

文章编号:1673-2049(2014)02-0112-07

三七灰土本构关系及强度性质试验

米海珍,黄建明,胡燕妮

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:对6种含水率、4种不同围压条件下的灰土试样进行了室内不固结、不排水的三轴试验,探讨了不同含水率试样适用的本构模型及其强度变化规律。试验结果表明:灰土的脆塑性受含水率和围压共同制约,不同含水率情况下,灰土的应力-应变关系有着不同的形式,在含水率较低时可采用胡克模型,含水率较高时采用邓肯-张模型更为合理,这一含水率界限应在塑限附近;三七灰土的强度参数均可由含水率和围压给出;所得结论可为三七灰土工程数值模拟计算提供参考,具有工程应用价值。

关键词:灰土;应力-应变曲线;强度;初始弹性模量;脆塑性;含水率;邓肯-张模型

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Experiment on Constitutive Relation and Strength Properties of Three-to-seven Lime-loess

MI Hai-zhen, HUANG Jian-ming, HU Yan-ni

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to investigate the suitable constitutive model of different moisture content samples and intensity variation, authors designed multiple unconsolidated and undrained triaxial tests of 6 kinds of moisture contents and 4 different confining pressures. The test results show that brittleness and plasticity of lime-loess is influenced by moisture content and confining pressure actually, the stress-strain curve changes with the variation of moisture content, Hooke model is applicable when the moisture content is low, on the contrary, Duncan-Chang model can be only used in a situation of high moisture content, this boundary of moisture content should be near the plastic limit based on those tests, and strength parameters can be given by moisture content and confining pressure. The conclusions can provide a reference to the numerical simulation of three-to-seven lime-loess, and have great significance in application engineering.

Key words: lime-loess; stress-strain curve; intensity; initial elastic modulus; brittleness and plasticity; moisture content; Duncan-Chang model

0 引言

灰土是黄土地基处理中常用的一种土工材料,它能够有效地改善地基的工程性能,而且施工便捷、环保、经济,因此在许多实际工程地基处理时常被

选用。

目前对灰土强度和变形特性的研究有诸多成果,如灰土适用的工程条件^[1]、灰土强度的影响因素以及施工时的现场控制等^[2],但是对其应力-应变关系、弹性模量、材料动力学特性^[3]等方面的工作

收稿日期:2014-01-24

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(3ZSO42-B25-031);兰州理工大学基金项目

作者简介:米海珍(1956-),男,甘肃庆阳人,教授,工学博士,E-mail:mihaizhen@126.com。

还较为零碎。有学者认为水泥土的应力-应变关系为加工软化型,灰土的应力-应变关系为加工硬化型,水泥土主要为脆性破坏,灰土主要表现为塑性破坏^[4];刘有科^[5]将“胶结杆脆断模型”引入灰土的应力-应变曲线,解释试验过程中灰土试样呈现的脆性破坏现象;笔者对灰土的浸水强度和残余强度进行了研究^[6-7],结果表明,残余强度与围压呈线性关系,同时还认识到灰土材料不可简单地判断为一种脆断性材料,其塑性和脆性随含水率和围压的变化而有所不同。

总的来说,对灰土材料的强度和变形性质的研究工作仍显不足,且多为对无侧限抗压强度及其影响因素的讨论,缺乏全面、准确地反映材料强度和变形性质的工作。鉴于灰土本构关系和强度性质研究的必要性,笔者设计了多组室内三轴试验,探讨了三七灰土在复杂应力条件下的强度变化特征和变形规律,包括强度随含水率及围压的变化、土体应力-应变关系、脆塑性的评判以及运用邓肯-张模型的前提条件等,由此获取一些定量的数学描述,以便能为理论研究提供参考并为工程设计提供依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用试样由熟石灰和黄土以体积比 3 : 7 配制,其中,黄土取于甘肃兰州市兰工坪,此处为黄河Ⅲ级阶地,试验用黄土的基本物理性能指标见表 1;石灰为新鲜镁质消石灰,CaO 含量(质量分数) 74.8%,MgO 含量 8.1%,属优等品。配制成灰土后,其液限为 31.6%,塑限为 20.5%。

表 1 试验用黄土的物理性能指标

Tab. 1 Physical Performance Indexes of Loess in Test

黄土类型	土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
粉质粘土	2.69	25.4	16.1	9.3

1.2 试验参数

试样含水率选在 8%~30% 范围内,共 6 种;围压选用 50,100,150,200 kPa 四种情形。

用制样模制样(试样的高度为 125 mm,直径为 61.8 mm)。将制成的土样埋入与试样含水率相同的素黄土中,用塑料布包裹,保持含水率不变,养护 3 个月,试验后测含水率,本文中给出的含水率为试验后测得值。

1.3 试验仪器及试验方法

试验采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪(江苏南京土壤仪器厂有限公司生产)。考虑到灰土在

用于地基改造、加固时,通常采用最优含水率,在压缩时不可能排水,因此试验采用不固结、不排水的剪切方式。

2 试验结果与分析

图 1 为不同围压下的应力-应变关系,其中, ω 为含水率, σ_3 为围压。表 2 为不同含水率、不同围压下试样的峰值强度、比例强度以及初始弹性模量。

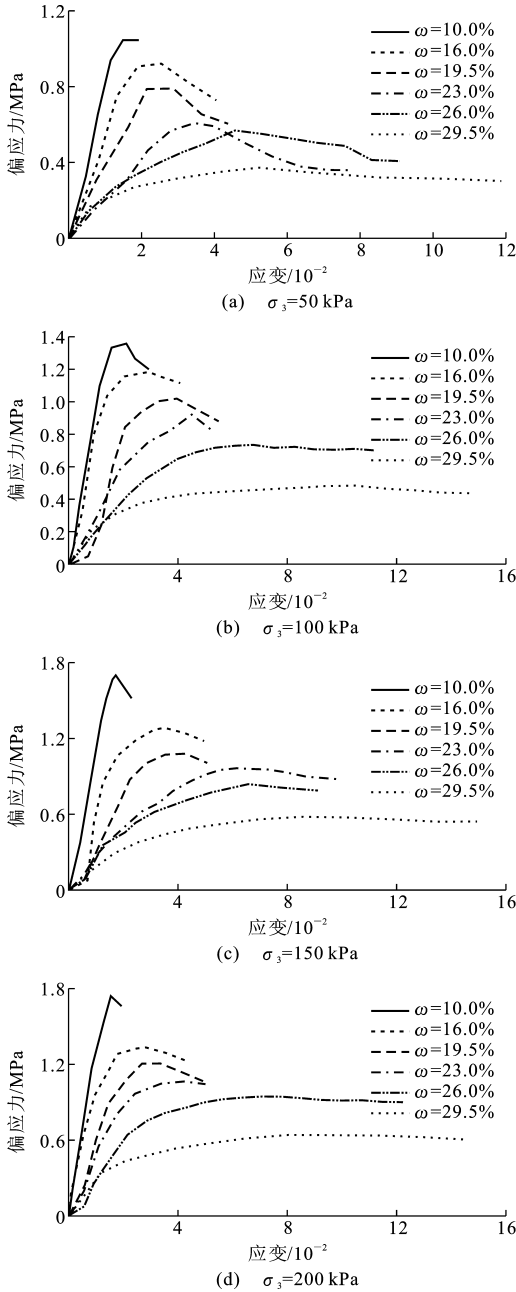


图 1 不同围压下的应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain Curves Under Different Confining Pressures

2.1 三七灰土的强度规律

三七灰土的强度规律按以下2种方式给出:一

表 2 不同含水率、不同围压下试样的强度及初始弹性模量

Tab.2 Strengths and Initial Elastic Moduli of Samples

Under Different Moisture Contents and

Confining Pressures

含水率/%	围压/kPa	峰值强度/ kPa	比例强度/ kPa	初始弹性 模量/kPa
10.0	50	1 050.0	1 050.0	724.04
	100	1 358.4	1 340.0	902.79
	150	1 697.3	1 697.3	1 054.12
	200	1 738.8	1 738.8	1 158.74
16.0	50	918.5	800.0	453.76
	100	1 183.9	950.0	781.44
	150	1 286.0	1 020.0	838.58
	200	1 335.6	1 150.0	896.74
19.5	50	788.1	786.2	343.93
	100	1 020.3	800.0	431.74
	150	1 083.6	880.0	464.04
	200	1 211.0	1 050.0	649.38
23.0	50	610.5	463.4	211.24
	100	919.2	690.0	343.76
	150	962.1	820.0	378.92
	200	1 059.2	965.0	498.24
26.0	50	564.6	370.0	151.42
	100	733.2	594.0	181.52
	150	839.9	610.0	200.52
	200	946.8	747.0	292.08
29.5	50	373.0	182.0	81.82
	100	484.0	250.0	112.22
	150	579.9	330.0	167.52
	200	643.8	400.0	212.88

种是将试样视为一般的固体材料,其强度规律用应力-应变关系曲线中的比例强度和峰值强度描述;另一种是将试样视为散体材料,以 c, φ 值给出,其中, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角。

2.1.1 三七灰土应力-应变关系曲线

(1)应力-应变曲线形状

含水率对应力-应变曲线的影响。同一围压情形下,随着含水率的增加,各曲线峰值逐渐下降,曲线的切线模量随着含水率的增加而减小(图 1)。当含水率较低时,整个曲线呈直线形,此时材料表现出明显的脆性性质;当含水率增高时,曲线的直线段越来越短,即比例强度越来越小,应力在达到峰值后迅速衰减,此种情况的应力-应变曲线呈现加工软化材料的特性;当含水率继续增加,直至超过塑限时,应力-应变曲线的直线段基本消失,应力在达到峰值后无衰减现象,而应变不断增加,表现出流动性质,符合加工硬化材料的性质。因此,灰土线弹性应力-应

变关系只适用于含水率较小的情形,当含水率超过一定值时,灰土应力-应变关系就应该用双曲线模型,而这一含水率在灰土的塑限附近(在本次试验中)。

围压对应力-应变曲线的影响。由图 1 可知:对于低含水率的试样,由于其应力-应变曲线呈直线形,当围压增加时,其应力-应变关系直线段变长,且斜率明显增大,破坏应变也明显减小;而对于高含水率的试样,围压的增加使得初始弹性模量不断增加,曲线直线段不断缩短,应力水平提高的速率越来越慢,峰值强度越来越大。

(2)曲线的初始弹性模量

对不同含水率和围压的应力-应变曲线的比例强度段内数据进行线性拟合进而求得曲线的初始弹性模量 E_i 。图 2 为初始弹性模量随含水率的变化,图 3 为初始弹性模量随围压的变化。

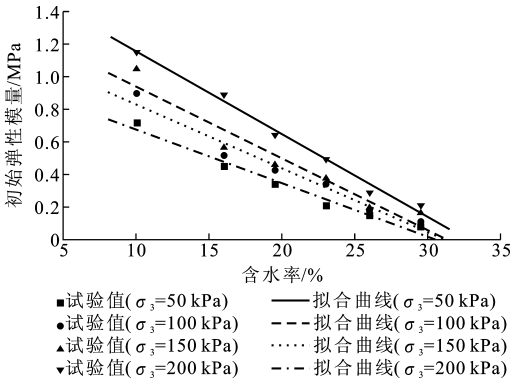


图 2 初始弹性模量随含水率的变化

Fig.2 Variations of Initial Elastic Moduli with Moisture Contents

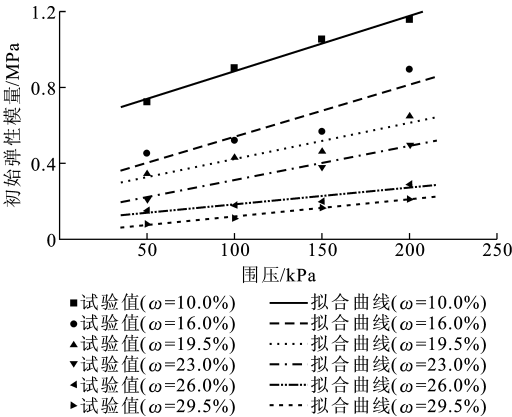


图 3 初始弹性模量随围压的变化

Fig.3 Variations of Initial Elastic Moduli with Confining Pressures

从图 2,3 可以看出,初始弹性模量不论随围压还是含水率变化都近似呈线性。考虑到初始弹性模量 E_i 受含水率和围压共同影响,利用 MATLAB 软

件对各组数据进行二元拟合,得

$$E_i=0.012\sigma_3^2+0.347\omega^2-0.067\omega\sigma_3-0.105\sigma_3-50.886\omega+1\,348.987 \quad (1)$$

式(1)拟合过程中的相对误差不超过 20%。

(3)峰值强度规律

本文中分别以含水率、围压为横坐标,峰值强度和比例强度为纵坐标,将表 2 中统计的峰值强度和比例强度绘制于相应的坐标系中,如图 4~7 所示。

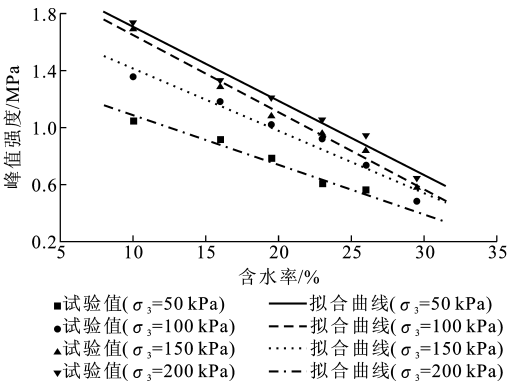


图 4 峰值强度随含水率的变化

Fig. 4 Variations of Peak Strengths with Moisture Contents

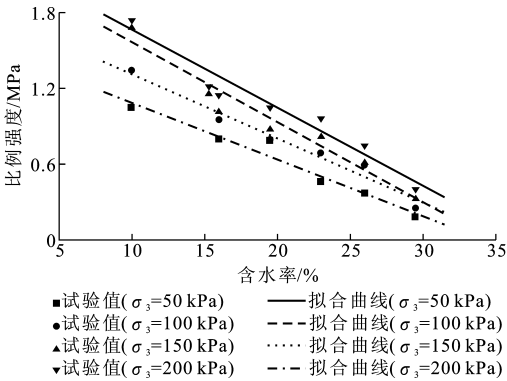


图 5 比例强度随含水率的变化

Fig. 5 Variations of Proportional Strengths with Moisture Contents

由此可知,不论是峰值强度还是比例强度均随含水率的增加呈线性减小,随围压的增加而呈线性增大。利用 MATLAB 拟合比例强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_e$ 、峰值强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_p$ 与含水率和围压的关系,得

$$(\sigma_1-\sigma_3)_e=0.006\sigma_3^2-0.732\omega^2+2.827\sigma_3-9.013\omega+1\,281.97 \quad (2)$$

$$(\sigma_1-\sigma_3)_p=0.012\,5\sigma_3^2-0.18\omega^2-0.111\omega\sigma_3+1.674\sigma_3-36.583\omega+1\,523.109 \quad (3)$$

式中: σ_1 为竖向应力。

式(2),(3)拟合的相对误差均小于 20%。

2.1.2 三七灰土的 c, φ 值及其规律

对不同含水率的试样,取峰值强度对应的围压

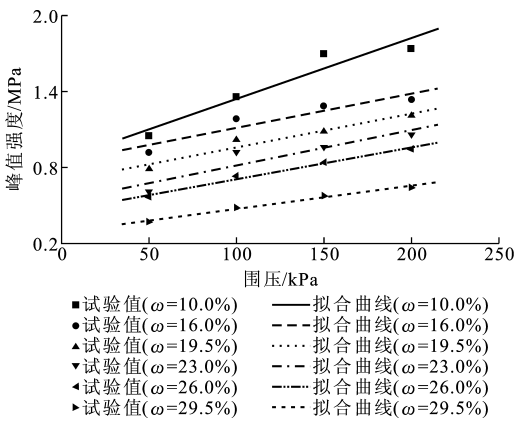


图 6 峰值强度随围压的变化

Fig. 6 Variations of Peak Strengths with Confining Pressures

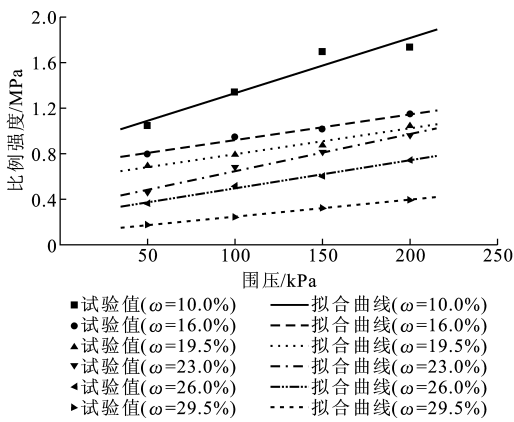


图 7 比例强度随围压的变化

Fig. 7 Variations of Proportional Strengths with Confining Pressures

σ_3 与偏差应力 $\sigma_1-\sigma_3$ 绘制莫尔圆,如图 8 所示,其中, σ 为土中正应力, τ 为土中剪应力。不同含水率土体的粘聚力和内摩擦角如表 3 所示。

对含水率与粘聚力、含水率与内摩擦角的关系进行拟合,得到粘聚力随含水率增加以二次函数关系递减(图 9),内摩擦角随着含水率增加呈线性减小趋势(图 10),具体数学关系式为

$$c=230.871\,23+4.964\,67\omega-0.323\,97\omega^2 \quad R^2=0.991\,3 \quad (4)$$

$$\varphi=44.092\,53-0.587\,54\omega \quad R=-0.963 \quad (5)$$

式中: R 为相关系数; R^2 为判定系数。

2.2 利用邓肯-张模型的条件

邓肯-张模型假设应力-应变关系具有双曲线形式,能够反映土体变形的非线性。以含水率 $\omega=29.5\%$ 时的试样为例,探讨含水率超过塑限时,三七灰土三轴试验结果与邓肯-张模型的吻合情况。

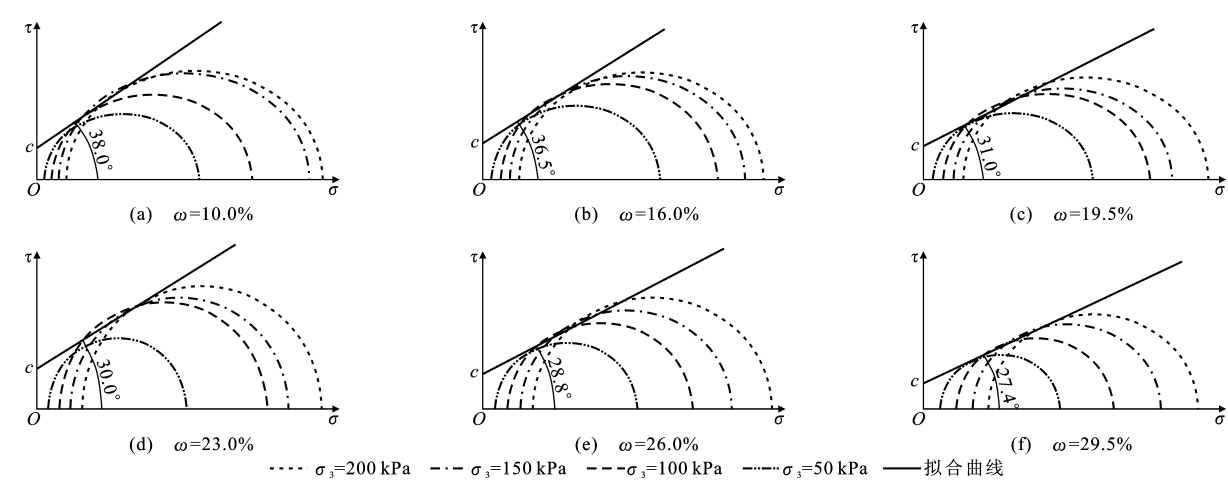


图 8 灰土的抗剪强度包络线

Fig. 8 Shear Strength Envelopes of Lime-loess

表 3 不同含水率土体的粘聚力和内摩擦角
Tab.3 Cohesive Forces and Internal Friction Angles of Samples with Different Moisture Contents

含水率 ω / %	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
10.0	250	38.0
16.0	225	36.5
19.5	200	31.0
23.0	175	30.0
26.0	150	28.8
29.5	90	27.4

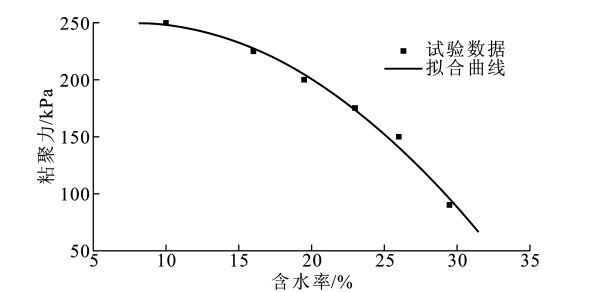


图 9 粘聚力随含水率的变化

Fig. 9 Variations of Cohesive Forces with Moisture Contents

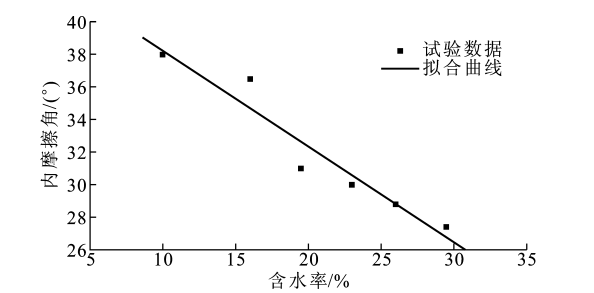


图 10 内摩擦角随含水率的变化

Fig. 10 Variations of Internal Friction Angles with Moisture Contents

2.2.1 c, φ 值的确定

c, φ 的具体值由三轴试验测得, 本例可由表 3 查取。

2.2.2 破坏比 R_f 值的确定

由邓肯-张模型中切线弹性模量的求解方法^[7]可知

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2ccos(\varphi) + 2\sigma_3sin(\varphi)}{1 - sin(\varphi)} \tag{6}$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \tag{7}$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为模型灰土峰值强度; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为模型灰土长期强度。

邓肯-张模型应符合

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \tag{8}$$

式中: ϵ_1 为轴向应变; b 为直线的斜率; a 为截距。

将三轴试验结果在 $\epsilon_1 - \epsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 的坐标系中拟合。初始弹性模量 E_i 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的计算公式为

$$E_i = 1/a \tag{9}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b \tag{10}$$

由此得到不同围压下邓肯-张模型的部分参数计算结果, 如表 4 所示。

2.2.3 参数 K, n 值的确定

绘制 $lg(\sigma_3 / kPa) - lg(E_i / MPa)$ 的关系曲线, 如图 11 所示。

由下式

$$E_i = KP_a(\sigma_3 / P_a)^n \tag{11}$$

可知

$$K = 0.666\ 14$$

$$n = 0.243\ 02$$

式中: $P_a = 1.01\ kPa$ 。

表 4 邓肯-张模型中部分参数计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Parameters of Duncan-Chang Model

σ_3/kPa	a	b	E_i/MPa	$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ult}}/\text{kPa}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_f/\text{kPa}$	R_{fi}	R_f
50	0.002 56	0.002 22	0.390 6	450.45	381.30	0.85	0.875
100	0.002 08	0.001 87	0.480 8	534.76	466.56	0.87	
150	0.001 93	0.001 64	0.518 1	609.76	551.81	0.90	
200	0.001 83	0.001 38	0.546 4	724.64	637.06	0.88	

注： R_{fi} 为不同围压下的破坏比。

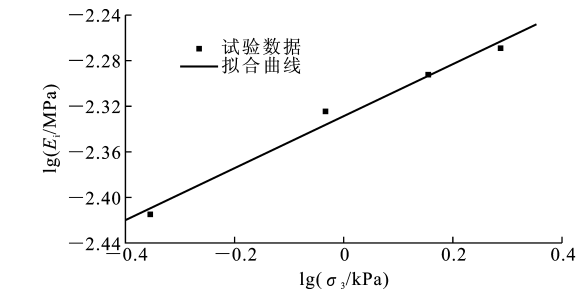


图 11 $\lg(\sigma_3/\text{kPa})$ - $\lg(E_i/\text{MPa})$ 关系

Fig. 11 Relations Between $\lg(\sigma_3/\text{kPa})$ and (E_i/MPa)

在数据的统计拟合过程中, $\epsilon_1-\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3)$, $\lg(\sigma_3/\text{kPa})$ - $\lg(E_i/\text{MPa})$ 都呈现近似的线性关系, 与邓肯-张模型中用双曲线来拟合土体应力-应变关系的情形吻合较好。笔者对含水率较小和围压较低时测得的三轴试验数据进行了拟合, 发现 $\epsilon_1-\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3)$ 与 $\lg(\sigma_3/\text{kPa})$ - $\lg(E_i/\text{MPa})$ 的线性拟合较难实现或参数 a, b 取值的规律不明显, 原因是其应力-应变关系曲线与双曲线形状相差较大。因此, 对于含水率低于塑限的试样, 邓肯-张模型便不适用; 当含水率超过塑限附近(该值似应在塑限附近)某一值时, 其应力-应变关系才符合邓肯-张模型。

2.3 三七灰土的变形

2.3.1 灰土材料的脆塑性

有关规范规定, 试验土样若无明显的破坏特征, 则以其轴向应变达到 0.15~0.2 为破坏判据。从图 1 中得到峰值强度对应的应变和破坏应变, 如图 12, 13 所示。

从图 12, 13 可以看出, 灰土的变形比较小, 峰值强度对应的应变最大值不超过 0.1, 应变最小值为 0.016~0.02, 这表明灰土更具有脆性特点。从图 12, 13 还可以看出: 在低含水率时, 材料达到峰值强度时所对应的应变最大值为 0.04, 表现出明显的脆性; 随着含水率的增加, 试样破坏时所对应的应变逐渐增大, 材料的塑性性质越来越明显。含水率增加直至超过塑限的过程, 是应力-应变曲线由直线逐渐过渡到双曲线的过程, 应力水平达到一定程度后基本保持不变, 应变明显增加(可以认为具有流动性

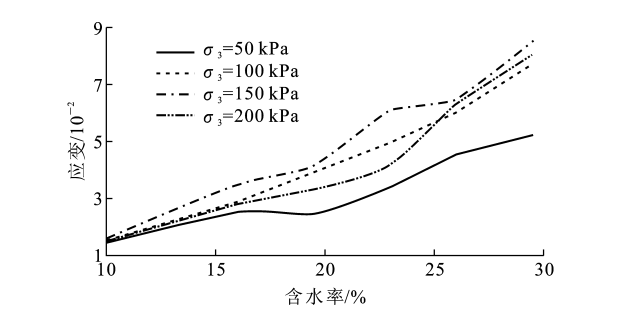


图 12 峰值强度时应变随含水率的变化

Fig. 12 Variations of Strains with Moisture Contents at Peak Strength

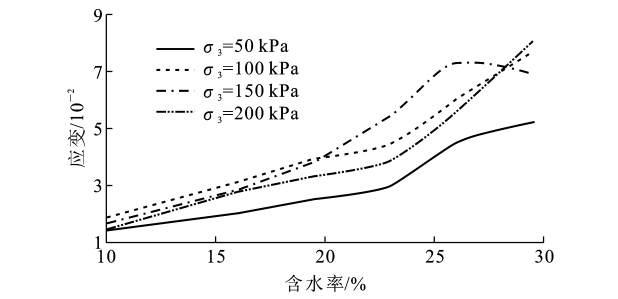


图 13 不同围压下破坏应变随含水率的变化

Fig. 13 Variations of Failure Strains with Moisture Contents Under Different Confining Pressures

质), 材料表现出明显的塑性性质。

此外, 由图 12, 13 还可以看出: 围压使土体应力-应变关系硬化趋势越来越明显, 围压的增加有使土体由脆性向塑性转化的作用; 同时, 随着含水率的增加, 围压对材料破坏时应变的影响也越来越大, 材料的脆性性质将逐渐减弱。

2.3.2 变形和破坏

以围压为 200 kPa 时不同含水率试样的应力-应变曲线为例, 当 $\omega < 23\%$ 时, 由于试样呈现出很强的类脆性, 取其应力-应变关系曲线的峰值为破坏强度; 当含水率较高时, 曲线形式接近理想弹-塑性模型, 曲线无明显峰值, 达到某一应力后下降不明显, 此时, 应以应变来确定其破坏强度。从某种意义上说, 含水率的高低决定着变形和破坏的特征。变形与破坏的关系, 具体应视土体应力-应变关系而定。

若应力-应变关系为理想弹性-塑性模型(对应应变硬化材料),试样应力状态达到其屈服应力时,会发生很大的变形,但是屈服并不意味着破坏,只能说明土体达到其强度。此种情形下若保持一定应力水平,应变会不断增加,因此,可规定当土体应变达到某一值时为破坏,此时,可由应变判定破坏;对于应变软化材料而言,屈服就意味着土体发生破坏。

3 结 语

(1) 三七灰土的初始弹性模量和其强度均可由含水率和围压的二元二次多项式关系定量表述。

(2) 含水率的增加使三七灰土内摩擦角呈线性减小,粘聚力以二次函数形式减小。

(3) 存在某一含水率界限值使三七灰土由加工软化材料转变为加工硬化材料。这一含水率界限值应在塑限附近,由本次试验结果可知,含水率界限值应介于 23%~26% 之间,由于试验数量较少,该界限值还不能准确给出。

(4) 对于高围压和高含水率的灰土试样,其应力-应变关系与邓肯-张模型吻合很好,故建议在低含水率时灰土的应力-应变关系采用胡克定律(直线形),在高含水率时其弹性模量成为变数,需要采用邓肯-张模型,这两者之间的含水率界限值应在塑限附近。

参考文献:

References:

- [1] 郭婷婷,张伯平,田志高,等. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):719-721.
GUO Ting-ting, ZHANG Bo-ping, TIAN Zhi-gao, et al. Study on Engineering Characteristic of Lime-fly-ash Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 719-721.

- [2] 韩晓雷,郅彬,郭志勇. 灰土强度影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):667-669.
HAN Xiao-lei, ZHI Bin, GUO Zhi-yong. Research on the Principal Factors in Strength of the Lime-loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 667-669.
- [3] 白颢,孔令伟. 固结比对石灰土动力特性的影响试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1590-1594.
BAI Hao, KONG Ling-wei. Experimental Research on Influence of Consolidation Ratio on Dynamic Characteristics of Lime-treated Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1590-1594.
- [4] 王天亮,刘建坤,田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):193-198.
WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Static Properties of Cement- and Lime-modified Soil Subjected to Freeze-thaw Cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198.
- [5] 刘有科. 灰土强度影响因素及其本构关系的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
LIU You-ke. Research on the Influence Factors in Strength and the Constitutive Relationship of the Lime-loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [6] 米海珍,王昊,高春,等. 灰土的浸水强度及残余强度的试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2781-2785.
MI Hai-zhen, WANG Hao, GAO Chun, et al. Study of Immersion Strength and Residual Strength of Lime-loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2781-2785.
- [7] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.