

DOI: 10.11779/CJGE202006023

黄土的动扭剪震陷特性试验研究

邵 帅¹, 邵生俊^{*1, 2}, 陈 攀¹, 张 博¹

(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: 原状结构性黄土具有显著的动力易损性。地震作用下黄土的骨架结构遭到破坏, 使得土骨架结构的颗粒重新排列而变得致密, 土的架空孔隙结构塌陷, 孔隙体积减小, 宏观上表现为黄土产生震陷变形。通过西安原状黄土在不同含水率、不同固结围压条件下的动扭剪试验, 表明不同含水率筒状黄土试样的轴向变形非线性累积增长, 径向和环向变形近似等于零。测试分析了黄土在动扭剪过程中孔隙结构塌陷的累积体应变表征震陷性的震陷系数, 以及动剪应力幅值、振次、含水率及固结围压对黄土震陷系数的影响。揭示黄土的震陷系数随动剪应力幅值、循环振次、固结围压和含水率的增大而增加, 建立了黄土震陷系数与动剪应力、振次、固结围压和含水率之间的关系式, 提出了黄土震陷变形预测的一种途径。

关键词: 原状黄土; 动扭剪试验; 动剪应力幅值; 振次; 震陷系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)06-1167-07

作者简介: 邵 帅(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与土动力学研究。E-mail: 315602024@qq.com。

Experimental study on seismic subsidence characteristics of structural loess under cyclic torsional shear

SHAO Shuai¹, SHAO Sheng-jun^{1, 2}, CHEN Pan¹, ZHANG Bo¹

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

Abstract: The undisturbed loess has significant structural and dynamic vulnerability. Under the earthquake, the dynamic shearing action destroys the original structure of loess. The pore volume of loess is reduced and the soil particles are rearranged and compacted, and the macroscopic representation is the occurrence of loess response, which is called seismic deformation of loess. In this study, the dynamic torsional shear tests on Xi'an undisturbed loess are conducted under different water contents and confining pressures. The axial cumulative deformation of undisturbed loess under different experimental conditions is analyzed. The influence of dynamic shear stress amplitude, vibration frequency, water content and consolidation confining pressure on the seismic subsidence deformation of loess is discussed. In addition, the empirical formula for calculating the seismic subsidence deformation of loess is established on the basis of influencing factors. The results show that the seismic subsidence deformation of loess increases gradually with the action of dynamic shear stress, and the growth rate tends to decline. The water content and consolidation confining pressure are the important factors on the seismic subsidence deformation characteristics of undisturbed loess. Under the same dynamic shear stress, the seismic subsidence deformation increases with the increase of water content and decreases with the increase of consolidated confining pressure. And the empirical formula for the seismic subsidence deformation of loess can be used to calculate the seismic deformation of loess foundation.

Key words: undisturbed loess; dynamic torsional shear test; dynamic shear stress; vibration time; seismic subsidence coefficient

0 引言

中国黄土是干旱与半干旱地区的第四纪沉积物, 主要连续分布在中国西部高烈度地震区的黄土高原^[1-4]。特殊的物质来源、沉降环境和地质作用使得黄土具有显著的结构性及震动作用易损性。强震作用下, 当静动应力大于黄土的结构强度时, 黄土的大孔隙、弱胶

结结构单元首先遭受破坏, 破坏土骨架土粒落入大孔隙之中, 土粒逐渐重新排列而变得致密, 地表产生不均匀沉降, 称之为黄土地震陷^[5-6]。据史料记载, 1556

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572245)

收稿日期: 2019-08-24

*通信作者: (E-mail: sjshao@xaut.edu.cn)

年陕西华县 8.25 级地震、1718 年甘肃通渭 7.5 级地震、1739 年宁夏平罗—银川 8.0 级地震和 1920 年宁夏海原 8.5 级地震都存在黄土震陷场地遗迹。近年来, 1995 年甘肃永登 5.8 级地震和 2013 年岷县—漳县 6.6 级地震也发现了实际黄土震陷场地例证^[5, 7]。

为了揭示黄土的震陷特性, 以便满足实际黄土工程的抗震减灾, 开展黄土震陷特性研究刻不容缓。目前, 室内土的动力试验仪器主要包括动三轴仪、动单剪仪和动扭剪仪。动三轴仪是通过模拟土单元体 45° 斜面上的往复剪切作用来研究土动力剪切特性的, 与实际场地水平向剪切波向上传递的土单元应力条件存在差异^[8]。动单剪仪是通过对试样单独或同时施加竖向动应力和水平动应力来研究土动力特性的。它能够比动三轴仪系统更好的模拟地震运动的动剪应力和动剪应变的变化特性, 但试样侧壁限制变形且受到摩擦剪切作用, 动变形不均匀, 仅能近似模拟 K_0 条件下试样的应力状态^[4]。动扭剪仪是通过对空心圆筒试样同时施加静扭转剪应力、竖向轴应力、内腔流体压力和外壁压力室流体压力, 以及单独或同时施加动扭剪应力、竖向轴应力等测试土动力特性的。不仅模拟了土的三向主应力条件, 而且模拟了地震作用下土单元的主应力轴旋转, 以及复杂应力路径^[4, 9-14]。本文采用空心圆柱扭剪试验仪对西安原状黄土进行了不同含水率, 不同固结围压的动扭剪震陷特性试验研究。

1 土样基本物理性质及试验方法

1.1 土样的物理性质指标与制备

试验选用西安地铁 5 号线高阶地某车站施工现 场, 取土深度 5~8 m, 属于 Q₃ 黄土。经室内常规试验测定, 其基本物理性质: 天然密度为 1.68 g/cm³, 含水率为 21.0%, 干密度为 1.39 g/cm³, 液限为 34.2%, 塑限为 18.6%, 塑性指数为 15.6%。试样制备成空心圆柱体, 内、外直径分别为 6, 10 cm, 高为 15 cm。空心圆柱体试样由专门配套的切削、钻孔、削铣工具, 先切削成直径 10 cm、高 15 cm 的圆柱体, 再在圆柱体中心钻孔, 最后削铣钻孔达到内径 6 cm 的圆筒体而制成。测试每个试样的含水率和干密度, 然后, 将它们分别用保鲜袋包裹, 放入密闭保湿缸内, 使试样内部水分达到均匀平衡状态, 以便用于试验。

1.2 试样的应力状态

空心圆柱扭剪仪的试验原理是通过对圆筒试样施加轴向荷载 W , 水平内扭矩 T 以及内腔压力 p_i 、外腔压力 p_o 。由扭矩 T 作用施加扭剪应力 $\sigma_{z\theta}$; 由内、外腔压力作用施加径向应力 σ_r 和环向应力 σ_θ ; 由轴力及内、外腔压力作用施加轴向应力 σ_z 。然后, 单独或

同时施加动扭剪应力和轴向应力进行土试样的动力响应测试。试样的内、外腔压力分别由内、外腔气压转换为水压作用于乳胶膜密封试样内、外壁上而施加, 故内、外壁面上无剪应力, σ_r 为主应力, 且 $\sigma_r = \sigma_2$, 如图 1 所示。根据轴向和环向平面内的应力条件, 可计算得到大、小主应力, 以及主应力方向角^[14]。

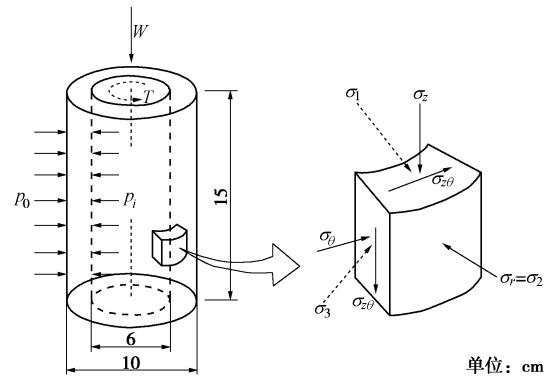


图 1 空心圆柱试样的加载和应力条件

Fig. 1 Loading and stress conditions of hollow cylinder specimen

假定试样为弹塑性材料, 给出轴向正应力 σ_z 、径向正应力 σ_r 、环向正应力 σ_θ 和扭剪应力的平均值 $\sigma_{z\theta}$:

$$\sigma_z = (W + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) - A_r p_0) / A_s , \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} , \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} , \quad (3)$$

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\} , \quad (4)$$

式中, A_r 为试样传力轴的截面面积, A_s 为试样截面面积。 r 为传力轴半径, r_i , r_o 分别为试样内、外半径。

圆筒试样的变形包括轴向变形, 内、外筒径向变形, 以及扭转变形。对应的应变分别为轴向应变 ε_z 、径向应变均值 $\bar{\varepsilon}_r$ 、环向应变均值 $\bar{\varepsilon}_\theta$ 和剪应变 ε_θ :

$$\varepsilon_z = \Delta H / H_0 , \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_r = -(u_o - u_i) / (r_o - r_i) , \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_\theta = -(u_o - u_i) / (r_o - r_i) , \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_{z\theta} = (2\Delta\theta(r_o^3 - r_i^3)) / (3H(r_o^2 - r_i^2)) , \quad (8)$$

式中, ΔH 为轴向变形, H_0 为试样轴向固结后高度, u_o 为圆筒试样外壁变形, u_i 为圆筒试样内壁变形, r_o 为圆筒试样外壁半径, r_i 为圆筒试样内壁半径, $\Delta\theta$ 为圆筒试样扭转转角。

1.3 动力试验参数及方法

(1) 固结

本次试验通过现场探井采取原状黄土制备圆筒试样, 通过风干-保湿、滴水-保湿在保湿缸内由土的水

膜转移平衡方法控制含水率分别为 12%, 18% 和 24%。将配置好含水率的圆筒试样由内腔、外壁乳胶膜包裹, 密封安装在压力室底座、顶盖中间; 然后, 沿轴向和内外壁分别施加均等固结围压 (100, 200, 300 kPa), 待固结变形稳定时结束固结。

(2) 动剪切试验

试验时, 对试样施加循环扭剪应力, 循环作用直到试样破坏。在循环剪切过程中测试非饱和黄土的动应变。图 2 为循环扭剪动应力的时程曲线。

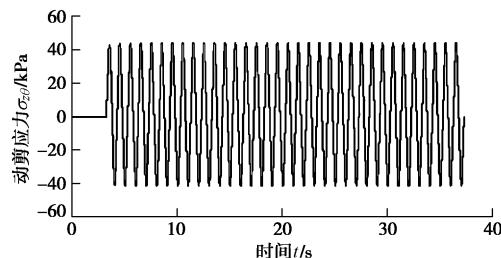


图 2 动剪应力时程曲线

Fig. 2 Time history curves of dynamic shear stress

1.4 试样的动应变

在静动荷载作用下, 黄土的应变反应包括剪应变和体应变。非饱和黄土的震陷实际上是土的体缩应变, 因此, 震陷变形特性可以通过土的体应变变化规律来研究。圆筒试样的体应变可以由轴向应变、环向应变和径向应变之和确定:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r , \quad (9)$$

式中, 圆筒试样的环向应变 ε_θ , 径向应变 ε_r 通过试样的内腔和试样外密封有机玻璃筒内水位变化来确定, 如图 3 所示。当圆筒试样径向变形时, 试样外壁径向鼓胀变形导致外腔水位上升, 可由外腔压差传感器测试外腔水位相对于压力室水位 (保持不变) 的压差; 试样内壁径向鼓胀变形导致内腔水位下降, 可由内腔压差传感器测试内腔水位相对于压力室水位的压差。图 4 为内、外腔水位变化的时程变化曲线, 表面均匀固结动扭剪作用下圆筒试样横截面无形状变化, 环向应变和径向应变近似等于零。试样的轴向应变如图 5 所示, 动扭剪作用过程中, 黄土试样的震陷可由轴向应变的累积发展反映。震陷应变又可称为震陷系数。

2 黄土的动扭剪震陷特性

2.1 循环振次对黄土震陷变形的影响

在均压固结条件下, 动扭剪应力循环作用使得土结构不断受到扰动破坏, 逐渐产生竖向应变。如图 2 所示循环扭剪动应力作用下, 黄土试样轴向应变的时程曲线如图 5 所示。不同均等固结围压下, 圆筒试样内外腔的水位均保持不变, 表明试样环向、径向应变

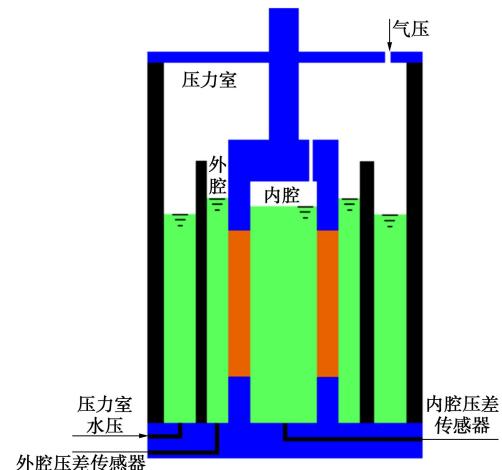


图 3 扭剪仪内外腔压差测试原理图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring pressure difference between inner and outer chambers of torsional shear instrument

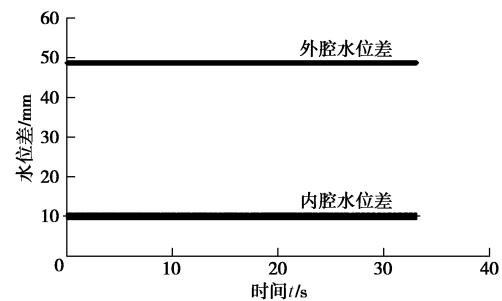


图 4 内、外腔水位变化时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of water level change in inner and outer chambers

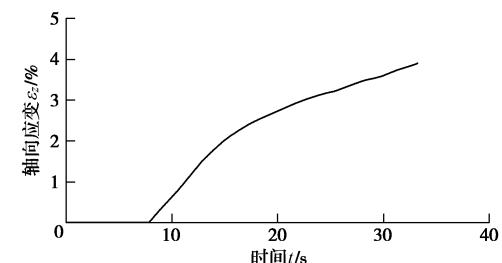


图 5 轴向应变时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of dynamic shear stress and axial strain 均等于零。由轴向应变可以确定震陷系数, 依据轴向应变时程曲线, 可分别得到循环震次 N 为 10 次、20 次和 30 次的震陷系数随动剪应力的变化曲线, 如图 6 所示。图 6 表明了固结围压分别为 100, 200, 300 kPa 作用下黄土的震陷变形规律。

可以看出, 在一定固结围压和振次条件下, 不同含水率黄土的轴向累积应变随着动剪应力增大而增加, 即黄土的震陷系数随着动剪应力增大而增大。在较小动剪应力作用下, 黄土的震陷变形较明显, 表明黄土的弱结构单元易遭到破坏; 此后, 随着动剪应力的增大, 黄土的结构遭到动剪切作用的破损越来越严

重, 黄土的震陷变形逐渐增大。比较不同固结围压条件下循环动剪应力作用 10 次、20 次和 30 次的震陷曲线, 在一定动剪应力条件下, 黄土的震陷变形随振次的增大而增大。

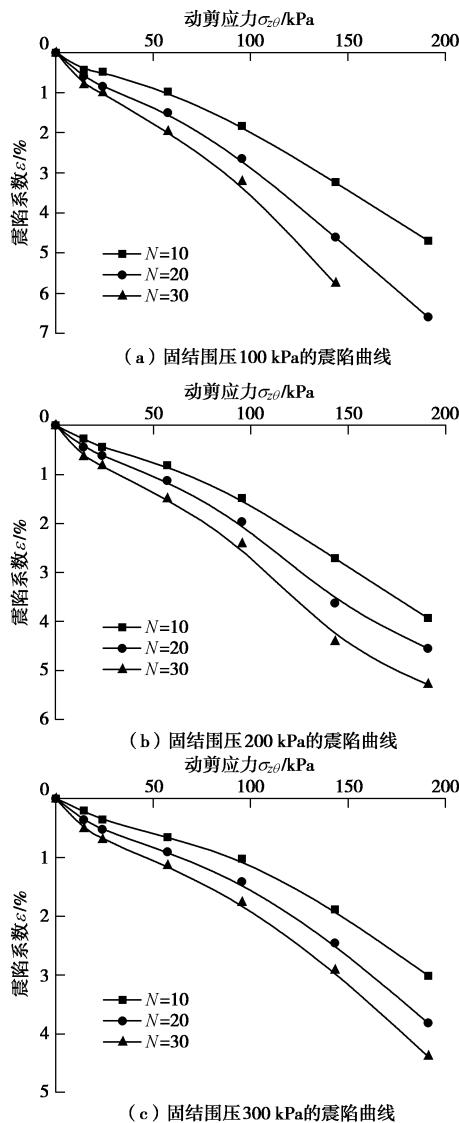


图 6 含水率 12% 黄土的震陷曲线

Fig. 6 Seismic curves of loess under different vibration times
(water content of 12%)

2.2 含水率对黄土震陷变形的影响

在黄土含水率分别为 12%, 18% 和 24% 条件下, 分别进行了固结围压为 100, 200, 300 kPa, 不同动剪应力幅值的循环动扭剪振次 10 次的试验, 测试分析了不同含水率黄土的震陷系数随动剪应力幅值的变化规律, 如图 7 所示。比较同一固结围压条件下, 不同含水率黄土的震陷系数随动剪应力的变化关系, 可以得到以下认识:

(1) 黄土的震陷变形受含水率变化的影响较大。在相同固结围压和动剪应力条件下, 黄土的含水率越大, 其震陷系数越大。这说明黄土具有大空隙架空结

构、高孔隙比和裂隙构造, 易受不同含水率水膜楔入作用, 不同含水率黄土的结构性不同, 承受动剪应力的抗力也不同。含水率增大时, 土骨架结构中土粒之间的水膜增厚, 基质吸力减小, 土结构性降低, 土结构的抗力减小, 固结围压作用下土结构发生变化, 动剪应力作用时, 震陷变形增大。因此, 含水率变化引起土结构的骨架土粒和孔隙分布排列特征和联结特征变化, 是影响震陷变形的主要因素。

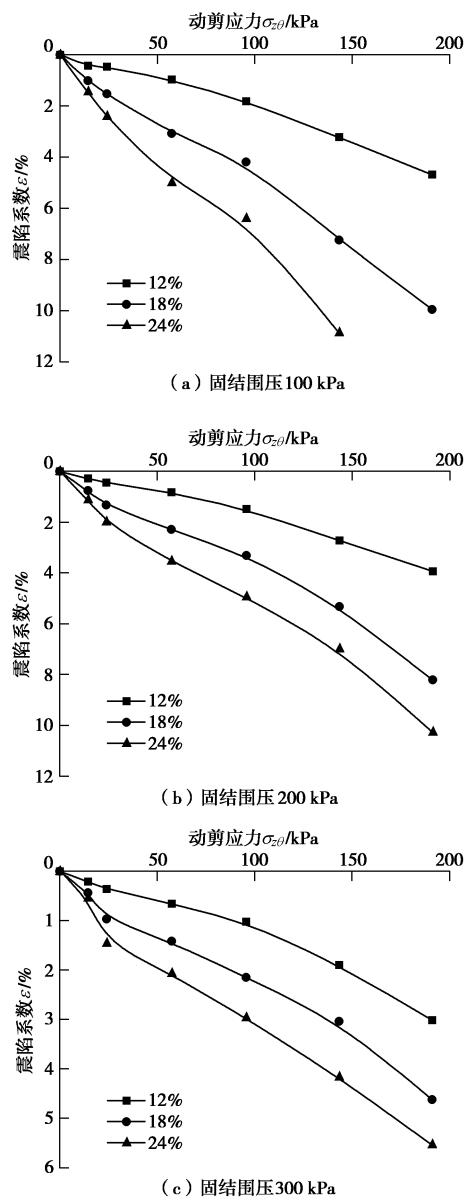


图 7 不同含水率条件下黄土的震陷曲线

Fig. 7 Curves of seismic subsidence of loess under different water contents

(2) 比较不同含水率黄土的震陷曲线, 随着含水率的增大, 黄土震陷曲线逐渐变陡, 即黄土震陷系数随动剪应力的变化速率增大。这是因为黄土的含水率增大削弱了土结构性, 使得土结构的动力屈服强度减小, 循环动剪应力作用增大, 增强了动力破坏土结构

的能力, 从而增大了黄土的震陷变形速率。

2.3 固结围压对黄土震陷变形的影响

针对含水率分别为 12%、18% 和 24% 的黄土, 在循环振次为 10 次的动剪应力作用下, 不同固结围压黄土的震陷系数随动剪应力的变化曲线如图 8 所示。可见, 在同一含水率和动剪应力条件下, 固结围压越大, 黄土的震陷系数越小。

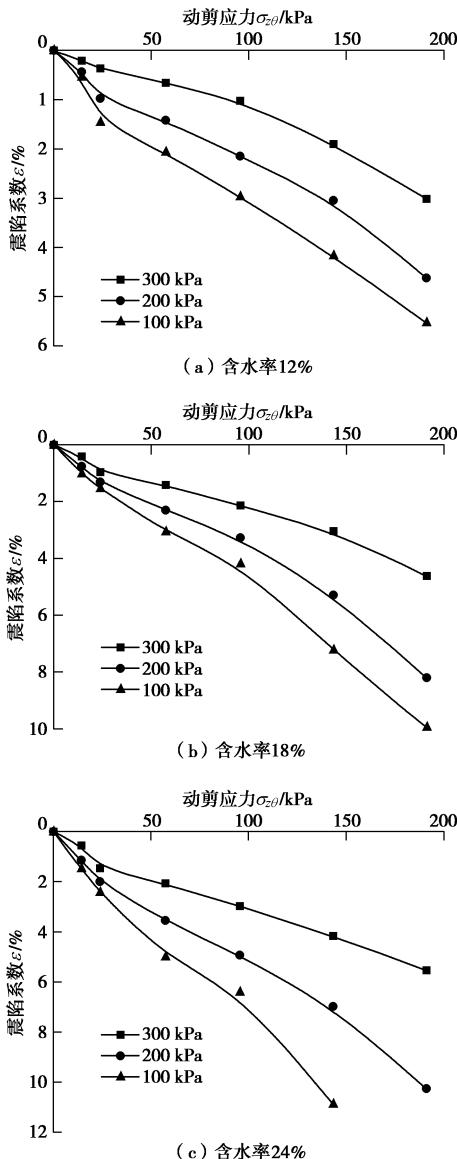


图 8 不同固结围压条件下黄土的震陷曲线

Fig. 8 Curves of seismic subsidence of loess under different confining pressures

3 黄土震陷系数的经验公式

3.1 黄土震陷系数经验公式的推导

依据不同固结围压、动剪应力幅值和循环振次作用下不同含水率黄土的震陷变形测试结果, 在相同固结围压和动剪应力幅值条件下, 可得到一定含水率黄土的震陷应变与循环振次的关系, 如图 9 (a) 所示;

在相同围压和循环振次条件下, 可得到一定含水率黄土的震陷应变与动剪应力幅值和大气压比值之间的关系, 如图 9 (b) 所示; 在相同固结围压、动剪应力幅值和循环振次条件下, 可得到黄土的震陷系数与含水率比值之间的关系, 如图 9 (c) 所示。表明黄土的震陷系数与循环振次的关系可由自然对数函数表述; 黄土的震陷系数与动剪应力幅值和大气压比值之间的关系可由二次多项式描述; 黄土的震陷系数与含水率比值之间的关系可由线性函数表述。因此, 黄土的震陷系数固结围压、动力作用强度和含水率之间的关系可为

$$\varepsilon = \left(A \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right)^2 + B \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right) \right) w \ln(N) , \quad (10)$$

式中, ε 为震陷系数, w 为含水率, w_l 为土的液限, $\sigma_{z\theta}$ 为动剪应力幅值, N 为振次, p_a 为标准大气压, A 、 B 为土性参数。不同固结围压条件下, 参数 A 近似为 5.1×10^{-3} , 参数 B 随着固结围压的增大而线性减小,

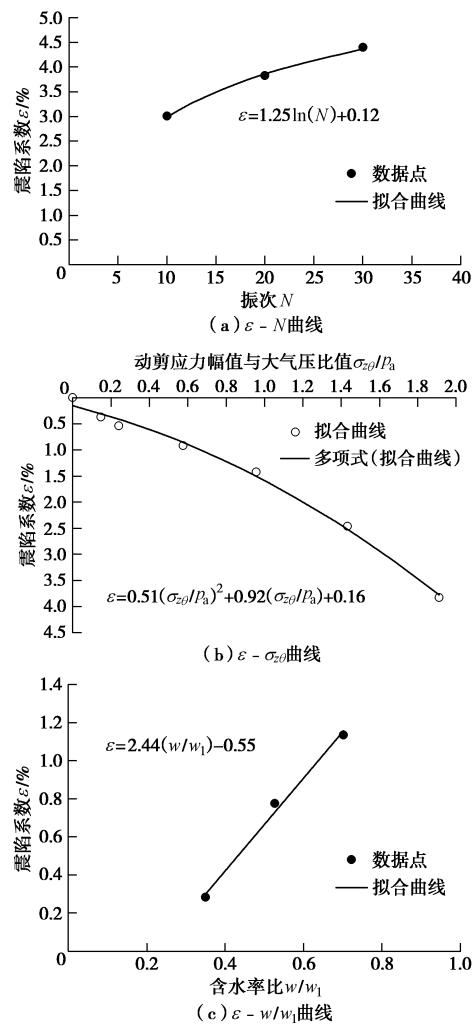


图 9 不同影响因素与黄土的震陷系数的关系

Fig. 9 Relationship between different influencing factors and seismic subsidence coefficient of loess

如图 10 所示,

$$B = a \cdot \frac{\sigma_c}{p_a} + b \quad , \quad (11)$$

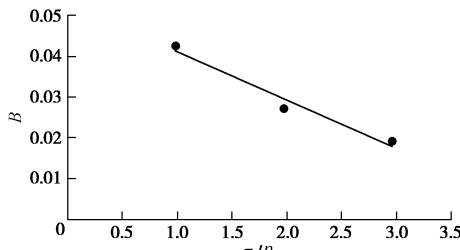


图 10 $B - \sigma_c/p_a$ 的关系曲线

Fig. 10 Relationship between B and σ_c/p_a

式中, a , b 为土性参数, 对本文试验的西安原状黄土, $a=-0.012$, $b=0.055$ 。

式(11)可改写为

$$\varepsilon = \left[A \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right)^2 + \left(a \cdot \frac{\sigma_c}{p_a} + b \right) \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right) \right] \frac{w}{w_l} \ln(N) \quad (12)$$

不同固结围压、动剪应力幅值、循环振次及含水率条件下, 西安黄土震陷系数的经验关系式为

$$\varepsilon = \left[5.1 \times 10^{-3} \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right)^2 + \left(0.055 - 0.012 \frac{\sigma_c}{p_a} \right) \left(\frac{\sigma_{z\theta}}{p_a} \right) \right] \frac{w}{w_l} \ln(N) \quad (13)$$

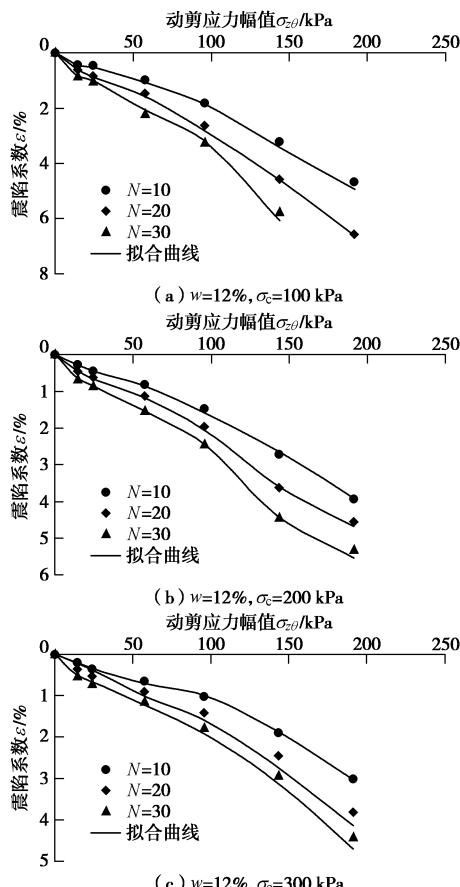


图 11 不同条件下黄土震陷试验点与拟合曲线(含水率 $w=12\%$)

Fig. 11 Test points and fitting curves under different test conditions (water content of 12%)

3.2 黄土震陷系数经验公式的验证

依据震陷系数关系式(13), 拟合分析含水率 12% 黄土循环振动次数分别为 10 次、20 次和 30 次的震陷系数随动剪应力幅值的变化规律, 比较发现二者近似一致, 表明拟合效果良好, 如图 11 所示。可见, 震陷系数经验公式(13)能够合理的评价不同固结围压、不同含水率、不同振次及不同动剪应力幅值下西安黄土的震陷变形。

4 结 论

采用动扭剪试验仪对西安黄土进行了震陷变形试验研究, 分析了含水率、固结围压、动剪应力幅值和循环振次对黄土震陷变形的影响, 得到了如下 4 点认识。

(1) 在循环扭剪作用下, 均压固结圆筒黄土试样产生明显的轴向累积变形, 且初始增长较快, 随后逐渐变缓。然而, 圆筒试样的内、外径基本保持不变。

(2) 黄土的震陷变形随含水率呈线性增大; 随动剪应力幅值呈二次多项式增大; 随振次呈自然对数增大。

(3) 固结围压越大, 黄土的压硬性和内摩擦性使其动抗剪能力越大, 动剪应力作用下黄土的震陷变形越小。即, 较大固结围压条件下, 黄土产生震陷变形量需要动力作用强度越大。

(4) 建议了西安黄土考虑含水率、固结围压、动剪应力幅值和循环振次的震陷系数经验关系式, 可用于评价西安黄土地基的震陷变形。

参考文献:

- [1] 谢定义. 黄土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Mechanics of Loess[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and Engineering of Loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science& Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 208 - 247. (LIU Dong-sheng. Loess and the Environment[M]. Beijing: China Science Press, 1985: 208 - 247. (in Chinese))
- [4] 邵生俊. 砂土的物态本构模型及其应用[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2002. (SHAO Sheng-jun. Physical State Constitutive Model of Sand and Application[M]. Xi'an: Shaanxi Science& Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 王强. 黄土的震陷特性及场地震陷分析评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (WANG Qiang. Seismic

- Subsidence Characteristic of Loess and Evaluation Methods of Seismic Subsidence At Loess Site[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [6] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min. Loess Dynamics[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [7] 张 帅. 双向循环应力作用下黄土强度特性试验研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2014. (ZHANG Shuai. Experiment Research on Strength Character of Loess Under Bi-Directional Cyclic Loding[D]. Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [8] 吴飞洁. 非饱和黄土震陷变形的动单剪试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (WU Fei-jie. Dynamic Simple Shear Test on Seismic Subsidence Deformation of Unsaturated Loess[D]. Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [9] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, 33(4): 355 - 384.
- [10] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave load[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11 - 26.
- [11] ISHIHARA K, YAMAZAKI A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. Soils and Foundations, 1984, 24(3): 85 - 100.
- [12] VAID Y P, SAYAO A, et al. Generalized stress-path dependent Soil behavior with a new hollow cylinder torsional apparatus[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 601 - 616.
- [13] SAYAO A, VAID Y P. A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens[J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 60 - 72.
- [14] 潘 华, 陈国兴. 动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1701 - 1712. (PAN Hua, CHEN Guo-xing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1701 - 1712. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 环境保护, 从心开始