

珊瑚砂石在南太平洋地区工程中的应用

牛东东, 杨彤彤

(中交一航局第一工程有限公司)

摘要:为实现资源高效利用、降低造价及绿色环保,采用对比分析和试验研究的方法评估了珊瑚砂石与级配碎石的物理性能,并提出优化混合料配比的方案。研究表明,单一珊瑚砂石强度低,但掺入级配碎石后可显著提升 CBR 值,满足路面基层需求,为充分利用当地材料提供了科学依据,有效降低了对传统材料的依赖和施工成本。结合工程案例和规范,进一步验证了水泥稳定珊瑚砂石在管涵回填中的适用性,拓宽了其工程应用范围。试验结果表明,该材料适用于路面基层、底基层及管涵回填。同时,通过对不同地区珊瑚砂石性能的试验研究,量化了地域特性对 CBR 值的影响,为区域性材料选择提供了数据支持,为珊瑚砂石的高效利用和工程应用提供了技术参考,有助于实现资源优化配置,降低工程成本。

关键词:南太平洋地区;珊瑚砂石;路面基层与底基层;CLSM 管涵回填料;地域特征

0 引言

众多中资施工企业逐步开拓海外市场,在南太平洋岛国建设大量的公路、机场跑道等基础设施。但大部分岛国及地区建筑材料稀缺,运输成本高昂,如果用船舶从其他地区运输天然砂石进行工程建设,势必会加大工程建设费用,增加工期,这严重制约了岛国建设的发展。为解决上述困难,可就地取材,利用海岛周边丰富的珊瑚砂石作为建筑骨料,来代替部分普通砂石用于工程建设^[1]。

珊瑚砂石分布在世界 110 个国家,大部分在热带地区,全球珊瑚礁总面积约为 28.43 万 km²,其中印度洋-太平洋地区(包括红海、印度洋、东南亚和太平洋)占 91.9%,仅东南亚就占 32.3%,太平洋(包括澳大利亚)占 40.8%,大西洋和加勒比海仅占 7.6%^[2]。太平洋盆地的地质特征是与构造有关的深海海沟活动,死珊瑚和活珊瑚都是岛礁的特征,所以珊瑚砂石在太平洋地区储量丰富,大多数太平洋岛屿国家(PIC)都可在当地购买。并且自第二次世界大战以来,太平洋地区的道路路面结构主要采用珊瑚材料(天然石灰石)^[3]。

珊瑚砂石是构成珊瑚礁的主要成分,是由热带海洋中的造礁珊瑚及其他造礁生物、附礁物、藻类等遗骸堆积建造形成的一种特殊岩土类型,分为散体粒状的珊瑚砂(粒径 0~5 mm)及珊瑚礁石(粒径>5 mm)2 类。珊瑚礁发育过程中,主要的成

岩作用过程为:生物黏结作用、生物侵蚀作用、泥晶化作用、内沉积物充填作用、非生物成因的胶结作用、机械侵蚀作用、矿物转化等^[4]。然而,由于南太平洋地区的海域多样性和岛屿分布,珊瑚砂石的分布情况可能会有所不同,需要具体考察每个地区的地质和生态特征。本文主要基于澳大利亚昆士兰州的交通和主要道路部门(Department of Transport and Main Roads)发布的技术规范 MRTS 05《Transport and main roads, unbound pavements》^[5]中对道路基层与底基层的要求,探讨单一珊瑚砂石材料及其与级配碎石混合料的适用性。其次结合所罗门蒙达机场跑道升级项目的工程实例,验证水泥稳定珊瑚砂石应用于管涵回填的可能性。最后通过各地区珊瑚砂石的物理性能对比简要说明珊瑚砂石的地域性。

1 珊瑚砂石及级配碎石适用性研究

试验所用珊瑚砂石形貌见图 1。



图 1 珊瑚砂石

依据澳大利亚土工工程测试标准 AS 1289 《Methods of testing Soils for Engineering Purposes》^[6]对珊瑚砂石及级配碎石进行筛分试验、击实试验和 CBR 测试试验。击实试验是土工工程中常用的一种试验方法,用于确定土壤的最大干密度和最佳含水量。加州承载比(CBR)试验是一种用于评估路基土强度的试验,最终影响道路路面的厚度,从而影响建筑成本^[7]。试验得出的珊瑚砂石及级配碎石物理性能结果如表 1 所示,颗粒筛分试验结果如表 2 所示。

表 1 珊瑚砂石及级配碎石物理性能

项目	现场含水率/ %	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/ %	CBR(浸泡 4 d)/%
珊瑚砂石	0.1	1.73	10.0	39
级配碎石	2.1	2.04	6.0	83

表 2 珊瑚砂石及级配碎石筛分试验结果

筛孔尺寸/mm	珊瑚砂石通过率/%	级配碎石通过率/%
53.0	100	100
37.5	100	98
26.5	100	91
19.0	100	67
13.2	92	58
9.5	82	50
6.7	67	44
4.75	57	38
2.36	39	30
1.18	28	23
0.600	20	15
0.425	18	11
0.300	16	9
0.150	13	6
0.075	11	5

珊瑚砂石棱角突出、孔隙丰富,在低应力水平下即可发生颗粒破碎。由于其属于钙质砂石,且主要成分为碳酸盐^[8],故其外观颜色呈白色。通过对珊瑚砂石和级配碎石的各项特征指标对比发现:珊瑚砂石粒径 4.75 mm 以下颗粒通过率均大于级配碎石,即珊瑚砂石中细颗粒含量多,并且珊瑚砂可压缩性强和较低的屈服强度导致珊瑚砂石整体强度低于级配碎石;珊瑚砂石最佳含水率比级配碎石大,而最大干密度较小,这是珊瑚砂石内部多呈孔洞结构,密度比级配碎石小所导致的;珊瑚砂石低抗压性和低密实度也最终使其测得的 CBR(浸泡 4 d)远远小于级配碎石,仅为级配

碎石的 47.0%。

澳大利亚昆士兰州的交通和主要道路部门 (Department of Transport and Main Roads)发布的技术规范《Transport and main roads, unbound pavements》^[5]中对道路工程不同子类型基层及底基层 CBR 最低要求见表 3。

表 3 CBR 标准要求—类型 2

特性	子类型				
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
CBR(浸泡 4 d)/%	80	60	45	35	15

由此可见级配碎石 CBR 为 83.0%,单从 CBR 的角度来说可适用于所有子类型道路基层及底基层,而珊瑚砂石 CBR 为 39.0%,仅可适用于子类型 2.4 道路底基层和子类型 2.5 道路基层,并且其 CBR 值仅超过子类型 2.4 所要求的最低 CBR 值的 11.4%,所以如果用作 2.4 型道路底基层则会存在一定的质量风险。而 2.5 型道路基层 CBR 最低值 15%又仅为珊瑚砂石 CBR 的 38.5%。据此,如果从减少质量风险的角度仅仅将珊瑚砂石用作 2.5 型道路基层,其实是一种资源的浪费,并且也达不到利用珊瑚砂石代替部分普通砂石减少工程造价的目的。

2 珊瑚砂石及碎石混合料适用性研究

为了充分利用珊瑚砂石以减少工程建设费用,创新性地开展了珊瑚砂石及碎石混合料的路面底基层和基层适用性研究,并设计了 2 组试验,分别是碎石:珊瑚砂石=3:7 和碎石:珊瑚砂石=5:5,以上均为质量比。同样依据《Methods of testing Soils for Engineering Purposes》^[6]对珊瑚砂石及级配碎石混合料进行筛分试验、击实试验及 CBR 测试试验,得出的颗粒级配曲线如图 2 所示,物理性能结果如表 4 所示。

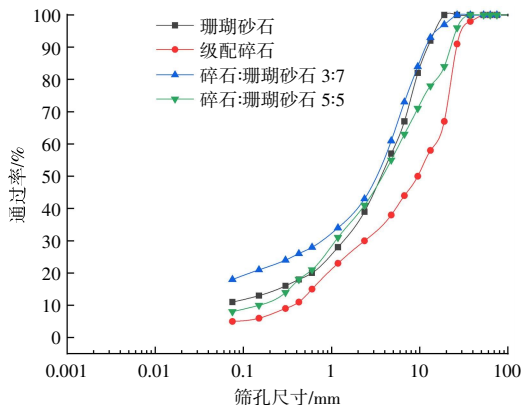


图 2 颗粒级配曲线对比图

表 4 级配碎石及珊瑚砂石混合料物理性能

碎石:珊瑚砂石 (质量比)	现场含水 率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水 率/%	CBR(浸泡 4 d)/%
3:7	0.6	1.66	19.0	65
5:5	3.1	1.96	13.0	72

通过颗粒级配曲线可以看出: 珊瑚砂石中掺入一定比例的级配碎石会使颗粒级配曲线斜率减小, 并使曲线变得平缓, 这也表明颗粒尺寸分布更加均匀。珊瑚砂石及其混合料也均表现为粗颗粒(粒径 4.75 mm 以上被视为粗颗粒)较少且粗颗粒含量依次为: 级配碎石>碎石:珊瑚砂石为 5:5>珊瑚砂石>碎石:珊瑚砂石为 3:7。然而再结合 4 种材料的最大干密度大小顺序可以发现、无论是单一材料还是混合料粗颗粒含量对最大干密度相对影响较大, 即粗颗粒含量与最大干密度存在正相关, 这一点文献[9]中也有论证。

根据珊瑚砂石及碎石混合料各项物理性能指标和《Transport and main roads, unbound pavements》^[9]中的各子类型路面基层、底基层最低要求可以发现: 在珊瑚砂石中掺入一定比例的碎石会明显改善珊瑚砂石的密实度, 增强抵抗变形的能力, 进一步提高 CBR, 使其满足除子类型 2.1 外的所有子类型的 CBR 最低要求。结合表 1、表 4 可以得出: 单一珊瑚砂石的 CBR 值与混合料 CBR 值对比, 分别提高了 66.7%(碎石:珊瑚砂石=3:7)和 84.6%(碎石:珊瑚砂石=5:5), 并且随着级配碎石掺配的比例变大, CBR 值也在逐步增大。

3 水泥稳定珊瑚砂石混合料适用性研究

国内外文献研究表明: 钙质砂是一种具有高碳酸钙含量的特殊岩土, 特殊的生物成因促成它具有多棱角、高孔隙比、多内孔隙、单颗粒强度低、颗粒易破碎等不同于陆源土的特性^[9]。所以, 在实际工程应用中通过添加石灰、水泥或化学水泥浆等化学物质来强化和稳定珊瑚砂石。当水泥与珊瑚砂通过水合作用结合时, 就会产生硅酸钙和铝酸钙水合物。这些水合物将珊瑚砂颗粒粘合在一起, 增加了材料的整体强度和刚度, 使其能够支撑更重的载荷, 而且不会发生明显的变形或沉降^[10]。

国内已有部分学者对水泥和珊瑚砂石混合料展开研究。陈飞翔等^[11]研究表明, 与河砂混凝土相比, 珊瑚砂混凝土的抗压强度偏低, 但两者抗折强度及劈裂抗拉强度相差无几; 李林^[12]研究表

明珊瑚砂混凝土比普通混凝土强度发展快, 具有早强效应, 养护前 7 d 强度就可接近 28 d 强度, 后期强度发展较缓慢; 王磊等^[13]分析了珊瑚混凝土早强快硬的原因; 苏家驹^[14]通过研究不同水泥掺量下珊瑚砂含石量对无侧限抗压强度的影响, 最终确定珊瑚砂作为基层稳定材料的最优水泥含量及珊瑚砂含石量; 张晋勋等^[15]依托马尔代夫维拉纳国际机场改扩建项目, 对珊瑚砂的物理力学特性进行研究分析, 并确定了水泥稳定层的最佳配合比, 使其 7 d 无侧限抗压强度达到 2.5 MPa 以上, 从而验证了水泥稳定珊瑚砂在机场跑道基层应用的可行性。然而国内学者大多研究珊瑚砂用于结构混凝土及路面基层与底基层, 很少涉及用于管涵回填。

规范 AS/NIS 3725: 2007《Design for installation of buried concrete pipes》^[16]中提供了配合比要求, 如表 5 所示, 并提出: 具有适当刚度和稳定性的材料—受控低强度材料 (CLSM) (例如填充浆料、可流动填充料、可流动砂浆、黏土水泥混合浆料、非收缩填充料或受控密度填充料) 可用作需机械压实的颗粒填料在肩部和侧部区域的替代品, 为所罗门群岛蒙达机场跑道升级项目运用水泥稳定珊瑚砂石混合料进行管涵回填提供了理论依据。

表 5 CLSM 配合比要求

材料	重量百分比/%
水泥	2~6
粉煤灰	0~20
Coronus 材料	60~80
水	10~20

AS/NIS 3725: 2007 对 CLSM 回填料的主要要求除满足配合比要求外, 还包括坍落度在 150~200 mm 范围, 28 d 抗压强度达到 0.6~3.0 MPa。考虑到施工现场珊瑚砂石的高吸水性、低抗压性并结合其他文献中对水泥稳定珊瑚砂石中最优水泥掺量的要求, 施工配比中水泥重量百分比为 6%。按水泥:珊瑚砂石:水=6%:78.6%:15.4%的比例进行掺配, 且级配也满足要求。项目回填之前将混合料在试验室进行了检测, 结果均能满足要求, CLSM 回填料检测报告见图 3。

在 CLSM 回填料施工过程中, 无需机械压实, 而且在施工完毕后的养护及监测中发现其表面没有出现裂缝, 无沉降。由此可以说明水泥稳定珊瑚砂石混合料用作管涵回填料是完全可行的。

受控低强度材料混合比例
报告 (CLSM)

报告编号:ACAG/MAP-202208007

项目名称		Munda 跑道、滑行道和停机坪加铺工程		检测日期		2022/08/20	
使用部位		RCP管涵的基础垫层和加铺区		报告日期		2022/09/18	
设计等级		3.0MPa		试验条件		25℃	
参考标准		AS 1012.2-2014,AS1012.3.1-2014,AS1012.8.1:2014, AS1012.9-2014		试验检查申请表编号		CHEC/MCA/RTCF /0008/R0	
材料							
水泥		骨料			减水剂		
类型	P•O 42.5	类型	珊瑚砂石	类型	/		
品牌	安徽海螺牌	生产产家	Munda Kokeqolo采石场	生产产家	/		
测试报告编号	CGS No.:005	测试报告编号	ACAG/MAP-202208005	测试报告编号	/		
混凝土技术规范							
水泥重量百分比 (%)	珊瑚砂石重量百分比 (%)	水重量百分比 (%)	坍落度 (mm)	抗压强度(MPa)			
				7d	28d		
6.0	78.6	15.4	190	2.4	2.9		

图 3 CLSM 回填料检验报告

4 珊瑚砂石地域性研究

由于南太平洋地区的海域多样性和岛屿分布导致珊瑚砂分布广泛，成因复杂，孔隙类型及微观结构亦各不相同，使其工程特性具有明显的地域特征。即珊瑚砂石的物理性质与地域相关性较

大，沉积条件不同常常导致珊瑚砂石的物理性质有较大不同^[17]。表 6 列出了来源于马来西亚、所罗门群岛、瓦努阿图及斐济部分地区的珊瑚砂石物理特性。

通过分析表 6 中各项指标可以发现：各地区

表 6 各地区珊瑚砂石物理特性对比

材料来源	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	CBR(浸泡 4 d)/%
中马友谊大桥项目 ^[2]	1.54	15.2	78.6
所罗门群岛蒙达机场跑道升级项目	1.73	10.0	39.0
所罗门群岛圣克鲁斯机场跑道升级项目	2.00	11.2	50.0
瓦努阿图南桑托路建设项目-Tebroma 采石场	1.97	12.0	60.0
瓦努阿图南桑托路建设项目-Suranda 采石场	2.02	11.0	120.0
瓦努阿图南桑托路建设项目-Hegan 采石场	1.99	10.5	70.0
瓦努阿图南桑托路建设项目-USA 2 采石场	1.98	12.0	85.0
瓦努阿图南桑托路建设项目-Narango 采石场	1.92	12.0	110.0
斐济 ^[18]	1.81	16.03	40.1
各项指标变异系数 CV	8.57	16.87	39.91

珊瑚砂石最大干密度和最佳含水率变异系数位于 5%~20%之间，离散程度不大，尤其是南太平洋地区(所罗门群岛、瓦努阿图及斐济)最大干密度的变异系数为 5.35，波动范围小，较为稳定；相反，同一国家不同采石区域以及不同国家之间珊瑚砂石 CBR 的变异系数超过 30%，属于高变异性，CBR 最小值仅为最大值的 32.5%。因此，在

实际工程应用中为了合理利用珊瑚砂石，必须在结合设计和规范要求的基础上考虑其地域性可能导致的 CBR 巨大差异。

5 结语

本文基于所罗门群岛规范要求，通过材料试验对比分析和工程实例应用的方式，对珊瑚砂石材料、珊瑚砂石和级配碎石混合料、水泥稳定珊

瑚砂石材料道路工程适用性以及珊瑚砂石地域性进行了研究,最终得出以下结论:

1) 单一珊瑚砂石材料虽级配良好,但孔隙率大,CBR强度低,易破碎,仅可满足低要求的子类型2.4和2.5道路路基要求。但是在其中按照一定比例掺入级配碎石可显著改善其物理性能,并提高强度,使其满足子类型2.2~2.5路面基层或底基层要求,从而达到利用珊瑚砂石代替部分碎石以降低工程造价的目的。

2) 水泥稳定珊瑚砂石混合料除了可用于路面基层和底基层之外,还可用于管涵回填。该回填材料回填过程中无需机械压实,回填后无裂缝,无沉降。水泥稳定珊瑚砂石混合料与水拌制形成的CLSM回填料对于填充材料沉降要求严格、机械压实存在困难或机械压实可能导致管涵受损的工程项目是非常适用的。

3) 珊瑚砂石由于其沉积条件的不同而导致其物理性能也有较大差异,尤其是CBR,而CBR恰恰是影响珊瑚砂石工程应用的关键指标。故在实际工程应用中,必须提前对工程项目所在地的珊瑚砂石进行物理性能检验,以确定其合理的利用方式。

参考文献:

- [1] 余殷鹏,吕亚茹,李峰,等.珊瑚砂剪切特性试验分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2017,18(1):29-35.
- [2] 孙凤启,张焕春.珊瑚礁灰岩及珊瑚砂路桥工程应用分析——基于南太平洋地区项目的实践[J].建筑机械,2023(8):58-62.
- [3] CONTENT T P. Rights and permissions[Z]. 2024.
- [4] 王瑞,余克服,王英辉,等.珊瑚礁的成岩作用[J].地球科学进展,2017,32(3):221-233.
- [5] MRTS 05,Transport and main roads,unbound pavements[S].
- [6] AS 1289,Methods of testing soils for engineering purposes[S].
- [7] SYO A,SJ A,CA B,et al. Road pavement thickness and construction depth optimization using treated and untreated artificially-synthesized expansive road subgrade materials with varying plasticity Index[J]. Materials,2022,15(8):2773.
- [8] 余以明,刘松,高凡,等.珊瑚礁石礁砂水稳层应用于机场跑道的研究[J].河南建材,2017(3):34-36.
- [9] 冯韦皓.水泥稳定珊瑚礁砂基层的路用性研究[D].杭州:浙江工业大学,2019.
- [10] HASAN M M,KABIR M B,PRODHAN M S R,et al. The physical and mechanical properties of coronus sand [J]. European Journal of Theoretical and Applied Sciences,2024,2(1):313-337.
- [11] 陈飞翔,张国志,丁沙,等.珊瑚砂混凝土性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2016(7):16-21.
- [12] 李林.珊瑚混凝土的基本特性研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [13] 王磊,范蕾.珊瑚碎屑混凝土的强度特性及破坏形态分析[J].混凝土与水泥制品,2015(1):1-4.
- [14] 苏家驹.水泥稳定珊瑚礁砂在工程上的应用[J].科技创新与应用,2018(8):154-155.
- [15] 张晋勋,张绍栋,王广兴,等.机场跑道水泥稳定珊瑚砂基层配合比研究与应用[J].施工技术,2019,48(4):48-50,72.
- [16] AS/NZS 3725:2007,Design for installation of buried concrete pipes [S].
- [17] 姜松,李建双.珊瑚砂物理力学性质调研及试验研究[J].中国港湾建设,2017,37(7):31-34.
- [18] KUMAR S P,DARSHINI P S T. Strength behaviour of expansive subgrade soil stabilized with coronus material[M]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2022.