

延安新区压实黄土抗剪强度试验研究

李旭东¹, 黄雪峰², 杨佳¹, 汪正金¹

(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 401331)

摘要: 压实黄土的抗剪强度是影响黄土高填方边坡稳定性的重要因素。对延安新区压实 Q_2 、 Q_3 黄土开展了多组不同初始压实度和初始含水率条件下的直剪试验, 研究了压实度、含水率对黏聚力、内摩擦角和抗剪强度的影响, 初步探讨了现场回填压实黄土和室内制备压实黄土表现出不同抗剪强度特性的原因。结果表明: 黏聚力和内摩擦角均随着压实度的增大而增大, 土中粘粒含量对压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角指标有较大影响; 黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均随含水率的增大而不断减小, 压实 Q_2 黄土对含水率变化更为敏感; 现场回填压实黄土比室内制备的压实黄土具有更高的抗剪强度。

关键词: 压实黄土; 压实度; 含水率; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU44

文献标志码: A

Experimental study of the shear strength of compacted loess in Yan' an new district

LI Xudong¹, HUANG Xuefeng², YANG Jia¹, WANG Zhengjin¹

(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: The shear strength of compacted loess is an important factor which seriously influencing the stabilization of the high loess-filled project. In order to study how the compaction degree and water content influence the shear strength, a series of direct shear tests with different initial compaction degrees and initial water contents are carried out for compacted Q_2 loess and Q_3 loess in Yan' an new district. Then, a preliminary discussion is conduct to find out the shear strength difference between compacted loess from backfill and samples prepared in laboratory. The results show that cohesion and internal friction angle increase with the increase of compaction degree, the clay content in compacted loess has a great influence on the cohesion and internal friction angle. Cohesion, internal friction angle and shear strength decrease with the increase of water content, and compacted Q_2 loess is more sensitive to water. The shear strength of compacted loess from backfill is much higher than samples prepared in laboratory.

Key words: compacted loess; compaction degree; water content; cohesion; internal friction angle

由于国家西部大开发战略的支持, 延安市提出“中疏外扩”的战略措施, 拟在清凉山以北、宝塔山以东以及凤凰山以西建立占地总面积约为 78.5 km² 的延安新区。延安新区位于沟壑纵横的黄土地区, 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。高填方

的回填材料主要为 Q_2 、 Q_3 黄土, 压实黄土的力学性质直接关系着高填方工程长期的安全与稳定。抗剪强度是土体的一项基本力学性质, 黏聚力和内摩擦角是反映土体抗剪强度大小的两项重要指标, 而初始含水率、初始干密度及结构性均是影响压实黄土两项指标的重要因素。含水率、干密度对抗剪强度

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划 (2013BAJ06B00); 陕西省科技统筹创新工程计划 (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。

的影响，国内学者已对不同地区的原状黄土和压实黄土开展了大量的研究工作，取得了较多规律性成果^[1-6]，应捷等^[7]和袁志辉^[8]甚至研究了控制吸力条件下原状黄土的抗剪强度特性，但考虑到吸力难以准确控制与测量，该研究方法并不常见。

目前，国内学者对延安新区黄土的抗剪强度特性的研究还较少，黄泽等^[9]和肖丁^[10]对延安新区原状、重塑 Q₃ 黄土的抗剪强度展开了相关研究，但其研究成果未涉及高填方中广泛回填的 Q₂ 黄土，考虑到不同地区黄土的力学性质的差异性，本文将着重对延安新区压实 Q₂、Q₃ 黄土的抗剪强度特性开展多组对比性试验研究，为延安新区黄土高填方边坡的设计与施工提供参考。

1 试验方案

试验用土均取自延安新区，其初始物理参数如表 1 所示。为研究压实度对压实黄土抗剪强度的影响，将 Q₂ 黄土和 Q₃ 黄土自然风干后碾碎，加水分别配制成最优含水率为 13.4% 和 13.5% 的重塑土样足量，然后将其制成压实度分别为 80%、85%、90% 和 95% 的 4 组压实黄土试样。为研究含水率对压实黄土抗剪强度的影响，将自然风干碾碎后的 Q₂ 黄土配制成含水率为 9.3%、11.7%、15.0% 和

16.9% 的土样足量，Q₃ 黄土配制成含水率为 8.1%、11.8%、14.4% 和 16.9% 土样足量，并将其分别制成压实度为 85% 的 4 组压实黄土试样，其中每组均有 4 个试样，压实黄土的制样方法均采用千斤顶静力压样法。

为研究不同制样方式对压实黄土抗剪强度的影响，本文选取延安新区黄土高填方现场浸水试验场地 2# 取样探井中深度为 14 m 的现场回填压实黄土，共削取 4 个黄土试样，其初始物理性质参数见表 1，将削样后的散土碾碎后直接利用千斤顶压样法制成一组与回填压实黄土相同干密度和含水率的压实黄土试样，试样在试验前均置于保湿器中保存。

试验仪器采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪。试验时将备好的压实黄土试样小心装入剪力盒中，试样上下放一层不透水硬塑料薄膜和一块透水石，装好后立即进行加载剪切，每组试验的 4 个试样分别在 50、100、150 和 200 kPa 的垂直压力下以 0.8 mm/min 的速率进行剪切。当量力环中百分表读数出现峰值时，停止剪切，此时量力环测出的结果即为试样在该垂直应力下的抗剪强度；若试样的剪切位移超过 6 mm 时百分表仍未出现峰值读数，则取剪切位移为 6 mm 处的量力环的试验结果为试样在该垂直应力下的抗剪强度。

表 1 试验土样的初始物理参数
Tab.1 The initial physical parameter of loess for tests

土样类别	天然含水率 / %	天然干密度 / (g·cm ⁻³)	土粒相对密度	塑限 / %	最优含水率 / %	最大干密度 / (g·cm ⁻³)
Q ₂ 黄土	9.9~11.4	1.43~1.62	2.73	17.1~18.0	13.4	1.92
Q ₃ 黄土	8.3~12.7	1.35~1.51	2.71	16.6~18.3	13.5	1.82
回填压实黄土	8.4	1.52	2.71	17.5	13.6	1.79

表 2 不同压实度条件下压实 Q₂ 和 Q₃ 黄土的直剪试验结果
Tab.2 The direct shear test results of compacted Q₂ and Q₃ loess with different compaction degrees

土样类别	含水率 / %	压实度 / %	干密度 / (g·cm ⁻³)	抗剪强度 / kPa				黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °
				σ=50	σ=100	σ=150	σ=200		
压实 Q ₂ 黄土	13.4	80	1.54	57.28	74.87	91.71	110.66	39.38	20.28
		85	1.63	71.12	97.33	112.30	134.76	52.41	22.38
		90	1.73	88.81	104.82	127.28	151.61	65.42	24.16
		95	1.82	117.92	142.25	170.32	190.91	93.59	26.17
压实 Q ₃ 黄土	13.5	80	1.46	33.69	56.15	82.35	101.07	11.23	24.54
		85	1.55	52.41	74.87	99.20	123.53	29.95	25.43
		90	1.64	58.02	86.10	112.30	136.63	32.75	27.66
		95	1.73	76.74	104.82	132.89	159.09	49.60	28.82

2 试验结果及分析

2.1 压实度对压实黄土抗剪强度的影响

对压实度分别为 80%、85%、90% 和 95% 的压实 Q_2 、 Q_3 黄土的直剪试验数据进行整理,最终可得试验结果如表 2 所示。

图 1(a) 和 (b) 分别为相同初始含水率条件下,黏聚力、内摩擦角与压实度的关系曲线,试验结果表明:

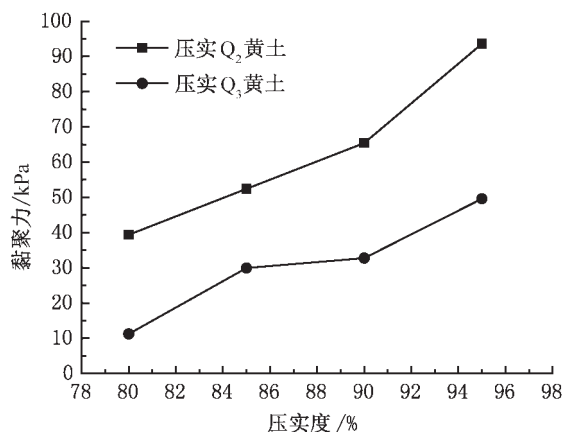
(1) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力均随压实度的增大而增大。压实 Q_2 黄土的黏聚力随压实度的增大近似呈线性增长,黏聚力由最初的 39.38 kPa 增至 93.59 kPa; 压实 Q_3 黄土的黏聚力随压实度的增大不断增大,但线性关系不明显,黏聚力由最初的 11.23 kPa 增至 49.60 kPa,且在相同干密度条件下,压实 Q_2 黄土的黏聚力均大于压实 Q_3 黄土。

(2) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的内摩擦角均随压实度增大近似呈线性增长,压实 Q_3 黄土的内摩擦角由最初的 24.54° 增至 28.82° , 压实 Q_2 黄土的内摩擦角由 20.28° 增至 26.17° , 且在相同干密度条件下,压实 Q_3 黄土的内摩擦角均大于压实 Q_2 黄土。

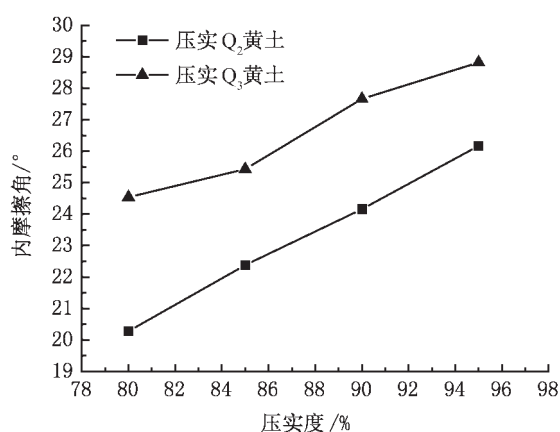
(3) 在相同干密度条件下,压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角两个参数差异的主要原因是 Q_2 黄土中黏粒含量高于 Q_3 黄土,砂粒含量低于 Q_3 黄土^[11],粘粒含量对压实黄土的黏聚力指标有较大影响,这与李立军等^[12]所得结论不一致。

2.2 含水率对压实黄土抗剪强度的影响

对压实度为 85% 的多组不同含水率条件下压实 Q_2 、 Q_3 黄土的直剪试验数据进行整理,最终可得试验结果如表 3 所示。



(a) 黏聚力随压实度变化规律



(b) 内摩擦角随压实度变化规律

图 1 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角随压实度变化规律

Fig.1 The variation of c and φ of compacted Q_2 、 Q_3 loess with compaction degree

图 2(a) 和 (b) 分别为压实度为 85% 条件下,黏聚力、内摩擦角与含水率的关系曲线,由试验结果可知:

(1) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力均随含水率的增大而逐渐减小。随含水率的增大,压实 Q_2 黄土的黏聚力由最初的 123.53 kPa 减至 39.31 kPa,黏聚力在最优含水率左侧减小速度快,曲线斜率较陡,而黏聚力最优含水率右侧减小速度慢,曲线较为平缓,由此可见,含水率小于最优含水率的压实 Q_2 黄土的黏聚力对水更加敏感;压实 Q_3 黄土的黏聚力随含水率的增大而减小的速度较慢,曲线整体较为平缓。

(2) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的内摩擦角均随含水率的增大而逐渐减小,压实 Q_2 黄土的内摩擦角由 33.38° 减至 19.77° , 压实 Q_3 黄土的内摩擦角由 32.47° 减至 24.72° , 且其内摩擦角均在最优含水率左侧减小速度慢,在最优含水率右侧减小速度变缓,压实 Q_2 黄土的内摩擦角减幅明显大于压实 Q_3 黄土,对含水率变化更加敏感。

(3) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角均受含水率影响较大,抗剪强度随含水率的增大不断降低,高填方工程中要注重边坡工程的防排水工作。同时,尽管压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均会随着含水率降低不断提高,但并非表示回填压实的含水率越低越好,在含水率较低情况下,土体难以达到最佳压实效果,也就达不到回填压实土体的检验标准。

2.3 制样方式对压实黄土抗剪强度的影响

由于高填方试验现场取土探井中取回的回填压实黄土有限,本文仅对深度 14 m 的回填压实黄土成

表 3 不同含水率条件下压实 Q₂ 和 Q₃ 黄土的直剪试验结果

Tab.3 The direct shear results of compacted Q₂ and Q₃ loess with different moisture contents

土样类别	压实度 / %	干密度 / (g·cm ⁻³)	含水率 / %	抗剪强度 / kPa				黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °
				σ=50	σ=100	σ=150	σ=200		
压实 Q ₂ 黄土	85	1.63	9.3	153.5	190.91	228.35	250.81	123.53	33.38
		1.63	11.7	101.0	131.02	149.74	177.81	77.68	26.47
		1.63	13.4	71.12	97.33	112.30	134.76	52.41	22.38
		1.63	15.0	67.38	89.84	108.56	127.28	48.66	21.64
		1.63	16.9	58.02	74.87	91.71	112.30	39.31	19.77
压实 Q ₃ 黄土	85	1.55	8.1	89.84	116.05	153.48	183.43	56.15	32.47
		1.55	11.8	59.89	84.23	114.17	136.63	33.69	27.49
		1.55	13.5	52.41	74.87	99.20	123.53	29.95	25.43
		1.55	14.4	48.66	76.74	95.46	119.79	27.14	24.90
		1.55	16.9	46.79	71.12	93.59	116.05	24.33	24.72

表 4 不同制样方式压实黄土的直剪试验结果

Tab. 4 The direct shear results of compacted loess with different sample preparation methods

土样类别	干密度 / g·cm ⁻³	含水率 / %	抗剪强度 / kPa				黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °
			σ=50	σ=100	σ=150	σ=200		
现场回填压实黄土	1.46	8.4	63.64	93.59	123.53	160.97	29.95	32.78
室内制备压实黄土	1.46	8.4	44.92	71.12	86.10	106.69	27.14	21.83

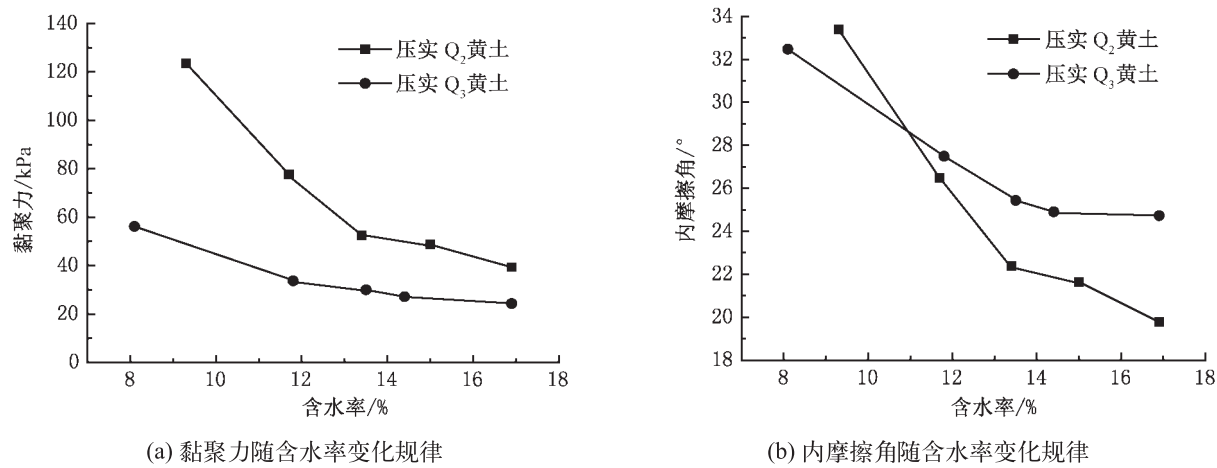


图 2 压实 Q₂、Q₃ 黄土的黏聚力和内摩擦角随含水率变化规律

Fig. 2 The variation of c and of compacted Q₂、Q₃ loess with water content

功制取了一组试样，对相同干密度和含水率条件下不同制样方式的两组压实黄土的直剪试验数据进行整理，结果如表 4 所示。

由表 4 中试验结果可知，在相同含水率和干密度条件下，现场回填压实黄土的黏聚力比室内制备的重塑压实黄土大 2.81 kPa，内摩擦角比重塑压实黄土大 10.95°，其抗剪强度也大于室内制备的重塑压实黄土，这可能与试样的制样方式有关。张诚厚^[13]、

龚晓南等^[14]和田堪良^[15]等学者认为土体均具有结构性，视含水率、干密度、矿物成分等不同而表现出不同强弱程度的结构强度。而不同的制样方式对试样的结构形成有一定程度的影响^[16]，现场回填压实黄土经过机械压实和土层自身的固结作用，形成了一定的特殊结构，相比于室内压实制备的黄土试样，具有更高的结构强度，因而表现出较高的黏聚力、内摩擦角以及较高的抗剪强度。

3 结论

1) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角均随着压实度的增大而增大,且在相同干密度条件下,压实 Q_2 黄土的黏聚力指标均大于压实 Q_3 黄土,其内摩擦角指标均小于压实 Q_3 黄土,这与 Q_2 黄土中的粘粒含量有关。

2) 压实 Q_2 、 Q_3 黄土的黏聚力和内摩擦角均随着含水率的增大而逐渐减小,且在最优含水率干侧减小快,最优含水率湿侧减小缓慢,压实黄土的抗剪强度会随着含水率的增加不断降低。

3) 相比于室内重塑压实黄土,现场回填压实黄土具有更高的抗剪强度,制样方式不同导致两者具有不同的结构强度,但由于本文中试样数量有限,对比试验数据较少,试验结论有一定的局限性,今后还需对此进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 胡长明,梅源,王雪艳.吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J].工程力学,2013,30(10):108-114.
- [2] 王林浩,白晓红,冯俊琴.压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J].岩土工程学报,2010,32(Z2):132-135.
- [3] 吴玮江,堪文武,宋丙辉,等.兰州原状 Q_2 黄土剪切试验研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2012,48(6):21-25.
- [4] 贾亮,朱彦鹏,朱鋈川.兰州马兰、离石压实黄土抗剪强度影响因素探讨[J].岩土工程学报,2014,36(Z2):120-124.

- [5] 骆以道.考虑饱和度的压实填土抗剪强度研究[J].岩土力学,2011,32(10):3143-3147.
- [6] 廖红建,李涛,彭建兵.高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J].岩土力学,2011,32(7):1939-1944.
- [7] 应捷,杜燕宁.原状非饱和黄土抗剪强度特征及试验研究[J].工程勘察,2006,8(4):6-10.
- [8] 袁志辉,倪万魁,刘茹,等.基于吸应力的非饱和黄土抗剪强度研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2015,38(5):648-653.
- [9] 黄泽,张沛然,肖丁,等.重塑黄土抗剪强度试验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(4):36-39.
- [10] 肖丁,张沛然,杨帆,等.黄土抗剪强度试验研究[J].四川建筑,2015,35(1):102-104.
- [11] 方祥位,成培江,申春妮,等.陕西蒲城 Q_2 黄土物质组成试验研究[J].后勤工程学院学报,2012,28(1):1-6.
- [12] 李立军,刘春玲,金胜国.击实黄土抗剪特性的试验研究[J].山西建筑,2014,40(25):83-84.
- [13] 张诚厚.上海粘土的准超压密特性[J].岩土工程学报,1982,4(3):62-69.
- [14] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等.黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J].水利学报,2000(10):43-47.
- [15] 田堪良,王沛,张慧莉.黄土结构性分析及新认识[J].人民黄河,2012,34(4):145-148.
- [16] WANG Long, XIE Xiaoguang, LUAN Hai. Influence of laboratory compaction methods on shear performance of graded crushed stone[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2011, 23(10): 1483-1487.

(责任编辑 王利君)

(上接第18页)全国岩石力学与工程学术大会论文集,2010:3235-3240.

- [8] 鞠杨,张钦刚,杨永明,等.岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究[J].中国科学:技术科学,2013(10):1144-1154.
- [9] 刘杰,于振民,王瑞红,等.砂岩劈裂裂隙无充填多因素影响下渗流规律研究[J].水利学报,2016,47(1):54-63.
- [10] 胡少华,周佳庆,陈益峰,等.岩石粗糙裂隙非线性渗流特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):48-56.
- [11] 孙可明,辛利伟,翟诚,等.考虑三维形貌特征粗糙

裂隙加卸载渗流规律研究[J].岩土力学,2016(Z2):161-166.

- [12] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志.考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1629-1635.
- [13] 尹立明,王刚,孙文斌,等.节理粗糙度对应力-渗流耦合特性影响试验研究[J].山东科技大学学报,2012,31(6):30-35.
- [14] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1-2): 1-54.

(责任编辑 王利君)