

锚杆加固机理的试验研究现状

方从严 卓家寿

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 :从锚杆形状和灌浆体特性对锚杆抗拔承载力的影响,锚杆的倾斜角、节理面的粗糙度、锚杆长度及直径等加锚设计参数对加固效果的影响,锚杆加固对岩体的弹性模量、抗压强度、内摩擦角、凝聚力和渗透系数等岩体参数的影响 3 个方面介绍了国内外相关的试验研究成果,讨论了岩体锚固的试验研究中存在的问题及进一步的研究方向。

关键词 :岩体;锚杆;锚固机理;试验

中图分类号 :TU323 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2005)06-0696-05

在众多的岩体工程中,经常需要进行大范围的开挖,开挖卸荷和地应力释放可能会危及岩体的稳定性。为此,在开挖前后施加各类加固锚件以改善岩体工作条件,提高岩体的稳定性。大量工程实践表明,岩体加锚增稳的效果是十分显著的^[1,2]。为了研究锚杆在岩体中的传力机理及其受力状态,近 10 多年来,许多专家学者从不同角度对锚杆进行了现场测试或室内模拟试验,取得了一些可喜的成果。

1 锚杆抗拔承载力的试验研究

锚杆的抗拔力是指锚杆的锚固体与岩体紧密结合后抵抗外拉力的能力。影响锚杆抗拔能力的因素很多,而锚杆形状和灌浆体特性是其主要影响因素,相关研究也比较活跃。

1.1 试验研究现状

Kilie 等^[3]进行了锚杆形状对锚杆抗拔能力影响的试验研究。该试验选取一组带突缘或带肋的锚杆进行了抗拔承载力的比较研究,得出以下结果:(a)失效模式的观察。锚杆与灌浆体接触面的失效主要出现在对光滑锚杆的试验上,这类失效模式的抗拔承载力也最小;沿灌浆体周围的失效在带有 1 个突缘、2 个突缘、3 个 60°的突缘及带肋锚杆的试验中均已观察到;锚杆本身的失效出现在锚杆带有 3 个突缘、其角度 β 为 15°、30°和 45°角的试验中,锚杆被拉断。这类失效模式的最大屈服荷载达 118 kN。(b)随着锥形突缘角度的不断增加,其抗拔承载力呈减小的趋势。

Kilie 等^[4]进行了另一试验,研究了不同灌浆体特性对锚杆抗拔能力的影响。试验比较了不同水灰比(0.34、0.36、0.38、0.40)、不同锚孔深度(15~32 cm)、不同添加剂(硅质砂、粉煤灰)和水泥砂浆在不同养护时间下的锚固体承载力。抗拔破坏试验中可以看到锚固体的失效面均发生在锚杆与砂浆的接触面上。试验结果表明,锚固体的承载力随锚杆直径和锚孔深度的增加而增加,水灰比和砂浆的养护时间对承载力有比较大的影响,随砂浆的抗剪强度和弹模的增加,锚固体的承载力也呈增加的趋势。

Benmokrane 等^[5]对钢绞线和螺纹钢分别进行了锚固长度、灌浆用水泥砂浆的水灰比、添加剂对其抗拔承载力影响的试验,结果表明,钢绞线与灌浆体之间的平均最大剪应力值低于螺纹钢与灌浆体之间的平均最大剪应力值,这两者的荷载传递机理也不同。

Benmokrane 等^[6]还对玻璃纤维锚杆的锚固特性进行了实验室试验和现场测试,结果表明,压痕或表面的变形对玻璃纤维锚杆的黏结强度有非常大的影响,同时由于其弹模较低,玻璃纤维锚杆比钢锚杆更易产生滑移。

Jeng 等^[7]利用模型试验,研究带扩孔锚杆分别在直接施加拉力和预应力下的锚固机理,观察到(a)将锚

杆从岩体中拔出的主要障碍来自底部扩体,拉拔锚杆时将在岩体内产生拉应力 (b)锚杆的拔出力随锚杆的锚固长度 L 、底部扩体的直径 D 及 $L/(D-d)$ 的增大而增大(d 为锚杆的直径) (c)垫板的尺寸应与底部扩体尺寸同比例增加,至少亦应和底部扩体尺寸相同。

荣冠等^[8]进行了螺纹钢锚杆与圆钢锚杆对比试验,研究以螺纹钢为杆体的全长黏结砂浆锚杆锚固机理。试验结果表明:拉拔条件下螺纹钢受力范围相对圆钢小且衰减快,螺纹钢周边浅部黏结物应力水平高于圆钢周边黏结物应力水平,且其变形破坏更显著,螺纹钢以屈服形式破坏而圆钢则整体拔出。

1.2 机理分析

锚杆特性对锚杆抗拔能力的影响主要体现在锚杆表面与灌浆体之间的相互作用。锚杆与灌浆体之间的黏结是岩锚体系中一个非常薄弱的环节,它包括锚杆表面与灌浆体间的物理黏结、钢筋的肋节、螺纹、凹凸等在灌浆体中形成的机械联锁以及它们之间的摩擦力。在锚杆与灌浆体之间的结合破坏之前,其结合力发挥作用;当锚杆和灌浆体之间发生一定的相对位移后,两者界面的某些地方就要被破坏,这时锚杆与灌浆体之间摩擦阻力就要发挥主要作用,显然增大锚杆表面的粗糙度就能提高摩擦阻力,对灌浆体而言则提高了其剪切强度^[9],因此,表面光滑的锚杆比表面带有螺纹或压痕的锚杆抗剪承载力低。带突缘或带肋的锚杆与灌浆体的结合力主要取决于机械作用,在进行拉拔试验时,有可能发生灌浆体的开裂、压碎或锚杆的拉断,其承载力将有很大提高。

灌浆材料特性对锚固体的承载力的影响不仅体现在灌浆材料的水灰比和砂浆的养护时间上,同时,水泥的膨胀性、水泥标号、固化温度、施工质量等也影响着锚固体的承载力。添加剂(包括速凝剂、膨胀剂)对锚固体的承载力的影响也值得进一步研究。

2 加锚设计参数对加固效果影响的试验研究

加锚参数包括锚杆的倾斜角、锚杆长度、直径、节理面的粗糙度、锚杆表面特性等。这些参数都对加锚节理面的抗剪性能产生直接的影响,从而影响了锚杆的加固效果。

2.1 试验研究现状

葛修润等^[10]进行了加锚节理面抗剪性能的室内模拟试验,探讨了锚杆对节理面抗剪性能的影响及锚杆阻止节理面发生相对错动的“销钉”作用机制。试验结果表明:加锚节理面的抗剪强度随剪切位移的增大而增大,即使不大的剪切位移就已使锚杆的抗剪作用得到充分发挥;锚杆倾斜角对加锚节理面抗剪强度有重大影响。

Kharchafi 等^[11]进行了大尺度(1:1)试验,研究加锚节理面的抗剪性能。试验采用 3 个大块体(每个均为 $100\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$)模拟节理岩体,每个节理面用一根锚杆加固。试验结果表明:锚杆产生的抗力正比于锚杆截面,锚杆倾角 β 的改变将影响最大锚固力和节理系统的刚度,随锚杆倾角 β 的增大,其拉应力增大,剪应力减小。

温进涛等^[12]对含结构面岩体的锚索锚固机理进行了室内模型试验,试验模拟了不同锚索安装角和不同结构面粗糙程度下的锚索抗剪性能。结果表明 (a)当结构面比较粗糙时,可能的剪切破坏形式多为锚索与灌浆体的脱离,锚固体的剪切荷载-位移呈现“脆性特征”; (b)当结构面光滑时,起控制作用的则是锚索与灌浆体间的挤压破坏,锚固体的剪切荷载-位移呈现“塑性特征”; (c)锚索安装角的大小对试件的抗剪强度产生影响,当结构面比较粗糙时,这种影响变得较大(对峰值抗剪强度的影响约为 30%) (d)锚索由于具有柔性特征,当结构面光滑时,可以在较大的剪切位移下,仍使锚固体保持很高的剪切强度。

朱焕春等^[13,14]通过对三峡永久船闸高强度锚杆的现场试验,研究了锚杆的抗剪性能,证实了设置自由段可以有效地实现剪应力向正应力的转化,可以提高锚杆承担剪切变形的能力,揭示出循环荷载作用下锚杆应力大小和影响范围会向深度传递,但变形相对稳定。

陈安敏等^[15]通过模型试验探讨了预应力锚索对块状岩体的加固效应及其主要影响因素,分析了锚索长度及预应力值大小对其加固效果的影响。其影响表现在:当 $L' \leq d'$ (L' 为锚索总长, d' 为锚固区半径) 时,锚索与岩体一起塌落;当 $L' = 1.5d'$ 时,锚索不塌落,但也不能形成锚固区,锚索不起加固作用;当 $L' \geq 2d'$ 时,锚索可以发挥加固作用,下部可以形成锚固区。合适的锚索长度为 $L' = 2d' \sim 3d'$,存在一个最佳预应力值,该实验中为 $\sigma_p/\sigma_c = 0.67$ 。

Spang 等^[16]通过室内和现场的剪切实验研究了节理岩体中锚杆的作用方式,用 8 mm 直径钢锚杆进行了约 60 个实验室的剪切实验,并用 40 mm 直径钢锚杆进行了现场补充实验.结果如下:(a)最大剪力和最大荷载时的剪切位移随锚杆断面的增加而增加;(b)锚杆中的力会大大增加被锚杆锚固的粗糙节理面的抗剪能力;(c)被锚杆锚固的节理面的刚度随摩擦角的增加而增加;(d)剪切面能使锚杆弯曲,因而会产生很大的拉力;(e)锚杆锚固节理面的最大抗剪能力随锚杆的倾斜角(在 $\beta \leq 45^\circ$ 时)的增加而增加,增加锚杆倾斜角(在 $\beta \leq 30^\circ$ 时)会大大减小剪切位移;(f)抗剪强度最大值的 80% 是从非常小的剪切位移中得到的,剪胀角对锚杆的最大抗剪强度的影响与锚杆倾斜角相当;(g)全长水泥灌浆锚杆具有“销钉效应”,它提供的抗剪强度约为锚杆最大拉荷载的 70% ~ 80% (h)全长水泥灌浆锚杆也具有“摩擦效应”,可增强锚杆锚固节理面的抗剪强度.

2.2 机理分析

从以上试验可知,锚杆本身对加固效果的影响涉及锚杆的长度、直径、锚杆表面特性等.随锚杆长度的增加,锚杆的加固效果得到提高.但是当锚杆长度超过一定长度后,其加固效果提高甚微或不再提高.锚杆直径的增加常常伴随着锚固体直径的增加,随着锚固体的直径的增大,轴力及剪应力的分布趋于平缓,即参与工作的接触面增大,因而锚固体的抗力和刚度也明显增加.灌浆材料特性同样对锚杆的加固效果产生影响,这种影响是通过锚固体承载力的影响体现出来的.

锚杆的安装方法也影响着锚杆的加固效果,它包括锚杆的倾斜角、锚杆的自由段长度、底部扩体的设计和垫板尺寸的选择.锚杆的倾斜角度一般也应限定在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的范围内,锚杆倾斜角的增大可大大减小其剪切位移,锚杆倾斜角对加固效果的影响程度还与节理面的粗糙程度有关.粗糙度大的剪切面,其抗剪切位移的能力比光滑表面的要大.锚杆的自由段长度的选择各国的相关规范也做了规定,设置自由段不仅可以有效地增加锚固体的抗剪承载力,同时自由段长度的选择还必须使锚杆锚固于比破坏面更深的稳定的地层上,以保证锚杆和被锚固结构的稳定性.锚固体底部扩体的设计和垫板尺寸的选择应相协调,特别是垫板的尺寸直接影响着其对锚固体的约束程度,对加固效果有很大的影响.

此外,在利用预应力锚杆加固岩体时,岩体的徐变、锚杆材料的松弛、不同型式的锚具、锚杆(索)的腐蚀等都影响着锚杆的加固效果.

3 锚杆加固对岩体参数影响的试验研究

3.1 试验研究现状

邹志晖等^[17]通过模拟试验,研究了锚杆在不同岩体中的工作机理,探讨了锚杆对不同岩体的约束效应和对不同弹模岩体的 E 、 c 、 φ 值及破坏强度的影响机制.研究表明:不同的带锚岩体的锚固效应是不同的.岩性越软布锚对岩性的影响越敏感,岩性越硬,布锚影响越小,当岩体的弹模提高到某一值时,布锚的作用就很微小了.在岩体屈服之前,锚杆与岩体同步变形,此时锚杆的约束效应极小;在岩体进入屈服后,锚杆限制围岩的变形,从而提高了带锚体的总体破坏强度,改善了围岩的整体力学性能.由于锚杆的存在,岩体的塑性特征进一步加强.当岩体由硬到软时,岩体中的锚杆约束效应逐渐增大.

侯朝炯等^[18]对巷道锚杆支护围岩强度机理进行了研究,通过实验室试验和理论分析,研究了巷道锚杆支护对锚固范围岩体峰值强度和残余峰值强度的强化作用以及 E 、 c 、 φ 等力学参数在锚固体峰值强度前后的变化,分析了锚固体强度强化后对巷道围岩塑性区和破碎区的控制程度.

陈妙峰等^[19]研究了钢管锚杆在岩体加固中的锚固性能.结果表明:(a)当岩体为完整中等坚硬岩体时,锚杆破坏形式为锚杆与黏结材料之间发生黏结破坏产生滑移,对锚杆抗拔性能起主要作用的是黏结材料的强度等级与锚杆的几何尺寸.(b)当锚杆受拉力较小时,只有前端部分区域受力,加载端处的黏结首先丧失而产生端部位移,局部滑移逐渐向自由端发展,最终达到整体滑移.(c)黏结应力沿锚杆杆体分布,当荷载较小时,黏结应力只在杆体的上半段分布,随荷载的增大,黏结应力曲线的峰值也随之增大,黏结应力的分布向下扩展,同时最大值在杆体上的位置也向下移;当荷载增大到 200 kN 以上时,黏结应力已在杆体全长分布,随着荷载进一步增大,黏结应力曲线的峰值在杆体上的位置也进一步下移,同时上段的黏结应力值有所下降.

叶金汉^[20]通过室内三轴压缩试验,研究了锚固岩体的应力应变曲线、强度及其破坏性状.结果表明:(a)在同样的岩性、同样的锚杆数量和质量下,锚固角(锚杆和裂隙面的夹角)为 30° 时锚固效果最好;(b)锚固岩

体在三向应力状态下的特性表现为强度提高、变形量减少、弹性模量增大、应力应变曲线由脆性转为弹塑性;(c)岩体锚固效应的机制是锚杆约束了岩体的变形,提高了其抗剪强度,使岩体的破坏从脆性状转变为弹塑性或黏弹性状,提高了岩体的稳定性。

朱维申等^[21]针对三峡永久船闸高边坡岩体在开挖过程中的锚杆加固问题进行了室内相似材料模型块试验,得出如下结论:(a)节理岩体的抗压强度、弹性模量、扩容起始应力和残余强度等力学参数随着锚固密度的增大而增加,而泊松比则减小,两者近似呈线性关系。(b)对比节理与锚杆交角 84° 和 70° ,在相同锚固密度情况下,节理与锚杆交角 84° 时的抗压强度、弹性模量、扩容起始应力比 70° 时大,泊松比两者较接近,残余强度在锚杆根数较少时 84° 比 70° 大,随着锚固密度增大,两者的残余强度逐渐趋于接近。

康天合等^[22]运用物理模拟方法,探讨了锚杆对层状节理岩体的锚固效果。试验结果表明:(a)在非锚固条件下,岩体发生由表及里的层裂破坏,锚固使层裂破坏得到有效控制,其破坏形式为岩体中产生大尺度的断裂,断裂后的锚固岩体仍具有良好的整体承载性能;(b)岩体的分层厚度和块度越小,效果越好;(c)在钢-梁-网锚固中,锚杆的作用是使沿锚杆方向的碎裂岩体得到加强,钢带和网的作用是使垂直于锚杆轴向方向的相邻各锚杆之间的岩体整体性得到加强。

3.2 机理分析

加锚物理效应是目前非常受关注的一个研究课题。锚杆加固对岩体的弹性模量、抗压强度、内摩擦角、凝聚力和渗透系数等都会产生影响。总的来说,加锚的物理效应是非常明显的,而且岩性越软这种影响越明显,同时布锚的方式和密度也影响着加锚的物理效应。由于实验本身的困难,目前有关锚杆加固对岩体影响的实验研究还不多,对加锚的效应还仅仅是定性的认识,不能量化。

4 需要进一步研究的问题

锚杆加固机理的研究应综合考虑工程应用的效果和加锚岩体的性态、加锚构件的效应等。

a. 通过实验和数值分析,研究锚杆、灌浆体与岩体之间的界面特性,从而揭示加锚系统的荷载传递机理和加锚系统对岩体的加固作用机理;研究锚杆承载力的时空效应;研究施加预应力的加固效果;研究锚杆及锚索穿过软弱结构面对岩体整体作用的加强;研究锚固体与岩体共同形成的组合抗力体在预应力及荷载作用下的应力重分布的特性。

b. 进一步研究加锚后的岩体本身物理效应的变化即材料参数量值的变化,如弹性模量、抗压强度、内摩擦系数、凝聚力和渗透系数等的变化规律。

c. 在加锚的结构效应方面,进一步研究锚固体与岩体共同形成的组合抗力体的工作性态、群锚效应的机理、加锚参数(如锚杆间距)的优化。

d. 研究地层开挖、地震、冲击荷载、冰冻、波浪、高温等条件下锚固体的性能。

参考文献:

- [1] WINDSOR C R. Rock reinforcement system[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(6): 919—951.
- [2] 卓家寿,章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 180—192.
- [3] KILIC A, YASAR E, ATIS C D. Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully grouted rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 1—6.
- [4] KILIC A, YASAR E, CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bol[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 17: 355—362.
- [5] BENMOKRANE B, CHENNOUF A, MITR H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(7): 633—642.
- [6] BENMOKRANE B, XU Hai-xue, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforce plastic(GFRP) anchor bolts[J]. Int J Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr, 1996, 33(5): 455—465.
- [7] JENG F S, HUANG T H. The holding mechanism of under-reamed rockbolts in soft rock[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1999, 36: 761—775.
- [8] 荣冠,朱焕春,周创兵. 螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 469—475.

[9]张乐文 ,汪稔. 岩土锚固理论研究之现状 J]. 岩土力学 ,2002 ,23(5) :627—631.

[10]葛修润 ,刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究 J]. 岩土工程学报 ,1988 (1) :7—18.

[11]. KHARCHAFI M , GRASSELLI G , EGGER P. 3D behaviour of bolted rock joints : Experimental and numerical study[A]. In : ROSSMANITH. Mechanics of Jointed and Faulted Rock[C]. Rotterdam : Balkema , 1998. 299—304.

[12]温进涛 ,朱维申 ,李术才. 锚索对结构面的锚固抗剪效应研究 J]. 岩石力学与工程学报 ,2003 ,23(10) :1699—1703.

[13]朱焕春 ,吴海滨. 反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究 J]. 岩土工程学报 ,1999(6) :662—665.

[14]朱焕春 ,荣冠. 张拉荷载全长黏结锚杆工作机理试验研究 J]. 岩石力学与工程学报 ,2002 ,21(3) :379—384.

[15]陈安敏 ,顾金才. 预应力锚索的长度与预应力值对其加固效果的影响 J]. 岩石力学与工程学报 ,2002 ,21(6) :848—852.

[16] SPANG K , EGGRE P. Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 1990 ,23(3) :201—229.

[17]邹志晖 ,汪志林. 锚杆在不同岩体中的工作机理 J]. 岩土工程学报 ,1993(6) :71—79.

[18]侯朝炯 ,勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度机理研究 J]. 岩石力学与工程学报 ,2000 ,19(3) :342—345.

[19]陈妙峰 ,唐德高. 锚杆锚固机理试验研究 J]. 建筑技术开发 ,2003 ,30(4) :21—23.

[20]叶金汉. 裂隙岩体的锚固特性及其机理 J]. 水利学报 ,1995(9) :68—74.

[21]朱维申 ,任伟中. 船闸边坡节理岩体锚固效应的模型试验研究 J]. 岩石力学与工程学报 ,2001 ,20(5) :720—725.

[22]康天合 ,郑铜鏢 ,李焕群. 循环荷载作用下层状节理岩体锚固效果的物理模拟研究 J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 ,23(10) :1724—1729.

Experimental study on anchorage mechanism of anchor bolts

FANG Cong-yan , ZUO Jia-shou

(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :A summary was made on some advances in experimental study on the anchorage mechanism of anchor bolts from three aspects , i. e. the influences of the bolt shape and grout property on the pull-out load capacity of anchor bolts , the influences of design parameters of anchor bolts , including their inclination , roughness of joint surface , length , and diameter , on the effect of rock mass reinforcement , and the effect of reinforcement with anchor bolts on the parameters of anchored rock mass , including the elastic modulus , compressive strength , internal friction angle , cohesion , and permeability coefficient. Finally , some problems existing in the experimental study and the direction for the further study were discussed.

Key words :rock mass ; anchor bolt ; anchorage mechanism ; test