

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.04.038

砂浆锚杆加固效果的等效数值模拟方法研究

陈东方¹, 冯夏庭², 徐鼎平², 江 权², 刘国锋², 简崇林³

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘 要: 针对常规数值模拟计算无法有效地反映锚杆对围岩的加固效果的缺陷, 结合岩体变形在锚杆中产生的支护压力计算公式, 提出了一种简单、有效的砂浆锚杆加固等效数值模拟方法。该方法首先在有锚杆支护隧道开挖的计算结果中提取每根锚杆的最大轴力; 然后根据该轴力值按锚杆支护压力公式计算其所产生的等效均布力; 最后将该均布力施加到相同计算工况下无锚杆支护的围岩表面进行模拟计算。将该方法应用于锦屏二级水电站地下厂房枢纽洞室及乌东德水电站 4[#]导流洞 0+550 m 断面的开挖与支护计算, 通过与现场实测数据对比, 结果表明, 该方法能较好地模拟锚杆支护对围岩的加固效果, 其模拟结果可为隧洞的施工与支护设计提供可靠的参考依据。

关 键 词: 砂浆锚杆; 加固效果; 数值模拟; 支护设计

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 04 - 1195 - 10

An equivalent numerical method for evaluating the reinforcing effectiveness of grouted bolts

CHEN Dong-fang¹, FENG Xia-ting², XU Ding-ping², JIANG Quan², LIU Guo-feng², JIAN Chong-lin³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan, Hubei 430071, China; 3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Because conventional numerical methods fail to evaluate the effectiveness of grouted bolts in reinforcing the surrounding rockmass, a simple and effective equivalent numerical method, with combination of a formulation for the bolt supporting pressure induced by rockmass deformation, is proposed for this purpose. In this method, the maximum axial force of each bolt is first determined by numerically simulating the bolt-supporting tunnel excavation. The obtained maximum axial force is then used to calculate the equivalent force distributing along the rock bolt by using the formulation of the bolt supporting pressure. Finally, the excavation process without bolt supporting is simulated by applying the equivalent distributing force to the surrounding rockmass surface. This method is applied to calculate the excavation and support of the underground powerhouse at Jinping hydropower station and the diversion tunnel #4 (section 0+550 m) at Wudongde hydropower station. By comparing the calculation results with the field measured data, it is found that the proposed method can well address the effectiveness of grouted bolts in reinforcing the surrounding rock, and the simulation results can provide reference for tunnel construction and support design.

Keywords: grouted bolts; reinforcement effect; numerical simulation; supporting design

1 引 言

普通砂浆锚杆是隧洞工程中广泛采用的支护结构之一, 锚杆的加固效果已被大量工程实践所证实^[1-6]。然而, 作为支护设计的有利支撑, 如何利用数值模拟手段有效地反映锚杆对围岩的加固效果

仍是一个需要广泛讨论和研究的热点问题。在数值模拟方面, 大型通用的计算软件通常是将常规锚杆单元模型作为杆单元来处理, 这种模拟方法能模拟锚杆的支承作用, 也能较准确地获得锚杆轴力, 但没有考虑锚杆与岩体的联合作用, 不能较真实地模拟锚杆改善围岩的应力状态。因而计算得到的锚杆

收稿日期: 2014-08-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(No. 11232024); 国家自然科学基金国际合作重大项目资助(No. 41320104005); 国家自然科学基金(No. 51309219)。

第一作者简介: 陈东方, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事岩体工程设计智能优化及风险量化理论方面的研究工作。E-mail: cdf612.cn@163.com

对围岩的支护效果甚微,反映不出大量工程实践所揭示的锚杆强有力的支护效果。

目前,解决这个问题主要存在两种途径。一是建立加锚岩体的本构关系。例如,朱训国等^[7]分别建立了锚杆与注浆体或岩体耦合及非耦合状态下的解析本构方程;杨松林等^[8]将加锚的层状岩体作为等效连续介质推导了加锚层状岩体的本构方程,该模型可对节理岩体中的锚杆加固作用做出合理的定量评价;李术才等^[9]根据应变能等效的方法和自洽理论,建立了加锚断续节理岩体断裂损伤模型;同时杨廷毅^[10]、张玉军^[11]及张强勇^[12]等也从不同角度构建了加锚岩体的本构模型。此类方法虽然能较好地反应围岩与锚杆的相互作用关系,但其计算机制过于复杂。另一种途径是将锚杆的加固效果等效处理,不改变加锚岩体的本构关系,只改变其力学参数。朱维申等^[13]通过模型试验研究了不同布锚参数下节理岩体的抗压强度、弹性模量等力学参数的变化规律;陈卫忠等^[14]在进行边坡稳定性分析时通过经验公式提高岩体的强度参数来模拟锚杆的加固效果;蔡小林等^[15]利用有限元分析软件 FINAL 在考虑岩土弹塑性性能基础上,研究分析了通过提高锚杆区域围岩参数模拟锚杆作用的可行性;刘杰等^[16]对系统锚杆采用二维“子模型”进行等效计算,通过提高初期衬砌参数来等效系统锚杆的施加效应。以上研究结果表明,同时提高锚杆作用区域的围岩参数可以较好地实现模拟锚杆控制围岩变形及应力释放等作用。但该方法在很多情况下无法确定应该提高弹性模量、凝聚力还是内摩擦角等何种岩体力学参数。虽然一些学者在这方面做了相关研究,但仍然没有得到共识。如朱敬民等^[17]对岩石与锚杆组合材料的力学性能进行的模拟研究结果表明,当锚杆沿着试件的轴线方向时,围岩强度的提高主要是内摩擦角 φ 增加,而凝聚力 c 几乎没有变化;Marence 等^[18]则研究认为,在有节理岩体中,锚杆的作用提高了围压的凝聚力和刚度,而内摩擦角是不变的,但对于不同岩体是不是都符合这种规律是不得而知的。除此之外,吴文平等^[19]认为,此类方法存在更大的缺陷在于先将围岩的力学参数调整为加锚岩体的力学参数,然后进行开挖模拟,这与实际工程中先开挖后支护的施工顺序不符。因为围岩在开挖前是没有锚杆加固的,这导致模拟结果过分夸大锚杆的加固效果。针对上述问题,笔者在前人的研究基础上,结合锚杆与围岩的相互作用关系,提出了一种简单、方便并且有效的锚杆加固等效数值模拟方法。

2 砂浆锚杆加固效果的等效数值模拟方法

对于锚杆对围岩的等效加固效果,已有学者从锚杆对围岩的等效支护力的角度进行了相关研究。麦侗曾等^[20]在假设锚杆轴力按二次抛物线分布,并且最大值在杆体中点的情况下,认为锚杆与围岩的相互作用力为

$$\sigma_x = -\frac{1}{\pi d} \frac{8xN_{\max}}{l^2} \quad (1)$$

式中: l 为锚杆的长度; N_{\max} 为锚杆轴力最大值; d 为锚杆直径; x 为锚杆上的点距锚杆端部的距离,并且 $0 \leq x \leq l/2$ 。

正是由于这一作用力的存在,使围岩近似处于三向应力状态。若将各根锚杆中受力情况看成一样的,将这一作用力移植到锚杆端部的岩面上去,可近似为锚杆对围岩的等效支护力,其大小为

$$\sigma = \int_0^{l/2} \frac{n}{S} \sigma_x \pi d dx = -\frac{8N_{\max}n}{Sl^2} \int_0^{l/2} x dx = -\frac{nN_{\max}}{S} \quad (2)$$

式中: n 为锚杆数; S 为围岩表面积。

虽然以上研究提出了锚杆等效支护力的计算公式,但对于实际工程中的锚杆受力而言,不同部位的锚杆受力往往存在着差异性,相应的不同部位锚杆对围岩的加固效果也是不同的,因此,该公式的应用具有局限性。

对于锚杆支护体系中单个锚杆对围岩的支护效果,姚宜春等^[21]从锚固微元与岩体的受力关系出发,认为由于锚杆作用,使得围岩变形减小,相应的围岩中应力增加了 $\Delta\sigma_r$ 。由静力等效,有

$$\sigma_b A = \Delta\sigma_r S_1 \quad (3)$$

式中: σ_b 为锚杆轴向应力; A 为锚杆横截面积; S_1 为锚杆的影响范围。

因此,单个锚杆对围岩产生的支护力为

$$\Delta\sigma_r = \frac{\sigma_b A}{S_1} \quad (4)$$

实际上,式中 $\sigma_b A$ 即为锚杆所受轴力的大小,因此,该公式与式(2)在形式上是吻合的。

同时,对于锚杆对围岩的影响范围,Torres^[22]和 Hoek^[23]等认为,可近似为锚杆间排距所围成的面积,并且岩体变形在锚杆中产生的最大支护压力为

$$P_s^{\max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_1} \quad (5)$$

式中: T_{bf} 为锚杆系统的最终抗拉强度; s_c 为锚杆间距; s_1 为锚杆排距。

基于以上研究成果,本文提出了锚杆加固效果

的等效数值模拟计算方法，计算流程如图 1 所示。

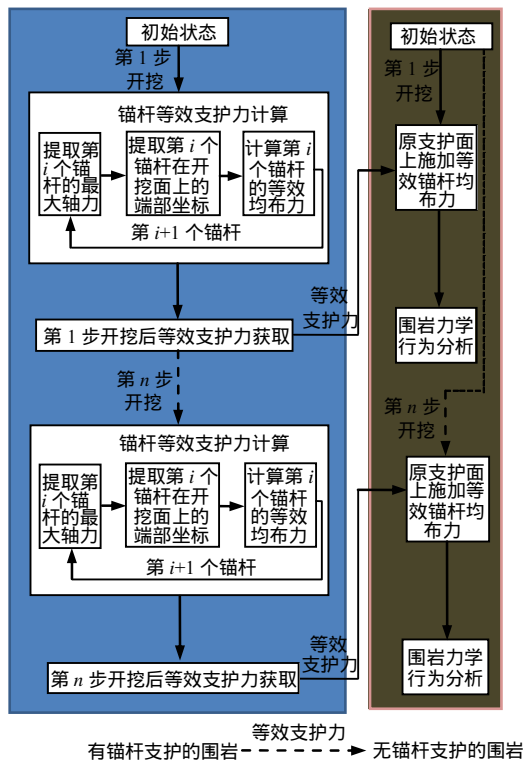


图 1 锚杆加固效果的等效计算流程图

Fig.1 Flow chart for the equivalent calculation of bolt reinforcement effects

具体步骤如下：

(1) 根据实际开挖步序及支护参数模拟洞室开挖过程，利用 fish 语言提取每根锚杆在开挖面上的端部坐标及最大轴力，如图 2(a)所示。

(2) 根据锚杆间排距及锚杆在开挖面上的端部坐标计算并确定每个锚杆所作用的范围，如图 2(b)所示。

(3) 将提取的锚杆轴力替换式(5)中的锚杆系统的最终抗拉强度 T_{bf} 计算每根锚杆的等效均布力。

(4) 在不考虑锚杆单元的计算工况下，以相同的开挖步序模拟洞室的开挖，同时在开挖面上施加由步骤(3)得到的锚杆等效均布力(见图 2(c))，计算至收敛即可获取当前开挖工况下的围岩力学状态。

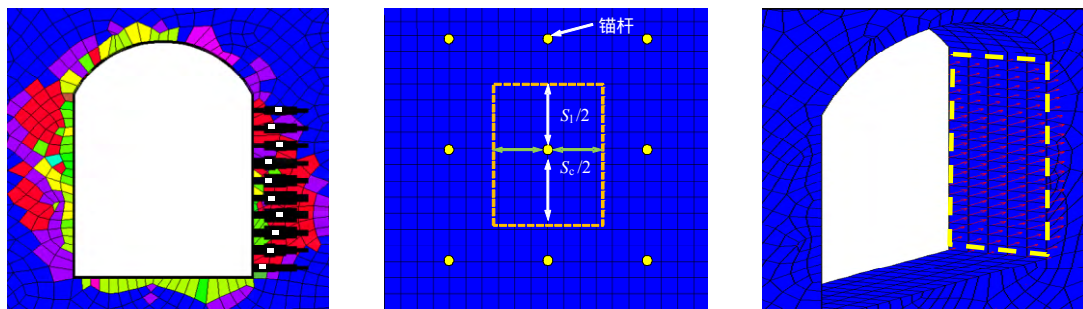
(5) 根据以上计算流程对下一步的开挖支护进行锚杆加固效果的等效计算。

3 锚杆加固效果的等效计算方法验证

3.1 工程应用一

3.1.1 工程概况

锦屏二级水电站是位于雅砻江水头最高、装机规模最大的水电站。水电站地下发电枢纽位于雅砻江



(a) 岩体开挖后每根锚杆最大轴力提取 (b) 每个锚杆作用面积计算 (c) 等效均布力作用于无锚杆支护结构的围岩上计算至平衡

图 2 锚杆加固效果的等效计算过程示意图

Fig.2 Schematics of the equivalent calculation of bolt reinforcement effects

右岸，厂房尺寸为 352.40 m×28.3 m×72.20 m (长×宽×高)，装有 8 台 600 MW 的水轮发电机组，主变洞尺寸为 374.60 m×19.80 m×31.40 m (长×宽×高) 位于主厂房下游侧 45 m 处，并通过 8 条母线洞、8 条尾水管、尾闸室等构成一大型洞室群结构。其中厂房自上而下分 8 期开挖，而主变室自上而下分 4 期开挖(见图 3)。厂房枢纽洞室群所采用的围岩支护方式包括砂浆锚杆、锚索、喷射混凝土等，具体的支护参数如图 4 所示。

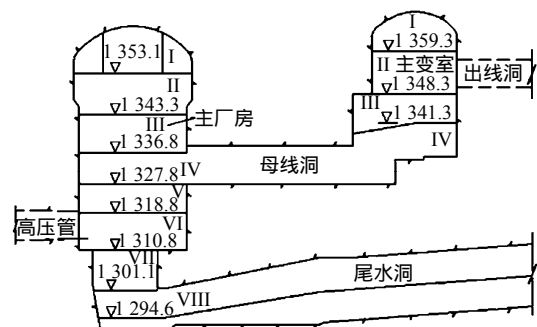


图 3 厂房枢纽洞群分层开挖方案^[23] (单位：m)
Fig.3 Excavation scheme of underground cavern group^[23] (unit : m)

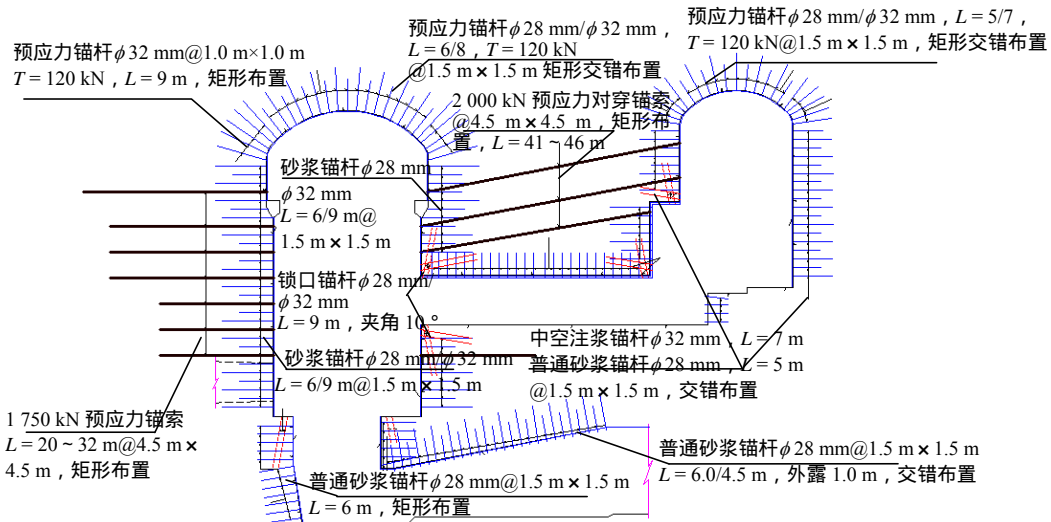


图4 厂房枢纽主要洞室锚杆支护设计^[24]

Fig.4 Design of the rock bolt support for underground caverns^[24]

3.1.2 计算模型及参数确定

本文以监测断面厂右 R0+192 (见图5) 的主厂房层、层及主变室层开挖支护过程为研究对象, 该断面位于盐塘组 T_{2y}^{S-1} 灰黑色中厚层细晶大理岩中, 围岩类别为 类。

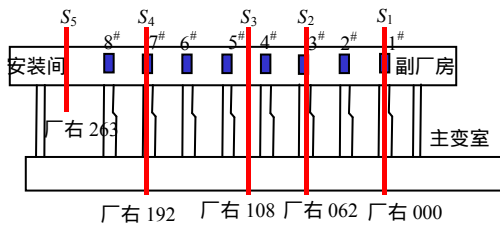


图5 系统监测断面

Fig.5 Systematic monitoring sections

数值分析的本构模型采用江权等^[25]提出的岩体劣化模型 (rock deterioration model, RDM)。该模型考虑了破损区内的岩体力学性质随着岩体破损程度的不同而发生相应劣化的特征, 进而描述了岩体力学参数随围岩力学性质劣化而动态更新的过程。岩体力学参数采用该监测断面 T_{2y}^{S-1} 地层的参数反演研究成果^[26], 见表1。

表1 岩体力学参数

Table 1 Parameters of rock mechanics

E_0	E_d	ν	ϕ_0	ϕ_d	c_0	c_d	$\bar{\epsilon}_p^p$	$\bar{\epsilon}_c^p$
/GPa	/GPa		/ (°)	/ (°)	/MPa	/MPa	/10 ⁻³	/10 ⁻³
8.2	5.4	0.23	22.5	52	7.5	0.5	5.0	4.0

注: E_0 为初始变形模量; E_d 为劣化变形模量; ν 为泊松比; ϕ_0 为初始内摩擦角; ϕ_d 为劣化内摩擦角; c_0 为初始凝聚力; c_d 为残余凝聚力; $\bar{\epsilon}_p^p$ 为塑性应变; $\bar{\epsilon}_c^p$ 为等效塑性。

为了模拟厂右 R0+192 监测断面厂房层、层及主变室层的开挖支护过程, 本文构建了相应

的三维网格模型如图6所示。模拟所包含的支护形式包含普通砂浆锚杆、预应力锚杆及混凝土喷层。其中砂浆及预应力锚杆采用 Cable 单元模拟, 混凝土喷层采用 Shell 单元模拟, 开完后最终的支护结构形式如图7所示。

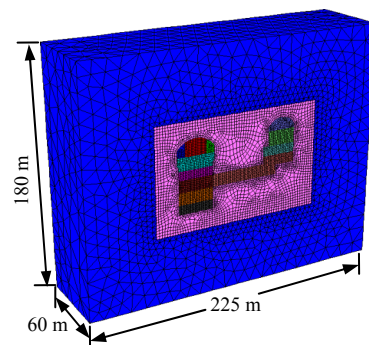


图6 锦屏水电站地下厂房三维网格模型

Fig.6 Three-dimensional mesh model of underground powerhouse in Jinping II hydropower station

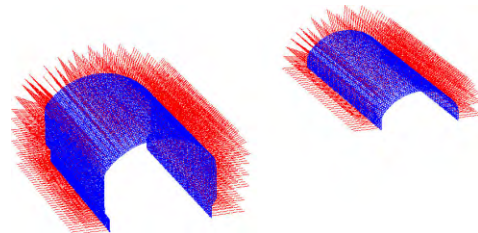


图7 主厂房及主变室支护结构模拟

Fig.7 Simulated responses of support structures

3.1.3 计算结果对比分析

根据开挖支护设计方案, 厂房及主变室在每一分层开挖后及时进行喷射混凝土以封闭围岩, 并进行了不同间排距及长度的普通砂浆锚杆及预应力锚杆支护。基于数值模拟计算结果, 获取了厂房层

及主变室 层开挖支护后锚杆的受力情况，并提取了每根锚杆的最大轴力（见图 8）及端部坐标。结合每根锚杆的间排距，根据式（5），将得到的等效均布力施加在相同工况但无锚杆支护的开挖面上（见图 9），进而通过计算得到了厂房 层及主变室层锚杆加固效果下的围岩力学状态。

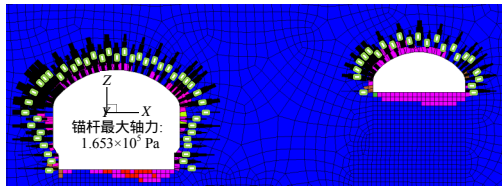


图 8 每根锚杆最大轴力的提取 (Y=30 m)
Fig.8 Determination of the maximum axial force of each bolt (Y=30 m)

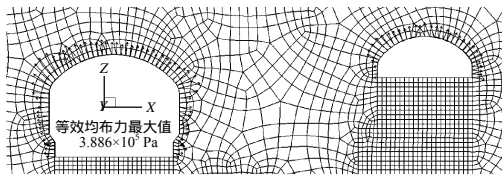
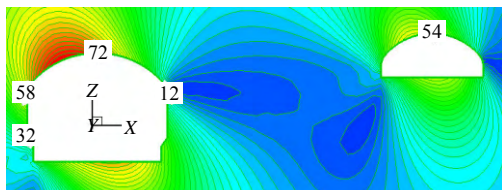
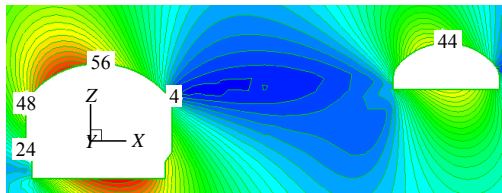


图 9 等效均布力的施加 (Y=30 m)
Fig.9 Application of the equivalent distributing force of each bolt (Y=30 m)

图 10 为常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果的等效数值模拟下，Y=30 m 断面处围岩的位移分布情况，对比两种计算结果可以看出，厂房锚杆加固效果下，顶拱、左、右侧拱座及主变室顶拱处围岩变形要比常规锚杆支护数值模拟的结果分别小 16、10、8、10 mm。因此，锚杆加固效果的等效数值模拟计算对围岩的变形可以起到明显的抑制作用。



(a) 常规锚杆支护数值模拟下围岩位移分布情况



(b) 锚杆加固效果等效数值模拟下围岩位移分布情况

图 10 常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效数值模拟下的围岩位移分布情况对比 (Y=30 m)
Fig.10 Comparisons of the calculated contours of the surrounding rockmass based on the conventional numerical method and the proposed equivalent numerical method (Y=30 m)

由于厂右 R0+192 监测断面的多点位移计是在厂房 层开挖前通过排水廊道布置的，因此，可以监测到开挖后完整的围岩变形过程。本文选取了厂房 层开挖后监测过程完整有效的测点 Mcf0+192-1 与 Mcf0+192-3（见图 11）的监测数据（见图 12）作为计算结果的验证依据。

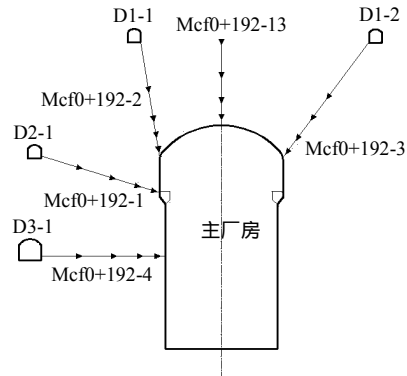
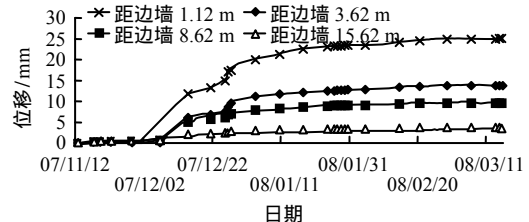
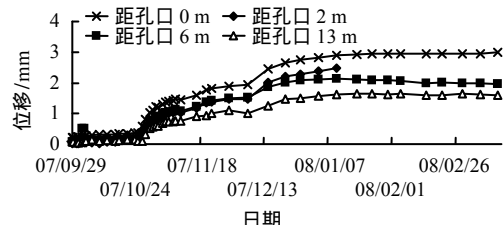


图 11 右厂 R0+192 多点位移计监测布置示意图
Fig.11 Layout of monitoring instrument at R0+192 of main powerhouse



(a) 多点位移计 Mcf0+192-1 监测到的变形-时间曲线



(b) 多点位移计 Mcf0+192-3 监测到的变形-时间曲线

图 12 主厂房第 2 层开挖时多点位移计监测到的变形-时间曲线

Fig.12 Deformation-time curves monitored with multi-point displacement meters during excavation of the second layer of the main powerhouse

从图 13 中可以看出，厂房 层开挖后，监测点 Mcf0+192-1 处锚杆加固效果等效计算下的位移值比实测值小了约 1 mm，而常规锚杆支护数值模拟下的位移值比实测值大了约 7 mm；监测点 Mcf0+192-3 处锚杆加固效果等效计算下的位移值比实测值大了约 1 mm，而常规锚杆支护数值模拟下的位移值比实测值大了约 9 mm；因此，锚杆加固效果下的围岩位移值与实测结果较为接近。同时，与常规锚杆支护数值模拟的计算结果相比，锚杆加固效果等效计算的准确性尤为突出。

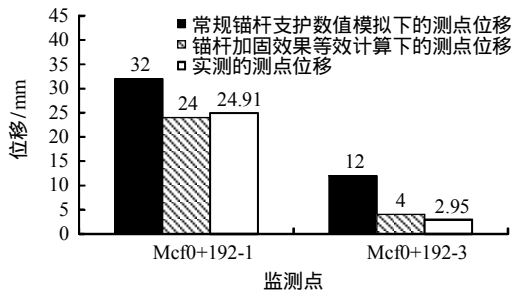


图 13 常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效计算下测点位移与实测结果对比

Fig.13 Contrast of displacements among the situation of normal numerical simulation and equivalent reinforcement of bolt support and the measured results

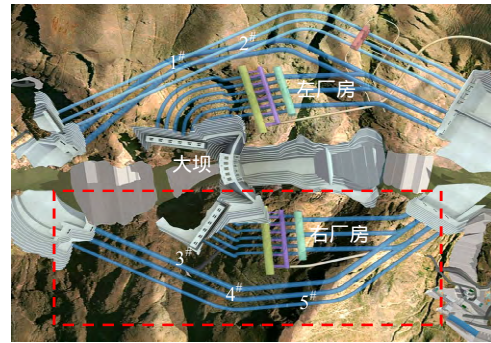


图 14 乌东德水电站导流洞布置示意图^[27]

Fig.14 Plane arrangement sketch of diversion tunnels of Wudongde hydropower station^[27]

3.2 工程应用二

3.2.1 工程概况

乌东德水电站左、右岸共布置了 5 条导流洞(左岸 1[#]和 2[#]导流洞、右岸 3[#]~5[#]导流洞,见图 14)。1[#]和 2[#]导流洞进口底板高程为 814 m,出口高程为 800 m,洞身呈城门洞型,净断面尺寸约为 18 m×26 m(宽×高)。3[#]和 4[#]导流洞为低高程导流洞,进口底板高程为 812 m,出口底板高程为 800 m,净断面尺寸约为 20 m×27.5 m(宽×高);5[#]导流洞为高高程导流洞,进口底板高程为 833 m,出口高程为 824 m,净断面尺寸约为 15 m×19 m(宽×高)。导流洞洞线呈平行布置,轴线间距为 50 m,洞间岩柱宽度约为 32~35 m。

本文选取 4[#]导流洞 0+550 m 断面为研究对象,该部位地层为因民组极薄层大理岩化白云岩(P_{t2y}^{2-1}),单层厚度一般为 3~7 mm,层间多充填 0.5~1.0 mm 左右厚的千枚岩膜,遇水易软化泥化,层间多较光滑。岩层产状为 123° 52°,其走向与洞轴线夹角仅为 20°。结构面以层面为主,微裂隙发育,岩体破碎,围岩类别为 Ⅲ类^[28](如图 15 所示)。



图 15 4[#]导流洞 0+550 m 断面左侧边墙层状岩体层面分布图

Fig.15 Rock layer distribution of left sidewall of section 0+550 m of diversion tunnel #4

3.2.2 计算模型及相关参数确定

根据文献^[27],工程区地应力以自重应力为主,因此,研究洞段(埋深为 352m)的初始应力场为自重应力场。考虑薄层岩体的结构和力学特性,岩体力学模型采用遍布节理模型,该模型可以考虑层状岩体基质和层面力学性质的差异,模型详情参见文献^[29]。其力学参数根据数值计算反演选定,列于表 2。

表 2 岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock mass

E/GPa	ν	$\psi/(^\circ)$	σ^t/MPa	c/MPa	$\phi/(^\circ)$	c_j/MPa	$\phi_j/(^\circ)$	$dip/(^\circ)$	$dd/(^\circ)$	$\psi_j/(^\circ)$	σ_j^t/MPa
1.8	0.33	8.0	1.0	2.0	45	0.1	25	52	123	6.0	0.2

注: E 为变形模量; c 和 ϕ 、 c_j 和 ϕ_j 分别为基质和层面的凝聚力和内摩擦角; σ^t 和 σ_j^t 分别为基质和层面的抗拉强度; ψ 和 ψ_j 为基质和层面的剪胀角; dip 为层面倾角; dd 为倾向。

4[#]导流洞 0+550 m 断面的开挖及支护方式如图 16 所示。隧洞为城门洞型,洞身高为 27.2 m,宽为 19.9 m。隧洞分 5 层开挖,其中 1 层开挖高度为 9 m, 2~5 层开挖高度均为 4.5 m, 6 层开挖高度为 4.7 m。全断面采用 6 m 和 9 m 交叉布置的系统砂浆锚杆支护,锚杆直径为 $\phi 28$ mm,间排距为 1.5 m×1.0 m;在左、右边墙拱座以下布置 6 排 12 m

长的 125 kN 预应力锚杆,锚杆直径为 $\phi 32$ mm,间排距为 3.0 m×3.0 m;围岩表面喷射厚度为 25 cm 的 C25 钢纤维混凝土,同时施加间距为 1 m 的 I20 钢拱架。所构建的三维网格模型如图 17 所示。锚杆采用 Cable 单元模拟,混凝土喷层及钢拱架共同采用 Shell 单元模拟, 6 层开挖后最终的支护结构形式如图 18 所示。

3.2.3 计算结果对比分析

由于 4[#]导流洞 0+550 m 断面的多点位移计是在层开挖前布置的，因此，缺乏层开挖的监测位移量。为检验锚杆加固效果的等效计算结果与现场实测数据的差异，本文选取该断面在层开挖前后顶拱及左、右侧边墙处的监测位移增量及锚杆加固效果等效计算下的位移增量进行对比。

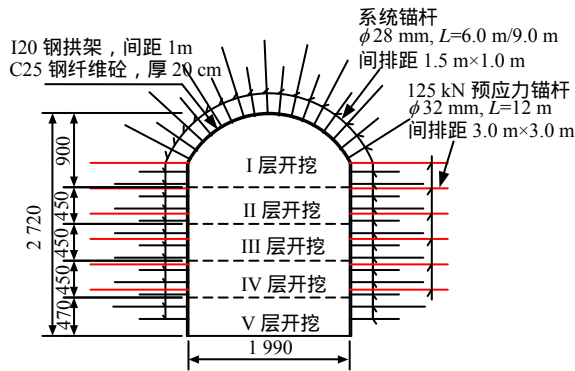


图 16 开挖尺寸及支护形式 (单位: mm)
Fig.16 Excavation size and support forms (unit: mm)

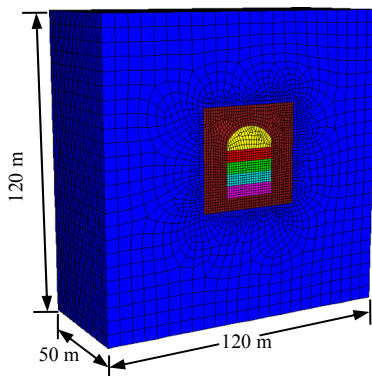


图 17 乌东德 4[#]导流洞三维网格模型
Fig.17 Three-dimensional mesh model of diversion tunnel #4 at Wudongde hydropower station

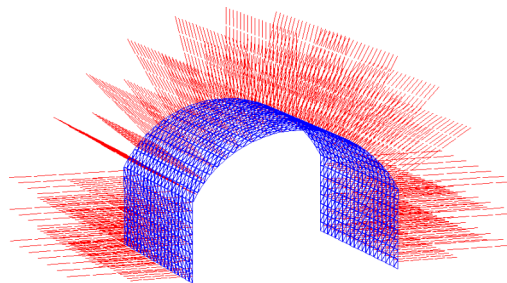


图 18 支护形式模拟
Fig.18 Simulation of support forms

通过数值计算模拟层开挖支护过程，获取了锚杆的受力情况。根据图 1 的计算流程提取了每根锚杆的最大轴力 (见图 19)，并将等效的均布力施加于围岩表面 (见图 20)，进而得到了层开挖后锚杆加固效果等效数值模拟下的围岩力学状态。

通过图 21(图中三角形指示现场多点位移计布置位置)的计算结果可以对比发现，Y=25 m 断面处锚杆加固效果下顶拱、左、右侧拱座处围岩变形要比常规锚杆支护数值模拟的结果分别小 12、8、8 mm。

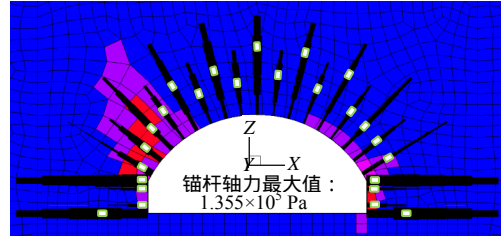


图 19 层开挖后每根锚杆最大轴力提取 (Y=25 m)
Fig.19 Maximum axial force of each bolt determined after layer excavation (Y=25 m)

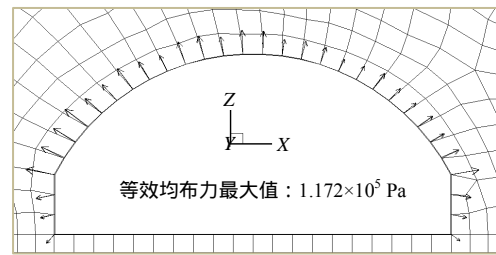
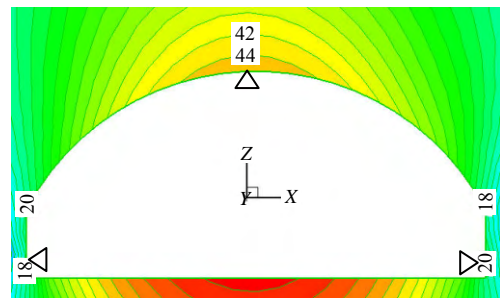
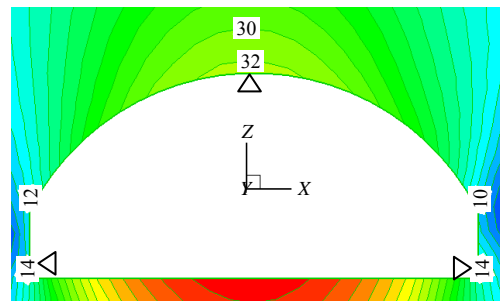


图 20 层开挖后等效均布力的施加 (Y=25 m)
Fig.20 Application of equivalent uniform force of each bolt after layer excavation (Y=25 m)



(a) 层开挖后常规锚杆支护数值模拟下的围岩位移分布情况



(b) 层开挖后锚杆加固效果等效数值模拟下围岩位移分布情况

图 21 层开挖后常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效数值模拟下的围岩位移分布情况对比 (Y=25 m)
Fig.21 Comparisons of the calculated surrounding rock displacement contours after Layer I excavation based on the conventional numerical method and the equivalent numerical method (Y=25 m)

同样，对 层开挖支护进行数值模拟计算，得到的锚杆轴力及等效均布力施加情况分别如图 22、23 所示。

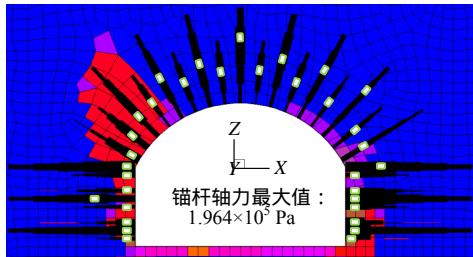


图 22 层开挖后每根锚杆最大轴力提取 (Y=25 m)
Fig.22 Maximum axial force of each bolt extracted after layer excavation (Y=25 m)

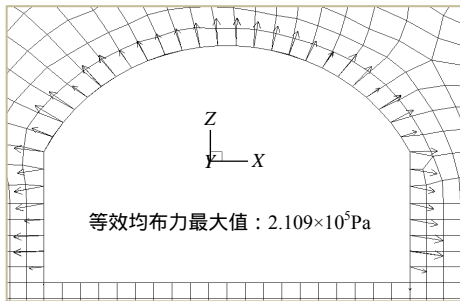
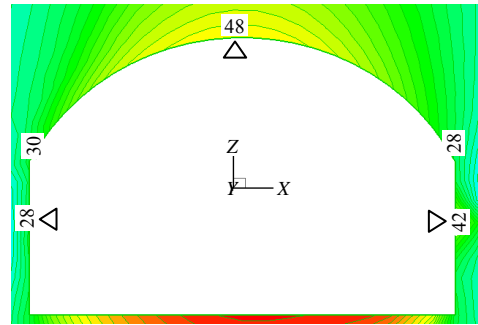


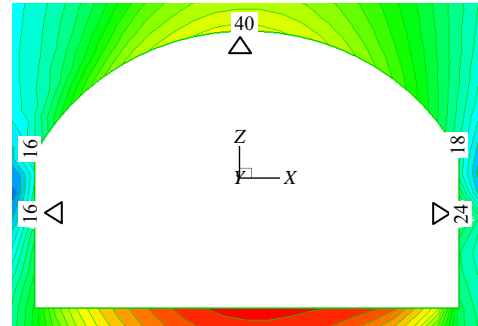
图 23 层开挖后均布面力的施加 (Y=25 m)
Fig.23 Application of equivalent uniform force of each bolt layer excavation (Y=25 m)

对比常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果的等效数值模拟下 Y=25 m 断面处围岩的位移分布情况 (见图 24)，同样可以看出，锚杆加固效果的等效计算对围岩的变形起到了明显的抑制作用。

图 25 为 4[#]导流洞 0+550 断面顶拱及左右边墙监测点处在 层开挖前后的位移监测曲线，进而由此获取各监测点处的 层开挖位移增量。同时与图 21、24 所计算的常规锚杆支护数值模拟及锚杆加固效果计算下各监测点的位移增量相比 (见图 26)，顶拱中心线处锚杆加固效果等效计算下的位移值比实测值小了约 1 mm，而常规锚杆支护数值模拟下的位移值比实测值大了约 5 mm；左侧边墙处锚杆加固效果等效计算下的位移值比实测值大了约 0.5 mm，而常规锚杆支护数值模拟下的位移值比实测值大了约 8.5 mm；右侧边墙处锚杆加固效果等效计算下的位移值比实测值小了约 0.2 mm，而常规锚杆支护数值模拟下的位移值比实测值大了约 12 mm。可以看出，锚杆加固效果等效数值模拟的计算结果与实测的结果相符，同时验证了该方法可以体现锚杆抑制围岩变形的作用效果。



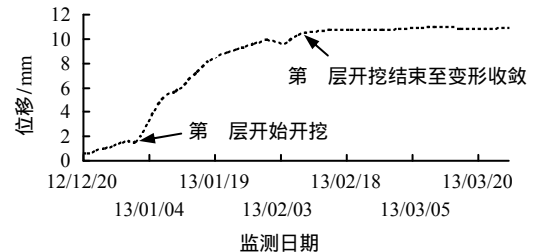
(a) 层开挖后常规锚杆支护数值模拟下围岩位移分布情况



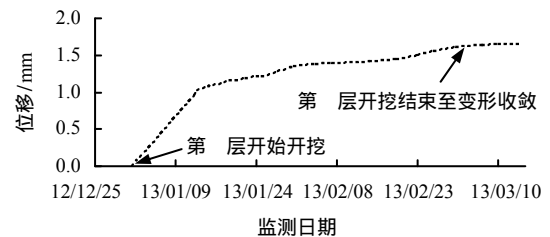
(b) 层开挖后锚杆加固效果等效数值模拟下围岩位移分布情况

图 24 层开挖后常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效数值模拟下的围岩位移分布情况对比 (Y=25 m)

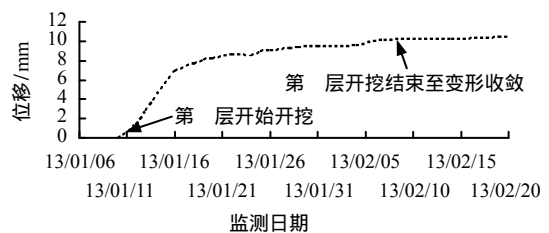
Fig.24 Comparisons of the calculated surrounding rock displacement contours after Layer II excavation based on the conventional numerical method and the equivalent numerical method (Y=25 m)



(a) 4[#]导流洞 0+550 m 断面顶拱中心线处孔口位移监测曲线



(b) 4[#]导流洞 0+550 m 断面左侧边墙孔口位移曲线



(c) 4[#]导流洞 0+550 m 断面右侧边墙孔口位移曲线

图 25 基于多点位移计的 层开挖监测点位移曲线
Fig.25 Displacement curves of monitoring points after layer excavation based on multi-point displacement meter

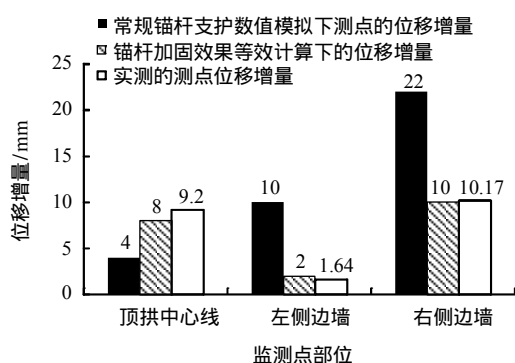


图 26 常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效计算下测点位移增量与实测结果对比

Fig.26 Comparisons between the calculated and measured results of the displacements at various points.

4 结论及讨论

(1) 锚杆对围岩的加固效果可以从在开挖面上加等效均布面力的角度来研究。其主要过程为：首先在隧道的开挖支护至围岩稳定后，提取每根锚杆的最大轴力；然后根据该轴力值按锚杆支护压力公式计算其所产生的等效均布力；最后将该均布力施加在相同计算工况下但无锚杆支护的围岩表面，以反映锚杆加固对围岩应力状态的改善作用。

(2) 对比分析锦屏二级水电站厂房层、主变室层及乌东德4#导流洞0+550m断面层和层开挖后常规锚杆支护数值模拟与锚杆加固效果等效数值模拟下的围岩位移分布曲线可以看出，相同部位锚杆加固效果下的围岩位移要明显小于常规锚杆支护数值模拟下的围岩位移。因此，将该方法应用于锚杆对围岩加固效果的等效数值模拟计算是有效的。

(3) 通过实际工程验证，锚杆加固效果的等效数值模拟计算结果与现场监测数据较为接近。因此，该方法的模拟结果符合客观实际。

(4) 本文提出的锚杆加固效果的等效模拟方法充分考虑了围岩与支护结构之间的相互作用关系，可应用于不同岩性及本构关系的数值模拟计算，有效克服了传统模拟方法的缺陷，应用范围广泛。与以往方法相比，该方法仅在结构单元模拟方法计算结果的基础上再增加一次计算，却既能有效避免锚杆支护结构的围岩力学参数难以确定的难题，也可以在精确获得每根锚杆受力的情况下，给出更为准确的加锚围岩力学响应行为的预测，因此，该方法可应用于锚杆的支护时机及锚杆支护参数优化等方面的数值模拟研究。

参考文献

- [1] FREMAN T J. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. *Tunnels and Tunneling*, 1978, 10(5): 37 - 40.
- [2] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: [s. n.], 1995.
- [3] 朱浮声, 郑雨天. 全长粘结式锚杆的加固作用机理分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(4): 333 - 337. ZHU Fu-sheng, ZHENG Yu-tian. Support action analysis of tensioned and grouted bolts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(4): 333 - 337.
- [4] GRAZIANI A. Evaluation of rockbolt effectiveness in reducing tunnel convergence insqueezing rocks[J]. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2000, (1): 64 - 72.
- [5] 胡涛, 刘海涛, 刘雄, 等. 砂浆预应力锚杆轴向应力分布研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(增刊1): 179 - 182. HU Tao, LIU Hai-tao, LIU Xiong, et al. Study of axial stress distribution of mortar prestressed anchor rods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(Supp.1): 179 - 182.
- [6] HOEK E. Model to demonstrate how rockbolts work[J]. *Practical Rock Engineering*, www.roscience.com, 2007.
- [7] 朱训国, 杨庆, 栾茂田. 岩体锚固效应及锚杆的解析本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 527 - 532. ZHU Xun-guo, YANG Qing, LUAN Mao-tian. Study of reinforcement effect of anchored rock masses and analytic constitutive equation for rock bolt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 527 - 532.
- [8] 杨松林, 朱焕春, 刘祖德. 加锚层状岩体的本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 427 - 430. YANG Song-lin, ZHU Huan-chun, LIU Zu-de. A new constitutive model of the layered rock mass reinforced with bolts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 427 - 430.
- [9] 李术才, 王刚, 王书刚, 等. 加锚断续节理岩体断裂损伤模型在硐室开挖与支护中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1582 - 1590. LI Shu-cai, WANG Gang, WANG Shu-gang, et al. Application of fracture-damage model to anchorage of discontinuous jointed rock mass of excavation and supporting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1582 - 1590.
- [10] 杨廷毅, 王慎跃. 加锚节理岩体的损伤增韧止裂模型研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(1): 9 - 17. YANG Yan-yi, WANG Shen-yue. Study on toughening of jointed rock masses reinforced with bolts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(1): 9 - 17.
- [11] 张玉军, 刘谊平. 锚固正交各向异性岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(8): 1115 - 1119.

- ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. 3D elastoplastic finite element analysis for bolted orthotropic rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1115 - 1119.
- [12] 张强勇. 岩土工程强度与稳定计算及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 78 - 82.
- [13] 朱维申, 任伟中. 船闸边坡节理岩体锚固效应的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 720 - 725.
- ZHU Wei-shen, REN Wei-zhong. Research on reinforcing effects for jointed rock masses of shiplock slope by physical modeling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 720 - 25.
- [14] 陈卫忠, 朱维申. 节理岩体加固效果及其在边坡工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 2001, (1): 3 - 6.
- CHEN Wei-zhong, ZHU Wei-shen. Solidification effect of jointed rock mass and its application to the slope engineering[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2001, (1): 3 - 6.
- [15] 蔡小林, 赵德安. 隧道计算中提高围岩参数模拟锚杆作用的探讨[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2004, 23(1): 10 - 14.
- CAI Xiao-lin, ZHAO De-an. Probe into simulation of the bolt function by increasing geometrical parameters in tunnel calculation[J]. **Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Science**, 2004, 23(1): 10 - 14.
- [16] 刘杰, 唐亮, 李建林, 等. 基于隧道衬砌和等效锚杆模拟的密集地下洞室群稳定性分析[J]. 岩石力学, 2014, 35(增刊 1): 373 - 381.
- LIU Jie, TANG Liang, LI Jian-lin, et al. Stability analysis of close-located underground caverns based on tunneling and equivalent anchor bolt simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp. 1): 373 - 381.
- [17] 朱敬民, 王林, 顾金才, 等. 岩石和锚杆组合材料力学性能的模拟试验研究[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1988, 32(2): 11 - 18.
- ZHU Jing-min, WANG Lin, GU Jin-cai, et al. Modelling study on mechanical behavior of complex material consisted of rock and rockbolts[J]. **Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering**, 1988, 32(2): 11 - 18.
- [18] MARENCE M, SWOBODA G. Numerical model for rock bolts with consideration of rock joint movement[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1995, 28(3): 145 - 165.
- [19] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞系统砂浆锚杆的加固机制与加固效果模拟方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 2711 - 2721.
- WU Wen-ping, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Reinforcing mechanism and simulating method for reinforcing effects of systemically grouted bolts in deep-buried hard rock tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 2711 - 2721.
- [20] 麦侗曾, 张玉军. 锚固岩体力学性质研究[J]. 工程力学, 1987, 4(1): 106 - 116.
- MAI Ti-zeng, ZHANG YU-jun. Research of the bolted rocks statical behavior[J]. **Engineering Mechanics**, 1987, 4(1): 106 - 116.
- [21] 姚显春, 李宁, 陈蕴生. 隧洞中全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2272 - 2276.
- YAO Xian-chun, LI Ning, CHEN Yun-sheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2272 - 2276.
- [22] CARRANZA-TORRES C, FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock-masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2000, 15(2): 187 - 213
- [23] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: The Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [24] 江权, 冯夏庭, 向天兵, 等. 大型洞室群稳定性分析与智能动态优化设计的数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 524 - 539.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, XIANG Tian-bing, et al. Numerical simulation method for stability analysis and intelligent and dynamic optimization design of large cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 524 - 539.
- [25] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144 - 152.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Guo-qing. Study of constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 144 - 152.
- [26] 冯夏庭, 周辉, 江权, 等. 雅砻江锦屏二级水电站大型地下厂房洞室群施工期快速监测与反馈分析阶段报告二[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [27] 钮新强, 石伯勋, 翁永红, 等. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2011.
- [28] 长江设计公司乌东德水电站设计代表处. 金沙江乌东德水电站施工地质简报(总第 5-60 期) [R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2012.
- [29] Itasca Consulting Group. FLAC3D Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, user's manual[S]. Minneapolis, Minnesota, USA: [s. n.], 2005.