

文章编号: 1001-4888(2010)03-0279-07

循环荷载作用下饱和粘土中的 有效应力原理的实验研究^{*}

李 颀¹, 李 忠 刚², 周 扬 锐³, 黄 建 川¹

(1. 天津大学 建工学院, 天津 300072; 2. 北京中船重工船舶设计研究中心, 北京 100086; 3. 中海油服, 天津 300021)

摘要: 有效应力原理是土力学中的经典理论, 在土动力学中, 有效应力原理的应用基本上是沿用土静力学中的方法, 即通过建立合理的孔压模式, 利用有效应力原理对土体的破坏进行分析。但是通过动三轴试验发现, 在动三轴不固结不排水试验中, 整个试验过程中孔压不发生变化, 土体强度却发生了明显的衰减。这种现象利用有效应力原理无法得到合理的解释。针对这种现象, 本文建议引入损伤变量 D , 作为反映土体结构变化的参数, 对有效应力原理进行修正。经过修正后的有效应力原理反映了在循环荷载作用下, 循环扰动造成的结构损伤对有效应力的影响, 可以合理地解释动力作用下土体中孔压和有效应力相互转换, 以及土体强度衰减的原因。

关键词: 饱和粘土; 循环荷载; 动三轴试验; 损伤变量; 有效应力原理

中图分类号: TU435

文献标识码: A

0 引言

有效应力原理是太沙基首次提出的, 其主要内容可归纳为两点:

第一, 饱和土体内任意平面上受到的总应力可分为有效应力和孔隙水应力两部分, 其间关系总是满足^[1]:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

第二, 土的变形和强度的变化只取决于有效应力的变化。这意味着引起土的体积压缩和抗剪强度发生变化的原因, 并不是作用在土体上的总应力, 而是总应力与孔隙水压力之间的差值, 有效应力。

有效应力原理在土力学中占据重要的地位, 有效应力原理的提出代表着土力学作为一门独立学科的形成。而他的正确性也在长期的工程实践中被一次次验证。目前对于有效应力原理问题的探讨主要集中于非饱和土体^[2,3]。但是, 需要指出的是, 这些验证大都是建立在土静力学的基础之上。在土动力学中, 有效应力原理的应用基本上是沿用土静力学中的方法^[4]。所采用的一般方法是, 研究土体在循环荷载作用下产生的孔隙水压力的变化, 努力建立正确反映土体中孔压变化的模式, 然后利用有效应力原理分析土体的破坏机理。但是, 在土体承受动荷载时, 土体一直处于循环荷载的扰动作用下, 在这一过程中, 土体的结构实际上一直发生着变化, 此时忽略土体结构损伤对有效应力的影响分析循环荷载作用下土体特性就存在着明显缺陷。

对于循环荷载作用下土体结构损伤所带来的问题, 在近年来已经越来越引起研究者的重视, 2000

^{*} 收稿日期: 2009-07-31; 修订日期: 2009-12-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863), 项目编号: 2006AA09A110; 留学回国启动基金资助项目

通讯作者: 李颀(1970—), 女, 副教授, 主要从事海洋土的工程性质以及海洋、港口建筑物基础设计方面的研究。E-mail: lisa@tju.edu.cn

年, M. D. Liu, J. P. Carter^[5,6]在修正的剑桥模型的基础上, 引入结构破损指数来表达结构逐渐破损的过程, 假设结构性土的硬化和结构破损都仅仅是塑性体积应变的函数, 屈服面大小变化规律不仅仅是塑性体积应变的函数, 同时也是破损指数和应力比的函数。这一模型较好地反映了土力学中的结构性土体的动力特性。2000 年, C. Shao, C. S. Desai^[7]利用扰动状态模型的思路, 提出了一个反映加卸荷变形特性的非线性模型; 2001 年, A. Gajo 等^[8]曾把边界面作为结构损伤变量的函数, 提出了一个考虑等向硬化, 运动硬化和旋转硬化的模型, 来揭示结构性土和重塑土考虑各向异性的动力变形特性。土体结构性实验和理论研究在国内起步较晚, 尤其是结构性粘土在循环荷载作用下的力学特性研究更不多见, 2003 年, 黄茂松等^[9]在边界面塑性理论基础上, 利用 Dafalias 径向映射概念引入天然粘土结构衰减内变量, 提出一个表达天然状态结构性粘土力学特性的各向同性硬化弹塑性模型。2006 年, 孙吉主等^[10]通过在边界面弹塑性模量中直接引入损伤变量, 建立了结构性软土的边界面模型。这些研究都是从土体的本构关系直接入手来探讨结构损伤对土体特性的影响。实际上, 土体结构损伤引起的强度变化首先应该反映在土体所承受的有效应力上, 将有效应力原理直接应用于土动力学当中是否合适就成为一个值得探讨的问题。本文通过静动三轴试验对这一问题进行了探讨。

1 问题的提出

1.1 三轴试验概况

问题的提出源于我们进行的静三轴不固结不排水试验(UU)以及不固结不排水循环三轴试验。试验土样取自天津塘沽的饱和原状粘土, 试验用土基本物理性质见表 1, 试验用土的颗分曲线见图 1。

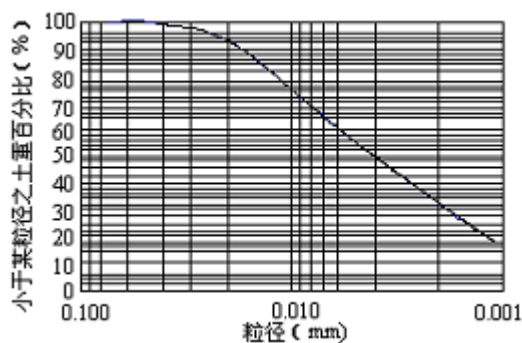


图 1 土体的颗分曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

各类三轴试验土样的直径均为 50mm, 高 100mm, 使用组合式 GDS-DCSS 型静动三轴试验机, 循环荷载采用单向等幅应力控制循环加载方式。循环荷载选用正弦波形, 本试验加载频率取 0.08Hz, 对应于南海百年一遇波浪周期 12.2s。具体的试验步骤如下: 将试样装入三轴压力室, 为保证试样的饱和度, 通无气水驱赶气泡。通过这种处理, 粘土的孔压系数 B 均可达到 98% 以上。然后施加围压, 分别进行静动三轴试验。

表 1 土的基本物理性质

Tab. 1 The physical characteristics of soil

名称	容重 γ (kN/m ³)	含水量 ω (%)	液限 ω_L (%)	塑限 ω_p (%)	塑性指数 I_p	饱和度 S_r (%)
粘土	17	62	45	24	21	>98%

1.2 不固结不排水试验中观察到的现象

进行了多组不固结不排水循环试验, 采用 $\sigma_{3c} = 30\text{kPa}$ 和 $\sigma_{3c} = 60\text{kPa}$ 两种围压, 分别采用静应力比(上覆压力与土体静强度之比, 用来模拟土体上部受荷状况)为 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 循环应力与静应力之比为 0.9。在所有不固结不排水动三轴试验中, 土体当中的孔隙水压力并不随着振次的增加而发生累积, 在整个试验过程中, 孔压基本在围压的水平上保持不变, 见图 2。

虽然在整个振动过程中,土体中的孔压不发生变化,但他们的滞回圈均产生了不同程度的倾斜,见图3,说明土体强度发生了衰减。这种现象利用有效应力原理同样不能很好地解释。根据有效应力原理,土的变形和强度的变化只取决于有效应力的变化,当孔压不发生变化,则有效应力不发生变化,则土体的强度应该保持不变,但根据饱和粘土的不固结不排水动三轴试验可以发现,土体强度出现了明显的衰减。

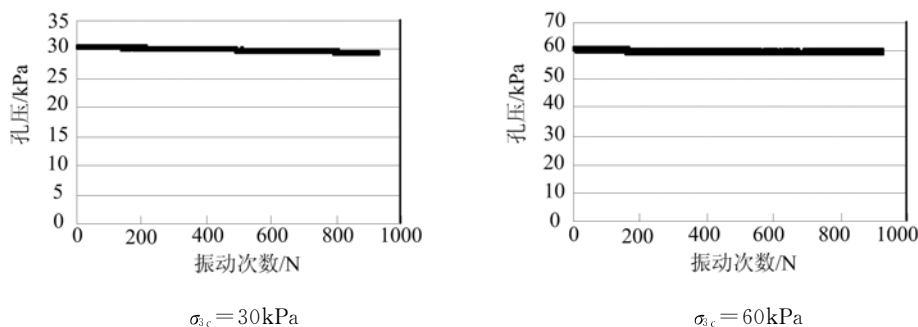


图2 不固结不排水循环三轴试验中孔压的变化曲线

Fig. 2 Pore water pressure curves of unconsolidated undrained cyclic triaxial tests

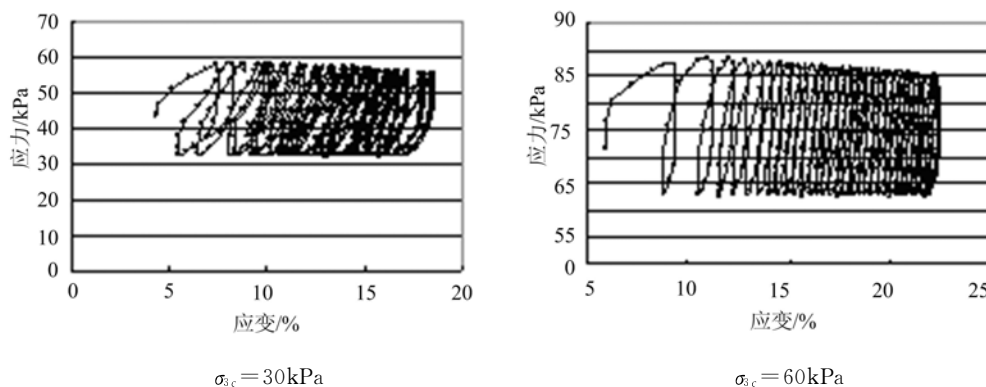


图3 不固结不排水循环三轴试验中的滞回圈

Fig. 3 Hysteresis loops of unconsolidated undrained cyclic triaxial tests

2 问题产生的原因分析

根据试验中发生的现象可以看出,将有效应力原理直接应用于循环荷载作用下的计算分析是存在问题的。分析上述情况产生的原因,认为主要的原因来自于有效应力的定义方法。我们知道,有效应力定义为:

$$\sigma = \frac{\sum P_{sv}}{A} + u \frac{A_w}{A} \quad (2)$$

其中,右端的一项 $\frac{\sum P_{sv}}{A}$ 为全部竖向粒间作用力之和除以横断面积 A ,他代表全面积 A 上的平均竖向粒间应力,并定义为有效应力。右端第二项 $\frac{A_w}{A} \approx 1$, 因此(2)式简化为:

$$\sigma = \sigma' + u$$

这就是土力学中的有效应力原理。从定义中可见,有效应力为平均竖向粒间应力,这相当于将土体视为一材料连续体,在整个计算过程中不考虑孔隙的存在对材料性质的影响。在静力作用下这种假设可以反映土体的受力状态。但在动力作用下,土体相当于一种充满裂隙的材料,在动力作用下由于裂隙的存在会发生疲劳损伤,在土力学中,我们可将这种损伤视为土体结构的改变。此时忽略这些裂隙的影响,即不考虑动力荷载对土体结构的影响,无法反映土体真实的损伤状态,也就无法反映这种损伤对于有效应力或者说是土体强度的影响。

土体所承受的循环荷载实质上就是对土体一定程度的扰动,在这种循环扰动作用下,土体的结构一直在发生着一定程度的变化。有效应力原理可以表达有效应力和孔隙水应力之间的转换关系,但却无法反映土体结构变化对有效应力的影响。土体结构变化对土体强度或者说是有效应力的影响在土静力学中是通过灵敏度的概念体现的。对于承受循环荷载作用下的土体,在循环荷载这一特殊扰动荷载作用下,土体的结构在随时发生着变化,这种变化对土体有效应力的影响不能简单忽略,应该并且能够在有效应力原理中得到体现。

3 有效应力原理的修正

本文建议借鉴损伤力学中的方法,引入反映土体疲劳的损伤变量 D 。即在循环荷载作用下认为土体是一种存在内在损伤的连续体,采用损伤力学中的相应方法进行研究。损伤变量的经典定义为:

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (3)$$

式中, A 为产生损伤后的瞬时表观面积; A_D 为横截面上出现孔隙的总面积。按此经典定义的损伤变量为:一个代表性体积元素内损伤的等效面积与该截面总面积的比值。在损伤力学中,疲劳的损伤变量 $D=0$ 为无损伤材料; $D=1$ 为发生损伤破坏的材料; $0 < D < 1$ 为发生一定损伤的材料^[11]。

根据上述定义, Rabotnov(1968)给出^[11]:

$$\sigma' = \frac{P}{A - A_D} \quad (4)$$

式中, σ' 为有效应力; P 为荷载。将损伤变量(3)引入(4)中,则可得到引入损伤变量的有效应力表达式:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (5)$$

承受静力作用的土体,由于总孔隙面积很小(即 $\frac{A_w}{A} \approx 1$),可近似认为 $D=0$ 。在循环荷载作用下,材料会发生疲劳损伤,此时可根据疲劳力学中的定义对此进行分析。将这一定义引入到土体有效应力原理当中,将考虑土体结构疲劳损伤影响的有效应力定义为:

$$\sigma'^* = \frac{\sigma'}{1 - D} \quad (6)$$

其中 σ' 为根据经典有效应力原理定义的有效应力, σ'^* 为土体考虑土体结构损伤影响的有效应力。引入损伤因子后,土体的有效应力原理转变为:

$$\sigma = \frac{\sigma'}{1 - D} + u \quad (7)$$

当 $D=0$ 时,土体处于无损伤状态,即不考虑土体的结构损伤,土体的有效应力原理保持不变,土体所能承受的有效应力与静力状态相同;当 $0 < D < 1$ 时,土体发生一定的损伤,在达到相同的孔压累积时,通常意义上的有效应力 σ' 将发生衰减;当 $D=1$ 时,(7)式保持成立,则存在 $\sigma' = 0$,说明土体发生了破坏。采用这种方法可以较好地揭示动力作用下土体中孔压和有效应力相互转换关系,以及土体强度衰减的原因。

4 有效应力原理修正的验证

我们利用不固结不排水循环三轴试验的结果对上述修正进行验证。由于不固结不排水三轴试验在整个试验过程中不容许排水,所以土体的体积保持不变,土体孔压在试验过程中也没有变化,但在随着振次的增加,土体的强度却发生了明显的衰减,可以认为此时土体强度的衰减是因为材料的损伤(或称为土体结构的改变)所引起的,而与孔压无关。

首先根据试验结果,得到土体强度衰减的情况。根据不固结不排水静三轴试验得到土体的静强度为 16kPa。根据不固结不排水动三轴试验,得到围压 $\sigma_{3c} = 30\text{kPa}$ 和 60kPa 时,破坏标准为 10% 时的土

的动强度曲线,见图4。

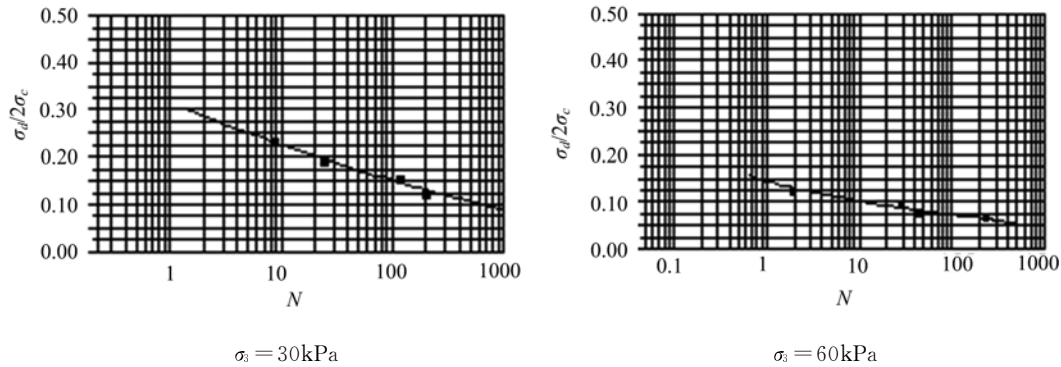


图4 土的动强度曲线

Fig. 4 The dynamic shear strength curves

对于某一固定的 σ_{3c} , 根据上述土的动强度曲线可以得到破坏条件下的主应力 $\sigma_{1d} = \sigma_{1c} + \sigma_d$, $\sigma_{3d} = \sigma_{3c}$, 可以作出一个摩尔圆, 利用这种方法可得到不同振次下土的不固结不排水抗剪强度, 进而得到土的不固结不排水强度 S_u 随振次的变化, 见图5。

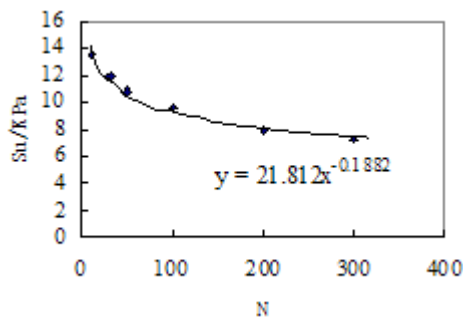


图5 土体动不固结不排水强度随振次的变化

Fig. 5 The relationship between dynamic UU shear strength and vibration number

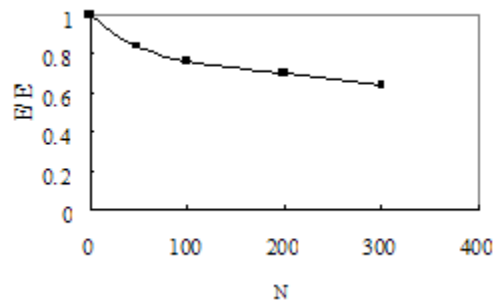


图6 弹性模量随振次的衰减

Fig. 6 The decrease of elastic module with vibration number

对不固结不排水强度随振次的变化进行拟合, 可以得到不固结不排水强度和振次的关系如下式:

$$S_u = AN^B \quad (8)$$

式中, N 为振次; A, B 为待定系数。从图中可以看出, 土体的不排水强度随振次的增加产生了明显的衰减。

然后, 确定土体的损伤变量 D 。 D 的量测方法采用损伤力学中间接测量的方法。 Lemaitre 等人根据材料弹性模量的衰减来确定 D 的数值。

$$D = 1 - \frac{E'}{E} \quad (9)$$

式中, E' 为受损材料的弹性模量, E 为未受损材料的弹性模量。

同样, 利用不固结不排水动三轴试验的结果, 可以得到土体的弹性模量随振次(300次)的衰减情况, 见图6。 根据弹性模量的衰减可以计算得到损伤因子 D 的范围为 $0 \sim 0.36$ 。

根据图5和图6, 采用修正后的有效应力原理, 对比分析了强度衰减和有效应力衰减之间的关系, 见表2。

表 2 有效应力和强度随振次的衰减

Tab. 2 The decrease of effective stress and strength with vibration number

振次	有效应力的衰减	土体强度的衰减
0	1	1
50	0.83	0.68
100	0.76	0.6
200	0.70	0.5
300	0.64	0.48

从表中可以看出,有效应力衰减和强度衰减之间非常接近,误差范围最大不超过 20%。

5 结论

在循环荷载作用下,土体的结构发生了一定程度的改变。有效应力可以反映有效应力和孔隙水应力之间的转换关系,但却无法反映土体结构对有效应力的影响,本文根据试验结果,对有效应力原理在循环荷载作用下的应用问题进行了初步探讨,采用损伤变量法对有效应力原理进行了修正,根据上述分析可以得到如下结论:

(1) 在动三轴不固结不排水试验中,在整个试验过程中孔压不发生变化,但土体强度发生了明显衰减;

(2) 在土静力学中,土体扰动对土体强度的影响是通过灵敏度的概念来体现的。在循环荷载作用下,循环扰动的存在使得土体结构一直在发生着变化,此时忽略这种结构变化对有效应力的影响存在缺陷,无法合理解释试验中存在的各种现象。

(3) 有效应力原理可以反映有效应力和孔隙水应力之间的相互转换关系,但却无法反映土体结构损伤对有效应力的影响。根据土体在循环荷载下的受力特点,建议引入损伤变量 D ,作为反映土体结构变化的参数,对有效应力原理进行修正。经过修正后的有效应力原理,可以合理的解释循环荷载作用下土体中孔压和有效应力相互转换,以及土体强度衰减的原因。

参考文献:

- [1] 陈仲颐,周景星. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1992(Chen Zhongyi, Zhou Jingxing. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1992 (in Chinese))
- [2] 赵成钢,蔡国庆. 非饱和土广义有效应力原理[J]. 岩土力学,2009,30(11): 3232—3236(Zhao Chenggang, Cai Guoqing. Principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3232—3236 (in Chinese))
- [3] 汤连生,颜波,张鹏程,张庆华. 非饱和土中有效应力及有关概念的解说与辨析[J]. 岩土工程学报,2006,28(2): 216—220(Tang Liansheng, Yan Bo, Zhang Pengcheng, Zhang Qinghua. Definition and exploration for effective stress and related conception in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 216—220 (in Chinese))
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988(Xie Dingyi. Dynamic Soil Mechanics[M]. Xian Jiaotong University Press, 1988 (in Chinese))
- [5] Liu M D, Carter J P. Modeling the destructuring of soils during virgin compression[J]. Geotechnique, 2000, 50 (4): 479—483.
- [6] Liu M D, Carter J P. On the volumetric deformation of reconstituted soils[J]. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech, 2000, 24(2): 101—133.
- [7] Shao C, Desai C S. Implementation of DSC model and application for analysis of field pile tests under cyclic loading [J]. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech, 2000, 24(2): 601—624.
- [8] Gajo A, Wood D M. A new approach to an anisotropic bounding surface plasticity and simulations of natural and reconstituted clay behavior[J]. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech, 2001, 25(2): 207—241.

- [9] 黄茂松, 钟辉虹, 李永盛. 天然状态结构性软土的边界面弹塑性模型[J]. 水利学报, 2003, 24(3): 317—321 (Huang Maosong, Zhong Huihong, Li Yongsheng. Elasto-plastic boundary surface model for natural soft clay with structural damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 24(3): 317—321 (in Chinese))
- [10] 孙吉主, 王勇, 孔令伟. 湛江海域结构性软土的边界面损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 99—102 (Sun Jizhu, Wang Yong, Long Lingwei. Study on bounding surface damage model for structural soft soil in Zhanjiang sea area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 99—102 (in Chinese))
- [11] 勒迈特 J. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996 (Lemaitre J. Damage Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese))

Experimental Study of the Effective Stress Principle in Saturated Clay under Cyclic Loading

LI Sa¹, LI Zhong-gang², ZHOU Yang-rui², HUANG Jian-chuan¹

(1. The Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. China Ship Design & Research Center Co., LTD, Beijing 100086, China

3. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

Abstract: The principle of effective stress is the classical theory in soil mechanics. In soil dynamics, the effective stress theory is also used without any modification. But according to the results of unconsolidated undrained cyclic triaxial tests, it is found that the soil strength decreases obviously along with the cyclic number while the pore water pressure does not vary during the tests. Effective stress principle can't explain this phenomenon clearly. Aim at this problem, a damage factor D is introduced in this paper to express the influence of soil structure change on the soil effective stress. Based on this factor, the effective stress principle is modified. The modified effective stress principle can express not only the relationship between effective stress and pore water pressure but also the damage influence of soil structure on the effective stress, and can also explain why soil strength decreases under cyclic loading.

Keywords: saturated clay; cyclic loading; dynamic triaxial test; damage factor; effective stress theory