

高强页岩轻骨料混凝土配合比与微观结构研究

张 玉, 刘伯权, 吴 涛, 陈 旭

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 采用五种不同表观形态、强度等级的页岩陶粒, 建立配合比设计方案, 通过试验结果选取了合适骨料; 配制了强度等级约 LC40—LC60 的高强轻骨料混凝土, 系统地分析了干表观密度、水胶比、骨料形态和粒径对抗压强度的影响; 进而, 从微观结构出发, 研究了碎石型页岩陶粒表观与内部形态, 以及高强轻骨料混凝土骨料-水泥浆界面的微观结构特征, 揭示了硅灰对骨料-水泥浆界面的影响机理。结果表明: 900 级碎石型页岩陶粒是制备高强轻骨料混凝土的最优骨料; 抗压强度随干密度的增加呈现上升趋势, 随水胶比的减小而提高, 硅灰的加入可以明显提高抗压强度, 但受粗骨料强度制约; 轻骨料混凝土骨料-水泥浆界面区的黏结强度较普通混凝土好, 适量的硅灰可以改善界面过渡区, 增加骨料的三维受压作用, 提高轻骨料混凝土强度。同时, LC60 级高强轻骨料混凝土破坏面不再光滑, 与低强度的轻骨料混凝土存在差异。

关键词: 高强轻骨料混凝土; 物理力学性能; 微观结构; 影响因素

中图分类号: TU377.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)02-0225-08

Mechanical properties and microstructure of high-strength lightweight aggregate concrete with shale ceramist

ZHAGN Yu, LIU Boquan, WU Tao, CHEN Xu

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061)

Abstract: Five types of shale ceramists with different apparent shapes and strengths were used to produce the lightweight aggregate concretes (LWAC). The most appropriate aggregate for the LWAC were determined through analyzing the results of compression tests. The high strength lightweight aggregate concretes (HSLAC) of about LC40—LC60 were prepared to investigate the influences caused by the shape and the diameter of aggregate, the dry apparent density, and the ratio that water to binder on the compressive strength of LWAC. Further, the apparent and the inner morphology of the crushed shale ceramist, as well as the microstructure features of interfacial transition zone in HSLAC were studied in terms of the micro-scale, besides, the action mechanism of silica fume on the ITZ in LWAC was revealed. The test results showed that the grade 900 shale ceramist was proved to be the most optimal aggregate for casting the HSLWC. Either the dry density was increased or the W/B ratio was decreased; an improvement in the compressive strength of LWAC was observed, and, the inclusion of silica fume caused a significant increase in compressive strength but this effect was limited by the strength of the coarse aggregate. A better bond property of ITZ in LWAC, compared to that of ITZ in normal weight concrete, was obtained in the experimental investigation. Meanwhile the properties of ITZ could be modified by a proper content of silica fume, thereby the triaxial compressive action of aggregates and the compressive strength of LWAC were improved. Additionally, the failure surface of LWAC with a strength of LC60 was not smooth, which is differ from that of LWAC with a lower strength.

Key words: high-strength lightweight aggregate concrete; mechanical properties; microstructure; influence factors

轻骨料混凝土用量仅次普通混凝土, 优势众多^[1-3], 在建筑结构、桥梁工程、大跨结构、海洋建筑平台等已有广泛应用, 发展前景良好。此前研究表明: 因骨料强度低及其内部的吸返水特性影响, 轻骨料混凝土发生骨料破坏(见图 1), 破坏机理与普通混凝土存在显著差异, 导致脆性特征显

著, 延性差, 应用受到限制^[4]。

随着生产技术的进步, 在强度提高的同时骨料表面特征得以改善, 以及水泥、减水剂、硅灰等掺合料的加入, 高强轻骨料混凝土应运而生, 即强度等级达到 LC40 及以上。骨料和水泥浆体的强度逐渐接近, 达到相对平衡, 能够满足结构材料的使用

收稿日期: 2017-03-19

修改稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578072, 51708036); 陕西省自然科学基金(2017JQ5092); 中央高校基本科研业务费基金项目(300102288401)

作者简介: 张 玉(1988—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为工程结构抗震。E-mail: zhangyu88521@163.com

要求.

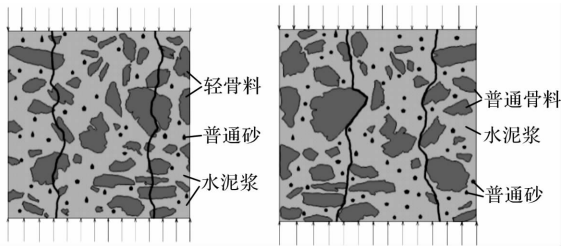


图 1 破坏模式

Fig. 1 Failure mode

国外, zhang、Yang、Ke、Mora 等基于微观、细观、宏观不同尺度下, 从骨料内部结构特性、外部表观特征系统地对高强轻骨料混凝土力学性能进行了研究, 其中, 最高抗压强度可达 100 MPa^[5-8]. 而国内受骨料生产技术和施工工艺的影响, 20 世纪 70~90 年代所开展的相关研究中轻骨料混凝土强度等级偏低^[9]. 进入 21 世纪, 胡曙光、刘巽伯、叶列平、吴涛等^[10-13]等采用高强骨料均配制了强度等级超过 LC50 的轻骨料混凝土, 并深入对该类混凝土的力学性能进行了分析, 但因轻骨料受生产地

影响, 种类较多, 内部微观结构存在差异, 引起高强轻骨料混凝土的宏观力学性能不同, 各个研究结论难以统一. 因此, 结合现有典型轻骨料及已有研究成果, 本文建立了符合强度等级要求的配合比设计方案, 深入研究了其力学性能、影响因素及微观结构.

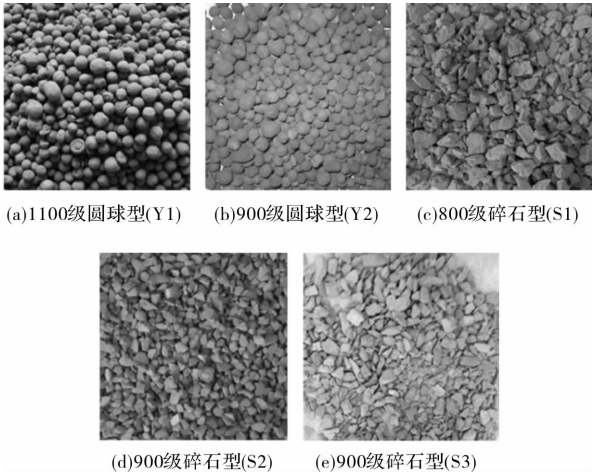


图 2 轻骨料类型

Fig. 2 Lightweight aggregates

表 1 骨料性能

Tab. 1 The performance of lightweight aggregates

陶粒种类	堆积密度 /(kg · m ⁻³)	表观密度 /(kg · m ⁻³)	孔隙率 /%	吸水率 1 h/%	吸水率 24 h/%	筒压强度 /MPa	粒径/mm
Y1	1 019	1 933	47.28	8.1	9.1	13.2	5~14
Y2	869	1 538	43.50	7.0	7.5	10.4	5~16
S1	755	1 471	48.67	8.2	10.1	6.2	5~16
S2	856	1 471	41.81	8.2	10.1	6.2	5~10
S3	860	1 512	43.12	2.2	2.6	6.9	5~16

1 试验概况

1.1 原材料

为挑选合适骨料, 选取由宜昌光大生产的 5 种页岩陶粒(见图 2), 对其颗粒级配、表观密度、堆积密度、吸水率和筒压强度进行测试, 见表 1. 细

骨料采用渭河中砂, 基本性能见表 2, 水泥采用“海螺牌”P. O42.5 水泥, 基本性能指标见表 3, 辅助胶凝材料为埃肯牌 EM920U 微硅粉、I 级粉煤灰、西安德龙粉体工程材料有限公司生产的 S95 矿粉以及 BKS-199 聚羧酸高效减水剂.

表 2 中砂基本性能

Tab. 2 Performance of the sand

细骨料	细度模数	含泥量/%	堆积密度 /(kg · m ⁻³)	表观密度 /(kg · m ⁻³)	含水率/%	最大粒径/mm
中砂	2.56	1.7	1 510	2 620	1.9	4

表 3 水泥性能指标

Tab. 3 The performance of cement

项目	初凝时间/min	终凝时间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
水泥	203	250	32.5	56.4	5.9	8.4

1.2 配合比设计及试验结果

为研究骨料形态和粒径对高强轻骨料混凝土抗压强度的影响，同时，为后续配制高强轻骨料混凝土提供最优骨料，依据《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ51-2002)^[14]设计 A 组配合比，见表 4。为保证拌合物的工作性能，砂率采用 45%，其中选取粉煤灰和硅灰、矿粉和硅灰组合用以确定合适掺合物。试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块，每组 3 个，抗压试验在 WAW31000 试验机进行，压力机与试块接触前采用位移控制加载速度为 0.1 mm/s，接触后采用力控制，加载速度为 6 kN/s，试验结果均乘尺寸换算系数 0.95，换算

为标准试块结果，具体试验结果见表 4。

根据表 4 结果，综合考虑重量和强度需要，选取 Y2、S1 和 S3 骨料制备了 LC40、LC50、LC60 三种强度等级轻骨料混凝土，研究水胶比对强度的影响，设计了 B 组配合比。其中粗骨料采用 Y2 时，因为圆球型骨料的比表面积较小，砂率取 35%，粗骨料采用 S1 时，为保证拌合物的流动性，砂率取 45%，粗骨料采用 S3 时，综合考虑混凝土强度、拌合物工作性和干密度三种影响因素，砂率取 40%，且掺合料选取粉煤灰和硅灰的组合方式，具体配合比及试验结果见表 5。

表 4 A 组配合比设计方案

Tab. 4 Mix proportion of A group

组别	试件 编号	胶凝材料/(kg·m ⁻³)				骨料/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	砂率 /%	水胶 比	ρ_d / (kg·m ⁻³)	$f_{cu,3}$ /MPa	$f_{cu,7}$ /MPa	$f_{cu,28}$ /MPa
		水泥	粉煤灰	矿粉	硅灰								
A1	Y1-1	400	66	—	44	672	4	45	0.28	1933	33.7	48.4	59.3
	Y2-1					558				1839	34.2	48.3	60
	S1-1					503				1841	37.8	51.3	63.1
	S2-1					531				1895	40.2	54.3	66.7
	S3-1					548				1869	38.4	48.4	62.5
A2	Y1-2	400	—	55	55	682	5.5	45	0.26	1940	34.1	50.5	63.7
	Y2-2					566				1848	34.8	51.5	66.1
	S1-2					517				1859	40.6	53	67.6
	S2-2					539				1910	43.9	56.1	70.8
	S3-2					558				1921	44.2	51.3	71.6

表 5 B 组试件配合比设计

Tab. 5 Mix proportion of B group

组别	试块	胶凝材料/(kg·m ⁻³)			水剂/ (kg·m ⁻³)	骨料/ (kg·m ⁻³)	砂率 /%	水胶 比	ρ_d / (kg·m ⁻³)	$f_{cu,3}$ / MPa	$f_{cu,7}$ / MPa	$f_{cu,28}$ / MPa
		水泥	粉煤灰	硅灰								
B1	LC40-Y2-1	360	90	—	2.2	671	35	0.38	1720	32.8	38.8	45.8
	LC40-Y2-2	360	90	—	2.8	680		0.36	1740	34.1	41.7	48.6
	LC50-Y2-1	400	100	—	3	657		0.34	1754	36.5	43.2	51
	LC50-Y2-2	400	100	—	3	666		0.32	1776	37.9	45.8	53.3
	LC50-Y2-3	400	100	—	3.5	676		0.3	1796	41.4	46.4	54.7
	LC60-Y2-1	440	66	44	4.8	656		0.28	1826	44.2	47.7	59.6
	LC60-Y2-2	440	66	44	5	666		0.26	1830	44.5	49.0	63.6
	LC60-Y2-3	440	66	44	6	677		0.24	1836	44.1	49.5	65.1
B2	LC50-S1-1	440	110	—	4	499	45	0.3	1838	38.2	49.7	59.7
	LC60-S1-1	440	66	44	4	508		0.28	1841	40.7	51.3	63.1
	LC60-S1-2	440	66	44	5.5	517		0.26	1850	40.3	52.5	66.3
	LC60-S1-3	440	66	44	6	525		0.24	1857	43.7	53.2	68.5

续表 5

组别	试块	胶凝材料/(kg·m ⁻³)			水剂/ (kg·m ⁻³)	骨料/ (kg·m ⁻³)	砂率 /%	水胶 比	ρ_a / (kg·m ⁻³)	$f_{cu,3}$ / MPa	$f_{cu,7}$ / MPa	$f_{cu,28}$ / MPa
		水泥	粉煤灰	硅灰								
	LC40-S3-1	360	90	—	2.6	606		0.4	1824	22.9	29.5	44.8
	LC40-S3-2	360	90	—	2.7	615		0.38	1796	29.6	36.3	45.5
	LC40-S3-3	400	100	—	3.2	590		0.36	1836	28.9	35.4	50.1
	LC40-S3-4	400	100	—	3.4	600		0.34	1807	30.7	38.6	52.9
B3	LC40-S3-5	400	100	—	4	608	40	0.32	1845	32.1	42.2	53.8
	LC50-S3-1	400	100	—	4.3	617		0.3	1832	32.0	42.4	55.2
	LC50-S3-2	440	66	44	5.3	598		0.28	1827	39.7	49.5	61.6
	LC50-S3-3	440	66	44	5.4	602		0.27	1861	41.9	48.6	65.4
	LC60-S3-1	440	66	44	5.5	607		0.26	1871	43.7	49.9	72.9

2 影响因素分析

2.1 干表观密度

干表观密度是影响混凝土强度的因素之一, 本试验采用破碎试件烘干法来测定干密度, 经测定含水率在 5.6%~7.8%之间, 最后计算出干表观密度, 经计算干密度在 1 720~1 940 kg/m³之间, 干表观密度对混凝土抗压强度的影响见图 3。研究表明: 强度随着密度的增大而增加, 基本呈线性关系。

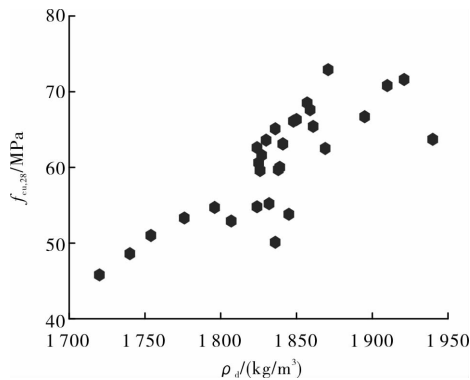


图 3 干表观密度对抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of dry apparent density on compressive strength

2.2 水胶比

图 4 为水胶比与混凝土 28 d 抗压强度关系图, Y2 表示使用 900 级圆球型页岩陶粒制备的轻骨料混凝土。可以看出: (1)Y2 和 S3 组水胶比 0.30 降到 0.26 时, 因为硅灰的加入, 提高了强度的增长幅度; (2)水胶比从 0.26 降到 0.24 时, Y2 和 S1 组试块的 28 d 强度增幅均减小, 但 Y2 降低幅度显著, 这是因为高强轻骨料混凝土中水泥石强度高, 与骨料的粗糙多孔表面的机械咬合作用好, 并且骨料内养护作用使界面黏结强度提高, 使用轻骨料制

备的混凝土, 界面不再薄弱面, 水胶比 0.26 时, 混凝土中的陶粒大多已发生破坏, 继续降低水胶比、提高胶凝材料用量, 对强度影响不大, 此时较高强度的 S1 骨料可以使混凝土的强度继续提升, 但水胶比为 0.24 时, 拌合物的流动性较差, 初凝时间较短。研究表明: 高强轻骨料混凝土的强度随着水胶比的降低而提高, 掺入硅灰, 提高了强度的增长幅度, 0.26 水胶比制备的轻骨料混凝土, 既可以发挥陶粒的强度又具有良好工作性能。

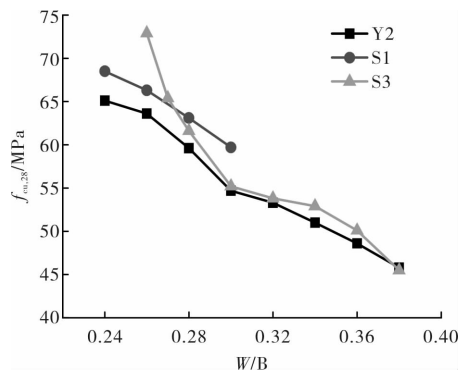


图 4 水胶比对抗压强度的影响

Fig. 4 The influence of water-binder ratio on compressive strength

2.3 骨料形态与粒径

骨料形态对抗压强度的影响, 从图 5 可以看出, S1-1、S3-1 比 Y2-1 强度高, S1-2、S3-2 比 Y2-2 强度高。研究表明: 碎石型骨料制备的轻骨料混凝土强度比圆球型的高, 因为碎石型陶粒比圆球型比表面积大, 增加了界面黏结面积, 其表面粗糙多棱角, 有利于与水泥浆体形成较强的黏结面, 故制备的混凝土强度高。

骨料粒径对抗压强度的影响, 900 级碎石陶粒为 800 级碎岩陶粒筛到粒径为 10 mm 以下得到, 从图 5 中可以看出: (1)S2-1 比 S1-1 强度高, S2-2

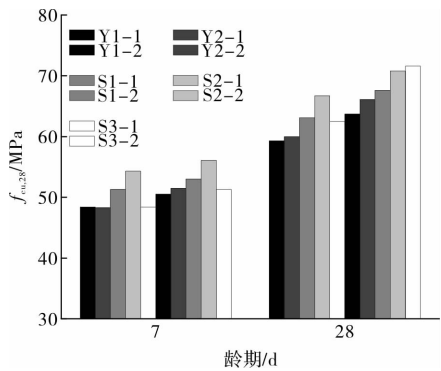


图 5 粗骨料类型对抗压强度的影响
Fig. 5 The influence of coarse aggregates on compressive strength

比 S1-2 强度高, 使用 5~10 mm 碎石型陶粒比 5~16 mm 碎石型陶粒制备的轻骨料混凝土强度高, 因为小粒径碎石的比表面积大, 增加了界面的黏结面积, 且随着粒径的减小, 碎石陶粒的内部缺陷减少, 整体性提高; (2) 对比 Y1 和 Y2 制备的混凝土可以发现, 当水胶比为 0.28 时, Y1-1 与 Y2-1 强度基本相同, 当水胶比为 0.26 时, Y1-2 比 Y2-2 强度低, 虽然 Y1 比 Y2 筒压强度大 27%, 但试验过程中发现 1 100 级圆球混凝土试块在受力过程中, 界面破坏较多, 因为圆球型陶粒随着粒径减小, 更接近球形, 表面愈加光滑, 导致骨料与水泥石之间的黏结性能降低, 部分界面成为薄弱面, 随着粒径的降低, 薄弱面增加, 故使用 5~14 mm 圆球陶粒制备轻骨料混凝土不能提高其强度. 研究表明: 粗骨料粒径在一定范围内, 碎石型骨料随着粒径减小, 制备的轻骨料混凝土强度增加; 而圆球型骨料随着骨料粒径的减小, 混凝土强度降低.

混凝土比强度指抗压强度与干密度的比值, 由图 6 可见, 碎石型骨料制备的混凝土比强度均比圆球型高, S3-2 的比强度最高达到 37.1 MPa/(t · m⁻³). 研究表明: 碎石型骨料制备高强轻骨料混凝土可以

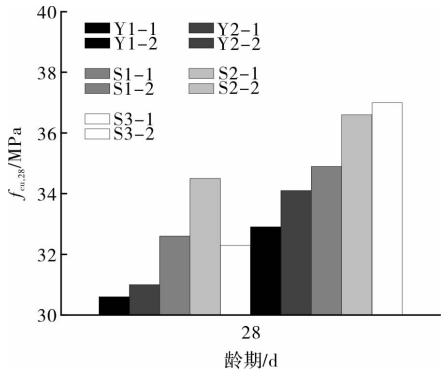


图 6 不同骨料混凝土的比强度差异
Fig. 6 Strength-weight ratio on high-strength lightweight aggregate concrete with different aggregate

获得较高的经济效益, 且 900 级碎石型页岩陶粒 S3 是制备 LC60 混凝土的最合适粗骨料.

3 微观结构

轻骨料混凝土中的骨料、水泥石和界面过渡区是影响力学性能的主要因素, 骨料和水泥石的黏结性能, 对混凝土的力学性能有着重要影响. 前期研究表明, 900 级碎石型页岩陶粒为制备高强轻骨料混凝土的最合适骨料. 采用 S-4800 型扫描电镜, 重点观察骨料—浆体的界面过渡区, 并对页岩陶粒的外观形貌进行分析, 从微观层面揭示轻骨料混凝土强度发展较快的原因, 分析硅灰的增强机理.

3.1 试样设计及制备

根据前期所做的宏观力学性能研究, 选择 MNC、MB、MD 和 MPC 四组来进行轻骨料混凝土的微观结构研究. 为防止细骨料对微观形貌的干扰, 采用水泥净浆来制备微观试样, 试验配合比见表 6, 研究内容与所用试样见表 7.

表 6 轻骨料混凝土微观试样配合比
Tab. 6 Mix proportion of Micro-examination specimen

试件 编号	水泥 /kg	粗骨 料/kg	粉煤 灰/kg	硅灰 /kg	净水 用量 /kg	宏观 试验 组号
MNC	360	1010	90	0	180	C40
MB	360	606	90	0	180	LC40
MD	440	607	66	44	143	LC60
MPC	484	607	66	0	143	

表 7 轻骨料混凝土微观研究内容及编号
Tab. 7 The details of Micro-examination specimens

研究内容	所用试样
页岩陶粒的微观形貌	陶粒表面、内部试样
骨料—浆体的界面过渡区	MB、MNC
硅灰对界面过渡区的影响	MD、MPC

试样的制备过程为在制备水泥净浆后加入粗骨料, 搅拌振动成型, 试块尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 各成型 3 块, 24 h 后脱模, 采用标准条件养护至相应龄期. 达到规定龄期后, 采用金刚石切片锯加工微观结构试样, 并将试样观测面进行处理, 加工完成后使用丙酮终止水化. 观测前, 将试样取出烘干, 涂抹导电胶带并粘贴试样后, 使用 E-1045 进行喷金处理, 置于 S-4800 型扫描电镜内观测, 如图 7 所示.

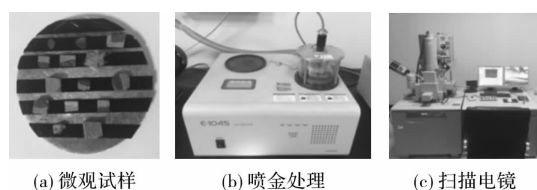


图7 试验过程

Fig. 7 The test details

3.2 页岩陶粒微观形态

所用骨料为900级碎石型页岩陶粒,图8给出陶粒表面和内部结构的SEM照片。由图可见,本文所选碎石陶粒内部为多孔结构,表面覆盖致密外壳,与圆球型类似^[15]。同时,陶粒外部覆盖玻璃釉状外壳,外壳厚度大约在0.3~0.5 mm之间,外壳表面的粗糙多孔,增加了与浆体的接触面积,增大了粘附力和机械咬合作用。陶粒内部呈多孔结构,孔与孔之间相互独立,不连通,孔径在10~60 μm 之间,所以碎石型页岩陶粒具有容重低和吸水率低的特性。

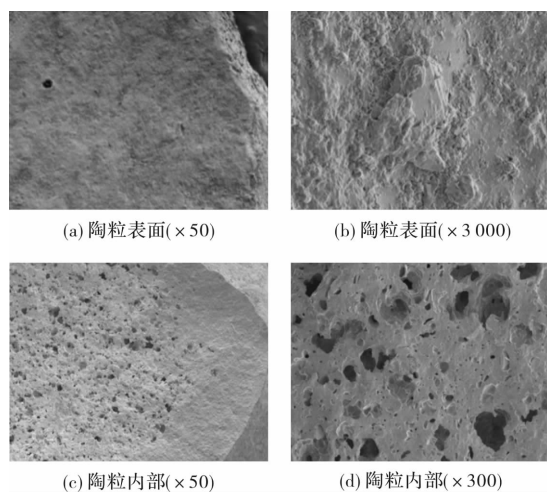


图8 碎石型页岩陶粒表面与内部结构

Fig. 8 The surface and internal microstructure of shale ceramsite

3.3 骨料—浆体界面过渡区微观结构

力学性能试验研究发现,C40普通混凝土的 $f_{\text{cu},3}/f_{\text{cu},28}$ 为44.6%,LC40轻骨料混凝土为51.1%,说明轻骨料混凝土强度发展较普通混凝土快,为从微观层面解释,对比分析MB与MNC试样的SEM照片,如图9,照片中上方为浆体,下方为骨料。

由图9可见:

(1)对比图9(a)与图9(b):轻骨料与浆体间界面不明显,轻骨料与浆体黏结紧密;普通骨料与浆体间有明显缝隙,黏结较差,说明:轻骨料混凝土界面的黏结性能较好,使其早期强度发展较快;

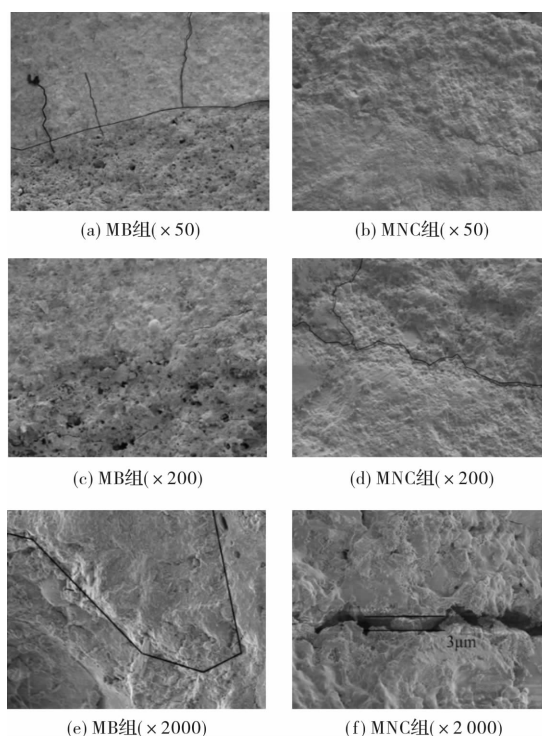


图9 轻骨料混凝土与普通混凝土骨料—浆体界面过渡区微观结构对比

Fig. 9 Microstructure between lightweight aggregate concrete and normal weight concrete

(2)由图9(c)与图9(d)可以看出:轻骨料混凝土内部微裂纹从浆体开始,贯穿界面并进入骨料,微裂纹并没有被骨料阻断,而是进入骨料,或者沿着界面;普通混凝土内部微裂纹从浆体开始,发展至界面时被骨料阻断。因为页岩陶粒强度比砾石强度低,所以这种微裂纹对混凝土来说是正常现象,微裂纹在材料切片之前并不存在,这正说明混凝土试样在制作过程中产生微裂缝的诱发原因是其脆性引起;

(3)由图9(e)和图9(f)可见:普通骨料与浆体之间的缝隙约为3 μm ,说明:普通混凝土的界面区存在“墙效应”或“表面效应”^[16];轻骨料混凝土界面的形态变化显著,浆体致密,骨料多孔,且水泥浆进入骨料内部一定深度,表明:轻骨料混凝土的界面区并不存在“墙效应”,因为轻骨料的粗糙多孔特性,使浆体与轻骨料紧密融合在一起,改善了骨料和浆体的机械咬合作用。

研究表明:较强的机械咬合作用和不存在“墙效应”,使轻骨料混凝土界面的黏结性能较普通混凝土好,进而提高了轻骨料混凝土的整体性,使其强度增长较快。

3.4 硅灰对骨料—浆体的界面过渡区的影响

研究硅灰的掺入是否可以改善界面过渡区,提高页岩陶粒和浆体之间的机械咬合作用和化学黏结

作用, 对高强轻骨料混凝土的界面区研究有着重要作用。力学性能试验表明: 硅灰的掺入可显著改善轻骨料混凝土的宏观力学性能。图 10 为掺入硅灰和未掺硅灰的轻骨料混凝土微观试样。

图 10(a)~图 10(d)可以看出, 低倍数下 MD 试样和 MPC 试样的界面区微观结构相似, 轻骨料混凝土的界面形态变化显著, 浆体较致密, 骨料疏松多孔, 且水泥浆进入骨料内部一定深度, 机械咬合作用和火山灰反应的化学黏结作用相结合, 使骨料与浆体的界面黏结紧密。

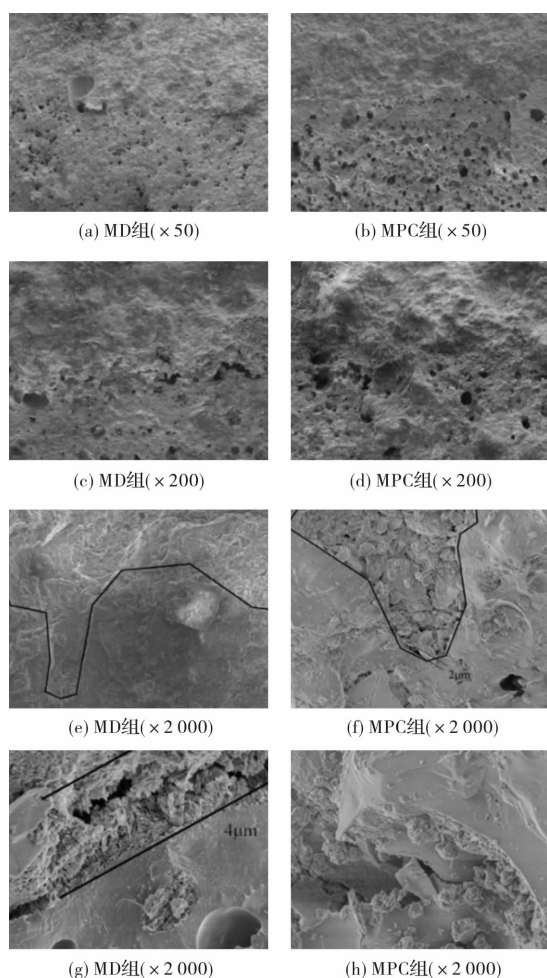


图 10 硅灰对骨料—浆体界面过渡区的影响

Fig. 10 The influence of silica fume on microstructure

Scrivener^[17]认为混凝土内部的毛细管孔径在 10~50 nm 之间, 当水胶比较大时可达 3~5 μm, 当孔径大于 50 nm 时将对混凝土力学性能和抗渗性产生不利影响。当放大倍数增加到 2 000 倍时, 对比图 10(e)和图 10(f)可以看出: (1)进入骨料内部的浆体, MD 的更加致密, 几乎看不到浆体内部的毛细管; (2)MD 试样浆体的孔径小于 50 nm, MPC 试样浆体的孔径大于 50 nm, 说明 MD 试样的水泥浆体强度更高, 掺入硅灰可以提高界面区页岩陶粒和浆体之间的机械咬合作用。

随着放大倍数的增加, 对比图 10(g)与图 10(h), 可以看出: (1)MD 试样的界面区钙矾石层的孔径大约在 0.1~0.5 μm 之间, 界面区的宽度大约为 4 μm, MPC 试样的界面区钙矾石层的孔径大约在 1~2 μm 之间; (2)界面区水化产物主要是无定型的水化硅酸钙 C-S-H, 且掺入硅灰后, 界面区更加致密。说明: 硅灰的掺入降低了界面区钙矾石层的孔径, 提高了界面区混凝土的强度, 增加了骨料与浆体的化学黏结作用。

研究表明: 掺入适量的硅灰可以改善界面过渡区, 提高页岩陶粒和浆体之间的机械咬合作用和化学黏结作用, 从而使界面区的多孔钙矾石层不再是高强轻骨料混凝土的薄弱面。

4 结论

采用五种不同堆积密度的碎石和圆球型膨胀页岩陶粒, 对其物理性能进行了研究, 设计了 44 组配合比试验方案, 系统分析了粗骨料、水胶比对其力学性能的影响, 得到了强度等级为 LC40、LC50、LC60 的配合比, 并对骨料、900 级碎石型轻骨料混凝土骨料-水泥浆界面区微观结构进行了研究, 结果表明:

(1) 抗压强度随干密度的增加呈现上升趋势。碎石型骨料制备的高强轻骨料混凝土比圆球形骨料制备的强度高。五种骨料中的 900 级碎石型页岩陶粒为制备高强轻骨料混凝土的最优骨料;

(2) 高强轻骨料混凝土的抗压强度随着水胶比的减小而提高; 硅灰的加入可以明显提高其强度, 但极限强度受粗骨料的制约。制备高强轻骨料混凝土的最优水胶比为 0.26, 此时混凝土既可以充分发挥陶粒的强度又具有良好工作性能;

(3) 较强的机械咬合作用和不存在“墙效应”, 使轻骨料混凝土界面的黏结性能较普通混凝土好, 进而提高了轻骨料混凝土的整体性, 使其强度增长较快; 掺入适量的硅灰可以改善界面过渡区, 提高页岩陶粒和浆体之间的机械咬合作用和化学黏结作用, 从而使界面区的多孔钙矾石层不再是高强轻骨料混凝土的薄弱面;

(4) 研究表明: 骨料强度的提高引起骨料-水泥浆界面强度与骨料强度相差较小, 薄弱连接面在二者之间均有发生, 破坏面不再光滑, 与低强度的轻骨料混凝土存在差异, 这也是轻骨料混凝土强度提高的根本原因。

参考文献 References

- [1] GAO J, SUN W, MORINO K. Mechanical properties

- of steel fiber reinforced, high-strength, lightweight concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19(4): 307-313.
- [2] 孙海林,丁建彤,叶列平. 高强轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用及发展[C]//第十五届全国桥梁学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002, 12.
SUN Hailin, DING Jiantong and YE Lieping. The development and application of high-strength lightweight aggregate concrete in bridge engineering[C]// The fifteenth national conference on bridge. Shanghai: Tongji University press, 2002, 12.
- [3] 邵永健. 型钢轻骨料混凝土梁的力学性能及设计方法的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
SHAO Yongjian. Experimental study on mechanical performance and design method of reinforced lightweight aggregate concrete beams [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [4] 叶列平,孙海林,陆新征,等. 高强轻骨料混凝土结构—性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
YE Lieping, SUN Hailin, LU Xinzhen, et al. High-strength lightweight reinforced concrete structure-performance, analysis and calculation [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] ZHANG M H, GJVORV O E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete [J]. *Materials Journal*, 1991, 88(3): 240-247.
- [6] YANG C C, Huang R. Approximate strength of lightweight aggregate using micromechanics method [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1998, 7(3): 133-138.
- [7] KE Y, Beaucour A L, Ortola S, et al. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8): 2821-2828.
- [8] MORA C F, Kwan A K H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(3): 351-358.
- [9] 龚洛书. 轻集料混凝土技术的发展与展望[J]. *混凝土*, 2002, (2): 13-15.
GONG Luoshu. Development and outlook of lightweight aggregate concrete technology [J]. *Concrete*, 2002, (2): 13-15.
- [10] 高礼雄,胡曙光,丁庆军. 高强粉煤灰陶粒的研制及其混凝土试配[J]. *桂林工学院学报*, 2002, (2): 171-173.
GAO Lixiong, HU Shuguang, DING Qingjun. Research on high-strength sintered fly ash aggregate and lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 2002, (2): 171-173.
- [11] 李平江,刘巽伯. 高强页岩陶粒混凝土的基本力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2004, (1): 113-116.
LI Pingjiang, LIU Xunbo. Fundamental mechanical properties of concrete with high strength expanded shale [J]. *Journal of Building Materials*, 2004, (1): 113-116.
- [12] 李渝军,叶列平,程志军,等. 高强陶粒混凝土与变形钢筋黏结锚固强度的试验研究[J]. *建筑科学*, 2006, (4): 51-55.
LI Yujun, YE Lieping, CHENG Zhijun, et al. Bond strength between high-strength lightweight aggregate concrete and deformed bar [J]. *Building Science*, 2006, (4): 51-55.
- [13] 刘喜,吕贝贝,刘全威,等. 高强轻骨料陶粒混凝土配合比及强度影响因素试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(4): 847-852.
LIU Xi, LV Beibei, LIU Quanwei, et al. Mechanical properties of lightweight concrete under mix proportion and strength factors [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(4): 847-852.
- [14] 中华人民共和国建设部. 轻骨料混凝土技术规程: JGJ 51-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction, PRC. Technical specification for lightweight aggregate concrete: JGJ 51-2002 [S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2002.
- [15] 董祥. 纤维增强高强轻骨料混凝土物理力学性能、抗冻性及微观结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
Dong Xiang. Study on physical and mechanical properties, frost resistance and microstructure of fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete [D]. Nanjing: Southeast university, 2005.
- [16] DIAMOND, S. The microstructures of cement paste in concrete [C]// Proc. of the 8th International Conference on the Chemistry of Cement. Rio de Janeiro: Special Reports, 1986, 1: 122-147.
- [17] SCRIVENER K L, GARTNER E M. Microstructural gradients in cement paste around aggregate particles [C]// MRS Proceedings. London: Cambridge University Press, 1987, 114: 77-88.

(编辑 沈 波)