

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01154

有压隧洞管片衬砌在高水头荷载下的应力变形分析

赵春荣¹, 崔 炜²

(1. 北京工业职业技术学院, 北京 100024; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 某拟建输水隧洞在 III 类围岩中采用开敞式 TBM 开挖, 喷混凝土作为初期支护, 钢筋混凝土管片作为衬砌, 承担 110 m 水头的内水压力和 200 m 水头的外水压力, 水荷载较大。在考虑管片之间及外包结构的接触关系、管片配筋和混凝土联合受力的条件下, 采用有限元法模拟分析了管片衬砌在水荷载下的应力和变形特性, 认为外水压力是管片衬砌设计的控制性荷载, 从而提出了可供结构设计计算参考的管片模型简化处理方式。研究认为, 在本文的围岩、支护、水荷载条件下, 将钢筋混凝土管片作为隧洞衬砌是可行的。

关键词: 有压隧洞; 管片衬砌; 有限元; ABAQUS

中图分类号: TV 672 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 01-0154-04

Stress Deformation Analysis of Segment Lining in Pressure Tunnel under High Water Pressure

ZHAO Chunrong¹, CUI Wei²

(1. Beijing Polytechnic College, Beijing 100024, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A proposed water transfer tunnel will be excavated with tunnel boring machine (TBM) in the surrounding type III rock. The shotcrete and reinforced concrete segment serve as the initial support and permanent liner, respectively. The considerable internal and external water pressures are loaded on the liner, with the water head values of 110 m and 200 m, respectively. In this paper, in consideration of the contact relationship between segments, the contact relationship between segment and surrounding structure, and the cooperative working performance of reinforcement bars and concrete, the stress deformation characteristics of the liner under high water pressures are analyzed using the finite element method. The results showed that the external water pressure is the decisive load for the design of tunnel liner, and therefore a simplified model of segment liner design was proposed. The results suggested that it is feasible to use the reinforced concrete segment as tunnel lining under the conditions of the surrounding rock, support, and water pressure shown in the study.

Key words: pressure tunnel; segment lining; finite element method; ABAQUS

有压隧洞若采用管片衬砌, 在承受高内(或外)水压力时须满足三方面要求: 第一, 管片满足承载力要求, 在高水压作用下不破坏; 第二, 混凝土裂缝宽度满足隧洞衬砌的限裂要求; 第三, 管片之间接头缝张开裂不会导致止水失效。其中, 第二、第三个要求的目的是控制隧洞的渗水量; 管片承载力、裂缝宽度与结构应力有关, 而应力和变形是相关的; 管片接头缝状况与管片之间的相对位移有关。

目前, 虽然已经有将钢筋混凝土管片作为有压隧洞衬砌的成功实例^[1-4], 但在水工隧洞中所占的比例较少。

希腊雅典调水二期工程隧洞^[1]和南非-莱索托一期引水工程部分隧洞^[2]采用管片衬砌, 承受最大内水压力约 70

m 水头; 在南水北调中线北京团城湖输水隧洞中也应用了管片加钢筋混凝土内衬的组合形式, 承担的内水压力为 30 m 水头^[3]; 南水北调中线穿黄隧洞所承受最大内水压力 51.7 m 水头, 也采用了组合衬砌: 管片作为初期支护, 二次衬砌采用预应力混凝土^[4]。

实践证明, 在做此类设计时, 应用有限元类的三维数值应力变形分析进行辅助设计, 是十分必要的。余成学等^[5]曾使用有限元法分析研究青松电站引水隧洞采用管片衬砌的可能性, 该管片衬砌受到最大内水压力为 88.4 m 水头; 赵大洲等^[6]研究了南水北调西线工程深埋长隧洞采用管片衬砌结构受力状况, 向衬砌所施加的最大内水压力达到 1.2

收稿日期: 2013-08-06 修回日期: 2013-11-27 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01154.html>

基金项目: 北京工业职业技术学院校级科研课题“深基坑支护施工全过程仿真系统的开发”(bgzyky201362); “十二五”国家科技支撑计划项目“水电大坝建设关键技术研究”(2013BAE06B02)

作者简介: 赵春荣(1980-), 女, 河北邯郸人, 讲师, 工学硕士, 从事结构工程研究和教学工作。E-mail: Chunrongzhao428@163.com

MPa。但是总体来看,管片衬砌承受100 m水头以上的已建工程未见于公开报道。本文将以一个承受内、外水压力分别为110 m和200 m水头的管片衬砌隧洞为例,利用有限元方法分析管片结构在内、外水压力下的应力、变形特征,提出管片衬砌设计的控制性荷载和计算模型的简化处理方式,论证管片衬砌在高水头荷载下应用的可能性,以期对相关工程设计和论证提供参考。

1 工程结构概况

拟建有压输水隧洞全长50 km,最大埋深约500 m,沿线围岩以III类围岩为主,围岩的变形模量为7 GPa。隧洞拟采用开敞式TBM开挖,开挖洞径为6.0 m,开挖后将喷射100 mm厚的C20混凝土进行支护,采用钢筋混凝土管片作为永久衬砌,衬砌内径为5.0 m,衬砌与支护之间回填C20豆粒石混凝土,见图1。每节管片为矩形结构,厚度为0.3 m,宽1.1 m。4块管片拼装成环,形成隧洞衬砌。沿隧洞纵向,管片相邻两环纵缝错开拼装。管片之间使用钢螺栓连接,接头处设止水。管片混凝土强度等级为C30,内部双层对称配HRB335钢筋,钢筋直径为18 mm,间距100 mm分布。由于管片制作和拼装误差会造成接头处出现缝隙,设计假定该缝隙宽2 mm。该隧洞承受最大内水压力为110 m水头。通过地质勘测分析和综合评价,衬砌承受最大外水压力为200 m水头。

2 计算模型

建立沿隧洞纵向单节管片宽度的三维有限元模型,包含管片混凝土、环向配筋、接头缝隙、连接螺栓、回填豆粒石混凝土、喷混凝土支护、围岩等分区,见图1和图2。使用大型通用有限元软件ABAQUS计算分析,模拟混凝土与钢筋的联合作用效应、混凝土材料的强度状况、各结构之间的非线性接触关系。

2.1 接触模型

对于管片结构计算而言,接头的模拟是关键问题之一。管片接头模型主要有以下三种处理方式:(1)组合完毕的管片截面刚度按 EI 处理,因接头处薄弱,把接头处刚度折减为 kEI ($k < 1$)^[7];(2)管片按曲梁或壳处理,把管片接头视作弹簧^[8];(3)管片按常规实体结构对待,接缝按没有厚度的接缝单元处理^[5]。因为管片接头在结构上是不连续的,拼装和制造误差还会造成缝隙,即使有螺栓连接,螺栓与整个管片结构相比也非常单薄,所以管片接头传递弯矩和拉力的能力非常有限。处理方式(1)和(2)的接头力学参数取值具有较大的不确定性,可能导致计算结果与真实受力状态相差很大。处理方式(3)的接缝单元能够传递压应力和剪应力,但不能传递拉应力,需要假定接触单元的切、法向刚度和强度。这种模拟方法在力学上较符合实际,但是在计算操作中略显繁琐。鉴于此,本文采用更加准确、方便的处理方式——ABAQUS接触算法来模拟管片接头的力学行为,以及管片与回填豆粒石混凝土之间的作用关系。接触时发生的摩擦力学行为依据Coulomb摩擦模型,接触迭代判断采用罚函数法^[9]。混凝土之间的摩擦系数取0.65。在计算模型的初始状态下,缝隙两侧的管片单元完全脱开、无连接,在内水压力

作用下,接头处的缝隙张开、变大;在外压作用下,缝隙由张开变成压紧,传递压力和摩擦力;在较大不对称外荷载作用下,接头能够错位或者局部张开。

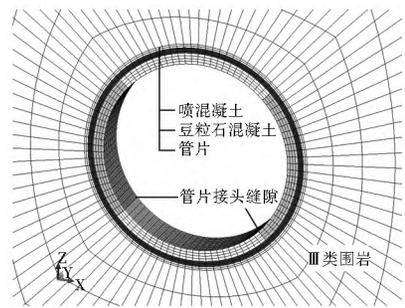


图1 隧洞管片衬砌及外围结构的有限元网格

Fig. 1 FEM mesh of segment lining and surrounding structures

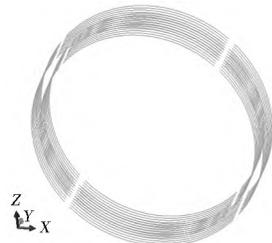


图2 管片环向配筋

Fig. 2 Circumferential reinforcement of segment

2.2 钢筋混凝土的模拟

管片混凝土采用混凝土损伤塑性模型(CONCRETE DAMAGED PLASTICITY)。该模型用于模拟混凝土、砂浆等准脆性材料的行为:抗压强度远高于抗拉强度;受拉软化、受压先强化后软化;受拉、压不同的弹性刚度退化行为和应变率效应等^[10]。损伤塑性模型参数通过混凝土单、双轴拉伸和压缩试验即可获得。本文管片的混凝土等级为C30,混凝土模型中的单轴抗压、拉强度分别取轴心抗压、拉强度标准值20.1 MPa和2.01 MPa。使用2节点空间杆单元T3D2模拟环向钢筋,埋置到混凝土实体单元内。在衬砌受力的过程中,钢筋单元与混凝土单元联合受力,钢筋单元的节点位移与其所在混凝土单元的节点位移通过数值插值达到协调。

3 结果分析

3.1 内水压力作用下衬砌状况

出于设计安全考虑,管片衬砌承受内水压力工况的结构有限元计算时,未考虑外水压力对其的平衡作用。计算结果表明,在1.1 MPa的内水压力作用下,衬砌变形不连续,管片接头之间的缝隙张开约0.3 mm。整体上看,管片基本沿其外法线向外变形,管片跨中变形较大、端部变形较小,跨中向外最大位移为0.4 mm,见图3。管片与豆粒石混凝土之间的接触压力并非均匀分布,而是呈端部大、跨中小的趋势,管片跨中、端部与豆粒石混凝土之间的接触压力分别为0.77 MPa、1.12 MPa,见图4。由于管片接头的存在,连接成环的衬砌具有柔性结构的特征,具有很强的适应内水压力变形的能力,绝大部分内水压力因衬砌变形而传递给豆粒石、初期支护、围岩等外围结构承担,仅少部分内水压力由管片承担。

另外,在内水压力的作用下,钢筋最大拉应力出现在每

个管片的跨中部位, 最大拉应力为 13.9 MPa, 拉应力较小。管片连接螺栓拉应力为 150 MPa, 低于强度设计值。管片混凝土环向应力表现为拉应力, 见图 5; 跨中拉应力最大, 且内侧大于外侧, 内、外侧拉应力分别为 1.9 MPa、1.6 MPa, 未超过混凝土的轴心抗拉强度, 混凝土内无塑性破坏区。

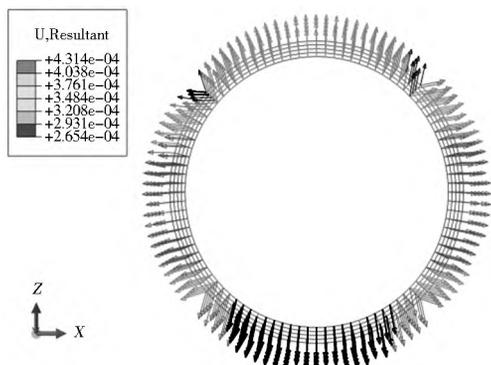


图 3 管片在内水压力作用下的位移矢量(单位: m)
Fig. 3 The displacement vector of segment under the internal water pressure (unit: m)

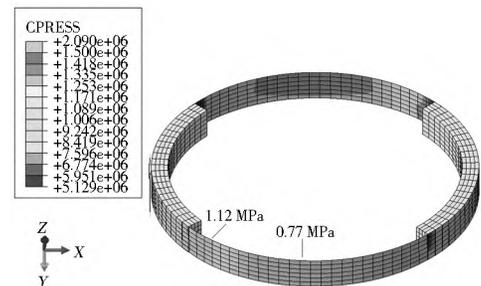


图 4 管片与豆粒石混凝土之间的接触压力(单位: Pa)
Fig. 4 The contact pressure between segment and surrounding concrete (unit: Pa)

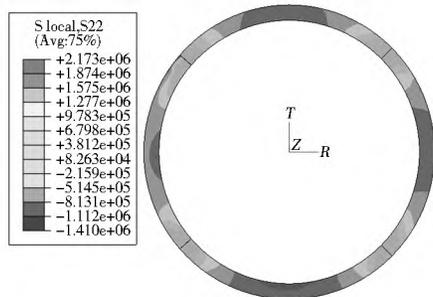


图 5 内水压力作用下的管片环向应力(单位: Pa)
Fig. 5 The circumferential stress of segment under the internal water pressure (unit: Pa)

3.2 外水压力作用下衬砌状况

在隧洞开挖阶段, 初期支护已使围岩处在稳定状态, 故在设计中认为围岩压力全部由初期支护承担。喷混凝土支护和回填豆粒石混凝土透水性较大, 所以把管片作为外水压力的承载结构。在竣工期和检修期, 外水压力对管片的作用效应最为明显, 2.0 MPa 的外水压力以面力的形式施加在管片外表面, 此时衬砌无内水作用。

计算结果显示, 在外水压作用下, 管片混凝土和钢筋均处在压应力状态, 管片内侧压应力大于外侧, 环向最大压应力位于管片跨中(图 6), 为 18.2 MPa, 小于混凝土的抗压强度标准值, 混凝土内无塑性区产生。管片内侧配筋压应力略大于外侧, 最大压应力约 125 MPa, 小于强度设计值。虽然

混凝土无塑性破坏区, 由于压应力已超过混凝土抗压强度设计值, 出于安全考虑, 应通过提高混凝土强度等级、设排水孔降低外水压力等手段使衬砌满足承载能力设计要求。

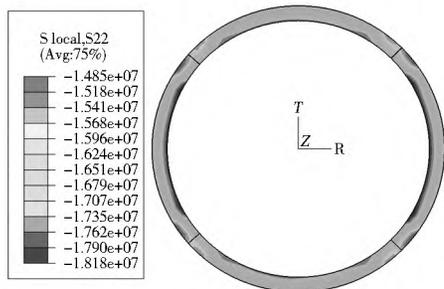


图 6 外水压力作用下的管片环向应力(单位: Pa)
Fig. 6 The circumferential stress of segment under the external water pressure (unit: Pa)

管片接头接触压力随外水压力增长的变化情况见图 7, 管片接头和跨中的位移变化情况见图 8。在计算迭代过程中, 施加 0.12 倍外水压力之前, 管片接头处接触压力为零, 缝隙处于张开状态, 管片位移迅速增长, 管片的变形形式为平动。在外水压力升至 0.12 倍时, 接头缝隙闭合, 接触压力骤然增大, 管片变形增长变缓, 直到外水压力达到最大值。在此过程中, 管片跨中变形略大于接头处(图 8), 跨中位移持续沿隧洞径向向内; 接头位移在计算开始时沿隧洞环向变形, 在接头缝隙闭合后, 再向隧洞径向向内变形。整体上看, 衬砌沿隧洞径向向内变形, 最大位移 4.4 mm, 该位移来源于两部分: 接头缝隙闭合前的管片平动, 缝隙闭合后在外水压力下的变形。

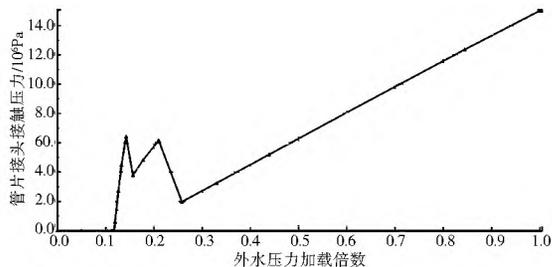


图 7 管片接头接触压力随外水压力增长的变化
Fig. 7 Variation of contact pressure of segments joints with the increasing of external water pressure

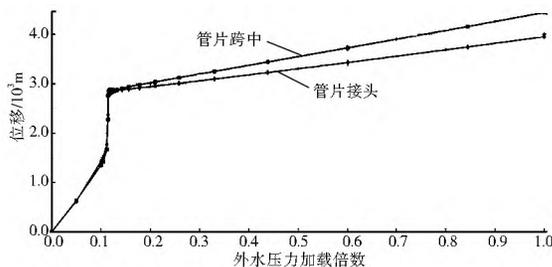


图 8 管片位移随外水压力增长的变化
Fig. 8 Variation of segment displacement with the increasing of external water pressure

把管片接头按连续模型处理, 此时管片衬砌形成一个封闭的圆筒。对比管片接触模型和封闭圆筒模型的成果发现, 衬砌混凝土的应力差异不超过 2%, 钢筋应力差异不超过 1%, 见表 1。可见, 在外水压力作用下, 圆形衬砌处在环向受

压状态,此时管片接头能够有效地传递环向压应力。因此,衬砌采用接触模型或封闭圆筒模型,混凝土和钢筋的应力状态十分接近。两种模型计算结果的主要差异在于位移,采用接触模型的管片位移因包含了在接头缝隙闭合之前平动,所以大于封闭圆筒模型。

表1 两种衬砌模拟模型产生的衬砌应力、位移对比

Table 1 Comparisons of stress and displacement of two lining models

管片衬砌模拟方法	拱顶混凝土压应力/MPa		拱顶钢筋压应力/MPa		拱顶下沉/mm
	外缘	内壁	外侧	内侧	
管片接触模型	16.4	17.4	108.1	114.9	4.4
封闭圆筒模型	16.1	17.7	106.9	116.0	1.5

3.3 接头止水的影响

管片之间的止水是有压隧洞防止内外水外渗的关键措施。目前,管片之间多采用适应变形能力强的柔性橡胶止水。施工时将弹性橡胶密封垫压入管片接头处的沟槽内,经管片之间压紧,从而起到密闭止水的作用。因止水被限制在混凝土沟槽内,它在外水或内水压力作用下的适应变形能力和止水效果无本质区别。本文衬砌变形分析表明,管片接缝处错位位移微乎其微,有0.3~0.4 mm大小的环向张开。

管片橡胶止水措施曾经在万家寨引黄一期工程输水隧洞南干单洞工程中得到了成功的应用^[1]。该工程也是采用混凝土管片作为永久衬砌,管片的周边设膨胀橡胶止水条。该隧洞围岩大部分为I至III类围岩,岩性大部分为灰岩、砂岩,局部地段有黄土,层间赋存承压地下水,最大外水头可达325 m。因此根据本文变形分析和万家寨工程经验综合推断,柔性止水能够胜任本文有压隧洞的防内外水外渗。

4 结论

(1) 在内水压力作用下,整个管片衬砌的变形不连续,管片之间的接头张开。管片衬砌的这种变形特征把绝大多数内水压力传递给外围结构承担。在1.1 MPa内水压力作用下,管片配筋的拉应力水平很低。内水压力不是管片衬砌设计的控制性荷载。

(2) 在隧洞竣工期和检修期,外水压力使管片接头缝隙闭合。在缝隙闭合前,管片的位移形式为平动,闭合后管片衬砌才开始受力变形。在2.0 MPa外水压力作用下,钢筋应力不及设计强度的一半,但混凝土应力已接近抗压强度标准值。外水压力是管片衬砌设计的控制性荷载。

(3) 内水压力作用下,连接螺栓的作用单薄,管片接头缝隙张开,管片接头基本不传递荷载。在内水压力工况的设计计算中,为了简化计算,管片接头可按脱开考虑。

(4) 在外水压力作用下,圆形衬砌处在环向受压状态,此管片接头能够有效地传递环向压应力,衬砌采用接触模型或封闭圆筒模型,混凝土和钢筋的应力差异不超过2%。在外水压力工况的设计计算中,为了简化计算,管片衬砌可按封闭圆筒模型对待。

(5) 在本文的围岩和初期支护条件下,承担1.1 MPa的内水压力和2.0 MPa的外水压力,采用钢筋混凝土管片作为隧洞衬砌是可行的。

参考文献(References):

- [1] [1] 杨维九,谈英武,邢建营.希腊雅典调水二期工程[J].南水北调与水利科技,2009,7(1):89-91.(YANG Wei jiu, TAN Ying wu, XING Jian ying. Evinos-Mornos Project in Greece [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(1): 89-91. (in Chinese))
- [2] 杨维九,罗国杰.莱索托高原调水工程[J].南水北调与水利科技,2004,2(4):53-56.(YANG Wei jiu, LUO Guo jie. Water Transfer Project in Lesotho Highland [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(4): 53-56. (in Chinese))
- [3] 张毅,王东黎,王雷.盾构管片钢筋混凝土内衬大型输水隧洞结构研究[J].水利水电技术,2009,40(7):62-65.(ZHANG Tao, WANG Dong li, WANG Lei. Study on Large Scale Water Conveyance Tunnel Structure with Shielding Segment Steel Reinforced Concrete inner Lining [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(7): 62-65. (in Chinese))
- [4] 钮新强,符志远,张传健.穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究[J].人民长江,2011,42(8):8-13.(NIU Xin qiang, FU Zhi yuan, ZHANG Chuan jian. Study on Structural Properties of New Type of Composite Lining in Shield Tunnel Crossing Yellow River [J]. Yangtze River, 2011, 42(8): 8-13. (in Chinese))
- [5] 余成学,张龙.管片衬砌承担高内水压力的可行性分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1442-1447.(SHE Cheng xue, ZHANG Long. Feasibility Analysis of Prefabricated Concrete Segment Lining in Tunnel under High inner Water Pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1442-1447. (in Chinese))
- [6] 赵大洲,景来红,杨维九.南水北调西线工程深埋长隧洞管片衬砌结构受力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3679-3684.(ZHAO Da zhou, JING Lai hong, YANG Wei jiu. Numerical Analysis of Segment Linings in Deep and Long Tunnels of West Route of South to North Water Transfer Project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3679-3684. (in Chinese))
- [7] 侯公羽,杨悦,刘波.盾构管片接头模型的改进及管片内力的数值计算[J].岩石力学与工程学报,2007,26(Supp.2):4284-4291.(HOU Gong yu, YANG Yue, LIU Bo. Improved Joint Model of Shield Tunnel Segments and Numerical Calculation of inner Forces [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp. 2): 4284-4291. (in Chinese))
- [8] 朱伟,黄正荣,梁精华.盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):940-947.(ZHU Wei, HUANG Zheng rong, LIANG Jing hua. Studies on Shell-spring Design Model for Segment of Shield Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940-947. (in Chinese))
- [9] Abaqus Manuals[M]. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.
- [10] Lee J, G L Fenves. Plastic Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [11] 游龙飞,卢文波,吴庆鸣,等.TBM施工隧洞防渗止水研究[J].人民黄河,2006,28(11):48-50.(YOU Long fei, LU Wen bo, WU Qing ming, et al. Water Stop Research of TBM Constructed Tunnel [J]. Yellow River, 2006, 28(11): 48-50. (in Chinese))