

基于变形加固理论的隧洞与巷道开挖稳定分析

刘耀儒¹, 崔智雄¹, 张 莉², 杨 强¹

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 邯郸职业技术学院 电子信息工程系, 河北 邯郸 056001)

摘 要: 地下工程的开挖稳定和加固分析是岩土工程中的难题之一。变形加固理论是研究荷载超出结构极限承载力的理论, 探求的目标是结构在承受荷载超出其极限承载力时维持稳定所需的最优加固力。给定荷载下结构出现不平衡力的区域即为首先破坏的区域; 给定荷载下结构总是趋于加固力最小化、自承力最大化的状态。而整体稳定性可采用余能范数进行定量评价。基于三维非线性有限元方法, 详细推导了不平衡力和塑性余能范数的表达式。通过典型深部隧洞与巷道开挖及加固的算例, 对比分析了加固前后围岩内不平衡力的分布以及塑性余能范数的大小。结果表明, 对围岩加固可在一定程度上提高围岩的强度和承载能力。

关 键 词: 隧洞; 巷道; 稳定; 不平衡力; 塑性余能

中图分类号: TV 554

文献标识码: A

Analysis of stability of tunnel and roadway during excavating based on deformation reinforcement theory

LIU Yao-ru¹, CUI Zhi-xiong¹, ZHANG Li², YANG Qiang¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Electronics and Information Engineering, Handan Polytechnic College, Handan, Hebei 056001, China)

Abstract: The traditional method which focuses on displacement, stress and yield zone has some difficulties in stability and reinforcement analysis during excavation in underground engineering. The deformation reinforcement theory mainly discusses the optimal reinforcement force required by the structure to keep stable when it bears load which is beyond the limits of the load bearing capacity. It notes that for the structure under the action of a given load, the area where unbalanced forces exist is the location of initial failure occurs; structure under a given load reinforcement force always tends to minimize the reinforcement force and maximize self-bearing. The whole stability can be judged by plastic complementary energy norm quantitatively. Two important concepts of deformation reinforcement theory, unbalanced force and plastic complementary energy norm, are deducted and illustrated based on 3D nonlinear finite element method. Through two typical examples of tunnel and roadway in deep rock, the distribution of unbalanced force and the plastic complementary energy norm of surrounding rock before and after the reinforcement have been analyzed. The results show that the reinforcement of the surrounding rock can improve the strength and the bearing capacity, and the deformation reinforcement theory based on nonlinear calculation is effective for analyzing stability and reinforcement of underground structures.

Key words: tunnel; roadway; stability; unbalanced force; plastic complementary energy

1 引 言

在深部岩石中开挖隧洞与巷道会不可避免地遇到高地应力和高外水压力等工程问题, 因此, 隧洞与巷道的稳定问题非常重要^[1]。对于深部隧洞与巷道的开挖稳定分析^[2-3], 目前主要有工程地质法、

解析法、模型试验法和数值分析方法等。其中, 数值分析方法由于其较高的精度和较好的经济性而得到极大的发展。

对于结构稳定破坏的判断一直是困扰工程技术人员的难题^[4-8], 它关系到支护时机的选取和工程的造价^[9-10]。新奥法施工“适时支护”原理指出, 对

给定荷载下的结构，选择合适的支护时间可使加固力最小。变形加固理论^[11-14]主要研究荷载超出结构极限承载力，其出发点是给定外荷载和结构整体稳定安全度，求得不平衡力的大小和分布，据此推断破坏区域的大小、程度以及相应的稳定程度；同时确定加固区域及加固力。变形加固理论给出了结构失稳的明确定义，即在给定荷载及加载路径下，结构不存在同时满足平衡条件、变形协调条件和本构关系的力学解。

本文提出了采用变形加固理论进行深部隧洞和巷道稳定分析的方法，比较分析了隧洞围岩在不加固、喷锚和喷锚支护联合衬砌 3 种工况，以及巷道围岩在不加固和灌浆加固两种工况下的稳定情况。

2 变形加固理论

变形加固理论针对关联理想弹塑性材料结构的小变形弹塑性进行分析，主要研究荷载超出极限承载力后的结构失稳行为。

2.1 变形加固理论的有限元法表述

设某一点在某一加载步或迭代步前初始应力为 σ_0 且满足屈服条件 $f(\sigma_0) \leq 0$ ，如图 1 所示。

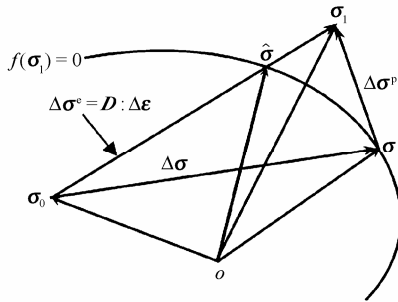


图 1 弹塑性应力调整图

Fig.1 Elastoplastic stress adjustment

对某一个加载步或迭代步，由位移法求得该点应变增量为 $\Delta \epsilon$ ，它对应于弹性试应力 $\sigma_1 = \sigma_0 + D : \Delta \epsilon$ ，这里 D 为弹性张量；若 $f(\sigma_1) > 0$ ，则需进行试应力 σ_1 调整至屈服面，其差值为塑性应力 $\Delta \sigma^p = \sigma_1 - \sigma = D : \Delta \epsilon^p$ ，其中 $\Delta \epsilon^p$ 为此加载步或迭代步中的塑性应变增量。在有限元分析中， $\Delta \sigma^p$ 的等效节点力即为不平衡力，

$$\Delta Q = \sum_e \int_{V_e} B^T \Delta \sigma^p dV \quad (1)$$

式中： B 为应变矩阵，下标 e 为对所有单元求和； V 为体积。对某一给定的外荷载节点力向量 F ，仍以上述迭代步为例来分析，在该迭代起始步，弹性试

应力场 σ_1 应满足平衡条件，即

$$\sum_e \int_{V_e} B^T \sigma_1 dV = F \quad (2)$$

将 $\sigma_1 = \sigma + \Delta \sigma^p$ 及式 (1) 代入式 (2) 化简得，

$$\sum_e \int_{V_e} B^T \sigma dV + \Delta Q = F \quad (3)$$

调整后的应力场 σ 全面满足屈服条件，故其等效节点力可视为结构的自承力。故从式 (3) 可以看出，在节点力水平上，结构内力为结构自承力和不平衡力之和，以此与外荷载平衡，

$$\text{结构自承力} + \text{不平衡力} = \text{外荷载} \quad (4)$$

式 (4) 说明，结构在外荷载 F 的作用下，若无法自稳（即无法全面满足屈服条件），可以对结构施加一个与不平衡力 ΔQ 大小相等方向相反的加固力（即 $-\Delta Q$ ），此时结构内力（即 σ ）全面满足屈服条件，结构稳定。由式 (1) 可知，不平衡力向量 ΔQ 是由初应变 $\Delta \epsilon^p$ 产生的荷载向量，故不平衡力向量 ΔQ 必然是自平衡的荷载向量，即所有节点的不平衡力的矢量和必为 0，而 $\Delta \sigma^p$ 为自平衡应力场。这深刻说明了加固力是自平衡力系，而非一般外荷载。

2.2 最小塑性余能原理

在变形加固理论里，塑性余能范数的定义是一个指标函数，其形式为

$$\Delta E = \frac{1}{2} \int_V \Delta \sigma^p : C : \Delta \sigma^p dV = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_1 - \sigma) : C : (\sigma_1 - \sigma) dV \quad (5)$$

式中： C 为四阶柔度张量。

可以证明^[14]，对于给定的外荷载和加载路径，弹塑性失稳结构总是趋于塑性余能最小的状态，此即最小塑性余能原理。最小塑性余能原理是结构平衡条件、变形协调条件和放松的本构关系（仅放松屈服条件）的集中体现，在变形加固理论的框架里，可以用最小塑性余能范数 ΔE 来探讨结构的稳定性，它对应于最近的两个应力场 σ_1 和 σ 。由于塑性余能总是非负的，如图 2 所示（ t_i 为边界上的外荷载， n_j 为边界外法线方向）。其可能的最低值只能是 $\Delta E = 0$ 。

如果 $\Delta E = 0$ ，则两场 σ_1 和 σ 必然完全相同，结构稳定；如果 $\Delta E > 0$ ，结构失稳，需要加固才能稳定，加固力由 $\Delta \sigma^p = \sigma_1 - \sigma$ 的等效节点力确定。最小塑性余能原理表明失稳结构有趋于新的稳定状态的趋势，这种趋势的内在动力可以理解为结构的自我调整能力。如果受扰动结构不能调整到新的稳定

状态,说明结构自我调整能力有所不足。

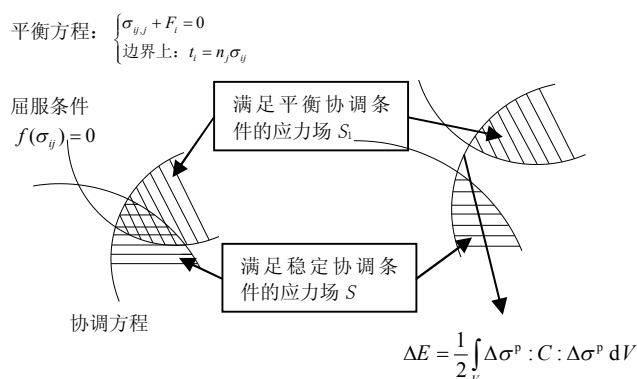


图2 弹塑性解向量空间示意图

Fig.2 Elastoplastic solution in vector space

3 隧洞数值算例

3.1 计算模型

某水电工程4条引水隧洞平行布置,隧洞中心之间的距离为60 m,隧洞开挖直径为13 m,衬后直径为12 m。在垂直隧洞轴线方向,隧洞顶边界距上部边界约为6倍隧洞直径,底部边界距离洞底约6倍隧洞直径,沿隧洞轴线方向取100 m,总的模拟范围为340 m×160 m×100 m。图3为单洞的局部有限元网格。

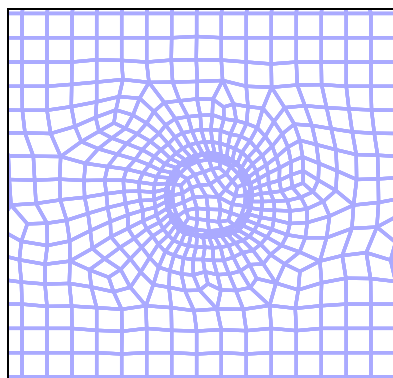


图3 隧洞有限元网格

Fig.3 Finite element meshes of tunnel

模型有限元网格节点总数为78 598,单元数为74 575。采用理想弹塑性模型,屈服条件为Drucker-Prager屈服准则。围岩的弹性模量 $E = 3.75$ GPa,泊松比 $\mu = 0.45$,重度 γ 为 2.4 kN/m³,内摩擦系数 $f = 0.58$,黏聚力 $c = 0.45$ MPa。喷锚的弹性模量为 $E = 26.5$ GPa,泊松比 $\mu = 0.18$,内摩擦系数 $f = 1.35$,黏聚力 $c = 2$ Pa。混凝土衬砌的弹性模量为 $E = 28$ GPa,泊松比 $\mu = 0.167$,内摩擦系数 $f = 1.4$,黏聚力 $c = 2.5$ MPa。

约束条件为:底部边界和四周边界均为法向约束。采用非线性有限元程序 TFine 进行计算,模拟开挖过程、喷锚支护和衬砌过程。

3.2 计算结果分析

当山体未开挖时,隧洞周围不存在不平衡力,如图4所示。

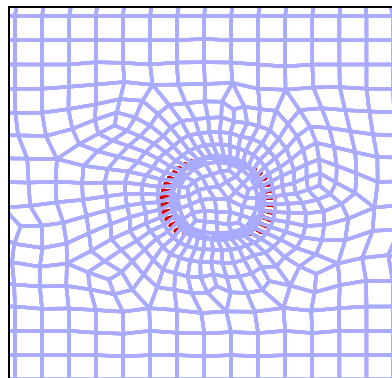


图4 未开挖时围岩不平衡力分布

Fig.4 The distribution of unbalanced force before excavation

隧洞开挖后,隧洞周围的岩体出现较大的不平衡力,尤其是洞室靠近侧壁部位(如图5所示),局部不平衡力非常大,表明未支护时,开挖隧洞处于不稳定状态。因此,在开挖时就应该进行支护。

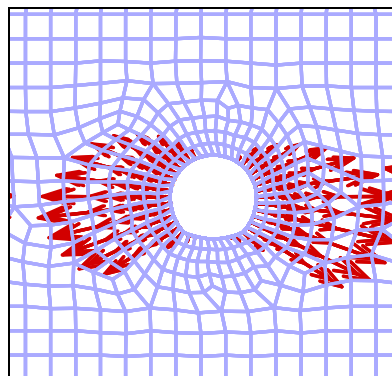


图5 隧洞开挖围岩不平衡力分布图(未支护)

Fig.5 The distribution of unbalanced force after excavation (no support)

对隧洞周围岩体进行喷锚支护后,围岩的不平衡力有所减小,但是喷锚层承受较大的不平衡力,如图6所示。说明在隧洞开挖后,喷锚支护可以在一定程度上提高围岩的力学性能,改善隧洞围岩的应力条件,但喷锚加固层本身会承受较大的荷载。

对隧洞周围岩体进行喷锚支护及衬砌加固后,围岩的不平衡力变得很小,不平衡力转移到了衬砌上,如图7所示。这表明在深部开挖隧洞时,采用

合适的施工工序对围岩进行加固，可保证围岩基本处于稳定状态^[15-16]。

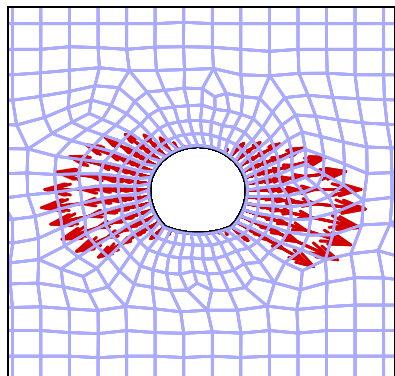


图 6 隧洞喷锚支护后围岩不平衡力分布图
Fig.6 The distribution of unbalanced force before excavation (bolt and shotcrete)

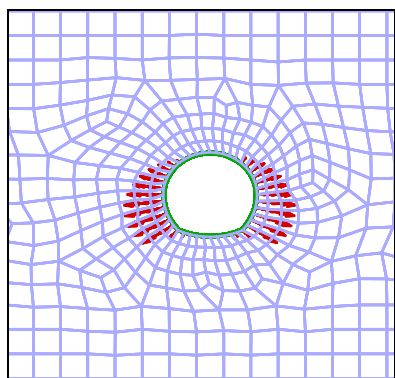


图 7 隧洞喷锚和衬砌后围岩不平衡力分布
Fig.7 The distribution of unbalanced force before excavation (bolt, shotcrete and liner)

4 深埋软岩巷道数值算例

4.1 计算模型

某煤矿巷道高为 3.5 m，跨度为 3.4 m，埋深为 600 m，有限元计算模型如图 8 所示，锚注灌浆后浆液扩散半径为 1.3 m。

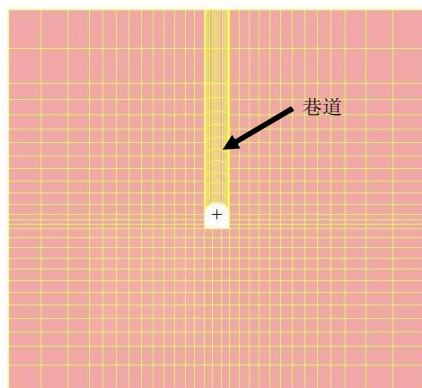


图 8 深埋软岩巷道有限元模型
Fig.8 Finite element model of roadway

模型有限元网格节点总数为 53 571，单元数为 39 200。采用理想弹塑性模型，屈服条件为 Drucker-Prager 屈服准则。加固前的软岩材料弹性模量 $E = 2.2 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.28$ ，重度 $\gamma = 2.14 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦系数 $f = 0.384$ ，黏聚力 $c = 1.6 \text{ MPa}$ 。加固后软岩材料弹性模量变 $E = 5.0 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.28$ ，重度不变，内摩擦系数 $f = 0.577$ ，黏聚力 $c = 2.4 \text{ MPa}$ 。

约束条件为：底部和四周边界均为法向约束。采用非线性有限元程序 TFine 进行计算，模拟开挖过程和灌浆加固过程。

4.2 计算结果分析

当山体未开挖时，山体的不平衡力和塑性余能范数值都为 0，整个岩体中无塑性屈服区域，如图 9 所示。

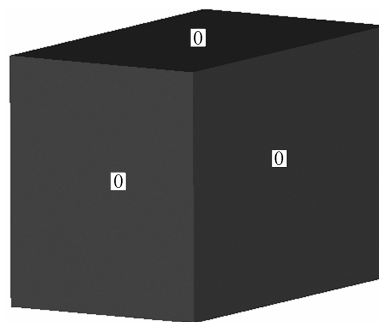


图 9 未开挖时山体岩石屈服区域
Fig.9 Yield zone of rock before excavation

图 10 为巷道开挖后，巷道周围的岩体出现较大的不平衡力，尤其是洞室顶部靠近侧壁部位，局部不平衡力非常大，且不易转移。因此，洞室顶部和侧壁是加固支护的重点部位，必须在开挖时 just 进行加固。两侧偏上围岩的塑性余能范数大于 0 但数值并不大，如图 11 所示，说明山体结构整体基本是稳定的，但必须通过有效地加固才能保证软岩洞室的稳定。巷道围岩附近集中出现较大塑性屈服区域如

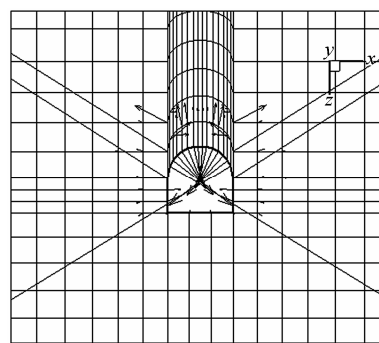


图 10 巷道开挖后围岩不平衡力分布
Fig.10 The distribution of unbalanced force after excavation (no support)

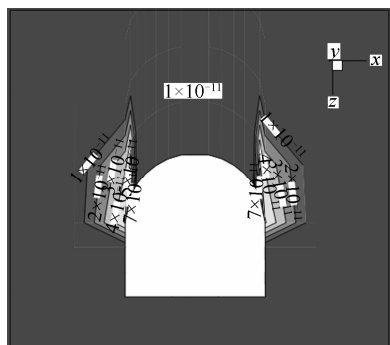


图 11 巷道开挖后围岩塑性余能范数
Fig.11 Plastic complementary energy after excavation (no support)

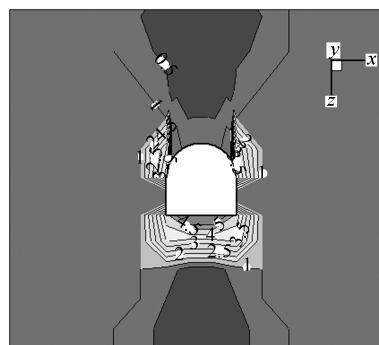


图 14 巷道加固后围岩塑性区分布
Fig.14 Yield zone after excavation (with support)

图 12 所示, 分别位于巷道的侧顶部和底部, 且屈服程度比较大, 顶部由于岩体屈服而下沉, 底部岩体屈服形成底臃。巷道开挖对巷道附近周围很大一部分山体都有影响, 但影响程度最深在 3~4 倍隧洞直径的围岩处, 约 8~12 m 处, 且开挖对顶部和底部的影响区域要大, 对洞室侧壁影响范围小但程度比较大。

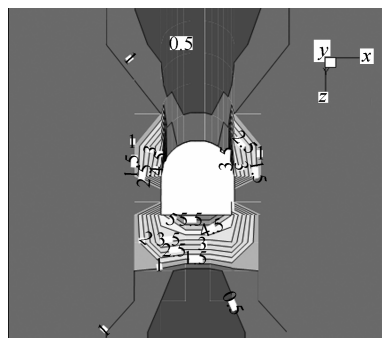


图 12 巷道开挖后围岩塑性区分布
Fig.12 Yield zone after excavation (no support)

对巷道周围岩体进行灌浆加固后 (如图 13 所示), 不平衡力的分布区域变化不大, 但数值减小, 说明灌浆加固取得了一定效果, 围岩基本处于稳定状态^[16]。通过图 14 围岩塑性区的分布也可看出, 塑性屈服程度的值有所减小。

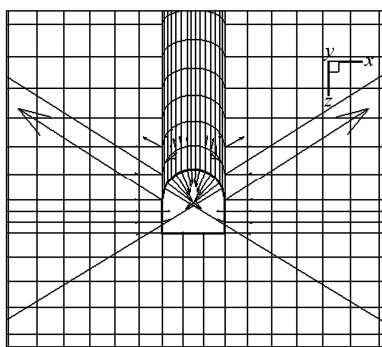


图 13 巷道加固后围岩不平衡力分布
Fig.13 The distribution of unbalanced force after excavation (with support)

5 结 论

对于深层隧洞结构, 喷锚支护能在一定程度上降低围岩的不平衡力, 配合衬砌的联合加固后能够有效地转移围岩上的不平衡力, 保证开挖隧洞时围岩的稳定。

对于深部软岩巷道结构, 灌浆加固能在一定程度上提高围岩的力学性能, 改善巷道围岩的应力条件, 但不能完全消除巷道围岩塑性区域较大的情况, 因此, 仍需要在此基础上提供其他的支护手段, 如锚固、支护等手段。

采用变形加固理论可以进行深部隧洞与巷道的稳定分析。

参 考 文 献

- [1] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1184—1190.
CHEN Wei-zhong, WU Guo-jun, DAI Yong-hao. Stability analysis of diversion tunnel for Jinping Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1184—1190.
- [2] 张强勇, 俞裕泰. 有压隧洞衬砌与围岩相互作用数值模拟分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(2): 18—21.
ZHANG Qiang-yong, YU Yu-tai. Numerical simulation analysis of interaction between lining and surrounding rockmass for pressure tunnel[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(2): 18—21.
- [3] 刘全林, 杨敏. 软弱围岩巷道锚注支护机理及其变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1158—1161.

- LIU Quan-lin, YANG Min. Analysis of deformation of surrounding rock masses of tunnel using bolt-grouting support and its mechanism[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1158—1161.
- [4] 王连国, 缪协兴, 董健涛, 等. 深部软岩隧洞锚注支护数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 983—985.
WANG Lian-guo, MIAO Xie-xing, DONG Jian-tao, et al. Numerical simulation research of bolt-grouting support in deep soft roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 983—985.
- [5] 梁礼绘. 高埋深地下洞室围岩稳定性及支护结构研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [6] 夏向阳. 深部高应力软岩巷道锚注支护数值模拟研究与应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2003.
- [7] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部隧洞稳定的若干岩石力学问题[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 288—295.
HE Yong-nian, HAN Li-jun, SHAO Peng, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(3): 288—295.
- [8] 王永岩, 齐琨, 杨彩虹, 等. 深部岩体非线性蠕变规律研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 117—121.
WANG Yong-yan, QI Jun, YANG Cai-hong, et al. A study of nonlinear creep law in deep rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 117—121.
- [9] 赵国堂, 刘亮. 软岩隧洞围岩变形形态与适时支护[J]. 阜新矿业学院学报, 1994, 13(4): 6—9.
ZHAO Guo-tang, LIU Liang. Deformation characteristics of soft rock around roadway and optimal supporting time[J]. **Journal of Fuxin Mining Institute**, 1994, 13(4): 6—9.
- [10] 王永岩. 软岩隧洞变形与压力分析控制及预测[D]. 阜新: 辽宁工程大学, 2001.
- [11] 杨强, 陈新, 周维垣. 基于 D-P 准则的三维有限元增量计算的有效算法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 16—20.
YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan. A practical 3D elastoplastic incremental method in FEM based on D-P yield criteria[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(1): 16—20.
- [12] 杨强, 周维垣, 陈新. 岩土工程加固分析中的最小余能原理和上限定理[C]//冯夏庭, 黄理兴编: 21 世纪的岩土力学与岩土工程. 武汉: 亿东印务有限公司, 2003: 158—166.
- [13] 杨强, 陈新, 周维垣, 等. 三维弹塑性有限元计算中的不平衡力研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 323—326.
YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan, et al. On unbalanced forces in 3D elastoplastic finite element analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 323—326.
- [14] YANG Q, LIU Y R, CHEN Y R. Deformation reinforcement theory and its application to high arch dams[J]. **Science in China Series E: Technological Science**, 2008, 51: 32—47.
- [15] 陈卫忠, 朱维申, 李术才, 等. 水布垭大型地下厂房施工顺序和锚固参数优化分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1623—1628.
CHEN Wei-zhong, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, et al. Optimization of the construction sequence and anchoring parameters in the large underground cavern excavation of Shuibuya project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1623—1628.
- [16] 伍国军, 陈卫忠, 戴永浩. 浅埋大跨公路隧道施工过程中支护优化的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1118—1123.
WU Guo-jun, CHEN Wei-zhong, DAI Yong-hao, et al. Study of excavation sequences and support optimization for shallow-buried and large-spanned tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1118—1123.