DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.043

基于不同含水率下重塑黄土强度特性试验研究

潘明，仝飞*

（太原理工大学 建筑与土木工程学院，山西 太原 030024）

摘要：在路基回填施工过程中，土体的含水率与回填速度直接关系到工程的安全性和经济效应。因此对不同含水率、剪切速率下重塑黄土的强度特性及指标进行了三轴试验研究。结果表明：含水率与剪切速率都对重塑黄土的强度有明显影响。剪切速率增加，应力－应变曲线上移；含水率增大，黏聚力和内摩擦角均减小，但减小幅度不同；黏聚力与内摩擦角均可由含水率的一次函数关系式表示。利用莫尔－库仑公式得出了重塑黄土的破坏强度公式。

关键词：剪切速率；含水率；重塑黄土；三轴试验；破坏强度

黄土是沉积物的一种，含有大量的水云母、高岭土及蒙脱土，具有吸附、膨胀、收缩、湿陷性及其他不良的工程性质。中国的山西、甘肃、陕西等地即由黄土及其风化的碎屑物组成，这些地区为典型的黄土分布区域。

近年来，黄土地区地基发生破坏的情况时有耳闻，尤其是雨季来临时，因雨水冲刷作用使土体中孔隙水压力明显上升，导致地基土体结构的抗剪强度降低，引起地基失稳破坏。60％左右的黄土地区具有湿陷性，尤其在大量雨水渗入后，其强度会迅速减小，甚至有可能引发工程事故。为此，诸多学者针对黄土类土的力学性质进行了研究，取得了一些成果。刑鲜丽等通过三轴固结不排水剪切试验，研究了非饱和黄土抗剪强度参数的变化规律，验证了有效应力与抗剪强度之间存在线性关系；黄琨等通过重塑非饱和黄土的直剪试验，得出了含水率增加，抗剪强度随之降低；黏聚力可由含水率的分段函数形式表示；杨晶等通过击实试验，研究了不同击实功下土体抗剪强度与含水率之间的关系；邓军涛等采用总应力法，研究了增湿条件下含水率对抗剪强度及其强度参数的影响规律，推导出了兰州地区原状黄土在增湿条件下的破坏强度计算公式。另外，不少学者，分析了剪切速率对不同土体抗剪强度及其参数的影响规律。综上可以看出，就含水率和剪切速率对重塑黄土的强度及其指标影响的分析尚不多见。在实际工程建设中，不仅考虑安全性，还要考虑经济效益，开挖及回填工程的施工速度直接关系到工期，因此进行含水率、剪切速率与黄土强度特性的研究显得很有必要。

1 试验方法

1.1 试样基本性质

试验用土取自山西某道路路基，人工取原状土样，土样湿密度为1.71 g/cm^3，干密度为1.43 g/cm^3，取土深度为2.0～4.0 m，呈黄色－褐黄色，土质较均匀，为粉质黏土。基本物理性质指标及土颗粒组成通过室内试验测得，见表1、2。

表1 试样基本物理性质指标

含水率/％	液限/％	塑限/％	孔隙比	塑性指数	相对密度
19.3	29.9	18.5	0.891	11.4	2.71

表2 土颗粒组成

组成/％			
粗粒土（>0.075 mm）	粉粒（0.075～0.005 mm）	黏粒（<0.005 mm）	分类
9.4	73.8	16.8	粉黏质土

1.2 试验方法

将原状土样均匀摊铺后自然风干，用橡皮锤碾碎，过孔径2 mm筛，测量过筛后土的含水率。根据已知

收稿日期：2018－10－12

基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目（编号：51408392）

作者简介：潘明，男，硕士研究生.E－mail:15262727128@163.com

*通信作者：仝飞，男，博士，副教授.E－mail:nbs190@163.com

含水率配制需要的含水率，密封后闷料 24 h 备用，试样的尺寸：直径为 39.1 mm，高 80 mm。实际工程中，施工进度较快，为了充分模拟实际施工情况，采用 4 种剪切速率(0.4、0.8、1.2、1.6 mm/min)。依据原状土样的含水率，设置 4 种含水率(14.8%、17.1%、19.3%、21.6%)；根据回填土的载荷预估情况，设置 3 种围压(100、200、300 kPa)，共计 48 个试样，以供试验适用。试验采用应变控制式 TSZ－3 型三轴仪和 TCK－1 型三轴试验测量控制仪，对以上土样采用固结不排水三轴试验，当轴向应变 $\varepsilon_1=18\%$时结束试验。

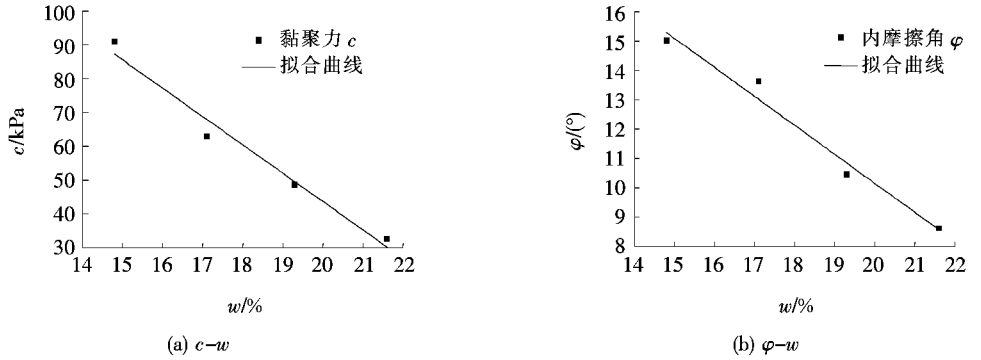
2　试验结果与分析

2.1　应力－应变曲线

重塑土样的应力－应变曲线都表现出应变硬化或弱硬化的形式，均未出现峰值。同一围压下，随着剪切速率增加重塑土样的应力－应变曲线也随之上移；剪切速率从 $v=0.4$ mm/min 增加到 0.8 mm/min 时，其对应的应力－应变曲线上移的幅度最大，随着剪切速率继续增加，应力－应变曲线会依然上移，但上移的幅度明显减小。围压、含水率及剪切速率对重塑土样的应力－应变关系曲线均有影响，含水率对土体的抗剪强度影响最为明显，围压次之，剪切速率的影响效应最小。在轴向应变较小($\varepsilon_1<3\%$)时，其应力－应变曲线呈现出近似线性的关系，这是由于在应变较小的范围内，土体的变形主要是弹性变形；当 $\varepsilon_1>5\%$附近时，其应力－应变关系曲线表现出明显的非线性。

2.2　重塑黄土强度分析

因篇幅所限，此处仅对剪切速率 $v=0.4$ mm/min 下的黄土试样的强度指标(黏聚力 c、内摩擦角 φ)与含水率 w 之间的关系进行拟合，如图 1 所示。



(a) c–w　　(b) φ–w

图 1　强度指标与含水率的拟合关系图

对试验数据拟合可以得出，黏聚力、内摩擦角可分别由含水率表征为：

$$c=211.399-0.839w \tag{1}$$

$$\varphi=29.897-0.987w \tag{2}$$

线性拟合得到的式(1)、(2)的相关系数 $R^2>0.962$，表明黏聚力、内摩擦角与含水率之间均存在线性关系。

土工三轴试验中，一般用土样破坏时的主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 作为土体的破坏强度。当应力－应变曲线出现较为明显的峰值点时，取峰值点处所对应的主应力差值作为土体的破坏强度；否则，一般取轴向应变 $\varepsilon_1=15\%$处所对应的主应力差作为土体的破坏强度。由于试验过程中应力－应变曲线都未有明显的峰值点出现，故取轴向应变 $\varepsilon_1=15\%$所对应的主应力差值作为重塑土试样的破坏强度值。

为了节省篇幅，避免重复推导，仅演示剪切速率 $v=0.4$ mm/min 时重塑土体破坏强度的计算公式，并将不同含水率和围压下土体的破坏强度值绘制在二维坐标系中，如图 2 所示，并对其进行线性拟合。

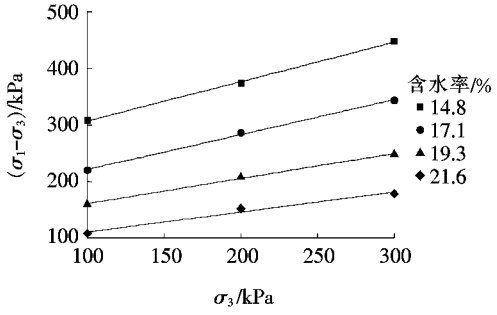


图 2　土样破坏强度与围压的关系

从图 2 可以看出：在同一含水率条件下，土样的破坏强度与围压近似服从线性关系，土样的破坏强度随着围压增加也随之增加。综合考虑式(1)、(2)，破坏强

度与围压之间的关系可以用式(3)表示：

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=\sigma_3\cdot f(w)+g(w) \tag{3}$$

式中：$(\sigma_1-\sigma_3)_f$为土体破坏时所对应的主应力差，即破坏强度；$f(w)$、$g(w)$为与含水率有关的函数。

根据莫尔－库仑破坏准则可知：

$$\tau_f=(\sigma_1-\sigma_3)_f=\sigma\cdot\tan\varphi+c \tag{4}$$

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=\sigma_3\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}+2c\frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{5}$$

由式(3)和式(5)可以推出：

$$f(w)=\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{6}$$

$$g(w)=\frac{2c\cdot\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{7}$$

从式(6)、(7)可知：$f(w)$为与内摩擦角 φ 有关的函数；$g(w)$为与内摩擦角 φ、黏聚力 c 都有关的函数。通过式(3)可以拟合出重塑土样破坏强度与围压之间的系数，如表 3 所示。

表 3 破坏强度与围压之间的拟合系数

含水率/%	$f(w)$	$g(w)$	相关系数
14.8	0.69	237.46	0.997
17.1	0.61	159.96	0.995
19.3	0.44	116.80	0.996
21.6	0.35	76.10	0.952

$f(w)$和 $g(w)$与含水率之间存在着相关关系。

$f(w)$和 $g(w)$都可以由含水率 w 表示成一次线性表达式：

$$f(w)=a-bw \tag{8}$$

$$g(w)=c-dw \tag{9}$$

利用式(8)、(9)对试验数据进行拟合，可以得出：$a=1.497$，$b=0.053$，$c=572.390$，$d=23.341$，再将式(8)、(9)代入式(3)可得破坏强度的公式：

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=1.497\sigma_3-0.053\omega\sigma_3-23.341\omega+572.390 \tag{10}$$

利用推导所得的重塑黄土的破坏强度计算式(10)计算出剪切速率 v=0.4 mm/min 时，不同含水率及围压下土样的破坏强度值，并将其与试验实测的数据对比，可以得到破坏强度与含水率的关系图，如图 3 所示。剪切速率 v=0.8、1.2、1.6 mm/min 时，不同含水率及围压下重塑黄土破坏强度的计算公式分别如式(11)、(12)、(13)所示，且计算公式的相关系数分别为 0.993 6、0.992 9及0.993 8。

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=1.548\sigma_3-0.053w\sigma_3-24.433w+607.580 \tag{11}$$

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=1.616\sigma_3-0.054w\sigma_3-25.989w+649.789 \tag{12}$$

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f=1.637\sigma_3-0.055w\sigma_3-26.385w+664.322 \tag{13}$$

从图 3 可以看出：试验实测值与计算值之间的相对误差较小，计算值与实测值的变化趋势具有一致性，说明推导出的计算式在预测重塑土破坏强度方面具有可行性。

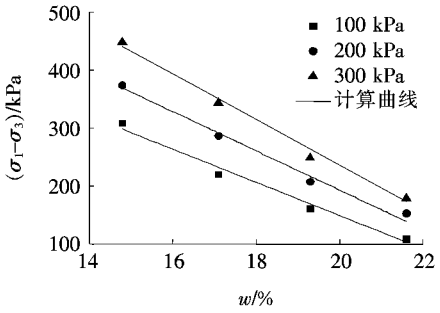


图 3 重塑土样的破坏强度与含水率的关系

2.3 重塑土样强度指标分析

2.3.1 推导计算公式

从图 2 可以看出：同一含水率条件下，土体的破坏强度与围压之间存在一次线性关系，结合式(4)可以认为重塑土样的破坏强度基本上服从莫尔－库仑土压力强度破坏理论。通过式(6)可以计算出：

$$\sin\varphi=\frac{f(w)}{2+f(w)} \tag{14}$$

$$\cos\varphi=\frac{2\sqrt{1+f(w)}}{2+f(w)} \tag{15}$$

由式(14)、(15)可以计算出：

$$\tan\varphi=\frac{f(w)}{2\sqrt{1+f(w)}} \tag{16}$$

将式(14)、(15)代入式(7)，可以计算出：

$$c=\frac{g(w)}{2\sqrt{1+f(w)}} \tag{17}$$

将式(8)、(9)及参数 $a=1.497$，$b=0.053$，$c=572.390$，$d=23.341$ 分别代入式(16)和(17)，可得到重塑黄土在剪切速率 v=0.4 mm/min 时，不同含水率下，土体抗剪强度参数(即内摩擦角 φ 和黏聚力 c)关于含水率的计算表达式：

$$\varphi=\arctan\left(\frac{-0.053w+1.497}{2\sqrt{-0.053w+2.497}}\right) \tag{18}$$

$$c=\frac{-23.341w+572.390}{2\sqrt{-0.053w+2.497}} \tag{19}$$

利用上述推导方法，同样可以推导出其他剪切速率条件下，不同含水率的土体抗剪强度参数计算公式。因篇幅限制，未列出其他剪切速率下的计算公式。

2.3.2 验证计算公式

朱桐浩等利用最小二乘法回归分析的方法求解了不同围压下土体抗剪强度指标，且精度很高，但推导过程复杂，且计算工作量大。而利用陈立宏等提出的“$\sigma_1-\sigma_3$”法求解土体的抗剪强度指标并与计算公式得到的强度指标作对比，如表 4 所示。

表 4　重塑土样的抗剪强度指标

含水率/%	内摩擦角			黏聚力		
	计算公式/(°)	($\sigma_1-\sigma_3$)法/(°)	相对误差/%	计算公式/kPa	($\sigma_1-\sigma_3$)法/kPa	相对误差/%
14.8	15.23	15.01	1.44	86.71	90.98	4.92
17.1	13.18	13.63	3.41	68.69	62.89	8.44
19.3	11.04	10.46	5.25	50.20	48.59	3.21
21.6	8.61	8.62	0.12	29.33	32.61	11.18

从表 4 可以看出：两种方法计算得到的土体抗剪强度指标存在相对误差，内摩擦角的相对误差为 0.12%～5.25%，黏聚力的相对误差为 3.21%～11.18%，就一般的工程而言该计算表达式是合理的。

3　结论

通过常规三轴剪切试验研究了含水率和剪切速率对重塑黄土抗剪强度特性的影响，得出以下结论：

(1) 含水率和剪切速率对重塑黄土的应力－应变关系曲线形式会产生明显的影响。同一剪切速率下，含水率减小，所对应的应力－应变关系曲线会上移；剪切速率增加，其曲线会随之上移，且曲线上移的幅度会随着剪切速率的增加而不断减小。

(2) 含水率增加，其黏聚力与内摩擦角均减小，但减小的幅度有所差异；黏聚力与内摩擦角均可由含水率的一次函数表达式表示。

(3) 利用莫尔－库仑强度公式可以推导出山西重塑黄土在不同剪切速率下，土体破坏强度计算公式可由含水率和围压表示，经验证该推导公式是合理的。

参考文献：

[1] 谢定义，邢义川.黄土土力学[M].北京：高等教育出版社，2016.

[2] 缪林昌，仲晓晨，殷宗泽.膨胀土的强度与含水量的关系[J].岩土力学，1999(2).

[3] 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(4).

[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).

[5] 刑鲜丽，李同录，李萍，等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J].水文地质工程地质，2014(3).

[6] 黄琨，万军伟，陈刚，等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学，2012(9).

[7] 杨晶，白晓红，王林浩，等.基于不同初始含水量的压实黄土力学特性试验研究[J].太原理工大学学报，2012(6).

[8] 邓军涛，王娟娟，李瑞娥，等.增湿条件下兰州 Q3 原状黄土的强度特性[J].干旱区资源与环境，2016(1).

[9] 邓亚虹，魏宝华，王晗，等.原状黄土变形与强度特性的加载速率效应[J].中国公路学报，2016(7).

[10] 彭芳乐，李福林，李建中，等.加载速率变化条件下砂土的黏塑特性及本构模型[J].岩土力学与工程学报，2008(8).

[11] 周杰，周国庆，赵光思，等.高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J].岩土力学，2010(9).

[12] 李建中，徐力生.低含水率黏土的加载速率效应与蠕变变形[J].煤炭地质与勘探，2008(1).

[13] GB /T 50123－1999　土工试验方法标准[S].

[14] 朱桐浩，周婉珍，廖克碧.土壤三轴试验强度直线的回归分析[J].四川建筑科学研究，1979(2).

[15] 陈立宏，陈祖煜，李广信.三轴试验抗剪强度指标线性回归方法的讨论[J].岩土力学，2005(11).

[16] 武立波，牛富俊.宁东黄土状粉土三轴试验变形数据处理方式[J].中外公路，2016(5).

[17] 宋学庆.石灰粉煤灰黄土工程性质试验研究[J].中外公路，2017(5).