

# 水底隧道穿越风化槽技术及施工效应研究

黄俊<sup>1</sup>, 张顶立<sup>2</sup>

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 北京交通大学隧道及地下工程试验中心)

**摘 要:** 通过对厦门东通道水底公路隧道风化槽的工程特性分析, 结合国内外钻爆法的成功实例, 并借助数值分析方法, 优化隧道穿越风化槽的施工工艺, 确定了超前注浆加固的时机和注浆加固的范围。

**关键词:** 水底公路隧道; 钻爆法; 风化槽; 施工效应

## 1 水底隧道发展概况

水底隧道的建设, 至今已有 4 000 年左右的历史。公元前 2 000 年, 巴比伦人首先用围堰明挖法建成了穿过幼发拉底河的水底隧道, 随着科技的发展, 1925 年布鲁纳尔氏父子首次采用盾构法在英国泰晤士河下修建了隧道, 1927 年建成的纽约荷兰特(Holland)隧道, 采用全横向通风系统解决隧道通风问题。1910 年美国人在底特律河下用沉管法修建了第一条双线铁路隧道。

1971 年日本用矿山法修建了穿越津轻海峡的青函隧道。隧道全长达 53.85 km, 于 1985 年成功贯通, 为全世界所瞩目。1987 年 9 月, 久经酝酿的英吉利海峡隧道破土开工, 隧道全长 49.2 km, 水底段长 37.5 km, 于 1993 年竣工运行。该隧道由英法两国采用双护盾全断面掘进机联合施工, 施工进度创世界之最。世界上其他地区也正在积极规划和论证海峡隧道方案。

我国水底隧道尚处起步阶段, 上海市在 1970 年建成打浦路越江隧道(长 1 300 m), 1988 年建成延安东路隧道(长 2 261 m), 2003 年建成的复兴路越江隧道, 还有已建成的珠江、甬江、上海外环等水底沉管隧道。海南、广东、青岛、长江口等地已在积极酝酿、规划水底隧道的建设, 厦门东通道工程就是其中之一。

目前, 水底隧道按修建方法基本可分为矿山法、盾构法、沉管法。此外, 可根据条件将三者混合使用, 或采取桥隧联合方案跨越海峡或河流, 可缩短隧道长度, 降低造价。

一般把埋置于基岩, 用传统钻爆法或臂式掘进

机开挖隧道的方法称为矿山法。这些隧道被称为深埋隧道或暗挖法隧道。如日本的青函隧道、关越隧道、英国的墨西隧道等。矿山法关键问题是控制地下水流入隧道导坑, 因此, 确定隧道穿越地层的工程地质条件, 是矿山法施工的前提, 同时, 也是隧道施工安全的保证。

日本青函隧道, 穿过津轻海峡, 全长 53.85 km, 海底段长 23.3 km, 采用了矿山法施工。作为世界上最长的海底隧道, 它在水平钻探, 超前注浆加固地层, 喷射混凝土等技术上有巨大发展, 尤其在处理海底涌水技术方面, 独具一格, 为工程界所津津乐道。

挪威已建成的 100 多 km 的海底隧道均采用钻爆法施工。可见, 国外钻爆法在水底隧道施工中的应用很多, 国内基于多年山岭隧道和城市浅埋地铁隧道施工的经验, 厦门东通道公路隧道的钻爆法施工方案具备可行性。

## 2 厦门东通道工程

### 2.1 工程概况

拟建厦门东通道水底公路隧道工程, 是国内计划建设的第一条水底隧道, 该工程位于厦门岛东北端的湖里区五通村与同安区西滨村之间, 呈北东向展布, 隧道全长约 5.9 km, 其中海域段长约 4.2 km。东通道工程是厦门市公路骨干网规划中的重要组成部分, 是厦门岛连接大陆的第 3 条通道。左、右线隧道分别设一竖井。

根据厦门东通道工程可行性研究报告, 工程拟采用钻爆法暗挖隧道, 由两条运营隧道和一条服务

隧道组成。单孔运营隧道的开挖跨度为14.67 m,高度9.85 m,面积达110 m<sup>2</sup>。隧道通过地段的工程地质、水文地质,在初步设计阶段地质勘察中,发现场区五通岸陆地南半部、西滨岸陆地及西滨侧潮间带基岩的全风化~强风化带厚度较大。在海域新发现了几条构造破碎带处,全~强风化带异常深厚,形成风化深槽。隧道在不同位置穿越、部分穿越及下穿风化槽。此类全风化~强风化岩体强度低、自稳能力差,易发生渗透破坏。按工可设计的暗挖隧道埋深,有很大一部分洞身处于全~强风化带或风化深槽内。因此,有必要对隧道穿越风化槽的施工力学行为进行分析预测,以保证隧道施工安全及围岩稳定。

## 2.2 钻爆法施工方案的确定

从隧道设计方案,隧道穿越地层条件出发,可以采用钻爆法和TBM掘进机法开挖,本文对设计中推荐的钻爆法进行数值分析。其中隧道开挖采用CD法开挖,辅助工法采用注浆法。

隧道全部穿越风化槽位置的注浆预加固措施,为在距离风化槽一定距离时(图1中5 m),封闭掌子面,进行全断面注浆,且注浆加固范围为纵向25 m,环向隧道结构外侧5 m范围,分3段注浆实现。注浆完成后,在超前预注浆达到设计要求后,施作隧道拱部超前自进式注浆锚杆,掌子面向前开挖,多个开挖循环后,必须保留约10 m长超前预注浆加固段,作为下一步超前预注浆隔水止浆墙,开始新一轮的全断面(帷幕)超前预注浆。循环施工,直至快速、安全通过水底风化深槽。该加固方式与数值分析同步进行。

## 3 风化槽对工程的影响

### 3.1 风化槽的工程地质特性

钻孔揭示,风化槽组成物质为燕山早期第二次侵入的花岗闪长岩及其风化物,其内穿插二长岩、辉绿岩(玢岩)等岩脉,多沿本场区最为发育的近南北向及北北东向高角度裂隙侵入,脉宽一般不足1 m,个别部位宽达10~20 m。根据风化程度可分为全、强、弱、微4个风化带。

全风化带( $W_4$ ):全风化花岗闪长岩,一般呈棕黄~灰黄色,含灰白色及褐色斑点,岩体已呈砂质粘土或砂质亚粘土状,在构造破碎带内仍可达30 m左右(以标准贯入击数是否达到50击/30 cm作为划分全、强风化带的标准)。

强风化带( $W_3$ ):花岗闪长岩强风化带,呈棕黄~灰黄色,从上至下一般由砾质粘性土→泥质砂砾石

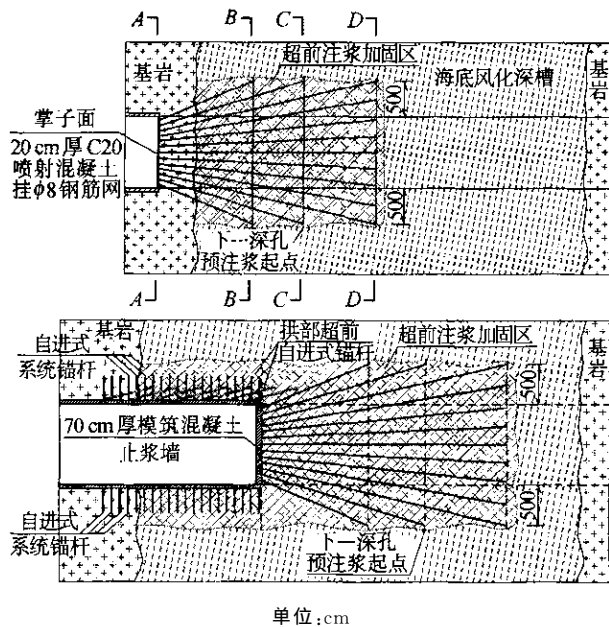


图1 全断面(帷幕)超前预注浆立面

土→酥脆岩体过渡,中下部常有大小不等的弱~微风化球状残余体。强风化带顶界高程一般低于-10 m;厚度一般小于15 m,构造破碎带内可达30 m以上。

弱风化带( $W_2$ ):该风化带的主要特征是岩体被较多风化裂隙切割,风化裂隙一般追踪构造裂隙或原生节理发育,部分追踪低倾角裂隙,裂隙两侧数毫米~数厘米范围内的矿物风化成黄色,部分裂隙内充填物或胶结物已风化为泥,岩块大部仍保持原岩特征,仅边缘带变软。该风化带为强风化与微风化的过渡带,厚度一般不超过5 m,局部追踪构造破碎带可达很深部位。

微风化带( $W_1$ ):花岗闪长岩为灰白色,辉绿岩脉呈灰绿色,石英岩脉呈白色,二长岩脉呈淡黄色夹灰绿斑。上述微风化岩石均属硬质岩类,岩脉多沿高角度构造裂隙侵入,两者界面多很规则,熔融现象不明显。微风化带顶界形态主要受构造控制,构造破碎或裂隙发育带顶界变化很大。

微风化岩破碎带:颜色与原岩基本相同,揭露于风华槽轴线附近。岩体被3组以上构造裂隙切割,裂隙间距小于20 cm,岩体被割成碎石状,岩质仍较硬,少数裂隙内存在碎屑物,一般呈高角度带状产出。

### 3.2 风化槽的施工评价

风化槽的组成物质,经研究证实,为花岗闪长岩风化形成的,仍保留了花岗闪长岩的结构。

风化深槽岩土体,总体上属弱~微透土层。风化槽全~强风化带岩体渗透系数为 $10^{-4}$  cm/s级;弱风

化带岩体渗透系数为  $10^{-5}$  cm/s 级。在全水头作用下,根据已有的勘察成果资料,运营隧道及服务隧道通过的全~强风化带岩体的渗透稳定。但从工程安全的角度看,在极端地质条件下,存在发生渗透破坏的可能性。

穿越断层破碎带、风化槽,主要是断层破碎的支撑、加固堵水问题。目前国内外普遍采用注浆法、冻结法和其他辅助方法。注浆法是人工充填围岩裂隙的一种方法,在一定的注浆压力作用下,浆液被挤压入岩层裂隙流动扩散,由于其充塞和水化作用,在裂隙内成为具有一定强度和低透水性的结石体,从而达到堵塞裂隙、截断水路和加固围岩的目的。一般注浆范围为洞径的 2~3 倍,水底段为 3 倍。

4 隧道穿越风化槽的施工效应

4.1 建模及计算假设

本次计算,采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分程序,对水底隧道钻爆法施工的力学行为进行模拟,初步分析风化槽对隧道开挖的影响规律,并优化钻爆法穿越风化槽不良地层的合理施工工艺及辅助工法。

结合隧道穿越地层纵断面图,计算模型主要针对隧道穿越风化槽的 3 种工况,如图 2 所示,工况 3 为隧道全部穿越风化槽,风化槽底位于隧道底下 8 m;工况 2 为隧道部分穿越风化槽,风化槽底在隧道拱顶下 5 m;工况 1 为隧道下穿越风化槽,风化槽底位于隧道顶部上 2 m。风化槽纵向长度略有不同。因对称关系,隧道结构选取一半,上表面取至海底面,隧道侧向及底部分别取至隧道中心线外侧 70 m,隧道路面标高下 50 m,隧道纵向取 100 m。模型包括 31 512 个节点,28 500 个单元。

计算参数、施工工艺参数及模型假设如下:

- (1)材料采用摩尔~库仑准则、大应变变形模型计算;
- (2)假定地表和各土层均成层均质水平分布,参数见表 1;
- (3)开挖步长为 1 m,以壳体单元模拟掌子面前方超前预加固,参数见表 2;
- (4)对复合式钢格栅混凝土衬砌采用壳体单元模拟,参数见表 2,锚杆采用杆单元模拟;
- (5)地层和材料的应力应变均在弹塑性范围内变化,地应力场由重力自动生成;
- (6)考虑地下水的影响,在隧道模型表面( $z=35$  m)施加均布荷载,考虑 15 m 水深水压;

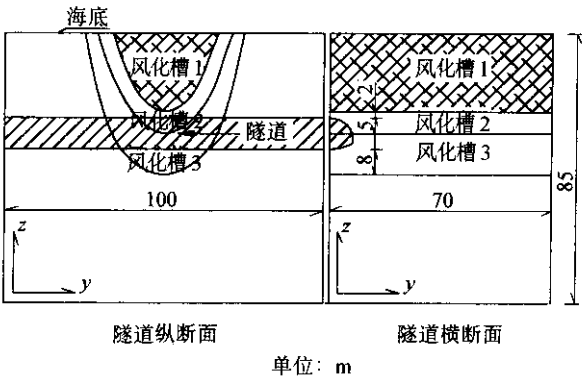


图 2 计算模型

表 1 围岩物理力学参数

岩土层名称	体积模量 $B/\text{MPa}$	剪切模量 $S/\text{MPa}$	摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$	粘聚力 $C/\text{kPa}$
第四系沉积土	10	8	12.5	19.7
全风化岩	96	62.8	16.8	37.4
强风化岩	100	74	19.3	36.0
弱~微风化带	8 330	6 250	30	500
注浆加固区	300	200	25	100

表 2 隧道支护结构力学参数

支护	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	厚度/m
超前预加固	1 050	0.25	0.3
隧道衬砌	3 140	0.25	0.4

(7)边界条件,模型上表面为自由面,侧面限制水平位移,底面限制竖向位移。

数值模拟优化方法:在 3 种工况中,分别计算不注浆、超前风化槽 3 m、5 m 开始注浆,及隧道径向注浆范围在隧道外 3 m、5 m 进行了分析。计算时首先生成网格,然后生成初始应力场,并计算使每循环的不平衡力小于 100 N,从而得到不同状态下的围岩变形及隧道结构变形值。

## 4.2 计算结果分析

3 种工况的计算结果见表 3。从隧道开挖后的拱顶沉降值看,若不采取超前及径向的注浆加固,则隧道开挖过程中掌子面将失稳;而超前注浆加固的时机应以 5 m 为控制标准,若小于 5 m 则在风化槽界面位置易出现较大变形,同时会带来涌水、突水等风险;风化槽的横向加固范围为隧道外 5 m 以上。

表 3 各种工况隧道开挖后拱顶沉降值

工况	拱顶沉降/mm			
	径向注浆加固范围 (超前风化槽 5 m)		超前风化槽加固距离 (径向注浆加固范围 5 m)	
	隧道外 3 m	隧道外 5 m	3 m	5 m
1	32.5	19.1	38.3	19.1
2	34.8	20.0	45.8	20.0
3	35.2	21.7	50.2	21.7

工况 3 模型,在超前 5 m 注浆和径向加固至隧道外侧 5 m 工艺开挖后的位移等值线,即塑性区分布见图 3、图 4 所示。从图中可以明显看到风化槽位置的位移较大,塑性区明显。

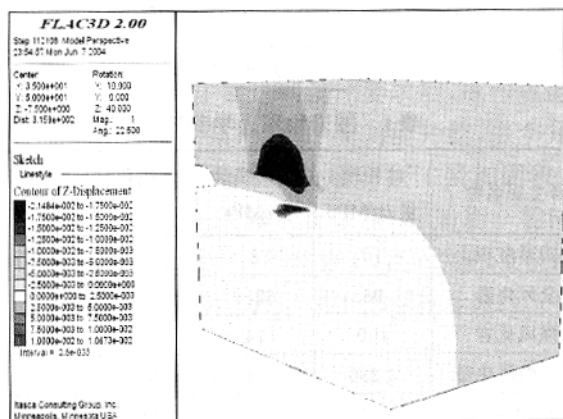


图 3 工况 3 超前加固 5 m、径向加固 5 m 位移等值线

## 5 几点体会

从风化槽的工程特性和数值分析,可以明确风化槽对隧道开挖的影响较大,若不采取适当的预加固措施,无法保证隧道顺利穿越风化槽带。借鉴国内外钻爆法的既有经验和理论分析,得到以下几点体会。

(1) 风化槽的存在对隧道开挖的影响较大,其强度和稳定性都无法满足隧道的施工要求,若不采取预加固措施则其变形很大,掌子面失稳,且钻爆法施工对围岩的扰动较大,特别对于水底隧道易出现突水、坍塌,开挖的风险很大,在隧道掌子面到达风化槽前,必须进行全断面注浆预加固。

(2) 风化槽注浆预加固范围,纵向要提前 5 ~

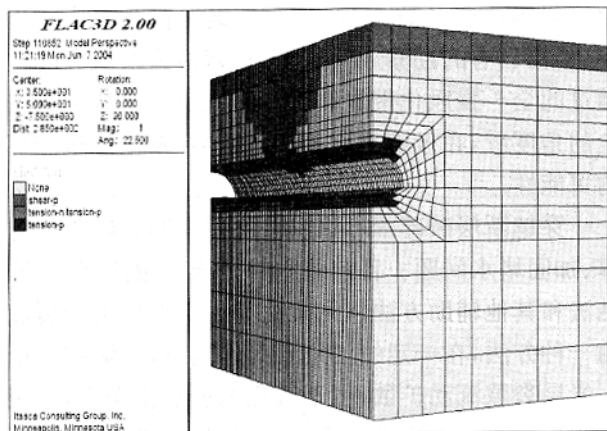


图 4 工况 3 超前加固 5 m、径向加固 5 m 塑性区分布

8 m,至少提前 5 m,实施全断面或部分断面预注浆加固。从勘察报告资料和现场施工围岩的实际揭露情况,适时进行超前地质预报,确定风化槽的实际形状,若为范围较大的槽型,则有必要对隧道开挖影响范围(2 倍隧道开挖直径)进行注浆加固。

(3) 风化槽注浆预加固横向范围,为隧道外 5 ~ 8 m(即隧道外 5 m 到 2 倍洞径位置),从勘察报告资料、现场施工围岩的实际揭露情况,及超前地质预报结果,确定注浆加固的范围,特别要保证隧道拱部的注浆加固范围和加固效果,在预加固强度达到要求后,才开始破掌子面开挖。

(4) 超前注浆预加固的关键部位为全~强风化槽与弱~微风化围岩的交界面,其加固范围比风化槽位置要略大,预防开挖过程中的突水、坍塌。

(5) 注浆加固的纵向范围,一般为隧道与风化槽交界面外 5 m 左右,下一轮预加固要保留 10 m 左右的加固区,以便封闭掌子面进行下一轮的预加固措施,对于纵向范围较小的风化槽可以一次性预加固。

(6) 预加固后的施工过程中,要做好超前的锚杆和系统锚杆的施作,并注意施作时机和注浆效果,提高加固区范围外的围岩强度,保证隧道结构的安全及隧道结构与围岩的整体性,才能使后期隧道的防水和隧道使用有充分的保障。

(7) 隧道部分穿越、下穿风化槽工况,在预加固前提下,隧道开挖引起的围岩位移较小,但两者施工工艺要求,应当和隧道完全穿工况同等对待,由于风化槽纵向宽度较大,因此,必须提前施作预加固。

## 参考文献:

- [1] 赵宏,刘树年. 水底隧道施工技术资料汇编[Z].
- [2] 陈先国,高波. 重叠隧道的施工力学研究[J]. 岩石力

学与工程学报, 2003, 22(4).

[3] 黄俊. 地铁暗挖隧道上覆富水软弱地层大变形规律及控制研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2004.

[4] 中交第二公路勘察设计研究院. 厦门市东通道工程预可行性研究报告[R]. 2002.

[5] 广东核力工程勘察院. 厦门市东通道工程项目预可行性研究阶段工程地质综合勘察报告[R]. 2001.

[6] User's Manual CS. ITASCA Consulting Graup Inc. , 1996.

[7] Itasca consulting group. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension (FLAC3D), Version 2.0, Manual, Itasca, Minnesota, Minneapolis. 1997

# A Study on Technic of Benthic Tunnel Traversing Weathered Trough and Its Construction Effect

*HUANG Jun<sup>1</sup>, ZhANG Ding-li<sup>2</sup>*

(1 China Highway Planning and Design Institute ( HPDI ) Consultants, INC. , Beijing 100010,China;

2 Reaserch Center of Tunneling and Underground Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044,China)

**Abstract:** By the analysis of engineering character about weathered trough of benthic highway tunnel traversing the Xiamen East Passage Channel and successful examples of drilling and exploding methods at home and abroad,the time of advanced grout reinforcement and the scope of construction techniques for traversing weathered trough are confirmed in virtue of numerical simulation method.

**Key words:** benthic highway tunnel; drilling and exploding method; weathered trough; construction effect