

新型锚杆、锚索的发展现状及展望

李世民 徐宝 郭彦朋

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

摘要:通过大量文献研究和广泛工程调研,从六个方面综合论述了近期国内外新型岩土锚杆(索)的发展现状,即用于地下工程支护、城市基坑加固、腐蚀地质工程加固、软土地层工程加固、地下洞室抗爆以及边坡地震灾害治理的新型岩土锚杆(索)。在此基础上,分析了当前锚杆(索)发展中仍存在的主要问题,并指出了今后需要进一步开展的重要工作,包括针对深地下工程支护问题加强对屈服型锚杆(索)的研发,针对锚固工程耐久性问题加强对非金属锚杆(索)的研发,针对城市基坑工程加固问题加强对回收锚杆(索)的研发,针对软土地层工程加固问题加强对扩体型锚杆(索)的研发以及针对地下洞室锚固抗爆问题加强对新型抗爆锚杆(索)的研发。

关键词:岩土工程 锚固 锚杆 锚索 发展现状

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.02.003

1 引言

自1872年首批锚杆在英国北威尔士(N. Wales)的一家板岩采石厂投入使用以来^[1],以锚杆(索)为代表的岩土锚固技术,在100多年的岩土工程实践中已解决了难以数计的岩土工程问题,产生了无法估量的社会效益,与此同时,岩土锚固技术自身也得到了持续发展和不断完善,保持着旺盛的生命力。

近十多年来,国际岩土锚固技术的发展更是方兴未艾,在锚固理论、设计、计算方法、施工工艺、锚固检(监)测、标准化建设、新结构(材料)锚杆(索)等方面都取得了很多可喜的成就^[2]。其中,锚杆(索)的创新发展尤为突出,最能直接反映锚固技术取得的重大进步。国内外锚固工程界不断致力于对锚杆(索)的开发,经过大量的科学研究和工程实践,已研制出了多种新型锚杆(索)。本文通过大量的文献研究和广泛的工程调研,试就从地下工程支护、城市基坑加固、腐蚀地质工程加固、软土地层工程加固、地下洞室抗爆及特殊地质灾害治理方面对新型锚杆(索)的发展现状作一综合阐述。在此基础上,分析了当前岩土锚杆(索)发展中仍存在的主要问题,指出了今后需进一步开展的重点研究工作。

2 用于地下工程支护的新型锚杆(索)

我国著名防护工程专家钱七虎院士曾指出^[3]:

“21世纪是地下空间的世纪。”当前,随着世界各国地下设施建设的不断加强和采矿业的迅速发展,在地下工程建设中已越来越多地需要应对各种形式的危害(如岩爆、大变形等),传统的全长粘结型锚杆已难以适应复杂的荷载环境。为此,国内外工程技术人员用于地下工程支护的锚杆(索)都进行了改造和发展。

D锚杆(图1)是挪威科技大学于2010年研制的一种用于地下工程支护的新型吸能锚杆^[4, 5, 6],可有效治理地下工程中的围岩挤胀变形、塌方、岩爆等灾害。这种锚杆由光滑杆体及杆体上突出的锚定件组成,锚杆全长注浆。锚定件包括浆叶型和波纹型两种。当围岩变形时,锚定件固定在注浆体中,锚定件间的光滑杆体可自由变形,穿过围岩开裂面的杆体受荷均匀,显著低于全长粘结螺纹钢锚杆受到的集中荷载。加拿大JENMAR公司于2008年研制出了用于地下工程支护的Yield-Lok锚杆^[7](图2)。这种锚杆主要利用镦粗的锚头在聚合物包壳内的滑动从而产生屈服位移。

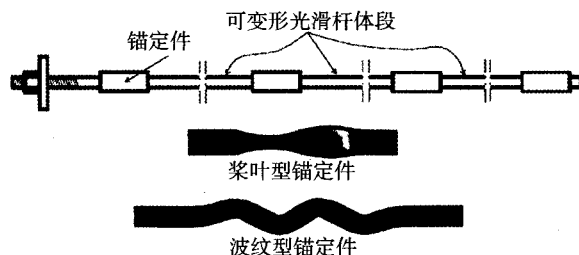


图1 D锚杆结构示意图

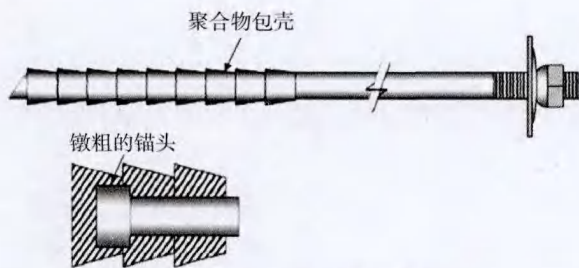


图2 Yield-Lok锚杆结构示意图

除上述两种典型锚杆外,国外用于地下工程支护的新型锚杆(索)还有澳大利亚科廷科技大学于2008年研制的Garford锚杆^[8],奥地利Atlas公司于2007年研制的Roofex锚杆^[9],瑞典皇家理工学院于2005年研制的新型吸能锚杆^[10, 11],南非SRK矿业咨询公司于2005年研制的Duracable锚索^[12]等。这些锚杆(索)大都结构和材料新颖,承载力高,可变形量大,具有良好的抗静动载性能。

近年来,国内随着人们对地下工程的关注,也开发了几种新型锚杆(索),比较典型的有中国矿业大学于2011年开发的恒阻大变形锚杆^[13],山东大学于2010年开发的高强预应力让压锚杆^[14]以及煤炭科学研究总院于2011年开发的新型笼形锚索^[15]。恒阻大变形锚杆是专门针对大变形巷道和高应力巷道而研制的,是可以保持恒定阻力并靠机械滑动装置延伸的锚杆。高强预应力让压锚杆是通过位于垫板和螺母之间的金属让压套管压缩变形实现让压的锚杆,有效地避免了锚杆螺母处的应力集中(图3)。新型笼形锚索是对传统单束矿用锚索的改进。这种锚索在锚固段将钢绞线绽开,形成了中空的“鸟笼”。鸟笼可保证锚索在孔中对中,并增加锚固面积,从而获得较大抗拔力。

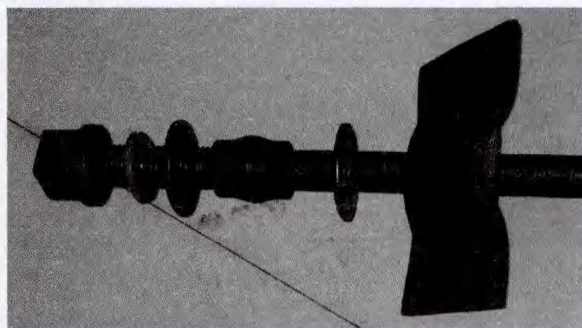
3 用于城市基坑加固的新型锚杆(索)

近年来,随着土地市场化的发展,人们对地下空间的产权意识日益增强,锚杆(索)施工时超越“红线”的现象越来越受到限制。另外,锚杆(索)在基坑加固中的大量使用,也导致对城市地下环境造成的污染越来越严重。为此,国内外众多科研院所和施工单位针对这种情况开展了多种可回收锚索研制工作,并收到了良好的经济

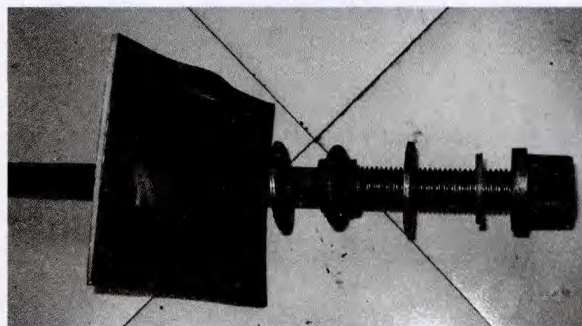
和社会效益。

国外对锚索施工超越“红线”问题关注得比较早,上世纪90年代中期就已开发出了多种可回收式锚索^[16-19],比较典型的有德国DYWIDAG-Systems公司研制开发的DYWIDAG回收式锚索,英国学者Anthony D.Barley等人开发研制的SBMA回收式锚索,日本国土防灾株式会社开发的JCE回收式锚索以及日本KTB协会开发的KTB荷载分散型回收式锚索等。这些可回收式锚索从施工工艺上大致可分为机械式回收、力学式回收和化学式回收三种。

在发达国家中,日本对可回收锚索的研究尤为重视,近年来一直在不断改进。日本飞岛建设公司于2007年开发出了IH可回收式锚索^[20, 21](图4),是一种可设置成压力分散型的可回收式锚索。这种锚索利用锚固段内设置的电磁线圈加热熔断锚索,从而实现对锚索的回收,其回收效率较高,只需对电磁线圈通电80s,便可熔断钢绞线(图5),回收时,只需人力便可将钢绞线拔出。与日本的很多传统可回收锚索相比,IH可回收锚索具有设计灵活(钢绞线既可双数使用也可单数使用)、成本低、易回收、钢绞线可重复使用等优点。



(a) 让压前



(b) 让压后

图3 高强预应力让压锚杆

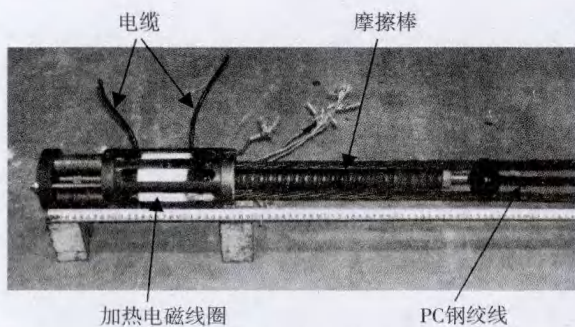
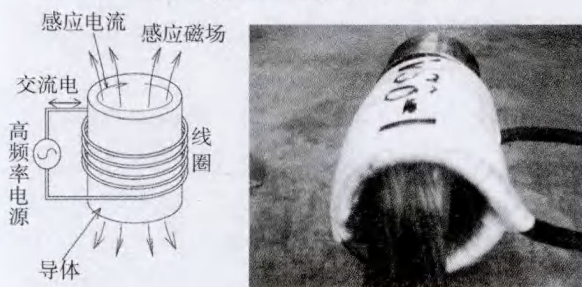


图4 IH可回收锚索的锚固段构造



(a) 熔断原理

(b) 熔断照片

图5 电磁线圈通电后熔断钢绞线

日本日特建设公司于2008年开发出了一种自行切断式可回收锚索^[22] (图6), 也是一种压力型锚索。这种锚索回收时, 借助千斤顶的拉拔作用, 利用内锚头的超硬切割装置, 自行将锚索切断, 从而实现锚索的回收 (图7)。这种锚索承载力比传统可回收锚索高约20%; 自行切断能力强, 回收时需要施加的荷载较低; 对于25m以上长度的锚索, 其与日本很多传统回收锚索相比回收速度可提高4倍以上。

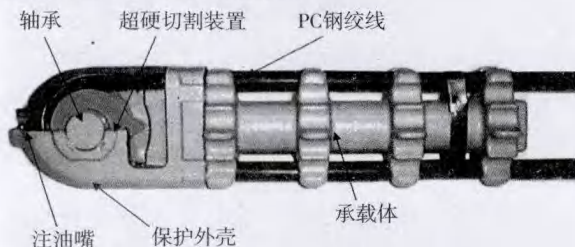


图6 自行切断式可回收锚索的锚头



图7 自行切断式可回收锚索的回收过程

与国外一些发达国家相比, 国内开展回收式锚杆 (索) 的研究起步相对较晚, 但发展很快,

已有多家科研院所和施工单位开展了有关可回收锚杆 (索) 的研制工作, 并取得了多项研究成果^[23-27]。总参工程兵科研三所曾于2003年研制出了一种压力分散型的U型回收式锚索。北京力川地基工程公司于2007年研制出了直列无级调压式回收锚索 (图8)。深圳钜联锚杆技术有限公司于2006年开发出了JL可回收锚索 (图9), 是一种后弹开扩大头回转型可回收锚索, 克服了普通等直径U型锚索的一些缺点。广州泰基工程公司于2009年研制出了LTRA可回收锚索, 是一种主副索式的可回收锚索。上海房睿建筑科技有限公司于2012年开发出了一种新型的置入式可回收土钉。

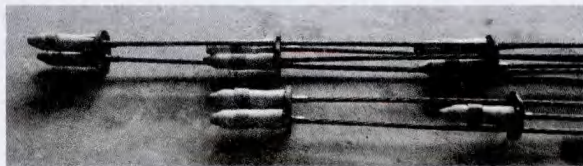
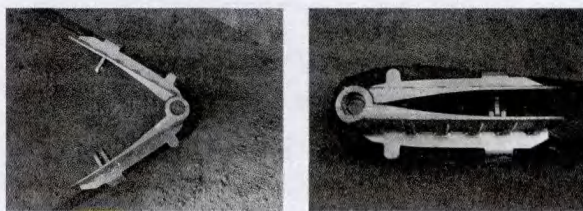


图8 压力分散型的直列无级调压式可回收锚索



(a) 弹开状态

(b) 闭合状态

图9 JL可回收锚索锚头的弹开和闭合状态

4 用于腐蚀地质环境的新型锚杆 (索)

在使用钢材作为拉杆的永久性锚固工程中, 一个重要问题是钢拉杆的防腐。钢材自身的物理化学性质、地下水和地层的水化和电学性质以及地层的化学成分都对锚杆 (索) 腐蚀的形成和发展具有重要影响。目前, 对于处于腐蚀地质环境的永久性锚固工程, 要么使用轻质高强、耐腐蚀、低松弛的非金属锚杆 (索) 代替钢锚杆 (索), 要么就是对钢锚杆 (索) 进行繁琐的防护处理。

在欧洲、北美、日本等发达国家, 上世纪90年代就开始试图用非金属锚杆 (索) 取代钢锚杆 (索), 力求从根本上解决由钢筋或钢绞线腐蚀所引起的工程耐久性问题。这类非金属锚杆 (索) 大多为采用玻璃 (Glass) 纤维、芳纶

(Aramid)纤维、碳(Carbon)纤维以及一些特殊纤维材料增强的塑料筋杆(索)体^[28-34]。意大利SIREG.SPA公司于上世纪90年代初研制出了系列化的玻璃纤维锚索。美国Hughes Brothers公司于上世纪90年代中期制作出了玻璃纤维筋锚杆。日本Highway Public公司和Sumitomo Construction公司于上世纪90年代中期开发出了采用芳纶纤维增强的Technora筋锚杆。上世纪90年代中期,意大利SIREG.SPA公司研制出了采用碳纤维增强的CARBOPREE筋锚杆(图10)。日本的Zenitaka-Gumi、Kajima等公司于上世纪90年代中期开发出了CFCC(碳纤维绞线)和Leadline(棒形碳纤维)筋锚杆。英国学者M. J. Turner于上世纪90年代末研制出了一种名为Paraweb聚酯织带的锚杆,



图10 CARBOPREE筋锚杆及锚具

这种锚杆由一根或多根Paraweb聚酯织带绕过钻孔底部而构成受拉杆件(图11)。

相对国外来说,国内对非金属锚杆(索)的研究起步较晚,研究机构主要集中在一些高等院校等部门^[35-38]。目前,国内也有一部分公司拥有自己的非金属锚杆产品,如深圳海川实业有限公司于2006年开发的路威2006FRP锚杆等。

国内为有效提高锚固工程的使用寿命,除开发非金属锚杆(索)外,还努力寻求开发具有防腐性能的金属锚杆(索)。四川准达岩土工程公司于2006年研制了自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索^[39, 40](图12,图13)。这种锚索具有有效防腐、克服锚固段应力集中、有效减小孔径、全孔一次注浆、可进行二次补偿张拉等特点。

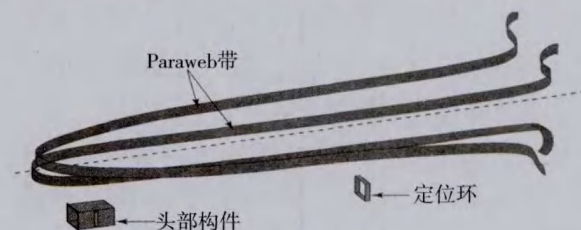


图11 Paraweb聚酯织带



图12 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索结构示意图



图13 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索实拍照片

5 用于软土地层环境的新型锚杆(索)

提高软土地层环境中单根土锚的锚固力,对于降低锚固技术施工成本及扩大使用范围具有重要意义。目前,常用的方法主要有两种,即扩体型锚杆(索)和二次高压灌浆锚杆(索)。

国外较早就对扩体型锚杆(索)开展了研究^[41-43],上世纪80年代末,瑞典的Atlas公司开发出了一一种由折叠铁片组成的囊袋扩体锚索,英国开发了Soilex囊袋扩体锚索;上世纪90年代,英

国万用锚杆公司开发出了UAC扩孔锚杆,英国Fondedile基础公司开发出了具有多个圆锥锚固体的锚杆,法国学者Soletanche开发出了一种可在松软土、岩溶地层以及低承载力的地层中反复灌浆的IRP锚杆。

国内对扩孔地锚的研究也一直十分重视,上世纪90年代,我国台湾学者卢锡焕发明设计了保壮PCBA扩孔地锚;台湾大地工程股份有限公司特制的扩孔器可在锚固段上扩成多个圆锥形扩体。深圳钜联锚杆技术公司于2001年开发了一种利用高压水射流束在土层中进行扩大头锚杆施工的工艺方法,被命名为“JL扩大头锚杆”或“高压喷射扩大头锚杆”。我国京冶地基工程公司则于2011年开发出了—种新型承压式囊袋扩体锚索(图14)。这种锚索具有如下特点:锚索囊式扩体段通过压力注浆向外均匀挤压,保障索体的置中;囊式扩体段对周边土体产生挤张作用,形成扩大头(图15),增加锚杆拉拔力;囊内灌注高标号水泥浆体,其结石体强度大于40MPa,可保证锚固端头强度。

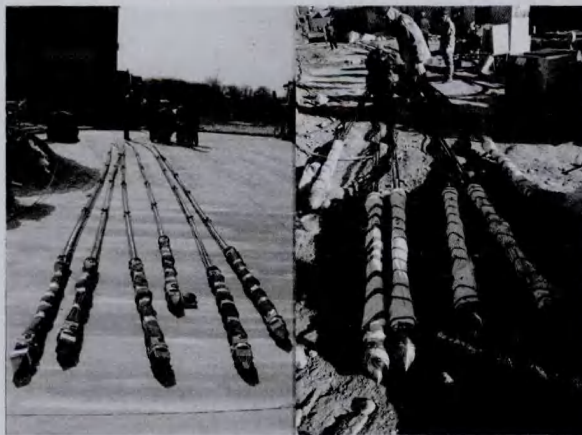


图14 待送入孔中的新型承压式囊袋扩体锚索



图15 从土中挖出的承压式囊袋扩体

6 用于地下洞室抗爆的新型锚杆(索)

研究地下洞室在爆炸荷载作用下的安全问题

具有重要的经济和军事意义。大量科学研究和工程实践表明,经过锚杆(索)加固的地下洞室除具有良好的抗静荷载性能外,还具有优异的抗爆炸荷载的性能^[44]。因此,锚固技术本身也是一种很好的地下洞室抗爆技术。

国内曾对普通全长粘结锚杆(索)的抗爆性能开展过大量的研究工作,近期又对一些新型锚杆(索)的抗爆性能开展了研究。总参工程兵科研三所近期开发出了—种新型端部消波锚杆^[45, 46, 47]及—种新型挤压套屈服锚索^[48]。所谓端部消波是指在锚杆钻孔端部设置—段空腔(图16),利用这段空腔削弱来袭爆炸应力波。挤压套屈服锚索(图17)则采用以柔克刚的办法,利用挤压套屈服机构的伸长来实现对洞室围岩大变形的让压。研究表明,端部消波锚杆和挤压套屈服锚索都具有较好的抗爆性能。

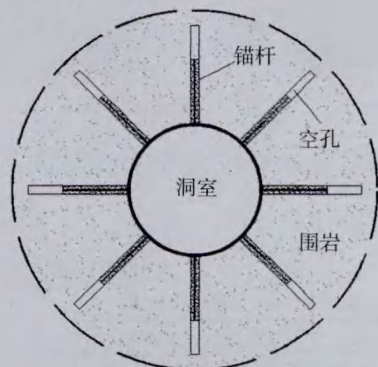


图16 端部消波锚杆支护洞室示意图

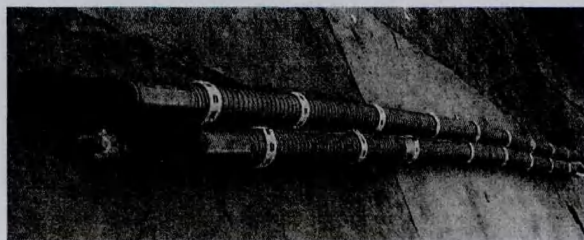


图17 新型挤压套屈服锚索

国外也比较重视抗爆锚杆(索)的研究。上世纪90年代中期,南非学者W.D.Ortlepp曾对—种锥头屈服锚杆(图18)的抗爆性能开展了大量的模型试验工作^[49, 50],结果表明,相对于普通全长粘结锚杆,锥头屈服锚杆具有十分优良的抗爆性能。这种锚杆的锥形头部可在注浆体内位移,同时保持锚固力,光滑杆体则可变形延伸。新加

坡防护科学技术局(DSTA)曾于2000~2001年间为检验瑞典的一种新型抗动载屈服锚杆(图19)的抗爆效果,进行了多次大规模的原型坑道内爆炸试验^[51]。实测结果表明,这种锚杆发挥出了很好的抗爆作用。

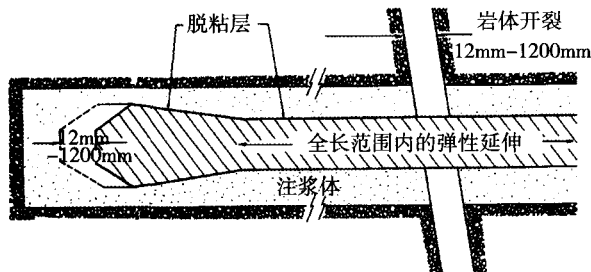


图18 锥头屈服锚杆的工作机理

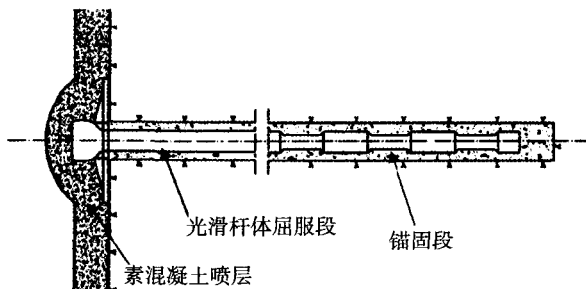


图19 新型抗动载屈服锚杆结构示意图

7 治理边坡地震灾害的新型锚杆(索)

汶川地震后,我国锚固工程界调查分析了地震对锚固边坡的破坏情况,发现在高烈度地震区锚固工程存在较严重的破坏现象,如锚头破坏、地梁或框架失效、锚索松弛和索体拉断等,于是开始思考开发能够治理严重地震灾害的预应力抗震锚索。

重庆交通科研设计院于2011年开发出了一种新型抗震锚索^[52, 53]。这种锚索以压力型锚索为基础,采用抗震锚固体系和抗震装置,以抗震内锚具为核心构件(图20)。该锚固体系可缓冲地震冲击力并与岩土体协调变形,从而避免锚固体系发生毁灭性破坏。目前,这种抗震锚索已在四川、云南等地高速公路边坡工程中得到应用。

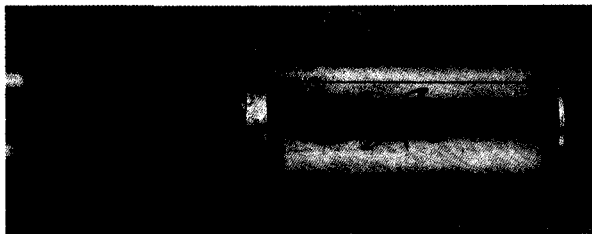


图20 某边坡工程中使用的抗震锚索的锚头

8 存在的问题及今后需开展的工作

综上所述,近10多年来国内外岩土锚固界在新型锚杆(索)开发利用方面已取得了令人瞩目的成绩。然而,作为岩土锚固工作者,我们在充分肯定成绩的同时,也应该看到锚杆(索)发展中仍然存在的一些问题。这些问题要么是工程建设需求提出的,要么就是锚杆(索)自身缺陷造成的。在今后的工作中,我们应针对这些问题,继续做好新型锚杆(索)的研发工作,以便更好地为国民经济和国防工程建设服务,主要包括以下几个方面。

(1) 针对深地下工程支护问题,加强对屈服型锚杆(索)的研发

随着人们对地下空间开发和地下资源开采力度的不断加大,未来的地下工程将越来越深入地下。深地下工程所处地质环境具有“三高一扰动”的复杂特征,建造过程中,如果支护措施不当,往往会造成恶性事故和重大灾害。普通的粘结式或机械式锚杆,往往变形让压能力差,易丧失锚固力,导致围岩失稳破坏。屈服型锚杆(索)可在保持锚固力的前提下与围岩共同协调变形,从而使地应力得以平稳释放。从上文中可知国内外已开发出了多种屈服型锚杆(索),但对屈服型锚杆(索)的研究仍有很多工作有待继续,例如研制新结构(材料)的屈服锚杆(索),具有高承载力和大变形量性能的屈服锚杆(索),可施加高预应力的屈服锚杆(索),具有防腐性能的屈服锚杆(索)以及可回收的屈服锚杆(索)等。

(2) 针对锚固工程耐久性问题,加强对非金属材料锚杆(索)的研发

尽管人们已试图通过多种途径提高锚固工程的使用寿命,例如制定严格的规范防护措施,采用非金属材料锚杆(索)或具有防腐性能的金属锚杆(索)等,但由于锚固工程属于隐蔽性工程,再加上工作环境和施工条件恶劣等原因,锚固工程的耐久问题仍未很好地解决。非金属材料锚杆(索)具有良好的抗腐蚀性能,在锚固工程中具有广阔的应用前景,但目前关于非金属材料锚杆(索)的研

研究和应用总体上还比较少,理论方面也没有形成比较成熟的体系,在工程实践中遇到的很多问题还未能得到很好的解决。今后关于非金属锚杆(索)还有很多工作有待加强,例如对非金属锚杆(索)锚固机理的研究,对非金属锚杆(索)长期工作性能的研究,对非金属锚杆(索)在特殊环境下工作性能的研究以及对非金属锚杆(索)预应力锚具的研究等。

(3) 针对城市基坑工程加固问题,加强对回收锚杆(索)的研发

可回收锚杆(索)为城市基坑加固提供了有效技术手段。然而,目前城市基坑锚索回收仍遗留有一些问题有待深入研究和解决。例如,多数回收式锚索回收不完全;承载体锚头不可回收;金属锚头留置于地下;未能完全解决地下污染问题;有些回收式锚索回收后,钢绞线破坏严重,不能重复使用;多数回收式锚索承载力的提高与回收拉力的降低以及锚索回收率之间存在矛盾;可回收式锚索的施工工艺和设计计算方法尚不完善等。为此,今后对可回收式锚杆(索)的开发还有待深入,主要包括研制高回收率的回收式锚索,研制非金属锚头的回收式锚索,研制高承载力回收式锚索以及开展回收式锚索设计计算方法和施工工艺的研究等。

(4) 针对软土地层工程加固问题,加强对扩体型锚杆(索)的研发

扩体型锚杆(索)为处于软土地层工程的加固提供了可行技术手段,但目前扩体型锚杆(索)的工程应用总体上还比较少,国家有关规范也未对此项技术作十分明确和具体的要求,其施工技术和设计方法仍有待进一步完善。今后应进一步发展和完善高压注浆工艺,加强对新型扩孔钻具的研制,不断研制新型注浆材料以及完善扩孔锚杆(索)设计方法等。

(5) 针对地下洞室锚固抗爆问题,加强对新抗爆锚杆(索)的研发

国外深钻地武器的持续发展已对我军国防工程及地下战略能源储备工程构成了严重威胁。锚固抗爆技术能够大幅度提高地下洞室抗爆性能。

目前,虽已开发了一些用于地下洞室抗爆的锚杆(索),但抗爆锚杆(索)技术仍有很大潜力可挖。今后一段时期有待开发的还有“弹簧式锚杆”、“粘滞性锚杆”、“根部摩擦消能锚杆”等新型抗爆锚杆(索)等。这些新型抗爆锚杆(索)目前正在抓紧研制之中。另外,开展深地下工程动静载耦合下的锚固技术研究也是当前一个重要的研究方向。

参考文献

- [1] R.沙赫, K.加肖尔等. 岩石锚杆支护实用手册[M]. 腾中健, 徐招才译. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [2] 陈安敏, 沈俊, 顾金才等. 岩土锚固技术研究现状、成就及展望[J]. 防护工程, 2010, 32(3): 66-73.
- [3] 钱七虎, 陈志龙. 21世纪地下空间开发利用展望[C]. 中国土木工程学会编. 中国土木工程学会第八次年会论文集. 1998: 162-169.
- [4] Charlie C Li. Performance of D-bolts Under Static Loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(2): 183-192.
- [5] Charlie C Li, Chantale Doucet. Performance of D-bolts Under Dynamic Loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(2): 193-204.
- [6] Charlie C Li. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(3): 396-404.
- [7] Wu R, Oldsen J. Development of a new yielding rock bolt—Yield-Lok bolt[C]. In: The 44th US Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, USA, 2010: 190 - 197.
- [8] Varden R, Lachenicht R, etc. Development and implementation of the Garford Dynamic Bolt at the Kanowna Belle Mine[C]. In: 10th Underground Operators' Conference, Launceston, Australia, 2008: 95-102.
- [9] Charette F, Plouffe M. Roofex—results of laboratory testing of a new concept of yieldable tendon[C]. In: Proceedings of the 4th International Seminar Deep and High Stress Mining. Perth, Australia, 2007: 395 - 404.
- [10] Anders A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 291 - 300.
- [11] Anders A. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 501 - 512.
- [12] [12] W D Ortlepp, P N Erasmus. A simple yielding element for steel reinforcement in earthquake-resistant structures[C]. In: 6th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structure, Perth, 2005: 1-10.
- [13] 张国锋, 于世波, 李国峰等. 巨厚煤层三软回采巷道恒阻让压互补支护研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1619 - 1626.
- [14] 连传杰, 徐卫亚, 王亚杰等. 新型高强预应力让压锚杆巷道支护性能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2329-2335.



- [15] 闫莫明. 矿用单束锚索的应用和发展[C]. 徐国明, 李伟中, 李文平等主编. 岩土锚固技术与工程应用新发展. 北京: 人民交通出版社, 2012: 445-449.
- [16] Barley, A.D., Chris R. Windsor. Recent advances in ground anchor and ground reinforcement technology with reference to the development of the art[C]. In: Proc. International Conference on Geotechnical Engineering. Melbourne, Nov.2000: 1048-1094.
- [17] Barley A.D., Payne W.D., McBarron P.L.. Six rows of high capacity removable anchors support deep soil mix cofferdam. In: 12th Europeane conference in soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, June 1999: 1465-1471.
- [18] Herb ST. Removable ground anchors—answer for urban excavations [J]. Ground Engineering, 1997, 30(3): 21-22.
- [19] 常波, 李钟. JCE回收式锚索在北京地区的试验研究[C]. 徐祯祥. 岩土锚固技术与西部开发. 北京: 人民交通出版社, 2002: 392-396.
- [20] 堀崎敏嗣, 三浦利浩, 高橋昌秀. 高周波誘導加熱を利用した除去式アンカー工法[J]. 建設の施工企画, 2008, 4(4): 101-105.
- [21] Toshihiro Oka, Tsunematsu Mukaidani, Toshiji Horisaki, etc. Development of removable ground anchor using high frequency induction heating method[C]. In: Proceeding of the 4th annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan. Wako Japan, 2007: 173-175.
- [22] 屋伏行雄. 利用した除去式アンカー工法の開発[J]. 地盤工学ジャーナル, 2009, 4(4): 307-315.
- [23] 陆观宏, 倪光乐, 莫海鸿. 一种新型的可回收锚索技术[J]. 岩土工程, 2006, 9(5): 38-39.
- [24] 盛宏光, 聂德新, 傅荣华. 可回收式锚索试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 68-72.
- [25] 李保国, 宁锐, 林建平. 直列无级调压式速卸锚索施工技术[J]. 施工技术, 2007, 36(9): 37-39.
- [26] 李锡银. 定阔式可回收锚索在基坑支护中的应用[J]. 中国水运, 2008, 8(9): 187-188.
- [27] 王立明, 张全胜. 置入式可回收土钉试验研究[C]. 徐国明, 李伟中, 李文平等主编. 岩土锚固技术与工程应用新发展. 北京: 人民交通出版社, 2012: 174-177.
- [28] Matthew Sentry, Abdelmalek Bouazza, etc. Advancements in Ground Anchors: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strands[C]. In: Stuart Littlejohn, edited. International conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service, London, UK.2007: 321-330.
- [29] Brahim Benmokrane, Xu Michael H. Design and applications of aramid and carbon fiber-reinforced plastic(FRP)ground anchor [R]. Sherbrooke: University of Sherbrooke, 1996.
- [30] Clarke J.L., Waldron P. The reinforcement of concrete structures with advanced composites[J]. The Structural Engineer, 1996, 17(3): 56-61.
- [31] Ehsani M R, Saadatmanesh H, Tao S. Bond of GFRP rebars to ordinary-strength concrete[C]. In: Nanni A, Charles W ed. Proceedings of International Symposium: Fibre-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures. Detroit, 1993: 333-346.
- [32] J.F. Berthet, E. Ferrier P, Hamelin G, et al. Modeling of the Creep Behavior of FRP-Confined Short Concrete Columns Under Compressive Loading[J]. Materials and Structures, 2006, 39(1): 53-62.
- [33] M.J. Turner. Trial soil nail wall using PermaNail corrosion-free soil nails[J]. Ground Engineering, 1999, 32(11): 46-50.
- [34] 袁勇, 贾新. 岩石GFRP锚杆的可行性研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 13-15.
- [35] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋锚杆及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2205-2210.
- [36] 马念杰, 李英明, 颜爱珍. 新型玻璃钢锚杆成型工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(1): 14-16.
- [37] 李明, 张起森, 何唯平. FRP锚杆的研究应用综述[J]. 中外公路, 2005(25): 141-143.
- [38] 彭衡和, 邱贤辉. GFRP锚杆加固高速公路红砂岩边坡的工程实例分析[J]. 公路工程, 2008(4): 114-117.
- [39] 杨俊志, 冯杨文. 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索的研究与应用[J]. 预应力技术, 2006, 22(2): 17-22.
- [40] 邢丹, 王立明, 袁富富. 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索在高边坡加固工程中的应用[J]. 四川水力发电, 2009, 28(1): 53-56.
- [41] Petros P. Xanthakos. Ground anchors and anchored structures [M]. New York: John Wiley&Sons, Inc. 1991.
- [42] 翟金明, 周丰俊, 刘玉堂. 扩大头锚杆在软土地区锚固工程中的应用与发展[C]. 中国岩石力学工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会编. 锚固与注浆新技术(第二届全国岩石锚固与注浆学会会议文集)北京: 中国电力出版社, 2002: 26-31.
- [43] 程良奎, 范景伦, 韩军等著. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [13] 李世民, 韩省亮, 曾宪明. 锚固类结构抗爆性能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3553-3562.
- [45] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1892-1897.
- [46] 顾金才. 锚固洞室抗爆能力试验研究[C]. 地下交通工程与工程安全——第五届中国国际隧道工程研讨会文集. 上海, 2011: 11-24.
- [47] 李世民, 李晓军, 李洪鑫等. 一种新型复合锚固结构抗爆性能的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1223-1230.
- [48] 刘玉堂. 屈服锚索的抗震作用[J]. 预应力技术, 2011(3): 5-8.
- [49] Ortlepp W.D. Grouted Rock as Rockburst Support: A Simple Design Approach and An Effective Test Procedure[J]. Journal of The South African Institute of Mining & Metallurgy, 1994, 94(2): 47-63.
- [50] Ortlepp W D, Stacey T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 15-21.
- [51] Zhou Yingxin, Zhao Jian. Advances in Rock Dynamics and Applications[M]. New York: CRC Press. 2011.
- [52] 罗斌, 唐树名, 饶泉宇等. 抗震锚索的开发与应用[J]. 公路交通技术, 2011(6): 25-30.
- [53] 罗斌, 唐树名, 饶泉宇等. 抗震锚索及其应用[C]. 徐国明, 李伟中, 李文平等主编. 岩土锚固技术与工程应用新发展. 北京: 人民交通出版社, 2012: 32-36.