

# 石粉对水泥湿堆积密度和混凝土性能的影响

王雨利<sup>1</sup>, 周明凯<sup>2</sup>, 李北星<sup>2</sup>, 管学茂<sup>1</sup>, 杨雷<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 材料科学与工程学院 河南焦作 454000; 2. 武汉理工大学 硅酸盐工程中心教育部重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:**石灰岩机制砂的用量越来越大,相应地,它的副产物石灰岩石粉也越来越多。如果不能合理地将石粉加以利用,势必给环境造成很大的负担。以石粉做矿物掺合料取代水泥为研究目的,对比了在0%、10%、15%、20%时的比例等质量取代水泥,对混凝土工作性能、抗压强度和抗渗性能的影响,得出石粉取代水泥的比例为10%左右时,对混凝土的性能有较好的改善作用。通过测其石粉和水泥混合后的湿堆积密度,得出石粉的质量比为10%时,二者的密实度最大。表明石粉做掺合料时,可通过二者混合后密实度的变化来判断二者的最佳比例。

**关键词:**石灰岩石粉,掺合料,混凝土,湿堆积密度

中图分类号:TU528.041 文献标识码:A 文章编号:1006-7329(2008)06-0151-04

## Effects of Stone Powder on Wet Packing Density of Cement and Performances of Concrete

WANG Yu-li<sup>1</sup>, ZHOU Ming-kai<sup>2</sup>, LI Bei-xing<sup>2</sup>, GUAN Xue-mao<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan, 454003, China; 2. Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430070, China)

**Abstract:** The amount of limestone powder, which is a by-product of manufactured fine aggregate, is larger and larger with the increase of manufactured fine aggregate. Environment will be severely polluted if the powder is improperly used. The effects of limestone powder on workability, compressive strength, and impermeability of concrete were studied when cement is substituted for the mass proportion of 0, 10, 15, 20 percent with it. The results show that the performances of concrete are better improved when the percentage of limestone powder is about 10 percent. The wet packing density of mixture of limestone powder and cement was measured, and it shows that the degree of density was biggest when limestone powder is 10 percent. This shows that the best mixing proportion of limestone powder and cement may be determined through measuring the change of compactness of mixture of limestone powder and cement.

**Key words:** limestone powder; mineral admixture; concrete; wet packing density

从20世纪60年代,云、贵等砂少石多地区,开始用生产碎石的副产品石屑配制水泥砂浆和低强度等级混凝土<sup>[1]</sup>。到了20世纪90年代,京、津、沪、渝、湖北、河南、山东等省市,也相继出现以机制砂代替天然砂配制混凝土,在实际工程中应用,并取得了较好的经济效益和社会效益<sup>[2]</sup>。从贵州等地机制砂生产的大致情况来看,未经处理的机制砂石粉(粒径小于75 μm的颗粒)含量一般为10~15%<sup>[3]</sup>,这远大于规范中规定的

含量。因此,“多余”的石粉要采取筛分、水洗或这两种工序同时来除去。据估计,在美国,每年有四十亿吨的石粉被堆积在采石场附近,而且石粉的数量会因机制砂生产量的增加而持续增加,久而久之,会造成很大的环境污染<sup>[4]</sup>。

因此,如何合理有效的利用这些大量的“多余”石粉,已成为摆在我们面前一个亟待解决的难题。为了控制和提高机制砂混凝土的性能,许多专家对机制砂

\* 收稿日期:2008-07-20

基金项目:博士基金(B2008-48-648259);西部交通建设科技项目(200331881106)

作者简介:王雨利(1975-),男,副教授,博士,主要从事新型建筑材料研究。(E-mail)wangyuli75@126.com

的最佳石粉含量进行过研究<sup>[5-7]</sup>。对于石粉做掺合料的研究,重庆大学的陈剑雄教授<sup>[8]</sup>采用 P. O52. 5R 水泥和比表面积为 13 000 cm<sup>2</sup>/g 的石粉,通过对抗压强度的测试得出石粉的最佳取代量为 10%。张永娟等<sup>[9]</sup>对不同细度的石粉做过水泥胶砂试验研究,也得出石粉做掺合料时最佳掺量为 5%~10%。但就石粉做掺合料时最佳含量确定的机理却很少见报道。

为了揭示石灰岩石粉做掺合料时,对混凝土性能影响的机理。通过测试石粉和水泥在不同比例时的湿

堆积密度,计算了二者混合后的填充率  $\Phi$  和空隙率  $\epsilon$  ( $\epsilon=1-\Phi$ )。

### 1 原材料及测试方法

#### 1.1 原材料

1.1.1 水泥 本次试验采用的水泥为华新堡垒 P·O32.5,密度为 2.96 g/cm<sup>3</sup>。P·O32.5 水泥的主要性能指标见表 1。

表 1 华新 P·O32.5 级水泥性能指标

性能	细度 /%	标准稠度 /%	凝结时间(h:min)		安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝		沸煮法	3 d	28 d	3 d
指标	1.2	27.6	3:15	3:44	合格	5.3	8.6	26.1	46.1

1.1.2 石粉 采用福刚风选石粉,密度为 2.69 g/cm<sup>3</sup>,80  $\mu$ m 筛余为 5.2%,比表面积为 2 863 cm<sup>2</sup>/g。

1.1.3 骨料 细骨料是湖北省恩施市福刚砂石料厂的水洗机制砂,主要性能指标(表 2)。

粗骨料采用湖北省恩施市福刚碎石厂 5~25 mm 连续级配碎石。

1.1.4 减水剂 采用武汉浩源 FDN-9000 缓凝高效减水剂。

表 2 福刚水洗机制砂的主要性能指标

项目	筛分级配	细度模数	表观密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	亚甲蓝 MB 值	石粉含量 /%	泥块含量 /%	压碎值
指标	满足 II 区级配要求	3.10	2.695	0.5	4.5	0.3	12

### 1.2 测试方法

1.2.1 坍落度和抗压强度 依据中华人民共和国行业标准 JTG-E30-2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》

1.2.2 湿堆积密度的试验 试验仪器:100 ml 的容器,精度为 0.1 g 的电子称,水泥净浆搅拌机,小刀。

$$\phi = \frac{V_s}{V_t} = \frac{\frac{m_c + m_{sp}}{\rho_c + \rho_{sp}}}{\frac{m_c + m_{sp} + m_w}{\rho_{max}}} \quad (1)$$

式中: $m_c$  为水泥的质量; $m_{sp}$  为石粉的质量; $m_w$  为水的质量; $\rho_{max}$  为水泥浆的最大容重; $\rho_c$  为水泥的密度; $\rho_{sp}$  为石粉的密度。

试验方法:固定粉体的质量 500 g,采用 0%、5%、10%、15%、20%、30% 不同的比例用石粉等量取代水

泥。其试验过程与《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T1346—2001 中标准稠度用水量的测定方法相似。通过调节用水量,测试不同浆体的容重,记录获取浆体的最大容重  $\rho_{max}$  时的用水量  $m_w$ ,采用公式 1 计算填充率  $\phi$ 。公式 2 计算空隙率  $\epsilon$ 。

空隙率  $\epsilon$  采用公式 2 计算。

$$\epsilon = 1 - \phi \quad (2)$$

1.2.3 混凝土 NEL 氯离子扩散系数法快速试验 采用清华大学基于 Nernst-Einstein 方程研究开发的用氯离子扩散系数评价混凝土渗透性的试验方法(NEL法),测试氯离子在混凝土中的扩散系数。试验所用仪器为 NEL-PD 型混凝土渗透性检测系统。

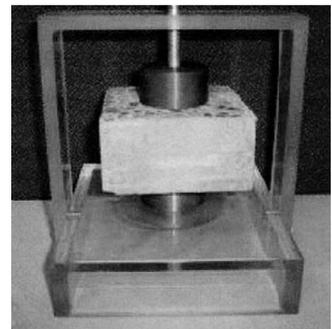


图 1 NEL 氯离子扩散系数试验

将混凝土试件切割成 100 mm×100 mm×50 mm 的试件,与电极接触的两个测试面磨光。将试件进行真空饱盐,在低电压下测试饱盐混凝土试件的扩散系数。

混凝土中的氯离子扩散系数:

$$d_{cl} = f \frac{RT\sigma}{F^2 C_{cl}}$$

式中: $d_{cl}$  为混凝土中氯离子扩散系数, m<sup>2</sup>/s; R 为气体常数, J/(mol·K); T 为绝对温度, K;  $\sigma$  为外加电压, V;  $F$  为法拉第常数, C/mol;  $C_{cl}$  为氯离子浓度, mol/m<sup>3</sup>。

常数,为  $8.314\text{J/mol}\cdot\text{k}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $\sigma$  为饱盐混凝土的电导率,  $\text{S/m}$ ;  $F$  为法拉第(Faraday)常数,为  $96\,500\text{C/mol}$ ;  $C_d$  为饱盐混凝土中孔溶液中氯离子浓度,通常可以取饱盐溶液浓度,  $\text{mol/m}^3$  ( $4.0\times 10^3\text{mol/m}^3$ );  $f$  为修正系数,通常可以取 1.0。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 石粉做掺合料时对混凝土性能的影响

2.1.1 试验设计 固定水粉比为 0.49 不变,固定砂率 41% 不变,固定用水量  $180\text{kg/m}^3$  不变,减水剂按粉体质量的 0.6% 掺入,设计容重为  $2426\text{kg/m}^3$ ; 水泥用量为  $368\text{kg/m}^3$  作为基准样,然后分别按 10%、20%、30% 的比例用石粉等量取代水泥。

表 3 石粉做掺合料对氯离子扩散系数影响

编号	取代比例/%	用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )		坍落度/mm	扩展度/mm	抗压强度/MPa		$\sigma 10^{-4}$ /( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$d_{cl}-10^{-14}$ /( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )28 d
		水泥	石粉			7 d	28 d		
1	0	368	0	150	—	29	41	684	456
2	10	331	37	180	360	30	43	652	435
3	15	313	54	185	380	27	38	733	489
4	20	294	74	180	350	25	30	777	518

综合以上分析,可以得出,在石灰岩石粉做掺合料时,取代水泥的比例为 10% 左右时,对混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透的性能有较好的改善作用。

### 2.2 含有不同比例石灰岩石粉水泥浆湿堆积密度的测试

从以上试验结果和试验分析可以得出,石灰岩石粉做掺合料取代水泥时,其取代比例为 10% 左右时,对混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能有较好的改善作用,即在一定程度上提高了混凝土的密实性。石

### 2.1.2 结果与讨论 试验结果见表 3。

从表 3 可以看出,在石粉做掺合料取代水泥时,混凝土的坍落度和扩展度都有所增加,这说明在适量的取代范围内,石粉做掺合料时对混凝土的工作性能有改善作用。随着石粉取代水泥质量的增加,混凝土的 7 d 和 28 d 的抗压强度先是增加,后又减小,其中在石粉取代水泥的比例为 10% 时,混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度最大。石粉做掺合料时对混凝土 28 d 氯离子扩散系数影响的规律则与对抗压强度的相反,即先减小,后又增加,其中在取代比例为 10% 时,混凝土的饱盐电导率和氯离子的扩散系数最小,即混凝土抗氯离子渗透的性能最好。

灰石粉虽然并非化学惰性,它可以和 C3A 反应,并且使混凝土的早期强度增加,但是它对长期强度并无贡献,因此被认为是非胶合剂<sup>[10]</sup>。由此,我们认为石灰石粉在做掺合料影响水泥乃至混凝土性能的时候,不但有化学效应,而且还应该有物理效应。为了研究其物理机理,我们测试了水泥和石灰岩石粉混合后的湿堆积密度,它可以反映粒径小于  $75\mu\text{m}$  的颗粒混合后的堆积情况<sup>[11]</sup>。

表 4 在不掺减水剂时湿堆积密度的测试

编号	取代比例/%	质量/g		$m_w/g$	$\rho_{max}$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	堆积密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	填充率 $\phi$	空隙率 $\epsilon$
		水泥 $m_c$	石粉 $m_{sp}$					
1	0	500	0	110	2.090	1.713	0.578	0.422
2	5	475	25	110	2.085	1.709	0.580	0.420
3	10	450	50	111	2.081	1.703	0.581	0.419
4	15	425	75	113	2.073	1.691	0.580	0.420
5	20	400	100	115	2.061	1.676	0.577	0.423
6	30	350	150	118	2.036	1.647	0.573	0.427

试验结果见表 4 和表 5,其中表 4 是在不掺减水剂时湿堆积密度的测试,表 5 是在掺减水剂时湿堆积密度的测试。

从表 4 和表 5 可以看出,不管是参与不掺减水剂,石灰岩石粉取代水泥的比例在 10% 以内时,二者所组成粉体混合物的填充率  $\phi$  呈递增的趋势,当取代量超过 10% 时,填充率  $\phi$  又呈递减趋势,在 10% 获得最大值;空隙率  $\epsilon$  则相反,在取代比例为 10% 为最小。这说明石粉和水泥混合时,石粉取代水泥的比例为 10% 时,可以获得空隙率

最小的粉体混合物。

表5 在掺减水剂的情况下湿堆积密度的对比

编号	取代比例 /%	质量/g		$m_w$ (g)	$\rho_{max}$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	堆积密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	填充率 $\phi$	空隙率 $\epsilon$
		水泥 $m_c$	石粉 $m_{sp}$					
1	0	500	0	94	2.152	1.811	0.612	0.388
2	5	475	25	96	2.157	1.810	0.614	0.386
3	10	450	50	97	2.151	1.802	0.615	0.385
4	15	425	75	99	2.141	1.787	0.612	0.388
5	20	400	100	101	2.130	1.772	0.610	0.390
6	30	350	150	104	2.109	1.746	0.607	0.393

这说明,石灰岩石粉做掺合料,以10%左右的比例取代水泥后,石粉和水泥的混合后的空隙率最小,从而提高了混凝土的密实性。

### 3 结 论

1)采用石灰岩石粉做掺合料,研究石灰岩石粉对混凝土工作性能、抗压强度和抗氯离子渗透性能的影响,得出石灰岩石粉在取代水泥的比例为10%时,对混凝土的性能有较好的改善作用;

2)通过测试石灰岩石粉和水泥的湿堆积密度,然后计算二者混合后的填充率,可以得出石灰岩石粉取代水泥的比例为10%时,混合物的填充率最大,空隙率最小。

### 参考文献:

- [1] 冯贵芝. 贵州地区机制砂自密实混凝土的性能研究[J]. 贵州工业大学学报, 2006(5):76-81.  
FENG Gui-zhi. Study on properties of machine-made sand self-compacting concrete in guizhou area[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2006(5):76-81
- [2] 刘振. 机制砂的应用技术及经济分析[J]. 铁道勘测与设计, 2005(5):68-70.  
LIU Zhen. Economic analysis and application technology of manufactured fine aggregate [J]. Railway Survey and Design, 2005(5): 68-70.
- [3] 武汉理工大学, 贵州中建建筑科研设计院, 贵阳市建设局, 等. 岩溶地区机制砂生产与应用情况调研报告[R], 2004.
- [4] NAM-SHIK AHN, B A E, M S E. An Experimental Study on the Guidelines for Using Higher Contents of Aggregate Micro Fines in Portland Cement Concrete[D]. The University of Texas at Austin, August 2000:1-6.

- [5] TAHIR C, KNALED M. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(7):1 121-1 130.
- [6] A K SAHU, SUNIL KUMAR, A K SACHAN. Crushed Stone waste as fine aggregate for concrete[J]. The Indian Concrete Journal, January, 2003:845-848.
- [7] 杨建国, 刘跃清等. 用机制砂拌制水泥砂浆和混凝土[J]. 铁道建筑技术, 1996(2):24-25.  
YANG Jian-guo, LIU Yue-qing, et al. Cement mortar and concrete mixed with manufactured fine aggregate [J]. Railway Construction Technology, 1996(2):24-25.
- [8] 陈剑雄, 李鸿芳, 陈寒斌. 石灰石粉超高高性能混凝土性能研究[J]. 施工技术, 2005(4):27-28.  
CHEN Jian-xiong, LI Hong-fang, CHEN Han-bin. Study of performances of limestone ultra-high-strength high performance concrete[J]. Construction Technology, 2005(4): 27-28.
- [9] 张永娟, 张雄. 石灰石微粉矿物外加剂性能研究[J]. 房材与应用, 2001(4):34-37.  
ZHANG Yong-juan, ZHANG Xiong. Properties research on mineral admixture of fine limestone powder [J]. Housing Materials & Applications, 2001(4): 34-37
- [10] M DAIMON, E SAKAI, 涂成厚译. 石灰石粉的应用[J]. 国外建材科技, 1999(20):47-51.  
M DAIMON, E SAKAI, TU Ceng-hou. Applications of limestone powder [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 1999(20):47-51.
- [11] PEDRO NEL QUIROGA, DAVID W FOWLER. The Effects of Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete[D]. The University of Texas at Austin, December 2003:166-168.

(编辑 陈 蓉)