

DOI: 10.11779/CJGE202107021

原状黄土的结构性与渗气特性的关联性初探

张登飞¹, 陈存礼², 舒迎涛³, 庞腾腾⁴

(1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 哈尔滨电气国际工程有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150028; 4. 西安市建筑设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 对3个地区的不同含水率原状黄土进行了等向压缩与渗气性同步测定试验, 分析了原状黄土等向压缩过程中变形特性与渗气特性, 探讨了压缩特性与渗气性之间的关联性通过引入用渗气性定义的结构性参数, 提出了描述湿载耦合作用时原状黄土压缩变形的表达式。研究结果表明: 原状黄土的渗气性变化与压缩特性的变化过程呈良好的关联性, 渗气性可反映原状黄土结构与湿度不同而引起结构势差异及其应力作用引起黄土结构势的损伤过程; 把结构屈服时某一含水率与参考含水率土的渗气系数之比定义为结构比参数, 通过将不同含水率下结构比参数引入到等向应力变量中而得到了具有归一性的压缩曲线; 据此, 提出了以参考含水率的原状黄土的压缩曲线为基础, 统一、连续描述非饱和原状黄土屈服前后压缩变形模式, 其计算与试验结果皆吻合较好。

关键词: 土的结构性; 等向压缩特性; 渗气特性; 原状黄土

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1345-07

作者简介: 张登飞(1987—), 男, 博士, 主要从事黄土灾害与黄土力学方面的研究工作。E-mail: dfzhang87@nwu.edu.cn。

Correlation between structure of intact loess and gas permeability

ZHANG Deng-fei¹, CHEN Cun-li², SHU Ying-tao³, PANG Teng-teng⁴

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 3. Harbin Electric International Company Limited, Heilongjiang Province, Harbin 150028, China; 4. Xi'an Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The isotropic compression tests with simultaneous gas permeability measurements are performed for intact loess with various water contents in three regions. The behaviours of compression deformation and change of induced gas permeability of intact loess are analyzed. The correlation between gas permeability and compression deformation is discussed. The formula of compression curve of intact loess is proposed to characterize the compressive deformation under the coupling of moisture and stress, in which the structural parameter defined by gas permeability is included as a known parameter. The results suggest that changes of gas permeability of intact loess are found to have a good correlation with volumetric deformation during isotropic compression tests. The structural potential difference of intact loess caused by the fabric and moisture and its damage induced by the stress can be reflected by the change in gas permeability. The gas permeability ratio corresponding to the yield stress at the ratio of a certain water content to the reference water content is defined as the structural ratio parameter, and it is introduced into the isotropic stress variable to lead to a normalized compression curve of intact loess with various water contents. Regarding the compression curve at the reference water content as the reference state, a unified and continued description of the compression deformation before and after yielding for unsaturated intact loess is proposed, and the calculated results agree well with the test ones.

Key words: soil structure; compression; gas permeability; intact loess

0 引言

土结构性是“21世纪土力学的核心”^[1]。作为典型强结构性黄土, 自身独特的水敏性和动力易损性是黄土结构破损的具体表现, 结构性作为最为根本的内在属性决定着黄土的土力学性质^[2]。将结构性参量引

入到探讨黄土的力学特性上, 建立结构性演化与力学

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907233); 支撑服务川藏铁路规划建设地质调查(20190505); 川西—藏东地区交通廊道活动构造与地质调查(DD20201123)

收稿日期: 2020-10-26

特性之间的联系是黄土结构性研究的主题, 产生了从微观形态学^[3-6]、固体力学^[7-11]和土力学^[2, 12-15]3 种途径研究黄土结构性的各具特色丰富研究成果。

气体渗透时, 由于渗透力较小, 与土颗粒间没有相互作用, 较少引起土的结构变化等特点, 使得用渗气的方式认识土结构性变化成为可能的土力学途径。目前, 国内外研究侧重点是揭示多因素影响下土的渗气性演化过程, 关注了湿度^[16]、密度^[16]、应力^[17]、尺度效应^[18]和组构^[19]对土的渗气性影响; 探讨了自然沉积或制样方法形成的初始结构性^[20-21]、各向异性^[22]和裂隙性^[23]对土的渗气性影响; 探究了土的渗气性演化与其微观之间的联系^[24-25]。这些研究反映了土的渗气性对众多影响因素的敏感性, 同时从另一角度说明可以用渗气性的变化来体现这些影响因素。由此提出设想: 是否可以用土的渗气性来定义结构性参数, 实现多因素对黄土力学特性的影响皆涵盖在结构性参数对其力学特性的影响上, 并作为桥梁将微观结构与宏观力学特性在定量上联系起来, 统一纳入力学本构模型中。针对这一设想与目标, 本文初步开展等向应力条件下原状黄土的结构性与渗气特性的关联性探讨, 用渗气试验确定的结构性参数引入到应力状态变量中, 统一描述不同含水率原状黄土的压缩变形特性。

1 试验方案及方法

1.1 试验用土及试样制备

试验用土分别取自西安、天水和兰州 3 个地区斜坡侧壁的原状 Q_3 黄土, 取土深度约 3~4 m, 其他物理性质指标见表 1, 按土的液塑限分类属于粉质黏土和粉土。由土的颗粒级配曲线(图 1)可知, 西安黄土主要以粉粒为主(含量 73%), 含有部分黏粒(含量 23%); 天水黄土主要以粉粒为主(含量 77%), 含有少量的砂粒(含量 10%)和黏粒(含量 13%); 而兰州黄土主要以粉粒(含量 60%)和砂粒(含量 30%)为主; 用专门的削样器制备直径约 3.91 cm, 高度为 8 cm 三轴试样进行试验。

表 1 原状黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact loess

地区	含水率 $w_p/\%$	干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 I_p	土样 定名
西安	15.2	1.30	30.9	19.8	11.1	粉质黏土
天水	11.0	1.45	27.5	17.9	9.6	粉土
兰州	8.0	1.30	24.9	16.5	8.4	粉土

1.2 试验仪器与渗气系数测定原理

试验仪器是将已有三轴渗气仪^[25]的渗气测量装置进行改进。具体改进了两处: ①将通过水箱放水以在试样两端形成气压差的被动渗气压施加方式, 转变为通过气压加载装置施加气压以在试样两端形成气压

差的主动渗气压施加方式; ②通过量测水的体积换算得到气的体积以测定渗气速率方式, 转变为通过电子皂膜流量计直接测定渗气速率, 其中流量计为双量程(0~30 mL/min)和(0~30 L/min), 精度为±1%。改进的三轴渗气仪如图 2 所示, 其他的加载与变形测量装置的详细结构见文献[26]。

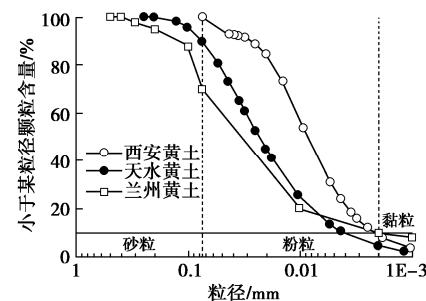


图 1 原状黄土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of intact loess

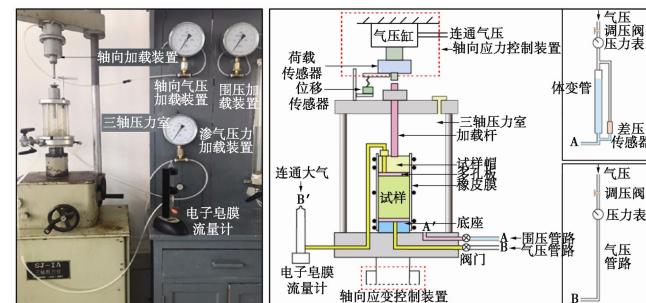


图 2 三轴渗气仪

Fig. 2 Triaxial equipment for air permeability

主动施加渗气压后(控制气压范围在 0~20 kPa), 三类原状黄土的渗气速率与气压梯度的典型关系如图 3 所示。可见, 二者呈较好的线性关系, 可以用达西定律来描述气相运动^[8], 即

$$k_a = \frac{v_a}{i_a} = \frac{Q_a/A}{\Delta p/(\rho_w g L)} = \frac{Q_a \rho_w g L}{\Delta p A} \quad (1)$$

式中 k_a 为渗气系数(cm/s); v_a 为渗气速率(cm/s); i_a 渗气压力梯度; Q_a 为渗气体积流速(cm^3/s); Δp 为试样两端的气压差(kPa); A , L 分别为试样的面积(cm^2)与高度(m), ρ_w 为水的密度($10^3 kg/m^3$), g 为重力加速度(取 $10 m/s^2$)。由式(1)可知, 为了测定渗气系数, 需确定气压差 Δp 和渗气体积流速 Q_a , 可分别通过主动渗气压施加方式和皂膜流量计测定。考虑到压力与温度对渗气体积流速的影响, 通过理想气体状态平衡方程校正至标准状态。

1.3 试验方案及方法

为反映含水率变化引起原状黄土的结构性变化, 对天然含水率试样进行增湿或减湿到不同的目标含水率; 为研究结构性对原状黄土压缩与渗气特性的影响,

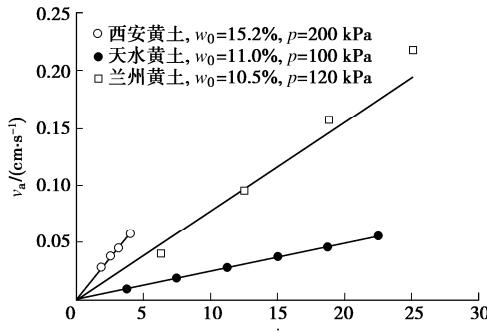


图 3 原状黄土的渗气速率与气压梯度的典型关系曲线

Fig. 3 Relationship between rate of gas flow and gas-pressure

gradient at various given isotropic stresses for intact loess
进而探讨结构性与渗气特性的关联性, 对西安、天水
和兰州 3 个地区原状黄土在等向压缩过程中同步进行
渗气试验。其中, 渗气试验控制的初始含水率 w_0 和净
等向应力 p 见表 2。为陈述方便, 把 p 称为等向应力。

试验主要包括预湿、等向压缩和渗气量测 3 个阶段。
先通过喷洒增湿法或自然风干法把天然含水率 w_n
的试样控制到不同目标初始含水率 w_0 。再向试样施加
等向应力 p , 记录试样的体积变化, 待其稳定后进入
渗气量测阶段, 即向试样施加渗透气压以在试样两端
形成气压差, 用皂膜流量计测量通过试样的气体流速。
对于每级等向应力, 施加至少 4 个不同渗气压, 渗气
测量完成后再进行下级加载与渗气。

表 2 渗气试验的控制条件与试验结果

Table 2 Control conditions and results of air permeability tests

地区	初始含水率 $w_0/\%$	等向应力 p/kPa	屈服应力 p_y/kPa	渗气系数 $k_a/(cm \cdot s^{-1})$
西安	1.5	0 50 100 200 300 400	265	6.68×10^{-2}
	8.5	0 50 100 200 300 400	210	4.61×10^{-2}
	13.5	0 50 100 200 300 400	155	2.47×10^{-2}
	15.2	0 50 100 200 300 400	135	2.14×10^{-2}
	16.6	0 50 100 200 300 400	115	1.12×10^{-2}
	21.8	0 50 100 200 300 400	100	8.40×10^{-3}
天水	11.0	— 50 100 200 — 400	240	9.50×10^{-4}
	13.0	— 50 100 200 — 400	180	7.44×10^{-4}
	15.0	— 50 100 200 — 400	145	5.34×10^{-4}
	19.0	— 50 100 200 — 400	105	3.51×10^{-4}
兰州	8.0	0 50 120 200 300 —	110	1.02×10^{-2}
	10.5	0 50 120 200 300 —	105	8.20×10^{-3}
	12.5	0 50 120 200 300 —	92	5.60×10^{-3}
	14.5	0 50 120 200 300 —	75	2.56×10^{-3}
	18.7	0 50 120 200 300 —	68	7.19×10^{-4}

注: “—”表示未在对应的等向应力下进行渗气试验。

2 试验结果与分析

2.1 原状黄土的压缩与渗气特性

等向压缩条件下, 西安、天水与兰州 3 地区不同含水率原状黄土的孔隙比 e 和渗气系数 k_a 二者与等向

应力 p 之间的 $e - \ln p$, $k_a - \ln p$ 关系曲线如图 4 所示。
由图 4 可以看出:

(1) 不同试验条件下 $e - \ln p$ 曲线皆呈先缓后陡的下降趋势, 试验点近似位于两相交的直线段上, 其交点对应的应力即为结构屈服应力 p_y , 该值皆大于自重应力 (表 2)。 $p \leq p_y$ 时, 作用力未使原状黄土的初始结构性破坏, 处于初始结构的自我调整过程, 表现为变形缓慢增大; $p > p_y$ 时, 作用力使得初始结构性开始遭到破坏, 处于初始结构破坏与次生结构形成的耦合变化过程, 表现为力的微小增量引起变形的较大增长。

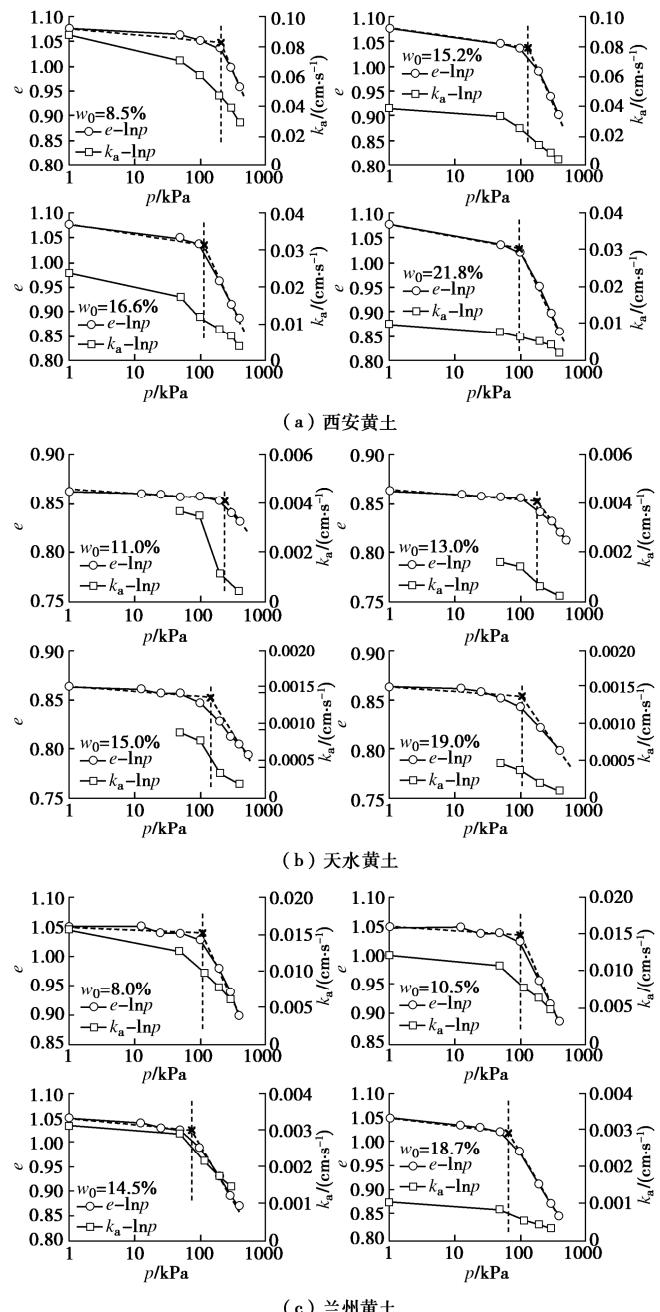


图 4 不同含水率下原状黄土的 $e - \ln p$ 和 $k_a - \ln p$ 关系曲线
Fig. 4 Curves of $e - \ln p$ and $k_a - \ln p$ of intact loess with various water
contents

(2) 随着初始含水率增大, $e - \ln p$ 曲线呈逐渐下移趋势, 即初始含水率愈大, 原状黄土的压缩变形愈大(限于篇幅, 未示出)。这是由于非饱和土的结构应力(包括表面张力、基质吸力、胶结力、嵌固力等这些阻碍土变形的力)^[27]的存在所致。含水率愈大, 吸力联结愈小, 胶凝物质间由于水膜楔入而距离愈大, 削弱了粒间的联结强度, 致使结构应力减小, 压缩性增大, 引起原状黄土的低含水率压缩曲线逐渐向高含水率的曲线逼近。说明结构应力阻止了非饱和黄土压缩变形, 使得产生同一压缩变形时不同初始含水率黄土所对应的总应力不同。从另外一个侧面也反映了土的结构性涵盖了湿度对原状黄土压缩特性的影响。

(3) 对于渗气系数 k_a , 皆随着黄土的组构差异、含水率变化和初始干密度变化而改变, 体现了渗气性对原状黄土土性变化的敏感性; 对于同一含水率的原状黄土, 在压缩过程中由于应力的作用使得结构损伤而造成渗气特性的变化, 且 $k_a - \ln p$ 曲线变化趋势与其压缩变形相似, 近似呈先缓后陡的下降趋势且转折处对应的等向应力 p 基本接近, 体现了原状黄土的渗气性变化与压缩过程之间具有很好的关联性。这与软岩的渗气性与蠕变特性联系密切的研究结果相一致^[28]。说明渗气性既可以反映由于黄土组构不同而引起的差异, 又可以反映由于湿度不同而引起土结构势的差异, 还可以反映由于力的作用而引起土结构势的损伤过程, 有望成为一个综合代表土性特征的结构性参数。

2.2 结构性参数与压缩特性的关系

基于上述基本认识, 借鉴天然软黏土定义结构比变量^[29]的思路, 选取某一含水率原状黄土为参考状态, 定义结构比参数 χ'_0 为

$$\chi'_0 = k_{ay} / k_{ay}^r - 1, \quad (2)$$

式中, k_{ay} 为初始含水率 w_0 下结构屈服应力 p_y 对应的渗气系数, k_{ay}^r 为参考含水率 w_{0r} 下结构屈服应力 p_{yr} 对应的渗气系数。为保证结构比参数 χ'_0 值非负, 对于西安、天水和兰州原状黄土, 选取参考含水率 w_{0r} 分别为 21.8%、19.0% 和 18.7%, 由图 4 试验结果确定出不同 w_0 下结构屈服应力 p_y 及其对应的渗气系数 k_{ay} (其值见表 2), 绘出 w_0 与 w_{0r} 对应的结构屈服应力比 χ_0 ($\chi_0 = p_y / p_{yr} - 1$) 与结构比参数 χ'_0 之间关系如图 5 所示。可见, 对于西安、天水和兰州 3 个地区的原状黄土, 随着含水率的增加, 结构比参数 χ'_0 和结构屈服应力比 χ_0 皆同步减小, 且不同初始含水率下 $\chi_0 - \chi'_0$ 关联性密切, 近似呈良好的线性变化趋势, 其表达式为

$$\chi_0 = \zeta \chi'_0, \quad (3)$$

式中, ζ 为反映黄土组构影响的土性参数。对于本文研究的西安、天水和兰州黄土, 其值分别为 0.166, 0.732 和 0.047。

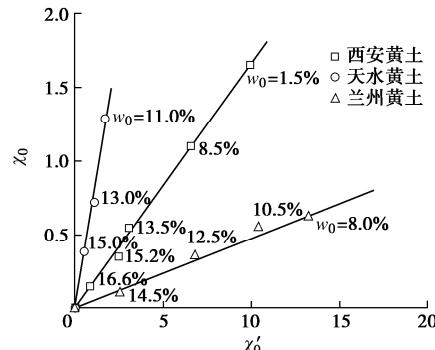


图 5 不同含水率原状黄土结构屈服应力比 χ_0 与结构比参数 χ'_0 之间关系

Fig. 5 Relationship between ratio of yield stress and structural ratio parameter of intact loess with various water contents

将图 4 所对应的压缩曲线分别按等向应力 p 除以各自的结构比参数 $(1 + \zeta \chi'_0)$, 再整理出 $e - \ln[p/(1 + \zeta \chi'_0)]$ 曲线如图 6 所示。可见, 原来分布在很大范围内的不同含水率原状黄土压缩曲线簇, 经过转换后均分布在一个狭窄的带内, 基本上可以归一为一条曲线, 且可近似用参考含水率 w_{0r} 的压缩曲线来表示, 即考虑结构性的影响后得到了基本归一的结果。

根据图 6 的不同含水率 w_0 原状黄土归一化的压缩曲线结果, 则基于变形等效原则得到同一孔隙比下, w_0 对应的等向应力 p 可用参考含水率 w_{0r} 对应的等向应力 p_r 表示:

$$p = (1 + \zeta \chi'_0) p_r. \quad (4)$$

若将 $e - \ln p$ 压缩曲线上同一孔隙比下含水率 w_0 与参考含水率 w_{0r} 压缩曲线之间的应力差视为结构流体等效应力 \bar{p}_w ^[27], 由此可得到不同含水率 w_0 下结构流体等效应力 \bar{p}_w 为

$$\bar{p}_w = p - p_r = \zeta \chi'_0 p_r. \quad (5)$$

式(5)建立了同一孔隙比下结构流体等效应力与结构比参数之间定量化关系, 表明只需根据渗气试验得到结构比参数 χ'_0 , 确定出结构流体等效应力 \bar{p}_w 及其和总应力 p 之差 $p - \bar{p}_w$, 即可得到不同含水率原状黄土 $e - \ln(p - \bar{p}_w)$ 归一的压缩曲线(图 6)。换言之, 结构比参数可以涵盖含水率(吸力联结)引起的结构性变化对原状黄土压缩特性的影响, 若在总应力状态变量 p 中引入结构比参数 χ'_0 , 即可统一描述不同含水率原状黄土的压缩变形特性。这一规律使得描述非饱和黄土压缩特性大为简便, 只需确定参考含水率的压缩特性并用结构比参数 χ'_0 对总应力 p 进行规格化即可, 避免了建立非饱和黄土压缩性指标与含水率之间关系时引入新的参数。另外, 对于确定结构性参数 χ'_0 的渗气试验既简单方便易行, 又可与力学试验同步动态进行。但尚存在不足之处在于对于高饱和度的原状黄土, 孔隙气相成为封闭气泡而处于完全不连通状态, 无法通过渗气试验确定结构比参数, 这可利用低饱和

度试验结果构建渗气函数来评估高饱和度土的渗气系数, 进而确定结构比参数, 实现从饱和到非饱和状态的结构比参数统一描述, 这有待进一步研究与验证。

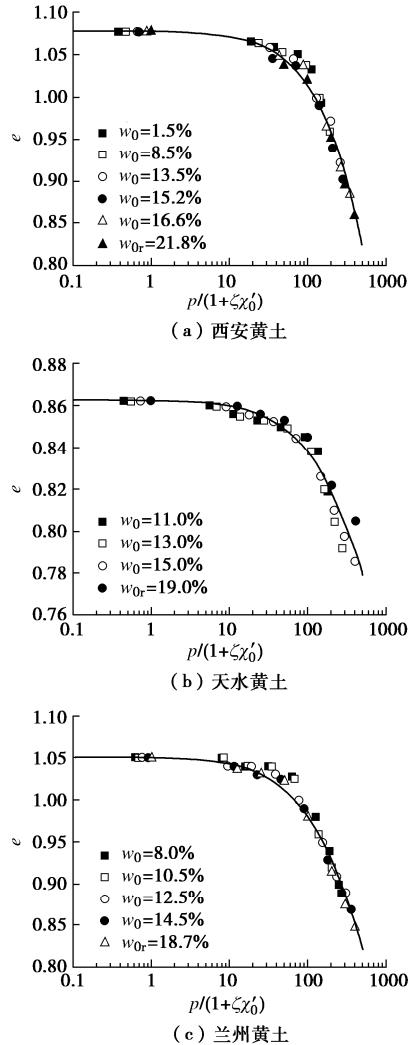


图 6 结构比参数对不同区域不同含水率原状黄土压缩变形的归一化曲线

Fig. 6 Normalized curves of compressive deformation of intact loess with various water contents in different areas by using structural ratio parameter

2.3 非饱和原状黄土压缩特性的统一描述及其验证

对于参考含水率 w_{0r} 下原状黄土的压缩曲线描述, 可基于姚仰平等^[30]的思路在单对数坐标中引入压硬性参量 p_s 来描述, 其表达式为

$$e = e_0 - \lambda \ln \left[(p_r + p_s) / (1 + p_s) \right], \quad (6)$$

式中, λ 为 $e - \ln p_r$ 曲线渐近线的斜率, e_0 为 $p_r=1$ 时对应的孔隙比。对于压硬性参量 p_s , 反映了曲线的弯曲程度以描述土的压硬规律, 其计算式为

$$p_s = \exp \left[(N - e_0) / \lambda \right] - 1, \quad (7)$$

式中, N 为 $e - \ln p_r$ 曲线渐近线上等向应力 p_r 为 1 kPa 时对应的孔隙比, 决定了渐近线在 $e - \ln p_r$ 空间内的位置。对于本文研究的西安、天水和兰州三地区的原状黄土, 通过最小二乘法拟合得到 $w_{0r}=21.8\%$, 19.0% 和

18.7% 对应的参数分别为 ($\lambda=0.467$, $N=4.136$), ($\lambda=0.085$, $N=1.358$) 和 ($\lambda=0.207$, $N=2.192$), 拟合曲线分别如图 6, 7。可见, 式 (6) 可以很好地统一描述参考含水率 w_{0r} 下不同区域原状黄土屈服前后的压缩特性。

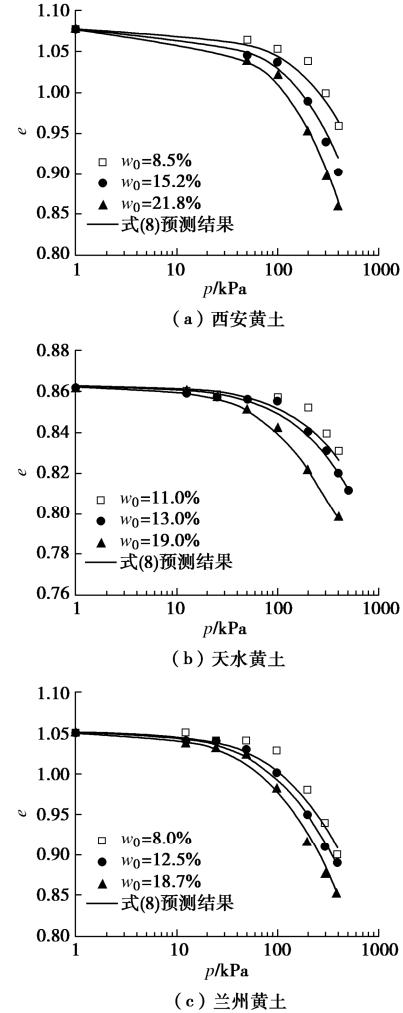


图 7 非饱和原状黄土的 $e - \ln p_r$ 压缩试验与计算结果

Fig. 7 Comparison between calculated and measured results from isotropic compression tests at various water contents for intact loess

基于变形等效原则, 同一孔隙比下某一含水率 w_0 原状黄土应力 $p - \bar{p}_w$ 等于参考含水率 w_{0r} 原状黄土加荷至应力 p_r , 将式 (4), (5) 代入式 (6) 整理得到

$$e = e_0 - \lambda \ln \left[\frac{p / (1 + \zeta \chi'_0) + p_s}{1 + p_s} \right]. \quad (8)$$

该式为统一描述不同含水率 w_0 原状黄土的压缩变形模型, 共包括 4 个参数: λ , N , ζ 和 χ'_0 。模型参数确定简单方便, 需要至少 3 个不同含水率试样 (包括 1 个参考含水率 w_{0r} 试样), 同步进行压缩与渗气同步试验, 根据参考含水率 w_{0r} 的压缩试验结果确定参数 λ 和 N , 根据不同含水率 w_0 的渗气试验结果确定出参数 ζ 和 χ'_0 。对于西安、天水和兰州的原状黄土, 孔隙比 e_0 分别为 1.077, 0.862 和 1.050, 根据前述试验确定的

模型参数, 用式(8)计算出这3个地区原状黄土的 $e - \ln p$ 压缩曲线, 如图7所示。可见, 不同地区不同含水率原状黄土的压缩模式计算结果与试验结果吻合较好。说明本文提出模式可较好地预测非饱和原状黄土的压缩变形特性。

3 结 论

本文开展了等向应力条件下原状黄土的结构性与渗气特性的关联性初步探讨, 用渗气试验确定的结构性参数引入到应力状态变量中, 统一描述了不同含水率原状黄土的压缩变形特性, 得到以下3点结论。

(1) 原状黄土的渗气性变化与压缩特性关联性密切, 等向压缩过程中 $e - \ln p$ 和 $k_a - \ln p$ 曲线皆呈先缓后陡的下降的相似变化趋势, 基本以结构屈服应力为界; 初始含水率变化引起的原状黄土结构性变化对其压缩与渗气特性的影响明显, 低含水率的压缩与渗气曲线逐渐向高含水率的曲线逼近。

(2) 渗气性对原状黄土土性变化敏感, 皆随着黄土的组构差异、含水率变化和初始干密度变化而改变; 它可综合反映黄土组构与湿度不同而引起黄土结构势差异及其应力作用引起黄土结构势的损伤过程; 把渗气系数比定义为结构比参数 χ'_0 , 不同地区不同含水率原状黄土 $e - \ln[p/(1+\zeta\chi'_0)]$ 关系曲线皆具有良好的归一性, 且可近似用参考含水率的压缩曲线来描述。

(3) 提出了统一描述不同含水率原状黄土屈服前后压缩变形模型(式(8)), 模型参数确定简单方便, 即与压缩性有关参数只需根据参考含水率压缩试验确定, 与结构比有关的参数只需根据渗气试验确定; 对于3个地区的不同含水率原状黄土压缩变形的计算与试验结果皆吻合较好。

针对提出的“用土的渗气性来定义结构性参数, 实现多因素对黄土力学特性的影响皆涵盖在结构性参数对其力学特性的影响上, 并作为桥梁将微细观结构与宏观力学特性在定量上联系起来, 统一纳入力学本构模型中”科学设想, 本文在等向应力条件下进行了验证, 后续将该思路扩展到三轴剪切应力条件以及初始物理条件, 以期实现非饱和黄土变形强度的统一描述。

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]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97. (SHEN Zhu-jiang. Mathematical model for soil structure—The core topic of soil mechanics in the 21st century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] JIANG M J, ZHANG F F, HU H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 249-260.
- [4] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10. (in Chinese))
- [5] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 17(12): 1309-1318. (LEI Xiang-yi. Classification of micro-structure and collapsibility of the loess[J]. Scientia Sinica, 1980, 17(12): 1309-1318. (in Chinese))
- [6] WANG J D, LI P, MA Y, et al. Change in pore-size distribution of collapsible loess due to loading and inundating[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(5): 1081-1094.
- [7] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003, 34(7): 1-6. (SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. Binary medium model for loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 1-6. (in Chinese))
- [8] 李宏儒, 胡再强, 赵凯, 等. 结构性土二元介质本构模型及破损率影响因素的研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊1): 67-72. (LI Hong-ru, HU Zai-qiang, ZHAO Kai, et al. Structural soil binary-medium constitutive model and factor of breakage ratio influence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 67-72. (in Chinese))
- [9] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272. (in Chinese))
- [10] 邵帅, 褚峰, 邵生俊. Q_3 结构性黄土的扰动状态本构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1494-1500. (SHAO Shuai, CHU Feng, SHAO Sheng-jun. Experimental study on constitutive model of structural Q_3 loess based on disturbed state concept[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1494-1500. (in Chinese))
- [11] 姚志华, 连杰, 陈正汉, 等. 考虑细观结构演化的非饱和 Q_3 原状黄土弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1553-1563. (YAO Zhi-hua, LIAN Jie, CHEN Zheng-han, et al. An elastic plastic constitutive model for unsaturated Q_3 undisturbed loess considering meso-structured evolution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1553-1563. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 冯志焱. 非饱和黄土的结构性定量化参数与结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008. (FENG Zhi-yan. Research on Soil Structural Parameters and Structural Constitutive Model of Unsaturated Loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘奉银, 张 昭, 周 冬. 湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗气渗水函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1907 – 1914. (LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong. Density-saturation-dependent air-water permeability function of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1907 – 1914. (in Chinese))
- [17] CHEN C L, ZHANG D F, ZHANG J. Influence of stress and water content on air permeability of intact loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(9): 1221 – 1230.
- [18] PICCOLI I, SCHJØNNING P, LAMANDÉ M, et al. Coupling gas transport measurements and X-ray tomography scans for multiscale analysis in silty soils[J]. Geoderma, 2019, **338**(3): 576 – 584.
- [19] ZHAI X F, HORN R. Dynamics of pore functions and gas transport parameters in artificially ameliorated soils due to static and cyclic loading[J]. Geoderma, 2019, **337**(3): 300 – 310.
- [20] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q_3 黄土渗气特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1264 – 1273. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Experimental research on gas permeability of unsaturated Q_3 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1264 – 1273. (in Chinese))
- [21] ZHAN T L T, YANG Y B, CHEN R, et al. Influence of clod size and water content on gas permeability of a compacted loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(12): 1468 – 1474.
- [22] BERISSO F E, SCHJØNNING P, KELLER T, et al. Gas transport and subsoil pore characteristics: anisotropy and long-term effects of compaction[J]. Geoderma, 2013, **195/196**: 184 – 191.
- [23] 袁俊平, 张 锋, 王启贵, 等. 裂隙对压实膨胀土渗气性影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, **34**(3): 34 – 38. (YUAN Jun-ping, ZHANG Feng, WANG Qi-gui, et al. The influences of fissure on gas permeability of the compacted expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, **34**(3): 34 – 38. (in Chinese))
- [24] NGUYEN V, PINEDA J A, ROMERO E, et al. Influence of soil microstructure on air permeability in compacted clay[J]. Géotechnique, 2021, **71**(5): 373 – 391.
- [25] 李喜安, 刘锦阳, 郭泽泽, 等. 马兰黄土孔隙结构参数与渗透性关系研究 [J]. 工程地质学报, 2018, **26**(6): 1415 – 1423. (LI Xi-an, LIU Jin-yang, GUO Ze-ze, et al. Study on relationship between pore structure parameters and permeability of malan loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(6): 1415 – 1423. (in Chinese))
- [26] 陈存礼, 张登飞, 张 洁, 等. 等向应力条件下原状 Q_3 黄土的渗气特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 287 – 294. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, ZHANG Jie, et al. Gas permeability of intact Q_3 loess under isotropic stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 287 – 294. (in Chinese))
- [27] 陈存礼, 曹程明, 王晋婷, 等. 湿载耦合条件下结构性黄土的压缩变形模式研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 39 – 45. (CHEN Cun-li, CAO Cheng-ming, WANG Jin-ting, et al. Modeling compression of structural loess under coupling of stress and moisture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 39 – 45. (in Chinese))
- [28] LIU Z B, XIE S Y, SHAO J F, et al. Multi-step triaxial compressive creep behaviour and induced gas permeability change of clay-rich rock[J]. Géotechnique, 2018, **68**(4): 281 – 289.
- [29] 尹振宇. 天然软黏土的弹黏塑性本构模型:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1357 – 1369. (YIN Zhen-yu. Elastic viscoplastic models for natural soft clay: review and development, 2011, **33**(9): 1357 – 1369. (in Chinese))
- [30] 姚仰平, 刘 林, 罗 汀. 砂土的UH模型[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2147 – 2153. (YAO Yang-ping, LIU Lin, LUO Ting. UH model for sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2147 – 2153. (in Chinese))