

文章编号:1671-6833(2013)04-0032-04

黄土隧道系统锚杆受力特性及长度优化分析

宿钟鸣

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西 太原 030006)

摘要: 简要推导了 Mindlin 位移的黄土隧道系统锚杆轴力分布的理论解和弹塑性均质土体条件下围岩塑性区半径的理论解. 以现场试验结果为依据,从拉拔力作用下系统锚杆的受力特性和锚喷支护中系统锚杆中性点的轴力两个角度出发,分析了黄土隧道中系统锚杆的受力特性及长度优化问题.

关键词: 黄土隧道;系统锚杆;塑性区;接触压力;长度优化

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.008

0 前言

系统锚杆是黄土隧道施工中最普遍的一种支护类型,其目的是向黄土围岩提供一种柔性支护力,调节围岩的应力状态,最大限度地发挥围岩的自承载作用. 宿钟鸣等^[1-2]通过研究得出了黄土隧道拱部和边墙砂浆系统锚杆的受力特点,并从径向位移的衰减规律和围岩压力分布形式两个角度分析了大断面浅埋黄土隧道系统锚杆受力差异较大的原因. 其研究仅局限于对黄土隧道拱部和边墙位置砂浆系统锚杆的轴力测量和分析,缺乏对砂浆系统锚杆受力特性及其受力状况与围岩塑性区关系的进一步研究. 文竞舟等^[3]以岩质公路隧道监控量测中测定的全长粘结式锚杆轴力为基本参量,推导了锚杆最大轴力与围岩塑性区半径及松动区半径的关系式,但未对锚杆长度参数的优化作进一步深入研究. 不少专家和学者^[4-8]就岩石隧道和黄土隧道中全长粘结式锚杆的受力特性进行了分析,但缺乏基于受力特性优化锚杆长度参数的研究.

笔者尝试从拉拔力作用下系统锚杆的受力特性和锚喷支护中系统锚杆中性点的轴力两个角度出发,分析了基于理论解的黄土隧道系统锚杆的长度参数优化问题. 研究结果为黄土隧道砂浆系统锚杆的设计和优化提供了理论依据和技术指导,具有一定的参考价值和实际意义.

1 系统锚杆受力理论解

假设系统锚杆作用的黄土体为半无限平面,在深度为 h 处作用一个集中力 Q ,则点 $B(x, y, z)$ 处的垂直位移 ω 可由 Mindlin 问题的位移解确定,如图 1 所示.

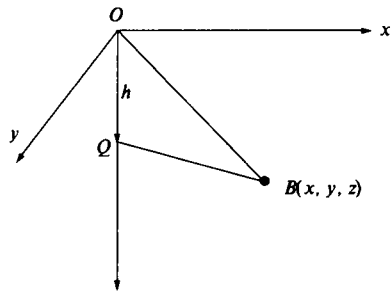


图1 Mindlin 解的计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of the solution to Mindlin

$$\omega = \frac{Q(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(3-4\mu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right]. \quad (1)$$

$$\text{式中: } R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}; \\ R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}.$$

在锚杆端部有 $x = y = z = 0$, 则(1)式简化为

$$\omega = \frac{Q(1+\mu)(3-2\mu)}{2\pi Eh}. \quad (2)$$

收稿日期:2013-04-23;修订日期:2013-05-22

基金项目:山西省交通建设科技项目(11-2-18)

作者简介:宿钟鸣(1983-),男,河南周口人,工程师,硕士,主要从事隧道与地下工程的科研工作, E-mail:375216207@qq.com.

考虑到锚杆近端土体与锚杆粘结材料之间的弹性变形协调,则有

$$\int_0^\infty \frac{(3-2\mu)a}{2G} \frac{\tau}{z} dz = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} (Q - 2\pi a \int \tau dz) dz. \tag{3}$$

并考虑到边界条件 $\tau|_{z=\infty} = 0$, 拉拔荷载作用下黄土隧道中砂浆系统锚杆所受剪应力沿锚杆体分布的解析式.

$$\tau = \frac{P}{\pi a} \left(\frac{1}{2} tz \right) \exp \left(-\frac{1}{2} tz^2 \right). \tag{4}$$

式中: P 为砂浆系统锚杆端头所受拉拔荷载.

$$t = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)a^2} \left(\frac{E}{E_a} \right). \tag{5}$$

将式(4)中 τ 的表达式积分, 即可求得拉拔荷载作用下黄土隧道中砂浆系统锚杆的轴力沿锚杆体分布的解析式.

$$N = P \exp \left(-\frac{1}{2} tz^2 \right). \tag{6}$$

2 围岩塑性区半径理论解

图 2 为一圆形隧道的横截面示意图, 假设围岩为弹塑性均质土体, 则其为轴对称的平面应变问题.

当支护抗力为 p_i 时, 结合支护与围岩界面的应力边界条件由塑性区平衡方程和 Morh - Coulomb 塑性方程可求得塑性区的应力:

$$\sigma_r^p = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi. \tag{7}$$

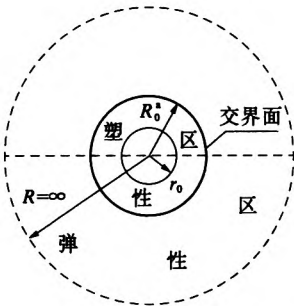


图 2 围岩弹塑性区域示意图
Fig.2 Schematic diagram of elasto-plastic zone in surrounding rock

$$\sigma_\theta^p = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi. \tag{8}$$

则弹塑性界面上的应力差 $\sigma_\theta^p - \sigma_r^p$ 为

$$M = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{R_0^p}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}. \tag{9}$$

假设围岩与锚杆共同变形, 锚杆最大轴力为

$$N_{\max} = \frac{k}{2} \left(\frac{M (R_0^p)^2}{4G} - r_0 u_0^p \right) E_a A_s \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r_c^2} \right). \tag{10}$$

式中: N_{\max} 为砂浆系统锚杆实测最大轴力; E_a 为锚杆体弹性模量; A_s 为锚杆体横截面面积; r_c 为锚杆外端点的半径; u_0^p 为锚杆锚固前洞壁的变形值. 将式(9) 代入式(10) 整理可得支护后塑性区的半径公式为

$$R_0^p = \left[\frac{A r_0^i}{t(p_i + C_1 \cot \varphi)} \right]^{\frac{1}{1+\mu}}. \tag{11}$$

式中:

$$A = 4G \left[\frac{2N_{\max}}{kE_a A_s \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r_c^2} \right)} + r_0 u_0^p \right]; G = E/2(1+\mu)$$

为土体剪切模量; $t = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; $C_1 = C + \tau_a A_s / ei$

为锚喷支护后围岩的黏聚力, e 和 i 为锚杆纵横间距.

3 工程概况

崑临高速公路某黄土隧道位于临县侯家岩村, 设计为小净距短隧道. 右洞起点桩号 K112 + 989, 终点桩号 K113 + 248, 全长 259 m, 洞体最大埋深 57.7 m; 左洞起点桩号 ZK112 + 984, 终点桩号 ZK113 + 258, 全长 274 m, 洞体最大埋深 64.3 m. 隧道平纵线形、几何尺寸、净空断面标准均按 80 km/h 行车速度设计; 隧道建筑限界: 净宽 10.25 m, 净高 5.00 m, 拱圈部位设计开挖半径为 15.64 m.

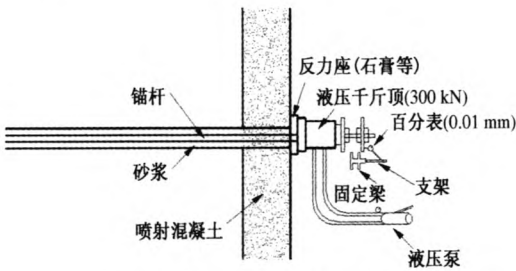


图 3 锚杆抗拔试验的装置
Fig.3 Device of drawing test for the anchor

4 系统锚杆受力现场试验

4.1 拉拔作用下受力分析

在依托工程 V 级围岩段按设计要求采用正常孔深, 将待测锚杆适当加长, 保证千斤顶与锚杆同心, 避免偏心受拉. 待测锚杆安装完毕后, 为便于安装承压垫板, 用砂浆将其孔口部抹平. 通过手动

液压泵均匀加压(10 kN/min),根据活塞面积换算锚杆承受的拉拔力.经现场锚杆拉拔检测得出其最大极限拉拔力 $P = 65.48$ kN.其检测锚杆的剪应力分布和轴力分布分别如图 4 和图 5 所示.

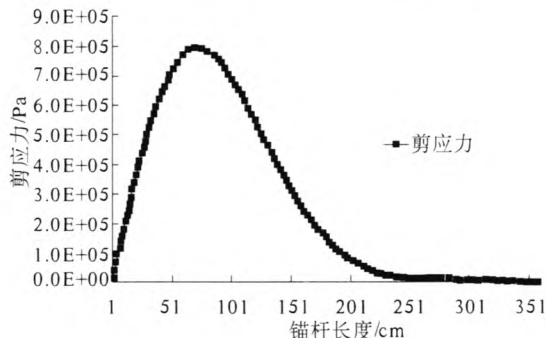


图 4 锚杆体剪应力分布曲线

Fig.4 Distribution curves of shear stress in anchor

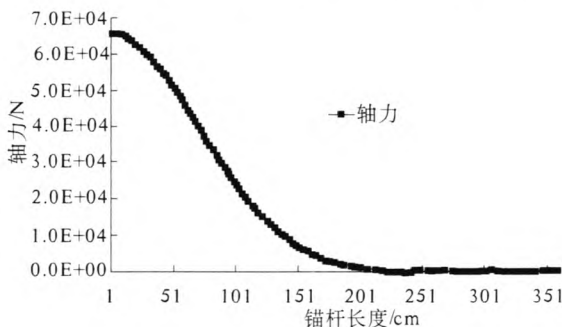


图 5 锚杆体轴力分布曲线

Fig.5 Distribution curves of axial force in anchor

理论计算结果表明锚杆体剪应力在 73 cm 深度位置达到最大值 790.401 kPa,至 440 cm 深度位置剪应力才逐渐减少为零;锚杆体轴力最大,在 200 cm 深度位置锚杆体轴力为 1.488 kN,至 300 cm 深度位置锚杆体轴力仅为 0.013 kN;黄土隧道中系统锚杆的轴力衰减速率小于其剪应力衰减速率. V 级围岩段 200 cm 深度外系统锚杆的轴力已很小,达不到理想的效果.因此,基于黄土隧道系统锚杆的现场实测拉拔力,可掌握锚杆的受力特性,以其轴力分布为基础可优化黄土隧道系统锚杆的设计长度.

4.2 实测轴力下长度优化分析

依托工程 V 级围岩段初期支护采用锚喷支护措施,系统锚杆为 $D = 22$ mm, $L = 3$ m,环纵向间距为 0.5 m 的砂浆锚杆,其弹性模量 $E_a = 210$ GPa, $r_c = 18.64$ m,已测得锚固前洞壁位移值 $u_0^a = 4.2$ mm.据岩土勘察报告显示,V 级围岩段黄土弹性模量及泊松比经试验测定分别为 $E = 150$ MPa, $\mu = 0.3$.为较精确地测出土体的黏聚力和内摩擦角,以原状土为试验对象,采用 TSZ-3 型应变

控制式三轴仪进行围压分别为 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 的三组试验,得出 $c = 91.81$ kPa, $\varphi = 35.24^\circ$.经现场实测,研究断面喷砼和围岩之间的压力为 112.76 kPa.



图 6 土体 c 和 φ 值的测定

Fig.6 Test of the value c & φ



图 7 围岩压力监测

Fig.7 Monitoring of the surrounding rock pressure

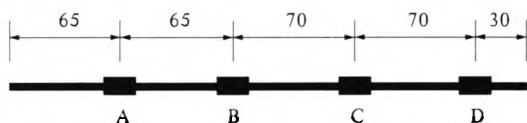


图 8 锚杆轴力监测点布置图 单位:cm

Fig.8 Layout plan of monitoring points for bolt axial force

在锚杆全长布置 4 个监测点 A、B、C、D,其中,A 点为近端,D 点为远端,B 点为锚杆的中性点位置($r_{\text{中}} = \sqrt{2r_c^2 r_0^2 / (r_c^2 + r_0^2)}$),经现场实测 B 点最大轴力为 11.68 kN.则按式(11)计算的围岩塑性区半径 R_0^a 为 17.51 m,此值小于拱部开挖半径(15.64 m)与设计系统锚杆长度(3 m)二者之和,计算表明采用 3 m 长的系统锚杆支护是可行的.而 $R_0^a - r_0 = 1.87$ m,此值远小于原设计系统锚杆的长度 3 m,说明其长度富余量过多,存在优化空间.据上述计算分析可将此处系统锚杆的长度优化到 2 m.

5 结论

以现场试验结果为依据,笔者尝试将系统锚杆受力的理论解和围岩塑性区半径的理论解应用于黄土隧道砂浆系统锚杆的受力特性分析和长度优化中,得出如下两点结论.

(1)拉拔荷载作用下,砂浆系统锚杆的轴力衰减速率小于剪应力衰减速率,以锚杆体轴力分布为基础可优化系统锚杆的设计长度;

(2)黄土隧道开挖支护中围岩塑性区半径可表示为系统锚杆轴力的函数,可依据实测锚杆轴力反分析围岩塑性区大小,进而优化系统锚杆的长度设计参数.

参考文献:

[1] 宿钟鸣,孙志杰,王晓峰.大断面浅埋黄土隧道锚杆轴力差异分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(4):769-771.
[2] 邵玉兰,赵队家,宿钟鸣.浅埋小净距黄土隧道工程[M].北京:人民交通出版社,2012:101-112.

[3] 文竞舟,王成,刘礼标.锚杆轴力反算围岩塑性区及松动区范围研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1023-1026.
[4] 尤春安.全长粘结式锚杆的受力分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):339-341.
[5] 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.
[6] 陈广峰,米海珍.黄土地层中锚杆受力性能试验分析[J].甘肃工业大学学报,2003,29(1):116-119.
[7] 李长平.水平岩层围岩条件下公路隧道砂浆锚杆作用浅析[J].山西交通科技,2006(6):41-43.
[8] 李闯.隧道水害及防水板无钉施工技术[J].徐州工程学院学报:自然科学版,2011,26(1):58-61.

Analysis of Mechanical Characteristic
and Length Optimization of Systematic Bolt in Loess Tunnel

SU Zhong-ming

(Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region of Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The theoretical solution to the distribution of axial force in Mindlin displacement problem and the plastic radius of surrounding rock in the condition of elastoplastic homogeneous soil are deduced. Based on the results of field test, the mechanical characteristic of systematic bolt and its length optimization are discussed in loess tunnel from the two perspectives of the drawing force and axial force at the location of neural point. The results obtained will offer the technical support for the length optimization of systematic bolt in loess tunnel.

Key words: loess tunnel; systematic bolt; plastic zone; contact stress; length optimization