

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.006

赵井辉, 刘福胜, 韦梅, 等. 花岗岩石粉细度及掺量对混凝土微观孔隙的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 39-45.
(ZHAO Jing-hui, LIU Fu-sheng, WEI Mei, et al. Effects of granite powder fineness and addition on concrete microscopic pores[J].
Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 39-45.)

花岗岩石粉细度及掺量对混凝土微观孔隙的影响

赵井辉, 刘福胜, 韦梅, 程明

(山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 在掺合料混凝土技术快速发展和建筑节能要求不断提高背景下,通过压汞法试验,研究分析花岗岩石粉的细度及掺量对混凝土微观孔隙结构的影响规律,从微观层面论证花岗岩石粉作为混凝土掺合料的可行性,并在微观层面进行混凝土宏观抗渗抗冻试验的联系分析。研究表明:花岗岩石粉越细,对混凝土小孔径孔隙的填充作用越好,对大孔径孔隙填充作用不明显,综合填充效果较差;混凝土中掺入 0~150 μm 花岗岩石粉,当掺量为 10% 和 20% 时,对混凝土孔隙结构参数及孔级分配起到优化作用;0~150 μm 花岗岩石粉掺量控制在 30% 以内时有利于提高混凝土抗渗性能;0~150 μm 花岗岩石粉掺量控制在 20% 以内时可保证掺合料混凝土抗冻等级与不掺石粉的混凝土抗冻等级相同,当花岗岩石粉掺量增大至 30% 时,掺合料混凝土抗冻等级有所降低。

关键词: 花岗岩石粉; 细度; 掺量; 混凝土; 微观孔隙; 抗渗性能; 抗冻性能

中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0039-07

花岗岩石粉是石材加工过程中产生的废弃材料,我国每年因加工花岗岩产生大量石粉,这些石粉占用土地资源,破坏耕地和土壤结构,如何有效利用花岗岩石粉成为亟待解决的问题。

随着掺合料混凝土技术的快速发展,掺合料种类也不断增加。目前国内很多学者为了解决花岗岩石粉资源浪费和污染问题,对花岗岩石粉取代水泥做掺合料的可行性进行了研究^[1]。但是目前花岗岩石粉取代水泥量普遍偏低,一般在 5%~15%^[2-3]。因此,如何在保证混凝土相关性能满足设计要求的前提下,有效提高花岗岩石粉综合利用率,减少混凝土水泥用量,成为花岗岩石粉混凝土研究必须解决的关键问题。混凝土是应用最广泛的建筑材料,全球每年混凝土用量可达 10^{11} t^[4],以花岗岩石粉为掺合料的混凝土技术在建筑工程领域的推广应用,具有显著的经济、环境和社会效益。

1 试验概况

1.1 试验目的

国内外对以花岗岩石粉为掺合料的研究较多,但从掺合料细度与掺量角度综合入手,从微观层面上分析掺合料细度及掺量对混凝土材料孔隙结构参数影响的研究甚少。试验以花岗岩石粉为掺合料,以水工混凝土为研究对象,通过压汞试验数据分析花岗岩石粉细度及掺量对混凝土孔隙结构参数及孔级分配的影响规律,从微观层面揭示掺合料对混凝土的微集料填充效应,为混凝土材料微观特征与宏观性能的联系性研究与分析提供重要理论依据。

1.2 试验材料

试验所用花岗岩石粉来源于泰安本地花岗岩生产中产生的石粉,石粉粒径与水泥粒径经激光粒度仪

收稿日期: 2015-05-16

基金项目: 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201401)

作者简介: 赵井辉(1988—),男,山东泰安人,硕士,主要从事水利水电工程设计理论与管理运行研究。

E-mail: zhaojinghui1@126.com

Mastersizer2000 检测,水泥平均粒径为 58.24 μm ,花岗岩石粉平均粒径为 19.375 μm ,由于水泥颗粒细度范围为 0~100 μm ,为研究花岗岩石粉细度对混凝土孔隙结构的影响规律,花岗岩石粉细度为 0~80 μm 和 0~150 μm ,花岗岩石粉需水量比为 119%,花岗岩石粉主要化学成分见表 1。水泥为中联牌 P·O 42.5 级水泥,45 μm 方孔筛余量为 7.55%;水为泰安市本地自来水;

砂选用泰安市生产的天然河砂,细度模数 2.67,含泥量 1.9%,泥块含量 0.42%,属于 II 级中砂;石子为粒径 5~25 mm 的连续级配碎石;减水剂为萘系高效减水剂。

表 1 花岗岩石粉的主要化学成分

Tab. 1 Main chemical components of granite powder								
成分	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
含量/%	3.01	1.33	2.99	15.87	0.33	67.3	3.72	4.58

1.3 配合比设计

本试验配合比设计以花岗岩石粉细度和掺量为变量,石粉细度为 0~80 μm 和 0~150 μm ,掺量为 10%,20%和 30%,按相应的掺量等质量取代基准组混凝土的水泥用量,试验基准组 J0 混凝土的水灰比为 0.46,掺入花岗岩石粉后的混凝土试验组用水量与基准组 J0 保持一致,减水剂用量以基准组和试验组混凝土塌落度、黏聚性和保水性基本达到相似为原则,以减少因混凝土工作性能不同而对试件孔隙率研究造成的影响,通过试验调整,使基准组与试验组坍落度基本保持在 (25±2)mm,黏聚性、保水性良好,具体配合比设计见表 2。试件制作过程中,将拌合物一次性装入模具,装料时用抹刀沿试模内壁略加插捣,并使拌合物略高于试模上口,将试件置于振动台,振动持续时间为 20~25 s,使混凝土表面出浆为止。

表 2 试验配合比

Tab. 2 Experimental mixture proportions							
				(kg·m ⁻³)			
编号	水泥	花岗岩石粉	减水剂	编号	水泥	花岗岩石粉	减水剂
J0	394.0	0	3.8	G1-2	354.6	39.4	3.4
G1-1	354.6	39.4	3.2	G2-2	315.2	78.8	3.1
G2-1	315.2	78.8	2.7	G3-2	275.8	118.2	2.3
G3-1	275.8	118.2	2.0				

注:J0 为基准组混凝土编号;Ga-b;G 为花岗岩石粉试验组编号,字母 a 代表花岗岩石粉掺量为 (10×a)/100,b 代表花岗岩石粉细度;“1”代表 0~80 μm ,“2”代表 0~150 μm 。例:G2-1 代表花岗岩石粉掺量为 20%,细度为 0~80 μm 。水、砂和石子的掺量分别为 181.2,788.4 和 1 049.6 kg/m³。

1.4 试验方法及基本原理

试验所用方法为压汞法(MIP),所用仪器为美国康塔公司的 PM-33-18 型压汞测试仪。试验样品制备过程为:取出标准养护 28 d 的混凝土试件,劈裂破型,从试件核心位置取样,尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm,用洗耳球吹净样品表面灰尘,在真空烘箱中保持 60 ℃烘 1 h,将烘好的样品降温后放入样品管,准备压汞试验。

压汞法测量的基本原理是经典的瓦什伯恩(washburn)方程^[5],汞对大多数固体材料具有非润湿性,需外加压力才能进入固体孔中,对于圆柱型孔模型,汞能进入的孔大小与压力符合 Washburn 方程,控制不同的压力,即可测出压入孔中汞的体积,由此得到对应于不同压力的孔径大小的累积分布曲线或微分曲线。

2 数据分析

2.1 孔隙结构特征参数分析

通过对试件样品的压汞测试,得到基准组混凝土与试验组混凝土孔隙结构特征参数(表 3)。

表3 孔隙结构特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of pore structure

编号	总孔隙率/%	总孔体积/(mL·g ⁻¹)	总孔面积/(m ² ·g ⁻¹)	比表面积/(m ² ·mL ⁻¹)	最可几孔径/nm	平均孔径/nm
J0	11.969 2	0.056 1	8.745 3	155.89	7.160	25.67
G1-1	11.438 2	0.039 9	5.190 7	130.09	9.142	30.57
G2-1	12.739 2	0.052 2	6.213 7	119.04	9.494	32.55
G3-1	13.993 7	0.061 6	8.059 0	130.83	8.807	30.15
G1-2	11.650 3	0.048 8	9.018 9	184.81	7.167	21.63
G2-2	10.777 6	0.050 0	7.936 7	158.73	7.186	24.15
G3-2	16.855 7	0.079 9	8.118 9	101.61	8.300	39.36

由表3可以看出花岗岩石粉细度及掺量对混凝土孔隙结构特征参数的影响规律如下:

(1)当细度为0~80 μm的花岗岩石粉按不同掺量掺入混凝土取代水泥后,试验组掺合料混凝土孔隙率随着花岗岩石粉掺量的增加而逐渐增加,但掺量为10%时,试验组混凝土G1-1孔隙率较基准组降低4.4%,在一定程度上有利于降低混凝土孔隙率,降低幅度不大。当花岗岩石粉掺量为20%和30%时,试验组掺合料混凝土的孔隙率较基准组混凝土孔隙率明显增大。

(2)当细度为0~150 μm的花岗岩石粉按不同掺量掺入混凝土取代水泥后,在3种掺量情况下,当掺量为20%时,试验组掺合料混凝土G2-2孔隙率达到最小值,较基准组混凝土孔隙率降低10.0%,该掺量条件下,与同掺量不同细度的G2-1试验组相比较,细度为0~150 μm的花岗岩石粉对混凝土孔隙率的降低作用优于细度为0~80 μm的花岗岩石粉。

(3)参照吴中伟对混凝土中的孔级划分^[6]来分析花岗岩石粉对混凝土孔隙结构的影响规律。其中孔径小于20 nm的孔为无害孔;孔径为20~50 nm的为少害孔;孔径为50~200 nm的为有害孔;孔径大于200 nm则为多害孔^[7]。从表3可以看出,混凝土的平均孔径整体都在少害孔级范围内。混凝土中按不同掺量及细度掺入花岗岩石粉后,只有掺入细度为0~150 μm、掺量为10%和20%的混凝土G1-2、G2-2的比表面积大于基准组J0,比表面积越大,混凝土平均孔径越小,但从孔级理论角度分析,花岗岩石粉细度及掺量并没有改变混凝土材料平均孔径的孔级。

(4)从花岗岩石粉的利用率、混凝土材料总孔隙率及平均孔径的角度分析,混凝土中掺入的花岗岩石粉细度为0~150 μm、掺量为20%时,效果最佳。

造成以上试验结果的分析如下:

以基准组混凝土J0和掺量为10%时的试验组G1-1、G1-2为例分析,虽然细度不同的花岗岩石粉都在不同程度上降低了混凝土孔隙率,但细度不同,花岗岩石粉的填充效应也就不同。图1为基准组J0与试验组G1-1、G1-2的注汞积分曲线,由于压汞试验过程是由低压到高压逐渐加压,汞进入孔隙的顺序是随着压力的增大,逐渐由大孔向小孔注入,为了分析方便,故图像横坐标值由左向右逐渐减小,且采用孔径的对数形式对横坐标进行标注。

从图1可见,在整个注汞过程中,G1-1的曲线在孔径大于80 nm时,注汞积分曲线在J0曲线的上方;当孔径小于80 nm时,G1-1曲线在J0曲线的下方,可得:混凝土中掺入细度为0~80 μm的花岗岩石粉,对减少孔径小于80 nm的混凝土孔隙体积具有促进作用,而对孔径较大的孔隙不但没有填充效应,反而增加了混凝土中大孔径的孔隙体积。研究证实,增加132 nm以下的孔不会增加混凝土的渗透性,即从孔径大小的角度分析,虽然该细度的花岗岩石粉降低了混凝土孔隙率,但对提高混凝土抗渗性能起到了抑制作用。曲线

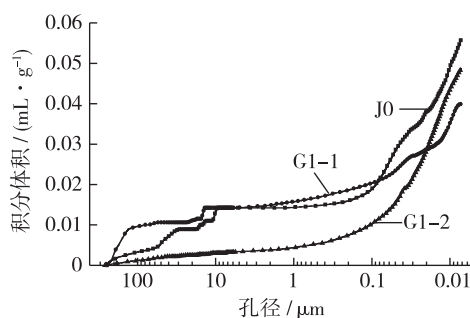


图1 不同细度条件下的注汞积分曲线

Fig. 1 Integral curves of mercury with different fineness

G1-2 在整个注汞过程中均在曲线 J0 的下方,说明细度为 $0 \sim 150 \mu\text{m}$ 的花岗岩石粉按 10% 的掺量掺入混凝土后,对混凝土内部的孔隙填充作用较好,可有效减少不同孔径的孔隙体积,对混凝土材料的密实性、耐久性等具有较好的提高作用。曲线 G1-1 和 G1-2 在孔径为 20 nm 处出现交叉点,当压力值促使汞向小于 20 nm 的孔隙中注汞时,由图 1 可以看出,试验组 G1-1 的累积注汞量开始小于 G1-2,说明细度越小的花岗岩石粉,对小孔径孔隙填充作用越好,随着孔径的减小,导致 G1-1 的注汞积分曲线斜率小于 G1-2 的注汞积分曲线斜率,这也是造成 G1-1 的孔隙率低于 G1-2 的主要因素。从注汞积分曲线整体趋势分析,花岗岩石粉细度范围越大,混凝土内部孔隙填充效果均匀性越好,尤其是对多害孔隙和有害孔隙的减少起到促进作用。

随着花岗岩石粉掺量的增加,当石粉细度为 $0 \sim 80 \mu\text{m}$ 时,由于花岗岩石粉颗粒对孔隙填充作用的局限性,导致孔径大于 80 nm 的孔隙体积增加和积累,以及胶凝材料的减少对混凝土密实性带来的负面效应,在这两种因素的影响下,导致混凝土孔隙率随着花岗岩石粉掺量的增加而逐渐变大。当花岗岩石粉细度为 $0 \sim 150 \mu\text{m}$,掺量不超过 20% 时,石粉颗粒的微集料填充效应占据主导作用,在 20% 掺量条件下,混凝土孔隙率达到最小值。当花岗岩石粉掺量增大到 30% 时,由于胶凝材料减少近 $1/3$,混凝土内部水化产物明显减少,石粉颗粒的填充效果不足以弥补水化硅酸钙凝胶等胶凝产物减少带来的弊端,故导致混凝土孔隙率大幅度增加。花岗岩石粉中粒径小于 0.045 mm 的硅质、钙质颗粒具有一定的反应活性,能与水泥水化产物发生缓慢的反应,生成具有一定强度的水化产物,充填混凝土孔隙^[8],这是试验组混凝土 G3-1 孔隙率小于试验组混凝土 G3-2 孔隙率的主要原因。

2.2 混凝土孔径分布与孔级比例分析

图 2 为基准组与试验组的混凝土注汞积分曲线图。从图 2 可见,G1-2,G2-2 曲线发展趋势十分接近,且始终在积分曲线 J0 下方,说明细度为 $0 \sim 150 \mu\text{m}$ 的花岗岩石粉掺量为 10% 和 20% 时,是试验组中对混凝土孔隙填充效果最佳的两组设计;曲线 G2-1,G3-1 发展趋势相近,且在孔径小于 200 nm 时,累积注汞量均开始高于曲线 J0,说明随着水泥取代量的增大,水泥水化产物减少对孔隙率的影响占据主导作用,细度为 $0 \sim 80 \mu\text{m}$ 的花岗岩石粉对混凝土孔隙填充效果开始下降,与细度相同掺量不同的试验组 G1-1 呈现出相反的试验结果。

花岗岩石粉细度及掺量对混凝土孔径分布的影响如图 3 所示,图 3 为孔径分布微分曲线图,微分曲线与横轴包纳的面积表示总孔隙体积,在一定的孔径范围内,曲线峰值越高说明该区间内孔隙总体积越大^[9]。

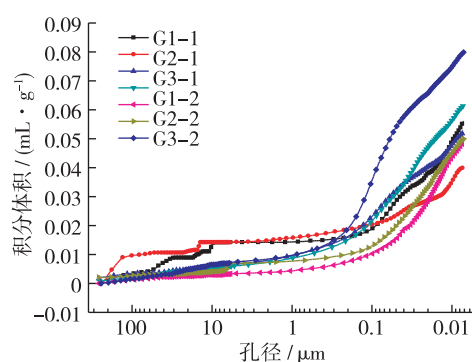


图 2 基准组与试验组混凝土注汞积分曲线

Fig. 2 Integral curves of mercury of baseline group and experimental group

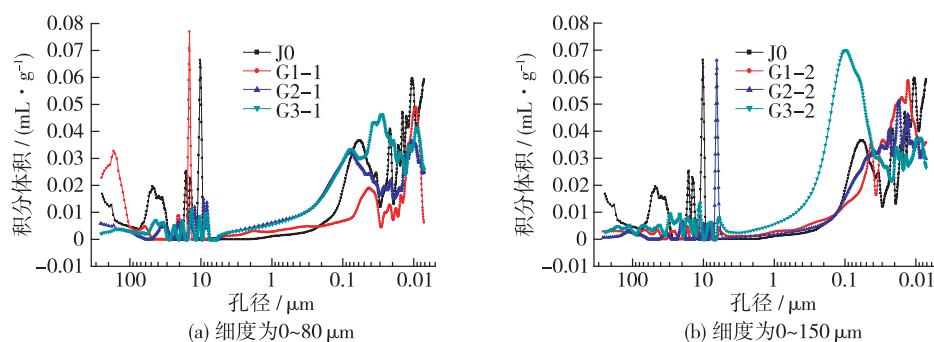


图 3 混凝土孔径分布微分曲线

Fig. 3 Differential pore size distribution curves of concrete

从图3(a)可以看出,当石粉细度为0~80 μm ,掺量为10%时,G1-1的微分曲线整体上处于J0微分曲线下方,随着石粉掺量的增加,微分曲线位置逐渐增高,当掺量达到30%时,G3-1微分曲线高于J0曲线;由此说明,随着细度为0~80 μm 的花岗岩石粉掺量的增加,混凝土中各孔级的孔隙体积均逐渐增加,对混凝土密实性的发展不利。由图3(b)可以看出,当石粉细度为0~150 μm 时,在10%和20%两种掺量条件下,花岗岩石粉对混凝土孔径分布影响规律相差不大,这也是图2中两者注汞积分曲线趋势相近的主要原因。

参照吴中伟教授的孔级理论,根据混凝土孔径分布积分曲线图2与微分曲线图3,试验对无害孔、少害孔、有害孔和多害孔4个孔级的各孔级注汞量与累积注汞量进行整理,得到图4所示的各孔级累积注汞量柱状图。从图4可见,两种不同细度的花岗岩石粉掺量不高于20%时,累积注汞量均低于基准组混凝土,但这并不是衡量混凝土孔隙率的标准,因为混凝土内部孔隙的孔径大小影响到不同孔径的孔隙体积,从而导致单位质量样品的密度不同,最终导致等质量样品体积的差别。所以图4的累积注汞量只能反映在同一配合比条件下,花岗岩石粉对混凝土不同孔级的孔隙填充效果与孔隙体积。

花岗岩石粉细度与掺量不仅影响着混凝土的总孔隙率大小,它还在更微观层面上影响着混凝土的孔级比例划分,并呈现一定的规律性。图5为不同孔级的孔隙体积占总孔体积的百分比柱状图,该图清楚地表示出不同孔级的比例关系,它对于从微观角度解释混凝土宏观抗渗、抗冻性能具有重要意义。从图5中可以看出,当花岗岩石粉细度为0~80 μm ,掺量为20%时,在同细度花岗岩石粉试验组中,混凝土孔隙中的有害孔和多害孔体积比例之和较基准组混凝土增加幅度最大,掺量为30%时,有害孔和多害孔体积比例之和略低于基准组混凝土,变幅不大,结合表3中G2-1、G3-1孔隙率均高于基准组混凝土,所以该细度和掺量条件不是最优设计。当花岗岩石粉细度为0~150 μm ,掺量不超过20%时,混凝土孔隙中的无害孔和少害孔体积比例之和较基准组明显增加,对混凝土抗渗抗冻性能的提高具有重要意义,结合表3中混凝土G1-2、G2-2的孔隙率,最优细度为0~150 μm ,最佳掺量为20%。

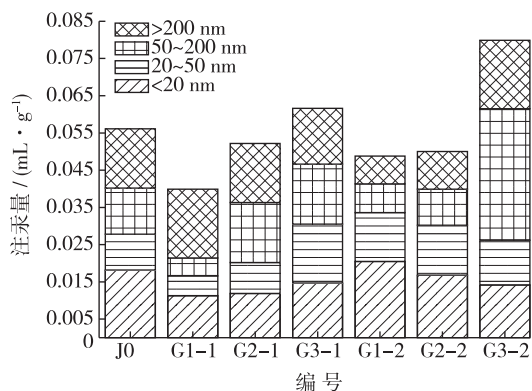


图4 各孔级累积注汞量柱状图

Fig. 4 Cumulative amount of mercury with different hole level

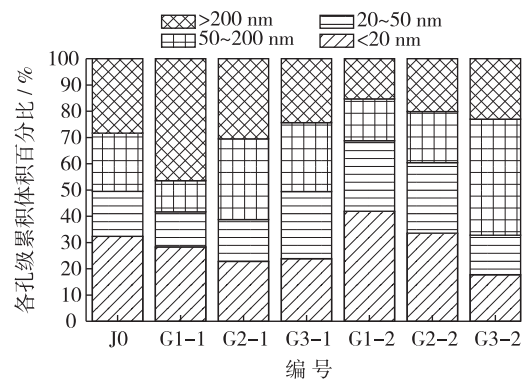


图5 各孔级体积累积百分比柱状图

Fig. 5 Cumulative percentage of different pore level volume histogram

2.3 微观孔隙参数与宏观试验的关系分析

通过对花岗岩石粉混凝土微观孔隙结构和孔级比例分析,对掺入花岗岩石粉细度为0~150 μm 的混凝土按照水工混凝土试验规程^[10]进行抗渗与抗冻性能试验,试验结果如图6和7所示。

混凝土抗渗性能与混凝土孔隙率并不存在简单的函数关系,孔隙率的大小不能直接影响和反应混凝土的抗渗性能,混凝土孔隙对混凝土抗渗和抗冻性能的影响主要取决于孔径大于132 nm的孔隙在总孔隙中所占的比例,通过对压汞试验数据整理得到相应的比例数据表4,其中 $V_{\text{总}}$ 为单位质量样品孔隙总体积, V_{D}

表4 孔隙孔径大于132 nm的体积比例

Tab. 4 Proportion of volume pore size greater than 132 nm

编号	J0	G1-2	G2-2	G3-2
$V_{\text{总}}(\text{mL/g})$	0.056 1	0.048 8	0.050 0	0.079 9
$V_{\text{D}}(\text{mL/g})$	0.017 3	0.008 9	0.011 5	0.027 8
$V_{\text{D}}/V_{\text{总}}(\%)$	30.84	18.24	23.00	34.80

为孔径大于 132 nm 的单位质量样品孔隙体积。

在水泥水化产物中,水化硅酸钙凝胶(C-S-H)约占水化产物的 70% 左右,是混凝土材料强度、密实性和孔隙发展的决定性材料。水化硅酸钙凝胶常表现为云状、颗粒状、网状等形状^[11],当掺合料取代部分水泥后,虽然凝胶数量减少,但增加了水化硅酸钙凝胶在空间上的云状、网状形态的复杂性,增大了材料内部孔隙长度及曲折性,即在一定程度上延长了外界水分的渗透路径,对降低混凝土相对渗透系数起到了积极作用。另一方面,由表 1 可以看出,花岗岩石粉主要成分是 SiO_2 ,活性较低,基本不参与水泥水化反应,花岗岩石粉掺入混凝土拌合物后,石粉颗粒对混凝土内部微观孔隙通道起到堵塞作用,切断了水分侵入路径,增大了外界水渗透阻力,当掺量不超过 30% 时,有利于提高混凝土抗渗性能。当花岗岩石粉的掺量在 30% 范围内逐渐增加时,其微集料填充效应难以抵消胶凝材料减少带来的负面效应,有害孔和多害孔数量逐渐增加,相对渗透系数呈增大趋势,但掺合料混凝土抗渗性能与基准组相比并未降低。由表 4 可见, $V_D/V_{\text{总}}$ 的比值也随石粉掺量的增加而增大,说明孔径大于 132 nm 的孔隙在总孔隙体积中比例的增加,是导致混凝土相对渗透系数逐渐增大的主要微观因素。当花岗岩石粉掺量为 10% 和 20% 时,孔径大于 132 nm 的孔隙在总孔隙体积中比例小于基准组混凝土,故其相对渗透系数明显小于基准组,有利于抑制外界水分向混凝土内部渗透,从而保证试验组混凝土在胶凝材料减少情况下,仍然可以达到与基准组相同的抗冻等级 F300。当花岗岩石粉掺量为 30% 时,虽然 G3-2 试验组的相对渗透系数与基准组基本持平,但在冻融循环试验过程中,由于孔隙水结冰引起的体积膨胀作用,以及孔隙水结冰膨胀对孔隙中未结冰水的压力作用,导致混凝土内部孔隙壁受到拉应力作用,混凝土胶凝材料的大幅度减少,导致主要水化产物水化硅酸钙凝胶的减少,对保持混凝土结构整体性及黏结强度不利,在很大程度上使 G3-2 试验组混凝土脆弱区发生冻胀破坏和表面剥离现象,故在反复冻融循环试验过程中,随着冻融次数的增加,破坏作用积累导致混凝土质量损失率增大,相对动弹性模量降低,最终导致混凝土抗冻等级的降低。

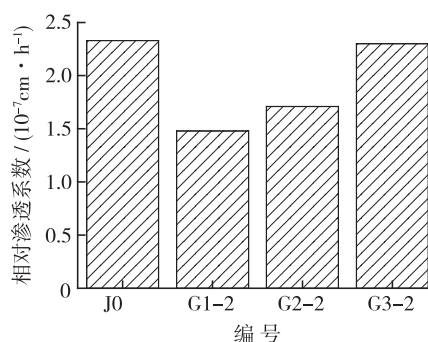


图 6 花岗岩石粉对混凝土抗渗性能的影响

Fig. 6 Effect of granite powder on concrete impermeability

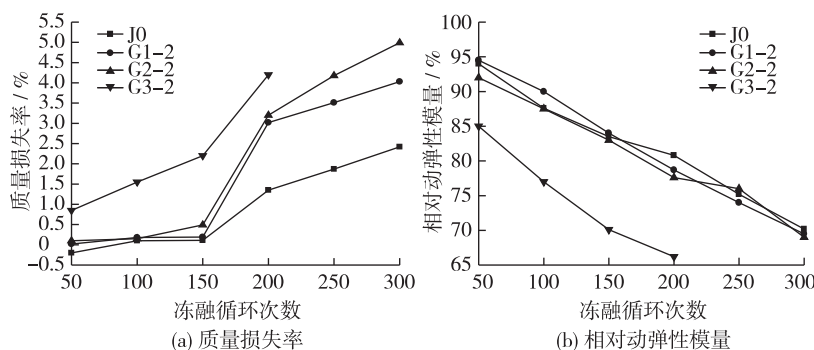


图 7 花岗岩石粉对混凝土抗冻性能的影响

Fig. 7 Effect of granite powder on concrete antifreezing performance

3 结 语

(1) 综合考虑混凝土孔隙率、孔级比例划分以及花岗岩石粉利用率,最终确定花岗岩石粉在混凝土中的最佳掺量为 20%,最优单掺细度为 0~150 μm 。

(2) 当花岗岩石粉细度为 0~150 μm ,掺量为 10% 和 20% 时,花岗岩石粉混凝土抗渗性能较基准组混凝土得到明显提高,花岗岩石粉混凝土抗冻等级与基准组混凝土均可达到 F300;当掺量继续增大时,对混凝土抗渗性能和抗冻性能呈现出不利的发展趋势。

参 考 文 献:

[1] 李相国,李孟蕾,马保国,等. 改性花岗岩石粉对水泥的性能影响[J]. 混凝土, 2013(8): 87-90. (LI Xiang-guo, LI Meng-

- lei, MA Bao-guo, et al. Effect of modification granite stone powder to cement performance[J]. Concrete, 2013(8): 87-90. (in Chinese))
- [2] ARUNTAS H, GURU M, DAY M, et al. Utilization of waste natural stone dust as an additive in cement production[J]. Mater Des, 2010(31): 4039-4042.
- [3] BINICI H, SHAH T, AKSOGAN O, et al. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates[J]. J Mater Process Technol, 2008(208): 299-308.
- [4] GLAVIND M. Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction [M]// KHATIBE E. Sustainability of construction materials. Cambridge: Wood Head Publishing in Materials. 2009:120-47.
- [5] 陈悦, 李东旭. 压汞法测定材料孔结构的误差分析[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4): 198-201, 207. (CHEN Yue, LI Dong-xu. Error analysis of material pore structure measurement with MIP method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4): 198-201, 207. (in Chinese))
- [6] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. (WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [7] 张粉芹, 王海波, 王起才. 掺合料和引气剂对混凝土孔结构与性能影响的研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 180-185. (ZHANG Fen-qin, WANG Hai-bo, WANG Qi-cai. Research on the mixture and entraining agent to concrete hole structure and properties[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 180-185. (in Chinese))
- [8] 英丕杰. 花岗岩石粉/粉煤灰对混凝土性能影响的试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. (YING Pi-jie. Experimental study of impacts of granite powder/ fly ash on concrete performance[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [9] 李淑进, 赵铁军, 吴科如. 混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(2): 6-8. (LI Shu-jin, ZHAO Tie-jun, WU Ke-ru. Study on the relationship between concrete permeability and microstructure[J]. Chinese Concrete and Cement Products, 2004(2): 6-8. (in Chinese))
- [10] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352—2006 Hydraulic concrete testing procedures[S]. (in Chinese))
- [11] 李素昉. 水泥微观形貌的图像分析[D]. 济南: 济南大学, 2004. (LI Su-fang. Analysis of cement morphology image[D]. Jinan: University of Jinan, 2004. (in Chinese))

Effects of granite powder fineness and addition on concrete microscopic pores

ZHAO Jing-hui, LIU Fu-sheng, WEI Mei, CHENG Ming

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: With the rapid development of admixture concrete technologies and increasing requirements of building for energy saving, the experimental studies on the influence of the fineness and addition of the granite powder on concrete microscopic pore structure with MIP (mercury-intrusion porosimetry) method are carried out in order to prove the feasibility of the granite powder as concrete admixture at the micro level and reveal the impermeability and antifreezing properties of concrete at the micro level. It is found from the studies that the smaller the fineness, the better the filling effect on smaller pores, but the integrated filling effects perform poorly; when the addition is 10% and 20%, the granite powder fineness is 0~150 μm , which plays an optimized role in concrete porosity and pore structure parameters; when the admixture dosage is controlled within 30%, the granite powder fineness is 0~150 μm , which is in favor of improving the impermeability of concrete; when the granite powder dosage is controlled within 20%, it can ensure the antifreezing properties of admixture concrete and non-doped powder concrete at the same level; and the admixture concrete antifreezing level decreases with the addition of granite powder being up to 30%.

Key words: granite powder; fineness; addition; concrete; microscopic pore structure; impermeability; antifreezing properties