

DOI: 10.11779/CJGE2014S2034

囊式扩体锚杆施工技术与工程应用

刘 钟^{1, 2}, 郭 钢^{1, 2}, 张 义^{1, 2}, 邓益兵³, 卢璟春^{1, 2}

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 3. 上海海事大学海洋环境与工程学院, 上海 201306)

摘要: 在论述了扩体锚固技术发展历程以及扩体锚杆的承载特性和破坏模式的基础上, 阐述了与传统等直径锚杆相比, 扩体锚杆的承载特性的优越性和破坏机制的合理性。基于扩体锚杆的众多优势, 研发了具有多重防腐功能的承压型囊式扩体锚杆, 并详细介绍了该种锚杆的结构型式、施工技术、施工设备和地基土性适用条件。最后结合一些典型的承压型囊式扩体锚杆应用案例, 论述了该种锚杆目前在中国的推广应用现状。

关键词: 等直径锚杆; 扩体锚杆; 承载特性; 破坏模式; 施工; 应用

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0205-07

作者简介: 刘 钟(1950-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土锚固、地基处理和基坑工程等方面的研究工作。E-mail: zzliu8@gmail.com。

Construction technology and engineering applications of capsule-type under-reamed ground anchor

LIU Zhong^{1, 2}, GUO Gang^{1, 2}, ZHANG Yi^{1, 2}, DENG Yi-bing³, LU Jing-chun^{1, 2}

(1. Central Research Institute of Building and Construction of MCC Group, Beijing 100088, China; 2. China Jingye Engineering

Corporation Limited, Beijing 100088, China; 3. Ocean Environment and Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai

201306, China)

Abstract: Based on the description of the developing history, the bearing capacity and failure mode of under-reamed ground anchor, the advantages of its bearing capacity and the rationalities of its failure mode are elaborated compared with those of normal tension-type anchor. According to the advantages of under-reamed anchor, a capsule-type under-reamed anchor with multiple anti-corrosion function is developed. Besides, structure, its construction technology, construction equipment and the applicable soil conditions are all discussed. Finally, combined with some classic applications of the capsule-type under-reamed anchor with multiple anti-corrosion function, the current situation of its promotion and application in China is introduced.

Key words: normal anchor; under-reamed anchor; bearing capacity; failure mode; construction; application

0 引言

随着中国城镇化建设的快速发展和城市建设用地的日益稀缺, 近年来, 地下空间建设正在向更深、更大的方向发展。大量的巨型地下交通枢纽、港口船闸、多层地下商城、地下仓库和车库、地下水库和地下人防工程在大中型城市中不断涌现。伴随而来的深大基坑支护工程和地下空间抗浮工程正面临新的挑战, 同时也为岩土锚固技术发展带来了新的机遇, 承压型囊式扩体锚杆新技术正是伴随着这些深大地下空间的建设需求而问世的。

为了提高土层锚杆的承载能力、安全度和耐久性, 应对地质条件的复杂性和工程需求的多样性, 自 20 世纪 70 年代, 出现了以机械扩孔、爆破扩孔和水力扩孔为技术基础的各类扩体锚固技术。其中, 较为著名的有英国 Fondedile 公司开发的多段式机械扩张绞刀

扩孔锚杆^[1], 法国 Soletanche 公司开发的机械径向绞刀扩孔锚杆^[1], 瑞典开发的由可折叠钢片构成的扩体锚杆^[2], 捷克斯洛伐克采用的爆炸扩孔锚杆^[1], 英国应用的高压喷射扩孔锚杆^[3], 日本采用的搅拌扩孔锚杆^[4]以及台湾采用的机械扩孔地锚^[5]。

世界知名公司开发的各类扩体锚杆技术在高承载力方面比传统的等直径锚杆有显著的进步, 然而, 这些技术依然存在着固有的技术缺陷。譬如, 机械绞刀扩孔技术通常只适用于密实黏性土层, 在砂性土层和地下水丰富的地层中扩穴很容易发生坍塌。此外, 扩穴后的渣土清除也是一个难以解决的技术问题。而扩穴内残留松散渣土必然会导致扩体锚固段长度和直径减小、锚固体围压减小, 锚土之间的黏结力下降, 进

而导致承载力降低。对于炸药爆破扩孔技术,首先在技术上很难控制爆炸扩孔后的空间形态和几何尺寸,其次技术实施不当还会带来施工安全问题,并且连续的爆破施工可能会使地层和先期施工的扩体锚杆产生破坏,引发工程事故。

上述欧洲国家在 20 世纪 80 年代所开发的高压喷射扩孔锚杆技术,目前在中国也投入了工程应用,但是在工程项目施工中发现以下 4 个重大技术缺陷。

(1) 扩体锚固段注浆体抗压强度不足

国内行业标准 JGJ/T 282—2012《高压喷射扩大头锚杆技术规程》^[6]要求旋喷扩大头锚杆的锚固段注浆体抗压强度不应小于 20 MPa。在扩体锚杆施工中,通常需要先进行钻进成孔,再更换旋喷器采用水灰比为 1.0~1.5 的水泥稀浆进行高压喷射流扩孔操作,并在锚杆杆体安放后,采用水灰比为 0.4~0.6 的水泥浓浆进行置换注浆。技术规程要求高浓度的纯水泥浆须把扩体锚固段内的水泥土浆置换出来,以便注浆体能够达到不小于 20 MPa 抗压强度的基本要求。但是,通过工程实践发现,采用压力注浆的方法实施大直径扩体锚固段内的水泥土浆全置换是难以实现的,在实际工程中,水泥土采样的抗压强度实测值远低于 20 MPa。

(2) 施工质量的可控性差

旋喷扩体锚杆施工采用的高压泵压力通常为 25~30 MPa,喷嘴移动速度为 10~25 cm/min,转速 5~15 r/min。旋喷施工易受人为因素影响,操作手的水平与责任心以及高压泵系统的性能与状态直接影响扩体锚杆的成锚质量。在施工中,任何高压泵压力过低或不稳定,旋喷进尺或提升速度过快,旋喷扩孔起始、终止位置不准确,水泥浆液配比有误,或者地层存在不确定性都会危及成锚的质量,特别是对扩体锚固段的长度、直径和注浆体抗压强度的控制十分困难。上述这些因素是导致国内某些深基坑支护工程中的旋喷扩大头锚杆出现施工事故的主要原因。

(3) 防腐与耐久性问题

由于旋喷扩体锚固段施工难以实现《岩土锚杆(索)技术规程》CECS 22:2005^[7]要求的 30 MPa 抗压强度,所以难以采用压力型的扩体锚固技术。而拉力型扩体锚杆的锚固体在受拉后极容易产生开裂,引发扩体锚杆腐蚀问题,这种耐久性降低又可能带来锚固体的长期安全性问题。

(4) 锚杆筋体安放无法保证居中问题

采用旋喷扩孔技术施做扩体锚杆时,在扩体锚固段内经常出现锚杆杆体发生偏斜不居中的现象,特别是在倾斜扩体锚固工程中。因此,如何保障锚杆杆体置放后居中,一直困扰着工程技术人员。

为了能够解决上述机械扩孔锚杆、爆破扩孔锚杆和旋喷扩孔锚杆技术中的问题与缺陷,中国京冶工程技术有限公司成功开发了具有多重防腐功能的承压型囊式扩体锚杆新技术体系。这一新技术体系的发展可以用图 1 的扩体锚杆的历史发展沿革来说明,已投入实际工程应用的承压型囊式扩体锚杆的开挖后形态参见图 2。

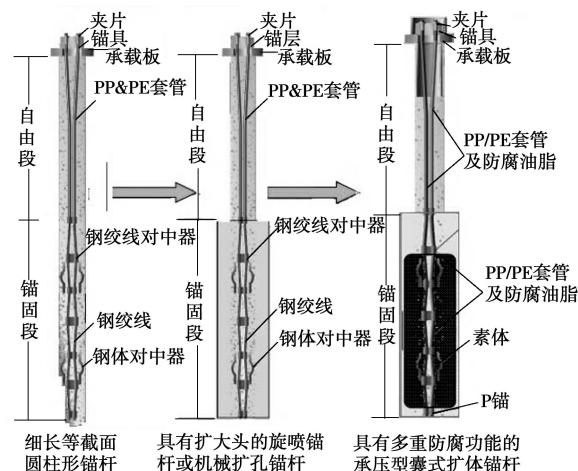


图 1 承压型囊式扩体锚杆的历史发展沿革

Fig. 1 Developing history of capsule-type under-reamed anchor



图 2 承压型囊式扩体锚杆的开挖检验工程照片

Fig. 2 Field tests on capsule-type under-reamed anchor

从图 2 中的承压型囊式扩体锚杆照片能够看到扩体锚固段的核心部分是由预设直径的囊仓所包裹的抗压强度大于 40 MPa 注浆固结体所构成,其周围被更大直径的水泥土加固体所包围。在实际工程中,对于不同特性的地层,扩体锚固段的空间形态和几何尺寸可以通过囊仓的设计调整来满足单锚设计承载力的控制要求。

近两年多来,由于承压型囊式扩体锚杆新技术具有显著的技术、环保和成本优势(参见图 3),这一新技术已经推广到 10 多个省市,采用承压型囊式扩体锚杆的深基坑支护和地下空间抗浮工程项目已超过 50 项,为工程建设方节省了大约 15%~20% 的建设资金,为国家节约大约 20% 的钢材和水泥,有力促进了国民经济的可持续发展。

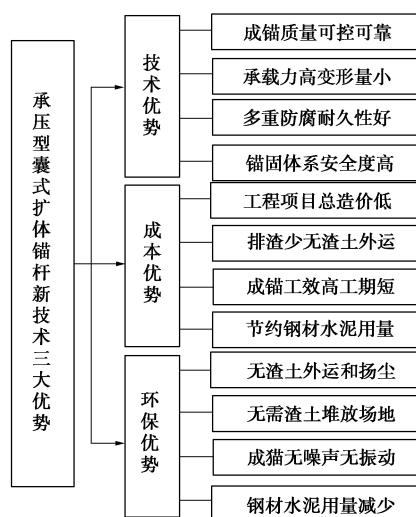


图 3 承压型囊式扩体锚杆新技术体系的三大优势

Fig. 3 Three advantages of new technology of capsule-type under-reamed anchor

1 破坏模式与承载机制

为了能够完善承压型囊式扩体锚杆新技术体系, 深入认识扩体锚杆的破坏模式、基本特性和承载力学机制, 笔者开展了多项理论分析和试验研究工作。通过 100 多个室内模型试验研究^[8]及有限元^[9]与颗粒流数值仿真, 发现扩体锚杆的破坏模式与扩体锚杆的深径比具有相关性, 深径比 T/D 定义为扩体锚杆的扩体锚固段顶端至地表的距离与扩体锚固段的直径之比。模型试验与有限元计算结果揭示出在模型试验条件下, 若 $T/D > 9$, 则扩体锚杆表现为深埋扩体锚杆的承载特性, 其荷载与位移的拉拔特征曲线表现出单调上升特征。图 4 为深埋扩体锚杆与传统锚杆的荷载与位移拉拔特征曲线对比图。众所周知, 等直径传统锚杆的拉拔曲线存在峰值, 荷载达到峰值后, 荷载 - 位移曲线将会出现陡降现象, 即锚杆承载力随着拉拔位移的持续增加而大幅度降低。

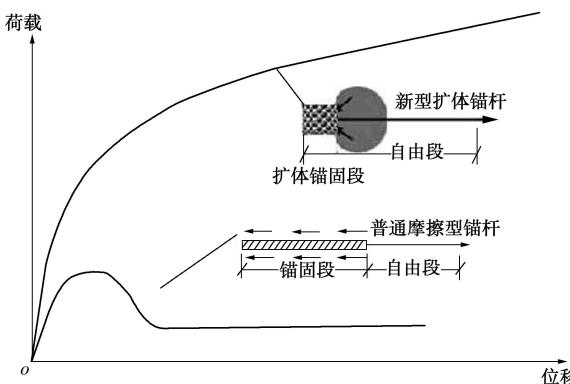
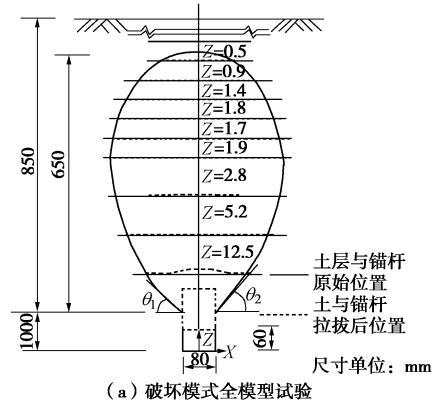
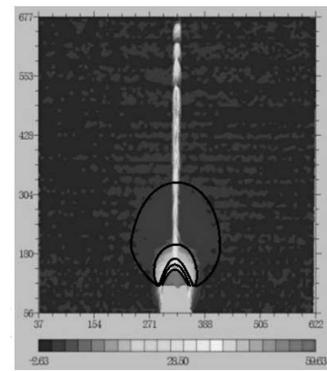


图 4 深埋扩体锚杆与传统锚杆的荷载 - 位移特征曲线对比图
Fig. 4 Comparison of Q - S curves of capsule-type under-reamed anchor and normal tension-type anchor

扩体锚杆的拉拔特征曲线不存在荷载峰值点, 锚杆荷载随着拉拔位移增加而表现出单调上升的力学性质, 其特征曲线表现出硬化的特性。深埋囊式扩体锚杆的这种承载变形特征随后又被近百个现场足尺试验实测结果所验证。扩体锚杆与传统锚杆具有不同力学特征的原因, 可以通过扩体锚杆破坏模式的模型试验结果加以阐述。文献[10~12]曾详细阐述了扩体锚杆破坏模式的全模型与半模型模型试验, 其最重要的试验实测结果见图 5。



(a) 破坏模式全模型试验



(b) 破坏模式半模型试验

图 5 深埋扩体锚杆破坏模式模型试验结果

Fig. 5 Model tests on failure mode of deep under-reamed anchor

图 5 (a) 所示为破坏模式的全模型试验结果, 图中展示了深埋扩体锚杆的破坏包络线, 其破坏体呈封闭气球形, 且破坏体被限制在地表以下一定深度的土层中。深埋扩体锚杆的破坏模式属于局部剪切破坏, 即锚杆位移会随拉拔荷载增加而增大, 其气球形破坏体也会相应逐步扩大, 破坏体周围的土体会被逐渐压密, 因而当扩体锚杆位移量较大时其承载力仍然会持续出现小幅增长的特点, 其前提是气球形破坏体的上方始终存在一定厚度的稳定土层, 即剪切破坏面未贯通至地表面。采用近景数字摄影变形量测方法获取的半模型试验结果(如图 5 (b))也揭示了相似的承载力学特征, 扩体锚杆的气球形破坏体随着拉拔荷载与位移的不断增加而逐渐变大, 实质上破坏体的包络面面积将随着荷载提高而扩展, 而作用于压力泡表面新

增面积上的抗力将是扩体锚杆荷载-位移曲线单调上升的内在力学原因。在工程实践中,通过现场足尺拉拔试验也发现,深埋扩体锚杆随着拉拔位移的逐步增加,新增拉拔力将通过扩散到更大的承压面积上而取得平衡。只要气球形破坏体具有足够的上覆土层厚度,并且拉拔位移量能够满足建构筑物的服务条件,该深埋扩体锚杆就可能获得更高的扩体锚固段端承力。因此可以认为深埋扩体锚杆承载变形曲线的单调上升的特性,主要源自于扩体锚杆端承力的贡献。

此外,中国现行扩大头锚杆的行业标准^[6]和英国相关标准^[3]关于扩体锚杆的承载力计算方法也说明了扩体锚固段端承力在整个扩大头锚杆承载力中所占的重要地位。在囊式扩体锚杆工程设计中,假定锚杆的承载力由三部分组成,包括普通锚固段侧摩阻力、扩体锚固段侧摩阻力和扩体锚固段前端面的端承力。具体的竖向和倾斜囊式扩体锚杆的抗拔力极限值设计计算方法详见文献[3, 6]。

2 结构型式与适用地层

承压型囊式扩体锚杆主要适用于第四系地层,包括黏土、粉土、黄土、砂土、砾砂、含卵砾石土、全风化和强风化岩层等地层。目前,这项新技术工程应用范围涵盖了土木建筑工程中的深基坑支护、结构抗浮以及边坡防护工程领域。其工程应用的最大优势是承载力大、安全度高、耐久性好、施工质量可控可靠,并且工程造价低。

承压型囊式扩体锚杆的结构构造特点与关键技术要点如下:①具备可以展开形成任意直径、长度、形态的可以折叠的完全封闭的囊仓。②筒织囊仓材料具有足够的抗拉、抗压、抗刺破、防渗漏功能。③通过水泥浆或水泥砂浆的定量压力灌注,可控制囊仓膨胀扩展成的空间形态与几何尺寸。④压力注浆系统配备了单向阀装置和保压排气装置。⑤采用杆体、承压钢板、摩擦压力筒和挤压锚组成的压力型传力机构。⑥装配具有防腐功能的前端导向密封结构。⑦采用工厂制造与现场快速装配相结合的施工成锚工艺。

采用上述关键技术后,能够将装配好的承压型囊式扩体锚杆杆体顺利地通过直径为140~180 mm的钻孔放入设计的锚固部位,再通过控制压力和水泥浆量,压力灌注囊仓形成任意设计形态和直径的扩体锚固段。

3 组合式施工新技术

近两年来,承压型囊式扩体锚杆技术体系的工程应用主要采用了:①高压喷射扩孔+胀压扩孔组合式

施工技术;②机械扩孔+胀压扩孔组合式施工技术。这两项组合式新工法能够解决其他扩体锚杆施工技术与工法的现存弊病,确保施工质量可控可靠和实现锚杆的高承载力,同时施工工艺也相对简单、便于实施。

(1) 高压喷射扩孔+胀压扩孔组合式施工新技术

第一项组合式施工新技术由钻喷注一体化施工技术与囊仓胀压扩孔技术组合构成。采用中国京冶开发的可液控启闭辅助注浆的钻具^[13],能够在一序施工中实现钻孔、高压喷射流扩孔和压力注浆3种功能。这项施工技术的核心是通过横向高压喷射钻具与竖向注浆钻具的结合,实现了射水钻孔、高压旋喷扩孔和钻孔底部压力注浆的一体化施工,从而大大简化了现有高压旋喷扩体锚杆的施工工序,缩短了扩体锚杆施工时间。若采用MXL-160、JXD-100长钻架旋喷锚杆钻机或塔式旋喷锚杆钻机还可能进一步提高功效、实现一序施工并节约水泥用量。

中国京冶开发的可控膨胀挤压土体装置是承压型囊式扩体锚杆的关键部件,通过应用这种装置能够实现扩体锚杆的胀压扩孔,可独立应用于较软地层中的扩体锚杆施工。这种方法的优点是施工操作简便易行,扩体锚固段与周围土体接触紧密,同时提高了扩体锚固段的围压及其周边土体的抗剪强度指标,进而提高了囊式扩体锚杆的承载力。但是这项单一施工技术的缺点是其地层适用范围受限,在较硬或密实地层中施工时,囊式扩大头的膨胀度有限,往往无法达到设计扩孔直径的要求。

高压喷射扩孔+胀压扩孔组合式施工新技术的最大优点是通过这两种施工方法的优势互补,全面规避了它们各自的技术缺陷。

a)采用可控膨胀挤压土体装置彻底解决了高压喷射扩体锚杆施工技术中,扩体锚固段注浆体的空间形态和大小不确定以及抗压强度不足问题。利用囊仓胀压扩孔技术可以在旋喷扩孔结束后,利用预设囊仓形态与尺寸完全控制了扩体锚固段的空间形态和体积大小。通过独立的囊仓压力注浆工艺,使用水灰比为0.40~0.45的水泥浓浆,1~2 MPa的注浆压力,依靠特种控压排气和止回保压装置还可以保持囊仓内的压力与围压相对平衡。而囊仓内的水泥注浆体的7天强度就可以达到40 MPa以上,完全能够满足在扩体锚固段底端设置压力型机构的技术要求。

在高压喷射扩体锚杆施工中,因员工素质和施工管理等因素引发的施工质量问题,能够通过设专人量测水泥浆罐内的液面高度变化来控制囊仓内注浆量的简单方法来加以控制与解决。囊仓内高质量定量压力注浆方法使锚杆施工质量实现了可控可靠,从而在囊式扩体锚杆个体与整体两方面提高了锚固体系的安全

度。

由于扩体锚杆的传力杆体和囊式可控膨胀挤压土体装置连接牢固, 因此, 当囊式扩体锚杆整体结构装置放置于锚孔之后, 随着囊仓内压力注浆量的不断增加, 囊仓逐渐膨胀, 最终使扩体锚杆的主传力杆件处于扩体锚固段内的居中位置。此外, 承压型囊式扩体锚杆的底端采用了压力型结构, 主传力杆件可采用无黏结钢绞线, 因此, 主传力杆件具有防腐油脂、PE 套管、注浆体、囊袋和金属导向帽等多重防腐措施, 从而使承压型囊式扩体锚杆的防腐性能和耐久性得到了极大提高。

b)采用高压喷射流扩孔技术大大拓展了囊仓胀压扩孔施工技术的地层适用范围, 如果仅靠单一的囊仓压力注浆胀压扩孔技术, 很难将这一施工技术手段推广到松散土地层和软土地层以外的其他地层。现在引入高压喷射流技术先期利用高压喷射水流或浆流切割各类岩土体, 得以在囊仓内压力注浆之前形成了足够大直径的扩体锚固段孔穴, 或略小于设计直径的扩体锚固段孔穴, 然后在经过囊仓内压力注浆就能够实现囊仓全尺寸展开并与锚周土体紧密贴合。高压喷射扩孔和胀压扩孔两种施工技术的紧密结合, 不但能使组合式施工新技术地层适用范围大为扩展, 还能够使施工质量水平明显提高, 进而实现了承压型囊式扩体锚杆的高承载力、小变形、高效率和低成本。

(2) 机械扩孔+胀压扩孔组合式施工新技术

第二项组合式施工新技术主要由机械绞刀扩孔技术与囊仓胀压扩孔技术组合而成。利用不同类型的机械绞刀扩孔钻具, 能够在黏性土或全、强风化岩层中进行扩孔施工, 而胀压扩孔技术仍然是利用可控膨胀挤压土体装置进行囊仓胀压扩孔施工。

前文曾经指出, 机械扩孔技术的存在两个缺陷: 一是在砂性土地层和富水地层中施工时, 容易产生扩穴坍塌; 二是扩孔后如何清渣。应用机械绞刀扩孔+胀压扩孔组合式施工新技术, 有利于这两种施工方法相互取长补短, 即机械绞刀扩孔技术扩大了囊仓胀压扩孔技术的地层适用范围; 而应用囊仓胀压扩孔技术能够通过囊仓膨胀挤压土体的功能弱化机械绞刀扩孔可能引起的扩穴坍塌效应, 并能够将孔内未清除干净的渣土挤压密实, 同时也保证了囊式扩体锚杆的主要传力杆件得以处于扩体锚固段内的居中位置。

采用上述两种组合式施工技术, 囊式扩体锚杆在施工质量控制和耐久性两方面得到大幅提升。其技术进步主要体现在囊仓压力注浆工艺质量的高度可控性, 确保扩体锚固段注浆体的短期抗压强度超过 40 MPa。另外, 由于采用了多重防腐技术措施还可以显著提高扩体锚杆的耐久性, 确保了用于结构抗浮和边

坡防护工程的囊式扩体锚杆的长期使用性能达到设计年限的要求。

4 施工设备与工艺流程

4.1 钻机装备与配套机械设备

目前承压型囊式扩体锚杆的实际工程应用主要涉及岩土锚固的 3 个领域, 即结构抗浮、基坑支护和边坡防护领域^[14]。针对采用囊式扩体锚杆设计的抗浮锚固工程, 应优先使用郑州和武汉生产制造的粉喷搅拌桩塔式钻机, 施工前需要对钻机进行功能性技术改造, 更换特种钻具, 增加用于旋喷工艺的分流器, 使之改型成为高效的旋喷扩体锚杆施工钻机, 见图 6。这种电动塔式钻机稳定性好, 移位速度快, 施工操作方便, 且易于引入钻喷注一体化施工技术, 有利于实现一序施工, 其单序钻扩孔深度可以达到 24 m, 施工效率高。对于设计长度为 20 m 的抗浮囊式扩体锚杆, 单机日产量 20 根左右, 即单机施工效率能够达到 400 m/d 左右的高水平。



图 6 塔式旋喷扩体锚杆钻机装备

Fig. 6 Tower-type jet grouting rigs of under-reamed anchor

针对采用囊式扩体锚杆设计的深基坑支护工程或边坡锚固工程, 建议采用无锡生产制造的主钻架长约 11~13 m 的 JXD-100 型或 MXL-160 型长钻架旋喷锚杆钻机 (参见图 7), 以便减少倾斜锚杆的施工工序, 达到提高施工效率、减少人工成本、节约建筑原材料的目的。



图 7 长钻架旋喷扩体锚杆钻机装备

Fig. 7 Long frame jet grouting rigs of under-reamed anchor

4.2 施工工艺流程

承压型囊式扩体锚杆施工的工艺流程主要由编锚、钻孔与扩孔、锚杆安插、压力注浆、防水与防腐处理、张拉和锁定等六大工艺流程所组成, 单根囊式扩体锚杆的施工工艺流程见图 8。

5 囊式扩体锚杆新技术的工程应用

基于承压型囊式扩体锚杆具有优良的承载力学机制和安全合理的施工方法, 其承载能力能够比传统锚杆提高 2~3 倍, 建筑原材料可节约 20% 左右, 锚固工程总造价能够降低 10%~20%。因此, 近两年多来, 承压型囊式扩体锚杆已在 10 多个省市投入工程应用, 已完成的典型深基础支护与结构抗浮工程项目超过 50 项, 累计施工长度超过 40 万延长米。表 1 和表 2 列出了部分已完成的典型工程项目, 从中可以获得对承压型囊式扩体锚杆工程应用现状的初步了解与认识。

6 结 论

本文首先论述了扩体锚杆的历史发展进程, 通过模型试验和现场足尺试验结果分析了扩体锚杆承载力学机制的特点, 然后结合承压型囊式扩体锚杆的结构形式和地基土层适用性详细介绍了扩体锚杆的组合式施工新技术、施工设备和施工工艺流程。最后, 通过几项典型的地下空间抗浮与深基坑支护工程应用案例阐述了承压型囊式扩体锚杆在国内的工程应用现状, 并得到以下 4 点结论。

(1) 承压型囊式扩体锚杆在工程应用中克服了传统等直径锚杆的应变软化承载特性, 拥有着卓越的承载特性和合理的破坏机制。

(2) 囊式扩体锚杆采用柔性囊仓、保压排气装置和压力型设计, 使其较现有的旋喷扩大头锚杆在注浆体抗压强度、施工质量可控性、防腐耐久性和安全度等方面具有较大优势。

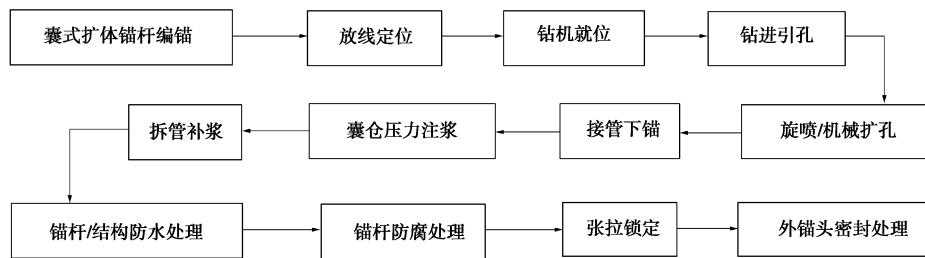


图 8 囊式扩体锚杆的施工工艺流程图

Fig. 8 Process flow of capsule-type under-reamed anchor

表 1 典型的承压型囊式扩体锚杆的深基坑支护工程应用概况

Table 1 Classic engineering applications of capsule-type under-reamed anchor in deep excavation programs

序号	项目名称	单锚长度/m	单锚承载力设计值/kN	锚杆数量	基坑深度/m
1	深圳中国储能大厦基坑支护工程	24	540	600	24
2	昆明环城南路 262 号旧城改造基坑支护工程	28	550	360	21
3	无锡东旺商务广场基坑支护工程	13~19	350	150	16~18
4	海门市工商局办公楼基坑支护工程	12~18	250	150	6.8
5	成都奥森特基坑支护工程	22	500	880	14.5
6	济南滨河商务中心基坑支护工程	18	500	300	14~16

表 2 典型的承压型囊式扩体锚杆的地下空间抗浮工程应用概况

Table 2 Classic engineering applications of capsule-type under-reamed anchor in anti-floating programs

序号	项目名称	单锚长度/m	单锚承载力设计值/kN	锚杆数量	基底埋深/m
1	河南煤业化工集团研发中心抗浮工程	18	600	4450	14.5
2	开封建业—铂尔曼酒店抗浮工程	14	540	1800	14
3	泉州新天一城市广场抗浮工程	23	700	1500	10
4	成都龙泉国寓抗浮工程	9.5	450	1800	11
5	南京证大大拇指广场抗浮工程	12	600	2200	14
6	威海青岛中路 87 号公寓式酒店抗浮工程	11	550	996	8
7	庐江中心城抗浮工程	11	420	1040	7
8	合肥茶博城抗浮工程	13	520	755	10.5

(3) 囊式扩体锚杆的两种组合式施工新技术, 以及专用的施工设备和特有的施工工艺流程能够确保实现囊式扩体锚杆的高承载、低变形、经济环保等特质。

(4) 凭借着较高的技术、成本和环保优势, 承压型囊式扩体锚固新技术体系目前已在全国开展了大量的工程应用, 已为建设方节约工程投资数千万元人民币。

参考文献:

- [1] HOBST L, ZAJÍC J. 岩层与土体的锚固技术[M]. 王绍基, 译. 北京: 冶金部建筑研究总院, 1986. (HOBST L, ZAJÍC J. Anchoring in rock and soil[M]. WANG Shao-ji, trans. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction, Ministry of Metallurgical Industry, 1986. (in Chinese))
- [2] MASSARSCH K R, OIKAWA K, ICHIHASHI Y, et al. Design and practical application of soilex anchors[C]// Ground Anchorages and Anchored Structures, Proceedings of The International Conference Organized by The Institution of Civil Engineers and Held in London, UK. 1997: 20 - 21.
- [3] British Standards Institute, British Standard Code of Practice for Ground Anchorages[S]. England, 1989.
- [4] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 35 - 45. (CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, HAN Jun et al. Ground anchorage[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 35 - 45. (in Chinese))
- [5] LIAO H J, ASCE M, HSU S T. Uplift behavior of blade-underreamed anchors in silty sand[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, ASCE, 2003: 560 - 568.
- [6] JGJ/T282—2012 高压喷射扩大头锚杆技术规程[S]. 2012. (JGJ/T282—2012 Technical specification for underreamed anchor by jet grouted[S]. 2012. (in Chinese))
- [7] CECS22:2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 2005. (CECS22:2005 Technical specification for ground anchors[S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 郭钢, 刘钟, 邓益兵, 等. 砂土中扩体锚杆承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3645 - 3652. (GUO Gang, LIU Zhong, DENG Yi-bing, et al. Model test research on bearing capacity characteristics of underreamed ground anchor in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3645 - 3652. (in Chinese))
- [9] 郭钢. 扩体锚杆承载特性与破坏模式模型试验与数值模拟研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2012. (GUO Gang. Model test and numerical simulation on bearing capacity characteristics and failure modes of underreamed ground anchor[D]. Master Thesis of Central Research Institute of Building and Construction of MCC Group, 2012. (in Chinese))
- [10] 郭钢, 刘钟, 卢璟春, 等. 砂土中扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究[C]// 第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2011: 95 - 100. (GUO Gang, LIU Zhong, LU Jing-chun, et al. Model test research on failure modes of underreamed ground anchor under vertical pullout in sand[C]// The Proceedings of 7th Chinese Youth Conference on Soil Mechanics and Engineering. Beijing: China Communications Press, 2011: 95 - 100. (in Chinese))
- [11] 郭钢, 刘钟, 杨松, 等. 不同埋深扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 123 - 126. (GUO Gang, LIU Zhong, YANG Song, et al. Model test research on failure modes of shallow and deep underreamed ground anchor under vertical pullout[J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 123 - 126. (in Chinese))
- [12] 郭钢, 刘钟, 李永康, 等. 扩体锚杆拉拔破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1677 - 1684. (GUO Gang, LIU Zhong, LI Yong-kang, et al. Model test research on failure mechanism of underreamed ground anchor[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1677 - 1684. (in Chinese))
- [13] 刘钟, 杨松, 赵琰飞, 等. 钻喷注一体化扩体锚杆施工方法[P]. CN101260669, 2008. (LIU Zhong, YANG Song, ZHAO Yan-fei, et al. Construction method of underreamed anchor with the integration of drilling, jetting and grouting[P]. CN101260669, 2008. (in Chinese))
- [14] 刘钟, 郭钢, 张义, 等. 抗浮扩体锚杆的力学性状与施工新技术[C]// 第十一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 2012: C15(1-8). (LIU Zhong, GUO Gang, ZHANG Yi, et al. Mechanical behavior and new construction technology of anti-floating underreamed ground anchor[C]// Proceedings of 11th Science and technology seminar on underground engineering cross the strait tunnel, 2012: C15(1-8). (in Chinese))

(本文责编 孙振远)