

珊瑚礁软土的工程性质

秦志光

(中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 针对沙特阿拉伯Tusdeer港口珊瑚礁软土, 结合区域地质特征, 分析软土的形成原因, 并根据室内试验、原位十字板试验等结果确定其工程性质。结果表明: 珊瑚礁软土的形成具有区域性特征, 平缓、呈锯齿状的泻湖浅盆地貌利于细颗粒的沉积, 软土的分布往往不连续且规模相对较小, 软土的钙质含量较高但存在区域性差异; 珊瑚礁软土中粉粒含量为56%~79%, 其工程性质与一般滨海、河湖软土存在较大差异; 珊瑚礁软土黏聚力为2~5 kPa, 低于滨海、三角洲软土, 内摩擦角22°~31°, 高于滨海、三角洲一般软土; 在深度2~5 m, 珊瑚礁软土原位十字板强度20 kPa左右, 灵敏度为1.5, 属于低灵敏软土; 珊瑚礁软土为工程性质不良的土体, 对工程具有危害性, 应充分考虑珊瑚礁场地钙质软土存在的可能性及影响, 慎重评价珊瑚礁工程场地的复杂程度。

关键词: 珊瑚礁; 钙质土; 珊瑚礁软土; 工程性质

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0232-07

Engineering properties of coral reef soft-soil

QIN Zhi-guang

(CCCC Key Laboratory of Environment Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Regarding the coral reef soft-soil at Tusdeer Port in Saudi Arabia, this paper analyzes the formation causes of coral reef soft-soil combining with the regional geological characteristics, and determines the engineering properties according to the results of laboratory test and in-situ cross plate test. The results show that the formation of coral reef soft-soil has regional characteristics. The gentle and serrated lagoon shallow basin landform are conducive to the deposition of fine particles. The distribution of soft soil is often discontinuous and relatively small scale. The carbonate content of soft soil is high, but there are regional differences. The proportion of silt in coral reef soft-soil is 56% to 79%, and characteristic properties of this soil are quite different from those of general coastal soft soil, river or lake soft soil. The cohesive force of coral reef soft-soil is 2 kPa to 5 kPa, which is lower than that of coast and delta soft soil, and the internal friction angle is 22° to 31°, which is higher than that of coast and delta soft soil. In the range of depth from 2 m to 5 m, the strength of in-situ vane of coral reef soft-soil is about 20 kPa, and the sensitivity is 1.5, which belongs to low sensitive soft soil. The coral reef soft-soil has poor engineering properties, which are harmful to the project. The adverse influence of coral reef soft-soil site on project should be fully considered, and the complexity of geologic conditions should be carefully evaluated.

Keywords: coral reef; calcareous soil; coral reef soft-soil; engineering properties

珊瑚礁钙质土的物理力学性质与陆源砂存在较大差异。钙质砂土与陆源石英砂土相比, 其黏

聚力更低(黏聚力值接近或为零), 内摩擦角更高(35°以上, 甚至超过50°)。珊瑚砂是钙质土中的一

种, 具有独特性质^[1]。当前, 根据既有工程所揭示的珊瑚礁土类型来看, 主要为珊瑚砂或砾, 其他类型较少。沈建华等^[2]指出钙质砂是一种海洋生物成因、碳酸钙含量大于 50% 的特殊岩土介质; 刘崇权等^[3-4]指出钙质土是一种海洋成因、碳酸钙含量大于 50% 的特殊土, 将碳酸钙量超过 50% 定义为钙质砂, 但并未给出定义的依据; PIANC^[5]依据钙质含量将钙质砂分为 3 类: 钙质含量大于 50% 时为 carbonate sand, 10%~50% 时为 calcareous sand, 2%~10% 时为 slightly calcareous sand。由珊瑚礁、生物骨骼碎屑物等有机质沉积而成、含碳酸钙成分的土被统称为钙质土。但在国内, 将含钙量大于 50% 的土称为钙质土, 这个定义一直存在争议。也有学者将钙质土称之为珊瑚礁土, 但两者实则不完全相同, 甚至差异很大。

钙质土可分为两类: 1) 由新近沉积的以珊瑚虫或者海洋生物骨骼等有机质材料为主的钙质材料, 沉积历史较短还未成岩或土, 材料性质尚不稳定, 对工程安全稳定产生较大的危害性, 已有地区或工程规定钙质含量超过 10% 不能作为地基与基础材料使用, 因此将含钙量大于 50% 定义为钙质土存在争议; 2) 沉积历史相对较长, 成分中以珊瑚礁颗粒材料为主, 已沉积为岩或土, 主要类型为珊瑚礁岩、珊瑚礁砂或砾以及珊瑚礁软土, 且常见为岩、砂或砾, 除珊瑚礁软土外其他珊瑚礁土体的工程性质较好, 总体上对工程建设有利, 可用于地基或者基础材料使用。现有地质调查结果表明, 珊瑚礁土类中除了珊瑚礁砂砾外, 还存在珊瑚礁粉土和珊瑚礁软土。钙质软土是一种在工程领域少见的地质体, 而海洋地质中存在的深海钙质软泥被认为是深海沉积主要特征之一, 在既有成果中对这种土体均有所揭示^[6-8]。

在海洋环境下, 具有泻湖浅盆地特征的区域容易致使细颗粒沉积, 不仅是滨海、近海地区具有的地质现象, 在远海环境中也可能存在珊瑚礁

软土沉积的现象, 只不过不同沉积环境下细颗粒的规模与分布特征不同, 对工程的影响程度也不尽相同。国外对含珊瑚礁软土区域开展地质、环境保护、资源利用等方面的研究较多, 但在工程使用或影响的方面开展的研究较少, 仅见于 Herrmann 等^[9-10]对珊瑚礁软土做过的一些室内试验研究。到目前为止, 我国尚未见有此类土相关研究成果的报道, 我国远海岛礁建设期间在施工过程中曾遇到过少量珊瑚礁软土岩土问题, 但范围较小。当珊瑚礁软土沉积或形成达到一定规模, 会对工程产生不良影响, 因此应对珊瑚礁场地的复杂程度提高认识与判断, 以便提前采取应对措施。

以往针对海洋地质的研究往往聚焦在地质形成与演变等方面, 极少从工程性质方面开展研究, 也导致岩土工程问题研究不足, 因此一些海洋岩土工程性质尚未被全面揭示。本文针对沙特阿拉伯 Tusdeer 港滨海的珊瑚礁软土, 通过室内与原位试验, 结合区域地质条件进行分析, 揭示钙质软土的成因与工程性质, 分析其土性基本规律与强度特征。

1 珊瑚礁软土的沉积特征

1.1 工程概况

Tusdeer 港位于沙特阿拉伯 Jiddah 市的东侧红海滨海区域, 见图 1。根据地质勘查资料揭示的地层依次为: 淤泥、粉土、粉砂、砂、砂砾等, 所有土层均含大量珊瑚礁及有机、钙质沉积物。淤泥即为珊瑚礁软土, 不连续分布, 大部分层厚相对较小, 一般 3~5 m, 最厚达 10 m, 典型地质断面如图 2 所示。地层分布具有典型的滨海沉积特征: 不同颗粒的岩土体分层明显; 沉积层中以海洋环境下形成的材料为主, 夹杂少量陆源搬运而来的材料(如黏性土、石英砂等); 一些地质体往往以透镜体形式分布; 地层中以砂或砾等粗粒土为主且夹层分布一定量的细粒土。

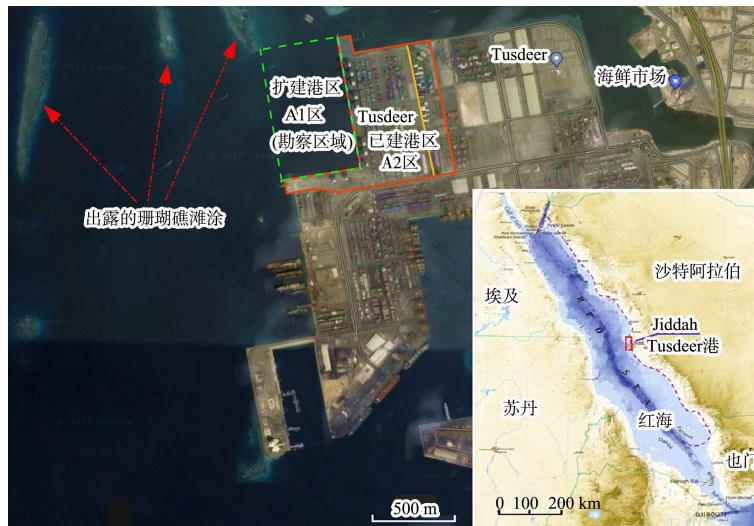


图 1 Tusdeer 港与工程位置(A1 区为工程区域)

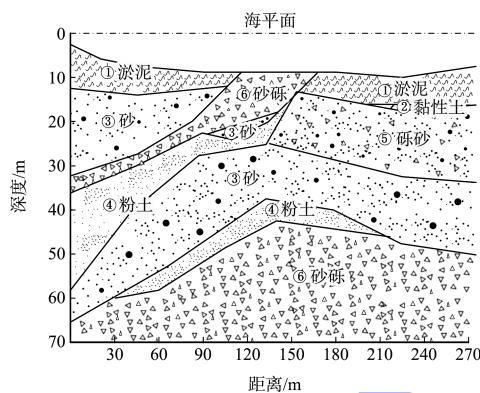
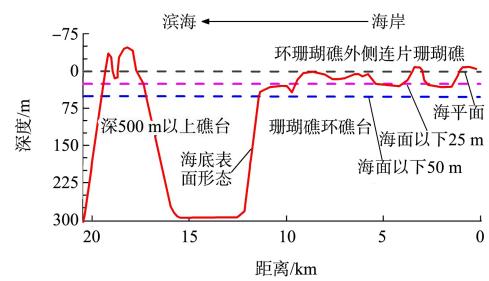


图 2 工程地质断面

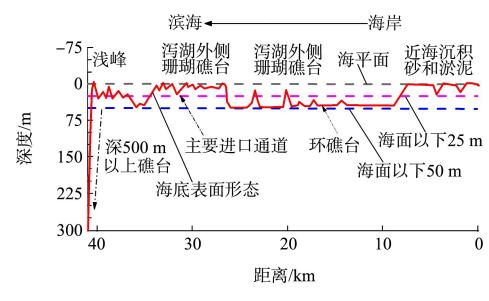
1.2 珊瑚礁地质特征与钙质软土的形成

红海海底广泛分布着珊瑚礁，其典型地形地貌如图 3 所示。图 3a) 的海岸外侧珊瑚礁台范围相对较窄，形成了近似环形的珊瑚礁台；图 3b) 的海岸外侧珊瑚礁环礁台范围及相应沉积范围更大，形成范围广阔的珊瑚礁台，礁平台表面更为平缓，更易于地表沉积物堆积。图 3a)、b) 在珊瑚礁礁(环)台上表面低洼处均存在泻湖盆状地形。红海海底三分之二的区域属于泻湖状盆地地貌，盆地内孕育了大量珊瑚礁，珊瑚礁大部分分布在近岸 25~70 km 范围内。珊瑚礁地质分布十分广泛，含钙量很高。在浅海区域形成了大小不一的数千个小岛、岛礁，这些岛基本上都是由珊瑚礁体组成，在深水区的斜坡段也珊瑚礁零星分布。根据图 3 海底地表形态可看出，沙特阿拉伯滨海至海沟前

缘区域形成广泛的泻湖浅盆地特征地貌，盆地内地表大都较为平缓，表面呈锯齿、浅盆地状，十分利于细颗粒的沉积，且沉积不易受海洋水动力等外部作用影响而向外流动，经较长时间的沉积逐渐形成软土层。由此可见，珊瑚礁软土是在地形较为平缓、低洼且受海洋水动力环境影响较小的区域经漫长的沉积而形成的，具有典型的区域性特征，沉积形成的规模往往不大，沉积物质受区域地质与沉积环境影响，不同地区或区域的珊瑚礁软土在物质组成上可能也不同。



a) 剖面1



b) 剖面2

图 3 红海区域典型滨海海底地貌剖面

珊瑚礁土在形成过程中,受历史地质构造运动、气候变化、海洋洋流影响等不同作用,形成不同的地质结构,地层中多次出现岩体、粗粒土、细粒土互层、夹层甚至透镜体分布的情况。滨海沉积物主要包括淤泥、粉土、粉砂、砂、砾石等类型。深海沟第四系沉积物往往含有玄武岩的矿物成分^[11],说明海沟位置曾受火山活动影响,滨海与浅海未见玄武岩矿物成分则说明珊瑚礁地质一直比较稳定。海底沉积物表层存在一层厚度不一的钙质软土,且含钙量比较高,表层软土的碳酸钙含量在70%~80%,沉积物中石英含量为15%,长石为15%,黏土为5%,其余主要为珊瑚碎屑物,每1 000 a 厚度增加0~5 cm^[12]。海底沉积物表层的钙质土与珊瑚礁软土又存在不同,前者的沉积物以海洋钙质生物为主,后者以珊瑚礁材料为主。因此不同沉积环境下形成的钙质土也不同,工程性质也存在差异。

2 珊瑚礁软土的物理力学性质

2.1 珊瑚礁软土的颗粒组成特征

在Tusdeer港滨海区域取样,35个钻孔中有11个揭示存在珊瑚礁软土,软土分布不连续,芯样如图4所示,土样的颗粒分析试验结果见图5。颗粒分析结果显示:粉粒占比56%~79%,平均约70%;黏粒约20%,黏粒与粉粒合计占总量的80%~90%。珊瑚礁软土以粉粒为主,与陆源软土以黏土颗粒为主的构成不同,这一特点是珊瑚礁软土的主要物理特征之一,也对工程性质产生了重要影响。以粉粒为主构成的土应该为粉土,珊瑚礁粉土在珊瑚礁土类中也是较为少见的一种土。王新志等^[13]对吹填的珊瑚礁钙质粉土开展渗透特性研究,证明其渗透性是陆源粉土的10~1 000倍。钙质粉土与陆源粉土的工程性质存在显著不同,当以粉粒构成为主的珊瑚礁土具有软土的工程性质时,该类土应命名为珊瑚礁软土。



图4 珊瑚礁软土现场取样

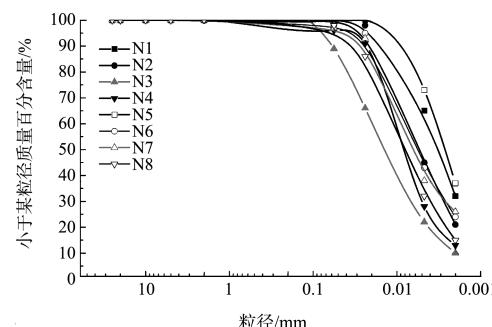


图5 珊瑚礁软土颗粒分析曲线

2.2 珊瑚礁软土的含钙量特征

滨海珊瑚礁地区沉积层受海洋、内陆环境双重影响,如果以海洋环境作用为主,岩土成分中以钙质含量偏高,陆源非钙质材料含量降低。相反如果以陆源作用为主,陆源非钙质材料成分将偏高。Tusdeer港珊瑚礁软土碳酸钙含量超过50%,平均为64%,范围在54.8%~73.5%,主要受海洋环境影响。而文献[6]的研究表明,该地区沉积淤泥钙质软土的碳酸钙含量为70%~80%,较Tusdeer港软土的碳酸钙含量偏高。另外,Tusdeer港软土中的粉粒材料平均含钙量为74.8%,低于该地区珊瑚礁砂砾材料的钙质含量一般水平(85%以上),说明珊瑚礁软土虽然主要由珊瑚礁材料组成,但受到近岸陆源物质影响更大。由此可见,Tusdeer港珊瑚礁软土主要由珊瑚礁材料组成,是一种高钙质软土。

2.3 珊瑚礁软土物理力学指标

取Tusdeer港珊瑚礁软土原状样,测定其天然含水率、液塑限等指标,结果见表1。与国内海相沉积软土的指标进行对比,结果见表2。可以看出,珊瑚礁软土天然含水率范围在46%~68%,

平均值达到 54%，液限平均值为 54%，塑性指数约 21。根据一般软土的定义标准，塑性指数大于 17 为黏性土，是以黏土颗粒为主要成分的土体，而珊瑚礁软土塑性指数达到 21，颗粒成分却以粉粒为主，与一般软土完全不同。珊瑚礁软土天然含水率

处于液限值附近，处于软塑和流塑状态，且液限值大于 50，属于高液限土。将珊瑚礁软土与国内典型软土对比得出：1) 珊瑚礁软土天然含水率、液限值、塑性指数等与国内滨海软土指标接近；2) 珊瑚礁软土的液性指数仅为 0.95，低于常规软土。

表 1 珊瑚礁软土物理力学指标

编号	深度/m	含水率/%	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	黏聚力 c_{cu} /kPa	内摩擦角 φ_{cu} /(°)
N1	1.5	52	56	33	23	0.83	2.4	25.2
N2	2.5	58	55	34	21	1.14	4.3	23.3
N3	3.0	46	53	34	19	0.63	5.4	26.9
N4	3.0	54	56	28	28	0.93	4.3	22.0
N5	3.0	68	58	35	23	1.43	2.7	25.6
N6	3.5	56	55	33	22	1.05	4.0	28.1
N7	4.0	47	52	31	21	0.76	3.1	30.1
N8	4.5	50	47	29	11	0.82	4.0	31.0
均值	-	54	54	32	21	0.95	3.8	26.5

表 2 不同区域常规软土试验物理指标

成因类型	区域	深度/m	天然含水率/%	液限 ω_L /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
滨海 ^[14]	天津塘沽	8~17	47	47	22	1.10
	舟山	2~14	45	34	14	-
三角洲	上海	6~7	50	43	20	1.16
	杭州	3~9	47	41	19	1.30
滨海	广州南沙	6~12	45	40	19	1.28
	Tusdeer 港	1.5~4.5	53	53	21	0.95

3 珊瑚礁软土的强度特征

3.1 三轴固结不排水剪切强度

取不同深度的珊瑚礁软土进行三轴固结不排水剪切试验，得到黏聚力为 2~5 kPa，平均值为 3.8 kPa；内摩擦角为 22°~31°，平均值为 26.5°。将强度指标与国内滨海、三角洲淤泥进行对比，结果见表 3。

表 3 不同沉积常规软土的强度指标

成因类型	区域	深度/m	黏聚力 c_{cu} /kPa	内摩擦角 φ_{cu} /(°)
滨海	天津塘沽	8~17	17.0	4.0
	天津新港	1.9	13.0	2.0
三角洲	上海	6~7	5.0	15.0
	杭州	3~9	6.0	14.0
滨海	广州南沙	6~12	9.7	5.6
	Tusdeer 港	1.5~4.5	3.8	26.5

珊瑚礁软土与国内一般软土相比，特点为：1) 珊瑚礁软土的黏聚力最小，基本在 5 kPa 以下，是国内滨海沉积软土的 1/4~1/2，均低于国内三角

洲相沉积软土；2) 有效内摩擦角最大，是国内滨海软土的 4.6~13 倍，是国内三角洲软土的 1.7 倍。可见，珊瑚礁软土的强度指标与国内滨海、三角洲软土存在很大不同，软土的黏聚力低、内摩擦角大。

3.2 原位十字板剪切强度

在 Tusdeer 港海上采用大型船只搭载十字板设备开展珊瑚礁软土原位试验，数据见表 4。珊瑚礁软土十字板强度特点：强度为 17.2~26.0 kPa，平均值 20.9 kPa，与国内一般软土不排水剪切强度(20 kPa^[15])相近；扰动后强度为 8.2~18.7 kPa；灵敏度为 1.0~2.3，平均值为 1.5，属于低灵敏度软土，低于国内典型沉积软土的灵敏度。扰动后强度变化相对较小，这一特征与以黏土矿物为主的陆源软土区别较大。究其原因，主要是由于珊瑚礁软土的物质组成颗粒以粉粒为主，其强度特征具有粉土的性质，灵敏度必然低于一般的陆源

软土, 说明珊瑚礁软土的工程性质优于一般的软土。

表 4 珊瑚礁软土原位十字板试验结果

测点	深度/m	海底高程/m	原状土强度 s_u /kPa	扰动土强度 s'_u /kPa	灵敏度
T1	2.0	-10.5	19.1	8.2	2.3
T2	2.5	-9.2	17.2	10.8	1.6
T3	3.0	-8.8	19.1	18.7	1.0
T4	3.0	-8.5	21.0	13.5	1.6
T5	3.5	-9.7	20.8	13.5	1.5
T6	4.5	-8.5	23.0	16.1	1.4
T7	5.0	-8.3	26.0	18.2	1.4
平均值	-	-	20.9	14.1	1.5

3.3 珊瑚礁软土强度取值

3.3.1 强度特征分析

不排水抗剪强度的计算公式为:

$$T = c_{eu} + \sigma' \tan \varphi_{eu} \quad (1)$$

式中: T 为抗剪强度; σ' 为有效应力。

通过室内试验得到珊瑚礁软土密度为 1.62 t/m^3 , 采用表 3 中参数, 计算得到珊瑚礁软土层不同深度对应的固结不排水有效强度, 并由表 3 计算不同地区软土的强度与深度关系, 结果见图 6。可以看出, 当深度较浅时(低于 5 m)珊瑚礁软土与其他类型软土相比强度较低或基本接近, 随深度增加, 当超过 5 m 时珊瑚礁软土的强度已超过其他所有类型软土, 体现出珊瑚礁软土黏聚力低、内摩擦角高的强度变化特征。这种特征是由于材料中粉粒含量高导致的, 粉粒较一般以黏粒为主的软土的黏聚力更低、内摩擦角更高, 材料的类型决定了土体最终的强度特征。

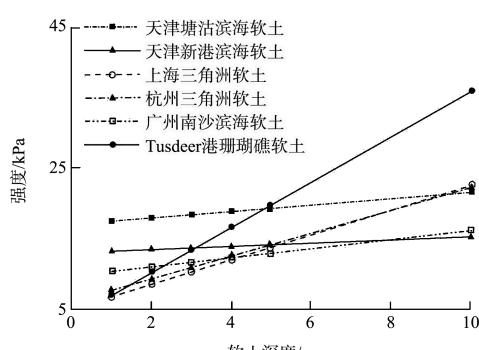


图 6 不同地区软土不排水固结强度计算值随深度关系

3.3.2 强度取值

原位十字板试验过程中, 土体处于固结不排水状态, 与室内三轴固结不排水强度试验状态可看作相同, 两种方法测试结果可进行比较。珊瑚礁软土的试验变化关系见图 7。可以看出, 固结不排水强度低于原位十字板强度, 随着入土深度的增加, 试验固结不排水强度与原位十字板强度均增大, 且两者数值越来越接近。根据图 7, 如果固结不排水强度与原位十字板强度随深度呈正比增长关系, 由于固结不排水强度线性斜率大于原位十字板强度线性关系, 则会导致两个强度值最终相交, 但实际上却不会出现上述情况。因原位十字板强度是实际土体在实际三维空间状态下的固结不排水剪切的峰值强度, 基于室内试验模拟条件下的固结不排水强度是二维状态下的结果, 其试验值低于实际三维状态下的原位试验强度, 因此图 7 中最终的室内固结不排水强度不会超过原位十字板试验强度, 两者最终不会相交。因此, 如果原位十字板强度随深度增加符合线性增长关系, 则固结不排水强度随深度变化关系便不符合线性增长关系, 而以指数关系变化更为合适。由此, 对于不同深度的强度值, 原位十字板试验可采用图 7 中的线性关系, 对于固结不排水强度宜采用图 7 中的指数关系。

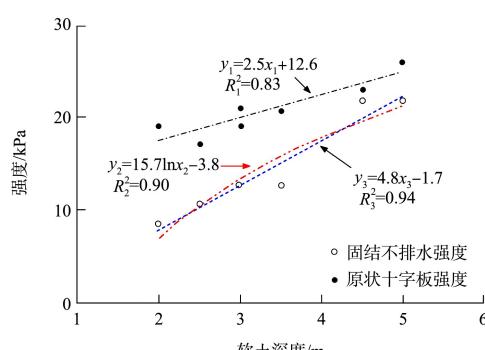


图 7 珊瑚礁软土固结不排水强度与原位十字板强度随土层深度变化关系

由于原位十字板试验获得的强度是实际状态下的峰值强度, 直接应用于设计计算则偏于不安全, 《工程地质手册》^[16]给出 Daccal 等按塑性指数进行修正的关系图, 根据该关系图当珊瑚礁软土

的原状土强度为 20.9 kPa, 液性指数取 1.0, 塑性指数取 20.8 时, 计算得到修正系数为 0.78。由图 6 中的数据计算固结不排水强度与原位十字板强度比值平均值为 0.67, 该值低于 Daccal 修正方法计算的修正系数。出于安全性考虑, 在设计中取原位十字板峰值强度的 0.67 作为计算值是比较合适的, 这一取值与国内《岩土工程勘察规范》建议采用峰值强度的 60%~70% 十分吻合。

4 珊瑚礁软土对工程的影响

常规软土一般是指天然含水率大、压缩性高、承载力低和抗剪强度低的软塑-流塑状态的黏性土, 分为淤泥、淤泥质黏土、泥炭质土、泥炭等。珊瑚礁软土黏粒含量不超过 40%, 粉粒含量超过 50%, 按成分构成应为粉土; 珊瑚礁软土 $I_p > 17$, 天然含水率在液限值附近, 处于软塑或流塑状态。珊瑚礁砂的黏聚力几乎为零, 而珊瑚礁软土的黏聚力较珊瑚礁砂高。珊瑚礁软土中尽管含有一定的黏粒, 但相比粉粒所占比例要低很多, 黏粒产生的作用有限。另外, 黏粒分散在粉粒中, 黏粒之间的相互影响与作用能力将大幅降低, 从而导致黏聚力大幅降低。珊瑚礁软土不同于一般常见软土, 其物理与力学性质与一般软土存在很大差别。

珊瑚礁软土仍是软土中的一种, 具有分布不均匀、低强度、高压缩性等特点, 成分中含有过高的粉粒, 而以粉粒构成为主的土体是极为容易液化的一类土, 所以珊瑚礁软土工程性质较差, 仍然是一种不良地质体。

5 结论

1) 珊瑚礁软土主要分布在滨海珊瑚礁区, 具有区域性地质特征, 沉积物受区域地质与沉积环境影响, 不同地区或区域的物质组成上不同, 而海底表面较为平缓、呈锯齿状的泻湖浅盆地地貌更利于软土的沉积。

2) 珊瑚礁软土属于高钙质土, 颗粒组成以粉粒为主, 粉粒对工程性质产生较大影响, 并与一般软土存在较大差异。

3) 珊瑚礁软土黏聚力均低于滨海、三角洲的一般软土, 同时内摩擦角高于一般软土, 敏感度均低于一般软土, 属于低灵敏度软土, 工程性质优于一般软土, 给出的强度指标可供设计与施工参考使用。

4) 珊瑚礁土工程场地存在岩土介质多样性和复杂性, 工程性质较差, 应重视珊瑚礁软土存在的可能性及其对工程建设的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 沈建华, 汪稔. 钙质砂的工程性质研究进展与展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(S1): 26-32.
- [3] 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, 18(3): 331-335.
- [4] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32-37, 44.
- [5] PINAC. Classification of soils and rocks for the maritime dredging process: PINAC Report No. 144 [R]. Brussels: PINAC, 2017.
- [6] ROWLANDS G, PURKIS S, BRUCKER A. Diversity in the geomorphology of shallow-water carbonate depositional systems in the Saudi Arabian Red Sea[J]. Geomorphology, 2014, 222: 117-134.
- [7] SPALDING M D, RAVILIOUS C, GREEN E P. World atlas of coral reefs[M]. Berkeley: University of California Press, 2001.
- [8] PURSER B H, BOSENCE D W J. Sedimentation and tectonics of Rift Basins: Red Sea-Gulf of Aden [M]. London: Chapman and Hall, 1998.
- [9] HERRMANN H G, HOUSTON W N. Behaviors of seafloor soils subjected to cyclic loading[C]//Society of Petroleum Engineers. Proceedings of the 10th Annual Offshore Technology Conference. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1978: 1797-1808.
- [10] HERRMANN H G, N HOUSTON W N. Response of seafloor soils to combined static and cyclic loading[C]// Society of Petroleum Engineers. Proceedings of the 8th Annual Offshore Technology Conference. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1976: 53-60.

(下转第 244 页)