

机制砂混凝土配合比设计及工作性能试验研究



李向辉*

中铁十六局集团路桥工程有限公司，北京 101500

摘要：以机制砂补充替代天然砂，已经成为土木工程建设的必然趋势。其推广和应用不仅能有效缓解天然砂供应不足的问题，还对践行生态文明建设，推动社会可持续发展起到关键作用。然而，机制砂混凝土的性能受到多种因素影响，各地区对机制砂的研究和应用水平也存在较大差异，尚未形成完善的机制砂理论体系，特别是对机制砂混凝土早期抗裂性能的研究相对较少。本文根据石灰岩机制砂特性，对石灰岩机制砂混凝土制备过程中的鹅卵石机制砂复掺比例进行了研究。我们分析了不同石灰岩机制砂取代率、水胶比和砂率对机制砂混凝土性能的影响，并进行了系列试验研究。试验结果表明，在石灰岩机制砂取代率为 40%~60%、水胶比为 0.38、砂率为 0.38 时，其受力性能最优。随着石灰岩机制砂取代率的增加，混凝土性能可能变差；适度增加水胶比可以提高其性能；在相同条件下，砂率的增加将使混凝土性能更好。

关键词：机制砂；混凝土；配合比设计；工作性能；试验研究

DOI: [10.57237/j.cear.2023.03.003](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.03.003)

Mix Design and Working Performance Test of Machine-made sand Concrete

Li Xianghui*

China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co, Beijing 101500, China

Abstract: Replacing natural sand with machine-made sand has become an inevitable trend in civil engineering construction. Its promotion and application not only effectively alleviate the problem of insufficient natural sand supply, but also play a key role in practicing ecological civilization construction and promoting sustainable social development. However, the performance of machine-made sand concrete is influenced by various factors, and there are significant differences in the research and application levels of machine-made sand in different regions. A comprehensive theoretical system of machine-made sand has not yet been formed, especially the research on the early crack resistance of machine-made sand concrete is relatively limited. This article studies the composite ratio of cobblestone machine-made sand in the preparation process of limestone machine-made sand concrete based on the characteristics of limestone machine-made sand. We analyzed the effects of different replacement rates, water cement ratios, and sand ratios of limestone machine-made sand on the performance of machine-made sand concrete, and conducted a series of experimental studies. The experimental results show that the mechanical performance of limestone is optimal when the replacement rate of sand is 40%~60%, the water cement ratio is 0.38, and the sand ratio is 0.38. As the replacement rate of limestone mechanism sand increases, the

*通信作者：李向辉, 1124879704@qq.com

performance of concrete may deteriorate. Moderately increasing the water adhesive ratio can improve its performance. Under the same conditions, an increase in sand content will improve the performance of concrete.

Keywords: Machine-made Sand; Concrete; Mix Design; Working Performance; Experimental Study

1 引言

机制砂，系指机械破碎、筛分除泥后，粒径小于 4.75 毫米的岩石颗粒，不含软质岩和风化岩颗粒[1]。相较于天然砂，机制砂的外观棱角分明且多尖角，其形态为三角形或矩形，表面粗糙且粒形不圆润，颗粒分布的级配程度不一，较多集中于 I 区，细度模数在 3.0 左右，粒径分布呈现出“两端多，中间少”的特性，即粗粒径和细粒径较多，而粒径在 0.3 至 0.6 毫米的中间粒径偏少。机制砂的生产方式为物理破碎，这导致其生产过程中产生较多的石粉，石粉作为机制砂级配的一种组成，适量的石粉能够有效地填充骨料的空隙，产生微骨料效应，改善混凝土拌合物的流动性，使水泥石更加密实，提高混凝土的强度；但石粉含量过高则可能导致混凝土的工作性能变差，单位用水量增加，离析、泌水现象更易发生，导致混凝土强度下降[2-3]。因此，对机制砂的石粉含量应有限制。总的来说，机制砂在颗粒级配、外观粒型、石粉含量等方面，与天然砂均存在较大的差异，其配制的混凝土与普通混凝土也存在显著的差异。为满足现代建筑工程对混凝土各方面性能的要求，需要对机制砂性能进行科学和系统的研究。

机制砂混凝土的国外运用研究在起步阶段就已经经历了较长的时期。在美国、日本和英国等西方发达国家，对机制砂的利用已有数十年历史，而在国家标准制定的过程中，人工砂的纳入时间也至少长达 30 年。最早在上世纪五十年代，一些西方国家为推动基础设施建设的迅速发展，已经开始大规模地将机制砂作为细集料进行应用[4]。此后，日本在上世纪八十年代开始广泛使用混合砂，最初的混合砂配比是按照天然砂与人工砂为 0.9:1 的比例进行配置；而到了上世纪九十年代，混合砂的配比已经降低至 0.5:1 [5]。美国地质勘探局在上世纪九十年代对机制砂的运用调查研究结果显示，实际工程中机制砂的应用比例已经高达 20%。

在上个世纪 60 年代，中国开始了对机制砂的应用研究。在环境条件的限制下，水利水电和建筑部门开始将本地石材制成机制砂，并对机制砂的生产工艺、技术性能，以及应用于混凝土和砂浆的性能展开了深入研究。

1978 年，贵州省制定了中国第一个人工砂地方标准——《山砂混凝土技术规定》[6]。随后，其他各省份通过实验研究和工程应用经验的总结，颁布了一系列地方性的技术标准和使用规范。2002 年 2 月 1 日起实施的国标《建筑用砂》（GB/T14684—2001）中，将人工砂纳入砂的分类，首次明确人工砂作为新砂源的地位，现已更新为《建筑用砂》（GB/T14684—2011）[7]。近年来，广西省内机制砂的发展迅速，于 2017 年 12 月 1 日制定了地方标准《机制砂及机制砂混凝土应用技术规范》（DB45/T1621—2017）。如今，关于机制砂、人工砂的标准、规范和指南已有数十种，为保证机制砂混凝土的总体质量，推动机制砂的科学应用，发挥了关键作用。

在中国的工程实践中，机制砂的运用非常广泛。机制砂的使用主要集中在水利水电工程领域，七十年代建成的贵州省乌江渡水电站，其细骨料的选用全部采用人工砂，总使用量达到了约 350 万 m³；在“北水南调”工程的西河闸工程中，使用了约 127 万吨的人工砂，用于生产的商品混凝土数量高达 180 万 m³；在三峡工程的建设过程中，人工砂石在混凝土的大量项中所占的比例约为 88% [8]；乌江构皮滩电站和黄河小浪底工程均大量使用了人工砂。

随着研究的不断推进，近年来机制砂在公路桥梁施工中的应用逐渐增多。机制砂主要用于配置 C40 至 C60 的高性能混凝土，如最大跨径的钢桁架悬索公路桥坝陵河大桥索塔采用 C50 高性能混凝土；构皮滩乌江大桥采用河砂和机制砂混合配置的 C50 混合砂混凝土；株六复线南山河特大桥的简支梁则采用 C55 人工砂流态高性能混凝土建造[9]。与此同时，机制砂在部分公路桥梁建设中的低强度混凝土应用亦得到了广泛推广，并取得了良好的技术和经济效益。

相较于一般混凝土，采用机制砂制作的混凝土，由于机制砂颗粒的形态不规则、表面粗砾且形态特征丰富，其配制的混凝土坍落度较小，单位用水量偏大，其工作性能较差，离析和泌水的现象频发[10]。在低强度混凝土的制作过程中，这一问题的严重程度更为显著，这主要是因为在制作低强度混凝土时，水灰比较

大，水泥的用量相对较少[11]。

总之，国内外学者在机制砂石粉含量对混凝土性能的影响方面进行了大量研究[12-13]。研究成果已逐步成熟，形成了一致的认识：适量的石粉有助于提升混凝土拌合物的流动性[14-15]，从而优化机制砂混凝土的性能。然而，仅关注石粉含量这一单一因素的研究仍有局限。为充分发挥混凝土性能，我们还应综合考虑其他关键因素，如水胶比、砂率、矿物掺和量等。特别是近年来，混合砂和矿物掺合料的广泛应用，对这些因素的研究显得尤为迫切。

本研究将采用正交实验方法，对C35混凝土的配比进行设计，并根据石灰岩机制砂的替代比例、水胶比例以及砂率，分析并确定机制砂混凝土的性能以及抗压强度。

2 试验材料基本特性

2.1 细集料

本文所验证的两种机制砂样本，分别为石灰岩机制砂与鹅卵石机制砂。其中，来自石灰岩矿床的石灰岩机制砂颗粒组成，大粒径部分偏多，特别是集中在2.5毫米至5毫米的区间，此区间内颗粒分布密集，且不符合连续级配的标准，因此，其不适用于直接应用于工程设施。经过筛网的设定，所生产的石灰岩机制砂样本，通过人工筛分为0毫米至2.5毫米和2.5毫米至5毫米两个区间，并按照7:3的比例混合，最终形成颗粒组成合理、细度模数为3.28的石灰岩机制砂样本。

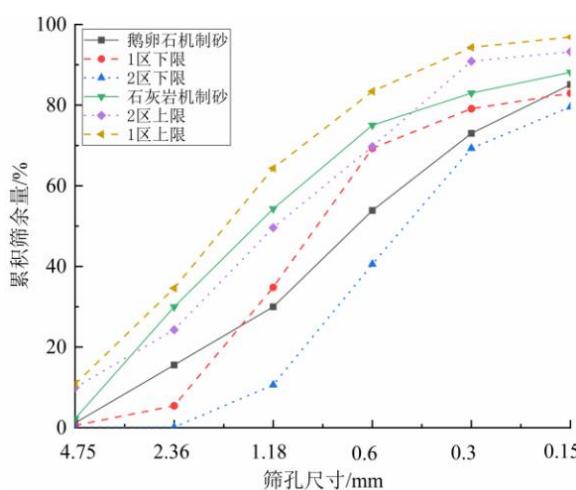


图1 级配曲线

依照中华人民共和国国家标准《建设用砂》(GB/T 14684-2011)所规定的方法，我们针对两种机制砂的颗粒

配置、细度模数、表面堆积密度、空隙系数等基础物理性质进行了系统的测评。具体的筛分数据及其颗粒配置的曲线展现图1的形式，其余的物理性质详见表1。

表1 石灰岩机制砂和鹅卵石机制砂各项物理性质

物理性质	石灰岩机制砂	鹅卵石机制砂
细度模数	3.28	2.64
表观密度 (kg/m ³)	2710	2627
松散堆积密度 (kg/m ³)	1660	1634
紧密堆积密度 (kg/m ³)	1860	1790
空隙率 (%)	38.8	37.8
石粉含量 (%)	3.6	2.4
MB 值 (g/kg)	0.8	0.5

2.2 粗集料

采用5mm~25mm连续级配的碎石来作为粗集料。这种碎石也可以与各种细集料互相搭配，形成具有更高强度和刚度的混凝土，从而确保了建筑物在各种气候条件下都能保持稳定。

2.3 水泥

采用等级为P·II 42.5的硅酸盐水泥，其性能指标完全符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)的规定，相关的物理性能参数详见表2。

表2 水泥物理性能指标

序号	性能指标		实测结果	技术要求
1	比表面积/(m ² /kg)	370	>300	
2	标准稠度用水量/ (%)	27	—	
3	安定性	合格	—	
4	凝结时间/(min)	初凝时间	157	≥45
		终凝时间	216	≤390
5	抗压强度/(MPa)	3d	28.3	≥17.0
		28d	53.1	≥42.5
6	抗折强度/(MPa)	3d	5.1	≥3.5
		28d	9.3	≥6.5

2.4 矿物掺合料

粉煤灰：采用II级粉煤灰，密度2.42g/cm³，烧失量1.87%，含水量0.2%，需水量比101%，其化学组成见表3。

表3 粉煤灰主要化学组成(%)

组分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₃
含量	23.27	56.96	4.63	1.5	1.5	0.86

矿渣粉：采用S95级矿渣粉，密度2.91g/cm³，比表面积440m²/kg，烧失量0.28%。

2.5 外加剂

减水剂：采用的是某建材公司提供的 HPWR 聚羧酸高性能减水剂，减水率 26%，其性能指标见表 4。

表 4 减水剂性能指标

性能指标	单位	取值
减水率	(%)	26
含固量	(%)	20
含气量	(%)	2.5
密度	(g/cm ³)	1.1
凝结时间差 (min)	初凝	+35
	终凝	+50
抗压强度比(%)	3d	185
	7d	160
	28d	145

3 机制砂混凝土配合比设计

3.1 C35 机制砂混凝土配合比计算

本试验中所采用的 C35 混凝土配合比系依循国家标准《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011) 进行设计修改，同时也参照了 2019 年颁发的《公路机制砂高性能混凝土技术规程》。

(1) 混凝土配制强度的确定

根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》，混凝土配制强度为：

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (1)$$

式中： $f_{cu,0}$ ——混凝土配制强度 (MPa)；

$f_{cu,k}$ ——混凝土设计强度等级值 (MPa)；

σ ——混凝土强度标准差 (MPa)。

对不大于 C20、C25~C45、C50~C55 三类等级强度混凝土的 σ 分别规定为 4.0MPa、5.0MPa 和 6.0MPa，故本次实验的 σ 取 5.0MPa， $f_{cu,0} \geq 35 + 1.645 \times 5.0 = 43.225M$ ，即 $f_{cu,0} \geq 43.225\text{ MPa}$ 。

(2) 配合比基本参数选择

(a) 水胶比计算

$$W/B = \frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_b} \quad (2)$$

式中： W/B ——混凝土水胶比；

α_a ， α_b ——回归系数，由于本次试验采用的粗骨料为碎石，按规范取 $\alpha_a = 0.53$ ， $\alpha_b = 0.20$ 。

f_b ——胶凝材料 28d 胶砂抗压强度 (MPa)，按规范求得理论值 $f_b = 41.905\text{ MPa}$ 。故水胶比 $W/B = 0.466$ (取 0.47)，但前期试配发现 0.47 时强度达不到设计强度，后续调整为 0.42。

(b) 用水量确定

在本次试验中，制作的混凝土坍落度达到了 90mm 以上，这个数值远远超出了标准。根据规范的要求，假设在没有添加减水剂的情况下，所需的水分含量为 215kg。值得注意的是，使用了一种聚羧酸高性能减水剂，其减水率高达 26%，因此，实际需要的水分含量为 159kg。

(c) 胶凝材料、矿物掺和量和水泥用量计算

根据相关的规程，用水量与水胶比的比率经计算后确定为 378.6 千克。矿物掺合料总含量占胶凝材料用量的 20%，包括了粉煤灰与矿粉 1:1 的混合比例。因此，粉煤灰与矿渣粉的用量共计为 37.86 千克，水泥用量则为 302.88 千克。

(d) 砂率选取

参照规范中的混凝土砂率选用表，根据水胶比以及碎石最大公称粒径，并且结合混凝土拌合物坍落度大小，确定混凝土的砂率为 36%。

(e) 粗细集料用量计算

对于机制砂混凝土，《公路机制砂高性能混凝土技术规程》中提出采用质量法计算配合比比较简易和准确，若采用绝对体积法计算配合比时，其条件和时间通常不能保证，故按下式进行计算。

$$m_c + m_b + m_g + m_w = \rho_{c,c} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{m_s}{m_s + m_g} \quad (4)$$

式中： β ——砂率；

$\rho_{c,c}$ ——混凝土拌合物假定表观密度 (kg/m^3)，其值可取 2400~2550 kg/m^3

这里水泥用量 m_c 为 302.88 kg/m^3 ，矿物掺合料总用量 m_b 为 75.72 kg/m^3 ，用水量 m_w 为 159 kg/m^3 ，砂率 β 为 36%，混凝土拌合物假定表观密度 $\rho_{c,c}$ 取值为 2400 kg/m^3 ，可计算出机制砂用量 m_s 为 670.5 kg/m^3 ，碎石用量 m_g 为 1191.9 kg/m^3 。

综上所述，C35 机制砂混凝土初始配合比为水泥:水:粉煤灰 : 矿渣灰 : 砂 : 碎石 = 302.88:159:37.86:37.86:670.5:1191.9=1:0.525:0.125:0.125:2.214:3.935。

3.2 配合比试配及调整

经过初步设计的配合比进行试配，砂的比例保持在 36% 的范围内，胶凝材料的用量保持不变，通过调整单位用水量，实现混凝土的工作性能满足要求，并由此确定单位用水量。机制砂混凝土的试配比率具体见表 5，而混凝土的工作性能，参考表 6 和图 2。

(a) 单位用水量 159kg/m³(b) 单位用水量 143.9kg/m³(c) 单位用水量 159kg/m³(d) 单位用水量 136.3kg/m³

图 2 机制砂混凝土拌合物工作性能状态

表 5 机制砂混凝土试配比(kg/m³)

编号	1	2	3	4
水胶比	0.42	0.40	0.38	0.36
水泥	302.9	302.9	302.9	302.9
水	159	151.4	143.9	136.3
粉煤灰	37.86	37.86	37.86	37.86
矿渣灰	37.86	37.86	37.86	37.86
砂	670.5	673.2	675.9	678.6
碎石	1191.9	1196.8	1201.6	1206.5
减水剂	3.03	3.03	3.03	3.03

表 6 工作性能

编号	单位用水量 (kg/m ³)	坍落度(mm)	工作性
1	159	165	严重离析、泌水
2	151.4	175	保水性、粘聚性一般
3	143.9	170	保水性、粘聚性好
4	136.9	160	干涩

经分析图 2 所示信息可见，当配合比用水量设定为 159kg/m³ 时，混凝土拌和物的离析与泌水现象较为严重；当逐步降低单位用水量至 143.9kg/m³ 时，其保水性能与粘聚性均表现良好，而且没有发生离析与泌水现象，工作性能完全符合标准，因此将单位用水量设定为 143.9kg/m³。

3.3 正交试验方案

正交试验现已进行，目标在于精确确立机制砂混凝土的最优配比率。其过程中，石灰岩机制砂的取代比率、水灰比、砂子比例这三大因素，将直接影响该混凝土的工作性能以及立方体抗压强度。本次的正交试验，设置了 A (石灰岩机制砂的取代比率)、B (水灰比)、C (砂子比例) 三大因素，且每一大因素又设

有三个水平，均可在表 7 中查阅。依据试验的特定目标，已选取好所需的因素以及水平，选定了正交表 L9 (33)，总计进行了 9 组试验，具体情况可见表 8。当前可得的配比率信息，在表 9 中详细列出。

表 7 机制砂混凝土正交试验因素水平

因素 水平	A(石灰岩机制砂取代率)	B(水胶比)	C(砂率)
1	60%	0.38	0.36
2	50%	0.40	0.38
3	40%	0.42	0.40

表 8 正交试验表

因素 水平	A(石灰岩机制砂取代率)	B(水胶比)	C(砂率)
1	1 (60%)	1 (0.38)	1 (0.36)
2	1	2 (0.40)	2 (0.38)
3	1	3 (0.42)	3 (0.40)
4	2 (50%)	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3 (40%)	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

表 9 机制砂混凝土配合比(kg/m³)

编号	水泥	水	粉煤灰	矿渣灰	碎石	石灰岩机制砂	鹅卵石机制砂	减水剂
1	303.1	144	37.9	37.9	1201.3	405.4	270.3	3.03
2	288	144	36	36	1175.5	432.3	288.2	2.88
3	274.3	144	34.3	34.3	1147.9	459.1	306.1	2.74
4	303.1	144	37.9	37.9	1163.8	356.6	356.6	3.03
5	288	144	36	36	1137.6	379.2	379.2	2.88
6	274.3	144	34.3	34.3	1224.4	344.4	344.4	2.74
7	303.1	144	37.9	37.9	1126.2	300.3	450.5	3.03
8	288	144	36	36	1213.4	273	409.5	2.88
9	274.3	144	34.3	34.3	1186.1	290.8	436.2	2.74

4 工作性能试验结果分析

4.1 工作性能分析

混凝土拌合物的工作性能，是由其流动性、黏聚性以及保水性共同组成的。优越的工作性能使得现场施工变得更加便利，并对混凝土的强度、耐久性和外观产生深远影响。在本次研究中，我们以坍落度作为衡量拌合物工作性能的核心指标，并遵循《普通混凝

土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)的规定进行坍落度试验。现场坍落度测试结果以及人工搅拌的混凝土拌合物试验分别呈现在图示 3，总共九组试验的混凝土拌合物工作性能统计结果详见表 10。



图 3 坍落度测试。

表 10 混凝土拌合物工作性能。

编号	试验组合	坍落度 (mm)	工作性能		
			粘聚性	保水性	流动性
1	A ₁ B ₁ C ₁	180	一般	一般	良好
2	A ₁ B ₂ C ₂	145	良好	良好	良好
3	A ₁ B ₃ C ₃	183	一般	一般	良好
4	A ₂ B ₁ C ₂	175	优	优	优
5	A ₂ B ₂ C ₃	178	优	一般	良好
6	A ₂ B ₃ C ₁	185	一般	差	良好
7	A ₃ B ₁ C ₃	180	良好	一般	差
8	A ₃ B ₂ C ₁	180	一般	一般	优
9	A ₃ B ₃ C ₂	175	良好	良好	优

采用极差分析法及方差分析法对机制砂混凝土拌合物的坍落度进行计算及影响因素直观分析，并制作直观分析图，以更清晰地呈现各因素对坍落度的影响程度，如图 4 所示。

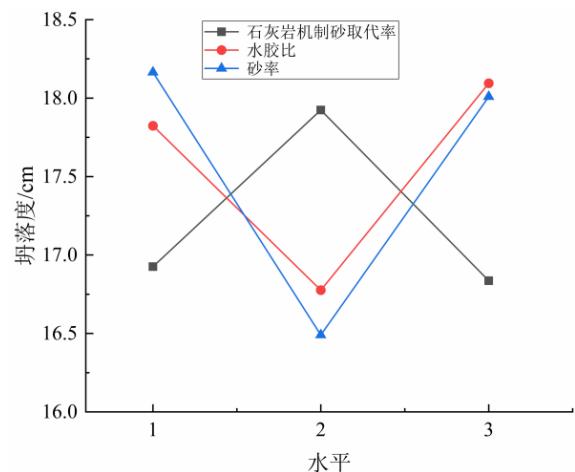


图 4 因素水平与坍落度关系

在对影响混凝土拌合物坍落度的因素进行分析后，可以发现主要因素按照 C（砂率）、B（水胶比）和 A（石灰岩机制砂取代率）的顺序排列。实际上，混凝土的坍塌度涉及多种影响因素，例如含水量、级配变化、称量偏差以及容易被忽视的水泥温度等。然而，相关规范并未明确规定坍落度的标准，仅作为判断混凝土施工和易性优劣的参考。三因素对坍塌度的影响虽然不显著，但若砂率过低，可能会导致离析和泌水现象。综合考虑各种因素，最佳组合是 A₂B₃C₁。

4.2 抗压强度分析

混凝土基本力学性能以立方体抗压强度作为考察指标，试件尺寸为 150mm×150mm×150mm 标准立方体试块，根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)规定的方法进行试验。9 组试验的 7d 与 28d 抗压强度见表 11。

表 11 机制砂混凝土抗压强度。

编号	试验组合	抗压强度	2
		7d	28d
1	A ₁ B ₁ C ₁	36.0	51.1
2	A ₁ B ₂ C ₂	34.4	46.5
3	A ₁ B ₃ C ₃	34.6	44.0
4	A ₂ B ₁ C ₂	36.1	49.4
5	A ₂ B ₂ C ₃	37.5	46.2
6	A ₂ B ₃ C ₁	30.6	45.8
7	A ₃ B ₁ C ₃	37.5	48.3
8	A ₃ B ₂ C ₁	35.8	48.0
9	A ₃ B ₃ C ₂	30.1	46.4

可以看出，C35 机制砂混凝土在 7d 强度与 28d 强度影响因素基本一样，影响大小均为 B（水胶比）>C（砂率）>A（石灰岩机制砂取代率），有所区别是 7d 强度影响因素中 C（砂率）在 40%、A（石灰岩机制砂取代率）在 60% 最优，而 28d 强度则是 C（砂率）在 40%、A（石灰岩机制砂取代率）在 40% 时最优。对于各因素的影响程度，其中 B（水胶比）对抗压强度的影响较显著，另外两种因素 C（砂率）和 A（石灰岩机制砂取代率）的影响不显著。若单以 28d 强度作为评判标准，则最佳组合为 A₃B₁C₁。

4.3 最佳配合比确定

综合以上的分析，C35 机制砂混凝土在 7d 和 28d 的强度之中，影响最大的因素为水胶比 B（水胶比），其次为砂率 C（砂率），然后是石灰岩机制砂取代率 A

（石灰岩机制砂取代率）。在水胶比 B（水胶比）上，其对混凝土强度的影响显著，且三种水胶比的 28d 强度平均值均超出了 C35 混凝土的设计强度，即三种水胶比均满足强度要求。为提升混凝土的工作性能，同时降低减水剂的用量，我们选择最大值 0.42 作为最佳水胶比。而 C（砂率）和 A（石灰岩机制砂取代率）的影响并不显著，因此在确定最佳配比时，主要从节省材料的角度来考虑。砂率 C（砂率）和石灰岩机制砂取代率 A（石灰岩机制砂取代率）无法从节省材料的角度进行考量，且三个强度的平均值均满足强度要求。在水胶比 0.42 时，砂率过低会导致工作性能降低，正交试验的第 3、6、9 组混凝土拌合物的工作性能对比发现，砂率 36% 时保水性较差，容易出现离析现象。因此我们选择最高的砂率 40% 作为最佳值。石灰岩机制砂替代鹅卵石机制砂的取代率 A（石灰岩机制砂取代率）对强度的影响最小，因此我们在最佳值中选择中间值 50% 作为最佳值。

最终确定 C35 机制砂混凝土最佳配合比为：水胶比 0.42，单位用水量 144kg/m³，胶凝材料 343kg/m³，水泥 274.4kg/m³，粉煤灰、矿渣灰 34.3kg/m³，砂率 40%，机制砂 765.2kg/m³（石灰岩机制砂 382.6kg/m³、鹅卵石机制砂 382.3kg/m³），碎石 1147.9kg/m³，减水剂 2.74kg/m³。

5 结论

先对 2 种机制砂的混合比例进行了理论计算和实际测定，确定了 3 种混合比例，之后设计了三因素三水平正交试验，利用极差分析法和方差分析法从工作性能和抗压强度 2 个方面对试验数据进行了分析，最终确定了 C35 机制砂混凝土最佳配合比。主要得到以下结论：

- (1).对于 C35 机制砂混凝土而言，在设计的不同石灰岩机制砂取代率、水胶比、砂率三因素中，水胶比是影响抗压强度的主要因素。
- (2).水胶比为 0.38 时，混凝土抗压强度最高；随着水胶比增加至 0.42 时，配制的混凝土强度略低，但均满足强度要求。另外两因素对强度影响不显著。
- (3).C35 机制砂混凝土最佳配合比为：水泥 274.4kg/m³，粉煤灰、矿渣灰 34.3kg/m³，机制砂 765.2kg/m³（石灰岩机制砂 382.6kg/m³、鹅卵石机制砂 382.3kg/m³），碎石 1147.9kg/m³，减水剂 2.74kg/m³。

参考文献

- [1] 董瑞, 陈晓芳, 钟建锋, 等. 石灰岩性机制砂特性研究 [J]. 混凝土, 2013, 03: 123-134.
- [2] 蒋正武, 潘峰, 吴建林, 等. 机制砂参数对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2011, 08: 66-70.
- [3] 刘雪, 郭远臣, 王雪, 等. 混凝土裂缝成因研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(07): 2173-2178.
- [4] 徐健, 蔡基伟, 王稷良, 等. 人工砂与人工砂混凝土的研究现状 [J]. 国外建材科技, 2004(03): 20-24.
- [5] 杨文烈, 邱春福. 机制砂的生产及在混凝土中的应用 [J]. 混凝土, 2008(06): 113-117.
- [6] 林力勋. 山砂及山砂混凝土的研究历程 [J]. 四川建筑科学, 2010, 36(03): 188-190.
- [7] 江京平. 《建筑用砂》(GB/T14684-2001)内容概要与人工砂应用前景展望 [J]. 建筑技术, 2003(01): 54-56.
- [8] 张义芳. 人工砂石系统工艺及质量控制方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [9] 杨青. 混合砂高性能混凝土的界面区特征与耐久性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [10] Nmai CK. Aggregates for Concrete [J]. ACI Education Bulletin, 1999: E1-1-26.
- [11] Zhou MK, Cai JW, Wang JL, et al. Research on Properties of Concrete Prepared with Artificial Sand Containing Stone Powder at High Content [A]. In: Nai-Qian Feng, Gai-Fei Peng, eds, Proceedings of Environmental Ecology and Technology of Concrete [C]. Uetikon-Zuerich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2005: 263-268.
- [12] Shi Mengxiao, Wang Qiang, Zhou Zhikai. Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 649-655.
- [13] Huajian Li, Fali Huang, Guanzhi Cheng, et al. Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016(109): 41-46.
- [14] 魏晓丹. 高效减水剂对混凝土长期性能的影响 [J]. 福建建材, 2018(12): 26-27.
- [15] 王波. 铁尾矿砂与天然砂对混凝土质量影响的研究 [J]. 市政技术, 2016, 34(02): 177-181.