余根灌注桩静载试验资料进行了分析研究,结果表明浸水前后单桩承载力及桩侧阻力变化均有规律,与土的物理指标关系密切。据此可计算单桩和群桩浸水后承载力。

2 试验概述

试桩以非湿陷性黄土为桩尖持力层。桩径 $d = 300 \sim 600\text{mm}$,多数 $d = 400\text{mm}$ 左右。桩长 $L = 8.0 \sim 12.0\text{m}$,少数达 16.0m 。地下水埋深大于桩长。

试桩先做天然状态下的试验,后对另一根进行浸水饱和后的试验。为了加快桩长深度内土体饱和,浸水方

法是:在桩周围挖一直径 3.0m 、深 0.5m 的试验浸水坑,沿桩四周距桩边 0.5m 左右处,均匀排列 6 个小直径人工洛阳铲成孔浸水孔,孔径 $100 \sim 150\text{mm}$,深度与桩长相同,孔内灌入粗砂砾,坑底铺设 100mm 厚砂砾石。浸水后经检验,土体均达饱和状态后才进行静载试验。试验中保持坑内水头,符合文献^[2]对单桩浸水静载试验的要求。试验采用慢速维持荷载法,所有试验均按有关规定进行,加载出现第二拐点并继续加载至破坏。

3 试桩分布区及其地基土性质

试桩主要分布在豫西河谷地带,按地貌单元和黄土的工程性质分为四个区:A 区为洛阳市区及近郊的 II 级阶地,B 区位于洛阳市区北部及东北部,毗邻黄土塬与 II 级阶地之间的 III 级阶地,C 区位于洛阳市北 25km 的吉利区,为黄河 II 级阶地,D 区位于河南最西部的三门峡地区(含灵宝市)的 II 级阶地。四区试桩深度内土的主要特征指标及地层概况见表 1。按文献^[2]的分区,D 区属关中地区,A~C 区属河南地区。

到稿日期:1997-12-27.

表1 四个试桩区土的主要特征指标

Table 1 The general characteristic indices of soils in four test zones

试桩区	地层时代	分层代号	层厚 (m)	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	液性指数 I_L	湿陷系数 $\delta_{s, max}$	$S_r = 90\%$ 时的 I'_L
A	Q ₄	1	3.0	0.885	62	28.2	18.9	9.3	0.15	0.035	1.14
		2	1.5	0.930	71	31.3	20.5	10.8	0.11	0.020	0.65
	Q ₃	2	1.5	0.806	72	33.6	21.5	12.1	<0	0.018	0.42
		2	3.0	0.907	68	32.2	21.0	11.2	0.20	0.020	0.81
B	Q ₃	1	7.9	0.993	55	28.0	18.6	9.4	0.17	0.0465	1.54
		2	3.5	0.758	72	30.9	20.3	10.6	<0	<0.015	0.46
C	Q ₄	1	4.5	0.927	61	26.8	17.6	8.8	0.39	0.0432	1.52
		2	1.5	0.822	70	31.2	19.4	11.8	0.16	0.017	0.67
	Q ₃	2	4.0	0.985	55	28.9	18.6	10.3	0.14	0.031	1.38
		2	6.0	0.941	58	28.2	18.1	10.1	0.21	<0.015	1.31
D	Q ₄	1	2.5	0.980	49	26.1	17.8	8.3	0.01	0.049	1.81
		1	3.0	0.985	49	25.3	17.6	7.7	0.04	0.062	1.99
		1	3.5	0.893	57	27.4	18.2	9.2	0.07	0.028	1.26

注:① 分层代号1为黄土状粉土;2为黄土状粉质粘土。② I'_L 为 $S_r = 90\%$ 时,按文献[2]的计算值。

③ C区6.0m处地层约含10%钙质结核。

④ 表中为探井取土试验指标。

4 试验结果整理与分析

4.1 桩竖向承载性状

(1) 破坏模式与荷载传递

上述四区均为河谷堆积阶地,地层为Q₄和Q₃黄土状粉土和粉质粘土(以下简称粉土和粉质粘土)。各区均有一定数量试桩,从桩的受力性状及桩侧阻力变化看,各区试桩成果特点一致。与表1对应的各区代表性试桩的桩顶荷载与位移 $Q-S$ 曲线详见图1~图2,均为同场地同桩径同桩长的浸水前后两根试桩,以比较浸水对桩竖向承载力的影响。

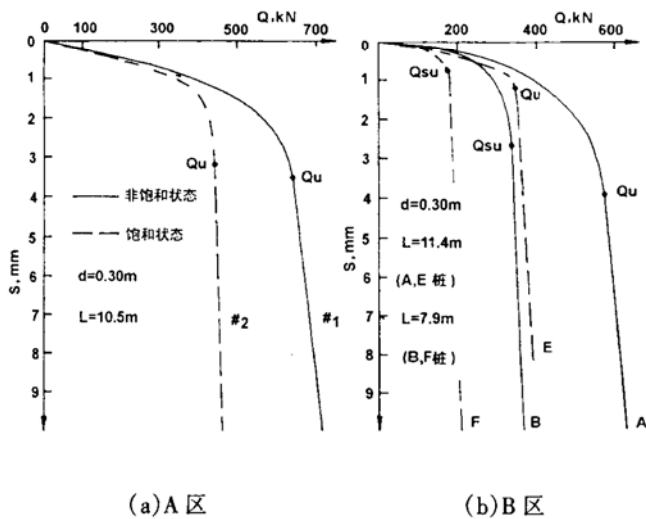


图1 A区和B区典型试验曲线

Fig.1 Typical test curves for zone A and zone B

为研究粉土和粉质粘土浸水前后桩侧阻力变化,在

B区还完成了分层侧阻测试。这里省略测试过程叙述,图3为侧阻 q_s 随深度的分布与变化曲线,图4为平均侧阻 \bar{q}_s 与桩土间相对位移 S_i 曲线。为了研究饱和后不同土质应力应变特性与 q_s 发挥性状的关系,还进行了室内静三轴UU试验,表明应力~应变与图4有相同规律,浸水前后均为加工软化型土。侧阻峰值大小主要受黄土固有的结构强度控制,达峰值后减小,表现为平均残余极限侧阻 \bar{q}_{su} (以下简称极限侧阻)。浸水前后达 \bar{q}_{su} 时的极限相对位移 S_{su} 一般为2.5mm和1.0mm。

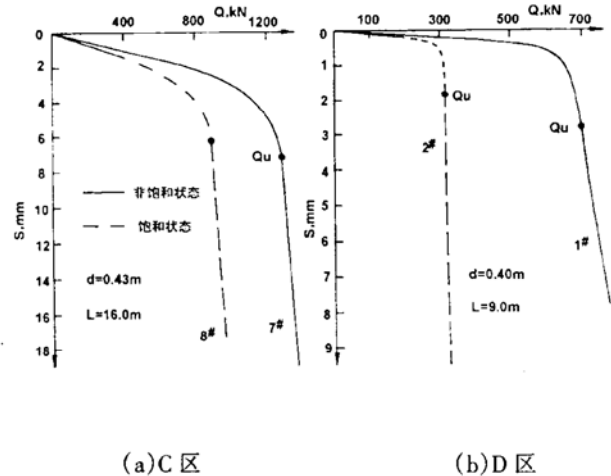


图2 C区和D区典型试验曲线

Fig.2 Typical test curves for zone C and zone D

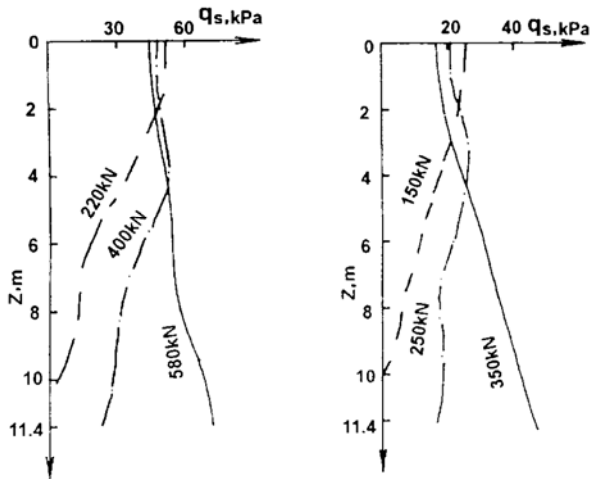
由图1~图2可知,浸水后承载力降低,但 $Q-S$ 线型并未改变。浸水前后,桩周与一般硬粘性土和软粘性土情况类似,桩端都表现为无坚硬持力层的摩擦桩,桩端呈刺入破坏^[4-5]。由图3可知,开始加载时,

荷载由上部桩周土承担,侧阻 q_s 曲线分布呈上大下小三角形;随加载增加,桩身竖向应力向下部传递, q_s 从上到下逐步发挥;达破坏状态时,下部桩周土侧阻和端阻得到发挥, q_s 曲线呈上小下大梯形分布。

(2)极限侧阻与极限端阻的比例

桩基设计是基于深基础侧阻和端阻的半经验~半理论方法,单桩极限承载力 Q_u 由总极限侧阻 Q_{su} 和总极限端阻 Q_{pu} 组成,忽略二者间相互影响。确定 Q_u 需考虑 $Q-S$ 曲线形状或桩长,以减小人为误差^[4-6]。由图1~图2可知:所有 $Q-S$ 曲线均属陡降型,第二拐点明显,取其为 Q_u 。根据 $S-\lg Q$ 曲线陡降直线段向上延伸与横坐标的交点,可划分 Q_{su} 和 Q_{pu} ;同时采用解析法计算,并与部分实测结果比较,综合确定。

通过对各试验区所有试桩成果的分析,极限状态时 Q_{pu} 仅占 Q_u 的3%~7%,属摩擦桩。这是因为桩径小, Q_{pu} 主要受桩长径比控制^[1]。将四区代表性试桩结果汇总,详见表2。表中桩侧阻折减系数 K 为浸水饱和前后平均极限侧阻之比。试验表明,桩长范围内土体天然饱和度愈低,浸水后导致桩极限侧阻降低幅度愈大。



(a) 浸水前 ($S_r = 60\%$) (b) 浸水后 ($S_r > 90\%$)

图3 B区浸水前后桩侧阻力分布

Fig.3 Distribution of skin friction of pile before and after immersion for zone B

4.2 浸水前后桩极限侧阻变化

(1)浸水不产生负侧阻

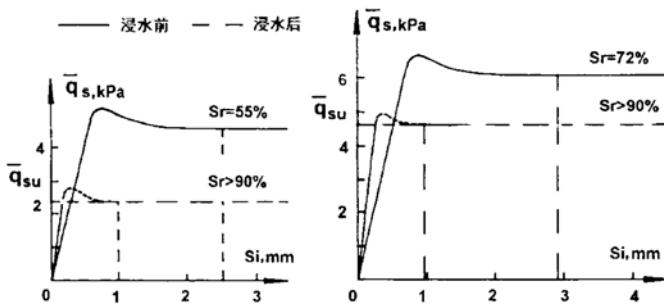
所有试验观测表明,浸水饱和后不产生负侧阻,地基无明显附加沉降,这是豫西黄土特性和地层结构决定的。该区黄土厚度一般为十余米,桩长10m左右,故浸水范围和浸水范围较小。与某电厂 Q_2 黄土中大直径扩底桩浸水试验结果不同,因为该场地为60m的厚层黄土,桩长32~40m,浸水范围和浸水坑直径均较大^[7]。

(2)侧阻折减规律

浸水饱和后桩平均极限侧阻 \bar{q}_{su} 折减系数 K ,与浸

水前土的饱和度 S_r 密切相关。所有试验表明,浸水后桩的 \bar{q}_{su} 都不同程度降低。 K 与浸水前桩周土体的 S_r (以小数表示)接近,见表2。 K 与 S_r 为线性关系,建议 K 由浸水前土的 S_r 值按表3确定。

K 值还与土塑性和密度有关。当桩周以粉土为主时, K 比 S_r 减少0.03~0.05;粉质粘土为主时, K 比 S_r 增大0.03~0.05。当其它条件相同时, K 随土的孔隙比 e 增大而线性减小。



(a) 黄土状粉土 (b) 黄土状粉质粘土

图4 B区浸水前后侧阻与桩土间位移关系

Fig.4 Correlation between pile-soil displacement and skin friction of pile before and after immersion for zone B

(3)侧阻发挥性状

a)除C区外,浸水前桩达 \bar{q}_{su} 所需桩土间极限相对位移 S_{su} 小于一般土,浸水后则更小。由表2和图4可知,浸水前与 \bar{q}_{su} 对应的 S_{su} 变化范围为0.88~2.88mm,一般为2.50mm;浸水后为0.47~1.90mm,一般为1.00mm,浸水后明显小于浸水前。

b)土塑性及土中钙质结核对桩的 q_{su} 发挥有影响,浸水后最为显著。如以粉土为主的B区E、F桩和D区#2桩,浸水后达 q_{su} 时 S_{su} 远小于粉质粘土为主的A区#2桩,可用黄土结构强度解释。达 q_{su} 时桩周土体产生剪切破坏,剪应力受浸水后黄土残余结构强度控制。土中粘粒(粒径 < 0.005mm)含量多,则结构强度高^[8]。所以粘粒量少的粉土,破坏时剪应变较粉质粘土小。

C区试桩下部地层中含钙质结核(俗称姜石)。人工成孔浇灌混凝土时桩周侧面实际变成凹凸状。这时桩周土为压剪型破坏,只有桩土间产生较大位移才达 q_{su} ,所以 S_{su} 较大。试验和工程实践均表明,土层中含较多姜石时,侧阻提高,且与姜石含量成正比。

4.3 饱和状态桩极限侧阻推荐值

黄土浸水饱和后桩极限侧阻力的发挥就是其残余结构强度的发挥过程。黄土残余结构强度实质是湿陷起始压力,主要影响因素是土的粘粒含量、孔隙比 e 和天然含水量 w 等^[8]。饱和状态可不考虑 w 和 S_r 对侧阻影响。粘粒含量在工程实践中主要由塑性指数 I_p

表2 四区典型试桩结果

Table 2 Typical results of pile test in four test zones

试桩区	桩号	桩径 d (m)	桩长 L (m)	浸水前后桩周土体饱和度 S_r (%)	Q_u 与对应沉降		Q_{pu} (kN)	Q_{su} 与对应沉降		平均极限侧阻与浸水后折减系数	
					Q_u (kN)	S_u (mm)		Q_{su} (kN)	S_{su} (mm)	\bar{q}_{su} (kPa)	K
A	1	0.30	10.5	69	640	3.12	20	620	2.50	62.7	$\frac{44.0}{62.7} = 0.70$
	2	0.30	10.5	饱和	450	2.90	15	435	1.90	44.0	
A	A	0.30	11.4	60	580	3.81	37	543	2.60	50.5	0.62
	E	0.30	11.4	饱和	350	1.16	15	335	0.80	31.2	
B	B	0.30	7.9	55	上部黄土状粉土侧阻力			340	2.62	45.7	0.53
	F	0.30	7.9	饱和				180	0.71	24.2	
	C	0.30	3.5	72	下部黄土状粉质粘土侧阻力			203	2.88	61.5	
	D	0.30	3.5	饱和				155	0.98	47.0	
C	7	0.43	16.0	60	1260	6.90	40	1220	5.10	56.5	0.69
	8	0.43	16.0	饱和	875	6.04	30	845	4.80	39.1	
D	1	0.40	9.0	52	700	2.86	50	650	0.88	57.5	0.46
	2	0.40	9.0	饱和	320	1.80	20	300	0.47	26.5	

表3 浸水饱和后 \bar{q}_{su} 折减系数 K Table 3 Reducing coefficient K of \bar{q}_{su} after immersion

S_r	≥ 0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	≤ 0.50
K	1.00	0.95	0.88	0.81	0.74	0.68	0.61	0.54	0.47

间接表示。近年来研究表明,低塑性粉土出现液塑限变化的反常现象,但 I_p 与粘粒含量间仍是线性关系^[9],所以这里以 e 和 I_p 两物理指标与侧阻建立关系。建议饱和状态人工洛阳铲成孔灌注桩极限侧阻力标准值 q_{sk} 按表4选用。饱和后桩极限端阻力标准值 q_{pk} ,桩长10m左右时,端承为粉土和粉质粘土时,可分别取 $q_{pk} = 150\text{kPa}$ 和 200kPa 。

5 工程实例——群桩载荷试验*

某大学教学楼,建筑面积 10600m^2 ,3~6层,砖混结构。50年代按国外规范将新黄土按一般湿陷性黄土进行基础设计,引起建筑物不均匀沉降和严重开裂,80年代采用人工洛阳铲灌注桩成功的进行了加固。试桩 $L = 6.2\text{m}$, $d = 0.40\text{m}$,持力层为非湿陷性黄土。地层结构和土的主要特征指标为:4.8m以上为新近堆积黄土状粉土(Q_4^2), $e = 0.961$, $S_r = 52\%$, $I_p = 7.9$, $\delta_{s,\max} = 0.0428$;下部为黄土状粉质粘土(Q_3), $e = 0.877$, $S_r = 61\%$, $I_p = 10.2$, $\delta_{s,\max} = 0.0330$ 。

为了解浸水对桩基影响,进行了单桩和群桩浸水前后荷载试验;为了解桩与承台反力分配,桩顶和承台底面埋设土压力盒。图5为桩数 2×3 的一组试验结果,由图10(a)可知,浸水后群桩的极限承载力($P_u = 1.30\text{MN}$)约为浸水前的 $1/2$,折减系数与桩长范围内浸

水前土体的饱和度平均值 $S_r = 0.55$ 接近。由图5(b)可知,浸水前承台下桩间土反力远小于桩顶,桩承受主要荷载。浸水后因故未能观测反力。

表4 饱和状态桩极限侧阻力标准值 q_{sk} (kPa)

Table 4 Standard value of ultimate skin friction of pile in saturated loess-like soils

孔隙比 e	塑性指数 I_p							
	7	8	9	10	11	12	13	14
≥ 1.00	20	23	26	30	34	37	40	42
0.95	24	27	32	37	39	42	44	46
0.90	28	32	36	39	42	44	46	48
0.85	32	36	39	42	44	46	48	51
0.80	36	39	42	44	46	48	51	54
0.75	39	42	45	47	49	52	55	60
≤ 0.70	45	48	52	55	58	62	68	80

注:当土中含较多姜石时,应适当提高 q_{sk} 。

因桩距较小,浸水前土质相对较硬,桩间土与桩群以整体下沉为主,类似一实体深基础,桩尖土受压缩。承台对端阻的“增强效应”使群桩荷载-沉降趋近缓降型, $P-S$ 曲线与单桩的 $Q-S$ 曲线线型不同,宏观破坏模式呈渐进型。浸水后土质变软,桩尖和桩间土均产生压缩变形,承台对侧阻的“削弱效应”增强,侧阻呈桩土非整体破坏(即各桩单独破坏),端阻呈刺入破坏^[4]。

* 注:试验资料由杨先健设计大师提供。

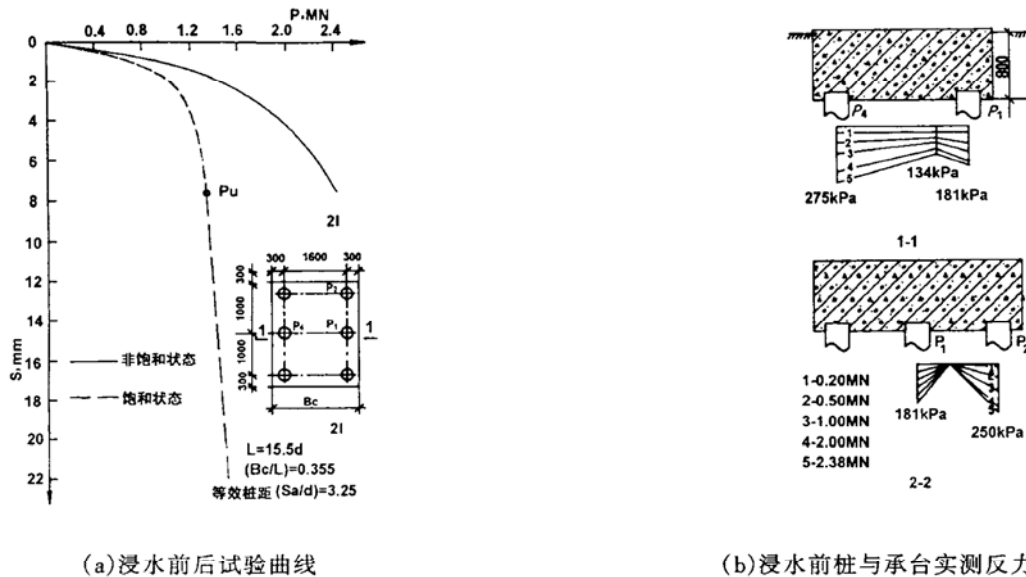


图5 群桩载荷试验曲线

Fig.5 Loading test curve of pile groups

承台下新黄土具湿陷性和高压缩性,浸水后土质更差,故不考虑承台分担荷载。若忽略群桩效应,可用极限平衡理论法由土的 e 和 I_p 两指标按上述确定 q_{sk} 和 q_{pk} ,计算群桩浸水后极限承载力为 1.49MN,比试验值 1.30MN 大 15%。若考虑承台、桩、土相互作用进行计算,则群桩极限承载力为 1.85MN,误差更大,可见需建立黄土的群桩相互作用系数。若按传统群桩承载力效率系数法计算,计算单桩 $Q_u = 249\text{kN}$ 与试验值 250kN 一致,则群桩效率系数 $\eta = 0.87$,小于 1,与上海软土中小桩距、小比例模型群桩试验结果一致。

提高。根据已有试桩资料,提出了非自重湿陷性黄土中人工洛阳铲灌注桩饱和状态极限侧阻力和极限端阻力标准值,对其它地区有待进一步验证和补充完善。

(5)群桩浸水后,侧阻呈桩土非整体破坏,端阻呈刺入破坏。现阶段可按极限平衡理论法估算群桩浸水后极限承载力。

(6)非自重湿陷性黄土场地,地基以高孔隙比的非饱和黄土状粉土为主时,浸水饱和后桩极限侧阻很低,工程设计中不宜采用摩擦桩。

参 考 文 献

- 1 高广运,王文东等.黄土地区扩底墩基础轴向承载力评价.见:第七届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1994.240~245.
- 2 中华人民共和国建设部.湿陷性黄土地区建筑规范(GBJ25-90).北京:中国计划出版社.1991.
- 3 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范(JGJ94-94).北京:中国建筑工业出版社.1995.
- 4 编写委员会.桩基工程手册.北京:中国建筑工业出版社,1995.9~126.
- 5 徐攸在等.桩的动测新技术.北京:中国建筑工业出版社,1989.30~81.
- 6 Winterkorn H F, Fang H Y. Foundation Engineering Handbook (Second Edition). Van Nostrand Reinhold, 1991.524~529.
- 7 李大展等.湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载力性状的试验研究.岩土工程学报,1994,16(2):11~21.
- 8 钱鸿缙,罗宇生等.湿陷性黄土地基.北京:中国建筑工业出版社,1985.20~158.
- 9 《岩土工程手册》编写委员会.岩土工程手册.北京:中国建筑工业出版社,1994.48~68.

6 结 论

(1)豫西地区非自重湿陷性黄土中人工洛阳铲成孔非挤土竖向受荷灌注桩,浸水前后均是以侧阻为主的摩擦桩,侧阻的发挥主要受黄土残余结构强度控制。浸水饱和前后黄土均为加工软化型,浸水不产生附加沉降和负侧阻。

(2)桩达极限状态时,浸水前桩土相对位移一般为 2.5mm,浸水后通常约为 1.0mm。黄土状粉土中的相对位移小于粉质粘土。土中含较多姜石时相对位移将增大,侧阻将提高。

(3)浸水后桩的极限侧阻低于浸水前,折减系数 K 与桩长范围内浸水前土的饱和度 S_r 接近。 $S_r \geq 0.60$ 时(多为黄土状粉质粘土) K 略大于 S_r , $S_r < 0.6$ 时(多为黄土状粉土) K 略小于 S_r ,据此可由非饱和黄土试桩结果和 S_r 估算饱和后极限侧阻。

(4)浸水饱和后桩的极限侧阻主要取决于黄土的孔隙比和粘粒含量,随粘粒含量增加和孔隙比减小而