

# 持力层对大直径扩底灌注桩竖向承载性状的影响

高广运<sup>1</sup>, 杨成斌<sup>2</sup>, 高盟<sup>3</sup>, 张婧<sup>1</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 合肥工业大学建筑设计研究院, 安徽 合肥 230009;  
3. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 大直径扩底灌注桩的沉降以桩端土层的竖向压缩变形为主, 因此端承土层特性对大直径扩底桩的竖向承载性状有较大影响。利用有限差分程序建立三维非线性有限差分数值模型, 研究了持力层性质对大直径扩底桩竖向承载性状的影响。结果表明, 大直径扩底桩承载力随持力层厚度的增加而增大, 且在持力层厚度较小时持力层厚度的变化对承载力和桩端阻力影响显著。桩侧土层模量与持力层模量比为 0.2 时, 桩端入持力层深度的变化在持力层厚度较小时对大直径扩底桩的极限承载力影响较大。相同持力层厚度下, 桩侧土层模量的变化对大直径扩底桩承载力的影响较大, 模量越大承载力越高; 下卧层模量的变化对大直径扩底桩承载力的影响较大。

**关键词:** 大直径扩底灌注桩; 竖向承载性状; 持力层; 三维有限差分模型; 验证

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)07-1184-08

**作者简介:** 高广运(1961-), 男, 安徽人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学和桩基方面的研究。E-mail: gaoguangyun@263.net。

## Influences of bearing stratum on vertical bearing behaviors of large diameter cast-in-place belled piles

GAO Guang-yun<sup>1</sup>, YANG Cheng-bin<sup>2</sup>, GAO Meng<sup>3</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Institute of Architectural Design, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** The main vertical deformation of large diameter cast-in-place belled piles is the compressive one of end-bearing stratum. So the properties of the end-bearing stratum have a great effect on the vertical bearing behavior of the large diameter belled piles. In order to analyze the effectiveness of the bearing stratum on the vertical bearing behavior of a belled pile, three-dimensional non-linear finite-difference numerical models are established by means of the finite-difference program. It is found that the vertical bearing capacity of a large diameter belled pile increases with the increment of the thickness of the bearing stratum. Both the bearing capacity and the tip resistance are notably affected when the thickness variation of the bearing stratum is on the small side. When the ratio of the modulus between the shaft stratum and the bearing stratum is 0.2, the ultimate bearing capacity of the large diameter belled pile is greatly affected as the variation of the tip embedded depth of the pile when the thickness of the bearing stratum is on the small side. With the same thickness of the bearing stratum, the bearing capacity of the large diameter belled pile is greatly affected as the variation of the modulus of the shaft stratum. The greater the modulus of the bearing stratum is, the greater the bearing capacity is. The bearing capacity of the large diameter belled pile is greatly affected with the variation of the modulus of the bearing substratum.

**Key words:** large diameter cast-in-place belled pile; vertical bearing behavior; bearing stratum; 3D finite-difference model; validation

## 0 引言

大直径扩底灌注桩基础(以下简称扩底桩)具有承载力高、桩身刚度大、能承受较大横向荷载、抗震能力强、质量易控制、沉降小等优点,在桥梁、港口、

高层建筑等重要工程中得到广泛应用,它能满足(超)

基金项目:上海市重点学科建设项目(B308);上海市规土局资助项目(FDZ2008034)

收稿日期:2011-07-18

高层建筑物框架、框剪、筒体、空间网架等结构体系或其他重型结构物承载的要求,且多设计为一柱一桩,不需桩顶承台,大大简化了基础结构的设计和施工。引起了学者们的重视,开展了相关研究。

李大展等<sup>[1]</sup>根据现场载荷试验,分析了浸水湿陷对扩底桩竖向承载力的影响,得出了负摩阻力的变化规律,提出了湿陷性黄土中扩底桩的荷载传递机理;黄强<sup>[2]</sup>通过对置于不同持力层、具有不同桩身和扩底直径的扩底桩荷载试验成果的分析,提出了砂性及碎石类土中扩底桩的变形计算模式,给出了临界桩径承载力参数及扩底桩的承载力折减系数;文献[3~12]根据现场载荷试验,分别研究了端承于黄土、粗砂、砂卵石等土层中扩底桩的竖向承载性状,得出了扩底桩的竖向承载规律,提出了建立在扩底墩地基模量新概念上的扩底墩深基础沉降计算方法;采用数值模拟技术,研究了扩底桩的尺寸效应和土体参数对扩底桩竖向承载性状的影响;王凤池等<sup>[13]</sup>分析了扩底桩工作机理和受力特点,指出它与中型桩区别的的必要和充分条件;邓洪亮<sup>[14]</sup>根据经典弹性力学理论分析了桩-土作用的力学性质和荷载传递机理,求得了扩底桩桩端阻力临界桩长、临界厚度数值解及其与土的性质和桩的几何尺寸间的关系;黄广龙等<sup>[15]</sup>根据对一大型建筑场地同一地质条件下相同桩径的钻孔扩底桩和直桩桩身轴力和桩侧阻力测试资料,对比分析了两种桩型桩身轴力、桩侧摩阻力以及桩端阻力分布特征,探讨了两种桩桩侧摩阻力、桩端阻力的发挥过程;文松霖<sup>[16]</sup>通过扩底桩的土槽载荷试验和离心机仿真模型试验,对不同类型荷载之间的相互影响、组合荷载作用下桩的抵抗机理和承载力屈服包络面的特性进行了分析,提出了用桩的单方向极限承载力求解桩的承载力空间屈服面的经验公式。

上述研究都是针对某一具体土层得到的扩底桩的竖向承载特性,而对桩端土层性质对扩底桩的竖向承载性能的影响规律尚缺乏整体认识。现场载荷试验是研究扩底桩竖向承载性状的最直接手段,但往往受到试验费用、试验周期、场地等条件的限制,而数值模拟具有直观、能灵活变化工况、经济、快速等优点。本文结合大直径扩底桩的规范编写<sup>[17]</sup>,利用有限差分程序建立扩底桩的三维有限差分数值模型,详细研究持力层及下卧层对扩底桩竖向承载性状的影响,为大直径扩底桩的规范编写提供一定的理论基础。

## 1 大直径扩底桩竖向承载性状

模型试验、数值模拟和工程应用表明,大直径( $d \geq 800 \text{ mm}$ )扩底灌注桩竖向承载性状不同于普通等直径桩,桩端设计为锅底形。扩底桩以桩端承载力

为主,即端承型桩,端阻力远大于侧阻力,端阻充分发挥所需位移远大于侧阻。 $Q-s$ 曲线为缓变形,无明显特征点。其端部破坏模式不同于普通桩基础,如图1示,竖向荷载作用下,随桩顶荷载的增加,沉降增大,但即使地基土沉降变形很大,扩底桩也不会突然失稳,总体上呈现以竖向压缩变形为主的渐进破坏模式<sup>[18]</sup>。

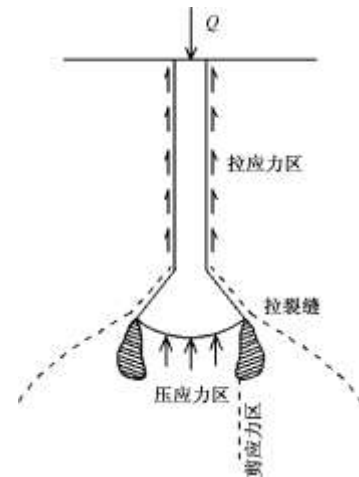


图 1 大直径扩底桩端部破坏模式示意图

Fig. 1 Sketch model of failure at end-bearing stratum of a large diameter belled pile

关于扩底桩端承力,目前大多采用端阻力折减法计算,如北京规范和现行建筑桩基技术规范。其结果会导致扩底桩端承载力偏小,甚至有时扩底反而较不扩底时的承载力更小,端阻力折减一直是困扰工程界的一个重要问题。根据扩底桩的受力机理及一些静压桩试验结果分析,其端承力的潜力是比较大的。因此有些研究者和工程师认为,面积修正系数限制了扩底桩的使用,是中国近年来扩底桩发展缓慢的主要原因之一<sup>[18]</sup>。

## 2 三维有限差分模型

### 2.1 模型建立

计算模型示意图和网格划分如图 2 所示。根据试算,地基土的计算范围横向取 6 倍桩身直径、纵向为 3 倍桩长的矩形区域即可满足要求,具体经试算确定;边界条件的设定为地基土四周和桩中心固定水平方向位移,底边固定竖直方向位移;土体采用 Mohr-Coulomb 模型,桩体为混凝土材料,采用线弹性模型;计算中所需的土体参数为体积模量  $K_s$ 、剪切模量  $G_s$ 、密度  $\rho_s$ 、黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。桩体采用线弹性模型,所需材料参数为体积模量  $K_p$ 、剪切模量  $G_p$  和密度  $\rho_p$ ;桩-土之间设三角形接触面单元。

### 2.2 模型验证

某工程为一厚度大于 20 m 的均质粉土地基<sup>[10]</sup>,采用大直径扩底桩基。粉土持力层的物理力学指标为:

天然含水率  $w=26.6\%$ 、重度  $\gamma=17.8 \text{ kN/m}^3$ 、天然孔隙比  $e=0.752$ 、塑性指数  $I_p=8$ 。对完成了静载试验的两根扩底桩采用上述计算模型进行数值模拟，分别记为  $k1, k2$ ，详见表 1，其中扩底高度均为  $1.8 \text{ m}$ 。土体单元计算参数： $E=15 \text{ MPa}$ ， $\nu=0.35$ ， $c=10 \text{ kPa}$ ， $\varphi=25^\circ$ ， $\rho=1.787 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。桩体采用 C20 混凝土，其弹性模量  $E_p=2.55 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，密度  $\rho_p=2500 \text{ kg/m}^3$ ；泊松比  $\nu_p=0.20$ 。考虑对称性，取  $1/4$  模型计算。

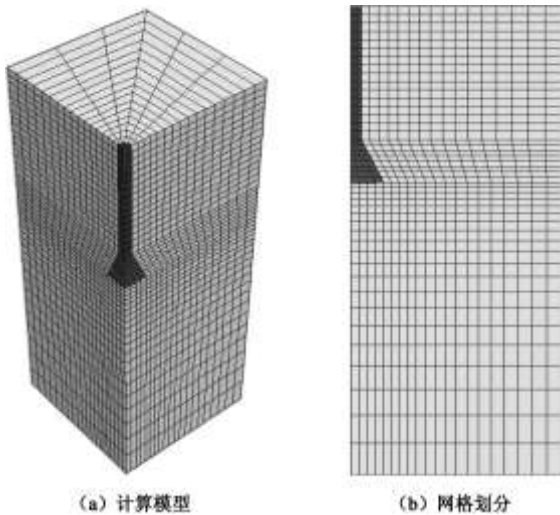


图 2 三维有限差分计算模型及网格划分

Fig. 2 Numerical model of three-dimensional finite-difference and grid partition

图 3 为大直径扩底桩的几何尺寸，其中  $d$  为桩身直径， $D$  为扩大端直径， $l$  为桩长， $L$  为扩大端变截面以上桩身长度， $h_a$  为扩大段斜边高度， $h_b$  为最大桩径段高度， $h_c$  为扩大端矢高， $b$  为扩大端半径与桩身半径之差。

表 1 某工程扩底桩尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of belled piles in a project

编号	桩长 $l/\text{m}$	摩擦段长度 $L/\text{m}$	摩擦段直径 $d/\text{m}$	扩底直径 $D/\text{m}$
k1	10.70	8.90	0.80	2.50
k2	12.20	10.40	0.80	2.50

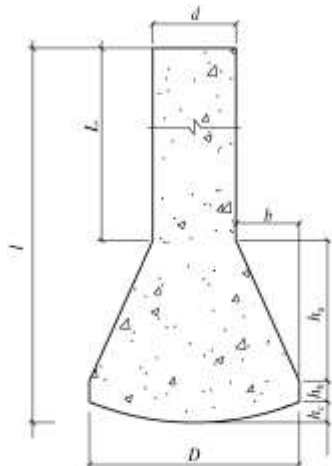


图 3 扩底桩的尺寸参数<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Dimension parameters of the belled piles

如图 4 所示，模拟计算  $Q-s$  曲线与实测  $Q-s$  曲线均吻合较好。由此可见，本文建立的计算模型和参数选取是合理的。如图 1 所示，扩大端斜面出现拉裂缝，因此计算中不考虑扩大端斜面侧阻力。

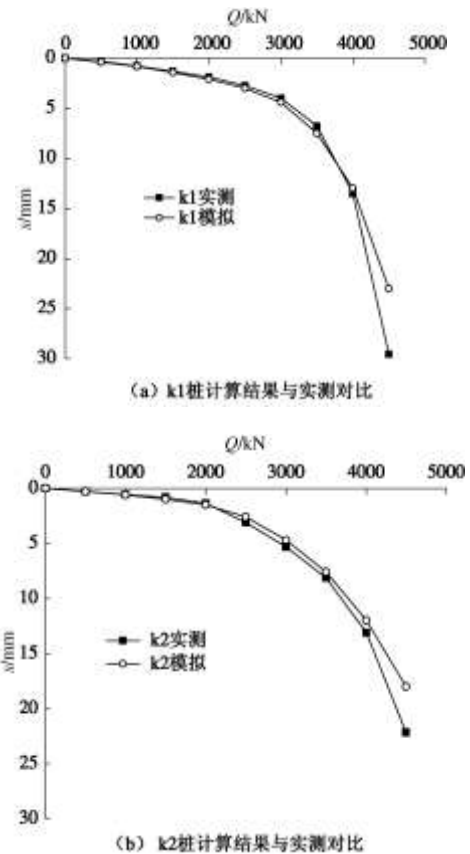


图 4 荷载沉降  $Q-s$  曲线

Fig. 4 Load-settlement  $Q-s$  curves

### 2.3 数值模拟试验模型

为研究持力层厚度、桩端入持力层深度和软弱下卧层对大直径扩底桩竖向承载性状的影响，设计 3 组数值模拟试验。

扩底桩计算尺寸：桩长  $l=11.50 \text{ m}$ ，摩擦段长度  $L=10.00 \text{ m}$ ，摩擦段直径  $d=1.00 \text{ m}$ ，扩底直径  $D=2.00 \text{ m}$ 。其中扩底高度和锅底高度（即扩大端矢高）分别为  $1.2, 0.3 \text{ m}$ 。

试验模型一：分析持力层厚度对扩底桩竖向承载性状的影响。

桩端置于持力层顶面，设计持力层厚度  $H$  分别为  $1.0 \text{ m} (0.5D)$ ， $2.0 \text{ m} (1D)$ ， $3.0 \text{ m} (1.5D)$ ， $4.0 \text{ m} (2D)$ ， $5.0 \text{ m} (2.5D)$ ， $6.0 \text{ m} (3D)$ ， $8.0 \text{ m} (4D)$ ， $10.0 \text{ m} (5D)$ ， $12.0 \text{ m} (6D)$ ， $16.0 \text{ m} (8D)$  共 10 组试验，编号分别为  $H1 \sim H10$ 。其中  $H=16.0 \text{ m} (8D)$  可视为无软弱下

卧层的情况。土体单元参数取值见表 2。接触面向刚度和剪切刚度均取为  $5 \times 10^7$  kPa/m, 黏聚力取为 8 kPa, 内摩擦角取为  $12^\circ$ 。

试验模型二: 分析桩端入持力层深度变化对大直径扩底桩竖向承载性状的影响。设计持力层厚度为  $H=2D$ 、 $H=3D$ 、 $H=4D$ 、 $H=5D$ , 则桩端入持力层深度  $T$  不同的大直径扩底桩试验共 16 组, 试验编号和桩端入持力层深度详见表 3。

试验模型三: 分析下卧层参数变化对大直径扩底桩承载性状的影响。桩端置于持力层顶面, 设计持力层厚度  $H=2D$  时编号分别为 E31~E35,  $H=3D$  时编号分别为 E36~E310, 共 10 组试验, 计算参数及试验编号详见表 4。

数值模拟加载时, 均在桩顶每级按 500 kN 加载。

表 2 土体计算参数

Table 2 Parameters of soils

参数	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^\circ)$	$\rho/(\text{kg m}^{-3})$
桩侧土层	10	0.35	15	18	$1.80 \times 10^3$
持力层	20	0.25	8	30	$1.95 \times 10^3$
下卧层	10	0.35	15	18	$1.80 \times 10^3$

### 3 计算结果分析

#### 3.1 持力层厚度 $H$ 的影响

图 5 为  $H6 \sim H10$  荷载沉降  $Q-s$  曲线, 由图可知, 具有相同的变化规律。取  $s=40$  mm 所对应的桩顶荷载作为大直径扩底桩的极限承载力, 可得各大直径扩底桩的极限承载力  $Q_u$  随持力层厚度  $H$  增加的变化规律, 如图 6 所示。由图可知, 随相对厚度  $H/D$  的增加,  $Q_u-H/D$  曲线斜率起始大、然后逐渐变小, 说明增加相同的持力层厚度, 在持力层厚度较小时, 持力层厚度对大直径扩底桩承载力影响相对较大, 随着持力层厚度

的增大影响逐渐减小。曲线拐点大约在  $H/D=2.5$  处, 说明实际设计中, 应尽量使持力层厚度大于  $2.5D$ , 以减小持力层厚度对大直径扩底桩极限承载力的影响。

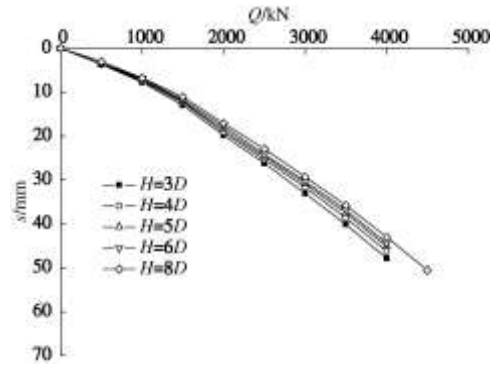


图 5  $H6 \sim H10$  荷载沉降  $Q-s$  曲线

Fig. 5 Load-settlements  $Q-s$  curves of H6-H10

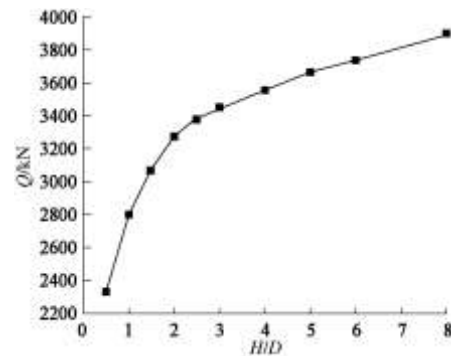


图 6  $H/D-Q_u$  曲线

Fig. 6  $H/D-Q_u$  curves

桩顶荷载  $Q=3000$  kN 时大直径扩底桩桩底的竖向应力等值线图如图 7 所示。由图可知, 不同持力层厚度下大直径扩底桩桩底地基土竖向应力等值线分布形态基本相似, 说明持力层厚度的增加对桩端地基土竖向应力的分布规律影响较小。

表 3 试验编号和桩端入持力层深度

Table 3 Simulation number and embedded depth of belled pile tip

编号	持力层厚度 $H$	桩端入土深度 $T$	编号	持力层厚度 $H$	桩端入土深度 $T$	编号	持力层厚度 $H$	桩端入土深度 $T$	编号	持力层厚度 $H$	桩端入土深度 $T$
T11	$2.0D$	$0.0D$	T21	$3.0D$	$0.0D$	T31	$4.0D$	$0.0D$	T41	$5.0D$	$0.0D$
T12	$2.0D$	$0.5D$	T22	$3.0D$	$0.5D$	T32	$4.0D$	$0.5D$	T42	$5.0D$	$0.5D$
T13	$2.0D$	$1.0D$	T23	$3.0D$	$1.0D$	T33	$4.0D$	$1.0D$	T43	$5.0D$	$1.0D$
T14	$2.0D$	$1.5D$	T24	$3.0D$	$1.5D$	T34	$4.0D$	$1.5D$	T44	$5.0D$	$1.5D$

表 4 试验编号和下卧层计算参数

Table 4 Simulation number and parameters of substrata

编号	桩侧土层模量/MPa	持力层模量/MPa	下卧层模量/MPa	桩侧土层模量/持力层模量	下卧层模量/持力层模量	下卧层黏聚力 $c/\text{kPa}$	下卧层内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
E31(36)	10	50	10	0.2	0.2	10	10
E32(37)	10	50	20	0.2	0.4	20	20
E33(38)	10	50	30	0.2	0.6	30	30
E34(39)	10	50	40	0.2	0.8	40	40

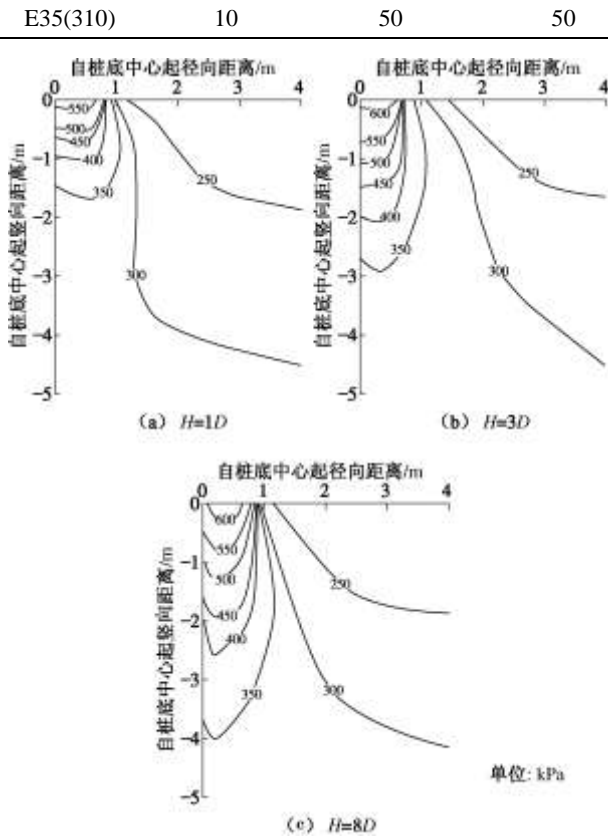


图7 桩端土体竖向应力等值线 ( $Q=3000\text{ kN}$ )

Fig. 7 Isolines of vertical stress for soils at pile tip ( $Q=3000\text{ kN}$ )

综合图7(a)~7(c)可发现,与无软弱下卧层( $H=8D$ )的大直径扩底桩桩底应力场分布规律类似,有软弱下卧层的桩端地基土应力场快速收敛。以桩端中心线上附加应力与自重应力之比20%为界,认为该点至桩底中心范围为桩底压力的影响范围,计算得到不同持力层厚度下扩底桩桩端竖向应力影响范围,见表5。由表5可知,无软弱下卧层时桩底竖向应力影响范围是 $2.5D$ ,有软弱下卧层时小于无软弱下卧层( $H=8D$ ),其竖向应力影响范围在 $2.0D$ 以内。

表5 桩端竖向应力影响范围

Table 5 Influence scope of vertical stress at pile tip				
有无软弱下卧层	有	有	有	无
持力层厚度/m	1D	2D	3D	8D
影响深度/扩底直径	1.50	1.75	1.90	2.50
影响深度/m	3.1	3.5	3.8	5.0

图8为持力层厚度 $H=1D$ 的扩底桩桩端在不同桩顶荷载下的竖向位移等值线图。由图可知,桩顶荷载越大,沿径向和深度方向的位移等值线间距越密,说明桩端土体位移场的影响范围越大。分析 $H=2D$ 、 $H=3D$ 、 $H=8D$ 的情况可得类似结果(限于篇幅,这里未提供相关计算关系曲线)。根据桩底中心线各点位移分析,无软弱下卧层时,径向影响范围约为 $1.5D$ ( $3.0\text{ m}$ );有软弱下卧层时,位移衰减快,径向影响范围约

为 $1.0D$ ( $2.0\text{ m}$ )。

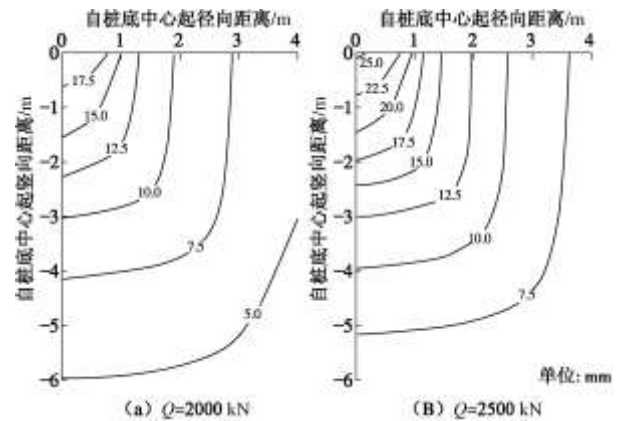
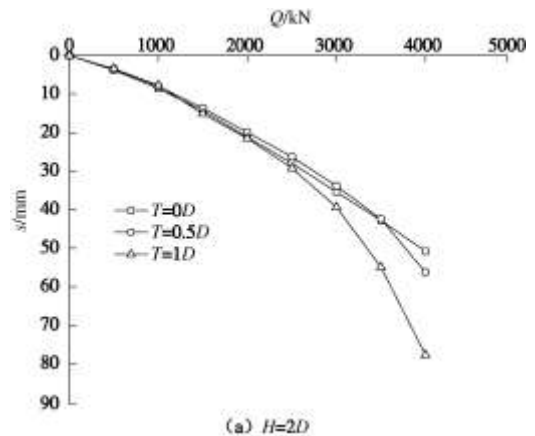


图8  $H=1D$ 的桩端土体竖向位移等值线

Fig. 8 Isolines of vertical displacement for soils at pile tip ( $H=1D$ )

### 3.2 桩端入持力层深度 $T$ 的影响

图9为持力层厚度 $H=2D, 3D, 4D, 5D$ 时,计算得桩端入不同持力层深度的桩顶沉降与荷载的 $Q-s$ 曲线。由图可知,持力层下有软弱下卧层时,随着持力层厚度的增加,桩端入持力层深度 $T$ 对扩底桩承载力的影响越来越小。与 $T=0D$ 的情况相比,持力层厚度较大( $H>3D$ )时, $T$ 越大,大直径扩底桩承载力也越大,但增幅较小,且随着荷载的增加,承载力增幅越来越小。这是因为桩侧土层模量远低于持力层模量, $T$ 的增加使得桩侧摩阻力增加,大直径扩底桩承载力也随之增加。随荷载增加,桩侧摩阻力逐渐达到



(a)  $H=2D$

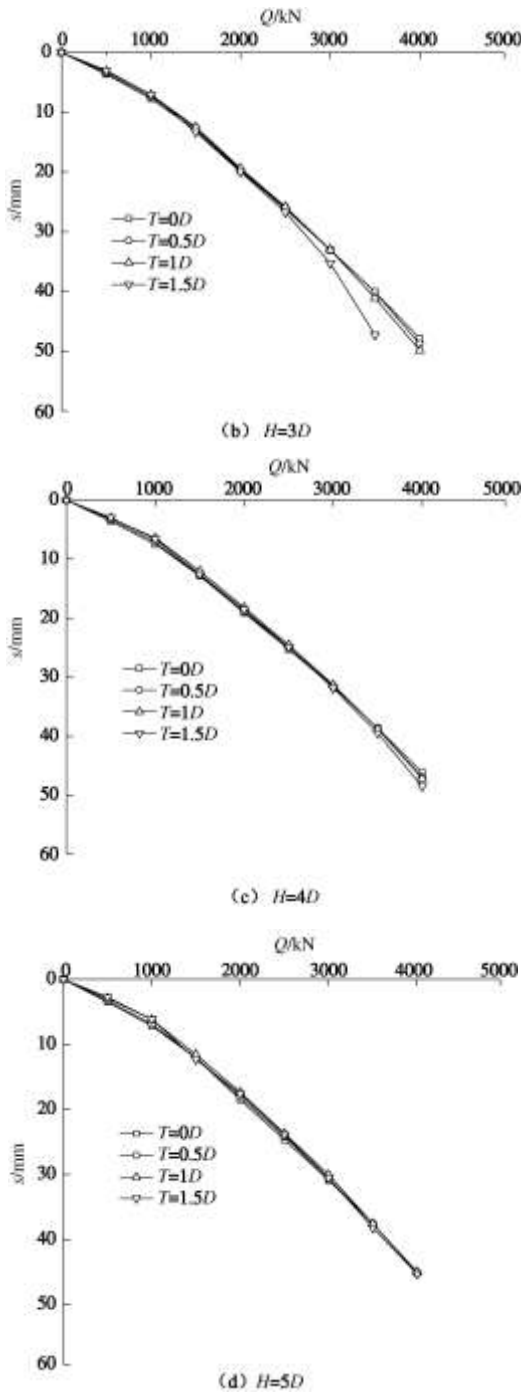


图9 荷载沉降 Q - s 曲线

Fig. 9 Load-settlements Q - s curves

极限值, 且大直径扩底桩扩大头侧面与土体的脱离造成该处侧摩阻力降低, 因此承载力增幅逐渐减小。

取  $s=40\text{ mm}$  所对应的桩顶荷载作为大直径扩底桩的极限荷载, 可以得到各扩底桩的极限承载力  $Q_u$ 。  $Q_u$  随  $T$  增加的变化规律如图 10 所示。

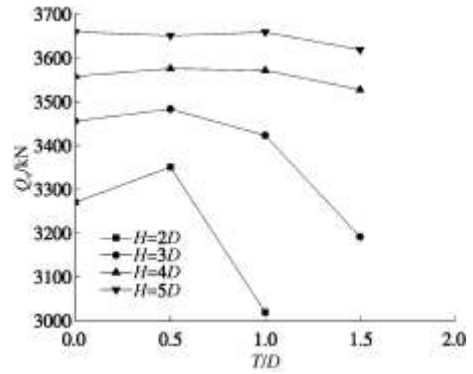


图 10 T/D 与极限承载力  $Q_u$  关系

Fig. 10 T/D- $Q_u$  curves

由图 10 可知, 持力层厚度较小 ( $H=2D$  和  $H=3D$ ) 时, 曲线斜率变化较大, 说明  $T$  对扩底桩的极限承载力影响较大; 持力层厚度较大 ( $H=4D$  和  $H=5D$ ) 时, 曲线斜率变化很平缓, 说明此时  $T$  对扩底桩的极限承载力影响很小。  $H=2D$  和  $H=3D$  时, 曲线拐点约在  $T/D=0.5$  处, 随着持力层厚度增加, 曲线拐点向右移动, 持力层厚度  $H=4D$  和  $H=5D$  时, 曲线拐点约在  $T/D=1$  处。因此, 对有软弱下卧层的扩底桩, 其应力和位移的有效影响深度约在距桩端下  $2.5D$  内, 故为保证端阻充分发挥, 持力层厚度应不小于  $2.5D$ 。以最小持力层厚度考虑, 由图 10 可知, 相同的持力层厚度下,  $T=0.5D$  时扩底桩的极限承载力最大。

由于软土地区可供选择为持力层的硬夹层厚度有限, 且桩端进入持力层深度太大将增大施工难度, 因此应根据持力层厚度及施工难易程度等确定扩底桩桩端进入持力层的深度, 结合数值分析的结果, 桩端入持力层的深度不宜大于扩底高度。

### 3.3 下卧层弹性模量 E 的影响

图 11 是计算得到的  $E_{31}-E_{35}$  的  $Q - s$  曲线。各  $Q - s$  曲线随下卧层弹性模量的增大向上偏移, 且下卧层模量与持力层模量之比较小 ( $E_3/E_2 < 0.6$ ) 时曲线偏移大, 下卧层模量与持力层模量之比较大时曲线偏移小, 说明下卧层越软弱, 其参数对桩的承载力影响越大。

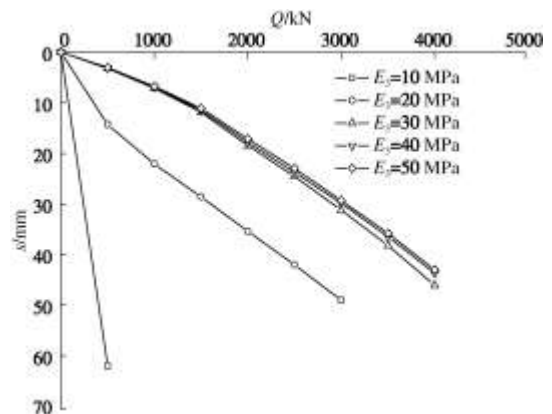
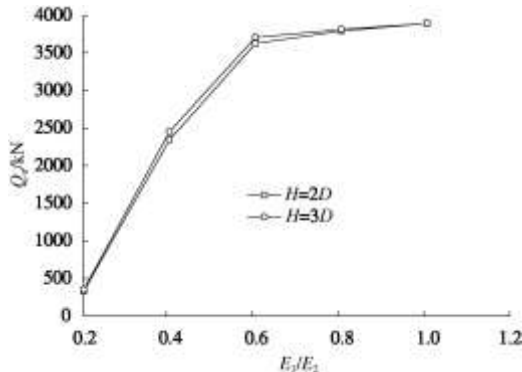


图 11 不同下卧层的  $Q-s$  曲线 ( $H=2D$ )Fig. 11  $Q-s$  curves for difference substrata ( $H=2D$ )

不同持力层厚度下, 下卧层弹性模量对扩底桩承载力的影响规律十分相似。但  $H=2D$  时各条  $Q-s$  曲线相差比  $H=3D$  时大, 说明持力层厚度较小 ( $H=2D$ ) 时, 下卧层参数对扩底桩承载力的影响较持力层厚度较大 ( $H=3D$ ) 时更大。

取  $s=40$  mm 所对应的桩顶荷载作为大直径扩底桩的极限承载力  $Q_u$ , 可以得到桩的极限承载力随下卧层模量增加的变化规律, 如图 12 所示。由图可知,  $H=2D$  和  $H=3D$  时的扩底桩极限承载力随桩侧土层参数的变化规律相似。以  $H=2D$  时的情况为例,  $E_3/E_2=0.2$  时扩底桩极限承载力为 327.48 kN,  $E_3/E_2=0.4$  时的极限承载力是  $E_3/E_2=0.2$  时的 6.16 倍,  $E_3/E_2=0.6$  时则为  $E_3/E_2=0.2$  时的 10.07 倍;  $E_3/E_2=1.0$  的极限承载力为 3893.96 kN, 是  $E_3/E_2=0.2$  时的 10.14 倍。可见对于有一定厚度持力层的大直径扩底桩, 下卧层土越软弱, 对大直径扩底桩承载力的影响越大, 当下卧层达一定强度后, 对大直径扩底桩承载力的影响将大大减小。结果表明, 下卧层模量与持力层模量之比  $E_3/E_2 > 0.6$  时, 下卧层土体参数变化对大直径扩底桩极限承载力的影响较小。

图 12  $E_3/E_2-Q_u$  关系曲线Fig. 12 Relationship between  $E_3/E_2$  and  $Q_u$ 

## 4 结 论

利用有限差分程序建立三维有限差分数值模型, 分析了持力层厚度、桩端入持力层深度和软弱下卧层对大直径扩底桩竖向承载性状的影响, 结论如下:

(1) 桩端置于持力层顶面, 持力层厚度  $H$  较小时, 软弱下卧层对扩底桩竖向承载力影响大; 随  $H$  的增大, 软弱下卧层的影响逐渐减小, 临界点约为  $H/D=2.5$  ( $D$  为扩大端直径)。故工程设计应选择持力层厚度  $H$  大于  $2.5D$  的持力层, 以减小软弱下卧层对扩底桩竖向承载力的不利影响。

(2) 软弱下卧层参数对大直径扩底桩承载力的影响较大, 设计持力层的选择除考虑其厚度外, 应尽量避免桩端下的下卧层与持力层模量比小于 0.6 的软弱下卧层。

(3) 有软弱下卧层的扩底桩, 桩端应力场与位移场均收敛较快, 其有效影响深度和范围均较小, 为桩端下  $2.0D$  范围内, 径向约为距桩底中心  $1.0D$  范围。无软弱下卧层时, 应力与位移的影响深度和范围均较大, 桩端下竖向为  $2.5D$ , 径向为  $1.5D$ 。

(4) 持力层厚度小于  $3.0D$  时, 桩端进入持力层深度  $T=0.5D$  时扩底桩的极限承载力最大。应根据持力层厚度及施工难易程度等确定桩端进入持力层的深度, 桩端入持力层的深度不宜大于扩底高度。

## 参考文献:

- [1] 李大展, 滕延京, 何颐华. 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-zan, TENG Yan-jing, HE Yi-hua. Experimental study on vertical bearing performance of large diameter belled pile in subsided loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 11 - 21. (in Chinese))
- [2] 黄 强. 大直径扩底桩承载力及变形计算[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 67 - 77. (HUANG Qiang. Research on designing bearing capacity and evaluation of settlement of man-dug caisson foundation with belled-out piled of big diameters[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 67 - 77. (in Chinese))
- [3] 高广运. 黄土层中扩底墩基础的沉降计算和实测[J]. 工业建筑, 1995, 25(1): 30 - 36. (GAO Guang-yun. Calculation and measurement of settlement for belled pier base in loess[J]. Industrial Construction, 1995, 25(1): 30 - 36. (in Chinese))
- [4] 高广运, 孙雨明, 吴世明. 人工挖孔桩竖向承载性状[J]. 工程勘察, 2002, 26(1): 11 - 13. (GAO Guang-yun, SUN Yu-ming, WU Si-ming. Vertical bearing performance of digged pile[J]. Engineering Survey, 2002, 26(1): 11 - 13. (in Chinese))
- [5] 蒋建平, 高广运, 顾宝和. 扩底桩楔形桩等直径桩对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 764 - 766. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun, GU Bao-he. Comparative study on belled, wedged and equal diameter piers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 764 - 766. (in Chinese))
- [6] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 砂卵石层上大直径扩底短墩竖

- 向承载性状[J]. 岩土力学, 2004, **25**(3): 359 - 362. (GAO Guang-yun, JIANG Jian-ping, GU Bao-he. Vertical bearing behavior of large diameter short-belled pier in sand-cobble layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(3): 359 - 362. (in Chinese))
- [7] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 同场地扩底桩和直桩的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 502 - 506. (GAO Guang-yun, JIANG Jian-ping, GU Bao-he. Comparative study on belled and equal-diameter piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 502 - 506. (in Chinese))
- [8] 蒋建平, 高广运. 大直径扩底桩端阻力折减问题探讨[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2282 - 2288. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun. Study on modifying coefficient of end-bearing resistance of large diameter belled piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2282 - 2288. (in Chinese))
- [9] 高广运, 郭星宇, 冯世进, 等. 粗砂层上扩底墩竖向承载性状的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(2): 311 - 315. (GAO Guang-yun, GUO Xing-yu, FENG Shi-jin, et al. Numerical simulation of vertical bearing behavior of belled pier ended on the coarse sand[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(2): 311 - 315. (in Chinese))
- [10] 高广运, 彭争光, 蒋建平, 等. 厚层黄土状土中扩底墩竖向承载性状[J]. 岩土力学, 2007, **28**(6): 1167 - 1171. (GAO Guang-yun, PENG Zheng-guang, JIANG Jian-ping, et al. Vertical bearing behavior of belled pier in thick loess-like soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(6): 1167 - 1171. (in Chinese))
- [11] 高广运, 张婧, 郭星宇. 土体参数对扩底墩竖向承载性状影响的数值分析[J]. 岩土工程技术, 2007, **21**(5): 230 - 233, 238. (GAO Guang-yun, ZHANG Jing, GUO Xing-yu. Numerical analysis of vertical bearing behavior of belled pier under different soil parameters[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, **21**(5): 230 - 233, 238. (in Chinese))
- [12] 蒋建平, 高广运, 章杨松. 基于现场试验的桩身总侧阻力达到极限后的退化[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 633 - 642. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun, ZHANG Yang-song. Degradation of pile total skin friction after reaching ultimate state based on field test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 633 - 642. (in Chinese))
- [13] 王凤池, 王明恕. 大直径扩底桩墩的工作机理和承载力设计[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 251 - 253. (WANG Feng-chi, WANG Ming-shu. Working mechanism and bearing capacity design of the pedestal pier with large diameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 251 - 253. (in Chinese))
- [14] 邓洪亮. 扩底桩深度效应数值解法及其承载力确定方法[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 97 - 102. (DENG Hong-liang. Numerical solution of depth effect and determination method of bearing capacity for pile with expanded end[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(1): 97 - 102. (in Chinese))
- [15] 黄广龙, 惠刚, 梅国雄. 钻孔扩底桩原型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1922 - 1926. (HUANG Guang-long, HUI Gang, MEI Guo-xiong. Comparative experiment study on pedestal piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1922 - 1926. (in Chinese))
- [16] 文松霖. 扩底桩承载力空间屈服包络面的基本特性[J]. 岩土力学, 2006, **27**(8): 1229 - 1234. (WEN Song-lin. Three dimensional failure envelope behavior of pedestal piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(8): 1229 - 1234. (in Chinese))
- [17] JGJ/T 225—2010 大直径扩底灌注桩技术规程[S]. 2011. (JGJ/T 225—2010 Technical code for large-diameter belled cast-in-place pile foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [18] 规范编制组. 大直径扩底灌注桩竖向承载性状研究报告[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2009. (Code compiled group. Investigating report of vertical bearing capacity behavior of large-diameter belled cast-in-place pile foundation[R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2009. (in Chinese))