

DX 桩及其在郑州地区的适用性分析

段钧培¹, 段鸿海², 陈旭¹

(1. 郑州大学力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 河北地质职工大学, 河北 石家庄 050081)

摘要: DX 桩由于具有良好的桩—土间力学性能, 在建设项目应用中取得了良好的效果。通过分析 DX 桩的桩—土间力学特点以及郑州地区的地质条件, 采用理论分析和有限元数值仿真方法, 分析 DX 桩在郑州地区的适用性, 为 DX 桩在郑州地区的工程应用提供参考依据。

关键词: DX 桩; 有限元; ABAQUS; 郑州地区

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)04-0048-05

Analysis on Applicability of DX Pile in Zhengzhou Area/DUAN Jun-pei¹, DUAN Hong-hai², CHEN Xu¹ (1. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China; 2. Hebei Vocational College of Geology, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: Because of the favorable mechanics performance between pile and soil, the application of DX pile achieves good results in construction project. By the analysis on DX pile about its mechanics characteristics between pile and soil as well as the geological conditions in Zhengzhou area, theoretical analysis and finite element numerical simulation were used to analyze the applicability of DX pile to provide the reference for engineering application of DX pile in Zhengzhou area.

Key words: DX pile; finite element; ABAQUS; Zhengzhou area

0 引言

桩基是一种历史悠久的基础形式, 我国很早就已成功地使用木桩来解决软土地基上的基础建造问题。到了近代, 一方面是高、重建筑和精密设备对地基基础的要求日益严格, 另一方面是成桩技术的进步, 使桩基具有更突出的承载力高、变形量小、抗拉拔能力强等优点。21 世纪以来, 桩基础施工技术在各个方向都取得了长足的发展, DX(发明人贺德新名字的汉语拼音 de xin 的缩写) 桩作为变截面新桩型的代表, 近年来得到了迅速的发展。

在全国重要的枢纽城市、工业城市、商业城市郑州, DX 桩却缺乏工程应用的实例, 工程经验不足。郑州处于高速发展阶段, 如果能够将 DX 桩合理应用到工程实际, 对本地的发展建设大有裨益。

1 DX 桩及其特点

DX 桩为多节挤扩灌注桩, 是一种变截面桩, 是在钻(冲)孔后, 向孔内下入专用的 DX 挤扩装置, 通过地面液压站控制该装置弓压臂的扩张和收缩, 按承载能力要求和地层土质条件, 在桩身不同部位挤

扩出 3 岔分布或 $3n$ 岔(n 为挤扩次数) 分布的扩大岔腔或近似的圆锥盘状的扩大头腔后, 放入钢筋笼、灌注混凝土, 形成由桩身、承力岔、承力盘和桩根共同承载的桩型。

DX 桩竖向抗压和抗拔承载力大; 成孔成桩工艺适用范围较广; 沉降小且均匀, 成腔质量可靠; 机控转角, 定位准确, 成桩差异性小, 可实现成孔与挤扩装置的车载一体化, 挤扩效率高; 挤扩时土体扰动小, 沉渣少且可用钻斗清除; 综合材料用量、承载力等因素考虑, 具有很好的经济效益。

对于第一代和第二代 DX 装置, 承力岔应设置在可塑—硬塑状态的粘性土中, 或稍密—密实状态的粉土和砂土中; 而承力盘可设置在粉土和砂土中, 或可塑—硬塑状态的粘性土中, 以及中密—密实状态的卵砾石层的上层面上; 底承力盘也可设置在强风化岩或残积土层的上层面上。

而对于新一代 DX 装置, 由于设备和工艺的进步, 一般遵循如下原则: $15 < N$ (标准贯入击数) < 40 的土体, 采用切削碾压工艺进行施工; 而 $N \geq 40$ 时, 再进行挤扩可能会使土体发生剪胀效应, 且挤扩所

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2015-03-27

作者简介: 段钧培, 男, 汉族, 1993 年生, 工程结构分析专业学生, 河南省郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学力学与工程科学学院, 2647064116@qq.com。

需的压力极大,施工困难,因而采用切削工艺,尽量保持土体的原状性,以达到充分利用土体承载力的效果。

淤泥及淤泥质土层、松散状态的砂土层、可液化土层、湿陷性黄土层、大气影响深度以内的膨胀土层、遇水丧失承载力的强化岩层,均不得作为承力盘和承力盆的持力土层。

2 郑州地区地质地层状况

郑州地区位于黄河中下游平原,是典型的黄河冲积平原城市。浅层地下水丰富,地势平坦开阔。由于郑州地区所占面积较大以及市区不同区域建设发展的时间不同,地下水的深度分布也会有所不同。在较先发展的地区,尤其像是郑州这种属于省会及重要交通枢纽的城市,一般会分布有人工回填土层,土层的厚度不等。郑州是以火车站为中心,向四周逐步发展而形成的城市。西区发展较早,属于老区,东区为近年来发展起来的新区,西区的地下水位在地面以下 15 m 左右,而东区的地下水位相对较浅,在地面以下 7 m 左右。

经查阅文献和多次实地勘测,郑州地区多为粉土和粉质粘土,东区地层略有不同,东区在地下水位以下夹有两层砂,属于饱和砂层,由于处在地下水位以下,有一定的施工隐患。东区和西区典型地层的力学参数详见表 1、表 2。

表 1 郑州东区典型地层的力学参数

土层名称	厚度/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
①粉土	3.92	18.5	11.6	22.3
②粉土	3.21	18.7	12.3	22.1
③粉土	1.95	19.5	14.9	11.9
④粉土	3.65	19.1	14.9	11.9
⑤粉质粘土	1.35	19.1	10.9	23.3
⑥粉土	7.52	19.8	10.6	25.6
⑦细砂	8.15	20.3	3.0	25.0
⑧粉质粘土	28.90	19.9	35.6	18.9
⑨细砂	5.51	20.2	3.0	25.0
⑩粉质粘土	≥ 15.00	19.3	32.2	19.3

从地层的分布来看,郑州地区的地层特性较好。不像有些冲积平原城市,河流历经频繁变迁,由于长期处于缓慢沉降过程,多分布着粉细砂、亚砂土、亚粘土、粘土和淤泥类土等,这些场地中,尤其是粉细砂及部分亚砂土、轻亚粘土,具有可液化性,一般很少固化。而郑州以粉土和粉质粘土为主,无淤泥质土等

表 2 郑州西区典型地层的力学参数

土层名称	厚度/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
①粉土	2.49	18.6	13.4	21.3
②粉土	2.96	18.8	13.7	19.3
③粉质粘土	2.52	19.1	24.6	16.8
④粉土	3.94	18.8	11.8	22.5
⑤粉质粘土	6.83	19.4	30.2	18.7
⑥粉质粘土	12.15	18.9	27.0	18.6
⑥ ₁ 钙质胶结层	2.14			
⑦粉质粘土	6.77	19.3	28.7	18.5
⑧粉质粘土	12.98	19.1	30.1	28.2
⑨粉质粘土	6.51	18.8	30.5	29.2
⑩粉质粘土	≥ 15.00	18.3	28.2	27.3

软弱土层,符合 DX 桩的适用条件。

3 DX 桩受力机理及承载力分析

3.1 DX 桩结构

DX 桩主要由承力盆、承力盘、桩身、桩根等组成,其构造如图 1 所示。

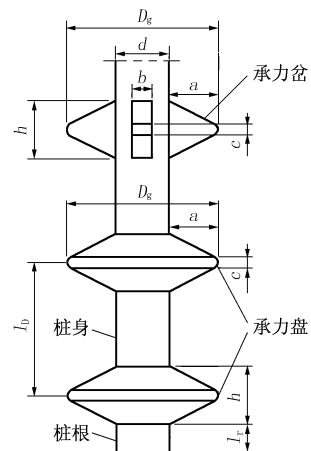


图 1 DX 桩构造简图
a—承力盆(盆)宽度;b—承力盆厚度;c—承力盆(盆)外缘高度;d—桩身设计直径;h—承力盆(盆)厚度;l_b—承力盆(盆)竖向间距;D_g—承力盆外接圆(承力盆)公称直径;l_r—桩根长度

图 1 DX 桩构造简图

(1) 承力盆——用三岔双缸双向液压挤扩装置在桩孔外侧沿径向对称挤扩,形成一定宽度的上下对称的楔形腔,此后盆腔与桩孔同时灌注混凝土所形成的楔形体,称为承力盆。

(2) 承力盘——在桩孔同一标高处,用三岔双缸双向液压挤扩装置在桩孔外侧沿径向水平挤扩,经过 7 次以上的转位挤扩,在桩孔周围土体中形成一近似双圆锥盘状的上下对称的扩大腔,此后盘腔

与桩孔同时灌注混凝土形成的盘体,称为承力盘。

(3) 桩身——桩的等直径部分。

(4) 桩根——底承力盘以下的桩身部分。

3.2 DX 桩的受力及荷载传递机理

DX 桩的荷载传递方式与一般桩的传递机理并无大的不同,当承受竖直荷载时,逐渐由上至下,由侧向阻力承担到桩根端阻和侧阻共同承担荷载。当侧阻不足以承担竖向荷载时,剩下的由端阻全部承担。与其他桩不同的是承力盘的阻力。由于支盘的存在,使得荷载的传递具有明显的时间和顺序性。在加载荷载的初期,承力盘就开始发挥作用,只不过承受的力较小,等到桩侧向摩阻到达极限值时,荷载开始由支盘承担,支盘也才开始有效地发挥相当于端承的作用。因此,DX 桩比一般桩的极限荷载更大。而且承力盘的受力在顺序上也有不同,总体趋势是上部比下部先发挥作用,随着荷载的增加,上部支盘承担的荷载比例逐渐减小,下部支盘承担的荷载比例逐渐增加。如果继续加载,上部支盘先达到极限,然后下部支盘继续承受多余的荷载,直至达到极限状态。

3.3 支盘数对承载力的影响

与相同桩径及桩长的钻孔灌注桩相比,DX 桩承载力大幅提高,提高部分的承载力主要由支盘的端阻力提供。在容许设置支盘的土层中,分支数越多,桩的承载力越高。由于桩在向下传递荷载的过程中,沿深度方向会将部分桩身轴力转化为侧摩阻力,使得桩身轴力沿深度方向逐渐减小。而承力盘是桩身侧摩阻力增加最多的位置,随着承力盘数的增加,桩身侧摩阻力沿深度方向减小的次数和幅度也随之增加。张德华、贺德新等人的研究表明,尺寸相同的前提下,具有 2 个承力盘的 DX 单桩的抗压承载力明显优越于普通直孔桩,大约为直孔桩的 1.5 倍,而 3 个承力盘 DX 桩的承载力又进一步优于 2 个承力盘 DX 桩,大约为其 1.2 倍。然而不可以无限制地设置支盘,支盘对地基土压力的叠加效应可能使多设的支盘发挥不了多大作用。因此,在 DX 桩的设计过程中,要考虑桩周土的承载能力及支盘的临界盘距,以使承力支盘最大限度地发挥作用。

3.4 群桩效应对承载力的影响

承力盘对桩周土的挤密效应明显,能有效提高承力盘周土的强度和刚度。当桩间距不大时,DX 桩群桩对于控制沉降有明显的效果。同时由于 DX

桩荷载传递的特点,承力盘端阻是自上而下分段发挥的,每一级承力盘分段承受并扩散桩顶传下来的荷载,使得荷载在到达桩端前已经得到了充分的削弱,从而大大降低了桩端底面的荷载,减小了桩端下土体的沉降。

4 DX 桩单桩竖向极限承载力计算

根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系确定单桩竖向抗压极限承载力标准值 Q_{uk} ,可按下列式估算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{Bk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \eta \sum q_{Bik} A_{pD} + q_{pk} A_p$$

$$A_p = (\pi/4) d^2$$

$$A_{pD} = (\pi/4) (D^2 - d^2)$$

式中: Q_{uk} ——单桩竖向抗压极限承载力标准值,kN; Q_{sk} ——单桩总极限侧阻力标准值,kN; Q_{Bk} ——单桩总极限盘端阻力标准值,kN; Q_{pk} ——单桩总极限桩端阻力标准值,kN; q_{sik} ——单桩第 i 层土的极限侧阻力标准值,kPa; q_{Bik} ——单桩第 i 个盘的持力土层极限盘端阻力标准值,kPa; q_{pk} ——极限端阻力标准值,kPa; u ——桩身或桩根周长,m; l_i ——桩穿过第 i 层土的厚度,m; η ——总盘端阻力调整系数,单个和 2 个承力盘时 $\eta = 1.00$,3 个及 3 个以上承力盘时 $\eta = 0.93$; A_{pD} ——承力盘设计截面面积, m^2 ,按承力盘在水平投影面上的面积扣除桩身设计截面面积计算; A_p ——桩端设计截面面积, m^2 ; D ——承力盘设计直径,m; d ——桩身设计直径,m。

以郑州佛岗地区为例,设计采用 98-600 型三岔双缸双向液压挤扩装置(如图 2 所示),该挤扩装置的主要技术参数为:桩身设计直径 600~800 mm,承力盘(岔)公称直径 1550 mm,承力盘(岔)设计直径 1400 mm,挤扩呈公称直径时两挤扩臂夹角 70° ,挤扩臂收回时最小直径 580 mm,液压系统额定工作压力 25 MPa,油缸公称输出压力 2198 kN,油泵流量 63 L/min,电机功率 37 kW。该工程桩身设计直径 0.7 m,承力盘设计直径 1.4 m,桩长 28.0 m,三个承力盘分别位于⑥、⑧、⑨土层,地层分布及其力学特性(极限侧阻力标准值、极限盘端阻力标准值和极限桩端阻力标准值按 JGJ 171—2009《三岔双向挤扩灌注桩设计规程》查表取值)见表 3。

代入经验公式计算得出,单桩竖向抗压极限承载力标准值 $Q_{uk} = 8152.26$ kN,大约为同尺寸普通

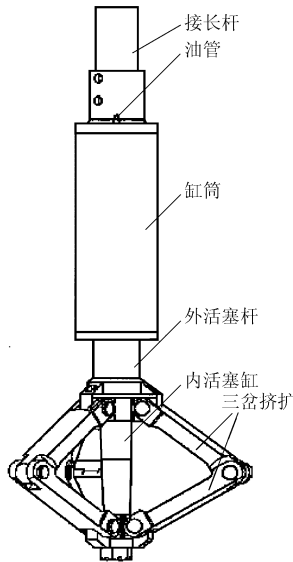


图 2 挤扩装置示意图

表 3 佛岗地区地层分布情况和力学特性

土层名称	厚度/ m	重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙 比	液性 指数	标准 贯入 击数	q_{sik} / kPa	q_{Bik} / kPa	q_{pk} / kPa
①杂填土	0.47				20.0			
②粉土	2.12	19.0	0.548	0.35	5.1	70.7		
③粉土	2.25	20.0	0.554	0.34	7.9	70.1		
④粉土	1.56	19.9	0.555	0.16	19.0	70.0		
⑤粉砂夹细砂	1.95	19.3	0.540		29.4	53.3		
⑥粉土	2.69	20.4	0.501	0.02	15.2	75.4	750	
⑦粉砂夹细砂	2.45	19.3	0.543		30.9	55.0		
⑧粉土夹砂	6.72	20.5	0.513	0.25	22.8	74.2	850	
⑨粉质粘土	9.00	20.5	0.570	0.04	11.8	67.5	1460	1640

直孔桩的 1.6 倍。依据该数值,取 9000 kN 作为竖向荷载进行有限元数值模拟。

5 DX 桩单桩的数值模拟

本章采用 ABAQUS 工程模拟的有限元软件,基于非线性有限元理论建立模型,对 DX 桩的工程性能予以分析。

如图 3 构建二维模型,根据工程经验,计算模型取 50 m 高、40 m 宽,忽略边界效应对计算结果的影响。

当内摩擦角 $> 22^\circ$ 时,Drucker - Prager 模型不能很好逼近 Mohr - Coulomb 模型,此时应该采用后者模拟工程材料。郑州地区部分地层内摩擦角 $> 22^\circ$,故土体采用 Mohr - Coulomb 模型。桩体采用各向同性的弹性模型。接触面元采用的是三结点接触面单元,相当于无厚度的 Goodman 单元,服从库仑摩擦

本构模型。详细参数设置见表 4。

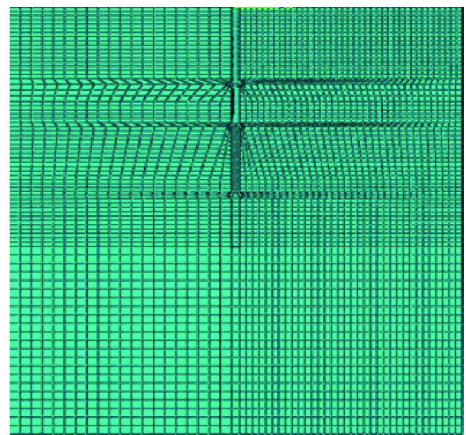


图 3 ABAQUS 中模型的网格划分

表 4 桩土相关参数

土层名称	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
②粉土	1900	24	0.25	10	18
③粉土	2000	31	0.25	12	22
④粉土	1990	26	0.25	14	24
⑤粉砂夹细砂	1930	44	0.25	1	31
⑥粉土	2040	21	0.25	12	22
⑦粉砂夹细砂	1930	40	0.25	2	32
⑧粉土夹砂	2050	27	0.25	12	26
⑨粉质粘土	2050	22	0.25	35	20
桩体	2500	30000	0.20		

ABAQUS 数值仿真模拟结果如下:

对于挤扩支盘桩,由于其特殊的结构,在抗压过程中支盘提供了较大的承载力,因此较容易发生支盘下端土体的受压破坏和支盘本身的强度破坏。由图 4 可以看出应力集中分布在承力盘下部及桩根端部,与工程常用的等截面摩擦桩相比,DX 桩充分利用了土体的承载能力,在同等混凝土用量或者占用同等空间的情况下,提供更大的承载能力。地基土土体强度是影响 DX 桩承载能力的重要因素,而郑州地区土体普遍抗剪强度较高,充分满足应用 DX 桩的需要,而且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。

根据 DX 桩的 $Q - s$ 曲线如图 5,可以看出其变形特性,DX 桩呈缓变形曲线,尤其没有明显的陡降段,即使到极限状态,破坏前亦无明显征兆,主要是随着桩顶荷载的增大,承力盘的端承力逐渐得到充分的发挥。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,对于以控制沉降

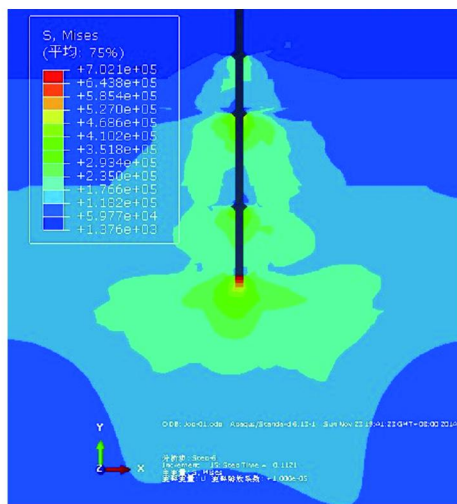


图4 9000 kN 荷载下土体米塞斯应力云图

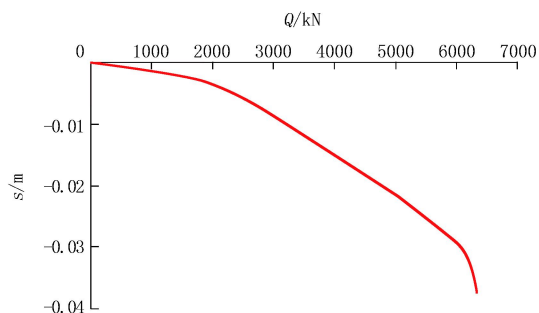


图5 DX 桩单桩 $Q-s$ 曲线

为主的建筑物,具有良好的应用价值。

通过数值仿真模拟结果可以看出,DX 桩在郑州的地质状况下,依然具有良好的桩土间力学性能,单桩承载能力较高。由于土体弹性模量 E 通常为压缩模量 E_s 的若干倍,需要根据实际工程勘测报告

提供的 E_s 值和当地经验来确定 E 值。然而本模型 E 取值偏小,导致模拟结果与实际产生一些偏差,还需要进一步完善。

6 结语

影响 DX 桩承载力的因素很多,如成桩工艺、桩长、桩径及设置岔盘土层的位置等,通过经验公式估算和数值仿真模拟可以很大程度减少试验成本。在合适的地质条件下,DX 桩可以大幅度提高单桩承载力,进而产生良好的经济效益。本文初步验证了郑州地区的地质条件适宜 DX 桩工作,故建议大规模推广使用。

参考文献:

- [1] 贺德新. DX 桩技术概论[J]. 岩土工程界,1999,(2):23-26.
- [2] 贺德新. DX 桩技术的设备与工法概述[J]. 中国工程科学,2012,14(1)13-18.
- [3] Hibbitte Karlsson, Sorenson. ABAQUS/Standard User's Manual [R]. 2002.
- [4] 吴兴龙,李光茂,魏章和. DX 桩单桩承载力设计分析[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):581-585.
- [5] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):371-375.
- [6] 陈轮,常冬冬,李广信. DX 桩单桩承载力的有限元分析[J]. 工程力学,2002,19(6):67-72.
- [7] 欧阳义,陈立宏,张德华. DX 桩单桩沉降的理论计算研究[J]. 中国工程科学,2012,14(1)74-79.
- [8] JGJ 171—2009,三岔双向挤扩灌注桩设计规程[S].
- [9] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].