

# 一种大直径扩底桩的沉降计算实用方法

高 盟<sup>1,2</sup>, 高广运<sup>3\*</sup>, 顾宝和<sup>4</sup>, 杨成斌<sup>5</sup>

(1. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266510;  
3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 中国建设综合勘察研究设计院, 北京 100007;  
5. 合肥工业大学建筑设计研究院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 根据大直径扩底桩桩端应力的分布特征, 利用 Mindlin 基本解推导了扩底桩桩端沉降计算公式, 并给出了沉降影响系数。公式中桩端持力层土体的变形模量用深层平板静力载荷试验测定, 但深层载荷试验有时难以实现。为此根据收集的扩底桩工程实测沉降和原型扩底桩静载试验结果, 建立了工程中常用的压缩模量与变形模量间的关系, 并给出了两者的换算关系。大量的工程实测表明, 得出的扩底桩沉降计算公式是实用的。

**关键词:** 大直径扩底桩; Mindlin 基本解; 沉降计算; 变形模量

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2012)08 - 1448 - 05

**作者简介:** 高 盟(1977 - ), 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 主要从事土动力学、桩基及基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: gmxyz@tom.com。

## Practical method for settlement calculation of large-diameter belled piles

GAO Meng<sup>1, 2</sup>, GAO Guang-yun<sup>3</sup>, GU Bao-he<sup>4</sup>, YANG Cheng-bin<sup>5</sup>

(1. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266510, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Beijing 100007, China; 5. Institute of Architectural Design, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on the stress distribution characteristics of pile tip, a practical method is derived to calculate tip settlement of large-diameter belled piles using the Mindlin fundamental solution. And the settlement coefficient is also given. The deformation modulus of pile tip bearing stratum is determined by deep plate loading test. However, the deep plate loading test is difficult at a certain condition. So, according to a large number of measured settlement data and load test results of large-diameter belled piles, the relationship between the compression modulus and the deformation modulus is obtained. Large numbers of engineering cases indicate that the proposed settlement formula is feasible.

**Key words:** large-diameter belled pile; Mindlin fundamental solution; settlement calculation; deformation modulus

## 0 引 言

大直径扩底桩由于其荷载传递机理不同于一般桩<sup>[1-5]</sup>, 使一般单桩的沉降计算方法不能用于扩底桩。必须建立适用于扩底桩的沉降计算理论。

顾宝和<sup>[6]</sup>提出将扩底桩桩端土压力简化为圆形均匀分布, 运用 Mindlin 位移基本解, 推导圆形均布压力作用下桩底土沉降位移解析解。黄强<sup>[7]</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静载试验成果的分析, 提出了砂性及碎石类土中扩底桩的变形计算模式, 指出扩底桩的沉降变形主要由桩身压缩量和桩端土压缩变形两部分组成, 其桩端土压缩变形

计算式采用圆形面积均布荷载作用下的 Bousinesq 解导出。高广运等<sup>[8]</sup>提出了建立在扩底墩地基模量新概念上的黄土层中扩底墩深基础沉降计算方法。刘之春等<sup>[9]</sup>提出一种计算扩底桩的沉降变形的公式, 指出与地基土相比, 桩身刚度为无限大, 因而扩底桩桩下沉降量可以看作在地基内部、中心荷载作用下的圆形刚性基础的沉降。

上述扩底桩的沉降计算理论和方法都是一定条件下得出的, 缺乏工程实用性。本文结合大直径扩底桩

收稿日期: 2011 - 07 - 28

\*通讯作者

的规范编写<sup>[10]</sup>, 基于 Mindlin 基本解, 提出了一种扩底桩沉降计算的实用方法。

### 1 理论计算公式的推导

大直径扩底灌注桩的沉降变形由桩身压缩变形  $S_1$ ; 桩侧摩阻力引起的桩底土体变形  $S'$  和桩端阻力产生的桩底土的变形  $S_2$  3 部分组成。桩身的压缩变形  $S_1$  可由弹性理论计算。而桩侧摩阻力引起的桩底土体变形较小, 因为桩侧摩阻力充分发挥时, 所需与周围土的相对位移很小, 土层中为 3~5 mm, 且与桩身直径无关。相反的, 为了使桩端阻力发挥出来, 所需桩端下土的位移较大, 并与桩底直径和桩下土的性质有关, 随扩底直径增大而增加。模型试验表明, 由于扩大端的存在, 桩底压应力区与桩侧拉应力区间有一临空区和拉裂缝区, 由于土拱的作用和土的黏聚力而不塌落, 故桩侧摩阻力引起的桩底土体变形可以忽略。因此, 关键是计算桩端阻力产生的桩底土的变形, 即桩底附加压力引起桩底土的变形。

假定荷载作用在半无限体表面的 Boussinesq 弹性理论, 显然不能用于分析深基础地基的应力和位移。大直径扩底桩下土体以竖向变形为主, 适合扩底桩基础地基应力和位移的是 Mindlin 解。Mindlin 利用 Kelvin 解答求得了弹性半无限空间体内作用有集中力时的解答。假设在弹性半无限空间体内深度  $h$  处作用有集中力  $P$ , 如图 1 所示, 自地表 (半无限空间体自由面) 深度  $Z$  处任意点的位移可表示为

$$w_z = \frac{P(1+\mu)}{8\pi(1-\mu)E} \left[ \frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{(Z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(5-12\mu+8\mu^2)}{R_2^2} + \frac{(3-4\mu)(Z+h)^2 - 2hZ}{R_2^3} + \frac{6(Z+h)^2Zh}{R_2^5} \right] \quad (1)$$

式中,  $R_1 = [r^2 + (Z-h)^2]^{1/2}$ ,  $R_2 = [r^2 + (Z+h)^2]^{1/2}$ ,  $\mu$  为泊松比。

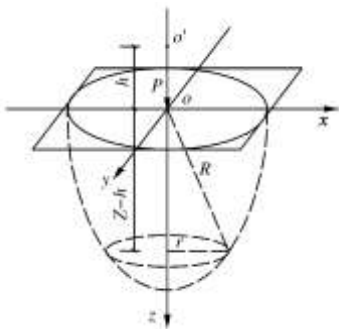


图 1 Mindlin 基本解示意图

Fig. 1 Sketch of Mindlin fundamental solution

对于扩底桩基础, 作用在地基内部的是一个圆形均布荷载, 因此 Mindlin 解答不能直接用于求解其应力分布。必须将其基本解答推广到均布荷载的情况。

假设地面以下深度  $h$  处有一圆形均布荷载作用, 圆半径为  $a$ , 均布荷载大小为  $q$ , 如图 2 所示。极坐标系下, 在圆形均布荷载内部取微分  $q\rho d\rho d\theta$ , 则该微面积上的荷载大小为  $q\rho d\rho d\theta$ 。由  $q\rho d\rho d\theta$  在距离  $o$  点以下距离地面深度  $Z$  处产生的位移为

$$dw_z = \frac{(1+\mu)q\rho d\rho d\theta}{8\pi(1-\mu)E} \left[ \frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{(Z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(5-12\mu+8\mu^2)}{R_2^2} + \frac{(3-4\mu)(Z+h)^2 - 2hZ}{R_2^3} + \frac{6(Z+h)^2Zh}{R_2^5} \right] \quad (2)$$

式中,  $R_1 = [\rho^2 + (Z-h)^2]^{1/2}$ ,  $R_2 = [\rho^2 + (Z+h)^2]^{1/2}$ 。

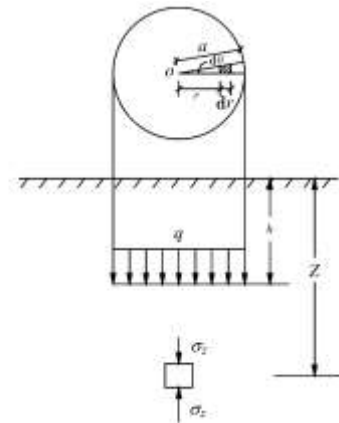


图 2 土体内作用圆形均布荷载示意图

Fig. 2 Sketch of internal uniform loading

对式 (2) 进行积分运算可得

$$w_z = \frac{1+\mu}{4(1-\mu)} \left[ \frac{(3-4\mu)a}{\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} + (Z-h)} + \frac{(Z-h)a}{\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} [\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} + (Z-h)]} + \frac{(5-12\mu+8\mu^2)a}{\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} + (Z+h)} + \frac{[(3-4\mu)(Z+h)^2 - 2hZ]a}{(Z+h)\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} [\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} + (Z+h)]} + \frac{2hZ\{[a^2 + (Z+h)^2]^2 + [a^2 + (Z+h)^2](Z+h)^2 + (Z+h)^4\}a}{(Z+h)[a^2 + (Z+h)^2]^{3/2} \{[a^2 + (Z+h)^2]^{3/2} + (Z+h)^3\}} \right] \frac{qa}{E} \quad (3)$$

令

$$I_p = \frac{1+\mu}{4(1-\mu)} \left[ \frac{(3-4\mu)a}{\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} + (Z-h)} + \frac{(Z-h)a}{\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} [\sqrt{a^2 + (Z-h)^2} + (Z-h)]} + \frac{(5-12\mu+8\mu^2)a}{\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} + (Z+h)} + \frac{[(3-4\mu)(Z+h)^2 - 2hZ]a}{(Z+h)\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} [\sqrt{a^2 + (Z+h)^2} + (Z+h)]} \right]$$

$$\frac{2hZ\{[a^2 + (Z+h)^2]^2 + [a^2 + (Z+h)^2](Z+h)^2 + (Z+h)^4\}a}{(Z+h)[a^2 + (Z+h)^2]^{3/2}\{[a^2 + (Z+h)^2]^{3/2} + (z+h)^3\}} \quad (4)$$

则式(3)变为

$$w_z = I_\rho qa / E \quad (5)$$

用式(5)计算扩底桩桩端下土的沉降变形  $S_2$ , 即

$$S_2 = \frac{I_\rho q_b a}{E_0} = \frac{DI_\rho q_b}{2E_0} \quad (6)$$

式(6)即本文的桩端沉降计算公式。

## 2 工程实用化

为使用方便, 本文按式(4)计算给出了桩的入土深度与扩底半径之比影响系数  $I_\rho$ :  $l_m/a$  为 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 0.652, 0.641, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 15.0 时,  $I_\rho$  为 0.837, 0.768, 0.741, 0.702, 0.681, 0.664, 0.625, 0.611, 0.598, 0.565。其中土体的泊松比取适用于桩端持力层岩土体的一般值  $\mu=0.35$ 。以上数值可内插, 当  $l_m/a>15$  时,  $I_\rho$  按 0.565 取值。

式(6)中桩端持力层土体的变形模量  $E_0$ , 可用顾宝和等提出的深层平板静力载荷试验的方法测定。但是对同一建筑物下所有的扩底桩位进行深层载荷试验有时难以实现。为此, 本文根据收集的扩底桩工程实测沉降和原型扩底桩静载试验结果, 建立了扩底桩桩端持力层土体室内土工试验压缩模量  $E_{s1-2}$  与计算变形模量  $E_0$  的关系。发现  $E_0$  与  $E_{s1-2}$  二者近似为线性关系, 如图 3,  $E_0 = \beta E_{s1-2}$ 。为使用方便, 给出了由桩端持力层  $E_{s1-2}$  换算为对应变形模量的修正系数  $\beta$ 。  $E_s$  为 10.0, 12.0, 15.0, 18.0, 20.0, 25.0, 28.0 时  $\beta$  为 1.30, 1.55, 1.87, 2.20, 2.30, 2.40, 2.50。本文的修正系数  $\beta$ , 已在端承于硬黏性土、粉土、砂土、卵砾石的大量扩底桩工程中应用, 并得到验证, 详见文献[10]。

## 3 沉降计算实例

### 3.1 工程实例 1 国家机械委四院情报楼<sup>[8]</sup>

该建筑物为框架结构, 8 层。基础方案选型时, 对“黄土层中扩底墩的变形和承载力能否满足要求”有不同意见, 要求进行变形计算和沉降观测等, 另外还有卵石(顶板埋深 23.0~25.0 m)上扩底墩和灌注桩等基础方案供选择。

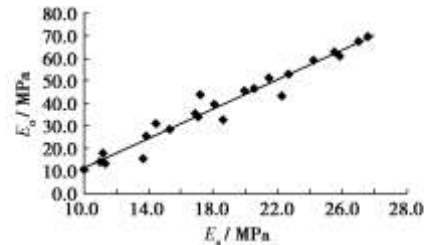


图 3  $E_0$  与  $E_{s1-2}$  的关系

Fig. 3 Relationship between compression modulus and deformation modulus

场区为 I 级非自重湿陷性, 上部约 5.0 m 以上为杂填土和新近堆积黄土, 其下为黄土状黏性土、砂层和卵石层, 持力层为黄土状粉土(顶板埋深 13.0~14.0 m)。虽然场区局部有不同程度浸水, 但对含砂量较大的持力层影响较小。以 3 号钻孔土的变形指标及对应桩基为例计算如下: 以  $a=1.6$  m,  $I_\rho=0.63$ ,  $q=485.8$  kPa,  $\beta=1.42$ ,  $E_s=11.2$  MPa, 由式(6)计算最终沉降量  $s=30.8$  mm。

根据场地条件, 在建筑物周围设置了 3 个深埋水准基点, 共布设沉降观测点 10 个。观测工作从第 2 层开始, 以后每增高 1~2 层观测 1 次, 至建成并使用 1 年多, 观测历时 34 个月。沉降观测结果见表 1, 选择两个测点作沉降-时间-荷载关系曲线, 见图 4。

由表 1、图 4 和表 2 分析可知: 本文提出的扩底桩沉降计算值与实测值基本一致, 二者平均误差 15%, 最大误差为 38.71%。

表 1 国家机械委四院情报楼高层部分沉降观测结果

Table 1 Observed settlements of building No. 8 of National Machinery Committee

时间	观测点号										工况进展
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1988-07-09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	完成第 2 层
1988-10-18					2.0	0.1	1.2	1.5		3.5	完成第 3 层
1988-11-30	3.0		3.0		4.0	0.8	0.1	3.2	1.2	4.0	完成第 5 层
1989-03-14	6.4	1.5	5.8	3.4	7.4	5.1	6.0	6.9	4.7	9.3	完成第 7 层
1989-06-24	8.5	3.8	8.2	5.2	9.4	6.5	7.3	8.6	8.7	12.3	完成第 8 层(封顶)
1990-02-12	11.4	8.3	10.2		18.3	7.5	10.9	18.1	20.0	21.1	装饰
1990-07-13			11.3		21.1	10.8	11.0	18.6	19.9	21.8	使用
1991-06-05			13.0	12.7	23.0	12.4	12.6	19.5	20.7	24.1	使用

表 2 国家机械委四院情报楼高层部分沉降实测与计算值对比

Table 2 Comparison between measured and calculated settlements of building No.8 of National Machinery Committee

孔号/观测点号	桩径/桩长/m	扩底直径 D/m	单柱荷载/kN	实测沉降/mm	计算沉降/mm	误差/%
1/3, 4	1.1/14.0	3.2	4020	12.9(均值)	12.9	0
2/3	1.1/14.0	3.2	4020	13.0	13.3	2.31

3/10	1.1/14.5	3.2	4020	24.1	30.8	27.80
6/8	1.0/14.5	2.7	2600	19.5	20.5	5.13
8/6	0.8/13.6	2.1	1500	12.4	17.2	38.71

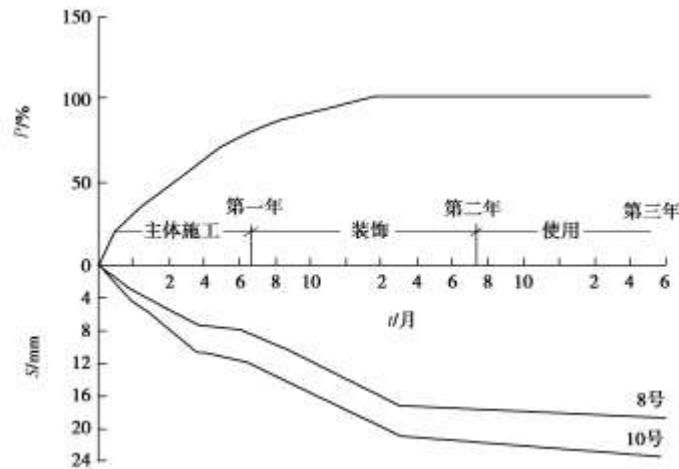


图 4 国家机械委四院情报楼高层部分实测沉降 - 时间关系曲线

Fig. 4 Measured settlement-time curves of building No. 8 of National Machinery Committee

表 3 三门峡百货大楼沉降实测与计算值对比

Table 3 Comparison between the measured and calculated settlement of Sanmenxia Department Store

孔号/ 观测点号	桩径/桩长 /m	扩底直径 D/m	单柱荷载 /kN	实测沉降 /mm	计算沉降 /mm	误差 /%
1/1	0.8/13.5	3.0	2500	9.0	8.5	5.56
1/2	1.0/13.5	3.7	4000	9.0	11.4	26.67
6/3	1.0/13.5	4.2	5000	8.0	10.9	36.25
7/5	1.0/13.5	3.7	4000	10.0	10.3	3.00
8/6	1.0/13.5	4.2	5000	14.0	11.0	21.43
3/7	1.0/13.5	3.7	4000	9.0	7.5	16.67

3.2 工程实例 2 三门峡百货大楼<sup>[8]</sup>

该建筑物为框架剪力墙结构, 5 层, 有一埋深 -4.6 m 地下室。自重湿陷场地, 于 1986 年 9 月进行勘察设计, 1988 年 12 月建成, 至今使用良好。自重湿陷土层深达 12.0 m, 为 III 级自重湿陷场地, 摩阻力为主的灌注桩和灰土挤密桩及换土垫层等地基基础方案都不适宜, 最终采用埋深 13.5 m 的土层上扩底桩方案。

地层结构: 上部 12.0 m 以上为欠压密强湿陷黄土状粉土, 其下为正常固结黄土状粉土和粉质黏土, 以 2 号测点为例计算:  $a=1.85$  m,  $I_p=0.636$ ,  $q=345.29$  kPa,  $\beta=2.09$ ,  $E_s=17.1$  MPa,  $s\approx 11.4$  mm。比较计算值与建筑物使用 2 a 后的最终沉降观测值, 如表 3 所示, 可知二者最大误差 36.25%, 平均误差 16%。

3.3 工程实例 3 中国人民解放军合肥炮兵学院#12 学院宿舍楼

该建筑物高 15 层, 框架剪力墙结构。基础工程设计方案比选后采用人工挖孔扩底混凝土灌注桩, 设计工程桩总数为 89 根, 桩身直径为 900~1000 mm, 桩端直径为 900~1800 mm, 桩身混凝土设计强度等级为 C35, 弹性模量为  $3.15\times 10^4$  MPa。桩端持力层为场地第 7 层中风化泥质砂岩。以#26 桩(桩长 23.46 m, 桩身直径 1000 mm, 扩底直径 1830 mm) 相应沉降测

点(#8 观测点) 为例进行计算, 因为持力层为中风化泥质砂岩, 桩端压缩量较小, 桩的沉降量主要由桩身压缩引起。计算得到桩身压缩量为 7.11 mm。因桩端中风化岩压缩性低, 根据由式(6) 计算的桩端土沉降量为 1.96 mm, 二者之和 9.07 mm 为最终沉降量。比较建筑物竣工后 5 个月内的最终沉降量观测值, 如表 4 所示, 可知计算与实测误差为 12.8%。

表 4 中国人民解放军合肥炮兵学院#12 学院宿舍楼#26 桩沉降观测结果

Table 4 Observed settlements of pile No. 26 of dormitory No. 12 of Hefei PLA Artillery Academy College

序号	时间	工程 进度	观测 值/m	变化 量/mm	累计 /mm
第 1 次	2006-02-19	一层顶	1.1035	—	—
第 2 次	2006-02-23	二层顶	1.1035	0	0
第 3 次	2006-03-02	三层顶	1.1025	1.0	1.0
第 4 次	2006-03-15	四层顶	1.1015	1.0	2.0
第 5 次	2006-03-24	六层顶	1.1005	1.0	3.0
第 6 次	2006-04-5	八层顶	1.0994	1.1	4.1
第 7 次	2006-04-12	十一层顶	1.0994	0	4.1
第 8 次	2006-04-22	十二层顶	1.0994	0	4.1
第 9 次	2006-05-14	十三层顶	1.0951	4.3	8.4
第 10 次	2006-06-16	装饰装修	1.0951	0	8.4
第 11 次	2006-07-21	竣工验收	1.0931	2.0	10.4

3.4 工程实例 4 中国人民解放军合肥炮兵学院研究生楼

该建筑物高 14~15 层, 框架结构, 占地面积  $78.0 \times 16.0 \text{ m}^2$ 。基础工程方案比选后采用人工挖孔混凝土灌注桩, 设计桩身混凝土强度等级为 C35。建设场地地形平坦, 地貌单元为南淝河 II 级阶地的坳沟与池塘。经勘察, 场地分为 7 层。以 #65 桩相应沉降测点 (#3 观测点) 为例计算, 桩长 12.01 m, 桩身直径 1200 mm, 扩底直径 2400 mm, 桩端持力层为第 5 层黏土, 层厚 4.8~11.50 m, 硬塑—坚硬状态。其中:  $a=1.2 \text{ m}$ ,  $I_p=0.625$ ,  $q=451.3 \text{ kPa}$ ,  $\beta=1.98$ ,  $E_s=16 \text{ MPa}$ ,  $E_0=\beta E_s=31.68 \text{ MPa}$ , 由式 (6) 计算得沉降量  $s \approx 10.68 \text{ mm}$ 。比较建筑物竣工 1 a 后的最终沉降观测值, 如表 5 所示, 可知二者误差为 1.7%。

表 5 中国人民解放军合肥炮兵学院研究生楼 #65 桩沉降观测结果

Table 5 Observed settlements of pile No. 65 of Graduate Students' Dormitory of Hefei PLA Artillery Academy College

序号	时间	工程进度	观测值/m	变化量/mm	累计/mm
第 1 次	2005-05-29	四层顶	1.4975	—	—
第 2 次	2005-06-03	五层顶	1.4785	1.0	1.0
第 3 次	2006-06-15	七层顶	1.4785	0	1.0
第 4 次	2005-06-22	九层顶	1.4785	0	1.0
第 5 次	2005-07-01	十一层顶	1.4785	0	1.0
第 6 次	2005-07-10	十三层顶	1.4745	4.0	5.0
第 7 次	2005-07-18	十五层顶	1.4745	0	5.0
第 8 次	2005-09-02	填充墙砌筑结束	1.4735	1.0	6.0
第 9 次	2005-10-10	竣工	1.4715	2.0	8.0
第 10 次	2005-12-10	竣工后两个月	1.4690	2.5	10.5
第 11 次	2006-03-10	竣工后五个月	1.4690	0	10.5

## 4 结 论

基于 Mindlin 基本解推导了扩底桩桩端沉降计算公式, 并根据大直径扩底灌注桩静载试验结果和工程经验, 提出了大直径扩底灌注桩沉降计算工程实用化方法。

(1) 提出了以深层静载试验确定桩端持力层土体变形模量  $E_0$  计算扩底桩深基础沉降, 并提供了用工程中常用的压缩模量  $E_s$  换算为变形模量  $E_0$  的一套修正系数, 完善了用理论公式计算扩底桩的沉降计算问题。

(2) 对端承于不同岩土层的多项大直径扩底灌注桩工程实例进行的沉降观测表明, 本文提出的沉降计算方法所得结果与工程实测吻合。

### 参考文献:

[1] 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))

- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 顾宝和. 根据变形确定扩底墩的轴向承载力[C]// 第三届工程勘察学术交流会议. 北京, 1987: 1 - 5. (GU Bao-he. According to the deformation determine the belled pier's bearing capacity[C]// Proceedings of the 3rd Engineering Academic Exchange Conference. Beijing, 1987: 1 - 5. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [9] 刘之春, 蒋永生, 龚维明. 大直径扩底桩承载力的沉降变形控制设计法初探[J]. 东南大学学报, 2001, 31(4): 49 - 53. (LIU Zhi-chun, JIANG Yong-sheng, GONG Wei-ming. Discussion of the design method of large diameter belled piles bearing capacity according to settlement[J]. Journal of Southeast University, 2001, 31(4): 49 - 53. (in Chinese))

- [10] JGJ/T 225—2010 大直径扩底灌注桩技术规程[S]. 2010. (in Chinese)  
(JGJ/T 225—2010 Technical specification for large diameter belled cast-in-place pile foundation[S]. 2010. (in Chinese))