

复杂地层条件下海底隧道工程的质量控制

(4) 25-33

Nilsen, B

王林} ✓

摘要: 当今地下工程的特点常常表现为地层条件困难, 合同纷繁复杂以及环境问题突出。特别是对于海底隧道, 隧道坍塌的后果是十分严重的。因此, 质量控制成为这类工程必不可少的部分。成功的关键因素是进行充分的地质勘察并做好隧道施工的规划设计。本文论述了在土工设计和控制方面的一些新趋势以及关于挪威二岛之间的 5.3 km 长、155 m 深的弗尔岛海底隧道的勘察和设计情况。该地区面临复杂的断层, 给隧道开挖造成了极大的困难。因此采用了特别的预防措施、广泛的调查研究和质量控制措施, 以确保工程在规定的工期和预算范围内顺利完成。

关键词: 海底隧道 复杂地层条件 质量控制 风险分析 不确定因素评估

U459-5

U455-1

1 引言

本文的主要背景材料是笔者以挪威公路局的名义对弗尔岛海底隧道所做的质量控制、可行性、风险及费用方面的评估。在挪威的西北海岸线上目前正在修建这座 5.3 km 长、50 m² 的隧道(图 1)。

以前, 沿挪威海岸线已经成功修建了大约 30 座海底岩石隧道。因此, 弗尔岛隧道的设计可以得益于众多类似工程有价值的相关数据。如果公路局仍想通过两个独立的专家组充分评估该工程, 那么这主要是基于弗尔岛隧道工程地层条件十分困难, 而且近年几座海底公路隧道工程遇到了意外问题, 例如

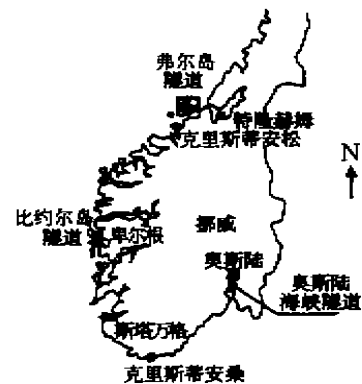


图 1 弗尔岛隧道及另外二座遇到意外问题的海底隧道的平面位置

① 比约尔岛隧道: 隧道施工期间, 在前寒武纪基岩中突然遇到了填有粘土、砂和煤层构造的、超过 10 m 宽的侏罗纪张拉断层带。该断层带渗透性极高、自稳性极差, 而且要求采取包括注浆、排水、桩柱、喷混凝土拱在内的非常耗时的工序, 以此才能够通过此断层。

② 北卡普隧道: 此处平坦的软弱沉积岩(主要为页岩、砂岩)自稳性极差, 在掌子面处要求大量的喷混凝土和混凝土衬砌, 使得隧道掘进速度降至 20 m/周。其原因这是由于平坦岩层的地震波速度相对较高(5 km/s 或者更高)。因此在预先勘察中没有反映出这些困难条件。

③ 奥斯陆峡湾隧道地处一条填有第四纪土壤的深裂缝上, 必须对其进行地层冻结才能通过。尽管在现场进行了大量的预先勘探工作, 包括传统的地震波折射法, 定向岩芯钻取法以及

地震层析 X 射线摄影法,但施工前未能探明这一裂缝带。

弗尔岛隧道是希特拉岛—弗尔岛工程的第二座海底隧道。5.7 km 长,246 m 深的希特拉岛隧道已于 1994 年完工。这两座隧道的前期勘察工作始于 1982 年,而对于弗尔岛隧道的勘察工作几乎一直持续到工程的开工(1998 年 2 月初)。与其它类似工程相比,该工程进行了大量的调查工作,发现了复杂的、在某些情况下甚至是不确定的地质条件。因此估计有十分困难的隧道施工条件,包括必须穿过几条大的、可能困难的软弱带,以及可能遇到新近沉积岩层。

作为最终决策的基础以及作为前期勘察和设计的质量保证,公路局最好做出一个最终的、独立的关于可行性、费用和风险的评估。本文结合岩土设计和控制方面的一些问题论述了其评估情况。

2 在岩土工程设计和控制方面的新趋势

地下工程几乎都是比较独特的,这是因为一个工程与另外其它工程的条件和要求均有所不同。而且工程的特点是条件困难,合同复杂和环保问题突出,因此工程的复杂程度普遍很高。另外社会大众也会积极参与进来。历史表明,因地质危害引起的损毁事故对工程的工期和造价有着显著的影响。

岩土工程新发展的起因在于人们希望进一步地了解和控制地下工程的复杂性。

新的设计规范和指南,发展现代化的质量体系,通过运用风险分析更好地理解复杂性以及寻求能更好描述费用和工期等不确定因素的系统等都是新趋势的表现所在。

确定调查和勘测范围的基本原则总是与根据工程的复杂性和类型所做出的决定以及主要的地质条件有关。这可通过几个国家的土工设计指南反映出来,作为例子,下面将论述有关挪威建筑标准委员会(NBR)和欧洲标准委员会(CEN)指南的几个方面。

通过上面的见解可知,质量控制的需求是大量的。对事故的审查可清楚地表明,需要有一个双重的质量体系。“做正确的事”和“正确地做事”这两个问题必须借助于这一质量体系来加以处理。目前已经发展成为基于 ISO 9001 的质量体系。这样的体系可以很容易地解决“正确地做事”这一问题,而采用这样的体系却很难涵盖“做正确的事”这一问题。其它的质量控制手段,如风险分析、技术审查和施工队伍技能等都可用来解决第二个问题。

在风险分析中所使用的方法,如过失树和事故树等是非常有价值的,因为它们能够以更为系统的方式描述事故造成破坏发展过程、事故的发生以及自然灾害的破坏作用。借助这样的方法可以更容易地认识到良好的组织和通讯以及职责明确的重要性。

2.1 设计指南

2.2.1 挪威标准 NS 3480

挪威标准 NS 3480“岩土工程设计”针对岩石和土壤,提供有关土木工程地质调查、设计、监督和控制方面的指南。其基本原则是工程业主和设计者在评价所谓破坏结果等级和困难程度基础上共同确定岩土工程等级(表 1)。

表 1 根据挪威标准确定土木工程等级(NBR, 1988 年)

破坏结果等级	困难程度		
	低	中	高
不太严重	1	1	2
严重	1	2	2
非常严重	2	2	3

按照 NS 3480 评估可能的破坏结果涉及到对经济具有长期影响的使用寿命和性能。

困难程度反映的是设计和施工中的不确定性,主要取决于:

- 现场工程地质条件;
- 地质条件对规划工程的影响程度;
- 是否有可靠的方法确定地质条件以及分析所需的输入参数;
- 是否有可靠的方法进行工程设计;
- 是否有类似工程经验。

位于乡村的水工隧洞和一般的低车流量的公路隧道通常属于 1 级岩土工程,而海下隧道和位于市区的大型洞室则通常属于 3 级岩土工程。

岩土工程的等级确定了所需付出努力的程度:

- 地质条件信息的收集;
- 分析和规划;
- 设计监督和控制;
- 施工监督和控制。

2.1.2 欧洲规范 7

相关的欧洲标准——欧洲规范 7 是一种所谓的欧洲标准草案或“ENV”,待在实际运用中获得经验后,将根据需要对其进行修订,并有望在 2000 年转为正式的欧洲标准。届时,在挪威该标准将替代 NS 3480(也将替代欧洲其它国家的相关国标)。

EC 7 岩土工程设计的基本用法原则上与 NS 3480 一样。但 NS 3480 主要提供岩土工程设计框架,而 EC 7 则更多地提供详细的规则。此处将介绍 1、2、3 类所谓岩土工程类别(对应于 NS 3480 中的岩土工程等级)。在进行地质调查之前一般就应当根据土工类别进行结构的初步分类。

按照 CEN(1994),在确定岩土工程设计要求时应当考虑下列因素:

- 结构的特性及尺寸大小以及其包括特殊要求的元素;
- 周围的情况(邻近建筑、交通、公用设施、植物、有害化学物质等);
- 地层条件、地下水状况和局部的地震活动状况;
- 对环境的影响(水文、地表水、沉陷、湿度的季节变化)。

不同的工程类别可以有不同的设计处理要求,没有必要按照最高工程类别处理整个工程。

2.1.3 设计的监督

在 NS 3480 及挪威关于 EC 7 的运用文件中,按照岩土工程类别确定了下列关于设计监督的指南:

- 对于第 1 类,可由参与设计的人员进行监督(简单监督);
- 对于第 2 类,应由有资质的、有经验的且未参与设计的人员进行监督(一般监督);
- 对于第 3 类,除了一般监督外,建议由独立于土工设计方的人员或组织进行特别的监督(扩大的监督)。

尽管此处没有特别提及设计监督,但这也与 EC 7 的原则一致。另外,可以有兴趣地注意到,“扩大的监督”可作为技术审查的一部分,以便检查是否“做了正确的事”。

2.2 风险分析

风险分析的目的在于评估潜在的危害以及导致危害的因素。

风险分析可分为以下几个步骤:

- ① 识别危害和事故;
- ② 确定所识别的危害和事故的发生概率;
- ③ 描述和评估后果,包括引发事故的分析;
- ④ 风险计算。

在一个工程范围内,风险分析和质量控制/保证应当着重于:

- 识别以及消除或减少灾害;
- 减少事故发生的可能性;
- 找出能阻止事故发生的措施;
- 减少可能发生事故的灾害程度。

包括由危害发展为破坏过程中的所有事故都存在着不确定性。这种不确定性不仅仅涉及到岩土,也涉及到工程中的施工人员及人员之间的关系。因此,风险分析中的一个重大任务就是要了解、描述和处理这些不确定性因素。

2.3 在工期和费用确定中不确定性的评估

确定费用和工期是任何地下工程的重要部分。这类工程的所有不确定因素将导致费用和工期确定的不确定性,预算工作中评估不确定性的方法之一就是作为一个随机过程来描述确定。目前有几种解决这一问题的方法(见 Einstein 等 1987 年或 Isaksson 1998 年)。但这些方法都相对比较复杂。

一种快速、简便分析不确定性的常用方法就是所谓的 Lichtenberg 方法(图 2)。

简短地说,该方法的基本原理就是为每种因素(数量或价格)确定一个下限(L_l , 仅低出 1 %)、一个上限(L_u , 仅超出 1 %) 和一个最适当的值(V_l , 代表最佳估算值)。在此基础上,按下式计算出平均值(M)和标准偏差(s):

$$M = 1/5(L_l + 3V_l + L_u) \quad (1)$$

$$s = 1/5(L_u - L_l) \quad (2)$$

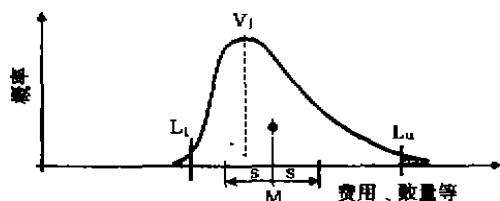


图 2 Lichtenberg 不确定性分析方法所用的参数

Lichtenberg 方法是一种假统计,严格地说,只有当各种因素相互独立时才有效,而且可通过厄尔兰分布(Erlang distribution)加以描述。运用该方法确定隧道工程费用,虽然总的来说是一种粗略简化的办法,但该方法可以很好地指出不确定因素的分布以及何为主要的因素。虽然,最基础的东西是用于描述每一基本单位施工效率和费用的变量。然而建立一个良好的隧道施工效率和费用数据库是进行每种预算的关键。第 3.4 节为该方法的一个实例。

3 弗尔岛隧道工程概述

弗尔岛隧道(图 3)长 5.3 km,最深处为海平面以下 155 m。其大部分(3.6 km)位在海底下面,岩石覆盖层厚度为 37~155 m。双车道隧道的横断面积为 50 m²(T₀ 隧道断面)。最大坡度

为8%。在最低处将开挖一座1150 m³的水库,足以贮存4天的漏水(若电力供应出现问题)。隧道施工费用确定为5500万USD(1USD=7.7NOK),相当于10400 USD/m。隧道于1998年2月动工,计划于2000年8月贯通,2001年6月交付行车运营。

3.1 地质

该地区的变质岩为前寒武纪,并在各种片麻岩之间变化,如花岗片麻岩、云母片麻岩和混合岩。在实际的隧道区域内观察到了几条或几层的石灰岩/大理石,岩层的走向主要为ENE—WSW,并朝NW方向急剧下降。

隧道区域紧挨着主陆相断层,大陆架的沉积岩层离弗尔岛只有20~30 km。因此,如果沿隧道在海底上可能出现局部的沉积盆地,那么重要的任务就是要把它找出来。

该地区在前寒武纪、加里东运动以及阿尔卑斯造山运动中遭受到了大的断层作用。在地形上可以看见代表断层和逆冲断层的几处凹地和山谷。同样,海底图也示出了具有凹地的地形,表明有断层或其它软弱带存在。地震波折射量测也证实了这一点。主要的地质特征是Tarva断层(图4),该断层在挪威本土上沿NW方向绵延有150多公里。这一可能古老的断层假定是在

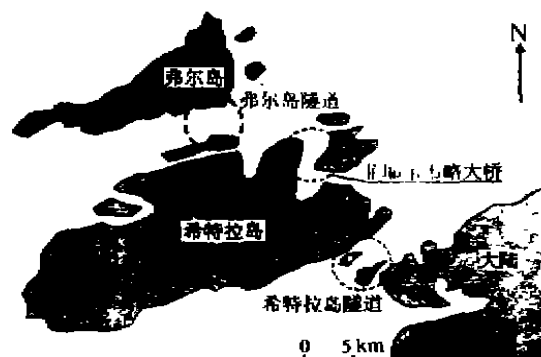


图3 连接希特拉岛和弗尔岛的弗尔岛隧道

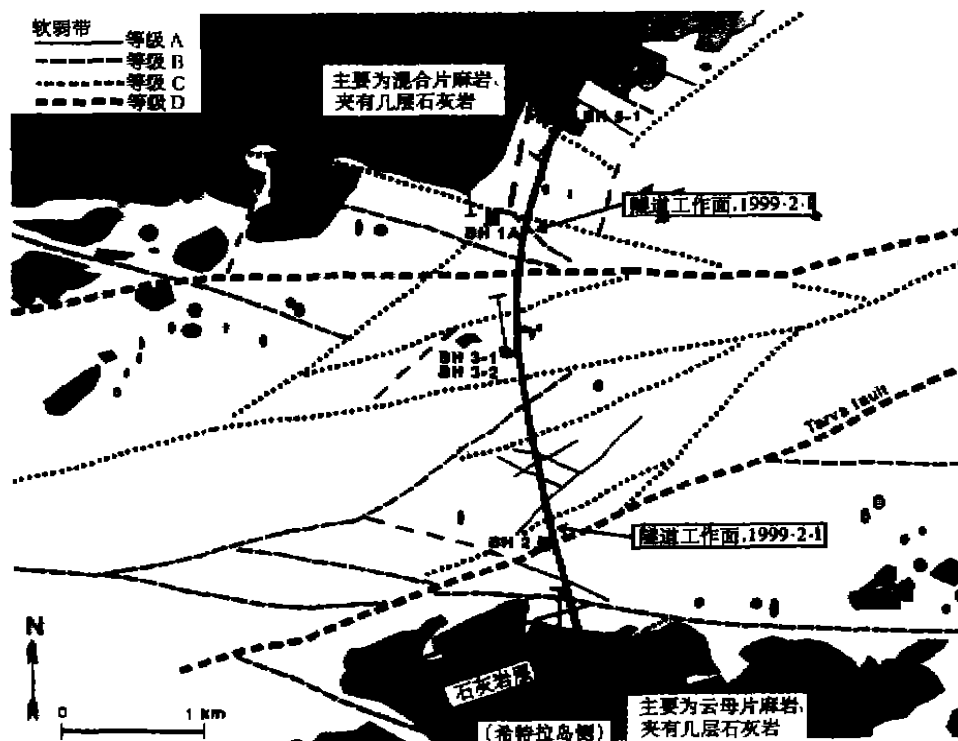


图4 根据地质图、航摄照片、现场调查加以阐明的隧道区域内的假定主要软弱带

侏罗纪/白垩纪或者是第三纪时重新被激活的。

3.2 现场勘测

工程的现场勘测始于1982年,主要是绘制地图、收集可得到的地质材料和初步的地震量测,包括地震波浅反射(声学的)量测和一次折射地震波断面。1992年选择了隧道定线,为此进行了费用预算和细部设计。

设计的后期,于1995年在弗尔岛峡湾两端进行了岩芯钻取。随即在峡湾北端发现了未曾预料到的不良地层条件。此地层是50 m²断面的隧道很难穿越的,其厚度超过30 m,由淤泥、砂和砾石构成,直接与海底相连。这样,这一部分的隧道轴线向东作了调整,另外还在此处增加了一些下面的现场勘察:

- 沿隧道轴线,在多个横断面上做折射地震波断面;
- 从陆地和弗尔岛峡湾中的一些小岛进行倾斜岩芯钻孔。由于地层条件困难,其中的一些岩芯钻取比较困难;
- 另外,从钻孔船进行了峡湾中的两处钻孔;
- 对该地区的地质构造沉降进行特别研究;
- 进行详细的钻取岩芯记录和实验室试验。

在增加了地质、地层条件信息基础之上,由两组工程地质专家进行了新的费用计算,在下一章节将对此加以叙述。在1997年最终决定修建隧道以前也进行了风险/不确定性分析。

3.3 可行性、风险和费用评估

折射地震波量测表明,此处有比挪威其它海底隧道更多的低速度带(软弱带)。另外,岩芯钻取贯穿了长段的岩层,而其中的软弱带比挪威一般硬岩中的变化程度要大一些。因此,许多地带的岩料是由像土一样的材料(粘土、淤泥、砂和砾石)构成。而粘土常常表现为较高的膨胀性、低强度和摩擦特性。

勘测结果证实,要对所有调查进行详尽的评估,以确定其可行性,另外在设计和施工期间应当采取特殊的程序(routine)和控制措施。

为此成立了两个小组进行隧道可行性评估,在其两份独立的报告中通过费用估算和风险评定分析了开挖方法和岩石支护措施。这两份报告都得出这样的结论,即采用钻爆掘进法并在设计和施工中进行严格的质量控制是修建该隧道最经济的方法。

在由本文作者编写的报告中,施工工期和费用预算是建立在对预期地层条件详细预报的基础上的。为此,将地层分为8个不同的等级,其中4个等级是针对软弱带之间所预计的地层质量,另外4个等级是针对软弱带的主要类型。对每个等级都给出了适宜的岩石支护的类型和数量。另外,沿隧道还假定了可能需要注浆作业的漏水情况。如第4.2节所述,这一预测已运用于工期和费用计划的后续实施中。

3.4 风险和不确定因素的评估

对于弗尔岛隧道,由于时间有限,故运用了第2.3节所述的方法。计算是以各种岩体等级和掌子面前方作业的范围和费用为基础的。如表2所示,最困难岩体等级(C和D)的长度和注浆范围是最确定的因素(最大变量),表2中的标准偏差相应于10%的变量系数,在以预计的地质复杂性、勘探钻孔、注浆和岩石支护范围为基础的“常规费用预算”中被视为低不确定性。

表 2 以 Lichtenberg 方法为基础进行的不确定因素分析(“最大/最小的预算”)

等 级	单 位	L_i	V_i	L_s	M	$M(NOK)$	s	$s(NOK)$	$s^2(NOK)$	
地 层 质 量	1	m	700	1 235	2 000	1 281		260	2 162 472	4.67629E+12
		NOK/m	7 000	8 362	9 500	8 317	10 654 333	500	640 500	4.1024E+11
	2	lm	1 200	1 720	2 500	1 772		260	2 611 492	6.81989E+12
		NOK/m	8 400	10 107	11 500	10 044	10 798 322	620	1 098 640	1.20701E+12
	3	m	600	1 060	1 700	1 096		220	2 913 416	8.48799E+12
		NOK/m	11 000	13 338	15 200	13 243	14 514 109	840	920 640	8.47578E+11
	4	m	50	330	500	308		90	1 658 430	2.75039E+12
		NOK/m	14 500	18 545	22 000	18 427	5 675 516	1 500	462 000	2.13444E+1
	A	m	50	125	300	145		50	868 110	7.53615E+11
		NOK/m	13 500	17 437	21 000	17 362	2 517 519	1 500	217 500	47 306 250 000
	B	m	150	240	400	254		50	2 443 710	5.97172E+12
		NOK/m	39 000	48 457	60 000	48 874	12 414 047	4 200	1 066 800	1.13806E+12
	C	m	150	380	600	378		90	6 749 190	4.55516E+13
		NOK/m	56 000	73 985	97 000	74 991	28 346 598	8 200	3 099 600	9.60752E+12
	D	m	10	140	280	142		54	8 862 869	7.85504E+13
		NOK/m	135 000	155 212	220 000	164 127	23 306 062	17 000	2 414 000	5.8274E+12
冻 结	m	0	0	50	10		10	3 100 000	9.61E+12m	
	NOK/m	250 000	300 000	400 000	310 000	3 100 000	30 000	300 000	90 000 000 000	
勘 探 钻 孔	I	m	3 500	4 310	4 500	4 186		200	32 400	1 049 760 000
		NOK/m	150	160	180	162	678 132	6	25 116	630 813 456
	II	m	250	320	1 000	442		150	41 430	1 716 444 900
		NOK/m	240	267	340	276	122 080	20	8 840	78 145 600
	III	m	300	600	1 100	640		160	208 032	43 277 313 024
		NOK/m	1 000	1 167	2 000	1 300	832 128	200	128 000	16 384 000 000
超 前 注 浆	i	m	400	1 195	3 200	1 437		560	4 095 168	1.67704E+13
		NOK/m	5 000	7 188	10 000	7 313	10 508 494	1 000	1 437 000	2.06497E+12
	ii	m	300	745	1 500	807		240	5 140 464	2.64244E+13
		NOK/m	15 000	19 031	35 000	21 419	17 284 810	4 000	3 228 000	1.042E+13
	iii	m	10	70	200	84		38	5 283 528	2.79157E+13
		NOK/m	60 000	145 067	200 000	139 040	11 679 377	28 000	2 352 000	5.5319E+12
					总计=159 431 528		$(\sum S^2)^{0.5}=16 484 868$			

4 隧道工程概况

到目前(1992年2月)为止,已经开挖了60%的隧道路段,遇到并顺利通过了许多预计的困难地段。只余下中部的2.1 km路段还未开挖。施工进度较工期计划提前了4个月。

工程主要的不确定因素及风险与漏水和不稳定的坍塌地层相关。作为质量控制的一部分,采取了大量的勘探钻孔和隧道施工的后续措施。每开挖20 m,即在工作面前方钻凿3~5个勘

探钻孔,以获取有关地层条件的信息。这样,在隧道施工进入困难地层之前可以及时地采取必要的措施。

在困难地层中采取的一些措施是:

- ① 施行超前注浆,即采用高压注浆方式在隧道前方钻 10~20 m 深的孔,进行注浆(图 5);
- ② 每隔 3 m 以 0.2~0.5 m 的间距设置 6 m 长的锚杆(spilling bolt),以稳固在下一个开挖循环中隧道顶部和两侧的地层;
- ③ 采用短尺爆破,并在爆破后立即对顶部、边墙和工作面施喷纤维混凝土;
- ④ 在稳定性极差的地方,除了第③项措施外要分步开挖和施做混凝土衬砌;
- ⑤ 准备有关设备,以便在诸如坍塌、逐步滑移的严重情况下对隧道工作面进行快速和全面的喷混凝土作业;
- ⑥ 为能即刻投入岩石支护作业要准备具有高泵送性能的先进设备。

作为控制体系的一部分,成立了 7 人专家小组,其中 5 人来自公路局,1 人来自外界,1 人来自现场管理部门。在隧道施工期间,每第二个月该小组即定点与现场管理方会晤。其任务是就安全措施、地层稳定性评估和岩石支护评定等方面进行讨论。

下一节将叙述隧道为穿越其中一条软弱带而施行的作业(图 6)。

4.1 在桩号 3 975~4 025 的软弱带中所进行的隧道施工作业

折射地震波量测表明该地区有两条低速度带(3.2 km/s 和 2.9 km/s),但经验和工程地质绘图表明可能只有一条大的软弱带。

从隧道内一凹穴进行的岩芯钻取勘探表明,该地带由蚀变片麻岩构成,含有厚度为 5~75 cm 的粘土层。在软弱带尾部稳定性最差。此处,即在到达邻近岩石层的明显边界前,钻眼坍塌达 2 m。

由于在一些 30 m 长的勘探钻孔中出现有小的漏水,因此对 20 个孔眼进行了 30 m 深的注浆。注浆花去了 14 500 kg 的水泥和 22 200 kg 的微细水泥,注浆作业成功地阻止了漏水,另外还增加了稳定性。在隧道掘进通过这一地带时采取了下列步骤:

- ① 减小开挖循环进尺,为 3 m(替代原来的 5 m);
- ② 以 0.25~0.4 m 的间距设置 6 m 长的全注浆插入锚杆(36~64 根)。用扁钢和喷混凝土使锚杆外端紧固在岩石上;
- ③ 爆破后立即在顶部和边墙施喷 1~2 层 6~12 cm 厚的纤维加筋混凝土;
- ④ 以平均为 1.5 m 的间距设置 4 m 长的锚杆;
- ⑤ 另外还施喷 2~3 层的纤维混凝土,喷混凝土总厚度达 19~31 cm。

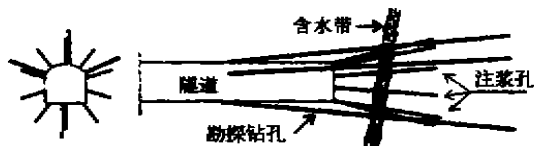


图 5 基本勘探钻孔系统的原理,另外在预计有困难地层和需辅助信息的地方进行岩芯钻取

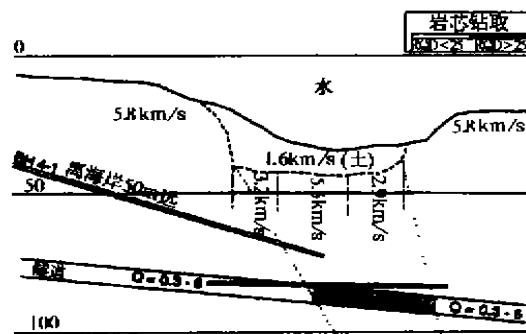


图 6 在桩号 3 975~4 025 处的软弱带细图

在该软弱带的尾部,有一 5 m 长的路段施做了混凝土衬砌,其原因在于不能设置锚杆。在最差的地层中使用挖掘机进行隧道开挖。

这之后,沿软弱带在 33.5 m 长路段的地面上浇筑了混凝土。

在通过了这一软弱带一段时间之后开始了收敛量测。示于图 7 的结果表明已停止了位移。

4.2 预测情况与实际情况的比较

将有关地层条件、岩石支护、施工费用的详细预测与实际所遇到的地层条件进行比较,如图 8 所示,这两者之间相当吻合。隧道北面部分(弗尔岛)的情况也是如此。

5 对今后工程的一些建议

毋庸置疑,现场特征描述、工程地质报告和隧道合同的质量常常可以得到改进。在回顾弗尔岛隧道和其它复杂岩体条件下的工程的基础上,特别提出以下有关今后工程设计中值得注意的经验、教训:

- 地层调查范围和设计应能反映出地质的复杂性和工程的类型,对调查的结果应准确加以整理,并在计算和评估当中发挥其作用;
- 地质标定(setting),包括了解构造情况对所有大型隧道工程都是至关重要的;
- 按照标书设计的范围进行地层调查有可能失去重要的信息,而使调查得不到认可。应当给予足够的时间进行所有必要的调查和测试;
- 在标书完成后地层调查不应当停止,而应当贯穿于整个施工期间。应当由代表业主和承包商的有经验的地质专家进行隧道绘图和后续工作;
- 风险分析和对不确定性因素的评估十分重要;
- 标书,包括地质报告要准备充分,对所有的说明和数量进行质量控制;
- 为了保证正确评价并使复杂工程的质量控制令人满意,应当及早在适当时候成立一个独立的咨询委员会;
- 在施工期间,要对工程师和承包商双方的能力、资质和日常工作提出严格的要求。

译自 B Nilsen, A Palmström, H Stille. Quality control of a sub-sea tunnel project in complex ground conditions. Challenges for the 21st century, 137~145(英文)

译者 王 彬 校者 李子安

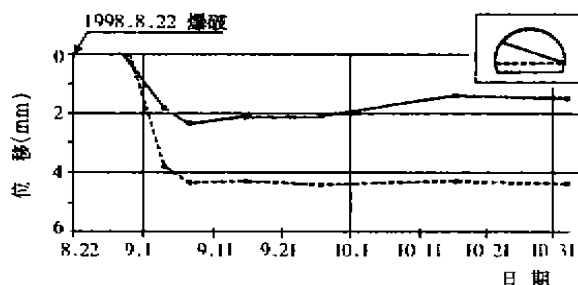


图 7 在桩号 3 992 处进行的收敛量测

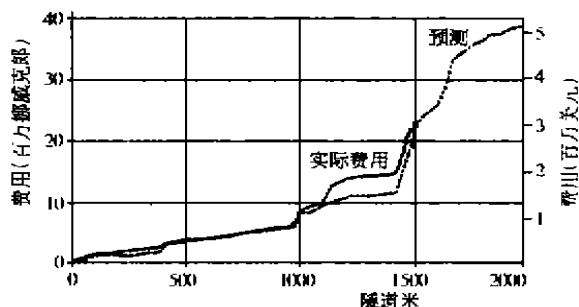


图 8 在希特拉岛侧关于岩石支护和注浆作业的预算费用与实际费用的比较