

近断层地震动组合斜入射下沥青混凝土 面板堆石坝响应研究

许斯年, 宋志强, 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: 西部地区水利工程多建于复杂地震断裂带附近, 因此近场地震动的脉冲效应对水工建筑物所产生的影响不可忽略。近断层地震动往往由 P 波、SV 波等共同组成, 到达地表后明显带有一定角度, 垂直入射假定不再适用, 因此有必要开展近断层脉冲型地震动组合斜入射对沥青混凝土面板堆石坝地震响应影响的研究。基于地表二维地震动反演确定 P 波、SV 波斜入射时程, 构建近断层地震动组合斜输入模型, 选取脉冲型和非脉冲型各 5 条地震动记录, 研究近断层地震动组合斜入射对沥青混凝土面板加速度、应力和坝体永久变形的影响规律。结果表明: 与地震动垂直入射相比, 面板水平向加速度随 P 波角度的增大而增大, 随 SV 波角度的增大而减小, 竖向加速度及坝体永久变形的规律则相反; 面板拉应力随着 P 波、SV 波角度的增大而增大; 近断层地震动的脉冲特性对堆石坝的响应有显著放大作用, 其中面板拉应力最大增加了 116%。

关键词: 沥青混凝土面板堆石坝; 近断层地震动; 组合斜入射; 脉冲效应; 地震响应

中图分类号: TV641.4; TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)04-0127-09

Seismic response of asphalt concrete face rockfill dam under combined oblique incidence of near-fault ground motions

XU Sinian, SONG Zhiqiang, LI Chuang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Water conservancy projects in the western region of China are mostly built near complex earthquake fault zones, and the pulse-like effect of near-field ground motions on hydraulic structures cannot be ignored. The near-fault ground motion is often composed of P-waves and SV-waves. When the seismic waves reach the surface, they often hit the ground at a certain angle, and the assumption of vertical incidence is no longer applicable. Therefore, it is necessary to clarify the impact of combined oblique incidence of near-fault pulse-like ground motions on the seismic response of asphalt concrete face rockfill dams. Based on the surface two-dimensional seismic motion inversion, the oblique incidence time history of P-waves and SV-waves were obtained, and a combined oblique incidence model of near-fault ground motions was constructed. Five pulse-like and non-pulse-like ground motions were selected to study the influence of the combined oblique incidence of near-fault ground motions on the acceleration, stress, and permanent deformation of asphalt concrete panels. The results show that compared to the vertical incidence of ground motions, the horizontal acceleration of the panel increases with the increase of P-wave angle and decreases with the increase of SV-wave angle, while the vertical acceleration of the panel and permanent deformation of the dam body are on the opposite; the tensile stress of the panel increases with the increase of P-wave and SV-wave angles; the pulse-like characteristics of near-fault ground motions have a significant amplification effect on the seismic response of the dam, with a maximum increase of 116% in panel tensile stress.

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2024-02-01

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)

作者简介: 许斯年(1999—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构抗震。

通讯作者: 宋志强(1981—), 男, 辽宁开原人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构抗震研究。

Key words: asphalt concrete face rockfill dam; near-fault ground motion; combined oblique incidence; pulse-like effect; seismic response

1 研究背景

沥青混凝土因其变形能力强、防渗性能好等优点,经常被用于浇筑土石坝心墙、堆石坝面板或库盆防渗体部位^[1]。而在我国水资源丰富的西部地区,地质条件复杂多变,断层活动频繁,这给沥青混凝土防渗体的抗震安全带来了严峻的挑战。

近断层地震动埋深较浅且有明显的较长周期与较大幅度的速度和位移脉冲,可能导致结构严重破坏^[2]。Hebbouche 等^[3]和 Gorai 等^[4]研究发现近断层地震动会对混凝土重力坝造成更严重、更具有破坏性的损伤。Akköse 等^[5]研究了近场、远场地震动作用下大坝与地基的非线性地震响应,与线性分析的结果比较,发现近断层地震动对坝体永久变形的影响十分显著。Bayraktar 等^[6]通过研究 4 种不同类型的大坝在近断层地震动作用下产生的位移与应力,发现近断层地震动对不同坝型都有显著影响。Jiang 等^[7]研究了近断层地震动正反向输入对高面板堆石坝地震响应的影响。邹德高等^[8-9]选取了 10 组近断层地震记录作为输入地震动,研究了脉冲和非脉冲地震动作用对面板堆石坝的加速度分布系数、水平位移以及面板顺坡向应力的影响。唐彧杰等^[10]选取了包括破裂前方脉冲、滑冲脉冲和无脉冲的近断层地震动,分析了混凝土高拱坝的损伤规律、耗能与坝顶位移等响应。刘琳等^[11]和宋志强等^[12]研究了脉冲型地震动单波斜入射下沥青心墙坝的响应,发现地震动脉冲特性对各响应影响显著。

以上研究大多假定地震动输入是垂直入射的,或只考虑了 P 波或 SV 波单波的斜输入对坝体响应的影响。然而,近断层地震动入射不能仅考虑一种波型,多种波形共同作用更符合地震动实际入射情况。当研究单波斜输入条件下坝体的响应时,地震动强度变化带来的影响是无法忽略的。王飞^[13]根据波场叠加原理通过反演构建了基于双向设计地震动的半空间内自由场,但其假设水平自由地表任意点的运动都是由入射 P 波和 SV 波共同作用的,通过 Snell 定律得到的入射角度是固定的且不能随意组合。何卫平等^[14]和李闯等^[15]研究了地震动空间差异对重力坝、沥青混凝土心墙坝地震响应的影响,但他们在选取地震动时均没有把近断层地震动的脉冲效应当作影响因素。因此考虑地震动脉冲特性的 P 波、SV 波组合斜入射,更符合沥青混凝土面板堆石坝近断层场地地震作用的实际情况。

本文通过构建近断层地震动组合斜输入模型,选取近断层脉冲型和非脉冲型各 5 条地震动记录,分析组合斜入射角度和地震动脉冲效应对沥青混凝土面板加速度、应力和坝体永久变形规律的影响。

2 近断层地震动选取

近断层脉冲地震动的显著特征是其含有明显的长周期速度大脉冲和长周期位移大脉冲,因此近断层地震动选取原则一般要满足 3 点^[16]:(1)断层距小于 20 km;(2)峰值速度(peak ground velocity, *PGV*)/峰值加速度(peak ground acceleration, *PGA*) > 0.2;(3) *PGA* > 0.1*g*。本研究依照以上原则,在太平洋地震工程中心选取了脉冲型和非脉冲型各 5 条地震动记录,如表 1 所示。

表 1 近断层地震动记录

地震动类型	地震动编号	台站名称	断层距/km	峰值加速度 <i>PGA</i> / 9.8 (m · s ⁻²)	峰值速度 <i>PGV</i> / (m · s ⁻¹)
脉冲型	1	TCU046	16.74	0.142	0.290
	2	TCU048	13.53	0.119	0.343
	3	TCU102	1.49	0.304	0.917
	4	TCU105	17.16	0.113	0.329
	5	TCU128	13.13	0.144	0.637
非脉冲型	6	CHY029	10.96	0.289	0.352
	7	TCU045	18.86	0.473	0.500
	8	TCU074	0.70	0.596	0.703
	9	TCU076	2.74	0.344	0.518
	10	TCU078	7.50	0.444	0.392

脉冲型与非脉冲型地震动最大的区别就是其具有较大幅度的速度与位移脉冲,如图 1 所示。以峰值加速度 (*PGA*) 相近的两条近断层地震动 TCU102 (脉冲) 和 CHY029 (非脉冲) 为例,脉冲型地震动的峰值速度 (*PGV*) 是非脉冲型地震动的 2.60 倍,脉冲型地震动的峰值位移(peak ground displacement, *PGD*) 是非脉冲型地震动的 9.41 倍。这种脉冲特性使得结构在短时间内获得很高的能量,对结构安全十分不利。

3 地震动组合斜入射方法

经过多次反射和透射到达地表的地震动成分复杂,不单是由某一类型的体波构成,且是多种类型的

体波共同作用的。由于近断层地震动距离地表很近,P波、SV波入射时会带有一定的角度,在地表会反射出两条不同类型的反射波。二者再通过叠加生成某点的地震动,地表控制点地震动组成详见图

2^[17],图2中 α 为入射P波及其反射的P波角度,(°); β 为入射P波反射的SV波角度,(°); θ 为入射SV波及其反射的SV波角度,(°); ζ 为入射SV波反射的P波角度,(°)。

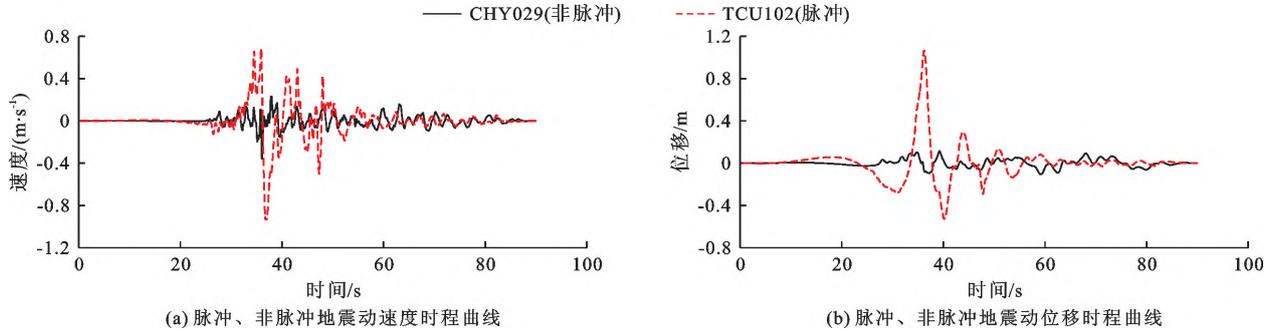


图 1 不同类型地震动速度、位移时程曲线对比

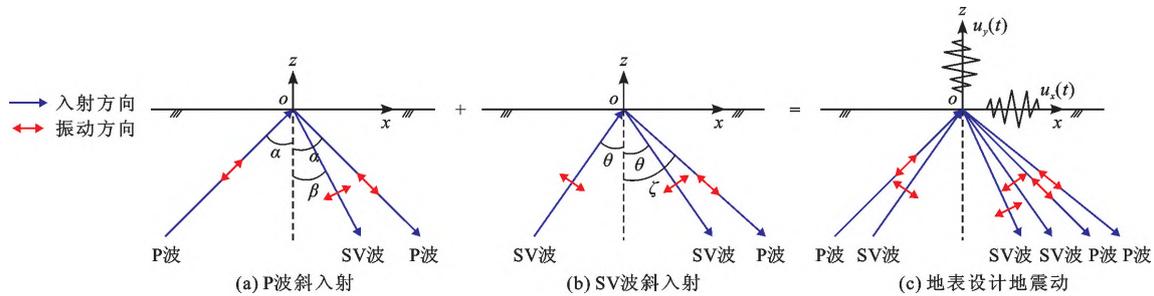


图 2 地表控制点地震动组成

P波、SV波组成的空间水平向和竖向自由场分别表达为公式(1)、(2)。

$$u_x(t) = g(t - \Delta t_1) \sin \alpha + A_1 g(t - \Delta t_2) \sin \alpha - A_2 g(t - \Delta t_3) \cos \beta + f(t - \Delta t_4) \cos \theta - B_1 f(t - \Delta t_5) \cos \theta + B_2 f(t - \Delta t_6) \sin \xi \quad (1)$$

$$u_y(t) = g(t - \Delta t_1) \cos \alpha - A_1 g(t - \Delta t_2) \cos \alpha - A_2 g(t - \Delta t_3) \sin \beta - f(t - \Delta t_4) \sin \theta - B_1 f(t - \Delta t_5) \sin \theta - B_2 f(t - \Delta t_6) \cos \xi \quad (2)$$

式中: $u_x(t)$ 、 $u_y(t)$ 分别为入射P波、SV波在空间质点产生的水平和竖向位移,m; $g(t)$ 、 $f(t)$ 分别为入射P波、SV波时程,m; Δt_i ($i = 1 \sim 6$)分别为入射P波及其反射的P波和SV波、入射SV波及其反射的SV波和P波从零时刻波阵面到该点的时间,s; A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 分别为入射P波与其反射P波、入射P波与其反射SV波、入射SV波与其反射SV波、入射SV波与其反射P波的幅值比,幅值比计算详见公式(3)~(6)^[18]。

$$A_1 = \frac{c_s^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta - c_p^2 \cos^2 2\beta}{c_s^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta + c_p^2 \cos^2 2\beta} \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{-2c_s c_p \sin 2\alpha \sin 2\beta}{c_s^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta + c_p^2 \cos^2 2\beta} \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{c_s^2 \sin 2\theta \sin 2\xi - c_p^2 \cos^2 2\xi}{c_s^2 \sin 2\theta \sin 2\xi + c_p^2 \cos^2 2\xi} \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{-2c_s c_p \sin 2\theta \sin 2\xi}{c_s^2 \sin 2\theta \sin 2\xi + c_p^2 \cos^2 2\xi} \quad (6)$$

式中: c_s 为SV波波速,m/s; c_p 为P波波速,m/s。

由一维波动理论可以得到,P波、SV波从(0,0)点到(x,y)点的时间。

$$\Delta t_p = \frac{x \sin \alpha + y \cos \alpha}{c_p} \quad (7)$$

$$\Delta t_{sv} = \frac{x \sin \theta + y \cos \theta}{c_s} \quad (8)$$

取两波阵面反向移动最大时刻的波阵面为零时刻波阵面。已知入射角 α 、 θ 时,公式(9)为地震波从零时刻波阵面到点(x_0, y_0)的时间。

$$\begin{cases} \Delta t_1 = (x_0 \sin \alpha - (H - y_0) \cos \alpha) / c_p \\ \Delta t_2 = (x_0 \sin \alpha + (H - y_0) \cos \alpha) / c_p \\ \Delta t_3 = (H - y_0) / (C_s \cos \beta) + (x_0 \sin \alpha - (H - y_0) \tan \beta \sin \alpha) / c_p \\ \Delta t_4 = (x_0 \tan \theta - H + y_0) \cos \theta / c_s \\ \Delta t_5 = (x_0 \sin \theta + (H - y_0) \cos \theta) / c_s \\ \Delta t_6 = (H - y_0) / (C_p \cos \xi) + (x_0 \sin \theta - (H - y_0) \tan \xi \sin \gamma) / c_s \end{cases} \quad (9)$$

式中： H 为该点至原点的竖向距离， m 。

将公式(9)代入公式(1)~(2)中，得到半空间任一点单波地震动响应。地表控制点地震动不变时的半空间地震动场是由两波响应矢量叠加而成的。

为了消除结构与地基相互作用中远域地基的辐射阻尼效应，本文采用黏弹性人工边界来模拟无限远域地基。在众多的人工边界中，黏弹性人工边界概念清晰，便于实现，精度良好，运算稳定。刘晶波等^[19]将黏弹性边界的地震动输入问题转化为在边界节点施加等

$$\begin{cases} \sigma_x(t) = \frac{G \sin 2\alpha}{c_p} [\dot{u}_p(t - \Delta t_1) + A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2)] + \frac{G \sin 2\beta}{c_s} A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) + \frac{G \sin 2\theta}{c_s} [\dot{u}_{sv}(t - \Delta t_4) + \\ B_1 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_5)] + \frac{G \sin 2\xi}{c_p} B_2 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_6) \\ \sigma_y(t) = \frac{\lambda + 2G \cos^2 \alpha}{c_p} [\dot{u}_p(t - \Delta t_1) - A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2)] + \frac{G \sin 2\beta}{c_s} A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) + \frac{G \sin^2 \theta}{c_s} [(-\dot{u}_{sv}(t - \Delta t_4) + \\ B_1 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_5))] - \frac{\lambda + 2G \cos^2 \xi}{c_p} B_2 \dot{u}_{sv}(t - \Delta t_6) \end{cases} \quad (11)$$

式中： G 为剪切模量， GPa ； λ 为拉梅常数。

4 沥青混凝土面板堆石坝模型及参数

4.1 计算模型

某沥青混凝土面板堆石坝最大坝高为76.00 m，坝顶宽度为10.00 m，坝顶高程为1 656.00 m，上游坝坡为1:1.7，下游坝坡在1 634.00 m高程以上为1:1.8，以下为1:1.7，且在1 634.00 m处设置1.5 m宽马道，采用沥青混凝土面板作为防渗体，厚度为20.20 cm。坝体材料分为主堆石区、次堆石区、垫层区、过渡区、沥青混凝土面板、库底块石回填料、覆盖层区和基岩等8个区域。单元类型采用ABAQUS有限元计算软件中的四节点等参单元，在沥青混凝土面板单元与垫层单元之间考虑接触相互作用，法向行为考虑为硬接触，切向行为为库伦摩擦接触，摩擦系数为0.5，覆盖层分别向上、下游方向延伸的距离为1倍的坝高。沥青混凝土面板堆石坝-覆盖层地基体系的有限元网格模型如图3所示。

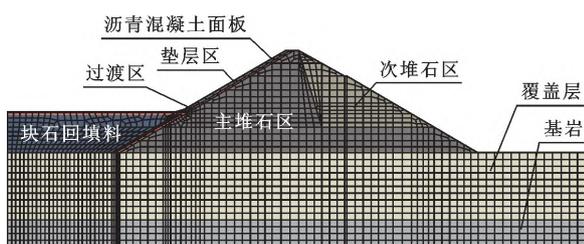


图3 沥青混凝土面板堆石坝-覆盖层地基体系有限元网格模型

效节点荷载问题。用公式(10)计算等效节点力 F_b 。

$$F_b = (K_b u_b^f + C_b \dot{u}_b^f + \sigma_b^f n) A_b \quad (10)$$

式中： K_b 为刚度系数， N/m ； C_b 为阻尼系数， $N/(m/s)$ ； u_b^f 、 \dot{u}_b^f 和 σ_b^f 分别为自由场位移、速度和应力， m 、 m/s 和 Pa ； A_b 为影响面积， m^2 。

现阶段的研究常会将总场分解为自由场和散射场^[20]后进行地震动的输入。由于黏弹性边界计算时弹簧阻尼器会吸收散射场，因此只需考虑自由场，用公式(11)计算底面边界应力场。

4.2 材料本构模型及计算参数

静力与动力计算分别采用非线性邓肯张E-B模型^[21]与等效线性黏弹性模型^[22]作为坝体、沥青混凝土面板和覆盖层土体材料的本构模型，基岩采用线弹性本构模型。对于剪切模量 G 和阻尼比 ε ，本文采用沈珠江模型^[23]进行求解。

$$G = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} P_a \left(\frac{\sigma'_3}{P_a} \right)^n \quad (12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (13)$$

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{\max} \left(\frac{\sigma'_3}{P_a} \right)^{n-1} \quad (14)$$

式中： k_1 、 k_2 、 n 为材料参数，由实验所得； $\bar{\gamma}_d$ 为归一化剪应变； σ'_3 为围压， MPa ； γ_{\max} 为最大动剪应变， P_a 为大气压； ε 、 ε_{\max} 分别为阻尼比和最大阻尼比。

沈珠江残余应变模型因其同时考虑了残余剪切和体积应变在国内土石坝计算中应用最为广泛。但有研究表明，其计算得到的残余应变有时偏大。为合理考虑土体应力水平对残余动剪应变的影响，采用邹德高等^[24]改进的沈珠江残余变形模型进行地震永久变形计算。

$$\Delta \varepsilon_r = c_1 (\gamma_d)^{c_2} \exp(-c_3 s_1^2) \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (15)$$

$$\Delta \gamma_r = c_4 (\gamma_d)^{c_5} s_1^2 \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (16)$$

式中： $\Delta \varepsilon_r$ 和 $\Delta \gamma_r$ 为残余体积与剪切应变增量； c_i

($i = 1 \sim 5$) 为实验参数; s_1 为应力水平; N 为总振动次数; γ_d 为残余剪应变。

沥青混凝土面板、坝体及覆盖层材料静力计算参数如表 2 所示。表 2 中 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 为非线性摩擦角实验参数, ($^\circ$); K 为土的弹性模量系数; n 为土的弹

性模量指数; R_f 为破坏比; K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数。

材料有限元动力及永久变形计算参数如表 3 所示。基岩弹性模量为 20 GPa, 密度为 2.7 g/cm³, 泊松比为 0.24。

表 2 材料有限元静力计算参数

材料名称	静力计算参数							
	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
沥青混凝土	2.467	30.9		1 447.0	0.12	0.71	2 430.0	0.347
碎石垫层	2.24	56.2	11.1	1 241.2	0.30	0.74	498.2	0.23
过渡层	2.21	56.4	12.1	1 324.3	0.25	0.72	526.7	0.03
上游堆石区	2.18	55.6	13.0	929.0	0.25	0.72	526.7	0.03
下游堆石区	2.16	53.4	12.4	747.2	0.23	0.70	162.8	0.20
库底块石回填	2.15	52.8	12.4	704.2	0.23	0.70	162.8	0.20
覆盖层	2.15	53.4	12.4	589.6	0.23	0.70	162.8	0.20

表 3 材料有限元动力、永久变形计算参数

材料名称	动力计算参数					永久变形计算参数				
	k_1	k_2	n	v	ε_{max}	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
沥青混凝土	18.0	635.2	0.398	0.33	0.20	0.03	0.18	0	15.00	0.90
碎石垫层	27.4	1 762	0.440	0.33	0.23	6.90	1.37	0	20.03	0.36
过渡层	27.4	1 762	0.440	0.33	0.23	10.02	1.26	0	19.25	0.39
上游堆石区	27.4	1 762	0.440	0.33	0.23	10.08	1.35	0	20.14	0.35
下游堆石区	16.5	1 201	0.487	0.33	0.25	10.08	1.35	0	20.14	0.35
库底块石回填	16.5	1 201	0.487	0.35	0.25	7.85	0.73	0	5.86	1.28
覆盖层	15.2	1 155	0.618	0.38	0.30	6.73	0.71	0	5.86	1.13

4.3 计算工况

取 P 波入射角度为 0°、30°、60°, SV 波入射角度为 0°、15°、30°, 两两角度组合形成共计 9 种计算角度工况。当 P 波、SV 波角度都为 0° 时为一致输入情况, 记作 P-0SV-0, 其余情况为非一致输入。为了消除地震动峰值加速度的不同对计算结果造成的影响, 将选取的所有地震动记录的峰值加速度调幅为 0.2g。

本文所选用的 5 条脉冲型、5 条非脉冲型地震动均为地表地震动记录。已知水平、竖向实测地震动记录, 组合为地表地震动时程, 再通过地表反演得到各个不同角度组合的入射 P 波、SV 波, 因此总共 90 种计算工况。

5 结果与分析

5.1 沥青混凝土面板堆石坝加速度响应

图 4 为不同角度组合斜入射下覆盖层到坝顶水

平向峰值加速度分布图。图 4(a)、4(b) 分别为 TCU105 (脉冲)、CHY029 (非脉冲) 地震动记录作用下的水平峰值加速度分布。从图 4(a)、4(b) 可以看出, 水平峰值加速度随 SV 波角度的增大而减小, 随 P 波角度的增大而增大, 并在 P-60SV-0 工况时峰值加速度达到最大。

脉冲型与非脉冲型地震动作用下的差异主要体现在坝顶处加速度的变化幅度以及加速度放大倍数的不同。一致输入情况下, 脉冲型地震动的加速度放大系数为 3.02, 非脉冲型为 1.92; P-60SV-0 工况下, 脉冲型地震动的加速度放大系数为 3.77, 非脉冲型为 2.24; P-0SV-30 工况下, 脉冲型地震动的加速度放大系数为 2.60, 非脉冲型为 1.93。这是因为当不同 PGV/PGA 的地震动不同角度组合输入时, 覆盖层和坝体材料的非线性使得地震动有不同程度的能量损耗, 最终导致坝体对地震动的放大程度有

一定的差别。

图4(c)为 P-60SV-0 工况各条脉冲型和非脉冲型地震动作用下覆盖层到坝顶水平向峰值加速度分布情况。从图4(c)可以看出,脉冲、非脉冲型地震动作用下坝顶加速度均值分别为 7.57、4.18 m/s²,脉冲特性对坝顶加速度响应的影响十分显著。各条

地震动作用下坝顶峰值加速度放大效应明显,脉冲地震动引起的加速度放大系数最大为 4.63,非脉冲地震动引起的加速度放大系数最大为 2.49。

图5为脉冲、非脉冲型地震动 P 波、SV 波不同角度组合输入下堆石坝面板顶部的水平、竖向加速度峰值。

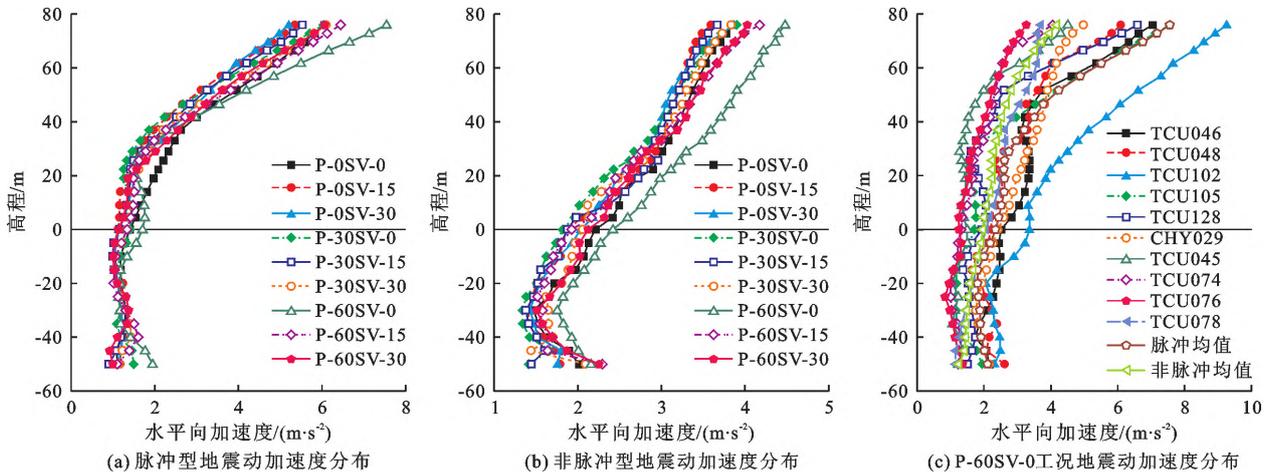


图4 覆盖层到坝顶水平向峰值加速度分布

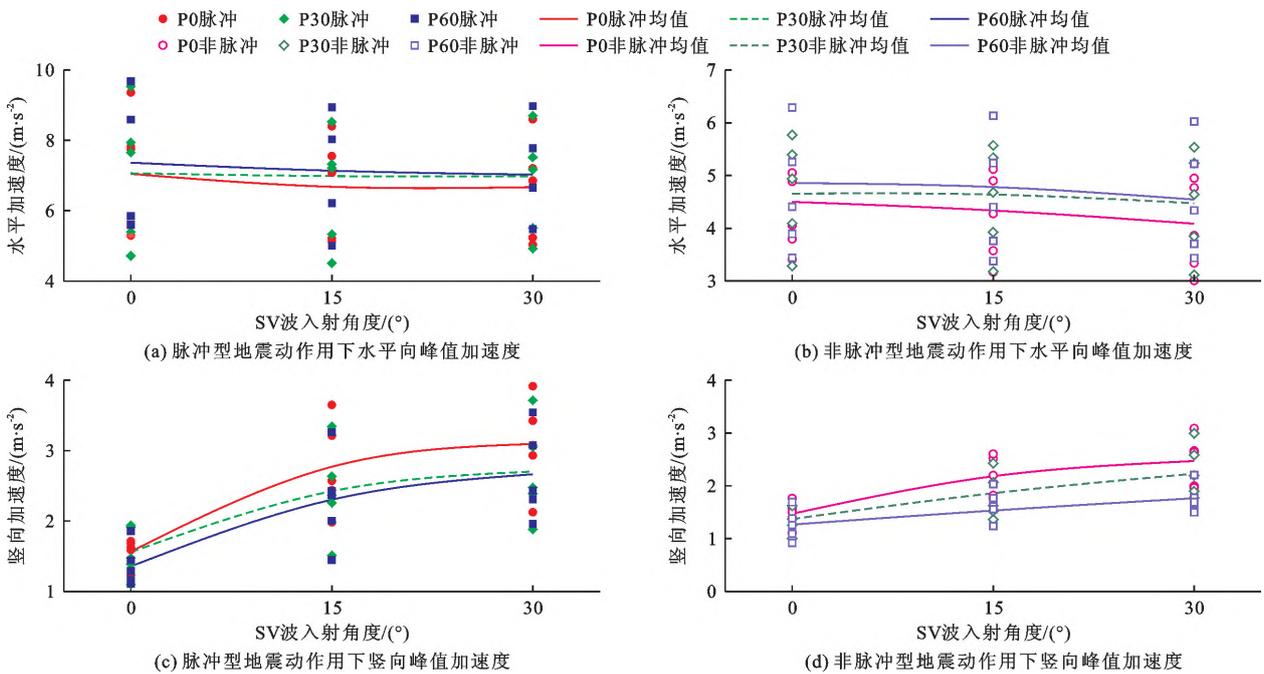


图5 面板顶部峰值加速度

由图5可以看出,面板顶部水平加速度峰值随着 P 波角度的增大而增大,随着 SV 波角度的增大而减小。面板顶部竖向加速度峰值随着 P 波角度的增大而减小,随着 SV 波角度的增大而增大。究其原因是因为随着 P 波、SV 波角度的增大,地震动的水平、竖向分量逐渐增大,对加速度的贡献值也随之逐渐增大。P-0SV-0 一致输入工况下,脉冲型地震动水平、竖

向放大系数为 3.52、0.78,非脉冲型地震动水平、竖向放大系数为 2.25、0.74;P-60SV-0 工况下,脉冲型地震动水平、竖向放大系数为 3.68、0.68,非脉冲型地震动水平、竖向放大系数为 2.43、0.63。

当 P-0SV-0 一致输入时,脉冲型地震动作用下的水平加速度峰值明显大于非脉冲型地震动,竖向加速度峰值则差异不大;随着入射角度的增加,普遍

脉冲型地震动作用下的加速度响应大于非脉冲型地震动的。这是因为近断层脉冲型地震动具有脉冲特性,其 PGV/PGA 普遍大于非脉冲型地震动,随着 PGV/PGA 的增大,结构在地震作用下的响应会越来越来。在 P-0SV-0 一致输入工况时,脉冲型地震动作用下水平向加速度峰值的均值为非脉冲型地震动

的 1.57 倍;在 P-60SV-30 工况时,脉冲型地震动作用下竖向加速度峰值的均值为非脉冲型地震动的 1.51 倍。

5.2 沥青混凝土面板应力响应

表 4、5 分别为 P 波、SV 波不同角度组合输入、不同地震动作用下面板主拉应力值。

表 4 脉冲型地震动不同角度组合入射下面板主拉应力及均值

kPa

P 波入射 角度/(°)	SV 波入射 角度/(°)	面板主拉应力					应力均值
		TCU046	TCU048	TCU102	TCU105	TCU128	
0	0	131.919	258.468	322.156	280.312	219.974	242.566
	15	138.852	253.353	349.339	301.833	236.862	256.048
	30	148.776	280.200	388.933	366.227	287.395	294.306
30	0	129.091	247.600	313.433	271.059	212.712	234.779
	15	141.810	257.448	350.992	304.250	238.759	258.652
	30	148.829	286.745	359.995	351.343	275.715	284.525
60	0	142.510	254.970	337.788	298.798	234.480	253.709
	15	154.637	258.010	379.396	301.077	236.269	265.878
	30	153.077	291.755	388.237	367.105	288.084	297.652

表 5 非脉冲型地震动不同角度组合入射下面板主拉应力及均值

kPa

P 波入射 角度/(°)	SV 波入射 角度/(°)	面板主拉应力					应力均值
		CHY029	TCU045	TCU074	TCU076	TCU078	
0	0	141.158	61.661	195.162	89.226	109.260	119.293
	15	140.040	54.770	217.707	88.847	107.999	121.873
	30	152.385	55.583	222.645	99.205	125.486	131.061
30	0	133.576	62.511	196.370	90.864	112.808	119.226
	15	138.783	54.501	220.490	88.569	109.076	122.284
	30	149.680	55.351	219.187	97.558	125.496	129.454
60	0	152.777	56.072	195.524	84.019	125.749	122.828
	15	141.016	51.035	229.833	96.221	117.339	127.089
	30	154.368	60.822	233.939	103.971	134.739	137.568

从表 4 可以看出,随着 P 波、SV 波角度的增大,面板主拉应力逐渐增大,但 P 波角度增长引起的变化幅度明显小于 SV 波。TCU105 台站记录的地震动 P-0SV-0 一致输入工况下,面板主拉应力为 280.312 kPa,P-60SV-30 工况下达到最大值 367.105 kPa,相比于一致输入增大了 31%。不同入射角度组合下面板主拉应力变化幅度较大,因此考虑角度变化对面板防渗体的设计与安全防护十分重要。

从表 4、5 可以看出,脉冲型地震动作用下面板主拉应力普遍大于非脉冲型地震动,且脉冲型地震动受

角度变化的影响大于非脉冲型地震动。脉冲型地震动作用下面板主拉应力均值的最大值为 297.652 kPa,同条件非脉冲型地震动作用下面板主拉应力均值的最大值为 137.568 kPa,增大了 116%;地震动 P-0SV-0 一致输入工况下,脉冲型地震动作用下面板主拉应力均值的最小值为 242.566 kPa,同条件非脉冲型地震动作用下面板主拉应力均值的最小值为 119.293 kPa,增大了 103%。由此可见,近断层地震动的脉冲效应对沥青混凝土面板应力的影响十分显著。

图 6 为 P-0SV-0 一致输入工况脉冲、非脉冲型地

震动作用下面板的主拉应力时程曲线。

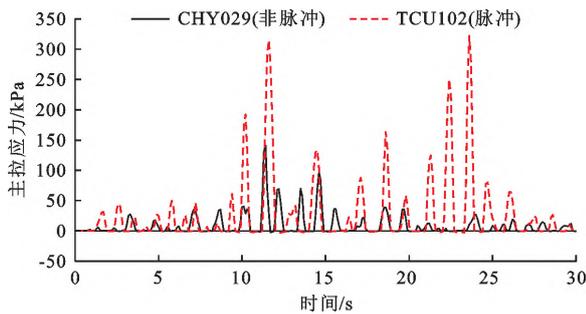
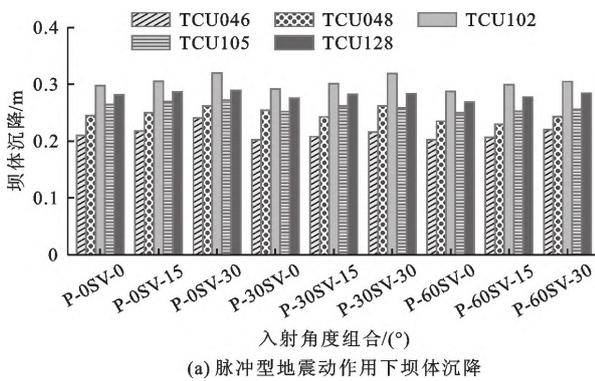
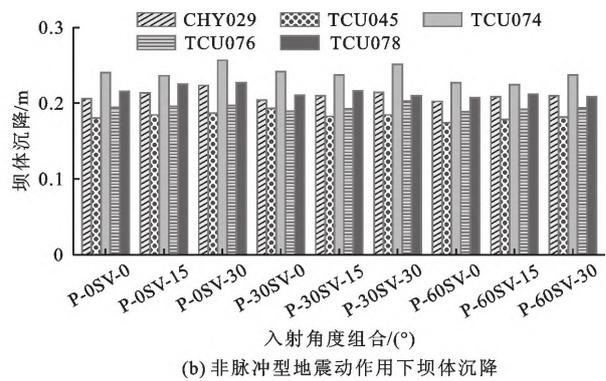


图6 不同地震动作用下面板主拉应力时程曲线

由图6可以看出,脉冲型地震动相较于非脉冲



(a) 脉冲型地震动作用下坝体沉降



(b) 非脉冲型地震动作用下坝体沉降

图7 不同类型地震动作用下坝体沉降对比

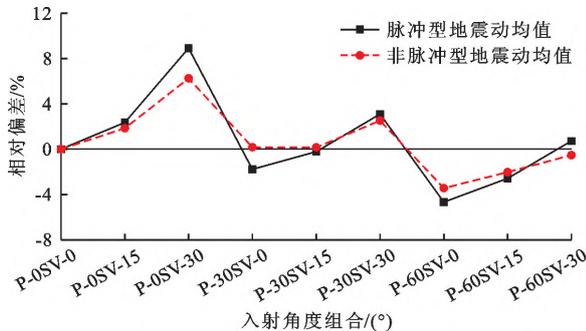


图8 不同地震动类型相对于一致输入均值偏差

由图7、8可以看出,坝体沉降随着P波角度的增大而减小,随着SV波角度的增大而增大,这与竖向峰值加速度随地震波不同角度的变化大体相同。在P-0SV-30工况入射时,坝体沉降的升幅最大,脉冲、非脉冲型地震动作用下的相对偏差分别为8.92%、6.25%。在P-60SV-0工况入射时,坝体沉降的降幅最大,脉冲、非脉冲型地震动作用下的相对偏差分别为4.67%、3.44%。脉冲、非脉冲型地震动坝体沉降均值的最大值均发生在P-0SV-30工况下,分别为0.276、0.218 m,脉冲型比非脉冲型增大了26.6%。

由此可见,近断层地震动的脉冲效应对沥青混

凝土面板坝永久变形的影响相较于地震动的组合斜输入更为显著。

5.3 沥青混凝土面板堆石坝永久变形

图7、8分别为脉冲型和非脉冲型地震动不同角度组合斜输入下坝体沉降图及脉冲型和非脉冲型均值相对于一致输入结果的偏差图。

凝土面板坝永久变形的影响相较于地震动的组合斜输入更为显著。

6 结论

本文基于波场叠加原理,用两向实测地震动记录在地表控制点组成二维设计地震动,经过反演推导得到入射P、SV波时程,构建了近断层地震动组合斜输入模型,选取近断层脉冲型和非脉冲型地震动各5条记录,研究了近断层地震动脉冲效应和斜入射角度对沥青混凝土面板堆石坝响应的规律。

(1) 坝顶、面板水平峰值加速度随P波角度的增大而增大,随SV波角度的增大而减小;面板竖向峰值加速度随P波角度的增大而减小,随SV波角度的增大而增大。入射角度变化引起的坝顶加速度放大系数最大为3.77,最小为2.60。脉冲型地震动作用下的面板顶水平向加速度峰值的均值最大为非脉冲型地震动的1.57倍。脉冲特性越强,结构的响应越大。

(2) 随着P波、SV波角度的增大,面板主拉应力逐渐增大,但P波角度增长引起的变化幅度明显小于SV波。非一致输入相较于一致输入工况,面板主拉应力的最大增幅为31%。脉冲型地震动作

用下面板主拉应力均值相较于同条件下非脉冲型地震动作用下面板主拉应力均值最大增大了116%,且脉冲型地震动在整个时程对面板产生了多次较大的拉应力,体现出了强烈的脉冲效应。

(3)坝体沉降随着P波角度的增大而减小,随着SV波角度的增大而增大,这与竖向峰值加速度随地震波角度的变化规律大体相同。非一致输入下坝体沉降升幅最大为8.92%。脉冲、非脉冲型地震动坝体沉降均值最大值均发生在P-OSV-30工况下,分别为0.276、0.218 m,脉冲型与非脉冲型相比增大了26.6%。近断层地震动的脉冲特性对坝体竖向永久变形影响显著。

参考文献:

- [1] 李闯,宋志强,王飞. P波空间斜入射下沥青混凝土面板堆石坝响应特性及面板破坏评价[J/OL]. 工程科学与技术: 1-14 [2023-09-21]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202201174>.
- [2] 李爽,谢礼立. 近场问题的研究现状与发展方向[J]. 地震学报,2007,29(1):102-111+114.
- [3] HEBBOUCHE A, BENSABIBI M, MROUEH H. Seismic risk analysis of concrete gravity dams under near-fault ground motions [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256: 2240-2243.
- [4] GORAI S, MAITY D. Seismic response of concrete gravity dams under near field and far field ground motions[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109292.
- [5] AKKÖSE M, SIMSEK E. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam - water - sediment - foundation interaction [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(11): 3685-3700.
- [6] BAYRAKTAR A, ALTUNISIK A C, SEVIM B, et al. Near-fault ground motion effects on the nonlinear response of dam - reservoir - foundation systems[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2008, 28(4): 411-442.
- [7] JIANG Qiuting, ZOU Degao, HAN Huichao, et al. Dynamic response of concrete face rockfill dam affected by polarity reversal of near-fault earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(1): 81-99.
- [8] 邹德高,韩慧超,孔宪京. 近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J]. 水利学报,2017,48(1):78-85.
- [9] 邹德高,韩慧超,孔宪京,等. 近断层地震动作用下面板堆石坝的加速度分布系数[J]. 水利学报,2018,49(10):1236-1242.
- [10] 唐彧杰,张燎军,翟亚飞,等. 近断层地震动作用下混凝土高拱坝损伤特性研究[J]. 水电能源科学,2021,39(6):64-68.
- [11] 刘琳,宋志强,王飞,等. 近断层SV波斜入射下沥青混凝土心墙坝响应分析[J]. 振动与冲击,2021,40(21):97-105.
- [12] 宋志强,刘琳,王飞,等. 近断层P波斜入射下沥青混凝土心墙坝响应分析[J]. 振动与冲击,2023,42(7):245-253.
- [13] 王飞. 空间非一致波动输入下沥青混凝土心墙坝地震响应特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [14] 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):913-924.
- [15] 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.
- [16] 王飞,宋志强,卢韬. 近断层地震动斜输入下水电站厂房非线性地震响应研究[J]. 振动与冲击,2020,39(5):63-73.
- [17] WANG Fei, SONG Zhiqiang, LIU Yunhe, 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.
- [18] 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.
- [19] 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,1998,21(3):55-64.
- [20] 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.
- [21] 余翔,孔宪京,邹德高,等. 覆盖层中混凝土防渗墙的三维河谷效应机制及损伤特性[J]. 水利学报,2019,50(9):1123-1134.
- [22] 傅华,陈生水,凌华,等. 高应力状态下堆石料工程特性试验研究[J]. 水利学报,2014,45(S2):83-89.
- [23] 迟世春,吕小龙,贾宇峰. 堆石料的动力残余应变模型[J]. 岩土工程学报,2016,38(2):370-376.
- [24] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(6):807-812.