DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.007

王玉军, 翟家欢, 高涛, 等. 再生砖骨料多孔混凝土微观结构及结构模型[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 46-53. (WANG Yu-jun, ZHAI Jia-huan, GAO Tao, et al. Experimental studies on microstructure and structure model for recycled brick aggregate porous concrete[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 46-53.)

再生砖骨料多孔混凝土微观结构及结构模型

王玉军¹, 翟家欢², 高 涛³, 翟爱良¹

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院,山东 泰安 271018; 2. 泰山基业开发建设有限公司,山东 泰安 271018; 3. 山东农业大学 信息科学与工程学院,山东 泰安 271018)

摘要:为了深入研究再生砖骨料多孔混凝土的微观结构,从本质上认识其性状及规律,引入扫描电镜研究再生 砖骨料多孔混凝土界面过渡区微观形貌;根据混凝土中心质假说分析概括再生砖骨料多孔混凝土结构模型,定 性研究微观结构与宏观性能的关系,探索界面过渡区形貌和骨料大中心质效应对再生砖骨料多孔混凝土宏观 性能的影响。结果发现再生砖骨料多孔混凝土具有较好的界面过渡区结构,结构密实,水化产物丰富,水灰比、 目标孔隙率、养护龄期,矿物掺料对结构的密实程度和水化产物的类型、数量有一定影响,进而影响强度。多孔 混凝土存在较多负中心质效应,大中心质只有再生砖骨料。今后应当把研究负中心质效应作为重点。

关 键 词: 再生砖骨料; 多孔混凝土; 微观形貌; 电镜扫描; 界面过渡区; 结构模型; 中心质假说 中图分类号: TU528.2 **文献标志码:** A **文章编号:**1009-640X(2016)02-0046-08

再生砖骨料多孔混凝土是以处理和强化后的再生砖骨料、水泥和水搅拌而成的多孔混凝土,由于其具备 一定强度和较高孔隙率,适于植物生长,广泛应用于城市绿化和河道护坡等,经济实用地解决水土流失、水质 净化问题,修复重建已退化生态环境和调节城市气候。同时,还可处理大量的建筑垃圾,保护环境,节约资 源。目前很多学者在普通混凝土微观结构研究方面取得大量成果,但在多孔混凝土尤其是再生砖骨料多孔 混凝土微观方面的研究尚少。因此,深入研究宏观性能与微观结构的相互关系,从本质上认识再生砖骨料多 孔混凝土的性状及内在规律,通过改善微观结构提高宏观性能,是再生砖骨料多孔混凝土研究需要解决的重 要课题。试验采用扫描电镜扫描再生砖骨料多孔混凝土试块得到混凝土的 SEM 图,观测水泥水化后生成的 钙矾石、C-S-H 凝胶及承受荷载之后的裂纹及界面过渡区(ITZ)结构,分析其结构特征,并根据中心质假说 建立再生砖骨料多孔混凝土结构模型。

1 试验方法及试验准备

1.1 SEM 图像简介

SEM 的成分分析以及数字图像分析的综合利用,可用于混凝土材料水化物质的分析及界面过渡区微观 形貌的分析。SEM 是经加速和聚焦的电子束(简称电子探针)在试样表面按一定的时间、空间序列扫描,激 发试样产生出各种物理信息,这些物理信息的强度随试样的表面特征而变化,物理信息经检测、放大后在设 于电镜外的显像管荧光屏上形成一幅反映试样表面形貌、组成及其他物化性能的扫描图像^[2]。这一原理使 得 SEM 具有在保持材料原始状态的条件下直接观察试件表面形貌及特征的优点,放大倍率为 20~20 000。

收稿日期: 2015-06-24

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAL04B05);山东省科技发展计划项目(2013GNC11402)

作者简介:王玉军(1990—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事结构工程鉴定与加固工作。 E-mail:gwangyujun@163.com 通信作者:翟爱良(E-mail:zhaial@sdau.edu.cn)

1.2 试验准备

1.2.1 试验材料 再生砖骨料选用山东省泰安市财源大街某砖结构房屋拆除产生的废弃砖块,经试验测定 强度可达到 MU10。废弃砖块经人工破碎、多次筛分取得粒径为 16.5~19.5 mm 的碎块。对得到的碎块首先 用自来水进行冲洗,去除破碎过程表面附着的尘土和杂质,然后采用与拌合混凝土相同水灰比的水泥浆对破 碎后的再生砖骨料进行包裹强化处理。骨料具体处理流程和方法可查阅文献[3-4]。处理强化后再生砖骨 料的相关物理性能根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T14685—2011)的规定进行试验测定。

试验用水泥为山东泰安市第二水泥厂生产的 P · O 42.5 强度等级的普通硅酸盐水泥,经测定,水泥密度 为 3.03 g/cm³。拌合试块用水采用自来水,符合《混凝土用水标准》(JGJ63—2006)。

1.2.2 配合比设计 由于宏观孔洞较多并且不含细骨料,多孔混凝土的配合比设计在设计原理和计算方法 上不同于普通混凝土。另外,由于本研究所采用的再生砖骨料的吸水率、含水率和表观密度与普通骨料有差 异,所以在配合比设计中应注意考虑骨料的特殊物理指标所带来的影响。试验采用饱和骨料体积法进行配 合比设计,具体计算过程参见文献[4]。为研究不同因素对再生砖骨料多孔混凝土微观结构的影响,试验选 取不同水灰比、矿物掺料、不同龄期,设计配合比见表 1。

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I							
编号	水灰比	目标孔隙率/%	$1/(kg \cdot m^{-3})$	水泥/(kg・m ⁻³)	粗骨料/(kg・m ⁻³)	粉煤灰/(kg・m ⁻³)	
W1	0.28	30	110. 2	393. 5	1 055.4	-	
W2	0.32	30	118.2	369. 3	1 055.4	-	
W3	0.40	30	131.5	328.9	1 055.4	-	
P4	0.32	24	135.7	424.0	1 090.7	-	
Р5	0.32	30	106. 1	331.7	1 090.7	-	
K6	0.32	30	106. 1	298.5	1 055.4	33.2	

表 1 混凝土配合比 Tab. 1 Mix proportions of concrete

注:K6组混凝土中掺10%粉煤灰。

1.2.3 试件及试验方法 由于再生砖骨料多孔混凝土的特殊结构和再生骨料的类型,故其搅拌成型工艺流程与普通混凝土不同。另外再生砖骨料经强化处理后仍然存在强度较低、稳定性较差、吸水性较强、多孔混凝土骨料之间充满空隙、仅靠少量水泥浆相连、骨料颗粒容易脱落等问题,在搅拌方法上本试验采用人工水泥浆裹石法,先将水泥与水搅拌均匀成水泥净浆,然后与浸泡并晾干至饱和面干状态的骨料混合搅拌均匀,人工振捣入模,入模之后进标养室养护48h拆模。每组试件3个,抗压强度试件规格为150 mm×150 mm×150 mm×150 mm×150 mm×150 mm×150 mm2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》执行。

SEM 试件制备直接关系到图像的观察效果和准确性,进而影响到对图像分析的正确性。由于仪器的特点,要求试件尺寸不超过仪器样品台的规定范围,一般要求试件直径不超过 25 mm,厚度不超过 20 mm。另外,对水化物形貌的分析以及界面微裂缝的分析一般采用自然断面。试验按照要求配合比制作混凝土试块,标准养护 28 d 取出,对所有试块进行强度测试后敲取小块进行微观试验。在试块中心随意敲取 1 cm²的薄碎片碎块,尽量选取水泥浆体与再生砖骨料胶结部分,用无水乙醇浸泡使之终止水化,取出后在 60℃下干燥至恒重。将试件粘贴在样品台上,选择观察面向上并进行镀膜,然后置于 JSM-6610LV 低真空扫描电子显微镜下进行观察,并获取 SEM 图像进行分析。该过程参见文献 [10] 和[12]。

2 试验过程和结果分析

2.1 宏观强度试验结果与分析

本试验旨在分析再生砖骨料多孔混凝土的微观结构形貌,并通过微观结构定性分析宏观强度形成机理, 对比微观分析结果与宏观强度试验结果。 对试块进行 7 d,28 d 抗压强度和 28 d 抗折强度测定,试 验数据见表 2。由表 2 可以看出,在一定水灰比范围内,随着 水灰比逐渐增大,7 d 和 28 d 抗压强度与 28 d 抗折强度都呈 增大趋势,这是因为,在一定水灰比范围内,水灰比越大水泥 水化越充分,水泥石越密实。另外,由于多孔混凝土强度主要 来自于水泥石以及界面过渡区黏结力,水泥石抗折强度较抗 压强度小很多,故多孔混凝土的抗折强度约为抗压强度的 30%~50%。而随着目标孔隙率的增大强度下降,且趋势较明 显,这是因为目标孔隙率的增大是通过减小水泥浆体积来实 现的,水泥浆体积减小,骨料表面浆膜厚度减小必然导致强度

	Tał	b. 2 Test	results				
袍早	抗压强度/MPa		28 J 拉托强度/MD。				
切用 与	7 d	28 d	20 U 加別 浊反/ MF a				
W1	6.23	6.65	3. 25				
W2	7.33	8.06	3. 52				
W3	8.52	10.06	3.67				
P4	10.07	11.38	4.17				
P5	6.60	7.33	3.48				
K6	8.86	9.86	3.67				

试验结果

降低。K6组与P5组相比,掺加少量粉煤灰使得所有强度都增加,但粉煤灰在早期时不参与水化对强度的贡献较小,强度的提高是由于粉煤灰的掺入增强了水泥浆的流动性,使试块下部浆体沉积。

2.2 界面过渡区水化特征及形貌结构分析

界面过渡区是混凝土中较薄弱的环节,它的结构状况影响着混凝土的强度和内部紧密程度。利用电镜 扫描观察了骨料和水泥浆之间的界面形貌特征,在低倍镜下明显可见水泥石和再生砖骨料之间呈带状的松 散区域,进一步放大可观察 Ca(OH)2晶体、针状钙矾石晶体和 C-S-H 凝胶等水化产物。而观察到的再生砖 骨料是一种光滑多孔的蜂窝状物质。经观察分析,再生砖骨料表面孔洞较多,容易吸收水分,使得部分水泥 颗粒陷入骨料内部并进行水化反应,生成大量针棒状钙矾石、纤维状 C-S-H 凝胶和片状 Ca(OH)2晶体,并 形成一层密实的外壳,阻碍了水分的进入,随着反应的进一步发生,水分减少,外壳阻止了水化反应进一步进 行,因此形成了结构相对松散的界面过渡区。

W2 在 7 d 和 28 d 龄期的 SEM 图见图 1。通过这两组图片分析不同养护龄期对再生砖骨料多孔混凝土 微观结构的影响。



(a) 7 d, 500倍

(b) 7 d, 2 000倍
 (c) 28 d, 500倍
 图 1 W2 养护 7 和 28 d 的 SEM 图
 Fig. 1 SEM of W2 after curing for 7 and 28 days

(d) 28 d, 2 000倍

从图 1(a)和(b)可见,经 7 d 水化后的界面上有大量体积较小针棒状钙矾石和纤维状的 C-S-H 凝胶生成,层状或片状的 Ca(OH)2晶体生成较少,且分布散乱。可明显观察到水化物结构松散而形成了骨料与水泥石之间连接较差的带状缝隙。从图 1(c)和(d)可见,经 28 d 养护后,水化产物较 7 d 致密均匀。有大量密集分布的 C-S-H 凝胶生成,多数 C-S-H 凝胶由纤维状 I 型凝胶经粒子接触连锁成网状或蜂窝状 II 型凝胶。大量 Ca(OH)2晶体也平行于骨料表面层叠生长,使得骨料与水泥石表面更好地咬合密实,但是仍可以清楚地看到骨料与水泥石之间的界面,钙矾石晶体数量较少。在文献[6-7]中也出现类似结论。

微观分析结果与试验强度趋势相吻合, W2 组 28 d 强度较 7 d 提高了 9.9%, 其余各组强度也都提高近 10%, 如表 2 所示。W1 和 W3 在 7 d 和 28 d 龄期的 SEM 图见图 2。观察这 3 组图片分析不同水灰比对再生 砖骨料多孔混凝土微观结构的影响。



图 2 W1 和 W3 养护 7 和 28 d 的 SEM 图 Fig. 2 SEM of W1 and W3 after curing for 7 and 28 days

选择 W1 和 W3 试件进行电镜扫描。比较 W1 和 W3 可知界面过渡区的密实程度和水灰比有关系,而密 实程度关系着混凝土的强度。对比图 2(a)和(b)可以看出,水灰比较大时,虽然用水量充分,水化产物发育 较好,但结构疏松,界面过渡区缝隙较宽。结合图 2(c)和(d)分析,当水灰比较小时,水化7 d 的水化产物发 育并不太好,晶体尺寸偏小,但由于靠近骨料处水泥颗粒吸收再生砖骨料里的水分,水化产物的结构较致密, 在界面过渡区处的缝隙宽度较小。水化 28 d 的试样,水化产物相互交织在一起,颗粒大而密实紧贴再生砖 骨料表面。水灰比越大水化越充分,蜂窝状 II 型 C-S-H 凝胶越多,而水灰比较小时针状晶体较多。

从强度试验来看,7 d 时 W3 组抗压强度是 W1 组的 1.36 倍; 而 28 d 时, W3 组抗压强度是 W1 组的 1.52 倍, 如表 2 所示。这一趋势与微观分析基本吻合。

K6 在 28 d 龄期的 SEM 图见图 3; P4, P5 在 28 d 龄期的 SEM 图见图 4。对比这些图片,分析不同目标 孔隙率对再生砖骨料多孔混凝土微观结构的影响。



图 3 K6 养护 28 d 的 SEM 图(×5 000) Fig. 3 SEM of K6 after curing for 28 days(×5 000)



图 4 P4,P5 养护 28 d 的 SEM 图 Fig. 4 SEM of P4 and P5 after curing for 28 days

掺粉煤灰后的 SEM 图中明显可见球状粉煤灰颗粒(见图 3)。掺粉煤灰的水泥石中 C-S-H 凝胶的微观 结构有明显不同。没有掺粉煤灰的水泥浆体中含有较多的结晶完好、晶粒较大的 Ca(OH)2晶体。掺粉煤灰 后,水泥石中 Ca(OH)2的含量不断减少,粉煤灰微珠表面已形成致密的水化产物,且其周围水泥的水化产物 也基本是致密的凝胶状物质。可以说明粉煤灰已与 Ca(OH)2生成了另一种类型 C-S-H 凝胶。K6 组与 P5 组配合比仅是粉煤灰掺量不同,P5 组没有掺粉煤灰,而 K6 组用 10%的粉煤灰代替水泥,28 d 强度的提高与 粉煤灰的作用机理有一定关系。

对比图 4(a)和(b)可见, P4 和 P5 两组只有目标孔隙率不同,水泥石配合比相同,界面过渡区微观形貌 未见差异。只是目标孔隙率增大是通过减小水泥浆体积来实现的,水泥浆体积减小导致水泥浆膜厚度减小, 所以水泥颗粒充分与水接触使得水化较充分,水泥石结构较密实。但同时由于结构较密实,则更容易形成裂 缝和微裂缝,如图 4(b)所示。P4 组强度比 P5 组强度有较大提高,一是由于微观结构中的微裂缝较多,二是 由于孔隙率的增大导致浆膜厚度减小,而多孔混凝土中水泥石承担主要强度。

在相同倍数下,将再生砖骨料多孔混凝土 SEM 图与参考文献[7]中天然骨料混凝土的 SEM 图进行比较 发现,再生砖骨料多孔混凝土的界面过渡区与砖骨料相接的边界不明显,但是界面过渡区密实性较之天然骨 料混凝土好。这是因为,再生砖骨料疏松多孔,部分水泥颗粒进入骨料孔隙内部发生水化,水化产物与孔隙 外部水化产物结合而产生边界不明显的界面过渡区,使得水泥石牢牢"抓住"砖骨料。另外,由于拌合混凝 土之前,再生砖骨料充分吸水成饱和面干状态且再生砖骨料疏松多孔保水性较好,可以为界面过渡区水泥水 化提供较多的水分,因此较之天然骨料,再生砖骨料多孔混凝土界面过渡区更为密实。

3 再生砖骨料多孔混凝土结构模型分析

吴中伟^[8]在研究混凝土结构组成时曾提出中心质假说。假说认为混凝土为复杂的多相聚集体,集料、 钢筋等为中心质,胶结浆体为介质,中心质与介质又各分为大、次、微3个层次。文献[9]中也做了同样分 析。凡是大中心质对大介质产生吸附、化合、粘结、强化、晶核作用、晶体取向等物化效应,称为大中心质效 应。在混凝土最终结构中存在着各级中心质的网络结构以及各级中心质周围的效应圈——结构膜层与水化 层,它们对于混凝土的最终性能有着极其重要的影响。骨料等大中心质是通过中心质效应,也就是生成结构 膜层来对混凝土结构的发展和形成起作用的。在混凝土结构中存在着中心质的网络结构和中心质周围的介 质效应圈——界面过渡区。它们的发展形成了混凝土的最终强度。

再生砖骨料多孔混凝土是由胶结浆体粘结再生砖骨料而形成的多孔骨架,有些文献将其称为"沙琪玛 结构"。根据吴中伟的假说对再生砖骨料多孔混凝土的结构模型进行分析。

3.1 中心质效应

结合 SEM 图 5,从放大倍数较低的 SEM 图中可以看出骨料和水泥浆之间的结合,水泥浆包裹着再生砖

骨料。因此可以看作是再生砖骨料分布在介质中,形成结构膜层相互连结成中心质网络结构,成为整个多孔 混凝土结构的骨架。这种效应范围充满整个介质,使得再生砖骨料颗粒粘结成整体,混凝土表现出良好性 能。这是再生砖骨料的大中心质效应。水泥熟料粒子水化成水化层形成次中心质,水化层充满整个次介质 时,也使得多孔混凝土表现出优良的性能。观察较大倍数的 SEM 图,如图 2(c),2(e)和图 3,可以看出各种 水化物质的连结,水泥水化形成的各种水化产物由于其各种针状、纤维状、网状结构而交织形成的骨架为多 孔混凝土的微中心质效应。



(a) 50倍

(b) **500**倍

图 5 W2 养护 28 d 的 SEM 图 Fig. 5 SEM of W2 after curing for 28 days

3.2 介质效应

结合较低倍数的 SEM 图(图 5),水泥水化成的水泥石包裹骨料将其连结成整体并发挥强度,在高倍镜下可见,水化物中网状、蜂窝状凝胶物质可包裹各种粒状物质并连结其成为整体。介质是中心质分散形成的连续相。介质对中心质的效应即为介质效应。再生砖骨料分散成结构膜层即为大介质,水泥水化成水化层即为次介质,网状 C-S-H 凝胶可视为微介质。当各级介质内部均匀分布各级中心质网络的时候,各级介质对各级中心质存在介质效应,对多孔混凝土最终结构性能有重要作用。

3.3 骨料大中心质与水泥石大介质之间的界面过渡区

在中心质与介质之间存在着渐变过渡层,也就是中心质效应和介质效应过渡区。如图 5,通过 SEM 图 可以看出再生砖骨料大中心质与水泥石大介质之间存在界面过渡区(ITZ),并且界面过渡区结构比再生骨 料和水泥石都要复杂。混凝土正是通过界面过渡区将不同材料粘结成整体,界面过渡区结构的好坏决定了 混凝土整体性能。由于再生砖骨料的多孔性和表面粗糙性,使得骨料大中心质与水泥石大介质更好地结合, 界面过渡区结构密实,使混凝土表现出优良的整体性。

3.4 负中心质效应

负中心质是指混凝土内部孔隙和裂缝。再生砖骨料多孔混凝土的孔结构包括水泥石内部微孔隙微裂 缝、再生砖骨料内部的孔洞和宏观孔洞。由图 6 和 7 可见,各种微观裂缝及孔洞遍布骨料和水泥石内部,尤 其是界面过渡区附近周围较多,而多孔混凝土特有的宏观孔洞也遍布混凝土内部。对多孔混凝土来说,负中 心质较多,形成的负中心质网络结构范围较广。而负中心质的网络结构对混凝土一般起副作用,因此多孔混 凝土的强度、耐久性等性能较普通混凝土差。但负中心质网络结构对多孔混凝土的透水性、透气性却发挥了 积极的作用。另外,通过 SEM 图可以看出,孔洞裂缝周围水分充足水化充分,水化物结构密实,这也对强度 形成起到积极作用。这种矛盾使得研究多孔混凝土的负中心质效应成为重点。

综上所述,再生砖骨料多孔混凝土的结构模型为:网络化的各级中心质分布在各级介质中,两者之间存 在过渡层。再生砖骨料大介质与水泥石大介质粘结形成整个结构的骨架,界面过渡区使两者更好地接触增 强结构整体性,骨架内部充斥着对透气性透水性有积极作用的负中心质孔隙。



图 6 放大 2 000 倍看到的孔洞 Fig. 6 Hole magnified 2 000 times



图 7 放大 500 倍看到的微裂缝 Fig. 7 Micro crack magnified 500 times

4 结 语

(1)由于再生砖骨料的多孔性和表面粗糙性使得再生砖骨料多孔混凝土具有较好的界面过渡区结构,结构密实,水化产物丰富。

(2)多孔混凝土的水灰比、目标孔隙率、养护龄期、矿物掺料对结构密实程度和水化产物的类型、数量有 一定影响,进而影响到强度。

(3)多孔混凝土的结构模型与普通混凝土的结构模型有较大差异,多孔混凝土存在较多负中心质效应, 大中心质只有再生砖骨料。在今后的研究中应当把负中心质效应作为重点,尽可能降低负中心质效应对强 度、耐久性等性能的消极作用,增强对透水性、透气性等性能的积极作用。

参考文献:

- [1] 路菊, 王莉, 黄文琪, 等. 建筑材料的扫描电镜样品制备技术与观察[J]. 电子显微学报, 2005, 24(4): 388. (LU Ju, WANG Li, HUANG Wen-qi, et al. Technique and scanning electron microscopy sample preparation for building materials[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2005, 24(4): 388. (in Chinese))
- [2] 王娴明,姚勇,赵若鹏. SEM 在混凝土结构耐久性评定中的应用[J]. 混凝土, 1996(1): 5-12. (WANG Xian-ming, YAO Yong, ZHAO Ruo-peng. Application of SEM in the evaluation of the durability of concrete structure[J]. Concrete, 1996(1): 5-12.(in Chinese))
- [3] 谢玲君, 翟爱良, 翟文举, 等. 影响烧结砖瓦再生骨料混凝土强度主要因素的试验研究[J]. 混凝土, 2012(5): 70-73.
 (XIE Ling-jun, ZHAI Ai-liang, ZHAI Wen-ju, et al. The study on the productive technical and properties of recycled brick concrete[J]. Concrete, 2012(5): 70-73. (in Chinese))
- [4] 韩健. 植生型生态再生砖瓦混凝土抗压强度和透水性能研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2014. (HAN Jian. Study on the compression strength and water permeability of vegetation-type ecological regenerate brick concrete [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese))
- [5] 王纯合, 翟爱良, 季昌良, 等. 再生砖骨料混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 40-44. (WANG Chun-he, ZHAI Ai-liang, JI Chang-liang, et al. Experimental studies on shear performance of recycled brickcoarse aggregate concrete beam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(4): 40-44. (in Chinese))
- [6]水中和,万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区(ITZ)(I)——元素与化合物在 ITZ 的富集现象[J]. 武汉理工大学学报,2002,24(4):21-23,74. (SHUI Zhong-he, WAN Hui-wen. Aggregate-cement interfacial transition zone (ITZ) in old concrete (I)——Concentrations of elements and compounds to the ITZ[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(4):21-23,74. (in Chinese))
- [7] 万惠文, 徐金龙, 水中和, 等. 再生混凝土 ITZ 结构与性质的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(11): 29-32. (WAN Hui-wen, XU Jin-long, SHUI Zhong-he, et al, Study on the structure and properties of recycled aggregate concrete ITZ[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(11): 29-32. (in Chinese))

- [8] 吴中伟. 混凝土材料学——各种混凝土的组成与结构[J]. 混凝土及建筑构件, 1981(2): 2-12. (WU Zhong-wei. Material science of concrete——composition and structure of all kinds of concrete[J]. Concrete and Building Components, 1981(2): 2-12. (in Chinese))
- [9] 孙南屏, 祁玲. 粗集料中心质效应的一些探讨[J]. 广西工学院学报, 1997(4): 21-25. (SUN Nan-ping, QI Ling. Some discussion about aggregate's large center mass effect[J]. Journal of Guangxi University of Technology, 1997(4): 21-25. (in Chinese))
- [10] 尚建丽. 高性能混凝土微观结构特征及开发应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1999(1): 86-88. (SHANG Jian-li. The characteristics and application of high performance concrete micro structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 1999(1): 86-88. (in Chinese))
- [11] 季昌良, 翟爱良, 翟文举, 等. 再生砖粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 59-64. (JI Chang-liang, ZHAI Ai-liang, ZHAI Wen-ju, et al. Experimental study on flexural performance of recycled brick coarse aggregate concrete beam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6): 59-64. (in Chinese))
- [12] 杜婷. 高性能再生混凝土微观结构及性能试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008. (DU Ting. Experimental study on the microstructure and basic behaviors of recycled high performance concrete[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))

Experimental studies on microstructure and structure model for recycled brick aggregate porous concrete

WANG Yu-jun¹, ZHAI Jia-huan², GAO Tao³, ZHAI Ai-liang¹

Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;
 Taishan Jiye Development Construction Limited Liability Company, Taian 271018, China;
 Information Science and Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to further study the microstructures and essentially understand the characteristics and rules of the recycled brick aggregate porous concrete, during the microscopic studies of the recycled brick aggregate porous concrete, the modern microscopic test equipment-scanning electron microscopy (SEM) is applied to the research of the microstructures of the cement-stone-recycled brick aggregate porous concrete. And according to the assumption of central grains developed by Professor WU Zhong-wei, the authors have analyzed and summarized the structure model for the recycled brick aggregate porous concrete, and have done qualitatively researches of the relationships between the microstructures and the macroscopic strength behavior, and then explored the morphology of ITZ (interface transition zone) and the impacts of aggregate's large center mass effect on the macroscopic properties of the recycled brick aggregate porous concrete. Analysis results show that the recycled brick aggregate porous concrete has better interfacial transition zone structure, the structure is very compact and the hydration products are very rich. Water cement ratio, design porosity, maintenance period and permeability reducing admixture all have a certain effect on the compactness of the structure and the type as well as the quantity of the hydration products, and on the strength of the concrete structures. There are a lot of negative center mass effects in the porous concrete and the large center mass is only in the recycled brick aggregate. Studies of the negative center mass effect should be taken as a key issue in the future.

Key words: recycled brick aggregate; porous concrete; microstructure; SEM (scanning electron microscopy); ITZ (interface transition zone); structure model; assumption of central grains