

非饱和-饱和状态下黄土地基中灌注桩承载性能的研究

刘三仓, 隋国秀, 刘志伟

(西北电力设计院, 陕西 西安 710032)

摘要: 通过黄土地区大量的室内取样试验、现场桩基荷载浸水试验资料的分析与研究, 揭示了黄土在含水率递增过程中抗剪强度的变化规律、非饱和-饱和状态下桩侧摩阻力的发展变化以及桩端在砂层、卵石及黄土条件下的附加沉降变形, 建立了黄土地区桩侧摩阻力和单桩承载力的经验公式, 供岩土工程技术人员在实际工程中参考使用。

关键词: 湿陷性黄土; 抗剪强度; 摩阻力; 附加沉降; 荷载; 承载力

中图分类号: TU475 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)01-0147-05

作者简介: 刘三仓(1960-), 男, 陕西白水人, 教授级高级工程师, 主要从事电力岩土工程勘察、试验和设计工作。

E-mail: liusc@nwepdi.com。

Research on bearing capacity of cast-in-place piles in unsaturated to saturated loess

LIU San-cang, SUI Guo-xiu, LIU Zhi-wei

(Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: Based on a great number of laboratory tests on soils and loading tests on cast-in-place piles in the loess region, the rules of the shear strength decreasing with the increasing of moisture content of the loess, the development and variation of skin resistance and the additional settlement deformation of piles with saturation of unsaturated loess were found. The empirical formulas of the skin resistance and bearing capacity of piles were set up for the loess.

Key words: collapsible loess; shear strength; skin resistance; additional settlement; load; bearing capacity

0 引言

随着国家中西部地区开发步伐的加快, 投资重心将会逐步向该地区偏移。而这里得天独厚的煤炭与天然气资源, 使得建设大中型火力发电厂显得更加有竞争力。因此, 在煤炭基地周边地区, 许多大容量的火力发电厂及重化工基地正在建设和规划中。这些大型工程的主要建(构)筑物多为大尺寸重荷载, 要求地基具有较高的承载力与较小的变形, 特别是对差异变形的严格限制。但这些工程多处于我国黄土广泛分布的地区, 特别是黄土台塬地区, 其地下水位埋藏较深, 天然状态下黄土多处于非饱和状态。而非饱和状态下黄土所特有的某些特性早已为人们所了解, 即随着土体中含水率的不断增加, 土体从非饱和向饱和状态过渡, 土体抵御外荷的能力也愈来愈小, 甚至产生湿陷变形, 这就使得在某些条件下受局部浸水影响易造成差异沉降的原因。对于自重湿陷性黄土还存在不同荷载条件及不同的浸水环境会产生不同的桩侧摩阻力的现象。这些问题的存在使得在非饱和黄土地区采用天然地基的可能性变得很小, 多数情况下都要进行不同程度的处理。在大厚度湿陷性黄土地区, 采用防水和消除部分湿陷量的地基处理方法仅能满足一般建(构)

物的要求, 对于较大尺寸与荷载的重要建(构)筑物这显然是不能满足要求的, 目前普遍采用能为建(构)筑物提供足够支撑力的扩底灌注桩方案。而位于不同场地上的扩底灌注桩, 其桩长、桩径、桩的承载力由于受到诸多因素的影响而难以确定。通常的做法主要是通过现场试验来确定单桩的承载力, 而一个完整的桩基试验的完成需要数月的时间, 费用少的几十万多的达几百万元, 这对于工程建设的周期与投资效益都是难以接受的。因而寻求一种理论上的计算方法是岩土工程技术人员迫切的需要。

1 黄土的抗剪强度与含水率的关系

大量的试验已经证明, 土体的抗剪强度随土体中含水率的增加而降低, 随土体含水率的减少而增大, 对同一种土体遵循 $\tau = f(w)^{[1]}$ 。

黄土是一种特殊性土, 分布和形成环境因素决定其在天然状态下多处于非饱和状态, 除所具有的一些自身特性外, 也同样表现出一一般黏性土的物理力学性质。随着土体中含水率的变化, 土体的抗剪强度增大

或降低。表 1、图 1 为陕西关中地区黄土室内试验获得的不同时代黄土抗剪强度指标^[1] c 、 φ 随含水率变化的统计数据和 φ 值随含水率变化趋势线。

表 1 黄土抗剪强度指标与含水率的试验统计

Table 1 Test statistics of shear strength and the moisture content of loess

		含水率 $w/\%$	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5
Q_3	c/kPa	90	75	63	53	45	38	35	
	$\varphi/(\text{^\circ})$	30	27.5	26	24.8	23.8	23.2	23	
Q_2^2	c/kPa	100	85	70	57	48	42	41	
	$\varphi/(\text{^\circ})$	29.5	27.5	26	24.5	23.5	23	22.8	
Q_2^1	c/kPa	130	110	92	78	72	68	—	
	$\varphi/(\text{^\circ})$	30	28	26	24.5	23.5	23.2	—	
Q_1^2	c/kPa	150	125	112	110	92	86	80	
	$\varphi/(\text{^\circ})$	30	28	26.2	25	24	23.2	23.2	
Q_1^1	c/kPa	150	120	108	94	85	78	74	
	$\varphi/(\text{^\circ})$	33.5	31	29.5	28.5	27	26.8	26.5	

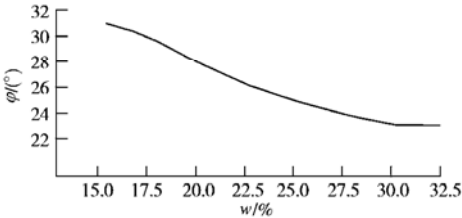


图 1 黄土抗剪试验 φ 值与含水率关系曲线

Fig. 1 Correlation between φ and water content

可以看出，随着黄土土体中含水率的递增，土体由含水率低的坚硬状态逐渐过度到饱和状态，土体的抗剪强度指标 c 、 φ 值也随之不断减小，相应土体的抗剪强度不断降低，饱和状态下 φ 趋于一个固定的数值。而在相同含水率的情况下，土体的强度大小取决于黄土沉积的时间长短。

2 典型条件下桩体试验结果的分析

2.1 试验条件和过程的简介

(1)桩端位于砂层中的非自重湿陷黄土地基中的桩体试验^[2]

a 桩为钻孔压浆桩,桩径为 $d=600\text{ mm}$ ，桩长 $L=24\text{ m}$ 。桩体 16 m 以上为 Q_3 非自重湿陷性黄土状粉土、粉质黏土。试桩在天然状态下加载到 1500 kN 时进行维持荷载浸水，土体饱和后继续进行加载试验，达极限承载力。侧摩阻力沿深度的发展变化如图 2 (a)，曲线 1、2 是天然状态下不同荷载下摩阻力分布曲线；曲线 3 是在曲线 2 原荷载下浸水饱和后摩阻力的重新分布；曲线 4、5 是饱和状态下继续加压条件下摩阻力的分布。

(2)桩端位于卵石层中的自重湿陷黄土地基中的

桩体试验^[3]

b 桩为钻孔压浆桩，桩身直径 $d=600\text{ mm}$ ，桩长 $L=23\text{ m}$ 。22 m 以上为 Q_4 、 Q_3 自重湿陷性黄土状粉质黏土，桩端位于卵石层地基之上。侧摩阻力沿深度的发展变化如图 2 (b)，曲线 1、2 是天然状态下不同荷载下摩阻力分布曲线；曲线 3、4 是在 1700 kN 荷载下浸水过程和浸水饱和状态下的侧阻力分布；曲线 5 是在饱和状态下继续加载条件下的摩阻力分布。

(3)桩端位于非自重湿陷黄土地层中的自重湿陷黄土地基中的桩体试验^[4]

c 桩为扩底灌注桩， $d=1200\text{ mm}$ ， $L=40\text{ m}$ ，扩大端直径 $D=2500\text{ mm}$ 。桩体 32 m 以上位于 Q_3 、 Q_2 自重湿陷性黄土状粉土、粉质黏土地基中，其下为非自重湿陷性黄土。侧摩阻力沿深度变化如图 2 (c)，曲线 1 是天然状态下 6000 kN 荷载下摩阻力分布；曲线 2 是在 6000 kN 荷载浸水饱和状态下的侧阻力分布；曲线 3 是在饱和状态下继续加载条件下的摩阻力分布。

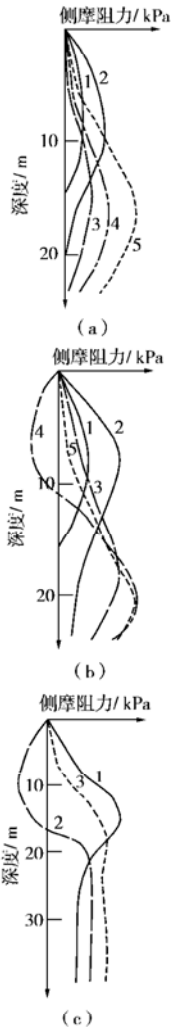


图 2 天然状态、浸水状态、饱和状态下桩体侧摩阻力的分布
Fig. 2 The distribution of skin resistance of the piles under natural, inundated and saturated states of loess

表 2 黄土地基中桩的侧摩阻力随土的状态变化情况表
Table 2 Skin resistance of the piles under different conditions of the loess

桩型		天然状态				浸水(不同时段)			停止浸水继续加载（部分失水）					
桩顶荷载/kN		200	600	1000	1500	1500	1500		1800	2600	3000	4000	4600	4800
a	12 m 以上侧摩阻力/kPa	6.3	18.5	32.3	40	7.8	10		14.2	10.2	9.4	12.3	18.9	22.4
	12 m 以下侧摩阻力/kPa	1.6	10.3	16.5	37.6	62.9	70.9		81.7	87.1	80.4	85.9	94.2	95.6
桩顶荷载/kN		500	900	1300	1700	1700	1700	1700	2500	2900	3300			
b	9 m 以上侧摩阻力/kPa	14.3	19.7	21.3	29.3	7.38	-11	-23.	-15.0	-7.6	2.2			
	9 m 以下侧摩阻力/kPa	12.5	27.1	43.5	53.0	38.9	33.1	15.1	26.1	27.3	33.5			
c	6000 kN 下中性点以上													
	负摩阻力平均值/kPa				-29				6000 kN 下中性点以下正摩阻力平均值/kPa					

2.2 桩侧摩阻力的发展变化规律

表 2 为黄土地基中桩的侧摩阻力随土的状态变化情况, 从图 2 和表 2 可以发现桩侧摩阻力的发展变化表现了以下特点。

(1)天然状态下的非饱和黄土,随着桩顶荷载的递增,侧摩阻力也在增大以及向深部不断传递。当有较大荷载时,外力才能传递到桩端,例如图 2 (a)、图 2 (b) 图摩阻力分布随桩顶荷载的增加由曲线 1 发展到曲线 2 以及表 2 中摩阻力随荷载的增大逐渐增大,通常情况下峰值摩阻力总是出现在桩体的中上部。

(2)浸水情况下,土体由非饱和向饱和状态过度,土体中的含水率逐渐增多,土体的抗剪强度不断降低,桩体上部或者中性点以上的土体侧摩阻力急剧变小,如图 2 (a)、图 2 (b) 摩阻力分别由曲线 2 发展到曲线 3。对于自重湿陷性黄土,出现了负摩阻力,如图 2

(b)、图 2 (c) 摩阻力相应由曲线 3 发展到曲线 4、曲线 1 发展到曲线 2。桩体上部黄土由非饱和状态到饱和状态侧摩阻力随土体含水率的增大而递减的发展变化规律可以概括成图 3,即随着土体含水率的递增,自重湿陷性黄土侧摩阻力不断降低直至出现负摩阻力,非自重失陷性黄土侧摩阻力同样不断降低并趋于一个稳定值。由于受到土体自重应力的重新分布和上部侧摩阻力的减小或负摩阻力的出现,桩体轴向力逐渐向深部转移和传递,引起桩体的压缩和桩端的沉降,使得桩体下部或中性点以下土体的侧摩阻力得以充分发挥。但桩土相对位移的差异和土体性质的不同摩阻力发挥的程度各异,如图 2 (a)、(b)、(c) 对应的摩阻力分布曲线 3、4、2 和表 2 桩摩阻力大小的变化。

(3)为了研究工程桩(桩顶有荷载)在浸水饱和和工况下的工作状态和摩阻力分布规律,将图 2 (a)、(b)、(c) 对应的摩阻力分布曲线 3、4、2 分别简化成图 4 (a)、(b)、(c)。表 3 为不同条件下中性点位置试验结果。从图 4 和表 3 可以看出,在自重湿陷性黄土场地,桩顶承受相当于设计荷载、桩端位于不同地层条件下的浸水饱和和试验实测结果表明:

a) 中性点深度和桩长的比例在 0.35~0.55 之间。

一般情况下当桩端位于黏性土、砂土和碎石土(桩端地层由压缩性高到压缩性低),比值分别从低向高取值;也随桩顶荷载的大小由小向大变化。

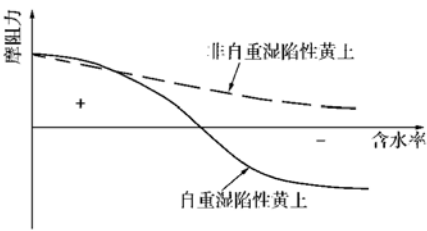


图 3 桩体上部的土在浸水过程中摩阻力的发展变化
Fig. 3 Variation and development of the pile skin resistance in the inundating process of the loess

表 3 中性点位置试验结果统计表
Table 3 Neutral point of test results

桩径 /mm	桩长 /m	桩端地层	桩顶荷载 /kN	中性点深度 /m	中性点与桩长比值
600	23	卵石	1700	12.0	0.52
600	23	卵石	0	18.0	0.78
800	23	卵石	2100	11.0	0.48
800	23	卵石	0	17.0	0.75
1200	40	Q2 黄土	6000	16.0	0.4
1200	40	Q2 黄土	0	24.0	0.6
1000	32	Q2 黄土	4800	12.0	0.38
1000	32	Q2 黄土	0	21.0	0.66

b) 负摩阻力的产生是缘于土体相对于桩体的位移,而产生这种位移是因为土体中含水率的增加引起的湿陷变形。黄土的湿陷变形程度取决于黄土内在的结构状况,这种结构与黄土的成因、沉积时间、天然状态下的埋深密切相关。不管是自重湿陷性黄土还是非自重湿陷性黄土,由于其结构本身对水的敏感性,饱水后土体的结构性大大减弱,使得土体传递力的性能增强,无论是所产生的负摩阻力还是正摩阻力,都是沿着桩体深度线性的递增或递减。这种饱水状态下摩阻力沿深度线性变化的规律是饱和黄土的特性之一,也是饱和黄土和非饱和黄土在力传递性能方面的显著区别。

(4) 饱和状态下继续施加桩顶荷载，桩相对于土体出现了位移，以及土体水分的损失，负摩阻力不断减少甚至消失，正摩阻力不断增大，如图 2 (a)、(b)、(c) 对应的摩阻力分布曲线 5、5、3。

2.3 饱和状态下灌注桩侧极限摩阻力和极限承载力计算的经验公式

根据图 4，可以建立饱和黄土地基中工程桩的侧摩阻力分布经验公式：

$$q_{sk}=\beta(c+rZ\tan\varphi) \text{ ,} \tag{1}$$

式中， β 为正、负摩阻力修正系数， c 、 φ 为饱和黄土固结快剪抗剪强度， r 、 Z 为计算深度黄土的饱和重度和地面或者中性点到计算点距离。

β 的取值：通过计算对比得出，对于中性点以上的黄土计算平均负摩阻力取 0.15~0.20；中性点以下黄土计算平均正摩阻力取 0.20~0.25；非自重饱和黄土计算正摩阻力取 0.15~0.20。这个结果和早年比伦^[5]通过现场试验得出负摩阻力的经验公式有些类似。

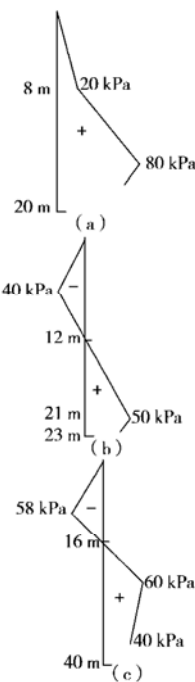


图 4 桩顶在一定荷载条件下浸水饱和和稳定后摩阻力沿桩身分布的简化图

Fig. 4 The distribution of the skin resistance along the pile shaft under steady load

根据摩阻力式 (1) 建立桩的极限承载力公式，其中：式 (2) 用于自重湿陷性黄土地；式 (3) 适用于非自重湿陷性黄土地。

$$Q_{uk} = \beta_2(C+\gamma(L-L_1)\tan\varphi) u (L-L_1) - \beta_1(C+\gamma L_1\tan\varphi) u L_1 + q_{pk} A_p \text{ ,} \tag{2}$$

$$Q_{uk} = \beta (C+\gamma L\tan\varphi) u L + q_{pk} A_p \text{ .} \tag{3}$$

式中 Q_{uk} 为单桩极限承载力标准值； L 为桩长； L_1

为中性点以上或相当于中性点以上桩长； β_1 为中性点以上平均摩阻力修正系数； β_2 为中性点以下平均摩阻力修正系数； u 为桩身周长； q_{pk} 为桩端土极限承载力标准值； A_p 为桩端横截面面积。

2.4 荷载作用下土体由非饱和到饱和状态桩体沉降分析

图 5 为不同状态下桩顶荷载 - 沉降曲线，表 4 为浸水期间桩顶沉降观测结果。

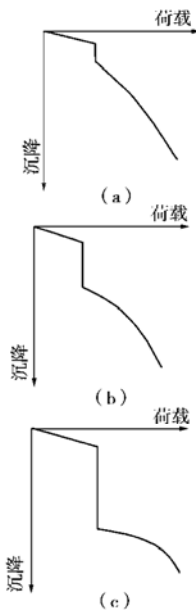


图 5 桩顶荷载 - 沉降曲线示意图

Fig. 5 Load-settlement curves under natural, inundated and saturated state of loess

从图 5 和表 4 可以看出，桩体由天然的非饱和状态过渡到饱和状态，在一定荷载（相当于预估设计荷载）作用下，由于桩侧摩阻力的减小或者自重湿陷变形引起的负摩阻力使得桩体受到的轴向力发生了变化，引起桩体在浸水过程中的压缩变形增加，以及造成桩端承受荷载的增加引起附加沉降变形。可以看出，在非自重湿陷黄土地，非饱和黄土浸水仅能引起桩体轴向力的变化，产生桩体附加压缩变形（例如 a 型桩），其变形量较小；在自重湿陷黄土地，浸水使桩体上部产生负摩阻力，引起桩端承受荷载的增加，造成土体产生附加沉降（例如 b、c 型桩），其附加沉降量的大小与桩径、桩长、桩型、成桩工艺、湿陷黄土的厚度、桩端地层的压缩性等有关。通过试桩试验结果证明，如表 4、图 5，土体附加沉降量的大小在相同荷载和负摩阻力条件下主要取决于桩端地层的压缩性，例如：b₁、b₂ 桩位于卵石层上，在较大的桩端附加应力增量作用下，桩体附加压缩变形和土体附加沉降仅 6.5~8 mm，桩端荷载的差异在低压缩地层中引起的附加变形差异较小；相反，桩端位于黄土地层上

表 4 浸水期间桩顶沉降的统计表
Table 4 The settlements of the pile top during inundation

桩型	桩长/m	桩径/mm	桩端地层	荷载/kN	天然状态下的沉降/mm	浸水状态下的附加沉降/mm	浸水前桩端土受力/kPa	浸水后桩端受力/kPa
a	24	600	砂层	1500	2.34	2.88	—	—
b ₁	23	600	卵石	1700	3.50	10.02	451	3071
b ₂	22.8	800	卵石	2100	2.06	10.11	693	1545
c ₁	40	1200	黄土	6000	4.01	14.46	70	784
c ₂	32	1000	黄土	4800	4.09	37.72	68	579

的 c_1 、 c_2 桩，在较小桩端附加应力作用下的附加压缩变形和附加沉降要大的多；同样桩端位于黄土地层上的 c_1 、 c_2 桩，由于 c_2 桩的桩端在浅部压缩性较大的黄土层上（天然状态静力触探锥尖 $q_c=4.0\text{ MPa}$ ），较桩端位于深部压缩性较小黄土层上（ $q_c=7.0\text{ MPa}$ ）的 c_1 桩在较小的附加应力而产生了较大的附加变形和附加沉降。

3 结 语

（1）黄土土体的抗剪强度和土体的含水率密切相关，随着含水率的递增，抗剪强度逐渐减小，完全饱和状态的黄土其抗剪强度指标 φ 趋于一个常数。黄土的沉积年代影响黄土的饱和抗剪强度，一般来说，沉积时间越长其饱和抗剪强度越大。

（2）伴随着土体含水率的递增，桩体上部桩侧摩阻力不断降低。在自重湿陷性黄土场地，由于土体湿陷变形的发展，摩阻力由正值逐渐过度到负值，出现了负摩阻力。在有一定荷载（相当于设计荷载）条件下，中性点位于 $0.35\sim0.55$ 桩长深度处。在非自重湿陷黄土场地，相当于中性点以上土体饱和状态下的侧摩阻力较小。

（3）饱和状态下，黄土原有的结构性减弱，土体传递力的能力增强，自重压力沿桩长线性增长，表现在摩阻力沿深度线性变化。

（4）饱和黄土摩阻力和承载力经验公式是模拟工程桩在工作状态下浸水饱和和试验结果的经验总结，真实地反映了工程桩的工作状态。

（5）黄土场地中的灌注桩在土体由非饱和 - 饱和状态的变化过程中，会产生一定的桩体附加压缩变形和桩端土的附加沉降，其大小取决于黄土的湿陷特性和桩端土的性质。

需要说明的是，本文是对陕西关中和山西晋东南 Q_3 、 Q_2 黄土场地大型灌注桩桩基试验成果的分析研究，该研究分析成果在最近进行的陇东地区灌注桩的浸水载荷试验中得到了进一步的验证，当然这些结论的广泛性还有待进一步的试验证明和分析探讨。

参考文献:

[1] 刘祖典.黄土的强度指标及其应用[D]. 西安: 陕西机械学院, 1990.(LIU Zu-dian. Strength index and its use of loess[J]. Xi'an: Shanxi Mechanical College, 1990.(in Chinese))

[2] 西安华泰岩土科技开发公司. 河津电厂钻孔压浆桩试桩总报告[R]. 1994.(Xi'an Hua-qin Geotechnical Science and Technology Development Company. Test report of bored pile in Hejin Power Plant[R]. 1994.(in Chinese))

[3] 电力工业部西北电力设计院. 陕西宝鸡第二发电厂钻孔压浆桩/干作业成孔灌注桩试桩总报告[R]. 1994.(Northwest Electric Power Design Institute. Test report of bored pile in Baoji Power Plant[R]. 1994.(in Chinese))

[4] 中国建筑科学研究院地基所. 蒲城电厂扩底灌注桩试验报告[R]. 1991.(Foundation Research Institute of Building Construction Science Research Institute of China. Test report of bored pile in Pucheng Power Plant[R]. 1991.(in Chinese))

[5] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998.(QIAN Jia-huan. Soil mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1998.(in Chinese))

[6] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 1995.(JGJ 94—94 Technical code for building pile foundations[S].1995.(in Chinese))

[7] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB50025 — 2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004.(in Chinese))