

江海盾构隧道施工风险分析与评价

季玉国

(安徽新建基础工程有限责任公司,安徽合肥 230022)

摘要:对国内江底、海底泥水盾构隧道施工风险进行了详细全面的分析,指出施工风险可能对盾构机械和施工人员、工程质量、工程结构带来的危害,并对风险进行了评价。结合国内隧道施工事故的实例,阐明隧道施工风险发生后果的严重性,对盾构隧道施工风险控制具有指导意义。

关键词:江底;海底;盾构隧道;风险分析;评价

中图分类号:U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)06-0076-04

Risk Analysis and Evaluation on Construction of River and Sea Shield Tunnel/*Ji Yu-guo* (Aahui Xinjian Foundation Engineering Co. Ltd., Hefei Anhui 230022, China)

Abstract: Detailed risk analysis was fully made on slurry shield tunneling construction in river bottom and sea bottom in China, construction risk to constructors, engineering quality and engineering structure were reminded and evaluated. According to the field case, severity of tunneling construction accident was clarified, which has instructive significance to control tunneling construction risk.

Key words: river bottom; sea bottom; shield tunnel; risk analysis; evaluation

随着我国国民经济的迅速发展,盾构法隧道施工进入空前发展阶段,已在不同的工程领域得到广泛应用。诸如武汉、上海、南京、杭州的过江交通大通道,沿江、沿海发电厂进排水隧道和长江、黄河流域的取水、输水隧道工程等,均采用大型盾构隧道法施工。而盾构隧道作为地下水工程特殊的专业施工,施工风险极高,危险性极大,危害产生的后果也异常严重,必须高度重视。笔者结合实践经验对江底、海底盾构隧道施工风险进行分析与评价,力求对泥水盾构隧道施工风险控制起到积极作用。

1 盾构隧道施工风险分析

应根据工程风险特点分析制定专项风险预案,认真分析识别影响工程设备安全、人员安全、施工进度、工程质量和环境等方面的风险,并进行综合分析评价。

风险识别要结合工程特殊的地理位置、工程地质水文等特点,参考国内外类似工程隧道施工经验,在风险识别的基础上,采用专家调查法和层次分析法进行识别判断。

综述江海盾构隧道施工主要风险如下。

1.1 地质勘测准确性的风险

由于江海地质勘察的局限性,加之深水地质勘

察比在地面相对困难和造价更高,对隧道穿越江底、海底地层了解的准确性相对较低,因此遇到未预测的不良地质和地下障碍物的风险更大。施工前及施工中必须对盾构穿越地层进行详细了解,对隧道穿越地层进一步探明,以减小隧道施工风险。

地质条件的不准确性,一方面造成盾构主要机械不能很好适应工程地质条件,使掘进困难;另一方面,对掘进施工也会造成难以预料的风险,甚至产生严重后果。

1.2 盾构机的适应性和可靠性(即盾构选型)风险

根据工程地质勘察报告及盾构隧道纵横剖面图和隧道埋深,了解盾构机掘进过程中穿越土体的地层。江底、海底隧道穿越的地层,多为第四系粉细砂、细砂、卵砾石层及可能出现的强风化岩石地层,同时盾构在江底穿越江中还可能存在冲槽浅埋段。因此,盾构开挖机械类型的选择及可靠性,包括保持开挖面的稳定、掘进方式、切削刀盘种类、出土方式、主轴的扭矩、推进能力以及最为关键的盾构机械的密封性能等方面,均要慎重对待。可以说盾构选型正确与否是工程成功的重要因素。

穿越江底、海底盾构隧道施工过程中,盾构机械选择不当,以及机械性能不合理所造成的风险事故大致有以下几种可能。

收稿日期:2008-01-15

作者简介:季玉国(1963-),男(汉族),安徽人,安徽新建基础工程有限责任公司副总经理、主任工程师,钻探工程专业,从事岩土工程、地下工程及基础工程施工及技术管理工作,安徽省合肥市巢湖路75号。

(1)大刀盘、刀头磨损:长距离隧道掘进施工将导致大刀盘、刀头磨损严重甚至无法正常推进;地层介质的变化,也使得刀头每隔一定距离由于高度磨损变平甚至需要更换。磨损严重的刀盘还会引起机头扭矩的增加,而可能使机械停止运转或掘进受阻。

(2)泥浆泵及管路磨损、堵塞:泥浆中砂石成分对泥浆泵及排送管路造成损失,也将使刀盘切削的土体无法正常排出。

(3)主轴承磨损、密封件防水失效:江海隧道长距离推进或遇到障碍物将会导致主轴承、密封件防水失效,密封仓内泥浆向盾构机内渗漏,不能保证工作面土压力和开挖面的稳定甚至停工。

(4)盾尾密封:盾尾密封系统不可靠或长时间磨损,会导致盾构周边水土流失,严重时将使盾构机内涌水或沉陷,防范不好会造成重大事故。

(5)铰结(转向)密封:铰结(转向)密封装置失效,还会导致盾构机内漏水、漏砂。

(6)数据采集系统、传感器失灵:盾构工作面数据采集系统、传感器因恶劣条件失效,无法准确获得盾构工作状态及正面舱压。

(7)液压推进系统漏油:无法提供正常的推力或导致盾构后退。

(8)注浆管路堵塞:注浆管路由于浆液硬化等原因堵塞,使得注浆工作无法正常进行。

(9)主轴承断裂:由于磨损或受到较大的偏心力矩致使主驱动轴承断裂,盾构机无法工作。

国内某隧道在盾构始发不久后因地下障碍物致使主轴折断停工3个月,经济和工期损失极大。另外,国内某电厂引水隧道也因盾构选型不当造成施工质量无法保证,机器损坏不能正常工作,最终不得不停工处理。

1.3 盾构进、出洞施工风险

国内外盾构施工经验表明,盾构进、出洞的安全风险控制是盾构法隧道施工一个非常重要的关键环节。国内外盾构法隧道多起事故也发生在盾构进、出洞上:工程技术表现在盾构进出洞端头地层的加固问题(加固方案及加固质量上)、盾构进出洞姿态的控制、泥水平衡的尽快建立、洞口密封破坏等方面。江海盾构隧道进、出洞端头地层多为淤泥质粉质粘土、粉细砂和砂层,地质条件差,且覆盖层较薄,同时盾构进、出洞后又穿越江海防洪大堤,技术要求高。因此选择合理可靠的端头地层加固方案、加固效果的控制和良好可靠的密封止水装置对盾构安全进、出洞至关重要。

盾构机进、出洞时的主要施工风险有:盾构进出洞端头地层加固不当、凿除洞门涌土漏砂涌水、盾构进出洞工作面突然产生涌水、涌砂,不能及时形成泥水压力平衡,造成地面沉陷、严重时盾构机被掩埋、工作井周围构筑物损坏及盾构姿态突变、盾构基座和支撑位移变形严重等。始发基座定位不够准确、反力架刚度不够,也可能使盾构机刚出洞就偏离设计轴线。

国内某城市地铁在进洞时因加固和其它原因,造成盾构机被掩埋,虽没有造成人员伤亡,但经济损失巨大。上海某隧道也发生过盾构进洞产生严重涌砂、涌水事故,造成邻近道路严重塌陷。这些教训足以告诫我们应当引起高度重视。

1.4 开挖面失稳

泥水加压式盾构掘进过程中,泥水进出往复循环,开挖面的泥膜受大刀盘的切削,始终处于形成-破坏-形成变化过程中。另由于地层的变化和掘进等因素,开挖面的平衡是相对的、变化的,因此在泥水盾构掘进中,合理进行泥水管理、切口水压管理和同步注浆管理及循环切削量控制是开挖面稳定的必要保证。由于江海隧道穿越地层较为复杂,在某一隧道断面上,即同一开挖面上可能同时存在粉细砂、砾砂、卵砾石和风化岩层等,所以泥浆性能(密度、粘度、失水量等)必须根据地层的变化而及时调整,合理的泥水质量和泥水压力对于开挖面稳定是非常关键的。

开挖面失稳产生风险,其后果主要为:(1)致使盾构前方地面或江海底产生较大隆起或沉陷;(2)开挖面遭遇流沙或发生管涌,盾构机将发生磕头或突沉;(3)掘进过程中出现超浅覆土将可能导致冒顶、江水回灌、泥水冒溢等事故;(4)承压水引起突然涌水回灌,盾构正面塌方;(5)地表产生较大沉降、变形,危及地面建筑及防洪大堤的安全。

1.5 盾尾密封失效

盾尾密封主要是防止地下水、泥水和壁后注浆浆液渗入盾壳后部,确保开挖面的稳定和盾构的正常掘进。由于盾尾密封装置随盾构机移动而向前滑动,当其配置不合理或受力后被磨损和撕拉损坏及缺乏油脂,就会使密封失效,会产生向隧道涌水涌砂,从而造成盾构围岩失稳,引发严重后果。因此盾尾密封装置的耐久性、密封可靠性以及能安全方便的维护更换是盾构施工中一个特殊而重要的工作,必须认真对待。

盾尾密封失效的后果:注浆浆液、地层中水(或

江水)、砂流入隧道,造成地表沉陷(江海深部严重时可能产生冒顶),可能产生特别重大的事故。

1.6 软硬不均复杂地层掘进施工

江海盾构隧道穿越地层多为粉细砂、细砂层,同时也可能存在砾砂层、卵砾石层及风化岩层,在同一开挖断面,也可能存在多种地层组合,对盾构掘进方向的控制、盾构姿态、掘进速度及盾构刀具的合理配置产生较大的难度,不可避免地使盾构在该地层掘进产生较大的风险。

掘进中地层的多变性也严重影响盾构的掘进速度和刀头的寿命。工程经验表明:由土层到风化岩层变化时,推力沿每环会发生巨大瞬间变化。韩国 Busan 地铁在 Sooyoung 河下掘进,遇到盾构上半部介质为粉质粘土、砂,下半部为风化岩石的混合地层,从测试的总推力看,在完全土层中几乎在 10000 kN 左右,而在混合的地层中推力在 20000 kN 左右,几乎增加了 1 倍左右,给盾构机械增大了极大的负荷

由于地层介质的变化,使得刀头每间隔一定距离由于高度磨损变平需要更换。磨损的刀盘也会引起机头扭矩增加而停止。研究表明,刀头的瞬间荷载作用可达到平均荷载的 10 倍左右;也会产生“冻结承载”引发停止旋转。某隧道在致密坚硬的砂层,由于刀盘切削工具选择不当而被迫停工处理。

同时在江中和岸边段浅覆盖地层中掘进,其风险也可能产生涌砂、涌水甚至冒顶事故。

1.7 江海底可能会更换刀具

盾构隧道主要在江底海底穿越软硬不均地层(上部多为粉细砂、细砂层,中部为砂砾层、下部为卵砾石层及强风化岩层),主要表现为长距离掘进会使刀具严重磨损,刀具更换可能性很大,更换刀具的风险依然严重。

(1)在江底很难采取地层加固后开仓换刀,即使设计有江底海底常压换刀方案,风险也相当大。根据目前世界范围内已施工的泥水盾构,虽有成功的实践验证,但危险性也极高。

(2)因江底海底换刀风险性高,对工期将会产生严重影响,即使常压换刀盘也是困难重重,影响整个工程的进展。

(3)更换刀具出仓带压或常压作业,人员必须经过严格特殊训练,风险极大,作业须特殊防护。据悉,国内个别隧道进行过这种作业。

1.8 盾构穿越防洪防汛大堤

泥水盾构穿越江堤海堤防洪防汛设施,可能会

产生不均匀沉降,盾构掘进参数如泥浆参数、泥水压力、壁后注浆、地基加固等施工过程或参数控制不好,就有可能产生较大的地面不均匀沉降。产生的后果主要表现为:可能造成防洪大堤沉降开裂、江边地下管线破损、对防洪大堤安全构成极大威胁。

1.9 掘进遇到障碍物

由于地下工程地质条件的复杂性以及地质勘探的局限性,隧道穿越地层不可能详细准确地掌握,盾构推进工作面可能会遇到障碍物,如废弃物、沉船等,如处理不当极易造成盾构机较大破损甚至无法正常推进,严重时造成严重后果。江底、海底隧道发生这种事故的可能性很大。

1.10 隧道上浮

泥水盾构在建立泥水压力平衡开始掘进时,有一定压力的泥水会从开挖面沿着盾壳窜至盾尾,甚至窜到已成型的隧道衬砌外。实际施工发现,根据不同地层和盾构类型,泥水会从开挖面沿着盾壳窜至盾尾后 20~30 m 不等,隧道会处于泥水的包裹环中,产生上浮的危险。同时,浆液性能参数及配比的适应与否,也是盾构隧道产生上浮的风险因素之一。

隧道上浮可能使隧道轴线偏离设计轴线,严重时可能侵入建筑限界并将给后续工程带来一定难度,还可能产生其它后果,施工中应引起足够的重视并加以防范。

1.11 隧道始发、接收井及明挖隧道深基坑失稳

江底海底隧道出口、入口多为明挖隧道,盾构机始发、接收井基坑与明挖段紧邻,明挖隧道和始发、接收井基坑开挖往往较深,多为 26 m 左右,而杭州、南京、上海过江隧道始发、接收井有的更深达 30 m 左右。由于沿江地层条件极其复杂,地下水丰富且补给充分,给基坑施工带来极大的危险。因此,必须严格从设计、施工、监理及政府监督方面进行层层把关,严格做好设计、施工方案的专家评审工作。基坑失稳带来的破坏具有突发性和灾难性,且难以补救。基坑失稳的形式有:围护结构与支撑体系失稳致使基坑坍塌,降水问题处理不当引起坑底突涌及基坑开挖支撑不及时产生的坑内滑坡,这些风险的控制是基坑安全的关键。

杭州某隧道工作井基坑,因多种原因降水工程无法达到工程施工需要,被迫变更加深围护结构,变更费用昂贵。

1.12 盾构组装吊装

国内如武汉、上海、南京、杭州等大型隧道盾构机的组装、吊装使用的吊装设备起重机能力达 450 t

左右,而最大的刀盘重达 300 t 之多。因此,对盾构组装和吊装安全风险控制尤为重要,起吊设备安全风险也是风险之一。风险管理要从起吊机械制造许可证、出厂检验合格证、现场组装吊装监控和调试验收鉴定、注册备案等方面严格管理控制,确保盾构组装、吊装、拆迁及人员的安全。

1.13 盾构机及地面附属设备管理

盾构机是个由数万个零部件组成、重达数千吨的庞然大物,机器构造和操作极其复杂。同时,它又与地面空压机系统、地面泥水分离系统和通风系统、管片生产厂相互共同协调工作。其中,地面空压机系统又由多个压力储存气容器和压力管道等组成,诸多为特种设备。这些设备的安装、调试和运营本身存在较大的安全风险,因此,特别应加强管理,防范风险。

1.14 盾构隧道内管片、箱涵运输安全管理

大直径盾构公路交通隧道设计多为中间箱涵加现浇边箱涵结构,中间箱涵与盾构隧道同步铺设施工,从而作为临时运输通道。箱涵承担重型车辆运输管片、箱涵,其交通运输安全也是风险之一。同时隧道内还存在高处作业和交叉作业施工安全风险。

1.15 江底联络通道施工

交通隧道为保证运营安全的需要,多在两隧道之间设计联络通道,而通道地层埋深较大,个别还位于承压水层中,施工风险极大。通道施工多采用冷冻和地基加固方法进行开挖,开挖施工过程中稍有疏忽将会发生严重事故。上海地铁某区间盾构联络通道位于承压水层中,因冷冻问题在开挖过程中发生透水事故,造成已建隧道被淹,幸免无人员伤亡,经济损失惨重,教训极其深刻。

2 风险评估

2.1 风险评估矩阵(如表 1)

2.2 施工风险评价

针对隧道在施工期各个环节可能潜在的各种风险进行定性分析,依据表 1,综合评价出隧道施工主要风险源的风险等级如表 2。

从表 2 可知:盾构进出洞、盾尾密封失效、复杂地层和浅埋地层掘进、深基坑失稳及联络通道施工风险最高,为三级风险,风险出现的可能性较大,且后果严重,应绝对规避这种风险;其次,表 2 中中等(二级)风险应严格加以监控防范,严防风险的发生;不大或较小可能出现的风险要时刻重视。

表 1 盾构隧道施工风险评估矩阵

灾害分类频率	(1) 可忽略的	(2) 较轻的	(3) 严重的	(4) 灾害性的
(A)不可能 ($X < 10^{-6}$)	1A	2A	3A	4A
(B)困难地 ($10^{-3} > X > 10^{-6}$)	1B	2B	3B	4B
(C)偶尔地	1C	2C	3C	4C
(D)可能地	1D	2D	3D	4D
(E)频繁地	1E	2E	3E	4E

后果描述	级别	灾害风险指标	风险决策准则
可忽略	一	1A、1B、1C	可接受且不必进行管理审视
较轻	二	1D、1E、2A、2B、3A、4A	可接受,同时必须进行管理审视
严重	三	2C、2D、3B、3C、4B	不希望发生;高层管理决策;接受或拒绝风险
灾难性	四	2E、3D、3E、4C、4D、4E	不可接受;停止运营和立即整顿

表 2 风险分析综合评价表

风险因素	风险出现的可能性	风险评价	风险级别标识
地质勘察准确性	不大	2D	★★
盾构机械的适应性和可靠性	不大	3B	★
深基坑失稳	较大	3C	★★★
盾构进、出洞	较大	2D	★★★
盾构掘进开挖面失稳	较小	3A	☆☆
盾尾密封失效	较大	3C	★★★
软硬不均复杂地层掘进	较大	2D	★★★
江海底更换刀盘	较小	3A	☆☆
盾构穿越大堤安全	不大	3B	★
开挖面遇障碍物	较小	3A	☆☆
隧道上浮	不大	3B	☆☆
浅埋段掘进	较大	2D	★★★
联络通道施工	较大	2D	★★★
盾构组装大型吊装安全	中等	2C	★★
盾构机及地面附属设备管理	中等	2C	★★
隧道内管片运输安全	较小	3A	☆☆

3 结语

盾构施工由于其地下水下的特殊性和复杂性,形成了其施工风险多、风险极大等特点,其产生的后果可能是严重的、特别重大的。因此,在盾构施工前我们必须高度重视并加以规避,要详细认真进行风险分析,编制落实应急预案,防止风险事故的发生,确保隧道工程施工安全。

参考文献:

[1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,2004.
 [2] 傅冰骏. 建立隧道掘进机产业 促进我国地下空间开发[J]. 探矿工程,2001,(2).
 [3] 陈裕康,高波,张粤,等. 南京地铁一号线盾构穿越内秦淮河掘进施工[J],探矿工程,2002,(6).