

引用本文:徐 港,文长城,王 青,等.超高性能混凝土保护层厚度取值分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(5):32-42.

XU Gang, WEN Changcheng, WANG Qing, et al. Value analysis of UHPC cover thickness[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 32-42.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01015

超高性能混凝土保护层厚度取值分析

徐 港^{1,2}, 文长城^{1,2}, 王 青^{1,2}, 鲍 浩^{1,2}, 汪胜巍^{1,2}

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木工程系, 湖北 宜昌 443002)

摘要:从结构的安全性、适用性、耐久性、耐火性出发,分析了影响超高性能混凝土(UHPC)保护层厚度取值的主要因素,包括黏结强度、裂缝、挠度、碳化、冻融、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、耐火性。在安全性方面,基于变形钢筋黏结强度的理论计算方法,得到了 UHPC 构件的最小保护层厚度,并试验检验了计算结果。在适用性方面,考虑了钢纤维对混凝土构件挠度和裂缝的影响,经过验算得到了保护层厚度最低要求。在耐久性方面,分别考虑了碳化、冻融、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀,借用已有公式计算出各类环境下的最小保护层厚度。在抵抗氯离子侵蚀方面,对不同环境进行了具体分析。此外,还对比分析了普通混凝土与 UHPC 的耐火性。最后,综合考虑安全性、适用性、耐久性、耐火性的要求,给出了 UHPC 保护层厚度取值的建议值。结果表明:当保护层不小于纵筋公称直径时,可保证 UHPC 构件的黏结强度,且最小保护层厚度可减小到普通混凝土的 0.824 倍以下;UHPC 抵抗碳化和冻融作用的性能远优于普通混凝土,5 mm 厚的保护层能够满足 UHPC 构件 100 年内使用需求;UHPC 的导热能力高于普通混凝土,应该增加 UHPC 构件的构造措施来满足其防火要求。

关键词:超高性能混凝土;保护层;黏结力;碳化;氯离子;冻融

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)05-0032-11

Value analysis of UHPC cover thickness

XU Gang^{1,2}, WEN Changcheng^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, BAO Hao^{1,2}, WANG Shengwei^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Department of Civil Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: From the perspective of safety, applicability, durability and fire resistance, the main factors affecting the value of thickness of ultra-high performance concrete (UHPC) cover was analyzed, including bond strength, crack, deflection, carbonization, freeze-thaw, chloride ion penetration, sulfate penetration and fire resistance. In terms of safety, the minimum cover thickness of UHPC components was calculated based on the theoretical calculation method of bond strength of deformed reinforcement, and the calculation results were verified by experiments. In terms of applicability, considering the influence of steel fiber on the deflections and cracks of concrete members, the minimum requirement of cover thickness can be obtained by

收稿日期:2022-01-05

基金项目:国家级地方高校能源和环境材料化学学科创新引智基地项目(D20015);

土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)

作者简介:徐 港(1974-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:postxg@163.com。

checking calculation. In terms of durability, factors such as carbonation, freeze-thaw, chloride ion penetration and sulfate penetration were considered respectively, and the minimum cover thickness under various environments was calculated by using the existing formula. In terms of resistance to chloride ion penetration, different environments were analyzed in detail. In addition, the fire resistance of ordinary concrete and UHPC was compared and analyzed. Finally, considering the requirements of safety, applicability, durability and fire resistance, the recommended value of UHPC cover thickness was given. The results show that the bond strength of UHPC members can be guaranteed when the cover thickness is not less than the nominal diameter of longitudinal reinforcement, and the minimum cover thickness can be reduced to not more than 0.824 times of the ordinary concrete. The performance of UHPC in resisting carbonation and freeze-thaw is far better than that of ordinary concrete, and the cover of 5 mm thickness can meet the needs of UHPC members within 100 years. The thermal conductivity of UHPC is higher than that of ordinary concrete, and the structural measures of UHPC components should be added to meet its fire protection requirements.

Key words: UHPC; concrete cover; bond strength; carbonization; chloride ion; freeze-thaw

0 引 言

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有超高强度、高韧性和优异耐久性的水泥基复合材料,在重载、大跨度、抗震、防爆和抗冲击结构中具有广阔的应用前景^[1-2]。根据 Sohail 等^[3]的研究,与普通强度混凝土相比,UHPC 中的氯离子扩散系数至少降低了 3 个数量级,从而延缓了钢筋开始锈蚀的时间。Moffatt 等^[4]研究了 UHPC 暴露在海洋环境长达 21 年的耐久性性能,监测结果表明,与典型高性能混凝土(HPC)和普通混凝土相比,UHPC 的耐久性都有显著提高。另有研究表明,UHPC 抗压强度不小于 120 MPa,抗拉强度不小于 5 MPa^[5]。因此,UHPC 的强度和耐久性远远优于普通混凝土,基于这种新型材料设计出的构件和结构往往能够打破传统普通混凝土的某些限制,这使得国家标准委员会的通用设计标准受到了一定挑战^[6]。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[7],混凝土保护层是指结构构件中钢筋外边缘至构件表面范围用于保护钢筋的混凝土,简称保护层。保护层厚度的存在能够保证混凝土结构的安全性、适用性和耐久性^[8-10],它既能为钢筋提供一定的黏结力,更能保护钢筋免于外界环境的直接侵蚀^[11-13]。混凝土保护层的最小厚度与混凝土强度等级有关,但各国规范却没有针对具有超高强度和超高耐久性的 UHPC 保护层进行说明和特别考虑^[14]。中国的现行规范^[7]规定,一类环境中混凝土保护层厚度最小值为 15 mm;BS EN 1992-1-1:2004

规定混凝土保护层最小厚度为 10 mm;ACI 318R-19 规定不考虑侵蚀环境时,保护层厚度最小可取 9.53 mm;CEB-FIP Model Code 2010 规定混凝土最小保护层厚度为 10 mm。但这些规定已经不再适合 UHPC^[15],其保护层厚度的取值需要进一步的分析。

Michaud 等^[16]利用 28 个缺口梁试件在屈曲试验中评估了保护层厚度为 1 倍钢筋直径的 UHPC 构件的安全性,试验发现 UHPC 保护层未被胀裂。Citek 等^[17]分别研究了厚度为 2 倍、1.5 倍和 1 倍钢筋直径的 UHPC 保护层对预埋带肋钢筋的黏结性能的影响,结果表明这种薄的保护层足以保证构件的黏结力要求。Qiu 等^[18]对 8 根 UHPC 梁的裂缝形态、裂缝间距和荷载裂缝宽度曲线进行了测试分析,发现减小 UHPC 保护层厚度有利于减小构件的平均裂缝间距和最大裂缝宽度。Luo 等^[19]研究了 UHPC 保护层厚度对 UHPC 轻型面板弯曲开裂行为(如裂缝宽度和裂缝间距)的影响,发现减小 UHPC 保护层厚度可有效抑制 UHPC 层裂缝的发生和扩展。Pyo 等^[20]利用预开槽三点弯曲试件研究了 UHPC 的裂缝速度,结果表明在低加载速率下,钢纤维的存在显著减缓了裂纹扩展;此外,随着 UHPC 中纤维体积掺量从 0.5%增加到 1.0%,临界应力强度因子显著增加。

El-joukhadar 等^[21]研究了超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)材料在氯化物环境中缓解钢筋腐蚀的效率,发现 1 倍和 2 倍纵筋直径的 UHPC 保护层厚度仍然能有效减缓钢筋的腐蚀速率。Lv 等^[12]

通过加速电化学腐蚀、直接拉伸试验和声发射分析,研究了 UHPC 被氯离子侵蚀的情况,结果表明 UHPC 能较好抵抗氯离子的侵蚀,并且少量氯离子侵蚀能够增加钢纤维与砂浆之间的黏结力,使得 UHPC 开裂时不会出现较大的裂缝。Ahmad 等^[22]研究了 UHPC 的耐火性,发现 UHPC 比普通混凝土更易发生高温爆裂和剥落。Li 等^[23]研究了 UHPC 的热工性能,通过试验测定了 UHPC 的热工参数,发现 UHPC 的导热系数低于普通混凝土。

以上研究已经取得了一定的研究成果,但缺乏系统性的研究与总结。因此,本文将从安全性、适用性、耐久性、耐火性等方面,对 UHPC 混凝土保护层厚度进行较为全面的总结和分析。

1 保护层厚度对黏结强度的影响

1.1 UHPC 与普通混凝土的黏结强度对比

根据文献[24]试验结果可知,在相同条件下,普通混凝土与钢筋的黏结应力为 19.7 MPa,而 UHPC 与钢筋的极限黏结应力为 39.1 MPa。根据文献[25]的试验结果可知,UHPC 与钢筋的最大黏结强度可达到 40.3 MPa,平均黏结强度也在 35 MPa 以上。因此,在保护层厚度、锚固长度、钢筋直径等条件相同的情况下,UHPC 与钢筋的黏结强度远大于普通混凝土。

中心拉拔试验表明,当纵筋的保护层厚度小于其公称直径的 4.5 倍时,混凝土与钢筋的黏结强度随保护层厚度的增大而增大^[26-28]。因此,混凝土保护层的厚度是决定混凝土构件中黏结强度上限的条件之一,而混凝土构件所需要的最大黏结力取决于钢筋中的轴力。假定普通混凝土构件与 UHPC 构件中的配筋相同,则两者所需的最大黏结强度是相同的,但 UHPC 与钢筋的黏结强度更大,因此适当减小保护层的厚度仍然能满足 UHPC 构件对黏结力的需求。

1.2 UHPC 保护层厚度取值分析

根据文献[29],混凝土与钢筋间的相互挤压力示意图如图 1 所示。图 1 中 N 为钢筋与混凝土之间的相互挤压力, p 与 T_0 为挤压力的分力。最终黏结强度与最大径向压力的关系为

$$\tau = a + p \tan(\theta) \quad (1)$$

式中: τ 为最终黏结强度; a 为化学胶结力; θ 为钢筋的肋面与水平面的夹角,如图 1 所示; p 为钢筋周围混凝土受到的径向挤压力。

式(1)中 a 与 θ 均为常量, p_{\max} 为混凝土开裂前

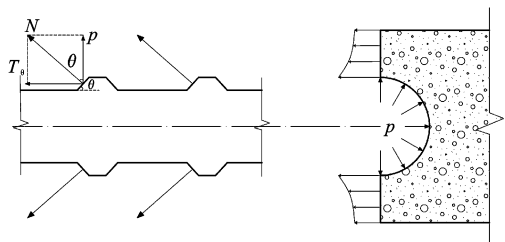


图 1 钢筋与混凝土间相互挤压力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of extrusion force between longitudinal reinforcement and concrete

承受的最大挤压力,当 $p \leq p_{\max}$ 时, τ 随着 p 的增大而增大;当 $p > p_{\max}$ 时,混凝土构件发生劈裂破坏。因此, p_{\max} 决定了黏结强度的上限。 p_{\max} 的值取决于混凝土抗拉强度、保护层厚度和受拉纵筋直径。根据文献[30],钢筋周围的混凝土受到的最大径向挤压力为

$$p_{\max} = f_t (0.59 \frac{c_s}{R_d} + 0.09) \quad (2)$$

式中: c_s 为受拉纵筋保护层厚度; R_d 为钢筋公称半径; f_t 为混凝土抗拉强度。

UHPC 的相对保护层厚度计算公式为

$$c_{s,UHPC}/d = 0.847 p_{\max,UHPC}/f_{t,UHPC} - 0.0763 \quad (3)$$

式中: $c_{s,UHPC}$ 为 UHPC 构件中受拉纵筋保护层厚度; $f_{t,UHPC}$ 为 UHPC 的抗拉强度; d 为钢筋公称直径; $p_{\max,UHPC}$ 为 UHPC 开裂前承受的最大挤压力。

假设钢筋在普通混凝土构件中受拉屈服时的黏结强度 τ 与在 UHPC 构件中黏结强度 τ_{UHPC} 相同,即 $\tau = \tau_{UHPC}$;由于化学胶结力较小,可认为钢筋与两种材料的化学胶结力相等,结合式(1)可知两者的法向压力相等,则 $p_{\max} = p_{\max,UHPC}$ 。根据规范^[7], $c_s/d \in [1, 4.5]$ 。同时,当混凝土强度等级小于 C30 时,构件的保护层厚度必须强制增加 5 mm。因此当相对保护层厚度 $c_s/d = 1$ 时,混凝土的强度等级不能小于 C30,则抗拉强度最小可取 $f_t = 1.43$ MPa,此时 p_{\max} 取得最小值。当相对保护层厚度 $c_s/d = 4.5$ 时,混凝土的强度等级为 C50, $f_t = 1.89$ MPa,此时 p_{\max} 取得最大值。因此, $p_{\max,UHPC} \in [1.816 \text{ MPa}, 10.206 \text{ MPa}]$,将其代入式(3)可得 $c_{s,UHPC}/d \in [0.355, 2.345]$ 。

1.3 试验验证

为了验证上述理论计算结果的可靠性,浇筑了一批 $1\,000 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的 UHPC 板,并将板与伴随试件置于标准养护室,一起进行了 28 d 标养,然后测得伴随试件立方体抗压强度为 126.6 MPa,劈裂强度为 12.30 MPa,抗折强度为 15.36

MPa,满足规范^[5]对 UHPC 的相关规定。每块板都配置 4 根纵向钢筋,不配箍筋,纵筋为直径 6 mm 的 HRB600 级钢筋。HRB600 级钢筋极限抗拉强度为 1 684 MPa,屈服强度为 1 486 MPa,弹性模量为 200 GPa。保护层厚度为 6 mm 和 3 mm,分别代表 $c_s/d=1$ 、 $c_s/d=0.5$ 。UHPC 的原材料包括 P. O52. 5 水泥、硅灰(SF)、粉煤灰、石英砂、高效减水剂、镀铜微丝钢纤维。UHPC 具体配料如表 1 所示。

表 1 UHPC 配合比
Table 1 UHPC mix ratio

水胶比	胶砂比	各材料用量/%				
		水泥	粉煤灰	硅灰	减水剂	钢纤维
0. 16	1	50	35	15	2	2

注:钢纤维掺量 2% 指占混凝土总体积的 2%。

试验时,采用螺旋千斤顶进行分级加载,加载过程中,使用 PTS 智能裂缝测宽仪测量每级荷载下的裂缝宽度,加载后裂缝如图 2、3 所示。

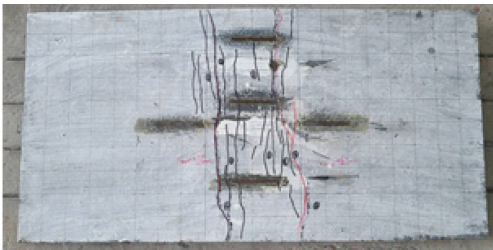


图 2 6 mm 厚保护层的板破坏形态

Fig. 2 Plate failure pattern of 6 mm concrete cover

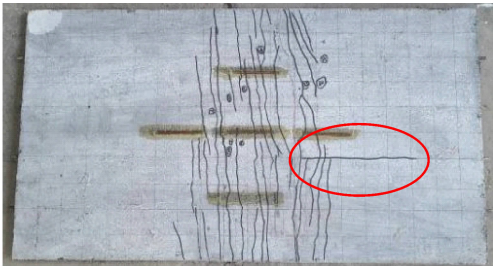


图 3 3 mm 厚保护层的板破坏形态

Fig. 3 Plate failure pattern of 3 mm concrete cover

图 2 中板的混凝土保护层厚度为 6 mm, $c_s/d=1$,直至被压坏,板的保护层始终未被胀裂,混凝土和钢筋间的黏结力是足够的。图 3 中板的混凝土保护层厚度为 3 mm, $c_s/d=0.5$,在加载过程中,钢筋出现纵向裂缝,如图中红圈所示,且保护层已经被胀裂,不满足实际需求。这与理论计算的结果不符,一方面,由于板中未配置箍筋,故而构件更易开裂;另一方面,试验中使用了 HRB600 级高强钢筋,它对黏结强度的要求更高。

经过试验验证,纵筋保护层厚度取值为 $c_s/d\geq$

1,实际的 UHPC 保护层厚度数值则是 c_s 减去箍筋直径。由于试验未设置保护层厚度为 4 mm 和 5 mm 的试验组,因而得到的结论偏保守。

2 适用性分析

2.1 裂缝分析

根据文献[31]对 UHPC 构件裂缝计算及修正方法,化简后得到 UHPC 保护层厚度 c_s 的表达式为

$$c_s = \frac{w_{\max} E_s}{1.51 \alpha_{cr} \Psi \sigma_{s, \text{UHPC}}} - 0.042 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \quad (4)$$

普通混凝土最大裂缝计算公式为^[7]

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_s}{E_s} (1.9 c'_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}}) \quad (5)$$

式中: c'_s 为普通混凝土的纵筋保护层厚度; w_{\max} 为最大裂缝限值; E_s 为钢筋弹性模量; σ_s 、 $\sigma_{s, \text{UHPC}}$ 分别为普通混凝土和 UHPC 中纵向受拉钢筋的应力; d_{eq} 为纵向受拉钢筋等效直径; ρ_{te} 为纵向受拉钢筋配筋率; α_{cr} 为构件受力特征系数; Ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋的应变不均匀系数。

将式(5)代入式(4)可得

$$c_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s, \text{UHPC}}} (1.258 c'_s + 0.053 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}}) - 0.042 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \quad (6)$$

根据文献[31], $\frac{\sigma_s}{\sigma_{s, \text{UHPC}}} \in [0.162, 0.655]$,在定性分析时可取最大值 0.655,代入式(6)可得

$$c_s = 0.824 c'_s - 0.0729 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,当允许裂缝宽度相同时, UHPC 的保护层厚度可以比普通混凝土小得多。

2.2 挠度分析

根据规范^[7]和文献[32]~[34]对超高性能混凝土梁刚度计算方法及修正方法的研究,可得长期荷载作用下 UHPC 梁的刚度 B 为

$$B = E_s A_s h_0^2 / [\beta (\frac{\Psi}{0.87} + 0.1 + \frac{4.5 \alpha_E \rho}{1 + 4.4 \gamma_f})] \quad (8)$$

$$\gamma_f = \frac{(b_f - b) h_f}{b h_0} \quad (9)$$

式中: A_s 为受拉纵筋面积; h_0 为截面的有效高度; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率,对钢筋混凝土受弯构件,取为 $A_s/(b h_0)$; γ_f 为受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; b_f 、 h_f 分别为受拉区翼缘的宽度、高度; β 为考虑荷载长期对挠度增大的影响系数; b 为矩形截面宽度,T 形、I 形截面后的腹板宽度。

将式(9)代入式(8)并化简可得

$$B=E_sA_s/[\beta(\frac{1.149\Psi+0.1}{h_0^2}+\frac{4.5\alpha_EA_s}{bh_0^3+4.4h_0^2(b_f-b)h_f})]\tag{10}$$

从式(10)可知,相同工况下,假定构件的截面高度为定值,混凝土保护层减小, h_0 增大导致刚度 B 增大,会使得构件的挠度减小。

3 耐久性分析

3.1 环境作用类别

结构的耐久性为结构在设计使用年限内正常工作的能力,它与结构自身因素和外部环境都有关^[13,35]。BS EN 1992-1-1:2004 考虑了碳化作用、氯离子侵蚀、冻融作用、其他化学物质侵蚀,将混凝土构件的所处环境划分为 X0、XC1~XC4、XD1~XD3、XS1~XS3、XF1~XF4、XA1~XA3 等 18 个类别;ACI 318R-19 考虑了冻融作用、有害离子侵蚀对混凝土结构的影响,将混凝土构件所处环境分为 F0~F3、S0~S3、W0~W2、C0~C2 等 14 个类别;CEB-FIP Model Code 2010 采用了与 BS EN 1992-1-1:2004 相同的标准,将混凝土所处环境划分为 18 类。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)将环境划分为一、二 a、二 b、三 a、三 b、四、五共 7 个类别。综合各国规范,本文的环境类别划分及概况如表 2 所示。

表 2 环境类别划分及概况
Table 2 Classification and overview of environmental categories

环境类别	环境概况
—	干燥的大气环境
二 a	非冻融的潮湿环境
二 b	干湿交替冻融循环环境
三 a	氯离子间接侵蚀环境
三 b	氯离子直接侵蚀环境
四	海洋环境
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响环境

3.2 一般大气环境

一般大气环境包含一类和二 a 类环境,只需要分析碳化作用的影响。对于保护层的设计首先应该满足

$$T_1+T_2\geq T\tag{11}$$

式中: T_1 为保护层完全碳化所需要的时间; T_2 为保护层完全碳化后钢筋锈蚀发生锈胀开裂所需要的时间; T 为设计耐久年限^[36]。

参照规范^[37],混凝土构件的设计耐久年限为

$$T_1=15.2K_kK_cK_m\tag{12}$$

$$T_2=H_cH_fH_dH_TH_{RH}H_mt_r\tag{13}$$

式中: K_k 、 K_c 、 K_m 分别为碳化系数、保护层厚度、局部环境对钢筋开始锈蚀耐久年限的影响系数; H_c 、 H_f 、 H_d 、 H_T 、 H_{RH} 、 H_m 分别为保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、环境温度、环境湿度、局部环境对混凝土保护层厚度锈胀开裂耐久年限的影响系数; t_r 为各项影响系数为 1.0 时构件自钢筋开始锈蚀到保护层锈胀开裂的时间。

根据规范^[37],混凝土碳化深度与时间的关系为

$$k=\frac{x_c}{\sqrt{t_0}}\tag{14}$$

式中: x_c 为混凝土碳化深度; k 为混凝土碳化速度系数; t_0 为碳化时间。

在实际情况下,混凝土的碳化系数不是一个常量,它与混凝土的抗压强度、水胶比以及所处的环境有关^[38]。因此,根据文献[39]中的数据,对抗压强度 120 MPa 的混凝土进行碳化速度系数推导。根据文献[39]中的表 9.7,在相同条件下,UHPC 与普通混凝土碳化深度如表 3 所示。

表 3 不同等级混凝土碳化深度
Table 3 Carbonation depth of different concrete

混凝土等级	C40	C80	C100	C120
91 d 碳化深度/mm	4.0	0.1	0.1	0.1

根据式(14)计算出 C120 的 UHPC 碳化速度系数为 $0.200\text{ mm}\cdot\text{a}^{-0.5}$ 。根据规范^[37]的表 5.2.2,数据拟合得到表达式 $K_k=2.275k^{-0.58}$,相关系数为 1.00,可以计算出当 $k=0.200\text{ mm}\cdot\text{a}^{-0.5}$ 时, $K_k=5.786$;对于一般环境取局部环境系数 $m=1.2$,根据表 5.2.5 线性插值得到 $K_m=1.402$;对于 UHPC,立方体抗压强度不小于 120 MPa,根据规范^[37]的表 5.3.3 对室外墙板影响系数曲线进行拟合得到 $H_f=0.001f_{cu}^{2.237}$,相关系数为 1.00,当 $f_{cu}=120\text{ MPa}$ 时取 $H_f=44.8$; H_d 取室外墙板的 0.97; H_T 取室外墙板的 1.01; H_{RH} 取室外墙板的 0.97; $m=1.2$, H_m 根据室外墙板数据的线性插值后取 3.272;对于室外环境的 t_r ,最小取值为 1.9。

联立式(11)~(14),并将上述系数取值代入,可得

$$T\leq 123.3K_c+264.7H_c\tag{15}$$

当保护层厚度取 5 mm 时, $K_c=0.54$, H_c 取最小值 0.31,则 $T\leq 148.6$ 年,完全可以满足 50 年、100 年的设计使用寿命,故在一类和二 a 类环境中,UHPC 保护层厚度最小取值为 5 mm。

3.3 冻融环境

对于二 b 类环境,根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[40],当质量损失率达到 5% 或者相对动弹性模量下降 40% 时认为结构失效。混凝土自然环境下工作寿命与实验室试验寿命关系为

$$t=K'n/B'$$
 (16)

式中: t 为混凝土自然环境下工作寿命; n 为实验室冻融循环次数; K' 为冻融循环系数,一般取 12; B' 为自然环境中一年冻融循环次数,这里取最为严重的东北地区的数据,120 次^[41-42]。

经过计算,UHPC 在自然条件下工作 50、100 年所受的冻融损伤与实验室冻融循环 500、1 000 次的损伤相同,然而根据文献[39]中表 9.3,C100 混凝土实验室冻融 1 200 次的质量损失为 0,故 UH-PC 的保护层设计不需要单独考虑冻融环境的影响,在二 b 类环境下,UHPC 保护层厚度与一类和二 a 类环境中相同。

3.4 氯离子侵蚀环境

氯离子侵蚀环境包括三 a 类、三 b 类和四类环境,根据规范^[37],在氯离子侵蚀条件下,混凝土保护层锈胀开裂的所需时间可按式(17)~(20)计算。

$$t_{cr}=t_i+t_c$$
 (17)

$$t_i=(\frac{c}{K})^2\times10^{-6}+0.2t_1$$
 (18)

$$K=2\sqrt{D}\text{erf}^{-1}(1-\frac{C_{cr}}{C_s})$$
 (19)

$$t_c=\beta_1\beta_2t_{c,0}$$
 (20)

式中: K 为氯离子侵蚀系数; t_{cr} 为混凝土保护层锈胀开裂所需时间; t_i 为混凝土保护层完全被侵蚀且钢筋开始锈蚀的时间; t_c 为钢筋开始锈蚀到保护层锈胀开裂所需时间; t_1 为混凝土表面氯离子浓度达到稳定值所需要的时间; D 为氯离子扩散系数; C_{cr} 为钢筋锈蚀临界氯离子浓度; C_s 为混凝土构件表面氯离子浓度; β_1 为混凝土保护层锈胀开裂时间修正系数; β_2 为考虑多个锈坑及分布对保护层开裂时间的修正系数; $t_{c,0}$ 为不考虑锈蚀产物渗透迁移及锈坑位置修正的钢筋开始锈蚀至混凝土保护层锈胀开裂的时间,根据规范^[37]表 6.3.2 中南方墙板构件的数据进行曲线拟合,推导得到 C120 的 UHPC 的保护层厚度 c 与 $t_{c,0}$ 的关系式为 $t_{c,0}=0.184c+4.098$,线性相关系数为 0.997;部分参数取值如表 4 所示。

根据文献[5]、规范^[37]和 规范^[43],可得 UHPC 和普通混凝土的 C_{cr} 和 D ,如表 5 所示。

表 4 各类环境中的部分参数取值
Table 4 Some parameter values in various environments

环境类别	三 a	三 b	四
$t_1/\text{年}$	10	0	0
$C_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3.20	5.87	19.00
β_1	1.05	1.10	1.10
β_2	1.2	1.2	1.2

表 5 普通混凝土与 UHPC 的 C_{cr} 和 D
Table 5 C_{cr} and D of ordinary concrete and UHPC

混凝土等级	$C_{cr}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$
C30	1.3	5.36×10^{-4}
C120	2.1	6.31×10^{-6}

联立式(17)~(20)可得

$$t_{cr}=\frac{c^2}{4D}[\text{erf}^{-1}(1-\frac{C_{cr}}{C_s})]^{-2}\times10^{-6}+0.2t_1+\beta_1\beta_2t_{c,0}$$
 (21)

将相关数据代入式(21)得

$$t_{cr}=\begin{cases} 0.399c^2+0.232c+5.163 & \text{三 a 类环境} \\ 0.093\ 5c^2+0.243c+5.409 & \text{三 b 类环境} \\ 0.031\ 1c^2+0.243c+5.409 & \text{四类环境} \end{cases}$$
 (22)

分别令 t_{cr} 为 50、100 年,经计算并取整数可得 3 类环境内 UHPC 保护层厚度取值,如表 6 所示。

表 6 3 类环境内 UHPC 保护层厚度取值
Table 6 Thickness of UHPC cover in three types of environment

设计使用年限/年	50			100		
	三 a	三 b	四	三 a	三 b	四
保护层厚度/mm	12	21	35	17	31	52

表 6 中对于四类环境保护层厚度的取值未考虑海水中硫酸盐的侵蚀。

3.5 硫酸盐侵蚀环境

四类和五类环境存在硫酸盐侵蚀作用,当硫酸根离子侵入混凝土后将与水泥水化产物反应生成钙矾石,钙矾石体积膨胀使得混凝土开裂。因此,可直接将硫酸盐在结构服役期内的侵蚀深度作为保护层厚度最小取值^[44]。

根据 Geng 等^[45-48]的研究发现,硫酸盐侵蚀混凝土的规律基本上符合 Fick 第二扩散定律的描述,但是硫酸根离子的扩散系数却与多种因素相关,包括水灰比、硫酸根离子浓度、应力等因素。一方面,离子的扩散速率与离子的半径有关,离子半径越大,扩散速率越小^[48],所以硫酸根离子比氯离子扩散更慢。另一方面,UHPC 中掺加了活性矿物掺合料,

有利于抵抗硫酸盐侵蚀,研究发现粉煤灰掺量为 25%和 45%的水泥制品比不含矿物掺合料的水泥制品膨胀更小^[49]。因此,在海洋环境下,硫酸根离子的侵蚀深度应该是小于氯离子侵蚀深度的。此外,氯离子的存在会对硫酸根离子侵蚀混凝土产生阻碍作用,且海洋中氯离子浓度比硫酸根离子浓度大几倍,根据文献[44]可知海洋环境中 Cl⁻含量约为 19.0 g · L⁻¹,SO₄²⁻含量约为 3.0 g · L⁻¹。因此在海洋环境中,不需要额外考虑硫酸根离子的侵蚀问题^[44,49]。

将氯离子浓度代入式(21)可以得到,在海洋环境中,设计年限为 50 年和 100 年的 UHPC 构件的保护层厚度为 35 mm 和 52 mm。对于其他环境,例如人为的工业污水环境,其中可能存在大量硫酸根离子,而氯离子却很少,因此需要根据 Fick 第二定律和式(21)结合实际情况来计算,其中硫酸根离子扩散系数可以根据各国标准进行实测。

4 耐火性分析

钢筋混凝土构件在火灾中失效的主要原因有两个:其一,混凝土由于高温而爆裂剥落;其二,钢筋在高温中软化使得混凝土构件整体承载力下降^[38,22]。UHPC 属于混凝土材料,也存在高温爆裂的风险,甚至较普通混凝土更容易发生爆裂,这是由于 UHPC 中水泥和硅灰含量较大,内部孔隙少,增加了爆裂剥落的风险^[22,50-51]。

根据 Ahmad 等^[22]的研究,当 UHPC 内部温度升高到 300 ℃以上时便会发生爆裂和剥落。根据研究,混凝土中的钢筋一般在 250~450 ℃下开始软化^[52],而火灾中明火造成的高温一般在 320~400 ℃^[22]。因此,设计 UHPC 保护层厚度时,需要根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)^[53]中的规定,保证在规定的时间内钢筋所处温度不达到 250 ℃即可。混凝土导热系数越大,其内部温度上升越快,UHPC 与普通混凝土导热系数如表 7 所示。

由表 7 可知,UHPC 导热系数的具体数值并没有统一的结论,不同学者测定的结果不尽相同。有人认为普通混凝土中骨料导热系数大,因此普通混凝土导热系数大于 UHPC。还有人认为 UHPC 结构致密,并且包含钢纤维,UHPC 导热系数应该大于普通混凝土。但分析 UHPC 保护层厚度的取值时发现,UHPC 保护层不仅更薄,而且更易发生爆裂剥落。因此,在减小 UHPC 保护层厚度的同时,为了增强 UHPC 结构的耐火性,需要采取其他构造

表 7 UHPC 和普通混凝土的导热系数(200 ℃)

Table 7 Thermal conductivity of UHPC and ordinary concrete (200 ℃)

墙体材料	钢纤维掺量/%	导热系数/[W · (m ² · K) ⁻¹]
UHPC ^[54]	1	1.580
	2	1.670
	3	1.720
	4	1.705
UHPC ^[55]	1	1.787
	2	1.841
	3	1.800
UHPC ^[56]	2	2.280
C40 ^[57]	0	2.210

措施,比如增加隔热层、保温层,以减缓内部升温速率。

5 保护层厚度建议值

考虑到混凝土碳化反应的差异和构件的重要性,分平面构件(板、墙、壳)及杆状构件(梁、柱、杆)两类确定保护层厚度的建议值。杆状构件的保护层厚度在平面构件保护层厚度的基础上乘以 1.3,并取整^[7]。同时,保护层厚度不得小于纵向受力钢筋的公称直径。因此,对于设计使用年限为 50 年的 UHPC 构件,保护层最小厚度 *c* 建议值如表 8 所示。

表 8 UHPC 最小保护层厚度(50 年)

Table 8 Minimum cover thickness of UHPC (50 years)

环境类别	<i>c</i> /mm	
	板、墙、壳	梁、柱、杆
一、二 a、二 b	5	7
三 a	12	16
三 b	21	28
四	35	46

对于设计使用年限为 100 年的 UHPC 构件,保护层厚度建议值如表 9 所示。

表 9 UHPC 最小保护层厚度(100 年)

Table 9 Minimum cover thickness of UHPC (100 years)

环境类别	<i>c</i> /mm	
	板、墙、壳	梁、柱、杆
一、二 a、二 b	5	7
三 a	17	23
三 b	31	41
四	52	68

对比国内外最新的 UHPC 规范,发现法国规范^[58-59]对于 UHPC 保护层提出了较为全面的规定,其保护层厚度的建议取值主要与环境类别、建筑类别有关,不考虑分构件类别的差异,在一~四类环境

中,UHPC 保护层厚度的取值范围分别为 5~15 mm、10~15 mm、10~25 mm、15~25 mm。其中一类、二类环境建议值与本文大致相当,但三类、四类环境的建议值比本文更小,可能与该规范规定的 UHPC 最低立方体抗压强度为 145 MPa 有关,高于中国规范^[5]中 UHPC 强度不低于 120 MPa 的要求。

6 结 语

(1)当保护层厚度不小于纵筋的公称直径时,UHPC 与钢筋的黏结强度能够满足安全性要求。

(2)当允许裂缝宽度相同时,UHPC 保护层厚度可以减小到普通混凝土保护层的 0.824 倍以下,有利于减小构件的挠度和截面尺寸。

(3)在相同的环境作用下,UHPC 保护层厚度可减小到普通混凝土的 1/3~1/2。

参考文献:

References:

- [1] 陈宝春,韦建刚,苏家战,等.超高性能混凝土应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):10-20.
CHEN Baochun, WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 10-20.
- [2] MA F D, DENG M K, FAN H K, et al. Study on the lap-splice behavior of post-yield deformed steel bars in ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120611.
- [3] SOHAIL M G, KAHRAMAN R, AL NUAIMI N, et al. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101669.
- [4] MOFFATT E G, THOMAS M D A, FAHIM A, et al. Performance of ultra-high-performance concrete in harsh marine environment for 21 years[J]. ACI Materials Journal, 2020, 117(5): 105-112.
- [5] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求: T/CECS 10107—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
Technical requirements for ultra high performance concrete: T/CECS 10107—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [6] KHAKSEFIDI S, GHALEHNOVI M, DE BRITO J. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101592.
- [7] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 王佳燕.混凝土结构钢筋保护层厚度偏差控制及检测[J].混凝土与水泥制品,2014(3):70-72.
WANG Jiayan. Thickness deviation controlling and detection of concrete structural reinforced cover[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(3): 70-72.
- [9] 朱 炯,陈素碧.基于耐久性的海工预应力混凝土结构保护层优化设计[J].混凝土,2016(9):132-135.
ZHU Jiong, CHEN Subi. Optimization design protection layer of pre-stressed concrete structures in marine environment based on durability[J]. Concrete, 2016(9): 132-135.
- [10] 余 波,毋 铭,杨绿峰.混凝土保护层对钢筋腐蚀机理及腐蚀速率的影响[J].工业建筑,2014,44(7):112-119,169.
YU Bo, WU Ming, YANG Lufeng. Influence of concrete cover on corrosion mechanism and corrosion rate of steel bars[J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 112-119, 169.
- [11] 李克非,陈肇元.混凝土结构耐久性设计中钢筋保护层的规定与建议[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(增2):23-26.
LI Kefei, CHEN Zhaoyuan. Specification and recommendation of concrete cover in durability design[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(S2): 23-26.
- [12] LV L S, WANG J Y, XIAO R C, et al. Influence of steel fiber corrosion on tensile properties and cracking mechanism of ultra-high performance concrete in an electrochemical corrosion environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122338.
- [13] 张建荣,黄鼎业.混凝土保护层的设计及构造建议[J].同济大学学报(自然科学版),2000,28(6):641-645.
ZHANG Jianrong, HUANG Dingye. Some suggestions on design and construction technology for concrete protective cover[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2000, 28(6): 641-645.
- [14] ZHU Y P, ZHANG Y, HUSSEIN H H, et al. Numerical modeling for damaged reinforced concrete slab strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110031.
- [15] LARSEN I L, THORSTENSEN R T. The influence

- of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119459.
- [16] MICHAUD D, FAM A, DAGENAIS M A. Development length of sand-coated GFRP bars embedded in ultra-high performance concrete with very small cover[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121384.
- [17] CITEK D, KOLISKO J, REHACEK S, et al. Concrete cover effect on bond behaviour of UHPC[J]. Solid State Phenomena, 2016, 249: 273-277.
- [18] QIU M H, SHAO X D, ZHU Y P, et al. Experimental investigation on flexural cracking behavior of ultra-high performance concrete beams[J]. Structural Concrete, 2020, 21(5): 2134-2153.
- [19] LUO J, SHAO X D, FAN W, et al. Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel+UHPC) lightweight deck system[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 120-137.
- [20] PYO S, ALKAYSI M, EL-TAWIL S. Crack propagation speed in ultra high performance concrete (UHPC)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 109-118.
- [21] EL-JOUKHADAR N, PANTAZOPOULOU S J. Effectiveness of UHPFRC cover in delaying bar corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121288.
- [22] AHMAD S, RASUL M, ADEKUNLE S K, et al. Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: effects of exposure duration and fiber content[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 291-301.
- [23] LI H Y, HAO X H, QIAO Q, et al. Thermal properties of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(3): 04020022.
- [24] 王进伟. 不锈钢筋与混凝土粘结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- WANG Jinwei. Experimental study on bond properties of stainless steel and concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [25] 王瑞龙, 马 龠. 钢筋与超高性能混凝土粘结锚固试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(9): 204-207, 22.
- WANG Ruilong, MA Biao. Study on bond anchorage test of steel bar and ultra-high performance concrete[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(9): 204-207, 22.
- [26] 郑山锁, 裴 培, 张艺欣, 等. 钢筋混凝土粘结滑移研究综述[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4182-4191.
- ZHENG Shansuo, PEI Pei, ZHANG Yixin, et al. Review of research on bond-slip of reinforced concrete[J]. Materials Review, 2018, 32(23): 4182-4191.
- [27] 孙 杨, 乔国富. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究综述[J]. 材料导报, 2020, 34(3): 122-131.
- SUN Yang, QIAO Guofu. Research on the bond properties between corroded reinforcing steel bar and concrete: a review[J]. Materials Reports, 2020, 34(3): 122-131.
- [28] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土黏结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- XU Youlin. Experimental study on bond and anchorage performance of deformed steel bar-concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [29] TEPFERS R, COSENZA E, MODNIKS J, et al. Bond of reinforcement in concrete[R]. Lausanne: FIB, 2000.
- [30] XU G, WEI J, TAN T, et al. Modelling bond strength of corroded plain bar reinforcement in concrete[J]. Structural Concrete, 2007, 8(3): 133-138.
- [31] 邱明红, 邵旭东, 胡伟业, 等. 钢筋 UHPC 受弯构件裂缝宽度计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 89-98, 119.
- QIU Minghong, SHAO Xudong, HU Weiye, et al. Calculation method for crack width of reinforced UHPC flexural components[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 89-98, 119.
- [32] 邓宗才, 肖 锐, 徐海宾, 等. 高强钢筋超高性能混凝土梁的使用性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(10): 1335-1340.
- DENG Zongcai, XIAO Rui, XU Haibin, et al. Serviceability research of ultra-high performance concrete beams reinforced with high strength steel bars[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(10): 1335-1340.
- [33] 聂 洁, 李传习, 钱国平, 等. 钢纤维形状与掺量对 UHPC 施工及力学特性的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 4042-4052.
- NIE Jie, LI Chuanxi, QIAN Guoping, et al. Effect of shape and content of steel fiber on workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(4): 4042-4052.
- [34] 管俊峰, 刘霖艾, 白卫峰, 等. 600 MPa 高强钢筋高强混凝土梁刚度试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1197-1211.
- GUAN Junfeng, LIU Linai, BAI Weifeng, et al. Research on rigidity of high-strength concrete beams with 600 MPa steel bars[J]. Journal of Basic Science

- and Engineering,2020,28(5):1197-1211.
- [35] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(4):371-380,403.
JIN Weiliang,ZHAO Yuxi. State-of-the-art on durability of concrete structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2002,36(4):371-380,403.
- [36] 保护层厚度专题研究组.钢筋混凝土保护层厚度取值的建议[J].建筑结构学报,1982,3(5):11-20.
Research Group on Concrete Protective Coaring Thickness. A suggestion on the minimum concrete protective coating thickness[J]. Journal of Building Structure,1982,3(5):11-20.
- [37] 既有混凝土结构耐久性评定标准:GB/T 51355—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Standard for durability assessment of existing concrete structures: GB/T 51355—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.
- [38] 屈文俊,车惠民.既有混凝土桥梁的碳化分析及耐久性预测[J].铁道学报,1996,18(3):80-85.
QU Wenjun,CHE Huimin. Analysis of concrete carbonization and durability prediction for exsiting concrete bridges[J]. Journal of the China Railway Society,1996,18(3):80-85.
- [39] 蒲心诚.超高强高性能混凝土:原理·配制·结构·性能·应用[M].重庆:重庆大学出版社,2004.
PU Xincheng. Super high strength high performance concrete: principle · preparation · structure · performance · application [M]. Chongqing: Chongqing University Press,2004.
- [40] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.
- [41] 王立久,汪振双,崔正龙.基于冻融损伤抛物线模型的再生混凝土寿命预测[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(1):29-35.
WANG Lijiu,WANG Zhenshuang,CUI Zhenglong. Service life prediction of recycled concrete based on freezing-thawing damage parabola model[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2011,19(1):29-35.
- [42] 王 月.氯盐冻融循环与侵蚀作用下活性粉末混凝土的耐久性研究[D].北京:北京交通大学,2016.
WANG Yue. Durability of reactive powder concrete under the action of chloride salt freeze-thaw cycling and erosion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2016.
- [43] 民用建筑可靠性鉴定标准:GB 50292—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Standard for appraisal of reliability of civil buildings: GB 50292—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.
- [44] 张成琳,刘清风.钢筋混凝土中氯盐和硫酸盐耦合侵蚀研究进展[J].材料导报,2022,36(1):69-77.
ZHANG Chenglin,LIU Qingfeng. Coupling erosion of chlorides and sulfates in reinforced concrete:a review [J]. Materials Reports,2022,36(1):69-77.
- [45] GENG Y J,JIN Z Q,HOU B R,et al. Long-term behavior of fiber reinforced concrete exposed to sulfate solution cycling in drying-immersion[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition),2017,32(4):875-881.
- [46] CONDOR J,ASGHARI K,UNATRAKARN D. Experimental results of diffusion coefficient of sulfate ions in cement type 10 and class G[J]. Energy Procedia,2011,4:5267-5274.
- [47] LI T,WANG S S. Modeling diffusion coefficient of sulfate ion in concrete using probabilistic approach [J]. Construction and Building Materials,2019,215:435-446.
- [48] CHEN Y,LIU P,ZHANG R L,et al. Chemical kinetic analysis of the activation energy of diffusion coefficient of sulfate ion in concrete[J]. Chemical Physics Letters,2020,753:137596.
- [49] MONTEIRO P J M,KURTIS K E. Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(7):987-993.
- [50] ALI F. Is high strength concrete more susceptible to explosive spalling than normal strength concrete in fire? [J]. Fire and Materials,2002,26(3):127-130.
- [51] SO H S,YI J B,KHULGADAI J,et al. Properties of strength and pore structure of reactive powder concrete exposed to high temperatures[J]. ACI Materials Journal,2014,111(3):335-346.
- [52] BILOW D N,KAMARA M E. Fire and concrete structures [C]//ANDERSON D, VENTURA C, HARVEY D, et al. Proceedings of the 2008 Structures Congress. Vancouver:ASCE,2008:1-10.
- [53] 建筑设计防火规范:GB 50016—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press,

2014.

[54] 郝先慧. 活性粉末混凝土高温热工参数与温度场研究 [D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.

HAO Xianhui. Study on high temperature thermal parameters and temperature field of reactive powder concrete[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2018.

[55] KODUR V, BANERJI S, SOLHMIRZAEI R. Effect of temperature on thermal properties of ultrahigh-performance concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2020,32(8):04020210.

[56] 郑文忠,王 睿,王 英. 活性粉末混凝土热工参数试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(9):107-114.

ZHENG Wenzhong, WANG Rui, WANG Ying. Experimental study on thermal parameter of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Structures, 2014,35(9):107-114.

[57] NOUMOWE A, SIDDIQUE R, RANC G. Thermo-mechanical characteristics of concrete at elevated temperatures up to 310 °C [J]. Nuclear Engineering and Design,2009,239(3):470-476.

[58] National addition to eurocode 2-design of concrete structures; specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC); NF P 18-710 [S]. Paris:AFNOR,2016.

[59] Concrete-ultra-high performance fibre-reinforced concrete-specifications,performance,production and conformity;NF P 18-470[S]. Paris:AFNOR,2016.