P 波和 SV 波斜入射下土石坝动力响应分析

郑晓东[1,2]，程琳[1,2]，马静[1,2]，张昀保[3]

(1. 河北工程大学 水利水电学院,河北 邯郸 056038;2. 河北省智慧水利重点实验室,河北 邯郸 056038;3. 河北省水利科学研究院,河北 石家庄 050057).

摘　要:【目的】探究 P 波、SV 波斜入射对土石坝动力响应的影响。**【方法】**以岳城水库主坝为例，建立土石坝-动水-地基三维有限元模型，模拟 P 波和 SV 波在不同入射角作用下土石坝的地震响应。**【结果】**最不利工况为 P 波 0°垂直入射及 60°斜入射、SV 波 0°及 32°斜入射，此时坝体顺水流位移、主拉应力、加速度及动水压力均达峰值；入射角度由垂直转为倾斜时，动力响应出现最大降幅，显著影响坝体安全稳定。**【结论】**地震波斜入射角度与坝体响应间呈非线性关系；传统垂直入射假设可能低估特定斜入射工况下坝体的失稳风险；本研究可为复杂地形区土石坝的精细化抗震设计及灾害预警提供理论支撑。

关键词:P 波;SV 波;入射角度;动力响应;土石坝

中图分类号:TV641　　**文献标识码**:A

地震波在地层中的传播受地球层状结构与局部地形条件的显著影响，传统土石坝抗震分析通常假设地震波垂直入射，该简化在多数情况下可行。然而在浅源地震或复杂场地中，地震波常以倾斜角度入射地表，导致行波效应与局部场地效应叠加，显著改变结构动力响应。研究表明，斜入射条件下地震动的空间非一致性可引发大体积结构的应力重分布与加速度放大效应，对工程安全构成潜在威胁。

近年来，国内外学者对地震波斜入射问题开展了广泛研究。在理论方法方面，高川[1]研究了 P 波与 SV 波随机组合斜入射下沥青混凝土面板堆石坝的地震响应，揭示了入射角度对坝体加速度和面板应力的影响规律。针对黏弹性人工边界等效节点力的数值偏差问题，章小龙[2]通过优化载荷计算算法，显著提升了边界力学参数的求解精度。张懂懂[3]通过改进的静动力耦合边界模拟方法，对比分析了 P 波与 SV 波斜入射对隧道衬砌结构地震响应的影响。基于有限/无限元耦合建模技术，杨永斌[4]系统分析了 P 波与 SV 波在含水土石复合场地中的斜入射传播特性，揭示了场地地质条件对地震波能量衰减的调控机制。此外，在坝工领域，张树茂[5]分析了土石坝加速度放大系数随入射角的变化规律，但针对三维坝体-库水-地基耦合系统的斜入射研究仍存在不足，尤其是动水压力与边坡效应的协同作用机制尚不明确。综上可知，已有研究多集中于单一波型的斜入射效应，P 波和 SV 波斜入射下对土石坝-库水-地基耦合系统的动力响应研究较少，尤其是考虑复杂边界条件和动水压力耦合效应的研究亟待深入。

基于此，本文以岳城水库土石坝为研究对象，建立三维有限元模型，采用黏弹性人工边界与等效荷载法实现 P 波、SV 波多角度斜入射输入。通过对比不同入射角下坝体位移、应力、加速度及动水压力的响应规律，揭示最不利工况的作用机制，为土石坝抗震设计提供理论支撑。

1　理论分析与模型验证

1.1　地震波斜入射理论

P 波和 SV 波斜入射理论基于波场分解与坐标变换原理，通过建立局部坐标系与全局坐标系的转换关系，实现波场参数的等效输入。

收稿日期/Received:2025-04-24　　**修回日期**/Revised:2025-08-04

基金项目:河北省教育厅科学研究项目资助（QN2025403）；邯郸市科学技术研究与发展计划项目（23422903054）；重庆工贸职业技术学院科研项目（ZR202435）。

第一作者:郑晓东(1983—),男,副教授,博士,从事水工结构抗震方面的研究。E-mail:yipianyuye@163.com。

通信作者:马静(1985—),女,博士,从事水利工程防灾减灾方面的研究。E-mail:mjanne@163.com。

如图 1 所示，当地震波荷载以 P 波形式斜入射立方体三维有限元模型，以立方体模型坐标原点为入射点，建立坐标系体系。对于模型边界上任意一点$A(x_0, y_0, z_0)$，自由波场包括直接入射的 P1 波、地表反射的 P2 波和 SV 波在地表反射后的组合，形成 P 波入射。且三种波形的局部坐标系体系分别为(X^1, Y^1, Z^1)、(X^2, Y^2, Z^2)、(X^3, Y^3, Z^3)。设入射的 P 波行波方向与 x、y、z 的夹角分别为α、β、γ。

将局部坐标(X^1, Y^1, Z^1)、(X^2, Y^2, Z^2)、(X^3, Y^3, Z^3)转换到整体坐标的转换矩阵为：

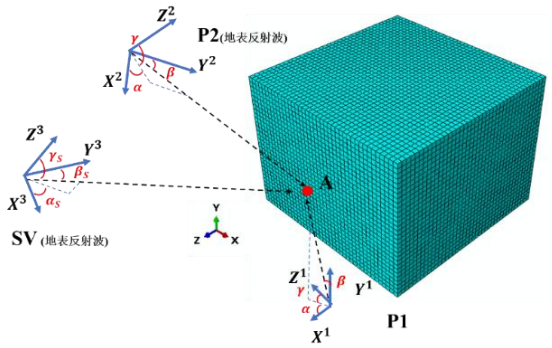


图 1　P 波斜入射局部坐标图

Fig.1　Local coordinate diagram of P-wave oblique incidence

$$\boldsymbol{T_1} = \begin{bmatrix} -\dfrac{\cos\gamma}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} & 0 & \dfrac{\cos\alpha}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} \\ \cos\alpha & \cos\beta & \cos\gamma \\ -\dfrac{\cos\alpha^*\cos\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} & \sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma} & -\dfrac{\cos\gamma^*\cos\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{T_2} = \begin{bmatrix} -\dfrac{\cos\gamma}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} & 0 & \dfrac{\cos\alpha}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} \\ \cos\alpha & -\cos\beta & \cos\gamma \\ \dfrac{\cos\alpha^*\cos\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} & \sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma} & \dfrac{\cos\gamma^*\cos\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha+\cos^2\gamma}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{T_3} = \begin{bmatrix} -\dfrac{\cos\gamma_S}{\sqrt{\cos^2\alpha_S+\cos^2\gamma_S}} & 0 & \dfrac{\cos\alpha_S}{\sqrt{\cos^2\alpha_S+\cos^2\gamma_S}} \\ \cos\alpha & -\cos\beta_S & \cos\gamma_S \\ \dfrac{\cos\alpha_S^*\cos\beta_S}{\sqrt{\cos^2\alpha_S+\cos^2\gamma_S}} & \sqrt{\cos^2\alpha_S+\cos^2\gamma_S} & \dfrac{\cos\gamma_S^*\cos\beta_S}{\sqrt{\cos^2\alpha_S+\cos^2\gamma_S}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{T_1}, \boldsymbol{T_2}, \boldsymbol{T_3}$分别为三维坐标变换矩阵，用于将局部坐标系下的物理量转换到全局坐标系；α, β, γ分别为入射波传播方向与全局坐标系各轴(x,y,z)的夹角，单位为弧度(rad)；$\alpha_S, \beta_S, \gamma_S$分别为 SV 波传播方向与坐标轴的夹角；$\cos\alpha^*, \cos\gamma^*$分别为修正的方向余弦,表征反射或折射后的波传播方向。

在局部坐标系下，A 点的位移场由入射波(P1)、反射波(P2)及转换波(SV)共同作用生成，其分量表达式如下：

$$[\boldsymbol{U^1}] = \begin{bmatrix} 0 & u(t-\Delta t^1) & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$[\boldsymbol{U^2}] = \begin{bmatrix} 0 & A_1 u(t-\Delta t^2) & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$[\boldsymbol{U^3}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & A_2 u(t-\Delta t^3) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{U^1}, \boldsymbol{U^2}, \boldsymbol{U^3}$分别为不同路径地震波引起的位移分量向量；$u(t-\Delta t^i)(\mathrm{i}=1,2,3)$分别为时间延迟后的位移函数，$\Delta t^i(\mathrm{i}=1,2,3)$为第 i 条路径的传播时间延迟；$A_1, A_2$分别为反射/折射波的幅值衰减系数,无量纲。

通过坐标转换矩阵，全局坐标系中 A 点的总位移向量可视为 P1、P2 与 SV 波自由场位移的线性组合，其数学描述如下：

$$[\boldsymbol{U}] = \sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{T_i}\,[\boldsymbol{U_i}] \tag{7}$$

式中：$[\boldsymbol{U}]$为总位移向量，由各路径位移分量线性叠加得到；$\mathrm{T_i}$为第 i 条路径的变换矩阵，$[\mathrm{U_i}]$为对应路径的位移分量。

总体坐标下的 P1 和 P2 及 SV 波在 A 点的自由场应力为：

$$[\boldsymbol{\sigma_{ij}}] = \sum_{l=1}^{2} [\boldsymbol{T_l}]^T \,[\boldsymbol{\sigma_{ij}^l}]\,[\boldsymbol{T_l}] \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma_{ij}}$为全局坐标系下的应力张量；$\boldsymbol{\sigma_{ij}^{l}}$为局部坐标系下的应力分量($l=1,2$ 代表不同局部坐标系)；$\boldsymbol{T_l}$为第 l 个局部坐标系的变换矩阵。

同样的方法可推导出总体坐标下的 SV1 和 SV2 及 P 波在 A 点的自由场应力。

本文采用黏弹性人工边界与等效节点力方法，将地震输入转化为作用在边界节点上的等效力[6]，有效模拟无限地基辐射阻尼效应[7]。

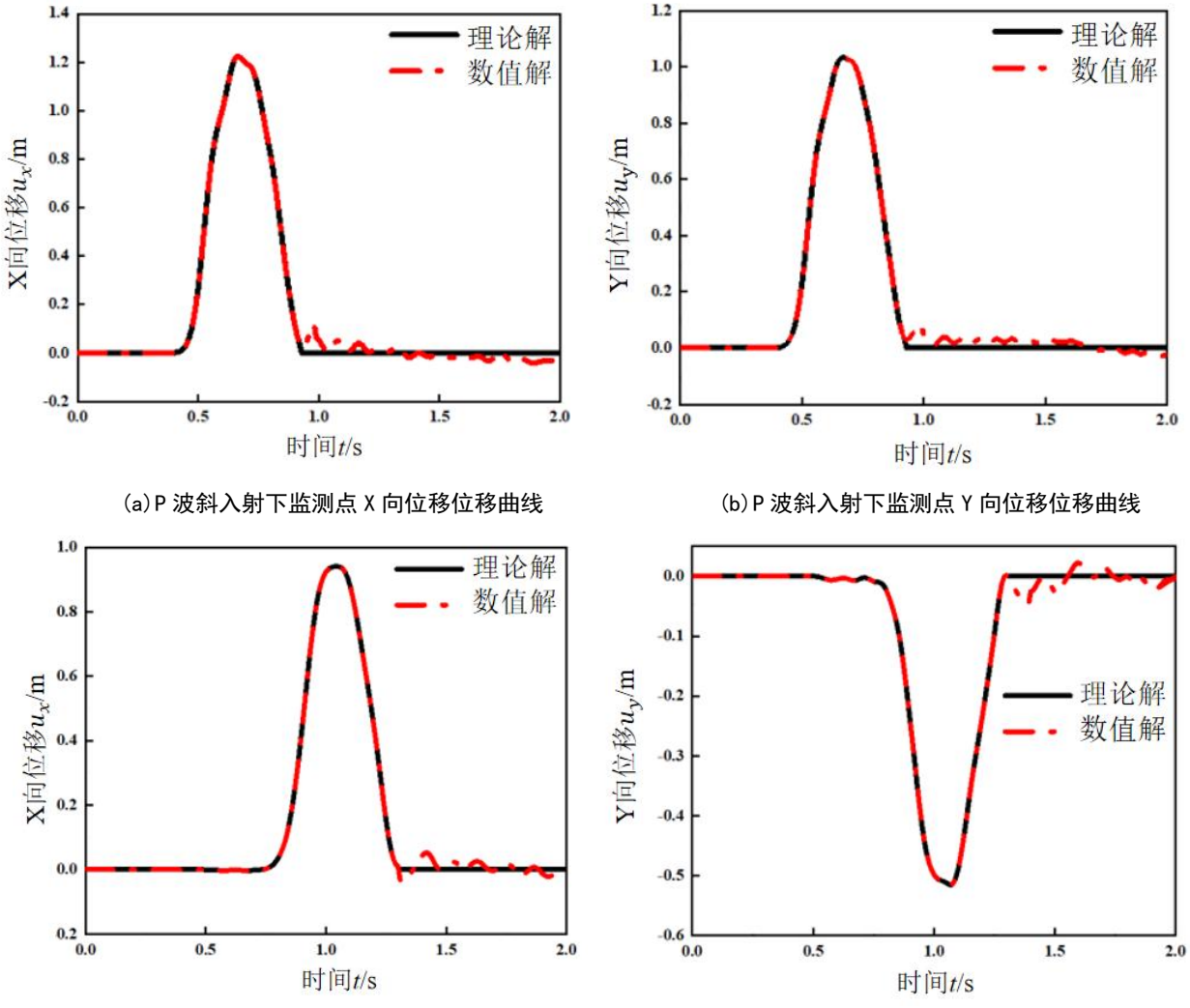
1.2 地震波输入方法模型验证

为验证地震波输入方法的准确性，建立均匀弹性半空间三维有限元模型，设置波形监测点，对比理论解与数值解的位移响应。

建立地震波的三维斜入射模型，设置波形监测点。为模拟无限地基辐射阻尼效应，在模型外缘及底部增设六面体网格层构建黏弹性人工边界，并将自由场荷载等效施加于截断边界表面[8]。

P 波和 SV 波的波速通过材料的弹性模量 E、泊松比ν和密度ρ计算得出，根据表 1 的数据计算得入射 P 波波速 Cp 为 820.41 m/s，SV 波波速 Cs 为 438.50 m/s，时间步长取为 0.01s。

图 2 为 P 波、SV 波入射模型后监测点在 P 波、SV 波斜入射时的水平向和竖向位移响应。结果表明，数值解与理论解波形基本吻合，虽后期波动存在轻微偏差，但整体具有较高精度，验证了本文地震波斜入射方法及程序的可靠性。



(a) P 波斜入射下监测点 X 向位移位移曲线　(b) P 波斜入射下监测点 Y 向位移位移曲线

(c) SV 波斜入射下监测点 X 向位移位移曲线　(d) SV 波斜入射下监测点 Y 向位移位移曲线

图 2　P 波和 SV 波斜入射下模型监测点位移曲线

Fig.2　Displacement curve of monitoring point A in SV-wave oblique incidence model

2　模型建立及参数设置

2.1　工程概况与模型参数

本研究以岳城水库主坝为研究对象，该水库属国家大I型水库，主坝为均质坝，坝高 55.5 m，坝顶宽 4.0~8.0 m，正常蓄水位深 27.62 m。建立土石坝-库水-地基三维有限元耦合模型[9]。

根据《水工建筑物抗震设计标准》（GB51247-2018），对于大型土石坝，设计地震动的主频通常取 1~5 Hz，以覆盖场地特征周期（本

研究中特征周期为 0.35 s，对应主频约 2.86 Hz）。结合实际工程中常简化为 2Hz 作为代表性低频成分，因其更易激发土石坝的长周期振动，并考虑波长与模型的匹配性，为避免因波长过短导致网格离散误差。故而选取主频为 2Hz。P 波波速为 820.41m/s，根据地震波传播公式计算得$\lambda \approx 410$m。

模型构建方面，土石坝坝体与地基均采用 C3D8P 单元（三维八节点压力-位移耦合实体单元）进行模拟。地基范围向上游延伸 3128 m、向下游延伸 1100 m，地表以下深度 2000 m，满足 NB/T 11559.2—2024 中关于地基延伸范围应不小于 3 倍波长的要求。网格尺寸统一采用 10 m。时间步长取 0.01 s，符合 Courant-Friedrichs-Lewy 稳定性条件及数值收敛要求。

基于 Mohr-Coulomb 强度准则，坝体与地基材料的弹塑性行为通过该本构关系进行表征。详细模型材料见表 1[10]，具体模型信息如图 8 所示，其中图 8(b)即为典型剖面，是坝体正中间的横断面，垂直于坝轴线，贯穿坝顶至地基。

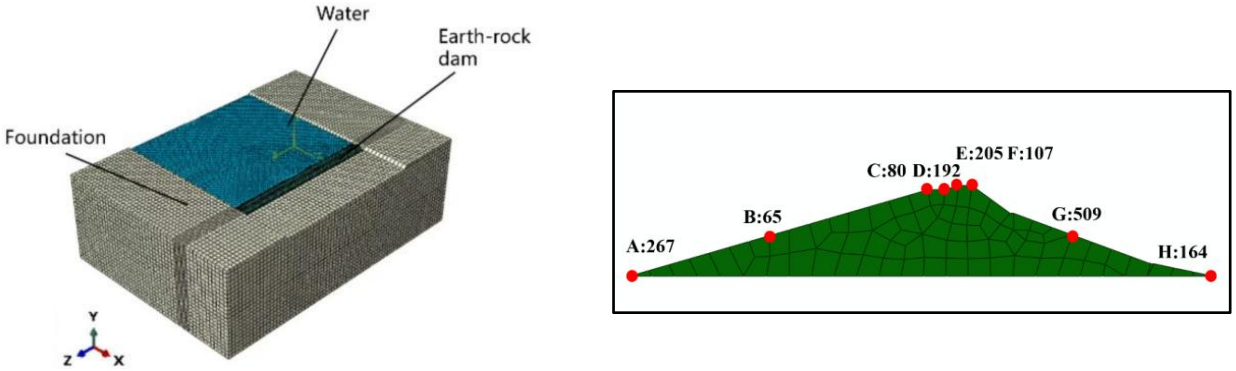
表 1　土石坝-库水-地基系统材料参数表

Tab.1　Material parameter table of earth-rock dam-reservoir water-foundation system

材料	密度/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角	凝聚力/MPa	渗透系数/（m/s）
地基	2550	3000	0.3	28	0.4	0.00635
坝体	2000	15	0.3	24	20	0.0048
库水	1000	2000				

岳城水库主坝为均质土坝，填筑材料为黏土质砂砾石，压实度≥95%。坝基材料为第三系砂岩夹泥岩，属低渗透性岩体，其值大于坝体是因坝体采用防渗心墙，而表 1 中“坝体”参数为整体平均值。坝基渗透性较高是因研究聚焦整体动力响应，未单独模拟防渗结构。

库水模拟采用 AC3D8 声学单元（三维八节点声学单元），共划分 10556 个单元，水体体积模量取 2 GPa[11]。水库上表面设为自由水面，截止边界处设置吸波边界以消除反射波。这种设置模拟了辐射衰减效应，使动态水压对均匀土坝的影响更加真实地反映出来。通过 ABAQUS 在库水与坝体、库水与地基的接触面上施加 Tie 约束，来模拟均质土坝与水体的声学介质与结构之间的联动效应。



(a) 土石坝-库水-地基整体有限元模型　　(b) 均质土坝模型监测点信息

图 3　土石坝具体模型和整体模型及细部构造图

Fig.3　Detailed model,overall model and detailed structure diagram of earth-rock dam

2.2　地震波输入

利用地基底部顶点作为入射角点，其中 SV 波入射临界角由下式计算：

$$\theta_{cr} = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}\right) \tag{9}$$

式中：θ_{cr}为临界入射角，当入射角大于此值时发生全反射，单位为弧度(rad)。

本文地基泊松比为 0.3，入射临界角度为 32°；故对于 SV 波斜入射情况下，本文仅考虑其临界入射角 0°到 32°以内的情况。确定 P 和 SV 波入射波与 X、Z 轴夹角α、γ的角度均为45^0，控制 P 波入射角$\beta_p = 0^0$、15^0、30^0、45^0、60^0、75^0；控制 SV 波入射角$\beta_{SV} = 0°$、5°、15°、20°、25°、32°。P 波及 SV 波都以入射向量进行三维空间斜入射。

依据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)规范，研究区地震动峰值加速度为 0.15 g，特征周

期 0.35 s，对应地震烈度等级为VII度。基于此，建议采用VII度的地震基本烈度值。为了符合抗震设计反应谱的要求，进行了地震人工波的拟合，包括加速度时程曲线、位移时程曲线以及速度时程曲线。地震波总时长为 20 s，时间步长为 0.01 s，详细参数请参考图 4[12]。

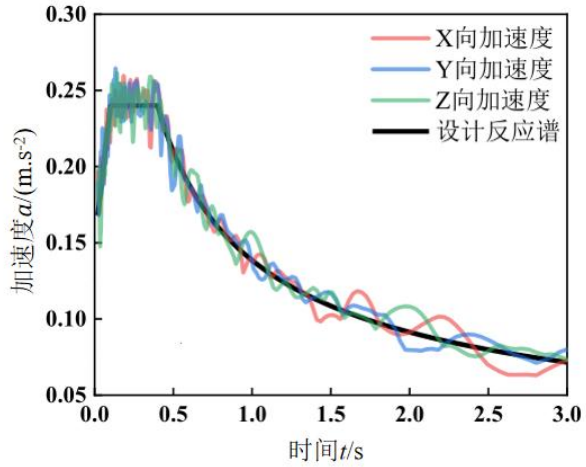


图 4　人工地震波设计反应谱

Fig.4　Design response spectrum of artificial seismic wave

3　计算结果与分析

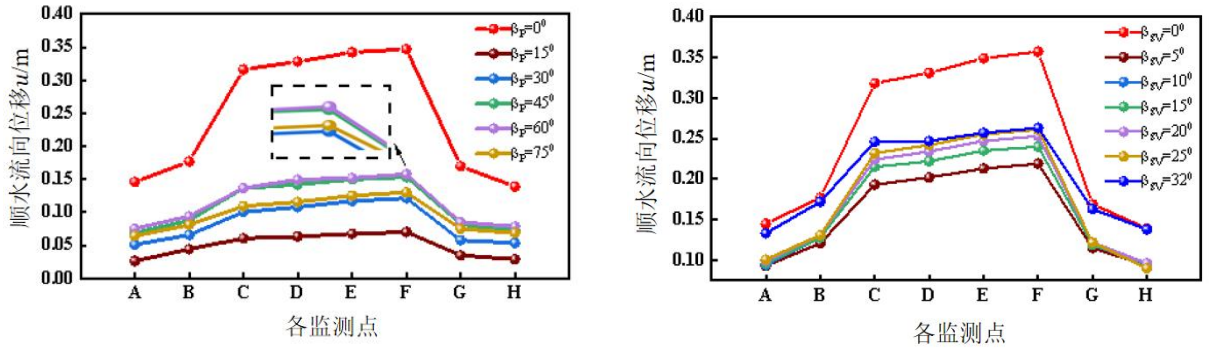
3.1　位移分析

不同入射角度下坝体顺水流向位移如图 5 所示。由图可以看出，P 波、SV 波以不同的角度入射时，坝体最大顺水流位移受入射角度影响变化显著。

如图 5(a)所示，当 P 波以 0°垂直入射时，各监测点顺水流向位移达到最大值。随着 P 波入射角从 15°增大至 60°，位移值总体呈上升趋势，增长显著。在 15°入射时，监测点 A 出现最小位移值，而点 F 位移降幅最大，达 79.82%。60°斜入射时，位移达到 P 波斜入射工况中的最大值，较 0°垂直入射下降 51.8%。当入射角增至 75°时，位移值低于 45°和 60°工况。

从图 5(b)可以看出，对于 SV 波，0°垂直入射时位移最大，监测点 F 处为 0.35 m，较 P 波同类工况略高 0.86%，对坝体稳定更为不利。随着 SV 波入射角从 5°增大至 32°，位移值持续上升。5°入射时，监测点 F 位移降幅为 40%；32°入射时位移达到 SV 波斜入射中的最大值（0.263 m），较 0°垂直入射降低 24.8%。

总体来看，P 波和 SV 波作用下，各监测点顺水流向位移随入射角变化均呈先降后升再降的趋势，监测点 F 始终为位移最大位置，点 A 和 H 则为最小，位移分布总体呈抛物线特征。水平倾斜角不变时，改变入射角度会显著影响坝体顺水流向位移，进而影响其安全稳定性。P 波在 0°和 60°入射、SV 波在 0°和 32°入射时，分别出现最大位移降幅或斜入射位移极值，对坝体安全极为不利，因而上述工况是均质土坝地震响应中最危险的情况。



(a) P 波斜入射下各监测点位移曲线　　(b) SV 波斜入射下各监测点位移曲线

图 5　P 波和 SV 波斜入射下各监测点位移曲线

Fig.5　Displacement curve of each monitoring point under oblique incidence of P wave and SV wave

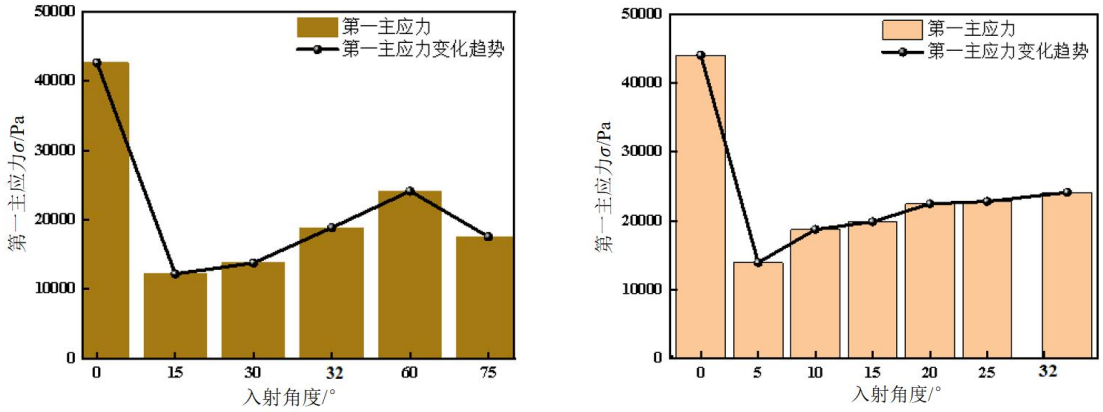
3.2　应力分析

提取均质土坝典型剖面的第一应力(主拉应力)峰值评估均质土坝结构的受力状态。P 波和 SV 波斜入射下不同角度入射下坝体应力发展规律如图 6 所示[13]。

如图 6(a)所示，当 P 波以 0°垂直入射时，坝体主拉应力达到最大，为 42.63 kPa；入射角为 15°时，主拉应力最小，仅为 12.17 kPa。当入射角从 0°增至 15°时，主拉应力出现最大降幅，降幅达 71.45%；随着入射角从 15°继续增大至 60°，主拉应力持续上升；而从 60°增至 75°时，应力值再度出现明显下降[14]。

从图 6(b)可以看出，SV 波在 0°入射时坝体主拉应力最大，为 44.11 kPa；而当入射角为 5°时，主拉应力最小，为 13.89 kPa。SV 波入射角从 0°增至 5°时，主拉应力降幅最大，达 68.51%；随着入射角从 5°继续增大至 32°，主拉应力呈持续上升趋势。

在 P 波 0°与 60°入射以及 SV 波 0°与 32°入射工况下，均出现了最大坝体主拉应力降幅或斜入射时的最大坝体主拉应力极值，对坝体安全稳定极为不利。应力分布结果表明，斜入射导致坝体坝踵内部的拉应力面积由于入射角度的变化开始突然向上游坝踵和坝体中心位置扩散，对坝体结构的长期稳定性构成潜在威胁[15]。



(a) P 波斜入射下坝体主应力发展规律　　(b) SV 波斜入射下坝体主应力发展规律

图 6　P 波和 SV 波斜入射下坝体主应力发展规律

Fig.6　Development law of principal stress of dam body under oblique incidence of P wave and SV wave

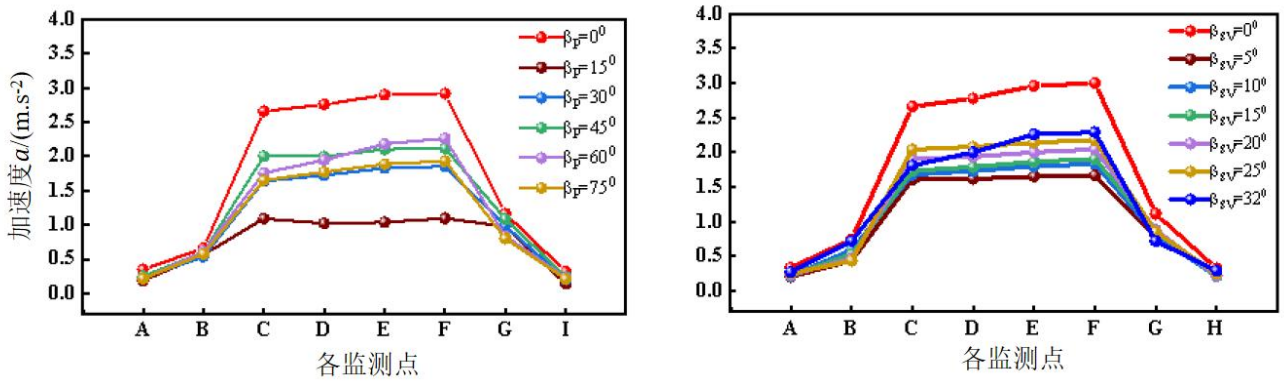
3.3　加速度响应分析

坝体在地震 P 波与 SV 波在不同角度入射下，均质土坝典型剖面的最大加速度沿各个监测点的变化趋势如图 7 所示。

如图 7(a)所示，当 P 波以 0°垂直入射时，各监测点的加速度响应值为所有入射角度中的最大值；而当入射角为 15°时，加速度响应值降至最低，较 0°垂直入射下降 62.46%，降幅最为显著。随着入射角从 15°增大至 60°，各监测点的加速度响应值总体上逐渐上升；在 60°入射时，多数测点的加速度响应值仅次于 0°工况，最大值为 2.263 m/s²，较 0°入射降低 22.5%。当入射角进一步增至 75°时，加速度响应值较 60°工况有所下降。总体而言，随 P 波入射角增加，坝体加速度响应呈先降后升再下降的趋势。

从图 7(b)可以看出，SV 波入射时，坝体中心顶点部位(监测点 F)的加速度响应受角度变化影响最为显著。随着 SV 波入射角从 0°增大至 32%，各监测点加速度值先升后降，整体呈抛物线分布，最大值出现在点 F，最小值出现在点 A 和点 I。在 0°垂直入射时，加速度响应最大，达 3.0 m/s²；5°入射时响应值最低，为 1.67 m/s²，降幅达 44.33%。从 5°至 32°，加速度响应随角度增加总体呈上升趋势。在 32°斜入射时，监测点 E 和 F 出现加速度极值，最大为 2.29 m/s²，仅次于 0°工况。

P 波与 SV 波在 0°入射时均出现加速度响应的最大降幅，而在 P 波 60°入射和 SV 波 32°入射时，则出现斜入射条件下的加速度极值，严重威胁坝体安全稳定。因此，P 波 0°和 60°斜入射以及 SV 波 0°和 32°斜入射为最不利工况，对均质土坝的安全运行具有显著不利影响[16]。



(a) P 波斜入射下坝体各监测点加速度响应 (b) SV 波斜入射下坝体各监测点加速度响应

图 7　P 波和 SV 波斜入射下坝体各监测点加速度响应

Fig.7　Acceleration response of each monitoring point ofdam body under oblique incidence of P wave and SV wave

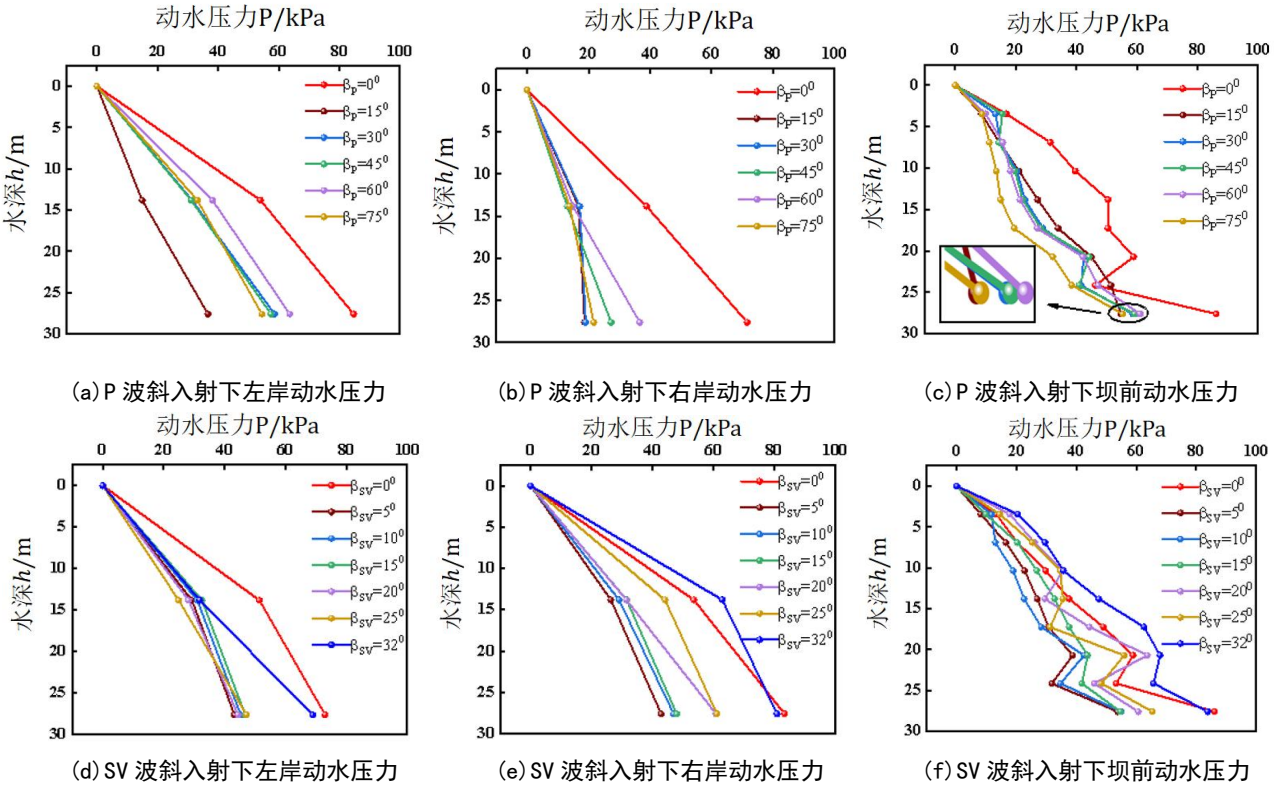
3.4 结构—动水压力耦合响应分析

图 8 为 P 波和 SV 波以不同角度入射下，均质土坝与水体发生耦联振动作用下各迎水面动水压力分布图。

如图 8 所示，当 P 波以 0°入射时，左、右岸及坝前动水压力均达到最大值，其中坝前动水压力最高，为 86.2 kPa。入射角为 15°时，顺水流与垂直水流方向的动水压力均降至最小，坝前动水压力为 54.6 kPa，较 0°入射下降 36.64%，此时出现第一次且幅度最大的下降。随着入射角从 15°增至 60°，动水压力逐步上升；60°斜入射时，动水压力值仅次于 0°工况，坝前最大动水压力为 61.0 kPa。而当入射角增至 75°时，动水压力再次下降，坝前值为 55.4 kPa，较 60°入射降低 9.2%。

从图 8 可以看出，SV 波在 0°入射时动水压力最大，坝前处为 86.4 kPa；5°斜入射时动水压力最小，坝前为 53.3 kPa，降幅达 38.33%，为该波型下的最大下降。随着 SV 波入射角从 5°增大至 32°，动水压力持续上升。其中 5°、10°和 15°入射时的动水压力值较为接近；32°入射时，各迎水面动水压力仅低于 0°工况，为 SV 波斜入射时的最高值，对坝体安全稳定最为不利[17]。

对比两种波型的作用效应：在 P 波斜入射下，坝前顺水流方向的动水压力平均值最大，左岸垂直水流方向次之，右岸最小；而在 SV 波作用下，虽然坝前动水压力仍最大，但右岸垂直水流动水压力高于左岸，与 P 波作用下的分布规律相反。其主要原因可能在于 P 波与 SV 波的行波方向和振动方向不同，其次也可能在于当地震以波动的形式进行传递时，往往受边坡效应所影响[18]。



(a) P 波斜入射下左岸动水压力　(b) P 波斜入射下右岸动水压力　(c) P 波斜入射下坝前动水压力

(d) SV 波斜入射下左岸动水压力　(e) SV 波斜入射下右岸动水压力　(f) SV 波斜入射下坝前动水压力

图 8　P 波和 SV 波斜入射下动水压力变化趋势图

Fig.8　Trend diagram of hydrodynamic pressure under oblique incidence of P wave and SV wave

4　总结

本文通过采用黏弹性人工边界和边界节点上的等效力代替传统地震动输入模式，以岳城水库土石坝为背景，建立了坝体—库水—地基多结构复杂边界的三维动力斜入射模型，系统分析了 P 波和 SV 波斜入射下坝体结构的动力响应特性，主要结论如下：

（1）P 波斜入射时，坝体动力响应随入射角度增加呈先降-升-降趋势；SV 波斜入射时动力响应随入射角度增加呈先降后升趋势。最不利工况为 P 波 0°和 60°入射、SV 波 0°和 32°入射，此时位移、应力、加速度和动水压力均达到峰值。传统垂直入射假设可能低估特定斜入射工况下坝体的失稳风险，建议在抗震设计中重点关注上述最不利工况。

（2）动水压力分布受波型与入射角度共同影响，SV 波作用下右岸压力显著高于左岸，与 P 波趋势相反，主要归因于波形传播方向差异，次要受边坡效应影响。

针对最不利工况，可在坝踵区域增设抗震锚索

（间距≤5m），锚固深度应穿透潜在滑动面至稳定岩层，以增强抗滑稳定性。本研究可为复杂地形区土石坝的精细化抗震设计提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 高川,宋志强,王宗凯,等.P波SV波随机组合斜入射下沥青混凝土面板堆石坝动力响应研究[J/OL].振动工程学报,2024[2025-09-05].https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20240401.0923.002.[GAO C,SONG Z Q,WANG Z K,et al.Dynamic response of asphalt concrete face rockfill dam under random combination of P wave and SV wave oblique incidence[J/OL].Journal of Vibration Engineering,2024[2025-09-05]..https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20240401.0923.002]

[2] 章小龙,李小军,陈国兴,等.黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J].力学学报,2016,48(5):1126-1135.[ZHANG X L,LI X J,CHEN G X,et al.An improved method of the calculation equivalent in viscous-elastic artificial boundary[J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2016,48(5):1126-1135.]

[3] 张懂懂,刘洋,熊峰,等.P波与SV波斜入射下岩体隧道洞口段地震响应分析[J].振动与冲击,2022,41(24):278-286.[ZHANG D D,LIU Y,XIONG F,et al.Seismic response analysis of tunnel near-portal under oblique incidence of P wave and SV wave[J].Journal of Vibration and Shock,2022,41(24):278-286.]

[4] 杨永斌,刘鹏,周泽洋,等.P/SV波任意角斜射下山岭-含水谷场地地震动分析[J].岩土工程学报,2025,47(5):889-902.[YANG Y B,LIU P,ZHOU Z Y,et al.Seismic analysis of irregular topography of hill and water-filled valley under oblique incident P- and SV-waves[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2025,47(5):889-902.]

[5] 张树茂,周晨光,邹德高,等.地震波倾斜入射对土石坝动力反应的影响[J].水电能源科学,2014,32(8):72-75+119.[ZHANG S M,ZHOU C G,ZOU D G,et al.Influence of oblique incidence of seismic waves on dynamic response to rock-fill dam[J].Water Resources and Power,2014,32(8):72-75,119.]

[6] GAO X W,DAVIES T G.3-D infinite boundary elements for half-space problems[J].Engineering Analysis with Boundary Elements,1998,21(3):207-213.

[7] 何建涛,马怀发,张伯艳,等.黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J].水利学报,2010,41(8):960-969.[HE J T,MA H F,ZHANG B Y,et al.Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J].SHUILI XUEBAO,2010,41(8):960-969.]

[8] 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 L,WANG L,ZHOU X L,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.]

[9] 宝鑫,刘晶波,李述涛,等.土-结构相互作用对储液结构动力反应的影响研究[J].工程力学,2021,38(增刊1):125-132.[BAO X,LIU J B,LI S T,et al.Influence analysis of soil-structure interaction on the dynamic response of storage tanks[J].Engineering Mechanics,2021,38(S1):125-132.]

[10] 王卓然,武雄.周边采煤活动对岳城水库库区大坝和坝基的渗流影响研究[J].地学前缘,2018,25(1):276-285.[WANG Z R,WU X.Seepage effects of surrounding coal mining activities on dam and foundation of Yuecheng Reservoir[J].Earth Science Frontiers,2018,25(1):276-285.]

[11] 刘远财,张水锋,张毅飞.不同库水模型对面板堆石坝动力特性和地震响应的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):115-123.[LIU Y C,ZHANG S F,ZHANG Y F.Effects of different reservoir water models on dynamic characteristics and seismic response of concrete-faced rockfill dam[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2025,46(1):115-123.]

[12] 陈震,李长永.高进水塔地震波斜波入射有限元分析[J].人民黄河,2012,34(3):131-133.[CHEN Z,LI C Y.Finite element analysis of high intake tower with oblique incident seismic wave[J].Yellow River,2012,34(3):131-133.]

[13] LYU D Y,MA S,YU C,et al.Effects of oblique incidence of SV waves on nonlinear seismic response of a lined arched tunnel[J].Shock and Vibration,2020,20201-12.

[14] CHEN D H,PAN Z Y,ZHAO Y Y.Seismic damage characteristics of high arch dams under oblique incidence of SV waves[J].Engineering Failure Analysis,2023,152:107455.

[15] 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 X Y,LIU X H,JIANG L.Analysis of seismic dynamic failure mechanism of large aqueduct structures under strong earthquakes[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2022,43(4):48-53.]

[16] 朱代富,张继勋,任旭华.地震波斜入射下重力坝的动响应

分析[J].水力发电,2021,47(9):64-69.[ZHU D F,ZHANG J X,REN X H.Dynamic response analysis of gravity dam under oblique seismic wave[J].Water Power,2021,47(9):64-69.]

[17] 刘云辉,陈灯红,潘子悦,等.SV 波斜入射下 Nam Ngum 5 拱坝-库水-地基系统的地震响应分析[J].地震工程与工程振动,2023,43(06):216-226.[LIU Y H,CHEN D H,PAN Z Y,et al.Seismic response analysis of Nam Ngum 5 arch dam-reservoir water-foundation system under oblique incidence of SV waves[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2023,43(6):216-226.]

[18] 周鹏,崔杰,李亚东,等.地震 P 波斜入射下入射角度对海底沉管隧道结构动力响应的影响[J].世界地震工程,2016,32(3):78-85.[ZHOU P,CUI J,LI Y D,et al.Effect of oblique incident angle of P-wave on submarine immersed tunnels[J].World Earthquake Engineering,2016,32(3):78-85.]

Dynamic Response Analysis of Earth-Rockfill Dams Under Oblique Incidence of P-Waves and SV-Waves

ZHENG Xiaodong[1,2],CHENG Lin[1,2],MA Jing[1,2],ZHANG Yunbao[3]

(1.College of Water Conservancy and Hydropower,Hebei University of Engineering,Handan 056038,China; 2.Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy,Handan 056038,China; 3.Hebei Research Institute of Water Resources,Shijiazhuang 050057,Hebei,China)

Abstract:【Objective】 To explore the influence of oblique incidence of P wave and SV wave on the dynamic response of earth-rock dam.【Method】 Taking the main dam of Yuecheng Reservoir as an example,a three-dimensional finite element model of earth-rock dam,dynamic water and foundation is established to simulate the seismic response of earth-rock dam under different incident angles of P wave and SV wave.【Result】 The most unfavorable working conditions are 0 vertical incidence and 60 oblique incidence of P wave and 0 and 32 oblique incidence of SV wave.At this time,the downstream displacement,principal tensile stress,acceleration and hydrodynamic pressure of the dam reach the peak.When the incident angle changes from vertical to inclined,the dynamic response decreases the most,which significantly affects the safety and stability of the dam.【Conclusion】 There is a nonlinear relationship between oblique incidence angle of seismic wave and dam response.The traditional assumption of vertical incidence may underestimate the risk of dam instability under specific oblique incidence conditions; This study can provide theoretical support for refined seismic design and disaster early warning of earth-rock dams in complex terrain areas.

Keywords:P-wave; SV-wave; incidence angle; dynamic response; earth-rockfill dam