

# 海底隧道衬砌混凝土抗蚀影响因素分析与模拟

胡红梅<sup>1</sup>, 马保国<sup>2</sup>, 钱刚<sup>3</sup>, 程瑶<sup>1</sup>, 杨艳春<sup>1</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005; 2. 武汉理工大学材料学院, 武汉 430070;

3. 厦门东通道工程现场指挥部总监办, 厦门 361009)

**摘要:** 对海底隧道衬砌混凝土抗蚀影响因素进行了全面分析, 建立了多因素的影响模型。指出以氯盐、硫酸盐和镁盐为代表的海洋环境介质的化学侵蚀破坏、以气候因素和盐类结晶为代表的物理因素作用、以自身结构的密实程度与收缩变形为代表的自身因素是影响隧道衬砌混凝土抗蚀性的 3 大主要因素。它们既相互联系又相互促进。其中, 混凝土自身的密实程度和微裂缝是关键影响因素。

**关键词:** 海底隧道; 衬砌; 混凝土; 抗蚀; 影响因素

中图分类号: TU 528.01

文献标志码: A

文章编号: 1671-4431(2007)03-0046-04

## Analysis and Simulation of Influencing Factors on Anti-corrosion of Lining Concrete for Submarine Tunnel

HU Hong-mei<sup>1</sup>, MA Bao-guo<sup>2</sup>, QIAN Gang<sup>3</sup>, CHENG Yao<sup>1</sup>, YANG Yan-chun<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Site Headquarter of East Passageway Submarine Tunnel (Xiangan Tunnel) Office of Chief Supervision Engineer, Xiamen 361009, China)

**Abstract:** The influencing factors on anti-corrosion of lining concrete for submarine tunnel were analyzed, and the model on multi-factors was made. Three main influencing factors on anti-corrosion of lining concrete were pointed out. They were chemical factors such as chloride, sulfate and magnesium salt, physical factors such as weather and salt crystallizing, and factors such as the density and shrinkage deformation of concrete. These factors related one each other and also there were interactions among them. In which, the density and shrinkage deformation of concrete self were key factors.

**Key words:** submarine tunnel; lining; concrete; anti-corrosion; influencing factors

随着人们对资源、环境和生态意识的提高和我国城市化进程的加快, 城市将向地下空间发展, 混凝土是隧道衬砌的主体材料, 有预制管片衬砌和现浇衬砌之分。由于隧道工程对衬砌的耐久性, 主要是抗蚀性的要求很高, 因此, 研究隧道衬砌混凝土抗蚀性的影响因素, 对其进行科学的分析和模拟, 是进一步研究隧道高抗蚀技术的基础。

### 1 隧道衬砌混凝土抗蚀影响因素分析

作为隧道的主要衬砌材料, 钢筋混凝土在运行过程中要遭受各种破坏因素的综合作用, 这些因素包括环境介质的物理和化学作用, 以及由于自身原因所引起的破坏。以环境条件最为复杂, 同时也是最为恶劣的海底隧道为例, 分析影响大型海底隧道抗蚀性能的主要破坏因素。

收稿日期: 2006-11-29.

基金项目: 国家“863”计划项目(2005AA332010)和福建省建设厅科技计划项目(2005-2-2).

作者简介: 胡红梅(1962-), 女, 教授. E-mail: hhm@xmu.edu.cn

## 1.1 化学侵蚀介质的影响

与淡水相比,海水中含有更多的无机盐类。资料表明<sup>[1]</sup>我国沿海海水中各种盐类的总含量,即盐度为 2%—3.5%,其中 NaCl 约占总盐量的 78%,其余是 MgCl<sub>2</sub>、MgSO<sub>4</sub>、KCl 等,约占 22%。这些盐类随着海水、海风、海雾缓慢渗入隧道,对衬砌混凝土构成腐蚀。

### 1.1.1 氯盐的侵蚀破坏

海洋环境中存在着大量的氯盐,海水中的氯盐占其总含盐量的 80% 以上。混凝土是由多元组分构成的复合材料,它的内部不可避免地存在着孔隙。而氯盐是一种极强的电解质,能以离子形态通过孔隙渗透进入混凝土中,不仅提高了氢氧化钙的溶解度,增加对混凝土的“溶解”侵蚀,而且会促进混凝土的冻融破坏,有时还产生结晶腐蚀。但是,氯盐最主要的破坏作用是对被混凝土包裹的钢筋的腐蚀。氯离子与钢筋直接发生电化学反应,像催化剂一样促使钢筋钝化膜破坏,使钢筋产生锈蚀,是海洋环境中的混凝土结构遇到的最危险的破坏因素<sup>[2]</sup>。

对氯盐的影响,通常用图 1<sup>[2]</sup> 进行描述。按照图 1 的描述,Cl<sup>-</sup> 导致钢筋腐蚀至结构破坏大致分为 A、B、C、D 4 个阶段:A 阶段—Cl<sup>-</sup> 进入混凝土中,在钢筋表面达到“临界值”,钢筋开始腐蚀;B 阶段—钢筋腐蚀发展,混凝土顺筋开裂发生;C 阶段—钢筋腐蚀继续发展、膨胀,导致混凝土剥落;D 阶段—钢筋腐蚀持续发展,最终导致结构失效、破坏。

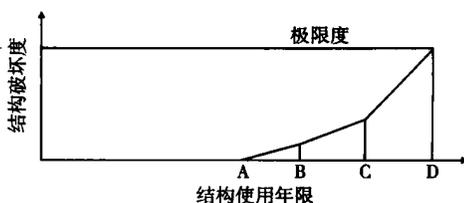


图1 Cl<sup>-</sup>导致钢筋腐蚀结构破坏的阶段描述

关于“临界值”问题,各国专家对此有所质疑。早期 Housmen 等人的试验研究表明,在混凝土的液相中,当浓度比值 Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> > 0.61 时,钢筋开始锈蚀,并以此作为“临界值”。而众多研究者认为,这个比值在 0.25—2.5 之间。“临界值”是一个相当复杂的问题,它与混凝土自身的品质和环境条件有密切关系,不同条件下具有不同的值。为此,一些国家对混凝土中的 Cl<sup>-</sup> 含量作了严格的规定<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 硫酸盐和镁盐的双重侵蚀破坏

除了氯盐,海洋环境中含有为数不少的硫酸盐和镁盐,其中以硫酸镁的侵蚀性最为强烈。因为 Mg<sup>2+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 均为侵蚀源,二者相互叠加,不但产生硫酸盐侵蚀,同时产生镁侵蚀,构成严重的双重复合侵蚀<sup>[4]</sup>。

### 1.1.3 碱集料反应

已有研究表明,碱活性集料、碱含量和水分的存在是混凝土发生碱集料反应(AAR)的充分必要条件。海洋潮湿环境使隧道内部长期保持着较高的湿度,同时,渗入的海水可提供碱集料反应所需的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>。据 Kawamura 的研究<sup>[5]</sup>表明,当混凝土内多孔溶液中的 OH<sup>-</sup> 浓度超过 300 mmol/L 临界值时,AAR 一旦引发,周围溶液中的 Cl<sup>-</sup> 可能起着催化作用。当混凝土中的碱含量较高时,海水中的 Cl<sup>-</sup> 可能发挥着类似的催化作用。因此,处于海洋环境中的隧道混凝土具有较大的碱集料反应风险。碱集料反应生成的碱-硅酸盐凝胶吸水膨胀,体积约增大 3—4 倍,膨胀压力约为 3—4 MPa,引起混凝土局部过度膨胀,从而诱发裂缝并加速侵蚀破坏。

## 1.2 物理因素的影响

### 1.2.1 气候因素

研究表明<sup>[6]</sup>,温度每升高 10 °C,腐蚀反应速度增加 1 倍,同时高温可大大缩短钢筋脱钝的时间,如 30 °C 比 10 °C 时缩短 66%,加速了腐蚀的破坏进程。我国南方沿海地区常年气温偏高,因而有助于腐蚀反应的发生。北方地区温差变化大,冬季气温正负变化,腐蚀环境下混凝土的冻融破坏(盐冻破坏)是北方沿海工程典型的破坏类型。南京水科院从 1956 年—1962 年曾先后调查了华北、华东和华南等地的码头、船坞、防波堤及海塘等港工建筑物,结果发现北方港工混凝土破坏均以潮差段最为严重,而且背阳面或迎风(浪)面比向阳面或背风(浪)面严重,与海水接触的比与淡水接触的严重,海水中的盐溶液与冻融的协同作用比单纯冻融严酷得多<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 盐类结晶

在多孔的混凝土中,当混凝土孔隙中的水分蒸发或水溶液的浓度大于饱和浓度时,水中的盐类即产生结晶,结晶压力所产生的应力可以大到足以使混凝土开裂和剥落<sup>[8]</sup>。当混凝土结构处于干湿交替或只有一面或几面处于湿的状态时,如混凝土挡土墙、海洋或近海混凝土结构等,常常发生由于盐类连续结晶-溶解循环

导致混凝土发生层状表面剥落,与冻融循环的结果有相似之处。

### 1.3 混凝土自身因素的影响

#### 1.3.1 混凝土结构的密度程度

众所周知,混凝土具有多相、多孔结构。普通混凝土由于水灰比较大(0.40—0.70),未使用矿物掺合料或矿物掺合料未经深加工处理、未使用高效减水剂或设计不合理等原因,孔隙率较大、大孔径的孔多、界面过渡区富集大晶粒的氢氧化钙板状结晶和针状钙矾石晶体,存在原生微裂缝,使外界水分和侵蚀性离子易于进入,不能满足海洋严酷环境条件要求。因此,隧道工程宜采用质量均匀而又密实、耐久、体积稳定性好的高性能混凝土作为衬砌材料。制备高性能混凝土的关键技术是掺入超细矿物掺合料和高效减水剂。质量优良的高效减水剂的减水率可以达到25%—35%,使混凝土的水胶比可以大幅降至0.40以下,因减水而大幅提高了混凝土的密实性。活性矿物掺合料则通过二次水化反应,优化了水泥石胶凝物质的组成,生成强度更高、稳定性更优、数量更多的低碱性水化硅酸钙,特别是可以减少和消除晶体强度低、易于引起腐蚀的游离氢氧化钙,使界面过渡区结构得到大幅改善,对提高混凝土的抗蚀性作用极大;同时由于超细矿物掺合料粒子填充于水泥粒子和界面的空隙之间,改善了胶凝材料的颗粒级配,提高了水泥石和界面结构的致密度,阻断了可能形成的渗透通路,因而抗蚀能力亦大幅提高。表1为作者采用RCM法,对普通混凝土、单掺矿物掺合料的混凝土和双掺高效减水剂与矿物掺合料的高性能混凝土所做的抗氯离子渗透性的试验结果,充分验证了上述观点。

表1 不同混凝土的抗氯离子渗透性的试验结果

编号	配合比方案/(kg·m <sup>-3</sup> )							氯离子扩散系数/(10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
	水泥	硅灰	粉煤灰	砂	石	水	高效减水剂	28 d	90 d
1	500	0	0	690	1 050	185	0	7.65	7.62
2	250	50	200	690	1 050	185	0	1.35	1.05
3	250	50	200	690	1 050	165	1.3% 萘系	0.95	0.74
4	250	50	200	690	1 050	165	1.25% 聚羧酸系	1.02	0.70

#### 1.3.2 收缩变形

研究指出<sup>[9]</sup>,大部分硅酸盐水泥浆体完全水化后,体积减缩总量为7%—9%。化学收缩与水泥的组成和用量有关。对单矿物的减缩作用研究发现,水泥熟料中4种矿物的减缩作用,无论是绝对值还是相对值,其大小排序为:C<sub>3</sub>A>C<sub>4</sub>AF>C<sub>3</sub>S>C<sub>2</sub>S,其中C<sub>3</sub>A的收缩约为C<sub>3</sub>S和C<sub>2</sub>S的3倍。因此,控制水泥及超细矿物掺合料的用量、选用C<sub>3</sub>A含量较低的水泥,可以减少由于水泥水化引起的化学收缩。

温度收缩与混凝土的热膨胀系数、混凝土内部最高温度和降温速率等有关。除环境温度剧变造成结构温度剧烈变化或结构中各部分温度差别悬殊所导致的裂缝外,导致混凝土过早开裂的主要原因之一是硬化过程中水泥水化放热,使混凝土结构内部温度过分升高、内外温差加大以及硬化后期降温速率过大。混凝土热膨胀系数随集料的热膨胀系数不同而改变,通常为(6—12)×10<sup>-6</sup>/℃。因此,降低温升、提高混凝土的抗拉强度、使用热膨胀系数低的集料(如石灰石、辉长石)、避免使用石英岩及砂岩等热膨胀系数较大的集料,有利于减少冷缩和防止开裂。

混凝土的自收缩是由于自干燥引起的。在较高水胶比的普通混凝土中,这部分收缩值很少,不必过分重视。而在低水胶比的高强混凝土和高性能混凝土中,自收缩可达数百微应变,占总收缩量的一半左右,不容忽视。由于这2种混凝土的水胶比低,提供给水水泥水化的自由水量少,且早期强度发展快,消耗的水多,因此在早期,自干燥将发展很快。Sellevold E J和Justnes H以及蒋正武等人的多项研究<sup>[10]</sup>表明:随着时间的推移,水胶比越小,相对湿度下降越快,相对湿度值越低。而且在水胶比相同时,若混凝土中浆体含量增大,则下降速率更快,相对湿度值也越小。掺入不同的矿物掺合料亦有不同的影响。虽然实验表明高性能混凝土内部相对湿度降低到75%左右就不再降低,但水泥浆体内部湿度由100%降低到80%时,由Kelvin方程计算得毛细孔压力从0增加到30 MPa,对混凝土的劣化作用明显。试验研究和工程实例证实,自收缩最终将导致混凝土产生贯穿性裂缝,从而危害到隧道高性能混凝土衬砌的耐久性与工程的安全性。

## 2 海底隧道抗蚀影响因素的模拟

如前所述, 影响海底隧道抗蚀的因素包括海洋环境介质的物理作用、化学侵蚀作用和由于自身体积不稳定导致收缩变形的加速劣化作用。这些因素是相互关联、相互促进或相互加强的, 使隧道混凝土的破坏不是由单一因素造成的, 而是由于 2 个或多个因素的协同作用, 或由一个因素诱发、其它因素相互作用所致。例如存在微裂缝或渗透性较大的混凝土常会因孔隙中盐的结晶应力或盐离子与混凝土组分发生化学反应而产生膨胀和开裂, 开裂加剧了海水的侵入, 并进一步连通了海水与混凝土组分间有害化学反应的通道, 最后导致水泥水化产物的分解和溶出, 造成了混凝土孔隙率的增大, 引起混凝土强度与刚度的损失。与此同时, 海水的侵入缩短了  $\text{Cl}^-$  到达钢筋表面的时间, 使钢筋表面的钝化膜极易分解破坏, 促进钢筋锈蚀, 这一切又加剧了混凝土的开裂破坏。

基于以上的分析研究, 作者建立了海底隧道衬砌混凝土腐蚀的多因素影响模型(图 2)。该模型用 3 个圆环分别代表 3 个影响因素中的一种因素体系; 圆环大小不一, 代表各因素影响程度的大与小; 圆环彼此交叉连生, 代表三因素相互间的协同作用关系。处于单环处表示腐蚀可能会发生; 处于双环处意味着腐蚀速度加快; 处于三环重叠的中心部分则代表腐蚀严重, 混凝土的耐久破坏开始显现。由于海底隧道不可避免地要与海洋环境介质接触, I、II 因素不可避免, 抗蚀形势严峻, 所以提高隧道衬砌混凝土抗蚀性的根本途径是控制第 II 因素, 即设法增加混凝土自身的密实性和控制混凝土微裂缝的产生。采用高性能混凝土能够提高混凝土的密实性和抵抗环境介质的物理与化学侵蚀作用, 但应该注意由于自收缩可能造成的不良影响。为了减小自收缩, 一方面应控制水胶比不宜过小, 水泥与矿物掺合料的比表面积不宜过大; 另一方面应及早和充分的供水养护(带水养护和水养护), 利用充足供水和湿胀现象来克服混凝土的自收缩。此外, 掺入膨胀剂或减缩剂也不失为一种强而有效的技术手段。

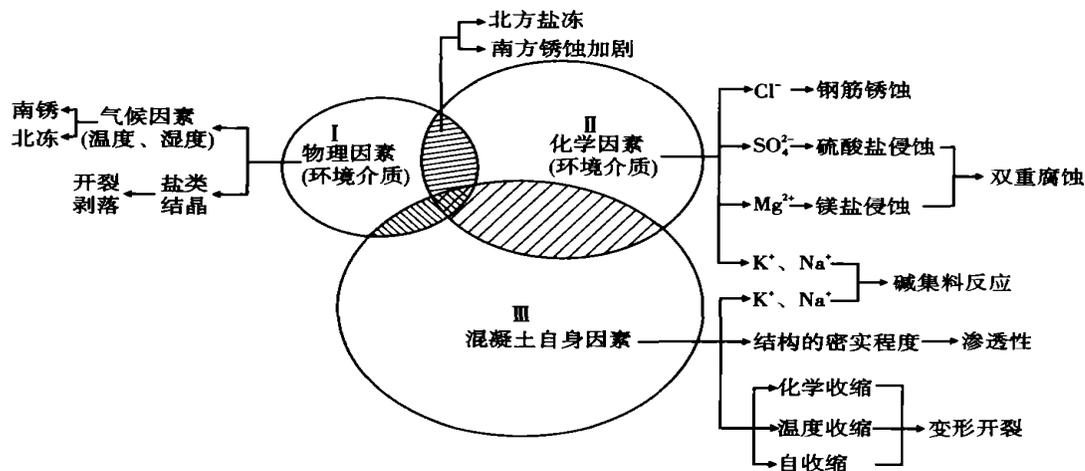


图2 海底隧道衬砌混凝土腐蚀的多因素影响模型

## 3 结论

a. 影响海底隧道衬砌混凝土抗蚀的主要因素包括以氯盐、硫酸盐和镁盐为代表的海洋环境介质的化学侵蚀破坏因素, 以气候因素和盐类结晶为代表的物理因素和以混凝土结构的密度程度与收缩变形为代表的自身因素。3 个因素互相联系, 互相促进。隧道衬砌混凝土的破坏是由于 2 个或多个因素的协同作用, 或由一个因素诱发、其它因素相互作用所致。

b. 建立了海底隧道衬砌混凝土腐蚀的多因素影响模型, 模拟了 3 因素影响程度的大小, 同时反映了三者之间的协同作用关系。其中, 混凝土自身的密实程度和微裂缝是影响隧道衬砌混凝土抗蚀性的关键因素。

c. 采用高性能混凝土对于提高隧道衬砌的密实程度和抵抗环境介质的化学与物理因素的破坏作用无疑是有效的技术手段, 但要采取相应措施避免由于自收缩过大影响到衬砌的抗蚀性。

(下转第 53 页)

### 3 结 语

在球衣菌周围、细胞内部和其所形成的鞘内均能发生氢氧化铁凝胶的矿化现象, 形成与无机条件下矿化形成结晶度高的针铁矿完全不同的铁氧氢氧化物( 正方纤铁矿,  $\beta\text{-FeOOH}$ ), 其结晶度较低, 晶粒表面结合有球衣菌分泌的多糖和蛋白质, 说明球衣菌分泌的多糖和蛋白质对氢氧化铁凝胶的矿化结晶行为具有调控作用。

在不同的培养基条件下, 水溶液中  $\text{Fe}^{3+}$  浓度相同时, 由于球衣菌胞外分泌的有机质成分和浓度不同, 由氢氧化铁凝胶矿化形成的铁氧氢氧化物的形貌和结构存在差异, 说明氢氧化铁凝胶的矿化过程还与细菌的生长环境有关。

#### 参考文献

- [ 1 ] 翁稣颖. 球衣细菌的研究——球衣细菌的纯种分离、鉴定和保存[ J ]. 微生物学报, 1980, 20( 4 ): 351-355.
- [ 2 ] 许旭萍, 余晨兴, 林跃鑫, 等. 水体中氧化铁鞘细菌的分离鉴定及保藏[ J ]. 应用与环境生物学报, 2003, 9( 3 ): 313-317.
- [ 3 ] Emma M C, Robert D B, William T M. An Investigation into the Size of an Iron Dextran Complex[ J ]. Journal of Inorganic Biochemistry, 1995, 60: 149-153.
- [ 4 ] Chua-anusorn W, Webb J. Infrared Spectroscopic Studies of Nanoscale Iron Oxide Deposits Isolated from Human Thalassaemic Tissues[ J ]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2000, 79: 303-309.
- [ 5 ] 霍光华, 李来生, 高荫榆. 波谱在多糖结构分析上的应用[ J ]. 生命的化学, 2002, 22( 2 ): 194-196.

( 上接第 49 页 )

#### 参考文献

- [ 1 ] 孙湘平. 我国的海洋[ M ]. 北京: 商务印书馆, 1985.
- [ 2 ] 洪乃丰. 氯盐环境中混凝土耐久性 with 全寿命经济分析[ J ]. 混凝土, 2005, ( 8 ): 29-32.
- [ 3 ] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与防护技术( 3 ) [ J ]. 工业建筑, 1999, 29( 10 ): 60-63.
- [ 4 ] 薛君. 钙矾石相的形成、稳定和膨胀[ J ]. 硅酸盐学报, 1983, 11( 2 ): 247-251.
- [ 5 ] Torii K, Kawamura M. Pore Structures and Chloride Permeability of Concrete Containing Fly Ash, Blast-furnace Slag and Silica Fume[ A ]. ACI Special Publications sp-132[ C ], 1992. 135-150.
- [ 6 ] 杨建森, 何党庆. 钢筋混凝土中钢筋腐蚀的化学机理与防腐措施[ J ]. 宁夏大学学报( 自然科学版 ), 2001, 22( 3 ): 298-301.
- [ 7 ] 林宝玉. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [ 8 ] 杨金兵, 吴学礼, 黄士元. 去冰盐对混凝土剥蚀的物理机理[ J ]. 上海建材学院学报, 1991, 4( 4 ): 341-346.
- [ 9 ] 吴中伟. 高性能混凝土[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [ 10 ] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 高性能混凝土自身相对湿度变化的研究[ J ]. 硅酸盐学报, 2003, 31( 8 ): 770-773.