

针片状颗粒对高强混凝土性能的影响研究

Study on the Influence of Elongated and Flaky Particles on the Performance of High Strength Concrete

宋少民, 卢超琦

(北京建筑大学, 建筑结构与环境修复功能材料北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 从粗骨料针片状颗粒角度出发, 研究其含量和粒径对高强混凝土性能的影响。选取掺加 5%、15% 和 25% 针片状颗粒含量的粗骨料配制混凝土, 对混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能进行试验研究; 选取 5~10 mm、10~16 mm 和 16~20 mm 共三种粒径区间的针片状颗粒, 探究粒径大小对混凝土性能的影响规律。结果表明: 针片状颗粒含量增加, 高强混凝土和易性和泵送性能变差, 混凝土抗压强度降低, 混凝土收缩增大, 且对高强混凝土耐久性能不利; 混凝土拌合物坍落度和扩展度、硬化混凝土各龄期抗压强度均随着粗骨料中针片状颗粒粒径增大而降低; 综合考虑针片状颗粒对高强混凝土性能影响规律, 建议控制针片状颗粒含量不超过 5%; 同时, 在计算针片状颗粒含量时, 需在标准计算方法基础上按不同粒径针片状颗粒分别乘以其对应的影响系数进行修正, 以实现粗骨料粒形更好的控制。

关键词: 粗骨料; 针片状颗粒; 高强混凝土; 性能影响

中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 04-0021-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.004

SONG Shaomin, LU Chaoqi

(Beijing Key Laboratory of Building Structure and Environmental Remediation Functional Materials,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: From the perspective of coarse aggregate elongated and flaky particles, the effect of its content and particle size on the properties of high strength concrete was investigated. The concrete was prepared with four kinds of coarse aggregates with 5%, 15% and 25% of the content of elongated and flaky particles, and the working, mechanical and durability properties of the concrete were investigated, and three kinds of elongated and flaky particles in the size range of 5-10 mm, 10-16 mm and 16-20 mm were selected to investigate the influence of the size on the performance of the concrete. The results show that the increase in the content of elongated and flaky particles, high-strength concrete ease and pumping performance deterioration, concrete compressive strength decreased, concrete shrinkage increased, and the durability of high-strength concrete is unfavourable; concrete mix slump and expansion, hardened concrete compressive strength at various ages with the increase in the size of the elongated and flaky particles in the coarse aggregate and reduce. Considering the influence of elongated and flaky particles on the performance of high-strength concrete, it is suggested to control the content of elongated and flaky particles not more than 5%; at the same time, when calculating the content of elongated and flaky particles, it is necessary to multiply the influence coefficients of elongated and flaky particles of different particle sizes on the basis of the standard method of calculation,

作者简介: 宋少民 (1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 高性能混凝土。

通信作者: 卢超琦 (1999—), 男, 硕士, 研究方向: 建筑材料。

收稿日期: 2023-03-01

材料科学

so as to achieve a better control on the particle shape of the coarse aggregates.

Keywords: coarse aggregates; elongated and flaky particles; high strength concrete; performance influence

0 引言

粗骨料的粒形是衡量骨料品质的重要技术指标,粗骨料的形态特征直接影响到混凝土中粗骨料间的堆积状态、排列方式、接触形式以及粗骨料与浆体的黏结性能^[1]。一般认为粗骨料颗粒形状最佳的是接近球体或立方体,而细长的针状颗粒和扁平的片状颗粒被视为粗骨料的不良粒形,其会导致混凝土界面性能变差、内部缺陷数量增多,进而对混凝土性能造成不良影响。相关标准中严格规定了针片状颗粒含量, JGJ 52—2006《普通砂、石质量及检验方法标准》中要求:对于强度等级不小于 C60 的高强混凝土,其含量应不超过 8%;强度等级 C30~C55,其含量不应超过 15%。依据不同强度等级对粗骨料中针片状颗粒含量的阈值进行限制,在保持混凝土拌合物施工性能良好的前提下,保证硬化混凝土强度的稳定发展和良好耐久性能^[2],有利于提高混凝土工程质量。

黄宗凯等^[3]认为粗骨料的针片状含量在实际使用中应进行控制,并提出含量在 8% 以内时,对混凝土流动性影响最小;王博洋等^[4]研究发现当骨料中针片状颗粒的质量分数高于 4% 时,会导致 C40 高性能混凝土强度明显下降,且对于 C50 高性能混凝土,针片状颗粒含量应不高于 2%;吴历斌等^[5]认为混凝土体系中存在对强度最有利的针片状颗粒含量值。目前国内大部分研究工作仅针对于针片状颗粒对中、低强度等级混凝土性能的影响,也提出了相应强度等级混凝土中针片状颗粒含量限值,但涉及高强混凝土的研究较少,而对于粗骨料较敏感的高强混凝土更应重视含量的控制,据此,通过配制 C70 高强混凝土,探究针片状颗粒含量对高强混凝土性能影响的规律,以期对混凝土性能的优化提供指导和参考依据,为实际工程中对针片状颗粒含量的控制提供参考;选用 3 种粒径区间的针片状颗粒以探究其不同粒径大小对混凝土性能的影响规律,同时根据抗压强度各龄期实测值赋以各粒径区间所对应的影响系数值,进而结合不同粒径针片状颗粒所对应的影

响系数值以计算粗骨料针片状颗粒含量,以实现优化粗骨料中针片状颗粒含量计算方法的目的,更客观地评价粗骨料中针片状颗粒含量,为相关标准的制定提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

选用北京金隅有限公司生产的 42.5R 级普通硅酸盐水泥与硅灰,粉煤灰为北京敬业达公司生产的 II 级粉煤灰,矿渣为金泰城建材公司生产的 S95 矿渣,胶凝材料物理性能见表 1~3,胶凝材料化学成分见表 4。配制混凝土所用的细骨料为二区机制砂,细度模数 2.7,表观密度 2 648 kg/m³,堆积密度 1 617 kg/m³。所用粗骨料为 5~25 mm 连续级配的石灰岩碎石,试验用粗骨料级配和物理性质均符合 GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》标准中对碎石的要求,粗骨料颗粒级配见表 5,其主要物理性质见表 6。外加剂采用聚羧酸高效减水剂,减水率 40%,含气量 2.9%,固含量 41%,拌合水为自来水。

表 1 普通硅酸盐水泥性能

Table 1 Main technical indexes of cement

密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (m ² /kg)	标准稠度用水量/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d
3.03	416	27.3	165	250	32.1	50.4

表 2 矿物掺合料主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of mineral admixtures

材料种类	密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (m ² /kg)	流动度比 /%	活性指数/%	
				7 d	28 d
矿粉	2.86	442	94	88	95
粉煤灰	2.30	410	106	76	80

表 3 硅灰主要性能指标

Table 3 Main technical indexes of silica fume

SiO ₂ 含量/%	密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (m ² /kg)	需水量比/%
90.8	2.14	1520	115

表 4 胶凝材料主要化学组成

Table 4 Main chemical composition of cementitious materials /%

材料种类	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O
水泥	17.41	62.55	8.09	4.77	3.76	3.42	—	—
粉煤灰	48.16	4.79	34.07	1.81	1.14	6.39	1.78	1.86
矿粉	33.57	39.48	17.43	6.63	1.58	1.31	—	—

表5 碎石颗粒级配范围与选用

Table 5 Grading range and selection of crushed stone particles

级配范围	粒径 /mm	累计筛余率/%						
		2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm	16.0 mm	19.0 mm	26.5 mm	31.5 mm
级配范围	5~25	95~100	90~100	—	30~70	—	0~5	0
选用级配	5~25	100	100	82	38	18	0	0

表6 粗骨料主要物理性质

Table 6 Main technical index of coarse aggregate

粒径区间 /mm	表观密度 /(kg/m ³)	堆积密度 /(kg/m ³)	空隙率/%	针片状颗粒 含量/%
5~25	2520	1470	41.6	4

1.2 试验设计

1.2.1 粗骨料的掺配

对选用的粗骨料进行清洗、风干。试验前将粗骨料进行筛分并按照粒径区间分别储存，将各粒径中的针片状颗粒用规准仪全部人工挑出备用，试验方法参照 GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》中针片状颗粒含量试验步骤进行。

具体试验内容为含量影响试验和粒径影响试验两部分，以探究针片状颗粒掺加对高强混凝土的影响规律。选取基准配合比和掺加 5%、15% 和 25% 针片状含量，分别用 ZP0、ZP5、ZP15 和 ZP25 表示。为研究不同粒径的影响并避免针片状含量因素干扰试验结果，需保证每组试验组中粗骨料针片状颗粒含量相同，考虑到针片状颗粒含量选择过高或过低可能会导致试验数据和结论缺乏实际意义，故选择针片状颗粒含量应适中且具有一定的代表性，故取含量为 15%，依据针片状含量确定应加入的针片状颗粒质量，分别在 5~10、10~16、16~20 和 20~25 mm 共 4 种粗骨料粒径区间中掺入每组所需的全部针片状颗粒，并分别用 ZP15-1、ZP15-2、ZP15-3 和 ZP15-4 表示，为了便于计算和分析，将含量影响试验中 ZP0 组和 ZP15 组的影响系数分别假定为 0 和 1.0，并采用内插法计算其余组系数。

1.2.2 混凝土配合比

混凝土强度等级为 C70，胶凝材料用量为 560 kg/m³，水胶比为 0.28，砂率为 37%，每个试验组混凝土配比在其他条件不变的基础上，仅改变针片状颗粒含量或粒径分布。考虑到当前工程大多采用预拌混凝土，同时要求混凝土达到良好的泵送施工效果，基准混凝土的流动性以坍落度 220 mm 左右、扩展度 550 mm 为控制指标，确定减水剂掺量为 1.64%，

C70 高强混凝土配合比见表 7。

表7 C70 高强混凝土配合比

Table 7 Mix of C70 high strength concrete / (kg/m³)

C	K	F	SF	S	G	W
411	95	32	22	618	1052	157

2 试验结果及分析

2.1 针片状颗粒含量对混凝土拌合物性能的影响

针片状颗粒含量对混凝土拌合物工作性能的影响如图 1 所示。拌合物的坍落度和扩展度均随着针片状颗粒含量增加而不断减小，拌合物的流动性逐渐变差，倒置排空时间则随着含量的增加而逐渐增大，泵送性能变差；当针片状颗粒含量增大至 15% 时，混凝土拌合物坍落度和扩展度较未掺针片状颗粒试验组分别降低了 20 mm 和 40 mm，倒置排空时间增加了 6 s；而当针片状颗粒含量进一步增大至 25% 时，混凝土拌合物坍落度和扩展度较未掺针片状颗粒试验组分别降低了 60 mm 和 100 mm，倒置排空时间增加了 15 s。

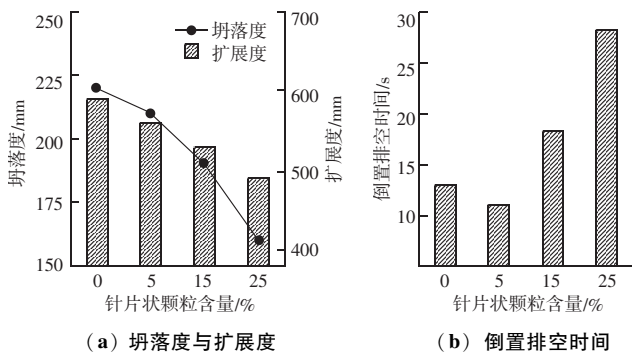


图1 粗骨料针片状颗粒含量对混凝土工作性能的影响

Fig. 1 Effect of coarse aggregate flat and elongated particle content on the workability of concrete

这是因为针片状颗粒自身形态特性常以滑动的方式在混凝土拌合物中移动，相较于球形等规则骨料滚动的移动方式，其在浆体中滑动所产生的摩擦力较大；除此之外，针片状颗粒的比表面积与规则颗粒相比较，在骨料总质量和浆体量一定的情况下，针片状颗粒含量越高，总比表面积越大，而总比表面积大会导致浆体对骨料的包裹性变差，导致黏聚性较差，同时，包裹其表面的胶凝材料浆体需求量增大，进而导致骨料间的富余浆体减少、浆体厚度变小^[6]，浆体的润滑作用减弱，骨料阻滞作用增强，拌合物的黏滞力增大，容易出现离析现象；

材料科学

且针片状颗粒之间易发生交错、形成较多搭接结构,增大了内阻力,阻碍了拌合物浆体的流动^[7]。而对于高强混凝土,较多的胶凝材料浆体用量能够缓冲针片状颗粒对拌合物性能的劣化作用,但当针片状颗粒含量进一步增大时,会显著影响拌合物的流动性,且在泵送施工时容易出现堵管问题。

2.2 针片状颗粒含量对混凝土力学性能的影响

2.2.1 抗压强度

针片状颗粒含量对高强混凝土抗压强度的影响如图2所示。各龄期混凝土抗压强度均随针片状含量的增加而降低,当含量增加至15%时,混凝土7和28d抗压强度分别大幅度降低至65.3和79.8MPa,相较于未含针片状颗粒的ZP0试验组,其抗压强度分别降低近7.5%和8.8%;当针片状颗粒含量进一步增大至25%时,混凝土7、14和28d抗压强度分别为62.4、72.1和76.7MPa,较ZP0试验组分别降低了近11.7%、11%和13%。

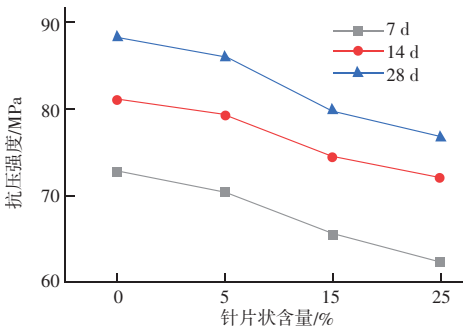


图2 针片状颗粒含量对高强混凝土抗压强度的影响
Fig. 2 Effect of flat and elongated particles content on compressive strength of high strength concrete

粗骨料针片状颗粒含量对高强混凝土抗压强度影响显著,高强混凝土抗压破坏形式不仅沿着界面剥落,还存在部分骨料被压碎的现象。较早龄期阶段,针片状颗粒由于自身粒形特点导致脆弱性在较低强度混凝土基体中表现的不明显,针片状颗粒主要是通过劣化界面过渡区、增加混凝土内部的薄弱环节,而对强度产生不利影响^[8]。随着养护龄期增加,基体强度不断提高,骨料本身脆弱性这一因素对强度影响愈发突出,高强混凝土从渐进累计破坏逐渐向脆性突发型转换^[9]。针片状颗粒由于其自身的形态特性,在外部荷载作用时,相较于球形骨料颗粒更为脆弱,表现为易被折断^[10],且当含量较多时,会导致骨料级配较差,在成型过程中试件不易

振捣密实,导致内部缺陷增多;针片状颗粒增多,会导致骨料总比表面积增大,骨料需要包裹面积增大,混凝土拌合物体系内富余浆体减少,浆体无法充分包裹骨料,会导致骨料与浆体之间存在界面缺陷的可能性增大;同时,针片状颗粒易在水平方向定向排列,气泡排出受阻,骨料下方自由水富集过多形成水囊,使得局部水胶比增大^[11],混凝土内部匀质性变差,骨料下方的水化产物结构较疏松,强度较低,容易出现孔隙和微裂缝;在荷载作用下,混凝土中粗骨料的棱角变化处易出现应力集中,导致微裂缝扩展造成损伤积累^[1],针片状颗粒会增加混凝土内部的棱角变化,使得内部出现较多应力集中现象,降低了混凝土的抗压强度。

2.2.2 收缩性能

针片状颗粒不仅会对高强混凝土力学性能产生影响,同时其含量的高低也关系着混凝土体积稳定性的好坏。高强混凝土收缩性能随针片状颗粒含量变化情况如图3所示。随着针片状颗粒增多,混凝土收缩值逐渐增大,混凝土的体积稳定性逐渐变差;当针片状颗粒含量达到15%时,混凝土120d收缩值较未含针片状颗粒组相比增大了近9.3%;当针片状颗粒含量进一步增加至25%时,混凝土120d收缩值较未含针片状颗粒组增大了近16.5%。而混凝土较差的体积稳定性将直接危害到混凝土耐久性,故应对含量阈值进行控制,建议不超过10%,以减少混凝土的收缩,避免对混凝土耐久性产生不利影响。

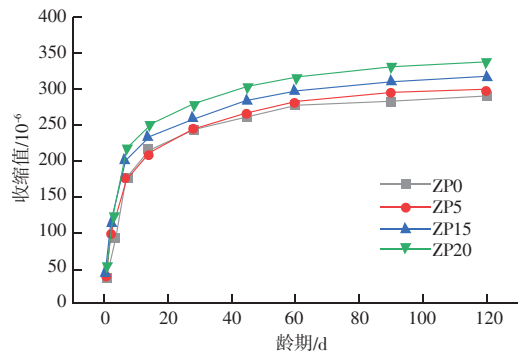


图3 针片状颗粒含量对混凝土收缩性能的影响
Fig. 3 Effect of flat and elongated particles content on shrinkage properties of concrete

2.3 针片状颗粒含量对混凝土耐久性性能的影响

通过测定不同含量试验组的混凝土电通量和碳化深度,以分别表征混凝土抗氯离子渗透性能和抗碳化

性能,并结合上述性能变化情况综合分析高强混凝土耐久性能,试验检测方法均依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,试验数据见表 8。

表 8 针片状颗粒含量对混凝土耐久性能的影响
Table 8 Effect of flat and elongated particles content on durability performance of concrete

组别	电通量/C	28 d 碳化深度/mm
ZP0	412	3.3
ZP5	424	3.1
ZP15	467	4.6
ZP25	495	7.8

由表 8 分析可知,混凝土电通量和 28 d 碳化深度均随着针片状颗粒含量的增多而逐渐增大,当针片状颗粒含量达到 15% 时,电通量值较针片状颗粒含量为 0 的混凝土增大了 55 C,增大了近 13%,28 d 碳化深度增大了 1.3 mm;随着含量进一步增大至 25% 时,电通量显著增大,较未含针片状颗粒的 ZP0 组混凝土相比增大了 83 C,增大近 20%,28 d 碳化深度增大了 4.5 mm,但均能达到 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》中 Q-V 的抗氯离子渗透性能等级和 T-IV 的抗碳化性能等级。根据上述试验数据变化趋势分析可知,在胶凝材料用量较高的高强混凝土体系中,混凝土内部的密实程度和碱度均较高,高强混凝土内部尚能承受较低针片状颗粒含量带来的劣化作用,故针片状颗粒对高强混凝土耐久性能影响不大;而当针片状颗粒过多时,过量的针片状颗粒对混凝土内部结构的劣化作用增强,致使混凝土内部缺陷增多,界面性能变差,混凝土内部的匀质性和密实程度均变差。

2.4 针片状颗粒的粒径对混凝土性能的影响

不同粒径分布针片状颗粒对混凝土性能的影响数据见表 9。在每组针片状颗粒含量均在 15% 的情况下,随着针片状颗粒粒径逐渐增大,混凝土拌合物的坍落度和扩展度均不断减小,硬化混凝土各龄期强度均不断降低,当针片状颗粒粒径为 20~25 mm 时,与 ZP0 组相比,坍落度和扩展度均明显降低,分别降低 30 mm 和 70 mm,拌合物流动性显著变差,各龄期抗压强度均大幅度降低,其中 7 d 和 28 d 抗压强度分别降低 14.4 MPa 和 18.4 MPa。针片状颗粒粒径对混凝土流动性和力学性能影响显著。

表 9 不同粒径分布针片状颗粒对混凝土性能的影响
Table 9 Influence of different particle size distributions of flat and elongated particles on the properties of concrete

组别	坍落度/mm	扩展度/mm	抗压强度/MPa			影响系数		
			7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
ZP0	220	580	72.8	81.0	88.2	0	0	0
ZP15-1	210	545	67.9	75.7	83.7	0.59	0.67	0.54
ZP15-2	195	520	66.1	74.2	81.7	0.81	0.89	0.77
ZP15-3	180	490	63.7	70.0	75.3	1.10	1.49	1.54
ZP15-4	170	450	58.4	65.6	69.8	1.73	2.11	2.19
ZP15	190	510	64.5	73.4	79.8	1.00	1.00	1.00

根据试验方案中的假定,将 ZP0 组的影响系数假定为 0,ZP15 组的影响系数假定为 1,按内插法计算各粒径组不同龄期抗压强度的影响系数范围,见表 9。表 10 为不同粒径针片状颗粒影响系数,由表 10 可知,针片状颗粒粒径越大,影响系数越大。基于影响系数对上述针片状粒径试验中各组进行针片状含量计算,求得针片状颗粒含量,见表 11。根据表内数据分析可知,结合影响系数计算针片状颗粒含量,相同质量的针片状颗粒,其针片状颗粒含量不同,其对混凝土性能的影响程度也随着针片状颗粒的粒径分布的不同而存在显著差异,故结合粒径影响系数计算针片状颗粒含量相较于常规算法更为科学、合理^[12]。

表 10 不同粒径针片状颗粒影响系数
Table 10 Influence coefficients of different particle sizes of flat and elongated particles

指标	5~10 mm	10~16 mm	16~20 mm	20~25 mm
影响系数范围	0.54~0.67	0.77~0.89	1.10~1.54	1.73~2.19
影响系数	0.61	0.83	1.32	1.96

表 11 不同组别修正后针片状颗粒含量
Table 11 Corrected flat and elongated particles content for different groups

	ZP0	ZP15-1	ZP15-2	ZP15-3	ZP15-4	ZP15
	0	9	12	20	29	16

3 结论

针片状颗粒含量是反映粗骨料生产技术水平与产品质量的重要指标,对混凝土性能有显著影响。对针片状颗粒含量和针片状颗粒粒径大小对高强混凝土性能的影响规律进行研究,并对针片状颗粒含量的测试方法进行了优化,具体结论如下:

(1) 粗骨料中较高的针片状颗粒含量,会导致高强混凝土性能大幅度变差。针片状颗粒含量增大,混凝土拌合物的坍落度和扩展度均逐渐降低,拌合

材料科学

物的倒置排空时间增加,较多的针片状颗粒对 C70 高强混凝土和易性和泵送性能存在显著不利影响。粗骨料中针片状颗粒含量逐渐增加, C70 混凝土抗压强度不断降低,混凝土收缩逐渐增大,混凝土力学性能和体积稳定性均逐渐变差;硬化混凝土电通量和 28 d 碳化深度也均随着针片状颗粒含量的增加而逐渐增大,较高的针片状颗粒含量对 C70 高强混凝土耐久性能存在不利影响。

(2) 针片状颗粒粒径大小对高强混凝土存在不同的影响。混凝土拌合物坍落度和扩展度、硬化混凝土各龄期抗压强度均随着粗骨料中针片状颗粒粒径增大而降低;并且针片状颗粒不同粒径对混凝土抗压强度的影响系数值也随着其粒径的增大而呈逐渐增大的趋势,最大粒径为 25 mm 及以上的大粒径针片状颗粒对混凝土性能的劣化作用更为显著。

(3) 从针片状颗粒含量和粒径角度出发,综合考虑针片状颗粒对高强混凝土性能影响规律,建议控制针片状颗粒含量不超过 5%,并在粗骨料粒径选择上应选择较小粒径骨料,以避免其粒径区间中存在大粒径针片状骨料给混凝土体系带来的不利影响,以保证高强混凝土性能满足要求。同时,建议结合混凝土现场拌和状态以及硬化混凝土各龄期抗压强度实测值赋予不同粒径针片状颗粒不同的现场影响系数。计算针片状颗粒含量时,需在标准计算方法基础上按不同粒径针片状颗粒分别乘以其对应的影响系数,以反映粗骨料对混凝土实际施工的影响情况,真实反映粗骨料品质的同时,对粗骨料粒径进行更好的控制。

参 考 文 献

- [1] 张雪芹,马昆林,龙广成,等.粗骨料形态特征表征参数及与混凝土性能关系的研究进展[J/OL].材料导报,2024(2):1-24.
- [2] 张景琦,江守恒,朱卫中.粗骨料针片状含量对泵送混凝土性能影响[J].低温建筑技术,2009,31(3):15-16.
- [3] 黄宗凯,徐玉芬,曾智科,等.粗骨料对混凝土性能的影响[J].江西建材,2018(13):12-14,18.
- [4] 王博洋,魏连雨.花岗岩针片状对高性能混凝土性能的影响[J].中外公路,2015,35(6):308-310.
- [5] 吴历斌,颜志勇,江莞.高强高性能混凝土中的集料研究[J].四川建筑科学研究,2002(3):55-58.
- [6] 彭园,高育欣,吴雄,等.骨料对 140 MPa 强度等级混凝土性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2015(1):15-18.
- [7] 韩宏伟.粗骨料针片状对混凝土性能的影响研究[J].低温建筑技术,2020,42(7):53-55.
- [8] 刘东.粗集料品质对高强混凝土性能影响研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [9] 万怡江,张正,庞太富,等.粗骨料颗粒尺寸对混凝土力学性能的影响试验[J].四川建材,2019,45(9):17-18,62.
- [10] 谭春腾.骨料质量对混凝土性能影响的研究[J].科技信息,2012(5):446,431.
- [11] 王兆云.尼克水电站骨料针片状颗粒对混凝土性能的影响[J].资源环境与工程,2014,28(4):470-472.
- [12] 陈晓玲.水泥混凝土用粗集料针片状颗粒含量试验优化研究[J].山西建筑,2014,40(24):112-114.
- [13] 普通砂、石质量及检验方法标准:JGJ 52—2006[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [14] 建设用卵石、碎石:GB/T 14685—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [15] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [16] 混凝土耐久性检验评定标准:JGJ/T 193—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.