

文章编号: 1000-4750(2013)10-0108-07

# 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性

胡长明<sup>1</sup>, 梅源<sup>1</sup>, 王雪艳<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学华清学院, 陕西, 西安 710043)

**摘 要:** 针对吕梁地区压实马兰黄土的变形及抗剪强度特性开展了压缩及直剪试验研究, 分析了初始压实度及初始含水量与抗剪强度指标之间的关系及其对土体压缩变形的影响, 并基于割线模量法提出了压实马兰黄土在初始压实度及初始含水量变化时的变形修正公式。研究表明: 压实马兰黄土初始含水量  $w$  及初始压实度  $K$  与粘聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  呈线性关系; 在不考虑压实度及含水量的影响时, 侧限压缩应变  $\varepsilon$  与垂直压力  $p$  关系可用  $\varepsilon=kp^n$  表达; 压实马兰黄土割线模量  $E_{soi}$  与  $K$  呈线性关系, 且与  $1/w$  的关系曲线与抛物线非常相似。建立的压实马兰黄土在初始压实度及初始含水量变化时的变形修正公式可以用于吕梁地区压实马兰黄土填筑地基变形分析与计算。

**关键词:** 压实马兰黄土; 抗剪强度; 变形特性; 割线模量; 变形系数

中图分类号: TU472 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0441

## DEFORMATION AND SHEARING STRENGTH CHARACTERISTIC OF COMPACTED MALAN LOESS IN LÜLIANG REGION

HU Chang-ming<sup>1</sup>, MEI Yuan<sup>1</sup>, WANG Xue-yan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Huaqing College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** Compression tests and direct shear tests are carried out to study the deformation and the shearing strength characteristics of compacted Malan Loess in Lüliang region. Analyses are made on the relationship between the initial compaction degree as well as the initial water content and the shear strength indexes and on their effects on the compressive deformation of soil. By employing secant modulus method, the modified formula of deformation is established, when initial compaction degree and initial water content of compacted Malan loess has been changed. The results of the research show that the relationship between the initial water content  $w$  as well as the initial compaction degree  $K$  and the cohesion  $c$  as well as the angle of internal friction is linear, and that the relationship between the confined compression strain  $\varepsilon$  and the vertical pressure  $p$  can be formulated as  $\varepsilon=kp^n$  without consideration of the effects of compaction degree and water content. Moreover, the results indicate that the relationship between the secant modulus  $E_{soi}$  and  $K$  is linear and that the relationship curve between  $E_{soi}$  and  $1/w$  is similar to a parabola. Hence, when the initial compaction degree and the initial water content have been changed, the modified formula of deformation can be used to analyze and calculate the deformation compacted Malan Loess in Lüliang region.

**Key words:** compacted Malan Loess; shearing strength; deformation characteristic; secant modulus; deformation coefficient

收稿日期: 2012-06-21; 修改日期: 2012-08-11

基金项目: 陕西省科技攻关计划项目(2011k10-20); 包头市科技计划项目(2011x1006)

通讯作者: 胡长明(1963—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士, 博导, 从事力学及施工技术的教学与科研工作(E-mail: hu.tm@163.com).

作者简介: 梅源(1983—), 男, 河南信阳人, 博士生, 从事岩土力学研究(E-mail: my0326@126.com);

王雪艳(1984—), 女, 河南许昌人, 助教, 硕士, 从事施工技术研究(E-mail: wxy19860412@163.com).

马兰黄土是典型的风积黄土, 结构疏松, 具有大孔隙, 垂直节理发育, 粒组成分以粉土为主, 土体各向异性明显。马兰黄土结构性较强, 力学性质不同于一般黄土, 在水软化作用下, 土体的物理、力学与水理性质呈现出明显的规律性, 属典型的水敏感性地质体, 常具有较强的湿陷性, 作为填料压实后, 即改变了马兰黄土原有的结构和物理力学状态, 不能完全按照一般黄土理论或是原状黄土的研究成果解决其强度分析及变形计算问题。吕梁山区广泛分布马兰黄土, 并常作为填料大规模应用于山区沟壑的填筑, 因此, 开展该地区的压实马兰黄土强度及变形特性的研究具有重要的工程意义。

国内外针对压实土或压实黄土的变形及强度问题开展的研究已经取得一些规律性成果。Lambe<sup>[1]</sup>认为在压实能和干密度相同的条件下, 最优含水率干侧压实的土比湿侧压实的土具有较高的强度、较低的侧限压缩性(限于较低作用应力下); Micheals<sup>[2]</sup>在试验中观察到非饱和的压实粘土含水率低于最优含水率时, 粘聚力随含水率减小而减小; 陈开圣<sup>[3]</sup>分析了压实黄土变形特性; 王林浩<sup>[4]</sup>对压实黄土状粉土的粘聚力与内摩擦角随干密度及含水率变化的总体趋势进行了定性研究; 骆以道<sup>[5]</sup>分析了含水状态影响压实土抗剪强度的机制; 申春妮<sup>[6]</sup>认为非饱和土的粘聚力和内摩擦角均随含水率增加而线性减小, 粘聚力随干密度呈指数增加; 程海涛<sup>[7]</sup>分析了干密度与含水率对强度参数的影响; 陈开圣<sup>[8]</sup>讨论了最优含水率附近的压实土样粘聚力与含水率的关系; 李保雄<sup>[9]</sup>揭示了不同沉积时代与含水状态下黄土抗剪强度的水敏感性特征及应力-变形机制; 张茂花<sup>[10]</sup>认为非饱和黄土的粘聚力随初始含水率的增大而迅速降低, 而内摩擦角受初始含水率变化的影响较小。除此之外, 苗天德<sup>[11]</sup>、陈正汉<sup>[12]</sup>、刘祖典<sup>[13]</sup>、张炜<sup>[14]</sup>等针对初始压实度及初始含水量变化导致压实马兰黄土填筑地基变形问题进行了大量的基础性研究。

上述研究作为本文的研究工作奠定了良好的基础。但研究内容或是针对一般压实土, 或是针对原状黄土, 即使针对的是压实黄土, 也没有将压实马兰黄土作为特例对待, 又由于不同地区的黄土土质情况不尽相同, 因此, 上述研究成果不能完全解决吕梁地区压实马兰黄土填筑地基的变形与强度问题。

本文通过压缩及直剪试验初步探讨了压实马

兰黄土初始压实度和初始含水率与抗剪强度指标及侧限压缩变形的关系, 并基于割线模量法提出了压实马兰黄土在压实度及含水量变化时的变形修正公式。研究成果可以用于压实马兰黄土填筑地基的变形分析与计算。

## 1 土样物理性质

### 1.1 主要物理指标

第四系上更新统马兰黄土( $Q_3^{col}$ )广泛分布于吕梁地区黄土梁、峁上, 是组成黄土丘陵顶部的主要地层, 岩性以粉土为主, 辅以少量粉质粘土, 结构疏松具有大孔隙, 具有较强的湿陷性, 垂直节理发育, 稍密-中密, 韧性及干强度低。试验制样采用的马兰黄土的主要物理性质指标见表 1, 粒组成分见表 2。

表 1 原状马兰黄土主要物理指标

Table 1 Main physical indices of Malan Loess

含水率 $w/(%)$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	饱和度 $S_r/(%)$	孔隙比 $e$	液限 $W_L/(%)$	塑限 $W_P/(%)$
11.2	1.41	33.7	0.924	25.3	16.2

表 2 吕梁地区马兰黄土的粒组成分

Table 2 Particle size distribution of Malan Loess in Lüliang

粒组	细砂	粉砂	粗粒粉土	细粒粉土	粘粒
粒径/ $\mu m$	75~250	50~75	10~50	5~10	<5
含量/(%)	0.7	16.6	58.0	8.9	15.8

### 1.2 最大干密度及最优含水率

为确定马兰黄土最大干密度  $\rho_{dmax}$  及最优含水率  $w_{op}$ , 开展了 6 组重型击实试验<sup>[15]</sup>。试验得到的含水率与干密度关系曲线见图 1。

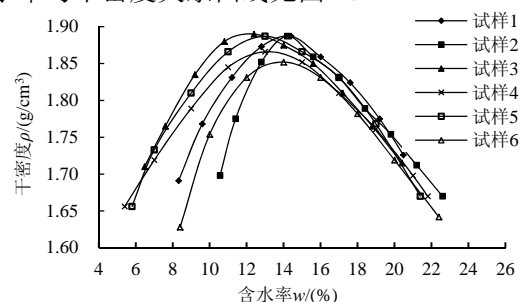


图 1 含水率与干密度关系曲线

Fig.1 Relationship curves between  $w$ - $\rho$

重型击实试验结果表明: 土样干密度随含水率的增加呈先增加后减小的规律, 当含水率至最优含水率后继续增加时, 土样干密度迅速下降, 类似于粘土, 表明马兰黄土对含水率比较敏感, 土样最优含水率为 12.3%~14.2%, 最大干密度为  $1.85g/cm^3 \sim 1.89g/cm^3$ 。

## 2 初始压实度及初始含水率对抗剪强度的影响

压实黄土一般属非饱和土，其初始含水率及初始压实度非常容易测定。尽管直接研究非饱和土的抗剪强度随初始含水率及初始压实度的变化是近似的和经验性的，但这种方法简单实用，也避免了吸力的量测困难<sup>[16]</sup>。压实黄土初始含水率和初始压实度变化对抗剪强度产生的影响主要由它们对粘聚力及内摩擦角产生的影响来反映。对于同一种土而言，初始压实度和初始含水率无疑是决定抗剪强度最主要的因素<sup>[5]</sup>。按照试样处于天然、最优、塑限、饱和状态的初始含水率水平及不同初始压实度水平制备试样进行直接快剪试验<sup>[15]</sup>，其中，初始压实度为 90% 的试样，初始含水率分别为 11.2%、12.7%、15.8%、21.5%；初始压实度为 93% 的试样，初始含水率分别为 11.2%、12.7%、15.8%、19.8%；初始压实度为 95% 的试样，初始含水率分别为 11.2%、12.4%、16.0%、18.9%；初始压实度为 98% 的试样，初始含水率分别为 11.2%、12.4%、16.0%、16.9%。

### 2.1 初始含水率及初始压实度对内摩擦角的影响

试验得到的试样内摩擦角与初始含水率及初始压实度变化曲线如图 2~图 3。

由图 2~图 3 可知：同一初始压实度水平下，试样内摩擦角  $\varphi$  值随着初始含水率  $w$  的增大而减小，且初始压实度越低，初始含水率对  $\varphi$  值的影响越大；同一初始含水率水平下  $\varphi$  值随初始压实度  $K$  增大而增大，并且初始含水率越大，初始压实度对  $\varphi$  值的影响越大。随着初始压实度的增大及初始含水率的降低，粘聚力及内摩擦角均会增加，但是初始含水率及初始压实度对粘聚力的影响程度远大于对内摩擦角的影响，粘聚力及内摩擦角与初始含水率及初始压实度呈线性关系。

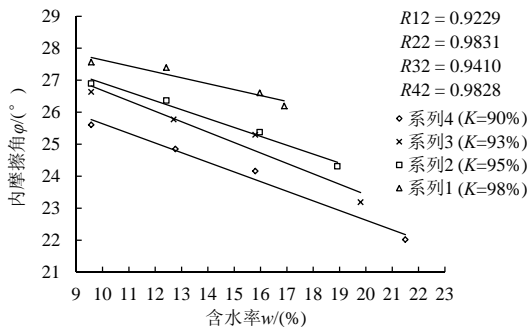


图 2 初始含水率与内摩擦角关系曲线  
Fig.2 Relationship curves of  $w-\varphi$

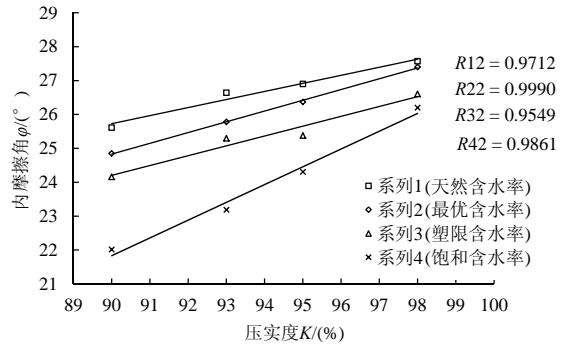


图 3 初始压实度与内摩擦角关系曲线  
Fig.3 Relationship curves of  $K-\varphi$

### 2.2 初始含水率及初始压实度对粘聚力的影响

试验得到的试样粘聚力与初始含水率及初始压实度变化曲线如图 4~图 5。

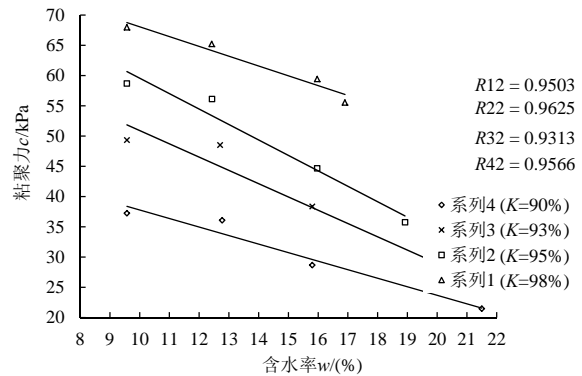


图 4 初始含水率与粘聚力关系曲线  
Fig.4 Relationship curves of  $w-c$

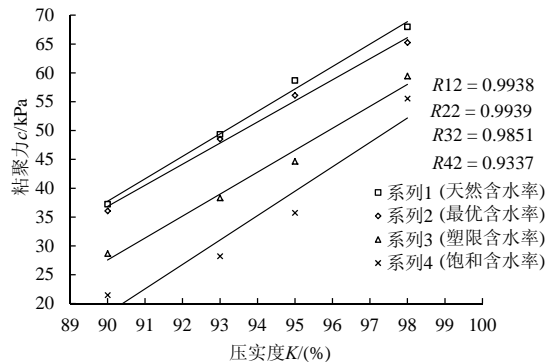


图 5 初始压实度与粘聚力关系曲线  
Fig.5 Relationship curves of  $K-c$

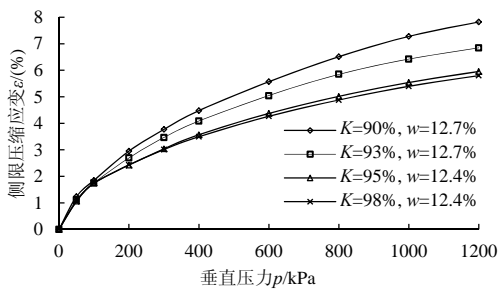
由图 4 可知：同一初始压实度水平下，粘聚力  $c$  随着初始含水率  $w$  的增大而减小，其原因可能是由于土中弱结合水膜中的水分子随初始含水率增大而增加，对土体颗粒的润滑作用越来越强，同时，自由水产生的水压力有使土颗粒间咬合作用变小，从而使得粘聚力减小。另外，初始压实度越低，土体粘聚力受初始含水率影响越小。同时，当土体初始含水率低于最优含水率时， $c$  值受初始含水率

影响较小，当土体初始含水率大于最优含水率时， $c$  值受初始含水率影响显著。

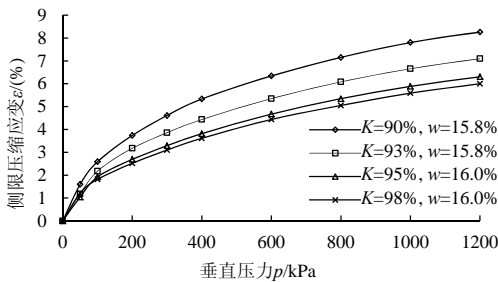
由图 5 可知：同一初始含水率水平下，粘聚力  $c$  值随初始压实度增大而增大，这是由于初始压实度越大，土粒接触越紧，咬合作用越大。同时，孔隙比缩小也有利于土中自由水压力的发挥。另外，不同初始含水率水平下，粘聚力随初始压实度增加表现出变化趋势基本相同，这种规律表明：不同初始含水率条件下，提高土体初始压实度所导致的粘聚力增加量基本不受初始含水率水平的限制。

### 3 初始压实度及初始含水率对压缩变形的影响

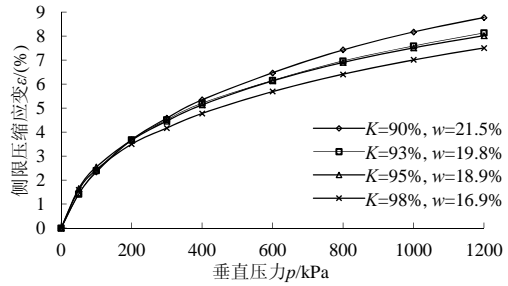
为明确初始压实度及初始含水率的变化对压实马兰黄土压缩变形的影响，配制不同初始压实度及初始含水率的试样进行压缩试验<sup>[15]</sup>。其中，初始压实度为 90% 的试样，初始含水率分别为 12.7%、15.8%、21.5%；初始压实度为 93% 的试样，初始含水率分别为 12.7%、15.8%、19.8%；初始压实度为 95% 的试样，初始含水率分别为 12.4%、16.0%、18.9%；初始压实度为 98% 的试样，初始含水率分别为 12.4%、16.0%、16.9%。试验加压等级分别为 50kPa、100kPa、200kPa、300kPa、400kPa、600kPa、800kPa、1000kPa、1200kPa，每级压力下的稳定标准为每小时变形不超过 0.01mm。试验过程中调节透水石的含水率与试样相接近，以免水分蒸发散失，试验得到的试样侧限压缩应变  $\varepsilon$  与垂直压力  $p$  的关系曲线如图 6 所示。



(a) 最优含水率状态



(b) 塑限含水率状态



(c) 饱和状态

图 6  $\varepsilon$ - $p$  关系曲线

Fig.6 Relationship curves of  $\varepsilon$ - $p$

图 6 表明，同一初始含水率水平下，初始压实度越大，侧限压缩应变越小，随着垂直压力的增大，初始含水率越高，侧限压缩应变增幅越大，这表明初始压实度对压缩变形的影响随初始含水率水平的提高而增大。纵向比较可知：同一初始压实度水平下，初始含水率越高侧限压缩应变越大，随着垂直压力的增大，初始压实度水平越高，侧限压缩应变增幅越小，表明初始含水率对压缩变形的影响随初始压实度水平的提高而减小。因此，提高初始压实度是控制压实马兰黄土填筑地基变形的有效方法之一。

从图 6 可以判断试样侧限压缩应变  $\varepsilon$  与垂直压力  $p$  关系曲线的形式类似于幂函数，采用幂函数对  $\varepsilon$ - $p$  关系曲线进行拟合，结果见表 3。

表 3  $\varepsilon$ - $p$  关系拟合结果

Table 3 Fitting result of  $\varepsilon$ - $p$  relationship

初始压实度 $K/(%)$	初始含水率 $w/(%)$	拟合公式	$R^2$
90	12.7	$\varepsilon = 0.1260p^{0.5896}$	0.9974
93	12.7	$\varepsilon = 0.1239p^{0.5756}$	0.9952
95	12.4	$\varepsilon = 0.1412p^{0.5341}$	0.9951
98	12.4	$\varepsilon = 0.1468p^{0.5247}$	0.9945
90	15.8	$\varepsilon = 0.2404p^{0.5086}$	0.9899
93	15.8	$\varepsilon = 0.1655p^{0.5412}$	0.9808
95	16.0	$\varepsilon = 0.1436p^{0.5423}$	0.9857
98	16.0	$\varepsilon = 0.1766p^{0.5013}$	0.9988
90	21.5	$\varepsilon = 0.1711p^{0.5654}$	0.9906
93	19.8	$\varepsilon = 0.1968p^{0.5360}$	0.9840
95	18.9	$\varepsilon = 0.2587p^{0.4920}$	0.9931
98	16.9	$\varepsilon = 0.2618p^{0.4795}$	0.9940

表 3 表明：压实马兰黄土的  $\varepsilon$ - $p$  关系符合幂函数的形式，即：

$$\varepsilon = kp^n \quad (1)$$

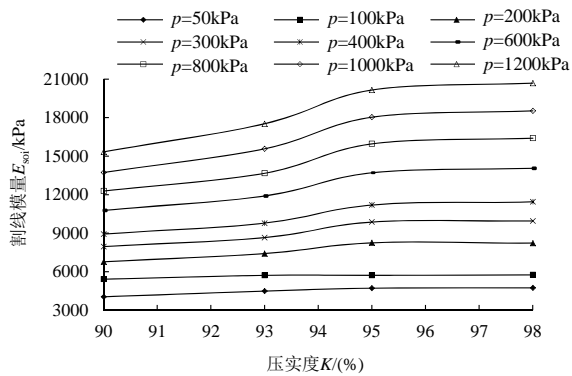
其中  $k$ 、 $n$  为常数，可通过试验得到。

## 4 压实马兰黄土变形修正公式

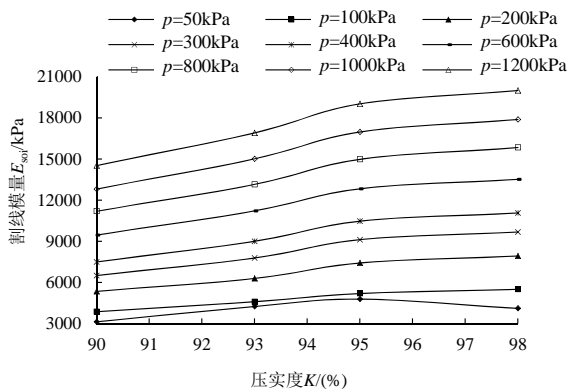
### 4.1 初始压实度与割线模量关系

根据压缩试验结果，绘制割线模量与初始压实

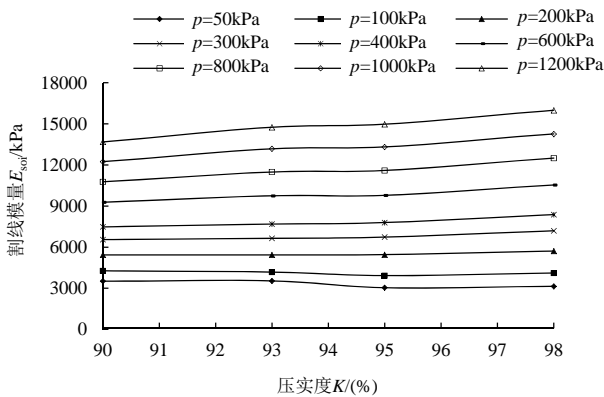
度的关系曲线如图 7 所示。



(a) 最优含水率状态



(b) 塑限含水率状态



(c) 饱和状态

图 7 初始压实度与割线模量关系曲线

Fig.7 Relationship curves of  $K-E_{soi}$

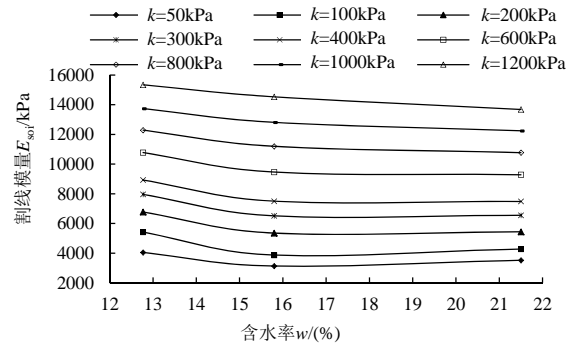
图 7 表明： $E_{soi}$  在初始压实度为 93%~95% 时受初始含水率状态影响较大，且此范围内  $E_{soi}$  的变化幅度随着初始含水率的增加而减小。且不难发现，试样的割线模量在不同初始含水率状态下随初始压实度增加而增大的线性关系是明确的，可用式(2)对压实马兰黄土的割线模量  $E_{soi}$  与初始压实度  $K$  的关系加以描述，即：

$$E_{soi}^K = \alpha K_i + \beta \quad (2)$$

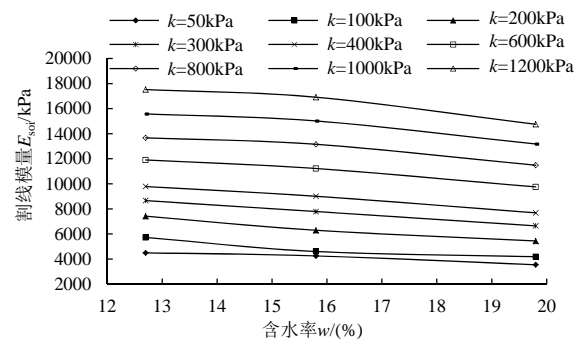
式中， $\alpha$ 、 $\beta$  为常数，可通过试验得到。

#### 4.2 初始含水率与割线模量关系

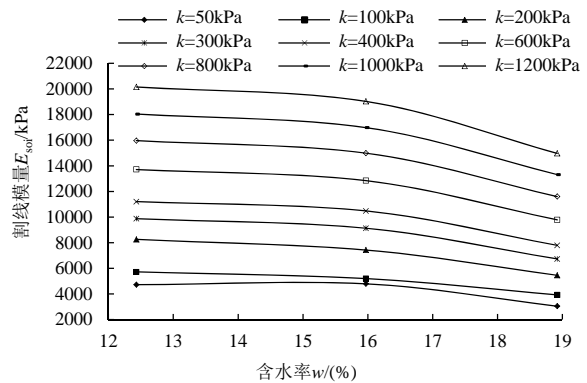
根据压缩试验结果，绘制割线模量与初始含水率的关系曲线如图 8 所示。



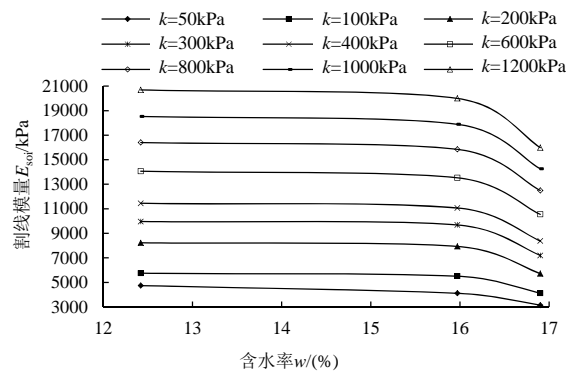
(a)  $K=90\%$



(b)  $K=93\%$



(c)  $K=95\%$



(d)  $K=98\%$

图 8 初始含水率与割线模量关系曲线

Fig.8 Relationship curves of  $w-E_{soi}$

不难发现, 试样的割线模量在不同初始压实度水平下随初始含水率的增加而减小, 在试样处于塑限状态时, 初始压实度对割线模量  $E_{\text{soil}}$  影响较大, 可见, 只有当土体饱和度达到一定水平时, 初始压实度的增加才会对土中自由水压力的发挥产生较大影响。

对试验数据进一步分析发现, 试样割线模量  $E_{\text{soil}}$  与初始含水率的倒数  $1/w$  的关系曲线与抛物线非常相似, 通过回归可确定趋势方程为:

$$E_{\text{soil}}^w = \frac{a}{w^2} + \frac{b}{w} + c \quad (3)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

初始压实度或初始含水率与割线模量的关系可采用土粒与水相互作用规律加以解释: 当初始压实度较低时, 土体孔隙比较大, 土粒间的接触相对较松, 土中自由水及气体较容易排出, 含水率的变化不会对土体强度造成较大影响; 当初始压实度很大时, 土体空隙比较小, 土粒间的接触相对较紧, 土中自由水及气体排出较困难, 土中自由水的压力发挥的比较充分, 因此, 初始含水率增加时同样不会带来土中水的压力的大幅变化。当压实度一定时, 初始含水率增加, 土中水以弱结合水膜形式存在的水分子越来越多, 自由水也越多, 当自由水压力达到一定水平时, 含水率的变化引起的水压力的变化幅度就会减小, 含水率的变化对强度的影响也随之减小。

### 4.3 压实马兰黄土填筑地基变形修正公式

当试样在压力  $p_i$  作用下, 由某一初始含水率或初始压实度由  $w_1$  或  $K_1$  变化至  $w_2$  或  $K_2$  时, 试样的割线模量  $E_{\text{soil1}}^*$  变为  $E_{\text{soil2}}^*$  (\*代表  $w$  或  $K$ ), 试样侧限压缩应变由  $\varepsilon_{i1}^*$  变为  $\varepsilon_{i2}^*$ 。设  $h_0$  为试样初始高度, 得到在压力  $p_i$  作用下, 试样变形量:

$$\begin{cases} \Delta h_{i1} = \varepsilon_{i1}^* h_0 \\ \Delta h_{i2} = \varepsilon_{i2}^* h_0 \end{cases} \quad (4)$$

由割线模量定义:  $E_{\text{soil}} = p_i / \varepsilon_i$ , 可以得到试样在荷载  $p_i$  作用下的变形量:

$$\Delta H = |\Delta h_{i2} - \Delta h_{i1}| = p_i h_0 \left| \frac{1}{E_{\text{soil2}}^*} - \frac{1}{E_{\text{soil1}}^*} \right| \quad (5)$$

将式(2)、式(3)分别代入式(5)中, 并由试样变形系数定义:  $\Delta \delta_{i1,2} = \Delta H / h_0$  可得压力  $p_i$  作用下, 试样初始含水率或初始压实度由  $w_1$  或  $K_1$  变化至  $w_2$  或  $K_2$  时的变形系数:

$$\begin{cases} \Delta \delta_{i1,2}^w = p_i \frac{\left| a \left( \frac{1}{w_1^2} - \frac{1}{w_2^2} \right) + b \left( \frac{1}{w_1} - \frac{1}{w_2} \right) \right|}{\left( \frac{a}{w_2^2} + \frac{b}{w_2} + c \right) \left( \frac{a}{w_1^2} + \frac{b}{w_1} + c \right)} \\ \Delta \delta_{i1,2}^K = p_i \frac{\alpha(K_2 - K_1)}{(\alpha K_1 + \beta)(\alpha K_2 + \beta)} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 当填筑体初始含水率或初始压实度发生变化的土层厚度为  $S^*$  时, 其修正变形量  $\Delta H^*$  为:

$$\begin{cases} \Delta H^w = p_i S^w \frac{\left| a \left( \frac{1}{w_1^2} - \frac{1}{w_2^2} \right) + b \left( \frac{1}{w_1} - \frac{1}{w_2} \right) \right|}{\left( \frac{a}{w_2^2} + \frac{b}{w_2} + c \right) \left( \frac{a}{w_1^2} + \frac{b}{w_1} + c \right)} \\ \Delta H^K = p_i S^K \frac{\alpha(K_2 - K_1)}{(\alpha K_1 + \beta)(\alpha K_2 + \beta)} \end{cases} \quad (7)$$

沟壑区地基填筑施工过程中, 下部土层的上部荷载逐渐变大, 其初始压实度由于压缩变形而不断增加。地表水浸入及水分蒸发或迁移亦会导致填筑体初始含水率发生变化。所以, 计算施工期及工后期填筑地基变形时, 可先不考虑含水率及压实度的影响, 采用式(1)计算填筑体变形量, 后采用式(7)计算在压力  $p_i$  作用下试样初始含水率或初始压实度由  $w_1$  或  $K_1$  变化至  $w_2$  或  $K_2$  时的变形系数, 对式(1)计算结果加以修正。

## 5 结论

本文通过系列试验探讨了吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性, 在此基础上得到了以下初步认识:

(1) 随着初始压实度的增大及初始含水率的降低, 压实马兰黄土粘聚力及内摩擦角均会增加, 但初始含水率及初始压实度对粘聚力的影响程度远大于对内摩擦角的影响, 粘聚力及内摩擦角与初始含水率及初始压实度具有线性关系;

(2) 压实马兰黄土初始压实度越大, 侧限压缩应变越小, 初始压实度对压缩变形的影响程度随初始含水率水平的提高而增大; 初始含水率越高, 侧限压缩应变越大, 初始含水率对压缩变形的影响程度随初始压实度水平的提高而减小。不考虑初始压实度及初始含水率的影响时, 压实马兰黄土的  $\varepsilon$ - $p$  关系符合幂函数的形式, 即:  $\varepsilon = kp^n$ ;

(3) 压实马兰黄土初始压实度及初始含水率发生变化时, 可采用本文式(7)对压实马兰黄土填筑地

基变形进行修正。

### 参考文献:

- [1] Lambe T W. The engineering behavior of compacted clay [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1958, 184(2): 46—55.
- [2] Mitchell Jk. *Fundamentals of soil behavior* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1976: 40—56.
- [3] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土变形特性[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1023—1030.  
Chen Kaisheng, Sha Aimin. Study of deformation characteristic of compacted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1023—1030. (in Chinese)
- [4] 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[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2): 132—136.  
Wang Linhao, Bai Xiaohong, Feng Junqin. Discussion on shearing strength influencing factors of compacted loess-like backfill [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S2): 132—136. (in Chinese)
- [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—3148.  
Luo Yidao. Research on shear strength of compacted soils considering saturation degree [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3143—3148. (in Chinese)
- [6] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1347—1352.  
Shen Chunni, Fang Xiangwei, Wang Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1347—1352. (in Chinese)
- [7] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土应力-应变-时间特性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2008, 28(1): 6—9.  
Cheng Haitao, Liu Baojian, Xie Yongli. Stress-strain-time behavior of compacted loess [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2008, 28(1): 6—9. (in Chinese)
- [8] 陈开圣, 沙爱民. 禹(门口)阎(良)黄土路基填料强度规律[J]. *水文地质工程地质*, 2009(5): 44—48.  
Chen Kaisheng, Sha Aimin. Study on strength characteristic for loess subgrade filter of Yumenkou-Yanliang highway [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009(5): 44—48. (in Chinese)
- [9] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 25(5): 1003—1008.  
Li Baoxiong, Miao Tiande. Research on water sensitivity of loess shear strength [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 25(5): 1003—1008. (in Chinese)
- [10] 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, 27(7): 1195—1200.  
Zhang Maohua, Xie Yongli, Liu Baojian. Analysis of shear strength characteristics of loess during moistening process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1195—1200. (in Chinese)
- [11] 苗天德, 刘忠玉, 任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(4): 383—387.  
Miao Tiande, Liu Zhongyu, Ren Jiusheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(4): 383—387. (in Chinese)
- [12] 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.  
Chen Zhenghan, Xu Zhenhong, Liu Zudian. Some problems on the collapse of collapsible loess [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1986, 19(3): 86—94. (in Chinese)
- [13] 刘祖典, 郭增玉, 陈正汉. 黄土的变形特性[J]. *土木工程学报*, 1985, 18(1): 69—76.  
Liu Zudian, Guo Zengyu, Chen Zhenghan. The deformation characteristics of loess [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1985, 18(1): 69—76. (in Chinese)
- [14] 张炜, 张苏民. 非饱和黄土地基的变形特性[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(4): 98—101.  
Zhang Wei, Zhang Sumin. The deformation characteristics of unsaturated loess foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(4): 98—101. (in Chinese)
- [15] SL237-1999, 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
SL237-1999, Specification of soil test [S]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese)
- [16] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1499—1503.  
Ling Hua, Yin Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1499—1503. (in Chinese)