

第一章 混凝土坝下游面压力管道

1.1 混凝土坝下游面压力管道布置

在混凝土坝坝后式水电站中，通常是将压力引水管道布置在混凝土坝内。从 20 世纪 60 年代开始，国外开始在较高水头的这类电站中，将压力管道布置在下游坝面上（以下简称坝下游面管，有时也称坝后背管或坝后管 图 1-1 所示），进水口仍设在上游坝面上。压力管道近于水平地穿过坝体上部，再沿坝下游面铺设，并以弯段及水平段与水轮机蜗壳连接。坝下游面管道与坝体分开施工，但固定在坝体上。

与坝内管道相比，坝下游面管有以下优点^[1]：

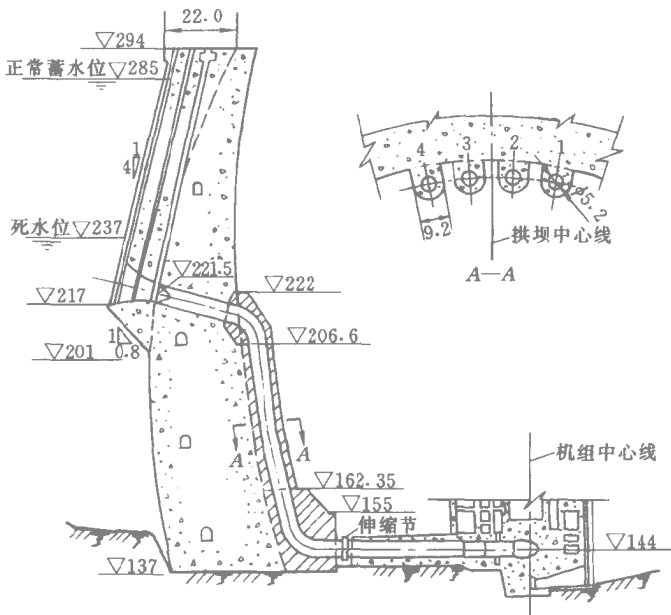


图 1-1 东江水电站

(1) 便于布置。对于较薄的混凝土高坝 如果将大直径管道布置在坝体内 往往需要将进水口放低 将管道布置在坝体下部 这就增加了进水口设施的困难。采用坝下游面管道可以将进水口尽量抬高。

(2) 将管道布置在坝体轮廓线以外的下游面上, 内水压荷载基本上不传递到坝体内, 减少了管道空腔对坝身的削弱, 有利于保持大坝特别是薄高拱坝的整体稳定性, 从而确保坝身安全。

(3) 管道布置在坝下游面上 可以晚于坝体施工 使坝体施工不受管道施工与安装的干扰 可以提高坝体施工质量 并加快进度 提前发电。

(4) 管道可以随机组的投产先后分期施工, 有利于合理安排施工进度, 且减少投资积压, 机组台数较多时, 效益更为显著。

对于高的较轻型混凝土坝和大直径压力管道, 这些优点就更加明显。正因为以上优点, 在国内外不少水电工程, 特别是高坝情况下布置坝后式厂房的水电站, 都选用了坝下游面管布置方案, 表 1-1 列出了采用坝下游面管的一些工程实例。

表 1-1 坝下游面管工程实例

电站名称	所在国家	坝 型	坝 高 (m)	最大水头 (m)	钢管直径 (m)	结 构 形 式
克拉斯诺雅尔斯克	前苏联	重力坝	124	101	7.5~9.3	钢衬钢筋混凝土
泽 雅	前苏联	支墩坝	115	98.8	7.8	钢衬钢筋混凝土
契尔盖	前苏联	拱 坝	232.5	207	5.5	钢衬钢筋混凝土
萨扬舒申斯克	前苏联	重力拱坝	242	222	7.5	钢衬钢筋混凝土
古勃萨依	前苏联	重力坝	101	101	7.0	明钢管
伊泰普	巴西、巴拉圭	重力坝	196	128	10.5	明钢管
瑞维尔斯托克	加拿大	重力坝	136		7.9	明钢管
东 江	中 国	拱 坝	157	175	5.2	钢衬钢筋混凝土
紧水滩	中 国	拱 坝	99	85	4.5	钢衬钢筋混凝土
锦 江	中 国	重力坝	59.45		3.4	钢衬钢筋混凝土
桃林口	中 国	重力坝	72.5	50	3.0	钢衬钢筋混凝土
五强溪	中 国	重力坝	87.5	73.8	11.2	钢衬钢筋混凝土
李家峡	中 国	拱 坝	165	122	8.0	钢衬钢筋混凝土
景 洪	中 国	重力坝	107.0	89.7	10.8	钢衬钢筋混凝土
三 峡	中 国	重力坝	175	146	12.4	钢衬钢筋混凝土

虽然坝下游面管具有以上优点，但由于上弯段以上的坝内埋管段加长，斜管段向下游平移，使厂房和坝纵轴线的距离加大（即厂房要向下游移动）既增加了引水道的总长度和其它工程量，又使引水道中的水力损失增加。如果混凝土坝下游面上要布置施工栈桥及施工机械，对管道施工也会有一定的干扰。因此，是否采用坝下游面管，应结合工程的具体情况，经过技术经济比较后确定。

举世瞩目的三峡水电站，在初步设计阶段，压力管道拟采用全部布置在坝体轮廓线以外的钢衬钢筋混凝土结构，由于这种布置使得工程量（如左岸厂房 #1~#5 机组段的基础开挖量）增加较多，因此经过技术经济比较，在技术设计阶段，决定采用浅槽式（有时也称浅埋式）钢衬钢筋混凝土管道布置形式。这种布置形式既保留了坝下游面管的所有优点，又使得工程量增加最小，实现了坝下游面管布置的最优化。

1.2 混凝土坝下游面压力管道结构形式

混凝土坝下游面管主要由进水口、渐变段、上水平段、上弯段、斜直段、下弯段和下水平段组成，其中进水口、渐变段和上、下水平段与坝内埋管布置基本相同，只是将斜直段和上、下弯段布置在坝下游面上。上、下弯段通过锚筋锚固在坝体上，成为斜直段的锚固端。斜直段可以采用钢衬钢筋混凝土结构，也可以采用明钢管结构，可以根据国家的技术经济发展水平和工程的具体条件作出决定。

1.2.1 坝下游面明钢管

钢管从坝体穿出以后，连接上弯管，上弯管锚固在坝体上，是下游坝面管的上固定端。明钢管用支承环支承在坝下游面上的支墩上，其布置和构造与一般的露天钢管相似。钢管斜直段以下连接下弯管，下弯管亦固定在坝体上，成为坝下游面明钢管的下固定端，然后进入厂房与蜗壳相连。比如目前已建成的世界上最大的水电站——伊泰普水电站，其双支墩重力坝高 196m，钢管直径

10.5m，斜直段为明钢管，管壁厚度为 30~65mm，单机容量 715MW，如图 1-2 所示。又如加拿大的瑞维尔斯托克水电站，重力坝高 136m，钢管直径 7.9m，斜直段也采用了明钢管。

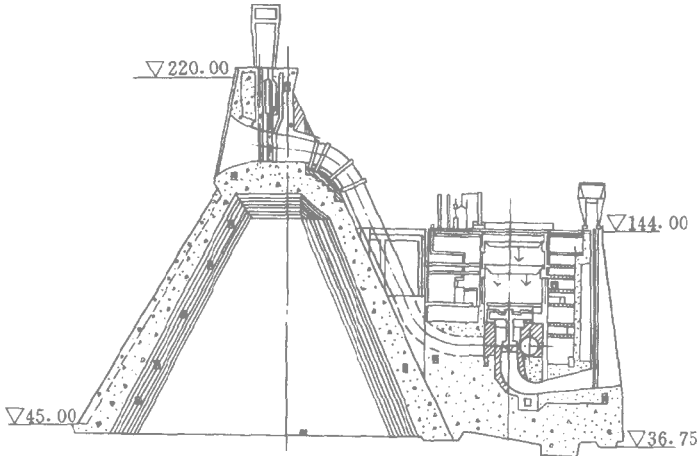


图 1-2 伊泰普水电站

坝下游面明钢管的现场安装工作量小，进度快，与坝体施工干扰小。但是当钢管直径和水头很大时，可能要加大钢管材料的强度和施工工艺上的困难。敷设在下游坝面上的明钢管一旦失事，水流直冲厂房，将产生灾难性的后果，因此必须要求钢管具有极高的安全可靠性的。

1.2.2 坝下游面钢衬钢筋混凝土管

如上所述，当钢管直径和水头很大时，如果坝下游面管采用明钢管结构，可能要提高钢管材料的强度和增加施工工艺上的困难，尤其是在钢铁工业相对落后的发展中国家，这时就可以采用钢衬钢筋混凝土结构。钢衬钢筋混凝土管道是内衬钢板外包钢筋混凝土的组合结构，管道用坝下游面上的键槽及锚筋与坝体固定。钢衬与混凝土之间不设垫层，二者共同承受内水压力。这种结构的实质是用钢筋混凝土代替了部分钢板，它的优点是：

- (1) 管道位于坝体轮廓线以外，所以允许混凝土开裂，使钢衬

和钢筋可以较充分地发挥承载作用。

(2) 利用了钢筋承载，可以减少钢板厚度，避免采用高强度厚钢板引起的技术、经济上的问题。

(3) 由于环向钢筋接头分散，钢管和钢筋在同一个地方破裂的机率极小，所以减少了钢管焊缝缺陷引起爆破的危险性。

(4) 减少外界因素对管道破坏的可能性，在严寒地区有利于管道防冻。

前苏联由于高强度钢材比较稀缺，而且认为钢衬钢筋混凝土组合结构更加安全，因此从 60 年代起已经有 5 座水电站，采用了这种结构形式，取得了一定的技术经济上的好处，并积累了一定的设计、施工经验。其中前苏联最大的萨扬舒申斯克水电站如图 1-3 所示，总装机容量 6400MW 重力拱坝坝高 236m 最大工作水头 278m，钢管直径 7.5m，外包钢筋混凝土厚 1.5m。由于采用了钢衬钢筋混凝土联合受力的结构，钢管壁厚大为减薄，仅为 16~30mm。其

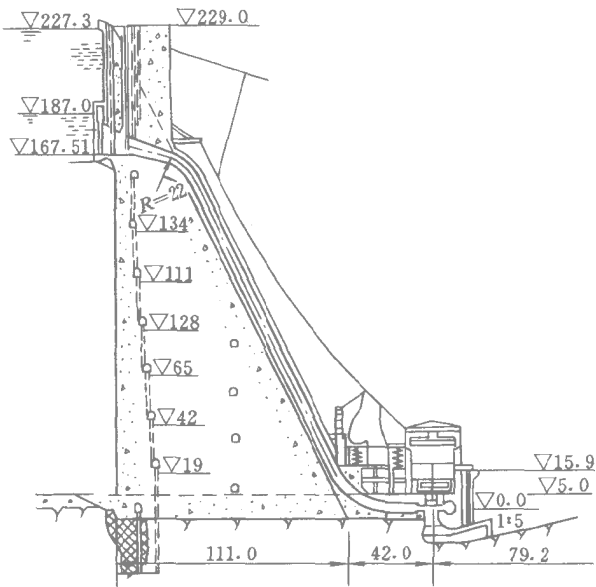


图 1-3 萨扬舒申斯克水电站

它 4 座水电站钢衬钢筋混凝土管道的主要参数如表 1-1。

由于这种形式的管道不仅具有这些优点，而且又能适应所有的混凝土坝型，所以这种管道有被广泛采用的趋势。我国已经建成的湖南东江水电站、浙江紧水滩水电站、湖南沅江五强溪水电站、青海黄河李家峡水电站，都采用了坝下游面钢衬钢筋混凝土管道。正在兴建的三峡水电站，经过十几年的科学研究，反复论证，已经决定采用坝下游面钢衬钢筋混凝土管道，布置在坝下游面浅槽内，管道露出坝面以外约一半多点，如图 1-4 所示，其主要参数列于表 1-1。以下主要对这一种结构形式进行论述。

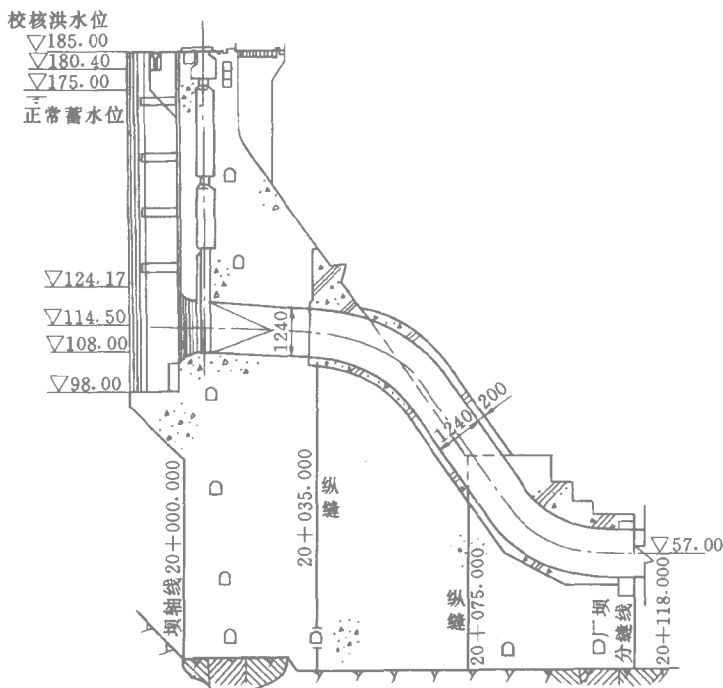


图 1-4 三峡水电站

1.3 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道构造^[1]

坝下游面钢衬钢筋混凝土管道的内层为钢管，由钢板卷制焊

成，按运输吊装条件制成一定长度的管节，运至现场进行环缝焊接组装。因为钢管埋设在混凝土内，又无外水压力作用或外水压力很小，所以如果能采取必要措施（如在钢管内加临时支撑结构）保证钢管在施工期间（包括运输和浇筑外包混凝土时）不变形，就不需要或仅需少量地在钢管外壁加设刚性环等加劲措施。

环向钢筋可设二或三层，应合理选择钢筋直径，使钢筋间距适中，利于受力和控制裂缝宽度，并便于混凝土浇筑。环向钢筋接头的焊接质量必须严格保证，并应经试验检定。前苏联已采用专门的装置将大直径（达 70mm）钢筋对接焊并卷成与钢衬管节长度对应的螺旋状钢筋环，这样不仅节约了钢材，而且减少了焊接接头，提高了质量和施工速度。内外层钢筋用角钢加工成的支撑桁架来固定，布置在每节骨架的两端。为了便于架设环向钢筋以及改善坝下游面管承受轴向力的性能，要加设纵向钢筋。与每一管节对应，组成有足够刚性的钢筋构架，整体吊运至现场，与钢管管节配合组装。内层钢筋与钢管之间用少量辐射向钢撑定位，二者之间留有 150mm 以上的间隙以利浇筑混凝土。必须指出，钢衬内外层钢筋的联合受力是靠将它们连成整体的混凝土而不是靠它们之间连接用的钢材，因此固定钢筋与钢衬的支撑应尽量少设，以免影响混凝土的浇筑质量，并避免钢衬与支撑连接处的局部应力。

管道与坝面之间有剪应力，可以在接触面上布置键槽，并加设法向钢筋。弯管段设有锚杆以防止管道与坝体脱离。

坝下游面钢衬钢筋混凝土管道的混凝土壁厚，根据钢筋布置和混凝土施工条件选定。用增加壁厚的办法来改善应力状况和抗裂性，效果是不显著的，也是不经济的。此外，增加壁厚也不能减小由坝体变形引起的管道内的轴向应力，因为管道的刚度相对坝体来说是比较小的，增加一些管壁厚仍然难于减小坝体的变形。实践说明，内径为 7~8m 坝下游面管，混凝土壁厚 1.5m 或更小些就可以了。

1.4 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道设计原则

1.4.1 荷载组合

坝下游面钢衬钢筋混凝土压力管道的荷载主要有：

(1) 内水压力。内水压力是坝下游面管的主要荷载，由钢衬和钢筋混凝土共同承受。当荷载较小，混凝土不开裂时，内水压引起的环向拉力大部分由混凝土承受，钢衬和钢筋的应力不大。荷载较大时，混凝土内将发生径向裂缝，环拉力主要由钢衬及钢筋共同承受。由于与钢筋单价相比钢板较贵，而且含筋量高又有利于阻止裂缝发展，因此原则上钢衬可采用结构要求的最小厚度且多用钢筋。但迄今为止，实际工程采用的钢衬厚度仍大于或接近于同截面钢筋的折算厚度。

(2) 温度荷载。温度荷载，主要由管道施工期与运行期温差差以及运行期间管道内外温差所产生。坝下游面管属厚壁管，管外壁不设保温层，因此温度应力不可忽略。混凝土不开裂时，管壁内外温差引起的温度应力，在管道的内外壁符号相反，因此宜布置内外两层钢筋受力。混凝土开裂以后，混凝土内的温度应力被释放，但必须考虑温度荷载所引起的钢衬和钢筋的附加应力及对裂缝宽度的影响。

(3) 坝体变形引起的作用在管道上的轴向力。坝体受载后，引起坝下游面管的轴向应力以及管道与坝面之间的剪应力和正应力。坝下游面管道的轴向应力主要是压应力，沿管道横截面略呈不均匀分布，在钢衬和外周混凝土中都存在，使坝下游面管处于不利的三向复合受力状态，在设计中要进行核算。管道与坝体之间的应力要用合理的管坝连接措施来解决。此外，拱坝的拱向应力也会引起管道中的附加应力，但设计中一般忽略不计。固定在坝体上的管道，局部地增加了坝体的刚度，也会影响坝体的变形和应力，其影响与管道的尺寸有关，在坝体设计中要考虑这种影响。

(4) 振动荷载。坝下游面管道因管内动水引起的振动，用与坝

体固定的措施来消除。地震荷载下管道与坝体作为整体考虑。

1.4.2 设计要求及准则

迄今为止，由于我国和国外的水电站压力钢管设计规范中均没有钢衬钢筋混凝土管道的内容，因此这种管道的荷载组合问题，在设计中可遵循压力钢管设计的一般性原则，参照其它管道形式进行设计。作为压力管道设计的一般性原则，要求在上述荷载各种可能的组合下，管道结构应该满足以下要求：有足够的强度；

管壁混凝土允许开裂，但裂缝宽度应该限制在允许范围内，一般不超过 0.3mm；管坝连接可靠；结构尽可能简单、安装及施工方便、经济。

内水压力是坝下游面管的主要荷载，钢衬和钢筋的参数主要由它所决定。60 年代，前苏联在克拉斯诺雅尔斯克水电站第一次采用这种管道时，没有考虑钢管与外包钢筋混凝土联合受力，只将后者视为预防钢管事故的防护性结构，在内水压力作用下，规定钢管和钢筋混凝土都能单独承受全部内水压力，安全系数前者取 1.3~1.8，后者取 1.1~1.3，总的安全系数为 2.4~3.1。

1966~1973 年，前苏联一些水电设计和科研部门在一系列理论和试验研究的基础上，得到了一些原则性结论，即：钢衬和混凝土能作为整体结构可靠地联合工作，即使钢衬与混凝土的粘结遭到破坏，也不影响管道的应力状态；结构破坏前，混凝土内产生有限的径向裂缝，正常运用时允许混凝土中发生裂缝；内水压力引起的钢衬和钢筋内的应力取值一样，与环的半径无关；

极限状态进行强度计算，在正常荷载作用下，钢衬和钢筋的应力不得超过规范所规定极限值。因而确认了按整体结构设计坝下游面管的原则，即不进行分部校核计算，只进行整体强度设计和校核。

在设计萨扬舒申斯克水电站坝下游面管时，就遵循了这个设计准则。根据上述准则完成的萨扬舒申斯克水电站坝下游面管的施工设计比以前有了很大进步，把二者作为整体结构，总安全系数取 1.8~2.0，钢衬不再按单独承受全部内水压力进行校核。同

时规定正常运行时混凝土内裂缝宽度不超过 0.3mm。

70 年代末期，我国在湖南东江和浙江紧水滩水电站首次采用坝下游面管道布置形式，在设计中，既按整体结构进行强度设计，又对钢衬和外包钢筋混凝土分别单独承载进行校核，这是为了确保坝下游面管道的安全而采取的“双保险”的设计方法。近十几年来，随着设计、科研工作的不断深入，对于坝下游面管道结构特点的认识也愈来愈深刻，在设计方法上按整体结构设计已经成为一种趋向。例如后来设计和建造的五强溪、李家峡以及三峡水电站坝下游面管，均采用了钢衬钢筋混凝土结构，而且结构总的安全系数在不断降低，正在接近前苏联的设计水平，即安全系数取 1.8~2.0。

前苏联建筑法规 CHII—56—77 规定，钢衬钢筋混凝土管道在内水压力作用下的强度计算公式是：

$$K_H n_c N \leq m_a (R_a F_a + R F_0)$$

式中 N ——内水压力（包括水锤压力）引起的环向拉力；

R, R_a ——钢衬与钢筋的屈服强度；

F_0, F_a ——钢衬与钢筋的截面积；

m_a ——工作条件系数；

K_H ——结构可靠系数；

n_c ——组合系数。

1.5 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道结构计算方法

上一节中提出的钢衬钢筋混凝土管道在内水压力作用下的强度计算公式，是计算已产生混凝土径向裂缝的管道结构的简化公式。该式的原理是，假设管道混凝土沿径向全部裂穿，混凝土不能承担环向应力，内水压力全部由钢管和钢筋承担，并且假设钢管和环向钢筋的应力值与各环半径无关，按明钢管锅炉公式计算出钢材总厚度，然后根据钢管规范的有关规定和钢筋布置因素，确定钢衬厚度，由钢材总厚度减去钢衬厚度即为各层钢筋的折算厚度。

虽然这种按明管公式计算钢材总厚度的方法概念明确，简单易行，便于设计人员操作，但仍略显粗糙。因此一些学者提出了许多更为精确的计算方法，概括起来主要有以下几种：

(1) 前苏联水工研究院高尔登，将钢衬钢筋混凝土管道简化为轴对称的厚壁圆环，采用有限元法计算钢衬、各层钢筋及混凝土的应力，常称之为高尔登法。该方法只适用于轴对称的管道结构，而且计算比较繁琐。

(2) 为了考虑管道结构的不对称性和钢衬、钢筋的作用，武汉水利电力大学马善定教授提出了钢衬钢筋混凝土管道非轴对称结构的计算方法，具体内容详见文献 [2]。为了简化计算，该方法假定钢衬与混凝土接触面上的径向压应力 P_r 沿圆周均匀分布，而切向剪应力为零，同时，将外包钢筋混凝土视为均质体，按等效弹模进行计算。经过与多个方案的有限元计算结果的比较，表明关于钢衬与混凝土接触面上径向压应力和切向剪应力的假定基本上是正确的。

由于考虑管道非轴对称结构的方法在计算外包钢筋混凝土应力时，要采用有限元或模型试验的方法，在使用上比较复杂，其结果与轴对称结构计算结果相差又不大，为此，对于管道混凝土未开裂和裂穿的两种情况，马善定教授又提出了更为简便的厚壁圆环的组合环法，本节后面将做简要介绍。

(3) 如上所述，对于坝下游面钢衬钢筋混凝土管道，简化成多层圆环的轴对称结构进行计算基本上是合理的。为此，在全面分析管道混凝土在内水压力作用下经历弹性——塑性——开裂整个过程的基础上，董哲仁教授级高工又提出了钢衬钢筋混凝土管道正交各向异性状态分析方法^[3]。该方法从求解正交各向异性体的基本微分方程入手，系统地导出了管道混凝土开裂但未裂穿和已经裂穿两种状态下的显式应力计算公式。这种方法避免了计算中解多元线性方程组的繁琐步骤，使计算更加简洁，而且可以保证计算精度，为设计人员提供了一种比较实用的设计方法

(4) 以上方法都是通过将坝下游面钢衬钢筋混凝土管道简化为轴对称结构, 根据钢衬、钢筋和混凝土变位相容的条件, 导出了计算钢衬、钢筋和混凝土应力的计算公式, 我们统称之为解析法。以上解析方法, 虽然计算比较简便, 容易为设计人员所掌握, 但由于做了许多简化与假定, 如轴对称假定、钢衬和混凝土接触面上径向应力均匀分布的假定等, 另外, 计算荷载只考虑了内水压力, 因此计算结果与实际情况还有较大差异。为了考虑钢衬钢筋混凝土管道结构的实际形状, 同时考虑内水压力、管道轴向力以及温度荷载的作用等, 近十几年来, 许多学者开始采用钢筋混凝土非线性有限元方法对管道结构进行计算分析^[3~7], 取得了较为满意的结果。下一章将对这种方法进行详细的论述。

1.5.1 混凝土开裂前管道应力分析^[1]

压力管道的直径与其长度相比一般较小, 因此可按平面应变问题来分析其内水压力作用下的应力状态。按弹性理论, 平面应变问题的计算仍可用平面应力问题的公式, 但需将弹模 E 换为 $E/(1-\mu)$ 泊松比改为 $\mu/(1-\mu)$ 。在以后的叙述中, 凡是平面应变问题, 都应作这种处理, 不再说明。

坝下游面管的设计中, 为了能充分地发挥钢衬及外包混凝土中钢筋的作用, 允许在设计内水压力下混凝土中存在径向裂缝。但是为了选择合理的管道结构形状和尺寸, 校核抗裂性能(特别是当内水压力较小或管壁按结构最小要求设计时), 分析开裂荷载限值 and 裂缝的位置, 合理布置钢筋以及进行模型试验时合理地选择模型形状等, 对混凝土不开裂时的应力状态进行分析仍然是必要的。

在平面问题中, 垂直于管道纵轴截取剖面, 如图 1-5 (a) 所示, 这种结构在内水压力下的应力分析, 由于其轮廓的复杂和材料的不均质性, 极难求得解析解, 必须进行简化才能进行分析。

1. 简化原则

为了求得管道应力的解析解, 首先将坝下游面钢衬钢筋混凝土管道简化为轴对称的厚壁圆环, 如图 1-5 (a) 所示。图中, r_0 、

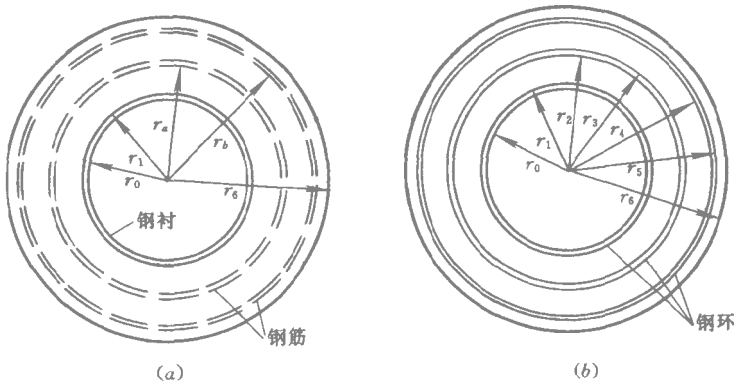


图 1-5 计算简图

r_1 为钢衬的内外半径； r_a 、 r_b 为内外层钢筋中心线处半径； r_6 为混凝土环外半径。

另外，将内外层钢筋按受力面积相等的原则折算成二层钢环，每层钢衬的中心线半径与该层钢筋中心线半径相同。设每延米管长的内层钢筋的根数为 n_a ，每根钢筋的截面积为 f_a ，总面积为 F_a (cm^2)，则折算后的钢环厚度为：

$$t_a = F_a / 100 = f_a n_a / 100 \quad (1-1)$$

折算后的钢衬中心线半径为 r_a ，所以钢衬的内外半径分别为：

$$r_2 = r_a - t_a / 2, r_3 = r_a + t_a / 2 \quad (1-2)$$

同理，外层钢筋的折算厚度为：

$$t_b = F_b / 100 = f_b n_b / 100 \quad (1-3)$$

钢衬的内外半径分别为：

$$r_4 = r_b - t_b / 2, r_5 = r_b + t_b / 2 \quad (1-4)$$

简化后的计算简图如图 1-5 (b) 所示，这是三层薄钢环、三层混凝土环的组合圆环，在均匀内水压力作用下是一个轴对称问题，可以求得其解析解。

2. 应力分析

根据组合圆环各层钢环及各层混凝土环的径向变位相容这一

条件,便可求得钢环及混凝土内的应力。

已知管道所受内水压力为 p_0 , 设最内层钢环外壁与最内层混凝土环内壁之间的径向压力为 p_1 , 最内层混凝土环外壁与中间一层钢环内壁之间的径向压力为 p_2 , 中间一层钢环外壁与中间一层混凝土环内壁之间的径向压力为 p_3 , 中间一层混凝土环外壁与外层钢环内壁之间的径向压力为 p_4 , 外层钢环外壁与外层混凝土环内壁之间的径向压力为 p_5 。可以列出各层钢环与混凝土环的内、外壁的径向变位值如下:

内层钢环外壁的径向变位为:

$$\Delta_{S1} = \frac{r_0^2}{t_0 E_S} (p_0 - p_1) \quad (1-5)$$

内层混凝土环内壁的径向变位为:

$$\Delta_{C1} = \frac{r_1}{E_C} \left[\frac{p_1(r_2^2 + r_1^2) - 2p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_C p_1 \right] \quad (1-6)$$

内层混凝土环外壁的径向变位为:

$$\Delta_{C2} = \frac{r_2}{E_C} \left[\frac{-p_2(r_2^2 + r_1^2) + 2p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_C p_2 \right] \quad (1-7)$$

中间一层钢环内壁的径向变位为:

$$\Delta_{S2} = \frac{r_2^2}{t_a E_S} (p_2 - p_3) \quad (1-8)$$

中间一层钢环外壁的径向变位为:

$$\Delta_{S3} = \Delta_{S2} = \frac{r_2^2}{t_a E_S} (p_2 - p_3) \quad (1-9)$$

中间一层混凝土环内壁的径向变位为:

$$\Delta_{C3} = \frac{r_3}{E_C} \left[\frac{p_3(r_4^2 + r_3^2) - 2p_4 r_4^2}{r_4^2 - r_3^2} + \mu_C p_3 \right] \quad (1-10)$$

中间一层混凝土环外壁的径向变位为:

$$\Delta_{C4} = \frac{r_4}{E_C} \left[\frac{-p_4(r_4^2 + r_3^2) + 2p_3 r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \mu_C p_4 \right] \quad (1-11)$$

外层钢环内壁的径向变位为:

$$\Delta_{S4} = \frac{r_4^2}{t_b E_S} (p_4 - p_5) \quad (1-12)$$

外层钢环外壁的径向变位为

$$\Delta_{S5} = \Delta_{S4} = \frac{r_4^2}{t_b E_S} (p_4 - p_5) \quad (1-13)$$

外层混凝土环内壁的径向变位为：

$$\Delta_{C5} = \frac{r_5}{E_C} \left[\frac{p_5 (r_6^2 + r_5^2)}{r_6^2 - r_5^2} + \mu_C p_5 \right] \quad (1-14)$$

变位相容条件是：

$$\Delta_{S1} = \Delta_{C1} \cdot \Delta_{C2} = \Delta_{S2} \cdot \Delta_{S3} = \Delta_{C3} \cdot \Delta_{C4} = \Delta_{S4} \cdot \Delta_{S5} = \Delta_{C5} \quad (1-15)$$

将径向变位的计算公式代入变位相容条件式，得到：

$$\frac{r_0^2}{t_0 E_S} (p_0 - p_1) = \frac{r_1}{E_C} \left[\frac{p_1 (r_2^2 + r_1^2) - 2p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_C p_1 \right] \quad (1-16)$$

$$\frac{r_2^2}{t_a E_S} (p_2 - p_3) = \frac{r_2}{E_C} \left[\frac{-p_2 (r_2^2 + r_1^2) + 2p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_C p_2 \right] \quad (1-17)$$

$$\frac{r_2^2}{t_a E_S} (p_2 - p_3) = \frac{r_3}{E_C} \left[\frac{p_3 (r_4^2 + r_3^2) - 2p_4 r_4^2}{r_4^2 - r_3^2} + \mu_C p_3 \right] \quad (1-18)$$

$$\frac{r_4^2}{t_b E_S} (p_4 - p_5) = \frac{r_4}{E_C} \left[\frac{-p_4 (r_4^2 + r_3^2) + 2p_3 r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \mu_C p_4 \right] \quad (1-19)$$

$$\frac{r_4^2}{t_b E_S} (p_4 - p_5) = \frac{r_5}{E_C} \left[\frac{p_5 (r_6^2 + r_5^2)}{r_6^2 - r_5^2} + \mu_C p_5 \right] \quad (1-20)$$

上列 5 个一次联立方程中， p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 为 5 个未知量，其余都为已知值，解方程组就可以求得 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 的值。然后根据下面的式子，就可以分别求得各层钢环和混凝土的应力为：

$$\text{钢衬应力} \quad \sigma_{S0} = \frac{(p_0 - p_1) r_0}{t_0} \quad (1-21)$$

$$\text{内层钢筋应力} \quad \sigma_{S1} = \frac{(p_2 - p_3) r_a}{t_a} \quad (1-22)$$

$$\text{外层钢筋应力} \quad \sigma_{S2} = \frac{(p_4 - p_5) r_b}{t_b} \quad (1-23)$$

内层混凝土环内壁的切向应力为：

$$\sigma_{c1} = \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} p_1 - \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p_2 \quad (1-24)$$

内层混凝土环外壁的切向应力为：

$$\sigma_{c2} = \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p_1 - \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} p_2 \quad (1-25)$$

采用类似的公式，还可以求得中、外层混凝土环的切向应力。类似地，对于具有三层或三层以上钢筋的钢衬钢筋混凝土管道，也可以按照上述方法求出管道钢衬、钢筋和混凝土的应力。实际计算时，将上述方程组编成一个小程序，可以很容易地求得计算结果。

3. 有初始缝隙时管道的应力分析

以上计算分析方法，是假定钢衬与外包钢筋混凝土一开始就共同承担全部内水压力 p_0 。而实际上，在首次充水运行时，由于钢衬与外包钢筋混凝土之间存在初始缝隙，钢衬在与混凝土接触之前，存在一个单独承载变形的阶段，然后才开始联合承载。此时管道的应力分析可以按下述方法进行计算。

设钢衬与外包钢筋混凝土之间的初始缝隙值为 Δ_0 ，而且沿圆周均匀分布，那么管道在内水压力 p_0 作用下，有一部分先使钢衬单独受力而向外变位，填满初始缝隙 Δ_0 。然后， p_0 中的剩余部分则由钢衬和外包钢筋混凝土联合承受。若此剩余部分的值为 p_0' ，则用于填满初始缝隙而由钢衬单独承受的部分应为 $(p_0 - p_0')$ ，根据变位条件：

$$\Delta_0 = \frac{r_0^2}{t_0 E_s} (p_0 - p_0') \quad (1-26)$$

可得：

$$p_0' = p_0 - \frac{\Delta_0 t_a E_s}{r_0^2} \quad (1-27)$$

将由此算得的 p_0' 代换上节公式中的 p_0 ，即可求得考虑初始缝隙时的管道应力。其中，将求得的钢衬应力与钢衬单独承受 $(p_0 - p_0')$ 时所产生的应力 $(\Delta_0 E_s / r_0)$ 叠加，即为钢衬实际所承受

的应力。

初始缝隙 Δ_0 主要由两部分组成：第一部分是施工期由于混凝土浇筑质量不好或混凝土水化热消失后冷却而产生的缝隙，此外，混凝土进一步干缩，也会产生缝隙，这个缝隙称为施工缝隙，以 Δ_1 表示。由于施工缝隙与各个工程的具体情况密切相关， Δ_1 很难通过计算来确定，往往采用工程类比法给出一个量值范围，初步计算时可取 $(2.0 \times 10^{-4} - 3.0 \times 10^{-4}) r_s$ 。第二部分是处于水电站运行充水后，温度骤降引起的钢衬冷却缝隙 Δ_2 ，其值取决于钢衬竣工时的温度 T_0 和运行时的温度 T_1 之差。可按式 (1-28) 计算：

$$\Delta_2 = \alpha_s(T_0 - T_1)(1 + \mu_s)r_s \quad (1-28)$$

式中 α_s ——钢衬的线膨胀系数；

μ_s ——钢衬材料的泊松比。

4. 算例

根据上述方法，对前苏联萨扬舒申斯克水电站钢衬钢筋混凝土管道的实例，进行了应力分析，并将计算结果与高尔登法的计算结果进行了比较。

计算时，全部采用工程的原始数据，具体参数如下：钢衬内径 7.5m，管壁厚度 25mm，外包混凝土内布置两层钢筋，内外层钢筋环的直径分别为 7.8m 及 10.2m，其中内层钢筋为每延米 4 根 $\varnothing 70$ 的钢筋，截面积为 154cm^2 ，外层钢筋为每延米 4 根 $\varnothing 60$ 的钢筋，截面积为 113cm^2 。计算内水压力为 2.61MPa。混凝土为 C20 (R200) 钢材和混凝土的弹模分别为 210GPa 和 29GPa。

计算结果列于表 1-2 的左半部，右半部为高尔登法的计算结果。对比后可以看出，钢衬、钢筋和混凝土的切向应力，两种方法所得相应值，相差均不超过 2%。

1.5.2 混凝土开裂后管道应力分析^[1]

由以上分析及计算可知，钢衬钢筋混凝土管道当混凝土不开裂时，绝大部分内水压力由钢筋混凝土承受。但当混凝土切向拉应力值较大时，将使混凝土沿径向开裂。开裂后，上述计算方法已不再适用，管道的应力分析更加复杂。