

隧洞围岩大变形机制 挤压大变形预测及应用

孙海良 赵重亮

中国南水北调集团中线有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18339

[摘要] 在复杂的地质环境以及高深的埋藏深度中,隧洞围岩的大变形已经成为影响水工隧洞安全施工和正常运行的主要工程难题,在高地应力、软弱结构面、地下水等因素的影响下,围岩容易发生较大的挤压变形以及时效性变形,如果不能准确地进行预测和控制就会严重影响到隧洞的结构稳定性及运行安全性。釜山隧洞为一无压流圆拱直墙型断面长距离双洞线水工隧洞,洞身埋深变化大、断面尺寸大、围岩受力条件复杂,围岩大变形问题具有典型性及代表性。针对隧洞围岩大变形成因机理,本文对挤压型大变形演化过程及其影响因素进行研究分析,综合考虑釜山隧洞工程结构特点以及水头压力等因素,对基于上述的大变形预测方法及其在该工程的应用进行了分析研究,在此基础上提出了相应技术措施,可为相似水工隧洞工程设计、施工及运营阶段提供借鉴作用。

[关键词] 隧洞工程; 围岩大变形; 挤压变形; 变形预测; 无压流隧洞

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A

Mechanism of Large Deformation in Tunnel Surrounding Rock, Prediction and Application of Compression-Induced Large Deformation

Hailiang Sun Chongliang Zhao

South-to-North Water Transfer Middle Route Project

[Abstract] In complex geological environments and deep burial depths, the large deformation of tunnel surrounding rock has become a major engineering problem affecting the safe construction and normal operation of hydraulic tunnels. Under the influence of high ground stress, weak structural planes, groundwater and other factors, the surrounding rock is prone to significant compression deformation and time-dependent deformation. If it cannot be accurately predicted and controlled, it will seriously affect the structural stability and operational safety of the tunnel. The Busan Tunnel is a long-distance double tunnel hydraulic tunnel with a non pressure flow circular arch straight wall section. The depth of the tunnel varies greatly, the section size is large, and the surrounding rock stress conditions are complex. The problem of large deformation of the surrounding rock is typical and representative. In response to the mechanism of large deformation of tunnel surrounding rock, this article studies and analyzes the evolution process and influencing factors of extrusion type large deformation. Taking into account the structural characteristics of the Busan Tunnel project and factors such as water head pressure, the prediction method for large deformation based on the above method and its application in the project are analyzed and studied. Based on this, corresponding technical measures are proposed, which can provide reference for the design, construction, and operation stages of similar hydraulic tunnel projects.

[Key words] tunnel engineering; Large deformation of surrounding rock; Squeezing deformation; Deformation prediction; Non pressure flow tunnel

引言

近年来,随着水利水电工程建设规模的不断增大,长、大断面、深埋水工隧洞逐渐成为输水、调水工程的主要组成形式,在此条件下,围岩力学环境变得越来越复杂,围岩大变形现象频

频出现,特别是软岩、高地应力或者构造发育地段,在围岩开挖扰动之后常常呈现出明显的塑性流变特性。釜山隧洞长2664m,其中主体工程部分隧洞呈平行双洞布置型式,两个洞之间围岩净距仅约18m,互相干扰较大。洞身断面为无压流圆拱直墙型,

设计过水能力为 $100\text{m}^3/\text{s}$,校核加大流量达到 $120\text{m}^3/\text{s}$,断面规模较大,结构受力集中程度高。隧洞整体纵坡约为 $1/7370$,线形较为平缓,但在开挖施工过程中,围岩卸荷作用及原位应力重新分配仍然十分突出,容易导致围岩发生挤压性大变形。如何科学认识其形成机制,合理预测变形发展趋势,并在工程中加以有效控制,是确保釜山隧洞安全建设与稳定运行的关键问题。

1 隧洞围岩大变形研究的工程意义

1.1 保障大断面水工隧洞结构安全的现实需求

釜山隧洞为无压圆拱直墙型断面,断面尺寸大,结构组成多,在围岩受力不平衡或者发生较大变形的情况下,围岩—结构间的关系更为敏感。围岩的大变形会导致原有的受力路线发生变化,从而使结构产生附加的内力及位移反应,并会影响到初支及衬砌系统整体的稳定性。如果缺乏对围岩大变形的认识,在隧洞施工及服役的过程中有可能造成结构安全储备不够的问题。因此,围岩大变形的研究是进一步了解大断面水工隧洞受力的基础工作以及前提条件。

1.2 提升长距离双洞线隧洞施工可控性的关键环节

釜山隧洞洞身线路长、结构型式多变,且采用双洞线布设模式,两洞之间岩体厚度小,导致围岩变形不再局限于单洞范围内,而是表现出显著的空间相关性。围岩受开挖扰动后发生变形的行为将影响施工安全及施工组织。开展围岩挤压大变形分析,有利于从系统层面把握双洞线隧洞围岩变形的演化特征及相互影响规律,并为施工过程中的风险识别与控制提供理论依据,提高长隧施工的可预见性和可控性。

1.3 服务隧洞长期运行与水力功能稳定

虽然无压流隧洞工作状态下不受内水压力控制,但是随着围岩变形的发展,可能会逐渐影响到隧洞的净空、过流条件及运行安全等方面。由于围岩蠕变、结构材料老化以及水流冲刷等原因,有可能进一步累积施工期未消散的变形,从而不断加剧其对隧洞的危害。因此,从全寿命的角度分析围岩的大变形可以预见隧洞变形对其运行的影响,对于保证在设计水头差下稳定输水、保证隧洞的水工作用及耐久性有重要意义^[1]。

2 隧洞围岩挤压大变形的主要问题

2.1 高地应力与软弱围岩条件下的塑性流动问题

由于在一定的埋深下,围岩所处的原始地应力较高,在隧洞开挖后破坏了围岩原来的受力均衡状况,并造成围岩的迅速卸荷及再分布,而围岩的整体强度或者其内某些结构面的抗剪强度不能够抵抗这种再分布之后产生的较大的应力作用,则围岩将由弹变转为塑变,随着应力值的增加,塑性区范围增大,挤压变形明显。

2.2 双洞线相互作用引起的围岩变形放大问题

釜山隧洞为平行双洞型式,两个隧道间围岩间距仅18米,在围岩条件较差及裂隙发育地段,岩体作为受力对象的整体性和强度都相对较差。两洞在邻近的空间同时或先后开挖,彼此间的围岩卸荷范围会互相重叠而影响对方,局部变形——整体空间相互作用。在此条件下,围岩挤压变形不再体现为单一隧洞各

自演化的过程,而是呈现出相互耦合、相互强化的特征,不仅加大了围岩力学响应的复杂程度,也显著提高了变形范围和变形幅度判定的难度。

2.3 围岩变形演化过程中显著的时效性与非线性问题

一般来说,围岩的大变形都有一定的时间效应,即不是在开挖后很快完成,而是在随后很长一段时间内都在发生变化。特别是软岩、破碎岩及有地下水活动的围岩中,由于围岩材料受到长期荷载的作用而产生蠕变,造成围岩变形随时间不断增长的现象,这种变形变化规律一般呈非线性关系。初期变形快,后期变形虽然较慢但仍不完全终止。由于围岩变形具有这种时间效应以及非线性的特点,造成围岩的实际响应偏离传统的基于线弹性及瞬态假设的分析计算结果,加大了变形量预测与控制的难度。

2.4 断面结构形式与局部刚度分布不均引发的变形问题

无压圆拱直墙型断面除需考虑水力过流条件外,在受力方面则对围岩变形较敏感,直墙处受围岩挤压容易发生较大水平方向位移,拱脚为直墙及拱部交界,往往是应力集中区和变形集中区;若围岩条件差或者围岩变形快,则局部应力集中会导致局部变形增大;由于断面结构强度不均匀,因此围岩收敛也存在较大的区域性差异,可能会影响隧道的整体稳定性^[2]。

3 围岩挤压大变形预测及工程应用对策

3.1 基于围岩力学特性的变形机制分析

隧道围岩大变形的实质就是围岩自身的承载能力不足以抵抗因开挖而产生的外来荷载,导致其发生变形积累的过程。针对釜山隧洞的大变形问题,在实际工程处理过程中,应根据实际勘探资料进行详细的围岩分类及受力分析,并对其产生变形的原因加以分析判断。首先对隧洞沿线各区段围岩进行室内岩石力学试验获取其基本力学参数指标:微风化的花岗岩饱和抗压强度在 $65\sim 80\text{MPa}$ 之间,弹性模量约为 $35\sim 42\text{GPa}$,泊松比约 $0.22\sim 0.26$;而破碎片岩的饱和抗压强度只有 $8\sim 15\text{MPa}$,弹性模量在 $3\sim 8\text{GPa}$,泊松比为 $0.32\sim 0.38$,并确定不同岩性的弹塑性转化条件。此外,利用钻孔电视及地质雷达法对洞室围岩结构面发育情况进行定量评价分析。综合大深度收敛量测及现场应力测量成果,认为该隧洞设计高程(埋深在 $300\sim 500\text{m}$)的最大水平主应力为 $18\sim 25\text{MPa}$;竖直主应力约为 $12\sim 16\text{MPa}$;应力比为 $1.5\sim 1.8$,据此绘制应力—应变完整曲线,分析围岩在不同的应力条件下进入弹塑性变形阶段,并准确地识别了塑性圈增长速率为 0.8mm/d 的关键点。建立基于机理的大变形危险性区域划分方法,并形成下一步大变形预测工作的基础理论依据及参数条件^[3]。

3.2 综合多因素的变形预测方法应用

隧道围岩大变形应采用多种方法相结合的方式来进行预测预报,在充分考虑各种方法的优缺点的基础上提出“经验法—力学计算法—数值计算法”的预测预报组合模式来准确地对各区段隧道围岩的大变形发展趋势做出正确的判断。针对釜山隧洞,先根据国内外类似地质条件下隧道的经验总结出隧道围岩级别与其位移量的关系表,针对IV级围岩区段,根据类似工程经验得

到初期变形量预测区间为: 80~150mm; V级围岩区段, 初期变形量预测区间为: 150~300mm, 在此基础上, 结合隧洞的具体参数进行理论计算, 利用修正的芬纳公式及卡斯特纳公式, 并将各区间对应的埋深、断面宽度(标准断面宽8.6m)和高度(标准断面高6.8m)及围岩力学参数等代入其中, 确定理论变形值并根据经验系数(IV级围岩取1.2~1.4, V级围岩取1.5~1.8)对比理论值与实际工程之间的差异; 主要预报方法为FLAC3D数值模拟法, 在软件中建立三维地质模型, 对开挖步距1.5m和循环进尺2m的条件进行数值模拟, 研究隧道开挖后围岩受到开挖卸载及初支(喷厚10cm及锚杆间距1.2m×1.2m)后的应力释放情况及变形发展趋势, 监测点布设间隔2小时测量一次, 有效控制开挖后3~7天内变形快速发展的时期, 并对大于5mm/d的变形速率进行预警。对隧洞由280m埋深向420m埋深过渡及岔洞部位进行局部精细化预测, 加密模型网格单元到0.5m×0.5m×0.5m, 得到更为准确的各区域变形量预测结果, 并据此指导局部支护参数调整和优化施工方案。

3.3 优化开挖与支护协同控制围岩变形

对于釜山隧洞围岩挤缩变形强烈部位(以V类围岩为主, 部分IV类围岩破碎带), 应形成开挖—支护联合控制变形机制, 并按照“少扰动、管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭”的原则, 对围岩变形进行有效控制。一方面, 在开挖进尺上由原计划每循环3m缩小到1.2~1.5m, 采取台阶法开挖, 上台阶高度控制在3.2m, 下台阶分2次开挖, 每步高1.8m, 开挖循环周期控制在12h内, 保证围岩裸露时间不大于8h, 减少卸荷后围岩的自由变形时间。初期支护体系加强设计: 喷射混凝土为C25早强混凝土, 厚度由一般地段8cm加厚到12~15cm, 24h抗压强度不小于15MPa; 系统锚杆采用Φ25mm高强度螺纹钢锚杆, 长3.5~4.5m, 间距加密为0.8m×0.8m梅花形布置, 锚杆锚固力不小于180kN; 拱脚、直墙处增加Φ16mm钢筋网(网格尺寸15cm×15cm), 并设I18型钢拱架, 间距0.6m, 型钢拱架与锚杆焊牢, 形成一体。为增加支护系统变形协调性能, 在喷射混凝土与围岩间设5mm厚土工布缓冲层, 允许围岩释放30%~40%的塑性变形能, 并在型钢拱架节点部位设伸缩装置, 伸缩量取50~80mm, 防止支护结构由于过大的刚度发生破坏。

3.4 充分考虑双洞线空间效应的整体控制策略

釜山隧洞两洞线布设, 洞径均8.6m, 两洞中心距25m, 双洞开挖的空间效应对围岩产生应力叠加, 容易引发挤压变形, 应统筹考虑两洞变形控制措施及施工组织方式。先利用数值计算研究

两洞先后开挖对围岩应力场的影响, 明确采取“左洞先行、间隔15~20d后开挖右洞”的错台开挖方式, 以期不出现左右洞均处于卸荷变形高峰的情况。在左洞开挖中, 先进行上半幅(桩号K0+000~K1+200)开挖, 在右洞开挖中, 滞后左洞上半幅开挖3个循环(约36h), 待左洞相应区段初期支护完成后, 并且初期支护混凝土强度达到70%, 再开挖右洞相应区段。开挖步距协调上, 右洞开挖进尺较左洞减少20%至1.0~1.2m, 并保证右洞开挖面距离左洞对应开挖面为10~15m, 降低两洞开挖卸荷的影响。在两洞中间岩柱处(宽约16.4m)增加专门监测横断面, 并埋设深层位移计(监测深度为8m, 量程精度为0.1mm)、应变计(测量范围为0~50MPa), 对中间岩柱进行变形及应力动态观测, 在变形速率大于3mm/d或者应力发展速率大于0.5MPa/d的情况下停止开挖, 及时对中间岩柱采取加固措施(施作Φ32mm预应力锚杆, 超前支护(预应力100kN, 间距0.8m×0.8m))。并优化施工通风及排水组织措施以降低施工活动对中隔壁产生的干扰, 在一定程度上缓解施工扰动造成的中间岩柱受力恶化; 同时优化开挖步骤和开挖速度, 尽可能降低空间效应对隧道施工造成的影响, 全面提高双洞线结构物的安全等级。

4 结语

水工隧洞围岩的大变形是工程建设中不可避免的技术难点之一。基于釜山隧洞, 研究围岩大变形机理及挤压式变形预测方法, 并将其应用于实际工程, 对于进一步了解大变形围岩具有重要意义; 在准确预测的基础上, 采用合理的措施以及有效的施工手段来避免和减少围岩挤压大变形的发生。保证了无压流隧洞结构安全及运行稳定。上述研究结果对于类似的长大水工隧洞工程有很好的借鉴作用和推广应用价值。

[参考文献]

- [1]于远祥, 陈宝平, 张涛, 等. 深埋软岩隧洞围岩变形破坏分区规律反演分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 46-52.
- [2]包林海, 王成虎, 郭启良, 等. 巴基斯坦某隧洞地应力状态及围岩大变形研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 38-44.
- [3]张建祥, 王术学. 灰色理论在水工隧洞围岩变形预测中的应用探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57(9): 34-3748.

作者简介:

孙海良(1982--), 男, 满族, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 本科, 中级经济师, 主要研究方向: 安全监测。

赵重亮(1988--), 男, 汉族, 辽宁省辽阳市人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 安全监测。