

文章编号:1007-9629(2011)06-0834-05

不同骨料混凝土的界面结构特征及极限拉伸性能

欧阳幼玲^{1,2}, 陈迅捷^{1,2}, 蔡跃波^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 材料结构所, 江苏 南京 210029;

2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 采用扫描电镜和能量散射能谱分析仪分析了混凝土中砂岩、大理岩、正长岩和玄武岩4种骨料与水泥浆体界面结构特征,并对这4种骨料混凝土的极限拉伸性能进行了研究.结果表明:不同骨料饱和面干吸水率不同,影响了骨料-水泥浆体界面过渡区水化产物的化学组成,进而影响了界面结构特征.砂岩、大理岩骨料与水泥浆体界面过渡区存在氢氧化钙的富集;正长岩、玄武岩骨料与水泥浆体界面过渡区则较少见到氢氧化钙的富集.4种骨料与水泥浆体界面过渡区宽度大小顺序为:大理岩>砂岩>正长岩>玄武岩.不同骨料混凝土的轴心抗拉应力应变行为受骨料-水泥浆体界面结构特征的影响.

关键词: 水工混凝土; 骨料; 吸水; 界面; 结构特征; 极限拉伸性能

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.022

Interfacial Microstructure Characteristics and Ultimate Tensile Properties of Concretes with Different Kinds of Aggregates

OUYANG You-ling^{1,2}, CHEN Xun-jie^{1,2}, CAI Yue-bo^{1,2}

(1. Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Interfacial microstructure characteristics of four different aggregate-cement paste were investigated by scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive spectrometer(EDS). The four aggregate were sourced from sandstone, marble, syenite and basalt, respectively. The ultimate tensile properties of concrete with those four different aggregates were discussed. Test results show that the water absorption at saturated surface-dry basis varies among the four aggregates and affects the chemical composition of hydration products in interfacial transition zone of aggregate-cement paste, and then affects the interfacial microstructure characteristics. Calcium hydroxide crystal is identified more clearly to be concentrated along the aggregate-cement paste interfacial transition zone of sandstone and marble than those of syenite and basalt. The width of interfacial transition zone varies among four aggregates, i. e. in descending order: marble, sandstone, syenite and basalt. It is also implicated that the interfacial microstructure characteristics play a role in affecting the axial tensile stress-strain behaviors of concretes.

Key words: hydraulic concrete; aggregate; water absorption; interface; microstructure characteristic; ultimate tensile property

收稿日期:2010-08-26; 修订日期:2010-12-30

基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539040)

第一作者:欧阳幼玲(1973—),女,湖北黄石人,南京水利科学研究院高级工程师,硕士.主要研究方向为水工材料. E-mail:ylouyang@

混凝土性能除受骨料强度、弹性模量和水泥浆体性能等因素影响,还受骨料-水泥浆体界面过渡区结构的影响^[1-2]. 骨料-水泥浆体界面过渡区结构相对疏松,强度较低,在外界因素的作用下易出现裂纹^[3],且水化产物的组成及形貌与基体不同. 已有的研究^[4-7]表明,骨料的矿物组成和表面结构会影响到水化产物特别是氢氧化钙(CH)和钙矾石(AFt)的成核生长,从而影响到界面过渡区的微观结构,进而影响到界面过渡区的力学性能. 但目前有关不同骨料吸水率对骨料-水泥浆体界面过渡区结构影响的研究较少,且主要集中在轻骨料方面^[8-9];另外,由于水工混凝土骨料均预先饱水,并且普遍掺加了粉煤灰等掺合料,因此,不同骨料吸水特性对水工混凝土界面结构特征的影响有待探讨. 为此,本文在各骨料饱和面干状态条件下,研究了砂岩、大理岩、正长岩

和玄武岩 4 种骨料与水泥浆体界面结构特征,同时对 4 种骨料混凝土的极限拉伸性能也进行了研究.

1 试验

1.1 原材料

试验所用水泥为 P·O42.5 中热硅酸盐水泥,粉煤灰为 I 级粉煤灰,掺量为 30%¹⁾. 二级配粗骨料分别为砂岩、大理岩、正长岩和玄武岩碎石;细骨料为与粗骨料相对应的人工砂,均属于二级配区的中粗砂. 不同骨料性能见表 1. 由表 1 可见:玄武岩骨料饱和面干吸水率最小,压碎值也最小;正长岩骨料饱和面干吸水率最大,压碎值也最大;大理岩和砂岩骨料饱和面干吸水率和压碎值居中,其中砂岩骨料饱和面干吸水率较大理岩骨料高.

表 1 骨料性能
Table 1 Aggregate properties

Aggregate type		Apparent density/ (g·cm ⁻³)	Water absorption at saturated surface-dry basis(by mass)/%	Content(by mass) of needle and slice shape granule/%	Crush value (by mass)/%
Basalt	Medium-sized stone	2.85	0.22	8.1	2.5
	Small-sized stone	2.79	0.62		
Marble	Medium-sized stone	2.71	0.28	3.3	11.4
	Small-sized stone	2.70	0.68		
Syenite	Medium-sized stone	2.67	1.27	7.3	13.3
	Small-sized stone	2.60	1.76		
Sandstone	Medium-sized stone	2.70	0.62	3.6	6.3
	Small-sized stone	2.67	0.91		

1.2 试验方案

成型混凝土试件时,骨料均为饱和面干状态. 混凝土水胶比为 0.39,砂率为 0.36. 掺加萘系减水剂及引气剂,使混凝土的坍落度控制在(90±20)mm,含气量控制在 4%~5%(体积分数). 试件尺寸分别为 100 mm×100 mm×100 mm 和 100 mm×100 mm×515 mm. 试件标准养护至 180 d.

进行微观测试时,将 100 mm×100 mm×100 mm 试件的上下两端各切去 20 mm 左右,消除离析对测试结果的影响. 在试件中部切取 15 mm×15 mm×10 mm 的薄片,研磨、抛光后用能量散射能谱分析仪(EDS)进行 X 射线能谱分析(energy dispersive X-ray analysis,EDXA);同时,将处于中间部位的试件破开,取界面黏结良好的细颗粒,然后采用扫描电

镜(SEM)对骨料-水泥浆体界面过渡区进行微观形貌观察.

采用 100 mm×100 mm×515 mm 的试件进行极限拉伸试验.

2 试验结果与分析

2.1 骨料-水泥浆体界面过渡区的微观形貌

骨料-水泥浆体界面过渡区微观形貌见图 1. 由图 1 可以看出,当骨料为砂岩或大理岩时,骨料-水泥浆体界面过渡区存在氢氧化钙(CH)的富集;当骨料为正长岩时,骨料-水泥浆体界面过渡区有较多纤维状 C-S-H 凝胶的存在,氢氧化钙很少;当骨料为玄武岩时,骨料-水泥浆体界面过渡区较少见到氢氧化钙的富集.

1)文中涉及的掺量、水胶比等除特别说明外,均为质量分数或质量比.

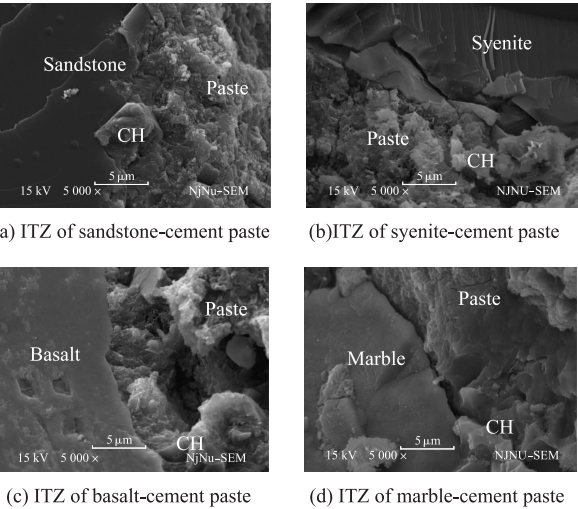


图 1 骨料-水泥浆体界面过渡区微观形貌

Fig. 1 Microstructure features of interfacial transition zone (ITZ) of aggregate-cement paste

2.2 骨料-水泥浆体界面过渡区的化学组成

在骨料-水泥浆体界面过渡区中,距骨料表面向基体方向 0,10,20,30 μm 处各选 10 个 $1\text{ }\mu\text{m}\times 1\text{ }\mu\text{m}$ 微区进行 X 射线能谱分析,取 10 次测试的平均值.由测定得到的 Na,Mg,Al,Si,K,Ca 和 Fe 含量,通过化学公式计算相应氧化物的含量.图 2 为距骨料表面向基体方向 10 μm 处的 EDXA 图谱.表 2 是骨料-水泥浆体界面过渡区 X 射线能谱分析结果.

根据表 2 的结果可计算得出各骨料-水泥浆体界面过渡区 SiO_2/CaO 质量比,见图 3.

由表 2、图 3 可见,在大理岩-水泥浆体及砂岩-水泥浆体界面过渡区,CaO 含量较高, SiO_2/CaO 质量比明显较小,且沿着骨料向基体方向, SiO_2/CaO 质量比逐渐增加,表明砂岩-水泥浆体和大理岩-水泥浆体界面过渡区确实存在氢氧化钙的富集.

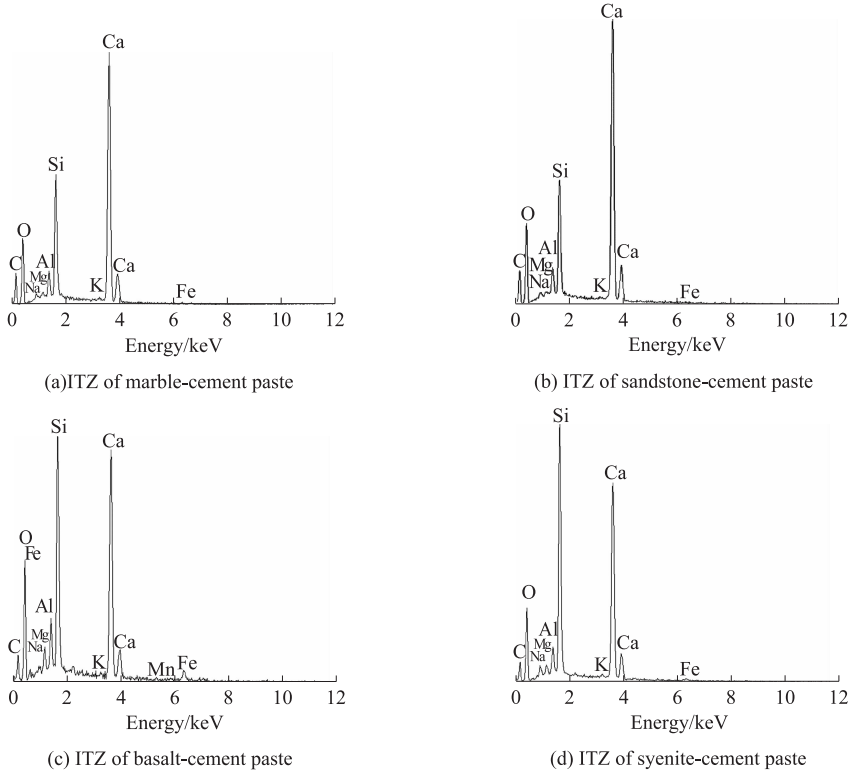


图 2 距骨料表面向基体方向 10 μm 处的 EDXA 图谱

Fig. 2 EDXA patterns at the site of 10 μm distance from aggregate surface to cement paste

表 2 骨料-水泥浆体界面过渡区 EDXA 分析结果

Table 2 EDXA results of interfacial transition zone of aggregate-cement paste

Distance from aggregate surface to cement paste/ μm	Content(by mass) of oxide/%							
	ITZ of marble-cement paste		ITZ of sandstone-cement paste		ITZ of basalt-cement paste		ITZ of syenite-cement paste	
	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO
0	13.9	64.4	12.9	63.3	30.3	46.7	37.2	41.7
10	17.3	58.8	16.8	64.4	30.6	43.5	36.4	43.4
20	28.0	45.9	28.2	50.0	29.1	45.5	32.6	46.0
30	35.0	44.8	31.0	44.8	29.5	42.8	30.6	44.6

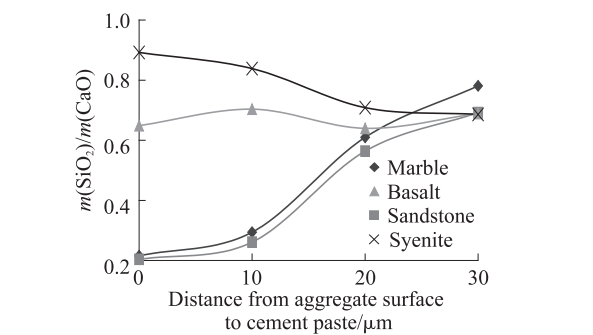


图 3 骨料-水泥浆体界面过渡区 SiO_2/CaO 质量比
Fig. 3 SiO_2/CaO mass ratio of interfacial transition zone of aggregate-cement paste

正长岩的饱和面干吸水率大,在孔溶液浓度差作用下,水泥浆体中 Ca^{2+} 等离子易向界面迁移,生成氢氧化钙结晶.但在图 1 中并未观察到氢氧化钙晶体的富集,这是因为骨料内的高水分起到一定的自养护作用^[8-9],有利于界面过渡区粉煤灰颗粒的二次水化,而粉煤灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及由水泥水化生成的低 SiO_2/CaO 摩尔比 C-S-H 凝胶发生二次火山灰反应,进一步生成高 SiO_2/CaO 摩尔比 C-S-H 凝胶^[10-11],因此在正长岩-水泥浆体界面过渡区,沿着骨料向基体方向, SiO_2/CaO 质量比逐渐减小.粉煤灰的二次水化消耗了正长岩-水泥浆体界面过渡区存在的氢氧化钙,改善了界面过渡区水化产物的化学组成.

玄武岩骨料的饱和面干吸水率最小,水泥浆体中 Ca^{2+} 等离子向界面的迁移相对较弱,因而在玄武岩-水泥浆体界面过渡区,沿着骨料向基体方向, SiO_2/CaO 质量比变化不明显,较少见到氢氧化钙的富集.

沿着骨料向基体方向,当 SiO_2/CaO 质量比逐渐趋于稳定时,表明骨料-水泥浆体界面过渡区结束^[8],此时距骨料表面距离即为骨料-水泥浆体界面过渡区的宽度.图 3 表明,4 种骨料与水泥浆体界面过渡区宽度大小顺序为:大理岩>砂岩>正长岩>玄武岩.

2.3 混凝土极限拉伸性能

水泥浆体、骨料和混凝土的典型抗拉应力-应变曲线见图 4^[12].与骨料和水泥浆体不同,混凝土抗拉应力-应变曲线包含线弹性阶段、内部裂纹形成阶段和裂纹扩展(稳定扩展和不稳定扩展)阶段.这主要是因混凝土中骨料-水泥浆体界面存在薄弱环节所致.

砂岩、大理岩、正长岩和玄武岩骨料混凝土 180 d 龄期轴心抗拉应力-应变曲线见图 5.不同骨料混凝土的轴向拉伸断面照片见图 6.

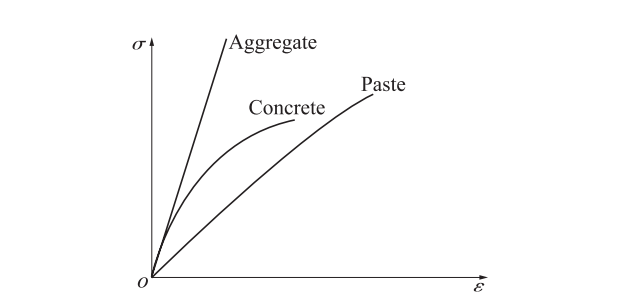


图 4 水泥浆体、骨料和混凝土的典型抗拉应力-应变曲线
Fig. 4 Typical tensile stress(σ)-strain(ϵ) curves of paste, aggregate and concrete

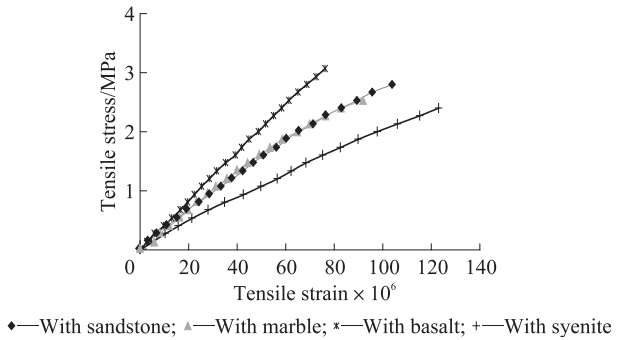


图 5 不同骨料混凝土 180 d 轴心抗拉应力-应变曲线
Fig. 5 Axial tensile stress-strain curves of concretes with different aggregates at 180 d age

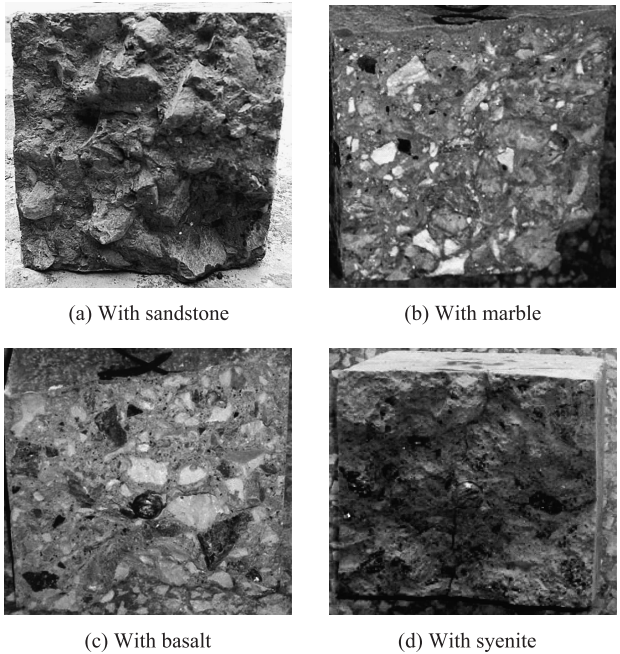


图 6 不同骨料混凝土 180 d 轴向拉伸断面图
Fig. 6 Axial tensile section image of concretes with different aggregates at 180 d age

由图 5,6 可见:(1)玄武岩骨料混凝土轴心抗拉应力应变行为主要表现为线弹性,抗拉应力最大,混凝土试件脆断,水泥浆体和界面被破坏,但骨料完整凸出断面.这是因玄武岩骨料-水泥浆体界面过渡区宽度最小的缘故.(2)砂岩和大理岩骨料混凝土轴

心抗拉应力应变行为表现为线弹性阶段相对较短,抗拉应力相对较小,裂纹在界面过渡区形成并扩展,直至混凝土试件断裂,水泥浆体和界面被破坏,但骨料仍完整凸出断裂面。这是因砂岩和大理岩骨料-水泥浆体界面过渡区较宽,且存在氢氧化钙富集的缘故。(3)正长岩骨料混凝土轴心抗拉应力最小,裂纹在骨料内部发展,水泥浆体和骨料同时被破坏,混凝土试件断裂。这是因正长岩骨料-水泥浆体界面过渡区宽度较小,其受制于骨料本体强度偏低所致。

3 结论

(1)不同骨料的饱和面干吸水率不同,影响了骨料-水泥浆体界面过渡区水化产物的化学组成,进而影响了界面结构特征。

(2)砂岩、大理岩骨料与水泥浆体界面过渡区存在氢氧化钙的富集;正长岩、玄武岩骨料与水泥浆体界面过渡区较少见到氢氧化钙的富集。

(3)4种骨料与水泥浆体界面过渡区宽度大小顺序为:大理岩>砂岩>正长岩>玄武岩。

(4)不同骨料混凝土的轴心抗拉应力应变行为受骨料-水泥浆体界面结构特征的影响。

参考文献:

- [1] ALEXANDER M G. Aggregate and the deformation properties of concrete[J]. ACI Mater J, 1996, 93(6): 569-577.
- [2] 马一平. 提高水泥石-集料界面粘结强度的研究[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(1): 29-32.
MA Yi-ping. Study on increasing of interfacial bond strength between cement paste and aggregate[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(1): 29-32. (in Chinese)
- [3] MINDESS S. Bonding in cementitious composites: How important is it? [C]//Bonding in Cementitious Composites. Pittsburgh: Materials Research Society, 1988.
- [4] 陈惠苏, 孙伟, STROEVEN P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(Ⅱ): 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 72-79.
CHEN Hui-su, SUN Wei, STROEVEN P. Interfacial transi-

tion zone between aggregate and paste in cementitious composites(Ⅱ): Mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1): 72-79. (in Chinese)

- [5] TASONG W A, LYNSDALE C L, CRIPPS J C. Aggregate-cement paste interface(Ⅱ): Influence of aggregate physical properties[J]. Cem Concr Res, 1998, 28(10): 1453-1465.
- [6] RAO G A, PRASAD B K R. Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(2): 253-257.
- [7] SHEN Y, XU Z, XIE P, et al. A new method of enhancing cement-aggregate interface(Ⅰ): Ideal aggregate and its effects on interfacial microstructures[J]. Cem Concr Res, 1992, 22(4): 612-620.
- [8] 胡曙光, 王发洲, 丁庆军. 轻集料与水泥石的界面结构[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(6): 717-723.
HU Shu-guang, WANG Fa-zhou, DING Qing-jun. Interface structure between lightweight aggregate and cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(6): 717-723. (in Chinese)
- [9] 董淑慧, 张宝生, 葛勇, 等. 轻骨料-水泥石界面区微观结构特征[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 737-741.
DONG Shu-hui, ZHANG Bao-sheng, GE Yong, et al. Micro-structure characteristics of interfacial transition zone (ITZ) between lightweight aggregate and cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 737-741. (in Chinese)
- [10] 蒲心诚, 王勇威. 高效活性矿物掺料与水泥基材料的高性能化[J]. 混凝土, 2002(2): 3-6.
PU Xin-cheng, WANG Yong-wei. Active supplementing mineral material and high performance of cement-based material[J]. Concrete, 2002(2): 3-6. (in Chinese)
- [11] 魏风艳, 吕忆农, 兰祥辉, 等. 粉煤灰水泥基材料的水化产物[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 52-56.
WEI Feng-yan, LÜ Yi-nong, LAN Xiang-hui, et al. Hydration products of fly ash cement-based material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1): 52-56. (in Chinese)
- [12] 刘亚莲, 胡建平. 提高混凝土抗裂能力的机理分析[J]. 混凝土, 2004(7): 24-26.
LIU Ya-lian, HU Jian-ping. Research on improving the resist-craze capability of concrete[J]. Concrete, 2004(7): 24-26. (in Chinese)