

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

高 川, 宋志强, 王宗凯, 李 闯

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 地震波组合入射角度的不确定性往往对面板堆石坝的动力响应具有显著影响。本文通过波场叠加原理, 将地表控制点的运动场进行分解, 根据二维反演得到入射 P 波、SV 波时程, 构建了地震波组合斜入射波动输入模型。通过数论选点法, 对构建的波动输入模型中的入射 P 波与 SV 波的角度进行抽样随机选取, 通过进行不同组合入射角度下的动力计算, 研究了组合入射角度不确定性对沥青混凝土面板堆石坝地震响应的影响规律。以某实际工程为例, 通过分析建基面水平向峰值加速度、面板应力及加速度、坝体水平向峰值加速度及永久变形等响应的均值、变异系数、95% 的置信区间限值及极值差异等统计规律及分布类型, 并与地震波垂直入射情况进行了对比, 分析了随机组合入射角度和输入地震动强度对随机响应离散程度和概率分布的影响。结果表明: 考虑组合入射角度不确定性会引起坝体建基面地震响应离散性增大; 面板主拉应力最大值相比垂直入射下的计算结果至少增大了 40%; 对坝顶和面板顶水平峰值加速度的影响大于对永久变形的影响; 三组地震波的永久变形与垂直入射的结果相比均有 70% 以上的超越概率; 坝体的地震响应统计结果不一定符合正态分布; 覆盖层地震响应结果的离散程度大于坝体。

关键词: 沥青混凝土面板堆石坝; 随机组合斜入射; 设计地震动; 峰值加速度; 永久变形

中图分类号: TV641.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202310028

Dynamic response of asphalt concrete face rockfill dam under random combination of P wave and SV wave oblique incidence

GAO Chuan, SONG Zhiqiang, WANG Zongkai, LI Chuang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The uncertainty of the combined incidence angle of seismic waves often has a significant effect on the dynamic response of faced rockfill DAMS. In this paper, the motion field of surface control points is decomposed by the principle of wave field superposition, and the time history of incident P and SV waves is obtained by two-dimensional inversion. The angle of incident P wave and SV wave in the wave input model are randomly selected by the method of number theory. The influence of the uncertainty of combined incident angle on the seismic response of asphalt concrete faced rockfill dam is studied by the dynamic calculation of different combined incident angles. Taking a practical project as an example, by analyzing the mean value, coefficient of variation, 95% confidence interval limit and extreme value difference of the horizontal peak acceleration of foundation surface, panel stress and acceleration, dam body horizontal peak acceleration and permanent deformation, and other statistical laws and distribution type tests, and compared with the vertical incidence of seismic waves, The influence of random combination incidence Angle and input ground motion intensity on random response dispersion degree and obedience probability distribution is analyzed. The results show that considering the uncertainty of the combined incidence angle, the seismic response dispersion of the foundation surface of the dam will increase. The maximum principal tensile stress of the panel increases by at least 40% compared with the calculated result of vertical incidence. The influence of the horizontal peak acceleration on the dam crest and the panel crest is greater than that on the permanent deformation. Compared with the results of vertical incidence, the permanent deformation of the three groups of seismic waves has a transcendental probability of more than 70%. The statistical results of seismic response of dam body may not accord with normal distribution. The dispersion of seismic response results of overlay layer is greater than that of dam body.

收稿日期: 2023-10-12; **修订日期:** 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039008); 陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-276); 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(22JP052)

Keywords: asphalt concrete face rockfill dam; random combination oblique incidence; design ground motion; peak acceleration; permanent deformation

中国西部地区水能资源分布广泛,该地区地震烈度相对较高,使得水利水电工程的抗震安全面临着很大的挑战^[1]。沥青混凝土面板堆石坝具有防渗性好、适应变形能力强和工程造价低廉等优点,是水能资源利用和开发首选的一类坝型^[2]。因此如何开展沥青混凝土面板堆石坝抗震安全问题的研究显得更加重要^[3]。

李闯等^[4]以 El-Centro 波作为坝体建基面控制点的设计地震动,研究了 P 波与 SV 波在不同组合入射角度下沥青混凝土土墙坝-覆盖层地基系统的动力响应;王飞等^[5]将测站实测的天然地震波作为控制面的设计地震动,研究了在设计地震动下不同斜入射角度对土石坝地震响应的影响;李明超等^[6]和 SUN 等^[7]将地表的设计地震动分级调幅至实测的一半,并将调幅的地震动时程作为基岩底部的入射波时程,分别研究了重力坝和水工隧洞在不同入射角度下的地震响应;王洋洋等^[8]将场址条件合成的场址人工波作为输入地震波,研究了 P 波、SV 波在不同入射角度下对坝后式厂房上下游混凝土墙损伤的影响;何卫平等^[9]以多条 Ricker 子波作为重力坝基岩底部 P 波和 SV 波的入射时程,研究了不同斜入射角度下重力坝的动力响应;苑举卫等^[10]采用 Koy-na 地震波将峰值加速度按比例进行调幅,作为基岩底部斜输入的入射地震波,研究了重力坝坝踵和地基刚度在不同斜入射角度下的动力响应规律。孙纬宇等^[11]以宁河波、Northridge 波及 El-Centro 波作为入射波,研究了 P 波和 SV 波在不同入射角度下河谷场地地震动放大系数的分布规律。

沥青混凝土面板堆石坝基底部位向上下游延伸尺度大,覆盖层与地基边界的地震动构成成分复杂^[12],对于实际的天然近场地震动,由基岩到达地表的传输过程中,地震动实际的入射方向是不确定的,在以往的地震响应研究中,普遍都采用的是无质量地基输入或者黏弹性边界波动输入,并以垂直入射的方式去模拟实际的天然地震动入射,难以模拟 P 波和 SV 波的实际组合入射情况,而在进行单波斜入射和组合斜入射时,都是提前假定已知入射角度,然后去分析坝体的地震响应规律。

实际上,P 波、SV 波的组合入射角度具有不确定性,开展 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研究,揭示入射角度的随机性对面板应力、坝体加速度和永久变形等地震响应的规律具有重要意义。

1 基于地表设计地震动的 P 波、SV 波随机组合斜入射模拟

1.1 基于地表控制点设计地震动基岩入射波确定

近地表入射的地震动存在着各种不同的成分,实际的地表设计地震动构成也并不只是一种类型的波,而是通过对多种波进行叠加形成的。如图 1 所示,真实的地震波在传播的过程中,经过不同的界面会发生折射与反射,当地震波以斜入射的方式进行传播时,对应的剪切波和压缩波在反射生成相同种类反射波的同时,还会生成另外一种不同类型的反射波。在地表控制点处的地震动则是由两种波共同作用形成的^[13]。

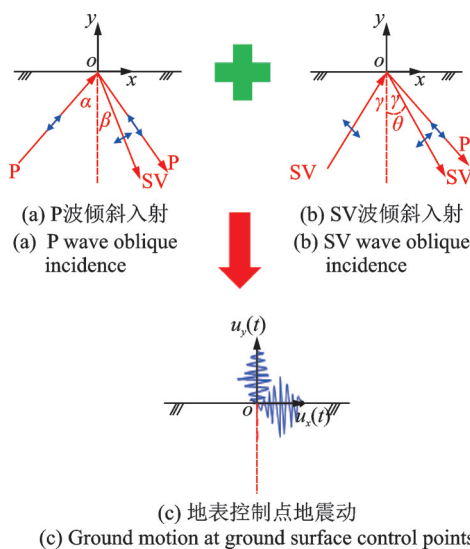


图 1 地表控制点地震动构成

Fig. 1 Ground motion formation of ground surface control points

根据一维波动理论和波场叠加原理,P 波和 SV 波产生的水平向和竖向自由场可分别表示为:

$$\begin{cases} u_x^P(t) = g(t - \Delta t_1) \sin \alpha + A_1 g(t - \Delta t_2) \cdot \sin \alpha - \\ \quad A_2 g(t - \Delta t_3) \cos \beta \\ u_y^P(t) = g(t - \Delta t_1) \cos \alpha - A_1 g(t - \Delta t_2) \cdot \cos \alpha - \\ \quad A_2 g(t - \Delta t_3) \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_x^{SV}(t) = f(t - \Delta t_4) \cos \gamma - B_1 f(t - \Delta t_5) \cdot \cos \gamma + \\ \quad B_2 f(t - \Delta t_6) \sin \theta \\ u_y^{SV}(t) = -f(t - \Delta t_4) \sin \gamma - B_1 g(t - \Delta t_5) \cdot \sin \gamma - \\ \quad B_2 f(t - \Delta t_6) \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中, $g(t)$ 、 $f(t)$ 分别为入射 P 波、SV 波响应时程; Δt_1 为入射 P 波的延迟时间; Δt_2 为反射 P 波的延迟时间; Δt_3 为入射 P 波所产生的反射 SV 波的延迟时间; Δt_4 为入射 SV 波的延迟时间; Δt_5 为反射 SV 波的延迟时间; Δt_6 为入射 SV 波所产生的反射 P 波的延迟时间; u_x^p 为 P 波对应形成的水平向位移; u_y^p 为 P 波对应形成的竖向位移; u_x^{sv} 为 SV 波对应形成的水平向位移; u_y^{sv} 为 SV 波对应形成的竖向位移; A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 分别为入射 P 波与反射 P 波、入射 P 波与反射 SV 波、入射 SV 波和反射 SV 波与入射 SV 波与反射 P 波的振幅比值; α 为 P 波入射角; β 为 SV 波的反射角; γ 为 SV 波入射角; θ 为 P 波的反射角。

根据 Snell 定理, 即可推导得到^[14]:

$$\sin \alpha / c_p = \sin \beta / c_s \quad (3)$$

$$\sin \gamma / c_s = \sin \theta / c_p \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{c_s^2 \sin(2\alpha) \sin(2\beta) - c_p^2 \cos^2(2\beta)}{c_s^2 \sin(2\alpha) \sin(2\beta) + c_p^2 \cos^2(2\beta)} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{-2c_s c_p \sin(2\alpha) \sin(2\beta)}{c_s^2 \sin(2\alpha) \sin(2\beta) + c_p^2 \cos^2(2\beta)} \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{c_s^2 \sin(2\gamma) \sin(2\theta) - c_p^2 \cos^2(2\theta)}{c_s^2 \sin(2\gamma) \sin(2\theta) + c_p^2 \cos^2(2\theta)} \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{-2c_s c_p \sin(2\gamma) \sin(2\theta)}{c_s^2 \sin(2\gamma) \sin(2\theta) + c_p^2 \cos^2(2\theta)} \quad (8)$$

式中, c_p 、 c_s 分别为 P 波、SV 波波速。

根据式 (3) 和 (4), SV 波在反射的过程中波形有所变换, SV 波在发生反射时存在着临界角, $\gamma_{cr} = \arcsin(c_s/c_p)$, 当 SV 波不在对应的角度范围内, 则无法形成平面反射波^[15], 故在本文选取的 SV 波入射角均控制在临界角的范围内。

将 $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 二者进行矢量叠加即可得出对应的位移时程。把 SV 波及其反射波定义为 SV 波系列组, P 波及其反射波定义为 P 波系列组。如何求解入射 P 波、SV 波时程成为求解空间任意位置自由场的关键问题。假定 P 波、SV 波在同一时间点到达地表控制点 $O(x, y)$, 并将该时间点的波阵面位置定义为零时刻波阵面所在位置, 则 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 、 Δt_4 、 Δt_5 、 Δt_6 时间延迟都为 0, 将其代入式 (1) 和 (2) 可以得到如下式所示的 P 波、SV 波的水平向和竖向响应:

$$\begin{cases} u_x(t) = Pg(t) + Rf(t) \\ u_y(t) = Qg(t) - Sf(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中, P 为 P 波对地表水平向的贡献度, Q 为 P 波对地表竖向的贡献度, R 为 SV 波对地表水平向的贡献度, S 为 SV 波对地表竖向的贡献度, 按照下式计算:

$$\begin{cases} P = \sin \alpha + A_1 \sin \alpha - A_2 \cos \beta \\ Q = \cos \alpha - A_1 \cos \alpha - A_2 \sin \beta \\ R = \cos \gamma - B_1 \cos \gamma + B_2 \sin \theta \\ S = \sin \gamma + B_1 \sin \gamma + B_2 \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (3)~(10), 在入射角、对应波速、地表水平向设计地震动 $u_x(t)$ 和竖向设计地震动 $u_y(t)$ 都给定的情况下, 即可反演得到基岩底部入射波时程。

本文研究的是随机选取 P 波入射角 α 和 SV 波入射角 γ 的情况下, 依据设计地震动反演基岩入射波时程, 分析沥青混凝土面板堆石坝地震响应的统计规律。

1.2 基于数论选点法的随机组合入射角度生成

地震波组合斜入射包含 2 个随机角度, 首先需要对组合入射角度进行随机选取。有关多维随机变量问题, 运用蒙特卡罗法产生的样本点, 容易使得样本点产生局部集中^[16]。在保持整体样本数量一定的情况下, 蒙特卡罗法难以全面均匀地覆盖概率分布空间, 可能会较大程度地影响随机响应的结果^[17]。如果增加样本数量, 有限元的计算效率将会下降^[18]。

为了使得选取的角度样本均匀地分布在给定的入射角度区域范围内, 本文引入数论选点法来实现组合入射角度随机选取, 该方法能够较好地使样本点均匀地覆盖概率分布空间^[19]。

本文通过运用数论选点法中的 good lattice point (GLP) 生成区间范围内的代表性点集。通过下式可以得到 $[0, 1]^s$ 内的 GLP 点集, 对于二维基本随机变量, 本文选取 233 个代表性点集, h_1, h_2, \dots, h_s 取值参见文献[20]。

$$x_{k,i} = \frac{h_i k}{n} - \text{fix}\left(\frac{h_i k}{n}\right); k=1, 2, \dots, 233; i=1, 2 \quad (11)$$

式中, k 为代表性点集的序号数; i 为点集维数; n 为代表性点集的总个数; h_1, h_2 为对应维度的系数。

图 2 给出了应用数论选点法生成的区间 $[0, 1]$ 内点集的二维空间分布。将生成的二维代表性点集进行缩放变换, 即将每个随机点的横坐标扩大 60 倍, 纵坐标扩大 30 倍即可得到本文选定的 P 波入射角和 SV 波入射角, 对应的 P 波入射角范围为 $[0^\circ, 60^\circ]$, SV 波入射角的范围为 $[0^\circ, 30^\circ]$ 。

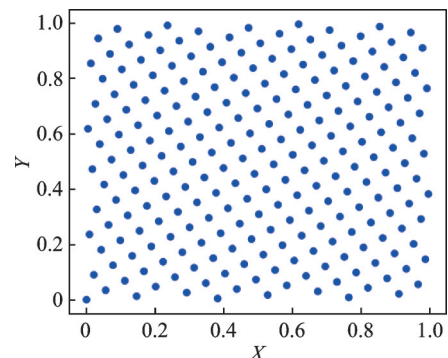


图 2 数论选点法生成的数据点集分布

Fig. 2 Data point set distribution generated by number theory point selection method

1.3 设计地震动选取和计算工况

本文选取 El-Centro 波和 Kobe 波 EW 向和竖向记录分别作为控制点水平向和竖向设计地震动。将 El-Centro 波的水平向和竖向记录分别调幅为 0.2g 和 0.13g 作为 1st 地震波, El-Centro 波的水平向和竖向记录分别调幅为 0.4g 和 0.26g 作为 2nd 地震波, 将 Kobe 波的水平向和竖向记录分别调幅为 0.4g 和 0.26g 作为 3rd 地震波。图 3 给出了计算采用的 3 条波的水平向和竖向地震动加速度时程, 持续时间统一截取为 20 s。每一条地震波对应 233 种不同组合入射角度的反演、输入和计算分析, 三条波共进行 699 种工况的计算。计算工况涵盖了相同设计地震动下, 不同组合入射角度的工况, 也涵盖了相同组合入射角度下, 不同设计地震动的工况。

1.4 P 波、SV 波随机组合斜输入方法

从测站获取的真实天然地震波都是提前假定零时刻 P 波与 SV 波的波阵面相交于地表控制点。而

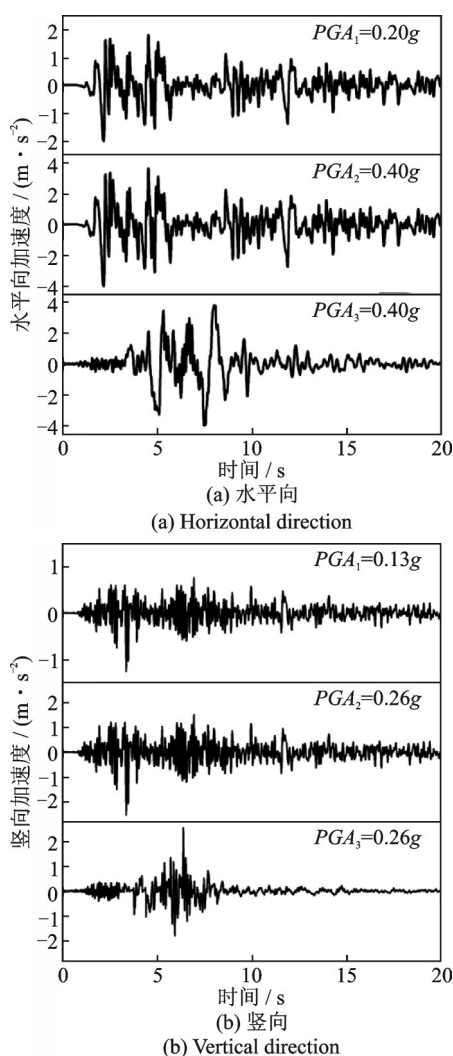


图3 计算采用的控制点地震动加速度时程曲线

Fig. 3 Ground motion acceleration time-history curves of control point used in calculation

实际应用中需要将波阵面从控制点移动到点(0,0)的位置。由波动输入理论可知,P波、SV波从点(0,0)到任意点(x,y)的传播时间分别为^[4]:

$$\Delta t_P = \frac{x \sin \alpha + y \cos \alpha}{c_P} \quad (12)$$

$$\Delta t_{SV} = \frac{x \sin \gamma + y \cos \gamma}{c_S} \quad (13)$$

式中, Δt_P 、 Δt_{SV} 分别为P波、SV波波阵面从点(0,0)到点(x,y)的时间。

取 $\Delta t_{in} = \max(\Delta t_P, \Delta t_{SV})$, 将 P 波和 SV 波波阵面同时由控制点向与波传播相反的方向移动 Δt_{in} 时间对应的距离, 即可得到零时刻的波阵面位置。通过式(1)与(2)可以确定在已知入射波的情况下自由场的计算。在已知 P 波、SV 波的入射角 α 、 γ 时, 任意位置 (x_0, y_0) 的时间计算如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = [x_0 \sin \alpha - (H - y_0) \cos \alpha] / c_P \\ \Delta t_2 = [x_0 \sin \alpha + (H - y_0) \cos \alpha] / c_P \\ \Delta t_3 = \{ [x_0 \sin \alpha - (H - y_0) \tan \beta \cdot \\ \quad \sin \alpha] / c_P \} + (H - y_0) / (c_S \cos \beta) \\ \Delta t_4 = (x_0 \tan \gamma - H + y_0) \cos \gamma / c_S \\ \Delta t_5 = [x_0 \sin \gamma + (H - y_0) \cos \gamma] / c_S \\ \Delta t_6 = \{ [x_0 \sin \gamma - (H - y_0) \tan \theta \cdot \\ \quad \sin \gamma] / c_S \} + (H - y_0) / (c_P \cos \theta) \end{cases} \quad (14)$$

式中, H 为地表控制点到地震波入射点的高度。

将对应不同波的时间延迟代入式(1)和(2)中, 即可得到 P 波或 SV 波共同作用下空间任一点的单波地震动时程。通过将 P 波和 SV 波对应的响应进行矢量叠加, 当地表控制点恒定时, 即可得到该控制点的地震动自由场。

本文计算采用黏弹性边界对地震动进行斜输入, 拟合地基的辐射阻尼效应。单位影响面积下弹簧阻尼的系数求解如下式所示^[21]:

$$\begin{cases} K_{BN} = E / (2R) \\ K_{BT} = G / (2R) \\ C_{BN} = \rho c_P \\ C_{BT} = \rho c_S \end{cases} \quad (15)$$

式中, K_{BN} 为法向弹簧刚度系数; K_{BT} 为切向弹簧刚度系数; C_{BN} 为法向阻尼系数; C_{BT} 为切向阻尼系数; ρ 为地基密度; E 为地基弹性模量; G 为剪切模量; R 为散射波源点到边界点的距离, 散射波源的位置在坝体建基面中心。

刘晶波等^[22]通过边界节点处的等效节点力来模拟地震动斜输入时的自由场:

$$F_B = (K_B u_B + C_B \dot{u}_B + N \sigma_B) A_B \quad (16)$$

式中, K_B 为弹簧刚度系数; C_B 为阻尼系数; u_B 和 \dot{u}_B 分

别为节点的位移时程和速度时程; N 为边界处对应的法线方向余弦; σ_B 为节点应力; A_B 为节点影响面积。

P 波和 SV 波入射底边界的速度场和位移场在前面已经推导, 通过下式可以得到底边界应力场:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x(t) &= \frac{G \sin(2\alpha)}{c_p} [\dot{u}_p(t - \Delta t_1) + A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2)] + \frac{G \sin(2\gamma)}{c_s} [\dot{u}_{sv}(t - \Delta t_4) + B_1 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_5)] + \frac{G \sin(2\beta)}{c_s} A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) + \frac{G \sin(2\theta)}{c_p} B_2 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_6) \\ \sigma_y(t) &= \frac{\lambda + 2G \cos^2 \alpha}{c_p} [\dot{u}_p(t - \Delta t_1) - A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2)] + \frac{G \sin^2 \gamma}{c_s} [-\dot{u}_{sv}(t - \Delta t_4) + B_1 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_5)] + \frac{G \sin(2\beta)}{c_s} A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) - \frac{\lambda + 2G \cos^2 \theta}{c_p} B_2 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_6) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

式中, λ 为拉梅常数; u_p 、 u_{sv} 分别为 P、SV 波对应形式的竖向、水平向速度场。

最终通过式(16)即可计算底边界处的等效节点力。侧边界同理进行输入。

1.5 组合斜输入方法验证

为验证本文组合斜输入方法的正确性与精度, 建立有限域地基模型如图 4 所示, 其中模型长为 400 m, 宽为 200 m, 取顶部左、中、右三个监测点进行分折。地基密度为 2000 kg/m³, 弹性模量为 1.3 GPa, 泊松比为 0.25, 入射 P 波波速为 883 m/s, 入射 SV 波波速为 510 m/s。取模型顶部中点为控制点, 该点对应的的设计地震动的位移时程按下式进行计算, 时间间隔为 0.01 s, 总时长为 2 s。

$$u(t) = \begin{cases} 2\sin(4\pi t) - \sin(8\pi t), & 0 \leq t \leq 0.5 \text{ s} \\ 0, & t > 0.5 \text{ s} \end{cases} \quad (18)$$

图 5 和 6 给出了 P 波和 SV 波入射角均为 30° 时

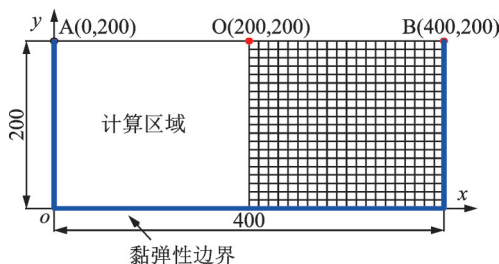


图 4 有限域地基模型图(单位:m)

Fig. 4 Finite domain foundation model diagram (Unit: m)

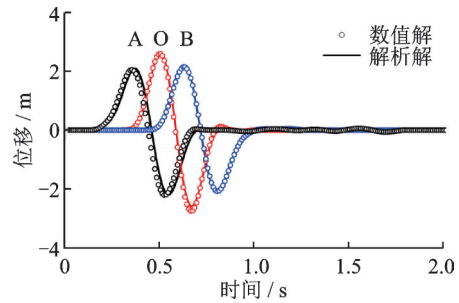


图 5 水平向位移时程对比图

Fig. 5 Horizontal direction displacement time-history comparison diagram

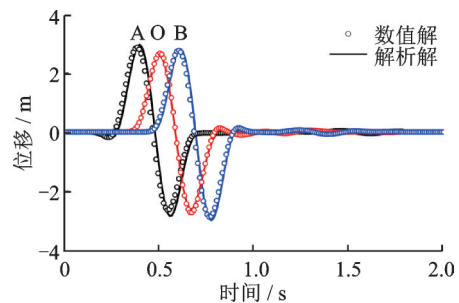


图 6 竖向位移时程对比图

Fig. 6 Vertical direction displacement time-history comparison diagram

A、O、B 三个监测点两向位移时程对比。可以看出, 解析解和数值解拟合较好, 验证了上述地震动二维反演和组合斜输入方法的正确性与精度。

2 沥青混凝土面板堆石坝模型及计算参数

2.1 工程概况及有限元模型

本文以某实际沥青混凝土面板堆石坝为研究对象。坝的高度为 73.76 m, 坝顶的宽度为 17.87 m, 坝顶高程为 1656.00 m, 上游坝坡坡比为 1:1.7, 上游正常蓄水位为 1654.20 m, 下游坝坡坡比在 1634.00 m 高程以上为 1:1.8, 以下为 1:2.0, 并在高程 1634.00、1614.00 和 1594.00 m 处设置 5 m 宽马道, 沥青混凝土面板水平厚为 0.4 m。

坝体材料分区及有限元网格模型如图 7 所示, 单元类型采用平面四节点等参单元, 共包括 15844 个单元和 16325 个结点。覆盖层与基岩厚度共 150 m, 将覆盖层分别向上、下游方向延伸距离为 10 倍的覆盖层厚度, 即 1500 m。沥青混凝土面板与垫层 2A 区采用 Goodman 接触。静力计算边界条件为基岩与覆盖层左右边界节点采用法向约束, 基岩底部为全约束。动力计算则是通过对控制点的地震动进行反演, 将反演的地震动从基岩的左端底部进行斜输入。

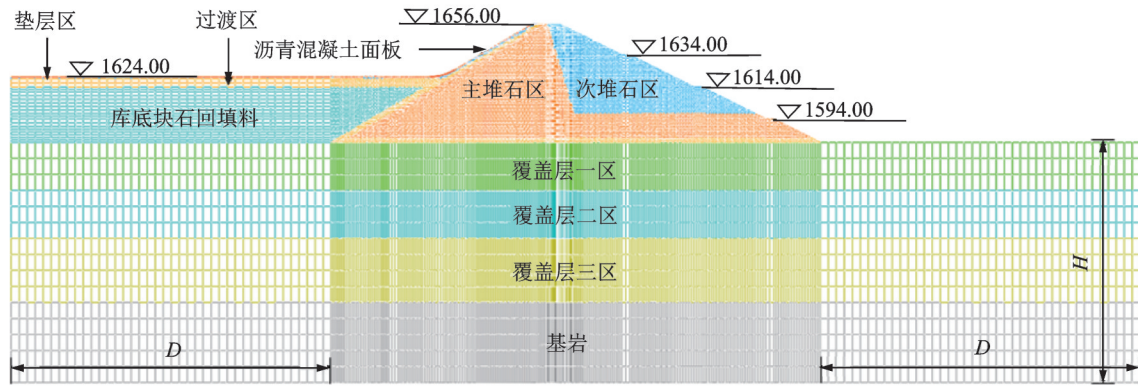


图7 沥青混凝土面板堆石坝部分有限元网格模型及材料分区图(单位:m)

Fig. 7 Finite element mesh model and material partition diagram of asphalt concrete face rockfill dam (Unit: m)

2.2 覆盖层和坝体材料本构模型及参数

沥青混凝土面板堆石坝的动力响应分析包括静动力计算和永久变形计算,覆盖层土体和坝体堆石料本构模型选取分别如下:

对于静力计算,本文采用邓肯-张 E-B 模型。

$$E_i = KPa(\sigma_3/Pa)^{n_1} \quad (19)$$

$$E_t = E_i \left[1 - \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} R_f \right]^2 \quad (20)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/Pa) \quad (21)$$

$$B = K_b Pa(\sigma_3/Pa)^m \quad (22)$$

式中, E_i 和 E_t 分别为初始切线模量和切线模量; c 和 φ 分别表示黏聚力和内摩擦角; R_f 为破坏比; K 为切线模量系数; n_1 为切线模量指数; m 为体积模量指数; φ_0 为初始摩擦角; $\Delta\varphi$ 为摩擦角变化值; K_b 为体积模量系数; B 为切线体积模量; Pa 为标准大气压强; K_{ur}/K 可由上述参数确定。 σ_1 和 σ_3 分别表示第一和第三主应力。

对于动力计算,本文采用等效线性黏弹性模型。剪切模量:

$$G = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} Pa \left(\frac{\sigma'_m}{Pa} \right)^{n''} \quad (23)$$

阻尼比:

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (24)$$

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{\max} \left(\frac{\sigma'_m}{Pa} \right)^{n''-1} \quad (25)$$

式中, σ'_m 为震前围压; γ_{\max} 为最大动剪应变; k_1, k_2, n'' 为试验所决定的材料参数; λ, λ_{\max} 分别为阻尼比、最大阻尼比; $\bar{\gamma}_d$ 为剪应变。

对于永久变形计算,本文采用沈珠江模型^[23]。

动力残余体积应变增量:

$$\Delta\epsilon_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (26)$$

$$\Delta\gamma_r = c_4 \gamma_d^{c_5} S_1^2 \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (27)$$

式中, ΔN 为时段增量; N 为总振动次数; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 为模型参数; S_1 为应力水平。

表1给出了材料有限元静力计算参数;表2给出了Goodman接触模型计算参数,表3给出了材料有限元动力计算及永久变形计算参数。

表1 材料有限元静力计算参数

Tab. 1 Finite element static force calculation parameters of materials

位置	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	K	n_1	R_f	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	Pa/kPa	K_b	m	K_{ur}/K
主堆石区	2.30	770	0.32	0.65	0	47	100	398.2	0.06	2.00
次堆石区	2.25	720	0.35	0.72	0	45	100	389.3	0.03	2.00
过渡区	2.09	650	0.52	0.89	0	50	100	561.1	0.05	2.00
垫层区	2.20	1000	0.52	0.67	0	42	100	358.8	0.23	2.00
覆盖层一区	2.24	990	0.68	0.76	80	38	100	283.0	0.20	1.95
覆盖层二区	1.55	1170	0.68	0.59	60	39	100	276.0	0.17	1.80
覆盖层三区	1.44	990	0.70	0.70	80	38	100	253.0	0.15	1.75
库底块石料	1.62	1620	0.65	0.65	70	40	100	261.0	0.18	1.87
沥青混凝土	2.43	350	0.33	0.76	200	25	100	1035.6	0.99	1.97

表 2 Goodman 模型参数

Tab. 2 Goodman model parameters

参数	取值
k_1	3200
k_2	3200
n''	0.42
R_f	0.7
δ	36
$\gamma_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	9.8
Pa / kPa	100

注: k_1, k_2, n'', R_f 为土体的非线性参数; δ 为土体与结构间的摩擦角; γ_w 为水的重度。

3 随机组合斜入射结果分析

3.1 坝体建基面水平加速度分析

图 8 给出了考虑组合入射角度不确定性的坝体建基面水平向峰值加速度响应的空间分布以及变异系数图。可以看出,考虑组合入射角度的不确定性且输入的地震动峰值之间存在差异时,坝体建基面峰值加速度响应的空间分布呈现出明显的差异性,且沿覆盖层两端水平峰值加速度处的离散程度明显大于中间。

表 3 材料有限元动力、永久变形计算参数

Tab. 3 Material finite element dynamic and permanent deformation calculation parameters

位置	k_1	k_2	n''	ν	λ_{\max}	$c_1 / \%$	c_2	c_3	$c_4 / \%$	c_5
主堆石区	26.0	2336	0.430	0.330	0.235	10.08	1.35	0	20.14	0.35
次堆石区	25.0	2270	0.425	0.330	0.235	10.38	1.35	0	20.14	0.35
过渡区	24.0	2200	0.420	0.330	0.245	10.02	1.26	0	19.25	0.39
垫层区	20.0	1200	0.385	0.330	0.260	6.90	1.37	0	20.03	0.36
覆盖层一区	15.2	1155	0.618	0.350	0.245	6.73	0.71	0	5.86	1.13
覆盖层二区	17.4	1200	0.612	0.380	0.250	1.36	1.23	0	4.49	1.19
覆盖层三区	16.0	1100	0.648	0.380	0.270	1.18	1.41	0	3.50	1.44
库底块石料	18.6	1404	0.562	0.350	0.238	7.85	0.73	0	5.86	1.28
沥青混凝土	19.0	720	0.470	0.345	0.280	0.03	0.18	0	15.00	0.90

注: 基岩为线弹性材料, 密度为 2.4 g/cm^3 , 弹性模量为 8 GPa , 泊松比为 0.25 , ν 为材料播送比。

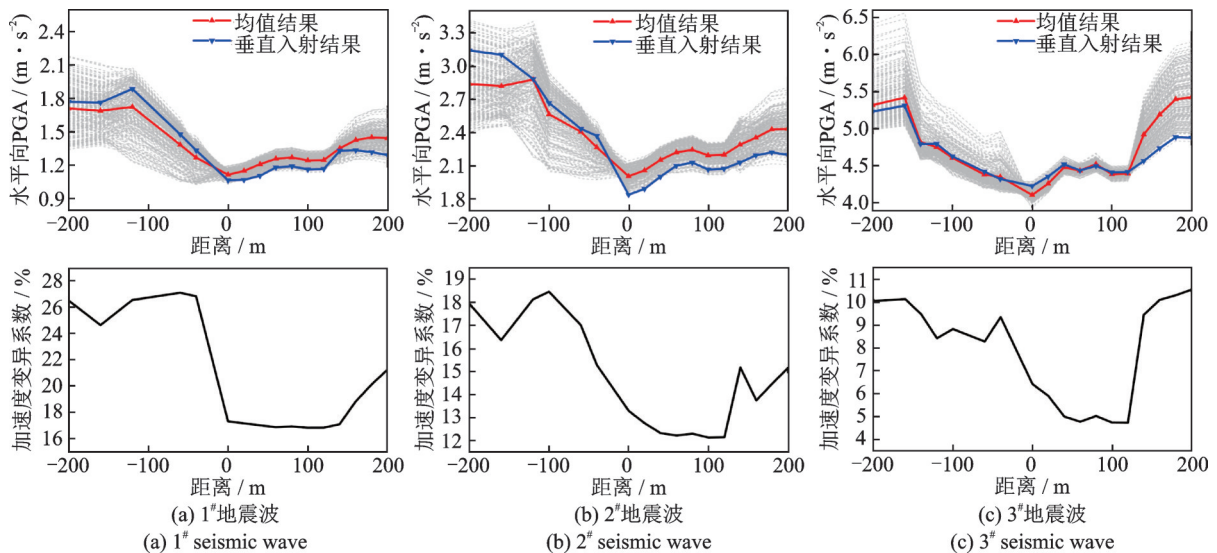


图 8 建基面水平向峰值加速度空间分布及对应的变异系数

Fig. 8 Spatial distribution of horizontal peak acceleration of foundation surface and corresponding coefficient of variation

表 4 给出了坝体建基面水平向峰值加速度各控制点响应,在建基面中点位置,三组地震波在垂直入射下的计算结果分别为 $1.06, 1.84$ 和 4.22 m/s^2 。当考虑组合入射角度不确定性时,三组地震波的均值分别为 $1.11, 2.00$ 和 4.10 m/s^2 。其中三组地震波的计算结果在建基面左端控制点(建基面中点向左

200 m)下的极值差异分别为 $62.8\%, 42.1\%$ 和 28.6% ,在建基面右端控制点(建基面中点向右 200 m)下的极值差异分别为 $40.7\%, 32.9\%$ 和 27.9% ,通过对比三组地震波下的计算结果可以发现,建基面水平向峰值加速度沿上下游方向的变化规律有显著差异,但是在不同地震波下的响应所反

表 4 坝体建基面水平向峰值加速度各控制点响应汇总
Tab. 4 Summary of responses of control points to horizontal peak acceleration on foundation surface of dam body

控制点	地震波	均值	变异系数	中位数	最大值	最小值	极值差异
左端	1 [#]	1.71(1.77)	0.265	1.72	2.18	1.34	62.8%
	2 [#]	2.84(3.14)	0.179	2.81	3.41	2.40	42.1%
	3 [#]	5.31(5.23)	0.100	5.21	6.41	4.98	28.6%
右端	1 [#]	1.44(1.29)	0.212	1.43	1.71	1.22	40.7%
	2 [#]	2.43(2.20)	0.151	2.43	2.80	2.11	32.9%
	3 [#]	5.42(4.88)	0.105	5.40	6.17	4.82	27.9%

注:括号中的数字表示垂直输入下的结果,表中加速度的单位为 m/s^2 。

映的整体趋势大致相同;因此,考虑组合入射角度的不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异对坝体建基面水平向地震响应的影响是有必要的。

3.2 沥青混凝土面板应力与水平加速度分析

表 5 为沥青混凝土面板响应统计表,可以看到,

表 5 沥青混凝土面板响应分析统计表

Tab. 5 Statistical table of response analysis of asphalt concrete panel

参数	面板最大主拉应力			面板顶水平峰值加速度		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
垂直入射	108.73	172.59	168.71	4.32	7.85	7.65
均值	124.20	199.04	206.38	4.03	7.84	8.13
变异系数	0.026	0.021	0.020	0.118	0.066	0.074
中位数	124.40	196.25	207.80	4.04	7.82	8.04
最大值	154.38	249.35	245.14	4.51	8.54	9.30
最小值	102.49	172.59	168.71	3.61	7.33	7.49
A-D统计值	0.688	0.672	1.645	0.682	0.675	1.655
相伴概率 P	0.071	0.068	0.032	0.073	0.062	0.043
95%均值置信区间	[122.87,125.52]	[196.91,201.18]	[204.12,208.64]	[4.004,4.0623]	[7.816,7.885]	[8.077,8.172]

注:表中对应的垂直入射、均值、中位数、最大值、最小值的最大主拉应力单位为 kPa ,对应峰值加速度单位为 m/s^2 。

由表 5 可以得到 3 组地震波下,面板顶峰值加速度响应均值分别为 4.03、7.84 和 8.13 m/s^2 。在垂直入射下的三组地震波加速度响应分别为 4.32、7.85 和 7.65 m/s^2 ,其中 3 组地震波下的极值差异分别为 24.93%、16.51% 和 24.17%。对结果经过 A-D 正态分布检验可以得出,第 1 组和第 2 组的面板顶部水平峰值加速度响应服从正态分布,而第 3 组面板顶部水平峰值加速度响应不服从正态分布。因此,考虑组合入射角度的不确定性,且同时考虑输入地震动峰值之间存在的峰值差异对面板顶部峰值加速度的响应以及服从分布的影响是有必要的。

3.3 坝体顶部水平加速度分析

图 9 和 10 分别为考虑组合入射角度不确定性下

沥青混凝土面板最大主拉应力在 3 组地震波下垂直入射的计算结果分别为 108.73、172.59 和 168.71 kPa ,当考虑地震波组合入射角度不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异时,3 组地震波下的均值分别为 124.20、199.04 和 206.38 kPa ,相比垂直入射下的计算结果至少增大了 10%。面板最大主拉应力均值均大于垂直入射下的计算结果,面板最大主拉应力最大值分别为 154.38、249.35 和 245.14 kPa ,相比垂直入射下的计算结果至少增大了 40%。通过 A-D 统计值与相伴概率等统计参数指标对面板应力结果进行正态分布检验评估,可以得到 3 组地震波在考虑组合入射角度不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异时,第 1 组和第 2 组地震波的最大主拉应力服从正态分布,而第 3 组地震波的最大主拉应力不服从正态分布,因此,考虑组合入射角度的不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异,对面板应力的响应以及服从分布的影响是有必要的。

的坝顶水平峰值加速度柱状分布图及峰值加速度频数分布直方图。红色虚线所示为考虑组合入射角度不确定性下的均值结果,分别为 3.99、7.91 和 8.11 m/s^2 。红色实线所示为垂直入射下的计算结果,分别为 4.28、7.86 和 7.64 m/s^2 ,其中 3 组地震波下的极值差异分别为 26.27%、16.80% 和 24.16%。结合图 9 并通过对 3 组地震波响应结果的变异系数值进行对比,1[#]、2[#]和 3[#]地震波的变异系数分别为 12%、6% 和 7%。1[#]地震波响应结果的离散度较为明显。

在图 10 中可以看到,1[#]地震波和 2[#]地震波的水平峰值加速度响应分布规律具有一定的相似性,2[#]和 3[#]地震波加速度大小分布相似,但是整体分布规律有较大的区别。图 11 为坝顶水平峰值加速度分

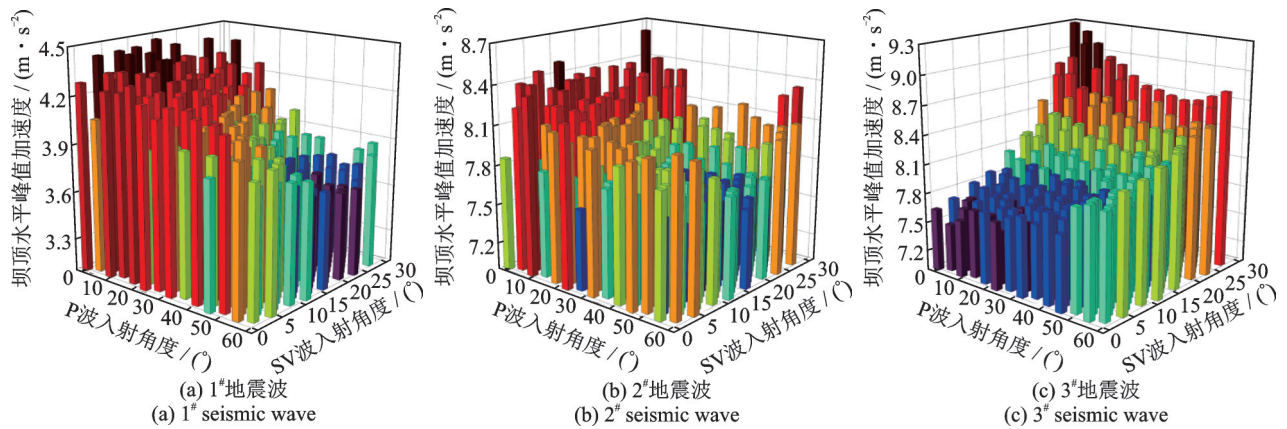


图 9 坝体顶部水平峰值加速度柱状分布图

Fig. 9 Distribution of horizontal peak acceleration at the top of dam body

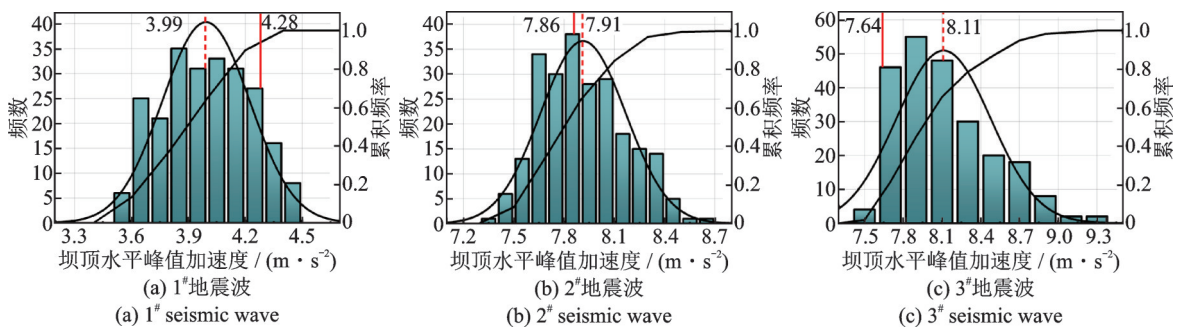


图 10 坝顶水平峰值加速度频数分布直方图

Fig. 10 Histogram of frequency distribution of horizontal peak acceleration of dam crest

布检验图,其中1[#]和2[#]地震波响应结果大多数都在95%置信区间以内,且在45°直线附近。对加速度响应结果进行分布类型检验,如表6所示,1[#]地震波和2[#]地震波的P值大于0.05,服从正态分布,而3[#]地震波的P值小于0.05,不服从正态分布。

通过对3组地震波的计算结果进行对比可知,1[#]、2[#]和3[#]地震波地震响应的统计结果分别为

12.4%、55.4%和96.9%的概率会超过垂直入射下的计算结果,考虑组合入射角度的不确定性会使得坝体地震响应相比垂直入射下的计算结果有较大的超越概率,但在不同的地震波作用下,超越概率有较大不同。因此,考虑组合入射角度的不确定性,且同时考虑输入地震动之间存在的峰值差异对坝体顶部峰值加速度的响应以及服从分布的影响是有必要的。

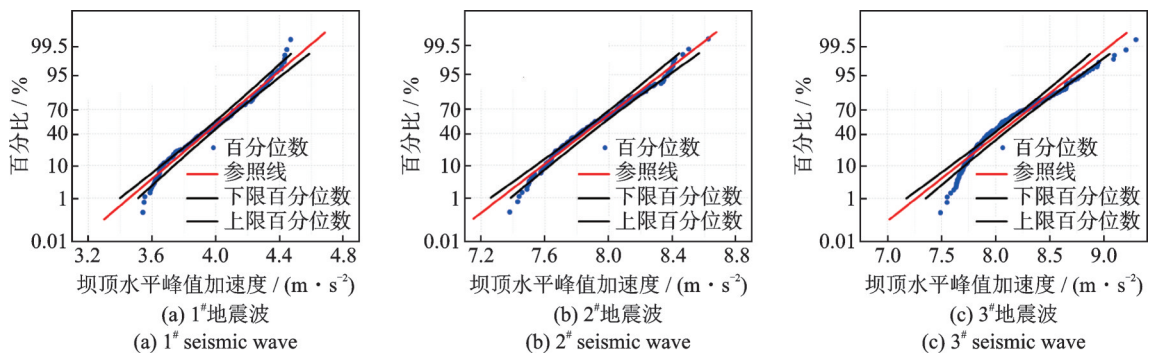


图 11 坝体顶部水平峰值加速度分布检验图

Fig. 11 Distribution test diagram of horizontal peak acceleration at the top of dam body

3.4 坝体永久变形分析

图 12 为坝体竖向永久变形数值随入射角度分布图,可以看到,当 P 波、SV 波入射角度变化时,竖向永久变形也会随之变化。3 组地震波下的竖向永久变形最大值都出现在 P 波入射角度为 2.06°,SV

波入射角度为 28.33°。

图 13 为坝体竖向永久变形的频数分布直方图,在垂直入射下所对应的永久变形的计算结果分别为 16.39、20.42 和 29.11 cm,考虑组合入射角度不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异时,3 组地震波对应计算结果的均值分别为

表6 坝顶水平峰值加速度概率统计参数表

Tab. 6 Table of probability statistical parameters of horizontal peak acceleration of dam crest

地震波	均值	变异系数	中位数	最大值	最小值	A-D统计值	相伴概率P	95%均值置信区间
1 [#]	3.99(4.28)	0.12	3.99	4.47	3.54	0.679	0.062	[3.963, 4.023]
2 [#]	7.91(7.86)	0.06	7.89	8.62	7.38	0.663	0.068	[7.881, 7.946]
3 [#]	8.11(7.64)	0.07	8.04	9.30	7.49	1.672	0.031	[8.065, 8.159]

注:括号中的数字表示垂直输入下的结果,表中加速度的单位为 m/s^2 。

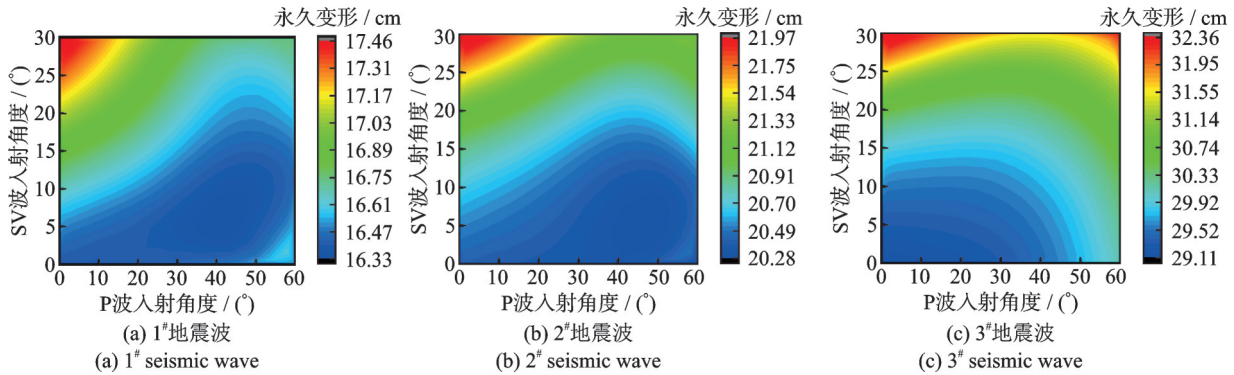


图12 坝体竖向永久变形数值分布

Fig. 12 Numerical distribution of vertical permanent deformation of dam body

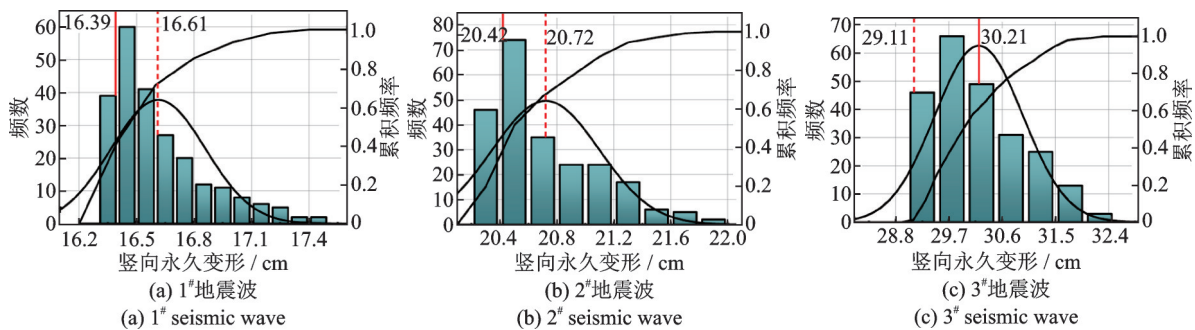


图13 坝体竖向永久变形频数分布直方图

Fig. 13 Histogram of frequency distribution of vertical permanent deformation of dam body

16.61、20.72和30.21 cm,大于垂直入射下的响应结果,3组地震波计算结果的最大值分别为17.45、21.96和32.35 cm,其中极值差异分别为6.86%、8.28%和11.13%。通过与面板顶及坝顶水平向峰值加速度作对比分析,永久变形呈现的离散性相对较弱。

图14为竖向永久变形统计分布检验图,可以看

到大多数数据点与参照线有一定的偏离,且普遍都不在95%的置信区间,并且根据如表7所示的A-D统计值和相伴概率等统计参数可以发现,3组地震波竖向永久变形结果都不服从正态分布。

通过对3组地震波竖向永久变形的计算结果对比分析,3组地震波的竖向永久变形与垂直入射的结果相比均有着70%以上的超越概率。因此,考虑

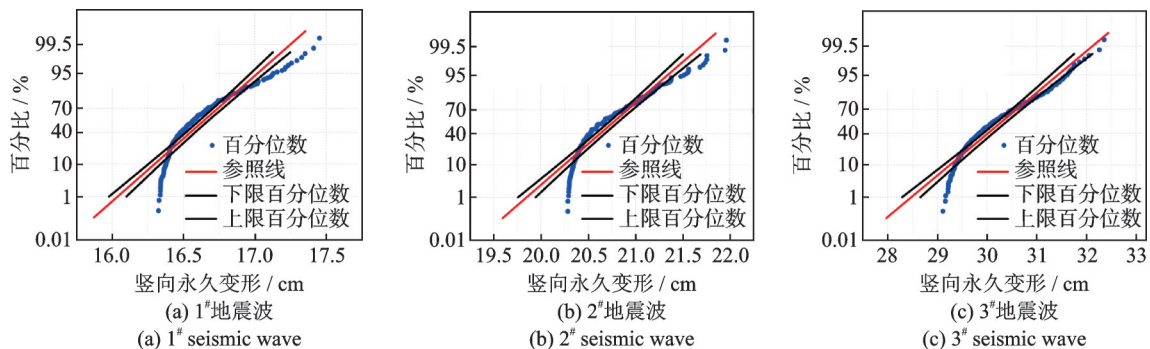


图14 坝体竖向永久变形分布检验图

Fig. 14 Distribution test diagram of vertical permanent deformation of dam body

表 7 坝体竖向永久变形响应统计表

Tab. 7 Statistical table of vertical permanent deformation response of dam body

地震波	均值	变异系数	中位数	最大值	最小值	A-D统计值	相伴概率P	95% 均值置信区间
1 [#]	16.61(16.39)	0.030	16.54	17.45	16.33	9.102	0.002	[16.581, 16.645]
2 [#]	20.72(20.42)	0.029	20.60	21.96	20.28	7.703	0.003	[20.673, 20.770]
3 [#]	30.21(29.11)	0.028	30.05	32.35	29.11	4.517	0.005	[30.109, 30.301]

注:括号中的数字表示垂直输入下的结果,表中竖向永久变形单位为 cm。

组合入射角度的不确定性,且同时考虑输入的地震动之间存在的峰值差异对坝体竖向永久变形的响应以及服从分布的影响是有必要的。

3.5 坝体-覆盖层沿高度的水平峰值加速度分析

图 15 分别给出了中轴线位置处坝体与覆盖层水平峰值加速度分布图与变异系数图。通过对图进行分析可以看出,考虑组合入射角度不确定性时,水平峰值加速度在覆盖层底部的离散性明显大于坝体。在不同的地震波下虽然变化的整体趋势具有一

定的相似性,但是水平向峰值加速度沿高度的变化规律不同;同时通过表 8 可以看到 3 组地震波的坝顶加速度放大倍数有着明显差异,故在考虑组合入射角度不确定性的同时,考虑地震动之间存在的峰值差异对地震响应的影响是很有必要的。

表 8 水平向峰值加速度及放大倍数统计表

Tab. 8 Horizontal peak acceleration and magnification statistics table

地震波	坝高/m	均值/(m·s ⁻²)	变异系数	放大倍数
1 [#]	0	3.31(3.29)	0.118	1.66
	73.76	4.92(5.27)	0.119	2.49
2 [#]	0	5.28(4.93)	0.101	1.32
	73.76	7.89(7.85)	0.064	1.97
3 [#]	0	4.89(4.55)	0.092	1.22
	73.76	8.11(7.64)	0.074	2.03

注:坝高为 0 表示坝底;括号中的数字表示垂直输入的结果。

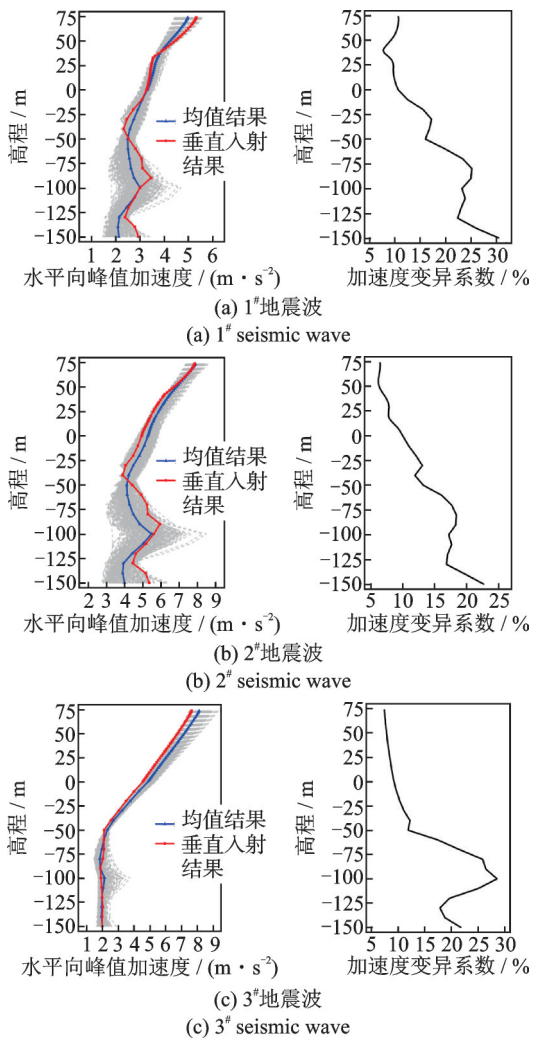


图 15 坝体中轴线位置水平峰值加速度分布及变异系数图
Fig. 15 Distribution of horizontal peak acceleration and coefficient of variation at the central axis of dam body

4 结 论

本文通过波场叠加原理,将地表控制点的运动场进行分解,根据二维反演得到入射 P 波、SV 波时程,构建了地震波组合斜入射波动输入模型。通过数论选点法,对构建的波动输入模型中的入射 P 波与 SV 波的角度进行抽样随机选取,通过进行不同组合入射角度下的动力计算,研究了组合入射角度不确定性对沥青混凝土面板堆石坝地震响应的影响规律。以某实际工程为例,通过分析建基面水平向峰值加速度、面板应力及加速度、坝体水平向峰值加速度及永久变形等响应的均值、变异系数、95% 的置信区间限值及极值差异等统计规律及分布类型检验,并与地震波垂直入射情况进行了对比,具体结论如下:

(1) 考虑组合入射角度不确定性且同时考虑输入地震动峰值之间存在的差异时,3 组地震波下坝体建基面加速度响应峰值的空间分布呈现出明显的差异性。其中 3 组地震波的计算结果在建基面左端控制点下的极值差异分别为 62.8%、42.1% 和 28.6%,在建基面右端控制点下的极值差异分别为

40.7%、32.9%和27.9%。差异在覆盖层建基面两端变化程度较为明显。

(2)3组地震波下随机组合入射角度的动力计算结果中,1[#]、2[#]、3[#]地震波地震响应的统计结果分别为12.4%、55.4%、96.9%的概率会超过垂直入射下的计算结果,这表示忽略组合入射角度的不确定性可能不能准确地分析大坝的地震响应。但在不同的地震波作用下,超越概率又有较大不同。面板顶和坝顶的加速度响应在不同的地震波下并不一定都服从正态分布,因此,考虑组合入射角度的不确定性,且同时考虑输入地震动之间存在的峰值差异对坝体顶部峰值加速度的响应以及服从分布的影响是有必要的。

(3)在3组地震波下竖向永久变形的计算中,当P波、SV波入射角度变化时,竖向永久变形也会随之变化。3组地震波的永久变形与垂直入射的结果相比均有着70%以上的超越概率,与面板顶及坝顶水平向峰值加速度相比,永久变形的离散性相对较弱,竖向永久变形并不服从正态分布。因此,考虑组合入射角度的不确定性且同时考虑输入地震动之间存在的峰值差异对坝体竖向永久变形以及服从分布的影响是有必要的。

(4)3组地震波下水平峰值加速度随着坝高的增加也在不断增大,呈近似线性变化,且沿高度的变化规律有较大的区别,加速度放大倍数也有明显差异。说明输入地震动峰值之间存在的差异带来的影响也是不可忽略的,应同时考虑组合入射角度的不确定性和输入地震动峰值之间存在的差异,进行沥青混凝土面板堆石坝-覆盖层系统的地震响应分析,以得到更加符合实际情况的坝体响应结果。

参考文献:

- [1] 邹德高,余翔,余挺,等.深厚覆盖层上高土石坝动力稳定分析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(1):22-27.
ZOU Degao, YU Xiang, YU Ting, et al. Study on the dynamic stability analysis method for high earth built on deep overburden[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(1): 22-27.
- [2] 饶锡保,程展林,谭凡,等.碾压式沥青混凝土心墙工程特性研究现状与对策[J].长江科学院院报,2014,31(10):51-57.
RAO Xibao, CHENG Zhanlin, TAN Fan, et al. Research status and countermeasures of engineering properties of rolled asphalt concrete core wall[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 51-57.
- [3] 刘升欢,宋志强,王飞,等.深厚覆盖层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究[J].振动工程学报,2021,34(4):721-729.
LIU Shenghuan, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Influence of liquefaction of deep overburden on the site predominant period and seismic response of the earth-rock dam[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(4): 721-729.
- [4] 李闯,宋志强,王飞,等.地震动空间差异对沥青混凝土心墙土石坝-覆盖层地基系统响应影响研究[J].振动与冲击,2022,41(19):37-47.
LI Chuang, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Effects of spatial difference of ground motion on seismic response of asphalt concrete core wall rockfill dam-overburden foundation system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 37-47.
- [5] 王飞,宋志强,刘云贺,等.基于设计地震动的斜入射波时程确定方法对土石坝地震响应的影响[J].振动与冲击,2021,40(19):80-88.
WANG Fei, SONG Zhiqiang, LIU Yunhe, et al. Effects of oblique incident wave time history determination method based on design ground motion on seismic response of earth-rock dam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(19): 80-88.
- [6] 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.
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.
- [7] SUN B B, DENG M J, ZHANG S R, et al. Inelastic dynamic analysis and damage assessment of a hydraulic arched tunnel under near-fault SV waves with arbitrary incoming angles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103523.
- [8] 王洋洋,景月岭,周召虎.考虑地震波斜入射作用的坝后式厂房动力响应分析[J].水电能源科学,2019,37(5):45-48.
WANG Yangyang, JING Yueling, ZHOU Zhaohu. Dynamic response analysis of power house at dam toe under obliquely incident waves[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 45-48.
- [9] 何卫平,熊堃,卢晓春.确定性地震动空间差异对重力坝地震响应影响研究[J].水利学报,2019,50(8):5.
HE Weiping, XIONG Kun, LU Xiaochun. Influence of deterministic spatial variation of motions on seismic response of gravity dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 5.
- [10] 苑举卫,杜成斌,刘志明.基于设计地震动的地震波斜入射波输入研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):250-255.

- YUAN Juwei, DU Chengbin, LIU Zhiming. Study on oblique wave input based on design seismic component [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 250-255.
- [11] 孙纬宇,汪精河,严松宏,等. SV波斜入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 237-243.
- SUN Weiyu, WANG Jinghe, YAN Songhong, et al. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 237-243.
- [12] 孔宪京,陈健云,邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(7): 1-11.
- KONG Xianjing, CHEN Jianyun, ZOU Degao. Study on development trend of seismic safety theory for high dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(7): 1-11.
- [13] WANG F, SONG Z Q, LIU Y H, et al. Construction of the spatially varying ground motion field of a bedrock-overburden layer site and its influence on the seismic response of earth-rock dams[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(18): 1914.
- [14] 王飞,宋志强,刘云贺,等. SV波斜入射不同自由场构建方法下水电站地面厂房地震响应研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 9-18.
- WANG Fei, SONG Zhiqiang, LIU Yunhe, et al. Seismic response of ground powerhouse of hydropower station based on different free field construction methods with oblique incidence of SV wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 9-18.
- [15] 王飞. 近断层地震动斜输入作用下水电站厂房非线性地震响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- WANG Fei. Nonlinear seismic responses of the powerhouse of a hydropower station under near-fault ground motions oblique input[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [16] LI J, CHEN J B. Stochastic Dynamics of Structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [17] 陈建兵,李杰. 结构随机响应概率密度演化分析的数论选点法[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 134-140.
- CHEN Jianbing, LI Jie. Strategy of selecting points via number theoretical method in probability density evolution analysis of stochastic response of structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 134-140.
- [18] 王宗凯,宋志强,刘云贺,等. 考虑材料参数空间变异性的沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统地震响应研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(5): 1188-1199.
- WANG Zongkai, SONG Zhiqiang, LIU Yunhe, et al. Research on seismic response of asphalt concrete core dam-overburden considering the spatial variability of material parameters[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(5): 1188-1199.
- [19] 华罗庚,王元. 数论在近似分析中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [20] 方开泰,王元. 数论方法在统计中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [21] 马笙杰,迟明杰,陈红娟,等. 黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
- MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [22] 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 Jingbo, LYU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64.
- [23] 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 Zhujiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143-150.

第一作者: 高 川(1998—),男,硕士研究生。

E-mail: 2210421318@stu.xaut.edu.cn

通信作者: 宋志强(1981—),男,博士,教授。

E-mail: zqsong@xaut.edu.cn