

结构轻盈的骨料混凝土的碳化和氯化物渗透阻力研究进展

索菲亚·博加斯, 亚历山大·雷亚

所属机构: 土木工程研究与可持续发展创新机构, 葡萄牙

摘要: 本文综述了结构轻骨料混凝土 (SLWAC) 的耐久性。讨论了钢筋混凝土的主要运输特性和降解机理, 即碳酸化和氯化物侵蚀, 还分析了主要成分参数的影响, 例如骨料类型, 粘合剂类型和水/粘合剂比率, 以及开裂的影响。最后, 评估了SLWAC使用寿命预测的当前知识。虽然对SLWAC耐久性能的了解仍然有限, 但在实验室或实际环境中进行的调查工作表明, SLWAC可以具有与正常重量混凝土更好的耐久性能, 特别是当考虑相同的强度水平的时候。另外, 本文强调了浆料质量对轻质骨料特性的重要性。关于SLWAC的耐久性标准化仍然不足, 是当前知识的主要差距之一。本综述的目的是促进对SLWAC的耐久性和使用寿命预测的更好理解, 从而有助于增强使用此类混凝土的信心。

关键词: 轻质骨料混凝土; 耐用性; 碳酸化; 氯化物渗透

The Carbonation and Chloride Penetration Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete: A Review

Sofia Bogas, Alexander Rea

Affiliation: Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Portugal

Abstract: This paper presents a comprehensive review on structural lightweight aggregate concrete (SLWAC) durability. The main transport properties and degradation mechanisms of reinforced concrete are addressed, namely, carbonation and chloride attack. The influence of the main composition parameters, such as type of aggregate, type of binder and water/binder ratio, as well as the influence of cracking, are also analysed. Finally, the current knowledge of SLWAC's service life prediction is assessed. Although the knowledge of SLWAC's durability behaviour is still limited, investigation works performed either in laboratory or in real environments indicate that SLWAC can have similar to better durability performance than normal weight concrete, especially when the same strength level is considered. The importance of the quality of the paste over the characteristics of the lightweight aggregates is highlighted. Durability standardization regarding SLWAC is still insufficient and is one of the main gaps of current knowledge. The objective of this review is to foster a better understanding on the durability and service life prediction of SLWAC, contributing to a greater confidence in using this type of concrete.

Keywords: Lightweight aggregate concrete; Durability; Carbonation; Chloride ingress

引言:

混凝土是一种准脆性材料, 在其整个使用寿命期间极易形成裂缝。混凝土中裂缝外观背后的原因包括设计不良, 机械作用, 湿热变化, 收缩等。当内部拉伸应力超过其最佳拉伸强度时, 混凝土中往往会形成裂缝。新创建的路径可能会增加混凝土对水和有害物质的渗透性, 从而对其耐久性产生负面影响。通过劈裂拉伸试验进行预开裂的研究表明, 对于超过0.05 mm的裂纹宽度, 特别是高达0.2 mm的裂缝宽度, 磁导率受到显著影响。对

于宽度大于0.2 mm的裂缝宽度, 渗透率持续增加, 但速度较低。在另一项研究中, 考虑具有自然和人工裂缝的混凝土试样, 渗透系数随裂缝宽度(0.1–0.5 mm)的抛物线增加。

结构轻骨料混凝土 (SLWAC) 由于其密度低、比强度高、抗振性能好、隔热性能好等特点, 在高建筑和大跨度桥梁中的应用越来越多。更重要的是, 与普通的波特兰水泥混凝土 (OPC) 相比, 重量减轻了20%。但它也可以保持更高的强度。因此, 减小结构截面尺寸,

增加跨度和层数以及降低成本具有重要意义。至于社会和环境的影响,大多数人造轻质骨料使用工业固体废物进行生产。因此,有充分的理由相信SLWAC具有很强的市场竞争力,很快会在土建结构中得到广泛应用。

虽然SLWAC已经使用了2000多年,但它在二十世纪中叶的建筑中才具有更大的相关性,特别是在自重是相关因素的解决方案中,例如在高层建筑,外壳和细长结构,大跨度桥梁和修复工程中。从那时起,SLWAC一直是正在进行的技术和科学发展的主题,特别是在过去三十年中,在高性能混凝土的技术开发,新外加剂的研究和应用,制造新型轻质骨料(LWA)的进步之后,最重要的是,由于海洋结构中更严格的耐久性要求,SLWAC可能会使负载降低的百分比增加一倍。

然而,尽管进行了研究工作,但知识仍然有限,特别是与普通重量混凝土(NWC)相比。一方面,第一代SLWAC的生产成本较高,质量较低,对其应用的信心较差,阻碍了其在建设中的肯定。另一方面,SLWAC特性可以根据LWA的类型和混凝土成分而有很大差异,这使得它们的表征更加复杂。

关于SLWAC的耐久性行为,知识甚至更少。该领域进行的研究表明,SLWAC的耐久性和使用寿命性能受到各种因素的影响,例如LWA的类型,混凝土成分,暴露和测试条件,含水量和劣化机理,这使得其解释和一般表征变得困难。

尽管如此,SLWAC的充分耐用性已经通过这种材料应用于旧结构的卓越性能得到了证明。一个多世纪以来,世界大战期间一直受到恶劣环境条件影响的船舶生产证明了SLWAC在恶劣海洋环境中的性能。在前苏联,SLWAC在造船业中的使用也非常重要。经过15-40年的航行经验,没有观察到明显的腐蚀现象。

混凝土协会的一项调查总结了SLWAC在北美,前苏联和西欧道路结构中的使用,表明SLWAC的耐用性至少相当于NWC。SLWAC耐用性的最重要例子之一归功于威廉普雷斯頓巷纪念桥,建于1952年,位于马里兰州安纳波利斯的切萨皮克湾上。悬架跨度是用24 MPa的SLWAC和0.4的水/水泥比(w/c)建造的,而进近跨度是在NWC中建造的。1975年,岩石学和超声分析显示SLWAC的显着完整性和NWC的高度恶化,导致选择使用SLWAC重建NWC跨度。

Mays和Barnes对联合王国的40个结构进行了全面检查,包括桥梁,停车场和建筑物,这表明SLWAC的耐用性不亚于NWC。Thienel等人还报告了来自德国15种结构的不同类型的SLWAC的冷冻和解冻,碳酸化和氯化物侵蚀的良好耐久性。这两项研究表明,SLWAC最终的耐

久性差可能与其生产过程和更大的聚集体偏析趋势有关。

SLWAC的耐用性也已通过其在海洋结构(即大跨度桥梁和海上结构)中的应用经验所证明。关于SLWAC在这些结构中的耐久性能的各种调查,包括实验室和原位测试,表明SLWAC中的氯化物渗透电阻往往至少与NWC一样高。

然而,尽管有一些良好性能的例子,但关于SLWAC耐久性行为的知识仍然很少,并且与传统的NWC相比,劣化机制的主导程度较低。如今,由于其多孔性,SLWAC仍然被视为不如NWC耐用,无论骨料和混凝土成分的类型如何。出于这个原因,一些规范性文件保守地建议,对于给定的强度水平,SLWAC比NWC更厚的混凝土覆盖层证据不足,而没有考虑混凝土类型和劣化机制。此外,由欧洲主要标准规定的所需使用寿命的组合物仅针对NWC进行定义或大致调整为SLWAC,而没有广泛的实验基础。因此,SLWAC的耐久性和使用寿命评估在过去几年中一直是深入研究的主题,这有助于提高使用SLWAC的信心。

本文讨论了SLWAC耐久性方面最相关的进展,这些进展受到两种最常见和最严重的具体恶化机制的影响:碳酸化和氯化物引起的腐蚀。首先,考虑到NWC的主要差异,回顾了SLWAC的主要传输特性,这些特性直接影响其耐久性。然后,讨论了关于SLWAC的碳酸化和氯化物渗透阻力及其使用寿命性能的最相关发现和最新调查。本综述的目的是促进对SLWAC的耐久性和使用寿命预测的更好理解,并突出该领域未来的一些研究需求。

碳化

一、骨料类型的影响

二氧化碳通过混凝土的扩散速率主要由其多孔结构的特性决定。由于它们的孔隙率较高,LWA的碳化电阻低于NWA,这有利于二氧化碳(CO₂)的扩散。此外,与胶凝基质相反,LWA不具有CO₂结合能力。事实上,Schulze和Gü n zler证实了LWA地区比通过周围散装水泥基质更深的碳化前沿。

一般来说,SLWAC中观察到的碳酸化比NWC高。Brown和Beeby观察到SLWAC与FA LWA的平均碳酸化深度比在NWC中平均碳化深度高出约90%。Gü n d ü z和Ug 您提到了碳酸化速率的dec r易用性,随着SLWAC中浮石LWA中LWA/水泥比率的降低,这表明了LWA的有效参与。Zhao等人还发现,通过提高粗砂和细废粘土砖骨料SLWAC中细骨料与总骨料的体积比,28天后碳酸化速率加快。结果还归因于这些聚集体的火山灰活性增加,这是由于其比表面积的增加,这减少了可用于碳酸化的氢氧化钙的量。

Bogas 和 Gomes 研究了 SLWAC 在粗和细火山 壁 LWA 和 w/c 为 0.35 和 0.65 的碳酸化行为。作者发现, 由于高孔性或缺乏致密的骨料外壳, SLWAC 中的碳酸化速率大于相同成分的 NWC, 与 w/c 无关。维埃拉在 SLWAC 中也获得了更高的碳酸化深度, 其中膨胀粘土 LWA 具有高孔隙率, 而不是在 NWC 中具有相同的 w/c 。尽管如此, 具有更致密 LWA 的 NWC 和 SLWAC 呈现出相似的碳酸化深度。

根据 Bogas 等人的说法, LWA 在碳酸化中的参与程度不仅取决于 LWA 的特性, 还取决于周围浆料的质量。当 LWA 包裹在高 w/c 糊中时, LWA 对碳酸化的影响应大于在密度较高的基质中。许多作者强调了通过高质量浆料有效分散和参与 LWA 颗粒的重要性, 以避免在混凝土表面和钢筋之间通过 LWA 颗粒建立扩散桥, 增加腐蚀风险。考虑到这一点, Vaysburd 建议, 对于密度低于 1300 kg/m^3 的 LWA, 混凝土覆盖层的厚度至少需要比最大 LWA 尺寸高两倍。但是, 此建议可能过于保守, 还应考虑糊状物的质量。事实上, 一些作者报告说, 高碳化电阻 SLWAC 可以通过低 w/c 浆料来实现。Bogas 评估了 SLWAC 对各种类型的 LWA 的碳化电阻, 粘合剂的类型和数量以及 0.35–0.65 的 w/b 。笔者认为, 对于低于 0.4 的 w/c , SLWAC 和 NWC 中的碳酸化深度不显著, 这些混凝土表现出相似的碳酸化性能。然而, 对于较高的 w/c , 碳化深度显著, NWC 的碳化电阻高于 SLWAC。

许多作者报告说, SLWAC 中的碳化率低于相同强度的 NWC。事实上, 对于相同的强度水平, SLWAC 通常具有比 NWC 更致密的基体, 因为水泥含量更高, w/c 更低, 因此降低了渗透性。因此, 在 SLWAC 中, 可碳化物质的量和基质的保护能力往往高于相同强度水平的 NWC, 有助于降低碳化深度。Lo 等人证实了在具有相同强度的膨胀粘土 LWA 的 SLWAC 中比在 NWC 中具有更高的碳化电阻。然而, 在 NWC 中 SLWAC 碳酸化率略低, 并且在具有开放孔隙结构的糊剂中 LWA 的参与增加。Lo 等人认为, 与同等强度的 NWC 相比, 具有 FA LWA 的 SLWAC 的碳化电阻高于其质量。Bremner 等人测量了 SLWAC 和 NWC 在不同强度水平下的碳酸化性能。作者得出结论, SLWAC 中的碳酸化深度低于同等强度的 NWC, 并提到高质量的浆料是充分碳酸化行为的基本方面。与同等抗压强度的 NWC 相比, Al-Khaiat 和 Haque 在 SLWAC 中观察到具有粗和细 FA LWA 的碳酸化深度略高。然而, 对于大于 1 周的固化期, 与具有较高水合水平的糊剂相关, SLWAC 和 NWC 的碳酸化抗性相当。考虑到相同的强度水平, Haque 等人在 SLWAC 中提到了具有粗 FA LWA 和 NWC 的相似碳酸化深度。

水含量对 SLWAC 中 CO_2 扩散的影响表现为两种方式。一方面, SLWAC 的干燥期比 NWC 的干燥期长。因此, 预计会有更高的碳化阻力, 至少直到环境和混凝土之间达到 hygral 平衡为止。另一方面, 一旦混凝土的 RH 降低, 存储在 LWA 中的水就会迁移到糊状物中, 使它们能够参与气体扩散。干燥后, LWA 的再饱和度很困难。

与 NWC 相反, 据报道抗压强度和抗碳化性之间的相关性较差, 因为两种性质受 LWA 的影响不同。例如, 对于具有低 w/b 的 SLWAC, 骨料的类型对碳化电阻影响不大, 而对抗压强度的影响很大。当根据抗压强度指定 SLWAC 的耐久性时, 必须考虑这一点。

前面讨论的方面强调了 SLWAC 比传统 NWC 更复杂的碳酸化行为。市售 LWA 的多样性允许生产具有广泛密度和抗压强度等级的 SLWAC, 这使得 SLWAC 碳酸化行为的一般表征变得困难。在此背景下, Bogas 等人开发了一项涉及各种混凝土组合物的综合工作, 这使我们能够更好地理解和表征常见 SLWAC 的碳酸化行为, 如下一章所述。

二、双相碳酸化模型

基于涉及 SLWAC 的广泛实验工作, 具有四种类型的 LWA, 不同的孔隙率, 九种类型的粘合剂和三种 w/b , Bogas 等人提出了一个双相模型, 以更好地描述 SLWAC 的碳酸化行为。根据该模型, 在第一阶段, 直到碳酸化前沿克服 $D_{\text{max}}/2 - D_{\text{max}}$ 厚层(粗骨料的直径), 其中粗 LWA 的存在受到限制, 由于众所周知的壁效应, SLWAC 的碳酸化速率与相同成分的 NWC 相似, 基本上取决于在粘贴的属性上。在第二阶段, LWA 的参与变得有效, SLWAC 的碳酸化速率根据 LWA 的密度而变化。当通过浇注表面发生碳酸化时, 该模型无效, 这在实际混凝土结构中很少见。基于该模型, 作者将 SLWAC 在两个阶段的碳酸化行为典型化为 w/c 和 LWA 密度等级的函数。根据作者的说法, 该模型可以解释文献中提出的一些明显矛盾的结果, 即, 将加速碳酸化结果与具有小碳酸化深度的自然暴露测试进行比较时。事实上, 由于碳酸化机理对于 SLWAC 来说是一个缓慢的过程, 具有良好的质量膏体; 过渡点只能长期达到, SLWAC 的性能可能与 NWC 的性能相同, 使用寿命合理。

三、粘合剂类型的影响

Bogas 等人发现, 用不同类型和体积的矿物外加剂(即 SF, FA 和 LF (6–9%SF, 15–30%FA, 15–30%LF 和 30–50%SF + FA) 部分替代原有波特兰水泥(OPC), 提高了 SLWAC 和 NWC 的碳酸化率。此外, 当这些外加剂被视为相同水泥含量的添加材料时, 没有发现显著的改善。事实上, 作者得出结论, 这些混合物对碳酸化速率

的潜在贡献可以被忽视。考虑到这一点, 建议使用一般方程来确定碳化系数作为 w/c 以及 LWA 的类型和类别的函数, 而不管粘合剂的类型和数量如何。这些表达式是为作者提出的双相模型的不同阶段定义的。

Lo 等人研究了 SLWAC 与发泡粘土 LWA, 25%FA 和 5-10%SF 的加速碳化。作者还得出结论, FA 为 25% 的 SLWAC 中的碳化速率与具有 OPC 的 SLWAC 相当。然而, 作者发现与 FA 和 SF 的三元混合物中的碳化率更高, 这意味着在这种情况下, 糊状微观结构的细化不如可碳化物质的减少相关。Gao 等人研究了 20~30%OPC 替代粗 FA 和粉碎 FA 对 SLWAC 加速碳化电阻 ($20\%CO_2$) 的影响, w/b 为 0.31, 最长可达 56 d。含 FA 的 SLWAC 中的碳化深度和 pH 溶液高于使用 OPC 的参考 SLWAC。然而, PFA 为 20% 的 SLWAC 的碳化深度仅为参考 SLWAC 的 78%。PFA 为 30% 的混凝土的碳化深度仍低于参考 SLWAC, 但高于 PFA 为 20% 的混凝土。作者将结果归因于粉碎的 FA 和颗粒状的高炉炉渣比水泥更细, 导致多孔水泥基质更少。在另一项研究中, Huberor á 和 Hela 分析了 SLWAC 在膨胀粘土 LWA 中的耐久性, w/b 为 0.33-0.35, 强度等级为 LC30 / 33-LC35 / 38, 暴露于碳化环境 12 个月。按水泥体积计算, 含有 40%FA 的混合物比含有 5%SF 或 40%LF 的混合物更具抵抗力。

四、真实环境中的抗碳化性

Holm 等人测量了第二次世界大战期间建造的混凝土船舶钻探的岩芯的碳化深度。岩心是从水准范围到最高水位 5 米的区域提取的。尽管在弗吉尼亚州查尔斯角的切萨皮克湾暴露在恶劣的海洋环境中超过五十年, 但碳化深度分别为 1 毫米, 1-2 毫米且不存在, 分别从主甲板, 翼壁以及船体和舱壁上取下的标本。这些结果归因于混凝土的高水泥含量和高质量。

Holm 等人, Holm 和 Bremner 在暴露 35 年后研究了切萨皮克湾大桥混凝土的长期碳化。碳化深度分别达到 2-8 mm 和 2-13 mm, 分别从桥面顶部和底部提取的岩心。作者解释说, 底面较高的碳化深度是由于与桥梁这一侧较干燥的混凝土相关的气体扩散增加, 以及桥面顶部的碳化深度减少, 桥面上覆盖着 36 毫米的沥青磨损过程, 本应抑制干燥。此外, 作者报告了柯萨奇交换桥 15 年暴露的甲板表面的结果, 该结果分别显示顶部表面和底部岩心中只有 5 毫米和 10 毫米的碳化深度。

氯化物渗透

一、骨料类型的影响

预计 SLWAC 中更高的氯化物扩散, 因为尽管 LWA 具有较高的孔隙率, 但 LWA 不具有氯化物结合能力。然而, 许多作者报告说, SLWAC 的氯化物渗透电阻往往至

少与 NWC 一样高。根据 NT Build 492 进行的快速氯化物迁移试验 (RCMT) 的氯化物迁移系数在 SLWAC 和 NWC 中相似, 对于不同的 w/c 。事实上, 尽管 LWA 往往比周围的基质更具渗透性, 但一些研究表明, 浆料提供的保护, 即高致密性, 以及 SLWAC 中聚集体膏 ITZ 的更好质量, 可以在相同成分的 SLWAC 和 NWC 中产生相似的氯化物渗透阻力。因此, 氯化物的渗透应基本上由基质的性质决定。

Kayali 和 Zhu 将 SLWAC 板与烧结 FA LWA 和 0.24 的 w/b 浸入 2% 氯化物溶液中超过 15 个月。作者发现, SLWAC 板坯在 5 毫米深度处表现出最少量的游离氯离子浓度, 与浸泡天数无关。作者认为, LWA 可能充当保护性储层, 吸收氯离子溶液, 从而防止氯离子到达钢表面。

Real 等人证实了 SLWAC 和 NWC 中相似的 RCMT 氯化物迁移系数, 尽管考虑了具有非常不同类型的 LWA, 不同类型和数量的矿物掺合剂的混凝土以及 0.35-0.55 的 w/b 。Liu 等人在 SLWAC 中获得了类似的结论, 其中发泡粘土 LWA 和 w/c 为 0.38, Liu 等人在 SLWAC 中获得了类似的结论, 其中发泡粘土 LWA 和 w/b 为 0.3 和 0.45。Youm 等人也报告了类似的趋势, 考虑到 SLWAC 中的 RCMT 具有扩展的板岩和 0.25 的 w/b 。此外, Real 等人还发现, 当用不同体积的粗 LWA 测试混凝土时, 氯化物迁移系数几乎没有受到影响, 这证实了氯化物迁移系数基本上受糊状物特性的影响。Bogas 也获得了类似的发现。

根据 ASTM C1202, Hammer 和 Smeplass 进行了快速氯化物渗透性测试 (RCPT), 得出的结论是 LWA 的类型对于 SLWAC 的氯化物扩散率不显著。通过 RCPT 以及浸渍和盐池测试, Chia 和 Zhang 还在 SLWAC 中发现了相当的通过电荷和氯化物穿透深度, 膨胀粘土 LWA 和 w/b 为 0.35 和 0.55, 并且在 NWC 中具有相同的成分。通过对分裂的 SLWAC 标本的检查, 在 LWA 颗粒内部发现不到 0.15% 的游离氯离子, 表明大多数氯离子没有穿透 LWA。这归因于 LWA 的密集外壳和 ITZ 的高质量。

然而, Real 等人发现, 具有更多孔 LWA 的 SLWAC 比相同成分的 NWC 具有更高的氯化物迁移系数, 特别是对于高 w/b 。Vieira 和 Youm 等人也获得了类似的趋势。维埃拉认为, 试样先前的真空饱和可能允许 LWA 参与氯化物迁移过程。根据 Bogas 和 Gomes 的说法, LWA 的弱影响应该与混凝土的低含水量更相关, 因为只要混凝土 RH 的小幅降低 (<5%), LWA 就会部分干涸。

二、氯化物进入海洋环境

对海洋结构和长期实际环境暴露条件的标本进行了各种调查。一般来说, SLWAC 的氯化物渗透电阻可以与 NWC 一样高, 这与文献中提出的实验室研究一致。如

前所述, 日本, 挪威和北美现有结构的各种示例表明SLWAC对氯化物侵蚀的高潜在耐久性。

Polder等人报告说, SLWAC中的氯化物进入量低于具有相似抗压强度的NWC, 经受18年的暴露。然而, SLWAC的粘结剂含量更高, w/b 低于NWC, 这可能证明结果是合理的。

Real和Bogas进行了全面的实验研究, 涉及65个SLWAC和NWC板坯标本, 涵盖广泛的密度(D1.6-2.0)和强度等级(LC20/22-LC55/60), 经受不同的实际暴露条件, 即XS1(暴露于空气中的盐, 但不直接接触海水区), XS2(永久淹没区)和XS3(潮汐, 飞溅和喷溅区)。暴露3年后, 作者发现SLWAC的氯化物扩散通常倾向于与相同成分的NWC相似, 至少 w/c 高达0.55。Thomas和Bremner在具有膨胀页岩LWA的SLWAC和相同年龄和成分的NWC中发现了等效的氯化物渗透行为, 在具有0.4-0.6的 w/c 和高炉渣量的混凝土块中, 暴露在缅因州东部港口海岸Treat岛上海洋暴露地点的恶劣潮汐带中25年。Moffatt等人也提到了同样的情况, 对于具有膨胀页岩和膨胀粘土LWA的SLWAC, FA和 w/b 比为0.38, 在暴露于恶劣海洋环境21年后。

碳化和氯化物腐蚀的使用寿命预测

在现行标准中, 使用寿命是使用规范性方法或基于性能的方法定义的。在规范方法方面, 在欧洲国家, EN 206建议最大 w/c , 最小水泥含量和最小抗压强度的成分限制。EN 1992-1-1对此进行了补充, EN 1992-1-1定义了钢筋混凝土覆盖层的最低要求, 以确保至少50年的使用寿命。但是, EN 206仅考虑了NWC, 没有为SLWAC提供建议。反过来, EN 1992-1-1确定, 对于SLWAC, 无论暴露等级如何, 都应在为NWC定义的最小混凝土覆盖层中添加5毫米。

在葡萄牙, LNEC规范E 464是EN 206要求的扩展。本规范为使用不同类型的粘合剂生产的NWC和SLWAC提供了建议。但是, 建议的限值仍然没有得到充分的证实。例如, 如前所述, SLWAC耐久性不应被确定为机械强度的函数。

另一方面, 基于性能的方法允许基于具体性能的使用寿命预测。然而, 使用寿命由劣化机制决定, 劣化机制受几个参数的影响, 例如混凝土成分和固化, 暴露和测试条件。这些机制的复杂性解释了为什么建议在使用寿命设计中使用简化模型。

Ferrer等人研究了SLWAC在碳化诱导腐蚀下的使用寿命。作者采用了LNEC规范E 465提出的基于性能的半概率方法来预测SLWAC的使用寿命。基于E 465的部分安全系数方法, 定义了新的算盘, 用于预测未裂解混

土的使用寿命, 作为混凝土覆盖层和 w/c 或加速碳化系数的函数。这些算盘是针对每个碳化暴露等级和给定的可靠性等级确定的, 最大失效概率为6.7%。所采用的程序详见。

此外, 对于不同的碳化暴露等级, 建议在碳化诱导腐蚀下的预期使用寿命至少为50年, 从而推荐SLWAC组合物的极限值。算盘和规定性成分是根据最常见的结构LWA(膨胀和烧结FA)的不同密度类别来定义的。算盘对用混合水泥生产的混凝土有效, 即使用FA, SF和LF, 前提是只考虑 w/c , 不包括矿物外加剂的贡献。

算盘表明, 普通的SLWAC的使用寿命明显低于具有密集LWA的NWC或SLWAC。事实上, 具有多孔LWA的SLWAC的最大 w/c (密度 $<1000 \text{ kg/m}^3$)比NWC高0.2, 而对于致密的LWA(密度 $>1400 \text{ kg/m}^3$), 推荐的成分是不同的。

然而, 作者得出结论, 即使对于具有低至中等质量基质的SLWAC(取决于LWA的类型, w/c 高达0.5-0.6, 对于最具腐蚀性的XC4类), 碳化引起的腐蚀也不应成为主要的降解机制, 前提是考虑适当的混凝土覆盖层厚度。这与Schulze和Gü n zler的工作一致, 他们估计在风干条件下, w/c 低于0.65的SLWAC的平均碳化将需要50多年才能达到30毫米。Bogas和Gomes报告了类似的发现, 甚至考虑到具有非常多孔的火山LWA的SLWAC。

裂纹对SLWAC耐久性的影响

对开裂对NWC耐久性的影响进行了各种研究, 包括实验或数值分析。然而, 到目前为止, 关于裂纹SLWAC的耐久性行为的知识非常有限。

Bremner等人分析了应力对SLWAC和NWC氮气渗透率的影响, w/c 约为0.6。作者验证了流速倾向于保持恒定, 直到对应于不稳定裂纹扩展开始的临界应力, 从中流速迅速增加。在NWC中, 当施加应力强度比水平较低(54%至62%)时, 渗透率迅速增加, 高于SLWAC(72%至82%)。Sugiyama等人得出了类似的结论, 测试了 w/c 为0.4和0.6的混凝土。

EuroLightConR13介绍了一种大规模的氯化物渗透测试程序, 该测试程序是在用膨胀粘土LWA和烧结FA LWA以及NWC制成的混凝土梁上进行的。光束暴露在交替的水分和温度循环中, 并在无约束和约束条件下进行了测试, 使其容易受到温度引起的微裂化的影响。经过6个月的测试, 结果显示SLWAC在克制和无节制条件下的表现与NWC一样好。

值得注意的是Bogas等人进行的研究, 该研究评估了开裂对不同类型聚集体和 w/c 产生的SLWAC的毛细

管吸收和加速碳化电阻的影响。作者分析了 0.1–0.3 mm 的人造和天然裂缝对 SLWAC 这些特性的影响，以及其对相同成分的裂纹 NWC 的相对行为。为了比较不同裂缝长度混凝土的吸收系数，作者提出了一个新的裂缝参数，可以应用于任何类型的 NWC 和 SLWAC。当平均水高度至少比裂缝长度高两倍时，发现裂解对吸收的影响不那么显著。作者得出结论，无论裂缝宽度如何，骨料类型都不会显著影响人工裂缝对所研究的耐久性特性的影响。然而，随着 LWA 孔隙率的增加，开裂对吸收和碳酸化的影响略有降低，这表明 NWC 的耐久性比 SLWAC 更受人工开裂的影响。然而，天然裂缝对 LWAC 的影响更大，具有更多的多孔 LWA。据笔者介绍，当 LWA 被天然裂缝截留时，气体渗透率增加，LWA 可以更好地参与碳酸化机理。因此，与 NWC 相反，自然裂缝对 LWAC 碳酸化速率的影响并不高于人工裂缝。

结论

尽管已经进行了各种实验室和现场调查，但我们对 SLWAC 耐久性行为的完美了解还有很长的路要走。浆料成分、骨料类型、固化和暴露条件、试验设置、渗透机理和混凝土含水量是有助于解释文献中报道的不同趋势的一些因素。

由于 LWA 的孔隙率较高，SLWAC 的碳化电阻往往低于相同成分的 NWC。然而，考虑到双相碳酸化模型和浆料提供的保护，多孔性较小的 SLWAC 的碳化阻力可与 NWC 在真实环境中相媲美。

关于氯化物侵蚀下的混凝土，尽管知识仍然有限，但在实验室或实际环境中进行的调查工作表明，SLWAC 可以具有与 NWC 更好的耐久性能，特别是当考虑相同的强度水平时。然而，尽管相同成分的 SLWAC 和 NWC 表现出相似的氯化物扩散系数，但 SLWAC 的表面氯化物含量往往高于 NWC，这可能导致更高的长期氯化物渗透率。

强调了浆料质量对 LWA 在耐久性能方面的特征的重要性。高质量浆料对 LWA 颗粒的有效分散和参与是确保 SLWAC 良好的耐久性能所必需的。

关于 SLWAC 的耐久性标准化仍然不足，这是该领域现有知识的主要差距之一。对使用寿命预测模型中使用的模型参数进行校准是必要的，使其适应 SLWAC，这需要涉及实验室和长期真实环境测试的全面研究。因此，需要进一步研究该领域，有助于更好地预测 SLWAC 的耐久性行为，并增强使用此类混凝土的信心。

参考文献：

[1]Salem N, Ltifi M, Hassis H. Characterisation of

lightweight concrete of Tunisian expanded clay: Mechanical and durability study. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2016.

[2]Ohuchi T, Hara M, Kubota N, et al. Some long-term observation results of artificial lightweight aggregate concrete for structural use in Japan. In *Proceedings of the International Symposium on Long-term Observation of Concrete Structures*, Budapest, Hungary, 17 – 20 September 1984.

[3]Mircea D, Loani A, Filip M, et al. Long-term durability of reinforced and prestressed elements in aggressive environments. *ACI Mater. J.* 1994; 91: 135 – 140.

[4]Kayali O, Zhu B. Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 2005; 19: 327 – 336.

[5]Hwang CL, Tran VU. Engineering and durability properties of self-consolidating concrete incorporating foamed lightweight aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016.

[6]Youm KS, Moon J, Cho JY, et al. Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Constr. Build. Mater.* 2016; 114: 517 – 527.

[7]Liu X, Du H, Zhang MH. A model to estimate the durability performance of both normal and light-weight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015; 80: 255 – 261.

[8]NT Build 492. Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments; Nordtest Method: Helsinki, Finland, 1999.

[9]ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration; American Society for Testing & Materials (ASTM): West Conshohocken, PL, USA, 2009; p. 7.

[10]Gautefall, O, Maage, M. High-Strength Concrete, SP4 Materials Design, Report 4.8 Chloride Penetration of HCS: Permeability, Diffusivity and Water Conveyance; SINTEF Report STF 70 A92136; SINTEF: Trondheim, Norway, 1992.

[11]Havdahl, J, Hammer, T, Justness, H, Smepllass, S. LWA Concrete for Floaters, SP5 Durability, Report 5.1 Rebar Corrosion and Frost Resistance; SINTEF report STF 70 A93042; SINTEF: Trondheim, Norway, 1993.

[12]Güneyisi E, Gesoglu M, Booya E, et al. Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2015; 74: 17 – 24.