

厦门海底隧道陆域段涌水原因分析

陈炜韬¹, 王明年¹, 魏龙海¹, 吉艳磊¹, 盖志英², 黄仁德²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 铁道第四勘察设计院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 涌水是隧道施工中常见的灾害现象, 它的形成原因是多方面的。以厦门海底隧道 NK12+088 断面涌水为实例, 通过结合该断面的工程地质情况, 运用理论分析和室内试验从地下水渗透破坏、围岩遇水崩解及掌子面围岩特征 3 个方面分析了涌水的原因。分析得到: NK12+088 断面处的全、强风化围岩均处于管涌发生的临界状态, 有发生渗透破坏的危险; 全强风化围岩遇水后在 17 min 崩解基本完成; 涌水位置为掌子面岩脉出现的位置; 分散的渗水点逐渐集中在一点或数点是涌水危险的开始。

关键词: 海底隧道; 涌水; 渗透破坏; 水力坡度

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0457-05

作者简介: 陈炜韬 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土质隧道围岩稳定性及支护力学行为研究。E-mail: cwt611@126.com。

Analysis of causes and disposals for water gushing of land regions Xiamen of submarine tunnel

CHEN Wei-tao¹, WANG Ming-nian¹, WEI Long-hai¹, JI Yan-lei¹, GAI Zhi-ying², HUANG Ren-de²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Fourth Railway Investigation & Design Institute, Wuhan 430063, China)

Abstract: Water gushing is common disaster in tunnel construction, and may be induced by many causes. Taking the water gushing of section NK12+088 of Xiamen submarine tunnel as an example, based on the theoretical calculation and laboratory tests and combined with geological engineering conditions of the section, the causes of water gushing were analyzed from three aspects: penetrating breakage of ground water, integration in water and emergence characteristics of surrounding rock in tunnel face. It was shown by the analysis that in completely weathered and strongly weathered surrounding rock penetrating breakage might happen due to piping, and the disintegration would be basically accomplished in seventeen minutes. Water gushing appeared in the location of rock vein. The concentration of dispersive penetration point was the dangerous mark of water gushing.

Key words: submarine tunnel; water gushing; penetrating breakage; hydraulic gradient

0 前言

涌水是隧道施工常见的地质灾害, 它不仅引起掌子面围岩坍塌及流失、埋没坑道、地表塌陷、支护结构变形等, 而且导致在施工中常常要改变施工方法、增加辅助的工法和工程建设费用。据统计, 我国 1988 年以前施工的隧道有 80% 在施工中都遇到了涌水, 故涌水灾害是隧道及地质工作者常常关注的问题之一。对海底隧道而言, 具有地下水水压力高、水源补给无限, 且施工中不具有自然坡排水条件的特点, 在开挖卸荷过程中, 风化破碎带处极易发生涌水的危险, 如日本的青函隧道、奥地利的 Oslofjord 海峡隧道施工时的涌水都发生在破碎带处^[1-2]。

不同地质情况下的隧道工程, 其涌水的原因是不

相同的。文献[1]对著名的青函隧道施工中发生的 4 次大的突水事件进行了分析, 发现这 4 次事件都发生在岩体破碎软弱区; 文献[3]对四川南柯河上一电站引水隧道的涌水塌方原因进行了分析, 认为施工原因和围岩本身破碎情况是涌水的主要原因; 文献[4]以国外 3 个工程实例分析了隧道开挖中高压涌水的原因和处理措施; 除此之外, 隧道开挖后, 水与围岩裂隙的相互作用也是隧道涌水的主要原因^[5-6]。

厦门海底隧道作为国内第一条海底隧道, 其主要

基金项目: 厦门东通道海底隧道施工阶段围岩分级项目; 西部交通建设科技项目 (2004-318-00030); 国家自然科学基金资助项目 (40702040)

收稿日期: 2007-04-26

修建在弱风化~微风化的花岗岩中。但是在陆域段主要穿越全强风化围岩,海域段也将穿越3条强风化基岩深槽和1个风化囊^[7],而且在风化槽附近存在微风化的破碎带。在2006年10月10日,服务隧道施工到陆域段NK12+088断面时曾发生大量的涌水。本文正是结合该涌水断面,从围岩条件和水土相互作用上分析了涌水的原因,并介绍了该断面涌水的处理措施,对本工程以后的风化囊槽及青岛海底隧道的施工提供借鉴。

1 涌水断面工程地质条件及涌水情况

1.1 NK12+088 断面工程地质条件

根据《厦门东通道工程施工图设计阶段工程地质综合勘察报告》^[7]和《厦门东通道工程A围堰下砂层分布情况工程地质勘察报告》,NK12+088涌水断面地层由上到下依次为:上部土层分别为近期沉积的淤泥及第三系冲洪积形成的黏土、砂土;下覆基岩为燕山早期第二次侵入的全风化~强风化黑云母花岗岩;NK12+088断面隧道上部穿越全风化黑云母花岗岩、下部为强风化黑云母花岗岩。具体纵断面工程地质剖面见图1。此外,服务隧道NK11+781.2~NK12+096.4段拱顶有砂层分布(见图1),隧道拱顶开挖线距砂层底面的距离为4.02~8.96m不等,该砂层与海水连通并受潮汐的影响;在砂层与隧道开挖区之间的全强风化围岩中有部分二长岩、玢岩岩脉分布。

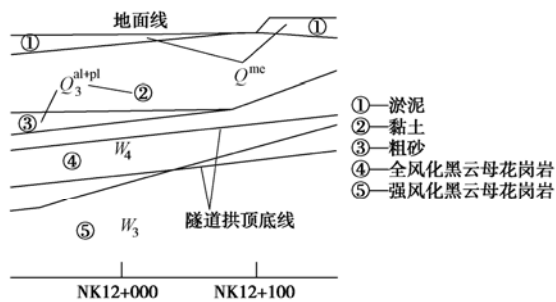


图1 涌水断面处工程地质纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal engineering geological profile in the section of water gushing

该断面的地下水主要为陆域地下水,受大气降水补给,若围岩裂隙与海水相通时,也受海水补给。地下水主要类型为松散岩类孔隙水、风化基岩孔隙裂隙水,其中松散岩类孔隙水赋存于第四系残积层中,风化基岩孔隙裂隙水赋存于基岩全~强风化层中。超前地质预报曾提出隧道右侧(面向出口NK12+096~NK12+086)、左侧(NK12+080~NK12+070)与隧道相交的10米范围内为规模稍大的多水带。

1.2 涌水情况及应急处理

2006年10月10日中午,掌子面在施作超前小导管时发现掌子面右侧有渗水现象,出现的位置主要在右拱腰处。下午2时左右水量增大并集中于一点向洞内涌进,至下午4时涌出的水已流至NK12+150,距离掌子面62m,此时施工方已经采取措施处理涌水^[8]。右拱腰集中渗流点1处形成和持续时间较长,也是右拱腰处各分散渗水点首次集中。至10月11日上午约10时,涌水已至NK12+200,右拱脚出现集中涌水点2,并且水量开始增大很大,并携带泥砂;大约20min后,右侧形成全面涌水点3,开始时形似“瀑布”;几分钟过后,“瀑布”消失,但总涌水量有增无减,同时掌子面正面和初期支护背后也开始出现涌水。具体的涌水位置和断面涌水点参照示意图2。此次涌水导致地表发生大量塌陷,形成一个半径为7.5m大的圆锥形漏斗,参见图3。

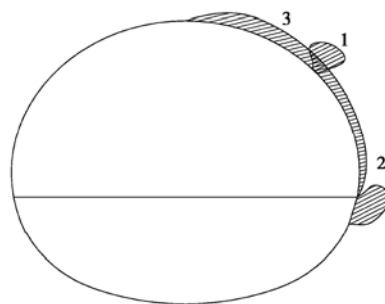


图2 NK12+088断面掌子面涌水点示意图

Fig. 2 Sketch map of the point of water gushing in section NK12+088

NK12+088断面涌水现象出现后,业主、施工、监理及设计方采取了积极有效的措施。由于涌水量大,并且携带了泥砂,且海底隧道不具有自然坡排水的能力,因此在采取的措施中,对涌出的地下水采取了排、堵、截相结合的办法,即分别在NK12+185、NK12+200处设置砂土袋挡水坝和混凝土挡水坝(厚3m),同时在NK12+200处的挡水坝上设置污水孔以便排水;对地表塌陷区进行注浆处理,同时在NK12+088~NK12+100段通过地表向洞内灌注级配砂石,以起到堵住掌子面、止水及防止地表塌陷扩大的作用。挡水坝的设置及采取的注浆加固等措施参见图3。通过以上几种措施成功的控制了涌水塌方,这些措施对以后类似涌水处理提供参考。

2 涌水塌方原因分析

2.1 地下水的渗透破坏

全、强风化花岗岩由于风化后主要以石英为主,因此在地下水作用下表现出砂性土的特征。土力学中指出^[9],水在砂性土中渗流时,在渗透压力下可能带

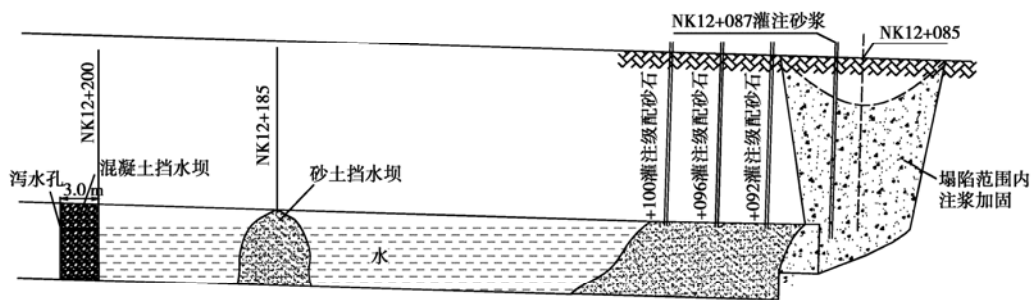


图 3 涌水处理措施示意图

Fig. 3 Sketch map of disposals for water gushing

表 1 土样基本性质及描述

Table 1 Basic property and description of sample

试样 编号	取样里程	天然含 水率/%	颗粒组成百分数/%					备注
			>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	0.075~ 0.25 mm	<0.075 mm	
A3-1	Nk12+344.5	41.1	37.1	28.5	10.4	18.6	5.4	强风化黑云母花岗岩：灰白色，岩石风化较严重，掌子面岩石呈松散粗砂状。
A4-1	Yk12+415	35.5	10.5	35.7	23.4	20.6	9.8	试样中含有粉质黏土与全风化黑云母花岗岩的接触面。
A4-2	Yk12+365	23.7	29.2	21.8	13.1	31.2	4.7	全风化黑云母花岗岩：肉红色，石英颗粒多，岩石风化严重，岩芯呈硬塑黏砂质土。

走一些细小颗粒，使得围岩中渗流通道逐渐增大形成管涌。一般情况下，当实际水力坡度 I_c 大于土质围岩的临界水力梯度 I_{cr} 时，将出现管涌，反之则不会出现渗透破坏。实际水力坡度 I_c 的计算参照文献[10]的计算公式，土质围岩的临界水力梯度 I_{cr} 以式（1）计算：

$$I_{cr} = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot \gamma}{(1 + w) \cdot \gamma_w \cdot \gamma_s} = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{(1 + e) \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

式中 γ_s 为土质围岩的重度， kN/m^3 ； γ_w 为水的重度，一般取 10 kN/m^3 ； γ 为土质围岩的天然重度， kN/m^3 ； e 为土体的天然孔隙比。

由上面的计算公式，由于涌水断面发生在陆域段，因此实际水力坡度 I_c 等于 1。根据勘察报告，全、强风化黑云母花岗岩的重度均为 27.2 kN/m^3 ，天然孔隙比分别为 0.772，0.677，将其分别带入式（1），则全、强风化围岩的临界水力梯度 I_{cr} 分别等于 0.97，1.03。通过比较水力坡度 I_c 和全、强风化围岩的水力梯度 I_{cr} 表明，该断面处的全、强风化围岩均处于管涌发生的临界状态。此外，在隧道开挖后，围岩卸荷导致裂隙增加，张开度增大，这无疑增大了全强风化围岩的天然孔隙比，从而使得极限水力梯度 I_{cr} 减小。经地下水作用后，围岩更易发生渗透破坏出现涌水。

2.2 围岩遇水崩解

围岩遇水后如果受水的影响较小，则有利于其自稳，反之，则遇水后会在水土相互作用下加速失稳。本次通过室内试验研究了涌水端全强风化黑云母花岗岩遇水的崩解情况。

试验装置由带刻度的量桶、水槽和铁丝网组成；试验过程为：将网格与量桶相连并给水槽中注满水，然后将取至掌子面的试验土样切成 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 大小并放置在网格上，随后将量桶、网格和土样一起缓慢放入水槽中，最后记录下水面在量桶上对应的刻度值随时间的变化情况。具体的试验过程见文献[11]。

试验取样及试样的基本性质如表 1，通过测试不同时刻下试样在水中的崩解量，绘制成崩解量随时间关系曲线见图 4。

从崩解试验结果图 4 可以看出，遇水后全、强风化花岗岩都出现了很快了崩解散落；在遇水后 17 min，三个试样的崩解量都在 80% 以上。其中，崩解最快的为强风化黑云母花岗岩试样 A3-1，崩解完成的时间仅 17 min。因此，该断面发生渗水时，围岩遇水崩解导致掌子面失稳，使得拱顶上部土体在失去支撑时受重力和地下水动力共同作用而发生地面塌陷。同时，由于全、强风化围岩的强崩解性，围岩遇水后更易形成

大的渗流通道,也容易使分散的渗流点逐渐集中形成大的涌水点。

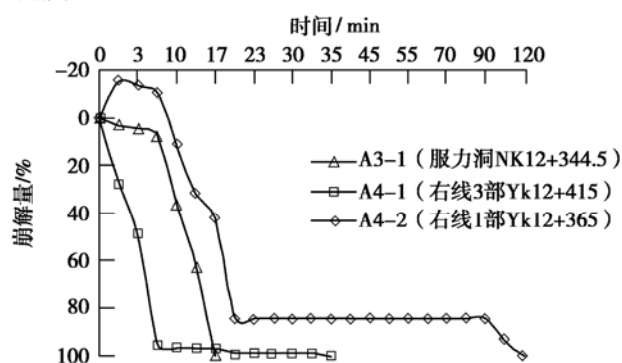


图4 全强风化围岩遇水崩解曲线

Fig. 4 Relationship between disintegration content and time

2.3 掌子面围岩特征

充足的水源和大的渗流通道是隧道涌水发生的两个必要条件。根据前面涌水段工程地质条件分析,由于砂层与海水相连,因此具有充足的水源。但是由于砂层距离隧道开挖线有一定距离,故要形成涌水必须有通道连接砂层中的水。

在NK12+088上台阶施工开挖时,掌子面地质素描显示在上台阶右侧有一二长岩的岩脉发育,呈硬塑状黏土,褐红色,示意图见图5。

围岩开挖后,破坏了原有的径流条件,同时围岩的卸荷也使全风化黑云母花岗岩与二长岩脉两个接触面张开形成渗流通道,文献[2, 12-13]研究也表明在这种裂隙处易发生渗透破坏。针对砂层出现的区域,《厦门东通道工程A围堰下砂层分布情况工程地质勘察报告》指出在该段内出现的竖向岩脉多开挖区附近的土体与砂层连通。

可见,隧道右肋处满足了涌水的两个条件,而且前面分析NK12+088处全风化围岩在地下水作用下易强崩解和发生渗透破坏,因此,渗水点的出现与岩脉的位置相吻合。

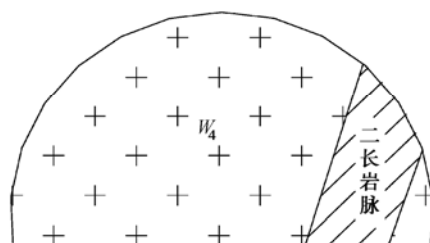


图5 NK12+088 掌子面地质素描图

Fig. 5 The geological sketch for tunnel face in NK12+088

前面主要从围岩本身条件、遇水性质及地下水作用三个方面分析了涌水产生的原因,除此之外,施工中对围岩的扰动等也是涌水的原因之一。但是就该断面涌水而言,地下水与围岩的相互作用是主要原因,

它使得分散的渗水点逐渐集中。

3 结 论

本文结合厦门海底隧道NK12+088断面工程地质条件及涌水情况,从地下水渗透破坏、围岩遇水崩解及掌子面围岩特征三个方面分析了涌水的原因,通过研究得到以下几点认识,对今后的施工和类似工程提供帮助。

(1) 经计算,NK12+088断面处的实际水力梯度为1.0,而全、强风化围岩的临界水力梯度分别等于0.97, 1.03,因此全、强风化围岩均处于管涌发生的临界状态,在地下水作用下围岩有发生渗透破坏的危险。

(2) 厦门海底隧道全强风化围岩遇水易崩解,一般在17 min基本完成,这个性质加速了地表塌陷和渗透通道的形成。

(3) 分散的渗水点逐渐集中在一点或数点是涌水危险的开始;同时,由于渗水点发生在岩脉与围岩的结构面处,因此,有必要对掌子面围岩及渗水情况进行观察和监测。

(4) 对于本工程,在以后的隧道顶部有砂层分布段、全强风化交界断面处、大的岩脉与围岩交界面处及风化囊槽施工中,必须注意涌水的发生。因为根据NK12+088断面的涌水原因分析,这些地段可能是涌水的临界地质条件。

参考文献:

- [1] TSUJI H, SAWADA T, TAKIZAWA M. Extraordinary inundation accidents in the Seikan undersea tunnel[C]// Proceedings-ICE: Geotechnical Engineering, 1996, 119(1): 1 - 14.
- [2] NILSEN B, PALMSTRØM A. Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels[J]. Modern Tunneling Science and Technology, 2001: 497 - 502.
- [3] 马德勤. 花岗岩体中隧道的大涌水塌方[J]. 水文地质工程地质, 1981(4): 49 - 49. ((MA De-qin. Water gushing out and collapse of granite tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1981(4): 49 - 49. (in Chinese))
- [4] 汪易森. 关于深埋长隧洞开挖中高压涌水问题的讨论[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 4 - 7. ((WANG Yi-sen. Discussion for high-pressure flow of deeply buried long tunnels[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(5): 4 - 7. (in Chinese))
- [5] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573 -

- 576.(HUANG Run-qiu, WANG Xian-neng, CHEN Long-sheng. Hydro-splitting off analysis on under groundwater in deep-lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 573 - 576. (in Chinese))
- [6] 王 鹰, 陈 强, 魏有仪, 等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学, 2004, **25**(4): 55 - 58. (WANG Ying, CHEN Qiang, WEI You-yi, et al. Water/rock interaction mechanism in deep-buried tunnels in karst area[J]. China Railway Science, 2004, **25**(4): 55 - 58. (in Chinese))
- [7] 中铁大桥勘测设计院. 厦门东通道工程施工图设计阶段工程地质综合勘察报告[R]. 武汉, 2004. (China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute corporation. Geology engineering Report of construction drawing in design phase of Xiamen submarine[R]. Wuhan, 2004. (in Chinese))
- [8] 西南交通大学. 厦门东通道海底服务隧道掌子面涌水情况报告[R]. 厦门, 2006. (Southwest Jiaotong University. Water gushing out report of tunnel face in service tunnel of Xiamen submarine tunnel[R]. Xiamen, 2006. (in Chinese))
- [9] 洪毓康. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (HONG Yu-kang. Soil mechanics and soil science[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese))
- [10] 李光耀, 夏支埃. 厦门东通道海底隧道风化深槽的岩土工程特征研究[J]. 资源环境与工程, 2006, **20**(1): 23 - 28. (LI Guang-yao, XIA Zhi-ai. The characteristics of the weathering grooves in the seabed tunnel of the east Xiamen passage way[J]. Resources Environment & Engineering, 2006, **20**(1): 23 - 28. (in Chinese))
- [11] 西南交通大学. 厦门东通道海底隧道施工阶段围岩分级研究阶段成果报告[R]. 成都, 2007. (Southwest Jiaotong University. Phase report of surrounding rock classification in construction phase of Xiamen submarine tunnel[R]. Chengdu, 2007. (in Chinese))
- [12] 雷升祥, 李淑媛. 浅谈海底隧道的地下水[J]. 现代隧道技术, 2004, **41**(5): 6 - 11. (LEI Sheng-xiang, LI Shu-yuan. Discussion on the groundwater in undersea tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, **41**(5): 6 - 11. (in Chinese))
- [13] 孙 钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (in Chinese))

勘 误

2008年第2期第232页作者单位署名有误, 应为(1.同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2.教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092), 英文为(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Centre of Environment and Sustainable Development, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)。特此更正。

(本刊编辑部)