

DOI: 10.11779/CJGE201810009

拉力型锚索各锚筋受力不均匀现象试验研究

付文光¹, 周凯², 卓志飞²

(1. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518054; 2. 深圳市冶建岩土工程有限公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 采用同步张拉、单拉及整体张拉法, 在3个场地的基坑工程进行了65组土层拉力型锚索试验, 结果表明, 锚索整拉时: ①锚筋数量较少或黏结长度较短时, 锚筋实际抗拉力或浆筋极限黏结力偏低是受力不均匀的重要原因; ②锚索在正常使用及承载能力极限状态下, 均普遍存在着受力严重不均匀现象, 明显降低了锚筋极限承载能力。锚筋受力变异系数0.15, 或相对极差30%且偏离度20%, 可作为判断严重不均匀程度的定量指标; ③锚筋刚度系数具有很大的随机性及不确定性, 大体上随着筋体自由长度的减短或受力的增加而增加; ④锚筋随着受力增加, 受力不均匀程度普遍增加, 但严重程度下降; ⑤锚筋数量越多, 受力越均匀; ⑥锚筋极限抗拉力可取标准值的0.8倍; ⑦预张拉及提高预紧力不能改善锚筋受力不均匀程度, 同步张拉是最佳改善方法。

关键词: 同步张拉; 锚筋; 受力不均匀; 抗拉力; 极限黏结力; 偏离度; 刚度系数; 预紧力

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1827-09

作者简介: 付文光(1970-), 男, 深圳人, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计咨询、工程实践、试验研究等工作。E-mail: zgjy1992@126.com。

Experimental study on uneven load phenomenon of tendons of tensile anchors

FU Wen-guang¹, ZHOU Kai², ZHUO Zhi-fei²

(1. Shenzhen GongKan Geotechnical Group Co., Ltd., Shenzhen 518054, China; 2. Shenzhen YeJian Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: Under integral tensioning of anchors, the results of 65 tensile anchor tests in 3 foundation pit projects with different tensile methods such as synchronous tension, separate tension and integral tension show that: (1) The real tensile resistance or ultimate bonding resistance is low if the number of tendons is less or the bonding length between tendon and grouting is short, and they are the important reasons for uneven loads on tendons. (2) The serious uneven load phenomenon of tendons is general under the serviceability limit state and ultimate limit state, and the ultimate load capacity of the anchor is reduced obviously. The variable coefficient 0.15, relative range 30% and deviation degree 20% can be used as the quantitative indice for estimating the severity. (3) The stiffness coefficient of tendons has much randomness and uncertainty, and it decreases along with the free length of tendons and increases along with the loads on tendons in general. (4) The degree of uneven load increases but serious degree decreases along with the loads on tendons in general. (5) The more the number of anchors, the more the uniform loads. (6) The ultimate tensile resistance of tendons can get 0.8 times the characteristic value. (7) Pretensioning and high pretension loads can not improve the unevenness degree of the tendons, while the synchronous tension method can improve it.

Key words: synchronous tension; tendon; uneven load; tensile resistance; ultimate bonding resistance; deviation degree; stiffness coefficient; pretightening load

0 引言

业界普遍认识到, 由多条钢绞线或钢筋组成的锚杆筋体, 各锚筋等伸长量受力时, 锚筋之间受力是不均匀的。业界习惯上采用一个千斤顶对锚筋整体张拉, 各锚筋伸长量相同但受力不同; 如果锚杆不张拉或锁定值较低, 外荷载通过锚头施加到锚筋上, 各锚筋仍等伸长而不均匀受力; 锚杆张拉锁定后正常服役时, 外荷载大于锁定力后对各锚筋产生的伸长增量相同,

再次发生受力不均匀。为了消除受力不均匀带来的不良影响, 锚杆相关技术标准采用了一些措施: ①《建筑地基基础设计规范》^[1]在计算土层锚杆锚筋截面积时, 设置了张拉工艺控制系数 γ_p , 锚筋为单条时取1.0, 为多条时取0.9; ②《岩土锚杆(索)技术规程》^[2]建议锚杆最大试验荷载不超过杆体极限承载力的0.8倍;

③将锚筋抗拉安全系数普遍加大,如《建筑边坡工程技术规范》^[3]规定永久锚杆的为2.6~3.1;④几乎都要求锚杆正式张拉前先按设计抗拔力的0.1~0.2倍预张拉1~2遍,使锚筋拉直、平顺及锚固体系各构件各部位接触紧密。但各锚筋受力不均匀程度究竟如何,这些措施能否完全满足工程需求、是否合理,国内外有效研究成果并不多。

这种受力不均匀现象研究起来比较困难,业界以前一直缺少单独测试各锚筋受力状况的适合方法:①贴片应变片法用胶凝材料将应变片黏贴在锚筋上,应用最为普遍^[4],但安装工艺复杂、技术要求高、费用高,尤其是在钢绞线上贴片,成活率低且受偏轴应变转换影响,效果很难保证,故较多应用于科研试验,很难推广应用到工程;②引伸计法将内置应变片的弹簧片用卡箍固定在钢绞线上^[5],安装工艺较为简单,但引伸计需要一定的体积,工程锚杆通常很难提供,且测试费用较高,一般只用于科研试验;③饼形振弦式锚索测力计在工程中应用广泛,环测力计外围均有多个钢弦传感器(一般3~6个),受力均匀时各传感器测量到的频率基本相同,偏心受力时则不同,根据数据相差程度可以推测各锚筋受力不均匀程度^[6]。这种测试结果过于粗糙,只能定性而不能定量;④把锚筋截断、接入钢筋计也是一种办法,但技术要求高、工艺复杂、费用高,且只能用于钢筋而不能用于钢绞线,很少采用;⑤采用光纤传感器测量钢绞线应变是一种较新技术^[7],但目前多见于试验研究,鲜见于实际工程;⑥使用一个千斤顶对各锚筋单独张拉,可获得单个受力,但因位移值测量不准,误差较大。近些年来,主要用于荷载分散型锚索的多个千斤顶的同步张拉方法,如图1所示,在国内得到了越来越多的应用,正好可用于单独测试各锚筋受力,是本文试验研究锚筋受力不均匀状况的主要方法。本文即以锚固段注浆黏结的拉力型锚索为研究对象,采用不同张拉工艺进行现场拉拔试验,测试及分析研究拉力型锚索各锚筋受力不均匀的问题。



图1 多个千斤顶对各锚筋同步张拉

Fig. 1 Synchronous tension on tendons with multiple jacks

1 试验概况

试验在3个场地进行,场地一位于深圳市龙岗区平湖,场地二位于深圳市南山区水湾,场地三位于深圳市南山区西丽。考虑到试验结果的代表性、通用性及普遍指导性,试验均在实际基坑工程的工程锚索上进行,且没有刻意强调施工质量。各试验场地主要地层为残积土、全一强风化岩,各地层性状、锚索施工工艺及参数等可参见文献[8]。

锚筋均选用1860 MPa普通钢绞线,规格 ϕ^j 15.24,实测抗拉力265~280 kN,不低于《预应力混凝土用钢绞线》^[9]规定的合格标准值260 kN。按一条锚索中的锚筋条数及张拉方式,试验样本分为M2、M3、M3d、M5及M5t共5组,具体参数如表1所示。M2组设定为破坏性试验;其它组设定为非破坏性基本试验,钢绞线拉断、拔脱、位移不收敛或锚夹具破坏则停止加载,否则一直加载到最大试验荷载 P_m 。表中“整拉”指采用一个千斤顶对各锚筋多循环整体张拉,“单拉”指采用一个千斤顶对各锚筋单独张拉锁定后再张拉下一条;“同步”指采用多个千斤顶对各锚筋多循环等荷载同步张拉。表中的 l_z 为筋体自由段与张拉段长度之和, l_a 为锚固段长度, n 为每根锚索中的钢绞线条数。顺便指出,浆体一周边地层间的锚固与浆体一筋体间的黏结不是一回事,但对于注浆黏结的普通拉力型锚索而言相差不多,本文不严格区别。

表1 锚索参数

Table 1 Parameters of anchors

组别	n	场地	张拉法	l_a/m	l_z/m	试验数	P_m/kN
M2	2	一	整拉	3~6	10.5~7.5	20	250
M3	3	三	整拉	3~6	7.5~4.5	11	200
M5	5	一	整拉	8~10	15.5~13.5	6	200
M3d	3	二	单拉	5	18.5	6	230
M5t	5	一	同步	8~18	15.5~5.5	22	240

2 锚筋拉断现象

(1) 综合文献[2]“建议锚杆最大试验荷载不超过杆体极限承载力的0.8倍”等相关标准、实用性及实践经验,本文将钢绞线实际抗拉力低于 $0.8F_m$ 视为非正常偏低, $0.8\sim 0.95F_m$ 视为正常偏低, F_m 为钢绞线抗拉力极限标准值,取260 kN。本文认为抗拉力非正常偏低主要是施工质量欠佳造成的,通过提高施工水平能够避免,但正常偏低则是施工质量正常时的常见现象,很难再通过提高施工水平而改善。采用整拉法的M2组及M3组锚索中,锚筋实际抗拉力非正常偏低情况很普遍。①M2组20根锚索,有8根非正常拉

断: 1 根 (编号 M2-4-3) 的 2 条锚筋先后拉断, 有 7 根各拉断 1 条锚筋后另外 1 条随即拔脱, 非正常拉断比例达 40.0%, 破坏荷载 P_u 为 F_m 的 36.5%~69.2%, 平均 55.0%, 最低的 3 根尚达不到单条钢绞线的极限抗拉力, 如表 2 所示; 其余锚索中 2 根荷载达到 P_m 停止加载, 10 根发生锚筋拔脱 (并非锚固体拔出) 破坏。②M3 组 11 根锚索, 有 3 根各发生 1 条锚筋非正常拉断, 比例 27.3%, P_u 为 F_m 的 49.0%~73.3%, 平均 58.6%, 如表 2 所示; 其余锚索中有 1 根工具夹片崩脱, 有 7 根锚筋拔脱破坏。

表 2 整拉时锚筋拉断现象

Table 2 Failures of tendons under integral tensioning

P_u /kN	锚索编号	n	F_m /kN	$(P_u/F_m)/\%$
190	M2-5-5	2	520	36.5
240	M2-3-2、M2-6-5	2	520	46.2
300	M2-5-3、M2-5-4、M2-6-4	2	520	57.7
360	M2-4-3、M2-6-2	2	520	69.2
382	M3-3-2	3	780	49.0
418	M3-6-6	3	780	53.6
572	M3-6-1	3	780	73.3

(2) 采用整拉法的 M5 组 6 根锚索, 控制单索 P_m 为 200 kN, 较小, 没有发生锚筋拉断现象。

(3) 采用单拉法的 M3d 组 6 根锚索, 控制单索 P_m 为 228 kN, 达到 P_m 后停止加载, 没有发生钢绞线拉断现象, 有少量锚筋拔脱。

(4) 采用同步张拉的 M5t 组 22 个试验中, 没有锚筋非正常拉断现象, M10-2、M15-3、M15-5 及 M18-1 共 4 根锚索各有 1 条锚筋抗拉力正常偏低, 分别为 230, 220, 230 及 240 kN, 而其余钢绞线 P_m 均达到 240 kN 未破坏, 这与一些文献中单索实际抗拉力一般为 210~240 kN^[10]大致符合, 说明《岩土锚杆 (索) 技术规程》建议最大试验荷载不超过杆体极限承载力的 0.8 倍 (本试验取 210 kN) 是合理的, 同时也说明有的技术标准^[3]锚筋抗拉力安全系数可能偏高了。

对于单条锚筋而言, 实际抗拉力正常偏低及非正常偏低 (小于 260 kN) 的主因基本相同, 如: ①钻孔、杆体、锚座与千斤顶的角度偏差较大, 千斤顶荷载与各锚筋径向不同轴。②实际工程中, 各锚筋往往并非顺直、平行排列, 通常会扭转、交叉, 筋体自由段彼此之间产生干扰, 尤其在孔口附近, 缺少隔离架的隔离与对中, 可能会有锚筋相互接触摩擦, 导致其发生空间位置的重新分布、弯曲、挤压或卡住。③筋体加工制作、存放、安装或张拉过程中受到损伤。例如, 某条锚筋断口大致位于自由段与黏结段分界处, 有受挤压痕迹, 但无法确定何时、何处、何原因受到的外伤。④张拉过程中锚筋被锚座、钢垫板、锚夹具等物

体卡住、咬伤、刮伤、磨伤或受到挤压等损伤, 例如, 图 1 中最下方那支千斤顶所夹持锚筋即受到钢垫板卡压而拉断。试验中绝大部分锚筋断口位于钻孔口至千斤顶夹持点之间, 被混凝土锚座、钢垫板及锚夹具损伤后非正常或正常拉断。

3 筋浆黏结力偏低及离散性较大现象

3.1 筋浆极限黏结力偏低现象

M5t 组中, 不少锚索的锚筋与浆体极限黏结力 R 明显偏低: M8-6、M10-6、M10-1、M12-6、M12-5、M12-3、M12-4 及 M15-4 共 8 根锚索各有 1 条锚筋在 96, 120, 190, 96, 144, 160, 180 及 220 kN 时拔脱破坏, 比例高达 36.4%。业界通常认为 R 一般较大, 不会发生这种破坏, 然而本试验对浆体与筋体黏结问题的研究表明^[8]: 浆筋黏结强度标准值 f_s 为 0.744~0.664 MPa, 远低于相关标准^[2]推荐的 3.0~4.0 MPa。再以 M3d 组为例, 如表 3 所示, l_a 为 5 m 时, M3d-2 及 M3d-3 的 #3 钢绞线 R 仅 66 kN 及 94 kN, 平均 164~228 kN/条, 大部分低于 F_m , 故更容易发生锚筋从浆体中的拔脱破坏、即筋体与浆体的黏结强度破坏而不是钢绞线拉断破坏。

表 3 M3d 组各锚筋极限黏结力

Table 3 Ultimate bonding resistances of tendons in M3d group

锚筋序号	M3d-1	M3d-2	M3d-3	M3d-4	M3d-5	M3d-6
1	190	228	228	218	228	228
2	151	199	228	190	210	228
3	151	66	94	190	180	228
总值/kN	492	493	550	598	618	684
均值/kN	164	164	183	199	206	228
相对极差/%	23.8	98.8	73.2	14.1	23.3	0

3.2 筋浆极限黏结力离散程度较大现象

众所周知, 同类型同长度锚索锚固体抗拔力的离散程度可能很大; 鲜为人知的是, 同一锚索不同锚筋的极限黏结力离散程度可能也很大, 是各锚筋实际受力不均衡的一个重要原因。这种离散程度较大现象普遍存在。如 M3d 组, 相对极差 (极差/平均值) 超过 30% 的比例达 33%, 最大的 2 根锚索高达 98.8% 及 73.2%; M5t 组 l_a 较长、 R 较大, 锚筋拔脱破坏发生较少, 但相对极差超过 30% 的比例仍有 18%, 最高的 3 条分别为 63.5%, 63.5% 及 50.0%, 如后文所示。

3.3 极限黏结力偏低及离散程度较大原因分析

锚筋 R 偏低及离散程度较大的原因, 主要和孔内清净程度、积水状况及等待注浆时间等黏结成锚条件相关, 泥、水是主要因素^[8]: 孔内积水、泥土或岩屑等杂质很难排除干净, 土层钻孔内有时还会存留有泥浆, 浆体中难免夹有泥土岩屑等杂质, 洗孔不干净时

浆体甚至可能局部为水泥土,水灰比为了容易泵送通常比较大,且可能还被孔内积水在不同程度上稀释;锚筋置放到孔洞中时表面通常黏附着水、泥、粉屑等杂质,注浆时很难被置换干净,可能导致筋体表面局部附着泥渣或泥皮而降低黏结强度;锚筋甚至会在孔壁松软时沉入孔壁,时间越长孔壁越松软,或因钻孔不直、下锚偏斜及钢绞线弹性弯曲等原因紧贴孔壁,导致局部无浆液包裹。由于不良因素干扰程度不确定性及差异性较大,导致各锚筋 R 偏低及离散程度较大。

3.4 极限黏结力偏低与锚筋非正常拉断的关系

浆筋极限黏结力 R 偏低及离散程度较大,是表2中较多锚筋被非正常拉断的一个主要原因。

(1) 通常, l_a 较长, R 大于 F_m ,不会发生锚筋拔脱破坏,业界以往的研究成果及经验主要集中于此。整拉时,钢绞线受力不均匀,受力较大的那条先达到 F_m 而拉断,将荷载瞬间转移到其余钢绞线上;钢绞线只有2条时,剩下那条因抗拉力不足随即拉断,例如M2-4-3锚索;不只2条时,其余钢绞线可能尚未达到 F_m 而没有破坏,例如表2中的M3组那3例。

(2) l_a 较短时,可能会发生锚筋拔脱破坏。只有2条钢绞线时, R 较大的锚筋决定了锚索的破坏形式:① R 小于 F_m 时发生锚筋拔脱破坏,例如M2-4-5、M2-5-5及M2-5-6;② R 大于 F_m 且锚筋实际抗拉力正常时发生锚筋正常拉断破坏,M2-5-3、M2-5-4、M2-6-4及M2-6-2很可能发生了这种破坏,不过也可能发生了下述第3种破坏;③ R 大于 F_m 但锚筋实际抗拉力非正常偏低,则发生锚筋非正常拉断破坏,例如M2-5-5、M2-3-2及M2-6-5,2条钢绞线的破断力之和甚至达不到1条钢绞线的极限抗拉力。2条钢绞线的破坏顺序,取决于其张拉时伸长量的大小: R 较小的那条如果伸长量比较小,则先发生锚筋拔脱破坏,反之则在另1条锚筋破坏后再发生拔脱破坏。

这种因 R 小于 F_m 而造成锚筋受力不均匀情况,业界以往的研究成果鲜有涉及。 R 小于 F_m 现象不仅在 l_a 较短时容易发生,由于锚索中普遍存在着锚筋 R 孤低现象,在 l_a 较长时也会发生,因此造成的锚筋受力不均匀情况较为普遍。

4 同步张拉试验及拟合结果

4.1 拟合公式

等荷载同步张拉时,各锚筋位移不等,受力相同,可利用同步张拉数据,拟合出整体张拉时各锚筋的受力不均匀状况,原理为:锚筋受力为其刚度系数与位移增量之积。各锚筋刚度系数可通过同步张拉法分别测得,拟合为整体张拉状况时,锚筋总受力为同步张拉时各锚筋受力之和,锚筋总刚度系数为各锚筋刚度

系数之和,以此可反算出拟合整体张拉时的位移增量,该位移增量与各锚筋的刚度系数之积,即该锚筋在拟合整体张拉时的单独受力,其与锚筋平均受力之差,即为不均匀受力。具体拟合步骤如下:

(1) 利用同步张拉各锚筋荷载-位移($P-s$)数据,按下式计算各锚筋抗拉刚度系数 k_i :

$$k_i = \frac{P_i - P_0}{s_i - s_{0i}} \quad (1)$$

式中 k_i 为第 i 条钢绞线抗拉刚度系数(kN/mm); P_i 为最大试验荷载或破坏荷载(kN); P_0 为试验初始荷载(kN); s_i 为相应于 P_i 时的锚头位移(mm); s_{0i} 为相应于 P_0 时的锚头初始位移(mm)。

(2) 拟合整拉时,锚索刚度系数 k 为各锚筋刚度系数 k_i 之和。

(3) 拟合整拉时,拟合锚头位移 S 按式(2)计算, n 为锚筋数量, P_p 为单条钢绞线的拟合整拉荷载, S 为锚索达到 P_p 时的位移:

$$S = \frac{n(P_p - P_0)}{k} + S_0 \quad (2)$$

S_0 为锚索相应于初始荷载 nP_0 时的拟合初始位移,

$$S_0 = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_{0i}} \quad (3)$$

(4) 用 S 代替 s_i , S_0 代替 s_{0i} ,用式(1)反算出 P_i ,令其为 P'_i ,此时 P'_i 即为拟合整体张拉时该条锚筋的理论单独受力。

式(1)采用总位移值计算刚度系数。没有采用弹性位移值,因为弹性位移如果采用实测总位移与实测塑性位移之差,塑性位移测量准确度较低,故误差较大;如果采用弹性模量计算弹性位移值,误差更大;而且采用弹性位移计算过于复杂。另外, S 及 S_0 也可取 s_i 及 s_{0i} 的平均值,不采用上式拟合,经试算,对相对偏离极差会产生约0~7%的误差,可被工程接受。

4.2 承载能力极限状态

工程中应考虑锚筋在两种状态下的受力性状:①正常使用极限状态,指锚索承载力达到设计拉力(标准组合的效应设计值),该拉力为长期荷载,考察此状态下锚筋受力不均匀情况可帮助了解锚索长期工作性能及判断是否有潜在风险;②承载能力极限状态,主要指试验时锚索承载力达到最大张拉荷载,一般为1.5~2.0倍设计拉力,该荷载为瞬时荷载,考察此时锚筋受力不均匀状态可帮助了解锚筋的承载能力安全状况以及指明工程质量的改进方向。

M5t组试验中,有16个荷载达到 P_m 或破坏,试验数据如表4所示。表中:① s_{0i} 取最后一遍张拉循环的位移值,以尽量消除塑性位移的影响;如取第一遍

表 4 M5t 组试验结果 (一)

Table 4 Results of M5t group 1

锚索 编号	s_i/mm															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	100.05	160.30	139.26	121.10	170.70	107.36	118.87	155.68	131.92	130.37	104.32	120.12	137.50≈	138.58	153.32	150.66
#2	94.85	140.78	161.22	119.15	173.46	106.98	114.24	173.64	117.74	133.26	115.64	124.15	118.12	151.61	167.68	124.87
#3	106.41	140.80	179.42	120.13	179.92	181.88*	122.89	164.32	110.13	137.22≈	110.90	128.47	123.43	144.31	158.26	135.36
#4	89.74	200.00*	174.43	114.94	163.28	118.77	132.37	161.24	149.70≈	23.018*	121.86	128.63	105.14	158.42	163.80	132.22
#5	100.69	123.00	138.30≈	115.77	165.12	127.21	133.32	150.78	106.95	172.50	113.10	120.96	115.97	125.94	166.78	137.83
平均值	56.86	114.38	85.70	78.95	100.49	100.83	70.81	94.36	90.49	110.66	82.80	74.01	87.17	95.83	96.01	86.22
相对极差/%	17.0	50.3	25.9	5.2	9.8	58.3	15.3	14.2	34.7	62.1	15.5	6.8	27.0	22.6	8.90	18.9
锚索 编号	s_{0i}/mm															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	41.05	93.99	66.73	53.17	78.58	61.70	51.84	73.18	69.26	63.19	70.00	60.64	94.10≈	80.90	69.48	75.58
#2	39.45	91.05	69.34	61.95	81.11	68.73	57.99	85.65	71.08	71.28	64.02	63.47	75.18	93.51	85.94	67.85
#3	46.22	90.80	70.10	66.42	83.82	100.61*	62.71	77.92	66.52	71.32	61.34≈	66.71	77.17	84.01	83.11	75.00
#4	38.47	126.13*	66.01	64.65	70.15	65.40	61.18	75.39	73.06≈	126.64*	6.61	68.40	65.53	85.99	80.59	66.07
#5	41.22	70.59	55.41≈	57.08	70.70	73.53	51.78	64.78	57.98	111.92	61.97	62.43	73.49	69.08	81.32	68.06
平均值	28.32	70.79	45.42	44.92	52.88	48.03	37.64	54.16	40.34	56.43	42.65	41.97	51.85	58.80	56.79	50.00
相对极差/%	18.8	58.8	22.4	21.8	17.8	52.6	19.1	27.7	22.3	70.9	13.6	12.1	37.1	29.5	20.6	13.5
锚索 编号	$k_i/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	3.63	2.53	2.87	2.89	2.45	3.90	3.31	2.69	2.59	3.73	4.72	3.73	3.73	3.85	2.65	2.96
#2	3.86	3.38	2.26	3.43	2.45	4.65	3.95	2.52	3.47	3.66	3.14	3.66	3.77	3.82	2.72	3.89
#3	3.56	3.36	1.90	3.65	2.35	2.19	3.69	2.57	3.71	3.59	3.27	3.59	3.50	3.68	2.95	3.68
#4	4.17	2.27	1.92	3.90	2.43	3.34	3.12	2.59	2.11	3.69	2.69	3.69	4.09	3.07	2.67	3.36
#5	3.60	3.21	2.51	3.34	2.39	3.32	2.72	2.58	3.31	3.79	3.17	3.79	3.81	3.90	2.60	3.18
平均值	3.76	2.95	2.29	3.44	2.41	3.48	3.36	2.59	3.04	3.69	3.40	3.69	3.78	3.66	2.72	3.41
相对极差/%	16.4	37.4	42.1	29.4	4.2	70.8	36.5	6.5	59.8	5.4	59.8	5.4	15.5	22.9	13.1	27.4
锚索 编号	拟合 P_i/kN															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	202.7	182.0	259.7	178.4	213.2	233.6	207.4	217.5	181.4	213.5	284.8	212.1	207.5≈	219.7	205.1	184.3
#2	215.3	238.7	207.5	209.3	212.7	276.2	243.7	205.0	237.4	229.9	195.4	208.2	209.5	218.2	209.9	237.0
#3	198.9	237.5	176.3	221.9	204.9	137.4*	228.9	208.5	252.7	226.8	202.8≈	204.9	195.8	210.9	226.8	224.9
#4	231.8	164.6*	177.7	236.1	211.0	201.9	196.3	209.7	151.6≈	144.9*	170.0	209.6	225.6	178.6	206.6	206.8
#5	201.2	227.1	228.7≈	204.3	208.3	200.8	173.7	209.4	227.0	234.8	197.1	215.2	211.6	222.6	201.6	197.0
平均值	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
相对极差/%	15.7	35.3	39.7	27.5	3.9	66.1	33.3	5.9	42.8	42.8	54.7	4.9	14.2	20.9	12.0	25.1
变异系数	0.065	0.163	0.168	0.102	0.016	0.242	0.131	0.022	0.177	0.177	0.208	0.019	0.051	0.086	0.047	0.101
锚索 编号	相对偏离															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	-3.5	-13.3	23.7	-15.0	1.5	11.3	-1.2	3.6	-13.6	1.7	35.6	1.0	-1.2	4.6	-2.3	-12.2
#2	2.5	13.7	-1.2	-0.4	1.3	31.5	16.0	-2.4	13.0	9.5	-7.0	-0.8	-0.2	3.9	0	12.9
#3	-5.3	13.1	-16.0	5.7	-2.4	-34.6	9.0	-0.7	20.3	8.0	-3.4	-2.4	-6.8	0.4	8.0	7.1
#4	10.4	-21.6	-15.4	12.4	0.5	-3.8	-6.5	-0.1	-27.8	-31.0	-19.1	-0.2	7.4	-14.9	-1.6	-1.5
#5	-4.2	8.2	8.9≈	-2.7	-0.8	-4.4	-17.3	-0.3	8.1	11.8	-6.2	2.5	0.8	6.0	-4.0	-6.2
相对极差/%	15.7	35.3	39.7	27.5	3.9	66.1	33.3	5.9	48.2	42.8	54.7	4.9	14.2	20.9	12.0	25.1

张拉循环的位移, 经试算, 对相对偏离极差会产生约 0~9% 的误差; ②试验初始荷载为单筋 10~18 kN; ③相对偏离指拟合整拉时各锚筋受力与平均受力的相对差, 即: 相对偏离=(各锚筋受力-平均受力)/平均受力; 偏离度指相对偏离的绝对值; ④锚索编号“8-2”中的“8”指 M5t 组的 l_a 为 8 m, “2”为该类型锚索的编号, 依此类推(表中锚索编号略掉了“M5t”

字样, 下同); ⑤位移平均值分别指 S 及 S_0 ; ⑥对于相对偏离, “相对极差”指极差; ⑦表中标志“*”为拔脱破坏, 标志“≈”为拉断破坏。

4.3 正常使用极限状态

锚筋设计抗拉力(正常使用极限状态)取文献[1, 3]等技术标准中规定的锚筋设计最大抗拉力, 一般约可取 $0.5F_m$, 即单索 130 kN。因工程中绝大部分锚索

表5 M5t 组试验结果 (二)

Table 5 Results of M5t group 2

锚索 编号	s_i/mm															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	56.59	120.59	73.88	73.26	104.82	91.39	64.37	87.73	89.58	87.14	71.66	67.11	102.74≈	90.81	86.83	91.86
#2	55.50	116.05	97.63	79.49	107.21	97.40	66.19	106.60	87.71	93.24	84.42	70.60	83.08	103.76	98.82	77.93
#3	61.24	115.45	101.22	83.24	121.59	143.44*	70.47	93.49	82.08	100.30	79.52≈	74.57	86.75	95.38	93.81	86.48
#4	52.20	152.92*	87.69	81.71	96.52	108.57	75.87	91.91	102.76≈	159.26*	87.35	75.82	73.91	97.94	92.33	78.33
#5	57.66	95.77	68.53≈	75.92	106.25	112.46	66.21	80.22	77.41	135.10	81.57	68.78	80.97	79.88	93.92	82.93
平均值	56.86	114.38	85.70	78.95	100.49	100.83	70.81	94.36	90.49	110.66	82.80	74.01	87.17	95.83	96.01	86.22
相对极差/%	16.0	47.6	38.1	12.7	23.4	47.0	16.8	28.7	28.8	62.7	19.4	12.2	33.7	25.5	12.9	16.7
锚索 编号	s_{0i}/mm															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	27.67	71.98	48.82	36.84	53.88	37.72	32.77	52.43	35.71	36.37	46.30	38.14	69.76≈	57.85	47.42	53.70
#2	26.77	70.92	53.69	46.19	57.28	49.68	38.64	68.19	46.81	46.52	44.98	42.06	51.65	70.43	62.23	48.17
#3	33.18	71.07	49.20	52.21	62.96	54.86*	43.30	56.60	43.84	54.59	40.84≈	45.09	54.41	61.77	60.29	55.32
#4	26.67	113.56*	42.39	51.69	46.89	49.61	43.09	56.32	46.64≈	102.84	40.81	46.02	41.72	61.18	57.94	46.64
#5	28.24	50.61	36.95≈	41.65	46.90	52.40	33.18	43.19	32.98	86.41	40.97	39.62	49.04	47.58	58.67	47.41
平均值	28.32	70.79	45.42	44.92	52.88	48.03	37.64	54.16	40.34	56.43	42.65	41.97	51.85	58.80	56.79	50.00
相对极差/%	22.8	83.2	36.2	33.6	30.0	35.1	27.6	45.2	33.6	101.7	12.8	18.7	52.6	38.2	25.8	17.3
锚索 编号	$k_i/(kN \cdot mm^{-1})$															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	4.08	2.47	4.31	3.08	2.55	2.42	3.23	2.89	1.89	2.01	4.02	3.52	3.09	3.09	2.59	2.67
#2	4.11	2.66	2.46	3.36	2.60	2.72	3.70	2.66	2.49	2.18	2.59	3.57	3.25	3.06	2.79	3.43
#3	4.21	2.70	2.08	3.61	2.22	1.47	3.75	2.76	2.67	2.23	2.64	3.46	3.15	3.03	3.04	3.27
#4	4.62	3.05	2.38	3.73	2.62	2.20	3.11	2.87	1.82	1.81	2.19	3.42	3.17	2.77	2.97	3.22
#5	4.01	2.66	3.42	3.27	2.19	2.16	3.09	2.75	2.30	2.09	2.51	3.50	3.19	3.16	2.89	2.87
平均值	4.21	2.71	2.93	3.41	2.44	2.20	3.38	2.79	2.23	2.07	2.79	3.50	3.17	3.02	2.86	3.09
相对极差/%	14.5	21.4	76.2	19.2	17.6	57.2	19.7	8.4	38.0	20.5	65.6	4.3	4.8	12.7	15.9	24.4
锚索 编号	拟合 P_i/kN															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	126.4	119.6	185.6	118.6	135.5	141.9	125.1	134.2	112.9	127.0	179.5	130.8	127.2≈	132.6	119.5	114.8
#2	127.2	127.9	111.0	128.4	138.0	157.9	140.8	124.8	143.1	136.4	121.8	132.5	132.6	131.3	127.3	142.1
#3	130.0	129.8	95.6	136.8	119.6	91.5*	142.5	129.2	151.8	139.0	123.9≈	128.9	129.4	130.4	137.3	136.5
#4	141.9	144.9*	108.0	140.9	138.7	130.4	121.2	133.2	109.1≈	116.0*	106.0	127.7	129.9	120.8	134.3	134.6
#5	124.5	127.8	149.8≈	125.2	118.3	128.3	120.4	128.7	133.1	131.6	118.9	130.1	130.8	134.9	131.5	122.0
平均值	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
相对极差/%	134.4	19.4	69.2	17.2	15.7	51.0	17.0	7.2	32.8	17.7	56.5	3.7	4.1	10.9	13.7	21.0
变异系数	0.053	0.071	0.285	0.069	0.078	0.189	0.083	0.029	0.143	0.070	0.219	0.014	0.015	0.042	0.053	0.086
锚索 编号	相对偏离															
	8-2	10-1	10-2	12-1	12-2	12-4	15-1	15-2	15-3	15-4	15-5	15-6	18-1	18-2	18-3	18-4
#1	-2.7	-8.0	42.8	-8.7	4.2	9.2	-3.8	3.2	-13.1	-2.3	38.1	0.6	-2.1≈	2.0	-8.1	-11.7
#2	-2.1	-1.6	-14.6	-1.2	6.1	21.4	8.3	-4.0	10.0	4.9	-6.3	1.9	2.0	1.0	-2.1	9.3
#3	0	-0.1	-26.4	5.2	-8.0	-29.6	9.6	-0.7	16.7	6.9	-4.7	-0.9	-0.5	0.3	5.7	5.0
#4	9.2	11.4	-16.9	8.4	6.7	0.3	-6.8	2.5	-16.0≈	-10.7*	-18.5	-1.8	-0.1	-7.1	3.3	3.5
#5	-4.3	-1.7	15.2	-3.7	-9.0	-1.3	-7.4	-1.0	2.4	1.2	-8.6	0.1	0.6	3.8	1.1	-6.2
相对极差/%	13.4	19.4	69.2	17.2	15.7	51.0	17.0	7.2	32.8	17.7	56.5	3.7	4.1	10.9	13.7	21.0

采用单循环法张拉锁定,故 s_{0i} 取第一遍张拉循环的位移值, s_i 取峰值荷载最早接近 130 kN 的那遍循环的相应位移值,以更接近工程实际。与表 4 对应的 M5t 组 16 个试验数据如表 5 所示。

5 试验数据分析

以变异系数为指标,130 kN 及 210 kN 时各锚索锚筋不均匀受力分布情况如表 6 所示。如果以偏离度及相对极差为指标,210 kN 时,偏离度超出 20%的锚索有 6 根,相对极差超过 30%的有 7 根,比例分别为

37.5%及 43.8%,与表 6 结果几乎一致。

表 6 锚索受力不均匀分布情况

Table 6 Uneven distribution of anchor loads

锚筋受力 变异系数	受力不均 匀程度	承载能力 极限状态		正常使用 极限状态	
		锚索数量 /根	比例 /%	锚索数 量/根	比例 /%
>0.15	严重	6	37.5	3	18.8
0.10~0.15	一般	3	18.8	1	6.3
0.05~0.10	轻微	3	18.8	6	37.8
<0.05	无	4	25.4	4	25.0

分析表 2~6 数据, 可以得出:

(1) 整拉时各锚筋受力严重不均匀现象比较普遍, 明显降低了锚筋极限承载能力。

(2) 锚筋拔脱的 3 条锚索, 锚筋受力变异系数大于 0.15, 相对极差超过 30%且拔脱锚筋偏离度超过 20%; 210 kN 时变异系数小于 0.15, 相对极差超过 30%但偏离度不大于 20%的锚索以及相对极差不超过 30%的锚索均没有发生拔脱破坏, 故可以变异系数 0.15, 或相对极差 30%且偏离度 20%, 作为判断锚筋拔脱破坏时受力严重不均匀的定量指标。

(3) M5t 组采用同步张拉法, 各锚筋单独受力, 锚筋拉断与否似乎不应与其它锚筋关联。然而, 锚筋拉断的 4 条锚索, 有 3 条满足上述锚筋受力严重不均匀判断条件, 即 210 kN 时变异系数大于 0.15, 相对极差超过 30%, 且有锚筋偏离度最大(正相对偏离)超过 20%但并非被拉断锚筋。同时, 210 kN 时变异系数小于 0.15, 相对极差超过 30%但偏离度不大于 20%的锚索以及相对极差不超过 30%的锚索共 10 根, 只有 M5t-18-1 拉断。这并非偶然, 说明锚筋拉断破坏也与受力不均匀程度相关, 即变异系数 0.15, 或相对极差 30%且偏离度 20%, 也可以作为判断锚筋拉断破坏时受力严重不均匀的定量指标。

M5t-18-1 锚索 210kN 时变异系数仅 0.051, 相对极差 14.2%, 最大偏离(#4 筋) 7.4%, 受力较为均匀, #1 锚筋拉断主因可能是如前所述的抗拉力正常偏低。但因其它锚筋偏离为负或几乎为零, 而#4 筋偏离度远远高出, 故也不排除#1 筋实际抗拉力受到了#4 筋干扰而下降, 即同样存在锚筋受力严重不均匀的可能性。

分析同步张拉时正相对偏离最大锚筋并非拉断锚筋的原因: 如前所述, 锚筋之间可能会接触、相互挤压, 最后一级荷载下, 刚度最大的锚筋(正相对偏离最大者)位置最稳定, 导致其它锚筋发生空间位置的重新分布、弯曲、挤压或卡住, 受干扰最严重者实际抗拉力降低而率先拉断。但整体张拉时, 各锚筋等量伸长受力不均匀, 刚度最大者将率先拉断。

(4) 130 kN 时, 锚筋受力偏离度超出 20%的锚索有 5 根, 相对极差超过 30%的有 6 条, 变异系数大于 0.15 的有 3 根, 比例分别为 31.3%, 37.5%及 18.8%, 说明锚索正常工作时各锚筋受力严重不均匀现象也比较普遍, 但因受力总体而言较小, 所以不太可能发生锚筋破坏。另外, 为了荷载损失后的锚筋持有荷载不低于设计荷载, 有的技术标准建议按 1.1 倍设计荷载进行锁定, 表 4~6 数据分析表明这种作法通常不会导致锚筋极限承载能力降低。

(5) 刚度系数具有很大的随机性及不确定性, 同

一锚索不同锚筋之间差异很大, 不同锚索之间差异也很大。M5t-12、M5t-15 及 M5t-18 类型锚索的锚筋自由长度分别为 11.5, 8.5 及 5.5 m, 130 kN 时总刚度系数平均值分别为 13.40, 13.96 及 15.18 kN/mm (M5t-8 及 M5t-10 锚索数量太少, 没有参与统计); 16 条锚索 130, 170, 210 kN 时总刚度系数平均值分别为 14.62, 15.65 及 15.74 kN/mm, 说明刚度系数大体上随着锚筋自由长度的减短而增加, 随着受力的增加而增加, 但数据关联性均不好, 例如 210 kN 时, M5t-15 类型比 M5t-12 类型的总刚度系数还要略低一点。随着受力的增加, 有 13 根、81.3%锚索的锚筋刚度系数的排列顺序发生变化, 仅 3 根未发生变化。以 M5t-10-1 为例, 各级荷载下锚筋刚度系数从高到低排列顺序如表 7 所示。锚筋刚度系数排序随荷载增加而随机变化, 无规律性, 也与是否产生破坏或锚筋自由长度无关联性, 说明了影响锚筋刚度系数的各因素具有很强随机性。

表 7 M5t-10-1 各锚筋刚度系数排序

Table 7 Order of stiffness of tendons in M5t-10-1 anchor

排序	1	2	3	4	5
130 kN	#4 锚筋	#3 锚筋	#2 锚筋	#5 锚筋	#1 锚筋
170 kN	#5 锚筋	#2 锚筋	#1 锚筋	#3 锚筋	#4 锚筋
210 kN	#1 锚筋	#5 锚筋	#2 锚筋	#4 锚筋	#3 锚筋

(6) 随着受力的增加: ①有的锚筋受力偏离度增加, 有的则减少, 有的相对偏离反向变化(即从正偏离转为负偏离或者相反), 几乎没有不变化的。以 M5t-10-1 为例, 其偏离程度变化情况如图 2 所示, 其中#4 锚筋相对偏离变化 33%, 发生拔脱破坏。②130 kN 时变异系数均值为 0.094, 210 kN 时为 0.112, 说明不均匀程度总体上随着受力的增加而有所加剧。③130 kN 时锚索变异系数最高的为 0.285, 最高的 3 个平均 0.231; 210 kN 时最高的为 0.242, 最高的 3 个平均 0.217, 即偏离的严重程度有所下降, 体现了锚筋受力的自我调节能力。

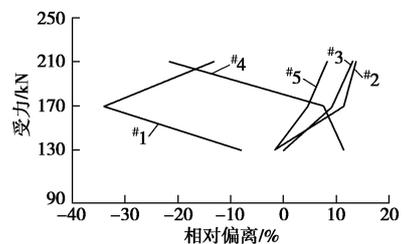


图 2 M5t-10-1 各锚筋受力相对偏离情况

Fig. 2 Relative deviations of loads on tendons in M5t-10-1

(7) 采用同步张拉法或单拉法的锚筋, 单筋受力均超过 200 kN, 没有发生非正常拉断现象, 而采用整拉法的锚筋非正常拉断现象比较普遍, 说明整拉时各锚筋受力不均匀程度比较严重, 这与同步张拉拟合结

果一致,但后者能够定量分析出受力不均匀程度。

(8) 整拉法锚筋为2条时大量被拉断,为3条时有少量被拉断,为5条时没有拉断,说明锚筋数量越多受力均匀性越好,同时也说明有的技术标准^[1]多条锚筋时计取0.9倍折减系数对于锚索不一定合适。

6 锚筋受力不均匀原因及解决办法

在浆筋极限黏结力正常及锚筋抗拉力正常时,各锚筋整体张拉受力不均匀的主因,即伸长量的强行一致。锚筋材质相同时,锚筋受力相同时伸长量不应一致,原因通常有:

(1) 各锚筋初始位移不同。锚索成孔、下料、编制及安装时不可避免要产生误差,各锚筋实际自由长度不同,松紧程度不同;张拉千斤顶通常采用穿心式,安装时,自重会将锚索压弯,为减少因弯曲而产生的误差,通常先安装1~2条钢绞线的夹具,然后加载,该锚筋受力后伸直,带动其余钢绞线及千斤顶伸直,再给其余钢绞线上夹具,整体加载至初始荷载,测量锚头初始位移,可见,千斤顶安装及加载工艺也会造成各锚筋初始受力、变形及刚度系数不同。

(2) 各锚筋不顺直、扭转、钻孔弯曲影响、空间位置的调整变化、筋体自由长度不同等,造成刚度系数不同。

(3) 各锚筋孔道弯曲、扭转程度不同,造成锚筋轴向偏心阻力不同;筋体自由段与隔离套管的润滑程度不同导致摩擦阻力不同;各锚筋与千斤顶荷载的偏心程度不同,造成施加到锚筋上的轴向荷载不同;受隔离架等的阻力不同,等等,这些因素导致各筋体所受阻力不同,即部分千斤顶荷载被各种阻力所消耗,没有全部施加到筋体上。

(4) 锚筋之间的相互接触、摩擦、挤压,对各锚筋影响程度不同,如前所述。

(5) 施工质量欠佳时锚夹片可能会滑丝,黏结段锚筋在锚固体中可能会滑移等。这些因素都具有较大的不确定性及随机性,导致锚筋实际伸长量、受力不均匀程度及分布也具有较大的不确定性及随机性。

为了改善受力不均匀状况,技术标准都要求预张拉;如果方法有效,预紧力显然越高越好,于是有标准建议提高至0.5倍设计值。循环张拉时,如果采用下一遍循环的最低荷载(与初始荷载相同)及相应位移作为初始荷载及初始位移进行受力分析计算,则可将上一循环的峰值荷载视为下一循环的预紧力。按此思路,M5t组拟合整体张拉时,预紧力达到120~160 kN后,下一循环峰值荷载130 kN时各锚筋受力如表8所示。预紧力为40~120 kN时的结果类似。

对比表4,5可知,预张拉并没有改善锚筋不均匀受力状况,提高预紧力高达1.2倍设计值也没起到什么作用。分析原因为:决定锚筋受力不均匀的主要因素,如刚度系数、几何尺寸及空间分布、锚筋之间的位置关系、偏心荷载及阻力等,是锚筋的固有属性,预张拉并不能使其改变;预张拉仍为整体张拉,最主要效果是加大了锚筋的塑性位移,减少了锚筋的整体松弛程度,但并没有实质上减少各锚筋之间的位移差,也就改善不了锚筋受力不均匀状况。

表8 预紧力较大时锚筋受力

Table 8 Loads on anchors under large pretension loads

锚索 编号	#1 锚筋 /kN	#2 锚筋 /kN	#3 锚筋 /kN	#4 锚筋 /kN	#5 锚筋 /kN	均值 /kN	相对 极差/%	变异 系数
8-2	127.56	129.74	126.81	143.06	122.84	130	15.6	0.059
10-1	125.63	132.90	134.62	124.82	132.04	130	7.5	0.034
10-2	200.34	102.18	95.57	112.37	139.54	130	80.6	0.329
12-1	119.30	131.12	139.95	134.31	125.32	130	15.9	0.061
12-2	137.53	138.16	117.21	137.45	119.65	130	16.1	0.082
12-4	140.94	167.72	102.48	119.70	119.16	130	50.2	0.193
15-1	123.57	153.88	147.22	117.04	108.29	130	35.1	0.151
15-2	137.61	117.76	132.15	130.92	131.55	130	15.3	0.056
15-3	117.03	146.69	151.22	95.53	139.53	130	42.8	0.179
15-4	129.69	136.47	133.75	110.44	139.65	130	22.5	0.089
15-5	175.10	121.79	126.62	106.32	120.17	130	52.9	0.202
15-6	133.02	127.81	127.65	128.66	132.85	130	4.1	0.021
18-1	142.02	126.47	123.66	129.30	128.55	130	14.1	0.054
18-2	135.27	136.20	131.41	110.92	136.20	130	19.4	0.083
18-3	122.69	127.62	142.99	129.16	127.54	130	15.6	0.059
18-4	110.11	150.62	139.60	131.56	118.10	130	31.2	0.125
均值							27.4	0.111

同步张拉或单拉法能够对各锚筋受力及变形单独控制,受力不均匀现象基本可以消除;而单拉法存在着应力叠加的缺陷^[11],故最好选用同步张拉法。

7 结 论

采用同步张拉法、整体张拉及单拉法,在3个场地的基坑工程中进行了65组土层锚索拉拔试验。试验锚索为工程锚索,没有刻意强调施工质量,代表了基坑工程的普遍质量水准,故试验结果具有普遍指导意义。结果表明:

(1) 锚筋数量较少时,锚筋实际抗拉力偏低是锚筋受力不均匀的一个重要原因。

(2) 锚筋黏结长度较短、数量较少时,浆筋极限黏结力偏低是锚筋受力不均匀的一个重要原因。锚固长度较长时,因浆筋极限黏结力偏低而造成的锚筋受力不均匀现象可基本消除。

(3) 锚筋实际极限抗拉力可取标准值的0.8倍。

(4) 施工质量普通的锚索,约40%存在锚筋受力严重不均匀现象,明显降低了锚筋极限承载能力。

(5) 锚筋受力的变异系数0.15,或相对极差30%且偏离度20%,可作为判断锚筋承载能力极限状态下受力严重不均匀程度的定量指标。

(6) 锚索正常工作时各锚筋受力严重不均匀现

象也比较普遍, 但通常不会造成锚筋破坏。

(7) 锚筋刚度系数具有很大的随机性及不确定性, 大体上随着筋体自由长度的减短而增加, 随着受力的增加而增加。

(8) 随着受力的增加, 锚筋受力不均匀程度总体上有所增加, 但严重程度有所下降。

(9) 锚筋数量越多, 受力越均匀。

(10) 整体张拉时预张拉及提高预紧力不能改善锚筋受力不均匀程度, 同步张拉法才能。

最后指出: 对于边坡锚索、抗浮锚索等永久性锚索及岩石锚索等, 其施工规范程度及质量水准一般来说要高于基坑土层锚索, 本文结论不一定完全适用。

参考文献:

- [1] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] CECS 22:2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 2005. (CECS 22:2005 Technical specification for ground anchor[S]. 2005. (in Chinese))
- [3] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [4] 亢景付, 艾 军, 刘 颖, 等. 用应变片测定钢绞线张拉力的理论修正[J]. 建筑技术, 2005(4): 285 - 286. (HANG Jing-fu, AI Jun, LIU Ying, et al. Theoretical revision of tensioning force of steel strand measured with resistance strain gages [J]. Architecture Technology, 2005(4): 285 - 286. (in Chinese))
- [5] 王建华, 杨莹浩, 康建强, 等. 钢绞线拉力测量传感器的研制[J]. 传感器与微系统, 2010(29): 83 - 85. (WANG Jian-hua, YANG ying-hao, KANG Jian-qiang, et al. Development of tension measurement for strand wire[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010(29): 83 - 85. (in Chinese))
- [6] 黄伟强, 张晓东, 吴 强, 等. 基坑支护锚索的钢绞线受力不均匀性分析[J]. 技术论坛, 2017(14): 277 - 278. (HUANG Wei-qiang, ZHANG Xiao-dong, WU Qiang, et al. Nonuniformity analysis of load about anchor strand in foundation pit[J]. Technical Forum, 2017(14): 277 - 278. (in Chinese))
- [7] 高俊启, 施 斌, 张 巍, 等. 分布式光纤传感器监测预应力锚索应力状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5604 - 5610. (GAO Jun-qi, SHI Bin, ZHANG Wei. Experimental study on monitoring of load for preloaded anchorage cable using distributed fiber optic sensor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5604 - 5610. (in Chinese))
- [8] 付文光, 卓志飞, 任晓光. 土层锚索浆体与筋体黏结强度的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1300 - 1308. (FU Wen-guang, ZHUO Zhi-fei, REN Xiao-guan. Tests and study about bond strength between grout and tendon of soil anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1300 - 1308. (in Chinese))
- [9] GB/T 5224—2014 预应力混凝土用钢绞线[S]. 2014. (GB/T 5224—2014 Steel strand for preloaded concrete[S]. 2014. (in Chinese))
- [10] 赵庆彪, 马念杰. 煤巷小孔径预应力锚索的工程特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2004(32): 9 - 11. (ZHAO Qing-biao, MA Nian-jie. Analysis on engineering characteristics of small diameter pre-loaded anchor for seam road way[J]. Coal Science and Technology, 2004(32): 9 - 11. (in Chinese))
- [11] 付文光, 胡建林. 荷载分散型锚杆张拉方法探讨与研究[J]. 铁道工程学报, 2011(9): 40 - 44. (FU Wen-guang, HU Jian-lin. The discussion and research on tensile methods for load-dispersive anchor[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(9): 40 - 44. (in Chinese))