

环形后张预应力混凝土技术及其工程应用与发展

赵顺波 江瑞俊

内容提要 根据国内外技术和工程实例调研结果,本文概括地总结了环形后张预应力混凝土技术的现状和发展趋势,简要介绍了黄河小浪底工程排沙洞双层双环后张无粘结预应力混凝土衬砌工程情况。

关键词: 预应力混凝土 环形后张技术 工程应用

前言

近年来,以采用高强钢丝和钢绞线、高强混凝土为特征的高效后张预应力混凝土技术,由于其在保证结构整体抗震性、提高结构耐久性和适用性、降低工程造价和使用维护费用等多方面的优越性,在我国房屋、桥梁结构中得到了广泛应用,在各种特种结构,如筒仓、蓄水池、污水消化池、核电站安全壳、电视塔等工程的应用中也得到了迅速广泛地发展。在水电工程领域,预应力技术在控制结构变形和控制裂缝发生与发展等方面的优势也得到了肯定。目前在水工结构领域的工程设施加固、坝体混凝土裂缝控制和坝体加高加固以及弧形闸门支墩锚固等领域已经积累了十分丰富的实践经验并形成了具有水工结构特色的大型预应力混凝土锚固技术体系。1992 年清江隔河岩水电站 4 条引水隧道采用环形后张有粘结预应力混凝土衬砌,揭开了我国在水工压力管道中应用预应力混凝土技术的新篇章。

环形后张预应力混凝土技术是在建造圆筒形断面的工业储仓、市政蓄水池、污水消化池以及水工压力管道等工程背景下发展起来的,最初的主要目的是保证混凝土结构具有足够的抗裂能力,进而提高其耐久性和适用性。在建造过程中,工程界还发现圆筒形预应力混凝土结构较钢管结构具有施工更加简便易行、综合造价更加低廉等特点。环形后张预应力混凝土之所以发展成一项独具特色的专项技术,在于它

区别于其它预应力混凝土所独有的预应力筋束锚固支撑方法、张拉施工方法和锚固区防腐处理方法等。相对于国外在环形后张预应力混凝土结构设计理论研究、技术体系的开发、施工工艺和规范的制定等方面,我国还存在较大的差距,因此,在广泛深入的调研工作基础上,系统开展环形后张预应力混凝土技术的研究,具有重要的应用理论价值和工程实践意义。

1. 环形后张预应力混凝土技术评述

1.1 材料

同常见的直线或曲线后张预应力混凝土技术相同,环形后张预应力混凝土技术按预应力筋束与混凝土的相互关系和施工工艺划分为后张有粘结和后张无粘结两大体系,混凝土强度等级在 C40 以上;预应力筋束采用高强钢绞线和高强钢丝束,发展趋势是低松弛级高强钢绞线和高强钢丝束;有粘体系的成孔材料为镀锌或不镀锌低碳钢波纹管。定型商品化的无粘结预应力筋束已有市场供应,如柳州欧维姆建筑机械有限公司和天津钢丝一厂等。

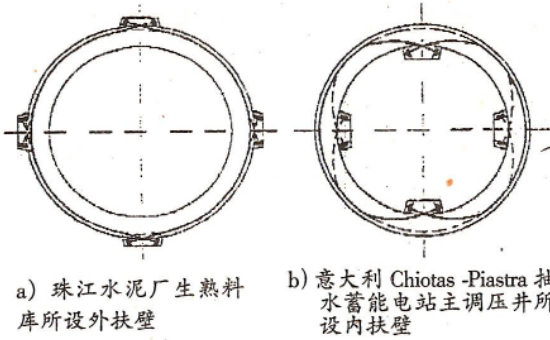
1.2 环形预应力筋束的锚固支撑方法及锚具的选择

1.2.1 扶壁支撑 沿轴向在管道壁内表面或外表面设置带形扶壁做为预应力筋束的锚固和张拉承台(图 1)。扶壁沿环向的布置和扶壁数目的确定,应力求在环向建立均匀的预压应力。对于竖立的圆筒形结构,扶壁沿环向应对称均匀布置;对于斜或平放的压力管道,则

赵顺波 华北水利水电学院副教授、博士

江瑞俊 黄河小浪底工程 CGIC 联营体成员

预应力环锚体系

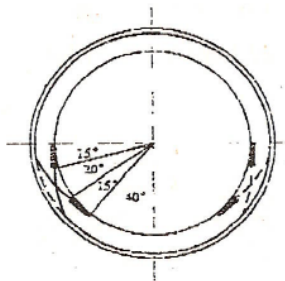


a) 珠江水泥厂生熟料库所设外扶壁 b) 意大利 Chiotas-Piastra 抽水蓄能电站主调压井所设内扶壁

图 1 环向预应力筋束的扶壁锚固支撑方法

应考虑施工的方便和可行性。扶壁的设置应保证张拉面与端部的预应力筋束垂直, 满足张拉施工空间及锚具的封头保护等要求。为了避免或尽量减少预应力筋张拉造成的局部次应力, 设置的外扶壁应保持预应力筋束末端在环形切线的延长线上, 设置的内扶壁应使预应力筋束从管壁外环向内环转向时具有较小的内弯曲率并采用较大的包角(一般为 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$)。

1.2.2 槽口支撑 沿轴向在管道壁内侧或外侧开设槽口做为预应力筋束的锚固和张拉承台(图 2), 其设置原则同扶壁支撑。设置外槽口可以在满足受力要求的前提下, 既不增加余的混凝土工作量, 也不影响结构整体的外观(槽口封堵), 而且便于结构的滑模施工。



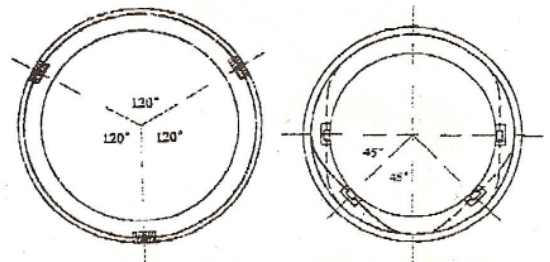
隔河岩水电站引水隧洞所设的内槽口

图 2 环向预应力筋束的槽口锚固支撑方法

扶壁支撑和槽口支撑采用的锚具为群锚体系, 如高强预应力钢丝束采用墩头锚固(DM)体系, 高强预应力钢绞线束采用 OVM、B&S 等锚固体系。

1.2.3 环锚无混凝土支撑 沿轴向在管道

壁内侧或外侧开设槽口, 并在槽口内放置可移动的环形锚具, 槽口只起放置并封堵保护环形锚具的作用, 环形锚具做为预应力筋束的锚固和张拉承台(图 3)。环形锚具集张拉和锚固于一体, 是针对环形预应力混凝土结构特点发展起来的专项技术, 最早于 70 年代初由意大利 VSL 国际预应力公司开发并应用在多条水工压力隧洞的预应力混凝土衬砌结构中(如 VSL ZU6 型环锚)。90 年代初具有中国特色的大吨位环形锚具(OVM-HM)锚在清江隔河岩水电站的引水隧洞预应力混凝土衬砌中得到成功应用。由于这种张拉锚固方法不需要借助混凝土支撑, 避免了锚垫板下混凝土的应力集中现象。但当在管道内侧槽口环锚支撑时, 应对因预应力筋束内弯产生的局部应力复杂区加强构造措施, 避免局部裂缝的产生。



a) 济南污水厂卵形消化池 b) 意大利 Chiotas-Piastra 抽水蓄能电站引水洞由内槽口由外槽口处环锚锚固支撑 口处环锚锚固支撑

图 3 环向预应力筋束的环锚锚固支撑方法

由于环锚无混凝土支撑方法的预应力筋束包角常要达 360° , 当采用有粘结预应力体系时施工期的预应力损失可达 50%, 影响了管壁混凝土环向预压应力的均匀性。因此, 济南污水厂卵形消化池池壁预应力混凝土施工采用外侧均布 3 槽口内环锚同步张拉的方法, 每区段预应力筋束的包角为 120° , 籍此减小预应力筋束与孔道间的摩擦损失。然而, 更有效的方法应该是采用无粘结预应力体系, 这不仅得到我国工程实践的证实, 意大利 VSL 国际预应力公司在 1972~1993 年间承建的 17 座污水消化池和蓄水池环形预应力工程中, 有 12 座采用无粘结预应力体系也决非偶然。

1.3 预应力筋束变角张拉方法

其关键部位为图 4 所示的弧形垫座(偏转器),弧形垫座可以是整体的或分块的,整体弧形垫座为某特定工程设计,分块弧形垫座为通用型。分块弧形垫座采用阶梯形定位方式搭接,通过叠加不同数量的楔形垫块满足相应的变角要求。由于弧形垫座的变角作用,张拉千斤顶已位于槽口之外,所以此时所需的预留槽口尺寸将大为减小,只有普通张拉方式的 $1/2 \sim 1/5$ 。

- 1 锚板 2 夹片 3 限位板 4 弧形垫座
5 过渡板 6 延长筒 7 千斤顶 8 9 10
8 工具锚板 9 工具夹片 10 钢绞线

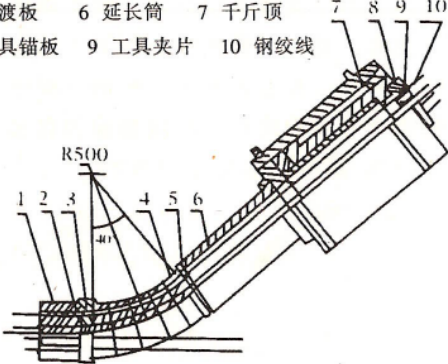


图 4 环向预应力筋束变角张拉装置(OVM)

在小浪底水利枢纽工程排沙洞环形预应力混凝土衬砌的无粘结预应力钢绞线张拉施工中,采用了德国 DSI 公司根据该工程需要生产的专用板凳式偏转器,4 条曲线形空心钢支撑沿钢绞线设置,有效的减小了钢绞线偏转造成的预应力损失。

1.4 锚头封堵与锚具保护

无论采用哪种锚固支撑方式,张拉完毕后,均应及时对锚固区加以保护。对有粘结筋,张拉完毕后应及时灌浆,然后将余留在外的预应力筋束切除并封堵锚头。对无粘结筋,应尽快切除锚具外多余筋束,按要求装好密封罩,安装前罩内应装入适当的防护油脂或水泥灰浆,然后根据设计要求,将锚头封堵或将预留槽口封平。

为了保证锚头的封堵质量,除应将原混凝土面打毛、高压水清理干净润湿外,封堵混凝土

强度等级应适当提高,应采用无收缩或微膨胀混凝土封堵槽口以保证槽口封堵混凝土与原混凝土良好粘结形成整体。

2. 工程应用概况

根据作者的调研结果,环形预应力混凝土技术已广泛应用于水电工程的压力隧洞和调压井、市政工程的污水消化池、蓄水池和水利、煤炭火力发电业的储料仓及核电站安全壳等,部分工程概况列入附表 1。

3. 小浪底排沙洞预应力混凝土衬砌概况

小浪底水利枢纽工程位于河南省济源市境内、黄河中游最后一段峡谷的出口处。3 条排沙洞内径均为 6.5m,主要承担排沙、排污的任务。由于地质条件非常复杂,为了保证周围山体的稳定性,设计要求排沙洞运行时不能有压力水渗入岩体软化夹泥层。设计之初,曾对钢板衬砌、钢筋混凝土衬砌、灌浆预应力衬砌和高效预应力混凝土衬砌进行了技术经济比较,最后选定采用高效预应力混凝土衬砌。根据承包商 CGIC 联营体的建议,于 1996 年 10 月~1997 年 9 月进行了排沙洞预应力混凝土衬砌有粘结体系和无粘结体系的现场试验研究和有限元仿真受力分析,并于 1997 年 9 月 23~25 日由小浪底建管局主持召开了专家咨询会议,最后确定采用无粘结预应力体系,经黄委会,小浪底设计院改进设计的无粘结预应力混凝土衬砌结构方案如图 5 所示:

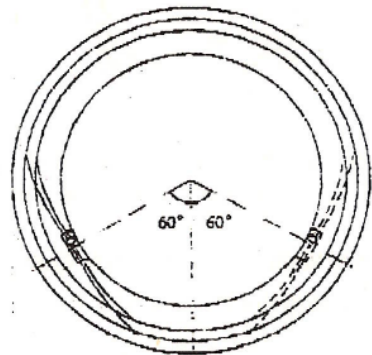


图 5 小浪底排沙洞衬砌预应力环锚钢绞线布置

该结构具有以下特点:

(1) 采用双层双圈无粘结预应力钢绞线环锚无混凝土支撑体系, 环锚锚板锚固端和张拉端各设 8 个锚孔, 内层 4 根钢绞线从锚固端起始沿内层圆周环绕 2 圈后进入内层张拉端, 外层 4 根钢绞线从锚固端起始沿外层圆周环绕 2 圈后进入外层张拉端, 钢绞线锚固端与张拉端的包角为 $2 \times 360^\circ$;

(2) 槽口外侧的双层预应力钢绞线, 减小了槽口处管壁局部受力过分集中现象。同时, 无粘结钢绞线的预应力损失最大仅为 25% 左右, 有效的改善了预应力沿环向分布的均匀性, 使管壁混凝土预压应力更为均匀;

(3) 采用双层双圈预应力钢绞线, 有效地增加了锚具槽间距, 使锚具槽数量较有粘结预应力混凝土衬砌方案减少了约 45%, 从而减轻因槽口导致的隧洞衬砌整体性削弱, 减少了锚具的防腐处理环节, 减少了槽口混凝土回填量;

(4) 无粘结钢绞线一次就位成形, 无需预埋波纹管及穿丝、灌浆等工序, 提高了施工进度, 降低了工程费用。

该工程采用天津钢丝一厂生产的 $\varnothing 15.7$ 预应力钢绞线, 抗拉强度 $f_{pk} = 1860\text{N}/\text{mm}^2$, 施工张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75f_{pk}$ 。环锚由柳州欧维姆建筑机械有限公司与德国 DSI 公司联合提供, 变角张拉垫座及张拉设备由德国 DSI 公司提供。经过 1# 排沙洞试验段的施工检验, 该方案是切实可行的, 达到了设计要求。目前已正式进行三条排沙洞的施工。

4. 结论

就预应力混凝土技术本身而言, 它在圆筒形结构中的应用已发展到成熟阶段, 并且通过实践证明了它在保持混凝土结构良好的耐久性、整体性、抗震性等方面具有很大的优越性, 特别是其控制混凝土裂缝和变形、保证管道高压防渗的优良性能以及对水电工程的混凝土压力管道结构等具有重要工程意义。因此对其设

计和施工方法进行更加深入系统地研究是十分必要的。

本项研究的前期调研工作得到水利部水利科技开发重点基金资助, 后期对国外工程的广泛调研得到了黄河小浪底水利枢纽工程 CGIC 联营体总经理 Krause T. 副总经理 Colin O., 洞挖部经理 Suquet L. 等先生的大力支持, 特别是排沙洞技术负责人 Fernandez A. 先生给予了很多具体帮助, 谨此一并致谢。

参考文献

- 1 中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组等主编。《预应力工程实例应用手册(房屋建筑篇)》。中国建筑工业出版社, 1994。
- 2 中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组等主编。《预应力工程实例应用手册(桥梁建筑篇)》。中国建筑工业出版社, 1996。
- 3 梁石根。《大型同仓预应力钢绞线后张法施工》。《建筑技术》, 1988, (8)。
- 4 陶学康, 蔡承生等。《无粘结预应力筋在混凝土圆形煤仓中的应用》。《特种结构》, 1991, (2)。
- 5 陈港。《预应力变角张拉工艺及其在筒形结构中的应用》。《施工技术》, 1992, (4)。
- 6 叶松丽。《预应力卵形消化池的设计与施工》。《特种结构》, 1988, (2)。
- 7 张志强, 周家俊等。《泰山核电站安全壳施工》。《建筑技术》, 1992, (6)。
- 8 陶学康主编。《后张预应力混凝土设计手册》。中国建筑工业出版社, 1993。
- 9 赵顺波, 鲁志勇等。《预应力锚固技术及其在水工结构中的应用》。《华北水利水电学院学报》, 1992, (3)。
- 10 孙景振, 张安平。《隔河岩水电站引水隧洞环形后张法预应力施工》。《水力发电》, 1993, (10)。

(其余参考文献略)

附表 1

环形预应力混凝土结构工程实例概况

工程名称	国家	建设年代	预应力混凝土结构概况	内压 (MPa)	预应力筋束张拉控制力	锚固支撑方法、锚具及预应力筋束包角
南京江心洲污水处理厂污泥消化池	中国	1991	6座,高17.3m,内径24.04m,壁厚0.4		无粘结高强度钢绞线束,3~4 ϕ 12.7@200~300mm	沿筒壁外环均布4个外扶壁, OVM13-1, $\theta_p = 180^\circ$
济南污水厂卵形消化池	中国	1993	地面以上壳体高度29m,最大内径24m,壁厚0.4m~0.7m		270KS1级高强度钢绞线,6 ϕ 180mm~4 ϕ 15@900mm, Pcon = 833.3KN	沿筒壁外环均布3排外槽口环锚, OVM-HM15, $\theta_p = 120^\circ$
秦山核电一期1 \times 300MW核电站安全壳	中国	1991	基底至穹顶总高73m,内径36m,壁厚1.0m,钢内衬6mm	0.26	英国 BS5896-3 型钢绞线,15 ϕ 15.7@350mm	沿筒壁外环均布3个外扶壁 瑞士 E6-12, $\theta_p = 240^\circ$
秦山核电二期2 \times 600MW核电站安全壳	中国	1996	基底至穹顶总高65.18m,内径37m,壁厚0.9m,钢内衬6mm	0.42	英国 BS5896-3 型钢绞线,19 ϕ 15.7@350mm	沿筒壁外环均布4个扶壁, 瑞士 E6-12, $\theta_p = 360^\circ$
大亚湾2 \times 600MW核电站安全壳	中国	1992	基底至穹顶总高66.68m,内径37m,壁厚0.9m,钢内衬6mm	0.42	美国 BS5896-3 型钢绞线,19 ϕ 15.7@350mm	沿筒壁外环均布2个外扶壁, 瑞士 E6-12, $\theta_p = 360^\circ$
隔河岩水电站引水隧洞	中国	1993	2 $\#$ 、4 $\#$ 洞总长300m,内径9.5m,衬砌厚0.75m		高强度钢绞线束 ϕ 15.2@400mm OVM; Pcon = 2268.5KN	2 $\#$ 、4 $\#$ 洞内槽口环锚, OVM-HM15, $\theta_p = 360^\circ$
Chioras piastra 抽水蓄能电站引水调压系统	意大利	引水洞	长62m,内径6.10m,衬砌厚0.6m	13	高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@230mm, Pcon = 1080KN	与垂直中心线成45°和90°,左右交替布置4排内槽口环锚, VSL ZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
		主调压井	底部110m,内径13m,衬砌厚0.60m	13	高强度钢绞线束12 ϕ 15.24@370mm~560mm, Pcon = 3160KN	沿内环均布4个内扶壁, EE6-12, $\theta_p = 180^\circ$
		副调压井	底部1151m,内径6.10m,衬砌厚0.60m	1.07~1.23	高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@250mm, Pcon = 1080KN	沿内环均布4排内槽口环轴, VSIZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
		环形压力室	长139m,内径6.10m,衬砌厚0.6m	1.3	高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@230mm, Pcon = 1080KN	与垂直中心线成45°和90°,左右交替布置4排内槽口环锚, VSL ZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
Taloro 抽水蓄能电站引水洞	意大利	1975~1976	4段各长495m,内径55m,衬砌厚0.45m	0.9	高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@300~360mm, Pcon = 1161KN	与垂直中心线成45°左右交替布置2排内槽口环锚, VSL ZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
Prosetzmo 水电站引水洞	意大利	1988~1990	两条各长2130m和2295m,内径5.60m,衬砌厚0.25m		无粘结高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@300~580mm, Pcon = 1075KN	与垂直中心线成60°,左右交替布置2排内槽口环锚, VSL ZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
Grimsel 抽水蓄能电站	瑞士	1977~1978	2段总长197m,内径6.80m,衬砌厚0.40m	0.75	无粘结高强度钢绞线束6 ϕ 15.24@200mm Pcon = 1110KN	与垂直中心线成45°和75°,左右交替布置4排内槽口环锚, VSL ZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
	瑞士	1977~1978	长60m,内径6.80m,衬砌厚0.60m	1.4	无粘结高强度钢绞线束12 ϕ 15.24@240mm Pcon = 2180KN	沿洞壁内环均布6个内槽口环锚, VSLZU6-6, $\theta_p = 360^\circ$
San Fiorino 水电站调压井	意大利	1971~1973	高度90m,内径8.2m,衬砌厚0.6m和0.8	1.0	高强度钢绞线束12 ϕ 15.24@200~1000mm, Pcon = 2180KN	沿洞壁内环成135°+135°+90°交替布置3个内槽口环锚, VSLZ6-12, $\theta_p = 360^\circ$
Brasimone 水电站调压井	意大利	1973~1974	高度61m,内径26m,衬砌厚0.7m	0.6	高强度钢绞线束12 ϕ 15.24~19 ϕ 15.24@150~400mm	沿洞壁内环均布3个内扶壁, EE6-12, EE6-19, $\theta_p = 120^\circ$
Taloro 抽水蓄能电站引水调压井	意大利	1975	高度90.6m,内径14.8m,衬砌厚0.8m	0.9	高强度钢绞线束上部1/3高度5 ϕ 15.24@750mm,下部2/3高度,19 ϕ 15.24@250~750mm	沿洞壁内环对面布置2个内扶壁, EE6-5, EE6-19, $\theta_p = 180^\circ$
柳又水电站调压井	日本		高31.4m,内径25m,壁厚0.4m	0.3	12 ϕ 8mm 高强度钢丝束	沿洞壁外环均布6个外扶壁, 夹片锚, $\theta_p = 120^\circ$
奥矢作隔一水电站引水调压井	日本		高50m,内径16.6m,壁厚0.6m	0.5	12 ϕ 8mm 高强度钢丝束	沿洞壁外环均布8个外扶壁, 夹片锚, $\theta_p = 180^\circ$