

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.23

甘肃兰州大青山 Q_2 黄土构度指标及结构性 参数变化规律分析

陶 虎^{1,2}, 邵生俊³, 王 强³, 于清高^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点
实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 西安理工大学岩土所, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着城市建设的发展, 用地矛盾日趋严峻, 为了缓解这种紧张的局面, 目前开展的平山填沟造地工程将面临着大量 Q_2 黄土工程问题。基于综合结构势理论, 以兰州大青山 Q_2 黄土为研究对象, 开展 Q_2 黄土构度指标及结构性随增湿、加载变化规律的试验研究, 对比分析了不同围压及含水率变化时应力结构性参数的演变规律, 同时建立了应力结构性参数最大值与构度指标、围压、含水率的函数关系 f_1 , 应力结构性参数与应变、最大应力结构性参数的函数关系 f_2 。将结构性参数引入邓肯—张模型, 建立了反映结构性土应力—应变的本构模型, 试验结果和与计算值表现出很好的一致性。

关键词: 构度; 应力结构性参数; 围压; 含水率; 本构模型

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)04-0130-08

Relation of structural index to changes of structural parameters for Q_2 -loess from Daqing mountain

TAO Hu^{1,2}, SHAO Shengjun³, WANG Qiang³, YU Qinggao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province,

Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaan Xi 710048, China)

Abstract: Land reclamation carried out at present for loess plateau cities could solve the contradiction between developing city construction and reducing land resource. However, the relative hill-leveling and valley-hilling will produce a great deal of engineering issues on Q_2 -loess. Following the theory of comprehensive structure potential, tests including structural index and structural parameters were performed on Q_2 -loess that sampled from the Daqing Mountain in Lanzhou district. Changes of structural stress-parameter were analyzed with different confining pressures and water contents. Function f_1 of the maximum structural stress-parameter in terms of structural index, confining pressure and water content was proposed, also function f_2 of structural stress-parameter in terms of strain and the maximum structural stress-parameter was presented. Furthermore, stress-strain constitutive model involving structure was constructed by introducing structural stress-parameter into the Duncan-Chang model. The theoretical results of revised Duncan-Chang model could well fit experimental results.

Keywords: structural index; structural stress-parameter; confining pressure; water content; constitutive model

收稿日期: 2015-01-22; 修订日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2014IESLZ02)

第一作者: 陶 虎(1975-), 男, 甘肃漳县人, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程的应用研究。E-mail: taohu01@126.com

0 引言

随着“一带一路”战略构想的提出,借助国家构建新丝绸之路经济带的契机,将为促进沿线新型城镇化和区域协调发展创造条件,城市建设和基础设施能力的提高也将面临更多复杂的岩土工程问题。目前开展的平山填沟工程将为再造一个新兰州提供大量土地资源。受青藏高原上升的影响,兰州地形呈东西走向,南北狭窄且在两侧山中发育了大量卵状黄土丘陵。马兰黄土(Q₃)分布在黄河阶地及黄土梁上,厚度约 10~34 m,随着平山造地工程的进行,更多地方将开挖到覆盖层埋深约 90~200 m 的离石(Q₂)黄土层。

黄土是一种特殊土,在干旱条件下呈欠压密强结构的性状,对水表现出特殊的敏感性。土的结构性早在 1925 年就被太沙基^[1]所指出,也被一系列学者^[2]所重视。张诚厚^[3]、Callisto、J. B. Burlandl 等^[4-5]通过大量试验证明了土的结构性对土的力学性质的影响。土的结构性也是决定各类土力学特性^[6]的一个最为根本的内在因素。

Q₂ 原状黄土在搬运、沉积、固结及数千万年地质构造中形成了其特殊的结构性,可以说现存结构状态是它整个历史形成过程中的综合产物。增湿和加载是导致结构性降低的外在因素,而黄土的排列、联接特征则是维持结构存在内因。目前,如何评价黄土这种复杂环境下沉积形成的多相多孔介质的强结构性土,以及黄土结构性与其水敏性之间强烈联系的关系、结构性演变与力学特性变化规律就成为当代黄土力学研究的重点^[7]。

在土地开发过程中,将面临更多与 Q₂ 原状黄土相关的工程问题,在被动加载、扰动、增湿的影响下,势必造成 Q₂ 原状黄土结构性变化,从而引发滑坡^[8]、崩塌、沉降等地质灾害。因此,研究 Q₂ 黄土结构性在增湿扰动影响下演变发展规律具有重要的科学意义。

1 黄土的初始结构性研究

1.1 黄土的结构性

土的结构性被提到 21 世纪土力学核心和中心的高度上来^[7]。结构性是天然土固有的特性,如果说结构性对任何土都是重要的,那么对黄土更是不可避免的,研究黄土的结构性具有重要的科学意义^[8]。

谢定义等^[9]于 1999 年在考察土结构性研究历史的基础上,将已有的对土结构性的研究方法归纳成了三种途径,即细观形态学途径、固体力学途径和

土力学途径。在对比三种研究方法优缺点的基础上,最终认为寻求一个参数来独立、有效地表征土结构性及其变化的土力学研究途径具有更大的吸引力。

综合结构势思想认为土结构性的强弱是对土的联结和排列两个方面综合反映,只有颗粒间的联结强度较大,且排列能使土颗粒在失去联结时处于较大不稳定状态的土才具有较强的结构性。任何土均有自己的初始结构性,它在加荷或浸水过程中,会发生初始结构性破坏和次生结构性形成的耦合变化。邵生俊等^[10]基于综合结构势理论建立了描述初始结构性的构度指标,文献^[11]认为构度指标大小受增湿灵敏度和扰动灵敏度的影响较大,构度是描述土的初始结构性的一个重要参数,在描述黄土力学性质方面比粒度、密度、湿度更为全面,构度指标能全面反映原状土的力学特性。

降雨入渗、地下水位上升产生的入渗都将对土体产生自上(下)向下(上)的增湿过程,随着湿度场的变化,土的联接减弱,结构强度场随湿度场变化,受人类活动的影响,扰动作用也将改变土结构单元的排列,增湿和扰动将加速结构体的破坏。认识黄土的初始结构性以及增湿、扰动作用下原状黄土结构性演变规律是十分必要的。

1.2 兰州大青山 Q₂ 黄土的初始结构性研究

本次研究试样取自兰州市大青山的一块场地,平山造地完成后将进行土地开发。现场通过人工探井的方法取样,取土深度 11~13 m,土样尺寸 20 cm×20 cm×20 cm,采用塑料包裹胶带缠绕的密封方法防止水分减少,外侧用棉被包裹装箱防止运输过程中被扰动。土样呈灰黄色,土中含有钙质结核杂斑,含云母,属于 Q₂ 粉质粘黄土,土的物性指标见表 1。

表 1 大青山 Q₂ 黄土的物理性质指标

Table 1 The basic physical properties for test Q ₂ loesses							
土样来源	Dr	ρ _d /(g·cm ³)	w/%	e ₀	w _L /%	w _p /%	I _p
大青山 Q ₂	2.7	1.56	10	0.731	29	19	10

室内采用单轴压缩试验进行原状土、重塑黄土、饱和原状土的最大无侧限压缩试验。室内制备含水率为 10%、20%、28% 的原状土、重塑土试样,测定最大无侧限抗压强度值,通过公式(1)计算构度指标^[12]

$$m_u = \frac{(q_u)_o / (q_u)_r}{(q_u)_s / (q_u)_o} = \frac{(q_u)_o^2}{(q_u)_s (q_u)_r} \tag{1}$$

式中:m_u为构度指标,反映结构性黄土的初始结构性大小;(q_u)_o、(q_u)_r、(q_u)_s分别表示原状土、重塑

土、饱和原状土的最大无侧限抗压强度。式(1)实际上反映了扰动灵敏度和浸水灵敏度^[12],也可以写成以下形式

$$m_u = m_w m_r = \frac{(q_u)_o}{(q_u)_s} \cdot \frac{(q_u)_o}{(q_u)_r} \quad (2)$$

式(2)中 m_w 反映了结构性土增湿后对水的灵敏度,比值越大说明对水的灵敏度越高。增湿过程中基质吸力降低,易溶盐被溶解,导致结构破坏,强度降低。 m_r 反映了原状土结构完全扰动后强度降低的潜在变化,称为扰动灵敏度,结构联结遭到破坏以后表现为结构可变的灵敏度,它和颗粒的排列特性与均匀性有关。式(2)中反映了增湿或扰动对构度指标的影响,增湿灵敏度越大,结构性土对水的灵敏度就高,工程中就要注意防水;扰动灵敏度越大,说明结构孔隙大,存在不稳定的结构体,工程中就要注意扰动的影响。

通过单轴压缩试验,分别测得兰州大青山 Q₂ 黄土在不同含水率下原状土、重塑土的最大无侧限抗压强度,饱和原状土的无侧限抗压强度,变化关系如图 1 所示;将三种土的最大无侧限抗压强度代入式(2)中,构度指标、增湿灵敏度、扰动灵敏度随含水率的变化关系见图 2。

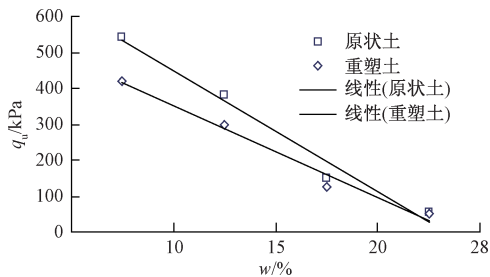


图 1 $q_u - w$ 关系曲线

Fig. 1 $q_u - w$ curves of loess samples

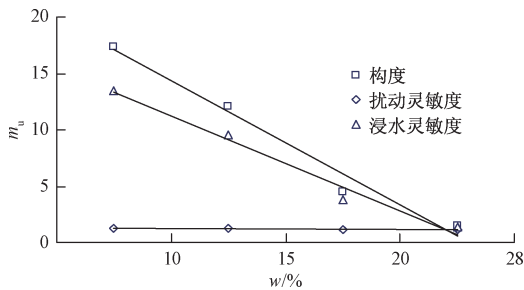


图 2 $m_u - w$ 关系曲线

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

低含水率情况下,原状土的强度远高于重塑土的,说明在干燥状况下原状土结构性较强,即结构势能大;随着含水率的增加,原状土、重塑土的强度之间的差值

逐渐缩小,说明在含水率增大的情况下,结构性逐渐减弱,即结构势降低,原状土和重塑土的强度逐渐接近。图 2 中,构度指标受增湿和扰动影响较大,在低含水率状态时构度指标较大,随着含水率的增加,构度指标减小,说明在干燥状态下,结构性(结构势)最强,经过增湿、扰动后,结构性(结构势)减弱,强度降低。图 2 中显示,兰州大青山 Q₂ 黄土对增湿的敏感性较为强烈,这与黄土中大量钙化物质、胶结物溶解导致结构性降低有关,而扰动灵敏度变化较小,说明扰动对结构的影响较小,这与大青山 Q₂ 黄土孔隙比($e = 0.731$)较小有关。

试验表明,兰州大青山 Q₂ 黄土的初始结构性受增湿灵敏度的影响较大,而扰动灵敏度不受含水率变化的影响。增湿灵敏度越大说明黄土对水的灵敏性越强烈,构度指标也就越大,原状土增湿后结构性降低;扰动灵敏度越大,则反映结构之间的孔隙较大,工程中就要注意增湿和扰动的综合影响。

2 黄土的应力结构性参数演变规律研究

2.1 应力结构性参数

构度指标用于描述土的某一含水率时初始结构性大小,而工程中降雨和入渗过程是渐进变化的,入渗过程使得水分首先溶解土中的化学胶结物质,其次导致基质吸力降低,同时水膜楔入还会发生土的膨胀,最终导致土的联结强度减弱;扰动(地震、人类活动)即改变了土颗粒间的排列又降低了土的联结作用,土的骨架在荷载作用下不稳定的结构块体和弱联结的胶结点首先被破坏。因此,扰动和浸水过程引起 Q₂ 黄土的结构性变化,最终导致强度降低。

通过三轴实验,建立应力结构性参数^[13]随含水率、扰动影响的关系如式(3)。

$$m_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_y^2}{(\sigma_1 - \sigma_3)_r (\sigma_1 - \sigma_3)_s} \quad (3)$$

式(3)中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ 表示原状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 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 分别表示重塑土样和浸水饱和土样的主应力差。从式(3)中可以看出:原状土与重塑土的强度比值、饱和状态时强度比值越大,则应力结构性参数越大,相反则应力结构性参数就越小。式(3)建立的结构性参数是动态变化的,在浸水、加荷等过程中使得土的联接和排列所蕴藏的结构势释放出来,同时随着应变发展,原状结构逐渐破坏,次生结构逐渐生成,不稳定的排列趋于稳定,结构势降低,最终表现为结构强度降低。因

此,应力结构性参数描述的是结构性土在增湿、扰动作用结构性参数随应变的发展规律。同时,应力结构性参数实质上是扰动灵敏度和浸水灵敏度乘积确定构度指标在变形过程的推广。

2.2 围压和含水率对应力结构性参数影响的试验研究

分别进行兰州大青山 Q_2 黄土原状样、重塑样和饱和原状样的三轴剪切试验,通过式(3)计算应力结构性参数,绘制相同围压下不同含水率的应力结构性参数随应变的关系曲线(图3),绘制同一含水率下不同围压的应力结构性参数随应变的关系曲线(图4)。图3中,在同一围压的影响下,应力结构性参数随着含水率的变化呈规律性变化,当 $0 < \varepsilon_1 \leq 1.0\%$ 时,应力结构性参数呈增大的趋势, $\varepsilon_1 > 1.0\%$ 以后,应力结构性

参数随着应变的增大呈减弱趋势。较低围压时,应力结构性参数较大,随着围压的增加,应力结构性参数减小。图4中,在相同含水率情况下,围压越大,应力结构性参数越小,随着含水率的增加应力结构性参数减小。

图3、图4中应力结构性参数随围压、含水率的变化关系曲线分三段,第一段为应变 $\varepsilon_1 < 1.0\%$ 时,土体单元呈弹性状态,荷载还没有破坏原状土的结构,因此认为结构性参数最大。当应力超过结构屈服强度时,土样开始以塑性变形为主,第二段为结构性参数减弱段,随着应变增加,结构性参数呈减弱趋势。第三段为结构性参数变化较为缓慢的阶段,可以认为第三阶段的结构性参数降低到最低程度,土样完全被破坏,仅剩余残余强度。

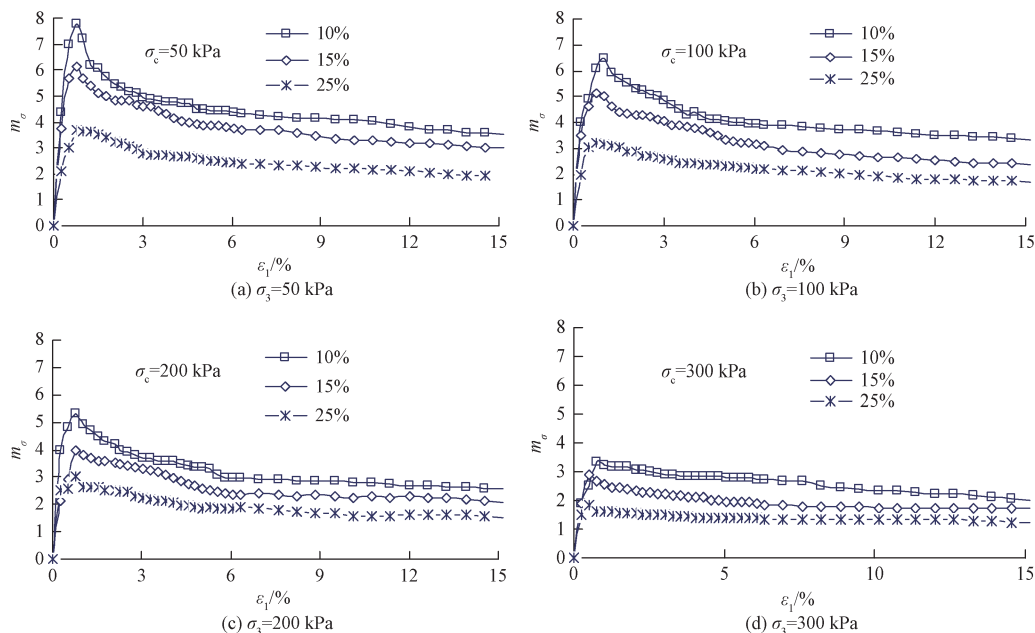


图3 $m_\sigma - \varepsilon$ 关系曲线

Fig. 3 $m_\sigma - \varepsilon$ curves of loess samples

2.3 构度指标与结构性参数的关系

对比分析最大结构性参数与含水率、围压的关系,如图5、图6所示。

低围压的情况下,原状土样在含水率较小时应力结构性参数的最大值较大,随着含水率的增大,应力结构性参数的最大值减小。当围压增大时,应力结构性参数的最大值呈减小趋势,当围压为 300kPa 时,不同含水率的应力结构性参数的最大值接近一致。在同一围压情况下,随着含水率增大,应力结构性参数的最大值呈减小趋势。

图5、图6中影响应力结构性参数最大值变化的

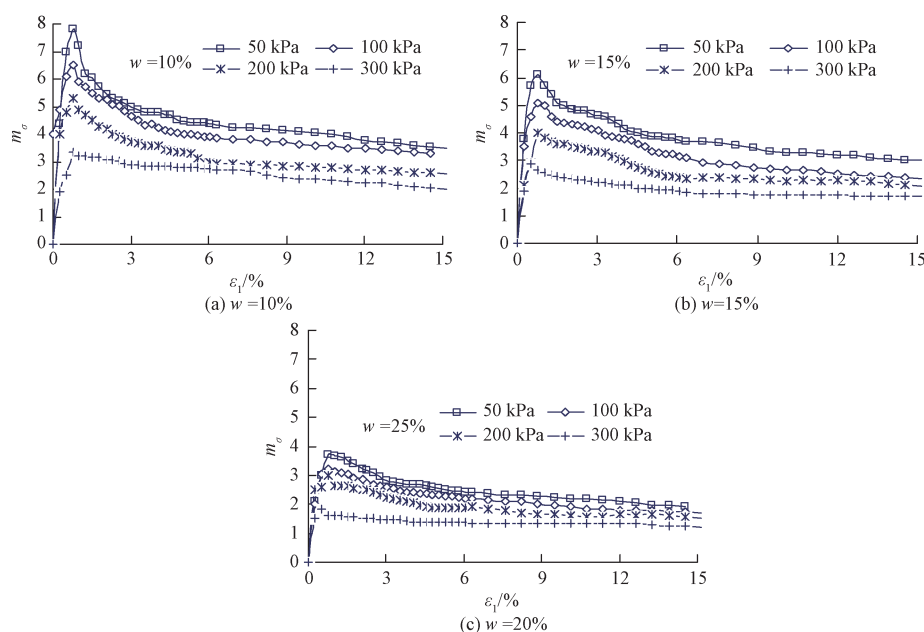
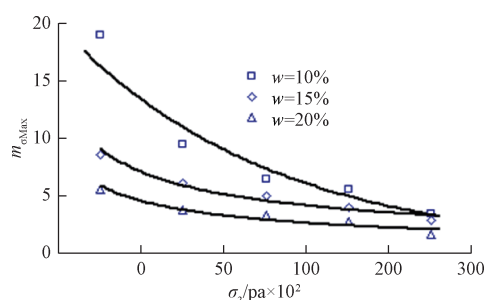
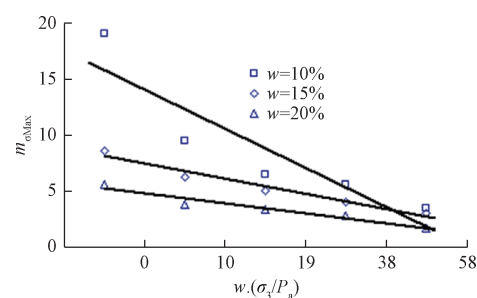
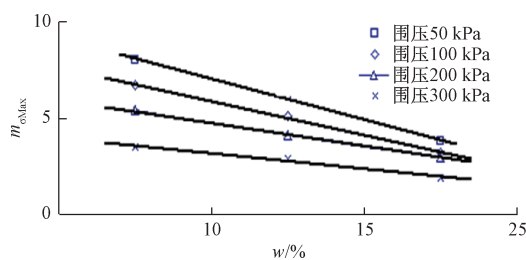
主要因素是围压和含水率。建立最大应力结构性参数与含水率围压乘积的关系曲线(图7),图7中综合反映了围压或含水率同时变化或其中一个指标发生变化时,最大应力结构性参数的变化特征。

建立结构性参数最大值与围压、含水率的关系,如式:

$$m_{\sigma \text{Max}} = f_1(w, \sigma_{3c}/P_a) \quad (4)$$

式(4)中, $m_{\sigma \text{Max}}$ 为应力结构性参数的最大值,大小与围压、含水率呈函数关系,当围压 σ_3 为 0 时,应力结构性参数的最大值为构度指标 m_u 。

图7中应力结构性参数的最大值与含水率围压的

图 4 $m_\sigma - w$ 关系曲线Fig. 4 $m_\sigma - w$ curves of loess samples图 5 $m_{\sigma\text{Max}} - \sigma_3$ 关系曲线Fig. 5 $m_{\sigma\text{Max}} - \sigma_3$ curves of different loess samples图 7 $m_{\sigma\text{Max}} - w \cdot (\sigma_3/p_a)$ 关系曲线Fig. 7 $m_{\sigma\text{Max}} - w \cdot (\sigma_3/p_a)$ curves of loess samples图 6 $m_{\sigma\text{Max}} - w$ 关系曲线Fig. 6 $m_{\sigma\text{Max}} - w$ curves of loess samples

乘积呈线性变化的关系,因此可以进一步建立函数关系如式(5)。

$$f_1(w, \sigma_3) = -\lambda(w \cdot \sigma_3 / P_a) + m_u \quad (5)$$

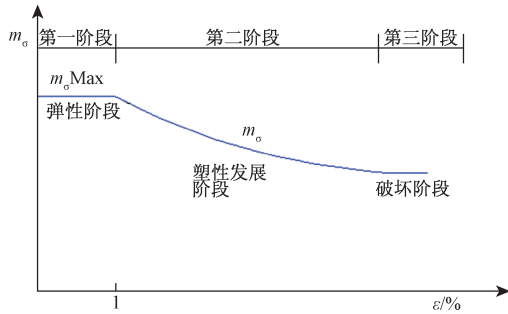
式(5)中, λ 为斜率,与结构性强弱有关,当围压 σ_3 为 0 时,应力结构性参数的最大值 $m_{\sigma\text{Max}}$ 等于构度指标 m_u 。

3 结构性土应力—应变本构模型的研究

3.1 结构性参数的变化规律

图 3、图 4 中,应变 $\varepsilon_1 < 1.0\%$ 的阶段原状土样呈弹性状态,外荷始终小于结构屈服强度,可以认为该段结构性最强,应力结构性参数为一个常数 $m_{\sigma\text{Max}}$,定义为第一阶段;当应力超过结构屈服强度时,土样开始出现塑性变形,随着应变增加,结构性参数减小,定义结构性参数减弱段为第二阶段;当土样完全被破坏时仅剩土的残余强度,结构性参数降低到最小的阶段定义为第三阶段。结构性参数随应变发展的三阶段关系见图 8。

第一阶段土的结构性最强,在第二阶段结构性参数随着应变的发展呈减弱趋势,因此应当注重研究第二段应力结构性参数随变化发展的变化规律。对于某

图8 $m_\sigma - w$ 关系曲线Fig. 8 $m_\sigma - w$ curves of loess samples

一状态的结构性土而言,从图7中可以通过围压和含水率确定最大应力结构性参数 $m_{\sigma Max}$,当应变 $\varepsilon_1 > 1.0\%$ 时,应力结构性参数 m_σ 随着应变 ε_1 增大而减小,因此可以建立应力结构性参数与最大应力结构性参数和应变的函数关系。

$$m_\sigma = f_2[f_1, \varepsilon_1] \quad (6)$$

式中,当 $\varepsilon_1 < 1.0\%$ 时, $m_\sigma = m_{\sigma Max}$,当随着应变增大,应力结构性参数减小,式(6)演变为以下形式。

$$f_2[f_1, \varepsilon_1] = m_u - \lambda(w \cdot \sigma_3 / p_a) - \varepsilon_1^{-a} \quad (7)$$

式(7)中, a 为变化参数,与结构性、围压、含水率有关。

3.2 结构性土应力-应变本构模型的建立

试验结果显示,应力结构性参数受围压、含水率的影响较大。原状土在增湿、扰动过程中应力结构性参数降低,其实质也是应力降低的过程。整理不同围压时 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma - \varepsilon_1$ 的关系曲线(图9)。

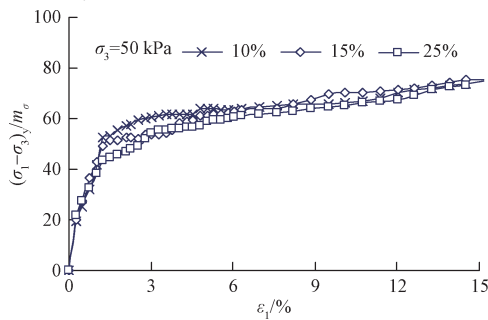
图9 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma - \varepsilon_1$ 关系曲线Fig. 9 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma - \varepsilon_1$ curves of loess samples

图9中,双曲线变化规律可以采用邓肯-张模型模拟,建立方程如下

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (8)$$

式(8)中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y / m_\sigma$ 称为考虑结构性参数变化影响的应力,用 $(\sigma_1 - \sigma_3)_i$ 表示,则可以得出考虑结

构性参数影响的初始切线模量 E_i 、破坏比 R_{if} 、应力水平 S_i 以及切线弹性模量 E_{it} 。其表达式为

$$\left. \begin{aligned} E_i &= 1/a; \\ R_{if} &= (\sigma_1 - \sigma_3)_{if} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}; \\ S_i &= (\sigma_1 - \sigma_3)_i / (\sigma_1 - \sigma_3)_{if} \\ E_{it} &= (1 - R_{if} S_i)^2 E_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(5)中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{if}$ 为结构性土应变为 15% 时的强度; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为结构性土应力渐进值。结构性土的初始模量 E_i 表示为式(10)。

$$E_i = K_i p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_i} \quad (10)$$

式中 K_i 、 n_i 为试验参数, p_a 为大气压 ($p_a = 101.4 \text{ kPa}$)。根据摩尔强度准则,得出结构性土的应力差与围压的关系如式(11)。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{if} = \frac{2c_i \cos \varphi_i + 2\sigma_3 \sin \varphi_i}{1 - \sin \varphi_i} \quad (11)$$

式(11)中 c_i 、 φ_i 为结构性土的抗剪强度指标。将式(10)、(11)代入式(9)可得结构性土的切线模量为式(12)。

$$E_{it} = K_i p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_i} (1 - R_{if} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_i (1 - \sin \varphi_i) S_i}{2c_i \cos \varphi_i + 2\sigma_3 \sin \varphi_i})^2 \quad (12)$$

考虑结构性的影响,公式(8)变为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_y = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} m_\sigma \quad (13)$$

式(13)为考虑结构性参数影响的应力应变关系方程。

将式(6)代入式(13),得出考虑原状黄土应力结构性参数影响的结构性土应力-应变本构模型如式(14)。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_y = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} f_2[f_1, \varepsilon_1] \quad (14)$$

式(14)中,函数 f_1 建立了最大应力结构性参数与不同含水率 w 、围压 σ_3 的关系,函数 f_2 描述了某一含水状态下最大应力结构性参数随应变的发展关系。式(14)中可以得出考虑结构性影响的原状黄土初始切线模量,当应变 $\varepsilon_1 \leq 1.0\%$ 的阶段,结构性土初始模量 E_{is} 的表达式如式(15)。

$$E_{is} = f_1(w, \sigma_3) / a \quad (15)$$

式(15)中,结构性土初始模量 E_{is} 受含水率 w 、围压 σ_3 的影响较大。

将结构性土初始模量 E_{is} 代入结构性土剪切模量 E_{ts} 的公式如式(16)。

$$E_{ts} = (1 - R_{if} S_i)^2 E_{is}$$
$$= f_1(w, \sigma_3) K_i p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_i} \left(1 - R_{if} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_i (1 - \sin \varphi_i) S_i}{2 c_i \cos \varphi_i + 2 \sigma_3 \sin \varphi_i} \right)^2 \quad (16)$$

式(16)为考虑了结构性参数在增湿和加载过程中对切线弹性模量的影响,在变形计算中可以引入刚度矩阵。

3.3 结构性土本构模型的验证

在不同含水率 w 下,建立含水率与斜率 λ 、构度指标 m_u 的关系(表2)。

表2 w 与 λ 、 m_u 关系

Table 2 The relationship between λ 、 m_u and w

$w/\%$	λ	m_u
10	3.63	19.94
15	1.35	9.41
20	0.88	6.09

围压为 50kPa, $w = 10\%$ 时, $a = 0.656$; $w = 15\%$ 时, $a = 0.534$; $w = 20\%$ 时, $a = 0.354$ 。试验参数 $c_i = 45\text{kPa}$, $\varphi_i = 23.30^\circ$, $K_i = 102.3$, $n_i = 0.51$ 。

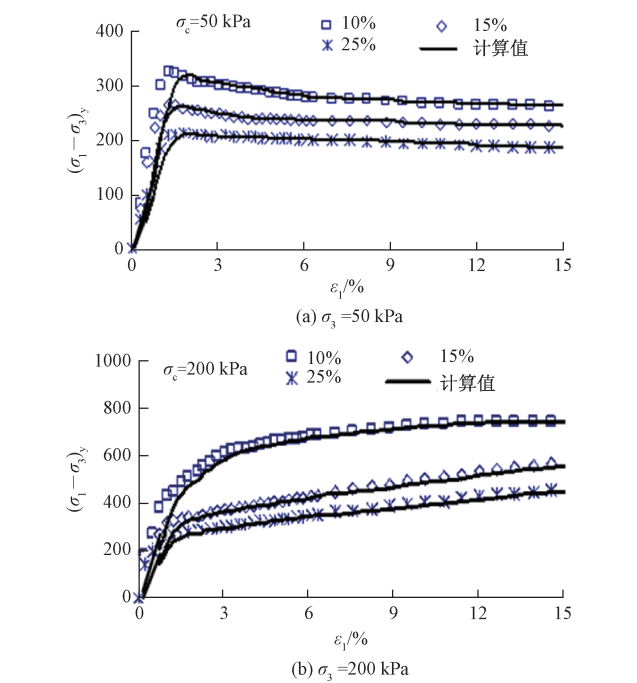


图 10 结构性土应力应变计算值与实测值对比
Fig. 10 Comparison between predicted and observed stress-strain curves of intact loess

图 10 中为围压为 50kPa、200 kPa 时,应力 - 应变实测值与计算值的关系,图中实线为计算值,点划线为实测值,可以看出两者基本吻合。

4 结语

(1) 构度指标描述了某一状态下土的初始结构性强弱,构度指标受增湿灵敏度的影响较大;应力结构性参数在含水率、围压的影响下随应变发展呈规律性变化。

(2) 结构性参数经历了三个发展阶段,第一阶段处于弹性阶段,结构性参数的值和结构强度最大;第二个阶段为塑性发展阶段,应力结构性参数随着应变的增加减小,结构强度逐渐减弱;第三个阶段为破坏阶段,结构性参数最小,结构完全被破坏,最终仅剩土的残余强度。

(3) 通过分析应力结构性参数与围压、含水率的变化规律,建立了最大应力结构性参数与含水率、围压的关系,在塑性发展阶段,应力结构性参数与构度、围压、含水率、应变存在函数变化关系。

(4) 将结构性参数引入邓肯-张模型,建立了描述原状黄土在增湿、扰动影响下,结构性参数对切线模量的影响,通过描述应变硬化和应变软化的两种曲线,计算值和实测值非常相近,将构度引入应力结构性参数表述土的应力 - 应变关系能真实反映黄土的变形特性。

参考文献:

[1] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: Weley, 1943.

[2] 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 Zhujiang. Mathematical model of soil structure characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95 - 97.

[3] 张诚厚. 两种结构性土的土工特性[J]. 水利水电科学技术, 1983(4): 65 - 71.

ZHANG Chenghou. The geotechnical characteristics of two kinds of structured soil [J]. Hydro-Science and Engineering, 1983(4): 65-71.

[4] Burland JB. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329 - 378.

[5] Callisto L, Calabresi G. Mechanical behaviour of a natural soft clay [J]. Geotechnique, 1998, 48(4): 495 - 513.

[6] 谢定义. 论述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): 3 - 12.

- XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-12.
- [7] 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, 20(2): 651-656.
- XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 20(2): 651-656.
- [8] 陈春利, 李同录, 等. 人工堆载诱发黄土滑坡失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 1-4.
- CHEN Chunli, LI Tonglu, et al. Mechanism of loess landslide induced by loading[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 1-4.
- [9] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35-40.
- XIE Dingyi, QI Jilin, ZHANG Zhengzhong. A constitutive laws considering soil structural properties [J] China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 35-40.
- [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): 15-20.
- SHAO Shengjun, ZHENG Wen, WANG Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-20.
- [11] 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): 17-23.
- SHAO Shengjun, WANG Liqin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 17-23.
- [12] 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 Shengjun, ZHENG Wen, WANG Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-20.
- [13] 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 Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.

欢迎订阅

《中国地质灾害与防治学报》

《中国地质灾害与防治学报》由中华人民共和国国土资源部主管、中国地质环境监测院和中国地质灾害防治工程行业协会主办, 1991 年创刊。本刊为中国科学引文数据库来源期刊; 中国核心期刊(遴选) 数据库期刊, 是我国工程地质、环境地质、地质灾害领域的综合性学术理论与实践的专业期刊, 主要刊载自由自然因素和人类经济活动诱发的崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、矿井突水、岩爆、瓦斯爆炸、黄土湿陷、粘性土胀缩、冻土融陷、地下水污染、海水入侵、水土流失、土地沙漠化、盐渍化等地质灾害的发生、发展机制、规律、监测、预报, 地质灾害防治新技术、新方法以及地质环境保护等具有较高学术水平的研究成果。面向国内从事工程地质学科发展、地质工程建设、技术方法创新、地质环境开发与保护等研究的科技人员。

本刊为季刊(季末 25 日出版), 国际标准大 16 开本, 每册定价 30.00 元, 全年 4 册 120.00 元。本刊刊号: CN11-2852/P, ISSN1003-8035, 邮发代号: 82-362。广告许可证号: 京海工商广字 0265 号。广大读者可通过邮局或编辑部订阅(汇款请注明《中国地质灾害与防治学报》“订刊款”字样)。