

文章编号:1673-2049(2017)05-0154-09

大气环境下轻骨料混凝土耐久性能研究综述

吴涛,孙艺嘉,刘喜

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:介绍了国内外学者在大气环境下轻骨料混凝土耐久性能方面的工作及研究成果,揭示了轻骨料混凝土与普通混凝土碳化机理的差异,系统分析了影响碳化的主要因素,阐述了现有碳化深度预测模型的优缺点。结果表明:现有研究广泛采用快速碳化试验,对轻骨料混凝土实际工程碳化规律的探索主要集中在20世纪;基于试验研究的宏观预测模型较多,考虑微结构内 CO_2 扩散机制的理论模型较少;大气环境下结构服役寿命预测模型缺乏相关试验验证。建议今后重点从细观、宏观2个层面进一步探索快速碳化及大气环境下轻骨料混凝土劣化规律,基于扩散机制及化学反应动力学建立碳化理论模型,分析复杂环境作用和环境-荷载耦合作用下构件的时变性能特点。

关键词:结构工程;轻骨料混凝土;碳化;预测模型;影响因素

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

Review on Durability of Lightweight Aggregate Concrete in Atmospheric Environment

WU Tao, SUN Yi-jia, LIU Xi

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The work and research results on durability of lightweight aggregate concrete in atmospheric environment by domestic and foreign scholars were introduced. The difference of carbonation mechanism between lightweight aggregate concrete and normal concrete was analyzed. Main factors influencing the carbonation of lightweight aggregate concrete were expounded in details. The merits and disadvantages of existing prediction models were elaborated. The results show that the existing researches mainly focus on rapid carbonization tests, while studies of actual structures are mainly conducted in the 20th century. The prediction models are mainly established based on experiments rather than theoretical analysis. Finally, there is a lack of experimental verification for carbonization predictions in atmospheric environment. It is suggested that the researches should be conducted in the perspective of macro-scale and meso-scale. Further research on lightweight aggregate concrete time-varying regularity in the real and accelerated environments necessary. The theoretical models for lightweight aggregate concrete carbonation reaction need to be established based on chemical kinetics and diffusion mechanism. Durability of lightweight aggregate concrete under the complex corrosion environment and coupling effects of mechanics and environment should be analyzed in future.

Key words: structural engineering; lightweight aggregate concrete; carbonation; prediction model

收稿日期:2017-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51578072);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM5070,2017JQ5092);

陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-04)

作者简介:吴涛(1976-),男,安徽霍山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wutao@chd.edu.cn。

el; influence factor

0 引言

大气环境中的 CO_2 与混凝土发生碳化反应会导致混凝土的 pH 值下降,破坏钢筋表面在高碱度环境中形成的钝化膜^[1],促使混凝土中的结合氯离子转化为自由氯离子^[2],严重的还会引起混凝土收缩变形,影响结构的体积稳定性^[3]。在混凝土结构长期服役过程中,碳化引发的耐久性问题影响结构使用功能的发挥,降低结构使用寿命。

轻骨料混凝土(LWA)具有高强轻质、保温隔热性好、节能效果显著、工程综合造价低等优点^[4],其用量仅次于普通混凝土,在高层建筑、公共建筑及桥梁工程等领域得到了推广应用。与普通骨料相比,轻骨料具有密度低、孔隙率高和吸返水等特性,且不同轻骨料在形状、密度和表面形态等方面差异明显,使得轻骨料混凝土的碳化反应过程更为复杂。长期以来,轻骨料混凝土在大气环境下的耐久性能优劣一直存在争议。揭示大气环境下轻骨料混凝土材料及结构劣化时变规律,完善相关理论分析模型,不仅为轻骨料混凝土结构抗碳化耐久性设计提供参考,而且对促进其工程应用具有重要的推动作用。

本文论述了大气环境下轻骨料混凝土耐久性能的研究工作及成果。分析了轻骨料混凝土与普通混凝土抗碳化性能的差异,对今后研究的发展方向提出了意见和建议。

1 轻骨料混凝土碳化特性

1.1 抗碳化性能的评价

碳化是指空气中的 CO_2 渗透到混凝土的孔隙和毛细孔中,与混凝土中的碱性物质发生反应的过程^[2]。从化学反应的角度看,轻骨料混凝土的碳化机理与普通混凝土相同,是水泥水化产物在水的条件下与 CO_2 发生化学反应的结果,其主要生成物是碳酸钙,骨料不参与化学反应^[5]。轻骨料混凝土抗碳化耐久性能的优劣一直存在争议,以普通混凝土为参照对轻骨料混凝土抗碳化性能的优劣进行评价,学术界存在2种观点。

一种观点认为:轻骨料具有多孔性, CO_2 能够通过骨料中的孔隙扩散^[6-7],见图1。当混凝土保护层厚度不足或质量较差时,这些孔隙甚至能够建立起连接混凝土表面和钢筋的“桥梁”^[8]。普通骨料的渗透率较低,因此轻骨料混凝土抗碳化性能劣于同

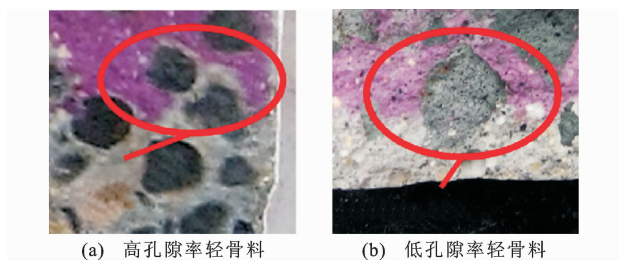


图1 轻骨料混凝土碳化前锋形状

Fig. 1 Carbonation Front Shapes of LWA

水灰比的普通混凝土^[9-11]。

另一种观点则认为:与相同强度的普通混凝土相比,轻骨料混凝土一般水灰比较低、水泥用量较高,导致砂浆密实度和可碳化物质含量均较高,使得轻骨料混凝土的抗碳化性能优于普通混凝土^[12-14]。此外,轻骨料的吸返水性能能够抑制 CO_2 在其内部扩散^[15],改善骨料-水泥石界面过渡区的孔隙结构^[16-18],促进矿物掺和料二次水化反应^[19-20],一定程度上延缓碳化反应进程^[21]。

1.2 实际工程碳化检测

为了评估大气环境下轻骨料混凝土的抗碳化性能,研究人员在室外暴露试验和实际工程碳化检测等方面开展了一些研究。

1.2.1 轻骨料混凝土结构碳化调查

1984年,Ohuchi等^[22]对日本多座桥梁的腐蚀情况进行调查,发现暴露19年的轻骨料混凝土碳化深度达到16~18 mm。1988年,Holm等^[23]对二战时期建造的轻骨料混凝土船只钻孔取样,发现碳化深度取决于船舰浸没于海水的位置,而且多年的侵蚀并未使碳化层达到钢筋表面。1995年,Osborne^[24]通过试验证明,室外暴露5年的轻骨料混凝土和普通混凝土碳化深度均很小,基本保持在1 mm以下。2000年,Thienel等^[25]对15座服役10~35年的轻骨料混凝土建筑进行碳化深度测试,结果表明随着轻骨料混凝土工作性能的提高,后期建造的结构耐久性有所提升。

1.2.2 与普通混凝土结构对比

1982年,周运灿^[26]的调查结果表明:同条件下使用7年浮石珍珠岩混凝土结构碳化深度为普通混凝土结构的2倍。1991年,Mays等^[27]对自然环境下暴露20年的16座轻骨料混凝土建筑钻芯取样,测得碳化深度介于6~25 mm之间,略大于相同条件下的普通混凝土建筑。2004年,由世岐等^[28]对已

有自燃煤矸石混凝土结构进行了碳化调查,发现其抗碳化性能略差于普通混凝土,但未造成工程质量问题。

实际工程碳化情况调查结果表明:轻骨料混凝土的抗碳化性能虽略低于普通混凝土,但倾向于满足耐久性要求。轻骨料混凝土碳化过程复杂,配比组成及环境条件是影响其碳化特性的重要因素,对此已有初步认识。

2 影响因素

2.1 水灰比

水灰比与混凝土的孔隙结构有密切联系,对CO₂的渗入和扩散产生重要的影响,进而对轻骨料混凝土抗碳化性能产生影响。

Swamy 等^[29-30]将膨胀页岩轻骨料混凝土试块放置于工业污染环境中 10 年,研究了水灰比对混凝土内部孔隙结构的影响,建立了孔结构特性参数 K_p 与碳化深度的试验公式。Bogas 等^[10]通过试验证明:只有碳化前端透过砂浆层达到骨料表面,轻骨料多孔性才会引起 CO₂ 加速扩散,减小水灰比可以延长 CO₂ 在砂浆层内扩散的时间,降低混凝土的碳化速率。Newman^[31]认为采用密实度较好的砂浆时,轻骨料孔隙给混凝土抗碳化性能带来的不利影响将会大大降低。张等^[32]通过试验证明:轻骨料混凝土的抗碳化性能随水灰比的减小而提高,并给出了碳化深度随着瞬时荷载比的变化趋势。本文搜集了文献^{[33]~[36]}的快速碳化试验数据,分别对水灰比 w/c 与碳化系数 k 进行拟合,见图 2,表明两者具有良好的线性关系。据此,一些学者提出了轻骨料混凝土碳化深度预测模型。

2.2 水泥用量

水泥用量决定了轻骨料混凝土可碳化物质的含量,是影响其碳化反应速率的另一个重要因素。

Holm 等^[22]将轻骨料混凝土良好的抗碳化性能一定程度上归因于配制混凝土时采用了较高的水泥用量。周运灿^[26]通过试验给出了浮石珍珠岩全轻、砂轻混凝土的最小水泥用量。龚洛书^[5,37]通过试验证明:水泥用量增加时,轻骨料混凝土的强度、密实性都随之提高,并通过回归分析得到了水泥用量对混凝土碳化的影响系数。Mircea 等^[38]选取了 260 根在不同自然环境下服役 10~12 年的梁,研究了混凝土碳化深度与水泥用量的关系,发现当水泥用量超过 400 kg·m⁻³ 时,轻骨料混凝土与普通混凝土抗碳化性能相当,而水泥含量较低时,轻骨料混凝土

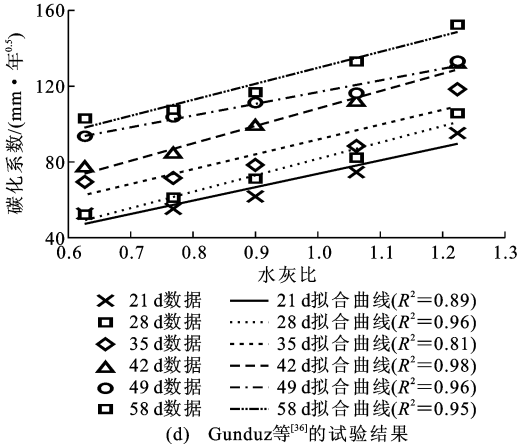
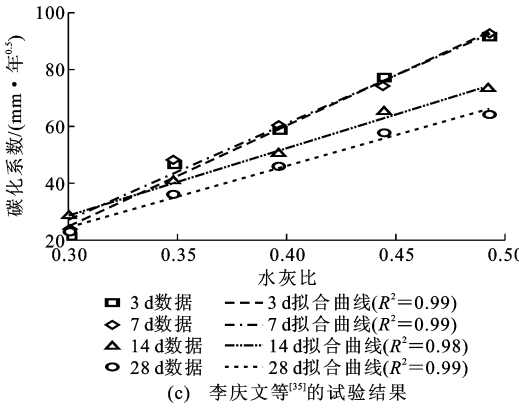
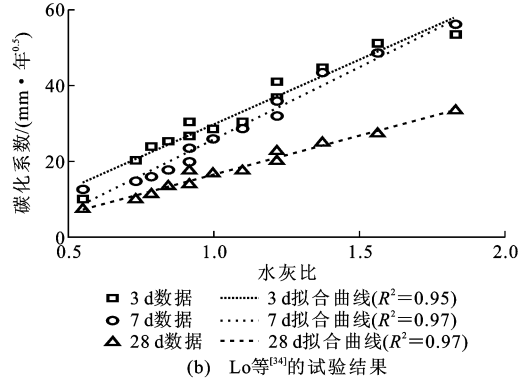
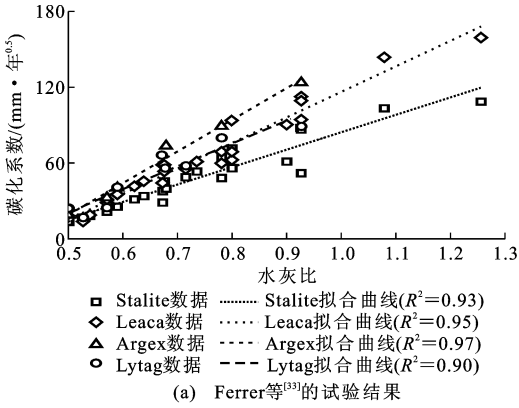


图 2 水灰比与碳化系数的关系

Fig. 2 Relationships Between Water Cement Ratio and k . 梁的碳化深度高于对照组 10%~30%。李庆文等^[35]认为碳化深度与水泥用量呈负相关,但单纯通

过增加水泥用量来延缓碳化的做法并不可取。

如前所述,较高的水泥含量也是轻骨料混凝土抗碳化性能优于同强度普通混凝土的重要原因。

2.3 矿物掺和料

在轻骨料混凝土中掺入粉煤灰(FA)、硅灰(SF)等矿物掺和料可以达到节约资源、减少环境污染的目的。矿物掺和料的火山灰反应会额外消耗碱性物质,导致混凝土中可碳化物质含量降低^[39],但反应的产物能够填充混凝土内部孔隙,改善其微观结构。因此,矿物掺和料对混凝土抗碳化性能的影响是以上 2 种作用耦合的结果^[40]。

Lo 等^[34]和 Bogas 等^[41]通过试验证明:低 FA 替代量对轻骨料混凝土碳化的影响很小,而高 FA 替代量使其抗碳化性能显著降低。王海龙等^[40]认为:对于天然浮石轻骨料混凝土,采用Ⅰ级粉煤灰替代水泥对孔隙细化的作用占主导地位,使其抗碳化性能提高。Gao 等^[42]发现采用Ⅱ级粉煤灰或超细粉煤灰等质量替代水泥均导致试样孔溶液 pH 值下降,而掺和料对抗碳化性能的影响主要取决于其细度。通过以上研究可以发现,由于 FA 的成分、细度以及碳化深度测量手段的不同,FA 对轻骨料混凝土抗碳化性能的影响尚未形成统一的结论,有待进一步研究。研究硅灰(SF)对轻骨料混凝土抗碳化性能的影响,主要采取单掺 SF 和双掺 FA+SF 两种方法,得到的试验结果基本一致:掺入 SF 导致轻骨料混凝土抗碳化性能降低^[41]。这是因为掺入 SF 对可碳化物质减少的作用大于对孔隙细化的效果,从而加速了碳化反应进程^[12,34]。

按照掺和料种类将碳化系数试验结果分为 3 类:粉煤灰、硅灰和粉煤灰+硅灰。将每项试验中掺合料替代率为 0% 的试件作为对照组,对碳化系数 k_c 进行量纲一化处理,采用碳化系数相对值作为评价指标。碳化系数相对值随矿物掺和料替代率变化曲线见图 3。

2.4 养护条件

水泥的水化程度和速率受到温度、湿度等养护条件的影响,轻骨料混凝土内部孔隙比较多,因此,良好的养护条件对保障轻骨料混凝土抗碳化性能的作用更为突出。

Haque 等^[43-45]对同强度的普通混凝土和轻骨料混凝土进行大量室外暴露试验,结果表明:总体上,轻骨料混凝土碳化深度大于普通混凝土,延长养护时间有利于减小二者差异,轻骨料混凝土对初始养护条件更加敏感;暴露 270 d 后,养护 7 d 的砂轻

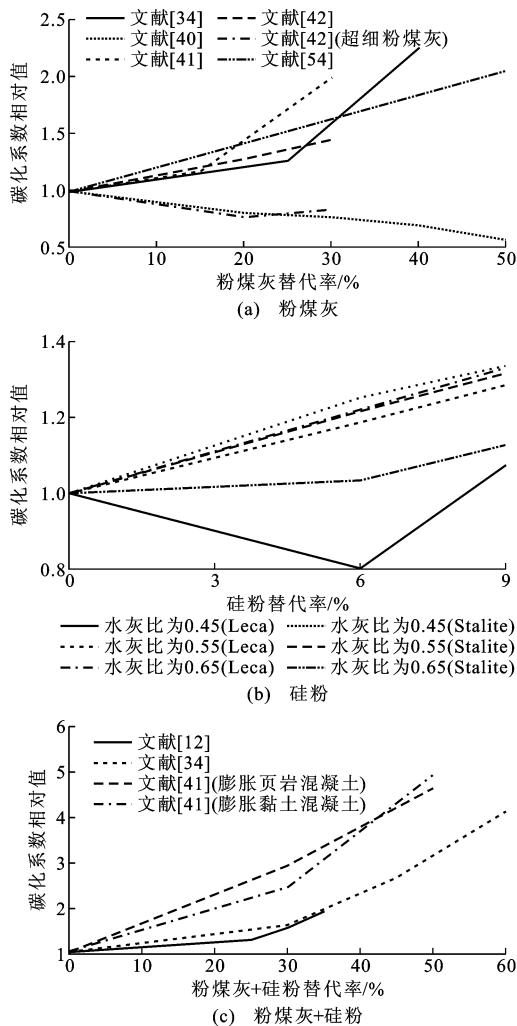


图 3 矿物掺和料替代率对碳化系数相对值的影响

Fig. 3 Effect of Mineral Admixtures Replacement Rate on Relative Value of Carbonation Coefficient

骨料混凝土碳化深度甚至低于同等条件下的普通混凝土;对于室外暴露 7 年的试块,良好的初始养护能够大幅降低轻骨料混凝土碳化深度。Lo 等^[34]发现热水养护会引起轻骨料混凝土密实度降低,导致试件碳化深度增大。张向东等^[46]的研究结果表明:煤矸石轻集料混凝土碳化深度与养护湿度呈负相关,与养护温度呈正相关。

可以看出,轻骨料混凝土养护条件对其抗碳化性能的影响不可忽略,在工程施工阶段加强养护对保障结构耐久性能具有重要作用。

3 轻骨料混凝土碳化深度预测

3.1 预测模型

目前,根据 Fick 第一定律建立的经典碳化模型已经得到众多学者的认可,其表达式为

$$x_c = k_c \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: t 为碳化时间; x_c 为混凝土碳化深度。

在此基础上, 龚洛书等^[37,47] 定量分析了骨料种类、水灰比、粉煤灰掺量及养护条件等因素对碳化深度的影响, 基于系数叠加原理对式(1)进行修正。

由世岐等^[28] 提出了自燃煤矸石混凝土的基准配合比, 通过控制变量法求得相应的影响因素系数。Bogas 等^[41] 对不同骨料、不同掺和料的轻骨料混凝土进行快速碳化试验, 发现 CO_2 接触骨料表面后扩散速率显著增大, 分段建立了水灰比-碳化系数计算

公式。

岳昌年等^[30] 根据混凝土中孔隙的大小、形状及分布规律提出了孔结构特性参数 K_p , 建立了孔结构特性参数 K_p 与碳化深度之间的经验公式。Ferrer 等^[33] 给出了抗碳化因子 R_{ca} 与水灰比之间的经验公式, 参照葡萄牙规范 LNEC E 465^[48] 采用半概率法建立了仅在碳化环境下的轻骨料混凝土结构使用寿命预测模型。具体碳化深度预测模型及其优缺点如表 1 所示。

表 1 轻骨料混凝土碳化预测模型

Tab. 1 Prediction Models of Carbonation of Lightweight Aggregate Concrete

数据来源	预测模型	备注
文献[47]	$x_c = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 k \sqrt{t}$ <p>式中: η_1 为水泥用量影响系数; η_2 为水灰比影响系数; η_3 为粉煤灰掺量影响系数; η_4 为水泥品种影响系数; η_5 为骨料品种影响系数; η_6 为养护方法影响系数; k 为碳化速率系数, 对轻骨料混凝土取 $k=4.18$。</p>	该模型从配合比设计的角度出发, 根据快速试验结果对式(1)进行修正, 参数简单, 便于工程应用。该模型基于特定的材料组成和环境条件建立, 影响因素考虑不够全面, 取值范围相对集中, 因此具有一定的局限性。
文献[41]	$x_c = x_0 + K_c t^{0.5}$ <p>$K_{c1} = 73.5(w/c) - 23.4 \quad w/c < 0.45 \text{ 且 } \rho < 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$</p> <p>$K_{c2} = \begin{cases} 265.4(w/c) - 101.4 & \rho < 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ 178.8(w/c) - 62.4 & 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} < \rho < 1\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ 130.5(w/c) - 45.7 & \rho > 1\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{cases}$</p> <p>式中: K_{c1} 为第一阶段碳化系数; K_{c2} 为第二阶段碳化系数; ρ 为骨料密度。</p>	该模型考虑了 CO_2 在水泥砂浆层和骨料内扩散速率的差异性, 量化了骨料密度对碳化速率的影响, 并证实了碳化系数与水灰比的线性关系不受掺和料影响。试验采用的骨料种类较少, 水灰比变化范围较小, 对掺和料的考虑亦不够全面, 因此该模型普适性不够。
文献[30]	$K_p = \eta V_T D_m$ $H_c = 0.012 K_p^{2.35}$ <p>式中: V_T 为膨胀页岩砂浆的总孔隙量; D_m 为平均孔径; η 为考虑“隔离孔”的系数; H_c 为平均碳化深度。</p>	该模型基于长期自然碳化暴露试验建立, 考虑了实际环境中温度、湿度和对 CO_2 扩散的作用, 提出的孔结构特性参数直接描述轻骨料混凝土特性, 具有明确的物理意义, 但该模型的应用一定程度上受试验条件和环境因素的限制。
文献[33]	$R_{ca, est} = \frac{0.108}{[(A w/c - B) \times 10^{-3}]^2}$ <p>式中: $R_{ca, est}$ 为加速碳化抗碳化因子; A, B 均为常量参数。</p> $t_{ic} = \left(\frac{R_{ca} c_1^2}{1.4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^n} \right)^{\frac{1}{1-2n}}$ <p>式中: t_{ic} 为设计腐蚀起始期; c_1 为保护层厚度; k_1, n, k_2 分别为相对湿度、干湿循环和养护条件系数; k_0 为经验系数; t_0 为基准时间(1 年)。</p> $t_L = t_{ic} + \gamma t_p$ <p>式中: t_L 为设计使用寿命; γ 为安全系数; t_p 为腐蚀扩展期。</p>	根据轻骨料混凝土构件碳化时变规律进行预测是该模型一大优势。该模型量化了材料组成和环境条件的影响, 揭示了碳化速率与水灰比之间函数关系, 考虑了钢筋锈蚀引起混凝土开裂对碳化作用的影响。同时, 在确定安全系数取值方面, 假设大气环境下结构服役寿命服从正态分布, 考虑了环境和结构本身的不确定性。抗碳化因子的计算依赖于经验数据, 由于试验研究结果易受到材料和操作的影响, 因此该模型有待进一步优化。

3.2 自然碳化深度预测及控制

混凝土碳化深度与环境中 CO_2 的浓度成反比, 国内外学者在此基础上, 结合前述的经典碳化模型, 建立了基于快速碳化试验的自然碳化深度预测模型

$$x_2 = x_1 \sqrt{\frac{t_2 C_2}{t_1 C_1}} \tag{2}$$

式中: x_1 为快速碳化试验时混凝土碳化深度; x_2 为混凝土自然碳化深度预测值; t_1 为快速碳化龄期; t_2

为自然碳化龄期; C_1 为快速碳化时 CO_2 浓度; C_2 为自然碳化时预测对象周围介质 CO_2 浓度平均值。

根据式(2)的模型, 文献[10]对轻骨料混凝土的碳化深度预测开展了一系列研究, 结果表明: 降低水灰比对延长碳化条件下轻骨料混凝土服役寿命起着重要作用; 文献[41]指出, 当水灰比小于 0.55 时, 即使采用高孔隙率的轻骨料, 混凝土碳化深度达到 40 mm 所需时间仍超过 50 年; 文献[49]预测膨胀黏土

轻骨料混凝土自然环境下碳化深度达到 25 mm 需要 67~170 年。吴晓斌等^[50]根据以上模型给出了钢纤维陶粒混凝土结构保护层厚度取值的建议。龚洛书等^[47]认为由于受环境气候条件中低温或潮湿等因素的影响,实际环境自然碳化的速度一般比快速碳化慢,因此这种预测方法偏安全。

规范编制方面,中国《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)^[51]规定结构用砂轻骨料混凝土抗碳化耐久性应按快速碳化标准试验方法检验,并给出了不同使用条件下 28 d 碳化深度限值。美国轻骨料混凝土结构规范 ACI 213R-03^[52]提出,在大气环境下保障混凝土保护层的厚度及质量是避免钢筋腐蚀的重要途径,而混凝土质量通常与其渗透性和变形能力相关。欧洲混凝土规范 EN 1992-1-1:2004^[53]规定了轻骨料混凝土结构的环境类别,包括不同湿度下的碳化环境等,并根据建筑物等级和环境类别明确了钢筋的最小保护层厚度。

4 后续研究工作建议

建议进一步开展大气环境下轻骨料混凝土耐久性能的相关研究工作如下:

(1)现有工作大多探讨轻骨料混凝土配合比中某种组分的影响,而材料配合比不能直接反映混凝土本身的特性,后续工作中应重点建立轻骨料混凝土特性参数(如孔隙率、可碳化物质含量等)与碳化速率之间的定量关系。

(2)轻骨料混凝土为骨料、水泥石和界面过渡区三相复合材料,应结合细观结构研究方法,明确 CO₂ 在各相中的扩散机制,探索碳化过程中化学成分和细观结构的变化。从整体的角度出发,按照材料组成-细观结构-碳化特性的层次建立轻骨料混凝土碳化数值模型。

(3)随着骨料品质及配制水平的提高,轻骨料混凝土的力学性能、工作性能及耐久性能均显著提升,因此有必要对高强、超高强轻骨料混凝土材料及结构的碳化规律进行深入探讨。

(4)以实际建筑为参照,开展同配合比轻骨料混凝土快速碳化对比试验,为大气环境下轻骨料混凝土结构服役寿命预测提供参考和依据。

(5)结合结构实际服役环境,明确内部钢筋锈蚀、轻骨料混凝土损伤及多种侵蚀介质耦合作用等对轻骨料混凝土碳化机制的影响并建立劣化模型。

5 结语

(1)试验研究方面,快速碳化试验应用广泛,采

用快速碳化法对影响因素进行分析能够获得较可靠的结果;对轻骨料混凝土实际工程的碳化检测主要集中在 20 世纪。

(2)数值模型方面,轻骨料混凝土碳化模型主要通过试验数据进行拟合或回归分析建立,考虑 CO₂ 传输机制和碳化反应的理论模型较少。

(3)大气环境下结构服役寿命预测模型主要基于快速碳化试验建立,但目前针对这类模型的试验验证很少,仍需进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 牛荻涛,孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1094-1099.
NIU Di-tao, SUN Cong-tao. Study on Interaction of Concrete Carbonation and Chloride Corrosion [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(8): 1094-1099.
- [3] 高英力,程 领,李 柯,等. 碳化作用下轻骨料混凝土干缩变形及影响规律[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(2): 440-444, 463.
GAO Ying-li, CHENG Ling, LI Ke, et al. Influence Laws and Dry Shrinkage of Lightweight Aggregate Concrete Under the Carbonization [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(2): 440-444, 463.
- [4] 丁建彤,郭玉顺,木村薰. 结构轻骨料混凝土的现状与发展趋势——第二届结构轻骨料混凝土国际会议介绍[J]. 混凝土, 2000(12): 23-26.
DING Jian-tong, GUO Yu-shun, KIMURA K. State-of-the-art of the Application of Structural Lightweight Aggregate Concrete in Foreign Countries [J]. Concrete, 2000(12): 23-26.
- [5] 龚洛书. 轻骨料混凝土碳化的试验研究[J]. 建筑节能, 1988(5): 1-6.
GONG Luo-shu. Experimental Study on Carbonization of Lightweight Aggregate Concrete [J]. Building Energy Efficiency, 1988(5): 1-6.
- [6] SCHULZE W, GUNZLER J. Corrosion Protection of the Reinforcement in Lightweight Concrete [C]// BROOKS A E. Proceedings of the First International Congress on Lightweight Concrete. London: Cement & Concrete Association of Great Britain, 1968: 111-

- 122.
- [7] BANDYOPADHYAY A K, SWAMY R N. Durability of Steel Embedded in Structural Lightweight Concrete [J]. *Materials and Structures*, 1975, 8(3): 203-210.
- [8] European Union. LWAC Material Properties State-of-the-art[R]. London: European Union, 1998.
- [9] 董作超. 煤矸石集料混凝土的力学性能与抗碳化试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
DONG Zuo-chao. Experimental Study on Mechanical Properties and Carbonation Resistance of Coal Gangue Aggregate Concrete[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [10] BOGAS J A, GOMES T. Mechanical and Durability Behaviour of Structural Lightweight Concrete Produced with Volcanic Scoria[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40(3): 705-717.
- [11] VIEIRA V M G. High-performance Lightweight Aggregate Concrete Durability and Microstructure[D]. Lisbon: LNEC, 2003.
- [12] LO T Y, TANG W C, NADEEM A. Comparison of Carbonation of Lightweight Concrete with Normal Weight Concrete at Similar Strength Levels[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8): 1648-1655.
- [13] BREMNER T W, HOLM T A, STEPANOVA V F. Lightweight Concretes — A Proven Material for Two Millennia[C]//SARKAR S L, GRUTZECK M W. *Advances in Cement and Concrete*. Durham: ASCE, 1994: 37-41.
- [14] VAYSBURD A M. Durability of Lightweight Concrete Bridge in Severe Environments[J]. *Concrete International*, 1996, 18(7): 33-38.
- [15] BOGAS J A. Characterization of Structural Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete[D]. Lisbon: Technical University of Lisbon, 2011.
- [16] 董淑慧, 张宝生, 葛 勇, 等. 轻骨料性能对界面区微观结构的影响[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(6): 1120-1124.
DONG Shu-hui, ZHANG Bao-sheng, GE Yong, et al. Effect of Property of Lightweight Aggregate on Microstructure in the Interfacial Transition Zone[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2009, 25(6): 1120-1124.
- [17] ELSHARIEF A, COHEN M D, OLEK J. Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(7): 1368-1376.
- [18] KE Y, ORTOLA S, BEAUCOUR A L, et al. Identification of Microstructural Characteristics in Lightweight Aggregate Concretes by Micromechanical Modelling Including the Interfacial Transition Zone (ITZ) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(11): 1590-1600.
- [19] 孔丽娟, 葛 勇, 张宝生, 等. 轻骨料的返水作用对粉煤灰二次水化的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(7): 1239-1243.
KONG Li-juan, GE Yong, ZHANG Bao-sheng, et al. Effect of Water Release of Lightweight Aggregate on Secondary Hydration of Fly Ash[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(7): 1239-1243.
- [20] ZHANG B S, KONG L J, GE Y. Influence of Lightweight Aggregate on Durability of High Performance Concrete[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 405-406: 197-203.
- [21] BENTZ D P, WEISS W J. Internal Curing: A 2010 State-of-the-art Review [M]. Gaithersburg: US Department of Commerce, 2011.
- [22] OHUCHI T, HARA M, KUBOTA N, et al. Some Long-term Observation Results of Artificial Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use in Japan[C]//ACI. *Proceedings of International Symposium on Long-term Observation of Concrete Structures*. Budapest: ACI, 1984: 74-82.
- [23] HOLM T A, BREMNER T W, VAYSBURD A. Carbonation of Marine Structural Lightweight Concretes [J]. *ACI Special Publication*, 1988, 109: 667-676.
- [24] OSBORNE B J. The Durability of Lightweight Aggregate Concretes After 10 Years in Marine and Acid Environments[C]//ACI. *Proceedings of the 1st International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord: ACI, 1995: 591-603.
- [25] THIENEL K C, SCHMIDT-DOHL F, FELDRAPPE V. In-situ Tests on Existing LWAC Structures[C]//HELLANDS, HOLAND I, SMEPLASS S. *Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Kristiansand: Ernst & Sohn Verlag, 2000: 1-11.
- [26] 周运灿. 浮石混凝土碳化与钢筋锈蚀的试验研究[J]. *低温建筑技术*, 1982(1): 1-9.
ZHOU Yun-can. Experimental Study on Carbonation and Steel Corrosion of Pumice Concrete [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 1982(1): 1-9.
- [27] MAYS G C, BARNE R A. The Performance of Lightweight Aggregate Concrete Structures in Service[J]. *The Structural Engineer*, 1991, 69(20): 351-360.
- [28] 由世岐, 刘 斌. 自燃煤矸石轻骨料混凝土碳化性能

- 综述[J]. 混凝土, 2004(6): 22-24.
- YOU Shi-qi, LIU Bin. Review of Carbonation Performance Spontaneous Combustion Gangue Lightweight Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2004(6): 22-24.
- [29] SWAMY R N, JIANG E D. Pore Structure and Carbonation of Lightweight Concrete After 10 Years' Exposure[J]. ACI Special Publication, 1993, 136: 377-396.
- [30] 岳昌年, 蒋恩德. 膨胀页岩混凝土的碳化深度与孔结构的关系[J]. 土木建筑与环境工程, 1985(2): 9-18.
- YUE Chang-nian, JIANG En-de. Correlation of the Pore Structure with Carbonation Depth of Solite Concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 1985(2): 9-18.
- [31] NEWMAN J B. Properties of Structural Lightweight Aggregate Concrete [C]//CLARKE J L. Structural Lightweight Aggregate Concrete. Glasgow: Chapman & Hall, 2013: 19-44.
- [32] 张 等. 轻集料混凝土抗渗及抗碳化性能研究[J]. 湖南交通科技, 2015, 41(2): 136-138.
- ZHANG Deng. Study on Impermeability and Carbonization Resistance of Lightweight Aggregate Concrete [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2015, 41(2): 136-138.
- [33] FERRER B, BOGAS J A, REAL S. Service Life of Structural Lightweight Aggregate Concrete Under Carbonation-induced Corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 161-171.
- [34] LO T Y, NADEEM A, TANG W C P, et al. The Effect of High Temperature Curing on the Strength and Carbonation of Pozzolanic Structural Lightweight Concretes[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1306-1310.
- [35] 李庆文, 张向东, 李桂秀, 等. 自燃煤矸石轻骨料混凝土碳化深度研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2616-2620.
- LI Qing-wen, ZHANG Xiang-dong, LI Gui-xiu, et al. Study on Carbonation Depth of Spontaneous Combustion Coal Gangue Lightweight Aggregate Concrete [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2616-2620.
- [36] GUNDUZ L, UGUR I. The Effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using Any Admixtures [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(9): 1859-1864.
- [37] 龚洛书. 关于轻集料混凝土抗碳化耐久性指标的规定[J]. 混凝土, 1991(2): 3-8.
- GONG Luo-shu. Provisions on Durability Indexes of Lightweight Aggregate Concrete Against Carbonization[J]. Concrete, 1991(2): 3-8.
- [38] MIRCEA D, LOANI A, FILIP M, et al. Long-term Durability of Reinforced and Prestressed Elements in Aggressive Environments[J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(2): 135-140.
- [39] 万朝均, 张廷雷, 陈璐圆, 等. 粉煤灰水泥石碳化性能的化学分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1102-1111.
- WAN Chao-jun, ZHANG Ting-lei, CHEN Lu-yuan, et al. Chemical Analysis of Carbonation of Fly Ash Blended Cement Pastes[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1102-1111.
- [40] 王海龙, 申向东. 粉煤灰对轻骨料混凝土耐久性影响的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2009(4): 1-4.
- WANG Hai-long, SHEN Xiang-dong. Experimental Study on Influence of Fly Ash on Durability of Lightweight Aggregate Concrete[J]. New Building Materials, 2009(4): 1-4.
- [41] BOGAS J A, REAL S, FERRER B. Biphasic Carbonation Behaviour of Structural Lightweight Aggregate Concrete Produced with Different Types of Binder [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 71: 110-121.
- [42] GAO Y, CHENG L, GAO Z, et al. Effects of Different Mineral Admixtures on Carbonation Resistance of Lightweight Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43(6): 506-510.
- [43] HAQUE N, AL-KHAIAT H. Strength and Durability of Lightweight Concrete in Hot Marine Exposure Conditions[J]. Materials and Structures, 1999, 32(7): 533-538.
- [44] AL-KHAIAT H, HAQUE N. Strength and Durability of Lightweight and Normal Weight Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 231-235.
- [45] HAQUE M N, AL-KHAIAT H, KAYALI O. Long-term Strength and Durability Parameters of Lightweight Concrete in Hot Regime: Importance of Initial Curing[J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 3086-3092.
- [46] 张向东, 李庆文, 李桂秀, 等. 自燃煤矸石轻集料混凝土碳化性能试验研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(3): 40-42, 51.
- ZHANG Xiang-dong, LI Qing-wen, LI Gui-xiu, et al. Experiment Study on Carbonation Resistance of Spon-

taneous Combustion Coal Gangue Lightweight Aggregates Concrete[J]. Non-metallic Mines, 2015, 38(3): 40-42, 51.

[47] 龚洛书, 苏曼青, 王洪琳. 混凝土多系数碳化方程及其应用[J]. 混凝土, 1985(6): 10-16.

GONG Luo-shu, SU Man-qing, WANG Hong-Lin. Concrete Multi-coefficient Carbonation Equation and Its Application[J]. Concrete, 1985(6): 10-16.

[48] LNEC E 465, Concrete-methodology for Estimating the Concrete Performance Properties Allowing to Comply with the Design Working Life of the Reinforced or Prestressed Concrete Structures Under the Environmental Exposures XC and XS[S].

[49] BOGAS J A, BRITO J D, CABACO J. Long-term Behaviour of Concrete Produced with Recycled Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(13): 470-479.

[50] 吴晓斌, 曾志兴. 钢纤维陶粒混凝土碳化深度试验研究[J]. 混凝土, 2009(9): 79-82.

WU Xiao-bin, ZENG Zhi-xing. Experimental Research on Steel Fiber-ceramic Concrete Carbonation Depth [J]. Concrete, 2009(9): 79-82.

[51] JGJ 51—2002, 轻骨料混凝土技术规程[S].

JGJ 51—2002, Technical Specification for Lightweight Aggregate Concrete[S].

[52] ACI 213R-03, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete[S].

[53] EN 1992-1-1: 2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings[S].

[54] AKCAOZUGLU S, ATIS C D. Effect of Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash Addition on the Strength Properties of Lightweight Mortars Containing Waste PET Aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 4052-4058.