

文章编号:1007-9629(2022)07-0737-07

再生粗骨料混凝土界面参数研究

彭立港¹, 赵羽习^{1,*}, 曾维来^{1,2}, 刘承斌¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 中国建筑国际集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 对不同再生粗骨料取代率和水灰比下 9 组混凝土的力学性能及耐久性能进行了测试; 基于测试结果及分析, 提出了长度界面参数、体积界面参数和广义界面参数的概念, 并比较分析了 3 个界面参数与再生粗骨料取代率、水灰比、力学性能及耐久性能的关系。结果表明: 再生粗骨料混凝土的力学性能及耐久性能与再生粗骨料取代率、水灰比紧密相关; 广义界面参数可反映界面体积和新砂浆水灰比对混凝土性能的影响, 较好揭示了再生粗骨料混凝土性能的劣化机理。

关键词: 再生粗骨料混凝土; 再生粗骨料取代率; 水灰比; 力学性能; 耐久性能; 界面参数

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.012

Interface Parameter of Recycled Coarse Aggregate Concrete

PENG Ligang¹, ZHAO Yuxi^{1,*}, ZENG Weilai^{1,2}, LIU Chengbin¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. China State Construction International Holdings Limited, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The mechanical and durability properties of nine groups of concrete, with various recycled coarse aggregate (RCA) replacement rates and water-to-cement ratios, were examined. Based on the experimental results and analysis, the length, volume and generalized interface parameters were determined; the correlation between three interface parameters and the RCA replacement rate, the water-to-cement ratio, the mechanical and durability properties were established. The results show that the mechanical and durability properties of RAC are closely related to the RCA replacement rate and the water-to-cement ratio; the generalized interface parameter reflects the effects of interface volume and water-to-cement ratio of new mortar on concrete properties, which reveals the degradation mechanism of RAC properties.

Key words: recycled coarse aggregate concrete; recycled coarse aggregate replacement ratio; water-to-cement ratio; mechanical property; durability; interface parameter

界面过渡区(ITZ)是混凝土内部的薄弱区域。由于再生骨料表面附着的老旧水泥砂浆在再生骨料混凝土中引入了含量和种类更复杂的界面过渡区, 再生骨料混凝土的力学性能及耐久性能通常要比普通骨料混凝土差^[1-6]。

已有学者通过测试界面过渡区的微观力学性能和几何参数, 将其与混凝土材料性能建立了直接的相关关系。Ryu^[7]发现界面的显微硬度值越高、宽度越

小, 混凝土材料性能越强。Xiao等^[8]在此基础上, 参数化地揭示了界面过渡区与新老砂浆性能对再生骨料混凝土本构关系的影响。Adessina等^[9]测试了不同介质的微观弹性模量, 并通过试验和模型预测得到了再生骨料混凝土弹性模量和氯离子渗透系数。张鸿儒^[10]将界面长度、宽度与再生骨料混凝土抗压强度、超声波测密实性和氯离子渗透系数建立了相关关系。但是, 上述界面参数的相关研究仍存在着一定的局

收稿日期: 2021-05-02; 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2021R52035)

第一作者: 彭立港(1997—), 男, 湖南长沙人, 浙江大学博士生。E-mail: pengligang@zju.edu.cn

通讯作者: 赵羽习(1973—), 女, 浙江杭州人, 浙江大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yxzhaoy@zju.edu.cn

限性,例如显微硬度、界面宽度、微观弹性模量等微观性能在工程实际中难以获取;界面参数与混凝土材料耐久性能的相关关系较弱,未能综合考虑到粗骨料数量、砂浆性能等因素的影响。

为实现再生粗骨料混凝土界面参数的轻量化、综合化描述,本文提出了长度界面参数、体积界面参数和广义界面参数,比较分析了界面参数与再生粗骨料取代率、水灰比、混凝土力学性能和耐久性能的关系,以期揭示再生粗骨料混凝土性能的劣化机理。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥;细骨料采用含水性¹⁾3.8%的天然河砂;天然粗骨料(NCA)采用碎石,其吸水率和表观密度分别为2.20%和2 680 kg/m³;再生粗骨料(RCA)由废弃混凝土破碎而得,其吸水率和表观密度分别为4.16%和2 370 kg/m³。根据GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》中基于吸水率和表观密度的骨料分类标准,本文所用再生粗骨料满足Ⅱ类骨料的标准。2种粗骨料均采用连续性级配,粒径范围为5~20 mm。

1.2 混凝土配合比

为了研究基于界面过渡区的再生粗骨料混凝土界面参数,设置了3种再生粗骨料取代率($w_{RCA}=0\%$ 、50%、100%,对应的混凝土分别记为NAC、RAC50、RAC100)和3种水灰比($m_w/m_c=0.45$ 、0.55、0.65)共计9组混凝土,如表1所示。为更好地比较再生粗骨料取代率和水灰比对混凝土性能的影响,本研究中设置了相同的用水量和单方混凝土质量。在室内浇筑完成后,将所有试件表面覆膜以减少水分蒸发,养护1 d后拆模,随后放在标准养护室(温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度95%以上)中养护至28 d。

1.3 试验方法

1.3.1 抗压强度测试

参照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,每组混凝土分别浇筑9个边长为100 mm的立方体试件,使用WE-100型压力试验机,分别在3、28、120 d龄期时测试立方体试件抗压强度,取每组3个试件抗压强度的平均值作为该组混凝土的抗压强度 f_c 。

1.3.2 抗氯离子渗透性能测试

根据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,每组混凝土分别浇筑2

表1 混凝土配合比设计
Table 1 Mix proportion design of concretes

No.	NCA	RCA	Fine aggregate	Cement	Water
NAC-0.45	1 059.0	0	649.0	478.0	215.0
RAC50-0.45	529.5	529.5	649.0	478.0	215.0
RAC100-0.45	0	1 059.0	649.0	478.0	215.0
NAC-0.55	1 112.0	0	682.0	391.0	215.0
RAC50-0.55	556.0	556.0	682.0	391.0	215.0
RAC100-0.55	0	1 112.0	682.0	391.0	215.0
NAC-0.65	1 151.0	0	705.0	330.0	215.0
RAC50-0.65	575.5	575.5	705.0	330.0	215.0
RAC100-0.65	0	1 151.0	705.0	330.0	215.0

个高200 mm、直径100 mm的圆柱体试件,养护至28 d时使用水冷式金刚石锯将试件切割得到高50 mm、直径100 mm的圆柱体试件共6个(靠近浇筑面的试件舍弃),随后使用砂纸和锉刀将切割面打磨光滑。采用快速氯离子迁移系数法,分别在28、120 d龄期时进行通电加速渗透试验,测试其快速氯离子迁移系数(D)。通电加速试验结束后,将试件表面冲洗干净,并使用压力试验机将其沿轴向劈成两半,立即在劈断面喷涂0.1 mol/L的AgNO₃溶液,根据显色分界线测得氯离子渗透深度。混凝土的快速氯离子迁移系数可按下式计算:

$$D = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \times \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

式中: U 为电压的绝对值,V; T 为阳极溶液的初始和结束温度平均值, $^\circ\text{C}$; X_d 为氯离子渗透深度平均值,mm; t 为试验持续时间,h; L 为试件高度,本文中 $L=50$ mm。

1.3.3 界面长度测试

每组混凝土分别浇筑1个边长为100 mm的立方体试件,养护至28 d龄期时使用水冷式金刚石锯将试件切割得到长宽均为100 mm、厚度为10 mm的薄片。切割完毕后,使用研磨抛光机对薄片的切割面进行打磨抛光。随后,将混凝土薄片浸泡于无水乙醇中24 h后取出,放在40 $^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,以防止水泥继续水化。考虑到混凝土中粗骨料空间分布位置和形状大小等随机因素的影响,本研究截取薄片9个边长20 mm的区域进行界面长度测试。

1)文中涉及的含水性、取代率和水灰比等均为质量分数或质量比。

对于天然粗骨料混凝土 NAC,其内部只存在天然粗骨料、砂浆和二者的界面过渡区 ITZ1. 采用 Image J 软件,根据 9 个测试区内天然粗骨料与砂浆在灰度值上的差异,提取测试区内天然粗骨料的面积 A_{NA} 和界面过渡区 ITZ1 的长度 l_{ITZ1} .

对于再生粗骨料混凝土 RAC50 和 RAC100,其内部除了天然粗骨料与新砂浆的界面过渡区 ITZ1 外,还存在老砂浆与新砂浆之间的界面过渡区 ITZ2 以及天然粗骨料与老砂浆之间的界面过渡区 ITZ3. 由于老砂浆与新砂浆之间的灰度值较为接近,因而 ImageJ 软件无法区分识别出新砂浆与老砂浆. 因此利用 ImageJ 软件只能获取再生粗骨料混凝土内天然粗骨料的面积 A_{NA} ,以及界面过渡区 ITZ1、ITZ3 的长度之和 $l_{ITZ1} + l_{ITZ3}$.

为了能获取再生粗骨料混凝土各测试区内老砂浆的面积 A_{OM} 和界面过渡区 ITZ2 的长度 l_{ITZ2} ,将各组混凝土的测试区图像导入 Auto CAD 软件,利用 Auto CAD 软件的多线段绘制功能绘制测试区内老砂浆的轮廓,进而获取 A_{OM} 和 l_{ITZ2} .

参考张鸿儒^[10]的研究成果,使用长度界面参数 $R_{I/A}$ 来表征再生粗骨料混凝土内界面过渡区的几何长度参数,以消除混凝土中粗骨料空间分布不均匀性的影响. 长度界面参数 $R_{I/A}$ 具体表达式^[10]如下:

$$R_{I/A} = \frac{\sum l_i}{A_{NA} + A_{OM}} \quad (2)$$

式中: $\sum l_i$ 为在 20 mm × 20 mm 的测试区内各类界面过渡区的长度之和.

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

各组混凝土的抗压强度见表 2. 从表 2 可以看出,各组混凝土抗压强度均随龄期延长而增大,并且在 28 d 前(3~28 d)抗压强度的增长速率远大于 28 d 后(28~120 d)的增长速率. 这是由于早龄期时水泥的水化速率较快,水化产物的填充效应比较明显,因而混凝土抗压强度能得到快速提升;随着龄期的延长,未水化的水泥颗粒越来越少,水化进程也越来越缓慢,因而抗压强度的提升也不再明显.

表 2 各组混凝土的抗压强度和快速氯离子迁移系数

Table 2 Compressive strength and rapid chloride diffusion coefficient of concretes

No.	f_c/MPa			$D \times 10^{12}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
	3 d	28 d	120 d	28 d	120 d
NAC-0.45	10.50	32.20	36.50	7.50	5.66
RAC50-0.45	8.69	30.90	36.10	9.53	7.10
RAC100-0.45	10.59	29.10	33.60	11.40	7.88
NAC-0.55	8.27	26.00	31.00	13.28	9.40
RAC50-0.55	8.12	25.70	27.40	14.82	10.87
RAC100-0.55	5.70	19.20	19.60	17.08	12.86
NAC-0.65	4.80	17.80	20.00	14.63	12.70
RAC50-0.65	2.68	14.30	16.60	18.57	17.95
RAC100-0.65	3.52	13.70	15.20	21.98	19.31

当再生粗骨料取代率与龄期固定时,水灰比越大,混凝土抗压强度越小. 这是因为本文中水的用量是一定的,当水灰比较大时,意味着水泥用量更少,这会在混凝土中产生多余的自由水,这部分多余的自由水不能参与水泥的水化过程,而在混凝土中留下更多孔隙;同时,较大的水灰比会导致水泥水化产生更多的 CH 晶体,使得水泥砂浆更加疏松,从而影响混凝土的抗压强度.

当水灰比和龄期固定时,再生粗骨料取代率越高,混凝土抗压强度越小. 这是因为界面过渡区是混凝土内的薄弱环节,再生粗骨料取代率越高,混凝土内界面过渡区的含量和种类就越多,抗压强度测试加载过程中混凝土就越容易开裂而失效破坏.

2.2 抗氯离子渗透性能

各组混凝土的快速氯离子迁移系数见表 2. 从表 2 可以看出,龄期越长,混凝土快速氯离子迁移系数越小,即混凝土抗氯离子渗透性能越强. 其机理解释与 2.1 相似,龄期越长,水泥的水化作用越彻底,水化产物对混凝土内部孔隙、裂缝等缺陷的填充效应也就越明显,因而混凝土密实程度越高,抵抗外界侵蚀物质(即氯离子)的能力也就越强.

当再生粗骨料取代率与龄期固定时,水灰比越大,混凝土快速氯离子迁移系数越大,即混凝土抗氯离子渗透性能越弱. 这是因为水灰比越大,水泥砂浆越疏松多孔,氯离子的渗透通道越多,混凝土抗氯离子渗透性能也就越弱.

当水灰比和龄期固定时,再生粗骨料取代率越高,混凝土快速氯离子迁移系数越大,即混凝土抗氯离子渗透性能越弱.这是因为界面过渡区给氯离子提供了更多的渗透通道.

2.3 长度界面参数

张鸿儒^[10]提出的长度界面参数 $R_{I/A}$ 可以反映混凝土内界面过渡区的二维数量,其定义为:再生粗骨料混凝土截面内,单位面积的粗骨料所引入的界面过渡区的长度总和.本文将记为 ξ_l .

各组混凝土的长度界面参数见图1.从图1可以看出,对于3种水灰比的混凝土,长度界面参数均随着再生粗骨料取代率的提高而变大.这是因为随着再生粗骨料取代率的提高,再生粗骨料表面附着的老砂浆将在混凝土中引入更多的界面过渡区,从而导致混凝土中的界面长度总和变大.同时,再生粗骨料取代率越大,长度界面参数的离散性就越大.这是由于再生粗骨料表面附着的老砂浆的含量是随机的,再生粗骨料取代率越高,老砂浆的含量不确定性就越大,从而导致长度界面参数的离散性越大.

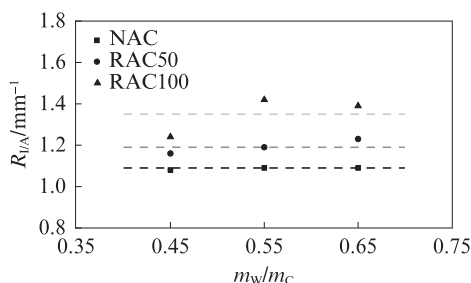


图1 各组混凝土的长度界面参数 $R_{I/A}$
Fig. 1 Length ITZ parameter of concretes

2.4 体积界面参数

长度界面参数 ξ_l 未能考虑混凝土内再生粗骨料数量对界面含量的影响.针对这一研究的不足,本节在长度界面参数 ξ_l 的基础上建立了能反映再生粗骨料数量影响的体积界面参数 ξ_v ,并将其定义为:再生粗骨料混凝土内界面过渡区的总体积占混凝土体积的比值.具体表达形式如下:

$$\xi_v = \frac{V_{ITZ}}{V_{test}} = d_{ITZ} \xi_l \frac{V_a}{V_0} \quad (3)$$

式中: V_{ITZ} 为混凝土切片测试区内界面过渡区的体积; V_{test} 为混凝土切片测试区的体积; d_{ITZ} 为界面过渡区的宽度,考虑到界面过渡区的宽度值相对稳定(为45~55 μm),故本研究取 $d_{ITZ}=50 \mu\text{m}$; V_0 为单方混凝土的体积, $V_0=1 \text{ m}^3$; V_a 为单方混凝土中粗骨料的体积.

V_a 的计算方法如下:

$$V_a = V_{NCA} + V_{RCA} = \frac{M_{NCA}}{\rho_{NCA}} + \frac{M_{RCA}}{\rho_{RCA}} \quad (4)$$

式中: V_{NA} 、 V_{RA} 分别为单方混凝土中天然粗骨料、再生粗骨料的体积; M_{NCA} 、 M_{RCA} 分别为单方混凝土中天然粗骨料、再生粗骨料的质量; ρ_{NCA} 、 ρ_{RCA} 分别为天然粗骨料、再生粗骨料的表观密度.

9组混凝土单方体积内,粗骨料总体积 V_a 以及对应的体积界面参数 ξ_v 的值如表3所示.

表3 混凝土单方体积内的 V_a 和 ξ_v
Table 3 Values of V_a and ξ_v in concrete per cubic meter

No.	V_{NA}/m^3	V_{RA}/m^3	V_a/m^3	ξ_v
NAC-0.45	0.395	0	0.395	0.021
RAC50-0.45	0.198	0.223	0.421	0.024
RAC100-0.45	0	0.447	0.447	0.028
NAC-0.55	0.415	0	0.415	0.023
RAC50-0.55	0.207	0.235	0.442	0.026
RAC100-0.55	0	0.469	0.469	0.033
NAC-0.65	0.429	0	0.429	0.023
RAC50-0.65	0.215	0.243	0.458	0.028
RAC100-0.65	0	0.486	0.486	0.034

2.5 广义界面参数

影响混凝土材料性能的因素除了界面体积外,还有混凝土内砂浆的性能.而混凝土的水灰比 m_w/m_c 一方面能很好地表征砂浆的性能,另一方面在工程实际中获取相对简单.因此,在体积界面参数 ξ_v 的基础上,同时考虑水灰比,建立包含更多信息的再生粗骨料混凝土参数,称为广义界面参数 ξ_g . ξ_g 应满足以下2点条件:(1)当水灰比一定时, ξ_g 与 ξ_v 间存在线性关系;(2)当 ξ_v 的值一定时, ξ_g 与水灰比之间存在反比例关系.基于此,本文提出广义界面参数 ξ_g 的形式如下:

$$\xi_g = (1 + \beta_1 \xi_v) \times \left(1 + \frac{m_c}{m_w} \beta_2 \right) \quad (5)$$

式中: β_1 、 β_2 分别为界面体积、水灰比对混凝土材料性能影响程度的系数.

β_1 和 β_2 与混凝土性能指标和龄期有关,对不同龄期下的各项混凝土性能指标,存在不同的 β_1 和 β_2 值.为了分析广义界面参数 ξ_g 的有效性,本文通过1st Opt软件对9组混凝土在各龄期下的抗压强度和快速氯离子迁移系数进行拟合,获得 β_1 和 β_2 的值,如表4所示.

2.6 界面参数的有效性分析

2.6.1 界面参数与再生粗骨料取代率的关系

由于对应不同的龄期和不同的性能指标,存在不同的 ξ_g 值,因此本文以28 d龄期下的抗压强度所对

表4 各龄期下抗压强度和快速氯离子迁移系数所对应的 β_1 和 β_2 值

Table 4 Values of β_1 and β_2 for compressive strength and rapid chloride ion diffusion coefficients of concretes at various ages

Parameter	3 d	28 d	120 d
β_1 for f_c	736.68	8.93	2.39
β_2 for f_c	-0.452	-0.190	-0.065
β_1 for D		51.89	-115.29
β_2 for D		-0.240	-0.417

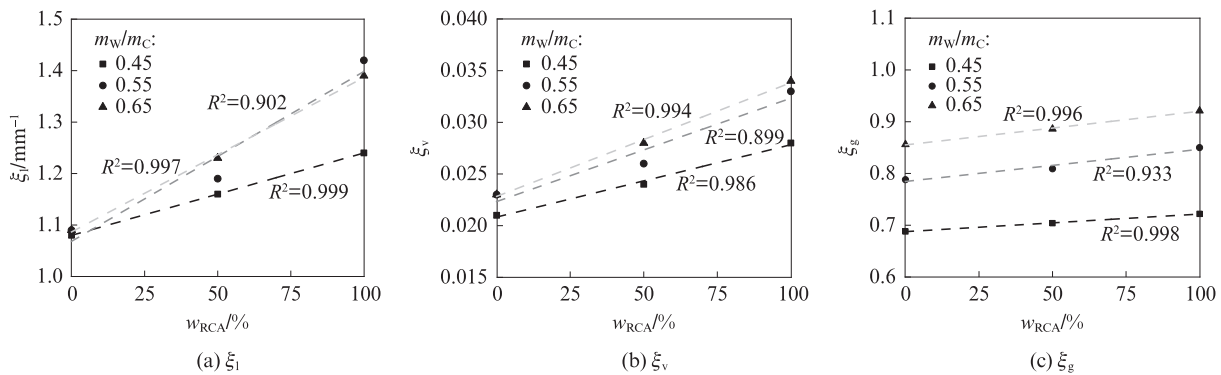


图2 界面参数与再生粗骨料取代率的关系

Fig. 2 Relationship between interface parameter and RA replacement ratio

由图2(b)可见,对于3种混凝土水灰比,体积界面参数 ξ_v 的值均随着再生粗骨料取代率的增大而增大.这是因为体积界面参数 ξ_v 包含了2部分内容,分别为长度界面参数 ξ_l 和粗骨料的体积 V_a .前文已知,长度界面参数 ξ_l 随着再生粗骨料取代率的增大而增大;对于粗骨料的体积 V_a ,当混凝土配合比中粗骨料质量一定时,由于再生粗骨料表观密度较低,因此再生粗骨料取代率越高,单位体积混凝土内粗骨料的体积越大.

由图2(c)可见,对于3种混凝土水灰比,广义界面参数 ξ_g 均随着再生粗骨料取代率的增大而增大.这是因为广义界面参数 ξ_g 包含了体积界面参数 ξ_v 和水灰比 m_w/m_c 这2个部分.前文已知,在水灰比一定的前提下,体积界面参数 ξ_v 随再生粗骨料取代率增大而增大,因此 ξ_g 也随之增大.

2.6.2 界面参数与混凝土材料性能的关系

对于界面参数 ξ_l 和 ξ_v ,由于其未考虑水灰比的影响,因此取同一龄期下3个水灰比的混凝土所对应相关系数的平均值为该龄期下相关系数的最终值.

在龄期3、28、120 d时,3个界面参数与混凝土抗压强度的相关系数如图3(a)所示.从图3(a)中可以发现,在龄期3 d时,界面参数 ξ_l 、 ξ_v 与抗压强度的相关系数为负值,表明彼此之间不存在线性关系.这是因为,在早龄期时,混凝土内水泥水化未完全,混凝土

应的 ξ_g 值为例进行分析.界面参数与再生粗骨料取代率的关系如图2所示.

由图2(a)可见,对于3种混凝土配合比,长度界面参数 ξ_l 的值均随着再生粗骨料取代率的增大而增大.这是因为,长度界面参数 ξ_l 反映的是单位面积粗骨料所引入的界面过渡区长度,而相比于天然粗骨料,单位面积再生粗骨料上存在更多的界面过渡区.所以,再生粗骨料取代率越高,混凝土截面内界面过渡区的长度更长.

的抗压强度更大程度上受砂浆性能的影响,而混凝土内界面含量对抗压强度的影响较小.但是,在龄期28、120 d时,界面参数 ξ_l 和 ξ_v 与抗压强度拟合曲线的相关系数均提升,且随着龄期的延长,拟合曲线的线性关系也增强.这是因为,随着龄期的延长,水泥水化完全、砂浆性能相对稳定后,混凝土内界面含量对抗压强度的影响增强.

对于广义界面参数 ξ_g ,其与3、28、120 d龄期时抗压强度的相关系数分别为0.884、0.955和0.959.这表明 ξ_g 与各龄期时的抗压强度之间均存在良好的线性相关关系.比较广义界面参数 ξ_g 与 ξ_l 、 ξ_v 可以发现,对各龄期下混凝土的抗压强度, ξ_g 的相关系数都更接近1,特别是3 d龄期时的相关系数提升最明显.这表明 ξ_g 与各龄期下抗压强度的线性关系更强,即 ξ_g 的有效性更高.而这是因为广义界面参数 ξ_g 综合考虑了界面含量和水灰比对混凝土抗压强度的影响.

在龄期28、120 d时,3个界面参数与混凝土快速氯离子迁移系数的相关系数如图3(b)所示.由图3(b)可以发现,与 ξ_l 和 ξ_v 相比, ξ_g 与各龄期下混凝土快速氯离子迁移系数的相关系数更接近1,尤其是龄期120 d时.这表明广义界面参数 ξ_g 与各龄期下混凝土的快速氯离子迁移系数之间的线性关系更强.这是因为再生粗骨料取代率和水灰比均会影响氯离子在混凝土内的迁移,而广义界面参数 ξ_g 综合考虑了界面

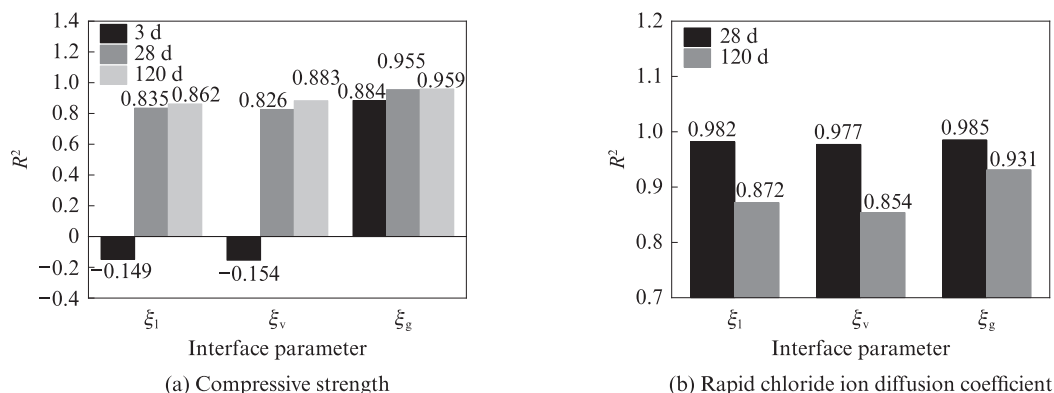


图3 界面参数与混凝土材料性能的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between interface parameter and material property of concretes

含量和水灰比对混凝土快速氯离子迁移系数的影响。此外, ξ_g 与龄期 28、120 d 时混凝土快速氯离子迁移系数的相关系数分别为 0.985 和 0.931。因此可以认为, 广义界面参数 ξ_g 与各龄期下混凝土的快速氯离子迁移系数之间存在一定的线性关系。

2.6.3 广义界面参数的有效性验证

学术界和工程界较为重视 28 d 龄期下混凝土材料的力学性能和耐久性能。因此, 基于表 4 中对 28 d 抗压强度 $f_{c,t=28d}$ 拟合所得广义界面参数的系数 β_1 和 β_2 , 推导出基于广义界面参数 ξ_g 的抗压强度模型:

$$\begin{cases} f_{c,t=28d}(\xi_g) = 90.11 - 83.42\xi_g \\ \xi_g = (1 + 8.93\xi_v) \times \left(1 - 0.19 \frac{m_c}{m_w}\right) \end{cases} \quad (6)$$

同理, 可得 28 d 快速氯离子迁移系数 $D_{t=28d}$ 的

模型:

$$\begin{cases} D_{t=28d}(\xi_g) = -9.37 + 17.86\xi_g \\ \xi_g = (1 + 51.89\xi_v) \times \left(1 - 0.24 \frac{m_c}{m_w}\right) \end{cases} \quad (7)$$

为了检验基于广义界面参数 ξ_g 的模型有效性, 利用张鸿儒论文^[10]中 3 组再生粗骨料取代率下混凝土的 28 d 抗压强度和快速氯离子迁移系数, 通过式 (6)、(7) 获得计算值, 并与张鸿儒论文^[10]中的实测值进行比较, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 3 组混凝土 28 d 抗压强度和快速氯离子迁移系数的计算值与实测值的相对误差均小于 15%。因此, 可以认为基于广义界面参数 ξ_g 的模型在一定程度上能预测 28 d 龄期下混凝土的抗压强度和快速氯离子迁移系数值。

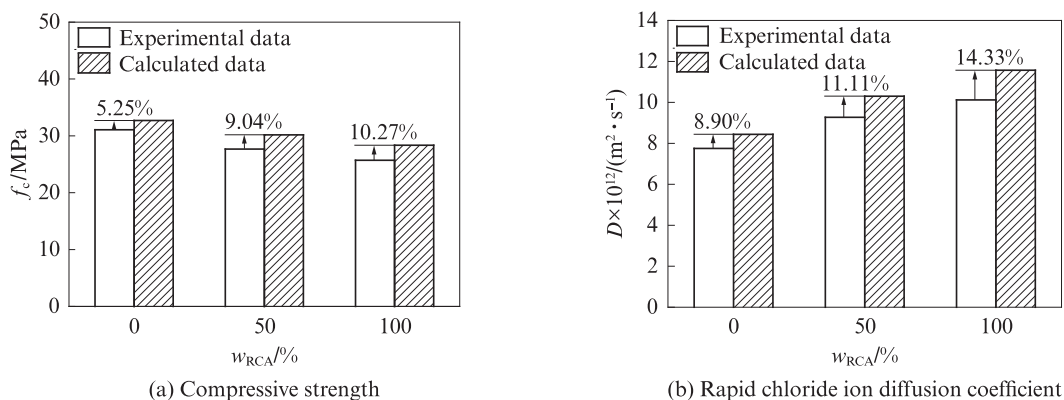


图4 混凝土材料性能的实测值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of experimental data and calculated data of concrete material properties

由于再生粗骨料上附着的老砂浆含量具有随机性, 因此再生粗骨料混凝土材料性能具有较大的离散性。由图 4 还可见, 相比于实测值, 通过广义界面参数 ξ_g 计算得到的 28 d 抗压强度更大、抗氯离子渗透性能更差, 这可能是张鸿儒论文^[10]与本文所用再生粗骨料中老砂浆含量及性能不一致等原因所致。

3 结论

(1) 随着再生粗骨料取代率和水灰比的增加, 再生粗骨料混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能均降低。

(2) 长度界面参数 ξ 只能表征再生粗骨料取代率

对界面含量的影响,未考虑混凝土内粗骨料数量对界面含量的影响.

(3)体积界面参数 ξ_v 同时考虑了再生粗骨料取代率和粗骨料数量对界面体积的影响.但是,混凝土性能不仅与界面体积相关,也与砂浆性能相关,而 ξ_v 未能反映砂浆对混凝土性能的影响.

(4)广义界面参数 ξ_g 能综合反映混凝土内界面体积和新砂浆性能对混凝土性能产生的影响,可以定量地揭示再生粗骨料混凝土材料性能的劣化机理.

(5)广义界面参数 ξ_g 具有一定的可行性,但其适用性仍存在着一些不足.在后续研究中,可以基于本研究提出的广义界面参数 ξ_g ,综合考虑再生粗骨料成分来源、老砂浆含量及老砂浆性能等因素的影响,建立更加系统全面的界面参数.

参考文献:

- [1] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31:364-383.
- [2] TAM V W Y, SOOMRO M, EVANGELISTA A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications(2000—2017)[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 272-292.
- [3] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 721-740.
- [4] RAJEEV R, REBECCA J G, YAN Z G, et al. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117651.
- [5] PENG L G, ZHAO Y X, ZHANG H R. Flexural behavior and durability properties of recycled aggregate concrete(RAC) beams subjected to long-term loading and chloride attacks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 277: 122277.
- [6] ZHAO Y X, PENG L G, ZENG W L, et al. Improvement in properties of concrete with modified RCA by microbial induced carbonate precipitation[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124: 104251.
- [7] RYU J S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate[J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(20): 1565-1567.
- [8] XIAO J Z, LI W G, CORR D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52: 82-99.
- [9] ADESSINA A, FRAJ A, BARTHELEMY J F, et al. Experimental and micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 126: 105900.
- [10] 张鸿儒. 基于界面参数的再生骨料混凝土性能劣化机理及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- ZHANG Hongru. Deterioration mechanism of recycled aggregate concrete(RAC) based on interface parameters and the application of RAC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [11] YOO D Y, YOON Y S. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(2):125-142.
- [12] LIN Y Z, YAN J C, WANG Z F, et al. Effect of silica fumes on fluidity of UHPC: Experiments, influence mechanism and evaluation methods[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 451-460.
- [13] RAGALWAR K, HEARD W F, WILLIAMS B A, et al. Significance of the particle size distribution modulus for strain hardening-ultra-high performance concrete(SH-UHPC) matrix design[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234 :117423.
- [14] BROUWERS H J H, RADIX H J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(11): 2116-2136.

(上接第 699 页)