

文章编号:1006-2106(2014)12-0013-05

# 青岛胶州湾隧道工程施工地质条件研究<sup>\*</sup>

马若飞<sup>\*\*</sup>

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:**研究目的:针对青岛胶州湾海底隧道跨度大,施工难度大,洞身地质条件复杂,施工影响因素不确定,风险亦大的特点,研究、分析洞身断层、涌水、围岩分级变更等对施工的影响,为保障施工安全提供科学依据。

**研究结论:**(1)胶州湾海底隧道洞身构造和裂隙水分布,受不确定因素的影响存在差异;(2)研究、分析了洞身断层的具体位置和特征,找出了存在差异的原因:将断层所用的方位角误以为是走向方位角,造成了走向、倾向背离区域构造的异常现象;(3)通过对围岩变更数据的研究,绘制出围岩分级变更比例示意图,直观反映了施工前后围岩等级划分的变化:原Ⅲ级围岩所占的比例由 53% 变更调整为 29%、Ⅳ级围岩的比例由 28% 变更调整为 58%、Ⅴ级围岩的比例由 10% 变更调整为 4%;(4)该研究成果可应用于隧道施工期间开展工程地质工作,实施动态设计,保障工程的质量、工期、安全和控制投资规模。

**关键词:**海底隧道;地质条件;研究

**中图分类号:**U459.5 **文献标识码:**A

## Research on the Engineering Construction Geological Condition of Qingdao Jiaozhou Bay Tunnel

MA Ruo - fei

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd, Xi'an, Shanxi 710043, China)

**Abstract: Research purposes:** With regard to the characteristics of Qingdao Jiaozhou bay tunnel construction, such as large - span cross - section, great difficulty in construction, complex geological conditions, uncertainty of the construction influencing factors, high risk, this paper researches and analyzes the impact of fault, water bursting, surrounding rock classification change on construction, to ensure the security of construction and provide scientific basis.

**Research conclusions:** (1) Jiaozhou bay tunnel structure and fissure water distribution can be different affected by uncertain factors. (2) Found out the reasons of possible differences by research and analysis of specific location and characteristics of tunnel fault: mistaking fault azimuth angle for strike azimuth angel which leads to anomalies of strike and propensity distortion in regional structure. (3) Based on the research of change data of surrounding rock, map the proportion change in surrounding rock classification diagram, to intuitively reflect the variation trend of surrounding rock classification before and after the construction: the proportion of Grade Ⅲ surrounding rock has been changed from 53% to 29%, the proportion of Grade Ⅳ surrounding rock has been changed from 28% to 58%, the proportion of Grade Ⅴ surrounding rock has been changed from 10% to 4%. (4) The research can be applied in carrying out the engineering geological fieldwork, implementing dynamic design and guaranteeing the quality, time limit, safety and project investment control during tunnel construction.

**Key words:** subsea tunnel; geological condition; research

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-09-05

<sup>\*\*</sup> 作者简介:马若飞,1956 年出生,男,工程师。

## 1 工程概况

青岛胶州湾海底隧道是目前世界长度第三、我国长度第一的第二座大断面海底隧道。它是连接青岛市中心与国务院最新批复的“青岛西海岸新区”黄岛的重要通道,隧道北起青岛市西南的团岛,南接黄岛区属的薛家岛,下穿胶州湾湾口海域,是一条以城市道路功能为主,兼备公路功能的隧道,隧道设计为双向双洞六车道,设计车速 80 km/h,总长约 7.8 km,其中穿越海底段约 4.095 km,隧道采用三孔形式,两侧为主隧道,中间一孔为服务隧道。隧道沿线设通风竖井两道,车行横洞 8 处,人行横洞 16 处,以及各项运营管理设施,并预留市政管线敷设通道。隧道平面位置示意图如图 1 所示。

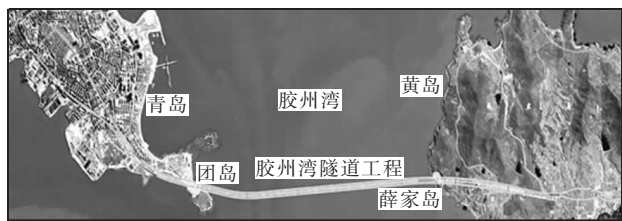


图 1 胶州湾隧道平面示意图

胶州湾隧道走向为  $N5^{\circ}E$ , 海域段最大海水深度约 42 m, 海床覆盖层厚度在 25 ~ 35 m 之间, 隧道围岩 II ~ V 级, 最大开挖断面 170  $m^2$ , 采用进口端与出口端相向掘进的方式用钻爆法施工, 本文以薛家岛端施工过程为主述。薛家岛端施工长度 3 300 m, 陆地开挖起点里程 YK 8 + 900, 入海点里程 YK 7 + 350, 分界与贯通点里程 YK 5 + 600, 其陆域段 1 550 m, 海域段 1 750 m。

## 2 主要地质特点

胶州湾海底隧道所经地段工程地质条件多变、水文地质条件复杂, 洞身岩体以岩浆岩为主, 深、浅层侵入岩、喷出岩交错, 多种岩脉穿插, 岩石软硬不均, 完整基岩面起伏大、风化层厚度不均, 差异性较大, 是其一个重要的特点。受场区区域构造的影响, 隧道洞身共通过 18 条断层, 多为中新代高角度、脆性断裂构造, 断裂带内岩体破碎, 完整性差, 断裂影响带岩体多呈碎裂-镶嵌碎裂结构, 裂隙发育。根据隧道地质勘察报告, 隧道洞身断层的出露位置多为推测, 具有不确定性, 钻探记录中, 一般断层岩芯采取率受钻探条件限制, 很难达标, 严重影响到洞身岩性的分析、判断, 这给断层在洞身的具体出露位置及其性状的确带来了极大的难度。考虑到该隧跨度大及海底施工难度大的现实, 为解决洞身施工期间可能出现的坍塌、涌水, 发挥施工期

地质工作的先导作用, 采用长与短、虚与实、定性与定量相结合的方法, 将设计文件中的 7 种地质超前预报手段优化组合为 3 种 (TSP + 长探孔探水 + 影像与地质素描编录), 进行超前地质预报工作, 有效的减少了地质预报工序占用施工作业的时间和协调难度, 以利施工单位与预报单位的及时施作, 同时又使隧道的动态设计 (及时变更) 得到有效落实, 有效的防止隧道施工中突发涌水的发生。结合现场开挖过程中的详细记录, 观察到洞身断层破碎带和碎裂岩具有下述明显特征:

一是, 断层破碎带岩体破碎, 错动、扰动、揉皱迹象明显, 一般沿岩性变化或侵入岩脉发育, 含水量丰富。

二是, 断层影响带以碎裂岩为主, 多以母岩为主体, 如碎裂花岗岩、碎裂流纹岩、碎裂安山岩等, 岩体尚完整, 但其上碎裂迹象明显, 网状裂隙发育, 一触即碎, 含水量一般 ~ 较丰富, 影响带多随岩性的软硬呈不规则的带状分布, 导致洞身 III、IV、V 级围岩变化频繁。

三是, 破碎带、影响带隐伏了突发涌水的可能, 如  $f_{4-4}$ 、 $f_{4-3}$  号断层在施工期间, 均出现了较大水头的突发涌水。本隧洞身位于半无限含水层中, 基岩裂隙水直接接受海水的定水头入渗补给, 易引起塌方和涌水突泥等突发性地质灾害, 严重危及施工安全, 给隧道施工留下了巨大的风险。

具有不确定的隐伏构造和未查清的断层位置及断层要素是洞身地质条件的另一个典型特点。

## 3 施工地质条件验证

施工开挖是对前期地质勘察工作的最直接检验, 是洞身地质工作的延续、补充与完善。尽管施工前期经历了各个勘察阶段, 但是由于受自然条件复杂多变的影响和现有勘察技术的限制, 勘察阶段的地质资料不可能完全真实地反映洞身工程地质条件, 难以准确地预见施工中可能出现的地质问题。

众所周知: 施工前依据地质勘察资料所做的隧道围岩分级与洞身的预估涌水量, 主要是根据勘测阶段取得地质参数经分析计算提供的, 它们往往代表一个点, 数据的采集依靠多点数据的延伸, 经分析判断推测出洞身地质条件, 用以指导施工的进行。受地质条件变化及计算公式边界条件的限制, 这些数据常常不能充分可靠的判定围岩分级与洞身实际出水量, 这是很正常的。因此, 根据各阶段勘察资料进行的施工图设计应属于预设计, 其准确性与实际的符合程度, 有待于施工中检验修正, 这一点, 在相关规范中都有明确的要求。

据了解, 青岛即将修建的地铁 1 号线位于胶州湾

隧道(左线)外侧约 100 m 处,两隧工程地质条件相似,开挖断面、洞型相近,拟采用施工方法一致。借鉴、利用经施工验证已查明的洞身工程地质、水文地质条件,合理比对参考,对降低地铁 1 号线施工风险有着重要的现实意义,能够起到良好的指导作用。

4 开挖验证综述

胶州湾海底隧道早在前期可研中就做了大量的工作,各勘察阶段对地层岩性、地质构造、水文地质条件、围岩特征、工程的风险性及适宜性又进行了相关研究,这些研究随着隧道的开挖不断得到检验,其成果有相

符也有出入。总结、归纳洞身施工地质条件与前期勘察报告比较,可以从以下三个方面入手进行分析:

4.1 洞身断层位置及性质比较

海底隧道受条件所限,钻探困难,取芯及岩芯鉴定存在一定的不确定性,大部分岩芯不能按要求取出,直接影响到洞身断层位置的确定和断层要素的确定,即使断层位置确定,倾向不确定,也会导致洞身断层破碎带出露位置的变化,势必影响到采用矿山法施工的隧道施工安全和稳定。

现将勘察报告和施工过程中洞身断层出露情况进行比较,如表 1 所示。

表 1 洞身断层出露情况比较表

编号	断层编号		开挖出露里程	宽度 /m	力学 性质	断层产状	预测 涌水量	实测 出水量	断层充填物	与洞身 交角/(°)
			详勘纵断面里程			象限角/方位角	(L·h <sup>-1</sup> )			
1	左 线 隧 道	f <sub>4-6</sub>	ZK 7 + 210 ~ + 254	44	压扭	N85°E/85°S	—	—	灰白色断层泥断层角砾	80
			无			175°∠85°				
2		f <sub>4-5</sub>	ZK 6 + 960 ~ 7 + 090	130	压扭	N70°E/63°N	712	3 600	灰白色断层泥断层角砾	65
			ZK 7 + 988 ~ 8 + 028	40		340°∠63°				
3		f <sub>4-4</sub>	ZK 6 + 860 ~ + 900	40	张性	N66°E/70°S	173	600	辉绿岩脉灰白色断层泥	61
			ZK 6 + 878 ~ + 918	40		156°∠70°				
4		f <sub>4-3</sub>	ZK 6 + 740 ~ + 790	50	张性	N60°E/80°S	782	3 900	辉绿岩脉灰白色断层泥	55
			ZK 6 + 762 ~ + 822	60		150°∠80°				
5		f <sub>4-2</sub>	ZK 6 + 440 ~ + 470	30	压扭	N52°E/80°S	有渗水	318	断层角砾断层泥	47
			ZK 6 + 442 ~ 462	20		142°∠63°				
6	f <sub>4-1</sub>	ZK 6 + 240 ~ 6 + 350	110	压扭	N40°W/70°S	—	局部渗水	辉绿岩断层角砾	45	
		ZK 6 + 287 ~ + 352	75		230°∠70°					
7	f <sub>3-2</sub>	ZK 5 + 910 ~ + 960	50	压扭	N35°E/75°N	—	局部渗水	灰白色断层泥断层角砾	30	
		ZK 5 + 745 ~ + 780	35		305°∠75°					

为完整表达洞身断层的性质,本表将原勘察资料中的断层要素方位角换算为象限角。按照前期地勘资料的表述:上述 f<sub>4</sub> 系列断层为西北向断裂,倾向以北为主。但在实际开挖中根据左、右线及中间辅助隧道开挖过程中断层出露的连线看,该系列断层为北东—北东东向断裂,走向 N57°E 至 N85°E 之间,倾向以南为主,从换算后的象限角来看,该系列断层也为北东—北东东向断裂,走向 N35°E 至 N85°E 之间,倾向以南为主,两者高度吻合,这恰恰符合青岛以北东向、北北东向为主的区域构造体系。

勘察资料出现判断失误的原因,分析时把表示断层所用的方位角误以为是走向方位角,根据相关规定,断层要素中的方位角是指倾向方位角,因走向与倾向垂直,两者相差 90°,这里就出现了走向、倾向背离区域构造的异常现象。

从表 1 可看出,除 f<sub>4-6</sub> 号断层为开挖新发现断层外,其余断层在详勘资料中均有所反映,但其宽度和出

现的位置有所差异,这些差异分析与断层产状的误判有一定的关系。

表 1 中的水文数据验证了断层破碎带为地下水的良好通道和贮存地。这里可以看出两点:一是张性断裂有利于地下水的流通,贮水量相对丰富;二是洞身开挖实际出水量一般达到预估涌水量的 4~5 倍,明显反映出施工期间的实际出水量比预估涌水量要高,这也给青岛地区同类工程在相同地质条件环境下的水文参数和施工设备配置提供了参考。

4.2 围岩变更情况比较

胶州湾隧道薛家岛端陆域段岩性以燕山晚期花岗岩为主,花岗斑岩呈脉状侵入花岗岩,宽度数厘米至数十米。花岗岩中细粒结构,块状构造,岩体较完整~完整,岩质较硬~坚硬;海域段岩性以下白垩纪青山群火山岩及燕山晚期侵入岩为主,岩体中穿插喜马拉雅期形成的辉绿岩脉及构造破碎带。

开挖揭示胶州湾薛家岛以 f<sub>4-6</sub> 号断层为陆、海域

的分界线,海域段喷出岩、中深层侵入岩、岩脉多呈侵入穿插接触,岩性交错变化频繁,岩质较软。

受多期火山活动捕掳、融蚀、与岩脉侵入挤压顶升的作用,其岩性具有复杂多变与突变的特征,出现施工

期间洞身围岩分级变化频繁,多由高一级向低一级变更的现象。以左线隧道为例,洞身围岩分级变更如表 2 所示。

表 2 洞身围岩分级变更统计表(单位:m)

薛家岛(出口)端		Ⅱ级围岩长度		Ⅲ级围岩长度		Ⅳ级围岩长度		Ⅴ级围岩长度	
左线隧道	长度	原设计	变更后	原设计	变更后	原设计	变更后	原设计	变更后
	3 293	290	290	1 742	959	916	1 895	345	149

分析表 2,可绘出设计、施工隧道围岩分级变更比例示意图,如图 2 所示。

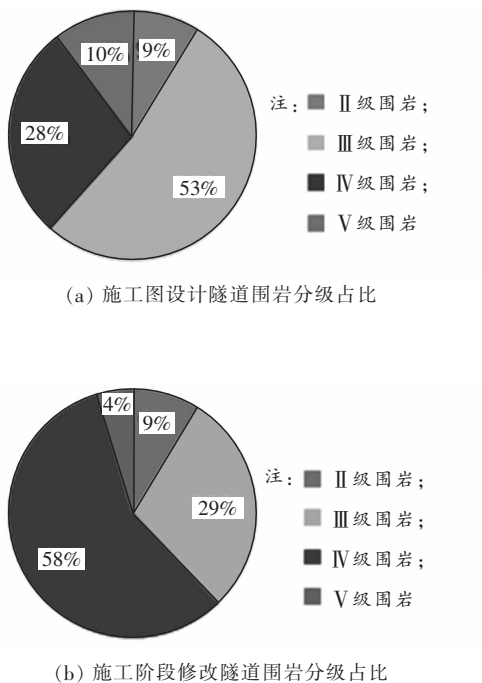


图 2 围岩分级变更比例示意图

图 2 直观地表达了青岛胶州湾海底隧道围岩分级的变化情况,图示反映出施工前后围岩等级划分的变化,可以看出:在本段隧道施工过程中,除Ⅱ级围岩的比例仅占 9%,维持不变外,原Ⅲ级围岩所占的比例由 53% 变更调整为 29%,Ⅳ级围岩的比例由 28% 变更调整为 58%,Ⅴ级围岩的比例由 10% 变更调整为 4%,均做了较大幅度的调整,整体上看围岩状态没有预期的好。研究、分析这一现象,特别是对即将穿海的地铁 1 号线具有一定的指导意义。

### 4.3 洞身渗漏与注浆堵水

#### 4.3.1 洞身渗漏情况

胶州湾隧道纵断面采用“V”字型坡,洞身穿越断层破碎带,一般宽度几米到几十米不等,破碎带岩体破碎,夹泥质物和软弱夹层,富含水,极易发生坍塌、涌水或海水倒灌现象,施工风险大,处理洞身涌水难度较大。

为确保洞身施工安全通过断层破碎带,设计要求施工采取超前探水措施,准确确定断层破碎带的具体位置,了解、掌握断层的特点,依据出水量有选择的进行全断面注浆、周边帷幕注浆或局部断面注浆进行封堵处理。

据设计文件:左线隧道易发生涌水地段为 ZK 6 + 762 ~ ZK 6 + 917 区间,计长 155 m,施工开挖过程中采用超前探孔技术,确认出水的地段基本相符,故按照设计对该段进行超前注浆处理。

#### 4.3.2 注浆方式及设备选择

注浆前根据现场地质条件和出水量的大小,采用水表与压力表对出水量进行测量,测得单孔最大出水量  $Q=3\ 900\ \text{L/h}$ ,实测水压 0.4 MPa。

注浆过程视洞身施工具体情况,分别采用了全断面帷幕、周边帷幕及局部断面注浆等方案,符合设计要求,形成了一套较为完整和成熟的注浆方案,取得了一定的经验,对指导今后同类型施工具有一定的积极作用。

机械设备选型:在开工前试验段就不断开展试验,最终确认采用多臂凿岩台车与多功能钻机,经实践证明:作为超前注浆的主要设备,上述配置适合本隧道地质情况,对提高注浆速度起到了积极地作用,为快速通过断层破碎带或有水地段提供了可靠的保障。

浆液配制经前期注浆试验确定:拟采用普通水泥浆、化学浆、双液浆、超细水泥浆等为主,视封堵具体情况适当调配。注浆工艺采用分段前进式注浆、钻杆后退式注浆、全孔一次性注浆相对应的超前预注浆进行止水和加固,取得了良好的效果。

注浆结果表明:胶州湾海底隧道采用分段前进式注浆方式,适合洞身的火山岩岩性,注浆孔原则上一次性注浆宜控制在 10 m 以下,超过此深度将致使注浆效果减弱,止水效果差,施工后期出现初期支护渗漏水难题。

#### 4.3.3 注浆参数

适合胶州湾隧道岩性的相应注浆参数,系根据注浆试验和注浆阶段的配合比试验,结合注浆段的现场

实际操作工艺不断完善,最终确定如下:

注浆孔开孔直径:130 mm,终孔直径 100 mm

分段注浆长度:30 m

浆液扩散半径:2.0 m 左右

注浆孔间距:3.0~3.5 m

注浆数据记录仪:采用三参数(P-Q-T)自动记录仪,可以保证注浆压力、流量、时间数据的全过程采集。

浆液材料配比:超细水泥,水灰比 1:1

单孔延米注浆量:0.34~0.46 m<sup>3</sup>

注浆压力:3.0~4.0 MPa

注浆速度:50 L/min

注浆结束允许出水量:0.4 m<sup>3</sup>/(d·m)。

#### 4.3.4 注浆标准

注浆结束标准以定压和定量为主。

注浆压力达到设计终压,当注浆速度小于 5 L/min,延续时长超过 20 min 时,即可结束该孔注浆。

当注浆过程中长时间压力不上升,并且达到设计注浆量时,应缩短浆液的凝胶时间,并采取间歇注浆措施,控制注浆量。

当设计孔全部达到结束标准,注浆效果检查合格时,结束注浆。

#### 4.3.5 注浆效果

薛家岛端左线隧道采用全断面注浆、帷幕注浆进行洞身封堵水处理,共实施 2 次 2 段,累计长度 60 m,注浆量 1 368 m<sup>3</sup>,用时 34 d。注浆堵水后的隧道出水量为 0.324 m<sup>3</sup>/(d·m),小于注浆结束允许的 0.4 m<sup>3</sup>/(d·m),注浆达到预期效果。

在注浆实施期间,通过采取加强洞身地质条件验证,结合现场实际情况,优选优配注浆参数,有针对性的布设孔位等一系列步骤,对部分设计为全断面注浆的地段,以周边帷幕和局部断面注浆相结合的方案进行了优化调整,优化方案比原全断面注浆设计布孔减少孔数达 40%,在保证注浆质量的同时,降低了劳动强度和材料消耗,节约了成本。

注浆实践表明:要适应场地洞身岩性和特殊的地质条件,胶州湾隧道注浆堵水利用超细水泥浆具有一定的优势。超细水泥浆与化学浆液相比,具有成本低,现场配置方便,注浆施工工艺简单,后期强度高耐久性好的优点,使得加固后的围岩稳定性显著提高,保证了隧道开挖安全和隧道使用的耐久性。超细水泥浆与普通水泥浆液相比,更具有扩散半径大,强度高,堵水效果好的优势。同时,施工中采用多臂凿岩台车作为超前预注浆钻孔的主要设备,提高了成孔的质量和效

率,注浆速度较单臂钻机成孔方式提高约 4 倍,注浆工期节省 1/3,适合本隧道地质条件,为洞身快速通过断层破碎带或有水地段提供了可靠的保障。

## 5 结论

对青岛胶州湾海底隧道施工过程中出现的工程地质、水文地质问题进行分析、研究,可以得出:在重大工程施工过程中注重开展地质工作,对于补充、完善地勘资料,保障动态设计贯彻实施,确保工程的质量、工期、安全和投资规模控制,都起到了关键的作用,具有十分重要的意义。本文研究的立意在于:针对地下工程施工过程中出现的常见、多发问题,提出经济、合理、可行、安全的有效措施,保障施工和日后运营安全的需要。研究成果应用于铁路、公路、城轨隧道等地下工程,对如何应对地下工程施工出现的问题有一定的借鉴和指导意义。

青岛胶州湾海底隧道通车已三年,三年来来此参观隧道的人络绎不绝,大家无不为了整洁、干净的大跨度洞身感到震撼,位于海水巨大压力下的洞身全程干爽,没有明显的渗漏点,充分证明我国海底隧道渗漏水的处理从设计到施工已经达到世界先进水平,隧道的修建为我国发展中的海底通道工程提供了宝贵的经验。

## 参考文献:

- [1] 青岛国信实业有限公司. 胶州湾隧道施工技术规范[Z]. 山东青岛:青岛国信实业有限公司,2007.  
Qingdao Guosen Industry Co. Ltd. Technical Specifications for Construction of Jiaozhou Bay Tunnel [Z]. Qingdao: Qingdao Guosen Industry Co. Ltd, 2007.
- [2] 中铁大桥勘测设计院有限公司,胶州湾隧道工程地质详勘报告[R]. 武汉:中铁大桥勘测设计院有限公司,2006.  
China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd. Detailed Engineering Geology Investigation Report on Jiaozhou Bay Tunnel [R]. Wuhan: China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd,2006.
- [3] 中铁隧道勘测设计院有限公司. 胶州湾隧道工程施工图设计[Z]. 河南洛阳:中铁隧道勘测设计院有限公司,2007.  
China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co. Ltd. Construction Drawing Design of Jiaozhou Bay Tunnel Project [Z]. Luoyang: China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co. Ltd,2007.

(下转第 36 页 To P. 36)