

目 录

序 言

第一章 概述	1
第二章 坝体内的圆孔	6
第一节 加劲圆孔的分析理论	6
第二节 承受内水压力的加劲圆孔	11
第三节 承受温度应力的加劲圆孔	25
第四节 设计用数表	39
第三章 用复变函数法计算孔口应力集中	50
第一节 复变函数的概念	51
第二节 平面弹性问题的通解及其复变函数表达法	68
第三节 复势的确定和保角变换的应用	73
第四节 任意单连域复势函数的构造和求解	81
第五节 边界值函数计算和应力计算	87
第四章 椭圆形及矩形孔口的计算	111
第一节 椭圆孔的映射函数	113
第二节 椭圆孔的复势函数和应力公式	116
第三节 椭圆孔口计算用表	130
第四节 正方形孔的分析	141
第五节 矩形孔的分析	148
第六节 矩形孔的计算用表	185
第五章 渐变段孔口和标准廊道的计算	200
第一节 渐变段孔口的分析	200
第二节 标准廊道的孔口应力	205
第六章 坝内其它型式的孔口	230
第一节 有限宽坝段开圆孔	230
第二节 有限宽坝段开正方孔和矩形孔	235

第三节 有限宽坝段开双矩形孔口	242
第七章 坝内孔口及廊道的布置和配筋问题	247
第一节 孔口形状的选择	247
第二节 坝内孔口及廊道的布置	248
第三节 廊道孔口的配筋	250
第四节 关于孔口的温度应力	255
附录	258
(一) 椭圆孔不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	258
(二) 圆孔承受平行 x 轴的均布力 $p_x = 1$ 时的应力表	266
(三) 椭圆孔承受平行 x 轴的均布力 $p_x = 1$ 时的应力表	270
(四) 圆孔承受平行 y 轴的均布力 $p_y = 1$ 时的应力表	286
(五) 椭圆孔承受平行 y 轴的均布力 $p_y = 1$ 时的应力表	290
(六) 圆孔受均匀内水压力($p_0 = 1$)之孔口应力表	306
(七) 椭圆孔受均匀内水压力($p_0 = 1$)之孔口应力表	310
(八) 圆孔孔边受 x 方向变荷 $[x_s = e_x x \cos(nx)]$ 作用之孔口应力表	326
(九) 椭圆孔孔边受 x 方向变荷 $[x_s = e_x x \cos(nx)]$ 作用之孔口应力表	330
(十) 圆孔孔边受 y 方向变荷 $[Y_s = e_y y \cos(ny)]$ 作用之孔口应力表	346
(十一) 椭圆孔孔边受 y 方向变荷 $[Y_s = e_y y \cos(ny)]$ 作用之孔口应力表	350
(十二) 正方孔不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	366
(十三) 矩形孔不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	368
(十四) 正方形孔承受平行 x 轴的均布力 $p_x = 1$ 时的应力表	384
(十五) 矩形孔承受平行 x 轴的均布力 $p_x = 1$ 时的应力表	388
(十六) 正方形孔承受平行 y 轴的均布力 $p_y = 1$ 时的应力表	420
(十七) 矩形孔承受平行 y 轴的均布力 $p_y = 1$ 时的应力表	424
(十八) 正方形孔承受均匀内水压力($p_0 = 1.0$)时的应	

力表	456
(十九) 矩形孔承受均匀内水压力($p_0 = 1.0$)时的应力表	460
(二十) 正方形孔孔边受 x 方向变荷 [$x_s = e_s x \cos(nx)$] 作用时的应力表	492
(二十一) 矩形孔孔边受 x 方向变荷 [$x_s = e_s x \cos(nx)$] 作用时的应力表	496
(二十二) 正方形孔孔边受 y 方向变荷 [$Y_s = e_s y \cos(ny)$] 作用时的应力表	528
(二十三) 矩形孔孔边受 y 方向变荷 [$Y_s = e_s y \cos(ny)$] 作用时的应力表	532
(二十四) 正方形渐变段孔口不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	564
(二十五) 矩形渐变段孔口不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	566
(二十六) 渐变段孔口在平行 y 轴方向均匀拉力 $p_x = 1$ 作用下之应力表	568
(二十七) 渐变段孔口在平行 y 轴方向均匀拉力 $p_y = 1$ 作用下之应力表	576
(二十八) 渐变段孔口在均匀内水压力($p_0 = 1$)作用 下之孔口应力表	584
(二十九) 渐变段孔口孔边受 x 方向变荷 [$x_s = e_s x \cos$ (nx)]作用之应力表	592
(三十) 渐变段孔口孔边受 y 方向变荷 [$Y_s = e_s y \cos$ (ny)]作用之应力表	600
(三十一) 标准廊道孔口不同 ρ 、 θ 值对应的 x 、 y 、 α_1 值表	608
(三十二) 标准廊道在平行 x 轴均匀拉力 p_x 作用下之应 力表	610
(三十三) 标准廊道在平行 y 轴均匀拉力 p_y 作用下之应 力表	614
(三十四) 标准廊道在纯剪力 τ_{xy} 作用下之孔口应力表	618

第一章 概 述

在混凝土坝体内，往往需要开许多孔洞和廊道。例如，泄洪底孔、导流底孔、输水管道、排水灌浆廊道、监测廊道、交通廊道、闸门操作廊道、电梯井、电缆洞、通气孔、水泵房等。这些孔洞或廊道的断面为圆形，或椭圆形，或矩形以及其它形状（见图1-1）。孔洞的尺寸和坝体断面相比一般是很小的，但也有例外。例如，采用坝内式厂房布置或空腹坝坝型时，便需在坝内开设大孔口。这些孔洞的存在将局部或全面地扰动了坝内原有应力分布状态，并常产生不利的应力集中或拉应力。在孔口周围特别是角缘处往往容易产生裂缝，这就说明在坝内留设孔洞时，必须仔细复核其周围的应力状态，采用合理的布置和孔口轮廓或作必要的补强。本书将介绍一些计算的方法和设计资料，但更重要的则是设计人员应对孔口应力分布情况及影响因素有一明确的概念，在布置和设计中的能把孔口的位置、尺寸、轮廓、配筋等定得合理些，以保证安全运行并节约投资、简化施工。

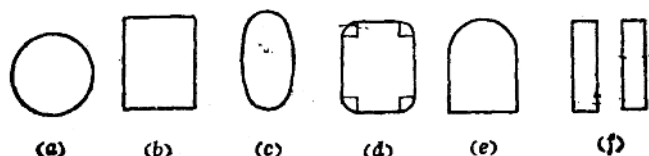


图 1-1 各式孔口形状
(a)圆孔，(b)矩形孔，(c)椭圆孔，(d)渐变段，
(e)标准廊道，(f)双矩形孔

本书主要讨论小孔口问题，所谓孔口的大小，原是一个相对的概念，并无严格的界线，但它们间的区别可以通过图1-2来说明。图1-2(a)中的孔口尺寸与坝体相比显得很小，若沿孔中心切一断面 AB ，则有无孔口时的正应力分布将分别如图上的实线及虚线所示。比较两者，可见除孔口附近略有不同外，离孔口较远处都基本相同。换言之，两种情况的应力分布的基本状态是相同的，孔口的存在只引起局部的应力重分布而已，这一类孔口就可称为小孔口。相反，在图1-2(b)中所示的孔口，其尺寸较大，取断面 AB ，有无孔时的应力分布曲线完全改观，连坝面边界上的应力也显著不同了，这一类就属于大孔口。

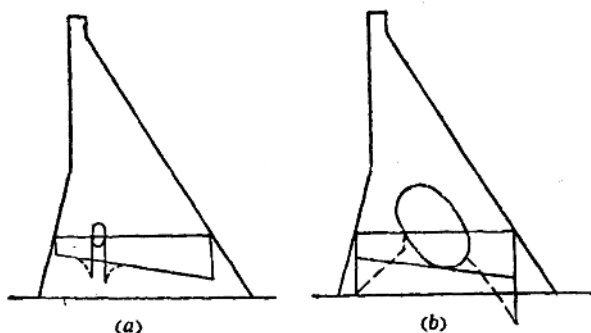


图 1-2 大孔口与小孔口问题

小孔口周围的应力比较容易计算，可以用近似的方法就能获得相当准确的结果。主要的计算步骤是：首先计算坝体在孔口中心（形心）处的应力（假定无孔口存在）。即该点上的主应力 σ_1 、 σ_2 及其方向，然后假定坝体中该孔周围的应力分布状态和位于均匀正交应力场 σ_1 、 σ_2 中的同样尺寸的孔

口周围应力相同（比较图1-3中（a）及（b）两种情况），而后一问题是较便于进行理论分析的。

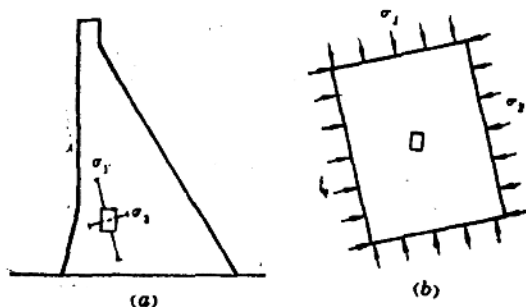


图 1-3 小孔口的分析原理

当然，上述的这种解法只是一种近似方法。这种方法仅适用于小孔口的情况，而且要求孔口离开坝体边界也有一定距离。例如，孔口中心距最近边界的距离不小于2~3倍的孔口尺寸，其分析成果是足够准确的。如不能满足上述要求，则分析成果就有一定的误差。

上述近似方法取应力场为均匀的，如果考虑应力场的非均匀性，则问题要复杂一些。虽然在自重和边界荷载作用下带孔口的坝体应力的理论解答也有一些被研究出来，但都限于很简单的情况，例如无限楔体内的小圆孔等，而且其数学处理较为复杂。这些研究的主要意义是在判断和证实近似分析法的适用范围和精度。

即使采用近似处理方式，如果孔口形状、应力场和孔边受力情况很复杂时，进行精确的理论分析仍很困难。以往，常用光弹试验来解决这些问题，本世纪三十年代，苏联学者

穆斯黑列什维里发展了用复势函数求解平面弹性理论问题的方法，使我们有了一种比较方便和有效的数学工具，本书将在第三章～第五章中加以扼要介绍。采用这一方法，对于坝内常见的小孔口均可求解，同时也可以考虑应力场的变化和孔口边界力的变化。因此，对于小孔口问题可以不作昂贵的光弹试验或烦琐的有限元分析，而直接用复势函数法来计算。

对于空腹坝，坝内厂房或大尺寸闸孔和输水管道，则问题性质完全不同。此时，精确地决定坝内应力状态和合适地拟定孔洞形状尺寸就成为一个较为复杂的问题。光弹试验和有限单元分析是解决这个问题的两种主要手段。近年来，有限单元分析的应用似更为广泛，我国广大设计人员已经依靠这些方法成功地分析和设计了大量的空腹坝和坝内式厂房，这在二三十年前是很困难或不可想象的。

下面将本书的内容简单介绍一下。坝体内有很多孔洞呈圆形。对于这种情况，我们可以用比较初等的方法求出应力分布的理论解答（解算无限域中圆孔周围的应力集中问题，包括周边加强的圆孔。）。这将在第二章详细论述。对于其它几何形状的孔洞，包括矩形、椭圆形、方圆形和城门洞形等，就必须采用更为有效的数学工具。复势函数法实为最合适的一种方法。但其理论涉及到复变函数论中的许多知识，而且复数演算常不为一般设计人员所熟悉和喜爱，因此推行不广。鉴于这个方法的有效性，同时国内介绍这一方法的理论特别是计算实际问题的著作较少，本书将给一定的篇幅加以介绍。第三章叙述了有关的数学知识和复势法的基本原理及公式。第四、五章中分别介绍其在椭圆孔、矩形孔、渐变段及方圆型廊道孔洞分析中的应用。并考虑多种条件，以便

计算坝体自重和水重对孔口应力的影响。这些章节中的叙述虽十分简要，从数学角度来看更不够严谨，但将较易为一般设计人员所掌握，按照各章中所举的实例进行类似的计算，可以解决设计工作中遇见的实际问题。作者认为，即使在电子计算机的计算技术日益发展的今天，设计人员掌握一些有效的理论分析手段仍然是有用的和必要的。目前，微型电子计算机已很普及，并且能配各种算法语言，更为复势函数法提供了方便的计算工具。作者在以上章节中推导了各种孔口的计算通用公式，并计算出应力成果列成表格，供广大设计人员采用。

第六章介绍了一些其它情况下的孔口分析，除简要地介绍理论分析方法外，并提供了一些光弹试验和有限元计算成果。

第七章对廊道和孔口的合理布置、合适孔型、改善孔口应力及配筋的问题作了讨论。

关于大孔口问题，特别是有关空腹坝和坝内式厂房的问题，本书将不作介绍，原因是近年来我国广大的设计人员和专家们已通过光弹试验和有限单元法成功地设计了很多这种大孔口的坝型，并且总结了很多宝贵的经验。不论从理论分析、试验技术和工程实践等方面来讲，这二十年来都有了极大的进展，这些丰富的内容，非本书的篇幅所能概括和容纳，而应有专门的著作加以系统介绍。

第二章 坝体内的圆孔

第一节 加劲圆孔的分析理论

坝体内有许多孔洞是圆孔，圆孔具有不少优点，例如孔口的应力集中度较为平缓，对承受内水压力有利；便于作理论分析；施工也较方便。特别是通过坝体的压力输水管道总是做成圆形的，为了承受内水压力并防止渗流，孔口常做上钢板衬砌，与混凝土固接在一起，或在孔周配置钢筋予以加强，从分析角度讲，这就相当于解算一个位于某种均匀应力场中的带有加劲环的圆孔问题。如图2-1所示，在一块平板内（平板的弹性常数为 E ， ν ）开有一个半径为 R 的圆孔。孔内嵌有一加劲环，环的内径为 r_0 （环厚为 $R-r_0$ ），环的弹性常数为 E_0 、 ν_0 ，平板处于均匀单向应力场 p 中，我们选取 x 轴与应力场方向平行，以利分析。

对于这个课题，主要的工作是寻找平板内的一个应力函数 F ，它在无穷远处给出 $\sigma_x=p$ ， $\sigma_y=\tau_{xy}=0$ ，在孔边($r=R$)给出一组应力 σ_r 和 $\tau_{r\theta}$ 以及变位 u_r ， u_θ 。将 σ_r 及 $\tau_{r\theta}$ 作用在环上，求出环的应力和变位 u'_r ， u'_θ ，则 u'_r 及 u'_θ 需和板的变位 u_r 、 u_θ 相符，因为我们认为环和板是密切接合的。稍加分析，可知应力函数 F 由 $\frac{1}{4}r^2 - \frac{r^2}{4}\cos 2\theta$ 再加上 $\ln r$ ， $\frac{1}{r^2} \times \cos 2\theta$ 和 $\cos 2\theta$ 等项构成，其中 $\frac{1}{4}r^2 - \frac{1}{4}r^2\cos 2\theta$ 代表均匀应力场的应力函数，另外三项代表开设圆孔并加上加劲环的

影响，这三项前各可冠以一个待定常数，并通过板和环的连续条件求出这些常数，目前已有一些近似或精确的解答^{[1][2]}。现直接引用文献[2]中的成果，写出平板内的应力和变位公式如下。

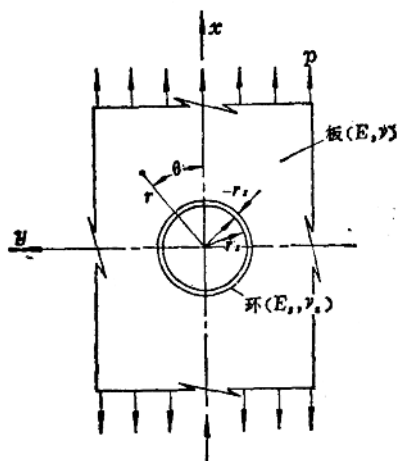


图 2-1

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[\left(1 - \frac{D}{2} \frac{R^2}{r^2} \right) + \left(1 - \frac{2CR^2}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \times \cos 2\theta \right] \quad (2-1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[\left(1 + \frac{D}{2} \frac{R^2}{r^2} \right) - \left(1 - \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2-2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p}{2} \left(1 + \frac{CR^2}{r^2} + \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (2-3)$$

$$U_r = \frac{pR}{8G} \left\{ \left[(\kappa - 1) \frac{r}{R} + D \frac{R}{r} \right] + \left[\frac{2r}{R} + C(\kappa + 1) \right] \right.$$

$$\times \frac{R}{r} + B \frac{R^3}{r^3} \Big] \cos 2\theta \Big\} \quad (2-4)$$

$$U_0 = \frac{pR}{8G} \left[-\frac{2r}{R} - C(\kappa-1) \frac{R}{r} + B \frac{R^3}{r^3} \right] \sin 2\theta \quad (2-5)$$

式中的 G 及 κ 为平板的另外两个弹性常数，可由 E 、 ν 计算， G 就是剪切模量

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-6)$$

κ 值对于平面应力问题为 $\frac{3-\nu}{1+\nu}$ ，但我们的问题为平面变形性质（以上切取一片平板计算仅为便于说明），此时

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (2-7)$$

就150、200、250号混凝土讲， $G \approx 9.86$ 、 11.14 、 12.21×10^4 (kg/cm^2)， $\kappa \approx 2.333$ 。

式中的 B 、 C 、 D 是三个待定常数，它们反映了环的相对刚度和相对厚度的影响：

$$B = -2 + \frac{2(1+\kappa)}{D_1} \left[\left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) (4n^6 - 7n^4 + 4n^2 - 1) + n^4(n^4 - 1) \left(1 + \kappa_s \frac{G}{G_s} \right) \right] \quad (2-8)$$

$$C = 2 - \frac{2(1+\kappa)}{D_1} \left[\left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) (3n^6 - 6n^4 + 4n^2 - 1) + n^6(n^2 - 1) \left(1 + \kappa_s \frac{G}{G_s} \right) \right] \quad (2-9)$$

$$D = 2 - \left[2(n^2 - 1)(1 + \kappa) \right] \div \left\{ 2 \left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) - n^2 \times \left[\left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) - \left(1 + \kappa_s \frac{G}{G_s} \right) \right] \right\} \quad (2-10)$$

其中

$$n = \frac{R}{r_s} \quad (2-11)$$

$$D_1 = \left(\kappa + \frac{G}{G_s} \right) n^2 \left[\left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) (3n^4 - 6n^2 + 4) + n^6 \right. \\ \times \left(1 + \kappa \cdot \frac{G}{G_s} \right) \left. \right] + \left(\kappa \cdot \frac{G}{G_s} - \kappa \right) \left[\left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) + n^6 \right. \\ \times \left. \left(1 + \kappa \cdot \frac{G}{G_s} \right) \right] \quad (2-12)$$

如前所述, G_s 及 κ_s 是加劲环的弹性常数。对于钢环, $G_s \approx 8.08 \times 10^5 (\text{kg/cm}^2)$, $\kappa_s \approx 1.8$, 对不同标号的混凝土, G/G_s 值大致如下。

150号混凝土	$G/G_s \approx 0.122$
200号混凝土	$G/G_s \approx 0.138$
250号混凝土	$G/G_s \approx 0.151$

以上式 (2-8) ~ (2-12) 为通用公式, 但计算较繁。一般 n 为稍大于 1 的数, 可写为

$$n = 1 + \Delta \quad (2-13)$$

$$\Delta = \frac{t}{R} \quad (2-14)$$

式中 t 为环的厚度。然后将 n^2 近似写为 $1 + 2\Delta$, $n^4 \approx 1 + 4\Delta$ 等, 代入, 略去高次微量, 并将混凝土及钢的材料常数代入, 就可以得出一些简化公式。例如对于 150 号混凝土, 我们不难写出

$$D_1 = 0.11669 + 4.17718\Delta \quad (2-15)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{-2 + 6.475\Delta}{1 + 35.797\Delta} \\ C &= \frac{2 + 32.562\Delta}{1 + 35.797\Delta} \\ D &= \frac{2 - 14.470\Delta}{1 + 12.281\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

同样，对于200号混凝土，有

$$D_1 = 0.14931 + 4.80388 \Delta \quad (2-15)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{-2 + 4.6561 \Delta}{1 + 32.174 \Delta} \\ C &= \frac{2 + 29.846 \Delta}{1 + 32.174 \Delta} \\ D &= \frac{2 - 12.656 \Delta}{1 + 10.923 \Delta} \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

对于250号混凝土，有

$$D_1 = 0.17876 + 5.32677 \Delta \quad (2-15)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{-2 + 3.468 \Delta}{1 + 29.799 \Delta} \\ C &= \frac{2 + 28.064 \Delta}{1 + 29.799 \Delta} \\ D &= \frac{2 - 11.468 \Delta}{1 + 10.032 \Delta} \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

如果钢材和混凝土的弹性常数和上举之值稍有不同，则可以仿此代入，求出形如式(2-15)~(2-16)的公式，但一般采用所列公式已可。混凝土在长期荷载作用下，要考虑徐变的影响，在计算中弹性模量应取得较低。

加劲环中的应力也可用类似的公式进行计算，但是，由于环为很薄的钢板衬砌，不必应用严格的弹性理论厚环公式计算，可只计算环中的环向应力，并令其近似的就等于孔口周边的混凝土环向应力乘以两者模量之比。

如果沿 y 轴方向尚存在均匀拉应力场 p_y ，则可以在式(2-1)~(2-3)中，置 $p = p_y$ 而且将 θ 改为 $\theta + \frac{\pi}{2}$ ，将这样所得的成果与 x 轴方向拉应力场 p_x 的影响迭加而求得合成应力

场。整理后的结果是:

$$\sigma_r = \frac{p_x + p_y}{2} \left(1 - \frac{D}{2} \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{p_x - p_y}{2} \left(1 - \frac{2CR^2}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2-17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_x + p_y}{2} \left(1 + \frac{D}{2} \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{p_x - p_y}{2} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2-18)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p_x - p_y}{2} \left(1 + \frac{CR^2}{r^2} + \frac{3}{2} \frac{BR^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (2-19)$$

在基本公式 (2-8) ~ (2-12) 中, 若置 $G_s = \infty$, 即加强环为无限刚强时, 不难求得:

$$B = \frac{2}{\kappa}, \quad C = -\frac{2}{\kappa}, \quad D = 1 - \kappa$$

相反, 如置 $G_s = 0$, (或 $n=1$), 即孔内无加强环时,

$$B = -2, \quad C = 2, \quad D = 2$$

这些都和弹性理论中的相应理论解相符。

第二节 承受内水压力的加劲圆孔

当圆孔内承受均匀内水压力 p_0 时, 我们要解算一个钢板衬砌与外包混凝土联合承受内压的问题。这个问题在本丛书《压力钢管》一书的埋藏式钢管中有所论述, 但该书主要介绍埋在围岩内的钢管。关于坝内埋管问题将在本书中稍作介绍。

1. 外包混凝土极厚，且不开裂

此时可用下式计算混凝土分担荷载的比值

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{t}{r_s} \frac{E_s}{p} \left(\alpha_s \Delta t + \frac{\Delta_0}{r_s} \right)}{1 + (1 + \nu_c) \frac{E_s}{E_c} \frac{t}{r_s}} \quad (2-20)$$

ε 值当然必小于 1。求出 ε 值后，钢管的环向应力为

$$\sigma_\theta = \frac{pr_s}{t} (1 - \varepsilon) \quad (2-21)$$

而混凝土孔口上承受的均匀径向压力为 εp 。

在推导式 (2-20) 时，假定钢管和混凝土间存在着初始的均匀间隙 Δ_0 ，而且在施工完成到运行期间钢管的温度下降了 Δt 度。钢管外包的混凝土很厚，且未发生开裂。式中的 r_s 为钢板衬砌的半径，因一般钢板极薄，就取其内径和轴线半径都为 r_s ，也可以令它等于外径 R ，这一般不会带来什么显著误差。 E_c 和 ν_c 分别为混凝土的弹模和泊松比。

式 (2-20) 是从已知的钢管厚度计算内压分担比例。如果钢板厚度是根据某些要求或设计原则确定的，则应用该式是方便的。但如要应用该式确定钢管厚度就需进行试算，使管壁应力在许可范围内。此时，不如将该式做些换化，写成如下形式

$$\varepsilon p = \frac{[\sigma_s] - \frac{E_s}{r_s} (\Delta_0 + r_s \alpha_s \Delta t)}{\frac{E_s}{E_c} (1 + \nu_c)} \quad (2-22)$$

更便于使用。因为，可以先规定钢材的容许应力 $[\sigma_s]$ ，代入上式计算 εp ，则钢管所分担的荷载即为 $(1 - \varepsilon)p$ ，最后可用下式确定钢管厚度

$$t = \frac{(1-\varepsilon)pr_s}{[\sigma_s]} \quad (2-23)$$

当然，上式中的 $[\sigma_s]$ 应和式(2-22)中 $[\sigma_s]$ 相同。由此作出的设计，理论上讲能使钢管在内压 p_0 作用下的环应力恰巧达到 $[\sigma_s]$ 。

2. 外包混凝土不过厚，且不开裂

在推导式(2-20)时，假定外包混凝土的尺寸很大。如果其尺寸并不过大，则宜作为厚圆筒处理(图2-2)。圆筒的内外半径分别为 R 、 r_0 ，而且可以近似令 R 等于钢板衬砌的内径或平均半径。这个圆筒在内缘承受均布径向压力 p' 时，其内半径将增大下列数量(平面变形问题)

$$\Delta_2 = \frac{p'(1+\nu_s)R}{E_s(r_0^2 - R^2)} \left[(1-2\nu_s)R^2 + r_0^2 \right] \quad (2-24)$$

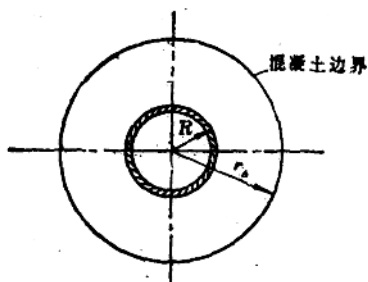


图 2-2

当 $r_0/R=3, 4, 5$ 时，按圆筒公式算出的 Δ_2 将比按无限域孔口的相应公式计算的值分别大20.8%、11.1%和6.9%。所以当 $r_0/R>4$ 或5时，就可以按无限外包域处理。

如果采用式(2-24)，则衬砌分担比的公式将为

$$\varepsilon = \frac{1 - \nu_i^2 - \frac{E_s t}{pR} \frac{A}{R}}{1 - \nu_i^2 + (1 + \nu_c) \frac{E_s}{E_c} \frac{t}{(r_b^2 - R^2)R} [(1 - 2\nu_c)R^2 + r_b^2]} \quad (2-25)$$

如果略去 ν_i^2 , 则得

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{E_s t}{pR} \frac{A}{R}}{1 + (1 + \nu_c) \frac{E_s}{E_c} \frac{t}{(r_b^2 - R^2)R} [(1 - 2\nu_c)R^2 + r_b^2]} \quad (2-26)$$

以上两类情况的特点, 都是混凝土不开裂。在这个条件下, 混凝土能承担相当大的一部分荷载, 从而可以减轻钢管中的应力。要使这一条件成立, 混凝土表面最大的环向应力 $\sigma_{\theta \max}$ 不应超过相应的抗裂容许应力 $[\sigma_t]$ 。如果只承受内水压力作用, 则 $\sigma_{\theta \max} = \varepsilon p$ 。但实际上还应迭加由于坝体应力场和温度变化影响产生的应力。迭加这些因素后, 沿孔周的 σ_θ 不再是轴对称的, 最大拉应力 $\sigma_{\theta \max}$ 往往发生在孔洞的顶部与底部。

对于不开裂情况的应力分析和设计问题, 还可以指出以下几点:

(1) 如果要比较可靠地使混凝土保持不开裂状态, 除了必须使 $\sigma_{\theta \max} < [\sigma_t]$ 外, 还宜在孔口周围配置适当的限裂钢筋, 而且要提高施工工艺水平, 保证混凝土的质量。

(2) 如果混凝土不开裂, 则所配的钢筋中的实际应力是很低的, 它所能起的“应力”作用十分有限(例如, 它能减低钢板中的应力或能增加承受内压的能力一般不过 5~10%), 在计算中不必考虑, 可作为一些安全裕度。

(3) 要按混凝土不开裂原则设计, 外包混凝土的厚度