

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0993

钙质粉土的固结特性试验研究

雷学文¹, 丁 豪^{1,2}, 王新志², 沈建华², 孟庆山²

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 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)

摘 要: 由于水力吹填的分选作用, 南海吹填珊瑚礁地基中含有厚度不均的细颗粒钙质粉土夹层。相比粗颗粒礁砂而言, 钙质粉土的压缩性高、承载力低、沉降变形大, 对建筑物安全造成不利影响。通过室内固结试验, 查明了钙质粉土的压缩特性, 揭示了钙质粉土的主固结沉降量、次固结沉降量、固结时间和固结速率特征, 为更好地了解钙质粉土的工程性质和珊瑚礁地基沉降计算提供科学依据。试验结果表明: 钙质粉土压缩系数在 $0.03 \sim 0.37 \text{ MPa}^{-1}$ 之间, 压缩模量在 $6.67 \sim 54.79 \text{ MPa}$ 之间; 压缩系数与含水率成正比, 与干密度成反比。其中, 含水率小于 15% 的中密和密实钙质粉土的压缩系数小于 0.1 MPa^{-1} , 压缩模量大于 20.0 MPa , 属于低压缩性土; 松散的钙质粉土均属于中压缩性土。与相同干密度和含水率的石英砂相比, 石英砂的压缩系数比钙质粉土大, 即钙质粉土比石英砂压缩性更低; 与相同干密度和含水率的杭州湾粉土相比, 两者均属于中压缩性土, 但钙质粉土的压缩模量比杭州湾粉土略大, 压缩系数略小; 当荷载大于 200 kPa 时, 钙质粉土在固结试验前 5 h 固结度达到了 0.95, 因此, 建议钙质粉土的固结试验在荷载小于 200 kPa 时固结时间仍取 24 h, 当荷载大于 200 kPa 时取 5 h, 此举将大大节省测试时间, 提高测试效率。

关 键 词: 钙质粉土; 干密度; 含水率; 压缩性指标; 固结速率

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 04-0909-12

Experimental study of consolidation properties of calcareous silt

LEI Xue-wen¹, DING Hao^{1,2}, WANG Xin-zhi², SHEN Jian-hua², MENG Qing-shan²

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Due to the effect of sorting by hydraulic dredger fill, the foundation of dredged coral reef in the South China Sea contains fine calcareous silt interlayer with uneven thickness. Compared with coarse-grained calcareous sand, calcareous silt presents higher compressibility, lower bearing capacity and larger settlement deformation, which adversely affect the safety of buildings on coral reefs. In this paper, the characteristics of primary and secondary consolidation settlement, consolidation time and consolidation rate of calcareous silt were obtained through laboratory consolidation tests, for better understanding the engineering properties of calcareous silt and calculation of coral reef foundation settlement. The calcareous silt shows $0.03 \sim 0.37 \text{ MPa}^{-1}$ of the compression coefficient and $6.67 \sim 54.79 \text{ MPa}$ of the compression modulus. Compression coefficient is directly proportional to moisture content and inversely proportional to dry density. Compression coefficient lower than 0.1 MPa^{-1} and compression modulus more than 20.0 MPa occurs in moderately dense and dense calcareous silt with water content of less than 15% as low compressibility soil, but loose calcareous silt is moderately compressible. Compared with quartz sand under the same dry densities and moisture contents, the compression coefficient of quartz sand is higher than that of calcareous silt, while the compression modulus is lower than that of calcareous silt. Under the same dry density and water content, both Hangzhou Bay silt and calcareous silt show moderate compressibility. However, the compressive modulus of calcareous silt is slightly larger than that of Hangzhou Bay silt, and its compressive coefficient is slightly smaller. When the load exceeds 200 kPa , the degree of consolidation of calcareous silt reaches 0.95 in the first 5 hours of the consolidation test. Therefore, it suggests 24 hours for the consolidation time of calcareous silt under loading less than 200 kPa but 5 hours under loading greater than 200 kPa for the testing efficiency.

Keywords: calcareous silt; dry density; moisture content; compressibility index; rate of consolidation

收稿日期: 2020-07-14

修回日期: 2020-10-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资助 (No. XDA13010203); 自然科学基金面上项目 (No. 41572297, No. 41772336, No. 41877267)。This work was supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA13010203) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (41572297, 41772336, 41877267).

第一作者简介: 雷学文, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学与岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: leixuewen@wust.edu.cn

通讯作者: 王新志, 男, 1981 年生, 博士, 研究员, 主要从事珊瑚礁工程地质及岩土力学特性的研究。E-mail: xzwang@whrsm.ac.cn

1 引言

我国南沙群岛珊瑚礁潟湖和礁坪上沉积了大量珊瑚礁砂和贝壳碎屑,这些生物成因的沉积物在波、浪、流等海洋水动力作用下被破碎,在潟湖中沉积形成钙质土,吹填陆域地基就是开挖钙质土后在礁坪上填筑而成。珊瑚礁钙质土在全球 $N30^{\circ}\sim S30^{\circ}$ 范围内比较常见^[1]。在珊瑚礁地基吹填过程中,由于水力分选作用,珊瑚礁砂颗粒在自重和水流冲击作用下产生粗细颗粒分离,在地基中呈现粗细颗粒的分层现象^[2],容易形成分布不均、形态各异以不同细粒含量的粉细砂层为主的细粒汇集层,引起钙质砂土地基承载力和不均匀沉降问题^[3],地基中局部细颗粒较为集中,存在粉细砂和粉土夹层。

钙质土的研究始于 20 世纪 70 年代,众多学者对钙质土的物理力学性质进行了大量的研究^[4],但国内学者大多都是针对粒径为 0.25~2.00 mm 的钙质砂开展研究,内容主要包括钙质砂的颗粒形状、物理力学特性、胶结特性、内孔隙特征、颗粒强度、桩基工程特性等方面的研究^[5-7],在岛礁工程实施以前,学者们对粒径小于 0.075 mm 的钙质粉土的研究较少涉及。

近些年来,国外学者对当地钙质粉土有一系列的研究。Lim 等^[8]设计了一个利用颗粒图像测速和数字图像相关技术的数值模拟程序,对钙质粉土在管道采样过程中的扰动有一个较好的认识:管状取样往往会使钙质粉土致密化。Kim 等^[9]报道了采用三维动态有限元分析了动态鱼锚在非均匀黏土和钙质粉土中安装和拔出过程,结果表明,在钙质粉土中,所获得的嵌入深度通常比黏土中要小。Chow 等^[10]开展了钙质粉土渗透试验并探讨了其强度变化。Chang 等^[11]研究了一种新型鱼锚在钙质粉土中的动力安装和单调拔出性能。Koh 等^[12-14]报告了一系列模型试验的结果,目的是了解加筋沉箱锚在安装过程中的行为,以及在轻度超固结钙质粉土中单调拔出的情况,及定量计算循环倾斜荷载作用下加筋沉箱在钙质粉土中的性能,并对高岭土和钙质粉土的沉箱安装引起的超静孔隙水压力的消散问题进行了数值模拟。

自从我国海洋强国战略的提出和南海工程建设实施以来,国内学者湛民^[15]通过直剪试验揭示了干密度和含水率是影响钙质粉土抗剪强度的主要因素,而剪切速率对抗剪强度参数影响不大。王新志

等^[12]对钙质粉土的渗透特性进行了试验研究,发现钙质粉土具有与普通陆源粉土相似的渗透规律,并建立了钙质粉土的渗透系数计算模型。以上是目前针对钙质粉土的研究成果,但是对钙质粉土的固结特性尚未有文献报道。因此,本文将探讨钙质粉土的固结特性,获取不同荷载作用下钙质粉土的主固结和次固结沉降量、沉降时间和固结速率特征,并和陆源粉土进行对比,评价钙质粉土的压缩特性。因吹填珊瑚礁地基中钙质粉土夹层强度低,对地基的长期稳定产生不利影响,本文的研究结果是吹填岛礁地基沉降计算和稳定性分析必不可少的,试验结果将对珊瑚礁地基的长期沉降和建筑物稳定性计算分析提供数据支撑和理论依据。

2 试验材料

试验土样取自南海吹填钙质土地基中粒径小于 0.075 mm 的细颗粒钙质土夹层(见图 1),钙质粉土主要矿物质成分为文石、高镁方解石,其电镜扫描见图 2,试验前按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]的有关规定对土样的物理性质指标进行测定。采用液塑限联合测定仪测出液限为 31.7%、搓条法测得塑限为 25.2%,即塑性指数为 6.5,属于粉土。利用日本 HORIBA 激光衍射粒度分析仪 particaLA-960 测得钙质粉土的粒度组成,结果如图 3 所示,小于 0.005 mm 的黏粒含量约在 5% 左右。对钙质粉土进行重型击实试验(见图 4),得到最优含水率为 15.6%(见表 1)。采用美国 MICROMERITICS 全自动真密度分析仪对试样的体积进行测定,得到相对密度为 2.81(见表 1)。其测试原理是:用气体置换法可准确测量材料的体积,使用惰性气体如氦气、氮气作为置换介质,气

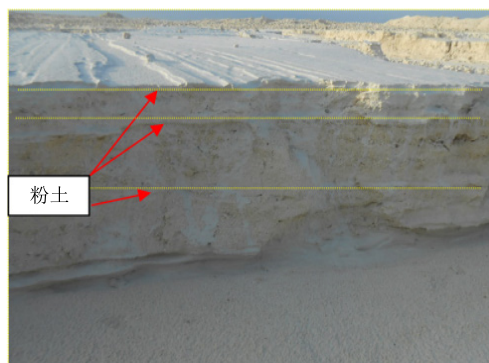


图 1 吹填土中的钙质粉土层^[2]

Fig.1 Calcareous silt in hydraulic dredged soil^[2]

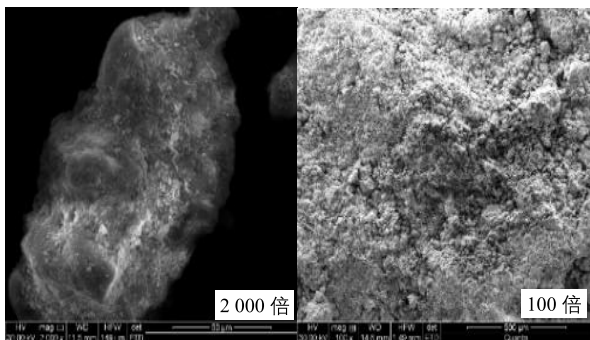


图 2 钙质粉土电镜扫描照片
Fig.2 SEM photos of calcareous silt

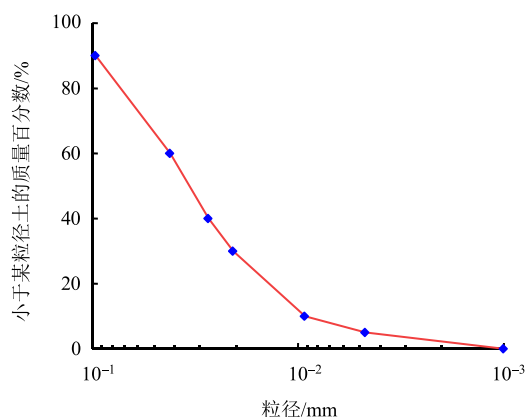


图 3 钙质粉土的颗分曲线
Fig.3 Grain size distribution of calcareous silt

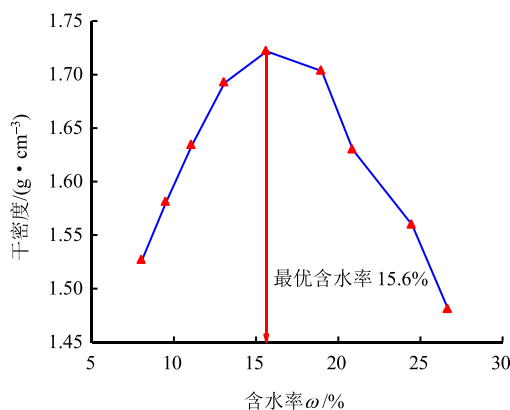


图 4 钙质粉土击实曲线
Fig.4 Compaction curve of calcareous silt

表 1 钙质粉土的物理性质参数
Table 1 Physical parameters of calcareous silt

塑限	液限	塑性指数	相对密度	最小干密度	最大干密度	最优含水率
$\omega_p/\%$	$\omega_L/\%$	I_p	G_s	$\rho_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	$\omega_{op}/\%$
25.2	31.7	6.5	2.81	1.34	1.74	15.6

体压力为固定值 0.15 MPa，温度为室温。首先，将样品密封在已知体积的样品仓内，适当的惰性气体填充到样品仓，然后扩散到已知体积的扩展仓内。

通过气体扩散前后的压力就可计算出样品的体积。氦气可迅速填充直径小至几埃米的孔内，仅仅是固体骨架的体积才会影响气体的置换体积。

3 试验设计

3.1 试验方案

本试验旨在研究钙质粉土的固结特性，查明钙质粉土在不同荷载水平下的固结速率。根据钙质土击实试验曲线，选取 5 种干密度和 5 种含水率开展标准固结试验，每级荷载维持 24 h，试验方案详见表 2。

本试验还选取了武汉江滩的石英砂进行了对比试验，分别选用细粒砂（0.075~0.25 mm）、中粒砂（0.25~0.5 mm）和粗粒砂（0.5~2 mm）3 组进行对比试验，分别设置初始干密度为 1.34、1.44 g/cm³，以及初始含水率 5%、10% 进行其标准固结试验，每级荷载下的固结时间为 24 h，其结果与钙质粉土标准固结试验进行对比分析。

表 2 钙质粉土固结试验方案

含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	法向加载 σ_n/kPa
5、10	1.34（松散）、1.44（松散）	12.5、25、50、100、200、
15、20、25	1.54（中密）、1.64（密实）、1.74（密实）	300、400、800、1 600、3 200

3.2 试验操作方法与数据处理

本试验采用常规三联固结仪，最大固结压力为 3 200 kPa。按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）^[16]进行标准固结试验，终止固结压力设定为 3 200 kPa。试样直径为 61.8 mm，高度为 20.0 mm。

试验完成后，计算试样的孔隙比和压缩系数，分析试样含水率、干密度对钙质粉土压缩性的影响规律。

4 试验结果分析

4.1 初始含水率对钙质粉土压缩性的影响

图 5 为初始干密度为 1.34 g/cm³ 的钙质粉土试样在不同初始含水率下的 $e-\lg p$ 曲线。很显然，钙质粉土的初始含水率越大，试样的孔隙比也越大，在固结压力下孔隙比减小的幅度也越大，表现出压缩性较高。在不同的压力区间，钙质粉土的压缩系数变化差异较大。由图 6 可知，当垂直压力在 12.5~200 kPa 区间内时，压缩系数有明显的下降趋势，当垂直压力在 200 kPa 以上时压缩系数趋于稳定，变化幅度很小。因此，当地基中附加荷载从 200 kPa

继续增加时,地基的压缩系数变化较小,压缩性基本保持不变。在地基处理时,可以采用大于 200 kPa 的压力对地基进行压实。

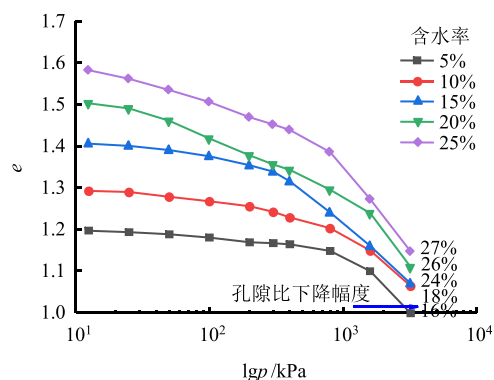


图 5 不同含水率下钙质粉土的 e - $\lg p$ 曲线 ($\rho_d = 1.34 \text{ g/cm}^3$)
Fig.5 e - $\lg p$ curves of calcareous silt under different moisture contents ($\rho_d = 1.34 \text{ g/cm}^3$)

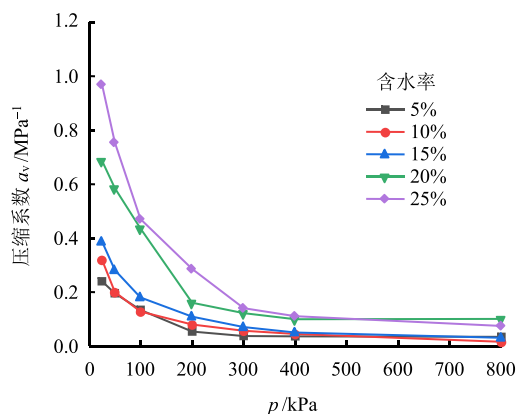


图 6 不同含水率下钙质粉土的 a_v - p 曲线 ($\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$)
Fig.6 a_v - p curves of calcareous silt under different moisture contents ($\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$)

图 7 和图 8 则表明当干密度不变时,含水率越高压缩系数越大,且当初始含水率大于最优含水率 (15.6%) 时压缩系数增长幅度更大,但是当固结压力大于 200 kPa 时,压缩系数的增长幅度较小。可见,当固结压力较大时,不同含水率下的钙质粉土固结速度均较快。

图 9 表明,压缩模量随初始含水率的增大迅速减小,随干密度的增大而增大。可见,含水率对钙质粉土的压缩性影响较大。图 10 的结果说明干密度越大,压缩系数 a_{v1-2} 越小。干密度 1.34 g/cm^3 的钙质粉土的压缩系数位于 $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{v1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 区间,属于中压缩性土,这与谌民^[14]的研究结论一致。在初始含水率小于 15% 时,中密和密实的钙质粉土 a_{v1-2} 小于 0.1 MPa^{-1} , E_{s1-2} 大于 20 MPa,属于低压缩性土;松散钙质粉土则仍属于中压缩性土。初始含水率超过 15% 时,钙质粉土 a_{v1-2} 增大较明显。可

见含水率越高越容易被压缩,含水率对钙质粉土的压缩性有较大影响。

4.2 干密度对钙质粉土压缩性的影响

图 11、12 分别为含水率 15% 和 20% 的钙质粉土不同干密度的 e - $\lg p$ 曲线。随着初始干密度的增大,试样的孔隙比减小,在相同的固结压力作用下孔隙比降低幅度也越小,压缩性更低。

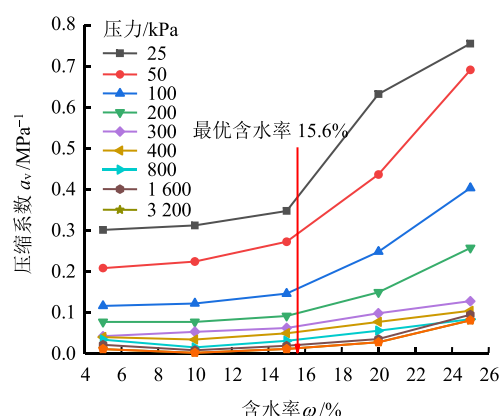


图 7 不同压力下钙质粉土的 a_v - a_v 曲线 ($\rho_d = 1.64 \text{ g/cm}^3$)
Fig.7 a_v - a_v curves of calcareous silt under different pressures ($\rho_d = 1.64 \text{ g/cm}^3$)

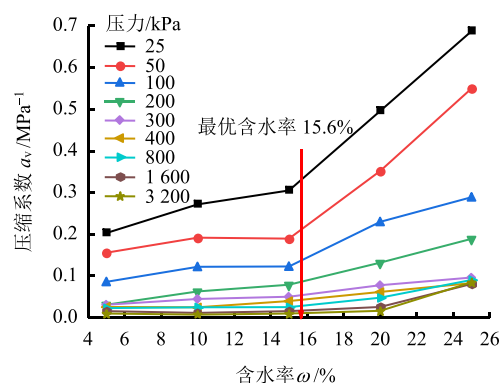


图 8 不同压力下钙质粉土的 a_v - a_v 曲线 ($\rho_d = 1.74 \text{ g/cm}^3$)
Fig.8 a_v - a_v curves of calcareous silt under different pressures ($\rho_d = 1.74 \text{ g/cm}^3$)

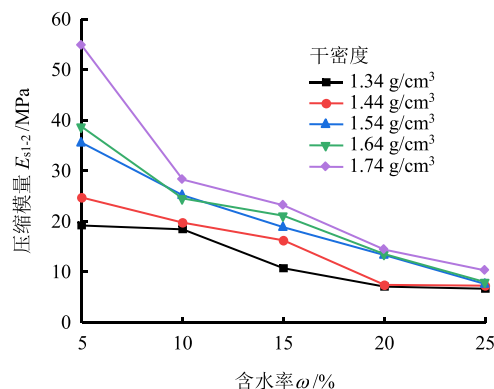


图 9 不同干密度下钙质粉土的 ω - E_{s1-2} 曲线
Fig.9 ω - E_{s1-2} curves of calcareous silt under different dry densities

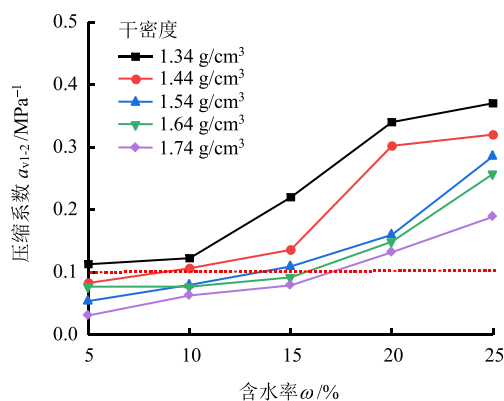


图 10 不同干密度下钙质粉土的 $\omega - a_{v1-2}$ 曲线
Fig.10 $\omega - a_{v1-2}$ curves of calcareous silt under different dry densities

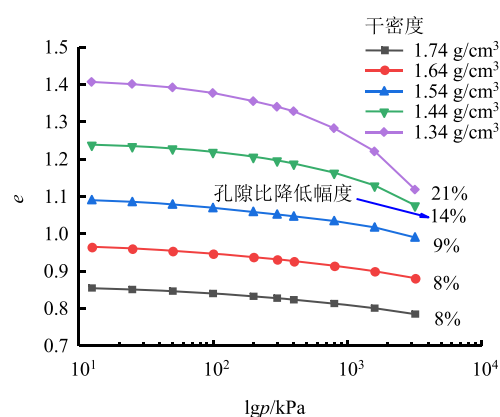


图 11 不同干密度下钙质粉土的 $e - \lg p$ 曲线 ($\omega = 15\%$)
Fig.11 $e - \lg p$ curves of calcareous silt under different dry densities ($\omega = 15\%$)

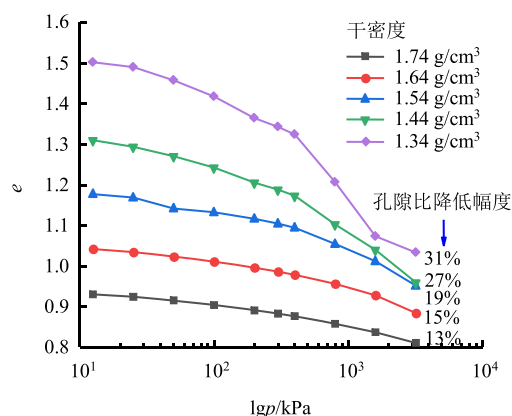


图 12 不同干密度下钙质粉土的 $e - \lg p$ 曲线 ($\omega = 20\%$)
Fig.12 $e - \lg p$ curves of calcareous silt under different dry densities ($\omega = 20\%$)

图 13、14 采用 100~200 kPa 压力区间的压缩系数、压缩模量, 其中压缩系数随着干密度的增加而减小, 随着含水率的减少而减少, 压缩模量随着干密度的增加而增大, 随着含水率的减少而增大。含水率小于 15% 时中密、密实的钙质粉土 $a_{v1-2} <$

0.1 MPa^{-1} , $E_{s1-2} > 20 \text{ MPa}$, 属于低压缩性土, 松散钙质粉土则仍属于中压缩性土, 即钙质粉土的压缩性受含水率和干密度影响较大, 含水率越大, 越松散的钙质粉土压缩性越高, 反之含水率越低越紧密的钙质粉土压缩性越低, 即可说明干密度与含水率都对钙质粉土的压缩性有较大影响。

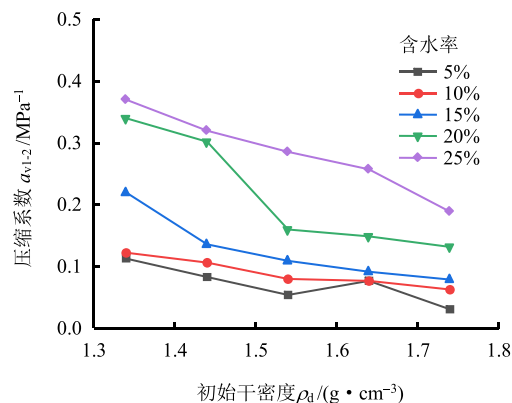


图 13 不同含水率下钙质粉土的 $\rho_d - a_{v1-2}$ 曲线
Fig.13 $\rho_d - a_{v1-2}$ curves of calcareous silt under different moisture contents

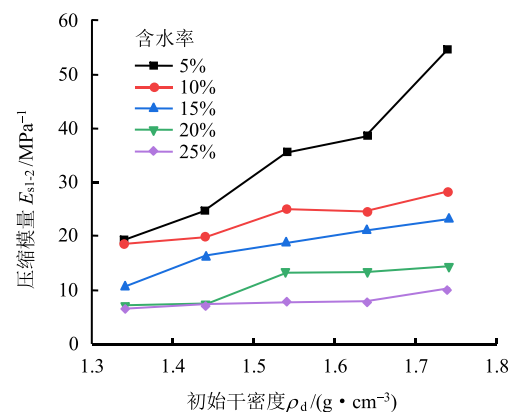


图 14 不同含水率下钙质粉土 $\rho_d - E_{s1-2}$ 曲线
Fig.14 $\rho_d - E_{s1-2}$ curves of calcareous silt under different moisture contents

4.3 钙质粉土的固结速率分析

图 15 反映了钙质粉土固结过程的沉降量随每级荷载的累积情况。显然, 干密度越大, 总的沉降量越小。图 16 和图 17 表明, 同一压力级下干密度越大沉降量越小, 这是由于干密度大的试样孔隙比较小, 可被压缩的体积较小, 进而沉降量也就较小; 在每一级压力加载后的 5 h 内, 沉降量有显著的增大趋势, 而在加载 5 h 之后沉降量-时间曲线开始平缓, 少量增长, 主固结沉降基本完成。

通过固结速率-时间关系可知 (见图 18~21), 加载后 1 h 的固结速率最大, 这是加载时发生的瞬

时沉降, 因为试样孔隙中含有大量气体在加载初期气体体积压缩而排出, 此时产生的超静孔隙水压力较小, 基本上没有孔隙水排出, 其沉降也是以瞬时沉降为主。从加载开始到 5 h 内随着超静孔隙水压

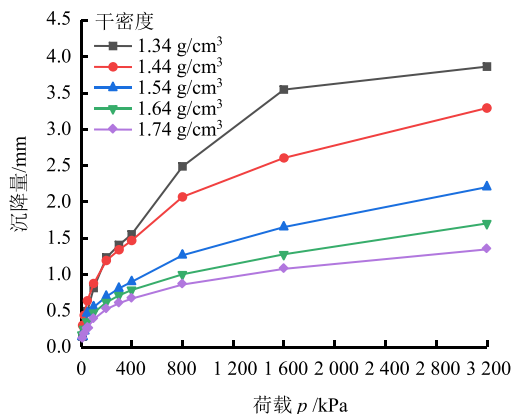


图 15 钙质粉土荷载-沉降关系曲线($\omega=20\%$)

Fig.15 Relationship between load and settlement of calcareous silt ($\omega=20\%$)

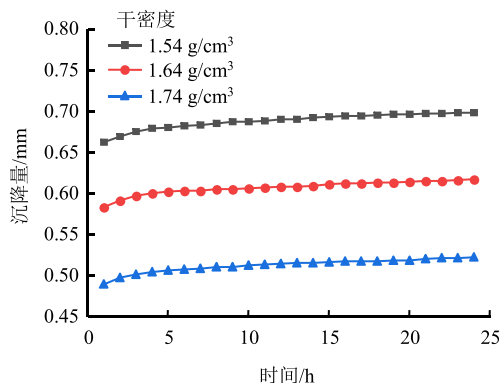


图 16 不同干密度下钙质粉土沉降-时间关系曲线 ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

Fig.16 $s-t$ curves of calcareous silt under different dry densities ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

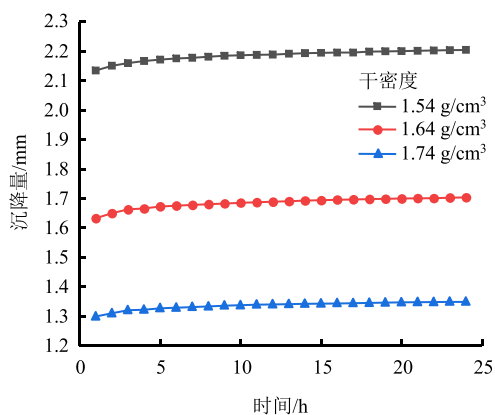


图 17 不同干密度下钙质粉土沉降-时间关系曲线 ($P=3\ 200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

Fig.17 $s-t$ curves of calcareous silt under different dry densities ($P=3\ 200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

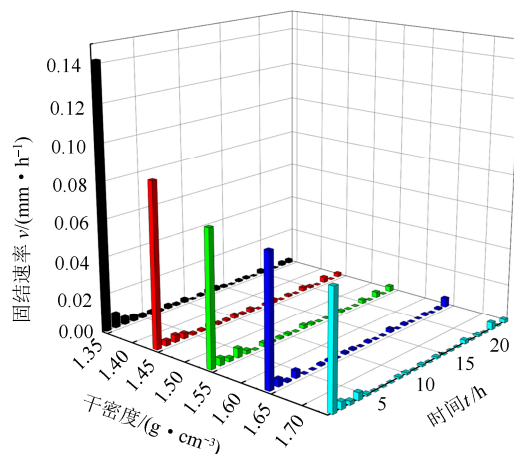


图 18 钙质粉土干密度-时间-固结速率关系 ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=15\%$)

Fig.18 Relationship between dry density, time and consolidation rate of calcareous silt ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=15\%$)

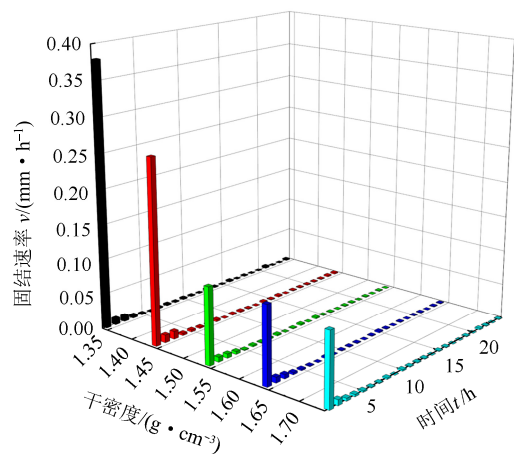


图 19 钙质粉土干密度-时间-固结速率关系 ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

Fig.19 Relationship between dry density, time and consolidation rate of calcareous silt ($P=200 \text{ kPa}$, $\omega=20\%$)

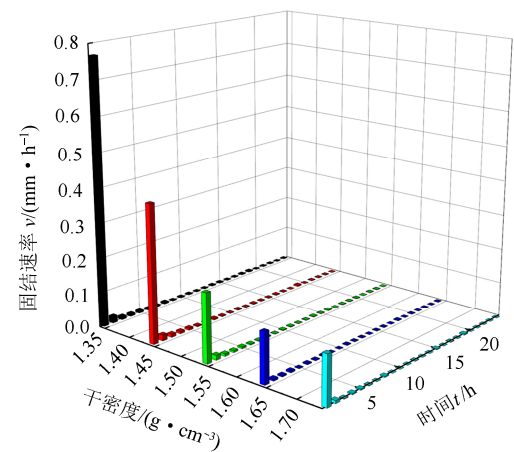


图 20 钙质粉土干密度-时间-固结速率关系 ($P=3\ 200 \text{ kPa}$, $\omega=15\%$)

Fig.20 Relationship between dry density, time and consolidation rate of calcareous silt ($P=3\ 200 \text{ kPa}$, $\omega=15\%$)

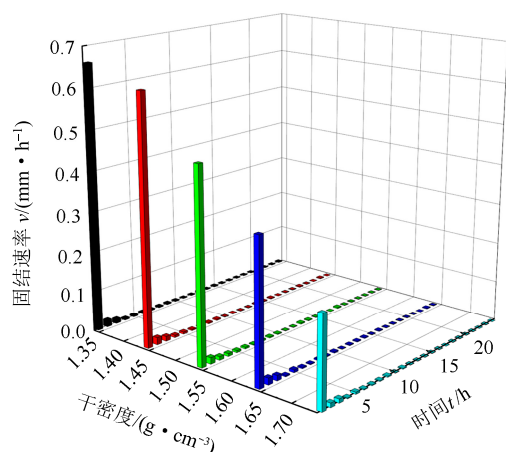


图 21 钙质粉土干密度-时间-固结速率关系
($P=3\ 200\ \text{kPa}$, $\omega=20\%$)

Fig.21 Relationship between dry density, time and consolidation rate of calcareous silt ($P=3\ 200\ \text{kPa}$, $\omega=20\%$)

力的消散, 试样发生主固结沉降, 5 h 后即超静孔隙水压力消散结束时, 试样依然发生少许沉降变形, 即开始发生次固结沉降。对比初始含水率为 15% 和 20% 的两组试样, 高含水率的试样沉降量较低含水率的大, 相同时间下的固结速率也快, 这是由于含水率较大导致孔隙比较大, 试样较为松软, 加载后沉降量增大, 同时间内固结速率也就加快。由此可见干密度和含水率对钙质粉土的沉降量及固结速率有一定的影响。

4.4 钙质粉土与石英砂压缩性指标对比

为了对比钙质粉土和石英砂的压缩性差异, 对相同干密度和含水率的土样进行对比试验和分析。由图 22~25 可知, 石英砂和钙质粉土都在初始干密度越小时孔隙比越大, 初始含水率越高时孔隙比越大; 而且钙质粉土在相同含水率和干密度时的孔隙比都比不同粒径的石英砂大。

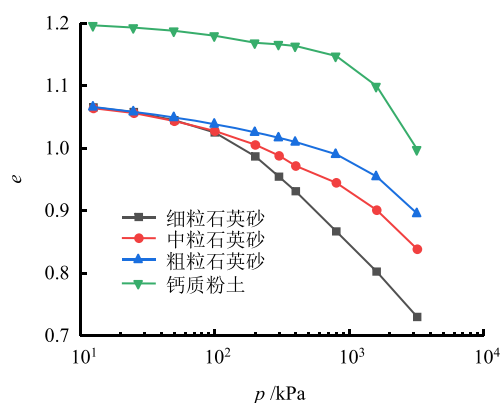


图 22 石英砂与钙质粉土的 $e\text{-}lgp$ 曲线对比
($\omega=5\%$, $\rho_d=1.34\ \text{g/cm}^3$)

Fig.22 Comparison of $e\text{-}lgp$ curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=5\%$, $\rho_d=1.34\ \text{g/cm}^3$)

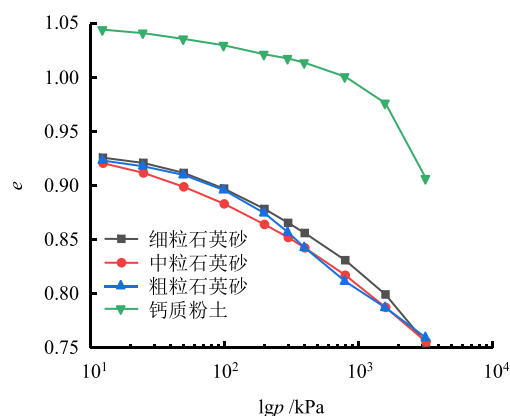


图 23 石英砂与钙质粉土的 $e\text{-}lgp$ 曲线对比
($\omega=5\%$, $\rho_d=1.44\ \text{g/cm}^3$)

Fig.23 Comparison of $e\text{-}lgp$ curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=5\%$, $\rho_d=1.44\ \text{g/cm}^3$)

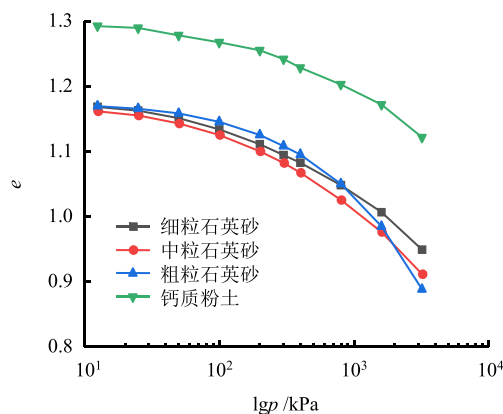


图 24 石英砂与钙质粉土的 $e\text{-}lgp$ 曲线对比
($\omega=10\%$, $\rho_d=1.34\ \text{g/cm}^3$)

Fig.24 Comparison of $e\text{-}lgp$ curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=10\%$, $\rho_d=1.34\ \text{g/cm}^3$)

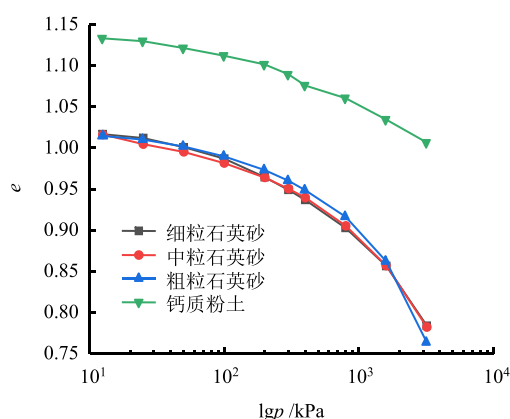


图 25 石英砂与钙质粉土的 $e\text{-}lgp$ 曲线对比
($\omega=10\%$, $\rho_d=1.44\ \text{g/cm}^3$)

Fig.25 Comparison of $e\text{-}lgp$ curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=10\%$, $\rho_d=1.44\ \text{g/cm}^3$)

图 26~29 显示出钙质粉土的压缩系数在同等条件下比不同粒径的石英砂小, 其中各个试样中 a_{v1-2} 差距为 ($1.34\ \text{g/cm}^3$, 5%) $0.02\sim0.26\ \text{MPa}^{-1}$ 、

(1.34 g/cm^3 、 10%) $0.08 \sim 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 、(1.44 g/cm^3 、 5%) $0.1 \sim 0.13 \text{ MPa}^{-1}$ 、(1.44 g/cm^3 、 10%) $0.06 \sim 0.12 \text{ MPa}^{-1}$ ，可以发现钙质粉土与不同粒径的石英

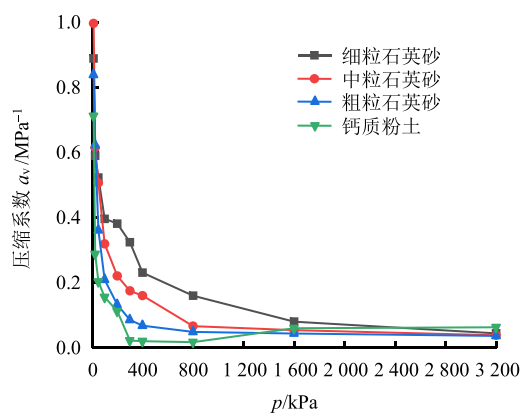


图 26 石英砂与钙质粉土的 a_v - p 曲线对比
($\omega=5\%$, $\rho_d=1.34 \text{ g/cm}^3$)

Fig.26 Comparison of a_v - p curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=5\%$, $\rho_d=1.34 \text{ g/cm}^3$)

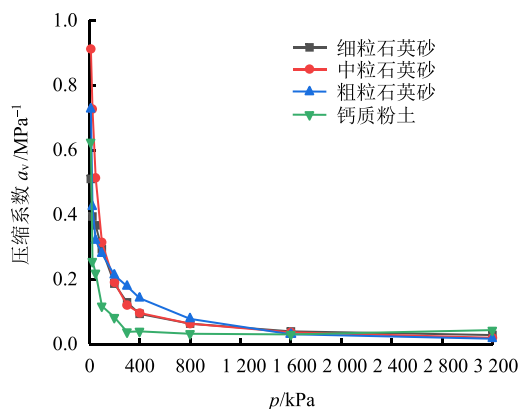


图 27 石英砂与钙质粉土的 a_v - p 曲线对比
($\omega=5\%$, $\rho_d=1.44 \text{ g/cm}^3$)

Fig.27 Comparison of a_v - p curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=5\%$, $\rho_d=1.44 \text{ g/cm}^3$)

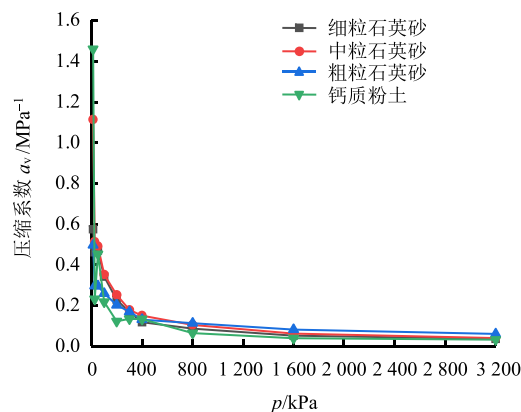


图 28 石英砂与钙质粉土的 a_v - p 曲线对比
($\omega=10\%$, $\rho_d=1.34 \text{ g/cm}^3$)

Fig.28 Comparison of a_v - p curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=10\%$, $\rho_d=1.34 \text{ g/cm}^3$)

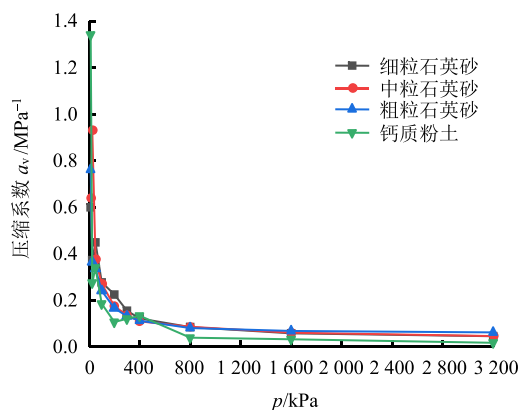


图 29 石英砂与钙质粉土的 a_v - p 曲线对比
($\omega=10\%$, $\rho_d=1.44 \text{ g/cm}^3$)

Fig.29 Comparison of a_v - p curves between quartz sand and calcareous silt ($\omega=10\%$, $\rho_d=1.44 \text{ g/cm}^3$)

砂的压缩系数差别较大，而且钙质粉土与石英砂具有相似的规律，只是压缩程度不同，并且相同干密度和含水率条件下，石英砂的压缩系数大于钙质粉土，即石英砂比钙质粉土的压缩性更高。

4.5 石英砂与钙质粉土的固结沉降对比分析

4.5.1 石英砂与钙质粉土的主固结沉降量对比

由表 3 以及图 30、31 可知，在 200 kPa 压力级后，固结试验加载的前 5 h 内，钙质粉土固结度（试样的沉降量与总沉降量之比）均超过 0.95，而石英砂超过 0.97，即前 5 h 内都完成了主固结沉降。而在 12.5~100 kPa 荷载下并未达到 0.95，说明荷载低于 200 kPa 时在前 5 h 达不到主固结完成的标准。中密和紧密状态下的钙质粉土在 5 h 固结度均已达到了 0.95，并且在含水率高于 15% 时松散状态下的钙质粉土在 5 h 固结度也达到了 0.95，所以在低含水率下的松散钙质粉土在压力大于 200 kPa 时固结 5 h 即可，小于 200 kPa 则按照《土工试验方法标准》^[16] 进行。钙质粉土在含水率为 5% 时，前 5 h 固结度比石英砂小，在含水率为 10% 时其固结度显著增大，而石英砂却有细微减小趋势，这说明钙质粉土的沉降量受含水率的影响较大。在 1、2 两天的压力级下 1.44 g/cm^3 的钙质粉土较 1.34 g/cm^3 的固结度小，前期压力较小，干密度大的试样结构更紧密所以沉降量较少。而随着压力的增大，累计的沉降量差别较小，是由于土体逐渐完成主固结，后续沉降量减小。相比之下石英砂的累计沉降量并不随干密度的增大而有明显的规律性变化，因为石英砂的粒径较大，颗粒之间的间隙大，所以石英砂受含水率和干密度的影响不及钙质粉土大。

表 3 每级加载前 5 h 的固结度

Table 3 Consolidation degree for the first 5 hours under each stage of loading

荷载 /kPa	干密度 1.34 g/cm ³				干密度 1.44 g/cm ³			
	含水率 5%		含水率 10%		含水率 5%		含水率 10%	
	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂
12.5	0.89	0.93	0.94	0.95	0.87	0.96	0.94	0.97
25	0.93	0.96	0.96	0.95	0.91	0.95	0.96	0.96
50	0.90	0.97	0.92	0.97	0.91	0.97	0.89	0.96
100	0.89	0.98	0.95	0.97	0.89	0.97	0.95	0.97
200	0.97	0.98	0.99	0.97	0.95	0.97	0.95	0.98
300	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99	0.98	0.99	0.97
400	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98
800	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.95
1 600	0.99	0.92	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.94
3 200	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.92	0.99	0.95

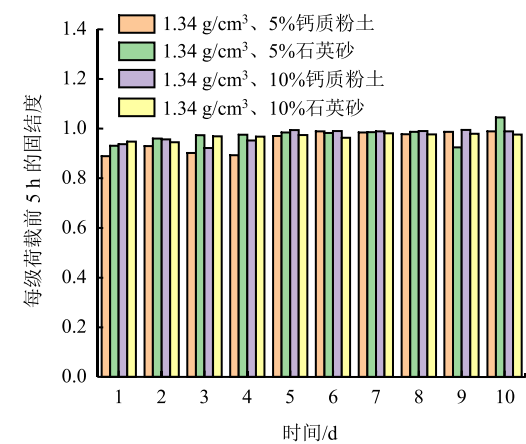


图 30 不同含水率下钙质粉土与石英砂的每级加载前 5 h 的固结度对比

Fig.30 Consolidation degree of calcareous silt and quartz sand under the first 5 hours of loading with different moisture contents

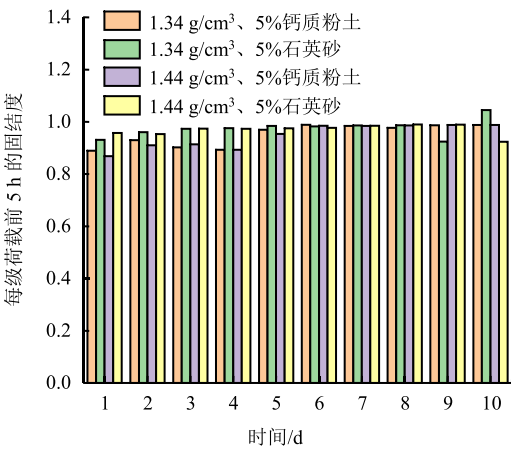


图 31 不同干密度下钙质粉土与石英砂的每级加载前 5 h 的固结度对比

Fig.31 Consolidation degree of calcareous silt and quartz sand under the first 5 hours of loading with different dry densities

4.5.2 石英砂与钙质粉土的次固结沉降量对比

由表 4、图 32 和图 33 可知，含水率 10%较 5%钙质粉土试样的次固结量小，1.44 g/cm³的钙质粉土试样在少数情况下较 1.34 g/cm³的钙质粉土试样的次固结量大，并且随着压力级的增大，其固结度（次

固结沉降量占总沉降量的比值）越来越小，逐渐趋于稳定；石英砂在 10%含水率下较 5%含水率下的次固结沉降量大，而在不同干密度下次固结沉降量没有较为明显的规律，这和主固结情况下的结论一致。

表 4 每级荷载下 5 h 后的固结度

Table 4 Consolidation degree after 5 h after at each stage of load

荷载 /kPa	干密度 1.34 g/cm ³				干密度 1.44 g/cm ³			
	含水率 5%		含水率 10%		含水率 5%		含水率 10%	
	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂	钙质粉土	石英砂
12.5	0.11	0.07	0.06	0.05	0.13	0.04	0.06	0.03
25	0.07	0.04	0.04	0.05	0.09	0.05	0.04	0.04
50	0.10	0.03	0.08	0.03	0.09	0.03	0.11	0.04
100	0.11	0.02	0.05	0.03	0.11	0.03	0.05	0.03
200	0.03	0.02	0.01	0.03	0.05	0.03	0.05	0.02
300	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03
400	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
800	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
1 600	0.01	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06
3 200	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08	0.01	0.05

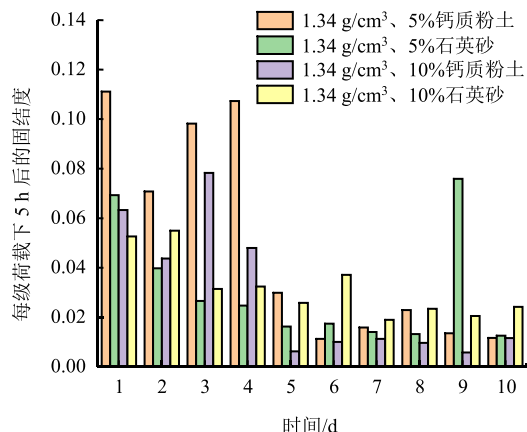


图 32 每级荷载下 5 h 后的不同含水率的钙质粉土与石英砂的固结度对比

Fig.32 Consolidation degree of calcareous silt and quartz sand after 5 h under each stage of loading with different moisture contents

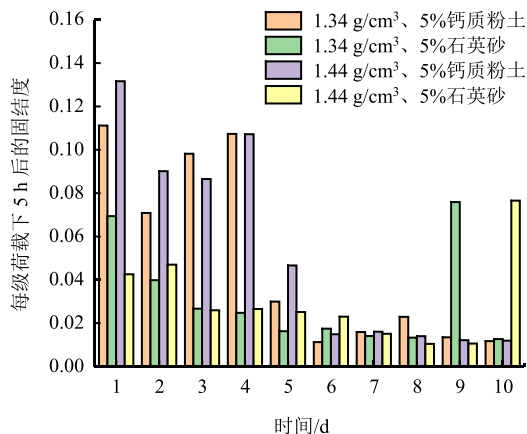


图 33 每级荷载下 5 h 后的不同干密度的钙质粉土与石英砂的固结度对比

Fig.33 Consolidation degree of calcareous silt and quartz sand after 5 h under at each stage of loading with different dry densities

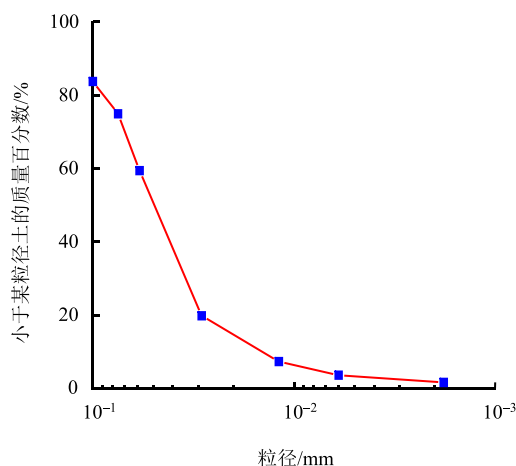


图 34 杭州湾粉土的颗分曲线

Fig.34 Grain size distribution of silty soil

4.6 杭州湾粉土与钙质粉土的对比

粉土在世界各地广泛分布,尤其是海岸区表面沉积的粉土较多。在杭州湾的萧山、上虞、慈溪等地区广泛分布着饱和粉土。试验土样选自慈溪郑徐水库堤坝填筑土料场(土样 1)和上虞世纪新丘海塘填筑土料场(土样 2)^[16]。本文以杭州湾粉土的物理性质、压缩特性与钙质粉土做对比分析。

由表 5、6 与表 1 及 4.2 节对比可知,相同干密度的杭州湾粉土与钙质粉土均属中压缩性土,但是钙质粉土的压缩模量比杭州湾粉土略大,钙质粉土的相对密度、孔隙比较大,塑性指数较小。虽同属粉土,但由于钙质粉土和陆源粉土的矿物成分、颗粒形态、孔隙结构和孔隙率的差异,钙质粉土的渗透系数范围在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s,渗透性比一般的陆源粉土大 10~100 倍^[2],造成了物理性质的一定区别以及压缩性的不同。

表 5 杭州湾粉土的物性参数^[17]
Table 5 Index parameters of silty soil^[17]

土样	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p	相对密度 G_s	最小干密度 $\rho_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$
土样 1	24.5	34.3	9.8	2.68	0.99	1.45
土样 2	23.2	30.5	7.3	2.66	1.08	1.62

表 6 杭州湾粉土的压缩性及其评价表^[17]
Table 6 Compressibility of silty soil and its assessment^[17]

土样 编号	假设干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	压实度 $D/\%$	固结试验		粉土压缩 性评价
			压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	
土样 1	1.47	100	0.169	10.79	中等压缩性
	1.41	96	0.186	10.22	中等压缩性
	1.38	94	0.197	9.86	中等压缩性
	1.35	92	0.207	9.59	中等压缩性
	1.32	90	0.228	8.90	中等压缩性
土样 2	1.51	100	0.138	12.77	中等压缩性
	1.45	96	0.150	12.23	中等压缩性
	1.42	94	0.161	11.63	中等压缩性
	1.39	92	0.175	10.94	中等压缩性
	1.36	90	0.186	10.52	中等压缩性
钙质 粉土	1.74	100	0.063	28.24	低等压缩性
	1.64	94	0.077	24.51	低等压缩性
	1.54	88	0.080	25.13	低等压缩性
	1.44	83	0.106	19.75	中等压缩性
	1.34	77	0.122	18.41	中等压缩性
石英砂	1.44	100	0.166	11.89	中等压缩性
	1.34	93	0.202	10.50	中等压缩性

5 结论与展望

本文通过室内试验研究了南海珊瑚礁吹填地基中钙质粉土的固结特性, 获取了钙质粉土的主固结沉降量、次固结沉降量、压缩系数、压缩模量, 探讨了主固结沉降量、固结速率、沉降时间及压缩系数与含水率、干密度之间的相关关系, 并与武汉江滩的石英砂以及杭州湾粉土进行了对比, 本文的主要结论如下:

(1) 钙质粉土的含水率和压缩系数成正比, 和压缩模量成反比; 干密度和压缩系数成反比, 和压缩模量成正比。钙质粉土的压缩系数 a_{v1-2} 在 $0.03 \sim 0.37 \text{ MPa}^{-1}$ 之间, 压缩模量 E_{s1-2} 在 $6.67 \sim 54.79 \text{ MPa}$ 之间; 含水率小于 15% 时中密、密实的钙质粉土 a_{v1-2} 小于 0.1 MPa^{-1} , E_{s1-2} 大于 20 MPa , 属于低压缩性土, 松散钙质粉土则仍属于中压缩性土。

(2) 相同干密度、含水率的条件下石英砂的压缩系数比钙质粉土大 $0.06 \sim 0.08 \text{ MPa}^{-1}$, 压缩模量比钙质粉土小 $7.86 \sim 7.91 \text{ MPa}$, 即钙质粉土比石英砂的压缩性更低, 并且石英砂受含水率和干密度的影响不及钙质粉土大。

(3) 同等压力下, 钙质粉土干密度越大沉降量越小, 当荷载大于 200 kPa 时, 低含水率下的松散钙质粉土在加载前 5 h 的固结度达到 0.95 , 而荷载小于 200 kPa 时固结度达不到 0.95 , 即主固结沉降尚未完成; 而中密和密实及高含水率的钙质粉土在前 5 h 的固结度可达 0.95 以上。高含水率的试样沉降量较低含水率的大, 同等时间下的固结速率也快, 由此可见干密度和含水率对钙质粉土的固结速率有一定的影响。建议钙质粉土的固结试验在荷载小于 200 kPa 时按《土工试验方法标准》^[16] 进行, 在荷载大于 200 kPa 时加载时间取 5 h , 此举可大大节省测试时间, 提高测试效率。

(4) 相同干密度和含水率下, 杭州湾粉土与钙质粉土同属中压缩性土, 钙质粉土的压缩模量比杭州湾粉土略大。钙质粉土的相对密度、孔隙比较大, 塑性指数较小; 但由于钙质粉土和陆源粉土的矿物成分、孔隙结构和孔隙率的差异, 钙质粉土的渗透系数范围在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$, 渗透性比一般的陆源粉土大 $10 \sim 100$ 倍, 造成了物理性质的一定区别以及压缩性的不同。

(5) 本文尚未对钙质粉土与陆源粉土的沉降量与固结速率进行对比分析, 此举也将对海洋地质工程建设有重要意义, 仍需进一步试验研究。

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 Chao-jing. Geotechnical investigation in calcareous soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 53-60.
- [2] 王新志, 王星, 胡明鉴, 等. 吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3127-3135.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, HU Ming-jian, et al. Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3127-3135.
- [3] 张晨阳, 谌民, 胡明鉴, 等. 细颗粒组份含量对钙质砂抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 195-202.
ZHANG Chen-yang, CHEN Min, HU Ming-jian, et al. Effect of fine particles content on shear strength of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl. 1): 195-202.
- [4] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 91-94.
LIU Chong-quan, WANG Ren, WU Xin-sheng. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 91-94.
- [5] 王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 133-143.
WANG Li, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2009, 24(2): 133-143.
- [6] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389-1392.
CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1389-1392.
- [7] 朱长歧, 崔翔, 胡明鉴, 等. 钙质土电导率和渗透性的相关研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 142-148.
ZHU Chang-qi, CUI Xiang, HU Ming-jian, et al. Study of electric conductivity and permeability of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl. 2): 142-148.
- [8] LIM G T, PINEDA J A, BOUKPETI N, et al.

- Experimental assessment of sampling disturbance in calcareous silt[J]. **Geotechnique Letters**, 2018, 8(3): 240-247.
- [9] KIM Y H, HOSSAIN M S, CHANG K. Numerical investigation of novel dynamic installed fish anchors in clay and calcareous silt[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 163: 29-39.
- [10] CHOW S H, O'LOUGHLIN C D, ZHOU Z, et al. Penetrometer testing in a calcareous silt to explore changes in soil strength[J]. **Géotechnique**, 2019, 70(12): 1-41.
- [11] CHANG K, HOSSAIN M S, WANG D, et al. Performance of a novel dynamically installed fish anchor in calcareous silt[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(6): 04019019. 1-04019019.14.
- [12] KOH K X, HOSSAIN M S, KIM Y. Installation and monotonic pullout of a suction caisson anchor in calcareous silt[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(2): 04016098. 1-04016098.13.
- [13] KOH K X, WANG D, HOSSAIN M S. Numerical simulation of caisson installation and dissipation in kaolin clay and calcareous silt[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2018, 77(3): 953-962.
- [14] KOH K X, KIM Y H, HOSSAIN M S. Cyclic response of a stiffened suction caisson anchor in calcareous silt[J]. **Ocean Engineering**, 2020, 201:107097.
- [15] 谌民. 钙质粉土物理力学特性及其对钙质砂强度的弱化机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- CHEN Min. Research on physical and mechanical properties of calcareous silt and its weakening mechanism of calcareous sand strength[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [16] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 仇涛. 粉土工程特性及填筑质量检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- QIU Tao. Research on engineering characteristics of silty soil and filling quality testing method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
-
- 上接第 891 页
- [21] WANG L, SUN D A, QIN A F, et al. Semi-analytical solution to one-dimensional consolidation for unsaturated soils with semi-permeable drainage boundary under time-dependent loading[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2017, 41(16): 1636-1655.
- [22] 周万欢, 赵林爽. 复杂初始和边界条件对一维非饱和土固结的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 305-311.
- ZHOU Wan-huan, ZHAO Lin-shuang. Influence of initial and boundary conditions on one-dimensional consolidation of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl. 1): 305-311.
- [23] 程涛, 晏克勤, 胡仁杰, 等. 非饱和土拟二维平面应变固结问题的解析计算方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 453-460.
- CHENG Tao, YAN Ke-qin, HU Ren-jie, et al. Analytical method for quasi-two-dimensional plane strain consolidation problem of unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(2): 453-460.
- [24] SHAN Z D, LING D S, DING H J. Exact solutions for one-dimensional consolidation of single-layer unsaturated soil[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2012, 36(6): 708-722.
- [25] SHAN Z D, LING D S, DING H J. Analytical solution for 1D consolidation of unsaturated soil with mixed boundary condition[J]. **Journal of Zhejiang University-Science A**, 2013, 14(1): 61-70.
- [26] ZHOU W H, ZHAO L S, GARG A, et al. Generalized analytical solution for the consolidation of unsaturated soil under partially permeable boundary conditions[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 17(9): 04017048.
- [27] WANG L, SUN D A, QIN A F. Semi-analytical solution to one-dimensional consolidation for unsaturated soils with exponentially time-growing drainage boundary conditions[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2018, 18(2): 04017144.
- [28] HUANG M H, LI J C. Generalized analytical solution for 2D plane strain consolidation of unsaturated soil with time-dependent drainage boundaries[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 103: 218-228.
- [29] MEI G X, CHEN Q M. Solution of Terzaghi one-dimensional consolidation equation with general boundary conditions[J]. **Journal of Central South University**, 2013, 20: 2239-2244.