

文章编号:1007-9629(2024)08-0667-08

基于性能需求的机制骨料混凝土配合比设计

吴朝明¹, 李春锦^{2,3}, 胡堃¹, 吴程航¹, 任强^{2,3,*}

(1. 贵州桥梁建设集团有限责任公司, 贵州 贵阳 550001; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 基于 Dinger-Funk 级配理论提出了机制骨料级配设计方法, 通过修正 Bolomey 公式明确了适用于机制骨料混凝土的强度-水胶比关系; 通过引入裹浆厚度概念建立了骨料与浆体之间的体积关系, 并将机制砂中的石粉视作浆体组成, 建立了机制骨料混凝土的配合比设计方法并进行了验证. 结果表明: 混凝土的工作性可以通过裹浆厚度来加以调控; 混凝土的抗压强度和氯离子扩散系数与裹浆厚度无明显相关性, 可以通过水胶比来加以调控; 本文提出的配合比设计方法可以定量设计满足不同性能需求的机制骨料混凝土.

关键词: 紧密堆积理论; 机制骨料混凝土; 裹浆厚度; 配合比设计

中图分类号: TU525

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.001

Mix Design of Manufactured Aggregate Concrete According to Performance Requirements

WU Chaoming¹, LI Chunjin^{2,3}, HU Kun¹, WU Chenghang¹, REN Qiang^{2,3,*}

(1. Guizhou Bridge Construction Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The mix design of manufactured aggregate was proposed based on the Dinger-Funk grading model. The mass relationship between binder and water for concrete with manufactured aggregate was determined by modifying the Bolomey's formula. The paste thickness was introduced to establish the volume relationship between aggregate and paste. In addition, the stone powder in manufactured sand was considered as a component of the paste. Finally, the mix design method of concrete with manufactured sand was proposed and verified with concrete of different strength grades. The results show that the workability of concrete can be regulated by the paste thickness. The compressive strength of concrete and the diffusion coefficient of chloride have no obvious correlation with the paste thickness, with the water to binder ratio being the main factor regulating the hardened performance of concrete. The proposed mix design method can be used to quantitatively design concrete with manufactured aggregate for various performance requirements.

Key words: close packing theory; manufactured aggregate concrete; paste thickness; mix design

混凝土是当今世界范围内用量最大的土木工程材料, 具有易取材、高可塑性等优点. 如何在满足性

收稿日期: 2023-10-30; 修订日期: 2023-12-05

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2022-122-024); 宁波市重大科技攻关暨揭榜挂帅项目(2022Z030)

第一作者: 吴朝明(1980—), 男, 贵州印江人, 贵州桥梁建设集团有限责任公司高级工程师, 学士. E-mail: 10482756@qq.com

通讯作者: 任强(1991—), 男, 江苏徐州人, 同济大学特聘研究员, 博士生导师, 博士. E-mail: renqiang@tongji.edu.cn

能需求的前提下有效降低混凝土的碳排放,是近年来的研究热点^[1-2].采用紧密堆积理论对混凝土的配合比进行优化,可以有效降低混凝土中胶凝材料的用量,从而降低混凝土的碳排放.

为实现骨料颗粒的紧密堆积,常见的处理方法为选用级配模型并设置目标级配: Peng等^[3]利用Dinger-Funk级配模型,对活性粉末混凝土中的细骨料及胶凝材料的占比进行了优化,得到了密实度较高的混凝土;崔巩等^[4]在活性粉末混凝土的配合比优化设计中也采用了类似的处理方法;万纯斌等^[5]的研究则主要着眼于骨料层面,优化了各粒径骨料的占比,进而实现了骨料的紧密堆积.然而,已有研究大多采用球体骨料假设,而机制砂的形状不规则,传统的级配与配合比设计方法难以满足机制骨料替代天然骨料制备混凝土的需求,亟须针对机制骨料的特点建立机制骨料高性能混凝土的配合比设计方法.

基于此,本文从机制骨料混凝土的基本构成出发,研究并提出了组分间体积关系的确定方法.通过引入关键参数,建立了面向不同性能需求的机制骨料混凝土配合比设计方法,并进行了验证.

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料为南京小野田生产的P·II 52.5水泥(C)以及深圳道特科技有限公司生产的粉煤灰(FA),其粒径分布如图1所示,化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)如表1所示.骨料来自贵州省纳雍县

马脚岩料场,其中细骨料为石灰岩机制砂(MS),粗骨料为单级配石灰岩碎石(CA,粒径分别为4.75~9.5、9.5~16、16~19、19~26.5 mm).机制砂的粒径分布如图2所示,骨料的性能如表2所示.外加剂为上海英杉新材料有限公司产PC-200型粉体聚羧酸高性能减水剂,减水率25%;拌和水为上海市自来水.

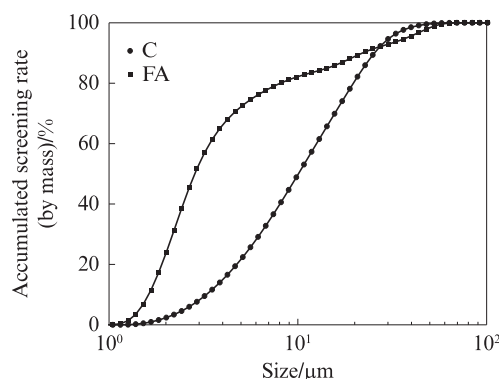


图1 胶凝材料的粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of cementitious materials

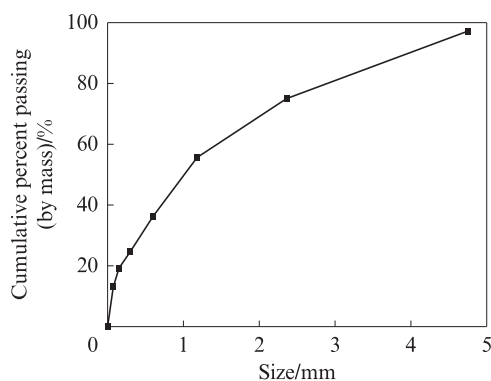


图2 机制砂的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of manufactured sand

表1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of cementitious materials

Material	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	IL
C	0.08	0.65	4.56	20.90	0.12	2.65	0.05	0.87	65.00	0.22	0.09	3.23	1.58
FA	1.65	1.79	13.10	51.80	2.02	0.29	0.22	2.97	16.60	0.94	0.07	5.02	2.04

Unit: %

表2 骨料的性能

Table 2 Properties of aggregates

Aggregate	MB value/ (g·kg ⁻¹)	w(stone powder)/%	Apparent density/ (g·cm ⁻³)
MS	0.4	11.5	2.68
CA			2.70

1.2 试验方法

1.2.1 骨料性能测试

骨料级配与堆积空隙率(φ_G)测试参照JGJ 52—

2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》执行;机制砂中的石粉含量(ω)测试参照GB/T 14684—2022《建设用砂》执行.

1.2.2 混凝土性能测试

混凝土的坍落度与扩展度测试按照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》执行.

混凝土的抗压强度测试按照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行.采

用边长为 100 mm 的立方体模具成型试件,成型 1 d 后拆模,并置于标准养护室中养护至 7、28 d,每组试件每个龄期进行 3 次重复测试,结果取其平均值。

混凝土的抗氯离子渗透性能测试参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的“RCM法”执行。

2 机制骨料混凝土配合比的设计

图 3 为混凝土的构成组分示意图。混凝土可视为由固体、液体及气体所构成的三相复合材料。其中,

固体组分由骨料、胶凝材料和石粉三部分组成。鉴于机制砂中石粉的惰性与粒径特征,将其作为浆体组成,但不作为胶凝材料考虑。在加水拌和之后,固体组分中的胶凝材料及石粉与拌和水结合形成浆体,故而混凝土亦可视为由骨料、浆体和空气所构成的非均质多孔材料。因此,要确定机制骨料混凝土的配合比,需确定以下 3 大关系:(1)不同粒径骨料之间的体积关系,可用级配表示;(2)胶凝材料与水之间的质量关系,可用水胶比表示;(3)浆体与骨料之间的体积关系,可用浆骨比表示。

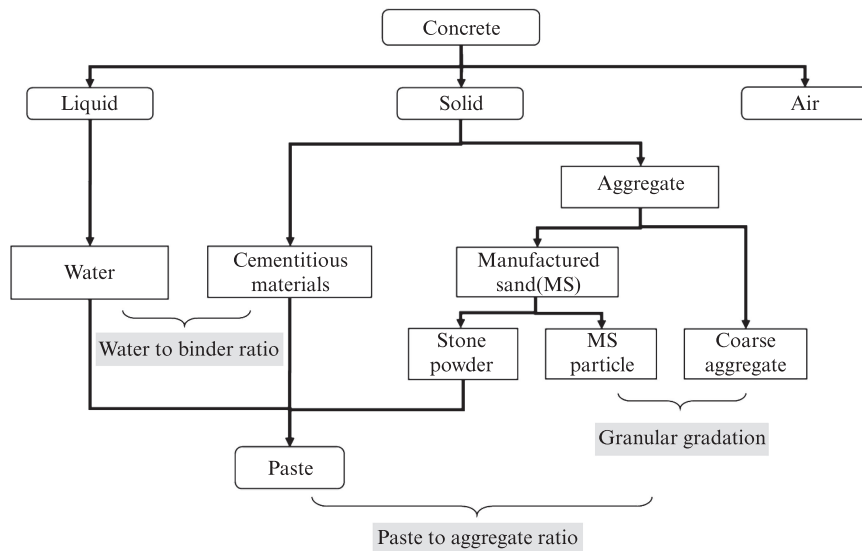


图 3 混凝土的构成组分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of concrete components

由图 3 可知,混凝土拌和物中浆体、空气和骨料的体积之和为 1,即:

$$V_p + V_{air} + V_M = 1 \quad (1)$$

式中: V_p 为浆体体积, m^3 ; V_{air} 为空气体积, m^3 ; V_M 为骨料体积, m^3 。

浆体由胶凝材料、石粉和拌和水等 3 种组分构成,其体积关系式如式(2)所示。

$$V_p = V_c + V_{powder} + V_{water} \quad (2)$$

式中: V_c 为胶凝材料体积, m^3 ; V_{powder} 为石粉体积, m^3 ; V_{water} 为拌和水体积, m^3 。

石粉体积可以根据机制砂体积及机制砂中的石粉含量计算得出,如式(3)所示。

$$V_{powder} = \frac{\omega \cdot V_M \cdot \delta}{(1 - \omega)} \quad (3)$$

式中: δ 为通过优化级配设计之后得出的砂率, %。

2.1 骨料级配的确定

骨料的级配设计是实现紧密堆积的途径, Dinger-Funk 模型是一种典型的级配设计模型,其表达式如下:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (4)$$

式中: $P(D)$ 为骨料粒径大于筛孔尺寸 (D) 骨料的体积分, %; q 为 Dinger-Funk 级配曲线模型中的分布模数,代表体系中粗细骨料的分布比例; D_{max} 和 D_{min} 分别为体系中的最大与最小骨料粒径, mm。

将试验所用骨料进行筛分之后,按 Dinger-Funk 级配进行复配,分析机制砂 (MS, 0.075~4.75 mm)、碎石 (CA, 4.75~26.5 mm)、机制砂-碎石骨料体系 (MS+CA, 0.075~26.5 mm) 的堆积空隙率随分布模数的变化情况,以此确定机制骨料体系在 Dinger-Funk 模型下达到最紧密堆积状态所对应的分布模数 (q_M)。试验所取分布模数的变化范围为 0.1~0.6。

图 4 为机制骨料堆积空隙率在不同 q 值下的变化情况。由图 4 可知,当 $q=0.35$ 时,机制砂、碎石及机制砂-碎石骨料体系在 Dinger-Funk 模型下的堆积空隙率最小,即机制骨料在 Dinger-Funk 模型下达到最紧密堆积状态时所对应的分布模数 $q_M=0.35$ 。

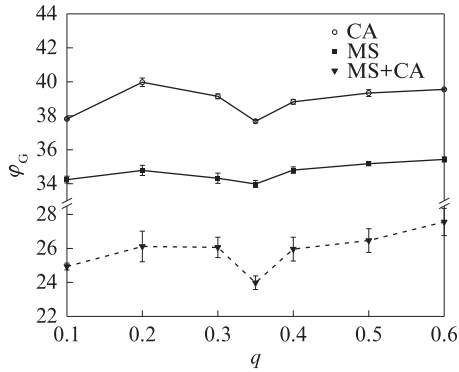


图4 机制骨料堆积空隙率在不同q值下的变化情况
Fig. 4 Packing void fractions of aggregate with various q values

以 $q_M=0.35$ 时的 Dinger-Funk 级配模型作为目标级配,使用最小二乘法可以实现骨料级配的优化设计.骨料级配优化设计的实质为实际颗粒级配与目标颗粒级配之间的差异最小化(R_{min})^[6].最小二乘法的表达式如式(5)所示.

$$R = \sum_{i=1}^n [P_{tar}(D_i^{i+1}) - P_{mix}(D_i^{i+1})]^2 \rightarrow R_{min} \quad (5)$$

式中: R 为二者的残差; D_i 为第*i*级骨料的平均粒径, m ; P_{tar} 为目标级配曲线; P_{mix} 为待设计的骨料级配曲线.

本试验在进行骨料级配的优化设计时,将机制砂(0.075~4.75 mm)作为整体进行考虑,而将碎石按粒径大小分为4个部分(4.75~9.5、9.5~16、16~19、19~26.5 mm)进行考虑.通过上述方法可以完成骨料级配的优化设计.本试验中骨料级配优化设计的特点在于:可在不改变原有机制砂级配的基础上,通过改变砂率与不同粒径碎石骨料的体积分数,实现对骨料级配的优化设计.

骨料级配的优化结果如表3所示.

表3 骨料级配的优化结果

Aggregate size/mm	Accumulated screening rate(by mass)/%	
	P_{tar}	P_{mix}
0.075	0	0
0.15	4.04	6.57
0.3	9.12	7.88
0.6	15.75	15.99
1.18	23.89	25.02
2.36	34.49	34.99
4.75	48.14	46.38
9.5	65.40	66.08
16	81.43	82.47
19	87.39	88.32
26.5	100.00	100.00

由表3可以计算出优化后机制骨料体系中不同粒径骨料的体积分数,结果如表4所示.由于此时的骨料级配与目标级配之间的差异最小,可以认为经过优化设计之后的骨料体系接近于最紧密堆积状态.

表4 不同粒径骨料在机制骨料体系中的体积分数

Table 4 Volume fractions of aggregates with different particle sizes in manufactured aggregate system

Aggregate size/mm	0.075-4.75	4.75-9.5	9.5-16	16-19	19-26.5
Volume fraction/%	46.40	19.70	16.39	5.85	11.68

2.1 混凝土水胶比的确定

水灰比是决定混凝土抗压强度的关键参数.对于含有粉煤灰、矿渣、硅灰等辅助胶凝材料的胶凝材料体系,采用等效水灰比($m_w/m_{C(eq)}$)更有意义.

混凝土强度-等效水灰比的关系可采用通用 Bolomey 公式表示(见式(6)).

$$f_c = \frac{\sigma}{m_w/m_{C(eq)}} + \epsilon \quad (6)$$

式中: f_c 为混凝土设计强度,MPa; $m_{C(eq)}$ 为等效水泥用量,g; m_w 为用水量,g; σ 及 ϵ 为与水泥种类及养护龄期相关的常数.

$m_{C(eq)}$ 可以通过胶凝材料用量(m_B)、辅助胶凝材料的掺量(p)及活性因子(k)进行计算(见式(7)).其中, k 与其种类、掺量及混凝土的试验龄期相关^[7-8].需要说明的是,使用最广的石灰岩质机制砂中的石粉可认为是惰性的,不属于等效水泥.

$$m_{C(eq)} = [1 - p(1 - k)]m_B \quad (7)$$

采用课题组前期积累的大量试验数据,对式(7)进行拟合,结果如图5所示.

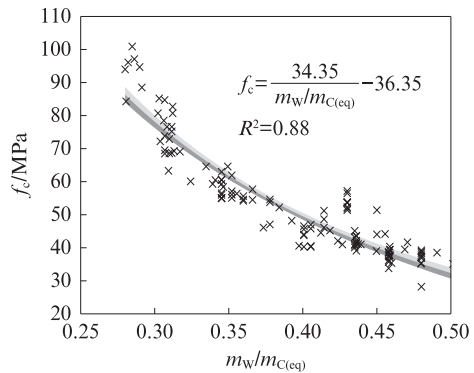


图5 修正 Bolomey 公式的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of modified Bolomey formula

由图5可知,针对机制骨料混凝土进行修正的 Bolomey 公式可由式(8)表示.

$$f_c = \frac{34.35}{m_w/m_{C(eq)}} - 36.35 \quad (8)$$

根据式(8)可计算出配制机制骨料混凝土所需的等效水灰比.根据辅助胶凝材料的掺量及活性因子,混凝土的等效水灰比可以转化为实际水胶比(m_w/m_B)(见式(9)).

$$m_w/m_B = [1 - p(1 - k)] \cdot m_w/m_{C(eq)} \quad (9)$$

综上所述,当辅助胶凝材料的种类、掺量及混凝土的试验龄期已知时,通过式(9)即可计算得到混凝土实际所需的水胶比.

2.2 混凝土浆骨比的确定

混凝土中的浆体可分为填充浆体和富余浆体.填充浆体用于填充骨料堆积产生的空隙,富余浆体则用于包裹骨料颗粒,在骨料颗粒之间形成一层润滑膜^[9].用于包裹骨料颗粒表面的浆体膜厚度称为骨料的裹浆厚度.

机制骨料混凝土中浆体总量与裹浆厚度之间的关系可由式(10)表示.

$$V_p = t_p \cdot m_{MA} A_M + V_{pore} \quad (10)$$

式中: t_p 为骨料表面的平均裹浆厚度,m; m_{MA} 为单位体积混凝土内机制骨料的质量, kg/m^3 ; A_M 为机制骨料的比表面积, m^2/kg ; V_{pore} 为单位体积的骨料堆积体中的空隙体积, m^3 .

通过骨料质量-密度-体积之间的转化关系,可将式(10)转化为:

$$V_p/V_M = (t_p \cdot \rho_s \cdot A_M + \varphi_G) / (1 - \varphi_G) \quad (11)$$

式中: V_p/V_M 为混凝土的浆骨比; φ_G 为机制骨料的堆积空隙率.

根据式(11)可知,混凝土的浆骨比由骨料的堆

积空隙率、骨料的比表面积及裹浆厚度共同决定.在骨料类型相同的条件下,骨料的堆积空隙率主要受骨料级配的影响^[10],当骨料级配一致时,可认为骨料堆积产生的空隙率一致.骨料的比表面积可以根据骨料级配进行计算,如式(12)所示^[11].

$$A_M = \gamma \frac{6000}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{D_i} \quad (12)$$

式中: γ 为修正系数,取1.21^[12],无量纲; ρ 为骨料的表观密度, kg/m^3 ; K_i 为第*i*级骨料质量在总体骨料质量中所占的比例.

综上所述,当骨料级配确定时,骨料的堆积空隙率与比表面积随之确定,继而裹浆厚度成为式(10)的唯一变量,当 t_p 确定时,混凝土中浆体与骨料之间的相对关系随之确定.

2.3 混凝土配合比的确定

为验证机制骨料混凝土配合比设计方法的可行性,利用该方法设计C30、C60这2种混凝土的配合比,并依据配合比进行混凝土配制.

本试验中,混凝土的胶凝材料体系由水泥及粉煤灰构成,其中粉煤灰掺量为20%.根据式(9)可计算出此时C30混凝土对应的水胶比为0.44,C60混凝土对应的水胶比为0.31.试验所用机制砂中石粉含量为11.5%,经级配优化后的骨料堆积空隙率为24%.将C30混凝土的裹浆厚度设定为15~40 μm ,将C60混凝土的裹浆厚度设定为35~60 μm .

试验中的混凝土外加剂掺量取定值2.75%,意在探究相同外加剂掺量下裹浆厚度变化对混凝土工作性、力学性能及耐久性造成的影响.具体的混凝土配合比设计表如表5、6所示:

表5 C30混凝土的配合比
Table 5 Mix proportion of C30 concrete

Specimen	$t_p / \mu m$	C	FA	MS	CA				W
					Unit: kg/m^3				
					4.75 mm < D ≤ 9.5 mm	9.5 mm < D ≤ 16 mm	16 mm < D ≤ 19 mm	19 mm < D ≤ 26.5 mm	
1	15	249.1	62.3	985.9	371.0	308.6	110.2	219.9	137.1
2	20	264.7	66.2	965.8	363.4	302.3	107.9	215.4	145.7
3	25	279.7	69.9	946.5	356.1	296.3	105.8	211.1	153.9
4	30	294.0	73.5	928.0	349.1	290.5	103.7	206.9	161.9
5	35	307.9	77.0	910.1	342.4	284.9	101.7	203.0	169.5
6	40	321.2	80.3	893.0	336.0	279.5	99.8	199.1	176.8

3 结果与讨论

3.1 裹浆厚度对混凝土工作性的影响

图6为裹浆厚度对混凝土工作性的影响.由图6

可见:2种混凝土的坍落度和扩展度均随着裹浆厚度的减小呈降低趋势.这是由于随着骨料表面裹浆厚度的降低,混凝土的浆骨比也随之降低,进而骨料之间摩擦力增大^[13].在裹浆厚度相同的情况下,低强度

表6 C60混凝土的配合比
Table 6 Mix proportions of C60 concrete

Unit: kg/m³

Specimen	$t_p/\mu\text{m}$	C	FA	MS	CA				W
					4.75 mm < D ≤ 9.5 mm	9.5 mm < D ≤ 16 mm	16 mm < D ≤ 19 mm	19 mm < D ≤ 26.5 mm	
1	35	369.3	92.3	910.1	342.4	284.9	101.7	203.0	143.9
2	40	385.2	96.3	893.0	336.0	279.5	99.8	199.1	150.1
3	45	400.6	100.1	876.4	329.8	274.3	97.9	195.4	156.1
4	50	415.4	103.8	860.5	323.8	269.4	96.2	191.9	161.9
5	55	429.7	107.4	845.1	318.0	264.6	94.4	188.5	167.4
6	60	443.5	110.9	830.3	312.4	259.9	92.8	185.2	172.8

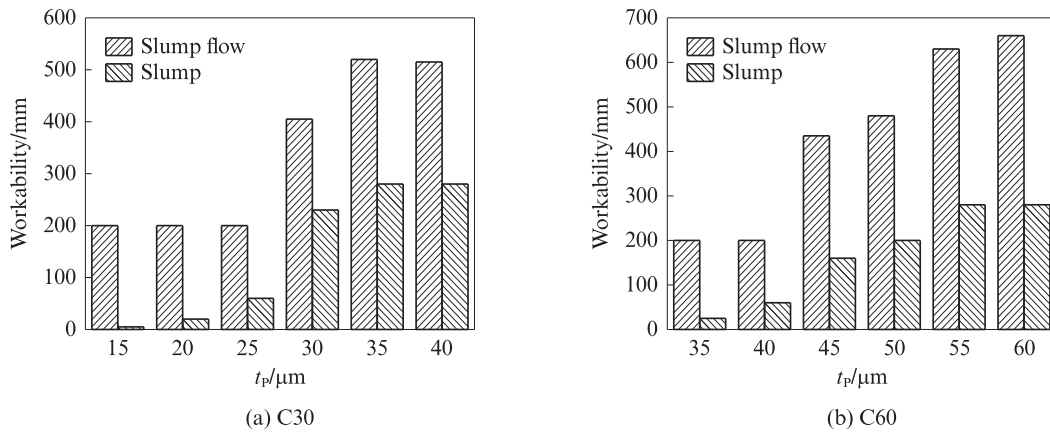


图6 裹浆厚度对混凝土工作性的影响

Fig. 6 Influence of paste thickness on workability of concrete

等级混凝土的工作性优于高强度等级混凝土.由式(10)可知,在裹浆厚度相同时,不同强度等级混凝土的浆体体积一致,导致二者工作性出现较大差异的原因在于水胶比不同.随着水胶比的增加,浆体自身的黏度与屈服应力减小,提供的“润滑”作用更显著,表现为混凝土的工作性改善^[14-17].

综上所述,通过裹浆厚度可以调控混凝土的工作性.出于对自密实性能的需求,C30混凝土的裹浆厚度宜取35 μm以上,C60混凝土的裹浆厚度宜取

55 μm以上;出于对于干硬性性能的需求,C30混凝土的裹浆厚度宜取15~25 μm,C60混凝土的裹浆厚度宜取35~40 μm.

3.2 裹浆厚度对混凝土力学性能的影响

图7为裹浆厚度对混凝土抗压强度的影响.由图7可知:C30和C60混凝土在7 d时均达到了设计强度的要求;当裹浆厚度相同时,C30混凝土由于等效水胶比较高,其抗压强度显著低于C60混凝土;虽然混凝土的抗压强度随着裹浆厚度的变化而发生波动,

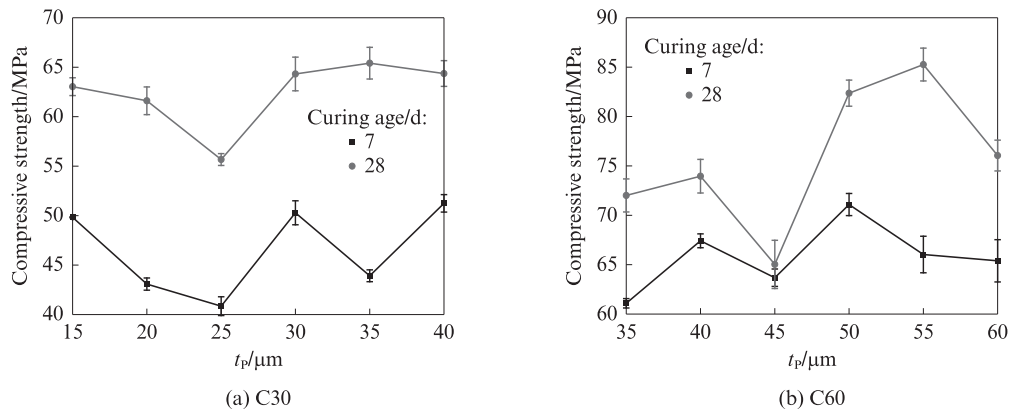


图7 裹浆厚度对混凝土抗压强度的影响

Fig. 7 Influence of paste thickness on compressive strength of concrete

但无明显规律,说明混凝土的抗压强度与裹浆厚度无明显的相关性。

综上所述,通过修正 Bolomey 公式所得到的水胶比可以满足不同设计强度等级混凝土的配合比设计需求。

3.3 裹浆厚度对混凝土耐久性的影响

试验采用非稳态氯离子迁移系数(D_{RCM})来评价混凝土的耐久性.图8为裹浆厚度对C60混凝土抗氯离子渗透性能的影响.由图8可知,混凝土的 D_{RCM} 值与裹浆厚度无明显的相关性.由于混凝土的抗氯离子渗透性能与混凝土的孔结构相关,当裹浆厚度较低时,浆体对骨料的包裹性较差,因而导致了混凝土内部的大孔较多,抗氯离子渗透性能较差;随着裹浆厚度的增加,浆体对于骨料的包裹性逐渐改善,混凝土内部的大孔数量逐渐减少,其抗氯离子渗透性能得到了一定程度的改善。

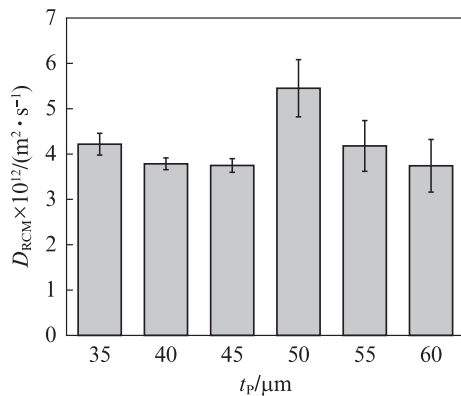


图8 裹浆厚度对C60混凝土抗氯离子渗透性能的影响
Fig. 8 Influence of paste thickness on chloride ion permeability resistance of C60 concrete

由试验得到,在裹浆厚度为35、40 μm 的情况下,C30混凝土的 D_{RCM} 值分别为 7.8×10^{-12} 、 $4.6 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,均显著高于相同裹浆厚度的C60混凝土.这是因为随着水胶比的增大,混凝土体系内部相互连通的孔隙占比增加,导致混凝土体系的空隙率增大,抗渗性降低。

综上所述,与混凝土的抗压强度表现类似,混凝土的 D_{RCM} 值与裹浆厚度无明显的相关性,裹浆厚度的变化对混凝土的硬化性能无明显影响。

4 结论

(1)提出了基于机制骨料粒形特征的紧密堆积级配设计方法,确定了不同粒径机制骨料的体积关系。

(2)提出了适用于机制骨料混凝土的修正 Bolomey 公式,确定了基于强度需求的胶凝材料与水

的质量关系。

(3)引入了裹浆厚度,确定了浆体与骨料的体积关系.混凝土的工作性随着裹浆厚度的增加而增加,可以通过裹浆厚度来调控混凝土的工作性;在15~60 μm 的裹浆厚度范围内,混凝土的抗压强度和氯离子迁移系数与裹浆厚度无明显的相关性,水胶比是调控混凝土硬化性能的主要因素。

(4)本文提出的配合比设计方法实现了机制砂高性能混凝土配合比的定量设计。

参考文献:

- [1] 蒋正武,高文斌,杨巧,等.低碳混凝土技术理念与途径思考[J].建筑材料学报,2023,26(11):1143-1150.
JIANG Zhengwu, GAO Wenbin, YANG Qiao, et al. Technical principles and approaches of low-carbon concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1143-1150. (in Chinese)
- [2] 汪保印,张洁,熊金伟,等.废弃石粉对混凝土的性能影响及碳排放分析[J].建筑材料学报,2023,26(11):1151-1157,1206.
WANG Baoyin, ZHANG Jie, XIONG Jinwei, et al. Influence of waste stone powder on the properties and carbon emissions of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1151-1157, 1206. (in Chinese)
- [3] PENG Y Z, LI X, LIU Y J, et al. Optimization for mix proportion of reactive powder concrete containing phosphorous slag by using packing model[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2020, 18(9):481-492.
- [4] 崔巩,刘建忠,姚婷,等.基于Dinger-Funk方程的活性粉末混凝土配合比设计[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(增刊II):15-19.
CUI Gong, LIU Jianzhong, YAO Ting, et al. Design of reactive powder concrete mix ratio based on Dinger-Funk equation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2010, 40 (Suppl II):15-19. (in Chinese)
- [5] 万纯斌,唐凯,李北星,等.基于致密配合比法的索塔清水混凝土配合比设计及性能研究[J].混凝土,2012(10):100-102.
WAN Chunbin, TANG Kai, LI Beixing, et al. Mixture proportion and properties of fair-faced concrete for cable support tower using a densified mixture design algorithm[J]. Concrete, 2012(10):100-102. (in Chinese)
- [6] HÜSKEN G, BROUWERS H J H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. [Erratum to document cited in CA149;562104][J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(9):832.
- [7] BABU K G, NAGESWARA RAO G S. Efficiency of fly ash in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 1993, 15(4):223-229.
- [8] HANSEN T C, HEDEGAARD S E. Modified rule of constant water-content for constant consistency of fresh fly-ash concrete mixes[J]. Materials and Structures, 1992, 25(6):347-354.
- [9] 孟令凯.基于浆体体积富余系数的混凝土配合比设计[D].烟

- 台:烟台大学, 2018.
- MENG Lingkai. Concrete mix design based on surplus coefficient of slurry volume [D]. Yantai : Yantai University, 2018. (in Chinese)
- [10] BROUWERS H J. Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3):031309.
- [11] 史才军, 王德辉, 安晓鹏, 等. 基于多种性能要求的混凝土组成设计方法[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(2):230-238.
- SHI Caijun, WANG Dehui, AN Xiaopeng, et al. Design method of concrete composition based on various performance requirements [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(2):230-238. (in Chinese)
- [12] CEPURITIS R, GARBOCZI E J, FERRARIS C F, et al. Measurement of particle size distribution and specific surface area for crushed concrete aggregate fines [J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(3):706-720.
- [13] 焦登武, 安晓鹏, 史才军, 等. 骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(9):1360-1366.
- JIAO Dengwu, AN Xiaopeng, SHI Caijun, et al. Effect of aggregate paste thickness on rheological properties of concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(9):1360-1366. (in Chinese)
- [14] 卢喆, 冯振刚, 姚冬冬, 等. 超高性能混凝土工作性与强度影响因素分析[J]. *材料导报*, 2020, 34(Z1):203-208.
- LU Zhe, FENG Zhengang, YAO Dongdong, et al. Analysis of influencing factors on workability and strength of ultra-high performance concrete [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Z1):203-208. (in Chinese)
- [15] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2014, 31(3):1-24.
- CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3):1-24. (in Chinese)
- [16] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1):141-149.
- WANG Dehui, SHI Caijun, WU Linmei. Research and application of ultra-high performance concrete in China [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(1):141-149. (in Chinese)
- [17] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101:741-751.