

砂的主要特征之一,而且石粉的存在会对混凝土的工作性能、物理力学性能和耐久性造成巨大的影响。

对于人工砂石粉研究的主要关注点在于“石粉含量”^[2~6]。一般认为,合理范围内的石粉含量对混凝土的各方面性能是有利的:(1)适量的人工砂石粉在混凝土中可以发挥微集料作用,能够改善混凝土的孔隙结构,提高混凝土的密实性,可以发挥其表面粗糙的颗粒形态效应,增加骨料与浆体之间的机械咬合力,改善混凝土各组分之间的界面作用;(2)达到一定细度的石粉还具有一定的活性效应,可以充当混凝土掺合料而取代部分水泥、粉煤灰等胶凝材料。但是,随着石粉含量的增加,石粉会对混凝土水化性能以及力学强度产生不利的影响。

此外,业界关于人工砂石粉特性及其对拌合混凝土性能影响的认识仍然存在明显的不足,其主要体现在以下三个方面:(1)我国的很多行业标准对人工砂石粉的含量都做出了明确的规定,但相关规范中的石粉含量与很多实际工程中的应用效果不符,导致在人工砂运用过程中存在较大的浪费和盲目,从而在很大程度上限制了人工砂的推广应用;(2)没有系统性地开展针对不同岩性的人工砂石粉对混凝土微宏观性能影响的相关研

究;(3)由于缺乏石粉对混凝土性能产生的影响全面的理论基础研究和试验研究,导致对人工砂石粉含量的控制仍存在较大的分歧,主要体现在石粉对混凝土性能的作用机理存在较大的争议。因此,开展有关对人工砂石粉的研究对由人工砂掺和制备的混凝土具有着重要的科学意义与工程应用价值。

2 试验及分析

笔者对人工砂中的不同石粉含量对混凝土性能产生的影响进行了分析与研究,本次研究通过试验的方法进行,具体叙述如下。

2.1 试验方法

(1)原材料。试验所用的水泥为峨胜 P·MH42.5 水泥,所用的砂为乌东德以及杨房沟水电站现场混凝土制备用砂,所用的石粉由两座水电站砂石加工系统制备的人工砂筛分所得,所用的粗骨料为乌东德以及杨房沟水电站砂石加工系统破碎所得的“粒径为 5~20 mm 的小石以及粒径为 20~40 mm 的中石”^[7]所组成的级配骨料。粗骨料品质符合相关规范中的相应技术要求。

(2)配合比。采用上述材料制备出不同岩性、不同石粉含量的混凝土标准试块,其混凝土配合比见表 1(其中石粉含量参数为质量百分比)。

表 1 混凝土配合比表

试块类型	水灰比	单位体积用量 /kg·m ⁻³						
		水	水泥	砂	小石(粒径为 5~20 mm)	中石(粒径为 20~40 mm)	石粉	筛余人工砂
石粉含量为 5%	0.44	153	348	710	605	605	35.5	674.5
石粉含量为 10%		153	348	710	605	605	71.0	639.0
石粉含量为 20%		153	348	710	605	605	142.0	568.0
石粉含量为 30%		153	348	710	605	605	213.0	497.0

设置了不同石粉含量用以了解其对混凝土力学性能的影响;同时采用乌东德水电站(石灰岩)以及杨房沟水电站(花岗岩)两种不同岩性的人工砂石粉探究了其 对混凝土性能的影响。混凝土抗压强度和抗拉强度测试所用的试件均为按标准方法制作的 150 mm×150 mm×150 mm 立方体,分别由含有不同岩性、不同含量的人工砂(5%、10%、20%和 30%)制成。

(3)试验内容:

①抗压性能试验。抗压强度试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019 进行,采用“标准试验方法并按照规定中的计算方法得到试验强度值”^[8]。

②抗拉强度试验。抗拉强度试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019 进行,采用“劈裂法测定混凝土的抗拉强度”。

③微观结构与化学成分分析。将压碎后的试件按照检测要求制备并进行 XRD 图谱分析及

SEM 电镜扫描分析。

2.2 力学性能测试

(1)抗压试验。混凝土抗压试验取得的结果,石粉含量与混凝土抗压强度关系见图 1。对于杨房沟组,随着混凝土中石粉含量的增加,混凝土的抗压强度呈现出先增加后减少的趋势。当石粉含量为 5% 时,混凝土强度最低为 56.49 MPa;当石粉含量增加到 20% 时,混凝土的抗压强度达到峰值,为 65.10 MPa;当石粉含量继续增加到 30% 时,混凝土的强度稍有降低,为 61.87 MPa。对于乌东德组,随着混凝土中石粉含量的增加,混凝土的抗压强度呈现出先增加后减少的趋势。当石粉含量为 5%~10% 时,混凝土强度有极细微的下降;当石粉含量为 5% 时,混凝土强度最低为 49.78 MPa;当石粉含量增加到 20% 时,混凝土的抗压强度达到峰值,为 53.84 MPa;当石粉含量继续增加到 30% 时,混凝土的强度稍有降低,为 53.73 MPa。

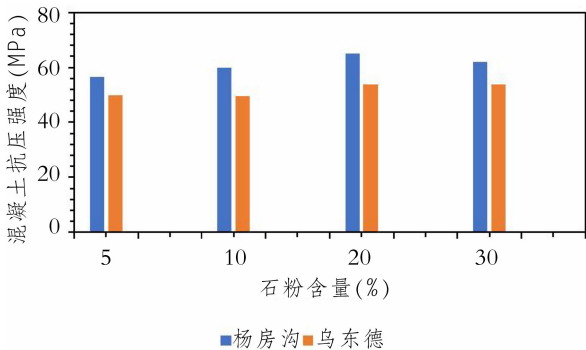


图 1 石粉含量与混凝土抗压强度关系图

(2)劈裂试验结果。石粉含量与混凝土抗拉强度关系见图 2。从整体趋势来看,随着混凝土中石粉含量的增加,混凝土的抗拉强度呈现出先增加后减少的趋势。对于杨房沟组,当石粉含量为 5%~20% 时,混凝土强度逐渐上升,且其上升趋势逐渐增大;当石粉含量为 5% 时,混凝土抗劈裂强度最低,为 3.36 MPa;当石粉含量增加到 20% 时,混凝土的劈裂抗拉强度达到峰值,为 3.85 MPa;当石粉含量继续增加到 30% 时,混凝土的劈裂抗拉强度稍有降低,为 3.14 MPa。对于乌东德组,当石粉含量为 5%~20% 时,混凝土抗裂强度逐渐上升,且其上升的趋势逐渐增大;当石粉含量为 5% 时,混凝土抗劈裂强度最低,为 4.46 MPa;当石粉含量增加到 20% 时,混凝土的

劈裂抗拉强度达到峰值,为 5.11 MPa;当石粉含量继续增加至 30% 时,混凝土的劈裂抗拉强度稍有降低,为 4.17 MPa。

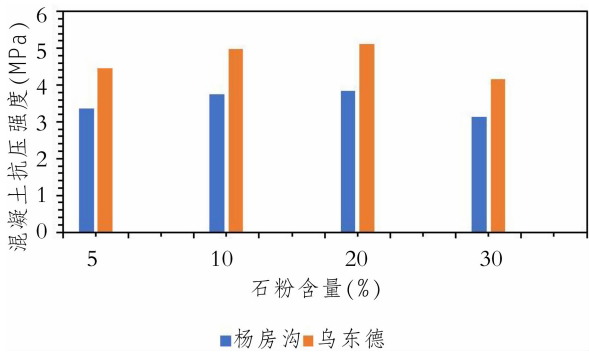


图 2 石粉含量与混凝土抗拉强度关系图

2.3 化学成分与微观性能分析

(1)石粉中的化学成分分析。通过 JADE 软件与 XRD 标准谱,对试验测试谱图进行分析解谱可以发现:

杨房沟组石粉样品 XRD 图谱中的主峰为 SiO_2 (石英),其余波峰含有 $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ (钠长石)及 KAlSi_3O_8 等物质,结合石粉外观颜色及形貌进一步分析杨房沟水电站人工砂及石粉样品后可以得出:石粉的主要成分为石英和钠长石以及少量的微斜长石、斜绿泥石、黑云母和堇青石。从成分组成看:杨房沟水电站人工砂及石粉样品系由花岗岩制备而成。

乌东德组石粉样品的解谱结果显示:主峰所示物质为 CaCO_3 。在进一步对比其余波峰标准谱后可以得出其余波峰所示物质主要为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和 SiO_2 ,在对物质组分以及外观形貌进行对比分析后可以得知乌东德水电站人工砂及石粉样品的主要成分为白云石与方解石以及少量的石英。从成分组成看:乌东德水电站人工砂及石粉样品系由石灰岩制备而成。

(2)微观结构分析。利用电子显微镜分别对不同石粉含量的杨房沟组以及乌东德组混凝土试件的微观形貌进行观测。从 5 000 倍放大的混凝土 SEM 照片中可以看出:在混凝土骨料孔隙中可以看到絮状 C—S—H 晶体以及针棒状的钙矾石晶体和表面粗糙的石粉颗粒。随着石粉含量的增加,所生成的针棒、长条状的水化产物的数量以及密集程度均有一定程度的增长,并且其大多数分布在骨料的孔隙中,呈针棒状及网状分布。同

时,随着石粉含量的增加,可以明显地发现试样中的片状晶体结构逐渐减少,而絮状的结构逐渐增多。石粉含量为30%的杨房沟组与乌东德组混凝土试件的絮状结构显然多于较低石粉含量的试样。而在石粉含量较低的混凝土试件中能够明显地观察到六边形的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,且其絮状水化凝胶体较少。

3 石粉与混凝土耦合作用机制分析

当水泥发生水化反应时,首先,由于石粉的粒径较小,可以填充在水泥骨料之间的孔隙之中起到填充作用,使混凝土的结构更为致密。基于本试验混凝土配合比,随着人工砂质量百分比的增加,混凝土试件中的硅酸二钙、白云石和方解石的含量越来越多。方解石是在混凝土试件养护过程中空气中的 CO_2 与试样中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 发生反应生成的碳化产物(CaCO_3 或 $\text{Ca}_x\text{Mg}_{1-x}\text{CO}_3$);其次,原材料中的 SiO_2 与试样中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成硅酸二钙($\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$),也可生成 C-S-H 。

大量碳化产物的填充使混凝土试件结构更加致密,吸水率降低。鉴于硅酸二钙的早期强度较低,但其随着龄期的增加\混凝土的力学性能亦有所上升。同时,由于石粉的晶核效应,当水泥发生水化反应时石粉粒径较小且充斥于混凝土骨料所形成的骨架之间,微小的石粉能够作为结晶核使水化生成的水化产物(如 C-S-H)附着在石粉表面形成晶体充斥于混凝土的微小孔隙中,从而提升混凝土的强度。

除此之外,随着石粉含量的增加,石粉填充并大量堆积于混凝土骨料形成的骨架之间导致水化反应时,水泥与水并不能充分反应,进而导致混凝土的强度有所降低。当填充作用与石粉对混凝土水化的负面效应相结合时,石粉含量对混凝土性能的影响便会呈现出先正向\后负向的情况,即当石粉含量增加时,混凝土的强度会首先由于晶核作用以及填充作用大于因石粉含量增加导致的水化反应不充分的负面作用,水化产物填充混凝土的微小孔隙而提升了混凝土的力学性能,但随着石粉含量的继续增加,这种晶核作用以及填充作用的影响小于混凝土水化不完全而导致结构疏松的影响时,混凝土的强度将会出现降低的情况。

4 结 语

基于试验中混凝土的配合比,当混凝土中的人工砂石粉掺量为20%时,混凝土的抗压以及劈裂抗拉性能最佳。当石粉含量小于20%时,混凝土的强度随石粉含量的增加,会因石粉的晶核作用以及填充作用大于其导致水化反应不充分的负面作用,提升混凝土的力学强度。但当石粉含量大于20%后,随着石粉含量的继续增加,石粉在混凝土中的这种晶核作用以及填充作用,小于混凝土水化不完全导致其结构疏松的影响时,混凝土的强度即会出现降低的情况。

除此以外,基于本试验的混凝土配合比,在石粉含量相同的情况下,杨房沟组人工砂混凝土的力学性能强于乌东德组,即花岗岩石粉对混凝土强度的提升强于石灰岩石粉。其主要原因为:首先,乌东德组的石粉成分主要为石灰岩,属于典型的钙质岩基岩石粉;而杨房沟组的石粉成分则为花岗岩,属于典型的硅质岩基岩石粉。而硅质岩的化学活性较钙质岩更低,故其水化反应过程中石粉中的物质更加稳定,与水发生反应时放热较少,从而减少了水化热,使得混凝土中产生的气泡和孔隙较少,混凝土的强度亦由此得到了一定程度的提升;其次,从微观结构看,在石粉含量相同的情况下,杨房沟组混凝土试样的整体结构相较于乌东德组混凝土试样更为致密。

参考文献:

[1] 陈家珑. 人工砂—新型建筑用砂[J]. 新型建筑材料,2002,29(6):32-34.
[2] 罗灿亮. 人工砂石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 江西建材,2015,35(20):1-2,6.
[3] 李雨婷. 人工砂石粉含量对混凝土性能影响试验研究报告[J]. 低碳世界,2014,4(5):145-147.
[4] 彭元福. 机制砂石粉含量对混凝土性能影响[J]. 铁道建筑技术,2014,52(12):69-70,85.
[5] 张如林. 陈玉前,刘书童,等. 机制砂石粉含量对混凝土的性能影响研究[J]. 混凝土,2016,38(3):84-85.
[6] 彭仁琛. 浅析机制砂中石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 福建建材,2020,39(1):22-24.
[7] 水工混凝土施工规范,DL/T5144-2015[S].
[8] 普通混凝土力学性能试验方法标准,GB/T50081-2019[S].

作者简介:

郭子晗(1981-),男,四川南充人,副高级工程师,从事水电工程施工技术与管理工作;
范晓亮(1977-),男,四川达县人,副高级工程师,从事水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)