文章编号:1000-8608(2009)02-0254-07

预应力锚固机制数值模拟研究

王忠昶*1,2,3,杨庆1,3,赵德深2

(1.大连理工大学 土木水利学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024;2.大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;

3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对预应力锚索加固时锚固段与自由段受力机制的不同,依据等效应变和等效温度 法建议了一种新的预应力施加方法,并采用有限元方法模拟了预应力锚索加固岩体的受力机 制.给出了不同锚固条件下锚固段和岩体的受力变形特征,指出了应用预应力锚索加固时应 该注意的问题:张拉式预应力锚索加固的岩体在内锚固段周围的岩体是受拉的,群锚时使得 内锚固段附近的岩体形成拉应力带,这种拉应力带对岩体的稳定十分不利,应积极采用不等 长锚索,以使内锚头分散布置在岩体的不同层位中;群锚条件下锚索之间外锚头位置岩体有 受拉现象,在满足工程需要的条件下锚索的布置间距应适当放大.

关键词: 预应力; 数值模拟; 拉应力区; 锚固 中图分类号: TU417.1 文献标志码: A

0 引 言

预应力锚固技术具有能充分发挥岩土自身的 强度、施工中不破坏原有岩体的整体性、占用空间 少、见效快和造价低等特点,在岩土工程领域得到 广泛应用.尽管预应力锚固经验日益成熟,但对预 应力锚索的作用机理研究仍处于探索阶段.预应 力锚索的施工工艺复杂,张拉力吨位、几何尺度、 材料类型的性质均变化很大,使得室内模型试验 的材料物理特性难于统一、相容,且成本昂贵而工 况极少:室内拉拔试验受边界条件、张拉力强度等 限制,也只能给出一些粗略的、定性的结论;现场 试验一般均耗费巨资,且受地质、施工条件限制, 试验分析结果不具代表性.数值模拟以节省物力、 财力,物理条件可以任意选取等优点得到广泛应 用,当前对锚索支护的数值模拟方法主要有杆单 元法^[1]、等效连续法^[2]、接触单元法^[3,4]、空间弹簧 滑移粘结单元法[5].陈卫忠等[6]建立了二维的预 应力锚索模型,将与围岩固结在一起的锚根部分 用杆单元来模拟,而自由段则用两端的锚固力来 模拟;在加锚岩体的等效模拟方面,王敏强等[7]将 预应力锚索外锚头、锚索体及内锚头均采用隐式 方法隐含在普通单元中,锚索体单元的刚度按拉 伸刚度产生附加刚度,经坐标转换再贡献到整体 刚度矩阵中;黄福德等^[8]采用三维杆与梁单元来 模拟预应力锚索自由段和锚固段;丁秀丽等^[9]将 预应力锚索外锚头的作用简化为岩体表面的分布 力,内锚固段采用杆单元,自由段简化为内锚段端 部的集中力.丁秀美等^[10]则在网格中距离等于锚 索长度且方向一致的两个节点上施加一对相向的 集中力;锚固的数值模拟方法不能很好地反映预 应力锚固的实际效果,存在着很多简化条件,与实 际情况存在差异.

本文根据预应力锚索中自由段和锚固段作用 机理的不同,提出一种新的能够施加等效预应力 的方法,分析预应力作用下不同锚固条件时锚索 和岩体的受力变形特征,揭示预应力锚索加固的 效果与机制,并给出预应力锚固时应注意的问题.

1 预应力锚固的物理力学效应

预锚加固的实质是使支护加固岩体从被动地

收稿日期: 2007-03-10; 修回日期: 2009-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678032,50574016);辽宁省教育厅基金资助项目(2008z030).

作者简介: 王忠昶*(1976-),男,博士,E-mail:wazoch@163.com;杨 庆(1964-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:qyang@dlut. edu. cn.

阻止岩体再变形、破坏转向主动地利用岩体本身 去加固,是一种主动加固法^[11,12],其加固机理体 现在两个方面:一方面使岩体的强度与变形特性 得到改善,大大提高岩体的承载能力;另一方面, 岩体内产生预锚附加应力场,使不利的应力状态 得到调整与改善,岩体结构面呈压紧状态,从而显 著提高岩体的整体性和岩体稳定的可靠度.预应 力灌浆锚索由锚头、自由段、锚固段三部分组成, 其工作机理为预应力产生的张力经外锚头的锚墩 作用在岩体上,加固岩体;预应力产生的张力通过 锚索传至内锚头,内锚头是通过砂浆与岩体相连 的,于是预张力将分散到深处岩体中去,然后再将

锚索灌浆固结,固结以后的锚索像锚杆一样工作.

2 单根预应力锚索的数值试验

2.1 三维预应力锚索单元

正常工作条件下,锚索单元处于线弹性状态. 锚固段的锚索采用空间杆单元来模拟,而自由段 锚索则采用一个自由度的两节点线单元,只允许 轴向变形,其双线性刚度矩阵只能承受单向拉伸 或压缩,而不能承受弯矩,该单元选择单向拉伸 时,单元一旦受到压力,则刚度矩阵自动被删除, 这个特征能够很好地模拟钢索类问题.图1为该 单元的结构示意图.



式中:A为单元截面积;E为弹性模量;L为单元长度;C₁为刚度系数值,拉伸状态时为1,压缩状态

0 0

0

(1)

0 0 0

时则为 0. 单元的应力矩阵如下:

$\mathbf{S}_{e} = \frac{F}{L}$	0	0	0	0	0	0]	
	0	C_2	0	0	$-C_{2}$	0	
	0	0	C_2	0	0	$-C_2$	
	0	0	0	0	0	0	
	0	$- C_{2}$	0	0	C_2	0	
	0	0	$-C_{2}$	0	0	C_2	
						(2))

式中:F对于起始迭代为AEɛⁱⁿ,对于随后的迭代,则是单元的轴向力,ɛⁱⁿ为初始应变;C₂为应力刚 度系数,拉伸状态时为1,压缩状态时则为0.

锚索预应力的施加一般有以下 3 种方法:

(1)等效应变法.预应力产生的应变通过位移 约束加载使结构中产生与预应力加载相当的应变.

(2)等效降温法.通过设置温度应变系数,在 给定的温度变化下获得给定的应变,从而产生想 要达到的预应力加载效果.

(3)等效力法.使用能够产生同样大小预应 力的等效集中力或等效面力进行加载.

本文建议采用前两种方法:通过等效法,在单 元上施加的力矢量为

 $\mathbf{F}_{e} = \mathbf{A}\mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}(-C_{1} \quad 0 \quad 0 \quad C_{1} \quad 0 \quad 0)^{\mathrm{T}} \quad (3)$ 式中: $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} = \alpha \Delta T - \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{in}}; \Delta T = T_{\mathrm{ave}} - T_{\mathrm{ref}}, \alpha$ 为温度膨 胀系数, T_{ave} 为单元平均温度, T_{ref} 为参考温度.

2.2 数值模型与单元参数的选取

数值试验模型如图 2 所示,岩体尺寸如图,锚 索的自由段长 30 m,锚固段长 10 m.采用单元类 型为(1)岩体采用八节点六面体等参单元模拟. (2)锚索体的自由段采用只能承受单向拉伸的三 维杆单元(图 2 中 AB 段). (3)锚索体的灌浆锚固 段采用三维杆单元(图 2 中 BC 段),为了能够反 映出锚索灌浆体与岩体的变形协调作用,在建模 时需将此部分杆单元所有节点与岩体的节点设置 重合.(4)边界条件的施加:图3所示模型下表面 施加所有方向约束,左右、前后表面分别施加沿法 线方向的约束.(5)力学参数的选取:岩体按理想 弹塑性介质考虑,弹性模量 E=0.35 GPa,泊松比 $\nu = 0.22$,粘聚力 c = 0.5 MPa,摩擦角 $\phi = 27^{\circ}$;锚 索按弹性介质考虑,锚索的 E=200 GPa, ν=0.3. (6)共划分单元 12 020 个,节点 13 671 个.其中岩 体单元 12 000 个,锚索自由段杆单元 15 个,锚索 锚固段杆单元5个,如图3所示.(7)锚索的预应 力取1500 kN,采用等效法处理后,将预应变施 加到锚索段.



图 2 岩体-锚索体模型图 Fig. 2 Model of rock mass-anchor cable





2.3 内锚固段的受力及变形分析

图 4、5 分别给出了预应力锚索锚固段的轴向 应力、轴向位移曲线,由图可见:

(1)在预张拉力的作用下,锚索通常受拉应力 的作用.张拉荷载传递至锚固段外端时应力即向 周围岩体扩散,从而表现出应力的分布外端大、根 部小的喇叭形,形成锚固段的外端轴向应力较大, 并向根部迅速衰减的分布形式(图 4).



图 4 锚固段的轴向应力曲线 Fig. 4 Axial stress curve of consolidated segment

(2)在预张拉力的作用下,锚索必然要产生沿 轴向的收缩变形,锚固段锚索体则拉动岩体变形 产生指向岩体自由表面一侧的位移,从计算结果 中还可以发现,锚固段的轴向位移在锚固段的外 端最大,随着深度的增加而逐渐减小(图 5).



图 5 锚固段的轴向位移曲线

Fig. 5 Axial displacement curve of consolidated segment

2.4 岩体的变形及受力分析

图 6、7 分别给出了单锚条件下岩体竖向位 移、应力、总应变和岩体的等效应力图,由图可见:

(1)单根预应力锚索作用下,岩体的位移以锚 索为中心呈轴对称分布.锚索在预张拉力作用下, 产生沿轴向的收缩变形,锚固段周围岩体位移为 正,自由段周围岩体位移为负,外锚头位置岩体的 位移最大,岩体的表层形成一个压缩区,形状呈漏 斗状,岩体有压密闭合现象,此压缩区范围内,岩 体的位移沿径向逐渐向两侧衰减,轴向位移随着 深度的增加而递减,形成一个类似的下沉盆地,锚 固段的岩体在锚索的张拉应力作用下,其周围岩 体的变形类似一个锥形体,同样沿径向逐渐向两 侧衰减,轴向位移随着深度的增加而递减(图 6 (a)).

(2)锚索的应力以锚索为中心呈轴对称分布, 在外锚头位置形成一个压应力锥,锚索张拉力在 外锚头周围岩体的压应力最大,锚索中心部位压 应力值最大,沿径向减小,在轴向随深度增加而递 减.锚固段的根部拉应力最大形成一个拉应力锥, 反映了此处的应力集中.锚固段周围岩体形成一 椭圆球形拉应力与拉变形区.拉、压应力区的分界 面可用一抛物面来描述(图 6(b)).

(3)在锚索的张拉应力作用下,岩体应变以锚 索为中心呈对称分布,在外锚头位置其压应变最 大,形成一压应变锥形体.其应变值沿着径向减 小,随深度的增加而减小.锚固段的根部其拉应变 最大,形成一个拉应变的锥形体,锚固段周围岩体 形成一个拉应变区,随着深度的增加,应变的波及 范围增大(图 6(c)).



(a) 位移图







(c) 总应变图

图 6 单锚时岩体 y方向位移、应力和总应变图 Fig. 6 Displacement, stress and total strain of rockmass in y direction under uni-reforcement

(4)张拉锚索作用的锚固段两端与自由段的 起始端的等效应力最大,其形状类似一个锥形体. 锚固段与自由段的交接处等效应力最小(图 7).



图 7 岩体等效应力图 Fig. 7 Equivalent stress of rock-mass

图 8、9 分别给出了单锚条件下岩体自由表面 法向位移、法向应力及剪应力分布图,由图可见, 锚索的预应力也在岩体表面产生位移和应力集 中,集中区发生在锚端作用点,且呈轴对称形式.



图 8 单锚时岩体自由表面 y方向位移、应力曲线 Fig. 8 Displacement and stress curves of free

surface of rock-mass in y direction under uni-reforcement



图 9 单锚时岩体自由表面剪应力变化曲线 Fig. 9 Shear stress curve of free surface of rock-mass under uni-reforcement

综合分析图 4~9 得到以下结论:

(1) 锚固段的轴向应力和位移随着深度的增加而逐渐减小, 预应力作用下, 岩体的应力和位移 以锚索为中心呈轴对称分布. 在外锚头、内锚固端 形成两个空间应力锥体,外锚头端形成一个压应 力锥,而内锚固段形成一个拉应力锥,使得岩体有 向一起收缩的趋势.

(2)锚索张拉力在外锚头周围岩体形成一个 压应力集中区,呈漏斗状.内锚固段周边岩体为 拉、压变形和拉、压应力的交汇地带,拉、压应力区 的分界面呈抛物面状.

3 群锚的数值试验

3.1 数值模型和单元参数的选取

群锚的力学参数与单锚的相同,群锚中锚索 的间距取为5m,两根锚索分列于岩体中央的两 侧,共划分单元12040个,节点13671个.其中岩 体单元12000个,锚索自由段杆单元30个,锚索 锚固段杆单元10个.

3.2 锚索和岩体的受力分析

图 10 给出了单锚和群锚时锚固段的剪应力 曲线,由图可见:

锚索锚固段与岩体界面的剪应力在外端迅速 增大至最大后缓慢减小,在距离锚固段起始端约 2 m处最大,剪应力高度集中,从此往下至距外端 约 6 m 处剪应力平缓降低,距 6 m 以后剪应力基 本不变化,预应力锚索的锚固段只有一部分发挥 了作用,主要分布在锚固段外端约 6 m 的范围 内,可见内锚固段的长度不是越长越好,在设计中 不宜将锚固段设计过长,造成不必要的浪费.大量 计算分析表明:锚固段为 5~8 m 时,就能够抵抗 中等强度岩体 3 000 kN 预应力的荷载;群锚作用 下内锚固段所能承受的最大剪切力比单锚作用下 的大,在承受相同的剪切应力时,群锚的锚固段所 需的长度小于单锚,可见随着群锚中锚索根数的 增加,内锚固段所需的长度减小.



Fig. 10 Shear stress curve of consolidated segment

图 11 给出了群锚条件下岩体竖向位移、应 力、总应变图,由图可见:



(a) 位移图



(b) 应力图





(1) 群锚相当于在岩体表面施加了一均布荷 载,在岩体的表层形成一个压缩层,相同的岩体与 锚固条件下,随着锚索数量的增加,岩体压缩效应 增强,压缩范围扩大,锚索锚固后表层的压缩变形 量明显高于内部岩体的变形量,内锚固段岩体的 张应力值变大,影响范围比单锚时的张拉区增大. 当预应力增大时,岩体的张拉变形量和应力值都相 应地增加,岩体的收缩趋势更明显;内锚固段和自 由段的交汇处依然是岩体的张拉和压应力区的分 界面,随着群锚的张拉和压缩应力的不断增大,锚 索压缩区的影响范围与内锚固段的张拉影响范围 不断增大,其之间的距离进一步缩小(图 11(a)).

(2)群锚条件下,岩体压缩应力和张拉应力增 大,压缩应力和张拉应力的影响范围增大;群锚条 件下,岩体的压缩和张拉应力以两根锚索间距的 中央呈轴对称分布,在两根锚索的外侧,张拉应力 和压缩应力沿径向衰减,随着深度的增加应力逐 渐减小;每个内锚固段根部形成了一个张拉锥形 体,其影响范围已经相互渗透,张拉力同样是以两 根锚索间距的中央呈轴对称分布(图 11(b)).

(3) 群锚时 y 方向的总应变比单锚时的值要 大, 岩体拉压的影响范围更接近; 外锚头之间的岩 体会有少量的张拉应变, 有向上凸起的趋势; 内锚 固段的总应变随着深度的增加而逐渐增大, 在锚 根部, 应变值达到最大, 随后逐渐减小, 在锚根部的 下方形成了一个半圆形的拉应变区域(图 11(c)).

图 12、13 分别给出了群锚条件下岩体自由表 面法向位移、应力及剪应力分布图,由图可见:







图 13 群锚时岩体自由表面剪应力变化曲线 Fig. 13 Shear stress curve of free surface of rock-mass under multi-reforcement

(1)群锚条件下,锚索之间岩体总的趋势是压 缩的,但相对于锚索处有上凸的趋势.岩体有张拉 的现象;群锚条件下,岩体的位移和应力都比单锚 条件下的大,可见群锚条件下岩体更容易压密.

(2)自由表面岩体的剪应力呈对称分布,在锚 索处其值最大.

由锚固效果的综合分析应注意:

(1) 张拉式预应力锚索加固的岩体在内锚固 段周围的岩体是受拉的.采用一系列的锚索拉加 固,则实际上使得内锚固段附近的岩体形成拉应 力带,因为岩体的抗拉强度很小,这种拉应力带对 岩体的稳定是十分不利的.因此在设计中,应防止 预应力锚索的内锚头布置在一个平面上而形成拉 应力面,如此巨大的张力,可能导致岩体内部张 裂. 应积极采用不等长锚索,以使内锚头分散布置 在岩体的不同层位中.

(2)群锚中,锚索之间外锚头位置岩体有受拉 现象,因此锚索的布置应在满足工程需要的条件 下,其间距适当放大.

4 结 语

本文根据预应力锚索的受力机理,应用等效 应变法和温度法,对岩体中锚索加固机制进行了 有限元模拟.通过模拟可知,在锚索的加固作用 下,岩体受力呈轴对称分布,在内锚固段附近会形 成拉应力区,岩体的表层会形成一个压应力区,使 得整个岩体有向一起压缩的趋势,增加了岩体的 力学参数,从而达到锚固的作用;锚固段的外端是 岩体拉压效应的分界面,群锚对岩体的加固效应 比单根锚索明显;锚索的预应力越大,岩体的压缩 趋势越明显,应用锚索加固岩体时,锚索的锚固段 附近会产生一个拉应力区,导致岩体破坏,群锚中 岩体的内锚固段和锚索之间岩体会产生拉应力 区,因此,锚索应布置在岩体的不同层位中,并在 保证岩体安全的情况下,间距适当加大.

参考文献:

- [1] 赵赤云. 预应力锚索锚固的作用分析[J]. 北京建筑 工程学院学报, 1999, **15**(2):84-88
- [2] 杨延毅,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
- [3]李 宁,赵彦辉,韩 煊.单锚的力学模型与数值仿 真试验分析[J].西安理工大学学报,1997,13(1):
 6-11
- [4] 李 宁,韩 煊. 预应力群锚加固机理数值试验研究
 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5):60-65
- [5] 张晗旭. 应用有限单元法探讨预应力岩锚的作用 [J]. 河海大学学报, 1999, **27**(3):26-27

- [6] 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]. 勘查科学技术, 2001, 1:3-6
- [7] 王敏强,刘晓刚,艾建中. 某厂房边坡施工过程仿真 及稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增 2):2506-2510
- [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, **55**(1):8-17
- [9] 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
- [10] 丁秀美,黄润秋,臧亚君. 预应力锚索框架作用下附 加应力的 FLAC3D 模拟[J]. 成都理工大学学报, 2003, **30**(4):339-345
- [11] 水利部水利水电规划设计总院. 预应力锚固技术[R]. 北京:水利部水利水电规划设计总院, 1999
- [12] 梁炯鋆. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京:中国电力 出版社, 1999

Numerical simulation study of pre-stress reinforcement mechanism

WANG Zhong-chang^{*1, 2, 3}, YANG Qing^{1, 3}, ZHAO De-shen²

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 - 2. College of Civil and Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;
 - 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method of equivalent pre-stress is suggested by using the methods of equivalent strain and temperature according to different working mechanisms between free segment and the consolidated segment of pre-stress anchor cable. The mechanism for reinforcement of pre-stress anchor cable is simulated by finite element. The mechanical and distortional character of the consolidated segment and rock mass under different consolidated conditions are presented. Some attentions to using pre-stress anchor cable are indicated. Rock mass around the consolidated segment sustains tension and tension band is formed on account of being consolidated by multi-anchor cables, and this is harmful to the stability of rock mass. Therefore, the anchor cable of unequal length should be used to avoid the anchor in arrangement of the same rock layer. The space between anchor cables should be widened under the conditions of satisfying the need of engineering owing to sustaining tension of rock mass between outer-end of anchor cables.

Key words: pre-stress; numerical simulation; tension stress zone; reinforcement