文章编号：1000-8608(2016)04-0382-08

地震波动输入方法对高土石坝地震反应影响研究

周晨光[1,2]，孔宪京*[1,2]，邹德高[1,2]，隋　翊[2]，张树茂[3]

（1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2.大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院，辽宁 大连 116024；
3. 北京矿冶研究总院，北京 100160）

摘要：将地震波动输入方法引入高土石坝地震反应分析程序，讨论了该方法在坝体与地基之间相互作用及无限地基辐射阻尼的模拟效果.为探讨地震波动输入方法对高土石坝地震反应的影响，从地震波频谱特性、坝体高度和地基模量三个方面开展了研究工作.分析结果表明：与传统的一致输入方法相比，地震波动输入方法可以考虑无限地基辐射阻尼的影响，并合理地反映出坝体与地基之间相互作用的变化规律；当高频含量较多的地震波作用时，传统一致输入模型与所提出地震波动输入模型的数值结果差异相对较大；两类模型数值结果的差异区域会随坝体高度的增加逐渐增大；地震波动输入方法可以较好地反映出地基模量变化对坝体与地基之间相互作用的影响.

关键词：高土石坝；一致输入；波动输入；地震波动输入方法；地震反应

中图分类号：TU435　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb201604009

0 引　言

地震动输入方法是土石坝地震反应计算中一个尚未解决好的关键难题之一.地震波从产生到作用于坝体要经历一个传播过程，使得建基面上各点作用的地震荷载不同.目前土石坝动力有限元计算中通常采用的地震动输入方式还是最简单的均匀一致输入方式，即在坝体内部各节点上施加同一个地震加速度时程产生的惯性力，这就等价于整个地基成为了一个刚性的振动台，建基面上各点的位移过程都相同.对于高土石坝而言，由于其尺寸和跨度很大，地震动输入的非一致性是很明显的，均匀一致输入的简化处理显得过于粗略.此外，地震的随机性、地壳结构的复杂性，会导致地震波传播到坝体结构时的入射波类型及角度存在一定的不确定性.高土石坝-地基系统，实为一个能量开放的系统，坝体与地基之间存在着不同程度的相互作用，同时外行的散射能量会向无限地基辐射.这些因素会导致坝体边界处各点的反应幅值及相位存在差异，地震波动效应的影响可能更加显著.因此，为了对高土石坝的地震安全性作出更准确的评估，采用非一致波动输入方式进行动力计算，确定合理的并可综合考虑相互作用、地基辐射阻尼和行波效应的地震动输入方法极为重要.

在采用有限元方法分析半无限空间动力反应问题时，常用的局部人工边界包括 Sommerfeld 边界[1]、黏性人工边界[2]、叠加边界[3]、Clayton-Engquist 边界[4]、黏弹性人工边界[5-6]、透射人工边界[7]等，这些人工边界具有时空解耦的特点，备受学术和工程界关注.其中，黏性人工边界模型物理概念清晰，应用方便，而且易于通过程序实现，因此已经在拱坝[8]、均质土石坝[9-10]、地铁车站[11-12]、隧道[13-14]、斜拉桥[15]等大型建筑物的地震反应分析中有所应用，不过此种人工边界结合相应的地震波动输入方法在高土石坝方面的应用相对较少，因此有必要深入、全面地开展相关研究，为大坝抗震设计和安全评价提供参考.

收稿日期：2015-08-25；　**修回日期：**2016-03-10.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51279025,91215301).
作者简介：周晨光(1982-)，男，硕士，工程师，E-mail:zhchg@dlut.edu.cn；孔宪京*(1952-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail:kongxj@dlut.edu.cn.

本文首先基于 SV 垂直入射半圆形山谷散射问题来验证实现黏性人工边界和波动输入方法的程序的正确性；然后采用波动输入方法计算一典型高黏土心墙坝的地震反应，并与传统一致输入模型的数值结果进行对比，讨论波动输入方法在地基辐射阻尼作用方面的模拟效果；之后通过改变岩性地基的边界范围，研究波动输入方法的稳定性；最后为探讨地震动输入方法对高土石坝地震反应的影响规律，同时采用波动输入模型和一致输入模型，分别从地震波频谱特性、坝体高度和地基模量三个方面开展较详细的研究工作.

1　地震波动输入方法及程序正确性验证

1.1　黏性人工边界界面单元及相应的地震波动输入方法

由于大连理工大学工程抗震研究所开发的黏弹性人工边界界面单元可用于等效黏弹性人工边界的作用[16]，而且建模简单快捷，适应复杂边界形状，所以本文采用此单元. 另外，因为一些学者研究表明黏性人工边界与黏弹性人工边界均具备较好的吸能作用[8]，因此计算选用黏性人工边界界面单元(见图 1，图中 k_n、k_t 分别表示单位面积上法向和切向的弹簧系数，c_n、c_t 分别表示单位面积上法向和切向的阻尼系数)，即 $k_n=k_t=0$，c_n 和 c_t 的计算式为

$$c_n=\rho v_p \tag{1}$$

$$c_t=\rho v_s \tag{2}$$

式中：ρ 为边界处波动介质的密度，v_p 和 v_s 分别为纵波 p 波和横波 s 波的传播波速.

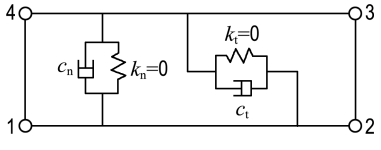


图 1　黏性人工边界界面单元

Fig. 1　Viscous artificial boundary interface element

地震波动输入在于模拟实际波场的应力边界条件，具体通过刘晶波等提出的等效节点荷载[6]来实现，计算式为

$$\boldsymbol{F}_b=\boldsymbol{R}_b^{ef}+\boldsymbol{C}_b\dot{\boldsymbol{u}}_b^{ef} \tag{3}$$

式中：b 表示系统边界，$\boldsymbol{C}_b$ 表示黏性人工边界界面单元在边界处产生的附加阻尼矩阵；$\boldsymbol{R}_b^{ef}$ 和 $\dot{\boldsymbol{u}}_b^{ef}$ 分别表示在自由波场作用下边界节点处的力和速度，所谓自由波场是由入射波场和反射波场叠加而成.

由于该地震波动输入方法模拟了实际波场的应力边界条件，可以模拟波动垂直入射情况和近场区发生浅源地震时波动倾斜入射下的波场分布，反映出行波效应的作用.

1.2　算例验证

通过 SV 波垂直入射二维半圆形山谷散射问题算例来验证程序在实现上述地震波动输入方法方面的正确性. 问题示意如图 2 所示，当垂直入射时入射角 $\theta=0°$，山谷半径 $r_0=210$ m，模型竖向高度 $y_b=525$ m，水平长度 $x_b=1\,050$ m. 有限元网格如图 3 所示，外侧网格尺寸 17.5 m×17.5 m；材料剪切模量为 5.292 GPa，泊松比为 1/3，密度为 2.7 g/cm^3；入射正弦波的位移振幅为 1 m. 量纲一频率表达式为 $\eta=2r_0/\lambda=\omega r_0/\pi c_s$，其中 λ 为波长，ω 为角频率，c_s 为剪切波速. 为论证上述方法适用一定的频率范围，η 取值考虑 0.5 和 2.0 两种情况.

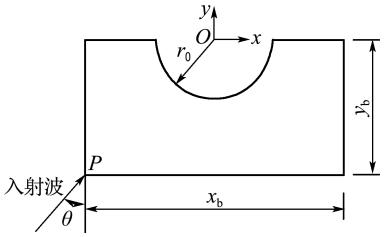


图 2　波动入射半圆形山谷

Fig. 2　Semicircle valley under wave incidence

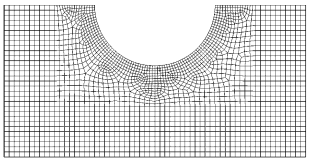
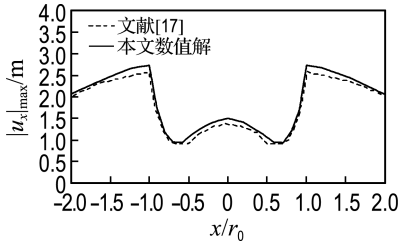


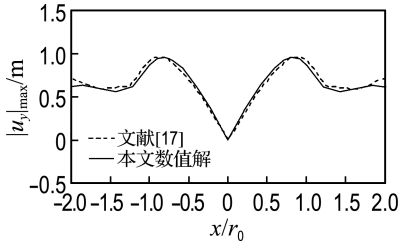
图 3　半圆形山谷的有限元网格

Fig. 3　Finite element mesh of semicircle valley

图 4、5 中的横坐标表示水平向的相对位置，即山谷表面和周围地表节点横坐标值与山谷半径的比值；纵坐标表示节点进入稳态振动时水平向和竖向的位移幅值. 验证结果参考文献[17]，可以看出，本文数值解与文献[17]给出的结果吻合较好，有效论证了地震波动输入方法和计算程序的正确性.



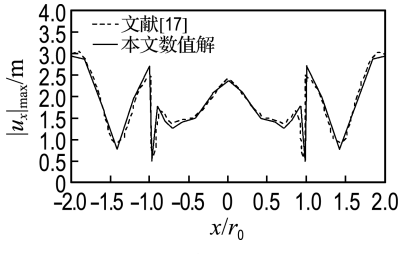
(a) 水平向



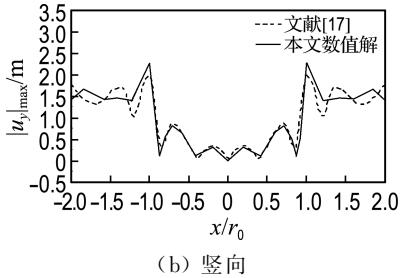
(b) 竖向

图 4 SV 波垂直入射时地表的位移幅值($\eta=0.5$)

Fig. 4 Surface displacement amplitude under SV-wave vertical incidence ($\eta=0.5$)



(a) 水平向



(b) 竖向

图 5 SV 波垂直入射时地表的位移幅值($\eta=2.0$)

Fig. 5 Surface displacement amplitude under SV-wave vertical incidence ($\eta=2.0$)

2 坝体模型及坝料参数

2.1 坝体模型

本文以二维黏土心墙坝作为研究对象,同时创建了 100、200、300 m 高度坝体有限元模型来开展对比分析. 坝体顶部宽度取 16 m,上、下游坝坡比均为 1∶2;黏土心墙顶部宽度取 4 m,两侧坡比均为 1∶0.2;反滤层的水平厚度取 8 m,坡比为 1∶0.2;过渡层的顶部宽度为 10 m,距坝顶高度为 14 m,坡比为 1∶0.3;蓄水高程距坝顶高度为 10 m. 坝料分区详见图 6.

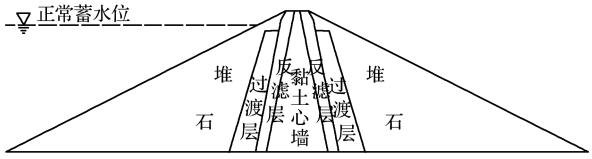
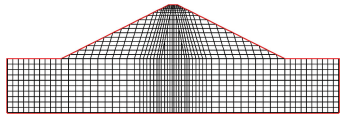


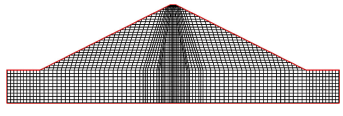
图 6 坝料分区示意图

Fig. 6 Partitions sketch of dam materials

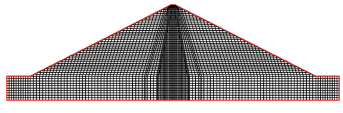
地震波动输入方法分析时采用的坝体有限元网格如图 7 所示,同时包含坝体与岩性地基,地基的深度以及水平向外延距离均取为 100 m. 当采用一致输入方法时考虑两类模型:(1)无地基模型,即不包含岩性地基区域,模型底部刚性约束;(2)无质量地基模型,即考虑岩性地基部分,但不考虑其质量,地基底部刚性约束,地基两侧边界竖向约束.



(a) 100 m



(b) 200 m



(c) 300 m

图 7 3 种高度的坝体有限元网格

Fig. 7 Finite element mesh of dam with three different heights

2.2 坝料参数

坝体填筑计算采用邓肯-张双曲线 E-B 模型,具体参数见表 1[18];地震反应计算采用等效线性黏-弹性 Hardin-Drnevich 模型,具体参数见表 2[18];图 8、9 给出了各种坝料的归一化等效动剪切模量和等效阻尼比与动剪应变幅值的关系曲线. 岩性地基的弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.25,密度为 2.65 g/cm^3.

本文所有计算均采用大连理工大学工程抗震研究所自主研发的大型岩土工程非线性有限元分析软件 GEODYNA[19].

表 1　静力模型参数

Tab. 1　Parameters of static model

材料	$\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	$\varphi_0/(°)$	$\Delta\varphi/(°)$	c/kPa	R_f
黏土心墙料	2.10	31.0	—	35	0.88
反滤料	2.00	42.7	3.8	—	0.72
过渡料	2.09	47.3	6.4	—	0.79
堆石料	2.12	41.8	3.0	—	0.71

材料	k	n	k_b	m
黏土心墙料	447	0.51	255	0.51
反滤料	1 141	0.20	423	0.23
过渡料	960	0.25	357	0.34
堆石料	1 050	0.25	500	0.25

表 2　动力模型参数

Tab. 2　Parameters of dynamic model

材料	K	n
黏土心墙料	1 609	0.53
反滤料	1 117	0.58
过渡料	4 722	0.42
堆石料	4 665	0.42

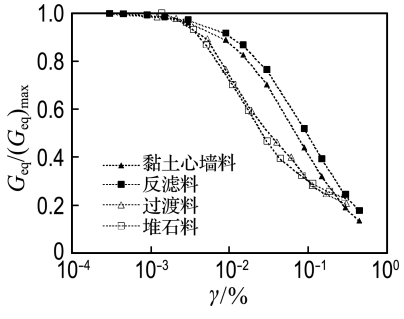


图 8　归一化等效动剪切模量与动剪应变幅值的关系曲线

Fig. 8　The relation curve of normalized equivalent dynamic shear modulus with shear strain amplitude

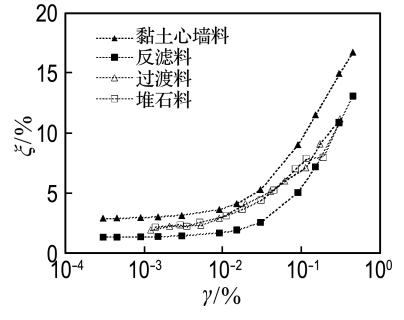
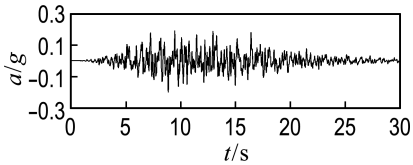


图 9　等效阻尼比与动剪应变幅值的关系曲线

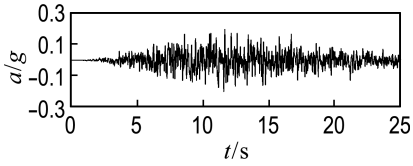
Fig. 9　The relation curve of equivalent damping ratio with shear strain amplitude

3　地震波动输入

选用双江口场地谱和规范谱的水平向地震波作为地震波动输入，加速度时程如图 10 所示，其峰值取为 0.2g；图 11 绘制了相应的加速度放大倍数反应谱. 后文数值计算仅包含 SV 波垂直入射的工况.



(a) 场地谱地震波



(b) 规范谱地震波

图 10　水平向地震动加速度时程

Fig. 10　Horizontal seismic acceleration time history

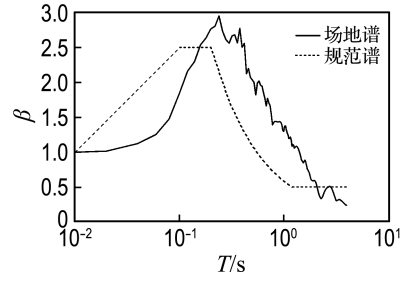


图 11　加速度放大倍数反应谱

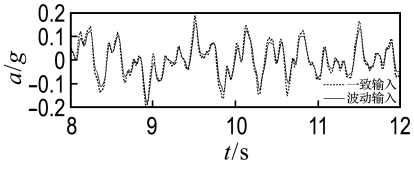
Fig. 11　Response spectrum of acceleration amplification

4　不同地震波动输入方法下坝体地震反应分析

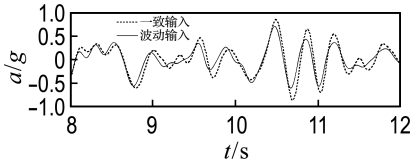
4.1　波动输入方法对地基辐射阻尼的模拟效果分析

计算采用 100 m 坝高对应的波动输入模型(图 7(a))和无地基一致输入模型. 地震波采用场地谱水平向加速度时程. 为便于观察，仅提取在 8～12 s 时段内坝底中点和坝顶中点的加速度时程曲线，见图 12. 可以看出，在坝底中点处，波动输入模型得到的加速度反应略小于一致输入模型，这表明，当地基刚度明显大于坝体时，坝体振动对地基运动的影响相对较小. 因为波动输入模型考虑了波动能量的传递和分配，从而反映出坝体与地基之间的相互作用，因此坝-基交界面的加速度反应小于自由波场作用下的地表反应(即露头基岩位置的地震加速度，亦为一致输入模型在

施加地震惯性力时采用的地震加速度). 此外,由于波动输入模型通过人工边界考虑了地基辐射阻尼的作用,其得到的坝顶加速度反应明显小于一致输入模型.



(a) 坝底中点



(b) 坝顶中点

图 12 坝底中点和坝顶中点加速度时程曲线

Fig. 12 Time history curves of acceleration at the bottom and top of dam center axis

由以上分析可知,波动输入方法既可模拟地基辐射阻尼效果,又可以反映出坝体与地基之间的相互作用.

4.2 波动输入方法对地基范围的敏感性分析

一般来讲,在有限元数值分析中地基截取的区域越大,坝体的动力反应越真实,但会大幅度增加计算工作量. 故而此处通过截取不同地基深度来分析波动输入方法对地基范围的敏感性.

计算采用 100 m 坝高对应的波动输入模型(图 7(a)),地基深度取为 100、200、300 m. 地震波采用场地谱水平向加速度时程. 不同地基深度的波动输入模型得到的坝顶最大加速度反应见表 3. 可以看出,与地基深度取 300 m 时的坝顶最大加速度反应相比,地基深度取 100 和 200 m 时与其的相对差值均小于 3%,说明岩性地基范围变化对波动输入模型的数值结果影响较小. 因此,后文计算采用的波动输入模型的地基深度及水平向外延距离均取为 100 m.

表 3 坝顶最大加速度反应

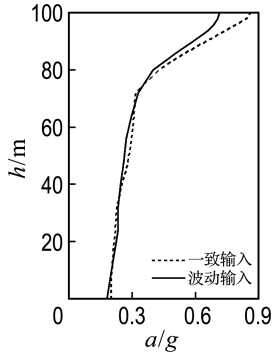
Tab. 3 Maximal acceleration response of dam top

地基深度/m	坝顶最大加速度反应/g
100	0.72
200	0.71
300	0.70

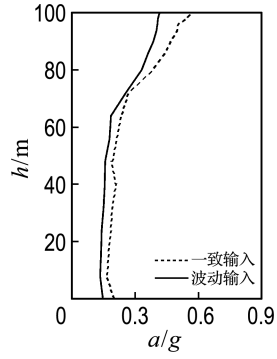
4.3 地震波频谱特性的影响

计算采用 100 m 坝高对应的波动输入模型(图 7(a))和无地基一致输入模型. 地震波分别采用场地谱、规范谱水平向加速度时程. 坝体中轴线水平向最大加速度分布曲线如图 13 所示. 可以发现,在低频成分含量相对较多的场地谱地震波作用下,仅在坝顶局部范围内,波动输入模型的加速度反应明显小于一致输入模型;而在高频成分含量相对较多的规范谱地震波作用下,在整个坝高范围内波动输入模型的加速度反应都较一致输入模型小. 这表明:当输入地震波的高频含量较多时,两类模型计算结果的差异较大.

近年来,汶川和芦山等地震的实测地震资料表明,实际地震动的高频含量较场地谱多,因此,在高土石坝的地震安全评价中考虑地震动输入方法是必要的.



(a) 场地谱



(b) 规范谱

图 13 坝体中轴线水平向最大加速度分布曲线

Fig. 13 Distribution curve of horizontal maximal acceleration along the central axis of dam

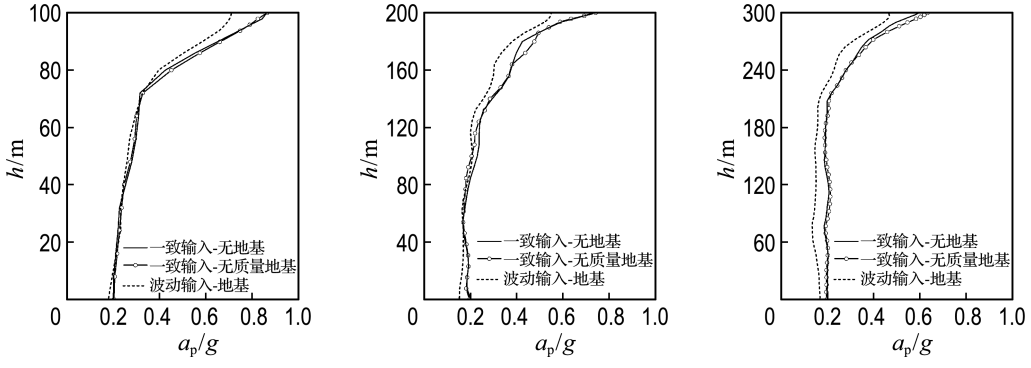
4.4 坝高的影响

计算采用 100、200、300 m 坝高对应的波动输入模型(图 7)和一致输入模型. 地震波采用场地谱水平向加速度时程.

坝体中轴线上水平向最大加速度的分布曲线如图 14 所示. 可以发现,当地基刚度很大时,坝体对地基动力反应的影响较小,这从坝-基交界面的加速度峰值近似等于露头基岩处的加速度峰值(0.2g)即可判定,所以无地基一致输入模型与无质量地基一致输入模型的结果相差很小,不过两者均未能考虑地基辐射阻尼,且前者无法反映坝体与地基之间的相互作用. 对于 100 m 高坝,在坝高 4/5 以上范围内波动输入模型得到的加速度反应明显小于一致输入模型;对于 200 m 高坝,

在坝高 1/2 以上范围内波动输入模型得到的加速度反应明显小于一致输入模型；对于 300 m 高坝，在整个坝高范围内波动输入模型得到的加速度反应均明显小于一致输入模型. 以上结果表明，坝体高度的增加会逐渐加大两类模型计算结果的差异区域. 其原因是，坝体高度的增加会使坝体底部的模量增大，减小其与地基模量之间的差异，从而使更多由坝体散射的波动能量透过坝-基交界面，向无限域辐射.

由于波动输入方法可以描述出波动能量在坝-基交界面的传输过程，反映出上、下波动介质模量变化带来的影响，可以合理地反映出坝高变化对坝体与地基之间相互作用的影响规律.



(a) 100 m　　(b) 200 m　　(c) 300 m

图 14　坝体中轴线水平向峰值加速度分布曲线

Fig. 14　Distribution curve of horizontal peak acceleration along the central axis of dam

4.5　岩性地基模量的影响

采用图 7(c)所示的 300 m 坝高模型进行动力反应计算，地基模量调整为 10 GPa. 地震波采用场地谱水平向加速度时程.

图 15 给出了坝体中轴线水平向最大加速度分布曲线，可以看出，无质量地基一致输入模型虽然在一定程度上考虑了坝体与地基之间的相互作用，但因其未合理考虑波动传输过程以及地基辐射阻尼，其结果较波动输入模型明显偏大. 而对于波动输入模型，降低岩性地基模量会减小坝体底部模量与地基模量之间的差异，在效果上等同于增大了坝体的高度，使更多由坝体散射的能量透过坝-基交界面，向无限域辐射，继而使坝体的加速度反应减小，因此波动输入方法可以较好地反映出地基模量变化对坝体与地基之间相互作用的影响.

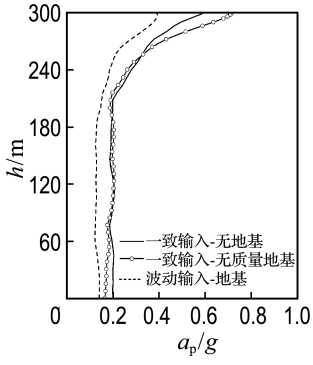


图 15　坝体中轴线水平向最大加速度分布曲线(坝高：300 m)

Fig. 15　Distribution curve of horizontal maximal acceleration along the central axis of dam (height of dam: 300 m)

5　结　论

(1)波动输入方法可以较合理地模拟高土石坝与地基之间的相互作用以及地基辐射阻尼效果.

(2)在高频含量较多的地震波作用下，一致输入模型和波动输入模型的加速度反应的差异相对较大.

(3)随坝高的增加，波动输入模型和一致输入模型的加速度反应的差异区域逐渐加大.

(4)波动输入方法可以较好地反映出地基模量变化对坝体与地基之间相互作用的影响.

因此，在高土石坝地震反应分析中，可以考虑采用波动输入方法研究坝体与地基之间的相互作用、地基辐射阻尼以及行波效应等方面的影响，以便更全面、准确地开展高土石坝抗震安全评价. 此

外,本文的研究成果为下一步分析行波效应对三维高土石坝地震反应的影响提供了依据.

参考文献:

[1] Sommerfeld A. **Partial Differential Equations in Physics** [M]. New York: Academic Press, 1964.

[2] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. **Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE**, 1969, **95**(4): 859-877.

[3] Smith W D. A non-reflecting plane boundary for wave propagation problems [J]. **Journal of Computational Physics**, 1974, **15**(4): 492-503.

[4] Clayton R, Engquist B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations [J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1977, **67**(6): 1529-1540.

[5] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1994, **120**(1): 25-42.

[6] 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, LV Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. **China Civil Engineering Journal**, 1998, **31**(3): 55-64. (in Chinese)

[7] 廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡,等. 暂态波透射边界[J]. 中国科学(A辑), 1984, **26**(6): 556-564.
LIAO Zhen-peng, HUANG Kong-liang, YANG Bai-po, *et al*. A transmitting boundary for transient wave analysis [J]. **Science in China (Series A)**, 1984, **26**(6): 556-564. (in Chinese)

[8] 刘云贺,张伯艳,陈厚群. 拱坝地震输入模型中黏弹性边界与黏性边界的比较[J]. 水利学报, 2006, **37**(6): 758-763.
LIU Yun-he, ZHANG Bo-yan, CHEN Hou-qun. Comparison of spring-viscous boundary with viscous boundary for arch dam seismic input model [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, **37**(6): 758-763. (in Chinese)

[9] 窦兴旺,夏颂佑,许百立. 人工边界法在土石坝动力分析中的应用[J]. 河海大学学报, 2000, **28**(5): 72-75.
DOU Xing-wang, XIA Song-you, XU Bai-li. Application of artificial boundary method to dynamic analysis of embankment dams [J]. **Journal of Hohai University**, 2000, **28**(5): 72-75. (in Chinese)

[10] 邹德高,徐 斌,孔宪京. 边界条件对土石坝地震反应的影响研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(s1): 101-106.
ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jing. Study of influence of boundary condition on rockfill dam seismic response [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, **29**(s1): 101-106. (in Chinese)

[11] 孙海峰,景立平,孟宪春. 地下结构地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(s1): 330-334.
SUN Hai-feng, JING Li-ping, MENG Xian-chun. Seismic response analysis of underground structures [J]. **World Earthquake Engineering**, 2010, **26**(s1): 330-334. (in Chinese)

[12] 陈建云,温瑞智,于品清,等. 浅埋软土地铁车站地震响应数值分析[J]. 世界地震工程, 2009, **25**(2): 46-53.
CHEN Jian-yun, WEN Rui-zhi, YU Pin-qing, *et al*. Numerical analysis of seismic response of a shallow-buried subway station structure in soft soil [J]. **World Earthquake Engineering**, 2009, **25**(2): 46-53. (in Chinese)

[13] 沈 慧,迟世春. 盾构隧道的开挖模拟及地震反应数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, **27**(3): 284-289.
SHEN Hui, CHI Shi-chun. Excavation simulation and numerical analysis of earthquake response of shield tunnel [J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2007, **27**(3): 284-289. (in Chinese)

[14] 朱长安,高 波,索然绪. 高地震区公路隧道地震动力响应分析[J]. 岩土工程技术, 2008, **22**(5): 232-235.
ZHU Chang-an, GAO Bo, SUO Ran-xu. Analysis for seismic dynamic responses of highway tunnel in high earthquake intensity area [J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2008, **22**(5): 232-235. (in Chinese)

[15] 李 纬,丁海平. 考虑土-结构相互作用的大跨度斜拉桥非线性地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(5): 555-560.
LI Wei, DING Hai-ping. Nonlinear seismic response analysis of large-span cable-stayed bridge with soil-structure interaction [J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2009, **29**(5): 555-560. (in Chinese)

[16] 周晨光,孔宪京,邹德高,等. 黏弹性边界在土石坝地震反应分析中的应用[C]//第18届全国结构工程学术会议论文集第Ⅲ册. 北京:《工程力学》杂志社, 2009.

ZHOU Chen-guang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, *et al*. Application of viscous-spring boundary in the seismic response analysis of the rockfill dam [C] // **Proceedings of the Eighteenth National Conference on Structural Engineering, No. Ⅲ**. Beijing: Engineering Mechanics Magazine, 2009. (in Chinese)

[17] Wong H L. Effects of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves [J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1982, **72**(4):1167-1183.

[18] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，大连理工大学. 300 米级双江口心墙堆石坝动力反应、抗震措施及安全评价标准研究[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，大连理工大学，2010.
HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Dalian University of Technology. Study on dynamic response, earthquake resistant measure and safety evaluation criteria of 300 m level Shuangjiangkou core rock-fill dam [R]. Chengdu: HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

[19] 邹德高，孔宪京. Geotechnical dynamic nonlinear analysis－GEODYNA 使用说明[R]. 大连：大连理工大学水利工程学院工程抗震研究所，2003.
ZOU De-gao, KONG Xian-jing. Geotechnical dynamic nonlinear analysis － GEODYNA manual [R]. Dalian: Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)

Study of influence of earthquake wave motion input method on seismic response of high earth-rock dam

ZHOU Chen-guang[1,2], KONG Xian-jing*[1,2], ZOU De-gao[1,2], SUI Yi[2], ZHANG Shu-mao[3]

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100160, China)

Abstract: Earthquake wave motion input method was introduced to a seismic response analysis program for high earth-rock dams. Then, the simulation effects of the method on the interaction between dam and foundation and the radiation damping of infinite foundation were discussed. On this basis, the influence of earthquake wave motion input method on seismic response of high earth-rock dam was studied from three aspects: spectrum characteristics of seismic waves, height of dam and foundation modulus. The research results show that: compared with traditional uniform excitation method, earthquake wave motion input method can take the influence of radiation damping of infinite foundation into account reasonably and reflect the change rules of interaction between dam and foundation. For the seismic wave with more high frequency components, there is a greater difference in numerical results between earthquake wave motion input model and uniform excitation model. With the increase of the height of dam, the difference on the whole between the two types of models is more obvious. Earthquake wave motion input method can reflect influence of interaction changing between dam and foundation with foundation modulus.

Key words: high earth-rock dam; uniform excitation; wave motion input; earthquake wave motion input method; seismic response