

锚杆应用及加固机理研究综述

任青文 罗 军

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 综述锚杆的工程应用、锚杆的类型及现有的有关加固机理研究的各种理论。列出目前已有的多种锚杆计算理论和相应计算模型及所采用的计算方法,并指出各种数值分析方法是目前研究锚杆作用的主要方法。分析我国有关锚杆作用研究的一些最新进展,包括计算理论、方法及试验方面的成果,同时指出目前研究中存在的问题和研究的方向。

关键词 岩土工程 锚固技术 锚杆 锚索 锚杆单元 加固机理

锚杆和锚索加固是岩土工程加固的一种重要手段。近十几年来,锚固技术以其独特的效应、简便的工艺、广泛的用途和经济的造价,在岩土加固领域中显示出越来越旺盛的生命力,几乎已触及土木建筑领域的各个角落。在水利水电工程方面的应用有:①大坝工程,加固已有大坝的坝基和坝肩,还可用于加高大坝,采用锚固技术施工时,不必放空水库,不用重修围堰,不需增加坝体重量,对抗震稳定也极有利;②大跨度地下洞室,支护其顶拱或边墙,锚杆通常与压力灌浆或钢丝网喷混凝土联合使用;③增加岩土边坡,尤其是高边坡的稳定性;④深基坑支挡工程和竖井工程;⑤输水隧洞和交通隧洞等。

锚杆的分类方式很多,按锚杆受力的情况和锚固的方式可分为:①顶端局部锚固式(点荷载方式),通常的预应力锚索多采取这种锚固方式;②通长全面粘结式(全长锚固式),普通砂浆锚杆即属于这一类,它在工程中应用广泛;③局部粘结式,介于①和②两种锚固方式之间的一种锚杆。这三类锚杆的选用,与具体地质条件密切相关,也与工程需要

和施工条件有关。

1 锚杆加固机理

试验和工程经验表明,锚杆工程是一种有效的加固措施,但由于其加固机理及作用方式复杂,至今还没有统一的理论。研究锚杆的加固机理必须考虑其锚固方式、它与所加固的岩体之间的相互作用,由于锚杆的作用是减少岩体变形和防止岩体破坏,所以首先要了解岩体的变形和破坏规律。

岩体是由结构体(岩块)和结构面这两种基本元素组成的,结构体和结构面按一定规律组合便形成了各种不同的岩体结构类型。研究表明,作为岩体内在因素的岩体结构在岩体的变形破坏发展过程中起着决定性作用;而作为外因的外力,即荷载,是通过内因起作用的。这就是岩体结构控制理论。

近来,人们又提出了所谓突破观点^[2],认为:工程岩体的变形破坏方式千差万别,但其破坏过程总是从一处或少数几处开始突破,并通过应力场调整和岩体性质改变,或者逐步扩展导致破坏,或者转入相对稳定。从力

第一作者简介:任青文,男,教授,从事结构与岩石计算力学以及地基稳定性研究,曾发表《岩质高边坡坝的失稳和治理分析》等论文。

学观点来看,突破观点与岩体结构控制理论是一致的,但着重强调了两点:第一,突破位置往往与结构面尤其与软弱结构面有关;第二,岩体的逐次破坏现象使优先处理突破口的方法更容易应用于工程实践。

基于这些认识,在岩体表面或内部修建工程时,应把岩体视为工程结构的一部分或全部。例如,岩体与地下洞室的支护结构形成一个完整的支护体系,而且在整个体系中,岩体应视为主要的承载体单元。事实上,矿山巷道隧洞施工中已广泛应用的“新奥法”就是基于这种认识的,它在支护的设计和施工方法上尽量抑制围岩强度的恶化,积极发挥围岩本身的承载能力。

基于上述理论,在岩体加固工程中,对不稳定岩体不一定采取支护措施,而从改造变更岩体结构的观点出发,对劈裂、块裂结构的岩体直接进行处理,使它变为完整的岩体。锚杆的作用就是在于提高岩体的完整性,可使劈裂、块裂或板裂结构的岩体转变为近似完整的岩体。锚固作用的效果还可从改变岩体应力状况方面来理解。众所周知,岩体变形和破坏机制包括结构变形和破坏及材料变形和破坏两种因素,其中材料的变形和破坏多数与岩体内部的应力状态有关,而预应力锚固可对岩体施加围压,改变岩体的应力状态,提高岩体的弹性模量和强度。此外,预应力锚固还可以提高和维护围岩的 c (粘结力) 和 φ (内摩擦角) 值。这相当于图 1 中剪切强度曲线上移,从而使围岩承载能力提高。为确定锚杆数量、长度、倾角与改变围岩 c 、 φ 值的关系,应作些系统的剪切试验。在没有试验数据的情况下,有一种做法是假设 φ 值不变, c 值的提高按锚杆的抗剪强度折算。预应力锚固另外一个重要作用就是通过喷混凝土层对岩体施加附加抗力,这种抗力使岩体处于三向受力状态,有助于改善岩体应力状况,见图 1 中莫尔圆的右移。

总之,锚杆加固作用表现在岩体结构性质的改善和岩体内部应力状态的改变两个方

面,是一种多因素的综合作用。以往的许多计算方法中,往往对这种综合作用认识不足,以致计算中未能充分反映锚杆的实际效用。

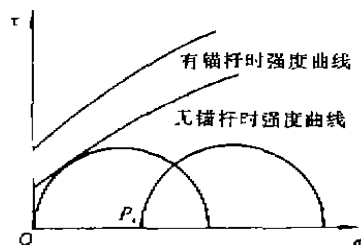


图 1 喷锚支护的两种作用

2 现有的锚杆计算理论和模型

2.1 早期的锚杆计算理论

早期锚杆主要应用于矿山巷道中,因此在煤矿部门研究较多,当时,锚杆的计算是根据一些简化假定,按材料力学的方法建立力学模型并进行计算的。比较常用的有悬吊理论、组合梁(板)理论、加固理论、内压理论等^[3]。

a. 悬吊理论。如图 2 所示,认为锚杆是将围岩表面不稳定的岩体固定悬吊在深处坚固稳定的岩层上,使破碎的岩块不致于冒落,这是一种最简单的预期效果,计算上也比较简单。

b. 组合梁(板)理论。如图 3 所示。对于水平成层围岩,当没有锚杆时,层理面是分离的,呈薄层重合梁状态工作,当有锚杆张拉时,由于增大了层面间的摩擦,则可以承受剪力,呈整体性的组合梁状态工作。显然,此时锚杆的张紧力是主要因素。

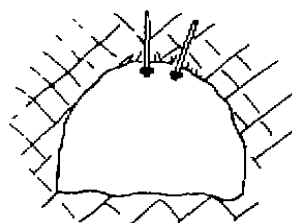


图 2 悬吊理论

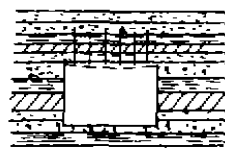


图 3 组合梁理论

c. 加固理论(增强理论)。如图 4 所示,对有节理、裂缝等力学不连续面的地层打进锚杆,使已破碎的地层具有整体性或近似整体

性,这样的效能称为增强效能。此时,锚杆需要按一定的图案(如梅花型、矩形、菱形等)和间距配置。事实上,就是本身整体性较好的围岩,由于锚杆的张拉作用,也可成为有整体性的准塑性构造体,岩体特性得以增强和改善。

d. 内压理论。主要用于研究松软岩层中的隧道稳定性,见图 5。与锚杆所受张力相当的力呈内压状态作用于隧道壁,在内压作用下隧道壁呈三轴应力状态,壁面承受切向应力的能力增大,使围岩呈很好的稳定状态。锚杆的张力则是靠连系杆或喷混凝土传递给壁面形成内压,显然这种效果是增强作用的一部分。



图 4 增强理论

图 5 内压理论

以上这些理论,各自在特定的岩体条件和锚固方式下反映了锚杆的加固作用。但相应的力学模型过于粗糙,都是把锚喷加固的岩体加固圈人为地从厚岩体中脱离开来,因而与实际情况出入较大。但由于其计算方法简单明了,在目前设计中仍广泛采用。

2.2 近期的锚杆计算模型和计算方法

锚杆支护理论随着锚固支护的广泛使用,正沿着几种不同的途径不断发展。其中之一是将锚杆作用等效为围岩力学参数(E , μ , c , φ 等)的改善,从而应用弹性、弹塑性等理论将洞室围岩视为无限平面带有复合圆环的力学模型,如图 6 所示,计算出加固圈内的

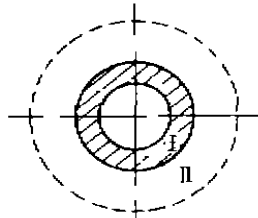


图 6 等效模型

I—锚喷加固圈; II—原岩弹(塑)性区

应力场和位移场。这种方法的困难在于锚杆加固圈的力学参数很难准确掌握。实验室内不可能模拟全部实际情况,利用现场实测数据反演,也只能在一定程度上解决这个问题,带有很大的局限性^[4]。

锚杆支护理论研究的另一途径是,对锚杆上剪力分布规律进行简化假定后,运用结构力学的方法对锚杆的轴力进行计算,从而得到锚杆的极限长度与相应的直径等。适用于全长锚固锚杆的锚杆中性点理论^[5]就属于这一类方法(见图 7)。这一方法的不足之处是未考虑由于锚杆的存在对锚固层以外原岩应变的影响。但是,由于计算方法简单、物理概念明确,因而对于锚杆的造型、结构设计及参数优化等起着有效的指导作用,计算出的锚杆参数可成为工程设计的重要参考。

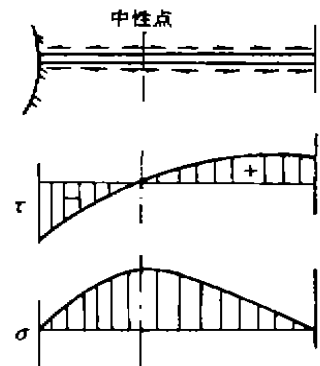


图 7 中性点理论

τ —剪力; σ —轴向力

锚杆支护计算比较完善的方法是建立在弹性、弹塑性或粘弹性力学基础上的,这类方法把围岩视为受外圈均匀压力的带圆柱孔的无限体,单一的锚杆用一对集中力(对于端锚锚杆)或一连串集中力(对于全长锚固锚杆)来代替,运用近代固体力学中的现有解答加以叠加,得到锚杆加固圈内的应力场和位移场,从而判断围岩的稳定性(见图 8)^[6,7]。例如,单一的预应力锚杆垂直作用于半无限大空间时,就可以由 Boussinesq 解答和 Mindlins 解答叠加,得到其相应的位移和应力场。从理论上说,这种近代固体力学的锚固计算方法较为合理,然而,由于地质条件的复杂性,

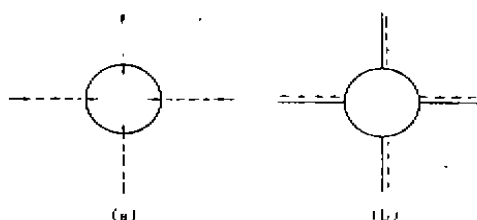


图8 建立在弹性、弹塑性理论基础上的锚固模型
(a)端部锚固型;(b)全长锚固型

使求解存在数学上的困难,目前解题范围还很有限。

近年来,工程设计和研究中分析锚杆支护的主要手段逐渐转向于数值方法。在有限单元法中通常是将锚杆简化为单纯受拉的杆单元。对于顶端局部锚固式锚杆,例如预应力和锚索,可以将它模拟成两节点单元,只研究其轴向的变形和力的变化;或者将自由张拉段和锚头部分处理成两节点的虚单元,而将锚根部分作为实体杆单元来研究。还有一种所谓粘结-滑移的粘结单元^[8],是反映全长固结式锚杆与围岩作用的数学模型,该种单元较好地模拟了当锚根与围岩间由于相对位移产生的剪应力大于其粘结力,使锚杆发生相对滑动的情况,比一般将锚杆离散成铰接于围岩单元节点处的杆单元,能更好、更真实地反映锚杆和围岩的相互作用。图7是理论分析和现场实测资料得到的锚杆轴力及剪力分布图。

边界元法是锚杆计算的另一种重要的数值方法,它是在进行单元剖分时将锚杆单元视为内部单元^[9],与围岩的作用力成为沿锚杆轴向分布的线分布体力,每个锚杆节点事实上只有一个未知数,即节点位移 u ,或轴线分布强度 f_b 。用这种方法进行锚固计算也是方便的。

3 锚杆作用研究进展

锚杆加固机理、计算理论和数值方法的

研究,近年来有了很大发展。随着国内锚杆支护在水利、水电、矿山等部门大量和广泛的应用,对锚杆支护机理、作用性质及相应理论的认识都有了相当大的提高。

中国水利水电科学研究院提出一种应用塑性力学上限解对采用锚索、锚桩加固的边坡进行稳定分析的计算方法^①。该法没有按传统作法将锚杆锚桩简化为一对集中力或是受弯构件,而是将它作为岩体的一部分,通过构造协调位移场,由能量耗散相等理论,采用优化方法寻找最优上限解。这种建立在外力虚功原理和能量耗散理论基础的塑性力学上限解法,较好地反映了锚杆、锚桩与边坡之间存在的变形协调性。

武汉岩土研究所通过大吨位试验分析和有限单元法的计算^②分析研究了预应力长锚索单体加固机理。认为锚固的作用范围,只在锚头、锚根附近约2m的区域内,采取增大锚固力,改变锚固倾角,变更锚索长度等措施,应力受影响的范围变化并不显著。他们的有限元离散计算是将锚索的锚根模拟为实体单元,而自由张拉段则取作两节点单元,即视为一对集中力作用。通过大量的多方案比较,发现对于由软弱结构面控制的岩体,如果不考虑由于锚索加固产生的结构面材料粘结力 c 增大的效应时,无论怎样增大预锚力、改变锚根长度、变更锚固倾角或加密锚群分布等,对岩体稳定和应力的影响都不明显。武汉岩土研究所还着重分析研究了锚根的作用,当锚根部分的锚索束成波状分布时,并假定被锚索束分割的粘结材料成块状,采用极限分析方法,提出有关锚固力的计算公式。

电力部西北勘测设计研究院最近对锚杆、锚索加固机理进行了大量、深入的研究^③。从现场量测到室内试验以及数值模拟都做了大量的工作,取得了一系列成果。在进行数值仿真分析时,采用了摩擦接触型节

①陈祖煜,应用塑性力学上限解进行施有锚索、锚桩边坡的稳定计算,中国水利水电科学研究院,1995。

②朱维申,李钊等,预应力锚索锚固机理研究,武汉岩土研究所,1995。

③黄富德,群锚加固机理研究,电力部西北勘测设计研究院,1995。

理单元及绳式锚索单元(不承受压力与剪力),该模型的建立还应用了考虑加锚岩体损伤断裂的关于节理岩体的“岩桥理论”。通过大型试验、现场观测和数值分析,认为群锚加固机理与单根锚杆的加固机理是不同的。当锚索吨位、间距合理时,各个单锚锚头部分产生的压力集中区还会连成一片或重叠,产生一种定义为“新围压”的所谓岩壳效应,使岩体表面的一薄层增韧、增压,岩性发生改变,从而起到稳定作用。研究还指出,锚索较长时,锚索的预应力沿轴向的损失衰减极大,从而使离锚头、锚根都较远的滑动层面或结构面上的法向应力、应变的增加效应都很小,而且,对于长锚索,其本身的预应力状态随时间的衰减也极快,变化较大。总之,锚索加固作用是一个动态调整过程,其研究和设计,要通过不断变化各类因素诸如间距、锚根长度、锚固角等来调整模拟锚索的加固作用。另外,该院近二三年来开展的研究工作还考虑了锚索加固受爆炸、时间等效应的影响,也得出了一些有意义的结论。

4 存在问题及研究方向

锚杆、锚索加固支护已在国内外矿山、土建、铁路、水利、水电等部门得到广泛的应用。其可靠性和经济性已被大量的工程实践所证实。近几年来,各类锚杆的作用机理日趋清楚,也已得到较一致的认识,已提出一些可实用的锚杆数学模型,它们在一定程度上反映了各类锚杆适应不同地质条件的加固机理。

应当注意到,尽管理论工作已取得一定成果,但锚杆加固机理仍是一个没有统一认识的问题,也缺乏行之有效的、合理的计算方法^[10]。现有各种模型仍存在不少显而易见的不足,理论和数值分析与实际情况出入较大,特别是对于由软弱结构面控制稳定的岩体加固情况。因而必须进一步通过理论分析、试验和现场量测对以下问题进行研究。

a. 锚杆锚固机理的研究,包括锚固作用对岩体物理力学性质的影响和锚杆与岩体之

间的相互作用。

b. 模拟锚杆作用的合理计算模型。

c. 影响锚杆作用的各种因素,如材料的徐变,施工爆破的影响等。

d. 群锚效应。

e. 锚固工程的优化设计。

参考文献

- 1 程良奎.我国岩土锚固技术的现状与发展.见:中国岩土锚固工程协会.岩土工程中的锚固技术.北京:地震出版社,1992.1~5
- 2 毕思文,尤逢仕.煤矿地下工程的岩土地质力学与锚固技术研究.见:中国岩土锚固工程协会.岩土工程中的锚固技术.北京:地震出版社,1992.166~171
- 3 郑雨天.喷锚支护理论探讨.矿山技术,1985(1):12~14
- 4 高山昭等.新奥法.隧道译丛,1984(5):52~65
- 5 王明恕等.全长锚固锚杆的力学模型及其应用.金属矿山,1983(4):21~24
- 6 李锡润等.预紧式锚根附加应力场分布规律和支护参数选择.地下工程,1983(5):11~15
- 7 苏志敏.Boussinesq解及Mindlin解在预应力锚固岩体中的应用.武汉水利水电大学学报,1992(4)
- 8 何唐镛,王建智.全长粘结式锚杆与围岩相互作用的有限元模型及分析.见:徐文焕主编.第一届全国计算岩土力学研讨会论文集(二).峨眉:西南交通大学出版社,1987.151~158
- 9 张有天,王镭,陈平.边界元方法中的锚杆模型.见:水利水电科学研究院科学研究论文集(23).北京:水利水电出版社,1986.23~30
- 10 Stuart Little John. Rock Anchorages. News Journal. ISRM, 1995, 2(384):18~38

(收稿日期:1995-11-17 编辑:张志琴)

