

控制基质吸力的非饱和粉质粘土固结试验研究

吴丽君¹, 蒋关鲁¹, 李安洪², 庞应刚²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 中铁二院集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 针对胶济客运专线非饱和原状粉质粘土, 在控制基质吸力条件下进行了 K_0 固结试验和常基质吸力固结试验研究, 得到了不同含水量土体的侧压力系数, 并在此基础上进行常基质吸力固结试验, 通过分级施加围压和上覆应力对现场应力状态进行模拟, 得到原状粉质粘土的水土特征曲线, 进而探讨了非饱和粉质粘土的水土特性及体变规律。试验结果表明: 不同含水量的非饱和土体侧压力系数不同, 并且侧压力系数随含水量的增加而增加; 非饱和原状粉质粘土的进气值约 25kPa; 土体饱和度对固结时间的影响显著, 非饱和粉质粘土的固结速度随着饱和度的增加而减小。

关键词: 非饱和粉质粘土; 水土特征曲线; 基质吸力

中图分类号: P642.11⁺6; TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0066-05

由于基质吸力的存在, 使得非饱和土固结变形特性较饱和土要复杂的多。研究资料表明, 基质吸力对土体的压缩变形特性有着不可忽视的作用。由于地区环境的影响而引起的非饱和土区域饱和度的变化, 直接导致平均净应力和基质吸力发生改变^[1], 最终造成土体的固结特性发生改变。

胶济客运专线青州取直段长 12.94km, 线路位于青州以北冲积平原上, 广泛分布着粉质粘土、粉土、黄土质粉质粘土, 分布不连续, 差异较大, 对沉降控制不利。所在区域内地表水不发育, 地下水为第四系孔隙潜水, 埋深超过 20m, 水量较小, 且水位、水量受季节变化影响较大。因此, 本次试验在控制基质吸力和净围压的情况下, 研究路基逐级填筑过程中非饱和粉质粘土的压缩变形性状, 以获得准确可靠的设计参数, 进而预测其长期沉降变形规律, 为高速铁路的设计施工提供科学依据。

1 研究方法

1.1 试验设备和土样

试验土样取自胶济客运专线试验工点, 深度自 4~20m 不等, 取样标准采用《原状土取样技术标准》(JG89-92)。土样基本物理力学指标如表 1 所示, 依

据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002), 可将其划为粉质粘土。

表 1 试验土样物理力学特性

Table 1 Physic-mechanical property of soil samples

土样	深度 (m)	含水量 (%)	天然重度 (kN/m ³)	初始饱 和度 (%)	液限	塑限	塑性 指数
土样 1	8	11.1	18.9	50.4	25	16.4	8.6
土样 2	16	17.19	19.1	73.8	27.4	19.4	13.1
土样 3	20	24.4	18.8	85.7	34.1	19.9	14.2
土样 4	16	18.06	19.3	74.4	30.7	17.6	13.1
土样 5	20	22.12	18.8	78.2	37.9	22.1	15.8

试验采用 GDS 非饱和三轴试验仪, 由围压控制器、孔隙水压控制器、孔隙气压控制器、高进气值陶土板和霍尔效应传感器组成, 具体参数如表 2 所示。

表 2 GDS 非饱和土三轴测试系统主要技术参数

Table 2 Main technical parameter of GDS unsaturated triaxial apparatus

体积(气/水) 测量分辨率 (mm ³)	孔压(气/水) 测量分辨率 (kPa)	陶土板底 座进气值 (kPa)	霍尔效应 传感器 精度	霍尔效应 传感器量 程(mm)
1	0.2	500	满量程的 0.8%	±3

1.2 试验方案

本次试验分为 2 个部分: K_0 固结试验, 对不同含水量的非饱和粉质粘土分别进行测试; 等基质吸力固结试验, 将每个试样的基质吸力控制在常数下, 改变净围压, 按照相同固结比进行固结试验(表 3)。试验通过 K_0 固结试验测试土样的泊松比和侧压力系数, 试验在试验的基础上, 研究路基填筑过程中非饱和土粉质粘土的压缩变形特性, 试验将土样控制在

收稿日期: 2008-10-15; 修订日期: 2008-11-27

基金项目: 客运专线厚层中等压缩土沉降特性及地基处理技术研究

作者简介: 吴丽君(1981-), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学研究。

E-mail: grace_binyu3@163.com

常基质吸力下进行,并采取分级加载的方式模拟现场实际应力状态(图1)。

表3 非饱和粉质粘土试验方案

Table 3 Testing project of unsaturated silt clay

试样编号	围压 (kPa)	上覆应力 (kPa)	气压 (kPa)
土样 1	95	160	100
	125	210	
	155	260	
	185	310	
土样 2	175	315	50
	205	365	
	235	420	
	265	475	
土样 3	220	350	50
	260	405	
	290	455	
	320	505	

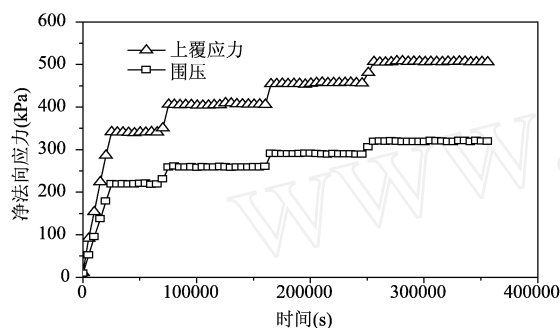


图1 典型粉质粘土应力路径

Fig. 1 Typical stress path of silt clay

1.3 试验方法

粉质粘土内部孔隙水和孔隙气的消散速率缓慢,试验过程中,为了控制非饱和土的基质吸力,加载速率相对饱和土试验也要慢得多,因此固结稳定的时间相对较长。

试验前将陶土板底座浸泡在无气水不少于48h,以便将空气从陶土板中排出。连接试验管路,彻底排除陶土板底座空腔和管路中的空气,然后利用反压饱和的方法使陶土板饱和。饱和过程中,陶土板表面始终覆盖一层保鲜膜,避免其失水干燥。试验完成后迅速将陶土板浸入无气水中以维持饱和状态,减少下次试验饱和时间。

试样由原状土切削而成,试验尺寸 $D \times H = 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。抹去陶土板上剩余的水,将试样安装在陶土板底座上。然后,将霍尔效应传感器固定在试样高度1/2处,调整磁臂高度确保测径器闭合成一条直线。检查霍尔效应传感器与土样是否粘结良好,以保证金

属环在试验过程中不会脱落。

由于非饱和土的孔隙水压力为负,为了避免出现气蚀现象影响试验精度,采用了轴平移技术。试验初始阶段,同步施加围压和孔隙气压,并且始终保持围压高于气压5kPa,避免将橡胶膜胀破,以此模拟试样的无压状态。试验中保持围压和孔隙气压不变直到试样的孔隙水压稳定,整个过程需要12~18h。

试验 利用霍尔效应传感器控制试样侧向变形为零,使系统自动调整轴向压力,从而测定土样不发生侧向变形情况下的侧压力系数,为了避免因侧向变形过大造成系统来不及调整,围压的加载速度控制在10kPa/h。试验 采取控制基质吸力的方法,分级施加围压和上覆应力进行非饱和粉质粘土固结试验。固结稳定标准:轴向变形量不超过0.01mm/h,排水量2h不超过0.05m³,每级荷载固结时间不少于24h。

2 试验结果及分析

2.1 初始基质吸力

由孔压和基质吸力时程曲线(图2)可看出,孔隙水压力随着孔隙气压增加而相应提高,在试验开始阶段孔隙水压的增长速度比孔隙气压慢,导致基质吸力一度呈现出增长的趋势。后一阶段随着孔隙水压力的逐渐增加,基质吸力达到峰值后开始减小,直至最终稳定,全过程历时18h。试验中对不同含水量粉质粘土的初始基质吸力进行了测试(表4)。

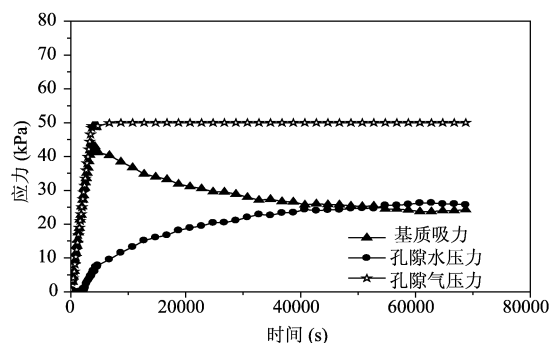


图2 典型基质吸力时程曲线

Fig. 2 Typical time-course of matrix suction test

由图3可以看出,曲线按照含水量由低到高的顺序可分为3段:BC段土体的含水量较低,此时土中孔隙气连通,水量的微小变化会引起基质吸力的剧烈增加。AB段基质吸力随含水量的减小变化幅度不大,该阶段是土体由气封闭向水封闭转化的过程,转化初期含水量变化幅度较小,土体处于双封闭状态,孔隙水和孔隙气都不连续;后一阶段转化幅度增大,土颗粒接触

点的水膜开始搭结并最终转化为水封闭结构。OA段土体含水量较高,土中孔隙充满水,土体颗粒接触点的水膜是连续的,基质吸力随含水量的变化显著。图中A、B两点分别对应土体的进气值和残余含水量,非饱和粉质粘土的进气值大约在25 kPa左右,含水量 $w = 23.6\%$;残余含水量大约11.87%。

表4 非饱和粉质粘土基质吸力试验数据

Table 4 Matric suction testing data of unsaturated silt clay

含水量 (%)	饱和度 (%)	基质吸力 (kPa)
11.1	50.4	77.58
15.02	68.6	55.8
17.19	73.8	49.2
18.06	74.4	45.87
21.51	78.8	41
21.77	82	25.9
22.7	85.2	40.3
24.4	85.7	23.9
24.5	86.2	15.9

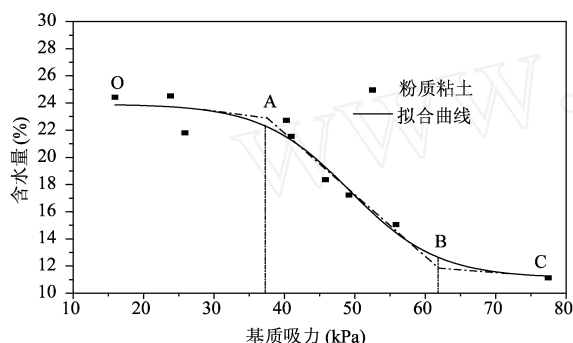


图3 非饱和粉质粘土水土特征曲线

Fig. 3 Soil-water characters curve of unsaturated silt clay

根据图3把气相形态与水土特征曲线对应起来,将非饱和粉质粘土按照气相形态分为3种类型:气相完全连通(饱和度 $S_r < 55\%$);气相内部连通(饱和度 $S_r = 55\% \sim 85\%$);气相完全封闭(饱和度 $S_r > 85\%$ 左右)。包承钢^[2]等提出水土特征曲线的进气值与气相完全封闭和气相内部连通的分界点对应,残余含水量与气相内部连通和气相完全连通的分界点对应。由此可以得出非饱和粉质粘土水土特征曲线的变化规律:当含水量高于23.6% ($S_r = 82.8\%$)时,土体对应于气相完全封闭;当含水量低于11.87% ($S_r = 52.9\%$)时,土体中气体已经完全连通。含水量介于两者之间时,水气转换幅度大,性质变化剧烈。

2.2 侧压力系数

图4为土样侧向变形为零时轴向应力随围压的变化,从图中可以看出,由于初始围压的存在,造成轴向

应力在很短的时间内变化较快。但是随着围压的逐渐增大,轴向应力和围压呈现出线性增长趋势。从图5可以看出,侧压力系数随着围压的增加逐渐稳定,稳定值即为侧压力系数。表5列举了不同含水量的土样测试结果,含水量22.12%和含水量18.06%的土体侧压力系数分别为0.61和0.52,泊松比分别为0.37和0.34。显然,含水量高的土体比含水量低的土体侧压力系数要大。

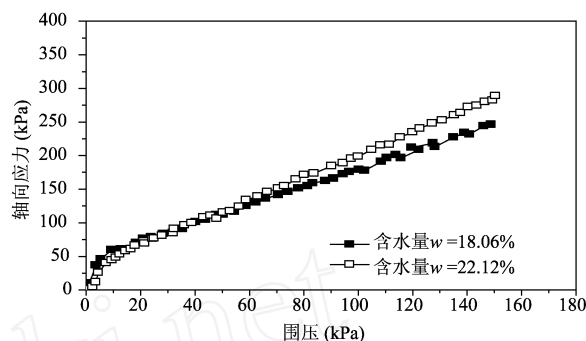


图4 轴向应力随围压变化

Fig. 4 Variety of axial stress with confining pressure

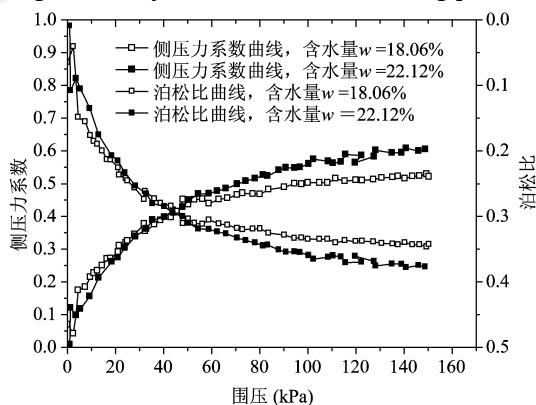


图5 侧压力系数和泊松比随围压变化

Fig. 5 Varieties of lateral coefficients and Poisson with confining pressure

表5 K_0 固结试验数据

Table 5 Parameters of K_0 consolidation testing

土样	含水量 (%)	围压 (kPa)	轴向应力 (kPa)	侧压力系数	泊松比
土样4	18.06	148.8	245.9	0.61	0.37
土样5	22.12	150.4	288.78	0.52	0.34

2.3 非饱和土体变形规律

图6和图7分别为每级荷载作用下轴向应变-时间变化曲线和固结过程排水量曲线,从图中可以看出,浅层粉质粘土的变形小,每级荷载下排水稳定时间短。这是由于土体的最终变形量仅与土骨架的压缩模量有

关^[3],与固结时间无关,但是饱和度的高低决定了固结过程的快慢,随着饱和度的降低,土体排水量减小,固结速度加快。总体而言,饱和土体的固结速度较非饱和土体快^[4]。

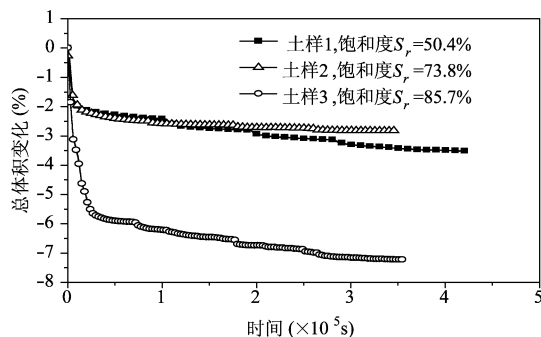


图6 粉质粘土轴向应变与时间关系曲线

Fig. 6 Strain-stress curves of silt clays

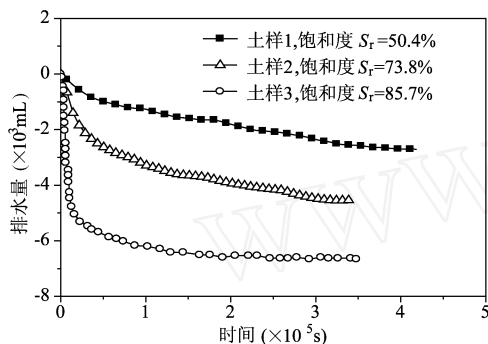


图7 固结过程排水量曲线

Fig. 7 Water discharge curves of consolidation process

图8是非饱和粉质粘土体积变化曲线,图中分别列出了气相、液相和土结构体积变化曲线。从图中可以看出,土样1排出的气相体积占总体积的61.4%,液相体积占38.6%,气相体积变化大于液相体积变化;土样2排出的液相体积占总体积变化的63.9%,气相体积占36.1%;土样3排出的液相体积到总体积的85.8%,气相体积占到总体积的14.1%,后两者液相体积变化明显比气相体积变化大。由固结过程中的水气运动规律可以看出,土体饱和度较低时,土中大孔隙基本与大气连通,当受到外荷载作用时,土结构变化以气体体积变化为主,由于孔隙气消散速度远远大于孔隙水的消散速度,导致土体固结时间相对较短;但是土体饱和度较高时,土体中形成封闭的气泡,只有少量孔隙气随水流移动,孔隙气不能在短时间内完全排出,此时体积变化主要是孔隙水引起的,土体固结所需时间相应延长。同时,试验中固结过程的快慢和饱和度并不

是呈现出单一的函数关系,加载速率、初始孔隙比、密度对土体的固结速度有明显影响,需要做进一步探讨建立固结时间与加载速率、初始孔隙比、密度的函数关系,更好地满足工程实际的需要。

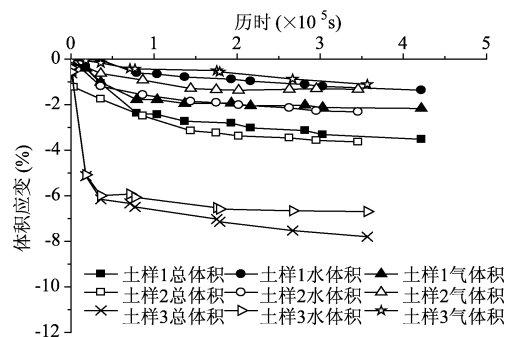


图8 非饱和粉质粘土体积变化

Fig. 8 Volume change of unsaturated silt clay

3 结论

(1)通过本次试验得到了非饱和粉质粘土水土特征曲线,当含水量高于23.6%(饱和度 $S_r = 82.8\%$)时,土体对应于气相完全封闭,土体的进气值约25kPa;当含水量低于11.87%(饱和度 $S_r = 52.9\%$)时,土体中气体已经完全连通。

(2)土体的侧压系数为0.52~0.61,泊松比分别为0.37和0.34。

(3)非饱和粉质粘土的固结速度随着饱和度的增加而减小。变形过程中,高饱和土体变形以液相变形为主,占到土结构变形的85.8%;低饱和土体变形以气相变形为主,占到土结构变形的61.4%。

参考文献:

- [1] Sun D A, Matsuoka H, Xu Y F. Collapse Behavior of Compacted Clays in Suction-Controlled Triaxial Testing [J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(4): 1-9.
- [2] 包承纲. 非饱和压实土的气相形态及孔隙压力消散问题[C]//第三届全国土力学和基础工程会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.
- [3] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 高饱和土体的压缩和固结特性及其应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 264-269.
- [4] 吴丽君, 蒋关鲁, 李安洪, 等. 胶济客运专线非饱和原状粉质粘土固结试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(5): 100-104.

Experiment research on consolidation tests of unsaturated silty clay under controlled matric suction

WU Li-jun¹, JIANG Guan-lu¹, LI An-hong², PANG Ying-gang²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China)

Abstract: K_0 -consolidation tests and consolidation tests under constant matric suction were performed on unsaturated undisturbed silty clay along Jiaozhou-Jinan railway line. K_0 -consolidation tests were carried out to get lateral coefficients of soil pressure in different water contents. Then consolidation tests under constant matric suction were performed through simulating graded confining pressures and overburden loading, and getting soil-water characters curve. We discussed on the soil-water characters and volume transformation rules of unsaturated silty clay. The main conclusions were obtained as follows: lateral coefficients of unsaturated silty clay are fluctuated from 0.51 to 0.61, and varie with water contents; the air entry value of unsaturated undisturbed silty clay is about 25kPa; saturation degree influences consolidation time strongly, and the higher saturation degree the longer consolidation time of unsaturated silty clay.

Key words: unsaturated silty clay; soil-water characters curve; matric suction

责任编辑:张明霞

(上接第 56 页)

Conception, classification and significations of soil-rock mixture

XU Wen-jie¹, HU Rui-lin²

(1. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: With the development of all kinds of large scale engineering projects, soil-rock mixture (S-RM) as a new geotechnical material was proposed. And the study on the physical and mechanical properties of S-RM is the research project that the rock & soil mechanics and engineering geologist together faces now. As the study of S-RM is still at primary stage, S-RM is not separated from the traditional classification system of geotechnical materials, and there is no systematic discuss on the conception and classification of S-RM. Based on the present classification system of geotechnical materials and the former research achievements, the paper discusses on the conception and the key problems of S-RM in detail, and points that S-RM is a kind of extreme inhomogeneous geotechnical materials which is formed in Quaternary period and composed of large rock block, fine grained soil, pores and with certain percentage of rock block. The maximum observable dimension (MOD), soil/rock threshold (S/RT), strength comparison between soil and rock and percentage of rock block are the four key factors in the conception of S-RM.

Key words: soil-rock mixture (S-RM); conception; maximum observable dimension (MOD); soil/rock threshold (S/RT); percentage of rock; classification system

责任编辑:张明霞