

泥岩隧洞仰拱矢跨比对围岩稳定性的影响

石广斌*, 魏娟盆, 肖清, 张雯, 来显杰

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对隧洞(道)工程中广泛存在软岩地层造成支护结构变形甚至破坏的问题, 结合印度尼西亚佳蒂格德水电站引水隧洞现场监测的顶板沉降和边墙收缩变形数据, 提出底板设置仰拱的支护方案. 利用有限元软件 MIDAS GTS 建立不同仰拱矢跨比和侧压力系数的数值模型, 反演佳蒂格德水电站引水隧洞的侧压力系数, 并分析两台阶开挖隧洞围岩和初期支护结构的变形和应力规律. 研究表明: (1) 反演的佳蒂格德水电站泥岩段引水隧洞围岩的侧压力系数为 1.2; (2) 泥岩隧洞的仰拱矢跨比宜为 1/10~1/8; (3) 拱脚局部有应力集中的现象, 必须对拱脚进行加固处理; (4) 综合考虑佳蒂格德水电站引水隧洞的施工条件、围岩及支护结构的变形和应力、施工经济性, 得出佳蒂格德引水隧洞最优矢跨比为 1/10.

关键词: 软岩隧洞; 仰拱; 矢跨比; 位移; 数值模拟

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)03-0001-08

The Influence of Inverted Arch Rise-Span Ratio on Surrounding Rock Stability of Mudstone Tunnel

SHI Guangbin, WEI Juanpen, XIAO Qing, ZHANG Wen, LAI Xianjie

(School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the problems of deformation or even destruction of support structure caused by unavoidable soft rock strata in tunnel (road) project, a support scheme of setting inverted arch on the bottom plate is put forward based on the data of roof settlement and side wall contraction deformation monitored by the diversion tunnel of Indonesia Jatigde Hydropower Station. Using finite element software MIDAS GTS, numerical models with different rise-span ratios and side pressure coefficients are established to invert the side pressure coefficients of the diversion tunnel of Jatigde Hydropower Station, and to analyze the deformation and stress laws of the surrounding rocks of the tunnel excavated by two steps and the initial support structure. Results show that (1) the inverted lateral pressure coefficient of the surrounding rock of the diversion tunnel of Jatigde Hydropower Station is 1.2; (2) the ratio of inverted arch to span of mudstone tunnel should be 1/10~1/8; (3) there is local stress concentration at the arch foot, so the arch foot must be reinforced, and (4) considering construction conditions, deformation and stress of surrounding rocks and support structure, and construction economy of the diversion tunnel of Jatigde Hydropower Station, the optimum ratio of rise to span of Jatigde diversion tunnel is 1/10.

Keywords: soft rock tunnel; inverted arch; rise-span ratio; displacement; numerical simulation

随着我国经济、科学技术和“一带一路”的发展, 在资源开发、水利水电、交通等基础设施方面的投资力度和建设规模越来越大, 使得在施工建设中遇到不良地质条件隧洞的概率增加, 对隧洞开挖施工

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 陕西省教育厅基金资助项目(21JK0719); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51904220)

*通信作者, E-mail: 422415860@qq.com

造成了挑战.隧洞在穿越破碎围岩、断层、软硬岩接触地段、节理裂隙发育岩体等不良地质时,往往会发生较大变形、软岩流变、突涌水等现象,若处理不当,容易造成坍塌、冒顶等事故.一旦发生事故,不仅造成工程施工困难,延误工期进度,而且整治时费用高、难度大,更重要的是可能会造成人员伤亡,给工程建设带来更大困难.因此,不良地质的软岩隧洞在开挖过程中所产生的工程问题越来越被国内外专家重视.

隧洞在施工过程中发生大变形破坏是一个极其复杂的过程,在这个过程中,围岩的岩性、工程地质条件、隧洞断面形状及尺寸、施工技术和支护方式等都会影响隧洞围岩的稳定性.国内外学者在软岩隧洞变形破坏上,主要从典型案例、岩性、工程地质条件、数值计算及试验研究等方面进行了研究,在软岩隧洞破坏机理和泥岩特殊性质方面也取得了大量成果.软岩隧洞变形破坏的典型案例有木寨岭隧道、惠那山隧洞、两水隧道、二郎山隧道等^[1-2],在这些隧道大变形控制和治理技术中都采用了底板仰拱的设计,并发现仰拱矢跨比对隧道围岩稳定非常敏感.马晓文等^[3]研究分析了泥岩隧道围岩在不同软化系数与软化深度下仰拱的位移及应力变化规律,认为软化系数与软化深度对泥岩隧道的仰拱受力有较大影响;丁冬冬等^[4]通过对宝兰客专上庄隧道仰拱底鼓变形现象研究,发现泥岩软化后,仰拱下部塑性区范围明显增加,仰拱拱底同一深度处的竖直位移远大于软化之前的位移;隋毅等^[5]通过理论分析、数值模拟及现场试验研究了某高铁隧道底板隆起变形的成因及变形规律;刘恒显等^[6]通过对兰州某公路黄土隧道进行现场监测,分析研究了隧道仰拱结构受力特性,结果表明当仰拱拱高达到 1.88 mm 时,可满足该隧道最大安全系数的要求;林越翔等^[7]利用动力有限元理论,研究了隧道仰拱在不同矢跨比、仰拱厚度和填充层厚度的条件下对重载铁路隧道底部结构动力响应特征的影响;孔恒等^[8]分析隧道底板隆起的表现形式、物理成因和力学原因,得出隧道底板底鼓的分类形式;康红普等^[9]认为底板岩层的挠曲、偏应力作用及泥岩遇水软化是软岩巷道底鼓的主要原因;樊纯坛等^[10]通过对宝兰客专魏家嘴隧道的围岩压力、钢拱架应力、初支与二衬接触压力等的研究分析,得出隧道变形和衬砌结构处于安全状态;黄华等^[11]对隧道仰拱底鼓提出力学模型和数值模型研究,得出仰拱底鼓量随着围岩等级的增加而增加,随着仰拱跨度的增加而增加,随着矢跨比增加而减小,其减小幅度也逐渐减小.

既有研究表明,隧洞底板设置仰拱对底鼓的治理很有效,且矢跨比对围岩稳定的影响较敏感,但是针对仰拱矢跨比对泥岩隧洞的围岩及其支护结构稳定的影响规律研究较少.因此,本文以印度尼西亚的佳蒂格德水电站引水隧洞工程为背景,研究仰拱矢跨比对泥岩隧洞的围岩变形及应力分布的影响规律,提出泥岩隧洞矢跨比的合理范围及佳蒂格德水电站引水隧洞仰拱矢跨比最优值,为佳蒂格德水电站引水隧洞或类似工程的支护提供参考.

1 工程背景

佳蒂格德水电站引水隧洞从调压井底部至岔洞长 710 m,开挖直径约 5.8 m,大约有三分之二的隧洞埋深超过了 50 m,在泥岩、岩层分界带及角砾岩等不良地质条件下进行施工(佳蒂格德软岩隧洞地质纵剖面如图 1 所示).在隧洞开挖卸荷过程中,随时都有发生塌方、突泥的可能,隧洞在初期支护后有很大的收缩变形,一些位置边墙收缩量超过 1 m,顶板下沉 30 cm,底鼓 75 cm,初期支护的钢拱架及混凝土发生了大变形,甚至导致初期支护破坏(佳蒂格德软岩隧洞底板隆起变形现场如图 2 所示).2018 年 10 月 10 日至 2019 年 12 月 2 日,隧洞开挖到掌子面桩号 PS0+290 m 处,发生了 3 次涌水、塌方、突泥和变形等地质灾害.经现场调查,隧洞初期支护后仍有较大变形的主要原因是在发生涌水、塌方、突泥地质灾害后,水的渗入使泥岩软化,降低了围岩强度.

通过室内试验得到发生涌水、塌方、突泥前后的泥岩具体物理力学参数,如表 1 所示.

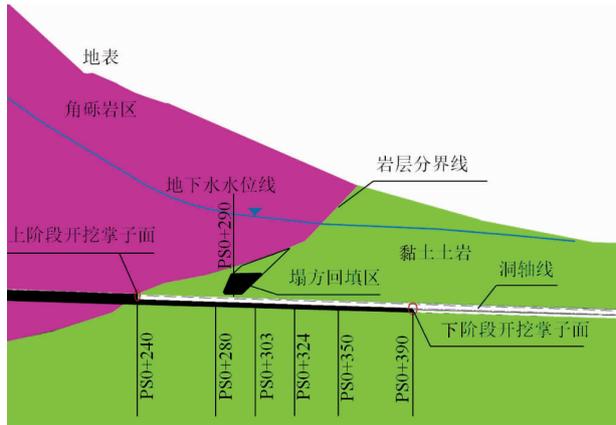


图 1 佳蒂格德软岩隧洞地质纵剖面



图 2 隧洞底板变形现场

表 1 泥岩的物理力学参数

名称	天然密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 C / MPa	抗压强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比 μ
涌水、塌方、突泥前	1.91	21.80	0.15	5.0	0.8	0.35
涌水、塌方、突泥后	1.95	15.64	0.08		0.4	0.40

隧洞支护结构的参数如表 2 所示.

表 2 隧洞支护结构的各项参数

名称	弹性模量 / GPa	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	泊松比 μ	抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa
C25 混凝土	22	2.5	0.167	12.5	1.3	
钢拱架	200	7.9	0.300			235
长锚杆	200	7.9	0.300			235
短锚杆	200	7.9	0.300			235

2 隧洞围岩侧压力系数反演

佳蒂格德引水隧洞的侧压力系数是通过钻孔压力试验得到的估计值,为 0.6~1.5,没有准确的值.因此,按照实际工程建立隧洞相似仿真模型,假设 PSO+290 m 处围岩的侧压力系数 λ 为 0.6,0.9,1.2,1.5 分别进行模拟计算.模型隧洞中心到地表距离为 108 m,隧洞宽度为 6.30 m,高度为 6.34 m,模型边界尺寸为 100 m×100 m,平底马蹄形隧洞计算模型如图 3 所示.隧洞支护结构如图 4 所示,岩体与混凝土采用平面应变单元,钢拱架采用植入式梁单元,间距为 0.75 m,锚杆采用植入桁架单元,长锚杆直径 D 为 25 mm,长度 l 为 4.5 m,间距为 1.0 m×1.0 m;短锚杆直径 D 为 25 mm,长度 l 为 3.0 m,间距为 0.5 m×0.5 m,围岩采用 Mohr-coulomb 本构模型.混凝土标号为 C25,厚度为 20 cm.由于隧洞在施工时出现了突泥和涌水,对泥岩有软化作用,经现场取样试验,在隧洞径向 3 m 深的范围内的围岩参数采用表 1 中涌水后的参数,其余的围岩参数取涌水前的参数,支护结构的参数取表 2 所示的参数.

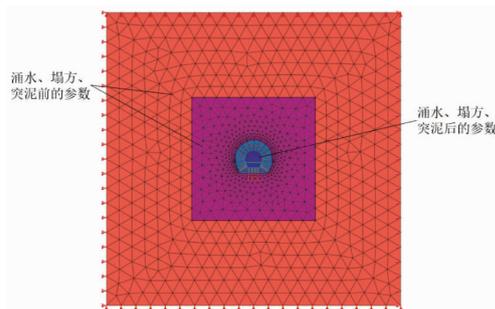


图 3 隧洞围岩计算模型

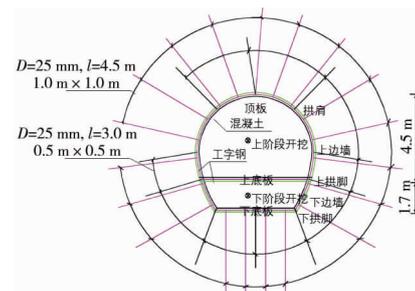


图 4 隧洞支护结构

PS0+290 m 两边墙和顶板的现场时序监测位移与不同侧压力系数的模拟计算位移的对比分析如图 5 和图 6 所示。

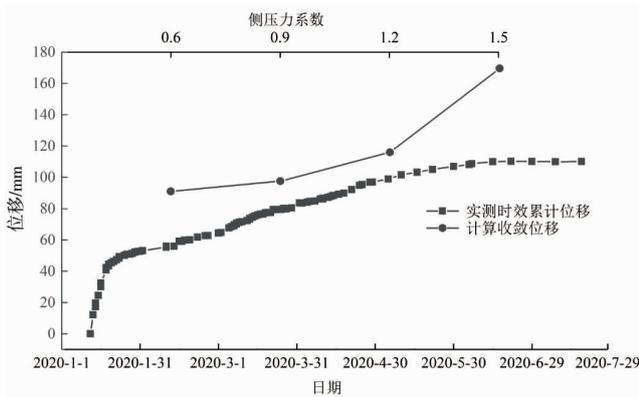


图 5 PS0+290 m 两边墙水平收敛时序监测位移与不同侧压力系数的数值计算位移对比

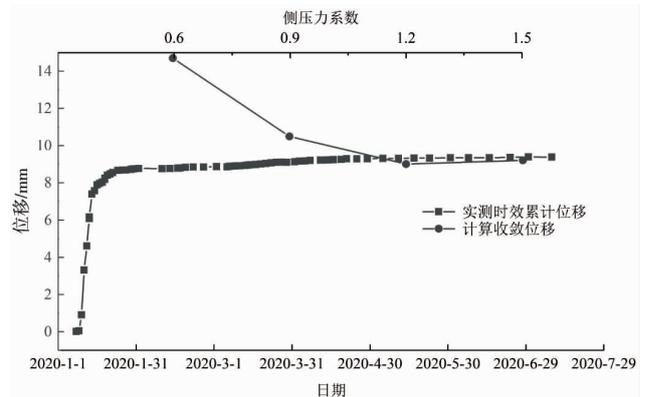


图 6 PS0+290 m 顶板垂直沉降时序监测位移与不同侧压力系数的数值计算位移对比

由图 5 和图 6 可知:PS0+290 m 处两边墙的相对位移于 2020 年 6 月 15 日后基本收敛至 115.00 mm, 而数值模拟计算中,当侧压力系数 λ 为 1.2 时,两边墙相对位移的结果为 115.27 mm,计算值与实测值的误差约为 0.23%;PS0+290 m 处顶板垂直位移于 2020 年 5 月 15 日后基本收敛至 9.80 mm,而数值模拟计算中,当侧压力系数 λ 为 1.2 时,顶板垂直位移为 9.17 mm,计算值与实测值的误差约为 6.43%。因此,佳蒂格德水电站引水隧洞 PS0+290 m 处围岩的侧压力系数 λ 可以近似定为 1.2。

3 仰拱矢跨比优化分析

3.1 拟定计算分析方案

为了研究仰拱矢跨比对支护结构和围岩稳定性的影响,在侧压力系数为 0.6,0.9,1.2,1.5 时,分别取隧洞仰拱矢跨比(仰拱矢高 H 与隧洞底板跨度 L 之比)为 0,1/12,1/10,1/9,1/8,1/7,1/6 这 7 种情形计算围岩和支护结构的受力及变形情况。由于现场采用的支护方案出现了大变形破坏,该模拟支护方案在原支护方案的基础上,将底板水平支撑改为仰拱,钢支撑间距改为 0.5 m,开挖支护方式改为上、下两阶段开挖和支护。矢跨比为 1/10 时,隧洞围岩模型如图 7 所示,隧洞支护结构模型如图 8 所示。

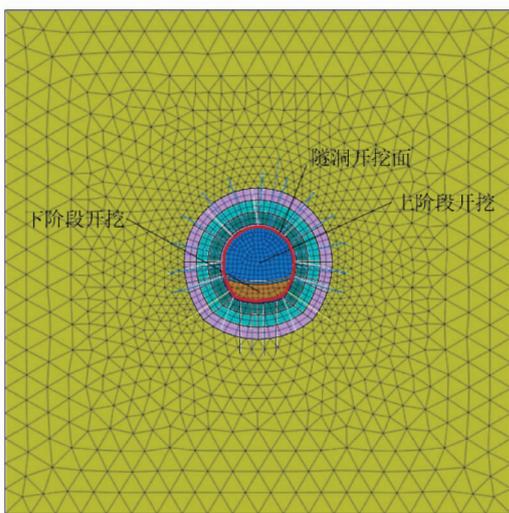


图 7 $H/L=1/10$ 时,隧洞围岩模型

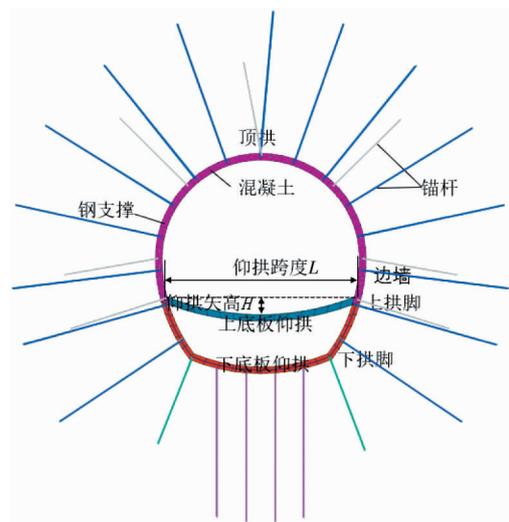


图 8 $H/L=1/10$ 时,隧洞支护结构模型

3.2 分析与讨论

3.2.1 围岩变形的变化规律分析

在不同仰拱矢跨比条件下对隧洞上、下阶段进行支护后,分析隧洞主要部位的围岩变形规律,并讨论

围岩在设置仰拱和不设置仰拱时的变形机理.隧洞完成支护后底板围岩垂直隆起变形规律如图9所示.

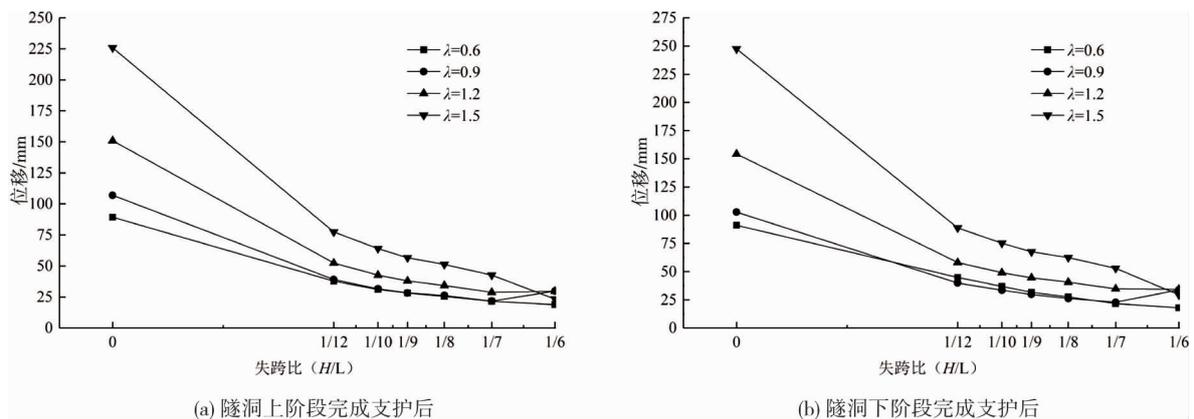


图9 底板围岩最大垂直隆起变形

由图9可知,隧洞底板设置仰拱可以明显减小底板围岩的垂直隆起变形.仰拱矢跨比为1/12与不设置仰拱相比,底板垂直隆起变形减少了57%~65%;在矢跨比为1/12~1/7时,随着仰拱矢跨比的增加,底板最大垂直隆起变形逐渐减小,其减少率小于仰拱矢跨比为0和1/12时的减少率;在矢跨比大于1/7时,底板最大垂直隆起变形规律不再明显.这是因为不设仰拱时,底板支护结构受到围岩抬升力的作用,使底板中心受到较大的负弯矩,底板支护结构在围岩水平压力作用下,若底板不发生向上隆起,不会产生弯矩,一旦底板产生向上的隆起变形,就会产生负弯矩,且随着隆起变形的增加而增加,较大的负弯矩会使底板支护结构产生向上的挠曲变形;而底板设置仰拱时,底板支护结构受到围岩抬升力的作用,使底板中心受负弯矩,但是底板仰拱支护结构在围岩水平压力作用下会产生正弯矩,相互抵消可以减小底板所受的负弯矩,从而达到控制底板隆起变形的效果.

顶板围岩垂直沉降变形规律如图10所示.由图10可知,隧洞底板设置仰拱对顶板围岩的垂直沉降变形的影响较小,无明显的规律性,这是因为改变底板支护形式对顶板围岩受力特征影响不大.

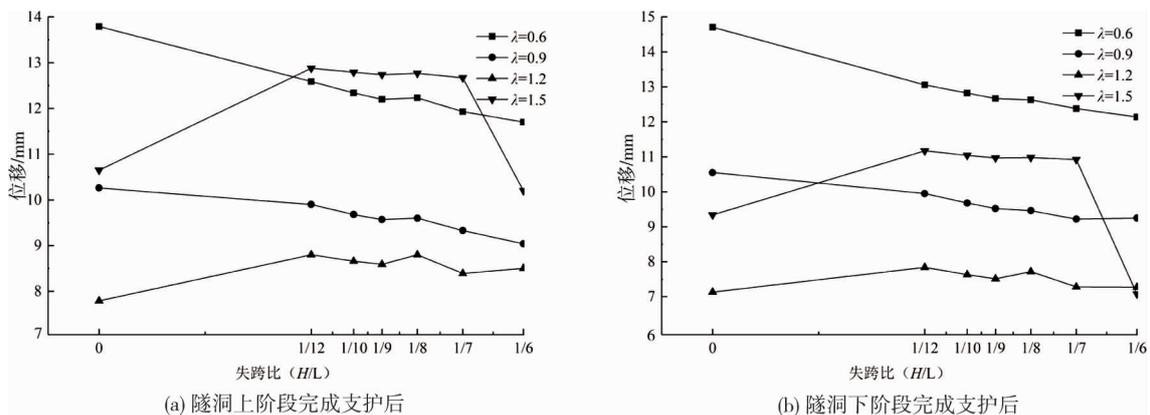


图10 顶板围岩最大垂直沉降变形

边墙围岩水平收敛变形规律如图11所示.由图11可知,隧洞底板设置仰拱可以明显减小边墙围岩的水平收敛变形.仰拱矢跨比为1/12与不设置仰拱相比,边墙水平收敛变形减少了50.0%~72.5%;当矢跨比大于1/12时,矢跨比对边墙水平收敛变形的影响较小.当矢跨比为0时,若底板支护结构不发生大变形,底板可以承载较大水平压力,使边墙水平收敛变形较小;若底板在下部围岩的反力和水平压力共同作用下发生较大变形,底板可以承载的水平压力较小,从而使边墙水平收敛变形增加.

综上分析可知,设置仰拱不仅可以有效控制隧洞底板的垂直隆起变形,同时也可以明显控制边墙的水平收敛变形,即控制边墙的变形破坏.

3.2.2 围岩塑性区最大深度变化规律分析

在不同仰拱矢跨比条件下完成隧洞上、下阶段的支护后,对隧洞围岩最大塑性区深度的变化规律进行

分析.隧洞底板围岩塑性区最大深度变化规律如图 12 所示.

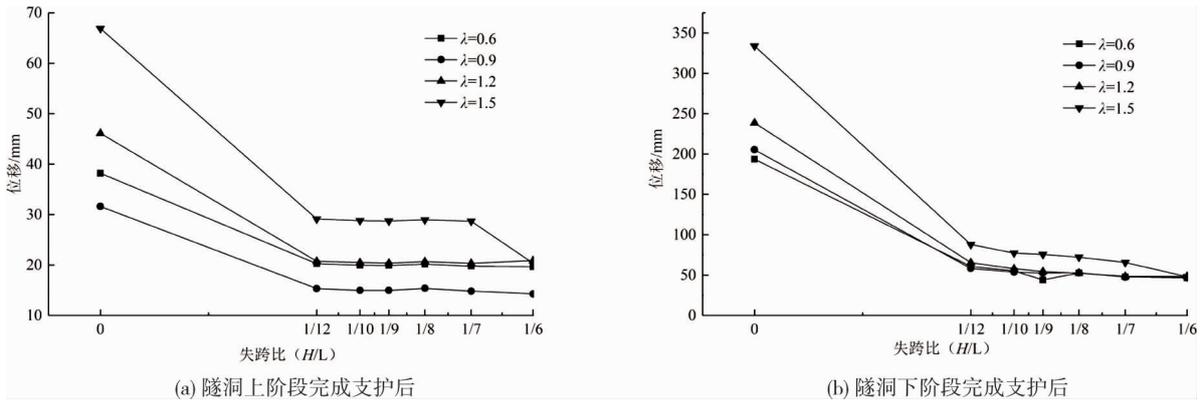


图 11 边墙围岩最大水平收敛变形

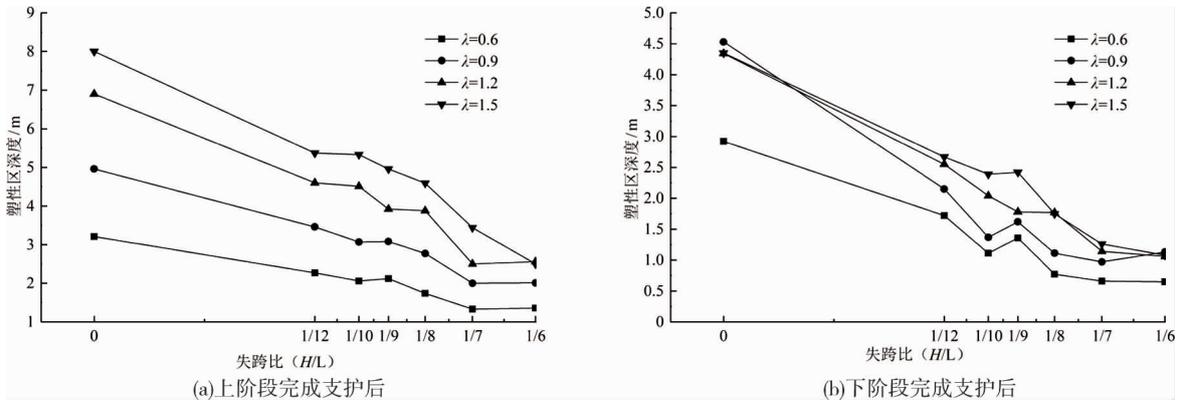


图 12 隧洞底板围岩塑性区最大深度

由图 12 可知,隧洞底板塑性区最大深度随矢跨比的增加而减小,这说明隧洞底板设置仰拱可以有效减小底板围岩的塑性区范围.隧洞上阶段完成支护后,当矢跨比为 0~1/7 时,塑性区深度基本呈线性减小,矢跨比大于 1/7 时减小速度有放缓趋势;下阶段完成支护后,由于第一次开挖存在干扰,规律性不明显,但总体规律与上阶段一致.

隧洞边墙和顶板围岩塑性区最大深度的变化规律如图 13 所示.由图 13 可知,随矢跨比增加,隧洞边墙围岩塑性区最大深度变化的幅度较小.这说明隧洞底板设置仰拱对顶板和边墙围岩塑性区范围的影响较小.

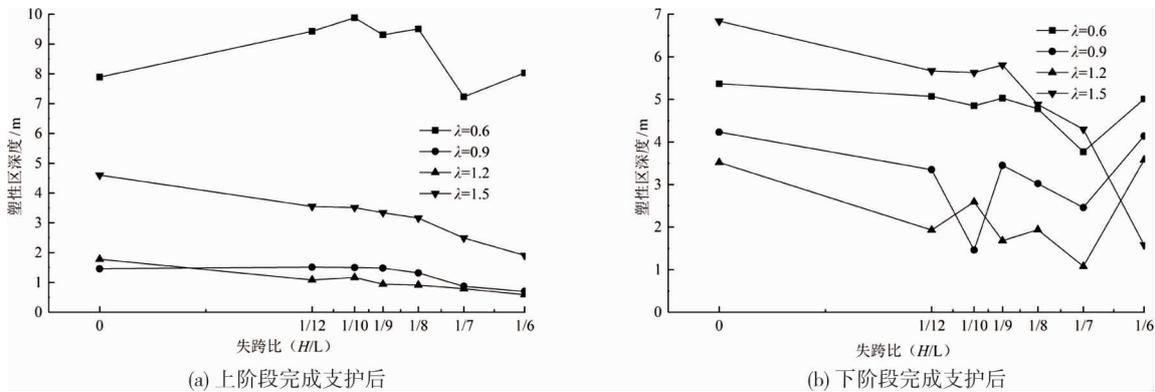


图 13 隧洞边墙和顶板围岩塑性区最大深度

因此,设置仰拱可以减小底板围岩塑性区的范围,同时对顶板和边墙围岩塑性区范围扩展具有一定的抑制作用.

3.2.3 仰拱结构内力变化规律分析

随着隧洞的开挖、支护及至隧洞稳定,隧洞支护结构的力学效应也会不断发生变化.在不同侧压力系

数的情况下,随着仰拱矢跨比的增加,隧洞支护结构的应力变化规律如图 14 所示(压应力为“-”,拉应力为“+”).

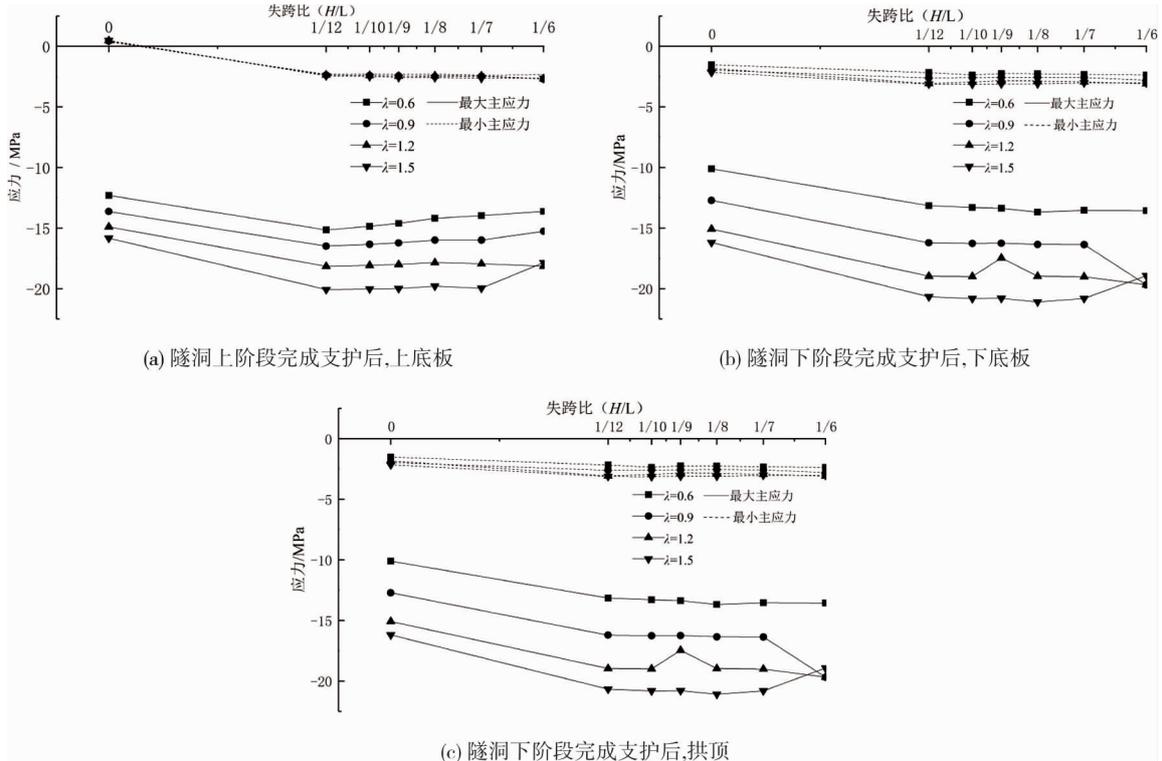


图 14 混凝土应力变化规律

由图 14 可知,底板混凝土在不设置仰拱时存在受拉的状态,不设仰拱时整体混凝土的最大主应力小于设置仰拱时的最大主应力,但均小于混凝土的抗压强度;顶板混凝土最小主应力均为受压状态,最大主应力在设置仰拱时有所增加,其中在侧压力系数为 1.5 时,顶板混凝土最大主应力有超过混凝土抗压强度的情况出现.

隧洞下阶段完成支护后,钢支撑最大压应力变化规律如图 15 所示.整体支护结构中钢支撑受压状态较多,且压应力大于拉应力,因此,在这里仅分析钢支撑的轴向最大压应力.由图 15 可知,底板不设置仰拱时钢支撑的最大压应力小于设置仰拱时的最大压应力,且在矢跨比为 1/12~1/7 时钢支撑的最大压应力变化很小,在侧压力系数为 1.5 时,钢支撑的最大压应力有超过其屈服强度的情况出现.

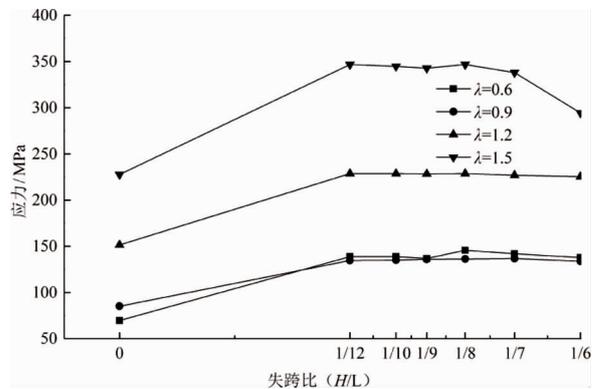


图 15 隧洞下阶段完成支护后,钢支撑最大压应力变化规律

侧压力系数为 1.2 时,围岩与初衬间的接触压应力如图 16 所示.由图 16 可知,底板围岩与混凝土间的接触压应力在拱脚处最大,在拱中较小;整体上,上阶段完成支护后上底板的接触压应力大于下阶段完成支护后下底板的接触压应力.接触压应力在矢跨比为 0 时最小,证明在底板不设置仰拱时,底板混凝土支护力较差.

3.3 实际工程最优矢跨比确定

隧洞的开挖支护不仅要保证围岩稳定,而且要有利于施工和经济性,隧洞矢跨比过大会使开挖量和支护面积增大,造成建设费用增加,而且过大的矢跨比使隧洞底板不能直接通车,还要对底板进行回填,因此,矢跨比的设置必须兼顾造价和施工条件.通过分析围岩变形和塑性区最大深度随矢跨比的变化规律,得出隧洞矢跨比应设置为 1/12~1/7;由混凝土应力和围岩与混凝土间的接触压应力随矢跨比的变化规律,得出隧洞矢跨比应设置为 1/10~1/8,最后再综合考虑开挖量和施工的便利性,得出佳蒂格德引水隧洞

最优矢跨比为 1/10.

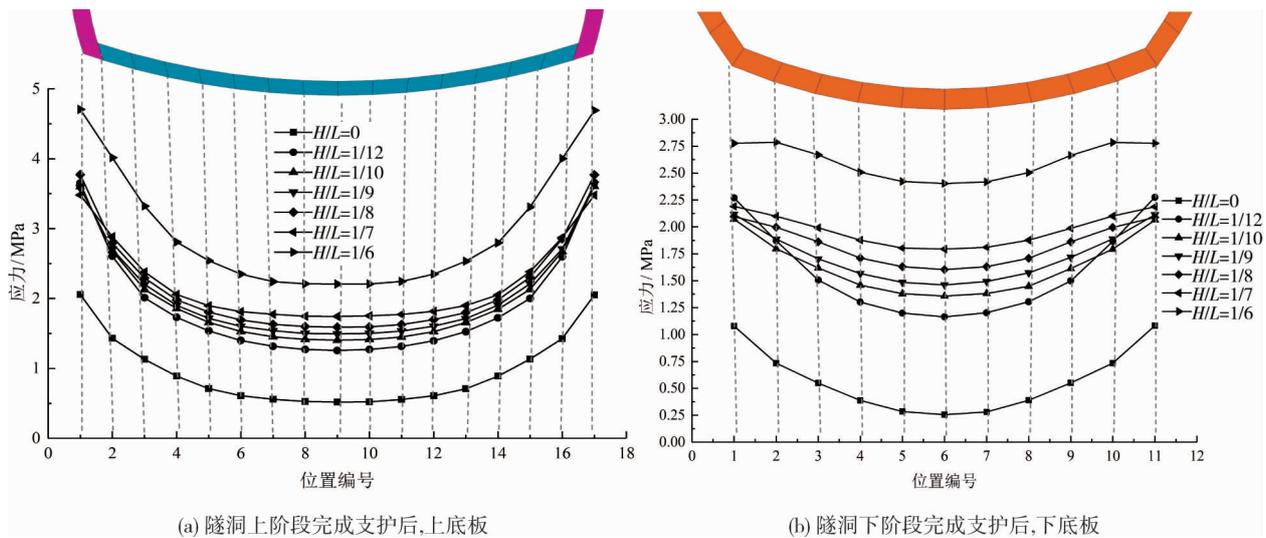


图 16 $\lambda = 1.2$ 时, 围岩与混凝土间的接触压应力

4 结论

1) 对于地下水水位较高的泥岩隧洞(道), 其底板应设置仰拱. 因为硬岩的围岩压力主要集中于隧洞(道)顶部, 而泥岩遇水软化后具有流变性, 围岩压力作用于支护结构分布比较均匀, 隧洞(道)底板也受到较大的围岩压力, 底板设置仰拱能够将围岩压力转化为支护结构的环向力, 进而控制围岩变形.

2) 理论上围岩压力作用于支护结构均匀分布时, 隧洞(道)支护结构越接近于圆形, 其支护力越好, 但实际围岩压力是不均匀作用于支护结构的, 其最优的支护结构应为椭圆形. 佳蒂格德水电站泥岩引水隧洞反演的侧压力系数为 1.2, 隧洞两侧的围岩压力大于顶、底板压力, 所以其支护结构应近似于长轴为水平向的椭圆形, 模拟计算的结果也证明了该结论. 当矢跨比为 1/6 时, 其支护结构更接近于圆形, 但支护效果较矢跨比为 1/7 时差.

3) 隧洞底板的垂直隆起变形和边墙的水平收敛变形以及塑性区变化与仰拱矢跨比存在相关性, 由此确定佳蒂格德水电站泥岩隧洞底板的仰拱矢跨比宜为 1/10~1/8.

4) 所确定的佳蒂格德水电站泥岩段引水隧洞矢跨比和支护方案, 经现场实施后, 围岩变形和破坏得到了有效控制.

参考文献:

- [1] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(增刊 2): 5521-5526.
- [2] 李俊平, 连民杰. 矿山岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [3] 马晓文, 梁庆国, 赵涛, 等. 泥岩隧道基底围岩软化对仰拱力学特性的影响[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊 1): 147-157.
- [4] 丁冬冬, 梁庆国, 徐善常, 等. 软化泥岩对隧道仰拱的受力特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10): 2001-2008.
- [5] 隋毅, 王卫军, 袁超, 等. 软弱泥岩隧道底鼓灾害机理研究与控制技术[J]. 矿业工程研究, 2022, 37(1): 24-30.
- [6] 刘恒显, 梁庆国, 丁冬冬. 黄土隧道仰拱结构受力特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 1): 77-83.
- [7] 林越翔, 彭立敏, 施成华, 等. 重载作用下铁路隧道底部结构动力响应特征及合理设计参数研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 86-92.
- [8] 孔恒, 王梦恕, 张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报, 2003(1): 33-36.
- [9] 康红普, 陆士良. 巷道底脚的挠曲效应及卸压效果的分析[J]. 煤炭学报, 1992(1): 37-52.
- [10] 樊纯坛, 梁庆国, 吴旭阳, 等. 宝兰客专魏家嘴黄土隧道受力特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1006-1014.
- [11] 黄华, 喻渝, 杨昌宇, 等. 缓倾围岩隧道底鼓变形规律及整治措施研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(4): 72-78.