

考虑不密实接触地下埋管联合受力分析*

陈莉静, 李 宁, 韩 信

(西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

〔摘 要〕 埋藏式压力钢管设计中, 钢衬、混凝土衬圈和围岩之间普遍存在着不连续的缝隙, 致使设计计算时难以进行联合受力分析。针对这种不密实接触问题, 采用厚壁圆环组合法, 提出了在钢衬和混凝土之间设置接触层的钢衬、混凝土衬圈和围岩三者联合受力分析方法。并利用变形协调条件, 推导出各环变形的解析解, 得到钢衬和围岩的压力分担比。不同接触情况下的受力分析结果表明, 当接触层弹性模量小于混凝土弹模的 $1/100$ 时, 接触层的弹性模量变化对钢衬和围岩压力分担比的影响较大; 而接触层厚度对压力分担比的影响不甚明显。另外, 接触层参数可通过其变形与规范建议的初始缝隙相匹配的原则加以确定。

〔关键词〕 压力钢管; 不密实接触; 地下埋管; 联合受力分析; 压力分担比

〔中图分类号〕 TV 732.4⁺1

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1671-9387(2005)06-0113-04

地下埋藏式压力钢管的设计中, 钢衬、混凝土衬圈和围岩联合受力分析一直倍受关注^[1~4], 目前采用的方法大都是基于围岩抗力对钢衬变位约束的考虑^[2~4], 用一般有限元法进行联合受力分析。围岩弹性抗力分析的前提是认为内水作用下, 混凝土沿径向开裂, 混凝土衬圈只起到传递压力的作用; 一般的有限元联合受力分析则假定钢衬和混凝土、混凝土与围岩间是完全接触^[3,4]。事实上, 为有利于抗外压稳定, 避免钢衬单独承担外水, 不是总希望混凝土开裂, 因而混凝土不仅传递压力, 也承担了压力; 而且钢衬与混凝土衬圈, 混凝土衬圈与围岩之间的接触情况, 决定了内水压力在钢衬、混凝土衬圈和围岩之间的传力、变形情况^[5,6]。本研究基于钢衬和混凝土衬圈之间接触不密实, 对内水压力作用下钢衬、混凝土衬圈和围岩进行了联合受力分析, 以期得到钢衬

与混凝土间接触情况对地下埋管受力影响的规律性认识, 为进一步联合受力分析参数的确定提供参考依据。

1 联合受力解析推导

将钢衬和混凝土间的不密实接触看作钢衬和混凝土衬圈之间的接触层。其中接触层的参数包含弹模、泊松比和厚度。

1.1 计算简图

在平面问题中, 垂直于管道纵轴截取剖面(图1), 在钢衬和混凝土衬圈之间设置接触层模拟钢管和混凝土衬圈之间的不密实接触。为得到各部分边壁变位的解析解, 采用简便的厚壁圆环组合法^[5]。各环之间变位协调, 且传递压力, 其计算简图如图2所示。

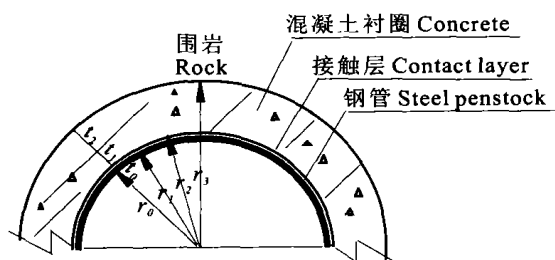


图1 地下埋管剖面示意图

Fig 1 Section configuration of underground penstock

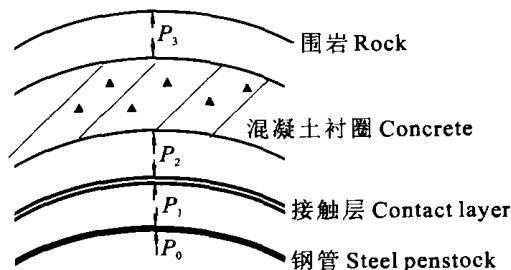


图2 计算简图(各环脱离体示意图)

Fig 2 Calculation model

〔收稿日期〕 2004-11-03

〔基金资助〕 高等学校博士学科点专项科研基金(20040700001)

〔作者简介〕 陈莉静(1975-), 女, 浙江永康人, 讲师, 在职博士, 主要从事结构工程、岩土工程数值仿真研究。E-mail: CHLJ75@163.com

1.2 内水压力作用下各环的变位

根据图 2, 可得到如下的各环变位值。

钢管变位为^[5]:

$$\Delta_s = \frac{r_0^2}{t_0 E_s} (1 - \mu_s) (p_0 - p_1) \quad (1)$$

式中, r_0 , t_0 , E_s , μ_s 分别为钢衬内壁半径、钢衬厚度、钢衬弹性模量和泊松比; p_0 为钢管内水压力; p_1 为钢管外壁和接触层内壁之间的径向压力。

接触层内、外壁变位:

$$\Delta_{f1} = \frac{r_1(1-\mu_f)}{E_f} \left[\frac{p_1(r_2^2 + r_1^2) - 2p_2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{\mu_f}{1-\mu_f} p_1 \right] \quad (2)$$

$$\Delta_{f2} = \frac{r_2(1-\mu_f)}{E_f} \left[-\frac{p_2(r_2^2 + r_1^2) + 2p_1r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{\mu_f}{1-\mu_f} p_2 \right] \quad (3)$$

式中, r_1 , r_2 , E_f , μ_f 分别为接触层内壁半径、外壁半径、弹性模量和泊松比; p_1 同上; p_2 为接触层外壁和混凝土衬圈内壁之间的径向压力。

混凝土衬圈内、外壁变位:

$$\Delta_{c1} = \frac{r_2(1-\mu_c)}{E_c} \left[\frac{p_2(r_3^2 + r_2^2) - 2p_3r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{\mu_c}{(1-\mu_c)} p_2 \right] \quad (4)$$

$$\Delta_{c2} = \frac{r_3(1-\mu_c)}{E_c} \left[-\frac{p_3(r_3^2 + r_2^2) + 2p_2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{\mu_c}{(1-\mu_c)} p_3 \right] \quad (5)$$

式中, r_2 , r_3 , E_c , μ_c 分别为混凝土衬圈内壁半径、外壁半径、弹性模量和泊松比; p_2 同上; p_3 为混凝土衬圈外壁和围岩内壁之间的径向压力。

围岩内壁变位:

$$\Delta_{r1} = \frac{r_3(1-\mu_r)}{E_r} (p_3 + \mu_r p_3) \quad (6)$$

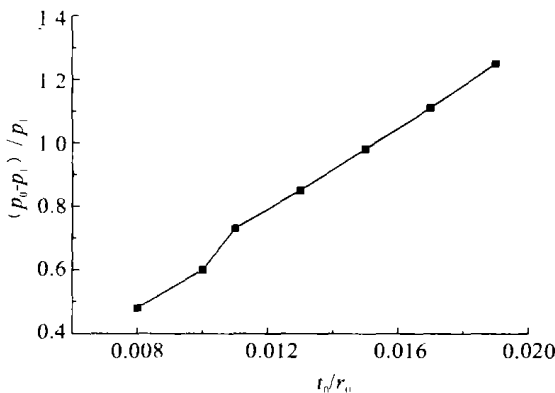


图 3 完全接触情况下压力分担比曲线

Fig 3 Pressure bearing ratio in perfect contact case

式中, r_3 , E_r , μ_r 分别为围岩内壁半径、弹性模量和泊松比; p_3 同上。

根据变位协调条件: $\Delta_s = \Delta_{f1}$, $\Delta_{f2} = \Delta_{c1}$, $\Delta_{c2} = \Delta_{r1}$ 可得到 3 个方程, 方程中包含的未知量有 p_1 , p_2 , p_3 和 E_f , μ_f 。可见地下埋管压力分担比与接触层参数取值有关。

2 不同接触情况的压力分担比分析

钢衬与混凝土衬圈接触越密实, 则接触层弹模越大, 接触层厚度越小。为了与文献[6]中所定义的压力分担比相一致, 以下分析中将混凝土与围岩承担的压力之和(p_1)与钢衬承担的压力($p_0 - p_1$)作比较, 根据式(1)到(6)的变形协调条件, 可得到压力分担比为 $\frac{(p_0 - p_1)}{p_1}$ 。

2.1 钢衬厚度变化对压力分担比的影响

在完全密实接触情况下, 即 $E_f = E_c$, $\mu_f = \mu_c$, 若此时设定围岩的弹模和泊松比与混凝土的相同, 即 $E_r = E_c$, $\mu_r = \mu_c$, 则式(2)的变位公式可写为:

$$\Delta_{f1} = \frac{r_1(1-\mu_c)}{E_c} (p_1 + \mu_c p_1) \quad (7)$$

式中, $r_1 = r_0 + t_0$ 。通过变位协调($\Delta_s = \Delta_{f1}$), 得到压力分担比公式为:

$$\frac{p_0 - p_1}{p_1} = \frac{E_s(1-\mu_c)^2}{E_c(1-\mu_s)} \frac{(r_0 + t_0)t_0}{r_0^2} \approx 10 \frac{t_0}{r_0} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 管径一定的情况下, 钢衬厚度对压力分担比影响较大, 且可以看出, 在这种特殊情况下, 钢衬分担的内水压力很小, 绝大部分内水由混凝土和围岩承担。若将围岩的弹模降低为 $E_r = 0.35 \times E_c$, 得到的压力分担比见图 3。

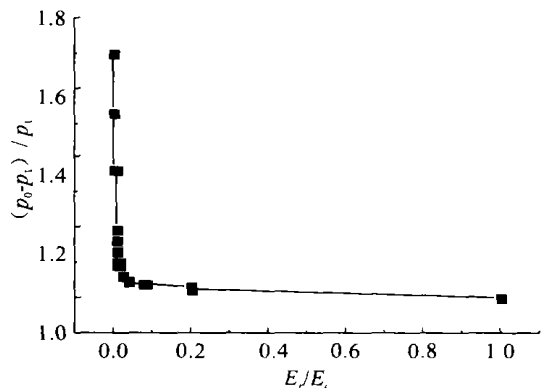


图 4 压力分担比随接触层弹模的变化曲线

Fig 4 Pressure bearing ratio in different elastic modulus of contact layer

由图 3 可以看出, 围岩弹模降低, 使钢衬分担的内水压力增大 $\frac{(p_0-p_1)}{p_1} \approx 67 \frac{t_0}{t_0}$ 。为考察接触层各参数对压力分担比 $\frac{(p_0-p_1)}{p_1}$ 的影响, 在以下分析中取 $E_r = 0.35 \times E_c$, $t_0 = 0.032 \text{ m}$, $r_0 = 2.1 \text{ m}$, 即 $\frac{t_0}{r_0} = \frac{15}{1000}$ (完全接触情况, $\frac{(p_0-p_1)}{p_1} \approx 1$)。

2.2 接触层弹模变化对压力分担比的影响

接触层厚度一定 ($t_1 = 0.02 \text{ m}$) 的情况下, 当 $\frac{E_f}{E_c} = 1 \sim \frac{1}{1000}$ 时, 压力分担比与接触层弹模的关系

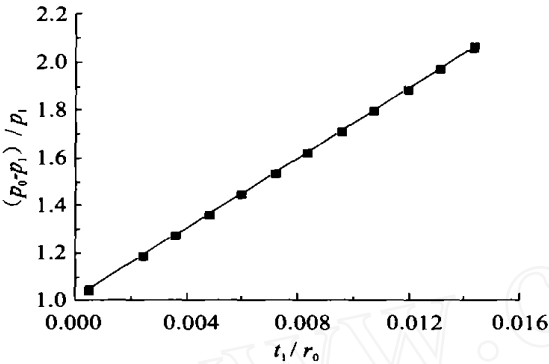


图 5 压力分担比随接触层厚度的变化曲线
Fig 5 Pressure bearing ratio in different thickness of contact case

3 接触层参数与缝隙值的匹配

在相应规范中, 钢衬和混凝土衬圈之间的缝隙建议取值为^[5]:

$$\delta_2 = (3 \sim 5.5) 10^{-4} r_0 \tag{9}$$

式中, r_0 为钢管内半径。当接触层截面变形与规范建议的缝隙值相等, 则可以初步确定接触层参数, 其计算公式为

$$\Delta_{f2} - \Delta_{f1} = \delta_2 \tag{10}$$

式中, 初始缝隙取值 $\delta_2 = 4.0 \times 10^{-4} r_0$ 。

根据式 (1)~(6) 的变位协调以及式 (10) 的附加条件, 可得到接触层参数的变化规律如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在与规范建议的初始缝隙值匹配时, μ_f 的取值对接触层其他 2 个参数的确定影响较小。随着接触层厚度的增加, 弹模的取值呈线性增长, 且不同管径下, 模拟相应初始缝隙的接触层弹模取值基本相同, 即缝隙层弹模取值与管径大小基本无关。

见图 4。从图 4 可以看出, 接触层弹模和混凝土弹模比大于一定值时, 接触层的存在对压力分担比影响很小, 即基本与完全密实接触结果相同。在本研究分析中, 当 $\frac{E_f}{E_c} < 1/100$ 时, 接触层的存在对压力分担比有明显影响。

2.3 接触层厚度变化对压力分担比的影响

接触层弹模不变 ($\frac{E_f}{E_c} = \frac{1}{500}$), 接触层厚度 $t_1 = 0.001 \sim 0.03 \text{ m}$ 时 ($r_0 = 2.1 \text{ m}$), 压力分担比与接触层厚度的关系见图 5。从图 5 可以看出, 接触层厚度增大 30 倍, 压力分担比增大 2 倍左右。

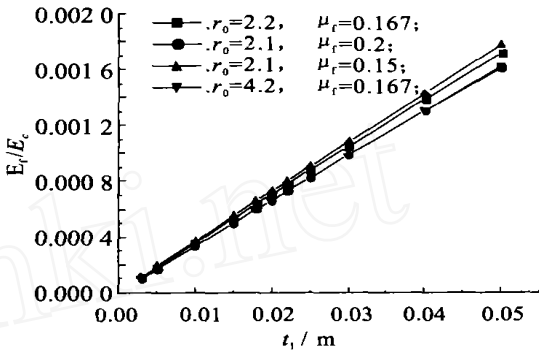


图 6 与初始缝隙值匹配时接触层参数规律
Fig 6 Parameter variation of contact layer in coincident with initial gap

4 结 论

1) 从本文弹性理论分析可知, 当接触层弹模大于等于正常混凝土弹模的 1/100 时, 接触层的存在对压力分担比影响很小, 即可按完全接触联合受力进行分析; 若接触层弹模小于正常混凝土弹模的 1/100 时, 接触层对地下埋管压力分担比有明显影响, 而接触层厚度对压力分担比的影响不甚明显。

2) 若将接触层参数与规范建议缝隙值相匹配, 随着接触层厚度增加, 弹模的取值呈线性增长, 且不同管径下, 模拟相应初始缝隙的接触层弹模取值基本相同。

3) 与常规方法相比, 用接触层不仅可以模拟钢衬与混凝土不密实接触情况, 而且可以通过设置接触层单元, 利用本文所介绍的方法确定接触层参数, 并应用于非圆形洞 (如城门型洞、马蹄型洞) 或钢结构复杂部位 (如分岔) 的有限元联合受力分析中。

[参考文献]

- [1] Adam Adamkowski Case study: lapino powerplant penstock failure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 7: 547- 555
- [2] 钟秉章, 陆 强 按联合受力设计的埋藏式钢岔管有限元分析方法[J]. 水利学报, 1994, (2): 18- 23
- [3] 肖 明 大型地下钢筋混凝土岔管结构优化设计[J]. 水利学报, 2001, (12): 8- 13
- [4] 丁旭柳, 伍鹤皋, 龚玉锋 地下埋藏式钢岔管承载机理研究[J]. 水利学报, 2003, (4): 119- 128
- [5] 伍鹤皋, 生晓高, 刘志明 水电站钢衬钢筋混凝土压力管道[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [6] SL 281-2003 水电站压力钢管设计规范[S].

Combined work analysis of underground penstock based on imperfect contact consideration

CHEN L i-jing, L I Ning, HAN Xin

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: It is difficult to analyze combined work of underground penstock due to the gap among steel lining, concrete lining and rock. Considering the gap between steel lining and concrete lining as the imperfect contact, contact layer is proposed to simulate the gap in the combined work analysis. After analyzing deformation of each circle, with combined circle method, pressure-bearing ratio of steel lining and rock is obtained in the condition of coincident deformation among each circle. The result from different contact case shows that the elastic modulus of contact layer is sensitive to pressure-bearing ratio when its elastic modulus is less than one percent of concrete's. Parameters of contact layer are determined when deformation of contact layer is equal to initial gap which is proposed in the criterion of penstock.

Key words: steel penstock; imperfect contact; underground penstock; combined work; pressure-bearing ratio