

DOI: 10.11779/CJGE201705013

基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证

赵丁凤^{1, 2}, 阮滨^{1, 2}, 陈国兴^{1, 2}, 徐令宇^{1, 2}, 庄海洋^{1, 2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009)

摘要: 非等幅循环荷载作用下, 采用“扩展 Masing”法则修正应力-应变滞回曲线时, 程序的实现过程中需要预留大量的状态变量。针对该问题, 提出了 Davidenkov 本构模型的不规则加卸载修正准则, 以代替“扩展 Masing”法则中的“上大圈”准则。通过等效剪应变算法的比选, 给出了加卸载判断简单且精度更高的等效剪应变算法。基于 ABAQUS 软件的显式模块, 开发了基于不规则加卸载准则的修正 Davidenkov 本构模型的显式子程序模块, 适用于大规模二维和三维场地非线性地震效应分析。选取 Mississippi 湾 500 m 深的钻孔作为计算模型, 通过与一维场地非线性地震效应分析专业程序 Deepsoil 计算得到的输入不同强度地震动下的地表峰值加速度、PGA=0.65g 的场地地震反应的对比分析, 佐证了提出的 Davidenkov 本构模型不规则加卸载准则与等效剪应变算法的合理性。

关键词: 修正不规则加卸载准则; Davidenkov 本构模型; 等效剪应变算法; 场地地震效应; 非线性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)05-0888-08

作者简介: 赵丁凤(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事城市地下结构抗震研究。E-mail: zdf0801@163.com。

Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS

ZHAO Ding-feng^{1, 2}, RUAN Bin^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, XU Ling-yu^{1, 2}, ZHUANG Hai-yang^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering & Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: Under irregular cyclic loadings, adopting the extended Masing criterion to modify the stress-strain hysteresis curves will bring about the program with a large number of state variables. In this paper, the initial stress-strain skeleton curve is simulated by the Davidenkov model, and the simplified loading-reloading rules are proposed instead of the upper boundary rules of the extended Masing criterion. Through comparison, an equivalent strain algorithm with simple unloading judgment standard and higher precision is proposed. Synthesizing computational accuracy and efficiency of large-scale nonlinear seismic site effect analyses, a three-dimensional explicit subroutine of the Davidenkov model with simplified loading-reloading rules is developed in ABAQUS/Explicit module. It is applicable to both two- and three-dimensional seismic site effect analyses. Finally, a two-dimensional numerical simulation for a soil column 500 m thick of Mississippi Embayment is carried out, the peak ground accelerations versus different seismic levels, site seismic responses for Kobe earthquake record of PGA 0.65g are compared with those computed by one-dimensional nonlinear seismic site response analysis program Deepsoil. The results show that the modified irregular loading-unloading rules based on the Davidenkov skeleton curve and the proposed equivalent strain algorithm are rational and valid.

Key words: modified irregular loading-unloading rules; Davidenkov constitutive model; equivalent strain algorithm; seismic site effect; nonlinearity

0 引 言

在场地非线性地震反应计算中, 核心问题在于选择合适的土体非线性本构模型及其合理的数值模拟实现方法。大量试验研究表明, 采用三参数的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258, 51438004); 国家科技重大专项项目(2013ZX06002001-9); 国家青年自然科学基金项目(51508271); 江苏省青年自然科学基金项目(BK20150958)

收稿日期: 2016-02-25

*通讯作者(E-mail: gxc6307@163.com)

Davidenkov 本构模型能较为理想地描述各类土体的非线性动力特性, 累积的试验资料非常丰富^[1-3]。

由于地震动往往是非等幅的, 需附加一些规定来修正不规则加卸载下 Davidenkov 模型的应力 - 应变滞回曲线。“扩展 Masing”法则奠定了不规则加卸载下土体应力 - 应变关系曲线的理论框架。但进行二维或三维复杂地震作用下的土体非线性地震反应计算时, 程序需要预留更多的状态变量来记忆各个拐点的信息, 使加卸载曲线完全遵循“上骨架曲线”及“上大圈”准则。Pyke^[4]简化了构造滞回曲线的“扩展 Masing”法则, 以“ n 倍法”代替“2倍法”, 使得应力 - 应变曲线始终不超过骨架曲线的渐近线, 即参数“ n ”的引入能够控制滞回曲线的发展方向。此外, 大崎顺彦等^[5]通过试验验证了“上骨架曲线”规则的合理性。试验结果亦表明, 加卸载曲线沿当前拐点指向历史上最值点的规定符合试验结果且更易于程序化实现。

基于前人的研究成果, 本文试图从 Davidenkov 骨架曲线出发^[6], 遵循“上骨架曲线”规则并引入 Pyke 提出的“ n 倍法”的思想来构造滞回曲线, 使加卸载曲线始终沿当前拐点指向历史上最值点方向前行, 并始终能回到初始骨架曲线上。通过等效剪应变算法的比选与精度分析, 给出了更适宜于一维应力 - 应变关系向三维空间扩展的等效剪应变算法。基于 ABAQUS 软件的显式模块, 开发了基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则的显式子程序模块, 适宜于分析二维或三维非线性问题。最后, 以位于美国东部新马德里地震带上的 Mississippi 湾场地为模型, 通过与国际通用的一维场地地震效应分析程序 Deepsoil 计算得到的场地地震非线性反应结果进行对比, 验证本文提出的基于 Davidenkov 本构模型的修正不规则加卸载准则及等效剪应变算法选取的合理性, 程序实现过程正确与否。

1 不规则加卸载条件下 Davidenkov 骨架曲线模型的修正加卸载准则

由 Martin 等^[6]提出的 Davidenkov 本构模型骨架曲线的表达式为

$$\tau = G\gamma = G_{\max}\gamma [1 - H(\gamma)], \quad (1)$$

其中,

$$H(\gamma) = \left\{ \frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right\}^A, \quad (2)$$

式中, τ , γ 分别为剪应力和剪应变, G_{\max} 为初始剪切

模量, A , B 和 γ_0 为土的试验参数。

构造不规则往返应力作用下的 Davidenkov 本构模型滞回曲线, 需对适宜于等幅往返应力作用的 Masing 法则进行修正, 如图 1 所示。基于 Pyke^[4]提出的“ n 倍法”的思想, 修正后的加卸载准则如下:

(1) 初始加载时, 加载曲线沿骨架曲线前行, 应力 - 应变关系由式 (1)、(2) 描述。

(2) 当施加的应力转向后, 后续的应力 - 应变曲线沿当前拐点指向历史上最大(小)点的方向前行, 应力 - 应变关系由式 (3) 描述, 即应力 - 应变滞回曲线由初始骨架曲线放大 n 倍来构造, 代替了 Masing 法则中的放大倍数 2。

$$\tau - \tau_c = G_{\max} \cdot (\gamma - \gamma_c) \cdot \left[1 - H \left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n} \right) \right], \quad (3)$$

式中, γ_c 为加卸载转折点处的应变。

(3) 若加、卸载曲线在转向前与骨架曲线相遇, 则遵循“扩展 Masing”法则中的“上骨架曲线”规则, 也即, 后续应力 - 应变曲线沿骨架曲线前行。

根据上述 3 条修正准则, 除记录历史上最值点外, 当施加的应力转向后, 仅需记忆当前转折点处的应力和应变值, 即可确定应力 - 应变曲线的走向。有效解决了“扩展 Masing”法则中的转折点信息记忆量大的问题。此时, 不规则加卸载条件下的应力 - 应变路径为曲线段 0→1→2→3→4→5→6→7, 修正了 2 倍 Masing 法则中的曲线段 2→1→3' 或曲线段 6→5→7'。

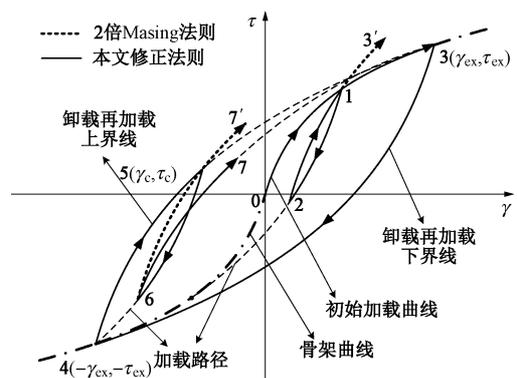


图 1 不规则加卸载准则修正的 Davidenkov 模型的应力 - 应变关系曲线示意图

Fig. 1 Stress-strain curves of Davidenkov model with irregular loading-unloading rules

2 Davidenkov 模型不规则加卸载准则修正的实现

2.1 时变切线剪切模量的推导

对式 (1) 中的变量 γ 求导, 得到初始骨架曲线

段 $t + \Delta t$ 时刻的时变切线剪切模量的表达式:

$$G^{t+\Delta t} = \frac{d\tau}{d\gamma} = G_{\max} \left[1 - \left(1 + \frac{2AB\gamma_0^{2B}}{\gamma_0^{2B} + \gamma^{2B}} \right) \cdot H(\gamma) \right]. \quad (4)$$

通过对式 (3) 中的变量 $(\gamma - \gamma_c)$ 求导, 得到应力 - 应变滞回曲线段的时变切线剪切模量的表达式:

$$G^{t+\Delta t} = \frac{d(\tau - \tau_c)}{d(\gamma - \gamma_c)} = G_{\max} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{2AB(2n\gamma_0)^{2B}}{(2n\gamma_0)^{2B} + |\gamma - \gamma_c|^{2B}} \right] H \left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$(2n\gamma_0)^{2B} = (\gamma_{\text{ex}} \pm \gamma_c)^{2B} \cdot \left(\frac{1-R}{R} \right). \quad (6)$$

其中, 参数 $(2n\gamma_0)^{2B}$ 由当前拐点及历史上的最大(小)点确定。将当前拐点 (γ_c, τ_c) 与历史上的最值点 $(\gamma_{\text{ex}}, \tau_{\text{ex}})$ 或 $(-\gamma_{\text{ex}}, -\tau_{\text{ex}})$ 代入式 (3) 得

$$R = \left(1 - \frac{\tau_{\text{ex}} \pm \tau_c}{G_{\max} \cdot (\gamma_{\text{ex}} \pm \gamma_c)} \right)^{\frac{1}{A}}, \quad (7)$$

式中, 符号“ \pm ”在加载时取“-”, 卸载时取“+”。

2.2 黏性阻尼

在进行场地动力分析时, 常会伴随高频失真及计算不稳定的现象。引入瑞雷阻尼作为黏性力可提高计算结果的准确性, 并可解决荷载转向时模量突变产生的计算失稳^[7]。然而使用外接子程序 UMAT/VUMAT 时, 会与 ABAQUS 软件自带本构模型库中的瑞雷阻尼中与刚度比例阻尼有关的设置产生冲突^[8], 因此需将瑞雷阻尼中与刚度矩阵相关的黏性力 σ^v 自行编入材料子程序中, 其表达式为

$$\sigma^v = \beta_R \mathbf{D}^{\text{el}} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \quad (8)$$

$$\beta_R = 2\xi_0/\omega_1, \quad (9)$$

式中, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为应变速率, β_R 为刚度矩阵相关的阻尼比例系数。 ω_1 为结构的 1 阶频率, \mathbf{D}^{el} 为弹性矩阵, 阻尼比 ξ_0 为无应变状态时的阻尼比, 即假定土体在弹性范围内仍产生耗能^[9]。

最终, 总应力由两个独立的应力分量表示:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^f + \boldsymbol{\sigma}^v, \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\sigma}^f$ 为只与应变大小有关的非黏性力, 由不规则加卸载准则修正的 Davidenkov 模型确定。总应力增量表达式为

$$\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t} = \boldsymbol{\sigma}_t^f + \Delta\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}^f + \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}^v, \quad (11)$$

式中, t 为增量步分析的开始时刻, Δt 为时间增量步。

3 等效剪应变算法的比选

3.1 等效剪应变的传统算法

由式 (4)、(5) 可知, 时变剪切模量计算的准确性与等效剪应变的选取密切相关, 即等效剪应变算法的选取是子程序三维空间扩展的关键问题。以应变偏量的第二不变量描述的等效剪应变能综合反映三维空间中土体的应力 - 应变关系^[10]。但直接采用应变偏量的第二不变量作为等效剪应变时, 其数值只能描述一维应力 - 应变关系曲线中应变大于零的部分, 故将等效剪应变 γ_{eq} 改由增量形式描述:

$$\gamma_{\text{eq}}^{t+\Delta t} = \gamma_{\text{eq}}^t + \text{sign} \cdot \left| \Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij}) \right|, \quad (12)$$

其中,

$$\Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij}) = \gamma_{\text{gen}}^{t+\Delta t}(e_{ij}) - \gamma_{\text{gen}}^t(e_{ij}), \quad (13)$$

$$\gamma_{\text{gen}}^t(e_{ij}) = \sqrt{\frac{4}{3} J_{2\varepsilon}^t(e_{ij})}. \quad (14)$$

式中 e_{ij} 为应变偏量; γ_{eq}^t 和 $\gamma_{\text{eq}}^{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的等效剪应变。加载时, $\text{sign}=1$, 卸载时, $\text{sign}=-1$ 。

$\Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij})$ 为等效剪应变增量, $\gamma_{\text{gen}}^t(e_{ij})$ 为 t 时刻的广义剪应变, 由 t 时刻应变偏量的第二不变量 $J_{2\varepsilon}^t(e_{ij})$ 确定。

3.2 等效剪应变的优化算法

由式 (5) 可知, 更新剪切模量时只需得到当前时刻应变与转折点处应变差值 $(\gamma - \gamma_c)$ 。现定义新的应变偏张量 e_{ij}^o 来替换等效剪应变传统算法中的 e_{ij} , 则式 (12) ~ (14) 变为

$$\gamma_{\text{eq}}^{t+\Delta t} = \gamma_{\text{eq}}^t + \text{sign} \cdot \left| \Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o) \right|, \quad (15)$$

$$\Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o) = \gamma_{\text{gen}}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o) - \gamma_{\text{gen}}^t(e_{ij}^o), \quad (16)$$

$$\gamma_{\text{gen}}^t(e_{ij}^o) = \sqrt{\frac{4}{3} J_{2\varepsilon}^t(e_{ij}^o)}, \quad (17)$$

式中, e_{ij}^o 的定义为以转折点处的应变张量 $e_{ij,c}$ 为起点, 转折点过后计算得到的应变张量 e_{ij} 为终点的张量:

$$e_{ij}^o = e_{ij} - e_{ij,c}. \quad (18)$$

3.3 等效剪应变不同算法实现过程的对比

为进一步对比分析这两种等效剪应变算法之间的差异性和优劣性, 图 2 给出了这两种等效剪应变算法的实现流程差异及计算误差分布。由图 2 可知:

(1) 对比流程图可知, 采用 e_{ij}^o 替换 e_{ij} 后, 改变了传统等效剪应变算法中加、卸载判断条件后的变量更新内容。等效剪应变传统算法在判断条件成立后更新转折点处的等效剪应变 γ_{qc} 值; 等效剪应变优化算法中除更新转折点处的 6 个应变偏量 e_{ij} 外, 还需根据更新的 e_{ij}^o 修正 $\Delta\gamma_{\text{inc}}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o)$ 值, 即一旦荷载发生转向, 此时转折点处的各个应变偏量 $e_{ij,c}$ 将作为新的计算参考点, $\gamma_{\text{gen}}(e_{ij}^o)$ 清空后重新从零开始累加。

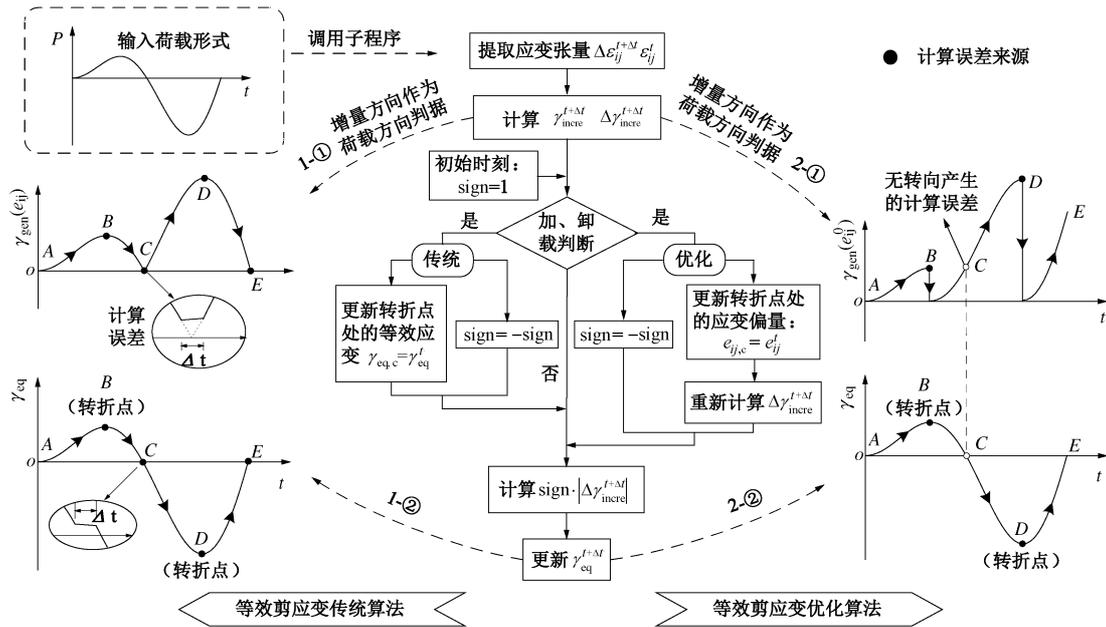


图 2 等效剪应变不同算法的实现流程差异及计算误差分布

Fig. 2 Implementation process differences and calculation error locations of two equivalent strain algorithms

(2)由图 2 中等效剪应变传统算法中的 $\gamma_{gen}(e_{ij}^t)$ 曲线 1-①可知, 土体从加载转向卸载状态时, 满足 $\Delta\gamma_{inc}^t(e_{ij}^t) \cdot \Delta\gamma_{inc}^{t+\Delta t}(e_{ij}^t) < 0$, 除实际加卸载点 B, D 外, C, E 点也会视为荷载的转向点, 此时还需附加条件来进一步判断这些点是否为真的荷载转向点, 这使得加、卸载的准确判断非常困难。由图 2 中等效剪应变优化算法中 $\gamma_{gen}(e_{ij}^o)$ 曲线 2-①可知, 在到达荷载转向点 B, D 前始终有 $\Delta\gamma_{inc}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o) > 0$, 故由 $\Delta\gamma_{inc}^{t+\Delta t}(e_{ij}^o) < 0$ 可直接判断土体发生卸载, 判断条件较等效剪应变传统算法的判断条件简单有效。

(3) 当固定时间增量步 Δt 下无法取到 $\gamma_{gen}(e_{ij}^t)$ 或 $\gamma_{gen}(e_{ij}^o)$ 曲线的转向点时将产生计算误差。在一个循环周期内, 等效剪应变传统算法中的计算误差出现在 B, C, D, E (图 2 中实心圆点) 四处, 等效剪应变优化算法中的计算误差只出现在荷载转向点 B, D 位置, 消除了等效剪应变传统算法中 C, E (卸载至反向加载点处) 的附加计算误差, 计算精度更高。

3.4 不同等效剪应变算法对动力反应结果的影响

由上述分析可知, 两种等效剪应变算法中计算误差大小与时间增量步的选取密切相关, 现以 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的土单元对比不同等效剪应变算法对动力反应结果的影响。土单元四周约束 y 和 z 方向的位移, 底面固定约束, 顶面沿 x 方向施加 $5t \sin(4\pi t)$ kN 的 4 个集中力, 持续时间为 10 s, 土单元的有限元模型如图 3 所示。时间增量步 Δt 分别设置为 0.01, 0.005, 0.001 s。

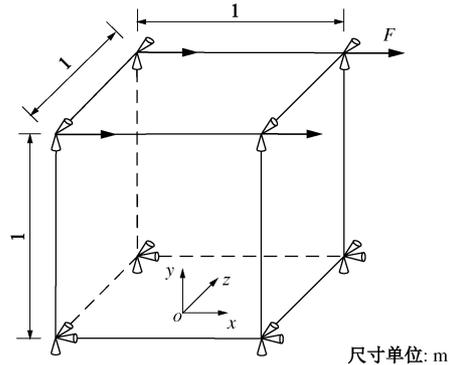
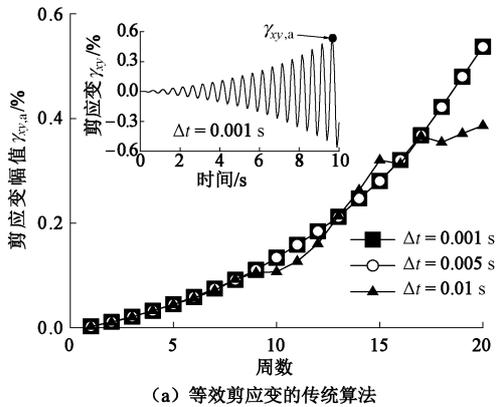


图 3 土单元有限元模型

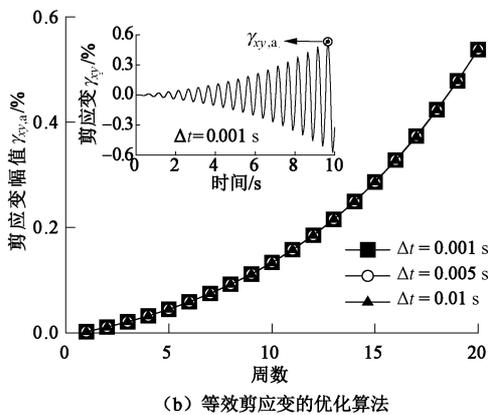
Fig. 3 Finite element model for soil

图 4 为两种等效剪应变算法下剪应变幅值 (正半轴的剪应变幅值点) 受时间增量步影响程度的比较。对比图 4 (a)、(b) 可知, 等效剪应变传统算法下剪应变结果的准确性对时间增量步的依赖性更强, 且随着持续时间的发展而愈加显著。在 0.01 s 的时间增量步下, 剪应变幅值在第 9 周以后与 0.001 s 增量步下的剪应变幅值差异增大且幅值曲线发展紊乱, 在第 20 周处的剪应变幅值相差最大, 达 28.07%。当时间增量步从 0.01 s 减小至 0.005 s 时, 才与 0.001 s 时间增量步下的剪应变幅值曲线基本重合, 在第 20 周处的剪应变幅值相差降低至 0.05%, 计算误差带来的影响可基本消除。采用等效剪应变优化算法时, 在 0.01 s 的时间增量步下的剪应变幅值与 0.005, 0.001 s 时间增量步下的剪应变幅值均基本重合。对比第 20 周处 0.005, 0.001 s 时间增量步下的剪应变幅值, 相差仅

为 0.01%，0.03%，计算误差带来的影响均很小。对于高精度、高效率地开展大尺度复杂场地地震反应分析，等效剪应变优化算法更优于等效剪应变传统算法。



(a) 等效剪应变的传统算法



(b) 等效剪应变的优化算法

图 4 不同等效剪应变算法下剪应变幅值受时间增量步的影响

Fig. 4 Influences of increment steps on amplitudes of shear strain by using two equivalent strain algorithms

4 Davidenkov 模型不规则加卸载准则修正的验证

基于 ABAQUS 软件平台，同时考虑到大尺度复杂场地及土 - 结构体系非线性地震效应分析时的计算效率及计算精度，本文通过 VUMAT 接口，编译了不规则加卸载准则修正的 Davidenkov 模型显式算法的子程序。现以位于美国东部新马德里地震带上的 Mississippi 湾场地为例，选取 500 m 深的钻孔作为计算模型，与同样场地条件下 Hashash 等^[11]采用的一维场地非线性地震效应分析软件 Deepsoil 的计算结果作对比分析，验证本文提出的 Davidenkov 模型加卸载准则修正的合理性。其中，场地剪切波速随深度的变化如图 5 所示，场地土体的重度均为 19.8 kN/m³。输入地震动选取 Kobe 地震记录，原始记录的持续时间为 50 s，峰值加速度为 0.83g，如图 6 所示。

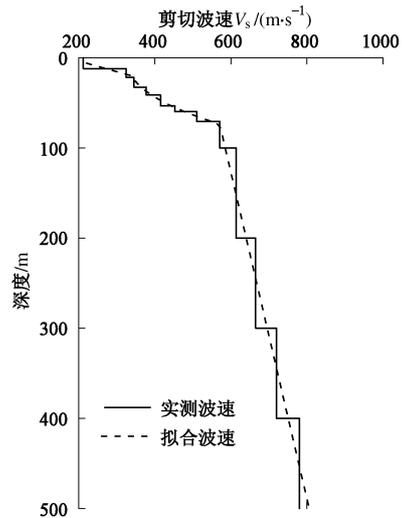


图 5 Mississippi 湾场地剪切波速随深度的变化

Fig. 5 Shear wave velocity versus soil depth in Mississippi

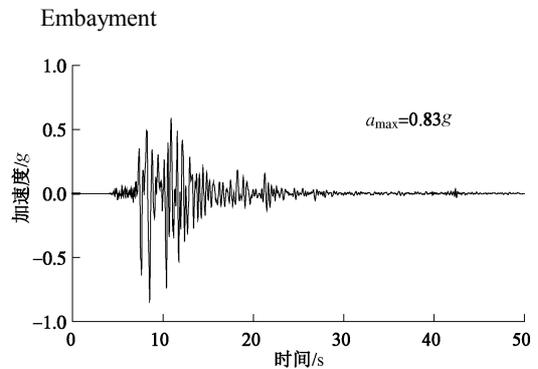


图 6 Kobe 波的加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time-history of Kobe earthquake record

Deepsoil^[12]程序中采用扩展的“Masing 法则”修正的 Matasovic 本构模型来描述土体的动力特性，其骨架曲线的表达式为

$$\tau = \frac{G_{mo} \cdot \gamma}{1 + \beta(\gamma/\gamma_y)^s}, \tag{19}$$

$$\gamma_y = a(\sigma'/\sigma_{ref})^b. \tag{20}$$

式中 τ ， γ 分别为剪应力和剪应变； G_{mo} 为初始剪切模量； β ， s ， γ_y 为土体的试验参数；参数 a 和 b 为不同深度处 γ_y 的修正系数； σ_{ref} 为参考围压。

此外，阻尼比 ξ_0 随深度的变化关系由下式描述：

$$\xi_0 = c/(\sigma')^d, \tag{21}$$

式中， c ， d 为不同深度处 ξ_0 的修正系数， σ' 为初始有效围压。分析采用的 Matasovic 模型及 Davidenkov 模型相应的拟合参数见图 7，修正系数 $a=0.00163$ ， $b=0.63$ ， $c=1.5\%$ ， $d=0.3$ 。

根据文献[11]给出的 Deepsoil 软件中场地模型的建立过程，ABAQUS 软件中场地按每 5 m 划分土层，并进行参数 γ_0 和阻尼比 ξ_0 的修正。采用一阶频率计算

黏性力, 单元类型为四结点双线性平面应变四边形缩减积分单元 (CPER), 该单元的求解精度高且自由度少。场地两侧及底部均约束重力方向 y 方向的位移, 在底面输入水平向 x 方向的地震动, 时间增量步设置为 1×10^{-4} s, 经 ABAQUS 软件线性摄动分析后, 得到场地的一阶频率 $f_1 = 0.26$ Hz。Deepsoil 软件中模型场地的一阶频率 $f_1 = 0.30$ Hz, 两个模型场地的一阶频率相差 13.3%。

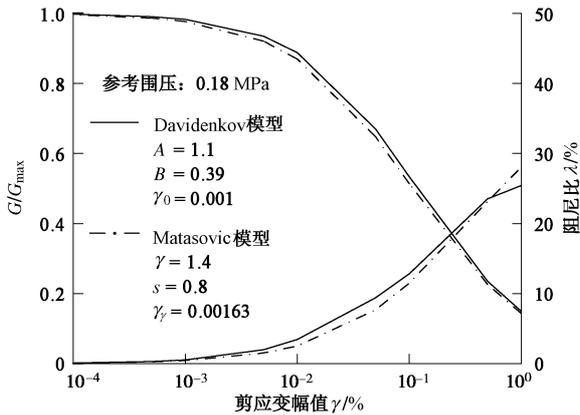


图 7 Davidenkov 模型和 Matasovic 模型描述的土的 $G/G_{max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线

Fig. 7 $G/G_{max} - \gamma$ and $\lambda - \gamma$ curves of soil given by Davidenkov model and Matasovic model

图 8 为输入不同强度的基岩地震动下, 采用“扩展 Masing”法则修正的 Matasovic 模型和本文提出修正法则的 Davidenkov 模型计算得到的地表峰值加速度的对比结果。由图 8 可知, 基岩输入地震动强度从 0.2g 增强至 1.5g 时, 土体非线性不断增强时, 两个模型计算的地表峰值加速度结果的吻合度均较高, 最大相差仅 2.4%。

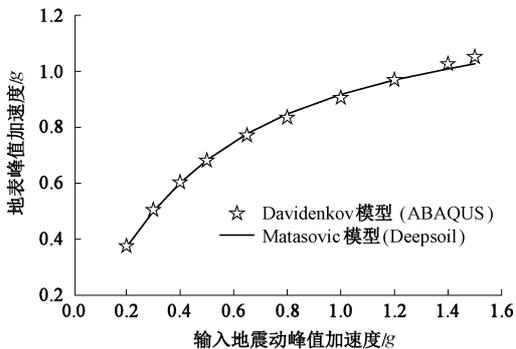


图 8 输入不同强度地震动下两种本构模型计算的地表峰值加速度对比

Fig. 8 Comparison of peak ground accelerations using two different constitutive models for different bedrock motion levels

图 9 为 PGA = 0.65g 的 Kobe 地震动作用下采用“扩展 Masing”法则修正的 Matasovic 模型和本文提出修正法则的 Davidenkov 模型计算得到的地表加速

度时程、地表加速度反应谱 ($\xi = 5\%$) 及 27.5 m 深度处剪应力 - 剪应变关系曲线的对比结果。由图 9 (a) 可知, 采用 Davidenkov 模型计算的地表峰值加速度为 0.77g, 采用 Matasovic 模型计算的地表峰值加速度为 0.78g, 两种模型计算的地表峰值加速度的结果非常接近, 加速度时程曲线上各幅值点相差也较小, 仅采用 Davidenkov 模型计算的地表峰值加速度出现时刻较 Matasovic 模型计算的地表峰值加速度出现时刻滞后了 0.48 s, 这可能是由于两种软件在黏性阻尼运算方法上的不同导致的。由图 9 (b) 可知, 两种计算模型得到的地表加速度反应谱的谱形相似。均表现为: 在周期约 0.25~0.45 s 范围有不同程度的衰减现象, 在周期约 0.45 s 以后有不同程度的放大现象。其中, 由 Davidenkov 模型计算的地表加速度反应谱在周期约 0.25~0.45 s 范围的衰减较多。由图 9 (c) 可知, 在 375 m 以下, 两种本构模型计算得到的峰值加速度随深度的变化几乎一致。浅于 375 m 范围内, 峰值加速度随深度的变化均呈现蛇形分布, 在 25 m 深度处, Davidenkov 模型计算得到的峰值加速度比 Matasovic 模型计算得到的峰值加速度小了约 29.1%。由图 9 (d) 可知, 在 75 m 深度以上, 两种模型计算得到峰值剪应变随深度的变化剧烈, Davidenkov 模型计算得到的最大峰值剪应变比 Matasovic 模型计算得到的最大峰值剪应变小了约 10.5%。由图 9 (e) 中 Davidenkov 模型得到的剪应力 - 剪应变关系曲线可知, 在复杂加载路径下, 应力 - 应变曲线一旦转向便沿着历史上的最值点方向前行; 未转向前若超过历史上的最值点, 应力 - 应变曲线能回到历史上的最值点且随后沿骨架曲线继续前行, 滞回曲线的发展连续且光滑, 子程序的实现过程准确无误。对比两种模型修正法则得到的滞回曲线可知, 当剪应变达到最大后, 两种模型计算的后续滞回曲线发展的差异变大。这是因为在滞回曲线上加卸载时, 两种模型的修正准则才产生不同, 当应变达到最大剪应变以后, 后续的应力 - 应变曲线的发展主要以滞回曲线上加卸载的方式进行修正, 随着加卸次数的不断增加, 应力 - 应变曲线发展的差异性也更加显著, 但两种修正准则下的滞回曲线整体走向基本一致。

综上可知, 相比较 Deepsoil 软件中实现的场地非线性效应分析方法计算得到的动力反应, 由 ABAQUS/Explicit 模块中改进的非线性分析方法计算得到的动力反应表现出较大的黏性阻尼特性及较小的滞回阻尼特性, 但同样能较好地估计深厚场地的非线性效应, 即 Davidenkov 模型不规则加卸载准则的修正合理。

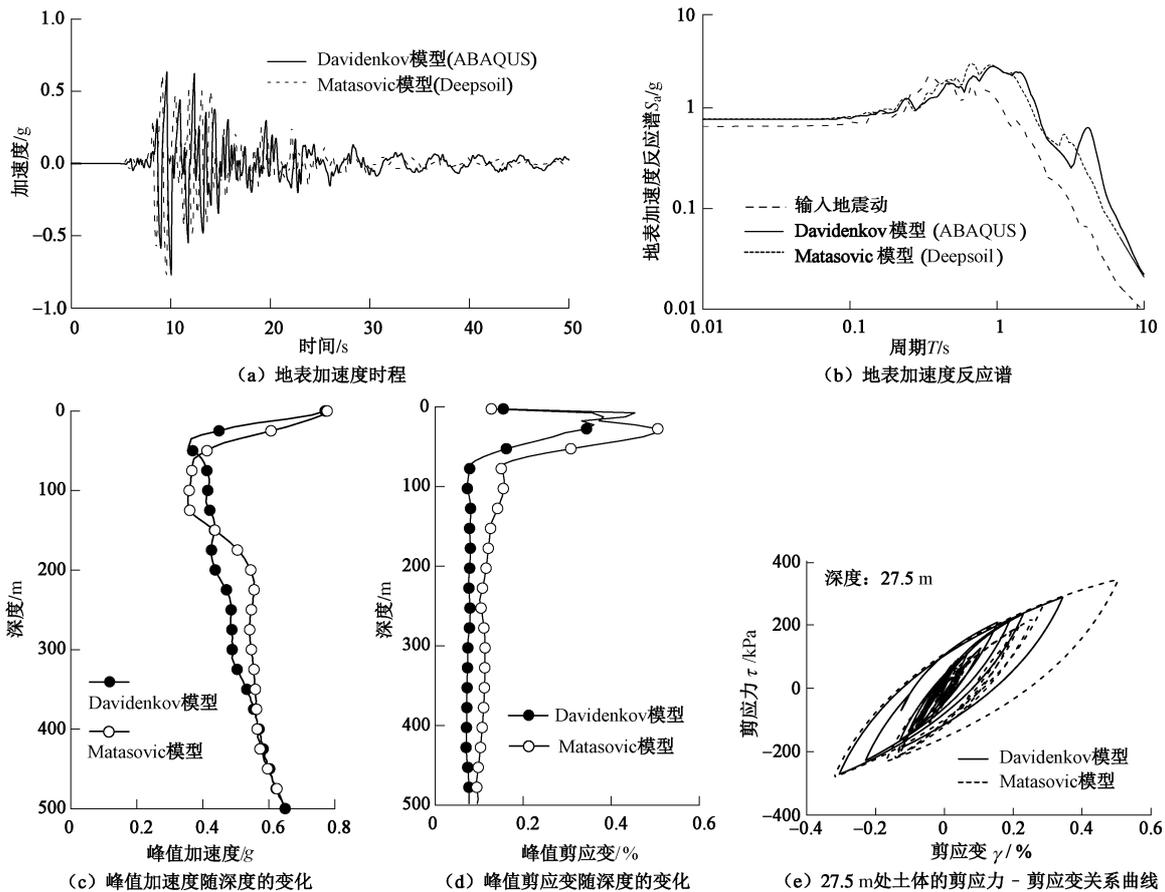


图9 PGA = 0.65g 的 Kobe 地震动作用下两种本构模型计算的场地地震反应的对比

Fig. 9 Comparison of site seismic responses using two different constitutive models for Kobe earthquake record of PGA 0.65g

5 结 论

从 Davidenkov 骨架曲线出发,遵循“扩展 Masing”法则中的“上骨架曲线”规则并参照 Pyke 提出的“ n 倍法”修正了滞回曲线的加卸载准则,解决了“扩展 Masing”法则在程序实现中记忆量大的问题。基于 ABAQUS 软件平台的显式模块,实现了不规则加卸载准则的修正 Davidenkov 本构模型的显式子程序模块。并从以下角度验证了本文提出的 Davidenkov 本构模型不规则加卸载准则和等效剪应变算法的合理性。

(1)通过等效剪应变算法的比选与单元的精度验证,等效剪应变优化算法有效解决了等效剪应变传统算法中加卸载判断依据困难的问题。由于等效剪应变优化算法中由时间增量选取产生的计算误差较少,相同时间增量步下的动力反应计算结果精度较高。

(2)以美国东部新马德里地震带上的 Mississippi 湾场地为例,选取 500 m 深的钻孔进行了二维非线性地震效应的数值模拟,动力反应计算结果(输入不同强度地震动下的地表峰值加速度、地表加速度时程、地表加速度反应谱、峰值加速度及峰值剪应变随深度的变化)与一维场地非线性地震效应分析专业程序 Deepsoil 的计算结果相比,吻合度较好,佐证了本文

提出的 Davidenkov 本构模型不规则加卸载准则与等效剪应变算法的合理性,程序的实现过程无误。

(3)与“扩展 Masing”法则修正的 Matasovic 模型的滞回曲线相比,以应力 - 应变曲线沿当前拐点指向历史上最大(小)点前行的方式修正 Davidenkov 模型的滞回圈的形状稍加扁长。当滞回曲线上加卸载次数较多时,两种修正准则下的滞回曲线发展的差异性显著,但滞回曲线整体的走向基本一致。

此外,本文开发的子程序中除场地地震效应分析需要的基本资料(土的密度、波速、 $G/G_{max} - \gamma_a$ 和 $\lambda - \gamma_a$ 曲线)外,修正法则的增加并未附加材料参数,材料参数少且易于通过试验获取。相比较一维场地非线性地震效应分析程序,该程序能更灵活地应用于二维、三维大尺度复杂场地及土-结构体系非线性地震效应分析。

参考文献:

- [1] 陈国兴, 庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 860 - 864. (CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2005, **27**(8): 860 - 864. (in Chinese)
- [2] WANG Z, FAN G, HAN J, et al. Reference strain γ_r in hyperbolic modeling of dynamic shear modulus of soils[C]// Proceedings of the Second International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering. Chengdu, 2013.
- [3] CHEN G, JIN D, ZHU J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of fuzhou basin, china[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, **105**(2A): 928 - 949.
- [4] PYKE R M. Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1979, **105**(6): 715 - 726.
- [5] 大崎順彦, 原昭夫, 清田芳治. 地盤震動解析のための土の動力学的モデルの提案と解析例[C]//第5回日本地震工学シンポジウム. 东京, 1978: 697 - 704. (COHSAKI Y, HARA A, KIYOTA Y. Stress-strain model of soil for seismic analysis[C]// Proceedings of the Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium. Tokyo, 1978: 697 - 704. (in Japanese))
- [6] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, **108**(7): 935 - 952.
- [7] PISANÒ F, JEREMIĆ B. Simulating stiffness degradation and damping in soils via a simple visco-elastic-plastic model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **63**(1): 98 - 109.
- [8] DASSAULT SYSTÈMES. ABAQUS Analysis User's Manual, version 6.10[CP/DK]. Providence, Rhode Island, USA, 2010.
- [9] BORJA R I, LIN C H, SAMA K M, et al. Modelling non-linear ground response of non-liquefiable soils[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, **29**(1): 63 - 83.
- [10] 庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 436 - 442. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, LIANG Yan-xian, et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 436 - 442. (in Chinese))
- [11] HASHASH Y M A, Park D. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment[J]. Engineering Geology, 2001, **62**(1): 185 - 206.
- [12] HASHASH Y M A. Deepsoil v5.1, user manual and tutorial 2002 - 2012[CP/DK]. Urbana Champaign: University of Illinois at Urbana Champaign, 2012.

第三届全国岩土本构理论研讨会

(一号通知)

近几年, 国内外学者在岩土材料的强度及本构理论取得了大量的创新性研究成果, 为进一步促进岩土本构理论的交流和学习, 岩土力学及岩土工程分会土的本构关系与强度理论专业委员会决定于 2017 年 9 月在北京工业大学召开第三届全国岩土本构理论研讨会。会议将围绕“重大工程防灾减灾中的岩土本构理论”这一主题, 针对土、混凝土、岩石等岩土类材料的本构理论、试验方法、数值模拟、工程应用等多个领域的问题进行研讨。本次会议旨在为国内外同行提供一个开放的交流平台, 相互交流防灾减灾和岩土本构理论相关领域近年来取得的新进展, 展现最新研究进展和研究成果, 共同探讨岩土本构理论面临的挑战和发展的趋势。会议将通过多种形式的报告开展, 共享新思想, 激发新思维, 拓宽新视野, 破解新难题, 解决新问题, 进一步推动我国在岩土本构理论、方法和应用等方面的进程, 促使我国岩土工程领域的发展和进步。望广大从事岩土本构理论及相关领域研究的专家、学者、工程技术人员以及研究生踊跃投稿并参加本次会议。

会议主题: 重大工程防灾减灾中的岩土本构理论,

征文范围: ①岩土材料本构理论与建模方法; ②岩土材料力学特性与试验技术; ③岩土本构理论的数值积分方法; ④本构理论在重大工程中的应用。

征文要求: ①论文截稿日期: 2017 年 6 月 30 日。②稿件要求在国内外未正式发表过的研究成果, 请严格按照《岩土工程学报》征文要求规范编辑全文。会议学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查, 精选一定数量的优秀论文推荐到《岩土工程学报》、《北京工业大学学报》。通过审稿程序的论文, 将在《岩土工程学报》、《北京工业大学学报》发表正刊各 1 期。③会议推荐优秀论文 8-10 篇至《工业建筑》正刊集中发表。④会议印刷供学术交流论文集一册, 已发表论文、尚未发表论文、1 页内的论文摘要均可, 论文集非正式出版, 尚未发表论文会后可投其他期刊。⑤论文的保密审查由作者本单位自行处理, 会议不再作保密审查, 作者本人对此负全部责任。⑥来稿请用 word 文档排版, 具体格式参见《岩土工程学报》模板。请在稿件首页注明作者研究方向、电话、Email 等联系方式、稿件是否公开发表过等。⑦稿件通过电子邮件发送到会议专用邮箱 (gctc_bjut@163.com)。

会议时间: 2017 年 9 月 1~3 日, 会议地点: 北京工业大学。联系地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号新学科楼 C452, 邮编: 100124, 电话: 010-67392981。联系人: 路德春 (13811035103), 范立峰 (13750826224), 王国盛 (15652352493), E-mail: gctc_bjut@163.com。

(会议组委会 供稿)