

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.008

珊瑚砂工程处理研究进展

李捷¹, 方祥位¹, 张伟¹, 申春妮²

(1. 后勤工程学院 土木工程系, 重庆 401311; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401311)

摘 要: 珊瑚砂岛礁工程建设与国家海洋权益问题息息相关, 开展相关研究具有重大战略意义。通过资料收集与分析, 综述了珊瑚砂桩基地层勘探、承载特性与群桩效应方面的学术成果, 总结了珊瑚砂混凝土的制作工艺、强度特性与耐久性研究的相关情况, 并介绍了珊瑚砂微生物固化技术的试验研究进展, 最后针对当前研究中的不足之处, 简要提供了建议与展望。

关键词: 珊瑚砂; 工程处理; 桩基工程; 混凝土; 微生物固化

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0043-06

Research Progress in Engineering Treatments of Coral Sand

LI Jie¹, FANG Xiangwei¹, ZHANG Wei¹, SHEN Chunni²

(1. Department of Civil Engineering, LEU, Chongqing 401311, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401311, China)

Abstract: The construction of coral reef islands is closely related to the national maritime sovereignty, thus the research on coral sand have important strategic significance. By data collection and analysis, the academic achievement of seismic exploration, bearing characteristic and pile group effect in coral sand pile foundation engineering compression were reviewed, the research on production technology, strength characteristics and durability of coral sand concrete were summarized, and the test research advance of coral sand bio-cementation were introduced. In the end, suggestions and prospects were proposed to improve the shortage of related works.

Keywords: coral sand; engineering treatments; pile foundation engineering; concrete; biocementation

为了保卫我国的领海完整, 加快“建设海洋强国, 维护海洋权益”的战略部署, 南沙群岛海域的岛礁正在紧锣密鼓地开展大量战略性工程的建设, 部分岛礁的工程建设已进入陆域吹填阶段, 工程主要处理对象为珊瑚礁岩土^[1-2]。

造礁石珊瑚群体死亡后, 骨骼和外壳聚集在一起经沉积形成的岩土体即为珊瑚礁。珊瑚礁在全球南北回归线之间的热带海域中广泛分布, 南海海域中的珊瑚礁地层发育良好, 下层岩体为礁灰岩, 表层沉积的松散或弱胶结的珊瑚碎屑土即为珊瑚砂。珊瑚砂又称为钙质砂, 主要成分为珊瑚碎屑, 混杂有海洋藻类、贝壳类生物碎屑, 矿物组成主要为文石、白云石和方解石, 碳酸钙含量极高, 可达 96% 以

上^[3-4]。由于沉积过程中的生物化学作用及海洋水动力环境的影响, 珊瑚砂孔隙比高且含有内孔隙, 颗粒比重大, 受压后易破碎, 颗粒形状不规则、粒径分布不均匀, 颗粒间易胶结, 因此其物理力学性质与普通石英砂具有较大差异^[5]。

最早的珊瑚砂岩土工程建设案例是在二战后期, 美军在巴布亚新几内亚洛斯的内格罗斯(Los Negros)岛上以珊瑚礁碎屑土为基材铺设修建了长为 2 375 m 的机场跑道^[2]。20 世纪 70 年代末在海洋石油开发过程中各类基于珊瑚砂岩土建设的工程事故频发, 在国际上引发了以军事和油气资源开发为目的的珊瑚砂工程地质特性研究热潮。我国在 20 世纪 70 年代末由于国防工程建设的需求, 对珊瑚砂工

收稿日期: 2016-12-22

修稿日期: 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479208, 11272354); 全军后勤科研计划项目(CY114C022)

作者简介: 李捷(1992—), 男, 湖南宜章人, 硕士研究生, 研究方向为岩土微生物技术及应用。E-mail: 672273445@qq.com

通讯作者: 方祥位(1975—), 男, 重庆铜梁人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及岩土微生物技术方面的工作。

E-mail: fangxiangwei1975@163.com

程特性开展了研究,有关机构组织了一系列围绕南沙群岛的科学考察,随之发表了一大批相关学术论文与专著,具有开创性意义的是汪稔等^[3]编著的《南沙群岛珊瑚礁工程地质》,系统论述了珊瑚礁的工程地质特性。

鉴于珊瑚砂岩土工程特性研究对国家战略权益的重大意义,本文总结了珊瑚砂工程处理研究领域的相关成果,并对下一步研究工作进行了展望,以期对珊瑚岛礁建设工程提供一定的参考与指导。

1 珊瑚砂桩基工程研究

桩基在珊瑚砂海域具有承载力高且沉降量小的特点,适合作为海洋石油平台的基础类型。最初工程界将基于陆源地基土处理的经验应用于珊瑚砂地层的桩基处理,结果发生了各种严重的工程事故,如伊朗波斯湾某海洋石油平台的大直径钢管桩在穿过 8 m 承载力良好地层,进入松散珊瑚砂地层后突然发生了 15 m 的自由下落^[6]。珊瑚砂特殊的工程力学特性使得珊瑚砂地层中的桩基工程建设面临许多疑难问题,例如岛礁环境限制导致原位测试数据难以获得、颗粒破碎导致桩侧与桩端阻力偏低、松散层与胶结层交替出现导致桩基计算与设计困难等,相关研究主要集中于珊瑚砂桩基地层勘探、桩侧摩阻力与桩端承载力特性、群桩效应等内容。

1.1 桩基地层勘探

研究者采用了各类原位测试方法评价珊瑚砂地层的桩基工程特性,包括静力触探、动力触探、标准贯入、平板载荷、旁压试验及地球物理勘探测试等,主要目标是探究珊瑚砂特殊的压缩性与胶结特性对桩侧摩阻力与承载力的影响。

在国外海洋石油开采工程相关的一系列研究中,King R W 等^[7]在澳大利亚北部的 Rankin 钻井平台对珊瑚砂地层进行了静力触探试验,触探头锥底面积 10 cm^2 ,贯入速度 2 mm/s ,测得桩侧摩阻力最高达 40 kPa ,桩抗拔阻力在 $5\text{ kPa} \sim 19\text{ kPa}$ 范围内,而在 2 次循环加载后迅速降至 5 kPa 以下,相同试验条件下在 Matinloc 钻井平台测得的抗拔阻力也仅为 $8\text{ kPa} \sim 17\text{ kPa}$ 。Hagenaar J 等^[8]采用标准贯入试验中的锤击数 N 来反映珊瑚砂地层中钢管桩的极限承载力,并设定 $N = 25$ 时桩侧摩阻力极值为 20 kPa , $N < 25$ 时桩侧摩阻力在 $0 \sim 20\text{ kPa}$ 范围内呈线性发展。

国内的珊瑚砂桩基地层勘探试验主要在南沙群

岛海域开展。朱长歧等^[9]分析了珊瑚砂沉积层上的平板载荷试验数据, 1.1 MPa 的承压板应力下沉降量仅为 $0.88\text{ mm} \sim 2.4\text{ mm}$,是由于珊瑚砂颗粒间的胶结作用导致沉降量极小,而胶结破坏及颗粒破碎后引起地层发生塑性变形。崔永圣等^[10]在南海某岛礁珊瑚砂地层进行了钻孔后的孔内电阻率与剪切波速测试,结果表明礁岩层与珊瑚砂的平均电阻率分别为 $1.47\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 与 $1.59\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,剪切波速范围分别为 $420\text{ m/s} \sim 670\text{ m/s}$ 与 $200\text{ m/s} \sim 300\text{ m/s}$,两种地层存在清晰的波阻抗界面与速度分界面,反映出珊瑚砂地层的软弱程度与珊瑚礁岩、碎屑的高孔隙比的特点。

纵观珊瑚砂桩基地层勘探研究成果,可以发现大多为区域性测试结果,参考意义有限,实际工程应用时并不能照搬沿用;测试手段与评价指标不尽相同、各有优缺点,目前也没有规范的选取标准,应用时应根据工程场地实际情况进行综合评判。

1.2 桩侧摩阻力与桩端承载力特性

在珊瑚砂地层中,桩侧摩阻力与桩端承载力受桩基类型与成桩工艺的影响较大。Angemeer J 等^[11]在澳大利亚某海域使用不同成桩工艺进行了桩基荷载试验,测试表明打入桩的残余桩侧摩阻力约为 $13\text{ kPa} \sim 18\text{ kPa}$,而钻孔灌注桩的残余桩侧摩阻力高达 92 kPa ,并建议以大尺寸桩基荷载试验数据为依据进行珊瑚砂地层桩基的设计。Nauroy J F 等^[12]开展了打入桩、钻孔灌注桩与打入灌注桩的室内与珊瑚砂地层现场试验研究,结果表明在 $2\text{ mm} \sim 6\text{ mm}$ 的小位移情况下桩侧摩阻力即可完全发挥,两类灌注桩的极限侧摩阻力约为 $200\text{ kPa} \sim 300\text{ kPa}$,远高于打入桩,其中打入灌注桩具有成本较低、施工便捷的特点,因此推荐使用打入灌注桩作为珊瑚砂地层中的桩基类型。

珊瑚砂特殊的压缩性、胶结特性与颗粒破碎特性也会显著影响桩侧摩阻力与桩端承载力,这一课题的主要研究手段为室内与现场试验,同时理论模型计算方面也取得了一系列研究成果。Dutt R N 等^[13]的理论认为,桩打入珊瑚砂沉积层的过程中会破坏珊瑚砂的原生胶结,残余的胶结体会形成一个拱形结构导致桩侧水平应力减小,此外打桩过程中的冲击力导致大量颗粒破碎的发生,使桩土摩擦角急剧降低。Zhang C 等^[14]考虑珊瑚砂的颗粒破碎及桩周围压、弹性参数的影响,建立了珊瑚砂桩基承载力的有限元计算模型,通过试验验证了模型的有效

性。单华刚^[15]对我国南海珊瑚砂地层的桩基承载性状进行了研究,基于桩土共同作用原理分析了桩侧摩阻力与珊瑚砂压缩性的关系,提出了考虑珊瑚砂颗粒破碎导致的体变与内摩擦角变化的桩端承载力计算理论,并基于此建立了桩端承载力 FE 模型,计算值与实测值较为吻合。

桩端承载力理论计算的关键是选择合适的桩土破坏模型,目前采用较多的是考虑土压缩与剪切特性的 Vesic 球形空穴扩张理论,Poulos H G 等^[16]对各类试验数据与 Vesic 理论计算结果进行对比研究,将计算值乘以经验系数后能够取得较好的拟合结果,但是经验系数的选取应基于工程场地实际情况,具有一定局限性。

1.3 群桩效应

Poulos H G 等^[16]利用模型试验研究群桩在静、动载荷作用下的受力特性,发现珊瑚砂的密实度及桩法向应力的增大导致邻桩间相互影响,且桩底端受邻桩影响较大。江浩等^[17]对南沙群岛永暑礁珊瑚砂进行的室内模型试验结果表明,竖向荷载作用下群桩的 $Q-s$ 曲线具有明显的陡降特征,可以从曲线判定群桩承载力;闭口群桩的承载力比开口群桩高 17%~20% 左右,但远小于普通陆源土地层中的闭口群桩承载力;群桩的桩侧摩阻力较小,具有深度效应,相对密度与开口、闭口等对其影响不大。

现阶段珊瑚砂地层中的群桩效应研究成果不多,大都沿用普通陆源土地层的经验标准,即认为群桩比单桩状态下的桩侧摩阻力能提高 50% 左右,对于桩间距的确定、桩侧阻力与桩端承载力的群桩效应系数计算等关键问题仍有待深入研究。

2 珊瑚砂混凝土研究

海洋岛礁的环境限制导致施工机械及建筑原材料运输困难,工程建设时必须尽可能就地取材以降低成本,利用珊瑚砂为骨料、采用海水拌养的方法制作珊瑚砂混凝土即成为一条可行的思路。事实上美国出于军事目的较早的开展了珊瑚砂混凝土的相关研究,并编制了相关施工规范,现今工程界大量研究了珊瑚砂混凝土的制作工艺、强度特性与耐久性等,推动了珊瑚砂混凝土的工程应用。

2.1 制作工艺

珊瑚砂混凝土的制作工艺应考虑其特殊的工程力学特性进行调整,关键点是珊瑚砂高孔隙比导致的特殊吸水性、砂颗粒形状不规则导致的水泥石难

以包裹及海水盐类对混凝土强度与耐久性的侵蚀。Rick A E^[18]在太平洋的比基尼岛上对珊瑚砂混凝土的建材应用做了详细研究,认为珊瑚砂混凝土的水灰比应在 0.5 左右,粗细骨料各占 50%,养护后混凝土立方体抗压强度可达 20 MPa。卢博等^[19]系统研究了不同水泥品种制作的珊瑚砂混凝土性能,发现抗硫酸盐水泥效果最佳,普通硅酸盐水泥次之,不宜使用火山灰水泥;同时对比了淡水与海水拌养珊瑚砂混凝土的性能,结果表明只要适当提高混凝土标号、增加水泥用量并降低水灰比,海水拌合珊瑚砂混凝土即可达到足够的强度。王以贵^[20]研究了珊瑚砂混凝土制作过程,发现应加大水泥用量起到润滑作用,使粗糙、形状不规则的珊瑚粗骨料更易捣固密实;珊瑚砂的多孔隙使吸水率高达 10% 以上,用水量也应加大。陈兆林等^[21]采用不同标号水泥配制珊瑚砂混凝土,发现当标号超过 200 时水泥用量明显加大,最适宜用 150~200 标号的水泥配制珊瑚砂混凝土。

引入新型制作工艺、添加辅助材料可以显著改善珊瑚砂混凝土的缺陷性。王磊等^[22]向珊瑚砂混凝土中加入剑麻纤维,发现掺量 $3.0 \text{ kg/m}^3 \sim 4.5 \text{ kg/m}^3$ 的剑麻纤维能提高珊瑚砂混凝土的劈裂抗拉强度与抗折强度,增强了延性,但对其抗压强度影响较小,同时电镜扫描结果表明剑麻纤维的亲水性能能够使纤维与水泥浆体结合紧密,增大了珊瑚砂骨料表面的水泥石密实度,提高了 C-S-H 凝胶的黏结力。

2.2 强度特性

珊瑚砂本身属于多孔轻质骨料,其抗压与抗拉强度、变形模量、强度发展规律等力学性能与常规混凝土具有差异,目前学术界较为侧重于对珊瑚砂混凝土强度发展规律的研究,目的是改进珊瑚砂混凝土的生产工艺、推动工程应用。

丁沙等^[23]研究了珊瑚砂混凝土的内部微观结构与胶体成分,发现珊瑚砂混凝土含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、Aft (钙矾石)、 CaCO_3 和 C-S-H 凝胶,而疏松多孔的特征使得珊瑚骨料-水泥浆体的界面黏结力比常规骨料混凝土更大,极大改善了界面结构性能,使珊瑚骨料表面的水泥石密度较高。潘柏州等^[24]按照全因子试验方法进行了珊瑚砂混凝土立方体抗压强度对比试验,结果显示 28 d 龄期强度高达 40 MPa,比河砂混凝土高 5% 以上,并具有早强、黏聚性好的优点。李林^[25]的研究表明珊瑚砂混凝土在养护初期

具有早强效应,比普通混凝土的强度发展快 50% 以上,在养护 7 d 时即已接近最终的 28 d 龄期强度,养护后期的强度发展较慢。陈兆林等^[26]的研究表明,当珊瑚砂混凝土水灰比在 0.35 ~ 0.90 范围内、坍落度为一般塑性混凝土水平时,净水灰比与抗压强度呈线性关系,且不受外加剂的影响。赵艳林等^[27]研究了海水拌养珊瑚混凝土抗压强度与龄期的关系,得出了 3 d、7 d 与 28 d 抗压强度的函数关系,线性相关性高达 0.99,并于普通混凝土的同期强度增长规律进行了对比。韩超^[28]的试验研究表明,由于珊瑚强度与变形模量较低,珊瑚砂混凝土的劈裂抗拉强度主要受水泥石强度及水泥砂浆与珊瑚砂骨料的黏结强度影响,其劈裂抗拉强度与抗压强度的比值显著高于普通混凝土。

2.3 耐久性

海洋环境中的盐分是影响珊瑚砂混凝土耐久性的主要因素,特别是氯离子的存在,研究显示珊瑚砂混凝土的氯离子扩散系数约为常规混凝土的 2 倍,并且海洋环境复杂的气候与水文条件、波浪潮汐的动力作用等都会劣化珊瑚砂混凝土的力学性能,导致开裂、剥落、钢筋锈蚀等现象发生,因此开展珊瑚砂混凝土耐久性研究具有一定的迫切性。

梁元博等^[29]根据海南热带海洋生物实验站的数据,分析了海洋环境中影响珊瑚砂混凝土耐久性的物理与化学因素,认为氯盐与氢氧化钙反应使混凝土孔隙率增大,而硫酸盐容易与铝酸三钙反应生成水化硫酸铝钙,其具有吸水膨胀的特性导致珊瑚砂混凝土的崩裂与剥落,高温高盐的环境均会促进两种反应的发生;高达 25℃ 的昼夜温差使珊瑚砂混凝土体积变化巨大,易于风化崩坏,海浪潮汐作用导致内部与表面不均匀的水分变化也会加剧混凝土的崩解。达波等^[30]计算了珊瑚砂混凝土结构的表面自由氯离子含量(C_s)和自由氯离子扩散系数(D_f),发现相同环境下珊瑚砂混凝土的 C_s 值比普通混凝土高 13 倍 ~ 28 倍,必须提高表观密实度及珊瑚砂混凝土的抗氯离子渗透能力,以及加强迎风面的结构防护才能提高耐久性。王芳等^[31]研究了钢管珊瑚砂混凝土中氯离子的腐蚀问题,分析了腐蚀机理及氧气含量与腐蚀厚度的关系,认为在保证珊瑚砂混凝土浇筑入钢管内的密实度使钢管隔绝外界氧气的情况下,氯离子对钢管的腐蚀性极小,不影响工程使用性能。张敏等^[32]采用不同种类与标号的水泥与珊瑚砂及海水拌合混凝土,试验结果显示水泥种

类是影响珊瑚砂混凝土抗腐蚀性的主要因素,应尽量选用抗硫酸盐水泥,而水泥标号对其抗腐蚀性影响不大。张伟等^[33]对海洋环境中珊瑚砂混凝土的定量分析表明,降低硅酸三钙的比例同时将铝酸三钙质量分数控制在 6% 以下,有利于提升其抗腐蚀性。

受限于应用年限不高与工程使用量相对偏低,珊瑚砂混凝土的耐久性研究大多以人工试验与理论分析为主,实际工程案例较为缺乏,各类研究成果仍有待工程实践的检验。

3 珊瑚砂微生物固化研究

某些特定的微生物(碳酸盐矿化菌或产脲酶菌),如巴斯德芽孢杆菌(*Bacillus pasteurii*),通过为之提供氮源(如尿素等有机物)和钙离子源,能快速析出具有胶凝作用的碳酸钙结晶,这一技术称之为微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术^[34]。利用 MICP 技术生成的碳酸钙具有较好的结晶形态,强度高、黏结性好,反应过程人为可调控,因此该技术在岩土工程、材料工程与环境工程中得到了广泛应用,如微生物水泥、放射性污染处理、重金属废水处理、建筑裂缝修复、地基加固与边坡防护等^[35-37]。珊瑚砂颗粒具有易胶结的特点,利用 MICP 技术固化松散珊瑚砂,生成的碳酸钙与珊瑚砂主要化学成分相同,具有较好的微观结构与黏结特性,且反应污染小,原位喷洒与注浆固化的方法对珊瑚砂地层无扰动,因此微生物技术固化珊瑚砂在岛礁工程中的岸坡防护、砂质地表加固、建筑修复等领域具有极高应用前景。

方祥位等^[38-39]在国内外率先对珊瑚砂微生物固化的原理、注浆工艺、固化体强度与微观结构等进行了系统研究,自主设计了珊瑚砂微生物固化试验模具,探索并改进了固化试验流程,研究了固化体的渗透性对强度与均匀性的影响,并利用电镜扫描照片描述了珊瑚砂颗粒之间的碳酸钙胶结状态。在此成果的基础之上,该课题组对珊瑚砂微生物固化进行了一系列研究:

影响因素方面,欧益希等^[40-41]研究了不同颗粒粒径珊瑚砂的微生物固化效果,得出微生物固化的最佳粒径范围为 0.25 mm ~ 0.5 mm;同时对不同溶液盐度条件下的珊瑚砂微生物固化效果进行了对比研究,结果表明在 35‰ 的海水平均盐度条件下进行珊瑚砂微生物固化是可行的。李捷等^[42-43]配制了不同颗粒级配与初始孔隙比的珊瑚砂试样进行微

生物固化,研究了固化体对细菌的吸附性、渗透特性、抗压强度与微观结构,结果表明适中的孔隙比能保证珊瑚砂对细菌的吸附性与渗透性达到最优平衡,孔隙比约为1的级配不良试样固化效果较好,强度较高且微观上碳酸钙对砂颗粒的包裹与黏结更均匀;同时研究了菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响,结果表明低活性菌液的微生物固化速率较慢、产物偏少,而高活性菌液的固化过快会导致试样渗透性急剧降低从而阻塞固化反应的进行,菌液脲酶活性为 $0.5\text{ mM}/(\text{L}\cdot\text{min})\sim 1.5\text{ mM}/(\text{L}\cdot\text{min})$ 条件下固化的试样强度高、整体结构性好,应力-应变曲线较为平滑。

力学特性方面,李捷等^[44]对珊瑚砂微生物固化体的力学特性进行了系统研究,单轴试验结果表明,固化体的单轴压缩应力-应变曲线为应变软化型,可分为压密、近似线弹性变形、塑性段与破坏后四个阶段;在不同含水率条件下,珊瑚砂颗粒破碎与碳酸钙胶结弱化的程度具有差异,导致随着含水率的增大,固化体强度减小而弹性模量先增大后减小。三轴压缩试验结果表明,偏应力-应变曲线可分为近似线弹性、屈服与延性硬化三个阶段,在应变持续增长后不发生软化现象,没有明显的破坏特征点,而是呈现出应变硬化或延性破坏状态,最终偏应力在一定水平维持稳定,固化体强度与弹性模量随围压增大而增大。

珊瑚砂微生物固化技术属于新兴的学科交叉研究,目前学术界并无理论指导与试验规范可循,因此前期研究的关键是珊瑚砂微生物固化的可行性论证及珊瑚砂微生物固化技术优化与影响因素研究、固化体基本力学特性及本构关系研究。关于珊瑚砂微生物固化技术的研究仍停留在理论研究与室内试验阶段,应加强现场试验的开展以提高珊瑚砂微生物固化技术的实际可行性。

4 建议与展望

总结珊瑚砂工程处理研究的相关成果可以发现,以现有施工技术为基础的珊瑚砂桩基与混凝土研究与应用已初具规模效应,但仍存在若干值得深入探索的问题,本文提供以下建议:

(1) 开发除打入桩与钻孔灌注桩以外更多的珊瑚砂地层桩基类型,充分考虑珊瑚砂高压缩性对桩端沉降与桩间土挤密效应的影响。

(2) 在考虑环保效益的前提下,研究利用水泥

外加剂提高珊瑚砂钢筋混凝土的抗腐蚀性 with 耐久性。

(3) 加强现场试验,逐步将微生物固化技术应用至陆域吹填珊瑚砂的固化处理中,改进固化工艺、降低成本,提高技术可行性。

(4) 为了推动珊瑚砂工程特性研究进展及推动各类工程处理方法的应用,应尽快制订珊瑚砂岩土工程勘探、测试与施工的相关技术规范。

参考文献:

- [1] 刘中民.国际海洋形势变革背景下的中国海洋安全战略——一种框架性的研究[J].国际观察,2011,31(3):1-9.
- [2] 孙宗勋.南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J].热带海洋,2000,19(2):1-8.
- [3] 汪稔,宋朝景,赵焕庭,等著.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
- [4] 孙宗勋,黄鼎成.珊瑚礁工程地质研究进展[J].地球科学进展,1999,14(6):577-581.
- [5] 刘崇权,汪稔.钙质砂物理力学性质初探[J].岩土力学,1998,19(1):32-37.
- [6] McClelland B. Calcareous Sediments: An engineering enigma [C]//Proceedings, International Conference on Calcareous Sediments. Perth:[s.n], 1988:777-787.
- [7] King R W, Van Hooydonk W R. Geotechnical investigations of calcareous soils on the North West shelf[C]//Proceedings the 12th Annual Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1980:303-314.
- [8] Hagenaar J. The use and interpretation of SPT results for the determination of axial bearing capacities of piles driven into carbonate soils and coral[C]//Proceedings of the second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam:[s.n], 1982:51-55.
- [9] 朱长歧,刘崇权.西沙永兴岛珊瑚砂场地工程性质研究[J].岩土力学,1995,16(2):35-41.
- [10] 崔永圣,马林,刘宏岳,等.珊瑚岛礁工程地球物理方法初探[J].岩土力学,2014,35(S2):683-689.
- [11] Angemeer J, Carlson E, Stroud S, et al. Pile load tests in calcareous soils conducted in 400 feet of water from a semi-submersible exploratory rig[C]//Proc. of the 7th Annual Offshore Technology Conference, Houston: Offshore Technology Conference, 1975.
- [12] Nauroy J F, Brucy F, Le Tirant P. Skin friction of piles in calcareous sands[C]//Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments. Perth:[s.n], 1988:209-214.
- [13] Dutt R N, Cheng A P. Frictional response of piles in cal-

- careous deposits [C]//Proc. of the 16th Annual Offshore Technology Conference, Houston: Annual Offshore Technology Conference, 1984:527-530.
- [14] Zhang C, Nguyen G D, Einav I. The end-bearing capacity of piles penetrating into crushable soils[J]. Ghe End - Bear, 2013, 63(5):341-354.
- [15] 单华刚. 珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5):680-680.
- [16] Poulos H G, Chua E W. Bearing capacity of foundations on calcareous sand [C]//Proceedings 11th Int. Conf. Soil Mechs. Foundn. Eng., San Francisco: [s. n], 1985: 1619-1622.
- [17] 江 浩, 汪 稔, 吕颖慧, 等. 钙质砂中群桩模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1):3023-3028.
- [18] Ehler R A. Coral concrete at bikini atoll[J]. Concrete International, 1991, 13(1):19-24.
- [19] 卢 博, 李起光, 黄韶健. 海水—珊瑚砂屑混凝土的研究与实践[J]. 广东建材, 1997, 10(4):8-10.
- [20] 王以贵. 珊瑚混凝土在港工中应用的可行性[J]. 水运工程, 1988, 13(9):46-48.
- [21] 陈兆林, 陈天月, 曲勤明. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. 海洋工程, 1991, 9(3):67-80.
- [22] 王 磊, 刘存鹏, 熊祖菁. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(6):826-830.
- [23] 丁 沙, 张国志, 陈飞翔, 等. 珊瑚砂混凝土配制技术研究[J]. 建材世界, 2016, 37(2):15-20.
- [24] 潘柏州, 韦灼彬. 原材料对珊瑚砂混凝土抗压强度影响的试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(S1):221-225.
- [25] 李 林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [26] 陈兆林, 孙国峰, 唐筱宁, 等. 岛礁工程海水拌养珊瑚礁、砂混凝土修补与应用研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(4):60-69.
- [27] 赵艳林, 韩 超, 张栓柱, 等. 海水拌养珊瑚混凝土抗压龄期强度试验研究[J]. 混凝土, 2011(2):43-45.
- [28] 韩 超. 海水拌养珊瑚混凝土基本力学性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [29] 梁元博, 卢 博, 黄韶健. 热带海洋环境与海工混凝土[J]. 海洋技术, 1995, 14(2):58-66.
- [30] 达 波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2):253-260.
- [31] 王 芳, 查晓雄. 钢管珊瑚混凝土试验和理论研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1):288-293.
- [32] 张 敏, 卢 博. 热带海岛混凝土在腐蚀介质中的腐蚀及反腐蚀措施的研究[J]. 海洋工程, 1997, 15(2):87-90, 92-96.
- [33] 张 伟, 刘 丹, 徐世君. 利用海砂海水生产混凝土——海洋岛礁混凝土发展的新方向[J]. 商品混凝土, 2015, 12(1):4-8.
- [34] Whiffin V S, Van Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5):417-423.
- [35] DeJong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4):287-301.
- [36] Chu J, Ivanov V, Stabnikov V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. Geotechnique, 2013, 63(10):871-875.
- [37] Van Paassen L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[C]//Geo - Frontiers Congress. Dallas: Advances in Geotechnical Engineering, 2011:4099-4108.
- [38] 方祥位, 申春妮, 楚 剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10):2773-2779.
- [39] 方祥位, 楚 剑, 申春妮, 等. 利用微生物固化松散珊瑚砂的方法: CN103773376A[P]. 2014-05-07.
- [40] 欧益希, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2):35-39.
- [41] 欧益希, 方祥位, 张 楠, 等. 溶液盐度对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1):78-82.
- [42] 李 捷, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒级配对珊瑚砂微生物固化影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6):7-12, 43.
- [43] 李 捷, 方祥位, 张 伟, 等. 菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(6):88-91, 96.
- [44] 李 捷, 方祥位, 申春妮, 等. 含水率对珊瑚砂微生物固化体力学特性影响研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(12):93-97.