

东深供水改造工程 $\phi 4.8$ 米大型无粘结预应力涵管的有限元仿真分析

严振瑞 朱方敏

(广东省水利电力勘测设计研究院 广州 510635)

摘要: 本文结合东深供水改造工程中的大型无粘结预应力涵管的结构设计, 针对两种预应力锚固方案: 环锚和对锚, 采用三维有限元技术对其进行了应力分析研究, 主要分析两种方案下的预应力损失和预应力效果, 并综合考虑施工等因素, 确立合理的预应力锚固方案, 为设计提供依据。

关键词: 涵管 预应力 有限元

东深供水改造工程(以下简称东改工程)是由东江向香港、深圳以及工程沿线东莞城镇提供饮用源水及农田灌溉用水的跨流域大型调水工程, 输水线路全长约50公里, 其中C II 标段凤凰岗-窑坑段线路长3.4km, 根据设计方案, 该段结构型式为浅埋预应力压力圆管, 单管内径4.8m, 共设两管, 平行布置。单个涵管设计过水流量为 $45\text{m}^3/\text{s}$, 采用后张无粘结预应力结构。内径4.8m的大型现浇预应力涵管的实际应用在国内外尚属首例, 是东深供水改造工程重大技术课题之一。

本工程无粘结预应力涵管, 在设计中先后提出了管顶环锚和以管底座作支撑的对锚(以下简称管底对锚)两个方案。本文采用有限元分析手段, 对这两种方案的涵管结构进行分析, 据此为选用合理的锚固方案提供依据。

1 设计标准与结构型式

东改工程被批准为一等工程, 本管道为一级建筑物, 结构安全等级为 I 级。管道将长期处于地下的环境, 因此环境条件属于二类, 预应力混凝土构件裂缝控制等级由水工混凝土结构设计规范定为二级(有限预应力设计)。

本管的HD(内水头与管内径的乘积)最大值为144, 适宜采用现浇预应力混凝土管。经过多个方案的比较, 最终确定采用现浇无粘结预应力混凝土“内圆外城门洞型”涵管结构(如右图1), 这与国内经验认为 $HD = 100 \sim 300$ 时, 宜采

用预应力混凝土管的意见是吻合的。而东改工程将涵管做成“内圆外城门洞型”则主要是为了施工更方便, 同时也容易保证施工质量。

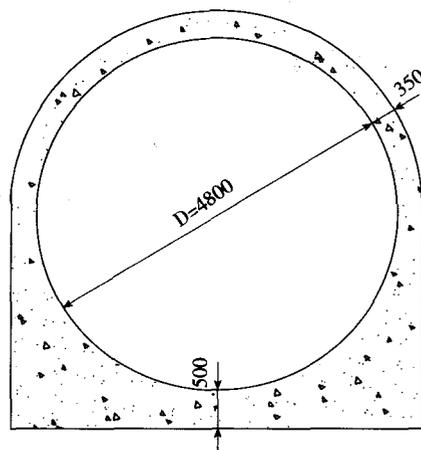


图1 涵管截面示意图

2 环形预应力作用机理

涵管采用无粘结预应力结构, 所以有必要了解环形预应力的分布特点。环形预应力技术是通过张拉环形预应力钢绞线对管道混凝土施加预应力, 以承担内水压力等。曲线锚束与直线锚束在预应力形成机理上有所不同, 直线束主要靠锚头挤压构件端部, 藉此向内传递内压力; 而环状曲线束则主要通过锚索张拉变形挤压孔道壁, 使管体混凝土截面内形成预压应力。取平面曲线锚束, 根据静力平衡方程, 可以推导出下式:

$$p = T/\rho, f = \mu_0 p$$

其中 p 为预应力钢绞线与孔道间的压力集度; T 为计算截面处预应力钢绞线张拉力; ρ 为计算截面曲率半径; μ_0 为预应力钢绞线与孔道间的

注: 《东深供水改造工程大型现浇后张无粘结预应力混凝土涵管设计》项目获第二届欧维姆预应力技术奖一等奖。

摩擦系数。由于环形预应力钢绞线与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失在全部预应力损失中所占比例较大，因而预应力钢绞线的沿程张拉力大小决定了钢绞线对孔道壁的挤压力大小，进而影响到截面的预压应力效果。对于圆管，钢绞线布置一个圆周时的钢绞线张拉应力如下图2。

在张拉端张拉力较大，由于锚具回缩使得槽口附近有较大预应力损失，而钢绞线中间部分张拉力则损失较大，张拉力的这个分布特点成为在确定锚固方案时需要考虑的一个因素。

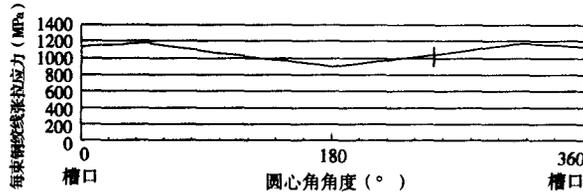


图2 钢绞线张拉应力

3 两个锚固方案的有限元分析

3.1 锚固方案

根据涵管截面以及钢绞线作用机理和预应力损失变化规律，设计计算表明，钢绞线的布置、张拉和锚固方式，对管身应力分布和抗裂性能有重大影响。因而提出了管顶环锚和管底座对锚两个方案：

(1) 管顶环锚方案钢绞线束张拉及锚固位置设在管顶截面 45° 处及 315° 处，即相邻两束钢绞线的锚头错开 90° ，两锚头之间的纵向距离为 $2d$ （ d 根据管型不同取不同的长度）（见图3）；

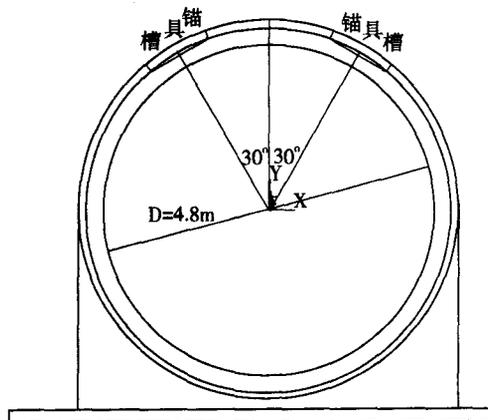


图3 环锚方案

(2) 管底对锚方案钢绞线束张拉及锚固位置设在管底座两侧侧壁上，并且钢绞线有向上 10°

的上翘角度，锚固点距地面高度650mm，纵向水平间距为 d （见图4）。

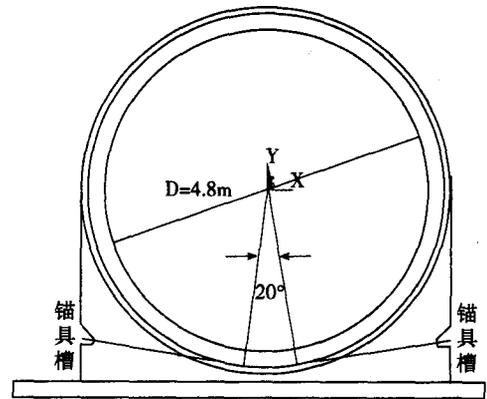


图4 对锚方案

上述两个方案中，钢绞线圈半径为2.65m；按设计内水头为20m、25m和30m分别分为A、B和C型管，钢绞线束间距 d 按A、B和C型管分别取360mm、340mm及300mm。

3.2 有限元模型

对于这两种锚固方案，本文建立三维有限元模型进行了应力分析。为了全面地分析结构中的局部加强部位的应力分布，同时为了考虑预应力钢筋的影响，在进行三维仿真分析时采用三维实体单元来建立计算模型。而对于横向曲线筋的预应力按静力等效的原则，在锚具所在单元位置施加集中力，锚具间的曲线筋所产生的分布力则按静力等效划分为分布力，并以节点力的形式加到节点上。

结构在受荷变形后，钢绞线张拉力有所提高，但提高很小，这点可由其他工程试验结果得到验证，而且未考虑张拉力的提高，对于结构分析是偏安全的。

采用上述做法大大简化了前处理工作，减少了集中力的施加，避免了过多的单元产生应力集中，把局部区域影响降到最小，使得计算结果较为合理。

本文分析中，对于所采用的有限元模型，主要考虑混凝土自重、钢绞线张拉力、内水压力以及填土压力。计算工况为：

工况1（施工期）：混凝土自重+钢绞线张拉；

工况2(试水期):混凝土自重+钢绞线张拉+内水压力;

工况3(运行期):混凝土自重+钢绞线张拉+内水压力+填土重;

工况4(检修期):混凝土自重+钢绞线张拉+填土重。

3.3 有限元结果分析

管顶环锚和管底对锚方案对于涵管应力分布的不同影响在于:环锚在管底附近预应力效果较小,而在管顶则较大;管底对锚则正好相反,尤其在管底区域有两倍的钢绞线截面积,会对该部位造成较大的应力影响。选取各种工况组合中较为不利的A型、C型有限元计算成果如表1:

表1 正常运行工况时涵管环向应力(MPa)

应力方案		A型		C型	
		设计填土	最大填土	设计填土	最大填土
管顶环锚	管底内壁	-0.76	-1.34	-0.26	-2.29
管底对锚	管底内壁	6.37	5.10	8.35	6.44
	管顶内壁	3.03	1.64	3.62	1.34

注:表中压应力为正,拉应力为负。

有限元结果表明,对于环锚方案,正常运行工况、试压工况及检修工况,A型管管底截面内壁均出现不大的环向拉应力,最大值仅为0.76MPa,径向拉应力出现在试压工况管底截面外壁,其值为1.33MPa,控制情况为正常运行工况;C型管情况与A型管相似,控制情况也是正常运行工况,此时管底截面内壁出现2.29MPa的环向拉应力,径向拉应力则出现在外壁,其值为1.2MPa。

对于管底对锚方案,其最小有效张拉力点的位置出现在管顶,但此处截面积较小,故对混凝土的预压应力效果较好,上表结果也说明管顶的预应力效果较好。管内壁一般不出现拉应力,仅在正常工况时管腰处有0.01MPa的拉应力。但是,由于管底预应力钢绞线的截面积增加了一倍,而且该处钢绞线的张拉力较大,故而管底环向压应力较大,而管底外表面则出现较大的径向拉应力,最大为1.85MPa。对于相对较薄弱的管顶,各管型在不同工况条件下均未出现拉应力。

4 方案比较

由两个方案的有限元对比分析,可看出:

(1)管顶环锚方案的薄弱截面在管底,经过改进,增加横向刚度,对于覆土较厚的条件是有利的;管底对锚方案的应力条件则相对较好。根据应力状态分析,我们认为两个方案都是可行的。

(2)管顶环锚方案锚固槽口设在管壁上,削弱了管壁截面,存在较严重的应力集中现象;管底对锚方案的钢绞线在管底截面密集交叉,而基底受地基约束,在张拉力作用下,出现较大的径向拉应力。

(3)就施工而言,管底对锚方案的施工难度较大,主要是钢外模安装较复杂和管底钢绞线密布,工人进仓振捣混凝土较为困难,稍有不慎则可能影响管底关键部位的混凝土质量;其次是张拉钢绞线要两端同时进行,工艺略为复杂。

(4)工程投资方面,两方案无大差别:管底对锚方案锚具材料较省,而安装费用则较多;环锚改进方案则相反。

5 结论

通过对涵管的两种方案进行三维有限元分析,可以得到如下结论:

(1)本工程所拟定的“内圆外城门洞型”涵管结构是合理的,能够满足要求及设计标准。

(2)设计所提出的两种方案都是可行的,考虑到管底对锚方案的管壁应力状态更好,可以满足一级裂缝控制条件,采用该方案较好。

(3)采用有限元分析手段,建立合理的有限元模型,既能全面地分析复杂非杆系结构的应力状态,也能分析结构在预应力作用条件下的应力状态。

参考文献

- [1] 周氏等.《水工混凝土结构设计手册》.中国水利电力出版社,1999年
- [2] 赵瑜等.大型预应力混凝土箱形渡槽结构三维有限元分析.长江科学院院报,1999年
- [3] 陶学康等.《无粘结预应力筋在混凝土圆形煤仓中的应用》.特种结构,1991年
- [4] 赵顺波,江瑞俊.《环向后张预应力混凝土技术及其工程应用与发展·世纪之交的预应力技术》.科学技术出版社,1998年