

珞珈山粘土压缩性的试验研究*

胡海英^{1,2} 王 钊²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要:对武汉大学珞珈山粘土完成了 15 组不同含水量和压实度的室内压缩试验, 分析了压实度、压实含水量及压实土体的饱和状态三因素对粘性填土压缩性能的影响, 并通过压实土体结构方面的理论对其影响机理进行了阐释: 这三方面因素主要是通过对土体结构及土中的基质吸力产生影响从而影响到土体的压缩变形性。试验表明, 压实度和压实含水量均是在一定的应力范围内对粘性填土的压缩变形性能产生影响, 在最优含水量附近粘性填土的压缩变形随着压实度的减小、压实含水量的增大而增大; 压实土体浸水饱和后的压缩变形远大于饱和前的变形, 压实含水量大的土体在其它条件相同的条件下因饱和引起的压缩变形小于压实含水量小的土体。

关键词:粘性填土; 压缩变形; 压实度; 压实含水量; 饱和状态; 土体结构

中图分类号: TU411.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)05-0066-05

Experimental Study on the Compressive Property of Luojiashan Clay

HU Hai-ying, WANG Zhao

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072, China)

Abstract: This paper carried out an experimental study on the compressive property of Luojiashan Clay at Wuhan University. In order to investigate the influence of compaction degree, compaction water content and saturation state of compacted soil on the compressive property of clayey fill, compression tests were done on the samples compacted to different water content around optimum moisture content by different degrees of compaction. The theory of compacted soil structure was used to explain mechanism of the influence, and it was the change of soil structure that caused the variation of compressive property. The results of the tests show that it was at a given range of stress that degree of compaction and compaction water content have influence on the compressive property of clayey fill. Around optimum moisture content with degree of compaction decreasing or compaction water content increasing, the compressive deformation of clayey fill increased. When compacted fill was saturated by water soaking, the compressive deformation increased much, and the clayey fill compacted at greater water content than optimum moisture content showed smaller compressive deformation caused by saturation at other conditions the same.

Keywords: clayey fill; compressive deformation; degree of compaction; compaction water content; saturation state; soil structure

随着粘性土越来越广泛的用于填筑路基、堤坝等土工构筑物, 对其力学性质的研究工作也在不断地深入。变形与强度特性是填土的两个重要力学性质, 它们直接影响到填筑体的工程性能, 如路基、堤坝的沉降与稳定问题。相对于砂类填土而言, 粘性填土的变形

与强度特性更容易受内部与外界多种因素的影响而发生变化, 因而一直是研究的重点内容^{[1]~[6]}。在已有的研究中, 特种土所做的研究较多, 一般粘性土的力学性能也需更多的试验研究和深入分析。以珞珈山粘土为研究对象, 对其压缩变形特性进行试验研究, 有关强度

* 收稿日期: 2007-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50279036)

作者简介: 胡海英(1976—), 女, 博士研究生, 主要从事公路工程质量、非饱和土特性方面的学习和研究。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

特性的研究将在其后的文章中阐述。

1 粘性填土的变形性影响因素

粘性填土在一定含水量下压实后一般为非饱和土,其变形性能受多种内外因素的影响,包括土体本身颗粒组份及组构的影响、压实施工条件与施工参数如压实能、压实度、含水量等的影响以及压实后周围水条件变化引起土体饱和度变化所产生的影响。相对砂性土而言,粘性填土因其组份中矿物成分的性质致使变形性能对含水量的变化非常敏感。本文即重点研究“水”对非饱和粘性填土压缩变形性能的影响规律。

2 结构对非饱和粘性填土压缩变形性能的影响

粘性填土在不同的初始含水量下压实将产生不同的结构形式,结构形式不同,土的变形性会有显著的差异。在低于最优含水量的条件下压实的粘性填土形成的结构是絮凝式的,颗粒间的排列呈“桁架式”,颗粒与颗粒之间为强联结;随着压实含水量的增大,粘性填土压实后土颗粒的定向性增强,结构向分散式发展,一般

在相同能量作用下,压实含水量越大,结构分散性越强。密实程度相同的两种结构形式,在较低的压力作用下,絮凝式的结构压缩变形较小;达到某一极限压力后,颗粒间的强联结破裂,“桁架式”的排列遭到破坏,此时表现出高于分散式结构的压缩性;在高应力作用下,初始絮凝式结构的土体也逐渐趋于分散式的结构,因此表现出与初始即为分散式结构的土体基本相同的压缩性^[6]。

3 试验研究

本次试验的主要内容包括以下三个方面:(1)土的基本物理性质试验;(2)非饱和土压缩试验;(3)饱和土的压缩试验。

3.1 试验用土的物理指标

本研究所用试验土样取自武汉大学珞珈山一填方土坡。试验土样全部采用重塑土样,重塑土样的基本物理性质指标见表 1。

表 1 试验用土物理性质指标

土样类型	土粒相对 密度 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	重型击实试验		粘粒含量 ($<0.005\text{ mm}$) $\%$
					最大干密度	最优含水量	
					$\rho_{dmax}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$W_{opt}/\%$	
重塑土样	2.73	47.3	20.6	26.7	1.84	15.3	44

3.2 压缩试验

(1) 土样制备

取试验用土约 15 kg 风干后,分成 3 组,分别加入适量的水调制成最优含水量($w=15.3\%$),最优含水量干侧($w=13.3\%$)和湿侧($w=17.3\%$)的土样,封闭 24 h 使土中水分充分均衡,制成不同压实度(90%, 93%, 95%)的土样,其中压实度为 90% 和 93% 的土样制备成两份,一份直接备用于非饱和土压缩试验,另一份进行抽气浸水饱和 24 h 后,用于饱和土的压缩试验。

(2) 试验过程

试验时将已制备好的压缩试样装入杠杆式固结仪(型号为 YS-1),对于非饱和土试样,周围用与试样含水量相近的湿棉花围住,尽可能避免试样与外界进行气水交换;饱和土样在试验过程中使其始终浸在水中

以保证试样的饱和性。试样装好后逐级施加荷载,每级荷载下压缩 24 h 后变形趋于稳定(即每小时变形小于 0.005 mm)时再施加下一级荷载。

由此试验得到粘性压实土在不同压实含水量、压实度及饱和状态下的变形规律。

4 试验成果与分析

饱和土与非饱和土的压缩试验成果经计算后获得应力对应孔隙比的试验数据列于表 2 中。从表 2 可以看出,试验时因为采取了相应的保水措施,含水量在试验前后基本上变化不大(个别试样除外)。对于个别试样在加载初期出现孔隙比略为增大的现象,主要是由于试验初期围在试样周围的湿棉花含水量稍大致使水分浸入试样引起土样产生少许膨胀变形所致。

表 2 压缩试验的孔隙比

试样 编号	项目 类型	含水量 $w/\%$		压实度 %	荷载级别 P/kPa												
		试验前	试验后		0	12.5	25	50	100	200	400	800	1 600	2 000	3 200	4 000	
1	非饱和土 孔隙比		16.3	90	0.649	0.654	0.652	0.644	0.629	0.607	0.566	0.502	0.442	0.429	0.39	0.375	
2		17.3	16.0	93	0.595	0.593	0.589	0.576	0.567	0.557	0.542	0.517	0.443	0.428	0.386	0.370	
3			17.7	95	0.562	/	/	0.552	0.54	0.522	0.505	0.477	/	/	/	/	
4			15.1	90	0.649	0.646	0.645	0.641	0.636	0.628	0.614	0.595	0.536	0.502	0.432	0.410	
5		15.3	15.3	93	0.595	0.593	0.593	0.59	0.585	0.578	0.565	0.548	0.505	0.483	0.42	0.400	
6			15.2	95	0.562	0.561	0.561	0.559	0.553	0.545	0.533	0.517	0.485	0.467	0.411	/	
7			12.8	90	0.649	0.648	0.648	0.647	0.644	0.632	0.622	0.605	0.555	0.53	0.452	0.438	
8		13.3	15.9	93	0.595	0.594	0.593	0.593	0.59	0.586	0.58	0.568	0.541	0.526	0.46	0.456	
9			14.0	95	0.562	/	/	0.554	0.553	0.548	0.54	0.525	/	/	/	/	
10			21.2	90	0.649	/	/	0.599	0.583	0.553	0.51	0.46	/	/	/	/	
11		17.3	21.1	93	0.595	/	/	0.526	0.51	0.484	0.453	0.412	/	/	/	/	
12		饱和土	20.2	90	0.649	/	/	0.598	0.584	0.557	0.506	0.452	/	/	/	/	
13			15.3	20.0	93	0.595	/	/	0.548	0.532	0.506	0.468	0.418	/	/	/	/
14				21.0	90	0.649	/	/	0.595	0.58	0.549	0.498	0.445	/	/	/	/
15			13.3	21.2	93	0.595	/	/	0.540	0.525	0.501	0.465	0.412	/	/	/	/

将表 2 的试验数据绘制成图 1 与图 2。

从图 1 的 $e-p$ 曲线可以看出,压实度决定了压实土体初始孔隙比的大小。压实度相同时,三种不同初始含水量的压实土体具有相同的初始孔隙比,开始施加荷载后,虽然受力相同,但压实含水量越大的土体表现出越大的压缩变形性。随着受力增加,各压缩曲线先后达到各自曲线上的第一个“特征点”,从 $e-\log p$ 曲线图上看类似于原状土的先期固结压力。在该点处,曲线的斜率发生较明显的转折;该点后的曲线斜率大于该点前的。从图中可以看到该“特征点”对于不同压实含水量、不同压实度的曲线对应着不同的应力,表 3 归纳了各曲线上该“特征点”对应的应力值。可以看出,在压实度相同的前提下,该“特征点”对应的应力值随着压实含水量的增加而降低;若压实含水量相同,则随压实度的增加而增加,但增加的幅度是逐渐减小的,

例如含水量同为 15.3% 时,压实度从 90% 增加到 93%,“特征点”对应的应力值增加约 1 000 kPa,压实度继续增加到 95%,对应的应力值仅增加约 400 kPa。过了第一个“特征点”,应力进一步增加,此时压实含水量相同的土体,尽管初始孔隙比不同,但在受力相同的条件下表现出相同的压缩性,不同压实度的土体也具有相近的孔隙比;而不同压实含水量的土体在此应力范围内孔隙比相差还较大,这一受力阶段说明压实含水量对土体压缩变形总量的影响大于压实度的影响。随着应力继续增加,图 1 中的各条压缩曲线达到第二个“特征点”(图 1 中大约为应力 3 000 kPa),该点后,各曲线的压缩变形性均大大降低,相对于应力增加变形很小,且对于相同的应力增量,各曲线的变形增量基本相同,说明该点后土体的压缩变形已几乎不受压实度和压实含水量的影响。

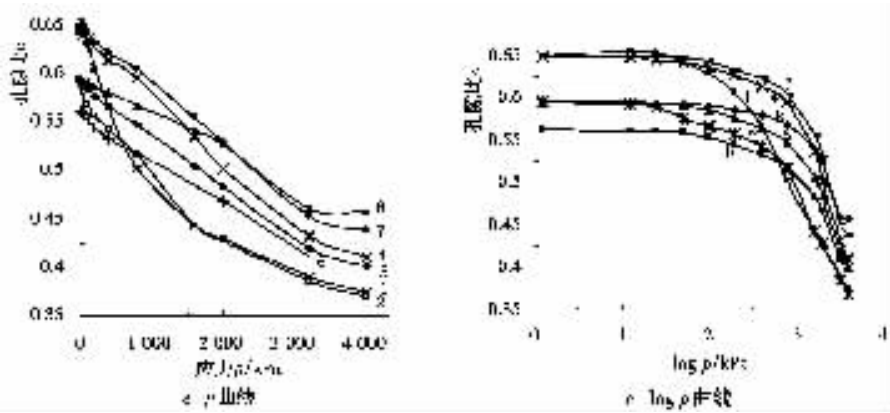


图 1 不同含水量、压实度下土的非饱和压缩曲线

表 3 各 $e-p$ 曲线上第一“特征点”对应的应力

项目	含水量 $w/\%$	压实度 $\%$		
		90	93	95
第一“特征点” 对应的应力值	13.3	约 1 000 kPa	约 2 000 kPa	/
	15.3	约 600 kPa	约 1 600 kPa	约 2 000 kPa
	17.3	约 100 kPa	约 1 000 kPa	/

压缩曲线所表现出的上述特征可以通过土体结构上的变化来解释。压实含水量为 13.3% 的土体形成的是絮凝式结构,15.3% 和 17.3% 含水量的土压实后形成的结构相对分散些,在小应力作用下,絮凝性强的结构压缩变形相对小一些。当外力增加到一定程度破坏了原有的结构形式,土体将开始表现较大的压缩性,即出现了前述的压缩曲线上的第一个“特征点”,但该点并不是先期固结压力所致,而是土体结构强度的一种反映,因此该点应力值受压实度和压实含水量的影响主要是土体的结构形式变化导致结构强度不同所致:压实含水量小,结构絮凝性强,土体的结构强度就高,如图 1 中的曲线 7(曲线 8)的压实含水量分别小于曲线 4(曲线 5)和曲线 1(曲线 2)的含水量,前者表现出的结构强度就大于后两者;此外,压实度大,单位体积内颗粒间的强联结多,土体的结构强度也高,如图 1 中曲线 2(曲线 5、曲线 8)的压实度大于曲线 1(曲线 4、

曲线 7)的压实度,其结构强度也是前者大于后者。应力继续增加,不同压实度的土体结构呈现相同的形式,也更趋于分散,而压实含水量的不同导致土体颗粒间距离与作用力不同,因而出现同含水量不同压实度的土体在相同应力下孔隙比相近、不同含水量的土体在相同应力下孔隙比不同的现象,正如表 2 中编号为 4、5、6 的三个试样,压实含水量相同但压实度不同,在应力超过 2 000 kPa 以后,三者的孔隙比已非常接近;而编号为 1、4、7 的三个试样,压实度相同但含水量不同,尽管在较大的应力(超过 2 000 kPa)作用下,三者的孔隙比始终保持相对较大的差值;对于表 2 中的其它试样,同样可以得出类似的结论。应力进一步增加,此时土体孔隙比已经很小,颗粒间的相互作用很强,外力不足以引起土体较大的压缩变形,图 1 中的各条 $e-p$ 曲线在很大的应力(约 3 000 kPa)以后,曲线几乎平行的现象就是这一结论的验证。

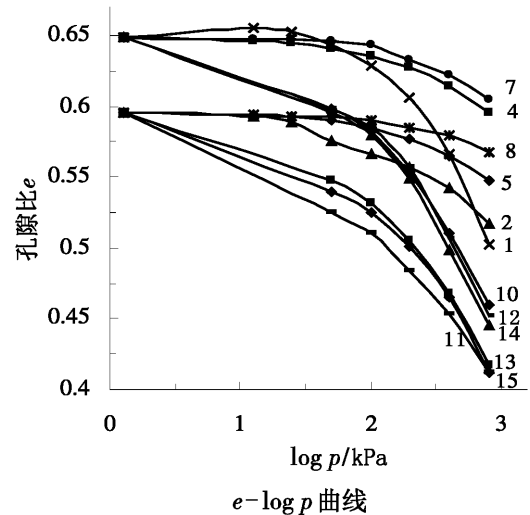
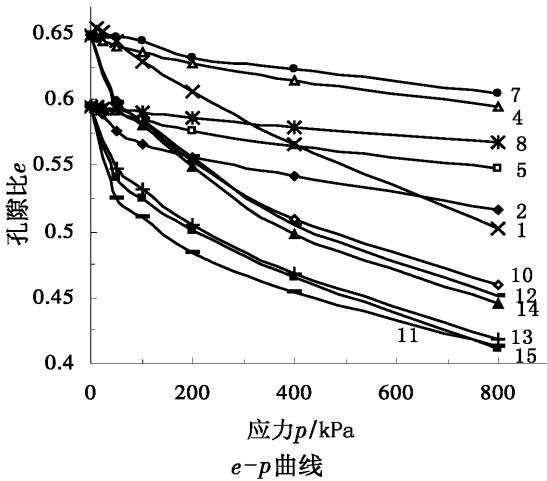


图 2 不同压实度和压实含水量下土体饱和前后的压缩曲线

图 2 绘制了不同压实度和压实含水量下土体饱和前后的压缩曲线。可以看出,不管压实度和压实含水量为何值,压实土体饱和后(曲线 10~15)的压缩性总是远大于饱和前的(曲线 1、2、4、5、7、8)。这是因为含水量的增加使土颗粒间的相互作用发生改变,土体中能够加强颗粒间吸附作用的基质吸力逐渐减小,在土

体达到饱和状态时基质吸力完全消失,这样在同样大小的外力作用下,饱和土的压缩变形要大于同样土体饱和前的变形。压实含水量不同的土体,在压实度和外力作用相同的条件下,由土体饱和引起的变形是不同的,一般压实含水量大的土体因饱和引起的变形相对要小些,这从图 2 中可以观察到:曲线 2、5、8 的压实

度同为 93%，压实含水量依次递减，浸水饱和后在相同应力作用下分别到达曲线 11、13、15，曲线 2 到曲线 11 的变形增加量相对最小，曲线 5 到曲线 13 的变形量次之，曲线 8 到曲线 15 的变形量相对最大；对于压实度同为 90% 的另一组曲线，也出现类似的情形。究其原因也是与土中基质吸力的变化有关：压实度相同时，压实含水量大的土体初始基质吸力相对较小，至土体饱和和基质吸力消失时，基质吸力的绝对减小值也小，这样在相同应力作用下的变形相对就小。压实度相同的土体，虽然初始含水量不同，但饱和后的压缩性是相似的，如图 2 中的曲线 10、12、14 及曲线 11、13、15。对于压实度不同的土体，图 2 的 $e-\log p$ 曲线显示：压实度小的土体饱和后（如曲线 10、12、14）与压实度较大的土体（曲线 11、13、15）相比，在相同的受力条件下，当应力增加到一定值（图 2 中约为 100 kPa），前者的压缩性开始表现出大于后者的特征，这可能是因为两者的初始结构形式不同所造成。

5 结论

本文的研究，对在最优含水量处（ $w=15.3\%$ ）、最优含水量干侧（ $w=13.3\%$ ）和湿侧（ $w=17.3\%$ ）压实到不同压实度（90%、93%、95%）的粘性填土，分别进行了非饱和状态与饱和状态下的压缩试验，并应用土体结构方面的理论，对所观察到的土体压缩变形中的现象与规律进行了阐释。

通过本文的试验研究，得出以下结论：

(1) 粘性填土的压缩变形性能受到压实度、压实含水量及压实土体饱和状态的影响。

(2) 压实度决定压实土体初始孔隙比的大小；在外力小于土体结构强度的条件下，粘性压实土的压缩变形随着压实度的增大而减小，当外力大于土体的结构强度时，压实度对粘性土体的压缩变形影响不大。

(3) 与压实度相比，压实含水量对粘性土体的压缩变形产生的影响较大。压实度同而压实含水量不同的土体，尽管初始孔隙比相同，在同等外力作用下所产生的压缩变形有很大差别，一般在最优含水量附近随着

压实含水量的增大土体的压缩变形也增加。压实含水量的这种影响只在土体的一定受力范围内起作用（如本试验中约为 3 000 kPa 以内），在极高的应力作用下，压实含水量对粘性土体的压缩变形基本上不产生影响。

(4) 粘性土体压实后饱和与否对土体压缩变形的大小也有明显的影响。一般来说，压实土体饱和后的压缩变形远大于饱和前的变形。在同样的外力作用下，初始孔隙比相同的压实土体，压实含水量大的土体因饱和和引起的变形要小于压实含水量小的土体。压实度相同的土体，不管初始含水量如何，浸水饱和后将具有相似的压缩性；压实度小的土体浸水饱和和在作用应力超过一定值（本试验土样约为 100 kPa）后将表现出压缩性大于压实度大的土体的特征。

(5) 压实度与压实含水量对粘性填土压缩变形性能的影响主要是通过对土体的结构产生影响而引起的。土体压实后是否浸水饱和和影响到压缩变形性是由于土体中的基质吸力减小或消失造成的。

参考文献：

- [1] COKCA E., EROL O AND ARMANGIL F. Effects of Compaction Moisture Content on the Shear Strength of an Unsaturated Clay[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004(22): 285-297
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红粘土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004(3): 369-373
- [3] 景宏君, 张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, (4): 14-18
- [4] 李道辅. 高速公路路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [5] LAMBE T. W. The Engineering Behavior of Compacted Clay [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1958(84), SM2: 1655
- [6] GULHATI S. K. Engineering Properties of Soil [M]. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1978

(编辑 王秀玲)