

文章编号: 1000-7598-(2003)02-0169-04

圆形支护结构的拱效应等效支撑计算方法

周 健, 罗筱波

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 从弹性力学中圆筒受均布荷载的解出发, 把圆形支护结构作为弹性地基梁, 把圆形支护结构的拱效应作为支护结构的等效支撑作用在弹性地基梁上, 从而得出一个计算圆形支护结构内力和位移的拱效应等效支撑方法。工程实例的计算表明, 该方法是实用而有效的。

关 键 词: 圆形; 支护结构; 拱效应等效支撑; 内力和位移

中图分类号: TU 472 **文献标识码:** A

Structural computation of circular retaining structure using method of equivalent retaining of arch effect

ZHOU Jian, LUO Xiao-bo

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method of equivalent retaining of arch effect for computing inner force and displacement of circular retaining structure is presented. An equivalent retaining structure of arch effect is got based on the solution of cylinder under uniform distributed loading in *Mechanics of Elasticity* and then this equivalent retaining structure is applied to an elastic foundation-beams to compute inner forces and displacements of the circular retaining structure. Engineering examples illustrate the feasibility and validity of this method.

Key words: circle; retaining structure; equivalent retaining of arch effect; inner force and displacement

1 前 言

在基坑工程中, 当建筑物的平面形状较方正时, 在平面上可以将支护结构布置成圆形或近似圆形, 由于圆形支护结构的拱效应, 具有比一般的多边形支护结构更好的受力性能。由于土压力是随深度线性增大的分布荷载且无集中力, 利用圆形支护结构来抵挡土压力可以充分利用材料性能。因为圆形支护结构是以受压为主, 且作用在圆拱上的四周土压力大部分可以在自身平衡。这种合理的支护结构可大大降低支护结构的费用, 不少学者已对圆形支护结构进行了研究。但是圆形支护结构的内力和位移的计算要比一般的矩形或多边形基坑支护结构复杂的多, 在实际工程计算中多采用薄壳有限元计算模型。而薄壳有限元计算模型理论的复杂性不利于其在简单工程分析中应用, 因此, 许多学者提出

了不少简单的计算方法。文献[1]提出了计算挡土拱圈内力和位移的非线性共同作用方法, 文献[2]从圆形支护结构的空间结构特性提出了考虑空间特性的计算方法并分析了影响圆形支护结构内力、变形的因素。文献[3]利用粘弹性力学分析的方法对地下圆形隧道支护结构和围岩稳定性进行了分析。文献[4]对 SPR 排桩拱形支护结构的性状进行了分析, 把 SPR 排桩拱形支护结构简化为平面结构, 按双铰拱进行计算。本文从弹性力学中圆筒受均布荷载的解析解出发, 把圆形支护结构的拱效应作为等效支护结构的支撑作用在弹性地基梁上得出了计算圆形支护结构的内力和位移的简化计算方法。

2 拱效应等效支撑计算方法

对于圆筒支护结构的内力和位移的计算方法有很多, 有简单的古典方法, 也有复杂的有限元方

收稿日期: 2002-01-29

基金项目: 上海市重点学科基金资助

作者简介: 周健, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程数值分析和土动力学方面的研究工作。

法,文献[5]详细介绍了各种计算方法。本文采用现行规范推荐的“竖向平面弹性地基梁法”进行支护结构的内力和位移计算,把圆形支护看作弹性地基梁,而把圆形支护的拱效应等效为梁的支撑。由于圆形支护结构的对称性和作用在支护结构上荷载的对称性,这种等效是可行的:把圆形支护看作弹性地基梁保证了支护结构在竖向方向的连续性,而圆形支护结构的对称性和作用在支护结构上荷载的对称性使得等效支撑可以模拟原来圆形支护结构的拱效应。

对于图 1 所示等圆筒结构,由弹性力学可推导出得到位移的解析解如下

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{1-\nu^2}{E} \left[-\left(1+\frac{\nu}{1-\nu}\right) \frac{1}{r} \frac{a^2 b^2 (q_2 - q_1)}{b^2 - a^2} + \right. \\ &\quad \left. \left(1-\frac{\nu}{1-\nu}\right) \frac{q_1 a^2 - q_2 b^2}{b^2 - a^2} r \right] \\ u_\theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 E 为圆形支护的弹性模量; u_r 为圆环的径向位移; u_θ 为圆环的环向位移; ν 为泊松比; r 为半径; a 、 b 为圆环的内外径; q_1 、 q_2 为圆环作用在内外径处的均布荷载。

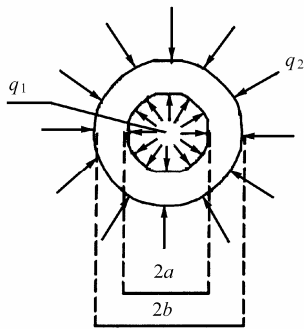


图 1 计算简图
Fig.1 Computaion sketch

在弹性地基梁法计算支护结构内力和位移中支撑是作为杆件处理的,由材料力学可知其位移为

$$u = \frac{PL}{E_1 A} \quad (2)$$

式中 u 为支撑的位移; E_1 为支撑的弹性模量; P 为作用在支撑两端的力; L 为支撑的长度; A 为支撑的横截面积。

令式 (1), (2) 中的 $u_r = u$, $q_1 = 0$, $P = q_2$, $r = \frac{1}{2(a+b)}$, $L = r$ 则可以得到支撑的 E_1 为

$$E_1 = kE \quad (3)$$

式中

$$k = -\frac{a+b}{A \left[4 \frac{1+\nu}{a+b} \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} + (1-2\nu)(1+\nu) \frac{b^2}{b-a} \right]} \quad (4)$$

把得到的等效支撑弹性模量 E_1 作为弹性地基梁的输入参数就可以按常规的计算方法计算圆形支护结构的内力和位移。可以采用如下的计算过程:

(1) 定等效支撑的高度 h , 如 1 m, 把每 h 高度的圆形支护结构等效为 h 高度的支撑。(2) 根据式 (3) 和式 (4) 计算等效支撑弹性模量 E_1 。(3) 把计算得到的等效支撑按施工工况的步骤逐步安装上去, 如图 1 所示。(4) 用竖向平面弹性地基梁法进行计算。具体计算时由于把连续的圆形支护结构等效为离散的支撑, 所以为了提高计算的精度, 在计算中采用了密集支撑的方法。

3 工程实例计算

某泵站工程的圆形支护结构采用地下墙与内衬整体复合墙体结构, 无支撑, 地下墙顶部设一道 3.725×2.5 m 圈梁, 地下墙分为 69 个多边形, 内切圆直径 60.65 m, 墙厚 0.80 m, 内衬厚 0.727 m, 地下墙深度 37.5 m。基坑开挖深度 26.45 m, 地下墙入土深度 11.05 m。场地地质条件和计算参数见表 1。地下水位标高为 4.4 m。

在计算等效支撑弹性模量时, 取 $\nu = 0.17$, 圆形支护的弹性模量 $E = 32.5$ GPa, 支撑高度 1 m, 宽度 1 m。在进行支护结构的位移和内力计算中取不

表 1 场地地质条件和计算参数

Table 1 Site's geological condition and computation parameters

土层	层底标高 / m	层厚 / m	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	φ / ($^\circ$)	C / kPa	m / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$
杂填土	3.3	1.6	18.7	30	0	15 000
褐黄色 粉质粘土	2.32	0.98	19.2	31	30	19 120
灰黄色 粉质粘土	1.3	1.02	18.5	30.5	22	17 755
灰色砂 质粉土	-2.05	3.35	18.3	36.5	12	24 195
灰色淤泥质 粉质粘土	-4.45	2.4	17.9	35	12	22 200
灰色淤泥 质粘土	-12.62	8.17	17.2	24.5	15	11 055
灰色粉砂夹 粘性土	-35.32	22.7	18	37.5	17	26075

利情况即不考虑内衬的影响, 由式 (3) 计算得到

$E_1 = 0.385 \text{ GPa}$ 。在开挖深度以上把圆形支护每 1 m 等效为一道支撑，考虑地面超载 40 kPa。用弹性地基梁法计算时支撑安装过程如表 2，参考逆作法施工开挖过程，计算中采用开挖 4 m，然后加支撑，支撑高度 1 m。因为浇注的底板高度为 2.3 m，所以计算中取最后两道支撑高度为 2 m，因此刚度加倍。为了减少连续的圆形支护结构等效为离散的支撑过程中产生的精度损失，计算中采用了密集加撑的方法。

弹性地基梁法计算所用的计算简图如图 2 所示。计算过程和结果如图 (3)~(8) 所示。

其结果与把支护结构按薄壳有限元计算模型计算和实测值的比较如表 3 所示。

表 2 支撑安装过程和工况
Table 2 Process of retaining's installation

工况编号	工况类型	深度 / m	支撑刚度 / $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$	支撑编号
1	加撑	0	385	1
2	开挖	4		
3	加撑	1.9	385	2
4	加撑	2.9	385	3
5	加撑	3.9	385	4
6	开挖	8		
7	加撑	4.9	385	5
8	加撑	5.9	385	6
9	加撑	6.9	385	7
10	加撑	7.9	385	8
11	开挖	12		
12	加撑	8.9	385	9
13	加撑	9.9	385	10
14	加撑	10.9	385	11
15	加撑	11.9	385	12
16	开挖	16		
17	加撑	12.9	385	14
18	加撑	13.9	385	15
19	加撑	14.9	385	16
20	加撑	15.9	385	17
21	开挖	20		
22	加撑	16.9	385	18
23	加撑	17.9	385	19
24	加撑	18.9	385	20
25	加撑	19.9	385	21
26	开挖	23		
27	加撑	20.9	385	22
28	加撑	21.9	385	23
29	加撑	22.9	385	24

171

30	开挖	26.5		
31	加撑	25	770	25

32	加撑	26.5	770	26
----	----	------	-----	----

表 3 计算结果比较
Table 3 Comparison of results

	水平位移 / mm	最大正弯矩 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	最大负弯矩 / $\text{kN} \cdot \text{m}$
等效支撑计算	12.7	918	544
薄壳有限元计算	13.2	915	612
实测	10.6		

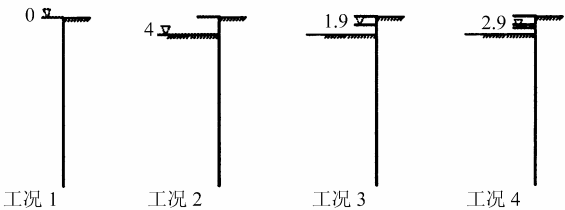


图 2 支撑安装过程
Fig. 2 The process of retaining's installation

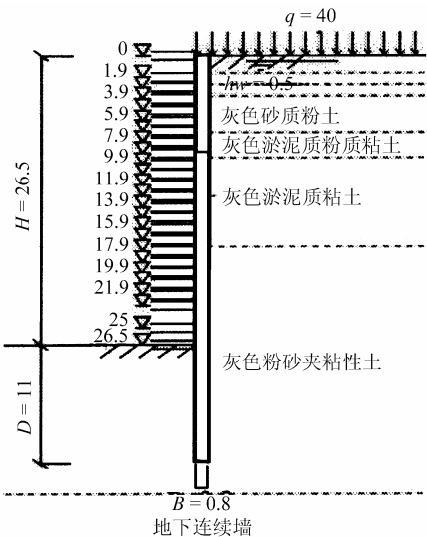


图 3 基坑计算简图
Fig. 3 Computational sketch of foundation pit

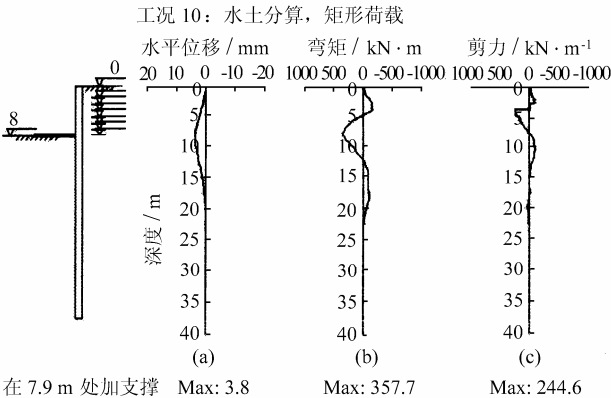


图 4 开挖到 8 m 时计算结果
Fig. 4 Computational result excavated at depth of 8 m

从比较可以看出, 等效支撑刚度计算的结果与薄壳有限元计算模型计算结果在内力的计算上比较吻合, 而对支护结构的水平位移用等效支撑刚度计算的结果比薄壳有限元计算模型计算结果还要更接近实测值。

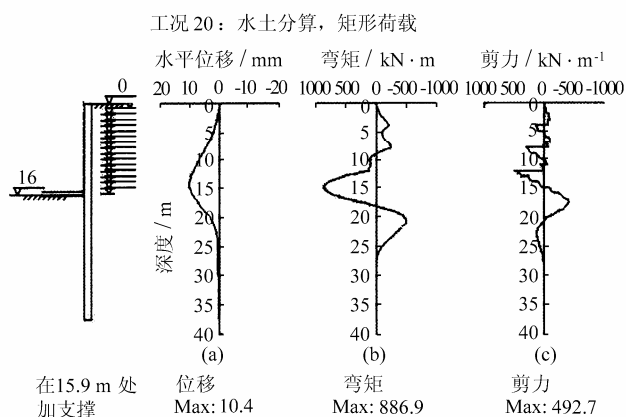


图 5 开挖到 16 m 时计算结果

Fig. 5 Computational result excavated at depth of 16 m

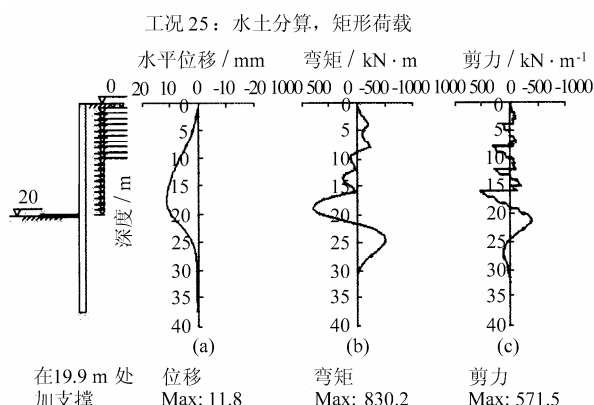


图 6 开挖到 20 m 时计算结果

Fig. 6 Computational result excavated at depth of 20 m

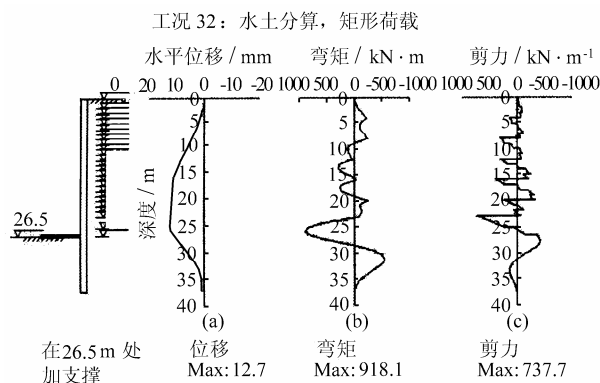


图 7 开挖到 26.5 m 时计算结果

Fig. 7 Computational result excavated at depth of 26.5 m

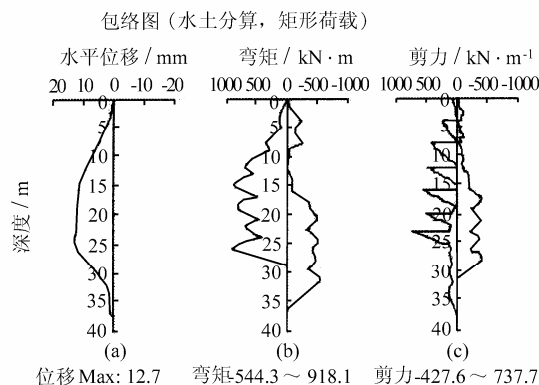


图 8 计算结果

Fig. 8 Computational result

4 结 语

(1) 本文提出的拱效应等效支撑计算方法, 是一种简化计算方法, 计算的圆形支护结构内力和位移与实测结果对比表明, 这种简化计算方法是合理和可行的。

(2) 提出的拱效应等效支撑计算方法与薄壳有限元计算模型相比, 不需要进行复杂的网格剖分和有限元计算, 所以, 具有计算简单, 计算速度快的特点。

(3) 所涉及的圆形支护是无支撑的圆形支护, 但是, 这种等效方法可以同样应用于有支撑的圆形支护结构的计算中。可以用等效支撑与实际支撑相叠加的方法去计算有支撑的圆形支护结构的内力和位移。

参 考 文 献

- [1] 陆瑞明, 赵锡宏. 挡土拱圈的内力和变形计算[J]. 岩土工程学报. 1997, 19 (6): 36—42.
- [2] 潘泓, 曹华先, 吴世明, 等. 深基坑开挖中圆形支护结构性状分析[J]. 工业建筑, 1999, 20 (5): 1—4.
- [3] 朱素平, 周楚良. 地下圆形隧道围岩稳定性的粘弹性力学分析[J]. 同济大学学报, 1994, 22 (3): 329—333.
- [4] 胡长明, 李迪, 谢行皓. SPR 排桩拱形支护结构的性状分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1999 (3): 280—283.
- [5] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.