

文章编号:1673-9469(2015)03-0009-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.003

应变控制下舟山海相软土骨干曲线特性研究

李登超¹,王明元²,高世虎³,甘孝清⁴,王亚军¹

(1. 浙江海洋学院 海运与港航建筑工程学院, 浙江 舟山 316000; 2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310012; 3. 河海大学 岩土力学研究所, 江苏 南京 210024; 4. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:通过 GDS 动三轴试验系统对舟山岱山岛海相软土进行应变控制加载条件下的动三轴试验,分析了不同应变幅值下,舟山海相软土滞回曲线的变化特征,对每级荷载运用多个滞回圈构造过骨干曲线的方法,基于实验数据分别采用 Hard - Drnevich 模型,修正 Hard - Drnevich 模型和 Martin - Darvidenkov 模型进行骨干曲线数值模拟,进而分析不同模型参数的敏感性,给出了不同围压下,不同模型参数的参考设计值。试验结果表明:hard - Drnevich 模型不能反映舟山海相软土应变软化特性,拟合效果较差;修正 hard - Drnevich 模型和 Martin - Darvidenkov 模型均能很好的拟合实验数据;鉴于参数的敏感性,建议用修正 hard - Drnevich 模型研究舟山海相软土骨干曲线特性。

关键词:应变控制;舟山;海相软土;滞回曲线;骨干曲线;拟合

中图分类号:TU435

文献标识码:A

Study on dynamic backbone curve behavior of Zhoushan marine soil under strain control

LI Deng - chao¹, WAGN Ming - yuan², GAO Shi - hu³, GAN Xiao - qing⁴, WANG Ya - jun¹

(1. School of Maritime and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhejian Zhoushan 316000, China; 2. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Zhejiang Hangzhou 310012, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210024, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Hubei Wuhan 430010, China)

Abstract: By using the GDS dynamic triaxial tests on Zhoushan Daishan marine soil, a series of strain control dynamic triaxial tests have been performed. Change of hysteretic loops character of Zhoushan marine soil under different strain amplitude has been studied, a method of using hysteretic loops to construct the backbone curves is found. As well as doing fitting curves and analyzing according to experiment datum. The datum were simulated by three modules, such as Hard - Drnevich model, modified Hard - Drnevich model and Martin - Darvidenkov model. To get the backbone fitting curves, the accuracy of the numerical simulation and parameter sensitivity of different modules with varying confine pressures have been analyzed. Results show that Hard - Drnevich model cannot fitting well for it cannot reflect Zhoushan marine soils Strain softening. While modified Hard - Drnevich model and Martin - Darvidenkov model can fit datum well. In view of the parameter sensitivity and accuracy, modified Hard - Drnevich model is suggested to be used to simulate Zhoushan marine soils, parameters gained by this article has some significance for civil engineering.

Key words: strain control; Zhoushan; marine soft soil; hysteresis curve; backbone curve; fitting

土体动力非线性本构关系是表征土动力学特性的最基本关系,是土动力学研究的核心问题之一^[1-4]。滞回曲线和骨干曲线是研究土动力特性

的重要手段,通过对二者研究分析,建立合理反映土体动力响应的动本构模型^[5-6],对于查明区域土质情况具有重要的参考价值。近年来国内外学

收稿日期:2014-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51109118);中国博士后科学基金项目(20100470344);浙江海洋学院中青年教师资助项目(11042101512)

作者简介:李登超(1989-),男,河南漯河人,硕士,主要从事海洋岩土工程方面的研究。

者对砂土和饱和软黏土在循环荷载作用下的动强度和动应变特性进行了大量的研究,但是对于海相软黏土骨干曲线的研究却很少见。汪明元,王亚军等^[7]对岱山海相软土动弹性模量及阻尼比进行实验研究,并给出了动弹性模量 E_d/E_{max} 和阻尼比 D/D_{max} 的归一化模型,但对应变控制下的骨干曲线模型却没有涉及;袁晓铭,孙静^[8]对土的动剪切模量和阻尼比进行小应变条件下的共振柱试验,并给出了推荐值和规范值,但小应变条件下得到的参数能否适用于应变较大的动三轴试验,尚无论述。基于此,本文取舟山原位海相软土进行不同围压、不同应变幅值下的循环排水动三轴试验。

1 试验土样与方案

1.1 土样特性及制备

试验用土取自舟山岱山海底 17.10 ~ 18.75 m 深度范围内的原状海相软土,取出后蜡封保存,根据土工试验要求,将原状土样制备成直径 38.1 mm,高 76 mm 的圆柱形试样,土样物理指标见表 1。

表 1 试样的物理性质指标

Tab. 1 Physical parameters of samples index

孔隙比 e_0	含水率 $\omega/\%$	比重 G_s	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	天然密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	液性指数 I_L
1.114	45.25	2.70	23.34	45.83	1.835	0.973

1.2 实验方案

本试验在英国 GDS 公司生产的全自动微机控制电磁式振动动三轴试验系统上进行。试验采用的应变控制方式分 11 级加载,相应的激振动应变幅值分别为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1%,各级加载循环次数 N 均为 50 次,激振频率为 0.1 Hz,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 动三轴实验方案

Tab. 2 Schemes of dynamic triaxial tests

土样编号	围压/kPa	固结比	频率/Hz	应变幅值
MS-1	100	1	0.1	0.05% ~ 1.0%
MS-2	200	1	0.1	0.05% ~ 1.0%
MS-3	300	1	0.1	0.05% ~ 1.0%

1.3 理论模型

通常,循环荷载作用下土体的动应力-动应变关系曲线可假定为双曲线形式^[9]。本文采用骨

干曲线模型分别为 H-D 模型,修正 H-D 模型以及 M-D 模型^[10-13]。文中以 τ_d 、 γ_d 为动剪应力和动剪应变, σ_d 为轴向动应力, ε_d 为轴向动应变, μ_d 为动泊松比, G_d 为动剪切模量, E_d 为动弹性模量。由于 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 和 $\tau_d - \gamma_d$ 之间具有相同的规律, γ_d 、 ε_d 和 G_d 、 E_d 具有如下换算关系。

$$\gamma_d = \varepsilon_d (1 + \mu_d) \quad (1)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \varepsilon_d)} \quad (2)$$

为处理数据方便,采用 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系来描述骨干曲线模型,由试验确定不同模型中相应的参数,再结合相应关系式进行转换结果见式(3)~(5)。

H-D 模型:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{A_h + B_h \varepsilon_d} \quad (3)$$

式中: A_h 、 B_h 均为试验参数, A_h 为土体最大动弹性模量的最大值, B_h 为土体极限动应力的倒数。

修正 H-D 模型:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{A_c + B_c \varepsilon_d^{C_c}} \quad (4)$$

式中: A_c 、 B_c 、 C_c 均为试验参数。考虑特殊情况,即当 $C_c = 1$ 时,修正 H-D 模型退化为 H-D 模型。

M-D 模型:

$$\sigma_d = (1 - (\frac{\varepsilon_d^{2B_m}}{C_m + \varepsilon_d^{2B_m}})^{A_m}) D_m \varepsilon_d \quad (5)$$

式中: A_m 、 B_m 、 C_m 、 D_m 分别为试验参数。当 $A_m = 1$ 且 $B_m = 0.5$ 时,M-D 模型就退化为 H-D 模型。

2 应力应变滞回圈的形成、变化过程

2.1 应力-应变滞回圈的形成

滞回圈是一个完整循环加载、卸载作用下形成的以坐标原点为中心,封闭并且呈现一定对称性的曲线,反映了动应变对动应力的滞后性^[14]。图 1 为不同围压下,应变分级加载所得的应力-应变滞回曲线,从图 1 可以看出:不同围压下,每一个完整的应力-应变循环关系曲线都会形成一个不完全封闭的滞回圈。随着应变幅值的增大,滞回圈面积开始增大,滞回圈逐渐被拉长,并向右倾斜,顶点高度逐渐降低。这是由于在循环荷载作用下,海相软土随循环加载时间的延长发生刚度软化现象所致^[15]。

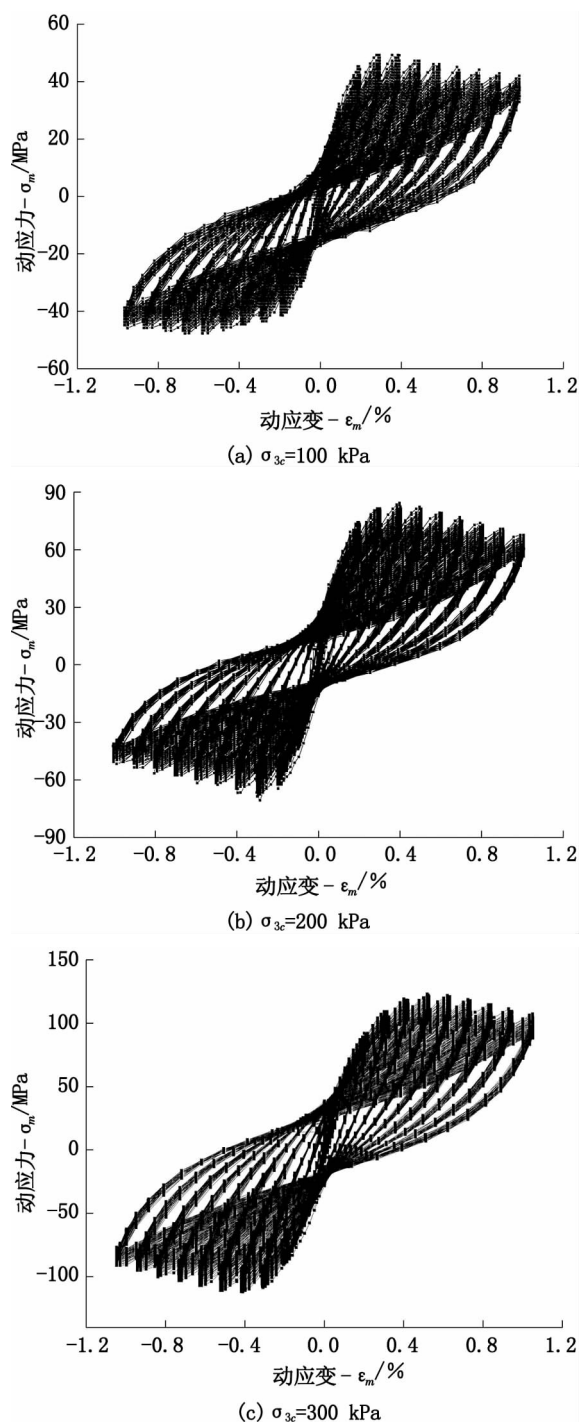


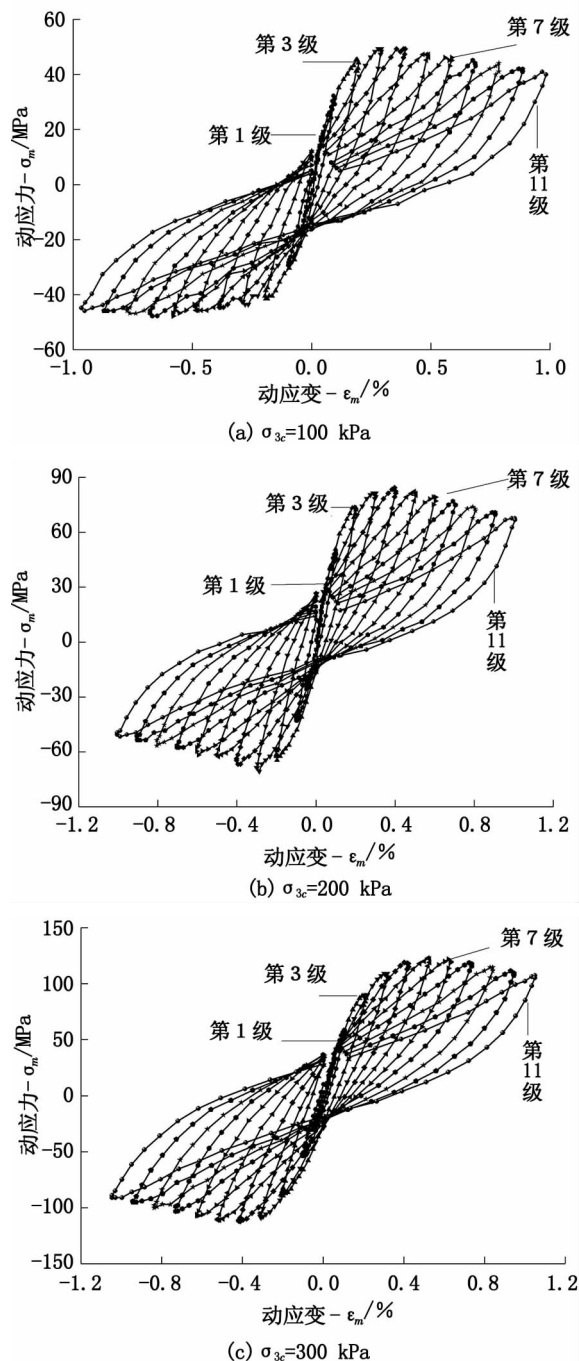
图1 不同围压下各级应力-应变滞回曲线

Fig.1 Hysteresis loops of each grade under different confining pressure

2.2 应力应变滞回圈的变化过程

图2所示为不同围压,不同应变控制条件下单滞回圈示意图。本文选取 $N=10$,即各级第10圈进行对比分析。随着循环荷载次数的增大,拉、压应变均在增加,且两者增加的速度近似。单滞回圈的面积也增加,表明阻尼比增加。同一围压

下不同应变幅值下应力-应变关系曲线也有一定的差异。在整个循环荷载过程中,拉、压应变表现大体相当,土样既不表现为受压破坏,也不表现为受拉破坏。

图2 各级应变幅值下, $N=10$ (圈) 单滞回曲线对比图
Fig.2 Single hysteresis loop with number 10 cycles of each strain amplitude

3 动骨干曲线模型的建立

3.1 滞回曲线与骨干曲线的关系

骨干曲线表示最大动应力与最大动应变之间

的关系。研究滞回曲线是进行骨干曲线分析的关键,滞回圈的位置和形状随动应变幅值大小的变化规律直观地表明了土体的非线性和粘滞性,对于构造骨干曲线,表征骨干曲线特性,计算阻尼比具有重要的作用。图3为典型滞回圈与骨干曲线关系图示。

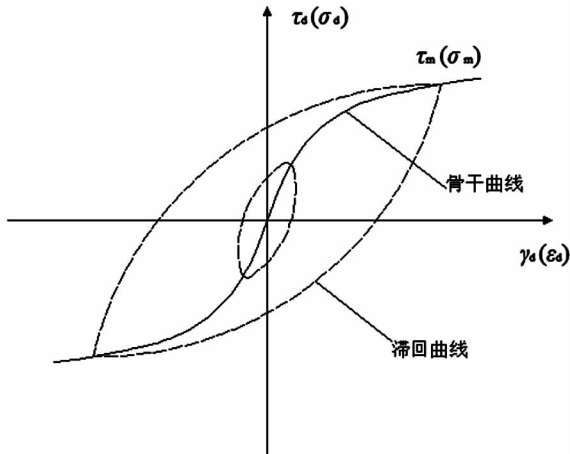


图3 典型滞回圈和骨干曲线

Fig.3 Typical bone curve and hysteretic loops

3.2 不同模型骨干曲线拟合及相关性分析

图4为围压100 kPa,各级应变控制下第10($N=10$)圈顶点拟合曲线。结果表明,各拟合曲线相关系数平方均达到90%以上。其中,修正H-D模型和M-D模型更是达到99%以上,说明修正的H-D模型和M-D模型能够很好的拟合实验数据。H-D模型曲线最后会逐渐趋向水平,不能反映应变软化特性,但实验数据却具有明显的应变软化趋势,因此,用H-D模型拟合实验数据有一定的误差;而修正的H-D模型和M-D模型因参数分别比H-D模型多1个和2个,使得拟合数据吻合程度较好,能够很好地体现出舟山海相软土应变软化特性。

3.3 不同模型参数敏感性分析

本文按照前述3种模型理论对实验数据所得骨干曲线进行拟合比较,并基于线性回归和数理统计方法,得到不同围压、不同模型的拟合参数,并将不同模型所得参数进行对比分析发现,尽管H-D模型拟合效果在90%左右,但是该模型表征最大动剪切模量 G_{max} 的参数 A_h 变化却在10%范围内,说明模型参数取值基本稳定,不会因实验数据的细微差别而产生很大的变化,这对工程场地选择有一定的参考价值;而M-D模型的最大参

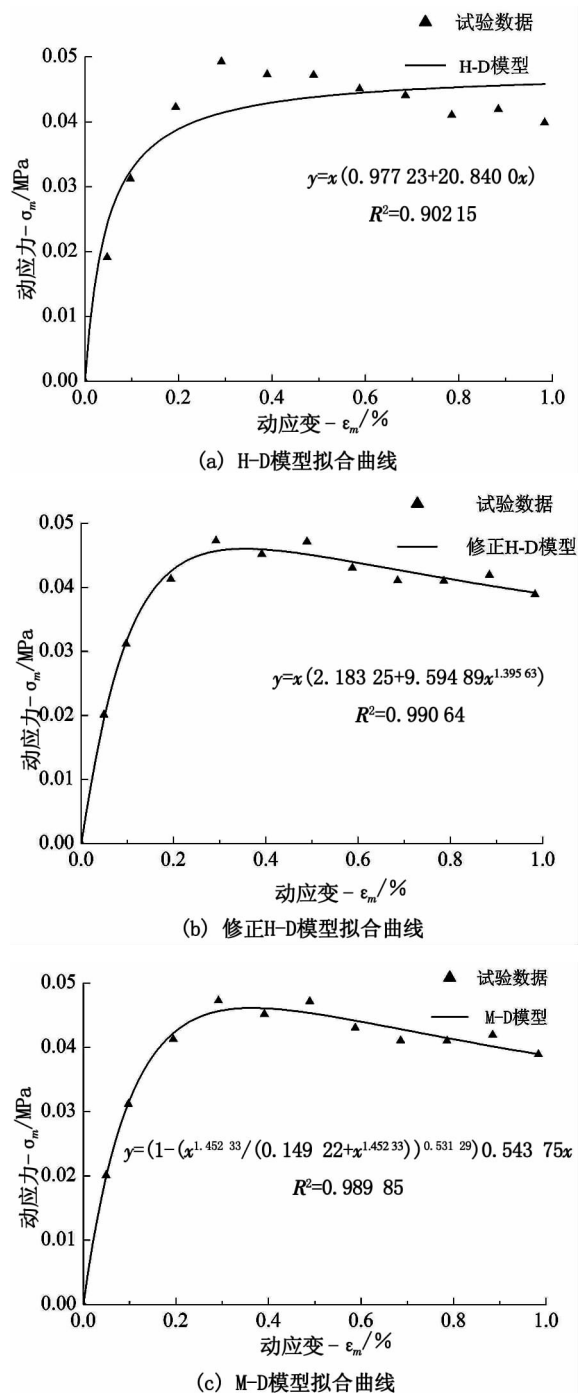


图4 围压100 kPa下三种模型拟合方程及相关系数

Fig.4 Fitted equation and correlation coefficient R^2 of three models under 100 kPa

数 A_h 变化竟达到59%,模型参数对实验数据非常敏感;修正H-D模型的最大参数也达到18.7%,模型参数对于实验数据的敏感性介于前两个模型中间,试验结果受各种因素的影响,具有离散性,对试验数据敏感性低的模型更适合数据的整理和分析。表3为不同围压下同模型相应的拟合参数。

表3 不同围压下不同模型的拟合参数

Tab. 3 Parameters of each fitting models under different pressure

模型	参数	100 kPa	200 kPa	300 kPa
H-D模型	A_h	0.977 2	0.716 3	0.850 1
	B_h	20.840 0	21.993 5	19.401 8
修正H-D模型	A_c	2.183 3	1.723 7	1.706 6
	B_c	9.594 9	10.255 1	7.526 4
	C_c	1.395 6	1.582 9	1.627 4
M-D模型	A_m	0.531 3	0.928 7	0.387 8
	B_m	0.726 1	0.796 1	0.943 1
	C_m	0.149 2	0.138 5	0.528 8
	D_m	0.543 8	0.587 6	0.707

图5为不同围压下,对于同一组试验数据,选用不同模型所得拟合曲线对比示意图。不难看出,修正H-D模型和M-D模型对于不同围压下的实验数据,都能很好的拟合实验数据,证明了用修正H-D模型和M-D模型分析舟山海相软土骨干曲线是正确、可行的。

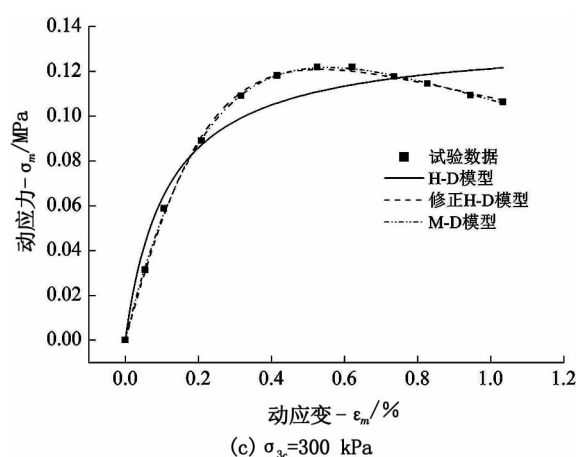
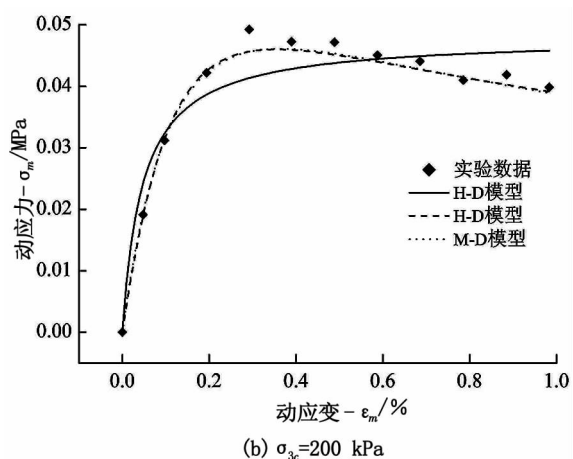
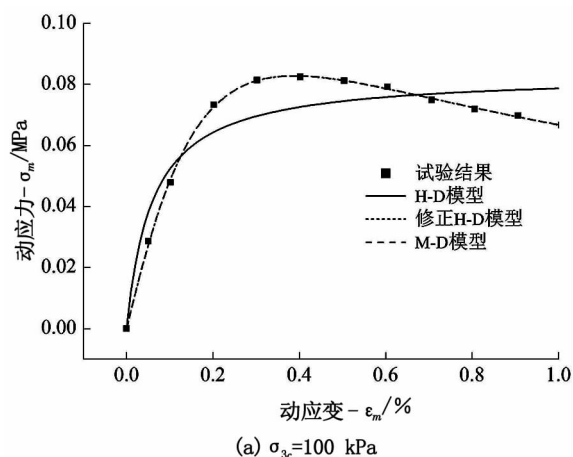


图5 不同模型拟合曲线对比

Fig. 5 Fitting curves of each modules with different confining pressure

4 结论

1) 应变控制下,舟山海相软土的应力-应变关系曲线表现为不完全闭合的滞回圈,随着循环次数的增大滞回圈向右倾斜,斜率逐渐减小,面积逐渐增大,土样表现出刚度软化现象。拉、压应变所占总应变的比值大体相当,土样不表现出特定的破坏类型。

2) 不同围压下,相同应变控制级别滞回曲线发展趋势大致相同,围压越大,曲线顶点越高,动应力越大,抗剪强度增大,土体抵抗破坏的能力提高。

3) 不同围压下,不同模型的拟合曲线随着荷载循环次数变化的趋势也有差异。H-D模型不能反映应变软化特性,拟合效果较差。而修正的H-D模型M-D模型都能很好的拟合实验数据。鉴于参数的敏感性,本文推荐用修正H-D模型行对舟山海相软土进行分析研究。

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 张军, 郑俊杰, 曹文昭, 等. 循环荷载作用下饱和压实黄土动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Z1): 323-327.
- [3] 蔡慧腾, 金星. 福州市区粉质黏土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(Z): 109-113.
- [4] 蒋国俊. 舟山群岛峡道水动力及沉积特性[J]. 浙江大学学报: 力学版, 2001, 28(1): 82-91.
- [5] 廖红建, 肖正华, 刘健. 动荷载下饱和重塑黄土的骨干曲线变化研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 376-379.

(下转第30页)

- [5] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels [J]. Journal of Structure Engineering, 2006, 132(2): 1907 – 1918.
- [6] 茹继平. 梁腹板开圆孔节点及钢框架抗震性能的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

- (上接第 13 页)[6] 张勇, 孔令伟, 李雄威. 循环荷载下饱和软粘土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1700 – 1701.
- [7] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1506 – 1509.
- [8] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2000, 20(4): 133 – 139.
- [9] 吴世明, 周建, 杨挺. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [10] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanic sand Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 603 – 624.
- [11] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and

- [7] 熊俊. 强震作用下钢框架焊接节点损伤性能和计算模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [8] FARAMARZ RAHIMINIA. Effects of joints panel shear deformation on elasto – plastic behavior of steel beam – to – column connections[D]. Kobe: Kobe University, 2013.
- (责任编辑 王利君)

- damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanic sand Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 667 – 692.
- [12] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized moduli reduction and material damping curves[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2001.
- [13] HARDIN B O, KALINSKI M E. Estimating the shear moduls of gravelly soil[J]. Journal of Rheology, 1966, 10(1): 253 – 273.
- [14] 周建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软粘土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43 – 47.
- [15] 王军, 陈张林, 蔡袁强, 等. 考虑软化特性的软黏土动应力 – 应变关系研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(1): 24 – 25.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 18 页)

2) 初始围压越大砂岩最终的弹性应变能越大。在卸围压初始阶段由于砂岩中微裂纹没有明显起裂扩展, 砂岩所释放的弹性应变能增大比较缓慢, 当围压降低至一定程度时裂纹扩展并相互贯通, 砂岩所释放的弹性应变能急剧增大, 最终砂岩所积累的弹性应变能超过在某应力状态下砂岩破坏所需要的表面能即发生破坏。

3) 从能量的角度出发, 利用可释放弹性应变能原理推导了砂岩的卸荷破坏准则, 该破坏准则考虑了初始应力状态对砂岩卸荷破坏的影响, 并利用试验数据进行了验证。

参考文献:

- [1] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729 – 1740.
- [2] BROWN E T, H T D. The failure of linear brittle materials

- under effective tensile stress[J]. Felsmechanik, 1967(1): 229 – 241.
- [3] 吴刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, 2(9): 174 – 181.
- [4] 吴刚. 岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J]. 岩土力学, 1997, 2(4): 13 – 16.
- [5] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 17(24): 3003 – 3010.
- [6] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(21): 2675 – 2681.
- [7] 刘维国, 单钰铭, 傅荣华. 岩石扩容过程中的体积应变与超声横波速度[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 360 – 364.
- [8] 彭瑞东. 基于能量耗散及能量释放的岩石损伤与强度研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2005.
- (责任编辑 王利君)