

软弱夹层厚度模拟实用方法及其应用

张志强^{1,2}, 李 宁¹, 陈方方³, SWOBODA G⁴

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 帝国理工学院 地球科学与工程系, 英国 伦敦 SW7 2AZ; 3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710061; 4. 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: 围岩中分布的软弱夹层对地下洞室围岩稳定性、支护结构安全性有着重要的影响, 以软弱夹层的变形、强度等效为出发点, 基于接触面单元和软弱夹层影响带概念, 提出一种在固定的有限元网格中模拟不同厚度的软弱夹层的实用化模拟方法, 并初步验证该方法的合理性、正确性、实用性; 利用提出的模拟方法, 以奥地利岩土工程有限元分析软件 FINAL 为平台, 系统分析地下洞室分别位于 II, III, IV 级 3 种围岩, 软弱夹层分别分布在顶部、拱肩、边墙 3 种不同部位, 软弱夹层厚度分别为 $0.000D$, $0.005D$, $0.010D$, $0.020D$, $0.200D$ 5 种厚度等条件下, 软弱夹层对洞室围岩位移场、应力场、塑性区以及喷层结构受力的影响, 着重讨论不同软弱夹层厚度条件下, 围岩位移场、应力场、塑性区及喷层内力随夹层厚度的变化差异; 总结当前试验条件下, 软弱夹层厚度对地下洞室围岩稳定性与支护结构安全性影响的一般规律; 研究成果可望为地下洞室的规划、设计、施工, 尤其是遭遇软弱夹层等特殊工程条件下的设计、施工、维护等提供一定的参考与指导作用。

关键词: 岩石力学; 地下洞室; 软弱夹层; 夹层厚度; 围岩稳定性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 2637 - 08

A PRACTICAL METHOD TO SIMULATE THICKNESS OF WEAK INTERBED AND ITS APPLICATION

ZHANG Zhiqiang^{1, 2}, LI Ning¹, CHEN Fangfang³, SWOBODA G⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College, London SW7 2AZ, UK; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710061; 4. Institute of Structure Analysis, University of Innsbruck, Innsbruck, A - 6020, Austria)

Abstract: Such discontinuities as weak interbeds, faults, joint distributed in surrounding rock mass play an important and decisive role in the stability of surrounding rocks of underground openings and the safety of supporting system in most practical engineering cases. Based on the equal deformation and strength for discontinuities, a method is presented, which can be applied to simulate the thickness of weak interbed in the numerical test with unique FEM mesh; and its validity, reasonableness and practicability are validated via some numerical tests. This method is composed by the COJO element, which is a perfect element formed in geotechnical FEM software FINAL to simulate the properties of contact, and influenced zone of interbed that is a fine mesh zone with constant thickness in FEM mesh. In this method, The mechanical parameters for influenced element are altered in order to reflect the various thicknesses of faults. Based on this method, systematic numerical tests have been conducted to study the stability of a tunnel surrounded by different thickness weak interbed buried in

收稿日期: 2009 - 04 - 24; **修回日期:** 2009 - 07 - 04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479023, 50708034, 50879068); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040700008)

作者简介: 张志强(1976 -), 男, 博士, 2000年毕业于西安理工大学水利水电建筑工程专业, 现任讲师, 主要从事岩体力学、岩土工程数值分析与地下洞室工程现场监测等方面的教学与研究工作。E-mail: zhangzq87@hotmail.com

surrounding rock mass and the safety of supporting structures. These different thickness weak interbeds are with the thicknesses of $0D$, $0.005D$, $0.010D$, $0.020D$, $0.200D$, respectively, where D is span of underground opening; and the surrounding rock masses are graded in classes II, III, IV. Some qualitative and quantitative laws on the influence of weak interbeds with different thicknesses are summarized, especially the influences on the deformation, stress of surrounding rock mass, as well as the inner force of shotcrete supporting structure. These results may have reference and guide significance to the selection of location and layout of underground opening, the design of supporting system and the construction of underground openings, especially these tunnels stricken to the faults.

Key words: rock mechanics; underground opening; weak interbed; interbed thickness; stability of surrounding rock mass

1 引言

大量已建、在建的各类地下洞室工程的实践中屡见不鲜的塌方、大变形等工程事故表明：地下洞室围岩稳定性与支护结构安全性在很大程度上决定于广泛存在于围岩中的软弱结构面，软弱结构面的厚度、分布、组合、充填等特征直接制约着围岩的变形、破坏的发生以及发展过程^[1, 2]。地下洞室开挖后，围岩整体失稳、大变形、支护破坏等工程事故往往发生在围岩中分布有软弱结构面的部位，致使在进行地下洞室围岩稳定性分析与评价工作时必须对软弱结构面对洞室的影响进行全面而深入的分析。已有学者在这方面做过不少前期的工作，如蒋爵光^[3]研究了在不同构造应力作用下节理岩体隧道的稳定性；任德惠和张平^[4]研究了具有不同倾角的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]对这方面的工作进行了较为全面的总结。国外，这方面的研究也有大量的开展，如 G. Bruneau 等^[7~10]。由于当时数值分析手段较为落后，已完成的研究工作往往是在对某个具体工程调查的基础上，通过现场观测方法研究了夹层对洞室围岩稳定性与支护结构安全性影响，并对其规律进行总结分析，所得到的结论多是定性的、特定条件下的，而进行软弱夹层空间产状(走向、倾角)、间距、充填、厚度等因素对洞室围岩稳定性影响系统的定量研究成果鲜有报道。随着数值分析方法的迅速发展^[11]，张志强等^[12~15]利用奥地利岩土工程分析平台 FINAL，研究了不同分布部位和分布距离的软弱夹层对地下洞室围岩稳定性与支护结构安全性的影响，初步总结了一些量化成果，但软弱夹层厚度对地下洞室围岩稳定性的影响等研究还未见报道。

软弱夹层的厚度(宽度)是软弱夹层的重要特征之一，研究成果^[1, 2]表明，在不同地质条件下，软弱夹层的厚度有很大的离散性，从几毫米到几米，也有厚达几十米，称之为软弱夹层带。数值试验中，对于软弱夹层厚度的模拟还没有十分理想的方法，最直接的方法是利用结构面单元和充填物单元进行模拟，但是这样方法只能用于尺寸相对较大的软弱夹层。如果软弱夹层的厚度较小时，为确保不产生畸形的网格，有限元网格剖分工作将会出现很大的困难，尤其是充填物单元部分。为解决此问题，本文以软弱夹层的变形和强度等效为出发点，基于接触面单元和软弱夹层影响带概念，推导一种简单并能反映软弱夹层强度和变形特性的模拟方法，实现了同一有限元网格中模拟不同厚度软弱夹层，并利用该模拟方法研究了软弱夹层厚度对地下洞室围岩稳定性以及支护结构受力的影响。与前人提出的方法^[1]相比，本文所提出方法，不需难以测定的参数法向刚度系数 K_n 和切向刚度系数 K_s ，取而代之的是实际软弱夹层的几何尺寸、充填物的变形参数、强度参数以及岩体的变形参数，增加了此法的实用性。

2 夹层厚度模拟实用方法的建立

从工程角度来看，软弱夹层表现出的性质主要为不连续性和大变形特性。若数值仿真试验分析中能恰当等效反映出这两种性质，也就达到了真实模拟软弱夹层对洞室围岩与支护结构影响的目的。基于这样的思路，本文以软弱夹层变形和强度等效为出发点，推导一种能在同一有限元网格中实现对不同软弱夹层厚度模拟的方法。原理如下：

不连续性的模拟：采用接触面单元模拟软弱夹层的不连续性。接触面单元可以表现出：(1) 软弱

夹层受拉、受压后的张开、滑移等不连续变形; (2) 软弱夹层受拉张开后产生的变形。

充填物大变形的模拟: 采用断层影响带(网格中一固定宽度的充填物单元)模拟软弱夹层充填物引起的变形, 可表现出受压条件下软弱夹层内软弱充填物的连续变形。

通过调整影响带充填物单元的变形和强度参数来模拟不同厚度软弱夹层。如表 1 所示。

表 1 软弱夹层的性质以及实用化模拟方法原理
Table 1 Properties of weak interbeds and their practical simulation method

性质	软弱夹层的变形	软弱夹层的强度
模拟内容	(1) 软弱夹层内部裂缝张开、滑移的不连续变形 (2) 软弱夹层内软弱充填物的连续变形	软弱夹层内软弱充填物的强度或 0 倍洞跨时的结构面强度
模拟方法	接触面单元张开、滑移变形以及影响带单元变形	接触面单元强度

为了确保接触面和影响带的组合能够反映原软弱夹层变形与强度性质, 并且在强度和变形的大小量值上相等, 还应当对接触面单元和影响带单元的力学参数进行确定。

本文采用接触面单元模拟软弱夹层内部裂缝张开、滑移, 所以接触面单元的强度参数可直接选取充填物的强度参数或无厚度结构面的强度参数(摩擦角和黏聚力)。影响带内的单元变形参数应当根据实际软弱夹层厚度, 设定影响带厚度以及夹层充填物变形模量。下面对接触面单元进行简要介绍, 并对影响带变形模量计算公式进行推导。

2.1 接触面单元

在 Katona 工作的基础上提出的一种新接触面单元 - COJO 单元^[16]。该单元直接选取接触面上的法向接触力作为附加未知量, 同时, 采用六结点等参元模拟接触面复杂的几何形状, 克服了传统接触面单元输入参数难以确定的不足, 如图 1 所示。

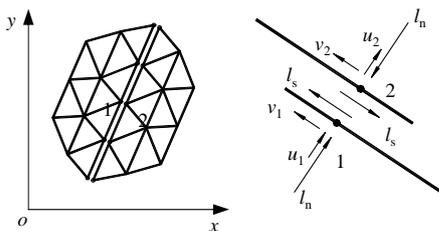


图 1 不连续面上的接触面单元

Fig.1 Interbed element along the interface of two contact bodies

该单元必须满足的几何和静力附加约束方程为

$$\left. \begin{aligned} \{C^* \ R\} \begin{Bmatrix} u \\ l \end{Bmatrix} &= f^* \\ C^* &= \{-T^* \ T^*\} \\ f^* &= \begin{Bmatrix} 0 \\ a^* \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: R 为与接触状态有关的矢量; u, l 分别为增量结点位移矢量和增量结点接触应力矢量; T^* 为单元闭合、滑动、开裂的状态参数; a^* 为给定的结点相对位移或结点接触应力矢量。

根据接触面闭合、滑动、开裂 3 种状态下的约束方程和结点接触应力与结点荷载之间的关系联立, 则得

$$\begin{bmatrix} 0 & C^T \\ C^* & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ l \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ a^* \end{Bmatrix} \quad (2)$$

可令,

$$k_c = \begin{bmatrix} 0 & C^T \\ C^* & R \end{bmatrix}, \quad f_c = \begin{Bmatrix} F \\ a^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

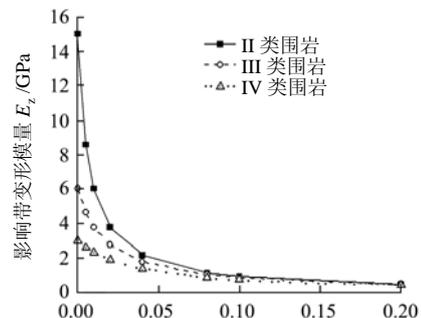
式中: k_c, f_c 分别为接触面单元的等效刚度矩阵和等效结点荷载向量, 可用常规的有限元集成规则迭加到总刚度矩阵和总荷载向量中。

2.2 影响带变形参数

根据变形等效, 推得软弱夹层影响带变形模量计算公式为

$$E_z = \frac{T_z(E_r E_f)}{(T_z - T_f)E_f + T_f E_r} \quad (4)$$

式中: T_z, T_f 分别为有限元网格中所设软弱夹层影响带厚度和实际软弱夹层厚度; E_f, E_r 分别为实际软弱夹层充填物和围岩中岩块的变形模量。根据式(4), 得出了不同围岩级别^[17]条件下, 所模拟夹层厚度与影响带变形模量的关系曲线, 如图 2 所示。



软弱夹层厚度/m

图2 影响带变形模量与模拟软弱夹层厚度关系曲线

Fig.2 Relation curves between modulus of influence zone and thickness of weak interbed

图2表明：影响带变形模量与夹层厚度呈明显的非线性关系，且不同围岩类别中影响带变形模量与夹层厚度呈现出不同的关系曲线。

3 软弱夹层厚度影响分析模型与方案

拟定分析地下洞室为跨度 10 m，高 12 m，埋深 100 m 的城门洞形隧洞。初始应力场按自重应力场施加。分析过程中，有限元模型^[11]包括围岩单元(LST 单元)，开挖单元(LST 单元)，喷射混凝土层单元(BEAM6 单元)以及接触面单元(COJO 单元)，有限元网格以及夹层分布如图 3 所示；在数值仿真试验中，岩体采用弹、塑性本构关系曲线以及 Mohr-Columb 强度准则，而对喷层采用非线性弹性本构模型。

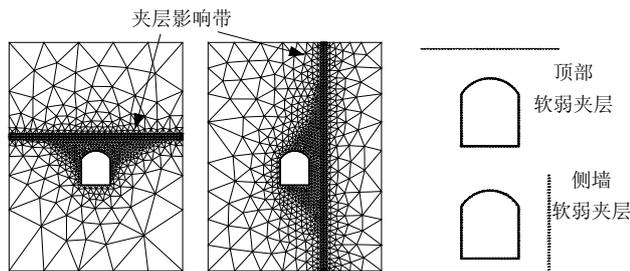


图3 有限元网格以及夹层分布图

Fig.3 Mesh and distribution of weak interbed

选择软弱夹层分布在洞室拱顶部位和边墙部位 2 种情况进行分析，而软弱夹层厚度分别选取为 0，

0.005D, 0.01D, 0.02D 和 0.2D(D 为隧洞洞跨)共计

5 种。根据段永斋^[17]的研究，岩体，喷层以及软弱夹层的力学、物理参数按表 2 所示进行选取。分析模型中软弱夹层影响带厚度设定为 2 m，根据式(4)可以得到 5 种软弱夹层厚度条件下软弱夹层影响带变形模量。

4 软弱夹层厚度对洞室稳定性与安全性影响分析

4.1 不同厚度的软弱夹层对洞周位移的影响

洞周围岩收敛位移是评判围岩稳定状态的重要指标，通过对洞周围岩位移进行分析，可以预测围岩的稳定性态。为直观表现软弱夹层对洞周围岩位移与变形的影响，将有夹层条件下的洞周关键点(左边墙中点、拱顶中点、右边墙中点)位移除以无夹层条件下的位移后得到一量纲一的比值，该比值可直接反映夹层对洞室位移的影响，本文将其定义为影响系数。图 4 中给出了 II, III, IV 级围岩条件下隧洞左边墙中点、拱顶中点、右边墙中点的特征位移比值随顶部夹层厚度变化的曲线。这些曲线反映出各级围岩中不同厚度的软弱夹层对洞室不同部位的位移影响，主要呈现出以下特点：

洞室位于 II 级围岩中，不同厚度的软弱夹层条件下左边墙中点、拱顶中点、右边墙中点的位移比值区间分别为 0.64~0.62, 1.86~2.15, 0.64~0.63；III 级围岩中，位移比值区间分别为 0.71~0.72, 1.86~2.18, 0.71~0.72；IV 级围岩中，位移比值区间分别为 1.11~1.16, 2.18~2.61, 1.10~1.18。

表 2 围岩与支护材料物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of surrounding rocks and supporting material

介质	变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	容重/(kN · m ⁻³)
围岩	II 类	15.00	0.22	1.8	50.0	27
	III 类	6.00	0.28	1.2	40.0	26
	IV 类	3.00	0.32	0.8	28.0	25
软弱夹层	0.10	0.40	0.6	23.0	0.0	23
0	6.00	0.40	0.6	23.0	0.0	23
影响带	0.005D	2.42	0.40	0.6	23.0	23
	0.010D	1.52	0.40	0.6	23.0	23
	0.020D	0.87	0.40	0.6	23.0	23
	0.200D	0.10	0.40	0.6	23.0	23

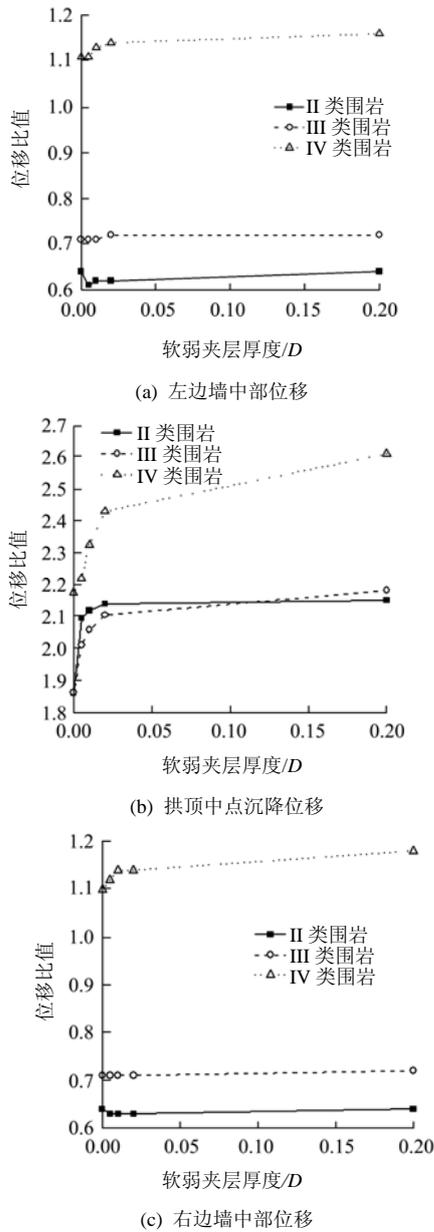


图 4 不同厚度软弱夹层对洞周关键点位移值影响曲线
 Fig.4 Displacement and its ratio of displacement with weak interbed and without interbed

在这些位移比值区间, 比值小于 1.0, 位移比无夹层时小, 反之, 位移比无夹层时大。比值不同的变化反映了厚度对位移以及位移比值的影响。

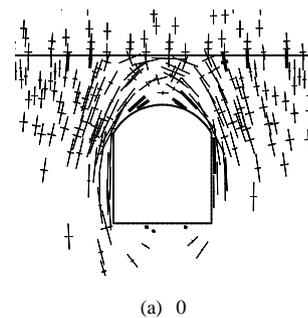
从各级围岩中不同厚度条件下洞周关键部位的位移比值分析中不难发现: 位于不同级围岩中的夹层对地下洞室关键位移影响有显著的差别, II, III, IV 级围岩中, 左边墙中点的位移比值分别为 0.64~0.62, 0.71~0.72, 1.11~1.16, 也就是说, 在 II, III

级围岩中有夹层情况的位移仅约为无夹层时的 64%, 71%, 而 IV 级围岩中有夹层情况的位移为无夹层时的 111%; 位于相同级别围岩相同厚度的夹层对地下洞室不同部位的影响也有显著的差别, 同样是 III 级围岩中, 左边墙中点、拱顶中点、右边墙中点的位移比值区间分别为 0.71~0.72, 1.86~2.18, 0.71~0.72, 顶部增大, 而侧墙减小; 位于相同级别围岩中不同厚度的夹层对地下洞室关键位移影响有显著的差别, 同样是 IV 级围岩中, 也是对顶部位移的影响, 夹层厚度从无厚度增大到 0.2 倍洞跨, 位移比值从 2.18 增大到 2.61。

从图 4 可以看出: (1) 分布于拱顶不同厚度的软弱夹层对地下洞室顶部的位移影响最大, 随夹层厚度的增加, 左右侧墙中点位移变化较小(见图 4(a), (c)), 而顶部位移变化明显(见图 4(b)); (2) 夹层厚度对关键部位位移的影响呈现出显著的非线性关系, 夹层从无厚度增加到 0.02 倍洞跨位移变化剧烈, 而从 0.02 倍洞跨增大到 0.2 倍洞跨位移变化相对平缓(见图 4(b)); (3) 顶部夹层时, 左右侧墙的位移比值小于 1.0, 而顶部的位移比值大于 1.0, 说明顶部夹层使顶部位移增大而侧墙位移减小。

4.2 不同厚度的软弱夹层对应力场、塑性区的影响

图 5, 6 分别给出了分布有不同厚度的软弱夹层洞室开挖后围岩的应力场和塑性区图。从图 5 中可以看出分布有不同厚度软弱夹层的岩层中开挖地下洞室后形成的应力场有以下特点: (1) 围岩出现明显的拉应力区(图中粗黑矢量区), 主要分布在隧洞顶部和两边墙向上对应的夹层附近; (2) 随夹层厚度增加, 拉应力区分布范围越大; (3) 夹层厚度对边墙和底板的应力分布规律与量值影响很小。



(a) 0

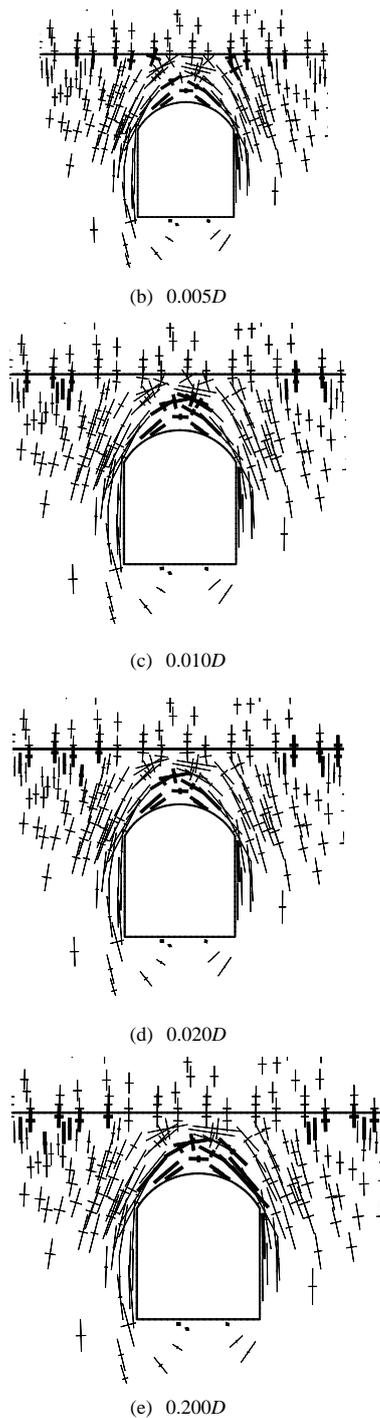


图5 不同情况下洞室开挖完成后围岩应力场
Fig.5 Stress vector diagram of the surrounding rock with different weak interbeds

图6列出了夹层厚度为0, 0.005D, 0.010D, 0.020D和0.200D这5种情况下围岩塑性区图。从图6中可以看出: (1) 塑性区主要分布在隧洞周围和两边墙向上对应的夹层附近; (2) 随夹层厚度增加, 隧洞顶部、边墙部位以及两边墙向上对应的夹层附近塑性区分布范围增大; (3) 夹层厚度对拱肩

和底板的塑性区分布影响很小。

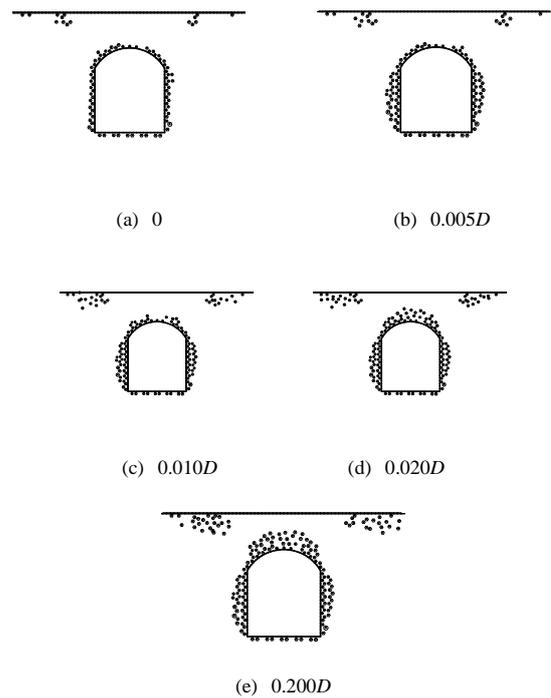


图6 不同情况下洞室开挖完成后围岩塑性区
Fig.6 Plastic zones of the surrounding rock with different weak interbeds

4.3 不同厚度的软弱夹层对喷层内力、应力的影响

软弱夹层对喷射混凝土层的影响主要表现在喷层轴力对弯矩大小、分布的影响。喷层应力起决定性作用, 喷射混凝土层中的应力水平是判断喷射混凝土是否开裂与破坏的重要指标, 表3中列出了5种情况下喷射混凝土层特征部位的应力值。

不同情况下喷射混凝土层轴力分布见图7。从图中可以看出: (1) 拱顶、左右侧墙中点以及底板等喷层分布的轴力为拉, 而其他部位轴力为压; (2) 左右边墙与顶拱部结合处出现了最大的压轴力; (3) 不同厚度的软弱夹层对喷层轴力分布规律没有产生明显影响; (4) 不同夹层厚度条件下喷层内的轴力量值变化明显。见图7(a)~(e)所示。

表3 不同情况下喷层的应力最大、最小值表

Table 3 Maximum stress and minimum stresses in shotcrete cross-section

夹层厚度	左边墙中点/MPa		拱顶中点/MPa		右边墙中点/MPa	
	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
0	-0.18	-0.25	0.63	0.45	-0.20	-0.28
0.005D	-0.35	-0.44	0.82	0.59	-0.35	-0.45

0.010D	-0.38	-0.47	0.94	0.69	-0.42	-0.52
0.020D	-0.44	-0.53	1.03	0.76	-0.46	-0.56
0.200D	-0.52	-0.62	1.29	0.99	-0.51	-0.62

种情况下不同厚度夹层方案下喷层各特征部位的应力最大和最小值。可以看出：在相同分布距离下，顶部夹层对喷层特征部位应力的影响较边墙夹层显

如表 3 所示，给出了夹层分布在拱顶和边墙 2

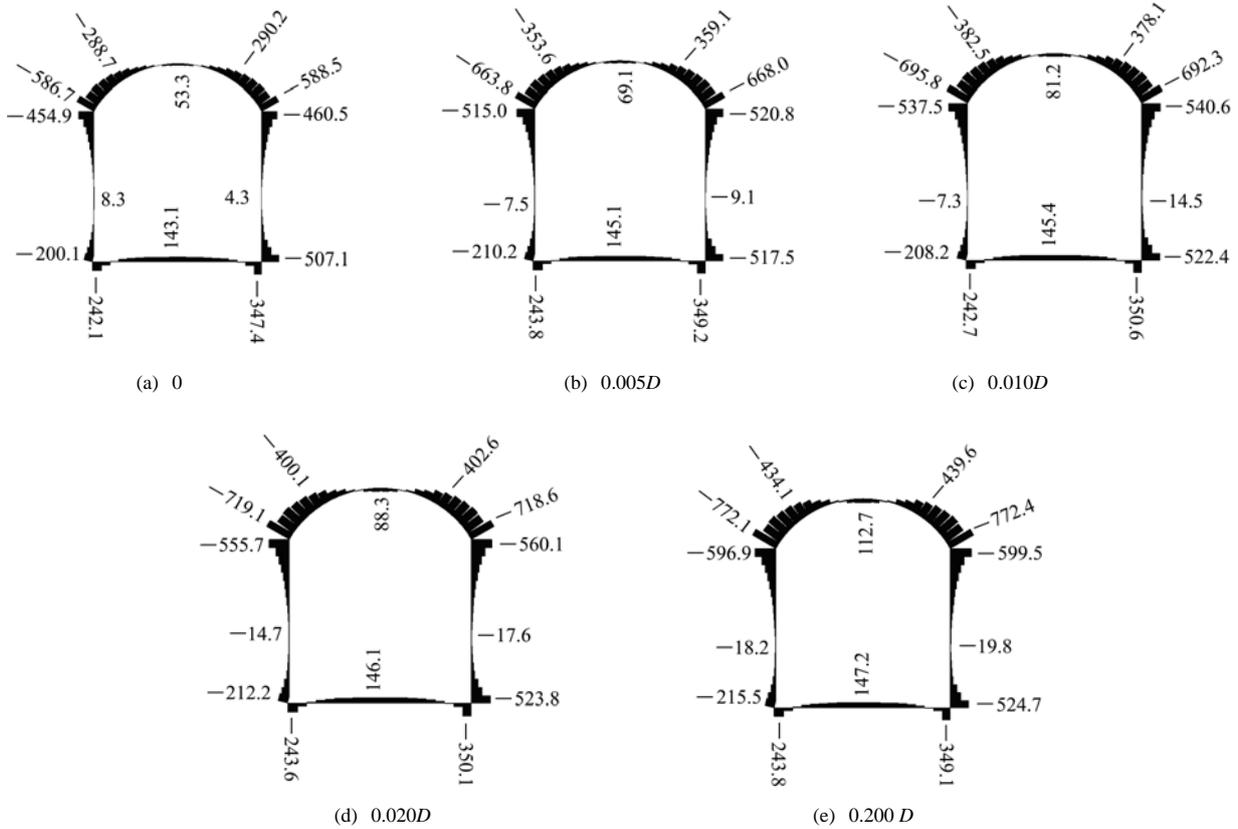


图 7 不同情况下喷射混凝土层轴力分布图(单位: kN)

Fig.7 Shotcrete axial force under different cases(unit: kN)

著。对于顶部喷层，夹层厚度分别为 0, 0.005D, 0.010D, 0.020D 和 0.200D 时，喷层最大拉应力值分别为 0.63, 0.82, 0.94, 1.03 和 1.29 MPa，表明顶部夹层对喷层应力的影响十分明显，应当加以重视。若出现大于 1.00 MPa 的拉应力，就应当采取一定的措施对围岩或支护结构进行加固或补强。

5 结 论

本文以变形和强度等效为出发点，基于接触面单元和软弱夹层影响带的概念，提出了一种在同一有限元网格中模拟不同尺度软弱夹层的简化、实用化方法，并进一步验证了所提方法的合理性、正确性；利用奥地利大型岩土工程有限元分析软件 FINAL，系统分析了不同级别代表性围岩中，软弱夹层厚度对地下洞室围岩稳定性的影响。主要成果

如下：

- (1) 以变形和强度等效为出发点，基于接触面单元和软弱夹层影响带，提出了一种在同一有限元网格中模拟不同尺度软弱夹层的简化模拟方法。
- (2) 利用 COJO 接触面单元以及影响带，将所建立的厚度软弱夹层模拟方法在 FINAL 分析平台上实现。
- (3) 在数值试验条件下，夹层厚度对洞室围岩位移、应力、塑性区以及喷层受力的影响表现出如下规律：分布在拱顶不同厚度的软弱夹层对地下洞室顶部的位移影响最大，且随夹层厚度的增加，左右侧墙中点位移变化较小而顶部位移变化明显；夹层厚度对关键部位位移的影响呈现出显著的非线性关系，0 倍洞跨增加到 0.02 倍洞跨位移变化剧烈，而从 0.02 倍洞跨增大到 0.20 倍洞跨位移变化相对平缓；顶部夹层使顶部的位移增大，而侧墙的位移减

小；随夹层厚度增加，拉应力区分布范围越大；夹层厚度对边墙和底板的应力分布规律与量值影响很小；不同厚度的软弱夹层对喷层轴力分布规律没有产生明显影响但喷层轴力量值变化明显。

参考文献(References):

- [1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993. (ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water 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 Dezhen. 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 Jueguang. Stability of tunnel in jointed surrounding rock under different tectonic stresses[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 Dehui, ZHANG Ping. Influence of fault obliquity on 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 Xinping. 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 Xuefu, ZHENG Yingren, LIU Huaiheng, et al. Stability analysis of underground cavern[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.(in Chinese))
- [7] BRUNEAU G, TYLER B D B, POTVIN Y, et al. Influence of faulting on a mine shaft—a case study: part I—background and instrumentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 95 - 111.
- [8] BRUNEAU G, HUDY M A B, HADJIGEORGIOU J, et al. Influence of faulting on a mine shaft—a case study: part II—numerical modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 113 - 125.
- [9] KWON S, WILSON J W. Deformation mechanism of the underground excavations at the WIPP site[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(2): 101 - 122.
- [10] DAVID P, PETER M. Numerical simulation of localisation phenomena in a fault zone[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11): 1 821 - 1 845.
- [11] 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 Ning, CHEN Bo, CHEN Feixiong, et al. Development and application of the Austrian software FINAL in China[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, (1): 27 - 33.(in Chinese))
- [12] 张志强. 软弱夹层对地下洞室稳定性影响的数值试验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2003.(ZHANG Zhiqiang. Numerical test on influence of weak interbed on underground tunnel[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese))
- [13] 张志强, 李宁, 徐彬. 大规模引水隧洞群施工方案三维有限元分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 83 - 87.(ZHANG Zhiqiang, LI Ning, XU Bin. 3D finite element analysis of excavation sequence of large-scale power tunnels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(6): 83 - 87.(in Chinese))
- [14] 张志强, 李宁, SWOBODA G. 软弱夹层分布部位对洞室稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 252 - 3 257. (ZHANG Zhiqiang, LI Ning, SWOBODA G. Influence of weak interbed distribution on stability of underground openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 252 - 3 257.(in Chinese))
- [15] 张志强, 李宁, 陈方方, 等. 不同分布距离的软弱夹层对洞室稳定性的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 363 - 1 368.(LI Ning, ZHANG Zhiqiang, CHEN Fangfang, et al. Influence of weak interbed distributed at different intervals on underground opening stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 363 - 1 367.(in Chinese))
- [16] 李宁, 张志强, 陈方方. 总干闸胸墙裂缝危害性及处理措施分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 537 - 1 541.(ZHANG Zhiqiang, LI Ning, CHEN Fangfang, et al. Analysis for hazard of crack lying in parapet of a water gate and its treatments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1 537 - 1 541.(in Chinese))
- [17] 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 Lezhai. Design handbook of underground construction in hydro-electric engineer[M]. Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishers, 1993.(in Chinese))