

水泥稳定珊瑚礁岩混合料配合比设计及性能研究

范学勇, 徐刚, 马强

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510220)

摘要:港池疏浚过程中将产生大量的珊瑚礁岩,为降低石料开采对自然环境的影响,提高珊瑚礁岩在道路基层中的应用,该文根据泰勒 n 法进行珊瑚礁岩混合料级配设计,通过击实试验分析了压实过程对混合料级配的影响,并以破碎率 B_s 对集料破碎程度进行评价;通过测定混合料无侧限抗压强度、劈裂强度、干燥收缩、温度收缩,对水泥稳定珊瑚礁岩混合料的路用性能进行研究。结果表明:压实过程会导致集料颗粒破碎,且破碎程度与混合料粗集料含量成正比;混合料抗压强度和劈裂强度与粗颗粒含量及水泥掺量成正比关系,为满足基层材料强度要求,珊瑚礁岩混合料中粗颗粒含量不宜小于50%,且水泥掺量应不小于4%;水泥稳定珊瑚礁岩混合料前期失水率较大导致收缩变形较为明显,收缩应变随混合料中粗集料含量增加而降低;混合料温缩应变与粗集料含量成反比关系,且在温度为50~40℃时混合料的温缩变形较大,施工过程中应考虑环境温度影响。

关键词:珊瑚礁岩; 配合比; 破碎率; 强度; 干燥收缩; 温度收缩

中图分类号: U414

文献标志码: A

路面结构基层以水稳类材料为主,而部分沿海地区由于自然条件限制天然砂石材料较为匮乏,大量的材料外购使工程造价显著增加。港池疏浚及航道开挖过程中会产生大量的珊瑚礁岩,美国土木工程标准《Unified Facilities Criteria Tropical Engineering》中提出,当工程建设石料受限时,可采用珊瑚礁岩作为水泥混凝土的集料。若将疏浚过程中产生的珊瑚礁岩应用于道路工程中,既可降低工程造价又可降低石料开采导致的自然环境破坏。

珊瑚礁岩主要由钙质砂和礁灰岩组成,具有质地脆、易破碎、孔隙及生物化石含量高、压缩性大等特点^[1-2],基于珊瑚礁岩的材料特性国内外学者进行了深入研究。莫洪韵^[3]对珊瑚礁岩的化学成分、颗粒棱角性及碳酸盐含量进行了分析,通过直剪试验和三轴剪切试验对珊瑚礁岩的抗剪性进行了研究,结果表明:珊瑚礁岩中碳酸盐含量在95%以上,材料形状以块状、纺锤状为主,内孔隙约占全部孔隙的10%;直剪试验中珊瑚礁岩无明显应变软化现象,破坏应变随垂直压力的增加而增加;三轴剪切过程中,随围压增大珊瑚礁岩由剪切膨胀逐渐向剪切压缩转变;虞海珍^[4]对钙质砂在复杂应力条件下的动力学特性进行了研究,结果表明钙质岩在高固结应力比、低围压条件下会产生液化现象;高孔隙比和压缩性的特质使钙质砂在循环荷载作用下易产生不可逆的塑性应变;钙质砂的动强度

随相对密度和固结应力比的升高而增大;吴文娟^[5]对礁灰岩的单轴抗压强度进行了研究,结果表明饱和状态下礁灰岩强度可达到C10混凝土强度水平,而干燥状态下可达到C15强度水平;在单轴压缩过程中,礁灰岩前期以弹性变形为主,加载破坏后表现出较强延性;三轴压缩过程中,由于剪切和摩擦礁灰岩在围压作用下仍保持较高的残余强度;吕晨炜^[6]对水泥稳定珊瑚礁、砂的路用性能进行了研究,结果表明:水泥稳定珊瑚礁岩的路用性能发展规律与水稳碎石基本一致,材料强度随水泥剂量的提高而增大,干缩变形与温缩变形亦随水泥剂量的升高而增加。基于此,该文以某沿海道路工程项目为依托,对水泥稳定珊瑚礁岩应用于道路基层的路用性能展开研究。

1 珊瑚礁岩性能检测及混合料配合比设计

1.1 珊瑚礁岩特性分析

由于珊瑚礁岩自身的材料特性,难以通过规范中检测指标对其材料性能进行评价。因此,该文采用JTG E40—2007《公路土工试验规程》中试验方法,对原状珊瑚礁岩的化学成分和物理力学性能进行检测,结果如表1~3所示。

表 1 珊瑚礁岩化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
CaO	48.5	SO ₃	0.51
MgO	2.63	P ₂ O ₅	0.05
Al ₂ O ₃	0.04	K ₂ O	0.007 6
SiO ₂	0.27	Cl	0.031
Na ₂ O	0.34	Fe ₂ O ₃	0.025
SrO	0.61	CO ₂	46.9

表 2 珊瑚礁岩质量检测

堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	空隙率/ %	吸水率/ %	筒压强 度/MPa
1 013	1 758	47.8	16.7	2.28

表 3 珊瑚礁岩物理参数

<i>e</i> _{min}	<i>e</i> _{max}	<i>D</i> ₆₀ / mm	<i>D</i> ₃₀ / mm	<i>D</i> ₁₀ / mm	<i>C</i> _u	<i>C</i> _c	<i>G</i> _s
0.94	1.52	0.63	0.25	0.14	4.5	0.71	2.68

注:*e*_{min} 为最小孔隙比;*e*_{max} 为最大孔隙比;*D*₆₀ 为限制粒径,土中某粒径的颗粒质量占 60% 的粒径;*D*₃₀ 为土中小于该粒径的颗粒质量为 30% 的粒径;*D*₁₀ 为土中小于该粒径的颗粒质量为 10% 的粒径;*C*_u 为不均匀系数;*C*_c 为曲率系数;*G*_s 为土颗粒比重。

由化学成分分析可知:珊瑚礁岩中碳酸盐含量达

95% 以上,现有研究成果表明:海洋土中的等效碳酸盐含量达到 50% 以上时,材料的力学特性将发生明显变化。原状珊瑚礁岩不均匀系数小于 5.0,为级配不良的均匀质土。因此,需要针对珊瑚礁岩的材料特性进行合理的级配设计,才能将其应用于道路基层结构中。

1.2 混合料级配设计

鉴于珊瑚礁岩材料特性区别于常规砂石混合料,因此不能采用规范中推荐的级配范围进行级配设计。传统骨架密实型混合料通过粗粒径集料形成坚实的骨架结构以承受荷载传递,而珊瑚礁岩质地较脆,粗颗粒形成的骨架结构难以承受较大荷载;悬浮密实型混合料的强度则通过混合料的黏聚力来提供,导致混合料的收缩变形较大,不利于基层结构稳定^[7-8]。因此,该文基于最大密实度曲线理论,通过泰勒 *n* 法进行珊瑚礁岩混合料级配设计,计算方法如式(1)所示:

$$P_x=100\times\left(\frac{d}{D}\right)^n$$

(1)

式中:*d* 为 *x* 级集料粒径(mm);*D* 为混合料最大粒径(mm);*n* 为递减系数;*P_x* 为 *x* 级集料的通过百分率(%)。

研究表明:4.75 mm 粒径集料是混合料形成骨架的主要承载部分,因此,该文选取 4.75 mm 粒径作为粗细集料的分界,通过泰勒公式进行连续级配设计。*n* 值根据现有研究成果控制在 0.25~0.5^[9],初拟 40:60、50:50、60:40 共 3 种粗、细集料掺配比例,混合料级配设计结果如表 4 所示。

表 4 混合料级配设计

粗集料:细 集料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							<i>C</i> _u	<i>C</i> _c
	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6		
40:60	100	96.0	83.8	72.7	60	50.5	39.9	31.59	1.15
50:50	100	93.3	81.4	64.7	50	39.5	27.6	36.71	1.37
60:40	100	91.5	74.4	56.7	40	31.8	18.6	34.94	1.23

通过计算不均匀系数 *C_u* 和曲率系数 *C_c* 对 3 种级配进行评价,结果表明 3 种级配混合料 *C_u* 值为 31~37,*C_c* 值为 1~3,满足混合料 *C_u*>5、1<*C_c*<3 的要求,证明 3 种级配混合料均为级配良好的不均匀混合料。

1.3 混合料击实特性研究

基于珊瑚礁岩质地脆、易破碎的特点,该文通过击实试验对珊瑚礁岩压实特性进行研究。为与实际施工过程中压实状态一致,采用振动压实法对混合料进行

压实。压实成型后试件进行破碎、烘干、筛分,通过粗颗粒含量变化量与击实前粗颗粒含量的比值(*B₅*)对材料颗粒破碎程度进行评价分析^[10]。计算方法如式(2)所示:

$$B_5=\frac{\Delta P_5}{P_5}\times100\%$$

(2)

式中:Δ*P₅* 为粗颗粒含量变化量(%);*P₅* 为压实前粗颗粒含量(%)。

击实后混合料破碎率 *B₅* 计算结果如图 1 所示。

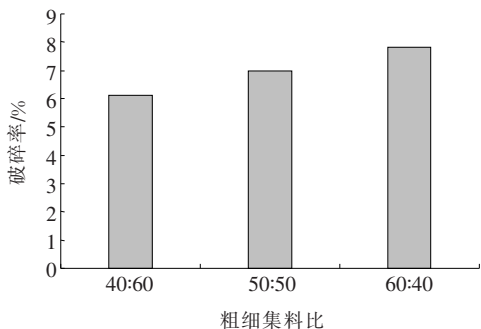


图1 混合料破碎率

由图1可知:经振动压实后3种级配混合料的粗集料均产生了一定程度的破碎现象,3种级配混合料的破碎率均值为6.97%。且随着粗集料含量的增加混合料的破碎率逐渐增大,说明压实过程导致破碎的集料以粗颗粒为主,混合料中粗颗粒含量越多集料破碎现象越明显。

1.4 混合料配合比设计

选取P.O42.5级水泥进行试验,水泥剂量设定为2%~8%,单位剂量以1%增加,根据现有研究成果,含水量选取12%~20%,单位含水量以2%增加,根据规范方法测定3种级配混合料的最佳含水率和最大干密度,结果如图2、3所示。

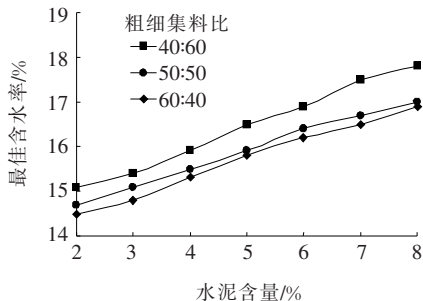


图2 混合料最佳含水率

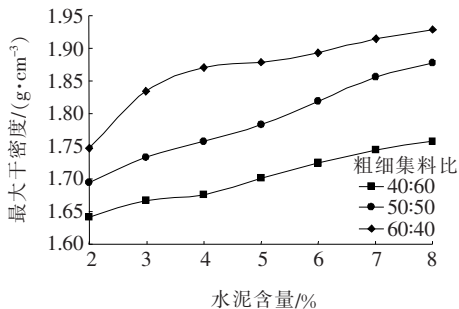


图3 混合料最大干密度

由图2、3可知:各级配水泥稳定珊瑚礁岩混合料的含水率和干密度的发展规律与常规水泥稳定砂石混合料基本一致,且最佳含水率明显高于同水泥剂量下

常规砂石混合料。与常规集料相比,由于珊瑚礁岩空隙率较大,致使混合料含水率明显升高。同一级配类型下,混合料最佳含水率和最大干密度随水泥剂量的增加而增大;同一水泥剂量水平下,最佳含水率随粗集料组分增加而降低,而最大干密度随粗集料组分增加而增大。随着混合料中细集料组分的增加,导致混合料表面积增大从而增加了混合料用水量;而随着粗集料含量的增加,在形成骨架结构的同时足量的细集料进行孔隙填充,有效地提高了混合料的密实程度。

2 水泥稳定珊瑚礁岩混合料抗压、抗拉强度分析

根据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中试验要求,通过振动成型法成型150 mm×150 mm圆柱体试件,于标准养生环境[温度(20±2)℃,湿度≥95%]下养生,养生结束浸水24 h后对试件的无侧限抗压及抗拉强度进行检测。

2.1 无侧限抗压强度

根据7 d无侧限抗压强度的代表值对水泥稳定珊瑚礁岩混合料的抗压强度进行评价,混合料抗压强度代表值计算结果见图4。

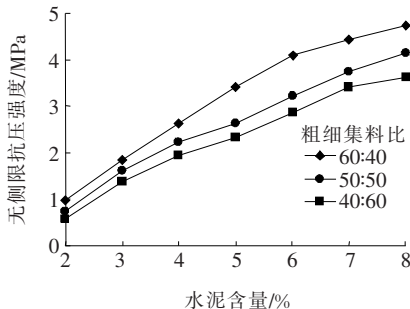


图4 混合料无侧限抗压强度

由图4可知:同等水泥剂量下,水泥稳定珊瑚礁岩混合料7 d抗压强度值略低于常规砂石混合料,其强度发展规律与常规混合料基本一致,强度随水泥剂量的增加而增大;且强度增长在前期发展速度较快,后期强度增长幅度明显降低^[11]。以粗细比为60:40混合料为例,水泥剂量为2%~3%时混合料强度增加了80%以上,当水泥剂量为7%~8%时,混合料强度涨幅为10%。同水泥剂量水平下,珊瑚礁岩混合料抗压强度与粗集料含量成正比关系,粗集料掺量为60%混合料与掺量为40%相比强度平均提高了40%。

结合前文混合料压碎特性的研究,珊瑚礁岩即使在压实过程中存在集料破碎现象,但依然可以保证一

定的抗压强度。

2.2 抗拉强度

通过劈裂试验对水泥稳定珊瑚礁岩混合料的抗拉强度进行研究,混合料劈裂强度代表值如图5所示。

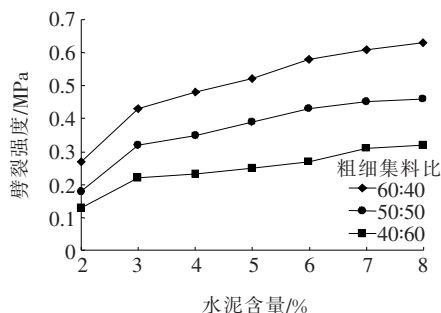


图5 混合料劈裂强度

由图5可知:水泥稳定珊瑚礁岩混合料劈裂强度发展规律与无侧限抗压强度类似,劈裂强度与水泥剂量成正比关系,且混合料在低水泥剂量范围内强度增长速度较快。混合料的劈裂强度随着粗集料掺量的增加逐渐提高,粗集料含量增加10%劈裂强度平均提高了40%左右。

根据JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》对公路基层施工强度要求,水泥稳定类材料7 d无侧限抗压强度应满足2.0~7.0 MPa。根据混合料强度试验结果,水泥稳定珊瑚礁岩混合料作为基层材料时水泥掺量应不低于4%,且混合料中粗集料含量不宜低于50%。

3 抗收缩性能

水稳类基层材料易产生收缩变形,裂缝反射至路面造成道路结构破坏。结合强度试验结果,选取粗、细集料比为50:50和60:40两种级配混合料进行水泥稳定珊瑚礁岩混合料抗收缩性能研究,根据规范方法成型100 mm×100 mm×400 mm中梁试件,标准条件养生后测定试件的干燥收缩和温度收缩。

3.1 干缩变形

水泥稳定珊瑚礁岩混合料失水率及干缩应变试验结果如图6、7所示。

由图6可知:水泥稳定珊瑚礁岩混合料失水率呈现早期发展较快、后期增长速度逐渐降低的趋势,两种级配混合料7 d失水率均值为2%,约占总失水率的30%,90 d后混合料失水率变化值明显降低。同龄期水平下,粗集料掺量为60%混合料失水率均低于掺量

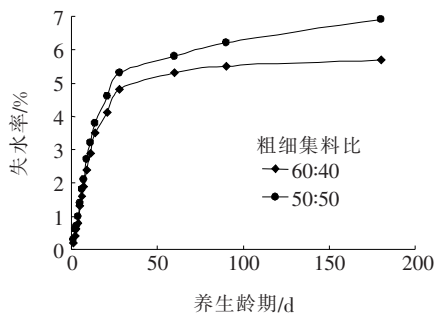


图6 混合料失水率

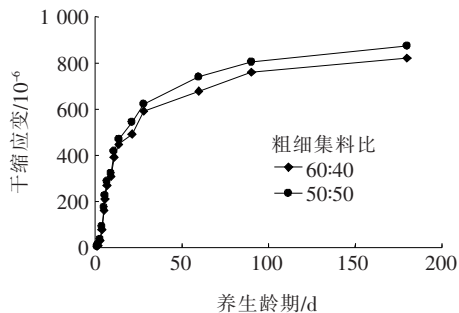


图7 混合料干缩应变

为50%混合料,混合料7 d和180 d失水率分别降低了14%和17%。

由图7可知:水泥稳定珊瑚礁岩混合料干缩应变发展规律与失水率保持一致,且干缩应变值与失水率成正比关系。前期混合料干缩应变增长速度较快,两种级配混合料7 d累计干缩应变均值为 278.53×10^{-6} ,约占总干缩应变值的34%。而随着粗集料含量的增加,混合料的干缩变形明显降低,粗集料含量增加10%混合料收缩应变全龄期内平均降低9%。混合料前期失水率较大导致内部毛细管张力升高,增大了弯液面内外压力差,使得干缩应变在前期增长速度较快;后期混合料颗粒表面吸附水含量降低使得颗粒间距离减小,增大了分子间的引力作用,使得后期混合料收缩应变继续增大^[12-13],但应变增长幅度明显降低。综上所述,珊瑚礁岩混合料施工过程中应注意前期洒水养生。

3.2 温度收缩

环境温度变化将使材料产生温度收缩变形,结合项目所在地气候特点以及规范要求,设置温度变化范围为0~70℃,单位温度变量为10℃,对水泥稳定珊瑚礁岩混合料的温缩变形特性进行研究,试验结果如图8所示。

由图8可知:试验温度区间内珊瑚礁岩混合料的温缩应变呈现先增大后减小的“凸形”发展趋势。在70~40℃内混合料温缩应变逐渐增大,50~40℃时

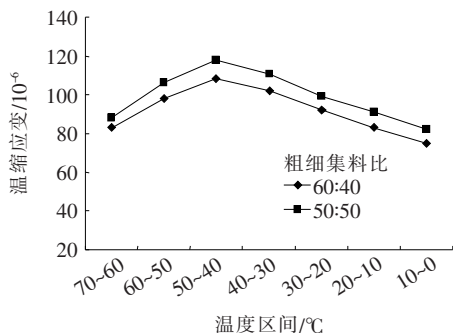


图 8 混合料温缩试验结果

温缩变形达到峰值,两种级配混合料最大温缩应变均值为 115.74×10^{-6} ,而 $40 \sim 0$ °C 混合料的温缩应变逐渐降低。混合料温缩应变与粗集料含量成反比例关系,粗集料含量增加 10% 混合料温缩应变平均降低了 8% 左右。因此,需控制水泥稳定珊瑚礁岩混合料中粗集料含量,且水泥稳定珊瑚礁岩基层材料应避免高温环境下施工,施工完成后应及时对其进行养生。

4 结论

(1) 珊瑚礁岩具有空隙率大、质地脆、易破碎的特点,在材料压实过程中会产生一定程度的破碎现象,且集料破碎率与混合料中粗集料含量成正比,但通过合理的级配与配合比设计,水泥稳定珊瑚礁岩混合料可满足基层材料强度要求。

(2) 水泥稳定珊瑚礁岩混合料无侧限抗压强度和劈裂强度值略低于常规砂石混合料,其强度发展规律与常规混合料基本一致,在施工过程中应控制粗细集料的掺配比例以及水泥掺量。水泥稳定珊瑚礁岩混合料用于基层材料时,粗集料掺量不宜低于 50% 且水泥掺量应控制在 4% 以上。

(3) 水泥稳定珊瑚礁岩混合料的干缩应变与失水率成正比关系,前期干缩应变增长速度较快而后期应变增长幅度逐渐降低,且干缩应变与混合料中粗集料含量成反比关系。

(4) 水泥稳定珊瑚礁岩混合料温度收缩在 $70 \sim 40$

°C 内呈现增长趋势,且在 $50 \sim 40$ °C 内达到峰值;随着混合料中粗集料掺量增加,其温缩应变值略有降低。因此,需控制水泥稳定珊瑚礁岩混合料中粗集料含量,且水泥稳定珊瑚礁岩基层材料应避免高温环境下施工。

参考文献:

- [1] 孟庆山,范超,曾卫星,等.南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J].岩土力学,2019,40(1):183-190.
- [2] 旷杜敏,龙志林,周益春,等.珊瑚礁岩土材料的物理力学性能研究综述[J].湘潭大学学报(自然科学版),2018,40(5):108-126.
- [3] 莫洪韵.岛礁钙质砂、岩混合料工程力学性能研究[D].南京:东南大学,2015.
- [4] 虞海珍.复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [5] 吴文娟,汪稔,朱长歧,等.珊瑚骨料混凝土动态压缩性能的试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(1):7-14.
- [6] 吕晨炜,伍浩良,石名磊.水泥固化稳定珊瑚礁岩、砂吹填材料路用性能研究[J].工程地质学报,2019,27(6):1440-1447.
- [7] 彭波,魏翻,黄祯敏.骨架密实型水泥稳定碎石级配算法研究[J].中外公路,2017,37(3):52-56.
- [8] 张栋梁,吴双全,梁鹏.基于均匀性设计的水泥稳定碎石宏观性能及微观机理[J].科学技术与工程,2019,19(28):333-340.
- [9] 梁鹏.基于均匀性设计的抗裂水泥稳定碎石性能研究[D].西安:长安大学,2018.
- [10] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B. Particle Breakage during Shearing of a Carbonate Sand [J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [11] 尚涛.水泥稳定珊瑚砂基层材料配合比设计及路用性能研究[D].西安:长安大学,2019.
- [12] 袁露.半刚性基层开裂机理及其与压实质量关系的试验研究[D].西安:长安大学,2017.
- [13] 董飞.掺废橡胶粉纤维水泥稳定碎石抗裂性能研究[D].南京:东南大学,2018.