

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.013

石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展

蒋林华¹, 张 炎¹, 李辰治¹, 徐 宁^{1,2}

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 从石灰石粉水泥基材料的作用机理、性能、应用技术标准和工程应用等方面对国内外石灰石粉水泥基材料取得的进展进行综述, 提出单掺石灰石粉水泥基材料中石灰石粉的作用机理、时变行为和性能调控方法等有待进一步研究的问题。
关键词: 石灰石粉; 水泥基材料; 作用机理; 材料性能; 应用技术标准; 工程应用; 综述
中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0083-07

Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder

JIANG Linhua¹, ZHANG Yan¹, LI Chenzhi¹, XU Ning^{1,2}

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In this paper, the current status of cement-based materials with limestone powder at home and abroad is reviewed from the aspect of the mechanism, material properties, technical standards and its engineering application. Problems about the mechanism, time varying behavior and performance controlling methods that are needed to be further studied have been proposed.
Key words: limestone powder; cement-based materials; mechanism; material properties; technical standards; engineering application; review

水泥基材料具有适应性强、成本低廉、坚固耐用等优点, 被广泛应用于水利水电、建筑、交通等工程中。现代水泥基材料技术进步的标志之一是广泛应用掺合料(又称矿物外加剂)。为节约水泥, 改善水泥基材料的性能, 生产水泥基材料时往往掺入较多的掺合料。掺合料的主要作用是降低水泥基材料的水泥用量、改善和易性、减少水化热和收缩、提高强度和耐久性。常用的掺合料有粉煤灰、矿渣、硅粉、天然火山灰质材料等。粉煤灰和矿渣是常用的水泥基材料掺合料。我国西部地区和“一带一路”沿线的许多国家, 粉煤灰和矿渣等掺合料紧缺, 长距离运输会大幅度提高成本。寻找一种绿色环保、廉价易得、性能较好的新型掺合料势在必行。

石灰石粉是以一定纯度的石灰石为原料, 经粉磨至规定细度的粉状材料。由于石灰石资源丰富、分布广泛、方便加工, 石灰石粉是一种廉价易得的材料。石灰石粉用作水泥混合材有很长的历史, 主要用于生产通用硅酸盐水泥和石灰石硅酸盐水泥。石灰石粉用作水泥基材料掺合料近年成为热点, 主要用于高流动性水泥基材料和优质掺合料缺乏地区的水泥基材料生产。采用石灰石粉作为新型掺合料, 可减少混凝土碳排放约15%, 节约水泥原材料10%左右。因此, 研究石灰石粉水泥基材料对实现水泥基材料产业的可持续发展, 确保工程的安全运行具有十分重要的意义。

本文从作用机理、性能、规范标准和工程应用等方面介绍石灰石粉水泥基材料所取得的进展, 提出未来

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401610); 国家自然科学基金(51278167)
作者简介: 蒋林华(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程新材料和结构耐久性研究。E-mail: lhjiang@hhu.edu.cn
引用本文: 蒋林华, 张炎, 李辰治, 等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 83-89.
DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.013.

的研究建议。

1 作用机理

石灰石粉在水泥基材料中的作用可归结为物理填充效应和化学活性效应。

1.1 物理填充效应

通常认为石灰石粉的活性较低,所起的作用主要是物理作用,因此常被当作惰性填料。刘数华等^[1]研究表明,由于石灰石粉比水泥更细,能够很好地填充水泥浆体中的孔隙,改善孔结构,使浆体更为密实。王雨利等^[2]测试了不同比例石灰石粉与水泥混合物的湿堆积密度,发现石灰石粉为 10% 时混合物密实度最大。Zhang 等^[3]测定了标准养护和蒸汽养护(45℃、7 d)石灰石粉、粉煤灰水泥浆体和混凝土的孔结构,石灰石粉和粉煤灰的掺量均为 40%,石灰石粉浆体和混凝土的水胶比为 0.40 和 0.33、粉煤灰浆体和混凝土的水胶比为 0.40,得到水胶比相同时,粉煤灰水泥浆体的微结构比石灰石粉水泥浆体更致密、石灰石粉混凝土的连通孔隙率高于粉煤灰混凝土的结论。Elgalhud 等^[4]对全球 1993 年以来发表的有关石灰石粉对水泥浆体、砂浆、混凝土孔结构影响的文献进行总结分析,影响因素涉及硅酸盐水泥和石灰石粉类型、水泥细度和生产方法、养护、成熟度、水胶比以及粉煤灰、矿渣、硅灰和偏高岭土等混合材料,指出:尽管硅酸盐水泥中石灰石粉掺量达到 25% 可能不会损害孔结构,但就对强度的影响方面而言,石灰石粉限制掺量大概在 15%,5~40℃ 的养护温度对孔结构的影响与硅酸盐水泥类似;提高温度会对孔结构产生不利影响。

1.2 化学活性效应

研究表明,石灰石粉并非完全惰性,在水泥水化反应中起晶核作用,诱导水泥的水化产物析晶,加速水泥水化并参与水泥的水化反应,生成水化碳铝酸钙,并阻止钙矾石向单硫型水化硫铝酸钙转化^[5-7]。

Kakali 等^[8]制备了掺 0、10%、20% 和 35% 石灰石粉的硅酸盐水泥,以及 C₃A 和 C₃S 浆体,采用 XRD 和 TGA 测定 1 d、2 d、7 d 和 28 d 的水化产物,得到石灰石粉会延迟钙矾石向单硫型水化硫铝酸钙转化、加速 C₃S 水化和早期生成单碳铝酸钙等结论。Vogliss 等^[9]采用 85% 硅酸盐水泥熟料和 15% 混合材料及 0.4 水胶比制备复合水泥浆体,通过 XRD 分析比较石灰石、粉煤灰和天然火山灰硅酸盐水泥的 1 d、2 d、7 d 和 28 d 的水化,得到第 1 天就生成单碳铝酸钙、第 28 天时仍然存在单碳铝酸钙的结论。Thongsanitgarn 等^[10]采用最大粒径为 5 μm 和 20 μm 的 2 种石灰石粉,研究石灰石粉粒径对掺石灰石粉高钙粉煤灰硅酸盐水泥水化热的影响,浆体水胶比为 0.5、石灰石粉掺量为 0~30%、养护温度为 20℃,由 XRD 和 TG 分析,结果表明,石灰石粉粒径对水化热有较大影响,5 μm 石灰石粉会加快水化热释放而 20 μm 石灰石粉对水化热释放无明显影响,两种粒径石灰石粉浆体到 28 d 均观测到钙矾石和碳铝酸钙存在。Tydlitat 等^[11]对 80% 硅酸盐水泥和 20% 石灰石粉制成的石灰石硅酸盐水泥,采用 0.35 和 0.50 的水胶比,监测 20℃ 和 35℃ 条件下浆体的早期水化热,认为石灰石粉对早期水化热释放有重要影响。Aqel 等^[12]采用 2 种水泥(普通用途和高早强)、3 种细度石灰石粉(粒径 17 μm、12 μm、3 μm 对应比表面积分别为 475 m²/kg、380 m²/kg、1125 m²/kg)制备浆体和砂浆,石灰石粉掺量为 0、5%、10% 和 15%,水灰比为 0.37,蒸养条件为 55℃、12 h 和 16 h,得到石灰石粉会加快水化、增加石灰石粉细度可减少水泥稀释效应影响的结论。

2 性能

石灰石粉水泥基材料性能的研究主要涉及拌合物性能、力学性能、体积稳定性和耐久性。

2.1 拌合物性能

石灰石粉可以改善水泥基材料的流变性能。掺入石灰石粉可减少水泥基材料拌合物的泌水和离析现象、降低屈服应力和黏度、提高流动速度,因而在自密实混凝土中获得广泛应用^[13]。欧洲自密实混凝土项目研究结果表明,含石灰石粉的自密实混凝土具有良好的拌合物性能,但也有研究得到石灰石粉会引起混凝土拌合物坍落度的剧烈损失^[5]。Yahia 等^[14]研究表明,石灰石粉掺量超过临界值时砂浆黏度明显增加。Celik 等^[15]采用粉煤灰和石灰石粉制备出了高工作性的自密实混凝土。

2.2 力学性能

石灰石粉可提高水泥基材料的早期强度,后期强度增长极为缓慢、甚至有所降低。Zhang 等^[3]研究得到结论:标准和蒸汽养护条件下,掺 40% 石灰石粉混凝土的 3 d、28 d、90 d 抗压强度均低于相同掺量同龄期粉煤

灰混凝土的抗压强度。Aqel 等^[12]研究表明,石灰石粉能提高砂浆的早期强度,石灰石粉和水泥的细度会涉及石灰石粉对强度的影响。Yahia 等^[14]、Celik 等^[15]、尹耿等^[16]的研究表明,一定细度的石灰石粉可提高水泥基材料的早期强度,但掺量增加会降低强度。张凤臣等^[17]测定了标准养护 28 d、蒸汽养护和蒸压养护条件下 35% 石灰石粉+65% 硅酸盐水泥胶砂试件的抗压和抗折强度,得到结论:蒸汽养护后的强度低于标准养护 28 d 的强度,蒸压养护后的抗压强度高于标准养护 28 d 的抗压强度,但抗折强度低于标准养护 28 d 的抗折强度。Shafigh 等^[18]测定了掺石灰石粉和大掺量粉煤灰轻骨料混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度,采用石灰石粉代替砂改善了混凝土的早期和后期抗压强度。Diab 等^[19]测定了掺石灰石粉混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量,研究表明 3 d、7 d、28 d、365 d 抗压强度及 28 d 劈裂抗拉强度和弹性模量均随石灰石粉掺量增加而降低,石灰石粉掺量在 10% 以内抗压强度降幅较小,劈裂抗拉强度的降幅大于抗压强度,弹性模量的降幅相对较小,掺入硅灰可改善材料性能。此外,Antoni 等^[20]测定了复掺偏高岭土和石灰石粉砂浆的力学性能,高岩^[21]进行了石灰石粉混凝土基本力学性能试验研究。

2.3 体积稳定性

石灰石粉对水泥基材料体积稳定性影响的研究结论并不一致。郭育霞等^[22]研究表明,石灰石粉掺量对混凝土干缩性能的影响随干缩龄期的不同而不同,内掺时,干缩随掺量增加而增大。李悦等^[23]测定了石灰石粉掺量为 10%、20% 和 30% 混凝土的收缩性能,认为石灰石粉可以降低混凝土的收缩,掺量越高,降低效果越明显。肖佳等^[24]对石灰石粉水泥基材料的自收缩性能进行研究,结果表明,硬化浆体的自收缩随石灰石粉掺量的增加呈现先增加、后降低的趋势。Zhang 等^[3]研究得到如下结论:石灰石粉对大体积混凝土绝热温升的减少与粉煤灰相同;水胶比相同时,体积稳定性与粉煤灰混凝土几乎相同。

2.4 耐久性

石灰石粉水泥基材料耐久性研究涉及抗冻、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀和抗氯离子渗透等。Zhang 等^[3]研究得到标准养护条件特别是蒸汽养护条件下抗碳化和氯离子渗透性能(电通量法)低于粉煤灰混凝土的结论。何智海等^[25]研究表明,单掺石灰石粉和双掺粉煤灰、石灰石粉混凝土的抗冻融性能均低于普通混凝土,石灰石粉细度对混凝土的抗冻融性能影响不大,粉煤灰、石灰石粉的互补效应使 10% 粉煤灰和 10% 石灰石粉混凝土的抗冻融性能均接近普通混凝土。Diab 等^[19]的研究表明,石灰石粉掺量不超过 10% 时,对混凝土抗硫酸盐侵蚀性的负面影响并不显著。邓德华等^[26]用天然石灰石粉等质量取代 20% 和 30% 水泥制备净浆和砂浆试件,常温浸泡在 0.35 mol/L Na₂SO₄ 溶液中,得到石灰石粉对水泥基材料的抗硫酸盐性有严重影响,会形成大量较大尺寸的石膏晶体而膨胀开裂的结论。Irassar^[27]、严军伟等^[28]对石灰石粉水泥基材料的硫酸盐侵蚀特性进行了综述,介绍了石灰石粉水泥基材料的硫酸盐侵蚀研究成果,提出了相应的改善措施。Hornain 等^[29]测定了掺 20% 石灰石粉净浆和掺 5% 石灰石粉砂浆的抗氯离子渗透性,得到掺入石灰石粉可降低氯离子扩散系数的结论。Tsivilis 等^[30]的研究表明,石灰石粉对混凝土抗氯离子渗透和抗冻性不利,曹鹏飞等^[31]、肖佳等^[32]得到了类似的结论。Lollini 等^[33]的研究表明,15% 石灰石掺量对混凝土抗碳化和氯离子渗透不利,30% 石灰石掺量降低更多。

3 规范标准

与石灰石粉水泥基材料有关的规范标准有石灰石粉作为水泥混合材和石灰石粉作为混凝土掺合料两大类。

3.1 石灰石粉作为水泥混合材

我国于 1995 年制定了建材行业标准 JC 600—1995《石灰石硅酸盐水泥》,后经 2 次修订,现行标准为 JC/T 600—2010《石灰石硅酸盐水泥》。除石灰石硅酸盐水泥外,硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥可采用一定比例的石灰石掺入水泥熟料中,磨细制成相应品种的水泥,现行标准为 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》。欧洲标准 BS EN 197-1 : 2011《Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements》以及美国、日本等国的水泥标准也对石灰石粉作为水泥混合材做出了相应的规定。我国石灰石硅酸盐水泥中石灰石(质量分数)在 10% ~ 25% 范围,硅酸盐水泥中石灰石质量分数小于 5%,普通硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥中石灰石质量分数小于 8%。欧洲标准石灰石硅酸盐水泥中石灰石质量分数范围分别为 6% ~ 20% 和 21% ~ 35%,其他水泥中石灰石质量分数小于 5%。

3.2 石灰石粉作为混凝土掺合料

近年来,随着石灰石粉作为掺合料在混凝土中的应用越来越广泛,国内外先后制定了若干石灰石粉作为混凝土掺合料的规范标准。我国制定的规范标准有:国家标准 GB/T 30190—2013《石灰石粉混凝土》、电力行业标准 DL/T 5304—2013《水工混凝土掺用石灰石粉技术规范》和住建行业标准 JGJ/T 318—2014《石灰石粉在混凝土中应用技术规程》。国外制定的规范标准有:日本标准 JIS A 5041—2009《Crushed stone powder for concrete》、英国标准 BS 7979—2016《Specification for limestone fines for use with Portland cement》等,美国、法国等也有相关标准。我国标准规定石灰石粉在混凝土中的掺量应通过试验确定,对采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的钢筋混凝土和预应力混凝土,国家标准和住建行业标准规定了最大掺量(质量百分比),最大掺量与结构类型、水胶比和水泥品种有关,质量分数为 15% ~ 35%。国外标准对石灰石粉的品质有明确要求,掺量同样由试验确定。

4 工程应用

石灰石粉作为掺合料应用于混凝土,不仅可以节约水泥、降低混凝土的水化热温升、简化温控措施,而且能够在一定程度上改善混凝土的和易性、抗渗性和抗裂性等性能。这是解决工程建设活性掺合料供应不足现状的可能方案,同时,可减少部分工程石灰石骨料加工过程中石粉的土地占用和环境污染问题,技术经济效益和社会效益显著。

国外有许多大型工程应用石灰石粉的实例^[34]。日本明石海峡大桥采用了高流动性混凝土,每立方米混凝土中石灰石粉掺量为 150 kg。法国西瓦克斯核电站反应堆 C50 高性能混凝土使用的水泥中含有 9% 的石灰石粉。德国的硅酸盐水泥 II/A-L 中石灰石粉占 6% ~ 20%。

近年来,一些掺合料资源缺乏地区的水利水电工程,因地制宜地开展了掺石灰石粉水工混凝土的研究,并取得了一定程度的应用。石灰石粉在碾压混凝土中的应用主要有两方面:一是部分取代细骨料,二是作为掺合料^[35-36]。国内的官地、普定、岩滩、江垭和国外的马来西亚沐若等工程的碾压混凝土中,采用石灰石粉取代部分细骨料,取得了良好的效果。国内的龙滩、漫湾、大朝山,以及国外的柬埔寨甘再、蒙古泰西尔、日本千屋等工程的碾压混凝土用石灰石粉取代或部分取代粉煤灰,戈兰滩、景洪等工程的碾压混凝土则采用石灰石粉与其他活性掺合料按一定比例混用。我国西藏地区粉煤灰掺合料资源极度缺乏,扎曲果多、加查水电站等工程开展或正开展石灰石粉作为水工混凝土掺合料的研究工作^[37]。已有掺石灰石粉碾压混凝土测定的性能指标主要有拌合物性能、抗压强度、抗拉强度(劈拉强度)、抗剪强度、弹性模量、极限拉伸值、干缩、自生体积变形、比热容、导热系数、导温系数、线膨胀系数、绝热温升、抗渗性和抗冻性^[38-39]。

柬埔寨甘再水电站大坝碾压混凝土采用的施工配合比见表 1。其中编号 1 ~ 3 的单掺粉煤灰混凝土用于大坝基础部位,编号 4 ~ 5 的双掺粉煤灰、石灰石粉混凝土用于大坝 123 m 高程以下,编号 6 的单掺石灰石粉混凝土用于大坝 123 ~ 153 m 高程。应用结果表明:与粉煤灰相比,相同强度等级的混凝土,采用石灰石粉的用水量增大、水泥用量增多,和易性变化不大,凝结时间缩短;早期强度接近,后期强度增长较小;抗冻、抗渗、自生体积变形等变化不大,干缩和绝热温升略大。

戈兰滩水电站碾压混凝土采用矿渣和石灰石粉 1 : 1 复掺,大坝内部掺合料总掺量(质量分数,下同)为 60%,外部为 55%。景红水电站采用水淬锰铁矿渣和石灰石粉 1 : 1 混掺,大坝内部碾压混凝土中掺合料总掺量为 60%,外部为 50%。寒冷地区的新疆特克斯山口水库大坝内部碾压混凝土采用粉煤灰和石灰石粉各掺 30%,同时掺 7% 石灰石粉代砂。试验研究和工程实践表明,各工程混凝土的工作性、强度、耐久性指标均满足设计要求,取得了良好的使用效果,具体配合比见表 2。

表 1 甘再水电站大坝碾压混凝土的施工配合比

Table 1 Mix proportions of the roller compacted concrete in the Kamchay Hydropower Dam

编号	水胶比	砂率/ %	材料用量/(kg·m ⁻³)			
			水	水泥	粉煤灰	石灰石粉
1	0.57	34	87	61	92	
2	0.60	29	78	52	78	
3	0.60	29	78	60	70	
4	0.60	32	86	66	39	38
5	0.65	32	87	54	40	40
6	0.65	32	95	73		73

注:设计强度等级为 C₁₈₀15W4。

表 2 掺石灰石粉碾压混凝土施工配合比

Table 2 Mix proportions of the roller compacted concrete with limestone addition

工程名称	强度等级	水胶比	砂率/%	材料用量/(kg · m ⁻³)						
				水	水泥	掺合料	砂	小石	中石	大石
戈兰滩水电站	C ₉₀ 15	0.50	34	83	66	100	731	439	585	439
	C ₉₀ 20	0.45	38	93	93	114	784	527	791	
景洪水电站	C ₉₀ 15	0.50	33	75	60	90	722	452	602	452
	C ₉₀ 20	0.45	37	84	93	93	790	621	759	
	C ₉₀ 15	0.55	37	88	64	96	794	443	591	443
	C ₉₀ 20	0.50	42	98	98	98	877	596	728	
特克斯山口水库大坝	C ₉₀ 15	0.46	30	74	64	142	617	467	622	467

石灰石粉在常态水工混凝土中单掺应用鲜见报道,首次大量单掺应用的工程是中国电建集团海外投资有限公司承担的老挝南欧江五级水电站,混凝土的强度等级为 C₉₀15、C₂₈20 和 C₂₈25,相应的石灰石粉掺量为 35%、30% 和 30%,2016 年完成项目工作,测定的混凝土性能指标有坍落度、含气量、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、极限拉伸值、干缩、自生体积变形、比热容、导热系数、线膨胀系数、绝热温升、抗渗性和抗冻性。研究和应用表明,与粉煤灰相比,石灰石粉常态的混凝土的早期强度高、后期强度增长小、干缩大、极限拉伸值小、弹性模量小、热学性能相当,综合抗裂性能略差,但各项性能指标能满足设计要求。

5 有待进一步研究的问题

从国内外已有的成果可以看出,在石灰石粉水泥基材料方面已开展了许多研究工作,并在工程中得到一定程度的应用,但基本局限于与其他活性掺合料混掺或碾压混凝土中。有关单掺石灰石粉水泥基材料的溶蚀、抗氯离子侵蚀等长期性能及其演化规律的研究极为缺乏,相关作用机理和性能调控方法方面面临诸多挑战。笔者认为以下几个方面需要深入研究:

- a. 单掺石灰石粉水泥基材料中石灰石粉的作用机理研究。已有的石灰石粉作用机理研究多停留在某一特定体系或某个特定方面的作用机理,研究结论存在矛盾,在水泥基材料中的潜在作用还未完全认识清楚。
- b. 单掺石灰石粉水泥基材料的时变行为研究。有关单掺石灰石粉水泥基材料的拌合物性能、力学性能、体积稳定性和耐久性等已有一些试验资料,但实验室采用的标准养护温度与工程的实际温度历程存在较大差异,试验龄期一般不超过 90 d (有的到 180 d),石灰石粉对水泥基材料强度等性能的影响还没有明确一致的结论。
- c. 单掺石灰石粉水泥基材料性能调控方法研究。一般认为,石灰石粉可以改善水泥基材料的流变性能,提高水泥基材料的早期强度,但对水泥基材料抗冻性、抗碳化性不利,对水泥基材料的后期强度、抗渗透性能以及 TSA 侵蚀机理、形成条件等许多方面还存在争议。

参考文献:

[1] 刘数华,阎培渝. 石灰石粉对水泥浆体填充效应和砂浆孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报,2008,36(1):69-72. (LIU Shuhua, YAN Peiyu. Influence of limestone powder on filling effect of cement paste and pore structure of sand grout[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008,36(1):69-72. (in Chinese))

[2] 王雨利,周明凯,李北星,等. 石粉对水泥浆密度的影响[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(1):12-16. (WANG Yuli, ZHOU Mingkai, LI Beixing, et al. Effect of aggregate micro fines on solidity ratio of cement paste[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010,32(1):12-16. (in Chinese))

[3] ZHANG Z, WANG Q, CHEN H. Properties of high-volume limestone powder concrete under standard curing and steam-curing conditions[J]. Powder Technology,2016,301:16-25.

[4] ELGALHUD A A, DHIR R K, GHATAORA G. Limestone addition effects on concrete porosity[J]. Cement and Concrete Composite,2016,72:222-234.

[5] 肖佳,许彩云. 石灰石粉对水泥混凝土性能影响的研究进展[J]. 混凝土与水泥制品,2012(7):75-80. (XIAO Jia, XU Caiyun. Research progress in the effect of limestone powder on perfoemance of cement concrete[J]. China Concrete and Cement

- Products, 2012(7):75-80. (in Chinese))
- [6] 王雨利,王卫东,朱建平. 不同石灰石粉掺量对硅酸盐水泥水化的影响[J]. 硅酸盐通报,2014,33(11):2974-2980. (WANG Yuli, WANG Weidong, ZHU Jianping. Effect of limestone aggregate micro fines with different contents on hydration of portland cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014,33(11):2974-2980. (in Chinese))
- [7] 杨华山,方坤河,涂胜金,等. 石灰石粉在水泥基材料中的作用及其机理[J]. 混凝土,2006(6):32-35. (YANG Huashan, FANG Shenhe, TU Shengjin, et al. The effect and its mechanism of calcium carbonate on the cement based materials[J]. Concrete, 2006(6):32-35. (in Chinese))
- [8] KAKALI G, TSIVILIS S, AGGELI E, et al. Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$ [J]. Cement and Concrete Research,2000,30(7):1073-1077.
- [9] VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, et al. Portland-limestone cements: their properties and hydration compared to those of other composite cements[J]. Cement and Concrete Composite, 2005,27(2):191-196.
- [10] THONGSANITGARN P, WONGKEO W, CHAIPANICH A, et al. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone power: effect of limestone particle size[J]. Construction and Building Materials,2014,66:410-417.
- [11] TYDLITAT V, MATAS T, CERNY R. Effect of W/C and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement[J]. Construction and Building Materials,2014,50:140-147.
- [12] AQEL M, PANESAR D K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler[J]. Construction and Building Materials,2016,113:359-368.
- [13] 田倩. 自密实高性能混凝土矿物外掺料[J]. 混凝土与水泥制品,2000(5):18-20. (TIAN Qian. Self compacting high performance concrete mineral admixture[J]. China Concrete and Cement Products, 2000(5):18-20. (in Chinese))
- [14] YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio[J]. Cement and Concrete Research,2005,35(3):532-539.
- [15] CELIK K, MERAL C, GURSEL A P, MEHTA P K, et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder,[J]. Cement and Concrete Composite,2015,56:59-72.
- [16] 尹耿,马保国,张凤臣,等. 超细石灰石粉水泥基材料早期性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(4):116-119. (YIN Geng, MA Baoguo, ZHANG Fengchen, et al. Performance of cement-based material containing ultra-finelimestone powder at early age[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(4):116-119. (in Chinese))
- [17] 张凤臣,赵云,朱福万. 养护制度与组分对含石灰石粉水泥基材料力学性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(6):30-35. (ZHANG Fengchen, ZHAO Yun, ZHU Fuwan. Effect of curing condition and component on mechanical properties of cement-based material with limestone powder[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014,36(6):30-35. (in Chinese))
- [18] SHAFIGH P, NOMEI M A, ALENGARAM U J, et al. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash[J]. Journal of Cleaner Production,2016,135:148-157.
- [19] DIAB A M, ELMOATY A E M A, ALY A A. Long term study of mechanical properties, durability and enviromental impact of limestone cement concrete[J]. Alexandria Engineering Journal,2016,55:1465-1482.
- [20] ANTONI M, ROSSEN J, MARTIRENA F, et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone[J]. Cement and Concrete Research,2012,42(12):1579-1589.
- [21] 高岩. 石灰石粉混凝土基本力学性能试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2014.
- [22] 郭育霞,贡金鑫,李晶. 石粉掺量对混凝土力学性能及耐久性的影响[J]. 建筑材料学报,2009,12(3):266-271. (GUO Yuxia, GONG Jinxin, LI Jing. Influence of mass fractions of limestone powder on mechanical property and durability of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2009,12(3):266-271. (in Chinese))
- [23] 李悦,丁庆军,胡曙光. 石灰石矿粉在水泥混凝土中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(3):35-37. (LI Yue, DING Qingjun, HU Shuguang. Utilization of limestone as mineral admixture in cement and concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007,29(3):35-37. (in Chinese))
- [24] 肖佳,勾成福,金勇刚,等. 石灰石粉水泥基材料自干燥与自收缩研究[J]. 混凝土与水泥制品,2011(8):20-24. (XIAO Jia, GOU Chengfu, JIN Yonggang, et al. Research on self drying and autogenous shrinkage of cement based stone powder[J]. China Concrete and Cement Products,2011(8):20-24. (in Chinese))
- [25] 何智海,刘运华,钱春香,等. 双掺粉煤灰和石灰石粉对混凝土抗冻融性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2010,37(2):1-4. (HE Zhihai, LIU Yunhua, QIAN Chunxiang, et al. The study of effects on resistance to freezing-thawing of concrete mixed

with fly ash and ground limestone[J]. New Building Materials, 2010,37(2):1-4. (in Chinese))

[26] 邓德华,肖佳,元强,等. 石灰石粉对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报,2006,34(10):1243-1248. (DENG Dehua, XIAO Jia, YUAN Qiang, et al. Effect of limestone powder on the sulfate-resistance of materials based on cement and its mechanism[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006,34(10):1243-1248. (in Chinese))

[27] IRASSAR E F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler: a review[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3):241-254

[28] 严军伟,邢婕,李杰,等. 石灰石粉混凝土及其硫酸盐侵蚀特性综述[J]. 混凝土,2011(8):79-81. (YAN Junwei, XING Jie, LI Lian, et al. Review on limestone powder concrete and sulfate attack on it[J]. Concrete, 2011(8):79-81. (in Chinese))

[29] HORNAIN H, MARCHAND J, DUHOT V. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research,1995,25(8):1667-1678.

[30] TSIVILIS S, BATIS G, CHANIOTAKIS E. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar[J]. Cement and Concrete Research,2000,30(10):1679-1683.

[31] 曹鹏飞,秦鸿根,庞超明. 掺石灰石粉自密实混凝土性能的研究[J]. 施工技术,2005,34(增刊):35-37. (CAO Pengfei, QIN Honggen, PANG Chaoming. Study on performance of self-compacting concrete mixed with limestone-powder [J]. Construction Technology, 2005,34(Sup):35-37. (in Chinese))

[32] 肖佳,邓德华,唐咸燕,等. 用粉煤灰改善石灰石粉混凝土的氯离子扩散性[J]. 中南林业科技大学学报,2007,27(5):79-82. (XIAO Jia, DENG Dehua, TANG Xianyan, et al. Effects of fly ash on the chloride diffusivity of concrete with limestone powder[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007,27(5):79-82. (in Chinese))

[33] LOLLINI F, REDAELLI E, BERTOLINI L. Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete[J]. Cement and Concrete Composite,2014,46:32-40.

[34] 宋少民,刘娟红,徐国强. 石灰石粉在混凝土中应用的综述与研究[J]. 混凝土世界,2009(12):38-43. (SONG Shaomin, LIU Juanhong, XU Guoqiang. Summarize and research on application of limestone powder in concrete[J]. China Concrete, 2009(12):38-43. (in Chinese))

[35] 刘数华,阎培渝. 石粉作为碾压混凝土掺合料的利用和研究综述[J]. 水力发电,2007,33(1):69-71. (LIU Shuhua, YAN Peiyu. Summarization of utilization and researches on stone powder used as mineral admixtures in roller compacted concrete[J]. Water Power, 2007,33(1):69-71. (in Chinese))

[36] 陈改新,孔祥芝. 石灰石粉:一种新的碾压混凝土掺和料[J]. 中国水利,2007(21):16-18. (CHEN Gaixin, KONG Xiangzhi. Limestone powder;a new type of RCC admixture[J]. China Water Resources, 2007(21): 16-18. (in Chinese))

[37] 李光伟,邓长军. 复掺石灰石粉和粉煤灰在西藏地区水工混凝土中应用试验研究[J]. 西北水电,2012(5):78-80. (LI Guangwei, DENG Changjun. Study on tests of application of limestone flour and flyash in hydraulic concrete in tibet region[J]. Northwest Hydropower,2012(5):78-80. (in Chinese))

[38] 蔡胜华,杨华全,周浪,等. 石粉含量对大坝碾压混凝土性能的影响[J]. 水力发电,2008,34(1):32-34. (CAI Shenghua, YANG Huaquan, ZHOU Lang, et al. Influence on stone powder content on rcc performance of pengshui hydropower station dam [J]. Water Power,2008,34(1):32-34. (in Chinese))

[39] 王珩,陆采荣,梅国兴,等. 磷渣粉石灰石粉复合掺合料及其混凝土的性能试验[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):85-89. (WANG Heng, LU Cairong, MEI Guoxing, et al. Performance test of phosphorus slag powder and limestone powder compound mineral additive and the compounded concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):85-89. (in Chinese))

(收稿日期:2017-01-14 编辑:高建群)