文章编号:1673-9469(2017)01-0048-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.011

延安新区压实 Q2 黄土增湿变形特性研究

李旭东¹,黄雪峰²

(1. 海军工程设计研究院,北京 100070; 2. 解放军后勤工程学院 军事土木工程系,重庆 401311)

摘要: 以延安新区黄土高填方工程建设为依托,开展了 16 组不同初始压实度和初始含水率条件下的压实 Q₂ 黄土高压力下的增湿变形试验,分析不同压实度和含水率条件下增湿变形系数随压力 增大的变化规律及影响增湿变形特性的主要因素。结果表明,不同初始压实度和初始含水率条件 下的曲线形态差异较大; 压实 Q₂ 黄土的增湿变形特性受压实度和含水率影响很大,提高压实度和 含水率可以显著减小其遇水饱和后的增湿变形量,将压实度提高至 90% 或将含水率增大至 16.8% 时,压实 Q₂ 黄土不再发生湿陷变形。

关键词: 黄土高填方; 压实 Q₂ 黄土; 增湿变形; 初始压实度; 初始含水率 中图分类号: TU44 **文献标识码:** A

Study of the moistening deformation characteristics of compacted Q_2 loess in Yan' an new district

LI Xudong¹, HUANG Xuefeng²

(1. Navy of Institute of Engineering Design & Research, Beijing 100070, China; 2. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract: Based on the high loess-filled project in Yan' an new district, a series of moistening deformation tests with different initial compaction degrees and initial water contents in high pressure are carried out for compacted Q_2 loess to study how the coefficient of moistening deformation change with the increasing of the vertical pressure, and the main factors influencing the moistening deformation characteristics. The results show that the- p curve greatly is different from different initial compaction degrees and initial moisture contents; Compaction degree and moisture content have a great influence on the moistening deformation characteristics of compacted Q_2 loess, the amount of moistening deformation saturated can decrease greatly by increasing them. Moreover, compacted Q_2 loess will lose collapsibility when its compaction degree is higher than 90% or moisture content is higher than 16.8%.

Key words: high loess-filled project; compacted Q_2 loess; moistening deformation; initial compaction degree; initial moisture content

湿陷性是原状黄土遇水表现出来的一种特殊力 学性质,前人已通过室内试验和现场浸水试验对原 状黄土的湿陷变形机理、变形特性等方面做了大量 的研究工作^[1-6],认为原状黄土的湿陷变形与其大孔 隙、欠压密的结构性密切相关。随着黄土高填方工 程的增多,压实黄土遇水后的变形日益受到关注, 原状黄土在风干、碾碎、配水并制成了压实黄土试样, 在破坏了原有结构后,其遇水后是否还发生湿陷变 形成为学者争论焦点。多数学者认为压实黄土不具 备原状黄土的特殊大空隙结构,不具有发生湿陷变 形的基本条件,但也有部分学者通过大量试验研究 发现压实黄土仍然具有湿陷性^[7-8],甚至还有学者认 为在相同干密度和含水率条件下,压实黄土的湿陷 性还要大于原状黄土^[9]。张苏明^[10]首次提出增湿变

收稿日期: 2016-11-06

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2012KTDZD03-04)

作者简介:李旭东 (1989-),男,湖南郴州人,硕士,助理工程师,从事非饱和土与特殊土地基处理研究。

			140	. I I II II I	iny sicai	param		Temore	Q_2	1033				
	初始含水率 /%	最优含水率 1%			最大干密度 /(g・cm ⁻³)				塑限 /%		液限 /%	1	相对密度	: -
	9.9~11.4	9.9~11.4 13.4		1.92				17.9		32.2		2.73		
表 2 增湿变形试验方案														
	Tab.2 The test scheme of moistening deformation													
	加载方案	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样	试样
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	第1级加载/kPa	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	第2级加载/kPa	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	第3级加载/kPa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
	第4级加载/kPa	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200			
	第5级加载/kPa	300	300	300	300	300	300	300	300	300				
	第6级加载/kPa	400	400	400	400	400	400	400	400					
	第7级加载/kPa	600	600	600	600	600	600	600						
	第8级加载/kPa	800	800	800	800	800	800							
	第9级加载/kPa	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200								
	第 10 级加载 /kPa	1 600	1 600	1 600	1 600									
	第 11 级加载 /kPa	2 000	2 000	2 000										
	最终荷载 /kPa	2 000	2 000	2 000	1 600	1 200	800	600	400	300	200	100	50	25
	加水增湿	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水	浸水

表 1 重塑 Q_2 黄土的物理性质参数 Tab.1 The physical parameters of remolded Q_2 loss

形的概念,认为湿陷变形是增湿变形的一种极端表现。张茂花^[11-13]等学者考虑含水率、干密度、结构性等因素对增湿变形的影响,极大促进了岩土工程界对压实黄土增湿变形特性的认识。

延安新区是目前世界上湿陷性黄土地区规模最 大的"削山填沟、造地建城"工程,沟底最深为 112 m,其主要的回填材料为 Q₂、Q₃黄土,压实黄 土的压缩变形、抗剪强度和湿陷变形等力学性质直 接关系着黄土高填方的长期安全与稳定,鉴于前人 对超高压力下压实 Q₂黄土的增湿变形特性研究较 少,结合黄土高填方工程设计与施工的实际需求, 本文将着重对压实 Q₂黄土在不同初始压实度和初始 含水率条件下的增湿变形特性进行研究,为黄土地 区工程设计提供依据。

1 试验方案

该试验所用 Q₂ 黄土均取自延安新区黄土高填方 施工现场,其初始物理性质参数如表1 所示。

为研究不同初始压实度和初始含水率压实 Q₂ 黄 土在高压力下的增湿变形特性,将重塑 Q₂ 黄土配制 初始含水率为 10.5%、13.4%、16.6% 和 18.6% 的四 组土样,静置 24 h 后,利用千斤顶压样法分别制成 初始压实度为 70%、80%、85% 和 90% 的 16 组压 实黄土试样,然后按照25、50、100、200、300、400、600、800、1 200、1 600 和 2 000 kPa 顺序进行逐级加载,增湿变形试验参照原状黄土的湿陷试验方法,采用单线法,增湿变形试验方案如表2所示。试验操作按照GB/T 50123-1999《土工试验方法标准》进行^[14],每级荷载下的稳定标准为变形不超过0.01 mm/h,每次固结试验前根据试样含水率对透水石进行配水,尽量减少试样在试验过程中的水分蒸发。当试样在最终压力下稳定后,向水槽中注满纯水,水面应高于试样上表面,每小时读一次数,终止试验的标准为连续2h沉陷量不大于0.01 mm。

2 试验结果分析

参照原状黄土湿陷系数的定义,令压实黄土的 增湿变形系数为

$$\delta_{\rm s}' = \frac{h_{\rm p} - h_{\rm p1}}{h_0}$$

式中: h_p 为某初始含水率条件下压实黄土试样在压力p作用下稳定后的高度(mm); h_{pl} 为上述试样由于浸水饱和发生附加变形稳定后的高度(mm); h_{p0} 为压实黄土试样的原始高度(mm)。

按照上述方式对 16 种不同初始含水率和初始压 实度条件下的压实 Q₂ 黄土的增湿变形试验数据进行 整理,可得试验结果如表3所示。

2.1 压实度对增湿变形的影响

由表 3 可得,相同初始含水率条件下,压实 Q₂ 黄土在不同初始压实度条件下的δ_s-p 关系,见图 1 (图中, K 为压实度, w 为含水率,虚线表示增湿 变形系数为 0.015,即规范中定义的黄土湿陷标准)。

由图 1 可以看出,不同初始压实度和初始含水 率条件的压实 Q₂ 黄土随垂直压力变化的增湿变形系 数差异较大。

(1) 在图 1(a) 中, 当*K*=70% 时,各垂直压力 下的增湿变形系数均大于 0.015,达到湿陷标准, 增湿变形系数会随压力的增大迅速增大,在垂直 压力 200 kPa 时峰值增湿变形系数为 0.066,显然 已达中等湿陷标准,随后增湿变形系数又迅速降 低,在1 200 kPa 后趋于稳定,δ_s-p 曲线可大致分 为初期快速增长,中期快速下降,后期逐渐平稳 的 3 个阶段;当*K*=80% 和*K*=85% 时,增湿变形 系数随压力的增加也呈三阶段变化,由于土体致 密程度提高,尽管大部分压力下的增湿变形系数 也达到了湿陷标准,但其峰值增湿变形系数降低 为 0.033 和 0.028,明显小于 K=70% 的情况;当 K=90% 时, δ_{s} -p曲线不再符合三阶段分布,随压 力的增大而不断增大,在垂直压力 2 000 kPa 时取 得最大,且无论初始含水率如何变化,增湿变形 系数保持在一个较低水平,增湿变形量均达不到 湿陷标准;在 0~800 kPa 压力范围内,不同压实度 条件下增湿变形系数相差较大,曲线较为分散, 当压力大于 800 kPa 时,增湿变形系数相差较小, 曲线间距较小,相互交叠,说明压实 Q₂黄土的增 湿变形对 800 kPa 以下的压力较为敏感,在相同含 水率条件下,提高压实度可以有效降低压实 Q₂黄 土在低压力作用下的增湿变形量。

(2) 在图 1(b)、(c)、(d) 中,增湿变形系数随压力 的变化关系与图 1(a) 中的 *d*_s-*p* 曲线有类似的规律, 但由于含水率的增大,其峰值增湿变形系数有较大 幅度的降低,总体而言,压实度是影响压实 Q₂ 黄土



Fig. 1 δ'_{s} -p of compacted Q₂ loess with different initial compaction degrees

含水率	压实度	干密度	压力 /kPa											
1%	1%	$/(g \boldsymbol{\cdot} \mathrm{cm}^{-3})$		25	50	100	200	300	400	600	800	1 200	1 600	2 000
	70	1.34	湿陷 系数 /×10 ⁻²	0.83	3.57	4.99	6.57	5.59	4.75	3.60	2.62	1.61	1.87	1.57
10.5	80	1.54		0.07	0.13	1.17	2.59	3.31	2.68	2.31	2.04	1.78	1.41	1.31
10.5	85	1.63		-0.42	-0.22	0.46	0.98	1.66	2.62	2.79	1.94	1.26	1.27	1.13
	90	1.73		-1.05	-0.56	-0.02	0.28	0.31	0.36	0.48	0.88	0.97	1.11	1.19
	70	1.34	湿陷系数	0.53	2.72	4.26	3.10	2.56	2.15	1.75	1.98	1.64	1.51	1.53
12.4	80	1.54		0.03	0.11	0.47	1.60	2.65	2.09	1.79	1.68	1.16	1.15	1.28
13.4	85	1.63		-0.22	-0.12	0.32	0.48	0.54	1.05	1.37	2.10	1.82	1.43	1.30
	90 1.73 /×10 ⁻²	/ × 10 ²	-0.45	-0.19	0.13	0.21	0.23	0.25	0.32	0.57	0.67	0.97	1.07	
	70	1.34	湿陷 系数 /×10 ⁻²	0.28	1.73	1.32	1.12	0.87	0.93	0.83	0.65	0.50	0.47	0.57
16.0	80	1.54		0.09	0.19	0.58	0.43	0.45	0.48	0.53	0.66	0.47	0.62	0.68
10.8	85	1.63		0.02	0.01	0.13	0.54	0.48	0.60	0.45	0.40	0.43	0.43	0.62
	90	1.73		-0.04	0.02	0.03	0.11	0.12	0.26	0.28	0.45	0.43	0.53	0.58
	70	1.34	湿路	0.21	0.82	0.88	0.75	0.55	0.59	0.41	0.49	0.53	0.44	0.38
10 6	80	1.54	系数 /×10 ⁻²	0.13	0.15	0.34	0.38	0.43	0.43	0.39	0.44	0.41	0.52	0.50
10.0	85	1.63		0.03	0.08	0.15	0.24	0.32	0.48	0.44	0.35	0.46	0.41	0.45
	90	1.73		0.03	0.05	0.04	0.08	0.12	0.18	0.20	0.24	0.32	0.43	0.47

表 3 压实 Q_2 黄土增湿变形试验结果 Tab.3 The moistening deformation test results of compacted O_2 loess

的增湿变形特性的重要因素,增湿变形系数会随压 实度的增大不断减小。笔者曾对从延安新区黄土高 填方现场浸水试验场地挖探井取回的回填压实黄土 进行室内试验,发现土样的干密度不高,在压力作 用下仍可能会出现较大程度的压缩变形和增湿变形 ^[15],因此,最大程度保证现场回填施工的压实度, 才能尽可能减小压实黄土的增湿变形量,保证黄土 高填方工程的长期稳定性。

2.2 含水率对增湿变形的影响

整理表 3 中的试验数据,可得相同初始压实度 条件下,压实 Q_2 黄土在不同含水率条件的 δ_{s-p} 关系, 如图 2 所示(图中, K为压实度, ω 为含水率,虚 线表示增湿变形系数为 0.015,即规范中定义的黄土 湿陷标准)。

由图 2 可知,在相同压实度条件下,不同含 水率条件下压实 Q₂ 黄土的 δ_s-p 曲线表现出较大差 异。在图 2(a)中,随着初始含水率由 10.5% 增大 至 18.6%, δ_s-p 曲线的峰值明显不断减小,其峰值 增湿变形系数依次为 0.066、0.043、0.017、0.009, 由中等湿陷程度降为不发生湿陷。且当含水率大于 16.8% 时,在 2 000 kPa 垂直压力范围内的增湿变形 量均达不到湿陷标准。当初始压实度由 70% 增大至 90%,如图 2(b)、(c)、(d) 所示,增湿变形系数随压 力的增大缓慢增长,增湿变形量越来越小,始终不 能达到湿陷标准。因此,当压实 Q2 黄土的初始含水 率增大到一定数值时,遇水会发生一定程度的增湿 变形,但无论压实度的高低,都不可能达到湿陷变 形标准。

在图 2(d) 中, 当 *K*=90% 时, 不同含水率条件 下的 $\delta_s p$ 曲线均在湿陷标准线以下, 说明当压实 Q₂ 黄土密实到一定程度后, 含水率的变化对其增湿 变形量影响不大, 增湿变形量不会达到湿陷标准。 因此, 严格控制回填黄土的含水率, 保证现场施工 的压实效果, 可以最大程度减小压实黄土的增湿变 形量。同时, 随着土体致密程度的进一步提高, 在 25、50、100 kPa 的低压力下, 会出现增湿变形系数 小于 0 的情况, 即高密度的压实 Q₂ 黄土试样在浸水 后会发生一定程度的体积膨胀, 且初始含水率越低, 体积膨胀越明显, 这可能与压实 Q₂ 黄土中的粘粒含 量和物质组成有关, 且与制样的初始含水率和压密 后土体的密实程度相关。

3 结论

 不同压实度和含水率条件下压实 Q₂ 黄土的 δ_s-p 曲线形态差异较大。低压实度、低含水率的 δ_s-p 曲线大致呈三阶段分布,并存在明显峰值增湿 变形系数,而高压实度、高含水率的δ_s-p 曲线总体 呈缓慢上升趋势,增湿变形系数数值差异较小。



图 2 不同初始含水率条件下压实 Q_2 黄土的 δ_s -*p* 关系 Fig. 2 δ_s -*p* of compacted Q_s loess with different initial water contents

2) 压实度是影响压实 Q₂ 黄土增湿变形特性的 重要因素,提高初始压实度可以显著减小压实 Q₂ 黄 土遇水的增湿变形量,当压实度大于 90% 时,含水 率为 10.4%~18.6% 范围内的压实 Q₂ 黄土均不会发 生湿陷变形。

3) 压实 Q₂ 黄土的增湿变形量随初始含水率的 增大而减小,初始压实度越低差异越显著,且当初 始含水率大于 16.8% 时,不同压实度条件下压实 Q₂ 黄土的遇水后均不会发生湿陷。

参考文献

- [1] 高国端. 我国黄土湿陷性质的形成研究 [J]. 南京建筑工 程学院学报, 1994, (2): 1-8.
- [2] BARDEN L SIDES G R.Engineering behaviour and structure of compacted clay[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1970, 96(4): 1171–1201.
- [3] 陈正汉,刘祖典.黄土的湿陷变形机理[J].岩土工程学报,1986,8(2):1-12.
- [4] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3): 86-94.
- [5] 汪国烈. 自重湿陷性黄土的试验研究(试坑浸水试验报

告)[R]. 兰州:甘肃省建筑科学研究院, 1975.

- [6] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土 场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J].岩土工 程学报,2006,28(3):382-389.
- [7] 陈开圣.公路工程压实黄土的强度与变形及其微观结构 研究 [D]. 西安:长安大学,2006:94-96.
- [8] 邓湘河.公路工程压实黄土的变形特性及微观结构研究 [D]. 西安:长安大学,2003.
- [9] 伍石生, 武建民, 戴经梁. 压实黄土湿陷变形问题的研究 [J]. 西安: 西安公路交通大学学报, 1997(3): 1-3.
- [10] 张苏民,郑建国.湿陷性黄土(Q3)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报,1990(4):21-31.
- [11] 张茂花,谢永利,刘保健.增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J].岩土力学,2005(9):1363-1368.
- [12] 赵彦旭. 压实黄土增湿变形的非饱和土力学研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2010.
- [13] 陈存礼,高 鹏,胡再强.黄土的增湿变形特性及其 与结构性的关系[J].岩石力学与工程学报,2006(7): 1352-1360.
- [14]GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准 [S].
- [15] 殷 鹤,黄雪峰,李旭东,等.延安新区回填压实黄土 压缩变形与湿陷特性[J].后勤工程学院学报,2016, 32(3): 26-32.

(责任编辑 王利君)