

# DX 桩单桩沉降的理论计算研究

欧阳义, 陈立宏, 张德华

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**[摘要]** DX 桩由于承力盘的存在, 改变了桩的荷载传递机理, 在提高承载力的同时, 沉降变形也显著减小。在桩的现场试验基础上, 分析了 DX 桩与等截面桩的桩顶荷载的分配特性, 进而依据 Mindlin 解和 Geddes 求解桩端土的附加应力, 编制了相应的程序, 计算结果表明在同样的荷载条件下, DX 桩的沉降是等截面桩的 0.55 ~ 0.80 倍, 并对承力盘的变化引起的 DX 桩的沉降变化进行了分析。

**[关键词]** DX 桩; 承力盘; 沉降; 附加应力

**[中图分类号]** TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0074-06

## 1 前言

DX 桩由于其承力盘的存在, 改变了桩的受力性状, 不仅桩端承受端承力, 桩身承力盘亦承受端承力, 同时由于挤扩成孔时的挤密作用, 承力盘附近土层的端阻力和侧摩阻力都得到很大程度的提高, 单桩承载力较等截面钻孔灌注桩有了大幅度的提高, 沉降变形也显著减少, 属于摩擦多支点端承桩。近 10 年来, 无论是其承载机理与承载力理论研究还是工程应用发展都较快<sup>[1,2]</sup>, DX 桩的沉降计算成为亟待解决的问题。实际工程沉降观测资料表明, DX 桩的沉降量比同类条件下相同桩身设计直径的等截面灌注桩基沉降量减少 30% ~ 60%<sup>[3]</sup>。在《三岔双向挤扩灌注桩设计规程》(JGJ 171-2009)中, DX 桩的沉降是在等截面桩沉降的基础上, 乘以一个桩基沉降系数  $\varphi_D$ , 对于无经验系数的地区,  $\varphi_D$  取 0.6 ~ 0.8<sup>[2]</sup>。也有一些学者对这方面进行了研究, 吴永红在多节挤扩钻孔灌注桩受力特点的基础上, 应用分层总和法对 DX 桩的沉降进行计算, 并在工程实例的基础上进行了修正讨论<sup>[4]</sup>; 曹正舸把挤扩桩桩的等截面部分和挤扩体部分分开, 对桩端下土层的附加应力采用 Geddes 解, 将两者对桩端土层的应力进行叠加, 采用有限压缩层地基模型, 按单向压缩计

算单桩的桩端沉降<sup>[5]</sup>。文章根据 DX 桩受力机理, 假设盘阻力和端阻力均匀分布于盘面和桩端, 对桩端土层的附加应力采用 Mindlin 解, 桩侧摩阻力沿桩身均匀分布, 对桩端土层的附加应力采用 Geddes 解, 应用分层总和法计算沉降, 对 DX 桩与同等荷载条件下等截面桩的沉降比值  $\alpha$  的变化进行了讨论。用 matlab 编制了相应的程序, 讨论了承力盘的埋深、大小等条件变化对  $\alpha$  值的影响。

## 2 基本公式

DX 桩的承载力  $P$  可以分为桩侧总摩阻力  $P_e$ 、总盘阻力  $P_b$ 、桩端阻力  $P_d$  三部分(如图 1 所示), 即  $P = P_e + P_b + P_d$ 。

根据 Mindlin 解有, 盘端的均匀盘阻力  $P_{bj}$  对半无限弹性体内任一点所引起的附加应力  $\sigma_z$  为:

$$\sigma_z = \frac{P_{bj}}{8\pi(1-\nu)D^2} \left[ -\frac{(1-2\nu)(m-1)}{A^3} + \frac{(1-2\nu)(m-1)}{B^3} - \frac{3(m-1)^3}{A^5} - \left\{ \frac{3(3-4\nu)m(m+1)^2 - 3(m+1)(5m-1)}{B^5} \right\} - \frac{30m(m+1)^3}{B^7} \right] \quad (1)$$

根据 Geddes 解有, 桩侧总摩阻力  $P_e$  对半无限

**[收稿日期]** 2011-10-10

**[作者简介]** 欧阳义(1986—), 男, 湖南邵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为桩基工程; E-mail: 10121200@bjtu.edu.cn

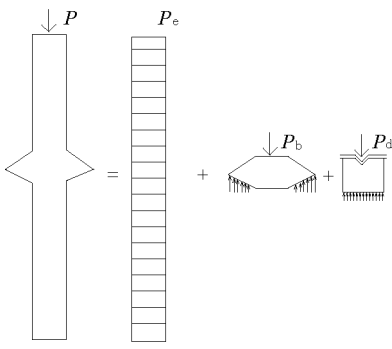


图1 DX 桩桩身受力的分解图  
Fig.1 DX pile's spreading view of the bearing capacity

弹性体内任一点所引起的附加应力  $\sigma_{z3}$  为:

$$\sigma_{z3} = \frac{P_e}{8\pi(1-\nu)D^2} \left[ -\frac{2(2-\nu)}{A} + \frac{2(2-\nu) + 2(1-2\nu)\frac{m}{n}(\frac{m}{n} + \frac{1}{n})}{B} - \frac{(1-2\nu)2(\frac{m}{n})^2}{F} + \frac{n^2}{A^3} + \frac{4m^2 - 4(1+\nu)(\frac{m}{n})^2 m^2}{F^3} + \frac{6m^2(\frac{m^4 - n^4}{n^2})}{F^5} + \frac{4m(1+\nu)(m+1)(\frac{m}{n} + \frac{1}{n})^2 - (4m^2 + n^2)}{B^3} + \frac{6m(mn^2 - \frac{1}{2}(m+1)^5)}{B^5} \right] \quad (2)$$

表1 工程试桩汇总

Table 1 Summarizing of test piles

桩型		试桩数据								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
广渠路试桩1 (DX 桩)	荷载级别	4 800	7 200	9 600	12 000	14 400	16 800	19 200	21 600	
	总盘阻力/kN	1 149	1 833	2 572	3 385	3 824	5 077	6 604	8 145	
	总盘阻力比例/%	23.94	25.46	26.79	28.21	26.56	30.22	34.40	37.71	
	桩端阻力/kN	495	1 179	1 248	1 273	1 304	1 305	1 498	1 677	
	桩端阻力比例/%	4.78	10.05	9.70	9.63	9.61	9.37	10.49	11.45	
广渠路试桩2 (DX 桩)	荷载级别	4 800	7 200	9 600	12 000	14 400	16 800	19 200	21 600	24 000
	总盘阻力/kN	1 467	2 486	3 161	4 326	5 260	6 444	8 024	9 653	11 106
	总盘阻力比例/%	30.56	34.53	32.93	36.05	36.53	38.36	41.79	44.69	46.28
	桩端阻力/kN	109	365	852	1 171	1 340	1 956	2 287	2 309	2 821
	桩端阻力比例/%	2.27	5.07	8.88	9.76	9.31	11.64	11.91	10.69	11.75

其中:  $A^2 = [n^2 + (m-1)^2]$ ;  $B^2 = [n^2 + (m+1)^2]$ ;  
 $F^2 = n^2 + m^2$ ;  $m = \frac{z}{D}$ ;  $n = \frac{r}{D}$  (3)

式中(3):  $z$  为所求土层某点到地面的距离;  $D$  为荷载  $P$  到地面的距离;  $r$  为荷载  $P$  到所求土层某点的距离。

假设盘阻力  $P_b$  均匀分布于盘端,  $P_b$  对桩端下层土体某点的附加应力  $\sigma_{z1}$  对式(1)采用积分即可求得, 同理可以求得桩端阻力  $P_d$  对桩端下层土体的附加应力  $\sigma_{z2}$ ; 桩侧总摩阻力  $P_e$  对桩端下层土体的附加应力  $\sigma_{z3}$  由式(2)即可求得, 则桩端下层土体受到的附加应力  $\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3}$ , 用 matlab 编制相应的程序计算  $\sigma_z$ 。

### 3 工程实践总结

为了研究 DX 桩的沉降, 假设桩侧摩阻力沿桩身均匀分布, 端阻力和盘阻力沿桩端和盘面均匀分布, 这就要求知道桩侧摩阻力和端阻力的分配比例, 笔者总结了几个工程试桩在当桩顶承受竖向受压力  $p$  的作用下, 其桩侧摩阻力与桩端阻力各占桩顶荷载的比例。

从表1 试桩数据和部分学者<sup>[6-10]</sup> 在一些现场试验研究中可以总结出, 在正常的工作荷载下, DX 桩的盘阻力比例一般为 20% ~ 40%, 桩端阻力比例小于 10% 左右, 桩侧摩阻力为 70% ~ 50%, 而在同等条件下的等截面桩的桩端阻力比例基本为 10% ~ 20%, 桩侧摩阻力比例为 90% ~ 80%。

桩型		试桩数据												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
滹沱河试桩 1 (DX 桩)	荷载级别	2 800	4 200	5 600	7 000	8 400	9 800	11 200	12 600	14 000	15 400	16 800	18 200	19 600
	总盘阻力/kN	655	1 277	1 622	2 034	2 339	2 500	3 149	4 023	4 691	4 846	4 990	6 460	8 164
	总盘阻力比例/%	23.39	30.40	28.96	29.06	27.85	25.51	28.12	31.93	33.51	31.47	29.70	35.49	41.65
	桩端阻力/kN	40	125	246	468	684	864	986	1 136	1 268	1 426	1 650	1 860	2 106
	桩端阻力比例/%	1.43	2.98	4.39	6.69	8.14	8.82	8.80	9.02	9.06	9.26	9.82	10.22	10.74
滹沱河试桩 2 (直孔桩)	荷载级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	桩端阻力/kN	2 200	3 300	4 400	5 500	6 600	7 700	8 800	9 900	11 000	12 100	13 200	14 300	15 400
	桩端阻力比例/%	141	338	370	420	480	685	702	860	1 320	1 670	2 310	3 430	4 512
江苏 LNG 试桩 1 (直孔桩)	荷载级别	1	2	3	4	5	6	7						
	桩端阻力/kN	8 557	11 020	11 367	11 713	12 059	12 405	12 751						
	桩端阻力比例/%	692	1 038	1 385	1 731	2 077	2 423	2 769						
江苏 LNG 试桩 2 (直孔桩)	荷载级别	1	2	3	4	5	6	7	8					
	桩端阻力/kN	10 348	11 728	12 860	13 217	13 573	13 929	14 286	14 642					
	桩端阻力比例/%	713	1 069	1 425	1 782	2 138	2 494	2 851	3 207					

## 4 承力盘对沉降的影响

DX 桩的承力盘所处不同的埋深、盘径大小和桩径大小,对桩端下层的土体将产生不同的影响。为了从计算理论的角度讨论由于承力盘的存在,桩端下层土体的沉降变化,本次计算方案,共假设 DX 桩的桩长为 30、40、50、60、70 m,桩身设置一个承力盘,承力盘沿着桩身不同位置变化,DX 桩的桩端阻力为桩顶荷载的 10%,直孔桩的桩端阻力为 20%,盘阻力和桩端阻力对桩端以下土层产生的附加应力用 mindlin 解,桩侧摩阻力对桩端以下土层产生的附加应力用 Geddes 解, $\alpha$  表示同等荷载条件下 DX 桩与直孔桩引起的沉降的比值, $\lambda$  表示盘位距桩底的距离与盘径的比值。

### 4.1 桩长对沉降比 $\alpha$ 的影响

1) DX 桩长为 30 m,盘径  $D$  为 2.0 m,盘位随桩身变化,盘阻力比例 20% ~ 40% 变化时, $\alpha$  比值的变化情况如图 2 所示。

2) DX 桩长为 30 ~ 70 m,盘径  $D$  为 2.0 m,盘位随桩身变化,盘阻力比例 30% 时, $\alpha$  比值的变化情况如图 3 所示。

3) DX 桩长为 30 m,盘径  $D$  为 2.0 m,盘位随桩

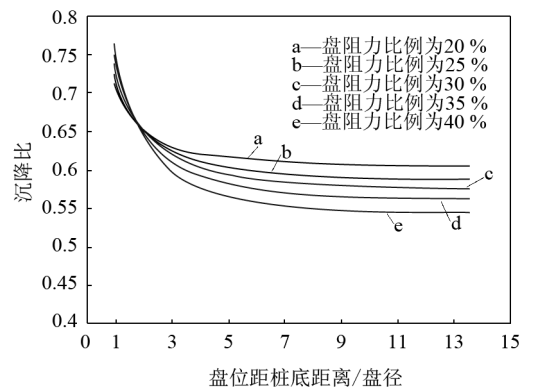


图 2 桩长 30 m 时  $\alpha$  值随  $\lambda$  的变化  
Fig. 2 DX pile is 30 m,  $\alpha$  value varying with  $\lambda$  increase

身变化,盘阻力比例 20% ~ 40% 变化时, $\alpha$  比值随承力盘埋深与桩长的比值变化情况如图 4 所示。

从图 2 ~ 图 4 看出,在承力盘距桩端 1D 范围上时,沉降比  $\alpha$  值的变化范围为 0.55 ~ 0.80。在图 2 中,对于不同盘阻力荷载的情况下, $\alpha$  值的变化都是随  $\lambda$  先快速变化,当  $\lambda > 4$  左右时, $\alpha$  值基本不随  $\lambda$  变化。当盘阻力比例在 20% ~ 40% 变化时,初始时盘阻力比例大的  $\alpha$  值较大,随着承力盘距桩端的距离越来越大,盘阻力大的  $\alpha$  值反而较小。当 DX

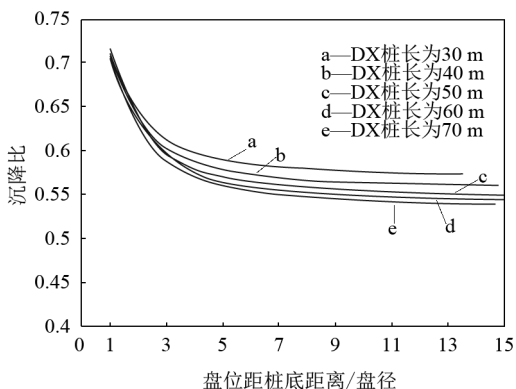


图3 DX桩长为30~70 m时 $\alpha$ 值随 $\lambda$ 的变化  
Fig.3 DX pile is 30 m to 70 m,  $\alpha$  value varying with  $\lambda$  increase

桩长为40、50、60、70 m时, $\alpha$ 也具有同样的发展规律。

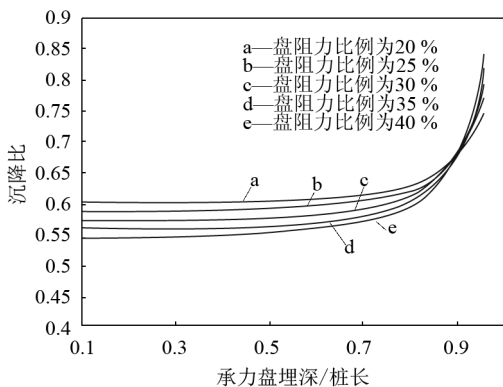


图4 DX桩长为30 m时 $\alpha$ 值随承载力盘埋深与桩长比值的变化  
Fig.4 DX pile is 30 m,  $\alpha$  value varying with the ratio of load - capacitating plate's depth and pile's length

当承载力盘的盘阻力比例一定时,由图3看出, $\lambda < 4$ , $\alpha$ 值的增速随桩长的增大而增大,并随着 $\lambda$ 减小而趋于一致,即在承载力盘埋深较大时, $\alpha$ 值随桩长的增大而逐渐趋于一致;在 $\lambda > 4$ 范围内, $\alpha$ 值的随 $\lambda$ 基本不变,随桩长的增大而减小,当桩长大于60 m时, $\alpha$ 值随桩长的变化已经不明显。

$\lambda < 4$ 时, $\alpha$ 随 $\lambda$ 变化很快,这也符合承载力盘的竖向影响范围,经研究,距离承载力盘 $4D$ ( $D$ 为承载力盘直径)左右时,其对土层的附加应力约为承载力盘承载力的千分之三左右,这基本不引起下层土体的压缩。 $\lambda > 4$ 时, $\alpha$ 随盘承载力比例的变化很小,这表明承载力盘在 $\lambda > 4$ 以上的范围时,DX桩的沉降可能随承载力盘的个数变化很小。

从图4可看出,在桩长为30 m时,沉降比 $\alpha$ 随承载力盘埋深与桩长的比值的变化(桩长为40、50、60、70 m有这类似的变化规律),承载力盘埋深越大,即离桩端越小, $\alpha$ 值越大,承载力盘埋深与桩长比值 $\beta$ 小于0.9时, $\alpha$ 值随盘阻力的增大反而小, $\beta$ 大于0.9时,盘阻力大的DX桩 $\alpha$ 值越大, $\beta$ 等于0.9左右时, $\alpha$ 值基本不随盘阻力而变化。这说明, $\beta < 0.9$ 时单位盘承载力引起的桩端沉降比单位侧阻力引起的桩端沉降要小,反之要大, $\beta = 0.9$ 时单位盘承载力与单位侧阻力对桩端下层土体沉降的影响一样。对于以控制沉降为主的建筑物,宜把承载力盘设置在桩身0.9倍以上的范围。

#### 4.2 盘径的影响

DX桩的承载力盘径的设计直径 $D$ 一般为桩径 $d$ 的1.7~2.5倍,为了研究承载力盘的大小对 $\alpha$ 值变化的影响,假设DX桩的桩径 $d$ 为1 m,盘径分别为1.7、2、2.3、2.5 m,桩长为50 m,盘阻力为桩顶荷载的30%, $\alpha$ 的变化如图5所示。

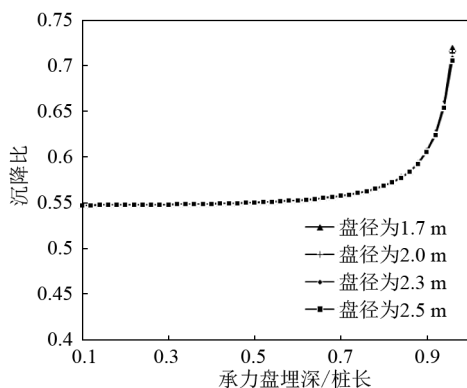


图5 桩长为50 m时不同的盘径的 $\alpha$ 值随盘位的变化

Fig.5 DX pile is 50 m, $\alpha$  value of the different plate diameter change with the plate's location

从图5看出,承载力盘的盘径在1.7~2.5 m变化时,桩长为50 m时,不同盘径的DX桩在相同的盘承力的情况下,其 $\alpha$ 值的变化基本不随盘径的改变而变化。说明在相同的盘承载力作用下,盘径的大小对桩端下层土体的沉降影响很小。

#### 4.3 桩径对沉降比 $\alpha$ 的影响

对于盘径不变的DX桩,沉降比 $\alpha$ 随桩径的变化如何,为了研究桩径的大小对 $\alpha$ 值变化的影响,可以假设DX桩的桩径为0.8、1.0、1.2、1.4 m的情况下,盘径 $D$ 均为2 m,盘阻力为桩顶荷载的30%, $\alpha$ 的变化如图6所示。

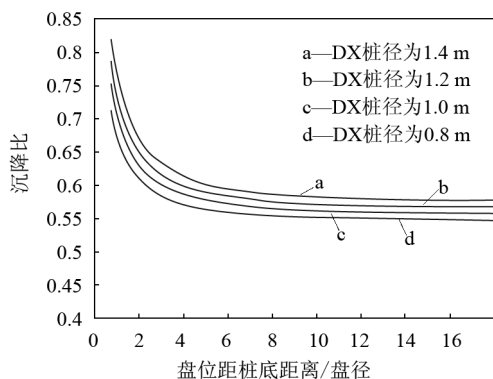


图6 桩长为50 m时不同的桩径的 $\alpha$ 值随 $\lambda$ 的变化  
**Fig. 6 DX pile is 50 m,  $\alpha$  value of the different pile diameter varying with  $\lambda$  increase**

从图6可看出,桩径的大小对 $\alpha$ 值有一定的影响,桩径越大, $\alpha$ 值越大,桩径从0.8~1.4 m变化时,在 $\lambda > 4$ 时, $\alpha$ 值随桩径的变化而变化的幅度在5%以内,可以认为桩半径每增加0.1 m, $\alpha$ 值增加

1%。在 $\lambda < 4$ 时, $\alpha$ 值的变化幅度增大,呈非线性变化。

#### 4.4 盘位埋深的与桩端距离影响

盘位埋深与桩端距离在 $4D$ 以内时,盘阻力比例为40%时, $\alpha$ 值随桩长的变化情况见表2。

当盘位位于桩端以上 $4D$ 以内时,盘阻力的变化对 $\alpha$ 值的影响愈明显, $\alpha$ 值随承力盘与桩端距离的减小而增大,并最终盘阻力越大, $\alpha$ 值越大。为了研究承力盘距桩端距离在 $4D$ 以内时 $\alpha$ 值与桩长的变化规律,假设盘阻力比例为40%,在桩长为30~70 m变化,桩径为1 m,盘径为2 m时,其 $\alpha$ 值的变化情况如表2和图7所示。总体来说, $\alpha$ 与盘位到桩端的距离呈非线性关系,随桩长的变化很小,并随着盘位与桩端的靠近,不同桩长的 $\alpha$ 值曲线逐渐一起靠近。在桩长为30~70 m变化时, $\alpha$ 的变化范围为0.57~0.75。因此可以认为 $\alpha$ 不随桩长变化。取 $\alpha$ 值为0.6~0.80, $\alpha$ 与盘位与桩端的距离的关系可以线性插值近似表示。

表2 盘位埋深与桩端距离在 $4D$ 内时 $\alpha$ 的变化

Table 2 As the distance of load-capacitating plate's location and pile's fringe is within  $4D$ , the diversification of  $\alpha$  value

桩长/m	承力盘埋深与桩端的距离/盘径						
	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
30	0.572	0.580	0.590	0.606	0.629	0.666	0.734
40	0.566	0.575	0.586	0.603	0.627	0.667	0.740
50	0.563	0.572	0.584	0.601	0.626	0.668	0.744
60	0.560	0.570	0.582	0.600	0.626	0.669	0.747
70	0.559	0.568	0.581	0.599	0.626	0.670	0.750

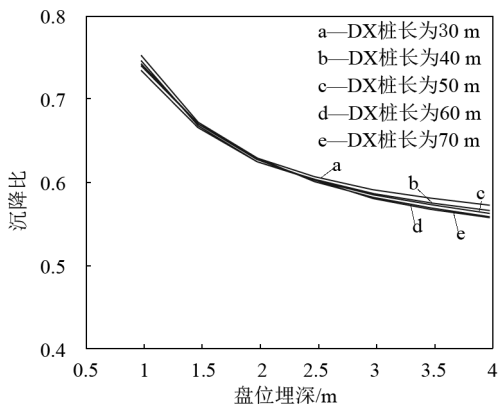


图7 盘位埋深与桩端距离与盘径的比值小于4时 $\alpha$ 的变化曲线

Fig. 7 As the distance of load-capacitating plate's location and pile's fringe is within  $4D$ , the diversification curve of  $\alpha$  value

## 5 结语

1) DX桩由于承力盘的存在,与在同样工程条件下的直孔桩相比,其引起的桩端沉降要小得多,从上面的讨论知,沉降比系数 $\alpha$ 的范围为0.55~0.80。规程中DX桩沉降量用与DX桩的桩径和桩长相等的直孔桩在同种荷载条件下的沉降量乘以一个系数 $\alpha_D$ , $\alpha_D$ 取值范围为0.6~0.8,这是合理的。

2)当盘阻力比例20%~40%变化时, $\alpha$ 的变化范围为0.55~0.80。承力盘埋深与桩端距离大于 $4D$ 时, $\alpha$ 值受盘位埋深的变化影响很小,基本不变, $\alpha$ 值范围为0.55~0.60。

3)在盘承载力相等的情况下,承力盘的盘径对 $\alpha$ 值的影响很小,可以忽略不计,但桩径对 $\alpha$ 值的影响随着盘位的埋深而变化,桩径越大, $\alpha$ 值越大。承力盘位于 $4D$ 以上深度时, $\alpha$ 值可能随承力盘的个数

变化很小。

4) 当盘位与桩端距离小于  $4D$ ,  $\alpha$  的变化范围可以取为  $0.60 \sim 0.80$ 。且  $\alpha$  值随桩长的变化很小,  $\alpha$  值与盘位到桩端的距离的关系可以用线性插值近似来表示。当盘位埋深与桩长的比值为  $0.9$  左右时, 单位盘阻力与单位侧阻力对桩端下层土体产生的沉降相等。

5) 文章采用的计算方法较为简单, 假设侧阻沿着桩身均匀分布, 与实际情况有一定区别, 但总的来说, 由于承力盘分担了部分的荷载, 而承力盘特有的倾斜结构使得应力较易扩散, 在承力盘远离桩端时承力盘的荷载对桩端底部土体影响很小, 从而降低了 DX 桩的沉降。

#### 参考文献

[1] 吴永红. 多支盘钻孔灌注桩在天津软土地区的首例应用与分析[M]//21世纪高层建筑基础工程. 北京: 中国建筑工业出

版社, 2000: 444 - 448.

- [2] 三岔双向挤扩灌注桩设计规程(JGJ171 - 2009)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 张晓玲. 挤扩支盘灌注桩的研究与工程应用[J]. 地基基础工程, 1999(1): 1 - 17.
- [4] 吴永红, 郑刚, 闫澍旺. 多支盘钻孔灌注桩基础沉降计算理论与方法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 528 - 591.
- [5] 曹正舸. 多节挤扩灌注桩沉降计算和性状研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [6] 沈保汗, 陈轮, 王海燕. DX桩侧阻力和端阻力的现场试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 9 - 14.
- [7] 王东坡, 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4645 - 4648.
- [8] 魏章和, 李光茂, 贺德新. DX桩的试验与研究[J]. 基础工程, 2000, 3(5): 13 - 16.
- [9] 穆保岗, 龚维明, 高芬, 等. 自平衡法与锚桩法的原位对比试验研究[J]. 交通科学与工程, 2009, 259(3): 40 - 45.
- [10] 谢锡丹, 许伟坤, 周仲景. 粘土地基桩侧阻力发挥机制研究[J]. 岩土工程界, 2006, 10(1): 31 - 33.

## Study on settlement of DX single pile

Ouyang Yi, Chen Lihong, Zhang Dehua

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] As the existence of load-carrying plate DX pile changes the load transfer mechanism of piles, improves capacity and also significantly reduces the settlement deformation. In this paper, on the basis of field trials, the distribution characteristics of load of DX piles and equal diameter piles are analyzed, and thus according to Geddes solution the soil pile superimposed stress is solved by using a program developed by authors. The results show that in the same load conditions, the settlement of DX pile is 0.55 to 0.80 times as compared with equal diameter pile. The changes of the settlement caused by load-carrying plate are analyzed.

[Key words] DX pile; load-carrying plate; settlement; superimposed stress