

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.029

珊瑚礁地基工程特性现场试验研究

王新志¹, 王 星^{1,2}, 刘海峰^{1,2}, 孟庆山¹, 朱长歧¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 珊瑚礁不同地貌带有着不同的工程地质特征和力学特性。为探究珊瑚礁地基的工程力学特性及其发育规律, 在西沙永兴岛不同地貌单元开展了浅层平板载荷试验、深层螺旋板载荷试验、压实度测试以及回弹模量试验, 获取了珊瑚礁不同地貌的地基承载力、变形模量、回弹模量等工程力学参数。试验结果表明: 人工填筑的钙质土地基承载力和变形模量明显高于天然形成的礁坪相地基和沙坝地基, 其承载力特征值可达 320~360 kPa, 变形模量在 95~200 MPa 之间, 且地基的沉降量很小, 满足一般低层建筑物对地基承载力和变形的要求; 在荷载作用下, 钙质土地基的沉降是瞬时完成的, 载荷试验可采用快速加载法; 在地下水位以上地基承载力随着深度增大逐渐增加, 但在地下水位以下承载力和变形模量明显减小。钙质土地基压实度在 87% 以上时回弹模量达到 472~730 MPa, 且回弹模量随着压实度的增大而增大。

关 键 词: 平板载荷试验; 珊瑚礁; 地基承载力; 变形模量; 回弹模量

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-2065-07

Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation

WANG Xin-zhi¹, WANG Xing^{1,2}, LIU Hai-feng^{1,2}, MENG Qing-shan¹, ZHU Chang-qi¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Different geomorphologic zones of coral reef demonstrate different geological engineering behaviors and mechanical properties. In order to investigate the engineering behaviors and its regularity, a series of tests including plate loading test, deep spiral plate loading test, compaction test and resilience modulus test is conducted on different zones in Yongxing Island, South China Sea. Engineering mechanical parameters including bearing capacity, deformation modulus, rebound modulus of coral reef are obtained. The test results show that the bearing capacity and deformation modulus of artificial calcareous soil ground are higher than those of reef flat foundation and sand bar foundation. The bearing capacity of artificial calcareous soil ground ranges from 320 to 360 kPa, and its deformation modulus ranges from 95 to 200 MPa. The bearing capacity of ground satisfies the requirement of low-rise buildings. As settlement of calcareous ground accompanies instantaneously under loading, fast loading method can be adopted in the plate loading test. The bearing capacity of subgrade above underground water table increases with increasing depth, but decreases below underground water table. The modulus of resilience increases with compaction. It can reach a range from 472 to 730 MPa with the degree of compaction over 87%.

Keywords: plate loading test; coral reef; ground bearing capacity; deformation modulus; modulus of resilience

1 引 言

钙质土是由海洋中的造礁石珊瑚死亡后的遗骸经过波浪的破碎或风化作用、水流搬运、堆积及胶结等物理、化学和生物作用形成的一种物理力学性质非常特殊的岩土介质, 其物质成分中碳酸钙的含量在 97% 以上, 主要分布于热带或亚热带气候的大

陆架及海岸线一带, 在我国南海海域广泛分布^[1-3]。钙质土的颗粒粒径范围较广, 但主要为砂土和碎石土, 粒径小于 0.075 mm 的细粒土的含量极少, 其质量约占 5%。钙质土的主要特点是颗粒形状不规则、易破碎、高内摩擦角、高孔隙比, 其物理力学性质和陆源砂有显著区别, 使其工程特性与陆相沉积物相比有较大的差异^[4]。

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 科技部 973 计划课题(No. 2013CB956104), 自然科学基金项目(No. 41572297, No. 41330642, No. 41372318)。

This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2013CB956104) and the National Natural Science Foundation of China (41572297, 41330642 and 41372318).

第一作者简介: 王新志, 男, 1981 年生, 副研究员, 主要从事珊瑚礁工程地质及岩土力学特性的研究工作。E-mail: xzwang@whrsm.ac.cn

通讯作者: 王星, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事钙质土力学特性的研究工作。E-mail: 18827069705@163.com

近年来,随着我国海洋工程建设和海洋资源开发的不断深入,与钙质土相关的岩土工程问题也逐渐得到重视,珊瑚礁工程特性的研究逐渐成为众多学者关注的焦点^[5-13]。珊瑚礁上存在3种不同地貌类型的地基,如礁坪相、沙坝区和人工填筑的地基,这些不同类型地基在物质组成、地基土的密实度差异较大,其工程力学特性的差异也较大,地基的承载力若不能满足设计要求,会引起地基沉降,甚至造成上部结构物的开裂破坏等一系列的工程隐患,因此,有必要深入研究珊瑚礁地基的承载特性和沉降规律,为岛礁工程的设计和建设提供可靠的参数。基于以上目的,本文通过对永兴岛不同地貌的钙质土地基开展浅层平板载荷试验、深层螺旋板试验、地基回弹模量试验,综合分析钙质土地基在荷载作用下的承载特性以及工程力学特性。

2 浅层平板载荷试验

2.1 试验方案

永兴岛是天然形成的灰沙岛,岛中心位于北纬 $16^{\circ}52'$,东经 $112^{\circ}20'$,呈椭圆形,东西长约1950 m,南北宽约1350 m,面积约2.6 km²,平均海拔高度为5 m,是西沙最大的岛屿,也是三沙市政府所在地。

珊瑚礁地基按地貌形态、地层地质条件及物质组成可分为3种类型:①礁坪相地基;②沙坝地基;③人工填筑地基。3类地基的地质条件、地貌特点如下:

①礁坪相地基礁坪相是珊瑚礁顶部的主体部分,主要受海潮的影响,涨潮时淹没、低潮时露出水面(见图1);礁坪的浅地层以松散钙质砂土为主,厚度约22 m,礁坪表层覆盖有少量礁石;通过对永兴岛的礁坪取样进行颗分试验后如图2所示,地基土以钙质中粗砂为主,含少量礁块,地基土较为松散,天然干密度为 $1.39\sim 1.56\text{ g/cm}^3$ (见表1);



图1 礁坪相地基平板载荷试验
Fig.1 Plate load test on coral reef flat

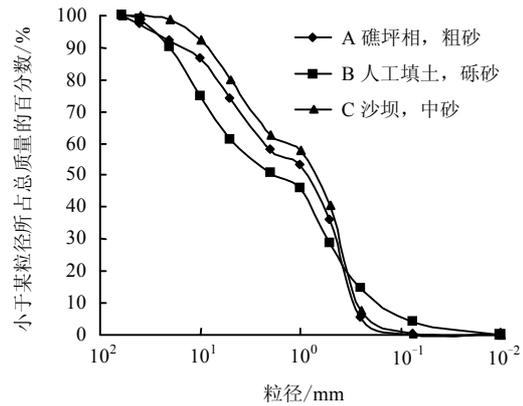


图2 永兴岛3类地基土的颗分曲线
Fig.2 Grain size distributions of three calcareous soils from Yongxing Island

②沙坝地基沙坝是珊瑚礁的礁坪上由于水流冲击形成的海拔最高、露出水面的砂质地基。主要是经过风暴潮和台风等作用后而形成的。沙坝处地基土以钙质中砂为主,含有少量砾石,密实度不均匀,地基天然干密度为 $1.19\sim 1.29\text{ g/cm}^3$;

③人工填筑地基在珊瑚礁上修筑机场跑道及建筑物地基,通常是以开挖珊瑚礁泻湖沉积的钙质砂作为主要填筑材料,在礁坪上填筑人工地基,并经过分层碾压而成(见图3)。人工填筑的地基土以钙质砾砂为主,经过碾压后较为密实,地基天然干密度为 $1.66\sim 1.70\text{ g/cm}^3$,地基承载力较高。



图3 人工填筑的钙质土地基
Fig.3 Artificial filled calcareous soil ground

由于在珊瑚礁上进行工程建设,不可避免地会遇到上述3种不同的地基,为了研究珊瑚礁不同类型地基的承载能力和变形特性,为岛礁工程的设计和施工提供可靠依据,以永兴岛为典型案例,在永兴岛选取了3种不同地貌类型的钙质土地基进行研究(见表1)。针对每种类型的地基各做一组浅层平板载荷试验,具体的试验方案及编号如表1所示。

在载荷试验的试验点附近测试了地基土的天然密度,由于珊瑚礁地基中含有直径大于30 cm的礁块,因此,地基密度测试采用挖大坑灌水法,同时

取土样测试含水率，用于计算地基土天然干密度，分析评价地基土的密实状态。

表 1 平板载荷试验方案

| 地基类型及编号 | 地基土类别 | 载荷试验编号 | | |
|--------------|-------|--------|----|----|
| A 礁坪相, 天然地基 | 钙质粗砂 | A1 | A2 | A3 |
| B 人工填土, 人工地基 | 钙质砾砂 | B1 | B2 | B3 |
| C 沙坝, 天然地基 | 钙质中砂 | C1 | C2 | C3 |

地基土天然密度试验设备包括：直径为 100 cm、高度为 20 cm 的钢圈，聚氯乙烯塑料薄膜。由于地基土中含有直径较大的礁块，直径最大的超过 30 cm，因此，天然密度测试采用挖大坑灌水法，挖坑直径为 100 cm，深度为 50 cm，挖出的土样称重，土样的体积测试采用上覆水法，然后依据下式分别计算地基土的天然密度和干密度，此法测试的精度较高，满足测试要求。

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (2)$$

式中： m 为土的质量； v 为土的体积； ρ 为钙质土的天然密度(g/cm^3)； w 为钙质土的天然含水率(%)； ρ_d 为钙质土的干密度(g/cm^3)。

此外，为了探究钙质地基的卸载回弹情况，在载荷试验加载结束后分别对 A3、B2、B3、C1 4 个试验点进行卸载回弹试验。

2.2 试验结果与分析

通过对现场浅层平板载荷试验数据的分析，按照《建筑地基基础设计规范》^[14]的规定，通过 $P-S$ 曲线确定钙质土地基的承载力和变形模量结果如表 2 所示。

表 2 珊瑚礁地基浅层平板载荷试验结果
Table 2 Results of plate load testing of coral reef

| 试验编号 | 天然干密度 /(g/cm^3) | 承载力特征值 /kPa | 变形模量 /MPa | 试验最大 沉降量 /mm | 卸载回 弹量 /mm | 回弹率 /% |
|------|--------------------------------------|----------------|--------------|--------------------|------------------|-----------|
| A1 | 1.39 | 200 | 116 | 2.56 | | |
| A2 | 1.53 | 240 | 56 | 7.92 | | |
| A3 | 1.56 | 120 | 87 | 6.12 | 2.12 | 34.6 |
| B1 | 1.67 | 360 | 200 | 2.93 | | |
| B2 | 1.66 | 320 | 171 | 2.68 | 0.74 | 27.6 |
| B3 | 1.70 | 320 | 95 | 7.70 | 0.58 | 7.53 |
| C1 | 1.29 | 220 | 114 | 5.53 | 2.23 | 40.3 |
| C2 | 1.19 | 180 | 62 | 7.07 | | |
| C3 | 1.24 | 240 | 110 | 11.55 | | |

图 4 为钙质土地基的荷载-沉降曲线 ($P-S$ 曲线)。从曲线可知，钙质土地基的 $P-S$ 曲线主要是直线型和曲线型，没有出现陡降段，即地基不会出现突然破坏。由于现场试验条件所限，试验最大加载量为 720 kPa，地基最大沉降量为 11.55 mm，最小为 2.56 mm；卸荷后测得地基的回弹量也很小，最大回弹量为 2.23 mm，说明地基变形主要为塑性变形，主要是砂土颗粒的压密和颗粒间的相对移动所致。

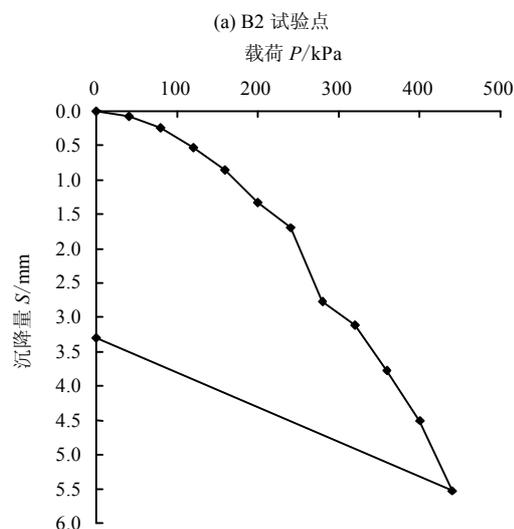
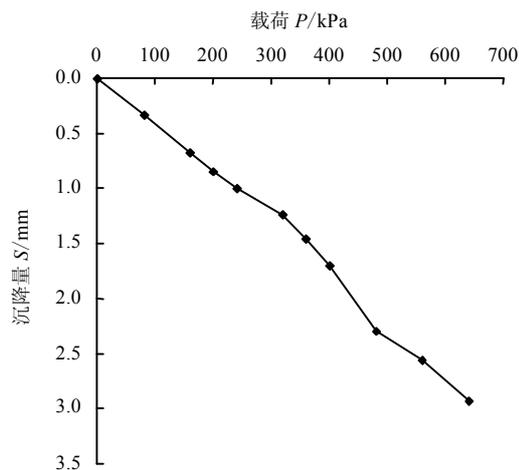


图 4 典型钙质土地基载荷试验曲线
Fig.4 Curve of plate load test on calcareous soil ground

总体而言，礁坪相地基承载力最低，承载力特征值为 120~240 kPa。在载荷试验过程中经历涨潮，试验时载荷板在水下约 20~30 cm，因此，地基处于饱和状态，变形稍大，载荷板的最大下沉量约为 8 mm，3 个试验的变形模量分别为 116、56 和 87 MPa，地基不均匀性较大；人工填筑的珊瑚礁地基承载力最高，地基承载力特征值在 320~360 kPa 之间，地基土变形模量为 95~200 MPa，地基沉降量均很小，

最大沉降量为 7.70 mm; 沙坝处地基在进行载荷试验过程中遭遇暴雨, 地基含水率较高, 最大达到 15.28%, 因此, 测得的地基承载力并不高, 为 180~240 kPa, 地基变形模量在 62~115 MPa 之间, 承载力特征值对应的地基沉降量最大为 2.32 mm。由此可见, 珊瑚礁地基作为低层建筑物的地基其承载力和沉降均能满足要求, 无需进行地基处理。

从浅层平板载荷试验结果可知, 珊瑚礁地基具有以下特点:

①人工填筑的地基承载力最高, 礁坪相和沙坝的天然地基承载力略低, 主要原因是人工填筑的地基土级配较好, 经过压实后密实度较高, 其天然干密度为 1.66~1.70 g/cm³; 而礁坪相地基天然干密度为 1.39~1.56 g/cm³, 沙坝处地基的礁块含量最少, 天然干密度为 1.19~1.29 g/cm³; 由此可见, 地基沉降量很小。

②纵观钙质土所有载荷试验数据后发现, 在最大加载值为 720 kPa 的情况下地基最大沉降量为 11.55 mm, 远小于陆源石英砂土的沉降量, 这与钙质砂的室内载荷试验的结果是一致的^[15]; 图 5 是典型钙质土地基 $Q-S-t$ 曲线, 由图可知, 在荷载作用下, 钙质土地基的沉降是瞬时完成的, 且保持稳定, 由此可见, 钙质土地基的载荷试验可采用快速加载法, 可提高现场试验效率, 无需采用慢速荷载维持法。

③地基沉降变形以塑性变形为主, 卸荷回弹变形较小。

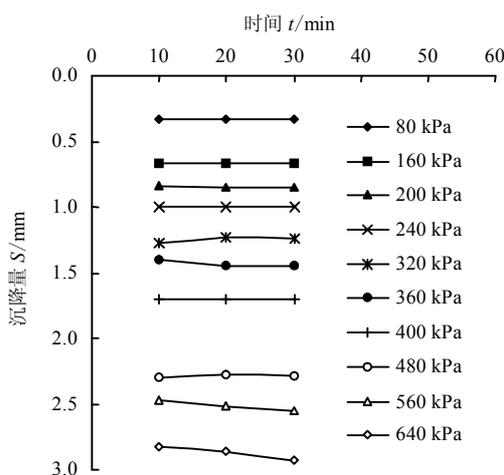


图 5 典型钙质土地基 $Q-S-t$ 曲线 (B2)

Fig.5 $Q-S-t$ curves of typical calcareous soil (B2)

3 地基深层载荷试验

3.1 试验方案

浅层平板载荷试验测试地基土的承载力和变形

模量只适用于地表以下 2~3 m 深度以内, 当需要对深层地基土的承载力和变形参数进行研究时, 则可采用深层螺旋板载荷试验来进行。该试验还可以研究地层深处的地基承载力和变形模量等参数随深度的变化规律。由于在进行螺旋板试验时需要人工钻进, 遇到礁石则钻进十分困难, 因此, 本次深层螺旋板载荷试验仅对沙坝的钙质砂地基承载力和变形模量在深度上的变化规律进行研究, 开展了 3 个孔位共计 13 个螺旋板载荷试验, 每个孔位的测试深度如表 3 所示。

表 3 深层螺旋板载荷试验方案
Table 3 Spiral plate load testing scheme

| 孔号 | 试验深度/m |
|-----|---------------------|
| 孔 1 | 0.5、1.5、2.5、3.5、4.5 |
| 孔 2 | 0.5、1.5、2.5 |
| 孔 3 | 0.5、1.5、2.5、3.5、4.5 |

3.2 试验设备和方法

试验采用南光地质厂生产的 WDL 型螺旋板载荷试验仪, 螺旋板的板头直径 D 为 113 mm, 截面积为 100 cm², 螺距为 25 mm; 螺旋板探头加载量程为 1 500 kPa, 采用千斤顶加载, 最大加载能力为 50 kN; 传力杆为直径为 38 mm 的合金钢厚壁空心管。试验压力采用 DN-1 型数字显示仪读取, 测试误差小于 0.5%F.S。在试验时将螺旋形承压板旋入地层的预定深度, 再通过千斤顶和传力杆向承压板施加压力, 直接测定承压板的沉降量, 计算地基承载力、变形模量等参数。试验按照《岩土工程勘察规范》^[16]的规定, 采用加载分级推持荷载沉降稳定法 (常规慢速法), 土层的变形模量 E_0 按 $P-S$ 曲线的初始直线段计算, 其计算变形模量的公式为

$$E_0 = \omega \frac{PD}{S} \quad (3)$$

式中: D 为螺旋板直径或边长 (m); P 为 $P-S$ 曲线线性段的压力 (kPa); S 为与 P 对应的沉降 (mm); ω 为与螺旋板直径、试验深度和土类有关的系数, 按《岩土工程勘察规范》表 10.2.5 取值。

3.3 结果分析

螺旋板载荷试验结果见表 4。图 6 是 3 个孔 13 个不同深度的 $P-S$ 曲线。由图可知, $P-S$ 曲线基本为直线型, 无法准确地确定地基土的极限承载力和比例极限, 因此, 地基承载力特征值按照 $S/D=0.02$ 来确定。

孔 1、2 的试验结果表明, 地基承载力特征值和变形模量都随深度增大而增大, 但从深度 4.5 m 往

下地基承载力减小，这是由于地下水位深度在地面下 4.0 m 左右，在地下水位以下，地基承载力和变形模量有所降低。孔 1、2 的地基承载力均较高，深度为 3.5 m 处最大承载力为 730 kPa；孔 3 在表层 0.5 m 的地基承载力和变形模量稍高，主要因为紧靠路边，车辆和行人的碾压作用使地基较为密实所致；深度从 1.5~3.5 m 地基承载力从 250 kPa 逐渐增大到 350 kPa，在深度为 4.5 m 处降低到 260 kPa，地基沉降量较小，从图上看，最大加载时的沉降量不超过 6 mm。

4 地基回弹模量试验

4.1 试验方案

在珊瑚礁上钙质土是填筑路基的理想材料，而地基的回弹模量是路基设计的重要参数，因此，确定人工填筑路基的回弹模量是否满足要求至关重要。本次试验以人工填筑的钙质土地基作为研究对象，选取 D、E 两个试验点，在每个试验点的周围各开展 3 个回弹模量试验。同时，为综合评价各个试验点路基的压实度，首先取 D、E 两点的地基土进行室内重型击实试验，获取最大干密度参数，然后在 6 个试验点的周围用挖大坑上覆水法测地基土的天然干密度和含水率，计算路基的压实度。

4.2 试验结果与分析

人工填筑钙质土地基回弹模量试验成果见表 5。图 7 为典型的钙质土地基沉降曲线和回弹曲线，两条曲线的对比进一步证实了钙质土地基在荷载作用下的沉降变形主要为塑性变形，回弹变形很小；同时通过对压实度和回弹模量的分析可以得出：钙质土地基在压实度达到 87% 以上时，回弹模量可以达到 428~730 MPa，且随着压实度的增高，回弹模量基本呈现上升趋势。

表 4 螺旋板载荷试验结果

Table 4 Load test results of spiral plates

| 试验编号 | 试验深度/m | 承载力特征值/kPa | 变形模量 E_0 /MPa |
|--------------------|--------|------------|-----------------|
| 孔 1-1 [#] | 0.5 | 180 | 4.0 |
| 孔 1-2 [#] | 1.5 | 300 | 6.9 |
| 孔 1-3 [#] | 2.5 | 500 | 11.5 |
| 孔 1-4 [#] | 3.5 | 730 | 15.9 |
| 孔 1-5 [#] | 4.5 | 290 | 11.3 |
| 孔 2-1 [#] | 0.5 | 320 | 8.0 |
| 孔 2-2 [#] | 1.5 | 380 | 8.9 |
| 孔 2-3 [#] | 2.5 | 650 | 15.1 |
| 孔 3-1 [#] | 0.5 | 350 | 18.2 |
| 孔 3-2 [#] | 1.5 | 250 | 5.5 |
| 孔 3-3 [#] | 2.5 | 300 | 5.9 |
| 孔 3-4 [#] | 3.5 | 350 | 7.8 |
| 孔 3-5 [#] | 4.5 | 260 | 5.4 |

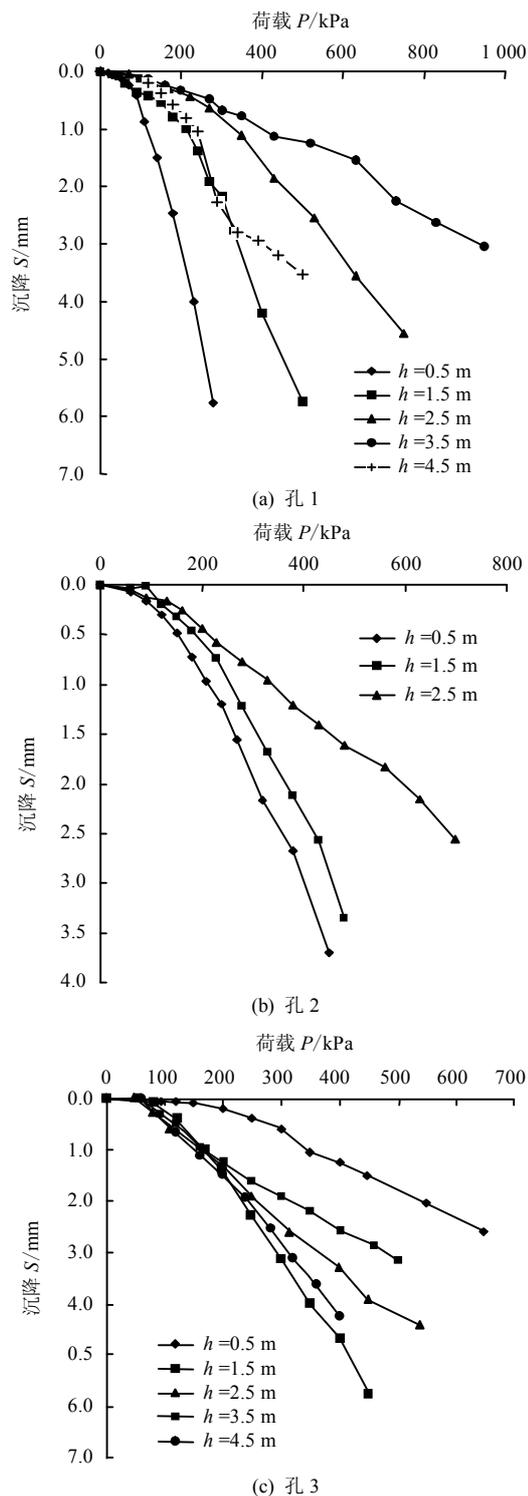


图 6 钙质土地基不同深度的 P-S 曲线
Fig.6 P-S curves of calcareous soil in different depths

表 5 回弹模量试验结果

Table 5 Test results of resilience modulus

| 试验编号 | 最大干密度 / (g/cm ³) | 天然干密度 / (g/cm ³) | 压实度 / % | 回弹模量 / MPa |
|------|------------------------------|------------------------------|---------|------------|
| D1 | 1.90 | 1.81 | 95 | 472 |
| D2 | 1.90 | 1.79 | 94 | 475 |
| D3 | 1.90 | 1.78 | 94 | 579 |
| E1 | 2.03 | 1.77 | 87 | 428 |
| E2 | 2.03 | 1.88 | 93 | 730 |
| E3 | 2.03 | 1.83 | 90 | 517 |

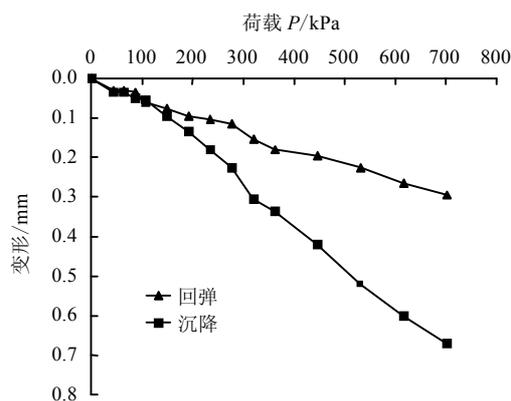


图7 钙质土地基回弹模量试验曲线 (D2)

Fig.7 Test curves of resilience modulus of calcareous soil (D2)

5 结论

(1) 通过对珊瑚礁3种不同地貌的地基浅层平板载荷试验可知,人工填土地基由于密实度较高,其承载力和变形模量明显较高,承载力特征值可达到320~360 kPa,地基沉降量很小;而礁坪相和沙坝的天然地基承载力略低,但承载力都满足一般建筑物对地基的要求;

(2) 通过对浅层平板载荷试验 $Q-S-t$ 曲线的分析可知,钙质土地基在荷载作用下沉降是瞬时完成的,且保持稳定,因此,钙质土地基的载荷试验可采用快速加载法,可极大地提高现场试验效率。

(3) 螺旋板载荷试验结果表明,在地下水位以上,地基承载力从上往下逐渐增加,但在地下水位以下,地基的承载力明显减小。

(4) 人工填筑的钙质土地基在压实度达到87%以上时,其回弹模量可以达到472~730 MPa,且随着压实度的增大而增大。

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.
WANG Ren, SONG Chao-jing, ZHAO Huan-ting, et al. Nansha Islands coral reef engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 吴京平, 楼志刚. 海洋桩基工程中的钙质土[J]. 海洋工程, 1996, 14(3): 74-82.
WU Jing-ping, LOU Zhi-gang. Research on the behavior of calcareous soils in offshore pile foundations[J]. *The Ocean Engineering*, 1996, 14(3): 74-82.
- [3] 单华刚, 汪稔, 周曾辉. 南沙群岛永暑礁工程地质特性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 31-36.

SHAN Hua-gang, WANG Ren, ZHOU Zeng-hui. Yongshu reef engineering geology of Nansha Islands[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20(3): 31-36.

- [4] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 74-84.
LIU Cong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, 16(4): 74-84.
- [5] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 123-128.
QIN Yue, YAO Ting, WANG Ren, et al. Particle breakage-based analysis of deformation law of calcareous sediments under high-pressure consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3123-3128.
- [6] MENG Qing-shan, WANG Ren, YU Ke-Fu, et al. Undisturbed strata succession sampling technology and the engineering geological characteristics of an atoll in the Southern South China Sea[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2009, 27: 296-308.
- [7] 单华刚, 王稔. 珊瑚礁工程地质中的几个重要问题研究[C]//第六届全国工程地质大会论文集. 北京: 中国地质学会, 2000.
SHAN Hua-gang, WANG Ren. Study on some important problems in engineering geology of coral reef[C]// Proceedings of the Sixth National Engineering Geological Congress. Beijing: Geological Society of China, 2000.
- [8] 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: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
WANG Xin-zhi. Study on engineering geological properties of coral reefs and feasibility of large project construction on Nansha Island[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [9] 严与平, 柯有青. 浅谈珊瑚礁工程地质特性及地基处理[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(增刊2): 47-49.
YAN Yu-ping, KE You-qin. Geological characteristics and foundation treatment of coral reef engineering[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2008, 22(Supp. 2): 47-49.
- [10] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 607-626.