

文章编号:1673-2049(2018)02-0016-07

# 海水海砂再生混凝土的基本力学性能

肖建庄<sup>1,2</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 张青天<sup>1</sup>, 沈 军<sup>2</sup>, 李 岩<sup>2</sup>, 周 颖<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**利用海水、原状海砂及再生粗骨料,制备了设计预期强度为C20~C50的海水海砂再生混凝土。通过240个标准立方体(150 mm×150 mm×150 mm)和96个棱柱体(150 mm×150 mm×300 mm)试件,完成了工作性能、立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度以及弹性模量试验,研究了海水海砂再生混凝土的基本力学性能;最后基于试验数据,得到了海水海砂再生混凝土立方体抗压强度与轴心抗压强度关系公式以及弹性模量与轴心抗压强度关系公式。结果表明:海水海砂再生混凝土工作性能良好,C40和C50强度等级的坍落度比一般再生混凝土分别提高5%和33%;立方体抗压强度、轴心抗压强度和劈裂抗拉强度随着龄期变长而增加,且长期强度趋于稳定;与普通混凝土相比,海水海砂再生混凝土7 d立方体抗压强度提高13%~52%,28 d抗压强度降低约5%,90 d抗压强度降低约15%,180 d抗压强度降低18%~29%;海水海砂再生混凝土28 d弹性模量比普通混凝土略有降低,降低幅度在14%以内;再生粗骨料对混凝土力学性能、工作性能的影响大于海水海砂。

**关键词:**海水海砂再生混凝土;力学性能;工作性能;强度;弹性模量

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Basic Mechanical Properties of Seawater Sea-sand Recycled Concrete

XIAO Jian-zhuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Qing-tian<sup>1</sup>, SHEN Jun<sup>2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, ZHOU Ying<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

**Abstract:** The seawater sea-sand recycled concrete with the anticipated design strength of C20~C50 was prepared using the seawater, sea-sand and recycled coarse aggregate. Based on 240 standard cubes (150 mm×150 mm×150 mm) and 96 prism specimens (150 mm×150 mm×300 mm), the workability, cube compressive strength, axial compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus were tested to investigate the basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete. Finally, based on the test data, the relationships between the cube compressive strength and axial compressive strength, the elastic modulus and axial compressive strength of seawater sea-sand recycled concrete were obtained. The results show that the workability of seawater sea-sand recycled concrete is well enough, and the slump of C40 and C50 seawater sea-sand recycled concrete increases by 5%, 33% than recycled concrete respectively. The cube compressive strength, axial compressive strength and splitting tensile strength increase with age, and the long-term strength tends to be stable. Compared with the ordinary concrete, the 7 d cube compressive strength of seawater sea-sand recycled concrete

收稿日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51325802)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

increases by 13%-52%, while the 28 d strength reduces about 5%, the 90 d strength reduces about 15%, and the 180 d strength reduces by 18%-29%. The 28 d elastic modulus of seawater sea-sand recycled concrete is slightly lower than that of ordinary concrete, and the decrease is within 14%. The effects of recycled coarse aggregate on the mechanical properties and workability of concrete are greater than those of seawater and sea-sand.

**Key words:** seawater sea-sand recycled aggregate concrete; mechanical property; workability; strength; elastic modulus

## 0 引言

2016年世界范围内混凝土的产量达到250亿t<sup>[1]</sup>,如此巨大的消耗量必然会导致淡水、河砂以及天然粗骨料资源短缺的问题。国外早已开始利用海水、海砂资源解决建筑资源短缺问题,英国最早开始将海砂作为建筑用砂<sup>[1]</sup>,2011年海砂已占日本生产预拌混凝土使用的7000余万t细骨料的12.2%(854万t)。海水、海砂中含有较多氯盐,会影响水泥的水化过程,且腐蚀钢筋,另外海砂中还有较多贝壳,对混凝土的强度、工作性能和耐久性等都有影响<sup>[2-6]</sup>。对于单独使用海水或海砂作为原材料,大部分学者认为海水或海砂混凝土的早期强度有所增长<sup>[6]</sup>,28d强度相差不大,Girish等<sup>[7]</sup>发现海砂混凝土的28d强度较普通混凝土低。此外,Cagatay<sup>[8]</sup>对土耳其1998年和1999年地震毁坏建筑取样分析发现,海砂混凝土的长期抗压强度低于普通混凝土。海砂混凝土的弹性模量与普通混凝土相似<sup>[6,9]</sup>,其抗折强度略优于普通混凝土<sup>[6]</sup>。另一方面,海水海砂混凝土耐久性能较普通混凝土低<sup>[10-12]</sup>。

2015年中国建筑废物产生量超过35亿t,而综合利用率却低于5%。将建筑废物破碎加工成再生粗骨料并运用到混凝土生产中,被视为解决建筑废物处理难题的重要途径<sup>[13]</sup>。再生粗骨料具有孔隙率较大、吸水率较高、表面残留水泥砂浆等特点<sup>[13]</sup>,再生混凝土在力学性能、耐久性能等方面与普通混凝土不同<sup>[13-17]</sup>,研究表明:再生混凝土的28d抗压强度可以达到一般的标准;再生混凝土早期和后期强度增长速度均比普通混凝土慢;当再生粗骨料替代率增大时混凝土的抗压强度降低;水胶比和替代率对再生混凝土抗拉强度影响很大。

同时使用海水、海砂以及再生粗骨料制备混凝土,既能解决目前资源短缺问题,又能消纳建筑废物,是实现混凝土可持续性的一种途径。Ettxeberria等<sup>[18]</sup>将海水与高炉矿渣水泥以及再生粗骨料组合使用,研究表明:海水提高了混凝土的早期抗压强

度,但海水再生混凝土的28d强度与普通混凝土相当。同时海水再生混凝土的凝结时间有所缩短,其干缩也有所减小。Selicato等<sup>[19]</sup>使用海水以及被氯离子污染的再生粗骨料浇筑混凝土,发现再生粗骨料对混凝土力学性能的影响大于海水。目前将再生粗骨料同海水、海砂组合制备混凝土的研究尚少,其力学性能影响机理仍有不明之处。

基于沿海地区及海岛建设的工程背景,以及就地取材的需求,直接采用原状海砂和海水,对沿海地区以及海岛工程建设有极大的意义。本文利用海水、原状海砂以及再生粗骨料制备了不同类型的C20~C50混凝土,研究海水海砂再生混凝土的工作性能、立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量等基本力学性能,探讨海水、海砂和再生粗骨料综合运用的可行性。

## 1 试验方案

### 1.1 材料性能

细骨料中天然河砂为中砂,细度模数为2.5;原状海砂选用福建海砂,细度模数为2.24,氯离子含量(质量分数,下同)为0.087%,贝壳含量为2.31%。粗骨料中,天然粗骨料为石灰岩碎石,粒径为5~25mm;再生粗骨料按《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)评定为Ⅱ类再生粗骨料,粒径范围为5~20mm,吸水率为4.8%,压碎指标为18%。采用聚羧酸系高效减水剂,减水率为15%;采用等级为32.5,42.5,52.5R的普通硅酸盐水泥;拌合水中淡水采用上海市自来水,海水根据ASTM D1141-98标准配制而成。

### 1.2 混凝土配制

混凝土的配合比见表1。4种类型混凝土中普通混凝土(NAC)采用淡水、河砂、天然粗骨料,再生混凝土(RAC)采用淡水、河砂、再生粗骨料,海水海砂混凝土(SNAC)采用海水、原状海砂、天然粗骨料,海水海砂再生混凝土(SRAC)采用海水、原状海砂、再生粗骨料,再生粗骨料和海水、海砂替代率均

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix Proportions of Concretes

混凝土强度等级	水灰比	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				
		水	水泥	细骨料	粗骨料	附加水
C20	0.52	150	288.462	843.462	1 118.077	11.15
C30	0.47	150	319.149	829.031	1 098.948	11.15
C40	0.40	150	375.000	800.386	1 105.295	11.15
C50	0.37	150	405.702	708.392	1 131.444	11.15

为 100%。共浇筑 240 个 150 mm×150 mm×150 mm 立方体和 96 个 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体试件。由于再生粗骨料的吸水率较高,再生混凝土和海水海砂再生混凝土相应增加附加水对其进行补偿,普通混凝土和海水海砂混凝土则无需附加水。

1.3 试块制作和试验方法

试块的制作均采用机械搅拌,对新拌混凝土按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)的测试方法进行混凝土坍落度试验。24 h 拆模后,将试块放入蒸汽养护室,在规范规定的标准条件下养护至试验龄期。按照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2016)分别进行立方体抗压试验、劈裂抗拉试验、轴心抗压试验、弹性模量试验(图 1)。

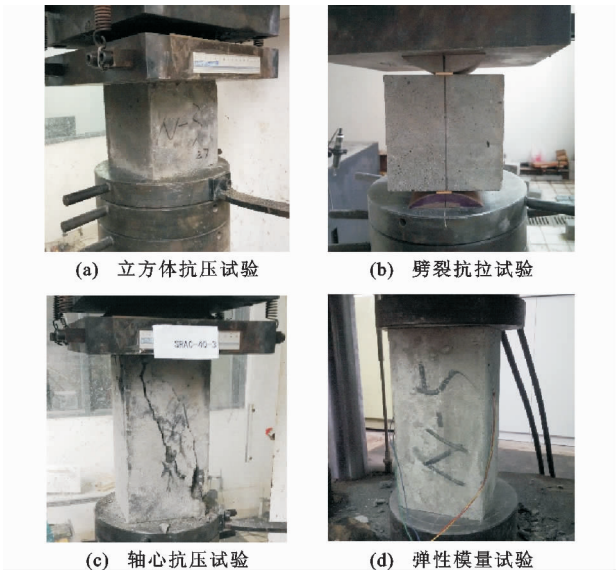


图 1 混凝土基本力学性能试验

Fig. 1 Basic Mechanical Property Tests of Concrete

2 试验结果与讨论

2.1 工作性能

所有海水海砂再生新拌混凝土均能正常浇筑和成型,且具有良好的黏聚性。各混凝土的坍落度如

图 2 所示。由图 2(a)可知,C40 和 C50 海水海砂再生混凝土能达到坍落度(220±20) mm 的范围,利用海水、海砂和再生粗骨料能配制满足坍落度设计要求且工作性能良好的混凝土。

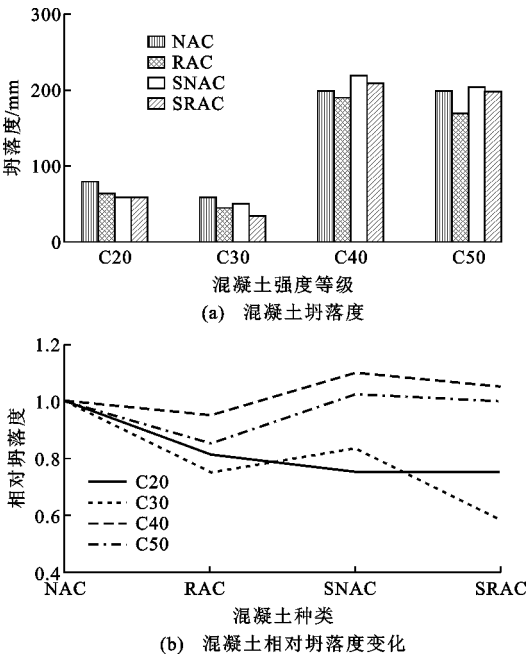


图 2 各混凝土坍落度比较

Fig. 2 Comparisons of Slumps of Concretes

由图 2(b)可知:再生混凝土的的坍落度比普通混凝土降低 15%~25%,这是由于再生粗骨料的表面经常附着硬化砂浆等碎屑颗粒,往往不及天然粗骨料表面光滑,从而导致流动性下降;海水海砂再生混凝土的坍落度比普通混凝土降低 10%左右,C40 和 C50 强度等级的坍落度比再生混凝土分别提高 5%和 33%,海砂中含有一定的贝壳,而片状的贝壳会在一定程度上降低混凝土的流动性,另一方面,海砂颗粒的表面比天然河砂圆滑,且粒径较小,导致包裹海砂的水泥浆体有较多残留,可提高混凝土的流动性,因此,海水海砂再生混凝土的流动性受海砂性能和再生粗骨料性能共同控制,本文试验中的海水海砂混凝土流动性与普通混凝土相近,C40 和 C50 优于普通混凝土,可见海水、海砂对混凝土流动性有利;此外,掺入海水、海砂能够降低再生粗骨料对混凝土流动性的不利影响,对混凝土工作性能起到提升作用,再生粗骨料对于海水海砂再生混凝土工作性能的影响程度大于海水、海砂。

2.2 立方体抗压强度

海水海砂再生混凝土的破坏形态呈现为正倒相连的四角锥,与普通混凝土类似,压力机的垫板通过接触面上的摩擦力来约束混凝土试块上下面的横向

变形,形成“套箍作用”,导致试块中部先出现裂缝且裂缝向内发展较多。

混凝土立方体抗压强度的试验结果见图3。由图3可知,海水海砂再生混凝土7 d立方体抗压强度较普通混凝土提高13%~52%。随着养护龄期延长,海水海砂再生混凝土立方体抗压强度增加并趋于稳定,但与普通混凝土相比28 d抗压强度降低约5%,90 d抗压强度降低约15%,180 d抗压强度降低18%~29%。海水海砂混凝土早期强度的快速增长是由于海水、海砂中含有NaCl和 $K_2SO_4$ 等盐类物质,它们能够加速水泥中硅酸三钙等物质在水中的溶解,从而加速混凝土水化过程。对于其长期强度的降低,研究表明:海水、海砂中的 $Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 等离子逐步扩散到混凝土内部,形成钙矾石、F盐以及其他渗透性的膨胀类软物质,从而使得混凝土内部水化机理改变,这些新形成物质的渗透会使混凝土内部微小裂缝发展,最终导致混凝土长期强度的降低。

图3中再生混凝土比普通混凝土强度普遍降低10%~25%,这是由于再生粗骨料孔隙率较大,表面残留水泥砂浆且来源复杂,从而降低了混凝土抗压强度。海水、海砂与再生粗骨料的组合使用能够降低再生粗骨料强度不足的不利影响,海水海砂再生混凝土的强度普遍比再生混凝土提升10%~20%。海水、海砂中的盐类物质能有效改善再生粗骨料内部尤其是界面过渡区的孔隙结构,通过加强再生粗骨料密实度来达到强化效果,所以海水、海砂中盐类物质对于再生粗骨料起到了改良性能的作用。

图4为混凝土抗压强度随龄期的变化曲线,海水海砂再生混凝土抗压强度随龄期发展规律与其他种类混凝土基本相同,其抗压强度发展较慢,但高于海水海砂混凝土。这是由于再生粗骨料在拌合过程中吸收的多余水分会随着水泥水化的进行释放出来,使得混凝土在较长时间内保持湿度,形成“内养护”作用,从而能促进混凝土抗压强度的发展。再生粗骨料与海水、海砂的组合使用能提高海水海砂再生混凝土的强度发展速度。

### 2.3 轴心抗压强度

混凝土轴心抗压强度试验结果如图5所示。由图5可知,再生混凝土的轴心抗压强度为同强度等级普通混凝土的74%~89%。与普通混凝土相比,C20~C40海水海砂再生混凝土轴心抗压强度降低5%~23%,但C50海水海砂混凝土的轴心抗压强度提高约7%。与再生混凝土相比,海水海砂再生

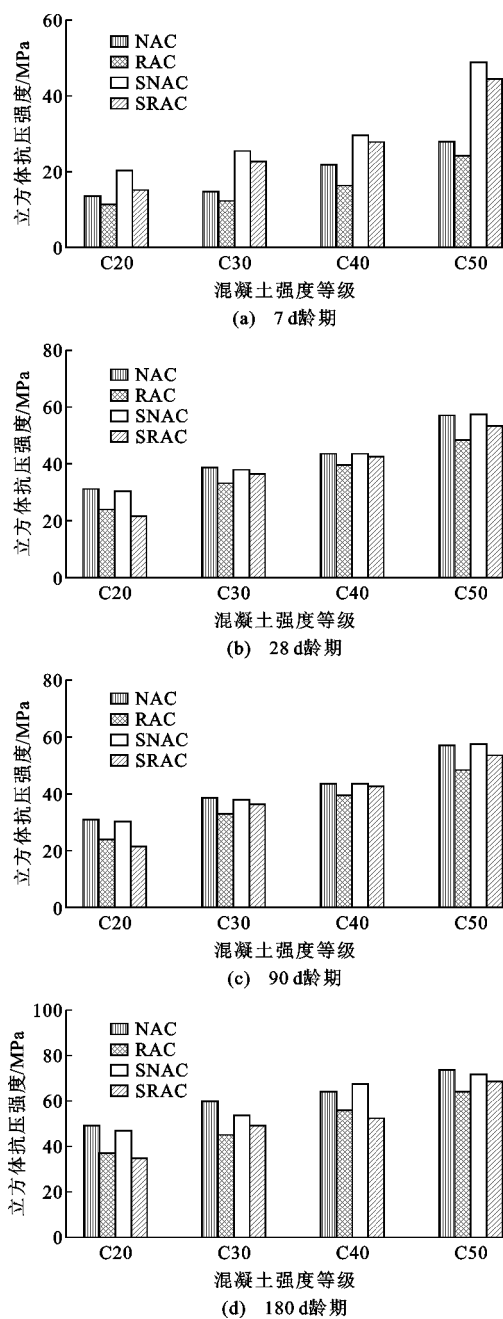


图3 混凝土立方体抗压强度

Fig. 3 Cube Compressive Strength of Concrete

混凝土轴心抗压强度提高4%~25%,同时随着混凝土的强度等级提高,轴心抗压强度也随之提高。可见,海水、海砂与再生粗骨料的组合使用能够降低再生粗骨料对强度的不利影响。一方面海水、海砂中 $Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 等离子起到了早强剂的作用,能提升混凝土早期强度,另一方面海水、海砂中盐类物质能有效改善再生粗骨料内部的孔隙结构。对于轴心抗压强度,再生粗骨料的影响大于海水、海砂。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)及ACI 318-02规范中,混凝土的轴心抗压强度 $f_c$ 与

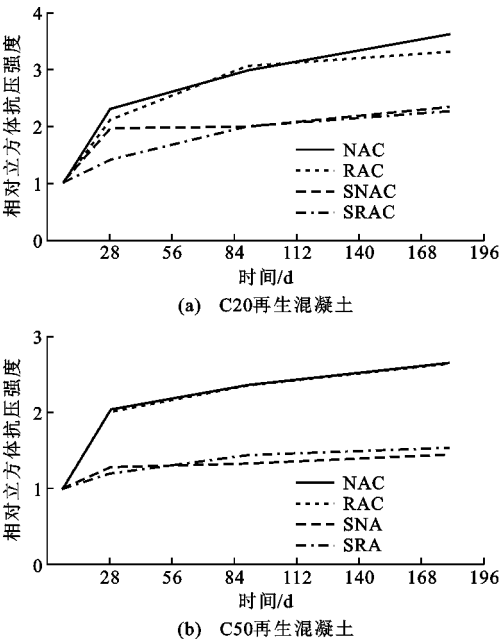


图 4 混凝土立方体抗压强度随龄期变化曲线

Fig. 4 Variation Curves of Cube Compressive Strength of Concrete with Age

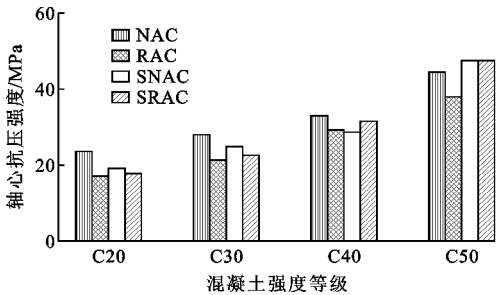


图 5 混凝土轴心抗压强度

Fig. 5 Axial Compressive Strength of Concrete

立方体抗压强度  $f_{cu}$  的比值为常数,见表 2。由表 2 可知,普通混凝土的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值为 0.73~0.78,与规范 GB 50010—2010 中计算值的相对误差最大为 5.4%,基本符合规范 GB 50010—2010 的规律。海水海砂再生混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值为 0.62~0.89,与规范 GB 50010—2010 中计算值相比偏差较大,相对误差范围为-18%~20%。对海水海砂再生混凝土的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值使用线性关系进行拟合(图 6),拟合度较高。因此,海水海砂再生混凝土有如下关系

$$f_c = 0.788\ 6f_{cu} \tag{1}$$

2.4 劈裂抗拉强度

劈裂试验中试块均为脆性破坏,且破裂线居中;观察试块破坏面,粗骨料破坏以及沿粗骨料砂浆界面破坏均有发生。图7为混凝土的劈裂抗拉强度。

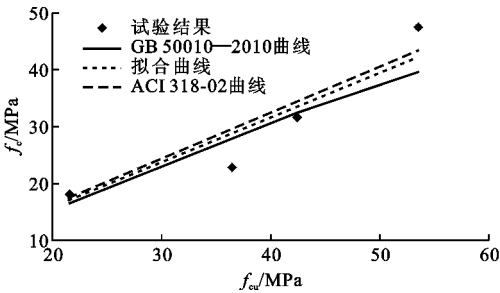


图 6 SRAC 的  $f_c$ ,  $f_{cu}$  关系

Fig. 6 Relationship Between  $f_c$  and  $f_{cu}$  of SRAC

表 2 混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度关系

Tab. 2 Relationship Between Axial and Cube Compressive Strength of Concrete

Compressive Strength of Concrete				
混凝土强度等级	C20	C30	C40	C50
NAC 的 $f_c/f_{cu}$	0.76	0.73	0.76	0.78
RAC 的 $f_c/f_{cu}$	0.72	0.65	0.75	0.78
SNAC 的 $f_c/f_{cu}$	0.64	0.66	0.66	0.83
SRAC 的 $f_c/f_{cu}$	0.83	0.62	0.74	0.89
规范 GB 50010—2010 计算值	0.76	0.76	0.76	0.74
ACI 318-02 规范计算值	0.79	0.79	0.79	0.79

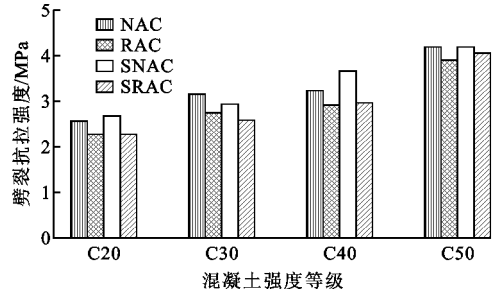


图 7 混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 7 Splitting Tensile Strength of Concrete

由图 7 可知,海水海砂再生混凝土的劈裂抗拉强度略低于普通混凝土,与同等级普通混凝土相比,降低幅度为 3%~17%,且随着强度等级的增加,幅度逐渐降低。海水海砂与再生粗骨料的组合使用能够减少再生粗骨料强度不足的影响,由于海水、海砂中  $Cl^-$  和  $SO_4^{2-}$  等离子起到了早强剂的作用,且其中盐类物质能有效提高再生粗骨料的密实度,与同等级再生混凝土相比,海水海砂再生混凝土劈裂抗拉强度提高幅度约为 5%。对于劈裂抗拉强度,再生粗骨料的影响大于海水、海砂。

2.5 弹性模量

混凝土的弹性模量见图 8。由图 8 可知,不同强度等级海水海砂再生混凝土的静力弹性模量介于 28.0~37.7 GPa 之间,且随着混凝土强度等级的增加,静力弹性模量随之提高,但并未随强度提高而同比例增长。海水海砂再生混凝土静力弹性模量比普

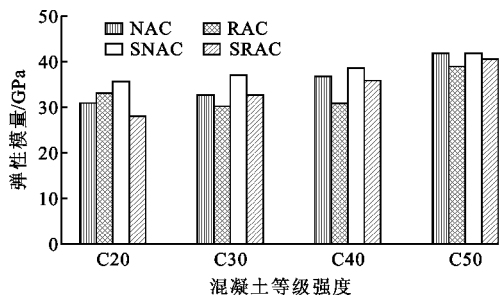


图 8 混凝土弹性模量

Fig. 8 Elastic Modulus of Concrete

通混凝土降低 2%~14%，与再生混凝土相比提高 8%~16%。一方面，由于再生粗骨料表面附着水泥砂浆以及内部存在微裂缝，使用再生粗骨料会降低混凝土弹性模量，但海砂粒度较细且含有少量贝壳，贝壳的主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ，使海砂具有较高的密度，其掺入能降低再生粗骨料对弹性模量的不利影响。另一方面，海水、海砂中的盐类物质对再生粗骨料起到改良性能的作用，能减少再生粗骨料内部微裂缝的数量，提高界面过渡区的性能，从而提高混凝土的弹性模量。

对于普通混凝土的弹性模量  $E_c$ ，在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 和 ACI 318-02 中分别用式(2)、(3)由立方体抗压强度计算，肖建庄<sup>[13]</sup>提出用式(4)来描述再生混凝土立方体抗压强度与弹性模量之间的换算关系。

$$E_c = \frac{1}{2.2 + 34.7/f_{cu}} \times 10^5 \quad (2)$$

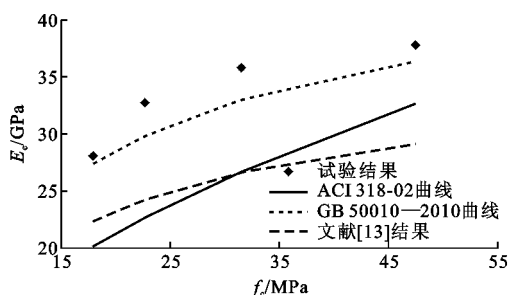
$$E_c = 4\,127 f_{cu}^{0.5} \quad (3)$$

$$E_c = \frac{1}{2.8 + 40.1/f_{cu}} \times 10^5 \quad (4)$$

由于并未测量同等条件下混凝土立方体抗压强度，而测定了同等条件下的轴心抗压强度和弹性模量，所以结合式(1)将式(2)~(4)中立方体抗压强度换算成轴心抗压强度，并与试验数据进行对比分析，验证海水海砂再生混凝土弹性模量  $E_c$  与轴心抗压强度  $f_c$  之间的关系，结果如图 9 所示，可见公式(2)~(4)的关系模型偏于保守，与试验数据拟合程度较差。

对于海水海砂混凝土的弹性模量与轴心抗压强度关系，结合式(1)，基于 GB 50010—2010 和肖建庄<sup>[13]</sup>建议的公式，提出修正参数  $a$  和  $b$ ，表示为式(5)；基于 ACI 318-02 的公式，提出修正参数  $c$  和  $d$ ，表示为式(6)。

$$E_c = \frac{1}{a + b/f_c} \times 10^5 \quad (5)$$

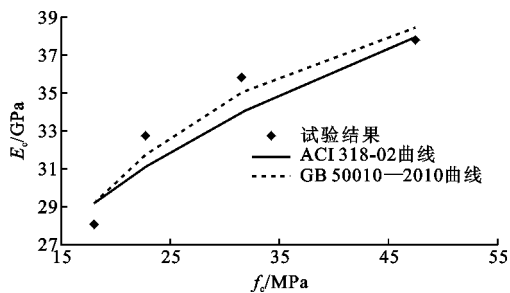
图 9  $E_c$  与  $f_c$  关系Fig. 9 Relationship Between  $E_c$  and  $f_c$ 

$$E_c = c f_c^d \quad (6)$$

对数据进行拟合，结果如图 10 所示，其中  $a = 2.1, b = 24.0, c = 13\,358.2, d = 0.27$ ，因此，修正后的弹性模量与轴心抗压强度关系可分别表示为式(7)、(8)，此时式(7)、(8)与试验数据拟合程度较好，判定系数  $R^2$  均大于 0.9。

$$E_c = \frac{1}{2.1 + 24.0/f_c} \times 10^5 \quad (7)$$

$$E_c = 13\,358.2 f_c^{0.27} \quad (8)$$

图 10 SRAC 的  $f_c$  与  $E_c$  关系Fig. 10 Relationship Between  $E_c$  and  $f_c$  of SRAC

### 3 结 语

(1) 利用海水、原状海砂和再生粗骨料能配制坍落度达到  $(220 \pm 20)$  mm 范围且工作性能良好的混凝土，C40 和 C50 海水海砂再生混凝土坍落度比一般再生混凝土分别提高 5% 和 33%。

(2) 海水、原状海砂和再生粗骨料可同时运用于配制 C20~C50 之间不同强度等级的混凝土。海水海砂再生混凝土的立方体压强度、轴心抗压强度和劈裂抗拉强度随着养护龄期延长而增加，且长期强度趋于稳定；与普通混凝土相比，7 d 抗压强度提高 13%~52%，180 d 抗压强度降低 18%~29%。

(3) 海水海砂再生混凝土的静力弹性模量比普通混凝土略有降低，降低幅度为 2%~14%。

(4) 再生粗骨料对混凝土力学性能、工作性能的影响均大于海水、海砂。

## 参考文献:

## References:

- [1] XIAO J Z, QIANG C B, NANNI A, et al. Use of Sea-sand and Seawater in Concrete Construction; Current Status and Future Opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1101-1111.
- [2] CAGATAY I H. Experimental Evaluation of Buildings Damaged in Recent Earthquakes in Turkey[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(3): 440-452.
- [3] LIMEIRA J, ETXEBERRIA M, AGULLO L, et al. Mechanical and Durability Properties of Concrete Made with Dredged Marine Sand[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11): 4165-4174.
- [4] YANG E I, KIM M Y, PARK H G, et al. Effect of Partial Replacement of Sand with Dry Oyster Shell on the Long-term Performance of Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 758-765.
- [5] 肖建庄, 卢福海, 孙振平. 淡化海砂高性能混凝土氯离子渗透性研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 4-6, 14.  
XIAO Jian-zhuang, LU Fu-hai, SUN Zhen-ping. Study on Chloride Ion Permeability of High Performance Concrete with Desalted Sea Sand[J]. Industrial Construction, 2004, 34(5): 4-6, 14.
- [6] 刘伟, 谢友均, 董必钦, 等. 海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 15-22.  
LIU Wei, XIE You-jun, DONG Bi-qin, et al. Study on Characteristics of Dredged Marine Sand and the Mechanical Properties of Concrete Made with Dredged Marine Sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1): 15-22.
- [7] GIRISH C G, TENSING D, PRIYA K L. Dredged Offshore Sand as a Replacement for Fine Aggregate in Concrete[J]. International Journal of Engineering Science & Emerging Technologies, 2015, 8(3): 88-95.
- [8] CAGATAY I H. Experimental Evaluation of Buildings Damaged in Recent Earthquakes in Turkey[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(3): 440-452.
- [9] LIMEIR J, AGULLO L, ETXEBERRIA M. Dredged Marine Sand as Construction Material[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 16(8): 906-918.
- [10] YIN H G, LI Y, LV H L, et al. Durability of Sea-sand Containing Concrete; Effects of Chloride Ion Penetration[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(1): 123-127.
- [11] YAMATO T, EMOTO Y, SOEDA M. Freezing and Thawing Resistance of Concrete Containing Chloride[J]. ACI Special Publication, 1987, 100: 901-918.
- [12] NAGATA T, OTSUKI N, NISHIDA T, et al. Experimental Study on Carbonation Phenomena and Corrosion Behavior of Steel Bar in Concrete Mixed with Seawater[J]. Cement Science & Concrete Technology, 2013, 67(1): 495-500.
- [13] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [14] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 92-98.  
XIAO Jian-zhuang, YANG Jie, HUANG Yi-jie, et al. Experimental Study on Recycled Concrete Confined by Steel Tube Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92-98.
- [15] LI Y, TAO J L, LEI T, et al. Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Concrete[J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 75-78.
- [16] CAI H Y, ZHANG M, DANG L B. Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete with Different Replacement Ratios[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 1277-1280.
- [17] CAI H Y, FU L B, DANG L B. Experimental Study on Strength of Recycled Concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 357-360: 1282-1285.
- [18] ETXEBERRIA M, GONZALEZ-COROMINAS A, PARDO P. Influence of Seawater and Blast Furnace Cement Employment on Recycled Aggregate Concretes' Properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 496-505.
- [19] SELICATO F, MORO M, BERTOLINI L, et al. Towards Sustainability of Concrete Without Chloride Limits[J]. ACI Special Publication, 2015, 305: 1-10.