

大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究

黄雪峰^{1,2}, 陈正汉¹, 哈双³, 薛塞光⁴, 孙树勋⁵

(1. 解放军后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050; 3. 宁夏扶贫扬黄工程指挥部, 宁夏 银川 750004;
4. 宁夏水利厅, 宁夏 银川 750001; 5. 甘肃省建筑科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 结合国家重点工程项目宁夏扶贫扬黄灌溉工程, 在自重湿陷性黄土厚度大于 35 m 的场地上进行了挖孔灌注桩(桩径为 0.8 m, 桩长为 40 m, 浸水坑直径为 30 m)的大型现场载荷-浸水试验。设置了 4 种类型的试桩(无摩擦桩、空底桩、摩擦端承桩和悬吊桩), 采用了多种测试方法(钢筋应力计、滑动测微计等)。研究结果表明: 空底桩和悬吊桩在长度比湿陷性黄土层厚度小许多时, 所测得的正、负摩阻力数值偏小, 穿透整个湿陷性黄土层的摩擦端承试桩所得结果比较符合实际; 实测负摩阻力远高于黄土规范建议的负摩阻力值, 且负摩阻力的数值与场地的湿陷类型、湿陷量的大小无明确对应关系; 桩土相互作用能减小场地的湿陷变形量。对黄土中几个大型工程的现场灌注桩试验资料分析发现, 中性点位置超出了建筑桩基技术规范提供的参考值范围。本文的研究成果可供今后类似场地的灌注桩的设计及修订黄土规范参考。

关键词: 大厚度自重湿陷性黄土; 灌注桩; 桩的现场浸水试验; 桩的承载性状; 负摩阻力; 中性点; 黄土规范

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)03-0338-09

作者简介: 黄雪峰(1960-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 中国土木工程学会土力学及岩土工程学会桩基学术委员会委员, 主要从事湿陷性黄土地基处理、桩基工程等方面的研究与设计工作。E-mail: hxfen60@163.com。

Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness

HUANG Xue-feng^{1,2}, CHEN Zheng-han¹, HA Suang³, XUE Sai-guang⁴, SUN Shu-xun⁵

(1. Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China; 2. Lanzhou Science and Technology University, Lanzhou 730050, China; 3. Command for Pumping Water from the Yellow River and Helping Poor People in Ningxia; Yinchuan 750004, China; 4. Ningxia Water Conservancy Administration, Yinchuan 750001, China; 5. Civil and Architectural Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Large scale field tests of filling piles were performed in a collapsible loess site with a thickness of 35m under natural content and immersion states. The diameter and length of test piles were 0.8 m and 40 m, respectively. 4 types of test piles were designed and several measuring methods were adopted. It was shown by test results that the positive frictional resistance measured from pile ZH2 and the negative frictional resistance measured from pile ZH5 were smaller than those measured from pile ZH3 and pile ZH4; The negative frictional resistance measured from test piles was far greater than the numerical value recommended by « Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions »(GB50025—2004); The locations of neutral points measured from several pile tests in-situ exceeded the range proposed by «Technical Code for Building Pile Foundations » (JGJ 94-94); The collapsible settlement of loess could be decreased with pile group. The results obtained in this paper might be useful for the similar project and to revise GB50025—2004 and Code JGJ 94-94.

Key words: self weight collapse loess with big thickness; filling pile; field immersion test of pile; bearing behaviors of pile; negative frictional resistance; neutral point; code for building construction in collapsible loess regions

0 引言

湿陷性黄土中的桩基受力机理与负摩阻力是黄土地区桩基设计的重要问题^[1-4], 许多学者为此做出了很

大努力^[4-11]。研究方法主要采用现场浸水试验, 可直

收稿日期: 2006-02-06

接得出桩基的承载力及负摩阻力,比较准确可靠,但费用高,费工费时,因而试验资料很少。表1是改革开放以来国内所作的湿陷性黄土中灌注桩现场浸水试验的基本资料。

近年来,随着国家经济的发展和西部大开发战略的实施,黄土地区的建设项目急剧增加,规模越来越大,桩基的使用日益增多,出现了需要解决的新问题。譬如,大厚度自重湿陷性黄土中的桩基设计就是一个挑战性课题。

宁夏扶贫扬黄灌溉工程是国家重点建设项目,该工程泵站、渡槽等大部分工程地处大厚度自重湿陷性黄土地区,黄土层厚度大于60 m,自重湿陷性土层厚度20~35 m。由于以前没有遇到过厚度如此之大的自重湿陷性黄土场地,因而对其中的桩基传力机理、负摩阻力的大小、中性点的位置等尚缺乏认识,对相应的桩基设计经验不足,不同的设计者所提出的承载力相差甚远,难以达成共识。为此,宁夏扶贫扬黄工程建设总指挥部组织设计单位、科研单位、同行专家经多次会议讨论研究,最后决定在11号泵站场地附近进行桩基在天然状态下、浸水状态下的试验研究工作。

试验场地位于宁夏固原县,黄土层厚度大于60 m,自重湿陷性黄土层厚度约35 m;试验设置了4类桩型,采用了多种测试方法;浸水试坑直径30 m,总耗水量31275 m³,浸水观测历时56 d,停水后观测历时12 d;坑外地面下沉范围为30~35 m,与场地湿陷性土层厚度接近。本试验研究为大厚度自重湿陷性黄土的桩基设计积累了宝贵资料和经验。本文介绍有关研究成果。

1 试验场地的岩土工程条件

试验场地位于宁夏固原县七营镇张堡村,场地地处清水河Ⅲ级阶地中部,地势较开阔,地形较平坦。场地黄土层厚度大于60 m,湿陷性土层厚度约35 m,地层自上而下为:黄土层,层厚35 m,浅黄色,土质较均匀,多孔,属自重湿陷性土层;壤土层,层厚大于25 m,为第四系上更新统冲积粉土层,呈棕黄~浅

红色,硬塑,稍湿,一般属非湿陷性土层。
由地质勘察资料知,该场地的地下水位深度大于70 m。黄土层属自重湿陷性土层,湿陷下限深度35 m。整个场地计算自重湿陷量一般≤140 cm,最大可达160 cm;计算总湿陷量一般为95~170 cm,最大可达190 cm。地勘报告将该场地评价为自重湿陷性黄土地,湿陷等级Ⅳ级,湿陷程度严重~很严重。

2 试验概况

2.1 试桩布置与仪器埋设

本次试桩,均为干作业人工挖孔混凝土灌注桩。根据研究需要,共安排试桩5根,其编号分别为ZH1, ZH2, ZH3, ZH4和ZH5;锚桩10根,皆为扩底桩,扩底直径1.6 m,扩底高度1.7 m。用于ZH1, ZH2, ZH3和ZH4的8根锚桩皆长30 m,用于ZH5的两根锚桩长40 m。各试桩的尺寸和主要测试内容见表2,试验平面布置见图1。ZH1和ZH2布置在距图1试坑边50 m处。

在ZH1桩端埋设压力盒,测定桩端阻力;桩侧裹两层油毡,油毡间涂抹黄油,以消除侧阻力的影响,可称之为无摩擦桩。ZH2在距钢筋笼底端1 m处放置钢板,不灌注混凝土,故称之为空底桩,用以测试天然状态下的正摩阻力。试桩ZH3和ZH4是摩擦端承桩,用以研究桩身轴力、侧阻力和正负摩阻力的变化规律;在这两根桩身中设置钢筋应力计,测点间距1.5 m;同时设置了滑动测微计,测点间距1.0 m,进行平行测试。钢筋应力计和滑动测微计的设置情况如图2所示。ZH5称为悬吊桩,其长度小于自重湿陷性黄土层厚度,用于测定浸水后的平均负摩阻力。应当指出,ZH5的设置方法与通常方法不同。后者一般将试桩的桩端放在非湿陷性土层上^[1],在浸水过程中桩身不下沉;而ZH5长20 m,桩顶固定,桩身悬吊在自重湿陷性黄土中,在浸水过程中桩身同样不会下沉,但桩长缩短10 m以上,可节省部分经费,其不足之处是得不出中性点。

表1 黄土中灌注桩现场试验资料

Table 1 Test information of cast-in-place pile in loess

试验地点、时间	自重湿陷性黄土层厚度/湿陷下限深度/m	湿陷等级	浸水试坑尺寸/m	浸水时间/d	桩径/m	最大桩长/m	试坑浸水自重湿陷量/cm
兰州东岗 1987	12/12	自重Ⅲ级	直径12	40	0.8	10	40
兰州河口 1988	15/15	自重Ⅲ级	直径15	45	1.0	15	55
蒲城电厂 1991	0/35	非自重	直径40	40	1.0	40	6.3
宝鸡第二电厂 1993	18.2/20	自重	50×30	95	0.8	22.85	8.5
宁夏扬黄 2001	35/35	自重Ⅳ级	直径30	68	0.8	40	48.5

注:1.蒲城电厂试验场地为黄土与古土壤成层交互分布,按现场浸水试验结果判为非自重湿陷性黄土地;2.蒲城电厂和宝鸡第二电厂的试桩皆为大直径扩底灌注桩资料;3.宝鸡第二电厂的钻孔压浆试桩长23 m,工程未采用。

试坑直径 30 m，坑深 0.5~1.2 m。为使试坑浸水后桩侧负摩阻力能充分发挥，在试坑中部布置了一个直径 5 m、深 1.5 m 的小坑，把试桩 ZH3，ZH4 布置在此坑中。试桩 ZH3 在天然状态下静载试验后完全卸载，浸水后未作测试工作。

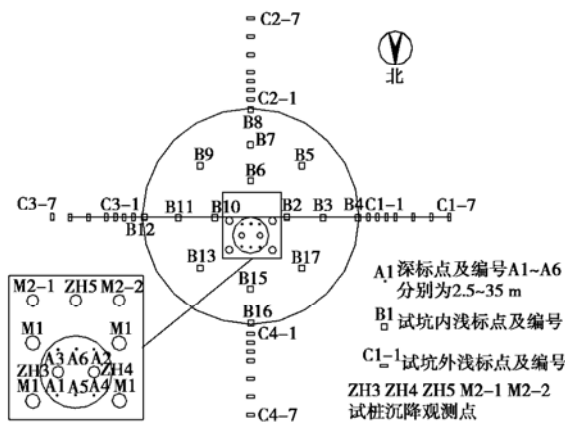


图 1 试桩平面布置图

Fig. 1 Layout of test piles in immersion site

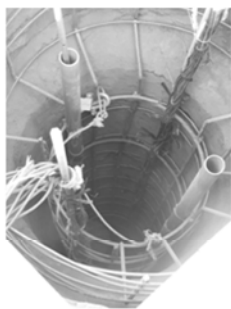


图 2 钢筋应力计和滑动测微计的设置

Fig. 2 Arrangement of steel stress meter and slippage micrometer

为了加快桩周地基土浸水饱和，在坑内布置直径 100~150 mm、深 26 m 的注水孔 141 个，注水孔中心间距 2 m，孔内填充粒径为 2~6 cm 的卵石。

为测量浸水后试坑内外地面和土中分层的湿陷变形，在试坑内设置地面沉降观测点 19 个、机械式土中分层沉降观测点 6 个，在试坑外设置地面沉降观测点

28 个。在试桩 ZH3，ZH4，ZH5 及 ZH5 的 2 根锚桩上，设置沉降观测点。土中机械式分层沉降观测点的设置及浸水变形结果见表 3。

2.2 桩身内力测试方法

本项试验用两种方法测试桩身内力。把桩视为弹性体，采用钢筋应变计与滑动测微计量测钢筋竖向应变与桩身应变，进而推算桩身轴向力与桩侧摩阻力。

在基桩主筋上不同部位的断面上对称安装埋入式钢筋应力计（见图 2）。该应力计适用于监测钢筋结构钢筋的工作应变，其传感器具有良好的温度补偿和自防护能力，通过电阻应变仪测量钢筋的工作应力引起的应变值，然后通过计算求出试桩的轴力。钢筋应力计在埋入之前进行标定，在水中浸泡，检查其稳定性。埋入后，进行 1 次测量，检查埋入后的钢筋应力计的成活率。然后，在静载试验开始前进行 1 次量测，作为初读数，以后每增加一级荷载量测 2 次，直至静载试验结束。试坑浸水前测量 1 次，浸水期间，每天测量 2 次。

滑动测微计由瑞士生产，是根据线法监测原理而设计的。其主体为一个标距 1 m、两端带有球状测头的探头，内装一个 LVDT 位移计和 NTC 温度计。为了测定测线上的应变及温度分布，测线上每隔 1 m 安置一个具有高精度定位功能的锥形环，环间用 HPVC 管相连，测微计可依次测量相邻锥形环之间的相对位移。每根试桩埋设 2 根滑动测微管（见图 2）。静载试验开始前进行 1 次量测，作为初读数，以后每增加 1 级荷载量测 1 次，直至静载试验结束。试坑浸水前测量 1 次；浸水期间，根据土层湿陷情况，决定测试次数。

计算桩的轴力时要用到桩身混凝土弹模值 E_s ，其值可根据各级荷载下桩顶荷载及桩顶部应变值求出。各试桩的桩顶高出试坑底面约 1.5 m，该段桩身轴力等于桩顶荷载。试桩 ZH3 在不同荷载下测得的 E_s 值

表 2 宁夏扬黄试桩设计参数及测试内容

Table 2 Design parameter and measurement for test piles				
试桩编号	桩长/m	桩径/m	混凝土强度	设置特点与测试内容
ZH1	40	0.8	C30	桩侧双层油毡隔离，测试天然状态的端阻力
ZH2	25	0.8	C30	桩底 1 m 脱空，测试天然状态的侧摩阻力
ZH3	40	0.8	C30	摩擦端承桩，测试天然状态的桩身内力及正摩阻力
ZH4	40	0.8	C30	摩擦端承桩，测试浸水与饱和状态的桩身内力及正、负摩阻力
ZH5	20	0.8	C30	悬吊桩，测试负阻力

表 3 坑内分层沉降观测点的浸水沉降

Table 3 Immersion settlement of observation points at different depth						
深标点编号	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
埋设深度/m	2.5	5	10	15	25	35
浸水沉降/cm	48.5	31.9	17.1	8.0	3.0	1.3

与应变的关系曲线如图3所示。应当注意, E_s 值随应变的大小而变化, 须按相应的应变范围选用。

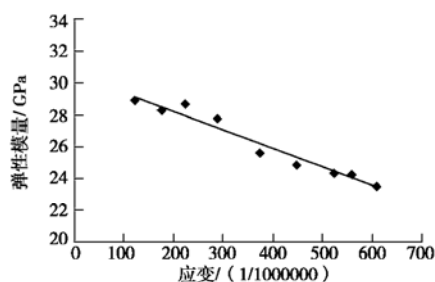


图3 ZH3 桩的弹性模量与应变曲线

Fig. 3 Relation between elasticity modulus and strain of pile ZH3

3 天然状态下桩的极限承载力

3.1 极限端阻力

由试桩 ZH1（桩侧隔离）的试验确定, 实测 $Q-s$ 曲线见图4。在天然状态下, 桩顶竖向最大稳定加荷量 950 kN。当加荷至 950 kN 时, 总沉降量大于 14.77 mm, 且 24 h 不能稳定。根据图4分析, 该试桩竖向极限承载力取 $Q-s$ 曲线明显陡降的起始点对应的荷载值 800 kN。由此计算得出, 在天然状态下其桩端土层极限承载力为 1600 kPa。应当指出, 桩侧用油毡隔离不可能完全消除桩侧摩阻力, 故所测端阻力数据偏高。

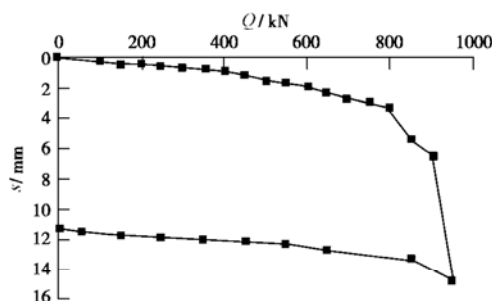


图4 ZH1 桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 $Q-s$ curve of pile ZH1

3.2 极限侧阻力

由试桩 ZH2（空底桩）确定, 实测 $Q-s$ 曲线见图5。在天然状态下, 桩顶竖向最大稳定加荷量 3600 kN, 当继续加荷至 4000 kN 时, 沉降剧增, 不能稳定, 便终止加荷, 此时的总沉降量已大于 32.50 mm。据图分析, 该试桩竖向极限承载力取 $Q-s$ 曲线明显陡降的起始点对应的荷载, 即 3600 kN。由于该试桩没有桩端阻力, 根据实测数据计算得出, 其桩侧极限正摩阻力平均值为 64.3 kPa。

3.3 单桩极限承载力

由试桩 ZH3 确定, 实测 $Q-s$ 曲线见图6。在天然状态下, 桩顶最大加荷量 10000 kN, 最终沉降量大

于 79.45 mm。当加载至 8400 kN 时, 总沉降量为 16.43 mm; 加载至 8800 kN 时, 总沉降量为 43.72 mm, 曲线出现陡降段。根据图6分析, 该试桩竖向极限承载力取 $Q-s$ 曲线明显陡降段的起始点所对应的荷载, 即 8400 kN。

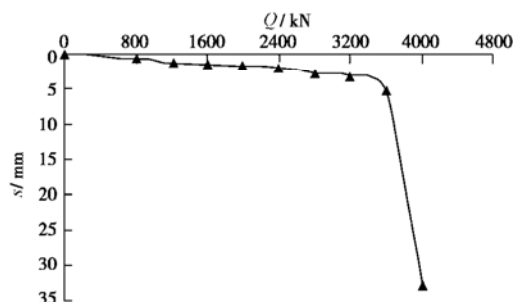


图5 ZH2 桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 5 $Q-s$ curve of pile ZH2

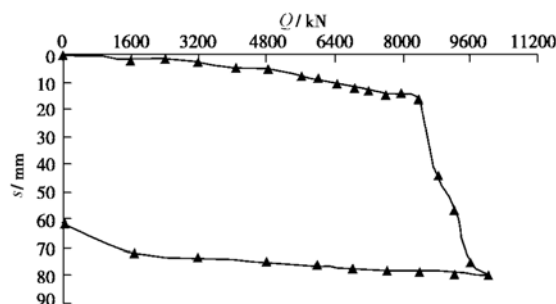


图6 ZH3 桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 6 $Q-s$ curve of pile ZH3

4 天然状态下荷载传递特征

4.1 桩身轴向力的传递特征

桩身轴向力的传递及正摩阻力的测试在 ZH3 中进行。桩身轴力和摩阻力的分布见图7~9。由图可见: 最初加载时桩顶荷载与桩身摩阻力相平衡, 桩的下部不受力; 随着上部荷载的加大, 部分力传至桩底并逐渐变大; 从桩身某段平均单位摩阻力 (f) 来看, 随着荷载加大, f 值不断加大, 以后增加的荷载由下部桩段或桩底承受。当荷载大于 8400 kN 以后, 桩侧各区段间的摩阻力和端力均得到较为充分发挥, 由图9可得平均摩阻力近似为常数 (80~82 kPa)。极限端阻力为 1550 kPa, 与 ZH1 测得的 1600 kPa 很接近。正摩阻力的平均值从荷载为 7200 kN 的 66 kPa 增加到荷载大于 8400 kN 时的 81 kPa, 比由 ZH2 测得的 64.3 kPa 大。

这是由于深部土层的侧压力大, 抗剪强度高, 在极限状态下发挥的摩阻力也大, 从而提高了平均摩阻力。这一点也可由图8和图9看出, 当桩顶荷载较大时 (大于 5600 kN), 在试桩 ZH3 上段 (5~15 m) 的

摩阻力小, 15~35 m 段的摩阻力大。空底桩 ZH2 长度 25 m, 不能包括摩阻力大的深部桩段, 故测出的平均摩阻力偏小。

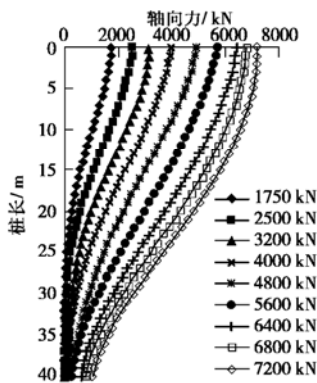


图 7 ZH3 桩的轴力

Fig. 7 Axial force of pile ZH3

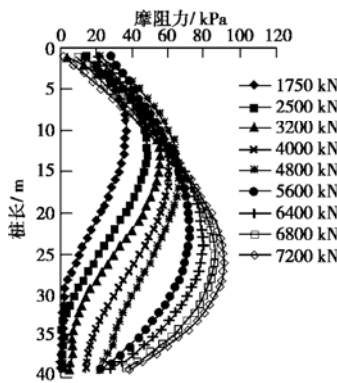


图 8 ZH3 桩的侧摩阻力

Fig. 8 Frictional resistance of pile ZH3

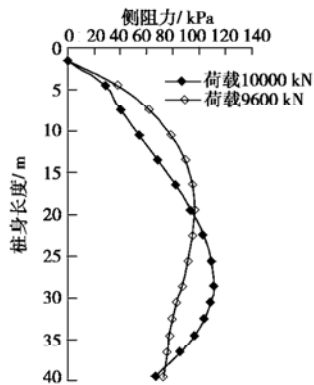


图 9 ZH3 桩侧摩阻力

Fig. 9 Frictional resistance of pile ZH3

4.2 桩侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系

桩侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系见图 10。当桩顶加荷至 4000 kN, 荷载均由桩侧摩阻力承担, 桩端基本不受力。当桩顶加荷大于 4000 kN 时, 桩端开始受力。当桩顶加载 8400 kN (极限荷载) 左右时, 摩阻力和端阻力均得到充分发挥时, 摩阻力和端阻力

分配比例关系为 6:1。因此, 在长桩受力过程中, 摩阻力占据很大的比例。

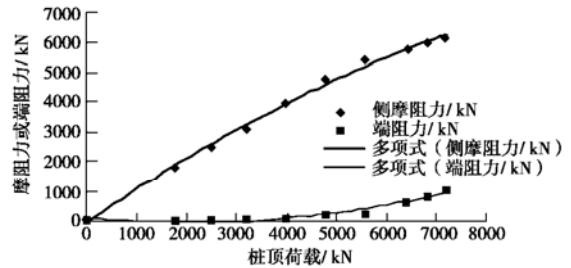


图 10 ZH3 桩的侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系曲线

Fig. 10 Relation of frictional resistance, and end bearing with load on pile top for pile ZH3

4.3 桩顶沉降和桩身弹性压缩变形与荷载关系

桩顶沉降和桩身弹性压缩变形与荷载关系曲线见图 11。随着桩顶荷载增加, 桩顶的沉降量与桩身混凝土弹性压缩总变形量基本一致, 桩顶的变形就等于桩身混凝土弹性压缩总变形。参考表 3, 深标点 A6 的浸水下沉量是 1.3 cm。在成桩过程中, 桩端土层受到压缩, 因而在天然状态下桩的沉降非常小, 说明沉降测试结果是可靠的。

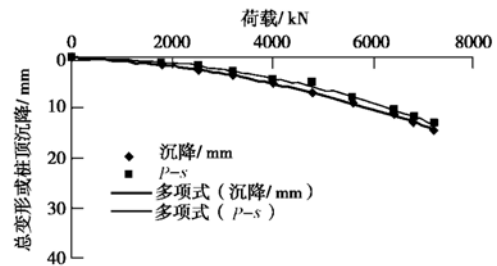


图 11 ZH3 桩顶沉降和桩身弹性压缩变形与荷载关系曲线

Fig. 11 Relation of top settlement and elastic compression deformation of pile with load on pile top for pile ZH3

5 浸水期间、饱和状态下桩身轴力的传递特征及负摩阻力变化

5.1 浸水期间、饱和状态下单桩极限承载力

试桩 ZH4 的实测 $Q-s$ 曲线见图 12。在天然状态下, 桩顶加载至设计荷载 1600 kN, 沉降量为 1.02 mm。在浸水期间, 桩顶维持设计荷载 1600 kN, 湿陷沉降量为 17.00 mm。在饱和状态下, 最大加荷量 5200 kN, 最终沉降量大于 66.27 mm。当加载至 4000 kN 时, 总沉降量为 20.74 mm; 加载至 4400 kN 时, 沉降出现突变, 总沉降量为 31.02 mm。据图 12 分析, 该试桩竖向极限承载力取 $Q-s$ 曲线明显陡降的起始点所对应的荷载, 即 4000 kN, 约为天然状态下 ZH3 竖向极限承载力的一半。

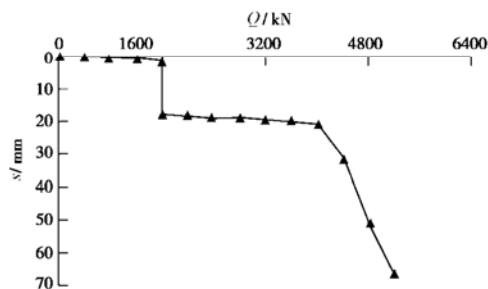


图 12 ZH4 浸水 $Q-s$ 曲线

Fig. 12 $Q-s$ curve in immersion process of pile ZH4

5.2 浸水期间桩身轴力传递与负摩阻力的演变特征

试桩 ZH4 保持恒载 (1600 kN) 在浸水期间与饱和状态下、饱和状态条件下加载的实测轴力、摩阻力变化曲线分别如图 13~15 所示。在天然状态下, ZH4 桩顶竖向加载至 1600 kN 并保持不变进行浸水。随着浸水时间增长, 桩周土体发生湿陷变形, 上部土层正摩阻力降低, 逐步向负摩阻力转化, 下部土层正摩阻力逐渐发挥; 浸水第 5 d 时桩侧产生负摩阻力, 形成下拉荷载。负摩阻力的演变有以下特点:

(1) 随着浸水时间的增长, 负摩阻力先急剧增长, 后缓慢增长, 然后趋于某一稳定值; 中性点也随着负摩阻力的增长逐渐下移 (见图 14); 在浸水 56 d 时, 负摩阻力最大值为 14.8 kPa, 中性点位于 17 m 深度处。

(2) 负摩阻力沿桩身的发展是随浸水时间的延续, 自上而下发生和发展的, 这一过程也是正摩阻力减小和消失的过程。在负摩阻力的作用下, 桩身各截面的轴力也经历先急剧增长, 后缓慢增长, 最后趋于某一稳定值的过程。

(3) 停水后, 桩周土发生固结变形, 桩侧负摩阻力迅速增长, 中性点也迅速下移; 停水 12 d 时, 负摩阻力最大值为 33.1 kPa, 位于 10 m 深度处, 相应的中性点则位于 19 m 深度处 (见图 14)。

(4) 在饱和状态下加载, 随着荷载的增加, 其负摩阻力逐渐减小和消失, 其中性点也逐渐上移 (见图 15)。

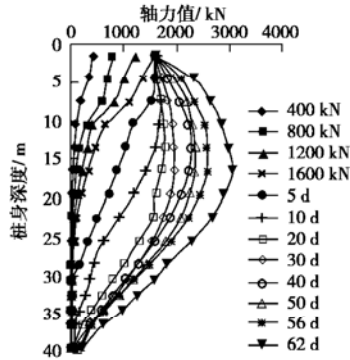


图 13 ZH4 桩身轴力

Fig. 13 Axial force of pile ZH4

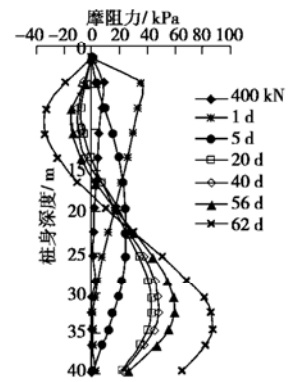


图 14 ZH4 桩在浸水与饱和状态时的桩侧摩阻力

Fig. 14 Frictional resistance of pile ZH4 in immersion and saturated state

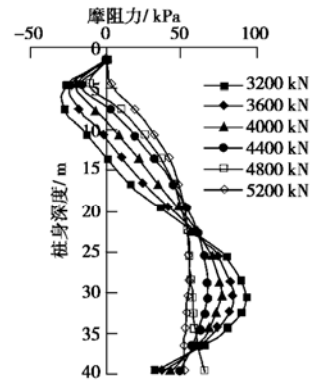


图 15 ZH4 在饱和状态加载时的桩侧摩阻力

Fig. 15 Frictional resistance of pile ZH4 under loading in saturated state

5.3 桩侧摩阻力、端阻力分担桩顶荷载的比例

ZH4 桩侧土体在饱和状态下, 桩侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系见图 16。当桩顶加荷至 1500 kN, 荷载均由桩侧摩阻力承担, 桩端基本不受力。当桩顶加荷大于 1500 kN 时, 桩端开始受力。当桩顶加载 4000 kN (极限荷载) 左右时, 摩阻力和端阻力均得到充分发挥时, 摩、端阻力分配比例关系为 3 : 1。当桩顶继续加荷至 5400 kN 时, 桩顶位移急剧增加, 桩与桩侧土产生剪切破坏, 桩侧阻力降低, 桩端受力加大, 此时摩、端阻力分配比例关系接近 2 : 1。因此, 在饱和状态下, 摩阻力明显降低, 桩端受力相对加大。

5.4 桩顶沉降和桩身弹性压缩变形与荷载关系

桩顶沉降和桩身弹性压缩变形与荷载关系曲线见图 17。在天然状态下, 桩顶荷载加至 1600 kN 时, 桩顶的沉降量与桩身混凝土弹性压缩总变形量基本一致。这时桩顶稳压 (荷载 1600 kN) 浸水, 待土体自重湿陷变形稳定后, 由负摩阻力作用产生的桩顶附加变形为 17 mm, 而桩身弹性压缩变形为 4 mm, 两条曲线开始分离。在土体完全饱和状态下, 桩顶继续加

荷至 4000 kN 时出现了明显的拐点; 继续加荷出现陡降段, 桩顶的沉降急剧加大, 桩与桩侧土产生剪切破坏; 而桩身混凝土弹性压缩变形曲线呈线性状态, 桩身混凝土未发生破坏。

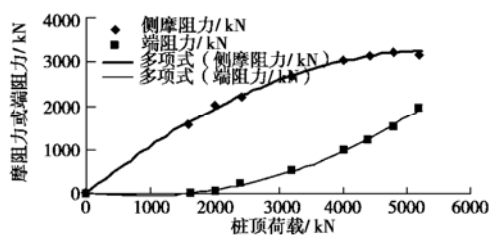


图 16 ZH4 桩的摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系曲线

Fig. 16 Relation of frictional resistance and end bearing with load on pile top for pile ZH4

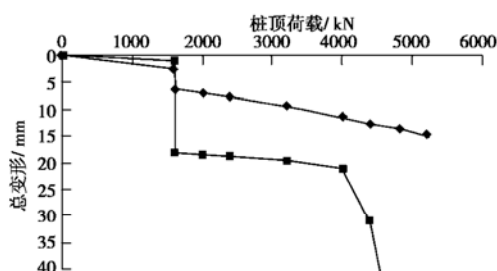


图 17 ZH4 桩顶沉降及桩身弹性压缩变形与荷载关系曲线

Fig. 17 Relation of pile top settlement and elastic compression deformation with load on pile top for pile ZH4

5.5 中性点位置的确定

当桩长穿越自重湿陷性下限深度, 桩端设置于较为坚硬的持力层时, 在桩的某一深度处, 桩土相对位移为零, 即既没有正摩阻力, 也没有负摩阻力, 该点称为中性点。中性点截面的桩身轴力最大 (见图 13)。

一般说来, 在桩周土浸水过程中, 土层向下位移大于桩的向下位移, 中性点随土层下沉位而向下移动, 当桩周土层下沉趋于稳定, 中性点也将稳定在某一深度 (L_N) 处。本次试验在浸水 65 d 后, 中性点稳定深度 (L_N) 为 19 m (见图 13~14), 湿陷性土层下限深度 (L_0) 为 35 m。中性点深度与湿陷性土层下限深度之比为 0.54。

6 负摩阻力测试结果及分析

6.1 悬吊桩 ZH5 的测试结果

悬吊法是测定负摩阻力是最早使用的方法, 该法只能测定桩侧的平均负摩阻力, 不能测定负摩阻力沿桩身的分布与浸水时间的关系、中性点位置等。该法由两根支撑桩支撑钢梁, 试验桩悬吊在钢梁上 (视支撑桩和钢梁均不变形) 并加装测力计。桩侧单位面积负摩阻力变化曲线见图 18 (实线为浸水时, 虚线为停水后)。浸水期间, 随着桩周土自重湿陷的产生和发展,

桩侧的负摩阻力从无到有、从小变大; 浸水 56 d 时测力装置测得的数据表明, 桩侧负摩阻力总量为 300 kN; 由此计算桩侧单位面积的负摩阻力平均值为 5 kPa。停水后, 由于水的消散, 桩周土发生排水固结变形, 桩侧负摩阻力迅速增长, 停水后第 7 天达最大值 1110 kN, 由此计算桩侧单位面积的负摩阻力平均值为 22 kPa。

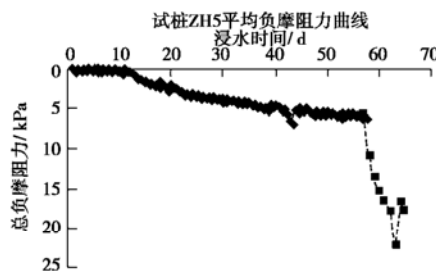


图 18 悬吊方法测定平均负摩阻力

Fig. 18 Average negative frictional resistance measured from pile ZH5

6.2 黄土中灌注桩负摩阻力的试验资料分析

本文用两种方法测定负摩阻力的结果与几处黄土中灌注桩现场浸水试验资料及黄土规范推荐的负摩阻力值列于表 4。有 4 点值得注意:

(1) 比较本项两种方法的测试结果可知, 悬吊法所测数值偏小。原因可能是悬吊桩较短, 不能反映整个自重湿陷性黄土层的湿陷情况。另外, 固定悬吊桩的钢梁本身的刚度, 钢梁在下拉荷载的作用下势必产生微小的挠曲, 从而影响负摩阻力的测试结果。

(2) 各地试验所得负摩阻力的数值相差较大, 比较离散, 尚得不出规律; 但各试验场地测得的负摩阻力值均高于黄土规范的建议值^[12] (见表 4 的注 2)。黄土规范的建议是以 20 世纪 70 年代在西安、兰州和青海所作的 3 处试桩结果为依据的, 而这 3 处的自重湿陷性黄土层厚度较小 (8~11 m), 桩长较短, 负摩阻力皆由悬吊法测试, 尚不具普遍性。

(3) 综合表 1 和表 5 可见, 负摩阻力的数值不一定随湿陷量的增大而提高, 并与场地的湿陷类型无明确关系。例如, 蒲城电厂试验场地为非自重湿陷性黄土地, 试坑浸水湿陷量为 6.3 cm; 宝鸡第二电厂试验场地为自重湿陷性黄土地, 试坑浸水湿陷量为 8.5 cm。虽然这两地的湿陷量远小于兰州东岗和兰州河口, 但负摩阻力却远高于属于自重湿陷性黄土的兰州两个场地。由此可见, 黄土规范中对自重湿陷量较大者负摩阻力取较高值 (参考表 4 的注 2) 的建议值得商榷。

(4) 各地试验所得中性点的位置离散性大, 从 0.34 到 0.85, 超出了建筑桩基技术规范第 5.2.16.3 条

提供的参考值范围^[13] (即, $(0.5\sim0.6) \times 1.1=0.55\sim0.66$)。

表 4 黄土中灌注桩负摩阻力试验资料

Table 4 Negative frictional resistance of filling piles in loess				
试验地点	测试状态	负摩阻力/kPa		中性点位置 L_N/L_0
		最大值	平均值	
兰州东岗	悬吊固结		18	
兰州河口	恒载固结	28	20	
蒲城电厂	恒载固结		27	0.34~0.50
	无载固结		44	0.60~0.71
宝鸡第二 电厂 灌注桩	浸水期	52.3	35.7	
	固结期	57.6	30.4	0.85
黄土规范 2004 推荐值		10/15		
宁夏扬黄	ZH4 固结		33.1	0.54
	ZH5 固结		22	

注: 1. 蒲城电厂和宝鸡二电厂皆为扩底桩负摩阻力数据, 由滑动测微计测试; 兰州河口用钢筋应力计测试。2. 黄土规范建议: 对灌注桩的桩侧平均负摩阻力特征值, 当自重湿陷量的计算值为 70~200 mm 时取 10 kPa, 大于 200 mm 时取 15 kPa。

7 试坑浸水变形分析

表 5 是本次试坑浸水的沉降较大的坑内浅标点、坑外最远浅标点、深标点 A1 及相邻场地大面积预浸水试验的沉降实测资料。由该表可知: 本次试验的最大沉降量略大于 48.5 cm (因标点 A1 位于地表下 2.5 m), 远小于相邻场地大面积预浸水试验的沉降^[14]。其原因有三: 一是本次试坑直径较小, 湿陷未能充分发展; 二是固结排水时间短, 仅 12 d (相邻场地大面积预浸水试验的固结排水时间 62 d); 三是试坑内的群桩 (试桩和锚桩共 9 根) 对桩侧土有摩擦悬挂作用, 对桩间土有约束限制作用, 阻碍土的湿陷下沉和侧向挤出。

从表 5 还可看出: 距坑边 15m 处的浅标点 C1-7、C2-7, C3-7, C4-7 (见图 1) 的沉降已很小, 说明浸水的水平影响范围在坑外 15 m 左右。由此同样可见, 湿陷并未充分发生。

表 5 标点浸水沉降与大面积预浸水沉降量资料

Table 5 Settlements of points labeled in Fig.1 of the paper and those of large pre-immersion area in reference [14]								
测点沉降/cm								预浸水
A1	B15	B16	B17	C1-7	C2-7	C3-7	C4-7	
48.5	39.9	43.9	40.0	0.5	0.2	0.5	0.1	215.1

8 结 论

(1) 无摩擦桩、空底桩和摩擦端承桩测得研究场地的试桩在天然状态下的正摩阻力和端阻力较高, 取低值时分别为 64 kPa 和 1550 kPa, 单桩极限承载力为

8400 kN; 饱水状态下单桩极限承载力不到天然状态下的一半, 仅 4000 kN; 负摩阻力为 33 kPa。

(2) 空底桩和悬吊桩在长度比湿陷性黄土层厚度小许多时, 所测得的正、负摩阻力不能反映整个湿陷性土层的变形情况及其与桩的相互作用, 数值偏小; 穿透整个湿陷性黄土层的摩擦端承试桩所得结果比较符合实际。

(3) 负摩阻力和中性点的位置与浸水过程、固结过程中的沉降有关, 数值的变化幅度大, 根据现有试验资料尚得不出有关规律。

(4) 几个大型工程的现场试验实测灌注桩的中性点的位置超出了建筑桩基技术规范提供的参考值; 实测负摩阻力远高于黄土规范建议的负摩阻力值, 且负摩阻力的数值与场地的湿陷类型、湿陷量的大小无明确对应关系, 非自重湿陷性黄土场地的负摩阻力不能被完全忽略。

(5) 群桩对桩侧土有摩擦悬挂作用, 对桩间土有约束限制作用, 阻碍土的湿陷下沉和侧向挤出, 从而减小场地的湿陷变形量。

参考文献:

[1] 钱鸿缙, 罗宇生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1985. (QIAN Hong-jing, LUO Yu-sheng, et al. Collapsed loess foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985.(in Chinese))

[2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997.(LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Shanxi Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))

[3] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1990.(LIU Jin-li. Design and calculation of pile foundations [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990.(in Chinese))

[4] 汪国烈, 明文山. 湿陷性黄土的浸水变形规律与工程对策[C]//湿陷性黄土研究与工程(第四届全国黄土学术会议论文集).北京: 中国建筑出版社, 2001,8:21 - 32.(WANG Guo-lie, MING Wen-shan. Immersion deformation of collapse loess and Engineering technologies[C]// Research and Engineering of Collapsed Loess. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001,8:21 - 32.(in Chinese))

[7] 刘利民, 舒翔, 熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.(LIU Li-min, SHU Xiang, XING Ju-hua. Theory advances and engineering practice of pile foundations [M]. Beijing: China Architectural Material Press, 2002.(in Chinese))

- [8] 自重湿陷性黄土地区桩基试验研究[R]. 甘肃省建工一局建筑科学研究所, 1975. (Test research of pile foundations in collapse loess regions[R]. Gansu Province Building Research Institute, 1975.(in Chinese))
- [9] 李大展, 滕延京, 何颐华, 隋国秀. 湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994,16(2):11 - 21.(LI Da-zhan, TENG Yan-jing, HE Yi-hua, SUI Guo-xiu. Vertical bearing behaviour of lager diameter belled pile in collapse loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994,16(2):11 - 21.(in Chinese))
- [10] 宝鸡第二发电厂干作业成孔灌注桩试桩报告[R]. 西北电力设计院, 1994.(Test research of belled pile in collapse loess for Baoji second power station [R]. North-West Power Design Institute, 1994.(in Chinese))
- [11] 刘明振. 含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩阻力的计算[J]. 岩土工程学报, 1999,21(6):749 - 752.(LIU Ming-zhen. A calculation method of negative skin friction on the pile group in the self-weight collapsible loess stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999,21(6):749 - 752.(in Chinese))
- [12] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(GB50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [13] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.(JGJ94—94 Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [14] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006,28(3):382 - 389.(HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang et al. A large area field immersion test research On the characteristics of collapse deformation of self weight collapse loess with big thickness under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(3):382 - 389.(in Chinese))

《岩土工程学报》2006 年第 28 卷第 11 期被 EI 收录论文 (25 篇)

论文题目	作者	页码
水泥土的电阻率特性与应用探讨	刘松玉, 韩立华, 杜延军	1921~1926
地基非线性沉降计算的原状土切线模量法	杨光华	1927~1931
饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比	孙树林, 王利丰	1932~1935
有荷载条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律	杨和平, 张 锐, 郑健龙	1936~1941
公路软基超载预压卸荷时间确定的沉降速率法研究	杨 涛, 李国维	1942~1946
松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型	骆祖江, 李 朗, 姚天强, 罗建军	1947~1951
多支撑挡墙边坡稳定性的强度参数折减有限元分析	章杨松, 陈新民	1952~1957
不同桩长、桩径桩筏基础的分析方法	张建辉, 靳元峻, 余晓雅, 王维玉	1958~1963
基于非线性接触本构的颗粒材料离散元数值模拟	张洪武, 秦建敏	1964~1969
钢筋混凝土矩形薄板在弹性地基上的热屈曲	程选生, 杜永峰, 李 慧	1970~1954
基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡稳定性强度折减法数值分析	吴顺川, 金爱兵, 高永涛	1975~1980
索风营水电站地下洞室岩体力学参数的位移反分析	许传华, 任青文, 郑 治, 肖德序	1981~1985
开放条件下粒径对块石和碎石护坡降温效果影响的试验研究	张明义, 赖远明, 高志华, 李东庆	1986~1990
典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究	包卫星, 杨晓华, 谢永利	1991~1995
虎跳峡龙蟠右岸边坡稳定性的数值模拟	徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 谭儒蛟, 李仁江, 曾如意	1996~2004
浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究	黄正荣, 朱 伟, 梁精华, 秦建设	2005~2009
三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究	闫治国, 朱合华, 邓 涛, 曾令军, 姚 坚, 强 健	2010~2014
有初始间隙摩擦接触问题的有限元混合法	赵兰浩, 李同春, 牛志伟	2015~2018
弹性地基上四边自由矩形薄板分析的有限积分变换法	钟 阳, 孙爱民, 周福霖, 张永山	2019~2022
复合土钉墙中垂直支护桩临界桩长的研究	屠毓敏, 鲁美霞	2023~2026
大面积带垫层刚性桩复合地基的荷载传递分析方法	楼晓明, 孙晓峰	2027~2030
极限荷载条件下螺旋桩的螺旋设计与承载力计算	董天文, 梁 力, 王明恕, 张成金	2031~2034
基于微粒群优化的智能位移反分析研究	赵洪波	2035~2038
边坡稳定分析的温控参数折减有限元法	曹先锋, 徐千军	2039~2042
松干密度的测定及其在灰土地基质量控制中的作用	颜凌瑞, 孟军省, 尹小涛	2043~2046

(《岩土工程学报》编辑部)