

带有刚性基础的地下埋管应力分析方法探讨

黄海燕¹, 巫友群², 王德信¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:根据结构力学方法、弹性力学有限元法和边界单元法的分析理论, 建立 5 种带有刚性基础的地下埋管结构计算模型, 并结合工程算例进行了对比分析, 指出各种方法的适用性及其不足之处. 建议在地下埋管结构的初始方案设计时采用结构力学方法, 在具体方案设计时采用有限元法, 边界单元法可作为辅助设计方法.

关键词:地下埋管; 计算模型; 有限元法; 边界单元法

中图分类号: O34

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)06-0020-03

地下埋管在国民经济的许多领域中有广泛的应用, 如水利工程、市政工程、能源工程和地下交通工程等. 由于地下埋管具有工程隐蔽、投资巨大等特点, 许多国家制定了相应的设计规范, 以保证埋管的正常工作. 但埋管开裂的情况仍时有发生^[1], 为了更合理地设计地下管道结构, 有必要对地下埋管的设计方法进行研究和探讨.

地下埋管可分为有基础和无基础两种情况. 本文就有刚性基础的地下埋管的设计方法进行分析与比较. 常用的设计方法有结构力学方法、弹性力学有限元方法和边界单元法等.

1 结构力学方法

在地下埋管中, 壁厚 δ 与管中心线半径 R_0 之比 $\delta/R_0 > 0.125$ 的圆环, 称为厚壁圆环; $\delta/R_0 < 0.125$ 的圆环, 则称为薄壁圆环. 薄壁圆环一般属于小曲率问题; 厚壁圆环一般属于大曲率问题, 在工程设计中, 不能一概套用薄壁圆环公式进行计算, 而需重新推导.

带有刚性基础的地下埋管计算简图如图 1 所示, 底座中心夹角为 $2\alpha_0 = \pi/2$. 下面推导厚壁圆环内力计算公式.

由文献[2]可知, 管底任意一点处的径向反力强度为

$$q_\theta = \frac{4Q \cos \theta}{D(\sin 2\alpha_0 + 2\alpha_0)} \quad (1)$$

式中: α_0 为半中心角; θ 为任意截面至过中心的垂直线的夹角; D 为管道外直径; $Q = qD$.

当 $2\alpha_0 = \pi/2$ 时:

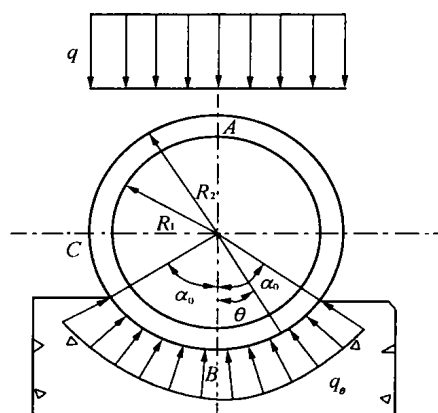


图 1 厚壁圆环计算简图

$$q_\theta = 1.556q \cos \theta \quad (2)$$

式中: q 为承受垂直均布荷载.

根据结构力学基本原理, 取力法基本体系如图 2 所示, 则系数项与自由项的取值分别为

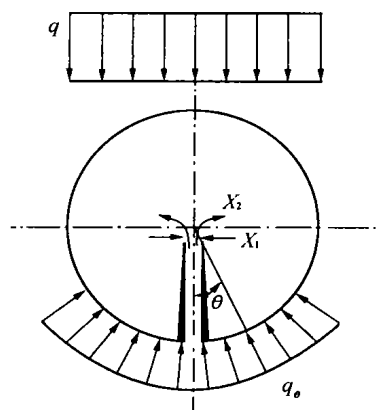


图 2 力法基本体系

$$\begin{cases} \delta_{11} = \pi R_0 \left(\frac{R_0}{ES} - \frac{1}{EA} \right) \\ \delta_{22} = \frac{2\pi}{ES}, \delta_{12} = \delta_{21} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta_{1P} = 1.360 q R_0 R_2 \left(\frac{R_0}{EI} - \frac{1}{EA} \right) \\ \Delta_{2P} = 4.555 \frac{q R_0 R_2}{ES} - 3.77 \frac{q R_2}{EA} \end{cases} \quad (4)$$

解力法典型方程得

$$\begin{cases} X_1 = -0.433 q R_2 \\ X_2 = -0.725 q R_0 R_2 + 0.600 q R_2 e \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_2 为管道外半径; R_0 为管道平均半径; E 为材料的弹性模量; A 为断面面积; e 为中性线偏心距, $e = S/A$; S 为断面对中性线的面积矩。

进而可求出管壁任意截面上的内力值。此处仅给出三个典型截面的内力, 见表 1。根据截面内力可由材料力学方法^[3]求出应力。

表 1 中心夹角为 90° 的埋管典型截面的内力

截 面	弯矩 $M/(N \cdot m)$	轴力 F_N/N
管顶 A	$-0.269 q R_0 R_2 + 0.600 q R_2 e$	$0.044 q R_2$
管底 B	$-0.292 q R_0 R_2 + 0.600 q R_2 e$	$-0.433 q R_2$
管侧 C	$-0.276 q R_0 R_2 + 0.600 q R_2 e$	$-1.001 q R_2$

2 弹性力学有限元法

将敷设于地下的管道, 看作置于弹性介质中的一无限长梁, 沿管纵向垂直截取一单位长度的管段, 作为平面应变问题处理。

2.1 计算模型一

计算时仅考虑垂直土压力和管底径向反力的影响, 管底任意一点处的径向反力强度由式(1)计算; 不考虑埋管、填土和地基的共同作用。

由于结构与荷载的对称性, 计算时取一半即可。计算简图如图 3 所示。混凝土单元采用四边形八结点等参单元, 对称面采用链杆支承, 管道的内、外壁属自由边界。配筋的影响用等效弹性模量替代。

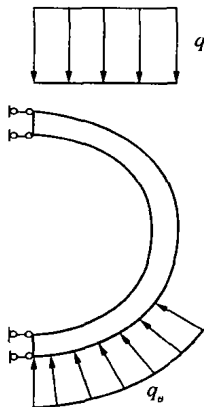


图 3 计算模型一的简图

2.2 计算模型二^[1]

对于埋在土壤中的管道, 管周土体既是作用在管道上的荷载, 同时又是在其中发生变形的一种介质。研究地下埋管的工作机理时, 把管道周围一定范围内的填土体作为结构的一部分加以考虑。国内外管道施工技术规定, 管周回填土的夯实要求达到该回填土质最大夯实密度的 95%, 而在一般填土条件下, 孔周土压力都处于非极限状态。为此, 将管周土体及地基近似理想化为直线变形介质即弹性介质。考虑到实际情况, 当地基整平、管道支座成型后, 地基在回填前已充分回弹, 呈自然平衡状态。因此, 可将管周回填土视为外加荷载一次置放于管道及地基上。

考虑到外边界条件对孔周应力状态的扰动影响, 以及在满足计算精度条件下尽量减少计算工作量, 拟定了在孔洞两侧及地基下部都采用距管孔中心为 $3.5D$ (D 为孔洞外直径) 的计算幅度, 构成一幅宽 $7D$ 、高 $4D + H$ 的计算范围。由于结构与荷载的对称性, 计算时取一半。模型底部铰支固定, 两侧链杆支承, 填土体的自由表面(地面)及管道的内壁都属自由边界。混凝土单元采用四边形八结点等参单元, 钢筋采用一维三结点等参单元。计算简图见图 4。

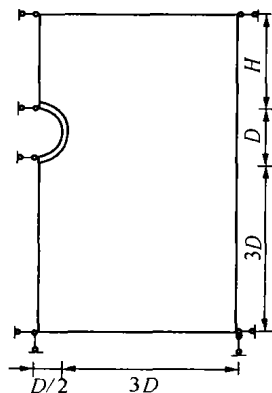


图 4 计算模型二的简图

3 边界单元法^[4]

计算时仅考虑垂直土压力和管底径向反力的影响, 管底任意一点处的径向反力强度由式(1)计算。不考虑埋管、填土和地基的共同作用。由于结构与荷载的对称性, 计算时取一半。计算简图见图 3。对称面采用链杆支承, 管道的内、外壁属自由边界。采用 2 次元对边界进行拟合。配筋的影响用等效弹性模量替代。

4 算 例

图 1 所示地下钢筋混凝土管, 内半径 $R_1 = 1.0\text{m}$, 外半径 $R_2 = 1.25\text{m}$, 平均半径 $R_0 = 1.125\text{m}$, 管道厚度 $\delta = 0.25\text{m}$, $\delta/R = 0.222$ 。其计算参数如下:

a. 回填土。管顶覆土厚度 $H = 3.8\text{m}$, 回填土为

塑性粘土,弹性模量 $E = 10.0 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.35$,内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$,凝聚力 $c = 0.011 \text{ MPa}$,容重 $\gamma_0 = 18.0 \text{ kN/m}^3$,静侧压系数 $\xi_0 = 0.35$.

b. 地基.以硬基作为计算条件,弹性模量 $E = 80.0 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.25$,呈自然平衡状态,故不计容重.基础采用刚性基础,中心包角为 90° .采用 C15 混凝土.

c. 钢筋混凝土管.采用 C25 混凝土,弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.167$,容重 $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$.钢筋采用 II 级,弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,采用双筋布置,内外层环向配筋率均为 $\rho = 1.5\%$,混凝土保护层厚度 $a = 35 \text{ mm}$.

4.1 计算结果

基于上述结构力学、有限元和边界元基本理论,相应计算模型的计算结果见表 2.

表 2 中心夹角为 90°的埋管典型截面的环向应力						MPa
部 位	结构力 学方法	弹性力学有限元法				边界 单元法
		计算 模型一	计算模型二			
			无钢筋作用	有钢筋作用		
管顶 A	外侧	-1.67	-1.71	-1.27	-1.05	-1.62
	内侧	2.17	1.93	1.69	1.41	1.85
管顶 C	外侧	1.69	1.49	1.31	1.08	1.56
	内侧	-2.31	-2.13	-1.91	-1.57	-2.05
管顶 B	外侧	-1.95	-2.05	-1.49	-1.27	-1.87
	内侧	2.11	1.92	1.59	1.34	1.79

4.2 结果分析

有限元分析表明,管顶 A、管底 B 和管侧 C 为管壁的 3 个控制性截面,因此在具体设计时只需验算在各种荷载组合条件下这 3 个控制性截面上的应力能否满足要求即可.

a. 管壁内外侧环向应力分析.管壁内侧环向应力在管顶 A 处出现最大的拉应力,然后沿管周方向逐渐减小,在管侧 C 处出现最大压应力,到管底 B 处又转为较大拉应力.在管壁外侧,环向应力在管顶 A 处出现较大压应力,渐变至管侧 C 处出现最大拉应力,在管底 B 处又转为最大压应力.分析表明:结构力学方法、有限元法与边界单元法计算得出的结论基本上是一致的.

b. 钢筋对应力的影响.由表 2 可以看出,在管道内布置钢筋对于减小管道内外侧的环向应力可以起到十分显著的作用,应力减小幅度可以达到约 20% 左右.这表明钢筋对应力有着重要的影响.

c. 设计方法比较.由表 2 可以看出,5 种计算模型的计算值基本接近.从总的趋势来看,按结构力学方法、边界单元法和有限元法的计算模型一计算出的应力比按有限元法的计算模型二计算出的应力偏大一些,这表明结构力学方法和边界单元法的设计

方案偏于保守.对于有限元法,计算模型的选择与建立对设计方案的采用有重大的影响.

综上所述,采用有限单元法计算分析地下埋管结构与采用结构力学方法或边界单元法存在一定的差异.

5 结 语

a. 结构力学方法应用简单、方便,但此方法只能作为方案初始设计时选用,其不足之处是较难确定垂直土压力(管道垂直土压力系数较难确定),同时未考虑水平土压力、管土相对刚度等因素的影响.

b. 弹性力学有限单元法计算模型一的应力值比计算模型二的应力值偏大.计算模型一存在与结构力学方法相同的不足.由于土体和埋置在其中的结构物是相互耦合系统,计算模型二考虑了埋管、填土和地基的共同作用,计算结果与实际情况较为吻合,此模型可供具体设计时选用.

c. 边界单元法抛弃了繁琐的网格剖分工作,计算原理及过程较为简单,可作为辅助设计方法选用,但存在与结构力学方法相同的不足.

参考文献:

[1] 黄清猷.地下管道计算[M].武汉:湖北科学技术出版社,1987.
[2] Г К 克列恩.地下管计算[M].金吾译.北京:中国工业出版社,1961.
[3] 杜庆华.材料力学[M].北京:高等教育出版社,1958.
[4] 姜弘道.边界单元法基础[M].南京:河海大学出版社,2000.
(收稿日期:2001-12-25 编辑:张志琴)

• 简讯 •

我国又有两座垃圾电站建成投产

利用焚烧垃圾的热能来发电,已成为我国大中城市加强城市环境保护的一项重大措施.继深圳和珠海之后,我国又有两座垃圾电站分别在浙江宁波和上海建成投产.

a. 宁波市修建了一座垃圾电站(枫林电站),是由宁波城建投资公司、宁波电建公司和宁波富达电器股份公司 3 家企业合资修建的,投资 4 亿元,它有 3 座焚烧炉,日处理垃圾 1000t,已于 2001 年 11 月完工,投入运行通过验收.据测算,该电站每年仅发电收益就有 2500 万元左右.

b. 上海市政府在浦东修建了一座垃圾电站,也是 3 座焚烧炉,日处理垃圾 1000t,装有 2 台单机为 0.85 万 kW 的汽轮发电机组,年发电量约 1.1 亿 kW·h,已于 2002 年 5 月建成并完成试运行,具备了商业运行条件.

另据悉,国家经贸委为鼓励和支持城市垃圾电站的建设和运营,在政策上作了倾斜,决定从 2002 年起,对垃圾电站实行增值税即征即退政策,以利于有实力的企业投资修建和实行市场运作.
(吴冀高供稿)