

双向水平地震作用下场地土三维非线性反应分析

梁发云^{1,2}, 陈海兵^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对双向水平地震作用下场地土三维非线性反应问题, 基于多重屈服面模型建立了三维竖向土柱模型, 重点考察了影响场地土非线性分析准确性和效率的相关因素, 其中多重屈服面模型参数、土层厚度划分、边界条件以及组成阻尼的频率或模态等的合理选择是进行非线性地震反应分析的关键参数。当土层性质差异明显时, 可以根据波速的不同分为多个子系统, 各个子系统分别选用相对应的阻尼参数进行分析。为确定分析方法的计算精度, 与已有文献的离心动力试验结果对比, 验证了三维竖向土柱模型的可靠性, 该模型可以有效地应用于双向非线性地震反应分析。

关键词: 地震反应; 多重屈服面; 双向地震动输入; 三维非线性; OpenSees 平台

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Nonlinear Three-Dimensional Seismic Ground Response Analysis in Bidirectional Horizontal Earthquake

LIANG Fayun^{1,2}, CHEN Haibing^{1,2}, HUANG Maosong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The three-dimensional vertical column system and the multi-yield surface plasticity constitutive model were implemented for the problem of nonlinear seismic site response to bidirectional horizontal earthquake loading. The practical issue concerned the specification of the accuracy and efficiency of site response analysis. The crucial parameters describing the multi-yield surfaces, soil thickness division and boundary conditions, and frequencies or modes for the damping formulation could help performing the accurate nonlinear seismic ground response in the bidirectional earthquake. The layered soil column was divided into multiple sub-soils with different viscous damping matrixes according to

the shear velocities as the soil properties were significantly different. The accuracy of the three-dimensional soil column method was verified by the dynamic centrifuge model test results. It is concluded that the three-dimensional vertical column model can be used for bidirectional nonlinear seismic local ground response analysis.

Key words: seismic ground response; multi-yield surface plasticity; bidirectional earthquake loading; three dimensional nonlinearity; OpenSees platform

地震作用下剪切波从基岩向地表传播时, 由于竖向地震分量通常相对较小, 场地地震反应分析时主要关注土层的水平地震响应, 土体自由场分析大多是基于单一的平动分量进行场地地震反应分析^[1]。然而, 地震时土层运动在空间上却表现出不同的大小和方向^[2]。已有强震观测数据大多会提供两个水平正交方向和一个竖直方向的地震加速度时程记录。单一的平动分量未考虑土体实际发生的多向运动对其应力应变的影响, 土体内部在多向运动下可能会出现旋转剪应力响应^[3], 而旋转剪应力的出现, 则会导致土中孔隙水压力的积累^[4-5]。

已有的多向地震作用下土层场地响应分析主要关注砂土液化时的孔压和抗液化强度。LASSIII 程序^[6]将饱和砂土视为多孔变形粒状固体和孔隙水的耦合两相介质, 结合砂土的双轴循环剪应力应变特性, 用于多向地震作用下的水平土层地震液化响应分析; SUMDES 程序^[3]则采用塑性界面模型分析土体在多向地震作用下的土层地震反应。对于形状复杂、平面不规则的结构, 双向水平地震动输入对于寻找地震扭转效应的最不利情况有着重要意义, 可为土体在空间状态下的应力和扭转变形分析提供依据^[7]。

以一维土层地震反应分析程序 SHAKE 为代表

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(91315301-05, 41672266); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015-90)

第一作者: 梁发云(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础与深基础工程, 岩土与地下工程抗震。

E-mail: fyliang@tongji.edu.cn

的等效线性化方法应用较为广泛^[8],但它不适用于双向地震反应分析,且这种等效线性化方法对于深厚软土以及强震作用的计算结果也不理想.多向地震相较于单向地震作用,土体动力特性表现出高度的非线性,有必要对场地地震反应进行非线性分析^[9].然而,场地地震反应非线性分析受土体动力本构模型参数选用等限制,在实际应用中非常复杂,土体动力本构模型选用需要准确反映地震不规则加载条件下土体的应力响应^[10-11].

OpenSees 软件是由加州大学伯克利分校主导研发的开源有限元程序,主要用于结构和岩土地震方面的模拟,具有很强的非线性分析能力^[12].在水平分层均匀土层中,当地震波从基岩向地表传播时,土层地震响应以剪切变形为主.本文基于 OpenSees 软件,采用多重屈服面本构模型,通过三维竖向土柱的建模方式,建立适用于场地土的双向非线性地震反应的三维模型,分析建模方式、土体动力本构参数和阻尼参数等因素对双向地震作用下非线性分析准确性的影响.在水平分层均匀场地中达到局部场地地震反应分析计算结果的精确性,三维竖向土柱模型是高效的建模方式之一.通过与离心动力模型试验的对比,验证了三维竖向土柱模型应用于双向非线性地震反应分析的可靠性,该模型可为工程应用提供参考.

1 多重屈服面模型

多重屈服面模型^[13-16]能够描述土体在动力作用下的弹塑性状态,较好地反映地震荷载作用下复杂应力路径和不规则加载条件下土体的有效应力响应. OpenSees 平台中所采用的多重屈服面 UCSD 土体动力本构模型^[17],既可模拟黏性土在快速加载条件下的不排水特性,也可模拟砂土的剪切特性、应变软化和孔隙水压力等特性.在多重屈服面塑性理论框架中,与土体非线性参数选用相关的主要包括屈服函数、硬化模式和流动准则.

在 UCSD 本构模型中,黏性土在主应力空间是圆柱形 Mises 屈服面^[13],屈服函数 f_{m1} 与土体不排水抗剪强度唯一有关;砂性土在主应力空间是圆锥形 Drucker-Prager 屈服面^[11],屈服函数 f_{m2} 与土体的有效黏聚力和有效内摩擦角有关.数学表达形式如下:

$$f_{m1} = \frac{3}{2} (s_{ij} - \alpha_{ij}^m) (s_{ij} - \alpha_{ij}^m) - k_m^2 = 0 \quad (1)$$

$$f_{m2} = \frac{3}{2} (s_{ij} - p_a \alpha_{ij}^m) (s_{ij} - p_a \alpha_{ij}^m) - M^2 p_a^2 = 0 \quad (2)$$

式(1),(2)中: s_{ij} 为偏应力张量; α_{ij}^m 为运动偏张量定义第 m 个屈服面在偏应力空间内的中心坐标; k_m 为第 m 个屈服面的大小; M 为与内摩擦角 φ 有关的材料参数; $p_a = p - a$, p 为平均有效应力, $a = c / \tan \varphi$ 为材料常数,其中 c 为黏聚力.

硬化模式采用运动硬化描述在循环荷载作用下土体滞后反应,所有屈服面在应力平面内可以采用包络线形式表示,符合 Masing 加卸载准则^[14].土体动剪切模量随剪应变的关系曲线近似分段线性化,每个线性分段代表了一个屈服面 f_m .如图 1 所示在双曲线形的八面体应力应变 $\tau-\gamma$ 关系上,随着偏应力不断增加,应力点在多重屈服面上移动时,对应于屈服面 $m = 1, 2, \dots, N$ (N 是总屈服面数),剪切模量 H_m 和最大屈服面 M_N 为^[11]

$$H_m = \frac{2(\tau_{m+1} - \tau_m)}{\gamma_{m+1} - \gamma_m} \quad (3)$$

$$M_N = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中: τ_{m+1}, τ_m 和 γ_{m+1}, γ_m 分别为相邻屈服面对应于双曲线形的 $\tau-\gamma$ 值; φ 为内摩擦角.土体最大屈服时,屈服面 f_N 对应于 $\tau_N, H_N = 0$.

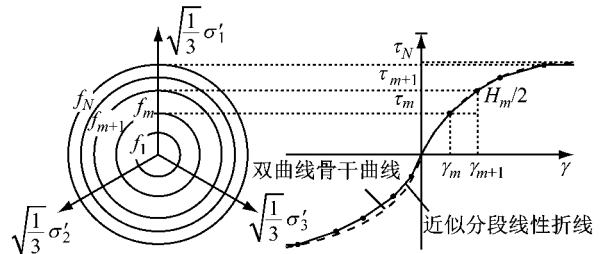


图 1 土体多重屈服面分段线性表示^[11]

Fig. 1 Piecewise-linear representation in multi-surface plasticity

黏土采用相关联流动法则,塑性应变增量矢量与屈服面正交.而砂土建立不相关联的流动法则,影响到土体材料体积的变化及强度,采用相位转换面定义土体压缩和剪胀的应力状态.在加载发生压缩时,应力状态处于相位转换面内部;随着进一步加载,土体在相位转换面外部出现剪胀趋势,随着卸载发生,土体进入压缩阶段.

多重屈服面模型用于土层非线性地震反应分析时需要确定其模型参数以及控制土体压缩或剪胀的参数.本文模型选用参数与文献^[17]建议一致.

2 三维模型建立

2.1 建模方式和单元类型

双向非线性地震反应分析需要建立三维模型. 采用如图2所示的三维竖向土柱分布质量模型实现场地的地震反应分析. 模型的建立方式和单元类型均需满足计算效率和精度的要求. 三维竖向土柱在水平 x 和 y 方向均划分为1个单元. 竖向划分厚度与地震波通过的最大频率 f_{\max} 有关. 基于模型计算效率和精度, 单元厚度至少能呈现一个土体单元的剪切变形, 根据地震波主要频率范围选取最大截止频率 $f_{\max} = 25$ Hz. 当不同单元内的地震波在高频段响应均稳定时, 土层单元厚度的划分才能达到合理的计算精度^[18]. 土体单元采用 McGann 等^[19]提出的8节点 SSPbrickUP 单元, 单个节点具有4个自由度, 包括3个位移分量 u 和1个孔压分量 p . 这是一种能够准确和高效地计算土体变形和压力的 u - p 单元, 可以实现地震下的流固耦合作用分析.

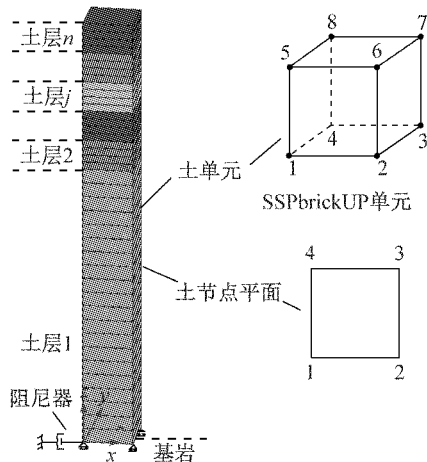


图2 水平土层三维竖向土柱分布质量模型

Fig.2 Distributed mass of 3D soil column horizontally layered deposits

2.2 边界条件和地震动输入

三维竖向土柱建模方式是一种简单高效的自由场非线性分析模型^[19], 然而模型的边界条件也需要满足模拟土层边界条件的要求. 地震从基岩向地表传播时, 土层响应需要考虑剪切变形机制, 三维竖向土柱建模方式可以实现场地的土层响应分析. 通过约束单元节点的相互关系, 模拟场地的变形机制, 节点所在的平面连接了2个土体单元, 约束节点平面内各点的相互运动, 即施加在节点2, 3和4的各个自由度的位移与节点1的位移相同. 土体单元仅可

以发生 x 和 y 方向的水平剪切变形和 z 方向的自重变形.

通过约束或释放 SSPbrickUP 单元的孔压自由度, 可以模拟在加、卸载过程中是否生成孔压. 本文通过固定模型顶部的孔压自由度, 模拟排水边界条件; 通过释放模型内部的孔压自由度, 产生内部孔压.

土层底部为基岩时, 模型底部边界设定为竖向固定, 水平 x 和 y 方向采用 Lysmer-Kuhlemeyer 黏性边界^[20], 以模拟弹性半空间下卧层吸收人工边界的反射波. 地震波水平 x 和 y 方向的加速度时程积分转化为速度时程, 乘以边界黏性阻尼系数(基岩和土的边界黏性阻尼系数为 $\rho_E V_{SE} A_E$, ρ_E 是基岩密度, V_{SE} 是基岩剪切波速, A_E 是基岩与土柱接触面积), 得到等效力的输入模式分别同时施加于土体底部节点上.

3 阻尼参数

地震波中的高频成分在土体内部传播时, 能量衰减比低频成分快, 传播到地表的地震波以低频为主. Kwok 等^[10]认为在土体自由场的非线性时程分析中, 可以选用与频率相关联的阻尼形式, 也可以使用与频率无关的黏滞阻尼(如等效黏性阻尼比随剪应变幅值变化)或者小应变滞回阻尼. 鉴于 Rayleigh 阻尼消除了具有很高频率的振型反应, 但可以有效保留两个指定频率之间对应的振型反应, 本文选用 Rayleigh 阻尼形式, 指定两个适合的频率考虑来自模型主要振型的贡献. Rayleigh 阻尼是与土体单元质量及刚度有关的阻尼形式. 黏滞阻尼矩阵 C 与质量矩阵 M 和刚度组合 K 成正比.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (5)$$

式中: 系数 a_0 和 a_1 分别为 Rayleigh 阻尼系数. Rayleigh 阻尼与频率有关, 对于两个特定频率 ω_m 和 ω_n , 当阻尼比 ξ 相同, 比例系数 a_0 和 a_1 分别为

$$a_0 = \frac{2\xi\omega_m\omega_n}{\omega_m + \omega_n} \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \quad (7)$$

阻尼比 ξ 及频率 ω_m, ω_n 是影响场地非线性分析结果的关键因素^[10]. 一般场地非线性地震反应分析中, ω_m 通常选用整体场地土层的周期频率^[10,21], ω_n 选用 $5\omega_m$ ^[10] 或根据基岩地震波主要频率分量进行选取^[22]. 然而, 以上与阻尼相关的频率选择方式, 没有考虑分层土的性质对地震波频率成分的吸收和过滤

效果. 在坚硬场地土中, 地表地震波中的短周期成分较多, 而深厚软弱土层中, 地表地震波中长周期成分显著增加. 因此, 对土层性质差异明显的分层土地, 由于存在着明显不同的阻尼, 可根据波速的不同分为多个子系统, 各个子系统选用相对应的 Rayleigh 阻尼参数. 单个子系统可认为是均质土层, 选用相应的阻尼比 ξ_i 和第一阶固有频率 ω_{mi} , ω_{ni} 参考文献[10]仍选用 $5\omega_{mi}$, 通过式(5)形成单个子系统的黏滞阻尼矩阵. 其中第 k 阶固有频率 ω_{ki} 为

$$\omega_{ki} = \frac{(2n-1)\pi V_{si}}{2H_i} \quad (8)$$

式中: V_{si} 和 H_i 分别为每个子系统对应的剪切波速和厚度.

4 与离心试验对比验证

4.1 算例一

为验证本文的三维土柱模型在地震下自由场分

析的准确性, 采用加州大学戴维斯分校 Wilson 等^[23] 的离心振动台模型进行验证, 计算采用换算后的原型尺寸. 试验由两层土层组成, 底部为相对密度为 75%~80% 的密实砂土, 厚度为 11.4 m, 不均匀系数为 1.5, 平均粒径为 0.15 mm, 砂土密度为 $1.66 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$; 上部为饱和软黏土, 厚度 6.1 m, 液限为 88%, 塑限为 48%, 不排水剪切强度约 2.8~14.9 kPa, 软黏土密度为 $1.6 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$. 该试验箱可以发生层状剪切变形, 用于反应场地的土体剪切变形机制, 可以采用本文的竖向土柱建模方式进行模拟. 由于试验箱可变形的层数较少, 需要考虑到剪切箱中非剪切变形土层的约束作用. 本文采用了土层重度增加 25% 进行计算^[24], 基底视为刚性基底. 土层相关参数如图 3 所示, 其中最大频率 f_{\max} 表明土层分层状况, 软黏土和密实砂土的剪切波速差异明显, 可以依据波速的不同采用相对应的 Rayleigh 阻尼参数. 土层剪切波速 v_s 由式(9)得到.

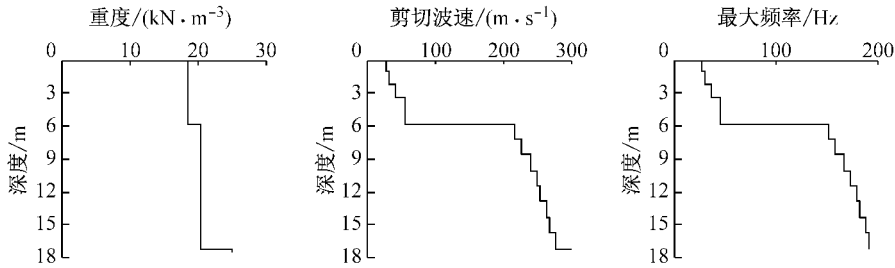


图 3 不同土层深度的单位重度、剪切波速和最大频率

Fig.3 Unit weight, shear wave velocity, and maximum frequency profiles versus depth of each layer

$$v_s = \sqrt{G_{\max}/\rho} \quad (9)$$

式中: ρ 为土体密度; 剪切模量 G_{\max} 对于砂土采用式(10)计算^[25], 黏土采用式(11)^[24] 计算.

$$G_{\max} = 2.17K_{2,\max} \sqrt{\sigma'_m/p_{\text{atm}}} \quad (10)$$

$$G_{\max} = 380c_u \quad (11)$$

式(10), (11)中: $\sigma'_m = (1+2K_0)\sigma'_v/3$, σ'_v 为竖向有效应力, $K_0=0.6$; p_{atm} 为大气压力; $K_{2,\max}=65$; c_u 为不排水剪切强度.

离心振动台输入的地震波来自 1995 年 Kobe 地震, 基底输入最大加速度为 $0.055g$, 自由场计算时采用基底加速度计的实测加速度时程数据, 峰值加速度为 $0.054g$. 根据文献[17]分别选用与软黏土和相对密度为 75% 的砂性土相关的多重屈服面模型参数进行分析, 土体低应变弹性模量 $E = 2G_{\max}(1 + \mu_s)$, 体积模量 $K = E/3(1 - 2\mu_s)$, 其中 μ_s 是土的泊松比, 砂土取 0.25, 软黏土取 0.45, 与频率有关的阻尼比取为 $0.002^{[10]}$.

图 4a 是本文三维土柱模型计算与试验的加速度时程对比图. 由图 4a 可知, 土层深度 z 方向的计算结果和实测响应形态一致, 土层的加速度从基底到地表逐渐放大. 在整个时间区间内, 砂土层中的试验与分析结果相吻合; 软黏土层除了顶部, 试验与计算结果也较为一致.

对试验得到的加速度时程进行积分处理即可得到自由场的位移响应. 与土层加速度响应相比, 自由场土体的位移响应在岩土工程分析中同样具有重要的意义, 可广泛应用于桩土相互作用分析以及评估振动台试验模型箱土层边界效应等问题. 图 4b 是本文模型计算与试验的位移时程对比图. 图 4b 中试验土层的位移时程曲线是加速度信号经过频域 0.2~25 Hz 带通滤波和频域积分后的结果. 计算得到的位移曲线与试验加速度频域滤波积分后的位移很好地吻合, 仅地表土层的位移有一定差异, 其原因可能是地表土层埋设的加速度计受到外界干扰所致.

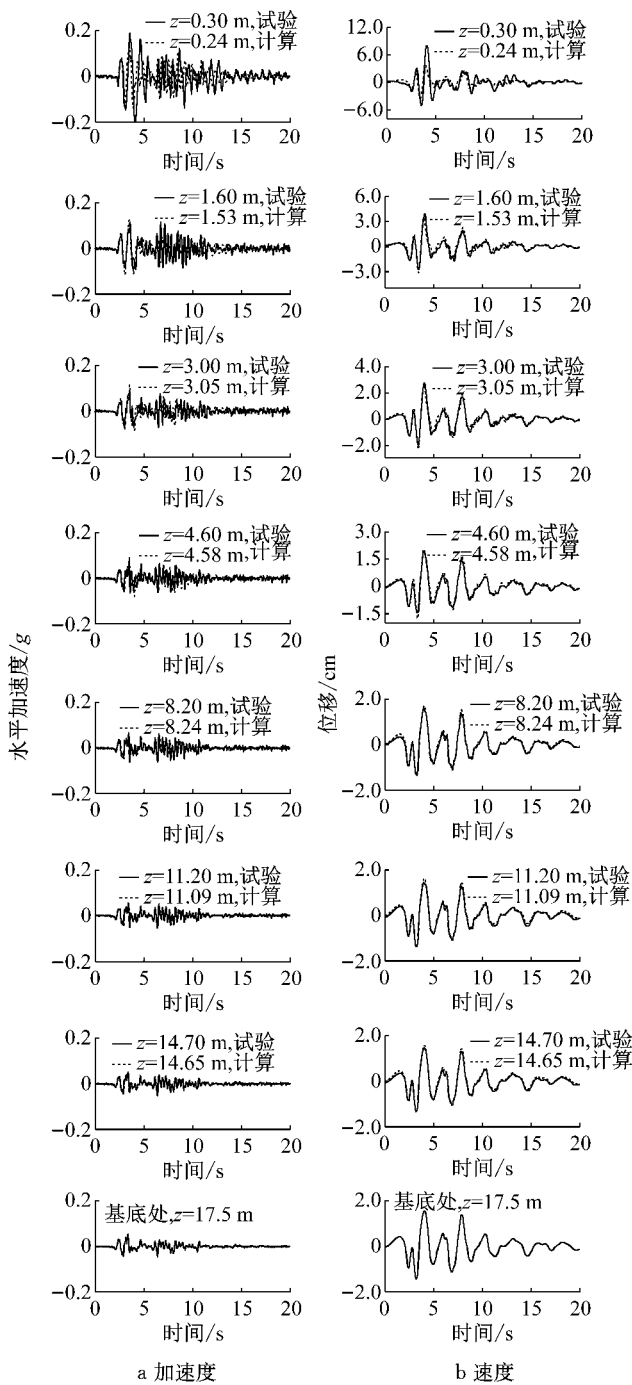


图 4 不同土层深度处水平加速度、位移
实测值和计算结果对比

Fig. 4 Acceleration and displacement comparison of recorded and calculated results versus depth of each layer

4.2 算例二

为验证本文模型在双向地震下自由场分析的准确性,算例采用 Su^[26]在香港科技大学离心机振动台模型试验中试验 C 的结果进行验证. 该试验采用层状剪切箱模拟场地的土体剪切变形,因此可以采用本文的竖向土柱建模方式进行模拟. 计算过程中均

采用换算后的原型尺寸. 试验用土厚度为 16 m,砂为相对密度为 40% 的 Toyoura 砂,不均匀系数为 1.7,平均粒径为 0.17 mm,最大孔隙比为 0.977,最小孔隙比为 0.597,密度 ρ_s 为 $1.9 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比为 0.25. 整个土层深度上每 4 m 划分为单一土层系统,单层土包括 10 个单元. 根据文献[17]选用松散至稍密的砂性土的多重屈服面模型参数进行分析,渗透系数为 $2 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与频率有关的阻尼比取 0.05. 剪切模量 G_{\max} 采用式(12)^[2] 计算,剪切波速 v_s 由式(9)得到.

$$G_{\max} = G_0 \frac{(2.973 - e_0)^2}{1 + e_0} \sqrt{\sigma'_v p_{\text{atm}}} \quad (12)$$

式中: $G_0 = 125$; $e_0 = 0.86$.

计算采用的输入地震波如图 5 所示,是由汉宁窗修正后的频率为 1.25 Hz 的正弦波,水平两个正交方向的峰值加速度分别为 0.10g 和 0.11g,相位差为 135° ,时间步为 0.04 s,持续时间为 24 s.

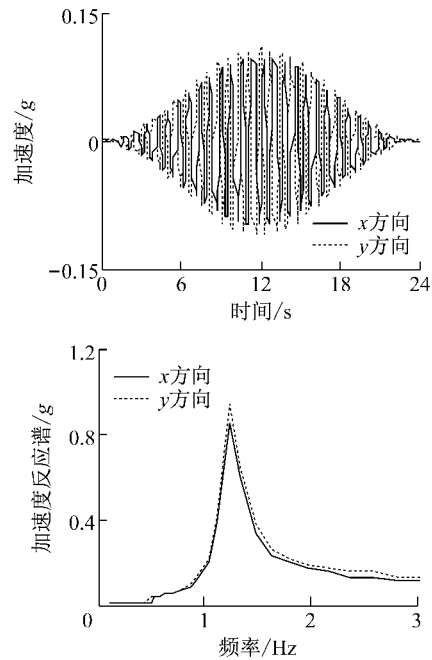


图 5 正交方向输入加速度

Fig. 5 Input acceleration in the orthogonal direction

图 6 是双向地震作用下,本文模型计算与文献[26]试验实测结果在 x 和 y 方向上加速度时程对比,其中 x 方向 $z = 12 \text{ m}$ 和 y 方向 $z = 4 \text{ m}$ 无实测结果. 剪切箱基底在深度为 16 m 处,试验实测 y 方向的地震波在形态上不对称,而计算采用基底加速度是图 5 所示的正弦波,在形态上对称. 尽管两者的结果对比有所差异,但计算和试验结果在整体趋势上较为一致. 在深度为 8 和 12 m 处, x 方向上计算得到的土层响应比 y 方向上的更为一致. 在 15.4 s 左

右时,浅部土层在 x 和 y 方向上的加速度都发生了急剧衰减,液化衰减的时间点与试验结果一致。

合,但土体内部的超孔隙水压力生成时间普遍比试验结果要早,且土层越深,数值越大。

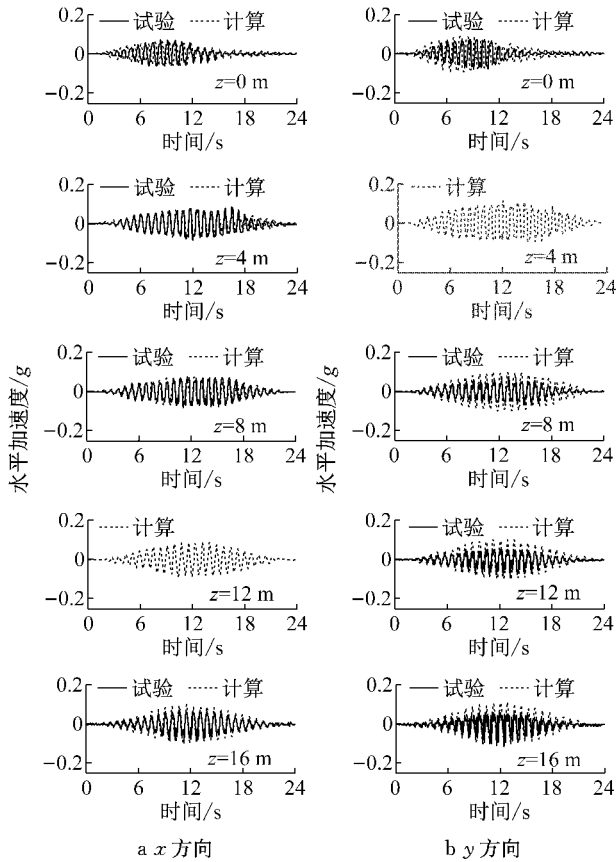


图 6 试验 C 中 x 方向和 y 方向的计算和实测加速度响应
Fig.6 Acceleration comparison of recorded and calculated results of test C in the direction of x and y

图 7 是土层内部超孔隙水压力的试验和计算结果对比。图 7 表明,试验结果和本文计算结果较为吻

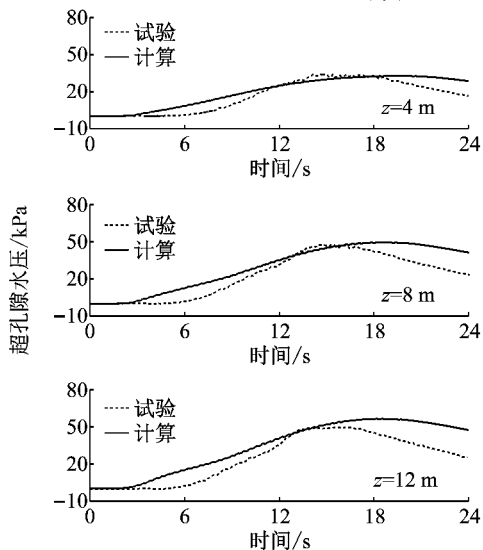


图 7 超孔隙水压力的计算和试验结果对比
Fig.7 Excess pore pressure comparison of recorded and calculated results

5 结论

(1) 建立了双向非线性地震反应的三维竖向土柱模型,结合多重屈服面本构模型,明确了建模方式以及土体动力本构参数和阻尼参数的选用原则.与已有文献的离心动力试验结果对比,验证了三维竖向土柱模型用于场地地震反应分析的准确性,表明上述建模方式可以有效地应用于水平分层均匀土层场地的双向非线性地震反应分析。

(2) 建立双向非线性地震反应分析时,需合理输入多重屈服面模型参数、土层厚度划分、重度、低应变剪切模量和体积模量,以及组成 Rayleigh 阻尼的频率或模态等必要参数.当土层性质差异明显时,可以根据波速的不同分为多个子系统,各个子系统选用相对应的 Rayleigh 阻尼参数进行分析。

参考文献:

[1] YANG J, YAN X R. Site response to multi-directional earthquake loading: a practical procedure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(4): 710.

[2] PENZIEN J, WATABE M. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 3(4): 365.

[3] LI X S, WANG Z L, SHEN C K. Sumdes: a nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multidirectional earthquake loading[R]. Davis: University of California, 1992.

[4] SU D, LI X S. Impact of multidirectional shaking on liquefaction potential of level sand deposits[J]. Geotechnique, 2008, 58(4): 259.

[5] ISHIHARA K, YAMAZAKI F. Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading [J]. Soils and Foundations, 1980, 20(1): 45.

[6] GHABOUSSI J, DIKMEN S U. LASS-III: computer program for seismic response and liquefaction of layered ground under multi-directional shaking[R]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1979.

[7] 李宏男, 孙立晔. 地震面波产生的地震动转动分量研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 15.

LI Hongnan, SUN Liye. Rotational components of earthquake ground motions derived from surface waves[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 15.

[8] SCHNABEL P B, LYSMER J, SEED H B. Shake: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites[R]. Berkeley: University of California, 1972.

[9] 陈青生, 高广运, 何俊锋. 上海软土场地三维非线性地震反应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3461.

- CHEN Qingsheng, GAO Guangyun, HE Junfeng. Three-dimensional nonlinear analysis of seismic groundresponse of soft soils in Shanghai[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3461.
- [10] KWOK A, STEWART J, HASHASH Y, *et al.* Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(11): 1385.
- [11] STEWART J P, KWOK A O-L, HASHASH Y M, *et al.* Benchmarking of nonlinear geotechnical ground response analysis procedures[R]. Berkeley: University of California, 2008.
- [12] MCKENNA F, FENVES G L. The OpenSees command language manual; version 1.2[R]. Berkeley: University of California, 2007.
- [13] PREVOST J H. Mathematical modelling of monotonic and cyclic undrained clay behavior [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1977, 1(2): 195.
- [14] PREVOST J H. A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils[J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985, 4(1): 9.
- [15] YANG Z. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction[D]. New York: Columbia University, 2000.
- [16] 高广运, 时刚, 顾中华. 一个考虑循环荷载作用的简化模型[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1195.
GAO Guangyun, SHI Gang, GU Zhonghua. A simplified elastoplastic constitutive model under undrained cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1195.
- [17] YANG Z, LU J, ELGAMAL A. User's manual-OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements[R]. San Diego: University of California, 2008.
- [18] ELGAMAL A, YANG Z, LU J. Seismic ground response user's manual; Cyclic1D 1.3 [R]. San Diego: University of California, 2012.
- [19] MCGANN C R, ARDUINO P, MACKENZIE-HELNWEIN P. Stabilized single-point 4-node quadrilateral element for dynamic analysis of fluid saturated porous media[J]. *Acta Geotechnica*, 2012, 7(4): 297.
- [20] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. *Proc of ASCE*, 1969, 95(4): 859.
- [21] PHILLIPS C, HASHASH Y M A. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(7): 1143.
- [22] 楼梦麟, 邵新刚. 深覆盖土层 Rayleigh 阻尼矩阵建模问题的讨论[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7):1272.
LOU Menglin, SHAO Xinggang. Discussion on modeling issues of Rayleigh damping matrix in soil layers with deep deposit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1272.
- [23] WILSON D W, BOULANGER R W, KUTTER B L. Soil-pile-superstructure interaction at soft or liquefiable soil sites-centrifuge data report for Csp4 [R]. Davis: University of California, 1997.
- [24] BOULANGER R W, CURRAS C J, KUTTER B L, *et al.* Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(9): 750.
- [25] SEED H B, WONG R T, IDRIS I, *et al.* Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(11): 1016.
- [26] SU D. Centrifuge investigation on responses of sand deposit and sand-pile system under multi-directional earthquake loading [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2005.