DOI：10.16285/j.rsm.2024.0307

航油储罐珊瑚砂地基变形特性研究

张小燕[1]，李 吉[1]，蔡燕燕[2]，张晋勋[3]

（1. 中国矿业大学（北京） 力学与土木工程学院，北京 100083；2. 华侨大学 岩土工程研究所，福建 厦门 361021；
3. 北京城建集团有限责任公司，北京 100088）

摘 要：珊瑚砂广泛应用于岛礁吹填工程中，其与陆源砂的物理力学性质截然不同。为探究吹填珊瑚砂地基变形机制，对珊瑚砂开展了级配、孔隙比和加载方式等因素耦合作用下的侧限压缩试验。珊瑚砂的初始颗粒级配对压缩变形特性影响较大，且颗粒破碎明显。砾砂的初始孔隙比越大压缩性也越大，珊瑚砂的变形主要由孔隙的移动填充为主，伴有少量的颗粒破碎，均为不可恢复的塑性变形，因此，珊瑚砂的回弹指数仅为黏土的 1/10。运用 Plaxis 3D 软件建立了航油储罐的三维模型，基于室内试验获得的力学参数，研究了航油储罐工程珊瑚砂地基在加卸载循环荷载作用下的变形规律，并与马尔代夫易卜拉欣·纳西尔国际机场的航油储罐工程实测数据进行了对比，验证了该模型的准确性。在航油储罐的最大储油量下，珊瑚砂地基达到最大变形量。在该荷载水平下，多次加卸载不会导致变形进一步发展。研究成果对工程安全控制有一定的指导意义。

关 键 词：大型储罐；珊瑚砂；不均匀沉降；有限元模拟

中图分类号：TU475 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 12－3738－10

Deformation characteristics of coral sand foundation of aviation oil storage tank

ZHANG Xiao-yan[1], LI Ji[1], CAI Yan-yan[2], ZHANG Jin-xun[3]

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China; 3. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Coral sand is widely used in island and reef reclamation projects, but its distinct physical and mechanical properties compared to land-based sand. To explore the deformation mechanism of hydraulic filled coral sand foundation, oedometer tests were conducted on coral sand, considering the combined effects of factors such as gradation, porosity, and loading methods. The initial particle size distribution of coral sand significantly impacts its compression deformation characteristics, with noticeable particle breakage. A larger initial void ratio in gravel sand results in greater compressibility. The deformation of coral sand primarily involves pore filling by particle movement, accompanied by minor particle breakage, all of which are irreversible plastic deformations. Consequently, the unloading index of coral sand is only 1/10 that of clay. Finally, a three-dimensional model of the aviation oil storage tank was created using Plaxis 3D software. Using mechanical parameters obtained from laboratory experiments, the deformation of the coral sand foundation in aviation oil storage tank engineering under cyclic loading and unloading was studied. The model's accuracy was validated by comparing it with the monitoring results of the aviation fuel storage tank project at Maldives' Ibrahim Nasir International Airport. At the maximum storage capacity of the aviation oil storage tank, the coral sand foundation reaches its peak deformation. At this load level, multiple loading and unloading cycles will not cause further deformation, providing valuable guidance for engineering safety control.

Keywords: large storage tank; coral sand; nonuniform settlement; finite element simulation

1 引 言

珊瑚砂广泛分布于岛礁，已应用于各岛礁工程地基吹填中[1-2]。为此，众多学者对珊瑚砂的特性展开研究。汪稔等[3]提出珊瑚砂在较高的应力条件下，变形过程存在颗粒破碎与滑移两种机制的耦合作

收稿日期：2024-03-12 录用日期：2024-08-21
基金项目：国家自然科学基金（No.52178375，No.52211530088，No.51809264）；中央高校基本科研业务费（No.2024ZKPYLJ03）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178375, 52211530088, 51809264) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2024ZKPYLJ03).
第一作者简介：张小燕，女，1986 年生，博士，副教授，主要从事海洋岩土工程方面的研究。E-mail: zhangxiaoyan@cumtb.edu.cn

用。吕亚茹等[4]将珊瑚砂与石英砂在高应力状态下的压缩特性进行对比分析，相同密实度下石英砂的压缩模量为珊瑚砂的 3～4 倍，压缩模量随相对密实度的增大而增大。骆赵刚等[5]采用土工格栅加筋改善珊瑚砂的力学性能和变形行为，随着格栅层数增加，偏应力−应变曲线逐渐转为硬化状态。Shen 等[6]认为改变粗粒含量是降低珊瑚砂压缩特性的最有效方式，并提出评价不同粗粒含量珊瑚砂压缩性的经验公式。Wu[7]和尹福顺[8]等通过侧限压缩试验研究了珊瑚砂的颗粒破碎对压缩行为的影响，证明相同垂直应力下，疏松、颗粒粒径更大的试样颗粒破碎总量较大，同时验证了颗粒破碎指数与单位体积功之间的关系，发现其不受初始孔隙比变化影响。刘志遐等[9]探究了含水率、碳酸钙含量对压缩系数和压缩模量的影响规律，证明沉降量与时间呈对数关系，在受压状态下沉降量与沉降速率随含水率增大呈现先增大后减小的规律。实际工程中，由于水力吹填过程中各区域与喷口处位置高低差异以及水力分选作用，不同粒径的珊瑚砂颗粒运移距离也具有明显差异，故而形成区域差异性强、粒径分布广、级配不均匀且部分粒组组成层聚集的非均质分布现象[10]。目前对珊瑚砂变形特性的研究多为室内试验研究，缺乏对珊瑚砂地基的承载力与变形特性研究。

自 20 世纪以来，罐体大型化成为国际上储罐工程设计的主要模式[11]。储罐工程大多建设在沿海或岛礁地区，地质条件较差且分布差异性过大，大型储罐的高负载和反复加卸载的使用特性可能会导致地基发生严重的不均匀沉降，进而造成储罐结构扭曲变形甚至撕裂[12-14]。

学者们已对储罐沉降进行了大量的理论研究。早在 1982 年，Allen 等[15]通过对大量储罐沉降数据进行系统的分析，提出用于常温常压储存流体的大型钢制储罐沉降的性能准则。Horvath 等[16]对各项性能准则的依据、失效机制及适用范围进行深入细化与解析。毕波等[17]通过对沉降观测结果分析，提出相邻储罐之间的相互影响及地基处理措施不当是储罐基础产生非平面倾斜的主要原因。田黎等[18]采用解释结构模型对储罐基础沉降破坏的不同影响因素进行阶梯分级处理，发现破坏的根本原因是储罐的地基土体不均匀。赵家伟[19]建立了不均匀沉降预测的一元回归关系式，提出影响定量预测不均匀沉降量的主要因素为地基土厚薄变化程度、土质、深浅程度和横向分布。赵永涛等[20]根据傅里叶分解取前八阶谐波沉降的叠加组合作为沉降函数，创建了以公共节点连接罐底和地基土的新型模型，通过计算分析地基厚度对基础沉降的影响提出储罐地基的建议厚度。上述研究多通过理论计算研究地基土层的性质对储罐不均匀沉降的影响。

部分学者采用数值模拟的方式对储罐沉降问题进行深入研究。陈志平等[21]提出以地基沉降量代替地基基床系数，用刚性环梁接触边界和弹性地基接触边界模拟地基实际情况，以接触单元代替弹簧单元的新型有限元建模方法。Wang 等[22]基于数值模拟分析了储罐基础在预压和稳定加载阶段的沉降特性，结果表明地基固结速度受渗透系数的影响明显，随着渗透系数增大，固结速度逐渐增大。石磊[23]采用 ANSYS 建立有限元模型，研究基础单次谐波沉降对罐体结构的影响，提出强度评定准则并确定储罐基础单次谐波沉降幅值的临界允许值。现有储罐沉降的研究多基于软弱土地基，而对于珊瑚砂基础的不均匀沉降机制研究较少，且在建模过程中未综合考虑土层厚度差异和基础与底板之间的相互作用等因素对储罐沉降的影响，模拟结果与实测差异较大[24]。

本文对珊瑚砂进行室内侧限压缩试验，研究了颗粒级配、初始孔隙比和加载路径对珊瑚砂压缩变形特性的影响。结合现场监测数据和试验结果，采用数值模拟对储罐基础的变形特性展开了研究，为吹填岛礁工程地基处理与变形控制提供参考。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

结合现场地质情况和《土的工程分类标准》（GB/T 50145－2007）[25]中对砂土分类标准，设计了 4 种典型珊瑚砂的级配曲线，各组不均匀系数 C_u 均大于 10，级配良好，各组土样基础物理力学参数如表 1 所示。

表 1　各组土样基础物理参数

Table 1　Physical parameters of soil samples

土样	细颗粒含量百分比/%	粗颗粒含量百分比/%	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
砾砂	43.1	38.5	80	0.162
粗砂	50.3	23.0	48	0.270
中砂	58.4	22.0	20	0.648
细砂	63.2	18.0	15	0.600

2.2　试验方案

为探究级配对珊瑚砂变形特性的影响，对上述 4 种级配条件下的珊瑚砂进行侧限压缩试验，并设计了 T1、T2、T3、T4 共 4 种不同的加卸载方式，

试验方案如表 2 所示。并分别在 e_1、e_2、e_3 这 3 种不同初始孔隙比条件下对砾砂开展试验，e_1 = 0.94，e_2 = 0.91，e_3 = 1.12。储罐地基土承载力特征值为 200 kPa，试验最大荷载水平设置为 800 kPa。T1 为直接加载至 800 kPa，然后卸载。T2 为分别加载至 200、400、800 kPa 后逐级卸载。T3 为对砾砂组直接加载至 800 kPa 后卸载，重复两次；T4 为直接加载至 800 kPa 后卸载，重复 3 次，用以研究加卸载次数对珊瑚砂变形的影响。本文采用湿夯的方式进行制样，初始含水率为 11%，该含水率为击实试验测试得到的最优含水率。为了更全面地分析各初始条件和反复加载对珊瑚砂的压缩变形特性的影响，在试验结束后对试样烘干并进行粒径筛分，对珊瑚砂的颗粒破碎情况进行分析。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

加载方式	最大荷载/kPa	级配	孔隙比
T1	800	砾砂、粗砂、中砂、细砂	e_1
T1	800	砾砂	e_2
T1	800	砾砂	e_3
T2	800	砾砂、粗砂、中砂、细砂	e_1
T3	800	砾砂	e_1
T4	800	砾砂	e_1

试验采用 WG 型单杠杆三联固结仪及其配套 TWJ-1 型数据采集装置进行压缩试验和数据采集。为了考虑颗粒粒径的影响，试验容器采用直径为 61.8 mm、高为 40 mm 的环刀。采用逐级砝码加压的方式施加荷载，待每级荷载下变形小于 0.01 mm 后认为变形稳定，进行下一次加载，结合土工试验数据采集处理系统对变形进行实时记录。

3 侧限压缩试验结果与分析

珊瑚砂在压缩过程中发生的体积变化主要是在低压力下颗粒间的旋转、滑移和填充，以及高压下颗粒破碎产生微粒对孔隙进行填充。袁泉等[26]将压缩过程划分为初始压密和颗粒破碎两个阶段。图 1 为各组珊瑚砂的 e-lg$p$（e 为孔隙比，p 为荷载）曲线，各组珊瑚砂在最大轴向压力为 800 kPa 时出现了不同程度的压缩变形，细颗粒含量越多，压缩性越小。当含水率一定时，粒径对珊瑚砂的干密度有明显影响[27]。粗颗粒在土体结构中承担骨架构成的作用，相同粗颗粒含量下，承载力差异会受到孔隙内细颗粒填充程度的影响，细颗粒填充程度越高，颗粒结构受力更加均匀，承载能力更强。砾砂的孔隙比变化量小于粗砂，这是由于细微颗粒的填充性能更倾向于使结构受力状态达到更优水平，其本身承载能力较弱且一般无法真正分摊压力。在粗颗粒含量差异显著的情况下，更多的粗颗粒使结构本身的承载力大幅提升，进而出现砾砂的变形小于细颗粒含量更大的粗砂现象[28]。

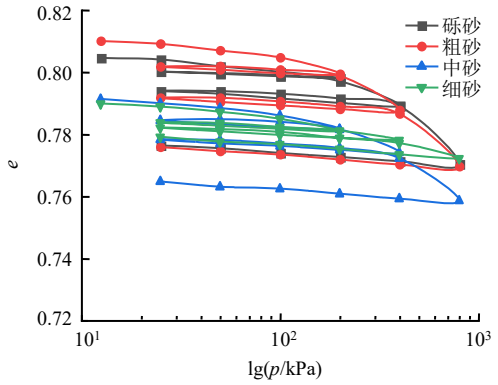


图 1 11%含水率下各组珊瑚砂的 e-lg$p$ 曲线

Fig.1 e-lg$p$ curves of each group of calcareous sand with water content of 11%

颗粒破碎是一个受颗粒强度、颗粒形状、颗粒密度、颗粒矿物组成等多种因素影响的复杂过程，一般情况下颗粒破碎发生在较高应力水平下，然而珊瑚砂质地较脆、颗粒不规则，在较低的应力水平下也会发生明显的颗粒破碎现象。本文采用 Hardin 模型中相对破碎率 B_r 对珊瑚砂的颗粒破碎特性进行计算[9]。图 2 为不同级配的珊瑚砂相对破碎率，砾砂的相对破碎率明显高于其他各组，为细砂组相对破碎率的 3.8 倍，说明在 800 kPa 的荷载水平下，颗粒破碎主要发生在粗颗粒土中。根据试验后试样的颗粒筛分结果来看，试验后的各组材料均表现为尺寸在 0.1 mm 以下的颗粒明显增加，也证实了珊瑚砂粗粒表面和棱角研磨成微小粉末占破碎的主要部分。

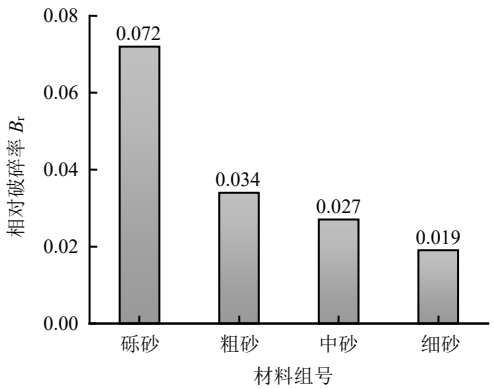
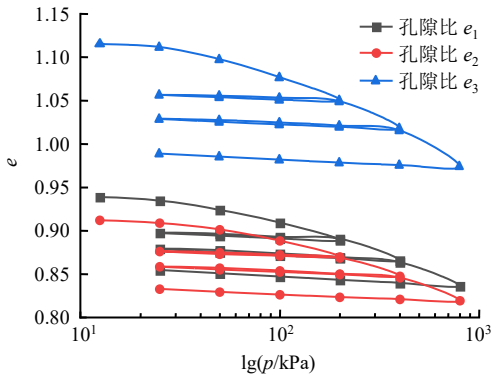


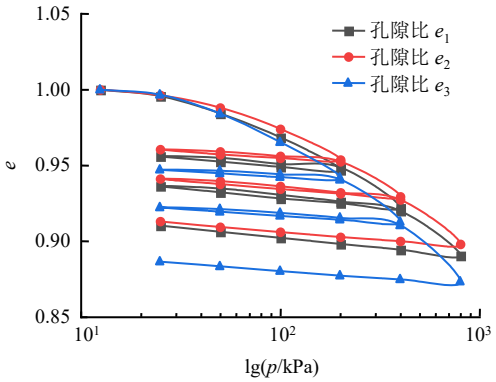
图 2 级配条件与相对破碎率之间的关系

Fig.2 Relationship between grading and relative breakage

图 3 为不同初始孔隙比的相同级配珊瑚砂试样的 *e*-lg*p* 曲线。由图可知，珊瑚砂试样受初始孔隙比条件影响显著，初始孔隙比更高的试样，随竖向应力的增加，试样孔隙比降低效果更显著。砂土在压缩过程中，首先发生的是颗粒的旋转填充，越大的初始孔隙比意味着颗粒之间孔隙更多。随着初始孔隙比的下降，颗粒间的孔隙减少，可压缩性减弱，颗粒间处于一种较为密实的状态。



(a) *e*-lg*p* 曲线



(b) 归一化 *e*-lg*p* 曲线

图 3　不同初始孔隙比下砾砂的 *e*-lg*p* 曲线

Fig.3　*e*-lg*p* curves of gravel sand under different initial void ratios

结合现场充水试验的实际工况，探究在低应力情况下，循环加载次数和加载方式对珊瑚砂压缩特性的影响。图 4 为砾砂组在直接加载至 800 kPa 与分级加载卸载后再加载至 800 kPa 下的 *e*-lg*p* 曲线，以及典型黏土分级加载再卸载曲线。对比钙质砂的两条曲线可知，直接加载的试样在各荷载水平下的压缩变形量均比多次循环加载的试样更大，说明珊瑚砂的压缩变形受加载方式与荷载大小的影响，这与黏土材料性质相似[29]。在卸载过程中，应力得到释放，颗粒具有重新滑移排列的机会从而获得更高的稳定性，故在低应力水平下，在达到最大应力状态前多次卸载再加载的方式能够使颗粒结构更加稳定，承载效果更佳。

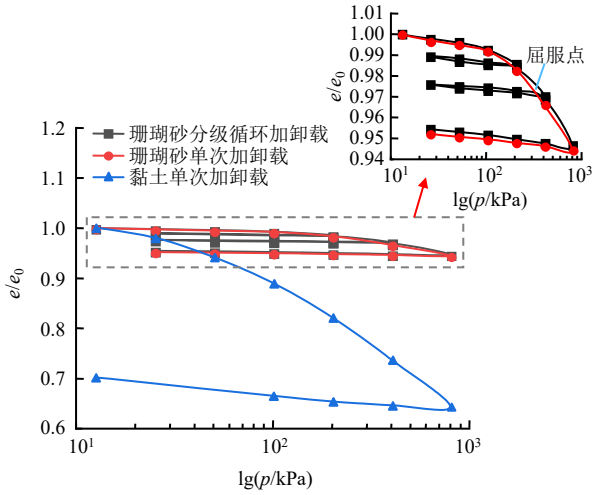


图 4　不同加载方式下的珊瑚砂 *e*-lg*p* 曲线

Fig.4　*e*-lg*p* curves of calcareous sand under different loading paths

在 3 次卸载中珊瑚砂孔隙比回弹量分别为 0.003 8、0.005 1 和 0.008 2，相较于卸载前最高应力水平下的孔隙比变化量占比为 26.7%、27.4%和 27.5%。取卸载段和再加载段的平均斜率——回弹指数 C_e 描述珊瑚砂回弹特性，前两次卸载 C_e 分别为 0.005 0 和 0.005 7。何平等[30]通过整合国内典型土层的回弹指数，得出正常固结的黏土回弹指数在 0.06～0.10 之间，较珊瑚砂高 10 倍以上。结合图中黏土卸载曲线可以证明两者回弹特性差异显著，珊瑚砂材料同黏土相比卸载下回弹极小，在压缩过程中主要发生的是不可恢复的塑性变形。吕亚茹等[4]将 *e*-lg*p* 曲线上曲率最大的点定义为屈服点，可以看出，相较于直接加载曲线，循环加载曲线在卸载荷载附近出现明显的屈服点。

图 5 为直接加载至 800 kPa 的砾砂在经过不同次数的加载试验后材料级配曲线图。整体而言，在相同低应力条件下，随着循环次数的增加，珊瑚砂试样的级配曲线向更为平滑的方向发展，说明颗粒

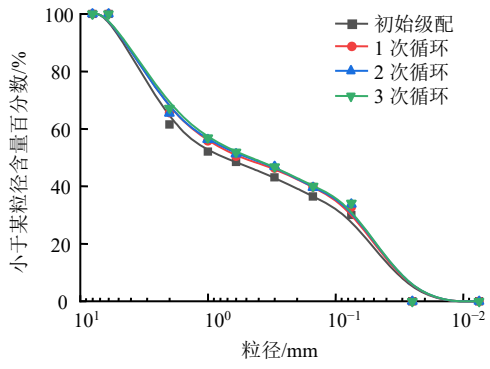


图 5　不同循环次数下的珊瑚砂级配曲线

Fig.5　Particle size distribution of calcareous sand under different loading cycles

破碎逐渐增加，但增长速率减缓，中、粗粒径颗粒量减小明显，整体而言主要是以中、粗粒径颗粒向更细的颗粒发展的破坏形式为主。不同循环次数带来的颗粒破碎主要为颗粒材料之间的磨损，珊瑚砂颗粒的棱角逐渐被磨损会使颗粒粒径略微降低，而颗粒的棱角被磨损及粒径变小，颗粒破碎也越来越难以发生，因此随着加卸载循环次数的增加，颗粒破碎越来越少。

4 数值模拟分析

4.1 工程概况

航油储罐位于马尔代夫易卜拉欣·纳西尔国际机场内，图 6 为现场储罐布置图。单个罐体的公称容积为 15 000 m^3，计算容积为 16 258 m^3。油罐采用立式拱顶锥底结构，罐底坡度为 4%，内直径为 37.0 m，罐体总体高度为 19.856 m，单个储罐总重 340.8 t。罐壁为 8 圈板，总厚度达 68 mm。油罐基础采用钢筋混凝土环墙式基础，环墙厚度为 600 mm，混凝土选用 C40，抗渗等级 P6；钢筋采用 HRB400，混凝土保护层厚度为 50 mm。

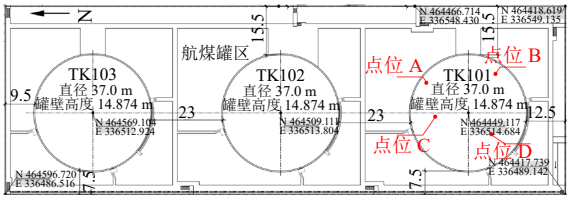


图 6 储罐现场平面布置俯视图（单位：m）

Fig.6 Layout of on-site storage tanks (unit: m)

4.2 场地工程地质条件

根据钻探结果分析，机场范围内深部地层为礁灰岩，浅层珊瑚砂区域分 4 层进行回填，回填土为未胶结松散珊瑚砂、多珊瑚角砾、珊瑚碎石和壳类海洋生物残骸，不规则砂粒较多。珊瑚角砾及碎石的含量为 15%～40%，一般粒径为 3～6 cm，最大粒径达 30 cm 以上。通过现场平板载荷试验测试得到珊瑚砂层、中垫层粗砂及礁灰岩层的物理力学性质如表 3 所示。每层回填后分别在 A、B、C、D 共 4 个点位进行原位干密度试验，点位位置与试验结果如表 4 所示。

4.3 航油储罐工程现场充水试验及现场监测

以 TK101 储罐为例，现场围绕整个罐体共布置 16 个监测点，围绕储罐底板与环墙交界处，等间距布置，监测点布置如图 7 所示。为检验储罐的安全性，分步进行了充水试验，第 1 次充水试验从 2019 年 4 月 1 日开始充水，2020 年 5 月 22 日充水至最大水位，7 月 23 日泄水结束，并在同年 11 月开展第 2 次充水试验。整个充水过程保持匀速，日进水量的水位高度不超过 600 mm，且当日沉降量超过 5 mm 时停止进水，待沉降稳定后再继续进行试验。

表 3 各地层物理力学性质一览表

Table 3 List of physical and mechanical properties of various strata

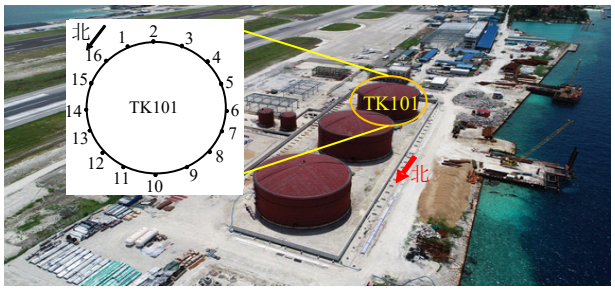
地层编号	地层名称	承载力特征值 f_{ak}/kPa	变形模量 E/MPa
①-2	含珊瑚砂珊瑚枝素填土	200	19.0
①-3	含珊瑚碎石珊瑚砂素填土	220	22.0
③	含珊瑚碎石粗砂	240	25.0
④	礁灰岩	300	45.0

表 4 现场回填土层各点干密度试验结果

Table 4 Results of dry density test at each point of backfilled soil layer

点位	经度	纬度	土密度/(g·cm^{-3})			
			土层 1	土层 2	土层 3	土层 4
A	N464460.81	E336517.39	1.65	1.61	1.62	1.61
B	N464441.13	E336523.65	1.66	1.67	1.65	1.62
C	N464441.21	E336506.36	1.66	1.61	1.63	1.61
D	N464458.81	E336507.32	1.60	1.67	1.66	1.62

注：N 为经度，E 为纬度。



注：1～16 为监测点。

图 7 现场监测点分布示意图

Fig.7 Schematic diagram of on-site monitoring points

根据文献[31]，通过罐周边弧长方向的不均匀沉降度 $\Delta s/l$，即相邻监测点总沉降差与两点间弧长的比值来描述罐体的沉降状态。充水试验结束后储罐环墙各监测点数据如表 5 所示，最大沉降为 231 mm，在监测点位 1 处；最小沉降为 21 mm，出现在点位 9 处。

图 8 为现场两次充水预压试验后各测点的累积沉降量。相较于第 1 次充水试验产生的累计沉降，第 2 次试验监测点变形增量在 1～2 mm 内。东侧 16 号点位整体沉降量显著高于西侧 8 号点位。待充水试验结束后进行安全检查，发现罐体周边土体出现多处裂纹；罐底边缘板翘起，且存在向罐中心收缩迹象；罐体东侧壁板多处出现凹凸变形。

表 5　TK101 第 1 次充水试验后现场环墙各测点总沉降值
Table 5　Total settlement of the rig wall for tank TK101 after the first water filling test

点位	总沉降量/mm	点位	总沉降量/mm
Q1	231.0	Q9	21.0
Q2	218.9	Q10	25.0
Q3	189.7	Q11	49.5
Q4	145.8	Q12	88.8
Q5	117.1	Q13	130.7
Q6	73.4	Q14	170.0
Q7	42.6	Q15	210.4
Q8	21.7	Q16	230.8

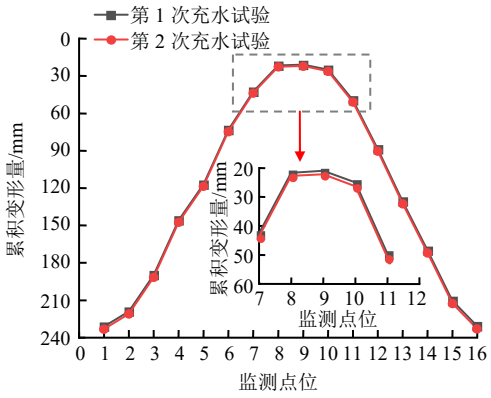


图 8　TK101 充水试验后各监测点累积沉降量
Fig.8　Accumulated settlement of each monitoring point for tank TK101 after water filling tests

储罐的深部地层为礁灰岩，因其经历了漫长沉积，工程性质稳定，难以出现较大变形。结合回填过程中的干密度试验与储罐充水试验监测结果进行分析，在不同深度和点位下，回填土层的干密度存在明显差异，说明地基范围内土的密实度和力学性质存在差异。初步认为航油储罐地基变形的原因为浅层回填区珊瑚砂的变形差异过大。

4.4　航油储罐 Plaxis 3D 建模

采用 Plaxis 3D 软件对储罐工程范围内结构与土体建立三维模型。土体材料选用土体硬化（hardening soil，简称 HS）模型，相较于 Mohr-Coulomb 模型，其屈服面会随着塑性应变的发生而膨胀，还同时考虑了土体剪胀和中性加荷，能较为准确地描述珊瑚砂的破坏与变形行为[32]。

土体硬化模型参数包括 4 个强度相关参数和 7 个刚度相关参数。强度参数包括有效黏聚力 c'、有效内摩擦角 φ'、剪胀角 ψ' 和破坏比 R_f。7 个刚度相关参数包括侧限刚度 E_{oed}、刚度相关幂指数 m、正常固结侧压力系数 K_0^{NC}、卸载再加载参考刚度 E_{ur}、三轴固结试验的参考割线模量 E_{50}、参考应力 P^{ref} 和卸载再加载泊松比 v_{ur}。根据侧限压缩试验结果可以确定数值计算中采用的模型参数 E_{oed}、m、K_0^{NC}、E_{ur} 和 E_{50}，参数 c'、φ' 和 ψ' 取自勘察报告，根据工程勘察资料和工程案例参数换算经验综合比较确定其余参数 P^{ref} = 100 kPa，v_{ur} = 0.2，R_f = 0.9[33]；土体参数如表 6 所示。在建立土层时，以储罐为中心，在罐体东西两侧均匀分布钻孔，并在钻孔不同深度设置不同的土体来还原土体在深度方向上的分布，水平方向上各钻孔下相同土体自动相连填充，从而实现以深度方向上的土层分布还原水平方向上的土体分布不均性，土层分布如图 9 所示。

表 6　油罐基础土层力学性质
Table 6　Mechanical properties of tank foundation soil layer

土层名称	重度/(kN·m^{-3})	c' /kPa	φ' /(°)	ψ' /(°)	m	K_0^{NC}	E_{50} /MPa	E_{oed} /MPa	E_{ur} /MPa
砾砂	20.0	2	34	4	0.5	0.44	15	14.1	83.9
粗砂	21.0	1	32	1	0.5	0.47	10	9.0	53.6
中砂	20.0	1	30	1	0.5	0.50	13	12.4	73.8
细砂	19.0	1	30	1	0.5	0.50	22	21.8	129.7
礁灰岩	19.5	1	35	5	0.5	0.43	40	40.0	180.0
中粗砂垫层	18.5	1	30	0	0.5	0.50	10	10.0	35.0

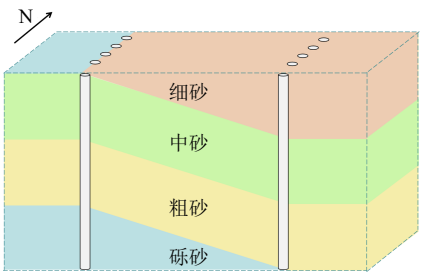


图 9　模型中各土层的分布示意图
Fig.9　Schematic diagram of distribution of soil layer in the model

地下环墙及储罐结构均以板单元进行模拟，地下水位取地下 2 m，环墙弹性模量为 30 GPa，油罐弹性模量为 210 GPa。根据工程尺寸构建模型基本结构，考虑模拟边界效应影响，土体模拟长×宽×高设置为 120 m×120 m×40 m。模型网格划分以储罐为中心向外由密至疏，土单元网格数为 81 372，对罐体底板及环墙临近土体进行局部加密处理；为了更加真实地模拟变形，在 Plaxis 软件中加了一个命令“界面”，通过给界面选取合适的界面强度折减因

子来模拟相互作用的粗糙率，使罐体和环墙结构与土体的变形相互独立，以模拟两者之间的变形差异；模型边界以位移作为限制条件，底面施加竖向固定约束，侧面施加水平固定约束，上表面为自由面。模型在南北方向上呈轴对称，在建立土层时，以储罐为中心，在罐体东西两侧均匀分布钻孔，根据钻孔勘察资料还原土体在深度方向上的分布，水位方向上两侧钻孔中相同土体自动相连，并对连接区域进自动填充，模型网格和监测点分布示意图如图 10 所示。根据现场施工工况依次进行模拟开挖、环墙施工、土体回填、罐体施工及充水加卸载试验。其中充水试验过程因计算可知，沉降前后重心偏移不超过 10 mm，偏心极小，故在本文中将充水过程简化为作用在底板上竖直向下的均布荷载，根据不同阶段下罐体水位高度计算相应的底板均布荷载。

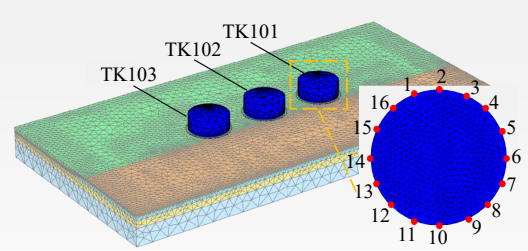


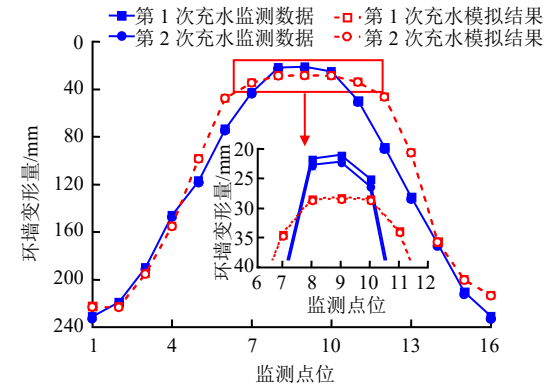
图 10 储罐模型三维网格示意图

Fig.10 Grid mesh of 3D model for storage tank

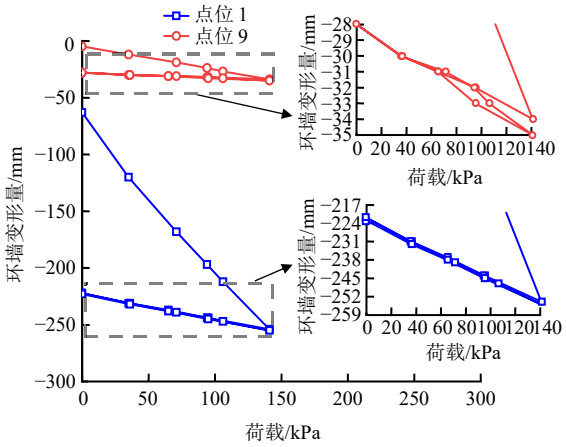
4.5 储罐沉降分析

图 11 为在两次预压充水试验完成后的环墙上监测点最终沉降量模拟结果与实测结果的对比曲线图。可以看出，在第 1 次充水试验后，环墙最大变形为 222.6 mm，出现在点位 1；变形最小值为 28.2 mm，出现在点位 9。第 2 次充水试验结束后，各测点变形增量在 1 mm 内，整体而言，两次充水试验的变形值与监测结果基本吻合，模拟效果良好。由于模型的简化及假设，部分点位的变形与监测数据存在一定的差异。

图 12 为储罐预压充水试验不同时刻下的地表沉降云图。第 1 次充水至满载后，储罐沉降分布呈“月牙”状，西侧土体沉降更为均匀，总体沉降量小；东侧土体以储罐中心为圆心，沉降值逐层向外不断增加，地表沉降在近环墙处达到最大沉降 322 mm，即图中所示红色区域。地表沉降相对于环墙的沉降高大约 100 mm，说明环墙基础对于储罐的变形起到了很好的变形协调作用。第 1 次泄水空载后，土体最大沉降 222 mm，回弹量占沉降总量的 17%，主要是模型中油罐壳体与土体通过“界面”命令紧密连接，储罐的卸荷回弹对土体提供了一个拉应力使土体回弹较大。第 2 次充水和泄水空载下地表沉降情况与第 1 次试验基本一致，前后沉降差约为 1 mm，结合室内试验分析和数值模拟结果，加载次数对珊瑚砂的压缩特性影响较小，在相同最大荷载水平下，循环使用不会造成基础沉降的进一步扩散。



(a) 监测数据与数值模拟对比



(b) 充水试验加卸载过程的沉降变形

图 11 TK101 罐两次充水过程的环墙变形

Fig.11 Settlement of tank TK101 during water filling test

整个模拟过程中，地表沉降量与环墙沉降量始终存在一定差异，以第 1 次试验泄水后为例，图 12 中橙色区域沉降量为 251.7 mm，环墙监测最大沉降为 222.6 mm。这与现场罐体底板边缘翘曲，且边缘板向内收缩的现象一致。目前对大型储罐的沉降观测多在环墙处等距布设测点进行监测[34-35]，地基的实际沉降与环墙沉降不同步，以环墙沉降代替基础沉降进行安全性分析，对罐体与土体结构安全存在一定的隐患，因此建议对地质条件差异显著的储罐工程采用底板沉降监测的方式进行沉降评估。同时，由于珊瑚砂地基的回弹变形较小，循环加载并不会使地基产生更大的不均匀沉降。因此，建议对罐体进行修复纠偏即可正常使用，不需要进行额外的地基加固。

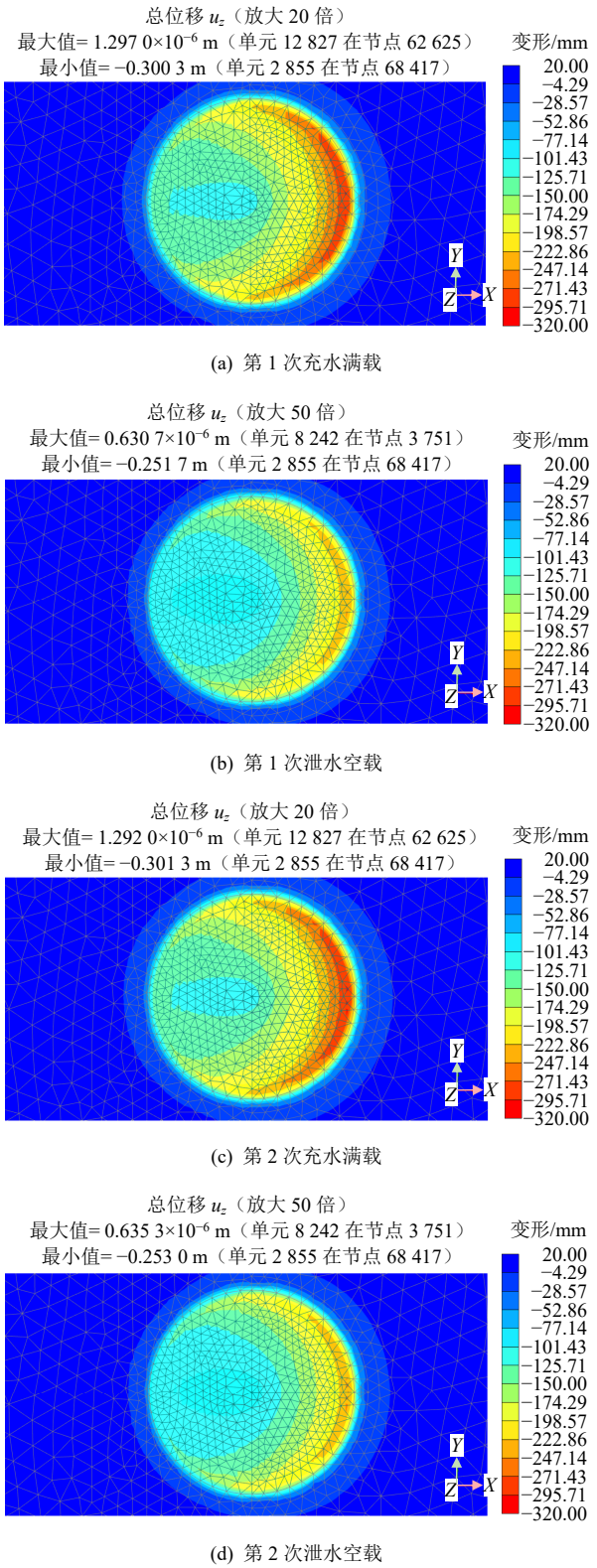


图 12　充水试验过程中的地表变形云图

Fig.12　Ground subsidence overlooking cloud view

5　结　论

本文通过对珊瑚砂进行侧限压缩试验，探究了颗粒级配、孔隙比与加载方式对珊瑚砂的变形特性及颗粒破碎特性的影响，并结合有限元模拟对储罐工程的变形机制进行了分析，得到如下结论：

（1）颗粒级配及初始孔隙比对珊瑚砂的压缩特性影响显著，中、粗颗粒作为骨架构成，直接承担荷载，细颗粒主要填充孔隙。珊瑚砂的压缩性随初始孔隙比的增大而升高，其在低应力条件下也会发生颗粒破碎，主要表现形式为粗颗粒的棱角破碎。

（2）珊瑚砂的压缩特性受加卸载路径和循环加载次数的影响，在加载过程中多次卸载释放压力可以使珊瑚砂骨架结构稳定，压缩性降低。压缩变形以不可恢复的塑性变形为主，回弹指数仅为黏土的 1/10，随着循环加卸载次数的增加，珊瑚砂的压缩变形增长速率缓慢，且几乎无颗粒破碎，级配曲线基本不变，证明循环荷载不会引起珊瑚砂发生较大沉降，为珊瑚砂作为储罐工程安全评估提供理论依据。

（3）通过 Plaxis 3D 模拟储罐预压充水试验，模拟结果表明土体的不均匀性是导致航油储罐地基变形的主要原因；在航油储罐的最大储油量下，珊瑚砂地基达到最大变形量，在该荷载水平下多次加卸载不会导致变形进一步发展。底板沉降明显高于环墙沉降，在进行沉降安全性评估时，取底板下基础沉降作为计算值更加可靠。

参 考 文 献

[1] 杨志强, 赵威, 宋朝景. 钙质土层的工程地质调查[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 53-60.
YANG Zhi-qiang, ZHAO Wei, SONG Zhao-jing. Engineering geological survey of calcareous soil layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 53-60.

[2] 王哲, 俞演名, 翁凯文, 等. 珊瑚礁珊瑚砂工程力学特性研究综述[J]. 科技通报, 2019, 35(7): 7-9.
WANG Zhe, YU Yan-ming, WENG Kai-wen, et al. A review of mechanical properties of coral reef calcareous sand[J]. **Science and Technology Bulletin**, 2019, 35(7): 7-9.

[3] 汪稔, 孙吉主. 珊瑚砂不排水性状的损伤−滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 75-78.
WANG Ren, SUN Ji-zhu. Damage-slide coupled interaction behavior of undrained calcareous sand[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, 33(7): 75-78.

[4] 吕亚茹, 李治中, 李浪. 高应力状态下珊瑚砂的一维压缩特性及试验影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3142-3150.
LYU Ya-ru, LI Zhi-zhong, LI Lang. One-dimensional compression behavior of calcareous sand and its

experimental technology under high stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.1): 3142-3150.

[5] 骆赵刚, 丁选明, 欧强, 等. 土工格栅加筋珊瑚砂的强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1053-1064.
LUO Zhao-gang, DING Xuan-ming, OU Qiang, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of coral sand reinforced by geogrid[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(4): 1053-1064.

[6] SHEN Y, ZHU Y H, LIU H L, et al. Macro-meso effects of gradation and particle morphology on the compressibility characteristics of calcareous sand[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2018, 77(3): 1047-1055.

[7] WU Y H, WU Y, LIU J X, et al. The evolution and influence of particle breakage on the compression behavior of calcareous sand[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2022, 40(6): 668-678.

[8] 尹福顺, 李飒, 刘鑫. 钙质粗粒料颗粒强度和压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1120-1129.
YIN Fu-shun, LI Sa, LIU Xin. Experimental study on single particle strength and compression properties of calcareous coarse sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(4): 1120-1129.

[9] 刘志遐, 郭成超, 曹鼎峰, 等. 中国南海珊瑚珊瑚砂压缩特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2401-2408.
LIU Zhi-xia, GUO Cheng-chao, CAO Ding-feng, et al. Compressive characteristics of coral calcareous sand in the South China Sea[J]. **Science Technology and Engineering**, 2022, 22(6): 2401-2408.

[10] WANG X Z, DING H Z, MENG Q S, et al. Engineering characteristics of coral reef and site assessment of hydraulic reclamation in the South China Sea[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 300: 124263.

[11] CHEN Z P, DUAN Y Y, SHEN J M, et al. A simplified method for calculating the stress of a large storage tank wall[J]. **Journal of Process Mechanical Engineering**, 2007, 221(3): 119-127.

[12] 徐至钧. 大型储罐的设计选型及国产化条件[J]. 石油工程建设, 1997(4): 16-19.
XU Zhi-jun. Type selection design and domestic fabrication conditions of large storage tank[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 1997(4): 16-19.

[13] DYSON G J, RANDOLPH M F. Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(4): 346-352.

[14] 张栋材. 油罐地基不均匀沉降原因分析及纠偏加固处理方法[J]. 水文地质工程地质, 2001(5): 69-72.
ZHANG Dong-cai. Analysis of uneven settlement and rectification and reinforcement of tank[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2001(5): 69-72.

[15] ALLEN M W, A. R J, WILLIAM L T. Criteria for settlement of tanks[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1982, 108(8): 1017-1039.

[16] HORVATH J S. Discussion of “criteria for settlement of tanks” by W. Allen Marr, Jose A. Ramos, and T. William Lambe (August, 1982)[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 109(12): 1610-1612.

[17] 毕波, 于文章. 大型储罐基础非平面倾斜问题的探讨[J]. 石油工程建设, 2003(6): 1-4.
BI Bo, YU Wen-zhang. Discussion on non-planar inclined foundation of large scale tank[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 2003(6): 1-4.

[18] 田黎, 姚安林, 李又绿, 等. 基于 ISM 的储罐基础破坏原因层次分析[J]. 石油化工安全技术, 2006(1): 19-21.
TIAN Li, YAO An-lin, LI You-lü, et al. The analytic hierarchy process of causes those make tank foundation failure based on ISM[J]. **Petrochemical Safety Technology**, 2006(1): 19-21.

[19] 赵家伟. 大型油罐充水预压试验环墙基础不均匀沉降预测[J]. 岩土工程界, 2001(1): 38-41.
ZHAO Jia-wei. The forecast to differential settlement of annular wall foundation of controlle controlled water tests to preload large oil tanks[J]. **Geotechnical Engineering World**, 2001(1): 38-41.

[20] 赵永涛, 张金池, 樊国涛, 等. 地基厚度对基础沉降储罐罐壁变形的影响[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(11): 1-4.
ZHAO Yong-tao, ZHANG Jin-chi, FAN Guo-tao, et al. Effect of foundation thickness on deformation of tank shell under foundation settlement[J]. **Industrial Safety and Environmental Protection**, 2021, 47(11): 1-4.

[21] 陈志平, 葛颂, 沈建民, 等. 大型原油储罐有限元分析建模的新方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 977-981.
CHEN Zhi-ping, GE Song, SHEN Jian-min, et al. New modeling method for finite element analysis of large oil

storage tanks[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2006, 40(6): 977-981.

[22] WANG S, YU R G, ZHANG X D. The numerical simulation of settlement characteristics of storage tank on the soft soil base[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 1446(90-93): 1992-1997.

[23] 石磊. 基础谐波沉降下储罐的力学特性研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2541-2548.
SHI Lei. Study on mechanical properties of storage tanks under the harmonic settlement of foundation[J]. **Journal of Safety and Environment**, 2022, 22(5): 2541-2548.

[24] GONG J, CUI W, ZENG S, et al. Buckling analysis of large scale oil tanks with a conical roof subjected to harmonic settlement[J]. **Thin-walled Structures**, 2012, 52: 143-148.

[25] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145－2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145－2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.

[26] 袁泉, 李文龙, 高燕, 等. 珊瑚砂颗粒特征及其对压缩性影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(2): 32-43.
YUAN Quan, LI Wen-long, GAO Yan, et al. Experimental study on particle characteristics of calcareous sand and effecton its compressibility[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2020, 39(2): 32-43.

[27] 王新志, 王星, 翁贻令, 等. 珊瑚砂的干密度特征及其试验方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 316-322.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, WENG Yi-ling, et al. Characteristics of dry density of calcareous sand and its testing methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 316-322.

[28] 沈扬, 沈雪, 俞演名, 等. 粒组含量对珊瑚砂压缩变形特性影响的宏细观研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3733-3740.
SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yan-ming, et al. Macro-micro study of compressive deformation properties of calcareous sand with different particle fraction contents[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 3733-3740.

[29] 龙蛟, 顾琳琳, 王振, 等. 多次加−卸载条件下考虑颗粒破碎的珊瑚砂一维压缩特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 144-150.
LONG Jiao, GU Lin-lin, WANG Zhen, et al. Study on one-dimensional compression characteristics of calcareous sand considering particle breakage under multiple loading-unloading conditions[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2022(1): 144-150.

[30] 何平, 王卫东, 徐中华. 上海黏土压缩指数和回弹指数经验关系[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3773-3782.
HE Ping, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Empirical correlations of compression index and swelling index for Shanghai clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3773-3782.

[31] American Petroleum Institute. API 650－2013 Welded tanks for oil storage[S]. Washington D C: API Publishing Services, 2007.

[32] 刘伟煌, 朱怀龙, 贺斯进, 等. 土体硬化模型参数试验研究及其在南昌地区基坑工程的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(6): 38-47.
LIU Wei-huang, ZHU Huai-long, HE Si-jin, et al. Experimental study on parameters of hardening soil model for soils and its application in foundation pit engineering in Nanchang[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2021, 43(6): 38-47.

[33] 谢东武, 管飞, 丁文其. 小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5): 898-906.
XIE Dong-wu, GUAN Fei, DING Wen-qi. Determination and sensitivity analysis of the parameters of hardening soil model with small strain stiffness[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2017, 39(5): 898-906.

[34] 司刚强. 大型原油储罐的沉降观测及结果评价[J]. 石油化工设备, 2020, 49(4): 1-5.
SI Gang-qiang. Settlement observation and results evaluation of large crude oil storage tanks[J]. **Petro-Chemical Equipment**, 2020, 49(4): 1-5.

[35] 田龙龙, 梁学琴. 深厚回填土地基储罐群不均匀沉降原因分析及纠偏加固处理[J]. 地基处理, 2022, 4(5): 414-422.
TIAN Long-long, LIANG Xue-qin. Analysis of differential settlement and corrective reinforcement of tanks on deep backfill soil foundation[J]. **Journal of Ground Improvement**, 2022, 4(5): 414-422.