

预应力混凝土卵形消化池

姜洪兴 郑麟 王大龄

(上海市政工程设计研究院 200002)

内容摘要 本文简介了济南污水处理厂 3 座容量各为 10536m^3 的预应力卵形消化池的池体结构分析、预应力钢丝束的配置、张拉锚固体系设计、施工、预应力混凝土成形。

一、工程概况

国内污水处理厂构筑物中的消化池,一般是采用柱壳锥顶的结构形式,迄今还未见有采用卵形消化池的工程实践。卵形池体与以往所建的柱壳锥顶池体比较,无论在工艺上和结构本身都具有明显的优点。国内从 60 年代就有建造卵形消化池的设想,由于计算手段、建筑材料、施工工艺等方面的因素,终未获实施。国外在环保设施方面发展很快,卵形池体在德国、日本等国都已形成一套独特方法和专利,设计、施工技术趋于成熟,我国在这方面尚属空白。鉴于卵形消化池在污泥处理和结构方面所具有的技术经济的优越性,在济南污水厂工程中,设计了容量为 10536m^3 的预应力砼卵形消化池。通过该项工程的实施,为进一步推广这一新型的结构创造条件。

该消化池池体分为上部壳体和下部块体两部分。地面以上为壳体部分,高度为 29m,最大内径为 24m,壳体壁厚为变厚度,最大处为 700mm,最小处 400mm,地面以下深 15m,基础采用直径为 800mm 钻孔灌注桩,池壁水平向及垂直向均采用低松弛高强钢绞线施加预应力。水平向采用 HM 型游动锚张拉锚固体系,竖向采用 OVM 型张拉锚固体系。该工程 1993 年 11 月份完成了闭水试验和池体应力测试。图 1 为该池体的竖向剖面简图。

二、池体结构分析

1. 计算假定

块体两部分,壳体和块体按计算要求均离散成壳元与块元。块元与壳元的交界处按块元的位移条件确定。变厚度壳体分区段用于等厚

度壳元来代替,共分为 4 种厚度,分别为 0.4m、0.425m、0.545m 及 0.70m。块元在桩支承处按固定支承边界条件考虑。桩的点支承为方便计算,假定为具有与桩径等宽度的固定支承环,计算出节点力后再根据半径 R_i 确定出该圈处用桩数,见图 2 所示。

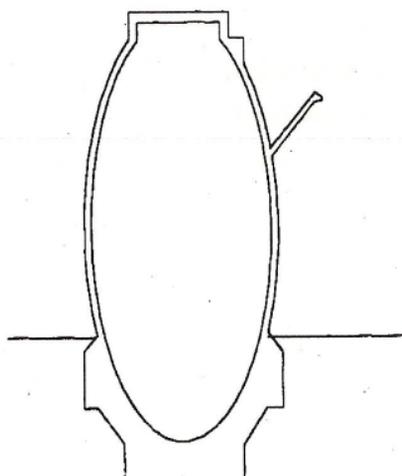


图 1 消化池竖向剖面示意图

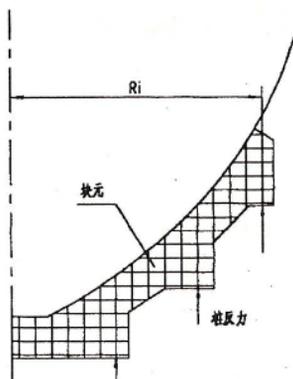


图 2 计算用桩数

内力计算采用可解析回转对称体的通用结构分析程序。该程序采用半解析有限元的理论编制。由于程序综合了解析法和离散计算的优点,使得整个求解效率大大提高,同时也改善了计算精度。

整个计算的内力输出结构采用空间杆由分析通用程序 SAP—5 进行复算。

2. 池体上的作用

(一)永久作用

(1)结构自重

(2)土压力

(3)池内液体压力,取液体容量为 $10.9\text{KN}/\text{m}^3$

(4)预应力

(二)可变作用

(1)温度作用:根据壁厚、保温层的构造、壁的温差取 7.5°C ;季节温差取 10°C

(2)地震作用:消化池为大体量重要构筑物,设计中按 7 地震设防

3. 计算结果

壳体单元输出各节点环向力、竖向弯矩等六个薄膜内力。

块体单元输出各节点六个节点内力分量。

4. 荷载效应组合

按承载能力极限状态组合进行设计。

根据 GBJ9—87

(1) $\gamma_0 S \leq R$

式中 γ_0 ——结构重要性系数取 1.10;

S ——荷载效应组合设计值;

R ——结构抗力设计值、设计中此值作为预压应力的控制值。

(2) $S = \gamma_C C_K + \gamma_{Q1} Q_{1K}$

式中 C_K 为荷载效应系数,上式用计算内力值代换为

$$S = \gamma_C N_K + \gamma_{Q1} N_{1K} + \gamma_{Q2} N_{2K} \cdot \Phi_{Q1}$$

式中 γ_C ——永久荷载的分项系数取 1.20;

N_K ——自重及池内液压作用产生的内力;

γ_{Q1} ——温度荷载分项系数取 1.40;

γ_{Q2} ——水平地震荷载分项系数取 1.30;

N_{1K} 、 N_{2K} ——分别为温度变化和地震作用产生的内力;

Φ_{Q1} ——可变荷载组合值系数取 1.0。

表 1 为具有代表性节体处的内力值

节点号	壁厚 (cm)	环向拉力(KN/m ²)
		自重 + 液压 + 温度 + 地震
13	40	130.8
28	42.5	997.5
65	45	1870.8
83	55	3099.6
100	65	874.1
103	67.67	179.4

三、池体预应力张拉锚固体系设计

1. 预应力钢材选用

池体最大环向拉力为 $3100\text{KN}/\text{m}^2$,一般的钢材和施加预应力的方法(如绕丝法、电张法)在本工程中均不能满足设计要求。因此选用高强度、低松驰级钢绞线作用预应力材料,与普通松驰级钢绞线相比较,低松驰级钢绞线具有较突出的特点:

(1)预应力松驰损失值低

在 80%破坏荷载下 1000 小时的松驰值为 3.5%或 4.5%,普通松驰级为 12 级;

(2)屈服强度高,受力产生的永久变形小。

其屈强比 $\geq 90\%$;

(3)产生在生产过程经过稳定化处理,贮存、施工均较方便。

本工程所选用的钢绞线为新华金属制品有限公司的产品,其生产质量标准均按美国 ASTM、A416—87cl 和英国 BS5896:1980 标准。

其适用的钢绞线技术标准如下。

级别 270KSI

公称抗拉强度 $1860\text{N}/\text{mm}^2$

预应力环锚体系

公称钢面积	140.00mm ²
最小钢面积	260.7mm ²
最小延伸率	3.5%
1000 小时最大松弛率	
70% σ_0 时	2.5%
80% σ_0 时	3.5%

2. 张拉锚固体系

钢绞线的锚固体系有 JMF 型、XM 型和 QM 型等。OVM 锚具是在以往群锚技术的基础上又改进开发的新一代的锚具系统。OVM 锚具适用于锚固不同级别的高强钢绞线,具有良好的自锚性能,施工操作简便,锚固性能可靠。HM 型锚具是在 OVM 锚具体系的基础上为适应曲线预应力筋各分段连续一次张拉的要求而开发的又一类型锚具。经分析比较后确定,水平向预应力束采用 HM 型锚具,竖向预应力束采用 OVM 型锚具。

HM 型锚具最突出的特点就是张拉端和锚固端在一块锚板上实现,锚板是可以移动的,不直接与池壁接触,所以又称为游动锚。其特点是:

- (1) 池壁上不需要专门设置竖向肋及特殊的加固加强措施;
- (2) 可以大大的减少曲线预应力筋的弯道摩擦损失;
- (3) 采用适当的分段,各分段同步张拉,可以满足大直径池体整圈一次建立预应力的要求。

本工程池体水平向预应力束采用三点同步张拉,每区段绞线束所对的中心角为 120°(如图 3 所示)。

由于弯道摩擦阻力的作用,钢绞线束中的预应力值随距张拉端的距离增大而减小,为使在整个曲面上建立的预应力值大致均衡,故上圈预应力束,均在其下一圈的基础之上按逆时针旋转 30°。

HM 型锚具组装件的组成(包括张拉设备)

如图 4 所示。

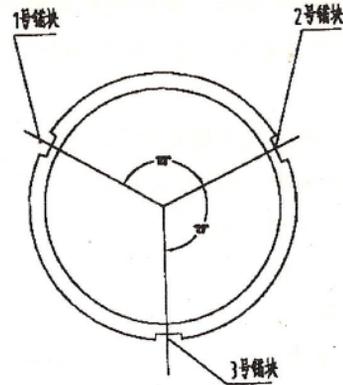


图 3

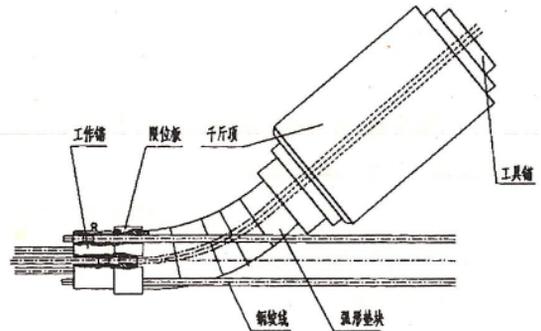


图 4

根据柳州市建筑机械总厂和长江水利委员会所做的静载试验报告, HM 型锚具组装件的效率系数 > 0.95 ; 弧形型块弯道及锚口总摩擦损失小于 12%, 在实际施工时可采用超张拉来部分补偿这部分附加的预应力损失。

3. 池壁水平向张拉孔的构造及波纹管的

选择

张拉孔按以下要求设计:

- (1) 工作锚可在张拉孔中自由移动;
- (2) 张拉孔封堵时确保工作锚的砼保护层厚度。

根据池体的内力计算值, 采用二种钢绞线束 6 束。

波纹管选用黑铁皮现场卷制, 管径按有关

资料介绍在正常施工条件下孔道与预应力筋的面积比为 3.5~4, 实际选用管径为: 6 束 $\varnothing 65$, 4 束 $\varnothing 50$ 。

四、预应力束的配置

1. 预应力损失值计算

(1) 张拉端锚具变形和钢筋内缩 σ_{11} , 这部分预应力损失值产生在张拉端附近, 在钢绞线应力最大处, 曲线预应力筋孔道壁阻在全部预应力损失值中占很大比例。本工程中张拉端至计算截面的切线夹角为 60° , 这部分损失值产生后, 由于负摩阻的影响, 对计算截面处的钢绞线内应力值不起作用, 相反这部分损失值还可以调整钢绞线内应力的不均匀性。在某些工程设计中还采用适当的内缩量来调整预应力筋的应力均匀性。所以, 预应力总损失值中不计 σ_{12} 。

(2) 预应力束的孔道壁阻损失 σ_{13}

由于 HM 型锚具的施工工艺特点, 这部分损失值中应加入锚口处弧垫摩阻损失。根试验这部分的损失与施工时的熟练程度, 弧形垫块的块数、垫块上是否涂有润滑剂有关, 综合各方面因素采用 $12\% \sigma_{con}$ 。

另一部分孔道摩阻按规范公式计算。

(3) 预应力钢绞线束应力松弛 σ_{14}

规范公式是按普通松弛级计算的。

新华金属制品有限公司 (XMPC) 生产的低松弛级钢绞线在 $0.8 f_{pk}$ 的张拉应力下 1000 小时的松弛值小于 4.5%, 与规范公式计算比较此值是其的 0.5 倍, 实际设计中此值选用 $0.045 \sigma_{con}$ 。

(4) 砼收缩和徐变 σ_{15}

按规范公式计算, 池体处于高湿度环境中, 计算值可降低 50%。

预应力总损失值为 $0.429 \sigma_{con}$

2. 预应力筋的张拉控制应力 σ_{con}

σ_{con} 取 $0.8 f_{pk}$

f_{pk} 钢绞线强度标准值 1860 N/mm^2

σ_{con} 取值大于规范规定 10%, 因为

(1) 低松弛级钢绞线屈服强度高, 屈服比大于 90%;

(2) 锚前预应力损失占 12%, 主要产生在张拉时, 弧形垫块弯道损失, 如减去这部分损失, 锚后的最大应力值为 $0.704 f_{pk}$, 满足规范的要求;

(3) 有利于提高实际预应力值, 达到设计要求。

3. 水平向钢绞线束的配置

配置原则: 池壁由外荷作用产生的环向张拉力全部由预应力筋来承受, 并使池壁保持有 $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ 的剩余压应力。

根据施工工艺要求, 池壁的构造要求, 钢绞线的最小间距取 180, 最大间距取 900。

由于环向力随着池壁高度的上升而减小, 为更合理的利用钢绞线的强度值, 在池壁高度一定范围内采用 4 束来配置。

池壁根部, 池体壳体单元与块体单元相交之处, 由于块体的刚度远大于壳体的刚度, 施加在壳体上的预应力很大一部分都被块体所吸收了。因此, 只在壳体上施加预应力很难达到要求的应力值。同时, 只在壳体上施加预应力在交界处就会产生应力突变。由于块体的边界效应, 环向预应力的作用效应转变成的以竖向弯曲变形为主, 通过局部划细网络计算后可以说明这一点。因此, 设备中对位于地面以下部分的块体单元的一定范围内也配置了预应力束。

竖向预应力筋的配置以考虑池体的整体构造要求为主, 卵形体处于空间三向受力状态, 池壁以承受环向轴拉力为主, 竖向应力相对很小。但在壳体与块体的交界处, 由于边界效应, 具有大的弯曲变形, 这部分弯曲变形在空池时, 即在施工或检修阶段最为不利。因此在配置竖向预应力筋时考虑如下要求:

(1) 部分抵消空池时的弯曲应力值;

(2) 提高池体的整体预应力度。

五、应力测试

预应力卵形消化池国内在设计 and 施工方面均属首次, 缺乏这方面的实际经验, 为确保工程设计的安全可靠, 验证所取设计参数的正确性, 工程设计中安排了应力测试的内容。

测试分两个方面:

(1) 实测池体在施工阶段(预应力张拉阶段)及满载时的实际应力值。

从基础砼浇筑开始就跟踪埋入应力计, 应力计的布置根据理论计算时的应力分布情况确定分每圈 3 点、4 点、6 点布置, 整个池体共埋入 120 个应力计。

从第一道预应力束开始张拉时即开始跟踪测读, 测读工作一直延续到充水试验后一段时间, 埋入的应力计长期有效。测读所采用的仪器为 SD-520 日本共和静态应变仪, 最后对测读数进行数值分析, 做出最终的测试报告。

(2) 测定曲线预应力束在弯道摩阻力最大这处的实际应力值, 以此来比较按规范公式计算的摩阻损失的差异。

为了直观的测出钢绞线中的应力值, 在块中预应力束孔道口开了一个窗口, 在钢绞线中接入全封闭式应力传感器, 钢绞线被张拉时直接读出每级拉力下应力传感器的读数。

安装时先把要求测读部位的钢绞线切断, 断头上加套管后用 GYJ 专用挤压器挤压成一端带套管的接头, 然后与传感器夹具连接在一起。

(3) HM 型锚具弧形垫块应力损失

HM 型锚具弧形垫块弯道摩阻占总控制应力的 12%, 是否能减小这部分损失, 为此做了不同垫块数及在弧形弯道中涂润滑剂与不涂润滑剂的几组试验。

六、施工

卵形消化池施工主要分项工程为

1. 基础工程(桩、桩承台)。
2. 壳体模板工程。

3. 砼工程。

4. 预应力张拉工程

卵形池体是一空间双曲面体, 给模板的架立和定位带来很大的困难。国外在模板架立技术上已趋成熟, 有定型的拼装式模板, 如迪维达克式圆锥形模板, 这种模板采用液压可以沿着要求的曲线爬升, 弯曲的角度可以调整, 国内设有这方面的技术。

本工程由中建八局二会公司负责施工, 他们精心设计出了一套独特的模板系统。所采用的立模材料尽可能多利用现有的支模构件和定型钢模板, 这种模板系统形成流水作业之后可以满足施工进度和质量等方面的要求。该模板系统为中建八局的专利。

池体砼在现场拌制后用泵送至浇筑点, 池体砼选用的强度等级为: 基础部分 C30, 壳体部分 C40。

预应力张拉工程是本工程的关键所在, 施加预应力也是整个设计所面临失败的关键, 预应力张拉前对施工质量提出严格要求:

(1) 每圈预应力束必须达到设计所要求的控制应力值;

(2) 不允许有孔道堵塞及漏浆;

(3) 确保钢绞线和锚固可靠;

(4) 及时进行孔道灌浆;

张拉程序设计时按如下原则:

(1) 使分批张拉产生的摩力损失值最小;

(2) 方便施工。

为减少砼收缩和徐变产生的预应力损失, 设计中要求池体砼全部浇筑完毕后, 养护三个月以上才能进行预应力束的张拉, 这样的要求对于地面以下块体上预应力束的张拉带来一些问题, 当地的地下水位很高, 接近于地表, 如果满足上述要求, 施工降水将会持续很长一段时间, 基坑长时间不能回填会对上部壳体的施工带来很大的不便, 经权衡之后, 改为地面以下块体先张拉, 基坑回填后, 进行上部壳体的施工, 待壳体全部施工完毕后, 经养护达到设计要求

后再开始整体一次张拉,这样做会对壳体部分有效压力的建立有所减少,因此,通过理论计算后定为下部块体以上的壳体施工 1.5m 高度以后,才允许基础块体部分施加预应力以满足最大应力达加的要求。

壳体部分预应力束的张拉按如下顺序。

绞线的壳体上每圈的编号为 V_{12} 、 V_{13} 、 V_{14} ...

V_{112}

张拉顺序为

V_{12} 、 V_{14} 、 V_{16} V_{112} (双号圈)

V_{13} 、 V_{15} 、 V_{17} V_{111} (单号圈)

每圈张拉分三点同步进行,用对讲机同步调整度,张拉前对千斤顶油压表进行标定,张拉控制应力值按油压表读数及钢绞线伸长量来双重控制,加荷顺序为

1. $0 \rightarrow 0.1 \sigma_{con}$ 全部放松,调整绞线及弧形垫空间隙;

2. $0 \rightarrow 0.1 \sigma_{con} \rightarrow 0.5 \sigma_{con} \rightarrow 1.0 \sigma_{con}$ ——持荷三分钟,千斤顶回油锚固。

七、几点讨论

1、本工程闭水试验刚结束,本文所介绍的内容待工程实践总结后进一步完善。

2、计算理论还有待进一步完善,尤其是在地震作用下涉及到池内固液藕连震动的问题,该问题国内还未见有成熟的计算理论,如在强地震区建造,不能忽视。

3、池体配置了双向预应力筋后,如何合理配置非预应力普通钢筋,有待进一步探讨。

4、卵形消化池的一次性投资成本要大于圆柱型池体,但如考虑包括运行期内的综合成本分析后,将可显示其优越性。目前还缺少这方面的资料,有待以后收集和整理,为进一步推广这一新型结构创造有利的条件。

5、本文仅介绍了卵形消化池设计的概况,经过这次工程实践,将准备就卵形壳体的内力分析、卵形池体的实测应力分析和消化池的防腐保温构造等专题分别进行专文探讨。

参考文献(略)

国家知识产权局来我公司检查专利工作

10月26日,国家知识产权局审查五部黄主任一行五人,专程到我公司检查指导专利工作。

在公司期间,黄主任一行听取了有关部门的工作汇报,与项目负责人和专利申请发明人进行了座谈,并实地检查了我公司的专利工作。检查组认为,我公司实施技术创新和建设现代企业制度工作卓有成效,为专利工作的开展创造了良好的条件;企业领导对专利工作的高度重视,使专利工作从制度、机构、人员、资金上有了保障;公司员工专利意识增强,使

企业专利工作得以深入持久地开展,这是一条成功的经验。检查组高度评价了我公司在技术创新和专利工作中引进激励竞争机制、实施专利申报奖励办法,特别赞赏我公司在项目开发中实行的“四位一体”(技术、专利、论文、工法)同步实施的方法。他们认为,这些措施有利于激发科技人员和全体员工的发明创造性,有效地加快专利工作的开展,很有企业特色。在柳期间,黄主任一行还介绍了当前国际、国内的专利信息动态。

(技术中心 杨金秀)