

预应力岩石锚杆锚固段应力分布模式分析

谷拴成¹, 邵红旗¹, 魏效农²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 铜川建筑安装工程公司, 陕西 铜川 727000)

摘要:在对传统剪滞模型基本原理及受力特点进行分析的基础上, 提出一种改进的剪滞模型, 并利用该模型对预应力岩石锚杆作用机理进行分析, 得到了浆体材料与岩体间的剪应力、钢筋与浆体材料间的结合应力分布模式及荷载-位移特性; 并对该模型进行了受力分析, 得到一些有实际意义的结论。

关键词: 岩土锚固; 预应力岩石锚杆; 剪滞模型; 锚固段; 应力分布模式

中图分类号: TD352⁺.5; TV554⁺.12; U455.7⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)11-0038-04
Analysis of Stress Distribution Model Along Anchoring Section of Prestressed Rock Bolt/GU Shuan-cheng¹, SHAO Hong-qi¹, WEI Xiao-nong² (1. School of Architecture and Civil Engineering, XUST, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Tongchuan Construction and Installation Engineering Company, Tongchuan Shaanxi 727000, China)

Abstract: A refined shear lag model is presented based on the analysis on the basic principle and mechanical characteristic of traditional shear lag model. The model is applied to the analysis on mechanism of pre-stress anchor bolt, shear stress between grouting material and rock and bond stress distribution model & loading-deformation characteristic were obtained. Stress analysis was also made on the model for some conclusions with practical significance.

Key words: anchorage of rock and soil; pre-stressed rock bolt; shear lag model; anchoring section; distribution model of stress

0 引言

长期以来, 锚杆作为一种有效的加固方法已广泛应用于土木工程和采矿工程中。然而, 目前对其设计仍旧是经验或半经验性的。其中一个很重要的因素是锚固机理研究不透彻。因此, 对锚杆的锚固机制的研究一直以来都是锚固工程中研究的热点和难点。目前, 对锚固机制的研究大多体现在 2 个方面: 锚固后岩体物理效应的改善和锚固段应力-应变函数的分布^[1]。

Freeman^[2]监测了锚杆的加载过程和剪应力沿锚杆的分布, 并提出了“中性点”、“拾取长度”、“锚固长度”等概念。根据这些观点, 在中性点处, 岩体的位移和锚杆的位移是相同的, 并且在界面上的剪应力为零, 而锚杆的轴向应力达到最大。考虑到中性点, Indraratna^[3]根据弹塑性本构关系, 建立了全长注浆锚杆的分析模型。根据 Bjornfot 和 Stephanson^[4]的工作, 在节理岩体中锚杆上可能不止一个中性点而是好几个。锚杆安装入岩体后, 锚杆与周围岩体在分离破坏前是协调工作的, 并且岩体的位移对中性点影响很大。

本文的目的是改进传统的剪滞模型, 建立改进

的锚杆与岩体相互作用模型。根据建立的模型对预应力岩石锚杆作用机理进行研究, 得到浆体材料与岩体间的侧阻力、钢筋与浆体材料间的结合应力分布模式及荷载-位移特性, 并对模型进行受力分析, 得到一些有指导意义的结论。

1 模型的建立

1.1 传统剪滞模型^[5~11]

剪滞模型(shear lag model)或剪滞理论最早由 Cox 提出, 并应用于复合材料的界面应力分析。其基本原理为: 纤维受到的轴向应力由界面上的剪应力来平衡, 纤维只承受轴向荷载, 而基体和界面只承受剪切荷载。该模型是基于弹性理论推导的, 并且假定接触面上没有滑移, 即锚杆与岩体完全粘结; 如图 1 所示: 借助该图可以描述锚杆与均质岩体相互作用的过程。岩体在没有锚杆时的位移为 u_{ini} , 有锚杆时则缩小为 u_m , 同时锚杆在岩体作用下也伸长了 u_b , 因而锚杆与岩体之间产生了位移差 Δu , 进而产生了剪应力 τ_b 与轴力增量 $dP(x)$ 。

对锚杆微元进行受力分析, 可以得到下面的平衡方程:

收稿日期: 2008-06-11

作者简介: 谷拴成(1963-), 男(汉族), 陕西扶风人, 西安科技大学建筑与土木工程学院院长、教授、博士生导师, 岩土工程专业, 从事岩土工程、地下抗震及地下结构可靠度等方面的教学与研究, 陕西省西安市雁塔路中段 58 号; 邵红旗(1982-), 男(汉族), 河南项城人, 西安科技大学在读工学硕士, 岩土工程专业, 研究方向为岩土加固理论与技术, shao_hongqi@163.com。

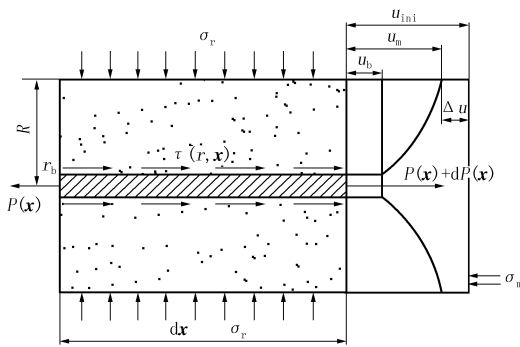


图1 传统的剪滞模型计算简图

$$dP(x) = -2\pi r_b \tau_b dx \quad (1)$$

由于围岩的边界条件相当复杂,要对锚杆围岩系统进行求解,还需假定围岩中的剪应力分布。考虑到剪应力在围岩中的非线性递减,假定围岩中的剪应力分布如下^[5]:

$$\tau(r, x) = r_b \tau(r_b, x) / r \quad (r_b \leq r \leq R) \quad (2)$$

式中: r_b ——锚杆的半径; R ——锚杆的影响半径,对于单根锚杆而言, R 随锚杆表面的剪力的增大而增大。但在隧道工程中,由于采用系统锚杆对围岩进行支护,沿洞周围岩的最大径向位移出现在两锚杆之间,最小径向位移则出现在锚杆处。因而,产生剪力的位移差,可以近似地认为是锚杆与两锚杆正中间围岩的位移差,锚杆的作用半径也简化地取为锚杆间距的一半。

另外,为了简化分析,假定:

$$\frac{dP(x)}{dx} = H(u_b - u_m) = -H\Delta u \quad (3)$$

式中: H ——与材料相关的一个常数。

将式(2)代入围岩的本构模型

$$\tau(r, x) = G_m \frac{\partial u_m}{\partial r} \quad (4)$$

并积分得:

$$\Delta u = \tau_b r_b \ln(R/r_b) / G_m \quad (5)$$

式中: R ——锚杆作用的影响半径。

将式(1)与式(5)代入式(3)得:

$$H = 2\pi G_m / \ln(R/r_b) \quad (6)$$

1.2 改进的剪滞模型

本文在传统剪滞模型的基础上提出一种包含界面层的改进剪滞模型。取长度为 dz 的微元体,微元体中包含有纤维、界面层及基体,见图2所示。

用该模型中的纤维来模拟预应力锚杆的钢筋,界面层来模拟锚杆中灌注的水泥浆,而基体正好模拟稳定岩体。设锚杆半径为 r_f ,灌浆材料厚度为 r_i ,岩体厚度为 r_m (剪切变形的影响半径),由静力平衡

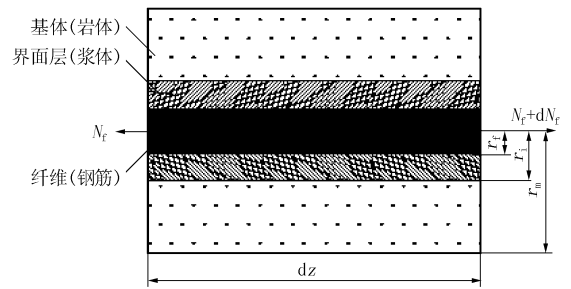


图2 改进的剪滞模型计算简图

关系得:

$$\frac{dN_f}{dz} + 2\pi r_i \tau_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dN_f}{dz} + 2\pi r_m \tau_m = 0 \quad (8)$$

从而可得:

$$\tau_i r_i = \tau_m r_m = \tau r \quad (9)$$

式中: N_f ——锚杆的轴力; τ_i 、 τ_m ——分别为浆体及岩体内的剪应力; τ ——介于浆体与岩体间任意点($r_f \leq r \leq r_m$)处的剪应力。

考虑位移边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} r = r_f: w = w_1 \\ r = r_i: w = w_2 \\ r = r_m: w = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: w_1 、 w_2 ——分别为浆体内外侧的轴向位移。

根据文献[12]的研究, r_m 可表示为:

$$r_m = 2.5(1 - \mu)l$$

式中: μ ——岩体泊松比; l ——锚杆的长度。

由弹性本构关系可得:

$$\tau = G_i \frac{dw}{dr} \quad (r_f \leq r \leq r_i) \quad (11)$$

式中: τ ——浆体内的剪应力; G_i ——浆体的剪切模量。

由式(9)得:

$$\tau = \tau_i r_i / r \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)积分得:

$$w = (\tau_i r_i / G_i) \ln r + c \quad (13)$$

将边界条件式(10)代入式(13)得:

$$\tau_i = (w_1 - w_2) G_i / [r_i \ln(r_i/r_f)] \quad (14)$$

同理:

$$\tau_m = -w_2 G_m / [r_m \ln(r_m/r_i)] \quad (15)$$

考虑钢筋(纤维)的平衡,有:

$$P = \pi r_f^2 \sigma_f = E_f \pi r_f^2 \frac{dw}{dz} \quad (16)$$

将式(14)~(16)代入式(7)、(8)可得:

$$\frac{d^2 w_1}{dz^2} + \frac{2G_i}{E_i r_f^2 \ln(r_i/r_f)} (w_1 - w_2) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d^2 w_1}{dz^2} - \frac{2G_m}{E_i r_f^2 \ln(r_m/r_i)} w_2 = 0 \quad (18)$$

消去 w_2 后,变为:

$$\frac{d^2 w_1}{dz^2} + \alpha^2 w_1 = 0 \quad (19)$$

其中:

$$\alpha^2 = \frac{2G_i / [E_i r_f^2 \ln(r_i/r_f)]}{1 - [G_i \ln(r_m/r_i)] / [G_m \ln(r_i/r_f)]}$$

式(19)的通解为:

$$w_1 = c_1 \cosh(\alpha z) + c_2 \sinh(\alpha z) \quad (20)$$

利用边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} z=0: P = -F = -\pi r_f^2 \bar{\sigma} = E_i \pi r_f^2 \frac{dw_1}{dz} \\ z=l: w_1 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

于是有:

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= -\left[\frac{\bar{\sigma}}{E_i \alpha} \right] \left\{ -\tanh(\alpha l) \cosh(\alpha z) + \sinh(\alpha z) \right\} \\ w_2 &= r_f^2 E_i \alpha^2 \ln(r_m/r_i) / (2G_m) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

由此可求出岩体与浆体之间的界面剪应力为:

$$\tau_i = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{2}} \left(\frac{G_m}{E_i} \right)^{1/2} \frac{r_f}{r_i} \frac{-\tanh(\alpha l) \cosh(\alpha z) + \sinh(\alpha z)}{\left[(G_m/G_i) \ln(r_i/r_f) + \ln(r_m/r_i) \right]^{1/2}} \quad (23)$$

钢筋与浆体间的剪应力为:

$$\bar{\tau}_i = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{2}} \left(\frac{G_m}{E_i} \right)^{1/2} \frac{-\tanh(\alpha l) \cosh(\alpha z) + \sinh(\alpha z)}{\left[(G_m/G_i) \ln(r_i/r_f) + \ln(r_m/r_i) \right]^{1/2}} \quad (24)$$

1.3 锚杆与岩体的分离作用

当作用的荷载增大时,锚杆与岩体之间可能发生分离滑移破坏作用,分离作用对锚固效果影响很大,不同类型的锚杆有不同的分离作用特性。本文仅讨论岩石预应力锚杆。接触面上的剪切强度有3部分组成,即粘结力、联锁作用力和垂直方向的摩擦力。随着协调变形沿接触面的消失,剪切强度随后也消失。分离以后,接触面上的剪应力在滑移部分变为残余强度。Malvar^[13](1992年)发现侧限压力对接触面的强度影响很大,分裂破坏可能发生在灌浆体中锚杆与浆体接触面或者灌浆体与岩体接触面,这将取决于哪一个最薄弱。

用摩尔-库仑准则来描述锚杆与岩体的分离作用,则剪切强度可用方程(25)计算:

$$\tau_m = c + \sigma_{nb} \tan \varphi^* \quad (25)$$

式中: φ^* 、 c ——分别是接触面的内摩擦角和粘聚

力,可以通过直剪试验或拉拔试验得到; σ_{nb} ——垂直于锚杆方向的正应力。

2 模型的受力分析

作为算例,假设浆体的弹性模量 $E_i = 2.63 \times 10^4$ MPa,浆体的剪切模量 $G_i = 1.11 \times 10^4$ MPa,岩体的剪切模量 $G_m = 0.47 \times 10^4$ MPa,岩体的泊松比 $\mu = 0.25$,锚杆半径 $r_f = 16$ mm,锚杆长度 $l = 12$ m,锚固段长度 6 m,钻孔直径 $r_i = 120$ mm,锚杆预应力 $P = 180$ kN,利用公式(24)可得到预应力岩石锚杆锚固段钢筋与浆体界面上剪应力在不同参数 α 下的分布曲线,如图3所示。

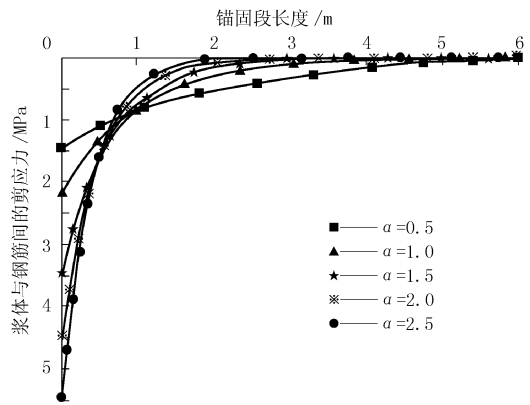


图3 锚杆锚固段剪应力分布曲线图

从对模型的力学推导、受力分析及锚固段剪应力分布曲线图可知预应力岩石锚杆锚固段的受力特点如下。

(1) 预应力锚杆内锚固段上剪应力的分布是很不均匀的,在内锚固段口部有高度的剪应力集中现象,剪应力随深度的衰减很快;浆体材料与岩体间的剪应力分布模式与钢筋与浆体材料间的剪应力分布模式按相似的规律变化。本文与程良奎^[14]所给出的结果在分布规律上基本一致,与顾金才等^[15]现场试验所给出的结果在分布规律上也基本一致,这都很好的证实了该模型的合理性。

(2) 两个界面上应力分布模式的形状取决于参数 α 的变化,而 α 的变化与钢筋、浆体材料、岩体三者之间的相对刚度有关。当岩体、浆体材料的刚度较大时(越硬), α 的取值越大,在锚固段端部剪应力集中越显著;相反,当岩体越软, α 取值越小,剪应力分布越均匀。

(3) 同时,从分布曲线看,当岩体较坚硬时,剪应力分布主要集中在锚固段外端 3 m 范围内,这进一步说明,在预应力锚杆设计中,盲目增加锚固段长

度是无益的。

3 结论

本文分析了传统剪滞模型的基本原理,并对其受力特点进行了推导分析;在此基础上,提出了一种改进的剪滞模型,利用该模型对预应力岩石锚杆的作用机理进行了理论推导分析,得出了浆体材料与岩体间的剪应力、钢筋与浆体材料间的结合应力分布模式及荷载-位移特性;两个界面按相同的规律变化,但其分布模式取决于参数 α 的变化。因此,本文提出的模型能有效地指导隧道预应力岩石锚杆支护的设计,对锚杆支护设计提出了新的思路,从而提高锚杆的支护作用效果。

参考文献:

- [1] 张乐文,汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学,2002,23(5):627-631.
- [2] Freeman T J. The Behavior of Fully-bonded Rock Bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. Tunnels tunneling,1978,(7):37-40.
- [3] Indraratna B, Kaiser PK. Analytical model for the design of grouted rock bolt[J]. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech,1990,(14):227-251.
- [4] Bjornfot F, Stephansson O. Interaction of grouted rock bolts and hard rock masses at variable loading in a test drift of the Ki-

- runavaara Mine, Sweden[M]. In: Stephansson P, editor. Proceedings of the International Symposium on rock bolting. Rotterdam; Balkema. 1984. 377-395.
- [5] Ji S, Zhao P. Strength of two-phase rocks: A model based on fiber loading theory[J]. J Struct Geol, 1994,(16):253-262.
- [6] Pinglao Zhao, Shaocheng Ji. Refinements of shear-lag model and its applications[J]. Tectonophysics,1997,(279):37-53.
- [7] Yue Cai, T. Esaki, Y. J. Jiang. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 2004,(41):1055-1067.
- [8] 方勇,何川. 全长粘结式锚杆与隧道围岩相互作用研究[J]. 工程力学,2007,24(6):111-116.
- [9] 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.
- [10] 谷拴成,姚国圣,刘娟,等. 锚杆在软岩中作用机理研究[J]. 山东科技大学学报,2005,24(4):74-76.
- [11] 姚国圣,李镜培,谷拴成. 软岩隧道中锚杆与岩体的相互作用模型研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(7):1216-1219.
- [12] Randolph M F. The response of flexible piles to lateral loading[J]. Geotechnique,1981,31(2):247-259.
- [13] Malver L J. Bond reinforcement under controlled confinement[J]. ACI Mater J.,1992,89(6):593-601.
- [14] 程良奎,胡建林. 土层锚杆的几个力学问题[A]. 中国岩土锚固工程协会. 岩土锚固工程技术[C]. 北京:人民交通出版社,1996.1-6.
- [15] 顾金才,沈俊,陈安敏,等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(S1):788-792.

汶川地震断裂带科学钻探在四川开钻

国土资源部网站消息 2008年11月6日上午,由科技部、国土资源部和中国地震局共同组织实施的汶川地震断裂带科学钻探一号孔开钻仪式在四川举行。国土资源部部长、党组书记、国家土地总督察徐绍史在开钻仪式现场宣布一号孔开钻,并启动钻机。他还向汶川地震科学钻探工程中心授牌。国土资源部副部长、党组成员、中国地质调查局局长汪民,四川省委常委、成都市委书记李春城分别讲话,四川省委常委、副省长、省委秘书长钟勉出席。

汪民在讲话中表示,汶川地震断裂带科学钻探项目是为贯彻胡锦涛总书记在今年6月23日两院院士大会上的讲话精神,落实温家宝总理重要批示而组织实施的。中央领导指出,对于自然灾害要提高监测和预警的能力,加强对其孕育、发生、演变、时空分布等规律和致灾机理的研究,并批准实施汶川地震断裂带科学钻探。

汪民强调,科学钻探是研究地震机制和监测地震变化趋势的有效方法。世界已有实践表明,通过科学钻探,有可能获取地震愈合和破裂期地震摩擦热、渗透性、流体作用、应力状态等重要科学证据,还可通过在钻孔中安放仪器监测地应力等地震信息变化。汶川地震断裂带科学钻探项目是当今世界回应大地震最快的一项科学钻探工程,也是我国第一次在地震发生后通过科学钻探研究地震断裂和地震机理的重要工程。一号孔的正式开钻,标志着中国地学界向地震研究

和预报领域吹响新一轮的进军号角。

中国科学院院士、汶川地震断裂带科学钻探项目首席科学家许志琴表示,国际地学界普遍认为,大地震后的快速科学钻探是回应大地震的有效科学途径。汶川大地震后不到6个月的时间便实施科学钻探,是世界上最快回应大地震的一项科学钻探工程,是中国科学家回应大地震的一次实际行动。

据了解,汶川地震断裂带科学钻探项目将持续到2012年12月。该项目将通过“钻探、井中探测、科学研究”三位一体的方式捕捉大地震直接信息,揭示地震机制。项目将在北川-映秀和安县-灌县两个断裂带上实施4个钻井,包括2口1200m深的先导井孔和2口3000m深的主孔科学钻,在主孔孔内安放科学仪器,建立深孔长期地震观测站。项目将开展地质构造、地震地质、岩石力学、地球化学、地球物理、流体作用和流变学等多学科研究。科学钻探通过对温度、地震波速和发震断层渗透性的精确研究,有可能获取汶川地震断层愈合期和破裂期的地震摩擦热、流体作用、应力状态等重要数据,揭示断裂破裂过程中的物理作用和化学作用,为未来地震的监测、预报或预警提供最基本的数据。

中科院院士邓起东、李廷栋、滕吉文,科技部、中国地震局有关负责人,国土资源部有关司局、中国地质调查局有关负责人,四川省人民政府、省国土资源厅、省地勘局和四〇三地质队等有关部门和单位负责人参加了开钻仪式。