

圆形地下连续墙结构设计中 α 系数取值探讨

陈富强^{1, 2}, 杨光华^{1, 2, 3}, 张玉成^{1, 2}, 姚丽娜³

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610;
3. 华南理工大学土木工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 对圆形地下连续墙结构设计的竖向弹性地基梁法中的墙体的等效分布弹性支撑系数 α 的影响因素和取值进行了探讨。从地下连续墙接头数量和槽段夹泥、柔性接头、半刚性接头以及刚性接头三种接头类型以及偏压作用范围方面研究了对系数 α 的影响。研究表明: 接头数量和槽段夹泥对 α 系数的影响较小, 而接头刚度和偏压范围对 α 系数的影响较大。规程中 $\alpha=0.5\sim0.7$ 对半刚性接头的地下连续墙还是比较合适的, 但是对于刚性接头则有一定的富余, 而对于柔性接头则取值偏大。建议系数 α 的取值应该综合分析接头的受力状态, 并通过适当的计算分析后进行取值。

关键词: 基坑工程; 圆形地下连续墙; 环向效应; 系数 α

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0203-04

作者简介: 陈富强(1983-), 男, 江西赣州人, 硕士, 工程师, 主要从事基坑工程、地基处理及边坡工程等方面的研究与设计工作。E-mail: jxchenfuqiang@163.com。

Discussion on value of coefficient α in structural design of circular diaphragm wall

CHEN Fu-qiang^{1,2}, YANG Guang-hua^{1,2,3}, ZHANG Yu-cheng^{1,2}, YAO Li-na³

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Guangdong Research Center of Geotechnical Engineering, Guangzhou 510610, China; 3. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Influence factors and proper value of the equivalently distributed stiffness coefficient α of diaphragm wall in the method of vertical beam on elastic foundation in the structural design of circular diaphragm wall are discussed. The influences of joint numbers of circular diaphragm wall, pit mud in groove segment, three joint types (namely, flexible joint, semi-rigid joint and rigid joint) and load bias range on α are studied. The results show that joint numbers of the circular diaphragm wall and pit mud in the groove segment have little influence on α , but the joint stiffness and load bias range affect it strongly. In addition, the specified value of α ranging from 0.5 to 0.7 in the regulation seems to be appropriate for the diaphragm wall with semi-rigid joint, but a little surplus for the rigid joint and a little lower for the flexible joint. The proper value of α should be taken through a comprehensive analysis of the stress state of the joint and appropriate calculation analysis.

Key words: excavation engineering; circular diaphragm wall; hoop effect; coefficient α

0 引言

由地下连续墙筑成的圆形围护结构, 在外部水土压力荷载作用下, 由于圆的拱效应影响, 可以产生环向压应力, 具有较好的自身稳定性、较强的整体刚度和较小的径向变形特点, 是一种较为经济合理的地下空间结构型式。由于这些优点, 近年来, 采用圆形地下连续墙的深基坑支护方案不断增多^[1-2], 而且圆形支护结构的直径也越来越大, 开挖深度越来越深, 地下连续墙的厚度却是越来越薄, 入土系数越来越小。

传统概念认为圆形围护直径超出 80 m 就失去了圆的作用, 目前对于 100 m 直径的圆形深基坑也被证

实存在圆的拱效应^[3]。

在工程设计中, 早期圆形地下连续墙的设计方法采用了与常规形状的地下连续墙设计方法一样, 即采用了忽略圆形拱效应的平面竖向弹性地基梁法, 到现在采用了考虑圆形拱效应的平面竖向弹性地基梁法, 而且该方法已经纳入了《港口工程地下连续墙结构设计与施工规程》(JTJ303—2003)^[4](以下简称规程)中, 但是该方法尚未编入国家和地方的基坑工程设计规范中。

规程中提到圆形支护地下连续墙结构宜按空间结构计算, 也可按轴对称结构取单位宽度的墙体作为竖向弹性地基梁计算。从工程实用的角度看, 平面竖向弹性地基梁法已经成为目前工程界普遍采用的方法, 且相关的设计软件提供了相应的分析模块, 应用较为方便^[5]。

采用竖向弹性地基梁法, 在计算墙体的等效分布弹性支撑系数时涉及到 α 系数, 规程中建议 $\alpha=0.5\sim 0.7$, 当墙体中心线半径或槽段数较多时取小值。也有学者^[3, 6-7]认为 α 是考虑施工时可能的槽段夹泥等影响的折减系数, $\alpha=0.6\sim 0.75$ 。从本质上讲, α 系数是反映连续墙的接头刚度对圆形拱效应的影响。

由于过去的常规形状的地下连续墙设计中, α 系数对整个结构的受力影响很小, 故对接头的刚度影响的研究很少。由于圆形地下连续墙受力状态以环向受压为主, 受弯为辅, 与常规形状的地下连续墙以受力差异很大, 而且施工接头为受力的薄弱环节, 施工接头的处理尤为最重要, 虽有学者^[8]对连续墙接头效应对连续墙的受力进行了研究, 但是对矩形连续墙的受力进行了分析, 目前对连续墙接头效应对圆形连续墙的受力研究很少。所以有必要研究圆形地下连续墙的接头刚度的影响。本文主要分析了接头的数量、槽段夹泥和三种接头效应(即不抗弯不抗剪柔性接头、抗剪不抗弯半刚性接头以及抗剪又抗弯刚性接头)的影响。

1 规程中环向效应的计算方法

根据《港口工程地下连续墙结构设计与施工规程》(JTJ 303—2003)中圆形支护地下连续墙结构设计的有关规定。圆形支护地下连续墙结构宜按空间结构计算, 也可按轴对称结构取单位宽度的墙体作为竖向弹性地基梁计算。墙体和环梁的环向效应, 可按轴对称结构简化为等效弹性支撑。

当圆形支护地下连续墙结构利用环梁作支撑时, 可将环梁的作用以等效支撑弹簧来替代, 如图 1 所示。单位宽度墙体上环梁的等效弹性支撑系数可按式(1)计算:

$$K_h = \frac{E_h A_h}{R_{h0}^2} \quad (1)$$

式中 K_h 为环梁的等效弹性支撑系数($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$); E_h 为环梁材料的弹性模量($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$); A_h 为环梁截面面积(m^2); R_{h0} 为环梁中心线初始半径(m);

圆形支护墙体的环向效应可采用分布的支撑弹簧来替代, 如图 2 所示。单位宽度地下连续墙墙体的等效分布弹性支撑系数可按式(2)计算:

$$K_d = \frac{E_d b}{R_0^2} \quad (2)$$

式中 K_d 为墙体的等效分布弹性支撑系数($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$); E_d 为地下连续墙环向综合压缩模量($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$), $E_d = \alpha E$, E 为地下连续墙混凝土弹性模量($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$), $\alpha=0.5\sim 0.7$, 当 R_0 较大, 或槽段数较多时取小值; b 为地下连续墙的墙体厚度(m); R_0 为墙体中心线半径(m);

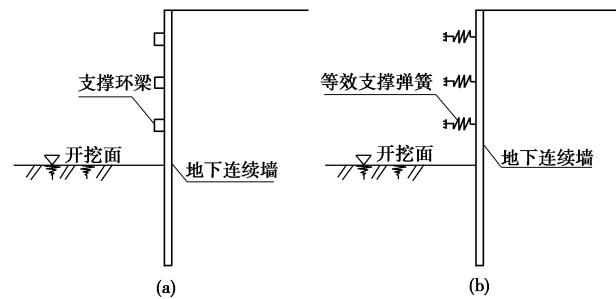


图 1 环梁等效支撑弹簧示意图

Fig. 1 Spring schematic diagram of ring beam equivalent bracing

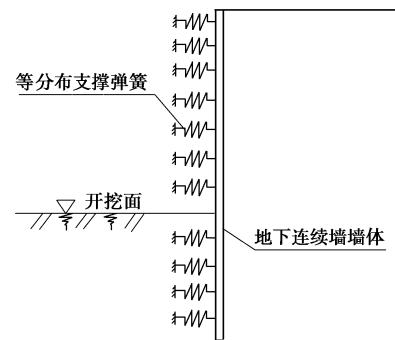


图 2 墙体环向效应的等效支撑弹簧示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diaphragm wall hoop effect equivalent bracing spring

2 接头数量和槽段夹泥的影响

假定圆形地下连续墙中的接头数量为 N 个, 根据日本经验^[9], 槽段之间残留泥浆约 3 mm 厚。圆形地下连续墙在土水侧压力作用下受压, 随开挖深度增加, 槽段在环向荷载作用下, 槽段逐渐压缩, 假设泥浆受压后由 3 mm 减小到 1 mm。假设由于泥浆压缩后的半径为 R , 则有

$$2\pi R = 2\pi R_0 - 0.002N \quad , \quad (3)$$

$$R = R_0 - \frac{0.001N}{\pi} \quad , \quad (4)$$

由于一般地下连续墙槽段宽度为 $L=6\sim 8 \text{ m}$, 则

$$N = \text{INT}\left(\frac{2\pi R_0}{L}\right) \quad . \quad (5)$$

假定接头为刚性接头, 即理论半径为 R , 由于槽段夹泥实际为 R_0 , 则可由式(2)可得

$$\alpha = \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \quad (6)$$

所以有当地下连续墙槽段宽度 $L=6$ m 时, $\alpha=0.993$; 当 $L=8$ m 时, $\alpha=0.995$ 。

从分析可知, 接头数量和槽段夹泥对圆形地下连续墙的拱效应的影响很小。

3 3 种接头效应的影响

根据受力特性地下连续墙施工接头可分为不抗弯不抗剪柔性接头、抗剪不抗弯半刚性接头以及抗剪又抗弯刚性接头 3 种。工程中常用的柔性接头主要有圆形(或半圆形)锁口接头、波形管(双波管、三波管)接头、工字形型钢接头、楔形接头、钢筋混凝土预制接头和橡胶止水带接头。半刚性接头有一字或十字穿孔钢板接头和十字型钢插入式接头, 刚性接头有钢筋搭接接头。

规程中计算墙体本身空间环向效应的等效弹性支撑系数时, 在计算深度处, 从圆形墙体中横向截取出单位高度的环形墙体, 该环形墙体就相当于一个支撑环梁。圆环的受力和变形如图 3 所示, 圆环在轴压力作用下会沿圆周方向产生压缩变形, 使环梁中心线的周长变短, 半径减小。墙体空间环向效应的等效弹性支撑系数为环梁的径向压力与环梁中心线半径的变化量的比值。

显然, 对于抗剪又抗弯刚性接头对圆形地下连续墙的拱效应, 由规程中附录 C 的环梁的等效弹性支撑系数计算知道, $\alpha=1$ 。

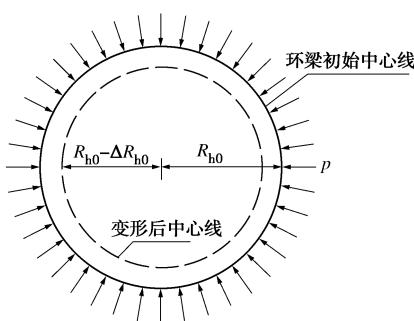


图 3 环梁的受力与变形

Fig. 3 Force and deformation of ring beam

对于抗剪不抗弯半刚性接头对圆形地下连续墙的拱效应, 半刚性接头受力特性即为铰节点, 所以分析时可以把圆形地下连续墙看作是多铰圆环梁的受力进行分析。由于多铰圆环梁是非静定结构, 为了分析多铰圆环在单位径向荷载下的受力, 需要采取一定的假定。

本次分析采用了有限元软件 MIDAS/GTS, 先建立了梁单元组成的圆环结构, 分析中不考虑梁的重力。

借助软件中的释放梁端约束, 可以模拟多铰圆环, 但是为了使计算结果稳定, 并不全部释放连续墙接头处的弯矩, 而是采用近似措施, 释放 99.8% 的弯矩, 即接头处只有 0.02% 的弯矩, 以达到模拟多铰圆环的目的。多铰圆环中铰的位置是按地下连续墙圆周长除以分幅长度 6 m 取整数后确定的。例如取 $R_0=5$ m 的 1 m 厚 1 m 高圆形地下连续墙进行分析, 地下连续墙槽段宽度按 $L=6$ m, 接头数量 $N=5$ 个, 分析在单位径向荷载 $P=1$ 作用下的受力。

分析了圆环直径为 $D=10, 20, 40, 60, 80, 100$ m 在单位径向荷载作用下的受力情况, 通过与规程中的拱效应的刚度进行比较, 发现不同圆环直径的多铰圆环的拱效应刚度与规程中计算的值差异很小, 系数 $\alpha \approx 0.99$ 。

对于不抗弯不抗剪柔性接头对圆形地下连续墙的拱效应, 柔性接头受力特性类似滚动支座, 只能提供法向的约束力。同样, 采用有限元分析, 只需要在多铰圆环模型中, 把接头处的剪力进行释放即可。同样, 为了使计算结果稳定, 并不全部释放连续墙接头处的剪力, 而是采用近似措施, 释放 99.8% 的剪力, 即接头处只有 0.02% 的剪力, 以达到模拟柔性接头的目的。计算发现不同圆环直径下柔性接头的拱效应刚度与规程中计算的值差异也很小, 系数 $\alpha \approx 0.99$ 。

对于半刚性接头和柔性接头的分析结果, 可以从结构力学中三铰拱在承受均匀水压力作用下, 其合理轴线是圆弧, 各截面处的弯矩和剪力都为零, 推理得到。

实际基坑开挖过程中, 地下连续墙常处于受偏压的状态下, 为了表明偏压作用的范围, 先将圆环分成四个象限, 同数学中的象限一样。分析了 $D=10$ m 的三种接头刚度在不同偏压作用下的受力情况, 所得不同的系数 α , 见表 1。

表 1 偏压作用下系数 α 值

Table 1 Value of coefficient α under load bias range

圆环直径	接头	一、二	一象限	一、三
		象限		象限
$D=10$ m	刚性	0.762	0.855	0.803
	半刚性	0.741	0.797	0.582
	柔性	0.369	0.505	0.420

可见, 系数 α 与接头的刚度及偏压范围有很大关系, 规程中 $\alpha=0.5 \sim 0.7$ 对半刚性接头的地下连续墙还是比较合适的, 但是对于刚性接头则有一定的富余, 而对于柔性接头的则取值偏大。

4 结 论

通过前面的分析, 获得如下 2 点结论。

(1) 规程 α 系数只考虑了地下连续墙圆的大小和槽段数量的影响, 没有考虑到槽段夹泥的影响和接头刚度的影响, 故 α 系数没有全面反映出地下连续墙拱效应。

(2) 研究表明, 接头数量和槽段夹泥对 α 系数的影响较小, 而接头刚度和偏压范围对 α 系数的影响较大。规程中 $\alpha = 0.5 \sim 0.7$ 对半刚性接头的地下连续墙还是比较合适的, 但是对于刚性接头则有一定的富余, 而对于柔性接头则取值偏大。由于 α 系数的影响因素较多, 对刚性接头和柔性接头的 α 系数的合理取值范围还有待进一步研究。针对具体工程时, 建议 α 系数的取值应该综合分析接头的受力状态, 并通过适当的计算分析后, 进行取值。

参考文献:

- [1] 顾倩燕, 朱宪辉. 超大直径圆形薄壁地下连续墙围护结构研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 534 - 537. (GU Qian-yan, ZHU Xian-hui, et al. Research on Self-Sustaining Retaining Structure with Circular Thin Shell Diaphragm Wall of Super Large Diameter [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 534 - 537. (in Chinese))
- [2] 王林, 谢亮, 等. 软土地区深基坑圆筒支护结构三维数值分析模拟[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 88 - 109. (WANG Lin, XIE Liang, et al. Three-dimensional numerical analysis and simulation of circular deep excavation in soft ground region [J]. Building Structure, 2011, 41(3): 88 - 109. (in Chinese))
- [3] 黄海云, 朱宪辉. 圆形支护体系的实测数据分析与研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1823 - 1825. (HUANG Hai-yun, ZHU Xian-hui. Researches on monitoring data of circle shape supports [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1823 - 1825. (in Chinese))
- [4] JTG 303—2003 港口工程地下连续墙结构设计与施工规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (JTG 303—2003 Design and construction technical code for diaphragm wall structure of port engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [6] 陈炯, 曾宪俊. 软土地基深基坑圆筒支护结构的受力分析方法[J]. 特种结构, 2005, 22(2): 6 - 9. (CHEN Jong, ZENG Xian-jun. The Analytical method of the supporting structure cylindric form for deep excavation in soft ground [J]. Special Structures, 2005, 22(2): 6 - 9. (in Chinese))
- [7] 丛蒿森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (CONG Ai-sen. Design construction and application of diaphragm wall [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2000. (in Chinese))
- [8] 诸以惇, 陈卫忠, 田洪铭. 等. 考虑连续墙接头效应的软土大型盾构工作井稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2937 - 2950. (CHU Yi-dun, CHEN Wei-zhong, TIAN Hong-ming, et al. Stability analysis of large shield working well considering effect of diaphragm wall joint [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2937 - 2950. (in Chinese))
- [9] 董新平, 郭庆海. 圆型基坑的变形特点及主要影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 196 - 199. (DONG Xin-ping, GUO Qing-hai, et al. Character and factor analysis of deformation of diaphragm wall in the cylindrical foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 196 - 199. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)