

海底隧道钢筋混凝土基于氯盐腐蚀的 耐久性参数设计研究

曲立清¹, 金祖权², 赵铁军², 李秋义²

(1. 青岛国信实业有限公司, 山东 青岛 266071; 2. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033)

摘要: 胶州湾海底隧道是中国自行建造的第二条海底隧道, 其服役寿命为 100 a。在详细分析海底隧道结构混凝土的服役环境基础上, 参考国内外现有的寿命预测模型, 依据混凝土耐久性试验结果和重大工程类比, 综合考虑混凝土碳化、混凝土初始氯离子浓度影响等因素, 建立了海底隧道混凝土在双重破坏因素作用下的寿命预测模型。通过上述模型进行计算, 计算结果表明: (1) 海底隧道要达到 100 a 服役寿命, 其衬砌混凝土靠近空气一侧保护层厚度应大于 70 mm, 靠近土体一侧应大于 60 mm; (2) 混凝土初始氯离子浓度应小于 0.15%; (3) 氯离子扩散系数应小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 水胶比 w/b 应小于 0.34, 混凝土强度等级应高于 C50。此外, 依据混凝土耐久性能与其配合比、原材料之间的定量关系, 提出海底隧道 100 a 服役寿命的混凝土配合比设计和原材料优选原则。

关键词: 海底隧道; 寿命预测模型; 混凝土; 耐久性

中图分类号: U 459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)11 - 2333 - 08

STUDY ON DURABILITY PARAMETER DESIGN OF SUBSEA TUNNEL REINFORCED CONCRETE BASED ON CHLORIDE CORROSION

QU Liqing¹, JIN Zuquan², ZHAO Tiejun², LI Qiuyi²

(1. *Qingdao Guoxin Industry Corporation, Qingdao, Shandong 266071, China*; 2. *Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China*)

Abstract: Kiaochow Bay subsea tunnel is the second self-building tunnel in China with the designed service life over 100 years. On the basis of service environment of subsea tunnel concrete, the durability experiments of concretes are conducted and concretes are compared with those of other major engineering cases. The prediction modeling of service life considering concrete carbonation, initial chloride contents and chloride diffusion in concretes is proposed. Considering the requirement of 100 years service life of subsea tunnel, the modeling parameters are calculated according to prediction modeling of service life. The results show that cover thickness of lining concrete, which faces to atmosphere, should be more than 70 mm and those of other sides should be more than 60 mm. The initial chloride concentration in concrete should be less than 0.15% of binding materials; and chloride diffusion coefficient of lining concrete must be less than $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Moreover, the water to binder ratio w/b of lining concrete should be less than 0.34 and strength grade higher than C50. Based on quantitative relationship between durability of concrete and mixture proportion, raw materials and the principle of mixture proportion designed as well as raw materials choice are given based on 100 years service life of subsea tunnel.

Key words: subsea tunnel; prediction modeling of service life; concrete; durability

收稿日期: 2007 - 06 - 13; **修回日期:** 2007 - 07 - 19

基金项目: 建设部研究开发项目资助(2007 - K6 - 31); 青岛胶州湾海底隧道混凝土材料与结构耐久性研究项目资助(20063702001811)

作者简介: 曲立清(1965 -), 男, 硕士, 1987年毕业于同济大学桥梁工程专业, 现任副总经理、高级工程师, 主要从事土木工程建设方面的研究工作。E-mail: jinzuquan@sohu.com, qdqlqing@sina.com

1 引言

青岛胶州湾海底隧道总长 7 870 m, 其中海域段 3 950 m, 陆域段 2 220 m, 此外在团岛另有陆上接线隧道长约 1 700 m。隧道中线间距为 55 m, 隧道埋深根据合理埋深 25 m 进行控制, 局部采用最小安全埋深 20 m。隧道采用双洞外加服务隧道, 矿山法施工, 工期为 3~4 a, 工程总投资 30 多亿元。

当前国际上已经建成的海底隧道已有多条, 但我国的第一条海底隧道——厦门东通道海底隧道于 2005 年 4 月 30 日才开工建设。由于海底隧道的建设是一项技术难度高、突发事件多、安全性要求特别高的系统工程, 因而胶州湾海底隧道作为我国建造的第二条特大型跨海隧道, 其开工建设受到国内外的广泛关注^[1~3]。其建设过程中经验和教训也为我国今后即将建设的 5 条海底隧道服务。

海底隧道建设, 混凝土是最大宗的建筑材料, 是关系到隧道安全、快速施工, 高耐久、长寿命运营的根本保障。然而, 我国混凝土结构工程的耐久性问题不容乐观, 据统计, 我国 1998 年铁路隧道结构受腐蚀裂损的共有 734 座; 1990~1997 年隧道修补费用达到了 3.56 亿元左右。在成昆、襄渝线上的隧道严重漏水达到了 60%, 衬砌损害达到了 20% 以上^[4]。海底隧道同样也面临海洋工程所面临的耐久性问题, 挪威对 700 座港工混凝土结构调查表明, 在浪溅区的梁板因钢筋腐蚀引起的严重破损占 20%; 沙特阿拉伯海滨地区 42 座混凝土框架结构, 74% 的结构都有严重的钢筋腐蚀破坏; 日本对 103 座码头调查证明, 20 a 以上的混凝土结构都有相当大的顺筋锈裂。我国 20 世纪 90 年代前兴建的海港工程, 一般 10~20 a 就会出现钢筋严重腐蚀破坏。1980 年对华南 18 座高桩码头调查结果表明, 80% 的高桩码头以上都发生了严重或较严重钢筋锈蚀破坏^[5]。

根据专家评审和设计要 求, 胶州湾海底隧道使用寿命应在 100 a 以上。本文针对胶州湾海底隧道钢筋混凝土的主要损伤因素, 根据耐久性研究的结果和重大工程类比, 对 Duracrete 寿命预测模型进行修正。通过模型计算, 分析混凝土原材料、保护层厚度等对其服役寿命的影响, 并提出海底隧道 100 a 服役寿命的混凝土配合比设计和原材料优选的关键参数。

2 模型推导

众多研究表明, 氯离子导致混凝土中钢筋锈蚀分为三个阶段: 腐蚀诱导期, 腐蚀发展期和腐蚀破坏期。一般而言, 腐蚀诱导期的时间长; 发展期的时间较短, 有文献报道仅 2~3 a; 破坏期的时间则更短。显然, 腐蚀诱导期决定了钢筋混凝土的使用寿命, 因而现有的寿命预测模型主要是指对混凝土腐蚀诱导期的服役时间进行预测^[6]。

当前基于氯离子扩散导致混凝土中钢筋锈蚀的模型主要是基于 Fick 第二定律进行修正, 混凝土中氯离子扩散的基本扩散方程为

$$\frac{C_f - C_s}{C_0 - C_s} = \text{erf}(\xi) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (1)$$

式中: $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数; C_f , C_0 , C_s 分别为 x 处、 t 时刻的氯离子浓度、混凝土的初始氯离子浓度以及混凝土表面层氯离子浓度; D 为混凝土氯离子扩散系数(28 d 测得值)(m^2/s)。

Duracrete 基于 Fick 第二定律, 并结合国际上混凝土耐久性研究的成果建立了基于氯离子渗透的寿命预测模型, 并对不同服役环境、养护条件、工程重要等级、保护层变异系数等进行了统计, 其寿命预测模型^[7]为

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \text{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c}{\gamma_1 A(w/b)\gamma_2} \right] \right\}^{-2} \cdot \frac{1}{Dk_c k_t^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (2)$$

式中: x , Δx 分别为保护层厚度(mm)及保护层厚度施工偏差; C_c 为钢筋锈蚀临界氯离子浓度(胶凝材料)(%); A 为混凝土表面氯离子浓度与水胶比 w/b 关系的回归系数; t_0 为混凝土氯离子扩散系数测试龄期; k_c , k_t 分别为扩散系数环境影响系数和养护影响系数; γ_1 , γ_2 , γ_3 均为安全系数; n 为龄期系数。

对比式(1), (2), 显然, Duracrete 预测模型忽略了混凝土中的初始氯离子浓度。实际工程中混凝土的原材料中不可避免地引入一定量的氯离子, 如果不对该氯离子含量进行严重控制, 就可能导致混凝土中钢筋提前失效, 钢筋混凝土中因使用海砂而导致结构提前失效就是一个明显的例子。因而, 综合上述公式, 修正 Duracrete 预测模型公式为

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c - C_0}{\gamma_1} \frac{1}{A(w/b)\gamma_2} \right] \right\}^{-2} \frac{1}{Dk_e k_c t_0^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (3)$$

根据前期的地质勘探和水文资料, 对比分析国内外隧道衬砌混凝土的服役环境。海底隧道混凝土接触空气的内侧, 一要考虑送风带来的盐雾污染, 既可以考虑为重度盐雾区。此外, 海底隧道中由于其通风不良, 隧道中 CO₂ 浓度将超过普通环境的 5 倍。显然, 海底隧道接触空气内侧的衬砌混凝土是在碳化和氯离子复合作用下而失效的。研究结果表明: 混凝土在碳化和氯离子复合作用下, 碳化粗化了混凝土孔结构, 其大于 30 nm 的毛细孔数量增加了 11%, 最小孔径增加了 17 nm; 碳化也降低了混凝土中 Friedel(C₃A · CaCl₂ · 12H)生成量; 从而增加了混凝土中的氯离子浓度, 提高了混凝土表面氯离子扩散系数, 降低了混凝土对氯离子的结合能力; 且随碳化时间增加, 幅度越大^[8, 9]。碳化对混凝土氯离子扩散系数和氯离子结合能力为

$$R = C_b C_f = (C_t - C_f) / C_f \quad (4)$$

式中: R 为氯离子结合能力, C_b 为混凝土结合的氯离子浓度, C_t 为混凝土中总的氯离子浓度^[10]。

碳化对混凝土氯离子扩散系数和氯离子的影响如图 1 所示。由图 1 可知: 碳化增加了混凝土表面氯离子扩散系数, 则混凝土在碳化和氯离子复合作用下, 其扩散系数 $D_{\text{multi}} = k_{\text{carbon}} D$, 因而, 海底隧道靠近空气内侧衬砌混凝土寿命预测模型为

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c - C_0}{\gamma_1} \frac{1}{A(w/b)\gamma_2} \right] \right\}^{-2} \frac{1}{Dk_{\text{carbon}} k_e k_c t_0^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (5)$$

式中: k_{carbon} 为混凝土碳化影响系数。

3 模型参数确定

3.1 保护层厚度施工偏差 (Δx)

保护层厚度施工偏差 (Δx) 在 Duracrete 预测模型中是基于工程重要性大小来考虑的, 施工偏差分别为 20, 14, 8 mm。在前期调查研究中, 南京玄武湖隧道保护层厚度施工偏差如图 2 所示。

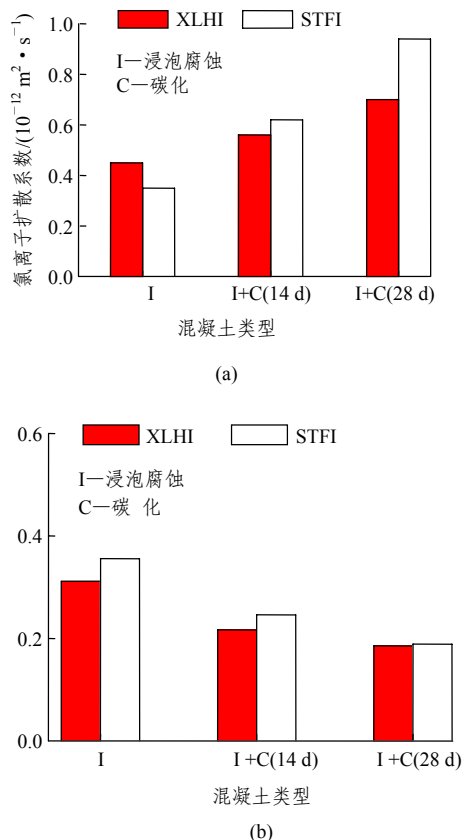


图 1 碳化对混凝土氯离子扩散系数和氯离子结合的影响
Fig.1 Effects of carbonation on chloride diffusion coefficient and chloride binding capacity

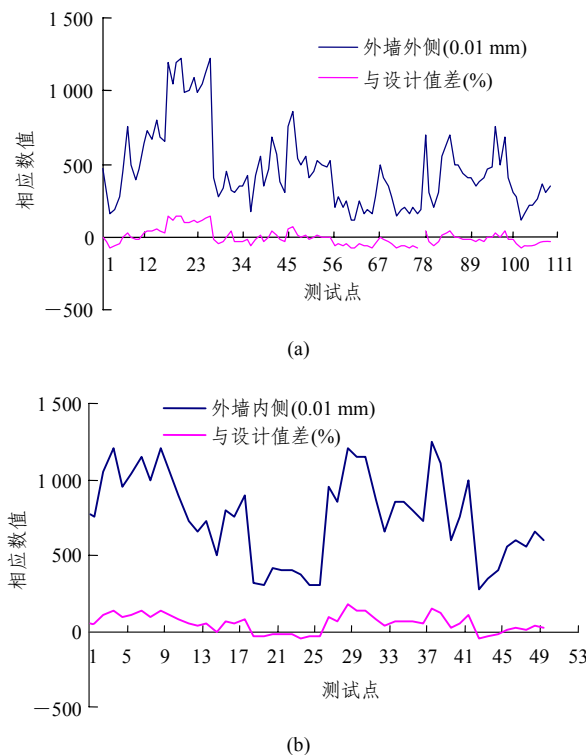


图 2 混凝土侧墙保护层厚度调查分析
Fig.2 Investigation on cover thickness of concrete side wall

根据国内的施工调查分析,综合 Duracrete 预测模型参数取值及今后施工中的严格要求等因素,在此混凝土保护层施工偏差可以取 14 mm。

3.2 钢筋锈蚀临界氯离子浓度(C_c)

对于钢筋锈蚀临界氯离子浓度(C_c),根据大量研究结果,建立了钢筋锈蚀临界氯离子浓度与 w/b 和混凝土服役环境的关系。在此,类比海洋环境的潮汐区环境($w/b = 0.3 \sim 0.4$),胶凝材料取值为 $C_c = 0.9\%$ 。

3.3 混凝土氯离子扩散系数测试龄期(t_0)

至于混凝土氯离子扩散系数测试龄期(t_0),当前我国和 Duracrete 预测模型在测试混凝土氯离子扩散系数的龄期均为 28 d,其后期氯离子扩散系数的改变,主要体现在混凝土氯离子扩散系数的龄期系数(n)上。因而,海底隧道混凝土氯离子扩散系数测试龄期 $t_0 = 28 \text{ d} = 0.076 \text{ a}$ 。

3.4 扩散系数环境影响系数(k_c)

Duracrete 预测模型主要考虑了水下区、潮汐区和大气区的环境影响,海底隧道内侧主要受到重度盐雾腐蚀,因而扩散系数环境影响系数(k_c)可按大气区取值,即 $k_c = 0.68$ 。

3.5 扩散系数环境影响系数(k_c)

Duracrete 预测模型考虑到 1, 3, 7, 28 d 养护时间的影响系数,海底隧道由于采用钻爆法施工,为了控制施工速度,其拆模时间较快。因而,可按 7 d 养护时间确定扩散系数的养护影响系数(k_c),即 $k_c = 1$ 。

3.6 混凝土碳化影响系数(k_{carbon})

前期的资料统计,混凝土的碳化增加了氯离子扩散系数 24%,由此混凝土碳化影响系数(k_{carbon})可以表示为: $k_{\text{carbon}} = 1.00 + 0.24 = 1.24$ 。

3.7 混凝土碳化影响系数(A_0)

混凝土表面氯离子浓度(A_0)与 w/b 关系的回归系数在 Duracrete 预测模型中按照混凝土服役环境有所不同,得到了不同的计算值,在此按大气区考虑,则 $A_0 = 2.57$ 。

3.8 安全系数($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)

Duracrete 预测模型按照维修成本的高低,也是工程重要性决定该系数。胶州湾海底隧道是我国第 2 条海底隧道,意义重大。海底隧道一旦破坏,其维修不易操作,维修成本高。因而按最高等级设防,安全系数($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)分别为: $\gamma_1 = 1.20, \gamma_2 = 1.70$

及 $\gamma_3 = 3.25$ 。

3.9 龄期系数(n)

龄期系数(n)主要反应了混凝土氯离子扩散系数随时间增加而减小的趋势, Duracrete 预测模型按照其不同的服役环境和混凝土类型进行选择。在本文中取 $n = 0.37$ 。

4 海底隧道服役寿命的影响因素分析

为保证海底隧道 100 a 服役寿命,考虑海底隧道衬砌混凝土服役环境条件。依据本文推导的寿命预测模型,变动隧道衬砌混凝土结构的基本参数,可以得到海底隧道服役寿命的影响因素以及保障其 100 a 服役寿命的混凝土耐久性参数。

4.1 保护层厚度影响

假设混凝土的氯离子扩散系数 $D = 4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $w/b = 0.34$, 混凝土初始氯离子浓度 $C_0 = 0.15\%$ 。变动混凝土保护层厚度,依据式(4)和确定的参数,求出不同混凝土保护层厚度下的海底隧道服役寿命,其结果如图 3 所示。

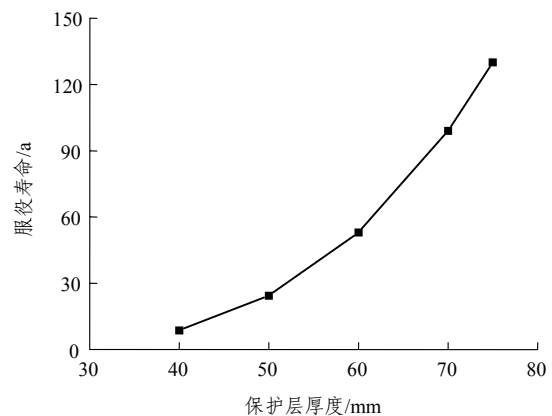


图 3 保护层厚度对隧道服役寿命影响

Fig.3 Effect of cover thickness on service life of subsea tunnel

由图 3 可知:混凝土保护层厚度越小,其服役寿命越小。为保证其 100 a 服役寿命,在严格控制混凝土的氯离子扩散系数、 w/b 及初始氯离子浓度情况下,其保护层厚度必须达到 70 mm,且其施工偏差不能超过 14 mm。当其保护层厚度降低到 60 mm,其服役寿命仅能达到 54 a;相反增加其保护层厚度到 75 mm,其服役寿命则可达到 130 a。

4.2 混凝土水胶比的影响(w/b)

依据本文的推导,海底隧道要保证 100 a 服役寿命,其保护层厚度必须大于 70 mm,在此假设混

凝土的氯离子扩散系数 $D = 4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 混凝土初始氯离子浓度 $C_0 = 0.15\%$ 。依据式(3)求出不同 w/b 下的海底隧道服役寿命, 其结果如图 4 所示。

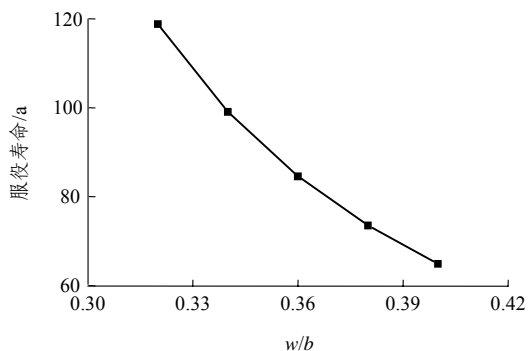


图 4 w/b 对混凝土服役寿命影响

Fig.4 Effect of w/b on service life of subsea tunnel

显然, 混凝土的 w/b 增加, 混凝土的服役寿命相应降低, 为保证海底隧道混凝土服役寿命达到 100 a, 其 w/b 应小于 0.34。当混凝土 w/b 增加到 0.38, 其服役寿命仅有 74 a; 而降低混凝土的 w/b 到 0.32, 其服役寿命能达到 119 a。

4.3 混凝土氯离子扩散系数的影响

依据前述, 海底隧道要保证 100 a 服役寿命, 其保护层厚度必须大于 70 mm, 其 w/b 应该小于 0.34, 在此假设混凝土初始氯离子浓度 $C_0 = 0.15\%$ 。变动混凝土的氯离子扩散系数, 依据推导的公式和确定的参数, 求出不同氯离子扩散系数下的海底隧道服役寿命, 其结果如图 5 所示。

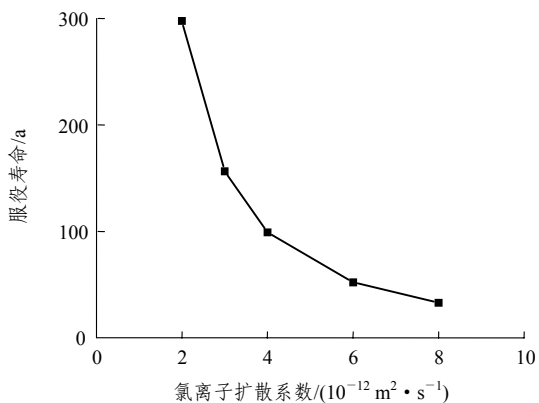


图 5 氯离子扩散系数对服役寿命影响

Fig.5 Effects of chloride diffusion coefficient on service life

由图 5 可知: 氯离子扩散系数对海底隧道服役寿命有显著的影响, 为保证海底隧道 100 a 服役寿

命, 其氯离子扩散系数应该小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 当混凝土的氯离子扩散系数降低到 $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 其服役寿命仅能达到 33 a。要保证混凝土的氯离子扩散系数, 则需从混凝土强度和适宜的矿物掺合料来保障。

4.4 混凝土初始氯离子浓度的影响

在保证混凝土保护层厚度为 70 mm, w/b 等于 0.34, 氯离子扩散系数等于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 前提下, 变动混凝土初始氯离子浓度 C_0 , 依据上文推导公式和确定的参数, 求出不同 w/b 情况下的海底隧道服役寿命, 其结果如图 6 所示。

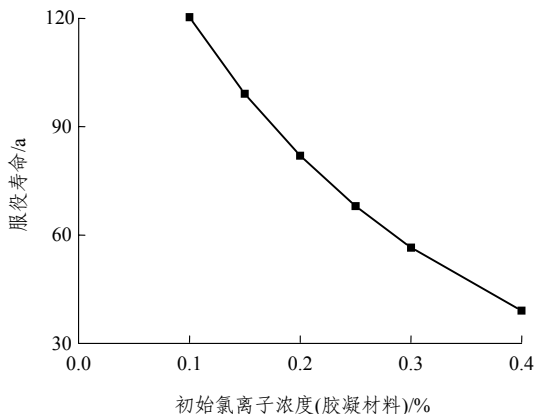


图 6 混凝土初始氯离子含量对服役寿命影响

Fig.6 Effects of initial chloride content on service life of subsea tunnel

由图 6 可知: 当混凝土的初始氯离子浓度为 0.15%~0.10%, 其服役寿命能达到 100~120 a。相反, 如对原材料不加以控制, 其初始氯离子浓度达到 0.30%, 其服役寿命仅能达到 57 a。

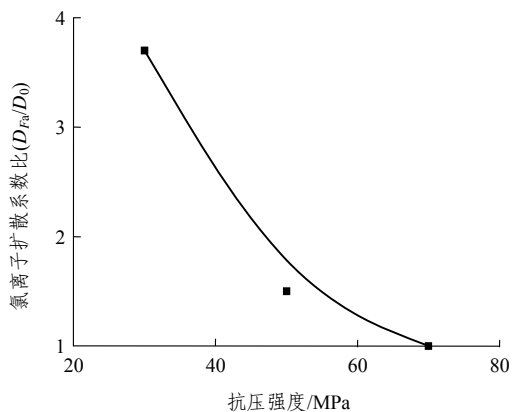
4.5 混凝土强度的影响

研究表明, 混凝土氯离子扩散系数与强度关系符合:

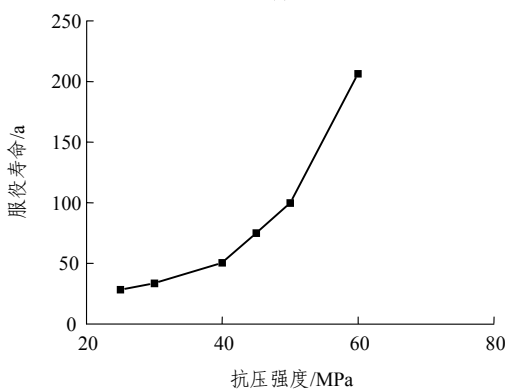
$$D_f = D_0(3.630 - 0.045f_c) \quad (6)$$

式中: D_f , D_0 分别为混凝土强度等级为 f_c 和 50 MPa 的氯离子扩散系数, f_c 为混凝土强度等级)。在此假定保护层厚度为 70 mm, 其 $w/b = 0.34$, 其初始氯离子浓度为 0.15%, 得到不同强度等级下海底隧道混凝土的服役寿命如图 7 所示。

显然, 为保证海底隧道混凝土氯离子扩散系数小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 保证其 100 a 的服役寿命, 混凝土强度等级应该大于 C50。



(a)



(b)

图7 混凝土强度等级对氯离子扩散系数及服役寿命的影响
Fig.7 Effects of compressive strength on chloride diffusion coefficient and service life of subsea tunnel

4.6 粉煤灰的影响

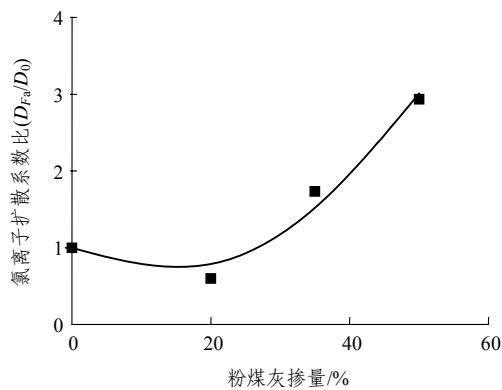
I 级粉煤灰由于其由于的形态效应、减水效应以及火山灰效应，已广泛应用于重大工程中^[11~13]。其对海工混凝土的影响直接体现在混凝土氯离子扩散系数、混凝土氯离子结合能力的变化上^[14]。前期研究表明，适宜的粉煤灰降低了混凝土的氯离子扩散系数，其关系符合：

$$D_{Fa} = D_0(1 - 4.44F_a + 16.92F_a^2) \quad (7)$$

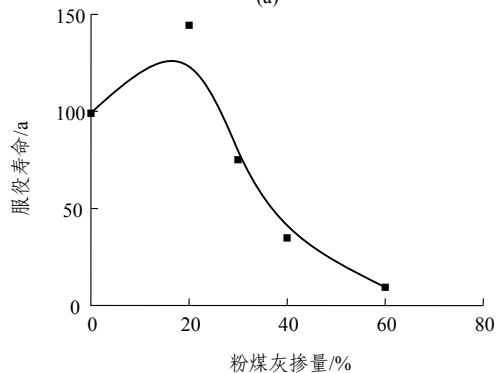
式中： D_{Fa} ， D_0 分别为粉煤灰掺量为 F_a 以及 0 时的氯离子扩散系数； F_a 为粉煤灰掺量。在此假定保护层厚度为 70 mm， $w/b = 0.34$ ，初始氯离子浓度为 0.15%，混凝土强度等级为 C50。得到不同粉煤灰掺量海底隧道混凝土的服役寿命如图 8 所示。

由图 8 可知：混凝土氯离子扩散系数随粉煤灰掺量在一定范围内降低，超过该范围，则扩散系数相应增加。为提高海底隧道混凝土的耐久性，建议混凝土中粉煤灰掺量在 26% 以内。

4.7 矿粉的影响



(a)



(b)

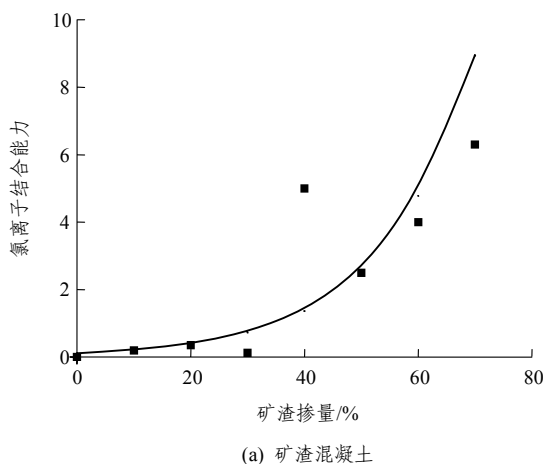
图8 粉煤灰对混凝土氯离子扩散系数、服役寿命的影响
Fig.8 Effects of fly ash content on chloride diffusion coefficient and service life of concrete

诸多文献研究表明，适当的矿粉将有助于提高海工混凝土抗氯离子腐蚀能力，现在国内外一些海港码头、大桥都在混凝土中掺加了适当的矿粉^[15]。研究表明，适当的矿粉掺量能大幅度的提高混凝土的氯离子结合能力，从而有助于降低混凝土的表观氯离子扩散系数^[16]。然而，矿粉掺量过大，混凝土的强度会降低^[17]，其抗氯离子扩散系数反而增加。矿粉对混凝土氯离子结合能力及强度的影响如图 9 所示。

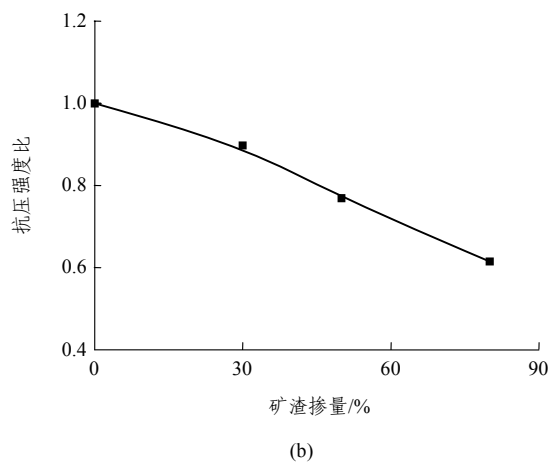
因而，从强度和混凝土氯离子结合能力综合考虑，混凝土中的矿粉掺量应该在一个适宜的范围。从前期的研究以及工程实际运用情况来看，混凝土中的矿粉掺量应该控制在 35% 以内。

5 隧道混凝土接触土体侧关键参数确定

海底隧道衬砌混凝土接触土体的外侧应考虑以下几种情况：(1) 防水层在施工不利情况下破裂，地下水将直接接触到混凝土。由于海域段地下水接



(a) 矿渣混凝土



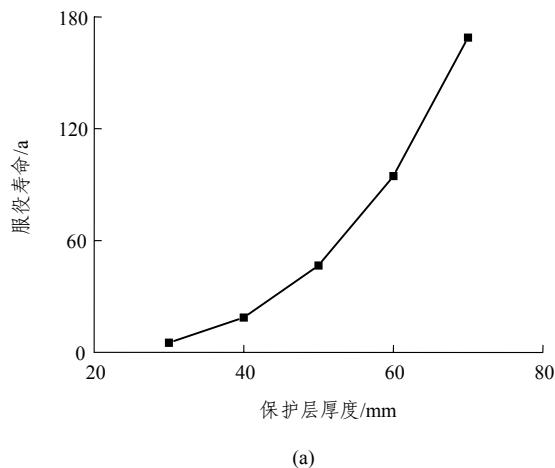
(b)

图 9 矿粉对混凝土氯离子结合能力和混凝土强度的影响

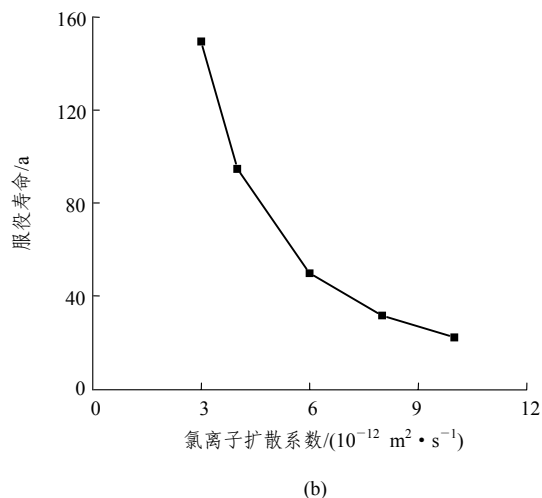
Fig.9 Effects of slag content on chloride binding capacity and compressive strength of concrete

受海水垂直补给, 其成分与海水一致, 同时考虑到衬砌结构存在干湿循环, 可类比与海洋工程的潮汐区环境。(2) 由于该侧处于封闭体系, 则不考虑碳化对混凝土服役寿命的影响。(3) 地下水中存在一定浓度硫酸盐, 需考虑硫酸盐对混凝土的腐蚀。但考虑到混凝土接触的地下水中 SO_4^{2-} 浓度最高达到 $2\ 000 \times 10^{-6}$, 而混凝土接触的地下水中氯离子浓度达到了 18 g/L 以上, 为简化计算, 在此可不考虑硫酸盐对混凝土的损伤, 仅考虑氯离子导致混凝土中钢筋锈蚀。

混凝土寿命预测模型见式(3)。其模型参数根据该混凝土服役环境, 参考 Duracrete 预测模型列表进行取值。在此, 假设混凝土的 $w/b = 0.34$, 混凝土初始氯离子浓度 $C_0 = 0.15\%$ 。变动混凝土保护层厚度以及混凝土的氯离子扩散系数, 计算出混凝土的服役寿命, 计算结果如图 10 所示。



(a)



(b)

图 10 混凝土保护层及氯离子扩散系数对隧道混凝土服役寿命的影响

Fig.10 Effects of cover thickness and chloride diffusion coefficient on service life of tunnel concrete

由图 10 可知: 混凝土保护层和氯离子扩散系数对海底隧道衬砌混凝土靠近土体侧有明显的影 响, 为保证海底隧道 100 a 的服役寿命, 其保护层厚度应大于 60 mm, 混凝土的 w/b 应小于 0.34, 混凝土初始氯离子浓度 C_0 应小于 0.15%, 混凝土的氯离子扩散系数应小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 即混凝土强度等级应在 C50 以上。

6 结 论

(1) 胶州湾海底隧道海域段衬砌混凝土靠近空气一侧在重度盐雾和碳化共同作用下服役, 其靠近土体一侧遭受氯离子和硫酸根离子复合作用。

(2) 混凝土在碳化和氯离子复合作用下, 碳化提高了混凝土表观氯离子扩散系数; 混凝土初始氯

离子浓度存在降低了混凝土中钢筋锈蚀临界值；综合考虑氯离子扩散，初始氯离子浓度和碳化复合作用，建立了海底隧道混凝土寿命预测模型。

(3) 为保证海底隧道 100 a 的服役寿命，其衬砌混凝土靠近空气一侧，保护层厚度应大于 70 mm，靠近土体一侧应大于 60 mm；同时，混凝土初始氯离子浓度 C_0 应小于 0.15%，氯离子扩散系数应小于 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ， w/b 应小于 0.34，而混凝土强度等级则高于 C50。

(4) 为提高海底隧道的服役寿命，建议其衬砌混凝土中掺加小于 26% 的粉煤灰和小于 35% 的矿粉。

参考文献(References):

- [1] 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): 1 513 - 1 521.(SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 28(8): 1 513 - 1 521.(in Chinese))
- [2] 吕 明, GRØV E, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(LU Ming, GRØV E, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(in Chinese))
- [3] 李述才, 李廷春, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道最小顶板厚度三维弹塑性断裂损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 138 - 3 143.(LI Shucai, LI Tingchun, CHEN Weizhong, et al. Application of 3D elastoplastic fracture damage model to determination of minimum roof thickness of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 138 - 3 143.(in Chinese))
- [4] 陈肇元. 土建结构工程的安全性及耐久性[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 174 - 187.(CHEN Zhaoyuan. Security and durability of building structure engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003: 174 - 187.(in Chinese))
- [5] 洪定海. 大掺量矿渣微粉高性能混凝土应用范例[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(1): 82 - 87.(HONG Dinghai. Application example of high performance concrete with large amount of slag[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(1): 82 - 87.(in Chinese))
- [6] 王立成. 氯盐环境下钢筋混凝土结构使用寿命评价的研究进展[J]. 水利水电工程学报, 2004, (4): 54 - 60.(WANG Licheng. Development of service life evaluation of reinforced concrete structures in chloride environment[J]. Hydro-science and Engineering, 2004, (4): 54 - 60.(in Chinese))
- [7] The European Union-Brite Euram III. General guidelines for durability design and redesign(BE 95 - 1347)[R]. Bruxelles : Brite-Euram, 2000.
- [8] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2006.(JIN Zuquan. Durability and service life prediction of concrete exposed to harsh environment in West China[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Southeast University, 2006.(in Chinese))
- [9] TUMIDAJSKI P J, CHAN G W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 551 - 556.
- [10] 王新友, 李宗津. 混凝土使用寿命预测的研究进展[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 249 - 256.(WANG Xinyou, LI Zongjin. Study on development of service life prediction of concrete[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(3): 249 - 256.(in Chinese))
- [11] WANG A Q, ZHANG C Z, SUN W. Fly ash effects: I the morphological effect of fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2 023 - 2 029.
- [12] WANG A Q, ZHANG C Z, SUN W. Fly ash effects: II the active effect of fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2 057 - 2 060.
- [13] WANG A Q, ZHANG C Z, SUN W. Fly ash effects: III the micro aggregate effect of fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2 061 - 2 066.
- [14] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete—effect of fly ash and slag[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 487 - 495.
- [15] 谢祥明, 莫海鸿. 大掺量矿渣微粉提高混凝土抗氯离子渗透性的研究[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 737 - 740.(XIE Xiangming, MO Haihong. Experiment study on improving resistance to chloride ion osmosis of concrete by means of adding large amount of fine slag powder[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 737 - 740.(in Chinese))
- [16] MOHAMMED T U, HAMADA H. Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9): 1 487 - 1 490.
- [17] ATIŞ C D, BILIM C. Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag[J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 3 060 - 3 065.