

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.012

# 物理性质对黄土初始结构性的综合影响研究

王丽琴<sup>1,2</sup>, 邵生俊<sup>1,2</sup>, 鹿忠刚<sup>1</sup>

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

**摘 要:** 黄土是具有特殊结构性的土, 目前对其结构性影响因素的研究大多处于单因素定性分析阶段。构度指标反映的是黄土的初始结构性。为研究物理指标对初始结构性的综合影响, 首先, 对西安、兰州两地原状及重塑的黄土试样开展了不同含水率下的无侧限抗压强度试验, 得到了相应黄土的构度。分析得出: 构度随含水率、干密度、最小密度比、塑性指数、液性指数的增大均呈减小的趋势, 除此之外, 还与黄土的形成时代及其分布地区有关。其次, 根据以上结论, 用基本物理指标构造了一个综合物理量, 进一步分析了构度与综合物理指标的关系, 得出了区分地区、区分地质时代的由综合物理量直接定量计算构度指标的经验公式。最后, 通过对西安另一场地的黄土进行试验得出的构度指标与运用本经验公式计算所得的构度值的对比, 初步验证了其合理性、适用性。经验公式为以后通过简单易测的物理指标定量计算构度提供了一种方法。

**关 键 词:** 黄土; 结构性; 物理指标; 定量计算; 经验公式

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017) 12—3484—07

## Influence of physical properties on the initial structure of loess

WANG Li-qin<sup>1,2</sup>, SHAO Sheng-jun<sup>1,2</sup>, LU Zhong-gang<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Loess is a soil with a special structure. Currently the studies of influence factors on loess structure are mostly qualitative analysis using single factor. Structural index reflects the initial structure of loess. To study the influence of the physical parameters on the initial structure, firstly, unconfined compressive strength tests are conducted on the undisturbed and remolded loess samples with different water content taken from Xi'an and Lanzhou. Next, the corresponding structural indexes of loess are obtained. The analysis shows that the value of structural index decreases with the increasing of water content, dry density, minimum density ratio, plasticity index and liquidity index. In addition, it is also related with the geological period and geographical distribution of loess. Secondly, according to the above conclusions, a comprehensive physical index is constructed by the fundamental physical indexes. The relationship between the structure and the comprehensive physical index is further analyzed. The empirical formulas are obtained which can directly calculate structure index quantitatively by the comprehensive physical index considering the distinction between the geographical zonation and geological periods. Finally, by the comparisons of the structure indexes obtained by test for another loess field in Xi'an and the structure indexes calculated by the empirical formulas herein, their rationality and applicability are verified. These formulas provide a simple and easy method for quantitative calculation of the structural index by physical indexes to measure in the future.

**Keywords:** loess; structure; physical index; quantitative calculation; empirical formula

## 1 引 言

土的结构性是指土的颗粒和孔隙的性状、排列方式(或称组构)及颗粒之间的相互作用。黄土是

第四纪形成的, 是干旱半干旱地区的沉积物, 由于其特殊的生成环境和存在的历史环境, 形成其明显的垂直节理和大孔隙结构, 这种独特的结构性是影响土力学特性的重要内在因素<sup>[1]</sup>。保持原有结构状

收稿日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.11572245, No.51608442); 陕西省科技厅基金(No.2014JQ5173); 陕西省教育厅科研计划项目资助(No.17JS089)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11572245, 51608442), the Foundation of Science and Technology Department of Shaanxi Province (2014JQ5173) and the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (17JS089).

第一作者简介: 王丽琴, 女, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: wangliq@xaut.edu.cn

态时土体不会被破坏, 当结构状态被破坏时力学性质将发生突变<sup>[2]</sup>, 黄土结构性的不同及其变化是其发生脆性破坏、湿陷的重要原因<sup>[2]</sup>。因此, 结构性的研究对结构性土工程性质研究的意义很大。

谢定义等<sup>[3]</sup>认为, 土结构性是决定各类土力学特性的一个最为根本的内在因素, 它的出现将会和粒度、密度、湿度等指标一起完整描述土的物理本质。谢定义等<sup>[3]</sup>以压缩试验为基础, 建立了一个定量表示的土的结构性参数  $m_p$  (称为综合结构势), 开辟了土结构性定量研究的先河。此后, 土结构性的研究就朝着这个方向不断迈进。基于综合结构势, 不少学者提出了各自的黄土结构性参数 (主应力差结构性参数  $m_\sigma$ <sup>[4]</sup>、应变综合结构势  $m_\varepsilon$ <sup>[5]</sup>、定量结构性参数  $m_p$ <sup>[6-7]</sup>和  $m_\varepsilon$ <sup>[8]</sup>、试锥结构性参数<sup>[9]</sup>、构度指标  $m_u$ <sup>[10]</sup>、应力比结构性参数  $m_\eta$ <sup>[11]</sup>等), 这些参数都可以通过黄土在原状、重塑、饱和 3 种不同状态下的相应试验结果计算得到, 从不同角度完成了对原状黄土结构性的定量描述。

然而, 不同地区、不同时代的黄土, 其物理性质不同, 结构性也有区别, 因此, 结构性参数的提出者们<sup>[4-13]</sup>对结构性参数的主要影响因素做了相应分析, 但这些大都是定性分析, 且大多集中在某单一指标对结构性参数的影响分析上。众所周知, 土是一种散粒体材料, 具有三相体系, 需 3 个独立的比例指标才能共同确定土体的物理性质, 且由于土体颗粒粒径、成分的不同, 即使物理性质指标相同, 所处的物理状态也不一定相同, 因此, 仅分析单一指标对结构性参数的影响是不够的。

若能找到结构性参数与物理性质的定量关系, 无疑对黄土结构性参数应用于工程实践是有帮助的。因此, 笔者<sup>[14]</sup>对黄土构度与物理指标之间的定量关系进行了初步的研究, 得到了干构度与物理指标的关系, 天然含水率及其他含水率下的构度只能通过与干构度的关系求算, 这样一来计算相对复杂, 二来经过双重经验关系的计算后会放大相应的误差, 因此, 不如在初始结构性指标 (构度) 与物理指标定性分析的基础上, 构造一个综合物理量, 研究构度与黄土综合物理量之间的关系, 尝试直接建立构度与综合物理量的定量计算公式, 为利用物理指标直接计算构度指标提供一种方法。

## 2 构度及其试验

邵生俊等<sup>[10]</sup>提出的构度指标 (以下简称构度)  $m_u$  的表达式为

$$m_u = \frac{q_{uo}^2}{q_{ur}q_{us}} \quad (1)$$

式中:  $q_{uo}$ 、 $q_{ur}$ 、 $q_{us}$  分别为原状土、重塑土、饱和原状土的无侧限抗压强度。

为分析构度的影响因素, 本文试验用黄土取自 4 个不同的场地, 分别是: ① Q<sub>3</sub> 黄土 1: 西安市曲江新区石灰厂旁陡坎, 取土深度为 4.0~4.5 m, 棕黄色, 较湿, 土中有虫孔和树根, 夹薄层条文型白色钙化物; ② Q<sub>3</sub> 黄土 2: 西安市曲江新区煤场边陡坎, 取土深度为 3.5~4.5 m, 棕黄色, 较湿, 有虫孔, 夹白色钙质黏土, 局部裂缝较多, 偶有蚁穴; ③ Q<sub>2</sub> 黄土 1: 西安市白鹿塬边坡, 取土深度为 6~8 m, 黄褐色, 较湿, 土质均匀, 含有钙质结核, 偶有孔洞; ④ Q<sub>2</sub> 黄土 2: 兰州市郊外大青山上, 取土深度为 11~12 m, 灰黄色, 较干, 含云母、钙质结核杂斑, 夹薄层条文型粉核, 偶见粉团。

本文对所取的 4 种黄土做物性试验, 每个试验均做 2 组平行试验。若平行试验结果在规定的范围内, 则取平均值作为最终指标值; 若超出范围, 则补做相应试验, 直至符合规定为止。经过测试, 得出所取黄土的基本物理性质指标如表 1 所示。

表 1 黄土的基本物理性质指标  
Table 1 Basic physical indexes of loess

| 土样                  | 物理性质指标     |                 |                 |             |             |                   |
|---------------------|------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------------|
|                     | 土粒<br>相对密度 | 干密度<br>$\rho_d$ | 初始含<br>水率 $w_0$ | 液限<br>$w_L$ | 塑限<br>$w_p$ | 塑性<br>指数<br>$I_p$ |
|                     | $G_s$      | $/(g/cm^3)$     | $/\%$           | $/\%$       | $/\%$       |                   |
| Q <sub>3</sub> 黄土 1 | 2.70       | 1.35            | 18              | 32.0        | 23.0        | 9.0               |
| Q <sub>3</sub> 黄土 2 | 2.70       | 1.36            | 17              | 32.5        | 22.5        | 10.0              |
| Q <sub>2</sub> 黄土 1 | 2.70       | 1.46            | 19              | 34.5        | 21.0        | 13.5              |
| Q <sub>2</sub> 黄土 2 | 2.70       | 1.56            | 10              | 27.0        | 19.0        | 8.0               |

本文选取式 (1)  $m_u$  来研究分析黄土的结构性与物理性质指标的关系, 因此, 需对不同含水率、密度、状态 (原状土、重塑土及饱和原状土) 的黄土进行无侧限抗压强度试验。本文采用南京自动化仪器厂生产的常规应变控制式三轴剪力仪进行无围压试验来测定黄土的无侧限抗压强度。试验用试样为圆柱状, 直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。对所取 4 个场地的黄土进行不同含水率 (2%、5%、10%、15%、18%、20%、25%、28%、饱和)、不同状态 (原状、重塑) 下的无侧限抗压强度试验。土样的不同含水率状态采用滴定法加水或晾干法制备。为保证试样含水率的均匀性, 滴定加水或晾干至设定含水率时, 将试样放置在一个密闭的保湿缸中养护 3 d 左右。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 试验结果

试验所得的不同含水率下原状黄土与重塑黄土的无侧限抗压强度见图 1、2。

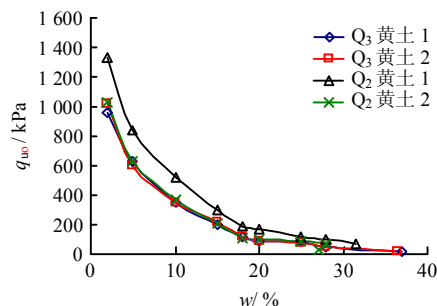


图 1 原状黄土的无侧限抗压强度

Fig.1 Unconfined compressive strength of undisturbed loess

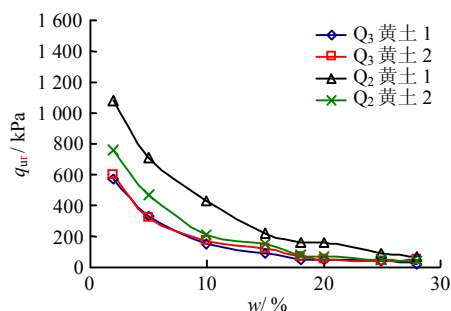


图 2 重塑黄土的无侧限抗压强度

Fig.2 Unconfined compressive strength of remolded loess

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; 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, 因而, 从图 1、2 的试验结果可以看出, 随着含水率的增加, 原状和重塑黄土的无侧限抗压强度均不断减小。

#### 3.2 各因素对构度的影响

##### 3.2.1 含水率对构度的影响

根据式 (1) 计算构度  $m_u$ , 得各黄土构度随含水率的变化曲线如图 3 所示。

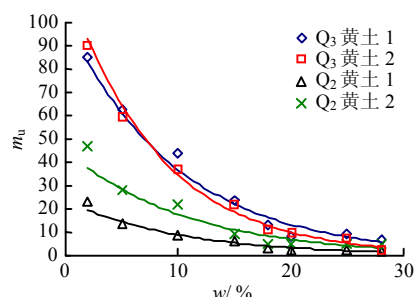


图 3 构度随含水率的变化曲线

Fig.3 Curves of structure with water content

构度指标  $m_u$  越大, 结构性越强, 反之越弱。

图 3 显示了随着含水率的增加, 各黄土的构度在不断减小, 说明随着含水率的增加, 黄土的原始胶结不断瓦解, 固化联结键不断地遭到破坏, 黄土的结构性不断降低。黄土的湿陷来自浸水时结构的破坏, 图 3 表明:  $Q_3$  黄土的构度大于  $Q_2$  黄土的构度, 兰州  $Q_2$  黄土的构度大于西安  $Q_2$  黄土的构度。说明在浸水条件下  $Q_3$  黄土的湿陷性普遍大于  $Q_2$  黄土的湿陷性, 兰州黄土的湿陷性大于同时期西安黄土的湿陷性。

##### 3.2.2 密度对构度的影响

土体的干密度反映了单位土体中固体颗粒的多少。干密度越大, 土体越密实, 反之越疏松。为分析不同干密度的黄土其初始结构性的规律, 作试验黄土的构度与干密度的关系曲线如图 4 所示。其中西安黄土包括  $Q_3$  黄土 1、 $Q_3$  黄土 2、 $Q_2$  黄土 1, 兰州黄土包括  $Q_2$  黄土 2。

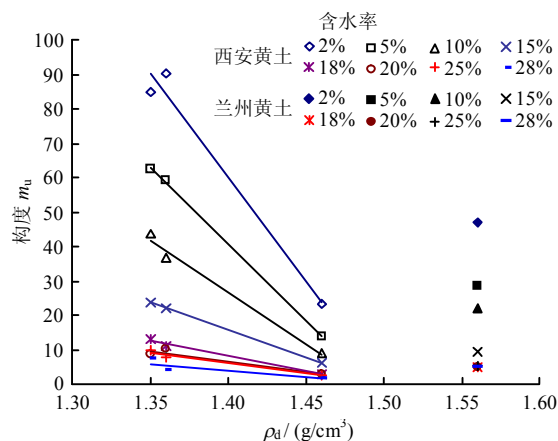


图 4 构度与干密度的关系

Fig.4 Relationships between structure and dry density

从图 4 可以看出: 在相同的含水率下, 西安黄土的构度随干密度的增大而减小, 而且构度减小的幅度随含水率的增大而减小。本试验中兰州黄土只有  $Q_2$  黄土 2 一种土样, 对比西安  $Q_2$  黄土 1 可以发现, 虽然  $Q_2$  黄土 2 比  $Q_2$  黄土 1 的干密度要更高, 但其构度不论在哪个含水率下均比  $Q_2$  黄土 1 的构度要高, 说明构度与干密度的关系同黄土的分布地区是有关系的。在不同的分布地区, 即使是同一沉积时期, 黄土的沉积环境也是不同的, 造成其初始结构性的不同, 因此, 导致兰州  $Q_2$  黄土 2 的干密度与构度的关系不在西安黄土构度随干密度的变化曲线上。可以推测, 兰州、西安黄土构度随干密度的变化曲线类似, 并位于西安曲线之上, 且在相应含水率下大致过  $Q_2$  黄土 2 的点。这样, 在同一干密度

下, 兰州黄土的构度就要大于西安黄土的构度, 而黄土的湿陷就是由于在浸水荷载的作用下结构发生破坏产生的, 因此, 兰州黄土将具有更大的潜在湿陷性, 这与多年来的实践结论也是相符的。

作为散体材料的土体而言, 颗粒与颗粒之间必然会有孔隙存在, 孔隙中或多或少地存在孔隙水。对同一天然土体, 其最大的密度就是孔隙中充满水时的密度, 即饱和密度  $\rho_{\text{sat}}$ ; 最小的密度就是孔隙中无水时的  $\rho_d$ 。 $\rho_d$  与  $\rho_{\text{sat}}$  的比值是土体密度比的最小值, 称为最小密度比, 图 5 给出了黄土构度与最小密度比的关系。从图可以看出: 试验黄土构度与最小密度比的关系和与干密度的关系相似, 说明两者对黄土构度的影响作用效果类似, 在此不再赘述。

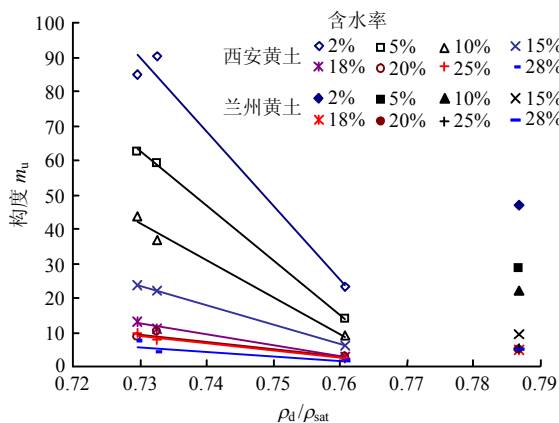


图 5 构度与最小密度比的关系

Fig.5 Relationships between structure and the minimum density ratio

### 3.2.3 物理状态对构度的影响

黄土的粒度成分以粉土颗粒为主, 含量约占 60%~70%, 一般不含大于 0.25 mm 的颗粒。除粉粒外, 黄土中还含有黏土颗粒。黏土颗粒表面带有负电荷, 可以吸附结合水, 其性质有别于其它粒径的颗粒。在不同的生成环境下, 黏土颗粒可以形成不同的结构, 因此, 黄土中黏粒含量的多少也影响其结构性的大小。黄土属于细粒土, 其塑性指数表示了土体塑性状态上、下界限的变化范围, 主要反映了土粒吸附水的能力。土粒越细, 黏粒含量越多, 吸附水分子的能力越强, 相应地土的塑限、液限和塑性指数越大。因此, 黄土的  $I_p$  可以间接地反映土体中黏粒含量的多少或黏性的大小, 而液性指数  $I_L$  的大小反映了土体所处的物理状态。图 6 给出了黄土构度与  $I_p$  的关系, 图 7 给出了黄土构度与  $I_L$  的关系曲线。

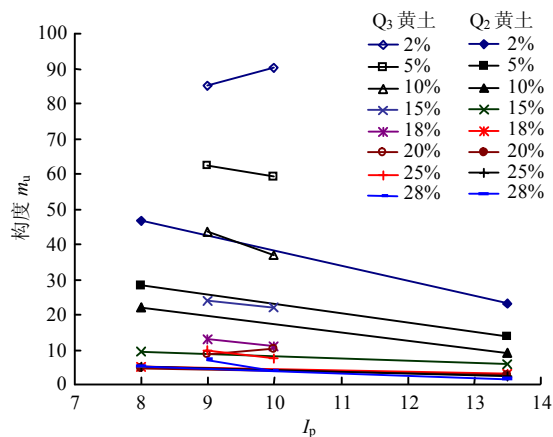


图 6 构度与塑性指数  $I_p$  的关系

Fig.6 Relationships between structure and plasticity index  $I_p$

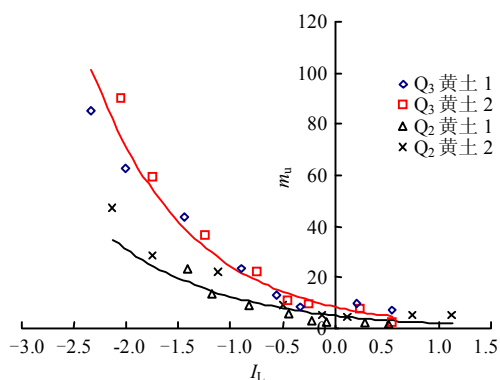


图 7 构度与液性指数  $I_L$  的关系

Fig.7 Relationships between structure and liquidity index  $I_L$

从图 6 可以看出: 除个别试验点 (含水率为 2% 与 20% 的  $Q_3$  黄土) 外, 在绝大多数含水率情况下, 同一沉积时期黄土的构度均随  $I_p$  的增大而减小, 不同含水率下的变化曲线基本平行。不同沉积时期黄土的构度随  $I_p$  的增大处于不同的变化曲线上。在同一含水率下,  $Q_2$  黄土的构度随  $I_p$  的变化曲线处于  $Q_3$  黄土的下方, 但两者基本平行。含水率越小, 两者的距离越远; 随着含水率的增加, 两者逐渐靠近。说明在同一沉积时期的黄土, 其塑性指数越大, 构度越小, 即黄土中黏性颗粒含量越多, 结构相对越稳定, 重塑及浸水对其结构性的影响越小, 进一步表明了黄土的结构性主要来自于黄土颗粒间的固化联结。图 7 表明: 4 种试验黄土的构度随液性指数  $I_L$  的变化规律近似一致。 $I_L$  越大, 黄土的构度越小; 反之, 黄土的构度越大。当含水率小于塑限,  $I_L < 0$  时, 黄土处于固态或半固态, 相应黄土的构度较大且变化率较大; 当  $0 \leq I_L < 1$  时, 黄土处于塑性状态, 相应黄土的构度较小且变化率较小; 当  $I_L \geq 1$  时, 黄土处于流动状态, 相应黄土的构度最小且基本不变化。

### 3.2.4 综合物理量与构度的关系

根据前面构度与各物理量之间关系的分析得知：黄土的构度随含水率、液性指数、塑性指数、干密度及最小密度比的增加均呈减小的趋势。黄土的各个物理性质及状态指标对其构度的大小都有或多的影响。土体是三相体系，需确定 3 个独立的物理性质比例指标及物理状态指标才能确定土体的湿度、密度，反映其粒度。物理指标不同，黄土的结构就不同。构度是无量纲的量，因此，为综合反映各物理量对黄土构度的影响，根据前述物理指标对构度影响的分析结果，并为与构度保持一致，应消除量纲，将液性指数、塑性指数、干密度及最小密度比相乘并除以水的密度，定义如下的综合物理量  $Z$  来分析其与构度的关系。

$$Z = I_L I_p \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{\rho_d}{\rho_{sat}} = (w - w_p) \frac{\rho_d^2}{\rho_{sat} \rho_w} \quad (2)$$

式中： $Z$  为综合物理量； $w$ 、 $w_p$ 、 $I_p$ 、 $I_L$ 、 $\rho_d$ 、 $\rho_{sat}$  分别为黄土的含水率、塑限、塑性指数、液性指数、干密度、饱和密度； $\rho_w$  为水的密度。

综合物理量  $Z$  中既包含了 3 个独立的物理性质指标，也包含物理状态指标。众所周知，已知土体的 3 个独立的物性指标，可以求出其余 6 个物性指标，因此，通过各物理量之间的关系， $Z$  也可写为

$$Z = \frac{(w - w_p) \rho_d G_s}{\rho_w (G_s + e)} = \frac{(w - w_p) G_s^2}{(G_s + e) 1 + e} = \frac{(w - w_p) S_r G_s}{(S_r + w) 1 + e} \quad (3)$$

式中： $S_r$ 、 $G_s$ 、 $e$  分别为黄土的饱和度、颗粒相对密度和孔隙比。

一般认为，重塑的、增湿的黄土的无侧限抗压强度不会大于原状土体的无侧限抗压强度，因此，构度  $m_u$  一定大于等于 1。根据式 (2) 计算各黄土在不同含水率下的综合物理量  $Z$ ，作构度与  $Z$  的关系曲线见图 8。

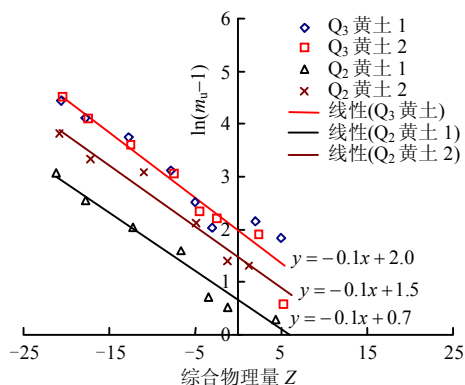


图 8 构度与综合物理量  $Z$  的关系

Fig.8 Relationships between structure and comprehensive physical index

从图可以看出，对西安  $Q_3$  黄土、 $Q_2$  黄土与兰州  $Q_2$  黄土来说： $\ln(m_u - 1)$  与  $Z$  基本均呈直线关系，且不同沉积时代、不同地区的直线基本相互平行，其斜率均为  $-0.1$ 。对此直线关系进行转换，即可得到黄土的构度与  $Z$  呈如下的指数型关系：

$$m_u = Ae^{\beta Z} + 1 \quad (4)$$

式中： $m_u$  为黄土的构度指标； $e$  为自然对数的底数； $A$  为因黄土分布地区、沉积时代而异的系数； $\beta = -0.1$ ，为常量。

式 (4) 中黄土的构度与  $e^{\beta Z}$  呈线性关系，其斜率就是因地区、沉积时代而异的系数  $A$ 。黄土实测  $m_u$  与  $e^{\beta Z}$  的关系曲线见图 9。

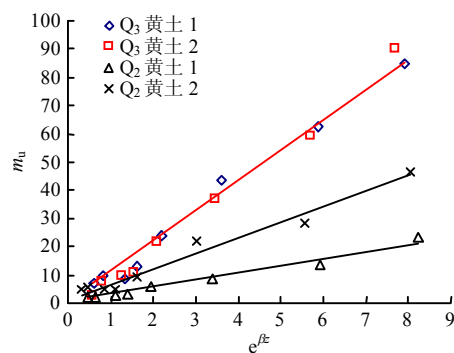


图 9 实测构度  $m_u$  与  $e^{\beta Z}$  的关系  
Fig.9 Relationships between  $m_u$  and  $e^{\beta Z}$

从图可以看出，不同地区、不同沉积时代黄土的构度  $m_u$  与  $e^{\beta Z}$  之间具有不同的线性关系，其表达式分别为

西安  $Q_3$  黄土：

$$m_u = 10.7e^{\beta Z} + 1 \quad (5)$$

西安  $Q_2$  黄土：

$$m_u = 2.9e^{\beta Z} + 1 \quad (6)$$

兰州  $Q_2$  黄土：

$$m_u = 5.6e^{\beta Z} + 1 \quad (7)$$

综合以上分析可知，黄土构度与其物理指标之间关系密切。黄土构度的大小不仅与物理性质指标有关，而且与物理状态指标有关系。含水率  $w$  越大，构度越小； $w_p$  越大，构度越大。当  $w > w_p$  时，干密度  $\rho_d$  越大，构度越小； $\rho_{sat}$  越大，构度越大，否则相反。根据黄土的  $w$ 、 $\rho_d$ 、 $\rho_{sat}$  或其它任意 3 个独立的物性指标与  $w_p$  即可计算出相应黄土不同含水率下的构度指标。

## 4 实例验证

为验证所得的综合物理量与构度的定量计算经



验公式是否适用于相应地区对应沉积时期其它场地的黄土，在西安地铁 5 号线月登阁段黄土地不同深度取样，分别取 2 个  $Q_3$  和  $Q_2$  试验用黄土，称之为  $Q_3$  黄土 3、 $Q_3$  黄土 4、 $Q_2$  黄土 3、 $Q_2$  黄土 4，分别做天然含水率下原状、重塑及原状饱和状态下的

无侧限抗压强度试验，利用式 (1) 求得相应的构度  $m_u$ ；同时对各黄土各项物理指标进行测试，通过式 (2) 分别计算各自的  $Z$ ，并将其代入按地区和沉积时代选择的式 (5) 或式 (6) 计算构度，所得结果见表 2。

表 2 月登阁段黄土土工试验指标及构度  
Table 2 Test indexes and structures of loess in Yue Deng-ge

| 土样         | 物理指标  |        |                     |            |            |            |       | 实测构度 | 计算构度  |
|------------|-------|--------|---------------------|------------|------------|------------|-------|------|-------|
|            | 初始孔隙比 | 土粒相对密度 | 干密度                 | 初始含水率      | 液限         | 塑限         | 塑性指数  |      |       |
|            | $e_0$ | $G_s$  | $\rho_d / (g/cm^3)$ | $w_0 / \%$ | $w_L / \%$ | $w_p / \%$ | $I_p$ |      |       |
| $Q_3$ 黄土 3 | 1.379 | 2.71   | 1.139               | 23.8       | 30.4       | 18.5       | 11.9  | 7.09 | 8.17  |
| $Q_3$ 黄土 4 | 0.957 | 2.71   | 1.386               | 20.0       | 33.7       | 22.7       | 11.0  | 9.98 | 10.04 |
| $Q_2$ 黄土 3 | 0.997 | 2.71   | 1.355               | 15.4       | 28.3       | 21.7       | 6.6   | 7.83 | 6.40  |
| $Q_2$ 黄土 4 | 0.868 | 2.71   | 1.446               | 24.3       | 34.0       | 26.3       | 7.7   | 4.21 | 4.61  |

表 2 表明，月登阁段黄土场地所得的黄土实测构度与计算构度比较接近，说明本文得出的黄土构度指标与物理指标之间的定量计算经验公式是合适的。

## 5 结 论

(1) 构度随含水率、干密度、最小密度比、塑性指数、液性指数的增大均呈减小的趋势变化，其中随含水率、液性指数的增大呈指数型减小。

(2) 黄土构度的大小除与上述物理指标有关外，还与黄土的形成时代及其分布地区有关。相同的条件下，形成时代越晚构度越大；不同地区的黄土，其形成环境不同，结构性的主要因素就有区别，因此，相同条件下构度指标的大小也不同。

(3) 构造了一个综合物理量，分析了综合物理量与构度的关系，建立了分地区（西安、兰州）、分时代（ $Q_3$ 、 $Q_2$ ）的利用综合物理量直接计算构度指标的经验公式，经初步检验，此经验公式是合理的、适用的。

(4) 为以后通过简单易测的物理指标定量计算构度提供了一种思路和方法，但鉴于本文中所采用的样本有限，期待以后不断丰富相关试验样本后，对此结论进行更广泛的验证。

## 参 考 文 献

- [1] 罗爱忠, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 黄土的湿载结构性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2209—2215.  
LUO Ai-zhong, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu, et al. A structural constitutive model for loess under the wetting condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2209—2215.
- [2] 骆亚生, 张爱军. 黄土结构性的研究成果及其新发展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 66—69.  
LUO Ya-sheng, ZHANG Ai-jun. Outcomes on structural research of loess and its new advance[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2004, 23(6): 66—69.
- [3] 谢定义, 齐吉琳. 土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-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 651—656.
- [4] 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.
- [5] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248—4251.  
LUO Ya-sheng, XIE 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(24): 4248—4251.
- [6] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352—1360.  
CHEN Cun-li, GAO Peng, HU Zai-qiang. Moistening deformation characteristic of loess and its relation to structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1352—1360.
- [7] 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.
- [8] 陈存礼, 高鹏, 唐杰. 三轴应力状态下不同湿度原状黄土的结构定量参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2313—2319.
- CHEN Cun-li, GAO Peng, TANG Jie. Structural quantitative parameter of intact loess with different water contents under triaxial stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2313—2319.
- [9] 冯志焱, 谢定义. 复杂加载条件下原状黄土结构性定量参数变化全过程分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 72—75.
- FENG Zhi-yan, XIE Ding-yi. Quantitative analysis of soil structure variations in whole process under complex loading conditions of intact loess[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 2009, 25(1): 72—75.
- [10] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15—19, 38.
- SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 15—19, 38.
- [11] 邓国华, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构参数[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2310—2314.
- DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu, et al. A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2310—2314.
- [12] 骆亚生, 谢定义, 李鹏. 非饱和黄土结构特性变化的主要影响因素[J]. 水土保持通报, 2005, 25(2): 36—39.
- LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, LI Peng. Main influence factors on structural property changes of unsaturated loess[J]. **Bulletin of Soil and Water Conservation**, 2005, 25(2): 36—39.
- [13] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1387—1393.
- SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 2014, 36(8): 1387—1393.
- [14] 王丽琴, 邵生俊. 黄土构度与物理指标之间的定量关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 4380—4386.
- WANG Li-qin, SHAO Sheng-jun. Quantitative relationship between the structural and physical indexes of loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.2): 4380—4386.

#### 上接第 3483 页

- [19] 潘一山, 罗浩, 李忠华, 等. 含瓦斯煤岩围压卸荷瓦斯渗流及电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 713—719.
- PAN Yi-shan, LUO Hao, LI Zhong-hua, et al. Experimental study on gas permeability and charge induction of gaseous coal rock under confining pressure unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34 (4): 713—719.
- [20] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluid flow[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1999.
- [21] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 907—914.
- XU Jiang, PENG Shou-jian, YIN Guang-zhi, et al. Development and application of triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing methane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 907—914.
- [22] 刘星光. 含瓦斯煤变形破坏特征及渗透行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- LIU Xing-guang. Study on the deformation and failure characteristics and the permeation behavior of gas-saturated coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [23] 夏伟, 符文熹, 赵敏, 等. 多空隙组合地质单元渗流理论分析与试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3175—3183.
- XIA Wei, FU Wen-xi, ZHAO Min, et al. Theoretical analysis and experiment for the seepage of a combinational fractured-vuggy-porous geological media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3175—3183.
- [24] ZHANG X M, ZHANG D M, LEO C J, et al. Damage evolution and post-peak gas permeability of raw coal under loading and unloading conditions[J]. **Transport in Porous Media**, 2017, 117(3): 465—480.