

文章编号:1007-9629(2025)03-0261-09

两相悬浮体系下机制砂自密实混凝土性能设计

何小兵^{1,*}, 刘威力², 肖杰¹, 刘李香², 高举¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

2. 江门市银洲湖高速公路有限公司, 广东 江门 529000)

摘要:将机制砂自密实混凝土视为粗骨料加砂浆的固液两相悬浮体系, 设计了 4 组基础砂浆来制备机制砂自密实混凝土, 每组在 1.5~2.9 mm 范围内设置 8 种砂浆膜厚, 研究了基础砂浆流变特性、强度及膜厚对机制砂自密实混凝土工作性能和力学性能的影响, 建立了基于基础砂浆性能及膜厚的机制砂自密实混凝土性能预测公式. 结果表明: 为保证机制砂自密实混凝土的工作性能和力学性能, 其优化砂浆膜厚范围为 1.9~2.3 mm, 对应的基础砂浆最大初始屈服剪切应力范围为 51.9~65.2 Pa; 预测公式拟合相关系数均达 0.90 以上, 相关性显著.

关键词:机制砂; 自密实混凝土; 两相悬浮体系; 流变参数; 工作性; 强度

中图分类号: TU528.53

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.009

Performance Design of Self-compacting Concrete Incorporated with Crushed Sand Based on Two-Phase Suspension System

HE Xiaobing^{1,*}, LIU Weili², XIAO Jie¹, LIU Lixiang², GAO Ju¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Jiangmen Yinzhouhu Expressway Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

Abstract: Self-compacting concrete (SCC) is regarded as a two-phase suspension system consisting of coarse aggregate and mortar. Four groups of basic mortars prepared by crushed sand were designed to prepare SCC, which had eight mortar film thicknesses ranging from 1.5 mm to 2.9 mm. The effects of the mortar rheological properties, strength and film thickness on the workability and mechanical properties of the SCC were investigated. The performance prediction formulas for SCC based on mortar properties (initial yield shear stress of the fresh mortar and strength of the hardened mortar) and film thicknesses were established. The results show that to ensure the workability and mechanical properties of the SCC incorporated with crushed sand, the optimized mortar film thickness ranges from 1.9 mm to 2.3 mm, corresponding to a basic mortar maximum initial yield stress range from 51.9 Pa to 65.2 Pa; the predictive formulas exhibit significant correlation, with correlation coefficients exceeding 0.90.

Key words: crushed sand; self-compacting concrete; two-phase suspension system; rheological parameter; workability; strength

自密实混凝土(SCC)是指无需人工振捣即可依靠自重完成模板填充的高流动性、高稳定性混凝土. 因其具有施工速度快、人工依赖性小、工程质量高、噪音小等优势, 并可适用于作业面狭窄和钢筋密集区域, 故在现代建筑工程中得到了广泛应用^[1-3]. 由于

天然砂数量正在逐步减少, 机制砂作为替代物已经成为了混凝土行业发展的必然趋势^[4-8].

自密实混凝土可以被认为是由粗骨料和砂浆构成的固液两相体系^[9]. 砂浆填充完粗骨料空隙后, 富余砂浆包裹在粗骨料表面. 当粗骨料性质和占比确

收稿日期: 2024-04-03; 修订日期: 2024-05-11

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0744); 广东江门银洲湖高速公路科研项目(YZH-YS023-2021-022)

第一作者(通讯作者): 何小兵(1978—), 男, 湖北仙桃人, 重庆交通大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: david.hxb@gmail.com

定后,砂浆性能^[10-11]及包裹膜厚^[12-14]直接影响自密实混凝土的性能. Murata等^[15]发现混凝土坍落度与其屈服应力之间存在显著相关性,但其关系式仅适用于坍落度在125~260 mm范围内的混凝土. 胡小芳等^[16]进一步优化了混凝土坍落度适用范围. Sedran等^[17]也发现自密实混凝土的坍落扩展度与其屈服应力关系密切,建立了自密实混凝土坍落扩展度与其屈服应力的关系. Nielsson等^[18]发现自密实混凝土扩展度达到500 mm所需的时间T500与其塑性黏度之间具有良好的对应关系,并给出了满足自密实要求的屈服应力-塑性黏度区域. 基于两相悬浮体系假定和膜厚理论的配合比设计方法的关键在于砂浆性能及膜厚设计,该方法不仅可以简化自密实混凝土配合比设计,而且可以充分反映其物理力学本质,为基于性能的自密实混凝土设计方法提供理论参考.

本文基于两相悬浮体系和膜厚理论,设计了不同基础砂浆流变特性、强度和砂浆膜厚的机制砂自密实混凝土,并对其工作性能(坍落扩展度、间隙通过性指标、离析率及T500)和力学性能(抗压强度及抗折强度)进行了测试,研究了基础砂浆流变特性、强度和砂浆膜厚对机制砂自密实混凝土工作性能与力学性能的影响规律,建立了基于基础砂浆流变特性、强度和砂浆膜厚的机制砂自密实混凝土性能预测公式,以期为机制砂自密实混凝土的设计和应用提供参考.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料及配合比

水泥(C)采用2种:一种为重庆小南海水泥厂生

产的P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,其表观密度为3 020 kg/m³,比表面积为402 m²/kg,80 μm筛余量¹⁾为0.6%,标准稠度用水量为27.4%;另一种为诸城市杨春水泥有限公司生产的P·O 52.5水泥,其比表面积为381 m²/kg,标准稠度用水量为27.1%. 粉煤灰(FA)采用重庆华珞粉煤灰公司生产的F类Ⅰ级粉煤灰,其表观密度为2 250 kg/m³,45 μm筛余量为0%,烧失率为5%,需水率为95%. 硅灰(SF)采用成都明凌科技有限公司生产的SF92硅灰,其烧失率为3%,含水率为0.5%,需水量比为118%,碱含量为0.3%,氯离子含量为1%,活性为97%. 细骨料采用石灰岩机制砂(CS),其细度模数为3.2,细粉含量为3%,表观密度为2 712 kg/m³,堆积密度为1 521 kg/m³. 粗骨料(CA)采用5~16 mm的连续级配碎石,表观密度为2 780 kg/m³,堆积密度为1 450 kg/m³,其级配如表1所示. 减水剂(WR)选用高效聚羧酸减水剂母液,减水率为25%~40%. 试验用水(W)为重庆主城自来水,水温(20±5)℃.

分别采用编号为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的机制砂基础砂浆制备强度等级为C30、C40、C50、C80的机制砂自密实混凝土,其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组砂浆采用P·O 42.5R水泥,Ⅳ组砂浆采用P·O 52.5水泥. 基础砂浆配合比如表2所示,其性能如表3所示.

机制砂自密实混凝土配合比见表4. 每个强度等级混凝土设置8种砂浆膜厚(T_m),其范围为1.5~2.9 mm. 两相悬浮体系及膜厚理论示意图如图1所示,将粗骨料简化成球体并假设所有粗骨料裹浆厚度一致,则可以通过拟定砂浆膜厚来控制粗骨料和砂浆占比,如式(1)所示,从而改变裹浆厚度.

表1 粗骨料级配

Table 1 Gradation of coarse aggregates

Sieve size/mm	Sieve residue(by mass)/%	Accumulative sieve residue(by mass)/%
19	0	0
16	5.4	5.4
9.5	61.2	66.6
4.75	30.9	97.5
2.36	2.5	100.0

表2 基础砂浆配合比

Table 2 Mix proportion of basic mortar

Mortar	Water-binder ratio	Sand volume fraction	w(FA)/%	w(SF)/%	w(WR)/%
Ⅰ	0.40	0.44	30	0	1.2
Ⅱ	0.32	0.44	30	0	1.5
Ⅲ	0.26	0.44	30	0	2.0
Ⅳ	0.22	0.42	30	2	3.0

1)文中涉及的含量和比值等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表3 基础砂浆性能

Table 3 Properties of basic mortar

Mortar	Initial yield shear stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)	Compressive strength(28 d)/MPa	Flexural strength(28 d)/MPa
I	51.35	3.98	43.68	8.88
II	46.31	7.57	58.61	10.16
III	21.94	20.89	65.52	11.89
IV	40.19	22.87	84.16	13.01

表4 机制砂自密实混凝土配合比

Table 4 Mix proportion of SCC incorporated with crushed sand

Concrete	T_m /mm	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						
		CA	CS	C	FA	SF	W	WR
C30	1.5	977	774	329	141	0	184	5
	1.7	937	791	337	144	0	189	5
	1.9	899	807	344	147	0	192	5
	2.1	865	822	350	150	0	196	6
	2.3	833	836	356	153	0	199	6
	2.5	803	849	361	155	0	202	6
	2.7	775	861	366	157	0	205	6
	2.9	749	872	371	159	0	208	6
C40	1.5	977	774	367	157	0	165	8
	1.7	937	791	375	161	0	169	8
	1.9	899	807	383	164	0	172	8
	2.1	865	822	390	167	0	175	8
	2.3	833	836	396	170	0	178	9
	2.5	803	849	402	172	0	181	9
	2.7	775	861	408	175	0	184	9
	2.9	749	872	413	177	0	186	9
C50	1.5	977	774	397	170	0	149	11
	1.7	937	791	406	174	0	153	12
	1.9	899	807	414	177	0	156	12
	2.1	865	822	422	181	0	159	12
	2.3	833	836	429	184	0	161	12
	2.5	803	849	435	186	0	164	12
	2.7	775	861	441	189	0	166	13
	2.9	749	872	447	192	0	168	13
C80	1.5	977	739	429	189	13	138	19
	1.7	937	755	438	193	13	141	19
	1.9	899	771	447	197	13	144	20
	2.1	865	785	456	201	13	146	20
	2.3	833	798	463	204	14	149	20
	2.5	803	810	470	207	14	151	21
	2.7	775	821	477	210	14	153	21
	2.9	749	832	483	213	14	155	21

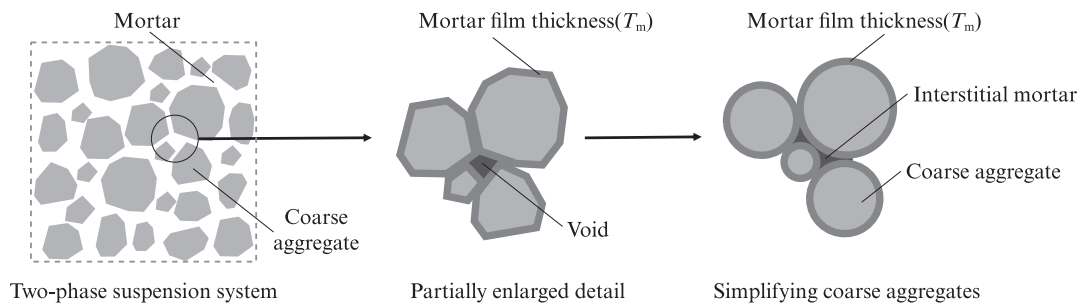


图1 两相悬浮体系及膜厚理论示意图

Fig. 1 Sketch map of two-phase suspension system and mortar film thickness theory

$$\left\{ \begin{array}{l} V_v + V_e + V_c = 1 \\ V_v = V_c e = V_c \left(\frac{\rho_{cad}}{\rho_{cpd}} - 1 \right) \\ V_e = A_c T_m = 6 V_c \sum_i \frac{K_i}{D_i} T_m \\ \overline{D_i} = \sqrt{D_i D_{i+1}} \\ V_c = \left[6 \left(T_m \sum_i \frac{K_i}{D_i} + \frac{1}{6} \right) + e \right]^{-1} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: V_e 、 V_v 、 V_c 分别为富余砂浆、空隙砂浆、粗骨料的体积分数, %; e 为空隙比, 即粗骨料自然堆积空隙体积与粗骨料实体体积(包括闭口孔隙)的比值, %; ρ_{cpd} 、 ρ_{cad} 分别为粗骨料的堆积密度和表观密度, kg/m^3 ; A_c 为单位体积混凝土中所含粗骨料的总表面积, m^2 ; K_i 为第 i 级粒径粗骨料所占总粗骨料的质量分数, %; $\overline{D_i}$ 为第 i 级粒径粗骨料的等效粒径, m ; D_i 、 D_{i+1} 分别为相邻筛孔尺寸, m 。

1.2 试验方法

1.2.1 工作性能测试

根据 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》, 测试混凝土的坍落扩展度、间隙通过性指标、离析率及 T500。

1.2.2 力学性能测试

根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》, 测试基础砂浆抗压强度和抗折强度, 抗压试件尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 抗折试件尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》, 测试机制砂自密实混凝土抗压、抗折强度, 抗压试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 抗折试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。

1.2.3 流变测试

采用 Anton Paar MCR-102 型旋转流变仪对基础砂浆的流变特性进行测试, 选取 8 mm 球形转子, 剪切速率设定为 $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 。测试数据采用相关度较

高的 Bingham 模型进行回归拟合, 从而获得基础砂浆的流变参数, 如式(2)所示。

$$\tau = \tau_0 + \eta \gamma \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa ; τ_0 为初始屈服剪切应力, Pa ; η 为塑性黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; γ 为剪切速率, s^{-1} 。

2 结果与分析

2.1 砂浆流变特性及膜厚对混凝土工作性能的影响

2.1.1 填充性

图2给出了不同砂浆制备的自密实混凝土的填充性随砂浆膜厚的变化规律。如图2(a)所示, 混凝土坍落扩展度随砂浆膜厚增加而增大, 但增长幅度逐渐减小, 当砂浆膜厚大于 2.3 mm 时, 混凝土坍落扩展度趋于平缓。以 C30 混凝土为例, 当砂浆膜厚由 1.7 mm 增加至 2.3 mm 时, C30 混凝土扩展度由 477 mm 增大至 648 mm , 增长了 35.8% ; 砂浆膜厚由 2.3 mm 增加至 2.9 mm 时, C30 混凝土坍落扩展度由 648 mm 增大至 695 mm , 仅增长了 7.3% 。砂浆膜厚决定着混凝土内部砂浆的数量。当砂浆膜厚较小时, 砂浆主要填充于粗骨料空隙之中, 而在粗骨料表面形成的润滑层厚度较小, 此时增加砂浆膜厚可以增大润滑层厚度, 降低拌和物的摩擦力, 从而显著改善混凝土的流动性。但是当砂浆膜厚达到某一限值后, 砂浆的润滑作用达到上限, 拌和物内部摩擦力趋于稳定, 因而混凝土坍落扩展度逐渐趋于平缓^[11]。混凝土坍落扩展度随着基础砂浆初始屈服剪切应力的减小而增大。当砂浆膜厚一定时, 砂浆初始屈服剪切应力越小, 其发生流动所需克服的阻力越小, 润滑效果越好, 混凝土的流动性越佳^[19]。

如图2(b)所示, 砂浆膜厚越大, 混凝土 T500 越短, 且呈现先快速降低后趋于平缓的趋势, 这与坍落扩展度变化趋势相对应, 且机理类似。混凝土 T500 随着基础砂浆塑性黏度的增大而增加, 这是由于基础砂浆的塑性黏度越大, 其流动性阻力越大, 混凝土流动速率越慢^[20]。

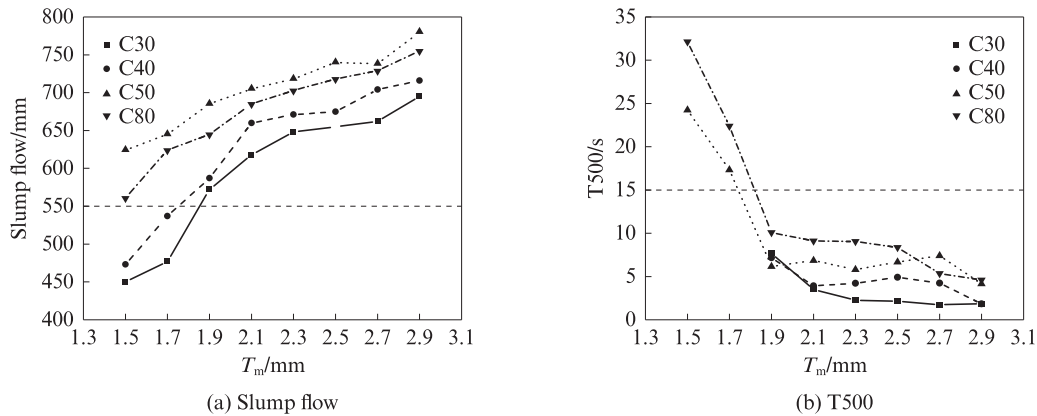


图2 不同砂浆制备的自密实混凝土的填充性随砂浆膜厚的变化规律

Fig. 2 Plot of T_m vs. filling ability of SCC prepared by different mortars

上述结果表明:混凝土的流动性由砂浆膜厚和砂浆流变特性共同决定,砂浆膜厚影响粗骨料之间的润滑层厚度,而流变特性则影响着砂浆层的润滑效果.砂浆初始屈服剪切应力对于混凝土坍落扩展度的影响更为显著,而砂浆塑性黏度则与流动速率关系更为密切.自密实混凝土要求坍落扩展度不小于550 mm、T500不大于15 s,因此砂浆膜厚不宜小于1.9 mm.

2.1.2 间隙通过性

间隙通过性指标反映了自密实混凝土遇到钢筋阻碍时的坍落扩展度损失,其数值越大则间隙通过性越差.不同砂浆制备的自密实混凝土的间隙通过性指标随砂浆膜厚的变化规律如图3所示.由图3可见:砂浆膜厚对混凝土间隙通过性指标影响不显著,总体呈现出随着砂浆膜厚的增大而降低的趋势;C30、C40、C50、C80混凝土的间隙通过性指标分别在44~54、34~44、14~22、27~34 mm范围内波动;基础砂浆初始屈服剪切应力越小,混凝土间隙通过性越大.这是因为根据流体阻塞模型^[21],基础砂浆初始屈服剪切应力越大,自密实混凝土在J环障碍处受到

的剪切应力与砂浆初始屈服剪切应力越容易达到平衡,越容易因J环阻碍而停止流动,从而降低了间隙通过性.上述结果表明:机制砂自密实混凝土的间隙通过性主要受基础砂浆初始屈服剪切应力的影响.自密实混凝土间隙通过性指标需小于50 mm,因此砂浆膜厚不宜小于1.9 mm.

2.1.3 抗离析性

不同砂浆制备的自密实混凝土的离析率随砂浆膜厚的变化规律如图4所示.由图4可见,当砂浆膜厚小于2.1 mm时,混凝土离析率随膜厚的增加变化不明显,但当砂浆膜厚超过2.1 mm后离析率开始迅速增大.以C50混凝土为例,当砂浆膜厚由1.5 mm增加至2.1 mm时,混凝土离析率仅从4.57%增至5.07%,但当膜厚由2.1 mm增加至2.9 mm时,离析率由5.07%骤增至24.81%.当砂浆膜厚较小时,砂浆数量较少并主要填充在粗骨料空隙之中,因而砂浆从粗骨料间渗出的数量较少.然而,随着砂浆膜厚的增大,包裹在粗骨料表面的富余砂浆量增加,其在重力作用下容易发生脱离,从而增大了离析风险^[22].总体来看,混

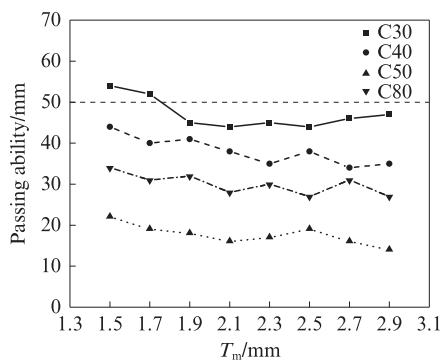


图3 不同砂浆制备的自密实混凝土的间隙通过性指标随砂浆膜厚的变化规律

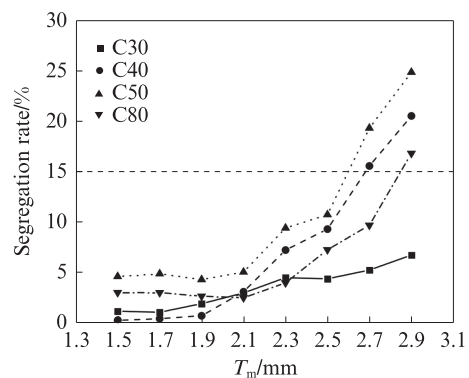
Fig. 3 Plot of T_m vs. passing ability of SCC prepared by different mortars

图4 不同砂浆制备的自密实混凝土的离析率随砂浆膜厚的变化规律

Fig. 4 Plot of T_m vs. segregation rate of SCC prepared by different mortars

混凝土离析率随着砂浆初始屈服剪切应力的增加而降低,这是由于砂浆初始屈服剪切应力越大,浆体发生流动的阻力越大,脱离粗骨料的砂浆量越少^[23].混凝土离析将严重损害工程质量,因此在设计自密实混凝土配合比时,要避免砂浆膜厚过大而发生离析.自密实混凝土离析率应不大于15%,因而砂浆膜厚不宜大于2.5 mm.综合考虑机制砂自密实混凝土的工作性能要求,其优化砂浆膜厚范围为1.9~2.5 mm.

2.2 砂浆强度及膜厚对混凝土力学性能的影响

机制砂自密实混凝土力学性能如图5所示.由图5可见,随着砂浆膜厚的增加,其抗压、抗折强度呈现先增大后减小的趋势,但总体变化幅度较小.当砂浆膜厚为2.1 mm时,C30、C40、C50、C80砂浆制备的自

密实混凝土抗压强度达到最大值,分别为44.98、54.76、61.91、95.21 MPa.混凝土的强度取决于粗骨料之间的胶结强度,其抗压、抗折强度随着基础砂浆抗压、抗折强度的增大而增大.当砂浆膜厚较小时,粗骨料间的砂浆数量较少,因而粗骨料之间的胶结作用较弱.随着砂浆膜厚的增加,粗骨料之间的砂浆量增多,粗骨料之间的胶结作用增强^[12],因此混凝土的强度提升.但当砂浆膜厚过大时,过多的砂浆量不仅削弱了粗骨料的骨架作用,还增大了离析风险.这一点可以结合图4进行分析,当砂浆膜厚超过2.1 mm之后,混凝土的离析率增大,因而强度降低.综合考虑机制砂自密实混凝土的工作性能和力学性能,其优化砂浆膜厚范围为1.9~2.3 mm.

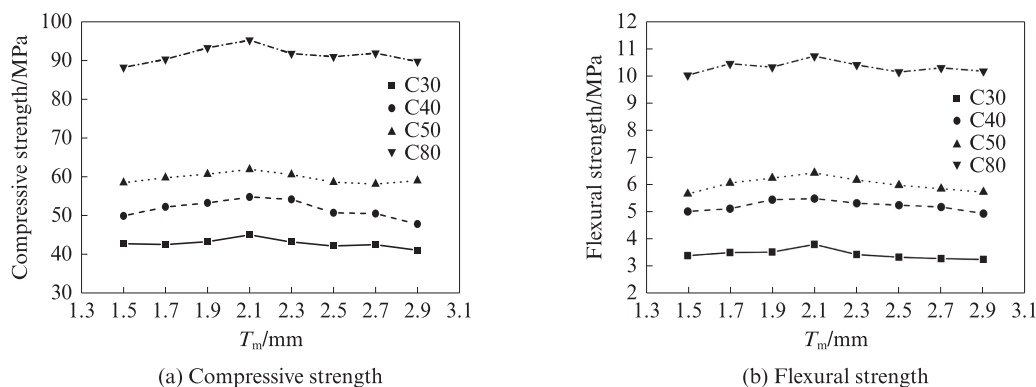


图5 不同砂浆制备的自密实混凝土的强度随砂浆膜厚的变化规律

Fig. 5 Plot of T_m vs. strength of SCC prepared by different mortars

2.3 基于砂浆性能及膜厚的混凝土性能预测

由图2(a)可见,机制砂自密实混凝土坍落扩展度随着砂浆膜厚的增加而增大,但提升幅度逐渐减缓,相同膜厚下,其随着基础砂浆初始屈服剪切应力的降低而增大.机制砂自密实混凝土坍落扩展度 S_F 与砂浆膜厚 T_m 、基础砂浆初始屈服剪切应力 τ_0 可以表示为联合分布函数 $S_F = F(T_m, \tau_0)$.如图5所示,机制砂自密实混凝土的强度随着砂浆膜厚的增加而先增大后减小,相同膜厚下,其随着基础砂浆强度的增大而增大.机制砂自密实混凝土抗压强度 f_{cu} 、抗折强度 f_{cf} 与砂浆膜厚 T_m 、基础砂浆抗压强度 f_{mcu} 、抗折强度 f_{mcf} 可以表示为联合分布函数 $f_{cu} = F(T_m, f_{mcu})$, $f_{cf} = F(T_m, f_{mcf})$.

2.3.1 机制砂自密实混凝土坍落扩展度预测

基于机制砂自密实混凝土的基础砂浆初始屈服剪切应力、砂浆膜厚以及坍落扩展度,绘制三维散点图,如图6所示.采用非线性曲面函数对其进行拟合,为统一量纲,引入重力加速度常数 g ,得到混凝土坍落扩展度的预测公式,如式(3)所示.可见,砂浆初始屈

服剪切应力、膜厚与机制砂自密实混凝土坍落扩展度之间具有良好的函数关系,相关系数 R^2 高达0.924.

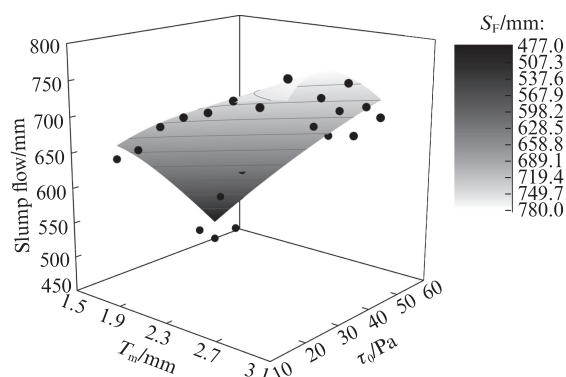


图6 机制砂自密实混凝土坍落扩展度拟合曲面

Fig. 6 Slump flow fitting curved surface of SCC incorporated with crushed sand

$$S_F = -0.05 \frac{T_m^2}{\left(\frac{\tau_0}{\rho g}\right)} + 2.96 \frac{T_m}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho g}}} + 199.02 T_m - 126587.53 \frac{\tau_0}{\rho g} + 428.52 \quad (3)$$

式中: ρ 为基础砂浆密度, kg/m^3 .

机制砂自密实混凝土坍落扩展度等高线图如图7所示.由图7可见,机制砂自密实混凝土坍落扩展度受基础砂浆膜厚和初始屈服剪切应力共同影响,在不同砂浆膜厚下,基础砂浆需要满足的流变特性要求不同,砂浆膜厚越小,基础砂浆所需的初始屈服剪切应力越小.因此可以根据预测公式获得不同砂浆膜厚下满足自密实混凝土要求的初始屈服剪切应力范围.前文已得出砂浆膜厚优化范围为1.9~2.3 mm,则根据式(3)可得,当砂浆膜厚分别为1.9、2.1、2.3 mm,坍落扩展度为550 mm时,满足自密实混凝土要求的基础砂浆最大初始屈服剪切应力分别为51.9、58.6、65.2 Pa.将满足自密实混凝土要求的砂浆膜厚与初始屈服剪切应力范围绘于图8.由图8可见,当砂浆膜厚为1.9~2.3 mm时,满足自密实要求的砂浆膜厚与对应的基础砂浆最大初始屈服剪切应力近似满足线性关系($\tau_0 = -33.25T_m + 128.38$).因此,在优化砂浆膜厚范围内可按照上述简化关系获

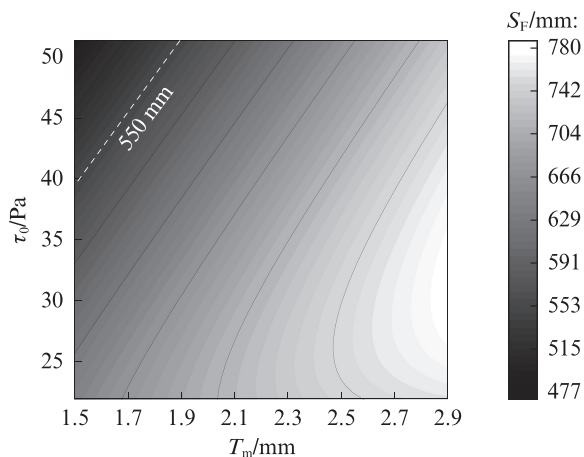


图7 机制砂自密实混凝土坍落扩展度等高线图

Fig.7 Slump flow contour map of SCC incorporated with crushed sand

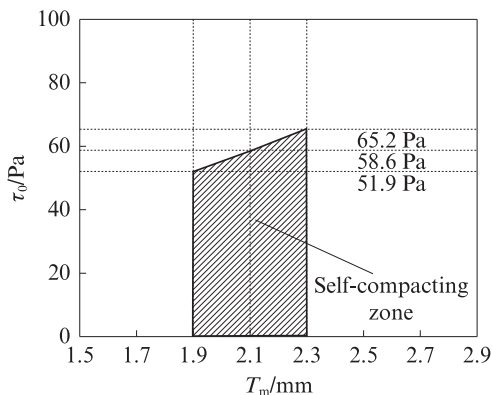


图8 满足自密实混凝土要求的砂浆膜厚及初始屈服剪切应力范围

Fig.8 Range of T_m and τ_0 that meets the SCC requirement

得基础砂浆初始屈服剪切应力阈值,以保证机制砂自密实混凝土的工作性能满足要求.

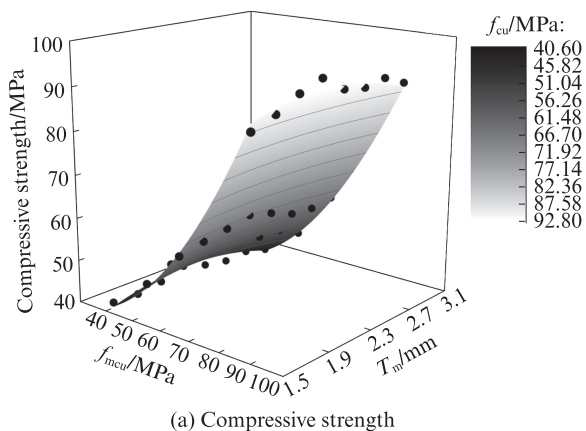
2.3.2 机制砂自密实混凝土抗压、抗折强度预测

基于基础砂浆强度、膜厚以及机制砂自密实混凝土的抗压、抗折强度测试结果,绘制三维散点图,如图9所示.采用非线性曲面函数进行拟合得到机制砂自密实混凝土的抗压、抗折强度预测公式,分别如式(4)、(5)所示.可见,机制砂自密实混凝土抗压、抗折强度与基础砂浆强度、膜厚呈二元二次函数关系,相关系数 R^2 分别达到0.994、0.906.

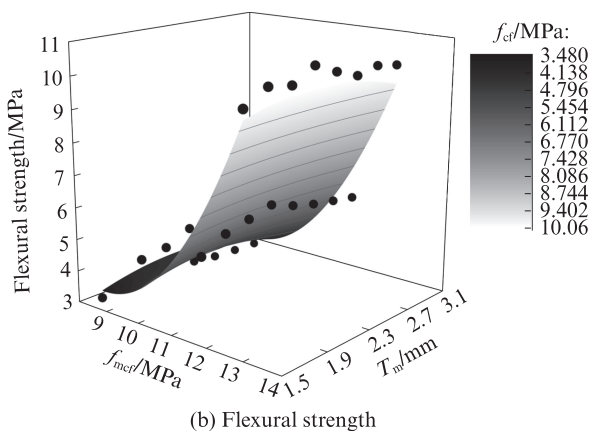
$$f_{cu} = 0.01f_{mcu}^2 - 6.93T_m^2 - 0.72f_{mcu} + 29.72T_m + 19.68 \quad (4)$$

$$f_{cf} = 0.37f_{mcf}^2 - 0.84T_m^2 - 6.65f_{mcf} + 3.59T_m + 29.90 \quad (5)$$

机制砂自密实混凝土强度等高线图如图10所示.由图10可见,机制砂自密实混凝土强度随着基础砂浆强度的增大而增大,随着砂浆膜厚的增加而先增大后减小,砂浆膜厚在1.9~2.3 mm时,混凝土具有最佳的强度.



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

图9 机制砂自密实混凝土强度拟合曲面

Fig.9 Strength fitting curved surface of SCC incorporated with crushed sand

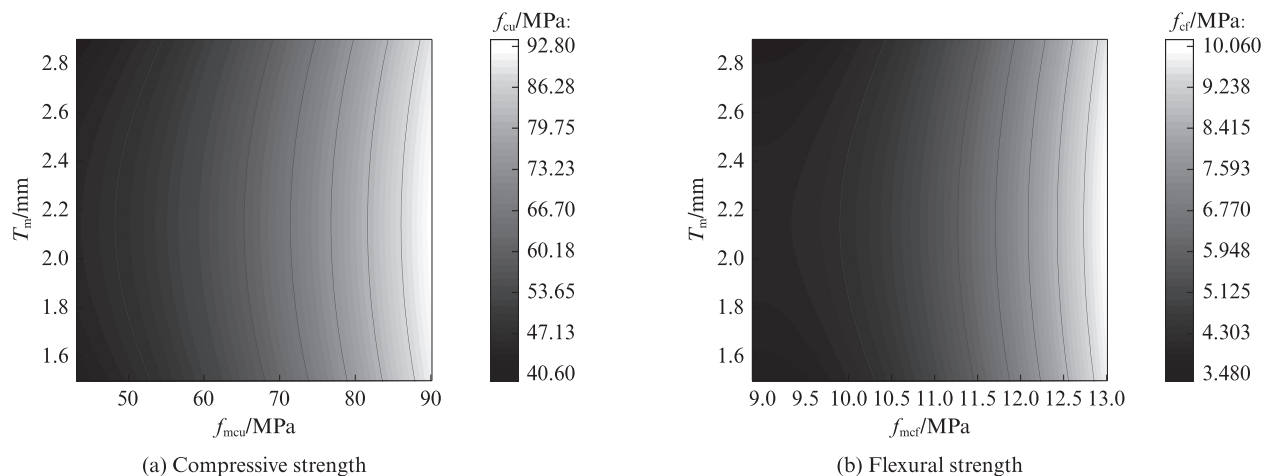


图10 机制砂自密实混凝土强度等高线图

Fig. 10 Strength contour map of SCC incorporated with crushed sand

3 结论

(1) 机制砂自密实混凝土的填充性、离析率与基础砂浆膜厚呈正相关,与基础砂浆初始屈服剪切应力呈负相关;间隙通过性指标随基础砂浆初始屈服剪切应力降低而提高.机制砂自密实混凝土强度与基础砂浆强度之间具有显著的正相关性,随砂浆膜厚增加而先增大后减小.建议对机制砂自密实混凝土进行两相悬浮体系设计时,宜控制砂浆膜厚为1.9~2.3 mm,基础砂浆最大初始屈服剪切应力为51.9~65.2 Pa.

(2) 机制砂自密实混凝土的坍塌扩展度与基础砂浆初始屈服剪切应力及膜厚的关系密切,可以通过拟合公式来进行预测.

(3) 机制砂自密实混凝土的抗压、抗折强度与基础砂浆的抗压、抗折强度及膜厚密切相关,可分别通过拟合公式来进行预测.

(4) 在两相悬浮体系假定下,基础砂浆流变特性及膜厚从本质上影响着机制砂自密实混凝土的性能.理论上,粗骨料的理化特性产生的吸附效应是有限的,当砂浆膜厚达到一定厚度时,其对砂浆性能影响有限,而对混凝土的影响基本可以忽略;粗骨料的级配影响砂浆总体积,但并不直接影响砂浆性能及膜厚,因此本文预测公式具有普适性.后续相关研究仍将持续,以进一步验证和优化该设计方法.

参考文献:

[1] NAIK T R, KUMAR R, RAMME B W, et al. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:463-469.

[2] SHI C J, WU Z M, LÜ K X, et al. A review on mixture design

methods for self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 84:387-398.

- [3] DEVI K, AGGARWAL P, SAINI B. Admixtures used in self-compacting concrete: A review [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2019, 44 (2):377-403.
- [4] CHEN X, GUO Y G, LI B, et al. Coupled effects of the content and methylene blue value (MBV) of microfiners on the performance of manufactured sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240:117953.
- [5] HE X B, GAO J, LIU Y X, et al. Gradation optimization of continuous-graded crushed sand based on mortar performance [J]. Construction and Building Materials, 2022, 358:129423.
- [6] HAN Z, ZHANG Y S, ZHANG W H, et al. Study on comprehensive morphological parameters of manufactured sand based on CT scanning and entropy method and its application in rheology of manufactured sand mortar [J]. Construction and Building Materials, 2023, 370:130628.
- [7] 汤明, 杨松, 郭加付, 等. 考虑石粉对流变性影响的自密实混凝土配合比设计 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2):191-198.
- TANG Min, YANG Song, GUO Jiafu, et al. Mix design of self-compacting concrete considering the effect of limestone powder on rheology [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25 (2):191-198. (in Chinese)
- [8] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 石灰岩机制砂混凝土抗冻性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5):516-523, 537.
- WANG Zhen, LI Huajian, HUANG Fali, et al. Frost resistance of limestone manufactured sand concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(5):516-523, 537. (in Chinese)
- [9] KABAGIRE K D, YAHIA A, CHEKIRE M. Toward the prediction of rheological properties of self-consolidating concrete as diphasic material [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195:600-612.
- [10] SAAK A W, JENNINGS H M, SHAH S P. New methodology for designing self-compacting concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6):429-439.
- [11] 何小兵, 沈武福, 贾秋炳, 等. 砂浆流变特性及其膜厚对自密

- 实混凝土性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3):463-470.
- HE Xiaobing, SHEN Wufu, JIA Qiubing, et al. Effects of mortar rheological characteristics and film thickness on self-compacting concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3):463-470. (in Chinese)
- [12] LI J J, CHEN Y H, WAN C J. A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157:621-634.
- [13] KWAN A K H, LI L G. Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50:598-608.
- [14] 何小兵, 刘树鑫, 刘亚, 等. 微细钢纤维自密实混凝土二次配合比设计新方法[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):56-63.
- HE Xiaobing, LIU Shuxin, LIU Ya, et al. A new two-step mix proportion design of micro-steel fiber reinforced self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):56-63. (in Chinese)
- [15] MURATA J, KUKAWA H. Viscosity equation for fresh concrete[J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(3):230-237.
- [16] 胡小芳, 苏志学. 改进式坍落度筒法测定新拌混凝土流变性能[J]. 混凝土, 2006(8):64-69.
- HU Xiaofang, SU Zhixue. The method of modified slump cone measuring fluidity of fresh concrete[J]. Concrete, 2006(8):64-69. (in Chinese)
- [17] SEDRAN T, DELARRARD F. Optimization of SCC thanks to packing model[C]//Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete. Paris: RILEM Publication SARL, 1999, 7:321-332.
- [18] NIELSSON I, WALLEVIK O H. Rheological evaluation of some empirical test methods—Preliminary results[C]//Third International RILEM Symposium. Reykjavik: RILEM Publication SARL, 2003, 33:59-68.
- [19] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83:146-159.
- [20] SUA-IAM G, MAKUL N. Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 130:32-40.
- [21] 谢越韬, 王易阳, 周虎. 自密实混凝土间隙通过性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(12):27-31.
- XIE Yuetao, WANG Yiyang, ZHOU Hu. Experimental study on the passing ability of self-compacting concrete(SCC)[J]. New Building Materials, 2017, 44(12):27-31. (in Chinese)
- [22] EL-CHABIB H, NEHDI M. Effect of mixture design parameters on segregation of self-consolidating concrete[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(5):374-383.
- [23] ESMAEILKHANIAN B, KHAYAT K H, YAHIA A, et al. Effects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self-consolidating concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 54:21-28.