

水布垭电站地下厂房软岩置换效果初步分析

Analysis on effect replacement of softrock of Shuibuya underground powerhouse

罗先启^{1,2}, 葛修润², 郑 宏²

(1. 三峡大学 土木学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为考虑地形地貌以及节理、断层等岩体构造对原始地应力场的影响, 首先选用较大计算范围以模拟水布垭地下厂房地应力场。然后取较小计算范围进行二次细分网格, 以便较准确地模拟地下厂房分步开挖的动态过程。二次细分网格位移边界值采用等参逆变换法由一次网格的计算结果插值得到。软硬相间岩层中地下厂房稳定性分析采用弹塑性脆性理论。重点对地下厂房中 P_{1q}^3 软岩及黄龙剪切带置换效果进行了分析, 并对地下厂房的布置及软岩置换提出了建议。

关键词: 等参逆变换; 弹塑性脆性理论; 软岩置换; 地下厂房; 稳定性分析

中图分类号: TV 223.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0463-05

作者简介: 罗先启(1965-), 男, 博士, 教授, 1986 年毕业于天津大学水利工程系, 从事岩土工程、水工结构方面的教学科研工作。

LUO Xian-qi^{1,2}, GE Xiurun², ZHENG Hong²

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A large model was used to simulate the effects of terrain, physiognomy etc. to original ground stress. A small model, in which the mesh was refined, was used to precisely simulate excavation of the underground powerhouse. The displacement boundary of the small model used the result of the large model, which was interpolated with numerical inverse isoparametric mapping. Stability of a ground powerhouse in soft-hard interlayered rock mass was analyzed with elastic-plastic-brittle theory. The effect of replacement of soft rock P_{1q}^3 and Huanglong shear zone was emphatically analyzed, and the layout of the underground powerhouse and replacement of soft rock were suggested.

Key words: numerical inverse isoparametric mapping; elastic-plastic-brittle theory; soft rock replacement; ground powerhouse; stability analysis

1 水布垭地下厂房概况^{*}

水布垭电站地下厂房由主厂房、引水洞、母线洞、尾水洞等洞室群组成。共设有 4 台机组。在初步设计中主厂房平面尺寸为 141 m × 23 m, 横剖面为城门洞型, 断面尺寸 23 m × 68 m(宽 × 高)。引水洞为一机一洞, 上平段与下平段高压段之间由 60° 的斜井段相接。上平段洞径直径为 8.5 m, 下平段和斜井段洞径为 6.9 m, 衬砌厚度 $t = 0.8$ m, 开挖断面直径 8.5 m, 下平段长 $L = 33.14$ m。4 条引水洞间距 24 m, 引水隧洞轴线与主厂房轴线夹角为 70°。母线洞位于主厂房下游侧, 垂直厂房轴线, 平行布置 4 条, 城门洞型, 断面尺寸 7 m × 6 m, 衬砌厚度 $t = 0.5$ m, 开挖断面 8 m × 7 m, 水平段长 25 m, 然后经直径 5 m 的母线竖井和断面为 5 m × 6 m 的水平母线洞将母线引入地面变电所, 与主变相接。尾水洞垂直主厂房轴线呈直线布置, 从高边坡下游出口。尾水洞为马蹄型衬砌断面, 尺寸为 8.5 m × 12.97 m, 衬砌厚度 $t = 0.8$ m, 开挖断面 10.1 m × 14.57 m, 4 条尾水洞间距 25.5 m。

厂房位于峡谷河段右岸岸坡山体中。其两端有张性大断层 F_2 和 F_3 贯穿通过。 F_2 、 F_3 两相向对倾, 在河谷横剖面上, F_2 、 F_3 之间的岩体上宽下窄。在平面上, 南西窄, 北东宽。地下厂房洞群布置于 F_2 、 F_3 所夹的

三角地带, 上游受 F_2 、 F_3 两断层的制约, 下游受 P_{1q}^4 分布高程的控制。因此, 主厂房布置四面受限, 可选择余地小。厂区地层从上至下由矛口组(P_{1m})、栖霞组第一至第十五段($P_{1q}^1 \sim P_{1q}^{15}$)、马鞍山组(P_{1ma})、黄龙组(C_{2h})、泥盆系写经寺组(D_{3x})等岩层构成, 如图 1 所示。地层产状平缓, 软硬相间, 软岩所占比例高, 且软岩中层间剪切带发育。尤其是地下厂房正好坐落在写经寺组(D_{3x})页岩、粉沙岩、泥灰岩、马鞍山组(P_{1ma})煤系、灰质页岩等软岩及黄龙剪切带(F_{205})之中。故大规模、大断面洞群开挖, 软岩成洞问题十分突出。

2 水布垭地下厂房稳定性分析中存在的主要问题

首先是软硬相间岩体的计算模型问题。马鞍山煤系, 黄龙剪切带穿过地下厂房尾水管附近, 整个地下厂房座落在上硬下软的岩体环境中。地下厂房周围围岩软硬相间, 计算模型中如何既考虑软弱岩体的性质, 同时考虑岩石的脆性性质。由峰值强度面到残余强度面的应力路径问题一直是有限元分析中争论的一个焦点。自从 Zienkiewicz 提出应力转移法之后的 20 余年

* 初稿收稿日期: 2001-08-08

清稿收稿日期: 2002-12-19

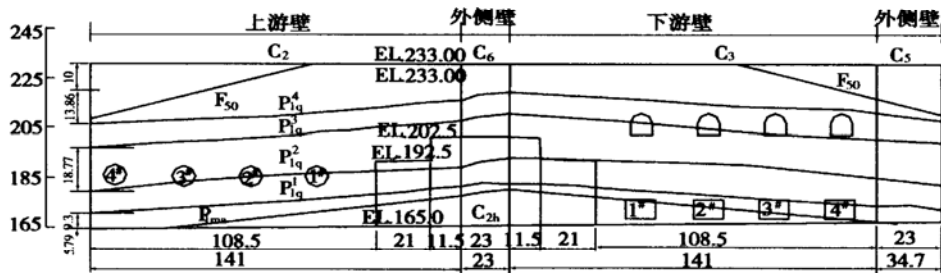


图1 初步设计阶段主厂房侧壁工程地质展示图

Fig. 1 Engineering geologic map at powerhouse

内,人们至少提出过4种假想的应力路径,显然这不仅在理论上过于粗糙,更糟的是不同的应力路径所得的结果往往相去甚远,使计算者和设计单位都无所适从。为了回避应力路径的不确定性问题,少数学者仍将脆性破坏过程作为连续的应变软化模型来处理,但是这显然有违于岩体的变形特征。再者,即使将其视为软化模型,也不可能取真实的软化段来进行本构积分。另外,值得一提的是,用软化模型取代脆塑性模型在使用上也是偏于危险的。

其次是原始应力场的模拟问题。地下洞室的计算,首先需确定原始地应力。水布垭地下厂房所处山体破碎,卸荷严重,原始地应力以自重应力场为主。这种情况下原始地应力与地形地貌以及节理、断层等岩体构造密切相关。如果既要考虑地形地貌以及节理、断层等岩体构造的宏观影响,又要模拟洞室局部开挖过程对围岩稳定的局部作用,无疑计算规模太大。二次细分网格法可以很好解决此类问题。

第三是大规模、大断面洞群开挖的计算机仿真数值求解问题。即使采用二次细分网格法,计算规模仍然很大。工程离散化后节点、单元数近3万,计算速度与精度显得尤其重要,本文采用改进的PCCG求解器,即改进的共轭梯度法^[1],较好地解决了软硬相间带来的病态问题和计算速度与精度问题。

3 二次细分网格法与等参逆变换插值法

3.1 二次细分网格法

在有限元计算中,确定计算范围时,理论上计算范围越大越好。在岩土工程中,一方面,由于要考虑地形地貌以及节理、断层等岩体构造对计算结果的影响,计算范围往往取比较大。受计算规模的限制,这时有限元网格常常比较粗。另一方面,由于计算所关心的建筑结构(如:露天开挖、岩体支护结构、地下洞室)尺寸较小,往往需要有限元网格比较细。为兼顾上述两方面要求本文提出二次细分网格法。

二次细分网格法的基本思想是,为考虑地形地貌

以及节理、断层等岩体构造对计算结果的影响,取比较大的计算范围,有限元网格较粗,对地形地貌以及节理、断层而言,网格是满足要求的,此网格称一次网格。按此网格计算初始应力场及位移场,然后取出建筑结构及其附近一定范围的局部,进行二次细分网格,重点研究由于开挖等原因对建筑结构的力学响应。二次细分网格的边界条件为计算二次细分网格原始应力时为位移边界,位移边界值为一次网格的计算结果。在第一次开挖及以后的开挖中为固定约束。有限元迭代格式为:

$$K \delta u^i = \delta f^i, \quad (1)$$

$$\Delta u = \sum \delta u^i, \quad (2)$$

$$\delta u^0(j) = \Delta u_j, j = 0, \quad (3)$$

$$\delta^i(j) = \begin{cases} \Delta u_j, & i = 0, \\ 0, & i > 0. \end{cases} \quad (4)$$

二次细分网格位移边界值为一次网格的计算结果,但二次细分网格的单元节点与一次网格不同。将一次网格的计算结果转换为二次细分网格边界值有很多插值方法,本文采用等参逆变换插值法^[2],这种插值法迭代格式简明,插值精度很高。

3.2 等参逆变换插值法

等参单元的核心是坐标变换,即把整体坐标系 $x-y-z$ 中的不规则单元用局部坐标 $\xi-\eta-\zeta$ 的规则单元来表示,使单元描述归于统一的格式,单元的几何分析和力学分析都均可在 $\xi-\eta-\zeta$ 空间中进行,从而使分析大为简化。

逆变换是指局部坐标系 $\xi-\eta-\zeta$ 下的坐标到整体坐标系 $x-y-z$ 下的坐标的变换,即已知坐标变换 $M: L \rightarrow G$, 当时 $\tilde{x} \in G$, 求 $\tilde{\zeta} = M^{-1}(\tilde{x}) \in L$ 。

在三维等参有限元分析中,有坐标变换:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i, \\ y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i, \\ z = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i, \end{cases} \quad (5)$$

式中, N_i 为形函数, x_i, y_i, z_i 为单元节点的坐标。式(5)可表示为

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) \tilde{x}_i. \quad (6)$$

将上式按照级数在某点 (ξ_0, η_0, ζ_0) 展开, 保留线性项, 写成张量形式, 有

$$\tilde{x} \approx \tilde{x}_0 + \tilde{J}_0(\xi - \xi_0), \quad (7)$$

式中, J 为 Jacobi 行列式。式(7)也可以写成

$$\begin{aligned} x &\approx x_0 + \left. \frac{\partial x}{\partial \xi} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\xi - \xi_0) + \left. \frac{\partial x}{\partial \eta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\eta - \eta_0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial x}{\partial \zeta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\zeta - \zeta_0), \\ y &\approx y_0 + \left. \frac{\partial y}{\partial \xi} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\xi - \xi_0) + \left. \frac{\partial y}{\partial \eta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\eta - \eta_0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial y}{\partial \zeta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\zeta - \zeta_0), \\ z &\approx z_0 + \left. \frac{\partial z}{\partial \xi} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\xi - \xi_0) + \left. \frac{\partial z}{\partial \eta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\eta - \eta_0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial z}{\partial \zeta} \right|_{(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)} (\zeta - \zeta_0). \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(7), 可以得到

$$\tilde{\xi} \approx \tilde{\xi}_0 + \tilde{J}_0^{-1}(\tilde{x} - \tilde{x}_0), \quad (9)$$

式中, J^{-1} 为 Jacobi 逆矩阵。由上式可以得出单元内任意点 $\tilde{x}_p$ 的局部坐标的迭代公式

$$\tilde{\xi}_{k+1} \approx \tilde{\xi}_k + \tilde{J}_k^{-1}(\tilde{x}_p - \tilde{x}_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (10)$$

式中, $\tilde{\xi}_k$ 为 $\tilde{\xi}$ 的第 k 次近似值。经过反复的迭代, 当 $\|\tilde{x}_p - \tilde{x}_k\| \leq \varepsilon$ 或者 $\|\tilde{\xi}_p - \tilde{\xi}_k\| \leq \varepsilon$ 时 (ε 为控制误差的一个小值), 可以认为局部坐标已经近似地求出, 即

$$\tilde{\xi}_p = \tilde{\xi}_k. \quad (11)$$

求出单元内任意一点 $\tilde{x}_p$ 后, 就可以用如下的公式求得这一点的物理量值了。设单元节点处的物理量值为 ϕ_i , 则有

$$\phi_p = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i, \quad (12)$$

式中 N_i 为形函数, n 为节点数, ϕ_p 为 $\tilde{x}_p$ 点的物理量值。

4 脆塑性岩石本构模型

对于脆性岩石, 设 $F(\sigma) = 0$ 及 $f(\sigma) = 0$ 分别为峰值强度面和残余强度面, 并设应力点由某一初始弹性状态加载到 $F(\sigma) = 0$ 上的某一点 A (如图2所示)^[3,4]。当满足加载条件时,

$$L \Delta \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl} d\sigma_{kl} > 0. \quad (13)$$

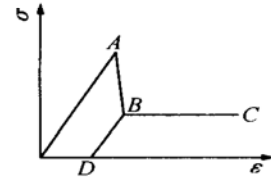


图2 脆塑性计算模型

Fig. 2 Plastic-brittle model of calculation

应力将发生突变而跌落至 $f(\sigma) = 0$ 上的某点 B 。下面我们将基于塑性位势理论, 给出确定 B 点的方法^[5,6]。

由于材料的脆性特性, 而使得屈服面在应力空间中有一非连续的变化, 因而也就产生非微分量的塑性应变增量 $\Delta \varepsilon_y^p$, 又因脆塑性材料仍为依留辛材料, 因而可以认为跌落时塑性应变的方向仍满足塑性位势理论, 即

$$\Delta \varepsilon_y^p = \Delta \lambda \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \right|_A, \quad (14)$$

其中 $\Delta \lambda$ 是塑性流动因子。由于

$$\Delta \varepsilon_y = \Delta \varepsilon_y^e + \Delta \varepsilon_y^p, \quad (15)$$

考虑到跌落过程的全应变增量 $\Delta \varepsilon_y = 0$, 得

$$\Delta \varepsilon_y^e = -\Delta \varepsilon_y^p. \quad (16)$$

再由 $\Delta \sigma_y = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} = -D_{ijkl} \Delta \varepsilon_y^p$, (17)

得跌落过程的应力增量

$$\Delta \sigma_y = \sigma_y^B - \sigma_y^A = -\Delta \lambda D_{ijkl} \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right|_A = -\Delta \lambda \tau_{ij}^A, \quad (18)$$

从而得 $\sigma_y^B = \sigma_y^A - \Delta \lambda \tau_{ij}^A$. (19)

其中 $\tau_{ij}^A \triangleq D_{ijkl} \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right|_A$. (20)

至于 $\Delta \lambda$ 则可由下式决定:

$$f(\sigma_y^B) = f(\sigma_y^A - \Delta \lambda \tau_{ij}^A) = 0. \quad (21)$$

当给定屈服面方程时, 采用式(21)即可求得脆塑性岩体塑性流动因子 $\Delta \lambda$ 。

5 水布垭地下厂房有限元计算

大模型底部约束面高程 50.0 m; 上游范围取至坝轴线附近; 下游范围取至尾水平台; 厂房靠近河床的端部(4# 机组) 取至河床边, 上部为自由, 下部为法向约束。另一端(安装场) 约束面距安装场端墙 500 余 m。计算范围含有一条节理, 两条断层(F_2, F_3)。单元 7566 个, 节点 8780 个, 材料种类数为 22, 如图3所示。

小模型底部约束面高程 50.0 m; 沿水流方向上游约束面距厂房上游侧墙 50 m; 下游约束面距厂房下游侧墙 56 m(到尾水平台); 厂房靠近河床的端部(4# 机组) 取至河床边, 上部为自由, 下部为法向约束。另一端(安装场) 约束面距安装场端墙 50 m。计算范围含有一条节理。单元 26244 个, 节点 28598 个, 材料种类数为 23, 如图4所示。

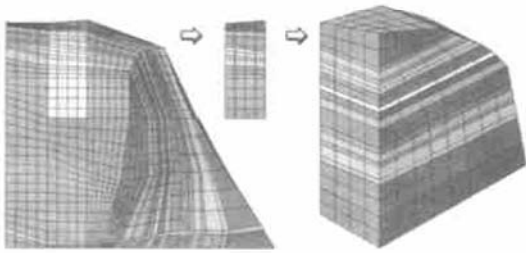


图3 原始应力场计算模型(大模型)

Fig. 3 The calculation model of original ground stress (the large model)

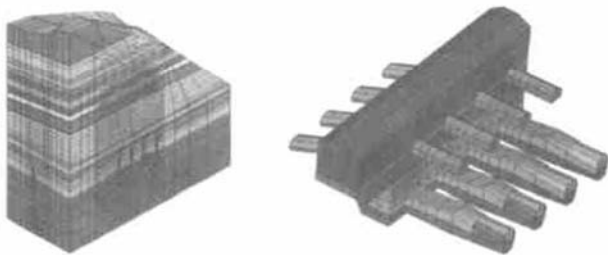


图4 二次细分网格模型及洞室群局部网格(小模型)

Fig. 4 The refined mesh and local mesh around tunnel (the small model)

为了分析的方便,计算地应力场的大模型与二次细分网格的小模型坐标系一致。其中: x 轴与主厂房纵轴一致,正向指向厂房山体内部,零点在厂房左侧(4[#]机组)端部。 y 轴与主厂房纵轴垂直,正向指向下游,零点在厂房上游边墙。 z 轴正向垂直向上,坐标值与高程一致。

计算时,首先对大模型(图3)进行计算,以模拟原始地应力场。然后取出地下厂房一定范围的局部(图4),进行二次细分网格,重点研究由于开挖等原因对围岩的力学响应。二次细分网格的边界条件为一次网格的计算结果,通过等参逆变换插值法求得。

根据施工设计开挖方案和一般施工经验,有限元计算中,开挖按七步考虑:第1步开挖拱顶,第2步开挖尾水管,第3~6步开挖主厂房;第7步开挖引水洞、母线洞。

初步设计阶段采用软岩置换的方式解决软岩的稳定问题。设计中软岩置换是将上、下游边墙8 m深的 P_{1q}^3 段和尾水管处8 m深的黄龙剪切带用C25的混凝土置换。如图5,6(a)所示。然而在软岩中开挖8 m宽的洞室,本身就存在较大的问题。本文提出齿墙方案。即置换部位与第一种置换方案相同,但置换的结构形式为齿状结构,如图6(b),(c)所示。

软岩置换齿墙方案有以下优点:①齿墙方案置换洞室小,掘进风险小;②回填快,对施工工期影响小;③节省混凝土;④为吊车梁提供支撑;⑤可机械化施工。



图5 尾水管进口处剪切带置换部分

Fig. 5 The replacement of shear zone at tail tunnel

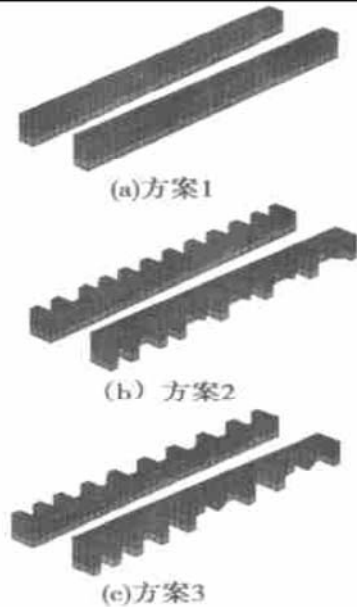
图6 主厂房壁 P_{1q}^3 层软岩置换部分

Fig. 6 The replacement of the soft rock P_{1q}^3 under the powerhouse

本文分析目的是探讨洞室群开挖过程中的稳定性及软岩置换的效果,因此拟定计算方案时重点模拟此两种情况。软岩置换的位置示意图如图7所示。其中对软岩置换的分析主要考虑3种情况,如表1所示。

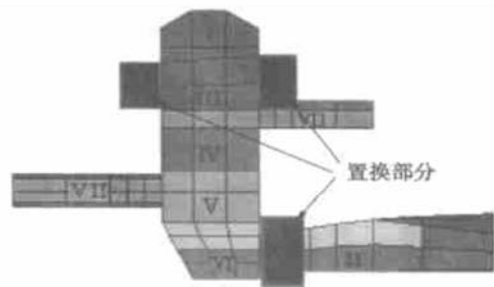


图7 软岩置换的位置示意图

Fig. 7 Location of the replacement of soft rock

表1 计算方案

Table 1 Calculation scheme

方案	方案描述	备注
1	设计推荐方案:边墙置换宽度8 m。尾水管置换宽度8 m。	图6(a)
2	作者推荐方案一:边墙宽4 m,齿墙深12 m,间距14 m,即1/4置换图6(b)	
3	作者推荐方案二:边墙宽4 m,齿墙深12 m,间距10 m,即1/3置换图6(c)	

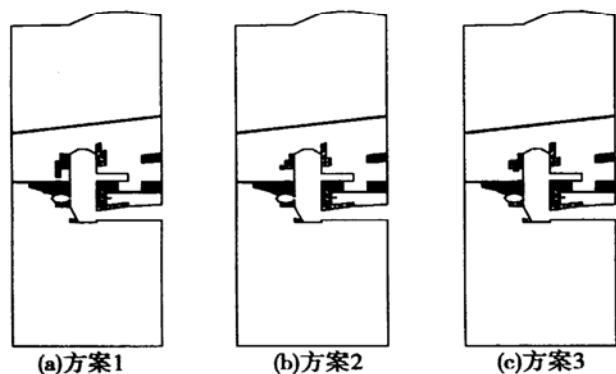


图8 方案1,2,3 破损区分布比较(4[#] 机组段)

Fig. 8 The damage area of three schemes (Unit 4)

6 初步结论及建议

方案1,2,3 重点模拟软岩置换情况。计算结果表明三种置换方案所表示出的洞室变形、塑性破坏区、围岩应力基本一致。不同之处在于:①置换后围岩拉应力大幅度减少,而三种置换方案拉应力减少情况差不多。②被混凝土置换部分没有进入塑性破坏,如图8所示。③被混凝土置换的局部,其位移减少。如:

方案1: 1[#] 机组上部 P_{1q}^3 处置换时上游水平位移 0.66 cm, 1[#] 机组下部黄龙剪切带处上游水平位移 0.67 cm, 下游水平位移 1.50 cm。

方案2: 1[#] 机组上部 P_{1q}^3 处置换时上游水平位移 0.67 cm, 1[#] 机组下部黄龙剪切带处上游水平位移 0.68 cm, 下游水平位移 1.52 cm。

方案3: 1[#] 机组上部 P_{1q}^3 处置换时上游水平位移

0.55 cm, 1[#] 机组下部黄龙剪切带处上游水平位移 0.64 cm, 下游水平位移 1.69 cm。

从以上计算结果分析, 可就软岩置换问题提出以下看法:

①软岩置换边墙宽 4 m 已足够, 可以推断当边墙宽度减少到 2~3 m 时也将可满足结构要求。②软岩置换形成钢筋混凝土结构, 结构本身的稳定性也足够。③考虑机械化施工和硐顶接触灌浆的需要, 可采用适当的布置形式和施工顺序。例如可将置换廊道适当加宽, 并将廊道剖面安放在边墙和将来要挖掉的岩体之内。回填时, 按边墙界线为界, 回填边墙内的挖空区。另一部分挖空区留作接触灌浆的巷道。④齿墙深度灵活。

参考文献:

- [1] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 改进的预处理共轭斜量法及其在工程有限元中的应用[J]. 应用数学和力学, 1993, 14(4): 353-361.
- [2] 钱向东, 任青文, 赵引. 一种高效的等参有限元逆变换算法[J]. 计算力学学报, 1998, 15(4): 437-441.
- [3] 刘文政. 脆塑性结构极限荷载的计算与工程应用[D]. 北京: 清华大学, 1989.
- [4] 葛修润, 周百海, 刘明贵. 对岩石峰值后区特性的新见解[J]. 中国矿业, 1992, 1(2): 1-5.
- [5] 沈新普, 岭章志, 徐秉业. 弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算[J]. 清华大学学报, 1995, 35(2): 22-27.
- [6] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 8-21.

欢迎订阅《工业建筑》

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管, 冶金部建筑研究总院主办, 1964 年创刊。《工业建筑》是高学术水平高知名度的双高期刊, “首届国家期刊奖”获奖期刊, 中国建筑科学类核心期刊、国际建筑数据库(ICONDA)收录期刊。多年来一直本着指导性、针对性、实用性、创新性的办刊宗旨, 重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术, 突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点, 优先报道国家级或者省部级科学基金资助项目和重大工程建设, 内容丰富翔实, 理论结合实际。适于土木工程界广大科

研、设计、教学、施工等专业技术人员及大、中专学生阅读。

《工业建筑》为大 16 开本, 彩色胶版印刷, 每月 20 日出版, 国内外公开发售。全国各地邮局均可订阅, 也可直接汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告, 收费合理, 具有一定规模, 是展示企业形象的理想舞台。

本刊地址: 北京海淀区西土城路 33 号; 邮编: 100088; E-mail: gjyz@public.sti.ac.cn; 联系电话: (010) 82227239(兼传真), (010) 82227235(总编)/7236(发行)/7337(编辑)/7238(广告)。