

土钉与土体间的应力传递研究

陈万祥, 郭志昆, 黄 育, 张 仕

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007)

摘 要: 根据土钉与土体间剪应力-相对位移关系曲线, 分析了土钉与土体间荷载传递机理, 建立了土钉与土体间应力传递的力学模型。利用截面上的平衡条件, 推导了有别于传统假设的作用在土钉上的应力分布及变形表达式, 从理论上分析了土钉与土体间的应力传递规律, 并结合工程实测数据验证了该模型的合理性。

关 键 词: 基坑支护; 土钉; 力学模型; 应力传递

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Study on stress transfer between soil nail and surrounding soil

CHEN Wan-xiang, GUO Zhi-kun, HUANG Yu, ZHANG Shi

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Based on shear stress-relative displacement curve between soil nail and soil, the force transferring mechanism is analyzed. A mechanical model of stress transfer is built. The formulas of stress distribution and deformation along the soil nail are given according to equilibrium conditions of the section. The law of stress transferring between soil nail and surrounding soil is analyzed theoretically; the results of the model are agreed with engineering data very well.

Key words: foundation pit support; soil nail; mechanical model; stress transfer

1 前 言

土钉支护是用于土体开挖和边坡稳定的一种新的挡土技术, 由于经济、可靠且施工快速简便, 已在我国得到迅速推广和应用。土钉(soil nails)是置入于现场原位土体中以较密间距排列的细长杆件, 如钢筋或钢管等, 通常还外裹水泥砂浆或水泥净浆浆体(注浆钉)。土钉的特点是沿通长与周围土体接触, 与周围土体形成一个组合物, 在土体发生变形的条件下, 通过与土体接触界面上的粘聚力或摩擦力, 使土钉被动受拉, 并主要通过受拉作用给土体以约束加固或使其稳定。

土钉作用机理十分复杂, 土钉支护实践经验明显超前于理论研究^[1~3], 因此迫切需要对土钉支护的工作机理进行全面的理论分析。当前研究土钉与土体之间的应力传递机理主要是土钉抗拔试验, 工程界常假设剪力沿土钉均匀分布。根据抗拔试验结果, 利用式(1) 估算钉土剪切面处的最大剪应力

(极限抗剪强度)^[4]。

$$\tau = \frac{F}{2\pi RL} = \sigma_v \tan \phi + c \quad (1)$$

式中 F 为钉端拉力; R, L 分别为土钉的直径和长度; σ_v 为土钉平均深度处垂直应力; c, ϕ 为钉土切向剪切面处的粘聚力和内摩擦角。

实际上, 土钉抗拔作用的机理远非上面的简单公式所能描述, 影响土钉抗拔作用的因素较多。文献[5]用解析方法研究土钉的抗拔试验表明, 钉-土间的相互作用与应力、应变及土钉拔出时产生的位移有很大的关系。本文根据实测的剪应力与位移关系曲线, 建立土钉与土体间应力传递力学模型, 用解析方法来研究土钉与土体间的应力传递机理, 为推广土钉支护技术提供理论和实践依据。

2 力学模型和数学推导

根据试验结果^[6], 土钉剪应力与位移的关系可描述见图 1, 数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \tau(x) &= ks(x), \quad s \leq s_u \\ \tau(x) &= \tau_u, \quad s \geq s_u \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 k 为剪切变形系数; $s(x)$ 为土钉与土体间的位移差产生的相对滑移; τ_u 为峰值剪应力。

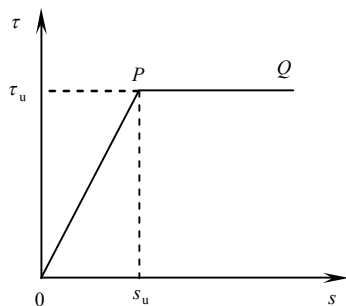


图 1 土钉剪应力与位移关系

Fig. 1 Relation between shear stress and displacement of soil nail

图 1 中 OP 表示随着位移的增加, 剪应力随位移呈线性增加, 表现为土钉与土体都保持在弹性范围内, 界面上的剪应力和剪应变遵守弹性关系; PQ 说明了当土钉-土体间的相对位移达到一定值(s_u)后, 土钉达到屈服而破坏。

用图 2(a)所示的单元体来研究土钉-土体之间的应力传递机理。取一半径为 R 的土体单元为研究对象, 该单元中央为一根土钉, 外围为土体, 假定土钉外端受到 $\sigma_n(0)$ 作用的拉应力, 土体受到 $\sigma_s(0)$ 作用的压应力, 从而使内部土钉和土体产生应力 $\sigma_n(x)$ 和 $\sigma_s(x)$, 如图 2(b)、图 2(c)所示, 分别取土钉 dx 微元和 x 处的整体为研究对象。

根据图 2(b)土钉微段 dx 上的平衡条件, 得

$$A_n d\sigma_n(x) - \tau(x)C_n dx = 0 \quad (3)$$

从图 2(c)单元 x 截面处 x 向得平衡条件, 得

$$-A_n \sigma_n(0) + A_s \sigma_s(0) + A_n \sigma_n(x) - A_s \sigma_s(x) = 0 \quad (4)$$

式中 C_n 为土钉的周长; A_s , A_n 分别为土体与土钉的横截面面积; $\sigma_s(x)$, $\sigma_n(x)$ 分别为土体与土钉 x 截面上的横向应力。

界面上的位移差产生的相对滑移为

$$ds(x) = dw_n(x) - dw_s(x) = [\varepsilon_n(x) - \varepsilon_s(x)]dx \quad (5)$$

式中 $w_s(x)$, $w_n(x)$ 分别为 x 截面处土体与土钉的位移。

本构关系: 土钉在整体拔出前(临界状态), 拉拔端的位移最大, 位移由抗拔端向内逐渐减小。因此, 当 $x=l$ 时, $s=s_u$, 在土钉被拔出时, 土钉各点处的位移相同, 即土钉发生均匀位移, 开始破坏。本文只考虑 $s(x) \leq s_u$ 时土钉的受力及变形情况。

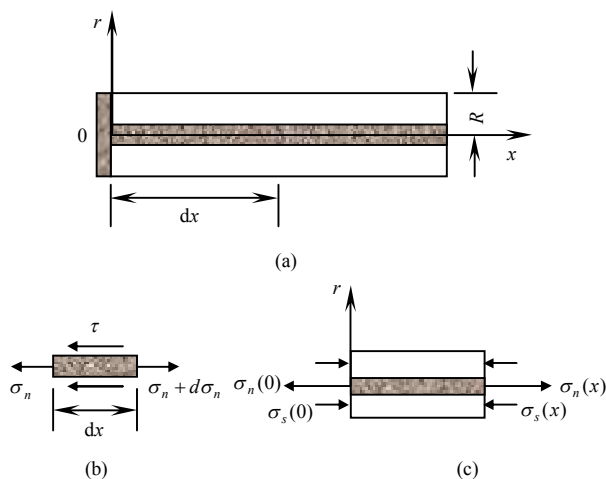


图 2 土钉剪切滑移模型

Fig. 2 Shear displacement model of soil nail

假定土钉与土体均为弹性材料, 则本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_n(x) &= \frac{1}{E_n} \sigma_n(x); \\ \varepsilon_s(x) &= \frac{1}{E_s} \sigma_s(x) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 E_n , E_s 分别为有效土钉弹性模量和土体压缩模量。

由式(5)得

$$\frac{ds(x)}{dx} = \varepsilon_n(x) - \varepsilon_s(x) = \frac{\sigma_n(x)}{E_n} - \frac{\sigma_s(x)}{E_s} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7)得

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{A_n \sigma_n(0) - A_s \sigma_s(0) - A_n \sigma_n(x)}{A_s E_s} + \frac{\sigma_n(x)}{E_n} \quad (8)$$

对 x 求一阶导数得

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \left(\frac{1}{E_n} - \frac{A_n}{A_s E_s} \right) \frac{d\sigma_n(x)}{dx} \quad (9)$$

将式(1)、式(3)代入式(9)并化简得

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - k_1^2 s(x) = 0 \quad (10)$$

式中

$$k_1^2 = kC_n \left(\frac{1}{A_n E_n} - \frac{1}{A_s E_s} \right)$$

式(10)的通解为

$$s(x) = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{-k_1 x} \quad (11)$$

将式(11)代入式(12)得

$$\tau(x) = k(C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{-k_1 x}) \quad (12)$$

由式(3)可得

$$\frac{d\sigma_n(x)}{dx} = \frac{C_n}{A_n} \tau(x) = \frac{C_n k}{A_n} (C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{-k_1 x}) \quad (13)$$

对式(13)积分得：

$$\sigma_n(x) = \int_0^x \left[\frac{C_n k}{A_n} (C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{-k_1 x}) \right] dx + C_3 = \frac{C_n k}{A_n k_1} [(C_1 e^{k_1 x} - C_2 e^{-k_1 x}) - (C_1 - C_2)] + C_3 \quad (14)$$

将边界条件 $s(x=0)=0$ ， $\sigma_n(x=0)=\sigma_n(0)$ 及 $\sigma_n(x=l)=0$ 分别代入式 (11) 和式 (14)，得到常数 C_1 ， C_2 和 C_3 分别为

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -C_2 = -\frac{\sigma_n(0) A_n k_1}{C_n k (e^{k_1 l} + e^{-k_1 l} - 2)}; \\ C_3 &= \sigma_n(0) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

分别代入式 (12) 及式 (14) 得：

$$\left. \begin{aligned} \tau(x) &= \frac{\sigma_n(0) A_n k_1}{C_n (e^{k_1 l} + e^{-k_1 l} - 2)} (e^{-k_1 x} - e^{k_1 x}); \\ \sigma_n(x) &= -\frac{\sigma_n(0)}{(e^{k_1 l} + e^{-k_1 l} - 2)} (e^{k_1 x} + e^{-k_1 x} - 2) + \sigma_n(0) = \left(1 - \frac{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x} - 2}{e^{k_1 l} + e^{-k_1 l} - 2} \right) \sigma_n(0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3 实例分析

南京玄武湖隧道工程梁洲段场地钢管土钉结构设计参数：自钻式土钉成孔直径 $D=110$ mm，土钉的杆体采用 $\phi 32$ mm 无缝钢管，土钉倾角为 15° ，钢管弹性模量为 210 GPa，混凝土的弹性模量为 20 MPa。采用 9 排自钻式土钉，5 m 以上水平间距 $S_h=1.0$ m，垂直间距 $S_v=1.2$ m；5 m 以下 $S_h=1.0$ m， $S_v=1.0$ m，土钉长 18 m，面层采用 $6.5@150$ mm $\times$ 150 mm 双层钢筋网， $2\phi 16$ mm 水平向加强筋，喷射 C20 混凝土。土质为粉细砂：灰色，饱和，稍密，土层重度为 19.1 kN/m³，粘聚力为 9.4 kPa，内摩擦角为 30.6° ，压缩模量为 10 MPa。在每根试验土钉 2.0，5.0，8.0，16.0 m，处布置电阻应变片测量土钉拉力分布。

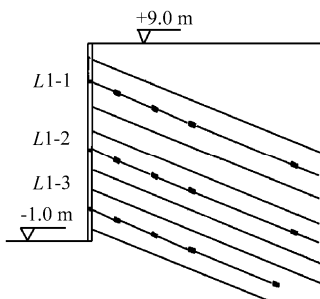


图3 部分测力计布置示意图

Fig.3 Location of some force measure

根据试验结果^[5]，采用下面得算式近似确定剪切变形系数：

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta F_i \cos \alpha}{(\Delta u_i l \pi D)}}{n-1} \quad (17)$$

式中 n 为试验加载次数； ΔF_i ， Δu_i 分别为相邻两次荷载增量与钉头位移增量； α 为土钉倾角。根据土钉现场抗拔试验数据，剪切变形系数 $k=3.453$ MPa $\cdot$ m⁻¹，相应的常数 $k_1=0.652$ 。本文探讨了如图 3 所示的土钉 L1-1、L1-2 和 L1-3 钉头应力分别为 4.32，5.26，2.11 MPa 时，土钉全长范围内的拉应力、剪应力和轴向相对滑移的情况，图 4 中“+”，“*”，“x”分别为 L1-1、L1-2、L1-3 的工程实测数据，并与本文方法分析结果作了比较。

由图 4~6 可以看出，拉应力沿着土钉呈非线性分布，靠近土钉面层很长一段范围内的拉应力分布比较均匀，而再往内端拉应力迅速减小，理论曲线与实测数据基本吻合（图 4），但实测数据在钉头处略偏小，这是由于靠近土钉面层应力松弛所导致的缘故。与之对应的剪应力在 $x \geq 12$ m 范围内呈非线性增大（图 5），导致钉土间的相对位移也呈非线性增加（图 6），这与工程界常假设的剪应力沿土钉均匀分布有一定差距。不难发现，利用式 (1) 估计土钉应力分布时，实际上往往低估了土钉中部的应力值。所有这些曲线关系很好地说明了钉土间的荷载传递过程，即土钉剪应力和相对位移向土钉面层方向递减，土钉周侧的摩擦阻力向内逐渐被调动起来，因此，靠近土钉面层的地方拉应力较大，常常发生屈服破坏，而内端在剪应力超过极限粘结强度时发生粘脱，在实际工程中可以根据钉土间上述应力传递规律来设计土钉。值得注意的是，土钉与土体间界面剪应力的大小与注浆压力、土质、土钉的垂直深度等因素也有密切关系。

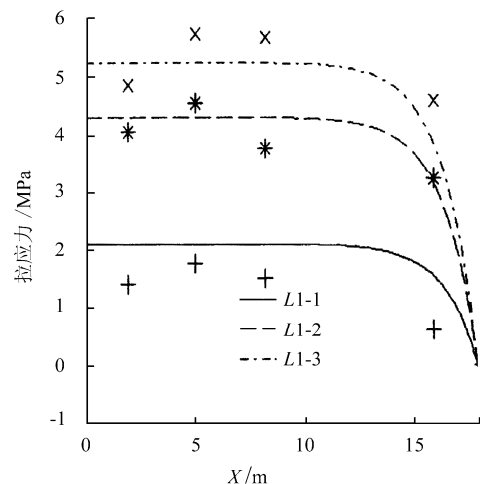


图4 拉应力分布曲线

Fig.4 Distribution curves of tensile stresses

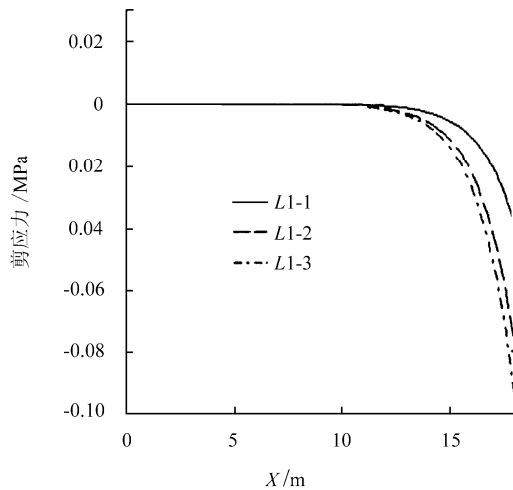


图 5 剪应力分布曲线

Fig.5 Distribution curves of shear stresses

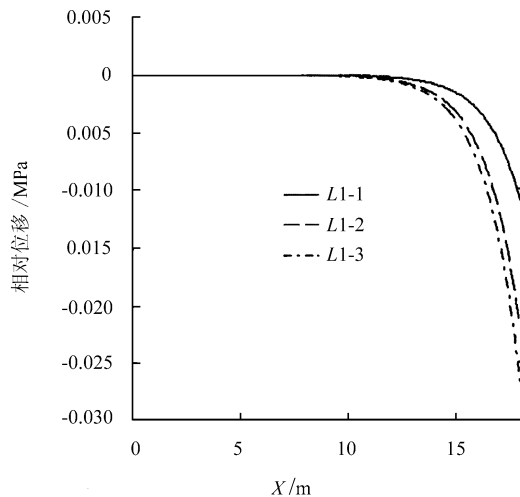


图 6 相对位移分布曲线

Fig.6 Distribution curves of relative displacements

4 结 语

本文根据土钉剪应力与相对位移关系,建立了土钉与土体应力传递力学模型,推导出土钉与土体间应力传递的表达式,并结合工程实测数据,验证了本模型的合理性。利用剪切变形系数 k 和位移的双曲线关系假设,对土钉应力与相对位移的分布进行了分析,通过计算发现,土钉的剪应力沿土钉长度方向呈非线性分布,靠近土钉自由端的剪应力较小,而靠近内端的剪应力较大,所以内端钉土间相对位移较大,土钉的摩擦阻力被充分调动。靠近土钉面层的拉应力较大,所以往往容易发生屈服破坏,而内端容易发生粘脱滑移。

参 考 文 献

- [1] 张明聚, 宋二祥. 土钉支护变形性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 59 - 63.
- [2] 张明聚, 宋二祥, 陈肇元. 基坑土钉支护稳定分析方法及其应用[J]. 工程力学, 1998, 15(3): 36 - 43.
- [3] 张明聚. 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 - 323.
- [4] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [5] 王建党, 贾立宏. 深基坑土钉支护抗拔机理[J]. 东北大学学报, 1999, 20(1): 71 - 74.
- [6] Milligan G W E, Tei K. The pull-out resistance of model soil nails[J]. Soil and Foundation, 1999, 38(2): 179 - 190.