

增湿条件下高填方黄土的强度特性*

Strength Characteristics of High-fill Loess under Humidification Conditions

王弘起¹, 武雯利², 邱明明², 孙杰龙²

(1. 陕西建工第十三建设集团有限公司 陕西 延安 716000

2. 延安大学 建筑工程学院 陕西 延安 716000)

摘要: 随着黄土丘陵沟壑区“填沟造城”等工程的开展,高填方问题已成为建设过程中一项重要研究课题。基于此,对高填方黄土进行增湿,制备出不同含水量、不同密度、不同砂岩含量的土样进行直剪试验,得出了土样含水量、密度及不同砂岩含量与土的黏聚力与内摩擦角的关系曲线。试验结果表明:(1)黄土试样的黏聚力随着含水量的增加先增加后减小,在最优含水量左右达到最大值,而内摩擦角的值是随着含水量的增加而递减的;(2)在任一含水量不变的条件下,黄土试样的黏聚力和内摩擦角总是随着密度的增加而近似呈现线性增长趋势;(3)通过掺加砂岩对黄土进行强度改良的过程中,将砂岩含量控制在 7% 左右,是较为理想的状态。

关键词: 黄土;抗剪强度;黏聚力;内摩擦角;砂岩土

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0031-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.005

WANG Hongqi, WU Wenli, QIU Mingming, SUN Jielong

(1. SCEGC No. 13 Constuction Engineering Group Company Ltd ,Yan'an 716000, China

2. School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: With the development of projects, for example "filling ditches and building cities" in the loess hilly and gully areas, the problem of high filling has become an important research topic in the construction process. Based on this, direct shear tests were performed under soil specimens with varying water content, densities and content of sandstone by humidifying the high-fill loess, and the relationships of the moisture content, density and different sandstone content of the soil specimen with the cohesion and internal friction angle of the soil are obtained. The test results show that the cohesion of the loess samples increases with the increase of the water content at first and then decreases, and reaches the maximum value around the optimal water content, while the value of the internal friction angle decreases with the increase of the water content; (2) under any condition of constant water content, the cohesion and internal friction angle of the loess specimen always increases linearly with the increase of density; (3) the sandstone content controlled at about 7% is an ideal state in the process of improving the strength of the loess by adding sandstone.

Keywords: Loess; shear strength; cohesion; internal friction angle; sandstone soil

* 基金项目: 陕西建工第十三建设有限公司科技开发计划项目 (SJ13JKT-2020-01); 陕西省教育厅一般专项科研项目 (21JK0991); 陕西省大学生创新创业训练项目 (S202110719080)。

作者简介: 王弘起 (1976—), 男, 高级工程师, 主要从事沿途工程与防灾研究。

收稿日期: 2023-06-24

岩土力学

0 引言

我国黄土分布的厚度、广度以及发育的完整性都是世界罕见的,我国黄土堆积主要集中在华北地区,在广袤的黄土高原上分布有 700 多个重要的城镇,黄土地区人口占到了我国总人口的 1/6 之多。典型的黄土为棕黄色或黄灰色的尘土和粉砂细粒组成,质地均匀、多孔隙、有显著的垂直节理,无层理,干燥时坚硬,一旦受到雨水冲刷,通常容易剥落和遭受侵蚀,更甚者会产生塌陷。因此在黄土地区进行工程建设,假如对黄土特性不了解,往往会给工程带来严重的破坏和损失。

对于天然、重塑黄土强度特性,国内外学者已做了大量研究,而且取得了很多规律性的成果。韩波^[1]进行了正常固结和超固结黄土的固结不排水三轴试验,进而分析了不同固结状态下黄土的应力应变关系、孔压应变关系、有效应力路径。曾玲玲等^[2]通过固结不排水剪应力路径试验对广州南沙典型软土在不同固结条件的力学特性进行了系统研究。李文^[3]通过野外极限状态坡测量、取样及不同含水率下的原状土的直剪试验、三轴压缩试验和重塑土的反复剪切试验,测得了甘肃地区不同地层黄土的三类抗剪强度指标。张茂花^[4]采用固结不排水剪切方法,对非饱和原状 Q_3 黄土进行了增湿情况下的三轴剪切试验,得到了湿陷性黄土的极限强度与初始含水量及围压的关系曲线,分析了增湿过程中黄土抗剪强度的变化规律。米海珍等^[5]通过对兰州黄土不同含水量试样进行三轴不固结不排水剪切试验,获得了含水量对兰州黄土剪切强度参数的影响,并从黄土结构性上做出了合理的解释,同时在试验的基础上提出了黏聚力、内摩擦角与含水量的关系表达式。刘小丽等^[6]通过现场试验与室内试验、理论分析和反演分析,研究成果包括各种特征强度及其相互关系、剪切引起的微观结构变化特征方面。郑建国等^[7]得出湿陷性黄土在增湿时其强度将明显降低。朱志坤^[8]通过室内击实试验,研究出黄土试样在不同含水量和不同击实功下其干密度值的变化,然后对不同干密度和不同含水量的太原重

塑黄土试样在 4 种垂直压力下分别进行快剪试验,得出试样的黏聚力和内摩擦角,并进一步对其展开了研究,最后通过不同干密度不同含水量的太原重塑黄土试样在 3 种围压下进行不固结不排水(UU)三轴压缩试验,分析了干密度、含水量和围压对黄土试样的应力应变关系的影响及其原因,并对其抗剪强度、强度参数 c 、 φ 值和偏应力极值的影响因素进行了研究。于永堂等^[9]对传统钻孔剪切仪进行改进,增加法向位移和剪切位移观测系统,设计钻孔剪切室内模型试验装置,通过模型试验探讨首级法向压力、分级法向压力增量、固结时间和加载剪切方式等对抗剪强度参数测试结果的影响规律,并总结钻孔剪切试验参数的控制方法,用于指导采用垫层法和挤密法处理黄土地基的钻孔剪切试验。王欢等^[10]对不同含水率和干湿循环次数下的改良膨胀土进行了直剪试验。陆正^[11]采用膨润土模拟膨胀土边坡中充填裂隙内的充填物质,制作出包含人工充填裂隙的膨胀土试件,并对其进行抗剪强度试验,研究充填裂隙含水率、厚度、倾角、蒙脱石含量等特性对膨胀土抗剪强度的影响。王文军^[12]通过室内试验,探讨了吹填淤泥固化土含水率和强度与养护龄期、固化剂掺量、淤泥初始含水率之间的关系,并尝试选择合适的参数,进而建立固化土无侧限抗压强度预测模型。侯超群^[13]对不同初始干密度和不同含水率的合肥膨胀土进行直剪试验,分析了初始干密度和基质吸力对合肥膨胀土抗剪强度指标的影响。Tan L R、D. G. Toll 和 E. F. Cokco 等^[14-16]等对压实土的黏聚力和内摩擦角随着初始含水量的变化规律进行了研究,研究表明,在一定压实能作用下,内摩擦角随着含水量的增大而减小,黏聚力在较低含水量下随着初始含水量的增大而增加,而当含水量增大到最优含水量时,达到最大值,然后随着含水量的增大而黏聚力值逐渐减小。

延安是中国革命的摇篮,同时也是一座闻名中外的历史文化名城,然而,由于狭窄的发展空间所限,延安原有的线型城市框架被一再拉长,革命旧址周边环境不断被蚕食,交通拥堵、城景争地、城乡统筹所必需的城市空间不足等矛盾日

益突出。随着“填沟造城”等工程活动的开展，高填方问题已成为黄土山区工程建设过程中一项重要的研究课题，而高填方黄土的稳定性评价、沉降预测及黄土湿陷性问题一直都是黄土高填方工程中的一个研究重点。对于天然黄土，国内外已经有诸多学者进行研究，而高填方黄土不同于天然黄土，高填方填筑体的高度肩高，甚至能达到百米以上，这使得下覆黄土长期处于高压之下，在上覆黄土的自重之下以及外荷载的影响下，下覆黄土随时会发生失稳破坏。基于此，本文主要是对高填方黄土进行室内直剪试验，探究其强度特性，此外，还通过掺加不同量的砂岩对其进行强度改良，以期对黄土地区的高填方工程提供一定的理论支撑。

1 试验土样及方案

本次试验采用常规直剪试验，试验时按照不同含水量目标进行预湿，随后进行直剪试验，通过试验观察高填方黄土在不同含水量下的抗剪强度参数的变化规律，为了控制含水量在实验过程中能够保持不变，故试验采用不固结不排水剪切方法，因此，所得试验关系均是总应力条件下的抗剪强度参数与含水量及土样密度的关系。

1.1 土样性质

陕建十三局金鸿·行知坊项目位于延安新区行知北路与公学北路的交汇处，总占地面积约为 251 亩，试验用土于陕建十三局行知坊项目现场所取，均为高填方重塑黄土，土样为黄褐色，且结构均匀，大孔隙多，具有一定的湿陷性。所取土样初始参数表如表 1 所示：

表 1 高填方土样基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of high fill soil samples

土样比重 /Gs	密度 /(g/m ³)	最优含水量 /%	塑限/%	液限/%
2.62	1.8	15	19	32

1.2 试验方案

试验所用仪器为直接剪切仪，在所取土基础上配备了不同含水率，依照 GB/50123-2019《土工试验方法标准》对所取土样进行过筛，增湿时，计算出从原始含水量增加到某一个指定含水量所

需水量，用塑料膜将其封存好，置于保湿缸中静置 24 h，量取一定量的土，制成不同含水量、不同密度的土样进行试验。不同密度的土样进行直剪试验，并掺加了不同砂岩含量（13%含水量基础上进行添加）对高填方黄土进行改良，试验方案如下：



图 1 砂岩照片
Fig. 1 Sandstone photo

表 2 试验方案
Table 2 Test plan

土样	含水量/%	密度/(g/m ³)	砂岩掺量/%
高填方黄土	12、15、 18、21	1.5、1.6、 1.8	0
不同砂岩掺量黄土	13	1.6	5、7、 9、11

1.3 试验程序

- (1) 按照上述方法对土样进行预湿；
- (2) 取四个相同含水量的试样进行直剪试验，其中垂直压力选定为 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa；
- (3) 控制剪切速率使得土样在 3 min~5 min 破坏；
- (4) 试验完成后用余土测定含水量，再次精确控制含水量。

2 试验结果及分析

至行知坊项目现场取样后根据 GB/50123-2019《土工试验方法标准》要求制样。按照不同目标含水量对试样进行增湿，将制备好的试样依次完成不同含水量、不同土样密度下的直接剪切试验。

岩土力学

2.1 抗剪强度指标随含水量的变化分析

本试验按摩尔-库仑破坏准则对试验结果进行整理,从而求得每一含水量,每一土样密度下的黏聚力与内摩擦角,为了更直观的分析不同含水量下的试验结果如图2、图3所示。

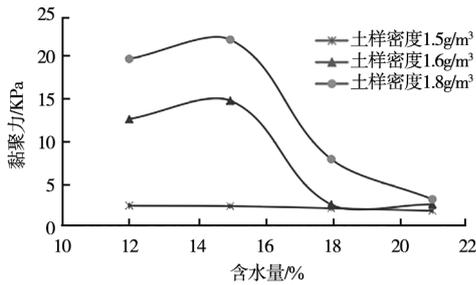


图2 不同含水量下黏聚力的变化曲线

Fig. 2 Change curve of cohesive force under different water content

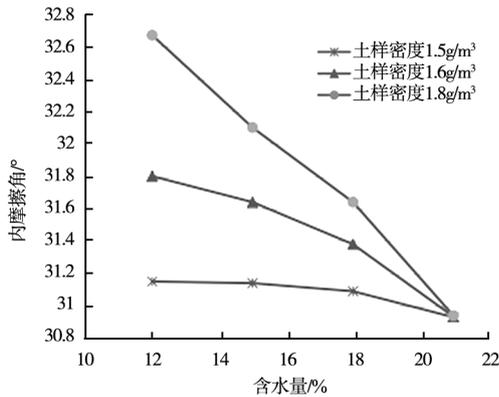


图3 不同含水量下内摩擦角的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of internal friction angle under different water content

由图2可知,在土样密度恒定的条件下,随着土样含水量的不断增大,黏聚力先增大后减小,在最优含水量左右达到最大值,随之减小。当土样达到1.5g/m³时,黏聚力随着含水量的增大几乎不会发生变化,由此可以反映出,较大密度的黄土试样对含水量的变化更为敏感,进一步说明,干密度的增加能够增大黄土试样黏聚力对水的敏感程度。这是由于含水量的增加使得土体变软,土样抗剪强度降低,土颗粒当中水分子是以结合水、自由水的形式存在的,当土样中含水量较低时,水分子多以结合水的形式存在,而结合水恰恰是黏聚力的重要来源之一,水分子对土颗粒有一定的粘结作用,使得颗粒间存在较大引力。随着含水量的增加,结合水膜逐渐变厚,出现自由

水,润滑作用增加,这边大大减少了黏聚力,故在同一密度条件下,随着含水量的增大,黏聚力呈现出减少趋势。

图3为黄土试样在不同含水量下的内摩擦角变化曲线图,由图2可知,在土样密度不变的条件下,随着含水量的不断增加,内摩擦角整体呈减小趋势。这是由于随着含水量的增大,土中自由水增多,润滑作用加大,故而使得土颗粒之间的摩擦力减小。当土样密度为1.8g/m³,含水量从12%增加到15%时,内摩擦角减少了1.7%,当土样密度为1.6g/m³,含水量从12%增加到15%时,内摩擦角减少了0.5%,当土样密度为1.5g/m³,含水量从12%增加到15%时,内摩擦角减少了0.03%,由此可见,随着土样密度的减小,内摩擦角变化量减少,进一步说明,土样密度的减小能够削弱含水量对黄土试样内摩擦角的影响。

2.2 抗剪强度指标随密度的变化分析

本试验主要做了四个不同含水量下土样的直剪试验,其中垂直压力选定为0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa,通过对试验数据进行整理,可以得出如下两图。

图4、图5分别为不同含水量下,黄土试样黏聚力与内摩擦角随着土样密度变化的关系曲线图。从图4可以看出,在同一含水量下,黄土试样黏聚力随着土样密度的增大而增加,且当含水量为12%时,土样密度为1.5g/m³时,黄土试样黏聚力为2.39 KPa,土样密度为1.6g/m³时,黄土试样黏聚力为12.73 KPa,增加了4.33倍;当含水量为15%时,土样密度为1.5g/m³时,黄土试样黏聚力为2.44 KPa,当土样密度为1.6g/m³时,黄土试样黏聚力为14.93 KPa,增加了5.12倍;而当含水量为18%时,土样密度从1.5g/m³增长到1.6g/m³时,黄土试样黏聚力增加了21.6%;黄土试样黏聚力随着土样密度的增大变化逐渐减小,由此可以看出,含水量较小的试样,随着土样密度的增大其黏聚力的增大更为显著。这是由于土样密度越大,颗粒间的相互接触更为紧密,其咬合作用相应增加,此外,当土样含水量较小时,土中更多出现的为结合水,使得颗粒之间的引力

加大，而随着含水量的增大，土中自由水占比增加，这便削弱了颗粒间的引力。因此，土样密度越大，含水量越小的黄土试样黏聚力就越大。

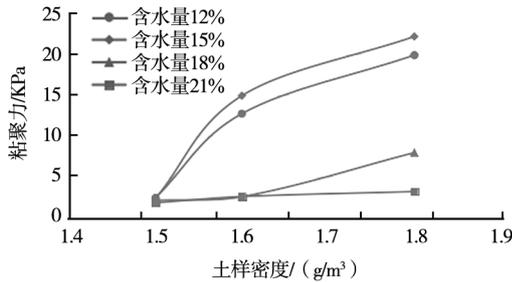


图 4 不同密度下黏聚力的变化曲线
Fig. 4 Change curves of cohesion at different densities

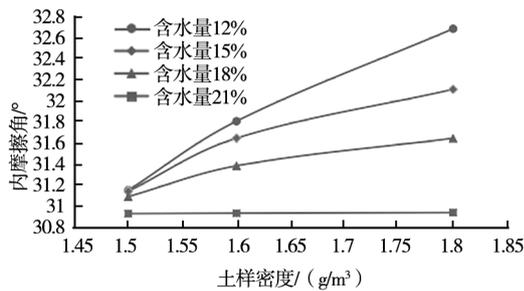


图 5 不同密度下内摩擦角的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of internal friction angle under different densities

从图 5 可以看出，在同一含水量下，黄土试样内摩擦角随着土样密度的增大而增大，表现出线性增长趋势。当含水量为 12% 时，土样密度从 1.5 g/m³ 增长到 1.6 g/m³ 时，黄土试样内摩擦角增长了 2.1%；当含水量为 15% 时，土样密度从 1.5 g/m³ 增长到 1.6 g/m³ 时，黄土试样内摩擦角增长了 1.6%；当含水量为 18% 时，土样密度从 1.5 g/m³ 增长到 1.6 g/m³ 时，黄土试样内摩擦角增长了 0.9%；当含水量为 21% 时，土样密度从 1.5 g/m³ 增长到 1.6 g/m³ 时，黄土试样内摩擦角几乎没有增长；随着土样密度的增加，黄土试样内摩擦角增长变化逐渐减小，由此可见，随着含水量的增大，削弱了内摩擦角随着土样密度增大而增大的程度。这是由于土样密度的增大，致使土颗粒间的接触更为紧密，土中水多以结合水的形式存在，而结合水较为稳定，且不易移动，因此，黄土试样内摩擦角会随着土样密度的增加而呈现出增长

趋势。

2.3 不同砂岩掺量下土样抗剪强度试验研究

本试验是在其它参数都一定的条件下，通过改变砂岩掺量来进行直剪试验，以期得到最佳砂岩掺量。制备试样所用砂岩掺量分别为 5%、7%、9% 和 11%，砂岩掺量 = 砂岩质量 (g) / 改良土质量 (g)。根据试验数据整理出如图 5、图 6 曲线，分别为不同砂岩含量下砂岩土的黏聚力和内摩擦角的变化曲线。

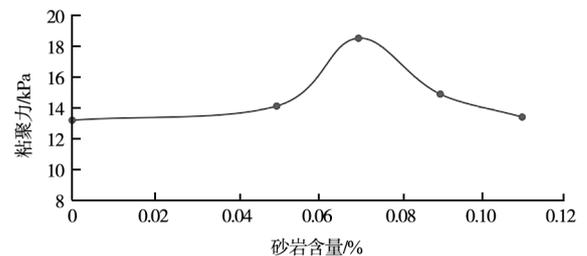


图 6 不同砂岩含量下黏聚力的变化曲线
Fig. 6 Change curve of cohesion under different sandstone content

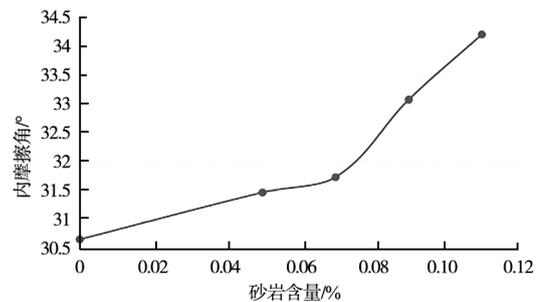


图 7 不同砂岩含量下内摩擦角的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of internal friction angle under different sandstone content

从图 6 可以看出，随着砂岩掺量的增长，改良土试样黏聚力逐渐增加，达到峰值后有回落趋势，当砂岩掺量从 0 增大到 5% 时，黏聚力增长较为缓慢，当砂岩掺量达到 7% 时，黏聚力达到了峰值，而当砂岩掺量继续增加，达到 9% 和 11% 时，随着砂岩掺量的增加，黏聚力逐渐降低。

从图 7 可以看出，随着砂岩含量的增加，改良土试样内摩擦角逐渐增大，当砂岩含量为 5% 时，改良土试样内摩擦角为 31.48°，当砂岩含量为 7% 时，改良土试样内摩擦角为 31.74°，增长了 0.8%，当砂岩含量为 9% 时，改良土试样内摩擦角为 33.06°，相较于 7% 砂岩含量的改良土试样内摩

岩土力学

擦角,增长了4.2%,当砂岩含量为11%时,改良土试样内摩擦角为 34.17° ,相较于9%砂岩含量的改良土试样内摩擦角,增长了3.4%,由此可以看出,随着砂岩含量的增大,改良土试样内摩擦角逐渐增长,这是由于砂岩的掺和使得土样滑动摩擦力增大,从而使得其内摩擦角有所增加。对图5、图6进行综合分析可知,在进行地基处理、边坡支护时,为了增大土体的抗剪强度,在土体中掺和砂岩是可行的,将砂岩含量控制在7%左右是较为理想的状态。

3 结论

(1) 黄土试样的黏聚力随着含水量的增加先增加后减小,在最优含水量左右达到最大值,而内摩擦角的值是随着含水量的增加而递减的,且土样密度的增加会增强含水量对黄土试样黏聚力和内摩擦角的作用,通过整理所得黏聚力、内摩擦角与含水量的变化曲线可知,黄土试样黏聚力与含水量之间近似存在指数函数关系,而内摩擦角与含水量之间近似存在线性函数关系。

(2) 在任一含水量不变的条件下,黄土试样的黏聚力和内摩擦角总是随着密度的增加而近似呈现线性增长趋势。且含水量的增加,会削弱土样密度对黄土试样黏聚力和内摩擦角的作用。

(3) 砂岩改良黄土随着黄土中砂岩含量的增加,内摩擦角逐渐增加,黏聚力先增大后减小,在砂岩含量7%左右达到最大值,因此,通过掺加砂岩对黄土进行改良的过程中,将砂岩含量控制在7%左右是较为理想的状态。

参 考 文 献

[1] 韩波,李杭州,宋丽.原状黄土非线性强度特性试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):117-121.

- [2] 曾玲玲,陈晓平.软土在不同应力路径下的力学特性分析[J].岩土力学,2009,30(5):1264-1270.
- [3] 李文.含水率对甘肃黄土边坡抗剪强度的影响研究[D].西安:长安大学,2010.
- [4] 张茂花,谢永利,刘保健.增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J].岩土力学,2006(7):1195-1200.
- [5] 米海珍,李如梦,牛军贤.含水量对兰州黄土剪切强度特性的影响[J].甘肃科学学报,2006(1):78-81.
- [6] 刘小丽,邓建辉,李广涛.滑带土强度特性研究现状[J].岩土力学,2004(11):1849-1854.
- [7] 郑建国,张苏民.湿陷性黄土在增湿时的强度特性[J].水文地质工程地质,1989(2):6-10.
- [8] 朱志坤.干密度和含水量对太原重塑黄土强度及强度参数影响的研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [9] 于永堂,张龙,郑建国,等.重塑黄土的钻孔剪切变形与强度特性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3367-3378.
- [10] 王欢,曹义康,任俊玺,等.干湿循环下粉砂土改良膨胀土强度特性分析[J].科学技术与工程,2021,21(26):11336-11342.
- [11] 陆正,王保田,康靖宇,等.含充填裂隙的膨胀土强度特性研究[J].粉煤灰综合利用,2021,35(6):24-28.
- [12] 王文军,袁飞飞,蒋建良,等.高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):461-467.
- [13] 侯超群,陈欢,孙志彬,等.较大吸力范围内合肥膨胀土强度特性试验研究[J].工业建筑,2020,50(11):78-81+70.
- [14] TAN L R, KONG L W. Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil [C]. Unstaturated Soils for Asia, Rahardjo, Toll and Leong (eds), Balkema, Rotterdam, 2000, 515-519.
- [15] D. G. Toll. The influence of fabric on the shear behavior of unsaturated compacted soil [J]. Geotechnical Special Publication, 2000, (99): 222-234.
- [16] E. F. Cokco, O. Erol. And F Armangil. Effects of compaction moisture content on the shear strength of a unsaturated clay [J]. Geotechnical and Geological Engineer, 2004, (22): 285-297.