

土钉支护体系抗拔力机理研究

丁振明^{1~3}, 秦四清², 刘军³, 夏柏如¹

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 北京市市政工程研究院, 北京 100037)

摘要: 对基坑土钉支护体系中抗拔力机理作用的分析与研究, 提出了关于抗拔力的新观点。研究认为, 土钉支护体系的抗拔力应由钉土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分来组成; 土钉在支护体系中首先是作为传力构件传递土体自承作用抗拔力, 而后是通过钉土作用提供抗拔力。进一步分别对两部份的抗拔力进行理论求解, 确定了土钉支护体系总抗拔力。最后通过工程实例证明了所提出抗拔力机理作用及其求解的正确性。

关键词: 土钉; 支护体系; 抗拔力; 钉土作用; 自承作用

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Research on anti-pulling mechanism in soil-nailing supporting system

DING Zhen-ming^{1~3}, QIN Si-qing², LIU Jun³, XIA Bai-ru¹

(1. College of Engineering Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China)

Abstract: The anti-pulling mechanism of soil-nailing supporting system in foundation pit is analyzed and discussed; and a new viewpoint about anti-pulling mechanism is put forward. Anti-pulling force in soil-nailing supporting system mainly originates from two parts: the nail-soil interaction and the self-supporting of soil. In the supporting system, soil-nailing, as a force transfer component, firstly transfers the anti-pulling force originating from the self-supporting of soil; then gives other force by the nail-soil interaction. The total anti-pulling force in the supporting mechanism is determined by solving theoretically the two anti-pulling forces respectively. Finally, an engineering case is introduced to prove the reasonability of the anti-pulling mechanism; and its theoretical solution is suggested.

Key words: soil-nailing; supporting system; anti-pulling force; nail-soil interaction; self-supporting

1 前言

秦四清等^[1]对土钉的抗拔力机理进行了较为全面地研究, 认为在钉土间不产生相对位移时钉土间的摩阻力没有发挥作用, 随着钉土相对位移的逐渐增大, 内部土钉段处周围的土体会产生摩阻力。这表明在钉土相对位置为零状态下支护体系的稳定, 不是通过钉土作用的摩阻力提供的, 而是由土体自承作用提供的。同时, 钉土相对位移增大时支护体系不但存在钉土作用的摩阻力, 而且存在土体自承作用, 两类作用力共同提供支护体系的抗拔力。目前对实际设计工程的抗拔力计算, 多采用《建筑基坑支护技术规程》^[2]计算。该计算是将土钉的竖向应力进行垂向分解进行摩阻力的求解, 所有抗拔力

都由钉土作用分担, 未考虑土体自承能力部分作用。文献[1~5]的研究也认为, 所有抗拔力都由钉土作用分担, 不能明确土体自承能力部分作用。本文从机理分析与理论计算的角度对土体自承作用和钉土作用共同作用的土钉支护体系的抗拔力进行详细研究, 旨在进一步从理论上充实土钉支护体系的作用机理, 并为工程实践提供科学依据。

2 机理分析

根据稳定区内土钉整体受力分析土钉受拔过程的受力变化(图1), 对土钉受拔的机理进行分析, 作用于土钉上的力有: 竖直方向的上覆土压力 G 、垂直土钉轴向的支撑力 N 、土钉轴向的静摩擦力 f 及土钉端部轴向的拔力 F 。假设土钉在没有拔出之

前, 状态保持平衡, 将土钉受力往土钉的轴向和其垂直方向上进行分解, 进行力系平衡分析。

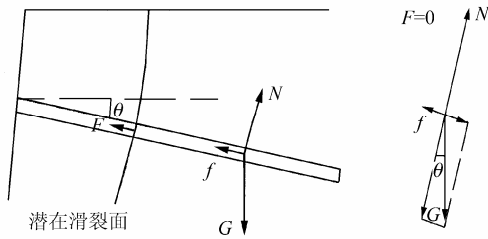


图 1 稳定土体内土钉整体受力

Fig.1 Force on soil-nailing in the stable area

在不受拔力的状态下 ($F=0$), 根据受力平衡可知土钉所受静摩擦力的作用方向与拔力方向一致, 主要是平衡上覆土压力在轴向的分量 ($G \sin \theta$)。土钉受轴向拔力的变化不引起其垂直方向力的变化, 即土钉四周所受的压力不变 ($N=G \cos \theta$), 由于土钉所受上覆土压力的大小不发生变化, 所以其轴向分量不变。土钉轴向受拔力过程中土钉受力表现: 拔力增大至上覆土压力的轴向分量之前 ($F < G \sin \theta$), 静摩擦力减小; 当 $F=G \sin \theta$ 时, 静摩擦力为零; 当 $F > G \sin \theta$ 时, 静摩擦力反向作用提供抗拔力; 当拔力大于抗拔力极限时, 土钉发生拔出破坏。

由以上分析可知, 土钉上覆土压力的轴向分力通过土钉作为传力构件贯穿作用于土钉抗拔过程, 抗拔力由土体自重作用产生, 称之为土体自承作用抗拔力, 应区别于以往研究所指的自承能力, 而土的摩阻力是在静摩擦力反向后才对土钉抗拔起作用, 可以称之为钉土作用抗拔力。

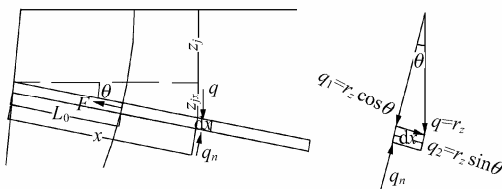


图 2 稳定区土钉微单元受力分析图

Fig.2 Force on tiny element about soil-nailing

图 2 为取稳定土体内微单元进行受外力分析图, 其中 F 是作为需要外加维持平衡的力考虑, 求解土钉所能提供的抗拔力。根据整体分析可知: 土体自承作用抗拔力是由 q_2 产生的, 并且只有上覆土体起作用, 即土钉的上半部分提供; 土钉作用抗拔力是由垂直轴向的压力产生的摩擦力提供, 它是

一个变化力, 但在拔出极限状态下可用摩阻力定义求解。

3 抗拔力求解

3.1 钉土作用抗拔力

土钉作用抗拔力可以根据摩阻力定义来进行求解, 根据整体分析可知, 土钉周身所受压力是相等的 ($q_n=q_1$)。

用 df_{jx} 表示第 j 排土钉土钉延长位置 x 处 dx 微单元由于钉土作用提供抗拔力, 由图 2 可知式(1)成立:

$$df_{jx} = \mu \pi D q_1 dx \Rightarrow df_{jx} = \mu \pi D \gamma z \cos \theta dx \quad (1)$$

式中 μ 为钉土之间的摩阻力系数; D 为土钉直径; r 为土体重度; z 为土钉埋深位置; θ 为土钉倾角。

由图 2 可以得知, 该受力点的深度 z 可以用土钉埋置深度 z_j 和土钉延长位置相关关系值 z_{jx} 表示:

$$z = z_j + z_{jx} \quad (2)$$

z_{jx} 可以通过土钉延长位置 x 表示:

$$z_{jx} = x \sin \theta \quad (3)$$

将式 (2)、式 (3) 代入式 (1), 并对式 (1) 在稳定区段延土钉长度进行积分, 得第 j 排土钉钉土作用提供的抗拔力 f_j 大小:

$$f_j = \int_{l_0}^l \mu \pi D \gamma (z_j + x \sin \theta) \cos \theta dx \Rightarrow f_j = \mu \pi D \gamma (l - l_0) \cos \theta \left[z_j + \frac{\sin \theta}{2} (l + l_0) \right] \quad (4)$$

式中 l_0 为土钉端部至滑裂面与土钉交点处的长度; l 为土钉长度。

对于土钉穿越不同的土层, 进行土钉稳定区分段积分, 包括摩擦系数 μ 的不同变化的积分和土层不同性质上 γ 的积分, 则 f_j 以式(5)求解:

$$f_j = \pi D \cos \theta \left[\int_{l_0}^{l_{k1}} \mu_1 \left(\sum_a \gamma_a z_{ja} + \sum_{b_1} \gamma_{b_1} z_{jb_1} \right) dx + \dots + \int_{l_{ki}}^l \mu_i \left(\sum_a \gamma_a z_{ja} + \sum_{b_i} \gamma_{b_i} z_{jb_i} \right) dx \right] \quad (5)$$

式中 l_{xi} 为土钉与不同土层交点的延长长度; μ_i 土钉穿越第 i 段的摩阻力系数; γ_a 为土钉埋深位置上覆不同土层重度; z_{ia} 为土钉埋深位置上覆不同土层厚度; γ_{bi} 为土钉埋深至计算深度不同土层重度; z_{bi}

为土钉埋深至计算深度不同土层厚度。

3.2 土体自承作用抗拔力

本文研究支护体系中土钉作为传递上覆土体土压力作用抗拔力的传力构件，只有土钉设置深度以上部分土体能够提供。

用 df'_{jx} 表示第 j 排土钉土钉延长位置 x 处 dx 微单元土体自承能力提供抗拔力，由图 2 可知式 (6) 成立：

$$df'_{jx} = \frac{1}{2} \pi D q 2 dx \Rightarrow df'_{jx} = \frac{1}{2} \pi D \gamma z \sin \theta dx \quad (6)$$

将式 (2)、式 (3) 代入式 (6)，并对式 (6) 在稳定区段延土钉长度进行积分，得第 j 排土钉土体自承作用提供的抗拔力 f'_j 大小，得：

$$f'_j = \frac{1}{2} \pi D \gamma (l - l_0) \sin \theta \left[z_j + \frac{\sin \theta}{2} (l + l_0) \right] \quad (7)$$

对于土钉穿越不同的土层，计算原理与钉土作用抗拔力一致， f'_j 以式(8)求解：

$$f'_j = \frac{1}{2} \pi D \sin \theta \left[\int_{l_0}^{k_1} \left(\sum_a \gamma_a z_{ja} + \sum_{b_1} \gamma_{b_1} z_{jb_1} \right) dx + \dots + \int_{k_i}^l \left(\sum_a \gamma_a z_{ja} + \sum_{b_i} \gamma_{b_i} z_{jb_i} \right) dx \right] \quad (8)$$

式中各公式的符号、参数意义与钉土作用抗拔力的符号、参数意义一致。

3.3 支护体系总抗拔力

根据以上的研究，可知第 j 排支护体系提供的抗拔力为钉土作用抗拔力与土体自承作用抗拔力之和，用 T_j 表示，其表达式为

$$T_j = f_j + f'_j \quad (9)$$

通过式 (10) 计算支护体系提供的总抗拔力：

$$T = \sum_{j=1}^n T_j \quad (10)$$

式中 n 为土钉的设计排数。摩擦系数 μ 可按表 1 选取^[4]。

表 1 土钉与土体间摩擦系数表

Table 1 Coefficients of friction between nail and soil

地基土名称	摩擦系数 μ
软塑粘土	0.25
硬塑粘土	0.30
亚砂土、亚粘土、半干硬的粘土	0.30~0.40
砂类土、碎石类土、软质岩石、硬质岩石	0.40

4 工程算例

4.1 工程概况

工程位于北京市海淀区知春路南侧，建筑面积 $1.38 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，占地面积为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，拟建建筑物设 3 层地下室，采用筏板基础，该场地的土层基本性质见表 2。

表 2 土层基本物理参数表

Table 2 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	土层厚度 /m	土层重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	粘聚力 c / kPa
①	人工填土	2.0	19	10	10
②	粘质粉土、砂质粉土	2.0	20	30	26
② ₁	粘质粉土、砂质粉土	1.5	20	30	10
③	粉细砂	1.5	20	35	0
④	粉质粘土、粘质粉土	3.0	20	20	25
⑤	粉质粘土、粘质粉土	8.0	20	16	27
⑥	粉细砂	6.0	20	40	0
⑦	卵石	5.0	20	40	0

基坑开挖按 1: 0.1 放坡，深度为 14.50 m，圆弧法计算滑移面具体位置为：滑弧与坡顶交点距坡面和坡顶交点距离为 5.63 m，滑弧与坡面交于坡脚处，土坡下滑力为 1 517.476 kN，天然安全系数为 0.52。东侧采用土钉支护方案，设计参数见表 3。

表 3 土钉设计参数表

Table 3 Design parameters of soil-nailing

土钉排号	土钉埋深/m	超挖深度/m	设计长度/m	杆体材料/mm
①	1.00	0.50	12	1 ϕ 16 钢筋
②	2.40	0.50	12	1 ϕ 20 钢筋
③	3.80	0.50	15	1 ϕ 20 钢筋
④	5.20	0.50	12	1 ϕ 20 钢筋
⑤	6.60	0.50	10	1 ϕ 20 钢筋
⑥	8.00	0.50	13	1 ϕ 22 钢筋
⑦	9.40	0.50	11	1 ϕ 22 钢筋
⑧	10.80	0.50	10	1 ϕ 22 钢筋
⑨	12.20	0.50	9	1 ϕ 22 钢筋
⑩	13.80	0.70	8	1 ϕ 22 钢筋

4.2 应力测试

选择基坑东侧中部进行应力现场测试，沿土钉杆体材料（螺纹钢）按延长位置设置应力计测试钢筋受力大小，设置 2 组剖面进行开挖全过程现场测试和观测，2 组剖面一共布置 108 个应力观测点，为便于进行 2 组之间的观测对比，采用一致的测点

布置方案。应力计采用钢弦式应力计, 监测工作至基坑开挖完成后各监测点应力趋于稳定而停止, 应力监测历时 2 个月。根据第 8, 9 排土钉实测收敛性, 第 10 排土钉不做测试, 除去施工机械产生破坏的监测点, 共获取监测数据 4 049 组。

4.3 结果分析

选取参数 $\mu = 0.38$, 其它参数选取工程实际参数。通过式 (8) 计算各排土体自承作用抗拔力大小, 以各排之和计算土体总的自承抗拔力大小为 433.522 kN。通过式 (5) 计算各排钉土作用抗拔力大小, 以各排之和计算总的钉土作用抗拔力大小为 1 864.968 kN。由式 (9) 和式 (10) 求解支护体系可提供的总抗拔力大小, 计算结果为 2 298.490 kN。各抗拔力的计算结果与实测土钉受力极大值之间的关系见图 3。

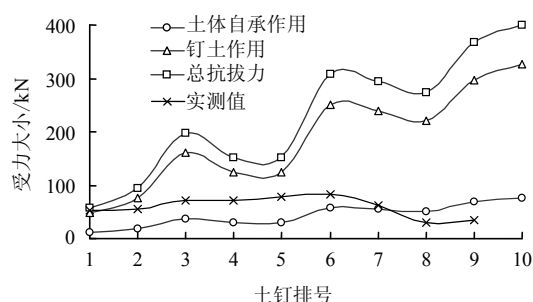


图 3 土钉支护体系作用力图

Fig.3 Anti-pulling force in supporting system

由图可知:

(1) 支护体系抗拔力主要是由钉土作用提供, 钉土作用可提供支护体系 80 % 的抗拔力, 其余由土体自承作用提供。在两类抗拔力共同作用下, 支护体系保持稳定状态。根据圆弧法计算的下滑力结果, 可得支护体系的安全系数为 1.5, 具有较大的安全储备。

(2) 第 1 排土钉实测值接近土体自承作用与钉土作用抗拔力之和, 第 2~6 排土钉实测值大于自承作用抗拔力而小于钉土作用抗拔力, 第 7 排土钉

实测值与自承作用抗拔力接近, 第 8, 9 排土钉实测值小于自承作用抗拔力。中上部土体在自承作用抗拔力下不能保持稳定, 需要调动钉土作用抗拔力共同维持稳定; 底部土体在自承作用抗拔力下保持稳定; 土体变形深度接近第 7 排土钉埋设深度。

(3) 土钉抗拔力整体上随深度有增加趋势, 但在实测结果上表现为中部土钉的受力较大, 所以设计可适当增大中部土钉长度, 以便有效控制土体变形范围, 第 3 排土钉的设计长度比其它土钉长, 所以虽然土钉埋设深度较浅也可提供较高的抗拔力。底部土钉受力较小, 可以将设计长度进行优化, 使得设计更加经济合理。

5 结 语

在土钉支护体系中, 将支护体系提供抗拔力分解为钉土作用抗拔力和土体自承能力抗拔力两部份, 更加清楚地阐述了支护体系的作用机理; 在支护体系中, 土钉首先是作为传递土体自承作用抗拔力的传力构件, 而后提供钉土抗拔力, 体现了土钉在支护体系中的作用; 对于两部份抗拔力理论求解对实际工程设计具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 秦四清, 王建党, 王清, 等. 土钉支护机理与优化设计[M]. 地质出版社, 1999.
- [2] JGJ120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] 张钦喜, 何建勇, 霍达. 土钉内力计算方法的探讨与实例分析[J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(4):
- [4] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2000.
- [5] 高大钊. 岩土工程标准规范实施手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 贾洪. 土钉喷锚支护边坡最危险滑裂面的遗传搜索与分析[硕士论文 D]. 北京: 北京工业大学, 2003.