

碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土力学性能研究

许玮滢¹, 杨树桐^{1,2}, 孙 赫¹, 徐铖基¹

(1. 中国海洋大学工程学院 土木工程系, 山东 青岛 266100; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266100)

摘要:以矿粉为原材料,通过碱激发的方式制备胶凝材料,拌以海水和珊瑚骨料制备碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土.首先通过碱激发矿粉海水珊瑚砂浆试验确定了合理的水胶比.进而通过改变珊瑚骨料相对于普通骨料的替代量,发现碱激发矿粉混凝土强度随普通骨料替代量的增加而不断降低.基于此,提出了提高混凝土的砂率、增大浆体对骨料的包裹作用,以提高碱激发全珊瑚骨料混凝土的强度.本文确定砂率为 60%,提出了碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土的合理配合比,并进行了基本力学性能试验.结果表明,由于海水与珊瑚骨料的早强作用,该新型混凝土 7 d 的抗压强度与抗拉强度均达到 28 d 的 70%以上.且轴心抗压强度与立方体抗压强度的比明显高于普通混凝土.

关键词:碱激发矿粉,珊瑚骨料,海水,砂率,混凝土

中图分类号: TU501

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0243-06

Study on the mechanical properties of seawater coral alkali-activated slag concrete

XU Weiying¹, YANG Shutong^{1,2}, SUN He¹, XU Chengji¹

(1. Department of Civil Engineering in College of Engineering in Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction Safety in Shandong Blue Economic Zone,
Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266100, China)

Abstract: Alkali-activated slag was used as cementing materials to produce seawater coral aggregate concrete in the present study. Proper water-to-binding materials ratio was first determined by test of seawater coral alkali-activated slag mortar. Then the strength of alkali-activated slag concrete is reduced as the replacement level of crushed stones by coral aggregates increases. Thus, it is necessary to improve the coral sand ratio (SP) and enveloping effect on the aggregates to increase the strength of seawater coral alkali-activated slag concrete (SCASC). The rational mix proportion of SCASC was then determined by setting the SP as 60% and the test on basic mechanical properties of SCASC was carried out. Results show that both the compressive strength and tensile strength at 7-day are more than 70% of those at 28-day. Moreover, the ratio of the uniaxial compressive strength to the cubic compressive strength is significantly larger than that in ordinary concrete.

Key words: Alkali-activated slag, coral aggregate, seawater, sand ratio, concrete

近年来,我国愈加重视海岛资源的开发与保护.在开发时需要建造大量配套的建筑工程.若从内陆运输骨料及海岛上稀缺的淡水资源,不但会加大工程成本,还易因为运输过程中的突发状况延误工期.而国内目前所惯用的建筑材料—硅酸盐混凝土在生产过程中不仅会产生大量的粉尘、温室气体,有毒气体等,还会释放出许多热能,并消耗掉大量的矿物质.同时,煅烧水泥需要消耗大量的煤炭,对环境具有一定的破坏.2013年,我国共生产水泥 24.2 亿 t, 占全球总量近 60%, 所造

成的污染与能源浪费难以估量^[1].而水泥的原材料—石灰石是一种不可再生资源,据目前的开采量估计,我国的石灰石资源大约有 450 亿吨,而可开采供以利用的仅 250 亿 t^[1],长此以往的大量使用将导致未来石灰石材料的用无可用.

目前,冶金工业产生的废弃物矿渣经磨细后通过碱激发剂进行激发可以制备强度达到 60 MPa 的混凝土^[2].同时,我国南海海域存在丰富的珊瑚岛礁资源,这是一种多孔,密度较低,碳酸钙含量达 95%的材料,其吸水率更高、表面粗糙,在

收稿日期: 2018-10-01

修改稿日期: 2019-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778591); 山东省研究生教育创新计划项目(HDJG17006)

第一作者: 许玮滢(1994—),女,硕士生,主要从事碱激发混凝土力学性能研究.

通信作者: 杨树桐(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事混凝土断裂力学、混凝土加固与锚固的理论与试验研究. E-mail: shutongyang2013@163.com

混凝土配制中通过耗费更高的砂浆包裹以获取良好的施工性能^[3]，目前研究表明^[4]：珊瑚混凝土的力学性能较为稳定，适合高温高湿的海洋环境。Li等^[5]在研究碱激发矿渣水泥净浆、砂浆和混凝土耐高温和力学性能时，将淡水换为海水。研究证明了将淡水换成海水所制备的碱激发矿粉混凝土，其强度及耐久性会更高。

如若能以矿粉为胶凝材料，以珊瑚为骨料，拌以海水、硅酸钠及氢氧化钠制备碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土，并将其应用于海岛建设中，不仅能够减少硅酸盐水泥的使用、减少碳排放、解决矿渣大量堆积、污染环境的弊端，还可以解决海岛上传统建筑材料稀缺的问题。

本文将矿粉与珊瑚骨料结合，在制备碱激发海水珊瑚砂浆的基础上，通过改变珊瑚骨料与普通骨料的比例，以及砂率和碱掺量，确定出此新型混凝土的合理配合比，并研究其基本力学性能。

1 试验材料

(1)珊瑚骨料：本试验采用的珊瑚粗骨料为西沙岛礁珊瑚，其形态见图 1，其基本指标如表 1 所示。所用细骨料为西沙岛礁珊瑚砂，其形态如图 2 所示，其基本指标如表 2 所示，图 3 为放大 500 倍后的珊瑚礁石微观形态。



(a) 0~5 mm 粒径



(b) 5~10 mm 粒径



(c) 10~20 mm 粒径

图 1 试验用珊瑚礁石

Fig. 1 Coral aggregates for test

表 1 珊瑚礁石质量检测与评价

Tab. 1 Detection and assessment on the quality of coral aggregates

检测项目	堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	表观密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	空隙率/%	吸水率/%	筒压强度/MPa
质量评定	918	1 899	51.7	19.4	2.01
	符合国家标准	—	—	—	优于国家标准

注：“—”表示该检测项目没有明确的国家标准。

表 2 珊瑚砂质量检测与评价

Tab. 2 Detection and assessment on the quality of coral sand

检测项目	松散堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	紧密堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	表观密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	空隙率/%	含水率/%	细度模数
检测结果	1 236	1 415	2 517	50.9	11.00	1.63
质量评定	略高于	—	—	—	—	细砂

注：“—”表示该检测项目没有明确的国家标准。



图 2 试验用珊瑚砂

Fig. 2 Coral sand for test

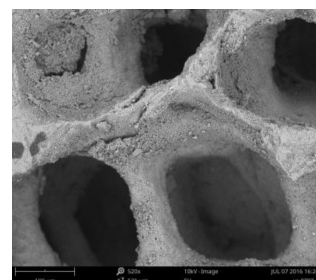


图 3 珊瑚礁石微观形态(放大 500 倍)

Fig. 3 SEM image of coral aggregate (Mag=500)

由于珊瑚的含水率较高，因此试验前应提前测量其含水率。其中珊瑚粗骨料在使用前 24 h 浸泡于海水中预湿，其含水率为将珊瑚浸泡于海水中 23 h 后，取出晾置 1h 后烘干测量所得，经测试，珊瑚粗骨料含水率为 11.9%。在设计试验配比时，应将珊瑚骨料所含水分考虑进拌合海水的掺量中。其中，净水胶比由净用水量计算得出，总水胶比在净水胶比的基础上加上珊瑚骨料及水玻璃中所含水分计算得出。

(2)普通骨料：本研究所用普通粗骨料的为 5~20 mm 连续级配的花岗岩碎石。

(3)矿粉：采用青岛建筑材料公司生产的 S95 级矿粉，经鉴定，矿粉的比表面积 350 m²/kg，矿粉的主要氧化物含量见表 3。

表 3 矿粉主要氧化物含量

Tab. 3 Main chemical compositions of the GGBFS/%

氧化物	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
含量/%	38.3	30.29	16.04	8.26	2.75	2.22	0.63

(4)工业水玻璃(Na₂O·nSiO₂)：蚌埠市精诚化工有限责任公司生产的钠水玻璃，水玻璃模数为 3.3，波美度 40。水玻璃的主要技术指标见表 4。

表 4 水玻璃的主要技术指标

Tab. 4 Main parameters of sodium silicate

化学成分/%			模数	波美度	透明度
Na ₂ O	SiO ₂	Fe			
8.3	26.5	0.015	3.3	40	82

(5)氢氧化钠(NaOH)：为纯度 99.5%的片状氢

氧化钠，生产商为青岛世纪星化学试剂有限公司。

(6)拌合海水：参考南海海水配制的人工海水，其成分及含量如表 5 所示

表 5 人工拌合海水的配比

Tab. 5 Chemical compositions of artificial seawater(g/L)

NaCl	MgCl	Na ₂ SO	CaCl ₂	KCL	NaHCO ₃
22.16	5.265	3.861	1.082	0.745	0.207

2 碱激发矿粉海水珊瑚骨料砂浆力学性能研究

本节主要针对碱激发矿粉海水珊瑚砂浆开展研究工作，旨在确定合理的碱掺量和水胶比。史才军^[2]提出，当碱激发剂模数介于 1.0~1.5 时，能起到最好的激发效果。而喻骁^[6]曾发现，当水玻璃的模数大于 1.6 时，混凝土的凝结速度极快不利于施工。为此，本试验将碱激发剂模数定为 1.3，碱激发矿粉海水珊瑚砂浆的配合比及相应稠度和基本力学性能如表 6 所示。本次试验参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[7]进行。其中，水胶比为总水胶比；碱掺量为碱激发剂中固体含量与矿粉的质量比。

由表 6 可以看出，当新拌砂浆的总水胶比为 0.50 时，砂浆的稠度为 157 mm，满足工程应用的要求。同时其 7 d 抗压强度能达到 52 MPa，7 d 抗折强度能达 6.3 MPa，28 d 的抗压与抗折强度相比较于 7 d 的强度均有所增长。由此可见，本试验所确定的水胶比、碱掺量以及碱激发剂的模数是合理的；同时可为碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土的配制提供参考。

表 6 碱激发矿粉海水珊瑚砂浆的配比及相应稠度和基本力学性能

Tab. 6 Mix design, consistency and basic mechanical property of seawater coral alkali-activated slag mortar

胶砂比	碱掺量 /%	模数	水胶比	稠度 /mm	7 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	7 d 抗折强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa
0.9	13%	1.3	0.50	157	52.0	61.6	6.3	7.9

3 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土力学性能研究

3.1 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土配合比的确定

参照富浆混凝土设计原理，将混凝土的胶砂比定为 0.9，砂率初定为 43.8%。根据碱激发矿粉海水珊瑚砂浆的试验结果，将净水胶比控制为 0.113。细骨料全部采用珊瑚砂。粗骨料采用珊瑚骨料等质量替代普通骨料的方式，替代率分别为

50%，70%和 100%。因而，共设计了 3 组混凝土，具体配合比及 7 d 和 28 d 的立方体抗压强度如表 7 所示。

由表 7 可以看出，当砂率在 43.8%左右，随着珊瑚礁石替代率的增加，碱激发矿粉海水混凝土的强度不断降低。当珊瑚骨料替代率达到 100%时，28 d 混凝土强度仅 14.5 MPa。这说明珊瑚骨料的加入会明显降低混凝土的强度。因此，若要采用全珊瑚骨料配制碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土，并达到结构混凝土使用的强度，需要进一步

提高配合比中的砂率，以增大胶砂材料对珊瑚礁石的包裹．表 8 为不同砂率对混凝土抗压强度的影响．

表 7 珊瑚骨料替代率对新拌砂浆抗压强度的影响

Tab. 7 Impact of the replacement level of coral aggregates on compression strength of SCASC

序号	胶砂比	砂率/%	碱掺量/%	净水胶比	总水胶比	珊瑚骨料替代率/%	塌落度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa
1	0.9	43.8	13	0.113	0.49	50	20	21.2	32.4
2	0.9	43.8	13	0.113	0.52	70	50	27.5	36.6
3	0.9	43.8	13	0.113	0.57	100	140	1.32	14.5

由表 8 可发现，新拌碱激发矿粉海水珊瑚混凝土的抗压强度随着砂率的增加呈现上升趋势，且当砂率为 60%时，碱激发矿粉海水珊瑚混凝土 7 d 及 28 d 的抗压强度较高，本试验将碱激发矿粉海

水珊瑚骨料混凝土的砂率定为 60%．此外，为了考虑碱掺量的影响，本试验分别考虑了碱掺量为 13%，16%和 20%三种情况．三种碱掺量对混凝土 7 d 与 28 d 抗压强度的影响见表 9．

表 8 珊瑚砂砂率对新拌混凝土抗压强度的影响

Tab. 8 Impact of coral sand ratio on compression strength of SCASC

序号	胶砂比	砂率/%	碱掺量/%	碱激发剂模数	净水胶比	总水胶比	塌落度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
1	0.9	43.8	13	1.3	0.113	0.57	140	1.3	14.5
2	0.9	60	13	1.3	0.113	0.49	260	31.0	41.6
3	0.9	70	13	1.3	0.113	0.46	210	29.2	40.02

表 9 珊瑚骨料的替代率对新拌混凝土抗压强度的影响

Tab. 9 Impact of adding amount of alkali on compression strength of SCASC

序号	胶砂比	砂率(%)	碱掺量/%	碱激发剂模数	净水胶比	总水胶比	塌落度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
1	0.9	60	13	1.3	0.113	0.49	140	31.0	42.2
2	0.9	60	16	1.3	0.077	0.49	260	30.7	44.27
3	0.9	60	20	1.3	0.026	0.49	210	28.1	33

由表 9 可发现，碱掺量地提高对碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土的抗压强度无明显改善．而且当碱掺量较大时，融有氢氧化钠的拌和水中出现白色沉淀，即氢氧化钠不能较好地溶解于拌合水中，从而导致激发效果较差，因而得到的混凝土抗压强度明显降低．本试验从经济角度出发，将混凝土

的碱掺量确定为 13%．

4.2 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土基本力学性能研究

基于碱激发矿粉珊瑚砂浆的研究成果，并结合确定的砂率和碱掺量，确定碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土合理配合比如表 10 所示．

表 10 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土配合比

Tab. 10 Matching ration of seawater coral alkali-activated slag concrete

矿粉/kg·m ⁻³	珊瑚砂/kg·m ⁻³	珊瑚礁石/kg·m ⁻³	海水/kg·m ⁻³	水玻璃/kg·m ⁻³	NaOH/kg·m ⁻³	净水胶比	总水胶比
500	556	371	56.31	126.58	21	0.113	0.49

基于上述配合比，参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[8]，采用标准试件对碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土的立方体抗压强度、劈裂强度、

抗折强度、轴心抗压强度、弹性模量及泊松比大小进行试验．其 7 d 和 28 d 的结果如表 11 所示．

表 11 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土基本力学性能

Tab. 11 Basic mechanical property of seawater coral alkali-activated slag concrete

龄期 / d	抗压强度 /MPa	劈裂强度 /MPa	抗折强度/MPa	轴压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
7	31.05	2.66	5.59	32.80	25.59	0.256
28	41.60	3.00	7.33	43.98	33.45	0.3

由表 11 可以看出, 碱激发矿粉海水珊瑚混凝土的 28 d 立方体抗压强度可以达到 42.2 MPa, 且 7 d 的强度均超过 28 d 强度的 80%. 7 d 和 28 d 的拉压比分别为 0.086 和 0.07, 而普通混凝土的拉压比为 0.05~0.1, 该混凝土的拉压比介于其中. 此外, 碱激发矿粉海水珊瑚混凝土的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比明显高于普通混凝土, 甚至大于 1. 实际上, 当混凝土立方体试块受压时, 由于混凝土受压面与试验机承压板之间存在摩擦, 从而产生较强的“环箍效应”, 使得试件整个受压高度范围内处于三轴受压状态; 而棱柱体轴心受压时, 远离加载端位置试件所受的“环箍效应”不明显, 使得试件处于单轴受压状态. 因此, 测得的混凝土轴心抗压强度低于立方体抗压强度. 但二者的比值随接触面摩擦系数的降低而提高^[9]. 刘巽伯等^[10]通过对轻骨料混凝土的研究发现: 由于混凝土试模的“墙壁效应”导致紧贴试模的混凝土面只允许砂浆存在, 而粗骨料后撤, 故试件受压端面几乎为砂浆成分; 相同强度等级的轻骨料混凝土和普通混凝土, 轻骨料混凝土砂浆成分较高, 故其受压端面的砂浆成分也越高, 从而导致承压板与轻骨料混凝土受压面的摩擦系数较低, 使得轻骨料混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值较大, 甚至出现比值大于 1 的情况. 而本文配制的碱激发海水珊瑚骨料混凝土, 胶凝材料用量较大, 明显高于粗骨料用量. 因此, 与轻骨料混凝土类似, 其与试验机承压板的摩擦系数低于普通混凝土, 导致轴心抗压强度与立方体抗压强度数值接近.

本次试验所制备的碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土的立方体受压破坏形态如图 4 所示, 轴心受压破坏形态如图 5 所示. 通过图 4 与图 5 可发现, SCASC 的轴心受压破坏形态与普通混凝土的相似, 均为受压后斜裂缝失稳扩展破坏, 无明显区别. 其劈裂破坏形态如图 6 所示, 抗折破坏形态如图 7 所示. 通过观察其破坏面可发现, SCASC 破坏过程中并未出现普通混凝土中骨料与浆体脱粘的现象, 而是珊瑚粗骨料全部断裂, 这与珊瑚粗骨料本身

形态细长, 且强度较低有关. 同时, 珊瑚骨料相对于普通石子, 孔隙大、表面粗糙, 使得浆体对珊

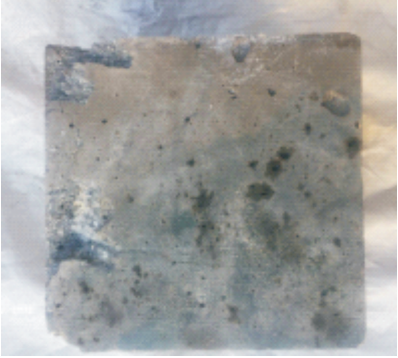


图 4 混凝土立方体抗压破坏情况
Fig. 4 Failure mode of SCASC after cube compressive strength test



图 5 混凝土轴心抗压破坏情况
Fig. 5 Failure mode of SCASC after uniaxial compressive strength test

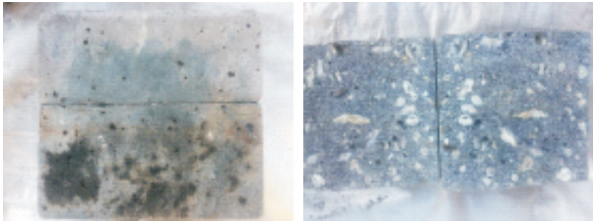


图 6 混凝土立方体劈裂破坏情况
Fig. 6 Failure mode of SCASC after splitting test

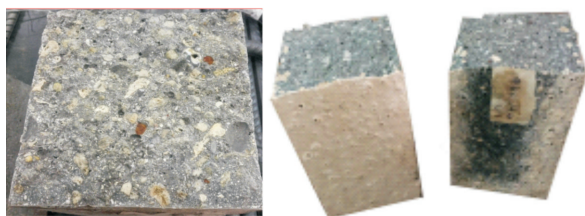


图7 混凝土试件抗折破坏情况

Fig. 7 Failure mode of SCASC after bending test

珊瑚粗骨料的包裹更为紧密严实,避免了混凝土因为骨料与浆体脱粘而产生的破坏。但这也表明,珊瑚骨料的抗折抗拉性能较差,易成为混凝土的薄弱环节。

4 结论

以矿粉为原材料,通过碱激发的方式制备胶凝材料,拌以海水和珊瑚骨料制备碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土。分别从浆体和骨料的强度入手,确定了该新型混凝土的合理配合比,并进行了基本力学性能试验。得出结论如下。

(1)当总水胶比为0.5、胶砂比为0.9、碱掺量为13%时,得到的碱激发矿粉海水珊瑚砂浆28d的抗压强度可以达到60 MPa以上;

(2)砂率一定的条件下,随珊瑚骨料对普通骨料替代率的增加,得到的混凝土抗压强度不断降低;随碱掺量的增加,混凝土强度变化不明显。进而在砂率为60%、碱掺量为13%的基础上,确定了碱激发矿粉海水全珊瑚骨料混凝土合理配合比。

(3)该新型混凝土7d的强度均超过28d强度的70%。此外,由于该混凝土胶凝材料及珊瑚砂用量较大,导致其砂浆成分高于普通混凝土。因而,该混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比明显高于普通混凝土,甚至大于1。

参考文献 References

- [1] 张人为. 用循环经济理念大力推广水泥窑纯低温余热发电[J]. 中国水泥, 2006(6): 8-11.
ZHANG R W. Promote the pure low temperature waste heat power generation of cement kiln with the concept of circular economy[J]. China Cement, 2006, (6): 8-11.
- [2] 史才军, 巴维尔·克利文科, 黛拉·罗伊. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
SHI C J, KRIVENKO P V, Della Roy, Alkali-activated

cements and concretes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

- [3] 靡人杰, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚骨料海水混凝土力学性能试验研究[J]. 海洋工程, 2016(34): 47-54.
MI R J, YU H F, MA H Y, et al. Study on mechanical property of coral concrete [J]. The Ocean Engineering, 2016(34): 47-54.
- [4] RICK A E. Coral concrete at bikini atoll [J]. Concrete International, 1991, 13(1): 19-24.
- [5] LI Y L, ZHAO X L, RAMAN Singh R K, et al. Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 704-724.
- [6] 喻晓, 胡爱宇. 氢氧化钠与硅酸钠对矿渣活性的激发效果浅析[J]. 浙江建筑, 2012, 29(7): 48-51.
YU Xiao, HU Aiyu. Analysis of the stimulation effect of sodium hydroxide and sodium silicate on slag activity [J]. Zhejiang Construction, 2012, 29(7): 48-51.
- [7] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [8] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [9] YANG S T, YANG C, HUANG M L, et al. Study on bond performance between FRP bars and seawater coral aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 272-288.
- [10] 刘巽伯, 杨正宏, 计亦奇. 轻骨料混凝土抗压强度浅析[C]// 中国建筑学会建筑建筑材料分会 2011 年学术交流会议论文集. 常州: 中国建筑学会建筑材料分会. 2012: 296-301.
LIU X B, YANG Z H, JI Y Q, Simple analysis on compressive strength of LWAC [C]// Proceedings of the 2011 Academic Exchange Conference of the Architectural Building Materials Branch of the National Architectural Association. Changzhou: The Architectural Society of China. 2012: 296-301.

(编辑 沈波)