

压力分散型锚杆剪应力分布与现场试验研究

张四平, 侯庆

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:将 Mindlin 弹性位移解与有限元的基本方法相结合, 计算了压力分散型锚杆的剪应力分布规律, 对比分析了其受力性能与拉力型锚杆的区别; 通过在软弱岩层中进行压力分散型锚杆的现场承载力试验, 证实了压力分散型锚杆的承载能力与同条件的拉力型锚杆相比有较大幅度的提高, 并分析了承载体间距对于压力分散型锚杆承载能力的影响, 可为该种新型锚杆今后的工程应用提供参考。

关键词:压力分散型锚杆; 剪应力分布; 现场承载力试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1006-7329(2004)02-0041-07

Study on Shear Stress Distribution and In-situ Test of Pressure - Dispersive Anchor

ZHANG Si - ping, HOU Qing

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: Combining the Mindlin elastic displacement solution with the elementary theory of finite element, in this paper, the shear stress distribution of pressure - dispersive anchor is calculated. Its work performances were compared with those of tensile anchor. According to the in - situ pull - out test of pressure - dispersive anchors in weak rock stratum, it is proven that the bearing capacity of pressure - dispersive anchor increases rather evidently than that of tensile anchor under the same condition and the effect of spacing between load - supporting bodies on the bearing capacity of pressure - dispersive anchor is analyzed. The analysis results of this paper can offer some references to the engineering application of this new type of anchor in the future.

Keywords: pressure - dispersive anchor; shear stress distribution; in - situ pull - out test

岩土锚固技术作为岩土支护中最经济、最有效的手段之一,在土木建设工程中发挥着越来越重要的作用。近年来,国内外工程界围绕改善锚杆荷载传递机制这一课题进行了大量的研究工作,开发出了多种新型锚杆,如压力型锚杆、拉力分散型锚杆、压力分散型锚杆等。其中,压力分散型锚杆凭借其合理的受力性能与良好的工程适用性,在岩土工程中获得了越来越广泛的应用。

压力分散型锚杆主要由锚头、无粘结预应力钢绞线、承载体和锚固段砂浆体等几部分组成,其中每一个承载体连同与之相对应的锚固段砂浆体和钢绞线组成一个相对独立的锚固单元,不同的锚固单元有着各自的杆体、自由段和锚固段。其构造图见图1所示。

压力分散型锚杆具有自身独特的传荷机理。传统的拉力型锚杆在承受拉力荷载后直接将拉力通过钢筋或钢绞线传递至锚固段砂浆体,使得锚固段砂浆体处于二维拉应力状态,不利于发挥材料的强度;而压力分散型锚杆受荷后会通过无粘结钢绞线将拉力荷载分散作用到各个承载体上,再通过承载体将分散的荷载以压力的形式传递给其前端的锚固段砂浆体。这种新的传荷机制一方面使得锚固段砂浆体

* 收稿日期:2003-12-10

作者简介:张四平(1955-),四川人,教授,主要从事边坡工程及岩土支护研究。

发生膨胀而处于三维压应力状态,改善了锚杆的受力性能;另一方面由于荷载被分散而大大降低了锚杆锚固段砂浆体与孔壁周围岩土体之间的应力峰值,因此有利于充分调动岩土体自身的强度潜能,提高锚杆的承载能力。

作为一种新型的锚固技术,压力分散型锚杆的成熟与推广既需要在理论研究方面不断探索,也需要在工程实践或相关试验中积累经验。本文将通过有限元的分析计算,并结合在软弱岩层中进行的现场试验,探讨压力分散型锚杆的剪应力分布规律,观察在软弱岩层中其极限承载力的提高幅度,分析其承载力的影响因素及破坏模式,从而为压力分散型锚杆今后的研究工作及工程应用提供一些有益的思路与参考。

观察在软弱岩层中其极限承载力的提高幅度,分析其承载力的影响因素及破坏模式,从而为压力分散型锚杆今后的研究工作及工程应用提供一些有益的思路与参考。

1 压力分散型锚杆的应力分布研究

1.1 计算原理与相关假定

分析与研究锚杆的应力状态及其分布规律是了解锚杆承载能力及工作特点的前提,而在锚杆应力的分析中,对锚杆锚固段砂浆体与孔壁周围岩土体间粘结剪应力的分析是最为重要的环节。在研究传统拉力型锚杆的应力分布规律时,研究者们常采用变形协调假设,即假定在弹性工作范围内锚杆与孔壁周围的岩土体在轴线方向上变形协调一致而没有相对滑移。因为压力分散型锚杆在工作荷载作用下其锚固段砂浆体与孔壁周围岩土体之间将产生很大的径向压应力,从而使得在孔壁界面上砂浆与岩土体的粘结比拉力型锚杆更为有效,因此分析拉力型锚杆时可以采用的变形协调假定更适用于压力分散型锚杆。基于此项考虑,本文对压力分散型锚杆剪应力的分析计算将采用如下思路:假定在弹性工作阶段锚杆与周围岩土体的变形协调一致,利用 Mindlin 弹性位移解计算锚杆孔壁处轴线方向上的岩土体变形值,同时结合有限元的基本分析方法,将数据离散化后建立平衡方程,最后利用相关的数学软件求解出平衡方程中的剪应力向量,从而得到在弹性阶段锚杆锚固段粘结剪应力的分布规律。

为了更好地利用相关理论进行分析,同时考虑到求解的简洁性要求,本文在进行有限元分析时,除了最基本的变形协调假定外,还将遵从如下的简化假定:

- 1) 锚杆与岩土层均为无自重、连续均匀、各向同性的理想线弹性体;
- 2) 考虑到锚杆孔洞在整个岩土层中所占的空间较小,且锚固段砂浆体的性能参数与周围的岩层相差不大,因此假定分析中的岩土层为一匀质半空间无限体,可采用 Mindlin 弹性位移解进行计算;
- 3) 假定不同锚杆的间距足够大,可忽略相邻锚杆间的影响;
- 4) 假定锚杆杆体与岩壁表面垂直,且没有未灌浆的自由段;
- 5) 文献[2]分析表明,锚杆的锚头反压力对于求解锚杆锚固段的剪应力分布影响较小,故分析中可忽略锚头反压力的影响;
- 6) 忽略筋材、承载体等对锚杆锚固段材性的影响。

1.2 Mindlin 弹性位移解

Mindlin 理论公式适用于求解在半空间无限体中作用一集中荷载时,在弹性阶段空间体中各点的竖向位移量及各方向的应力值。在本文的分析计算中,主要用到的是 Mindlin 公式中的弹性竖向位移解。在半无限空间中,当点(0,0,c)作用一集中荷载 F 时,点(x,y,z)的竖向位移可以表示为:

$$\omega = \frac{F}{16\pi G_r(1-u_r)} \left[\frac{3-4\mu_r}{R_1} + \frac{8(1-u_r)^2 - (3-4\mu_r)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \right.$$

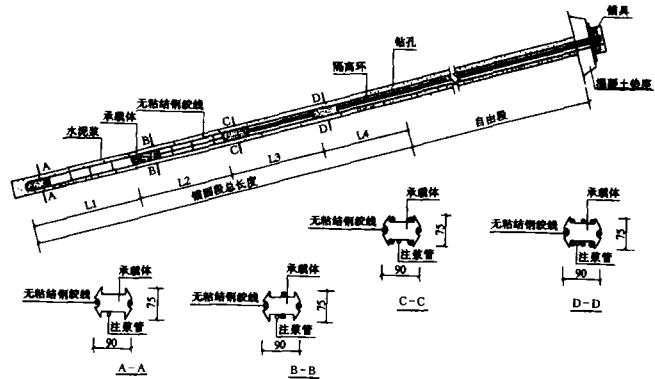


图 1 压力分散型锚杆构造图

$$\left. \frac{(3 - 4\mu_r)(z + c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z + c)^2}{R_2^5} \right] \quad (1)$$

式中: ω ——Mindlin 竖向位移解; G_r ——半无限空间体介质的剪切模量,本文中为岩土层的剪切模量; μ_r ——半无限空间体介质的泊松比,本文中为岩土层的泊松比; c ——集中力作用的深度; x, y, z ——位移计算点的坐标; F ——集中荷载值; $r^2 = x^2 + y^2$, $R_1 = [r^2 + (z - c)^2]^{1/2}$, $R_2 = [r^2 + (z + c)^2]^{1/2}$ 。

1.3 平衡方程的推导

设锚杆的轴线为 Z 轴, Z 轴的正方向指向锚杆的尾部。引入有限元“离散化”的思路,沿锚杆轴线方向取长度为 ΔZ 的单元进行分析,见图 2 所示。设锚杆对岩土体产生的粘结剪应力为 X'_r , 岩土体对锚杆产生的粘结剪应力为 X'_a , 显然有:

$$X'_r = -X'_a \quad (2)$$

它们沿锚杆轴线方向是连续分布的。由于 ΔZ 的长度很小,故可近似认为在此单元体中 X'_r, X'_a 的数值保持不变。现设有线荷载 $X_r = X'_r \times \Delta Z$, $X_a = X'_a \times \Delta Z$, 并认为原来的粘结应力对于锚杆砂浆体及岩土体的作用可由此线荷载来等效替代。将 ΔZ 范围内的 X'_r 转化为 $1/2 X_r$, 分别作用于单元体的两端, 且认为将 X'_a 转化为 $1/2 X_a$ 作用于单元体的两端后, 其对于锚杆体的作用等效于作用在锚杆截面上的一均布作用力, 如图 2 所示。

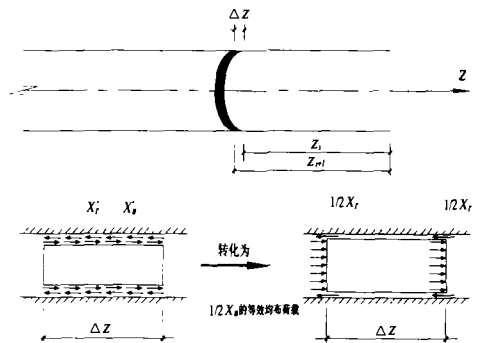


图 2 锚杆单元分析图

按假定 3, 只取单根锚杆进行分析。将锚杆体沿轴线等分为 n 个单元, 并将单元体按杆单元进行考虑, 故共有 $n + 1$ 个单元结点, 设单元的长度为 l (即 $l = \Delta Z$)。对于锚杆, 荷载与位移之间的基本关系为:

$$[K]\{W_a\} = \{P\} + \{Q_a\} \quad (3)$$

式中: $[K]$ ——锚杆各单元的组合刚度矩阵, $(n + 1) \times (n + 1)$ 阶, 在计算单元刚度矩阵时, 可取单元刚度系数 $k = A_m E_a / l$, 其中 A_m 为锚杆体的净截面积, E_a 为锚杆砂浆体的弹性模量, l 为锚杆单元长度;

$\{W_a\}$ ——锚杆各单元结点的位移向量, $n + 1$ 阶;

$\{P\}$ ——作用在承载体上的外荷载向量, $n + 1$ 阶;

$\{Q_a\}$ ——锚杆单元结点处岩土体对于锚杆的等效剪力向量, $n + 1$ 阶, 单元结点处锚杆所受的等效作用力与前述粘结应力的等效分布线荷载的关系为 $Q_{ai} = 2\pi r X_{ai}$, r 为锚杆半径, 故有 $\{Q_a\} = 2\pi r \{X_a\}$, 由此便将 $\{X_a\}$ 体现到了基本方程式(3)中, 通过求解平衡方程矩阵, 便可解得 $\{X_a\}$ 向量, 即可得到 X'_a 的大致分布规律。

在基本方程中, $[K]$ 与 $\{P\}$ 都是已知的, 关键是利用 Mindlin 公式求解 $\{W_a\}$ 向量。设与锚杆各单元结点位置相对应的岩土体的位移向量为 $\{W_r\}$, 由变形协调假定可知有:

$$\{W_a\} = \{W_r\} \quad (4)$$

因此只要求得 $\{W_r\}$ 也即得到了锚杆体的结点位移向量 $\{W_a\}$ 。

设有 $(n + 1) \times (n + 1)$ 阶的矩阵 $[S]$, 矩阵中的元素 s_{ij} 表示在 j 结点处的岩土体作用一单位力时对 i 结点处的岩土体引起的位移, 可由 Mindlin 弹性位移公式计算, 即取(1)式中的 $F = 1$ 来计算 s_{ij} 。 $\{W_r\}$ 与 $[S]$ 的关系为:

$$[W_r] = [S][Q_r] \quad (5)$$

式中 $\{Q_r\}$ 为锚杆单元结点处锚杆对于岩土体的等效作用力向量, 有:

$$\{Q_r\} = -\{Q_a\} \quad (6)$$

由此可得:

$$\{W_a\} = -[S]\{Q_a\} \quad (7)$$

将(7)式代入基本方程(3),可进行如下推导:

$$\begin{aligned} -[K][S][Q_a] &= \{P\} + \{Q_a\} \\ -2\pi r[K][S]\{X_a\} &= \{P\} + 2\pi r\{X_a\} \\ 2\pi r\{[K][S] + [E]\}\{X_a\} &= -\{P\} \\ \{X_a\} &= -\{[K][S] + [E]\}^{-1}\{P\}/2\pi r \end{aligned} \quad (8)$$

上式中 $[E]$ 为 $(n+1) \times (n+1)$ 阶的单位矩阵。

确定了承载体位置及相应的设计荷载后,即确定了 $\{P\}$ 向量,然后通过相关的数学软件 MATLAB 对 $\{[K][S] + [E]\}^{-1}$ 进行计算,即可求解出 $\{X_a\}$ 向量的值。需要说明的是,在一般的杆单元矩阵计算时,因为 $[K]$ 是一个奇异阵,故需引入约束条件消除杆体的整体位移后方可求解出 $[K]^{-1}$;但在本文的平衡方程中,经过推导与变换后需求解的是 $\{[K][S] + [E]\}^{-1}$ 而并非 $[K]^{-1}$,而 $\{[K][S] + [E]\}$ 是一个非奇异矩阵,故对平衡方程进行求解时无需再另行引入约束条件。

在矩阵平衡方程的推导中,使用线荷载向量 $\{X_a\}$ 是为了便于对平衡矩阵的理解,在实际计算中,则使用等效剪力向量 $\{Q_a\}$ 进行描述与表达,因为作用力的概念更为明确,且易于将其同外荷载向量 $\{P\}$ 进行对比。由于划分的锚杆单元长度不大,故 $\{Q_a\}$ 中 Q_{ai} 沿锚杆轴线的分布趋势可近似地代表砂浆体与岩土层间粘结剪应力的分布规律。由式(8)转化可得:

$$\{Q_a\} = -\{[K][S] + [E]\}^{-1}\{P\} \quad (9)$$

求解出 $\{X_a\}$ 或 $\{Q_a\}$ 后,可由式(7)求解出锚杆单元结点处的轴向位移向量 $\{W_a\}$:

$$\{W_a\} = -2\pi r[S]\{X_a\} \quad (10)$$

1.4 算例与对比分析

推导出矩阵平衡方程后,可进行压力分散型锚杆剪应力分布计算。计算选用软件 MATLAB6.0。参照本文第 3 节中表 1 的实测数据及相关资料,可取计算参数如下:软弱岩层的弹性模量 $E_r = 1.38 \text{ GPa}$,岩层泊松比 $\mu_r = 0.28$,锚杆砂浆体的弹性模量 $E_a = 18 \text{ GPa}$,锚杆的孔径 $r = 150 \text{ mm}$,锚杆锚固段总长 $L_a = 3.6 \text{ m}$,锚杆单元数 $n = 24$,结点数 $n + 1 = 25$,锚杆单元长度 $l = 0.15 \text{ m}$,锚杆单元刚度系数 $k = 1.97 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。此外,设所计算的分散型锚杆有三个承载体,其间距为 0.9 m ,其所在的位置为距离锚杆端头 1.8 m 、 2.7 m 、 3.6 m 处,分散外荷载的位置与承载体位置一致,各承载体受荷相等;拉力型锚杆的外荷载作用于锚杆的端头。取锚杆在弹性工作阶段所受的总荷载为 600 kN 。

将以上参数代入式(9)及式(10)可得到压力分散型锚杆与拉力型锚杆的剪应力分布如图 3 所示,其轴向位移分布如图 4 所示。

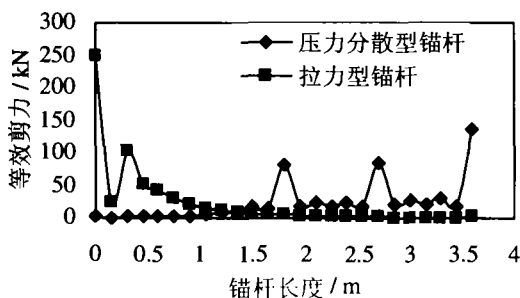


图 3 两种锚杆剪应力分布对比图

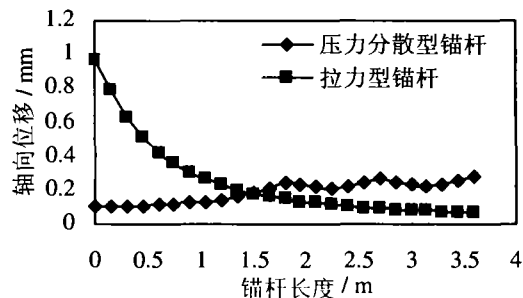


图 4 两种锚杆轴向位移分布对比图

由图 3 可见,压力分散型锚杆的剪应力分布有三个峰值,分别为三个承载体上外荷载的作用位置,其中在锚杆尾部的剪应力峰值比前两个承载体处的峰值更大一些;而对于拉力型锚杆,其最大的剪应力峰值在锚杆的端头部位,锚杆沿轴线的剪应力分布主要集中在锚头近端约 1 m 的范围内,存在着严重的应力集中现象。由此可见,由于一个大的外荷载被分散,使得压力分散型锚杆的剪应力峰值大为降低(本算例中压力分散型锚杆最大的剪应力峰值仅为拉力型的约 54.99%),其剪应力在整个锚杆轴线方

向上的分布更为均匀,受力更为合理,因此可以推断压力分散型锚杆在同等条件下具有比拉力型锚杆更高的承载能力。

由图 4 可见,两种锚杆的轴向位移分布规律与其剪应力的分布规律十分相似。压力分散型锚杆的轴向位移峰值与拉力型锚杆相比大为降低,位移的总量也减小了相当比例。由此可知,在相同的条件下压力分散型锚杆控制岩土层变形的能力比拉力型锚杆更强,因此其更适用于对控制变形要求严格的锚固支护工程。

求解平衡方程时,通过改变参数的选取,还可以观察参数变化对于锚杆剪应力分布及轴向位移分布的影响。如可通过改变岩土层的弹性模量来模拟锚杆所处的不同介质情况。按《工程岩体分级标准》及本文表 1 的实测数据,取 $E_1 = 0.3 \text{ GPa}$ 代表土层的弹性模量, $E_2 = 1.38 \text{ GPa}$ 代表软弱岩层的弹性模量, $E_3 = 6.0 \text{ GPa}$ 代表普通岩层的弹性模量,并考虑到岩土层的泊松比变化范围不大,近似地将以上三种介质的泊松比均取为 $\mu_r = 0.28$,锚杆的其它参数及外荷载均保持不变,通过求解矩阵平衡方程可得到锚杆在三种介质中的等效剪应力向量分布如图 5 所示,其相应的轴向位移分布如图 6 所示。

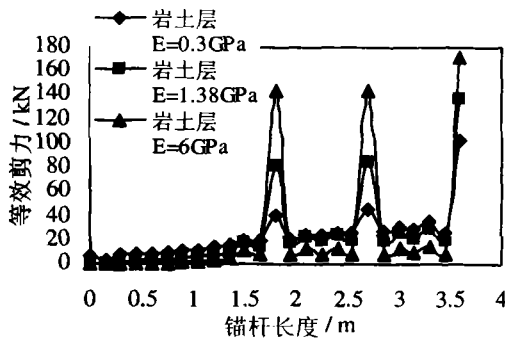


图 5 不同岩土介质剪应力分布对比图

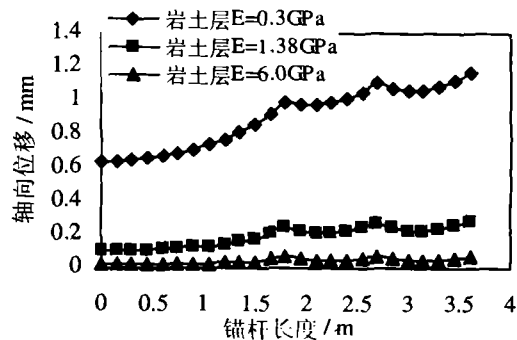


图 6 不同岩土介质轴向位移分布对比图

从图 5 中可知,随着岩土介质弹性模量的增大,在承载体附近的锚杆粘结剪应力的峰值会相应增大,而在各个峰值间的粘结剪应力值则逐渐降低。从图 6 中可知,随着岩土介质弹性模量的增大,锚杆的轴向位移将相应地减小,其中锚杆在土层介质中的位移比同等条件下其在普通岩层中的位移增大了近一个数量级。由此可见,岩土介质的质量对于锚杆轴向位移的影响是相当大的。

2 压力分散型锚杆现场试验

岩土工程是一门与实际应用有着紧密联系的学科,仅仅进行理论方面的研究显然是不够的。针对于国内压力分散型锚杆在岩层介质中的相关试验较少的现状,笔者在重庆的软弱岩层中结合实际工程进行了压力分散型锚杆的现场抗拔试验。

为了预估锚杆承载力以进行试验设计,在具体实施试验前,在试验场地的软弱岩层中先进行了岩芯的取样测试,所得的实测参数见表 1 所示。测试结果显示,岩芯强度不是很高,约为 6.8 MPa 左右,属于软弱的泥质页岩,满足本次试验的要求。

表 1 试验场地软弱岩层取样测试参数

名称	试样编号	抗压强度 R (MPa)		弹性模量 E (GPa)		泊松比 μ	
		单个值	平均值	单个值	平均值	单个值	平均值
泥质页岩	1	6.14		1.25		0.30	
	2	7.07	6.80	1.49	1.38	0.26	0.28
	3	7.18		1.41		0.28	

试验共进行了三组共 9 根锚杆的现场承载力抗拔对比测试,其中普通拉力型试验锚杆一组(3 根),压力分散型试验锚杆两组(6 根)。两组压力分散型试验锚杆的区别在于承载体的间距设置不同,第一组的承载体间距为 0.9 m ,第二组则为 1.2 m 。锚杆的设计孔径均为 150 mm ,钻孔深度为约 6.6 m ,其中

锚固段长度为 3.6 m, 处于泥质页岩层; 非锚固段长度约 3.0 m, 处于强风化破碎带。9 根锚杆均采用 9 束 1 860 MPa 级 (1×7 型) 的普通钢绞线, 压力分散型锚杆均采用 3 个钢质承载体。三组锚杆的布置见图 7(a)、(b)、(c) 所示, Z1、Z2、Z3 为试验锚杆承载体的编号。

试验锚杆的组装与安放等操作过程可见文献 [5] 所述, 组装完毕的压力分散型试验锚杆实物图见图 8 所示。本次试验中, 采用循环张拉与单调张拉相结合的张拉方式, 即在三组试验锚杆中每组各选取一根进行循环张拉, 其余的则进行单调张拉。

为了防止钢绞线的强度破坏, 试验中取最大张拉控制力为 1 900 kN, 此时锚杆钢绞线承受的应力约为其强度标准值的 81%。参照《建筑边坡工程技术规范》及《重庆市建筑地基基础设计规范》, 并结合具体的实际情况, 本次试验中锚杆的破坏准则按如下确定:

- 1) 锚头位移不收敛, 其位移增长在较长时间 (约 60 min) 内无稳定的趋势;
- 2) 在某级荷载下压力表读数不稳定, 锚杆无法稳定持荷;
- 3) 试验中后一级荷载产生的锚头位移增量超过上一级荷载位移增量的 2 倍;
- 4) 锚固体从岩土层中拔出, 或钢绞线从砂浆锚固体中拔出 (表现为压力表突然回油)。

当试验锚杆发生第 1-3 条准则规定的破坏时, 取上一级稳定荷载为锚杆的极限承载力; 当试验锚杆发生第 4 条准则规定的破坏时, 取破坏瞬间 (压力表最大读数) 时对应的锚杆承载力为其极限承载力。本次试验中各试验锚杆的极限承载力及破坏形态见表 2 所示。

表 2 试验锚杆的极限承载力及其破坏形态

序号	锚杆类型	承载体间距(m)	张拉方式	极限承载力(kN)	破坏形态及说明
1	拉力型	—	循环张拉	1 000	1 225 kN 级荷载时位移增量超过上一级的 2 倍以上
2	拉力型	—	单调张拉	1 450	1 675 kN 时锚头位移不收敛
3	拉力型	—	单调张拉	1 225	1 450 kN 时无法稳定持荷
4	压力分散型	0.9	单调张拉	1 675	1 900 kN 时锚头位移不收敛
5	压力分散型	1.2	单调张拉	1 900	受钢绞线强度控制, 未破坏
6	压力分散型	0.9	单调张拉	1 675	1 900 kN 时锚头位移不收敛
7	压力分散型	1.2	单调张拉	—	张拉时异常, 未得有效数据
8	压力分散型	1.2	循环张拉	1 900	受钢绞线强度控制, 未破坏
9	压力分散型	0.9	循环张拉	1 876	1 876 kN 时压力表回油, 无法继续持荷

实测结果显示, 拉力型试验锚杆的平均极限承载力为 1 225 kN, 而压力分散型试验锚杆的平均极限承载力则达到了 1 742 kN (第一组) 及 1 900 kN (第二组), 其极限承载能力提高了 42.2% 以上。试验结果表明, 压力分散型锚杆具有更为良好的受力性能, 与拉力型锚杆相比, 其极限承载力无论是在单调荷载或是循环荷载作用下, 都有较为明显的提高。

试验结果还反映了承载体的间距设置对于压力分散型锚杆受力性能的影响。第一组压力分散型试验锚杆的平均极限承载力为 1 742 kN, 该组的 3 根试验锚杆均告破坏; 而第二组压力分散型试验锚杆 (成功了 2 根) 在达到试验最大控制张拉力 1 900 kN 时仍能稳定地持荷, 锚头位移最终也能收敛, 说明其

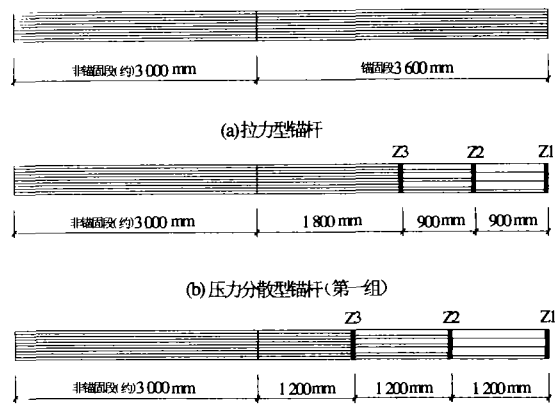


图 7 试验锚杆布置图

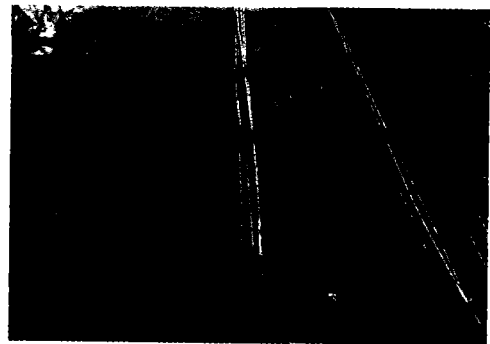


图 8 试验锚杆实物图

抗滑移破坏的极限承载力在1900 kN以上。由此表明,在加大了承载体的设置间距后,压力分散型试验锚杆的受力状态有所改善,其承载能力有所提高。

对于压力分散型锚杆,承载体间距的合理设置是充分发挥其受力性能优势的重要条件。在实际应用中,最为合理的承载体设置间距应该是在确保单元锚固区段的抗滑阻力能平衡该区段承受的压力荷载的前提下,还留有适当的安全储备。一般认为,在土层中其合理间距大致为3.0 m~6.0 m,在岩层中可为2.0 m以下,岩土层介质的质量越好,其承载体间距的设置可相应越小,具体可由现场情况确定。

本次试验中还采用了测量千斤顶大缸位移的方法来反映试验锚杆锚头处的位移情况。从试验结果来看,总体上两种类型的试验锚杆的锚头位移量相差不大。锚杆锚头的位移量主要是由锚杆钢绞线自身的变形量及锚杆的锚固段砂浆体的滑移或压缩(对于压力分散型锚杆)变形量所组成的。两种锚杆的锚头变形总量相差不大,而压力分散型锚杆的钢绞线全长都基本处于无粘结的自由状态,其钢绞线的伸缩变形量明显大于拉力型锚杆,因此可判断压力分散型锚杆的锚固段砂浆体的滑移变形量要远小于同等条件下的拉力型锚杆,其抗变形的能力更强。这与本文1.4节中有限元计算所得到的规律是一致的。

3 结语

1) 有限元的分析与计算表明,压力分散型锚杆锚固段的应力状态比拉力型锚杆大为改善,主要表现在锚杆锚固段砂浆体与孔壁周围岩土体之间的剪应力峰值大为降低,压力分散型锚杆的抗变形能力也相应地大为提高。

2) 现场试验表明,在软弱岩层中压力分散型锚杆的极限承载力与同等条件下的拉力型锚杆相比有较为明显的提高,在本次试验中平均提高了42.2%以上。另一方面,承载体间距的合理设置有利于改善压力分散型锚杆的应力状态,提高其极限承载能力。

3) 本次试验表明,在软弱岩层介质中,压力分散型锚杆主要发生的是锚固段砂浆体与岩土层间的粘结滑移破坏,或其最终的承载能力受钢绞线强度所控制,而锚杆锚固段砂浆体的局部承压破坏一般不易发生。为了充分利用压力分散型锚杆抵抗粘结滑移破坏的能力,应对锚杆的杆体进行合理设计,以确保钢绞线的总体抗拉强度不成为压力分散型锚杆极限承载能力的制约因素。

参考文献:

- [1] 程良奎,范景伦.压力分散型(可拆芯式)锚杆的研究与应用[J].北京:冶金工业部建筑研究总院院刊,2000,(2):1-8.
- [2] 陈超.压力型锚杆现场试验及剪力分布计算[D].重庆:重庆大学,2003.
- [3] 李人宪.有限元法基础[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [4] 顾亮.压力型锚杆的抗拔试验[J].工程勘察,1999,(1):10-12.
- [5] 侯庆.压力分散型锚杆工作机理与现场试验研究[D].重庆:重庆大学,2003.
- [6] 程良奎,范景伦.岩土锚固[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.