

DOI: 10.11779/CJGE201707005

深厚软土场地中三维凹陷地形非线性地震响应分析

梁建文^{1,2}, 梁佳利², 张季², 巴振宁²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354; 2. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300354)

摘要: 采用黏弹性人工边界并结合地震动输入等效结点力法实现半无限场地的波动输入, 采用等效线性法模拟土体的非线性特征, 基于有限元软件 ABAQUS, 建立弹性基岩上覆深厚软土中三维凹陷地形非线性地震响应分析模型。通过与文献比较, 验证了整体模型的精度。以天津地区某一浅椭圆凹陷地形为例进行数值计算, 比较了非线性地震响应与线性地震响应的差别, 并进一步分析了三维凹陷地形对非线性地震响应造成的影响, 最后计算了在地震安全性评价人工波作用下三维凹陷地形的非线性地震响应。研究表明, 土体的非线性特征对三维凹陷地形地震响应有显著影响。研究还发现一个特殊现象, 即凹陷地形中心附近的非线性地震响应可能会大于其线性地震响应, 且地震激励幅值越大, 这一现象越明显。对于三维复杂局部场地的非线性地震响应研究, 模型具有一定的参考价值。

关键词: 三维凹陷地形; 地震响应; 黏弹性边界; 等效结点力; 等效线性

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2017)07 - 1196 - 10

作者简介: 梁建文(1965 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程的研究。E-mail: liang@tju.edu.cn。

Nonlinear seismic response of 3D canyon in deep soft soils

LIANG Jian-wen^{1,2}, LIANG Jia-li², ZHANG Ji², BA Zhen-ning²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: A model is proposed for nonlinear seismic response of 3D canyon in deep soft soils. In the model, the viscous-elastic boundary and the equivalent node force input method are combined for wave motion input, and the equivalent linear method is introduced for nonlinear soil behavior. The model is based on the general finite element software ABAQUS. The accuracy of the model is verified by comparing with the results in the existing literatures. Nonlinear seismic response of a 3D shallow canyon in deep soft soils is performed and compared with the linear response, and the influence of canyon on nonlinear seismic response is analyzed. Finally, the nonlinear response of the 3D shallow canyon under excitation of the artificial wave from seismic safety evaluation is presented. It is shown that the nonlinear behavior of soils has significant effect on the seismic response of the 3D canyon. The nonlinear seismic response can be greater than the linear response near the canyon center, as a result of wave scattering by the 3D canyon, and it is more obvious for a larger seismic excitation. The proposed model is valuable for analyzing the nonlinear seismic effect of complex local sites.

Key words: 3D canyon; seismic response; viscous-elastic boundary; equivalent node force; equivalent linearity

0 引 言

强震观测和震害调查均表明, 局部场地条件对地震动有着不可忽视的影响, 有关这方面的研究一直都是学术界的热点。凹陷地形是一种典型的局部场地条件, 在实际工程中经常可见, 如常见的河谷多简化为二维凹陷地形、常见的湖泊应简化为三维凹陷地形。目前对于凹陷地形效应的研究, 以二维居多, 如文献[1~5], 三维凹陷地形的研究则相对较少。求解此类问题的方法, 大体上可以分为解析法和数值法两种。

解析法适用于研究均匀半空间中形状规则的凹陷地形, 多用波函数展开法求解。Lee^[6]采用此法对平面

波在均匀半空间中三维半球凹陷地形周围的散射开展了解析研究。

数值法适用于任意形状的凹陷地形, 场地可以是均匀半空间, 也可以是层状半空间, 一般采用边界元法和有限元法等。Sanchez-Sesma^[7]采用边界法给出了均匀半空间中三维半球凹陷地形的动力响应; Mossessian 等^[8]采用边界积分方程法, 研究了均匀半空间中三维任意形状的凹陷地形对平面波的散射;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578372)

收稿日期: 2016 - 04 - 11

Liang 等^[9]采用间接边界元法, 分析了层状半空间中三维半球凹陷地形对地震动的影响。

近年来, 人工边界的发展有力地推动了有限元法在无限域波动问题中的应用, 而黏弹性边界^[10-11]因其精度高、稳定性好和易于实现等优点, 在工程中得到了广泛应用。梁建文等^[12]采用黏弹性人工边界, 并结合地震动输入等效结点力法, 进行了层状半空间深厚软土地中三维半椭圆凹陷地形的地震响应分析, 研究表明, 黏弹性人工边界结合地震动输入等效结点力法具有很高的计算精度。

值得指出的是, 上述关于三维凹陷地形地震响应的研究都限于线性分析。但在强震作用下, 土介质均表现出一定程度的非线性特征, 尤其是深厚软土地, 非线性特征更加明显。然而, 深厚软土地中三维凹陷地形等局部场地的非线性地震响应分析至今鲜有研究。

本文作为文献^[12]的后续研究, 采用黏弹性人工边界并结合地震动输入等效结点力方法, 基于有限元软件 ABAQUS, 建立弹性基岩上覆深厚软土中三维凹陷地形非线性地震响应分析模型, 进行非线性与线性地震响应的对比, 分析三维凹陷地形对非线性地震响应的影响, 并开展三维凹陷地形在地震安全性评价人工波作用下的非线性地震响应结果。以期指出三维凹陷地形非线性响应与线性响应的主要差别, 揭示由于凹陷局部地形条件的存在而造成的地表地震响应与自由场地表地震响应的差别、以及凹陷地形地表地震响应的一些特点, 为三维凹陷地形场地的地震安全性评价提供参考依据。

1 方法

1.1 非线性波动问题的黏弹性边界方法和地震动输入等效结点力方法

本文通过在截断边界上施加三维黏弹性边界近似模拟波在半无限域中的传播。实现方法为, 分别沿三个坐标轴方向在边界结点处设置并联的弹簧和阻尼元件。如图 1, 边界上某一结点 b 的弹簧刚度和阻尼系数可以表示为^[10]

$$\left. \begin{aligned} K_{bn} &= \alpha_n \frac{G}{R} \cdot A_b, \\ K_{bt} &= \alpha_t \frac{G}{R} \cdot A_b, \\ C_{bn} &= \rho c_p \cdot A_b, \\ C_{bt} &= \rho c_s \cdot A_b. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 K_{bn} , K_{bt} 分别为黏弹性边界法向和切向的弹簧刚度; C_{bn} , C_{bt} 分别为黏弹性边界法向和切向的阻尼系数; G 为介质的剪切模量; A_b 为边界结点的影响面

积, 即图 1 虚线所包围的部分; ρ 为介质质量密度; c_p 和 c_s 分别为介质的 P 波和 S 波波速; α_n 和 α_t 分别为法向和切向弹簧的修正系数; R 为散射波源到人工边界结点的距离。黏弹性人工边界拥有良好的鲁棒性^[10], α_n , α_t 和 R 在合理的范围内取值均能得到良好的分析结果, 本文采用文献^[10]的推荐值, $\alpha_n=1.33$, $\alpha_t=0.67$, R 取计算模型的长、宽和高的一半的平方和开方。

对于非线性波动问题, 可以采用等效线性化方法^[11], 亦即黏弹性人工边界公式中的剪切模量 G 取等效剪切模量, P 波和 S 波波速 c_p 和 c_s 分别取相应的等效波速, 这些等效线性化参数值可以采用迭代方法求解^[11]。

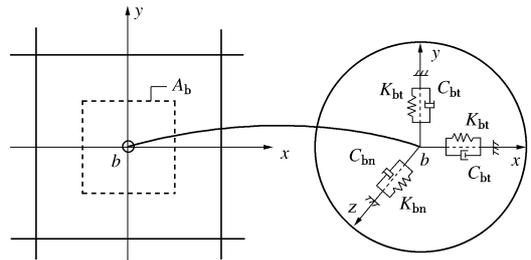


图 1 三维黏弹性边界

Fig. 1 3D viscous-elastic boundary

本文采用等效结点力方法实现地震动的输入, 亦即将输入地震波动转化为直接作用于人工边界上的等效结点荷载^[11], 边界上某一结点 b 的等效结点荷载可以表示为

$$\left. \begin{aligned} F_{bn}(t) &= (\tau_{bn}(t) + C_{bn} \dot{w}_{bn}(t) + K_{bn} w_{bn}(t)) \cdot A_b, \\ F_{bt}(t) &= (\tau_{bt}(t) + C_{bt} \dot{w}_{bt}(t) + K_{bt} w_{bt}(t)) \cdot A_b, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $F_{bn}(t)$, $F_{bt}(t)$ 分别为法向和切向的边界等效结点荷载, 式中的弹簧刚度 K_b 和阻尼系数 C_b 可由式 (1) 确定, τ_b , \dot{w}_b 和 w_b 分别表示结点处自由场的非线性应力、速度和位移, 本文通过地震响应程序 EERA^[13] 求得。

1.2 土体非线性分析的等效线性化方法

等效线性化方法是一种近似反映土体非线性的方法, 在工程中被广泛应用。其基本思想是通过迭代变换的剪切模量和阻尼比模拟土的非线性变化, 从而将求解过程线性化^[14]。大致步骤为: 选用一个初始的剪切模量 G_0 和阻尼比 ζ_0 , 进行初次计算; 由各单元的应变时程曲线, 计算各单元的最大剪应变 λ_{max} ; 根据 Idriss 等提出的等效线性化方法^[15], 等效剪应变 $\lambda_{eff} = 0.65 \lambda_{max}$; 根据各单元的等效剪应变, 更新各单元的剪切模量 G_i 和阻尼比 ζ_i , 重新进行计算, 直至前后两次的误差小于允许范围。

1.3 黏弹性边界和地震动输入等效结点力方法的实现

本文基于 ABAQUS 建立三维凹陷地形的非线性

地震响应分析模型。土体采用八节点六面体三维实体单元,黏弹性边界通过接地弹簧阻尼单元来模拟,等效结点荷载以结点集中力的形式施加,在隐式动力分析标准模块进行计算。

首先根据边界结点位置,求得结点影响面积 A_b 。计算散射波源到黏弹性边界的距离 R 。采用地震响应程序 EERA^[13],输入各土层及弹性基岩参数,在基岩面处输入地震动,求得模型各边界结点处对应介质的等效剪切模量 G 、等效P波和S波波速 c_p 和 c_s ,以及自由场非线性应力 τ 、速度 \dot{w} 和位移 w 。据式(1)求得弹簧刚度和阻尼系数,据式(2)求得等效荷载,在模型边界结点施加黏弹性边界及等效结点力。由于边界结点数量巨大,本文基于Python语言编制了黏弹性边界及等效结点力自动施加程序。

1.4 等效线性化方法的实现

费康等^[16]基于ABAQUS编写了等效线性化模型UMAT子程序,通过与SHAKE91计算结果的对比,验证了其可靠性。本文通过调用此UMAT子程序,在ABAQUS中实现等效线性化求解。子程序参数包括最大动剪切模量 G_{max} 、泊松比 ν 和圆频率 ω 。对于圆频率 ω ,有学者将 ω 取为结构基频,也有学者将 ω 取为地震荷载的主要频率范围^[16]。本文在计算层状场地的非线性地震响应时,综合考虑场地和地震波的特性,将圆频率 ω 取为场地一阶和二阶自振频率及地震波主频的平均值。

调用UMAT子程序,给定各单元初始状态变量,在隐式动力分析标准模块进行动力计算;完成计算后,进入后处理模块,提取各单元的最大剪应变;求得各单元的等效剪应变,根据剪切模量、阻尼比与等效剪应变的关系曲线,修正各单元状态变量;再次进入隐式动力分析模块进行求解,直至满足收敛条件,停止迭代,输出结果。本文基于Python语言编写相关程序,使整个迭代过程在ABAQUS中自动运行,无需人工干预。

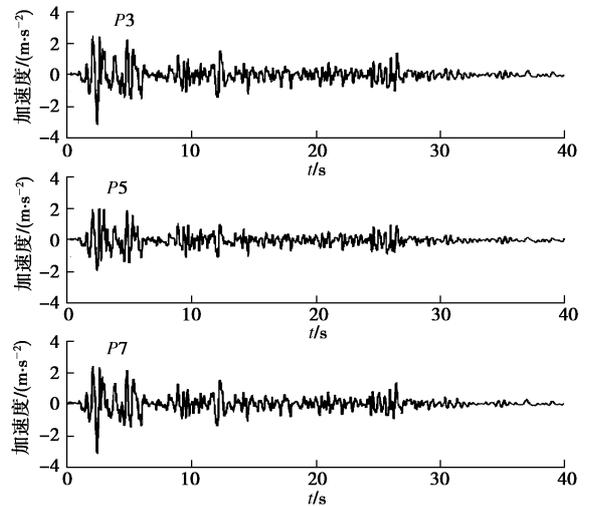
2 方法验证

因文献中目前没有三维凹陷地形非线性地震响应整体模型的结果可以比较,因此本文的方法验证分为两部分:①三维黏弹性边界及等效结点力方法验证,本文与文献[12]三维凹陷地形线性地震响应的ANSYS分析结果比较;②非线性波动输入方法的验证,本文与文献[17]地下双洞室非线性地震响应的有限元-边界元(FEM-BEM)耦合方法结果比较。

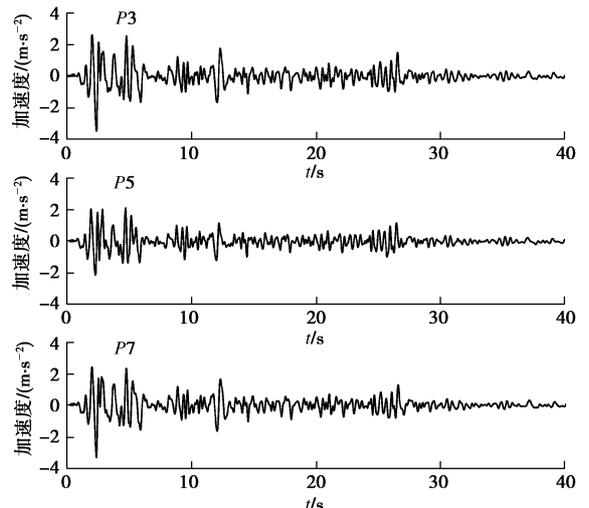
2.1 黏弹性边界及等效结点力方法验证

图2给出了本文(针对图5模型)与文献[12]对

应观测点的加速度时程结果对比。图中, $P3$ 点为三维凹陷地形 $x-z$ 剖面凹陷边界观测点, $P5$ 点为凹陷地形中心点, $P7$ 点为 $y-z$ 剖面凹陷边界观测点。从图可以看出,本文计算结果与文献[12]结果吻合很好,说明了本文施加黏弹性边界及等效结点力方法的正确性。



(a) 文献[12]加速度时程结果(观测点 $P3, P5, P7$)



(b) 本文加速度时程结果(观测点 $P3, P5, P7$)

图2 本文结果与文献[12]的比较

Fig. 2 Comparison between results in this paper and those in Reference [12]

2.2 非线性波动输入方法验证

为验证本文非线性波动输入方法的正确性,建立地下双洞室模型,如图3所示,土层总厚度 $H=80$ m,洞室埋深 $d=10$ m,洞室半径 $a=5$ m,洞室间距 $B/a=3$,对该模型进行非线性地震响应分析。图4分别列出了地表观测点 $x/a=0$ (x 为地表点的水平坐标)的水平加速度时程结果和 $x/a=2$ 的竖直加速度时程结果与文献[17]结果的对比。从图可以看出,本文结果与文献[17]结果吻合很好,验证了本文非线性波动输入方法的精度。

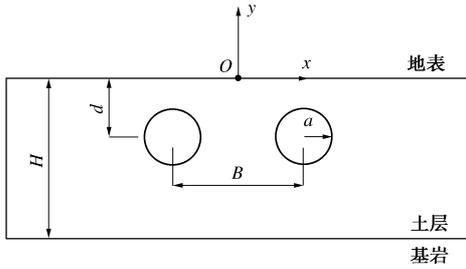


图 3 地下双洞室模型

Fig. 3 Underground two cavities

自振频率及地震波主频的平均值。图 7 给出了从基岩面垂直入射的 El Centro 波和 Taft 波加速度时程曲线和反应谱。

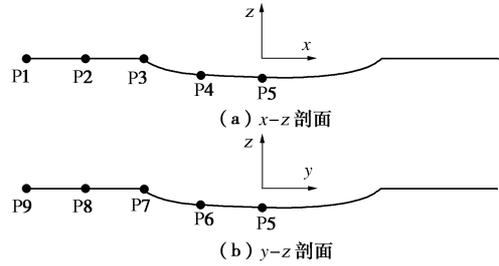
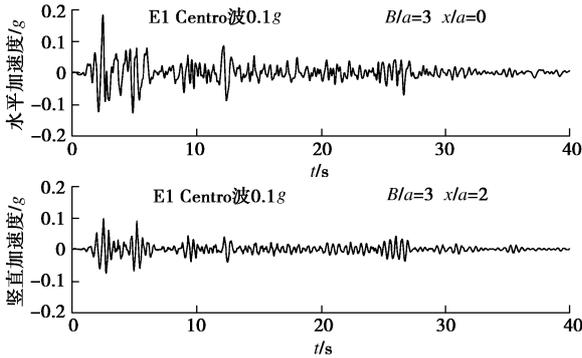
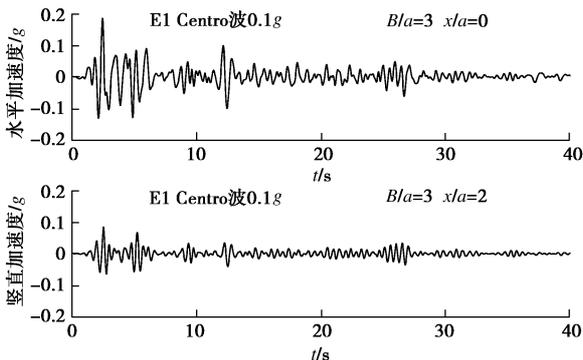


图 5 观测点位置

Fig. 5 Position of observing points



(a) 文献[17]加速度时程结果 (地表点 $x/a=0$ 和 2)



(b) 本文加速度时程结果 (地表点 $x/a=0$ 和 2)

图 4 本文结果与文献[17]的比较

Fig. 4 Comparison between results in this paper and those in Reference [17]

3 算例与分析

以天津地区某典型弹性基岩上覆深厚软土地中某浅椭圆凹陷地形为例进行数值计算和分析。图 5 所示凹陷地形, 水平断面为圆形, 竖向断面为半椭圆形, 凹陷的 (X-向和 Y-向) 宽度为 100 m, 深度 (Z-向) 为 10 m, 观测点 P1~P9 的位置如图。层状场地土层参数如表 1 所示, 各类土的非线性参数见图 6, 泊松比取 0.25。根据文献[12], 截取的三维有限元模型尺寸为 200 m×200 m×80 m, 该模型尺寸可以满足本文计算精度的要求; 依据地震波的主要频率范围及土层剪切波速确定单元尺寸; 圆频率 ω 取为场地一、二阶

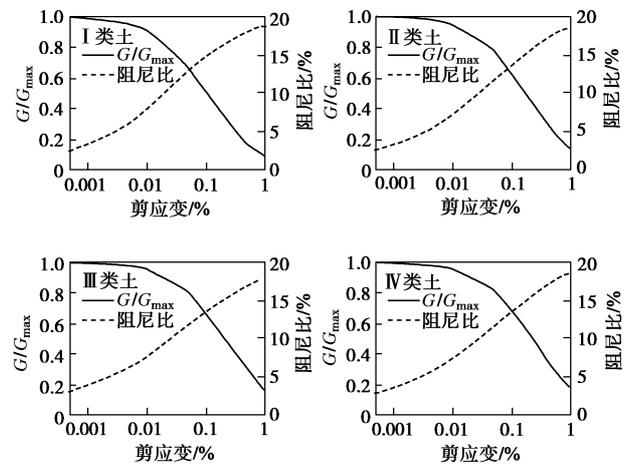


图 6 土的剪切模量比、阻尼比与等效剪应变的关系

Fig. 6 Relationship among shear modulus ratio, damping ratio and shear strain of soils

表 1 土层参数

Table1 Soil parameters

土层编号	类别	厚度 /m	剪切波速 /($m \cdot s^{-1}$)	密度 /($kg \cdot m^{-3}$)	阻尼比
1(地表)	I	10	150	1750	0.05
2	I	10	175	1775	0.05
3	II	10	200	1800	0.05
4	II	10	250	1850	0.05
5	III	10	300	1900	0.05
6	III	10	350	1950	0.05
7	IV	10	400	2000	0.05
8	IV	10	450	2050	0.05
9(基岩)		∞	500	2100	0.02

3.1 三维凹陷地形非线性地震响应与线性地震响应的对比

图 8 给出了 El Centro 波和 Taft 波垂直入射、X-向激励下, 观测点 P3, P5 和 P7 沿 X-向非线性和线性地震响应加速度反应谱的对比, 图 9 给出了各观测点沿 X-向非线性和线性地震响应加速度峰值包络图对比。

从图 8 可以看出,非线性地震响应加速度反应谱峰值比线性情况明显要小,但加速度反应谱的高频成分明显减少,而低频成分变化不大,且随着入射地震动幅值的增大,非线性和线性地震响应之间的差别也随之增大,体现出明显的非线性响应特征。特别值得注意的是,El Centro 波入射情况,凹陷地形中心 P5 点地震反应谱,在高频段的非线性反应谱幅值大于线性反应谱幅值,与凹陷地形边界点 P3 和 P7 点形成明

显的差别。这一特殊现象可能源于地震波在三维凹陷地形周围的散射,与入射地震波频谱具有密切关系,因为在 Taft 波入射情况,并没有出现这一特殊现象。然而值得注意的是,在 Taft 波入射情况,非线性与线性地震响应加速度反应谱峰值的差别要比 El Centro 波情况更大。因此局部场地的非线性和线性地震响应差别明显有异于一般工程场地情况,需要特别注意。

从图 9 可以看出,El Centro 波入射情况,在凹陷

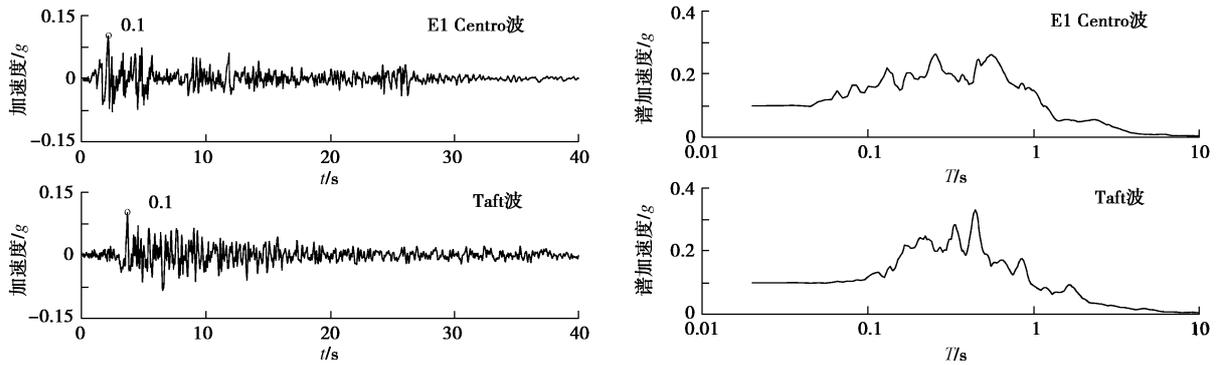


图 7 El Centro 波和 Taft 波加速度时程和反应谱

Fig. 7 Acceleration time histories and their response spectra of El Centro wave and Taft wave

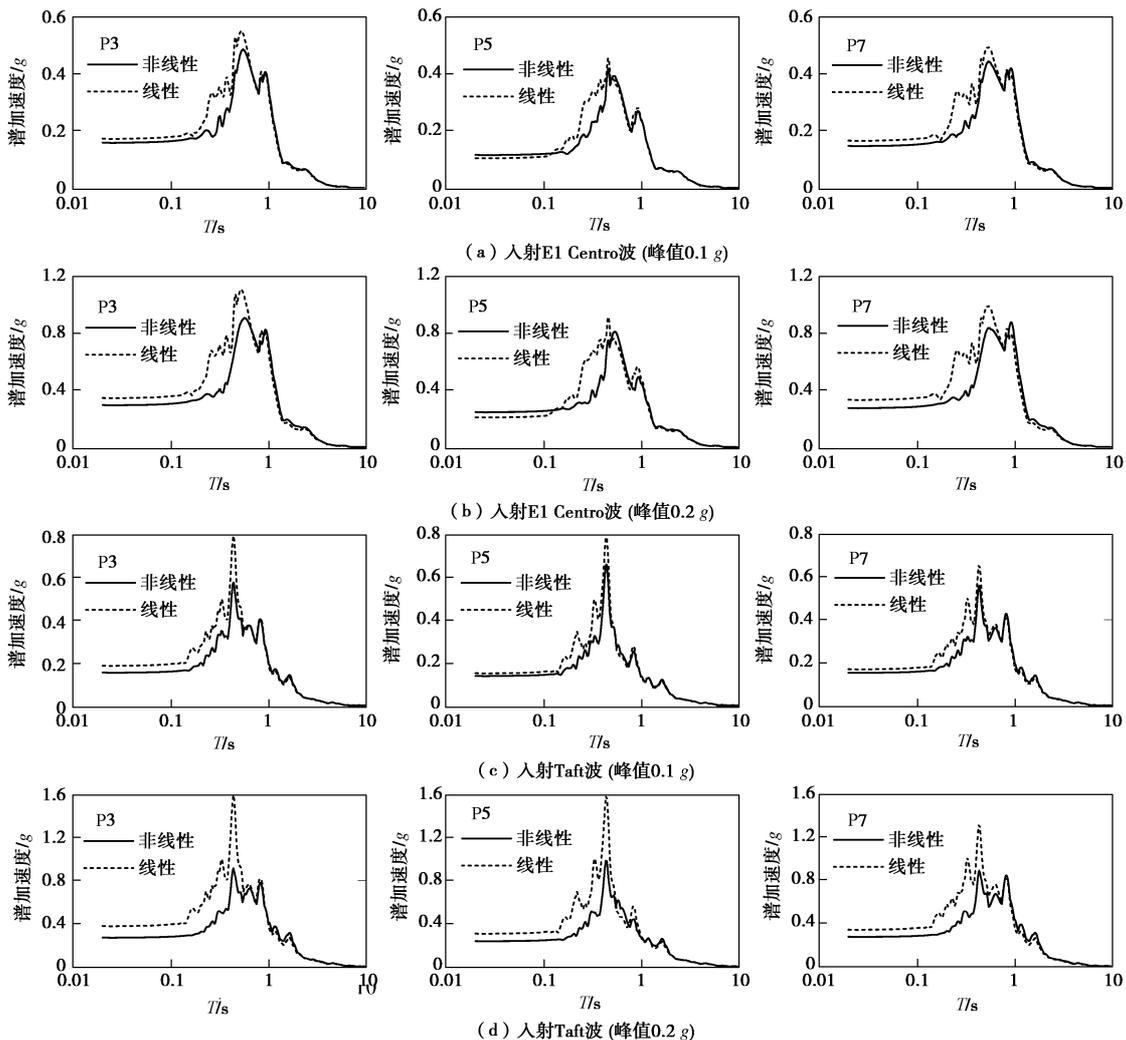


图 8 观测点 P3, P5 和 P7 非线性和线性地震响应加速度反应谱对比

Fig. 8 Comparison between nonlinear and linear seismic response acceleration spectra at observing points P3, P5 and P7

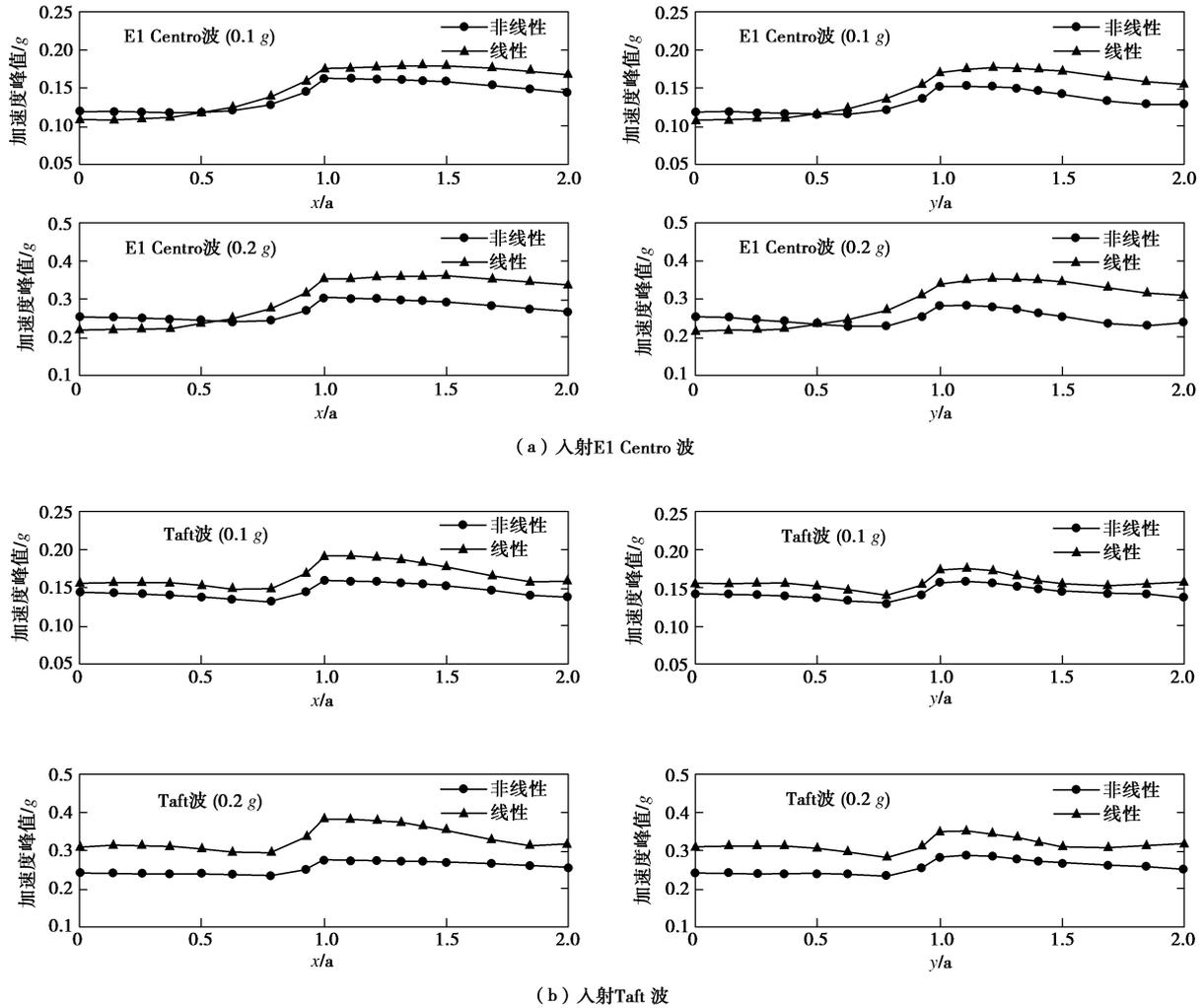


图 9 非线性和线性地震响应加速度峰值包络线的对比

Fig. 9 Comparison between nonlinear and linear seismic response PGA envelopes

地形中心附近 $x/a < 0.5$ 范围, 非线性地震响应加速度峰值大于线性地震响应加速度峰值, 而在凹陷地形 $0.5 < x/a < 1$ 和水平地表 $x/a > 1$ 范围, 非线性地震响应加速度峰值小于线性地震响应加速度峰值。Taft 波入射情况, 无论在凹陷地形中还是在水平地表, 非线性地震响应加速度峰值均小于线性地震响应加速度峰值。可以进一步看出, 随着入射地震动幅值的增大, 非线性和线性地震响应峰值之间的差别也随之增大。

3.2 三维凹陷地形对非线性地震响应的影响

图 10 分别给出了 El Centro 波和 Taft 波垂直入射, X-向激励下, 三维凹陷地形观测点 P3, P5 和 P7 的 X-向加速度反应谱。为便于比较, 同时给出了相应的自由场地表加速度反应谱。

从图10可以看出, 三维凹陷地形对非线性地震响应加速度反应谱有明显影响。首先在峰值方面, 与自由场相比, 3个观测点加速度反应谱峰值明显放大, 与线性情况^[12]的规律相似。对于El Centro波入射情况, 放大作用最大出现在沿激励方向的凹陷边界P3

点, 与激励方向垂直的边界点P7次之, 凹陷地形中心点P5最小; 而对于Taft波入射情况, 放大作用最大出现在凹陷中心点P5, 两个边界点P3和P7次之。其次在频谱方面, 与自由场相比, 凹陷地形的两个边界点P3和P7加速度反应谱在高频段明显放大, 在低频段差别不大; 而凹陷地形中心点P5加速度反应谱则在低频段峰值明显降低。

另外, 还可以看出, 随着地震激励幅值的增大, 对于El Centro波入射情况, 反应谱卓越周期逐渐加长, 而对于Taft波入射情况, 反应谱卓越周期基本没有变化。说明, 三维凹陷地形对非线性地震反应谱的影响与地震激励的频谱密切相关。

图 11 分别给出了 El Centro 波和 Taft 波垂直入射, X-向激励下, 三维凹陷地形两个水平方向 (X-向和 Y-向) 所在地表各观测点的 X-向加速度峰值包络线, 这里采用自由场地表加速度峰值进行正规化, 即纵坐标表示的是凹陷地形各观测点的 X-向加速度峰值 $|a_x|_{\max}$ 与自由场地表 X-向加速度峰值 $|a_x^f|_{\max}$ 的比值, 所以该

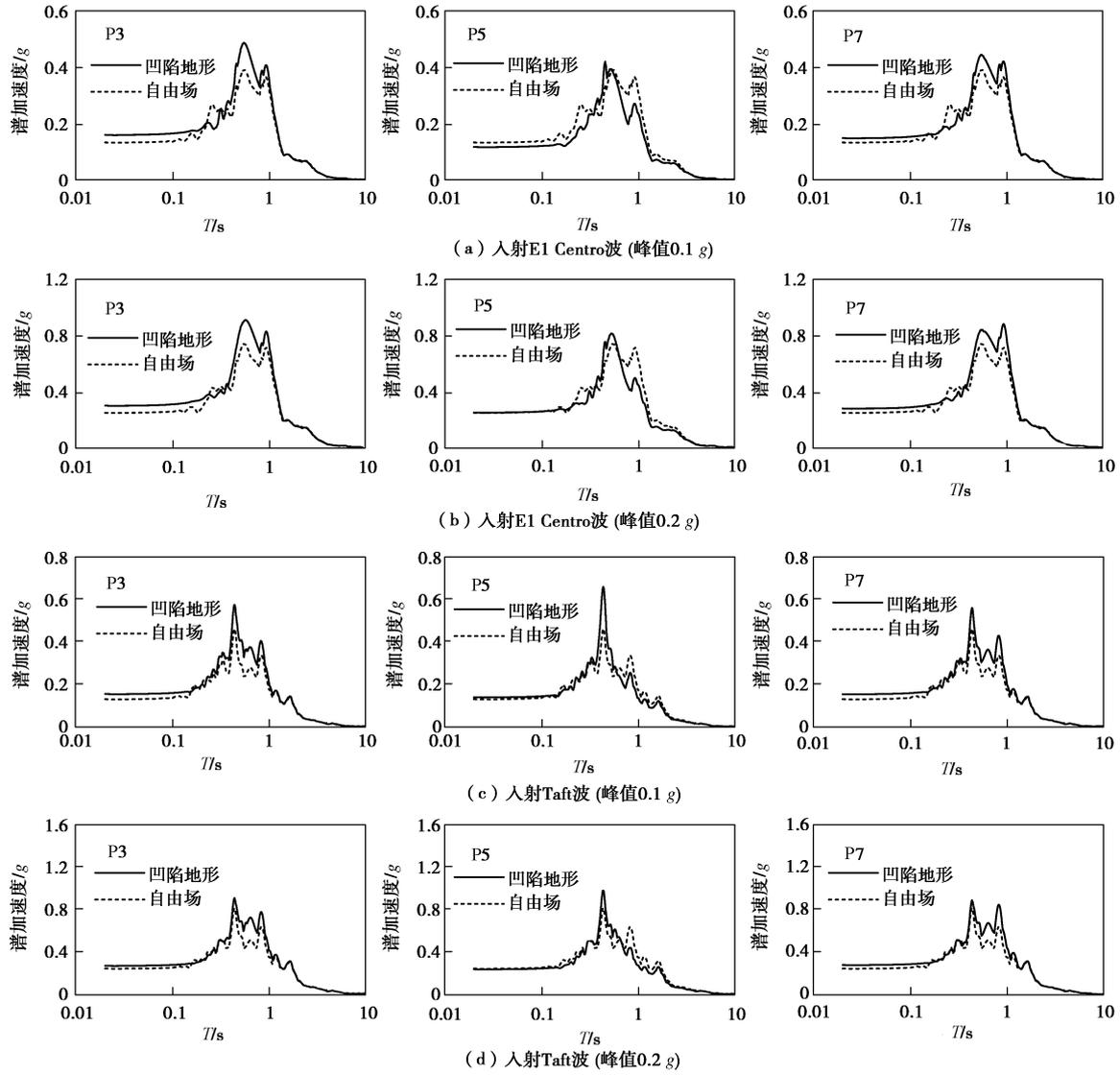


图 10 三维凹陷地形对非线性地震响应加速度反应谱的影响
 Fig. 10 Effect of 3D canyon on nonlinear seismic response acceleration spectra

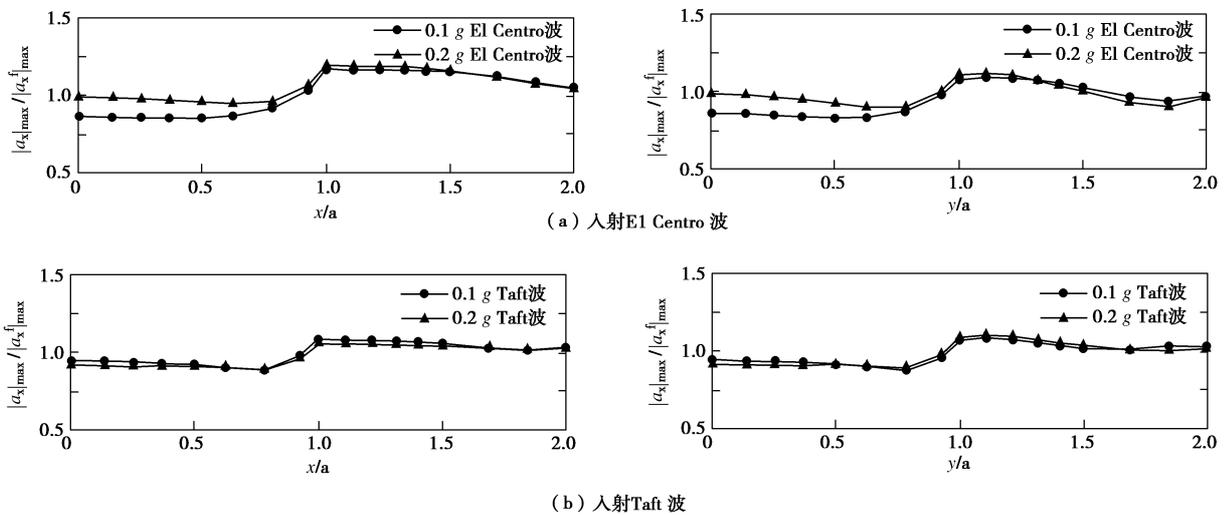


图 11 三维凹陷地形对非线性地震响应加速度峰值的影响
 Fig. 11 Effect of 3D canyon on nonlinear seismic response PGA

峰值包络线即表示三维凹陷地形的放大作用。可以看出, 虽然地震激励方向为 X -向, 但两个方向 (X -向和 Y -向) 地震加速度峰值包络线形状相似; 凹陷地形内观测点的加速度峰值普遍小于自由场加速度峰值; 凹陷地形外观测点的加速度峰值普遍大于自由场加速度峰值, 距离凹陷地形边界比较近的观测点的加速度峰值相对较大, 距离比较远的观测点的加速度峰值相对较小, 这一规律与线性情况^[12]相似。但是对于凹陷地形内观测点, 凹陷地形中心附近加速度峰值较大, 与线性情况^[12]明显不同, 且地震激励幅值越大, 凹陷地形内观测点的加速度峰值也越大, 这可能是三维凹陷地形非线性与线性地震响应之间的主要差别之一。

另外, 从图中还可以看出, 三维凹陷地形对 El Centro 波的放大作用要比 Taft 波大, 原因在于本文算例是一深厚软土地, 三维凹陷地形对低频成分更丰富的 El Centro 波具有更大的放大效应。

为了研究凹陷形状 (深宽比) 对三维凹陷地形非线性地震响应加速度峰值的影响, 图 12 给出了幅值为 0.2g 的 El Centro 波垂直入射, X -向激励下, 凹陷深

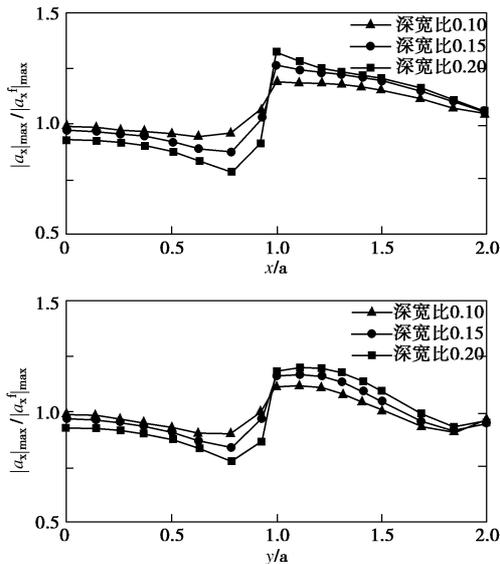
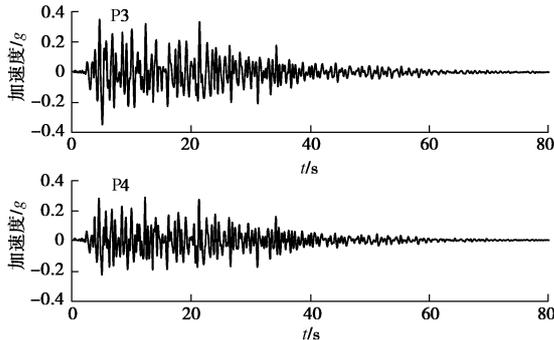


图 12 凹陷形状 (深宽比) 对三维凹陷地形非线性地震响应加速度峰值的影响 (入射 0.2g 幅值 El Centro 波)

Fig. 12 Effect of canyon shape (ratio of depth to width) on nonlinear seismic response PGA (input El Centro wave of amplitude 0.2g)



宽比分别为 0.10、0.15 和 0.20 时, 三维凹陷地形两个水平方向 (X -向和 Y -向) 所在地表各观测点的 X -向加速度峰值包络线。

从图 12 可以看出, 凹陷深宽比对三维凹陷地形非线性地震响应加速度峰值有明显影响。对于凹陷地形内观测点, 凹陷深宽比越大, 加速度峰值越小; 对于凹陷地形外观测点 (距凹陷地形较近), 凹陷深宽比越大, 加速度峰值越大。

3.3 三维凹陷地形在地震安全性评价人工波作用下的非线性地震响应

图 13 给出了地震安全性评价 (简称安评) 报告提供的人工波 (50 a 超越概率 2%) 加速度时程及其反应谱。图 14 给出了在安评人工波垂直入射, X -向激励下, 三维凹陷地形 (图 5) 观测点 P3~P7 的 X -向加速度时程曲线和反应谱, 图中同时给出了相应的自由场地表加速度反应谱。

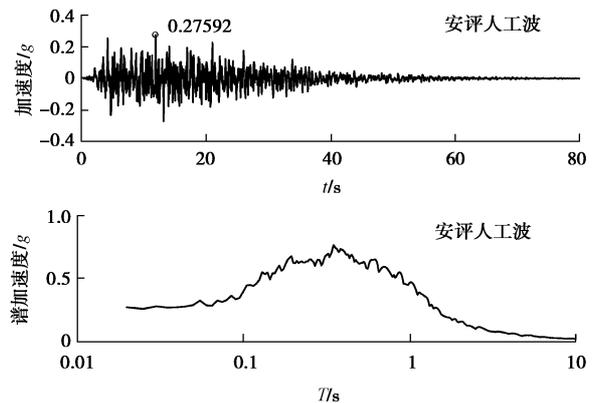
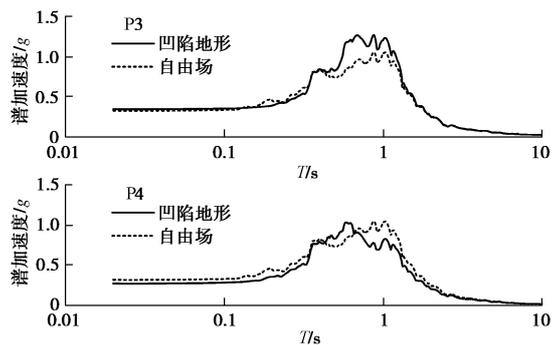


图 13 安评人工波加速度时程和反应谱

Fig. 13 Acceleration time histories and their response spectra of artificial wave from seismic safety evaluation

可以看出, 在加速度反应谱方面, 与自由场相比, 凹陷边界点 P3 和 P7 的反应谱峰值明显放大, 反应谱峰值位置有差别, 但差别不大; 而凹陷地形内 P4, P5 和 P6 点的反应谱峰值差别不大, 但峰值位置均明显向高频移动, 差别达 0.4 s, 与自由场差别明显, 特别值得注意。



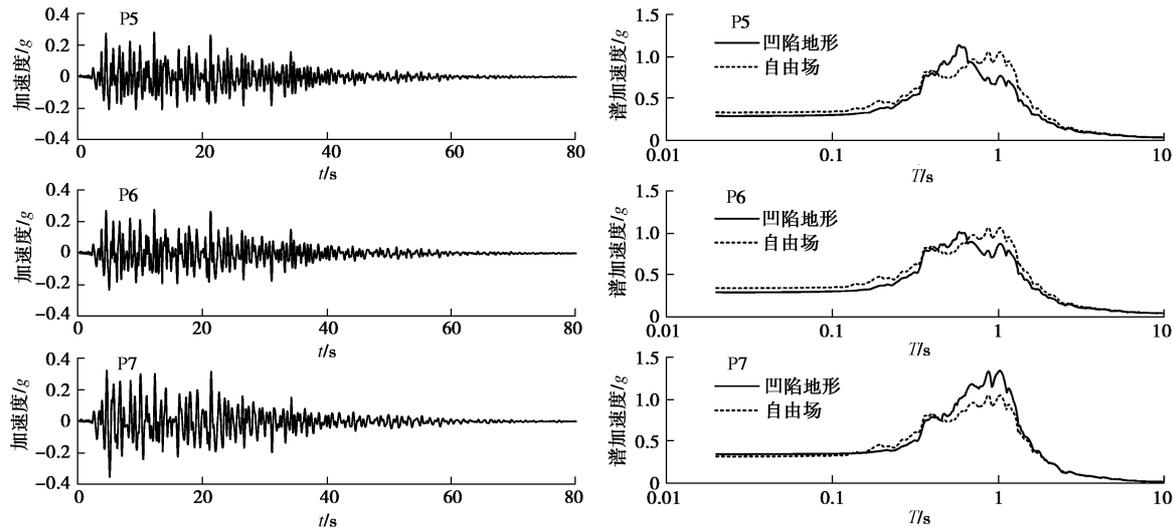


图 14 观测点 P3~P7 的加速度时程和反应谱 (入射安评人工波)

Fig. 14 Acceleration time histories and response spectra at observing points P3~P7 (artificial wave input from seismic safety evaluation)

4 结论与建议

本文建立了三维凹陷地形非线性地震响应分析问题的有限元模型,以天津市深厚软土地场中典型的三维浅凹陷地形为例,研究了三维凹陷地形非线性和线性地震响应的差别,以及三维凹陷地形对非线性地震响应的影响。研究主要得出如下结论:

(1) 三维凹陷地形的非线性地震响应加速度反应谱峰值比线性情况明显要小,但加速度反应谱的高频成分明显减少,且随着入射地震动幅值的增大,非线性和线性地震响应之间的差别也随之增大。就非线性和线性地震响应差别而言,三维凹陷地形有异于一般工程场地,需要在地震安全性评价中高度重视。

(2) 三维凹陷地形非线性地震响应有可能出现一种特殊现象,即在凹陷地形中心附近,非线性地震响应加速度峰值大于线性情况峰值,且地震激励幅值越大,两者差别也越大,也特别值得注意。

(3) 三维凹陷地形对非线性地震响应加速度反应谱有明显影响。与自由场相比,加速度反应谱峰值明显放大,边界点加速度反应谱在高频段明显放大,凹陷地形中心点加速度反应谱则在低频段明显降低,与自由场形成明显差别。

(4) 凹陷形状对三维凹陷地形非线性地震响应加速度峰值有明显影响。对于凹陷地形内观测点,凹陷深宽比越大,加速度峰值越小,对于凹陷地形外观测点,凹陷深宽比越大,加速度峰值越大。

(5) 三维凹陷地形场地的非线性地震响应,受地震激励的幅值和频谱、工程场地与凹陷地形的距离以及凹陷形状等诸多因素的影响,因此在开展地震安全性评价时需要建立三维模型来分析。

参考文献:

- [1] 杜修力,熊建国.波动问题的级数解边界元法[J].地震工程与工程振动,1988,8(1):39-49.(DU Xiu-li, XIONG Jian-guo. Application of boundary element method to wave propagation by using series solution[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1988, 8(1): 39-49. (in Chinese))
- [2] 袁晓铭,廖振鹏.圆弧形凹陷地形对平面SH波散射问题的级数解答[J].地震工程与工程振动,1993,13(2):1-11.(YUAN Xiao-ming, LIAO Zhen-peng. Series solution for scattering of plane SH waves by a canyon of circular-arc cross section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1993, 13(2): 1-11. (in Chinese))
- [3] 房莹光.相邻多个浅圆弧凹陷地形对平面SH波散射的级数解[J].应用数学与力学,1995,16(7):615-624.(FANG Ying-guang. Series solution for scattering of plane SH-waves by multiple shallow circular-arc canyons[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1995, 16(7): 615-624. (in Chinese))
- [4] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J].土木工程学报,1998,31(3):55-64.(LIU Jing-bo, LU Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese))
- [5] 周红,陈晓非.凹陷地形对Rayleigh面波传播影响的研究[J].地球物理学报,2007,50(4):1182-1189.(ZHOU Hong, CHEN Xiao-fei. A study on the effect of depressed topography on Rayleigh surface wave[J]. Chinese Journal of

- Geophysics, 2007, **50**(4): 1182 - 1189. (in Chinese))
- [6] LEE V W. A note on scattering of elastic plane waves by a hemispherical canyon[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1982, **1**: 122 - 129.
- [7] SANCHEZ-SESMA F J. Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1983, **73**: 1621 - 1636.
- [8] MOSESSESIAN T K, DRAVINSKI M. Scattering of elastic waves by three-dimensional surface topographies[J]. Wave Motion, 1989(11): 579 - 592.
- [9] LIANG J W, LIU Z X, LEE V W. Scattering of plane waves by a 3-D canyon in layered half-space[C]// Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008.
- [10] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, **24**(12): 31 - 37. (GU Yin, LIU Jing-bo, DU Yi-xin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, **24**(12): 31 - 37. (in Chinese))
- [11] 王振宇, 刘晶波. 成层地基非线性波动问题人工边界与波动输入研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(7): 1169 - 1173. (WANG Zhen-yu, LIU Jing-bo. Study on wave motion input and artificial boundary for problem of nonlinear wave motion in layered soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(7): 1169 - 1173. (in Chinese))
- [12] 梁建文, 齐晓原, 巴振宁. 基于黏弹性边界的三维凹陷地形地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014(4): 21 - 28. (LIANG Jian-wen, QI Xiao-yuan, BA Zhen-ning. Seismic response analysis of 3D canyon based on the viscous-spring boundary[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014(4): 21 - 28. (in Chinese))
- [13] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits[R]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [14] 齐文浩, 薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, 2007(4): 221 - 226. (QI Wen-hao, BO Jing-shan. Summarization on equivalent linear method of seismic responses for soil layers[J]. World Earthquake Engineering, 2007(4): 221 - 226. (in Chinese))
- [15] IDRIS I M, SUN J I. SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits[R]. Los Angeles: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 1992.
- [16] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 345 - 347, 363 - 368. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS to geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 345 - 347, 363 - 368. (in Chinese))
- [17] 张季. 层状场地中地铁隧道群对地震动的放大作用[D]. 天津: 天津大学, 2012. (ZHANG Ji. Amplification of earthquake ground motion by metro group cavities in layered half-space[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))