

钢衬钢筋混凝土管道垫层及选型研究^①

路振刚

董毓新

(东北电力试验研究院)

(大连理工大学)

摘 要: 对某巨型水电站坝后钢衬钢筋混凝土管道几种截面选型方案进行了探讨。利用空间正交各向异性块体夹膜单元及非线性有限元分析, 对钢衬钢筋混凝土管道垫层包角及弹模进行了详细研究, 提出了钢衬与外包钢筋混凝土联合作用管道的方案。

关键词: 压力管道; 正交各向异性材料; 垫层

中国图书分类号: TV732

近年来, 国内外已建和在建的坝后压力输水管道有十多处。初期建成的坝后压力管道, 将外包钢筋混凝土仅看作是防护性结构^{[2][4]}。在内水压作用下, 分别计算二者的强度安全系数, 设计荷载下, 总的安全系数组合 $K = 2.4 \sim 3.1$ 。但后来的研究成果表明: 钢衬与外包钢筋混凝土是可以联合工作的, 不存在灾难性破坏的可能性, 考虑联合作用时 $K = 1.8 \sim 2.0$ ^{[1][3]}。

高水头大容量机组的应用, 要求压力管道增加钢板厚度, 工程上急需采取措施, 减少钢板厚度。除采用高强度钢外, 比较好的方法就是采用联合承载结构, 用钢筋代替钢板。联合作用的管道允许混凝土开裂, 使钢衬充分发挥作用, 同时, 钢筋接头比较分散, 减少了钢管焊缝缺陷引起的爆破的危险性, 提高了结构安全度^[2]。可见, 对联合作用管道的研究, 有着重大的理论和实践意义。

1 问题的提出及应用的有限元理论

某巨型水电站坝后压力管道属巨型钢管。管道及其与坝体相互作用研究不多。委托单位提出三种断面形式: ①钢管与外包钢筋混凝土联合作用 (用软垫层与坝体隔开); ②钢管与外包钢筋混凝土均为独立工作 (设弹性垫层); ③钢管与外包混凝土之间设有刚性垫层, 确定垫层的合理包角, 如图 1 (a) ~ (c)。各方案要保证坝体下游面混凝土不开裂。其中, 方案 1 考虑了联合作用, 但由于管道与坝体之间设软垫层、管道无支承, 柔性大, 受力状态不佳, 应考虑部分或全部管道下部与坝体固结, 两侧及顶部用软垫层与坝体隔开, 使之对坝体应力无明显削弱, 又允许管道外包混凝土开裂, 充分发挥钢材作用, 这就是方案 4, 如图 1 (d)。文中将对方案 3 作比较细致的研究, 其它方案作为方案 3 的特例加以考虑。

^① 结合国家七五攻关项目

钢衬钢筋混凝土管道中, 由于钢板厚度 t 与管道内径 R 之比远小于 $1/25$, 且荷载无突变, 钢衬可看作空间薄膜, 钢筋也可以折算成钢板。这样, 钢材就可以用空间膜单元来模拟, 将空间膜单元与块体元结合, 就得到一种复合单元, 空间块—膜单元。当块体元的弹性模量为各向异性时, 可以模拟管道外包钢筋混凝土开裂前、后的两种应力状态。如图 2, 复合单元的刚度矩阵:

$$K_{ab}^e = K_a^e + K_b^e \quad (1)$$

表 1 管道 σ_θ 分布 单位: MPa

材料	方 案	联合 半 径 作用	明管
	半 径		
钢衬	615cm	18.7	136.8
	633cm	18.5	0.0
	753cm	15.3	0.0
混凝土	620cm	2.3	0.0
	629cm	2.3	0.0
	695cm	2.1	0.0
	762cm	1.7	0.0

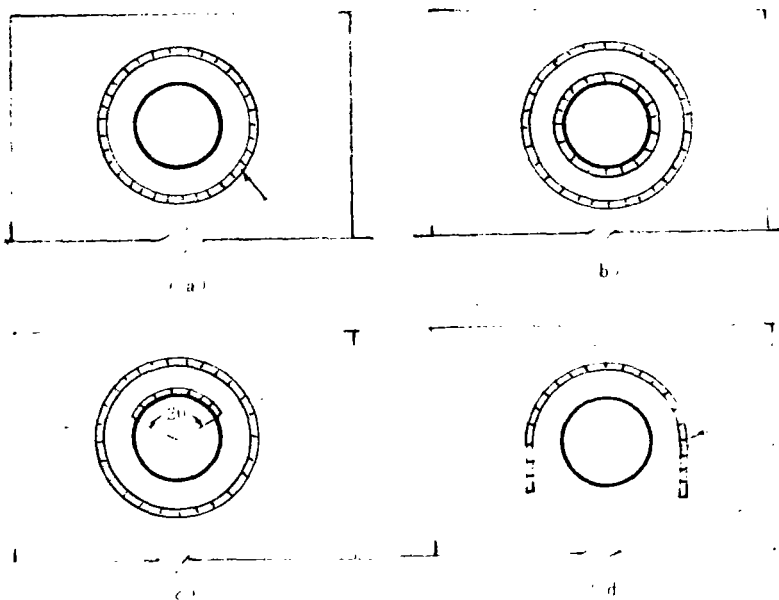


图 1 管道布置方案

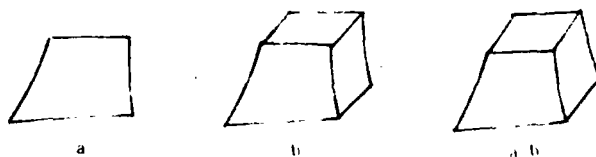


图 2 空间块—膜单元

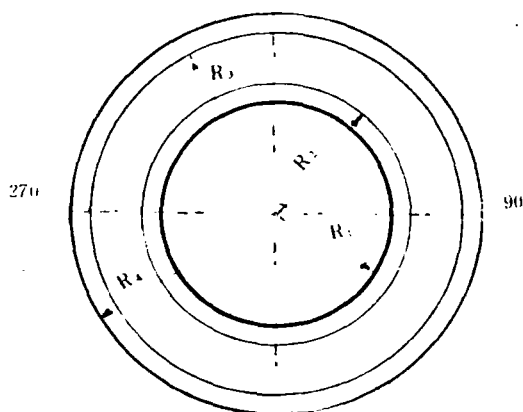


图 3 管道剖面图

采用空间复合块—膜单元, 可以很方便地计算联合作用管道的空间问题^[5]。

2 管道外包混凝土开裂前的应力分布

管道剖面如图 3 所示。外包钢筋混凝土厚 1.5m, 两层钢筋间距 1.2m, 钢衬厚

3.0cm, 钢筋折算厚度都是 1.5cm, $R_1=615.0\text{cm}$, $R_2=633.0\text{cm}$, $R_3=753.0\text{cm}$, $R_4=765.0\text{cm}$, 管道内压 $P=0.67\text{MPa}$ 时, 管道的应力分布计算结果如表 1 所示。

由表 1 知: 联合作用管道外包混凝土环向最大应力及环向平均应力分别为: $\sigma_{c1\max}=2.3\text{MPa}$, $\sigma_{c1}=2.10\text{MPa}$, 联合作用管道钢衬应力, $\sigma_{s1}=18.7\text{MPa}$, 明管钢衬应力 $\sigma_{s2\max}=136.8\text{MPa}$ 。

3 垫层包角对管道应力状态的影响

3.1 垫层的选材与假定

如图 1(C), 在钢衬与外包钢筋混凝土之间 2θ 角范围内设垫层。由于垫层只传递径向力, 因此, 设垫层弹模 $E\theta=0.0$, $E1=0.0$, $Gij=0.0$, 沿垫层厚度方向 (径向) 取一微元, 截面积为 dA , 该微元的径向刚度为 $[K_r^e]$, 则:

$$K_r^e = E_r \cdot dA / L \quad (2)$$

式 (2) 中, E_r 为垫层径向弹模, L 为垫层厚度。为便于研究垫层包角的影响, 计算中假设垫层 $E_r / L = \text{Canst}$, 这时, 微元垫层刚度 $[K_r^e] = C \cdot dA$, 垫层总的刚度 $K_s = f(\theta)$ 。

3.2 垫层包角的影响

利用对称性, 对 $0^\circ \sim 180^\circ$ 半园环内管道外包混凝土开裂前不同垫层包角工况进行了分析。

$$\text{定义: 钢衬应力影响系数 } \alpha = \frac{\text{钢衬最大应力}}{\sigma_{s2\max}} \quad (3)$$

$$\text{混凝土应力集中最大值影响系数 } \beta_{a1} = \frac{\text{应力集中 } \sigma_{c1\max}}{\sigma_{c1\max}} \quad (4)$$

$$\text{固结处混凝土应力平均值影响系数 } \beta_{a2} = \frac{\text{固结处 } \bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_{c1}} \quad (5)$$

$$\text{有垫层处混凝土应力影响系数 } \beta_b = \frac{\text{有垫层处 } \bar{\sigma}_c}{\sigma_{c1}} \quad (6)$$

$\sigma_{c1\max}$, $\bar{\sigma}_{c1}$, $\sigma_{s2\max}$ 意义同前, 各影响系数随 θ 值变化如图 4 所示。由上述不同垫层包角的钢衬钢筋混凝土管道的各种影响系数随 θ 值的变化规律, 可以得出以下几点结论:

①有垫层的管道, $2\theta > 90^\circ$ 后, 钢衬应力影响系数 α 接近 1.0, 钢衬的最大应力基本与明管相同。垫层包角值越小, α 越小, $\theta = 0^\circ$ 时, α 取极小值, 就钢衬的应力状态来讲, 联合作用的断面型式最有利。

②有垫层的管道, 钢衬与外包钢筋混凝土固结处, 混凝土平均应力影响系数 β_{a2} 只是在 $2\theta < 270^\circ$ 以后, 才有所下降, 在 $2\theta > 270^\circ$ 时, $\beta_{a2} > 0.94$, 这说明固结处混凝土的应力仍联合作用时的混凝土应力差不多。处包钢筋混凝土的配筋量仍不能减少。同时, α 值也比较大。有垫层的管道, $90^\circ < 2\theta < 270^\circ$ 是较不利位置, 该区域内, $\bar{\alpha} = 1.0$, $\bar{\beta}_{a2} = 0.94$, 钢衬最大应力与明管相同, 而固结处外包混凝土的应力与联合作用相差不多, 管道断面形式在此区域内, 很不经济。

③对有垫层处的钢筋混凝土来讲, $2\theta > 180^\circ$ 是最有利的位置, 在此区域内, $\beta_b = 0$, 外包钢筋混凝土应力很小。由此可见, 联合作用的管道如果在顶部及两侧与坝体分开, 当 $2\theta > 180^\circ$ 时, 就可保证坝体下游面不受管道变形的影响。如图 1 (b)。

④ β_{a1} 是应力集中影响系数, 管道外包混凝土全部开裂后, 其混凝土最大应力值不会超过其抗拉强度 $R_t = 2.6\text{MPa}$, 全部开裂后的管道 $\beta_{a1} = 1.0$ 。

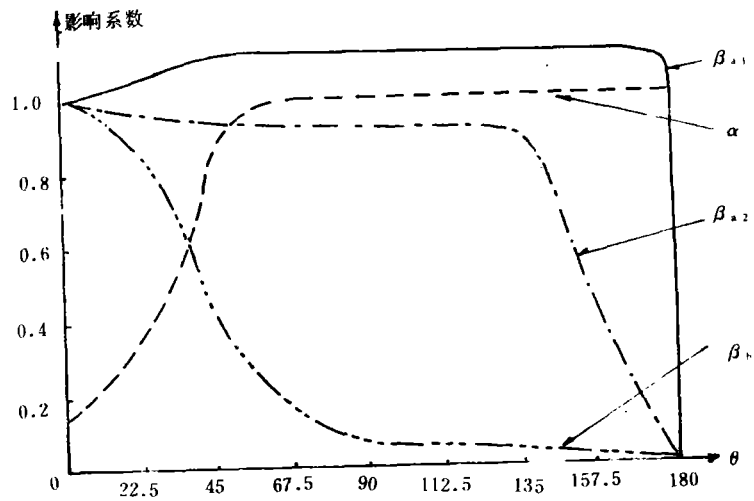


图 4 影响系数随 θ 变化图

4 垫层材料对管道应力分布的影响

由式 (2), $[K_r^0] = E_r \cdot dA / L$, 为明确研究对象, 设垫层包角 $2\theta = 360^\circ$, 此时, 垫层刚度 K_r 只受 E_r / L 的影响。对不同弹模及厚度的垫层, α 值的计算结果列于表 2, α 意义同前。由表 2 知:

表 2 垫层材料特性对 α 的影响

E_c : 混凝土弹模

α $L(\text{cm})$ E_r	0.0	$E_c \times 10^{-5}$	$E_c \times 10^{-3}$	$E_c \times 10^{-1}$	E_c
0.0	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
1.0	1.1	0.935	0.867	0.867	0.865
5.0	1.0	0.979	0.970	0.963	0.959

4.1 垫层厚度确定后, 垫层弹模对 α 值影响较小, 厚度对 α 值影响较大。

4.2 垫层把钢衬与外包钢筋混凝土隔开, 只传递径向位移, 这样, 荷载的主要部分就由钢衬来承担了。 $L = 0.0$ 时, $\alpha = 0.136$, 显然, 采取联合作用方案, 钢衬的承载比远远低于加垫层时的承载比, 联合作用增大了管道的承载能力。

5 结论

由以上各节的分析论证, 可得出以下几点结论:

5.1 钢衬与钢筋混凝土之间加垫层的钢衬钢筋混凝土管道在结构上应力状态不佳。工

程中,应在管道与坝体用软垫层分开处,采用联合作用的断面形式,即方案 1;在管道与坝体固结处,采用外悬式压力管道,即方案 4;这样,即允许管道外包钢筋混凝土开裂,又不影响坝体下游面的应力。联合作用的压力管道结构上合理,也很经济。

5.2 垫层材料的弹模对钢衬承载比影响不大,即使 $E_r/E_c = 1.0$,因 $E_\theta = 0$, $G_{ij} = 0$, α 值仍很高。垫层的厚度对钢衬的承载比影响较大,只要有垫层存在, α 值就比较高,钢衬承担着绝大部分内压 (80%)。只有联合作用时钢衬的应力才达到最小值。国内外的工程实践也表明:联合作用管道结构合理,经济效益高,有较大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 董哲仁等译.苏联坝后背管的研究.水利水电科学研究院
- [2] 马善定.混凝土坝下游面压力管道在内水压作用下的应力分析.武汉水利电力学院水电站教研室, 1985, 3
- [3] 董哲仁.下游坝面压力管道的强度安全系数.水利水电技术, 1988, 10
- [4] 武汉水利电力学院水电站教研室.东江水电站拱坝下游面压力管道结构研究.
- [5] Y.K.Cheung.M.F.Yeo.实用有限元分析导论,人民交通出版社

Research about the Spacer and Model of Steel Liner Reinforced Concrete Penstock

Lu Zhengang

(Northeastern Electric Power Test and Research Institute)

Dong Shuxin

(Dalian University of Technology)

Abstract: The research about several steel liner reinforced concrete penstock sections of a gigantic hydrolic project is conducted here. The encasing area and elastic modulus of the spacer is stuided attentively by using the space orthotropic brick element with membrane and NFEM analysis. The cooperating penstock model of steel liner and reinforced concrete is presented.

Key words: Penstock; Orthotropic Material; Spacer.