DOI：10.16285/j.rsm.2016.2629

黄土初始结构性对其压缩屈服的影响

王丽琴[1,2]，邵生俊[1,2]，赵　聪[1]，鹿忠刚[1]

（1. 西安理工大学 土木建筑工程学院，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：黄土是一种典型的具有结构强度的欠压密土，其特殊的结构性会使黄土的压缩曲线出现类似超固结土的明显转折点（对应的压力称为结构压缩屈服应力）。为分析黄土的初始结构性对其压缩屈服的影响，对 6 个场地的黄土进行了侧限压缩试验及单轴抗压强度试验，分别得到了各个场地不同含水率黄土的压缩屈服应力和构度指标。研究表明：黄土的构度指标与压缩屈服应力均随含水率的增大而减小，同时随含水率的增大，构度变化幅度小的黄土，其压缩屈服应力变化幅度也小；沉积时代相同的黄土，构度越大，其压缩屈服应力越大，两者呈线性关系；黄土的沉积时代不同，其构度与压缩屈服应力的线性关系就不同。分别给出了 Q_3、Q_2 黄土的构度与压缩屈服应力的线性关系式，并通过实例初步验证了此线性关系的适用性，为以构度为桥梁，利用简便易得的物理指标计算压缩屈服应力提供了一种途径。

关　键　词：土力学；原状黄土；初始结构性；构度指标；压缩屈服

中图分类号：TU 411　　**文献识别码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2018) 09－3223－07

Effect of initial structural property of loess on its compressive yield

WANG Li-qin[1,2], SHAO Sheng-jun[1,2], ZHAO Cong[1], LU Zhong-gang[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, 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 typical unconsolidated soil with structural strength. Its special structure results in an obvious turning point (where the pressure is called the compressive yield stress of structure) on its compression curve, similar to the curve of over-consolidated soil. To analyze the effect of initial structure on compressive yield of loess, confined compression tests and uniaxial compression strength tests were conducted on loess soils from six sites. The compressive yield stress and the structure index of loess with different water contents were obtained respectively. The results show that the structure index and the compressive yield stress of loess decrease with the increasing of water content. Meanwhile, with the increasing of water content, the variation of structure and variation of compressive yield stress are small. With the same sedimentary period of loess , greater structure index results in greater compressive yield stress. However, the linear relationship between structure index and compressive yield stress is different for the loess in the different sedimentary periods. The expressions of such correlations for Q_3 (late pleistocene) loess and Q_2 (middle pleistocene) loess are given respectively. Furthermore, the applicability of the correlations is verified by examples. Taking the structure as a bridge, there is a way to calculate compressive yield stress by using simple and easily available physical indexes.

Keywords: soil mechanics; undisturbed loess; initial structure; structure index; compressive yield

1　引　言

原状黄土具有特殊的结构性，结构性影响着其变形、强度等各方面的工程性质。从土力学角度定量分析黄土结构性始于谢定义等以压缩试验为基础，建立的一个定量表示土结构性的参数 m_p，称为综合结构势[1]。此后，基于综合结构势，不少学者提出了各自的黄土结构性参数，如：主应力差结构

收稿日期：2016-11-08
基金项目：国家自然科学基金项目（No.11572245，No.51608442）；陕西省教育厅科研计划项目资助（No.17JS089）；西安理工大学学科建设项目（No.2018-02-01）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11572245, 51608442), the Scientific Research Program of Shaanxi Provincial Education Department (17JS089) and the Discipline Construction Project of Xi'an University of Technology (2018-02-01).
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: wanglq@xaut.edu.cn

性参数[2]、应变综合结构势[3]、孔隙比结构性参数[4−5]和主应力差结构性参数[6]、试锥结构性参数[7]、应力比结构性参数[8]等，这些参数均从宏观的不同角度完成了对原状黄土结构性的定量描述，但以上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，而非土体的初始结构性[9]。邵生俊等[9]通过原状土、重塑土和饱和原状土的无侧限抗压强度，基于综合结构势提出了构度指标 m_u，表征了土体的初始结构性。

黄土是典型的具有结构强度的一种欠压密土[10−11]。在压缩过程中，黄土的结构强度逐渐发挥，直到其压缩曲线在某点出现曲率突变。此时土体结构在对应的荷载下发生了压缩屈服，结构压缩屈服前后黄土的压缩性大不相同。此曲率突变转折点的存在是土体初始结构性的体现，因此，有必要研究黄土的初始结构性对其结构压缩屈服的影响，定量分析两者的关系。

为此，本文对采取的黄土样进行了不同含水率、不同状态下的侧限压缩试验及无侧限抗压强度试验，得到了相应的结构压缩屈服应力及定量表示黄土初始结构性的构度指标 m_u，研究两者的关系得出：沉积时代相同的黄土，其构度指标与结构压缩屈服应力线性正相关，并给出了相应沉积时代（Q_3、Q_2）黄土的构度指标描述结构压缩屈服应力的表达式，最后用实例验证了此定量关系的适用性。

2 黄土室内试验及结果分析

2.1 试验用土

本文试验用黄土取自 6 个不同的场地，分别是：① Q_3 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，夹薄层条纹型白色钙化物；② Q_3 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_3 黄土 3，泾河岸坡，取土深度为 3.0～4.0 m，灰黄色，较干，有虫孔，局部有裂缝，土质均匀；④ Q_3 黄土 4，西安市白鹿塬田间土坡，取土深度为 4.0～5.0 m，黄褐色，较湿，有虫孔，局部粉核较多，偶有结成粉砂团；⑤ Q_2 黄土 1，西安市白鹿塬边坡，取土深度为 6.0～8.0 m，黄褐色，较湿，土质均匀，含有钙质结核，偶有孔洞；⑥ Q_2 黄土 2，兰州市郊外大青山上，取土深度为 11.0～12.0 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。

在取样过程中，为减少扰动，土样全部采用削土刀人工切削而成，并用塑料布和胶带及时密封，防止水分蒸发。按规范要求对各场地黄土的基本物理性质指标进行测试，结果见表 1。

表 1 黄土的基本物性指标

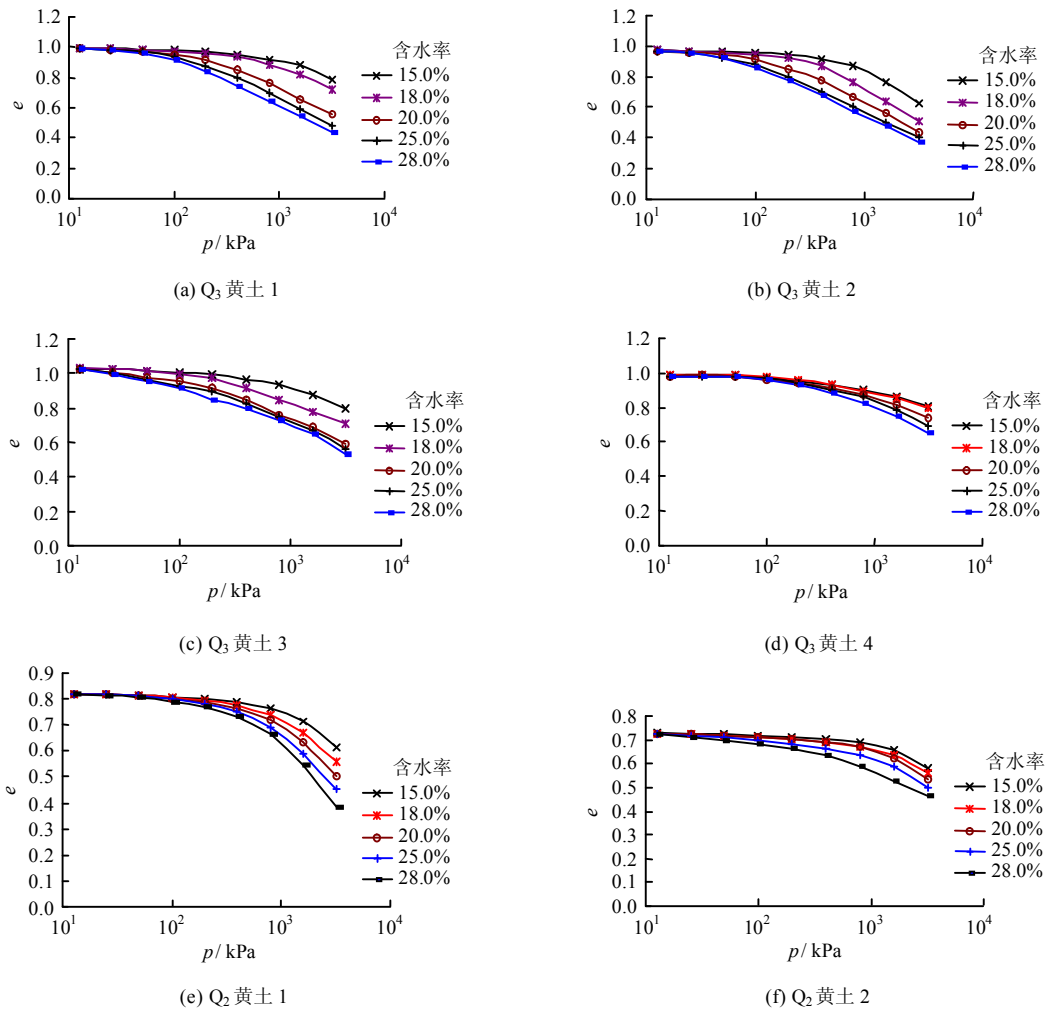
Table 1 Basic physical indexes of loess

土样	物理性质指标						
	初始孔隙比 e_0	干密度 ρ_d / (g/cm^3)	初始含水率 w_0/%	土粒相对密度 G_s	液限 w_L/ %	塑限 w_p/ %	塑性指数 I_p
Q_3 黄土 1	1.00	1.35	18.0	2.70	32.0	23.0	9.0
Q_3 黄土 2	0.98	1.36	17.0	2.69	32.5	22.5	10.0
Q_3 黄土 3	1.03	1.33	10.8	2.70	31.5	21.5	10.0
Q_3 黄土 4	0.99	1.36	22.0	2.71	33.5	20.5	13.0
Q_2 黄土 1	0.85	1.46	19.0	2.70	34.5	21.0	13.5
Q_2 黄土 2	0.73	1.56	10.0	2.69	27.0	19.0	8.0

2.2 侧限压缩试验及结果分析

本文对所取 6 个不同场地的原状黄土进行了不同含水率 w（15.0%、18.0%、20.0%、25.0%、28.0%）下的侧限压缩试验，压力 p 分别为 12.5、25.0、50.0、100.0、200.0、400.0、800.0、1 600.0、3 200.0 kPa。本试验采用高压固结仪，所用试样高为 20 mm，面积为 30 cm^2。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。试验所得各场地黄土的 e-lg$p$ 压缩曲线见图 1。

从图 1 可以看出：侧限状态下，随着压缩荷载 p 的增加，各黄土均逐渐被压密，孔隙比 e 越来越小。同一场地的黄土，随着含水率的增长，土体抵抗变形的能力越来越弱，孔隙比的减小幅度越来越大，因此，e-lg$p$ 曲线越靠下，说明增湿后土体的压缩性更大。黄土是具有结构强度的欠压密土[5, 9−10]，随着压缩荷载的增加，e-lg$p$ 曲线的斜率逐渐增加；荷载增大到一定程度后，曲线的斜率基本保持不变，进入直线段。在此过程中，e-lg$p$ 曲线会出现曲率突变的转折点，但不是由于先期固结压力所致，而是结构强度的一种反映和表现[12−13]。当作用荷载小于土的结构强度与先期固结压力的总和，原始结构尚未破坏时，土的压缩性较小，曲线较缓；一旦荷载超过此总和，土的结构破坏，压缩性突然增大[11]，便发生了结构压缩屈服，曲线变陡，因此原状黄土压缩曲线转折点所对应的压力不仅包含先期固结压力，还包含了侧限压缩条件下黄土天然结构破坏时的结构强度[14−16]。然而，在侧限压缩条件下，理论上土承受的压力可以无限增大，不存在工程意义上



(a) Q_3 黄土 1　(b) Q_3 黄土 2　(c) Q_3 黄土 3　(d) Q_3 黄土 4　(e) Q_2 黄土 1　(f) Q_2 黄土 2

图 1　不同场地黄土的 *e*-lg*p* 曲线

Fig.1　*e*-lg*p* curves of loess soils from different sites

的强度破坏[17]，即使是同一黄土，不同的试验条件得到的结构强度也是不同的[10]，因此为区分一般意义上的先期固结压力与强度试验中的结构强度，此侧限条件下压缩曲线转折点对应的荷载（采用 Casagrande 方法确定）称为结构压缩屈服应力，简称压缩屈服应力，记作 p_{sc}。6 个场地不同含水率下黄土的压缩屈服应力见表 2。

表 2　不同含水率黄土的压缩屈服应力

Table 2　Compressive yield stresses of loess with different water contents

含水率 / %	压缩屈服应力 p_{sc} / kPa					
	Q_3 黄土 1	Q_3 黄土 2	Q_3 黄土 3	Q_3 黄土 4	Q_2 黄土 1	Q_2 黄土 2
15.0	1 200	850	840	900	1 250	1 320
18.0	750	380	420	870	950	1 250
20.0	320	200	330	860	900	1 200
25.0	190	100	320	750	780	1 100
28.0	150	80	300	710	800	950

从表 2 可以看出：随着含水率的增大，各黄土的压缩屈服应力均逐渐减小，不同的是 Q_3 黄土 1 和 Q_3 黄土 2 比其余 4 种黄土的压缩屈服应力的变化大；同一含水率下的 Q_2 黄土的压缩屈服应力大于 Q_3 黄土的压缩屈服应力，即在侧限条件下 Q_2 黄土比 Q_3 黄土结构破坏所需的荷载大，因此相同荷载下 Q_2 黄土的压缩性要小。

压缩屈服应力 p_{sc} 是由黄土特殊的结构抵抗压缩荷载表现出来的，是土体初始结构性的体现。随着含水率的增大，各场地黄土的压缩屈服应力 p_{sc} 均在逐渐减小，表明：随着含水率的增加，发生压缩屈服所需的荷载越来越小，土体初始结构越容易遭到破坏，因而黄土的初始结构性与其压缩屈服存在必然的联系。

2.3　黄土单轴抗压强度试验及结果分析

构度指标 m_u [9]对初始结构性的定量描述为分析黄土的初始结构性与压缩屈服应力的关系提供了方便，构度指标 m_u 的表达式为

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

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

构度指标越大，黄土的初始结构性就越大。无侧限抗压强度也可以是围压为 0 的常规三轴试验所测得的单轴抗压强度，因此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试验。本文对所取各场地的黄土进行不同含水率（15.0%、18.0%、20.0%、25.0%、28.0%、饱和）、不同状态（原状、重塑）下的单轴抗压强度试验。试样直径为 39.1 mm，高为 80.0 mm；饱和试样采用真空抽气法制备。不同含水率试样的制备方法与前述侧限压缩试验试样的制备方法类似，在此不再赘述。

根据不同含水率原状、重塑黄土的单轴抗压强度试验结果，通过式（1）计算各黄土不同含水率下的构度指标，得构度随含水率的变化曲线如图 2 所示。

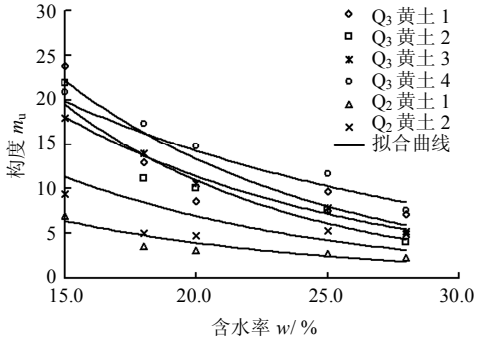


图 2 构度随含水率的变化曲线

Fig.2 Curves of structure index with water content

从图 2 可以看出：构度随含水率的增大而减小，说明含水率越大，黄土的初始结构性越小；Q_3 黄土的构度随含水率的变化曲线均高于 Q_2 黄土的曲线，说明同一含水率下 Q_3 黄土的初始结构性大于 Q_2 黄土的初始结构性。总体上来说，Q_3 黄土的构度随含水率的变化曲线较陡，Q_2 黄土的曲线较缓，说明在初始含水率相同时，浸水或增湿的条件下，Q_3 黄土的结构性较 Q_2 黄土的变化更大。

2.4 黄土构度指标与压缩屈服应力的关系

对比图 2 与表 2 中各黄土在不同含水率下的构度与压缩屈服应力，从 4 种 Q_3 黄土的对比可以看出：含水率 $w=15.0\%$时，Q_3 黄土 1 的构度最大，其相应的压缩屈服应力也最大。含水率 $w=28.0\%$ 时，Q_3 黄土 4 的构度最大，其相应的压缩屈服应力也最大；Q_3 黄土 2 的构度最小，其压缩屈服应力也最小。相对来说，Q_3 黄土 3、Q_3 黄土 4 的构度随含水率的变化曲线比较平缓，其压缩屈服应力的变化也较小。从 Q_2 黄土的对比也可以类似地看出：在各个含水率条件下 Q_2 黄土 2 的构度均比 Q_2 黄土 1 的构度大，相应地 Q_2 黄土 2 的压缩屈服应力也比 Q_2 黄土 1 的大。两 Q_2 黄土的构度随含水率的变化曲线均比较平缓，两者压缩屈服应力随含水率的变化也不大。以上情况均表明：地质沉积时代相同的黄土，压缩屈服应力基本随构度指标的减小而减小，两者正相关。以构度 m_u 为横坐标，压缩屈服应力 p_{sc} 除以标准大气压 p_a，即 p_{sc}/p_a 为纵坐标，作黄土的 m_u - p_{sc}/p_a 关系曲线，见图 3。

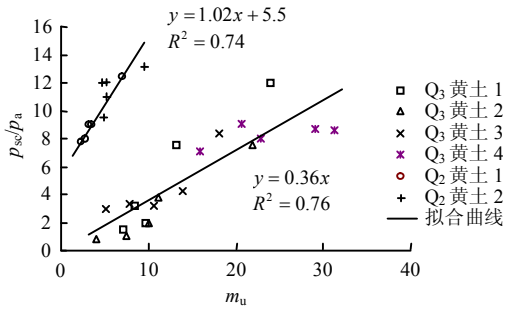


图 3 黄土 m_u–p_{sc}/p_a 关系曲线

Fig.3 m_u–p_{sc}/p_a curves of loess

从图 3 可以看出：沉积时代相同的黄土，m_u 越大，p_{sc}/p_a 越大，两者基本呈线性的变化规律；沉积时代不同的黄土，其 m_u - p_{sc}/p_a 关系曲线的位置不同，Q_2 黄土关系曲线的位置明显高于 Q_3 黄土的。当构度指标相同时，Q_2 黄土的压缩屈服应力明显大于 Q_3 黄土的，说明在同一荷载作用下 Q_2 黄土的压缩性明显小于 Q_3 黄土的压缩性；当压缩屈服应力相同时，Q_2 黄土的构度指标明显小于 Q_3 黄土的构度指标，说明压缩性相同或接近时 Q_2 黄土的结构性小于 Q_3 黄土的结构性。以上结果表明：黄土的初始结构性和压缩性均与形成时代关系密切。形成时代越早，在堆积过程中上部荷载及各种地质营力的作用下，早期结构强度中的一部分逐步转化为先期固结压力的一部分，因而现在表现为结构性减小，压缩性减小，反映为构度指标较小，但压缩屈服应力较大。

如前所述，图 3 中黄土的 m_u - p_{sc}/p_a 关系基本呈线性变化，因此其表达式可写作如下形式：

$$p_{sc}/p_a = Am_u + B \tag{2}$$

式中：A、B 均为与黄土沉积时代有关的参数。其中 $A>0$，$A+B\geqslant 0$。

则 Q_3、Q_2 黄土构度 m_u 与压缩屈服应力 p_{sc} 关系的表达式分别为

$$p_{sc} = 0.36 m_u p_a \quad (Q_3\text{黄土}) \tag{3}$$

$$p_{sc} = (1.02 m_u + 5.5) p_a \quad (Q_2\text{黄土}) \tag{4}$$

由于黄土的构度指标 m_u 是根据无侧限抗压强度试验结果通过式（1）计算得出的，压缩屈服应力 p_{sc} 是根据试验所得的压缩曲线采用 Casagrande 方法确定的，两者都不是试验直接的测试值，在计算 m_u 和确定 p_{sc} 时，无疑会叠加试验中无法避免的误差，因此，以上 Q_3、Q_2 黄土的线性关系的相关系数 R 的平方分别为 0.76 和 0.74，说明此线性关系比较合理，基本可以表达试验用黄土构度 m_u 与压缩屈服应力 p_{sc} 之间的关系。

3　实例验证

为检验上述所得的黄土构度与压缩屈服应力的关系，在西安地铁 4 号线南段明挖 I 标段某载荷试验点，2.0～6.0 m 深度的 Q_3 黄土层范围内，以 1.0 m 为间隔采取了 Q_3 黄土土样，13.0～14.0 m 深度的 Q_2 黄土范围采取了 Q_2 黄土土样。为避免采样对黄土的过多扰动，现场取样采用人工探井法，最大限度地保持土样为原状，减少了对土体不必要的干扰，可大大提高后续试验的精确度。场地不同深度黄土的基本物性指标见表 3。

表 3　不同深度黄土的基本物性指标

Table 3　Basic physical indexes of loess at different depths

土样	取土深度/ m	初始孔隙比 e_0	干密度 ρ_d / (g/cm^3)	初始含水率 w_0/ %	塑性指数 I_p
Q_3 黄土	2.0	0.815	1.46	20.5	11.4
	3.0	0.992	1.33	22.6	10.4
	4.0	0.978	1.35	24.8	13.0
	5.0	0.894	1.41	22.3	12.8
	6.0	0.734	1.54	21.1	10.8
Q_2 黄土	13.0	0.826	1.49	23.1	12.6
	14.0	0.863	1.46	23.2	13.9

对表 3 中各深度黄土进行了天然含水率下的原状、重塑及原状饱和状态下的单轴抗压强度试验及原状黄土的侧限压缩试验，通过式（1）计算得到黄土的构度指标 m_u，在相应的 e-lg$p$ 压缩曲线上得到压缩屈服应力 p_{sc}，将所得的 (m_u，p_{sc} / p_a) 点添加到图 3 中，如图 4 所示。

从图 4 可以看出：本场地 2.0～6.0 m 深度范围内 Q_3 黄土的 (m_u，p_{sc} / p_a) 点均分布于 Q_3 黄土的 m_u - p_{sc} / p_a 线性关系线附近；同样地，本场地 13.0～14.0 m 深度范围内 Q_2 黄土的 (m_u，p_{sc} / p_a) 点均分布于 Q_2 黄土的 m_u - p_{sc} / p_a 线性关系线附近，说明本文得出的 Q_3、Q_2 黄土的构度与压缩屈服应力线性关系对此场地黄土是适用的，初步验证了其适用性。

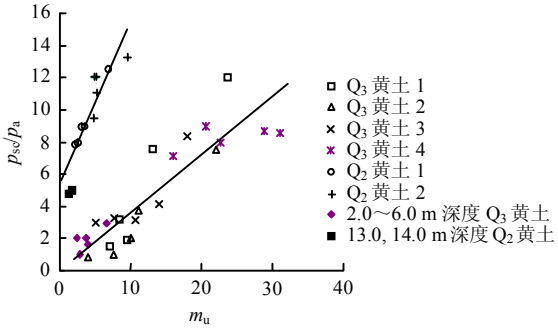


图 4　黄土 m_u-p_{sc}/p_a 关系验证

Fig.4　Verification of relationship between m_u and p_{sc}/p_a of loess

根据不同地区、不同沉积时代黄土的构度指标 m_u 与综合物理量[18]或物理指标之间的定量关系[19]，以构度指标为桥梁，通过式（3）、（4），可分别建立 Q_3、Q_2 黄土的物理指标与压缩屈服应力的关系，由此可利用黄土的物理指标计算其侧限压缩时的压缩屈服应力，实现压缩屈服应力 p_{sc} 的便捷计算。

4　结　论

（1）同一沉积时代的黄土，构度越大，其压缩屈服应力也越大，两者线性正相关。构度随含水率的变化曲线较平缓时，其压缩屈服应力随含水率的变化也较小；反之构度随含水率的变化曲线较陡时，压缩屈服应力的变化也较大。

（2）不同沉积时代黄土的 m_u - p_{sc} / p_a 关系曲线不同。黄土的初始结构性和压缩性均与形成时代关系密切。相同荷载条件下，Q_2 黄土的压缩性明显小于 Q_3 黄土的压缩性；压缩性相同或相近时，Q_2 黄土的初始结构性明显小于 Q_3 黄土的初始结构性。

（3）给出了 Q_3、Q_2 黄土的构度与压缩屈服应力之间的线性关系式。经过独立场地取土进行试验，结果初步验证了此关系的适用性，为以构度指标为桥梁，利用简单易得的物理指标计算其压缩屈服应力提供了一种途径。

以上分析的试验黄土大部分取自西安地区，只有一个试验样本来自兰州地区，本文的黄土构度与压缩屈服应力的关系是否适用于更广范围的其他场地黄土，还有待今后不断的验证。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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性定量化参数[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.

[7] 冯志焱, 谢定义. 复杂加载条件下原状黄土结构性定量化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.

[8] 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性参数[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.

[9] 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.

[10] 李作勤. 关于黏土压密类型的鉴别问题[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(1): 67－78.
LI Zuo-qin. Identification of consolidated types in clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 6(1): 67－78.

[11] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996: 19－20.
LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996: 19－20.

[12] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 116－117.
CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 116－117.

[13] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100－112.
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 100－112.

[14] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34－45.
LI Zuo-qin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 34－45.

下转第 3236 页