DOI：10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.012
肖欣宏，王静，谢小帅，等. 复杂岩溶地区引水隧洞衬砌外水压力研究[J]. 水利水运工程学报，2018(5)：82-88.（XIAO Xinhong，WANG Jing，XIE Xiaoshuai，et al. External water pressure on diversion tunnel lining in complex karst area[J]. Hydro-Science and Engineering，2018(5)：82-88.（in Chinese））

复杂岩溶地区引水隧洞衬砌外水压力研究

肖欣宏[1]，王　静[2]，谢小帅[1]，陈华松[2]，周家文[1]
（1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065；2. 云南省水利水电勘测设计研究院，云南 昆明 650021）

摘要：衬砌外水压力的合理计算是岩溶地区引水隧洞设计关注的重点，对结构设计参数选取及运行安全影响重大。针对滇中引水工程大理Ⅱ段引水隧洞，采用ABAQUS数值模拟的方法对不同衬砌及注浆圈参数下隧洞衬砌外水压力及渗流场变化规律进行研究分析，以确定合适的设计参数。研究结果表明：衬砌全封堵时外水压力基本可认为等效于该点处的静水压力，一般不能考虑水头折减；增大衬砌渗透系数是降低衬砌外水压力极为有效的措施，但同时对渗流场产生较大影响；减小注浆圈渗透系数或增大其厚度在降低衬砌外水压力的同时可有效减小渗流场扰动，极大缓解排水减压和环境保护之间的矛盾。通过分析不同因素对衬砌外水压力的影响，所得结果可为复杂岩溶地区隧洞工程防排水系统设计提供参考。

关　键　词：水利工程；引水隧洞；外水压力；渗流场；岩溶地区；注浆圈参数
中图分类号：TV672　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-640X(2018)05-0082-07

随着我国西部大开发战略的实施，水利交通行业地下工程常穿越西南复杂岩溶水地区。在岩溶富水高压地层修建的隧洞工程除面临围岩压力之外，洞室开挖后衬砌承受的高外水压力成为结构设计与施工关注的重点。若设计不当常会导致隧洞发生突涌水灾害，造成很大的经济损失，例如锦屏二级水电站探洞施工曾发生3次特大规模高压突涌水，大瑶山隧道施工过程中因高外水压力导致衬砌破坏[1-2]。因此合理确定衬砌外水压力已成为岩溶富水地区隧洞设计的关键问题之一。

目前隧洞衬砌外水压力的计算还没有统一的方法，常参照水工隧洞设计规范采用折减系数的方法对实测隧洞区域地下水位进行相应折减以作为隧洞衬砌外水压力[3-5]。但该方法存在诸多弊端，如洞室开挖前无法准确获得地下水活动状态进而选择合适的折减系数；折减系数取值区间较大造成取值误差较大；该方法没有考虑隧洞防排水措施对衬砌外水压力的影响[6]。针对隧洞衬砌外水压力计算中的问题，国内外学者采取不同方法进行了一系列研究。谢兴华等[7]采用三维拟连续介质渗流理论，通过数值计算确定了围岩衬砌上的外水压力场。刘立鹏等[8]推导了地下隧道渗水量和复合衬砌结构外水压力折减系数理论求解公式，揭示了注浆圈、初期支护、二次衬砌渗透系数及厚度等参数的变化对隧道渗水量和衬砌外水压力折减系数的影响规律。郑波等[9]提出了复合式衬砌等效渗透系数的概念和确定方法，并利用整体式衬砌结构的水压力计算方法估算衬砌水压力。张成平等[10]通过理论计算和分析，得到了注浆圈参数变化对隧道涌水量和衬砌外水压力的影响规律，分析了隧道排水率与衬砌外水压力之间的关系。李鹏飞等[11]采用理论分析和数值模拟方法揭示初期支护、二次衬砌及注浆加固圈等参数的变化对海底隧道渗水量和衬砌外水压力的影响规律。Arjnoi P等[12]利用数值模拟研究了不同排水工况下隧道围岩及衬砌的孔隙水压力与内力的分布规律。

上述研究多采用理论分析或数值模拟的方法对隧道衬砌外水压力进行分析，但针对我国西南地区复杂

收稿日期：2017-12-15
作者简介：肖欣宏(1993—)，男，重庆人，硕士研究生，主要从事水工结构与地下工程方面的研究。
E-mail：953813123@qq.com

岩溶环境，引水隧洞衬砌外水压力及渗流场的研究比较匮乏。衬砌外水压力研究的主要目的在于确定合适的渗控方案以保证隧洞施工安全，以往研究重点多是通过分析各因素对衬砌外水压力的影响规律来确定合适的衬砌及注浆圈参数，并没有验证该渗控方案下衬砌外水压力满足要求的同时隧洞周边生态环境是否受到较大影响。隧洞全范围孔压等值线图的变化可以直观显示洞室开挖对山体渗流场的影响，以此来反映隧洞开挖对周边生态环境的影响程度。本文以滇中引水工程穿越复杂岩溶地段的大理Ⅱ段引水隧洞为例，采用 ABAQUS 有限元软件研究衬砌外水压力影响因素的同时，分析不同因素下隧洞渗流场变化规律，综合分析两种标准以确定适应于西南复杂岩溶地区的堵排水措施，使衬砌外水压力满足要求的同时，不对隧洞周边生态环境造成较大负面影响。

1　工程概况及计算模型

1.1　工程概况

滇中引水工程从金沙江虎跳峡以上河段引水，以解决滇中地区严重缺水问题，具有显著的经济和社会效益。该工程由水源工程和输水工程两部分组成，输水总干渠全长 661.07 km，全线划分为大理Ⅰ段、大理Ⅱ段、楚雄段、昆明段、玉溪段及红河段。其中大理Ⅱ段全长 102.74 km，沿线建筑物包括隧洞、暗涵、渡槽、倒虹吸等形式，其中隧洞总长 91.186 km，占本段线路全长的 88.75%。大理Ⅱ段推荐线路中的海东、狮子山和磨盘山 3 条隧洞穿越 6 个岩溶水系统，3 条隧洞穿越的可溶岩洞段合计长 14.01 km，占本段线路总长的 13.64%。隧洞穿越复杂岩溶水地区存在一定程度的施工涌水、水环境疏干等岩溶灾害问题。初步统计，大理Ⅱ段可能产生 0.1 m^3/s 以上大量突水突泥段长 12.974 km，约占隧洞全长的 14.23%，最大涌突水量达 1.3 m^3/s。因此，针对大理Ⅱ段复杂岩溶水地区，研究其地下水渗流场及衬砌外水压力分布规律，以确定合适的堵排水措施对保证围岩稳定性和隧洞安全具有重要意义。

1.2　计算模型及参数

计算选择大理Ⅱ段海东隧洞某典型断面，断面纵剖面见图 1，岩石主要为裂隙性溶蚀风化带下白云质灰岩夹杂溶蚀破碎带。灰岩透水性较强，溶蚀破碎带溶隙较发育，断面埋深 323 m，地下水位距洞室顶板高程 135 m，断面形式为马蹄形，参数见图 2。

本次研究基于渗流应力耦合理论，选取 ABAQUS 有限元软件建立各向同性渗流介质模型，裂隙围岩可将其简化为等效连续多孔介质。建模时考虑隧道开挖半径的影响范围及隧洞地下水位高度，模型计算范围取为 10 倍开挖洞径[10]，洞室中心位于模型中心，模型网格划分见图 3。

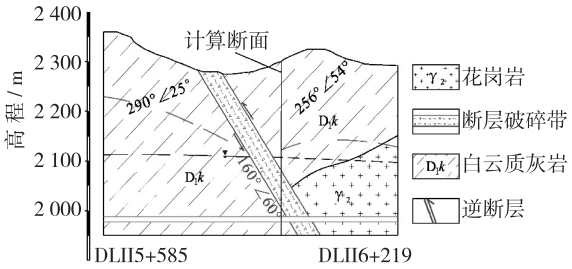

图 1　隧洞计算断面纵剖面

Fig. 1　Longitudinal profile of tunnel calculation section

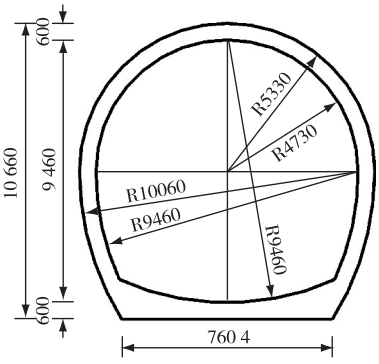

图 2　隧洞断面尺寸（单位：mm）

Fig. 2　Cross-section dimensions map of tunnel (unit: mm)

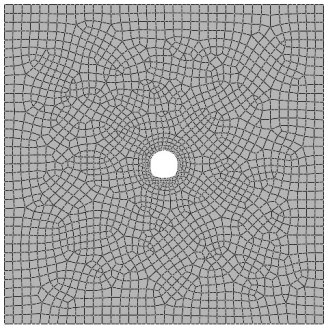

图 3　有限元网格模型

Fig. 3　Finite grid model

模型左右边界施加水平位移约束，底部边界施加竖向位移约束；模型上表面施加 7.7 MPa 的均匀压应力模拟上部岩体的压力，同时受到侧向构造应力作用，侧向系数为 1.2；模型上下边界分别施加地下水作用水头，其中上表面初始水头为 87.03 m，下表面初始水头为 193.63 m，左右两侧为不透水边界；隧洞衬砌内表

面为渗流边界，水压力设为0。通过查阅相关资料，数值计算时各材料力学参数取值见表 1 所示，围岩按 Mohr-Coulomb 屈服准则考虑。

表 1 材料力学参数统计

Tab. 1 Material mechanics parameters

材料	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ °
围岩	2.80	24	0.26	1.05	40
注浆圈	2.82	26	0.24	1.10	43
衬砌	2.50	28	0.17	—	—

2 衬砌参数对衬砌外水压力及渗流场影响

岩溶发育地区深埋高水头隧洞衬砌往往承受较高的外水压力，对洞室围岩及衬砌安全带来严重威胁。参考滇中引水工程大理Ⅱ段地质勘察资料，选取典型断面围岩渗透系数 k_r 为 1.16×10^{-5} m/s，属于中等透水性围岩，衬砌厚度取 0.6 m，分别研究衬砌渗透系数 k_1 为 $1\times10^{-10}\sim1\times10^{-5}$ m/s 时，隧洞衬砌外水压力变化规律。选择衬砌外表面拱顶、拱腰以及底板中点作为特征点，统计各点衬砌外水压力绘制关系曲线如图 4 所示。

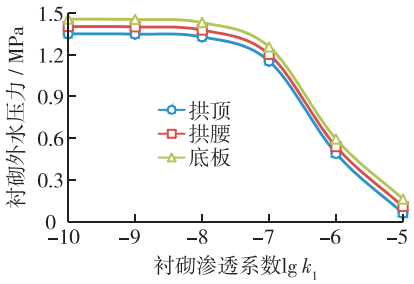

图 4 衬砌外水压力与衬砌渗透性关系

Fig. 4 Relationship between external water pressure of lining and permeability of lining

从图 4 可见，不同特征点衬砌外水压力随衬砌渗透系数变化规律一致，随着衬砌渗透系数的增大，衬砌外水压力逐渐减小。当衬砌渗透系数取为 1×10^{-10} m/s，衬砌透水性极小，衬砌拱顶外水压力为 1.350 MPa，等于该点的静水压力。衬砌某点的外水压力与该点静水压力之比称为外水压力折减系数，则该点外水压力折减系数为 1，故可认为衬砌全封堵时，外水压力等效于该点的静水压力而不能折减。当衬砌渗透系数 k_1 大于 1×10^{-8} m/s时，衬砌外水压力开始显著降低；当 k_1 为 1×10^{-7} m/s 时，衬砌拱顶外水压力为 1.153 MPa，相较于不排水衬砌减小了 14.6%，此时外水压力折减系数为 0.854；当 k_1 为 1×10^{-6} m/s 时，衬砌拱顶外水压力为 0.489 MPa，相较于不排水衬砌减小了 63.8%，外水压力折减系数为 0.362；当 k_1 为 1×10^{-5} m/s 时，衬砌拱顶外水压力为 0.057 MPa，减小了 95.8%，外水压力折减系数仅为 0.04。因此，增大衬砌渗透系数是减小衬砌外水压力的有效手段。

洞室围岩全范围渗透水压等值线图可以直观显示洞室开挖对山体渗流场的影响，图 5 为衬砌渗透系数为 1×10^{-10}，1×10^{-8}，1×10^{-7}以及 1×10^{-6} m/s 时隧洞渗透水压等值线分布。

从图 5 可见，衬砌渗透系数为 1×10^{-10} m/s时，地下水面线几乎不受隧洞影响，水压等值线相互平行呈静水压分布，这说明当衬砌渗透系数较小时，围岩周围渗流场因洞室开挖变化较小。衬砌全封堵时将地下水全挡在衬砌外表面，此时隧洞涌水量几乎为 0，衬砌外水压力约等于静水压力。随着衬砌渗透系数的增大，隧洞渗流场逐渐产生变化。当衬砌渗透系数为 1×10^{-8} m/s，靠近隧洞周边的渗透水压等值线有所降低，但降低幅度极小，这种趋势在渗透系数取为 1×10^{-7} m/s 时，变得更加明显。尽管模型顶部水压等值线仍不受影响，但隧洞周围渗透水压力显著降低，使得附近水压等值线图向下弯曲呈漏斗状分布。当衬砌渗透系数为 1×10^{-6} m/s 时，隧

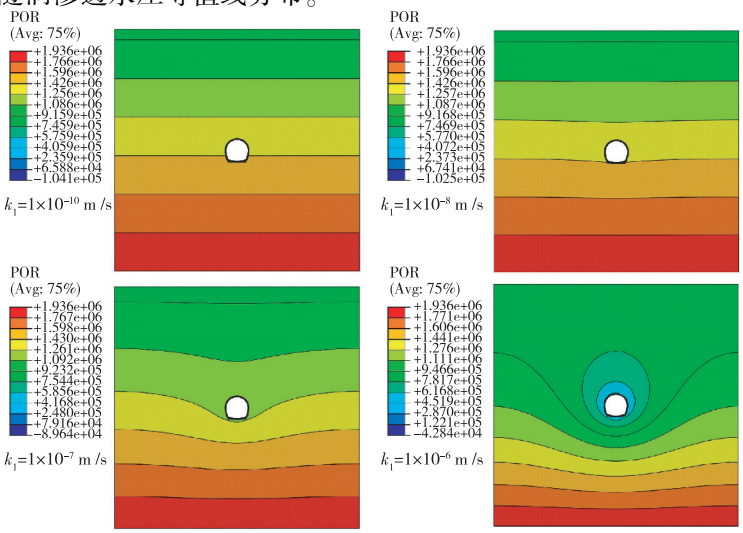

图 5 不同衬砌渗透系数隧洞渗透水压等值线

Fig. 5 Contour of tunnel pore water pressure with different lining permeability coefficients

洞上方模型范围内渗流场均受影响，水压等值线发生明显改变，洞室围岩全范围孔压显著下降，渗透水压等值线呈漏斗状分布，靠近洞室，水压等值线图逐渐变为环形分布，说明衬砌透水性的增大使得地下水被大量排出，从而导致洞室周围孔压下降数值明显。

综合分析衬砌渗透系数对衬砌外水压力及渗流场的影响可以发现，仅依靠排水措施无法同时满足两者安全的要求。岩溶高压地区降低衬砌外水压力是保证洞室结构安全的关键，但降低外水压力的同时会对山体渗流场产生较大影响，地下水通过排水措施而被大量排出，导致隧洞周边发生生态破坏、水土流失等问题。因此，仅通过增大衬砌渗透系数来降低外水压力既不科学也不合理。

3　注浆圈参数对衬砌外水压力及渗流场影响

复杂岩溶地区仅通过增大衬砌渗透系数的措施在降低衬砌外水压力的同时会对山体渗流场产生较大扰动，不利于生态保护。下面研究注浆圈厚度和渗透系数对隧洞衬砌外水压力的影响，结合隧洞渗流场的分析以确定合适的注浆圈参数。

3.1　注浆圈厚度

围岩渗透系数为 1.16×10^{-5} m/s，注浆圈渗透系数取为围岩渗透系数的 1/50，即 2.32×10^{-7} m/s[9]，分别研究注浆圈厚度为 3，5，7，9 m 时隧洞衬砌外水压力及渗流场变化规律。图 6 为不同衬砌渗透系数下衬砌拱顶外水压力与注浆圈厚度的关系曲线。

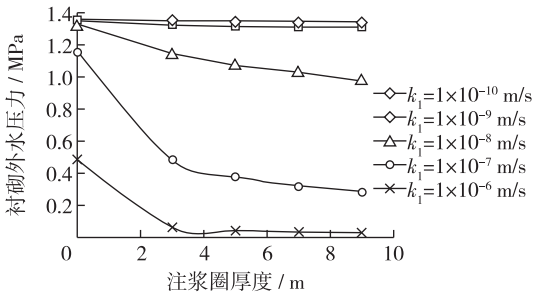

图 6　衬砌外水压力与注浆圈厚度关系

Fig. 6　Relationship between external water pressure of lining and thickness of grouting circle

从图 6 可以看出，衬砌渗透系数为 1×10^{-10} m/s 时，增大注浆圈厚度衬砌外水压力几乎无变化。注浆圈厚度为 9 m 时，衬砌拱顶外水压力为 1.345 MPa，相较于不注浆工况仅减小了 0.005 MPa。因此，当衬砌采取全封堵时，围岩注浆无法有效降低衬砌外水压力，注浆可以封堵渗水通道但无法做到完全不透水，若衬砌无排水措施，随着时间的推移从注浆圈渗入的水最终均会作用在衬砌外表面使得衬砌外水压力等于静水压力。当衬砌渗透系数为 1×10^{-9} m/s，随着注浆圈厚度的增大衬砌外水压力出现小幅降低；当衬砌渗透系数为 1×10^{-8} m/s，衬砌外水压力随注浆圈厚度变化的敏感性增强，注浆圈厚度为 9 m 时，衬砌外水压力为 0.986 MPa，相较于不注浆工况减小了 25.8%；衬砌渗透系数为 1×10^{-7} m/s，围岩注浆对降低衬砌外水压力效果较好，注浆圈厚度为 9 m 时衬砌外水压力为 0.281 MPa，比不注浆时减小了 75.6%。通过对比不同衬砌渗透系数下衬砌外水压力与注浆圈厚度关系曲线，可以发现衬砌排水时围岩注浆可以有效降低衬砌外水压力，且随着注浆圈厚度的增大，衬砌外水压力逐渐减小，因此增大注浆圈厚度是降低衬砌外水压力的有效手段。

不同注浆圈厚度下隧洞渗透水压等值线分布见图 7。图中各种工况下衬砌渗透系数均取为 5×10^{-7} m/s，注浆圈渗透系数取为 2.32×10^{-7} m/s，研究不注浆以及注浆圈厚度为 3，5 和 9 m 时隧洞渗流场分布规律。从图 7 可以看出，围岩注浆 3 m 后，隧洞渗流场发生显著改变，隧洞模型顶部水面线呈平行分布，但注浆圈附近水压等值线仍向下弯曲呈漏斗状，注浆圈内水压呈环

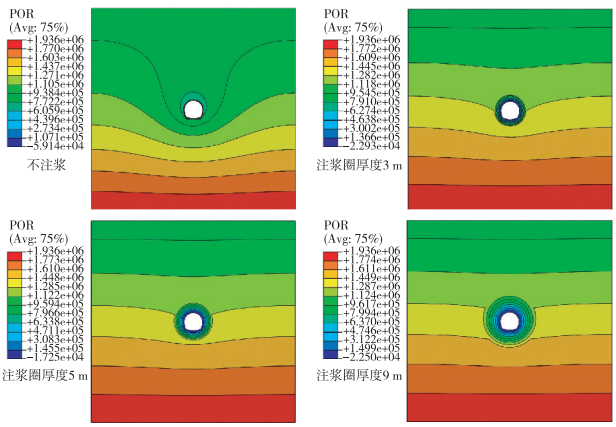

图 7　不同注浆圈厚度隧洞渗透水压等值线

Fig. 7　Contour of tunnel pore water pressure with different grouting circle thicknesses

形分布。当注浆圈厚度为 5 m 时,围岩注浆范围扩大使得隧洞渗流场受洞室开挖影响范围进一步减小,注浆圈附近漏斗下凹幅度明显降低;当注浆圈厚度为 9 m 时,围岩注浆已经能很好地保证渗流场的稳定,注浆圈外水压等值线平行分布,从注浆圈渗入的水通过衬砌排水措施排出,极大地保证了隧洞渗流场及周边生态环境的稳定。

通过对渗流场及衬砌外水压力的分析,围岩注浆可以在不影响生态环境的少量排水条件下显著降低衬砌外水压力,很好地缓解了排水减压和环境保护之间的矛盾。从图 6 可以看出,随着注浆圈厚度的增大,外水压力降幅越来越小,且注浆圈厚度越大,所需注浆量也越多,增加了经济成本,因此围岩注浆厚度存在经济合理值。从图 7 可见,注浆圈厚度为 5 m 时,隧洞渗流场已基本不受洞室开挖影响,实际工程中地质条件更为复杂,为保证注浆圈堵水的可靠性并综合考虑经济性,岩溶区注浆圈厚度一般取为 5~9 m。

3.2 注浆圈渗透系数

合理的注浆圈渗透系数可以有效保证注浆效果,图 8 为不同注浆圈厚度下衬砌外水压力与注浆圈渗透系数的关系曲线,其中横坐标为围岩与注浆圈渗透系数比值 n_g,n_g取为 5,10,30,50,70 和 100(注浆圈渗透系数依次为 2.32×10^{-6},1.16×10^{-6},3.87×10^{-7},2.32×10^{-7},1.66×10^{-7}和 1.16×10^{-7} m/s)。从图 8 可以看出,不同注浆圈厚度下衬砌外水压力均随注浆圈渗透系数的减小而降低;同一注浆圈渗透系数,注浆圈厚度越大衬砌外水压力越小,这与之前所得结论吻合。随着注浆圈渗透系数的减小,衬砌外水压力降幅越来越小,当注浆圈渗透系数小于围岩的 1/50 时,继续减小注浆圈渗透系数对降低衬砌外水压力的效果已不明显。

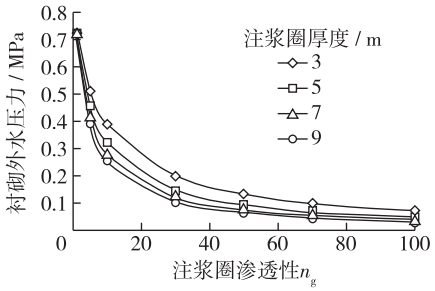

图 8 衬砌外水压力与注浆圈渗透性关系

Fig. 8 Relationship between external water pressure of lining and permeability of grouting circle

图 9 为不同注浆圈渗透系数下隧洞渗透水压等值线分布,其中衬砌渗透系数为 5×10^{-7} m/s,注浆圈厚度为 5 m,研究注浆圈渗透系数为围岩渗透系数 1/5,1/10,1/50 以及 1/100 时隧洞渗流场分布规律。围岩不注浆时渗流场分布如图 7 所示,当注浆圈渗透系数为围岩渗透系数的 1/5(2.32×10^{-6} m/s)时,隧洞渗流场相较于不注浆时水压等值线漏斗下凹范围减小,但幅度仍较大,该注浆圈渗透系数无法有效保证生态环境不受影响。继续减小注浆圈渗透系数,隧洞降水漏斗范围得到进一步控制,当注浆圈渗透系数为围岩的 1/50 时,模型顶部水压等值线平行分布,注浆圈附近水压等值线有小幅向下弯曲的趋势,该注浆圈渗透系数可以较好地保证山体渗流场的稳定;当注浆圈渗透系数为围岩的 1/100 时,隧洞渗流场变化不大,说明继续减小注浆圈渗透系数对减小渗流场扰动效果已不再明显。

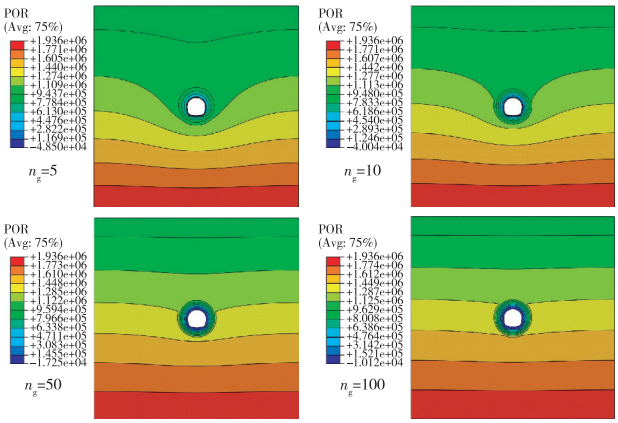

图 9 不同注浆圈渗透系数下隧洞渗透水压等值线

Fig. 9 Contour of tunnel pore water pressure with different permeability coefficients of grouting circle

衬砌外水压力随注浆圈渗透系数减小而降低,但注浆圈渗透系数越小,施工成本及难度越大,综合衬砌外水压力及渗流场的分析,为保证衬砌结构及地下水环境的稳定,通常取注浆圈渗透系数为围岩渗透系数的 1/30~1/50。

4 结 语

基于滇中引水工程复杂岩溶地区大理Ⅱ段引水隧洞,采用 ABAQUS 有限元软件分析了不同衬砌及注浆

圈参数下隧洞衬砌外水压力变化规律，主要结论如下：

（1）排水衬砌外水压力随衬砌渗透系数的增大而减小，但同时会对隧洞渗流场产生较大扰动，复杂岩溶地区透水性较强的围岩仅依靠排水措施降低衬砌外水压力不太合理，建议采取堵排结合的措施。

（2）围岩注浆降低衬砌外水压力作用明显，减小注浆圈渗透系数或增大其厚度既能有效降低衬砌外水压力又可以减小隧洞渗流场的扰动，缓解了排水减压与环境保护之间的矛盾；注浆圈渗透系数持续减小以及厚度的不断增大，衬砌外水压力降低效果越来越差，故注浆圈参数存在相对经济合理的范围。

（3）针对我国西南复杂岩溶地区中等透水性围岩，衬砌渗透系数为 1×10^{-7} m/s 时，围岩注浆后衬砌外水压力降低效果较好；综合考虑经济性及安全性，注浆圈厚度一般取为 5～9 m，注浆圈渗透系数取为围岩渗透系数的 1/30～1/50 较为合适。

参　考　文　献：

[1] 叶甜. 岩溶区深埋隧道衬砌外水压力研究[D]. 浙江：浙江大学，2015.（YE Tian. Study on external water pressure of deep buried tunnel lining in karst areas[D]. Zhejiang：Zhejiang University，2015.（in Chinese））

[2] 郑波. 隧道衬砌水压力荷载的实用化计算研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2010.（ZHENG Bo. Practical calculation of water pressure load on tunnel lining[D]. Beijing：China Academy of Railway Sciences，2010.（in Chinese））

[3] 庄宁，阚二林，邓明镜. 隧道衬砌外水压力确定的渗流场—应力场耦合模型研究[J]. 中南公路工程，2007，32(1)：55-59.（ZHUANG Ning，KAN Erlin，DENG Mingjing. Analysis of coupled seepage and stress fields model in determining tunnel's external water pressure[J]. Central South Highway Engineering，2007，32(1)：55-59.（in Chinese））

[4] 王建秀，杨立中，何静. 深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(9)：1339-1343.（WANG Jianxiu，YANG Lizhong，HE Jing. Introduction to the calculation of external water pressure of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(9)：1339-1343.（in Chinese））

[5] 周亚峰，苏凯，伍鹤皋. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌外水压力取值方法研究[J]. 岩土力学，2014，35(增刊 2)：198-203.（ZHOU Yafeng，SU Kai，WU Hegao. Study of external water pressure estimation method for reinforced concrete lining of hydraulic tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics，2014，35(Suppl2)：198-203.（in Chinese））

[6] 宋岳，贾国臣，滕杰. 隧洞外水压力折减系数工程地质研究[J]. 水利水电工程设计，2007，26(3)：38-40.（SONG Yue，JIA Guochen，TENG Jie. The engineering geological research for the reduction factor of tunnel external water pressure[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering，2007，26(3)：38-40.（in Chinese））

[7] 谢兴华，盛金昌，速宝玉，等. 隧道外水压力确定的渗流分析方法及排水方案比较[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(增刊 2)：2375-2378.（XIE Xinghua，SHENG Jinchang，SU Baoyu，et al. Seepage analysis method for determination of the external water pressure of tunnel and comparison of some drainage schemes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(Suppl2)：2375-2378.（in Chinese））

[8] 刘立鹏，汪小刚，贾志欣，等. 水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报，2013，35(3)：495-500.（LIU Lipeng，WANG Xiaogang，JIA Zhixin，et al. Method to determine reduction factor of water pressure acting on tunnel linings using water-rock independent calculation methodology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(3)：495-500.（in Chinese））

[9] 郑波，王建宇，吴剑. 基于等效渗透系数计算衬砌水压力方法研究[J]. 现代隧道技术，2011，48(6)：43-46，57.（ZHENG Bo，WANG Jianyu，WU Jian. Study of the calculation of external water pressure on tunnel lining based on the equivalent permeability coefficient of the composite lining[J]. Modern Tunneling Technology，2011，48(6)：43-46，57.（in Chinese））

[10] 张成平，张顶立，王梦恕，等. 高水压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(11)：2270-2276.（ZHANG Chengping，ZHANG Dingli，WANG Mengshu，et al. Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge lining in high water pressure and water-enriched region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007，26(11)：2270-2276.（in Chinese））

[11] 李鹏飞，张顶立，赵勇，等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(2)：280-288.（LI Pengfei，ZHANG Dingli，ZHAO Yong，et al. Study of distribution law of water pressure action on composite and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2012，31(2)：280-288.（in Chinese））

[12] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions onporewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2009, 24 (4): 376-389.

External water pressure on diversion tunnel lining in complex karst area

XIAO Xinhong[1], WANG Jing[2], XIE Xiaoshuai[1], CHEN Huasong[2], ZHOU Jiawen[1]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering*, *College of Water Resources and Hydropower*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*; 2. *Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation*, *Design and Research*, *Kunming* 650021, *China*)

Abstract: The reasonable calculation of the external water pressure on the tunnel lining is the focus of the design of the diversion tunnel in the karst area, which has a great influence on the selection of structural design parameters and the operation safety of the hydropower station. In view of the Dali section II diversion tunnel of the water diversion project for the central area of Yunnan Province, the ABAQUS numerical simulation method is applied to studying the variation law of the external water pressure and seepage field of the tunnel lining under the conditions of different lining parameters and grouting circle parameters so as to determine the appropriate design parameters. The analysis results indicate that the external water pressure is basically considered to be equivalent to the hydrostatic pressure at this point when the tunnel lining is fully blocked, and the water pressure reduction cannot be considered in this study. The external water pressure on the tunnel lining can be extremely reduced by increasing the lining permeability coefficient, but it has a great influence on the seepage field. Reducing the permeability coefficient or increasing the thickness of the grouting circle can not only reduce the external water pressure on the lining but also weaken the disturbance to the seepage field, which can greatly alleviate the contradiction between drainage decompression and environmental protection. The research results can provide some references for the design of the waterproof and drainage system in the tunnel engineering in the complex karst area in the southwest China.

Key words: hydroproject; diversion tunnel; external water pressure; seepage field; karst area; grouting circle parameters