

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.006



结构性土在能量转化过程中的 损伤演化规律

李忠友¹, 刘元雪², 李永毅¹, 甘怡³

(1. 中国人民解放军 93055 部队, 沈阳 110021;

2. 后勤工程学院 土木工程系, 重庆 400041; 3. 第三军医大学 校务部, 重庆 400030)

摘要:结构性土在受荷变形过程中,随着结构的破损,土体的力学性质逐渐由天然状态向完全破损状态(重塑状态)转变,而损伤变量及其演化规律是反映这种转变的核心所在。从损伤耗能的角度,定义了适应结构性土损伤机制的损伤变量表达式。从体应变与剪应变引起的土体损伤耗能不同机制,按照相容概率事件的叠加原理,建立了一般应变状态下土体损伤演化规律的基本表达式。通过一系列的结构性土的三轴压缩试验结果分析,得出了该土体的损伤演化方程,揭示了体应变与剪应变引起的损伤遵守不同的演化规律。理论计算结果与试验吻合,表明按此方法得到的损伤演化方程能够较好的反映结构性土的应力-应变关系。

关键词:结构性土;损伤;能量耗散;演化方程

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0040-09

Damage evaluation process analysis for structured soils in the energy conversion process

Li Zhongyou¹, Liu Yuanxue², Li Yongyi¹, Gan Yi¹

(1. 93055 troops of PLA, Shenyang, Liaoning 110021, P. R. China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, P. R. China; 3. Department of Administrative Affairs, Third Military Medical University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: In the process of loading and deformation, the mechanics characteristics of structured soils will be changed from natural state to damage state (remolded state) with the damage of structure; the damage variable and its evaluation equation are core to reflect the change. The variable expression is given for structured soils damage from the basic idea that damage is a course of energy dissipation. From the different mechanism of energy dissipation aroused by volumetric strain and shear strain, a basic expression that suits to general strain condition is put forward based on principle of superposition of compatible probability event. Through the analysis of the triaxial compression test, the damage evaluation equation to structured soils is set up, and it is revealed that the damage aroused by volumetric strain and shear strain abides by different evaluation law. Numerical calculation result can reflect the text perfectly, and it indicates that the method can reflect the stress-strain relation of structured soils perfectly.

Keywords: structured soils; damage; energy dissipation; evaluation equation

收稿日期:2016-12-10

作者简介:李忠友(1983-),男,博士,主要从事岩土工程稳定性研究,(E-mail) sklzy2013@sina.com。

Received:2016-12-10

Author brief: Li Zhongyou(1983-), PhD, main research interest stability of geotechnical, (E-mail) sklzy2013@sina.com.

结构性对天然土体的材料性能、力学响应及工程性质有着重要影响^[1-2],开展天然土体结构性研究具有重要的理论意义和工程应用价值。目前,研究土体结构性的很多,其中,利用损伤理论描述土体结构破损的过程,可以很好的解释结构性土的特殊性质,是一种切实可行的方法。结构性土体在荷载等外部因素作用下的破坏过程可以视为“结构单元”逐渐损伤的过程,因而,用损伤理论研究土体结构性的关键是寻找能够反映土体破损规律的损伤变量,并建立相应的损伤演化方程。目前,研究岩土材料损伤变量及其演化方程的方法很多,包括:1)根据损伤理论的基本概念,针对结构性土的特殊性质,直接给出损伤演化方程表达式^[3],该方法是引入损伤理论研究土体结构性土初期采用的一种主要方法,其中,以沈珠江^[4]建立的指数函数型的损伤演化方程最具代表性;2)利用不同表征方式定义损伤变量,并通过对试验数据的拟合建立相应损伤演化方程,该方法是当前应用较为广泛的,程明书等^[5]、胡华等^[6]、庞旭卿等^[7]、Guo 等^[8]通过不同的试验方法研究了膨胀土、花岗岩残积土、黄土及软土的损伤过程;3)基于统计损伤理论,研究结构性土损伤变量及其演化方程的方法。由于结构性土体的特殊性,几何损伤理论的许多基本定义难以适应,难以建立细观损伤与宏观力学性能劣化之间的联系。曹文贵等^[9]、杨明辉等^[10]、张向东等^[11]假定“结构单元”损伤面积或土体微元强度服从某种分布(如 Weibull 分布、正态分布等),建立统计损伤演化方程;4)以不可逆热力学为基础,通过热力学势来建立损伤演化方程。该方法主要是为了回避土体细观损伤的复杂性,从材料损伤是耗散能量这一角度出发,通过自由能函数定义损伤变量并建立相应损伤演化方程。一些学者在这方面做了大量研究工作,特别是 Lemaitre 等^[12]、Shao 等^[13]进行了系统的研究和论证,从能量角度出发研究结构性土的损伤,为结构性土损伤理论研究开辟了新的思路和方法。周家伍等^[14]通过对结构性土代表体元的能量分析,推导了基于结构损伤耗能条件下的损伤演化方程,给出了模型参数的确定方法。但该模型没有考虑结构性土在体应变和剪应变作用下损伤的区别,不能真实反映结构性土在复杂应力路径下的变化。

对于土体,由于其本身就是存在大量孔隙、裂隙的损伤体,特别是重塑土、砂土等,在不考虑土颗粒的破损时,已经是完全损伤的离散体,因而,已经超出了传统损伤理论的研究范畴。另外,传统损伤理

论将材料看成是单一介质,损伤后不再具有任何力学性能,而土体完全损伤后(如重塑土)的力学性质是无法忽略的。因此,当前很多基于金属、混凝土和岩石等材料建立起来的损伤变量及其演化方程并不适合直接应用于结构性土。本文以结构性土的三轴压缩试验为基础,从损伤的基本性质出发,建立了适用于结构性土的损伤变量及其演化方程。

1 损伤变量的定义

天然土体在形成过程中,由于土颗粒之间的物理、化学等作用,形成具有一定强度的胶结单元。由于胶结的作用,使离散的土颗粒粘聚在一起,形成相对完整的连续体或者说是准连续体。在土力学中,一般不考虑土颗粒的破坏,因而,结构性土体的损伤主要发生在土颗粒之间的胶结单元上,如图 1 所示。

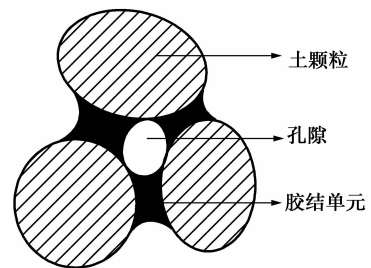


图 1 结构性土示意图

Fig. 1 Sketch figure of structured soils

结构性土的损伤过程主要是指在外部荷载作用下,土体内部胶结单元逐渐破损,导致其力学性能渐进性减弱的过程。当结构单元完全损伤后,土体的结构性消失,成为无结构性的重塑土^[15]。

根据结构性土与相应重塑土的应力-应变关系曲线可知,土体“结构单元”破损所需的损伤耗能如图 2 所示,可表示为

$$dW^d = dW - dW_d \quad (1)$$

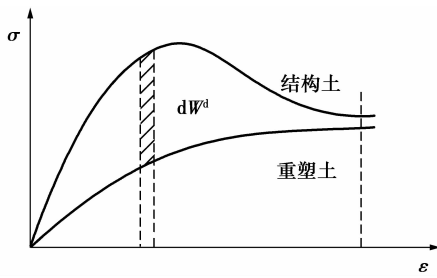
式中: dW 表示结构性土体的外力做功增量; dW_d 表示对应的重塑土(完全损伤土)外力做功增量。其中

$$dW = p d\epsilon_v + q d\epsilon_s \quad (2)$$

由于损伤是耗散能量的不可逆过程,按照各向同性假设和连续性假设,在相同应力路径下土体结构性完全破坏产生新的结构面所耗散的能量是定值,因而,可以定义能量耗散过程中土体结构性损伤的程度——损伤变量的表达式为

$$d\omega = \frac{dW^d}{W^d} \quad (3)$$

式中: W^d 表示结构完全破损时,损伤耗能的总量。

图 2 结构性土应力-应变曲线^[15]Fig. 2 Stress-strain curves of structured soils^[15]

2 损伤演化方程

用简图来表示结构性土,如图 3 所示。图中斜体部分代表土体颗粒,杆代表结构性单元。

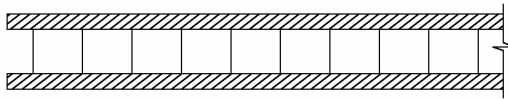


图 3 土体结构模拟图

Fig. 3 Simulated figure of structure of soils

结构性土在体应变与剪应变作用下均可引起“结构单元”的破损,如图 4 和图 5 所示。因而,在一般应力状态下,结构性土的损伤可分为两部分,一部分是体应变改变引起的,一部分是剪应变改变引起的。损伤增量可以写为

$$d\omega = d\omega_v + d\omega_s \quad (4)$$

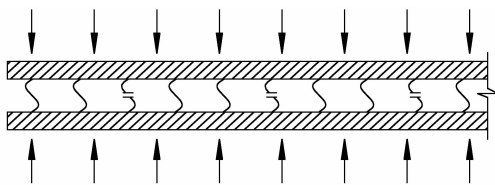


图 4 体应变作用下损伤模拟图

Fig. 4 Simulated figure of structure of soils under volumetric strain

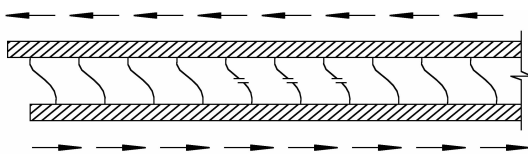


图 5 剪应变作用下损伤模拟图

Fig. 5 Simulated figure of structure of soils under shear strain

对于“结构单元”,引起同样的损伤,压破坏和剪破坏所耗散的能量是不同的。即由纯体应变导致材料完全损伤所耗能量与纯剪切导致材料完全损伤所耗能量是不同的,但是,损伤的结果是一致的,即“结构单元”破损,因而,损伤演化方程可以写为

$$d\omega = \frac{dW_v^d}{W_v^d} + \frac{dW_s^d}{W_s^d} \quad (5)$$

为了方便计算,引入假设:土体应变与剪应变都会引起损伤,并且,各自遵循不同的损伤演化规律,即

$$\omega_v = f_v(\epsilon_v) \quad (6)$$

$$\omega_s = f_s(\epsilon_s) \quad (7)$$

对于体应变引起的损伤耗能,通过后文试验数据分析,认为当等向压缩试验中原状土压缩曲线与重塑土压缩曲线大体上平行时,转折点的体应变为 ϵ_{v0} ,对应的损伤耗能为完全损伤耗能的 95% 是比较合理的;对于广义剪应变引起的损伤耗能,认为达到残余强度时的广义剪应变为 $\epsilon_s = \epsilon_{s0}$,对应的损伤耗能为完全损伤耗能的 95%。在扣除剪应变影响的情况下,有

$$W_v^d = \int_0^\infty (p - p_d) d\epsilon_v \approx \frac{1}{0.95} \int_0^{\epsilon_{v0}} (p - p_d) d\epsilon_v \quad (8)$$

在扣除体应变影响的情况下,有

$$W_s^d = \int_0^\infty (q - q_d) d\epsilon_s \approx \frac{1}{0.95} \int_0^{\epsilon_{s0}} (q - q_d) d\epsilon_s \quad (9)$$

式中: p 、 q 为原状土的球应力和剪应力; p_d 和 q_d 为重塑土(完全损伤土)的球应力和剪应力。等压固结试验可以保证剪应变始终为零, W_v^d 可以通过等向压缩的试验结果直接求得;不固结不排水剪切试验虽然可以保证体应变始终为零,但实验过程中有效应力(球应力 p)是变化的,因而,建议通过固结排水剪切试验结果间接求得。

当采用固结排水剪切试验来建立剪应变引起的损伤表达式时,无法保证剪切过程中体应变不变,得到的损伤耗能包括体应变和剪应变两部分共同作用引起的,即此时通过标准 CD 三轴剪切试验得到的 $W_s^d|_{\sigma_3}$,要小于土体在纯剪应变作用下完全损伤需要的耗能 W_s^d ,即

$$W_s^d > W_s^d|_{\sigma_3} \quad (10)$$

因而,要利用固结排水剪切试验的应力-应变曲线,求某一围压下的纯剪应变作用引起的损伤耗能,可以利用式(11)近似求得。

$$W_s^d = \frac{W_s^d|_{\sigma_3}}{\omega_{s0}} = \frac{W_s^d|_{\sigma_3}}{1 - \omega_{v0}} \quad (11)$$

式中: ω_{v0} 为材料完全破损时体应变引起的损伤,可按 $\omega_{v0} = f_v(\epsilon_{v0})$ 求得; ϵ_{v0} 是相对于原始试样的体应变。对于固结排水剪切试验,有

$$\epsilon_{v0} = \epsilon_v^c + (1 - \epsilon_v^c)\epsilon_s^c \quad (12)$$

式中: ϵ_v^c 是固结引起的体应变; ϵ_v^s 是剪切过程中引起的体应变。

在固结排水剪切试验中,有

$$\omega_s \Big|_{\sigma_3} = \frac{\Delta W_s^d \Big|_{\sigma_3}}{W_s^d} \quad (13)$$

近似认为,剪应变作用引起各个胶结单元破坏所需消耗的能量是相同的,因而,在任一状态下,有

$$\frac{\Delta W_s^d}{1} = \frac{\Delta W_s^d \Big|_{\sigma_3}}{1 - \omega_v} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),有

$$\omega_s \Big|_{\sigma_3} = \frac{\Delta W_s^d}{W_s^d} (1 - \omega_v) \quad (15)$$

又

$$\omega_s = \frac{\Delta W_s^d}{W_s^d} \quad (16)$$

结合式(15)和(16)可以得到

$$\omega_s \Big|_{\sigma_3} = \omega_s (1 - \omega_v) \quad (17)$$

即

$$\omega_s = \frac{\omega_s \Big|_{\sigma_3}}{(1 - \omega_v)} \quad (18)$$

当采用能量形式表达时,损伤表达式已经隐含了两部分损伤的相互影响,损伤增量可以直接叠加,如式(5)所示。当采用式(6)、式(7)的表达式时,需

要考虑两部分损伤的相互作用,因而,两部分损伤不能直接叠加。建议采用式(19)所示表达式。

$$\omega = \omega_v + \omega_s - \omega_v \omega_s \quad (19)$$

损伤可以看做随机出现在材料内部,可以从概率的角度,将土体应变引起的损伤和剪应变引起的损伤看做是两个样本空间相同的相容的事件 v 和 s ,他们发生的频率分别为 ω_v 和 ω_s ,则 $(v \cup s)$ 发生的频率即为式(19)。将式(19)变化可以得到

$$\omega = \omega_v + (1 - \omega_v) \omega_s \quad (20)$$

即:可以理解为土体应变引起的损伤均匀的分布于材料内部,剪应变引起的损伤是在体应变引起的损伤基础上引起的。

对式(20)求微分可以得到损伤的增量形式

$$d\omega = (1 - \omega_s) d\omega_v + (1 - \omega_v) d\omega_s \quad (21)$$

3 结构性土的三轴压缩试验

以重庆市某工程的粉质粘土为研究对象,利用应力路径三轴仪(GDS)等试验仪器,对原状土样和重塑土样进行了一系列对比试验。从天然土样表观看,土体成红褐色,里面含有少量灰黑色杂质。通过对天然土样进行多组室内试验,得到的基本物理性质指标如表 1 所示。

表 1 天然土物理性质指标

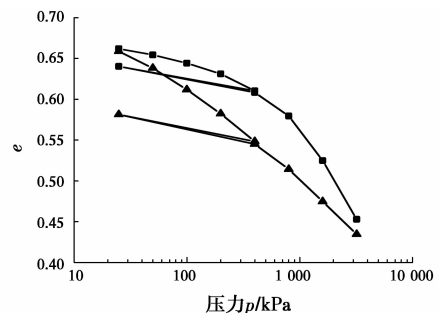
Table 1 The basic physical properties of undisturbed soils

含水量/ %	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比重 G_s	饱和度 $S_r / \%$	孔隙比 e_0	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
21.4	1.63	2.73	86.5	0.675	39.5	24.3	15.2	<0

3.1 等向压缩试验

将制好的土样在真空度近 1 个大气压的抽气缸中抽气 2 h 以上,再缓缓注水,直到淹没试样;然后静止 24 h 左右。取出试样,按操作规程装好样后,再进行反压饱和。当围压达到 200 kPa 后,试样饱和度达到 96% 以上,基本满足要求。由于本次试验要求对原状土和重塑土进行对比,因而,固结时间均采用 24 h。然后,利用 GDS 控制单元进行等向压缩试验,等向压缩试验结果如图 6 所示。

由图示结果可以看出,荷载较小时,由于土颗粒间胶结单元的作用,原状土成较完整的准连续体,土体主要是初始结构的自我调整,变形很小,且其压缩指数与回弹指数较为接近。随着荷载的增大,土体颗粒间的较弱的胶结单元所承受外荷载达到极限,



注: —■— 天然土试验曲线 —▲— 重塑土试验曲线

图 6 等向压缩试验 $e \sim \ln p$ 对比曲线

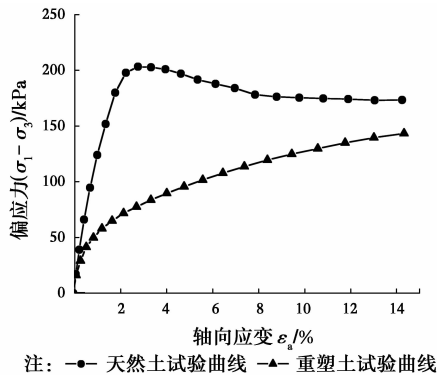
Fig. 6 Relation between e and p by isotropic consolidation

首先发生破坏,土体的变形除了颗粒间的滑移外,还伴随着结构的塌陷,土体变形迅速增大。当颗粒间胶结单元基本完全破损后,原状土的变形量及其趋

势与重塑土趋于一致。在压缩过程中,原状土的压缩指数 λ 由于损伤的作用,随 p (或体应变)增大而增大。重塑土的压缩指数 λ 与 p (或体应变)无关,为一常量。由于损伤的作用回弹模量逐渐接近,在固结压力达到 800 kPa 时,回弹模量相差 11% 左右。

3.2 固结排水剪切试验

按照 3.1 节的步骤对土样进行饱和,然后,分别利用 GDS 固结控制单元和固结排水剪切控制单元进行试验,试验结果如图 7 所示。

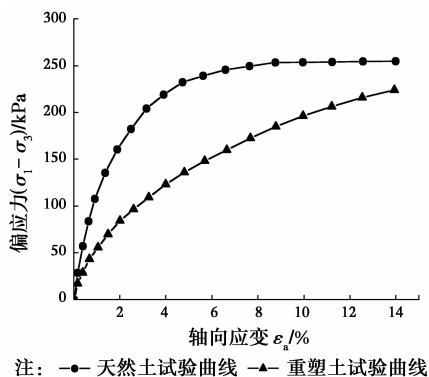


注: —●— 天然土试验曲线 —▲— 重塑土试验曲线

图 7 $\sigma_3 = 50$ kPa 时偏应力对比曲线

Fig. 7 Contrast curve of deviatoric stress by $\sigma_3 = 50$ kPa

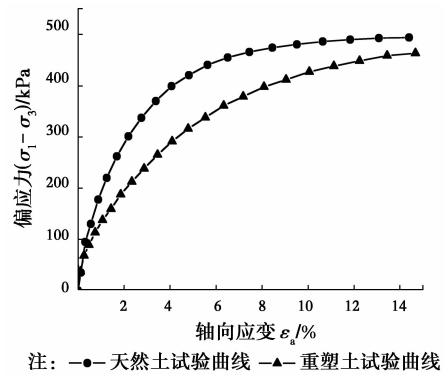
不同围压下的固结排水三轴剪切试验结果如图 7~9 所示。原状土在围压为 50 kPa 时,应力-应变关系呈应变软化型;当围压大于 100 kPa 时,应力-应变关系呈应变硬化型。重塑土不存在应力变化的现象,且随着围压的增加,与原状土之间的差别逐渐减小;在相同围压下,原状土与重塑土之间的差别先增大后减小,最后当应变达到 15% 以后,两条曲线发展趋势十分接近。在剪切初始,由于结构性的作用,原状土的刚度大于重塑土,随着轴向变形的增加,结构性单元逐渐破损,原状土的力学性质向重塑土转化,当剪切达到破坏时,原状土剪切面上的结构性单元基本全部破坏,其力学性质与重塑土较接近。



注: —●— 天然土试验曲线 —▲— 重塑土试验曲线

图 8 $\sigma_3 = 100$ kPa 时偏应力对比曲线

Fig. 8 Contrast curve of deviatoric stress by $\sigma_3 = 100$ kPa



注: —●— 天然土试验曲线 —▲— 重塑土试验曲线

图 9 $\sigma_3 = 200$ kPa 时偏应力对比曲线

Fig. 9 Contrast curve of deviatoric stress by $\sigma_3 = 200$ kPa

4 实验结果分析

对等向压缩试验数据进行整理,按式(3)、(6)、(8)可以得纯体应变作用下土体的结构损伤曲线,如图 10 所示。其拟合表达式为

$$\omega_v = \frac{1}{1 + 54\exp(-51\epsilon_v)} \quad (22)$$

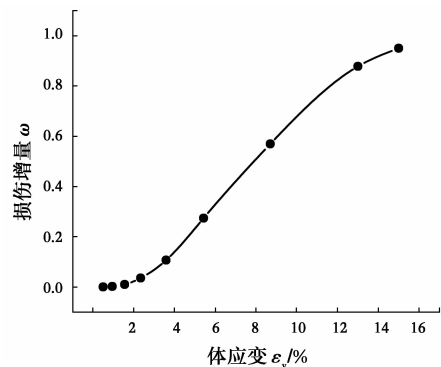


图 10 体应变作用下损伤变量试验曲线

Fig. 10 Damage variable test curves under volumetric strain

同理,按照式(11)、(12),可以得到不同围压下纯剪切引起的损伤耗能。通过计算结果(表 2)可以看出,不同围压下的纯剪应变引起的损伤耗能基本相同,因而,可以得到 $W_s^d \approx 26.4$ 。

表 2 不同围压下纯剪应变引起的损伤耗能
Table 2 Damage dissipation energy by pure shear strain under different confining pressure

p /kPa	ϵ_v^c /%	ϵ_v^s /%	ω_v	W_s^d
50	0.845	8.42	0.64	26.3
100	1.554	7.89	0.67	26.8
200	2.341	7.34	0.68	26.1

按式(3)可以得到不同围压下剪应变引起损伤

与剪应变关系,如图 11 所示。

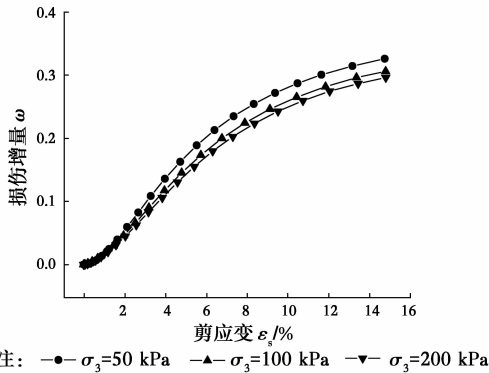


图 11 不同围压时剪应变作用下损伤变量试验曲线
Fig. 11 The damage variable test curves by shear strain under different confining pressure

上述关系是土体在体应变与剪应变共同作用下,剪应变引起的损伤演化方程。如果要得到纯剪应变作用下结构性的损伤曲线,需按式(18),去掉体应变的影响。对上述结果整理,得到纯剪应变作用下材料的损伤曲线,如图 12 所示。其拟合表达式为

$$\omega_s = (1.3 + 27.5\epsilon_s)\epsilon_s \quad (23)$$

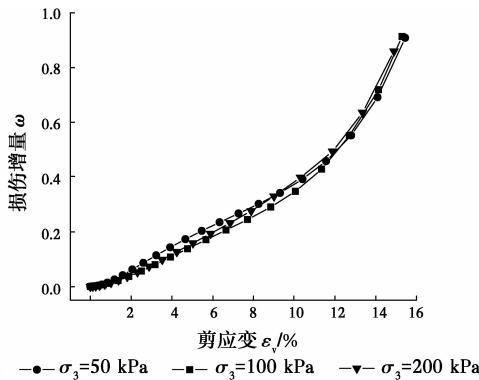


图 12 剪应变作用下损伤变量试验曲线
Fig. 12 The damage variable test curves by shear strain

纯体应变与剪应变引起的损伤拟合曲线,如图 13 所示。

将上述结果代入式(21),得到结构性土的损伤演化方程的增量表达式为

$$d\omega = \frac{(1.3 + 55\epsilon_s)d\epsilon_s}{1 + 54\exp(-51\epsilon_v)} + \frac{2754(1.3\epsilon_s + 27.5\epsilon_s^2)\exp(-51\epsilon_v)d\epsilon_v}{[1 + 54\exp(-51\epsilon_v)]^2} \quad (24)$$

试验结果表明:

- 1) 不同围压下的纯剪应变引起的损伤耗能基本相同,损伤随纯剪应变的变化也基本在一条曲线上。
- 2) 体应变与剪应变引起的土体结构损伤演化规律并不相同。
- 3) 在纯体应变作用下,损伤变量与体应变关系

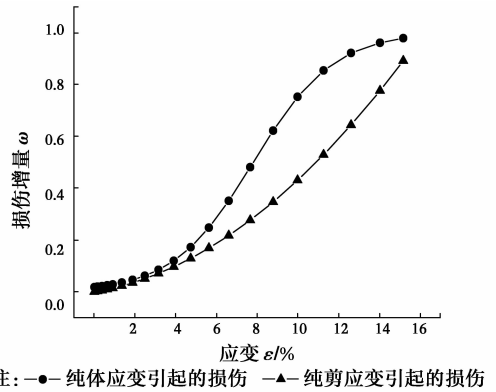


图 13 损伤变量拟合曲线
Fig. 13 Fitting curve of damage variable

曲线可以分为 3 个阶段:平缓阶段、陡增阶段、趋于稳定阶段。在体应变较小时,作用在结构单元上的应力小于结构屈服应力,只有少数脆弱结构单元出现破损,损伤曲线呈现平缓状,土体近似表现为弹性;当随着体应变的增大,作用在结构单元上的应力达到结构屈服应力并继续增大时,破损结构单元的数量急剧增加,损伤曲线出现了陡增段;随着体应变的进一步增大,土的初始结构最后基本被完全破坏,损伤变量逐渐趋近于“1”。

4) 在纯剪应变较小时,损伤曲线较为平缓,随剪应变的增加,结构单元破损的数量逐渐增大,直至达到土体破坏。

5 数值计算

传统损伤理论没有考虑材料损伤后的力学性能,因而,不适用于结构性土体。为考虑结构性土体“结构单元”损伤后的力学性能,沈珠江^[4]将复合体损伤理论引入到土力学中,为其在结构性土中的应用奠定了基础。周建廷^[16]进一步给出完整的各向同性岩土损伤本构关系表达式

$$\begin{cases} \sigma = (1 - \omega)\sigma_n + \omega\sigma_d \\ \epsilon = (1 - \omega)\epsilon_n + \omega\epsilon_d \\ d\sigma_n = [D_n]d\epsilon_n \\ d\sigma_d = [D_d]d\epsilon_d \end{cases} \quad (25)$$

式中: $d\sigma_n = [D_n]d\epsilon_n$, $d\sigma_d = [D_d]d\epsilon_d$ 分别为结构性土复合体理想部分(原状土初始状态)与损伤部分各自遵循的本构关系。

目前,大部分本构关系都是在对重塑土研究的基础上建立起来的,其中,剑桥模型是世界上唯一公认的土体弹塑性模型,特别是对于粘土类材料尤为适用,因而,混合体损伤部分(重塑土)可以采用剑桥

模型来计算。对于理想部分,沈珠江^[4]假设采用线弹性模型,这只是一种简化方法,与实际情况误差较大。特别是计算时需给出弹性体的应力界限,即初始屈服面。任何试验都无法实现试验过程中不出现损伤,因而,通过试验得到的初始屈服面并不是理想状态土的初始屈服面。对前文给出的实验结果进行模拟计算(材料性质及参数见表 1),理想状态仍采用剑桥模型,计算参数采用试验初始状态的力学参数。根据试验结果求得原状部分与损伤部分的力学参数为

理想状态: $\kappa_n = 0.0034, \lambda_n = 0.013, M_n = 1.3101$

损伤状态: $\kappa_d = 0.0089, \lambda_d = 0.039, M_d = 1.1958$

其中,剑桥模型中参数 κ 和 λ 分别为等应力比的正常压缩曲线及回弹曲线在 $e-\ln p$ 平面上的斜率; M 为 $p-q$ 平面上临界状态线的斜率,下标 n、d 分别表示理想状态和损伤状态。

计算时首先使围压从 0 kPa 增加到 200 kPa(即固结过程),而后保持 $\sigma_2 = \sigma_3 = 200$ kPa,增大 σ_1 进行剪切计算,计算结果如图 14~18 所示。

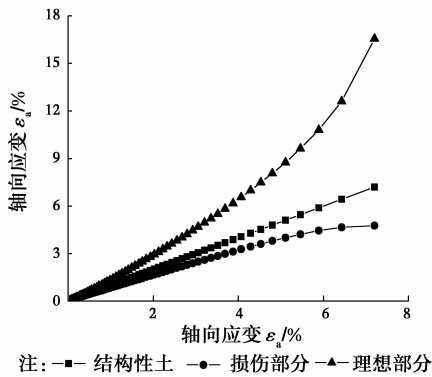


图 14 结构性土及其两组份应变曲线

Fig. 14 Strain curves of structured soils and two parts

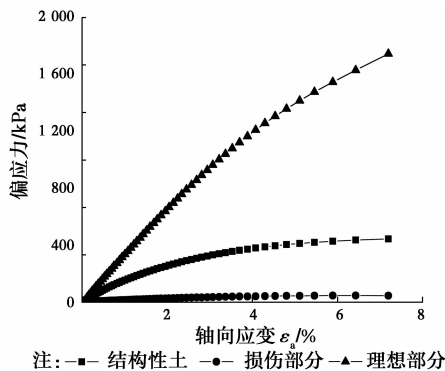


图 15 结构性土及其两组份应力曲线

Fig. 15 Stress curves of structured soils and two parts

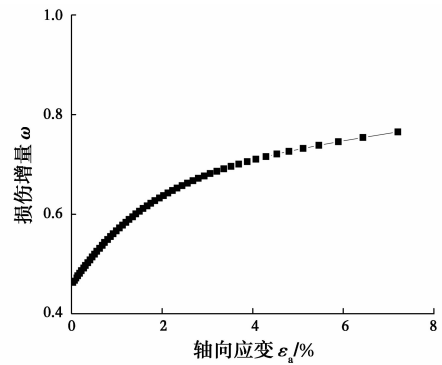


图 16 损伤演化曲线

Fig. 16 Development curves of damage variable

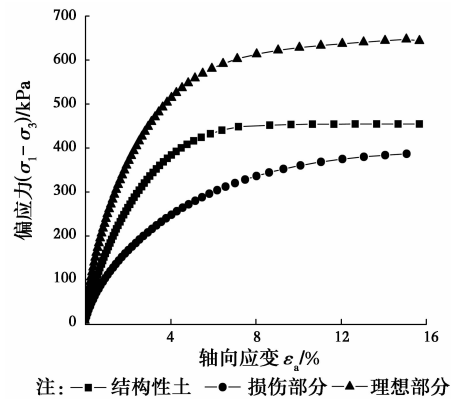


图 17 结构性土及其两组份应变关系

Fig. 17 the stress-strain relation of damage soils, ideal soils and natural soils

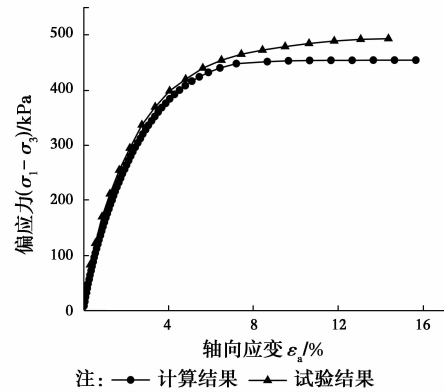


图 18 结构性土应力-应变关系

Fig. 18 Stress-strain curves of structured soils

从图 14~18 可以看出:

1)在剪切过程中,无论是应力还是应变,结构性土与理想部分、损伤部分都有较大的差别,随应变的增大,结构性土的应力-应变关系有向损伤部分靠拢的趋势。

2)固结过程中由于体应变的作用,已经出现了损伤,在剪切开始,损伤变量已经达到 0.46。因而在剪切开始,应力-应变就介于损伤部分和理想部分

之间,随着损伤程度的增加,逐渐与损伤部分接近。

3)文中给出的损伤演化方程能够较好的反映结构性土的应力-应变关系。

6 结论

1)剪应变与体应变均会引起土体结构单元的破损,虽然,引起损伤的机理不同,但结果都是引起结构单元的破损,因而,可以将其视为相容概率事件。在此基础上,建立了一般应变状态下土体损伤演化规律的基本表达式。

2)试验结果表明体应变与剪应变引起的土体结构损伤演化规律并不相同。在体应变作用下,损伤变量与体应变关系曲线可以分为3个阶段:平缓阶段、陡增阶段、趋于稳定阶段;在剪应变作用下,损伤变量与剪应变关系曲线初期较为平缓,随应变增加,损伤变量逐渐增大直至材料破坏。

3)理论计算揭示了结构性土在剪切过程中,无论是应力还是应变,结构性土与理想部分、损伤部分都有较大的差别。随应变的增大,结构性土的应力应变关系有向损伤部分靠拢的趋势;在固结过程中,由于体应变的作用,已经出现了损伤,因而,在剪切开始,会有应力-应变已经介于损伤部分和理想部分之间的现象出现。随着损伤程度的增加,逐渐与损伤部分接近。通过试验与理论计算对比,表明文中给出的损伤演化方程能够较好的反映结构性土的应力-应变关系。

参考文献:

[1] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 467-488.

[2] BURLAND J B, FENG. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329-378.

[3] 李忠友,纪秋林,邓勇,等. 岩土材料损伤演化规律研究 [J]. *后勤过程学院学报*, 2009, 25(1): 11-16.

LI Z Y, JI Q L, DENG Y, et al. Research on the damage law of geomaterial [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2009, 25 (1): 11-16. (in Chinese)

[4] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型 [J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(3): 21-28.

SHEN Z J. An elasto-plastic damage model for cemented clays [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(3): 21-28. (in Chinese)

[5] 程明书,汪时机,张雅倩,等. 膨胀土损伤变量不同表征方法评价的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 2892-2898.

CHENG M S, WANG S J, ZHANG Y Q, et al. Experimental study of assessment of different characterization methods of expansive soil damage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 2892-2898. (in Chinese)

[6] 胡华,蔡亮,梁健业,等. 花岗岩残积土冲击损伤与损伤演化特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(Sup1): 25-30.

HU H, CAI L, LIANG J Y, et al. Experimental research on impact damage and damage evolution characteristics of granitic saprolite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup1): 25-30. (in Chinese)

[7] 庞旭卿,胡再强,李宏儒,等. 黄土剪切损伤演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究 [J]. *水利学报*, 2016, 47(2): 180-188.

PANG X Q, HU Z Q, LI H R, et al. Structure damage evolution and mechanical properties of loess by CT-triaxial test [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(2): 180-188. (in Chinese)

[8] GUO Y H, WU N S, XU Q, et al. Disturbance damage evaluation of mechanical parameters of soft soil sample [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2015, 17(5): 628-633.

[9] 曹文贵,方祖烈. 岩石损伤软化统计本构模型之研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 628-633.

CAO W G, FANG Z L. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 628-633. (in Chinese)

[10] 杨明辉,孙龙,赵明华,等. 基于统计损伤理论的非饱和土简易本构模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 43-48.

YANG M H, SUN L, ZHAO M H, et al. A simplified unsaturated soil constitutive model based on statistical damage theory [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 43-48. (in Chinese)

[11] 张向东,李庆文. 考虑 Weibull 分布的饱和风积土统计损伤硬化模型研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(6): 726-732.

ZHANG X D, LI Q W. Study on statistical damage and hardening model of saturated aeolian soil considering effect of Weibull distribution [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(6): 726-732. (in Chinese)

[12] LEMAITRE J, DESMORAT R, SAUZAY M.

- Anisotropic damage law of evolution [J]. European Journal of Mechanics A-Solids, 2000, 19: 187-208.
- [13] SHAO J F, JIA Y, KONDO D, et al. A coupled elastoplastic damage model for semi-brittle materials and extension to unsaturated conditions[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38: 218-232.
- [14] 周家伍, 刘元雪, 李忠友. 基于能量方法的结构性土体损伤演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1689-1695.
ZHOU J W, LIU Y X, LI Z Y. Damage evolution of structured soil based on energy method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1689-1695. (in Chinese)
- [15] 刘元雪, 周家伍, 李忠友. 土体损伤复合理论的几个基本问题[J]. 地下空间与工程学报, 2010 (Sup2): 1683-1686.
LIU Y X, ZHOU J W, LI Z Y. Several basic problems for complex theory of soils damage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010 (Sup2): 1683-1686. (in Chinese)
- [16] ZHOU J T, LIU Y X, LI Z Y. The constitutive model for isotropic damage of geomaterial [J]. Key Engineering Materials, 2007, 348/349: 513-516.

(编辑 王秀玲)

更正启事

《土木建筑与环境工程》2017 年第 4 期第 107 页《空间高度对球面网壳结构内爆炸响应的影响》一文的第一作者“付诗琪”应为“付诗琦”。

特此更正。

《土木建筑与环境工程》编辑部