

原状黄土结构性及其量化参数研究

Structural properties of loess and its quantitative parameter

邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 较详细地考察了黄土结构性的研究现状, 在三轴试验的基础上, 提出了一个既能反映土粒微观排列的结构性, 又能反映土粒间由于特殊的胶结结构而综合表现出的宏观力学特征, 从而可以开展对土的结构性进行研究的结构性参数 m_o 。在分析大量试验数据的基础上, 证明了结构性参数的合理性、灵敏性和稳定性, 揭示了 m_o 与影响土结构性的因素之间的变化规律, 使黄土的结构性量化研究有了一个新的基础。

关键词: 原状黄土; 结构性; 量化参数

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0531-06

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 陕西省黄土力学与工程重点实验室副主任, 主要从事土动力学与黄土力学研究。

SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper gives a detailed observation of the structural properties of intact loess. Based on the results of triaxial compression tests of intact loess, a quantitative parameter of structural properties, which can not only reflect the microstructure and arrangement of the particles but also the microcosmic mechanic characteristics due to the particular coherent structure of soil particles, has been proposed to explore the structural properties of soil. At the same time, based on the analysis of plentiful test results, not only the rationality, sensitivity and stability of the fabric index, but also the variation of quantitative parameter m_o and the influence factors of soil structure have been revealed and verified. These works will provide a good foundation for the deep research on the structural properties of loess.

Key words: intact loess; structural properties; quantitative parameter

0 引言*

土的结构性是土颗粒空间排列和粒间联结作用的力学效应, 这种结构性对于土力学性质的影响首先为 Terzaghi 所认识, 并被 Skempton 证实。结构性土具有一定的结构强度, 它是土保持原始基本单元结构形式不被破坏的能力, 由土的原始结构强度和土粒间固化联结键强度组成。原状黄土在沉积过程中形成了大孔隙骨架结构, 颗粒间接触点处经过长期的物理化学作用而逐渐形成了胶结。实验观察表明, 由土颗粒和集合体团粒组成的骨架和骨架间较多的孔隙构成原状黄土的特殊显微结构, 从而使原状黄土一般都具有结构性和结构强度, 即具有较高的抗压和抗剪能力。一旦固化联结键被破坏, 如浸水、扰动等, 就会发生承载力降低、湿陷和强度弱化等现象。结构性黄土不同于超压密土, 它易受应力状态和浸水的影响。随着围压增大超过某一限度后结构性将被破坏; 随着含水率增大, 水膜增厚, 胶结物溶解, 结构性逐渐减弱, 强度也在降低^[1-5]。

应该认识到结构性是决定黄土力学特性的一个最为根本的内在因素, 它和其它描述物理性质的量, 如粒

度、密度和湿度, 将成为变形、强度等力学特性变化的主要依据。但是, 仅仅认识到结构性对土宏观变形和力学特性影响是不够的, 而应该更深入地对黄土的结构性本身进行研究。近年来随着对黄土结构性研究的深入, 对结构性的研究正在由定性研究向量化研究迈进, 出现了一些考虑土结构性影响的结构性参数, 而这些参数的研究集中在一般粘性土和人工制备的结构性土。

谢定义等认为扰动、加荷和浸水是改变原状土结构的主要作用, 通过重塑、扰动和浸水饱和可使原状土的结构势充分释放出来。因此, 通过人工制备结构性土、重塑土和饱和土的压缩试验, 测试了它们的压缩变形过程, 并由原状结构性土和相同密度及含水率下重塑土的变形量比较反映胶结结构的作用和空间排列变化的影响, 由原状结构性土及其饱和土变形量的比较反映浸水胶质溶解和水膜失效的影响。从而基于压缩变形构造了一个反映结构性的量化参数——综合结构势。原状土的胶结作用和空间排列稳定性越强, 原

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1017207); 陕西省自然科学基金资助项目(2001c52)

收稿日期: 2003-08-22

状土对水的敏感性越强,则综合结构势越大,反映土的结构性越强。该结构势实际上间接反映了土的灵敏度和土的湿陷性。但是,压缩试验受侧限变形的局限性,不能反映剪切变形发展结构性的变化,且是人工制备土,与原状黄土有实质的区别。对于原状黄土特殊的结构,十分有必要进行深入研究。

1 基于应力条件的结构性参数

长期以来,对黄土结构性的研究停留在通过微观形态学或矿物学和化学分析的结果对土体变形—强度特性规律进行描述上,这种研究方式不能全面反映土颗粒的排列和胶结特征,研究结果在土体的变形和强度分析中不能方便地应用。从更深刻的意义上来说,即不能综合表征黄土结构性在排列和胶结两方面的指标。

1.1 黄土结构性参数建立的思路

天然沉积的原状黄土未经扰动、加荷或浸水作用时,其原结构保持不变,表现为具有一定的结构性。使土的结构性发生变化或破坏的途径可以是扰动、加荷和浸水。扰动能破坏土的联结作用和已形成的稳定空间排列,使土颗粒间的胶结作用表现出的结构势彻底释放出来;加荷能使土骨架受到压剪作用,弱联结、不稳定的部位首先破坏,逐渐发挥次联结和稳定部位的抵抗作用,但终究既改变了土颗粒的排列方式,又改变了土颗粒的联结特征;浸水既可使土中的化学物质弱化、溶解,吸力联结丧失,水膜楔入又可使土发生膨胀^[6-7]。即通过加荷、浸水和扰动作用使天然原状土体的结构发生改变,通过原状土、重塑土和饱和土的三轴剪切试验,寻求建立反映结构性的量化指标。

在固结排水三轴剪切的条件下,随着应变发展,原状土体内部颗粒排列和胶结结构不断发生调整,原生结构逐渐破坏,次生结构逐渐生成。原生结构在压剪作用下的抗力构成主要表现为胶结产生的抗力,水膜吸力作用产生的抗力以及嵌固摩擦作用产生的抗力三部分。通过原状土重塑扰动和浸水饱和可分别使原状土由胶结作用、土粒空间排列、水膜吸力作用所表现出的结构势释放。综合比较分析原状土、重塑土和饱和原状土剪切变形过程中抗剪应力变化,可以揭示结构性随剪切变形的发展。因此黄土的结构性参数应该是动态变化的,并且在相当程度上涵盖粒度、密度和湿度等影响土力学性质的因素。结构性参数的最终表达式应该是粒度、湿度、密度、应变和应力等的函数。

基于以上的认识,对原状黄土、饱和黄土以及相同含水率和干密度的重塑黄土进行三轴试验,依据它们的应力应变曲线,可以得到给定应变条件下不同结构

状态土各自的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 来反映扰动、浸水和加荷作用下土的结构性变化。其中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 表示天然沉积黄土剪切过程结构性变化条件下的主应力差值, $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 分别表示扰动重塑土样和浸水饱和土样的主应力差。由原状土与重塑土的主应力差比值及原状土与饱和土的主应力差比值可以综合反映土粒空间排列和粒间连接特征所反映的结构性。因此,根据释放结构势的方法,可定义如下的结构性参数:

$$m_o = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_y}{(\sigma_1 - \sigma_3)_r} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_y}{(\sigma_1 - \sigma_3)_s} \quad (1)$$

从式(1)可以看出:土的原始联结越强,扰动重塑后的强度损失越大,土的结构性参数越大;浸水作用下结构性破坏越大,饱和原状样的强度损失越大,土的结构性参数也越大。随着应变发展,原状样的结构性逐渐损失,次生结构逐渐生成,伴随着结构强度逐步损失,该参数反映的结构性在不断变化。

1.2 黄土结构性参数测试方法

试验土样为西安南郊 Q_3 黄土,试验设备为常规三轴剪切仪,采用固结排水试验(CD)。固结围压分别取50, 100, 200, 300 kPa,以反映固结围压对结构性的影响。原状土含水率分别为2%, 8.5%, 15%和18%,从而反映含水率对结构性和结构性参数的影响。采取原状土的天然含水率为8.5%,干密度约为 1.30 g/cm^3 。含水率为2%的原状土采用天然原状土风干的方法制备。含水率为15%和18%的原状样采用天然原状土滴定注水的方法制备,先对试样加水,然后在保湿缸中放置24 h以上,让水分自由均匀扩散。重塑样在控制干密度和含水率的条件下,通过压样法制备。饱和样采用抽气饱和法制备。

2 黄土结构性参数测试分析

2.1 三轴剪切试验结果

原状样、重塑样和饱和原状样的三轴剪切试验结果如图1~3所示,依据它们的应力应变曲线可以看出, Q_3 黄土虽然质地疏松、孔隙发育,但湿度(含水率)较小($w = 2\%, 8.5\%$)时,其结构性明显,破坏形式受侧向压力影响较大。围压较小时,应力应变曲线呈软化型,曲线明显地分为三段。第一段反映结构保持完好状态下的变形,基本上呈变形线性单调增大阶段,具有一定的剪缩体变;第二段代表结构大量破损阶段,颗粒之间产生滑移,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;到了第三段,剪切带已形成,且剪切带有增厚的趋势,剪缩和剪胀处于

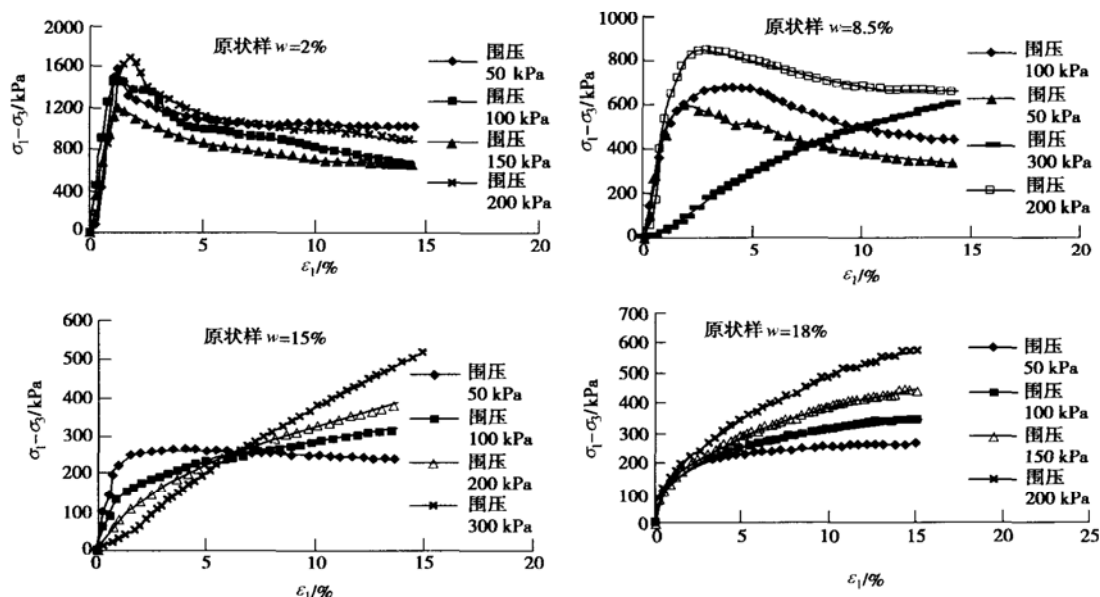


图1 原状黄土的应力应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curve of intact loess

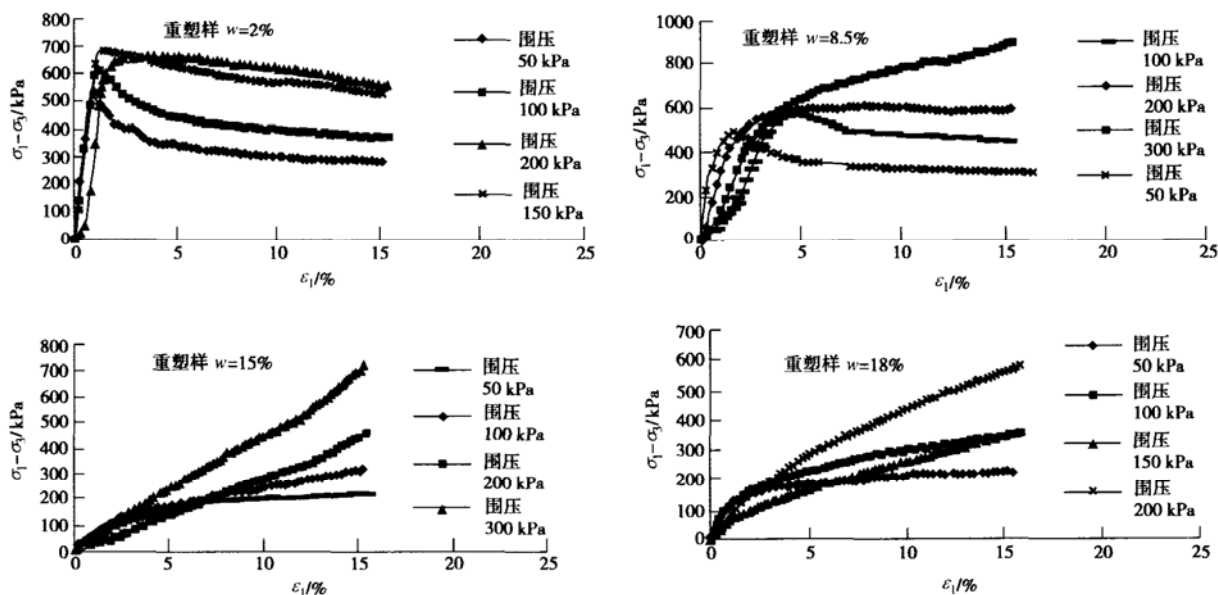


图2 重塑黄土的应力应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curve of remolded loess

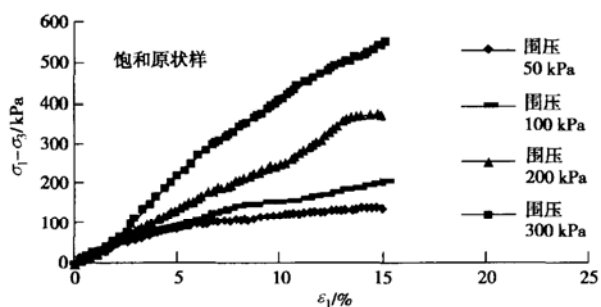


图3 饱和黄土的应力应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of saturated loess

的性质已接近重塑土, 颗粒之间的滑移成为变形的主要原因。对湿度(含水率)较小($w = 15\%$, 18%)时, 其结构性受侧向压力影响较大。即使围压较低的条件(50 kPa), 其应力应变曲线也没有明显峰值点, 呈强或弱硬化型双曲线, 总体上看, 结构性基本丧失。可见围压对黄土结构性的影响与含水率密切相关。

重塑样在低含水率低围压时, 应力应变曲线表现为弱软化型, 亦有峰值点。表明重塑样在制备时形成的特定次生结构和水膜吸力作用仍然具有弱结构性, 低围压破坏时仍有剪切带出现; 随着含水率增大, 土粒和团粒内部接触点的水膜增厚, 次生胶结减弱, 结构强

相对平衡。总体上表现为体变趋于稳定, 剪切带中土

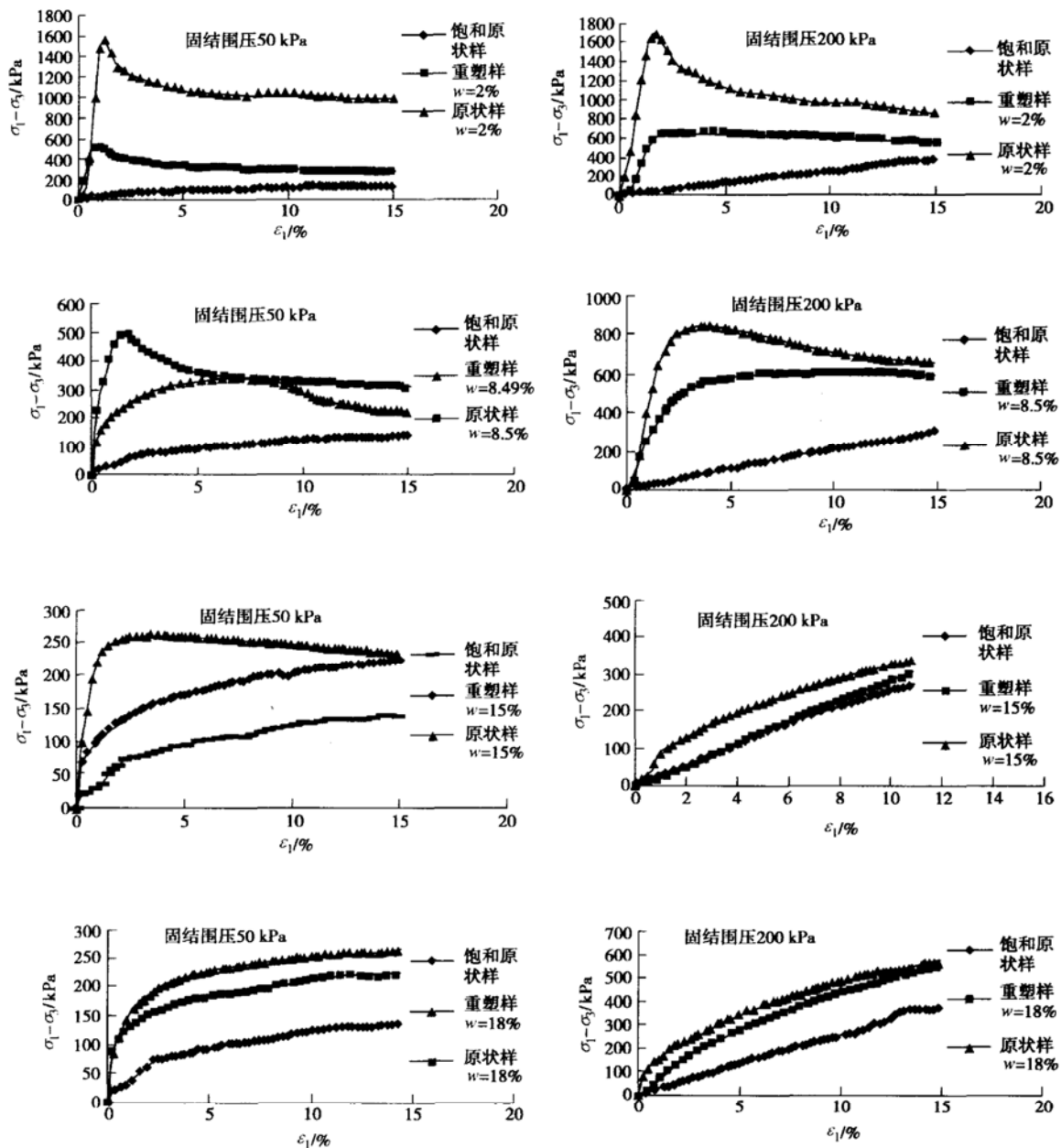


图4 不同含水率、不同固结围压下原状土、重塑土和饱和土的应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of intact, remolded and saturated loess under different water content and consolidation pressure

度变小,结构性逐渐消失,破坏时试样没有剪切带出现,呈现鼓胀状。

原状饱和样由于高含水率和胶结结构软化,在均压固结过程中显示出高压缩性,体变较大,剪切过程中也有较大的剪缩体变。不同围压下,应力应变曲线均呈硬化型。

比较同一围压、不同含水率下原状土应力应变曲线,表明含水率对 Q_3 黄土的结构性和强度有明显的影 响。相同围压下,低含水率时,应力应变曲线呈软化型或弱软化型;随着含水率升高,曲线呈硬化型,承受的剪应力随着剪切变形增大而提高。当围压较大时,土的结构性在均压固结下就遭到部分或完全破坏,所以应力应变曲线不再随含水率发生变化,均呈硬化型。

含水率对试样破坏形式的影响表现为:含水率较低时先呈现剪缩后呈现剪胀,破坏时出现明显的剪切带;含水率较高时剪缩现象显著,试样破坏时也呈现鼓胀状。

比较同一含水率、不同围压下原状土的应力应变特征可得:当围压小于结构强度时,应力应变曲线呈软化型;当围压大于结构强度时,土的结构在均压固结时破坏,应力应变曲线呈硬化型。这些关系表明,结构强度和围压对黄土的应力应变关系有显著影响,是原状黄土强度、变形的重要因素。

2.2 结构性参数的变化规律

在相同含水率和固结压力条件下,原状样、重塑样和饱和样的应力应变曲线如图4。从图中可以看出,当围压在 50~200 kPa 范围时,在原状样、重塑样和饱

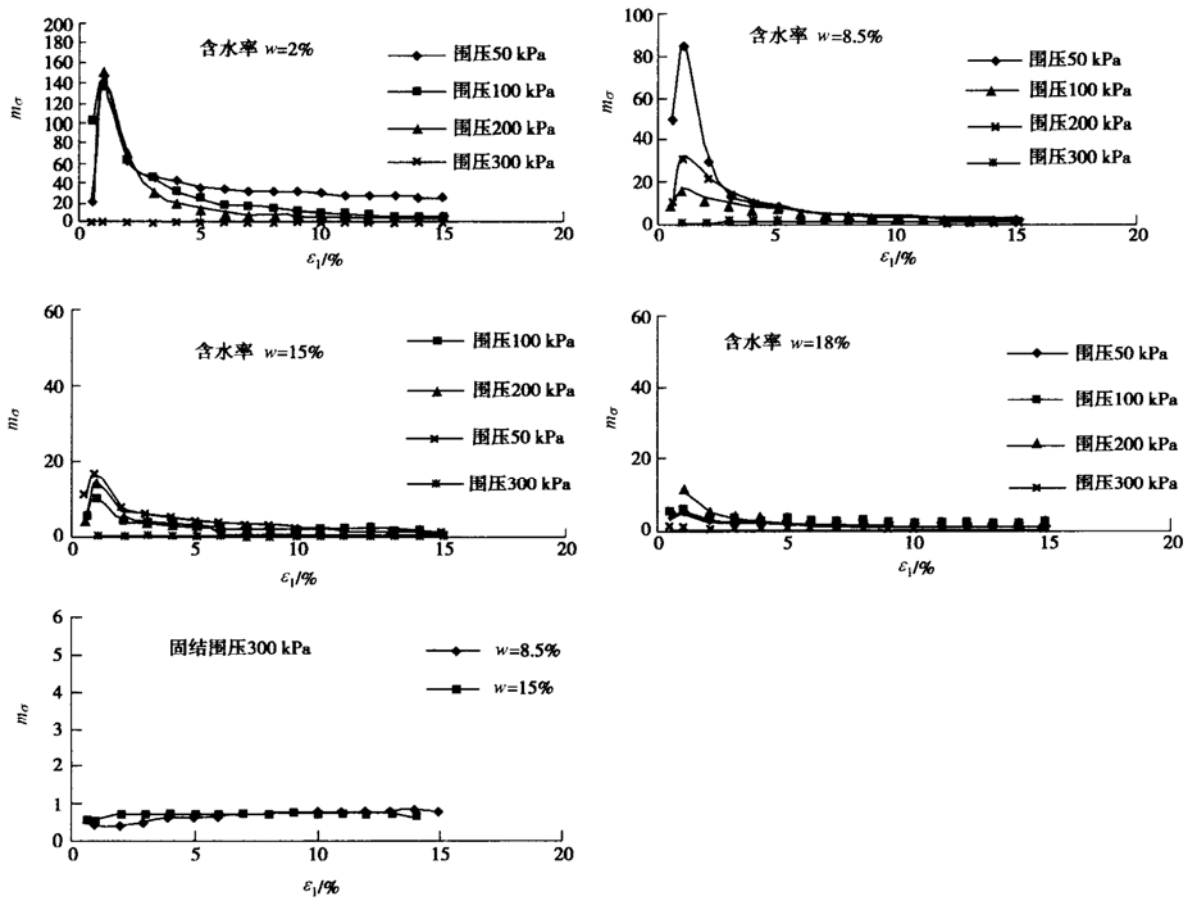


图5 结构性参数的变化曲线

Fig. 5 The relationship between fabric index and axial strain

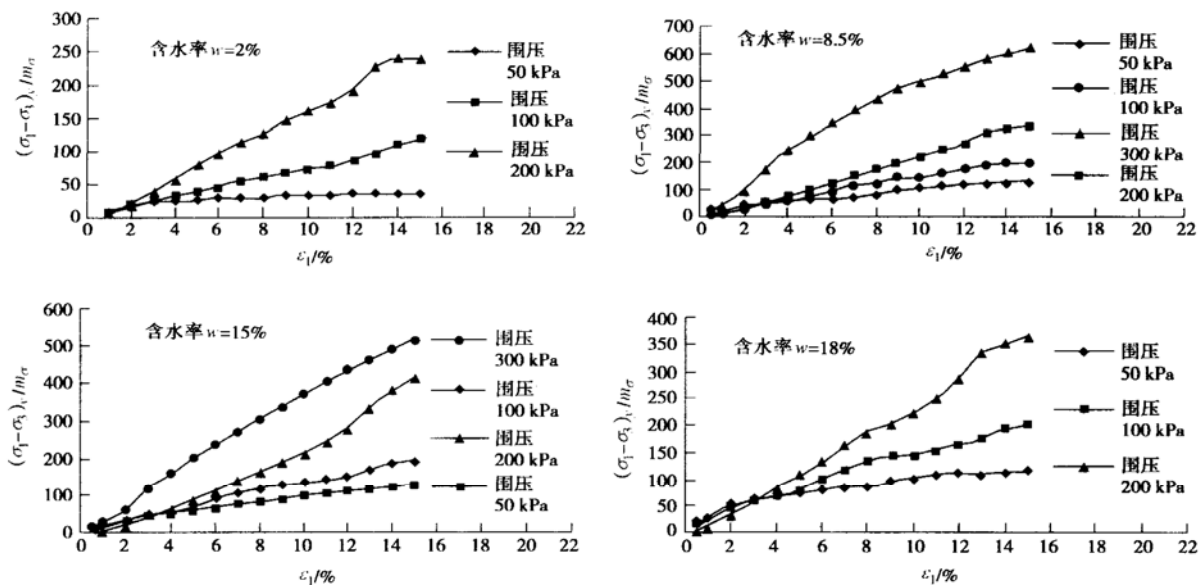
和样的应力应变曲线上,取相同轴向应变对应的主应力差,具有原状土主应力差大于重塑土主应力差,重塑土主应力差大于饱和原状土主应力差的特征。高围压作用时($\sigma_3 = 300$ kPa),彻底破坏了原状土的结构,则原状土的主应力差小于重塑土的主应力差,重塑土主应力差仍然大于饱和原状土的主应力差。 σ_3 较小时,围压作用对原状土结构的破坏较弱,有较大的结构强度, σ_3 增高时,原状土的结构在固结时就遭到破坏,结构强度降低。同时天然沉积过程中原状土的孔隙分布不均匀,高围压下胶结作用被破坏,而重塑土在制备过程中形成特有的完整次生结构,因此高围压下相同轴向应变的重塑土主应力差可能大于原状土主应力差。饱和土中没有水膜作用,且土颗粒之间胶结物质溶解,颗粒呈亚游离松散状态,故在剪切过程中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 始终小于 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ 。

依据式(1),由上述试验结果可以求得不同应变水平土的结构性参数,结构性参数与轴向应变的关系曲线见图5。在不同含水率图中, m_σ 与 ε_1 曲线均呈规律性排列。在 $\varepsilon_1 < 1.0\%$ 之前,由于试验误差所致,个别图 m_σ 的变化略显紊乱。在 $\varepsilon_1 > 2\%$ 之后,各图中取相

同 ε_1 时, m_σ 值随围压值增长而降低。依据结构性参数的变化曲线,当 $\varepsilon_1 > 1.0\%$ 、 $\sigma_3 < 300$ kPa时均呈较完整的单调下降曲线形态。当 $\sigma_3 > 300$ kPa时,土的结构在均压固结时就遭到破坏,故 $0 < m_\sigma < 1$ 。表明土的原生结构破坏,在剪切过程中 m_σ 又呈单调上升趋势,这也表明破坏后的原状土正逐渐形成与重塑土一致的次生结构。所有曲线随着 ε_1 增大,逼近线均为 $m_\sigma = 1$ 。

3 引入结构性参数的应力应变曲线

在三轴剪切试验中,低围压和低含水率黄土的应力应变曲线具有峰值点,明显地分为三段。第一段为结构完好状态下的近似弹性变形,曲线呈单调上升阶段;第二段代表结构大量破损阶段,曲线呈下降趋势;第三段呈现水平直线,轴向应变持续发展,而应力水平几乎不再增长。这种应力应变曲线是一种不稳定形态的曲线,无论在数学方面用函数来描述,还是在力学方面建立本构关系模型,都是不方便的。但是在应力应变关系中引入结构性参数 m_σ ,建立 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma$ 与 ε_1 的关系曲线后,它们的变化规律如图6所示。可以

图6 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_0$ 与 ε_1 的关系曲线Fig. 6 The relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_0$ and axial strain

看出, 原来的峰值曲线转变为单调上升的曲线形态, 即经过结构性参数校正后, 使应力应变曲线与正常固结的应力应变曲线形态一致, 说明已经定义的结构性参数, 能够反映原状土剪切过程中结构性的变化。

4 结论与认识

(1) 原状黄土有其特殊结构, 宏观地表现为具备结构性和结构强度。黄土的结构性是决定其力学特性的一个内在本质因素, 寻找建立反映黄土结构性的量化指标, 使其能全面反映土颗粒的排列和联结特征的力学效应, 将为认识黄土的力学性质开辟新途径。

(2) 建立反映土结构性的量化指标(结构性参数)的有效途径是释放原状土的固有结构势。浸水、加荷和扰动等作用让原状黄土的结构发生破坏, 结构势充分释放出来, 从中寻求结构破坏的特性和结构性演变的规律, 是发现和建立结构性参数的简易而可靠的方法。以天然原状黄土、原状饱和土和扰动重塑土的三轴剪切应力应变曲线为基础, 建立的结构性参数较全面地体现了上述思想。扰动、加荷和浸水作用下, 这个参数均有敏感的变化规律, 认为是一个比较成熟的参数。

(3) 结构性参数的测试结果表明, 不同含水率和不

同固结围压下, 结构性参数均呈现较好的规律性, 试验结果和理论分析有较好的一致性。在原状黄土的低围压和低含水率应力应变曲线中引入 m_0 后, 原来三段状的不稳定形态曲线转变为单调上升的曲线, 这表明了建议的 m_0 具有较好的合理性和稳定性。同时, 结构性参数反映土的结构性变化具有简单、明确、可靠等优点, 具有进一步研究的潜力。

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.
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西省科学技术出版社, 1996.
- [3] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [4] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性粘土剪切带的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 102-108.
- [5] 张 炜, 张苏民. 湿陷性黄土的结构强度特性[J]. 水文地质工程地质, 1990, (4): 22-26.
- [6] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82-90.
- [7] 邢义川, 谢定义, 李 振. 非饱和土有效应力参数研究[J]. 水利学报, 2000, (12): 77-81.