

青岛胶州湾隧道海域段 注浆施工风险分析与控制措施研究

潘国栋, 周书明, 段悟哲

(中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133)

摘要: 国外已成功修建多条海底隧道, 发展了很多成熟的施工技术, 其中注浆技术也得到了广泛应用, 但是在特殊复杂地质条件下修建隧道则面临诸多困难。国内钻爆法修建山岭隧道施工技术成熟, 采用注浆法处理复杂地质条件方面, 隧道工程界已经积累了不少的经验。但国内采用钻爆法修建海底隧道的例子相对较少, 高压海水环境下注浆技术的研究及相关施工经验相对匮乏。胶州湾隧道, 处于高压海水环境下, 且穿越数条断层破碎带, 地质条件复杂, 在施工过程中极易发生坍塌、突水突泥等事故, 给安全施工带来很大的困难, 甚至影响到施工人员的生命安全。因此, 结合胶州湾隧道工程, 对海域段注浆施工风险进行分析, 并提出风险应对措施, 可为以后类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 海底隧道; 海域段; 注浆; 风险分析; 风险控制

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0053-05

目前, 国外已成功修建了多条海底隧道, 发展了很多成熟的施工技术, 其中注浆技术也得到了广泛的应用, 较为典型的日本青函隧道在施工中曾遇到四次大的突水、突泥, 采用注浆的方法处理并通过。国内采用钻爆法修建海底隧道的例子较少, 但类似海底隧道复杂地质条件的山岭隧道, 采用钻爆法已成功修建数条, 较著名的有大瑶山隧道、圆梁山隧道、终南山隧道、野三关隧道等。海底隧道设计施工与陆域隧道相比其难点主要是水的控制。由于海底隧道建设中所遇到的水多为高承压水, 如果不对其进行有效的封堵, 特别是在断层破碎带等软弱地层中, 势必引起大的突水和坍塌。能否成功止水成为关系到工程能否顺利施工的关键问题。

1 海域段注浆方案

青岛胶州湾隧道工程的防水原则是“以堵为主、限量排放”, 隧道掘进时首先要通过超前地质预报系统分析前方地质情况, 对于破碎岩体和渗漏水较大地段采用预注浆方式, 将隧道开挖断面周围的涌水或渗水封堵于结构外。对于隧道海域段通过的 4 组 16 条断层破碎带, 则是注浆施工乃至整条隧道施工成败的关键区域。特别是 F2-1、F4-1、F4-3 和微风化破碎岩中发育张性裂隙的围岩破碎部位, 透水性较强, 注浆施工难度和风险很大。

关键区域的注浆原则是根据超前地质预报情况, 在确定破碎体的范围、性质和渗水情况后采用合适的注浆措施有效地控制施工风险。在方案选择上, 依据钻探取芯分析的地质状况、地下水量, 决定是否采用全断面帷幕注浆、周边帷幕注浆、局部断面帷幕注浆和径向注浆等措施。超前注浆的目的是为了保证隧道施工期间的安全正常施工, 防止在施工过程中产生大的涌水问题, 径向注浆的目的是为了对隧道周边裂隙透水层的封堵和地层固结加强, 满足隧道长期运营安全的需要。

注浆浆液主要采用普通水泥单液浆、超细水泥单液浆、硫铝酸盐水泥单液浆以及普通水泥-水玻璃双液浆等四种, 浆液配合比、注浆压力和结束标准等参考设计标准按照现场试验确定。注浆段落及适用条

收稿日期: 2010-04-06

作者简介: 潘国栋 男 1983 年出生 助理工程师

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

件如下:

(1)全断面注浆。①根据超前地质预报结果判定,前方围岩破碎、断层岩体风化严重或存在断层泥;②V级围岩地段;③超前探水孔单孔出水量大于 60 L/m ;④探水孔水压 $\geq 0.6 \text{ MPa}$ (服务隧道 $\geq 0.65 \text{ MPa}$);当隧道通过以上特点断层长度大于 25 m ,一次不能完成时采用全断面注浆。(以上适用条件满足任 1 条即选择此方案,以下同。)

(2)隧道周边帷幕注浆。①根据超前地质预报结果综合分析判定,前方围岩比较破碎,围岩风化较严重;②超前探水孔单孔出水量 $25 \sim 60 \text{ L/m}$;③探水孔水压 $0.3 \sim 0.6 \text{ MPa}$ (服务隧道 $0.35 \sim 0.66 \text{ MPa}$)。其他有全断面需要注浆的特点,但隧道穿过长度小于 25 m 时,采用隧道周边帷幕注浆。

(3)局部断面超前注浆。①隧道局部断面围岩节理裂隙较发育或比较破碎,其余部位围岩比较完整;②超前探水孔单孔出水量 $5 \sim 25 \text{ L/m}$;③探水孔水压 $\leq 0.3 \text{ MPa}$ (服务隧道 $\leq 0.35 \text{ MPa}$)。

(4)服务隧道周边短孔超前注浆。①隧道围岩节理裂隙较发育;②超前探水孔单孔出水量大于 $5 \sim 25 \text{ L/m}$;③探水孔水压 $\leq 0.35 \text{ MPa}$ 。

同时加强注浆效果检查,保证注浆效果,确保岩层加固和堵水效果,防止坍塌和涌水,对于开挖后的小涌水采用快凝材料迅速注浆堵水。

2 海域段注浆施工风险分析

渗水是胶州湾隧道施工中所面临的主要问题之一,且胶州湾隧道通过数个断层破碎带,在施工过程中极易发生坍塌、突水、突泥等事故。施工风险大,注浆加固堵水难度大。胶州湾隧道隧址处的不良地质段包括^[1]:①在海域有张扭性断层通过隧道,在断层带、断层影响带或节理裂隙密集带,裂隙贯通性较好,可能会有小股涌水;②侵入岩与围岩的接触带,往往节理裂隙发育,岩石破碎,是岩体薄弱部位;③岩体中,存在大量后期侵入的岩脉,由于大多数岩脉沿张裂隙侵入,故其接触面附近可能存在岩石软化带,隧道通过须防岩脉本身坍塌以及沿岩脉裂隙流入的海水或地下水;④存在一些节理裂隙发育地段。

如何安全可靠地穿越上述不良地质地段成为该工程施工成败的关键。胶州湾隧道设计中,注浆是解决上述问题的主要技术措施:根据断层破碎带处于不同的地质情况,采用全断面(帷幕)超前预注浆、局部超前预注浆、周边注浆、局部渗漏处注浆、背后注浆等方式;节理、裂隙带局部注浆止水。注浆施工的成败将很大程度上决定工程安全,上述地段则成为注浆施工的关键区域。

2.1 风险评估方法

(1)风险辨识。根据海底隧道施工的特点,参考国内外相关文献资料^[2-4]和类似工程施工经验,结合现场管理人员及相关专家的经验,采用专家调查法和层次分析法分析,辨识出胶州湾隧道海域段注浆施工的主要风险,并建立施工风险评价指标体系。

(2)风险分析及评价。根据海底隧道施工的特点,建立了一个基于多层次模糊综合评判的施工风险评价模型,通过综合考虑海底隧道工程施工风险因素发生的概率和风险因素对工程施工的影响程度,确定施工风险的大小。首先利用层次分析法^[5]建立海底隧道施工风险指标体系,确定各项指标的相对权重;其次,根据海底隧道工程施工的特点,利用专家经验法的模糊估计方式,对各基本风险因素进行风险估计;然后在基本风险因素的风险概率模糊集和风险损失模糊集基础上^[6],基于模型,综合考虑风险发生概率及造成的后果对风险评价的影响,建立风险评估矩阵及风险等级区域^[7-9],得到基本风险因素的评价指标,采用加权平均的方法对评价指标进行处理,最终确定海底隧道施工的基本风险因素的风险水平等级。通过多级模糊综合评价模型,确定高层次风险因素及各施工阶段的风险评价指标,从而确定高层次风险因素及整体风险水平等级。

2.2 海域段注浆施工风险辨识与估计

海域段过断层破碎带是隧道施工的最大风险源之一,超前预注浆和后注浆辅助工法是控制隧道坍塌与突涌水、顺利安全通过断层破碎地区的重要手段。针对海域段注浆施工具体的风险源有:

(1)注浆前的调查:注浆区域探测不准,超前地质预报与实际地质情况相差较大,导致注浆设计参数

过大或过小; (2)注浆材料包括浆液、注浆管、止浆塞等选择不当; (3)浆液配合比不当; (4)注浆施工工艺选择不当或者不按照注浆程序施工; (5)注浆压力控制, 过大或过小; (6)注浆效果: 未达到结束标准、检查手段不足等; (7)注浆设备不满足工艺要求; (8)后注浆不及时、方法针对性不强; (9)监控量测: 测点不足、数据错误、反馈不及时等; (10)材料和结构耐久性等。

2 3 海域段注浆施工风险评价

根据风险估计结果, 采用“信心指数法”^[4]并依据风险评价矩阵对其等级进行评定, 可得到基本风险因素的风险等级, 具体见表 1。

表 1 整体风险因素评价指标

风险事故因素	发生概率	事故损失	风险等级
注浆前的调查 (U_1)	D	4	四级
注浆材料选择 (U_2)	B	3	二级
浆液配合比 (U_3)	C	3	三级
注浆施工工艺 (U_4)	C	4	四级
注浆压力控制 (U_5)	B	3	二级
注浆效果检测 (U_6)	C	4	四级
注浆设备 (U_7)	C	3	三级
后注浆 (U_8)	C	2	二级
监控量测 (U_9)	B	2	二级
耐久性 (U_{10})	B	3	二级

3 注浆施工风险因素的控制措施

为保证胶州湾隧道施工注浆的质量和效率, 必须有效控制注浆施工中的风险, 对注浆方案、材料、参数、工艺、注浆效果检验进行了分析、研究。从评价结果看注浆前调查、施工工艺、效果检测以及浆液配合比和注浆设备五个因素的施工风险较大, 其中地质预报、施工工艺和效果检测的施工风险最大, 施工时必须采取相应的有针对性的应对措施。

3 1 注浆前的调查

(1)为确保海底隧道的安全、快速施工, 有效的采取施工方案, 选择合理的注浆方法, 在青岛胶州湾海底隧道施工中采取以地质分析为主, 长距离宏观预报与短距离精确预报相结合、超前探孔与物探相结合、多种物探方法相互补充验证、定性定量相结合的综合超前预报方案。根据预报内容、预报目的的不同分别采用相应的方法和仪器。通过对地质预报信息的综合分析, 可以比较准确地判明前方的地质情况。各种预报方法见表 2。

表 2 超前地质预报主要项目综合表

项 目	预报主要内容	主要方法 (仪器)	重点预报地段
围岩	岩性特征, 节理、裂隙发育	地质素描法, TSP203 物探法	断层破碎带
类别	特征和岩体结构特征		软弱围岩地段
涌水	涌水量大小、压力、变化规律,	钻探孔、测流计, TSP203	岩溶裂隙地段
状态	环境水文地质特征	压力计	高压地段
断层	位置、规模、破碎程度, 充填情况, 含水情况	钻探孔, TSP203 地质素描法, 物探法	断层破碎地段
溶洞	大小、位置、与水的关系	钻探孔, 地质素描法, 物探法	岩溶发育带
突水	位置、规模、泥屑、	钻探孔, TSP203 素描法,	岩溶发育带,
突泥	流泥成份性质	物探, 测流计	抗水压衬砌地段

- (2)利用服务隧道超前施工作地质先导洞, 可以有效的判别掌子面前方地质情况。
- (3)超前探孔施做时应进行涌水量和压力测试。根据测试确定合适的注浆方案。

3 2 注浆施工工艺

海底隧道海域段根据掌子面前方承压地下水的性质、分布、含水量、水压和围岩破碎情况选择合适的注浆方法和工艺。主要施工工艺为:

- (1)断层破碎带帷幕注浆施工中, 为达到较好的注浆及堵水效果, 注浆方式可采用分段前进式注浆或

分段后退式注浆。

(2)当岩石裂隙发育、岩体很破碎且钻孔涌水量较大或者出现涌泥现象时,采用分段前进式注浆方式,钻一段注一段,注浆分段长度可按实际情况确定,一般 $\leq 5\text{ m}$ 。

(3)当岩石裂隙不够发育、钻孔涌水量较小时,可采用分段后退式注浆方式(如成孔困难可采用下入护壁套管),钻孔一次直至设计深度,按 5 m 分段长度下入止浆塞,自内向外逐段进行注浆。

(4)当裂隙不发育、水量小时可采取全孔一次性注浆。

根据现场实际情况采用不同的注浆方案,严格按照注浆相应的设计参数进行施工。浆完成后开挖时也应坚持短进尺、强支护、快封闭、勤量测的方针,缩短每循环进尺,严格控制爆破药量,以减少对围岩的扰动。

3.3 注浆效果检测

(1)采用多种方法如分析法、检查孔法、开挖取样分析和物探法综合评判注浆效果;主要通过对检查孔进行观察,察看检查孔成孔是否完整,是否涌水、涌泥,检查孔放置一段时间后是否塌孔,定性评定注浆效果。

(2)开挖前主要通过检查孔观察法和物探方法进行效果检查,必要时对检查孔取芯。

(3)开挖后应采用物探和钻孔取芯检查注浆效果和注浆范围是否达到设计要求,同时开挖过后选择合适方法及时对需要补充注浆的地方进行后注浆,控制渗水量和其对钢架等支护结构的腐蚀。

3.4 浆液配合比

根据相关工程经验和室内试验结果,结合本工程特点初步选择普通水泥单液浆、超细水泥单液浆、特制硫铝酸盐水泥浆单液浆、普通水泥-水玻璃双液浆等作为注浆材料。

施工时根据现场情况,进行选择和优化组合。浆液配比参数如下:

(1)普通水泥单液浆。水灰比 $W:C$ 为 $0.4:1\sim 1:1$ 。用于探孔涌水量较小的地段。

(2)水泥-水玻璃双液浆。水灰比 $W:C$ 为 $0.4:1\sim 1:1$;体积比 $C:S$ 为 $1:1\sim 1:0.3$ 水玻璃浓度 $30\sim 45\text{ Be}'$ 。主要用于封闭掌子面、锚固孔口管和探孔顶水注浆,同时部分掌子面正前方钻孔中可采用可注性好、结石早期强度高水泥-水玻璃双液浆。

(3)超细水泥单液浆。水灰比 $W:C$ 为 $0.6:1\sim 1.2:1$ 。主要用于强风化和渗透性较差围岩段,同时可用于先期注浆,以冲开致密岩体中的裂隙,而后注入普通水泥浆。

(4)特制硫铝酸盐水泥单液浆。水灰比 $W:C$ 为 $0.6:1\sim 1.2:1$ 。主要用于探水孔涌水压力较大围岩地段及海水连通段,辅以超细水泥浆,以实现可控域注浆。

根据现场试验情况进行优化调整,同时每循环注浆段可根据注浆顺序采用不同配合比。

同时,为改善水泥单浆液的析水性大,稳定性差,注入能力有限,且凝胶时间较长,在遇高压动水情况下,浆液容易冲刷和稀释,影响注入效果,在浆液制备时可掺入适量的外加剂。

3.5 注浆设备

(1)根据注浆施工工艺选择合适的注浆设备,机械设备应能满足现场钻孔注浆施工的需要,同时设备应尽量满足故障率低、易维修、配件宜购置、便于移动等条件;(2)注浆机械设备应互相配套,这关系着钻孔注浆的工效和施工的成败;(3)注浆孔可采用钻孔台车钻注浆孔或采用重型钻机如C-6和RPD-150钻机钻孔;(4)注浆泵应选择合适的工作压力,同时便于计量和施工控制。

3.6 其他控制措施

(1)做好监控量测工作,做好对围岩-支护体系的稳定状态预测,并据此确定相应的施工措施,以确保围岩及结构稳定。(2)设置防水闸门,各通道口及重要部位加设移动式防水闸门和移动式挡水墙,一旦发生突泥突水灾害,人员撤离后可将防水闸门或挡水墙关闭,以阻挡灾害的蔓延。(3)在工作面设置实时监控系統,同时加强与洞外的联系,随时掌握现场情况。(4)钻孔、注浆人员应熟练掌握有关作业规程,严格执行相关安全生产保证措施。(5)施工开挖应在注浆固结达到强度后方可进行。

4 结论

结合青岛胶州湾海底隧道工程, 通过对隧道海域段注浆施工风险分析、评价和控制措施的研究, 可得如下结论:

(1) 由于海域段断层破碎带的存在以及处于高压海水环境下, 导致注浆施工难度增大, 甚至有可能造成灾难性的后果, 在施工中应重视地质勘察和超前地质预报, 为注浆参数设计提供可靠的数据。隧道注浆时, 应进行爆破震动的监测, 及时反馈信息, 调整爆破参数, 减轻爆破震动效应, 从而确保隧道施工安全。

(2) 从评价结果看, 注浆前调查、施工工艺、效果检测以及浆液配合比和注浆设备五个因素的施工风险较大, 地质情况和开挖的施工风险最大, 所以施工时必须采取相应的施工安全措施和应急预案, 将风险损失降低到最小。

参 考 文 献

- [1] 青岛胶州湾隧道工程地质详勘工程地质报告[R]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院有限公司, 2007.
- [2] 同济大学. 地铁及地下工程建设风险管理指南[R]. 上海: 同济大学, 2007.
- [3] Tsuchi H, Sawada T, Takizawa M. Extraordinary inundation accidents in the Sekan undersea tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 1996 119(1): 1-14.
- [4] 陈龙. 城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2004.
- [5] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [6] 李宏兴, 汪群. 工程模糊数学方法及应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.
- [7] 青岛胶州湾隧道工程施工风险评估与控制技术研究报告[R]. 天津: 中铁隧道勘测设计院有限公司, 2009.
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [9] Eskesen SD, Per Tengborg, Kampmann J, et al. Guidelines for tunnelling risk management. International Tunneling Association Working Group No. 2[J]. Tunneling and Underground Space technology, 2004(19): 217-237.

Risk Assessment and Control of Grouting Construction of Qingdao Jiaozhouwan Tunnel in Subsea Zone

Pan Guodong Zhou Shuming Duan Wuzhe

(China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co., Ltd. Tianjin 300133 China)

Abstract Foreign countries have successfully built a number of subsea tunnels and developed many mature construction technologies, in which grouting technique has been widely used. But the construction of tunnel under complex geological conditions is faced with many difficulties. The construction of drill and blast method to build mountain tunnel is mature in our country. Using grouting method to handle complex geological conditions, the tunnel engineering has already gained a lot of experience. However, with a very limited number of subsea tunnels using drill and blast method, grouting technology research and related construction experience in high-pressure water environments is relatively insufficient. Jiaozhouwan tunnel, which is in a high-pressure water environment and across several fault fracture zones, has complex geological conditions. During construction, it is very likely to meet collapsing, water and mud burst, and other sudden accidents, which would affect the construction safety, and even endanger the lives of construction workers. In this paper, combining Jiaozhouwan subsea tunnel project, the risk of grouting in water is analyzed and risk control measures are given, which would be of reference value to similar projects.

Key words subsea tunnel; subsea zone; grouting; risk assessment; risk control