

# 压实度和含水量对于压实黄土力学特性的影响

周 勤<sup>1</sup>, 赵发章<sup>2</sup>, 张洪亮<sup>3</sup>

(1. 甘肃省交通厅 兰州市 730030; 2. 甘肃省高等级公路建设开发有限公司 兰州市 730030;

3. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064)

**摘 要:** 通过压实黄土的室内回弹模量试验、湿陷试验、动三轴试验和抗剪强度试验, 分析了压实度和含水量对压实黄土的静态回弹模量、附加压缩变形、动模量、动阻尼比和抗剪强度力学性质的影响。试验发现, 在常用的 95% 的压实度基础上继续提高压实度对于提高压实黄土的回弹模量和抗剪强度仍然很有效; 当压实度达到 90% 以后, 压实黄土浸水以后产生的附加压缩变形基本可以消除。试验结果为黄土地区路基压实标准确定以及回弹模量、抗剪强度等取值提供了依据。

**关键词:** 压实黄土; 压实度; 含水量; 力学特性

黄土在我国分布面积很广, 黄土和黄土状土分布面积约为 64 万 km<sup>2</sup>。在路基工程中所使用的黄土是压实黄土。压实度和含水量是影响压实黄土力学性质的 2 个重要因素, 但仅有少数学者对其影响进行了研究。戴经梁、景宏君、王丽琴、杨有海等研究了压实度和含水量对于压实黄土的抗剪强度和渗透性的影响<sup>[1~5]</sup>。黄土的压实度和含水量是工艺参数, 公路路基对于黄土地区路基路面结构的影响, 归根结底体现在回弹模量、抗剪强度和浸水后附加压缩变形特性上。由于行车荷载实际上是移动荷载, 所以动模量和动阻尼比也影响黄土地区路基路面结构。压实度和含水量对于压实黄土的静动回弹模量和动阻尼比的影响, 国内外尚未见报道。要确定合理的路基压实标准, 首先必须了解压实度对于静动回弹模量

和动阻尼比的影响。作为交通部西部交通建设科技项目《黄土路基压实技术》的一部分, 本文通过室内试验, 系统研究压实度和含水量对于压实黄土的静动回弹模量、动阻尼比、浸水后附加压缩变形、抗剪强度的影响, 为今后黄土地区路基压实标准的确定和路基回弹模量、抗剪强度等取值提供依据。

## 1 试验原状黄土物理力学性质

采用甘肃省境内兰(兰州)海(海石湾)高速公路 K49+000~K50+860 段上的黄土进行试验。该黄土为新黄土(低液限粘土), 室内试验得到原状新黄土的物理力学性质见表 1。经击实试验得到其最佳含水量为 12%, 最大干密度为 1.85 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 新黄土物理力学性质

天然含水量/%	密度/(kN/m <sup>3</sup> )	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	孔隙比	湿陷系数	比重	饱和度/%	孔隙率/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
5.0	14.8	27.42	20.18	7.24	0.908	0.066	2.69	14.81	47.59	37	28.5

## 2 压实度和含水量对黄土静态回弹模量的影响

含水量不变, 压实度分别取 85%、90%、93%、95%、98%, 所得的静态回弹模量与压实度的关系曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在上述压实度范围内, 压实黄土的静态回弹模量在 85~110 MPa 之间, 它随着压实度的增大而增大, 而且增长的速度基本不变, 表明在常用的 95% 压实度的基础上继续提高

压实度, 仍可以有效提高土的静态回弹模量。压实度均取 95%, 含水量分别取 8%、10%、12%、14%、16%, 所得的静态回弹模量如图 2 所示。由图 2 可以看出, 当土样的含水量大于最佳含水量时, 土的静态回弹模量随含水量的增加降低得很快。当土的含水量低于最佳含水量时, 土的静态回弹模量随含水量的减小而减小, 但减小的速度较缓慢。虽然含水量低



于最佳含水量时土样在浸水饱和前的静态回弹模量值很高,但浸水饱和后的静态回弹模量随即大大降低。土样越干,静态回弹模量降低的幅度越大,即静态回弹模量的稳定性越差。而在最佳含水量压实的土样,浸水饱和后的静态回弹模量很高,且浸水前后静态回弹模量的差异不大,水稳性最好,这就是在最佳含水量状态下把土压实至最大干密度的原因。

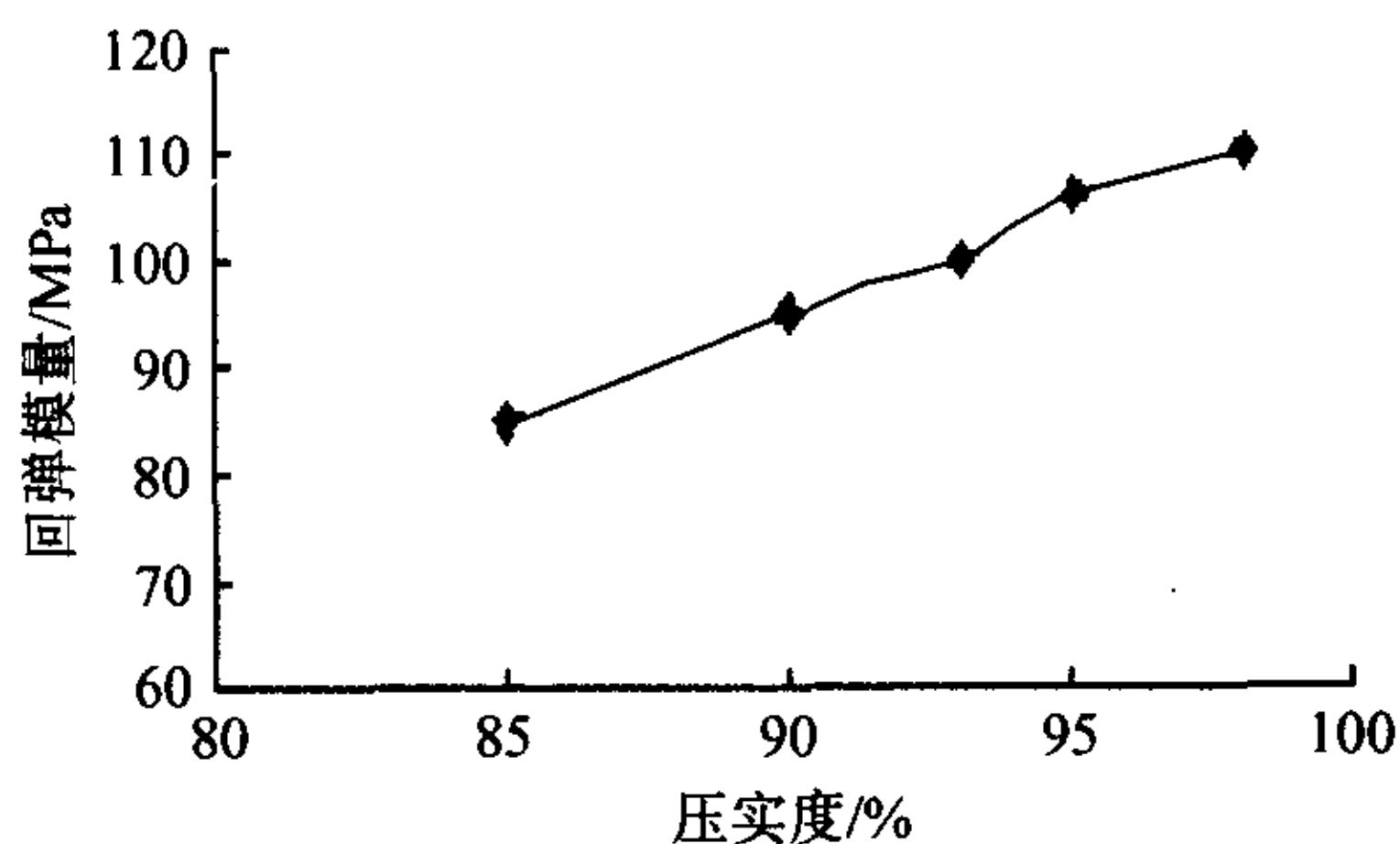


图1 静态回弹模量与压实度的关系曲线

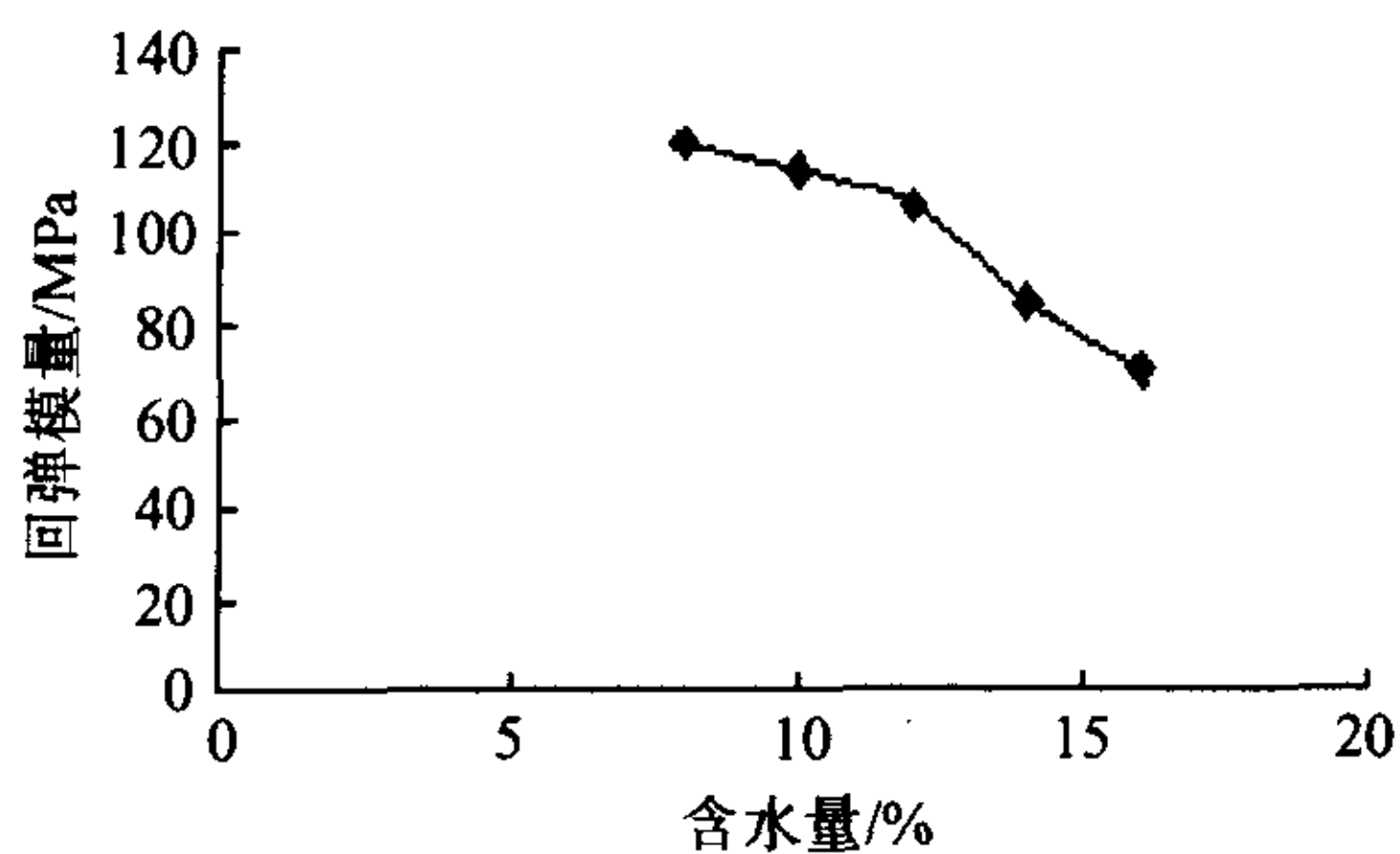


图2 静态回弹模量与含水量的关系曲线

### 3 压实度和含水量对黄土浸水后附加压缩变形特性的影响

试样压实度分别取 87%、90%、93%、95%、98%，含水量均取最佳含水量，加压等级分别取 50、100、150、200、400、600 kPa，浸水加压等级分别为 100、200、400、600 kPa。试验方法同原状黄土的湿陷试验，并定义压实黄土浸水以后附加压缩变形系数同原状黄土的湿陷系数，可以得到如图 3 所示的附加压缩变形系数与压实度的关系。由图 3 可以看出，当压实度达到 90% 以后，黄土的附加压缩变形基本可以消除；在压实度为 90% 以前，附加压缩变形将会随压实度的减小急剧增长。因此，在黄土路基可能受到水影响的区域内，压实度必须达到 90% 以上。对于填方路基，原地基表面的整个路基的压实度都应大于 90%。

经过研究发现，黄土附加压缩变形量的大小与击实试样的含水量有很大关系，含水量偏低时土粒之间易于移动而出现附加压缩变形。在填筑路基的

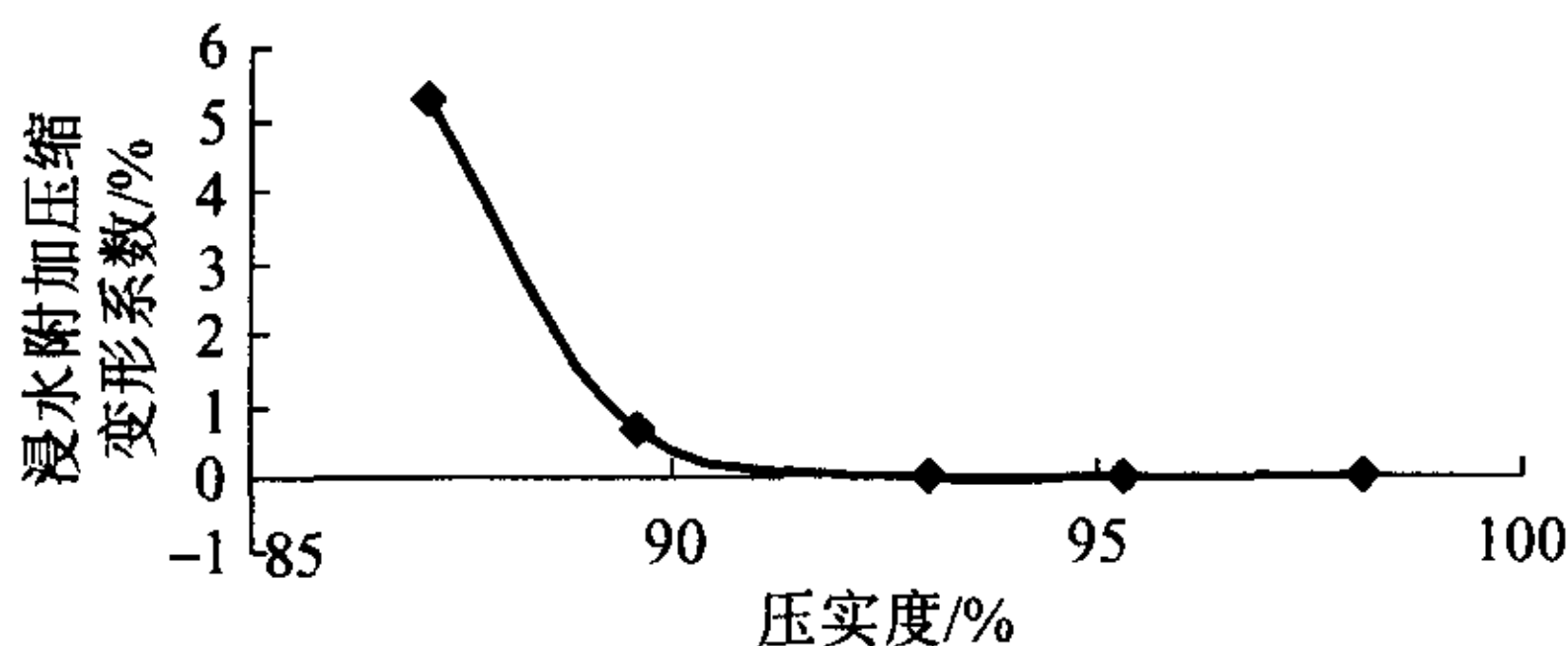


图3 浸水附加压缩变形系数与压实度的关系曲线

设计和施工时，有必要确定填土受水饱和时不产生附加压缩变形所需的最小含水量。试验发现，该最小含水量与最佳含水量很接近。这表明，要保证填土浸水饱和时不产生附加压缩，只要将土在最佳含水量时压实即可。

### 4 压实度和含水量对黄土动力特性的影响

汽车行驶在路面上除对路面施加垂直静压力外，还对路基产生振动作用。本报告基于振动三轴试验，输入一定的振动波形，模拟路基土在车辆动荷载作用下的响应，以便研究地基土的动模量和动阻尼比，为路基设计提供合理依据。

#### 4.1 试验原理

在分级施加动荷测试得到的循环动应力~动应变变化曲线上，通过应力与相应的应变之比确定动模量。阻尼比由动荷循环1周的应力~应变滞回圈面积确定，它表征粘弹性材料荷载循环1周所消耗能量的多少。

根据动三轴试验实测的动应力~动应变曲线，可以得到由动应力~动应变峰值点确定的骨干曲线变化规律，以及不同应力幅、应变幅下的应力~应变滞回圈。由骨干曲线可以确定动模量的变化规律，一般骨干曲线呈双曲线，即<sup>[6]</sup>：

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} = \frac{\epsilon_d}{\frac{1}{E_{\max}} + \frac{\epsilon_d}{\sigma_{ult}}} \quad (1)$$

式中： $E_{\max}$ 为最大动模量； $\sigma_{ult}$ 为骨干曲线渐进值。

即动模量为：

$$E_d = \frac{1}{1 + \frac{E_{\max}\epsilon_d}{\sigma_{ult}}} E_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_d}{\epsilon_r}} E_{\max} = \frac{1}{a} - \frac{b}{a} \sigma_d \quad (2)$$

定义式中 $\epsilon_d/\epsilon_r = \gamma_d$ 为参考应变，由式(2)可以得到动模量 $E_d$ 的变化规律。

施加正弦荷载，应力~应变滞回圈如图 4 所示。若施加半波正弦荷载，经过推导后阻尼比可按式(3)进行计算<sup>[7]</sup>：

$$\lambda_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A}{A_t} \quad (3)$$



式中: $\Delta W$  为1个加载周期中的能量损失; $W$  为总的应变能; $A$  为图4中滞回圈面积,表征 $\Delta W$ ;  $A_t$  为图4中最大动应变所对应的滞回圈上的点(A)和横坐标上的对应点(B)以及原点(O)组成的三角形OAB的面积,表征 $W$ 。

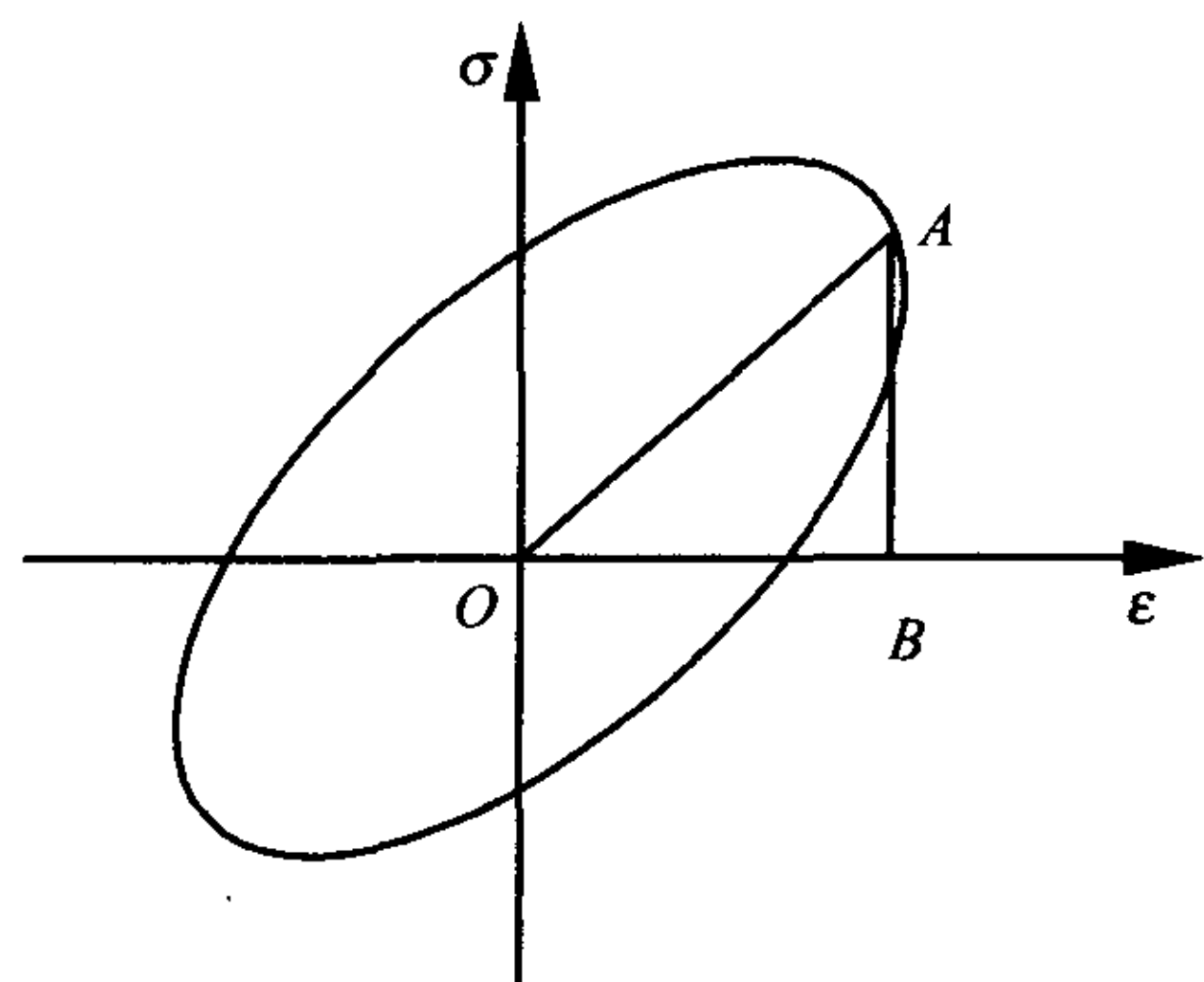


图4 正弦荷载作用下应力~应变滞回圈

#### 4.2 试验条件及方案

对于动模量测试试验,选取固结应力比  $K_c = 1.0$ ,取围压 $\sigma_{3c}$ 分别为14、28、42 kPa,输入振动波,振动频率为10 Hz、间歇时间为0.9 s,每级振动100次,试验过程施加分级动应力 24.8、37.3、49.7、62.0、74.6、111.9、149.2 kPa。

#### 4.3 试验结果

当含水量取12%时,初始动模量随压实度和围压的变化曲线如图5所示。由图5可以看出,初始动模量随压实度和围压的增大而增大。但由于所加的动应力太小,试验误差比较大,因而初始动模量随压实度的变化曲线不太理想。当固结比为1.0、压实度为95%、围压为14 kPa时,初始动模量与含水量的关系曲线如图6所示。由图6可以看出,随着含水量的增加,初始动模量减小。

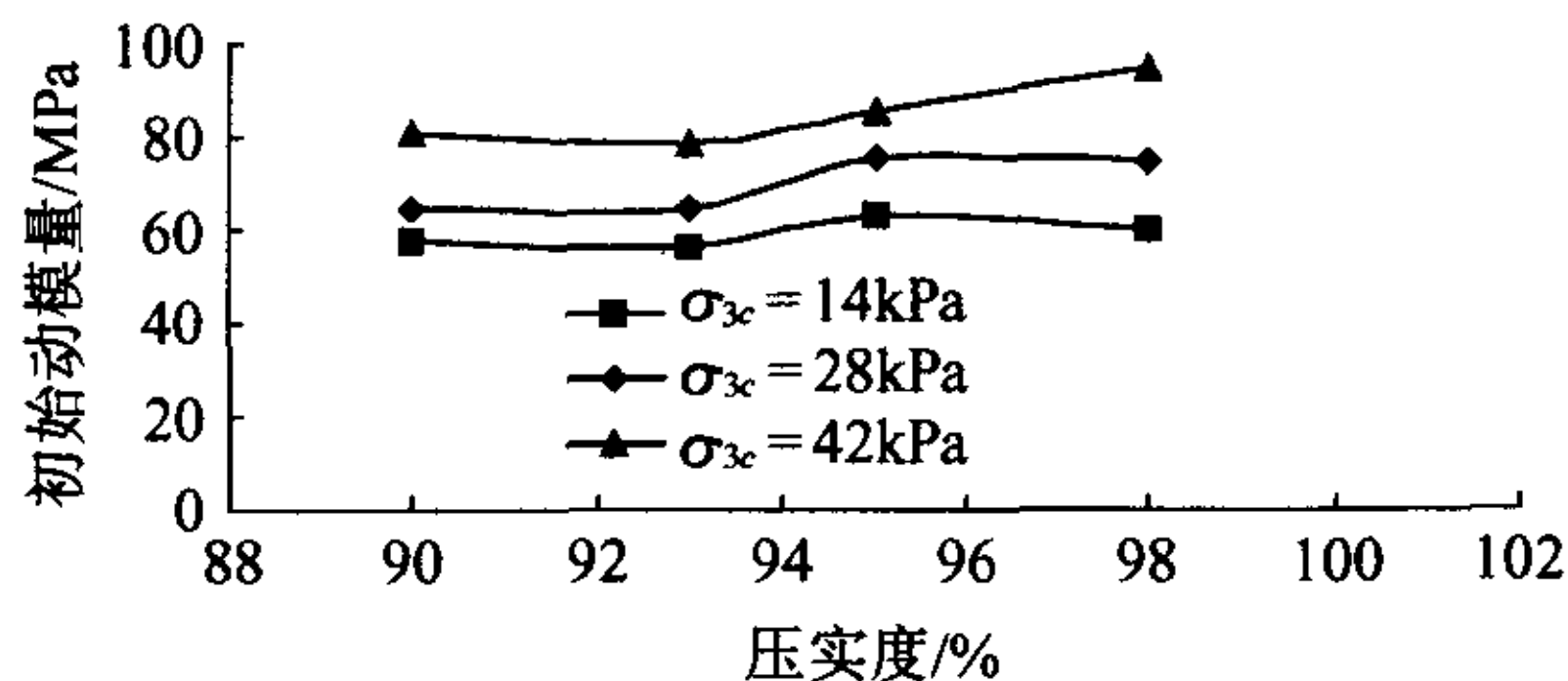


图5 初始动模量与压实度和围压的关系曲线

当固结比取1.0、含水量取12%、围压取42 kPa时,阻尼比与压实度的关系曲线如图7所示。由图7可以看出,阻尼比随压实度的增加而减小。当固结比取1.0、围压取42 kPa、压实度为95%时,绘制阻尼比

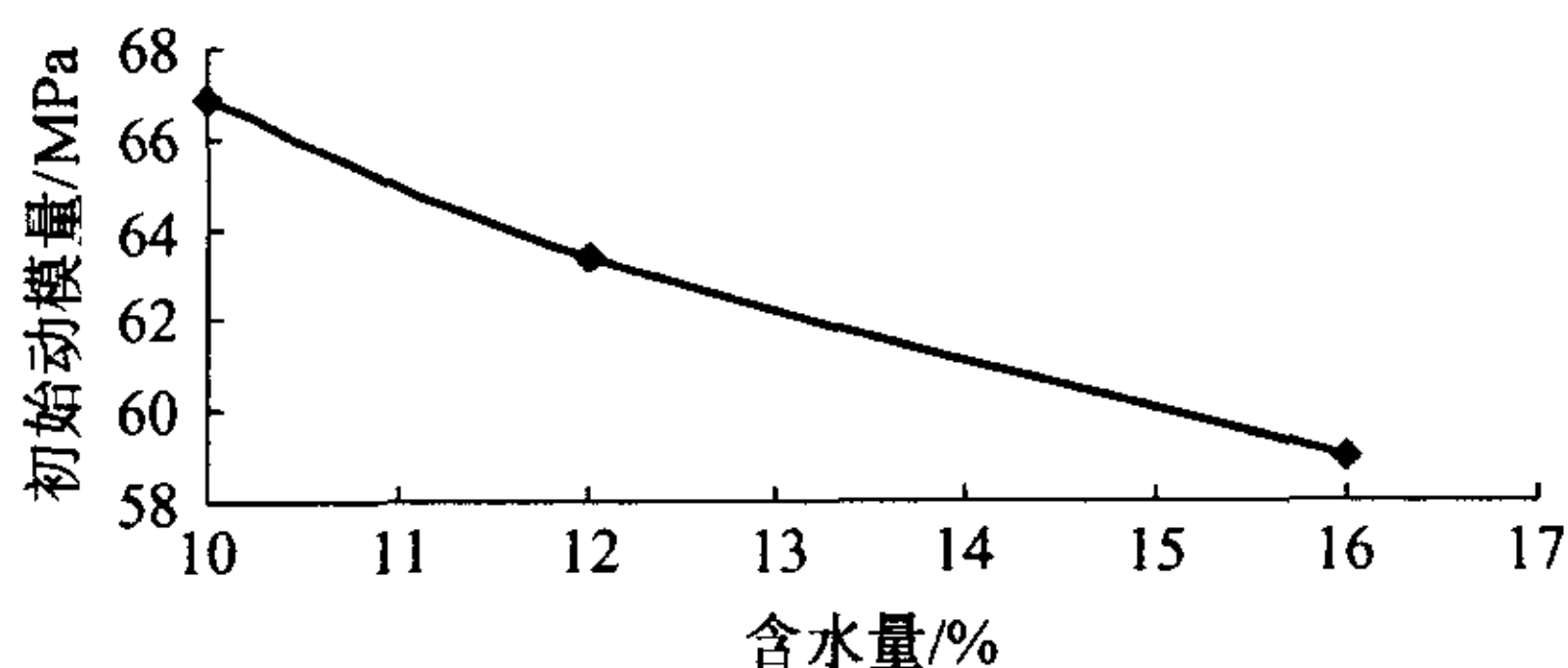
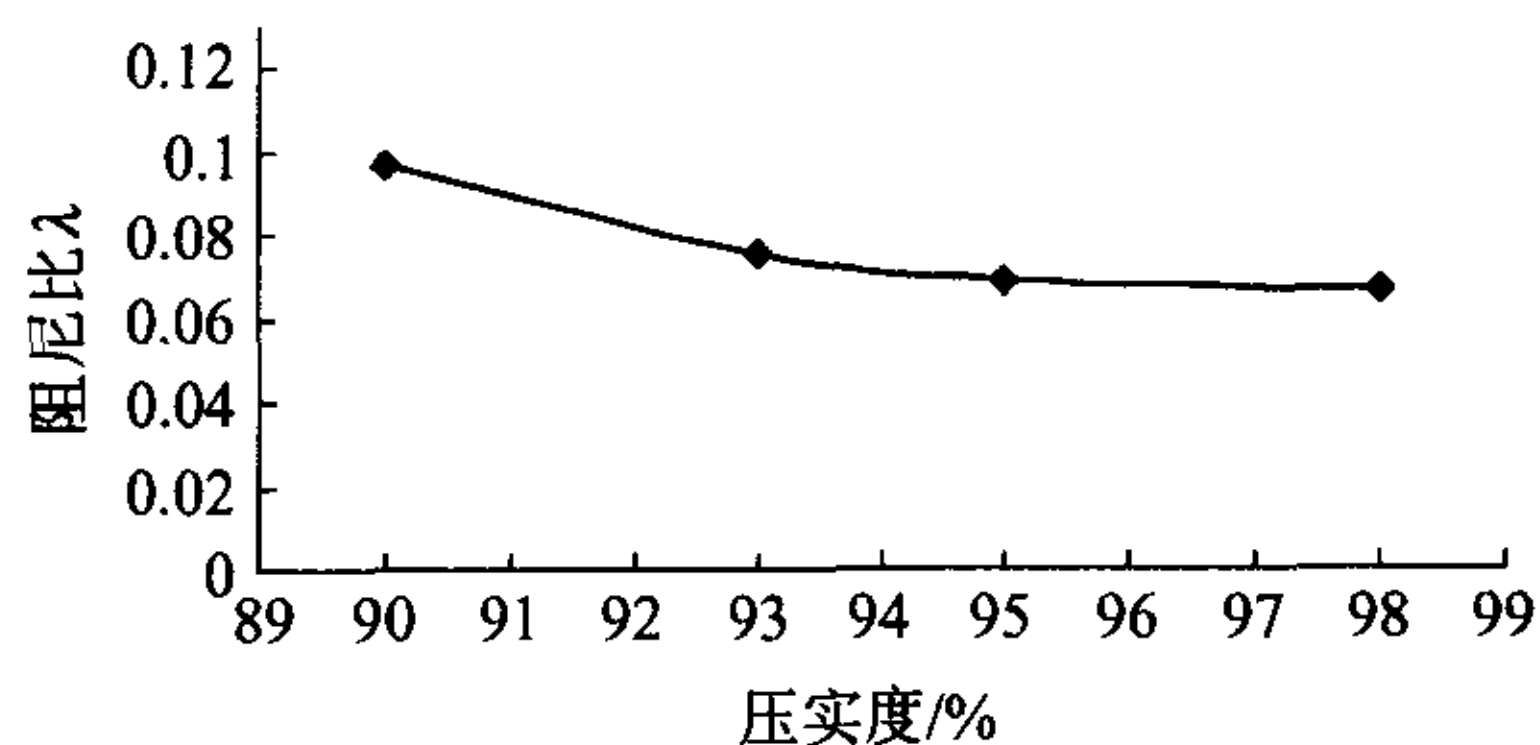


图6 初始动模量与含水量的关系曲线

随含水量的变化曲线,如图8所示。由图8可以看出,随着含水量的增加,阻尼比减小。



注:围压为42 kPa,含水量为12%。

图7 阻尼比与压实度的关系曲线

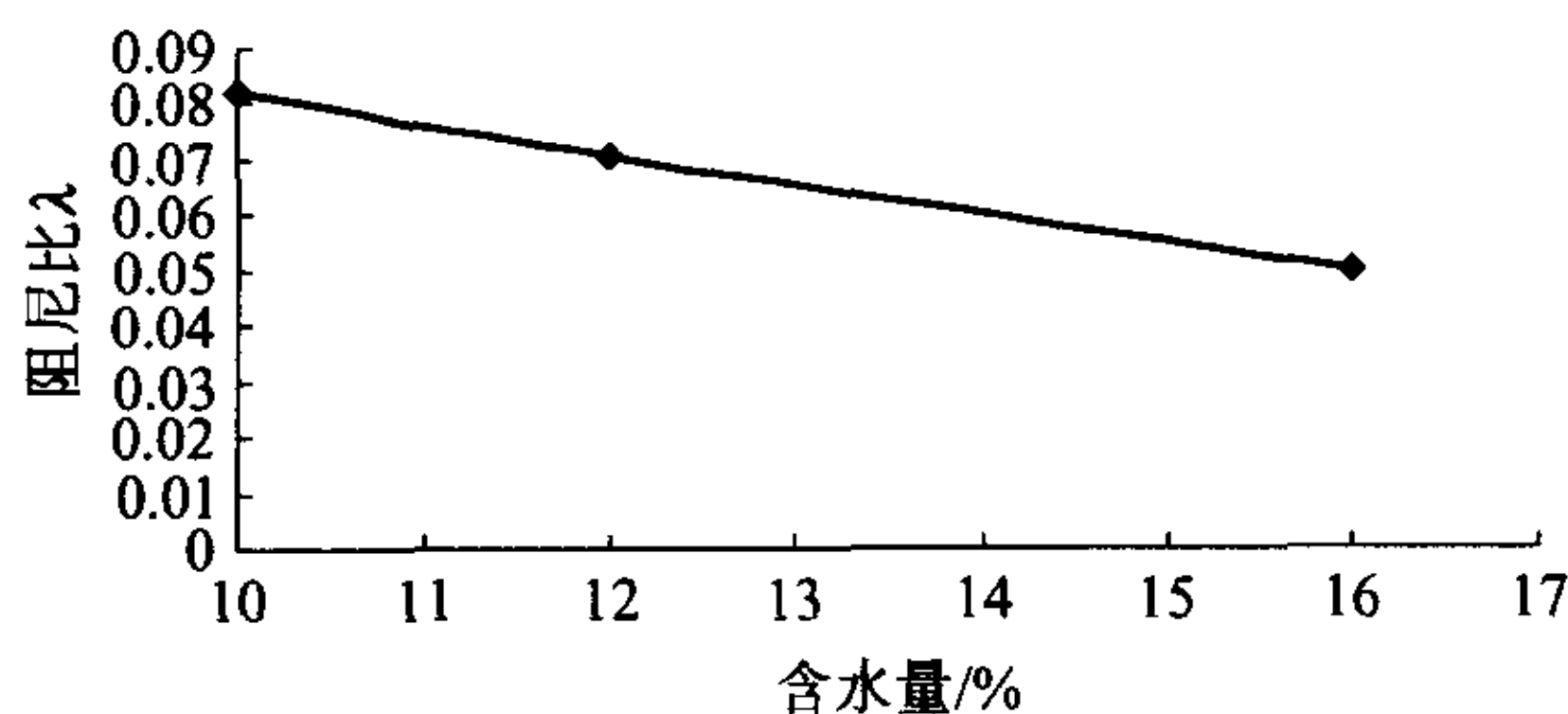


图8 阻尼比与含水量的关系曲线

#### 5 压实度对黄土抗剪强度的影响

将土样配制成最佳含水量,压实度分别取85%、90%、95%和100%,分别在压力为0.1、0.3、0.5 MPa下固结,然后以0.6 mm/min的速率进行直接剪切试验,试验结果如图9所示。由图9可以看出,抗剪强度随着压实度的增大而线性增大,在常用的95%压实度的基础上继续提高压实度,仍有助于提高黄土的抗剪强度。

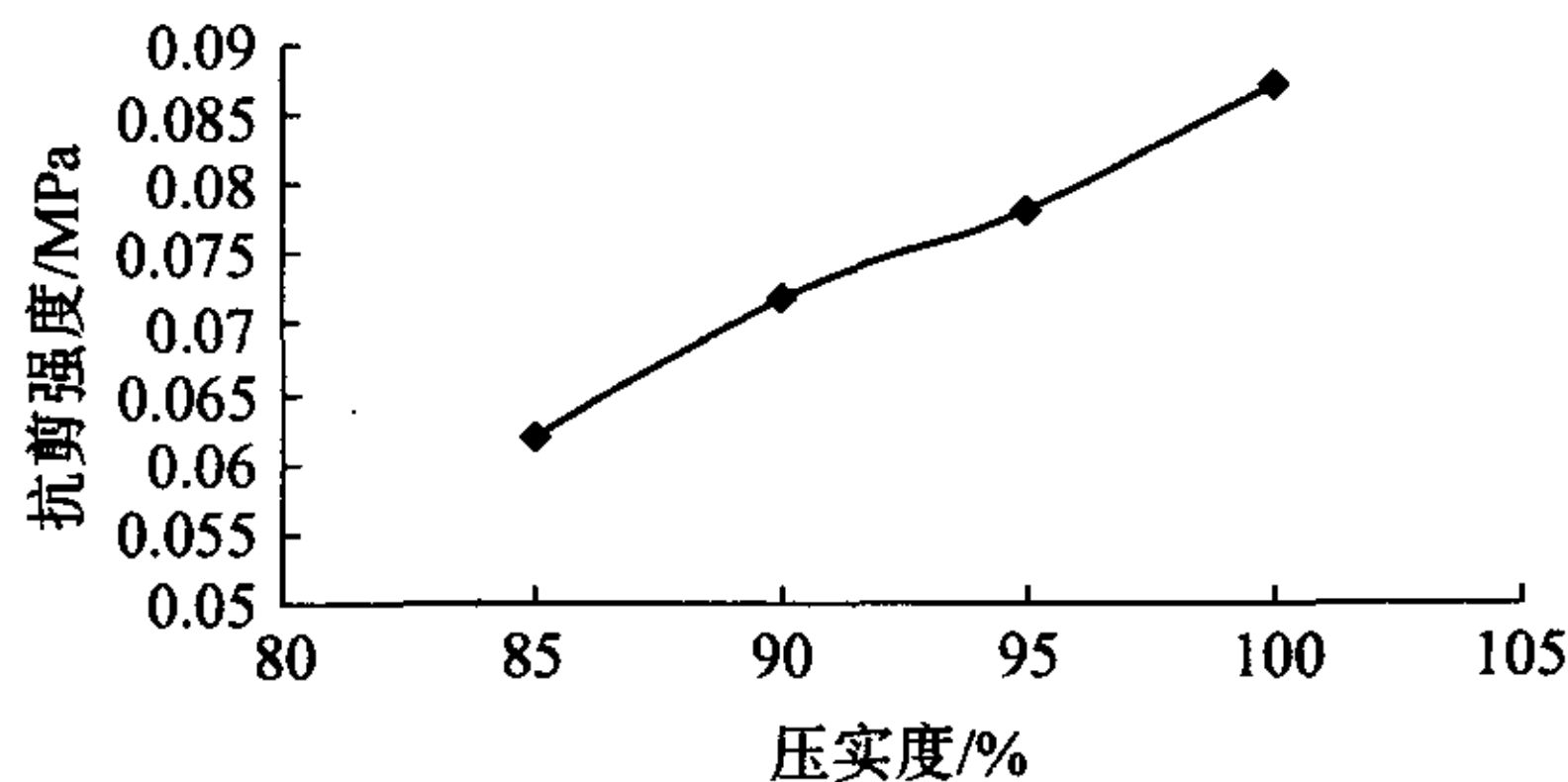


图9 抗剪强度与压实度的关系



## 6 结语

通过室内试验得到了压实度和含水量对于黄土力学性质的影响规律。

(1)黄土静回弹模量随着压实度的增大而增大,而且增长的速度基本不变,表明在常用的 95% 压实度的基础上继续提高压实度,仍可以有效提高黄土的静回弹模量。

(2)当压实度达到 90% 以后,压实黄土浸水以后产生的附加压缩变形基本可以消除。

(3)随着压实度的增大和含水量的减小,初始动模量增大。随着压实度和含水量的增大,阻尼比减小。

(4)抗剪强度随着压实度的增大而线性增大,在常用的 95% 压实度的基础上继续提高压实度,仍有助于提高黄土的抗剪强度。

## 参考文献:

- [1] 戴经梁,伍石生,盛安连. 压实黄土路基积水入渗规律研究[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(3B).
- [2] 景宏君,张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2).
- [3] 王丽琴,等. 压实黄土的渗透性及影响因素的研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版),2003,22(4).
- [4] 景宏君. 黄土路基积水入渗规律研究[J]. 公路交通科技,2004,121(4).
- [5] 杨有海,等. 压实黄土的强度特性及其影响因素的研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版),2003,22(3).
- [6] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [7] 胡长顺,等. 黄土路基压实技术研究分报告之二——黄土路基工作区压实标准研究[R]. 2005.

# Influence of Compactness and Water Content on Mechanical Properties of Compacted Loess

ZHOU Qin<sup>1</sup>, ZHAO Fa-zhang<sup>2</sup>, ZHANG Hong-liang<sup>3</sup>

(1. Department of Communication of Gansu Province, Lanzhou 730030, China;

2. Gansu Provincial High Grade Highway Construction & Development Ltd, Lanzhou 730030, China;

3. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China )

**Abstract:** Through indoor tests, the influence of compactness and the water content on the mechanical properties of compacted loess are analyzed, such as the rebound modulus, the collapsing deformation, the dynamic elastic modulus, the damping ratio and the shear strength. The tests show that the increase of compactness upon 95% will still be effective to the increase of the rebound modulus and the shear strength, and the collapsibility of the compacted loess is little enough to be ignored if the compactness is greater than 90%. The test results provide bases for the determination of the compactness criterion and the acceptance values of the rebound modulus and the shear strength for the subgrade composed of loess.

**Key word:** compacted loess; compactness; water content; mechanical properties

## 安南高速公路开工

2005 年 11 月 28 日,河南省 2005 年重点开工建设项目——安阳至南乐高速公路在安阳市境内与安林高速公路交接处举行开工奠基仪式。建成后的安南高速公路将成为连接东西出口的又一条重要通道。

该工程西起安阳市东南大官庄,与安林高速公路相接,与京珠高速公路相交,东至濮阳市南乐县与阿深高速公路相接。采用双向四车道高速公路技术标准,设计行车速度 120 km/h,路基宽度 28 m,路面面层采用沥青混凝土结构,全长 62.4 km,总投资近 20 亿元。

安南高速公路是连接山西、河南、山东的东西高速公路大通道的重要组成部分,该工程的建成将有效地缓解豫北地区东西方向区域交通不足的状况,对进一步完善中西部路网骨架,发挥高等级公路的整体效益,推动沿线市、县经济社会的发展起到极大的促进作用。