

钢筋混凝土圆形水池设计

湖北给水排水设计院

中国建筑工业出版社

钢筋混凝土圆形水池设计

湖北给水排水设计院

中国建筑工业出版社

本书在总结我国实践经验的基础上，全面地介绍了钢筋混凝土圆形水池的设计方法。

在荷载组合方面，阐述了温度和湿度变化对内力的影响及最不利荷载组合情况；在内力计算方面，对水池的结点计算，提出了结点刚度修正和结点不平衡力的计算方法；在截面计算方面，提出了池壁的裂缝深度和剩余截面抗裂度的计算方法等。对常用的圆柱壳、截头圆锥壳、球壳和弹性地基上的圆板，均编制了内力系数表，可供设计时使用。

本书供给水排水工程结构设计、施工和油池设计人员参考。

钢筋混凝土圆形水池设计

湖北给水排水设计院

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷



*

开本：787×1092毫米1/16 印张：20³/8 字数：482千字

1977年12月第一版 1977年12月第一次印刷

印数：1—8,830册 定价：1.55元

统一书号：15040·3388(平)

前 言

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我院设计人员，在设计革命运动中，坚持下楼出院，深入工地和生产现场，实行工人、领导干部、技术人员以及设计、生产、科研三个三结合，从1972年开始，用了四年多的时间，在总结我国二十多年来实践经验的基础上，对圆形钢筋混凝土水池的最不利荷载组合、组合壳体的结点计算、池壁裂缝深度和剩余截面计算等提出了新的看法；为了减少繁重的结构计算，加快设计进度和保证设计质量，我们尽可能地将各种计算过程编成系数表和图表。对书中的计算公式，除少数注明出处者外，其他公式都进行了详细的推导。

本书在编写过程中，北京市市政设计院、上海市政工程设计院和北京市自来水公司协助我们做了很多调查工作；湖北省电力勘察设计院计算组、武汉大学数学系数学专业七二届第五组的师生，协助我们编制了第三章和第四章的系数表；国家建委建筑科学研究院物理所和黑龙江省建筑研究所对第二章的内容，南京工学院丁大钧同志对第八章的内容，以及其他兄弟单位对本书的各章节也提出了很多宝贵意见，在此谨致谢意。

由于我们的政治思想水平和技术业务水平所限，错误与遗漏之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
第一节 圆形水池的用途和结构形式	1
第二节 水池设计的几个问题	5
一、关于水池的荷载及荷载组合问题	6
二、壳体的内力计算问题	8
三、壳体组合时的结点计算问题	9
四、池壁环向力的截面计算问题	10
五、池壁环向力的截面计算的技术经济效果	10
第二章 水池池壁结构热工计算	12
第一节 池壁温差计算	12
一、稳定传热温差计算的一般概念	12
二、平壁壁面温差计算	13
三、圆形水池池壁壁面温差的计算	17
四、大气温度波动对壁面温差的影响	21
五、中面季节平均温差计算	22
第二节 混凝土的温度变形	24
一、混凝土温度变形的特点和池壁温差计算的特殊问题	24
二、几个常用公式	24
第三节 池壁湿差计算	27
一、混凝土湿度变化的基本概念	27
二、湿差计算中需要注意的问题	28
三、湿差计算的常用公式	29
四、将湿差化为等效温差	30
第三章 圆柱形池壁的计算	33
第一节 液压作用下的圆柱壳计算	33
一、平衡方程	33
二、几何方程	34
三、物理方程	36
四、弹性曲面的基本微分方程及其解	38
五、内力及位移的一般表达式	40
六、几种不同边界情况的解答	41
第二节 轴对称温度场作用下的圆柱壳计算	49
一、季节温差 t_R 作用下的圆柱壳池壁的计算	52
二、壁面温差 Δt 作用下的圆柱壳池壁的计算	52
三、季节温差 t_R 和壁面温差 Δt 共同作用下的圆柱壳池壁的计算	57
第三节 边缘力作用下的圆柱壳计算	57

第四节 圆柱壳边缘刚度的计算	64
一、顶自由、底固定时边缘刚度的计算	65
二、两端固定时边缘刚度的计算	66
第五节 施加预应力时圆柱壳的计算	68
第六节 例题	69
第四章 圆锥形池壁的计算	75
第一节 圆锥壳的薄膜内力和变位	75
一、矩形荷载 p 作用	78
二、三角形荷载 q 作用	79
三、自重 g 作用	80
第二节 圆锥壳的弯曲内力和变位	82
一、平衡方程	82
二、几何方程	83
三、物理方程	85
四、基本微分方程及其解	86
五、内力及变位的一般表达式	90
六、几种情况下的解答	93
第三节 轴对称温度场作用下的圆锥壳计算	99
一、平衡方程	99
二、几何方程	100
三、物理方程	100
四、基本微分方程及其解	101
五、内力及变位的一般表达式	102
六、几种情况下的解答	102
第四节 圆锥壳的近似计算	104
第五节 例题	105
第五章 圆球形池底及池顶计算	112
第一节 薄膜内力及其边缘变位	112
第二节 边缘干扰及温差作用下的内力计算	113
一、平衡方程	113
二、几何方程	114
三、物理方程	114
四、基本微分方程及其解	115
五、边缘力作用下球壳的内力	118
六、边缘变位作用下球壳的内力及边缘刚度	119
七、周边固定时球壳的边缘弯矩和边缘水平力	120
八、温度内力	121
第三节 球壳的内力计算步骤	121
第四节 例题	122
第六章 等厚圆板及圆环计算	126
第一节 弹性地基上的圆板	126
一、均布荷载 q 作用下的周边自由板	126
二、边缘力矩 M_0 作用下的周边自由板	130

三、边缘力 P 作用下的周边自由板	131
四、均布荷载 q 作用下的周边固定圆板	131
五、边缘力 P 作用下的周边固定圆板	132
六、边缘转角 $\beta = 1$ 作用下的圆板固端刚度计算	133
第二节 周边支承的圆板	133
一、均布荷载作用下的圆板	134
二、边缘转角 $\beta = 1$ 作用下的圆板固端刚度计算	135
三、边缘作用有力矩 M_0 时的铰支圆板	136
第三节 多支柱支承的圆板	136
第四节 圆环	138
一、液压 q 作用	138
二、季节温差 t_R 作用	139
三、壁面温差 Δt 作用	140
四、水平位移 δ 和转角 β 作用	140
五、地基抗力的作用	141
第五节 例题	141
第七章 水池的结点计算及内力叠加	144
第一节 用变位法计算水池结点	144
一、变位法的法方程	144
二、正负号规定	150
三、结点刚度修正和结点不平衡力的计算	150
第二节 内力叠加	153
一、各基本结构的最终边缘力	153
二、基本结构各点的最终内力	154
第三节 无水平位移的结点计算	154
一、用变位法求解结点	154
二、用力矩分配法求解结点时存在的问题	155
第四节 水池内力计算的步骤	155
第五节 例题	156
第八章 池壁截面计算	196
第一节 目前池壁截面计算存在的问题	196
一、池壁截面计算的情况	196
二、裂缝深度与剩余截面	197
三、内力松弛系数	198
四、设计安全度	199
第二节 池壁截面的强度计算	199
一、小偏心受拉情况	200
二、大偏心受拉情况	201
第三节 池壁截面的裂缝计算	202
一、裂缝宽度问题	202
二、裂缝深度和剩余截面计算	202
三、假想应力计算	204

四、剩余截面的抗裂度验算	207
第四节 计算步骤及例题	208
一、计算步骤	208
二、例题	208
第九章 对水池设计、施工和使用的几点建议	216
第一节 工程实例分析	216
一、池壁环向力截面的内力分析和截面计算结果	216
二、竖向力的截面内力分析和截面计算	219
第二节 池壁产生裂缝的主要原因	219
第三节 预防池壁产生贯穿性裂缝的几点建议	220
一、设计应注意的问题	220
二、施工注意事项	221
三、使用过程中要注意的问题	222
第四节 池壁产生贯穿性裂缝后的处理原则	222
一、池壁渗漏的处理原则	223
二、池壁渗漏和池壁补强的处理原则	223
附 表	228
附表使用说明	228
附表 1 ~ 附表 41 (圆柱壳内力系数表)	231
附表 42 ~ 附表 64 (圆锥壳内力系数表)	272
附表 65 ~ 附表 69 (球壳内力系数表)	305
附表 70 ~ 附表 80 (圆板内力系数表)	310
主要参考文献	318

第一章 概 述

第一节 圆形水池的用途和结构形式

钢筋混凝土圆形水池，通常是由单个或数个旋转壳体所组成，由于壳体具有良好的受力条件，并易于采用装配式和预应力钢筋混凝土结构，这对于建造大容量的水池，节约建筑材料（与相同容量的矩形水池比较，有时能节约一半的钢筋和大量水泥）、加速施工进度、提高水池的抗裂抗渗性能、保证使用效果等方面均有显著的优越性。因此，圆形水池被广泛地应用于给水排水工程构筑物。

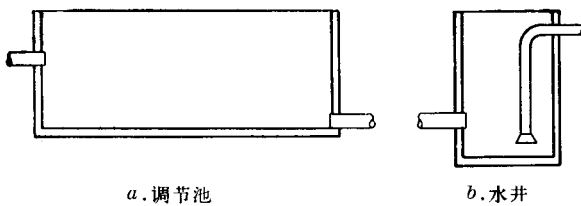


图 1-1 调节池及水井

圆形水池根据其不同的用途、容积和形状，大多数由圆柱壳、圆锥壳、球壳、圆板以及多支柱支承的圆板等结构组成。现将一些常见的结构形式介绍如下：

1. 由圆柱壳和圆板组成的水池及泵站

用于水质要求不高的工业用水调节池（图1-1 a）、水井（图1-1 b）和水源泵站（图1-2）。

由于工艺的要求，通常在水池内需要增加反应室和浓缩室，如给水的脉冲澄清池（图1-3 a）和悬浮澄清池（图1-3 b）。

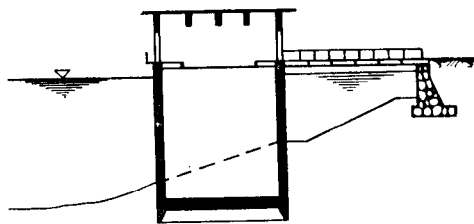


图 1-2 水源泵站

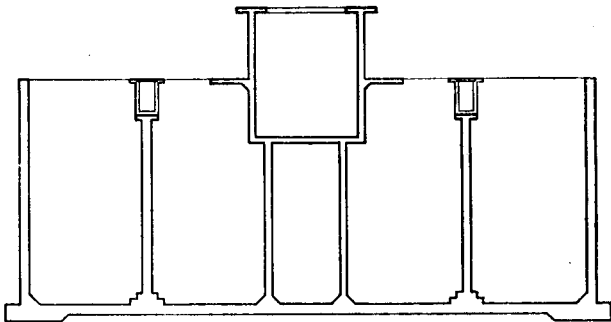


图 1-3 a 脉冲澄清池

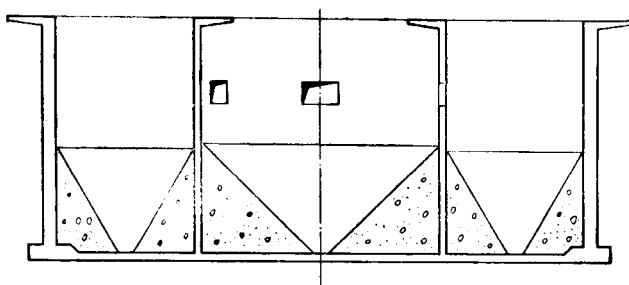


图 1-3b 悬浮澄清池

2. 由圆柱壳和多支柱支承的圆板组成的水池

用于生活用水和水质要求较高的工业用水的清水池（图1-4）、较大容量的清水池，多采用预应力钢筋混凝土结构。目前已建成者，容量最大为 15000 立方米，常见的为1500~7500 立方米（图 1-5）。

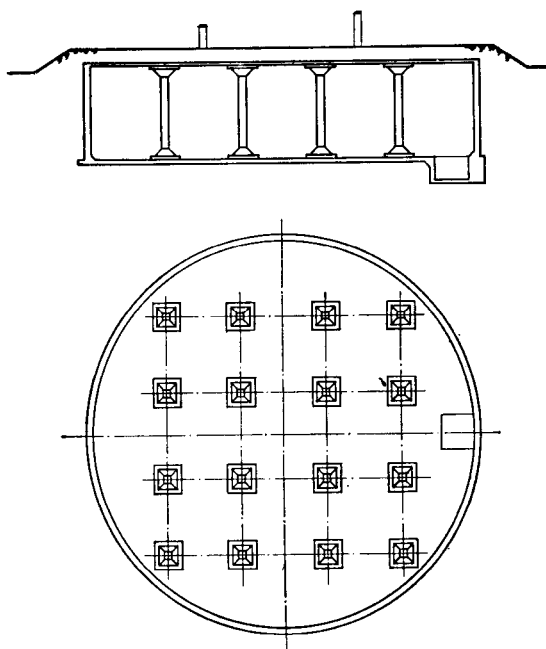


图 1-4 钢筋混凝土清水池

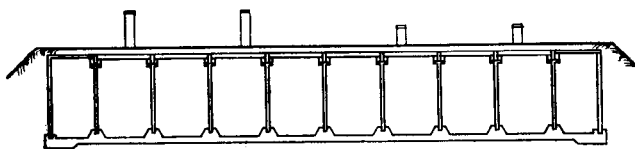


图 1-5 6000米³预应力钢筋混凝土清水池

3. 由两种或两种以上的壳体、圆板组成的水池

很多给水工程的沉淀池或澄清池，以及排水工程的曝气沉淀池和二次沉淀池，是采用两种以上的壳体及圆板组成。如图1-6是辐流式沉淀池；图1-7是竖流式沉淀池；图1-8是二次沉淀池；图1-9是曝气沉淀池；图1-10至1-12是加速澄清池；图1-13是水塔。

不少深度较大的水源泵站，也采用两种以上的壳体所组成，如图1-14。

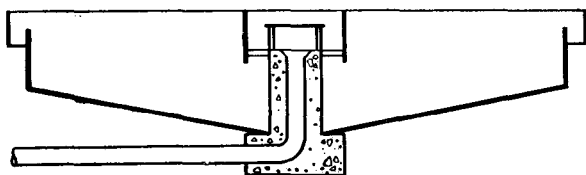


图 1-6 辐流式沉淀池

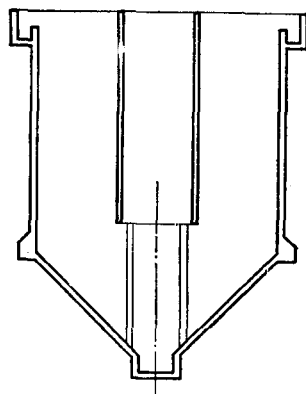


图 1-7 竖流式沉淀池

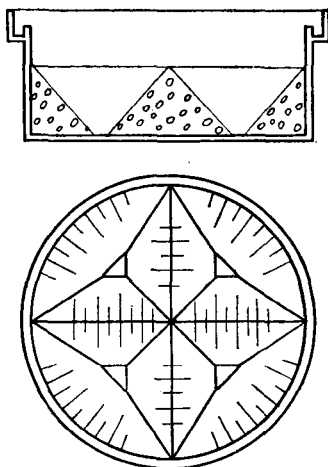


图 1-8 二次沉淀池

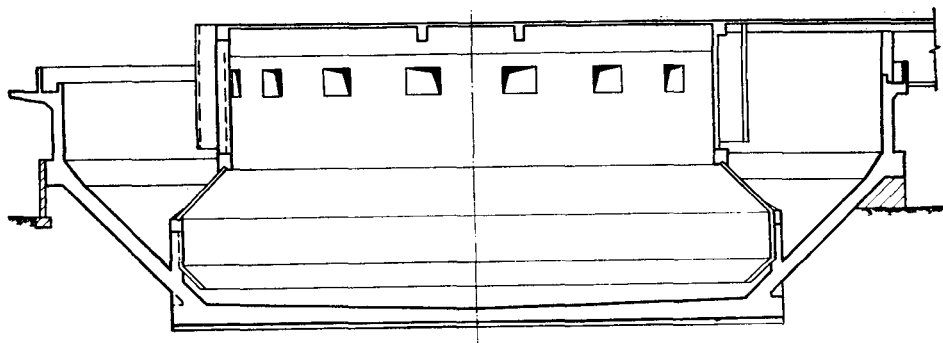


图 1-9 曝气沉淀池

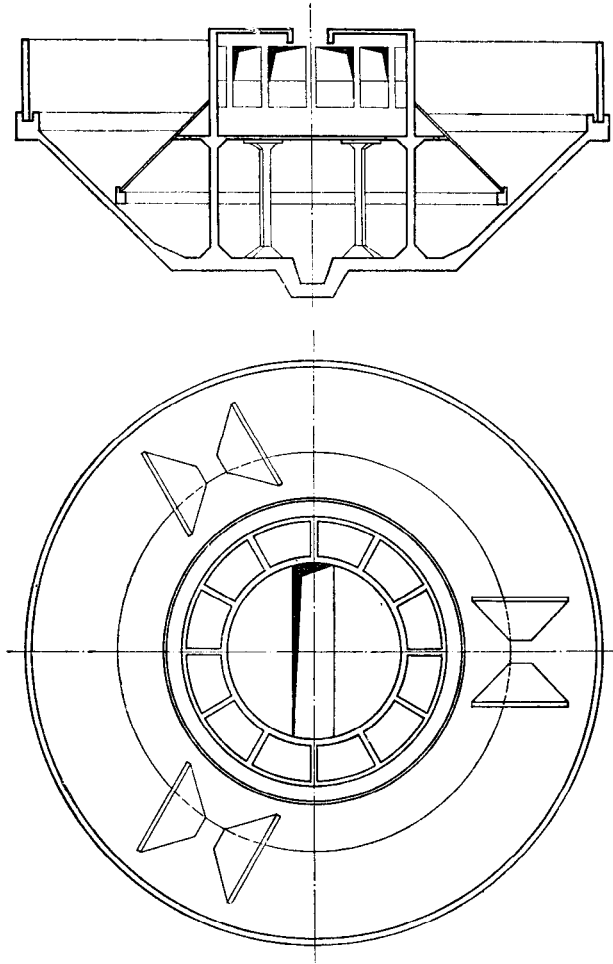


图 1-10 加速澄清池

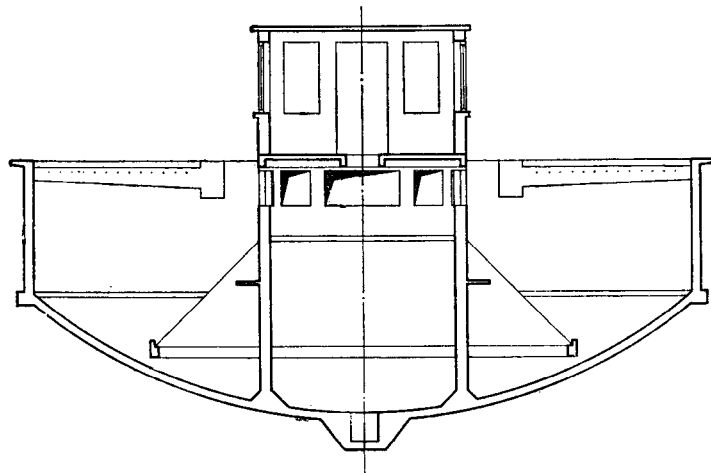


图 1-11 加速澄清池

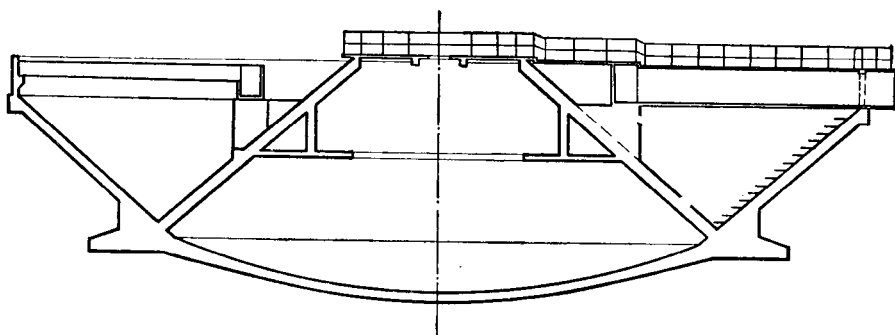


图 1-12 加速澄清池

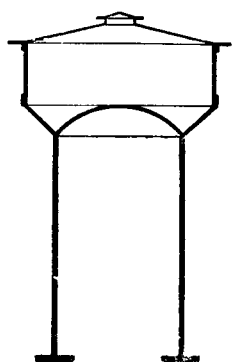


图 1-13 水 塔

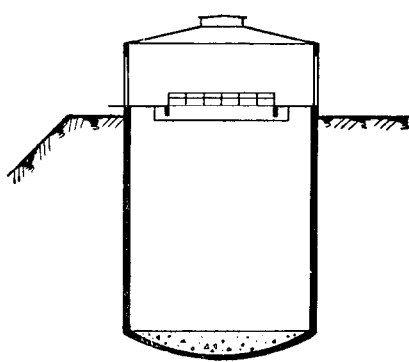


图 1-14 水源泵站

第二节 水池设计的几个问题

圆形水池的计算，过去虽有不少资料，但是根据这些资料所设计的水池，在工程实践中还存在不少问题，有待进一步研究解决。例如，在荷载计算方面，关于温度和湿度的变化规律，以及它对池壁内力所产生的影响尚欠比较全面的探讨和研究；对于组成圆形水池的一些基本壳体和由两个壳体或圆板所组成的水池，其内力计算方法有些过繁，不便于实际中应用，而有些近似计算方法和假定与实际不符，达不到设计应有的精度要求；对于圆形水池池壁经常出现的竖向裂缝和竖向贯穿性裂缝，其形成的原因和计算方法尚缺少探讨。这些问题，都有待通过调查研究来加以解决。

基于上述存在的问题，如何使设计更符合结构的实际工作情况，满足使用要求，在保证必要的安全度的条件下，尽可能地节约建筑材料用量，以便更好地贯彻多快好省地建设社会主义的总路线。遵照毛主席关于“实践的观点是辩证唯物论的认识论之第一的和基本的观点”的教导，我们决心带着这些问题，到实践中去进行调查研究。建国二十多年来规模宏大的社会主义建设所积累的丰富实践经验，正是我们提高认识的泉源。因此，我们对全国各地的三十多座钢筋混凝土圆形水池的设计、施工和使用情况作了比较详细的调查。对水池池壁的表面温差进行了大量的实测，对水池的裂缝情况作了比较详细的测绘（其中八座具有代表性的水池的调查资料，分别列于第九章表9-4至表9-11中，以供分析研究）。

在实际调查所取得的感性认识的基础上, 经过去粗取精, 去伪存真, 由此及彼, 由表及里的分析, 提高了我们对于上述存在问题的认识。现将我们对这些问题的看法简介如下:

一、关于水池的荷载及荷载组合问题

(一) 水池的荷载

过去的水池设计, 一般只考虑池内水压和池外土压(如有地下水时, 还包括地下水水压)两种荷载的作用; 少数水池还考虑了温度变化所引起的内力, 而多数水池未考虑温度变化的影响; 湿度变化所引起的内力基本上没有考虑。工程实践告诉我们, 有些水池, 在施工过程中, 尚未承受水压和土压荷载之前池壁就产生了裂缝。显然, 这些裂缝与水压和土压的荷载无关, 而是温度或湿度变化引起的内力所致。还有一些外露(即地面式)水池, 在开始使用时未出现裂缝, 但经过一段时间以后, 就陆续出现了裂缝, 这说明水压不是导致出现裂缝的主要原因, 只有在水压与温度变化(或湿度变化)的共同作用下, 才会出现裂缝。还有很多地下式(即有覆土的)水池, 只要施工过程中不产生裂缝, 覆土以后, 一般就不会再产生裂缝, 这说明是由于地下式水池其温度和湿度变化比较小的缘故。以上这些现象都说明, 水池的荷载并非只有水压和土压两种, 同时还必须考虑温度变化和湿度变化的影响。

温度变化对于水池池壁的影响, 可以分为两种情况来考虑。一种是由于水池池内的水温与池外空气(或填土)的温度不同, 这就使池壁内外壁面的温度不同, 两者之差称为壁面温差(以 Δt 表示); 另一种是由于施工期间混凝土闭合时的温度, 与水池使用时最高或最低温度之差, 称为季节平均温差(以 t_R 表示)。一般来说, 由于混凝土具有热胀冷缩的物理性能, 所以温度变化就会使池壁产生变形。当这种变形受到约束时, 就会使池壁产生应力。

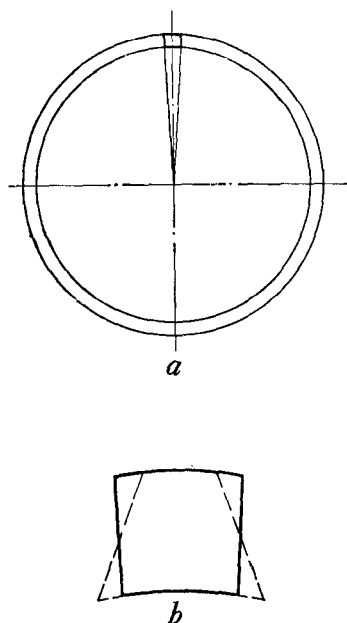


图 1-15

壁面温差对池壁的影响, 是造成池壁温度高的一侧膨胀, 温度低的一侧收缩。现以圆环为例, 从图1-15 a 的圆环取出单位宽度的截面来研究。假设圆环外侧温度低于内侧, 就会出现和图1-15 b 所示虚线部分的变形, 即外侧纤维沿圆周方向要缩短, 同时内侧的纤维沿圆周方向要伸长, 圆环内外侧的伸长和缩短, 必然导致圆环曲率的改变。由于封闭圆环自身阻碍这种曲率的改变, 致使温度低的一侧不能自由缩短而产生拉力, 温度高的一侧不能自由伸长而产生压力。这种自身阻碍变形的作用称之为自约束, 由于温度变形受到约束而产生的应力称为温度应力。

从一个圆柱壳池壁的研究来看, 壳体的变形不但受到自约束的限制, 而且还受到边界条件约束的限制。如图1-16 a 的壳体, 因上下端均为自由, 它不存在边界约束所产生的应力。但是, 图1-16 b 和图1-16 c 两种情况就会因受到边界条件的约束使壳体不能自由变形而产生温

度应力。这是由于壳体的变形受到其它物体的约束，所以称为外约束。因此，一个壳体（或基本结构），温差影响所产生的应力，应为自约束和外约束两种应力的叠加。图1-16所示的三种边界条件都是理想的边界条件，在工程实践中是难以做到的。关于边界条件的假定，可参看第七章的结点计算部分。

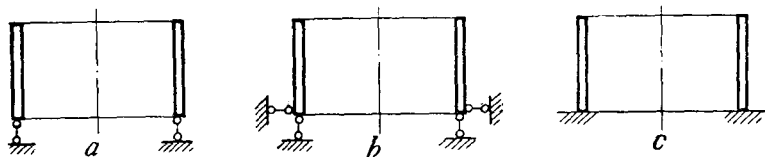


图 1-16

季节平均温差由于截面上的温度在同一时间内是常数，所以壳体本身可以自由变形，不存在自约束所产生的应力，如图1-17 a。但是，当受到边界条件的约束时(图1-17 b)，就会在外约束的条件下产生温度应力。

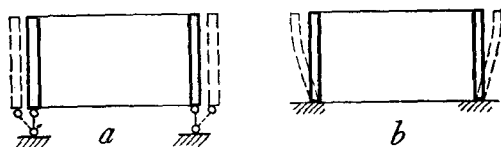


图 1-17

一般来说，壁面温差如图1-16所示的三种边界条件下，产生较大的环向弯矩，而季节平均温差则在后两种边界条件下，产生较大的环向力。

由于混凝土具有湿胀干缩的物理性能，当池壁混凝土因含水量变化而产生的变形受到约束时，就会产生应力，这种应力称为湿度应力。有一些水池的池壁，在拆除混凝土的模板时，就发现它产生了裂缝，如果排除了模板变形所引起的因素，那就很明显是由湿度应力所造成的。在我们调查过程中，还发现有些水池池壁外表面的竖缝是在炎热的夏季出现的。夏季池内水温低于池外气温，温差是不会导致这种裂缝的，显然是由于壁面湿差使池壁外表面出现较大的拉力而产生的裂缝。湿差的计算包括池壁壁面湿差和中面平均湿差两部分。湿差与温差虽然是两种不同的物理现象，但是两者所引起的变形却是相似的。因此，为计算方便起见，可将湿差化为等效温差^①来计算。

温度变化和湿度变化还存在一个互相影响的问题。从若干试验资料来看，长期与水接触的混凝土，当温度高于 -4°C 至 -7°C 时，温度变形为热胀冷缩，温度线胀系数基本上是个常量，当温度低于 -4°C 至 -7°C 时，其线胀系数就不再是常量，而且出现冷胀热缩的变形。因此，我们建议温度应力计算，外壁面以 -5°C 为其下限。混凝土的水分迁移，在很大程度上受到温度梯度的影响。很多试验表明，当试件一侧为水，另一侧处在摄氏零度以

① 等效温差是按照温差与湿差变形相等的原则，将湿差化为等效变形的温差计算。详见第二章第三节。

下的环境中,则水分向低温的一侧迁移,从而使湿度应力下降接近于零。

(二)水池的荷载组合问题

荷载组合是否符合实际,是关系到结构物是否安全和经济合理的问题。根据上述的调查研究,结合以往的实践和温、湿差计算等因素,有如下几种荷载组合。

第一种荷载组合:水压+自重。这是水池的基本荷载组合。在这种荷载组合下,所产生的环向弯矩较小,一般可以忽略不计,环向力的截面可近似按中心受拉情况计算。

第二种荷载组合:水压+自重+冬季温差(包括冬季壁面温差和季节平均温差)。这是水池池壁最不利荷载组合之一。冬季由于湿迁移,使得池外壁混凝土的水分增加,所以在气温低于摄氏零度时,可以不考虑湿差而只计算冬季温差。这种荷载组合是否属于最不利的组合,要看气候条件而定。当冬季壁面温差的绝对值大于夏季壁面湿差(指化为等效温差的数值)的绝对值时,一般属于最不利的荷载组合。在这种荷载组合下,池壁均有较大的内力,环向力的截面应按偏心受拉情况计算。

第三种荷载组合:水压+自重+夏季壁面湿差。这也是水池池壁最不利的荷载组合之一。由于夏季最大温差与湿差所引起的变形几乎抵销,两者同时作用所引起的内力可以忽略不计,但是壁面温差受气温变化的影响,当气温下降至与水温的数值接近相等时,而湿差并不会减小。所以,夏季只需要考虑壁面湿差所引起的内力。一般的说,当夏季壁面湿差(指化为等效温差的数值)的绝对值大于冬季壁面温差的绝对值时,就是最不利的荷载组合(如中南、华东地区)。这种荷载组合的截面计算与第二种荷载组合相同。

第四种荷载组合:土压+自重。这是池外覆土的水池,当有地下水时,应包括地下水的水压。这种组合也是水池的基本荷载组合之一。在这种荷载组合作用下,产生较大的竖向弯矩,深度较大的水源泵站尤为明显。竖向力的截面可按偏心受压或近似按受弯构件作强度验算来确定配筋。环向力的截面由于属中心受压或偏心受压情况,一般都有足够的安全度。

上述的第二种和第三种荷载组合,在某些情况下,当冬季壁面温差与夏季壁面湿差(指化为等效温差的数值)相差不大时,哪一种属于最不利的荷载组合,还不能直接从温、湿差的数值来判断,需要通过内力计算才能确定。

二、壳体的内力计算问题

组成水池的各种壳体,如前所述的圆柱壳、圆锥壳、球壳,作为一个独立的基本结构,都是根据弹性薄壳的理论,建立弹性曲面微分方程来求解的。由于圆柱壳和圆锥壳的两端均各具有两个边界条件。按照这两个边界条件求解积分常数时,就需要建立一组四元一次代数方程。在以往的工程实践中,人们为了简化积分常数的求解过程,将内力计算的误差确定在某种范围内的前提下,忽略远端的影响,使一组四元一次代数方程改变成两组各自独立的二元一次代数方程。这就是人们认为能够忽略远端影响的壳体,将它称为长壁,认为不能忽视远端影响的壳体,称为短壁。顶部封闭的球壳就不存在长、短壁的问题。参考文献[13]所介绍的圆柱壳采用查内力系数表的计算方法,是设计人员比较欢迎的一种计算方法。根据我们计算比较,采用查内力系数表来计算壳体,能够保证工程实践所需要的精度,而且在某些情况下,采用查表的方法比按公式用数解法求解的精度还高。因此,为加快设计进度和提高设计质量,我们对圆柱壳、圆锥壳、球壳和圆板的计算,都编制了内力

系数表供设计时使用。现就三种壳体的内力系数表的特点，作一些简要的介绍。

(一) 圆柱壳内力系数表：参考文献[13]的内力系数表的计算方法，已翻译成中文由《工程建设》一九五〇年第八、九、十期发表。该文所介绍的内力系数表，虽适用于长壁和短壁的情况，但边界条件不齐全，表内参变量的间隔也嫌过大，编表时泊桑比(μ)的取用数值与钢筋混凝土通常采用的泊桑比数值也不同。为此，我们根据水池设计的需要，编制了一套圆柱壳的内力系数表。这些表在荷载方面，包括了三角形荷载、矩形荷载、壁面温差和季节温差等情况；在边界条件方面，包括了各种水池结点调整前可能假定的边界条件和刚度系数表，以及结点调整后求各点内力所需的在边缘力作用下的内力系数表；对于表内参变量的间隔也适当加密，泊桑比取钢筋混凝土通常采用的数值即 $\mu = \frac{1}{6}$ 。由于编制这些系数表时，考虑了两端边界条件的互相影响，所以可适用于长壁和短壁的圆柱壳池壁。

(二) 圆锥壳内力系数表：圆锥壳的计算比圆柱壳的计算要复杂一些。就我们所搜集到的很不完整的资料来看，尚没有一种切实可行的简化计算方法和精度较高的内力系数表供水池设计使用。虽然在参考文献[4]、[17]都论述在某些条件的前提下，可以将圆锥壳简化为对等的圆柱壳来计算，但是这些特定的某些条件，并不是很明确的，还有待于进一步研究。本书提供的截头圆锥壳内力系数计算表，是立足于保证工程实践所要求的计算精度而编制的。运用这些计算表，可以大大地减轻计算工作量。

(三) 顶部封闭球壳内力系数表：是根据给水排水工程常见的几何尺寸编制的，表中只需两个参变量，便于查用和插值。与某些资料介绍的内力系数表减少一个参变量。

三、壳体组合时的结点计算问题

在本章第一节里所介绍的圆形水池，是由两个或两个以上的基本结构（即圆柱壳、圆锥壳、球壳、圆板及环梁等）组合而成。由于两个或两个以上的基本结构的连结处，其边

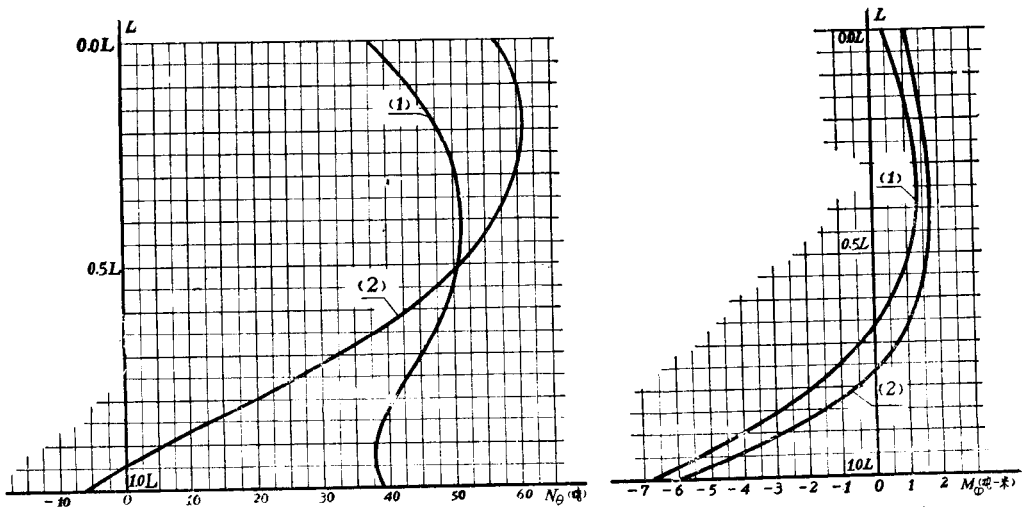


图 1-18 锥壳内力比较

- (1) 一按第七章介绍的变位法计算，但未考虑结点刚度修正和附加力的影响
- (2) 一按第七章介绍的变位法计算，考虑了结点刚度修正和附加力的影响