

不同含水率条件下粉性土物理力学性质

王 东¹, 陈 健¹, 季宏宇², 常森森¹, 迟连阳³

(1. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 3. 新疆新工勘岩土工程勘察设计院有限公司山东分公司, 山东 济南 250102)

摘要:为研究不同含水率和干密度对粉性土物理力学性质的影响规律,为粉土区工程建设提供理论依据,文章通过击实试验、直剪试验和固结试验,分析不同含水率和干密度对粉性土抗剪强度、孔隙比和压缩模量的影响。研究表明:现场粉性土的最优含水率为16.0%,其对应的最大干密度为 1.68 g/cm^3 ;粉性土的黏聚力随含水率的增加而减小,其中 1.35 g/cm^3 干密度试样的黏聚力减小了76.30%;当含水率小于10%时,粉性土的内摩擦角减小幅度明显小于黏聚力;含水率越高粉性土的孔隙比变化幅度越大;粉性土的压缩模量与干密度成正比,干密度越大,含水率变化对其压缩模量的影响程度越大。本文研究结果可为粉土区工程设计和施工提供理论支撑。

关键词:粉性土; 含水率; 击实试验; 直剪试验; 固结试验

中图分类号:U416.01

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)12-0039-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.12.148

Physical and mechanical properties of silt under different water content conditions

WANG Dong¹, CHEN Jian¹, JI Hongyu², CHANG Sensen¹, CHI Lianyang³

(1. Jinan Kingyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Civil Transportation Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China; 3. Shandong Branch of Xinjiang Xinjian Geotechnical Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the influence of different moisture contents and dry densities on the physical and mechanical properties of silty soils, and to provide a theoretical basis for engineering construction in silty soil regions. In this paper, the effects of different moisture contents and dry densities on the shear strength, void ratio, and compressive modulus of silty soils are analyzed through compaction tests, direct shear tests, and consolidation tests. Research findings indicate that the optimum moisture content of the silty soil at the site is 16.0%, corresponding to a maximum dry density of 1.68 g/cm^3 . The cohesion of silty soil decreases with increasing moisture content, with the cohesion of the 1.35 g/cm^3 dry density specimen decreasing by 76.30%. When the moisture content is less than 10%, the decrease in the internal friction angle of powdery soil is significantly smaller than that of cohesion. The higher the moisture content, the greater the variation in the void ratio of silty soils. The compressive modulus of silty soils is proportional to dry density; the greater the dry density, the more significant the effect of moisture content variation on its compressive modulus. The results of this study provide theoretical support for engineering design and construction in silty soil regions.

Key words: moisture content; silty soil; compaction test; direct shear test; consolidation test

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2022B109)

作者简介: 王 东(1982—),男,高级工程师,从事公路与城市道路建设研究。

通信作者: 季宏宇(1999—),男,硕士研究生,从事道路基础设施建设研究。

粉性土在我国分布广泛,尤其在长江中下游平原地区,以及鲁西南、豫东及淮北等黄河冲积平原地区^[1-4]。粉性土的物理力学性能与其颗粒组成、粒度成分以及含水量大小密切相关,并且受沉积年代、地理环境及空间分布等条件影响较大^[5-6]。粉性土特殊的物理和水理性质造就了其工程性质的特殊性,当地下结构物理设于地下水位变动幅度较大的粉性土地基中时,其沉降变形会受到较大的影响^[7-8]。分析粉性土在不同含水率下的物理力学特性对研究地下构造物的不均匀沉降具有重要的意义。国内外学者对粉性土的物理和水理性质进行了大量研究。

在粉性土的物理性质方面,曹卫东^[9]研究了粉土的击实特性,发现当含水量较小时,粉土的击实曲线远离饱和曲线,表明粉土中有较大的空隙体积。祁晓翔^[10]研究了非饱和砂质粉土的抗剪强度特性,认为含水率和干密度的变化对土样的抗剪强度指标具有规律性的影响。宋国文等^[11]通过室内标准贯入试验,研究了粉土的部分力学参数与标准贯入次数的关系,认为粉土的压缩模量、黏聚力和内摩擦角与标准贯入次数呈正相关。AZIZ^[12]通过黏性土改性粉土,认为在粉土中掺加一定比例的黏性土可以降低地基的沉降速率。文浩等^[13]、张燕明等^[14]分析了不同区域粉土的物理特性,认为不同区域的粉土颗粒级配和液塑限存在明显的差异,粉土各物理力学指标变化的内在本质是粉粒质量分数的变化。

在粉性土的水理性质方面,吴世余等^[15]对粉性土毛细水的力学和工程特性进行研究,通过对比粉性土试样浸水与否的无侧限抗压强度,认为毛细水的张力提高了土体强度,通过借砂模试验和电拟试验,分析了毛细水对堤坝渗流流态的影响,认为毛细水提高了渗流量和出逸点高度。王维蒙^[16]通过渗流破坏试验研究了含水率、压实度和塑性指数对粉土渗流破坏的影响,分析了粉土渗流破坏机理。方正^[17]系统研究了粉土的渗透变形特性,认为在水平渗流时粉土更容易发生渗透变形。郑坚杰^[18]通过

预降水试验,研究了粉土地层基坑开挖对环境的影响,给出了粉土区基坑开挖具体的防护措施。罗丹等^[19]通过现场渗水试验,研究了渗透系数与土体结构、孔隙比和不均匀系数的关系,认为孔隙比与渗透系数呈非线性关系。

综上所述,已经有大量学者对粉性土的物理和水理特性进行了研究,然而,前人在含水率对不同干密度粉性土的抗剪强度和固结影响方面研究较少。鉴于此,本文在前人研究的基础上,通过击实试验、直剪试验和固结试验,详细分析含水率对不同干密度粉性土抗剪强度、孔隙比和压缩模量的影响规律,以期可为相关研究提供参考。

1 原材料与试验

1.1 原材料

本文采用的土样取自某综合管廊建设项目施工现场,该土样的天然含水率为 20.4%,参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[20],采用移液管法分析了该土样的颗粒组成,试验结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,该现场土颗粒的粒径主要分布在 0.01~0.075 mm,属于典型的粒径小而比重大。其不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 4.2 和 2.7。参照文献 [20] 判断该土样粒径分布比较均匀,级配不良;并且粉粒质量分数约占 58%,黏粒质量分数低于 5%。根据土颗粒的质量分数和级配特征确定该施工现场的土为粉性土。绘制了该粉性土颗粒级配曲线,如图 1 所示。

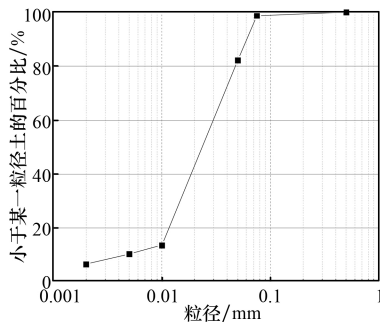


图 1 粉性土颗粒级配曲线

表 1 现场土颗粒分析试验结果

粒径/mm	<0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.075	>0.075
颗粒质量分数/%	3.6	3.8	3.2	68.6	19.6	1.2

1.2 试验

1.2.1 击实试验

为了确定该粉性土的最优含水率和最大干密度, 参照文献 [20] 分别制备了含水率为 12%、14%、16%、18% 和 20% 的 5 种粉性土试样, 使用多功能电动击实仪(锤重 2.5 kg, 落高 30.0 cm)进行室内轻型击实试验, 然后测定了 5 种粉性土试样的干密度, 如表 2 所示。

表 2 不同含水率下粉性土的干密度

含水率/%	12	14	16	18	20
干密度/(g·cm ⁻³)	1.61	1.64	1.68	1.66	1.63

从表 2 可以看出, 随着粉性土含水率的增加, 其干密度先增加后减小, 并且该粉性土的最优含水率为 16.0%, 其对应的最大干密度为 1.68 g/cm³。

1.2.2 直剪试验

为了研究不同含水率对粉性土抗剪强度的影响, 选择黏聚力和内摩擦角两大指标, 参照文献 [20] 使用应变控制式直剪仪进行快剪试验, 剪切速率 0.8 mm/min, 垂直压力的区间为 100 ~ 400 kPa。根据抗剪强度与垂直压力的关系分别计算了 4 种干密度土样在不同含水率条件下的黏聚力和内摩擦角, 如表 3、4 所示。

1.2.3 固结试验

为了研究不同含水率对该粉性土孔隙比和压缩模量的影响, 参照文献 [20] 使用标准固结仪对 4 种干密度粉性土试样进行不同含水率的室内

标准固结试验。根据公式 1 ~ 6 计算该粉性土的孔隙比和压缩模量^[20]。

初始孔隙比的计算方法见公式(1):

$$e_0 = \frac{(1 + 0.01w_0)\rho_s}{\rho_0} - 1 \quad (1)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; w_0 为初始含水率, %; ρ_s 为土粒密度, g/cm³; ρ_0 为初始密度, g/cm³。

单位沉降量计算方法见公式(2):

$$S_i = \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中: S_i 为某一级荷载下的沉降量, mm/m; h_0 为初始高度, mm; $\sum \Delta h_i$ 为某一级荷载作用下的总变形量, mm。

粉性土试样在不同荷载下变形稳定后的孔隙比 e_i 计算方法见公式(3):

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \times \frac{S_i}{1\,000} \quad (3)$$

式中: e_i 为某一荷载下压缩稳定后的孔隙比。

某一荷载范围的压缩系数 a_v 计算方法见公式(4):

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} = \frac{(S_{i+1} - S_i)(1 + e_0)/1\,000}{p_{i+1} - p_i} \quad (4)$$

式中: p_i 为某一荷载值, kPa。

某一荷载范围下的压缩模量 E_s 和体积压缩模量 m_v 计算方法见公式(5)、(6):

$$E_s = \frac{p_{i+1} - p_i}{(S_{i+1} - S_i)/1\,000} \quad (5)$$

表 3 不同含水率对 4 种干密度粉性土黏聚力的影响

干密度/ (g·cm ⁻³)	不同含水率下的黏聚力					
	1%	5%	10%	15%	20%	25%
1.35	21.60	13.65	9.13	6.58	5.98	5.12
1.46	49.12	40.25	32.72	25.62	18.13	13.52
1.54	61.44	56.52	44.52	37.82	31.89	25.32
1.68	68.13	60.14	53.98	45.54	41.93	32.12

表 4 不同含水率对 4 种干密度粉性土内摩擦角的影响

干密度/ (g·cm ⁻³)	不同含水率下的内摩擦角					
	1%	5%	10%	15%	20%	25%
1.35	35.13	28.51	27.56	26.08	26.39	26.45
1.46	37.12	29.72	28.76	28.16	28.51	28.76
1.54	38.23	32.51	29.98	30.96	29.75	29.81
1.68	39.85	35.85	32.96	32.32	30.21	30.56

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (6)$$

式中: E_s 为压缩模量, kPa; m_v 为体积压缩系数, kPa^{-1} ; a_v 为压缩系数, kPa^{-1} 。

2 试验结果分析

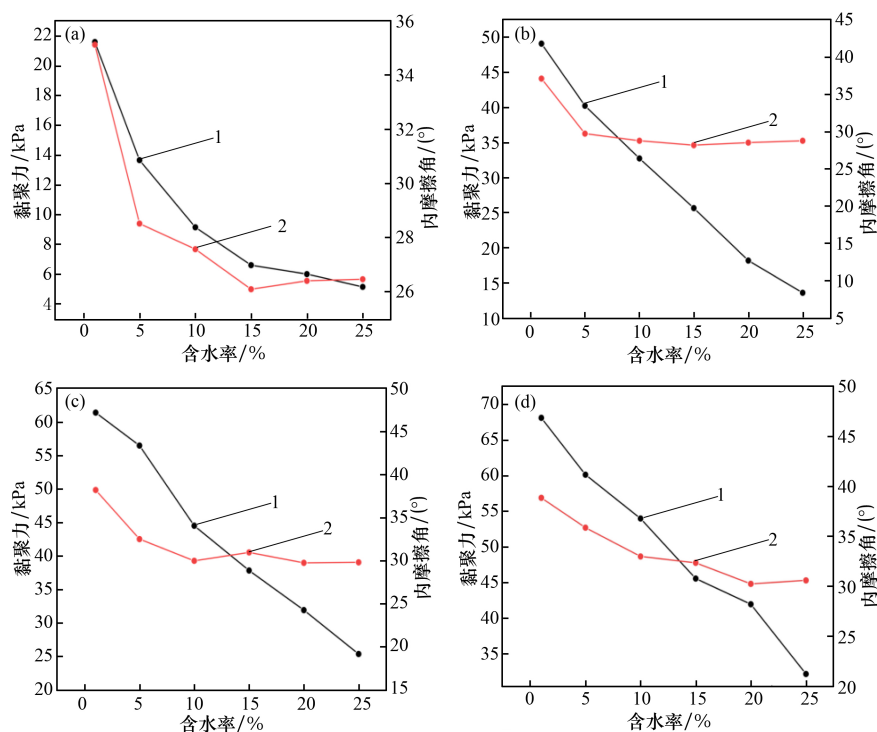
2.1 抗剪强度指标分析

2.1.1 含水率对不同干密度粉性土黏聚力和内摩擦角的影响

为了研究含水率对不同干密度粉性土黏聚力和内摩擦角的影响, 绘制 4 种干密度粉性土的黏聚力、内摩擦角与不同含水率的关系, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 含水率对粉性土的黏聚力影响较大, 4 种干密度粉性土的黏聚力均随含水率的增加而减小。随着粉性土的含水率由 1% 增加到 25%, 干密度为 1.35 g/cm^3 试样的黏聚力由 21.6 kPa 减小为 5.12 kPa, 减小幅度为 76.30%; 1.46 g/cm^3 试样的黏聚力由 49.12 kPa 减小为 13.52 kPa, 减小幅度为 72.48%; 1.54 g/cm^3 试样的黏聚力由 61.44 kPa 减小为 25.32 kPa, 减小幅度为 58.80%; 1.68 g/cm^3

试样的黏聚力由 68.13 kPa 减小为 32.12 kPa, 减小幅度为 52.85%。原因可能是水分的增加削弱了土颗粒之间的黏结作用, 导致黏聚力减小。与黏聚力的变化相似, 该粉性土的内摩擦角随含水率的增加而减小, 但减小幅度明显小于黏聚力。当含水率小于 5% 时, 干密度为 1.35 g/cm^3 和 1.46 g/cm^3 的粉性土内摩擦角减小速度较快。原因是在较低的干密度下, 土颗粒之间的排列相对松散, 水分质量分数的微小变化可以显著影响颗粒间的摩擦作用。当含水率小于 10% 时, 干密度为 1.54 g/cm^3 和 1.68 g/cm^3 的粉性土内摩擦角减小速度较快; 当含水率大于 10% 以后, 内摩擦角的减小速度才逐渐变缓。原因是较高干密度的土颗粒之间排列的比较紧密, 需要更多的水分才能显著改变颗粒间的摩擦状态。综上所述, 随着含水率的增加, 不同干密度粉性土的黏聚力和内摩擦角均减小。当粉性土的干密度为 1.35 g/cm^3 时, 其黏聚力减小幅度最大; 当含水率小于 10% 时, 不同干密度粉性土的内摩擦角受含水率变化的影响较大, 并且内摩擦角的减小幅度明显小于黏聚力。



干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$: (a) 1.35; (b) 1.46; (c) 1.54; (d) 1.68

1—黏聚力; 2—内摩擦角。

图 2 不同干密度粉性土的黏聚力和内摩擦角变化

2.1.2 干密度对不同含水率粉性土黏聚力和内摩擦角的影响

为了研究干密度对不同含水率粉性土黏聚力和内摩擦角的影响,如图 3 所示,绘制了 6 种含水率粉性土黏聚力、内摩擦角与不同干密度的关系。

从图 3 可以看出,随着干密度从 1.35 g/cm^3 增加到 1.68 g/cm^3 ,不同含水率粉性土的黏聚力分别增加了 46.53、46.49、44.85、38.96、35.95 kPa 和 27.00 kPa。随着干密度的增加,粉性土的含水率越小其黏聚力增加幅度越明显。原因主要有两个方面,一方面随着粉性土干密度的增加土颗粒的单位体积接触点数量增加,颗粒间的咬合作用作用增加,形成“骨架-基质”互锁结构;另一方面粉性土的含水率越低,孔隙水从连续相转为孤立液桥,产生负孔隙水压,提高了土体的黏聚力。随着干密度和含水率的增加,粉性土内摩擦角的变化与黏聚力相似,但增加幅度明显小于黏聚力。粉性土的内摩擦角在含水率为 5% 时,增长幅度最大,增长了 25.75%。这是由于粉性土的干密度越大,土颗粒之间的接触越紧密,其咬合作用越强,当土体受到剪切作用时,剪应力需要先克服这种咬合作用力,粒料才能产生相对滑动;在低含水率条

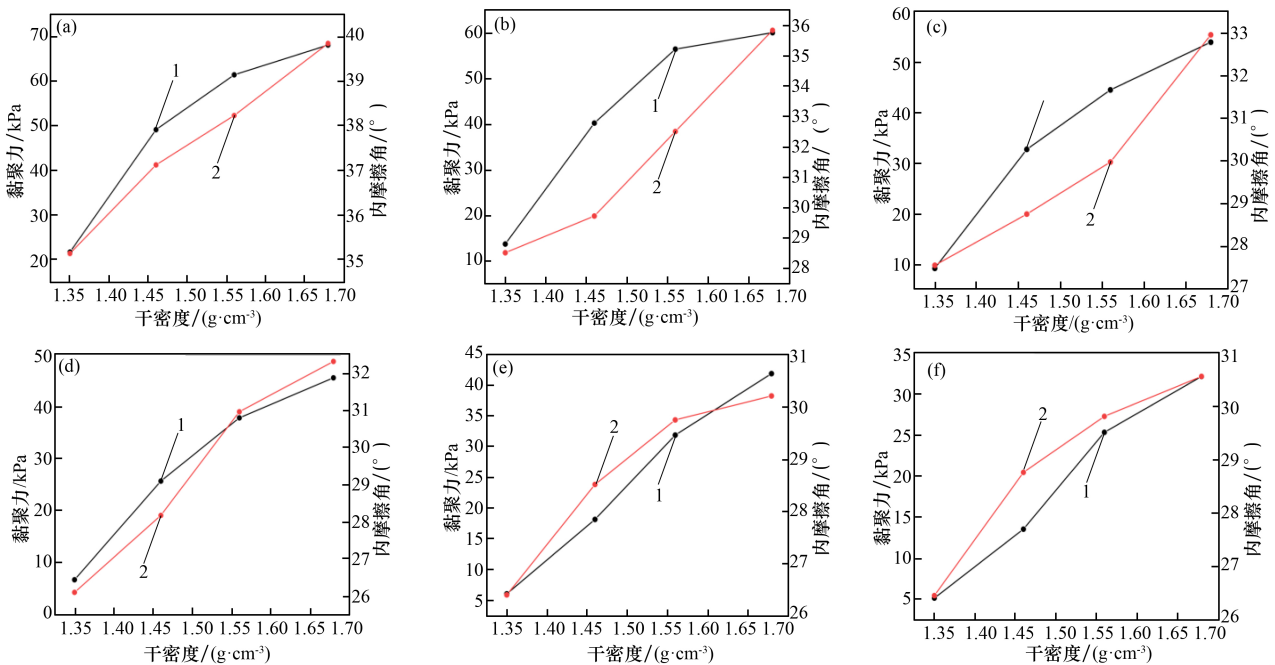
件下,负孔隙水压作用有利于提高土体的有效应力,进一步提升粉性土的内摩擦角。因此初始干密度对土体抗剪强度指标有较大的影响,粉性土的干密度越大,其对应的黏聚力和内摩擦角就越高,抗剪强度越大。

2.1.3 干密度对不同含水率粉性土抗剪强度的影响

为了更加深入的研究干密度对粉性土抗剪强度的影响,如图 4 所示,绘制了 4 种干密度粉性土在不同含水率条件下的抗剪强度变化。

从图 4 可以看出,在不同垂直压力作用下,4 种干密度粉性土的剪切强度均随含水率的增加而减小。原因是水分的润滑作用减少了土颗粒之间的摩擦力和黏结力,导致土颗粒更容易分散,降低了土体的整体稳定性。当含水率小于 5% 时,干密度为 1.35 g/cm^3 和 1.46 g/cm^3 的粉性土抗剪强度减小速率较快,原因是干密度较小的土样含有较多的孔隙,密实度较差,使水分更容易进入土体,导致土体抗剪强度快速降低。

当含水率由 5% 增加到 10%,干密度为 1.54 g/cm^3 和 1.68 g/cm^3 的粉性土抗剪强度减小速率较快,原因是孔隙水压力随着含水率的增加而不断提高,使土体的有效应力降低,此时干密



含水率/%: (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 15; (e) 20; (f) 25

1—黏聚力; 2—内摩擦角。

图 3 不同含水率粉性土的黏聚力和内摩擦角变化

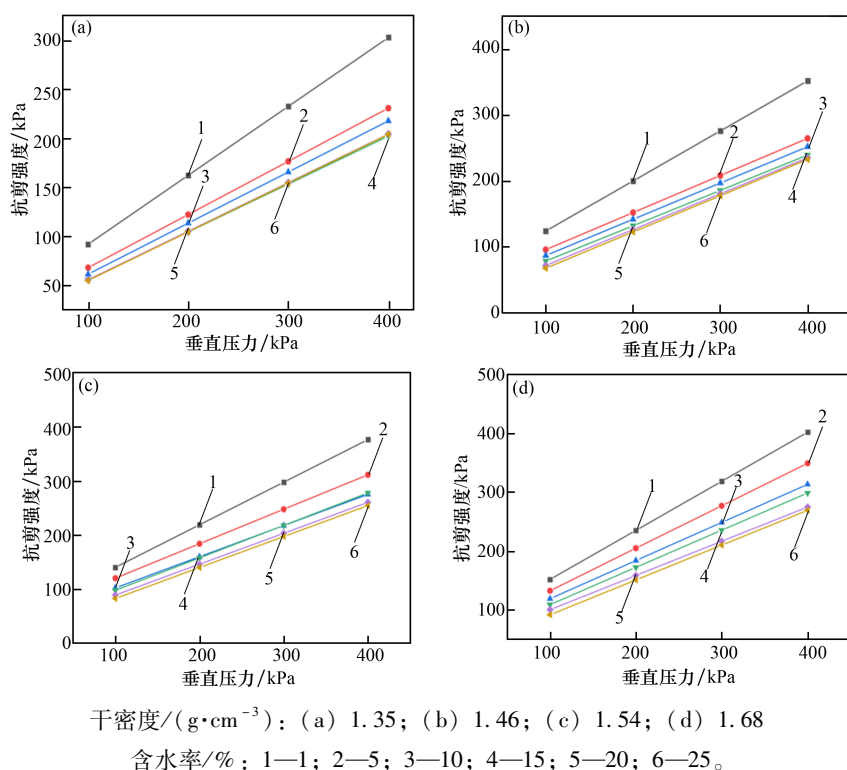


图 4 不同干密度粉性土的抗剪强度变化图

度较大的土样抵抗变形的能力下降。当含水率由 10% 增加到 25%，粉性土在不同干密度条件下的抗剪强度减小速率相当。原因是过高的含水率使土体塑性更加显著，土体失去了一定的结构强度，使土体抗剪强度快速降低；由于含水量的持续增加使土颗粒间的结合水膜变厚，甚至增加了土体中自由水的质量分数，使粉性土的黏聚力降低，其抗剪强度随之减小。

2.2 不同初始含水率条件下孔隙比分析

为了研究含水率对粉性土孔隙比的影响，根据试验结果，绘制了 4 种干密度粉性土的孔隙比与不同含水率的关系曲线，如图 5 所示。

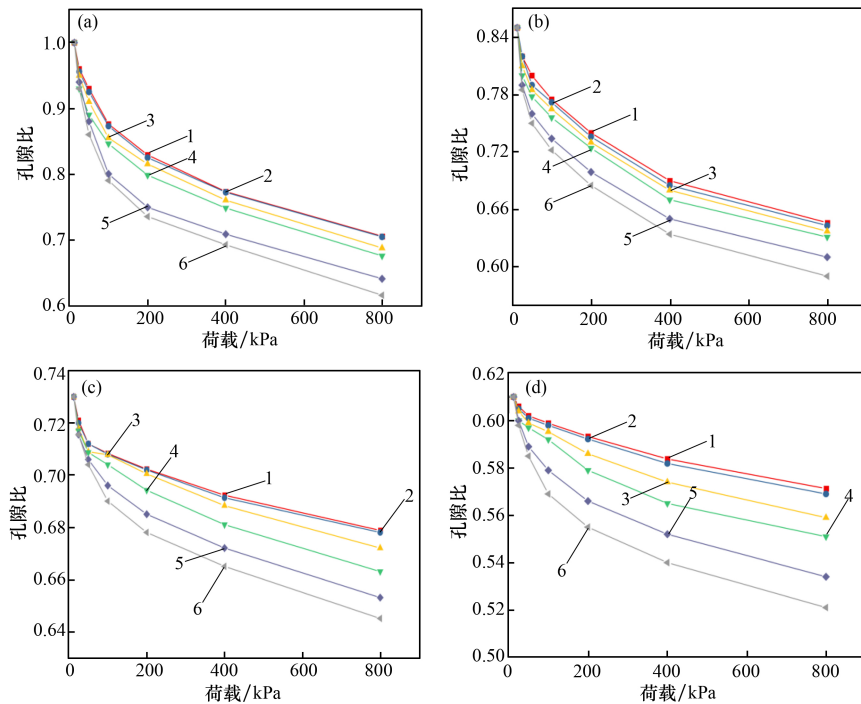
从图 5 可以看出，随着逐级荷载的施加，4 种干密度粉性土的孔隙比均呈下降趋势，原因是粉性土的粒径和比表面积较小，细颗粒随着荷载的增加发生了相对运动，水分和空气的排出使孔隙空间更加紧密。从图 5 还可以看出，4 种干密度粉性土的孔隙比随着含水率的增加而减小。原因是水的润滑作用减少了颗粒间的摩擦，在荷载的作用下，含水率较高的土样颗粒更容易滑动和重新排列，使颗粒之间的空隙结构更加紧密。从孔隙比的变化幅度看，当含水率小于 15% 时，4 种干

密度粉性土试样的孔隙比随着含水率的增加变化规律趋向一致且变化量较小；当粉性土的含水率大于 20% 时，孔隙比的变化速率明显增加，干密度为 1.35 g/cm^3 时孔隙比变化的幅度最大，干密度为 1.68 g/cm^3 时孔隙比变化的幅度最小。原因是含水率较大时，土颗粒间的黏结力较差，容易发生塑性变形；另一方面含水率较高的土样固结作用和液限效应更明显。

2.3 不同初始含水率条件下压缩模量分析

为了研究含水率对粉性土压缩模量的影响，计算了 4 种干密度粉性土在不同含水率条件下的压缩模量，根据计算结果，绘制了粉性土的压缩模量随含水率的变化曲线，如图 6 所示。

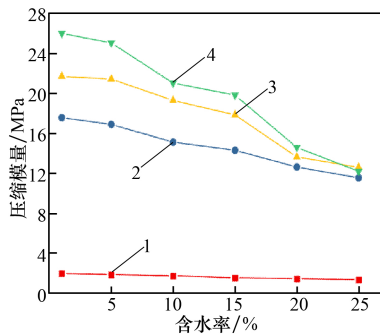
从图 6 可以看出，粉性土的压缩模量与干密度成正比，干密度越大土体的压缩模量越大，土体越不易被压缩。随着粉性土含水率的增加，土体的压缩模量均呈现出减小的趋势，粉性土的干密度越大其压缩模量受含水率的影响越大。随着含水率从 1% 增加到 25%，干密度为 1.68 g/cm^3 粉性土试样的压缩模量从 26.08 MPa 减小到 12.20 MPa，减大幅度为 53.22%；干密度为 1.54 g/cm^3 粉性土试样的压缩模量从 21.76 MPa 减小到 12.60 MPa，



干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$: (a) 1.35; (b) 1.46; (c) 1.56; (d) 1.68

含水率/%: 1—1; 2—5; 3—10; 4—15; 5—20; 6—25。

图 5 不同含水率条件下 4 种干密度粉性土的 $e-p$ 曲线



干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 1—1.35; 2—1.45;

3—1.54; 4—1.68。

图 6 不同干密度粉性土的压缩模量变化

减小幅度为 42.10%; 干密度为 1.46 g/cm^3 粉性土试样的压缩模量从 17.60 MPa 减小到 11.54 MPa, 减小幅度为 34.43%; 而干密度为 1.35 g/cm^3 的粉性土试样, 压缩模量从 1.92 MPa 减小到 1.29 MPa, 减小幅度为 32.81%。原因是粉性土的干密度越大, 其结构越紧密, 土体颗粒间的相互作用力越强, 水分的排出对孔隙结构的变化影响更显著。

3 结 论

本文以某地下综合管廊施工现场的粉性土为研究对象, 通过击实试验、直剪试验和固结试验,

分析了不同含水率和干密度对粉性土抗剪强度、孔隙比和压缩模量的影响。得出以下结论:

(1) 该施工现场粉性土的最优含水率为 16.0%, 其对应的最大干密度为 1.68 g/cm^3 。

(2) 不同干密度粉性土的黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而减小, 且黏聚力减小幅度更大; 在相同含水率条件下, 干密度越大粉性土的黏聚力和内摩擦角越大。

(3) 粉性土的含水率越高其孔隙比的变化幅度越大, 当含水率大于 20% 时, 1.35 g/cm^3 干密度试样的孔隙比变化幅度最大, 1.68 g/cm^3 干密度试样的孔隙比变化幅度最小。

(4) 该现场粉性土的压缩模量与干密度成正比, 不同干密度粉性土的压缩模量均随含水率增加而减小, 且粉性土的干密度越大, 含水率变化对其压缩模量的影响程度越大。

参考文献:

- [1] 向玉娥. 粉土路基强度折减法边坡稳定性分析[J]. 湖南交通科技, 2014, 40(4): 27-30.
- [2] 张宏博, 刘源, 陈晓光, 等. 透水性混凝土桩在黄泛区粉性土地基中的加固机理及效果研究[J]. 中外公

- 路,2019,39(3):20-25.
- [3] 张小宁. 耐候性吸水树脂改性粉土路基湿度调控机理与性能保持研究[D]. 济南:山东大学,2023.
- [4] 余虔,曹正龙,寇璟媛,等. 不同区域粉土累积塑性应变预测模型[J]. 公路交通科技,2024,41(7):56-64.
- [5] 姚妙娴. 改性粉土的物理力学指标试验研究[J]. 岩土工程技术,2024,38(3):374-378.
- [6] 吴道祥,郭佳诚,叶磊,等. 基于静力触探估算粉土物理力学性质指标的方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(7):972-977.
- [7] 程远,韩杰,朱合华,等. 振杆密实法加固粉土地基效果试验[J]. 中国公路学报,2019,32(3):63-70.
- [8] 郭旺,杨贤,朱燕文,等. 基于连续压实控制技术的土质路基压实质量评估研究[J]. 湖南交通科技,2023,49(3):81-85.
- [9] 曹卫东. 低液限粉土填筑路基压实性能的研究[D]. 济南:山东大学,2002.
- [10] 祁晓翔. 杭州典型非饱和砂质粉土的力学特性试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
- [11] 宋国文,李大华,韩孟君. 粉土的工程特性与标贯击数分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(2):6-9.
- [12] AZIZ M. Mechanical properties of a high plasticity clay mixed with sand and low-plastic silt[J]. Materials Today:Proceedings,2023.
- [13] 文浩,尹俊红,韩长玉,等. 河南中东部黄泛区粉土物理特性区域差异性实验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2018,48(5):623-630.
- [14] 张燕明,刘怡林,李小旋. 基于统计分析的粉土区域变化规律及其物理力学性质研究[J]. 公路交通科技,2018,35(5):24-33.
- [15] 吴世余,余金煌. 粉性土毛管水的力学和工程特性[J]. 岩土力学,2013,34(1):80-84.
- [16] 王维蒙. 地下管线泄漏引起粉土地基渗流破坏的机理研究[D]. 郑州:郑州大学,2021.
- [17] 方正. 粉土渗透变形特性及降水结构设计研究[D]. 济南:济南大学,2023.
- [18] 郑坚杰. 粉砂粉土地层基坑预降水对环境影响及处理[J]. 工程建设,2022,54(4):43-50.
- [19] 罗丹,陈泉萌,文方. 粉土渗透性试验研究:以古尔班通古特沙漠南缘为例[J]. 环境与发展,2018,30(8):123-125.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.