

珊瑚礁灰岩层基本性质及后压浆嵌岩桩 竖向承载特性试验研究

段 畅¹, 万志辉¹, 戴国亮², 郭子龙¹, 胡 涛², 龚维明², 张润泽²

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 海洋中吹填岛礁的开发已成为沿海国家的重要战略举措。以马累-机场岛跨海大桥工程拟建区的珊瑚礁灰岩为研究对象, 系统地研究其力学性质和工程特性。基于后压浆嵌岩灌注桩的现场静载试验和钻孔取芯试验, 深入探讨珊瑚礁灰岩层中大直径后压浆嵌岩灌注桩的承载与变形特性, 并对桩身完整性及后压浆浆液的渗扩范围进行全面评价。试验结果表明, 该地区的珊瑚礁灰岩具有密度低、孔隙大、结构独特性、强度各向异性以及胶结程度不均匀等显著特征。大直径后压浆嵌岩灌注桩在该地层中展现出良好的应用前景, 压浆后试桩极限承载力提升了3.6%, 桩顶位移相比压浆前减小了33.53%。钻孔取芯试验显示, 桩端压入的浆液向下渗扩范围约3 m(约2D), 显著改善了珊瑚礁灰岩的孔隙结构。最后, 通过建立珊瑚礁灰岩完整岩石单轴抗压强度与极限桩侧摩阻力和桩端阻力之间的关系, 提出珊瑚礁灰岩层后压浆嵌岩灌注桩承载力设计的计算方法, 为后续的工程设计提供了科学依据和理论支持。

关键词: 桩基础; 珊瑚礁灰岩; 后压浆嵌岩桩; 工程特性; 力学性质; 钻孔取芯; 单轴抗压强度

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0721-16

Experimental study on the fundamental properties of coral-reef limestone and the vertical bearing behavior of post-grouted rock-socketed shafts

DUAN Chang¹, WAN Zhihui¹, DAI Guoliang², GUO Zilong¹, HU Tao²,
GONG Weiming², ZHANG Runze²

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: The development of reclaimed islands and reefs has emerged as an important strategic measure for coastal nations. This paper systematically investigates the mechanical properties and engineering characteristics of coral-reef limestone in the proposed area for Male-Airport Island cross-sea bridge project. Based on the results of static load tests and core drilling conducted on post-grouted rock-socketed drilled shafts, this study provides a comprehensive analysis of the bearing deformation characteristics of the shaft embedded in coral-reef limestone before and after grouting. Additionally, the integrity of the shaft and the permeation diffusion range of the grouting are thoroughly evaluated. The test results reveal that the coral-reef limestone exhibits notable characteristics, including low density,

收稿日期: 2024-09-02; **修回日期:** 2024-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52008100); 中国博士后科学基金面上项目(2022M723534); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(23KJA560005)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52008100), China Postdoctoral Science Foundation(Grant No. 2022M723534) and Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China(Grant No. 23KJA560005)

作者简介: 段 畅(1997-), 男, 2021年毕业于南京工程学院土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事后压浆桩基础理论与工程实践等方面的研究工作。E-mail: dcc@njtech.edu.cn. 通讯作者: 万志辉(1990-), 男, 博士, 现任副教授、硕士生导师。E-mail: wanzhihui@njtech.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0650

large pore sizes, unique structure, strength anisotropy, and uneven cementation. Furthermore, large-diameter post-grouted rock-socketed drilled shafts demonstrate promising application potential in the coral-reef limestone strata. The post-grouting technique enhances the bearing deformation capacity of shaft foundations in coral-reef limestone, with the ultimate bearing capacity of the test shaft increasing by 3.6% after grouting, and the displacement of the shaft head decreasing by 33.53% compared to before grouting. Core drilling tests indicate that the grouting at the shaft tip penetrates approximately 3 m (around $2D$) downward, which significantly improves the pore structure of the coral-reef limestone. Finally, by correlating the unconfined compressive strength of intact coral-reef limestone with the ultimate side resistance and tip resistance, this paper develops a computational method for calculating the load capacity of grouted rock-socketed drilled shafts in coral-reef limestone formations. This methodology offers a robust scientific foundation and theoretical basis to guide subsequent engineering applications.

Key words: pile foundation; coral-reef limestone; post-grouted rock-socketed shaft; engineering characteristics; mechanical properties; core drilling; uniaxial compressive strength(*UCS*)

1 引言

随着海洋强国战略的推进,海洋吹填岛礁的开发已成为沿海国家的重要战略举措。太平洋南部、印度洋以及非洲东部的珊瑚岛礁为旅游业、连岛工程和海上城市建设提供了天然优势。然而,珊瑚礁的复杂地质特性对工程建设提出了诸多挑战。珊瑚礁灰岩是一种具有显著生物特性的特殊材料,其沉积演化与成岩机制十分复杂,表现出明显的不均匀性和独特的结构特征,其工程性质与陆源岩石及其他土层存在显著差异^[1]。刘海峰等^[2]对南海某岛礁的珊瑚礁灰岩进行了室内物理力学性质测试,并在恒定法向应力条件下开展了珊瑚礁灰岩与混凝土界面的剪切强度试验,深入探讨了桩-岩界面的应力-应变关系,并揭示了礁灰岩层界面摩阻力的作用机制。宋凯文等^[3]针对 2 种不同类型的珊瑚礁灰岩,开展了一系列基本的静态力学试验,并利用分离式霍普金森压杆(SHPB)对珊瑚礁灰岩与陆源岩进行了对比性的动态力学测试,以深入探讨岩样的破碎形态以及动态应力-应变曲线之间的关系。L. J. Ma 等^[4]对浅埋和深埋层区的礁灰岩进行了系列准静态和动态压缩试验及微观测试,研究了成岩变化相关的孔隙结构和矿物成分对珊瑚礁灰岩力学特性的影响。尽管国内外许多学者在珊瑚礁地质方面开展了大量研究,但尚未建立珊瑚礁岩土特性的全球规范,其在基础工程设计和施工中的一些独特性质仍需进一步探讨。

桩基础因其承载力高、稳定性好和沉降量小等优点,在岛礁工程基础设施建设中得到广泛应用。刘海峰等^[5-6]开展了嵌岩模型桩承载特性室内试验

研究,结果表明桩端阻力的发挥受到岩层强度和结构类型的影响,而桩侧残余摩阻力与岩石饱和单轴抗压强度之间呈正相关。张永涛等^[7]进行了不同岩层界面形态和胶结状态的礁灰岩-混凝土大型直剪试验研究,探讨了珊瑚礁灰岩层桩-岩界面阻力的发挥机制,并通过现场试验数据分析了珊瑚礁灰岩层灌注桩桩侧摩阻力的发挥系数。秦伟等^[8]在珊瑚礁地层中开展了高强度预应力混凝土管桩的现场静载试验,通过实测桩身内力分析了管桩的荷载传递规律,发现当管桩贯入深度小于 15 倍桩径时,入土深度与桩端阻力呈正相关,而与桩侧摩阻力呈负相关。目前,关于珊瑚岛礁地层桩基承载性能的试验研究主要集中于室内模型试验,而大直径嵌岩灌注桩的现场试验研究相对较少。由于珊瑚礁灰岩层的颗粒易碎、岩体多孔且结构均匀性和稳定性较差,因此在此类岩层中采用后压浆技术以提升桩基础的承载变形能力具有显著的优势。F. M. Ghazali 等^[9]介绍了在红海珊瑚礁灰岩层上开展钻孔灌注桩后压浆施工的过程,并通过静载试验验证了后压浆工艺在该地层基础中的适用性和安全性。Z. H. Wan 等^[10]采用自平衡法对 2 根大直径钻孔灌注桩进行了压浆前后的静载测试,结果表明后压浆技术能够有效提升珊瑚礁灰岩层桩基的承载力。万志辉等^[11]基于某工程开展了珊瑚礁岩层后压浆嵌岩桩的现场静载试验,分析了压浆前后的桩身内力的实测结果,并进一步研究了后压浆桩承载力的增强作用机制。虽然珊瑚礁地层后压浆桩基工程的承载效益已经得到验证,但对于该地层大直径嵌岩灌注桩的桩身完整性以及后压浆浆液渗扩效果的检测尚未见相关报道,对于礁灰岩层嵌岩灌注桩的承载力计算方法也亟需

进一步研究。

基于此，本文以马累 - 机场岛跨海大桥工程拟建区的珊瑚礁灰岩为研究对象，通过一系列基础力学试验，包括单轴抗压强度试验、单轴抗拉强度试验、点荷载强度试验以及扫描电镜切片鉴定，系统地研究珊瑚礁灰岩的力学性质与工程特性。基于后压浆嵌岩灌注桩的现场静载试验和钻孔取芯试验结果，探讨珊瑚礁灰岩大直径后压浆嵌岩灌注桩的承载能力与变形特性，并对桩身完整性及压入浆液的渗扩范围进行评价，最后提出珊瑚礁灰岩层灌注桩承载力设计的计算方法，以为珊瑚礁灰岩层深基础的设计与施工提供科学而可靠的依据。

2 工程地质概况

该工程为马累 - 机场岛跨海大桥的基础建设，拟建场地位于马尔代夫群岛北部的马累环礁区域。根据工程设计，该大桥全长约 2 km，其中桥梁部分长 1.39 km，包括 760 m 的主桥段和 630 m 的引桥

段，如图 1 所示。基础型式采用大直径嵌岩钻孔灌注桩，并结合后压浆工艺，以进一步提升基础的承载和变形能力。

场区的地质层主要由全新世松散珊瑚混砂、更新世礁灰岩及弱胶结或未胶结的珊瑚混砂地层组成。除浅表层存在夹杂珊瑚砾块和珊瑚残肢的填土外，主要地层包括填土、生物碎屑堆积以及礁灰岩。地质勘探结果显示，珊瑚礁灰岩主要表现为块状灰岩、砾块灰岩、砾屑灰岩和砂屑灰岩等，且不同钻探深度的岩石破碎等级和胶结程度存在明显差异。该区域的珊瑚礁地层表现出软硬交替的层理特征，具有孔洞发育、粒度级配不均、颗粒易破碎的特点，展现出典型的硬脆性特征。试验场地各土层的物理力学参数详见表 1。

对于基础设计而言，持力层的选择直接影响其承载力大小。该地区的礁灰岩层是桥梁主墩基础的主要地质岩层，考虑到礁灰岩层具有较好的工程性质和成岩化作用，将其选用为拟建桥梁基础的主要持力层。

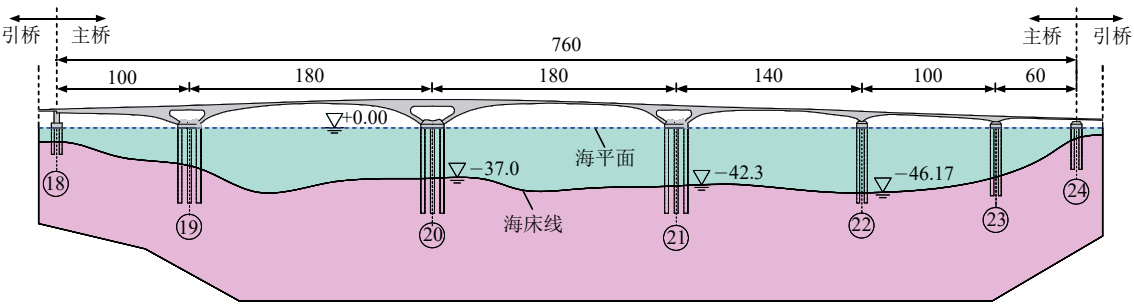


图 1 主桥桥型布置图(单位: m)
Fig. 1 Layout of main bridge type(unit: m)

表 1 试桩概况
Table 1 Overview of the test shafts

层号	土层名称	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔内剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔内声波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标准贯入击数	动力触探	点荷载/MPa	UCS_{avg} /MPa
①	填土	-	207	1 014	-	7	-	-
③	砾砂混砾块	-	228	1 355	21	12	-	-
④ ₁	礁灰岩	2.21	398	1 990	76	69	3.45	10.73
④ ₂	礁灰岩	-	364	1 747	25	26	2.87	-
⑤ _{1a}	礁灰岩	2.40	606	2 219	-	-	2.33	10.20
⑤ _{1b}	礁灰岩	2.22	626	2 876	-	-	2.47	7.50
⑤ _{1c}	礁灰岩	2.29	432	2 146	-	-	1.91	5.93
⑥ ₂	礁灰岩	2.25	628	2 530	-	31	2.83	8.42
⑥ ₃	礁灰岩	2.23	587	2 587	-	32	2.73	5.53
⑦ ₁	角砾混珊瑚砾块	2.20	590	2 959	53	-	2.40	5.18
⑦ ₂	礁灰岩	2.12	610	2 790	-	-	2.59	10.35

注： UCS_{avg} 为岩石单轴抗压强度平均值。

3 珊瑚礁灰岩工程特性与力学分析

3.1 珊瑚礁灰岩层的一般特性

珊瑚礁灰岩作为珊瑚岛礁陆基的主要地层,其复杂的成因使其被归类为一种不均匀性的岩土材料。珊瑚礁灰岩主要由珊瑚群体死亡后的遗骸积累而成,经过次生礁生物的充填、胶结,以及海洋动力作用下的沉积和成岩过程,最终形成具有一定致密性和结构强度的岩土材料。作为一种特殊的岩土介质,珊瑚礁广泛分布于全球热带海域,主要集中在北纬 30° ~南纬 30° 范围。在我国,珊瑚礁主要分布于南海地区,海南、广东、广西等沿海地带也存在少量分布。

在工程拟建区域,珊瑚礁岛的沉积物主要由海洋生物沉积构成,与陆源沉积物有显著区别。即便在同一珊瑚礁岛区,特殊的沉积环境和工程地质条件导致这些沉积物具有独特的地域性特征。此外,该勘探区域的珊瑚礁灰岩层表现出密度较低、孔隙率较高、结构性强、强度各向异性以及胶结程度不均等显著特点。

3.2 珊瑚礁灰岩的力学试验

(1) 单轴抗拉与抗压强度试验

岩样试件按照规程^[12]标准进行处理。抗拉试验制作直径为 50 mm,高度为 30 mm 的圆柱体试件。端面的不平整度最大误差不超过 0.05 mm。采用巴西劈裂法对珊瑚礁灰岩进行抗拉强度试验,结果显示岩样多呈现脆性破坏特征,破坏面沿径向分布。抗拉破坏裂缝特征及礁灰岩单轴抗拉强度如图 2 所示。

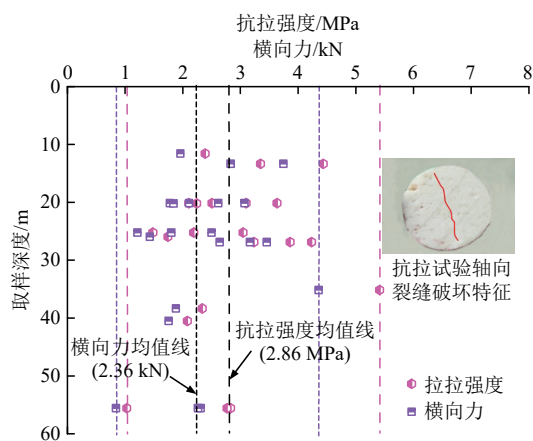


图 2 礁灰岩抗拉强度试验结果

Fig.2 Tensile strength test results of reef limestone

抗压试验中,岩样制备为直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体标准试件,岩样破坏后的裂缝及单轴抗压强度试验结果如图 3 所示。结果表明,珊瑚礁

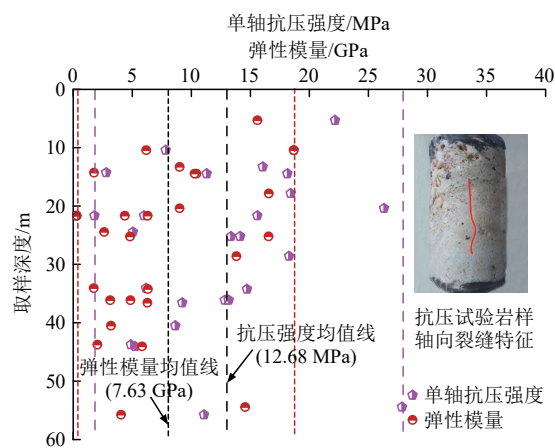


图 3 礁灰岩单轴抗压强度试验结果

Fig.3 Uniaxial compressive strength test results of reef limestone

灰岩的抗压强度范围为 1.81~27.85 MPa,平均抗压强度为 12.68 MPa,具有明显不均匀性;弹性模量范围为 0.28~18.68 GPa,平均弹性模量为 7.63 GPa,按强度特征划分为软岩及极软岩^[13]。单轴抗压强度与抗拉强度的均值比为 4.43,小于常规的陆源岩石 9.0~11.0 的范围值,该参数是反映珊瑚礁灰岩地质类型不同于陆源沉积岩的主要指标。

(2) 点荷载强度试验

点荷载试验设备采用 STDZ-1 型点荷载试验仪,制备试件岩样尺寸为 280 mm×270 mm×650 mm。对 158 个不同取样深度的礁灰岩岩样进行点荷载试验,并利用 3 倍标准差的方法^[14],对数据进行降噪处理。点荷载试验结果及岩石破坏特征如图 4 所示。结果表明,该场地礁灰岩的标准点荷载强度在 0.49~6.22 MPa 范围,点荷载强度平均值为 2.54 MPa。与抗拉强度试验结果相比,该礁灰岩点荷载强度平均值与抗拉强度试验结果较为接近。从点荷载岩石破坏特征可以看出,破坏面沿竖向劈裂,与抗拉试验中巴西劈裂裂缝特征相似,说明该礁灰岩在垂直生长线方向上最为薄弱。

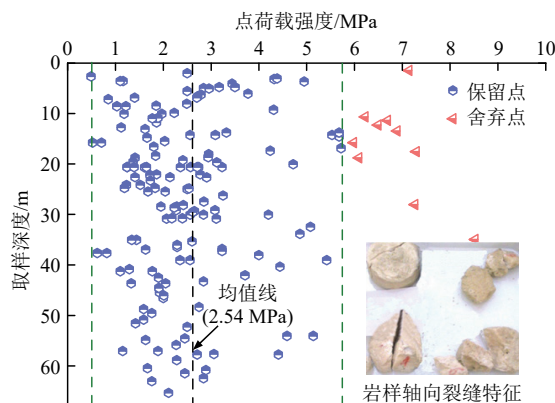


图 4 礁灰岩点荷载强度试验结果

Fig.4 Point loading test results of reef limestone

(3) 强度参数估算

根据 Mohr-Coulomb 强度破坏准则, 可以通过上述测得的单轴抗拉强度 σ_t 和单轴抗压强度 σ_c 计算出礁灰岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。具体计算公式^[15]如下:

$$c = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \right) \quad (2)$$

将试验得到的平均单轴抗拉强度和抗压强度代入式(1)和(2), 计算得到礁灰岩的强度指标 $c = 3.17$ MPa, $\varphi = 49.14^\circ$ 。

3.3 礁灰岩层的结构特征

珊瑚礁灰岩的结构特征与珊瑚礁生长的沉积历史环境、沉积相带演变密切相关。通过分析可以推断其形成时所处的海洋环境条件。这不仅有助于深入理解该地区的沉积地质演化过程, 也为工程地质分类提供了重要的参考依据。

该工程拟建区场地珊瑚礁灰岩主要由珊瑚、礁灰岩和生物碎屑灰岩组成。其中, 珊瑚包括滨珊瑚与蜂巢珊瑚两类, 滨珊瑚质量轻、单轴抗压强度高、结构致密且较为均匀, 内部存在细小孔隙, 具有较高的饱和吸水率; 蜂巢珊瑚则具有较大的孔隙且与外部连通, 饱和吸水率最高。礁灰岩包括珊瑚格架礁灰岩和砾屑灰岩 2 种类型。前者主要由原地珊瑚

骨架构成, 其生物格架结构由格架珊瑚与其他填充珊瑚共同形成, 岩样表面具有较多的孔隙和溶蚀孔洞, 孔洞及孔隙内部填充有泥晶物; 后者则主要由生物碎片和碎屑构成的包粒沉积而成。生物碎屑灰岩主要由生物碎片和碎屑胶结而成, 易于破碎且强度较低。珊瑚礁灰岩各类型岩样见图 5。

通过扫描式电子显微镜对不同深度取芯的珊瑚礁灰岩进行了岩性分析, 结果将岩样分为 3 类: (1) 珊瑚礁灰岩, 其岩体由支撑类珊瑚形成的生物礁结构构成, 胶结物质主要为叶状方解石。该类岩样的切片取自钻孔深度 5.2~5.6 m, 扫描电镜切片图像见图 6(a)。(2) 生物礁灰岩, 其岩石体由生物骨骼、生物碎屑和晶状方解石构成。生物碎屑主要为钙质生物碎屑, 通常呈单壳状; 而填充在珊瑚碎屑之间的胶结物主要为亮晶方解石, 少量为泥晶方解石。该类岩石体呈多孔结构, 孔洞大小不一且不规则, 大多数孔洞周围的晶状方解石胶结良好。切片岩样取自钻孔深度 10.55~10.75, 36.0~36.64 和 40.14~40.60 m, 相应的扫描电镜切片图像见图 6(b)~(d)。(3) 含生物碎屑的晶灰岩, 其岩石体主要由中晶方解石、微晶方解石和变余生物碎屑组成。中晶方解石晶体不够透亮, 内部含有泥晶方解石, 其中部分泥晶方解石块状体呈现出生物碎屑的特征, 归类为变余生物碎屑。该类岩石体呈多孔结构, 孔洞大小不一且不规则。切片岩样取自钻孔深度 27.9~28.1 m, 对应的扫描电镜切片图像见图 6(e)。

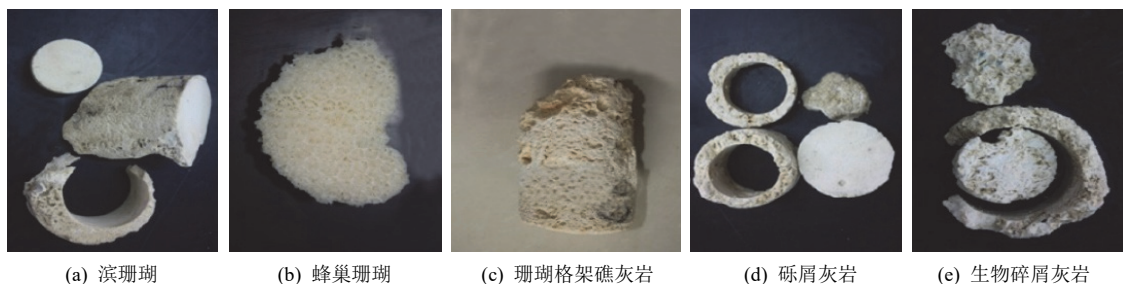


图 5 珊瑚礁灰岩类型

Fig.5 Types of coral-reef limestone

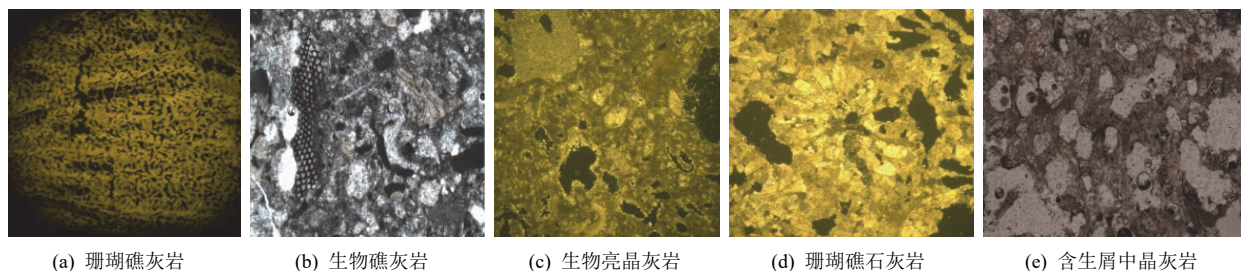


图 6 珊瑚礁灰岩扫描电镜照片

Fig.6 Scanning electron micrographs of coral-reef limestone

通过岩芯鉴别和扫描电镜切片鉴定分析可知,场区珊瑚礁灰岩具有以下几个显著特点:岩体内部孔隙和孔洞分布广泛、颗粒间的空间结构复杂多样,不同部位岩样胶结程度存在显著差异,导致岩体内部的物理性质不均一。此外,珊瑚礁灰岩中的颗粒易破碎,且整体上表现出典型的脆性特征。这些特性是珊瑚礁灰岩在力学行为和物理性质方面特殊性的具体化表现。

尽管上述对珊瑚礁灰岩力学性质和工程特性的分析为工程建设提供了宝贵的参考,但由于该礁岛沉积物的构成明显不同于陆源沉积物,且其独特的沉积环境和工程地质结构进一步加剧了这种差异,因此珊瑚礁灰岩与陆源岩石之间的差异需要特别重视。

目前,国内外关于岩石地层的基础工程研究主要集中于陆源岩石,而针对生物成因的珊瑚礁灰岩的基础工程相关研究案例相对匮乏。因此,迫切需要开展更多具有针对性和参考价值的现场试验研究,以丰富珊瑚礁地质基础工程的实践经验,为在这种特殊地质条件下的工程实践提供科学依据和可靠的指导。

4 后压浆嵌岩桩现场试验结果分析

4.1 试验概况

工程拟建区位于珊瑚礁灰岩层,该区域的地质

条件复杂。由于国内外关于此类特殊岩层段桥梁桩基础工程的公开施工案例相对较少,因此有必要在拟建区开展试验桩的承载力及施工工艺测试。该工程进行了 3 根试桩的压浆前后静载试验,并在桥位区布置了 1 根工艺试桩以进行钻孔取芯检测。所有试桩均采用旋挖钻成孔工艺,桩身混凝土的强度等级为 C35,成桩完成后均实施桩端和桩侧组合式后压浆施工。本文选取了其中一根静载测试试桩 TS1 和一根工艺检测试桩 TS2 进行分析。试桩的具体参数见表 2,地质分布及压浆管路布置详见图 7。

表 2 试桩尺寸及压浆参数

Table 2 Test shaft dimensions and grouting parameters

试桩 编号	桩长/m	桩径/m	压浆量/t		终止压浆 压力/MPa		试验 类型
			桩侧	桩端	桩侧	桩端	
TS1	44.0	3.63	2.4	3.7	6.7	7.2	静载 测试
TS2	45.0	1.50	-	1.64	-	4.0	工艺 测试

注:在实际压浆施工中,工艺试桩 TS2 桩侧压浆未能成功实施。

4.2 试验方法

(1) 组合后压浆施工工法

试桩 TS1 和 TS2 均采用桩端与桩侧组合式后压浆技术,其中桩端和桩侧的压浆装置分别使用直管法和环管法,所用的压浆管材为钢管,并与钢筋笼的加劲筋固定连接。桩端与桩侧组合式后压浆的施工方法如图 8 所示。

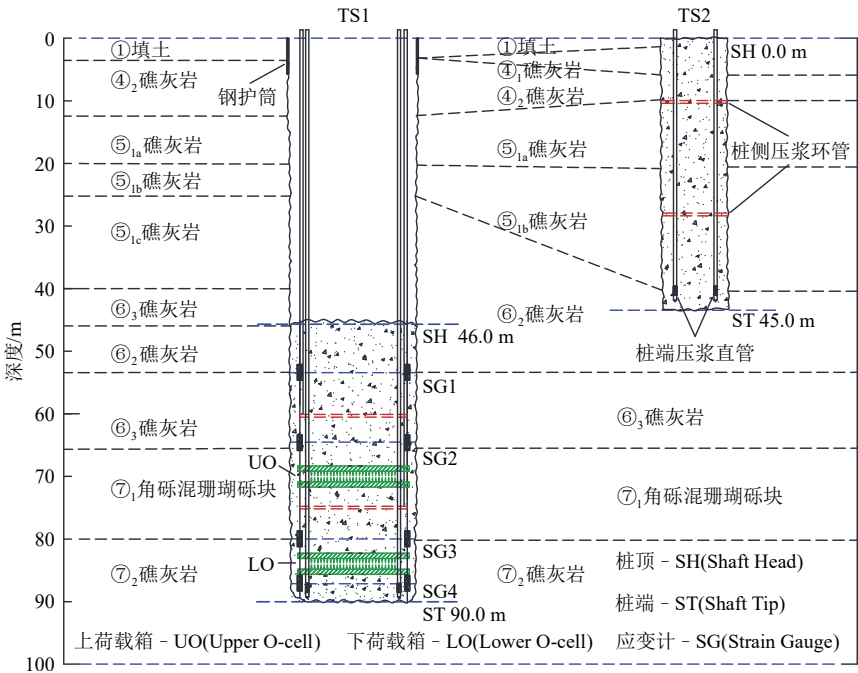


图 7 试桩地质剖面及压浆管布置图

Fig.7 Geological profile of test shaft and grouting pipes layout

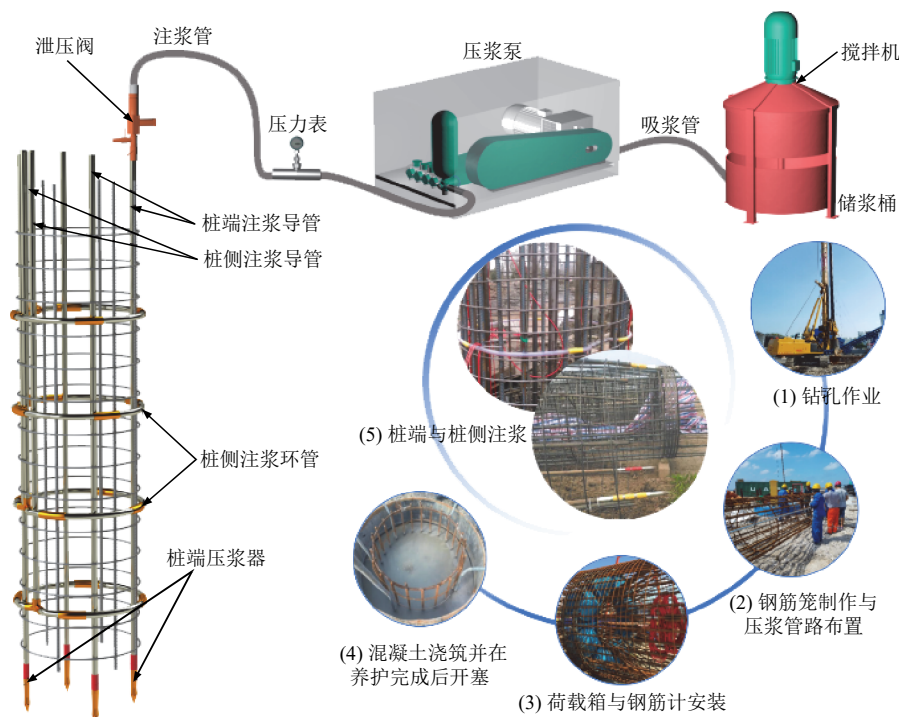


图 8 组合式后压浆桩施工流程

Fig.8 Construction procedure for combined tip-and-side post-grouted shaft

值得注意的是, 工艺试桩 TS2 压浆前, 对桩侧压浆环管进行清水开塞尝试, 但未能取得成功。随后采用张拉液压油泵对环管进行再次开塞处理, 并顺利疏通了压浆管路。然而, 在后续的实际压浆施工过程中, 桩侧浆液却未能顺利注入。分析原因主要是钻孔施工对桩周珊瑚礁灰岩的扰动, 使得孔壁附着了大量破碎的珊瑚礁碎屑、砂砾和角砾颗粒。在随后的混凝土浇筑过程中, 超方量的混凝土水泥浆液沿孔壁横向扩散, 与这些松散的岩层碎屑发生了胶结作用, 并在桩周形成了致密的水泥浆固化层, 导致桩侧压浆过程中浆液无法有效渗透。这正是造成实际压浆施工中浆液无法顺利注入的根本原因。

特别说明, 由于珊瑚礁灰岩层表面具有较多的孔隙和溶蚀孔洞, 常规硅酸盐水泥在这种地质条件下的应用效果可能不佳。此外, 鉴于马尔代夫作为自然生态保护区, 使用如水玻璃等传统压浆材料不符合环保要求。因此, 采用 GJ-100 特制注浆材料, 主要由水泥、专用外加剂、高分子聚合物及多种矿物改性材料复配而成^[11]。考虑珊瑚礁灰岩独特的力学特征, 期望 GJ-100 注浆材料能够在类似岩石地层的压浆施工中提供有效的参考与应用指导。

(2) 静载试验方法

考虑到施工场地情况及试桩荷载水平, 试桩 TS1 静载试验采用双荷载箱自平衡测试方法。静载试验分为压浆前后 2 个阶段进行, 压浆结束后需养护不低于 20 d 才能开展第二阶段的静载试验。加载采用慢速维持荷载法, 具体细节可参考规程^[16]。现场加载测试装置如图 9 所示。

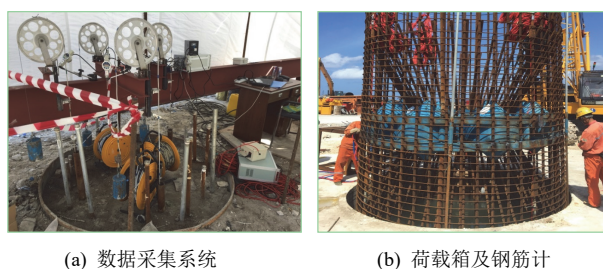


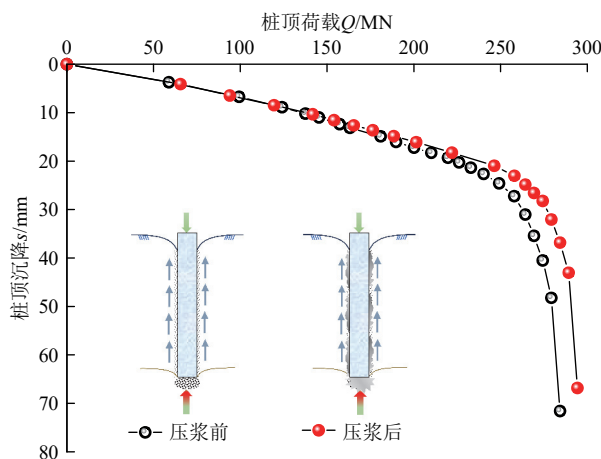
图 9 自平衡加载测试示意图

Fig.9 Bidirectional O-cell loading test diagram

4.3 静载试验结果分析

(1) 桩顶荷载 Q - 位移 s 曲线

在工程实践中, 研究人员和设计师通常依赖桩顶荷载 Q - 位移 s 曲线来评估试桩的承载能力和变形特性, 这也是施工设计的重要参考依据。依据现有规程^[16], 将试桩 TS1 加载测试结果转换为传统静载试验的桩顶荷载 - 位移(Q - s)曲线, 如图 10 所示。

图 10 试桩 TS1 压浆前后转换 $Q-s$ 曲线Fig.10 Conversion of the $Q-s$ curves for shaft TS1 before and after grouting

从图 10 中可以观察到,加载初期压浆前后的 $Q-s$ 曲线近似线性发展,此时可认为桩-礁灰岩层处于弹性剪切阶段,桩顶荷载逐渐传递至桩身。进一步观察发现,压浆前后曲线的前半段基本重合,表明该阶段岩层中注入的浆液对桩-岩界面的改善作用尚未充分体现。然而,当桩顶荷载达到 200 MN 时,压浆前后的曲线发展逐渐出现差异,桩-岩界面开始发生塑性变形,而在同等荷载下,后压浆桩表现出更好的桩顶变形控制能力。

当单桩承载力达到极限时,可将破坏前一级的荷载作为单桩极限承载力^[17]。由此可以得出,压浆前后试桩 TS1 的抗压极限承载力分别为 279.29 和 289.29 MN,均满足设计荷载需求,压浆后试桩的极限承载力提升了 3.6%;同时,试桩 TS1 在压浆前后的极限荷载下,桩顶位移分别为 48.22 mm (0.13D) 和 32.05 mm (0.08D),压浆后极限荷载下的桩顶位移相比压浆前减小了 33.53% (0.005D)。可见,随着荷载增加,桩身轴力逐步向下传递,浆液的注入使桩周岩土层固化范围扩大,从而带动更多的桩周岩层参与到荷载传递中,压浆后试桩表现出更优的桩顶变形控制能力。因此,在设计珊瑚礁灰岩层大型桥梁桩基础施工时,若对承载力要求较高且允许的差异沉降较小,选择大直径嵌岩灌注桩并结合后压浆工艺,是提高桩基础承载能力和变形特性的有效方案。

(2) 桩侧摩阻力分析

为研究珊瑚礁灰岩层大直径桩侧摩阻力的发挥情况,图 11 给出了桩侧摩阻力沿深度分布曲线。从

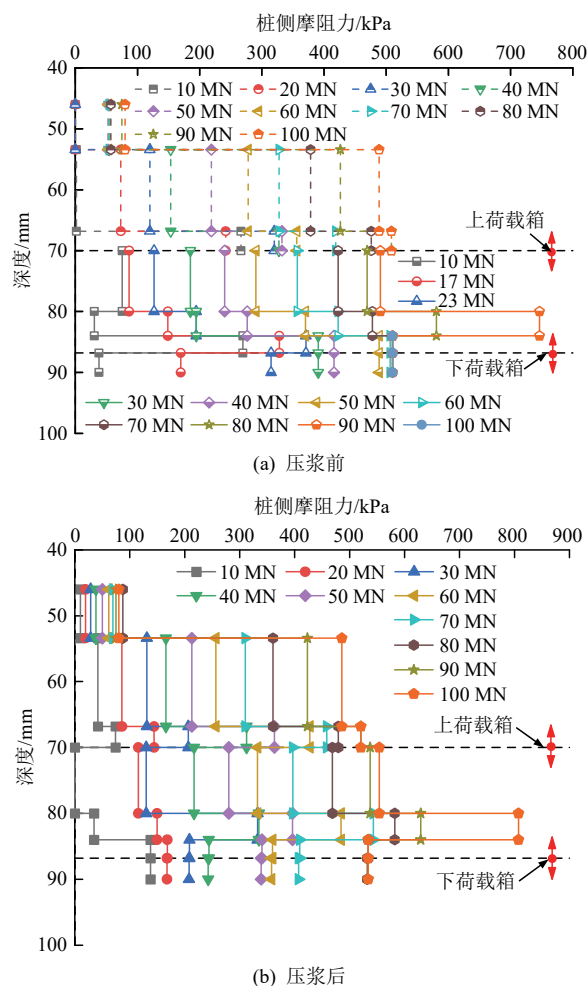


图 11 试桩 TS1 压浆前后桩侧摩阻力分布曲线

Fig.11 Shaft side resistance before and after grouting of TS1

图中可以看出,随着施加荷载的增加,桩侧摩阻力的发挥也逐渐增大。在靠近荷载箱的区域,礁灰岩层的侧摩阻力率先被调动,表现出较高的桩侧摩阻力值;而距离荷载箱远端的桩段,侧摩阻力调动速率相对较慢,且桩侧摩阻力未能完全发挥。当荷载达到 100 MN 时,靠近荷载箱位置处的桩侧摩阻力增幅较小,因此可以推断该级荷载作用下荷载箱两侧岩层的桩侧摩阻力得到了充分发挥。

图 12 展示了试桩压浆前后桩侧摩阻力-桩土相对位移关系曲线。从图中可以看出,压浆后 SH~SG2(46~66.8 m)的上段桩侧摩阻力提升效果并不明显,而 SG2~ST(66.8~90.0 m)的中下段桩侧摩阻力则得到了显著改善。分析认为,这一现象产生的原因可能有 2 个方面:一方面,后压浆施工工艺的影响导致上层压浆断面处的加固效果不佳;另一方面,压浆效果在很大程度上受到岩土层结构特性及胶结程度的影响,其中松散且多孔的礁灰岩层压浆加固效果通常更为显著。

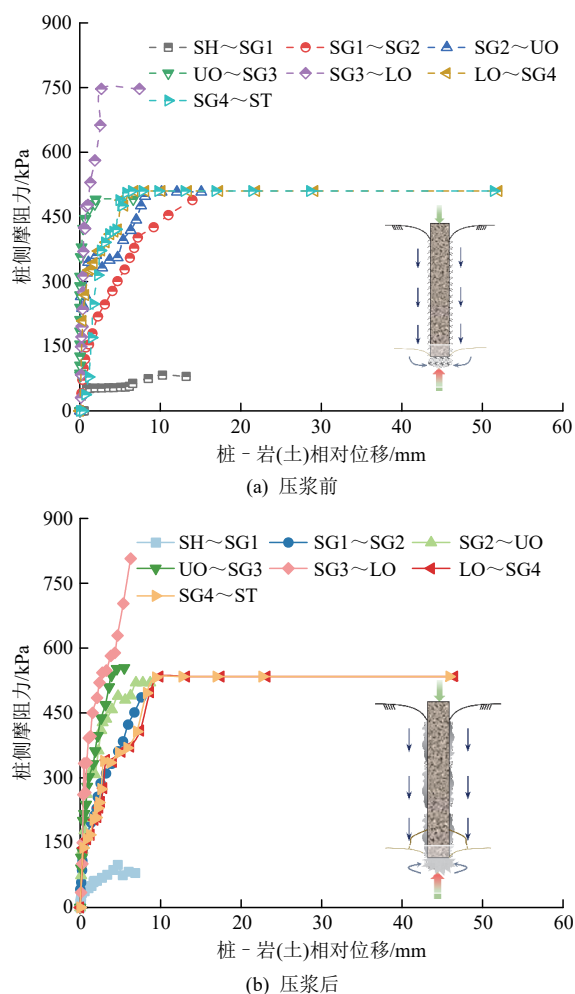


图12 试桩 TS1 桩侧摩阻力 - 桩土相对位移关系曲线

Fig.12 Shaft side resistance versus shaft-soil relative displacement of TS1

如前所述, 该地区受珊瑚礁沉积相带演变及沉积环境的影响, 不同深度处的岩层间也表现出不均匀性与结构独特性。⑥₂ 和 ⑥₃ 礁灰岩层($USC_{avg} = 5.53 \text{ MPa}$)分别呈中等胶结与弱胶结特性, 经试验测得压浆前后桩侧摩阻力极限值分别为 498 和 486 kPa; ⑦₁ 角砾混砾块($USC_{avg} = 5.18 \text{ MPa}$)以生物碎屑为主, 且颗粒大小不均匀, 压浆前、后桩侧极限承载力值分别为 503 和 536 kPa; ⑦₂ 礁灰岩($USC_{avg} = 10.35 \text{ MPa}$)位于桩端, 岩芯较完整且表面较为粗糙, 压浆前、后桩侧极限侧摩阻力值分别为 747 和 807 kPa。可见, 礁灰岩层大直径嵌岩桩桩侧摩阻力的发挥与岩层单轴抗压强度和岩体完整度有直接关系^[7]。

此外, 桩端注入的浆液在压力作用下能够有效加固桩端持力层, 并且部分浆液也会沿着桩身上返并下渗, 加固端部处的桩周岩土层, 从而增强桩端附近的桩侧摩阻力发挥。同时, Q. Q. Zhang 等^[18]的研究发现, 压浆后桩端持力层强度的增强也会提升端部处桩侧摩阻力的发挥。因此, ⑦₂ 礁灰岩压

浆后的桩侧摩阻力改善效果相较于桩身中上段更为显著。

(3) 桩端阻力分析

为研究珊瑚礁灰岩层大直径桩端阻力的发挥情况, 图 13 给出了试桩 TS1 压浆前后的桩端阻力 - 位移曲线。

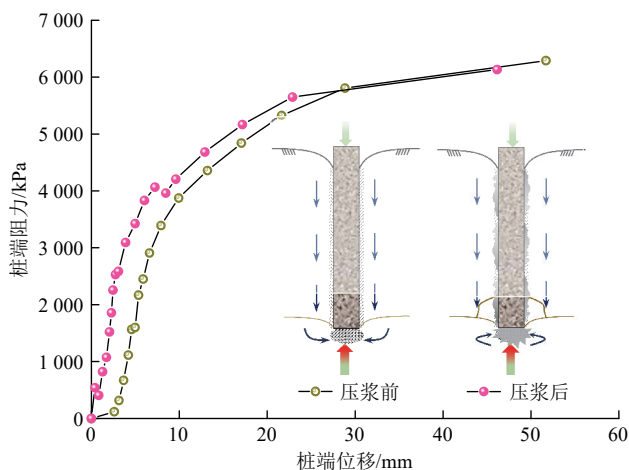


图13 试桩 TS1 桩端阻力 - 位移曲线

Fig.13 Shaft tip resistance versus tip displacement of TS1

整体上看, 试桩压浆前后的桩端阻力 - 桩端位移曲线呈现出类似双曲线的发展趋势。在初始荷载阶段, 桩端阻力表现出近似线弹性的特性, 当超过某一荷载值时, 曲线出现明显的转折点; 在最后两级荷载阶段, 压浆前后的曲线近似重叠。这可能是由于礁灰岩层与混凝土混合后逐渐压实硬化造成的, 曲线的转折点标志着桩端可能开始出现刺入变形。因此, 桩端的极限承载力应取转折点处的前一级荷载^[17]。在桩端持力层为 ⑦₂ 角砾混砾块($USC_{avg} = 10.35 \text{ MPa}$)的情况下, 压浆前后极限桩端阻力值分别为 5 807.45 和 5 649.18 kPa, 对应的桩端位移值分别为 7.9% D 和 6.3% D , 这与 K. F. Liu 等^[19]建议的(6%~12%) D 范围一致, 但高于 L. C. Reese 和 M. W. O'Neil^[20]报道的(4%~5%) D 。可见, 珊瑚礁灰岩特殊的工程特性导致其桩端位移发挥有所不同, 桩端阻力的有效调动所需的桩端位移值受到持力层种类、桩基尺寸及施工过程中的不确定性等因素的影响。

此外, 可以观察到压浆后的桩端岩层初始刚度大于压浆前的, 且在相同桩端位移下可以调动更大的桩端阻力发挥。可见, 桩端压浆能够增强桩端持力层的刚度, 减小桩端沉降量; 浆液在高压作用下固化底部松散的沉积岩屑, 并渗透、压密桩端持力层^[14], 对珊瑚礁灰岩的孔隙、溶蚀孔洞及生物碎片

起到充填和胶结作用。此外,万志辉等^[11]指出了桩端压浆的预压作用可以提前调动桩端阻力参与到桩基受荷工作。因此,后压浆技术在珊瑚礁灰岩大直径桩基础中的应用能够提高桩端阻力的发挥并有效控制桩基的沉降量。

4.4 压浆效果检测

珊瑚礁灰岩具有不同于陆源岩的特殊结构性和各向异性,多孔、低强度及脆性特征,使得钻孔灌注桩结合后压浆技术在礁灰岩层中的应用具有较大的潜力。然而,桩基础的施工和后压浆作业均属于地下隐蔽工程,同时当地缺乏相关的大型桥梁桩基工程施工经验。试桩 TS1 静载试验结果已表明,珊瑚礁灰岩层大直径嵌岩灌注桩具有显著的承载力,且压浆后桩基的承载变形能力得到进一步提升。为深入研究珊瑚礁灰岩层大直径钻孔灌注桩的桩身完整性及后压浆浆液的扩散效果,开展试桩 TS2 压浆后的钻孔取芯试验。

试桩 TS2 在成桩并经过一定养护周期后,开展了桩端和桩侧压浆试验,并在压浆完成 6 d 后进行了钻孔取芯检测。如前所述,试桩 TS2 的桩侧浆液未能顺利压出。因此,钻孔取芯试验主要用于评估桩身完整性及桩端浆液的扩散效果。在桩侧外壁 15 cm 处设置了一个深度为 15 m 的试钻孔,并在距离

桩中心 30 cm 处设置了另一钻孔,钻孔深度至芯样中不含浆液颗粒为止。试桩 TS2 的钻孔布置及钻取芯样如图 14 所示。

从图 14(a)~(c)可以观察到,深度范围 0.0~44.5 m 处的桩身完整性较好,局部柱状混凝土芯样中夹杂有少量的岩层碎块。这可能是由于混凝土浇筑过程中,孔壁脱落的部分珊瑚礁灰岩碎块在导浆管升降过程中被带入桩身内部。此外,桩侧试钻取芯结果显示,深度 8~15 m 处的桩侧芯样中夹杂有水泥颗粒。分析认为,浇灌的部分水泥浆液横向渗扩到桩周的珊瑚礁灰岩层中,对这些松散且孔隙较大的礁灰岩层进行了初步的渗扩加固,增大了桩身与珊瑚礁灰岩层之间的黏结力。

由图 14(h)~(j)可见,桩端 44.5~49.5 m 处的芯样多数为砂砾颗粒,并夹杂少量块状礁岩。而 44.5 m 处显示有固化后的浆液结石体,深度 44.5~47.5 m 处的芯样含有大量的压浆颗粒材料。经过清洗的块状珊瑚礁灰岩表面显著附着了压浆颗粒,这些颗粒有效地充填了礁灰岩层的孔隙并增强了其结构稳定性。由此可见,珊瑚礁灰岩层桩端压入浆液向下的渗扩范围约 3 m(约 2D),水泥浆液在巨大压力作用下能实现珊瑚礁灰岩层孔隙的填充和胶结岩层碎块,从而有效地提升珊瑚礁灰岩层整体结构的稳定性。

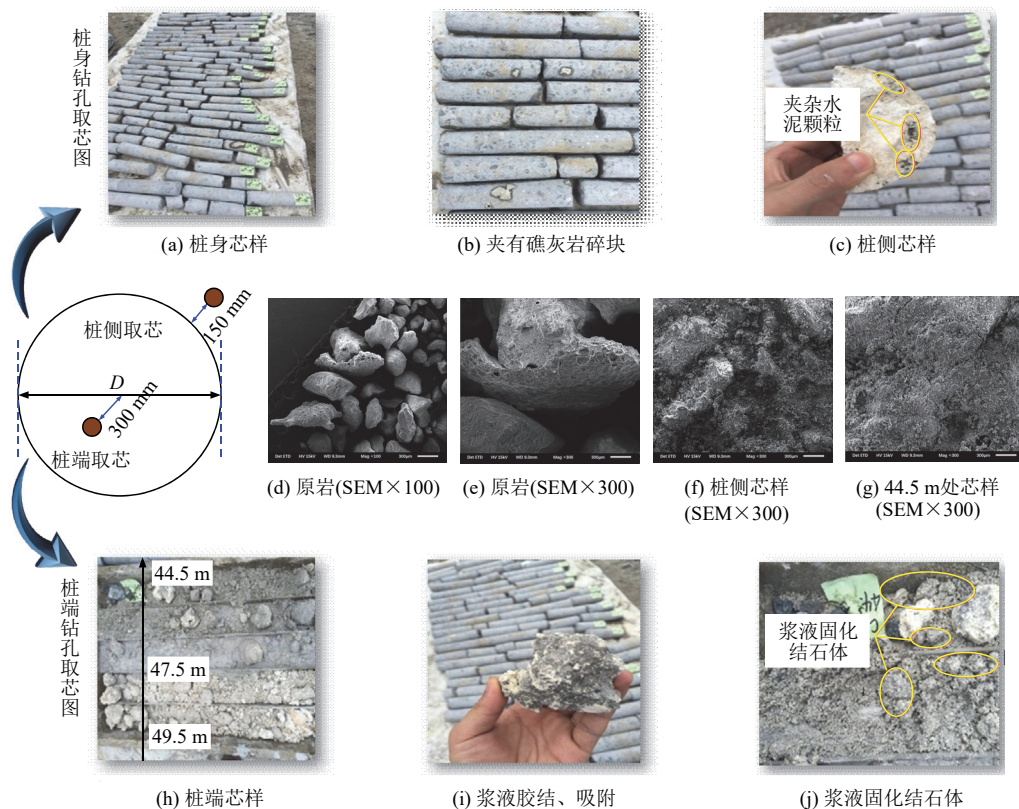


图 14 试桩 TS2 钻孔取芯图

Fig.14 The field diagram of shaft TS2 drilling core

另外, 分别选取原状岩、桩侧和桩端具有代表性的块状岩样在扫描电镜下观察, 结果如图 14(d)~(g)所示。可以看出, 原状礁灰岩结构形态呈散粒状分布, 颗粒表面粗糙、多棱角且存在较多的孔隙, 颗粒间为点对点接触。而从桩侧和桩端芯样的微观结果可以看出, 浆液加固后水化反应产生的胶凝物对礁灰岩孔隙进行了填充, 并在颗粒表面形成致密的胶结覆盖层, 颗粒间的接触方式也由点接触变为面接触, 从而提高了颗粒间的连接强度, 改良后的礁灰岩强度和刚度因此得到提升。

上述静载试验及钻孔取芯试验结果表明, 大直径后压浆嵌岩灌注桩在马尔代夫群岛的珊瑚礁灰岩地层中应用效果良好, 浇筑的混凝土沿着孔壁横向扩散可以增强桩侧摩阻力发挥, 同时结合桩端桩侧组合式后压浆技术, 能进一步提高桩基承载力并控制沉降量。本次试验成果为该地层的大型基础设计提供了有益的参考。

5 珊瑚礁灰岩后压浆嵌岩桩承载力计算方法

5.1 国内外后压浆灌注桩计算方法

当前, 后压浆桩基础在全国范围内得到广泛推广和应用, 然而对该桩基础的设计使用离不开对其承载力的准确预测。目前, 国内外主流的后压浆灌注桩承载力计算方法主要包括以下 3 类:

(1) G. Mullins 等^[21]提出的“TCM”法(tip capacity multiplier approach), 在未压浆钻孔灌注桩的桩端阻力基础上施加一个增强因子。(2) M. A. Pando 等^[22]提出的“ACM”法(axial capacity multiplier approach), 对未压浆钻孔灌注桩施加一个总的承载力提高系数。(3) 胡春林等^[23]提出并被中国规范所采纳的“CM”法(component multiplier approach)^[23-24], 即对桩端和桩侧阻力分别施加一个不同压浆增强系数。

然而, 这些方法均为经验性的计算方法, 依据不同的地层条件提出。因此, 不同地区的土层条件、钻孔施工工艺及压浆施工方法等都会影响后压浆桩基础承载力预测的准确性。规范^[24-25]“CM”法中的公式建议全风化和强风化岩层的桩端和桩侧压浆增强系数范围分别为 1.2~1.4 和 1.3~1.6, 但这些建议主要针对陆源岩, 且对岩体性质未做详细描述。Z. H. Wan 等^[14, 26]均指出规范推荐的桩端和桩侧

压浆增强系数在强风化花岗岩中的应用准确性不足, 而且珊瑚礁灰岩特性表明该岩层形成于特殊的沉积环境与工程地质条件, 其沉积物明显不同于陆源沉积物。因此, “CM”法在珊瑚礁灰岩后压浆嵌岩灌注桩承载力预测的精度上可能存在较大偏差。

此外, 规范^[24-25]中建议的嵌岩桩承载力计算公式均涉及桩基尺寸、嵌岩深度和岩石的饱和单轴抗压强度等因素, 并提供了相应的经验系数作为参考。其中, 规范^[25]采用与岩石强度和嵌岩径比 h_r/d 有关的侧阻和端阻综合系数 ζ_r 来确定单桩嵌岩段的竖向承载力标准值, 并对后压浆嵌岩段侧阻和端阻的综合系数进行了修正。而规范^[24]则采用了与岩石强度和破碎程度有关的端阻和侧阻发挥系数 c_1 和 c_2 , 并结合入岩深度和沉渣厚度进行取值来计算单桩竖向承载力容许值。然而, 该规范未能涵盖后压浆施工对嵌岩桩承载力的潜在提升, 这在现行规范中显现出一定的不足。鉴于此, 研究珊瑚礁灰岩等特殊沉积岩层后压浆嵌岩灌注桩承载力预测方法具有重要意义。这不仅可以为桥梁桩基嵌岩后压浆灌注桩承载力设计提供科学依据, 还将为工程实践提供重要的参考价值, 值得进一步的探讨和完善。

5.2 极限桩侧摩阻力和桩端阻力取值方法

国内外诸多学者研究发现, 极限桩侧摩阻力和极限桩端阻力值与岩层单轴抗压强度之间存在线性或非线性关系, 具体计算公式如下:

$$\tau_{\max} = \alpha \sigma_c^\beta \quad (3)$$

$$q_{\max} = N_s \sigma_c^m \quad (4)$$

式中: $\tau_{\max}$, $q_{\max}$ 分别为极限桩侧摩阻力值和极限桩端阻力值(MPa); α , β 为桩侧摩阻力系数值; N_s , m 为桩端阻力系数值; σ_c 为完整岩石无侧限抗压强度(MPa)。

R. G. Horvath 等^[27-37]通过实测数据数据拟合, 得到了页岩、泥岩、砂岩、花岗岩等不同岩性的陆源岩极限侧阻或端阻值的经验公式, 这些公式主要以非线性函数形式呈现, 见表 3。

为了进一步研究珊瑚礁灰岩嵌岩桩的平均极限桩侧摩阻力和桩端阻力与完整岩石单轴抗压强度之间的关系, 本文参照现有经验公式, 将所开展的 3 根试桩静载试验得到的压浆前后实测数据与岩石单轴抗压强度进行拟合分析, 如图 15 所示。

表 3 嵌岩桩极限侧阻或端阻经验计算公式

Table 3 Empirical methods for ultimate side and tip resistances of rock-socketed shafts

经验方法来源	桩侧摩阻力计算公式	经验方法来源	桩端阻力计算公式
R. G. Horvath 和 T. C. Kenney ^[27]	$\tau_{\max} = 0.21 \sigma_c^{0.5}$	D. F. Coates ^[33]	$q_{\max} = 3 \sigma_c$
T. J. Kaderabek 和 R. T. Reynolds ^[28]	$\tau_{\max} = 0.3 \sigma_c$	R. K. Rowe 和 H. H. Armitage ^[29]	$q_{\max} = 2.5 \sigma_c$
R. K. Rowe 和 H. H. Armitage ^[29]	$\tau_{\max} = 0.41 \sigma_c^{0.57}$	鲁先龙等 ^[34]	$q_{\max} = 4.99 \sigma_c^{0.30}$
L. Y. Zhang 和 H. H. Einstein ^[30]	$\tau_{\max} = 0.40 \sigma_c^{0.5}$ $\tau_{\max} = 0.80 \sigma_c^{0.5}$	L. Y. Zhang 和 H. H. Einstein ^[30]	$q_{\max} = 4.83 \sigma_c^{0.1}$
C. W. Ng 等 ^[31]	$\tau_{\max} = 0.19 \sigma_c^{0.5}$	C. Vi-pulanandan 等 ^[35]	$q_{\max} = 4.66 \sigma_c^{0.56}$
王钦科等 ^[32]	$\tau_{\max} = 0.226 \sigma_c^{0.5}$	L. Y. Zhang ^[36]	$q_{\max} = 6.39 \sigma_c^{0.45}$
		W. Xu 等 ^[37]	$q_{\max} = 10.2 \sigma_c^{0.15}$

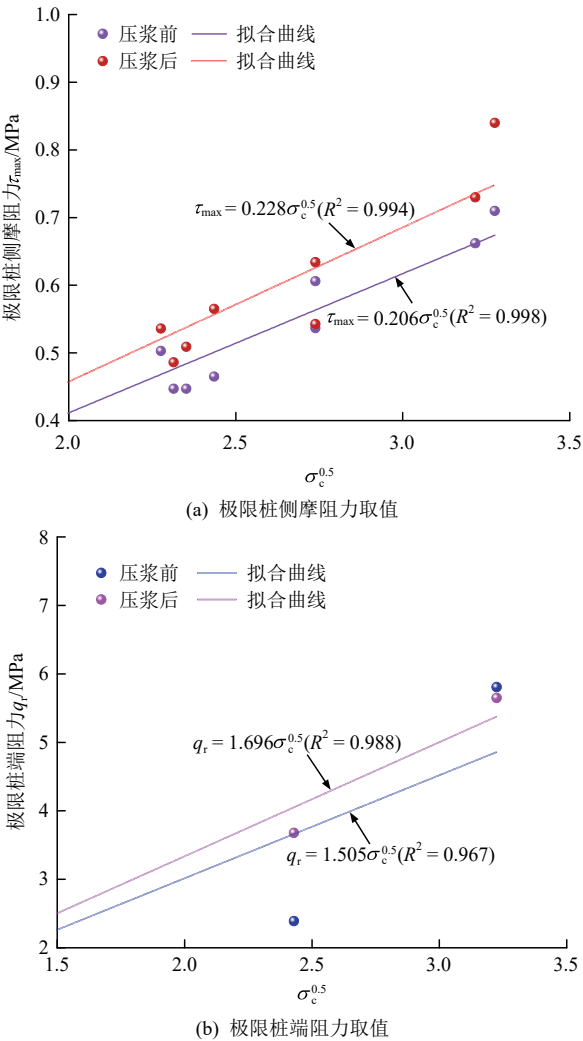


图 15 嵌岩桩承载力与岩石单轴抗压强度的关系

Fig.15 Relationship between bearing capacity of rock-socketed shafts and uniaxial compressive strength of rock

由图 15 可知, 压浆前后的极限桩侧摩阻力值 $\tau_{\max}$ 和极限桩端阻力值 $q_{\max}$ 与岩石单轴抗压强度 $\sigma_c^{0.5}$ 采用直线函数拟合效果良好, 拟合精度 R^2 均大于 0.95。可见, 珊瑚礁灰岩层极限桩侧摩阻力和桩端阻力值与岩石单轴抗压强度之间为非线性关系。

压浆前后的极限桩侧摩阻力拟合公式分别为 $\tau_{\max} = 0.206 \sigma_c^{0.5}$ 和 $\tau_{\max} = 0.228 \sigma_c^{0.5}$, 压浆前后的极限桩端阻力拟合公式分别为 $q_r = 1.505 \sigma_c^{0.5}$ 和 $q_r = 1.696 \sigma_c^{0.5}$, 可以看出压浆后珊瑚礁灰岩桩端桩侧阻力均得到不同程度的提升, 桩端阻力和桩侧摩阻力在压浆后分别提升了 12.69% 和 10.68%。需要特别说明的是, 这些公式仅适用于 2~11 MPa 范围的珊瑚礁灰岩层, 且由于珊瑚礁灰岩层结构差异性较大, 因此该建议公式有待进一步收集更多的现场实测数据以提高其普适性。

5.3 珊瑚礁灰岩后压浆嵌岩灌注桩承载力计算建议公式

由前面分析知, 珊瑚礁灰岩桩基础竖向抗压承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力共同承担, 因此, 本文的珊瑚礁灰岩嵌灌注桩极限承载力计算建议公式为

$$Q_u = Q_{s'} + Q_s + Q_r = u \sum q_{sik} l_i + \lambda_s \pi d \sum \tau_{\max} l_r + \lambda_p A_p q_r \quad (5)$$

式中: $Q_{s'}$, Q_s , Q_r 分别为浅覆盖层的总桩侧极限摩阻力、嵌岩段的总极限侧阻力标准值、嵌岩段极限端阻力标准值; u 为桩身周长; q_{sik} 为第 i 层土的桩侧极限摩阻力标准值; $\tau_{\max}$ 为珊瑚礁灰岩桩侧极限摩阻力; q_r 为珊瑚礁灰岩极限桩端阻力值; d 为桩身直径; l_r 为嵌岩段长度; A_p 为桩端面积; λ_s , λ_p 分别为压浆后桩侧摩阻力、桩端阻力增强系数 ($\lambda_s = \alpha_{\text{压浆后}} / \alpha_{\text{压浆前}}$, $\lambda_p = N_{s\text{压浆后}} / N_{s\text{压浆前}}$), 且 λ_s , λ_p 分别取 1.11 和 1.13。

此外, 根据规范^[25]的建议, 对于桩端位于完整或较完整基岩中的嵌岩灌注桩, 考虑到压浆后承载力的提升, 应对压浆后嵌岩段的承载力计算值进行修正, 建议公式为

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} = u \sum q_{sik} l_i + \zeta_r f_{rk} A_p \quad (6)$$

式中: Q_{sk} , Q_{rk} 分别为土的总极限侧阻力标准值、嵌岩段总极限端阻力标准值; f_{rk} 为岩石天然湿度单轴

抗压强度标准值; q_{sik} 为第 i 层土桩侧极限摩阻力值, 取值范围为 160~260 kPa; ξ_r 为桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数, 对后压浆灌注桩取规范建议值的 1.2 倍, 即 $\xi_r = 2.04$ 。

为进一步验证本文所建议的计算方法的合理性, 本文将其计算结果与规范建议公式计算得到的珊瑚礁灰岩层单桩抗压极限承载力, 以及 TS1 桩现场静载试验结果进行对比分析。同时, 还增加了与试桩 TS1 在桩基尺寸上有显著差异的代表性试桩 TS3 进行共同分析, 试桩参数详见万志辉等^[11]研究。结果如表 4 所示。由表可知, 采用本文建议的计算公式得到的珊瑚礁灰岩嵌岩灌注桩在压浆前后的承载力计算值与现场实测值对比绝对误差分别为 9.78%~9.83%和 4.29~17.65%, 而规范法计算得到的绝对误差值分别为 10.05%~11.74%和 10.42~20.45%。可见, 采用本文建议公式与规范方法计算得到的极限承载力对工程实践均有一定的指导意义。相较之下, 采用本文建议计算公式得到的承载力计算结果更加精确。但观察到, 压浆后采用本文建议计算公式得到的 TS3 桩端阻力误差值达到 53.55%, 这一显著差异可能源于本文提出的计算方法受到当前收集的实测样本数据相对不足的限制, 使得其在适用性和准确性方面稍有欠缺。同时, 研究发现压浆后的承载力估算误差范围大于压浆前, 这表明珊瑚礁灰岩层的结构异质性对后压浆效果具有显著影响。具体而言, 后压浆的加固效果受注浆位置处岩层的结构特征、破碎程度及岩石质量等级等因素的显著影响^[25], 因此表现出一定的离散性。

在规范法中, 嵌岩段的侧阻和端阻综合系数 ξ_r 实际上是由分离的侧阻系数和端阻系数进行简单数学代换得到, 其中侧阻系数来源于假定的岩层侧阻分布模式^[38], 端阻系数则是来源于部分陆源岩桩基

础试验数据的经验总结, 这种方法可能无法完全反映嵌岩灌注桩实际的工作受荷机制。此外, 综合系数 ξ_r 取值受到嵌岩长径比限制, 且简易的划分为软、硬两类岩石进行取值^[39]。不同质量等级的岩石均采用 1.2 倍的侧阻和端阻综合系数, 这种片面的取值方法未必能够真实反映后压浆桩基础在实际工程中的承载力提升效果。因此, 当面对力学机制较为复杂的交互层岩石, 这种取值的合理性也有待进一步探讨。

6 讨 论

注浆是一种广泛应用于各类建筑工程的加固技术, 涵盖隧道、煤矿、管道等领域。大量的实践研究已证明其在胶结破碎岩层和填充裂缝方面的有效性, 从而防止渗漏并提高岩石强度^[40]。然而, 在桩基础的应用中, 当桩端嵌入坚硬岩层时, 通常认为嵌岩桩具有足够的桩端承载能力来满足所需的荷载需求^[24-25]。因此, 后压浆技术一般不建议应用于持力层为硬岩的桩基础。根据万志辉等^[41]对 716 根后压浆灌注桩的资料统计分析, 发现国内后压浆桩基础的应用主要集中在黏土、粉质黏土、粉砂和细砂等土层中。但仍有少部分案例应用至全强风化和强风化岩层中, 并且已有相关研究表明该类软弱岩石中桩基础经过压浆后承载力增强效果显著^[14, 26], 远超出规范建议的压浆增强系数值。因此, 在软弱且破碎的岩层中应用后压浆技术来提高承载力并优化桩基尺寸, 无疑是一项不错的选择。

当前国内对于后压浆嵌岩桩灌注桩承载力计算, 通常将其视为普通土层的后压浆灌注桩, 并采用“CM”法进行承载力计算, 忽略了嵌岩桩的特定背景。本文从嵌岩桩的角度出发, 建立了珊瑚礁灰

表 4 珊瑚礁灰岩嵌岩桩极限承载力计算结果对比

Table 4 Comparison of calculated ultimate bearing capacities for rock-socketed shafts in coral-reef limestone

试桩 编号	承载力	压浆前					压浆后				
		实测值/ MN	计算值/MN		误差范围/%		实测值/ MN	计算值/MN		误差范围/%	
			本文 公式	规范 公式	本文 公式	规范 公式		本文 公式	规范 公式	本文 公式	规范 公式
TS1	桩侧摩阻力	215.33	256.65	-	19.20	-	226.90	284.06	-	25.19	-
	桩端阻力	63.96	49.95	-	-21.90	-	62.39	56.29	-	-9.78	-
	总极限承载力	279.29	306.60	312.07	9.78	11.74	289.29	340.35	348.46	17.65	20.45
TS3	桩侧摩阻力	63.02	54.15	-	-14.07	-	63.74	59.93	-	-5.98	-
	桩端阻力	4.22	6.48	-	53.55	-	6.50	7.30	-	12.31	-
	总极限承载力	67.24	60.63	74.00	-9.83	10.05	70.24	67.23	77.56	-4.29	10.42

岩完整岩石单轴抗压强度与极限桩侧摩阻力和桩端阻力之间的关系,创新性地提出了珊瑚礁灰岩层后压浆嵌岩灌注桩承载力设计的计算方法。该方法不仅为后续相关后压浆嵌岩桩基工程的承载力设计提供了新的思路,也为桥梁工程中后压浆嵌岩桩基础设计规范的制定奠定了科学基础。然而,本文收集的试验样本量较少,导致计算精准度不够。因此,未来亟需进一步扩展珊瑚礁灰岩层相关桩基的案例研究,以丰富样本库并提高计算方法的准确性。同时,考虑到现有嵌岩桩研究对岩石种类的划分尚不够细致,未来研究期望在深度学习的驱动下,构建更精细化的数据模型,以深入探讨不同岩石力学指标与桩基阻力之间的关系。

最后,期望本文的研究成果能够为相关工程实践和设计提供有力的参考和指导,可以极大推动珊瑚礁灰岩地质条件下基础工程的技术进步。

7 结 论

本文通过一系列基本力学试验及现场试验,系统研究了其力学性质和工程特性。基于后压浆嵌岩灌注桩的现场静载试验和钻孔取芯结果,深入探讨了珊瑚礁灰岩层大直径后压浆嵌岩灌注桩的承载与变形特性,并对桩身完整性及后压浆浆液的渗扩范围进行了全面评价,得出了以下结论:

(1) 该场地礁灰岩呈软岩特征,其抗拉强度平均值约为 2.86 MPa,抗压强度平均值约为 12.68 MPa。标准点荷载强度平均值约为 2.54 MPa,破坏特征与巴西劈裂相似,沿垂直生长线方向具有弱化面的结构特征。微观分析表明,该礁灰岩具有多孔性、颗粒空间复杂性、胶结不均匀性、颗粒易碎性及典型脆性等特点。

(2) 后压浆技术可以提高珊瑚礁灰岩层大直径嵌岩桩基础的承载变形特性,压浆后的试桩极限承载力提升了 3.6%,桩顶沉降相比压浆前减小了 33.53%。压浆后,46~66.8 m 的上段桩侧摩阻力提升效果不明显,而 66.8~90.0 m 的中下段桩侧摩阻力则得到了显著改善,压浆前后极限桩端阻力充分调动所需桩端位移值分别为 7.9% D 和 6.3% D 。

(3) 钻孔取芯结果显示,桩端压力浆液向下渗入约 3 m(约 2 D),桩端块状岩块表面吸附有压浆颗粒,礁灰岩层的孔隙得到填充,并增强了其结构稳

定性。扫描电镜试验显示,浆液加固后水化反应产生的胶凝物对礁灰岩孔隙进行了填充,颗粒表面形成致密的胶结覆盖层,颗粒间的接触方式也由点接触变为面接触,改良后的礁岩强度和刚度也因此得到提升。

(4) 珊瑚礁灰岩层极限桩侧摩阻力值和桩端阻力值与岩石单轴抗压强度呈指数关系,从拟合结果可以看出压浆后极限桩端阻力和桩侧摩阻力分别提升了 12.69%和 10.68%。本文所建议的后压浆嵌岩灌注桩承载力计算公式,可为后续工程设计提供理论依据和实践参考。

参考文献(References):

- [1] 汪 稔,宋朝景,赵焕庭,等.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997:1-60.(WANG Ren, SONG Chaojing, ZHAO Huanting, et al. Engineering geology of coral reefs in Nansha islands[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-60.(in Chinese))
- [2] 刘海峰,朱长歧,汪 稔,等.礁灰岩-混凝土界面剪切特性试验研究[J].岩石力学,2020,41(5):1540-1548.(LIU Haifeng, ZHU Changqi, WANG Ren, et al. Shear test on reef limestone-concrete bonding interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1540-1548.(in Chinese))
- [3] 宋凯文,黄俊红,罗 忆,等.循环冲击荷载下的礁灰岩力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增2):3956-3965.(SONG Kaiwen, HUANG Junhong, LUO Yi, et al. Mechanical properties of reef limestone under cyclic impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Supp.2): 3956-3965.(in Chinese))
- [4] MA L J, DENG J J, WANG M Y, et al. Effect of diagenetic variation on the static and dynamic mechanical behavior of coral reef limestone[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024, 34(7): 893-908.
- [5] 刘海峰,朱长歧,崔 翔,等.礁灰岩嵌岩桩的端承特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增2):4348-4355.(LIU Haifeng, ZHU Changqi, CUI Xiang, et al. Experimental research on end bearing characteristics of rock-socketed pile in reef limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.2): 4348-4355.(in Chinese))
- [6] 刘海峰,朱长歧,孟庆山,等.礁灰岩嵌岩桩的模型试验[J].岩石力学,2018,39(5):1581-1588.(LIU Haifeng, ZHU Changqi, MENG Qingshan, et al. Model test on rock-socketed pile in reef limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1581-1588.(in

- Chinese))
- [7] 张永涛, 刘玉擎, 陈培帅, 等. 珊瑚礁灰岩地层灌注桩侧摩阻力特征及发挥系数取值研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 748 - 757.(ZHANG Yongtao, LIU Yuqing, CHEN Peishuai, et al. Research and application of lateral friction resistance characteristics and coefficient value of cast-in-place piles in coral reef limestone strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 748 - 757.(in Chinese))
- [8] 秦 伟, 戴国亮, 马李志, 等. 珊瑚礁地层中 PHC 桩原位静载试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增 1): 381 - 389.(QIN Wei, DAI Guoliang, MA Lizhi, et al. In-situ static loading tests of prestressed high strength concrete(PHC) pile in coral strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Supp.1): 381 - 389.(in Chinese))
- [9] GHAZALI F M, SOTIROPOULOS E, MANSOUR O A. Large-diameter bored and grouted piles in marine sediments of the Red Sea[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(4): 826 - 831.
- [10] WAN Z H, DAI G L, GONG W M. Full-scale load testing of two large-diameter drilled shafts in coral-reef limestone formations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(3): 1 127 - 1 143.
- [11] 万志辉, 戴国亮, 龚维明. 珊瑚礁灰岩层后压浆桩增强效应作用机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 467 - 473.(WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming. Enhanced mechanism of post-grouting pile in coral-reef limestone formations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 467 - 473.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5368—2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T 5368—2007 Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [14] WAN Z H, DUAN C, HU T, et al. Field study on bearing capacity of large-diameter rock-socketed bored piles with combined grouting in highly weathered rock layers[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(10): 8 701 - 8 722.
- [15] 王新志, 汪 稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 221 - 2 226.(WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Research on characteristics of coral reef calcareous rock in Nansha islands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 221 - 2 226.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ/T 403—2017 建筑基桩自平衡静载试验技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ/T403—2017 Technical specification for static loading test of self-balanced method of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.(in Chinese))
- [18] ZHANG Q Q, ZHANG Z M, LI S C. Investigation into skin friction of bored pile including influence of soil strength at pile base[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2013, 31(1): 1 - 16.
- [19] LIU K F, XIE X Y, LUO Z, et al. Full-scale field load testing of long drilled shafts with enlarged base constructed in marine sediment[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2017, 35(3): 346 - 356.
- [20] REESE L C, O'NEILL M W. Drilled shafts: Construction and design[R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 1988.
- [21] MULLINS G, WINTERS D, DAPP S. Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 478 - 487.
- [22] PANDO M A, FERNANDEZ A L, FILZ G M. Pile settlement predictions using theoretical load transfer curves and seismic CPT data[J]. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 2004, (1/2): 1 525 - 1 531.
- [23] 胡春林, 李向东, 吴朝晖. 后压浆钻孔灌注桩单桩竖向承载力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 546 - 550.(HU Chunlin, LI Xiangdong, WU Zhaohui. Study of vertical bearing capacity for postgrouting bored pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 546 - 550.(in Chinese))
- [24] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG 3363—2019 Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019.(in Chinese))
- [25] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范

- 范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG 94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.(in Chinese))
- [26] ZHENG X, SHI B, SUN M, et al. Evaluating the effect of post-grouting on long bored pile based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. Measurement, 2023, 214: 112743.
- [27] HORVATH R G, KENNEY T C. Shaft resistance of rock-socketed drilled piers[C]// Symposium on Deep Foundations. New York: ASCE, 1979: 182 - 214.
- [28] KADERABEK T J, REYNOLDS R T. Miami limestone foundation design and construction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(7): 859 - 872.
- [29] ROWE R K, ARMITAGE H H. Design method for drilled piers in soft rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 241(1): 126 - 142.
- [30] ZHANG L Y, EINSTEIN H H. End bearing capacity of drilled shafts in rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(7): 574 - 584.
- [31] NG C W, YAU T L, LI J H, et al. Side resistance of large diameter bored piles socketed into decomposed rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(8): 642 - 657.
- [32] 王钦科, 马建林, 胡中波, 等. 浅覆盖层软质岩中抗拔桩承载特性现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1 498 - 1 506.(WANG Qinke, MA Jianlin, HU Zhongbo, et al. Field tests on bearing behaviors of uplift piles in soft rock with shallow overburden[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1 498 - 1 506.(in Chinese))
- [33] COATES D F. Rock mechanics principles[S]. Ottawa, Canada: Canadian Government Pub Centre, 1967.
- [34] 鲁先龙, 乾增珍, 杨文智, 等. 嵌岩桩的极限端阻力发挥特性及其端阻力系数[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4): 26 - 35.(LU Xianlong, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Statistical analysis on end-bearing capacity and resistance factor for rock-socketed piles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 26 - 35.(in Chinese))
- [35] VI-PULANANDAN C, HUSSAIN A, USLUOGULARI O. Parametric study of open core-hole on the behavior of drilled shafts socketed in soft rock[M]. Colorado: Contemporary Issues In Deep Foundations, 2007: 1 - 10.
- [36] ZHANG L Y. Prediction of end-bearing capacity of rock-socketed shafts considering rock quality designation(*RQD*)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(10): 1 071 - 1 084.
- [37] XU W, LIU B, ZHOU Y Q, et al. Construction of 8.0-m diameter rock-socketed piles in a large-scale deep excavation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35: 2 455 - 2 466.
- [38] 刘树亚, 刘祖德. 嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 86 - 92.(LIU Shuya, LIU Zude. Some problems on the research and design of rock-socketed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 86 - 92.(in Chinese))
- [39] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 嵌岩桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增 2): 289 - 295.(WANG Weidong, WU Jiangbin, WANG Xiangjun. Study of comprehensive coefficient of shaft/tip resistance for rock-socketed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Supp.2): 289 - 295.(in Chinese))
- [40] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 112 - 126.(HU Shaoyin, LIU Quansheng, LI Shihui, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 112 - 126.(in Chinese))
- [41] 万志辉, 戴国亮, 高鲁超, 等. 大直径后压浆灌注桩承载力和沉降的实用计算方法研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2 746 - 2 755.(WAN Zhihui, DAI Guoliang, GAO Luchao, et al. A practical method of calculation of bearing capacity and settlement of large-diameter post-grouting piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2 746 - 2 755.(in Chinese))