

珊瑚礁灰岩地层钻孔灌注桩侧摩阻力研究

刘军科

(中铁十一局集团第六工程有限公司,湖北 襄阳 441000)

摘要:某大桥是国家“一带一路”标志性项目,其桩基础置于弱胶结、多孔隙及高脆性的珊瑚礁灰岩中,传统的桩基设计与承载力评估标准并不适用,迫切需要展开研究。该文进行了钻孔灌注桩原位静载试验,并通过珊瑚礁灰岩与桩基界面力学试验、数值模拟方法进行了验证。结果表明:①水泥浆能够在胶结面处渗入礁灰岩孔隙内部,对孔隙进行扩展与填充,使其形成一种黏结与咬合的作用体系。这样将使珊瑚礁灌注桩具有250~275 kPa的侧壁阻力,最大荷载达到3 600 kN时,灌注桩的最大竖向位移仅为0.84 mm,竖向变形非常小;②数值模拟中,在贯入深度达到1 mm时,灌注桩侧摩阻力随位移线性增加,是弹性剪切力的累积;摩擦桩侧摩阻力发展较慢,在位移0.3 mm左右达到稳定,是桩身不同位置侧摩阻力动态发展的结果。灌注桩侧摩阻力模拟结果与静载试验结果较接近,但整体上大于静载试验结果,灌注桩数值模拟结果远大于摩擦桩。

关键词:珊瑚礁;灌注桩;侧摩阻力;静载试验;数值模拟

1 引言

珊瑚礁是造礁石珊瑚群体死亡后其遗骸经过漫长的地质作用形成的特殊岩土介质,主要分布于南纬30°至北纬30°之间的温热带海洋中。由于其沉积过程大多未经长途搬运,保留了原生生物骨架中的细小孔隙等原因,形成了颗粒多孔隙、形状不规则、易破碎、粒间易胶结等特点,其工程力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有较明显的差异。因此,对礁灰岩海域海洋工程中最常用的深基础形式——桩基工程问题,很有研究必要。

跨海大桥临时栈桥、海上石油与天然气平台等最常见的基础解决方案是用液压冲击锤将开口端钢管桩打入海床指定深度。由于海上作业数量少,钢管桩沉桩相对快速且效率高,与其他方案相比,也降低了打入钢管桩的风险。然而,在礁灰岩地层中,打桩锤产生的冲击能量会导致桩侧颗粒破碎和胶结体破坏,破碎的颗粒进而被挤入礁灰岩裂隙与孔隙中,使岩体体积收缩,产生“剪缩”现象。钢管桩在打入过程中,颗粒破碎引起的体积收缩效应和弱胶结体破坏引起的应变软化效应远比挤密作用严重,导致桩周围的侧向土刚度降低,侧阻力减小。工程实践证明,由于礁灰岩具有强度

低、易破碎的固有特性,从其他地基材料的桩基工程中获取的传统经验无法适用于礁灰岩地层。由于试验条件及成本的限制,关于礁灰岩的现场桩基试验相关文献尚未见报道,而目前室内模型试验也仅在桩的承载力及变形性状等方面展开了研究,不能代表现场桩基的实际性能,需要提出新的设计方法。

鉴于此,对于像桥梁基础等永久性结构,常常采用钻孔灌注桩或钢管复合桩。让人意外的是,尽管礁灰岩具有很低的岩石强度,但其侧摩阻力远远大于打入钢管桩,致使桩承载力有很大的提高。秦月等研究了钙质砂的模型试验,认为竖向抗压桩承载过程由以侧摩阻力承载为主发展为以桩端阻力承载为主;陈杨等针对取自南沙群岛的钙质砂,通过室内模型试验对钙质砂中单桩轴向抗拔承载特性进行研究,结果表明在一定范围内,增大地基相对密实度和埋深均能显著提高桩基的承载能力;王志新等研究了南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性,表明礁灰岩的破坏形态具有脆性岩石的特点,沿着珊瑚生长线同时出现多个破裂面,并保持较高的残余强度;刘海峰等开展礁灰岩嵌岩桩的模型试验研究,试验结果表明桩岩界面先后经历弹性剪切、剪应力跌落和摩擦剪切3个阶段。在剪应力跌落阶段,应力软化急剧,并很快过渡到界面的摩擦剪切。以上研究均以钙质砂为主,对珊瑚礁灰岩的研究很少,而

收稿日期:2019-12-29(修改稿)

作者简介:刘军科,男,大学本科,高级工程师, E-mail:337590854@qq.com

且成果往往缺乏现场实测数据作为支撑。

鉴于此,为了准确评估礁灰岩地层桩基的力学特性与承载力大小,该文依托“一带一路”重点大桥项目,开展钻孔灌注桩原位静载试验,珊瑚礁灰岩与桩基界面力学特性研究,以揭示桩基—礁灰岩界面破坏机理,并通过数值模拟方法进行验证,为珊瑚礁地层大桥桩基设计提供参考和依据。

2 工程概况

2.1 工程背景与地层特点

某大桥位于珊瑚礁地层,大桥线路全长 2.0 km,主桥长 760 m,引桥长 630 m,两侧接线长 610 m,大桥

宽度均为 21 m。桥梁基础采用分离式钢管桩大直径群桩基础方案,桩基础采用变截面钻孔灌注桩。

工程主要地层由上至下为全新世松散珊瑚混砂或砂混珊瑚,更新世上、中段礁坪相礁灰岩,深部泄湖相弱胶结或未胶结的珊瑚混砂或砂混珊瑚。依据钻孔取样和室内物理力学试验得到的岩性特征及场地分层详见表 1。

2.2 桥梁桩基特点

某大桥主桥 19[#]、23[#] 主墩采用 7 根直径 3.2/2.8 m 钻孔灌注桩基础,20[#]~22[#] 主墩则采用 7 根直径 3.6/3.2 m 钻孔灌注桩基础,最大桩长 110 m。钢护筒采用 Q345C 钢板卷制而成,壁厚 32 mm,最大长度 73.3 m,单根最大重量 219.4 t。

表 1 各岩土层设计参数建议值

地层编号及名称	标贯击数/频数	动探击数/频数	饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	点荷载强度 指数/MPa	单轴抗压 强度/MPa	地基承载力基 本允许值/kPa	侧摩阻力 标准值/kPa
(1)填土		7/4				120~180	15~25
(2)礁块石							
(3)砾砂混砾块	21/13	12/3				150~200	45~50
(4-1)礁灰岩(中)	76/1	69/2	2.21	3.45	10.73	450~500	100~120
(4-2)礁灰岩(弱)	25/4	26/3		2.87		350	80
(4-3)礁灰岩(弱)			2.31	2.80	10.10	300	70
(5-1)a 礁灰岩(强)			2.40	2.33	10.02	800	220~240
(5-1)b 礁灰岩(中)			2.22	2.47	7.50	550	150~180
(5-1)c 礁灰岩(弱)			2.29	1.91	5.93	400~450	80~120
(5-2)a 砾砂混砾块	22/3					150~220	40~55
(5-2)b 砾砂混砾块	37/2					230~250	58~65
(5-3)礁灰岩	60/1	20/5	2.34	4.97	9.44	400~500	90~140
(6-1)礁灰岩(强)			2.26	3.26	10.55	650~700	180~200
(6-2)礁灰岩(中)		31/2	2.25	2.83	8.42	450~550	110~170
(6-3)礁灰岩(弱)		32/3	2.23	2.73	5.53	350~400	90~120
(7-1)角砾混砾块	53/7		2.20	2.40	5.18	400	90~100
(7-2)礁灰岩			2.12	2.59	10.35	450~500	120~150

3 钻孔灌注桩承载力性能分析

钻孔灌注桩(简称为灌注桩)基础是目前国内外广泛使用的一种桥梁基础结构形式,它可将桥梁上部结构荷载通过桩身传递至深层稳定土层中,从而大幅减少基础沉降,提高桥梁结构稳定性。

该桥梁主桥墩灌注桩直径大,承载力大,无法进行

原位静载试验。为此,钻孔取样开展室内试验研究,并在距离主桥墩较近的岛屿上展开原位静载试验。

3.1 珊瑚礁灰岩与桩基界面力学试验

珊瑚礁灰岩样品取自第(4)层,对礁灰岩进行精加工,制备成 100 mm×100 mm×50 mm 试块,桩基浇筑为 150 mm×150 mm×50 mm 的混凝土块,成分与现场灌注桩一致。将岩样和桩基一同饱和后,采用 DZJ-15 型应变控制式直剪仪对试样进行剪切试验。

表 3 不同荷载下桩顶竖向荷载 Q 与桩顶竖向位移 s

荷载分级	荷载大小/kN	竖向位移/mm		
		SZ01	SZ02	SZ03
加载前	0	0.000	0.000	0.000
第 1 级	600	0.082	0.143	0.141
第 2 级	900	0.130	0.198	0.206
第 3 级	1 200	0.154	0.253	0.253
第 4 级	1 500	0.227	0.334	0.336
第 5 级	1 800	0.294	0.413	0.411
第 6 级	2 100	0.343	0.528	0.531
第 7 级	2 400	0.396	0.576	0.576
第 8 级	2 700	0.461	0.653	0.655
第 9 级	3 000	0.504	0.688	0.688
第 10 级	3 300	0.566	0.796	0.793
第 11 级	3 600	0.606	0.840	0.840

范围内达到最大值。在同一级别荷载下,桩身侧摩阻力也是从上至下先增大后减小,只是出现最大摩阻力的深度不同。随着荷载的增大,整个桩身的侧摩阻力都在增大,桩身最大侧摩阻力为 250~275 kPa,远远没有达到室内剪切试验的峰值摩阻力。

3.3 数值模拟研究

原位静载试验表明:珊瑚礁地层灌注桩具有极大的侧摩阻力,这种现象用普通的摩阻力理论是无法解释的。正如珊瑚礁灰岩与桩基界面力学试验所揭示,灌注桩在成桩过程中,混凝土在自重应力与上部水压作用下被压入珊瑚礁孔隙中,对孔隙进行了扩展与填充,灌注桩桩体与珊瑚礁地层形成一种黏结+咬合的作用体系。为此,以珊瑚礁—桩体界面剪切位移与剪切力的关系曲线为依据开展数值模拟研究,并以常规摩擦界面作为对照。

3.3.1 模型参数及应变条件

为了方便观察侧摩阻力的变化,采用 Abaqus 软件进行二维数值模拟。在竖向荷载作用下,桩—土处于平面应变状态,取一半模型进行研究。模型宽度取 50 倍桩径,灌注桩尺寸和初始位置与静载试验保持一致,桩端下取 25 倍桩径。钢筋混凝土灌注桩重度为 24 kN/m³,弹性模量为 31.5 GPa,泊松比为 0.2。第(4)层礁灰岩重度为 22 kN/m³,弹性模量为 8 GPa,泊松比为 0.25;内摩擦角为 46.79°,黏聚力为 1 048 kPa。采用 CAX4R 四结点双线性轴对称四边形减缩

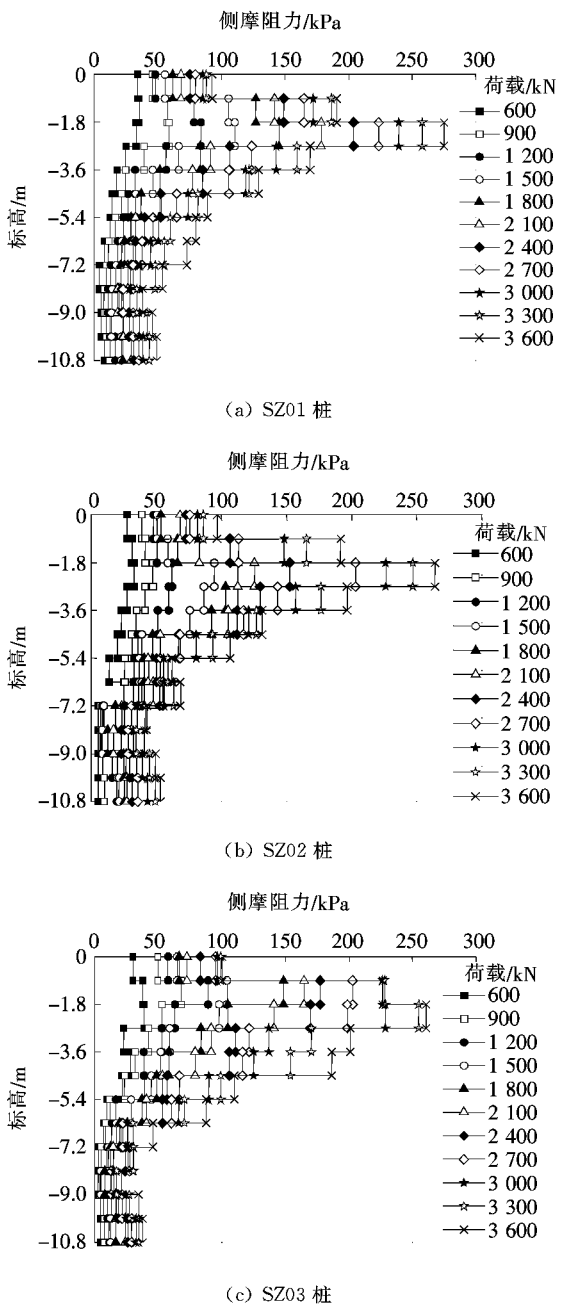


图 5 桩身侧摩阻力分布

积分单元,岩土被划分为 8 186 个网格,桩体被划分为 65 个网格。与室内剪切试验保持一致,桩的贯入以竖向位移控制。

3.3.2 破坏准则和损伤模型

与珊瑚礁—桩体剪切位移—剪切力关系曲线对应,在加压之前珊瑚礁—桩体之间处于黏结状态,加载过程中,珊瑚礁—桩体出现损伤破坏。200 kPa 围压下,定义线性损伤演化规律如图 6 所示,损伤线性演化规律通过间接的方式定义损伤系数 D [式(1)]。采用 Abaqus 黏结—损伤模块定义二者之间的接触状态。

其中土体能够承受的最大剪切强度为 2 971.6 kPa,对应的峰值位移为 4.306 mm;残余剪切强度为 269.4 kPa,对应的残余位移为 5.277 mm。强度跌落以后,礁灰岩以摩擦的方式继续给桩体提供侧阻力,摩擦系数为 0.7。

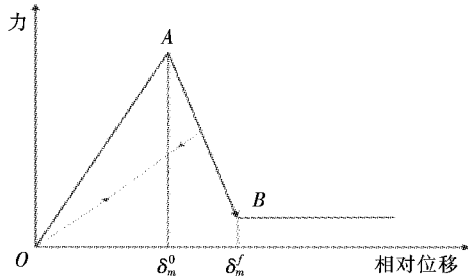


图 6 珊瑚礁线性损伤演化规律

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (1)$$

式中： δ_m^0 为峰值剪切强度对应的相对位移； δ_m^f 为残余剪切强度对应的位移； δ_m^{\max} 为加载过程中最大的位移。

作为对照组，在加载过程中，礁灰岩始终以摩擦的方式给桩体提供侧阻力，摩擦系数也为 0.7。

3.3.3 结果分析

图 7 为桩体在贯入深度达到 1 mm 时模型的竖向应力云图。

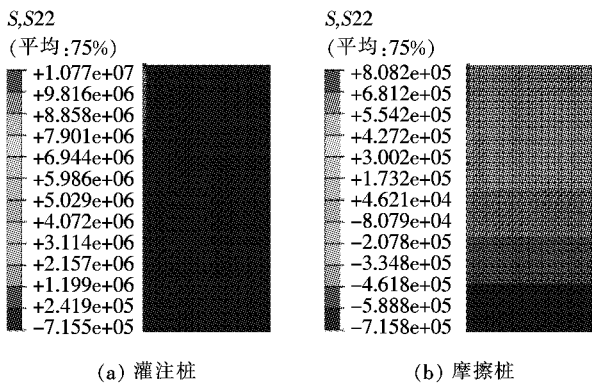


图 7 桩体竖向应力云图(单位:kPa)

由图 7 可知：在相同位移下，桩体最大竖向应力均发生在桩头部位，灌注桩承受的最大竖向应力为 1.077×10^7 kPa，摩擦桩承受的最大竖向应力为 8.082×10^5 kPa，二者相差两个数量级。最小竖向应力均为 7.155×10^5 kPa，即模型底部土体的最大竖向应力。观察左右两个桩体，可知桩体竖向应力均从桩顶至桩端递减，其中灌注桩桩体上部区域明显很小，下部区域明显很大，表明桩体承受的荷载主要集中在桩身上部，还未传递至桩身下部。摩擦桩桩体上部区域明显很

小，下部区域明显很大，表明桩体承受的荷载主要集中在桩身中上部，已传递至桩身下部与桩端。

图 8 为桩体在贯入深度达到 1 mm 时珊瑚礁—桩体间的剪切力云图。

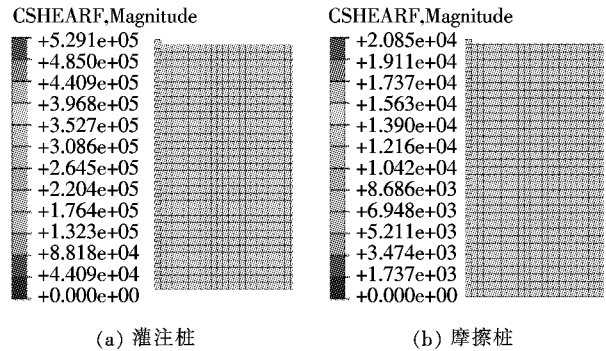


图 8 桩体—珊瑚礁剪切力云图(单位:kPa)

由图 8 可知：在相同位移下，灌注桩承受的最大剪切力为 5.291×10^5 kPa，发生在桩头侧面；摩擦桩承受的最大剪力为 2.085×10^4 kPa，发生在桩端侧部。珊瑚礁—灌注桩间剪力从桩头至桩端递减，而珊瑚礁—摩擦桩间剪力从桩头至桩端递增，表明此时灌注桩桩身剪力从上至下依次发挥，但均未达到峰值剪切强度；而摩擦桩上部桩侧剪力已经降低为残余摩擦阻力，桩身中上部剪力正在降低，桩身中下部正在向峰值摩擦力发展。

灌注桩、原位静载试验试桩及摩擦桩桩侧阻力随相对位移的变化规律如图 9 所示。

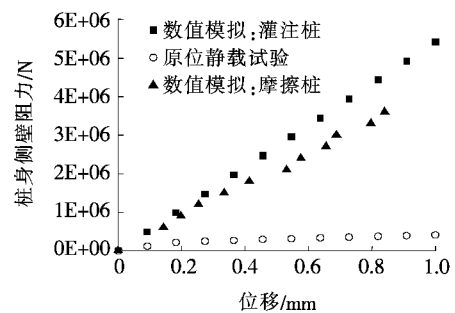


图 9 桩身侧壁阻力随相对位移的变化

由图 9 可知：灌注桩侧阻力随位移线性增加，与图 2 中弹性剪切阶段剪切力变化规律对应，是弹性剪切力的累积。摩擦桩桩侧阻力发展较慢，在位移为 0.3 mm 时达到稳定，是桩身不同位置侧摩阻力动态发展的结果。灌注桩侧阻力模拟结果与静载试验结果较接近，但整体上大于静载试验结果，可能是数值模拟没有考虑桩径、桩侧珊瑚礁应变软化等因素的影响，导致模拟结果偏大，可以在后期展开深入研究。灌注桩数值

模拟结果远大于摩擦桩,体现了灌注桩在破坏前桩体与珊瑚礁之间强大的胶结、咬合作用。灌注桩充分利用了礁灰岩结构性与多孔隙的特点,能够将其桩侧承载性能完全发挥出来,是一种合适的桥梁桩基类型。

4 结论

(1) 礁灰岩—桩基界面力学试验中,水泥浆能够在胶结面处充分渗入礁灰岩孔隙内部,使其形成一种黏结与咬合的作用体系。剪切曲线明显可分为弹性剪切、应力跌落和摩擦剪切3个阶段;不同法向应力作用下,剪切位移为3~6 mm时,剪切力达到峰值。

(2) 原位静载试验中珊瑚礁桩基具有非常大的侧摩阻力,最大荷载达到3 600 kN时,灌注桩的最大竖向位移仅为0.84 mm,竖向变形非常小。

(3) 数值模拟中,在贯入深度达到1 mm时,灌注桩承受的荷载主要集中在桩身上部,还未传递至桩身下部;摩擦桩承受的荷载主要集中在桩身中上部,已传递至桩端。灌注桩承受的最大剪力发生在桩头侧面,并从桩头向桩端递减,且均未达到峰值剪切强度;摩擦桩承受的最大剪力发生在桩端侧面,并从桩头向桩端递增,桩身上部桩侧剪力已经降低为残余摩阻力,桩身中上部剪力正在降低,桩身中下部剪力正在向峰值摩擦力发展。

(4) 灌注桩侧阻力随位移线性增加,是弹性剪切力的累积;摩擦桩侧阻力发展较慢,在位移为0.3 mm时达到稳定,是桩身不同位置侧摩阻力动态发展的结果。灌注桩侧阻力模拟结果与静载试验结果较接近,但整体上大于静载试验结果;灌注桩数值模拟结果远大于摩擦桩,体现了灌注桩在破坏前桩体与珊瑚礁之间强大的胶结、咬合作用。

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(1).
- [2] 单华刚,汪稔.钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J].岩土力学,2009(3).
- [3] Doherty P, Spagnoli G, Doherty M. Laboratory Investigations to Assess the Feasibility of Employing a Novel Mixed-in-place Offshore Pile in Calcareous Deposits[J]. Ships and Offshore Structures, 2015, 25(6): 1-11.
- [4] Fattah M Y, Al-Soudani W H S. Bearing Capacity of Open-Ended Pipe Piles with Restricted Soil Plug[J]. Ships and Offshore Structures, 2016, 11(5): 501-516.
- [5] 姚德波,殷新锋.基坑锁口钢管桩围堰的受力行为分析[J].中外公路,2017(2).
- [6] Akili W. On Design and Installation of Driven Piles in Coral Deposits: A Case Study from the Red Sea Coast of Saudi Arabia[C]. IFCEE 2015 International Association of Foundation Drilling Deep Foundation Institute Pile Driving Contractors Association American Society of Civil Engineers, 2015.
- [7] 刘崇权,单华刚,汪稔.钙质土工程特性及其桩基工程[J].岩石力学与工程学报,1999(3).
- [8] 王爱溪,林治平,冯光华.珊瑚礁灰岩中钢管桩动静承载力测试分析[J].施工技术,2018(19).
- [9] 许宁.浅谈珊瑚礁岩土的工程地质特性[J].岩土工程学报,1989(4).
- [10] 佚名.珊瑚岛礁跨海大桥的勘察实践及工程意义[J].水运工程,2018(8).
- [11] 张家铭,邵晓泉,王霄龙,等.沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J].岩土力学,2015(1).
- [12] 陈维超,杨伟军,任立,等.砂土地基钻孔灌注桩轴心温度场及应变试验研究[J].中外公路,2018(5).
- [13] 刘耀东,聂闯,梅靖宇,等.超长桩竖向承载力模型试验及有限元研究[J].中外公路,2019(4).
- [14] 祝敏杰.钻孔灌注桩在珊瑚礁地质条件下的施工工艺[J].中国港湾建设,2010(6).
- [15] 江浩.钙质砂中桩基工程承载性状研究[D].中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文,2009.
- [16] 秦月,孟庆山,汪稔,等.钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J].岩土力学,2015(6).
- [17] 陈杨,杨敏,魏厚振,等.钙质砂中单桩轴向抗拔模型试验研究[J].岩土力学,2018(8).
- [18] 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,2018(3).
- [19] 刘海峰,朱长歧,孟庆山,等.礁灰岩嵌岩桩的模型试验[J].岩土力学,2018(5).