

岩溶隧道围岩水力破坏机制研究

王建秀^{1,2}, 冯波², 张兴胜², 唐益群^{1,2}, 杨坪^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 将不同围岩结构岩溶隧道的水力破坏模式划分为: (1) 非贯通盲端裂纹的扩展; (2) 贯通裂纹的横向扩展; (3) 隔离体岩块的失稳; (4) 溶洞岩壁整体失稳。分析各种破坏模式的力学机制, 采用断裂力学方法分析非贯通盲端裂纹及贯通裂纹的横向扩展条件, 将非贯通盲端裂纹视为“无限大”体中的片状裂纹, 用 Green 和 Sneddon 的求解结果计算裂纹起裂条件; 将隧道-溶洞岩壁上裂隙视为岩板上贯通裂纹, 按照复变函数推导出的 Westergaard 解计算裂纹起裂条件。采用基于赤平投影与实体比例投影的极限平衡法分析隔离体岩块的失稳机制, 给出考虑水压力作用的极限平衡计算公式; 采用强度折减法分析溶洞岩壁整体失稳的破坏特征。针对各破坏模式给出防治措施, 研究结果可为类似工程提供参考依据。

关键词: 隧道工程; 岩溶隧道; 岩体结构; 水力破坏模式; 水力破坏机制

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)07-1363-08

HYDRAULIC FAILURE MECHANISM OF KARST TUNNEL SURROUNDING ROCK

WANG Jianxiu^{1,2}, FENG Bo², ZHANG Xingsheng², TANG Yiqun^{1,2}, YANG Ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to surrounding rock structure, the hydraulic failure of karst tunnel is divided into the extension of non-transfixion cracks, the extension of transfixion cracks(grouted transfixion cracks), the rock fall of isolated rock blocks and the collapse of rock wall between tunnel and karst cave. The hydraulic failure mechanisms of non-transfixion cracks and transfixion cracks(grouted transfixion cracks) are analyzed with fracture mechanics method, and the non-transfixion crack is treated as a sheet crack in infinite body. Its extension is calculated with Green and Sneddon's solutions, and the transfixion crack is treated as a crack in plate, and its extension is calculated with function of complex variable of Westergaard. The hydraulic failure mechanism of isolated rock blocks is analyzed with stereographic projection and limit equilibrium method, and the calculation formula of limit equilibrium considering water pressure is presented. The hydraulic failure mechanism of rock wall between tunnel and karst cave is analyzed with strength reduction method, and an instance is presented with finite element method. Corresponding control measures are suggested for different failure modes, so as to provide reference to similar projects.

Key words: tunnelling engineering; karst tunnel; rock structure; hydraulic failure mode; hydraulic failure mechanism

收稿日期: 2010-03-01; **修回日期:** 2010-03-27

基金项目: 上海市人才发展资金项目(2007); 上海市自然科学基金项目(10ZR1431500); 上海市重点学科(地质工程)(B308)

作者简介: 王建秀(1971-), 男, 博士, 1995年毕业于成都理工学院水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事地质工程、隧道与地下工程、岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: wang_jianxiu@163.com

1 引言

中国碳酸岩地层分布面积达 $3.443 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 1/3, 出露面积为 $0.907 \times 10^6 \text{ km}^2$, 接近国土面积的 1/10^[1, 2]。大量隧道工程修建于可溶岩中, 据中铁西南科学研究院 1989 年统计数据, 在 63 座铁路长隧道中有 26 座洞身穿过碳酸岩, 占长隧道总数的 41.27%。26 座长隧道都不同程度地遇到了地下水的危害问题, 发生过较大岩溶涌水灾害者 10 座, 占 38.64%。而在西南、中南地区 17 座岩溶中、长隧道中, 近 50% 发生过较大规模的涌水灾害(见表 1)。如大瑶山隧道班古坳竖井平导施工至 K994+213 时, 突发携带大量泥砂的岩溶水, 造成竖井被淹, 洞内设备被淹没, 中断施工 1 a。贵昆铁路梅花山隧道 1991 年 7 月雨季因地下河水猛涨, 洞内边墙喷射出高压水, 边墙衬砌开裂倒塌 12 m, 中断行车 7 d。京原铁路驿马岭隧道 1972 年洞内高压突水, 造成停运 1 a。宜万铁路齐岳山隧道穿越二、三叠系灰岩, 进口施工期间, 先后遭遇岩溶达 183 余处, 其中大型突水突泥溶腔严重影响施工的有 16 处(正洞有 9 处), 正洞 2[#]和 6[#]为高压富水型溶腔, 其他溶腔均是富水淤泥半充填溶腔, 给施工造成了巨大影响。日本东海道干线旧丹那隧道(长 7.84 km)开工后曾遇 6 次大的突水, 泥屑突出约 7 000 m³, 突水量最大达 134.4 m³/min, 造成严重伤亡, 贯通后总涌水量达 145 152 m³/d, 致使工期达 16 a 之久。国内雅砻江二级电站施工探洞发生高达 2 m³/s 的大突水, 冲毁了施工设施并废弃了一条施工隧洞。此外广渝高速公路华蓥山隧道(长 4.70 km, $Q_{\max} = 686\ 880 \text{ m}^3/\text{d}$)、京广铁路南岭隧道(长 6.06 km, $Q_{\max} = 81\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$)等都曾发生严重的突水涌泥事故, 造成了重大的经济损失。

目前有关岩溶隧道围岩研究较多^[3~10], 而涉及岩溶隧道水力破坏机制的文献较少, 主要集中于施工单位对隧道灾害、病害的分析^[11~14]。黄润秋等^[15, 16]分析了深埋隧道围岩水力劈裂机制, 但其研究对象为半无限体围岩, 未涉及隧道和溶洞之间板状的岩壁。郭伟等^[17, 18]对侧部或顶部水压充填型岩溶隧道施工过程中的围岩位移、塑性区、应力、锚杆轴力和喷混凝土层力学特性等进行了数值模拟研究, 但未采用强度折减法分析, 也未涉及高压水劈裂岩体的断裂力学机制。国外关于岩溶隧道水力破坏研究的报道较少, M. Pesendorfer 和 S. Loew^[19]

表 1 西南、中南地区岩溶铁路长隧道涌水量统计(据中铁西南科学研究院)

Table 1 Inflow statistics of long railway tunnel in karst area in southwest and central south of China(according to Southwest Research Institute of China Railway)

隧道名称	施工期间涌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	运营期间涌水量($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
		旱季	雨季
大瑶山隧道	4 000~15 000	3 000	-
南岭隧道	81 000	-	-
大巴山隧道	205 518(最大), 25 398(稳定)	1 500	27 000(最大)
中梁山隧道	14 138	18 000	54 000
梅花山隧道	55 000	6 920	55 000(最大) 16 219(稳定)
平关隧道	108 600	200	75 000
胜境关隧道	92 000	114	15 881
燕子岩隧道	>10 900	761	2 318
梅子关隧道	6 500	225	139 972
娄山关隧道	96 000~192 000		130 650
侏罗隧道	小	13	1 562(稳定)
岩脚寨隧道	12 100~100 800	909	2 721
新排隧道	>10 000	2 112	16 235
大寨隧道	小	388	4 080

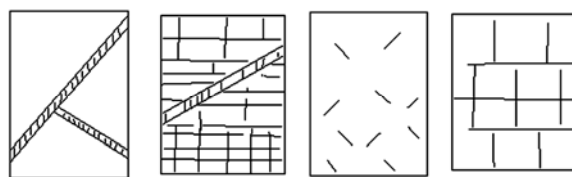
分析了岩溶地区深埋隧道的瞬态水压力变化规律, 但未涉及水压力对围岩的影响。岩溶隧道高压突水、涌泥与围岩水力破坏密切相关, 岩溶隧道围岩水力破坏模式及力学机制的研究亟待开展^[11~15]。

2 岩溶隧道围岩结构与水力破坏模式

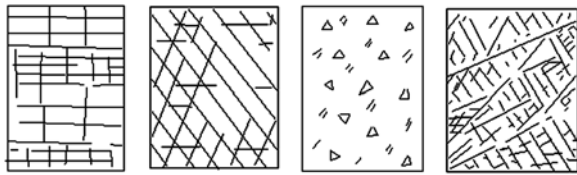
2.1 岩溶隧道围岩结构

隧道围岩由结构面和结构体组成, 可将其划分为块裂结构、板裂结构、碎裂结构、断续结构、完整结构和散体结构, 典型岩体结构见图 1。

(1) 块裂结构。定义为至少有一组软弱结构面或坚硬结构面参与切割, 呈块状结构体的高级序岩体结构。其软弱结构面主要为断层, 层间错动也是重要的软弱结构面之一。参与切割的坚硬结构面多



(a) 完整块裂结构 (b) 破碎块裂结构 (c) 完整结构 (d) 块状碎裂结构



(e) 层状碎裂结构 (f) 镶嵌碎裂结构 (g) 碎块散体结构 (h) 糜棱化散体结构

图 1 典型岩体结构示意图^[20]

Fig.1 Structures of typical rock mass^[20]

数为错动过的坚硬结构面, 一般延展较长。

(2) 板裂结构。主要发育在褶皱岩体内, 受一组软弱结构面切割, 结构体呈板状。软弱结构面主要为层间错动面或块状原生结构岩体内的似层间错动面。结构体多数为组合板状结构, 有的为完整板状结构。

(3) 碎裂结构。碎裂结构岩体分块状碎裂结构及层状碎裂结构两种亚类, 结构面主要为原生结构面及构造结构面。

(4) 断续结构。结构面错而不断, 个别部分为连续贯通结构, 多数为不连续切割, 未形成结构体。

(5) 完整结构。结构面不发育的块状岩体, 碎裂结构岩体中结构面被后生作用愈合后也可形成完整结构。

(6) 散体结构。碎屑状散体结构的结构面无序分布, 结构体主要为角砾, 常夹杂有泥质成分。糜棱化散体结构多为断层泥。

2.2 岩溶隧道围岩水力破坏模式

不同围岩结构岩溶隧道水力破坏模式见表 2。

表 2 岩溶围岩水力破坏模式

Table 2 Hydraulic failure modes of karst cave wall

岩体结构	破坏模式	破坏后果	发生部位
块裂结构	(1) 隔离体岩块失稳	塌方、充填溶洞突泥、结构面突水	拱顶、拱脚、边墙
	(2) 溶洞岩壁整体失稳		
板裂结构	(1) 贯通裂纹扩展	突水、涌水、偏压	拱顶、拱脚、掌子面
	(2) 灌浆封闭裂纹扩展		
碎裂结构	(1) 隔离体岩块失稳	落石、涌水、突水、大变形	拱顶、拱脚
断续结构	(1) 非贯通盲端裂纹扩展		
	(2) 贯通裂纹扩展	涌水、突水、落石	拱顶、拱脚、边墙
	(3) 灌浆封闭裂纹扩展		
完整结构	(1) 溶洞岩壁整体失稳	岩壁崩溃、突水、充填溶洞	边墙
	(2) 非贯通盲端裂纹扩展	突泥及洞内泥流	
碎屑状散体结构	(1) 管涌	涌水、突水、大变形、塌方	掌子面
	(2) 糜棱化结构		
糜棱化散体结构	(1) 管涌	涌水、突水、大变形、塌方	掌子面

3 岩溶隧道围岩水力破坏力学机制

岩溶地层赋存于地应力与地下水压力环境中, 地层重度大于地下水且地下水位一般位于地面以下, 一般不会被地下水劈裂。而隧道开挖后, 在岩体内部形成临空面, 高压地下水则可能劈裂围岩。

3.1 断续结构岩体非贯通裂纹扩展

在岩溶隧道断续结构围岩中存在岩桥和非贯通盲端裂纹, 在高压水的楔劈作用下, 裂隙网络盲端部位可能发生起裂和扩展, 可采用断裂力学方法分析其力学机制。

当裂隙尺寸远小于围岩时, 将非穿透型裂纹视为“无限大”体中的片状裂纹。Green 和 Sneddon 求解了“无限大”体中椭圆形片状裂纹问题^[21~23]。设无限大体中椭圆裂隙平面受均匀拉伸作用, 椭圆裂隙的长、短轴分别为 $2a$ 和 $2b$, 分别和 y 轴与外应力垂直, 椭圆边界上计算点的坐标满足椭圆方程。Irwin 给出了该点第 I 类应力强度因子的解:

$$K_I = \alpha P \sqrt{\pi b} \quad (1a)$$

其中,

$$\alpha = \frac{1}{\phi_0} \left(\sin^2 \theta + \frac{b^2}{a^2} \cos^2 \theta \right)^{1/4} \quad (1b)$$

$$\phi_0 = \int_0^{\pi/2} \left[\sin^2 \theta + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{1/2} d\theta \quad (1c)$$

式(1c)为第二类椭圆积分。

其短轴和长轴之比一定时, 第二类椭圆积分 ϕ_0 为常数。I 型应力强度因子 K_I 可写为

$$K_I = \frac{P \sqrt{\pi b}}{\phi_0} \left(1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \cos^2 \theta \right)^{1/4} \quad (2)$$

只考虑裂纹内地下水压力作用时, 可由迭加原理(见图 2)计算裂纹尖端应力强度因子:

$$K_{Ia} = K_{Ib} + K_{Ic} = \frac{P \sqrt{\pi b}}{\phi_0} \left(1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \cos^2 \theta \right)^{1/4} = \frac{P \sqrt{\pi b}}{\phi_0} \left(1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \cos^2 \theta \right)^{1/4} \quad (3)$$

当应力强度因子超过断裂韧度时, 裂纹起裂扩展, 当扩展裂纹贯通隧道后, 地下水涌出, 发生突水或在衬砌上形成高压水。

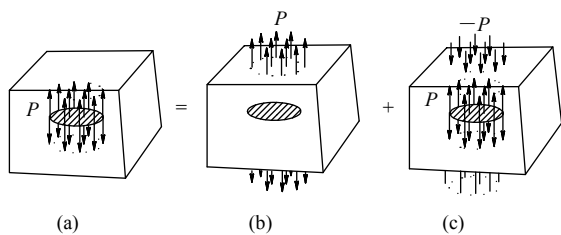


图2 计算应力强度因子的迭加方法

Fig.2 Superposition method of stress intensity factor

以锦屏勘探洞 2 848 m 围岩为例^[15], 大理岩实测静水压力为 2.08 MPa, 取动水压力为 1.25 MPa, 裂纹长度为 1.1 m, 宽度为 0.002 m, 此时, $b \ll a$, 椭圆积分约等于 1, 按最不利情况考虑, 取 $\theta = \pi/2$, 则根据式(3)可得 $K_{Ia} = 0.12 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。

当围岩(因爆破损伤)断裂韧度 K_{Ic} 小于应力强度因子时, 裂纹将发生扩展。

3.2 层状结构岩体贯通裂纹扩展

在隧道靠近但未揭穿大型溶洞时, 隧道与溶洞之间以岩壁分隔, 为简化分析, 忽略溶洞壁复杂的几何形态, 将隧道-溶洞之间岩壁概化为岩板(见图 3)。

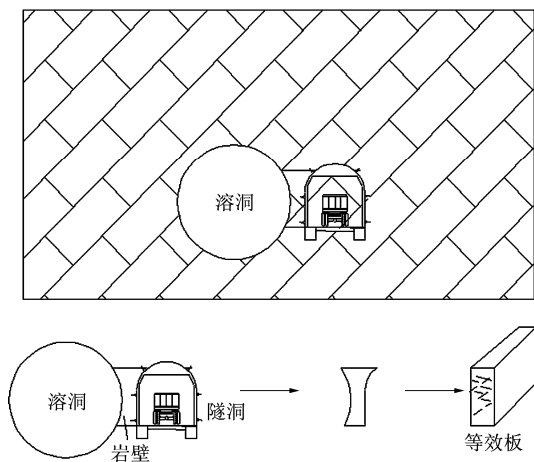


图3 岩溶洞壁概化模型

Fig.3 Simplified model of karst cave wall

在层状结构围岩中, 岩壁裂隙大部分为贯通隧道的裂纹(见图 4)。隧道开挖后, 由于临空面的形成, 高压水会导致贯通裂纹在岩壁上横向扩展。而注浆帷幕形成的止水带也可看作有充填的贯通裂纹, 高压水可使注浆充填材料与裂隙壁脱离并在岩壁上扩展, 导致止水帷幕被击穿。

假定二次应力作用下裂纹的起裂和扩展已经完成, 按照复变函数推导出的 Westergaard 解^[22]计算单纯外水压力作用下 I 型应力强度因子:

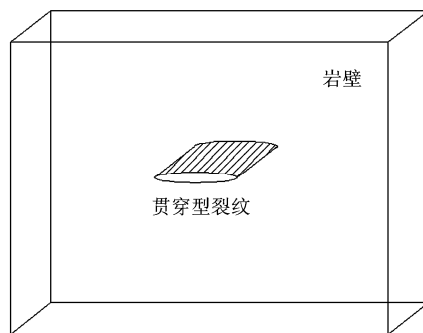


图4 溶洞岩壁上代表性的贯穿型裂纹

Fig.4 Typical transfixion crack on karst cave wall

$$K_I = \lim_{|\xi| \rightarrow 0} \sqrt{2\pi\xi} Z(\xi) \quad (4)$$

式中: $Z(\xi)$ 为 Westergaard 函数。

(1) 单纯水压作用下部分张开裂纹

假定裂纹长度为 $2a$, 局部接触, 局部张开, 距裂纹中心(坐标原点) $x = \pm b$ 部位各作用有一对劈开力 P (水压力)(见图 5(a)), Westergaard 函数^[22]取为

$$Z(\xi) = \frac{2Pz\sqrt{a^2 - b^2}}{\pi(z^2 - b^2)\sqrt{z^2 - a^2}} \quad (5)$$

式中: z 为岩板厚度, b 为由裂纹中心起算的距离。

整理后得

$$K_I = \frac{2P\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{a\sqrt{a^2 - b^2}}{(a^2 - b^2)\sqrt{2a}} = \frac{2P}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{a^2 - b^2}} \quad (6)$$

以锦屏深埋勘探洞 2 848 m 附近高压突水为例, 假设裂纹类型为部分张开不排水裂纹, 根据式(6)计算可得 $K_I = 3.16 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。

当围岩(因爆破损伤)断裂韧度 K_{Ic} 小于应力强度因子时, 裂纹将发生扩展。

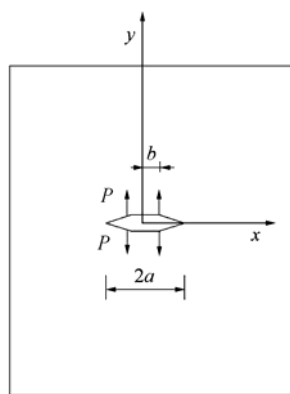
(2) 单纯水压作用下张开裂纹

对于裂纹完全张开, 静水压力均匀作用在裂隙壁面时(见图 5(b)), $P = p\delta b$, 将其代入式(6)并利用迭加原理, 有

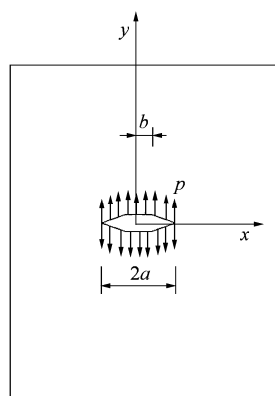
$$K_I = \int_0^a \frac{2p\delta b}{\sqrt{a^2 - b^2}} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (7)$$

令 $b = a \sin \theta$, 有 $\sqrt{a^2 - b^2} = a \cos \theta$, $db = a \cos \theta \cdot d\theta$, 则有

$$K_I = 2p\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^{\pi/2} \frac{a \cos \theta d\theta}{a \cos \theta} = 2p\sqrt{\frac{a}{\pi}} \left(\frac{\pi}{2} \right) = p\sqrt{\pi a} \quad (8)$$



(a)



(b)

图5 裂纹应力强度因子计算模式

Fig.5 Calculation model of crack stress intensity factor

以锦屏深埋勘探洞 2 848 m 附近高压突水为例, 假设裂纹完全张开, 则计算可得 $K_I = p\sqrt{\pi a} = 2.73 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。

当围岩(因爆破损伤)断裂韧度 K_{Ic} 小于应力强度因子时, 裂纹将发生扩展。

(3) 考虑二次应力作用时张开裂纹

考虑二次应力作用时裂纹起裂和扩展的计算方法, 含裂纹的岩体模型见图 6。

裂纹法向应力 σ_n 为拉应力时, 裂纹的扩展属于 I, II 复合型裂纹问题, 采用以下工程近似判据^[15, 16]:

$$K_I + K_{II} = K_{Ic} \quad (9)$$

式中: K_{Ic} 为 I 型断裂韧度值。

发生水力劈裂作用时的临界水头压力值为

$$P_c = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) + \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} \quad (10)$$

当裂纹法向应力 σ_n 为压应力时, 裂纹扩展问题属于纯 II 型裂纹问题, 假定裂纹的闭合力为 0, 则

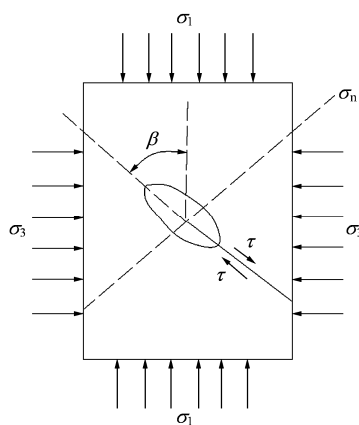


图6 含裂纹的岩体模型

Fig.6 Rock mass model containing a crack

$$K_{II} = \left\{ -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) + \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) - P \right] \tan \varphi \right\} \sqrt{\pi a} \quad (11)$$

断裂力学中, II 型裂纹的判据为

$$K_{II} = K_{IIc} \quad (12)$$

式中: K_{IIc} 为 II 型韧度值。此时, 发生水力劈裂作用时的临界水头压力值为

$$P_c = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) - \frac{1}{\tan \varphi} \left[\frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) \right] \quad (13)$$

2002 年 4 月 21 日, 渝怀铁路圆梁山隧道平导 2[#] 溶洞在超前地质钻孔时, 从钻孔处射出高压水, 射程约 30 m, 后多次突水涌泥。帷幕注浆后恢复掘进, 2002 年 5 月 9 日, 开挖至 PDK354+435 里程时, 右侧拱脚于 16:00 开始涌水、涌砂, 至 22:00 注浆体被高压水击穿, 发生大涌水、涌砂, 涌水量高达 800 m³/h, 涌砂量约 2 260 m³。采取工程措施后, 在 2002 年 10 月 22 日, 发生突水涌泥, 24 日发生大量涌水、涌砂。2003 年 4 月 18 日高压水又将注浆体击穿, 发生大量涌水、涌砂, 最大涌水量达到 5 000 m³/h, 被迫停工后在正洞侧设置泄水洞泄水降压^[8]。此过程中注浆体被击穿包含水力破坏作用, 其破坏形式主要是充填物和岩壁以及注浆体与岩壁界面破坏, 高压水的劈裂作用破坏了充填物以及注浆体与岩壁的连接, 导致地下水渗透通道的形成, 为突水卸压提供了充足的条件。

岩溶隧道施工过程中,对于层状结构岩体贯通裂纹或断续结构体非贯通裂纹扩展引起的涌水突泥等地质灾害,可采用超前地质预报、洞内裂隙统计与赤平投影等方法分析岩体结构,利用本文方法判断水力劈裂的可能性,进而采取光面爆破、超前注浆等措施予以防治。

3.3 隔离体岩块失稳

块裂结构、板裂结构和碎裂结构围岩结构体形状(见图 7)可以划分为:(1)板状结构体;(2)柱状结构体;(3)六面体状结构体;(4)四面体状结构体。

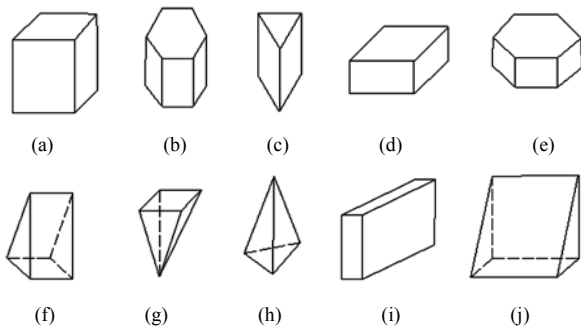


图 7 典型隔离体

Fig.7 Typical isolated rock blocks

针对典型隔离体可采用赤平投影与实体比例投影方法分析隔离体位置及块体形状,按极限平衡方法分析高压水作用下隔离体的稳定性。

不考虑水压力作用时,隔离体的稳定性系数求解方法可参考孙玉科和古迅^[24]的研究,有水压力作用时,以图 8 洞壁双滑面直四面锥体结构为例,在切割面 AOB , AOC , BOC 作用有静水压力 P ,沿 OA 滑动,将孙玉科和古迅^[9]的研究稳定性系数计算公式修正为

$$k = \left[\frac{Q \cos \gamma + PS_1 \cos(\alpha_1 + \gamma)}{\sin \beta_{23}} (\cos \beta_3 \tan \varphi_2 + \cos \beta_2 \tan \varphi_3) - P(S_2 \tan \varphi_2 + S_3 \tan \varphi_3) + c_2 S_2 + c_3 S_3 \right] / [Q \sin \gamma + PS_1 \sin(\alpha_1 + \gamma)] \quad (14)$$

式中: k 为结构体的稳定性安全系数; Q 为结构体的重力; P 为静水压力,非均匀分布时,可取等效值; γ 为结构面交线 OA 的倾角; S_1 , S_2 , S_3 分别为结构面 OBC , OAC , OAB 的面积; α_1 为结构面 OBC 的倾角; β_{23} 为结构面 OAC , OAB 的夹角; β_2 , β_3 分别为结构面 OAC , OAB 与通过交线 OA 的辅助垂直面的夹角; c_2 , c_3 分别为结构面 OAC , OAB

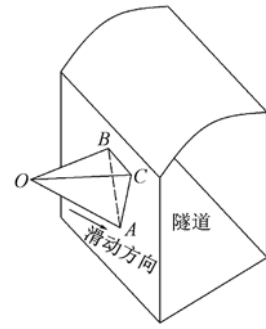


图 8 极限平衡法示意图

Fig.8 Sketch of the limit equilibrium method

的黏聚力; φ_2 , φ_3 分别为结构面 OAC , OAB 的内摩擦角。

隧道掘进中,可采用裂隙调查分析岩体结构面的分布情况,根据隧道走向用赤平极射投影判断可能出现的隔离体,掌子面经过时,予以加固或清除,对于大面积散体结构,可采用预注浆加固。

3.4 隧道 - 溶洞岩壁整体失稳

在隧道靠近但未揭穿大型溶洞时,如果隧道 - 溶洞岩壁为完整结构且为隔水层,则其类似于简支梁或四周嵌固的板承受均布水压力。岩壁被剪断后失稳,导致高压突水、涌泥,可采用强度折减法分析其破坏机制和潜在破坏模式。强度折减法基本原理^[25]是:对于莫尔 - 库仑材料,强度折减安全系数表示为

$$\tau' = \frac{\tau}{\omega} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\omega} = \frac{c}{\omega} + \sigma \frac{\tan \varphi}{\omega} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (15)$$

其中,

$$c' = \frac{c}{\omega}, \quad \tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{\omega} \quad (16)$$

强度折减法破坏的标准^[25]有:(1)以有限元静力平衡计算不收敛作为整体失稳的标志;(2)以塑性区或者等效塑性应变贯通作为整体失稳的标志;(3)滑动体无限移动,滑移面上应变和位移发生突变且无限发展作为整体失稳的标志。

在高压水作用下,岩壁承受的荷载达到极限,促使积聚的应变急剧增加直至破坏。当开挖扰动超出安全范围后,流体物质将压迫岩墙将高势能转化为动能而涌出,在短时间涌出较大的水量,形成突出事故。如大瑶山 1[#]隧道在 2006 年 6 月 24 日 16:20 横通道正洞段施工至 DK1909+342.5,掌子面施钻每循环 6 m,多孔超前探水,拱顶向下约 1.5 m、中线向左 4.3 m 和拱顶向下约 1.8 m、中线向右 4.5 m 开挖轮廓线上,探孔钻进至 3.8 m 时发生冒水冒泥。

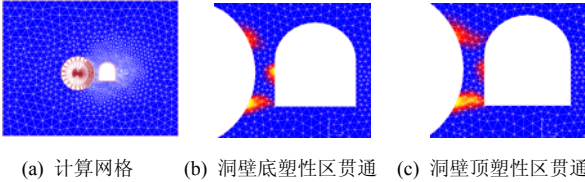
泥浆水压力较大, 含砂量较大。左侧孔开始时喷射距离约 6 m, 在 17: 30 时喷射距离约 11 m^[13]。重庆黔路通渝隧道在经历连续多天降雨, 在浇注衬砌过程中, K21+780 处右侧围岩突然发生突泥事故, 涌出坍方量累积达 3 000 m³ 左右, 并于 K21+730~830 沿隧道轴线长 70 m 范围内堆积了涌出的泥砂碎石和块石, 造成了较大的损失。其原因是 K21+776~785 段右侧拱顶致边墙形成了纵向长 9 m, 高约 7 m 的坍塌穴口, 部分初衬钢拱架已变形破坏, 且溶洞空腔向围岩深部延伸, 岩壁整体破坏^[14]。

采用强度折减法分析溶洞岩壁整体失稳破坏机制, 设隧道底宽 6 m, 左侧 2 m 处有一直径为 12 m 的溶洞, 洞内水压力为 0.8 MPa, 数值模型计算参数见表 3。计算网格参见图 9(a), 采用 DP-3 准则, 当强度折减系数为 1.695 时, 隧道下部塑性区贯通(见图 9(b)), 强度折减系数为 2.041 时, 上部塑性区贯通(见图 9(c))。

表 3 数值模型计算参数

Table 3 Calculation parameters in numerical model

容重/(kN · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
23	10	0.3	1	35



(a) 计算网格 (b) 洞底塑性区贯通 (c) 洞顶塑性区贯通

图 9 计算网格与贯穿的塑性区分布

Fig.9 Finite element mesh and distribution of plastic zones

在隧道施工中, 可采用超前地质预报确定溶洞位置与规模, 根据隧道走向及断面尺寸分析岩壁整体失稳的可能性。在隧道掘进至危险断面时, 采取注浆等预加固措施, 在初期支护后, 灌注超细水泥浆再次封堵。也可采用迂回方式先行穿越溶洞, 后期再行治理。

4 结 论

(1) 按围岩结构将岩溶隧道围岩的水力破坏模式划分为 4 种: 非贯通盲端裂纹的扩展、贯通裂纹的横向扩展、隔离体岩块的失稳和溶洞岩壁整体失稳。

(2) 采用断裂力学方法分析非贯通盲端裂纹的横向扩展条件, 将非贯通盲端裂纹视为“无限大”体中的片状裂纹, 用 Green 和 Sneddon 的求解结果分析裂纹水力破坏机制。

(3) 采用断裂力学方法分析岩壁贯通裂纹的横向扩展条件, 将隧道-溶洞岩壁概化为岩板, 岩壁上裂隙视为贯穿裂纹, 采用复变函数推导出的 Westergaard 解分析了岩板上贯通裂纹水力破坏机制。

(4) 采用基于赤平投影与实体比例投影的极限平衡法分析了隔离体岩块的失稳机制, 给出了考虑水压力作用的极限平衡计算公式。

(5) 采用强度折减法分析了溶洞岩壁整体失稳的力学机制。针对各破坏模式给出了防治措施, 可为高水压岩溶隧道的设计、施工提供参考依据。

参考文献(References):

[1] 郭纯青. 岩溶地下水资源评价灰色系统理论与方法研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993.(GUO Chunqing, et al. Gray system theory and method of karst groundwater resources evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.(in Chinese))

[2] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.(Karst Geology Research Group, Institute of Geology Chinese Academy of Sciences. Karst researches in China[M]. Beijing: Science Press, 1979.(in Chinese))

[3] 莫阳春, 周晓军. 侧部岩溶隧道围岩变形特征数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 30-34, 44.(MO Yangchun, ZHOU Xiaojun. Study of deformation properties of rock mass in lateral pressure karst tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(2): 30-34, 44.(in Chinese))

[4] 谭代明, 漆泰岳, 莫阳春. 侧部岩溶隧道围岩稳定性数值分析与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3 497-3 503.(TAN Daiming, QI Taiyue, MO Yangchun. Numerical analysis and research on surrounding rock stability of lateral karst cave tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 3 497-3 503.(in Chinese))

[5] 莫阳春, 周晓军, 邓遥林. 侧部岩溶隧道围岩与支护结构力学特性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 99-102.(MO Yangchun, ZHOU Xiaojun, DENG Yaolin. Analysis of mechanical characteristics of surrounding rock and support structures of lateral karst cave tunnel[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(3): 99-102.(in Chinese))

[6] 莫阳春, 周晓军. 达成高速铁路岩溶隧道围岩稳定性分析[J]. 中国

- 铁道科学, 2008, 29(3): 52 - 57.(MO Yangchun, ZHOU Xiaojun. Stability analysis of the surrounding rock of a karst tunnel in Da-Cheng high-speed railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 52 - 57.(in Chinese))
- [7] 赵明阶, 王学军, 刘绪华, 等. 隧道侧岩溶分布对围岩稳定性影响的数值模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1): 6 - 11.(ZHAO Mingjie, WANG Xuejun, LIU Xuhua, et al. Numerical analysis of influence of karst caves beside the tunnel on stability of its surrounding rock mass[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(1): 6 - 11.(in Chinese))
- [8] 赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445 - 449.(ZHAO Mingjie, AO Jianhua, LIU Xuhua, et al. Numerical analysis of influence of karst caves on top of tunnel on stability of surrounding rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 445 - 449.(in Chinese))
- [9] 李 奎. 隧道岩溶围岩力学特性的初步研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2005.(LI Kui. Pilot study on mechanics trait of tunnel karst wall rock[M. S. Thesis][D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [10] 彭 川. 岩溶隧道围岩与结构稳定性分析[硕士学位论文][D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.(PENG Chuan. Stability analysis of karst tunnel surrounding rock and structure[M. S. Thesis][D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2009.(in Chinese))
- [11] 张继奎. 圆梁山隧道特殊地质地段施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(ZHANG Jikui. Construction in special geological area of Yuanliangshan tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [12] 张会远, 穆静静. 岩溶区大断面隧道突泥突水的防治[J]. 铁道建筑, 2009, (6): 49 - 51.(ZHANG Huiyuan, MU Jingjing. Prevention and treatment of water bursting and sudden mud of large-section tunnel in karst area[J]. Railway Construction, 2009, (6): 49 - 51.(in Chinese))
- [13] 程崇国, 丁 浩, 黄伦海. 通渝隧道涌水突泥灾害的抢险处治设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(CHENG Chongguo, DING Hao, HUANG Lunhai. Disaster rescue design of water bursting and sudden mud in Tongyu tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [14] 石文慧. 论铁路隧道涌水及泥屑流突出灾害的防治[J]. 铁道勘测与设计, 1993, (1): 1 - 14.(SHI Wenhui. On the railway tunnel gushing water and mud debris flow disaster prevention highlighted[J]. Railway Survey and Design, 1993, (1): 1 - 14.(in Chinese))
- [15] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573 - 576.(HUANG Runqiu, WANG Xianneng, CHEN Longsheng. Hydro-splitting off analysis of underground water in deep-lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573 - 576.(in Chinese))
- [16] 王 鹰, 陈 强, 魏有仪, 等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机制[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 55 - 58.(WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Water-rock interaction mechanism of deep tunnel in karst developed area[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 55 - 58.(in Chinese))
- [17] 郭 伟. 侧部水压充填型岩溶隧道施工力学特性研究[J]. 湖南交通科技, 2008, 34(2): 131 - 135.(GUO Wei. Study of mechanical properties of lateral pressure in karst tunnel[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2008, 34(2): 131 - 135.(in Chinese))
- [18] 黎代仁. 侧部水压充填型岩溶隧道围岩变形特征分析[J]. 路基工程, 2009, (4): 144 - 145.(LI Dairen. Study of deformation properties of rock mass in lateral pressure karst tunnel[J]. Subgrade Engineering, 2009, (4): 144 - 145.(in Chinese))
- [19] PESENDORFER M, LOEW S. Subsurface exploration and transient pressure testing from a deep tunnel in fractured and karstified limestones(lotschberg base tunnel, Switzerland)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 47(1): 121 - 137.
- [20] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(SUN Guangzhong. Rock structure mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))
- [21] 赖祖涵. 断裂力学原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.(LAI Zuhan. Fracture mechanics[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1990.(in Chinese))
- [22] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1980.(Chinese Aeronautical Establishment. Stress intensity factor handbook[M]. Beijing: Science Press, 1980.(in Chinese))
- [23] 丁遂栋, 孙利民. 断裂力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.(DING Suidong, SUN Limin. Fracture mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.(in Chinese))
- [24] 孙玉科, 古 迅. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980.(SUN Yuke, GU Xun. The application of stereographic pole overhead projector in rock engineering geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1980.(in Chinese))
- [25] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 解放军后勤工程学院学报, 2005, 21(3): 1 - 6.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, SONG Yakun. Advance of study on the finite element strength reduction method[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 21(3): 1 - 6.(in Chinese))