

编者按 我国黄土分布很广,面积近达 64 万 km²,占世界黄土分布总面积的 49%左右;其中湿陷性黄土的分布面积又约占黄土分布总面积的 60%左右,主要分布在矿产资源丰富而经济基础又较落后的中西部地区。这对于该地区的广大建设者来说,如何处理好湿陷性黄土所带来的工程建设中许多技术问题,是一项长期的艰巨任务。

近几年来,我国对黄土的性状、结构、湿陷机理和湿陷评价,以及地基处理、复合地基、桩基和黄土地震性能的研究已取得了一些成果。其中关于非重湿陷性黄土中预制桩和灌注桩必须考虑负摩阻力的结论,引起了工程界的重视。我国中、西部黄土地区不少属于多震地区,然而,对黄土动力特性的认识却不深,亦未引起重视;其中黄土的震陷,虽不象砂土液化普遍,但其震陷系数达到 10% 震陷能引起边坡失稳、地基沉陷等灾害,在国内外都有破坏实例,应引起工程界的重视。

当前,加强对湿陷性黄土性状、湿陷机理,湿陷性评价、黄土动力特性等的深入研究,无疑会对我国中、西部地区的经济资源开发和经济建设都具有深远的意义。

湿陷性黄土中桩的 负摩阻力测试与验算

李大展 何颐华

李光煜

(中国建筑科学研究院地基所)

(武汉岩土力学研究所)

本文介绍了某湿陷性黄土地基大面积浸水试验中的 4 根大直径扩底灌注桩桩身内力的测试方法,并对负摩阻力的实测值与计算值进行了比较,最后对考虑负摩阻力的单桩承载力验算方法提出了建议。

关键词: 湿陷性 黄土 负摩阻力

THE MEASUREMENT AND CALCULATION OF NEGATIVE SKIN FRICTION FOR PILES IN COLLAPSIBLE LOESS

Li Dazhan He Yihua Li Guanyu

(China Academy of Building Research) (Wuhan Inst. of Rock and Soil Mechanics)

In this paper, the shaft force measurements of 4 large diameter belled piles during the immersion test of collapsible loess are introduced. The measured and calculated values for negative skin friction of piles are compared. And finally, the check method of pile bearing capacity with negative skin friction is suggested.

一、概述

桩的负摩阻力问题比较复杂,由于不同地区黄土湿陷性特不一,使得湿陷特性黄土地

基中桩的负摩阻力问题变得尤为复杂。

对于支承于可压缩土层上的桩而言(如本试验桩穿透湿陷性土层支承于非湿陷性土层上),一般情况下,在桩顶施加垂直荷

载后,桩会有沉降。此时,桩侧土体首先对桩产生向上的阻力,即正摩阻力。在黄土浸水湿陷时,当其湿陷量大于桩的沉降量时,桩侧土体会对桩产生向下的阻力,即负摩阻力。其作用相当于在桩侧表面上增加了一个外荷载。由此可见,影响负摩阻力大小的因素虽然很多^[1],但主要是土的沉降量要大于桩的沉降量,两者差值越大,负摩阻力也就越大。实测表明,土层的湿陷沉降量总是由表层向深层逐渐减小的。因此,在桩身上部,土层的沉降大于桩的沉降,产生负摩阻力;而在桩身下部,土层的沉降量就会小于桩的沉降,将产生正摩阻力。因为桩作为刚体(若忽略桩本身压缩量不计),其上部与下部的位移量是相同的,这样必然在沿桩身方向上有一个土层沉降与桩沉降相等的点。该点处摩阻力等于零,而桩身轴向力最大,该特征点称为中性点。可见,欲求出中性点位置有两个方法:其一是找出土层沉降与桩沉降相等的点;其二是在桩长方向求得轴向力最大的点,据此即可得出负摩阻力大小及其发生、发展规律。

本试验桩身内力采用滑动式测微计测试。

二、负摩阻力的测试

本次试验桩共4根(A₁,A₂,B₁,B₂)另有锚桩10根(C₁~C₁₀)。其主要参数如表1。

表1 试桩和锚桩设计参数

序号	桩号	数量根	桩长m	桩径,m		主筋	混凝土强度等级
				桩身	扩大端		
1	A ₁ , A ₂	2	40	1.2	2.5	8Φ25, 8Φ22	C30
2	B ₁ , B ₂	2	32	1.0	2.2	16Φ18	C30
3	C ₁ ~C ₃ , C ₆ ~C ₈	6	40	1.0	2.2	24Φ25	C20
4	C ₄ , C ₉	2	32	1.0	2.2	36Φ25	C20
5	C ₅ , C ₁₀	2	32	1.0	2.2	20Φ25	C20

桩身内力测试采用瑞士产滑动式测微计,它可连续测定一条测线上的应变分布。仪器主体为一标长1m,两端带有球状测点的位移传感器,内装一个线性电感位移计和

一个热电偶温度计(温度计用来区分被测介质因温度变化而产生的应变值)。通过屏蔽电缆连接到数字读数仪,分别测读位移值及测段温度。并可连接打印机或计算机进行数据记录和处理^[1]。

测试前,每根试桩预先埋入2根测线管,如图1所示。测线上每隔1m安装一个环形标,其间用硬塑料管连接,滑动测微计的测头可依次测量两个环形标之间的相对位移。环形标做成锤状,测头为球面,保证球心定位准确度达±0.001mm。环形标和测头接触面只取锤面和球面一部分,因此,只要旋转45°就可使测头从测量状态变为滑行状态。根据测得的应变量(相对位移)和桩身弹性模量(另由声波仪实测求得)即可算出桩身应力,从而根据桩截面面积得到桩身所受内力。

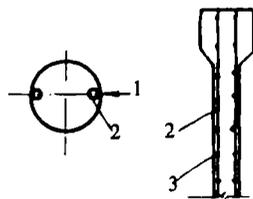


图1 测线布置示意

1—水平力; 2—HPVC套管; 3—测环

三、负摩阻力测试结果

试验场地位于陕西渭北黄土塬上,地基土为黄土与古土壤成层交互分布,上部6m为马兰黄土(Q₃),下部为离石黄土(Q₂),总厚度60m,属大厚度黄土地基。地基土分层情况如表3所示。

浸水试验的试坑直径40m,坑深1m,浸水历时40d,注水量近8万m³,其规模之大为国内首例。由场地内各类标点实测浸水后地基土的湿陷量小于7cm,判定本试验场地为非自重湿陷性黄土场地^[2]。

为研究桩的负摩阻力发生机理,静载荷试验分两种情况进行。A₁和B₁桩在试坑浸水前,先加荷至设计荷载的1.2倍(分别为

6MN 和 4.8MN) 后再浸水, 并在浸水期间用上述荷载量稳压, 待土层湿陷沉降稳定后, 进行静荷载试验至破坏。而 A₂ 和 B₂ 桩先浸水, 到土层湿陷沉降稳定时进行静荷载试验至破坏。实测的浸水前后全过程中桩身轴向力发展典型情况如图 2 所示。由图可见, 试桩的负摩阻力是在停水后(1990 年 12 月 26 日)发生的, 这是由于本场地黄土的特性决定的。与一般湿陷性黄土不同, 本场地为 Q₂ 黄土与古土壤交互层, 浸水后地基土湿陷性主要是由停水后土层固结引起的^[2]。如图 2 所示中性点位置在浸水全过程中经历了由浅到深, 然后随着地层沉降稳定而稳定的过程。

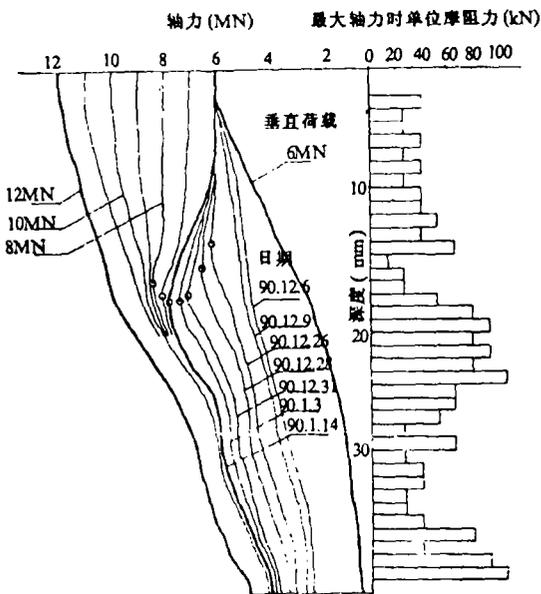


图 2 试桩荷载传递进程
○—中性点

最后稳定时中性点位置和各桩实测负摩阻力值见表 2。在地面沉降相同的情况下, 桩身沉降量大的, 产生负摩阻力小, 中性点位置较高, 表 2 所列的测试结果符合这一规律。例如 B₁ 桩由于浸水期间桩沉降量最大, 因而中性点位置最高, 总负摩阻力和平均单位负摩阻力均最小。另外, 由于桩顶垂直荷载的长期作用, 使桩在浸水期间不断沉降, 从而负摩阻力降低, 中性点上移, 使 A₁ 和 B₁ 桩的负摩阻力均较低。

表 2 桩的负摩阻力值和中性点位置

桩号	垂直荷载 MN	桩顶沉降 mm	中性点位置 m	与桩长的比例	负摩阻力		正摩阻力		端阻力	
					总值 kN	平均单位值 kPa	总值 kN	平均单位值 kPa	总值 kN	单位值 kPa
A ₁	6.0	19.47	17.5	0.44	1810	27.1	3970	46.8	3840	784
B ₁	4.8	41.81	12.0	0.38	1030	27.3	3630	57.8	2200	579
A ₂	0	3.00	25.0	0.63	4110	43.6	2640	46.7	1470	300
B ₂	0	12.00	21.0	0.66	2960	44.9	1460	42.2	1500	394

对于桩顶无荷载的 A₂ 和 B₂ 桩, 试验期间负摩阻力已充分发挥, 其值大致与桩的正摩阻力值相同。由表 2 可见, 本场地上虽然属于非自重湿陷性黄土, 但其浸水后产生的负摩阻力仍是很大的, 说明对于非自重湿陷性黄土中的桩, 仍有可能产生较大的负摩阻力。

四、负摩阻力实测值与计算值的比较

负摩阻力的计算甚为复杂, 一般只能进行简化计算。目前的计算方法仅限于计算负摩阻力单位值的最大值, 根据中性点位置求得负摩阻力总值。单位负摩阻力的计算一般采用下列两种方法。

1. 有效应力法

单位负摩阻力 q_n 按下式确定^[3]：

$$q_n = K \gamma \varphi' \sigma'_z$$

$$\sigma'_z = p_0 + \bar{\gamma} \cdot z$$

式中 P_0 ——桩顶平面以上的土重或堆载, kPa;

$\bar{\gamma}'$ ——深度 Z 以上土的平均有效重度, kN/m³;

Z——自桩顶至计算深度 Z 的距离, m;

$K \gamma \varphi'$ ——与土质、桩型、成桩工艺有关的系数, 自重湿陷性黄土取 0.20 ~ 0.35; 饱和软土取 0.15 ~ 0.25; 粘性土、粘土取 0.25 ~ 0.40; 砂土取 0.35 ~ 0.50。

根据本场地土性资料, 如取 $K \gamma \varphi'$ 为上限值 0.35, 计算得各层土的单位负摩阻力值列于表 3。根据各试桩的中性点位置(表 2), 算出负摩阻力总值(下拉荷载)和桩身平均单位值列于表 4。

2. 按室内外测定的土力学指标确定单位负摩阻力

$$q_n = q_u / 2$$

或 $q_u = C_u$

式中 q_u —— 土的无侧限抗压强度, kPa;

C_u —— 土的不排水抗剪强度, kPa。

根据本场地土的抗剪强度值, 可得单位负摩阻力, 如表 3。同理, 可得负摩阻力总值和单位负摩阻力平均值, 如表 4 所列。

表 3 单位负摩阻力计算值

层号	深度 m	层厚 m	有效 重度 kN/m ³	竖向有 效应力 kPa	Ktgφ'	单位负 摩阻力 q _n kPa	\bar{q}_n , kPa	
							有效 应力法	按抗剪 强度指 标
L ₁	5.2	5.2	4.3	22.4	0.35	7.8	3.6	15
F ₁	6.4	1.2	7.5	48.0	0.35	16.8	12.3	40
L ₂	10.4	4.0	7.0	72.8	0.35	25.5	21.2	40
F ₂	13.8	3.4	7.6	104.9	0.35	36.7	31.1	50
L ₃	19.9	6.1	6.5	129.4	0.35	45.3	41.0	40
F ₃	21.4	1.5	7.5	160.5	0.35	56.2	50.8	70
L ₄	26.5	5.1	6.8	180.2	0.35	63.1	60.0	40

注: L—黄土层; F—古土壤层。

表 4 负摩阻力总值和单位平均值

桩号	总值, kN			单位平均值, kPa		
	实测	有效应力法	按抗剪强度指标	实测	有效应力法	按抗剪强度指标
A ₁	1810	1417	2277	27.4	21.5	34.5
B ₁	1030	527	1145	27.3	14.0	30.4
A ₂	4110	2866	5854	43.6	30.7	62.1
B ₂	2960	1663	2440	44.9	25.2	37.0

由表 4 可见, 按有效应力法计算结果与实测值相比偏低, 而按抗剪强度指标计算结果偏高, 计算值与实测值吻合程度不很理想。分析其原因除了土工试验结果有离散性外, 说明当前关于负摩阻力计算方法还是粗略的, 有待通过更多的实测资料予以改进。

五、考虑负摩阻力的桩承载力验算方法的建议

桩基负摩阻力可能发生在建筑物施工过程中、使用前或使用过程中。对于湿陷性黄土而言, 也即是浸水后加荷载或加荷载后发生浸水湿陷之分。如上所述, 本次试验对两种情况均进行了测试。测试结果表明, 对于穿透湿陷性黄土支承在可压缩性的非湿陷性土上的桩, 由于其桩端持力层并非有基岩一样的嵌固作用, 随着上部荷载的增加, 桩的

沉降也随之增加, 继之引起负摩阻力的降低(图 2)。因此, 对于黄土地基中的摩擦桩(包括端承摩擦桩)的负摩阻力问题, 首先是一个附加沉降问题, 其次才是承载力问题。在桩身材料强度满足要求的情况下, 应着重考虑由负摩阻力引起的沉降量与差异沉降量对建筑物的影响。另外, 由于负摩阻力出现极限值的概率是较小的, 因而在承载力验算时可取较低的安全系数。

鉴于上述, 并按文献[1]介绍, 本工程考虑负摩阻力作用时桩承载力验算按下式进行:

$$F_d + Q_n < (R_{sc} + R_{pu}) / K_n$$

桩身强度按下式验算:

$$(F_d + Q_n) / A_p < S_p$$

式中 F_d —— 作用于桩顶的长期设计荷载, kN;

Q_n —— 由负摩阻力引起的下拉荷载, kN;

R_{su}, R_{pu} —— 分别为桩侧总正极限摩阻力和桩端总极限阻力, kN;

A_p —— 桩身横截面面积, m²;

S_p —— 桩身短期容许强度, kPa;

K_n —— 考虑负摩阻力的承载力安全系数, 建议值为: 先浸水, 后加荷时取 1.2; 先加荷, 后浸水时取 1.6。

关于 K_n 值建议值为 1.2 和 1.6 的理由作如下说明:

根据本试验中静荷载试验结果, 地基土浸水饱和情况下试桩的极限承载力, A 型桩为 11MN; B 型桩为 6.4 ~ 7.2MN。以上数值是在桩顶荷载与负摩阻力共同作用下得到的。因此, 若取安全系数 $K=2$, 各桩的容许承载力分别如表 5 所列。现场静荷载试验表明, 无论是先加荷后浸水, 还是先浸水后加荷, 考虑了负摩阻力作用下的上述容许承载

表 5 安全系数 K_n 值的取定

桩号	极限荷载	容许荷载	负摩阻力	(2)+(3)	安全系数	安全系数取定值
	MN	MN	MN			
	(1)	(2)	(3)			
A ₁	11.00	5.50	1.80	7.30	1.50	1.60
B ₁	7.20	3.60	1.03	4.63	1.56	1.60
A ₂	11.00	5.50	4.11	9.61	1.14	1.20
B ₂	6.40	3.20	2.96	6.16	1.04	1.20

(下转第 11 页)

式和静力触探公式来估算单桩竖向承载力标准值之外,又增加了一个估算单桩竖向承载力标准值的途径。

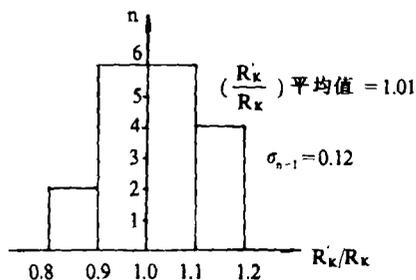


图5 试算情况频数分布

四、结 语

1. 在饱和黄土地区采用钢筋混凝土预制桩时,从静压桩和打入桩的单桩竖向承载力的对比情况看,两种沉桩方法均可采用。由于静压桩施工时无噪音和污染,桩身混凝土强度等级可适当降低和减少配筋量,所以得(上接第6页)

力值都是安全的。据此,可以得出本试验中桩承受最大负摩阻力时所具有的安全系数值,此值即可认为是考虑负摩阻力的承载力安全系数 K_n 。基于安全考虑,对于两种不同情况分别取定为1.2和1.6。应该指出,上述 K_n 值的取定是以本试验场地地基土为依据的,而桩是穿过湿陷性土层支承于非湿陷土层上。

最近审定通过的《建筑桩基础技术规范》(送审稿)^[4]对考虑负摩阻力的桩基承载力和沉降的验算作了如下规定:

1. 对于摩擦型桩取桩身计算中性点以上侧阻力为零,进行验算;
2. 对于端承型桩除满足上述要求外,尚应考虑下拉荷载的作用;
3. 当周围土层沉降不均匀或建筑物对不均匀沉降较敏感时,均应将上述两种桩型负摩阻力引起的下拉荷载计入附加荷载,验算桩基沉降。

由此可见,该规范也充分地反映了同样的观点,即对于摩擦型桩,其负摩阻力问题首先是一个附加沉降问题,其次才是承载力问题。

到广泛采用。为充分发挥桩端持力层的承载力,应设法使静压桩的桩端进入持力层一定的深度。

2. 本文提出的按标准贯入锤击数来估算单桩竖向承载力标准值的经验公式,可供饱和黄土地区估算预制桩单桩竖向承载力标准值时参考使用。

参考文献

- [1]《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89),中国工业出版社,1989
- [2]刘金砺,《桩基础设计与计算》,中国工业出版社,1990
- [3][苏]穆斯塔伐耶夫著,张中兴译,《湿陷性黄土土地基与基础的计算》,水利电力出版社,1984
- [4]孙更生,郑大同,《软土地基与地下工程》,中国工业出版社,1984
- [5][美]A.S.Vesic,《桩基础设计原理》,浙江省建筑科学研究所译,1982
- [6]建筑基础构造设计指针(日文),日本建筑学会,1988

六、结 论

1. 滑动式测微计能连续地测定桩身内间距为1m的两点间平均应变值,从而准确地测得整个桩身应变规律。

2. 实测数据表明,虽然本场地土属于非自重湿陷性黄土,但其停水后产生的负摩阻力仍是很大的,说明非自重湿陷性黄土也要考虑负摩阻力问题。

3. 本试验所得负摩阻力实测值与理论计算值有一定差异,应积累更多的实测资料,以便改进计算方法。

4. 试验表明,对于黄土地基中的摩擦型桩,其负摩阻力问题首先应考虑的是附加沉降问题,其次才是承载力问题。

参考文献

- [1]刘金砺,《桩基础设计与计算》,中国工业出版社,1990年
- [2]李大展等,《蒲城电厂扩底灌注桩试验报告》,中国建筑科学研究院地基基础研究所,1991年5月
- [3]李光煜,滑动测微计简介,岩土力学,9(1)1988
- [4]《建筑桩基础技术规范》编制组,《建筑桩基础技术规范》(送审稿),1991年12月,北京