

预应力锚索锚固效应的三维数值模拟 及其工程应用研究

张思峰¹, 周 健¹, 宋修广², 李术才²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 预应力锚固技术在岩土加固的各个领域得到了广泛的应用, 但是关于其锚固机理的研究仍处于探索阶段。本文采用快速拉格朗日分析法 (FLAC^{3D}) 对预应力单、群锚体系作用下锚固段、自由段以及锚头部位的受力、变形和破坏机理进行了三维数值模拟分析, 探讨了影响锚固段剪应力分布的一些因素, 在此基础上得出了一些有益的结论, 可为预应力锚固的工程设计和理论研究提供参考。最后, 将其应用到工程实践中, 证明了其有效性。

关键词: 预应力锚索; 锚固效应; 数值模拟; 工程应用

中图分类号: TU452, O241

文献标识码: A

0 前言

预应力锚固技术具有对岩土体扰动小、施工快、安全、经济等优点, 在岩土加固的各个领域得到了广泛的应用, 充分显示了其巨大的经济效益和社会效益。但关于锚固机理方面的研究仍滞后于工程实践, 大多数设计只能主要凭经验和工程类比法来确定。国内外一些学者从现场试验、室内试验及数值分析方面进行了一些这方面的研究, 但对于单根锚索内锚固段剪应力分布机理的研究相对较多。如 Fuller 和 Cox RHT^[1] 采用模型试验的方法研究了荷载作用下锚索与砂浆之间的位移与粘结力的关系; 尤春安, 张瑞良等^[2~3] 则分别通过弹性理论分析得出了锚固段剪应力分布的公式; Stillborg^[4] 则将拉力型锚索的表面剪应力沿内锚固段全长表示为指数形式分布; Li C. 和 Stillborg^[5] 在试验基础上验证了上述结论, 并提出随着荷载增大, 将使锚固段前部首先产生破坏, 剪应力随之下降; Malek Bouteldja^[6] 通过有限元数值模拟试验研究了锚索几何形状、粘结材料、围压等因素对锚固段抗剪刚度的影响。另外, 一些学者也对单根锚索作用下周围岩体的应力应变特性进行了一些研究。如李铀, 白世伟等^[7~11] 分别通过试验或数值模拟方法对单锚作用下的锚固机理进行了分析和探讨, 得出了一些有益的结论。相对于单锚来说, 预应力群锚则由于相互作用机理更加复杂, 使得现场测试资料及理论分析工作还相当不足。但实际预应力锚固工程的经济性和安全性将在很大程度上

收稿日期: 2006-02-17

基金项目: 山东省交通厅基金项目 (2005y002)。

作者简介: 张思峰 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程计算分析工作。E-mail: sddxzsf@163.com

取决于这种群锚之间的相互作用, 因此, 如何合理的预测群锚效应, 并使其在实际工程的设计中得以体现将是一个十分重要的问题。目前对于群锚加固机理的研究还主要采用数值模拟的方法, 丁秀丽, 盛谦等^[10]曾结合三峡永久船闸预应力锚索加固高边坡工程, 采用数值模拟方法, 对多根锚索作用下的锚固机理进行了探索, 并提出了岩石锚固墙的概念。

本文在总结现有研究成果的基础上, 采用快速拉格朗日分析法着重对预应力单、群锚体系作用下锚固段、自由段以及锚头部位的受力、变形和破坏机理作了更进一步的探讨, 得到了一些新的结论。最后将此计算模型应用于实际工程中, 验证了模型的正确性及预应力加固的有效性。

1 预应力作用下的简化力学模式

预应力锚索在外荷载作用下, 通过钢绞线与水泥浆以及水泥浆与地层间的粘结力依次传递到岩石或土体中 (图 1)。显然, 锚索受力后其杆体应能自相平衡, 即杆体微段受力应满足下列静力平衡条件:

$$\pi D \cdot \tau(x) dx + [q - (q + \frac{\partial q}{\partial x} dx)] = 0 \quad (1)$$

简化后可得:

$$\tau(x) = \frac{1}{\pi D} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

式中 $q(x)$ 、 $\tau(x)$ 分别为单位长度上锚索索体所受的轴力及索体表面的剪应力, D 为锚索直径。在锚固工程设计中, 剪应力 $\tau(x)$ 的分布规律则是作者更为关注的问题, 它可以简化为弹性理论中无限体内一点在集中力作用下的 Kelvin 问题^[12]。但是由于受多种因素影响, 至今在锚固工程的设计中仍采用均匀分布的假设, 但大量的实测结果已经证明: 锚固段的侧阻力并非均匀分布。

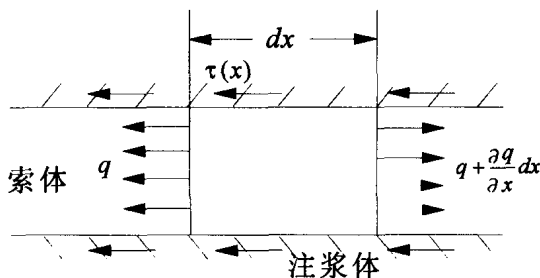


图1 内锚段受力模式

Fig.1 Stress model of the anchorage segment

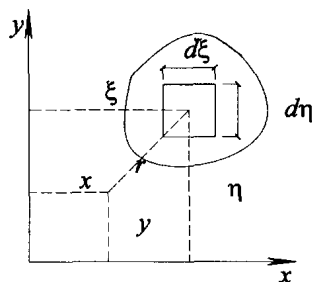


图2 半无限体表面荷载作用

Fig.2 Surface loading of a semi-infinite body

对于预应力作用下外锚墩部位的受力变形, 可按照弹性理论的 Boussinesq 解来求之。在半无限体表面上受集中力 P 作用下表面任一点变形为:

$$w = \frac{P(1 - \nu^2)}{\pi E r} \quad (3)$$

式中 r 为计算点至荷载 P 之间的距离。如果无限体表面受分布荷载 (图 2), 则积分可得任一点变形量为^[13]:

$$w(x,y)=\frac{1-\mu^2}{\pi E}\iint_A\frac{p(\xi,\eta)d\xi d\eta}{\sqrt{(\xi-x)^2+(\eta-y)^2}}\tag{4}$$

按照上述公式，并将锚墩简化为为受均布荷载的圆形柔性基础，则可得中心沉降量为其边缘沉降量的 1.57 倍。

2 数值模拟分析

数值模拟采用国际上著名的岩土工程分析软件 FLAC^{3D} 程序，其算法的基础是快速拉格朗日计算方法。它将计算区域划分为若干个六面体单元，每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性本构关系，如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动，则单元网格及结构可以随着材料的变形而变形，这就是所谓的拉格朗日法^[14]。

而预应力锚索采用 FLAC 软件提供的 cable 单元来模拟，预锚力的传递规律采用空间弹簧—粘结滑移单元来模拟锚索与胶结体之间的传力和滑移特性（图 3），该模型能够形象的模拟预应力锚索在岩体中的作用规律^[10,15]。

2.1 计算模型的建立及力学参数

计算模型沿 *x*、*y*、*z* 方向的计算范围为 50 × 60 × 50m，其中 *y* 方向为锚索布置方向（如图 4 所示）。坐标原点设置在外锚头处。边界条件除外锚头所在表面为自由表面，其余表面均为法向约束。屈服准则采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。计算中，采用的岩体力学参数见表 1。锚索长度取为 40m，内锚固段 8m，外锚头锚墩为 1m × 1m，参照丁秀丽，盛谦等^[10]所述方法，在此范围内施加表面荷载以模拟预应力对表层岩体的压缩作用。

2.2 计算结果及分析

（1）由图 5 可以看出，锚索张拉在锚墩周边岩体中形成了一圆形压应力区，压应力在锚索中心最大，沿径向逐渐减小，沿轴向呈高陡的抛物线形式分布^[10]。压应力区的存在对于边坡工程中开挖卸荷引起的松动区有较大的改善作用，但对于软弱岩层将引起较大的预应力损失。根据某软岩高边坡预应力锚索张拉完成 1h 后监测结果显示（见表 2），由于锚索所处位置坡体强度不同，最大预应力损失值达到 9% 左右。

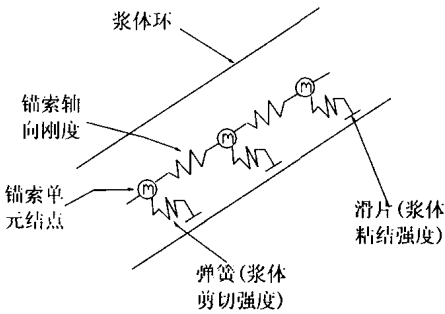


图 3 内锚固段力学模型
Fig.3 Mechanical model of the anchorage segment

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	粘聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	抗拉强度 (MPa)
3.74	2.03	220	31	1

表 2 锚索张拉锁定 1h 后预应力对比

Table 2 Comparison of prestresses after 1 h of cable anchoring

锚索 编号	张拉锁定值 (kN)	1h 后预应力值 (kN)	变化幅度 (%)
ML2	673.11	614.88	- 8.7
ML4	695.61	690.29	- 0.7
ML6	723.83	657.54	- 9.2
ML7	566.98	554.50	- 2.2

(2) 由图6可以看出, 在内锚固段的两个端部分别出现了压应力集中和拉应力集中现象^[10], 在内锚固段中前部为拉压应力交界区。在自由段末端为压应力区, 形状为椭圆形。而拉应力区为一“碗”形, 影响范围较大, 1500kN级预应力引起的拉应力区“碗口”半径约为30m。最大的拉应力值出现在内锚固段后端索体附近, 其形状也为一椭圆形。除“碗形”拉应力区外, 模型内全为压应力区所覆盖, 说明加锚后改善了岩体的应力状态, 锚固效果是明显的。

(3) 图7为锚固段后端沿锚索轴向的 σ_y 应力剖面图。由图可以看出, 在锚固段后端基本全为拉应力区, 但拉应力量值从锚索中心沿径向急剧减小, 衰减很快, 即较大拉应力值只分布在锚索的周边较小半径内。当群锚布置间距大于此高拉应力区范围时, 将不会产生张发明, 刘宁等^[16]提出的群锚第二效应现象。

(4) 在外锚墩压应力作用下, 坡体表面由锚墩外缘向锚墩中心位移呈指数形式分布, 在稍深部位转变为抛物线形式分布, 但与压应力区分布形状相比要矮缓了许多。在内锚固段, 位移在锚索附近最大, 沿锚索径向向两侧呈对称分布, 但位移值并不随径向距离的增大而急剧衰减, 在“碗”形拉应力区内几乎为均匀分布, 说明锚固体与周围岩体共同作用, 能够联合抵抗外部变形。

(5) 随着预应力增大, 内锚段前部的压应力区有向锚固段深部移动的趋势。图8为内锚段前部出现塑性区后的应力图。可以看出, 当其前部塑性屈服后, 压应力集中区呈锥状发展, “刺入”拉应力区域, 此时预应力主要由未出现塑性破坏的锚固段后部承担, 直至全部进入塑性区而破坏。同时由于压应力的后移, 岩体的这种三维受压状态仍可提供较高的强度, 故仍可承受较高的荷载^[8], 即锚索的塑性破坏区将出现逐步后移的现象, 呈现出渐进破坏的方式。

(6) 群锚如同群桩一样, 并不是单锚的简单几何相加。首先, 群锚相当于在坡体表面施加一均布荷载, 不同的岩体质量, 不同的预应力引起的群锚效应则不同。经过群锚加固后, 预应力通过锚墩向坡体内部扩散, 边坡由于开挖而形成的松动卸荷区由于群锚附加应力场的形成而得以改善。且随着预应力值的增大, 压应力集中区影响范围加深、加宽, 而岩体弹性模量的影响则与此相反。

其次, 多根锚索使内锚段部位的拉、压应力区互相叠加。这种拉应力区的联合可能使锚根部分受整体拉力作用而发生剪切破坏(图9)。但是, 同时内锚段前部压应力区域的联合也将有助于改善锚索根部的拉应力区分布。因此, 实际工程中应综合考虑各种因素选择合适的布置间距或采用内锚固段长度和深度交错布置的方式, 以避免拉应力的互相叠加。

(7) 数值模拟中分析了锚索刚度、岩体剪切模量、预应力大小等因素对内锚段剪应力分布的影响。分析认为, 内锚固段剪应力峰值位置基本不随各因素的改变而改变, 但峰值大小随锚索刚度的增大或预应力、岩体剪切模量的减小而有不同程度的减小, 即剪应力分布曲线在内锚段随以上因素变化有均匀化趋势。在上述三个因素中, 影响最大的因素是预应力的大小, 而岩体剪切模量对剪应力分布的影响最小。

(8) 锚索锚固体的破坏机制是岩土工程界十分关注的问题, 但对此方面的研究还很少见。对于锚固体周围岩体的破坏方式, 一般是考虑一个倒置的岩石锥的拔出, 锥尖在锚索(杆)底部。在此次数值模拟中, 假定索体与胶结体黏结强度以及索体抗拉强度都无限大, 探索不同强度(改变粘聚力 c 值)的围岩破坏方式, 得到以下结论:

①单锚情况下, 当岩体强度较高(试验中采用 c 为200kPa)时, 岩体一般不会出现倒置

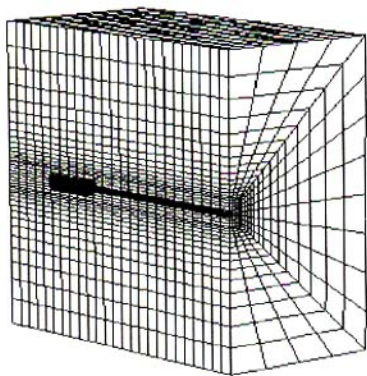


图4 计算模型剖面

Fig.4 Model of calculation

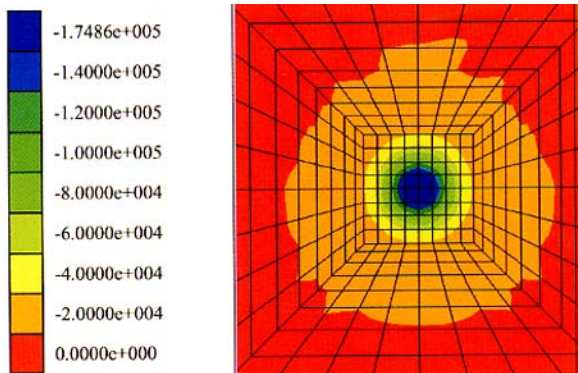
图5 锚墩 y 向正应力云图 (单位: Pa)

Fig.5 Elevation view of the normal stress field of the anchor pier (unit: Pa)

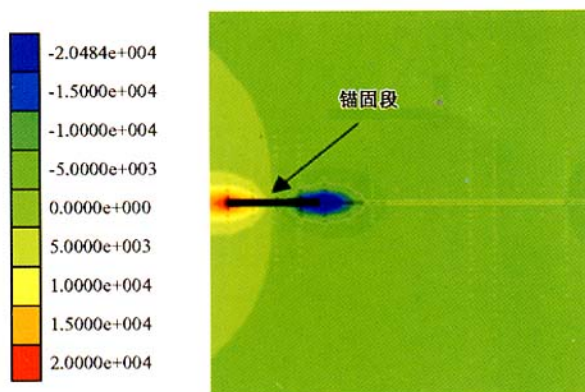
图6 内锚固段 y 向正应力云图 (单位: Pa)

Fig.6 Normal stress of the anchorage segment (unit: Pa)

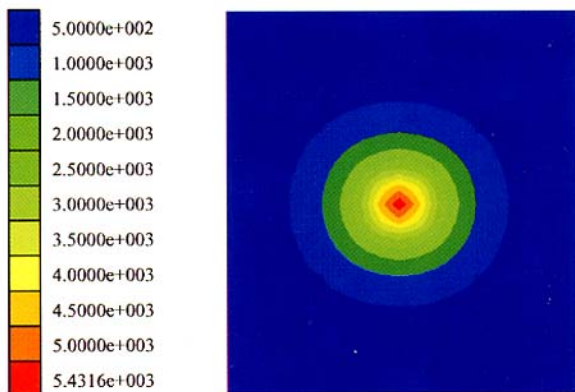
图7 锚固段后端 y 向正应力云图 (单位: Pa)

Fig.7 Axial stress of the back anchorage segment (unit: Pa)

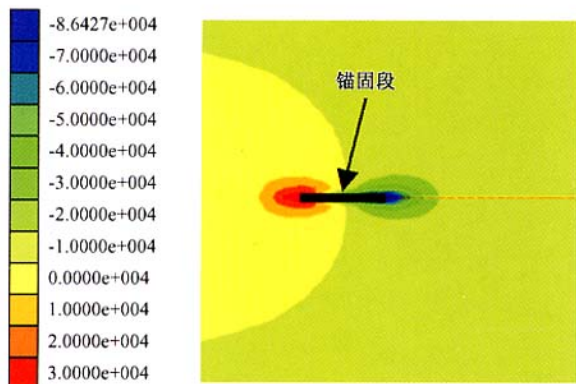


图8 锚固段出现塑性区时轴向正应力图 (单位: Pa)

Fig.8 Axial stress of the anchorage segment after breakdown (unit: Pa)

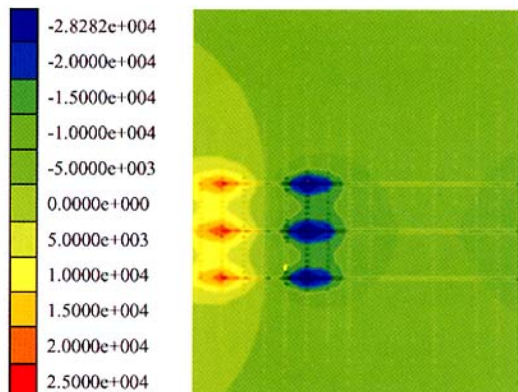


图9 多根锚索作用下内锚段轴向应力及位移图 (单位: Pa)

Fig.9 Axial stress and displacement of the anchorage segment (unit: Pa)

的锥体破坏, 而是出现浆体与孔壁的粘结破坏。而当岩体强度较低时 (c 为 50kPa), 岩石出现锥体破坏。

②在相邻锚索作用下, 首先每根锚索内锚固段前后端分别出现压破坏区和拉破坏区, 并最终由于应力的叠加使两个锥体相连。

3 工程应用

为验证数值模拟的正确性及分析加锚效果, 本文结合一实际预应力锚索加固边坡工程, 采用本文所述的预应力锚索模型, 对边坡有、无支护情况下的坡体变形进行了分析, 并与现场监测结果进行了对比。

某高速公路路堑高边坡轴线开挖深度达 80m, 出露地层为灰岩、泥灰岩与泥岩互层。其岩石层面缓倾向路基方向。滑坡原因为顺坡缓倾的泥岩层, 软弱易变形, 这是滑坡赋存的基础地质条件。边坡的加固以预应力锚索为主要形式, 如图 10 所示。

计算模型中考虑了缓倾向路基方向的优势节理组以及顺坡缓倾的泥岩层。分别对分步开挖无支护工况以及实际分步开挖加锚工况进行了计算。实际支护形式采用锚索水平间距 5~7m 不等, 垂直间距 5m, 预应力采用 850~1000kN 不等。边坡开挖采用从坡顶到路面六步开挖卸荷的动态方法进行模拟, 屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。模型网格图略。

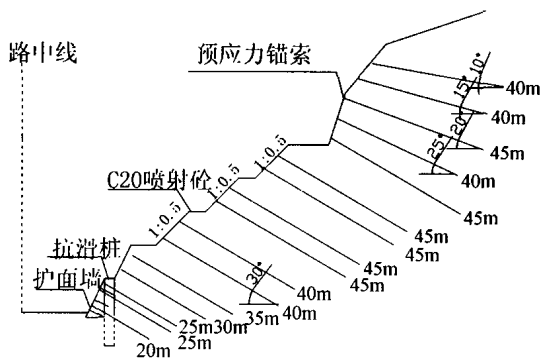


图 10 边坡加固治理剖面图

Fig.10 Section of slope after reinforced

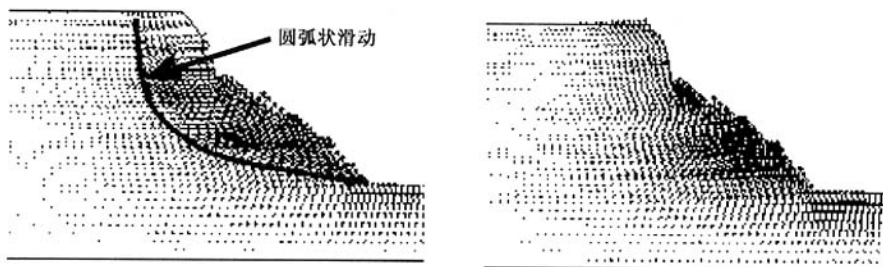


图 11 无支护 (左边) 及有支护 (右边) 工况下坡体位移

Fig.11 Displacement of slope not reinforced (left) and reinforced (right)

图 11 分别为无支护及有支护工况下的坡体变形情况。由图可以看出, 无支护工况下, 在最后一级坡面开挖过程中, 整个坡体出现塑性破坏从而产生整体滑动。而在预应力锚索支护情况下, 坡体拉应力区范围缩小了 80% 左右, 较大的压应力一直延伸到坡面附近。从位移图上也可以看出, 经过加固后, 临空方向水平位移明显减小, 坡体位移基本上全为回弹变形。后利用钻孔测斜仪对坡体深部水平位移进行监测 (图 12), 结果

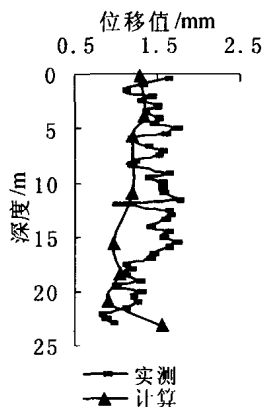


图 12 某断面监测数据与实测数据比较

Fig.12 Comparison of monitoring data with numerical simulation in a cross-section

显示,坡体加固完成后沿深度方向位移值在 0.5 ~ 1.5mm 之间变化,与数值模拟结果完全相符。

4 结论

本文采用数值模拟方法对预应力单锚、群锚作用下的锚固机理包括位移场、应力场的变化特点以及内锚固段剪应力分布影响因素、周围岩体破坏方式等进行了研究,并在此基础上,将其应用于工程实践中,得出以下结论:

(1) 单根锚索加固后,在锚墩周边的岩体中形成一圆形压应力区,有助于改善坡体表面的应力状态,但对于软弱岩层将引起较大的预应力损失。

(2) 虽然在内锚固段后端存在一“碗”形拉应力区,但拉应力量值从锚索周边沿径向衰减极快,即较大拉应力值只是分布在锚索的周边较小半径内。

(3) 当内锚固段出现塑性区后,其前端的压应力集中区呈锥状发展,“刺入”拉应力区域,此时预应力主要由未出现塑性破坏的锚固段后部承担。

(4) 综合分析单锚、群锚的加固机理,作者得出,预应力群锚的加固效应主要在以下两个方面有别于单锚加固效应:

①群锚相当于在坡体表面施加一均布荷载,形成一整体加固带,这种压应力的叠加,提高了其抵抗不利荷载的能力,增强了坡体稳定性。

②多根锚索使内锚段部位的拉、压应力区互相叠加。这种拉应力区的联合可能使锚根部分受整体拉力作用而发生剪切破坏。但同时内锚段前部压应力区域的联合也将有助于改善锚索根部的拉应力区分布,提高其承载力。

(5) 岩体剪应力的分布与锚索刚度、岩体弹模以及预应力大小等因素有关,但其中最敏感的因素是预应力的大小。

(6) 实际工程现场监测说明数值模拟结果是正确的,同时也表明了预应力锚索可以极大地改善边坡受力状况,增强边坡稳定性。

参 考 文 献

- [1] Fuller, PG, Cox RHT. Mechanics load transfer from steel tendons of cement based grouted [A]. In: Proceedings of the Fifth Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials [C]. Melbourne: Published by Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995.
- [2] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (6): 925 ~ 928.
- [3] 张瑞良, 董燕军, 唐乐人, 等. 预应力锚索锚固段周边剪应力分布特性的弹性理论分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (增刊 2): 4735 ~ 4738.
- [4] Stillborg B.. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 1984.
- [5] Li C., Stillborg B.. Analytical models for rock bolts [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36 (8): 1013 ~ 1029.
- [6] Bouteldja M. Design of cable bolts using numerical modeling [D]. Canada: McGill University, 2002.
- [7] 李铀, 白世伟, 朱维申, 等. 预应力锚索锚固效应的仿真试验与数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (增刊): 260 ~ 264.
- [8] 黄福德, 赵彦辉, 李宁. 预应力锚固机理数值仿真分析研究 [J]. 西北水电, 1996 (1): 8 ~ 17.

- [9] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (增刊): 917~921.
- [10] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (7): 980~988.
- [11] 朱维申, 白世伟, 等. 预应力锚索加固机理研究 [R]. “八五”国家科技攻关, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1995.
- [12] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.
- [13] 注册岩土工程师基础考试复习教程编委会, 注册岩土工程师基础考试复习教程 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
- [14] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (1): 6~10.
- [15] FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.0, User's Manual [S]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [16] 张发明, 刘宁, 赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (增刊): 1077~1080.

3D NUMERICAL SIMULATION OF THE ANCHOR EFFECT OF PRESTRESSED CABLES AND ITS ENGINEERING APPLICATION

ZHANG Si-feng¹, ZHOU jian¹, SONG Xiu-guang², LI Shu-cai²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong)

Abstract: Prestressed cable anchor technology has been widely used in many fields of geotechnical reinforcement engineering. However, the research on the reinforcement mechanism of prestressed anchorage is still at an exploratory stage. Based on the fast Lagrangian analysis method (FLAC-3D), the stress, deformation and failure mechanisms of the anchorage segment, free segment and anchor pier under the effect of the single or multi-cable anchor system have been analyzed through 3D numerical modeling and some influence factors of shear stress distribution along the anchorage segment have also been discussed. On that basis, some useful conclusions are drawn, which can provide a reference for the engineering design and theoretical study. These research results prove to be effective through engineering practice.

Key words: prestressed anchor cable; anchor effect; numerical modeling; engineering application