

# 渤海海峡隧道支护结构耐久性分析

吴永胜, 万飞, 谭忠盛

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**[摘要]** 通过对海底隧道结构耐久性影响因素进行分析,并根据工程试验研究成果及设计施工技术经验,提出了渤海海峡隧道初期支护和二次衬砌结构耐久性的提高措施。对已成功修建的海底隧道耐久性设计参数进行分析整理,结合渤海海峡隧道的实际情况,采用工程类比法提出了渤海海峡隧道的耐久性设计参数,为渤海海峡隧道100年使用年限提供了有力的保障。

**[关键词]** 海底隧道; 支护结构; 耐久性; 设计参数

**[中图分类号]** U45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0067-06

## 1 前言

海底隧道深埋于海底土层中,影响其耐久性能的因素错综复杂。由于侵蚀性地下水的渗漏、隧管内有有害气体的侵蚀,加上结构裂缝的形成与扩展,均会导致衬砌结构钢筋锈蚀及混凝土腐蚀等多种病害产生<sup>[1]</sup>。这将严重影响隧道的使用性能,使隧道结构未达到设计基准期即需大修,既浪费了大量资金,又影响了隧道的正常使用,缩短了维护周期和使用寿命,严重时还会威胁隧道内行车安全。如果对隧道的病害不及时进行治理,会使衬砌结构造成进一步损坏,甚至使隧道报废。1973—1975年建造的阿联酋迪拜 Shindagha 海底隧道,1986年就不得不维修,维修费用是建造费的两倍;20世纪70年代建成的香港地铁部分区间隧道,在90年代就发现内排钢筋严重锈蚀,导致混凝土保护层的剥落,影响到正常使用。香港地铁不得不花费大量资金,在不能影响正常运营的十分苛刻的条件下,采用特殊施工措施及工具,利用晚间收车的短短几个小时,花费几年的时间,采用超高压水刀铲除保护层及内排钢筋,然后喷射钢纤维混凝土或植筋后再扎内排钢筋以聚合物混凝土加以修复;打浦路隧道在运营了36年后,也存在隧道衬砌结构混凝土劣化、钢筋和管片螺栓锈蚀及渗漏水等现象。

渤海海峡隧道作为世界最长的海底隧道,其建造费用投入巨大,对国家和地方经济影响深远、意义非凡。因此,其设计和施工需充分考虑耐久性影响因素并采取相应的防范措施,减少类似病害的发生,提高结构安全性,减少维修费用。

## 2 工程概况

渤海海峡通道初步设计采用双洞单线+服务隧道方案,主隧道及服务隧道采用敞开式 tunnel boring machine (TBM) 法开挖,横通道采用钻爆法开挖。主隧道外径为 11.3 m, 服务隧道外径为 7.5 m, 横通道外径为 4.5 m, 采用复合式衬砌, 初期支护采用锚喷支护, 二次衬砌采用钢筋混凝土衬砌, 主隧道初期支护为 30 cm, 二次衬砌为 40 cm; 服务隧道初期支护为 30 cm, 二次衬砌为 30 cm (见图 1)。

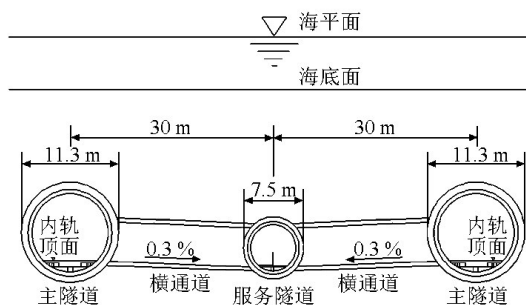


图1 隧道横断面

Fig.1 Tunnel cross section

**[收稿日期]** 2013-10-09

**[作者简介]** 吴永胜(1974—),男,湖北红安县人,博士研究生,主要从事地下与隧道工程设计、施工技术的研究;E-mail:wyskmust@126.com

渤海海峡表层海水温度和盐度。海峡累年平均水温为 11.5 ℃, 2 月平均水温最低, 为 2.5 ℃; 8 月最高, 为 22.1 ℃。3 月上旬至 8 月下旬为升温期, 9 月上旬至翌年 2 月下旬为降温期。累年平均盐度为 31.33, 一年中, 2—3 月为高盐期, 2 月最高, 达 31.82; 7—9 月为低盐期, 8 月最低, 为 30.49。全年多风浪, 春季涌浪最少, 其中 4 月频率为 50%, 系全年最低; 秋季最多, 其中 11 月频率达 78%, 系全年最高。

### 3 海底隧道耐久性主要影响因素

海底隧道作为一种特殊形式的混凝土结构, 其耐久性方面有着较多的独特之处。这些特点主要来自海底隧道自身所处的水土环境与其他类型地下结构周围的环境不同。一般说来, 影响海底隧道结构耐久性的因素可分为环境因素、结构因素和材料因素 3 类<sup>[2]</sup>, 其中环境因素(环境的氯盐、腐蚀气体、环境温湿度等)对衬砌结构材料的长期作用, 造成钢筋的腐蚀和混凝土的腐蚀及损伤; 材料因素中有混凝土碳化、氯离子侵入、化学物质(软水、盐类、酸类等)侵蚀、冻融循环和碱-骨料反应等; 结构因素包括衬砌受力状态的变化、偏压和超载等。

#### 3.1 影响喷射混凝土耐久性的因素<sup>[3]</sup>

目前, 虽然普遍认为初期支护在隧道结构中具有很大的作用, 但是无论在设计还是施工中忽略了对喷射混凝土的耐久性要求。

##### 3.1.1 添加剂对喷射混凝土的影响

为发挥喷射混凝土的效果, 喷射混凝土多掺速凝剂, 以缩短混凝土的初凝和终凝时间, 以大大加快工程建设进度、节省劳力、节约木材和混凝土用量、减少地下工程的开挖量, 但这种作用有可能是以损害后期强度和耐久性为代价的。

喷射混凝土的抗渗性主要取决于孔隙率和孔隙结构。喷射混凝土由于操作上的原因, 很容易造成不均匀性质, 因此其抗渗性波动较大。由于速凝剂中的盐类阻碍了水泥矿物水化作用的结果, 掺有速凝剂的混凝土龄期 14 d 后的抗渗性能相当差。

喷射混凝土水泥用量大, 含水量大, 又掺有速凝剂, 因此比普通混凝土收缩性大, 内应力较大, 容易产生开裂的危险。

提高掺有速凝剂的喷射混凝土的耐久性, 除采用低碱速凝剂、降低水灰比外, 确定最佳配合比, 提高施工质量是关键。最佳配合比要求水泥用量低、

砂率合理、并在不改变水泥与速凝剂的相容性的前提下, 适当的掺加矿物掺合料。为了提高施工质量, 考虑操作上的原因, 建议喷射混凝土采用湿喷, 并要求在有条件的情况下加强早期潮湿养护。

##### 3.1.2 施工对喷射混凝土的影响

施工人员往往对喷射混凝土的作用缺乏足够的认识, 常常忽视喷射混凝土的存在和作用, 因而在实际工作中时常发生喷射量不足、喷射厚度不均匀、喷射配比不合适以及基层处理不当等现象, 使得喷射混凝土不能充分发挥其应有的效应。

除了施工人员在思想上的不重视外, 喷射混凝土施工工艺也有许多不可忽视的问题, 如喷射方式的选择、喷射材料的选择、喷射配比的确定、喷射厚度的检查和控制, 喷射施工队的素质等。

##### 3.1.3 其他因素对喷射混凝土的影响

喷射混凝土中碱-集料反应必须特别重视, 因为目前广泛使用的喷射混凝土速凝剂碱含量都较高, 连同水泥本身的碱性物质, 再加上喷射混凝土单方水泥用量较高, 这样单方水泥中的总碱含量往往远高于产生碱-集料反应的最低限。为了防止碱-集料反应, 可采取如下措施: a. 对于喷射混凝土使用的骨料, 应做是否属于活性骨料的检验; b. 采用碱性物质含量低于 0.5% 的低碱水泥; c. 采用掺加善于吸收和结合水泥中的碱性物质的磨细掺合料。

#### 3.2 影响衬砌结构耐久性的因素

##### 3.2.1 裂缝对隧道衬砌耐久性的影响

隧道衬砌受力后, 混凝土本身的孔隙率扩大或压缩, 隧道外侧的有害化学离子、隧道内侧在运营过程中受到汽车尾气的污染, 酸性物质的增加, 碳化作用面积的增加, 特别是整体二衬结构, 在受力的情况下产生各式的裂缝, 都大大增加了混凝土在大气环境中的劣化速度。

##### 3.2.2 氯离子对隧道衬砌耐久性的影响

虽然隧道二次衬砌与初期喷锚支护间有防水薄膜的防水作用, 但是由于施工(易造成防水薄膜小的空洞、裂隙、局部接头的质量缺陷、固定防水薄膜的铁钉处的存在等)及防水薄膜质量缺陷、材料老化等原因, 地下水还是可以通过裂缝直接作用于二次衬砌。地下水中的有害物质能够通过扩散等作用侵入混凝土内部, 从而激活混凝土中的氯离子, 进而引起氯离子腐蚀的发生。

##### 3.2.3 碳化对隧道衬砌耐久性的影响

混凝土碳化会加剧混凝土的收缩, 使混凝土表

面产生拉应力而出现微裂纹,降低混凝土抗拉、抗折强度及抗渗能力。更严重的是,碳化作用会降低混凝土的碱度。当混凝土中pH值降低到一定程度后,就会破坏混凝土中的钢筋钝化膜,造成钢筋锈蚀,而钢筋锈蚀又将导致混凝土保护层开裂、钢筋与混凝土之间粘结力破坏、结构耐久性降低等不良后果。

### 3.2.4 混凝土碱-骨料反应对隧道衬砌耐久性的影响

碱-硅酸反应是指混凝土中的碱组分与集料中的某些硅活性组分之间发生的化学反应,其结果导致集料被侵蚀,生成具有膨胀性的产物并导致混凝土结构开裂。因此,碱-硅酸反应首先是一个化学反应,反应物是活性 $\text{SiO}_2$ 和混凝土孔溶液中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{OH}^-$ 等,反应产物是碱-硅酸凝胶(也称硅胶体),这种硅胶体遇水膨胀,会产生很大的膨胀压力,导致混凝土开裂,膨胀压力的大小取决于集料中活性 $\text{SiO}_2$ 的含量。该破坏不同于其他混凝土病害,其开裂破坏是整体性的。

### 3.2.5 混凝土的渗透性对隧道衬砌耐久性的影响

由于混凝土固有的多孔性,在存在内外压力差的情况下,必然存在液体或气体从高压处向低压处迁移渗透的现象,这种现象被称为混凝土的渗透性。混凝土的渗透性和混凝土的抗碳化能力与抵抗外界有害物质及抗冻性都有密切的关系。一般说来,抗渗性能好的混凝土,耐久性也就越好。

### 3.2.6 钢筋锈蚀对隧道衬砌耐久性的影响

对于海底隧道衬砌结构,由于混凝土碳化作用、干湿交替的破坏作用,可以导致钢筋表面钝化膜破坏,使钢筋处于活化状态。

1) 由于混凝土的碳化,导致混凝土的pH值下降。当混凝土碳化导致 $\text{pH} < 9$ 时,钢筋表面的钝化膜就会被逐渐破坏,在其他条件具备时,钢筋就会发生锈蚀。

2) 由于衬砌结构使用环境中气候的季节性变化不大,温度变化不大,混凝土主要受使用环境的湿度变化影响,会因为湿度的变化发生干缩与湿胀,这些都会破坏混凝土的固有结构。

就海底隧道衬砌结构而言,由于混凝土碳化和外部温湿环境变化的影响存在,在衬砌结构的外侧,温湿环境变化为主要因素,在内侧,混凝土碳化将占主导地位。

### 3.2.7 汽车尾气对隧道衬砌耐久性的影响

目前酸雨或酸性气体对室外混凝土结构的腐

蚀所造成的损失已经很严重,酸雨对混凝土结构的腐蚀在世界范围内是一个大问题。隧道运营中,汽车尾气中含有的酸性气体对隧道衬砌混凝土结构的侵蚀是比较严重的<sup>[4]</sup>。

## 4 支护结构耐久性提高措施

### 4.1 提高初期支护耐久性的措施

初期支护结构主要由喷射混凝土、工字钢、锚杆等组成,因此针对这几部分的耐久性进行改进<sup>[5]</sup>。

#### 4.1.1 抗海蚀喷射混凝土

厦门翔安海底隧道就抗海蚀喷射混凝土进行了试验研究,开展了粉煤灰、磨细矿渣粉、硅粉、钢纤维、仿钢纤维等方案喷射混凝土的力学性能、干缩变形、韧性及其耐久性能的试验研究。研究表明,所设计各种方案喷射混凝土1d抗压强度均达到了大于10MPa的要求,28d抗压强度达到并超出C25的强度等级,抗渗等级达到了P12,而且耐久性好。

#### 4.1.2 工字钢的耐久性

厦门翔安海底隧道进行了工字钢腐蚀试验,两种喷射混凝土试件分别在3.5%盐水和淡水中浸泡60d,工字钢在恒电流极化下的电位极化值-时间曲线见图2。

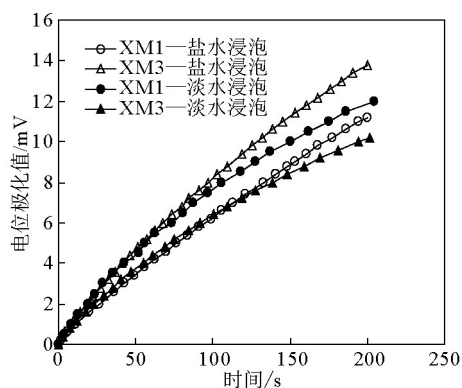


图2 电位极化值-时间曲线

Fig.2 Time curve of potential polarization value

根据图2所示的电位极化值-时间曲线计算得到的混凝土试件中工字钢极化电阻和腐蚀速度,见表1。

由表1可见,在两种水溶液中浸泡的试件,其工字钢腐蚀速度较为接近,表明在水中浸泡条件下,盐水中氯离子等有害离子对工字钢腐蚀影响较小,这是由于混凝土中钢的腐蚀是氧的去极化腐蚀,在饱水条件下,钢的腐蚀速度受氧扩散控制,在不同

表1 工字钢极化电阻和腐蚀速度  
Table 1 Polarization resistance and corrosion rate of joist steel

试件编号	极化电阻/ ( $k\Omega \cdot cm^2$ )		腐蚀速度/ ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ )	
	盐水浸泡	淡水浸泡	盐水浸泡	淡水浸泡
XM1	1 245	1 159	0.042	0.044
XM3	1 417	1 448	0.036	0.036

水溶液中,混凝土中含氧量均很低,因此腐蚀速度较接近且腐蚀很慢,饱水条件下混凝土中工字钢腐蚀速度处于可以忽略不计的范围。

#### 4.1.3 锚杆的耐久性

厦门翔安海底隧道进行了锚杆的室内加速腐蚀试验,见表2。由试验结果可知,镀锌层在砂浆或水泥净浆中是不耐腐蚀的,但镀锌层的存在可以通过溶解自己来保护钢筋,对钢筋起到牺牲阳极和阴极保护作用,因此在98 d的试验时间内,镀锌层内部钢筋尚未锈蚀,而裸露的螺纹钢筋已有17.3%面积发生锈蚀。

表2 锚杆腐蚀失重率和锈迹率  
Table 2 Corrosion loss rate and rust rate of anchor bolt

锚杆种类	锈迹率/%	腐蚀失重率/ ( $g \cdot cm^{-2}$ )		镀锌层测量值			
		腐蚀区	平均	原始厚度/ $\mu m$		减薄量/ $\mu m$	
				腐蚀区	平均	腐蚀区	平均
A4标镀锌钢筋	24.8	0.043	0.011	149.1	34.5	8.6	
A4标螺纹钢筋	17.3	0.018	0.003	—	—	—	
A2标镀锌钢筋	100	0.030		105.8	25.5		

镀锌层对钢筋的保护年限可由其减薄速度来估算,在试验加速腐蚀条件下估算结果见表3。

表3 镀锌层保护年限估算  
Table 3 Estimating years of galvanized layer protection

锚杆种类	原始镀层厚度/ $\mu m$	98 d的平均减薄量/ $\mu m$	估算年限/年
A4标镀锌钢筋	149.1	8.6	4.56
A2标镀锌钢筋	105.8	25.5	1.12

由表3可见,由于工程提供的两种镀锌钢筋锚杆镀锌层厚度不同以及它们在砂浆/净浆中的消耗速度不同,它们消耗完毕及提供给钢筋的保护年限

不同,A4标镀锌钢筋上的镀锌层保护年限约为4.5年,而A2标镀锌钢筋的镀锌层保护年限约为1年。

由试验研究成果可知,工字钢的腐蚀基本可以忽略;采用抗海蚀喷射混凝土可以提高喷射混凝土的耐久性;锚杆的腐蚀速度较快,在满足支护结构稳定的前提下可以取消系统锚杆。

## 4.2 提高二次衬砌耐久性的措施

### 4.2.1 从结构构造提高耐久性的对策

为了提高衬砌结构的耐久寿命,除了采用具有较高抗裂性能混凝土外,在设计时可以从结构构造作如下考虑。

1)钢筋开始锈蚀的时间与混凝土保护层的厚度有密切关系,适当加大混凝土保护层厚度是提高混凝土结构耐久性、延长混凝土结构使用寿命的重要措施。衬砌结构的钢筋保护层厚度不宜小于40 mm。

2)衬砌结构应尽量设表面防护涂层,形成有害粒子隔离屏障,延缓向混凝土内部扩散的时间和速度。

3)施工缝布设应考虑外界环境作用,应尽量避免最不利局部环境作用的部位(如围岩破碎、软弱等部位),要尽可能减少伸缩缝的数量。

4)衬砌结构为重要结构物,宜采用多重防护措施。衬砌结构宜预先埋设钢筋锈蚀后阴极保护所需的设施等,以便钢筋锈蚀后及时采取阴极保护措施,减缓钢筋锈蚀速度,延长结构耐久寿命。另外,宜同时采用在混凝土中掺和阻锈剂和钢筋表面使用防腐涂层等初级防护措施。

5)隧道衬砌结构钢筋应选用相同材质的钢筋,以利于降低钢材的电化学锈蚀速度。

### 4.2.2 从材料上提高耐久性的对策

从以往工程室内试验中可以看到,通过调整混凝土的配合比,改变水灰比等可以有效地提高混凝土的抗压强度。为有效提高衬砌结构耐久性能,最大限度降低衬砌结构劣化的危害,在施工材料以及施工质量上作如下要求。

1)优先选用低水化热和含碱量低的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,避免使用早强水泥,水泥宜与矿物掺和料一起使用。由于衬砌结构易遭受海水有害离子(硫酸盐、氯盐和酸等)的侵蚀,因此,应采用较大掺量矿物掺和料的低水胶比混凝土。单掺粉煤灰的掺量不宜小于25%,且宜符合使用粉煤灰

加硅灰、粉煤灰加矿渣或两种以上的矿物掺和料。

2)水泥的细度(比表面积)要符合国家标准,不得超过 $350\text{ m}^2/\text{kg}$ ,为了保护混凝土的体积稳定性和抗裂性能,硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥中的 $\text{C}_3\text{a}$ 不宜超过 $10\%$ ,游离的氧化钙含量不超过 $5.5\%$ ,水泥碱含量(按 $\text{Na}_2\text{O}$ 当量计)不宜超过水泥质量的 $0.6\%$ 。

3)混凝土的最低强度等级不低于C30。

#### 4.2.3 从管理和维护上提高支护结构的耐久性

根据现行结构设计规范以及上节所提出的设计、原材料方面的要求,并通过严格的施工质量控制,能够从一定程度上保证衬砌结构的耐久性能。但由于环境中偶然因素、荷载变异以及施工中人为的事故等影响,可能导致衬砌结构耐久寿命降低的劣化现象仍然存在。因此必须严格贯彻隧道维护管理“预防为主,早期发现,及时维护,对症下药”的原则,对已经存在的劣化现象进行维护、处理和防治,将其对结构寿命的影响降低到最小限度。

1)预防为主。预防维护管理是最好的维修管理方法。也就是说,在劣化发生之前进行详细的检查,并采取必要对策不让劣化发生是最经济的维修管理方法,因此建立一个完善的检查体系是十分重要的。

2)早期发现。隧道变异的发生一般都是有前兆的,早期发现这些前兆,并作出正确的判断,及时处理可能发生的变异,是当前各国进行隧道维修的基本前提。

3)及时维护。隧道是修筑在地下的线性结构物,周围动态及环境条件是十分复杂的。因此,即使进行了详细的调查,有时也很难充分掌握隧道的变异状态。在变异发生的初期阶段,只要采取一些简单的措施就可以解决问题,但如在发展过程中就要采取强有力的措施。对检查中存在的问题,要及时决策进行处理,不留隐患,防治劣化现象随时间加剧。

4)对症下药。隧道的变异是各式各样的,整治的方法也是各式各样的,因此,针对不同的劣化现象,采用有效的处理和措施,确保处理效果。

## 5 渤海海峡隧道耐久性参数

当前,还没有关于海底隧道设计的相应规范,进行耐久性设计和结构参数取值时,可依据隧道的环境类别,参考《公路隧道设计规范》(JTJ D70—

2004)、《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)、中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES01—2004)、AASHTO(美国国家公路与运输协会)公路桥梁规范、英国BS 8500-1:2002及加拿大CSAA 23.1-04/A23.2-04等规范的相应条文,通过工程类比的方法加以确定。

厦门翔安海底隧道设计基准周期按100年考虑,根据《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275—2000),陆域段所处环境条件为大气区,结构设计混凝土强度等级应不小于C30,衬砌混凝土3d抗压强度不低于 $21\text{ MPa}$ ;衬砌混凝土抗渗等级为S8,并适当掺加优质掺合料如粉煤灰复掺矿渣粉。浅滩及海域段所处环境条件为浪溅区,结构设计混凝土强度等级不小于C45,衬砌混凝土3d抗压强度不低于 $21\text{ MPa}$ ,衬砌混凝土抗渗等级为S12,90d氯离子扩散系数 $<2.0\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ,并适当掺加优质掺合料如粉煤灰复掺矿渣粉。根据工程的实际情况,设计要求中空注浆锚杆必须浸锌处理(光亮型热浸锌),厚度大于 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。

青岛胶州湾海底隧道二次衬砌混凝土强度等级均采用C50,抗渗等级S12,裂缝控制宽度 $0.2\text{ mm}$ ,保护层厚度接触空气侧 $60\text{ mm}$ ,接触围岩侧 $50\text{ mm}$ 。初期支护设计采用抗海水侵蚀高性能防渗喷射混凝土和湿喷混凝土工艺,湿喷混凝土强度等级C35,抗渗能力应大于S8。隧道陆域段设计采用具有能对注浆是否饱满和注浆后长度可进行准确检测的材料,并浸锌处理,厚度为 $0.4\text{ mm}$ 。中空注浆锚杆必须具有能对注浆是否饱满和注浆后长度可进行准确检测的材料,并浸锌处理,厚度为 $0.4\text{ mm}$ 。海域段采用具有独特防腐性质的多重防腐锚杆。

渤海海峡隧道在参考青岛胶州湾海底隧道及厦门翔安海底隧道设计的基础上,初步耐久性设计如下。

1)二次衬砌耐久性。二次衬砌混凝土强度等级均采用C50,抗渗等级S12,裂缝控制宽度 $0.2\text{ mm}$ ,保护层厚度接触空气侧 $60\text{ mm}$ ,接触围岩侧 $50\text{ mm}$ 。

2)喷射混凝土耐久性。设计采用抗海水侵蚀高性能防渗喷射混凝土和湿喷混凝土工艺。湿喷混凝土强度等级C35,抗渗能力应大于S8。

3)锚杆耐久性。考虑锚杆在已修建海底隧道中的应用及研究情况,推荐渤海海峡隧道在初期支护中取消系统锚杆,以达到在保证施工安全的条件下,降低施工成本、提高施工进度目标。

## 6 结语

综合以上研究,得出以下初步结论。

1)影响海底隧道其耐久性能的因素错综复杂,主要可分为环境因素、结构因素和材料因素三类。

2)可以通过采用抗海蚀喷射混凝土、取消系统锚杆提高初期支护的耐久性,通过在结构构造、材料和管理维护方面提高衬砌的耐久性。

3)借鉴已成功修建的海底隧道耐久性设计参数,渤海海峡隧道喷射混凝土采用抗海蚀高性能防渗喷射混凝土,二次衬砌保护层内侧 50 mm、外侧

60 mm、裂缝控制宽度 0.2 mm。

### 参考文献

- [1] 赵铁军,姜福香.海底隧道工程耐久性技术[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [2] 高占学.隧道衬砌耐久性研究[D].上海:同济大学,2003.
- [3] 谭忠盛.双洞八车道公路隧道建设关键技术研究报告[R].北京:北京交通大学,2007.
- [4] 刘惠玲,周 定.我国西南地区酸雨对混凝土性能影响的研究[J].哈尔滨工业大学学报,1997,6:101-106.
- [5] 陆采荣.海底隧道支护结构力学特征及耐久性研究与应用[R].南京:南京水利科学研究院,2011.

# Supporting structure durability analysis of Bohai Strait tunnel

Wu Yongsheng, Wan Fei, Tan Zhongsheng

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**[Abstract]** Through the analysis of factors affecting the durability of the tunnel structure, and according to the relevant engineering test results and the experience of design and construction technology, improving measures of the primary support and secondary lining durability of Bohai Strait tunnel were put forward. The durability design parameters of successfully built tunnel were analyzed. Combining with the actual situation of the Bohai Strait tunnel, the engineering analogy method was adopted to get the durability design parameters of the Bohai Strait tunnel. It could provide a strong guarantee to the fixed number of 100 years of the Bohai Strait tunnel.

**[Key words]** subsea tunnel; supporting structure; durability; design parameters