

## 桩端扩大头尺寸对承载性能影响模型试验

龚晓南<sup>1†</sup>, 邵佳函<sup>1</sup>, 解才<sup>1</sup>, 舒佳明<sup>2</sup>

(1.浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2.中淳高科桩业股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:**为了研究注浆加固体积即扩大头尺寸对桩端承载性能的作用效果,本试验通过往PVC管内注浆,改变注浆量和PVC管尺寸来控制扩大头尺寸,然后以此开展室内单桩静载模型试验,最后采用了传统桩端沉降公式计算得出桩端阻力-位移曲线并与实测曲线对比.结果表明:桩端灌注水泥土形成扩大头的桩,相比未注浆的桩,其承载力显著提高,在相同的荷载下,其沉降显著变小;随着扩大头直径的增加,承载力持续增长,但每单位直径增加所提高的承载力先增后减,在工作荷载下对减少位移的效果呈递减趋势;端阻分担比在位移5 cm后趋于稳定,其中桩端水泥土扩大头承担较高的端阻比例,且其比例随扩大头直径的增大而增大,由于水泥土受力较大,实际工程中应该注意桩端水泥土的强度;传统桩端沉降公式计算的桩端阻力-位移曲线与实测曲线吻合良好.

**关键词:**桩端扩大头;尺寸;模型试验;承载性能;端阻力;桩端沉降计算

**中图分类号:** TU473.1

**文献标志码:** A

## Model Test on Influence of Enlarged Head Size on Bearing Capacity of Pile End

GONG Xiaonan<sup>1†</sup>, SHAO Jiahuan<sup>1</sup>, XIE Cai<sup>1</sup>, SHU Jiaming<sup>2</sup>

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2.ZCONE High-Tech Pile Industry Holdings Co Ltd, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** To examine the effect of volume of grouting reinforcement body, namely the size of the expanded foot, on the bearing capacity of pile tip, indoor single-pile static-load model tests were conducted through injecting grout into PVC pipe and changing grout amount and PVC pipe size to control the size of the expanded foot. Finally, the pile tip resistance-displacement curves were calculated by the traditional pile tip settlement formula and compared with the measured curves. The results show that when comparing with the pile without grout injection, the piles that form expanded foot after being injected cement soil show the significantly improved bearing capacity, and dramatically reduced settlement under the same load; As the diameter of expanded foot increases, the bearing capacity continues to rise; However, the bearing capacity improved with the increase of per unit diameter at first and then decreased, and its effect on reducing displacement under working load shows a decline trend; The sharing ratio of tip resistance tends to be stable after a displacement of 5 cm. The cement soil expanded foot on pile tip has high ratio of tip resistance and the ratio rises as expanded foot diameter increases. In practical engineering, more importance should be attached to the strength of cement soil on pile tip for the high stress of cement soil, and the

\* 收稿日期:2017-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278450), National Natural Science Foundation of China(51278450)

作者简介:龚晓南(1944—),男,浙江金华人,浙江大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail:21512006@zju.edu.cn

pile tip resistance–displacement curves calculated by using traditional pile tip settlement formula fit the measured curves well.

**Key words:** expanded foot of pile tip; size; model test; bearing capacity; tip resistance; pile tip settlement calculation

随着注浆技术在工程上应用<sup>[1]</sup>越来越广泛,后注浆的加固机理也被深入研究.目前认为桩端灌注水泥浆后形成水泥土扩大头,从而增大了桩端的受力面积<sup>[2]</sup>,同时浆液对桩端持力层起到渗透、填充、压密、固结等作用以及浆液上返加固桩侧土体<sup>[3-4]</sup>.因此桩端后注浆不仅能提高桩的承载力<sup>[5]</sup>,还能减少桩基的沉降<sup>[6]</sup>.

而注浆量作为影响桩端承载性能的一个重要参数也是桩端注浆技术的一个研究重点.目前关于注浆量对桩承载性能影响的研究成果有很多<sup>[7-9]</sup>.大部分学者认为桩基承载力随着注浆量的增加而增加,但存在一定限度<sup>[10-13]</sup>.然而由于浆液渗漏等因素,注浆量不等同于注浆加固体大小,上述学者都未研究桩端注浆所形成的加固体体积大小对桩承载性能的提高程度,目前对此的研究还停留在数值层面<sup>[14-15]</sup>,造成桩端注浆技术没有定量的设计标准.

故本文通过模型试验去定量地研究注浆加固体体积大小(即扩大头尺寸)对桩基承载性能的作用效果.由于实际注浆形成类似球形<sup>[16-17]</sup>的扩大头在本模型试验里不易控制,本试验通过往 PVC 管内注浆的方式形成形状规则的圆柱型扩大头.改变注浆量和 PVC 管尺寸来控制扩大头的尺寸,最后通过模型桩单桩静载试验可以得到荷载–位移曲线,从而得出不同尺寸扩大头对桩基承载性能的作用效果,一方面为后注浆桩的最优注浆量提供参考,另一方面为工程上桩端扩大头的尺寸设计提供一定的借鉴作用.

## 1 试验前准备

### 1.1 试验模型箱

试验模型箱为长和宽都为 1.8 m,高为 2.5 m 的铁质长方体模型箱.模型箱内壁装 4 根内径 10 mm 的不锈钢薄管通向模型箱底部,用于试验结束后使地基自下而上饱和.在模型箱底部安装 4 个阀门,便于地基饱和后排水.模型箱顶部焊有一工字钢横梁用于后续静载试验中千斤顶反力加载.

### 1.2 模型桩与扩大头尺寸选取与布置

模型桩为直径 76 mm 的钢管桩,桩长为 1 m,壁厚 3 mm.根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94–2008)<sup>[18]</sup>,模型桩的布置中心距 $>3D$ , $D$ 为扩大头直径,模型桩埋设方式为埋入式.模型桩的布置如图 1 所示.

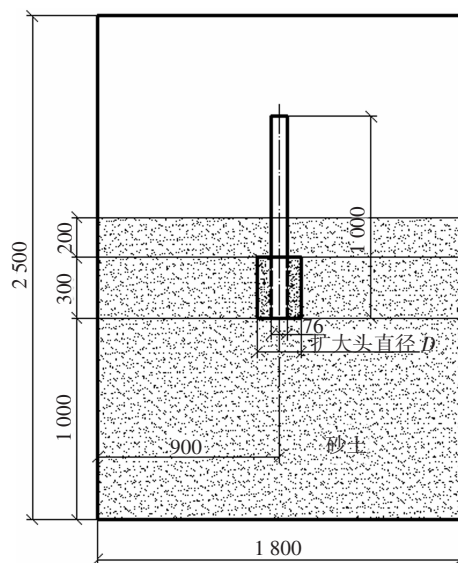


图 1 模型桩布置图(单位:mm)

Fig.1 Model pile layout (unit: mm)

本试验通过对 PVC 管注浆来获得圆柱状的扩大头,以便更好地研究加固体的体积对承载力的影响.扩大头的直径  $D$ (外径)分别为 110、160、200、250 mm,扩大头高度为 300 mm.考虑砂土注浆渗流损失较大,参考刘利民等<sup>[9]</sup>的研究成果,取注浆量扩大系数为 1.5.各尺寸扩大头相应所需的注浆量  $V$ (已算上扩大系数)如表 1 所示.其中  $D$  为扩大头直径, $V$  为相应的注浆量.

表 1 各尺寸所需注浆量

Tab.1 Amount of grouting needed for each size

$D/mm$	$V/cm^3$
76(无扩大头)	0
110	2 234
160	7 003
200	12 090
250	20 037

桩端扩大头注浆体积为整个桩端扩大头的体积,即理论上桩端处泥浆将被水泥浆完全替换;考虑到在实际工程中泥浆不会被水泥浆所完全替换,水泥土的配比参考现场取芯水泥土试块试验结果,以水泥浆:泥浆为4:1配置,如表2所示.其中水泥掺入量为水泥质量与土体和水质量之和的比值,含水率为水的质量与水泥和土的质量总和的比值.

表2 水泥土配比

Tab.2 Cement soil proportion

泥浆含水率/%	水灰比	V(水泥浆): V(泥浆)	水泥掺入量/%	含水率/%	$m_{水泥}:m_{水}:m_{土}$
50	0.6	4:1	99.01	58.27	1:0.74:0.27

为了检测端阻的分布,在钢管桩底部焊一个直径相同的圆铁块,然后布置1个土压力传感器来检测桩端阻力,在桩两边水泥土扩大头下方分别埋1个土压力传感器用于检测水泥土扩大头的端阻,其中传感器的尺寸为: $\Phi 30\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ ,在水泥土下埋设土压力传感器时由于尺寸限制,传感器只安装在直径为160、200、250 mm的扩大头下.模型桩和PVC管如图2和图3所示.

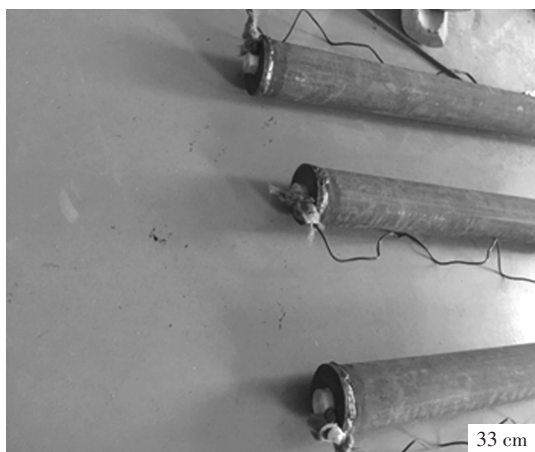


图2 模型桩示意图  
Fig.2 Sketch of mode pile

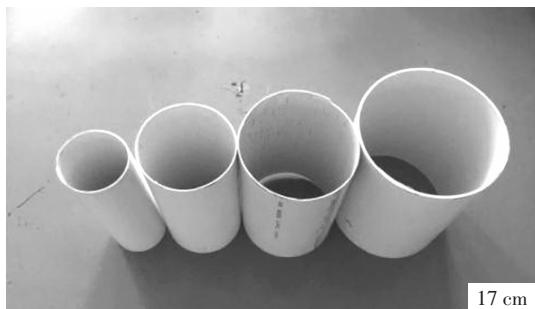


图3 PVC管示意图  
Fig.3 Sketch of PVC pipe

### 1.3 地基土制备

由于在砂土中注浆提高承载力的效果比黏土好<sup>[20-21]</sup>,为了试验结果对比更加明显,试验采用砂土来模拟地基土.用砂土进行试验需控制其颗粒级配,为了减小试验结果的离散性,尽量使用颗粒级配比较均匀的砂土制作模型地基.试验用砂土的颗粒级配曲线如图4所示.从图4可得均匀系数  $C_u = 3.5$  和曲率系数  $C_c = 0.96$ .

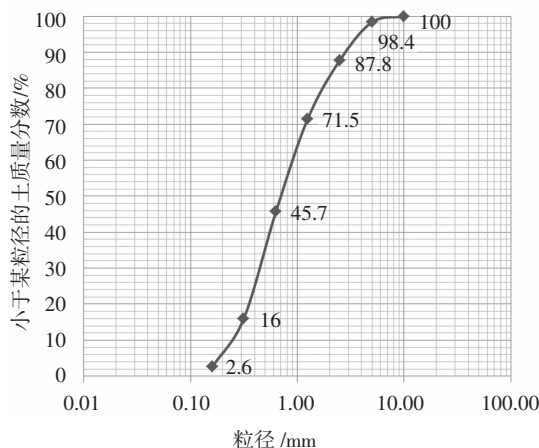


图4 砂土颗粒级配曲线

Fig.4 Gradation curve of sand

模型试验采用分层击实后饱和上水的方式进行地基土填筑,填筑过程除了要保证密度和含水率达到设计要求外,还要保持地基土的均匀性.填筑过程中以干密度作为夯实标准.本次试验中设定每次夯实后砂土厚度为0.1 m,故每层所需砂土质量  $m$  为:

$$m = \rho V \tag{1}$$

其中  $\rho$  为土体夯实后密度; $V$  为每层夯实后的体积,即为  $V = 1.8 \times 1.8 \times 0.1\text{ m}^3 = 0.324\text{ m}^3$ .试验用土的最小干密度为  $1.4\text{ g/cm}^3$ ,最大干密度为  $1.9\text{ g/cm}^3$ ,烘干法测得砂土天然含水率为4%,为使相对密度  $D_r$  达到0.8以上,设定干密度为  $1.8\text{ g/cm}^3$ ,故夯实后砂土的密度  $\rho$  可用下式计算:

$$\rho = \rho_d(1 + \omega) \tag{2}$$

式中: $\rho$  为砂土夯实后密度; $\rho_d$  为砂土夯实控制干密度; $\omega$  为砂土天然含水率.

根据式(2)计算得夯实后的密度  $\rho$  为  $1.872\text{ g/cm}^3$ ,故根据式(1)得每次分层填筑的砂土质量为  $606\text{ kg}$ .

故每次取  $606\text{ kg}$  倒入模型槽内,用夯实工具人工分块夯实到模型槽预先画好的刻度线处.每层土夯完后取3个测点,用灌水法测其密度,所测的密度与设定密度差值不超过5%认为合格,可进行下

一层填土,否则需要将该层进行重新填筑至达到合格标准.填至标记 1 m 处开始埋设钢管桩以及土压力传感器,然后在桩端水泥土扩大头位置处预埋各种尺寸的 PVC 管.待填土至 PVC 管口时,先灌注桩端水泥土,后将 PVC 管拔出,待水泥土凝结后继续填土夯实至 1.5 m 位置线.

填土完成后对地基土进行饱和,在饱和完成后,将模型箱底部安装的阀门打开,进行排水.土体排水后,在模型槽内取土进行室内物理力学性质试验,测得其基本物理力学指标如表 3 所示.其中  $\gamma$  为土的重度, $\omega$  为含水率, $c$  为土的黏聚力, $\varphi$  为内摩擦角, $D_r$  为密实度.

表 3 砂土基本物理力学指标

Tab.3 Basic physical and mechanical indexes of sandy soil

$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\omega/\%$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$D_r$
18.4	2.9	0.1	39	0.83

### 1.4 水泥土试验

在桩端灌注水泥土的同时,在相同的配比和养护条件下,进行水泥土试验,水泥土试验模型参照砂浆制样方法,将水泥与土搅拌均匀后,加入设定含水量所需的水并继续搅拌均匀,搅拌完成后放入  $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$  的立方体模具中均匀捣实抹平,制样完成后在与模型桩处水泥土相同的条件下养护 7 d,然后在 100 kN 量程的万能试验机上进行无侧限抗压强度试验.测试结果如表 4 所示. $p_s$  为水泥土无侧限抗压强度, $E_{50}$  为水泥土的压缩模量,1、2、3、4 组分别对应 110、160、200、250 mm 桩的同期养护试块,每组试块 6 个.由表 4 可以看出由于配比较高,水泥土的无侧限强度都达 10 MPa 以上.

表 4 水泥土无侧限抗压强度测试结果

Tab.4 Unconfined compressive strength test results of cement soil

组别	$p_s/\text{MPa}$	$E_{50}/\text{MPa}$
1	12.3	415
2	14.5	515
3	13.4	434
4	14.4	460

## 2 模型桩静载试验

### 2.1 模型桩单桩抗压静载试验

静载试验加载设备采用液压千斤顶进行反力

加载,由于桩为钢管桩,桩身压缩小,故只需用量程为 60 mm 的百分表位移计测量桩顶位移,静态应变仪测读出预埋在桩底的传感器的应变,再根据传感器的标定结果求出端阻.加载方式严格按照《建筑桩基检测技术规范》(JGJ106-2014)<sup>[22]</sup>来实行,采用慢速维持荷载法分级加载,荷载分级为设计预估最大试验荷载的 1/10,第一级加载值为分级加载值的 2 倍.每级加载后,隔 5、15、30、45、60 min 各测读桩顶沉降量一次,以后每隔 30 min 读一次直到沉降稳定后记录桩顶沉降和桩底土压力再进行下一级加载.稳定标准为每级荷载下的沉降增量不超过 0.1 mm/h.直到试验终止条件出现.

经测试后,整理数据绘制了各扩大头尺寸桩的荷载-位移曲线如图 5 所示,其中  $F$  为桩顶荷载, $S$  为桩顶位移.极限承载力的确定按照《建筑桩基检测技术规范》(JGJ106-2014)4.4.2 条,取荷载-沉降曲线上明显陡降段的起点所对应的荷载值作为极限承载力,因此从图 5 可知各尺寸扩大头桩的极限承载力分别为 24、36、60、88、110 kN.从图 5 还可以看出对比桩端有无水泥土,76 mm 桩(无水泥土)在较小的荷载下,就发生很大的位移,而有水泥土后,在相同的荷载下位移显著减小,说明水泥土扩大头对减少沉降效果显著,而且扩大头尺寸越大,在相同荷载下的位移也就越小.但在工作荷载下,随着扩大头尺寸的增大,对位移的减小效果逐渐减弱,尤其是 200 mm 与 250 mm 两条荷载位移曲线在工作荷载下十分接近,说明继续扩大尺寸,对减小正常工作荷载下的沉降作用不大;但若超过工作荷载,随着荷载继续增加,两者的差异逐渐显著,其作用仍明显.

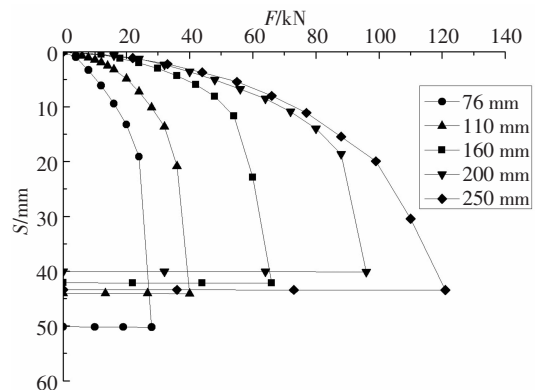


图 5 各扩大头尺寸模型桩荷载位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve of model pile with various size of enlarged head

实际工程中,桩基往往不会达到极限承载力的状况,否则破坏便会产生,故根据《建筑桩基检测技术规范》(JGJ106-2014)4.4.4 条,正常服役下的单桩竖向抗压承载力取极限承载力的 50%,得出正常服役下的承载力随桩端扩大头尺寸变化曲线如图 6 所示.其中  $F_N$  为正常服役承载力, $D$  为扩大头直径.从图 6 可以看出,随着扩大头尺寸增加,承载力显著提高,相比没有水泥土的桩分别提高了 50%、150%、267%、358%.图 6 还可以看出曲线的斜率先增后减,即每单位直径增加所提高的承载力先增后减,在 200 mm 时达到最高,随后减小,故继续增大尺寸其性价比降低.而且可以预见当竖向受力继续增加,桩和水泥土之间必然发生滑动,对承载力的提高效果会变差.在实际的桩基设计时,可以参考本试验结果,选择性价比最高的扩大头尺寸.

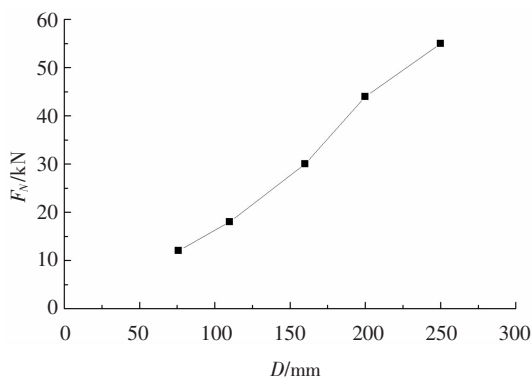
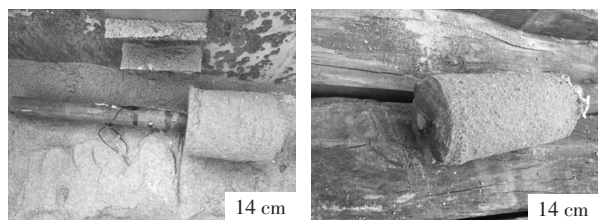


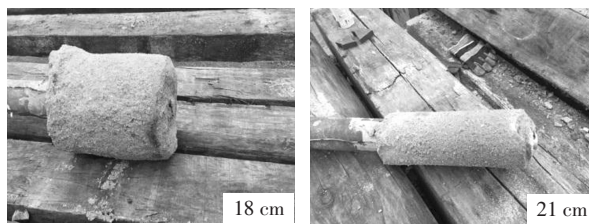
图 6 正常服役下桩的承载力随桩端扩大头尺寸变化曲线

Fig.6 Variation curve of normal service's bearing capacity with change of enlarged head size of pile end

为了查明桩端极限承载力破坏的具体情况,试验完成后将模型桩取出,各扩大头尺寸的桩端如图 7 所示.从图 7 可以看出,110 mm 桩端破了一个小角,可能由于局部搅拌不均导致强度偏低,在受力的时候桩端和土接触时发生破坏,其他桩端扩大头都保持其完整性,而且水泥土和桩端之间也未发生明显的位移.故此次试验承载力受地基土剪切破坏控制.



(a) 110 mm 桩端 (b) 160 mm 桩端



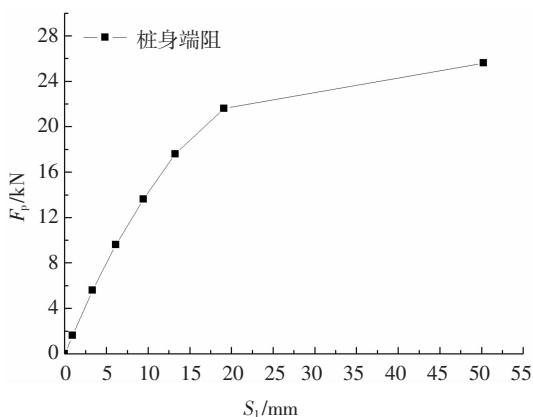
(c) 200 mm 桩端 (d) 250 mm 桩端

图 7 试验后桩端情况

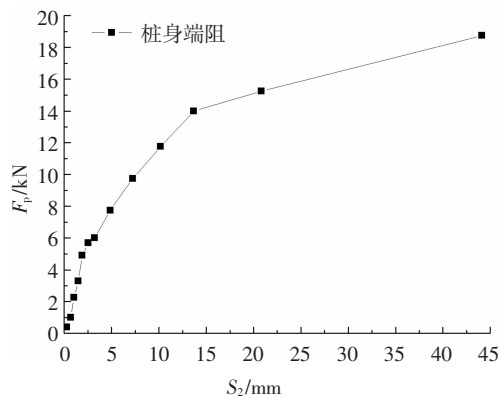
Fig.7 Pile end conditions after test

### 2.2 桩端阻力

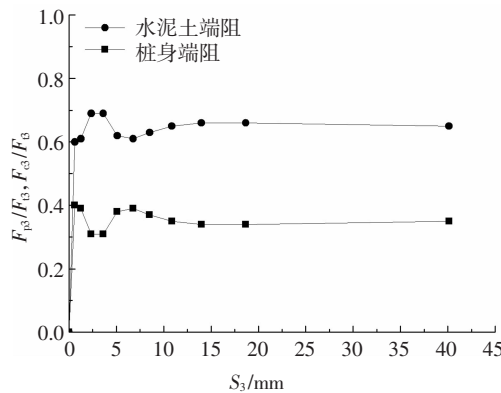
各直径水泥土扩大头桩端阻力随位移变化曲线如图 8 所示.为了清楚显示桩身和水泥土的端阻分担比,将 160、200、250 mm 直径的端阻归一化,110 mm 直径的水泥土端阻由于传感器尺寸原因无法测得,故不进行处理.其中  $F_{ei}(i=3,4,5)$  为各尺寸扩大头的总端阻力,  $F_{ei}(i=3,4,5)$  为水泥土端阻力,是 2 个传感器计算的平均值,  $F_{pi}(i=1,2,3,4,5)$  为桩身端阻力,  $S_i(i=1,2,3,4,5)$  为各桩的桩端位移.对比图 8(a)与图 8(b)可以发现,有水泥土后桩身端阻立刻大幅下降,由此可见水泥土扩大头对提高承载力起着重要的作用.对比图 8(c)~图 8(e)可以看出,在位移较小时,端阻分担比一直在变化,当位移超过 5 mm 后,端阻分担比趋于稳定;水泥土分担的端阻比例远高于桩身端阻,且水泥土直径越大,稳定状态其分担的端阻比例也越大,图 8(e)中水泥土最终分担的端阻比例可达 84%.但直径也不是越大越好,前人的经验表明当轴力继续增大,桩身和水泥土发生位移后,端阻分担比将重新分布,水泥土分担的端阻反而变小,而且工程中还要考虑经济性采取性价比最高的直径.此次试验由于水泥土配比较高,扩大头强度较高,故基本没出现水泥土破坏,也没有发生桩身和水泥土之间明显的相对位移,实际应用中要注意保证桩端水泥土的强度.



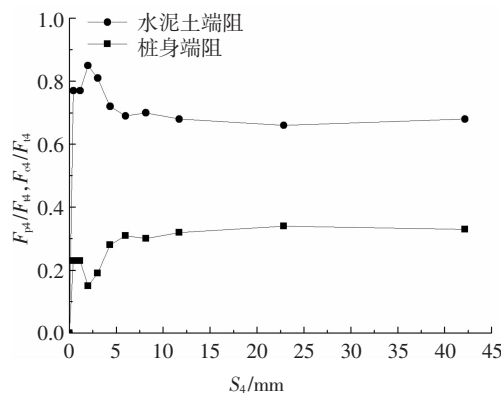
(a) 76 mm 端阻



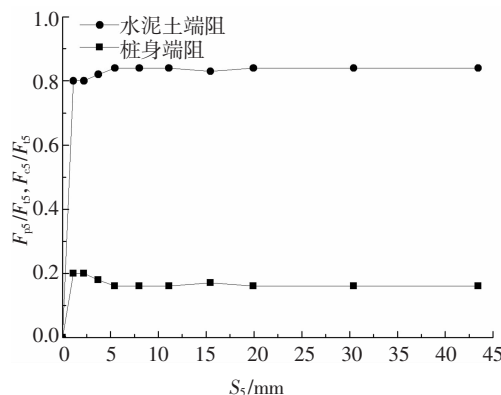
(b) 110 mm 端阻



(c) 160 mm 归一化端阻



(d) 200 mm 归一化端阻



(e) 250 mm 归一化端阻

图 8 各尺寸扩大头桩的水泥土端阻和桩身端阻  
Fig.8 Cemented soil's end resistance and pile body's end resistance of various sizes of enlarged head of pile

此次试验由于桩身入土部分少,又是钢管桩,实际侧摩阻力集中在桩侧水泥土与砂土的接触界面,长度为 30 cm,故侧摩阻力较小,为端承桩.而且由于接触面均匀且形状规则,属性基本相同,故可大胆推测桩侧摩阻力与扩大头尺寸基本成线性关系.

### 3 桩端阻力计算与对比分析

从图 8 可以看出桩端阻力-位移曲线基本呈双曲线形式,故参考[23]提出的应用较为广泛的桩基沉降计算公式:

$$S_b = \frac{P_b(1-\mu)}{4r_b G_b} \tag{3}$$

式中: $S_b$  为桩端沉降; $P_b$  为桩端荷载; $\mu$  是土体泊松比; $r_b$  为桩端半径; $G_b$  为桩端土体的剪切模量. 本试验的  $\mu$  为 0.3.

由于沉降的非线性,参考[24]提出的桩端土体的剪切模量随桩端荷载改变的公式:

$$G_b = G_w \left( 1 - R_f \frac{P_b}{Q_b} \right) \tag{4}$$

式中: $G_w$  为桩端土体的初始剪切模量; $R_f$  为破坏比; $P_b$  为桩端阻力; $Q_b$  为最大桩端阻力.

对于本次试验,110 mm 直径的扩头桩由于水泥土端阻不能测得,只知桩身端阻,无法与实测比较,故只计算其他尺寸的桩端阻力-位移曲线.将图 8 曲线的初始段数值代入式(3)计算得 76、160、200、250 mm 桩径对应的  $G_w$  分别为 7.6 MPa、27.3 MPa、22.0 MPa、14.8 MPa.

在每组试验后都各取几份土样进行室内三轴试验,发现  $R_f$  值并不固定,80%土样的  $R_f$  集中在 0.7~0.85 区间内,考虑  $R_f$  受温度、试验土重填等影响,在有限的试验条件下,难以直接确定各组试验情况下的  $R_f$  值,故  $R_f$  取值在室内试验的基础上进行小幅调整,发现  $R_f$  分别取 0.7、0.8、0.75、0.75 时,实测曲线和计算曲线吻合良好.

将各级端阻  $P_b$  代入式(4),计算出改变后的  $G_b$ ,然后回代入式(3)计算出各级端阻对应的桩端沉降  $S_b$ ,绘制出传统桩端沉降公式计算的桩端阻力-桩端位移曲线与实测曲线对比如图 9 所示.从图 9(a)看出对于无水泥土桩其位移趋势较为接近,实测曲线比公式计算曲线沉降要小,可能原因是实际土体密度较高,沉降较小.比较图 9(b)~图 9(d)可以看出,对于有水泥土扩大头的桩,在前半段两曲线的位移吻合较好,在后半段才出现曲线分离,而且水泥土半径越大,吻合度越高,160 mm、200 mm 桩的两曲

线前半段基本一致,250 mm 桩的两曲线基本重合.说明传统桩端沉降公式亦可以用来计算此次试验的桩端沉降.

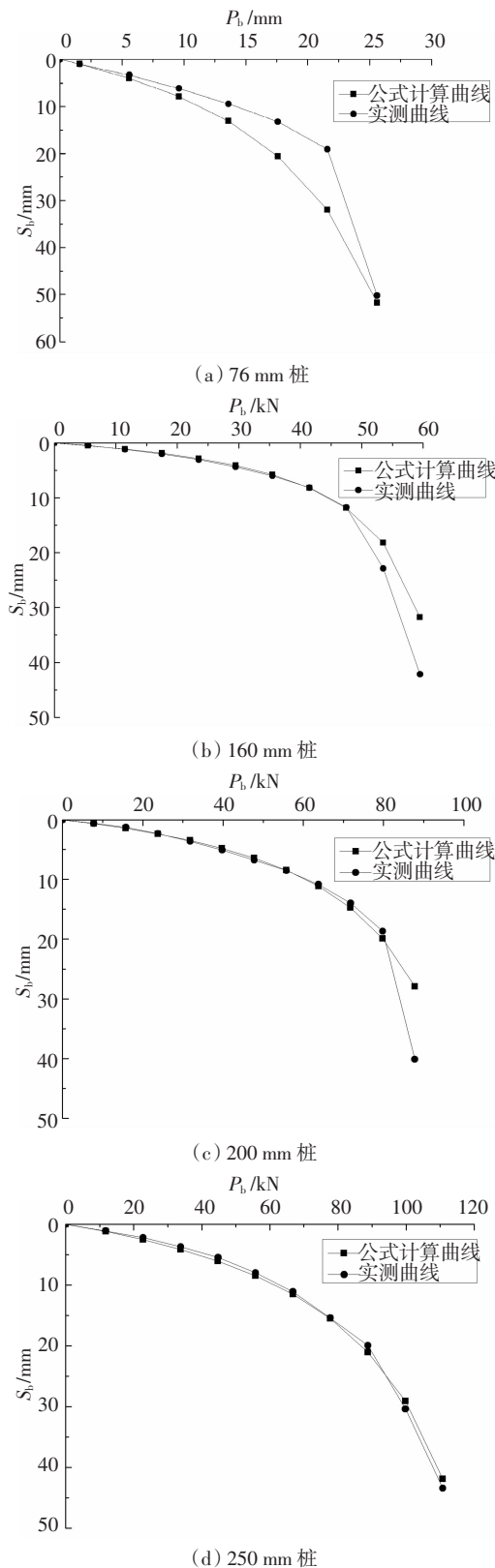


图9 公式计算位移曲线与实测曲线对比  
Fig.9 Comparison of load-displacement curve of calculated by formula and measured

## 4 结论

本文通过对具有不同尺寸桩端扩大头的钢管桩进行模型试验,研究水泥土加固体尺寸对桩承载性能的影响,分析试验结果得出以下结论:

1) 桩端灌注水泥土形成扩大头以后,相比无扩大头的桩,其承载力显著提高,在相同的荷载下,其沉降显著变小,这说明桩端扩大头的存在和浆液入渗可以很好地改善桩端承载性能.

2) 随着扩大头直径的增加,桩的承载力持续增长,但每单位直径增加所提高的承载力先增加,在直径 200 mm 之后开始减小,在工作荷载下对减小位移的效果呈递减趋势,故考虑经济性可以选取一个最优扩大头直径.

3) 桩端水泥土扩大头承担端阻比例远高于桩身端阻,且分担的端阻比随扩大头直径的增大而增大;端阻分担比在位移 5 mm 以后趋于稳定.由于水泥土受力较大,实际应用中应该注意桩端水泥土的强度.

4) 传统桩基沉降公式计算的桩端阻力与桩端沉降曲线,同含水泥土扩大头的桩端沉降实测曲线吻合良好.

未来可以考虑研究改变地基土类型、水泥土的强度、注浆压力等参数,研究其对承载性能的影响情况.

## 参考文献

- [1] 陈娟,徐力生,徐蒙,等.注浆压力动荷载作用下盖重非线性响应简化分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):68—74.  
CHEN J, XU L S, XU M, et al. Simplified analysis of concrete covering dynamic response under grouting pressure fluctuating load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(1): 68—74. (In Chinese)
- [2] SUTHAN P, SHERIF E, WALT V. The effects of compaction post grouting of model shaft tips in fine sand at differing relative densities —experimental results [C]// Proceedings of Art of Foundation Engineering Practice Congress. Reston: ASCE, 2010: 486—500.
- [3] 刘金励,祝经成.泥浆护壁灌注桩后注浆技术及其应用[J].建筑科学,1996,3(2):13—18.  
LIU J L, ZHU J C. Technology and application of post-grouting for slurry drilling piles [J]. Building Science, 1996, 3(2): 13—18. (In Chinese)
- [4] 张忠苗,吴世明,包风.钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究

- [J].岩土工程学报,1999,21(6):681—686.
- ZHANG Z M, WU S M, BAO F. Study of mechanism and application on bored pile end grouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):681—686. (In Chinese)
- [5] 戴国亮, 龚维明, 薛国亚, 等. 超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J]. 岩土力学, 2006, 27(5):849—852.
- DAI G L, GONG W M, XUE G Y, *et al.* Effect examination for a base post-grouted overlength drilling pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5):849—852. (In Chinese)
- [6] 刘开富, 方鹏飞, 刘雪梅, 等. 软土地区桩端后注浆灌注桩竖向承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2):1054—1057.
- LIU K F, FANG P F, LIU X M, *et al.* Experimental study on vertical bearing performance of base post-grouted cast-in-place piles in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2):1054—1057. (In Chinese)
- [7] 张忠苗, 王华强, 邹健. 含部分黏性土的卵石层桩底注浆现场试验与分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2):308—314.
- ZHANG Z M, WANG H Q, ZOU J. In-situ test and analysis of pile end post grouting in gravel strata with cohesive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2):308—314. (In Chinese)
- [8] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 大直径扩底嵌岩桩竖向承载性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2):541—547.
- LIU N W, GONG X N, YU F, *et al.* Vertical bearing capacity of rock-socketed pile with enlargement at pile end [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2):541—547. (In Chinese)
- [9] FU X D, ZHOU Z B. Study on bearing capacity of bored cast-in-situ piles by post pressure grouting [J]. Grouting and Ground Treatment, 2003, 51(6):707—715.
- [10] JEYASUTHAN P, SHERIF E, WALT V, *et al.* Large-scale laboratory study on the innovative use of compaction grout for drilled shaft tippost grouting [C]// Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo, Contemporary Topics in Deep Foundations. Reston: ASCE, 2009:39—46.
- [11] DUAN X S, KULHAWY F H. Tip post-grouting of slurry-drilled shafts in soil: Chinese experiences [C]// Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo, Contemporary Topics in Deep Foundations. Reston: ASCE, 2009:47—54.
- [12] 张广兴. 桩端后注浆最优注浆量实测研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(4):69—70.
- ZHANG G X. Experimental study on optimum grouting quantity of pile end grouting [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(4):69—70. (In Chinese)
- [13] 杨德欢, 黄小娟, 刘俊斌, 等. 预应力混凝土管桩桩端桩侧联合后注浆模型试验研究[J]. 科技资讯, 2012(28):39.
- YANG D H, HUANG X J, LIU J B, *et al.* Model test study on pile end and side post grouting of prestressed concrete pipe pile [J]. Science & Technology Information, 2012(28):39. (In Chinese)
- [14] 黄敏, 张克绪, 张尔齐. 桩底灌浆钻孔灌注桩竖向承载性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8):1114—1117.
- HUANG M, ZHANG K X, ZHANG E Q. Research on behavior of boring pile grouted at bottom under axial load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(8):1114—1117. (In Chinese)
- [15] 黄吉龙, 陈锦剑, 王建华. 桩端后注浆灌注桩竖向承载性能数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12):2122—2125.
- HUANG J L, CHEN J J, WANG J H. Numerical analysis on the bearing capacity of post-grouting bored pile under vertical load [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12):2122—2125. (In Chinese)
- [16] FEMANDEZ L, MIGUEL A, PHILIP G. Load test program to validate model for post grouted drilled shafts [C]// Proceedings of Geo-Denver 2007, New Peaks in Geotechnics. Reston: ASCE, 2007:1—11.
- [17] MIGUEL E R, MIGUEL A. Load transfer mechanisms of tip post-grouted drilled shafts in sand [C]// Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo. Reston: ASCE, 2009:23—30.
- [18] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:11—13.
- JGJ94—2008 Technical specification for construction of pile foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:11—13. (In Chinese)
- [19] 刘利民, 金兴平. 钻孔灌注桩后注浆技术[J]. 西部探矿工程, 1999, 11(5):11—12.
- LIU L M, JIN X P. Post grouting technology of bored pile [J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11(5):11—12. (In Chinese)
- [20] PHILIP K, FEMANDEZ A, MIGUEL A. Post grouted drilled shaft sacomprehensive case history from Texas [C]// Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo. Reston: ASCE, 2009:31—38.
- [21] XIAO D P, WU C Q, WU C L. Bored pile post-grouting technology and its engineering application [C]// Proceedings of the US-China Workshop on Ground Improvement Technology. Reston: ASCE, 2009:198—206.
- [22] JGJ106—2014 建筑桩基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014:13—18.
- JGJ106—2014 Technical code for testing of building foundation piles [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014:13—18. (In Chinese)
- [23] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded pile [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(12):1465—1488.
- [24] HAN J, YE S L. A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension [J]. Canadian Geotechnical Engineering, 2006, 43(1):19—29.