

文章编号: 1000-7598(2012)02-0415-07

预应力锚杆柔性支护体系的锚杆抗拔力研究

周 勇^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 预应力锚杆柔性支护体系是在锚杆支护基础上发展起来的, 是用于深基坑支护或提高边坡稳定性的一种新技术, 为深入了解其工作性能和作用机制, 对其锚杆抗拔力进行了分析和研究, 提出了摩擦型灌浆锚杆抗拔力的改进求解方法。研究表明, 预应力锚杆柔性支护结构体系中锚杆所提供的抗拔力应由锚土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分组成; 锚杆在支护体系中是作为传力构件传递土体自承作用抗拔力, 通过锚土作用提供抗拔力。进一步分别对两部分抗拔力进行理论求解, 给出了各自相应的理论计算公式, 确定了预应力锚杆支护体系总的抗拔力。工程实例证明了所提出的锚杆抗拔力求解的合理性。依据改进求解方法所求得的锚杆极限抗拔力在数值上较传统方法结果大, 改进求解方法后的抗拔力概念更加明确, 这从理论上进一步充实了预应力锚杆支护体系的作用机制, 为工程实践提供了科学依据。

关 键 词: 土力学; 锚杆支护体系; 抗拔力; 锚土作用; 土体自承作用

中图分类号: TU 32

文献标识码: A

Research on anti-pulling force of anchor of flexible supporting system with prestressed anchors

ZHOU Yong^{1,2}, ZHU Yan-peng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Flexible supporting system with prestressed anchors is a new technique developed from anchored retaining wall for retaining deep foundation pit or improving stability of existing slope. In order to further study the behaviors and working mechanism of the flexible supporting system with prestressed anchors, the anti-pulling force of anchor is analyzed and studied. The improved solution method of anti-pulling force of frictional grouting anchor is proposed. The study indicates that in the supporting system of flexible supporting structure with prestressed anchors, the anti-pulling force should be decomposed into two parts: the anchor-soil interaction and the soil self-supporting. In the supporting system, anchor, as a force transfer component, firstly transfers the anti-pulling force coming from the soil self-supporting; then provides other anti-pulling force by the anchor-soil interaction. The two anti-pulling forces are solved theoretically; and the theoretical calculation formulae are given respectively; then the total anti-pulling force of anchor is determined. Two case studies are introduced to prove the rationality of the solution of anti-pulling force of anchor. The values of limit anti-pulling force of anchor based on the improved solution method are larger than these of the traditional methods; and the concept of anti-pulling force solved according to the improved solution method is more clear, which further enriches the working mechanism of prestressed anchor supporting system from theoretical aspect and provides the scientific basis for engineering practices.

Key words: soil mechanics; anchor supporting system; anti-pulling force; anchor-soil interaction; soil self-supporting

1 引 言

随着城市高层建筑、城市地铁和基础设施的大量兴建, 出现了大量基坑开挖支护和边坡加固工程, 对于前者, 工程上较多地采用预应力锚杆柔性支护

技术^[1]、土钉与预应力锚杆复合支护结构^[2]; 对于后者, 当为大型边坡时多采用锚索抗滑桩^[3], 如果是中小型边坡, 现在通常采用锚索地梁^[4]或框架预应力锚杆柔性支护结构^[5], 其中框架预应力锚杆柔性支护结构由于能够充分发挥框架与锚杆的协同工

收稿日期: 2010-07-16

基金项目: 兰州理工大学博士科研基金项目 (No. BS04200902); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划资助项目 (No. Q201108); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50978129)。

第一作者简介: 周勇, 男, 1978年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事深基坑开挖支护和边坡加固方面的教学与研究工作。

E-mail: gsutzhoy@163.com

作性能,而且立面美观、施工工艺较为简单,目前在中小型边坡加固工程中得到了广泛应用^[6-7]。预应力锚杆作为锚杆柔性支护体系中的核心受力构件,其由锚头、自由段和锚固段组成。锚头位于锚杆的外露端,通过其与锚下承压装置的连接最终实现对锚杆预应力值的锁定,并将锚固力传递给锚固段。自由段连接锚头和锚固体,通常利用其弹性变形特性对锚杆施加预应力。锚固体位于锚杆的根部,把锚固力传递给稳定地层。锚杆依靠外锚头的固定、锚固段锚杆与砂浆的粘结力、砂浆自身的承载力以及锚固体和周围被锚固土体的粘结力,最终将锚杆拉力传递到被加固的土体上。为了更加有效地利用锚杆与锚下承压装置之间的协同工作性能,实现对基坑或边坡水平位移的有效控制,对锚杆施加预应力是关键,但预应力究竟施加多少,这是困扰工程设计人员的一个难题。理论上讲,锚杆预应力的数值不能超过锚杆的极限抗拔力,同时不能超过锚杆钢筋本身的承载力。显然,后者较为容易确定,而前者由于影响因素多,确定起来相对困难。本文针对这一问题首先分析了预应力锚杆的抗拔机制,然后对摩擦型灌浆土层锚杆的抗拔承载力按传统方法进行了分析求解,并针对传统求解方法未能考虑土体自承作用的缺陷,将预应力锚杆支护体系中锚杆的抗拔承载力分为土体自承作用和锚土作用,从理论计算的角度对两种作用进行了详细研究,旨在从理论上进一步丰富预应力锚杆支护结构体系的作用机制,为基坑和边坡工程实践提供科学依据。

2 预应力锚杆的抗拔机制

锚杆的受力机制如图 1 所示。在保证基坑或边坡不发生整体失稳的前提下,预应力锚杆抗拔承载力主要取决于锚杆本身的强度、锚杆与注浆体之间的握裹力及锚固体与土体间的摩阻力 3 个方面。但其发挥机制与大小尚受诸多因素的影响,如岩土介质的强度参数、锚孔的几何尺寸及倾角、施工方法、工程特性及使用要求等,这些因素中的绝大部分通常表现出较强的随机变异性^[8]。通常,预应力锚杆受荷时,首先是锚杆将锚头传递而来的荷载通过锚杆与砂浆间的握裹力传至水泥砂浆,然后再通过砂浆与孔壁间的摩阻力传递到被锚固地层中,最终达到改善土体应力状态与限制变形的目的。从锚杆沿轴向的传力特性看,锚固体传递荷载时,是随荷载增大由近至远逐步进行,且锚固段沿轴向应力分布极不均匀,最近端应力集中程度严重,随着荷载向远端传递,锚固砂浆体与周围土层界面发生粘脱。

这种逐步破坏的粘结作用将大大降低土层强度的利用率,当锚固段长度增大至一定长度后,则靠近锚杆根部的粘结应力就会减小,甚至等于 0。因此,为了保证锚杆与砂浆之间的可靠连接,使其具有足够的锚固力,且从经济角度考虑,锚杆应该具有合理的锚固段长度^[9-10]。

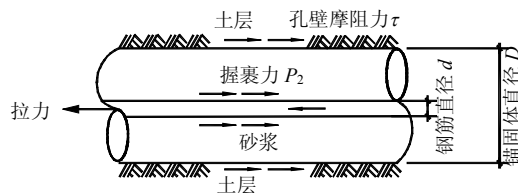


图 1 锚杆受力机制

Fig.1 Force mechanism of anchor

3 预应力锚杆抗拔力的确定

3.1 摩擦型灌浆锚杆抗拔承载力的传统求解方法

对于利用砂浆与孔壁摩阻力起锚固作用的摩擦型灌浆锚杆,其抗拔力一般取决于锚固段砂浆与土体之间的粘结强度,因此,锚杆的极限抗拔力可以表示为

$$T_{uj} = \pi D L_{aj} \tau \quad (1)$$

式中: T_{uj} 为第 j 排锚杆的极限抗拔力; D 为锚杆锚固体的直径; L_{aj} 为第 j 排锚杆的锚固段长度; τ 为锚固段周边砂浆与孔壁的平均抗剪强度。

由式 (1) 可见,锚固体直径 D 、有效锚固段长度 L_a 和砂浆与孔壁周边的抗剪强度 τ 是直接影响锚杆抗拔力的因素。其中,锚杆周边土体抗剪强度 τ 值又受地层性质、锚杆的埋置深度、锚杆类型和施工灌浆等复杂因素的影响。由于土层强度一般低于砂浆强度,因此,土层锚杆孔壁对于砂浆的摩阻力应取决于沿接触面外围的土层抗剪强度,即:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: c 为锚固区土层的黏聚力; φ 为锚固区土层的内摩擦角; σ 为孔壁周边法向压应力。

3.2 摩擦型灌浆锚杆抗拔承载力的改进求解方法

显然按照式 (1)、(2) 的计算实质就是将锚杆的竖向应力沿垂直方向分解进行摩阻力的求解,所有抗拔力都由锚土作用承担,这种求解思想实际上就是《建筑基坑支护技术规程》^[11]中关于锚杆抗拔力的计算思路,但这种求解方法不能明确土体自承能力部分的作用,存在不合理性。本文借鉴丁振民

等^[12]对土钉抗拔机制的研究思想,认为锚固体与土体之间不产生相对位移时锚固体与土体之间的摩阻力没有发挥作用,随着锚固体与土体之间相对位移的逐渐增大,锚固段周围的土体会产生摩阻力。这表明在锚固体与土体之间没有相对位移的情况下,这时维护支护结构稳定所需的摩阻力并不是通过锚固体与土体之间的摩阻力提供的,而是通过土体自承作用提供的。另外,当锚固体与土体的相对位移逐渐增大时,在支护体系中不仅存在锚固体与土体之间的摩阻力,而且还存在土体自承作用,两类作用力共同提供维护支护体系稳定所需要的抗拔力。以下从预应力锚杆的力学分析出发,从理论计算的角度对土体自承作用和锚固体与土体共同作用的预应力锚杆柔性支护体系的锚杆抗拔力的求解方法进行改进。

3.2.1 锚杆力学分析

根据锚杆在锚固区内整体受力情况分析其受拔过程的受力变化,如图2所示。锚杆上的作用力有:竖直方向的上覆土压力 E 、垂直锚杆轴向的支撑力 N 、锚杆轴向的静摩擦力 F 以及锚杆端部的轴向拔力 P ,如图2(a)所示。现假设锚杆在没有被拔出之前,其状态一直保持平衡,将锚杆受力向锚杆的轴向和垂直方向进行分解,进行力系的平衡分析,如图2(b)所示。

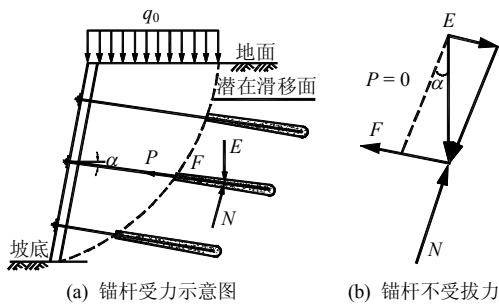


图2 锚固区内锚杆整体受力图

Fig.2 Force on anchor in anchorage area

根据图2,在锚杆轴向和垂直方向可以建立静力学平衡方程,如式(3),(4)所示:

$$P + F = E \sin \alpha \quad (3)$$

$$E \cos \alpha = N \quad (4)$$

式中: α 为锚杆与水平面的夹角。

如果锚杆不受拔力,即拔力 $P=0$,由图2(b)知,锚杆所受静摩擦力 F 的作用方向与拔力方向一致,由式(3)可知,其作用是平衡上覆土压力 E 沿锚杆轴向的分力 $E \sin \alpha$,同时由式(4)知,对于

某一排锚杆而言,由于其上覆土压力的大小不发生变化,所以锚杆所受到的周边压力 N 也是一定的,且其轴向分量不发生变化,即恒等于 $E \sin \alpha$ 。进一步分析式(3)可知,当锚杆所受拔力增大至上覆土压力的轴向分量之前,即满足条件 $P < E \sin \alpha$,此时静摩擦力 F 随拔力 P 的增大逐渐减小,且其方向与拔力方向一致;当 $P = E \sin \alpha$ 时,静摩擦力 $F=0$;而随着拔力的增大,当满足条件 $P > E \sin \alpha$,静摩擦力开始反向作用提供抗拔力,当拔力 P 大于锚杆的极限抗拔力时,锚杆被拔出,支护体系被破坏。

由上述分析可知,锚杆的上覆土压力的轴向分力 $E \sin \alpha$ 通过锚杆作为传力构件始终作用于锚杆的抗拔全过程,这种抗拔力由锚杆上覆土体自重作用产生,称其为土体自承作用抗拔力;而土体的静摩擦力是在由于锚杆拔力的增大而为了维护体系的平衡反向后才对锚杆的抗拔起作用,称其为锚土作用抗拔力。

为进一步具体分析求解锚杆的抗拔力,作出锚固区内锚杆微单元受力分析图,如图3所示。根据前述两种抗拔力的定义可知土体自承作用抗拔力是由 q_2 产生的;锚土作用抗拔力是由上覆土压力的垂直轴向分力 q_1 产生的摩擦力提供。

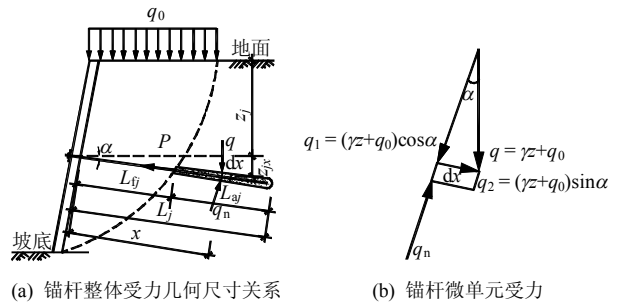


图3 锚固区内锚杆微单元受力分析图

Fig.3 Force on tiny element about anchor in anchorage area

3.2.2 锚土作用抗拔力

锚土作用抗拔力在抗拔极限状态下可根据摩擦阻力的定义进行求解,由整体受力分析知,锚杆周边所受压力是相等的,即图3(b)中的 $q_n = q_1$ 。现定义 dT_{uj1} 为第 j 排锚杆延长位置 x 处 dx 微段上由于锚土作用而提供的抗拔力,可以表示为

$$dT_{uj1} = \eta \pi D q_1 dx = \eta \pi D (\gamma z + q_0) \cos \alpha dx \quad (5)$$

式中: η 为锚固体与土体之间的摩阻力系数,其取值可参见文献[13]; z 为锚杆锚固段计算点位置的上覆土层厚度。

由图 3(a)的几何关系可知, 锚杆在受力计算点的深度 z 可以用锚杆埋置深度 z_j 和锚杆延长位置的竖向投影值 z_{jx} 表示, 即

$$z = z_j + z_{jx} = z_j + x \sin \alpha \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5), 同时将其在锚杆锚固区内沿锚杆长度方向进行积分, 得第 j 排锚杆由锚土作用提供的抗拔力 T_{uj1} 如下:

$$T_{uj1} = \int_{L_{ji}}^{L_j} \eta \pi D [\gamma(z_j + x \sin \alpha) + q_0] \cos \alpha dx$$

即

$$T_{uj1} = \eta \pi D (L_j - L_{ji}) \cos \alpha \cdot \left[\gamma z_j + \frac{\sin \alpha}{2} \gamma (L_j + L_{ji}) + q_0 \right] \quad (7)$$

式中: L_{ji} 为第 j 排锚杆自由段长度; L_j 为第 j 排锚杆总长。

对于土质不均匀的情况, 锚杆将穿越不同的土层, 此时计算锚杆的锚土作用抗拔力需要将锚杆在锚固区内进行分段积分, 积分时需要考虑土层不同时, 其摩阻力系数 η 和重度 γ 的变化对锚土作用抗拔力的影响, 此时 T_{uj1} 按式 (8) 求解:

$$T_{uj1} = \pi D \cos \alpha \left[\int_{L_{ji}}^{L_{j1}} \eta_i \left(\sum_{a1} \gamma_{a1} z_{ja1} + \sum_{b1} \gamma_{b1} z_{jb1} + q_0 \right) dx + \dots + \int_{L_{ji}}^{L_j} \eta_i \left(\sum_{ak} \gamma_{ak} z_{jak} + \sum_{bi} \gamma_{bi} z_{jbi} + q_0 \right) dx \right] \quad (8)$$

式中: L_{aji} 为第 j 排锚杆锚固段位于第 i 段土层内的长度; η_i 为锚杆锚固段穿越第 i 段土层的摩阻力系数; γ_{ak} 和 z_{jak} 分别为锚杆埋深位置以上上覆不同土层的重度 and 厚度; γ_{bi} 和 z_{jbi} 分别为锚杆埋深位置至计算深度不同土层的重度和厚度。

3.2.3 土体自承作用抗拔力

根据前述分析, 土体自承作用抗拔力只有锚杆埋置深度以上部分土体才能够给锚杆提供抗拔力。定义 dT_{uj2} 为第 j 排锚杆延长位置 x 处 dx 微段处土体自承作用提供的抗拔力, 由图 3 (b) 知下式成立:

$$dT_{uj2} = \pi D q_2 dx = \pi D (\gamma z + q_0) \sin \alpha dx \quad (9)$$

将式 (6) 代入式 (9) 并将其沿锚固区内锚杆延长方向进行积分, 得第 j 排锚杆由土体自承作用提供的抗拔力 T_{uj2} 如下:

$$T_{uj2} = \pi D (L_j - L_{ji}) \sin \alpha \cdot \left[\gamma z_j + \frac{\sin \alpha}{2} \gamma (L_j + L_{ji}) + q_0 \right] \quad (10)$$

当锚杆穿越不同土层时, 土体自承作用提供的抗拔力计算过程与锚土作用抗拔力计算过程相似, 此时采用下式求解:

$$T_{uj2} = \pi D \sin \alpha \left[\int_{L_{ji}}^{L_{j1}} \left(\sum_{a1} \gamma_{a1} z_{ja1} + \sum_{b1} \gamma_{b1} z_{jb1} + q_0 \right) dx + \dots + \int_{L_{ji}}^{L_j} \left(\sum_{ak} \gamma_{ak} z_{jak} + \sum_{bi} \gamma_{bi} z_{jbi} + q_0 \right) dx \right] \quad (11)$$

3.2.4 锚杆总抗拔力

根据以上分析, 第 j 排单根锚杆的总抗拔力为锚土作用抗拔力与土体自承作用抗拔力之和, 用 T_{uj} 表示, 其可以表示为

$$T_{uj} = T_{uj1} + T_{uj2} \quad (12)$$

4 算例分析

4.1 算例分析 1

以文献[14]中的兰州市某高层商住楼 11 m 深基坑工程为例进行预应力锚杆抗拔承载力的计算, 已知土体物理力学性质和最终的锚杆设计参数值如表 1、2 所示。计算时以式 (7)、(10) 计算锚土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力, 且分别以式 (1)、(12) 计算总的抗拔力, 计算结果见表 3, 表中总抗拔力 1 由式 (1) 计算所得, 总抗拔力 2 由式 (12) 计算求得。另外, 计算过程中锚杆材料采用 HRB335 级钢筋, 其水平间距取 2.5 m, 锚杆与水平面的夹角取 10° , 锚杆锚固体与土体间的摩阻力系数取 0.38。

表 1 土体物理性质
Table 1 Physico-mechanical properties of soil

土层名称	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩 擦角 φ /($^\circ$)	地面 荷载 q_0 /kPa	边坡 倾角 β /($^\circ$)
黄土状粉土	17.5	16	24	12	75

表 2 算例 1 锚杆设计参数值
Table 2 Design parameters of anchors in case 1

锚杆 排号	位置 /m	自由段 长度 L_f /m	锚固段 长度 L_a /m	锚固体 直径 D /mm	钢筋 直径 d /mm
1	1.5	7.0	8.0	150	32
2	4.3	6.0	11.0	150	32
3	7.1	4.0	12.0	150	32
4	9.9	1.5	9.5	150	32

表3 算例1 锚杆抗拔力计算结果 (单位: kN)

Table 3 Calculating results of anchor anti-pulling forces in case 1 (unit: kN)

计算项目	锚杆排号			
	1	2	3	4
总抗拔力 1	124.46	284.16	433.30	440.64
锚土作用抗拔力	101.07	236.92	352.46	342.00
土体自承作用抗拔力	46.90	109.94	163.54	158.70
总抗拔力 2	147.97	346.86	516.00	500.70
锚杆设计承载力	114.55	162.40	174.00	139.20

4.2 算例分析 2

以文献[15]中 5.4 节的兰州市某 12 m 高住宅小区边坡工程实例为例进行预应力锚杆抗拔承载力的计算, 土体和锚杆设计参数见表 4、5 所示, 锚杆的抗拔承载力计算结果见表 6, 表中总抗拔力 1 由式 (1) 计算所得, 总抗拔力 2 由式 (12) 计算求得, 计算过程中锚杆材料采用 HRB335 级钢筋, 其水平间距取 2.0 m, 锚杆与水平面的夹角取 10° , 锚杆锚固体与土体间的摩阻力系数取 0.37。

表4 边坡设计参数

Table 4 Design parameters of slope

土层名称	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩 擦角 φ /($^\circ$)	地面 荷载 q_0 /kPa	边坡 倾角 β /($^\circ$)
黄土	16.5	15	24	10	80

表5 算例2 锚杆设计参数值

Table 5 Design parameters of anchors in case 2

锚杆 排号	位置 /m	自由段 长度 L_f /m	锚固段 长度 L_a /m	锚固体 直径 D /mm	钢筋 直径 d /mm
1	2.0	6	8	200	28
2	4.0	5	9	200	32
3	6.0	4	11	200	32
4	8.0	4	10	200	32
5	10.0	3	10	200	32
构造	12.0	3	7	200	28

注: 表中结果对文献[15]的表 5.5 按照图 5.22 所示设计结果进行了修正。

表6 算例2 锚杆抗拔力计算结果(单位: kN)

Table 6 Calculating results of anchor anti-pulling forces in case 2 (unit: kN)

计算项目	锚杆排号				
	1	2	3	4	5
总抗拔力 1	128.66	207.02	329.15	368.43	437.63
锚土作用抗拔力	101.04	163.74	264.11	295.74	348.86
土体自承作用抗拔力	46.88	75.98	122.56	137.24	161.88
总抗拔力 2	147.92	239.72	386.67	432.98	510.74
锚杆设计承载力	114.18	132.31	193.93	181.25	181.25

4.3 结果分析

根据表 3、6, 作出算例分析 1 和算例分析 2 中各锚杆抗拔力的计算结果与锚杆设计承载力之间的关系见图 4、5。

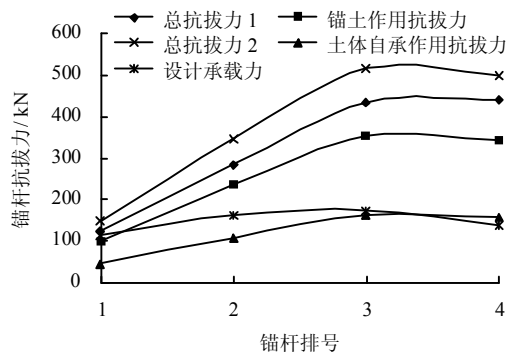


图4 算例1 中锚杆作用力图

Fig.4 Force diagram of anchors in calaculating case 1

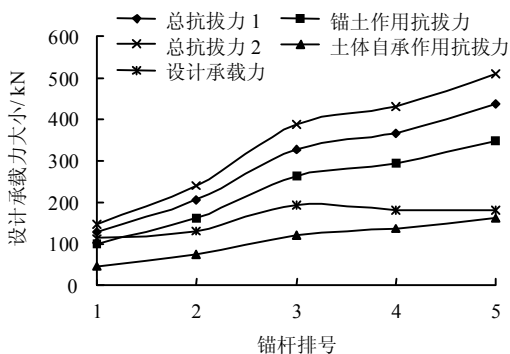


图5 算例2 中锚杆作用力图

Fig.5 Force diagram of anchors in calaculating case 2

由图 4、5 可知:

(1) 按式 (12) 计算所得的极限抗拔力较按式 (1) 所求得的结果大, 但总拔拔力曲线变化趋势基本一致, 都呈现出逐渐增大的趋势。在实际工程计算分析中, 目前还是较多地采用传统方法计算锚杆的抗拔力, 这显然偏于保守。这一点充分解释了为什么有时由于地质条件的原因导致锚杆的施工长度达不到设计长度, 但基坑或边坡仍然比较稳定的现象。

(2) 在预应力锚杆柔性支护体系中, 体系抗拔力主要由锚土作用提供, 由表 3、6 知其所提供的抗拔力可达到支护体系总抗拔力的 68% 以上, 其余抗拔力由土体自承作用提供。从锚杆的设计承载力看, 仅仅依靠土体自承作用不能保持体系的稳定, 在两类抗拔力共同作用下, 支护体系保持稳定。采用圆弧滑动条分法分别对算例 1 中的基坑和算例 2 中的边坡进行稳定性计算, 得安全系数分别为 1.478 和

1.512, 与《建筑边坡工程技术规范》^[16]规定的安全系数 1.3 相比, 有较大的安全储备。

(3) 除算例 1 中第 4 排锚杆的设计承载力 139.2 kN 小于土体自承作用抗拔力 158.7 kN 外, 其余各排锚杆的设计承载力均大于土体自承作用抗拔力。算例 1 中按改进求解方法计算的第 4 排锚杆的总抗拔力有减小的趋势, 而算例 2 中锚杆的总抗拔力一直在增加, 这说明锚杆总抗拔力的变化没有特定的规律。

(4) 锚杆的总抗拔力总体上呈现出增加的趋势, 但锚杆的设计承载力表现出中部锚杆的受力较大, 这一规律与笔者在开展框架预应力锚杆柔性支护结构的试验研究中所获得结论也是一致的^[17], 因此, 在设计时应该适当加长中部锚杆; 对于下部锚杆, 由于其埋置深度较大, 在锚固段长度设计较短的情况下仍然可以提供较大的抗拔力, 因此, 可以考虑将下部锚杆设计得适当短一些, 这样可以节约工程造价。

5 结 论

(1) 摩擦型灌浆土层锚杆抗拔承载力的传统求解方法的本质就是将锚杆所受的竖向应力沿垂直锚杆轴向分解进而进行摩阻力的求解, 方法虽然简单, 但忽略了土体自承作用抗拔力, 因此, 将这种方法用于求解锚杆抗拔力已显不足。

(2) 提出了摩擦型灌浆土层锚杆抗拔力求解的新观点。分析认为, 在预应力锚杆柔性支护结构体系中, 锚杆抗拔力应由锚土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分组成, 锚杆首先是作为传递土体自承作用抗拔力的传力构件, 当土体自承作用抗拔力不满足支护体系的稳定性要求时, 锚杆开始提供锚土作用抗拔力, 这体现了预应力锚杆对支护体系稳定性的贡献。

(3) 分析推导了锚土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力的理论计算公式。工程实例计算分析表明, 按改进求解方法计算所得的锚杆抗拔力较传统求解方法计算的结果要大, 锚土作用抗拔力可达支护体系总抗拔力的 68% 以上, 在两类抗拔力的共同作用下, 支护体系才能保持稳定状态。本文对两部分抗拔力的分析与理论求解对于锚杆柔性支护体系的工程实践具有一定的指导意义, 这样更加清晰地准确地表明了预应力锚杆支护体系的作用机制。

(4) 本文仅仅是针对土层锚杆进行分析, 且未考虑地下水和地震作用等偶然因素的影响, 当基坑或边坡地质环境条件复杂和影响锚杆抗拔力的因

素较多时, 要准确计算锚杆的抗拔力是较为困难的, 希望在后续研究中进一步开展数值模拟分析和现场试验研究。

参 考 文 献

- [1] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1257—1261.
JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(11): 1257—1261.
- [2] 董诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3793—3796, 3802.
DONG Cheng, ZHENG Ying-ren, CHEN Xin-ying, et al. Research on composite support pattern of soil nails and prestressed anchors in deep foundation pits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3793—3796, 3802.
- [3] 冯玉国, 王渭明, 刘军熙. 预应力锚索抗滑桩结构稳健优化设计[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 515—520.
FENG Yu-guo, WANG Wei-ming, LIU Jun-xi. Robust optimization design of anti-slide piles with prestressed anchor cables[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 515—520.
- [4] 方理刚, 段靓靓, 梁锴, 等. 横观各向同性岩体边坡与预应力锚索框架梁相互作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 135—143.
FANG Li-gang, DUAN Liang-liang, LIANG Kai, et al. Interaction between transverse isotropy rock slope and prestressed anchor cable with frame beam support[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 135—143.
- [5] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构的稳定性分析方法及其应用[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 376—382.
ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Stability analysis method for prestressed anchor and grillage supporting structures and its application[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(3): 376—382.
- [6] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆支护结构中锚杆间距的设计参数[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 98—104.
ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Design parameters of anchor spacing in supporting structure with framed and prestressed anchors[J]. **Journal of Lanzhou University**

- of Technology, 2010, 36(2): 98—104.
- [7] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [8] 刘东升, 雷用, 王平. 锚杆抗拔力的可靠性分析与设计[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 323—327.
- LIU Dong-sheng, LEI Yong, WANG Ping. Reliability analysis and design of anchor bolt[J]. **Underground Space**, 2001, 21(4): 323—327.
- [9] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆柔性支护结构中锚杆长度的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 406—410.
- ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Study on the anchor length of frame supporting structure with prestressed anchors[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(3): 406—410.
- [10] 张友葩, 高永涛, 吴顺川. 预应力锚杆锚固段长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 980—986.
- ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan. Study on bonding length of prestress anchor bar[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 980—986.
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [12] 丁振明, 秦四清, 刘军, 等. 土钉支护体系抗拔力机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1799—1802.
- DING Zhen-ming, QIN Si-qing, LIU Jun, et al. Research on anti-pulling mechanism in soil-nailing supporting system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1799—1802.
- [13] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [14] 周勇, 朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3115—3122.
- ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Sensitivity analysis of design parameters of grillage supporting structure with prestressed anchor in loess slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 3115—3122.
- [15] 李忠. 新型边坡支挡结构稳定性分析方法研究[博士学位论文 D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [17] 周勇. 框架预应力锚杆柔性支护结构的理论分析与试验研究[博士学位论文 D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.

上接第 353 页

- [4] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. **Soil Dyn. Earthq. Engrg.**, 2004, 24: 69—87.
- [5] 高广运, 李伟. 二维地波阻板隔振分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 130—135.
- GAO Guang-yun, LI Wei. 2-D analysis of ground vibration isolation using wave impeding block[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, 25(2): 130—135.
- [6] 高广运, 冯世进, 李伟, 等. 三维层状地基竖向激振波阻板主动隔振分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 471—476.
- GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, LI Wei, et al. 3D analysis of active vibration isolation with wave impedance block in layered ground under vertical loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(4): 471—476.
- [7] SEAL S H, KAUSEL E. Dynamic and static impedances of cross-anisotropic halfspaces[J]. **Soil Dyn. Earthq. Engrg.**, 1990, 8(4): 172—178.
- [8] 稽醒, 臧跃龙, 程玉民. 边界元法进展及通用程序[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [9] LAMB H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society, London (Series A)**, 1904, 203: 1—42.
- [10] 王贻荪. 地面波动分析若干问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 4(2): 56—67.
- WANG Yi-sun. Some problems in the ground vibration analysis[J]. **Journal of Building Structures**, 1982, 4(2): 56—67.
- [11] WOODS R D, BARNET N E, SANGESSER R H. A new tool for soil dynamics[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1974, 100(11): 1231—1247.