

挤扩支盘桩与DX桩承载力盘挤扩机理对比研究

李薇薇¹ 李从昫²

(1. 天津电力设计院,天津 300200; 2. 北京电力设计院,北京 100055)

【摘要】 挤扩支盘桩与DX桩是从普通的灌注桩衍生而来的一种新桩型,与普通混凝土灌注桩相比,单桩竖向承载力、单方混凝土承载能力都有显著提高,具有良好的社会与经济效益。通过对两种挤扩设备(单向挤压设备和双向挤压设备)的挤扩原理分析对比,说明双向挤压设备形成的支盘其承载性能明显好于单向挤压设备所形成的支盘。在对两种挤扩设备挤压土体形成支盘的过程及运动机理分析的基础上,给出了确定承载力盘轮廓线的方法,并推导出承载力盘体积的计算公式,为其承载力计算提供依据。

【关键词】 挤扩支盘桩;DX桩;承载力;挤压设备

【中图分类号】 TU 473.12

Extruding Mechanism Comparative Study of Squeezed Branches and plates Pile and DX Pile

Li Weiwei¹ Li Congyun²

(1. Tianjin Power Design Institute, Tianjin 300200; 2. Beijing Power Design Institute, Beijing 100055, China)

【Abstract】 Squeezed branches and plates pile and DX squeezed pile are new types of pile developed from normal bored pile. Compared with normal bored pile, its ability to afford the load of individual vertically and unit consumption of concrete is apparently higher and its social and economical profit is obvious. First, It conducts a comparative study of two extruding devices (one-way extruding device and two-way extruding device), and concludes that the bearing capacity of branches and plates formed through two-way extruding device is much better than that of branches and plates formed through one-way extruding device. After analyzing the process of plates being formed through two kinds of equipments, a method is provided to draw the outline of two types of dishes respectively, and deduces the formula of dish volume which affords the load.

【Key words】 squeezed branches and plates pile; DX pile; dish which afford the load; extruding device

0 引言

近些年来,普通灌注桩单桩的承载机理分析已进行了许多工作,但其研究对象大都为等截面桩,对非等截面桩等异形桩则很少涉及。DX挤扩灌注桩是近年来出现的新桩型之一,其受力特点类似于人工挖孔的扩底桩、机械挤扩的夯扩桩等^[1]。扩底桩、夯扩桩等类型的桩在桩底存在较好持力层的情况下,能使桩的承载力得到较大幅度地提高,但由于施工工艺、地质条件等方面的原因,扩底面积有限,承载力提高的幅度受到限制。DX挤扩灌注桩是通过改变桩身截面面积而形成的桩型,该类桩型突破传统桩型为了提高桩的承载力必须找到坚硬土层的限制,通过机械方式在较稳定的土层形成承载力盘,优

化桩体结构,而且承载力盘的数量可以根据土层情况和荷载情况而多重设置,从而改变传统的桩端受力为桩侧受力。在基岩埋藏较深的情况下,从理论上讲,采用支盘灌注桩可以在不达到基岩的条件下提高承载力,节约大量的经费,缩短施工工期,因而具有广阔的应用前景^[2]。

纵观DX桩的研究现状,可以发现虽然国内外对DX桩的荷载传递机理进行了一些研究,但仍存在不少值得探讨的问题,为了能更清楚地了解DX桩的荷载传递机理,为工程应用提供可靠的理论依据,本文对单向和双向两种挤扩装置的挤扩成盘的过程进行分析,深入研究两种不同挤扩方式形成的承载力盘的轮廓线形状和对承载性能带来的影响,分

别建立两种挤扩装置的受力模型,推导出承载力盘体积计算公式,为其承载力计算提供依据。

1 挤扩支盘桩与DX桩简介

挤扩支盘桩为挤扩式变截面桩,可分为两大类:挤扩多分支承载力盘桩(以下简称支盘桩)^[3]和DX多节挤扩灌注桩(以下简称DX桩)^[4]。

支盘桩和DX桩是从普通混凝土灌注桩衍生出来的一种新桩型,是在施工过程中采用钻机成孔,然后沿桩身不同深度,通过支盘成型设备施加较大的油缸压力,对土强力挤密形成分支或承载力盘,从而提高桩的承载力,见图1。

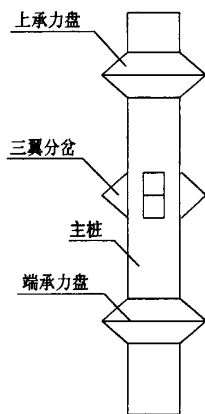


图1 DX桩桩身构造图

支盘桩与DX桩分别是用单向挤扩装置、双向挤扩装置进行挤扩而完成的一种变截面桩,都是在钻孔灌注桩(直孔桩)工艺中增加一道挤扩工序,按承载能力要求,根据地层的力学指标及土质条件,选择有利地层作为持力层,使用挤扩装置,由地面液压站控制该装置挤扩臂的扩张和收缩,在桩身不同部位挤扩出3岔分布或3n岔分布的扩大岔腔或近似的圆锥盘状的扩大盘腔,放入钢筋笼,灌注混凝土,成桩。扩大后的盘(岔)腔径为主桩径的1.7~2.6倍,从而使摩擦型桩变为多层端承、多段侧摩阻共同承载的新桩型。

2 两种挤压设备的挤压过程

承载力盘成型,在实际的操作过程中不是一次就能达到要求,首先,在同一个角度,液压挤土设备的压力有限,每次施加压力只能使土达到一定的塑性变形,达不到工程所要求的承载力盘的形状,必须经过机械设备的多次挤压才可达要求,同时根据土的压缩模量的不同,挤压的次数也不一样,有的土质较松软,可能经过2~3次就可以挤压成型,而有的土质较硬,经过5~6次才可以成型,每经过一次挤

压,土就被压密一些,经过几次的压缩,土的受力性能有了很大的提高,承载力盘在承受荷载时,承载力盘周围的土层的受力性质明显好于未经挤压的土层,而在受力时,承载力盘承担相当大的荷载,这样就充分发挥了该土层的潜力,使其受力性能更好。为了形成承载力盘,有多种挤扩机械,最为常见的挤扩设备主要有YZJ型支盘挤扩机和DX挤扩设备。它们的作用原理大体相同,具体的形式分为两种,前者为单向挤压,后者为双向挤压^[5-6],作用简图分别见图2。

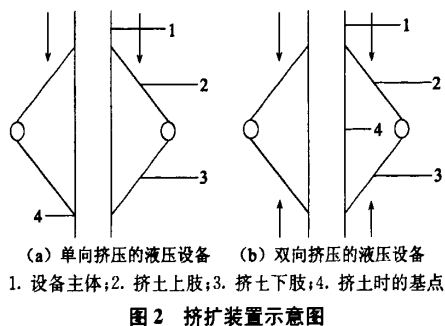


图2 挤扩装置示意图

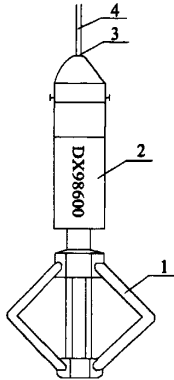
2.1 单向两弓臂压臂挤土设备的挤压过程

单向挤压设备的挤土臂在挤土过程中是围绕下臂的底端为基点在运动的,如图2(a)所示,挤压时,机械设备的上分支受力,以下分支的下部为不动点向下运动,使两分支臂向外扩张挤压土体,第一次挤压后,土体产生了一定角度的塑性变形,然后机械设备经过卸载、加载的过程,进行第二次挤压,依次进行,直到成盘。单向挤压设备在运动过程中只有上肢的上端是在不断向下运动的,下支的下端是固定不动的,整个下肢只有水平方向的运动,而没有竖直方向的运动,在挤土臂对土体进行作用时,挤土臂的下端为铰支,只能转动,不能平动,上端既可以转动也可以平动,这样液压设备在施加力时,整个挤土下肢都和土体接触,对土施加作用力,不会有挤土臂悬空,不和土体接触的情况出现,从而使挤压形成的支盘灌注下部的土体,从距离桩孔由近到远,都受到近似程度的挤压,轮廓线为直线型。但这种单向挤扩设备—YZJ型支盘挤扩机仍存在以下几种缺陷:①挤扩过程中挤扩臂上部容易产生“临空区”对土体扰动大,沉渣多;②活塞杆受偏力易弯曲;③机具易偏移,与桩孔轴心不对中;④挤扩臂回收时容易夹土,往往造成挤扩臂不能回收,强迫收拢致使挤扩臂、连接轴或法兰座受力过大而断裂;⑤人工操作挤扩转角存在较大误差;⑥连接管因与机身刚性连接而易折断。因此这种挤扩效果不是最理想的,于是人们

开发出了一种新的设备即双向三弓压臂挤扩设备—DX 挤扩装置^[7]。

2.2 双向三弓压臂挤土设备的挤压过程

DX 挤扩系统由挤扩装置、联接器、接长杆、液压控制系统及车载系统组成。DX 挤扩装置由双向液压油缸装置、三岔挤扩弓压臂液压定位装置、压力传感器、角度(流量)传感器及位移传感器等组成(见图3)。DX 挤扩装置主要技术性能见表1^[8]。



1. 三岔挤扩弓压臂; 2. 双向液压油缸;
3. 油管; 4. 钢丝绳

图3 DX 挤扩装置示意图

表1 DX 挤扩装置主要技术性能

设备型号	98-400型	01-500型	98-600型	01-800型
适应挤扩的直孔直径/mm	450~600	500~700	600~800	800~1200
弓压臂收回最小尺寸/mm	380	450	580	780
弓压臂挤扩最大尺寸/mm	1080	1200	1550	2000
弓压臂高度/mm	130~160	180~200	200~240	250~280
挤扩最大尺寸时两臂夹角/(°)	70	70	70	70
液压系统额定工作压力/MPa	25	25	25	25
油缸公称输出压力/kN	1256	1256	2266	2266
油泵流量/(L·min ⁻¹)	36.7	36.7	63	63
电机功率/kW	18.5	18.5	37	37

如图2(b)所示,DX 挤扩装置和单向挤压设备所不同的是在挤扩过程中,双向液压油缸相对位移,3岔挤扩弓压臂是围绕着中心基点运动,只作水平

运动而无上下运动,可保证在砂层或其它土层在挤扩后不掉或少掉砂土;三岔式弓压臂的内外屋脊的表面形状,在挤扩过程中,使土体形成3个相同的“小屋脊”,而且不塌孔并保证弓压臂挤扩后顺利回位;当桩身较长时,挤扩装置与吊车之间采用钢丝绳柔性连接,以避免YZJ型支盘成型机与吊车之间因采用刚性连接而造成费工费时、垂直误差较大、甚至发生机头掉入孔底等缺点,当桩较短时可采用半刚性连接。由于挤扩装置为等角度的三个弓压臂同时工作,三点支撑,三个方向同时受力,这样一次挤扩成三岔扩大腔,受力稳定合理。

3 两种不同挤压运动的原理

单向挤压的液压设备—YZJ型支盘挤扩机在作用时是以挤土下肢的下端为基点,只从上方施加力来推动两个挤土臂,使之向外挤土,使土产生塑性变形,形成承力盘。图4(a)表示了单向挤压设备对土进行多次挤压,形成承力盘的过程,在盘、支腔挤扩过程中上、下挤扩臂及挤扩臂铰点的运动轨迹,由图4(a)及图5可知,上臂AB和下臂BC的A、B、C三点的运动轨迹如下:

$$A \text{ 点 } \{x=0, y=\downarrow\}$$

$$B \text{ 点 } \{x=\rightarrow, y=\downarrow\}$$

$$C \text{ 点 } \{x=0, y=0\}$$

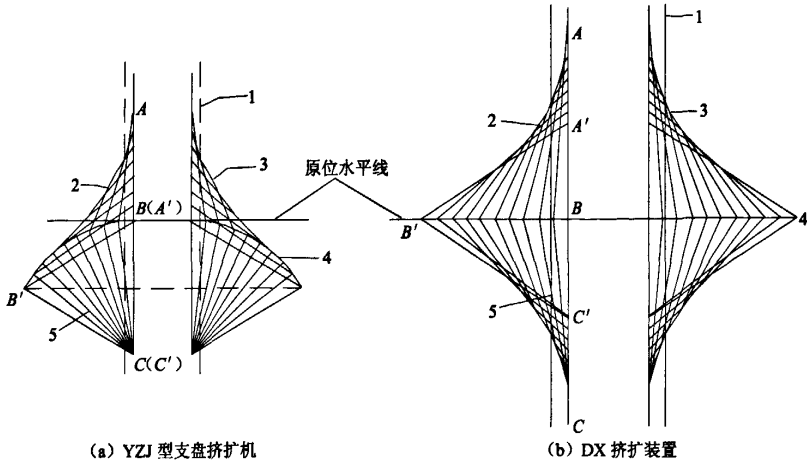
双向挤压的液压设备—DX 挤扩装置在作用时从上下两个方向用力来推动挤土臂,使之同时向外扩张,并向设备中点移动,在这个过程中,挤土臂向外挤土,使土产生一定的塑性变形。图4(b)表示了双向挤压设备对土进行多次挤压,形成承力盘的过程,图中每一根线代表每一次挤压后挤土臂所处的位置,整个图形的外围轮廓线为最后形成的承力盘的形状,在盘、岔腔挤扩过程中上、下挤扩臂及挤扩臂铰点的运动轨迹由图4(b)及图6可知,上臂AB和下臂BC的A、B、C三点的运动轨迹如下:

$$A \text{ 点 } \{x=0, y=\downarrow\}$$

$$B \text{ 点 } \{x=\rightarrow, y=0\}$$

$$C \text{ 点 } \{x=0, y=\uparrow\}$$

且 $A \text{ 点 } |y\downarrow| = C \text{ 点 } |y\uparrow|$, 所以B点只有水平方向运动,挤扩臂铰点轨迹即为原位水平线,且AB和CB所形成的包络线均匀连续、上下对称,受力总是平衡的,使挤扩过程中,挤扩腔顶壁不掉土或少掉土,容易获得高质量的空腔,从而提高了空腔挤扩的稳定性和可靠性。



(a) YZJ 型支盘挤扩机 (b) DX 挤扩装置
1. 桩孔壁; 2. 上挤扩臂; 3. 盘、支(岔)腔壁; 4. 挤扩臂铰点轨变; 5. 下挤扩臂

图 4 挤扩装置的运动轨迹

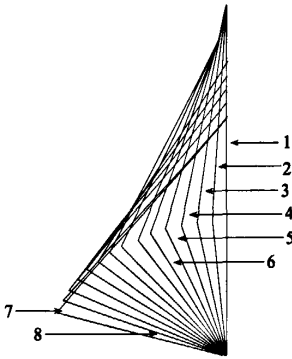


图 5 图 4(a) 的局部放大图

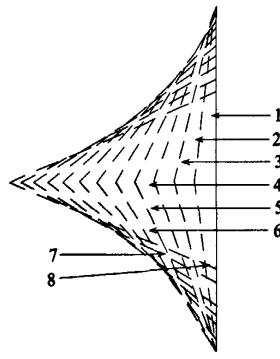


图 6 图 4(b) 的局部放大图

4 挤扩装置运动机理分析

4.1 承力盘形状的确定

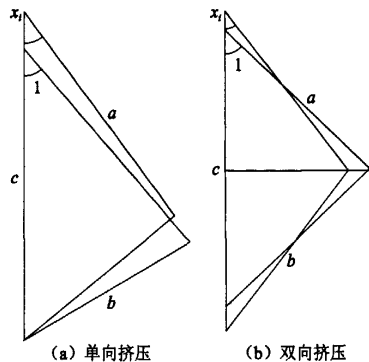
在 DX 桩设计过程中, 确定挤压所形成的承力盘的轮廓线是很重要的, 这是因为只有知道了承力盘的详细形状才能确定浇筑混凝土量。下面就对承力盘的形状进行详细分析。

承力盘形状计算简图见图 7, 假设上臂长 a , 下臂长为 b , 两臂直接的连杆长为 c , 液压装置每一次施加力, 各杆之间的角度都会有变化, 直到最后支盘灌注达到要求的形状, 在实际研究时一般不易测知角度的变化, 但可以测知连杆缩短的长度 x_i , 然后用 c 减去 x_i , 再通过解三角形的方法即可以求得每一次挤压完成后各杆之间的角度, 再根据角度做出不等肢挤土臂单向挤压的轮廓线计算式:

$$\text{施加一次力之后: } c_1 = c - x_1$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{c_1^2 + a^2 - b^2}{2 \cdot c_1 \cdot a}$$

$$\text{则最后成形时: } c_n = c - \sum_{i=1}^n x_i$$



(a) 单向挤压 (b) 双向挤压

图 7 承力盘形状计算简图

同理可得到等肢挤土臂双向挤压的轮廓线计算式:

$$\text{施加一次力之后: } c_1 = c - x_1$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{c_1/2}{a}$$

$$\text{则最后成形时: } c_n = c - \sum_{i=1}^n x_i$$

(1)

$$\theta_n = \arccos \frac{c_n/2}{a} \quad (2)$$

在求得每次挤压后形成的所有的三角形后，即可以粗略地绘出承力盘大致的轮廓线。但是这种方法并不精确，因为挤扩完形成的支盘外形并不是严格的三角外形。所以这种方法并不能精确地确定支盘包络线的方程式，也不能准确地求出岔盘的体积。因此有必要对DX挤扩运动轨迹进行分析。

4.2 DX挤扩运动轨迹分析

在第一象限内的X轴和Y轴之间，放置一线段，长为L，当这一线段位置在X轴上即为图中的OA线段。OA的长度为L。当线段放在Y轴上时，其位置为OB，OB的长度也是L。当线段的两端分别在X轴和Y轴上滑动时，就在第一象限内形成许多直线（见图8）。这一线族中的每一条直线在第一象限内的长度都是L。很明显，挤出物块截面在第一象限内的曲线，就是前述第一象限内直线族的包络线，是一条曲线，而不是直线。

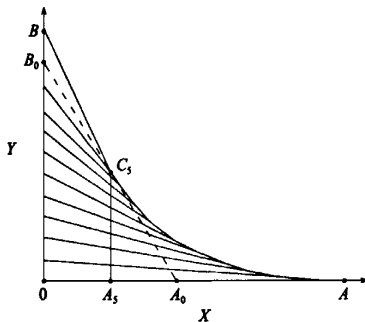


图8 直线L的运动轨迹

有一点值得注意，当固定长度的线段两端分别在X轴和在Y轴上滑动时，如果这线段与X轴的角度最大值有一个极限值。例如是54°，而不是90°（如图8中的∠OA₀B₀），在这条线上，包络线出现在C₅点，包络线自A点起沿曲线到C₅点为止，自C₅点以后，曲线族的最大值点的轨迹就是A₀B₀直线上由C₅到B₀的线段。这一段不是曲线而是直线，由下面的计算可以看到在A₀B₀直线上，当∠OA₀B₀确定后，极大值出现点C₅的横坐标和OA₅的长度是可以计算出来的。

参考图9、图10，设有一线段，长为L，与X轴的交角为θ，在X轴上任意一点A₄作垂直于X轴的直线，与上面线段交于C₄点，这C₄点的纵坐标为y，A₄点的横坐标为x，从图上很容易看出他们之间的关系式为： $y = (L \cdot \cos \theta - x) \cdot \tan \theta$ (3)

现在把x视为固定值，则式(3)成为y与之间的函数关系。我们来求出y为极大值时，θ值应是多少。将式(3)两边同时求导得：

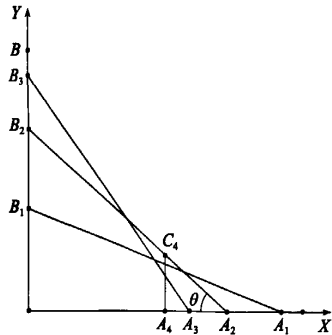


图9 C₄点与γ、x的关系

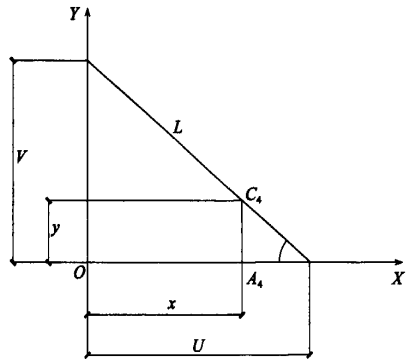


图10 C₄点y与θ的关系

$$y = (L \cdot \cos \theta - x) \tan \theta + (L \cdot \cos \theta - x) \cdot \tan \theta = L(-\sin \theta) \cdot \tan \theta + (L \cdot \cos \theta - x) \cdot \sec^2 \theta = -L \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta + L \cdot \sec \theta - x \cdot \sec^2 \theta$$

$$\text{当 } y=0, -L \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta + L \cdot \sec \theta - x \cdot \sec^2 \theta = 0$$

$$L(\sec \theta - \sin \theta \cdot \tan \theta) - x \cdot \sec^2 \theta = 0 \quad (4)$$

故给定θ后即可求得x值。但是给定x后，由式(4)求解θ并不容易，在实际计算中是希望通过x来表达θ。由图10可知：

$$\tan \theta = V/U, \quad \sin \theta = V/L, \quad \sec \theta = L/U, U^2 + V^2 = L^2 \quad (5)$$

将式(5)中的tan θ, sin θ, sec θ带入式(4)得：

$$L[L/U - (V/L) \cdot (V/U)] - x \cdot L^2/U^2 = 0$$

$$\Rightarrow L^2/U - V^2/U - x \cdot L^2/U^2 = 0 \Rightarrow U^3 = x \cdot L^2,$$

即： $U^3/L^3 = x/L$

因此得出：

$$\cos \theta = \sqrt[3]{x/L} \quad (6)$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} = \sqrt{1 - (x/L)^{2/3}} \quad (7)$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{1 - (x/L)^{2/3}}}{\sqrt[3]{x/L}} = \sqrt{1/(x/L)^{2/3} - 1} \quad (8)$$

将式(6)、式(7)、式(8)代入式(3)得到包络线 y 与 x 的方程: $y=(L \cdot \sqrt[3]{x/L}-x) \cdot \sqrt{1/(x/L)^{2/3}-1}$ (9)
从方程式可以看出包络线是曲线方程而不是直线方程了,而且 θ 也是 x 的函数。

下面根据式(9)求出挤扩臂在第一向限包络线的 x, y 的坐标,由式(6)可知 $x/L=\cos^3\theta$ 这是横坐标 x 与 θ 的方程。其中 θ 为通过该区域内任意一点的直线 L 与 x 轴之间的夹角。当 $\theta=0^\circ$ 时,包络线的 $x=L$ 。代入式(3)得 $x=L$,即包络线通过的点为 $(L,0)$;当 $\theta=90^\circ$ 时, $x=0$,由式(3)得 $y=L$,包络线通过的点为 $(0,L)$ 。包络线的方程得到以后,还要计算包络线的起始坐标。因为撑臂与 x 轴之间的最大角度不是 90° 而是 54° ,故包络线起点的 x 坐标不是坐标的原点。

由式(6)可得: $x/L=\cos^3\theta$

可求得当时 $\theta=54^\circ$ 时, $\cos 54^\circ=0.58785$;

所以 $x=(0.58785)^3L=0.203075L$

将式(3)两边同时除以 L 得:

$$y/L=(\cos\theta-x/L) \cdot \tan\theta$$

推导出:

$$y/L=(\cos\theta-x/L) \cdot \tan\theta=(0.58785-0.203075) \times 1.376382=0.529508$$

即: $y=0.529508L$

故图 11 中包络线起点 B 的坐标是 $(0.203075L, 0.529508L)$ 。当 $\theta=45^\circ$ 时,撑臂在 Y 轴上的一端,坐标为 $\sin 54^\circ=0.809017$,因此令 A 点坐标为 $(0, 0.809017L)$,表 2 根据式(9)列出了挤扩支盘外包络线在第一向限包络线的 x, y 的坐标。

表 2 包络线在第一向限 X, Y 的坐标

点号	X 坐标	Y 坐标	点号	X 坐标	Y 坐标
A	0.000000L	0.809017L	6	0.600000L	0.155058L
B	0.203075L	0.529508L	7	0.700000L	0.097384L
3	0.300000L	0.409961L	8	0.800000L	0.051391L
4	0.400000L	0.309058L	9	0.900000L	0.017666L
5	0.500000L	0.225099L	10	1.000000L	0.000000L

知道了挤扩包络线的方程就可以将支盘的体积求出来,从图 11 可以看出 A, B 两点之间用直线连接的,从 B 点到 C 点之间是曲线,方程式就是(9)。体积的计算就是求旋转体的体积,将圆面积进行定积分,然后求出支盘的体积。

AB 段方程: $y_1=\tan\theta \cdot x=\tan 54^\circ \cdot x=1.376382 \cdot x$

BC 段方程: $y_2=(L \cdot \sqrt[3]{x/L}) \cdot \sqrt{1/(x/L)^{2/3}-1}$

$$V=2\left(\int_0^{x_1} \pi \cdot y_1^2 \cdot dx + \int_{x_1}^{x_2} \pi \cdot y_2^2 \cdot dx\right) \quad (10)$$

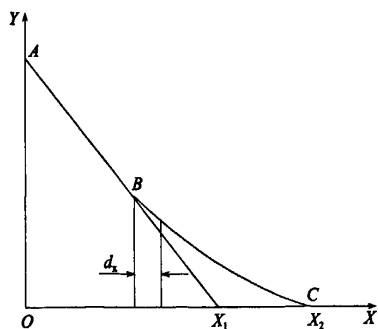


图 11 支盘体积计算简图

根据式(10)可以精确的求出支盘的体积。

5 结论

1)分析了DX桩与挤扩支盘桩的承载力盘的成型过程的差异,描述了挤土设备挤压桩周土体形成承载力盘的过程,得出挤扩支盘灌注桩承载力盘的轮廓线是曲线型的,而不是通常认为的直线型。

2)对两种挤扩设备(单向挤压设备和双向挤压设备)的挤扩原理进行了分析对比,由于作用方式的不同,双向挤压设备形成的支盘其承载性能明显好于单向挤压设备所形成的支盘。

3)对两种挤扩设备挤压土体形成支盘的过程及运动机理分析的基础上,给出了确定承载力盘轮廓线的方程,并且推导出承载力盘体积的计算公式。

参 考 文 献

- [1] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册(第一版)(M). 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [2] 潘雪峰. 竖向荷载作用下挤扩支盘桩承载力试验研究和沉降计算[D]. 太原:太原理工大学,2003.
- [3] 沈保汉. 评价桩工作特性的新方法— $P/P_u-s/s_u$ 曲线法[J]. 建筑技术开发,1994(2):11-21.
- [4] 吴景海. 挤扩多分支承载力盘混凝土灌注桩的工程应用[J]. 中国市政工程,1998,84(1):44-47.
- [5] 王新宇. 挤扩支盘桩的结构原理及其应用[D]:上海:同济大学,2004.
- [6] 沈保汉,贺德新,陈 轮,等. DX 多节挤扩灌注桩[J]. 岩土工程界,2002,5(4):30-35.
- [7] 沈保汉,贺德新,刘振亮,等. DX 多节挤扩桩的产生及特点[J]. 工业建筑,2004,34(3):1-4.
- [8] CECS 192:2005 挤扩支盘灌注桩技术规程.

收稿日期:2008-10-20