DOI：10.16285/j.rsm.2016.2153

# 高面板坝地震动非一致输入响应规律

姚 虞[1,2]，王 睿[1]，刘天云[1]，张建民[1]

（1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084；2. 水电水利规划设计总院，北京 100120）

**摘 要：**在多点输入方法和等价黏弹性模型的基础上，采用半解析的波函数组合法实现了面板堆石坝在非一致输入下的动力计算。从频域散射角度对计算方法的合理性进行了验证。对比了非一致输入与一致输入下高面板堆石坝的动力响应，发现在采用基岩自由表面点的振动过程相同的对比标准下，非一致输入的整体动力响应较小；在面板坝防渗系统相对薄弱的止水结构附近，非一致输入的动拉应力最大值比一致输入的结果更大；非一致输入下大坝动力响应值的分布相比一致性输入呈现出中间小、周边大的特性。并基于波动理论进一步分析了不同种类地震波入射角度对高面板堆石坝动力响应的影响，揭示了 P 波、SV 波和 SH 波入射下高面板堆石坝动力响应规律：随着入射角的增大，SH 波入射时，高面板坝动力响应强度基本不变；SV 波入射时，存在一个临界角，当入射角在临界角左右时高面板坝动力响应强度急剧增大和减小，之前基本不变，之后一直减小；P 波入射时，存在一个特征角度，在入射角小于特征角度时高面板坝动力响应强度基本不变，大于特征角度时高面板坝动力响应强度减小。

**关 键 词：**高面板堆石坝；非一致输入；动力响应；入射角度；波动理论

**中图分类号：**TV 641 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 06－2259－08

# Seismic response of high concrete face rockfill dams subject to non-uniform input motion

YAO Yu[1,2], WANG Rui[1], LIU Tian-yun[1], ZHANG Jian-min[1]

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

**Abstract:** Based on multipoint ground motion input method and an equivalent visco-elastic constitutive model for rockfill, a semi-analytical method is used to conduct dynamic analysis of high concrete face rockfill dams (CFRD) subject to non-uniform input motion. The validation of the calculation method is first conducted in the frequency domain. Under the condition that the acceleration time histories on the surface of the free field are assumed to be consistent for different modes of non-uniform and uniform seismic input, the following main conclusions can be drawn. The seismic response to the non-uniform input is generally smaller than that to the uniform input. The dynamic tensile stresses become obviously larger at the waterstops (the seepage control system of CFRD) for the non-uniform input than for the uniform one. The seismic responses of the high CFRD to the non-uniform input are characterized by the smaller in central part and the larger around the boundary. The seismic response of high CFRDs under the incidence of P, SV and SH waves are featured by the following several main facts and findings: With increasing incident angle for SH waves, the response intensity shows almost constant. There exists a critical angle for SV waves. When the incident angle is close to the critical angle, the response intensity first increases and then decreases sharply, and before that, the intensity is nearly constant, while after that, the intensity keeps decreasing. There exists a feature angle for P waves. When the incident angle is smaller than it, the response intensity is almost constant, while when larger, the intensity keeps decreasing.

**Keywords:** high CFRD; non-uniform input; seismic response; angle of incidence; wave theory

## 1 引 言

高面板坝的抗震设计常常要进行动力有限元计算，在地震动输入方面会面临两个问题：一个是如何反映地震波的行波效应，另一个是如何避免人工边界对外行波的反射。在目前常用的堆石坝动力分

收稿日期：2016-10-26
基金项目：自然科学基金面上项目（No.51678346）。
This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51678346).
第一作者简介：姚虞，男，1989 年生，博士，主要从事高土石坝抗震等方面的研究。E-mail: yaoyutsinghua@126.com

析程序中这两个问题往往被忽略，代之以均匀输入和固定边界。事实上由于行波效应和场地效应，地震动的非一致现象十分明显。张建民等[1]通过对汶川地震中紫平铺面板堆石坝的震害调查指出，非一致输入会引起坝体非一致的变形以及周边缝的不连续变位，对大坝的防渗系统有很大威胁。对于 200 m 级乃至更高的超高面板坝，地震动作用的非一致性更加明显，采用简单的均匀输入与实际有很大差别，有必要研究非一致输入方式。

已有不少学者对土石坝的非一致输入下的响应进行了研究。Dibaj 等[2]最早利用有限元法对土石坝进行了非一致输入下的动力计算。Haroun 等[3]假定了多种非一致输入的模式，并将坝简化为二维弹性剪切梁模型结合有限元进行了计算，发现一般情况下一致输入的结果要更大一些，除非非一致输入能显著激起坝体的基本振动模态。Dakoulas 等[4]基于剪切梁模型给出了方形河谷中土石坝在 SH 波倾斜入射下的解析解，计算得到的加速度峰值与一致性输入相比较可明显减小，另外随着入射角的增大峰值加速度会先增大后减小，在 30°左右达到最大值。将土石坝作为弹性或黏弹性的地基梁进行动力计算，得到的结论适用于宽浅型河谷，且不能比较坝体的残余变形和面板等细部结构的应力变形，输入地震波也限于 SH 波。

张楚汉等[5]使用黏弹性边界对拱坝进行了计算，指出在相同阻尼比的情况下非一致输入的响应明显减小。吴兆营[6]对 P 波和 SV 波以不同角度入射土石坝的动力响应进行了研究，其侧边采用自由场边界，底边采用黏性边界，研究发现，P 波入射角度越大，坝体表面永久变形越大，而 SV 波则是以 30°～45°入射时坝体表面永久变形最大。张树茂[7]采用黏弹性人工边界研究发现，P 波入射角度越大，坝体永久变形越大，而 SV 波则是入射角度越大，坝体永久变形越小。采用人工边界的方法对坝工动力非一致输入进行计算，其精度受所采用人工边界精度的影响，而目前各种人工边界都有一定的缺陷。例如透射边界在时步积分时可能出现对高频波的振荡失稳问题。黏性边界和黏弹性边界不能完全吸收掉外行波，特别是黏性边界还存在低频失稳问题。

目前，非一致输入对面板堆石坝动力响应的影响规律仍不明晰。姚虞等[8−10]针对半无限空间的散射问题提出了波函数组合法，该方法具有稳定性高、计算量小的特点，可用于求解地震波作用下面板堆石坝建基面的位移场时程，从而实现地震动的非一致输入。本文将简要介绍波函数组合法的基本思路以及动力计算所采用的模型；然后研究非一致输入对面板堆石坝动力响应的影响规律，包括对比非一致输入与一致输入，研究不同种类的地震波入射角度对面板坝动力响应的影响规律，并基于波动理论对得到的规律进行理论分析。

## 2 分析方法

### 2.1 基本假定

为实现面板堆石坝的非一致输入，首先将基岩考虑为均匀各向同性线弹性体。由于堆石区的模量一般跟基岩模量相差两个量级[11]，有理由认为坝体对基岩表面对地震波的散射的影响很小[12]，因而忽略空心河谷表面位移过程与坝体−地基系统中坝基位移过程的差别。于是整个求解过程被分为两步（如图 1 所示）：①求解任意形状空心河谷散射问题，得到河谷表面各点的位移过程；②将河谷表面各点的位移过程作为坝体建基面各点的输入进行动力计算。




**图 1 坝体地基系统散射问题分解示意图**

**Fig.1 Decomposition of scattering problem of bedrock and dam**

### 2.2 波函数组合法简介

波函数组合法可求解半无限空间空心域的散射问题。其实现步骤主要包括：

（1）用位移势函数表示的波动方程有一组级数解，级数解的每一项称为波函数。波函数满足波动方程，但由波函数求得的应力场不满足半空间自由表面零面力边界条件。

（2）在半空间自由表面反向叠加由任一项波函数求得的半空间自由表面处的面力，将该面力在半空间产生的应力场和位移场与对应波函数产生的应力场和位移场叠加，构成同时满足域内波动方程和半空间自由表面零面力边界条件的解。由此产生一组新的满足半空间零面力边界条件的级数解。

（3）对于任意单频波以任意角度入射半无限弹性空间的自由场存在解析解。自由场解析解满足波动方程、无限远边界条件和半空间零面力边界条件，但不满足散射边界的零面力边界条件。匹配步骤（2）得到的级数解的系数，使之与自由场在散射边界处

产生的面力之和满足零面力边界条件，这样得到的振动场同时满足域内方程和所有边界条件，即得到了原问题的解。

### 2.3　计算方法验证

对于 2.1 节的空心河谷简化假定，本节从空心假定对散射边界位移产生的影响的大小是否在可接受范围内来进行验证。算例为二维弹性半空间中半圆形弹性夹塞物对垂直入射的 SH 波散射问题的求解，如图 2 所示。

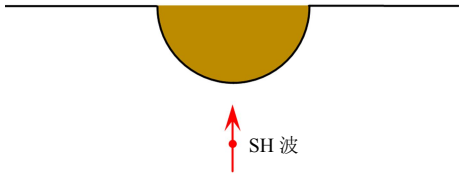
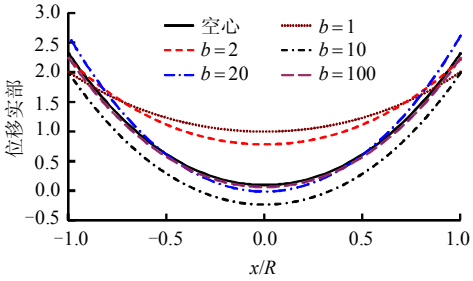
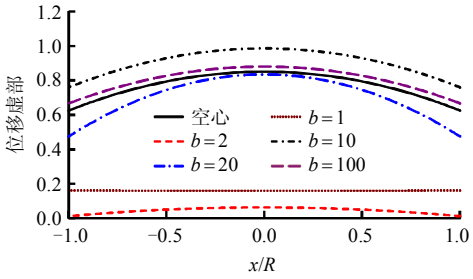



**图 2　SH 波垂直入射半空间中半圆形夹塞物示意图**
**Fig.2　Semicircle scatterer subjected to vertical incidence of SH wave in half space**

半圆形夹塞物的半径 $R$ 取为 200 m，入射 SH 波的频率取为 2 Hz。半无限空间的剪切模量取为 6 GPa，密度取为 2 650 kg/m$^3$。夹塞体的密度按照古水面板堆石坝主堆石区的参数，取为 2 214 kg/m$^3$，剪切模量分别取为半空间模量的 1 倍、0.5 倍、0.1 倍、0.05 倍和 0.01 倍。计算结果如图 3 所示，图中 $b$ 为半空间剪切模量与夹塞物剪切模量之比。图 3 分别给出了频域内位移实部和虚部的对比结果，可以看到，随着夹塞物模量的减小，其边界放大系数越来越接近空心时边界的放大系数，减小到半空间剪切模量的 0.01 倍时两者差别不大。可以认为，此时以空心的结果替代弹性体夹塞物的结果是合理的，而堆石体的模量与基岩之比也为 1/100 量级，从而验证了空心河谷简化假定对计算高面板堆石坝地震动非一致输入的合理性。




(a) 位移实部分布




(b) 位移虚部分布

**图 3　半圆形夹塞物频域内边界位移**
**Fig.3　Boundary displacement of semicircle scatterer in frequency domain**

## 3　非一致输入与一致输入的对比分析

图 4 给出了面板堆石坝计算模型的网格示意图。该网格共 5 936 个节点，5 720 个单元。坝高 300 m，坝轴线（沿图中 $x$ 方向）长 760 m，顺河向（沿图中 $y$ 方向）长 892.46 m，上游坡比 1:1.4，下游坡比 1:1.5，分为面板和堆石区两种材料。面板采用线弹性模型，弹性模量取为 30 GPa，泊松比取为 0.167，密度取为 2 400 kg/m$^3$；堆石体密度取为 2 214 kg/m$^3$，静力计算采用 E-B 模型，动力计算采用等价黏弹性模型[13]。所采用的静、动力参数见表 1、2，具体见参考文献[13]。输入计算中基岩的弹性模量取为 15 GPa，泊松比取为 0.25，密度取为

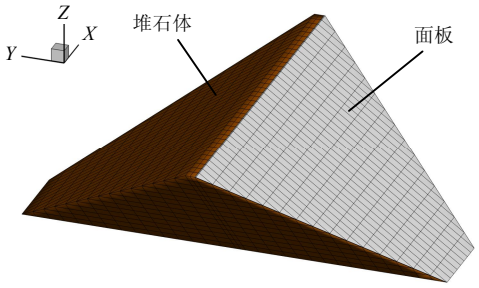



**图 4　面板堆石坝计算模型有限元网格示意图**
**Fig.4　FEM model of concrete face rockfill dam**

**表 1　堆石区静力计算参数**
**Table 1　Static calculation parameters of rockfill**

| $c$ / kPa | $\varphi$ / (°) | $K$ | $K_{ur}$ | $n$ | $R_f$ | $K_b$ | $m$ | $\Delta\varphi$ / (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 55.5 | 1 350 | 2 025 | 0.28 | 0.8 | 780 | 0.18 | 11.3 |

注：$c$、$\varphi$ 为材料的强度参数；$K$ 为反映一个大气压下材料加载的初始切线模量参数；$K_{ur}$ 为反映一个大气压下材料卸载的初始切线模量参数；$n$ 为反映材料初始切线模量随围压变化的参数；$R_f$ 为破坏比；$K_b$ 为反映一个大气压下材料加载的初始体变模量参数；$m$ 为反映材料初始体变模量随围压变化的参数；$\Delta\varphi$ 为反映材料的摩擦强度随围压变化的参数，这些静力参数均可由常规三轴压缩试验得到。

**表 2　堆石区动力计算参数**
**Table 2　Dynamic calculation parameters of rockfill**

| $k_2$ | $\lambda_{max}$ | $\mu_d$ | $k_1$ | $n$ | $c_1$ | $c_2$ | $c_3$ | $c_4$ | $c_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 660 | 0.21 | 0.2 | 39 | 0.444 | 0.008 4 | 0.81 | 0 | 0.108 2 | 0.62 |

注：$k_2$ 为反映一个大气压下材料最大动剪切模量的参数；$\lambda_{max}$ 为反映材料阻尼比的参数；$\mu_d$ 为反映材料泊松比的参数；$k_1$ 为反映材料阻尼比随剪应变变化的参数；$n$ 为反映材料最大动剪切模量随围压变化的参数；$c_1$、$c_2$、$c_3$、$c_4$、$c_5$ 为等价黏弹性模型中假定的残余体变和残余剪应变随循环周次累计的相关参数。

2 650 kg/m$^3$。建基面上的所有节点的振动过程将先由波函数组合法求出，然后作为输入对坝体进行动力计算。

本文用以对应一致输入与非一致输入的依据是保证两者在远离河谷的自由场表面振动过程相同。图 5 给出了计算采用的建基面加速度时程曲线，峰值为 1.62 m/s$^2$，时长为 40 s，步长为 0.02 s。对垂直向上入射的 P 波和 S 波，分别让其产生的基岩自由表面竖向和水平加速度时程与所给加速度时程一致。对于 P 波和 S 波，圆频率为 $\omega$ 的单频波在自由表面产生的频域内位移分别为竖向的 $-2\mathrm{i}\omega/c_\mathrm{p}$ 和水平的 $-2\mathrm{i}\omega/c_\mathrm{s}$（$c_\mathrm{p}$ 和 $c_\mathrm{s}$ 分别为基岩的压缩波速和剪切波速）。记加速度时程的傅里叶变换结果为 $F(\omega)$，则 P 波和 S 波的势函数组合系数分别为

$$A(\omega)=\frac{\omega^2F(\omega)}{-2\mathrm{i}\omega/c_\mathrm{p}}=\frac{\mathrm{i}\omega c_\mathrm{p}}{2}F(\omega) \quad (1)$$

$$B(\omega)=\frac{\omega^2F(\omega)}{-2\mathrm{i}\omega/c_\mathrm{s}}=\frac{\mathrm{i}\omega c_\mathrm{s}}{2}F(\omega) \quad (2)$$

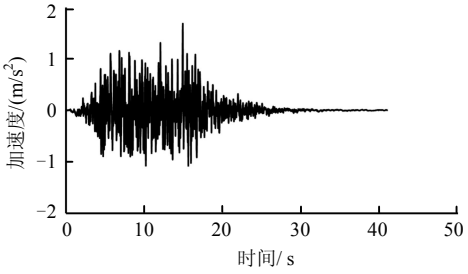



**图 5 建基面加速度时程曲线**

**Fig.5 Acceleration time history at base of dam**

为保持基岩自由表面点的振动方向一致，以振动方向为顺河向的 SH 波垂直向上入射作为非一致输入与一致性输入进行比较。图 6～8 分别给出了非一致性输入与一致性输入面板坝的顺河向加速度最大值之差纵断面结果、坝体残余沉降之差横断面结果以及面板动压应力最大值之差结果。表 3 给出了一致输入与非一致输入的堆石体顺河向加速度 $a_y$、堆石体残余沉降 $s$、面板坝轴向动拉应力 $\sigma_\mathrm{dxt}$、面板坝轴向动压应力 $\sigma_\mathrm{dxp}$、面板顺坡动拉应力 $\sigma_\mathrm{dst}$、面板顺坡动压应力 $\sigma_\mathrm{dsp}$、面板震后坝轴向拉应力 $\sigma_\mathrm{pxt}$、面板震后坝轴向压应力 $\sigma_\mathrm{pxp}$、面板震后顺坡向拉应力 $\sigma_\mathrm{pst}$、面板震后顺坡向压应力 $\sigma_\mathrm{psp}$ 的最大值比较。可以看到非一致性输入结果明显要小。图 9 给出了两种输入方式下建基面加速度最大值分布对比，可见河谷边界上多数区域均是非一致输入的要小，因此，总体来说计算出的动力响应要比一致输入的小。两者差别最大能达到 45%，可见仅仅对坝工做一致性输入计算的评价是不够精细的，有必要采用非一致输入。

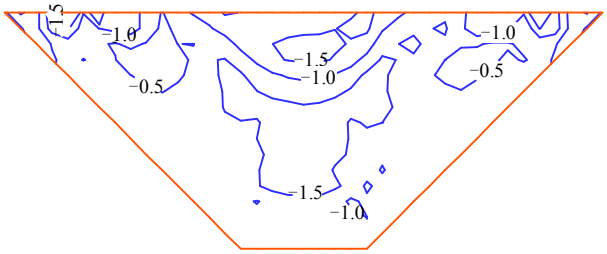



**图 6 非一致与一致输入顺河向加速度最大值之差（单位：m/s$^2$）**

**Fig.6 Difference of peak acceleration along the river between results for non-uniform and uniform input (unit: m/s$^2$)**

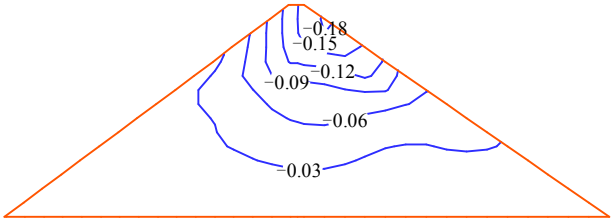



**图 7 非一致与一致输入残余沉降之差（单位：m）**

**Fig.7 Difference of residual settlement between results for non-uniform and uniform input (unit: m)**

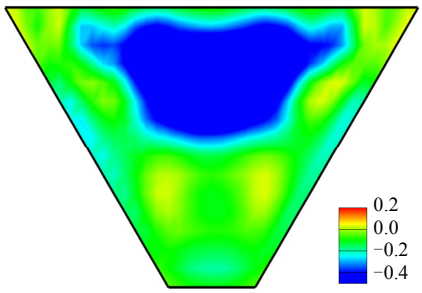



**图 8 非一致与一致输入面板顺坡向动压应力最大值之差（单位：MPa）**

**Fig.8 Difference of peak dynamic compressive stress perpendicular to the dam slope between results for non-uniform and uniform input (unit: MPa)**

**表 3 一致输入与非一致输入动力结果最大值对比**

**Table 3 Contrast of extremum of dynamic calculation results between uniform input and non-uniform input**

| 输入形式 | $a_y$ / (m/s$^2$) | $s$ / m | $\sigma_\mathrm{dxt}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{dxp}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{dst}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{dsp}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{pxt}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{pxp}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{pst}$ / MPa | $\sigma_\mathrm{psp}$ / MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 一致 | 7.15 | 0.68 | -1.25 | 1.12 | -2.88 | 2.88 | -3.83 | 10.95 | -0.49 | 8.33 |
| 非一致 | 5.57 | 0.50 | -1.00 | 0.73 | -1.79 | 1.94 | -3.14 | 8.85 | -0.27 | 7.33 |
| 差值比例/ % | 28 | 26 | 20 | 35 | 38 | 33 | 18 | 19 | 45 | 12 |

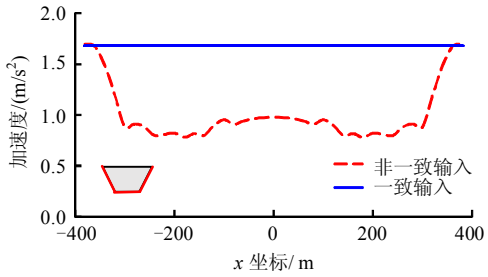



**图 9　建基面加速度最大值分布对比**

**Fig.9　Contrast of peak acceleration of points on base of dam**

另外，两者在分布上也有明显区别，主要表现在非一致输入时由于边界为可动边界，其周边动力响应存在明显差异性，相比一致输入结果其等值线更加分散到周边，即与一致性输入的分布相比表现出中间小、周边大的趋势，这导致在局部上，非一致输入的动力响应可能会大于一致输入。从图 10 给出的非一致输入与一致输入动拉应力计算结果的差值可以看出，在面板周边特别是尖角处非一致输入的动拉应力最大值比一致输入的结果更大，而这些地方正是面板坝防渗系统相对薄弱的止水所在的位置，所以对坝工计算采用一致性输入除了不够精细之外还可能存在安全隐患，因而从安全性考虑也有必要进行非一致输入的计算。

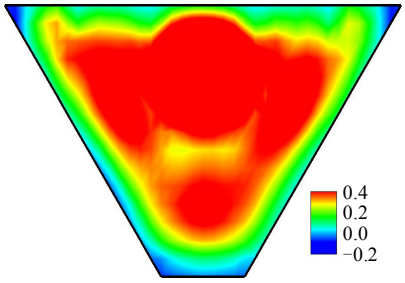



**图 10　非一致与一致输入面板顺坡向动拉应力最大值之差（单位：MPa）**

**Fig.10　Difference of peak dynamic tenile stress perpendicular to dam slope between results for non-uniform and uniform input (unit: MPa)**

## 4　入射角度对面板坝动力响应的影响

地震波从震源传递到近场之后，其入射方向具有任意性，需要进行研究。为使不同角度入射的波存在可比性，不同角度入射的波将采用与垂直向上入射时相同的势函数。图 11 为 P 波或 SV 波入射角示意图，图 12 为 SH 波入射示意图。为保持振动方向在同一数值平面内，SH 波的角度变化平面与 P 波或 SV 波的垂直。

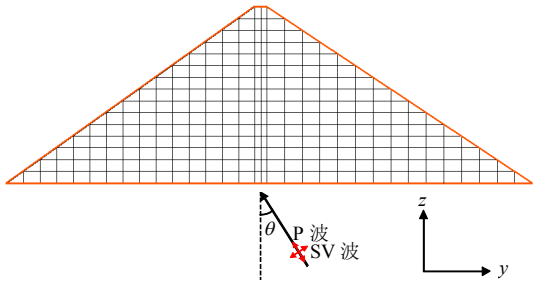



**图 11　P 波或 SV 波入射角示意图**

**Fig.11　Direction of incidence of P or SV waves**

### 4.1　不同种类地震波动力计算结果

对于 P 波以入射角 $\theta$ 分别取 0°、15°、30°、45°、60°、75° 及 85° 时高面板坝的响应，图 13 给出了残余沉降最大值 $s$ 与 $\theta$ 的关系，以反映整个时间段地震强度的规律。可以看出，在 $\theta<60°$ 时，$s$ 基本不变；在 $\theta>60°$ 后，$s$ 迅速减小。

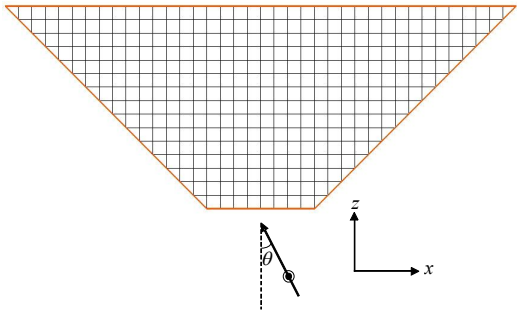



**图 12　SH 波入射角示意图**

**Fig.12　Direction of incidence of SH waves**

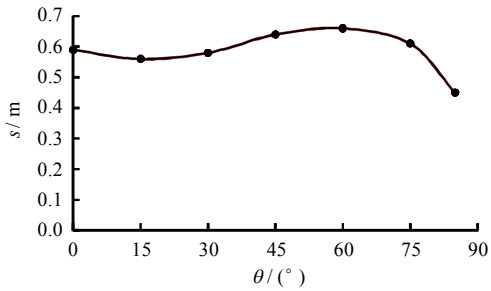



**图 13　P 波入射残余沉降最大值与 $\theta$ 的关系**

**Fig.13　Relationship between maximum residual settlement induced by P waves and incident angle $\theta$**

对于 SV 波以入射角 $\theta$ 分别取 0°、15°、30°、35.26°、45°、60°、75° 及 85° 时高面板坝的响应，图 14 给出了残余沉降最大值与 $\theta$ 的关系。可以看出，在 $\theta=35.26°$ 时，$s$ 达到峰值；在 $\theta>35.26°$ 后，$s$ 迅速减小。

对于 SH 波以入射角 $\theta$ 分别取 0°、15°、30°、35.26°、45°、60°、75° 及 85° 时高面板坝的响

应，图 15 给出了残余沉降最大值与$\theta$的关系。可以看出，当$\theta$变化时，$s$基本不变。

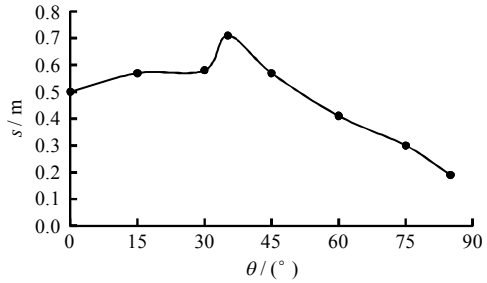



**图 14 SV 波入射残余沉降最大值与$\theta$的关系**

**Fig.14 Relationship between maximum residual settlement induced by SV waves and incident angle $\theta$**

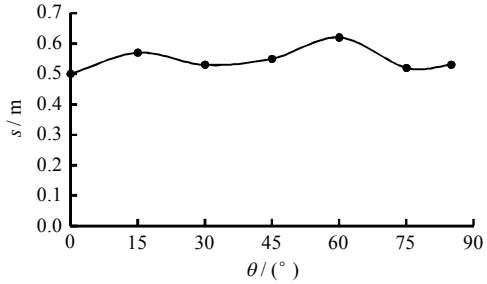



**图 15 SH 波入射残余沉降最大值与$\theta$的关系**

**Fig.15 Relationship between maximum residual settlement induced by SH waves and incident angle $\theta$**

### 4.2 规律分析

以上计算结果可以从理论上给出一定的解释。严格来说，不同的河谷形状在地震波作用下其散射边界的振动强度都不同，因此，如果要得到对于任意形状的河谷都普适的入射角度对坝体动力响应的影响规律，只能从一个平均的概念下来研究。任意形状河谷在地震波作用下形成的振动场可以视为自由场与散射场的叠加，而散射场则是由河谷形状和自由场来决定。可见如果不考虑河谷形状的因素，则自由场强度可以衡量不同种类不同角度地震波产生的振动强度。因此，本文以半空间自由场表面点的振动位移幅值作为分析对象，来探讨不同种类不同角度地震波对面板堆石坝振动响应规律的影响。

（1）P 波入射情况

当 P 波在 $x$-$z$ 平面内以与 $z$ 轴夹角$\theta_0$入射时，入射与反射势函数为

$$\left.\begin{aligned}\varphi_1 &= A_1\exp[\mathrm{i}k(x-p_1z)]\\ \varphi_2 &= A_2\exp[\mathrm{i}k(x+p_1z)]\\ \psi_2 &= B_2\exp[\mathrm{i}k(x+p_2z)]\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：$\varphi_1$为入射压缩波势函数；$\varphi_2$为反射压缩波势函数；$\psi_2$为反射剪切波势函数；$k$ 为 $x$ 向波数；$p_1=\sqrt{c^2/c_\mathrm{p}^2-1}$，$c=c_\mathrm{p}/\sin\theta_0$ 为水平视波速；$p_2=\sqrt{c^2/c_\mathrm{s}^2-1}$；且

$$\left.\begin{aligned}\frac{A_2}{A_1} &= \frac{4p_1p_2-(1-p_2^2)^2}{4p_1p_2+(1-p_2^2)^2}\\ \frac{B_2}{A_1} &= \frac{-4p_1(1-p_2^2)}{4p_1p_2+(1-p_2^2)^2}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

自由场为

$$\left.\begin{aligned}u_x^\mathrm{f} &= \mathrm{i}k[\varphi_1+\varphi_2-p_2(-\psi_2)]\\ u_y^\mathrm{f} &= 0\\ u_z^\mathrm{f} &= -\mathrm{i}k[p_1(\varphi_1-\varphi_2)+\psi_2]\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

令 $z=0$，得自由表面点位移幅值 $A_\mathrm{surf}$ 为

$$A_\mathrm{surf}=k\sqrt{(A_1+A_2+p_2B_2)^2+(p_1A_1-p_1A_2+B_2)^2} \tag{6}$$

入射波的位移幅值 $A_\mathrm{inc}$ 为

$$A_\mathrm{inc}=kA_1\sqrt{(1+p_1^2)} \tag{7}$$

则放大系数$\alpha$ 为

$$\alpha=\frac{A_\mathrm{surf}}{A_\mathrm{inc}}=\frac{\sqrt{(A_1+A_2+p_2B_2)^2+(p_1A_1-p_1A_2+B_2)^2}}{A_1\sqrt{(1+p_1^2)}} \tag{8}$$

将式（4）代入式（8），可得

$$\alpha=f_\mathrm{P}(\theta,\nu) \tag{9}$$

式中：$\nu$ 为介质泊松比。

可见 P 波的放大系数只与入射角和介质泊松比有关。

（2）SV 波入射情况

当 SV 波在 $x$-$z$ 平面内以与 $z$ 轴夹角$\theta_0$入射时，入射与反射势函数为

$$\left.\begin{aligned}\varphi_2 &= A_2\exp[\mathrm{i}k(x+p_1z)]\\ \psi_1 &= B_1\exp[\mathrm{i}k(x-p_2z)]\\ \psi_2 &= B_2\exp[\mathrm{i}k(x+p_2z)]\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中：$\psi_1$为入射剪切波势函数；$p_1=\sqrt{c^2/c_\mathrm{p}^2-1}$，$c=c_\mathrm{s}/\sin\theta_0$ 为水平视波速；$p_2=\sqrt{c^2/c_\mathrm{s}^2-1}$，且

$$\left.\begin{aligned}\frac{A_2}{B_1} &= \frac{4p_2(1-p_2^2)}{4p_1p_2+(1-p_2^2)^2}\\ \frac{B_2}{B_1} &= \frac{4p_1p_2-(1-p_2^2)^2}{4p_1p_2+(1-p_2^2)^2}\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

自由场为

$$\left.\begin{aligned} u_x^{\mathrm{f}} &= \mathrm{i}k[\varphi_2 - p_2(\psi_1 - \psi_2)] \\ u_y^{\mathrm{f}} &= 0 \\ u_z^{\mathrm{f}} &= -\mathrm{i}k[p_1(-\varphi_2) + \psi_1 + \psi_2] \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

令 $z=0$，得自由表面点位移幅值为

$$A_{\mathrm{surf}} = k\sqrt{(A_2 - p_2B_1 + p_2B_2)^2 + (p_1A_2 - B_1 - B_2)^2} \tag{13}$$

入射波的位移幅值为

$$A_{\mathrm{inc}} = kB_1\sqrt{(1+p_2^2)} \tag{14}$$

则放大系数为

$$\alpha = \frac{A_{\mathrm{surf}}}{A_{\mathrm{inc}}} = \frac{\sqrt{(A_2 - p_2B_1 + p_2B_2)^2 + (p_1A_2 - B_1 - B_2)^2}}{B_1\sqrt{(1+p_2^2)}} \tag{15}$$

将式（11）代入式（15），可得

$$\alpha = f_{\mathrm{SV}}(\theta, \nu) \tag{16}$$

可见 SV 波的放大系数也只与入射角和介质泊松比有关。

（3）SH 波入射情况

当 SH 波在 $x$-$z$ 平面内以与 $z$ 轴夹角 $\theta_0$ 入射时，入射与反射势函数为

$$\left.\begin{aligned} \varphi_1 &= A_0\exp[\mathrm{i}k(x\sin\theta_0 - z\cos\theta_0)] \\ \varphi_2 &= A_0\exp[\mathrm{i}k(x\sin\theta_0 + z\cos\theta_0)] \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

式中：$A_0$ 为入射 SH 波的振幅。

自由场为

$$\left.\begin{aligned} u_x^{\mathrm{f}} &= 0 \\ u_y^{\mathrm{f}} &= 2A_0\cos(kz\cos\theta_0)\exp(\mathrm{i}kx\sin\theta_0) \\ u_z^{\mathrm{f}} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

令 $z=0$，得自由表面点位移幅值为

$$A_{\mathrm{surf}} = 2A_0 \tag{19}$$

入射波的位移幅值为

$$A_{\mathrm{inc}} = A_0 \tag{20}$$

则放大系数为

$$\alpha = \frac{A_{\mathrm{surf}}}{A_{\mathrm{inc}}} = 2 \tag{21}$$

可见 SH 波的放大系数为常数。

值得注意的是，3 种地震波基岩表面点放大系数 $\alpha$ 均与地震波的频率无关，意味着不同频率组分的地震波产生的 $\alpha$ 值均相同，这使得单纯地分析入射角的影响成为可能。

图 16 给出了介质泊松比为 0.25 情况下 P 波、SV 波和 SH 波入射半空间自由表面放大系数与入射角的关系图。从图中可以看出，SV 波的曲线存在一个峰值，峰值所对应的入射角为 SV 波的临界入射角 $\theta_{\mathrm{cr}} = \arcsin(c_{\mathrm{s}}/c_{\mathrm{p}})$，当入射角大于临界入射角时，入射 SV 波的水平视波速 $c < c_{\mathrm{p}}$，使得 $p_1 = \sqrt{c^2/c_{\mathrm{p}}^2 - 1}$ 不再为实数，则反射波不再为平面波。从该图中比较计算所用的角度 0°、15°、30°、45°、60°、75° 和 85° 所对应的放大系数（对 SV 波还有补充计算的临界入射角 35.26°），可以发现，对于 P 波，存在一个约 60° 的特征角，当入射角小于特征角时放大系数基本不变，大于特征角之后开始减小；对于 SV 波，当入射角在临界角前后时放大系数急剧增大和减小，之前基本不变，之后一直减小；对于 SH 波，则放大系数一直不变。反观图 13～15，可以看出，面板堆石坝的震后沉降最大值也大概符合这个规律。当然，半空间自由表面点的振动规律不能完全反映河谷上所有点的振动规律，所以两者不可能完全重合，但在追求普适于不同形状的河谷的不同种类波的入射角度对面板堆石坝动力响应的影响时，即不考虑河谷形状的散射效应时，由半空间自由表面点的放大系数得到的规律是合适的。

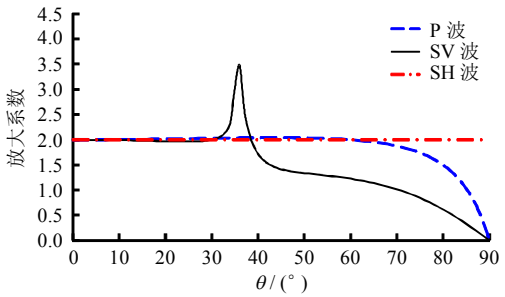



**图 16　放大系数与入射角 $\theta$ 的关系**
**Fig.16　Relationship between amplification factor and incident angle $\theta$**

## 5　结　论

本文基于波函数组合法计算并分析了面板堆石坝在不同输入方式和不同种类的波以不同角度入射下的动力响应，得到了以下结论：

（1）在取用基岩自由表面点的振动过程相同的对比标准下，整体而言，非一致输入的动力响应较小。

（2）在面板坝防渗系统相对薄弱的止水所在的

位置附近，非一致输入的动拉应力最大值比一致输入的结果更大。非一致输入下大坝动力响应值的分布相比一致性输入表现出中间小、周边大的特性。

（3）随着入射角的增大，SH 波入射时，高面板坝动力响应强度基本不变。SV 波入射时，存在一个临界角，当入射角在临界角左右时高面板坝动力响应强度急剧增大和减小，之前基本不变，之后一直减小。P 波入射时，存在一个特征角度，在入射角小于特征角度时高面板坝动力响应强度基本不变，大于后减小。

（4）本文研究所得结论有以下两点具有重要的工程意义：①非一致输入下面板坝呈现出面板周边拉应力比一致输入更大的特点，这就要求在目前的一致输入为主的抗震设计的基础上，要对面板周边缝部位做额外的考虑，留出充分的安全余量；②不同的波以不同角度入射时，除了 SV 波以外，面板坝的动力响应相比垂直入射都不会明显增大，而 SV 波出现峰值也是在临界角附近，此时的波动场已不是平面波波动场，而会变得复杂，在实际问题中会衰减很快，所以总的来说，在不清楚地震传播方向的情况下，采用垂直入射进行计算对工程设计大体上是足够的。

本文所采用的波函数组合法具有数值稳定性高、计算量小、完备性好的特点，但仍然存在局限性。本文的方法要求地基是均匀各向同性的线弹性介质，且其模量要明显大于坝体。另外本文对堆石体所采用的动力本构模型相对简单，所得到的结果仅为定性的规律。要进一步精细化地研究，可以考虑实际地基的非均匀特性，对堆石料采用更合理的动力本构模型，并可探讨坝体与地基波阻抗差异对结果的影响。

## 参 考 文 献


[1] ZHANG Jian-min. Geotechnical aspects and seismic damage of the 156 m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 76: 145－156.

[2] DIBAJ M, PENZIEN J. Response of earth dams to traveling seismic waves[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1969, 95(2): 541－560.

[3] HAROUN M, ABDEL-HAFIZ E. Seismic response analysis of earth dams under differential ground motion[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1987, 77(5): 1514－1529.

[4] DAKOULAS P, HASHMI H. Wave passage effects on the response of earth dams[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(2): 97－110.

[5] ZHANG Chu-han, PAN Jian-wen, WANG Jin-ting. Influence of seismic input mechanisms and radiation damping on arch dam response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(9): 1282－1293.

[6] 吴兆营. 倾斜入射条件下土石坝最不利地震动输入研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2007.
WU Zhao-ying. Study of the worst seismic motion input for earth-dam seismic stability under the oblique incidence condition[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2007.

[7] 张树茂. 地震波动入射方向对土石坝地震反应的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
ZHANG Shu-mao. Research on the effect of incident directions of seismic waves on the dynamic response of rock-fill dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[8] YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min. A new series solution method for two-dimensional elastic scattering by a canyon in half-space[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2016, 89: 128－135.

[9] 姚虞, 刘天云, 张建民. 求解二维弹性半空间散射问题的波函数组合法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 109－113.
YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min. Combination method of wave functions to solve the problem of scattering in 2D elastic half space[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2013, 35(1): 109－113.

[10] 姚虞, 刘天云, 张建民. 高面板坝地震动三维非一致输入的波函数组合法[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 324－328, 348.
YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min. Wave function combination method used for three-dimensional non-uniform input of earthquake motion in high concrete-faced rockfill dam[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(2): 324－328,348.

[11] SEIPHOORI A, HAERI S, KARIMI M. Three-dimensional nonlinear seismic analysis of concrete faced rockfill dams subjected to scattered P, SV, and SH waves considering the dam–foundation interaction effects[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2011, 31(5): 792－804.

[12] PAO Y H, MOW C C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. New York: Crane, Russak Co., Inc., 1973.

[13] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996, (2): 143－150.
SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1996, (2): 143－150.