

不同围岩中软弱夹层对洞室围岩稳定性的影响

张志强¹, 李 宁¹, 陈方方², Swoboda Gunter³

(1 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

3 茵斯布鲁克大学 结构分析研究所, 奥地利 茵斯布鲁克 A-6020)

【摘 要】 【目的】研究不同级别围岩中软弱夹层对地下洞室围岩稳定性以及支护结构安全性的影响。【方法】利用奥地利大型岩土工程分析系统 FINAL, 通过建立软弱夹层分布于地下洞室拱顶、肩部以及侧墙时的不同有限元分析模型, 分析不同级别(Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级)围岩下软弱夹层对地下洞室围岩位移场、应力场、塑性区及喷层应力的影响。【结果】Ⅱ、Ⅲ级围岩中, 拱顶软弱夹层使拱顶位移增加约 85%, 侧墙位移减小 30%~35%; Ⅳ级围岩中, 拱顶位移增加约 120%, 侧墙位移增加约 10%; 各级围岩中, 拱顶软弱夹层使围岩拉应力区面积增大 4.0~5.0 倍; Ⅱ、Ⅳ级围岩中, 拱顶软弱夹层对围岩塑性区的影响较小, Ⅲ级围岩中塑性区面积约为无软弱夹层时的 2.0 倍。【结论】分布在不同级别围岩中, 不同位置软弱夹层对地下洞室产生的影响有差异; 若有软弱夹层分布时, 应采取措施控制软弱夹层引起的位移、拉应力区以及塑性区的增加。

【关键词】 地下洞室; 软弱夹层; 分布位置; 围岩级别; 稳定性; 安全性

【中图分类号】 TU457

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)07-0193-08

Effect of weak interbed on tunnel stability in different graded surrounding rock mass

ZHANG Zhi-qiang¹, LI Ning¹, CHEN Fang-fang², SWOBODA Gunter³

(1 Institution of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710048, China;

2 School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shanxi 710054, China;

3 Institute of Structure Analysis, University of Innsbruck, Innsbruck A-6020, Austria)

Abstract: 【Objective】 The research was done to study the effect of the weak interbed distributed in rock mass with different grades on the stability of surrounding rock mass of tunnel and the safety of supporting system. 【Method】 Systematic numerical tests were carried out to study the displacement vector field, the stress vector field, the plastic region of surrounding rock mass and the stress in shot-crete with a weak interbed distributed in crown, shoulder and side wall respectively by means of the FEM code FINAL introduced from Austria. 【Result】 The displacement in tunnel crown was increased by about 85%, the displacement at walls of both side decreased by 30%—35% and tensile zone in surrounding rock mass increased by 4.0—5.0 times, under the condition that tunnel with crown weak interbed was located in surrounding rock mass graded Ⅱ, Ⅲ. In surrounding rock mass graded Ⅳ, the displacement in crown of tunnel was increased by 120%, the displacement at walls of both side increased by 10% and tensile zone in surrounding rock mass increased inconspicuously. When the tunnel was surrounded by rock mass graded Ⅱ and Ⅳ, the depth of plastic zone changed little, but in graded Ⅲ, the depth of plastic zone doubled. 【Conclusion】 The same weak interbed distributed around tunnel, showing different effect characteristics in sur-

* [收稿日期] 2010-12-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50708034, 50879068); 陕西省教育厅科研计划项目(11JK0730)

[作者简介] 张志强(1976—), 男, 四川广汉人, 讲师, 博士, 主要从事岩体力学、岩土工程数值分析研究。

E-mail: zhangzq87@hotmail.com

rounding rock mass with different grades, and some measurements should be carried out to deal with the increase of displacement, tensile zone and plastic zone in surrounding rock mass with weak interbed.

Key words: underground opening; weak interbed; distribution location; grade of surrounding rock mass; stability; safety

随着我国水利、采矿、交通、石油等行业的洞室工程向着高埋深、大跨度、长距离趋势发展,各式各样的地下洞室不可避免地会遇到各种各样的结构面,如软弱夹层、断层、裂隙组等。大量的洞室工程实践表明,分布于洞室围岩中的软弱夹层,对洞室围岩体的整体稳定性和支护结构安全性非常不利,其制约着整个工程岩体变形、破坏的发生和发展过程^[1-2]。软弱夹层对洞室围岩稳定性和支护结构安全性的影响是多方面且复杂的,已有学者开展了一系列研究工作并取得了对实际工程具有指导作用的研究成果^[3-12]。例如,蒋爵光^[3]研究了在不同构造应力作用下节理岩体洞室的稳定性;任德惠等^[4]研究了不同倾角结构面对洞室稳定性的影响;李新平^[5]研究了裂隙分布对地下洞室稳定性的影响;于学馥等^[6]对地下围岩稳定性的研究进行了较为全面的总结。国外这方面的研究也有报道,如 Bruneau 等^[7-8]、Kwon 等^[9]、Place 等^[10]、Hao 等^[11]均开展过断层对洞室围岩稳定性影响的研究。但由于当时数值分析手段的限制,已报道的研究工作多是在对某个具体工程调查的基础上,通过现场观测到的现象,就软弱夹层对洞室围岩稳定性与支护结构安全性的影响特征进行总结与分析,所得到的结论大多是定性的且局限于某种特定条件下,而关于软弱夹层空间产状(走向、倾角、间距)以及充填、厚度等因素对洞室围岩稳定性影响的系统定量研究尚鲜有报道,尤其是在不同围岩级别中洞室受软弱夹层影响的研究更为少见。随着数值分析方法和技术的发展及广泛应用^[12],考虑到初始地应力环境中,相同的软弱夹层体现出的性状有所不同。如张志强等^[13]基于先进的数值分析方法,研究了不同应力环境中软弱夹层对洞室围岩稳定性的影响。但综观现有的研究成果,当前关于软弱夹层对洞室稳定性影响的研究远未达到解决实际工程难题的要求,软弱夹层对洞室围岩稳定性、支护结构安全性的影响,尤其是对洞室围岩应力场、位移场、塑性区以及支护结构所受内力的影响,一直是地下工程界研究的重点、难点。为此,本研究以四川紫坪铺泄洪洞为对象,以从奥地利引进的岩土工程有限元分析程序 FINAL 为平台,就不同围岩条件下软弱夹层对洞室围岩位移场、关

键点位移、围岩塑性区分布以及支护结构受力的影响进行研究,并分析得出量化的影响规律,以期含软弱夹层洞室围岩稳定性、安全性评价及其施工支护方案的确定提供参考。

1 四川紫坪铺泄洪洞软弱夹层的分布

四川紫坪铺水利枢纽工程 2 号泄洪洞,洞形为城门洞形(圆拱直墙),高跨比为 1.0~1.5,开挖跨度约为 12 m。根据前期地质勘探和现场开挖揭示的地质条件,该泄洪洞龙抬头段主要分布有 L9、Lc 等软弱夹层,其中 L9 软弱夹层分布于泄洪洞的肩部与顶部,Lc 软弱夹层分布于泄洪洞底部(图 1)。隧洞围岩稳定性和支护结构安全性受软弱夹层的控制。隧洞从桩号 0+000 到 0+070 围岩级别变化显著,其中 0+000~0+012 为 V 级围岩,0+012~0+027 为 IV 级围岩,0+027~0+055 为 III 级围岩。图 1 分别给出了该隧洞桩号分别为 0+010、0+020、0+030 的地质横剖面图,此 3 断面分别位于 V 级、IV 级、III 级围岩中。

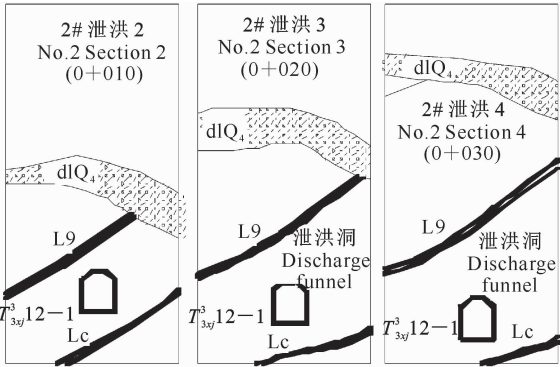


图 1 四川紫坪铺 2 号泄洪洞的典型地质横剖面图
Fig. 1 Typical profile of geology of No. 2 discharge tunnel in Zipingpu Project in Sichuan

2 模型的建立与研究方案的确定

为使研究更具一般性,本研究根据四川紫坪铺水利枢纽工程 2 号泄洪洞与软弱夹层 L9 的几何关系,以及该隧洞所穿越的不同级别围岩等工程情况,并将软弱夹层的分布位置进行一定的拓展,选取埋深 100.0 m、城门洞型、高 12.0 m、跨度 10.0 m 的洞室为分析对象,并拟定洞室分别位于 II、III、IV 级围

岩。洞室拱顶、肩部以及侧墙软弱夹层的位置如图 2 所示。

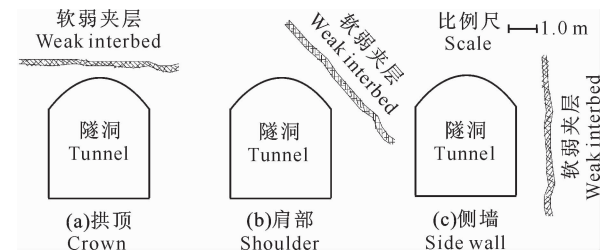


图 2 软弱夹层分布示意图

Fig. 2 Tunnel and distribution of weak interbed

图 2 中,洞室拱顶和肩部软弱夹层距洞室最近距离为 0.5 倍洞径,侧墙软弱夹层距洞室最近距离为 0.2 倍洞径,所研究的软弱夹层厚度为 0.01 倍洞径,其中的充填物按 V 级围岩的力学参数选取。

表 1 围岩与支护材料的物理力学参数

Table 1 Rock mass and supporting material mechanics parameter

材料 Material	变形模量/GPa Deformation module	泊松比 Possion's ratio	凝聚力/MPa Cohesion	内摩擦角/(°) Inner friction angle	抗拉强度/MPa Tensile strength	容重/(kN·m ⁻³) Bulk density
Ⅱ级围岩 Surrounding rock in grade Ⅱ	15.0	0.22	1.8	50.0	1.5	27.0
Ⅲ级围岩 Surrounding rock in grade Ⅲ	6.0	0.28	1.2	40.0	1.0	26.0
Ⅳ级围岩 Surrounding rock in grade Ⅳ	3.0	0.32	0.8	28.0	0.5	25.0
软弱夹层充填物 Filling	0.10	0.40	0.6	23.0	0.0	23.0
喷射混凝土层 Sshot-crete	21.0	0.18			1.1	24.0

3 结果与分析

为了得到无量纲值表达的位移、应力变化规律,本研究不对具体的位移、应力进行分析,而采用处理后所得到的相对值,如位移相对值(Δ_d)、喷层应力相对值(Δ_s)进行分析,以便得到更普遍的规律,各相对值的定义以及其性质如下所述。

Δ_d 是指地下洞室同一部位有软弱夹层条件下的位移与无软弱夹层条件下的位移之比。位移相对值反映了软弱夹层对洞室围岩位移的影响程度,若 $\Delta_d < 0$,表明该点有软弱夹层时位移方向与无软弱夹层时相反;若 $0 \leq \Delta_d < 1.0$,表明该点有软弱夹层时的位移小于无软弱夹层的位移;若 $\Delta_d > 1.0$,表明该点有软弱夹层时的位移大于无软弱夹层的位移。 $|\Delta_d|$ 越大,表明软弱夹层对该点位移的影响越大。 Δ_d 的计算公式为:

$$\Delta_d = d_1 / d_0 \tag{1}$$

式中: d_1 为洞室分布有软弱夹层时某一部位的位移值, d_0 为无软弱夹层时某一部位的位移值。

同理, Δ_s 为地下洞室同一部位有软弱夹层条件下的喷层应力与无软弱夹层条件下的喷层应力的比

有限元模型包括岩体单元(LST 单元)、软弱夹层单元(COJO 单元)^[12] 以及喷射混凝土层单元(BEAM6 单元)。数值仿真试验中岩体(围岩和开挖岩体)采用弹塑性本构关系以及莫尔-库仑强度准则,喷层采用变刚度非线性弹性本构模型,在分析过程中,刚度变化根据喷层凝固程度而定。本研究将不同级别围岩模拟转化为不同的变形和强度参数,分析时选择Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级代表性围岩,根据文献[14]选取各级围岩的物理力学参数,结果如表 1 所示。

分析过程中,隧洞均按全断面开挖模拟,并在距掌子面 0.5 倍洞径时进行喷层支护。对于非应力环境影响方案,侧压系数均取为自重应力下的侧压系数 $k = \mu / (\mu - 1)$,其中 μ 为岩体的泊松比。

值,其计算公式为:

$$\Delta_s = \sigma_1 / \sigma_0 \tag{2}$$

式中: σ_1 为洞室分布有软弱夹层时某一部位的喷层应力值, σ_0 为无软弱夹层时某一部位的喷层应力值。

为了反映软弱夹层对地下洞室形状的影响,本研究根据洞室拱顶沉降和侧墙收敛量定义了洞室形状影响系数(λ),即拱顶沉降和侧墙收敛量之比值,计算公式为:

$$\lambda = d_c / (|d_{ls}| + |d_{rs}|) \tag{3}$$

式中: d_c 为洞室拱顶沉降量, d_{ls} 为左侧墙中点水平位移值, d_{rs} 为右侧墙中点水平位移值。

λ 越小,拱顶沉降越小,隧洞高跨比增大; λ 越大,拱顶沉降越大,隧洞高跨比减小。

3.1 软弱夹层对洞周关键部位位移相对值的影响

无软弱夹层分布时,位于不同级别围岩的洞室洞周位移主要由围岩变形模量控制,位移随围岩变形模量的增大而减小,洞周位移大体上与围岩变形模量的倒数成正比。进一步分析可知,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩中变形模量与拱顶竖向位移之积分别为 36.86, 36.79, 40.73 GPa·mm,表明Ⅱ、Ⅲ级围岩中,关键点位移与变形模量之积为常数;Ⅳ级围岩中,关键点

位移与变形模量的乘积略有增大,这主要是由于Ⅱ、Ⅲ级围岩大多数都处于弹性阶段,而Ⅳ级围岩中一部分围岩进入了塑性阶段,出现了塑性位移所致。

从表 2 可以看出,若软弱夹层分布在洞室拱顶,Ⅱ、Ⅲ级围岩中拱顶位移相对值分别为 1.84 和 1.87,影响程度大致相当,但左、右两侧墙位移相对值均从Ⅱ级围岩的 0.67 增大到Ⅲ级围岩的 0.75;Ⅳ级围岩中,拱顶位移相对值为 2.18,侧墙中点位

移相对值约为 1.10。可以看出,Ⅱ、Ⅲ级围岩中软弱夹层将会使拱顶位移增加约 85%,侧墙中点位移减小约 30%;Ⅳ级围岩中拱顶位移增加约 120%,侧墙位移增加约 10%。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩中, λ 分别为 3.0、2.5 和 1.0,位于不同围岩中的软弱夹层,使地下洞室的拱顶沉降和水平收敛位移比值有所不同,也将引起洞室形状的变化。

表 2 不同级别围岩下不同位置分布软弱夹层对洞周关键点位移相对值的影响

Table 2 Relative value of displacement of key points under different cases

关键点 Key Point	拱顶软弱夹层 Interbed in crown			肩部软弱夹层 Interbed at shoulder			侧墙软弱夹层 Interbed at side wall		
	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
左侧墙中点(水平) Point at left side wall	0.67	0.75	1.11	0.67	0.75	0.91	0.83	0.88	0.80
拱顶中点(竖直) Point in crown	1.84	1.87	2.18	1.36	1.36	1.44	0.96	0.97	1.01
右侧墙中点(水平) Point at right side wall	0.67	0.75	1.10	1.33	1.38	1.51	11.33	11.13	6.96

由表 2 可知,洞室右肩部分布软弱夹层时,Ⅱ、Ⅲ级围岩的拱顶位移均增加约 35%,左侧墙中点位移分别减小 33%和 25%,右侧墙中点位移均增加约 35%;Ⅳ级围岩中,拱顶中点的位移增加约 45%,左侧墙中点位移减小约 10%,右侧墙中点位移增加约 50%。在此条件下洞室形状影响系数分别为 2.83, 2.44 和 1.03(图 3)。

对于右侧墙中点(水平)而言,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩的位移相对值分别为 11.33、11.13 和 6.96,位移相对值也在向 1 靠近。

3.2 软弱夹层对洞室围岩应力场及拉应力区的影响

若无软弱夹层,位于Ⅱ、Ⅲ级围岩的洞室开挖后围岩拉应力区均很小,但当洞室位于Ⅳ级围岩时,顶部 0.1 倍洞跨深度内会出现拉应力(图 4(a))。从出现洞室顶部拉应力单元(图 4 中的粗黑线)数上看,Ⅱ级围岩中有 3 个单元出现了拉应力,而Ⅲ、Ⅳ级围岩中均仅有 1 个单元出现了拉应力。

图 4(b)显示,洞室拱顶部位分布有软弱夹层时,拉应力区主要出现在 2 个部位:即拱顶部位、开挖后较弱软弱夹层拉开到未被拉开的过渡区。不同级别围岩中,软弱夹层对拉压应力区的分布影响较小,但对应力大小影响较大。Ⅱ、Ⅲ级围岩中侧墙部位的切向应力较Ⅳ级围岩大 50%左右,而在洞室拱顶部位,Ⅱ、Ⅲ级围岩的切向应力却较Ⅳ级围岩小 20%左右。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ各级围岩中拉应力单元数分别为 5,4,5。

图 4(c)显示,当软弱夹层分布于洞室肩部时,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩中拉应力区分布位置、大小变化明显。Ⅱ级围岩仅在拱顶较小的区域产生拉应力区,Ⅲ级围岩中拱顶稍右部和右侧墙上半部位出现拉应力区,Ⅳ级围岩中整个右拱顶部位、右侧墙上上部以及左侧墙的中上部均产生了拉应力区。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ各级围岩条件下拉应力单元数分别为 4,1,2。

图 4(d)显示,软弱夹层分布于右侧墙时,Ⅱ级

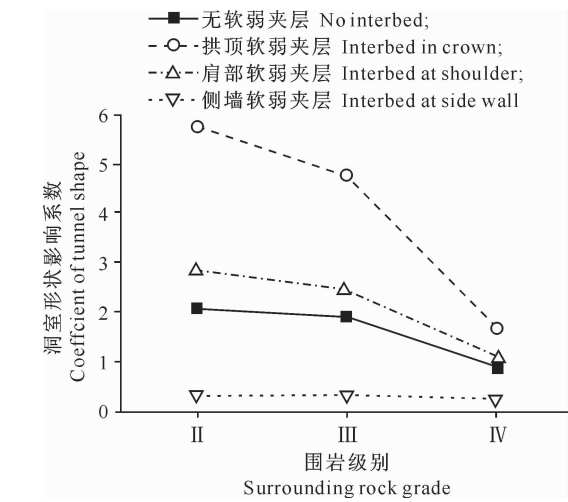


图 3 不同级别围岩下不同位置分布软弱夹层洞室形状影响系数的变化

Fig. 3 Curves of shape coefficient of tunnel vs grades of surrounding rock

由表 2 还可知,软弱夹层分布在右侧墙时,左侧墙中点的位移减小约 20%,拱顶沉降与无软弱夹层时大致相当,而右侧墙中点的位移增加明显。随着围岩级别的增大,围岩质量降低,各点的位移相对值均在向 1 靠近,说明软弱夹层对位移的影响在减小。

围岩的拉应力区仅出现在右侧墙中下部位,Ⅲ级围岩的拉应力区出现在整个右侧墙部位,Ⅳ级围岩的

拱顶中点和左侧墙中部同时出现了拉应力。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ各级围岩条件下拉应力单元数分别为 8,1,5。

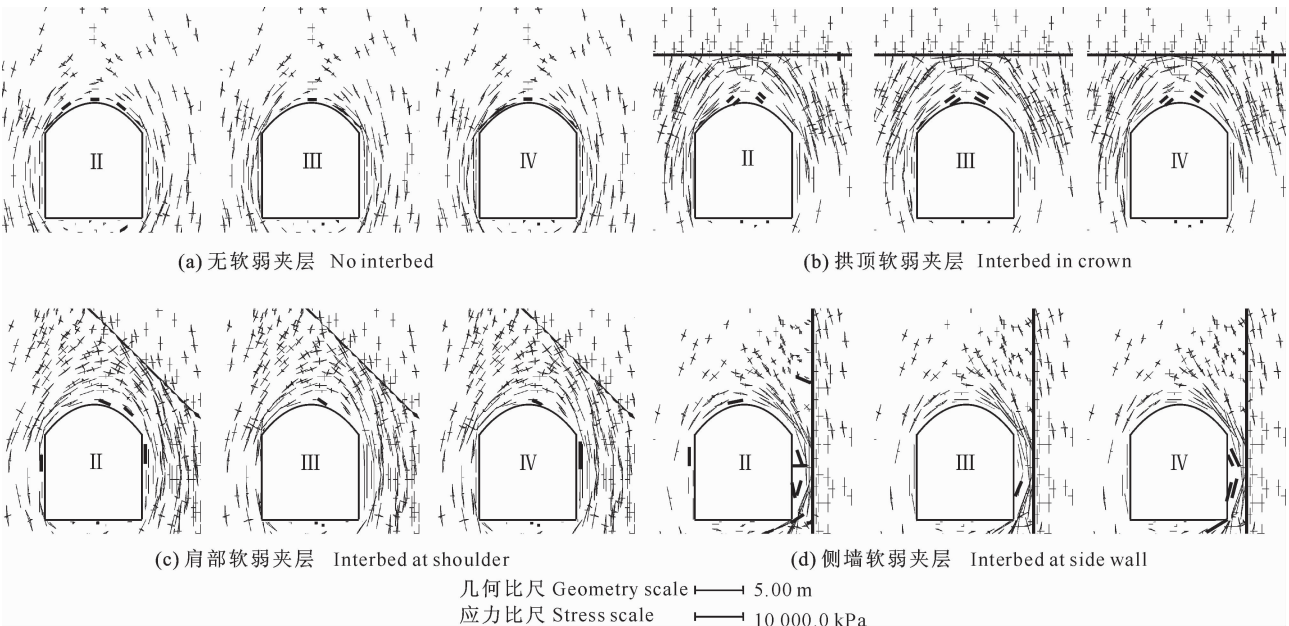


图 4 各级别围岩下不同位置分布软弱夹层对围岩应力矢量场的影响
Fig. 4 Stress vector fields of surrounding rock under different cases

不同级别围岩情况下软弱夹层对洞室开挖后应力场的影响主要表现为:1)各级围岩中,分布在拱顶部位的软弱夹层使洞室围岩拉应力区面积增大 4.0~5.0 倍;2)肩部部位软弱夹层使Ⅲ级围岩的拉应力区面积增加约 2.0 倍,Ⅱ、Ⅳ级围岩的拉应力区变化较小;3)侧墙部位软弱夹层使Ⅱ、Ⅳ级围岩的拉应力区面积分别增加约 3.0 和 5.0 倍,而对Ⅲ级围岩围岩拉应力区影响较小。

3.3 软弱夹层分布对洞室围岩塑性区深度的影响

表 3 和图 5 显示,软弱夹层分布在洞周时,洞室围岩塑性区深度明显增加。

表 3 不同位置分布软弱夹层对各级别围岩中洞室塑性区深度(洞跨倍数)的影响

软弱夹层分布位置 Distribution of weak interbed	塑性区深度(洞跨倍数) Depth of plastic region(scaled by span)		
	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
无 No interbed	0.05~0.1	0.1~0.2	0.5~0.6
拱顶 Crown	0.05~0.1	0.25~0.3	0.6~0.7
肩部 Shoulder	0.05~0.1	0.2~0.25	0.4~0.6
侧墙 Side wall	0.1~0.2	0.2~0.3	0.7~0.8

由表 3 和图 5(a)可见,无软弱夹层情况下,Ⅱ级围岩中,仅 4 个拐角处产生了很小的塑性区,塑性区平均深度为 0.05~0.1 倍洞跨;Ⅲ级围岩的岩体强度较Ⅱ级围岩低,开挖轮廓拐角处的塑性区向其

附近发展,形成的塑性区深度为 0.1~0.2 倍洞跨。Ⅳ级围岩时,围岩塑性区深度急速增加,塑性区不仅包括整个侧墙,而且向深处发展显著,最终形成了 0.5~0.6 倍洞跨深度的塑性区。在此条件下洞室拱顶均未产生塑性区。

表 3 和图 5(b)显示,软弱夹层分布于洞室拱顶时,Ⅱ级围岩中的塑性区与无软弱夹层时基本相同;Ⅲ级围岩中,除了洞室拱顶外,其他部位产生了深度为 0.25~0.3 倍洞跨的塑性区;Ⅳ级围岩中,围岩塑性区增大非常显著,最终形成的塑性区深度为 0.6~0.7 倍洞跨。

表 3 和图 5(c)显示,软弱夹层分布于右肩部时,在Ⅱ级围岩中,右边 2 拐角塑性区深度较左边大,其他部位围岩塑性区的分布及深度与无软弱夹层时大体相同;Ⅲ级围岩中,右侧墙部位塑性区较大,塑性区贯穿了右侧墙部位,出现了 0.2~0.3 倍洞跨深度的塑性区;Ⅳ级围岩中塑性区成倍增长,最终围岩的塑性区深度为 0.4~0.6 倍洞跨。

表 3 和图 5(d)显示,软弱夹层分布在洞室右侧墙时,Ⅱ级围岩中,软弱夹层与开挖边界之间的一部分岩体进入塑性状态;Ⅲ级围岩中,开挖轮廓与软弱夹层间的岩体几乎全部进入了塑性状态,同侧肩部围岩也开始屈服,同样在异侧侧墙的 2 个拐角处约有 0.1 倍洞跨深度内产生了塑性区;Ⅳ级围岩中,因

软弱夹层隔断,围岩塑性区无法再向更深处发展,所以右侧塑性区深度最大仅为软弱夹层到开挖线的距离,但左侧墙塑性区不断向更深处发展,最终形成

0.7~0.8 倍洞跨深度的塑性区,另外洞室拱顶产生了 0.1~0.2 倍洞跨深度的塑性区。

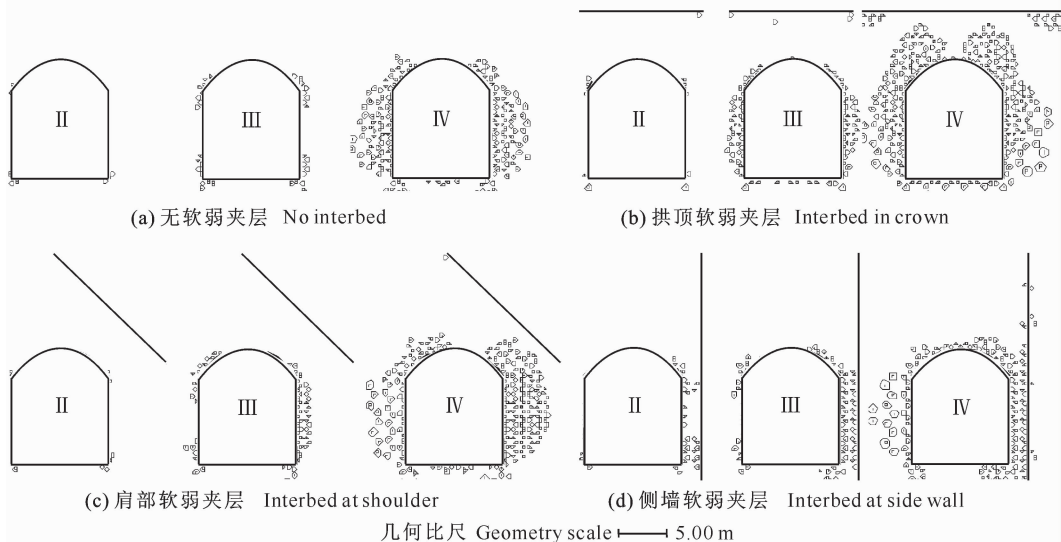


图 5 不同级别围岩下软弱夹层分布对围岩塑性区的影响

Fig. 5 Plastic regions of surrounding rock mass under different cases

综上所述,不同级别围岩下软弱夹层分布对洞室塑性区的影响表出以下规律:1)Ⅱ级围岩中,洞室拱顶、肩部部位的软弱夹层,对围岩塑性区的影响小,侧墙部位软弱夹层对围岩塑性区的影响较大;2)当洞室处于Ⅲ级围岩中时,3 种部位软弱夹层对围岩塑性区的影响均比较明显,其中洞室拱顶产生的塑性区深度约为无软弱夹层时的 2.0 倍,肩部、侧

墙部位的塑性区深度约为无软弱夹层时的 1.5 倍;3)洞室处于Ⅳ级围岩时,3 种分布部位软弱夹层对围岩塑性区深度的影响不大。

3.4 软弱夹层对喷射混凝土层应力的影响

当洞室位于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级别围岩中时,拱顶、肩部以及侧墙软弱夹层的喷层应力相对值见表 4。

表 4 不同级别围岩下软弱夹层分布对洞室喷层应力相对值的影响

Table 4 Relative value of stress in shot-crete at key point under different cases

围岩级别 Rock grade	拱顶软弱夹层 Interbed in crown						肩部软弱夹层 Interbed at shoulder						侧墙软弱夹层 Interbed at side wall					
	左侧墙 Left side wall		拱顶 Crown		右侧墙 Right side wall		左侧墙 Left side wall		拱顶 Crown		右侧墙 Right side wall		左侧墙 Left side wall		拱顶 Crown		右侧墙 Right side wall	
	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_{\min}$
Ⅱ	0.60	0.57	-7.39	-6.10	0.58	0.56	1.07	1.05	5.44	5.70	0.32	0.30	1.21	1.18	24.72	23.19	19.59	18.13
Ⅲ	-0.29	-0.43	-0.88	-0.60	-0.33	-0.48	0.99	0.99	2.81	2.95	-0.40	-0.52	1.20	1.16	8.58	8.53	22.05	20.17
Ⅳ	2.90	2.74	2.61	2.66	2.99	2.80	1.57	1.52	2.59	2.74	3.06	2.79	0.63	0.70	5.10	5.28	-7.83	-4.94

注:“-”表示与无软弱夹层时的拉、压性质相异,“+”或无标识表示与无软弱夹层时的拉、压性质相同。
Note:“-” means to be different in stress status with no interbed,“+” means to be same in stress status.

从表 4 可以看出,1)当洞室位于Ⅱ级围岩时,拱顶软弱夹层将会使拱顶部位的喷层产生拉应力,喷层拉应力最大值为无软弱夹层时的 6.0~7.0 倍;Ⅳ级围岩中,喷层内均受压应力,为无软弱夹层时 2.5~3.0 倍。2)在洞室肩部有软弱夹层分布时,在Ⅱ级围岩中,软弱夹层对左侧墙喷层影响不明显,而使拱顶喷层应力增加 5.0~6.0 倍;在Ⅲ级围岩中,拱顶喷层应力约为无软弱夹层时的 3.0 倍左右;在Ⅳ级围岩中,左侧墙喷层应力增加,为无软弱夹层的

1.5 倍,洞室拱顶、右侧墙喷层应力增加,为无软弱夹层的 2.5~3.0 倍。3)当洞室侧墙存在软弱夹层时,在Ⅱ级围岩中,软弱夹层使拱顶喷层压应力增加,为无软弱夹层时的 23.0~25.0 倍,而在右侧墙中部产生很大的拉应力;Ⅲ级围岩中,拱顶喷层压应力增大,为无软弱夹层时的 8.0~9.0 倍,右侧墙中部的拉应力约为无软弱夹层时的 20.0 倍左右;Ⅳ级围岩中,左侧墙应力值有所减小,而拱顶喷层产生压应力,喷层应力约为无软弱夹层时的 5.0 倍,右侧墙

喷层拉应力增加 4.0~7.0 倍。

3.5 不同侧压条件下软弱夹层对洞室围岩位移的影响

本研究选择了侧压系数 k 分别为 0.38, 1.0 和 2.0 等 3 种条件下的应力环境,分析不同侧压条件下软弱夹层对洞室围岩位移的影响,结果如图 6 所示。图 6 中,软弱夹层将围岩划分成 2 部分:不包含洞室部分和包含洞室部分。由图 6 可知,软弱夹层将一个连续位移场改变成为非连续位移场,两区域相比,不包含洞室部分围岩位移基本可以忽略不计。软弱夹层使得开挖引起的荷载无法向深处围岩传递,减少了分担开挖荷载的围岩,恶化了围岩受力条件,随着侧压系数 k 的增大,软弱夹层阻隔作用更加明显。

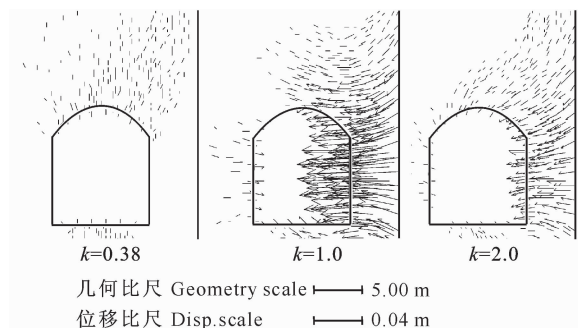


图 6 不同侧压条件下软弱夹层对洞室围岩位移场的影响

Fig. 6 Displacement fields under different confining coefficient with weak interbed

4 结 论

本研究以四川紫坪铺水利枢纽工程 2# 泄洪洞为例,利用奥地利大型岩土工程分析系统 FINAL,分析了 II、III、IV 3 种级别围岩中,软弱夹层分别分布于洞室拱顶、肩部和侧墙条件下,洞室围岩的稳定性与支护结构的安全性,着重讨论了不同围岩级别条件下软弱夹层对洞室围岩位移场、应力场、塑性区以及喷层应力的影响,得到了以下结论。

1) 当洞室位于 II、III 级围岩时,拱顶软弱夹层使拱顶中点位移增加约 85%,左右侧墙位移减小 30%~35%;IV 级围岩中,拱顶位移增加约 120%,左右侧墙位移增加 10%左右。II、III 级围岩中,右肩部软弱夹层使拱顶中点位移增加了 37%左右,右侧墙中点的位移增加约 33%;而在 IV 级围岩中,拱顶位移增加约 45%,右侧墙位移增加 50%左右;在右侧墙部位分布有软弱夹层时,II、III 级围岩中,左侧墙与拱顶中点的位移减小 10%~15%,而右侧墙

位移增大 10.0~12.0 倍;IV 级围岩中,左侧墙位移减小约 20%,右侧墙位移约为无软弱夹层时的 7.0 倍。

2) 各级围岩中,拱顶软弱夹层使围岩拉应力区面积增大 4.0~5.0 倍。软弱夹层分布于肩部时,III 级围岩中,拉应力区面积增加 2.0 倍;II、IV 级围岩中,拉应力区面积变化很小;侧墙部位有软弱夹层时,III 级围岩中拉应力区面积变化较小,II 级围岩中拉应力面积增加约 3.0 倍,IV 级围岩中拉应力区面积增加 5.0 倍。

3) II 级围岩中,无论软弱夹层分布于拱顶还是肩部,其对围岩塑性区的影响均很小,但侧墙软弱夹层对围岩塑性区影响较大,围岩塑性区深度约为无软弱夹层时的 2.0 倍;III 级围岩中,3 种部位软弱夹层对围岩塑性区深度均有明显影响,拱顶、肩部、侧墙塑性区深度分别约为无软弱夹层时的 2.0, 1.5 和 1.5 倍;IV 级围岩中,3 种软弱夹层分布部位对围岩塑性区影响不大。

4) 洞室拱顶分布有软弱夹层时,II、III 级围岩中,拱顶喷层会出现一定的拉应力,其值为无软弱夹层时的 6.0~7.0 倍;IV 级围岩中,拱顶、侧墙喷层应力增大 2.5~3.0 倍。对于肩部软弱夹层,II 级围岩中,其对左侧墙喷层应力影响不明显,但使拱顶的应力增加 5.0~6.0 倍;III 级围岩中,喷层应力约为无软弱夹层时的 3.0 倍,IV 级围岩中,左侧墙喷层应力约增加了 1.5 倍,拱顶、右侧墙喷层应力均增加了 2.5~3.0 倍。对于侧墙部位软弱夹层,II 级围岩中,软弱夹层使拱顶喷层压应力增加了 23.0~25.0 倍,III 级围岩中增加 8.0~10.0 倍;IV 级围岩时应力增加约 4.0~7.0 倍。

本研究结果已运用于四川紫坪铺水利枢纽工程 2# 泄洪洞的设计、施工中,并且提出在分布 L9 软弱夹层的洞段与部位增加 12 m 长的锚筋束加固,确保了工程的安全。

[参考文献]

- [1] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
Zhou W Y. Advanced rock mechanics [M]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 1993. (in Chinese)
- [2] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Gu D Z. Basement of rock engineering geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [3] 蒋爵光. 在不同构造应力作用下节理岩体隧道的稳定性 [J]. 西南交通大学学报, 1982(1): 20-23.

Jiang J G. Stability of tunnel in jointed surrounding rock under different tectonic stress [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1982(1):20-23. (in Chinese)

[4] 任德惠,张 平. 不同倾角结构面对洞室稳定性的影响 [J]. 煤炭学报,1988,13(3):51-53.

Ren D H,Zhang P. Influence of fault obliquity for stability of opening [J]. Journal of China Coal Society,1988,13(3):51-53. (in Chinese)

[5] 李新平. 裂隙分布对地下洞室稳定性的影响研究 [J]. 金属矿山,1997(3):10-15.

Li X P. Effect of joint distributions on stability of underground cavern [J]. Metal Mine,1997(3):10-15. (in Chinese)

[6] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社,1983.

Yu X F,Zheng Y R,Liu H H,et al. Stability Analysis of Underground Cavern [M]. Beijing,Coal Industry Press,1983. (in Chinese)

[7] Bruneau G, Hadjigeorgiou D B, Tylerb J, et al. Influence of faulting on a mine shaft-a case study:part I :Background and instrumentation [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2003(40):95-111.

[8] Bruneau G, Hadjigeorgiou D B, Tylerb J, et al. Influence of faulting on a mine shaft-a case study:part II :Numerical modelling [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2003(40):113-125.

[9] Kwon S, Wilson J W. Deformation mechanism of the underground excavations at the WIPP site [J]. Rock Mech Rock Eng,1999,32(2):101-122.

[10] Place D, Mora P. Numerical simulation of localisation phenomena in a fault zone [J]. Pure Appl Geophys,2000(157):1821-1845.

[11] Hao Y H, Azzam R. The plastic zones and displacements around underground openings in rock masses containing a fault [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20:49-61.

[12] 李 宁,陈 波,陈飞熊,等. 奥地利岩土工程软件 FINAL 的应用与开发 [J]. 西安公路交通大学学报,2000(1):27-33.

Li N,Chen B, Chen F X,et al. Development and application of the austrian software FINAL in China [J]. Journal of Xian Highway University,2000(1):27-33. (in Chinese)

[13] 张志强,李 宁,陈方方,等. 不同应力环境中软弱夹层对洞室围岩稳定性影响研究 [J]. 水力发电学报 2009,28(2):83-89.

Zhang Z Q,Li N,Chen F F,et al. Influence of weak interbed on stability and safety of underground at different confining pressure environment [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(2):83-89. (in Chinese)

[14] 段乐斋. 水利水电工程地下建筑物设计手册 [M]. 成都: 四川科学技术出版社,1993.

Duan L Z, Design handbook of underground construction in hydro-electric engineer [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Techincal Publishers,1993. (in Chinese)

(上接第 192 页)

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [J]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.

Bao S D. Agricultural chemistry analysis in soil [J]. 3rd ed. Beijing,China Agricultural Press,2000. (in Chinese)

[15] 肖 波,武菊英,王庆海,等. 四种禾本科牧草对官厅水库库滨荒地的培肥效应研究 [J]. 草业学报,2010,19(5):113-121.

Xiao B,Wu J Y,Wang Q H,et al. Effects of four gramineous pasture grasses on soil physicochemical properties in wasteland at the buffer zone of Guanting Reservoir [J]. Acta Prataculturae Sinica,2010,19(5):113-121. (in Chinese)

[16] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

Shao M A,Wang Q J,Huang M B. Soil physics [M]. Beijing: High Education Press,2006. (in Chinese)