

岩土体对锚索预应力的响应特性

冯金健,胡毅夫,张爱民,景 觅

(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:基于空间半无限体理论,对外锚头预应力线荷载在岩土体中的传递规律进行了研究.给出了锚墩下岩土体内任意点的应力及位移分布形式及相应的表达式.通过数值模拟,得到与理论计算一致的结果,结果表明:锚墩下岩土体形成一个近似椭球状的压缩区,位移等值线呈 U 型.锚墩下岩土体的应力和位移均呈双曲线形式分布,锚墩之间部分岩土体在一定深度内形成无应力锥区.据此提出锚索间距的“预应力墙厚度”设计法,锚墩间无应力区锚杆补强方法.

关键词:岩土力学;预应力锚索;岩土体;似椭球体压缩区;无应力锥

中图分类号:TU473.12 **文献标识码:**A

Response Characteristics of Rocks Mass and Soil to Prestressed Anchorage Cables

FENG Jin-jian, HU Yi-fu, ZHANG Ai-min, JING Mi

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Study on mechanical characteristics of rocks under prestressed anchorage cables pier based on the half-space theory of the elasticity. The distribution law of stress and displacement of rocks under anchored pier were obtained, and its expression was given. The results obtained by numerical simulation are consistent well with theoretical calculation. The results show that a compressive zone which approximately ellipsoidal is formed on the surface of rockmass during the tensile process. And the displacement contour appears as “U” shape. The stress and displacement of rocks under pier decrease hyperbolic to 0 with increasing degree of depth. Between two piers, non-stressed zone is formed on surface. Tendon spacing was determined based on the thickness of prestressed-wall. The non-stressed and weaken-stressed zones between anchorage cables were reinforced by cable bolt.

Key words: rock-soil mechanics; prestressed anchorage cable; rock-soil mass; approximately ellipsoidal zone; non-stressed zone

收稿日期:2008-10-23

基金项目:湖南省交通厅科技资助项目(200541);常张高速公路建设开发有限公司科研基金资助项目(200301).

作者简介:冯金健(1985-),男,福建泉州人,中南大学硕士研究生.主要研究方向:岩土工程加固与边坡防护.

0 引言

随着预应力锚索应用范围的不断扩大和实践经验的不断丰富,预应力锚索加固技术理论取得了不少有益的成果^[1-3].但是锚索传递的预应力在岩土体中的分布规律研究成果见诸报道不多.

有些学者^[4-5]通过大量的现场试验,认为岩体形成压缩区,在锚墩附近形成压应力集中区,群锚作用下形成的压应力区重叠连接成片,组成“岩石承载墙”,但没有指出压力区与预应力大小、锚索间距、锚墩尺寸等的关系.

也有学者^[3,6-8]通过室内模型试验和数值分析研究了锚索的锚固机理,得到了锚索预应力的有效作用范围,但没有得到一致结果.文献[6]认为压应力集中区的分布形态与锚索的吨位、角度无关,而文献[7]认为分布形态与锚索布置方式、间距、预应力大小有关.压应力的分布规律有待进一步研究.

本文基于空间半无限体理论,计算分析锚墩下岩土体的力学特性,并根据荷载传递规律,提出锚索间距“预应力墙厚度”设计法.

1 锚墩下岩土体内任意点处的应力及位移计算

锚头预应力通过锚墩压紧岩土体的作用类似于空间半无限体边界受荷载作用^[9-11].为了分析方便,做出如下假设:(1)锚墩下荷载为均匀分布($q = P/b$);(2)锚墩下岩土体为均质线弹性材料.则锚墩下岩土体力学特性的计算模型可简化为图 1.由公式(1)可以计算出地表作用一个微小集中

力 qdx 时,锚墩下岩土体内任意点 $M(x_0, z_0)$ 的竖向正应力 $d\sigma_z$ 和竖向位移 dw .应用叠加原理可以计算出地表作用均布荷载时岩土体内与锚索轴向成一定夹角的点 M 的应力 σ_z 和位移 w 的值.

$$\begin{cases} w = \frac{(1+\mu)P}{2E\pi R} \left[\frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu) \right] \\ \sigma_z = -\frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} d\sigma_z = -\frac{3z_0^3 q dx}{2\pi [(x_0 - x)^2 + z_0^2]^{\frac{5}{2}}} \\ dw = \frac{(1+\mu)q dx}{2E\pi [(x_0 - x)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}}} \times \left[\frac{Z_0^2}{[(x_0 - x)^2 + z_0^2]} + 2(1-\mu) \right] \end{cases} \quad (2)$$

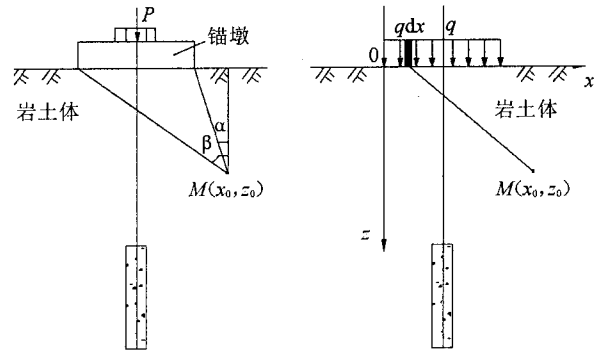


图 1 锚墩下岩土体力学特性计算模型

Fig. 1 Calculation model of mechanical characteristics of rocks under pier

对式(2)求积分,可得

$$\begin{cases} \sigma_z = \int_0^b \frac{3z_0^3 q}{2\pi [(x_0 - x)^2 + z_0^2]^{\frac{5}{2}}} dx = -\frac{3q}{2\pi z_0} \left[\sin\alpha - \sin\beta - \frac{1}{3}\sin^3\alpha + \frac{1}{3}\sin^3\beta \right] \\ w = \int_0^b \frac{(1+\mu)q}{2E\pi [(x_0 - x)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{Z_0^2}{[(x_0 - x)^2 + z_0^2]} + 2(1-\mu) \right] dx \\ = \frac{(1+\mu)q}{2E\pi} (\sin\alpha - \sin\beta) + \frac{(1-\mu)q}{E\pi} \left[\ln \left| \sec\alpha + \frac{x_0 - b}{z_0} \right| - \ln \left| \sec\beta + \frac{x_0}{z_0} \right| \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\alpha = \arctan \frac{x_0 - b}{z_0}$; $\beta = \arctan \frac{x_0}{z_0}$; α, β 如图 1

中所示. E 为岩体的弹性模量; μ 为岩体的泊松比; b 为锚墩宽度.

由式(3)可知,锚索压应力的分布形态与锚索预应力大小、岩体力学性质无关,但压缩区范围与预应力大小、岩体力学性质有关.

2 算例

某高速公路边坡锚固设计中,锚索施加的预应力为 $P = 600$ kN,锚墩宽 $b = 0.4$ m,锚索间距为 4 m.岩土体弹性模量 $E = 1\ 600$ MPa,泊松比 $\mu = 0.39$.以上述计算参数为基础,利用 Matlab 语言自行编制的程序,研究锚墩下岩土体的力学特性.

2.1 应力分析

取岩土体内竖向应力为 0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa 和 1 MPa, 得到不同应力值的等值线(图 2)。由图可知压应力在轴向随深度增加而递减, 这与文献[7]得到的结果一致。锚墩下岩土体则形成一个近似椭圆的应力分布形状, 这与文献[1]、文献[5]中得到的岩土体锥形受压区的结论相近。压应力在锚索轴向和径向衰减很快, 在预应力 $P = 600$ kN 的作用下, 深度为 1.7 m 时应力仅为 0.1 MPa, 而在锚墩两侧 0.5 m (即距锚索 0.7 m) 处压应力就衰减到 0.1 MPa。这表明锚头预应力的传递范围是很有限, 且轴向的影响范围比径向大。

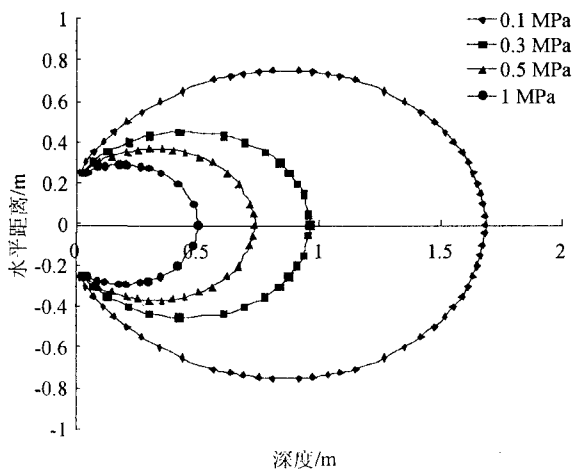


图 2 锚墩下岩土体的应力等值线

Fig. 2 Stress contour vs depth after tensile process

锚墩下土体的压应力曲线(图 3)表明, 土体的压应力呈双曲线形式衰减。在预应力 $P = 600$ kN 的作用下, 轴向深度 0 ~ 0.5 m 范围内, 压应力急剧下降, 在 0.5 m 处仅为地表正压力的 6% ~ 7%。在 1 m 处, 三条曲线重合, 应力随着深度的增加曲线趋于平缓, 应力衰减缓慢。

锚墩两侧土体的压应力曲线(图 4)具有以下特点: 应力在岩体表面位置处为 0, 往内不断增加达到峰值, 然后开始逐渐衰减直至为 0。距锚墩越近, 应力在越短的距离达到峰值, 且增幅越大, 峰值也越大。随着与锚墩距离增加, 峰值减小迅速, 且峰值点往锚索深度移动, 应力曲线趋于平缓。这表明, 锚墩两侧表面岩体处于无应力状态, 进一步验证了锚墩下应力传递的椭圆面扩散效应。

2.2 位移分析

岩土体的位移等值线(图 5)与应力不同, 呈 U 型分布, 曲线前半段近似直线分布, 后半段呈抛

物线分布。图 6 反应了锚墩下岩体的位移与应力具有相同的衰减特性, 呈双曲线形式衰减, 但衰减速率与应力相比趋于缓慢。

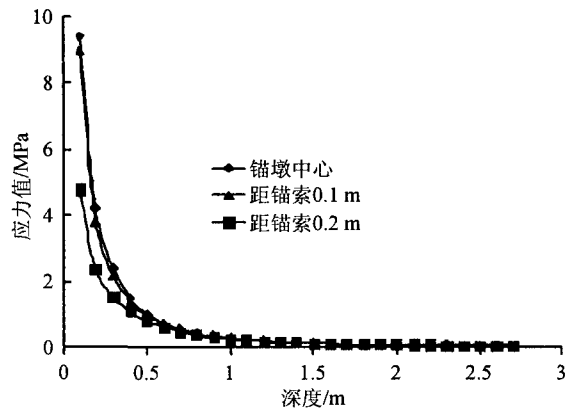


图 3 锚墩下距锚索不同距离处岩土体的应力分布曲线
Fig. 3 Stress distribution in different place under pier

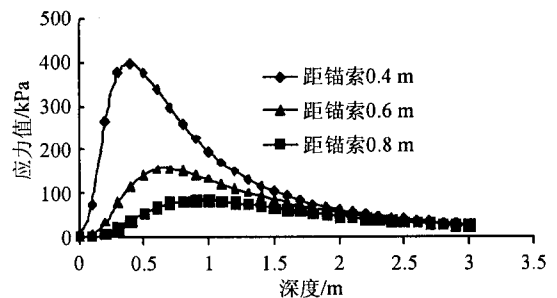


图 4 锚墩间距锚索不同距离处岩土体的应力分布曲线
Fig. 4 Stress distribution in different place between piers

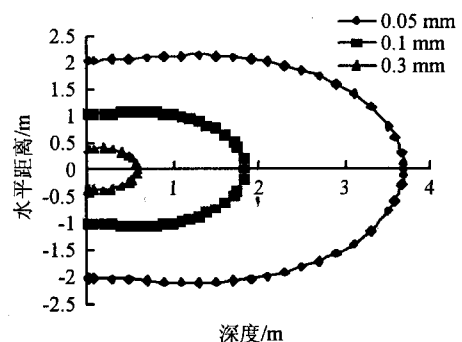


图 5 锚墩下岩土体的位移等值线
Fig. 5 Displacement contour after tensile process

锚墩两侧岩土体的位移分布曲线(图 7)表明锚墩两侧岩土体的位移远小于锚墩下岩土体的位移, 且衰减随着与锚墩距离的增大趋于平缓。

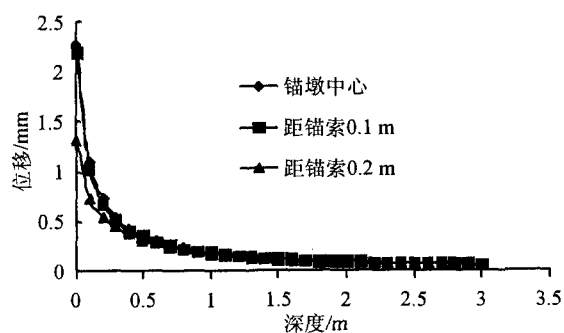


图 6 锚墩下距锚索不同距离处岩土体的位移分布曲线
Fig. 6 Displacement distribution in different place under pier

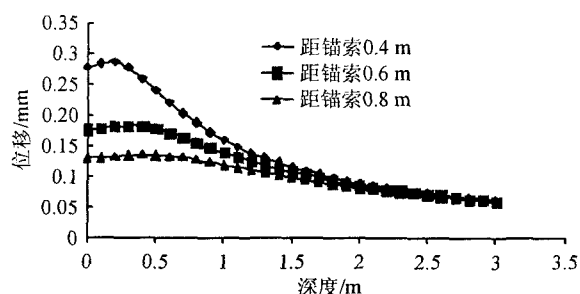


图 7 锚墩间距锚索不同距离处岩土体的位移分布曲线
Fig. 7 Displacement distribution in different place between piers

2.3 群锚预应力在岩土体中的传递

在锚索之间一定的区域内,相邻锚索的压应力叠加使其衰减的压应力得到一定的补偿,但应力增加很有限(图 8)。锚索间岩土表层形成无应力区,一定深度形成应力薄弱区。通过调整锚索间距或通过锚索间用锚杆补强,可以增强锚索间岩土体的锚固力,使其满足边坡稳定要求,形成一个完整的压缩带。预应力锚索在岩体内形成的连续分布的压缩带构成了所谓的岩石锚固应力墙。

根据锚墩下岩土体的应力特点,提出锚索间距的“预应力墙厚度”设计法,锚索间无应力区及应力薄弱区采用锚杆补强的设计方法,并在工程中得到了很好应用,取得了满意的效果。

“预应力墙厚度”设计法:在相邻锚索同一应力值椭球体出现的内外两交点的距离定义为满足某应力值 k 的锚固应力墙厚度 h 。根据边坡加固需要的锚固力 F 、锚固角 ψ 、锚索预应力松弛率 κ 以及加固可靠度 n ,则可得到相邻锚索的设计间

距数值解或图解。假定椭球体边界压应力 k 等于边坡加固岩体的必要加固力 F ,则相应压应力的椭球体 k 等值线为锚头施加的预应力有效作用范围。该范围的岩体力学强度改善程度就成了边坡锚固设计的定量设计内容。

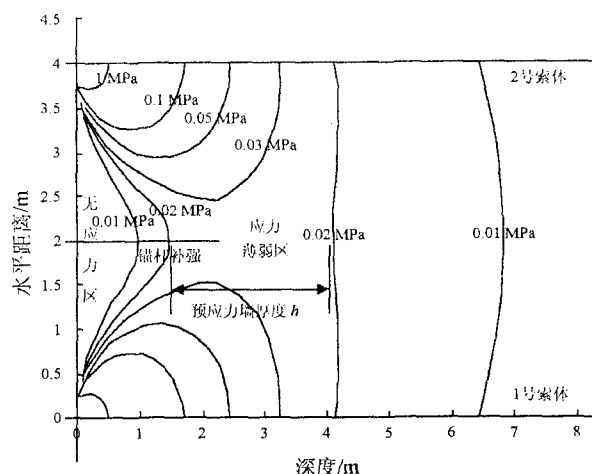


图 8 群锚作用下岩土体的应力等值线
Fig. 8 Stress contour with effects of prestressed anchor groups

3 数值模拟

为了验证理论求解的正确性,采用 FLAC^{3D} 建立预应力锚固数值仿真模型,采用 Mohr - Coulomb 模型进行单锚及群锚作用下的模拟试验。

图 9 ~ 图 11 为计算结果,与前面的理论分析

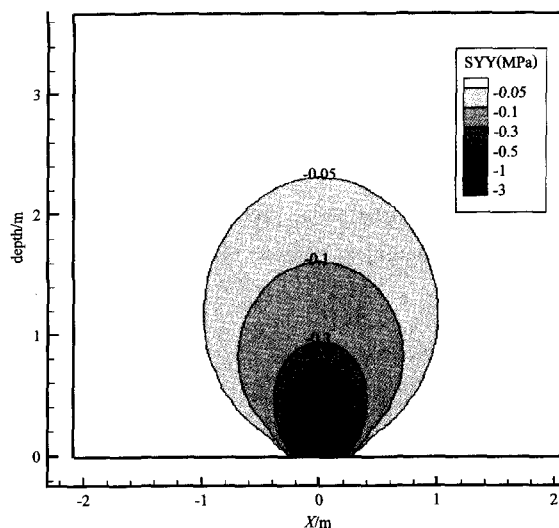


图 9 单锚作用下外锚头岩土体的应力等值线
Fig. 9 Stress contour under anchored pier with single anchor

相比可以看出,两者在规律上完全一致.在数值上,应力值吻合较好,但位移值比理论计算结果偏大,这是由于理论计算中采用弹性分析没考虑岩土体的塑性变形造成的.但理论计算对预应力锚索外锚头岩土体的应力分布特性研究具有一定的指导意义.

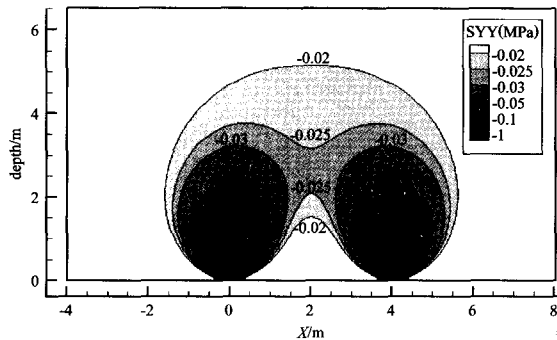


图 10 群锚作用下外锚头岩土体的应力等值线
Fig. 10 Stress contour under anchored pier on the effects of anchor cable group

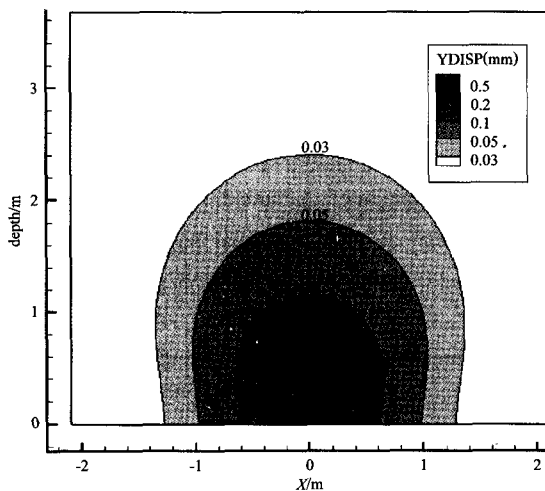


图 11 锚墩下岩土体的位移等值线
Fig. 11 Displacement contour after tensile process

4 结论

基于空间半无限体理论,得到锚墩下岩土体的应力和位移分布规律,并给出相应的表达式,与数值模拟结果吻合较好.主要结论如下:

1) 锚索压应力集中区的分布形态与锚索预应力大小、岩体的弹性模量无关.锚墩下岩土体形成一个近似椭球体的受压区,而位移等值线呈 U 型.

2) 应力和位移均呈指数形式分布,在轴向随深度增加而递减;在水平向,随着与锚索距离的增大而减小.

3) 锚头施加给岩土体的锚固力影响深度很浅,不能够改变影响范围以外的滑床力学状态.

4) 提出锚索间距的“预应力墙厚度”设计法,锚索间无应力区及应力薄弱区采用锚杆补强的设计方法.

5) 由于岩土工程所面临的地质条件复杂多变,且面临的工程条件具有不确定性,因此,锚索外锚头岩土体的力学特性仍需更进一步地开展理论研究和试验分析工作.

参考文献:

- [1] 程良奎,范景伦,韩 军,等.岩土锚固[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [2] 张乐文,李术才.岩土锚固的现状与发展[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2214-2221.
- [3] 沈 俊.预应力锚索加固机理与设计计算方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2005.
- [4] 黄福德.李家峡水电站层状岩质高边坡现场大型预应力群锚加固机理实验研究[J].西北水电,1995,14(4):46-55.
- [5] 朱杰兵,韩 军,程良奎,等.三峡永久船闸预应力锚索加固对周边岩体力学性状影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):853-857.
- [6] 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):917-921.
- [7] 丁秀丽,盛 谦,韩 军,等.预应力锚索锚固机制的数值模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):980-988.
- [8] 朱哈迈.破碎岩质边坡锚固技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [9] 铁摩辛柯 S,古地尔 J N.弹性理论[M].徐芝纶,译.北京:高等教育出版社,1990.
- [10] 董燕军.岩土预应力锚索荷载传递规律及其设计方法研究[D].长沙:中南大学,2004.
- [11] 高 鹏.预应力锚索地梁内力计算方法及荷载传递规律的理论研究[D].长沙:中南大学,2007.