

DX 桩与后压浆钻孔灌注桩现场试验研究

刘春刚¹, 柴小兵¹, 欧阳义¹, 贺德新²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京中阔地基基础技术有限公司, 北京 100097)

[摘要] 对 DX 桩进行了现场竖向抗压静载试验, 并与后压浆直孔灌注桩进行了比较。结果表明, DX 桩和后压浆钻孔灌注桩都可以提高桩的承载力和控制桩的沉降, 4 根试验桩的试验效果相差不大, 但 DX 桩能以桩径小、桩长短满足大承载力的桩基, 达到极限承载力时, 混凝土的单方承载力是后压浆钻孔灌注桩的 1.5 倍, 可以减少工程材料, 降低工程造价; 且 DX 桩施工工艺更简单, 能加快施工进度。

[关键词] DX 桩; 静载荷试验; 承载力; 沉降

[中图分类号] TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0080-06

1 前言

DX 桩是近些年来发展的一种多节挤扩灌注桩, 其桩身由主桩和多个承力盘构成。其中承力盘是通过 DX 专用旋挖挤扩装置, 通过液压系统控制该装置旋转切削或者旋转碾压形成的上下对称的腔体, 在浇筑混凝土后形成由桩身、承力盘和桩根共同承载的桩型。由于承力盘增大了桩身的有效承载面积, 同时挤扩设备对周围土体有一定的挤密作用, 可以充分发挥端阻力的作用, 而土体的端阻力往往是侧阻力的几十倍, 因此 DX 桩可较大幅度提高单桩承载力, 降低沉降。

经过多地工程实践证明, DX 桩技术具有工艺独特, 操作设备方便, 承载力高等特点。近年已经有不少学者对 DX 桩进行了研究。魏章和等在对 DX 桩现场测试、理论分析的基础上, 分析了 DX 桩的变形破坏机理和承载性能, 提出了单桩极限承载力计算的公式和经验公式和影响因素^[1]; 周青春和于南燕通过现场静载试验对 DX 桩的荷载传递特点和桩周土体的破坏进行了研究^[2]; 陈轮等通过大比例的现场模型 DX 桩静荷载试验对 DX 桩的承载力机理和荷载传递规律进行了更为详细的研究^[3,4];

沈保汉也对 DX 桩的承载受力机制和影响承载力的各个因素进行了广泛的研究^[5]。通过近年工程实践和研究表明, 由于 DX 桩承力盘增大了桩身的有效承载面积, 同时挤扩时对周围土体有挤密作用, 与普通直孔等截面灌注桩相比, 因桩身多个断面面积大幅度增大, 充分利用了好土层的地基承载力, 单桩承载力比普通直孔灌注桩一般可提高 1 倍以上, 并具备良好的抗压和抗拔能力。

后压浆技术是 20 世纪 60 年代初开始应用于桩基施工, 在提高桩基础承载力方面是比较成熟的技术。其在公路、桥梁和高层建筑等行业中得到了广泛的应用。后压浆技术分为桩端压浆和桩侧压浆两种方式, 是在钻孔灌注桩成桩并达到一定强度的基础上, 通过埋设在桩身的注浆管, 将能够固化的浆液压入桩端地层或桩侧。这些浆液经过渗透、填充、置换、劈裂、压密及固结等物理或者化学作用来固化沉渣和泥皮, 以此来改变桩身周围土体的物理力学性质, 使得桩底、桩侧一定范围内的土体相结合, 使得土体强度和刚度大幅度提高; 同时可以形成网状结石的复合土体, 显示出“加筋效应”。究其实质是后压浆桩改善了桩土的边界条件。

已有的资料表明, 后压浆技术可以提高钻孔灌

[收稿日期] 2011-10-15

[基金项目] 铁道部重点科技项目(2009J010-F)

[作者简介] 刘春刚(1987—), 男, 陕西宝鸡市人, 硕士研究生, 主要从事路基工程方面的研究工作; E-mail: 10121196@bjtu.edu.cn

注桩承载力的 30% ~ 100%，增大桩身刚度和稳定性、减少桩基沉降量；同时该技术具有设备简单，效果明显，增加费用低，提高经济效益，施工时不增加工期等优点。后压浆技术应用于群桩时，还能改善桩荷载传递性能，增强桩群整体性，减少变形^[6]。

关于后压浆技术的研究比较多面，胡德华^[7]对后压浆钻孔灌注桩的加固机理和施工工艺进行了较详细的介绍；郝世龙、罗雄文^[8]对后压浆技术的参数控制进行了相关分析，赵晨等^[9]和冯定波^[10]在现场试验的基础上对后压浆钻孔灌注桩的承载机理进行了详细的研究；黄生根等^[11]通过在软土中对后压浆桩与普通钻孔灌注桩的对比试验中发现未压浆桩破坏形式为陡降型，而后压浆桩为缓变型破坏；程晔、龚维明等^[12]通过对超长后压浆桩与等直径的普通钻孔灌注桩的现场试验研究，表明后压浆桩不仅可以提高桩承载力，还能有效控制基础的沉降。关于后压浆钻孔灌注桩的单桩承载力的计算在《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG D63 - 2007 中有推

荐的经验系数法，此外中国建筑科学研究院和相关地方都有相应的经验公式。

DX 桩是在挤扩过程中挤密周围的土体增加桩侧摩阻力，同时其承力盘提供盘阻力而大大提高了桩的承载力，后压浆钻孔灌注桩是通过注浆来提高桩侧摩阻力和端阻力的。文章主要通过对 DX 桩和后压浆钻孔灌注桩的现场竖向静荷载试验，比较了 DX 桩和后压浆钻孔灌注桩的差异，为 DX 桩在建筑基础中的设计和应用提供了参考。

2 试验设计

2.1 工程场地概况

工程位于河南省郑州市，地形单元为黄河冲积平原，地面标高为 99.69 m，勘察期间地下水位埋深为 4.5 ~ 6 m（绝对标高为 93.50 ~ 92.2 m），根据钻探、静力触探、标准贯入试验结果，结合室内土工试验资料，得到其地基土层土性及其力学特征分布（见表 1）。

表 1 试验场地土层分布情况
Table 1 Soil properties of the test site

地层序号	地层名称	厚度/m	含水率/%	土粒比重/Gs	孔隙比	重度/(kN·m ⁻³)	q _{si} /kPa	q _{bk} /kPa	q _{pk} /kPa
1	杂填土	0.80	—	—	—	—	12	—	—
2	粉土	2.01	14.7	2.69	0.862	17.9	39.8	—	—
3	粉土	2.17	19.2	2.69	0.862	17.6	39.8	—	—
4	粉土	1.83	20.6	2.69	0.773	18.5	51.1	—	—
5	粉土	1.99	18.4	2.69	0.784	18.5	49.7	—	—
6-1	粉土	2.68	21.9	2.70	0.755	18.9	50.8	—	—
6	粉砂	3.00	—	—	—	18.0	54.2	—	—
7	粉土	3.52	19.2	2.69	0.701	19.0	62.6	—	—
8	细砂	5.84	—	—	—	18.0	55.6	—	—
9	粉土	3.98	22.3	2.70	0.747	18.5	45.7	824	—
10	细砂	6.46	—	—	—	18.0	56	1 450	—
11	粉质粘土	5.63	21.5	2.70	0.815	18.5	67.8	1 450	—
12	粉土	4.81	22.9	2.70	0.851	17.8	41.2	—	—
13	粉质粘土	8.4	23	2.72	0.817	17.3	64.1	1 050	—
14	粉土	6.65	22.4	2.7	0.898	17.8	35	—	800
15	粉质粘土	8.63	21.2	2.72	0.792	17.4	72	—	1 700

2.2 试验桩设计方案

试验共有 4 根竖向受压的试桩，其中 B - 1、B - 2 为后压浆钻孔灌注桩，选用土层（15）粉质粘土作为桩端持力层，沿桩身 9 个截面布置钢筋应力计；D - 1、D - 2 为 DX 挤扩桩（3 个承力盘），沿桩身

8 个截面布置钢筋应力计，桩端持力层选用土层（14）粉土。试验场地土层情况和 DX 桩的承力盘的位置及持力层如图 1 所示，试验桩的具体参数见表 2。

土层	D-1	D-2	B-1	B-2
7粉土				
8细砂				
9粉土				
10细砂				
11粉质粘土				
12粉土				
13粉质粘土				
14粉土				
15粉质粘土				

图1 土地地层与试验桩柱状图
Fig.1 Soil types and the sketch diagram of test piles

成桩完成后,桩身的完整性检测采用低应变法,试验加载装置采用堆重平台反力装置,试验加载方式采用慢速维持荷载法,荷载分级按预估极限荷载

的1/10施加,B-1和D-1分9级加载,B-2与D-2分10级加载,然后都分5级卸载,试验按照《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2003(简称基桩规范)相关要求进行,其检测结果见表3。

表2 试验桩的基本参数

Table 2 Parameters of test piles

桩号	B-1	B-2	D-1	D-2
桩长/m	55.7	54.7	48.0	47.6
有效桩长/m	43.2	43.3	33.6	33.6
桩身直径/mm	800	800	700	700
承力盘数/个	—	—	3	3
承力盘直径/mm	—	—	1 500	1 500
桩身混凝土强度等级	C50	C50	C60	C60

表3 试桩检测结果

Table 3 Results of test piles

桩号	B-1	B-2	D-1	D-2
预估极限承载力/kN	20 000	19 950	20 000	20 000
混凝土用量/m ³	27.9	27.4	18.1	18.1
低应变检测完整性	完整	完整	完整	完整

3 试验结果分析

根据设计要求,本次试桩加载至设计极限值即停止加载,所测得各桩沉降与荷载值见表4,试验所得的Q-s曲线和s-logQ曲线如图2、图3所示。

表4 试桩在各级荷载下的沉降值

Table 4 Settlements of test piles under each load level

荷载级数	B-1		B-2		D-1		D-2	
	荷载/kN	累计沉降/mm	荷载/kN	累计沉降/mm	荷载/kN	累计沉降/mm	荷载/kN	累计沉降/mm
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4 000	1.55	3 800	3.55	4 000	4.23	2 000	2.18
2	6 000	2.18	5 700	7.66	6 000	5.73	4 000	4.92
3	8 000	4.65	7 600	8.54	8 000	7.42	6 000	7.87
4	10 000	7.40	9 500	10.91	10 000	10.28	8 000	11.15
5	12 000	10.31	11 400	16.88	12 000	12.96	10 000	14.82
6	14 000	14.39	13 300	20.56	14 000	17.25	12 000	18.01
7	16 000	18.87	15 200	27.74	16 000	20.09	14 000	20.48
8	18 000	23.42	17 100	30.60	18 000	22.89	16 000	22.87
9	20 000	28.74	19 000	35.80	20 000	25.44	18 000	26.99
10	16 000	28.54	19 950	38.42	16 000	25.42	20 000	30.63
11	12 000	26.78	15 200	37.58	12 000	24.50	16 000	30.59
12	8 000	22.73	11 400	34.29	8 000	20.67	12 000	28.91
13	4 000	17.92	7 600	27.52	4 000	14.79	8 000	23.20
14	0	13.04	3 800	19.99	0	7.82	4 000	17.22
15	—	—	0	13.64	—	—	0	9.89

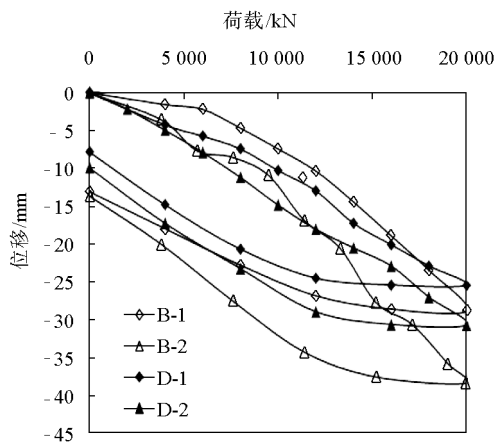


图2 试验桩的 $Q-s$ 曲线
Fig.2 $Q-s$ curves of test piles

从图2中可以看出,在整个加载阶段,后压浆钻孔灌注桩和DX桩的 $Q-s$ 曲线基本一致,都属于缓变型,但加载级数相同的DX桩的最终沉降量要比后压浆钻孔灌注桩小一些(B-1与D-1加载级数相等,B-2与D-2加载级数相等);但在加载的初始阶段,后压浆钻孔灌注桩的桩顶沉降比DX桩要稍小些。随着桩顶荷载的增大,后压浆桩的桩顶沉降逐渐大于DX桩,本次试验中,B-1与D-1在荷载19 000 kN的时候,B-1的桩顶沉降开始大于D-1,B-2的桩顶沉降在12 000 kN的时候,其沉降开始大于D-2桩。这主要是因为随着桩顶荷载的增大,桩侧摩阻力逐渐充分发挥,后压浆钻孔灌注桩的桩端阻力的比例逐渐增大,从而引起桩端下层土体的下沉速率加快,而DX桩由于承力盘的存在,其盘

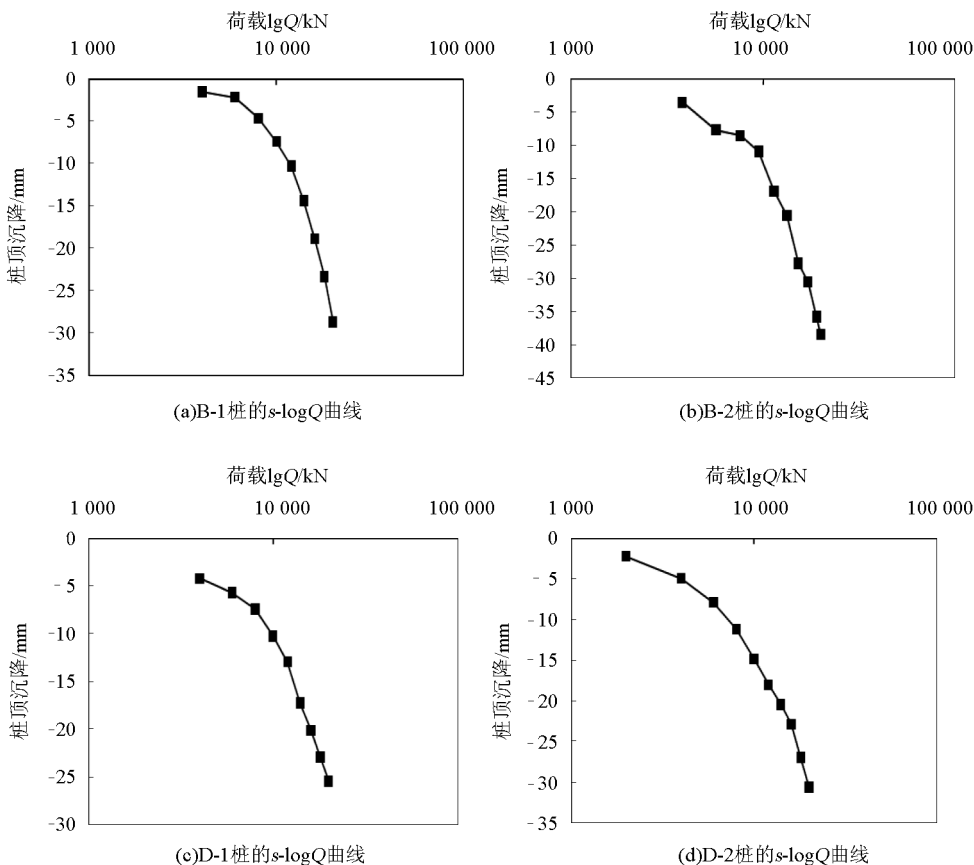


图3 各桩的 $s-\log Q$ 曲线
Fig.3 $s-\log Q$ curve of test piles

承力消耗了很大一部分桩身荷载,传递到桩端时,桩端阻力的变化较后压浆钻孔灌注桩小,最终后压浆钻孔灌注桩的沉降超过DX桩。

DX桩的直径为700 mm,有效桩长为33.6 m,

桩端持力层的极限端阻力为800 kPa;后压浆钻孔灌注桩的直径为800 mm,有效桩长43.3 m,桩端持力层的极限端阻力为1 700 kPa。所以若是DX桩和后压浆钻孔灌注桩在相同的设计条件下,DX桩的沉

降和 $Q-s$ 曲线可能会优于同条件下的后压浆钻孔灌注桩。因而 DX 桩能以桩径小、桩长短满足大承载力的要求。

在卸载完成后, D-1 桩、D-2 桩的回弹率分别为 69.3% 和 67.7%, B-1 桩、B-2 桩的回弹率依次为 54.6% 和 64.5%。DX 桩的回弹率略高于后压浆钻孔灌注桩,但两者的回弹率都在 50% 以上。这表明 DX 桩和后压浆钻孔灌注桩在正常工作荷载作用下,其桩顶沉降中弹性变形占很大一部分,桩身周围土体的塑性变形量和桩端的刺入变形量比较小。

图 3 为各桩的 $s-\log Q$ 曲线,从图 3(b) 中可以看到 B-2 桩的 $s-\log Q$ 曲线末端开始出现陡降段,说明在达到预估极限承载力前已达到其极限承载力,其余各桩的 $s-\log Q$ 曲线末端均未呈现出竖向陡降段。经逆斜率法^[13]推求, B-1、B-2 桩的极限承载力分别为 20 000、18 181.8 kN; D-1、D-2 桩的极限承载力分别为 23 529.4、25 000 kN, DX 桩的实际极限承载力高于后压浆钻孔灌注桩。

DX 桩的设计桩长为 47 m,有效桩长为 33.6 m,桩径为 700 mm;后压浆钻孔灌注桩的桩长为 55 m,有效桩长为 43.3 m,桩径为 800 mm。经计算,后压浆钻孔灌注桩每根桩的混凝土用量为 27.6 m³,每立方米的承载力为 722.9 kN;DX 桩每根桩的混凝土用量为 18.1 m³,每立方米的承载力为 1 106.3 kN,为后压浆钻孔灌注桩的 1.5 倍。

通过比较可以发现,DX 桩和后压浆钻孔灌注桩都能满足大承载力的桩基要求,同时还能很好地控制桩的沉降,相对于后压浆钻孔灌注桩,DX 桩所消耗的混凝土用量更少,只需在成桩过程中加一道挤扩工序,施工工艺简单。

4 结语

1) DX 桩作为一种新型的变截面桩,与普通钻孔等截面灌注桩相比,其承力盘增大了桩身的有效承载面积,同时承力盘的设置可以充分利用好土层的地基承载力,多层分散承担桩的竖向荷载,在大幅度增加桩的承载力的同时,桩底应力减小,所以能减

小桩的整体沉降量。

2) DX 桩和后压浆桩两种桩型在提高桩的承载力的同时,还能更大程度地发挥混凝土的承载能力,为工程节省大量财力、物力,且 DX 桩只须在成孔后增加一道挤扩工序,而后压浆钻孔灌注桩在成桩后增加一道注浆的工序。

3) DX 桩和后压浆钻孔灌注桩在达到设计极限承载力后卸载,其回弹率都在 50% 以上,所以合理地使用 DX 桩或压浆钻孔灌注桩,均可在很好地提高桩基承载力的同时控制基础的沉降。相比而言,DX 桩桩长较短,在经济性上更具优势。

参考文献

- [1] 魏章和,李光茂,贺德新. DX 桩的试验与研究[J]. 岩土工程界, 2000, 3(5): 12-16, 21.
- [2] 周青春,于南燕. DX 桩的试验研究[J]. 岩石力学, 2001, 22(3): 298-302.
- [3] 陈 轮,王海燕,沈保汉,等. DX 桩承载力及荷载传递特点的现场试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 5-8.
- [4] 陈 轮,沈保汉,王海燕,等. DX 桩单位侧阻力和单位端阻力的现场试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 15-18, 39.
- [5] 沈保汉,贺德新,孙君平,等. 影响 DX 挤扩灌注桩竖向抗压承载力的因素[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 32-38.
- [6] 郝玉朝. 西安北站密集群桩后压浆技术综述[J]. 铁道技术, 2010(2): 62-65, 83.
- [7] 胡德华. 后压浆钻孔灌注桩化学加固机理及设计探讨[J]. 武汉化工学院学报, 2002, 24(3): 48-50.
- [8] 郝世龙,罗雄文. 后压浆技术的参数控制与承载特性分析[J]. 中国西部科技, 2010, 9(24): 56-57, 22.
- [9] 赵 晨,彭铁红,李海东. 后压浆提高桩基础承载力的机理分析[J]. 市政技术, 2008, 26(4): 354-356.
- [10] 冯定波. 桩端后压浆对提高钻孔灌注桩承载力的作用机理分析[J]. 中外建筑, 2009(6): 198-199.
- [11] 黄生根,张晓炜,曹 辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251-254.
- [12] 程 晔,龚维明,张喜刚,等. 超长直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3885-3892.
- [13] 沈保汉. DX 挤扩灌注桩竖向抗压极限承载力的确定[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 13-17, 27.

Study of in-situ test to DX pile and post-grouting bored pile

Liu Chungang¹ , Chai Xiaobing¹ , Ouyang Yi¹ , He Dexin²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Zhongkuo Foundation Technology Co. ,Ltd, Beijing 100097, China)

[**Abstract**] The in-situ vertical resisting compression static test of DX pile is made and it is compared with post-grouting bored pile. The results indicate that DX pile and post-grouting bored pile can enhance capacity and control settlement effectively; effect of four test piles is not quite different, but the DX pile is of smaller diameter and shorter length which can meet large capacity; its concrete bearing capacity of per cubic meter is 1.5 times larger than that of post-grouting bored pile; DX pile can reduce engineering materials to lower project cost and speed up the construction progress.

[**Key words**] DX pile; static load test; bearing capacity; settlement