

文章编号:1007-2993(2020)05-0286-04

# 珊瑚礁灰岩的透水特性和基坑降水措施研究

郑建国<sup>1,2</sup> 乔建伟<sup>1,2</sup> 唐国艺<sup>1,2</sup>

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710043;  
2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西西安 710043)

**【摘要】** 通过工程地质钻探和压水试验,分析了印度尼西亚东爪哇岛珊瑚礁灰岩的结构特征和透水特性,并通过现场试验,研究了珊瑚礁灰岩地区基坑的止水降水措施。结果表明,该区上部珊瑚礁灰岩按固结程度可划分为灰泥混珊瑚礁钙质结核、碎块状珊瑚礁灰岩和柱状珊瑚礁灰岩。珊瑚礁灰岩的透水率受岩体内部溶孔发育程度及其连通性的控制,透水率与固结程度成反比。灰泥混珊瑚礁钙质结核的透水率为无穷大;碎块状珊瑚礁灰岩的透水率为31~74 Lu,局部地段透水率达到无穷大;柱状珊瑚礁灰岩的透水率为2.25~17 Lu,其随深度的增加而减小。直接抽排降水措施不能有效降低基坑地下水位。压力灌浆止水帷幕通过充填珊瑚礁灰岩内部溶孔从而大大降低珊瑚礁灰岩的透水率,可用于珊瑚礁灰岩地区的基坑降水。

**【关键词】** 珊瑚礁灰岩;固结程度;透水率;基坑降水

**【中图分类号】** P 642

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2020.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Permeability Characteristics and Foundation Pit Precipitation Measures of Coral Reef Limestone

Zheng Jianguo<sup>1,2</sup> Qiao Jianwei<sup>1,2</sup> Tang Guoyi<sup>1,2</sup>

(1. China JIKAN Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;  
2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**【Abstract】** The structure characteristics and permeability characteristics of coral reef limestone in East Java, Indonesia were analyzed by engineering geological drilling and water pressure test in borehole. And the foundation pit precipitation measures in coral reef limestone area were studied by field test. The results show that the upper part of the coral reef limestone in this area can be divided into plaster mixed with calcareous concretion of coral reef, fragmented coral reef limestone and columnar coral reef limestone according to the consolidation degree. The permeability rate of coral reef limestone is controlled by the degree development of the dissolved cave inside the rock mass and its connectivity, and the permeability rate of coral reef limestone is inversely proportional to the consolidation degree. The permeability rate of the plaster mixed with calcareous concretion of coral reef is infinite. The permeability rate of fragmented coral reef limestone is 31~74 Lu, and in the local area is infinite. The permeability rate of columnar coral reef limestone is 2.25~17 Lu, which decreases with increasing depth. The direct pumping and drainage measures can not effectively decrease the groundwater level of the foundation pit. The pressure grouting water-resisting curtain can greatly reduce the permeability rate of the coral reef limestone by filling the dissolved caves inside the rock mass, and can be used for the foundation pit dewatering in the coral reef limestone area.

**【Key words】** coral reef limestone; consolidation degree; permeability rate; foundation pit dewatering

### 0 引言

珊瑚礁灰岩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岩土体,广泛分布在南北回归线之间的热带海洋地区,其独特的物质组成、结

**基金项目:** CMEC 孵化科技项目(CMEC-KJFH-2018-02);科技部对发展中国家科技援助项目(KY201502002);国机集团科技发展基金(SINOMACH09);陕西省“三秦学者”创新团队支持计划资助(2013KCT-13)

**作者简介:** 郑建国,男,1964年生,大学本科,全国工程勘察设计大师,主要从事特殊岩土性质与地基处理方面的研究。E-mail: zhengjg@jk.com.cn

**通讯简介:** 乔建伟,男,1990年生,博士,主要从事特殊岩土性质方面的研究。E-mail: 15029207728@163.com

构特征和发育环境的特殊性,导致其具有独特的物理力学特性和工程地质特性<sup>[1-5]</sup>。珊瑚群体死亡后堆积在原地的遗骸构成的岩体称为原生礁;死的或活的珊瑚体被波浪等外力破坏,其残骸和各种附着生物及钙质藻类的遗骸,连同其它各种生物骨壳等碎屑经过迁移堆积,被压密胶结成的岩体为次生礁。原生礁和次生礁经过长期的物理化学和生物化学作用后构成了珊瑚礁岩土体(coral reef soil),广义上的珊瑚礁岩土包括珊瑚砂(coral sand)、钙质土(calcareous soil)以及珊瑚礁灰岩(reef limestone)<sup>[6-7]</sup>。

与珊瑚砂和钙质土相比,珊瑚礁灰岩的物理力学特性和工程地质特性研究还比较少,尚处于起步探索阶段。王新志<sup>[8-9]</sup>通过室内试验对南沙群岛珊瑚礁灰岩的声学特性、密度、孔隙率、强度特性和变形破坏特征进行了综合研究,根据礁灰岩的结构特征和组分划分为珊瑚灰岩、珊瑚砾块灰岩、生物砂砾块灰岩、珊瑚砾屑灰岩、生物砂砾屑灰岩、珊瑚藻石砂砾屑灰岩、生物砾砂屑灰岩、含砾砂屑灰岩和生物砂屑灰岩等9类。Zhu等<sup>[10]</sup>基于一系列的工程地质勘探手段、室内试验和原位试验研究了马尔代夫珊瑚礁灰岩的物理力学性质,揭示了珊瑚礁灰岩具有多孔洞的骨架结构,发现不同位置珊瑚礁灰岩的胶结程度或成岩程度不尽相同。任世锋等<sup>[11]</sup>通过室内渗透试验和钻孔抽水试验,发现巴哈马北阿巴科港地区珊瑚礁灰岩的渗透特性与孔隙和裂隙的发育程度及其连通性有关,提出原位渗透试验结果更能够反映珊瑚礁灰岩的渗透特性。

综上,目前关于珊瑚礁灰岩的研究特别是针对其透水特性和基坑止水降水措施的研究还相对较少。而珊瑚礁灰岩主要分布在海岛或沿海地带,其地下水位浅,水量大,大规模工程建设过程中的基坑降水问题往往是决定工期和施工难度的关键问题。本文通过工程地质钻探和现场钻孔压水试验揭示了印度尼西亚东爪哇岛珊瑚礁灰岩的结构特征和透水特性,通过现场原型试验分析了珊瑚礁灰岩地区基坑工程的降水措施。

## 1 场地珊瑚礁灰岩的结构特征和透水特性

### 1.1 珊瑚礁灰岩结构特征

工程地质钻探结果揭示珊瑚礁灰岩埋藏较浅,上部第四系覆盖层①黏土厚度为1~2 m(见图1)。珊瑚礁灰岩按岩芯结构类型可划分为三层:②灰泥混珊瑚礁钙质结核;③块状珊瑚礁灰岩;④柱状珊瑚礁灰岩。

②灰泥混珊瑚礁钙质结核:钻孔岩芯显示该层岩

土由大量灰泥和珊瑚礁钙质结核组成(见图2a),未固结。灰泥为灰绿色,软塑。钙质结核含大量蜂窝状溶蚀孔洞(见图2b),粒径不均匀,最大粒径超过10 cm;

③块状珊瑚礁灰岩:灰白色,岩芯呈碎块状和散粒状,固结一般。内孔隙发育(见图2c),局部含纯灰泥和具有大量蜂窝状溶蚀孔洞的钙质结核;

④柱状珊瑚礁灰岩:灰白色,岩芯呈短柱状,局部含有碎块状和散粒状(见图2d),固结较好。单个最长柱状岩芯约28 cm,岩芯断面稍致密,内孔隙发育,含少量溶蚀孔洞且局部充填灰泥。

因此,该区上部发育的珊瑚礁灰岩按固结程度可分为未固结成岩的灰泥混珊瑚钙质结核层、固结一般的块状珊瑚礁灰岩和固结较好的柱状珊瑚礁灰岩。此外,岩芯结果表明该区珊瑚礁灰岩的固结程度随着深度的增加而增加。

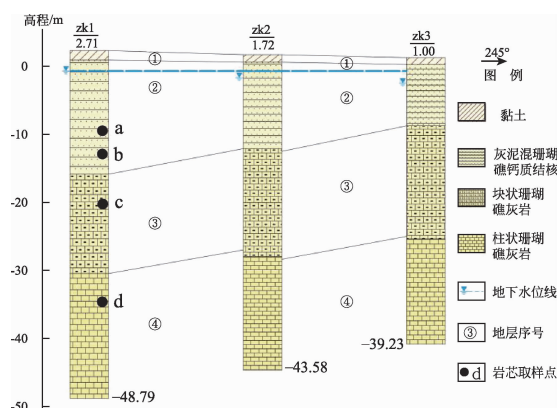


图1 研究区工程地质剖面图

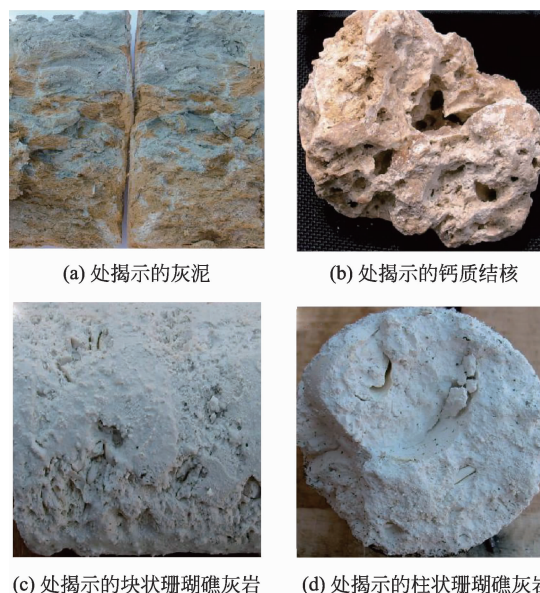


图2 zk1 取样点珊瑚礁灰岩典型照片

### 1.2 珊瑚礁灰岩的透水特性

在研究区开展钻孔压水试验,测得各试验段的

透水率如图3所示。结果表明,珊瑚礁灰岩的透水率随着深度的增加而逐渐减小,其中②层灰泥混珊瑚礁钙质结核透水性最大,透水率为无穷大;③层块状珊瑚礁灰岩的透水性次之,透水率为74~31 Lu,局部为无穷大;④层柱状珊瑚礁灰岩的透水性最小,透水率为17~2.25 Lu。灰泥混珊瑚礁钙质结核层透水率无穷大,是由于该层钙质结核内含大量的蜂窝状溶蚀孔洞所致。块状珊瑚礁灰岩局部透水率为无穷大,是由于局部发育含大量蜂窝状溶蚀孔洞的钙质结核所致。40 m处柱状珊瑚礁灰岩的透水率降为2.25 Lu,是由于下部岩层固结较好,岩芯稍致密所致。

因此,该区珊瑚礁灰岩的透水性强,透水率大小受固结程度和溶蚀孔洞发育程度控制。珊瑚礁灰岩的固结程度越差,其渗透性越大;溶蚀孔洞的发育程度越高,其渗透性越大。

地层序号	地层名称	厚度/m	深度/m	柱状图图例	地层描述	试验段次	深度/m	灌浆前透水率/Lu
①	黏土	0.9	0.9		棕红色,可塑	孔口管	4	
②	灰泥混珊瑚礁钙质结核	11.6	12.5		白色-灰白色,局部黄色。半成岩,岩芯由大量灰泥和珊瑚礁钙质结核组成,未固结。灰泥为灰绿色,软塑。钙质结核含大量蜂窝状溶蚀孔洞,粒径不均匀,最大粒径超过10 cm。	1	6	无穷大
						2	11	无穷大
						3	16	74
③	块状珊瑚礁灰岩	13.5	26		灰白色,中细粒结构,岩芯呈碎块状,含大量蜂窝状溶蚀孔洞和生物化石。	4	21	无穷大
						5	26	31.3
						6	31	17
④	柱状珊瑚礁灰岩	15	41		灰白色,岩芯呈短柱状,局部含有碎块状和散粒状,单个最长柱状岩芯约28 cm,岩芯断面稍致密,可见少量珊瑚贝类化石,内孔隙发育,少量溶蚀孔洞,局部充填灰泥。	7	36	13
						8	41	2.25

图3 研究区钻孔压水试验各试验段和透水率分布图

## 2 现场试验

### 2.1 基坑概况及直接抽排水试验

现场试验的基坑设计深度13.5 m,基坑底面尺寸为29 m×38 m,距离海岸10 m(见图4a),地下水位埋深1 m,基坑开挖过程中采用1:1放坡开挖。首先进行无止水帷幕的直接抽排水试验,基坑开挖过程中采用16台大功率抽水机直接抽排的方式降水(抽水量250 m<sup>3</sup>/h),在基坑开挖至9 m时,基坑内出现7个地下水突涌点(见图4b)。把矩形基坑假想为一个半径为r<sub>0</sub>的圆形大井,其流入基坑内的涌水量Q为从四周坑壁和坑底流入的水量之和,按公式(1)计算<sup>[12]</sup>:

$$Q = 1.366k \frac{(2H-S)S}{\lg \frac{R}{r_0}} + 6.28k \frac{Sr_0}{1.56 + \frac{r_0}{m_0} + 1.185 \frac{r_0}{m_0} \lg \frac{R}{4r_0}} \quad (1)$$

式中:k为渗透系数,cm/s;H为含水层厚度,m;S为基坑水位降深,m;R为基坑降水影响半径,m;r<sub>0</sub>为计算引用半径,m;m<sub>0</sub>为基坑底部至含水层的距离,m。

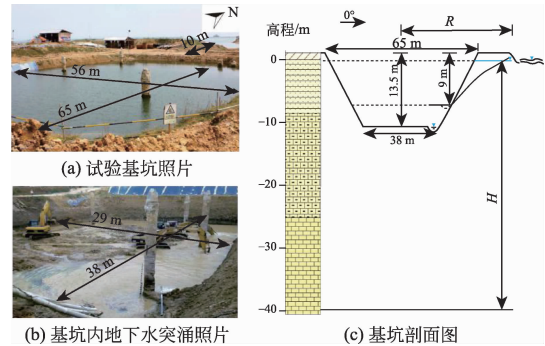


图4 基坑及直接抽排水试验照片

根据抽水量反算整个基坑涌水量Q大于4000 m<sup>3</sup>/h,代入公式(1)计算渗透系数k大于3.0×10<sup>-2</sup> cm/s,表明珊瑚礁灰岩的透水率大,直接抽排法无法降低地下水位到理想深度。

### 2.2 止水帷幕试验

#### 2.2.1 试验设计

为满足一般工程后续施工的要求,止水后须达到完全止水或剩余涌水量不超过50 m<sup>3</sup>/h,据此反算确定的灌浆后达到的设计要求指标为:(1)帷幕深度伸入设计不透水层不少于2.0 m;(2)灌浆后珊瑚礁灰岩的渗透系数k≤5×10<sup>-5</sup> cm/s,即透水率小于5 Lu。

止水帷幕按三排孔设计,孔距为2.0 m,排距为0.75 m,划分为4个单元工程,灌浆孔位布置如图5所示。

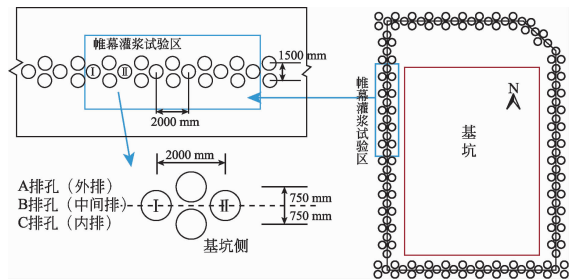


图5 压力灌浆止水帷幕试验平面布置图

#### 2.2.2 止水帷幕施工

灌浆水泥采用普通硅酸盐水泥,配合水玻璃等外加剂,帷幕灌浆的浆液由稀到浓,逐级变换。灌浆孔开灌水灰质量比根据不同岩层透水率,采取5:1~0.5:1不等,透水率越大,水灰质量比越小。

施工灌浆按分序加密的原则进行,先施工外排



的灌浆孔,然后施工内排的灌浆孔,最后施工中间排的灌浆孔。中间排灌浆孔分两序施工,先施工 I 序孔(在 I 序孔中先施工先导孔),再施工 II 序孔。采用自下而上灌浆,在设计压力下,注入率不大于 1 L/min 后继续灌注时间 30 min,灌浆即可结束。

### 2.3 试验结果分析

对比止水帷幕试验前后的钻孔岩芯,如图 6 所示。从图 6 可以看出灌浆后珊瑚礁灰岩的岩芯结构改变显著,岩芯的溶蚀孔洞消失,水泥结石体充盈密实;灌浆后珊瑚礁灰岩由含大量溶蚀孔洞的岩体变为水泥浆充填密实的岩体。

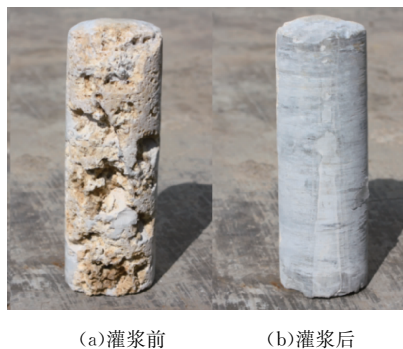


图 6 灌浆前后同一深度钻孔岩芯图

灌浆止水帷幕完成后,再次进行钻孔压水试验测试其透水率,其灌浆前后的透水率如表 1 所示。

表 1 止水帷幕前后珊瑚礁灰岩透水率

深度范围/m	天然透水率/Lu	止水帷幕后透水率/Lu
4~6	无穷大	3.96
6~11	无穷大	3.78
11~16	74	3.83
16~21	无穷大	2.73
21~26	31.3	2.38
26~31	17	2.50
31~36	13	2.15
36~41	2.25	2.95

从表 1 可以看出,试验后珊瑚礁灰岩的透水率均小于 5 Lu,其平均透水率由试验前的  $\geq 27.52$  Lu 降低为试验后的 2.91 Lu,渗透系数约为  $2.91 \times 10^{-5}$  cm/s,根据公式(1)计算基坑涌水量  $Q$  小于  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,在采用上述试验所用的孔距、排距、设计灌浆压力情况下,帷幕检查孔各段透水率和据此计算的基坑涌水量均能满足设计要求(透水率  $\leq 5$  Lu,渗透系数  $k \leq 5 \times 10^{-5}$  cm/s)。止水帷幕灌浆完成后采用 4 台抽水机从基坑抽水,抽水过程中基坑再未出现明显的突涌点,有效地降低了地下水位,可以满足基坑降水及后续施工的要求。因此,采用灌浆止水帷

幕方法对珊瑚礁灰岩地区的基坑止水降水是合适的。

### 3 结论

(1)印度尼西亚东爪哇岛地区上部发育的珊瑚礁灰岩按结构类型可划分为灰泥混珊瑚礁钙质结核、块状珊瑚礁灰岩和柱状珊瑚礁灰岩。

(2)受珊瑚礁灰岩内部发育的蜂窝状溶蚀孔洞所控制,珊瑚礁灰岩的透水率远大于一般岩体,最大透水率可达无穷大;透水率与固结程度成反比,固结程度越好,透水率越小。

(3)直接抽排水不能有效降低基坑地下水位;灌浆止水帷幕通过减小珊瑚礁灰岩的内孔隙从而大大降低透水率,可用于珊瑚礁灰岩地区的基坑降水工程。

### 参 考 文 献

- [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.
- [2] 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.
- [3] Ismail M A, Joer H A, Randolph M F. Sample preparation technique for artificially cemented soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(2): 171-177.
- [4] 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.
- [5] 杨永康,丁学武,冯春燕,等. 西沙群岛珊瑚礁灰岩物理力学特性试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2016, 15(5): 78-83.
- [6] 许 宁. 浅谈珊瑚礁岩土的工程地质特性[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 81-88.
- [7] Fookes P G. The geology of carbonate soils and rock and their engineering characteristics and description [C]//Engineering for Calcareous Sediments. Balkema: Rotterdam, 1988.
- [8] 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): 2221-2226.
- [9] 王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
- [10] Zhu C Q, Liu H F, Wang X, et al. Engineering geotechnical investigation for coral reef site of the cross-seabridge between Male and Airport Island[J]. Ocean Engineering, 2017, 146: 298-310.
- [11] 任世锋,席文熙,曹中兴. 珊瑚礁物理力学性质分析及工程应用[J]. 长春工程学院院报, 2016, 17(2): 81-85.
- [12] 张永波,孙欣忠. 基坑降水工程[M]. 北京: 地震出版社, 2000.