

DOI: 10.11779/CJGE201603006

新疆昭苏县草甸土的工程性质试验研究

冯瑞玲^{1, 2, 3}, 吴立坚⁴, 王鹏程¹, 张益铭¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 轨道交通北京市重点实验室, 北京 100044; 3. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 北京 100044; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 由于目前对草甸土的工程性质了解甚少, 一方面引起了草甸土与草炭土、泥炭等的混淆, 另一方面导致了在设计过程中不知如何选择相应的处治措施。鉴于此, 以新疆伊犁昭苏县草甸土层为研究对象, 参照一般土体的室内土工试验方法, 测试了草甸土的比重、重度、烧失量、渗透系数、抗剪强度、无侧限抗压强度等物理力学指标, 并将试验结果与国内外草炭土、泥炭、泥炭质土的工程特性进行了对比分析。结果表明: 按照有机质含量分类, 新疆昭苏县草甸土属于泥炭质土; 其含水率处于泥炭质土的低限附近, 而重度则高于一般泥炭和泥炭质土的重度, 具有较好的渗透性、很高的压缩性; 草甸土中的草根可以显著提高土体的黏聚力, 但对内摩擦角的影响不明显; 无侧限抗压强度试验过程中草甸土未发生类似于一般黏土的剪切破坏, 而是产生了很大的压缩变形和鼓胀变形; 草甸土在受荷载后主固结沉降完成很快, 其主固结系数随着固结压力的增大线性减小; 当固结压力超过 100 kPa 时, 草甸土的主固结比较小, 说明此时草甸土的次固结变形量不容忽视, 地基沉降计算中应予以考虑。

关键词: 新疆; 草甸土; 物理性质; 抗剪强度; 次固结

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)03-0437-09

作者简介: 冯瑞玲(1976-), 女, 副教授, 主要从事岩土工程、路基工程等方面的教学和科研工作。E-mail: rlfeng@bjtu.edu.cn。

Experimental study on engineering properties of meadow soil in Zhaosu County of Xinjiang

FENG Rui-ling^{1, 2, 3}, WU Li-jian⁴, WANG Peng-cheng¹, ZHANG Yi-ming¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Track Engineering, Beijing 100044, China; 3. Beijing Engineering and Technology Research Center of Rail Transit Line Safety and Disaster Prevention, Beijing 100044, China; 4. Research Institute of Highway, the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: Few research results about engineering properties of meadow soil are available, which makes it difficult to distinguish meadow soil from peaty soil. At the same time, the ground treatment measures cannot be chosen appropriately during construction. Based on the meadow soil in Zhaosu County of Xinjiang Uygur Autonomous Region, according to Chinese laboratory geotechnical tests on soils, many indexes of the meadow soil are investigated, such as specific gravity, bulk density, water content, loss on ignition, coefficient of permeability, shear strength, unconfined compressive strength, and they are compared with those of worldwide meadow soil, peat and peaty soil. The test results show that the meadow soil can be classified as a kind of peaty soil based on its loss on ignition. Its water content is near the lower limit of the peaty soil, and its bulk density is larger than that of the peaty soil. The meadow soil has high permeability and compressibility, and it also has high cohesive strength because of the grass root in it. The grass root has little effect on the internal friction angle. The compressive distortion and bulging distortion of meadow soil are large, and its failure mode during the unconfined compressive tests is not shear destruction. The primary consolidation of the meadow soil is completed in short time, and its primary consolidation coefficient decreases with the increasing stress. When the consolidation stress is larger than 100 kPa, the primary consolidation ratio is small, which means that the secondary consolidation of the meadow soil cannot be ignored during the settlement calculation.

Key words: Xinjiang; meadow soil; physical property; shear strength; secondary consolidation

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108024, 41371081); 中央高校基本科研业务费项目(2014JBM093)

收稿日期: 2015-01-12

0 引言

中国草甸土面积为 25.07 万平方公里，主要分布在黑龙江、内蒙古、新疆、西藏、青海等省（自治区），其中黑龙江省的分布面积最大，约占全国草甸土总面积的 1/3，其次是内蒙古和新疆，分别占全国草甸土总面积的 23.9%和 15.3%^[1]。

草甸土是在地下水浸润作用下，在草甸植被下发育而成的具有腐殖质层（A）及锈色斑纹层（BCg 或 Cg）两个基本发生层的半水成土壤，属于半水成土纲、暗半水成土亚纲下的一个土类^[1]。

草甸土植被覆盖率一般为 70%~90%，甚至达到 100%，并且植被生长茂盛，每年都能够向土壤提供丰富的植物残体，加之气候冷凉，微生物分解活动受到抑制，所以草甸土有机质含量较高，腐殖质层深厚^[1]。

上述对草甸土的分类、定义等都是从土壤学、农学角度出发的，现有的研究成果也大多与农业、林业相关^[2-5]。在工程技术规范中未涉及草甸土的相关内容^[6-10]，且目前国内外关于草甸土的工程性质的研究也未见报道，因此在工程建设的过程中遇到草甸土地基时，直接引入了土壤学中草甸土的概念。由于工程界、学术界对草甸土的工程性质都知之甚少，一方面引起了对草甸土与草炭土、泥炭、泥炭质土等土类的混淆，另一方面导致了在设计过程中不知如何选择相应的处治措施。比如在新疆兵团农四师吐坡公路建设的过程中，原设计方案参照一般软土的地基处理方式，对草甸土路基段采用抛石挤淤及在基底铺设土工格栅的方式进行处理，后经论证取消了草甸土地基的处理措施，变更为在草甸土地基上直接填筑路基^[11-12]。经实践证明对草甸土地基不进行处治是可行的。鉴于此，本文对新疆兵团农四师吐坡公路草甸土的工程性质进行了详细研究，并与草炭土、泥炭、泥炭质土的工程特性进行了对比分析。

1 现场取样及室内试样准备

本次试验所取典型草甸土样为新疆兵团农四师（新疆伊犁州昭苏县）吐坡公路 K0+600 断面未经扰动的天然草甸土，共取了 4 块土样。为了比较草甸层对土的工程特性的影响，在 K4+000 断面取了一块非草甸土试样（由于取样较少，因此该断面主要做了直剪试验）。取样过程中，将草甸层土样切割成约 40 cm×25 cm 的尺寸，厚度以草甸层的厚度为准。

为了不破坏草甸土层的物理力学性能，取出的立方体块状土样立即用多层 1 mm 厚塑料薄膜袋保湿包装密实，再放入纸箱内再次密封后运至试验室。

草甸土样运至试验室后，为了尽可能地减少对土样的扰动，采用锯及专用切刀，将现场所取原始试样进行锯割、切块加工。试样加工过程中主要考虑如何使得测试数据相对准确、可靠以及试样形状、尺寸及草甸土层的层次结构等几个重要因素。首先按设想进行试样初加工，基本形成一定形状和尺寸，然后作精细加工，逐步剔除多余部分草甸土，使之达到相对规则的几何形状和较为准确的尺寸。制取试样以一个原始试样按其层理结构，分别在具有代表性的表层（即第一层，草皮顶面下 1 cm 深处）和下层（即第二层，草皮顶面下 7 cm 深处）取样完成相关试验。室内取样过程中，首先在原状土样上用环刀大概测出取样的大小，再用削土刀切取出长方体土块，厚度约为 10 cm，接着用环刀及削土刀在土块上小心取样。

鉴于目前国内外对草甸土的工程特性的研究尚属首次，因此本次试验项目共包括 7 项：①重度试验；②含水率试验；③土粒比重试验；④烧失量试验；⑤直剪试验；⑥无侧限抗压强度试验；⑦渗透试验。

由于目前中国对草甸土的物理力学特性的试验方法并没有相关规程可依，加之本次试验所取试样中的草根的最大直径为 1.5 mm，可以忽略草根直径带来的尺寸效应，因此室内试验过程，所有试验项目均参照《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）中的相关规定进行。

2 草甸土的工程分类

由于草甸土的有机质含量较高，腐殖质层深厚，因此对草甸土的工程分类首先参照有机质土、泥炭等特殊土的分类方法进行。

目前确定有机质含量的常见方法有两种：一种是化学试剂法，一般用重铬酸钾，但是这种方法只适用于有机质含量不大于 15%的土，另一种方法是用烧灼失重代替有机质含量，即烧失量法^[11]。经过初步鉴定，本次试验的草甸土的有机质含量大于 15%，因此本次试验采用烧失量测定土中有机质的含量。测试结果见表 1。从表 1 中可以看出，昭苏县草甸土的烧失量为 26.4%，烧失量较大。

表 1 烧失量试验结果

Table 1 Test results of loss on ignition		
取样位置	烧失量/%	烧失量平均值/%
K0+600	26.1223	26.3753
	26.6282	

中国《岩土工程勘察规范》（GB50021—2001）、《铁路工程特殊岩土勘察规程》（TB10038—2012）中将有机质含量为 10%~60%的土定义为泥炭质土；《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）中将有机质含量

为 5%~10% 的土称为有机质土, 有机质含量大于 10% 的土称为有机土; 而《公路工程地质勘察规范》(JTJ064—98)、《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ017—96) 中则未对泥炭质土、泥炭等高有机质含量的土进行详细划分。

鉴于此, 以有机质含量为分类依据, 参照《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)、《铁路工程特殊岩土勘察规程》(TB10038—2012) 的规定, 新疆昭苏县草甸土从工程角度分类属于泥炭质土, 参照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 中的规定, 则新疆昭苏县草甸土属于有机土。

不同地区泥炭质土的有机质含量范围^[13-18]见表 2。从表 2 可以看出: 昭苏县草甸土的有机质含量处于云南滇池泥炭、吉林江源镇、大石头镇草炭土的有机质含量的下限附近。

3 草甸土的物理特性

昭苏县草甸土的天然含水率、密度、比重、渗透系数、液限分别采用 28, 40, 10, 4, 10 个土样进行了室内测试, 测试结果见表 2。

表 2 不同地区泥炭质土的物理特性指标

Table 2 Physical indexes of peaty soil in different areas					
泥炭质土来源	有机质含量/%	含水率/%	比重	密度/(g·cm ⁻³)	20℃时渗透系数/(10 ⁻⁴ cm·s ⁻¹)
新疆昭苏县	26.3753	30.1~80.6	2.35~2.54	1.33~1.61	1.102~1.283
云南滇池	29.09~58.30	213.0~339.0	—	1.11~1.37	0.001~0.010
杭州江阳畈	34.9890	356.9~395.8	2.12	1.06~1.18	—
吉林延边(江源镇)	25.3700~87.2100	136.2~557.2	1.60~2.20	0.49~1.37	0.0001~10.000
吉林延边(大石头镇)	27.3400~50.4200	126.3~327.1	1.60~2.20	0.99~1.48	—
吉林延边(黄松甸镇)	57.5800~62.0200	208.7~228.3	1.60~2.20	1.07~1.12	0.0001~0.100
吉林延边(龙泉镇)	43.8600~63.900	110.6~899.0	1.60~2.20	0.96~1.21	0.001~1.000

注: 表中云南滇池采用有机质含量, 其余地方均采用烧失量作为有机质含量。

天然含水率的范围为 30.1%~80.6%。但是, 由于取样的过程中草甸土中的水可能被挤出, 另外取样的季节也会影响土样的天然含水率, 因此实验室中的天然含水率可能并不能完全代表草甸土的实际含水率。

参照国内外泥炭、泥炭质土的研究成果^[19-26], 将泥炭、泥炭质土的重度与含水率汇总在图 1 中。从图 1 中可以看出: 泥炭、泥炭质土的含水率变化范围为 30%~1800%, 变化很大, 而新疆昭苏县草甸土的含

水率变化范围为 30.1%~80.6%, 处于泥炭质土的低限附近, 而重度则高于一般泥炭和泥炭质土的重度。

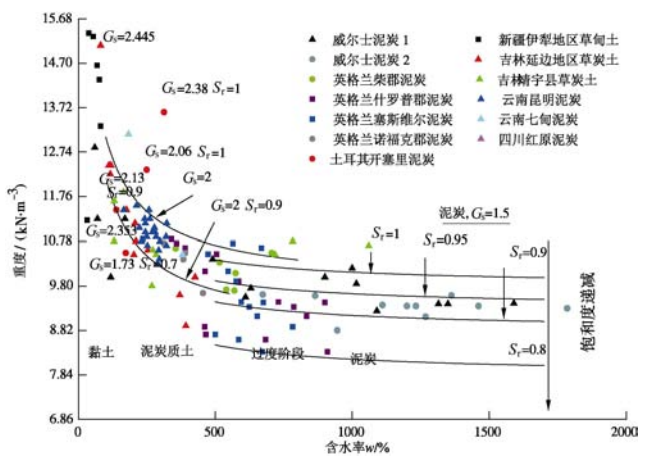


图 1 泥炭、泥炭质土的重度 - 含水率分布曲线
Fig. 1 Relationship between the bulk density and water content of peat and peaty soil

新疆昭苏县草甸土的液限范围为 59.8~97.4, 与国内其它地区的泥炭质土相比偏低; 新疆草甸土的比重为 2.35~2.54, 与一般土体的比重相比偏小, 但高于其它地区泥炭质土的比重的上限值。

新疆昭苏县草甸土的渗透系数为 $1.102 \times 10^{-4} \sim 1.283 \times 10^{-4}$ cm/s, 与粉砂、黄土的渗透系数^[27]的数量级相同。从表 2 中可以看出: 不同地区泥炭质土的渗透系数变化范围为 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ cm/s, 差别很大, 而昭苏县草甸土的渗透系数接近于泥炭质土的高限。

4 草甸土的力学特性

4.1 草甸土的抗剪强度特性

本次共计做了 3 组直剪试验, 每组 5 个土样, 施加的垂直压力分为 5 个等级, 即 50, 100, 200, 300, 400 kPa。首先在原状土中切取高约 10 cm 的长方体土样, 然后再用环刀取土样, 取土样时在距离土样顶面(草皮) 1 cm 以下的深度处。值得注意的地方是, 本次直剪试验所取土样如下: K0+600 断面纵向土样(顺着草由上向下的方向切取土样, 以下纵向土样与此相同); K0+600 断面横向土样(垂直于草根方向切取的试样, 以下横向土样与此相同); K4+000 断面纵向土样。

K0+600 断面草甸土纵向土样、横向土样, K4+000 断面纵向土样不同荷载等级下的剪切变形与剪应力关系曲线如图 2~4 所示。

从图 2~4 中可以看出, 3 组直剪试验的剪应力与剪切位移曲线上均不出现明显的峰值点(K0+600 断面 400 kPa 压力除外), 根据现行《公路土工试验规程》中的相关规定, 取最大位移值为 6 mm 时的剪应力为破坏值, 得到 3 组直剪试验的抗剪强度指标见表 3。

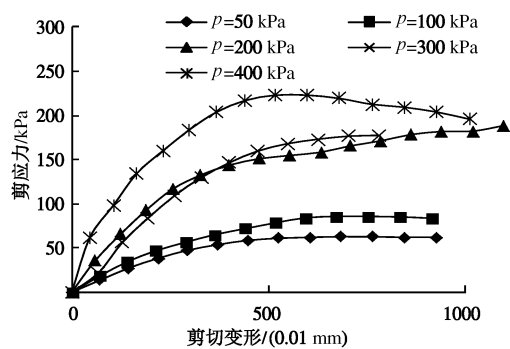


图 2 K0+600 断面草甸土纵向土样的剪切变形与剪应力关系曲线

Fig. 2 Relationship between shear deformation and shear stress of longitudinal sample at K0+600

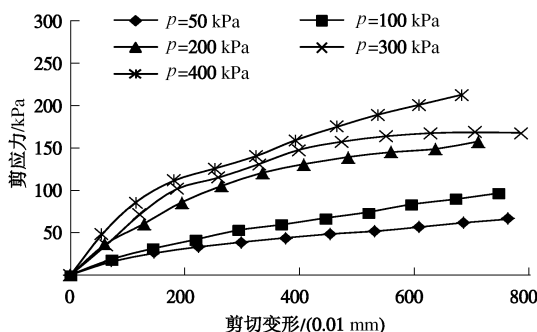


图 3 K0+600 断面草甸土横向土样的剪切变形与剪应力关系曲线

Fig. 3 Relationship between shear deformation and shear stress of transverse sample at K0+600

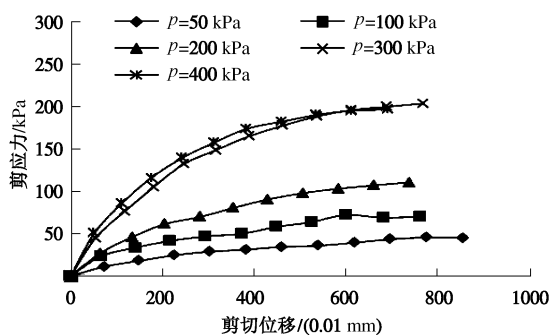


图 4 K4+000 断面纵向土样的剪切变形与剪应力关系曲线

Fig. 4 Relationship between shear deformation and shear stress of longitudinal sample at K4+000

从表 3 中可以看出:昭苏县典型草甸土的黏聚力、内摩擦角值均较大。经过查阅地勘资料可知,本次试验土样所在区域内的地表土层(即 K4+000 断面附近无草根的土样)为低液限粉土,其液限范围为 26.2%~28.6%,塑限为 17.8%~18.7%,比重为 2.70~2.72。此外,草甸土纵向土样与横向土样的黏聚力与内摩擦角基本相同,说明草甸土中的根系纵横交错形成了三维网状结构,从而使其表现出了各向相等的抗剪强度。

草甸土宏观上所表现出来的这种抗剪强度特性与 Mesri 对泥炭进行电镜扫描所得的微观结构的结果吻合较好,即泥炭中的植物根系在纵向与横向上均形成了蜂窝结构^[21]。

表 3 直剪试验结果汇总表

Table 3 Results of direct shear strength tests		
土样方向	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
K0+600 断面纵向土样	43.72	27.2
K0+600 断面横向土样	44.82	24.6
K4+000 断面纵向土样	20.49	28.8

比较典型草甸土与当地一般土体的抗剪强度结果可以看出:两者的内摩擦角基本相同,但草甸土的黏聚力远大于一般土体的黏聚力。由此说明草甸土中分布的草根可以提高土体的黏聚力,这与植被护坡、边坡绿色防护工程发展的过程中,对于草本植物根系对土壤的加筋作用方面的研究结果一致,即在草本植物根系盘结范围内,土体可看作由土和根系组成的根—土复合材料,草本植物的根系如同纤维的作用,因此可按加筋土原理分析边坡土体的应力状态,即把土中草根的分布视为加筋纤维的分布,且为三维加筋。这种加筋为土层提供了附加“黏聚力” ΔC ,另一方面又因限制了土体的侧向膨胀而使 σ_3 增大到 σ'_3 ,在 σ_1 不变的情况下使最大剪应力减小,这两种作用使边坡土体的承载能力提高^[28-31]。

从相关文献[17, 18, 22, 26]可知:中国云南泥炭、泥炭质土的黏聚力范围为 6.3~21.88 kPa,内摩擦角范围为 2.5°~22.3°,吉林草炭、泥炭、泥炭质土的黏聚力范围为 3~51 kPa,内摩擦角范围为 5°~25°。由此可知:新疆昭苏县草甸土的黏聚力值高于云南泥炭、泥炭质土的相应值,接近于吉林草炭、泥炭的高限值;内摩擦角则略高于云南、吉林相应参数的高限。

4.2 无侧限抗压强度

本次试验取样过程中首先在原状土中切取一高约 10 cm 的长方体土样,然后再用削土刀将土样削成高度 10 cm,直径 5 cm 的圆柱体试样,本次取样保留上部草皮。

图 5 为 K0+600 断面草甸土无侧限抗压强度试验过程中不同时期的试样变形情况,图 5(a)所示为试验的初始阶段,土样变形不大,图 5(b)所示为试验结束阶段,土样发生了严重的塑性变形。

K0+600 断面草甸层土样的无侧限抗压强度试验的应力应变关系曲线如图 6 所示。

从图 6 中可以看出:在无侧限抗压强度试验的初始阶段,K0+600 断面草甸土的应力—应变关系曲线的斜率较大且基本呈线性关系,当轴向应力继续增大时,曲线斜率变缓。在本次试验过程中,K0+600 断面的两个试样始终没有发生剪切破坏,只是在纵向被

压缩, 而且加压头贯入土样的贯入量很小, 试件中部横向鼓胀变形很大, 过程中有水排出。K0+600 断面的两个草甸土试样的轴向压缩率分别为 54.6%和 65.1%。轴向压缩率=(土样初始高度-试验结束时土样高度)/土样初始高度。

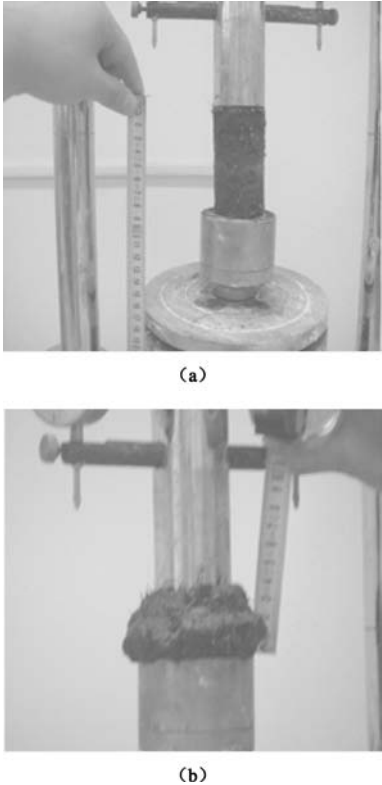


图 5 K0+600 断面试样变形情况
Fig. 5 Deformation of sample at K0+600

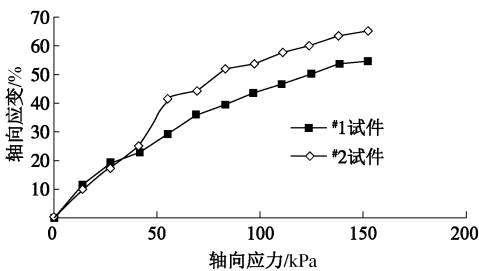


图 6 K0+600 断面草甸土无侧限抗压强度试验应力 - 应变关系曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of unconfined compressive strength of sample at K0+600

按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的相关规定, 对于 K0+600 断面的试件, 由于没有出现剪切破坏面, 应力应变曲线上没有出现明显的峰值应力, 取应变为 15%处的应力作为无侧限抗压强度, 则 K0+600 断面草甸土的无侧限抗压强度为 20.85 kPa。本次无侧限抗压强度试验, K0+600 断面试样破坏情况如图 7 所示。图 8 为吕岩^[14]对吉林草炭土进行三轴

试验后的破坏情况。



图 7 K0+600 断面试样无侧限抗压强度试验后
Fig. 7 Sample at K0+600 after unconfined compressive strength tests



图 8 吉林草炭土的破坏模式
Fig. 8 Failure mode of turf soil in Jilin Province

从图 7, 8 中可以看出: 新疆昭苏县草甸土的破坏模式与吉林草炭土的破坏模式不同, 昭苏县草甸土未发生剪切破坏, 而吉林草炭土的破坏模式与一般黏土的破坏模式相同, 即仍然以剪切破坏为主。

5 草甸土的压缩特性

为了充分考虑新疆地区的气候因素及水文地质变化条件, 本次固结试验对 K0+600 断面的土样进行了饱水条件下的压缩试验和原状样的压缩试验。其中进行饱水压缩试验的土样需要在固结仪中饱水 24 h 后才能开始进行单向固结试验。

本次压缩试验取样过程中, 首先在原状土中切取一高约 10 cm 的长方体土样, 然后再用环刀在距上方草皮 1 cm 以下, 以及距离底部 1 cm 以上的部位取土样, 其中 K0+600 断面草甸土做两个饱水土样和两个原状样的单轴固结试验。

为了了解草甸土的固结特性, 本次单向固结试验重点关注的固结特性参数包括压缩模量 E_s , 压缩系数

a, 固结系数 C_v , 主固结比 r 。

5.1 压缩模量与压缩系数

K0+600 断面草甸土样各级荷载下的压缩模量、压缩系数随固结压力的变化曲线见图 9, 10。

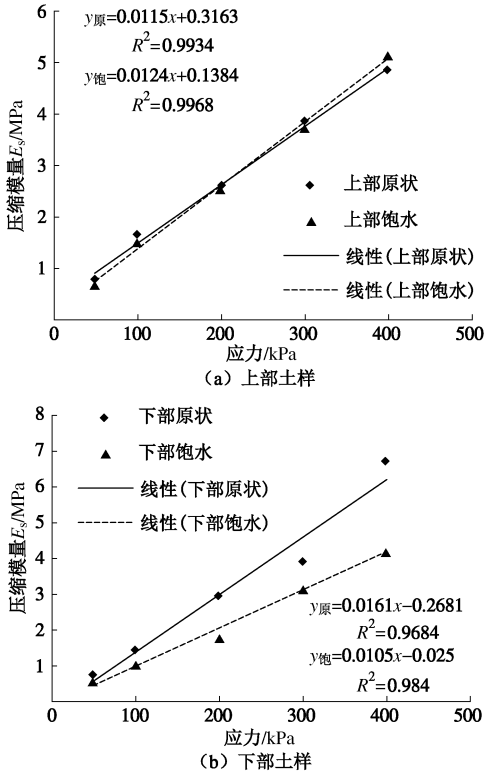


图 9 K0+600 断面草甸土的压缩模量与固结压力曲线
Fig. 9 Relationship between compressive modulus and consolidation stress of meadow soil at K0+600

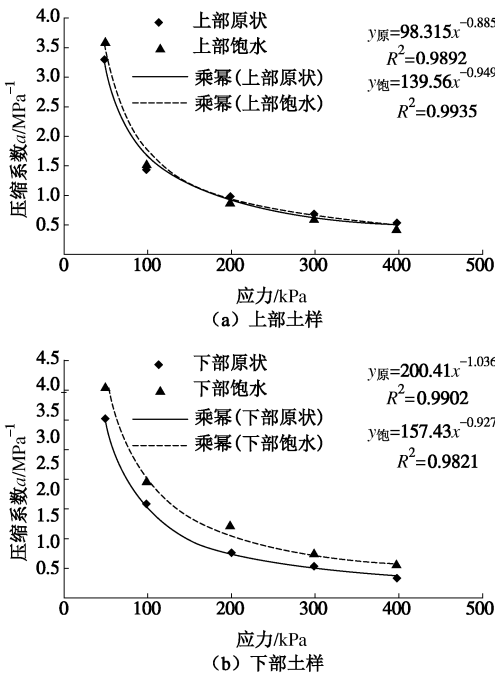


图 10 K0+600 草甸土的压缩系数与固结压力曲线
Fig. 10 Relationship between compressive coefficient and consolidation stress of meadow soil at K0+600

从图 9, 10 中可以看出:

草甸土的压缩模量随着固结压力的增大线性增长, 压缩模量的范围为 0.6~6.7 MPa。上部原状样在固结压力为 300~400 kPa 时的压缩模量为 0~50 kPa 时的 6.6 倍。由此说明, 在估算草甸土类地基的压缩量时, 应注意根据实际的压力变化范围确定压缩模量。

草甸土的压缩系数随着固结压力的增长呈幂函数形式衰减, 草甸土的压缩系数的变化范围为 0.4~4 MPa⁻¹。

水对上部土样的压缩模量、压缩系数基本无影响。

参照黏性土压缩性按压缩系数和室内压缩模量的分类标准^[27]可知: 新疆昭苏县草甸土属于高压缩性土。这与 Xiao 等^[32]对加利福尼亚堤坝上受到冲刷的泥炭质土具有高压缩性的研究结论一致。

5.2 固结系数

固结系数的测试方法有时间平方根法和时间对数法两种。Sing 等指出, 泥炭及泥炭质土的固结系数更适合用时间平方根法来计算^[33-34]。因此本文在研究过程中采用了时间平方根法推求草甸土的固结系数。草甸土在 100 kPa 压力时典型的时间平方根曲线见图 11。

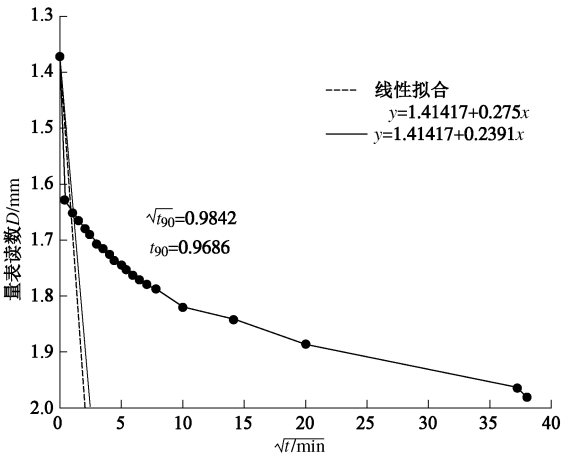


图 11 草甸土的变形 - 时间曲线 (时间平方根法, 固结压力 100 kPa)

Fig. 11 Relationship between deformation and time of meadow soil (square root of time method, consolidation stress is 100 kPa)

从图 11 中可以看出: 草甸土的主固结变形是在加荷后很短的时间内完成的, 但后续的次固结沉降仍然很大。

本次单向固结试验土样在各级压力下固结度达到 90%的时间见表 4。从表 4 中可以看出: 4 组土样在不同压力下固结度达到 90%所需的时间范围为 56~108 s。这与 Wong 等对泥炭质土的研究结果一致, 即在交通荷载作用下, 6 min 的火车荷载只有 60~80 s 会引起泥炭质土的孔压的变化^[35], 由此说明草甸土的主固

结变形在很短的时间内即可完成。

表 4 草甸土的固结参数

Table 4 Consolidation paramaters of meadow soil				
位置	固结压力/kPa	t_{90} /s	C_v /($10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	r
上部原状样	50	56	14.07	0.81
	100	58	12.24	0.50
	200	57	11.52	0.50
	300	61	10.04	0.33
	400	90	6.40	0.26
上部饱水样	50	58	13.66	0.84
	100	64	11.01	0.52
	200	59	10.97	0.46
	300	73	8.19	0.29
	400	63	9.04	0.20
下部原状样	50	58	13.38	0.81
	100	57	11.97	0.55
	200	56	10.73	0.58
	300	67	8.07	0.28
	400	74	6.85	0.20
下部饱水样	50	57	13.78	0.82
	100	67	10.63	0.46
	200	70	9.29	0.41
	300	108	—	0.32
	400	81	7.12	0.24

采用时间平方根法求得的草甸土样的主固结系数见表 4，主固结系数随压力的变化见图 12。

从表 4、图 12 中可以看出：草甸土的主固结系数的范围为 $6.40\times 10^{-3}\sim 14.07\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ ，其值随着固结压力的增大而线性减小。吕岩试验所得吉林草炭土的主固结系数范围为 $98.3\times 10^{-3}\sim 245\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ ^[14]，由此可知，吉林草炭土的主固结系数是新疆昭苏县草甸土的主固结系数的 15~17 倍。Ulusay 试验所得土耳其泥炭质土的固结系数范围为 $0.166\times 10^{-3}\sim 2.25\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ ^[24]，即新疆昭苏县草甸土的主固结系数是土耳其泥炭质土的主固结系数的 6~38 倍。

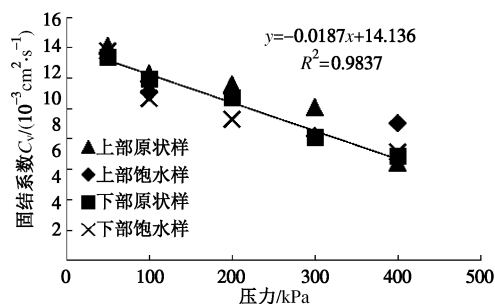


图 12 草甸土的主固结系数 - 压力曲线

Fig. 12 Relationship between primary consolidation coefficient and stress of meadow soil

土体随超静孔隙水压力消散而发生的主固结压缩量与总压缩量之比称为主固结比 r 。计算草甸土在每一级荷载下固结度为 100%时的压缩量与该级荷载下总压缩量的比值可得草甸土的主固结比 r ，计算结果

见表 4，主固结比随压力的变化见图 13。

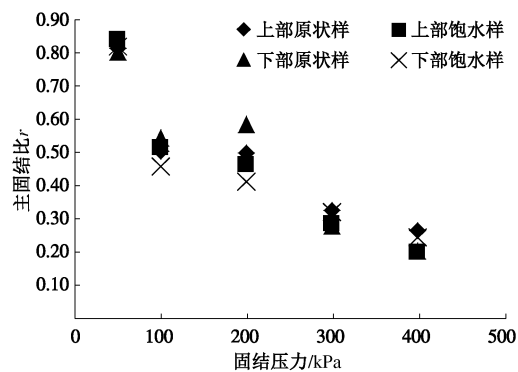


图 13 草甸土的主固结比 r - 固结压力曲线

Fig. 13 Relationship between the primary consolidation ratio and stress of meadow soil

从表 4、图 13 中可以看出：草甸土的主固结比随着荷载等级的提高而减小。草甸土在荷载等级较低(荷载为 50 kPa)时，其主固结压缩量约为总压缩量的 0.8 倍，主固结比 r 较大；当荷载等级较高（固结压力超过 100 kPa）时，草甸土的主固结比的范围为 0.2~0.58，说明此时草甸土的次固结变形量占比较大。这与 Mesri 等对泥炭质土的研究结论一致，即次固结是引起泥炭质土沉降的主要原因^[21]。因此，在计算草甸土地基的沉降量时，次固结引起的沉降量不容忽视。

6 结 论

本文通过对新疆昭苏县吐坡公路草甸土的物理力学指标进行室内试验，总结出草甸土的主要工程性质如下：

- (1) 从工程应用角度按照有机质含量分类，草甸土属于泥炭质土，其比重与一般土体的比重相比偏小，具有很好的渗透性。
- (2) 草甸土纵向土样与横向土样的黏聚力与内摩擦角基本相同，草甸土中分布的草根可以提高土体的黏聚力，但对内摩擦角的影响不明显。
- (3) 无侧限抗压强度试验过程中草甸土未发生一般土体的剪切破坏，而是产生了很大的压缩变形量，其轴向压缩率高达 55%~65%。
- (4) 草甸土受荷载后主固结沉降完成很快，其主固结系数随着固结压力的增大线性减小。
- (5) 当荷载等级较高（固结压力超过 100 kPa）时，草甸土的主固结比的范围为 0.2~0.58，说明此时草甸土的次固结变形量不容忽视，地基沉降计算中应予以考虑。

参考文献：

[1] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版

- 社, 1998. (National Soil Survey Office. Chinese soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. (in Chinese))
- [2] 范昊明, 李贵圆, 周丽丽, 等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(1): 114 - 117. (FAN Hao-ming, LI Gui-yuan, ZHOU Li-li, et al. Effect of freeze-thaw on physical and mechanical properties of meadow soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(1): 114 - 117. (in Chinese))
- [3] 郑 蕾, 张忠学. 黑龙江省黑土、草甸土耕地土壤与荒地土壤水分入渗试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(11): 53 - 58. (ZHENG Lei, ZHANG Zhong-xue. Study on permeability of black soils and meadow soils in cultivated soils and wasteland soils in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(11): 53 - 58. (in Chinese))
- [4] 王长庭, 王启兰, 景增春, 等. 不同放牧梯度下高寒小嵩草草甸植被根系和土壤理化特征的变化[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 9 - 15. (WANG Chang-ting, WANG Qi-lan, JING Zeng-chun, et al. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristic changes in Kobresia pygmaea meadow under different grazing gradients[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(5): 9 - 15. (in Chinese))
- [5] 王海峰, 王晓巍, 宋永柱. 浅论草甸土的测试分析与改良[J]. 黑龙江水利科技, 1998, 3: 72 - 73. (WANG Hai-feng, WANG Xiao-wei, SONG Yong-zhu. Discussion on the test analysis and improvement of meadow soil[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 1998, 3: 72 - 73. (in Chinese))
- [6] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [7] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (JTG E40—2007 Code for highway geotechnical testing[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [8] JTJ064—98 公路工程地质勘察规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995. (JTJ064—98 Code for geologic investigation for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese))
- [9] JTJ017—96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997. (JTJ017—96 Code for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. Beijing: China Communications Press, 1997. (in Chinese))
- [10] TB10038—2012 铁路工程特殊岩土勘察规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012. (TB10038—2012 Code for special geotechnical investigation of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [11] 沈宇鹏, 冯瑞玲, 许国光. 吐坡公路沼泽草甸土路基筑路技术研究[J]. 路基工程, 2008(3): 83 - 85. (SHEN Yu-peng, FENG Rui-ling, XU Guo-guang. Research on roadbuilding technology for swamp meadow soil subgrade on Tu Po highway[J]. Subgrade Engineering, 2008(3): 83 - 85. (in Chinese))
- [12] 李宛霓. 草甸土地基上路基的稳定性与沉降变形研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 3 - 12. (LI Wan-ni. Research on settlement and deformation characteristics of the meadow soil foundation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [13] 赵朝发. 泥炭质土物理力学特性、本构模拟及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (ZHAO Zhao-fa. Characterization and constitutive modeling of peat and its engineering application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [14] 吕 岩. 吉林省东部地区沼泽草炭土的结构特性及模型研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012. (LÜ Yan. Study on the structural characteristics and model of marsh turfy soil in the east of Jilin Province[D]. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese))
- [15] 王方中. 人行桥沉降观测及下卧西湖泥炭质土性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (WANG Fang-zhong. Settlement observation of a pedestrian bridge and investigation of underlying west lake peat soil behavior[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [16] 王丹微, 王 清, 陈剑平. 滇池盆地泥炭土分布规律及工程地质特性研究[C]// 中国岩石力学与工程学会. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册). 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2006. (WANG Dan-wei, WANG Qing, CHEN Jian-ping. Research on the distribution regularity and the engineering geological property of peat soil in Dianchi Basin[C]// Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the Second Chinese Conference on Rock Mechanics & Engineering (Volume 2). Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, 2006. (in Chinese))
- [17] 熊恩来. 云南泥炭、泥炭质土的力学特性及本构模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005. (XIONG En-lai. Research on physical properties and relationship between strain and

- stress of peat & peaty soil in Yunnan[D]. Kunming: Kunming University, 2005. (in Chinese))
- [18] 孙晓娟. 滇池泥炭土工程地质特性试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006. (SUN Xiao-juan. Research on the geological properties of peat soil in Dianchi Lake[D]. Kunming: Kunming University of Science And Technology, 2006. (in Chinese))
- [19] ULUSAY R, TUNCAY E, HASANCEBI N. Geo-engineering properties and settlement of peaty soils at an industrial site (Turkey)[J]. *Geol Environ*, 2010, **69**: 397 - 410.
- [20] MESRI G, AJLOUNI M. Engineering properties of fibrous peats[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(7): 850 - 866.
- [21] MESRI G, STARK T, AJLOUNI M, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 1997, **123**(5): 411 - 421.
- [22] 黄俊. 南昆线七甸泥炭土的工程岩土学特征[J]. *路基工程*, 1999, **6**: 6 - 12. (HUANG Jun. Geotechnical engineering properties of peaty soil at Qidian area of Nanning-Kunming railway[J]. *Subgrade Engineering*, 1999, **6**: 6 - 12. (in Chinese))
- [23] 蒋忠信, 黄俊, 陈国芳, 等. 南昆线七甸泥炭土路基加固的沉降控制[J]. *铁道工程学报*, 1998(4): 83 - 93. (JIANG Zhong-xin, HUANG Jun, CHEN Guo-fang, et al. Subsidence control for reinforcing peat soil roadbed in the Qidian worksite of Nanning-Kunming railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1998(4): 83 - 93. (in Chinese))
- [24] 蒋忠信, 黄俊, 金宗斌. 南昆线七甸泥炭土路基沉降的观测与分析[J]. *路基工程*, 1999, **6**: 29 - 33. (JIANG Zhong-xin, HUANG Jun, JIN Zong-bin. Observation and analysis on the subgrade settlement of peat soil at Qidian area of Nanning-Kunming railway[J]. *Subgrade Engineering*, 1999, **6**: 29 - 33. (in Chinese))
- [25] 吕岩, 仝磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **4**: 655 - 660. (LÜ Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turf soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **4**: 655 - 660. (in Chinese))
- [26] 刘飞. 吉林敦化地区草炭土特性的时间效应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. (LIU Fei. Study on the time effect characteristics of turf soil in dunhua region of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese))
- [27] 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (Engineering geology manual[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [28] BIBALANI G H, GOLSHANI A A, NAJAFIAN K A. The traction effect of lateral roots of Gavan (*Astragalus raddei*) on soil reinforcement in Northwest Iran (rangelands of the Shanjan area of Shabestar)[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006, **86**(3): 493 - 499.
- [29] COMINO E, MARENGO P, ROLLI V. Root reinforcement effect of different grass species: a comparison between experimental and models results[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, **110**: 60 - 68.
- [30] 周锡九, 赵晓峰. 坡面植草防护的浅层加固作用[J]. *北方交通大学学报*, 1995, **19**: 143 - 146. (ZHOU Xi-jiu, ZHAO Xiao-feng. Reinforcement action of slope protection with herbage at shallow layer[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1995, **19**: 143 - 146. (in Chinese))
- [31] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (in Chinese))
- [32] XIAO M, GOMEZ J, ADAMS B, et al. Experimental study on subsurface erosion of peats[C]// *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design—Proceedings of the GeoFlorida 2010 Conference*. ASCE, 2010: 672 - 680.
- [33] SING W L, HASHIM R, ALI F H. Engineering behavior of stabilized peat soils[J]. *Eur J Sci Res*, 2008, **21**(4): 581 - 591.
- [34] SING W L, HASHIM R, ALI F H. Compression rates of untreated and stabilized peat soils[J]. *Elect J Geotech Eng*, 2008, **13**(G): 1 - 13.
- [35] WONG R, THOMSON P, CHOI E. In situ pore pressure responses of native peat and soil under train load: a case study[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2006, **132**(10): 1360 - 1369.