

超长距离钢顶管泥浆减阻施工技术

陈永飞

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200082]

摘要: 在北海某排海管工程2 180 m及珠海磨刀门某过海管工程2 329 m超长距离钢顶管施工中,采取分段分站式压浆减阻技术,并针对顶管穿越不同的土层,选用不同的泥浆配比,取得良好的减阻效果。一次性顶进2 000 m,无需启用中继间进行接力顶进,为类似超长距离顶管施工提供参考。

关键词: 超长距离;钢顶管;泥浆减阻;接力顶进

中图分类号: TU990.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0420-04

Construction Technology of Slurry Drag Reduction for Ultra-Long Distance Steel Pipe Jacking

CHEN Yongfei

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200082, China]

Abstract: In the construction of ultra-long distance steel pipe jacking of a 2 180-m sea discharge pipeline project in Beihai City and a 2 329-m cross-sea pipeline project in Modaomen, Zhuhai City, the segmented and station-based grouting drag reduction technology is adopted. For pipe jacking through different soil layers, the different slurry ratios are selected, achieving favorable drag reduction effects. There is no need to activate the relay room for relayed jacking if jacking in 2 000 m at one time, which provides valuable reference for the construction of similar ultra-long distance pipe jacking projects.

Keywords: ultra-long distance; steel pipe jacking; slurry drag reduction; relayed jacking

1 工程概述及地质情况

北海某排海管工程1#~2#井区间钢顶管一次性顶进2 180 m,钢管外径2 000 mm,壁厚22 mm,管道中心标高-21.5 m。根据地质资料剖面图显示,顶管穿越主要地层为:粉土⑦层、黏性土⑧层、粉土⑨层、中、粗砂⑩层、黏性土⑪层、中、粗砂⑫层、黏性土⑬层。顶管沿线穿越的土层种类较多,土层层次紊乱,土体差异性大,尤其是坚硬的⑧层黏性土与渗透性大的⑩层粗砂层,两者软硬交替且渗透性差异显著,受地下水及海水的影响明显,顶管施工难度大。选用泥水平衡顶管机,主推为4只4 000 kN千斤顶,总顶力16 000 kN。第一道中继间布置在顶管机后20 m,第二道中继间布置在距离第一中继间30 m处;其后每100 m布置一个中继间,共布置22个中继间。每个中继间安装30只250 kN油缸,合计顶力7 500 kN。

珠海磨刀门某过海管工程35#~36#井区间钢顶管一次性顶进2 329 m,钢管外径2 420 mm,壁厚24 mm,管道中心标高-19.2 m。根据地质资料剖面图显示,顶管穿越地层主要为淤泥②层、淤泥质黏土③层,顶管沿线土层分布较稳定,土层较厚,呈流塑状软土,适宜采用顶管施工。选用泥水平衡顶管机,主推为6只3 000 kN千斤顶,总顶力18 000 kN。第一道中继间布置在顶管机后10 m,第二道中继间布置在距离第一中继间30 m处;其后每102 m布置一个中继间,共布置23个中继间。每个中继间安装26只350 kN油缸,合计顶力9 100 kN。

2 泥浆减阻的作用原理

在顶管机设计时,根据穿越土层地质及顶管管道直径大小,顶管机刀盘外径比管道外径大2~5 cm。大口径的管道在软土层、砂性土层中,刀盘直径比管道外径大2 cm左右;在坚硬的黏土层中,刀盘直径比管道外径大5 cm左右;在对沉降要求不高的区域,顶管机尾部设置比管外径大2~4 cm的泥浆外套,以确

收稿日期: 2025-12-28

作者简介: 陈永飞(1977—),男,学士,高级工程师,从事给排水管道顶管施工。

保泥浆套的形成^[1]。

因顶管机刀盘外径比管道外径稍大,顶进时管道与管外周边土体之间形成间隙。触变泥浆经压浆机从管道上预埋的单向阀注向管外,填充管道与土体的间隙,在管道外侧与土体之间形成致密的泥浆套,使整条管道漂浮在触变泥浆中,从而达到减阻效果^[2]。

触变泥浆在顶管中主要作用为:

(1)触变泥浆使管道漂浮在泥浆中,只有管道上部与土体接触,接触面大大减小,起减阻作用。

(2)触变泥浆填补顶管机刀盘切削后留下的间隙,起填补作用。

(3)触变泥浆在注浆压力下,减小顶管机刀盘切削后的土体变形,防止管道顶进过程中土层塌方,起支撑作用^[3]。

触变泥浆减阻效果的好坏,决定顶管沿线布置的中继间启动频率、使用数量及使用时间。根据相关资料显示:当启用1个中继间时,顶管难度系数增加至1.36;当启用2个中继间时,顶管难度系数增加至1.64;当启用3个中继间时,顶管难度系数增加至2.15。中继间启用越多,施工难度越大。若触变泥浆减阻效果差,必定频繁启用中继间,从而降低顶管功效。因此,泥浆减阻效果是影响顶管顶进效率、顶进成本的关键因素^[4]。

3 常规压浆施工技术的缺陷

常规500 m以内的顶管工程,一般采用地面一站式压浆,即在地面布置泥浆站,直接向管道进行压浆减阻^[5-6]。由于只有一条压浆管,顶管机尾部2~3道压浆孔及顶管工作井洞口1~2道压浆孔常开,其它压浆孔由补浆人员在顶进过程中从顶管机前端向工作井后端逐一开启、逐一关闭进行间隙式补浆。

常规的压浆很难形成完整的泥浆套,顶管摩阻力一般为3~5 kN/m²^[7],这远远不能满足超长距离顶管减阻施工需求。常规的压浆缺陷主要表现在以下两方面。

3.1 顶管机尾部同步压浆量不能得到充足供应

由于顶管沿线补浆时,从前到后逐一开启、逐一关闭进行间隙式补浆,当顶进距离较短时,顶管机尾部同步注浆量能充足供应;但随着顶管距离增加,补浆距离不断延长,当补浆人员不断向顶管工作井方向移动时,顶管机尾部同步注浆管路也随之增长。沿线路管道损耗的压力增大,首尾难以兼顾,导致顶管机

尾部同步注浆量很难得到充足供应。这会造成无法及时充足填补顶管机刀盘切削留下的空隙,难以迅速形成完整泥浆套,最终导致后续补浆效果差。

3.2 管道沿线补浆压力难以控制

常规的压浆,顶管机尾部和顶管洞口有几道压浆孔是常开的。随着管道沿线补浆位置的变化,补浆的压力应不断调整,但因管道沿线补浆位置很难确定,地面压浆人员无法及时调整压力。为方便施工,地面压浆人员只能将压浆泵的压力调至10 kgf/cm²左右,甚至更高,远超过施工需要。由于顶管沿线补浆压力高,顶管沿线时常出现地面冒浆现象。冒浆通道一旦形成,后续顶进补浆时将持续漏浆。为堵塞冒浆通道,需在漏浆点前后数10 m范围内停止补浆,待土体恢复数天后再进行补浆,从而导致漏浆点附近泥浆套完整性被破坏。

根据有关规范,顶管勘探孔应布置在管道设计轴线的两侧,陆域顶管的勘探孔应布置在顶管轴线两侧10 m范围内,水域顶管的勘探孔应布置在顶管轴线20 m范围内,且不能布置在顶管管体范围内^[8]。其主要目的就是防止顶管注浆时触变泥浆外泄。

在顶管洞口附近补浆时,由于顶管补浆压力过高,常导致顶管穿墙止水橡胶板外翻或损坏,洞口时常出现漏水、漏浆,使顶管洞口附近难以形成完整的泥浆套。

4 分段分站式注浆减阻施工技术

在北海某排海管工程1#~2#井区间顶管及珠海磨刀门某过海管工程35#~36#井区间顶管施工时,均采用分段分站式压浆减阻施工技术。在顶管工作井地面施工区域布置1个面积约60 m²泥浆房,现场布置1台拌浆剪切泵用于泥浆制作,2台BW250压浆泵分别用于送浆和补浆,另布置4只20 m³水箱用于储存泥浆。

为提高压浆效率,便于压浆控制,采用两路直径50 mm泥浆管,一路用作压浆管道,另一路专门用作送浆管道。顶管机尾部设置同步压浆站,另在管道内500、1 000、1 500 m位置设置3个补浆站(见图1),进行分段、分站式压浆。

顶管机尾部设环向同步压浆孔,每5 m设置一道泥浆孔,共4道,每道4个压浆孔,压浆孔与管道垂直中心线呈45°布置(见图2),每道补浆环有独立的阀门控制及压力表,主管布置一个流量计,由同步压浆站负责压浆。

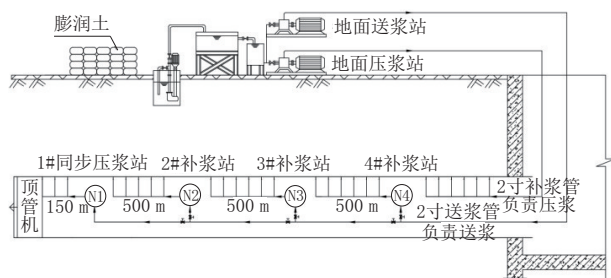


图1 分站式压浆站布置图

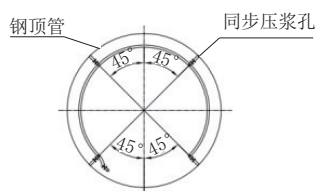


图2 同步压浆孔布置图

顶管机尾部的同步压浆站配置1台BW150型压浆泵,顶进过程中常开,确保触变泥浆及时、完全填充顶管机刀盘切削产生的间隙。顶管机后的同步压浆机由头部钳工兼顾操作,注浆压力控制在地下水压力+1 kgf/cm²左右,压力过高,触变泥浆将直接进入顶管机泥水舱,造成浆液损耗。

管道经同步压浆后,能使管道处于漂浮状态。因而后续管道沿线跟踪补浆孔按扇形布置,每15 m布置一道,每道3个补浆孔,补浆孔与管道垂直中心线呈60°布置(见图3)。管道正上方一个孔,每道补浆环有独立的阀门控制及压力表,每段主管布置一个流量计。

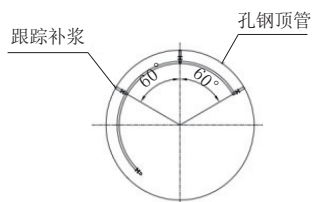


图3 跟踪补浆孔布置图

每个补浆站配置1台BW150型压浆泵,负责各区间的补浆。补浆压力控制在地下水压力+2 kgf/cm²左右。补充注浆时,补浆压力不宜过高,特别在浅覆土区域,补浆压力太高容易产生地面冒浆现象,导致减阻泥浆套不易形成^[9]。

中继间启用时,中继间雌、雄头不断拉伸,容易破坏已形成泥浆套的完整性。因而在每个中继间位置布置一道压浆孔,中继间启用时,须同步补浆。

5 顶管洞口止水措施

常规顶管施工中,顶管穿墙洞口采用橡胶板止水^[10],对于较深的顶管出洞口及地下水丰富砂性土

层洞口,总是出现漏水漏浆现象,并导致顶管出洞土体塌方,顶管摩阻力大。

为防止顶管洞口穿墙管止水装置漏水漏浆,采用止水橡胶板+止水牛油盘根复合式顶管止水装置(见图4)。增加牛油盘根止水系统后,可以杜绝止水橡胶板外翻现象,同时可以大大提高穿墙管的止水能力,能有效地确保顶管出洞后就能形成完整的泥浆套。

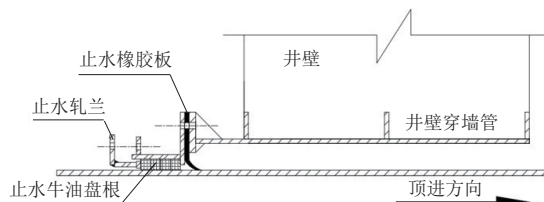


图4 复合式顶管止水装置

6 顶管泥浆配比选择

目前顶管施工触变泥浆主要注浆材料使用最多的是膨润土(一种层状结构的结晶氢化硅酸铝),膨润土遇水膨胀,膨润土浆液静止时成凝胶状,运动时成溶胶状。触变泥浆由膨润土(润滑介质)、纯碱(分散剂)、CMC(增黏剂)按一定的比例配置而成^[11]。

针对北海某排海管工程1#~2#井区间中粗砂土层中顶管施工中,泥浆比重控制在1.06~1.07 g/cm³,黏度控制在60 s左右,每方触变泥浆膨润土含量不宜低于100 kg。这样的浓泥浆能快速在砂土层形成泥浆套。

针对珠海磨刀门某过海管工程35#~36#井区间淤泥质黏土层顶管,泥浆比重控制在1.03~1.05 g/cm³,黏度控制在30 s左右,每方触变泥浆膨润土含量控制在50 kg左右。在淤泥质黏土中顶管,只要使顶管悬浮在泥浆中,顶力就会立即减小。

新配置泥浆需要经过24 h静置发酵后,才可供顶管注浆使用。

7 泥浆减阻的效果

在北海某排海管工程(海域段)1#~2#井区间顶管施工中,顶管顶进至2 000 m时,总顶力约7 600 kN,无需启用中继间进行接力顶进,管道外壁平均摩阻力约0.59 kN/m²。在超过2 000 m时,只有在作业人员换班或设备维修顶管停滞时间超过12 h情况下,才需启用3号中继间进行接力顶进,一般推进10 m左右后,顶管摩阻力又恢复到正常水平。

珠海磨刀门某过海管工程35#~36#井区间顶管

施工中,顶管顶进至2 000 m时,顶管摩阻力约6 800 kN,无需启用顶管中继间接力顶进,管道外壁平均摩阻力约0.44 kN/m²。在超过2 000 m时,顶力虽然没有明显上升趋势,但在顶进测量时发现,顶管机测量光靶时常出现左右晃动。对比管节焊接前后测量数据发现,顶管机在钢管焊接期间常有3~5 cm的波动。为防止管道失稳,后期不再追求减小摩阻力,而是适当减少顶管机后部约200 m范围的注浆量,将顶力控制在1 100 t左右,适当增加周边土体摩阻力来约束管道,能防止管道摆动。在顶进至2 000 m以后,每节钢管焊接后重新顶进时,启用3号中继间接力顶进两次(顶进距离约50 cm),顶管摩阻力便迅速下降,后续顶进不需再启用中继间。

综合北海与珠海两个超过2 000 m的超长距离钢顶管施工经验,在正常顶管情况下(800~2 000 m),当管道外壁充满泥浆时,管道处于漂浮状态,顶管总推力没有明显变化。对两个项目顶管顶力施工记录的分析还发现:由于钢管焊接,顶管正常停滞6 h左右,顶管摩阻力约增加50%。但只需重新顶进50 cm左右,顶管摩阻力便迅速下降;顶进到2 m左右后,顶管摩阻力能恢复到结束时水平。在作业人员换班时期,顶管停滞12 h左右,顶管摩阻力增加100%,需启用中继间进行接力顶进,并且需要顶进10 m左右(一个班顶进距离),才能将摩阻力降下来。

8 结 语

超长距离顶管采取分段、分站式压浆,并结合顶管穿越土层情况,选用适合土层的泥浆,减阻效果好,可以将顶管摩阻力控制在1 kN/m²以内,顶管中继间可从常规的每100 m一个,调整到200~300 m布置一个,从而显著降低顶管施工成本。但在超长距离的顶管中,仍必须布置中继间来应对因设备故障或其他意外事件导致顶管长时间停滞的异常情况。

参考文献:

- [1] 马保松, Stein D, 蒋国盛. 顶管和微型隧道技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 孙鹤明. 大直径顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [3] 葛春辉. 顶管工程设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 韩选江. 大型地下顶管施工技术原理及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] DG/TJ 08-2049—2016 顶管工程施工规程[S].
- [6] 顾杨, 李耀良. 超大直径钢筋混凝土顶管设计与施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [7] GB 50268—2008 给水排水管道工程施工及验收规范[S].
- [8] CECS 246:2008 给水排水工程顶管技术规程[S].
- [9] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [10] 葛金科, 沈水龙, 许焯霜. 现代顶管施工技术及其工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 余彬泉. 顶管技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(上接第419页)

- [11] 温锁林. 近距离上穿运营地铁隧道的基坑明挖施工控制技术[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊2): 451-454.
- [12] 袁昶, 刘俊杰, 吴云鹏. 上跨运营地铁车站箱涵施工变形监测及计算[J]. 建筑机械, 2025(7): 182-190.

- [13] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 613-621.
- [14] 中铁二局第四工程有限公司. 一种临近明挖基坑既有桥梁承台保护构造: 中国, 201821582025.7[P]. 2018-09-27.