

腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性设计研究

安新正¹,杨莹莹¹,陈科¹,刘燕²

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 河北农业大学 城乡建设学院,河北 保定 071001)

摘要:为推广耐久性设计在再生混凝土结构工程设计中的应用,在考虑再生粗骨料来源的复杂性和再生混凝土初始损伤的影响基础上,结合近年来我国再生混凝土结构相关研究与应用成果,根据普通混凝土结构耐久性设计原则,分析研究腐蚀环境条件下再生混凝土结构的耐久性设计问题,然后确立腐蚀环境条件下再生混凝土结构耐久性设计的基本方法。结果表明:在再生混凝土与普通混凝土强度等级相同的情况下,当 $30\% < \text{再生粗骨料取代率} \leq 50\%$ 及再生粗骨料取代率 $> 50\%$ 时,钢筋保护层厚度应适当分别增加3 mm和5 mm,而再生混凝土养护时间应适当分别延长24 h和48 h。

关键词:再生混凝土结构;腐蚀环境;耐久性设计;耐久性质量控制

中图分类号:TU201.1

文献标识码:A

Study of durability design method for recycled concrete structures exposed to corrosion environment

An Xinzheng¹, Yang Yingying¹, Chen Ke¹, Liu Yan²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. College of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Hebei Baoding 071001, China)

Abstract: In order to propose application of durability design technology in the design of recycled concrete structures to extend the applied field of durability design, the durability design of recycled concrete structure exposed to corrosion environment was analyzed based on the durability design of concrete structure, and the important achievements obtained on the study and application of recycled concrete structure in China. A basic design method for durable recycled concrete structure is presented in this paper. The environmental factor and the quality control requirement to guarantee the durability of recycled concrete structure are taken into consideration in the method. The results show that when the recycled coarse aggregate replacement ratio is $30\% \sim 50\%$ and the recycled coarse aggregate replacement ratio is more than 50% , the protection cover of reinforcing bar should increase respectively 3 mm and 5 mm, and the curing time of recycled concrete should increase respectively 24 hour and 48 hour.

Key words: recycled concrete structure; corrosion environment; durability design; durability quality control

再生混凝土是由再生骨料替代部分(或全部)天然骨料后经配制而成的混凝土材料。再生混凝土的结构应用对于实现建筑垃圾的再生与循环利用,保护环境都具有重要的现实意义。在腐蚀介质环境的作用下,再生混凝土结构在设计的使用期限内,能够满足其设计适用性与安全性的能力是再生混凝土结构耐久性的基本要求^[1]。对待建

再生混凝土结构采用耐久性设计方法进行结构设计是保证其实现耐久性服役寿命的关键。近年来,在再生混凝土结构的耐久性问题上,国内外学者已进行了广泛的调查与研究^[2-4],能够为新建结构的耐久性设计提供一些研究方法和数据基础,但不够系统,基本上还处于初期阶段。相关的研究成果都已表明,再生混凝土在耐久性能上与

天然骨料混凝土存在着一定的差异性^[5-7]。因此,依据混凝土结构耐久性设计的相关理论、规范与标准^[8-10],对再生混凝土结构进行相关的耐久性设计还存在着许多值得注意的问题。本文针对腐蚀介质环境作用下再生混凝土结构的耐久性问题,分析研究再生混凝土结构耐久性设计的基本方法及耐久性质量控制要求,旨在为设计工作者进行再生混凝土结构的耐久性设计提供帮助。

1 影响再生混凝土结构性能的环境因素

再生混凝土结构工作性能的退化,主要由结构中受力钢筋的锈蚀损伤及再生混凝土材料力学性能退化损伤引起。这些损伤都与作用在再生混凝土结构表面的微环境有着十分密切的关系。微环境对结构物的作用程度会因结构物所处区域的不同而有所差异,因此对结构物所处区域的微环境进行调查分析很有必要。

1.1 引发钢筋锈蚀损伤的环境因素

碳化和氯离子侵蚀是引发再生混凝土结构中钢筋锈蚀损伤的两个主要因素^[11-12]。再生混凝土结构构件表面微环境中的二氧化碳向混凝土内部扩散并引发再生混凝土碳化。当碳化深度达到受力钢筋表面位置并使钢筋表面钝化膜消失后,钢筋开始锈蚀。钢筋锈蚀的速率由微环境作用的条件和再生混凝土的氯离子扩散系数所决定。

1.2 引起再生混凝土腐蚀损伤的环境因素

再生混凝土腐蚀损伤包括盐类结晶膨胀引发的物理损伤,和由化学反应的生成物引发的化学损伤两个方面。盐类在再生混凝土内部的空隙及微裂缝中逐渐结晶并累积填充,并引发膨胀应力,当膨胀应力超过再生混凝土的抗拉强度时,便引发混凝土开裂,导致再生混凝土材料的力学破坏^[13]。化学损伤主要包括:硫酸根离子与混凝土中氢氧化钙(水泥水化产物)化学反应引发的损

伤,以及再生混凝土内部碱集料反应引发的损伤。前者化学反应生成钙矾石(或石膏),这些生成物填充于再生混凝土中的空隙和微裂缝之中,并随着时间的延续而逐渐累积充满再生混凝土的空隙和微裂缝,同时又吸水肿胀产生膨胀应力并最终造成再生混凝土材料的力学性能退化;后者为再生混凝土内碱活性骨料与其孔隙溶液之间的碱-骨料反应,反应产物吸水后体积膨胀并最终造成再生混凝土材料的破坏,碱集料反应一旦发生其破坏后果将非常严重^[14]。当下国内外对碱集料反应的控制措施主要由控制再生混凝土配料中水泥的含碱量、外加剂、掺合料及混凝土的总含碱量来实现。

2 耐久性设计控制因素的确定

材料耐久性损伤必然引起构件承载性能的退化,是再生混凝土结构耐久服役寿命降低的直接原因。因此,对再生混凝土结构进行耐久性设计时,通常要考虑微环境因素作用下材料的耐久性损伤与结构构件的耐久性损伤的相关关系,应将以下因素作为主要控制因素:再生混凝土的抗渗性、水泥的矿物成分、再生混凝土及其集料中碱的含量、构件中受力钢筋的混凝土保护层厚度和裂缝宽度。

微环境作用下的再生混凝土结构耐久性损伤,包含再生混凝土性能损伤和钢筋锈蚀损伤。因此,再生混凝土结构的耐久性设计,应该在满足设计安全裕度的前提下,分别从材料层面及结构层面上确定耐久性设计的相关参数。

依据参阅文献[8-9]的相关要求,在表1列出了再生混凝土结构物在结构层面上的耐久性设计控制因素与微环境因素的相关性。

依据参阅文献[8-9]的相关要求,在表2列出了再生混凝土材料层面耐久性设计的控制因素与微环境因素的相关性。

表1 结构层面耐久性设计控制因素与微环境因素相关性

Tab. 1 Correlation between controlling factors of durability design at the structure level and environmental factors

结构层面耐久性设计 控制因素	微环境因素			
	引发钢筋锈蚀的因素		盐类作用	
	碳化作用	氯离子侵蚀	物理	化学
钢筋保护层混凝土抗渗性	相关	相关	相关	相关
混凝土保护层厚度	相关	相关	相关	相关
构件混凝土表面裂缝宽度	相关	相关	相关	相关

表2 材料层面耐久性设计控制因素与微环境因素相关性

Tab. 2 Correlation between controlling factors of durability design at the material level and environmental factors

材料层面耐久性设计 控制因素	微环境因素				
	引起钢筋锈蚀的因素		盐类作用		碱集料反应
	碳化作用	氯离子侵蚀	物理	化学	ARR
水灰比	相关	相关	相关	相关	相关
掺合料主要成分	-	相关	-	相关	相关
细骨料 Cl ⁻ 含量	-	相关	-	-	-
细骨料 SO ₄ ²⁻ 含量	-	-	相关	相关	-
粗骨料碱活性	-	-	-	-	相关
水泥用量	相关	相关	相关	相关	相关
水泥 C ₃ A 含量	-	-	-	相关	-
水泥 SO ₃ 含量	-	-	-	相关	-
混凝土 Cl ⁻ 含量	-	相关	-	-	-
混凝土总碱含量	-	-	-	-	相关

3 区域环境条件与作用等级的确定

再生混凝土结构物所处的场址环境是直接作用于工程结构不同部位的微环境。为了更合理、更科学地对再生混凝土结构进行耐久性设计,应依据结构物所处微环境的差异将结构物进行设计部位划分。比如,可以把无干湿交替作用的结构部位划分为上部结构,把有干湿交替作用的结构部位划分为中部结构,把承受地下水、土壤直接作用的结构部位划分为地下结构。首先,在再生混凝土结构耐久性设计的初步阶段,要针对其区域环境进行年平均温度、年平均湿度、地下水位变化范围、地下水与土中主要有害介质含量、pH 值等水文与气候的相关调查与统计分析。然后,再依据设计结构不同部位处微环境的调查分析结果,并参照文献[9]对作用于再生混凝土结构上的微环境作用类别、作用等级进行相关确定。

4 耐久性设计与质量控制

由于目前在再生混凝土结构的耐久性设计上还没有相关的标准与规范可依,设计者一般依据已有的普通混凝土结构耐久性设计方法,在考虑环境侵蚀作用给工程结构带来的不利影响时,应着重考虑再生混凝土材料自身缺陷带来的不利影响。

4.1 结构层面的耐久性设计

4.1.1 裂缝控制

再生混凝土结构构件的混凝土表层裂缝损伤可为环境对结构的侵蚀作用提供有利条件。研究表明^[15-17],混凝土的裂缝宽度对其结构的耐久性

使用寿命,尤其是对处于干湿循环且有较强侵蚀性地下水、土壤侵蚀环境作用下的地下结构的耐久性使用寿命具有重要影响。考虑到再生混凝土与普通混凝土构件在开裂效应上存在较大的差异性^[18],进行再生混凝土结构受荷裂缝、温度裂缝等的控制设计上应依据相关的试验研究成果进行合理和科学的设计。如果没有针对设计工程的实际试验研究成果可以参照,可以依据普通混凝土结构耐久性设计规范,取同等条件下普通混凝土结构的耐久性允许裂缝宽度减去 0.05 mm,以确保再生混凝土结构耐久性使用寿命不会因结构的裂缝问题而严重降低。

4.1.2 保护层厚度确定

钢筋保护层厚度对再生混凝土结构的碳化耐久性寿命和氯离子侵蚀作用耐久性寿命有着重要的影响,因此再生混凝土结构耐久性设计包括针对碳化过程的耐久性设计与针对氯离子侵入过程的耐久性设计。相关钢筋保护层厚度的耐久性设计方法主要包括:传统方法、指数方法、因子法和数学模型法。由于再生混凝土在建筑工程中应用较少,还基本上处于初期阶段,再加上再生骨料来源的复杂性,当下还没有十分可靠的再生混凝土碳化耐久性寿命和氯离子侵蚀耐久性寿命的相关数学模型研究成果,设计者在耐久性设计上还主要采用“传统方法”。

依据“传统方法”,为了保证再生混凝土保护层厚度的充裕度,再生混凝土构件的钢筋保护层厚度(x_c)由以下三个方面的取值确定:按相应微环境条件下普通混凝土构件确定钢筋最小保护层厚度($x_{d,min}$);考虑再生混凝土与普通混凝土性能差异性可能带来的不利影响,需要增加的差异附

加值(x_f);再生混凝土在施工中可能带来的操作允差(Δx)。即,再生混凝土构件钢筋保护层厚度的取值可按下式进行:

$$x_c = x_{d,\min} + x_f + \Delta x$$

基于目前的相关研究成果,上式中操作允差 Δx 可取10 mm,差异附加值 x_f 可依据再生混凝土中再生粗骨料取代率的不同,按下列具体情况进行取值:当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且再生粗骨料取代率 $\leq 30\%$ 时,可取 $x_f = 0$ mm;当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且 $30\% <$ 再生粗骨料取代率 $\leq 50\%$ 时,可取 $x_f = 3$ mm;当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且再生粗骨料取代率 $> 50\%$ 时,可取 $x_f = 5$ mm。

4.2 材料层面耐久性设计

再生混凝土材料耐久性劣化是其所处的微环境中侵蚀性介质与再生混凝土中的有效成分进行反应的结果^[19]。因此,在进行再生混凝土的耐久性设计时,应依据再生混凝土结构所处微环境的调查结果(侵蚀性介质情况、冻融条件等)及耐久性设计寿命要求,对再生混凝土的强度性能指标及配合比设计提出相应的具体要求(譬如,参照表2中材料层面耐久性设计的控制因素与引起耐久性损伤的环境因素的相关性来选择水泥的品种、集料的种类与性质、外加剂、掺合料、配合比等),并使再生混凝土材料相关性能指标(密实性、抗冻性、抗裂性等)满足耐久性设计要求。由于再生粗骨料来源及组成的差别,特别强调的是再生混凝土的配合比设计应在充分借鉴现代混凝土性能改良技术(如:掺加粉煤灰、磨细矿渣微粉、硅灰等技术)并结合相关侵蚀性介质(碳化、氯离子渗透等)耐久性试验结果的基础上确定。

4.3 耐久性质量控制

4.3.1 施工及养护

要使再生混凝土结构达到设计的耐久性寿命,还必须在设计上对再生混凝土及其结构的施工及养护工艺提出严格要求。由于再生粗骨料存在较多的宏观缺陷(骨料微裂纹、骨料部分表面残存旧砂浆),因此在再生混凝土的生产中,可以要求再生粗骨料采用预处理技术处理过的再生粗骨料,以提高再生混凝土拌合料的基本性能。在设计上严格规定再生混凝土浇注中的一次浇注高度及振捣方法、振捣时间,以控制再生混凝土的均匀

性和密实性。

在再生混凝土浇注后的养护设计上,结合再生混凝土结构所处得微观环境及再生混凝土耐久性配合比设计中所采用的原材料的具体情况(如:环境、水泥品种、外加剂等),给出具体的养护方法。特别注意的是应适当延长再生混凝土养护时间,以减小其收缩徐变效应。基于目前的相关研究成果,具体延长时间可依据再生混凝土中再生粗骨料取代率的不同,按下列具体情况进行取值:当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且再生粗骨料取代率 $\leq 30\%$ 时,可不考虑延长养护时间;当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且 $30\% <$ 再生粗骨料取代率 $\leq 50\%$ 时,延长时间可取24 h;当再生粗骨料来源为废弃混凝土,且再生粗骨料取代率 $> 50\%$ 时,延长时间可取48 h。

4.3.2 日常维护

日常维护设计是再生混凝土结构耐久性设计的重要内容,设计者应依据再生混凝土结构所处的微观环境的类型与作用等级、结构耐久性设计使用寿命,对再生混凝土结构(特别是结构关键部位)的正常维护、检验方法与检查间隔时间进行详细而具体的设计,从而有利于管理者根据再生混凝土结构实际的劣化情况,采取及时的补救措施,确保再生混凝土结构的安全性及可靠性。

5 结论

本研究提出了依据结构不同部位所处的微环境及相关耐久性质量控制要求下再生混凝土结构耐久性设计的基本方法。再生混凝土结构裂缝宽度的设计控制值应比同条件下普通混凝土结构裂缝宽度允许值 $[W]$ 低0.05 mm;钢筋保护层厚度和再生混凝土养护时间的取值应在规范要求的基础上,考虑再生粗骨料取代率对结构耐久性能的影响,进行适当的增加。具体为:当 $30\% <$ 再生粗骨料取代率 $\leq 50\%$ 及再生粗骨料取代率 $> 50\%$ 时,钢筋保护层厚度应适当分别增加3 mm和5 mm,而再生混凝土养护时间应适当分别延长24 h和48 h。

参考文献:

- [1] ISO13823:2008. General principles on the design of structures for durability[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2008.
- [2] 肖建庄,雷 斌. 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 66-72.

(下转第24页)

- clay treated with fibre and cement[J]. *Geosynthetics International*, 2012, 19(3): 252 – 262.
- [10] FATAHI B, TM LE, KHABBAZ H. Shrinkage properties of soft clay treated with cement and geofibers[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2013, 31(5): 1421 – 1435.
- [11] TEMEL YETIMOGLU, ONER SALBAS. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(2): 103 – 110.
- [12] SIVAKUMAR BABU G L, VASUDEVAN A K. Sumanta Hal-dar Numerical simulation of fiber – reinforced sand behavior[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(2): 181 – 188.
- [13] SUNG SIK PARK. Unconfined compressive strength and ductility of fiber – reinforced cemented sand[J]. *Composite Materials and Adhesive Bonding Technology*, 2011, 25(2): 1134 – 1138.
- [14] KUMAR D, NIGAM S, NANGIA A, et al. Improvement in CBR Values of Soil Reinforced with Jute Fibre[J]. *Internal Journal of Engineering and Technical Research*, 2015, 3(5): 290 – 293.
- [15] 李广信, 陈 轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋粘性土的试验研究[J]. *水利学报*, 1995, 6: 31 – 36.
- [16] MALEKZADEH M, BILSEL H. Effect of polypropylene fiber on mechanical behavior of expansive soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 17/A: 55 – 63.
- [17] 张小江, 周克骥, 周景星. 纤维加筋土的动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(3): 45 – 49.
- [18] GHIASSIAN H, GHAZI F. Liquefaction analysis of fine sand reinforced with carpet waste fibers under triaxial tests[C]// 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.
- [19] MAHER M H, WOODS R D. Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. ? *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, 116(7): 1116 – 1131.
- [20] NR KRISHNASWAMY, NT LSAAC. Liquefaction potential of reinforced sand[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 1994, ? 13(94): 23 – 41.
- [21] 姚 波, 刘振杰, 宋 佳, 等. 水泥增强法提高土工织物加筋土抗剪强度的试验研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(11): 1860 – 1862.
- [22] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(2): 123 – 131.

(责任编辑 李 军)

(上接第 18 页)

- [3] 闰宏生. 再生混凝土结构的氯离子侵蚀试验[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(12): 1673 – 1676.
- [4] FUNG W K. Durability of Concrete Using Recycled Aggregates[C]// SCCT. SCCT Annual Concrete Seminar. Hone Kone: SCCT, 2005, 101 – 129.
- [5] OTSUKI N, MIYAZATO S, YODSUDJAI W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride peneration and carbonation[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(5): 443 – 451.
- [6] 郭远臣, 王 雪, 何运祥. 再生骨料混凝土吸湿性能及对干燥收缩的影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3): 386 – 390.
- [7] 安新正, 易 成, 姜新佩, 等. 海水环境下再生混凝土的腐蚀研究[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(1): 5 – 9.
- [8] DB11/T803 – 2011. 再生混凝土结构设计规程[S].
- [9] GB/T50476 – 2008. 混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [10] 金伟良, 袁迎曙, 卫 军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] PAPADAKIS V G, VAYENAS C G, FARDIS M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(4): 363 – 373.
- [12] TUUTTI K. Corrosion of steel in concrete[R]. Stockholm; Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [13] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for salt scaling[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(4): 1161 – 1179.
- [14] ULM F J, COUSSY O, LI K F, et al. Thermo – chemo – mechanics of ASR expansion in concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(3): 233 – 242.
- [15] 金祖权, 赵铁军, 陈惠苏, 等. 海洋环境下裂缝混凝土氯盐腐蚀[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(7): 2821 – 2826.
- [16] KWON S J, NA U J, PARK S S, et al. Service life prediction of concrete wharves with early – aged crack; Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(1): 75 – 83.
- [17] 崔正龙, 路沙沙, 汪振双. 弯曲裂缝对再生混凝土构件碳化性能影响的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(5): 1173 – 1176.
- [18] 刘 超, 白国良, 尹 磊, 等. 长期荷载作用下再生混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(1): 82 – 87.
- [19] 肖建庄, 雷 斌. 再生混凝土耐久性能研究[J]. *混凝土*, 2008(5): 83 – 89.

(责任编辑 王利君)