

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0015-06

黄土的构度指标及其试验确定方法

邵生俊^{1,2}, 郑 文¹, 王正泓¹, 王 帅¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 黄土的结构性是一个重要的物理性质指标, 它与土的粒度、密度和湿度一起影响土的力学性质。依据加荷、扰动、浸水释放土结构势的方法, 由土的无侧限抗压强度定义了黄土结构性的构度指标。通过多个场地不同黄土的无侧限单轴压缩试验, 测试分析了不同含水率原状土、重塑土和饱和原状土的单轴压缩应力-应变曲线及无侧限抗压强度变化规律, 由此得出土的构度指标的变化规律。并且, 在粒度、密度、湿度相似条件下, 比较分析了土的构度指标与其压缩性之间的关系。土的构度指标与粒度、密度和湿度指标一起能够合理描述土的物理力学基本性质。

关 键 词: 黄土, 结构性, 构度, 无侧限抗压强度

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Structural index of loess and its testing method

SHAO Sheng-jun^{1,2}, ZHENG Wen¹, WANG Zheng-hong¹, WANG Shuai¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: Loess structure is an important physical property, which influences mechanical properties of loess with its particle size, density and humidity. Based on the structure potential of loess released by loading, remolding and saturating, the unconfined compressive strength of intact, remolded and saturated loess were measured by uniaxial compression test; and the structural index of loess was defined by comparing the stability and changeability of loess structure which determined respectively by the ratio of confined compression strength of loess and remolding soil and the ratio of confined compressive strength of saturating loess and loess. Through the unconfined uniaxial compression test of four kinds of loess adopted from different sites, the unconfined uniaxial compression stress-strain curves of intact, remolded and saturated loesses with different water contents were tested to reflect the uniaxial compression stress-strain property, as well as the law of unconfined compressive strength and loess structural index changing with the water content was analyzed for different kinds of loesses. When the particle size, density and humidity of loess being similar, the greater the structure index of loess, the smaller the compressibility and the greater the shear strength of loess. So the structure Index structure together with the particle size, density and humidity can be used to describe reasonably the fundamental physico-mechanical properties of intact soils.

Key words: loess; structure; structure index; uniaxial compressive strength

1 引 言

土的颗粒形状、粒组构成、孔隙性状、含水状态、矿物成分、沉积环境与应力历史等因素不同, 其具有不同的结构性, 表现为具有不同的力学性质。这种力学性质表现为土保持原结构状态不被破坏的能力, 以及结构破坏后力学性质的明显改变。土的结构性对于工程建设是非常重要的, 因此, 土结构性的研究已被提到“21 世纪土力学的核心问

题”的高度^[1-2]。长期以来, 对于土的基本物理性质仅局限于从粒度、密度和湿度三方面来描述, 忽视了一个极其重要的因素^[3], 即结构性(构度)的量化^[4]。在谢定义^[5]提出综合结构势之后, 人们通过比较原状土、重塑土和饱和土的压缩变形、剪切作用、阻抗作用等, 已经分别建立了压缩应变(变形)结构性参数^[5]、孔隙比结构性参数^[6], 应力结构性参数^[7-9]、振次结构性参数^[10]和应力比结构性参数^[11]以及圆锥贯入度结构性参数^[12], 其中, 压缩变形类

收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50779054, No. 10872161); 陕西省黄土力学与工程重点实验室基金项目(No. 220533)。

第一作者简介: 邵生俊, 男, 1964 年生, 教授, 博导, 从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn

结构性参数只是反映了土结构性的抗压缩作用,不能揭示土结构性的抗剪切作用;剪切应力类参数能够同时反映土结构性的抗压缩、抗剪切作用效应,具有更大的优越性;圆锥贯入结构性参数反映了土结构性阻抗圆锥贯入的作用效应。前二类结构性参数均属于土受荷作用下结构性发挥和随着变形发展结构逐渐破损而结构性衰减的量化参数,后一类结构性参数实质上是土结构性的最大阻抗作用效应。应用圆锥贯入度结构性参数可以确定反映土结构性的单值指标,而不能考察变形发展过程土结构性的变化,因此可以将这类参数定义为土结构性的构度指标(一种物性指标),与土的粒度(颗粒组成、级配)、密度、湿度指标一起用于揭示土的基本物理性质。然而,圆锥贯入度往往受土局部结构的不均匀性的影响而变化较大,所确定的构度指标比较离散。本文目的在于寻求建立土构度指标确定的新途径,并初步论证其合理性。

2 黄土构度的试验研究

2.1 构度指标定义

目前已建立的结构性参数大多是描述土在变形过程中结构性的变化规律,如压缩变形过程的结构性参数,三轴、真三轴剪切变形过程的结构性参数。它们便于考察受荷过程中土的结构性变化。还没有给出一个反映土初始结构性的度量指标,以便人们在粒度、密度和湿度的基础上进一步认识土的基本物理性质。从能够反映土结构性的抗剪切效应和方便测试角度出发,沿用综合结构势思想,通过原状土、重塑土和饱和土的无侧限抗压强度试验,由原状土和重塑土的无侧限抗压强度比较反映土的结构可稳性,由饱和土与原状土的无侧限抗压强度比较反映土结构性的可变性,定义了如下构度指标:

$$m_u = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(q_u)_o / (q_u)_r}{(q_u)_s / (q_u)_o} = \frac{(q_u)_o^2}{(q_u)_r (q_u)_s} \quad (1)$$

式中: $(q_u)_o$ 、 $(q_u)_r$ 、 $(q_u)_s$ 分别为原状土、重塑土、原状饱和土的无侧限抗压强度; m_1 反映了结构可稳性; m_2 反映了结构可变性。从式(1)可以看出,土的原始联结越强,扰动重塑后土的强度损失越大,得到的无侧限抗压强度越小,即 m_1 越大,可稳性越大;土的排列越不稳定,浸水后在力的作用下结构性破坏越大,得到的无侧限抗压强度越小,即 m_2 越小,土的可变性越大,可见结构性的强弱与 m_u 的大小直接而灵敏的联系。对于结构性灵敏的软黏土,它的含水率一般较高(接近饱和土含水率),其对浸水的反应一般比较迟钝,即 $m_2 \approx 1$, 此时,

$m_u = m_1 = q_{u原} / q_{u重}$, 则该类土的构度指标与其灵敏度指标一致。该构度指标与前述的圆锥贯入度结构性参数指标比较,它是土单元体结构性的宏观反映,因此更具有合理性。

2.2 无侧限压缩试验结果

试样分别取自西安的曲江、陕西泾河岸坡和西安东郊白鹿原 4 个不同场地,将它们分别称之为黄土①、黄土②,黄土③,黄土④。黄土①取自曲江黄土塬,取土深度 4~4.5 m,属 Q_3 黄土;黄土②取自泾河岸坡,取土深度 10~12 m,属 Q_2 黄土;黄土③取自西安东郊白鹿原黄土边坡,取土深度为 4~5 m,属 Q_3 黄土;黄土④也取自泾河岸坡,取土深度为 3~4 m,属 Q_3 黄土。4 种黄土的物理指标见表 1。

表 1 土的物理性质指标
Table 1 Physical properties for test loesses

黄土 种类	相对 密度	干密度 /(g/cm ³)	天然含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
黄土①	2.7	1.35	18.0	42.0	26.0	16
黄土②	2.7	1.58	2.80	33.0	21.0	12
黄土③	2.7	1.36	22.0	39.0	25.0	14
黄土④	2.7	1.33	10.8	35.5	23.5	12

图 1~3 分别为前 3 种黄土不同含水率原状土、重塑土及饱和土的无侧限单轴压缩试验(剪切速率为 0.386 mm/min)所得的应力-应变曲线。从图 1~3 可以看出,在不同含水率条件下,不同黄土均表现出较强的变形软化特性,有明显的峰值强度,属于脆性破坏,应力-应变曲线有一个陡直上升段,土的结构稳定,变形小,土粒之间不会有滑移,土单元体基本上呈线弹性变形阶段。当土的结构性不足以抵抗轴向压缩荷载时,土骨架遭到破坏,轴向作用应力出现峰值,土粒之间开始出现滑移变形,部分颗粒的联结破损后出现微裂隙,随着轴向变形增大,作用应力持续减小,土骨架中出现的微裂隙继续增大。这种微裂隙和位移继续增大增多时,尽管伴随大孔隙结构的塌陷,但剪切带正逐渐产生,已开始出现剪胀现象。当剪切带形成后,土单元体承担的作用荷载趋于稳定。当黄土饱和后,随着轴向应变增大,土单元的轴向应力增大,呈弱软化型,其抗剪强度较低含水率原状土的强度显著降低。黄土①、黄土②、黄土③的不同含水率重塑黄土因重塑扰动改变了原状土的结构,其抗剪强度明显小于原状土的强度,且较低含水率时也具有软化变形性质。重塑黄土①在较低含水率时也表现为显著的变形软化,达到峰值后迅速降低,直至彻底破坏,而

在 15 %、18 %、21 %、25 % 含水率下, 重塑土均呈现出理想塑性或弱硬化特征, 无明显的峰值强度, 取变形充分发展时的轴向应力为无侧限抗压强度。重塑黄土②的密度较大, 在不同含水率条件下的应力应变曲线均呈软化型。重塑黄土③与其原状土比较, 两者的无侧限抗压强度差异较小, 其应力-应变

曲线均呈软化型。从相同含水率下的原状土、重塑土无侧限抗压强度的比较来看, 原状土的原始胶结作用越强, 扰动重塑后强度损失越大, 表现为在相同应变条件下重塑土的轴向应力明显低于原状土; 原状土的骨架排列如果不稳定, 则浸水作用对结构的破坏就相当明显, 故饱和土的无侧限抗压强度小。

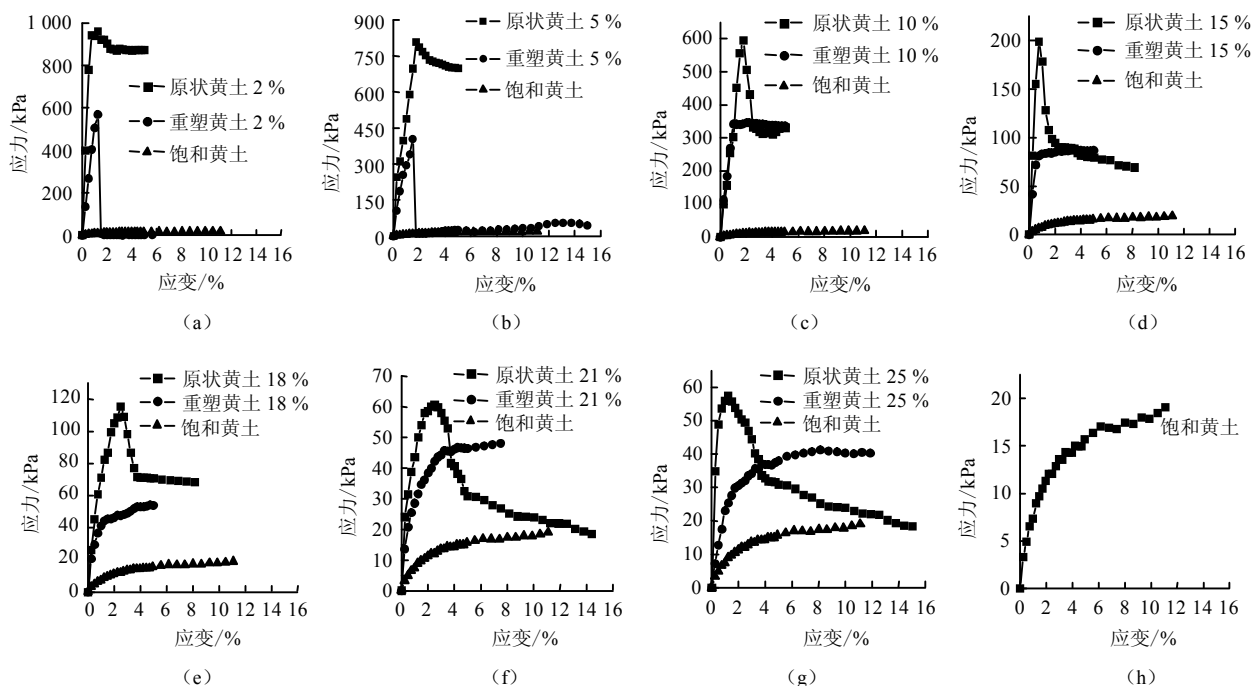


图1 黄土①不同含水率原状土、重塑土及饱和原状土的应力-应变曲线

Fig.1 The stress-strain curves of intact, remolded and saturated loesses ① with different humidities

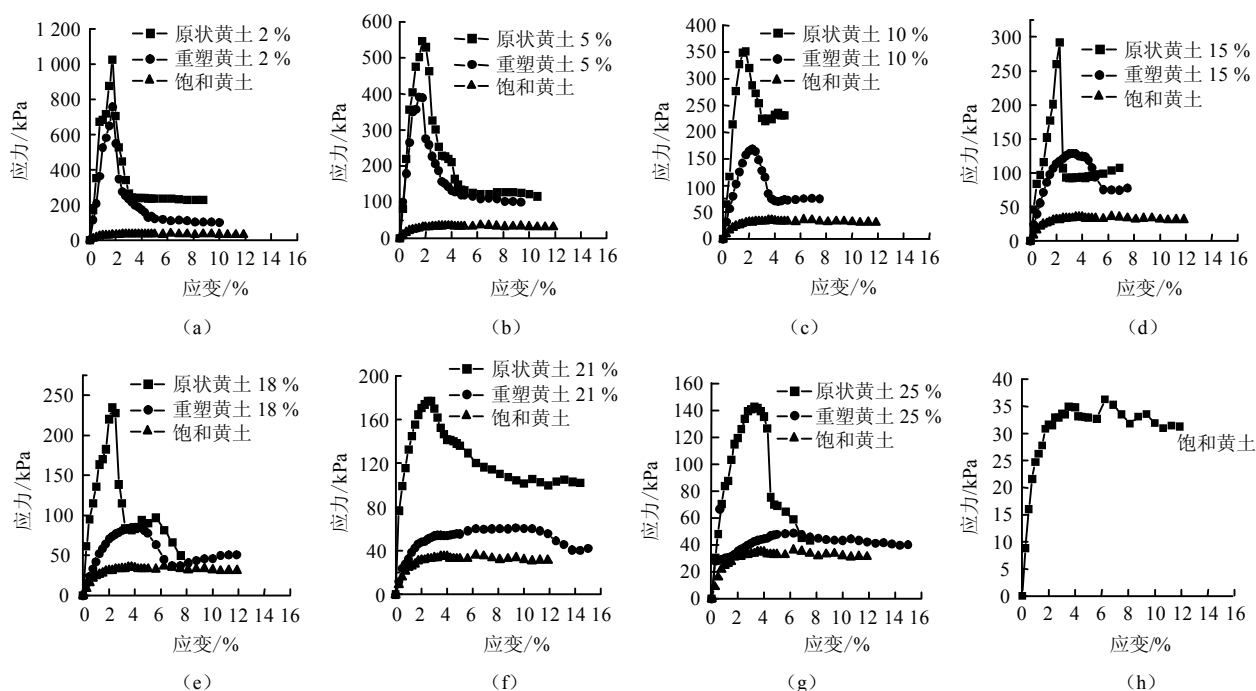


图2 黄土②不同含水率原状土、重塑土及原状饱和土的应力-应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of intact, remolded and saturated loesses ② with different humidities

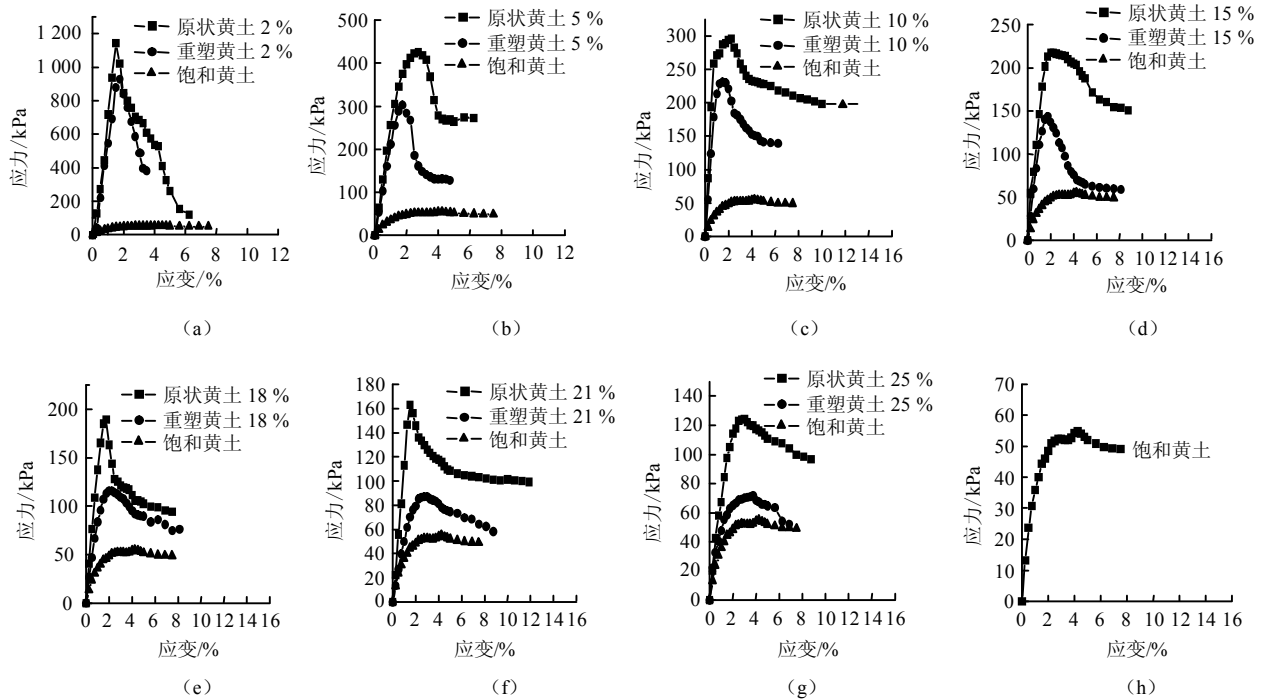


图3 黄土③不同含水率原状土、重塑土及饱和原状土的应力-应变曲线

Fig.3 The stress-strain curves of intact, remolded and saturated loesses ③ with different humidities

2.3 构度指标

依据不同黄土的无侧限单轴压缩试验结果,图4分别给出了前3种黄土及其重塑土和饱和土的无侧限抗压强度随含水率变化规律。随着含水率的增加,无论是原状土还是重塑土,其无侧限抗压强度均在不断减小。这说明湿度状态对于不同黄土的抗剪切作用效用明显,且不同含水率原状土的无侧限抗压强度均大于重塑土的强度。较低含水率时,黄土①与其重塑土的无侧限抗压强度差较大,黄土②、③与其重塑土的无侧限抗压强度差较小;随着含水率增大,黄土①的无侧限抗压强度衰减较缓慢,黄土②、③的无侧限抗压强度衰减较快。尽管黄土②的干密度较大,但含水率较低时,黄土①的

无侧限抗压强度却较大,说明黄土①的结构性强。

依据不同含水率黄土、重塑土和饱和土的无侧限抗压强度,由式(1)确定的构度随含水率的关系曲线如图5所示。随着含水率的增大,不同黄土的构度均呈衰减变化规律,但黄土①低含水率时构度指标值大,随着含水率增大,构度逐渐衰减,高含水率时构度指标值趋于1.0;黄土②低含水率时构度指标值较小,且随着含水率增大,其构度衰减幅度大,含水率大于5%后呈逐渐衰减变化规律,高含水率时其构度指标仍大于1.0;黄土③低含水率的构度指标值更小,含水率达5%时其构度指标值降低幅度亦大;含水率大于5%后也呈逐渐衰减变化规律;高含水率时其构度指标也大于1.0。

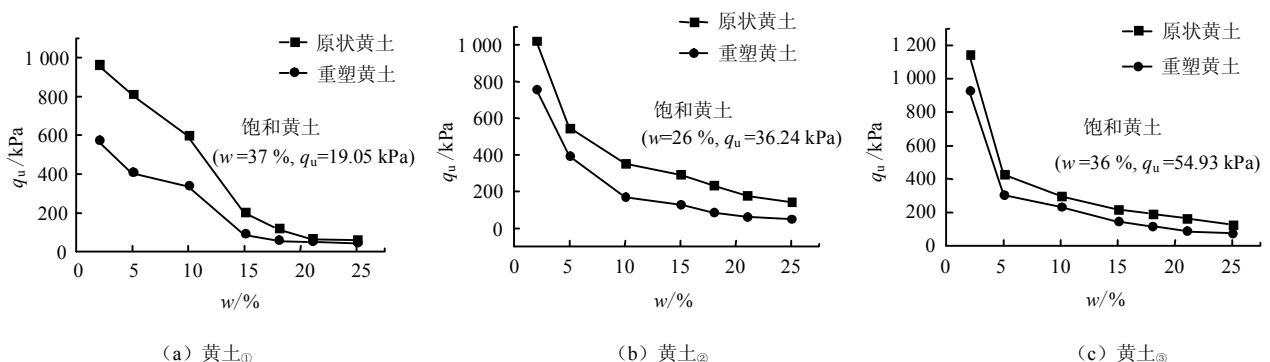


图4 无侧限抗压强度与含水率的关系

Fig.4 The relationship between unconfined compressive strength and water content of loess

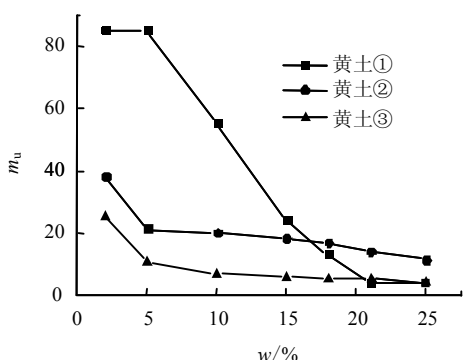


图 5 黄土① 构度随含水率的变化曲线

Fig.5 The relationship between soil structure and water content for the three kinds of loesses

3 构度指标的合理性分析

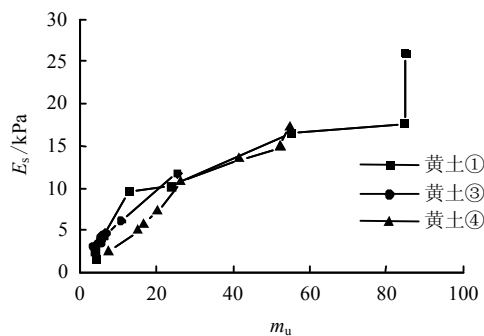
为了考察土构度指标评价土力学性质的合理性,分别测试了黄土不同含水率条件下的压缩模量,见表 2。黄土①和黄土③的粒度、密度和湿度物性指标相近,但两种土的压缩模量不同,黄土①的压缩模量明显高于黄土③,即黄土③的可压缩性要大于黄土①,这说明了仅仅依据土的粒度、密度、湿度物性指标来判断土的力学性质存在明显不足。进一步考虑结构性的影响,相同湿度条件下,黄土①的构度指标大于黄土③,即前者的结构性强于后者,则黄土①表现出的抗压缩性强于黄土③。比较黄土②与黄土①,在相同含水率条件下,由于黄土②的密度大,即使黄土①的结构性强,构度指标值大,则黄土②的抗压缩性仍强于黄土①。黄土③与黄土②比较,由于前者的密度和构度均小于后者,则黄土②的抗压缩性必然强于黄土③。比较黄土①、③、④,即使它们的粒度、密度、湿度近似一致,但其结构性却也不同。4 种黄土压缩性的变化规律表明,构度指标能合理地反映土的结构性,且能够合理揭示结构性土的力学性质。

表 2 土构度与压缩模量的对比
Table 2 Comparison between structure index and compression modulus

土类	参数	含水率/%					
		2	5	10	15	18	21
黄土①	压缩模量 /MPa	26.007	17.633	16.495	10.125	9.534	2.621
	构度 m_u	85.054	84.756	55.170	23.946	12.974	4.182
黄土②	压缩模量 /MPa	34.974	28.027	22.292	10.003	9.633	8.877
	构度 m_u	38.072	20.960	20.127	18.285	17.109	14.123
黄土③	压缩模量 /MPa	11.173	6.079	4.566	4.167	3.604	3.135
	构度 m_u	25.587	10.926	6.898	6.002	5.635	5.550

压缩模量	17.241	14.814	13.422	10.753	7.272	5.764	4.975
黄土④ /MPa							
构度 m_u	55	52.311	41.873	26.508	20.502	17.034	15.263

依据表 2,由黄土①、黄土③和黄土④的压缩模量和构度的测试结果,绘制成如图 8 所示的曲线,表明当黄土的粒度、密度相近时,其压缩模量随构度的增大而增大,呈非线性的增长变化规律。

图 6 Q₃黄土压缩模量与其构度的关系Fig.6 The relationship between compression modulus and structure index of Q₃ loess

4 结 论

(1) 黄土的结构性是影响其力学性质的重要指标,依据原状土、重塑土和饱和土无侧限抗压强度,应用综合结构势思想,定义给出了反映土结构性的构度指标。它与土的粒度、密度和湿度指标一起描述土的性状,能够更加合理反映土的基本物理性质。

(2) 通过 4 种黄土的无侧限单轴压缩试验,测试分析了不同湿度条件下原状土、重塑土及饱和土的单轴压缩应力-应变曲线,得到了原状土、重塑土无侧限抗压强度随含水率的变化规律,以及黄土构度指标随含水率的变化规律。

(3) 不同黄土的结构性不同,构度随含水率的变化规律也不同。结构性越强,构度指标越大,原状土与重塑土、饱和土的无侧向抗压强度差值越大;结构性越弱,构度指标越小,原状土与重塑土、饱和土的无侧向抗压强度越小;在粒度、密度、湿度相似条件下,土的构度指标越大,其压缩性越小。

(4) 构度指标不仅可以反映 Q₃ 黄土的结构性,而且也能够揭示 Q₂ 黄土的结构性。土的构度指标不同,其力学性质也不同。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. Soil structure snapshots of the mathe-

matical model-in the 21st century is the core of soil mechanics problems[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.

下转第 38 页

- [2] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 111—114.
XIE Ding-yi. Consideration of soil mechanics in 21st century[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.
- [3] LIU M D, CARTER J P. Volumetric deformation of natural clays[J]. **Journal of Geomechanics**, 2003, 2(3): 236—252.
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 1—13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess mechanics[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.
- [5] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-ling. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [6] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1891—1896.
CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1891—1896.
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [8] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 93—98.
SHAO Sheng-jun, DENG Guo-hua. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(11): 93—98.
- [9] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1668—1672.
SHAO Sheng-jun, LONG Ji-yong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1668—1672.
- [10] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力条件下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 4248—4251.
LUO Ya-sheng, XIAN Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 4248—4251.
- [11] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [12] 冯志焱. 非饱和黄土结构性定量化参数与结构性本构关系研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2008.