第 38 卷 第 3 期
2016 年 6 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol.38 No.3
June,2016

地下水对地震动参数的影响①

常晃瑜[1]，薄景山[1,2]，张兆鹏[2]，谭启迪[1]，王 亮[2]

（1.防灾科技学院，河北 三河 065201；2.中国地震局工程力学研究所，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘要：为分析地下水的存在对地震动参数的影响，以 3 个实际场地作为计算土层，2 条真实的地震波记录作为输入地震动，分别计算不含地下水工况和饱含地下水工况的土层地震反应。其中，不含地下水工况使用单相介质模型，饱含地下水工况使用双相介质模型，算法均使用有限差分方法，人工边界使用透射边界。根据得到的加速度时程，提取它们的峰值加速度和反应谱数据，经过对比分析，得出以下结论：(1)含地下水场地的地表峰值加速度要明显小于不含地下水场地的地表峰值加速度；(2)含地下水场地的地表加速度反应谱要大于不含地下水场地的反应谱值；(3)由于地下水的存在，场地放大系数反应谱特征周期向长周期改变，反应谱平台值变大。

关键词：土层地震反应；两相介质；地表峰值加速度；地下水；反应谱；放大系数反应谱

中图分类号：P315　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2016)03－0366－07

DOI：10.3969/j.issn.1000－0844.2016.03.0366

Effect of Groundwater on Ground Motion Parameters

CHANG Chao-yu[1], BO Jing-shan[1,2], ZHANG Zhao-peng[2], TAN Qi-di[1], WANG Liang[2]

(1.*Institute of Disaster Prevention*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
2.*Institute of Engineering Mechanics*, *CEA*, *Harbin* 150080, *Heilongjiang*, *China*)

Abstract: To analyze the impact of groundwater on ground motion parameters, in this study, we selected three practical sites and used two real seismic waves as input ground motions for calculating the seismic responses of the soil layer in conditions with and without groundwater. We used a two-phase model and a single-phase model for the conditions with and without groundwater, respectively, and applied the finite-difference and artificial transmitting boundary methods. Based on the obtained horizontal acceleration time history, we extracted peak acceleration and response spectrum data. From our comparative analysis results, we draw the following conclusions: (1) The peak ground acceleration of site soil with groundwater is significantly lesser than that without groundwater. (2) The value of the surface acceleration response spectra of site soil with groundwater is greater than that without groundwater. (3) Due to the existence of groundwater, the characteristic period of the amplification factor response spectra becomes long.

Key words: soil seismic response; two-phase media; peak ground acceleration; groundwater; response spectrum of amplification factor

0 引言

工程场地是地震波传播的介质，国内外强震观测和震害经验几乎一致表明，场地条件是引起地表震害和地震动局部变化的主要因素之一[1-3]。地球

① **收稿日期**：2015-10-15
基金项目：中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目(ZY20150301)；国家自然科学基金项目(50978237)
作者简介：常晃瑜(1990－)，男，硕士研究生在读，主要从事岩土工程抗震研究。E-mail：changchaoyu@126.com。

陆地面积约 1.49 亿 km^2，地下水分布面积达 1.30 亿 km^2，占陆地面积的 87.25%，有人类活动的场地基本上都存在地下水，地震发生时，地震波的传播必然受到地下水的影响。地下水作为重要的场地条件已经被证实对地震烈度有重要影响[4-5]，造成这种影响的可能原因有两个，一是场地发生砂土液化而引起地基失效，另一个是地震动不同造成不同的结构破坏。砂土液化问题已经被研究所证实，然而地下水的存在对地震动参数的影响并没有得到统一的定论，是近期研究的热点之一。

Yang J[6-7]根据 1995 年阪神大地震时一个人工岛上台阵记录到的地震资料研究发现，地下水的存在对地震动参数有较大的影响。黄雨等[8]指出饱和、深厚的上覆土层对上海地区地震反应特性具有重要影响。景立平等[9-10]通过计算得出 P 波入射时，水对土层反应的影响要大于土层结构变化的影响，并进一步指出饱和土的地形效应相比单相土的地形效应更明显。夏坤等[11]通过等效线性化方法计算了黄土地区地下水位对地震动的影响。陈青生等[12]、高广运等[13]研究了上海软土地区地下水位上升对地震反应的影响。

研究场地效应一个重要的途径是进行数值分析，即场地地震反应分析。过去人们进行场地地震反应分析[14-15]时使用的是单相介质理论，然而含地下水的饱和土层，水和土不但具有不同的运动规律，还可能发生相互作用，改变其力学性质[16-18]，因此在计算含水场地地震反应时需要考虑水和土之间的耦合作用。

为了探讨地下水对地震动参数的影响，根据土体中有无地下水，采用不同的方法进行地震动反应分析。其中对不含地下水的土体采用单相介质理论，对饱含地下水的土体则采用两相介质理论。最后对比分析两者的结果，得出地下水对水平向地震动参数的影响。

1　计算方法

一般，第四纪以来沉积的土层比较平稳，近似于水平分层，多数土层剖面的特性是横向变化比竖向方向小，可以简化为水平成层模型。本文按水平分层考虑，建立土层地震反应分析模型。模型中土层水平且无限延伸，上部为自由界面；底部为不透水界面，地下水位以下土体饱和，水位以上为单相介质，地震波只沿垂直方向传播。

1.1　双相介质模型

选取 Biot 模型[19-20]进行分析，在弹性本构的基础上，其波动方程如下：

$$N\nabla^2 u+\mathrm{grad}[(A+N)\boldsymbol{e}+Q\boldsymbol{\varepsilon}]=\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}\boldsymbol{u}+\rho_{12}\boldsymbol{w})+b\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{w}) \quad (1)$$

$$\mathrm{grad}(Q\boldsymbol{e}+R\boldsymbol{\varepsilon})=\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{21}\boldsymbol{u}+\rho_{22}\boldsymbol{w})-b\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{w}) \quad (2)$$

其中：A、N、Q、R 均为常量；$\boldsymbol{w}$、$\boldsymbol{u}$ 分别为液相和固相的位移矢量，$\boldsymbol{\varepsilon}=\mathrm{div}\boldsymbol{w}$、$\boldsymbol{e}=\mathrm{div}\boldsymbol{u}$ 分别为液相和固相的体积应变；ρ_{11}、ρ_{12}、ρ_{22} 为质量系数，$\rho_{11}=\rho_s(1-\varphi)+\varphi\rho_f(\delta-1)$，$\rho_{12}=\varphi\rho_f(1-\delta)$，$\rho_{22}=\delta\varphi\rho_f$，$\rho_s$、$\rho_f$ 分别为固相颗粒质量密度、液相质量密度，φ 为孔隙率，δ 为固液耦合系数；$b=\mu\varphi^2/k$，为耗散系数，μ 为流体的动力黏度，k 为渗透系数。

$$\rho_{11}=\rho_s(1-\varphi)+\varphi\rho_f(\zeta-1) \quad (3)$$

$$\rho_{12}=\varphi\rho_f(1-\zeta) \quad (4)$$

$$\rho_{22}=\zeta\varphi\rho_f \quad (5)$$

式中：ρ_s 为固相质量密度；ρ_f 为液相质量密度；φ 为孔隙度；ζ 为弯曲度。Berryman 在 1980 年研究表明[21]，固体颗粒为球状或接近球状时 $\zeta=1/2\varphi+1/2$。

本文使用有限差分进行数值计算。首先将横向均匀成层的一维土体模型从上到下依次分为 n 层，每层厚度为 Δz_n，$n=1,2,\cdots,N$。设时间步距为 Δt，$t=p\Delta t$，p 为正整数。在 $t=p\Delta t$ 时刻第 n 层顶点的固相速度记为 v_n^p，液相速度记为 w_n^p；在 $t=(p+1/2)\Delta t$ 时刻第 n 层中点固相剪切力记为 τ_n^p。

对上述波动方程进行时空交叠格式中心差分[22]，得到递推公式如下：

$$v_1^{p+1}=v_1^p+\Delta t\{2D_{22}(1)\times(\tau_1^p/\Delta z_1)+[D_{12}(1)+D_{22}(1)]b_x(w_1^p-v_1^p)\} \quad (6)$$

$$v_n^{p+1}=v_n^p+\Delta t[2(\tau_n^p-\tau_{n-1}^p)/\Delta z_n/Y_1+D_1(n)\times b_x(w_n^p-v_n^p)] \quad (n=2,3,\cdots,N) \quad (7)$$

$$w_1^{p+1}=w_1^p+\Delta t\{2D_{12}(1)\times\tau_1^p/\Delta z_1+[D_{11}(1)+D_{12}(1)]b_x(w_1^p-v_1^p)\} \quad (8)$$

$$w_n^{p+1}=w_n^p+\Delta t[2\times(\tau_n^p-\tau_{n-1}^p)/Y_2-D_2(n)\times b_x(w_n^p-v_n^p)] \quad (n=2,3,\cdots,N) \quad (9)$$

$$\tau_n^{p+1}=\tau_n^p+\Delta t\cdot N(v_{n+1}^{p+1}-v_n^{p+1})/\Delta z_n \quad (10)$$

式中：

$$Y_1=\Delta z_n/D_{22}(n)+\Delta z_{n-1}/D_{22}(n-1)$$

$$Y_2 = \Delta z_n / D_{12}(n) + \Delta z_{n-1} / D_{12}(n-1)$$
$$D_1(n) = [\Delta z(n) D_{12}(n) + \Delta z(n) D_{22}(n)] / \Delta z(n)$$
$$D_2(n) = [\Delta z(n) D_{11}(n) + \Delta z(n) D_{12}(n)] / \Delta z(n)$$
$$D_{11} = \rho_{11} / (\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)$$
$$D_{12} = \rho_{12} / (\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)$$
$$D_{22} = \rho_{22} / (\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)$$

式(6)～(10)构成了求解一维饱和土层顶层速度～层间剪应力的时域显式递推积分格式。

土层的积分格式都是条件稳定的，计算时间步距 Δt 均应满足以下条件：

$$\Delta t \leqslant \min(\Delta h / c_n),\ n = 1,2,\cdots,N \tag{11}$$

式中：c_n 为第 n 层介质的剪切波速。

为满足精度要求，应满足以下条件：

$$\Delta h_n = (1/6 \sim 1/12) T_{\min} c_n \tag{12}$$

式中：$T_{\min}$ 为输入地震动频率成分中具有工程意义的最小周期。

在人工边界的处理上选择透射边界，即在 $z_b = z_n + jc_a\Delta t$ 处，$t = (p+1)\Delta t$ 时刻，在已知入射波为 v_{bi}^{p+1} 的条件下，总波场的反应为：

$$v_b^{p+1} = v_{br}^{p+1} + v_{bi}^{p+1} \tag{13}$$

式中：v_{br}^{p+1} 为人工边界处的外行波场，具体表达为：

$$v_{br}^{p+1} = \sum_{j=1}^{J} (-1)^{j+1} C_J^j v_{jr}^{p+1-j} \tag{14}$$

至此，本文较为详细的介绍了考虑饱和两相介质的土层地震反应的全过程。利用以上介绍的方法，以 Intel Visual Fortran2011 作为编译平台，编写了一维的两相介质土层地震反应分析计算程序 Twophasex1D，利用该程序可以计算双相介质的土层地震反应。

1.2 单相介质模型

根据连续介质理论，单相介质方程建立如下：

运动方程

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho(z) \frac{\partial v}{\partial t} \tag{15}$$

变形相容方程

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \tag{16}$$

线性本构方程

$$\tau = G\gamma \tag{17}$$

采用和上述两相介质相同的数值方法对以上方程进行差分，得到单相介质地震反应的时域递推积分格式：

$$v_1^{p+1} = v_1^p + 2\frac{\Delta t}{\rho_1 \Delta z_1} \tau_1^p \tag{18}$$

$$v_n^{p+1} = v_n^p + 2\frac{\Delta t}{\rho_n \Delta z_n + \rho_{n-1}\Delta z_{n-1}} (\tau_n^p - \tau_{n-1}^p),\quad n = 2,3,\cdots,N \tag{19}$$

$$\tau_n^{p+1} = \tau_n^p + \Delta t \cdot G \frac{v_{n+1}^{p+1} - v_n^{p+1}}{\Delta z_n} \tag{20}$$

人工边界同样采用局部透射边界来处理。据此编写单相程序 Onephasex1D，利用此程序可以计算单相介质的土层地震反应。

2 算例选择

2.1 计算土层选取

选取北京高端制造业基地 FMD 大厦 1# 钻孔、无定河特大桥 4# 钻孔、正线跨太中银铁路特大桥 1# 钻孔所在场地作为计算土层。这几个场地的土层结构简单，土类较为常见，具有代表性，且具有计算所需的各种参数。以上 3 个土层所在场地均为Ⅱ类场地，为书写和记忆方便，分别记为工况 1、工况 2 和工况 3。详细参数资料见表 1。

从表中可以看出，工况 1 在深度为 46.2 m 时，剪切波速可以达到 507 m/s，可作为输入基岩面，故取地表下 46.2 m 处作为地震动输入界面。同理，工况 2 和工况 3 分别选取 53.5 m 和 17.8 m 作为地震动的输入界面。

2.2 地震动输入的选取

选取实际记录的 El Centro 地震波(NS 方向)和 Taft 地震波(南偏东 60°方向)作为地震动输入，其中 El Centro 波的峰值加速度为 326 gal，而 Taft 波为 175.9 gal。图 1 为这两条地震动的加速度时程曲线和对应的傅里叶谱曲线。

3 结果分析

3.1 对地表峰值加速度的影响

将每一工况分为不含地下水和饱含地下水两种情况，不含地下水的工况使用单相介质模型计算，饱含地下水的工况使用双相介质模型计算。3 个工况在两条地震动输入下，可以得到 12 条地表地震动时程，即各 6 条不含地下水和饱含地下水情况的结果。提取此 12 条地震动的峰值加速度，其结果如表 2 所列。

通过表 2 可以得出，无论“大震”还是“小震”，无地下水时的地表峰值加速度均要小于有地下水时，两者的比值在 0.93 倍左右，这说明地下水的存在会使地表地震动峰值减小。这是因为两相介质中，土和水存在相对运动，引起能量的耗散，从而减小了地震动的作用，起到“减震”的效果。不同场地工况下，

表 1　各工况的计算参数

Table 1　Calculation parameters for condition

工况	序号	土性	深度/m	层厚/m	密度/(kg·m^{-3})	波速/(m·s^{-1})	孔隙率	渗透系数/(m·s^{-1})
工况 1	1	杂填土	1.7	1.7	1 900	152	0.27	8.0×10^{-6}
	2	黏质粉土	6.0	4.3	1 920	178	0.28	1.0×10^{-6}
	3	粉质黏土	8.0	2.0	2 010	182	0.26	5.0×10^{-8}
	4	黏质粉土	9.2	1.2	1 950	187	0.26	1.0×10^{-6}
	5	粉质黏土	22.1	12.9	1 890	263	0.29	5.0×10^{-8}
	6	粗砂	24.8	2.7	2 050	289	0.23	4.0×10^{-4}
	7	粉质粘土	35.6	10.8	2 000	388	0.25	1.0×10^{-7}
	8	块石土	46.2	10.6	2 050	496	0.23	8.0×10^{-3}
	9	卵石	50.0	3.8	2 200	507	0.18	1.0×10^{-2}
工况 2	1	粉砂	2.0	2.0	1 960	232.2	0.28	5.0×10^{-6}
	2	粉砂	11.0	9.0	1 960	279.7	0.28	5.0×10^{-6}
	3	粉砂	16.0	5.0	1 980	342.8	0.27	5.0×10^{-6}
	4	粉砂	20.7	4.7	1 980	449.4	0.27	5.0×10^{-6}
	5	黄土	26.0	5.3	1 790	449.4	0.35	1.0×10^{-5}
	6	黄土	36.0	10.0	1 880	490.1	0.32	1.0×10^{-5}
	7	黄土	44.8	8.8	1 990	490.1	0.28	1.0×10^{-5}
	8	粉土	50.0	5.2	2 050	441.2	0.25	6.0×10^{-7}
	9	粉土	53.5	3.5	2 050	441.2	0.25	6.0×10^{-7}
	10	强风化砂岩	60.0	6.5	2 200	986.9	0.20	1.0×10^{-3}
工况 3	1	黄土	3.0	3.0	1 880	211.8	0.31	5.0×10^{-5}
	2	黄土	7.0	4.0	1 880	211.8	0.31	5.0×10^{-5}
	3	粉砂	10.0	3.0	1 960	361.3	0.29	7.0×10^{-6}
	4	粉砂	13.8	3.8	1 960	361.3	0.29	7.0×10^{-6}
	5	粉土	17.8	4.0	2 050	438.1	0.25	1.0×10^{-7}
	6	细砂	25.0	7.2	2 100	513.0	0.24	1.0×10^{-5}

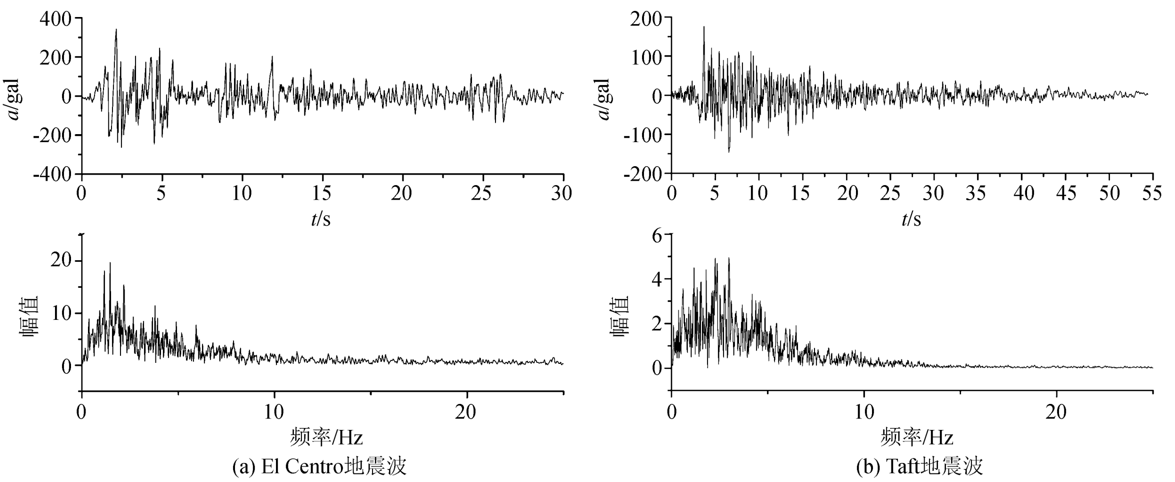

图 1　基岩输入地震动曲线

Fig.1　Curves of input ground motion at the bedrock

表 2　地下水对地表峰值加速度的影响

Table 2　Effect of groundwater on peak ground acceleration

工况	El Centro 波			Taft 波		
	无地下水情况/gal	有地下水情况/gal	两者比值	无地下水情况/gal	有地下水情况/gal	两者比值
工况 1	1 597.08	1 490.98	0.93	550.27	519.38	0.94
工况 2	2 470.83	2 326.58	0.94	660.12	610.42	0.92
工况 3	1 089.05	994.08	0.91	421.52	394.76	0.93

同一地震动输入时，有地下水场地与无地下水场地地表峰值加速度的比值并不相同，说明不同的土层条件，地下水的“减震”效果也存在差异，出现这种现象的原因可能与含水土层的渗透特性、土层结构等因素有关，需要进一步探索。对比同一工况输入 El Centro 波和 Taft 波时，工况 1 的比值分别为 0.93 和 0.94，工况 2 分别为 0.94 和 0.92，工况 3 分别为 0.91 和 0.93，并不相同，这说明地下水对地表峰值加速度的影响受到输入地震波的影响。

3.2 对反应谱的影响

图 2 反应了不同工况、不同地震动输入下无地下水和有地下水时地表加速度反应谱的对比。从图中可以看出：总体来说两种情况下的地表加速度反应谱差别不很明显，主要体现在 0.1～0.8 s 周期段，有地下水时地表加速度反应谱值要小于无地下水时；0.8 s 以后周期段，两种情况下的地表加速度反应谱基本一致。工况 3 的加速度反应谱差异较大，而工况 1 和工况 2 的加速度反应谱差异较小，这说明地下水对地震动参数的影响与土层资料有关，更进一步分析 3 种工况土层参数的区别，疑与土层埋深有关。

为了清晰地表示有地下水和无地下水场地地表加速度反应谱的差别，将得到的反应谱曲线规准化，并采用最小二乘分段拟合方法对其进行标定[23]，得到放大系数反应谱的特征周期和平台值如表 3 所列。

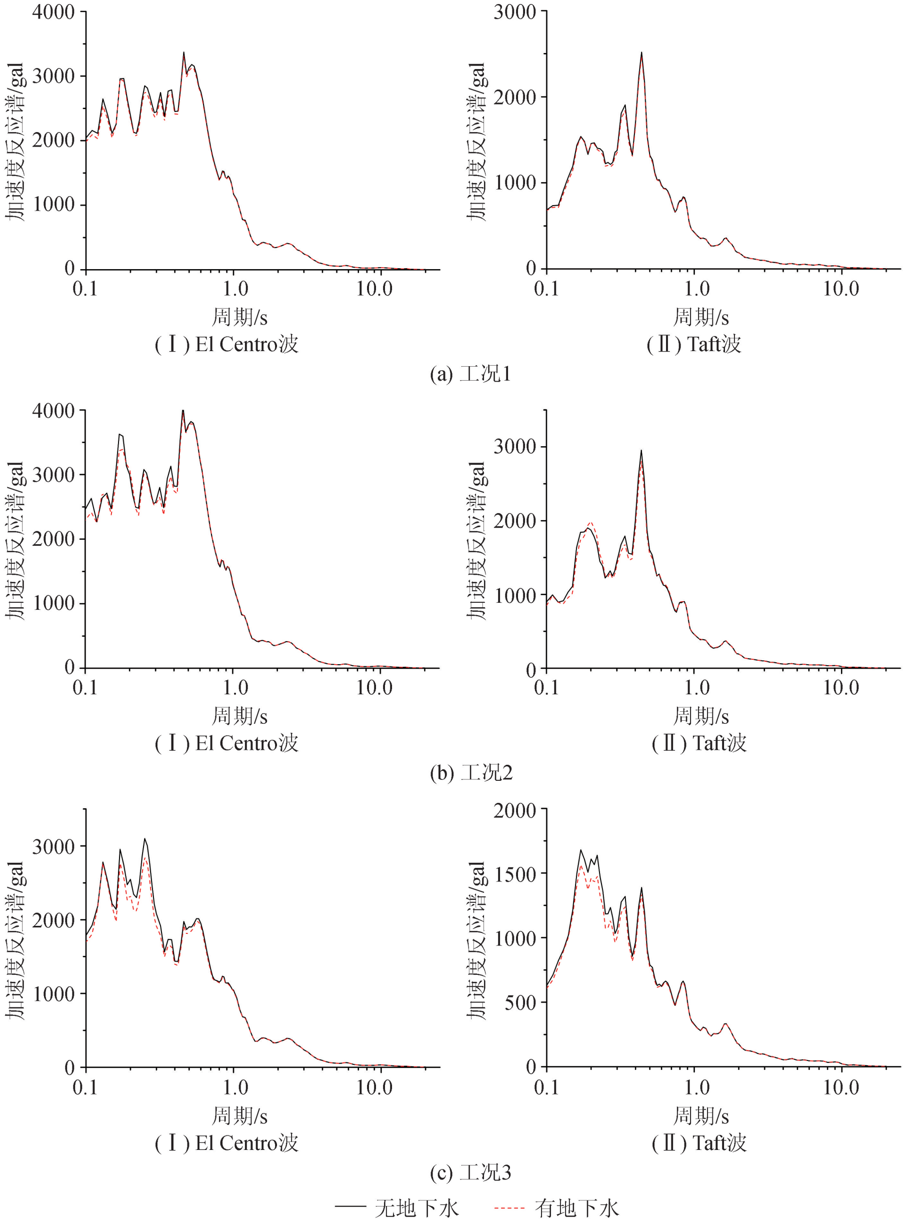

图 2 地表加速度反应谱曲线

Fig.2 The surface acceleration response spectra

表 3　地下水对放大系数反应谱特征周期（T_g）及平台值（β_{max}）的影响

Table 3　Effect of groundwater on characteristic period（T_g）and platform value（β_{max}）of the amplification factor response spectra

工况	T_g				β_{max}			
	El Centro 波		Taft 波		El Centro 波		Taft 波	
	无地下水情况	有地下水情况	无地下水情况	有地下水情况	无地下水情况	有地下水情况	无地下水情况	有地下水情况
工况 1	0.60 s	0.60 s	0.46 s	0.48 s	1.65	1.73	2.57	2.67
工况 2	0.58 s	0.60 s	0.46 s	0.50 s	1.22	1.30	2.38	2.54
工况 3	0.56 s	0.58 s	0.40 s	0.42 s	2.02	2.20	2.85	2.90

从表中可以得出，有地下水存在时，除工况 1 在 El Centro 波输入下放大系数谱的特征周期没有变化，其他场地放大系数谱的特征周期要大于无地下水时的情况，但变化的程度不同。这说明地下水的存在使得场地放大系数谱特征周期（T_g）变大，但变化的幅度不大；而对于场地放大系数谱平台值（β_{max}）来说，有地下水的场地要大于无地下水的情况，但增大程度不同，这与输入地震波和场地本身特性有关。地下水的存在使得放大系数谱平台值增大，是由于含地下水土层的地表峰值加速度要小于不含地下水土层，且这种变化要大于反应谱的总体变化，规准化后的放大系数谱的平台值反而大于不含地下水土层的放大系数谱平台值。

4　结语

本文选取了 3 个实际场地作为计算土层，两条大小不同的地震动作为输入，分别利用单相介质理论和双相介质理论计算无地下水时和饱含地下水时场地的地震反应，通过对比分析，得出地下水存在对地震动参数的影响为：

（1）含地下水场地的地表峰值加速度要明显小于不含地下水场地的地表峰值加速度；

（2）含地下水场地的地表加速度反应谱要大于不含地下水场地的反应谱值；

（3）由于地下水的存在，放大系数反应谱特征周期和平台值变大。

因此，地下水对地震动参数的影响是不容忽视的，这一问题的研究对场地划分和抗震设防有一定的参考价值。值得指出的是，本文的土层模型及输入地震动数量有限，仅能得出一个规律性认识，下一步需要增加样本数量，考虑不同幅值和频谱地震动输入以及不同场地类别土层进行计算，使这一问题的研究更加深入。

参考文献（References）

［1］　薄景山，李秀领，李山有.场地条件对地震动影响研究的若干进展[J].世界地震工程，2003，19(2)：11-15.
BO Jing-shan，LI Xiu-ling，LI Shan-you. Some Progress of Study on the Effect of Site Conditions on Ground Motion[J]. World Earthquake Engineering，2003，19(2)：11-15.(in Chinese)

［2］　卢育霞，石玉成，万秀红，等.近地表速度结构对场地强地震动特征的影响[J].地震工程学报，2014，36(4)：813-819.
LU Yu-xia，SHI Yu-cheng，WAN Xiu-hong，et al.Influence of Near-Surface Velocity Structure on Site Characteristics of Strong Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal，2014，36(4)：813-819.(in Chinese)

［3］　李恒，张静波，吴建超.软夹层和硬夹层对地表地震动特性的影响[J].地震工程学报，2014，36(3)：441-445.
LI Heng，ZHANG Jing-bo，WU Jian-chao.Effects of Soft and Hard Interlayers on Ground Motion Characteristics[J].China Earthquake Engineering Journal，2014，36(3)：441-445.(in Chinese)

［4］　胡聿贤，孙平善，章在墉，等.场地条件对震害和地震动的影响[J].地震工程与工程振动，1980(1)：34-41.
HU Yu-xian，SUN Ping-shan，ZHANG Zai-yong，et al.Effect of Site Conditions on Earthquake Demage and Ground Motion[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration，1980(1)：34-41.(in Chinese)

［5］　李孝波，薄景山，李平，等.地震烈度异常研究的若干进展[J].地震学报，2013，35(3)：430-440
LI Xiao-bo，BO Jing-shan，LI Ping，et al.Some Progress of Study on Abnormality of Seismic Intensity[J].Acta Seismologica Sinica，2013，35(3)：430-440.(in Chinese)

［6］　Yang J.Influence of Water Saturation on Horizontal and Vertical Motion at a Porous Soil Interface Induced by Incident SV Wave[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2000，19：575-581.

［7］　Yang J.Influence of Water Saturation on Horizontal and Vertical Motion at a Porous Soil Interface Induced by Incident P Wave[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2000，19：339-346.

［8］　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.(in Chinese)

［9］　景立平，卓旭炀，王祥建.复杂介质对地震波传播的影响[J].岩

土工程学报,2005,27(4):393-397.
JING Li-ping,ZHUO Xu-yang,WANG Xiang-jian.The Effect of Complex Media on Seismic Wave Propagation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(4):393-397.(in Chinese)

[10] 景立平,卓旭炀,王祥建.复杂场地对地震波传播的影响[J].地震工程与工程振动,2005,25(6):16-23.
JING Li-ping,ZHUO Xu-yang,WANG Xiang-jian.Effect of Complex Site on Seismic Wave Propagation[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(6):16-23.(in Chinese)

[11] 夏坤,董林,孙军杰.地下水位对黄土土层地震动影响初探[J].地震工程与工程振动,2012,32(6):45-52.
XIA Kun,DONG Lin,SUN Jun-jie,Preliminary Investigation on Effect of Groundwater Rise on Earthquake Responses for Loess Sites[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2012,32(6):45-52.(in Chinese)

[12] 陈青生,高广运,何俊峰.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):3461-3467.
CHEN Qing-sheng,GAO Guang-yun,HE Jun-feng.Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Seismic Ground Response of Soft Soils in Shanghai[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(11):3461-3467.(in Chinese)

[13] 高广运,陈青生,何俊峰,等.地下水位上升对上海软土场地地震反应的影响[J].岩土工程学报,2011,33(7):989-995
GAO Guang-yun,CHEN Qing-sheng,HE Jun-feng,et al.Effect of Rise of Groundwater Table on Seismic Ground Response of Soft Soil in Shanghai[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(7):989-995.(in Chinese)

[14] Idiss I M,Seed H B.Seismic Response of Horizontal Soil Layers[J].Journal of the Soil Nechanics and Foudations Division,Asce,1968,94(4):1003-1031.

[15] Wolf J.P.Dynamic Soil-Structure Interaction[M].Englewood Cliffs,Inc.,Pretice-Hall,New Jersey,1985.

[16] Yang J,Yan X R.Site Response to Multi-Directional Earthquake Loading:A Practical Procedure[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2009,29:710-721.

[17] 门福录,崔杰,袁晓铭,等.含地下水的土层对地震波传播的影响[J].地球物理学报,1992,35(4):521-532.
MEN Fu-lu,CUI Jie,YUAN Xiao-ming,et al.Effect of Saturated-soil Layers on Seismic Wave Propagation[J].Atta Geophysica Sinica,1992,35(4):521-532.(in Chinese)

[18] Sibylle Steimen,Donat Fah,Fortunat Kind.Christian Schmid and Domenico Giardini.Identifying 2D Resonance in Microtremor Wave Fields[J].Bull Seism Soc Am,2003,93(2):583-599.

[19] Biot M A.Theory of Propogation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid,Ⅰ.Low-Frequency Range[J].J Acoust Soc Am,1956,28(2):168-178.

[20] Biot M A.Theory of Propogation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid,Ⅱ.High-Fequency Range[J].J Acoust Soc Am,1956,28(2):179-191.

[21] James G.Berryman.Biot′s Theory of Elastic Waves in Fluid-Saturated Porous Media[J].The Journal of the Acoustical Society of America,1980,68(Suppl 1):2.

[22] 卢滔,周正华,霍敬妍.土层非线性地震反应一维时域分析[J].岩土力学,2008,29(8):2170-2176.
LU Tao,ZHOU Zheng-hua,HUO Jing-yan.1D Nonlinear Seismic Response Analysis of Soil Layers in Time Domain[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29(8):2170-2176.(in Chinese)

[23] 郭晓云,薄景山,巴文辉,等.最小二乘法分段拟合标定反应谱方法[J].世界地震工程,2012,28(3):29-33.
GUO Xiao-yun,BO Jing-shan,BA Wen-hui,et al.Sectional Least Square Fitting Method for Calibrating Seismic Design Response Spectrum[J].World Earthquake Engineering,2012,28(3):29-33.(in Chinese)