

基坑圆环支撑体系水平刚度系数计算方法研究

王春艳¹, 张方涛¹, 马 郎², 康安栋¹, 徐光黎¹, 李 松²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 由受力根据刚度分配的原则, 引入受力分配系数, 对圆环支撑体系水平刚度系数的计算进行了解析式的推导, 提出了圆环支撑体系水平刚度系数的简易计算方法, 并给出了解析式的修正式。并以某超深基坑圆环支撑体系为例, 应用所提出的公式计算该圆环支撑体系的水平刚度系数, 并与三维有限元分析结果进行对比, 同时分析了不同封闭环梁、发射梁对水平刚度的影响, 结果表明: 二者误差较小, 圆环支撑体系水平刚度主要由受力杆件封闭环梁决定, 与发射梁等传力杆件关系不大, 依据所提出的解析式进行计算, 结果精确且简单易行, 可为基坑圆环支撑体系水平刚度系数的取值提供依据。

关 键 词: 基坑; 圆环支撑; 水平刚度; 三维数值模拟

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)03-0840-07

A method for calculating horizontal stiffness coefficient of ring supporting system for foundation pit

WANG Chun-yan¹, ZHANG Fang-tao¹, MA Yun², KANG An-dong¹, XU Guang-li¹, LI Song²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Central Southern Geotechnical Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The force distribution coefficient is introduced according to the principle of the stiffness distribution; a method of calculating the horizontal stiffness coefficient of the ring support system is developed, and its analytical solutions are derived; furthermore, the revised analytical solutions are given. The procedure is employed to calculate the horizontal stiffness coefficient of the ring support system of an extra deep foundation pit with ring support. The influence of different closed ring beams and transmitting beams on the horizontal stiffness is also analyzed. The calculated results by proposed procedure are compared with those by three-dimensional finite element method. The results show that the error with the two methods is small, and the horizontal stiffness of the ring support system is mainly determined by the closed beam of the force bar, and is trivially affected by the force beam of the transmitting beam. According to the proposed analytical formula, the result is accurate and simple, which can provide the basis for determining the design values of the horizontal stiffness coefficient of the foundation ring support system.

Keywords: foundation pit; ring support; horizontal stiffness; 3D numerical simulation

1 引 言

随着城市地下空间的快速开发和利用, 基坑工程越来越多, 规模大、深度深、周边环境复杂已成为基坑工程的显著特点。目前, 基坑支护有着多种形式, 排桩或者地连墙加内支撑是目前应用较多的一种支护结构形式, 内支撑具有支撑刚度大、控制基坑变形和保护周边环境能力强、而且不侵入周围地下空间形成障碍物等优点。内支撑布置形式包括

正交支撑、对撑、角撑结合边桁架以及圆环支撑等, 其中圆环支撑充分利用混凝土抗压能力强的特点, 将受力支撑形式设置成圆环形结构, 适用于超大面积的深基坑工程以及多种平面形式的基坑。然而从基坑支护结构设计角度看, 圆环支撑的水平刚度系数取值成为设计人员的难点, 相关规范仅提供水平对撑情况下的水平刚度系数计算解析式^[1-2]见式(1), 对于圆环支撑水平刚度大多数凭借经验估算, 缺少依据, 容易造成较大偏差, 设计的支护结构或

是不经济, 或是不安全。

$$k_R = \frac{\alpha_R E A b_a}{\lambda l_0 s} \quad (1)$$

式中: k_R 为挡土结构计算宽度内弹性支点刚度系数 (kN/m); λ 为支撑不动点调整系数; α_R 为支撑松弛系数; E 为支撑材料的弹性模量 (kPa); A 为支撑的截面面积 (m²); b_a 为挡土结构计算宽度 (m); l_0 为受压支撑构件的长度 (m); s 为支撑水平间距 (m)。

国内许多学者也试图解决内支撑水平刚度的计算问题, 刘汉凯^[3]进行了内支撑平面钢架线弹性受力分析, 得到不同类型支撑弹性支点刚度计算公式, 葛帆等^[4]运用迭代求解法计算了非对称荷载情况下支撑的水平刚度, 杨敏等^[5]对围檩、内支撑结构和锚杆的水平刚度分别给出计算方法, 陈林靖等^[6-7]、戴自航等^[8-9]根据综合刚度和双参数法, 提出能够合理求解内支撑式支护结构杆系有限元数值解。刘小丽等^[10]通过有限元数值分析方法计算了4种不同内支撑结构的刚度, 并探讨了对内支撑刚度的影响因素。陈焘等^[11]提出了异形基坑内支撑的等效计算方法, 对基坑进行分块并研究各部分的受力形状。李钧等^[12]也通过对不对称基坑内支撑受力的分析, 认为对等效刚度计算公式简化和设置相应的折减系数才能真实地反映内支撑的有效刚度; 袁海庆等^[13]针对围檩和内支撑与桩顶位移不协调的问题, 提出了将排桩-内支撑-土压力空间体系转换为桩弹簧支座-内支撑-等效节点荷载“等价平面体系”。但主要存在两方面的问题: 一是对于圆环支撑体系水平刚度计算方法的研究较少, 尚没有水平刚度求解解析式; 二是大部分提出的计算模型较复杂, 其中存在较多难于确定的参数, 不利于推广应用。

为此, 本文由受力根据刚度分配的原则, 引入受力分配系数, 对圆环支撑体系水平刚度的计算进行了解析式的推导, 提出了圆环支撑体系水平刚度的简易计算方法, 为基坑圆环支撑体系水平刚度系数的取值提供依据。并以某超深基坑圆环支撑体系为例, 应用本文所提出的公式计算该圆环支撑体系的水平刚度, 并与有限元分析结果进行对比, 同时分析了不同封闭环梁、发射梁对水平刚度的影响, 并验证该解析式的合理性和适用性。

2 圆环支撑水平刚度解析式的推导

2.1 基本假设

针对圆环支撑体系水平刚度解析式的计算推

导, 需作如下假设:

(1) 假定圆环支撑体系中环梁受力均匀, 以轴向受压为主。

(2) 忽略基坑形状不规则对圆环支撑体系水平刚度带来的影响。当发射梁以及连系梁沿圆环梁四周均匀布置, 并且在基坑支护薄弱处采取加强措施, 可以减弱基坑因形状不规则带来的影响。

(3) 忽略混凝土在受力阶段产生裂缝等原因带来的对水平刚度的影响。

2.2 水平刚度解析式

对于单道环梁, 当基坑平面近似方形, 四周的力较均匀传到圆环上时, 假定圆环上作用法向均布荷载为 q , 圆环压缩前直径为 d_1 , 设圆环上每断面的压力为 P , 则有环梁所受围压为

$$P = \frac{q d_1}{2} \quad (2)$$

本次圆环支撑体系水平刚度解析式的推导以3道圆环梁为例, 如图1所示, 将直径从小到大的环梁依次定名为第1、2、3道环梁, 设第1道环梁直径为 d_1 , 弹性模量为 E_1 , 环梁截面积为 A_1 , 第1道环梁压缩后的直径为 d'_1 ; 第2道环梁直径为 d_2 , 弹性模量为 E_2 , 环梁截面积为 A_2 ; 第3道环梁直径为 d_3 , 弹性模量为 E_3 , 环梁截面积为 A_3 。

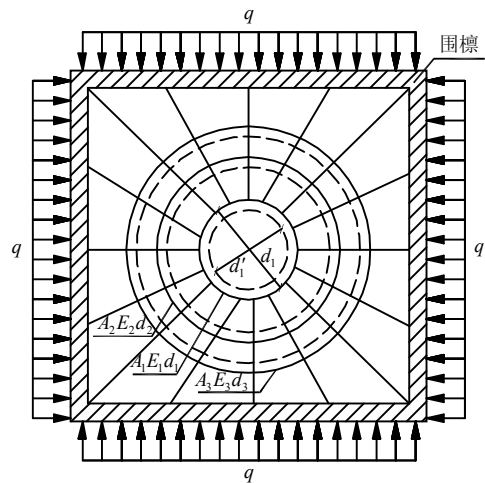


图1 圆环支撑水平刚度计算简图

Fig.1 Horizontal stiffness calculation diagram of ring support

设作用在围檩的法向均布荷载为 q , 由受力根据刚度分配的原则, 最内部的环梁所受的围压 p_1 为

$$p_1 = \frac{\frac{E_1 A_1}{d_1}}{\frac{E_1 A_1}{d_1} + \frac{E_2 A_2}{d_2} + \frac{E_3 A_3}{d_3}} q \quad (3)$$

上式亦可变为

$$p_1 = \frac{1}{1 + \frac{E_2 A_2 d_1}{E_1 A_1 d_2} + \frac{E_3 A_3 d_1}{E_1 A_1 d_3}} q = \beta q \quad (4)$$

令 $\beta = \frac{1}{1 + \frac{E_2 A_2 d_1}{E_1 A_1 d_2} + \frac{E_3 A_3 d_1}{E_1 A_1 d_3}}$, 并定义 β 为受力分配系数。

内部环梁所受轴力为

$$N = \beta q \frac{d_1}{2} \quad (5)$$

第 1 道环梁压缩量为

$$\rho = \frac{N \pi d_1}{E_1 A_1} = \frac{\beta \pi q d_1^2}{2 E_1 A_1} \quad (6)$$

圆环在压缩后的直径为 d_1' :

$$\pi d_1' = \pi d_1 - \frac{\beta \pi q d_1^2}{2 E_1 A_1} \quad (7)$$

支承点位移为

$$\Delta_r = \frac{1}{2} (d_1 - d_1') = \frac{\beta q d_1^2}{4 E_1 A_1} \quad (8)$$

圆环支撑梁通常用整浇钢筋混凝土, 松弛系数 α 取 1.0, 则

$$K_B = \frac{q}{\Delta_r} = \frac{4 E_1 A_1}{\beta d_1^2} = \frac{4 E_1 A_1 \left(1 + \frac{E_2 A_2 d_1}{E_1 A_1 d_2} + \frac{E_3 A_3 d_1}{E_1 A_1 d_3} \right)}{d_1^2} \quad (9)$$

同理可得: 对于其他不同道数的环梁, 刚度计算解析式为

$$K_B = \frac{q}{\Delta_r} = \frac{4 E_1 A_1}{\beta d_1^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i A_i d_i}{E_1 A_1 d_1}} \quad (11)$$

式中: n 为封闭环梁的道数, 该圆环支撑体系水平刚度计算解析式适用于圆环支撑体系含有一道以及多道的圆环梁的情况。

2.3 修正水平刚度计算解析式

从式 (10)、(11) 可以看出, 解析式中仅考虑了环梁的压缩变形对内支撑水平刚度的影响, 对发射梁等因素并未考虑, 本文提出的计算解析式是在若干假设的基础上推导出来的, 是一种近似解, 因此, 对于该解析式的应用范围作如下说明:

第 1 道环梁压缩变形量以式 (8) 计算。

发射梁压缩变形量为

$$\Delta_l = \sum_{j=1}^n \frac{q_j s_j l_j}{E_j' A_j'} \quad (12)$$

式中: 第 1 道环梁与第 2 道环梁之间的发射梁长度 l_j 为 l_1 , 第 2 道环梁与第 3 道环梁之间的发射梁长度为 l_2 , 其他可以此类推; $E_j' A_j'$ 为对应 l_j 段发射梁的截面面积与材料弹性模量之积, 考虑了发射梁为变截面的情况; s_j 为对应 l_j 段发射梁所承担的荷载范围; q_j 为对应 l_j 段发射梁所受荷载。

则对应 l_j 段发射梁所受荷载 q_j 为

$$q_j = q \beta_j \quad (13)$$

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{E_i A_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i A_i}{d_i}} \quad (14)$$

由 (13) 可知, $\beta_1 = \beta$, $\beta_n = 1$, 且 $\beta \leq \beta_j \leq 1$ 。对应 l_j 段发射梁所承担的荷载范围 s_j 为

$$s_j = \frac{\theta}{2} \left(d_1 + 2 \sum_{i=1}^j l_i \right) \quad (15)$$

式中: θ 为发射梁所承担的荷载范围对应的圆心角, 以弧度为单位。

当 $\Delta_l / \Delta_r \leq 1/9$ 时, 如果忽略发射梁压缩变形的影响, 刚度解析解数值偏大, 水平刚度实际值大约可达解析解数值的 90% 及以上, 对于岩土工程来说, 该精度一般能满足要求。对于本文依托的基坑工程圆环支撑的水平刚度计算, 使用本文推导的解析式进行计算, 忽略了发射梁的压缩变形的影响, 按照式 (12) ~ (15) 进行判断, 第 1 道与第 2、3 道内支撑水平刚度实际值分别可达解析解数值的 94.7% 和 93.3%, 实际值与解析解误差较小。因此, 对于该深基坑圆环支撑体系水平刚度的计算可以使用本文解析式进行求解。

误差是相对的, 当实际工程中很难具体到水平刚度实际值为解析解数值的多少比例时, 才可以用本文提出的公式进行计算。为此, 可以对式 (10) 进行修正, 令 $\zeta = \frac{\Delta_r}{\Delta_r + \Delta_l}$, 则经过修正的刚度 K_B' 为

$$K_B' = \zeta \frac{4 E_1 A_1}{\beta d_1^2} \quad (16)$$

3 有限元算法

3.1 基本思想

对于复杂的桁架支撑以及圆环支撑体系，其水平刚度系数也可以采用有限元手段进行计算，其方法是，在水平支撑体系的围檩上施加与围檩垂直的均布荷载 p ，求得围檩上各节点的平均法向位移 δ ，则弹性支座的水平刚度为

$$K_{Bi} = \frac{p}{\delta} \quad (17)$$

式中： K_{Bi} 为水平支撑系统的一个平均支撑刚度。

3.2 边界条件

对于复杂水平支撑体系，通常情况下由于基坑四周与围檩长度方向正交的水平荷载往往为不对称分布，为避免模型整体平移或者转动，需设置必要的边界条件以限制整个模型在其平面内的刚体位移，目前用的较多的处理方法有以下两种：

(1) 在模型的局部设置固定支座，这种方法一般在位移最小的位置设置固定支座来限制整体模型的刚体位移，一般需要较多的工程经验。

(2) 在模型的周边施加弹簧单元，这种方法在结构荷载法计算中经常用到，核心的问题是弹簧刚度系数的选取，一般须根据工程经验来确定。

方法(1)需要根据人为的经验判断位移值较小的地方，并在模型当中认为该点位移值为 0，此方法能大概得出梁板支撑整体变形趋势及位移极值，但在有限元模型当中固定的几个点处会发生应力集中，得出的支撑及围檩受力误差较大，这是难以避免的；方法(2)是通过设置弹簧单元来平衡掉模型因荷载不对称产生的不平衡力，所得到的支撑体系受力也较为均匀，不会出现严重应力集中现象，但弹簧刚度系数的选取人为性较强，原则上是弹簧刚度系数尽量取小值，与圆环支撑水平刚度相比可忽略不计。

3.3 平均法向位移的计算

图2为位移分解示意图。由于 δ_i 为与围檩垂直方向的位移，所以需要整体坐标系下求得的 D_X 、 D_Y 进行分解，进而得到需要的 δ_i ，设围檩与 X 轴的夹角为 θ_i ，则：

$$\delta_i = |\sin \theta_i \cdot D_{Xi} + \cos \theta_i \cdot D_{Yi}| \quad (18)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \quad (19)$$

平均法向位移 δ 的计算可根据式(18)、(19)

进行求解。

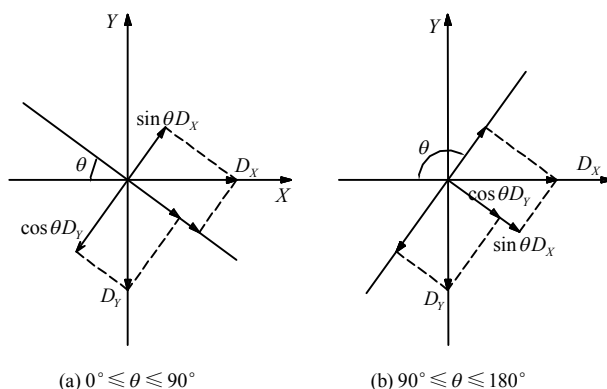


图2 位移分解示意图

Fig.2 Schematic diagrams of displacement decomposition

4 算例分析

4.1 三维有限元模型的建立

依托某圆环支撑体系深基坑工程，使用 Midas GTS 软件建立圆环支撑体系的三维有限元数值分析模型，各支撑梁及围檩的尺寸按照设计图纸选取，见表1，混凝土强度等级为 C40，弹性模量为 32.5 GPa，其中 $p = 30 \text{ kN/m}$ ，本次分析忽略立柱所提供的水平刚度，仅考虑其对内支撑体系的竖向约束。建立的三维有限元模型如图3所示。

表1 杆件截面尺寸信息

Table 1 Bar section size

杆件	截面尺寸(宽×高)/mm	
	第1道支撑	第2、3道支撑
环梁	1 200×800	1 500×900
发射梁	900×800	1 000×800
连系梁	600×650	600×650

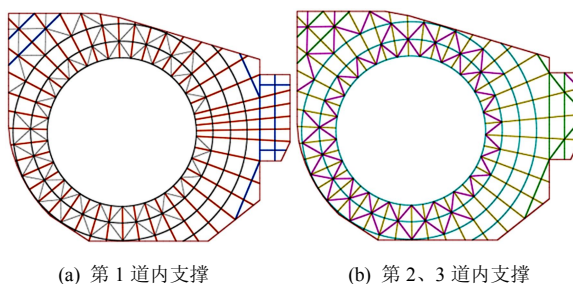


图3 圆环内支撑三维有限元模型

Fig.3 3D FE models of ring support

经过设置多组弹簧刚度系数的试算和对比，见表2，边界所设置的弹簧单元水平刚度系数取为 $1 \times 10^{-7} \text{ kN/m}$ ，该刚度足够小，并且能够保证模型整体不发生刚体位移，同时也不会影响支撑体系的变形和受力，计算得到的结果可靠。图4所示为弹簧

刚度系数取 $1 \times 10^{-7} \text{ kN/m}$ 时的内支撑位移云图。

表 2 第 2、3 道支撑最大水平位移统计表
Table 2 Statistical table of maximum horizontal displacement of the second and third supports

弹簧刚度系数 /(kN/m)	水平位移/mm	
	D_X	D_Y
1×10^{-5}	-0.75	-1.09
1×10^{-7}	-0.75	-1.09
1×10^{-8}	-0.76	-1.16
1×10^{-9}	-0.95	-1.95
1×10^{-10}	-5.6×10^{27}	-4.7×10^{27}

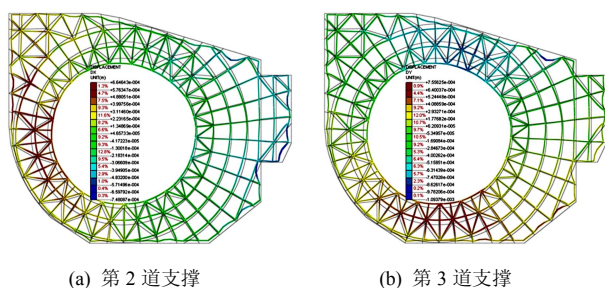


图 4 第 2、3 道支撑水平位移云图 D_X 、 D_Y

Fig.4 D_X and D_Y nephograms of horizontal displacement of the second and third supports

4.2 水平刚度数值解

第 1 道支撑水平位移如图 5 所示, 根据式(17)~(19) 计算得到的 K_{B1} 为 58.3 MN/m^2 , 同理据图 4 可得, K_{B2} 与 K_{B3} 为 76.1 MN/m^2 。

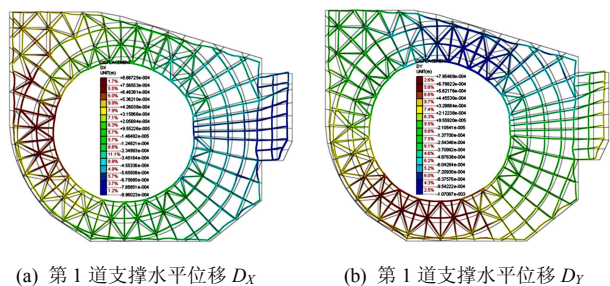


图 5 第 1 道支撑水平位移 D_X 、 D_Y

Fig.5 D_X and D_Y nephograms of horizontal displacement of the first supports

4.3 解析解与数值解的对比分析

对于该圆环内支撑体系, 可使用式(9) 简化计算。根据设计文件 d_1 为 72 m , d_2 为 88 m , d_3 为 105 m , 经过计算 K_{B1} 为 60.3 MN/m^2 , K_{B2} 与 K_{B3} 为 84.8 MN/m^2 。表 3 为支撑水平刚度对比表。

从表 3 中数值可以看出, 公式解析解与有限元数值解基本相同, 使用修正的公式解析解与实际水平刚度值更接近, 两者之间误差更小, 进一步验证了简化计算解析公式的合理性。

表 3 支撑水平刚度对比表

Table 3 Comparison of horizontal stiffness from analytical and numerical results

参数名称	公式解析解(修正)	数值解/(MN/m ²)	相对误差/%
K_{B1}	60.3(57.1)	58.3	3.4(2.1)
K_{B2} 和 K_{B3}	84.8(79.1)	76.1	11.4(3.9)

注: 括号内为修正的公式解析解, 以数值解为实际水平刚度值。

4.4 解析解和数值解条件下的地连墙位移与实测位移值对比分析

根据 3.3 节的水平刚度计算解析解及数值解结果, 运用天汉系列软件采用弹性抗力法计算地连墙水平位移, 并与现场实测位移值进行对比分析, 如图 6 所示。据对比曲线图可知, 解析解和数值解条件下的计算水平位移曲线与现场实测水平位移曲线接近程度较高, 且各测点实测位移曲线最大值所对应的地下连续墙深度与计算位移曲线最大值所对应的地下连续墙深度基本一致, 进一步验证了简化计算解析公式的合理性。

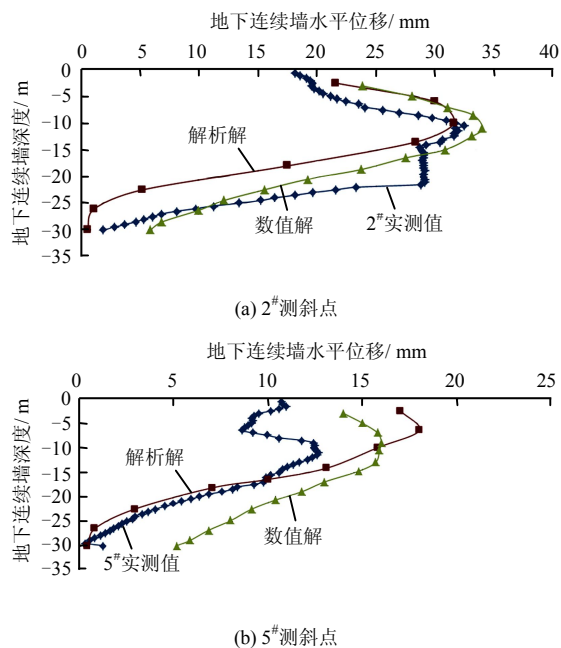


图 6 某深基坑测斜点解析解与数值解条件下的地连墙计算位移值与实测值对比曲线
Fig.6 Comparison of measured displacement value by inclinometer in diaphragm wall value and its predicted values by analytic solution and numerical solution at a deep foundation pit

5 圆环支撑水平刚度影响因素分析

5.1 杆件划分

从式(10)、(11)可以看出, 圆环支撑水平刚度受第一道环梁(最内部环梁)截面尺寸、材料弹性模量和环梁直径以及受力分配系数决定, 其中

受力分配系数与环梁道数以及其他各道环梁截面尺寸、材料弹性模量和环梁直径息息相关，且一般情况下与发射梁及连系梁关系不大。但需要指出的是，圆环支撑体系为整体受力体系，整体刚度与发射梁及连系杆基本没有关系，并不代表其截面尺寸可任意设定，发射梁及连系杆同时需满足自身受力上的要求。

根据以上分析，可以将圆环支撑体系各杆件划分为两大类：一类为受力杆件，其中仅包括封闭环梁；另一类为传力杆件，其中包括发射梁和连系杆。受力杆件的特点是自身形成了围闭结构，有受力支点；而传力杆件仅能起到传力的作用，自身没有受力支点。

5.2 各封闭环梁 E 相同、 A 不同

本次计算共分析了第2、3道封闭环梁的截面面积为0.5、1、2倍的第1道封闭环梁截面面积3种计算模式，表4为水平刚度对比表之1。

表4 水平刚度对比表之1
Table 4 The first comparison table of horizontal stiffness

计算模式	第1道支撑水平刚度 / MPa		第2、3道支撑水平 刚度/ MPa	
	解析解	数值解	解析解	数值解
$A_2 = A_3 = 0.5A_1$	42.2	42.2	59.3	53.9
$A_2 = A_3 = A_1$	60.3	58.3	84.8	76.1
$A_2 = A_3 = 2A_1$	96.5	98.0	135.7	135.1

从表4中可以看出，式(10)和(11)不仅适用于 $A_2 = A_3 = A_1$ 的特殊情况，对于材料相同、面积不相同的情况也适用。

5.3 各封闭环梁 E 不同、 A 相同

本次计算共分析了第2、3道封闭环梁的弹性模量为0.5、1、2倍的第1道封闭环梁弹性模量3种计算模式，表5为水平刚度对比表之2。

表5 水平刚度对比表之2
Table 5 The second comparison tables of horizontal stiffness

计算模式	第1道支撑水平刚度 / MPa		第2、3道支撑水平 刚度/ MPa	
	解析解	数值解	解析解	数值解
$E_2 = E_3 = 0.5E_1$	42.2	44.4	59.3	57.4
$E_2 = E_3 = E_1$	60.3	58.3	84.8	76.1
$E_2 = E_3 = 2E_1$	96.5	85.6	135.7	111.5

从表5可知，对于封闭环梁面积相同，材料等级不同的情况也基本适用，进一步验证了式(10)、(11)的合理性。

5.4 各封闭环梁 E 相同与 A 相同、发射梁 A 不同

为分析发射梁截面对圆环支撑体系水平刚度的

影响，共计算了发射梁截面面积为原始设计截面面积0.5、1、2倍3种情况，表6为水平刚度对比表之3。

表6 水平刚度对比表之3
Table 6 The third comparison tables of horizontal stiffness

计算模式	第1道支撑水平刚度 / MPa		第2、3道支撑水平 刚度/ MPa	
	解析解	数值解	解析解	数值解
$A_{\text{发}} = 0.5A_0$	60.3	51.6	84.8	68.1
$A_{\text{发}} = A_0$	60.3	58.3	84.8	76.1
$A_{\text{发}} = 2A_0$	60.3	63.6	84.8	83.4

注： A_0 为发射梁原始设计截面面积。

从表6可以看出，发射梁截面面积的变化对圆环支撑体系水平刚度影响较小，这与式(10)、(11)简化计算解析式并没有将发射梁的影响列入其中的处理方法是一致的，说明本文所推导的圆环支撑水平刚度计算解析式是合理的。

5.5 封闭环梁道数不同

该圆环支撑体系含3道封闭环梁，对于含有1道或者2道封闭环梁的圆环支撑水平刚度计算，解析法是否适用需要进行计算分析和验证，因此，分析了仅有 A_1 道封闭环梁、 A_1 和 A_2 两道封闭环梁以及 A_1 、 A_2 和 A_3 道封闭环梁共3种情况下的内支撑水平刚度。表7为水平刚度对比表之4。

表7 水平刚度对比表之4
Table 7 The fourth comparison tables of horizontal stiffness

计算模式	第1道支撑水平刚度 / MPa		第2、3道支撑水平 刚度/ MPa	
	解析解	数值解	解析解	数值解
$A_1、A_2、A_3$	60.3	58.3	84.8	76.1
$A_1、A_2$	43.8	41.7	61.6	52.0
A_1	24.1	26.8	33.9	34.6

从表7可以看出，封闭环梁道数对圆环支撑水平刚度的影响较大，并且式(10)、(11)适用于1道以及2道或2道以上封闭环梁的圆环支撑体系水平刚度的计算。

5.6 解析式在圆环支撑体系中的应用价值

从以上分析可知，本文所推导的圆环支撑水平刚度解析式基本能反映圆环支撑真实水平刚度，具有较广泛的适用性。式(10)、(11)可为圆环支撑体系基坑设计提供指导依据，实际工程应用中可简便快速确定封闭环梁道数，并设计环梁截面和计算水平刚度，当内支撑水平刚度不满足变形控制要求时，调整起来也较为方便，大幅提高工作效率，不再依赖工程经验估算。因此，本文圆环支撑体系

水平刚度计算解析式的提出具有较大的应用价值。

6 结 论

(1) 本文提出的圆环支撑体系水平刚度计算解析式及其修正式具有较广泛的适用性, 依据本文提出的解析式进行计算, 结果精确且简单易行, 可为基坑圆环支撑体系水平刚度系数的取值提供依据。

(2) 圆环支撑体系水平刚度主要由受力杆件封闭环梁决定, 其中包括封闭环梁的道数、截面尺寸、直径及弹性模量, 与发射梁等传力杆件关系不大。

(3) 本文提出的解析式可用于指导圆环支撑支护结构体系的设计, 根据刚度需要动态调整封闭环梁截面尺寸、直径等, 大幅提高了工作效率, 不再依赖经验估算, 具有较大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 湖北省建设厅. DB42/159-2012 基坑工程技术规程[S]. 武汉: 湖北省建设工程标准定额管理总站, 2012.
Department of Housing and Urban Rural Development of Hubei Province. DB42/159-2012 Technical specification for engineering of foundation excavation[S]. Wuhan: Management Station of Construction Project Standard Fixed in Hubei Province, 2012.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ120-2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [3] 刘汉凯. 基坑内支撑刚度计算方法辨析[J]. 佳木斯大学学报, 2013, 31(1): 73-76.
LIU Han-kai. Calculating methods for the stiffness of the interior bracing of foundation excavation[J]. **Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)**, 2013, 31(1): 73-76.
- [4] 葛帆, 王志人. 基坑支护非对称荷载下支撑结构的刚度计算[J]. 城市勘测, 2012, (4): 73-76.
GE Fan, WANG Zhi-ren. The stiffness calculation of bracing structure under the asymmetric load in deep excavation[J]. **Urban Geotechnical Investigation & Surveying**, 2012, (4): 73-76.
- [5] 杨敏, 熊巨华. 建筑基坑支撑结构体系水平刚度系数的计算[J]. 岩土工程技术, 1999, (1): 13-16.
YANG Min, XIONG Ju-hua. Calculation of horizontal stiffness coefficient support system structure in building foundation pit[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 1999, (1): 13-16.
- [6] 陈林靖, 戴自航. 深基坑内撑式支护结构计算的综合刚度和双参数法[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 891-895.
CHEN Lin-jing, DAI Zi-hang. Composite stiffness and biparameter method for analyzing retaining structures of deep foundation pits with internal braces[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 891-895.
- [7] 陈林靖, 戴自航. 基坑悬臂支护桩双参数弹性地基杆系有限元法[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 416-419.
CHEN Lin-jing, DAI Zi-hang. Link finite element method of biparameter elastic foundation for analyzing cantilever-retaining piles for foundation pits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 416-419.
- [8] 戴自航, 苏美选, 胡昌斌. 抛物线分布荷载推力桩双参数法的 2 种数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1463-1469.
DAI Zi-hang, SU Mei-xuan, HU Chang-bin. Two numerical solutions of piles subjected to laterally parabolic distributed loads with bi parameter method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1463-1469.
- [9] 戴自航, 沈蒲生. 推力桩计算的综合刚度双参数法半数值解[J]. 福州大学学报, 2004, 32(6): 741-746.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng. Semi-numerical solution of laterally loaded piles by the bi-parameters method with composite stiffness[J]. **Journal of Fuzhou University**, 2004, 32(6): 741-746.
- [10] 刘小丽, 陈芳, 贾勇刚. 深基坑内支撑等效刚度数值计算影响因素分析[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(2): 275-280.
LIU Xiao-Li, CHEN Fang, JIA Yong-Gang. Analysis on influencing factors for computing the equivalent stiffness of the interior bracing of deep excavation by numerical method[J]. **Periodical of Ocean University of China**, 2009, 39(2): 275-280.
- [11] 陈焘, 张茜珍, 周顺华, 等. 异形基坑支撑体系刚度及受力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 1): 36-39.
CHEN Tao, ZHANG Xi-zhen, ZHOU Shun-hua, et al. Stiffness and stress analysis of irregular foundation pit support system[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(Supp.1): 36-39.
- [12] 李昀, 顾开云, 林靖. 浅谈不对称圆形内衬支撑基坑设计[J]. 岩土工程学报, 2013, (增刊 2): 888-891.
LI Jun, GU Kai-yun, LIN Jing. Design method for bracing of asymmetric cylindrical foundation pits[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, (Supp.2): 888-891.
- [13] 袁海庆, 张光文. 排桩-内支撑深基坑支护体系的等效转换与简化计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 725-729.
YUAN Hai-qing, ZHANG Guang-wen. Equivalent transformation and simplified calculation method for row piles with internal bracing system[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 725-729.