文章编号:1672-3031(2017)01-0061-04

已建压力隧洞复合预应力混凝土衬砌修补加固关键技术研究

赵 妍,孙粤琳,王荣鲁,刘致彬
(中国水利水电科学研究院 材料结构研究所,北京 100038)

摘要:提出一种复合预应力混凝土衬砌修补、加固防渗方案,该方案在原衬砌混凝土上,二次浇注一高性能纤维混凝土薄层。在新老混凝土中间设置薄钢板,通过在老混凝土表面开槽等手段,在老混凝土与防渗层之间形成一密闭中空的环形空间。利用水泥浆通过有限的径向位移对新浇注的薄层混凝土根据需要人为地施加某一数值与分布的均布压应力,使二次衬砌混凝土层具有一定数值的环向预压应力。这样可以分担部分的内水压力,而使该方案具有预应力混凝土补强加固效果及复合防渗功能。其优点是不仅省去预应力筋,达到防渗加固效果,而且施工简便,损失过水断面较小。

关键词:复合预应力混凝土衬砌;外加预应力法;修补加固;防渗
中图分类号: TV554 **文献标识码**: A **doi**: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.01.009

1 问题的提出

压力引水隧洞在设计和施工阶段对围岩情况估计过高,运行后发现洞内混凝土衬砌开裂、渗漏严重,因此不得不停止运行进行修补加固处理。尽管这些工作可利用机组检修期或负荷不大的季节进行,但由于修补时间短,只能修补一部分。可见,对已建压力隧洞的修补加固方案提前进行深入研究,以确定最佳的修补加固方案是十分重要的。目前常用的修补加固方案有内衬钢板、拆除并重建钢筋混凝土衬砌、对衬砌混凝土进行灌浆,以及表面粘贴碳素纤维等。如观音岩水库高输水隧洞就分段采用了凿除碳化混凝土后内衬钢板以及衬砌局部开挖后置换钢筋混凝土衬砌的方案[1];潘桥水库泄洪隧洞采用了内衬钢板的补强措施[2],乌拉泊水库输水隧洞将原混凝土全部拆除全断面重建钢筋混凝土衬砌[3];引滦隧洞通过对衬砌混凝土进行灌浆以提高结构的整体性[4]。几种措施相比较而言,内衬钢板方案施工简单可靠,加固后在不缩小钢板衬砌内径的前提下基本不会影响过流能力,但运行后的内水压力基本由钢板承担,原有混凝土衬砌没有得到充分利用,同时,需要耗费大量钢材,整体工程成本较高。拆除并重建隧洞钢筋混凝土衬砌方案会缩小洞径,减小过流量,对于发电引水隧洞而言会影响发电能力,同时,拆除和重建的工程量较大,原有衬砌直接被废弃,没有得到合理的利用。其他一些方案,如对衬砌混凝土进行灌浆、在衬砌表面粘贴碳素纤维等,只能起到一定的防渗作用和局部修补加固的效果,隧洞结构的整体刚度得不到提高,不能从根本上解决病害问题。

目前,预应力混凝土衬砌技术在水工隧洞上得到广泛应用,清江隔河岩引水隧洞[5]、天生桥一级引水洞[6]均采用有黏结锚索混凝土衬砌;小浪底排沙洞采用无黏结锚索混凝土衬砌[7]。中国水利水电科学研究院在此基础上,研发了复合预应力混凝土修补加固技术。

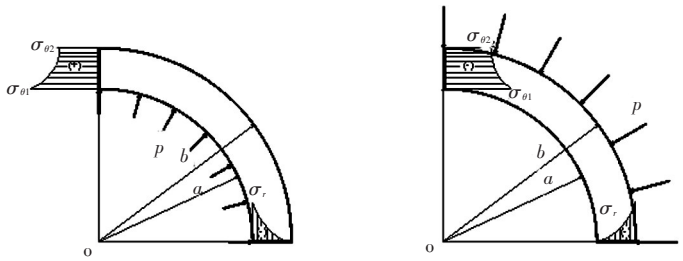
复合预应力混凝土衬砌修补加固技术是在原衬砌混凝土基础上,二次浇注一混凝土薄层,混凝土薄层由高性能纤维混凝土组成。在新、老混凝土中间设置薄钢板或PVC防渗层,通过在老混凝土表面开槽等手段,在老混凝土与防渗层之间形成一密闭中空的环形空间,利用水泥浆通过有限的径向位移对新浇注的薄层混凝土施加均布压应力,使二次衬砌混凝土层具有一定的环向预压应力,以

收稿日期:2015-12-03
作者简介:赵妍(1978-),女,河北乐亭人,博士,高级工程师,主要从事水工复杂结构等研究。E-mail:zhaoyan@iwhr.com

分担部分的内水压力，其优点是不仅省去预应力筋，而且施工简便。本文重点阐述压力隧洞复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的总体设计及施工工艺。

2　采用外力预应力法的理论依据

根据弹性力学理论，厚壁圆筒承受内、外均布荷载时的应力状态[8]如图1所示，应力计算公式为：



（a）内水压力时　　（b）外水压力时

图1　厚壁圆筒承受内水压力和外水压力时的应力状态

内水压力时：

$$\sigma_{\theta 1}=\frac{a^2+b^2}{b^2-a^2}p;\ \ \sigma_{\theta 2}=\frac{2a^2}{b^2-a^2}p \tag{1}$$

外水压力时：

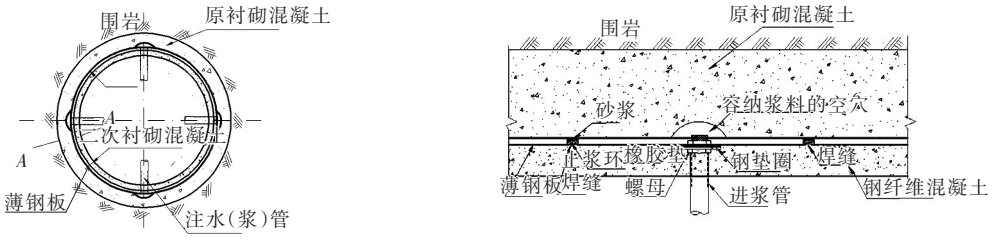
$$\sigma_{\theta 1}=-\frac{2b^2}{b^2-a^2}p;\ \ \sigma_{\theta 2}=-\frac{a^2+b^2}{b^2-a^2}p \tag{2}$$

在内水压力作用下，环向应力为拉应力，最大值在内表面；在外水压力作用下，环向应力为压应力，最大值亦在内表面。如果厚壁圆筒同时承受相同的内、外均布荷载时，环向应力仍为压应力，这就是复合预应力混凝土衬砌隧洞修补加固的理论根据。

3　复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的设计要点

3.1　主要结构　压力隧洞的修补加固取决于隧洞损坏情况的严重程度。衬砌混凝土开裂、渗漏严重，特别是纵向开裂，结构问题是主要的。在总结以往工程实践经验基础上，经过分析比较，对直径较大的隧洞（D>8 m），建议采用复合预应力混凝土衬砌修补加固结构，如图2所示。该结构是由原衬砌混凝土层、薄钢板及二次浇筑的高性能钢纤维混凝土薄层（厚度约150 mm）组成，再与压力灌浆等辅助手段相结合，使二次衬砌混凝土层具有一定的环向预压应力，以承受部分内水压力，从而使该结构具有预应力混凝土补强加固效果及复合防渗结构。

3.2　新内衬高性能钢纤维混凝土　钢纤维混凝土指用长25 ~ 30 mm、直径0.25 ~ 0.50 mm的短钢丝，一般按总体积2 %左右与水泥、骨料及外加剂一起拌和而成的混凝土。钢纤维混凝土的力学性能与普通混凝土相比，其极限拉伸值由1.0×10^{-4}提高到2.32×10^{-4}，抗弯强度亦可大大提高，实践证明，初



（a）横断面　　（b）A–A剖面

图2　复合衬砌预应力混凝土衬砌修补加固结构

裂抗弯强度可提高0.5 ~ 2倍，断裂抗弯强度可提高2~3倍，冲击韧性、疲劳强度及抗冲磨性能也有很大程度的提高。这些性能恰好是水工隧洞衬砌混凝土所需要的。

3.3　预应力的施加　复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的质量关键是施加预应力过程的控制。首先，利用注水压力超载，但注水压力尚未达到临界失稳压力。在此阶段发生了新衬砌混凝土的收缩变形、弹性压缩、徐变变形以及原衬砌混凝土和围岩的弹性压缩变形和塑性变形。然后，卸掉水压力，改用膨胀型水泥浆施加预应力达到设计值，此值远小于注水压力值。显然，当水泥浆凝固后，由于徐变变形和塑性变形所引起的预应力损失已大部分被补偿或被收复，所以用水泥浆施加预应力后的预应力损失会显著减小。

3.4　双层防渗结构　用水泥浆施加预应力大小的控制，按全预应力控制，即在全部荷载最不利组合作用下，新衬混凝土内侧边缘不出现环向拉应力。不出现拉应力，混凝土就不会开裂，自然也就不会有渗漏问题。再加上薄钢板第二道防渗作用，很明显，复合预应力混凝土衬砌修补加固结构具有双层防渗作用。新衬混凝土厚度在保持一个最小值情况下，其环向可控制不出现拉应力。因为大部分预应力损失被收复，新衬预应力混凝土层内的压应力值是可靠的。

3.5　受力特点　压力隧洞复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的受力特点可分为施工阶段和运行阶段。待新内衬混凝土达到设计强度后，此时新内衬和原衬混凝土仍是分开的，但通过外加预应力法，首先用注水压力超载，以使徐变变形和塑性变形尽早发生；然后用注浆压力对新衬混凝土施加预应力，待水泥浆凝固后，新内衬和原衬混凝土形成一整体，但受力状态不同，称为施工阶段。运行阶段则是在已受力基础上共同承受内水压力的作用。针对这一特点，结构设计应按不同阶段分别进行验算。

4　复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的施工工艺

复合预应力混凝土衬砌修补加固结构的施工工艺过程如下。

(1)原隧洞衬砌混凝土裂缝或渗漏部位处理。施工前应将原衬砌表面的杂质，如氢氧化钙、铁锈沉积物及污泥等清除干净，并将渗水裂缝封闭。裂缝随荷载或混凝土的湿热变化时开时合，用来修补的材料必须具有足够的柔韧性。修补的目的主要是为注浆压力提供一个封闭的空间，同时起防渗作用。至于回填灌浆和固结灌浆应根据具体工程情况而定，可提高衬砌和围岩的承载及抗渗能力。

(2)铺设止水(浆)环。为了将一个浇筑段分为若干个注水(浆)区域，特设止水(浆)钢环，如图2所示，厚度3 ~ 4 mm，其宽度为50 ~ 60 mm。两道止水环之间间距与薄钢板的宽度相同，用螺钉与衬砌混凝土固定。为了止水，其下面应涂抹一薄层聚合物水泥浆。

(3)在洞内两道止水环中间的上、下、左、右对应注水(浆)管位置开挖ϕ200 mm、深50 mm左右的空穴，如图3所示，以容纳浆料的自由扩散。

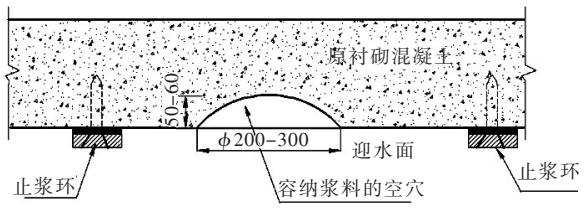


图3　容纳浆料的空穴（单位：mm）

(4)铺设薄钢板。薄钢板之间的环向对接部位正好落在止水环上面焊接，如图4所示，这样3块钢板可以焊接在一起。应当注意，在焊接环向横缝时，应使各板块的纵向焊缝错开。因此，由原衬混凝土层、薄钢板和止浆环围成若干个圆环形封闭空间，用水泥浆充满各封闭空间，并通过注浆压力对新衬混凝土层施加预应力。

(5)浇筑高性能钢纤维混凝土薄层。选用迭合层或新浇筑一薄层高性能纤维混凝土是合适的。大

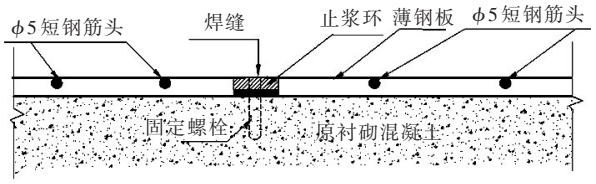


图4　薄钢板与止水环间的焊接横缝

多数裂缝是由于荷载、温度和湿气的变化引起的，此时新浇筑内衬混凝土薄层与原衬砌混凝土是隔离的，这样裂缝就不会反射到新内衬混凝土层上。

高性能混凝土是从高强混凝土发展而来，目前可以采用高效减水剂和掺入活性矿物掺料的办法，拌合与浇筑采用普通拌合机和振捣器即能生产出C50以上的混凝土。但是，这种混凝土的最大缺点是延性较低，其补救办法是加入钢纤维或其他纤维。在新衬混凝土内掺入一定数量的乱向、不连续的短钢纤维形成的高性能纤维混凝土，具有较好的抗裂能力、抗渗性、抗冲击韧性和耐磨等优良性能，将其用于新内衬混凝土，能有效地提高内衬混凝土层的抗裂性和耐久性。

(6)施加预应力。待衬砌混凝土达到设计强度后，即可开始施加预应力。首先，用注入水压力检查注浆区域是否通畅，逐步升高压力以使塑性变形和徐变变形尽早发生。然后，注入膨胀型水泥浆，直至排气孔出现稠浆为止，升高注浆压力达到设计值，维持5min以上，压力不变即可关闭注浆管和排气管。待水泥浆凝固后，新内衬混凝土便获得了环向预压应力，而水泥浆薄层径向受压，对传递内水压力给原衬砌混凝土及围岩毫无影响。

由于衬砌混凝土层很薄，注水或浆压力不宜过大，以防压屈失稳。

5　结语

本文对已建压力隧洞提出了切实可行的修补加固方案，即充分利用原衬砌混凝土再加上钢板及止浆环组成的密闭空间，用来灌注水泥浆实现外加预应力法对新衬混凝土层施加环向预应力或填充密实水泥浆层传递荷载，这样可以分担部分的内水压力。使该方案具有预应力混凝土的优点，又可以达到补强加固防渗功能，而且施工简便，损失过水断面较小。基于以上优点，对已建隧洞的复合预应力混凝土衬砌修补加固方案如能应用于工程上，将带来巨大的社会、经济及环境效益。

参　考　文　献：

[1] 赵国杰，刘春冬，李娅．观音岩水库高输水隧洞除险加固设计[J]．水利水电工程设计，2009，4(4)：5-6．
[2] 赵宁琼，余 林．潘桥水库泄洪隧洞安全评价及加固设计[J]．水利水电快报，2009，30(4)：33-35．
[3] 王学萍．乌拉泊水库输水隧洞除险加固方案探讨[J]．水利水电技术，2008，39(7)：95-99．
[4] 孙长利，马明辉，张伟．引滦隧洞补强加固过程中防止出现渗水的处理问题论述[J]．建筑工程，2010(6)：40-41．
[5] 孙景振．清江隔河岩水电站引水隧洞环形后张预应力锚束施工[J]．水利水电施工，1994(3)：4-8．
[6] 魏德荣，刘泽钧，叶全闻．天生桥一级水电站引水隧洞预应力衬砌实测变形和实测应力分析[J]．贵州水力发电，2004，18(8)：28-32．
[7] 亢景付，胡玉明，侯新华．小浪底排沙洞混凝土衬砌不同阶段预应力变化实测分析[J]．水力发电学报，2003(2)：90-66．
[8] 徐芝纶．弹性力学简明教程[M]．北京：高等教育出版社，2002．

（下转第69页）

[7] 中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组,等. 混凝土面板堆石坝会议论文集[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.
[8] 朱维新, 易进栋. 西北口水库混凝土面板堆石坝离心模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990.
[9] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86.

Centrifugal model tests on the flood retaining scheme using cushion layer of a slab faced rockfill dam

YI Jindong, XU Guangming, ZHU Dazheng
(*Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: Xibeikou concrete faced rockfill dam is the first case of such a type of dam with a height of 100 meters. The drawdown of reservoir level prior to a flood with a reoccurrence of 100 years reaches a magnitude of 21.63 m, and the maximum rate of drawdown is about 3.65 m/h. Before casting the concrete slabs, the flood should be retained by the filled dam. The cushion material, which serves as a foundation of concrete slabs and is responsible for the safety during flood season, is subject to the drag of seepage force during drawdown of the reservoir level, and its stability needs careful verification. In this study, centrifugal model tests were conducted on flood retaining schemes using cushion materials with different permeability. These experimental results have been adopted in controlling the flood during construction of the dam, and have provided technical support for the safety of dam during flood seasons.
Keywords: geotechnical centrifugal model tests; model dam; flood retaining using cushion materials; drawdown of reservoir level; permeability of cushion materials

(责任编辑: 韩　昆)

(上接第64页)

Construction technique and calculation research on an anti-seepage structure of composite prestressed concrete lining in pressure diversion tunnel

ZHAO Yan, SUN Yuelin, WANG Ronglu, LIU Zhibin
(*Materials Department*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: This techniqueis presented by compositeprestressedconcretefor liningrepairing, strengthening and anti-seepage. A thin layer of the high performance fiber reinforced concreteis poured overthe original concrete lining. The sheet steel is set between the old and new concrete. By means ofgrooving in the surface of the old concrete, a closed hollow annular space is formed between the old concrete and impermeable layer. The uniform pressureof a certain value needed can begivento the thin layer of new concreteby grouting artificially. It can form the ring preload stress in the secondary layer of lining concrete in order to bear part of the internal water pressure. The technique has the effect of reinforcement and anti-seepage. It can not only eliminate the prestressedtendons, butalso can control seepageand achievethe reinforcement effect. Also the construction is simple andthe loss crossof section is small.
Key words: CompositePrestressedConcrete Lining; External Pre-stressed Method; Repairing and Strengthening; anti-seepage

(责任编辑: 王冰伟)