平面 SV 波斜入射时胶凝砂砾石坝的地震响应

于浩然[1]，何卫平[1,2]，刘旺[1]，黄诗博[1]，姚惠芹[1,2]

（1. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002；2. 三峡大学 水电工程施工与管理湖北省重点实验室，湖北 宜昌 443002）

摘　要：【目的】以 Oyuk 坝为例，研究平面 SV 波入射角度变化对胶凝砂砾石坝地震响应的影响。【方法】以 ABAQUS 为平台，通过黏弹性边界模拟地基的辐射阻尼效应，采用波动输入模型实现不同角度的平面 SV 波斜入射，研究平面 SV 波斜入射时胶凝砂砾石坝在位移、加速度和应力方面的响应。【结果】①与垂直入射相比，平面 SV 波斜入射时胶凝砂砾石坝地震响应的分布规律基本一致，但响应数值存在较大变化。②在运动响应方面，在垂直入射和倾斜入射下，坝体运动均以水平向为主，竖直向运动小于水平向的；坝顶水平向运动峰值随入射角度的增加逐渐减小，竖直向运动峰值则逐渐增大。③在应力响应方面，平面 SV 波斜入射带来的变化主要体现为坝踵受拉区沿建基面的扩大和主应力峰值的增加；坝踵第一主应力峰值由垂直入射的 0.34 MPa 增至 30°入射的 0.53 MPa，坝趾第三主应力峰值由垂直入射的 4.12 MPa 增至 30°入射的 4.46 MPa。【结论】平面 SV 波倾斜入射得到的坝体应力一般大于垂直入射情况的，且倾斜入射时坝体运动和应力的峰值分布也有所改变，说明胶凝砂砾石坝地震响应分析时考虑地震波倾斜入射是有必要的。

关键词：胶凝砂砾石坝；波动输入模型；黏弹性边界；地震响应；平面 SV 波；斜入射

中图分类号：TV312　　**文献标识码**：A

胶凝砂砾石坝是起源于20世纪70年代的新坝型[1-2]，其特征是以低强度的胶凝砂砾石料作为筑坝材料，通过扩大坝体横截面形成强度和稳定性满足要求的坝体结构[3-8]。胶凝砂砾石坝因具备良好的抗震性能，目前在地震带分布较多的国家普遍应用，如希腊的 Marathia 坝、土耳其的 Oyuk 坝和 Cindere 坝、日本的 Tobetsu 坝等。我国胶凝砂砾石坝的建设起步较晚，早期的工程应用以围堰为主，目前逐步推广至永久性工程，如山西守口堡大坝与四川金鸡沟大坝等。已建的胶凝砂砾石坝通常选址于地震风险较高的场址，因此研究其地震响应规律，是确保工程安全运行的重要环节。

早期研究一般采用刚性地基或无质量地基计算胶凝砂砾石坝的地震响应。Mahmoodi K 等[9]基于刚性地基假设，采用增量动力分析法(IDA)对日本 Tobetsu 坝进行损伤分析，提出损伤指数来量化表达坝体的损伤程度。熊堃等[10]基于无质量地基模型，研究 Oyuk 坝在水荷载与地震荷载超载下的损伤规律及安全度，证实胶凝砂砾石坝具有较高的超载安全度。何蕴龙等[11]以无质量地基为基础，运用动力时程分析方法研究胶凝砂砾石坝的地震响应规律，提出地震动态分布系数及动水压力分布系数的计算方法。刚性地基和无质量地基虽在胶凝砂砾石坝地震响应分析中应用普遍，但其本质属振动输入方法，无法模拟地基辐射阻尼效应和地震波传播效应，这无疑会影响地震响应分析结果的准确性。

波动输入模型采用黏弹性边界模拟地基辐射阻尼效应，通过边界节点实现对地震波入射和传播过程的有效模拟，是能真实体现结构地震响应物理过程的输入模型。蒋莉等[12]以波动输入模型为基础，研究地下厂房的地震响应。许新勇等[13]基于波动输入模型分析强震作用下大型渡槽结构的破坏机理。然而，目前采用波动输入模型研究胶凝砂砾石坝地震响应的研究仍然较少。Kondo M 等[14]采用波动输入模型，研究坝体尺寸和地基变形对胶凝砂砾石坝动力响应特性的影响。张劭华等[15]基于波动输入模型研究守口堡大坝的动力响应，结果说明在设计地震动下该坝型具有良好的抗震性能。何卫平等[16]

收稿日期/Received：2025-12-17　　**修回日期**/Revised：2026-07-13

基金项目：国家自然科学基金项目（51809152）；湖北省重点实验室开放基金项目（2023KSD22）。

第一作者：于浩然(2000—)，男，硕士研究生，从事水工结构抗震方面的研究。E-mail:1401156249@qq.com。

通信作者：何卫平(1987—)，男，副教授，博士，从事水工结构抗震方面的研究。E-mail:heweiping_hwp@126.com。

基于复杂波场假定，采用波动输入模型研究胶凝砂砾石坝的地震响应，揭示复杂波场效应对胶凝砂砾石坝地震响应的影响。

实际地震波传播到工程场址时通常是斜入射情况[17-18]。目前已有较多学者研究水工结构在斜入射地震波作用下的地震响应。李明超等[19]对 Koyna 重力坝-地基三维模型，分析不同入射角的 P 波和 SV 波对坝体非线性动力响应和塑性损伤的影响。Xu Shutong 等[20]探讨 SV 波的入射角度、地震烈度以及脉冲/非脉冲地震动对重力坝-库水-地基系统损伤与位移响应规律的影响。杜修力等[21]分析了 SV 波斜入射下拱坝的地震响应，结果表明相对于垂直入射，斜入射的响应更为不利。García F 等[22]研究地震波入射角度对 Morrow Point 拱坝地震响应的影响。郑晓东等[23]研究平面 P 波和 SV 波斜入射时土石坝的地震响应，结果表明垂直入射的结果会低估坝体的失稳风险。

综上，波动输入模型以模拟地基辐射阻尼效应和地震波传播效应的优势在水工结构抗震领域应用普遍。然而，目前胶凝砂砾石坝的相关研究通常采用垂直入射假定，尚未见地震波斜入射条件下胶凝砂砾石坝地震响应的研究。为揭示平面 SV 波斜入射时胶凝砂砾石坝的地震响应，本文选取百米级的 Oyuk 坝为对象，以 ABAQUS 为平台建立包含大坝和地基在内的二维有限元模型，基于黏弹性边界实现平面 SV 波在截断边界的斜入射方法。然后研究平面SV波不同入射角影响下胶凝砂砾石坝的地震响应，揭示大坝的位移、加速度和应力等响应规律。

1 平面 SV 波倾斜入射的实现

1.1 黏弹性边界

局部人工边界是波动输入模型的重要组成部分。目前发展较为成熟的人工边界主要有透射边界、黏性边界和黏弹性边界等，其中黏弹性边界克服了透射边界的高频失稳和黏性边界的低频漂移问题，同时具备良好的散射波吸收能力和模拟无限地基恢复能力的优势，被广泛应用到工程结构的地震响应分析中。黏弹性边界通过在边界节点施加并联的弹簧和阻尼元件实现，二维条件下，截断边界在法向的弹性系数和阻尼系数分别为：

$$K_{\mathrm{N}}=\alpha_{\mathrm{N}}\frac{G}{R}\cdot A \quad C_{\mathrm{N}}=\rho C_{P}\cdot A \tag{1}$$

在切向的弹性系数和阻尼系数分别为：

$$K_{\mathrm{T}}=\alpha_{\mathrm{T}}\frac{G}{R}\cdot A \quad C_{\mathrm{T}}=\rho C_{\mathrm{S}}\cdot A \tag{2}$$

式中：ρ为介质的密度；A 为节点的控制面积；C_{P} 和 C_{S} 分别为 P 波和 SV 波波速；α_{N} 和α_{T} 分别为黏弹性边界的法向和切向系数，取值分别为 1 和 0.5[24]；G 为介质的剪切模量；R 为人工边界至散射波波源的距离。

1.2 平面 SV 波斜入射的实现

波动输入模型的基本原理是将入射波形成的自由场应力施加在截断边界上实现输入。如图 1 所示，平面 SV 波斜入射时，叠加 SV 波的应力场与黏弹性边界确定的附加力实现地震波的输入，任意边界节点的等效节点力为：

$$F_{\mathrm{B}}=K_{\mathrm{B}}u_{\mathrm{B}}^{ff}+C_{\mathrm{B}}\dot{u}_{\mathrm{B}}^{ff}+\sigma_{\mathrm{B}}^{ff}A_{\mathrm{B}} \tag{3}$$

式中：F_{B}为边界节点的等效节点力；K_{B}为黏弹性边界的弹性系数；C_{B}为黏弹性边界的阻尼系数；A_{B}为边界节点控制面积；σ_{B}^{ff}为平面 SV 波斜入射产生的应力场；u_{B}^{ff}、$\dot{u}_{\mathrm{B}}^{ff}$分别为边界节点的位移和速度。

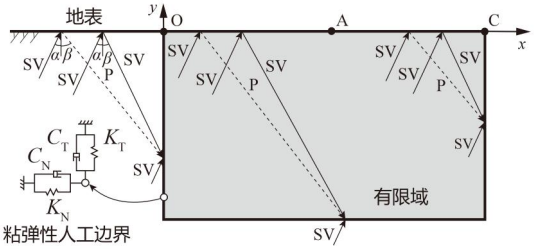


图 1 SV 波斜入射地基内的波场示意图

Fig.1 Wavefield in the foundation with SV wave obliquely incidence

在自由场应力计算方面，平面 SV 波斜入射时须考虑入射波及其形成的反射波。假设平面 SV 波以α角斜入射至地表，依据地表的应力和位移边界条件，可获得反射 P 波和反射 SV 波的相关信息。其中反射 SV 波的反射角仍为α，反射 P 波的反射角β可通过斯奈尔定律获得：

$$\beta=\arcsin\left(\frac{C_{\mathrm{P}}\sin\alpha}{C_{\mathrm{S}}}\right) \tag{4}$$

反射 SV 波和反射 P 波的幅值分别为：

$$A_{\mathrm{S}}=\frac{C_{\mathrm{P}}^2\cos^2 2\alpha-C_{\mathrm{S}}^2\sin 2\alpha\sin 2\beta}{C_{\mathrm{S}}^2\sin 2\alpha\sin 2\beta+C_{\mathrm{P}}^2\cos^2 2\alpha} \tag{5}$$

$$A_{\mathrm{P}}=\frac{2C_{\mathrm{S}}C_{\mathrm{P}}\sin 2\alpha\cos 2\alpha}{C_{\mathrm{S}}^2\sin 2\alpha\sin 2\beta+C_{\mathrm{P}}^2\cos^2 2\alpha} \tag{6}$$

式中：A_{P}和 A_{S}分别为反射 P 波和反射 SV 波的幅值。以地基左下角作为地震波的零时刻，则得到地震波到达有限域任意一点的时间间隔为：

$$\Delta t_1=\frac{y_0\cos\alpha+x_0\sin\alpha}{C_{\mathrm{S}}} \tag{7}$$

$$\Delta t_2=\frac{2H\cos\alpha-y_0\cos\alpha+x\sin\alpha}{C_{\mathrm{S}}} \tag{8}$$

$$\Delta t_3=\frac{H\cos\alpha-(H-y_0)\tan\beta\sin\alpha+x\sin\alpha}{C_{\mathrm{S}}}+\frac{H-y_0}{C_{\mathrm{P}}\cos\beta} \tag{9}$$

式中：Δt_1、Δt_2、Δt_3依次为入射 SV 波、反射 SV 波和反射 P 波相对于零时刻波阵面的时间延迟；H为有限域高度；x_0、y_0为有限域内任意一点坐标。

设 $u_0(t)$为斜入射平面 SV 波的位移时程，由式(4)—式(9)可得有限域任意一点的自由场位移为：

$$u_x(t)=u_0(t-\Delta t_1)\cos\alpha+A_{\mathrm{S}}u_0(t-\Delta t_2)\cos\alpha+A_{\mathrm{P}}u_0(t-\Delta t_3)\sin\beta \tag{10}$$

$$u_y(t)=-u_0(t-\Delta t_1)\sin\alpha+A_{\mathrm{S}}u_0(t-\Delta t_2)\sin\alpha-A_{\mathrm{P}}u_0(t-\Delta t_3)\cos\beta \tag{11}$$

根据波动输入理论以左侧边界为例推导出左侧边界的自由场应力，计算公式如下：

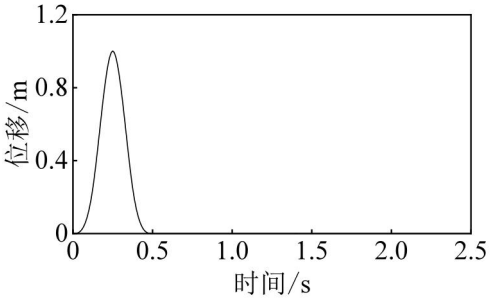
$$\sigma_x(t)=\frac{G\sin 2\alpha}{C_{\mathrm{S}}}\left[\dot{u}_0(t-\Delta t_1)+A_{\mathrm{S}}\dot{u}_0(t-\Delta t_2)\right]+\frac{G\sin 2\beta}{C_{\mathrm{P}}}A_{\mathrm{P}}\dot{u}_0(t-\Delta t_3) \tag{12}$$

$$\sigma_y(t)=\frac{G\sin 2\alpha}{C_{\mathrm{S}}}\left[\dot{u}_0(t-\Delta t_1)-A_{\mathrm{S}}\dot{u}_0(t-\Delta t_2)\right]+\frac{\lambda+2G\cos^2\beta}{C_{\mathrm{P}}}A_{\mathrm{P}}\dot{u}_0(t-\Delta t_3) \tag{13}$$

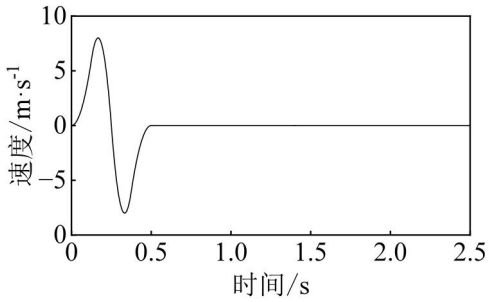
式中：σ_x、σ_y分别为水平向和竖直向自由场应力；λ为拉梅常数。底部边界与右侧边界的自由场应力仅需将延迟时间替换即可。

1.3 平面 SV 波斜入射验证

以方形地基算例验证黏弹性边界的精度和波动输入模型的正确性，方形地基范围为 2400 m×1200 m，地基弹性模量 15 GPa、泊松比 0.25、密度 2500 kg/m³。平面 SV 波以 15°角度斜入射。斜入射平面 SV 波的位移与速度时程在图 2 显示，其中入射波持时为 0.5 s，计算总时长为 2.5 s，时间步长为 0.002 s。



(a) 位移时程

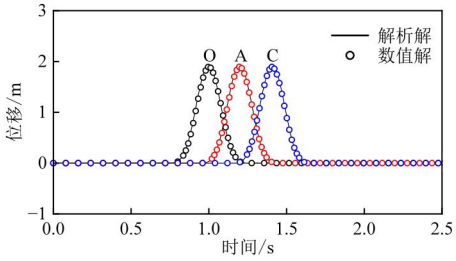


(b) 速度时程

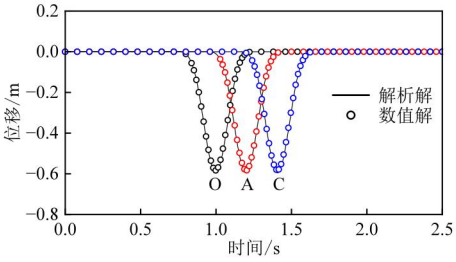
图 2 入射波的位移和速度时程曲线

Fig.2 Displacement and velocity waveform of incident wave

验证数值模型模拟平面 SV 波斜入射时的精度，以图 1 中地表 O、A、C 三个点的解析解与数值模拟得出的数值解进行对比。三个点的水平向与竖直向位移在图 3 显示，由图可知，数值模拟得到的时程曲线与解析解吻合良好。在误差方面，地表 O、A、C 三个点，数值模拟得到的水平向位移峰值误差分别为 1.90%、1.95%和 2.04%，竖直向位移峰值误差分别为 2.05%、1.95%和 2.15%。所有位置的运动误差均小于 3%，这说明采用数值模拟研究平面 SV 波斜入射时具有较高精度。



(a) 水平向位移时程曲线



(b) 竖直向位移时程曲线

图 3 自由面空间点运动时程

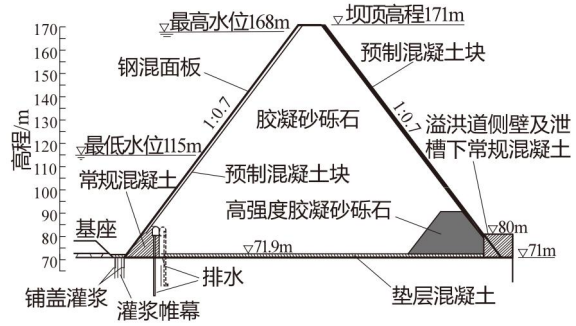
Fig.3 Time history of motion at three points on the free surface

2 Oyuk 坝有限元模型与计算参数

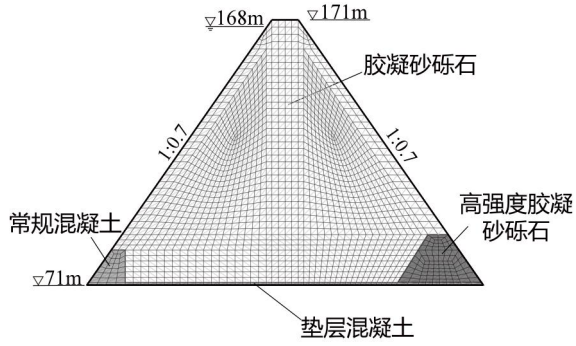
2.1 Oyuk 坝有限元模型

Oyuk 坝是目前仅有的几座百米级胶凝砂砾石坝工程，该坝位于土耳其境内的 Alangüllü流域。图 4 展示了 Oyuk 坝的详细材料分区和网格划分情况，该坝主体采用胶凝砂砾石，坝踵和坝底采用混凝土、坝趾采用高强度胶凝砂砾石进行强化，最大

坝高为 100 m，上、下游坡比为 1:0.7，坝前最高水位的高程为 168 m，上游水深为 97 m，详细信息如图 4(a)所示[25]。



(a)Oyuk 坝典型横剖面



(b)坝体网格

图 4　Oyuk 坝信息与坝体有限元网格模型

Fig.4　Information of Oyuk dam and finite element mesh of dam body

依据 Oyuk 坝的材料分区建立二维有限元模型(图 4(b))。坝体与地基均采用平面应变单元(CPE4)模拟，其中坝体节点总数 1798，单元总数 1724；地基节点总数 26985，单元总数 26624。坝体和地基均采用线弹性材料模拟，材料参数列于表 1。

表 1　坝体与地基材料参数

Tab.1　Dam and foundation material parameters

材料参数	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
混凝土	2400	25	0.167
胶凝砂砾石	2300	10	0.200
高强度胶凝砂砾石	2350	12	0.200
地基	2500	15	0.250

2.2　荷载条件和计算工况

计算中首先计算胶凝砂砾石坝的静力响应，并在此基础上模拟动力荷载的作用，最终得到胶凝砂砾石坝的静动综合响应。静荷载考虑坝体自重、静水压力和扬压力荷载，库水动水压力通过 Westergaard 附加质量模拟，其具体表达式为：

$$m_i = 0.875\rho A_i \sqrt{H_0 h_i}\, \boldsymbol{l}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{l}_i \tag{14}$$

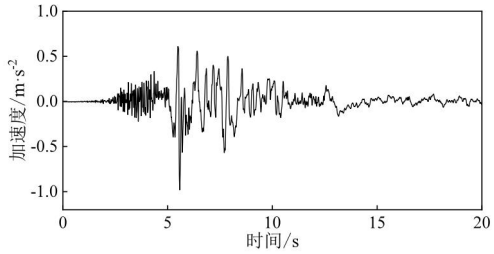
式中：m 为上游坝面节点的附加质量；i 为上游坝面的节点编号；ρ为库水密度；H_0 为上游库水深度；h 为节点对应的水深；$\boldsymbol{l}$ 为上游坝面节点的外法线单位向量；A 为上游坝面节点的控制面积。

地震荷载为斜入射的平面 SV 波，本文选定 El Centro 地震动作为入射波的加速度时程。为确保研究合理性，将地震动峰值调整至 0.1g。加速度时程以及积分得到的速度和位移时程在图 5 显示。

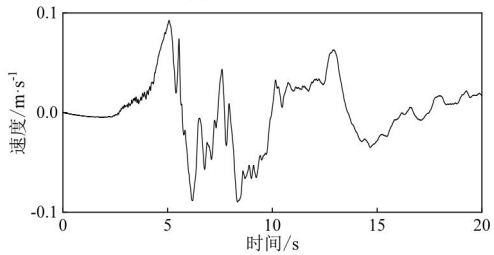
由于 SV 波斜入射时存在临界角问题，当 SV 波入射角度超过临界角时，地震波会在自由面产生非均匀波。此外，SV 波到达场址时入射角一般较小[26]。考虑到以上两种因素的影响，本文设定的入射角度均小于临界角，临界角计算公式如下：

$$\varepsilon = \arcsin\left(C_{\mathrm{S}}/C_{\mathrm{P}}\right) \tag{15}$$

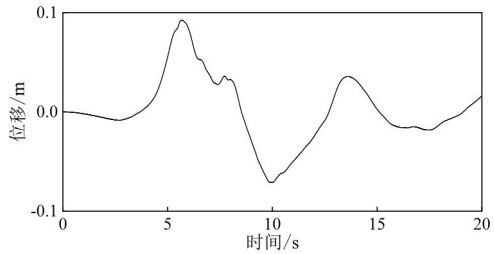
本文算例中临界角为 35.26°，为保证计算结果的准确性，规避计算工况落入临界角邻近区域引发波场突变效应，本次研究中选取平面 SV 波的入射角分别为 0°（垂直入射）、5°、10°、15°、20°、25°和 30°。



(a)加速度时程



(b)速度时程



(c)位移时程

图 5　El Centro 地震动

Fig.5　El Centro earthquake record

计算中须考虑阻尼的影响，本文采用瑞利阻尼，阻尼系数通过大坝前两阶的自振频率以及所取的阻尼比数值确定，计算公式为：

$$\alpha = 2\xi\omega_1\omega_2\left(\omega_1+\omega_2\right)^{-1} \quad (16)$$

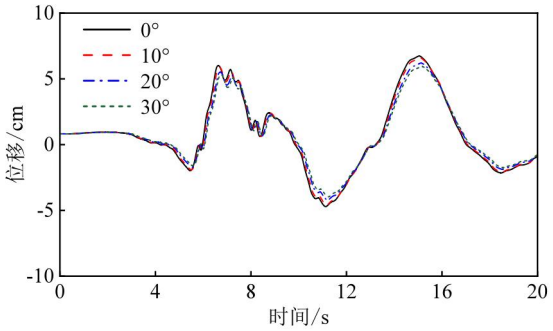
$$\beta = 2\xi\left(\omega_1+\omega_2\right)^{-1} \quad (17)$$

式中：α为质量比例阻尼系数，β为刚度比例阻尼系数；ω_1、ω_2分别为结构-地基自振的前两阶圆频率；ξ为结构阻尼比，取值为 0.05。

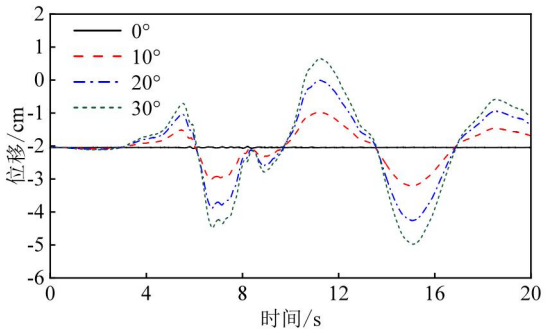
3 结果与分析

3.1 坝顶位移响应

图 6 为平面 SV 波斜入射时得到的坝顶位移时程曲线。由图 6 可知，垂直入射和倾斜入射引起的坝顶水平向位移的时程基本相似，竖直向位移时程除垂直入射接近零值外，其余时程也具备较强相似性。由于平面 SV 波的振动方向垂直于传播方向，垂直入射时地震波的运动分量全部在水平向，竖直向位移分量接近零值。在小角度入射时振动主要在水平方向，水平向位移分量远大于竖直向位移分量。



(a)水平位移时程



(b)竖直位移时程

图 6 不同入射角度坝顶位移时程

Fig.6 Variation of displacement time history at dam crest with incident angle

图 7 为不同入射角度下坝顶位移峰值随入射角的变化。由图 7 可知，由于平面 SV 波引起水平方向分量随入射角逐渐减小，受此影响，坝顶的水平向位移峰值随入射角的增加逐渐减小。在平面 SV 波垂直入射时峰值为 6.74 cm，在入射角为 30°时减小至 5.95 cm，降幅为 11.72%。平面 SV 波引起的竖直向分量随入射角的增加逐渐增大，受此影响，坝顶的竖直向位移峰值随入射角的增加逐渐增大，在平面 SV 波垂直入射时峰值为 2.08 cm，在入射角为 30°时增加至 4.98cm。

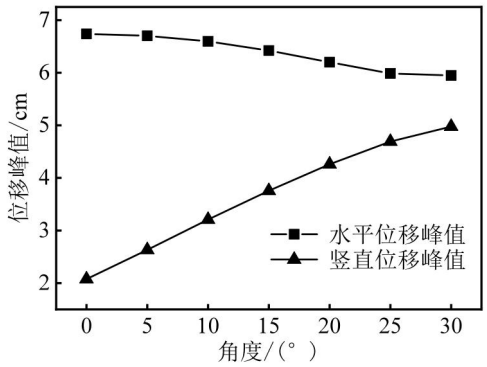
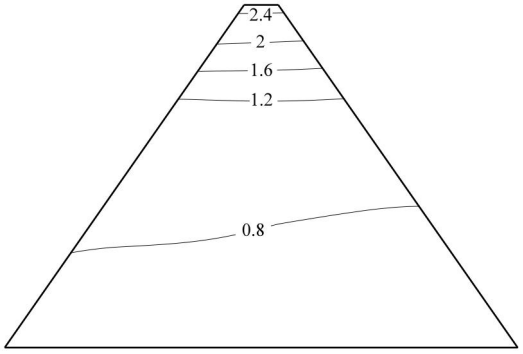


图 7 坝顶位移峰值随入射角的变化

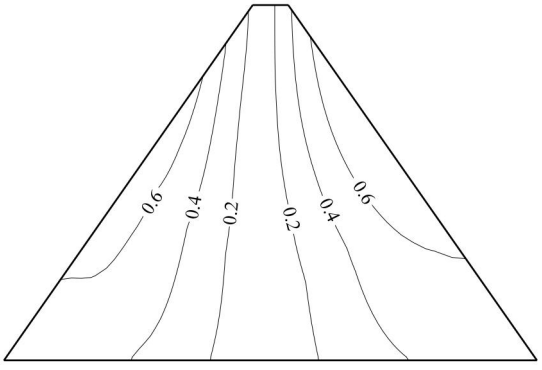
Fig.7 Change of peak displacement at the dam crest with incident angle

3.2 坝体加速度响应

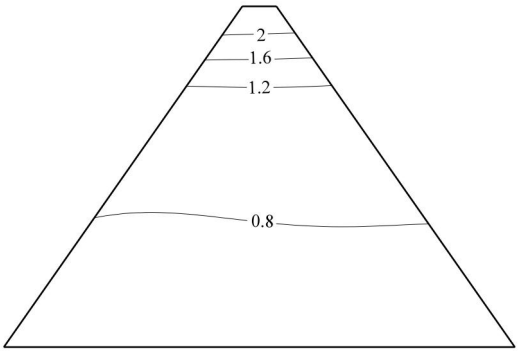
坝体加速度峰值是水工结构关注的重要响应量。胶凝砂砾石坝的加速度峰值分布如图 8 所示。由图可知，地震波垂直入射和斜入射时，水平向与竖直向加速度峰值的分布规律基本一致：水平向加速度峰值基本呈现出水平层状分布，由下到上逐渐增大，在坝顶达到最大值；竖直向加速度峰值基本呈现出对称分布，在坝体中上部的坝面达到最大值。平面 SV 波斜入射时，竖直向加速度峰值的数值有所增加，且上游坝面最大值的出现位置向坝顶方向移动。



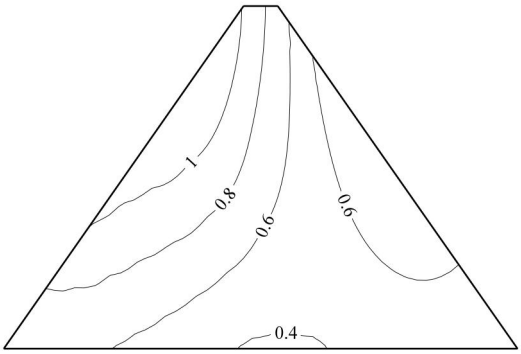
(a)水平向加速度峰值-垂直入射



(b)竖直向加速度峰值-垂直入射



(c)水平向加速度峰值-30° 入射

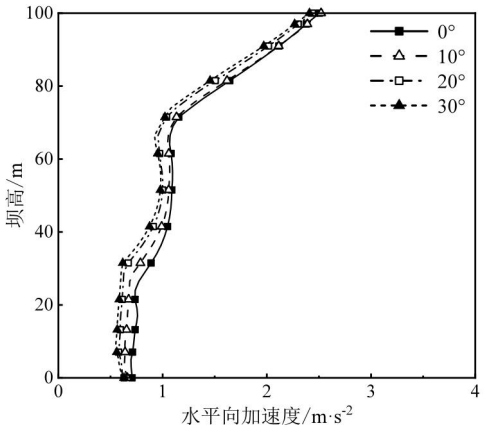


(d)竖直向加速度峰值-30° 入射

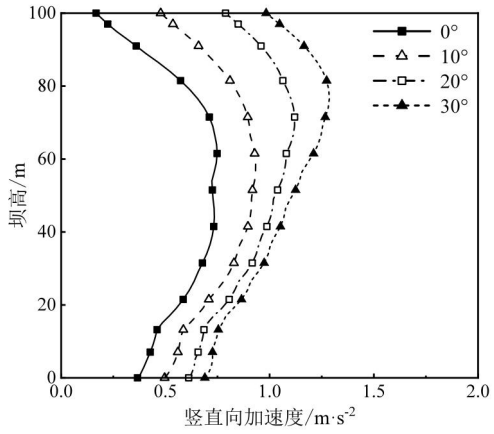
图 8　坝体加速度峰值分布（单位：m/s²）

Fig.8　Peak acceleration distribution of dam body

以坝体上游面响应为基础，坝体加速度峰值随坝高的变化如图 9 所示。由图 9 可知，不同入射角时加速度的峰值的分布规律基本一致：水平向加速度峰值均随坝高上升逐渐增加；竖直向加速度峰值在 2/3 坝高以下随坝高上升逐渐增加，在该部位以上随坝高上升逐渐减小。在入射角影响方面，不同坝高处水平向加速度峰值均随入射角的增加逐渐减小，竖直向加速度峰值随入射角的增加逐渐增大。



(a)水平向加速度峰值



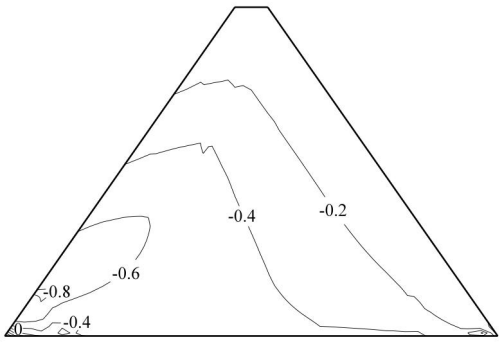
(b)竖直向加速度峰值

图 9　上游坝面加速度峰值分布

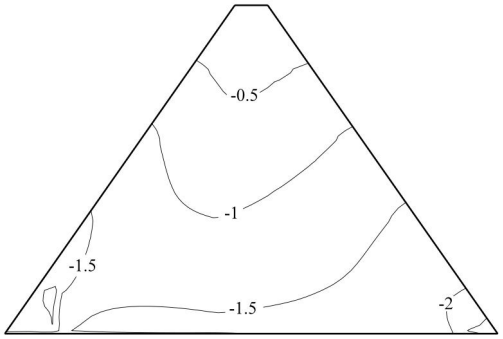
Fig.9　Peak acceleration distribution at upstream face

3.3　主应力响应

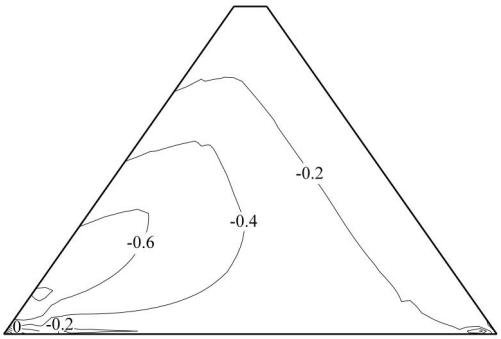
图 10 为垂直入射和斜入射(30°)时胶凝砂砾石坝的主应力峰值分布图。由图 10 可知，垂直和斜入射时，胶凝砂砾石坝第一主应力峰值分布规律基本一致，均在坝踵部位出现受拉区，在坝趾附近的压应力较大。垂直入射时坝踵部位受拉区沿建基面延伸的长度为 5.6 m，30°斜入射时受拉区的延伸长度增加至 7.1 m，增幅 26.8%。垂直入射和斜入射时，胶凝砂砾石坝的第三主应力峰值分布规律一致，且压应力数值也基本一致。



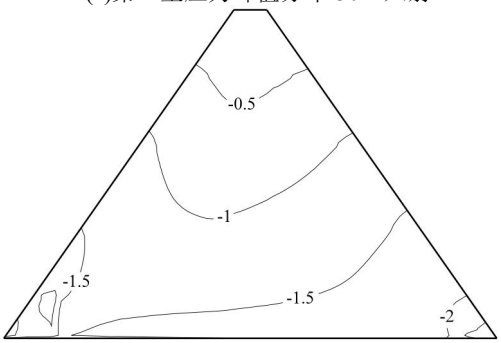
(a)第一主应力峰值分布-垂直入射



(b)第三主应力峰值分布-垂直入射



(c)第一主应力峰值分布-30° 入射

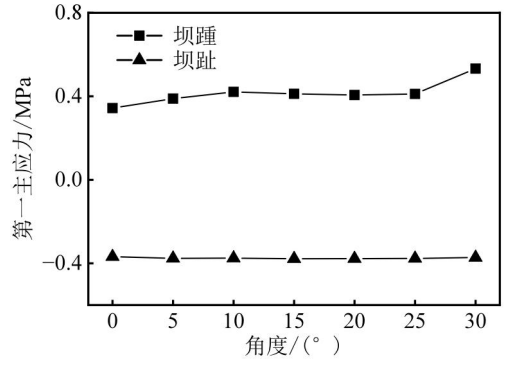


(d)第三主应力峰值分布-30° 入射

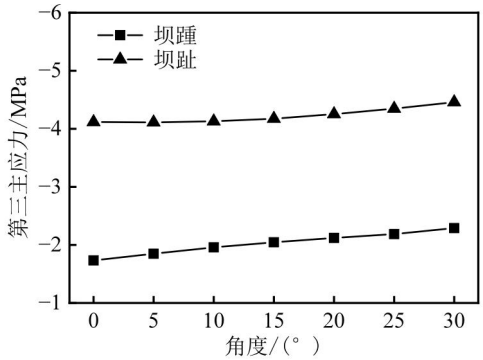
图 10　坝体主应力峰值分布（单位：MPa）

Fig.10　Peak principle stress distribution of dam body

坝踵和坝趾单元的主应力峰值随入射角的变化如图 11 所示。由图 11 可知，随着入射角增加，坝踵第一主应力峰值总体呈现出增加趋势，在 10°~25°入射时变幅不显著。垂直入射时第一主应力峰值为 0.34MPa，30°入射时增加至 0.53MPa，增幅为 55.9%。坝趾第三主应力随着入射角的增加逐渐增大，垂直入射时第三主应力峰值为 4.12MPa，30°入射时增加至 4.46MPa，增幅为 8.3%。



(a)第一主应力峰值



(b)第三主应力峰值

图 11　坝体主应力峰值随入射角变化

Fig.11　Change of peak principal stress with incident angle

4　结论

以 Oyuk 坝为例，研究 SV 波倾斜入射时胶凝砂砾石坝的地震响应规律，揭示位移、加速度和应力情况随地震波入射角的变化，得出以下结论。

1)平面 SV 波斜入射下，坝体运动响应以水平向为主，水平向的位移和加速度响应均大于竖直向。在地震响应峰值方面，水平向位移分量随入射角的增加逐渐减小，但减小趋势并不显著；竖直向位移分量随入射角的增加逐渐增加，增加趋势较为显著。水平向加速度峰值基本呈现出水平层状分布，且由坝底向坝顶逐渐增大；竖直向加速度峰值基本呈现出对称分布，在坝体中上部的坝面达到最大值。加速度响应随入射角的变化规律与位移规律相同。

2)垂直和倾斜入射时，胶凝砂砾石坝主应力峰值分布规律基本一致，均在坝踵出现受拉区，在坝趾出现较大受压区。斜入射带来的变化主要为坝踵受拉区的扩大和应力峰值的增加。建基面受拉区长度由垂直入射的 5.6 m 增加至 30°入射的 7.1 m，坝踵第一主应力峰值由垂直入射的 0.34 MPa 增加至 30°入射的 0.53 MPa，坝趾第三主应力峰值由垂直入射的 4.12 MPa 增加至 30°入射的 4.46 MPa。

3)随着平面 SV 波入射角的增加，坝踵的拉应力和建基面的受拉区均会出现一定程度的增加，这说明与垂直入射相比，平面 SV 波倾斜入射会对胶凝砂砾石坝产生更加不利的影响。在胶凝砂砾石坝抗震性能评估研究中，考虑地震波的倾斜入射是有必要的。

参 考 文 献

[1] Raphael J M. The optimum gravity dam[C]//Proceedings of conference on rapid construction of concrete dams. New York: ASCE, 1970: 221-224.

[2] Londe P, Lino M. The faced symmetrical hardfill dam: a

new concept for RCC[J]. International Water Power and Dam Construction, 1992, 44(2): 19-24.

[3] Ding Zelin, Wang Xiaonan, Xu Liangjie, et al. Study on the safety of cemented sand and gravel dams based on the profile form of model tests[J].Structures, 2023, 56: 104978.

[4] Cai Xin, Zhang Yanan, Guo Xinwen, et al. Review on research progress of cemented sand and gravel dam [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2022, 29(1): 438-451.

[5] 丁泽霖,徐良杰,王肖楠.基于多元优化的百米级胶凝砂砾石坝设计方法[J].水力发电学报,2023,42(12):119-131.[Ding Zelin,XU Liangjie,Wang Xiaonan.Design method of 100-metercemented sand and gravel dams based on multivariate optimization[J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(12): 119-131]

[6] 刘艳华,严俊,杨玉坚,等.基于反应谱法的胶凝砂砾石坝地震反应有限元分析[J].水利水电技术(中英文), 2023, 54(增刊 1):68-73.[Liu Yanhua,Yan Jun,Yang Yujian,et al.Finite element analysis of seismic response of a cement sand and gravel dam based on response spectrum method[J].Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S1): 68-73.]

[7] 丁泽霖,王肖楠,张宏洋,等.复杂地基重力坝与胶凝砂砾石坝变形破坏对比分析[J].工程科学与技术,2023,55(4):197-206.[Ding Zelin,Wang Xiaonan,Zhang Hongyang,et al. Comparative analysis of deformation and failure of gravity dam with complex foundation and cemented sand-gravel dam[J].Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(4): 197-206.]

[8] 张亚楠,李俊岭,万宇,等.基于多元优化的胶凝砂砾石坝体功能分区设计及超载分析[J/OL].水电能源科学,2025[2026-11-07].https://link.cnki.net/urlid/42.1231.TK.20260324.1050.028.[Zhang Yanan,Li Junling,Wan Yu,et al.Functional zoning design and overload analysis of cemented sandand gravel dam body based on multi-element optimization[J/OL].Water Resource and Power,,2025[2026-11-07].https://link.cnki.net/urlid/42.1231.TK.20260324.1050.028.]

[9] Mahmoodi K,Noorzad A,Mahboubi A,et al. Seismic performance assessment of a cemented material dam using incremental dynamic analysis[J]. Structures, 2021, 29: 1187-1198.

[10] 熊堃,何蕴龙,陈涛.百米级硬填料坝结构安全度分析[J].人民长江,2012,43(2):74-77.[Xiong Kun,He Yunlong,Chen Tao.Structural safety analysis of a 100 m level hardfill dam[J].Yangtze River, 2012, 43(2): 74-77.]

[11] 何蕴龙,张劭华,石熙冉.胶凝砂砾石坝抗震特性及其地震作用计算方法[J].水利学报,2016,47(5):589-598.[He Yunlong,Zhang Shaohua,Shi Xiran.Seismic behavior of cement-sand-gravel dam and the calculation method of its seismic loads[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 589-598.]

[12] 蒋莉,王磊,周晓岚,等.基于黏弹性边界的地下厂房地震响应分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(1):82-88.[Jiang Li,Wang Lei,Zhou Xiaolan,et al.Analysis of seismic response of underground powerhouse based on viscoelastic boundary[J].Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition), 2021, 42(1): 82-88.]

[13] 许新勇,刘旭辉,蒋莉.强震作用下大型渡槽结构地震动力破坏机理分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(4):48-53.[Xu Xinyong, Liu Xuhui, Jiang Li. Analysis on seismic dynamic failure mechanism of large aqueduct structure under strong earthquake[J].Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition), 2022, 43(4): 48-53.]

[14] Kondo M,Sasaki T,Kawasaki H.Characteristics of stress distribution in trapezoid-shaped CSG dam during earthquake[C]//Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering. Vancouver, Canada,2004: 33-92.

[15] 张劭华,何蕴龙,孙伟.守口堡胶凝砂砾石坝抗震性能[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(2):193-200.[Zhang Shaohua, He Yunlong, Sun Wei.Seismic behavior of Shoukoubu hardfill dam[J].Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 193-200.]

[16] 何卫平,刘旺,宋俊杰,等.复杂波场效应对胶凝砂砾石坝地震响应影响研究[J].振动工程学报,2026,39(3):896-906.[He Weiping, Liu Wang, Song Junjie, et al.Influence of complex wavefield effect on seismic response of hardfill dam[J].Journal of Vibration Engineering, 2026, 39(3): 896-906.]

[17] 张垠,于彦彦,丁海平.平面 SV 波斜入射下含饱和土层沉积盆地的地震效应[J].自然灾害学报,2026,35(2):190-202.[Zhang Yin, Yu Yanyan, Ding Haiping. Seismic effects of sedimentary basin with saturated soil layer under oblique incidence of plane SV wave[J].Journal of Natural Disasters, 2026, 35(2): 190-202.]

[18] 李明达,郎秋玲,李艳朋,等.SV/P 波斜入射下岩溶盾构隧道的地震响应和损伤研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(4):796-806.[Li Mingda, Lang Qiuling, Li

Yanpeng, et al. Study on seismic response and damage characteristics of karst shield tunnels under oblique incidence of SV/P waves[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(4): 796-806.]

[19] 李明超,张佳文,张梦溪,等.地震波斜入射下混凝土重力坝的塑性损伤响应分析[J].水利学报,2019,50(11):1326-1338,1349.[Li Mingchao,Zhang Jiawen,Zhang Mengxi,et al.Plastic damage response analysis of concrete gravity dam due to obliquely incident seismic waves[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1326-1338,1349.]

[20] Xu Shutong,Xu Qiang,Chen Jianyun, et al. Seismic performance analysis of gravity dam system under arbitrary oblique incidence of near-fault SV ground motions[J].International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022240.

[21] 杜修力,徐海滨,赵密.SV波斜入射下高拱坝地震反应分析[J].水力发电学报,2015,34(4):139-145.[Du Xiuli,Xu Haibin,Zhao Mi.Analysis on seismic responses of high arch dam to SV waves of oblique incidence [J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 139-145.]

[22] García F,Aznárez J J,Padrón L A,et al. Relevance of the incidence angle of the seismic waves on the dynamic response of arch dams[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 442-453.

[23] 郑晓东,程琳,马静,等. P波和SV波斜入射下土石坝动力响应分析[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025.[2026-09-19].https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20251013.1725.002.[Zheng Xiaodong, Cheng Lin, Ma Jing, et al. Dynamic response analysis of earth-rockfill dams under oblique incidence of P-waves and SV-waves[J]. Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition),2025.[2026-09-19].https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20251013.1725.002.]

[24] 马笙杰,迟明杰,陈学良,等.静动力边界转换及其合理性验证方法的研究[J].地震学报,2024,46(1):157-171.[Ma Shengjie, Chi Mingjie, Chen Xueliang,et al.Research on the static-dynamic boundary switch and its rationality verification method[J].Acta Seismologica Sinca, 2024, 46(1): 157-171.]

[25] Batmaz S,Köksal A,Ergeneman I,et al.Design of the 100 m-high Oyuk Hardfill dam[J].International journal on hydropower & dams, 2003, 10(5): 138-142.

[26] 何卫平, 杜修力. 工程场址复杂波场特征的确定性分析[J/OL]. 工程力学, 2025. [2026-09-19]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250217.0937.011. [He Weiping, Du Xiuli. Determinstic analysis of wavefield Characteristics at engineering site[J/OL]. Engineering Mechanics, 2025. [2026-09-19]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250217.0937.011.]

Seismic response analysis of Hardfill Dam under oblique incidence Plane SV waves

YU Haoran[1], HE Weiping[1,2], LIU Wang[1], HUANG Shibo[1], YAO Huiqin[1,2]

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: **【Objective】** This study investigates the effect of varying incident angles of planar SV waves on the seismic response of a hardfill dam, using the Oyuk Dam as an example. **【Methods】** In the calculation, the radiation damping effect is simulated by the viscoelastic boundary, and the incident waves are applied using the wave input method. Based on the ABAQUS software, the displacement, acceleration, and principal stress of the hardfill dam under oblique plane SV waves are revealed. **【Results】** Compared with vertical incidence, the response distribution under oblique incidence remains basically the same, but the response values exhibit significant changes. In terms of movement response, the dam body moves mainly horizontally under both vertical and inclined incidence, and the vertical movement is less than the horizontal movement. The peak horizontal motion at the crest decreases with increasing incidence angle, whereas the peak vertical motion gradually increases. The effect of oblique incidence is mainly reflected in the expansion of the tensile zone at the interface and the increase in stress values. The peak major principal stress at the dam heel increases from 0.34 MPa under vertical incidence to 0.53 MPa under 30° oblique incidence. The peak minor principal stress at the dam toe increases from 4.12 MPa to 4.46 MPa under the same conditions. **【Conclusions】** The results show that stresses in the dam body

under the oblique incidence of SV waves are generally greater than those under vertical incidence, and the distribution of peak motions and peak stresses also changes in oblique incidence conditions. This indicates the necessity of considering oblique seismic wave incidence in the seismic response analysis of hardfill dams.
Keywords: hardfill dam; wave input method; viscoelastic artificial boundary; seismic response; plane SV wave; oblique incidence