

文章编号:1673-9468(2008)04-0033-04

土钉支护机理的研究

涂兵雄¹, 贾志刚², 刘春晓¹, 白金杰¹, 梁凯^{1,3}

(1.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2.黄淮学院 建筑工程系,
河南 驻马店 463000;3.河北电信公司,河北 石家庄 050000)

摘要:根据土钉支护的受力特点和钉土间的相互作用,采用剪滞力理论建立了土钉内力传递的计算模型,由平衡条件推导出了以土钉轴向应力为变量的微分方程,根据边界条件得出了土钉内力的传递公式,分析了土钉支护内力传递的规律。通过理论推导与土钉支护工程实例的现场测试结果对比研究,发现理论分析与实测结果吻合较好,验证了计算模型和分析方法的可行性,对土钉支护结构的设计和内力分析具有一定的指导意义。

关键词:土钉支护;剪滞力;现场测试

中图分类号: U455.7+1

文献标识码: A

Research of the mechanism on the soil nail surporting

TU Bing-xiong¹, JIA Zhi-gang², LIU Chun-xiao¹, Bai Jin-jie¹, LIANG Kai^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Department of Architectural Engineering, Huanghuai College, Zhumadian 463000, China;
3. Hebei Company of Telecommunication, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The differential equation as a variation of the axis stress of the soil nail was derived by the balance condition, according to the bearing characteristics of soil nailing, the interaction between nail and soil, and the mechanical model of the transmission of the soil nail internal stress with the shear-log theory. Then the transmission equation was solved due to the boundary condition and the discipline of the internal stress transmission was analyzed. When compared with the field tested result of the soil nailing project by writing the MATLAB programs, the anastomoses between the theory analysis and the field test was good and the feasibility of the model and analysis method are proved. The result contributed a instruction significance to the design and the analysis of internal stress of soil nail structure.

Key words: soil nailing; force of shear-log; field test

目前在土钉支护设计中,大多数设计方法还是沿袭了锚杆支护设计的方法^[1]。即按照主动区土钉所受的拉力来计算稳定区土钉锚固长度,再加上主动区长度,从而得出土钉支护的设计长度。显然这种设计思想将土钉和锚杆的作用等同起来。但是土钉的支护机理类似于加筋土特性。传统的加筋土研究^[2]比较完善,而对于以土钉作为插筋的机理研究就相对缺乏,正确分析土钉支护的机理,计算土钉的拉力^[3],必须从钉土相互作用着手。因此,本文通过剪滞理论^[4]推导了深基坑土钉支护的内力传递公式,对土钉支护机理进行

了研究。

1 模型建立和基本假设

剪滞法理论最早由 Rosen 提出,用于分析复合材料中应力沿长度的变化规律。该理论假定基体只传递剪应力,用平衡条件便可以推导出应力传递公式。R. John Byrne^[5]曾用类似的方法分析了工作应力状态下钉土间的相互作用,将土钉和土体看成复合单元,共同承担拉力作用。然而一般认为土体是不能受拉的,因此该方法不太合理。

由于土钉支护机理极其复杂,要建立非常精确分析土钉作用的力学模型是不现实的,因此不得不采用一些基本假设:

- (1) 钉土界面处,土钉和土体间的接触良好;
- (2) 在土钉轴向上,土钉的正应力比土钉钢筋强度小得多;
- (3) 土钉的轴向力由接触面上的剪应力传递;
- (4) 相邻的土钉对于所研究的单元体的应力场无影响;
- (5) 土钉以外的土体具有平均性能。

2 理论推导

以土钉始端为坐标原点建立直角坐标系(图1),沿土钉轴向取一微元体(图2),土钉单元和其邻近的土体单元形成一个复合单元体。

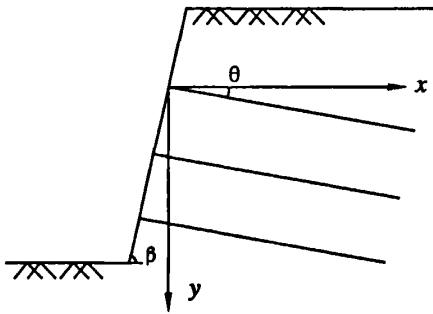


图1 直角坐标系
Fig.1 Rectangular coordinates

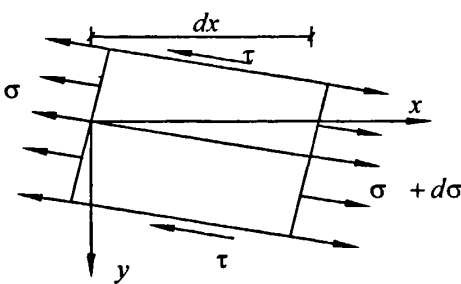


图2 土钉微单元体应力
Fig2. Micro-unit stress of soil nail

由土钉单元轴向应力平衡条件可得

$$(\pi R^2)\sigma + \tau \left(\frac{2\pi R^2 dx}{\cos\theta} \right) = (\pi R^2)(\sigma + d\sigma)$$

$$\text{即 } \frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\tau}{R\cos\theta} \tag{1}$$

式中 R —土钉半径; σ —土钉轴向应力; τ —钉土接触面的剪应力; θ —土钉与水平面的夹角。

按照宏观强度准则,对于加筋材料有以下关系

$$\bar{\sigma} = (1 - \omega)\sigma_s + \omega\sigma, \tag{2}$$

式中 $\bar{\sigma}$ —复合土体在土钉轴向上的等效平均应力; ω —土钉横截面面积与复合土体单元截面面积的比率; σ_s —土钉外土体的平均轴向正应力。 $\bar{\sigma}$ 可以用下式表示

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_w + \sigma_0}{2} \tag{3}$$

式中 $\sigma_w = k_w(q + \gamma h)$; $\sigma_0 = k_0(q + \gamma(h + L\sin\theta))\sin\beta$; k_w —土压力折减系数,根据实测结果常取0.7~1.0; q —地面超载; γ —土体重度; h —面层与土钉交点到地面的距离; k_0 —静止土压力系数; L —土钉长度; β —土坡与水平面夹角。

代入 ω 的表示式,(3)式可以写成 $\bar{\sigma} = \left(\frac{R_s^2 - R^2}{R_s^2} \right)\sigma_s + \left(\frac{R^2}{R_s^2} \right)\sigma$ 即

$$\sigma_s = \frac{R_s^2 \bar{\sigma} - R^2 \sigma}{R_s^2 - R^2} \tag{4}$$

式中 R_s —复合土体半径,由等效土钉间距按式 $\sqrt{S_n \cdot S_n / \pi}$ 确定。

设圆柱形土钉体外面有一层与土钉粘结的剪切层,其厚度为 t ,一般为土钉体半径的0.1~0.2倍,土体的剪切应变 γ 可以根据土钉与土体的相对位移来确定。

$$\gamma = \frac{u_s - u}{t} \tag{5}$$

式中 u_s —平均复合土体的位移; u —土钉的位移,负号表示剪应变的方向与 x 轴的正方向相反。

考虑到土钉通过微小的变形传递应力,因此可认为土钉和土体都处于弹性应力状态。将(5)式对 x 求一阶导数,并代入应力应变关系可得

$$\frac{dx}{dx} = \frac{G}{t\cos\theta} \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma_s}{E_s} \right) \tag{6}$$

式中 G —土体的剪切模量; E —土钉的弹性模量; E_s —复合土体的杨氏模量。

式(1)对 x 求导得

$$\frac{d^2\sigma}{dx^2} = \frac{2G}{Rt\cos^2\theta} \cdot \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma_s}{E_s} \right) \tag{7}$$

代入(4)式得

$$\frac{d^2\sigma}{dx^2} - m^2\sigma + n^2 = 0 \tag{8}$$

式中 $m^2 = \frac{2G}{Rt\cos^2\theta} \left(\frac{1}{E} + \frac{R^2}{E_s(R_s^2 - R^2)} \right)$;

$$n^2 = \frac{2G}{Rt\cos^2\theta} \cdot \frac{R_s^2 \bar{\sigma}}{E_s(R_s^2 - R^2)}$$

式(8)的通解为

$$\sigma = Ae^{mx} + Be^{-mx} + \frac{n^2}{m^2} \quad (9)$$

转化为土钉内力沿土钉延长的分布为

$$\sigma = Ae^{ml\cos\theta} + Be^{-ml\cos\theta} + \frac{n^2}{m^2} \quad (10)$$

对于土钉面层的作用,目前众说不一。文献[6]实测的面层压力约为主动土压力的70%,法国的Clouterre试验研究工程表明,面层的刚度对于其上的土压力大小有很大的作用,土压力约为土钉最大拉力的30%。因此无论是从理论上还是工程实践角度来讲,面层所受的土压力是不应忽略的。根据边界条件 $\sigma_{(0)} = k_w\sigma_a$ 和 $\sigma_{(L)} = 0$ 得

$$A = \frac{k_w\sigma_a e^{-ml\cos\theta} - (e^{-ml\cos\theta} - 1)n^2/m^2}{e^{-ml\cos\theta} - e^{ml\cos\theta}};$$

$$B = \frac{k_w\sigma_a e^{ml\cos\theta} - (e^{ml\cos\theta} - 1)n^2/m^2}{e^{ml\cos\theta} - e^{-ml\cos\theta}}$$

式中 σ_a —主动土压力强度。

土钉支护的实测资料^[7]表明,土钉支护破裂面的轨迹是各层土钉拉力最大拉力点的连线,且各拉力最大点处土钉沿轴向的剪应力为零。因为土钉轴向拉力是由土钉间的剪力产生的,破裂面与土钉交点处是相对位移为零点,也是主动区和被动区土钉拉力方向变化处,因此在土钉与破裂面相交处土钉的拉力最大,钉土间轴向剪应力为零。对(9)式求 x 一阶导数,并令导函数等于零,便可得土钉承受最大拉力的位置。

$$l_m = \frac{1}{2m} \ln\left(\frac{B}{A}\right) \quad (10)$$

由(10)式可计算各层土钉最大拉力的位置,各层土钉最大拉应力点的连线即为土钉支护的破裂面。土钉最大拉应力为

$$\sigma_m = Ae^{ml_m} + Be^{-ml_m} + \frac{n^2}{m^2} \quad (11)$$

3 工程实例

引用广州珠江新城某基坑开挖过程中土钉的监测数据^[8]与本文对比。主要土层物理力学性质见表1,基坑支护方案见表2,土钉拉力沿土钉延长分布的本文计算值与实测值对比见图3。

4 结束语

1)从钉土间的相互作用出发,建立了土钉内力传递的计算模型,推导了土钉的内力传递公式,研究了土钉支护的机理。

2)计算和实测结果都表明,土钉中拉力沿土钉延长基本呈中间大,两端小的曲线分布。在最大值前段,土体相对土钉产生向基坑侧的位移并逐渐积累,土钉内力逐渐增加;在最大值后端,土钉相对土体产生向基坑侧的位移,侧摩阻力反向,内力值逐渐减小。

表1 主要土层物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of subsoil

土层名称	w(%)	e	I_L	a_{1-2} (MPa)	E_s	C(kPa)	$\varphi(^{\circ})$	N
粉质粘土	26.4	0.76	0.38	0.39	4.66	30.8	8	11.7
粉质粘土	29.0	0.80	0.58	0.47	3.95	24.8	10.5	15.6
强风化岩	24.6	0.70	0.23	0.27	7.08	28.9	17.1	47.9

表2 支护与测试方案

Tab.2 Project of excavation retaining and field test

土钉	竖向间距(m)	水平间距(m)	土钉直径(mm)	土钉长度(m)	倾角($^{\circ}$)	测试编号
第1排	0.8	1.5	25	12	10	
第2排	1.3	1.5	25	13	10	L2-1
第3排	1.5	1.5	25	12	15	L2-2
第4排	1.5	1.5	25	10	15	L2-3
第5排	1.5	1.5	25	9	15	L2-4
第6排	1.8	2.0	25	6	15	

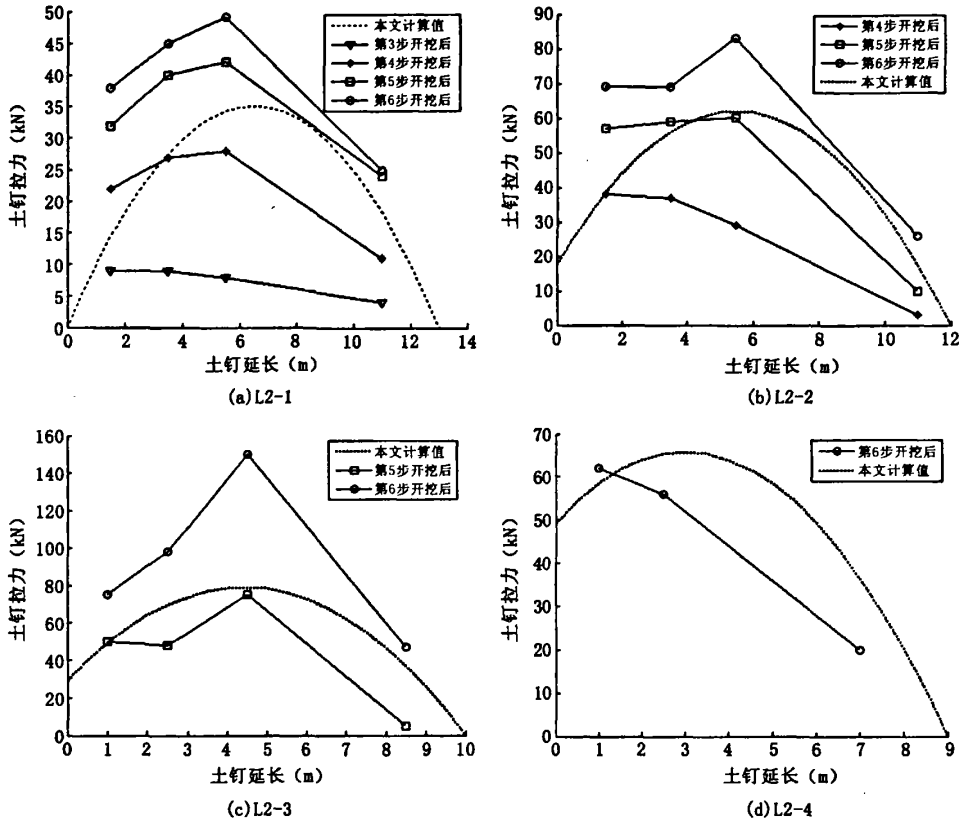


图3 土钉拉力沿土钉延长的分布
Fig.3 Distribution of nail tension

3)在钉头处,面层对土钉的拉力有一定的作用,表现为计算曲线与纵坐标相截,且越向下面,钉头处拉力越大,面层作用越明显。

4)本文计算结果与实测数据比较吻合,但与后续工况开挖的实测值比较计算偏低,但下排土钉的吻合比上排要好,说明土钉的受力机制有很强的时间效应。故本方法尚有待修正以便能计算出土钉在各工况下的内力,更好地反映土钉的作用机理。

参考文献:

- [1] JGJ 120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 吴雄志,赵乃茹.加筋土强度模型与应力-应变特性研究[J].岩土工程学报,1992,14(9):80-87.
- [3] 李玉安,陈国华,王建雷.土钉支护中的力学性能[J].河北建筑科技学院学报,2005,22(2):45-46.
- [4] 秦四清,王建党.土钉支护机理与优化设计[M].北京:地质出版社,1999.
- [5] JOHN BYRNE R. Soil nailing: a simplified kinematic analysis, performance of reinforced soil structure [J]. British Geotechnical Society, 1990, (3): 225-260.
- [6] 李成.侯月铁路膨胀岩堑坡锚固防护工程的应用与研究[A]李俊杰,岩土力学与工程[C]大连:大连理工大学出版社,1995.
- [7] 贾金青,张明聚.深基坑土钉支护现场测试分析研究[J].岩土力学,2003,24(3):413-416.
- [8] 张明聚,郭忠贤.土钉支护工作性能的现场测试研究[J].岩土工程学报,2001,23(3):319-423.

(责任编辑 闫纯有)

作者: [涂兵雄](#), [贾志刚](#), [刘春晓](#), [白金杰](#), [梁凯](#), [TU Bing-xiong](#), [JIA Zhi-gang](#), [LIU Chun-xiao](#), [Bai Jin-jie](#), [LIANG Kai](#)

作者单位: [涂兵雄, 刘春晓, 白金杰, TU Bing-xiong, LIU Chun-xiao, Bai Jin-jie\(河北工程大学, 土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#), [贾志刚, JIA Zhi-gang\(黄淮学院, 建筑工程系, 河南, 驻马店, 463000\)](#), [梁凯, LIANG Kai\(河北工程大学, 土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038; 河北电信公司, 河北, 石家庄, 050000\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING\(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 25(4)

被引用次数: 3次

参考文献(8条)

1. JGJ 120-1999. 建筑基坑支护技术规程
2. 吴雄志;赵乃茹 [加筋土强度模型与应力-应变特性研究](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1992(09)
3. 李玉安;陈国华;王建雷 [土钉支护中的力学性能](#)[期刊论文]-[河北建筑科技学院学报](#) 2005(02)
4. 秦四清;王建党 [土钉支护机理与优化设计](#) 1999
5. JOHN BYRNE R [Soil nailing:a simplified kinematic analysis,performance of reinforced soil structure](#) 1990(03)
6. 李成 [侯月铁路膨胀岩锚固防护工程的应用与研究](#) 1995
7. 贾金青;张明聚 [深基坑土钉支护现场测试分析研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2003(03)
8. 张明聚;郭忠贤 [土钉支护工作性能的现场测试研究](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2001(03)

引证文献(3条)

1. 张浩龙, 李柏生, 任永忠, 朱彦鹏 [深基坑土钉和桩锚支护数值模拟分析](#)[期刊论文]-[兰州理工大学学报](#) 2012(6)
2. 赵延林, 景海河, 曹洋 [复合土钉支护中土钉内力实验](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2009(5)
3. 赵延林, 曹洋, 高红梅, 马强 [复合土钉支护内力与变形的模拟分析](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2009(6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200804010.aspx