

DOI: 10.11779/CJGE201408002

黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系

邵生俊, 王丽琴, 陶 虎, 王 强, 王 帅

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

摘 要: 土的粒度、密度、湿度和构度是其固有的物质组成和状态特性指标, 用来描述土的力学性质及其变化规律。土的构度是其结构性的定量描述指标, 它不仅与土物质组成和存在状态的粒度、密度和湿度有关, 而且与土骨架结构中土粒空间排列的组构和粒间联结特征有本质的联系。土骨架结构的土粒排列和粒间联结具有抵抗外荷作用的可稳性和遭受破坏的可变性, 从比较黄土结构的可稳性和可变性出发, 建立的构度指标实质上包括了原状黄土与其饱和条件下抗压强度比较确定的浸水灵敏度及原状黄土与重塑黄土抗压强度比较确定的扰动灵敏度。揭示黄土具有浸水灵敏度随含水率增大呈显著衰减的变化规律和不同含水率黄土的扰动灵敏度基本保持不变的规律。通过黄土构度随含水率和塑限差值的变化规律, 构度随塑限、液限的变化规律, 以及构度随液性指数的变化规律分析, 揭示了构度与粒度、密度、湿度的本质联系。通过黄土构度与液性指数、干密度和孔隙比表征的综合物理特征量之间的关系分析, 揭示了干密度相近条件下黄土构度随综合物理特征量的单调变化规律。论证了黄土构度指标的可靠性与合理性。

关键词: 构度指标; 水敏势; 扰动势; 粒度; 密度; 湿度

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)08-1387-07

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 从事黄土力学、黄土动力学等的研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity

SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, TAO Hu, WANG Qiang, WANG Shuai

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

Abstract: The granularity, density, humidity and structure of soil are the natural indexes of its components and state behaviors, which can be used to describe its mechanical property and variation law. The structural index is a quantitative parameter of structure. It is related with the granularity, density and humidity of soil components and state behaviors and has an essential relationship with the fabric arranged with soil particles and the connection between soil particles. Both the fabric and connection have the steadiness to resist external loads as well as the variability under damage loads. The structural index is established from the steadiness and variability of loess structure in terms of the product of the ratio of intact to remolded sample unconfined compressive strengths (UCS) and the ratio of intact to saturated sample UCSs. It essentially covers water-immersion and load-disturbance sensitivities, and reveals their variation laws. By analyzing the relationships between the structural index and the difference between natural water content and plastic limit, liquid limit and liquidity index, the essential relations of the structural index with the granularity, density and humidity are revealed. In addition, a composite physical index in terms of liquid limit, dry density and void ratio is proposed to study its influence on the structural index. The results show the structural index of loess has a monotonic relation with the composite physical index under approximate dry densities. Thereby, the reliability and reasonableness of the structural index of loess are further verified.

Key words: structural index; water-sensitive potential; disturbance potential; granularity; density; humidity

0 引 言

黄土是干旱与半干旱自然环境条件下沉积的一种特殊土, 它具有显著的结构性以及与此密切联系的水敏性。黄土地区基础设施建设涉及到大量的黄土工程因黄土的结构破损和工程性质遇水衰减而产生许多稳定性问题。譬如, 大厚度湿陷性黄土地基工程的湿陷

变形沉降问题, 深厚黄土基坑土体剪切破坏和土压力问题, 沟壑高填方土体不均匀沉降问题、大厚度湿陷性黄土地层的大断面隧道工程围岩稳定性和地基湿陷

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320); 陕西省黄土力学与工程重点实验室重点科研计划项目(2010JS084)

收稿日期: 2014-01-06

变形问题等。然而,长期以来,人们对黄土力学问题的认识与传统土力学一致,主要依据其土粒级配、矿物成份、孔隙比、干密度、含水率、饱和度等粒度、密度、湿度的物理性质,而忽视了黄土特殊的结构特征对其力学性质的影响^[1]。同时,黄土工程力学问题的分析不能仅局限于浅埋基础黄土地基浸水饱和湿陷性变形的评价方法及刚塑性极限平衡的强度稳定性分析方法,而应该考虑黄土浸水环境条件和深厚湿陷性黄土增湿与浸水可能性,以及湿、载作用下黄土结构性演变与其应力应变特性、湿陷性、抗剪性的本质联系,以便解决当前重大黄土工程的复杂力学问题。

尽管人们对土的结构有了许多新认识^[2],并且试图从土的状态、应力历史和结构的定量化出发合理描述结构性土的力学效应^[3],但是,目前工程设计中还没有提出一个合理指标,把它作为一个能评价土性的基本指标引入土力学及相应的工程实践中。尤其是如何评价黄土这种复杂环境下沉形成的多相多孔松散介质的结构性,以及湿、载作用下黄土结构性演变与力学特性变化规律之间的内在联系就成为当代结构性黄土力学研究的重要课题。从土的结构可稳性和可变性出发,通过扰动、加载和浸水释放土的结构性,业已提出的综合结构势研究途径^[4],为研究黄土的结构性状及其变化规律打下了坚实的基础。依据原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的单轴抗压强度,应用综合结构势的研究途径,建立了描述黄土初始结构性的构度指标^[5]。并且,从综合结构势研究途径出发,研究了考虑黄土结构性的本构模型和强度规律^[6-10],从而可以在粒度、密度、湿度描述土力学性质基础上,引入构度指标,完善土力学性质物理本质的认识。本文在不同结构状态土单轴抗压强度试验基础上,进一步认识构度指标的物理本质,分析了构度指标与粒度、密度和湿度指标之间的关系,论证了构度指标的可靠性和合理性。

1 黄土构度的试验研究

1.1 黄土的无侧限抗压试验研究

单轴抗压试验是一种简单、有效地测试土强度的方法,它适用于一般黏性土。传统土力学中比较原状

土和重塑土的单轴抗压强度,定义了土的灵敏度,它实际上反映了原状土结构重塑后对土强度特性的影响。灵敏度指标应用于软土,可以判断其是否属于灵敏土。传统土力学中土的灵敏度实际上仅反映了重塑扰动原状土结构破坏的本质特性。对于黄土而言,不仅重塑扰动可以改变土的结构特征,而且浸水作用也可以改变土的结构特征。为了考虑浸水对黄土结构的作用影响,可以由原状黄土的单轴抗压强度与饱和黄土的单轴抗压强度比较来反映浸水的结构破坏作用。由此可见,在某个场地采取原状土,可制备原状土、重塑土圆柱状试样。原状土、重塑土圆柱状试样均可通过保持含水率不变、滴定入渗、浸水饱和或风干途径,得到天然含水率、减湿、增湿、饱和试样。然后,将不同含水率原状土试样、不同含水率重塑土试样和饱和原状土试样装入单轴抗压试验机,施加竖向应力,控制加载过程试样的变形速率,随着试样轴向变形的发展,可以测出峰值强度。或者,应变充分发展的抗压强度。峰值强度之后,再发展 3%~5%应变后停止加荷。根据试验结果,可以得到不同含水率原状结构土和重塑结构土的单轴抗压强度变化规律,以便了解天然黄土骨架的竖向柱状结构、竖向裂隙、大孔隙、高孔隙比等因素影响的结构性变化规律。

本次试验所用土样分别取自西安曲江、白鹿塬、泾河右岸和兰州大青山。取样时应尽量减少对土块的扰动,避免取样时人为造成的结构破坏。同时,取样过程要用塑料布和胶带及时密封土块,防止水分蒸发,运送土样的过程中避免被破坏。

所采用的原状黄土分别为西安市曲江新区场地一 Q₃ 黄土 (loess1),西安市曲江新区场地二 Q₃ 黄土 (loess2),西安泾河右岸坡场地一 Q₂ 黄土 (loess3),西安泾河岸坡场地二 Q₃ 黄土 (loess4),西安白鹿塬场地一 Q₃ 黄土 (loess5),西安白鹿塬场地二 Q₂ 黄土 (loess6)和兰州市郊外大青山场地 Q₂ 黄土 (loess7)。7 种土样的物性指标见表 1。

1.2 不同含水率原状土、重塑土的无侧限抗压强度的变化规律

同一场地土样分别制备不同含水率的原状土、重塑土,并通过单轴压缩试验确定不同含水率下的单轴

表 1 黄土的基本物性指标

Table 1 Fundamental physical parameters of loess							
土样 (地质年代)	e_0	G_s	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_0/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$
黄土 1(Q ₃)	1.00	2.70	1.35	18.00	37.00	23.00	14.00
黄土 2(Q ₃)	0.98	2.70	1.36	17.00	36.00	22.50	13.50
黄土 3(Q ₂)	0.71	2.70	1.58	2.80	31.00	19.00	12.00
黄土 4(Q ₃)	1.03	2.70	1.33	10.80	33.50	21.50	12.00
黄土 5(Q ₃)	0.98	2.70	1.36	22.00	37.00	20.50	16.50
黄土 6(Q ₂)	0.82	2.70	1.46	19.00	38.00	21.00	17.00
黄土 7(Q ₂)	0.73	2.70	1.56	10.00	29.00	19.00	10.00

抗压强度,可以得到原状土和重塑土的强度变化规律。表 1 所述 7 个场地土样分别制备了含水率为 2%, 5%, 10%, 20%, 28%原状土和重塑土试样,进行单轴抗压强度试验,得到了如图 1 所示原状土和重塑土单轴抗压强度随着含水率的变化曲线。表明 7 个场地所有原状土和重塑土随着含水率的增加,其单轴抗压强度均呈减小的变化规律。并且,原状土的单轴抗压强度总是大于重塑土的,这与原状土存在结构性有关。

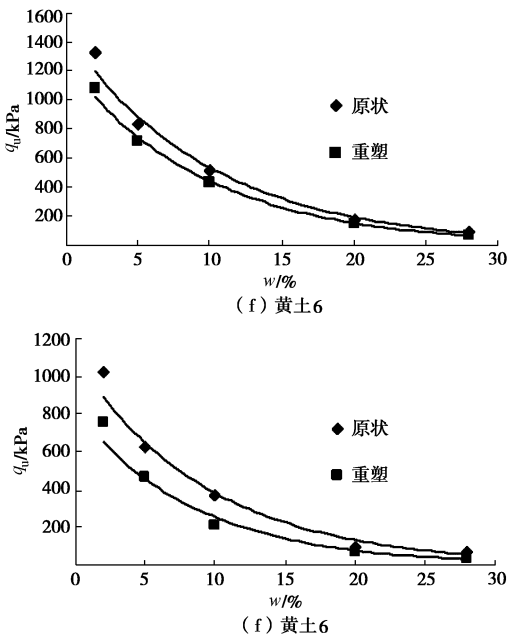
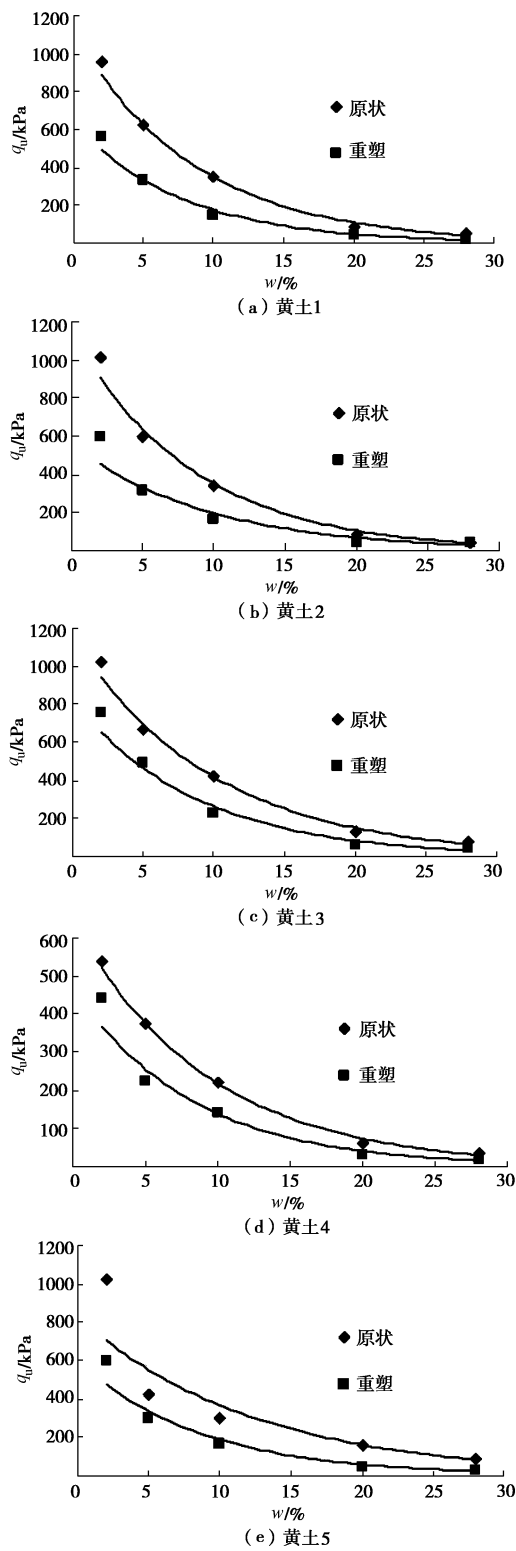


图 1 原状土、重塑土 $q_u - w$ 关系曲线

Fig. 1 $q_u - w$ curves of undisturbed and remolded loess samples

增湿或减湿作用是影响黄土强度的重要因素之一。在不同含水率下,原状土的结构强度明显高于重塑土的;含水率越小,两者的差值越大。随着含水率的增加,原状和重塑黄土的强度均呈降低趋势,且两者之间的差值也在减小。当黄土接近饱和状态时,原状土与重塑土强度差值越来越小,因此含水率的增加导致了黄土结构强度的降低。

1.3 构度指标的变化规律

笔者在文献[3]中应用综合结构势研究途径,依据原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的单轴抗压强度,分别确定反映黄土结构可稳性和可变性的定量指标,比较黄土结构的可稳性和可变性,建立了描述黄土初始结构性的构度指标。

依据图 1 所示结果,可以得到不同场地的不同含水率黄土的构度,如图 2 所示。原状黄土的构度大于 1.0;随着增湿作用下黄土含水率的增大,其构度逐渐减小,表明黄土的结构性衰减;随着减湿作用下黄土含水率的减小,其构度增大,表明黄土的结构性增强。

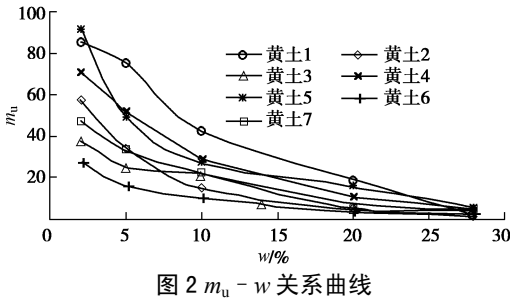


Fig. 2 $m_u - w$ curves of different loess samples

2 黄土结构性的增湿及扰动作用分析

土的结构性是指维持土自身结构状态不变的结

构可稳性与结构变化的可变性的综合反映。反映黄土初始结构性的构度指标^[3]是以原状黄土单轴抗压强度与饱和黄土单轴抗压强度比反映的可稳性,和以重塑黄土单轴抗压强度与原状黄土单轴抗压强度比反映的可变性的比较定义的。前者主要反映了黄土结构的联结特征,后者主要反映了黄土结构的排列特征。黄土初始结构性的构度指标定义式为

$$m_u = \frac{m_1}{m_2} = \frac{q_{uo}/q_{us}}{q_{ur}/q_{uo}} = \frac{q_{uo}^2}{q_{ur}q_{us}}, \quad (1)$$

式中, m_1 为可稳性指标, m_2 为可变性指标, q_{uo} 为原状土的抗压强度, q_{ur} 为重塑土的抗压强度, q_{us} 为饱和土的抗压强度。依据构度指标的定义式, 如果按照灵敏度的定义, 由原状土单轴抗压强度与重塑土单轴抗压强度之比反映了扰动作用的灵敏度, 那么, 原状土单轴抗压强度与饱和土单轴抗压强度之比就反映了浸水作用的灵敏度。即式(1)还可表述为

$$m_u = m_w \cdot m_d = \frac{q_{uo}}{q_{us}} \cdot \frac{q_{uo}}{q_{ur}} = \frac{q_{uo}^2}{q_{ur}q_{us}}. \quad (2)$$

式中 $m_w = q_{uo}/q_{us}$ 为浸水灵敏度, 反映了原状土完全浸水饱和后强度降低的潜在变化, 也可称之为水敏势; $m_d = q_{uo}/q_{ur}$ 为扰动灵敏度, 反映了原状土结构完全扰动后强度降低的潜在变化, 也可称之为扰动势。

可见, 构度是浸水灵敏度和扰动灵敏度的乘积。浸水灵敏度和扰动灵敏度越大, 土的构度越大, 结构性越强; 反之则小。同时, 浸水灵敏度反映了黄土遇水后强度丧失对水的敏感程度, 而扰动灵敏度则反映了原状土具有排列和联接特征的结构被重塑后的敏感程度。构度越大, 土遭受浸水和扰动作用的强度变化越大, 对工程的潜在危害性越大。对于湿陷性黄土而言, 遇水后强度降低较多, 对土结构性的影响较大, 可以看作是浸水作用为主导因素。而对于非湿陷性黄土, 浸水作用后强度变化较小。

既然土的构度由与浸水作用相关的灵敏度和与扰动作用相关的灵敏度组成, 那么在不同含水率条件下, 其水敏势和扰动势将会发生变化, 对构度的贡献也将不同。分别测定 7 种土样在含水率为 2%, 5%, 10%, 20% 时原状土、重塑土的单轴抗压强度及饱和原状土的单轴抗压强度, 依据式(2)可以得到浸水灵敏度和扰动灵敏度的变化曲线分别如图 3, 4 所示。

图 3 表明, 随着含水率的增大, 水敏势逐渐降低。说明在天然含水率较小的情况下再次浸水产生的结构强度降低较大; 而随着天然含水率的增大, 进一步浸水增湿后黄土的强度降低变化较小。同时还表明 Q₃ 黄土的水敏势变化较大, 说明 Q₃ 黄土对

水的敏感性较强。图 4 表明, 黄土的扰动势随含水率的变化基本保持不变; 重塑导致土骨架排列的变化对黄土结构性的影响较小。图 2 中构度变化曲线与图 3 非常相似, 即黄土的构度变化与其水敏势具有更密切关系, 不同含水率黄土的扰动势可近似为定值。黄土的构度除受水敏势的影响之外, 还要考虑扰动势变化的影响。

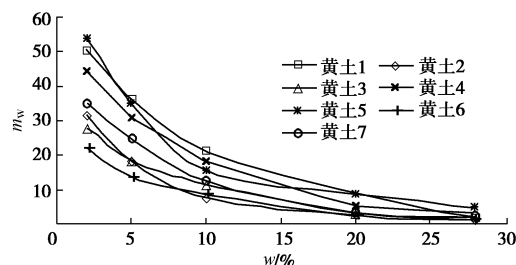


图 3 $m_w - w$ 关系曲线

Fig. 3 $m_w - w$ curves of different loess samples

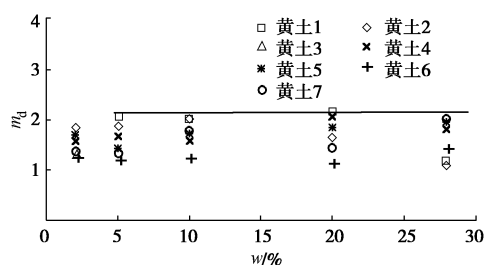


图 4 $m_d - w$ 关系曲线

Fig. 4 $m_d - w$ curves of different loess samples

3 构度与粒度、密度、湿度之间的变化规律分析

一般土的力学性质与其粒度、密度、湿度和结构具有内在联系。不同结构的土, 其力学性质不同, 它是土结构性内在因素影响的结果。土的粒度是指土颗粒的粗细程度, 不仅包含了土的颗粒级配, 同时也包含了与细粒粒径相关的矿物成分。对于细粒土可以由液、塑限和塑性指数定量描述; 土的密度是指土的密实程度, 它可由干密度、孔隙比、孔隙率和比容来定量描述; 土的湿度是指土的含水程度, 它可由含水率、饱和度等指标定量描述。如果土的结构由反映土初始结构性的构度指标来定量描述, 则有必要考察它与粒度、密度和湿度之间的关系。

3.1 构度与密度之间的关系

土的密度是反映土三相物质中质量和体积相对含量的一类指标。当土中只有固相和气相时, 土的密度被称为干密度, 它反映了单位土体积内土骨架的质量。土的干密度实际上也包含了土粒物质成分的影响。除干密度之外, 孔隙比和孔隙率也反映了土的密实度。孔隙比是单位土粒体积对应的孔隙

体积隙的大小, 其倒数就是单位孔隙体积对应的土粒体积。它们一起更加全面地反映了土骨架的紧密程度。

土的干密度越小即孔隙比越大, 颗粒排列和联结就越不稳定, 扰动和浸水后土结构的变化更突出, 土表现出的结构性较强, 构度指标也较大。由于不同含水率黄土的扰动灵敏度变化较小, 而浸水灵敏度变化较大, 因此, 针对不同密度的黄土主要考察浸水灵敏度的变化规律。依据图 3 所示, 孔隙比较大的黄土 1、黄土 2、黄土 4、黄土 5 的水敏性较强, 而孔隙比较小的黄土 3、黄土 6、黄土 7 的水敏性较弱。

为了揭示土的密度对其结构性的影响, 通过反映土单位体积土粒质量的干密度和单位孔隙体积对应的土粒体积来综合反映土的密实度, 分析了构度与干密度和孔隙比之比值的关系, 如图 5 所示。表明不同含水率黄土的构度随干密度和孔隙比比值的增大, 总体上呈现减小的变化趋势。即土的干密度越小, 孔隙比越大, 土骨架颗粒的排列和联结特征遭受浸水和扰动作用的变化越大, 土的构度越大; 土的干密度越大, 孔隙比越小, 骨架颗粒的排列和联结特征遭受浸水和扰动作用的变化越小, 土的构度越小。

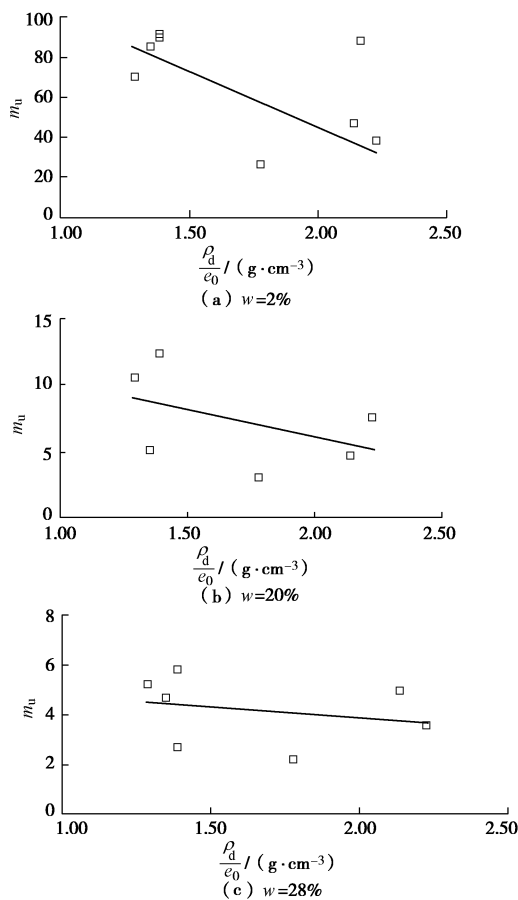


图 5 土的构度随密实度的变化

Fig. 5 Variation of structural index with ratio of density to void ratio

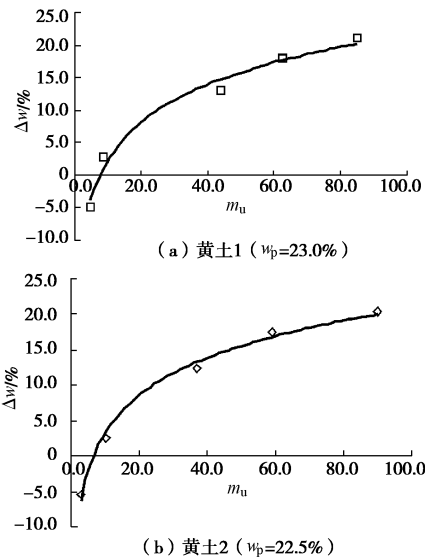
图 5 还表明, 构度指标随干密度和孔隙比比值变化规律的离散性较大。即同一含水率条件下黄土的构度不仅受反映土密实度的干密度和孔隙比的影响, 还与黄土的其它物性有关。

3.2 构度与粒度之间的关系

黄土属于细粒土, 其粒度可进一步由液限、塑限和塑性指数来描述。土的塑限是土达到塑性状态的一个指标; 土的液限是土达到流塑状态的界限含水率; 塑性指数是土塑性状态上下界限的变化范围, 主要反映了土粒的持水性能。土粒越细, 吸收水分持水能力越强, 土的塑限、液限和塑性指数越大。土的构度描述了土的初始结构性, 它可以通过浸水、扰动作用的灵敏度确定。当土的含水率接近塑限时, 土容易发生塑性变形, 黄土遭受浸水作用的灵敏度较小, 因此构度也较小; 当黄土的天然含水率小于塑限时, 黄土的浸水灵敏度增大, 因此, 取塑限与天然含水率的差值来考察塑限对黄土构度的影响。即定义塑限与含水率的差值为

$$\Delta w = w_p - w \quad (3)$$

依据不同黄土构度随含水率变化的测试结果, 分析了构度与含水率差之间的关系, 如图 6 所示。图 6 所示黄土 1~黄土 4 构度随含水率差值的变化规律近似一致。塑限与含水率的差值越大, 黄土的构度越大; 反之, 黄土的构度越小。当含水率小于塑限时, 黄土的构度较大。比较 7 种土样的构度随塑限与含水率之差的变化关系, 如图 7 所示。表明, 当塑限与含水率之差小于 10% 时, 构度随含水率减小的增长率较小; 当塑限与含水率之差大于 10% 时, 构度随含水率减小的增长率较大。同时, 由于不同黄土密度和结构等差异的影响, 构度随塑限和含水率差值变化规律的测试结果离散性较大。



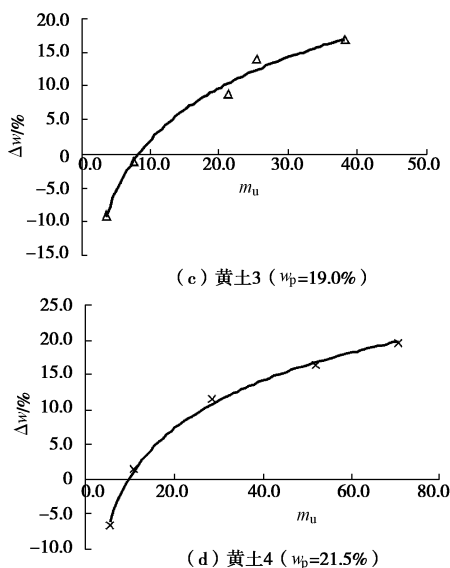
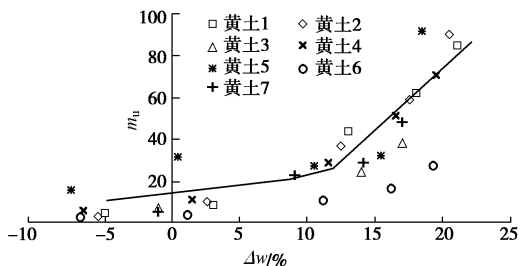


图6 构度随含水率差的变化关系

Fig. 6 Variation of structural index with difference between plastic limit and natural water content

图7 $m_u - \Delta w$ 关系曲线Fig. 7 $m_u - \Delta w$ of different loess samples

为了考虑塑限、液限对构度的影响,图8分别分析了不同含水条件下土的构度随塑限、液限的变化测试结果。表明黄土的构度随塑限的增大总体上呈单调增长的变化规律,而构度随液限的增大并非呈单调增长的变化关系。

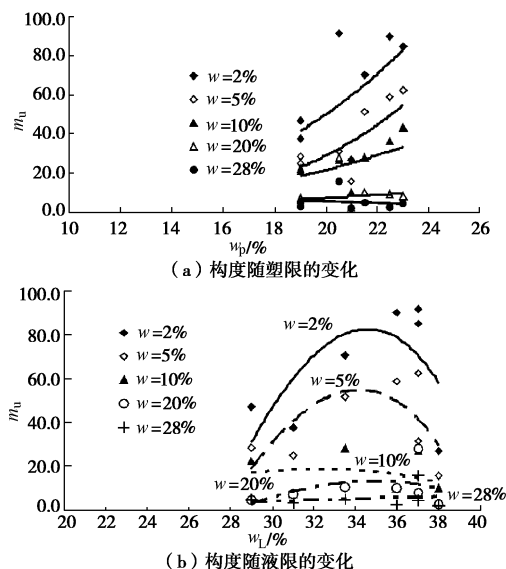


图8 构度随塑限、液限的变化规律

Fig. 8 Variation of structural index with plastic and liquid limits

3.3 构度与稠度状态之间的关系

土的稠度状态:液性指数实际上统一反映了土的湿度和粒度的影响。土的构度随液性指数的变化如图9所示,表明随着液性指数增大,土的构度逐渐减小。当土的液性指数小于零时,土的构度较大;当土的液性指数大于零时,土的构度较小。但是,相近液性指数条件下,黄土的构度有较明显的差异,反映了黄土结构特征差异。

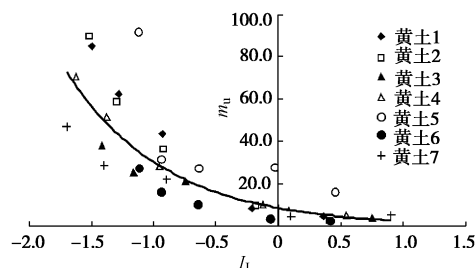


图9 构度与液性指数之间的关系

Fig. 9 Relationship between structural index and liquidity index

3.4 构度与稠度、密度之间的关系

为了统一考察构度与粒度、密度和湿度之间的关系,通过液性指数反映粒度和湿度,以及干密度和孔隙比反映密度,建立了一个综合考虑粒度、密度和湿度的物理特征量 $I_L \rho_d / (\rho_w e_0)$, 分析了不同黄土的构度与综合物理特征量之间的关系,如图10所示。可见,干密度较小的黄土1、黄土2、黄土4、黄土5的构度随综合物理特征量具有相关性较好的单调变化关系,干密度较大的黄土3、黄土6、黄土7的构度随综合物理特征量同样具有相关性较好的单调变化关系。一方面表明黄土的液塑限、含水率、干密度和孔隙比反映的粒度、密度和湿度对其构度有显著地影响;另一方面又表明同一构度的黄土其液塑限、含水率、干密度和孔隙比不同。可见,从反映黄土粒度、密度和湿度的液塑限、含水率、干密度和孔隙比和构度指标一起描述黄土的力学性质更具有合理性。

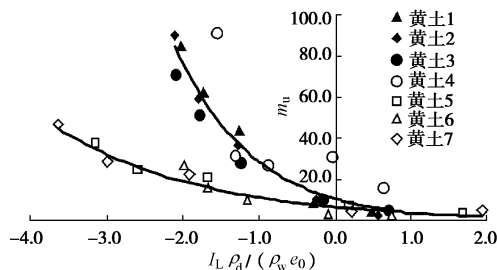


图10 黄土的构度随综合物理特征量的变化关系

Fig. 10 Relationship between structural index and composite physical index

4 结 论

(1)土骨架结构的土粒排列和粒间联结具有抵抗外荷作用的可稳性和遭受破坏的可变性,从原状土抗

压强度和饱和土抗压强度比值与重塑土抗压强度和原状土抗压强度比值的比较综合反映黄土结构的可稳性和可变性出发, 建立的构度指标实质上包括了浸水灵敏度和扰动灵敏度, 揭示了浸水灵敏度和扰动灵敏度的变化规律。黄土的浸水灵敏度随天然含水率的变化较大, 而扰动灵敏度随天然含水率的变化较小, 反映了黄土的水敏性。

(2)通过黄土构度与干密度和孔隙比比值之间的关系, 构度与塑限和含水率差值之间的关系, 构度和液、塑限之间的关系, 以及构度和液性指数之间的关系分析, 揭示了黄土的粒度、密度和湿度对构度的影响。表明构度随干密度和孔隙比比值的增大而减小; 随塑限和含水率之差的增大而增大; 随塑限的增大而增大; 低含水率时, 随液限的增大呈峰值变化曲线关系。它们之间的相关性揭示黄土的构度能够综合反映粒度、密度和湿度等物理性质; 它们之间不同相关关系的离散性表明土骨架土粒排列与粒间联结特征不同的结构性差异。

(3)通过液性指数、干密度比和孔隙比建立了一个综合考虑粒度、密度和湿度的物理特征量。干密度近似一致条件下, 黄土的构度与综合物理特征量之间具有单调变化的关系。既表明黄土的液塑限、含水率、干密度和孔隙比反映的粒度、密度和湿度对其构度有显著的影响, 又表明具有相同构度的黄土其粒度、密度和湿度特性指标可能不同。

(4)土的粒度、密度、湿度和构度是其固有的物质组成和状态特性指标, 用来描述土的力学性质及其变化规律。土的构度是其结构性的定量描述指标, 它不仅与土物质组成和存在状态的粒度、密度和湿度有关, 而且与土骨架结构中土粒空间排列的组构和粒间联结特征有本质的联系。论证了构度指标的可靠性与合理性。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese))
- [2] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 467 - 488.
- [3] KAVVADAS M, AMOROSI A. A constitutive model for structured soils[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 263 - 274.
- [4] 谢定义, 齐吉琳. 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. (in Chinese))
- [5] 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 - 20. (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 - 20. (in Chinese))
- [6] 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 structure and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(11): 93 - 98. (in Chinese))
- [7] 邓国华, 邵生俊. 黄土隧道围岩的结构性变化特征分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 219 - 225. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun. Variation characteristic analysis of a structural parameter for surrounding soils in loess tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 219 - 225. (in Chinese))
- [8] 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))
- [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. (in Chinese))
- [10] 邓国华, 邵生俊, 余芳涛. 结构性黄土的修正剑桥模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 834 - 841. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao. Modified Cam-clay model of structured loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 834 - 841. (in Chinese))