

文章编号:1001-5132 (2008) 03-0386-06

废弃型壳砂混凝土的基本力学性能研究

胡海柯, 赵恒义, 樊海平

(宁波大学 力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过一系列试验证明了废弃型壳砂具有良好的级配, 其有害物质含量基本符合使用要求。此外, 废弃型壳砂混凝土的配置试验和基本力学性能试验结果进一步表明, 废弃型壳砂混凝土的流动性较差, 水灰比、砂率和龄期对废弃型壳砂混凝土的抗压强度影响巨大。最后并通过拟合得到了废弃型壳砂混凝土的受压应力 - 应变全曲线方程。

关键词: 废弃型壳砂; 混凝土; 力学性能; 应力 - 应变曲线

中图分类号: TU528.56 文献标识码: A

传统的铸造工艺会产生大量的废砂, 而这些废砂除很小一部分可以回收外, 绝大部分采用直接倾倒的方法进行处理, 严重影响了当地的环境。另一方面, 随着我国基础建设的飞速发展, 长期的掠夺式开发导致我国不少地区出现了天然砂资源短缺, 甚至无砂可用的状况, 因此寻找新的建筑用砂材料已是一种趋势。

常用的铸造用砂与建筑用砂同属于石英砂, 主要成分为 SiO_2 , 本文尝试采用铸造用的废弃型壳砂替代天然砂制作混凝土的工艺, 对其基本力学性能进行测试, 研究废弃型壳砂作为建筑代砂材料的可行性。

1 废弃型壳砂的基本特征

试验采用河砂和废弃型壳砂来配置混凝土, 废弃型壳砂在颜色上明显要比河砂深, 天然河砂呈现的是泥黄色, 而型砂则呈现红褐色。外观上, 废弃

型壳砂表面比河砂要粗糙, 且有尖锐的菱角。

1.1 废弃型壳砂的基本物理性能和级配

本文中所用的天然河砂、B 型砂和 C 型砂的表观密度和堆积密度分别为 $2.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $2.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $2.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

细骨料级配对于混凝土的性能有很大的影响, 良好的级配使骨料的空隙率和总表面积均较小, 所需水泥浆量较少, 而且还可提高混凝土的密实度、强度和其他性能。按建筑行业标准对试验所用河砂和废弃型壳砂进行分筛, 分筛结果见表 1。普通混凝土用砂的细度模数 M_x 一般为 $3.7 \sim 1.6$, 而本文河砂、B 型砂及 C 型砂的 M_x 为 2.30、3.11、2.74。在配置混凝土时, 需同时考虑砂的颗粒级配和细度模数^[1], 分筛试验表明: 废弃型壳砂具有良好颗粒级配, 且符合规范对于建筑用砂细度模数的要求。

1.2 废弃型壳砂的化学成分分析和有害物质检测

废弃型壳砂的主要化学成分为 SiO_2 , 另外还有少量的金属氧化物如 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 Na_2O 等。按

表1 试验用砂分筛结果

筛孔直径/mm	分计筛余/%		
	河砂	B型砂	C型砂
0.160	14.74	5.10	7.96
0.315	42.86	12.70	18.20
0.630	29.86	26.28	32.74
1.25	4.28	32.40	15.20
2.50	3.90	14.46	12.70
5.00	0	0	2.50

国家标准对废弃型壳砂进行有害物质检测,结果见表2。废弃型壳砂中,轻物质含量较高,理论上轻物质含量过高会延缓水泥的硬化过程,降低混凝土的早期强度。但试验结果表明,废弃型壳砂混凝土的早期强度并未比河砂混凝土低,其24小时抗压强度要比河砂高,3天抗压强度跟河砂基本一致。此外,废弃型壳砂当中含有一定数量的石粉。国家标准中对石粉含量有严格的限制(不超过7%),但实际生产中可以放宽这种限制,例如很多研究表明在低标号混凝土中石粉含量高达15%~18%时,混凝土仍然具有很好的性能,因此可以根据实际需要放宽石粉含量要求。从有害物质检测的结果来看,废弃型壳砂基本符合建筑用砂的使用要求。

表2 有害物质检测结果

	云母含量/%	石粉含量/%	亚甲蓝MB值/(g·kg ⁻¹)	轻物质含量/%	硫化物和硫酸盐含量/%	有机物含量比色法
B型砂	0.88	6.47	0.25	2.11	0.38	合格
C型砂	1.12	7.37	0.50	1.50	0.49	合格
国家标准	2.0	7.0	<1.40	1.0	0.5	合格

2 废弃型壳砂混凝土的配置

混凝土的配合比是指混凝土中各组成材料的质量比例,配合比设计的优劣与混凝土性能有着直接密切的关系。本文采用传统的混凝土配置方法结合试验来确定废弃型壳砂混凝土的配合比^[2]。为

了研究废弃型壳砂混凝土的和易性及强度随水灰比、用水量和砂率的变化规律,最终确定的配合比方案见表3。

表3 试验中河砂混凝土和废弃型壳砂混凝土的配合比

水灰比	砂率/%	组成材料/(kg·m ⁻³)			
		石子	砂	水泥	水
0.5	34.3	1 033	567	500	250
	37.5	1 000	600	500	250
	40.1	958	642	500	250
	42.7	916	683	500	250
0.55	37.5	1 000	600	500	275
0.6	37.5	1 000	600	500	300

2.1 废弃型壳砂混凝土的和易性研究

混凝土拌合物的和易性是项综合技术性质,包括流动性、粘聚性和保水性等3个方面的含义。本文采用坍落度法结合直观观察来评定废弃型壳砂混凝土的和易性,试验结果见表4。

表4 不同水灰比条件下的坍落度值

水灰比	坍落度/mm		
	河砂混凝土	B型砂混凝土	C型砂混凝土
0.5	5	10	15
0.55	15	13	20
0.6	80	15	30

坍落度试验表明:废弃型壳砂混凝土的粘聚性和保水性良好,但坍落度不大,表现为低塑性。随着水灰比的增大,河砂混凝土的坍落度增长比较明显,而废弃型壳砂混凝土的增长相对要小的多。这主要是因为型砂外表粗糙,具有尖锐的菱角,相对于河砂而言,总表面积要大,导致摩擦力较大,拌合物的流动性随水灰比的增大上升不如河砂混凝土来的明显。但在水灰比为0.5的情况下,废弃型壳砂混凝土的坍落度反而要大于河砂混凝土。这可能是由于型砂的密度相对于河砂要小,其在单位体积拌合物中所占的体积量也相对较大,形成的砂浆也相对较多,而砂浆所起的润滑作用减少了粗骨料之间的摩擦力。

废弃型壳砂混凝土的单位用水量对拌合物的流动性影响不如河砂混凝土来的明显。如用于实际混凝土工程,在配置时应当适量地增加单位用水量,或添加有助混凝土流动性的外加剂。根据规范中选用坍落度的规定,废弃型壳砂混凝土适用于基础或地面等垫层、无配筋的大体积结构(挡图墙、基础等)或配筋稀疏的结构,不适于板、梁、大型及中型截面的柱子和配筋较密的结构。

3 废弃型壳砂混凝土基本力学性能

混凝土在结构中主要用作受压材料,其基本力学性能包括抗压强度、抗拉强度、泊松比和弹性模量等。混凝土的单轴抗压强度和劈裂抗拉强度是混凝土最基本和最重要的力学性能指标^[4],国家标准规定采用标准立方体试件进行单轴抗压强度和劈裂抗拉强度试验。

3.1 基本力学性能试验情况及结果

废弃型壳砂混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验的试样尺寸为:100 mm × 100 mm × 100 mm,试验前对试样进行标准养护,标准养护条件为温度(20 ± 3),湿度 90%以上,试样彼此间隔为 10 ~ 20 mm。试验表明:同河砂混凝土一样,水灰比 W/C 、砂率和龄期对废弃型壳砂混凝土力学性能的影响具有一定的规律。

3.1.1 水灰比的影响

水泥强度等级和水灰比是影响混凝土强度的最主要因素^[5]。因为混凝土的强度主要取决于水泥石的强度及其与骨料间的粘结力,又取决于水泥强度等级和水灰比的大小。从图 1 和图 2 可知,在水泥强度等级相同的情况下,水灰比越小,废弃型壳砂混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度越高。这是因为当水泥用量一定,增加用水量的时候,除水泥水化所需的结合水外,流离水增加。这些多余的流离水在水泥硬化时逐渐蒸发,在混凝土中留下许多微小孔洞,导致混凝土的密实性下降,抗压与抗拉

强度降低。试验表明:废弃型壳砂混凝土的抗压强度在增长的同时,劈裂抗拉强度也在增长,但抗压强度的增长幅度相对于劈裂抗拉强度要大的多。通过对拉压比的比较发现,废弃型壳砂混凝土的劈裂抗拉强度要比河砂混凝土高 10%至 20%左右,但具体幅值差别不大,说明三者的脆性大致相当。

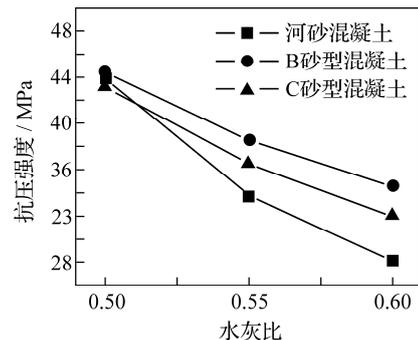


图 1 不同水灰比条件下的抗压强度变化

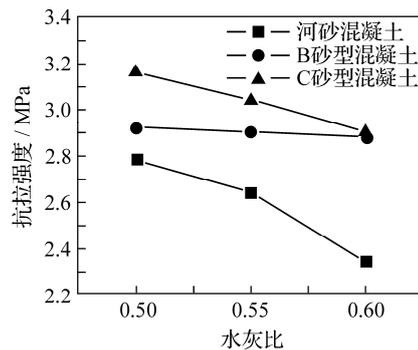


图 2 不同水灰比条件下的劈裂抗拉强度变化

3.1.2 砂率的影响

砂率是指细骨料占骨料总量的质量百分比,是影响混凝土工作性、表观密度、强度和变形性能的主要因素之一。图 3 是废弃型壳砂混凝土抗压强度与砂率的变化图,砂率在 37.5%时,达到最大强度,

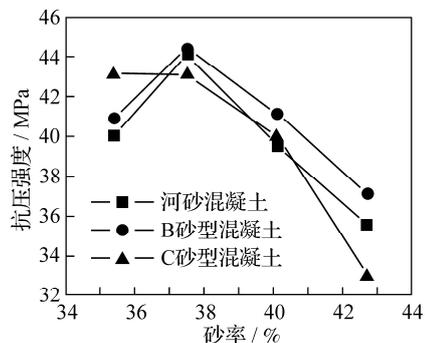


图 3 不同砂率条件下的抗压强度变化

无论砂率低于还是高于 37.5%, 强度均有所下降。这主要是由于在砂率低于 37.5% 时, 粗集料之间的空隙未被填充密实, 随着砂率的提高, 空隙率减少, 混凝土更加密实, 使强度得到提高。而砂率高于 37.5% 以后, 随着砂率的提高, 粗骨料的用量降低, 细骨料的用量增大, 而水泥用量却没有变化, 使砂浆本身密实程度降低, 粗骨料与水泥石间的界面强化度和机械啮合作用下降, 混凝土强度有所降低。

3.1.3 龄期的影响

混凝土的制作、养护阶段和使用阶段, 水泥的水化作用一直在进行, 因此混凝土的强度随龄期而变化。水泥与水作用后生成的水化物可分为 2 类: (1) 完全水化的水泥结晶体, 具有线弹性性质, 它与骨料一起共同构成了混凝土内部的弹性骨架; (2) 未完全水化的水泥凝胶体, 在荷载作用下具有滞性流动的特性, 由此产生的变形大部分是不可恢复的, 表现出明显的塑性^[6]。

混凝土的成熟度(水化程度)随时间的延续而增加。其内部的水泥凝胶体逐步向水泥结晶体转化, 滞性流动减小, 宏观力学行为表现为弹性性能的强化, 水泥和骨料的粘结强度增大, 并具有更高的极限强度和弹性模量。但混凝土的后期水化是在相当长的时间内完成的, 研究表明至龄期 20 年后水化仍未完全终止, 故通常是水泥凝胶体和结晶体并存, 因此混凝土同时具有弹性和塑性的特征; 但不同时期 2 种组分所占比例不同, 因此不同时期的混凝土具有不同的弹塑性特征, 其强度随龄期的增长而增长(见图 4)。表 5 为不同龄期的河砂混凝土、B 型砂混凝土和 C 型砂混凝土的抗压强度($W/C=0.5, S_p=37.5\%$)。

3.2 废弃型壳砂混凝土的受压应力 - 应变全曲线的试验研究

混凝土的受压应力 - 应变全曲线, 反映了混凝土的基本力学特性, 是研究混凝土强度和变形的依据之一^[7]。曲线是混凝土的受压性能和指标的综合宏观反应, 其几何形状和特征点反映了型砂

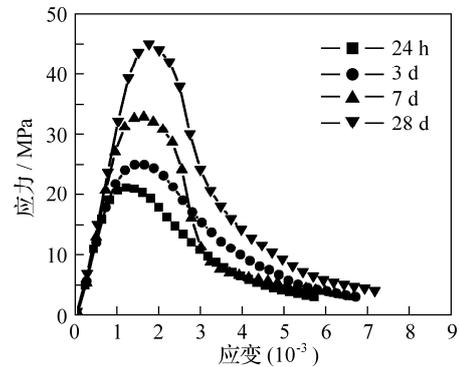


图 4 不同龄期的废弃型壳砂混凝土的应力 - 应变曲线

表 5 不同龄期河砂混凝土和型砂混凝土的抗压强度

品种	抗压强度/MPa			
	24 h	3 d	7 d	28 d
河砂混凝土	14.92	24.47	26.91	43.89
B 型砂混凝土	20.60	24.50	33.53	44.43
C 型砂混凝土	19.48	24.00	30.78	43.10

混凝土受压后的变形、裂缝发展、损伤积累和破坏等全过程中各阶段的特性。

3.2.1 废弃型壳砂混凝土受压应力 - 应变全曲线特征

试验表明: 河砂混凝土、B 型砂混凝土和 C 型砂混凝土的受压应力 - 应变全曲线形状具有一致的几何特征, 如图 5 所示。

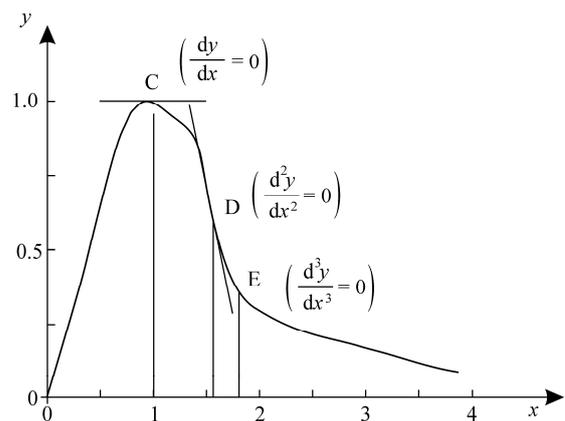


图 5 混凝土的受压应力 - 应变全曲线特征

针对混凝土的受压应力 - 应变曲线, 国内外学者已提出了许多不同的曲线方程, 它们中多数采用上升段和下降段曲线的统一方程。国家混凝土结构设计规范采纳了清华大学建议的表达式, 它根据上升段和下降段曲线的形状, 分别用多项式和有理

式进行拟合,同时符合曲线在峰点连续的条件.该应力-应变标准曲线方程的表达式为:

$$x \leq 1, y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, \quad (1)$$

$$x > 1, y = x / (\alpha_d(x-1) + x), \quad (2)$$

其中: $1.5 < \alpha_a < 3.0, 0 < \alpha_d < \infty$.

3.2.2 受压应力-应变全曲线方程的拟合

为了给出不同水灰比、不同强度及不同龄期的废弃型壳砂混凝土的受压应力-应变全曲线方程,对实验实测的所有受压应力-应变全曲线进行归一化处理,并进行计算机拟合.拟合时采用上升段的式 1 和下降段的式 2,拟合结果见表 6.同时从表 6 可知,实测受压应力-应变全曲线的 α_a 值大多数 < 1.5 (理论上 α_a 的值在 $1.5 \sim 3.0$ 之间),这可能是由于在加载之前,混凝土本身已经具有一个初始应力状态,加载时会先抵消这部分内力,最终导致实测的受压应力-应变全曲线上初始段有一个拐点.

河砂混凝土的 α_a 变化范围在 $0.78 \sim 2.80$, α_d 在 $0.72 \sim 3.20$; B 型砂混凝土的 α_a 变化范围在 $0.50 \sim 2.03$, α_d 在 $1.75 \sim 3.39$; C 型砂混凝土的 α_a 变化范围在 $0.70 \sim 1.91$, α_d 在 $1.22 \sim 4.57$. 在配合比相同的情况下,河砂混凝土的 α_a 值通常要大于型壳砂混凝土,而废弃型壳砂混凝土的 α_d 值要大于河砂混凝土.说明通常情况下废弃型壳砂混凝土的初始切线模量和峰值割线模量的比值要小于河砂混凝土,其应力-应变曲线下下降段相对比较陡峭,达到破坏强度后,型砂混凝土材料破坏来得剧

烈,表现的脆性要比河砂混凝土明显,其峰点后的残余强度要小.

4 结论

(1) 按照国家标准和建筑行业标准对所采集的废弃型壳砂的基本物理性能、基本化学成分、有害物质含量及颗粒级配进行试验检测.检测报告表明废弃型壳砂混凝土具有良好的级配,有害物质含量基本符合使用要求,其中石粉和轻物质的含量略高于国家标准,但通过试验研究发现石粉和轻物质含量的少量超标并未对混凝土的性能产生明显的影响.

(2) 采用传统的混凝土配置方法,通过坍落度试验和现场直观观察,掌握了废弃型壳砂混凝土拌和物的和易性,证明了普通混凝土的配合比设计方法同样适用于废弃型壳砂混凝土,同时为确定废弃型壳砂混凝土的工程适用范围提供了依据.

(3) 借助电液伺服万能试验机,对不同的水灰比、砂率及龄期条件下的废弃型壳砂混凝土和河砂混凝土的立方体抗压强度测试的结果表明:废弃型壳砂混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度与河砂混凝土相近;水灰比对废弃型壳砂的抗压强度的影响要远大于抗拉强度;砂率和龄期对废弃型壳砂混凝土的影响同河砂混凝土基本一致.

(4) 对试验测得的废弃型壳砂混凝土的受压应力-应变全曲线进行数学拟合,拟合结果表明:规

表 6 受压应力-应变全曲线拟合结果

样品	拟合项	28 d, Sp=37.5%			28 d, W/C=0.5			W/C=0.5, Sp=37.5%		
		W/C=0.5	W/C=0.55	W/C=0.6	Sp=34.3%	Sp=40.1%	Sp=42.7%	24 h	3 d	7 d
河砂混凝土	α_a	1.48	0.80	1.04	1.14	1.08	0.94	2.80	0.78	1.41
	α_d	2.47	2.74	1.69	2.79	2.29	3.20	0.72	2.87	1.94
B 型砂混凝土	α_a	0.82	1.22	0.50	0.92	1.62	1.53	1.24	2.03	0.62
	α_d	2.86	3.01	1.93	2.54	2.95	3.93	1.75	2.06	2.72
C 型砂混凝土	α_a	0.70	0.58	0.82	0.71	0.75	0.56	1.76	2.14	1.57
	α_d	4.57	3.03	1.78	2.38	2.18	3.32	1.22	1.91	3.6

范中普通混凝土的应力应变全曲线方程同样适用于废弃型壳砂混凝土.

参考文献:

- [1] 陈志源,李启令.土木工程材料[M].武汉:武汉理工大学出版社,2003.
- [2] 湖南大学,天津大学,同济大学,等.建筑材料[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [3] 过镇海.混凝土的强度和本构关系—原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [4] Soroka I. Portland cement paste and concrete[M]. New York: Chemical Publishing Company Inc, 1980.
- [5] 王立久,张树忠,赵国藩.轻集料混凝土配合比设计[J].混凝土与水泥制品,2002(3):17-19.
- [6] Paul Stutzman. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement micro-structure[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26:957.
- [7] 沈聚敏,王传志,江见鲸.钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M].北京:清华大学出版社,1991.

An Approach to Obtain Mechanics Properties of Waste Foundry Sand Concrete

HU Hai-ke, ZHAO Heng-yi, FAN Hai-ping

(Mechanics and Material Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A series of tests indicate that waste foundry sand (WFS) satisfies the engineering requirements set for aggregate gradation level with its noxious components within the technical tolerance. Based on the test results of ingredient mixing and basic mechanics properties, it is found that the fluidity of WFS concrete is not up to technical standards, and the stress resistance is greatly affected by water-to-granule ratio, sand proportion and time lapse. A complete curvilinear function indicating the relation between stress and strain is obtained using fitting technique for WFS concrete.

Key words: waste foundry sand; concrete; mechanics property; stress-strain curve

CLC number: TU528.56

Document code: A

(责任编辑 章践立)