

深厚饱和软土地中透镜体对上部结构地震响应的影响

韩 冰^{1,2}, 梁建文^{1,2}, 朱 俊²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 土木工程系, 天津 300350)

摘 要: 工程场地中透镜体对地震动具有明显的影响, 且饱和场地与相应干土地的地震响应具有明显的差别, 而目前对于深厚饱和软土地中透镜体对地震响应的影响还鲜有研究。采用有限元-间接边界元耦合法, 建立饱和场地中非线性土-结构动力相互作用模型, 对深厚饱和软土地中透镜体的宽度、厚度和埋深对上部结构动力响应的影响进行了系统地分析, 并着重讨论了土骨架-孔隙水耦合作用的影响。研究表明, 深厚饱和软土地中的透镜体可能会明显改变上部结构的动力响应; 透镜体的宽度、厚度和埋深对上部结构动力响应有不同程度的影响, 且与干土地中规律存在明显差异; 土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构动力响应的影响显著。

关 键 词: 深厚饱和软土地; 有限元-间接边界元耦合法; 透镜体; 土-结构动力相互作用; 地震响应; 土骨架-孔隙水耦合作用

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2227-11

Effect of lenticle on seismic response of structures in deep water-saturated poroelastic soft site

HAN Bing^{1,2}, LIANG Jian-wen^{1,2}, ZHU Jun²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A lenticle existing in engineering site affects significantly on the earthquake ground motion. There exists obvious difference between the seismic response of water-saturated poroelastic site and the corresponding dry site. However, there are few studies in literature on influence of lenticle on seismic response in deep water-saturated poroelastic soft site up to now. Using finite element and indirect boundary element coupled method (FEM-IBEM), this paper investigates the effect of width, thickness and embedded depth of a lenticle on dynamic structural response by the nonlinear dynamic saturated soil-structure interaction model, and particularly analyzes the effect of dynamic coupling effect between solid frame and pore water. The lenticle width, thickness and embedded depth show different effects on the structural response, resulting in obvious difference with those of a lenticle in dry site. The dynamic coupling effect between solid frame and pore water has significant effect on seismic response of the structure.

Keywords: deep water-saturated poroelastic soft site; FEM-IBEM coupled method; lenticle; dynamic soil-structure interaction; seismic response; dynamic coupling effect between solid frame and pore water

1 引 言

在滨海、湖泊、河道等沉积地区, 透镜体是一种比较常见的局部场地。研究表明, 场地中透镜体

的散射作用对地震动具有明显的影响^[1-2]。

在沿海地区地下水位较高, 场地多呈饱和状态, 如天津、上海等地。根据 Biot's 理论^[3-4], 饱和多孔介质的波动问题实际上是土骨架-孔隙水耦合作用

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51578372)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578372).

第一作者简介: 韩冰, 女, 1987 年生, 博士后, 主要从事地震工程研究。E-mail: hanbing@tju.edu.cn

通讯作者: 梁建文, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事地震工程研究。E-mail: liang@tju.edu.cn

的过程,与孔隙率、土骨架刚度、泊松比以及界面透水条件密切相关。当饱和介质的孔隙率较小或土骨架刚度较大时,土骨架-孔隙水耦合作用的影响不大;而当孔隙率较大,且土骨架的刚度较小(即本文研究的饱和软土介质)时,土骨架-孔隙水耦合作用的影响较大^[5]。研究表明,由于土骨架-孔隙水耦合作用的影响,水平层状饱和场地与相应干土地的地震响应具有明显的差别^[6-7]。

近年来,场地中透镜体对地震动影响问题开始引起关注。Dravinski^[8]采用边界积分方法分析了SH、SV、P和Rayleigh波在均匀场地中夹塞体周围的散射。利用波函数展开法并结合加权残值法,Manoogian等^[9]研究了平面SH波在均匀弹性场地中夹塞体周围散射问题。采用波函数展开法,袁晓铭^[1]研究了弹性场地中圆形弹性夹塞对平面SH波的二维散射问题,揭示了夹塞区对弹性波影响的基本规律。何颖等^[10]研究了透镜体断面形状随机性对地表动力响应极值的重要影响。梁建文等^[11-12]研究了层状场地中透镜体对地震动的线性和非线性放大作用。然而,目前针对饱和场地中透镜体的研究还非常少。袁晓铭等^[2]研究了地震激励下,饱和砂土透镜体的液化对建筑物动力响应的影响,表明其对短周期的建筑物主要起隔振作用,但在冲击型地震动的激励下,宽度和厚度小且埋深浅的透镜体液化可能对短周期建筑物起放大作用。

值得指出的是,目前关于饱和场地中透镜体(非液化)问题,尤其是对于沿海地区工程场地中常见的深厚饱和软土地中的透镜体问题的研究,还很少。

文献[13]研究了单相(干土)深厚软土地中透镜体对上部结构动力响应的影响,表明在单相(干土)深厚软土地中透镜体的存在可能会明显改变上部结构的动力响应,透镜体宽度、厚度和埋深对结构动力响应均有很大影响。本文在文献[13]的基础上,采用有限元-间接边界元耦合法,进一步建立饱和场地中非线性土-结构动力相互作用模型,研究深厚饱和软土地中透镜体对上部结构动力响应的影响,并着重比较考虑与不考虑土骨架-孔隙水耦合作用时上部结构动力响应的差别。

2 方 法

2.1 模型

如图1模型图所示,上部结构选取一典型的框架结构,地上9层地下1层。深厚饱和软土地由基岩半空间及其上部水平成层的饱和土层组成,土

层中含有一饱和的透镜体。基岩、土层和透镜体都是均匀各向同性的介质。

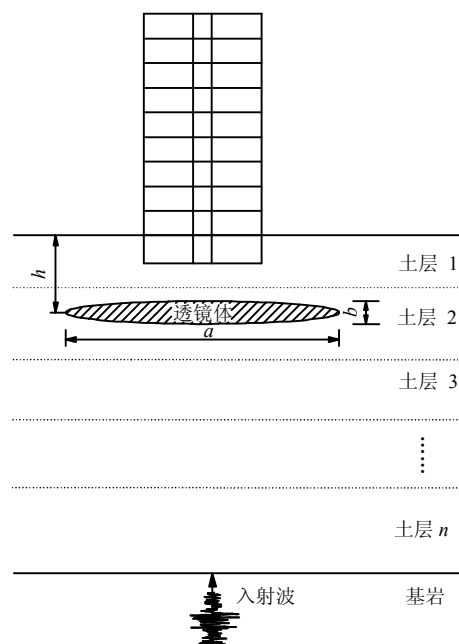


图1 模型图
Fig.1 The model

场地中基岩为单相弹性介质,由剪切模量 μ_R 、质量密度 ρ_R 、泊松比 ν_R 和阻尼比 ζ_R 确定。基岩上覆饱和土层,饱和土层由如下参数确定:土层厚度 l 、土骨架剪切模量 μ 、孔隙率 n' 、土骨架质量密度 ρ_s 、孔隙水质量密度 ρ_f 、饱和土层质量密度 $\rho = (1 - n')\rho_s + n'\rho_f$ 、土骨架结构参数 m 、土颗粒压缩常数 α 、孔隙水压缩模量常数 M 、反映黏稠性耦合的系数 b' 、泊松比 ν 、滞后阻尼比 ζ 。饱和和透镜体为椭圆形,埋深为 h 、宽度为 a 、厚度为 b 。透镜体介质由如下参数确定:土骨架剪切模量 μ_L 、孔隙率 n'_L 、土骨架质量密度 ρ_{Ls} 、孔隙水质量密度 ρ_{Lf} 、饱和透镜体介质质量密度 ρ_L 、土骨架结构参数 m_L 、土颗粒压缩常数 α_L 、孔隙水压缩模量常数 M_L 、反映黏稠性耦合的系数 b'_L 、泊松比 ν_L 、滞后阻尼比 ζ_L 。

模型中,饱和土层与弹性基岩界面不透水,饱和土层与透镜体界面透水,基础与地基土交界面不透水,地表透水。

2.2 Biot's 饱和理论

1941年,Biot提出了用固体土骨架位移 u_i 和流体相对于土骨架位移 w_i 表示的饱和多孔介质的本构方程^[3]:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} e + 2\mu \varepsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} p_f \quad i, j = x, y, z \quad (1)$$

$$p_f = -\alpha M u_{i,i} - M w_{i,i} \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为饱和土体的总应力; e 、 ε_{ij} 分别为固相和液相的体积应变; p_f 为土体的孔隙水压力; δ_{ij} 为狄拉克函数; μ 、 λ 为材料的两个拉梅常数。饱和多孔介质的动力平衡方程可表示为^[4]

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) u_{j,ji} + \alpha M w_{j,ji} = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i \quad (3)$$

$$\alpha M u_{j,ji} + M w_{j,ji} = \rho_f \ddot{u}_i + m \ddot{w}_i + b' \dot{w}_i \quad (4)$$

式中: $m = c \rho_f / n'$, $c = 1 + \gamma(1 - n') / n'$, γ 为一个取决于土颗粒形状的无量纲因子。

2.3 饱和场地中土-结构动力相互作用的有限元-间接边界元耦合法

如图2所示, 计算区域由近场有限元子域和远场边界元子域组成。有限元子域用 Ω^F 表示, 其宽度和高度分别用 W 和 H 表示; 边界元子域用 Ω^B 表示, Ω^F 和 Ω^B 的边界用 s 表示。

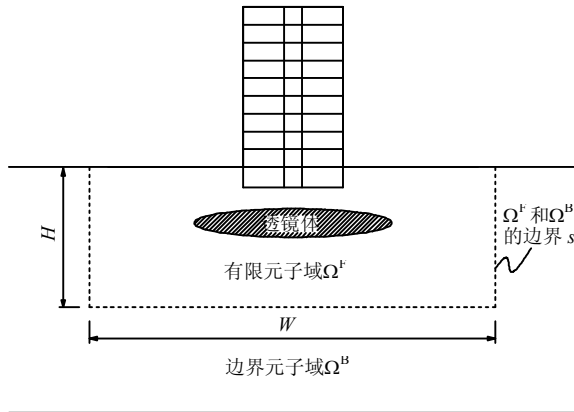


图2 有限元子域与边界元子域模型图

Fig.2 Model of FEM domain and IBEM domain

2.3.1 远场边界元子域 Ω^B 计算

将 Ω^B 的边界 s 离散为 N 个单元, 每个单元用 $S_j (j=1, \dots, N)$ 表示。地震激励下, Ω^B 中任意一单元的动力响应可分为两部分: 自由场和散射场动力响应。

假设每个单元的自由场位移 (包括土骨架位移和单元法向的孔隙水相对于土骨架的位移) 和应力 (包括单元总应力和孔隙水压力) 分别用 u_i 和 t_i ($i=1, \dots, N$) 表示。散射场的位移格林函数和应力格林函数分别用 g_{ij}^B 和 r_{ij}^B 表示, 即在单元 j 上施加单位均布虚拟荷载后, 单元 i 的位移响应 (包括土骨架位移和单元法向的孔隙水相对于土骨架的位移) 和应力响应 (包括单元总应力和孔隙水压力)。则边界

s 上任一单元 j 的位移和应力可表示为

$$u_i^B = u_i + \sum_{j=1}^N g_{ij}^B p_j^B \quad (i=1, N) \quad (5)$$

$$t_i^B = t_i + \sum_{j=1}^N r_{ij}^B p_j^B \quad (i=1, N) \quad (6)$$

式中: p_j^B 为作用在单元 j 上的均布虚拟荷载。

详细的自由场和散射场求解过程参见文献 [14-16]。

2.3.2 近场有限元子域 Ω^F 计算

将 Ω^F 用二维平面应变模型来模拟, 其中透镜体和土体离散为四节点等参单元, 上部结构用考虑剪切变形的梁单元^[17]模拟。为便于耦合, Ω^F 在进行单元离散时边界 s 上的节点与 Ω^B 边界上的节点是重合的。

饱和多孔介质的四节点等参单元中每个节点有4个自由度, 分别是土骨架水平方向位移 u_x 和竖向位移 u_z , 孔隙水相对于土骨架的水平方向位移 w_x 和竖向位移 w_z 。首先, 根据饱和和多孔介质的本构方程 (1)、(2) 和动力平衡方程 (3)、(4) 可得到等参单元应变及应力与节点位移关系, 进而便可得到饱和和多孔介质四节点等参单元的动力刚度矩阵 $[k_d]$ 。在形成各单元动力刚度矩阵时, 需要考虑材料的滞后阻尼, 即 $\mu^* = \mu(1 + 2i\zeta)$, $E^* = E(1 + 2i\zeta)$, μ 和 E 分别为材料的剪切模量和弹性模量, ζ 为材料的滞后阻尼比。然后将各等参单元和梁单元的动力刚度矩阵集整为 Ω^F 的整体刚度矩阵 $[K^F]$ 。假设字母 b 表示边界 s 上的各节点, 非边界上的各节点用 u 表示, 则 $[K^F]$ 可以简写为

$$[K^F] = \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{ub} \\ K_{bu} & K_{bb} \end{bmatrix} \quad (7)$$

假设 Ω^B 通过边界 s 施加给 Ω^F 的作用, 可以用一组施加在 Ω^F 的边界 s 上的虚拟均布荷载来模拟。在 s 的每段 S_j 上施加的均布虚拟荷载为 $p_j^F (j=1, \dots, N)$, 则施加在整个 s 上的虚拟荷载用矩阵 $[P^F]$ 表示。那么 Ω^F 的波动可理解为由 $[P^F]$ 的作用而产生。根据 Ω^F 的整体刚度矩阵 $[K^F]$ 便可确定各节点的位移 (包括土骨架位移和孔隙水相对于土骨架的位移):

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{ub} \\ K_{bu} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_u \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ [A][P^F] \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $[A][P^F]$ 是通过转换矩阵 $[A]$, 将施加在边界 s 上的均布虚拟荷载等效地移至边界的节点上;

$[U_u, U_b]^T$ 为非边界上的各节点和边界上各节点的位移 (包括土骨架位移和孔隙水相对于土骨架的位移)。进而便可确定各节点的应力及孔隙水压力。

类似于 Ω^B 中的位移格林函数和应力格林函数, 我们也定义 Ω^F 内的格林函数 g_{ij}^F 和 r_{ij}^F , 表示在 Ω^F 边界 s 的 j 段上施加均布虚拟荷载后 i 段上的位移 (包括土骨架位移和单元法向的孔隙水相对于土骨架的位移) 和应力 (包括总应力和孔隙水压力)。则 Ω^F 边界 s 的任一段的位移和应力可表示为

$$u_i^F = \sum_{j=1}^N g_{ij}^F p_j^F \quad (i=1, N) \quad (9)$$

$$t_i^F = \sum_{j=1}^N r_{ij}^F p_j^F \quad (i=1, N) \quad (10)$$

2.3.3 边界条件

根据耦合边界上位移连续和应力平衡条件有

$$\sum_{j=1}^N \int_{s_j} g_{ij}^F p_j^F ds_j = u_i + \sum_{j=1}^N \int_{s_j} g_{ij}^B p_j^B ds_j \quad (i=1, N) \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N \int_{s_j} r_{ij}^F p_j^F ds_j + \left(\int_{s_i} t_i ds_i + \sum_{j=1}^N \int_{s_j} r_{ij}^B p_j^B ds_j \right) = 0 \quad (i=1, N) \quad (12)$$

式 (11)、(12) 可以写为

$$\sum_{j=1}^N \int_{s_j} g_{ij}^F p_j^F ds_j - \sum_{j=1}^N \int_{s_j} g_{ij}^B p_j^B ds_j = u_i \quad (i=1, N) \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^N \int_{s_j} r_{ij}^F p_j^F ds_j + \sum_{j=1}^N \int_{s_j} r_{ij}^B p_j^B ds_j = - \int_{s_i} t_i ds_i \quad (i=1, N) \quad (14)$$

将式 (13)、(14) 写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} G^F & -G^B \\ R^F & R^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^F \\ P^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^F \\ -T^F \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $[G^F]_{ij} = \int_{s_j} g_{ij}^F ds_j$; $[G^B]_{ij} = \int_{s_j} g_{ij}^B ds_j$; $[R^F]_{ij} = \int_{s_j} r_{ij}^F ds_j$; $[R^B]_{ij} = \int_{s_j} r_{ij}^B ds_j$; $[U^F]_i = u_i$; $[T^F]_i = \int_{s_i} t_i ds_i$ 。

根据式 (15) 便可以确定出作用在 Ω^F 和 Ω^B 上的虚拟荷载 $[p^F]$ 和 $[p^B]$, 然后根据式 (9)、(10) 和式 (5)、(6) 确定出 Ω^F 和 Ω^B 任一点的位移和应力响应。

2.4 有限元-间接边界元耦合方法的等效线性化求解

等效线性化方法是在总体动力效应相当的前提下, 用等效的剪切模量和等效阻尼比代替不同应变幅值下的剪切模量和阻尼比, 从而可将非线性问题线性化。本文有限元-间接边界元耦合方法的等效线性化求解方法步骤如下:

(1) 根据场地参数确定 Ω^B 中各土层的初始剪切模量 μ^0 和初始阻尼比 ζ^0 , 计算 Ω^B 在地震激励下的自由场位移和应力响应, 进而可确定各土层的最大剪应变 γ_{\max}^0 。

(2) 根据等效线性化原理, 各土层等效剪应变为

$$\gamma_{\text{eff}}^0 = 0.65 \gamma_{\max}^0 \quad (16)$$

(3) 利用 γ_{eff}^0 , 通过无量纲动模量比和阻尼比与剪应变的关系, 重新确定各土层剪切模量 μ^i 和阻尼比 ζ^i 。

(4) 重新确定各土层最大剪应变 γ_{\max}^i , 并根据容许误差值 κ 进行如下的判断: 若 $|\gamma_{\max}^i - \gamma_{\max}^{i-1}| > \kappa$, 则重复步骤 (2) ~ (4), 直至 $|\gamma_{\max}^i - \gamma_{\max}^{i-1}| \leq \kappa$; 若 $|\gamma_{\max}^i - \gamma_{\max}^{i-1}| \leq \kappa$, 则结束 Ω^B 的迭代计算, 确定考虑了各土层非线性的等效土层参数即为剪切模量 μ^i 和阻尼比 ζ^i 。

(5) 根据场地介质参数确定 Ω^F 中各单元的初始剪切模量和初始阻尼比, 并与考虑了土层非线性的 Ω^B 耦合, 计算 Ω^F 中各单元的最大剪应变, 类似于步骤 (2) ~ (4) 进行 Ω^F 的迭代计算, 根据容许误差值 κ 进行收敛判断, 直至 Ω^F 中的 $|\gamma_{\max}^i - \gamma_{\max}^{i-1}| \leq \kappa$ 。

(6) 最后将场地和上部结构的动力响应输出。

需要说明的是, 这种计算方法避免了 Ω^B 和 Ω^F 同时进行迭代计算, 显著减小了迭代计算量。

3 精度验证

为验证本文有限元-间接边界元耦合法的计算精度, 下面分 3 部分进行验证。

3.1 验证饱和场地自由场非线性响应的计算精度

将本文模型中透镜体参数与周围土层参数取为相同, 不考虑上部结构的存在, 即退化为饱和和自由场模型, 与文献[7]中水平层状饱和场地地震响应的等效线性化方法的结果进行对比, 场地参数及输入地震动参数详见文献[7]。图 3 给出了 0.1g 幅值的

El Centro 波在基岩处以不同的入射角度 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) 入射时, 水平向地表峰值加速度 PGA (相对于入射波幅值) 放大倍数及竖向地表峰值加速度 PGA (相对于入射波幅值) 放大倍数, 其中包括干土地计算结果, 以及饱和场地中上部干土土层与下部饱和土层界面不同透水条件 (透水、不透水) 的结果。

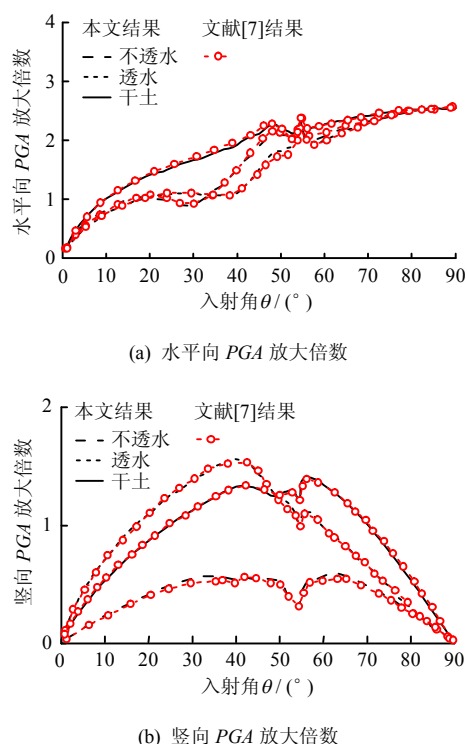


图3 本文水平和竖向地表峰值加速度放大倍数与文献[7]结果对比

Fig.3 Comparison of horizontal and vertical PGAs in this paper with those in the literature [7]

可以看出, 本文模型的计算结果与文献[7]结果吻合很好, 从而验证了本文饱和场地自由场非线性响应的计算精度。

3.2 验证含透镜体场地地表响应的计算精度

将本文计算模型退化为刚性基岩上覆单一水平土层 (单相干土) 场地, 土层厚度为 30 m, 透镜体的宽度为 20 m, 厚度为 4 m, 埋深为 10 m。土层及透镜体介质参数参见文献[12]。在基岩输入 0.1g El Centro 波, 且不考虑上部结构的存在, 求地表中心点的加速度时程, 将本文方法的计算结果与文献[12]有限元程序 FLUSH 的计算结果进行对比。图 4(a)、4(b)为本文方法计算得到的线性和非线性场地地表中心点的加速度时程曲线, 图 4(c)为本文加速度时程曲线 (图 4(a)、4(b)) 的地震反应谱结果与文献[12]

的地震反应谱结果对比。

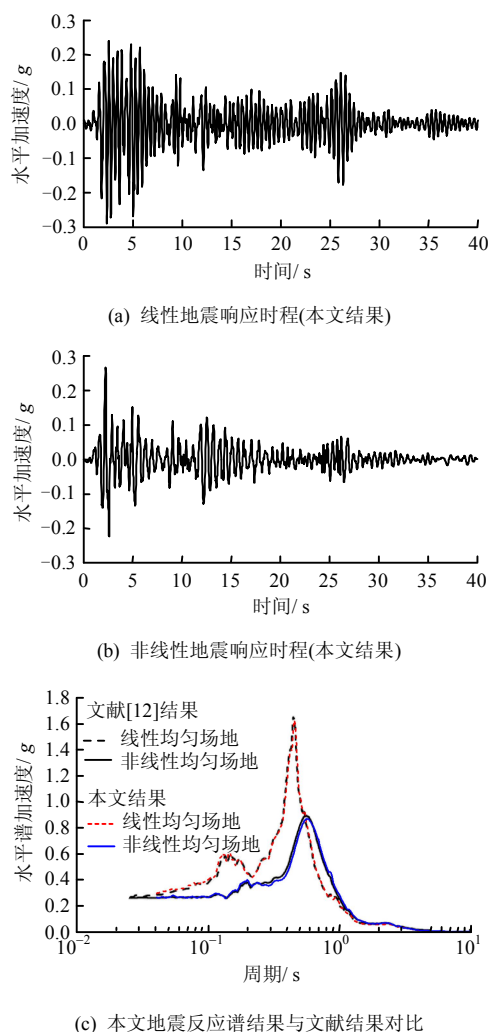


图4 本文结果与文献[12]结果对比

Fig.4 Comparison of our results with those in literature [12]

可以看出, 本文 FEM-IBEM 耦合法的计算结果与 FLUSH 结果吻合非常好, 可以验证本文含透镜体场地 (线性或非线性) 地表响应的计算精度。

3.3 验证包括上部结构的整体模型的计算精度

利用本文有限元-间接边界元耦合方法建立层状场地-埋置刚性基础-剪力墙动力相互作用模型如图 5(a)所示, 将饱和场地退化为单相干土地地, 计算参数详见文献[18], 求解基础水平位移频谱, 计算结果与文献[18]中边界元方法结果进行对比, 如图 5(b)所示。

从图 5(b)可以看出, 本文计算结果与文献[18]中计算结果吻合非常好。虽然图 5(a)中计算模型与本文第 4 节参数分析中采用的上部结构模型 (见图 1) 不同, 但从图 5(b)可以验证本文包括上部结构的整体模型的计算精度。

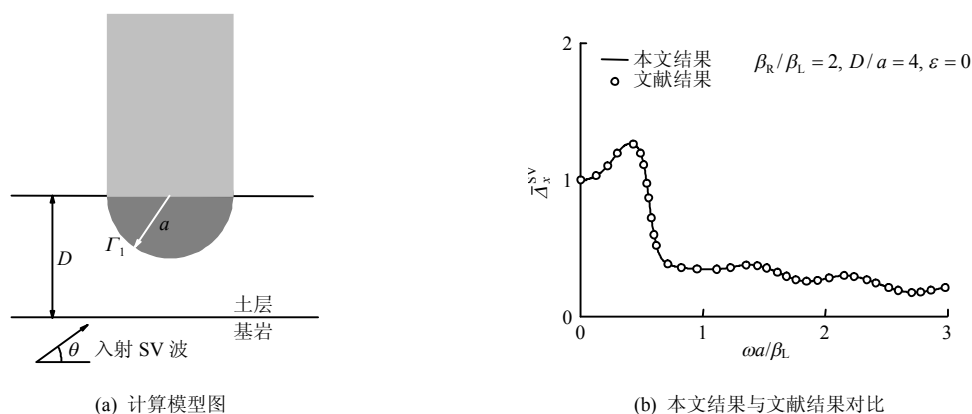


图5 本文结果与文献[18]结果对比

Fig.5 Comparison of our results with those of in literature [18]

通过上述 3 部分的计算结果对比, 可以验证本文有限元-间接边界元法的计算精度。

4 参数分析

上部结构选取天津地区的某一框架结构, 具体参数见文献[13]。计算场地取为天津地区某典型深

厚饱和软土地, 基岩及各土层的介质参数见表 1。根据天津地区某工程场地地震安全性评价报告确定的各土层介质的无量纲动模量比 μ/μ_{\max} 和阻尼比 ζ 与剪应变 γ 的关系见文献[13]中的表 3。透镜体介质参数如表 2 所示, 无量纲动模量比 μ_L/μ_{\max} 和阻尼比 ζ_L 与剪应变 γ 的关系见文献[13]中的表 4。

表1 天津地区某典型深厚饱和软土地土层参数

Table 1 Soil layer parameters of a typical deep water-saturated poroelastic soft site in Tianjin

土层 编号	l /m	μ /MPa	n'	ρ_s /(kg/m ³)	ρ_i /(kg/m ³)	ρ /(kg/m ³)	m /(kg/m ³)	α	M /MPa	b' /(N·s/m ⁴)	ν	ζ
1	10	58.95	0.3	2 321	1 000	1 925	7 222	0.828 7	62.81	10^7	0.33	0.05
2	10	78.00	0.3	2 357	1 000	1 950	7 222	0.828 7	63.71	10^7	0.33	0.05
3	10	99.98	0.3	2 393	1 000	1 975	7 222	0.828 7	64.34	10^7	0.33	0.05
4	10	125.00	0.3	2 429	1 000	2 000	7 222	0.828 7	64.79	10^7	0.33	0.05
5	10	182.25	0.3	2 464	1 000	2 025	7 222	0.828 7	65.37	10^7	0.33	0.05
6	10	251.13	0.3	2 500	1 000	2 050	7 222	0.828 7	65.72	10^7	0.33	0.05
7	10	332.00	0.3	2 536	1 000	2 075	7 222	0.828 7	65.95	10^7	0.33	0.05
8	10	425.25	0.3	2 571	1 000	2 100	7 222	0.828 7	66.10	10^7	0.33	0.05
9(基岩)		537.50				2 100					0.33	0.02

表2 饱和透镜体介质参数

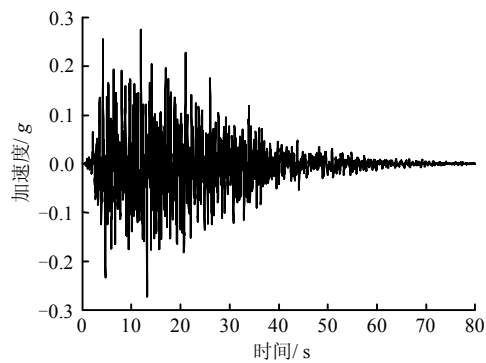
Table 2 Parameters for water-saturated poroelastic lenticle

类别	μ_L /MPa	n'_L	ρ_{Ls} /(kg/m ³)	ρ_{Lf} /(kg/m ³)	ρ_L /(kg/m ³)	m_L /(kg/m ³)	α_L	M_L /MPa	b'_L /(N·s/m ⁴)	ν_L	ζ_L
透镜体	11.52	0.3	2 142.86	1 000	1 800	7 222	0.828 7	50.72	10^7	0.33	0.05

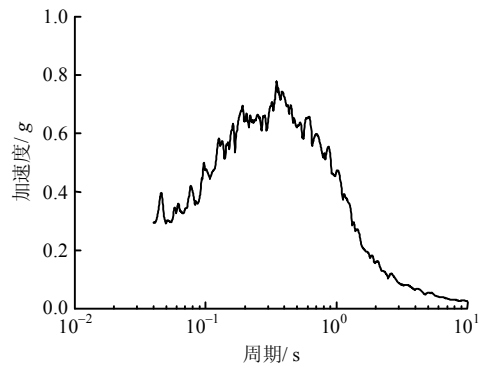
如图 6 所示, 选取天津地区某工程场地地震安全性评价报告中给出的场地基岩水平加速度时程, 作为计算模型中的入射地震波, 地震波从基岩面垂直入射。

对于饱和场地, 目前工程分析通常忽略土骨架-孔隙水耦合作用, 而仅考虑土的天然密度。亦即, 土骨架的剪切模量、泊松比和阻尼比与表 1、2 中饱和介质土骨架剪切模量、泊松比和阻尼比相同, 介

质质量密度与表 1、2 中饱和介质总质量密度 ρ 相同, 但不涉及与土骨架-孔隙水耦合作用有关的参数 m (土骨架结构参数)、 α (土颗粒压缩常数)、 M (孔隙水压缩模量常数)、 b' (反映黏稠性耦合的系数)。不考虑土骨架-孔隙水耦合作用的计算参数见表 3、4。介质的无量纲动模量比和阻尼比与考虑土骨架-孔隙水耦合作用的参数一致, 见文献[13]中的表 3、4。



(a) 入射地震波时程曲线



(b) 入射地震波反应谱

图 6 入射地震波

Fig.6 Incident seismic excitation

表 3 不考虑土骨架-孔隙水耦合作用模型的场地介质参数
Table 3 Parameters of the site without coupling effect between solid frame and pore water

土层编号	l/m	μ/MPa	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	ν	ζ
1	10	58.95	1 925	0.33	0.05
2	10	78.00	1 950	0.33	0.05
3	10	99.98	1 975	0.33	0.05
4	10	125.00	2 000	0.33	0.05
5	10	182.25	2 025	0.33	0.05
6	10	251.13	2 050	0.33	0.05
7	10	332.00	2 075	0.33	0.05
8	10	425.25	2 100	0.33	0.05
9(基岩)		537.50	2 100	0.33	0.02

表 4 不考虑土骨架-孔隙水耦合作用模型的透镜体介质参数
Table 4 Parameters of lenticle without coupling effect between solid frame and pore water

类别	μ_L/MPa	$\rho_L/(\text{kg}/\text{m}^3)$	ν_L	ζ_L
透镜体	11.52	1800	0.33	0.05

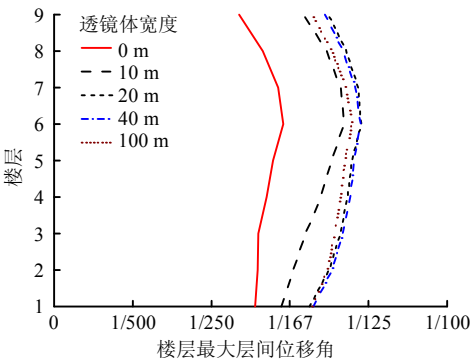
有限元子域 Ω^F 的高度 H 和宽度 W 根据计算精度和计算结果稳定性来确定。当透镜体宽度 $a \leq 20\text{ m}$ 时, H 取为 40 m , W 取为 80 m ;当透镜体宽度 $20 < a \leq 40\text{ m}$ 时, H 取为 40 m , W 取为 160 m ;当透镜体宽度 $40 < a \leq 100\text{ m}$ 时, H 取为 40 m , W 取为 200 m 。本文计算中, Ω^F 四节点等参单元最大尺

寸为 $0.5 \sim 0.7\text{ m}$,在入射波最小波长(7 m)的 $1/12 \sim 1/10$ 范围内。

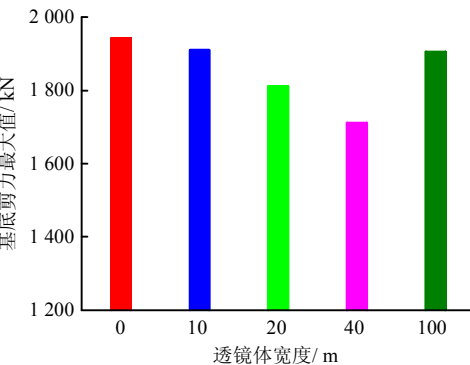
下面将系统地研究透镜体的宽度、厚度及埋深对上部结构动力响应的影响,并对比考虑与不考虑土骨架-孔隙水耦合作用时上部结构动力响应的差异。

4.1 透镜体宽度的影响

图 7 给出了不同的透镜体宽度时上部结构的楼层最大层间位移角和基底剪力最大值。另外表 5 给出了对应不同透镜体宽度时,考虑和不考虑土骨架-



(a) 楼层最大层间位移角



(b) 基底剪力最大值

图 7 透镜体宽度对上部结构楼层最大层间位移角和基底剪力最大值的影响

Fig.7 Effect of lenticle width on maximum story drift and maximum base shear force of the structure

表 5 不同的透镜体宽度时土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构动力响应幅值的影响

Table 5 Effect of dynamic coupling effect between solid frame and pore water on maximum seismic structural response corresponding to different lenticle widths

透镜体宽度 /m	最大层间位移角		基底剪力最大值/kN	
	不考虑耦合作用	考虑耦合作用	不考虑耦合作用	考虑耦合作用
0	1/127	1/171	1 594	1 942
10	1/132	1/135	1 543	1 910
20	1/133	1/129	1 531	1 811
40	1/100	1/128	1 530	1 711
100	1/108	1/132	1 370	1 905

孔隙水耦合作用的上部结构动力响应幅值的对比结果。计算中,透镜体的宽度 a 分别取为 10 m (小于结构宽度)、20 m (约等于结构宽度)、40 m (大于结构宽度) 和 100 m (远大于结构宽度),透镜体的埋深 h 取为 10 m,厚度 b 取为 4 m。

由表 5 可以看出,无透镜体时,楼层层间位移角最大值为 1/171,上部结构的基底剪力最大值为 1 942 kN。透镜体宽度分别为 10、20、40 和 100 m 时,楼层层间位移角最大值分别为 1/135、1/129、1/128 和 1/132,比无透镜体时分别放大了 26.42%、33.62%、33.96% 和 30.17%。说明透镜体的存在对上部结构的楼层层间位移角有明显的放大作用,透镜体宽度为上部结构宽度的两倍左右时,楼层层间位移角达到最大值,这与单相介质(干土)场地结论^[13]一致。但透镜体宽度对层间位移角最大值的影响较小,这与单相介质(干土)场地结论“透镜体的宽度对上部结构层间位移角影响很大”差别较大。透镜体宽度分别为 10、20、40、100 m 时,基底剪力最大值分别为 1 910、1 811、1 711、1 905 kN,比无透镜体时分别减小了 0.73%、5.87%、11.07% 和 0.47%。说明透镜体的存在对结构基底剪力最大值有一定的减小作用,这与单相介质(干土)场地规律^[13]基本一致,但饱和场地中透镜体宽度对基底剪力的影响程度小于单相介质(干土)场地。

另外,通过表 5 中对比结果发现,土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构层间位移角和基底剪力影响较大。考虑土骨架-孔隙水耦合作用后,结构层间位移角最大值减小,而基底剪力最大值明显增大,如透镜体宽度 100 m 时,考虑土骨架-孔隙水耦合作用时基底剪力比相应不考虑的结果增大 39.05%。造成如此差别的原因,一方面在于土骨架-孔隙水耦合作用的影响,另一方面可能还与基础与地基土交界面不透水的边界条件有关。

由此说明,透镜体宽度对楼层最大层间位移角和结构基底剪力影响不大。考虑土骨架-孔隙水耦合作用后上部结构基底剪力可能会明显大于相应不考虑土骨架-孔隙水耦合作用的结果。

4.2 透镜体厚度的影响

图 8 给出了不同的透镜体厚度时上部结构的楼层最大层间位移角和基底剪力最大值。另外表 6 给出了对应不同透镜体厚度时,考虑和不考虑土骨架-孔隙水耦合作用的上部结构动力响应幅值的对比结果。计算中,透镜体的厚度 b 分别为 2、4、6 m,透镜体埋深 h 取为 10 m,宽度 a 取为 40 m。

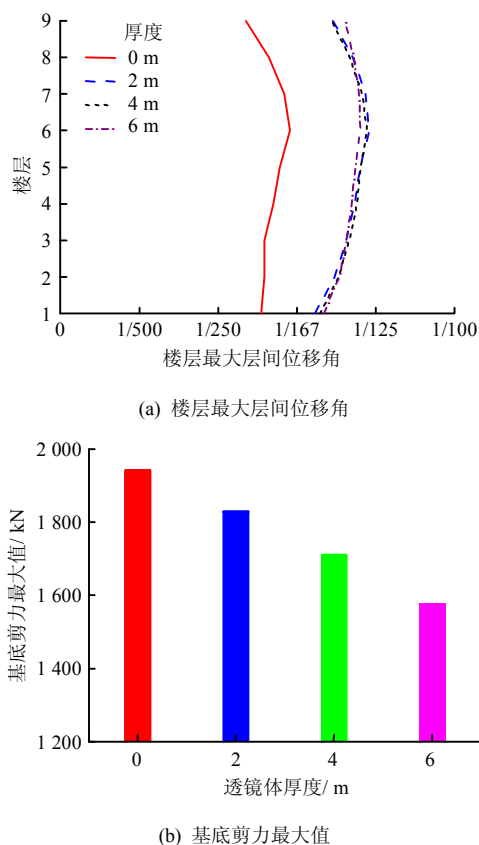


图 8 透镜体厚度对上部结构楼层最大层间位移角和基底剪力最大值的影响

Fig.8 Effect of lenticle thickness on maximum story drift and maximum base shear force of the structure

表 6 不同的透镜体厚度时土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构动力响应幅值的影响

Table 6 Effect of dynamic coupling effect between solid frame and pore water on maximum seismic structural response corresponding to different lenticle thicknesses

透镜体厚度 /m	最大层间位移角		基底剪力最大值/kN	
	不考虑耦 合作用	考虑耦 合作用	不考虑耦 合作用	考虑耦 合作用
0	1/127	1/171	1 594	1 942
2	1/133	1/127	1 534	1 829
4	1/100	1/128	1 530	1 711
6	1/110	1/131	1 462	1 576

由表 6 可以看出,透镜体厚度分别为 2、4、6 m 时,上部结构楼层最大层间位移角分别为 1/127、1/128 和 1/131。说明透镜体的厚度对楼层最大层间位移角的影响比较小,这与单相介质(干土)场地规律^[13]差别较大。

透镜体厚度为 2 m 时基底剪力最大值为 1 829 kN,比无透镜体时减小了 5.82%;透镜体厚度为 4 m 时基底剪力最大值是 1 711 kN,比无透镜体时减小了 11.89%;透镜体厚度为 6 m 时,上部结构基底剪力最大值是 1 576 kN,比无透镜体存在时,减小了 18.85%。说明,随着透镜体厚度的增大,其

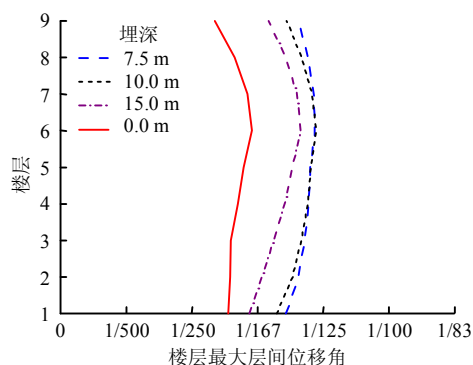
对上部结构基底剪力的影响呈增大趋势, 上部结构基底剪力最大值幅值逐渐减小, 这与单相介质(干土)场地^[13]规律一致。

另外, 从表6对比结果可以看出, 土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构层间位移角和基底剪力影响较大。考虑土骨架-孔隙水耦合作用后, 结构层间位移角最大值减小, 而基底剪力明显增大。

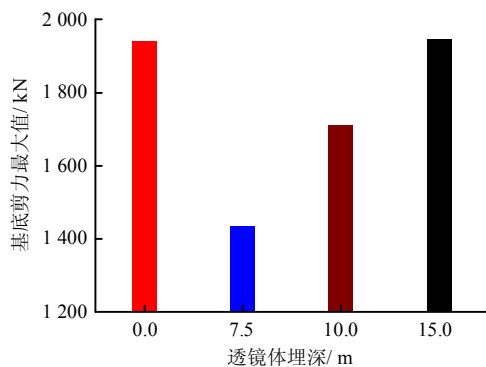
可以看出, 透镜体的厚度对上部结构楼层最大层间位移角的影响较小; 随着透镜体厚度的增大, 其对结构基底剪力的影响呈增大趋势, 基底剪力最大值逐渐减小; 另外, 考虑土骨架-孔隙水耦合作用后上部结构基底剪力可能会明显大于不考虑土骨架-孔隙水耦合作用的结果。

4.3 透镜体埋深的影响

图9给出了不同埋深的透镜体时上部结构的楼层最大层间位移角和基底剪力最大值。另外表7给出了对应不同透镜体埋深时, 考虑和不考虑土骨架-孔隙水耦合作用的上部结构动力响应幅值的对比结果。计算中, 透镜体埋深 h 分别取为7.5、10.0、15.0 m, 透镜体宽度 a 取为40 m, 厚度 b 取为4 m。



(a) 楼层最大层间位移角



(b) 基底剪力最大值

图9 透镜体埋深对上部结构楼层最大层间位移角和基底剪力最大值的影响

Fig.9 Effect of lenticle embedded depth on maximum story drift and maximum base shear force of the structure

表7 不同透镜体埋深时土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构动力响应幅值的影响

Table 7 Effect of dynamic coupling effect between solid frame and pore water on maximum seismic structural response corresponding to different lenticle embedded depths

透镜体埋深 /m	最大层间位移角		基底剪力最大值/kN	
	不考虑耦合作用	考虑耦合作用	不考虑耦合作用	考虑耦合作用
0.0	1/127	1/171	1 594	1 942
7.5	1/99	1/128	1 536	1 435
10.0	1/100	1/128	1 530	1 711
15.0	1/135	1/136	1 514	1 945

由表7可以看出, 随着透镜体埋深的增大, 其对上部结构动力响应的影响逐渐减小, 这与单相介质(干土)场地规律^[13]一致。当透镜体埋深为7.5 m时, 楼层层间位移角最大值为1/128, 基底剪力最大值为1 435 kN; 当透镜体埋深10 m时, 楼层层间位移角最大值为1/128, 基底剪力最大值为1 711 kN; 当透镜体埋深达到15 m时, 楼层层间位移角最大值为1/136, 基底剪力最大值为1 945 kN。说明, 随着埋深的增加, 上部结构动力响应逐渐接近无透镜体时结果(层间位移角最大值为1/145, 基底剪力最大值为1 942 kN)。

另外, 从表7对比结果可以看出, 土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构层间位移角和基底剪力影响很大。考虑土骨架-孔隙水耦合作用后基底剪力可能会明显增大, 如透镜体埋深15 m时考虑土骨架-孔隙水耦合作用后基底剪力增大28.47%。

可以看出, 埋深较浅的透镜体对上部结构动力响应的影响较大; 随着透镜体埋深的增大, 影响呈减小的趋势; 另外, 不考虑土骨架-孔隙水耦合作用可能会明显低估上部结构的基底剪力。

5 结 论

本文采用有限元-间接边界元耦合方法, 建立非线性饱和软土地中土-结构动力相互作用模型, 系统地研究了深厚饱和软土地中透镜体的宽度、厚度和埋深对上部结构动力响应的影响, 并着重研究了土骨架-孔隙水耦合作用对结构动力响应幅值的影响。研究得出以下结论:

(1) 深厚饱和软土地中透镜体的存在会明显改变上部结构的动力响应, 结构的层间位移角和基底剪力可能会明显变化。

(2) 深厚饱和软土地中透镜体宽度对楼层最大层间位移角和结构基底剪力影响不大。

(3) 深厚饱和软土地中透镜体的厚度对上部

结构楼层最大层间位移角的影响较小;随着透镜体厚度的增大,其上部结构基底剪力的影响呈增大趋势。

(4) 深厚饱和软土地中透镜体埋深对上部结构的动力响应影响很大。透镜体埋深比较浅时,其上部结构动力响应的影响很大;随着透镜体埋深的增大,影响呈减小的趋势。

(5) 土骨架-孔隙水耦合作用对上部结构动力响应的影响显著,工程中如果不考虑土骨架-孔隙水耦合作用,可能会明显低估上部结构的基底剪力。

参考文献

- [1] 袁晓铭. 地表下圆形夹塞区出平面散射对地面运动的影响[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 373—381.
YUAN Xiao-ming. Effect of a circular underground inclusion on surface motion under incident plane SH waves[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39(3): 373—381.
- [2] 袁晓铭, 孙锐. 饱和砂土透镜体液化对建筑物地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 68—74.
YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Effect of liquefaction of lenticular saturated sand zone on seismic response of buildings[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(1): 68—74.
- [3] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12(2): 155—164.
- [4] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33(4): 1482—1498.
- [5] LIN C H, LEE V W, TRIFUNAC M D. The reflection of plane waves in a poroelastic half-space saturated with inviscid fluid[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2005, 25(3): 205—223.
- [6] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海深厚饱和覆盖土层的动力耦合地震反应分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 411—416.
HUANG Yu, YE Wei-min, TANG Yi-qun, et al. Coupled seismic response analysis of deep saturated soil covering layers in Shanghai[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(4): 411—416.
- [7] 张季, 梁建文, 巴振宁. 水平层状饱和场地地震响应分析的等效线性化方法[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 52—61.
ZHANG Ji, LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning. Equivalent linear analysis of seismic response of horizontally layered fluid-saturated poroelastic half-space[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(10): 52—61.
- [8] DRAVINSKI M. Ground motion amplification due to elastic inclusions in a half-space[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1983, 11(3): 313—335.
- [9] MANOOGIAN M E, LEE V W. Diffraction of SH-waves by subsurface inclusions of arbitrary shape[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1996, 122(2): 123—129.
- [10] 何颖, 梁建文. 地下透镜体断面形状随机性对地表动力响应极值的影响[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 765—771.
HE Ying, LIANG Jian-wen. Effect of randomness in the cross-section shape of underground lenticles on the extreme of the surface dynamic response[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(3): 765—771.
- [11] 梁建文, 张炳政, 巴振宁. 层状场地中透镜体对地震动影响的基本规律[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 1—12.
LIANG Jian-wen, ZHANG Bing-zheng, BA Zhen-ning. On the effect of a lenticle in layered site on ground motion[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(5): 1—12.
- [12] 梁建文, 张炳政, 巴振宁. 基岩上均匀场地中透镜体对地震动的非线性放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 13—24.
LIANG Jian-wen, ZHANG Bing-zheng, BA Zhen-ning. Nonlinear amplification of ground motion by a lenticle in single layer on bedrock[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 13—24.
- [13] 韩冰, 梁建文, 张季. 深厚软土地中透镜体对上部结构地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(5): 151—161.
HAN Bing, LIANG Jian-wen, ZHANG Ji. Effect of lenticle in deep soft site on seismic response of structures[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 36(5): 151—161.