

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.022

黄土地基中微型抗压与抗拔桩对比试验研究

周俊鹏^{1,2}, 黄雪峰^{1,2}, 刘自龙³, 朱中华³

(1. 后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401311;

2. 后勤工程学院 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401311;

3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 微型抗拔桩是西北黄土地区光伏电站的一种典型锚固基础, 为研究微型桩在抗压与抗拔条件下位移与受力性状的异同, 在黄土地基进行了不同尺寸的抗压桩与抗拔桩的单桩竖向静载试验。试验结果表明: 相同荷载作用下, 抗拔桩的桩顶位移和位移增长速率均大于抗压桩, 考虑桩顶上拔量得出的极限承载力低于按规范进行试验得出的结果, 因此, 在确定抗拔桩的极限承载力时应考虑桩顶上拔量; 两种试桩桩身轴力随埋深分布曲线相似, 即存在一个向下传递的过程; 抗拔桩桩身中上部侧阻达到极限后会随着荷载的增加出现减小的趋势; 抗拔桩桩端侧阻存在弱化现象, 抗压桩桩端侧阻则存在强化现象。研究结果对黄土地区光伏电站微型抗拔桩锚固基础的设计与施工具有重要的参考意义。

关键词: 黄土地基; 微型抗拔桩; 微型抗压桩; 桩身轴力; 侧摩阻力

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)01—0121—05

Experimental Study of Micro Compression and Uplift Pile in Loess Foundation

ZHOU Junpeng^{1,2}, HUANG Xuefeng^{1,2}, LIU Zilong³, ZHU Zhonghua³

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Mini pile is a typical anchorage foundation of photovoltaic power station in northwest loess region. Vertical compressive and uplift static load test on mini-piles in which the piles is in different sizes were carried out in loess foundation to research the differences of displacement and bearing capacity when a single pile is under the condition of compression and uplifting. The results indicated that under the same load, the uplift piles displacement and its rising rate were greater than those of compressive piles. Bearing capacity of uplift piles according to displacement is lower than that according to technical code. As a result, the displacement of uplift piles should be taken into consideration to determine the bearing capacity. The axial force distribution of uplift pile is similar to that of compressive pile. The top could bear main load when the load is small; with the increasing of load, the load which the top of pile body could bear soon reach the limit, and main load transfer to the medium and bottom. Lateral friction of top and medium of uplift pile which is reach limit would decrease with the increase of load. The lateral friction of bottom of the uplift pile shows the weakening effect and the compressive pile shows the strengthening effect. The results can provide important reference to the design and construction of micro uplift pile in photovoltaic power station in the loess area.

Keywords: loess foundation; mini uplift pile; mini compression pile; axial force of pile; lateral friction of pile

近年来,随着我国光伏发电产业在西北黄土地区的迅速崛起,微型桩作为光伏电站的抗拔锚固基

础应用也日益增多。前人通过试验研究表明^[1-6],抗拔桩与抗压桩的位移与受力特性均有所不同;但

和抗压桩相比,对抗拔桩的研究还较为匮乏,在黄土地区实测的微型桩对比资料也较稀缺。实际工程中,规范^[7]规定用土的抗压极限侧摩阻力乘以抗拔折减系数估算抗拔桩的极限承载力,许多学者也对此进行了探讨^[8-9];但相对于规范中的桩型来说,微型桩尺寸较小。本文根据兰州市某光伏电站微型桩竖向抗拔及抗压静载试验结果,研究分析了黄土地基中微型桩在抗拔与抗压时位移与承载特性的不同,该结果可为黄土地区光伏电站抗拔桩的设计和理论研究提供参考。

表 1 地基土物理力学性质参数

土样 编号	取土 深度/m	含水率 $w/\%$	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e/\%$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P/\%$	土按塑性 指数分类	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
T1-1	1	8.2	13.6	1.160	19.0	25.7	16.4	9.3	粉土	23	19.1
T1-2	2	9.0	13.7	1.151	21.2	28.7	17.6	11.1	粉质黏土	23	19.4
T1-3	3	9.4	14.2	1.077	23.5	26.7	16.8	9.9	粉土	23	19.3
T1-4	4	7.9	14.7	0.993	21.7	28.5	17.5	11.0	粉质黏土	25	18.4
T2-1	1	7.0	14.6	0.985	19.3	26.6	16.7	9.9	粉土	25	18.1
T2-2	2	8.5	13.0	1.250	18.4	24.7	16.0	8.7	粉土	23	19.6
T2-3	3	9.2	14.0	1.109	22.3	25.2	16.2	9.0	粉土	23	19.3
T2-4	4	6.5	14.9	0.936	18.7	27.7	17.2	10.5	粉质黏土	26	17.7

1.2 试验方案

试桩采用洛阳铲打孔,成孔后下放钢筋并浇筑混凝土,桩身混凝土等级为 C35,每根试桩均插入一根 HRB400 直径 25 mm 的钢筋;对于进行竖向抗拔静载试验的试桩钢筋均高出地面 1 m。本次试验共浇筑 5 根不同尺寸的微型桩,各试桩桩径均为 200 mm;其中 2 根抗压桩(试桩编号分别记为 YS1 和 YS2,桩长分别为 2 m 和 3 m),3 根抗拔桩(试桩编号分别记为 BS1、BS2 和 BS3,桩长分别为 2 m、3 m 和 4 m)。

抗拔加载装置由拉拔仪、加荷梁和支座组成,其中支座采用地基提供反力;抗压加载装置由千斤顶和压重平台反力装置组成。试验测试系统主要包括应变片、应变传感器、应变仪和大量程百分表。抗拔、抗压试验装置如图 1 所示。

1.3 试验方法及数据处理

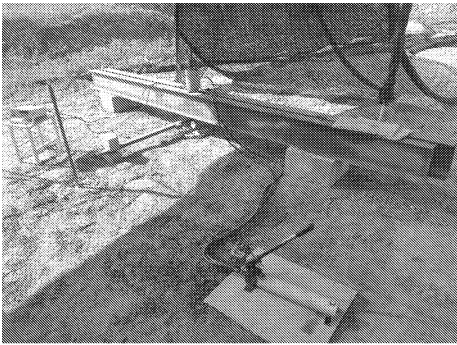
试验采用规范^[10]规定的慢速维持荷载法,加载时候逐级等量加载。在竖向抗压静载试验中,两根试桩分别以 10 kN 和 15 kN 为一个等级进行加载;在竖向抗拔静载试验中,三根试桩分别以 5 kN、5 kN 和 6 kN 为一个等级进行加载。在前一级荷载条件下,当位移达到规范^[10]规定的稳定条件时,加载下一级荷载;当某一级荷载下桩身位移过大且超过标

1 试验概况

1.1 工程地质条件

试验场地位于兰州市西部,根据该区域地质资料来看,场地属于大厚度黄土地区,土壤剖面主要特征为:表层覆盖较浅的素填土,其下即为大厚度黄土。为得到场地地基土物理力学性质指标,打探井取原状土进行室内试验,具体地质条件见表 1。试验场地的地下水埋设较深,故可不考虑地下水对微型桩基础的影响。

准或者加载达不到下一级荷载时,判定桩身发生破坏,结束试验。



(a) 抗拔试验装置



(b) 抗压试验装置

图 1 试验装置

在桩身埋设应变片,以得到桩身轴力和侧摩阻力的变化规律,具体埋设位置见表 2。试验测得钢筋的应变之后,通过应变片的率定曲线可以换算得到钢筋受力大小。假设应变片截面处混凝土和钢筋的应变大小相同,可以得到混凝土的受力大小。应变片截面处所受轴力即为钢筋和混凝土所受力之和。

表 2 微型桩尺寸表

试桩 编号	桩径 d /mm	桩长 L /m	荷载分级 /kN	应变片埋深 /m
YS1	200	2	10	1、2
YS2	200	3	15	1、2、3
BS1	200	2	5	1、2
BS2	200	3	5	1、2、3
BS3	200	4	6	1、2、3、4

2 试验结果及其分析

2.1 荷载 – 位移规律

图 2 为试桩的 $Q-s$ 曲线,图 3 为试桩的 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 曲线,从图 2、图 3 可以看出:

(1) 两种试桩破坏曲线形态较为接近,均为“渐进破坏”的缓变型。曲线的初始段基本为直线,位移随着荷载线性增加,土体处于弹性阶段;随着荷载的增加,曲线不再保持为直线,土体开始出现塑性变形,此时土体处于弹塑性阶段;当荷载达到极限时,曲线斜率变大,土体发生破坏,达到极限状态。试桩 YS1 和 YS2 分别在加载至 90 kN 和 150 kN 时,桩顶位移在规定时间内不能趋于稳定,判定前一级荷载 80 kN 和 135 kN 为抗压试桩的极限荷载;试桩 BS1、BS2 和 BS3 分别在加载至 40 kN、55 kN 和 84 kN 时,桩顶位移在规定时间内不能趋于稳定,判定前一级荷载 35 kN、50 kN 和 78 kN 为抗拔试桩的极限荷载。

(2) 抗拔桩与抗压桩在同样大小荷载作用下,前者的桩顶位移较大,这说明抗拔桩极限侧摩阻力的发挥所需要的桩土相对位移要大于抗压桩。抗拔桩的位移增长速率也大于抗压桩,抗拔桩 BS2 在达到 45 kN 荷载时, $\Delta s/\Delta Q = 0.526 \text{ mm/kN}$;抗压桩 YS2 荷载为 45 kN 时, $\Delta s/\Delta Q = 0.0127 \text{ mm/kN}$;因此,若采用规范^[10]规定的终止加载条件判定抗拔桩的极限承载力,可能在达到极限承载力之前已出现超过正常使用极限状态的现象。刘祖德^[11]提出,对于抗拔桩的极限承载力,可以取桩顶上拔量为 $0.025d$ (d 为桩径)时对应的荷载。对于本次试验的微型桩,可以取 $s = 5 \text{ mm}$ 时的荷载作为桩的极限承

载力,此时,BS1、BS2 和 BS3 的极限承载力分别为 30 kN、40 kN 和 66 kN。可以看出,考虑桩顶上拔量得出的极限承载力低于按规范^[10]进行试验得出的结果;值得注意的是,本文中试桩的长径比较小,尚且会有如此结果,对于长径比较大的抗拔桩,在判定极限承载力时更应考虑桩顶上拔量。

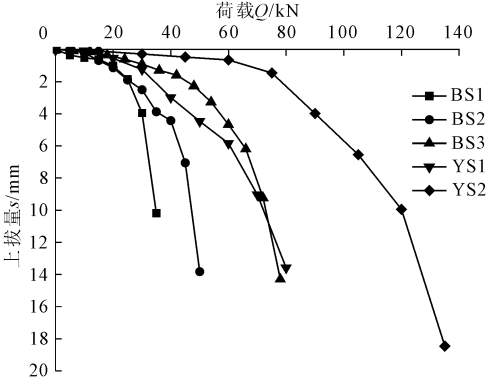


图 2 单桩竖向静载试验的 $Q-s$ 曲线

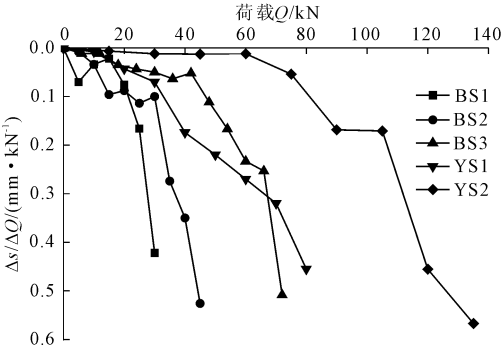


图 3 试桩的 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 曲线

2.2 桩身轴力传递分析

图 4 为抗拔桩 BS2 和 BS3 和抗压桩 YS2 在桩顶荷载下桩身轴力随埋深的分布图,从图 4 可以看出:

(1) 两种试桩桩身轴力均随埋深的增加而减小。对于不同的加载等级,轴力随埋深的分布曲线有不同的衰减速率,轴力曲线的衰减速率反映了侧摩阻力发挥的程度。随着荷载的增大,抗拔桩桩身上部轴力的衰减速率先增大后减小,尤其是试桩 BS3 在埋深 0 m ~ 1 m 范围内,当荷载增加到 54 kN 时,轴力衰减速率明显减小;抗压桩桩身上部轴力衰减速率先增大后保持不变;这可能是由于抗拔桩在上拔过程中,带动桩周土体一起上拔,土体内部产生裂隙,导致侧摩阻力减小;抗压桩在下压过程中,桩周土体压密,因此侧摩阻力不会减小。相比于桩身下部衰减速率的明显增大,试桩桩身上部轴力的衰减速率变化并不大;这说明两种试桩桩身轴力传递特性相似,即随着桩顶荷载等级的增大,上部土体所

能承担的荷载较快达到极限并基本保持不变,荷载逐渐转移到下部土体并由下部土体承担。

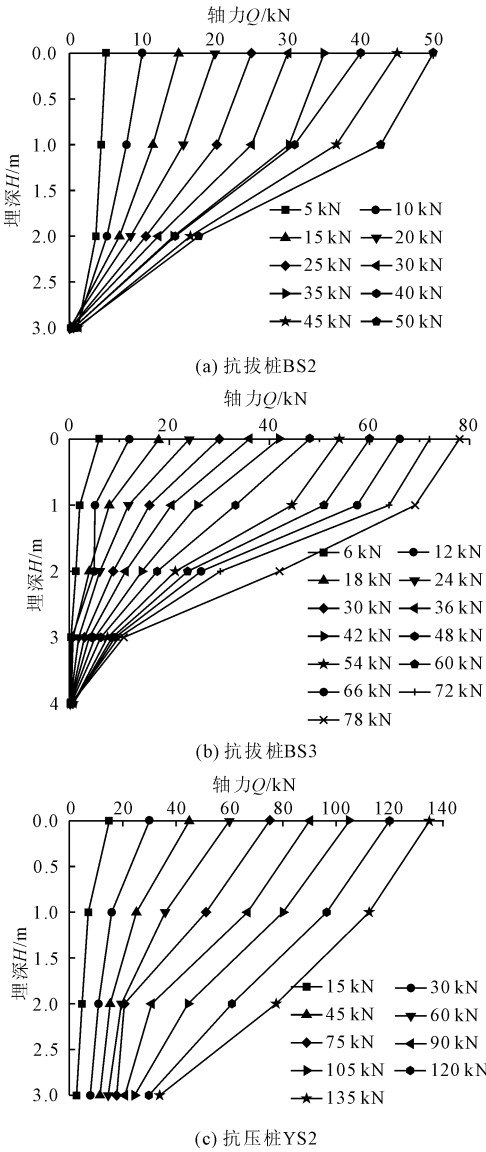


图 4 试桩桩身轴力随埋深分布曲线

(2) 抗拔桩桩端处的轴力基本为零,说明抗拔桩为标准的摩擦桩;当试桩 BS2 荷载达到极限值 50 kN 时,在桩长范围内桩土接触面的平均侧摩阻力达到 26.54 kPa。抗压桩桩端处轴力随着荷载增加而不断增大,当抗压桩 YS2 荷载达到极限值 135 kN 时,桩端处轴力为 33.83 kN,占桩顶荷载的 25.05%,表现为端承摩擦桩的性质;桩端上部所承担的荷载为 101.17 kN,在桩长范围内桩土接触面的平均侧摩阻力达到 53.70 kPa。规范^[7]中规定抗拔系数 $\lambda = 0.5 \sim 0.7$,当长径比 l/d 小于 20 时, λ 应该取小值;本次试验中试桩长径比均小于 20,抗拔桩和抗压桩的平均侧摩阻力比值 λ 为 0.494,略低于规范^[7]规定的折减系数。

2.3 桩侧摩阻力分析

图 5 为抗拔桩 BS2 和 BS3 和抗压桩 YS2 在各级荷载下桩身侧摩阻力随埋深分布图,从图 5 可以看出:

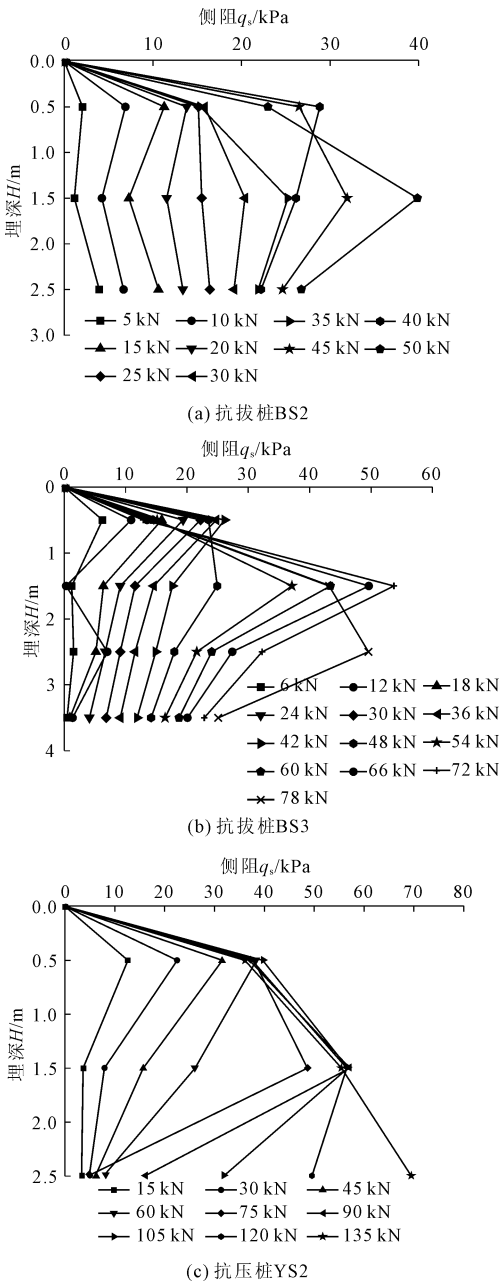


图 5 试桩桩身侧摩阻力随埋深分布曲线

(1) 桩身各部分侧摩阻力均随着荷载的增加而增大;但在不同的加载阶段,桩身不同部位的侧阻增加幅度有所不同。当荷载较小时,桩身上部侧阻增加幅度较下部大;荷载较大时,桩身上部侧阻达到极限,下部侧阻开始大幅增加。这说明桩身侧阻的发挥不是一个同步的过程,桩身上部侧阻先于下部发挥。

(2) 当荷载较大时,抗拔桩桩身上部侧阻较极限值有所降低,抗压桩侧阻基本保持不变,这一点已

在前述轴力分析中提到。抗拔桩桩身下部侧阻较中部明显有减弱的趋势,抗压桩下部侧阻则在极限荷载时大于中部。这可能是因为抗拔桩在上拔过程中桩端形成空穴,使得桩端周围土体应力水平降低所造成的。

前人的研究^[12-13]也指出了抗拔桩桩端侧摩阻力弱化的现象;对于抗压桩,当荷载较小时,桩端部侧摩阻力并未充分发挥,当荷载达到135 kN时,桩端部侧摩阻力明显大于中部,这说明端阻的发挥会增强端部侧阻,即端阻对端部侧阻有强化作用^[14-15]。

为分析桩身各部分总侧摩阻力的发挥规律,将试桩以1 m的长度进行分段,图6为各桩段在不同荷载等级下总侧摩阻力与桩顶荷载的关系曲线。从图6可以看出,当荷载较小时,荷载主要由桩身上部承担。抗拔桩BS3在外荷载为6 kN时,各桩段从上到下总侧摩阻力分别为3.9 kN、0.764 kN、0.955 kN、0.191 kN;抗压桩YS2在外荷载为15 kN时,各桩段从上到下总侧摩阻力分别为7.933 kN、2.292 kN、2.101 kN。随着桩顶荷载的增加,桩身上部所能承担的荷载很快达到极限;对于抗拔桩,此时荷载主要由桩身中部所承担,对于抗压桩,此时荷载主要由桩身中部和下部一起承担。

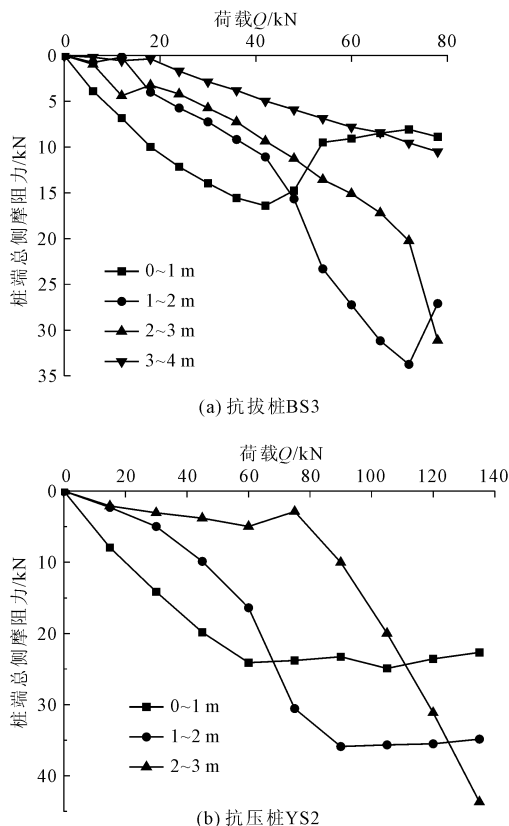


图6 试桩各桩段总侧摩阻力分布曲线

3 结 论

(1) 相同荷载作用下,抗拔桩的桩顶位移和位移增长速率均大于抗压桩,考虑桩顶上拔量得出的极限承载力低于按规范进行试验得出的结果;在确定抗拔桩的极限承载力时应考虑桩顶上拔量。

(2) 两种试桩桩身轴力随埋深分布曲线相似,在荷载较小时荷载主要由桩身上部承担,随着荷载的增加,桩身上部所能承担的荷载很快达到极限,大部分荷载往桩身下部传递转由桩身中下部承担。

(3) 本次试验中得到的抗拔系数 λ 为0.494,略低于规范规定的折减系数范围。

(4) 抗拔桩桩身中上部侧阻达到极限后会随着荷载的增加出现减小的趋势,抗拔桩桩端侧阻存在弱化现象,抗压桩桩端侧阻则存在强化现象。

参考文献:

- [1] 陈小强,赵春风,甘爱明.砂土中抗拔桩与抗压桩模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(3):738-744.
- [2] 陈小强,赵春风,甘爱明.成层土中抗拔桩与抗压桩的模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1537-1541.
- [3] 马杰,赵建,赵延林.抗压桩与抗拔桩受力特性的现场破坏性试验[J].西南交通大学学报,2013,48(2):283-289,296.
- [4] 罗少锋,杨文星.黄土地基中抗拔桩与抗压桩对比试验研究[J].工业建筑,2012,42(10):78-82.
- [5] 刘念武,张忠苗,俞峰,等.黏性土中微型桩抗压和抗拔现场试验[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(8):698-704.
- [6] 张正雨,尹晔.抗拔桩和抗压桩的机理分析及承载力计算[J].山西建筑,2009,35(9):118-119.
- [7] 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008:46-48.
- [8] 陈尚荣.软土地区抗拔桩承载特性现场试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):188-192.
- [9] 孙金磊.等截面抗拔桩力学特性以及对支护结构影响规律研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(2):172-175,189.
- [10] 中华人民共和国建设部.建筑桩基检测技术规范:JGJ106—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014:13-22.
- [11] 刘祖德.抗拔桩基础[J].地基处理,1995,6(4):1-12.
- [12] 张忠苗,吴庆勇,张广兴.抗拔桩和抗压桩受力性状异同性研究[J].工程勘察,2006(6):4-9.
- [13] 杜广印,黄锋,李广信.抗压桩与抗拔桩侧阻的研究[J].工程地质学报,2000,8(1):91-93.
- [14] 张建新,吴东云.桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究[J].岩土力学,2008,29(2):541-544.
- [15] 黄雪峰,张建华,马良荣,等.湿陷性黄土嵌岩灌注桩桩侧阻力强化效应试验研究[J].建筑结构,2011,41(S2):351-355.