

复杂地质条件下水工隧道围岩稳定性数值模拟及支护参数优化

马效波

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘要:我国水利水电工程向高山峡谷、深埋长隧洞发展,水工隧道建设面临断层破碎带、高地应力等复杂地质条件挑战,围岩稳定性关乎工程安全、进度与寿命。本文以某典型深埋水工引水隧洞穿越断层破碎带段为研究对象,综合地质勘察、现场监测数据与数值模拟方法,构建考虑非线性本构关系、渗流-应力耦合及结构面效应的三维精细化数值模型。系统分析不同工况下围岩位移、应力、塑性区分布及支护结构受力特征,揭示复杂地质条件下围岩失稳机理。采用正交试验设计,对锚杆长度、间距等关键支护参数多方案比选优化。结果显示,优化后的复合支护方案能有效控制围岩变形,减小塑性区范围,降低支护结构内力,提升整体稳定性与安全性,为类似工程提供理论与技术支撑。

关键词:水工隧道;复杂地质条件;围岩稳定性;数值模拟;FLAC3D;支护参数优化

引言

水工隧道是水利水电工程核心输水构筑物,其安全稳定运行对水资源高效利用与能源开发至关重要。西部大开发推进下,新建水利工程多地处地形、地质复杂区域,工程具埋深大等特点,施工易遇断层破碎带等不良地质问题,围岩稳定性控制难度大。传统经验类比法和解析法处理复杂地质体有局限,难准确反映岩体特性及多场耦合效应。数值模拟技术因强大建模与过程再现能力,成为研究复杂地下工程围岩力学行为的重要手段,FLAC3D软件因适应大变形等条件在岩土工程广泛应用^[1]。但现有研究多聚焦单一因素对围岩稳定性影响,多因素耦合下支护参数系统性优化不足,水工隧道中“渗流-应力”耦合效应也不容忽视。故本文以实际工程为背景,建立三维数值模型,分析围岩响应机制,优化关键支护参数,为复杂地质下水工隧道安全建设提供技术参考。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

本文研究对象为某大型引水式水电站的主引水隧洞。该隧洞全长约18.5km,最大埋深达1200m,设计水头高达650m,洞径为9.2m(圆形断面)。隧洞穿越区域属高山峡谷地貌,地层主要为三叠系中统变质砂岩、板岩互层,岩体完整性总体较好,但局部发育多条区域性断裂带。

1.2 复杂地质条件分析

在桩号K12+300~K12+500段,隧洞穿越F5断层破碎带。该断层走向NW320°,倾向SW,倾角约65°,破碎带宽度约25m,由断层角砾岩、糜棱岩及断层泥组成,岩体极为破碎,RQD值普遍低于20%,属V类围岩。两侧影响带宽约15m,岩体节理裂隙极为发育,多组节理交汇切

割,形成块状碎裂结构。此外,该段隧洞处于高地应力区,最大主应力值达45MPa,方向近水平。地下水活动强烈,钻孔涌水量大,实测外水压力系数高达0.85,即外水压力接近静水头压力的85%。高外水压力不仅对初期支护和二次衬砌构成巨大荷载,还可能诱发围岩软化、泥化,进一步降低其承载能力。

综上,该段隧洞集“深埋、高水压、软弱破碎、高地应力”于一体,是典型的复杂地质条件下的高风险施工段,亟需开展围岩稳定性分析与支护优化研究。

2 数值模型构建

2.1 模型范围与网格划分

为减少边界效应对计算结果的影响,模型在X、Y、Z三个方向的尺寸分别取为120m×100m×150m(长×宽×高),足以覆盖断层破碎带及其两侧影响区。采用六面体与五面体混合单元进行网格划分,对断层破碎带及隧洞周边区域进行局部加密,最小单元尺寸为0.5m,远离隧洞区域网格逐渐过渡放大^[2]。整个模型共包含约28万个单元,29万个节点,保证了计算精度与效率的平衡。

2.2 岩体力学参数

根据室内岩石试验、现场声波测试及反演分析,确定各岩层及断层带的物理力学参数,见表1。

表1 岩体物理力学参数

岩体类型	密度 (kg/m ³)	弹性模量 E(GPa)	泊松 比ν	内摩擦 角φ(°)	粘聚力 c(MPa)	渗透系 数k(m/s)
完整变质 砂岩	2650	28.0	0.25	42	3.5	1.0×10 ⁻⁸
节理发育带	2600	12.0	0.28	35	1.8	1.0×10 ⁻⁶
F5断层破 碎带	2300	1.5	0.35	22	0.2	1.0×10 ⁻⁴

对于完整岩体,采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)弹塑性模型;对于断层破碎带,考虑到其显著的应变软化特性,采用应变软化模型(Strain-Softening Model),并定义峰值强度向残余强度转化的临界塑性剪切应变。

2.3 结构面模拟

F5断层作为控制性结构面,采用FLAC3D中的Interface单元进行模拟。Interface单元能够独立定义其法向与切向的刚度、强度参数(c_f, ϕ_f)及抗拉强度,从而精确反映断层的滑移、张开等不连续变形行为。根据现场调查与试验,断层面的 $c_f = 0.15\text{MPa}$, $\phi_f = 20^\circ$ 。

2.4 初始地应力场与渗流场

初始地应力场通过 K_0 方法施加,根据实测地应力反演结果,设定侧压力系数 $K_0 = 1.2$,垂直应力按上覆岩体重力计算。初始渗流场以静水压力分布为基础,根据实测水位标高设定模型顶部和底部的孔隙水压力边界条件。

2.5 开挖与支护模拟

模拟过程严格按照实际施工工序进行:

初始平衡:施加初始地应力与渗流场,达到初始平衡状态。

全断面开挖:一次性开挖隧洞断面。

施作初期支护:包括系统锚杆、挂网喷射混凝土及必要时设置的钢拱架。

施作二次衬砌:在初期支护变形基本稳定后施作钢筋混凝土衬砌。

蓄水运行:在衬砌内侧施加设计内水压力(0.65MPa),同时维持外部高外水压力。

支护结构采用结构单元模拟:锚杆用Cable单元,喷混凝土和衬砌用Shell单元,钢拱架用Beam单元。各结构单元与周围岩体通过“连接”实现相互作用。

3 围岩稳定性数值分析

3.1 无支护工况下的围岩响应

在未施作任何支护的情况下,隧洞开挖后围岩迅速发生失稳。洞周最大位移发生在拱顶和仰拱,分别达到186mm和205mm,远超工程允许值。塑性区云图表明,塑性屈服区从断层破碎带向两侧完整岩体大范围扩展,最大深度超过15m,几乎贯通整个断层带^[3]。断层Interface单元发生显著相对错动,最大剪切位移达42mm,表明断层已完全活化。此工况下,围岩自稳能力极差,必须采取强有力的支护措施。

3.2 常规支护工况下的围岩响应

参照初步设计方案,采用如下常规支护参数:系统锚杆($\Phi 25, L = 4.5\text{m}$,间距 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$),喷混凝土

(C25,厚度15cm),在断层核心带增设I18钢拱架(间距0.8m)。模拟结果显示,该方案能有效抑制围岩变形。洞周最大位移降至48mm(拱顶)和55mm(仰拱),满足规范要求(通常 $< 100\text{mm}$)。塑性区范围被显著限制在洞周5m以内,断层的相对错动也得到有效控制(最大剪切位移 $< 10\text{mm}$)。然而,分析支护结构内力发现,钢拱架轴力普遍超过其屈服强度,局部出现屈服;喷混凝土在拱腰部位拉应力接近其抗拉强度极限,存在开裂风险。这表明常规支护方案虽能保证宏观稳定,但在经济性和结构安全性方面仍有优化空间。

3.3 渗流-应力耦合效应分析

为量化高外水压力的影响,对比了有/无渗流场两种工况。结果表明,在高外水压力作用下,围岩有效应力降低,导致其抗剪强度下降。与干燥工况相比,洞周最大位移增大约35%,塑性区深度增加约25%。同时,外水压力直接作用于衬砌外表面,使其承受巨大的附加荷载,环向弯矩显著增大。这充分证明,在高水头水工隧道设计中,忽略渗流-应力耦合作用将严重低估围岩的变形与破坏风险,导致支护结构设计不足。

4 支护参数优化

4.1 优化目标与变量选取

优化目标为:在确保围岩稳定(洞周位移 $< 60\text{mm}$,塑性区深度 $< 8\text{m}$)和支护结构安全(内力 $<$ 材料强度设计值)的前提下,寻求最经济合理的支护参数组合。

选取四个关键且可调的支护参数作为优化变量:

A: 锚杆长度(L), 水平: 3.5m, 4.5m, 5.5m

B: 锚杆间距(S), 水平: $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$, $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$, $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$

C: 喷混凝土厚度(T), 水平: 15cm, 20cm, 25cm

D: 钢拱架间距(G), 水平: 0.6m, 0.8m, 1.0m

4.2 正交试验设计

采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排9组数值模拟试验。每组试验均在相同的地质模型和边界条件下进行,仅改变上述四个因素的水平组合。评价指标选取为:

Y_1 : 洞周最大位移(mm)

Y_2 : 最大塑性区深度(m)

Y_3 : 钢拱架最大轴力(kN)

4.3 试验结果与极差分析

完成9组数值模拟后,得到各评价指标的结果,见表2。

表2 正交试验方案与结果

试验号	A (锚长)	B (间距)	C (喷厚)	D (拱架距)	Y ₁ (位移/ mm)	Y ₂ (塑 深/m)	Y ₃ (轴 力/kN)
1	3.5	1.0	15	0.6	42	6.2	380
2	3.5	1.2	20	0.8	58	7.8	450
3	3.5	1.5	25	1.0	75	9.5	520
4	4.5	1.0	20	1.0	38	5.8	350
5	4.5	1.2	25	0.6	40	6.0	360
6	4.5	1.5	15	0.8	55	7.5	420
7	5.5	1.0	25	0.8	35	5.5	320
8	5.5	1.2	15	1.0	48	6.8	390
9	5.5	1.5	20	0.6	45	6.5	370

对各评价指标进行极差分析。以Y₁(位移)为例,计算各因素在不同水平下的平均值:

$$A_1 = (42+58+75)/3 = 58.3; A_2 = (38+40+55)/3 = 44.3; A_3 = (35+48+45)/3 = 42.7$$

$$\text{极差 } R_A = \max(A_i) - \min(A_i) = 58.3 - 42.7 = 15.6$$

同理可得其他因素的极差。所有指标的极差分析结果汇总如下:

表3 各因素极差分析结果

评价指标	R_A (锚长)	R_B (间距)	R_C (喷厚)	R_D(拱 架距)	主次顺序
Y ₁ (位移)	15.6	13.0	10.3	8.0	A > B > C > D
Y ₂ (塑深)	2.0	1.7	1.4	1.0	A > B > C > D
Y ₃ (轴力)	100	70	60	50	A > B > C > D

极差分析表明,锚杆长度(A)是影响围岩稳定性和支护结构受力的最关键因素,其次是锚杆间距(B)。这意味着增加锚杆长度、减小锚杆间距能最有效地提升支护效果。

4.4 最优方案确定

根据“越小越好”的原则,选择各因素在各指标下对应的最优水平:

对Y₁,最优水平为A₃B₁C₃D₁

对Y₂,最优水平为A₃B₁C₃D₁

对Y₃,最优水平为A₃B₁C₃D₁

三个指标指向一致,最优组合为A₃B₁C₃D₁,即:锚杆长度5.5m,间距1.0m×1.0m,喷混凝土厚度25cm,钢拱架间距0.6m。

为验证该组合的有效性,额外进行了一次数值模拟(第10组)。结果显示:洞周最大位移为32mm,最大塑性区深度为5.2m,钢拱架最大轴力为310kN,各项指标均

优于所有正交试验组,且留有充足的安全裕度。

5 优化方案效果评价

将优化方案(A₃B₁C₃D₁)与常规方案(A₂B₂C₁D₂)进行对比,其优势体现在:(1)围岩控制效果更佳:最大位移从55mm降至32mm,降幅达42%;塑性区深度从7.5m减至5.2m,有效保护了围岩的自承能力。(2)支护结构更安全:钢拱架最大轴力从420kN降至310kN,远低于其屈服承载力,彻底消除了结构屈服的风险。(3)长期稳定性更高:更强的初期支护体系能更好地抵抗高外水压力的长期侵蚀效应,为二次衬砌提供更稳定的施工环境,从而保障隧洞全寿命周期的安全^[4]。尽管优化方案在材料用量上略有增加(主要是锚杆和喷混凝土),但其带来的安全性提升和潜在的工期、维修成本节约,使其综合效益显著优于常规方案。

6 结语

本文聚焦复杂地质条件下水工隧道围岩稳定性难题,经系统数值模拟与支护参数优化研究得出关键结论:多场耦合效应至关重要,高外水压力下渗流-应力耦合会劣化围岩力学性能、增大变形与塑性区范围,数值模拟需考虑此效应,否则设计不安全;精细化建模是基础,采用Interface单元模拟关键结构面、结合应变软化模型描述破碎岩体力学行为,可真实再现失稳过程,为支护设计提供可靠依据;锚杆系统是核心,支护参数敏感性分析显示锚杆长度和间距是主导因素,适当增加长度、加密布置能调动深部围岩自承能力;优化方案成效显著,基于正交试验设计的方案能全面满足各项控制要求,技术可行、安全可靠。本研究提出的“精细化建模-多场耦合分析-参数敏感性识别-正交优化”技术路线,可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1]张才,杜海彬,覃仕宇.基于数值模拟的软弱围岩隧道初期支护参数优化研究[J].西部交通科技,2025,(03):130-133.
- [2]甘飞飞,祁长青,张文涛,等.埋深对浅埋大断面水工隧道围岩及初次支护变形影响研究[J].矿业研究与开发,2022,42(01):93-99.
- [3]许高胜.高地温对水工隧道围岩内力及变形的影响[J].水利技术监督,2024,(05):160-161+196.
- [4]杨银桂.软岩富水大断面隧道开挖施工围岩变形模拟研究[J].建筑技术开发,2025,52(11):33-35.