

文章编号: 1000-7598(2009)增刊2-0452-05

岩石高边坡开挖卸荷松弛准则研究与工程应用

冯学敏¹, 陈胜宏², 李文纲¹

(1.中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072; 2.武汉大学 水电学院, 武汉 430072)

摘要: 基于对卸荷松弛过程和机制的定性分析, 提出了以岩石极限拉应变作为卸荷松弛的判别准则。通过对岩石极限拉应变室内试验资料与其抗拉强度之间关系的分析, 并结合小湾工程卸荷松弛分析的成功实践经验, 提出了极限拉应变值的取值原则, 并明确了岩石边坡开挖后实际拉应变的计算方法。运用三维弹黏塑性加锚节理岩体流变模型, 将该准则和计算方法应用于锦屏一级拱坝建基面开挖卸荷松弛的数值分析中, 通过与实际开挖揭示和声波测试资料的对比, 结果表明分析结果较为合理, 为工程建设提供了有益的指导。

关键词: 岩石高边坡; 开挖卸荷松弛; 判别准则; 极限拉应变; 锦屏一级拱坝建基面

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Research on unloading relaxation criterion of high rocky slope excavation and its engineering application

FENG Xue-min¹, CHEN Sheng-hong², LI Wen-gang¹

(1.Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, CHECC, Chengdu 610072, China;

2.School of Water Resources and Hydropower Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research advance and existent insufficiency of unloading relaxation in rocky slope excavation are summarized. Based on the qualitative analysis of unloading relaxation process and mechanism, the limit tensile strain of rock is proposed as the criterion of unloading relaxation. The value taking principle of limit tensile strain of rock is put forward by analyzing the relationship between lab test value of limit tensile strain of rock and its tensile strength, and by referring to the successful practice of excavation unloading relaxation analysis in Xiaowan arch dam. The calculation method of tensile strain in rocky slope after excavation is deduced. By adopting three-dimensional elasto-viscoplastic finite element method of reinforced jointed rock masses, this unloading relaxation criterion and corresponding calculation methods are applied to the numerical analysis of rocky slope excavation unloading relaxation in Jinping First-Cascade arch dam foundation plane. By comparing to the disclosed situation after actual excavation and the sonic wave testing data, the results of numerical analysis are confirmed reasonable, so as to provide beneficial guidance to the construction of project.

Key words: high rocky slope; unloading relaxation of excavation; criterion; limit tensile strain; Jinping First-Cascade arch dam foundation plane

1 引言

开挖卸荷松弛是水利水电、交通、能源等领域岩石高边坡工程中存在的一个普遍性问题。岩体边坡开挖卸荷松弛问题主要是指工程开挖引起的坡体应力场的调整所产生的表、浅部岩体松弛行为或现象, 其定义可以理解为由于边坡开挖(一般具有中、

高初始地应力水平)卸荷作用, 在开挖坡面附近的一定区域或范围内应力水平急剧降低, 应力释放或转移至深层岩体, 该区域即称之为边坡开挖卸荷松弛区(或松弛带)。主要表现为开挖坡面岩体向临空面方向发生卸荷回弹变形, 浅表部位应力降低, 岩体回弹膨胀、结构松弛, 破坏岩体的完整性; 而在开挖坡面更深部位产生更大程度的应力集中, 岩体

收稿日期: 2009-08-18

资助项目: 中国水电顾问集团重大科研项目——高拱坝坝基岩体流变力学特性与工程稳定性研究。

第一作者简介: 冯学敏, 男, 1977年生, 博士, 主要从事水工结构高边坡岩土工程问题研究。E-mail: fxm_ll_163@163.com

在应力场调整至新的平衡状态过程中下产生卸荷裂隙或使原有裂隙发展张开，从而弱化了岩体结构，不同程度劣化其强度参数。岩石高边坡开挖卸荷松弛具有一定的时间效应。

岩石边坡开挖卸荷松弛问题属卸荷岩体力学范畴，其力学本质是岩体应力张量增量的主应力分量的增减变化。卸荷岩体力学属于较为新兴和前沿的课题，国内哈秋龄最早提出“卸荷岩体力学”的概念，并在文献[1-2]中论述了卸荷岩体力学与传统加载力学的区别及各自的力学特性。目前已有的研究尚不成熟，主要集中于以下几方面：一是开挖卸荷松弛的力学机制，如张强勇、朱维申等^[3]建立了三维弹塑性损伤本构模型并在三峡船闸高边坡中进行了探索；卢文波、周创兵等^[4]提出开挖卸荷具有瞬态特性并研究了其动力效应。二是卸荷岩体力学参数研究，如李建林、哈秋龄^[5]研究并模拟了三峡岩体卸荷宏观力学参数；三是数值模拟分析及工程应用，且大多依托三峡船闸岩石高边坡^[6-7]，有些学者在考虑岩体卸荷松弛基础上进行了岩体质量评价和边坡稳定性分析^[8-9]。此外，王浩、廖小平^[10]结合实际工程对岩体卸荷松弛区的划分进行了探讨。

综合上述已有研究成果可以发现，对于岩石高边坡开挖卸荷松弛判别准则的研究目前尚不深入，文献[10]分析了边坡开挖后最大主应力增量的负值区与坡体塑性区的分布规律，提出“以应力张量增量的最大主应力分量增减变化作为开挖卸荷松弛区的划分标准”，为卸荷松弛判别准则的研究提供了有益的参考。近年来，笔者结合中国水电顾问集团重大科研项目《高拱坝坝基岩体流变力学特性与工程稳定性研究》、依托锦屏一级等西南地区特大高坝水电工程对岩石高边坡开挖卸荷松弛问题作了较为深入的研究，其中提出以岩石的极限拉伸应变值作为卸荷松弛的判别准则，对其取值原则、实际最大拉应变的计算等问题进行了研究，并将其应用于锦屏一级拱坝建基面开挖卸荷松弛的数值仿真分析，取得了较好的效果。

2 卸荷松弛的极限拉应变准则

2.1 机制分析

对于岩石边坡开挖卸荷松弛的过程和机制可以定性描述，如图1流程所示。由图可以发现，在此过程中边坡岩体的以下几种物理量产生了增减变化：位移、应力、应变以及基于它们的点安全度或屈服度等。一般而言，岩石边坡开挖后回弹位移大、应力下降幅度大、抗拉点安全度小的部位更易发生

松弛现象，但这只是一个相对宏观的概念，无法以一个绝对的指标来判断边坡岩体是否会松弛，所以位移、应力和点安全度等物理量只宜作为宏观的经验判断依据。同时，从图1中还可以发现，卸荷松弛现象产生的质变阶段为“产生微张拉层裂”，而这种微裂隙不同于诸如温度应力、结构应力等引起的垂直于坡面的开裂裂缝，其产生是因为在某个方向（一般为与坡面成大角度方向）上的应变超过了材料的极限拉应变，从而出现垂直于该方向的层状裂缝，即层裂现象。这种层裂微裂隙在应力进一步调整过程中如果扩展将会导致局部岩体结构损坏。因此，岩石材料的极限拉应变能够反映开挖卸荷松弛的本质和机制，从而为建立一个量化的、较为客观的判别准则提供了可能。

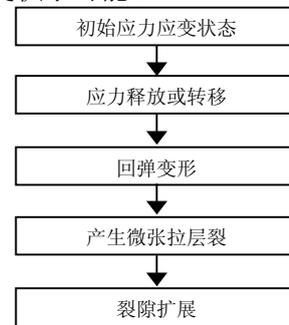


图1 岩石边坡开挖卸荷松弛过程和机制示意图

Fig.1 The process and mechanism of unloading relaxation in rocky slope excavation

2.2 取值原则

岩石的极限拉应变通过试验可以获得，但据调查目前此类试验基本只在混凝土材料上有所实施，针对岩石材料的极限拉应变测试试验极少，表1为通过室内试验得到的几种岩石的拉伸应变极限值。

由于岩石材料的极限拉应变试验极难开展，如何获取其取值成为一个亟待解决的问题。对于混凝土材料，其极限拉应变和其抗拉强度与弹模的比值之间存在很强的正比规律性，即 ε_t 与 σ_t/E 存在较为一致的正相关性。受此启发，笔者对岩石材料的类似规律也进行了搜集和分析，根据表1试验数据以及相应岩石材料的平均抗拉强度及变形模量，分析结果见表2。从表2可以发现：① ε_t 与 σ_t/E 在一个数量级且数值相差不大；② σ_t/E 值大于 ε_t （仅页岩例外），幅度一般为20%~60%。笔者所在的课题组曾对小湾拱坝建基面开挖卸荷松弛进行了数值分析，其枢纽区主要为花岗片麻岩，分析中极限拉应变取值为 15×10^{-5} ，分析结果表明：左岸990 m高程以下、右岸975 m高程以下建基面会发生松弛，

表1 几种岩石的拉伸应变极限值(室内试验资料)

Table 1 Limit tensile strain of some kinds of rocks lab test

岩石名称	岩芯直径 /mm	试件高与直径比	极限拉伸应变值
石英岩 A	41	2	0.000 120
石英岩 B	41	2	0.000 100
石英岩 C	28	2	0.000 081
石英岩 D	41	2	0.000 130
石英岩 E	41	2	0.000 152
熔岩 A	41	2	0.000 132
熔岩 B	41	2	0.000 138
玄武岩 B	41	2	0.000 175
苏长岩	54	2.5	0.000 173
砾岩 A	41	2	0.000 086
砾岩 B	41	2	0.000 073
砾岩 C	41	2	0.000 083
砂岩	41	2	0.000 090
页岩 A	41	2	0.000 116
页岩 B	41	2	0.000 150
页岩 C	28	2	0.000 095

表2 岩石材料的 ε_t 与 σ_t/E 对照表Table 2 Parallel table of ε_t and σ_t/E of rock

岩石均值	石英岩	玄武岩	砾岩	砂岩	页岩	花岗片麻岩 (小湾)
$\varepsilon_t/10^{-5}$	11.66	17.5	8.07	9.0	12.03	15.0*
σ_t/E	15.4	21.3	14.5	23.4	10.5	15.8

注: 该值为小湾工程拱坝建基面开挖松弛分析采用值(非试验值)。

左岸L990至河床偏右岸R953列特征点的松弛深度约为8.0~9.0 m, 右岸R975列特征点的松弛深度约为2.0 m。小湾拱坝建基面开挖已经结束, 目前正在实施坝体混凝土浇筑, 开挖揭露及监测数据表明岩体松弛范围与深度的分析判断与实际基本相符。

基于以上岩石材料力学指标对比分析以及小湾工程的实践, 岩石极限拉应变值 ε_t 与其抗拉强度与变模的比值 σ_t/E 之间正相关性规律较好, 而后者通过一般性的岩石力学试验容易获取, 前者可以根据后者来确定, 公式为

$$\varepsilon_t = k_s k_r \sigma_t / E \quad (1)$$

式中: k_s 为考虑现场岩体尺寸效应的修正系数; k_r 为考虑岩体结构(如断层、软弱岩带等)的修正系数。实际取值时可根据需要参考经验判断或工程类比。在边坡开挖卸荷松弛的具体分析中, 若岩体的实际最大主拉应变大于其极限拉应变值, 即认为发生卸荷松弛。

2.3 计算方法

岩体的极限拉应变值由式(1)确定, 而实际边坡岩体中的最大主拉应变的计算需要先计算得到总应变(场)。需要注意的是, 这里指的总应变不仅仅

是岩石边坡开挖过程中的应变增量, 而是包括初始地应力场作用下的应变(初始应变) ε_{ini} 和边坡开挖过程中的应变增量 ε_{ex} 两部分, 后者比较容易由位移场求得得到, 前者可以通过高斯点的初始应力和材料的弹性矩阵逆阵计算近似得到。具体计算方法是: 总应变等于初始应力场反演得到的初始应变和开挖引起的增量应变的叠加, 然后求出总应变场的最大主拉应变 ε_{max} , 用 ε_{max} 和 ε_t 的大小关系来判断材料是否松弛破坏, 即

$$\{\varepsilon\}_{all} = \{\varepsilon\}_{ini} + \{\varepsilon\}_{ex} \quad (2)$$

初应变和开挖引起的增量应变可由式(3)、(4)近似求得

$$\{\varepsilon\}_{ini} = [D]^{-1} \sigma_{ini} \quad (3)$$

$$\{\varepsilon\}_{ex} = [B] u_{ex} \quad (4)$$

式中: $\{\varepsilon\}_{all}$ 为总应变; $\{\varepsilon\}_{ini}$ 为初应变; $\{\varepsilon\}_{ex}$ 为开挖引起的增量应变; $[D]$ 为材料的弹性矩阵; $[B]$ 为应变矩阵; σ_{ini} 为初应力; u_{ex} 为开挖引起的位移。

3 岩石高边坡开挖卸荷松弛的数值分析

卸荷松弛现象在高坝工程岩石高边坡的开挖中尤为突出, 此问题影响到建基面岩体质量、基础处理、工程总体施工进度甚至大坝设计方案, 特别对于岩石较硬、脆以及中高地应力地质条件的开挖工程具有重大意义。为指导工程建设, 笔者所在课题组运用三维弹黏塑性加锚节理岩体流变模型^[12-14]、采用第2章节中所述的极限拉应变判别准则, 对锦屏一级拱坝建基面开挖卸荷松弛进行了数值仿真分析。

3.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅砻江干流中下游水电开发规划的“控制性”水库梯级。电站装机容量为3 600 MW, 大坝为世界第一高拱坝, 坝高 305.0 m, 坝顶高程为 1 885 m, 水库正常蓄水位为 1 880 m。大坝建基面于2007年5月开始按10 m一个梯段爆破开挖, 截至2009年5月下旬, 左右岸坝基已开挖至1 610 m高程。

枢纽区为典型的深切“V”型峡谷, 相对高差 1 500~1 700 m。左岸为反向坡, 1 820~1 900 m高程以下为大理岩, 坡度为55°~70°, 以上为砂板岩, 坡度为40°~50°, 呈山梁与浅沟相间的微地貌特征。右岸为顺向坡, 全为大理岩, 地貌上呈陡缓相间的台阶状, 陡坡段坡度为70°~90°, 缓坡段约为40°。枢

枢纽区断层较发育，其中以NE~NNE向最为发育，且断层规模较大，如左岸 f_5 、 f_8 、 f_2 断层，右岸 f_{13} 、 f_{14} 断层等，而近EW向断层也有一定发育，如左岸坝头 f_{42-9} 、右岸猴子坡 f_7 断层及斜穿坝基的 f_{18} 断层。

3.2 计算条件

三维有限元模型中考虑了左、右岸发育的 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{42-9} 、 f_{13} 、 f_{14} 、 f_{18} 和煌斑岩脉X及边坡浅表部位的强、弱卸荷带。天然边坡有限元网格中含节点总数为132 686，单元总数为294 057，模型视图见图2和图3。特别针对模拟边坡开挖后卸荷松弛区（带），在开挖成型的网格中，坡面浅表单元尺寸划分为2、3、5 m。

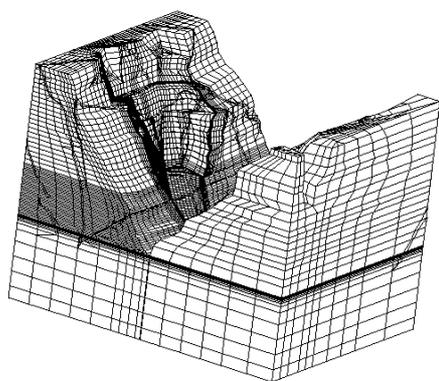


图2 天然边坡有限元网格（左岸视图）
Fig.2 FEM mesh of the natural slope (left bank view)

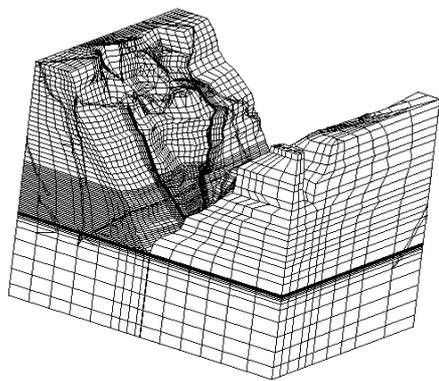


图3 开挖成型边坡有限元网格（左岸视图）
Fig.3 FEM mesh of the slope after excavation (left bank view)

初始地应力场是进行数值计算分析的前提条件。锦屏一级枢纽区的地应力水平较高，最大主应力平均在20~30 MPa水平，最大达40.4 MPa，且受软弱岩带影响空间分布很不均匀，左岸受深部裂隙带的影响尤其如此。采用多元线性回归分析方法、选择岩体自重与地质构造作用作为待回归因素，分析得到了枢纽区的初始地应力场。

在天然状态及施工期，左右岸坡体内地下水位

较低（接近江面）且岩体透水性较强，此分析中不考虑渗流场的影响。

枢纽区左岸上部高程砂板岩的平均抗拉强度与变模的比值 $\sigma_t/E = 16.6 \times 10^{-5}$ ，左岸下部高程及右岸大理岩的平均 σ_t/E 为 17.6×10^{-5} ，参考式(1)并考虑到软弱岩带的影响，计算中取极限拉应变值 $\epsilon_t = 20 \times 10^{-5}$ 。

3.3 计算结果及分析

通过计算可以得到建基面坡体的位移场、应力场以及应变场，并可以根据式(2)~(4)计算得到最大主拉应变场。图4为开挖完成时建基面最大主应变分布等值线图。

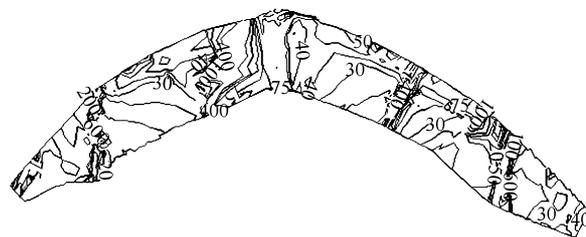


图4 开挖完成时建基面最大主应变分布等值线图（单位： 10^{-5} ）

Fig.4 The distribution contour map of maximum principal strain in the foundation plane after excavation (unit: 10^{-5})

根据判别准则可以找出可能发生开挖卸荷松弛的区域和深度。图5为开挖完成时建基面可能发生卸荷松弛的区域分布图，其中粗黑线划分部分为松弛较为严重的区域。可能发生卸荷松弛的4个区域为：①左岸建基面上游侧 f_5 断层出露点（1 730 m高程）与下游侧1 705 m高程点连线，至 f_2 断层出露线（上游1 65 m高程、下游1 695 m高程）之间的梯形区域；②左岸建基面上游侧 f_2 断层出露点（1 665 m高程）与下游侧1 610 m高程点连线，至河床之间的梯形区域；③右岸 f_{18} 断层出露线（上游1 590 m高程、下游1 620 m高程）至河床之间的梯形区域；④右岸建基面上游侧 f_{14} 断层出露点（1 710 m高程）与 f_{18} 断层出露线之间（上游1 590 m高程、下游1 620 m高程）的三角形区域。

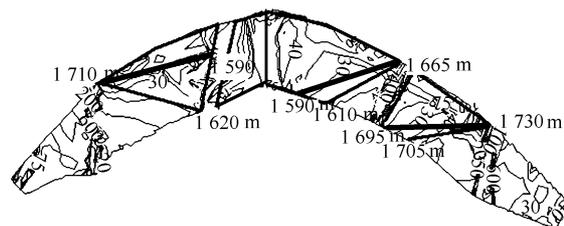


图5 开挖完成时建基面松弛分布区域示意图（单位： 10^{-5} ）
Fig.5 Relaxation area distribution in the foundation plane after excavation (unit: 10^{-5})

从左右岸各高程系列特征点的最大主拉应变分析来看,左岸 1 730~1 590 m 高程的松弛深度为 7.5~22.5 m,右岸 1 710~1 590 m 高程的松弛深度为 5.5~24.5 m,河床 1 590~1 580 m 区域松弛深度为 26.5~41.0 m,表明左岸 1 730 m 高程以下、右岸 1 710 m 高程以下以及河床部位松弛深度较大。

目前锦屏一级拱坝建基面左右岸均已开挖至 1 610 m 高程,根据开挖揭示以及现场声波检测及钻孔电视影像资料,发生卸荷松弛的区域分布与上述分析结果基本吻合,但是松弛深度一般在 2~4 m 范围内,局部最大为 5~6 m,与上述数值分析结果相差甚大,其可能的原因主要有:①建基面开挖尚未完成,接近河床部位的卸荷荷载尚未施加;②开挖卸荷松弛具有较强的时间效应,经过一定时间后松弛范围及深度均会有所扩展;③坡体内断层、深部裂隙及软弱岩带较多,它们在开挖卸荷作用下产生的应变很大,甚至在初始地应力状态时其最大主拉应变已经超过 20×10^{-5} ,影响了整个坡体松弛范围及深度的判断。

4 结 语

本文在已有研究成果的基础上,基于对岩石边坡开挖卸荷松弛过程和机制的定性分析,提出以岩石极限拉应变作为卸荷松弛的判别准则。通过对岩石极限拉应变室内试验资料与其抗拉强度之间关系的分析,并结合小湾工程卸荷松弛分析的成功实践经验,提出了极限拉应变值的取值原则,并明确了岩石边坡开挖后实际拉应变(总应变)的计算方法。将以上准则和方法应用于锦屏一级拱坝建基面开挖卸荷松弛的数值分析中,在松弛范围的划分判定方面取得了较好的结果,为工程建设提供了有益的指导。

本文的研究成果还比较初步,在以下几个方面存在不足,值得进一步进行研究工作:①本文提出的极限拉应变值确定原则只是针对目前此类岩石试验难以开展而提出的,若条件成熟还是应以试验来定,而且最好是基于现场岩体试验来测定;②工程应用结果表明,数值分析成果对松弛深度的判断与实际开挖揭示偏大很多,需在判别卸荷松弛时对断层、裂隙带等软弱岩带予以特别考虑,并且可以考虑对于不同弱化程度的岩体区域采取不同的极限拉应变值;③岩体开挖卸荷松弛具有较明显的时间效应,本文数值分析中并没有考虑。

参 考 文 献

- [1] 哈秋龄. 岩体工程与岩体力学仿真分析-各向异性开挖卸荷岩体力学研究[J]. 岩土工程学报. 2001, 23(6): 664-668.
- [2] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2001, 20(5): 603-618.
- [3] 张强勇, 朱维申, 陈卫忠. 三峡船闸高边坡开挖卸荷弹塑性损伤分析[J]. 水利学报. 1998, (8): 19-22.
- [4] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2008, 27(11): 2184-2192.
- [5] 李建林, 哈秋龄. 三峡卸荷岩体宏观力学参数三维数值模拟[J]. 武汉水利电力学报. 1997, 19(3): 1-6.
- [6] 丁秀丽, 徐平, 夏熙伦. 三峡船闸高边坡岩体开挖卸荷变形及流变分析[J]. 长江科学院院报. 1995, 12(4): 37-43.
- [7] 徐平, 周火明. 高边坡岩体开挖卸荷效应流变数值分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2000, 19(4): 481-485.
- [8] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 考虑岩体开挖卸荷边坡岩体质量评价[J]. 岩土力学. 2008, 29(10): 2741-2746.
- [9] 王瑞红, 李建林, 刘杰, 等. 考虑岩体开挖卸荷动态变化水电站坝肩高边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2007, 26(增刊): 3515-3521.
- [10] 王浩. 边坡开挖卸荷松弛区的力学性质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报. 2007, 18(增): 5-10.
- [11] 吴刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报. 2001, 09(02): 174-181.
- [12] CHEN S H, EGGER P. Elasto-viscoplastic distinct modelling of bolt in jointed rock masses[C]//Proc. Comp. Mech. and Adv. in Geomech. Wuhan: [s. n.]. 1997: 1985-1989.
- [13] 陈胜宏, Egger P, 熊文林. 加锚节理岩体流变模型及三维弹黏塑性有限元分析[J]. 水利学报, 1998, (9): 41-47.
- [14] CHEN S H, EGGER P. Three dimensional elasto-viscoplastic finite element analysis of reinforced rock masses and its application[J]. *Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.* 1999. 3(1): 61-78.