



基于正交试验的细砂灌注桩 自密实混凝土配合比设计

刘世奇, 王 盟

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510450)

摘要: 以细度模数在 1.6~1.7 的天然坑砂作为细集料进行 C40 细砂灌注桩自密实混凝土配合比设计。采用水胶比、砂率、外掺缓凝保坍剂比例、粉煤灰取代率为影响因素, 针对 3 种水平因素设计正交试验, 对自密实混凝土的工作性、立方体抗压强度、凝结时间进行研究。对自密实混凝土的工作性进行定性分析, 采用极差、方差分析方法得到混凝土立方体抗压强度影响因素的变化规律。结果表明: 细砂自密实混凝土砂率、合适砂率区间、水胶比区间宽度较普通自密实混凝土小; 粉煤灰取代率对细砂自密实混凝土的工作性和抗压强度影响较大; 缓凝保坍剂掺量增加会延长凝结时间, 同时增加离析率。在水胶比为 0.33、砂率为 39%、外掺缓凝保坍剂比例为 7.5%、粉煤灰取代率为 23% 时, 所配制的细砂灌注桩自密实混凝土具有良好的工作性, 混凝土 28 d 强度达到 54.2 MPa。

关键词: 自密实混凝土; 细砂; 工作性; 抗压强度; 配合比设计

中图分类号: U655.55; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0242-08

Orthogonal experiment-based mix design of fine sand bored pile self-compacting concrete

LIU Shiqi, WANG Meng

(The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510450, China)

Abstract: The mix design of C40 fine sand bored pile self-compacting concrete (SCC) is carried out, and natural pit sand with a fineness modulus between 1.6 and 1.7 is used as fine aggregate. The water-binder ratio, sand ratio, external retard and collapse preventer and fly ash replacement percentage are selected as influencing factors. Orthogonal experiment is designed for 3 horizontal factors to study the workability, cube compressive strength and setting time of self-compacting concrete. The workability of self-compacting concrete is qualitatively analyzed, and the variation law of the factors affecting the compressive strength of concrete is obtained by using range and variance analysis methods. The results reveal that the sand ratio, optimal sand ratio range and water-binder ratio range of the fine sand SCC is smaller than ordinary SCC. The replacement percentage of fly ash has a great influence on the workability and compressive strength of the fine sand SCC. Increasing the content of retard and collapse preventer can extend the setting time and increase the segregation rate. The fine sand SCC prepared with water-binder ratio of 0.33, sand ratio of 39%, external retard and collapse preventer of 7.5%, fly ash replacement percentage of 23% has the good workability, and 28 d strength of the concrete reaches 54.2 MPa.

Keywords: self-compacting concrete; fine sand; workability; compressive strength; mix design

混凝土钻孔灌注桩是一种采用钻孔机械在地层中钻成桩孔, 达到设计高程后在孔内吊入钢筋笼, 灌注桩身混凝土而形成的一种基础形式^[1]。

对于灌注桩的桩身质量而言, 混凝土的工作性至关重要, 若混凝土工作性不良, 则在灌注桩施工过程中, 很容易出现堵管等质量问题^[2]。

收稿日期: 2024-11-26

作者简介: 刘世奇 (1997—), 男, 工程师, 从事水运工程试验检测工作。

自密实混凝土作为一种高性能混凝土,其在浇筑过程中不需要振捣,仅依靠自身重力即可完成在模板内的自密实填充状态,能较好地通过狭窄的钢筋网笼^[3-4]。自密实混凝土具有的高流动性、均匀性、稳定性等优点可较好地适配混凝土灌注桩的技术要求。

在 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》^[5]中,细集料推荐使用Ⅱ区中砂,因此在已有的自密实混凝土配合比设计研究中,细集料通常是中砂或者复配砂^[6-7]。贺东青等^[8]研究黄河特细砂与天然中砂互掺成细砂后配制的自密实混凝土性能,结果显示特细砂含量越高,细度模数越小,混凝土的性能越差;刘发民^[9]将细度模数 0.65 的特细砂与细度模数 2.91 的中砂混合成细砂,再对其配制的自密实混凝土中砂浆的流变性进行研究,结果表明中砂掺量在 40%、总体细度模数为 1.57 时,自密实混凝土中砂浆的工作性最优;曹振生等^[10]研究机制砂细度模数与自密实混凝土工作性的关系,在细度模数为 2.9 时,自密实混凝土的工作性最好,28 d 抗压强度最大。

细砂的细度模数在 1.6~2.2,在东非是一种常见的天然细集料,但直接采用细砂配制自密实混凝土或进行配合比设计的研究较为少见,而且复配砂在使用过程中往往会出现粗、细集料级配的断层^[11]。因此本文根据灌注桩自密实混凝土的技术需要,针对细砂的技术特点,从力学性能、工作性能两个方面开展混凝土配合比设计研究,最后通过正交试验获得满足要求的细砂灌注桩自密实混凝土配合比。

1 工程概况

基卢瓦马索科(Kilwa Masoko)渔港工程位于坦桑尼亚东南部,常年气温高于 25℃。本工程是基卢瓦马索科港口港区新建的码头,新建码头前沿线长度为 315 m,码头结构采用高桩梁板结构,桩基础采用灌注桩的形式,桩径 1 m,平均桩长 40 m,

每根桩混凝土平均用量 40.6 m³。灌注桩浇筑形式见图 1,采用 C40 混凝土,由容积 1.5 m³ 料斗分 2 次转运的方式至钻孔上方完成浇筑,单根桩平均浇筑时间 6 h,混凝土需要在料斗中放置至少 10 min,在转运过程中不可避免地会产生振动,如果遇到提导管,混凝土在料斗中的时间甚至会到达 30 min,这对混凝土抗离析性能提出更高的要求。根据工程概况和施工经验,提出的 C40 自密实混凝土技术要求为:坍落扩展度不小于 600 mm,初凝时间不小于 8 h,离析率筛析(GTM)试验的结果不大于 10%,7 d 立方体抗压强度不小于 40 MPa,28 d 立方体抗压强度不小于 53.2 MPa。

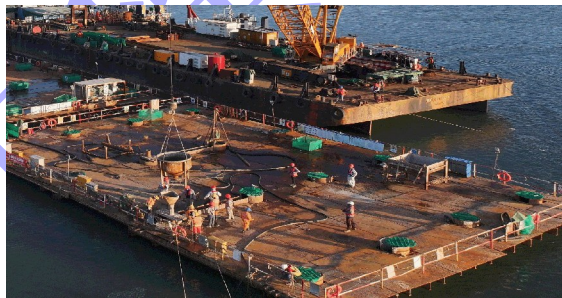


图1 基卢瓦马索科渔港灌注桩施工
Fig. 1 Cast-in-place pile construction of
Kilwa Masoko Fishing Harbor

2 原材料

采用 TWIGA CEMI 42.5N 水泥,表观密度 3 000 kg/m³,初凝时间 70~90 min,28 d 抗压强度 45~50 MPa。粉煤灰为印度产 ASTM C618 F 级粉煤灰,表观密度 2140 kg/m³。粗集料为 LINDI 生产的花岗岩集料,为满足英标 BS 882:1992^[12]连续级配要求,采用 5~10 mm 和 10~20 mm 两个级配按照 4:6 比例混合,表观密度 2 760 kg/m³;细集料受当地条件影响,只有细度模数为 1.6~1.7 的天然坑砂,含泥量 2.5%,表观密度 2 580 kg/m³;外加剂包含 HSP-V-HTN2 型聚羧酸高性能减水剂(减水率 30%)和高效缓凝保坍剂。

3 试验概况

3.1 基准配合比设计

基准配合比参考 JGJ/T 283—2012《自密实混

凝土应用技术规程》，同时考虑到细集料为细砂，比表面积较大，根据 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》^[13]，砂率可以适当减少。由于项目位于坦桑尼亚，当地业主、咨询工程师均认可英标规范，因此根据英标规范^[14]对混凝土结构耐久性的规定，项目桩基混凝土粉煤灰掺量应在 21%~35%。由此得到基准配合比见表 1。

表 1 C40 自密实混凝土基准配合比
Tab.1 Standard mix ratio of C40 self-compacting concrete
kg/m³

水泥	粉煤灰	砂	小石子	大石子	水	减水剂	缓凝保坍剂
375.9	99.9	654	446	668	157	5.33	0.37

3.2 正交试验方法

1) 选择 4 种影响因素，即水胶比(A)、砂率(B)、粉煤灰取代率(C)、缓凝保坍剂比例(D)，分别取 3 个水平因素，因素水平见表 2，正交试验见表 3，试验配合比见表 4。

表 2 因素水平
Tab.2 Factor level

水平	因素			
	A	B/%	C/%	D/%
1	0.31	37	21	7
2	0.33	39	26	8
3	0.35	41	31	9

表 3 正交试验
Tab.3 Orthogonal experiment

组别	因素			
	A	B/%	C/%	D/%
1	0.31	37	21	7
2	0.31	39	31	8
3	0.31	41	26	9
4	0.33	37	31	9
5	0.33	39	26	7
6	0.33	41	21	8
7	0.35	37	26	8
8	0.35	39	21	9
9	0.35	41	31	7

表 4 试验配合比

Tab.4 Mix ratio of experiment								kg/m ³
组别	水泥	粉煤灰	砂	小石子	大石子	水	减水剂	缓凝保坍剂
1	400.1	106.4	643	438	656	157	5.57	0.39
2	349.5	157.0	677	424	636	157	5.57	0.45
3	374.8	131.7	712	410	615	157	5.57	0.50
4	328.3	147.5	654	445	688	157	5.23	0.47
5	352.1	123.7	689	431	647	157	5.23	0.37
6	375.9	99.9	725	417	625	157	5.23	0.42
7	332.0	116.6	664	452	678	157	4.93	0.39
8	354.4	94.2	700	438	656	157	4.93	0.44
9	309.5	139.1	736	423	635	157	4.93	0.35

2) 选择坍落度扩展度试验对自密实混凝土的流动性进行评价，选择 J 环试验对自密实混凝土的间隙通过性进行评价，选择 GTM 筛析试验对自密实混凝土的抗离析性进行评价^[15]。

3) 参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[16]进行凝结时间试验，为了更好地符合现场实际情况，将试验温度设定在 25℃。

4) 采用边长 150 mm 的立方体试件，测试混凝土 7、28 d 抗压强度。

4 试验结果与分析

4.1 混凝土强度试验结果与分析

4.1.1 混凝土强度试验结果

根据正交试验方案，各组混凝土 7、28 d 立方体抗压强度结果见表 5。

表 5 立方体抗压强度试验结果
Tab.5 Experiment results of cube compressive strength
MPa

组别	7 d 立方体抗压强度	28 d 立方体抗压强度
1	47.2	57.8
2	38.2	49.6
3	44.4	54.5
4	37.4	49.1
5	40.8	52.8
6	42.6	54.4
7	36.8	48.2
8	41.5	52.3
9	38.2	49.3

4.1.2 极差分析

极差 R 描述了某一因素不同水平时, 对试验结果的影响程度。极差越大, 说明该因素对结果的影响程度越大。

混凝土立方体抗压强度极差分析见表 6。可以看出, 各因素对 7、28 d 立方体抗压强度的影响显著性从大到小依次为粉煤灰取代率、水胶比、缓凝保坍剂比例、砂率。

表 6 立方体抗压强度极差分析
Tab. 6 Range analysis of cube compressive strength

指标	结果和极差	因素			
		A	B	C	D
7 d 立方体抗压强度	k_1	43.27	40.47	43.77	42.07
	k_2	40.27	40.17	41.13	39.20
	k_3	38.83	41.73	37.47	41.10
	R	4.44	1.56	6.30	2.87
28 d 立方体抗压强度	k_1	53.97	51.70	54.83	53.30
	k_2	52.10	51.57	52.20	50.73
	k_3	49.93	52.73	48.97	51.97
	R	4.04	1.16	5.86	2.57

注: $k_i(i=1,2,3)$ 为任一因素为 i 水平时, 对应的所有试验组的测试结果之和的平均值。

4.1.3 方差分析

方差分析可以计算各个因素和空白平均偏差的二次方和, 再通过计算某因素的 F 值, 定量评价各个因素对试验结果影响的显著性。某因素 F 值越大, 其对试验结果影响的程度就越大。由于本文正交试验自由度为 8, 而对 4 因素 3 水平进行方差分析至少需要 9 自由度。因此, 本文试验选择均方最小的砂率作为误差项。各因素的方差分析见表 7。 F 函数参考值为: $F_{0.05}(2, 2) = 19.00$ 、 $F_{0.10}(2, 2) = 9.00$ 、 $F_{0.25}(2, 2) = 39.00$, 其中 0.05、0.10、0.25 为显著性水平, 两个“2”分别为因素的自由度、空白误差项的自由度。

由表 7 可知, 各因素对 7、28 d 立方体抗压强度的影响显著性从大到小依次为粉煤灰取代率、水胶比、缓凝保坍剂比例、砂率, 其结果与极差分析一致。进一步分析各因素的显著性, 结果如下。

表 7 立方体抗压强度方差分析

Tab. 7 Variance analysis of cube compressive strength

试验指标	因素	二次方和	自由度	均方	F
7 d 立方体抗压强度	A	30.71	2	15.35	7.40
	B	4.15	2	2.07	—
	C	60.07	2	30.03	14.48
	D	12.76	2	6.38	3.08
28 d 立方体抗压强度	A	24.45	2	12.22	9.99
	B	2.45	2	1.22	—
	C	51.81	2	25.90	21.17
	D	9.89	2	4.94	4.04

1) 粉煤灰取代率对 28 d 强度影响最为显著, 其置信度高达 95%。委托第三方对该品牌粉煤灰的理化特性进行试验, 发现该型粉煤灰筛余量 30% (45 μm), 28 d 强度活性指数为 83.5%, 活性较低, 随着粉煤灰取代率的升高, 整个胶凝材料体系水泥用量降低, 使得水泥水化产生的 CSH 凝胶、CH 晶体含量也随之降低, 从而降低了自密实混凝土的立方体抗压强度。

2) 水胶比对 28 d 立方体抗压强度的影响也较为显著, 其置信度为 90%。由表 6 可以看出, 水胶比从 0.31 上升至 0.35, 28 d 抗压强度下降 4.04 MPa, 这是由于胶凝材料数量降低, 导致水泥浆体中自由水含量升高, 进一步增加了硬化混凝土中毛细孔含量^[17]。

3) 外掺缓凝保坍剂比例对立方体抗压强度的影响显著性不高。当其比例由 7% 提高到 9% 后, 混凝土的 28 d 抗压强度下降了 1.33 MPa。聚羧酸减水剂的作用机理主要为通过静电斥力效应和空间位阻效应, 将水泥絮体之间的部分水释放出来, 增加自由水的比例, 同样会造成混凝土中毛细孔含量的增加^[18]。

4) 本文正交试验中砂率因素对混凝土的立方体抗压强度影响不大, 这可能是由于该因素不同水平间的差距不大, 整个自密实混凝土体系仍然处于最紧密堆积状态。只有在砂率达到 41% 后, 混凝土体系中的砂浆体积过大, 破坏了混凝土粗集料间的最紧密堆积状态, 使得混凝土强度有了些许下降。此外, 由于细集料为细砂, 含泥量也

较高,砂率的增长不可避免地引起混凝土中含泥量增大,从而引起混凝土强度的下降^[19]。

4.2 混凝土工作性试验结果与分析

4.2.1 混凝土工作性试验结果

试验通过设置自密实混凝土工作性指数衡量其工作性能。根据施工现场对混凝土的性能要求,规定 GTM 离析率 $S_R \leq 10\%$ 计 0.30, $10\% < S_R \leq 15\%$ 计 0.15, $S_R > 15\%$ 计 0.05; 规定扩展度 $U_{SF} > 600$ mm 且扩展时间 $T_{500} \leq 4$ s 计 0.40, $U_{SF} > 600$ mm 且 $T_{500} > 4$ s 计 0.20, $U_{SF} < 600$ mm 计 0.10; 规定 J 环扩展度与出机扩展度之差 $\Delta U_{SF} \leq 25$ mm 计 0.30, $25 \text{ mm} < \Delta U_{SF} \leq 50$ mm 计 0.15, $\Delta U_{SF} > 50$ mm 计 0.05^[20]。混凝土工作性试验结果见表 8。

表 8 混凝土工作性试验结果
Tab. 8 Experiment results of concrete workability

组别	$S_R / \%$	U_{SF} / mm	T_{500} / s	$\Delta U_{SF} / \text{mm}$	工作性指数
1	3.4	610	6.88	70	0.55
2	9.3	690	3.72	40	0.85
3	17.3	675	4.26	25	0.55
4	19.1	750	2.38	25	0.75
5	7.5	700	3.24	30	0.85
6	15.6	630	4.87	20	0.55
7	11.9	705	3.03	30	0.70
8	18.4	645	4.12	35	0.40
9	11.0	680	4.38	25	0.65

4.2.2 极差分析

混凝土混凝土工作性极差分析见表 9。可以看出,各个因素对自密实混凝土工作性的显著性从大到小依次为粉煤灰取代率、水胶比、缓凝保坍剂比例、砂率。

表 9 混凝土工作性极差分析
Tab. 9 Range analysis of concrete workability

指标	结果和极差	因素			
		A	B	C	D
工作性指数	k_1	0.65	0.67	0.50	0.68
	k_2	0.72	0.70	0.68	0.70
	k_3	0.58	0.58	0.77	0.57
	R	0.14	0.12	0.27	0.13

由于自密实混凝土的工作性评价方法尚无统一标准^[21],工作性指数中各个指标的加权系数只

能根据混凝土需求自行选取,若进行定量分析则会引入较大的误差,因此本文对工作性指数只进行定性分析,可以得出:水胶比从 0.31 上升至 0.33 混凝土工作性指数增加,从 0.33 上升至 0.35 混凝土工作性指数降低。砂率从 0.37 上升至 0.39 混凝土工作性指数增加,从 0.39 上升至 0.41 混凝土工作性指数降低。随着粉煤灰取代率增加,自密实混凝土的工作性指数增加。缓凝保坍剂掺量从 7% 增加至 8%,自密实混凝土的工作性指数增加;从 8% 增加至 9%,自密实混凝土的工作性指数降低。

综合来看,随着粉煤灰取代率的增加,自密实混凝土的流动性、间隙通过性、抗离析性在提升。这是由于粉煤灰颗粒含有玻璃微珠成分,能够有效减少混凝土颗粒间的摩擦效应,起到矿物减水作用,有效减少自密实混凝土浆体黏性,增加混凝土流动性^[22];由于粉煤灰的密度小于水泥,因此取代相同质量的水泥会使得自密实混凝土浆体中粉煤灰体积分数增加,降低了胶凝材料体系对于外加剂的敏感性,有效提升混凝土的抗离析性能。

水胶比和砂率的最佳工作性指数均在第 2 水平,水平过高或过低均会造成自密实混凝土工作性下降。由于胶凝材料、细集料、水共同构成砂浆,且试验中水质保持不变,因此胶凝材料和细集料的变化就会造成砂浆性能的变化。

就砂率因素而言,砂率过低会造成砂浆体积不足,增大粗集料间的摩擦作用;砂率过高,则会造成集料总表面积增大,使得包裹集料的浆体不足^[23],润滑效应下降。特别是本文试验的细集料属于细砂,含泥量大、细粒组分多、比表面积大,砂率对于混凝土工作性的影响显著性增加^[24],使得混凝土的最佳砂率区间缩小。

就水胶比因素而言,水胶比过低,颗粒间水膜厚度不足,胶凝材料水化颗粒之间更容易形成网状结构,造成混凝土流动性下降;若水胶比过高,胶凝材料含量不足,颗粒更易发生接触碰撞,

同时包裹润滑砂的浆膜层厚度减小, 增大了颗粒间摩擦力, 同样造成混凝土流动性下降^[25]。

随着外掺缓凝保坍剂比例的增加, 自密实混凝土流动性增加, 但自密实混凝土的抗离析性降低, 同时表面发生一定程度的泌水现象。这主要是试验水泥对外加剂的敏感性较大, 使得自密实混凝土中自由水含量增加。

4.3 混凝土凝结时间试验结果与分析

根据正交试验方案, 各组混凝土初凝时间结果见表 10, 极差分析结果见表 11。可以看出, 各因素对混凝土的初凝时间的影响显著性顺序从大到小依次为缓凝保坍剂比例、粉煤灰取代率、砂率、水胶比。

表 10 混凝土初凝时间结果

Tab. 10 Initial setting time results of concrete

组别	初凝时间/min
1	490
2	550
3	590
4	610
5	530
6	535
7	585
8	570
9	500

表 11 混凝土初凝时间极差分析

Tab. 11 Range analysis of initial setting time of concrete

指标	结果和极差	因素			
		A	B	C	D
初凝时间	k_1	543.3	561.7	531.7	506.7
	k_2	558.3	550.0	540.0	556.7
	k_3	551.7	541.7	581.7	590.0
	R	15.0	20.0	50.0	83.3

4.4 细砂灌注桩自密实混凝土最佳配合比

根据表 10 可知, 所有配合比的混凝土均满足初凝时间不小于 8 h 的要求。因此在考虑最佳配合比时主要综合考虑工作性指标和立方体抗压强度指标。对于水胶比、砂率、外掺缓凝保坍剂比例 3 个因素, 优先选择工作性最佳水平。选择水胶比为 0.33、砂率为 39%、外掺缓凝保坍剂比例为 8%。

本文试验中粉煤灰取代率对混凝土立方体抗压强度影响最显著, 因此选择粉煤灰取代率为 21% 以保证 28 d 立方体抗压强度满足工程要求。

经过初步试拌发现, 混凝土出现轻微泌水, GTM 离析率 S_R 为 12%。原因是外掺缓凝保坍剂比例过高, 且粉煤灰掺量太低, 导致胶凝材料体系对外加剂敏感性较高。因此微调外掺减水剂比例为 7.5%, 粉煤灰取代率为 23%。最终得到施工配合比为: 水泥、粉煤灰、砂、小碎石、大碎石、水、减水剂、缓凝保坍剂分别为 366.4、109.4、689、431、647、157、5.47、0.41 kg/m³。混凝土坍落度扩展度为 675 mm, 扩展时间 3.85 s, J 环扩展度与出机扩展度之差 20 mm, GTM 离析率 8.5%, 初凝时间 550 min, 7 d 立方体抗压强度 42.1 MPa, 28 d 立方体抗压强度 54.2 MPa, 满足 C40 灌注桩细砂自密实混凝土性能要求。

5 工程应用

根据上述施工配合比, 在 30A 号灌注桩中进行细砂自密实混凝土浇筑。混凝土搅拌车出站到达现场后进行混凝土坍落度扩展度试验, 现场扩展度达到 660 mm, 受限于现场条件, 对混凝土抗离析性采用视觉稳定性试验(VSI), 扩展度试验时混凝土外围只有极少量砂浆, 稳定性良好。

混凝土采用料斗接力转运的方式浇筑, 由 2 个料斗流水作业。混凝土在岸侧装入料斗, 由岸侧履带吊将料斗吊至海上转运平台, 海侧履带吊将料斗从转运平台吊起, 吊至 30A 号灌注桩剪球料斗上方, 放料完成后将空料斗放至转运平台, 由岸侧履带吊将空料斗吊至搅拌车旁, 准备进行下一轮浇筑。在浇筑过程中, 混凝土平均转运时间 8 min, 在剪球料斗上方放料时混凝土下料顺畅、迅速, 混凝土在剪球料斗中无浮浆、集料沉底等离析现象。

细砂自密实混凝土 7 d 立方体抗压强度 41.0 MPa, 于 7 d 龄期对 30A 号灌注桩进行低应变检测, 结果显示桩身完整, 为 I 类桩; 细砂自密实混凝土

28 d 立方体抗压强度 53.9 MPa, 强度满足工程技术要求。细砂自密实混凝土成功应用于基卢瓦马索科渔港工程, 工程总计 160 根灌注桩, I 类桩率 100%。

6 结语

1) 基于正交试验, 本文以自密实混凝土工作性为最优先指标, 立方体抗压强度为次优先指标, 凝结时间为普通指标, 选择水胶比为 0.33、砂率为 39%、外掺缓凝保坍剂比例为 7.5%、粉煤灰掺量为 23%, 成功配制了工作性能良好、满足工程需要的 C40 灌注桩细砂自密实混凝土。

2) 细砂自密实混凝土在进行自密实混凝土配合比设计时砂率较规范推荐值偏小。

3) 细砂自密实混凝土由于细集料的细度模数较小, 细颗粒组分较高, 细集料总表面积较中砂大, 含泥量高, 造成混凝土合适砂率区间宽度减小, 合适水胶比区间宽度减小, 在实际生产时需要严格控制混凝土生产质量。

4) 粉煤灰取代率增加会导致自密实混凝土 7、28 d 立方体抗压强度下降, 但同时也会增加混凝土工作性, 需要根据混凝土性能需求进行取舍。

5) 增加外掺缓凝保坍剂比例在显著延长混凝土凝结时间, 增加混凝土流动性的同时, 也会引起混凝土泌水、GTM 离析率增大。粉煤灰掺量提高和砂率提高均会在一定程度上降低混凝土对外加剂的敏感性。

参考文献:

- [1] 付祖良. 钻孔灌注桩水下混凝土灌注技术研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
FU Z L. Research and application on the technology of pouring concrete of bored piles under water[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [2] 祝昌曦, 周志斌, 王章夫. 混凝土工作性对灌注桩质量的影响[J]. 混凝土, 2007(1): 74-75, 78.
ZHU C D, ZHOU Z B, WANG Z F. The concrete operating characteristic influences the quality of concrete filling pile[J]. Concrete, 2007(1): 74-75, 78.
- [3] 林祖宏. 自密实混凝土配合比及其性能研究现状综述[J]. 混凝土, 2016(9): 97-99.
LIN Z H. Summary of recent research on self-compacting concrete[D]. Concrete, 2016(9): 97-99.
- [4] 刘俊霞, 刘盼, 张茂亮, 等. 粉煤灰自密实混凝土物理力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2020(11): 8-11, 15.
LIU J X, LIU P, ZHANG M L, et al. International advances on physical and mechanical properties of fly ash self-compacting concrete [J]. Concrete, 2020 (11): 8-11, 15.
- [5] 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T 283—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T 283-2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [6] 吕卫清, 王胜年, 吕黄, 等. 钢壳沉管自密实混凝土配制技术研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 3952-3958.
LYU W Q, WANG S N, LYU H, et al. Preparation technology of steel shell submerged tunnel used self-compacting concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12): 3952-3958.
- [7] 季锡贤, 张恒春, 殷新博, 等. C50 机制砂自密实混凝土配制及施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(S1): 158-160.
JI X X, ZHANG H C, YIN X B, et al. The preparation and construction technology of C50 self-compacting concrete with manufactured sand [J]. Construction technology, 2014, 43(S1): 158-160.
- [8] 贺东青, 李衫元, 迟曼曼, 等. 钢纤维自密实特细砂混凝土性能的实验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 597-603.
HE D Q, LI S Y, CHI M M, et al. Experimental study on the performance of steel fiber self-compacting ultra-fine sand concrete [J]. Journal of Henan University (natural science), 2021, 51(5): 597-603.
- [9] 刘发民. 基于超细砂砂浆的自密实混凝土工作性能预测研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
LIU F M. Research on prediction of work performance of self-compacting concrete based on ultra-fine mortar[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [10] 曹振生, 赵高锦, 何宏龙, 等. 机制砂自密实混凝土泵送性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(9): 16-20.

- CAO Z S, ZHAO G J, HE H L, et al. Experimental study on pumping performance of machine-made sand self-compacting concrete [J]. China concrete and cement products, 2021(9): 16-20.
- [11] 付晓宇. 黄河特细砂对钢纤维自密实混凝土的性能影响研究[D]. 郑州: 河南大学, 2020.
- FU X Y. Research on the influence of Yellow River superfine sand on the properties of steel fiber self-compacting concrete[D]. Zhengzhou: Henan University, 2020.
- [12] Specification for aggregates from natural sources for concrete: BS 882: 1992[S]. London: British Standards Institution, 1992.
- [13] 水运工程混凝土施工规范: JTS 202—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Specifications for concrete construction of port and waterway engineering: JTS 202-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] Concrete-complementary British standard to BS EN 206-part 1: method of specifying and guidance for the specifier: BS 8500-1: 2015 + A2: 2019 [S]. London: British Standards Institution, 2020.
- [15] 于方, 宋神友, 李汉渤, 等. 钢壳沉管自密实混凝土工作性能评价方法的对比试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1228-1237.
- YU F, SONG S Y, LI H B, et al. Comparative test study on work performance evaluation methods of steel-shell submerged tunnel used self-compacting concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1228-1237.
- [16] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [17] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- FENG N Q. High performance concrete structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [18] ZHANG Q Q, LIU J Z, LIU J P, et al. Effect of superplasticizers on apparent viscosity of cement-based material with a low water-binder ratio [J]. Journal of materials in civil engineering, 2016, 28(9): 04016085.
- [19] 刘良合, 焦绪学. 特细砂配制海工高性能混凝土技术及应用[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 116-120.
- LIU L H, JIAO X X. Technology of preparing marine high-performance concrete with superfine sand and its application [J]. Port engineering technology, 2021, 58(4): 116-120.
- [20] 韩霞, 刘清, 韩风霞, 等. 基于正交试验风积砂自密实混凝土配合比试验研究[J]. 混凝土, 2021(5): 113-118.
- HAN X, LIU Q, HAN F X, et al. Experimental study on aeolian sand self-compacting concrete based on orthogonal experiment[J]. Concrete, 2021(5): 113-118.
- [21] 张勇, 李化建, 赵庆新, 等. 自密实混凝土稳定性评价方法研究进展[J]. 混凝土, 2015(10): 113-118.
- ZHANG Y, LI H J, ZHAO Q X, et al. Research on the development of the test methods for the stability of self-compacting concrete[J]. Concrete, 2015(10): 113-118.
- [22] 龚明子, 钱潘悦, 王涛, 等. 粉煤灰的颗粒特征对混凝土流变性能的影响[J]. 混凝土, 2023(9): 122-125.
- GONG M Z, QIAN P Y, WANG T, et al. Effect of fly ash particle characteristics on rheological properties of concrete[J]. Concrete, 2023(9): 122-125.
- [23] 徐杰, 叶燕华, 朱铁梅, 等. 砂率对自密实混凝土工作性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 101-103, 115.
- XU J, YE Y H, ZHU T M, et al. Effect of sand ratio on working performance of self-compacting concrete [J]. Concrete, 2013(4): 101-103, 115.
- [24] FELEKOGLU B. A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete [J]. Construction & building materials, 2008, 22(4): 646-654.
- [25] 黄静. 低水胶比浆体的工作性与流变性的关系及其影响因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- HUANG J. Study on the relationship of workability and rheological properties of slurry with low water-binder ratio and its influencing factors [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

(本文编辑 王璁)