

黄原胶固化砂-黏土混合土的一维固结压缩特性试验研究

刘 洋

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200000)

摘 要: 生物聚合物黄原胶作为一种新型环保固土材料, 可有效提高土体强度, 但其对于土体变形的影响未见报道。文中研究了黄原胶固化砂-黏土混合土的一维固结压缩特性, 发现黄原胶与细粒形成黄原胶-细粒基质, 具有较大刚度, 可减小土体压缩性, 在混合土细粒含量较高时效果尤其显著。

关键词: 混合土; 粒间孔隙比; 临界细粒含量; 黄原胶

中图分类号: TU192

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0064-03

现如今, 国家对于农业耕地资源高度重视, 越来越多的高层以及超高层建筑、水利设施、海防及堤坝、市政工程等项目需要在混合土(同时包含粗、细土颗粒)地基上进行建造施工, 地基土的物理力学特性, 尤其变形, 关系到这些工程建设的安全实施及使用。一般来说, 土体变形特性可通过常规一维固结试验获得。土体固结是指土体在承受外部荷载作用时, 逐渐排出孔隙中的自由水部分, 并伴随着超静孔隙水压力逐步消散, 有效应力逐步增大, 土体的沉降及变形随之不断发展, 并最终达到稳定的过程; 其中, 变形是土体固结过程中最重要的特征之一。混合土中的细粒含量不仅影响着土体承载力, 也会对其在压缩过程中变形产生重要影响。由于土体变形是由土颗粒间孔隙的压缩引起, 当细粒含量较低, 且填充于粗颗粒间孔隙时, 此时细粒对土体压缩性影响不大。当细粒含量增长, 将粗颗粒相互分离, 并与粗颗粒共同成为土体骨架时, 细颗粒对土体压缩性影响增大。在压缩过程中, 依据初始条件和所施加的荷载不同, 粗颗粒和细颗粒的位置会进行重新分布与排列^[1, 2]。黄原胶作为一种绿色环保的生物胶黏合剂, 能提高孔隙流体黏度, 并与细粒土形成氢键、离子键等化学键, 有效提高固化土的力学强度^[3]。目前, 黄原胶固化砂-黏土混合土的变形特性未见报道, 鉴于此, 文中通过开展一维固结试验, 分析固结参数和临界细粒含量 FC_c , 探究黄原胶对砂-黏土混合土沉降变形特性的影响规律。

一、试验部分

1. 试验材料与方案

试验采用的主要材料: 砂(福建标准砂), 砂的最大孔隙率 $e_{max}=1.4$, $e_{min}=0.62$, 比重 $G_s=2.71$, $D_{50}=0.57\text{mm}$, $C_u=5.63$ 。黏土采用上海商用高岭土 $w_p=26.1$, $w_L=56.8\%$, $G_s=2.60$, $D_{50}=37\mu\text{m}$ 。本研究使用的黄原胶粉由山东扶风发酵有限公司(中国山东省)生产。

2. 方案

砂-黏土混合土由干燥、筛分后的砂和高岭土混合制成, 其中高岭土含量(即细粒含量 FC , $\leq 75\ \mu\text{m}$)为混合土总

质量的 16%、18%、20%、30%、40%和 50%, 此为未固化土对照组, 黄原胶固化土需另外添加 1%的黄原胶粉末。采用干拌法制作砂-黏土混合物, 通过静压法获得固结试样。一维固结试验涉及的试样抽气饱和、置样及加载均依据《土工试验规范 GB/T 50823-2019》开展。

(1) 抽气饱和: 将土样依次置于叠加器中并保证压紧, 放入真空饱和缸中, 在密封条件下抽气 2 h。打开进水管夹, 使清水缓慢进入到真空饱和缸中, 注意此时测压仪表盘指针应保持不变, 待水完全没过试样后立即停止抽气。同时, 打开管夹使空气进入缸内, 保证试样在缸内静置 24 h 以上以使土样的饱和度达到 95%以上。

(2) 置样: 在固结容器中依次放入透水石和滤纸, 将土样小心放入容器中, 在试样顶部放上一层滤纸和透水石后, 将加压盖放到透水石上并使二者中心对齐。将固结容器移动到加压框正中心的位置, 保证加压盖顶部的凹槽和加压框中心螺母的底部对准, 调节好位置后装上位计架。安装百分表, 调整传压杆端与加压盖中心、百分表测量杆头在一条垂直线上并使各部分充分接触, 将百分表调零。

(3) 加载: 施加竖向载荷, 加压等级从 12.5 kPa 至 800kPa, 且每级载荷的大小是前一级载荷的两倍。每一级载荷下土样需固结 24h, 试样压缩相对稳定后才可进行下一级荷载的施加。通过百分表测得试样的变形量, 并在指定的时间间隔进行记录。对每种试样条件下的固结试样, 皆进行了三次平行试验, 避免试验操作等造成的误差影响试验结果。

二、结果与分析

1. 黄原胶对不同竖向压力下孔隙比的影响

图 1 显示了未添加和添加 1% XG 的不同细粒含量试样的孔隙比-压力关系图。从图中可以看出: (1) 土的压缩性, 即初始孔隙比和最终孔隙比的差值在加入黄原胶后变小。(2) 对于细粒含量大于 30%的试样, 未添加黄原胶时压缩性较大, 添加黄原胶后可显著减小压缩性。这是因为黄原胶与细粒通过氢键及离子键形成黄原胶-细粒基质, 具有较大的刚度。(3) 对于细粒含量小于 30%的试样, 添加黄原胶可小幅

收稿日期: 2022-08-28

作者简介: 刘 洋, 男, 上海理工大学环境与建筑学院。

降低压缩性，这是因为砂颗粒相互接触形成砂骨架，竖向压力主要由砂骨架承担，黄原胶-细粒基质作为砂骨架间的填充物，对变形影响不大。综上所述，黄原胶减小土体沉降的效果在细粒含量较多 (FC>30%) 时比较明显。

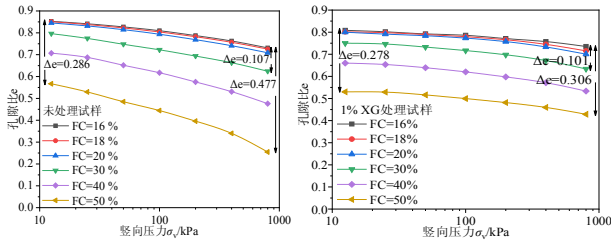


图 1 未处理试样和 1%XG 处理试样孔隙比-压力关系图

2. 黄原胶对体积压缩系数和压缩指数的影响

图 2 给出了未添加和添加 1%XG 的不同细粒含量试样的体积压缩系数。可以看出加入黄原胶之后，土体的体积压缩系数有了明显下降，大致为未固化土的 1/3~1/2。这是由于黄原胶与混合土中的细粒形成了黄原胶-细粒基质，相较于细粒本身具有较大的刚度和较小的压缩性。另外，未处理试样在不同细粒含量条件下的体积压缩系数相差较大，黄原胶处理土在不同细粒含量条件下的体积压缩系数差距较小。这呼应了前文所述，黄原胶处理细粒含量较多的混合土效果较好，减小压缩性较有效，因而黄原胶固化不同细粒含量混合土的体积压缩系数差距减小。

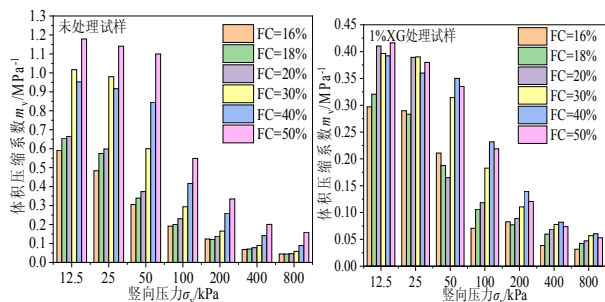


图 2 未处理试样和 1%XG 处理试样体积压缩系数-压力关系图

图 3 为未处理和 1%XG 处理试样的细粒含量和压缩指数 (C_c) 的关系图。从图中可以看出，未处理试样在细粒含量较低时 (FC=16%、18%、20%)，压缩指数随着细粒含量的增加变化不大；当细粒含量较多时，压缩指数随着细粒含量的增加而增加，且增幅变大。这是由于细粒含量较少时，土体的骨架主要由砂粒构成，砂粒和砂粒之间相互接触使得土体很难被压缩。当细粒含量变多时，细粒将砂骨架推散，使得部分砂粒不再直接接触，土骨架由砂颗粒和细颗粒共同构成；由于细粒土更容易被压缩，所以当细粒含量增长到一定值时压缩指数会随着细粒含量的增加而增加。土体的受力状态也由砂主要承担转变为砂粒与黏粒共同承担。当加入 1% 黄原胶后，土体压缩指数呈现先上升后下降的趋势，当细粒含量较低时，砂粒占主导地位，黄原胶的加入会使得压缩指数与未加入之前相比有所降低；当细粒含量较多时，黄原胶与细粒形成的黄原胶-细粒基质刚度较大，与砂骨架共同承担荷载，减小土的压缩指数。

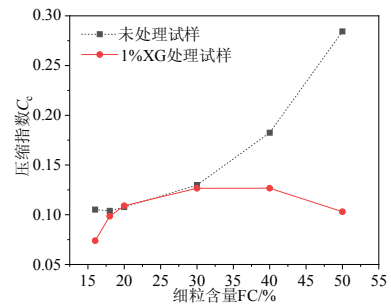


图 3 细粒含量和压缩指数关系图

3. 黄原胶对临界细粒含量的影响

临界细粒含量是评价土体压缩的一个重要的指标，Koester^[4], Polito 和 Martin^[5]发现对于非塑性细粒而言，临界细粒含量值范围在 20%至 30%，Georgiannou^[6]等人发现对于塑性细粒而言，临界细粒含量小于 20%。Cabalar 和 Hasan^[7]发现砂的尺寸和形状也会影响临界细粒含量的值。图 4 为不同竖向荷载下粒间孔隙比 (e_s) 随着细粒含量的变化图。

$$e_s = \frac{e + FC}{1 - FC} \tag{1}$$

当粒间孔隙比等于砂的最大孔隙比时，对应的细粒含量即为临界细粒含量 (FC_c)^[8]。由图 5 可知，临界细粒含量随竖向压力增大而增大，对于未处理试样，FC_c=23.75%~35%，对于 1%XG 处理试样，FC_c=25.8%~33%。可以发现，加入黄原胶后，FC_c的范围变小了。

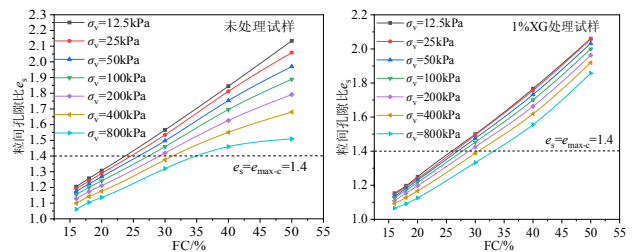


图 4 不同竖向荷载下粒间孔隙比随细粒含量的变化图

三、结论

文中开展黄原胶固化砂-黏土混合土的一维固结试验，获得以下结论：

- (1) 黄原胶与细粒形成黄原胶-细粒基质，具有较大刚度，使土体固结沉降（压缩性）减小。
- (2) 对于细粒含量较多的混合土 (FC>30%) 黄原胶对降低土体沉降效果显著。
- (3) 黄原胶固化土的临界细粒含量值所在区间长度缩小。

参考文献

[1] Monkul M., Ozden G., 2005. Effect of intergranular void ratio on one-dimensional compression behavior. International Conference on Problematic Soils[C]. Famagusta, N. Cyprus.
 [2] Cabalar A. F., 2010. Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands. Engineering Geology[J]. 112 (1-4): 21-28. (下转第 119 页)

内摩擦角和内聚力赋予了剧烈砂化白云岩不同的抗剪能力,使得作用在岩盘上的作用力大小各异,抗剪能力越大,位移值增幅越小。在临界点前各进尺最大挤出位移相等,亦可证明采用塑性贯通作为灾变判据是合理的。

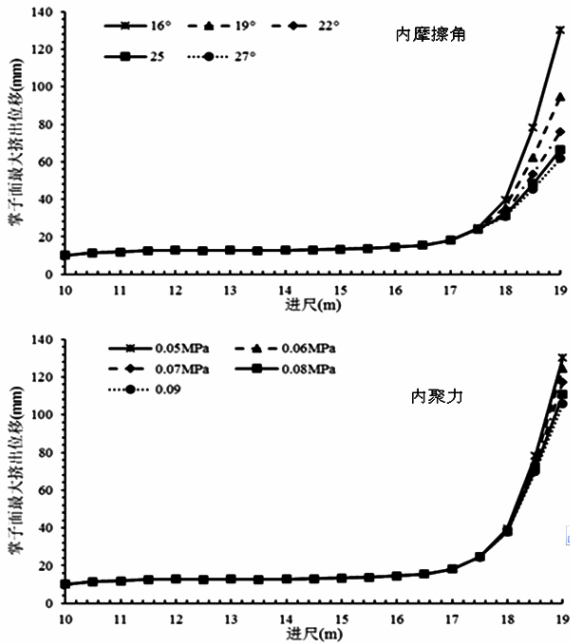


图 6 剧烈砂化白云岩参数对最大挤出位移的影响

2. 临界厚度预测公式

假定各因素对模拟结果的影响之间存在线性关系,据此建立如下拟合公式:

$$L_c = AH_w + B\varphi + C \ln(c) + L_0 \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 为待定系数; L_0 为待定常数项; H_w 为隧洞中心水头; φ 、 c 分别为剧烈砂化白云岩内摩擦角和内聚力。

将各工况模拟结果对式 (1) 进行多元拟合,得到防突结构临界安全厚度预测公式为:

$$L_c = 0.016H_w - 0.129\varphi - 1.074 \ln(c) + 4.445 \quad (2)$$

相关系数 $R^2=0.9767$, 拟合效果较好。

现场工况为: 埋深 160m, 隧洞中心水头 120m, 强烈

砂化白云岩内摩擦 32° , 内聚力 0.3MPa。将参数带入预测公式计算,防突结构临界安全厚度结果为 3.46m。根据现场施工经验,一般预留的防突结构临界安全厚度为 5.0m。若将文中预测值加爆破开挖扰动损失带 $L=1.5\text{m}$ ^[7],所得结果与现场预留的灾变临界厚度值是十分接近的,说明模拟拟合预测公式具有很好的适应性和可靠性。

四、结论

文中以滇中引水工程玉溪段某隧洞为背景,基于 FLAC^{3D} 数值软件,分析不同参数对防突结构临界厚度的影响,构建预测公式,得到以下结论:

(1) 强烈砂化白云岩内摩擦角、内聚力对防突结构厚度影响较大,呈负相关性;隧洞中心水头与防突结构临界安全厚度呈正相关性;剧烈砂化白云岩内摩擦和内聚力对临界厚度影响较小。

(2) 防突结构临界厚度预测公式与实际工程有较好的一致性,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 杨子汉, 杨小礼, 许敬叔等. 基于上限原理的两种岩溶隧道岩墙厚度计算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38 (3): 801-809.
- [2] 孟凡树, 王迎超, 焦庆磊等. 断层破碎带突水最小安全厚度的筒仓理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52 (2): 89-95.
- [3] 徐光黎, 储汉东, 李维娜等. 岩溶隧道隔水岩盘安全厚度预测模型[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集, 2016: 865-871.
- [4] 陈泽龙, 崔江余, 王军等. 富水断层带隧道突水突泥的临界判据[J]. 铁道建筑, 2020, 60 (11): 53-55+63.
- [5] 李建国, 沐红元, 米健. 砂化白云岩工程地质特性初步研究[C]//. 水工隧洞技术应用与发展, 2018: 52-58.
- [6] 田启文, 岳朝林. 坪头水电站岩溶砂化细晶白云岩的特性及围岩分类[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (5): 45-49.
- [7] 李术才, 袁永才, 李利平等. 钻爆施工条件下岩溶隧道掌子面突水机制及最小安全厚度研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (2): 313-320.

(上接第 65 页)

- [3] Chang I, Im J, Prasadhi AK, Cho G-C, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Construction and Building Materials[J]. 2015, 74: 65-72.
- [4] Koester, J.P., The influence of fines type and content on cyclic strength, ground failures under seismic conditions. Geotechnical Special Publication[J]. 1994, 44: 17-33.
- [5] Polito, C.P., Martin, J.R., Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering[J]. 2001: 408-415.
- [6] Georgiannou, V.N., Hight, D., Burland, J.B., Behaviour of clayey sands under undrained cycle triaxial loading. Geotechnique[J]. 1991, 41 (3): 351-415.
- [7] A.F. Cabalar, R.A., Hasan, Compressional behaviour of various size/shape sand-clay mixtures with different pore fluids. Engineering Geology[J]. 2013, 164: 36-49.
- [8] Monkul, M.M., Ozden, G., Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. Engineering Geology[J]. 2007, 89, 195-205.