

基岩中入射波三维时域反演及自由场构建

王 飞^{1,2}, 宋志强¹, 刘云贺¹, 李 闯¹

(1. 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;

2. 西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039)

摘要: 基岩入射波一维和二维时域反演不能反映入射方位角和斜入射角的空间任意性, 导致构建的自由场可能与实际偏离较远, 因此有必要开展基岩入射波三维时域反演研究。基于波函数组合法, 利用基岩中 P 波、SV 波和 SH 波的入射波时程表达地表控制点自由场, 建立基于设计地震动的基岩入射波三维时域反演方法, 并进一步构建了多波组合斜入射下的空间非一致自由场, 分析了基于一维和二维反演方法构建的自由场偏差, 揭示了不同反演和自由场构建方法对于沥青混凝土心墙土石坝地震响应的影响机制。结果表明: 基于地震动三维反演方法构建的自由场具有空间非一致性, 能够更全面地反映场地的地震动情况。当入射方位角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、斜入射角在 $40^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 与三维反演方法相比, 一维反演方法构建的特征点 x 向自由场偏差较大, 位移峰值最大偏差为 55.8%; 当入射方向与某个水平坐标轴平行时, 二维反演方法构建的特征点另一个水平向自由场偏差较大, 位移峰值最大偏差为 100%。介质泊松比增大, 一维反演下 x 向自由场偏差减小, 二维反演下 x 向自由场偏差增大, 特征点位移峰值最大偏差分别为 46% 和 36%。与基于地震动三维反演方法获得的心墙拉应力最大值相比, 二维和一维反演下拉应力最大值分别减小了 83.3% 和 20.0%。

关键词: 斜入射波; 沥青混凝土心墙土石坎; 三维时域反演; 自由场; 非一致性

中图分类号: TV312; TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)01-0156-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.01.016

引 言

地震动输入是大坝抗震安全评价的基础^[1]。地震危险性分析给出的坝址场地平坦基岩地表设计地震动通常不能作为大坝-地基系统底部的地震动输入^[2], 而需要通过反演或反卷积等方法获得深部基岩地震动, 进而构建地基截断边界自由场, 完成坝址地基地震动输入。

胡聿贤等^[3-5]、阴光华等^[6]、蔡袁强等^[7]、陈清军等^[8]和潘晓东等^[9]研究了深部基岩地震动频域求解方法, 即根据地表实测地震动反应和场地特征参数, 一维反演深部基岩或一定深度土层中的地震动。Mejia 等^[10]利用反卷积方法通过 SHAKE 程序^[11]一维反演了输入地震动。Ju^[12]采用一维反卷积方法获得了输入地震动, 研究了土-结构相互作用。反卷积方法由于采用了传递函数矩阵, 仅适用于一维线弹性问题。Feldgun 等^[2]依据土体表面实测加速度记录, 基于一维时域反演方法获得了两层和多层土地下卧基岩地震动。Jeong 等^[13]将输入地震动反演问题转化为偏微分方程约束下优化控制问题, 在时

域中一维重构了截断边界底部地震波。陈厚群等^[14]、Chopra^[15]和 Løkke 等^[16-17]假定入射波场由来自深部基岩垂直向上入射的平面 P 波、平面 SV 波和 SH 波组成, 简化为三个一维反演问题, 构建了深部基岩处输入地震动。

地震动一维反演方法假定地震波垂直入射, 仅考虑沿地基深度方向的行波效应。在简化地震动反演问题的同时, 也简化了与之配套的地震动输入方法。实际上, 当震源距坝址场地较近时, 在地表以下一定深度基岩处地震波不是垂直入射, 而是倾斜向上入射^[18-19]。在三维空间中, 地震波的入射方向和斜入射角度具有任意性^[20-21], Jin 等^[22]和 Sigaki 等^[23]通过发生在美国和日本的大量实测地震记录, 采用数学回归分析证实了这一点。此时, 地震动反演问题涉及到不同类型地震波的入射、反射, 以及在不同空间位置的组合和叠加过程, 因此不可避免地涉及到入射方位角和倾斜入射角的基岩地震动二维和三维反演问题。

Ghahari 等^[24]应用盲识别法, 基于地表相邻两个台站的地震动记录, 在二维空间中反演了基岩中的地震动。Liang 等^[25]采用动力刚度矩阵法在频域中

二维反演了基岩斜入射 P 波和 SV 波的加速度时程。Cen 等^[26]、王飞等^[27]和何卫平等^[28]假定二维平面空间自由场由斜入射 P 波和 SV 波以及它们的反射波组成,基于控制点自由波场与设计地震动相同的原则,利用波场叠加原理反演了基岩中斜入射 P 波和 SV 波的时间序列,分别研究了土石坝和重力坝的地震响应。文献[26-28]将地表面水平两向设计地震动分量在主震方向的投影进行叠加,叠加后的地震动作为二维空间中的水平向地震动。这种做法虽然避免了地震动三维反演,但是将水平两向地震动在主震方向合成缺乏理论依据,也忽略了平面外的运动,即平面 SH 波的作用。

基于地震动二维反演方法获得的深部基岩中地震动只考虑水平主震方向和竖向方向两个方向的地震动,与高坝、大库需要开展坝体-地基-库水三维地震响应分析的需求不适应。因此,有必要开展地震动三维时域反演研究。

本文考虑地震波入射方位和斜入射角的任意性,基于波场叠加原理建立了基岩中斜入射波时程、入射方位角和斜入射角与自由场的函数关系,基于控制点设计地震动与自由场分量相同的原则,三维反演了基岩中斜入射波时程。分析了一维、二维反演方法相对于本文三维反演方法的自由场偏差,揭示了不同反演及自由场构建方法对沥青混凝土心墙土石坝地震响应的影响机制。

1 基岩入射波三维时域反演

基岩中入射地震波反演思路:利用未知入射波

$$\begin{bmatrix} (\sin \alpha + A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \beta) \cos \gamma & (\cos \theta - B_1 \cos \theta - B_2 \sin \zeta) \cos \gamma & -2 \sin \gamma \\ (\sin \alpha + A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \beta) \sin \gamma & (\cos \theta - B_1 \cos \theta - B_2 \sin \zeta) \sin \gamma & 2 \cos \gamma \\ \cos \alpha - A_1 \cos \alpha + A_2 \sin \beta & -\sin \theta - B_1 \sin \theta + B_2 \cos \zeta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g(t) \\ f(t) \\ h(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为图 1(a) 中反射 P 波和反射 SV 波振幅与入射 P 波振幅的比值; B_1 和 B_2 分别为图 1(b) 中反射 SV 波和反射 P 波振幅与入射 SV 波振幅的比值。其他符号的含义如图 1 所示, A_1 和 A_2 以及 B_1 和 B_2 分别如下式所示:

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

$$A_2 = \frac{2c_s c_p \sin(2\alpha) \cos(2\beta)}{c_s^2 \sin(2\alpha) \sin(2\beta) + c_p^2 \cos^2(2\beta)} \quad (3)$$

$$B_1 = \frac{c_s^2 \sin(2\theta) \sin(2\zeta) - c_p^2 \cos^2(2\theta)}{c_s^2 \sin(2\theta) \sin(2\zeta) + c_p^2 \cos^2(2\theta)} \quad (4)$$

时间序列和假定的入射方位角和斜入射角,在均质弹性半空间内建立自由场运动与未知入射波时间序列的函数关系,基于控制点自由场运动与设计地震动相同的原则,反演入射波时间序列。

如图 1 所示,均质弹性半空间自由场运动由斜入射平面 P 波、SV 波和 SH 波以及三者的反射波组成,自由表面控制点 O 的水平 x 向、 y 向和垂直 z 向的地震动位移分量分别为 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 $w(t)$,可为设计地震动或实测地震动。参照地震波垂直入射时各类型波同时到达控制点的观点,假定斜入射 P 波、SV 波和 SH 波对控制点 O 的整个运动过程均有贡献。斜入射 P 波、SV 波和 SH 波的位移时程分别为 $g(t)$ 、 $f(t)$ 和 $h(t)$,三种斜入射波入射方向与水平 x 向之间的夹角均为 γ ,记为入射方位角;三种斜入射波入射方向与垂直 z 向的夹角分别为 α 、 θ 和 φ ,记为斜入射角; β 为图 1(a) 中反射 SV 波与垂直 z 向的夹角; ζ 为图 1(b) 中反射 P 波与垂直 z 向的夹角。在控制点 O 处,分别将三种类型的入射波和它们的反射波产生的位移沿坐标轴正向分解,利用叠加原理构建有限域内任意一点自由场位移分量。根据控制点自由场运动分量分别与设计地震动对应分量相同的原则,在确定的场地条件和给定的入射方位角 γ 以及斜入射角 α 、 θ 和 φ 下,依据控制点 O 地震动位移分量 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 $w(t)$,反演求得斜入射 P 波、SV 波和 SH 波的时间序列 $g(t)$ 、 $f(t)$ 和 $h(t)$ 。

在控制点 O 处,斜入射 P 波、SV 波和 SH 波的时间序列、入射方位角 γ 、斜入射角 α 、 θ 、 φ 与设计地震动的函数关系可以表示为如下矩阵形式:

$$B_2 = \frac{-2c_s c_p \sin(2\theta) \cos(2\theta)}{c_s^2 \sin(2\theta) \sin(2\zeta) + c_p^2 \cos^2(2\theta)} \quad (5)$$

式中 c_p 和 c_s 分别为介质中压缩波和剪切波波速。当场地介质参数已知时,在给定的角 γ 、 α 、 θ 和 φ 下,可以三维反演斜入射 P 波、SV 波和 SH 波的时间序列。

式(1)表示地震动三维反演模型,当 $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ 、 $\alpha = \theta = \varphi = 0^\circ$ 时,退化为地震动一维反演模型;当 $0^\circ \leq \gamma, \alpha \leq 90^\circ$ 、 $0^\circ \leq \theta \leq \arcsin(c_s/c_p)$,且考虑平面 P 波和 SV 波组合作用时,退化为地震动二维反演模型^[27-28],地震动一维和二维反演是地震动三维反演

的特例。表 1 为对三种地震动反演模型的描述。

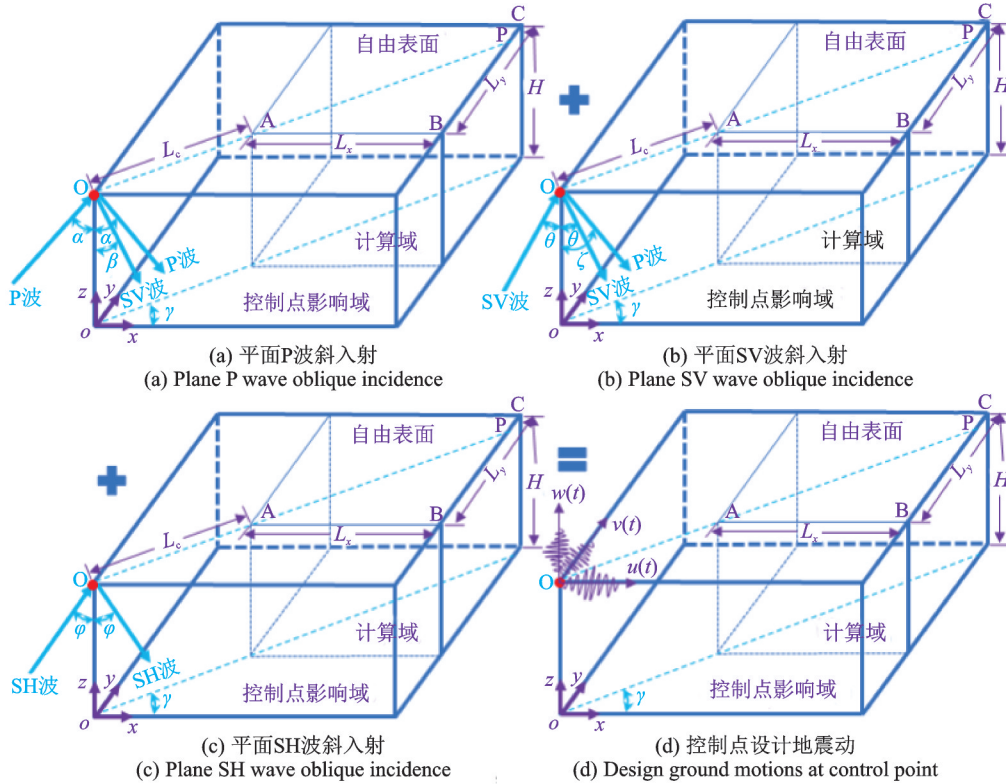


图 1 P 波、SV 波和 SH 波三维组合斜入射下的波场组成

Fig. 1 Wave field composition under three-dimensional combined oblique incidence of P, SV and SH waves

表 1 地震动一维、二维和三维反演模型描述

Tab. 1 Description of the ground motion 1D, 2D and 3D inversion models

反演方法	入射方式	γ, α, θ 和 φ 取值	控制点地震动组成
一维	平面 P 波、SV 波和 SH 波垂直入射	$0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ, \alpha = \theta = \varphi = 0^\circ$	x 向、 y 向和 z 向地震动分别由垂直入射 SV 波、SH 波和 P 波产生
二维	平面 P 波和 SV 波组合斜入射	$0^\circ \leq \gamma, \alpha \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq \arcsin(c_s/c_p)$	水平主震方向 (x 向和 y 向合成) 和 z 向地震动由斜入射 SV 波和 P 波共同产生
三维	平面 P 波、SV 波和 SH 波组合斜入射	$0^\circ \leq \gamma; \alpha, \varphi \leq 90^\circ; 0^\circ \leq \theta \leq \arcsin(c_s/c_p)$	x 向、 y 向和 z 向地震动由斜入射 SH 波、SV 波和 P 波共同产生

2 半空间表面自由场构建

以图 1 中半空间为研究对象,控制点 O 距计算域内点 A 的距离 $L_c=1000$ m,计算域边长 $L_x=L_y=1000$ m,深度 $H=200.0$ m,介质弹性模量为 2 GPa,密度为 2700 kg/m^3 ,泊松比为 0.24。以 1940 年发生在美国的 Imperial Valley-02 地震中 El Centro Array 9[#] 台站记录的水平两个方向位移 (I_I-ELC180 和 I_I-ELC270) 和竖向位移 (I_I-ELC-UP) 记录分别作为控制点 O 处 x 向、 y 向和竖直 z 向的位移分量,如图 2 所示。在地震动三维反演中 $\gamma=30^\circ, \alpha=60^\circ, \theta=10^\circ, \varphi=10^\circ$; 地震动二维反演中 $\gamma=30^\circ, \alpha=60^\circ, \theta=10^\circ$; 地震动一维反演中 $\gamma=0^\circ, \alpha=0^\circ, \theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$ 。

根据式(1)反演控制点 O 处的入射 P 波、SV 波和 SH 波的时间序列,反推入射 P 波、SV 波和 SH 波自控制点至任意位置的时间延迟,采用波函数组合法构建地震动一维、二维和三维反演下计算域空间的自由场位移。

2.1 自由场位移幅值、持时和波形分析

图 3 为基于地震动一维和三维反演方法构建的点 C 处的自由场位移。图 3 表明,在同一点处,基于地震动一维反演方法获得的自由场位移在峰值、波形和持时上与基于地震动三维反演方法获得的结果存在显著差异。与地震动三维反演方法相比,基于地震动一维反演方法获得的水平 x 向位移峰值增加了 15.5%,水平 y 向和竖直 z 向位移峰值分别减小了

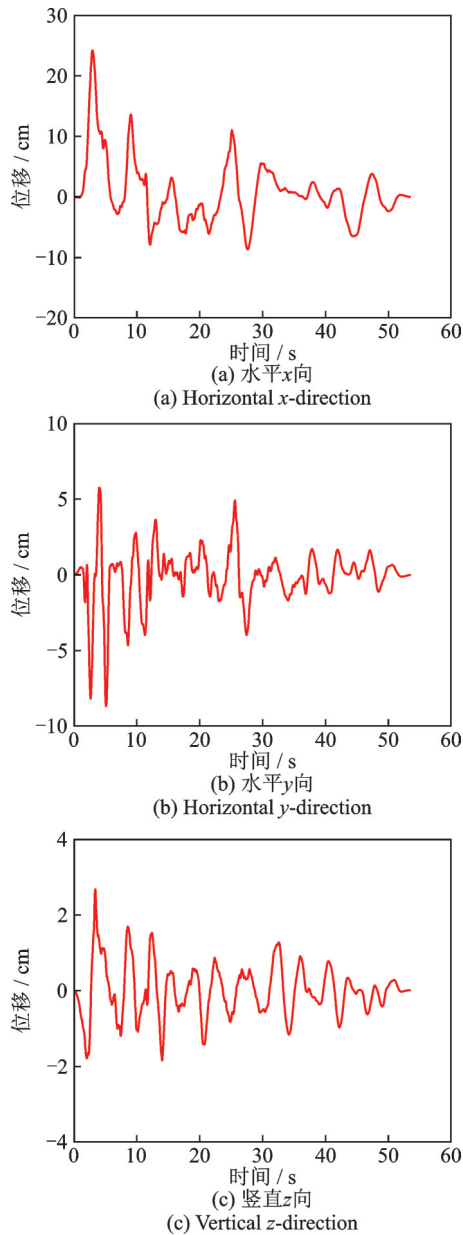


图 2 控制点 O 设计地震动的位移时程

Fig. 2 Displacement time history of design ground motions at control point O

21.5% 和 10.0%, 三向位移运动持时均缩短了 2.24 s。

图 4 为基于地震动二维和三维反演方法构建的点 C 处的自由场位移。图 4 表明, 基于地震动二维反演方法获得的位移结果明显不同于基于地震动三维反演方法获得的结果。与地震动三维反演方法相比, 基于地震动二维反演方法获得的水平 x 向和 y 向位移峰值分别减小了 44.6% 和 35.8%, 持时均增加了 1.33 s, 竖直 z 向位移峰值、波形和持时没有发生变化。与地震动三维反演方法相比, 基于地震动二维反演方法获得的水平向位移结果偏差较大。偏差的主要原因是: 将控制点水平 x 向和 y 向地震动在主震方向(入射方位角 γ)的投影叠加视为水平向地震动, 这种人为将地震动互相正交的三分量转化

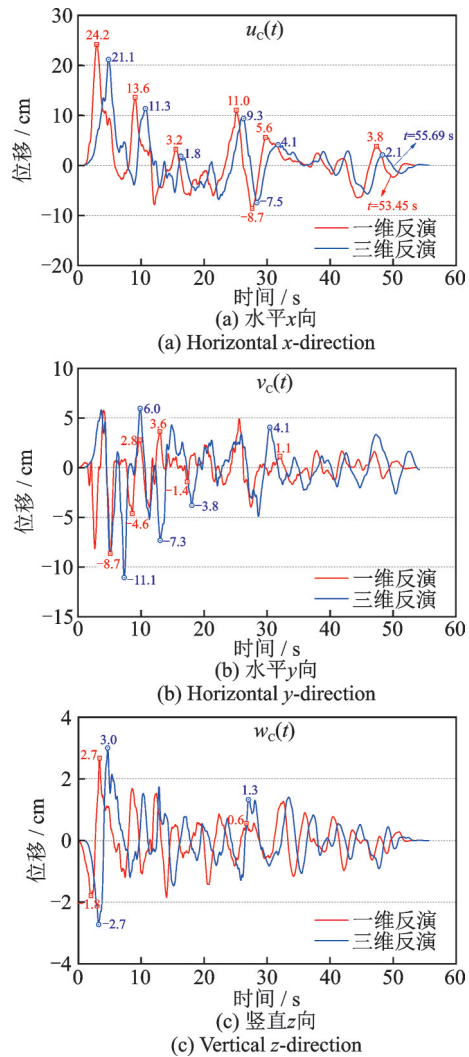


图 3 基于地震动一维和三维反演方法构建的点 C 处的位移
Fig. 3 Displacements of point C constructed based on the ground motion 1D and 3D inversion methods

为两分量的做法不符合实际。

2.2 自由场位移空间差异性分析

图 5 为基于地震动三维反演方法构建的控制点 O、点 B 和点 C 处的自由场位移。图 5 表明, 基于地震动三维反演方法构建的点 B 和点 C 处的自由场位移运动在峰值、波形和持时上明显不同于控制点地震动, 基于地震动三维反演方法构建的局部场地上的地震动呈现空间非一致性。在地震动一维反演方法中, 自由表面各点自由场位移在峰值、波形和持时上均一致, 并且各点自由场运动与控制点地震动相同。

在基于地震动二维和三维反演方法的自由场构建中, 地震波(P波、SV波和SH波)到达自由地表面不同位置的初至时间不同, 并且波场叠加机制不一致, 导致自由地表面任意点自由场运动存在空间非一致性。在基于地震动三维反演方法的自由场构建中, 自由表面点 C 处, P波、SV波和SH波的初至时间分别为 1.358, 0.760 和 2.237 s。基于地震动三维

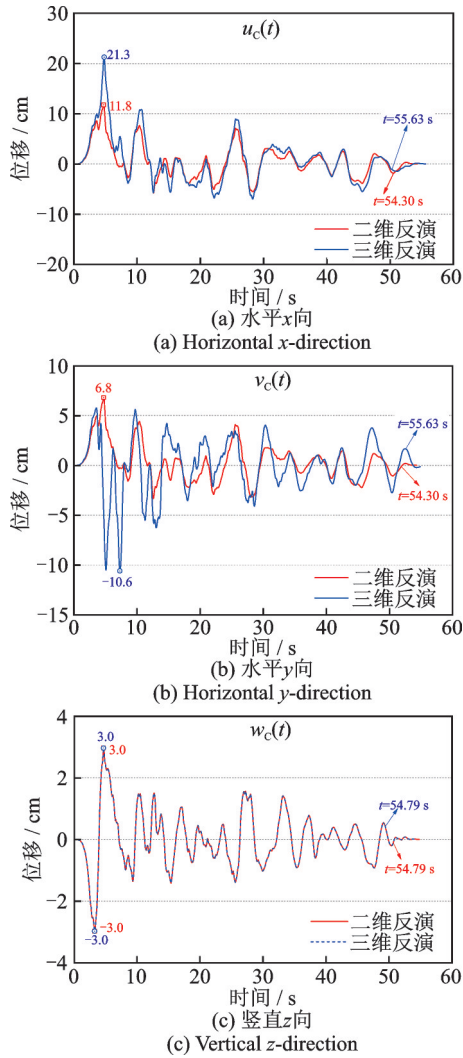


图4 基于地震动二维和三维反演方法构建的点C处的位移
Fig.4 Displacements of point C constructed based on the ground motion 2D and 3D inversion methods

反演方法的自由场构建考虑了地震波入射方位角 γ 和斜入射角 α, θ, φ 的不确定性,能够更全面地反映地震波的传播特性。地震动二维反演方法人为地将地震动互相正交的三分量转化为两分量,不符合实际情况。在基于地震动一维反演方法的自由场构建中,地震波自底部基准面到达平坦地表面任意点的初至时间相同,任意点位置处的叠加机制相同,致使平坦地表面任意点的自由场运动相同。

2.3 入射方位角和斜入射角对自由场的影响

不同位置处地震波初至时间与地震波入射方位角和斜入射角以及波速(取决于介质参数)有关。在均匀各向同性介质中,当波速和泊松比保持不变时,入射方位角和斜入射角成为决定空间任意点P波和S波初至时间的主要因素,也是导致不同空间点地震动存在幅值、波形和持时差异的主要原因。下面主要讨论不同入射方位角、斜入射角和泊松比情况下,基于地震动一维和二维反演方法构建的半无限

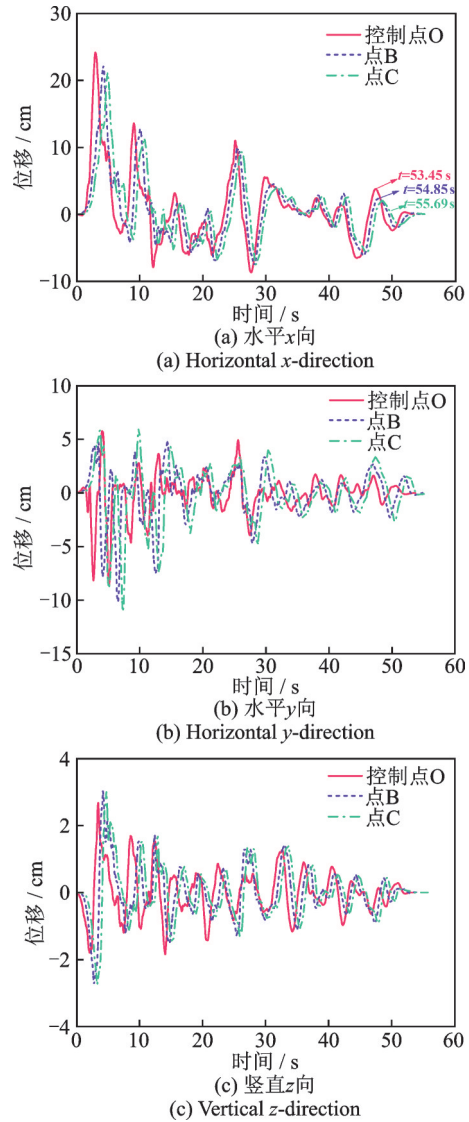


图5 基于地震动三维反演方法构建的点O、点B和点C位移
Fig.5 Displacements of points O, B and C constructed based on the ground motion 3D inversion method

空间自由场相对基于地震动三维反演方法构建的自由场的偏差。

图6为 $\gamma=30^\circ$ 时基于地震动一维和二维反演方法获得的点C处的位移峰值相对基于地震动三维反演的偏差随斜入射角(α, θ 和 φ)的变化。地震动一维反演中斜入射角 $\alpha=\theta=\varphi=0^\circ$;地震动二维反演中斜入射角 $\alpha=\theta$;地震动三维反演中斜入射角 $\alpha=\theta=\varphi$ 。

图6(a)表明,入射方位角 γ 不变,斜入射角较小时,基于地震动一维反演方法获得的自由表面位移峰值相对偏差小。斜入射角 $\alpha=\theta=\varphi=30^\circ$ 时,位移峰值的相对偏差达到最大。三个方向中竖直 z 向相对偏差最大,最大相对偏差为46.9%。图6(b)表明,基于地震动二维反演方法获得的水平 x 向位移峰值相对偏差较大,不同斜入射角情况相对偏差均在30%以上,水平 y 向在10%左右,竖直 z 向位移峰值与基于地震动三维反演方法获得的值接近。

可见,当平面P波、SV波和SH波入射方向与竖向的夹角均相等时,平面P波、SV波和SH波斜入射角主要影响基于地震动一维反演方法获得的竖直 z 向自由场分量,以及基于地震动二维反演方法获得的水平 x 向自由场分量。

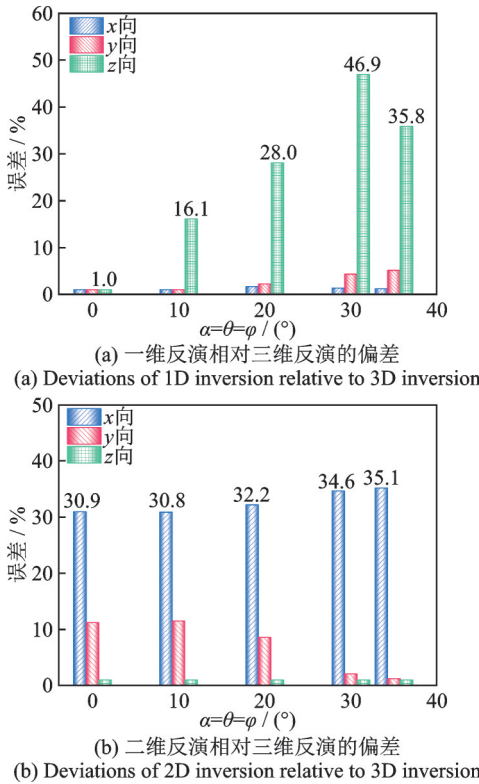


图 6 $\gamma=30^{\circ}$ 时点 C 位移峰值相对偏差随斜入射角 $\alpha = \theta = \varphi$ 的变化

Fig. 6 Variation of the peak displacement relative deviations of point C with the oblique incident angle $\alpha = \theta = \varphi$ when $\gamma=30^{\circ}$

由于P波波速大,S波波速小,P波和S波到达同一点的初至时间差异越大,该点地震动与控制点地震动的差异就越大,也说明基于一维反演方法构建的该点地震动与基于三维反演方法构建的地震动偏差越大。另外SV波存在入射临界角的问题,当斜入射角超过临界角时,SV波会失去均匀平面波的特性,SV波斜入射角的变化有限,因此可推断出入射方位角 γ 和P波斜入射角 α 对基于一维反演构建的位移峰值相对基于三维反演方法的偏差的影响更大。接下来主要讨论入射方位角 γ 和斜入射角 α 对相对偏差的影响。

图 7 为基于地震动一维反演方法获得的点 C 位移峰值相对基于地震动三维反演的偏差随入射方位角 γ 和斜入射角 α 的变化。其中,地震动一维反演过程中 $\gamma = \alpha = \theta = \varphi = 0^{\circ}$;地震动三维反演过程中 $\theta = \varphi = 10^{\circ}$ 。图 7 表明,基于地震动一维反演方法获得的 x 向位移峰值相对偏差随入射方位角 γ 先增大

后减小,随斜入射角 α 的增大而增大。在 $\gamma \in [0^{\circ}, 60^{\circ}]$ 和 $\alpha \in [40^{\circ}, 90^{\circ}]$ 的相交区域,位移峰值偏差较大,均在 10% 以上;在 $\gamma = 10^{\circ}, \alpha = 70^{\circ}$ 时偏差最大,为 55.8%。 y 向位移峰值相对偏差随入射方位角 γ 先增大后减小,随斜入射角 α 的增大而增大。在 $\gamma \in [10^{\circ}, 70^{\circ}]$ 和 $\alpha \in [50^{\circ}, 90^{\circ}]$ 的相交区域,位移峰值偏差较大,均在 10% 以上,最大偏差达 25.3%。 z 向位移峰值相对偏差随斜入射方位角 γ 和入射角 α 的变化没有明显的规律。在 $\gamma \in [0^{\circ}, 80^{\circ}]$ 和 $\alpha \in [0^{\circ}, 90^{\circ}]$ 的相交区域,位移峰值偏差较大,最大偏差接近 30%;当入射方位角 $\gamma = 90^{\circ}$ 时,基于地震动一维反演

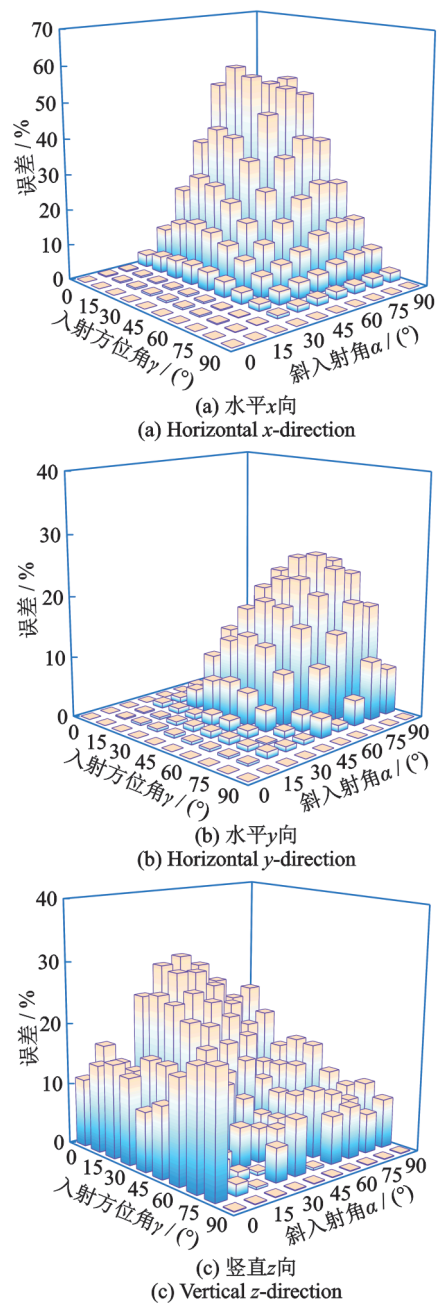


图 7 基于地震动一维反演方法的位移峰值相对三维反演的偏差

Fig. 7 Peak displacement deviations based on the ground motion 1D inversion relative to 3D inversion method

方法获得的位移峰值与基于地震动三维反演方法获得的位移峰值接近。

图 8 为基于地震动二维反演方法获得的点 C 位移峰值相对基于地震动三维反演的偏差随入射方位角 γ 和斜入射角 α 的变化。其中,地震动二维反演过程中 $\theta=10^\circ$;地震动三维反演过程中 $\theta=\varphi=10^\circ$ 。图 8 表明,基于地震动二维反演方法获得的水平向位移峰值偏差较大,竖向位移峰值与基于地震动三维反演方法获得的值接近,相对偏差可忽略,故没有给出竖向偏差变化图。当入射方位角 $\gamma=90^\circ$ (即平面 P 波和 SV 波的入射方位与 y 轴平行) 时, x 向位移峰值相对偏差最大,达到 100%,这种情况视为与 y 轴平行的二维平面振动问题;随着入射方位角 γ 减小, x 向位移峰值相对偏差单调减小,斜入射角 α 对相对偏差的影响小。当入射方位角 $\gamma=0^\circ$ (即平面 P 波和 SV 波的入射方位与 x 轴平行) 时, y 向位移峰值相对偏差最大,达到 100%,这种情况视为与 x 轴平行的二维平面振动问题;随着入射方位角 γ 增大, y 向位移峰值相对偏差单调减小,同样,斜入射角 α 对 y 向相对偏差影响小。导致点 C 位移峰值相对偏差较大的原因是,地震动二维反演方法人为地将水

平两向地震动在主震方向合成,这种做法不符合地震波传播规律,与实际情况不符。

2.4 介质泊松比对自由场的影响

当入射方位角与斜入射角保持不变时,场地不同位置处的地震波初至时间只与波速(取决于场地基岩介质参数)有关。由于 $c_s/c_p = \sqrt{(1-2\mu)/(2-2\mu)}$,其中 μ 为泊松比,因此 P 波和 S 波初至时间的差异与介质泊松比 μ 有关,泊松比 μ 越大, P 波和 S 波初至时间差异越大,导致任意点位移运动与控制点地震动的差异可能越明显。

为揭示有限域空间介质泊松比对地震动一维和二维反演获得的相对偏差的影响,图 9 为基于地震动一维和二维反演构建的点 C 处的位移峰值相对三维反演的偏差随泊松比的变化规律。

图 9(a) 表明,在水平 x 向和 y 向,随着介质泊松比增大,基于地震动一维反演方法构建的点 C 位移峰值相对三维反演的偏差单调减小,泊松比从 0.15 增大到 0.45 时, x 向偏差从 46% 减小到 3.0%, y 向偏差从 20.9% 减小到 1.3%,泊松比对 x 向和 y 向自由场的影响非常显著。泊松比对竖直 z 向相对偏差的影响不明显,偏差在 10% 左右。图 9(b) 表明,在水平 x 向,随着介质泊松比增大,基于地震动二维反演方法构建的点 C 位移峰值相对三维反演的偏差增加, x 向最大偏差为 36%。在水平 y 向,随着介质泊松比增大, y 向相对偏差减小, y 向最大偏差为 25.8%。泊松比不影响 z 向相对偏差。

在大多数情况下,基于地震动一维和二维反演方法构建的位移峰值相对地震动三维反演有较大的偏差,相对偏差随入射方位角和斜入射角以及介质泊松比变化。地震动三维反演考虑了不同类型平面波入射方位角和斜入射角的不确定性变化,能够反映工程场地地震动的空间非一致性,更符合场地地震动形成的物理机制和地震波的传播特性,并且基于地震动三维反演方法构建的地震动场能够更全面地反映控制点下的地震动场情况,因此有必要发展地震动三维反演方法。

3 地震动反演与自由场构建方法对大坝响应影响研究

3.1 工程概况与有限元模型

以西南地区某沥青混凝土心墙土石坝为研究对象,建立有限元分析模型。图 10 为沥青混凝土心墙

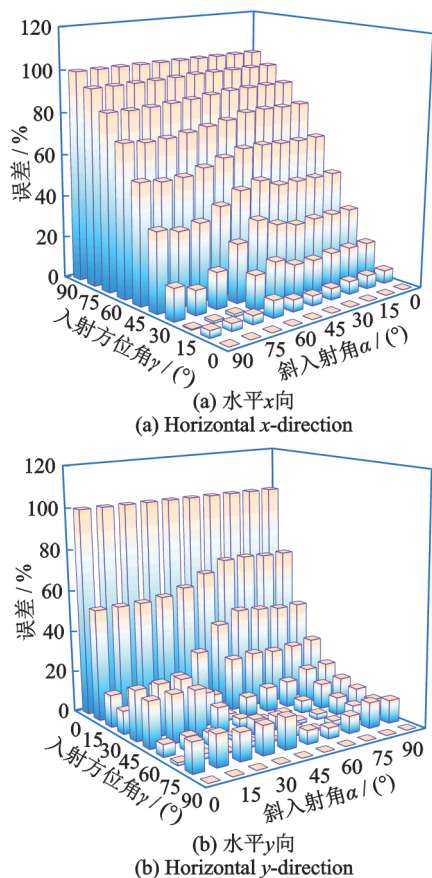
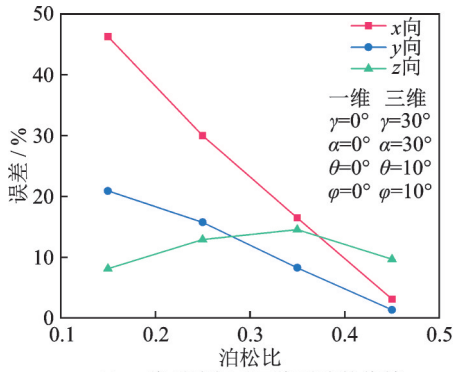


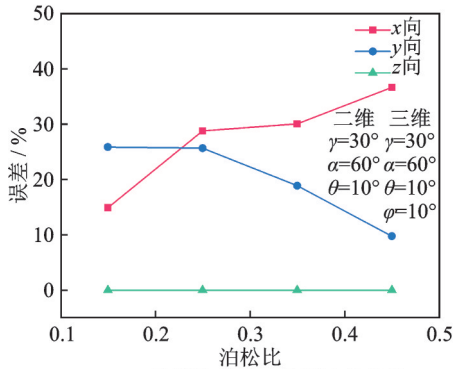
图 8 基于地震动二维反演方法的位移峰值相对三维反演的偏差

Fig. 8 Peak displacement deviations based on the ground motion 2D inversion relative to 3D inversion method



(a) 一维反演相对三维反演的偏差

(a) Deviations of 1D inversion relative to 3D inversion



(b) 二维反演相对三维反演的偏差

(b) Deviations of 2D inversion relative to 3D inversion

图 9 位移峰值相对偏差随泊松比的变化

Fig.9 Variation of peak displacement relative deviations with Poisson's ratio

土石坝水流向最大剖面。大坝坐落在梯形河谷基岩上,建基面高程为 848.0 m,正常蓄水位高程为 929.5 m,最大坝高为 84.5 m,坝顶宽 9.0 m,坝顶长 170.0 m。沥青混凝土心墙被上、下游土石体包裹,心墙高 83.5 m,心墙顶部厚度为 0.6 m,底部厚度为 1.1 m,心墙底部与混凝土基座连接,大坝上游坡比为 1:2.2,下游坡比为 1:2.0。河谷左、右岸坡度均为 1:1.5。

图 11 为基岩地基-沥青混凝土心墙土石坝-库水系统模型,在大坝左右岸方向、上下游方向和深度方向均延伸 1 倍坝高。采用大型商业有限元软件 ABAQUS 分析沥青混凝土心墙土石坝的地震响应,沥青混凝土心墙、过渡料、上下游土石料、混凝土基座和两岸岩体均采用 C3D8 单元类型模拟,沥青混

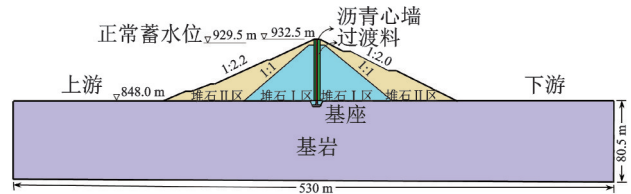


图 10 沥青混凝土心墙土石坝最大剖面

Fig.10 The maximum section of embankment dam with asphalt concrete core wall

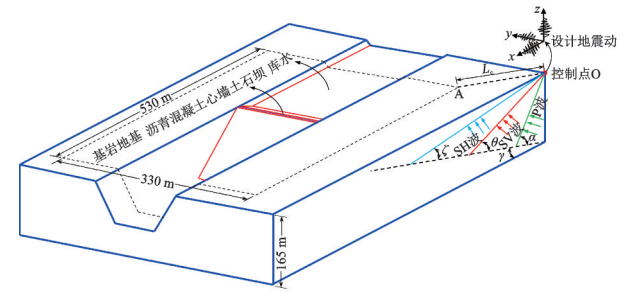


图 11 基岩地基-沥青混凝土心墙土石坝-库水三维模型

Fig.11 3D model of bedrock foundation-asphalt concrete core wall embankment dam-reservoir water

凝土心墙土石坝整体有限元模型单元总数为 38756,结点总数为 43119。由于心墙较薄,为反映循环往复荷载作用下心墙上下游侧变形的差异,在心墙厚度方向划分 5 层单元。

上下游土石料和沥青混凝土心墙分 8 级加载模拟施工分层填筑,水库分 3 级蓄水,沥青混凝土心墙上游面受到静水压力的作用,上游水位以下土石料受到浮托力的作用。静力计算中土石料、过渡料和沥青混凝土的本构关系采用邓肯-张 E-B 模型^[29],静力计算参数如表 2 所示。静力计算获得坝体土石料、过渡料和心墙的震前初始围压,将其作为动力时程计算初始条件。土石料、过渡料和沥青混凝土材料动力非线性特性通过等效线性化方法反映,应力-应变关系采用沈珠江等^[30]改进的等效线性黏弹性模型,动力计算参数如表 3 所示。静动力计算中,混凝土基座和基岩考虑为线弹性材料,混凝土和基岩的密度、弹性模量和泊松比分别为 2450 kg/m³ 和 2700 kg/m³, 28 GPa 和 8 GPa, 0.167 和 0.24。

表 2 邓肯-张 E-B 模型计算参数

Tab.2 Calculation parameters of Duncan-Chang E-B model

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K	n	R_f	c / kPa	φ_0	$\Delta\varphi$	K_b	m
堆石 I 区	2150	750	0.6	0.78	0	42	6.5	700	0.1
堆石 II 区	2180	810.8	0.25	0.65	0	51.7	9.1	265.0	0.2
过渡料	2250	910.9	0.31	0.63	0	50.6	7.2	395.5	0.34
沥青混凝土	2630	210.5	0.48	0.68	210	27.8	5.6	1401.5	0.47

注: ρ 表示质量密度, c 为凝聚力,其余均为常规三轴试验参数。

表3 动力计算参数

Tab. 3 Dynamic calculation parameters

材料	k_1	k_2	n	λ_{\max}	μ
堆石 I 区	20.0	2270	0.273	0.22	0.35
堆石 II 区	25.9	1694	0.38	0.245	0.35
过渡料	28.3	1832	0.375	0.22	0.328
沥青混凝土	15.7	1979.4	0.40	0.345	0.345

注: k_1 和 k_2 为动剪数模量系数, n 为动剪切模量指数, λ_{\max} 为最大阻尼比, μ 为泊松比。

3.2 计算工况

控制点 O 距上游左岸地表面点 A 的水平距离 $L_c=1000$ m, 控制点 O 地震动与图 2 中地震动相同, 同为 El Centro Array 9[#] 台站获得的实测记录, 基于地震动一维、二维和三维时域反演方法获得基岩中的入射波时程, 构建坝址场地地震动, 进而研究不同地震动反演下沥青混凝土心墙土石坝地震响应的差异。

基于三维时域反演方法研究了三种入射方式的心墙土石坝地震响应, 入射方式 1 中 $\gamma=0^\circ$, $\alpha=50^\circ$, $\theta=10^\circ$ 和 $\varphi=10^\circ$; 入射方式 2 中 $\gamma=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$, $\theta=10^\circ$ 和 $\varphi=60^\circ$; 入射方式 3 中 $\gamma=60^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 和 $\varphi=30^\circ$ 。基于二维反演方法研究了 $\gamma=0^\circ$, $\alpha=50^\circ$ 和 $\theta=10^\circ$ 入射方式下的心墙土石坝地震响应。基于一维反演方法研究了 $\gamma=0^\circ$, $\alpha=\theta=\varphi=0^\circ$ 入射方式下的心墙土石坝地震响应。

3.3 沥青混凝土心墙应力分析

图 12~14 分别为基于地震动三维、二维和一维反演方法获得的心墙最大主应力极大值分布, 图中负值表示受压, 正值表示受拉。图 12 表明, 心墙下部受压, 压应力最大值位于底部与混凝土基座连接处; 上部受拉, 拉应力最大值出现在心墙上部两侧。基于地震动三维反演的三种入射方式下, 心墙拉应力最大值分别为 392, 450 和 410 kPa, 拉应力最大值平均值为 418 kPa。由于基于地震动三维反演方法获得的心墙加速度峰值呈现空间非对称分布, 造成心墙最大主应力表现为空间非对称分布。在入射方式 1 中, 即使地震波入射方向与水流向平行, 心墙最大主应力仍然有迎波侧小、背波侧大的分布趋势, 分析认为, 主要由 SH 波在河谷两侧表面发生不一致的透射效应引起。

图 13 表明, 地震动二维反演下心墙仅在顶部附近受拉, 范围很小, 拉应力最大值仅为 70 kPa。在入射方向与水流向平行且没有考虑 SH 波的作用下, 基于地震动二维反演方法获得的心墙最大主应力等值线关于中心线对称。图 14 表明, 地震动一维反演

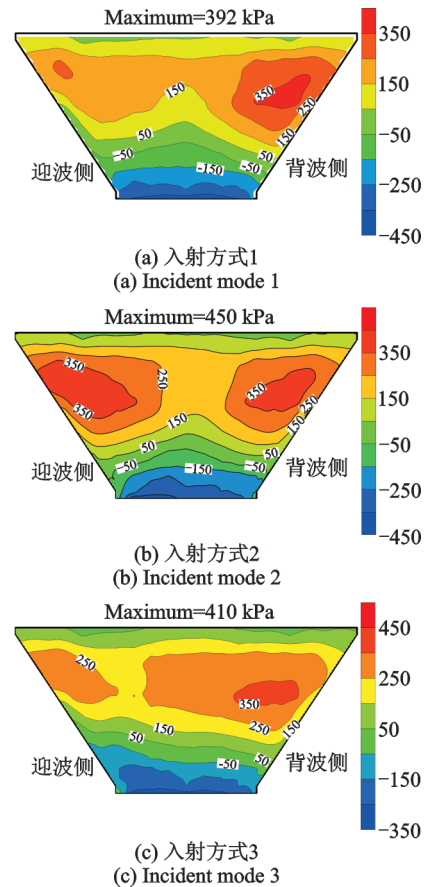


图 12 基于三维反演方法获得的心墙最大主应力

Fig. 12 The maximum principal stress of the core wall based on 3D inversion method

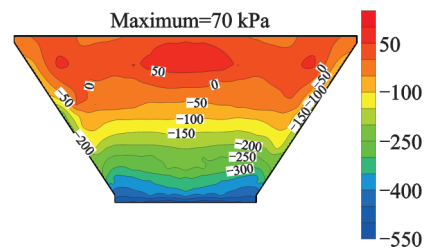


图 13 基于二维反演方法获得的心墙最大主应力

Fig. 13 The maximum principal stress of the core wall based on 2D inversion method

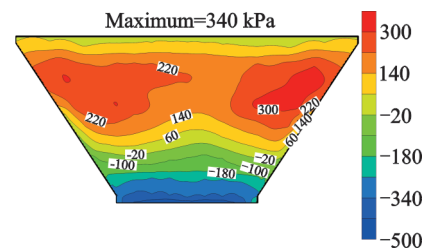


图 14 基于一维反演获得的心墙最大主应力

Fig. 14 The maximum principal stress of the core wall based on the 1D inversion

下拉应力最大值出现在心墙上部背波侧, 拉应力最大值为 340 kPa。地震动一维反演方法中各类型波入射方向均与地表垂直, 同样在 SH 波影响下河谷

两侧表面透射效应不一致,心墙最大主应力在两侧呈现空间非对称分布。

与基于地震动三维反演方法获得的结果相比,地震动二维和一维反演下心墙拉应力区缩小,拉应力最大值比三维反演结果的平均值分别减小了83.3%和20.0%。

4 结论

本文针对地震波入射方位角和斜入射角具有不确定性的事实,基于地表控制点设计地震动开展了地震动三维时域反演研究,基于地震动三维时域反演方法构建了局部小范围坝址场地上的自由场运动,并与地震动一维和二维反演方法获得的运动进行了对比分析。研究了三种地震动反演方法和自由场构建方法下沥青混凝土心墙土石坝地震响应的差异。主要结论如下:

(1)地震动三维时域反演考虑了地震波入射方位角和斜入射角的不确定性。地震动一维和二维时域反演是地震动三维时域反演的特例,当入射方位角 $\gamma \in [0^\circ, 90^\circ]$ 、斜入射角 $\alpha = \theta = \varphi = 0^\circ$ 时,地震动三维反演退化为地震动一维反演;当入射方位角 $\gamma \in [0^\circ, 90^\circ]$ 、斜入射角 $0^\circ \leq \alpha, \theta \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq \arcsin(c_s/c_p)$ 且考虑平面P波和SV波作用时,地震动三维反演退化为地震动二维反演。

(2)当入射方位角 γ 确定时,基于地震动一维反演的偏差随斜入射角先增大后减小,特征点竖向位移峰值的偏差较为突出,最大偏差达46.9%;基于地震动二维反演的水平 x 向位移峰值最大偏差达30%以上。当SV波和SH波的斜入射角确定时,基于一维地震动反演的偏差在 $\gamma \in [0^\circ, 60^\circ]$ 和 $\alpha \in [40^\circ, 90^\circ]$ 的相交区域,特征点最大偏差为水平 x 向的55.8%;基于地震动二维反演的偏差在入射方位与水平 y 轴平行时达到最大,水平 x 向偏差为100%。基于地震动三维反演方法构建的自由表面各点自由场位移在幅值、持时和波形上发生明显的变化,局部小范围场地上地震动场表现出空间和时间上的非一致特性。

(3)介质泊松比对基于地震动一维和二维反演方法相对地震动三维反演的偏差有显著的影响。介质泊松比越小,基于地震动一维反演方法获得的水平 x 向和 y 向偏差越大, x 向和 y 向位移峰值最大偏差分别为46%和20.9%,泊松比变化对竖直 z 向偏差影响小,位移峰值偏差在10%左右。介质泊松比增大,基于地震动二维反演方法获得的 x 向偏差增大,最大偏差为36%, y 向偏差减小,竖直 z 向偏差保持不变。

(4)沥青混凝土心墙土石坝实例研究表明:基于地震动三维和一维反演方法获得的心墙最大主应力呈现空间非对称分布,基于地震动二维反演方法获得的心墙最大主应力关于心墙中心线对称分布;基于地震动三维反演方法获得的心墙拉应力区较大,拉应力值最大;与基于地震动三维反演方法获得的结果相比,地震动二维和一维反演下拉应力最大值比三维反演结果的平均值分别减小了83.3%和20.0%。

基于地震动一维和二维时域反演的方法会低估大坝的地震响应。基于地震动三维时域反演方法构建的坝址地震动场更全面,可以体现坝址地震动空间的非一致性,适应河谷坝址-大坝-库水三维地震动响应分析的需求,较为全面地预测大坝的地震响应。建立的地震动三维反演方法可为大坝的抗震计算提供基础。

参考文献:

- [1] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1417-1423.
CHEN Houqun. Discussion on seismic input mechanism at dam site[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1417-1423.
- [2] Feldgun V R, Karinski Y S, Yankelevsky D Z, et al. A new analytical approach to reconstruct the acceleration time history at the bedrock base from the free surface signal records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 19-30.
- [3] Hu Y X. Input identification from structural vibrational response: UCB/EERC-80/26 [R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1980.
- [4] 胡聿贤, 朱镜清, 朱莉, 等. 频域中的结构振动输入反演[J]. 地震工程与工程振动, 1981, 1(1): 41-55.
HU Yuxian, ZHU Jingqing, ZHU Li, et al. Identification of input to vibrational structure in frequency domain [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1981, 1(1): 41-55.
- [5] 胡聿贤, 朱镜清, 朱莉. 非线性振动输入反演的时频域法[J]. 地震工程与工程振动, 1982, 2(2): 1-10.
HU Yuxian, ZHU Jingqing, ZHU Li. A mixed method for the input identification of nonlinear vibrations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1982, 2(2): 1-10.
- [6] 阴光华, 陈清军. 地震波反演与土-结构动力相互作用分析[J]. 力学季刊, 2010, 31(2): 256-264.
YIN Guanghua, CHEN Qingjun. Inversion of ground motion and analysis of soil-structure dynamic interaction

- [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(2): 256-264.
- [7] 蔡袁强, 凌道盛, 周迪永, 等. 非线性分层地基地面运动反演分析[J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 426-432.
CAI Yuanqiang, LING Daosheng, ZHOU Diyong, et al. Inverse calculational analysis of ground motion in non-linear layered soil[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 426-432.
- [8] 陈清军, 刘拓. 地震波反演两种计算方法比较与频率截断问题的探讨[J]. 力学季刊, 2010, 31(3): 388-394.
CHEN Qingjun, LIU Tuo. Comparison of two methods of ground motion inversion and discussion on question of frequency cut-off[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(3): 388-394.
- [9] 潘晓东, 董天乐, 蔡袁强, 等. 非线性成层地底下基岩平稳地震动输入[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2): 246-251.
PAN Xiaodong, DONG Tianle, CAI Yuanqiang, et al. Study on stationary earthquake motion input at bedrock under nonlinear layered soils[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(2): 246-251.
- [10] Mejia L H, Dawson E M. Earthquake deconvolution for FLAC [C]//Fourth International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2006: 4-10.
- [11] Schnabel P B, Lysmer J, Seed H B. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites: EERC 72-12[R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1972.
- [12] Ju S H. A deconvolution scheme for determination of seismic loads in finite-element analyses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 258-267.
- [13] Jeong C, Esmailzadeh S E. Seismic input motion identification in a heterogeneous halfspace[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(8): 04018070.
- [14] 陈厚群, 侯顺载, 王均. 拱坝自由场地震输入和反应[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(2): 53-64.
CHEN Houqun, HOU Shunzai, WANG Jun. Earthquake input and free-field motion response of arch dams [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(2): 53-64.
- [15] Chopra A K. Earthquake Engineering for Concrete Dams: Analysis, Design, and Evaluation[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [16] Løkke A, Chopra A K. Direct finite element method for nonlinear analysis of semi-unbounded dam-water-foundation rock systems[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(8): 1267-1285.
- [17] Løkke A, Chopra A K. Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of concrete dams: simplification, modeling, and practical application[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2019, 48(7): 818-842.
- [18] 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.
- [19] 杜修力, 黄景琦, 赵密, 等. SV波斜入射对岩体隧道洞身段地震响应影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1400-1406.
DU Xiuli, HUANG Jingqi, ZHAO Mi, et al. Effect of oblique incidence of SV waves on seismic response of portal sections of rock tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1400-1406.
- [20] 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.
- [21] Zhang J W, Li M C, Han S, et al. Estimation of seismic wave incident angle using vibration response data and stacking ensemble algorithm[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137: 104255.
- [22] Jin X, Liao Z P. Statistical research on S-wave incident angle[J]. Earthquake Research in China, 1994, 8(1): 121-131.
- [23] Sigaki T, Kiyohara K, Sono Y, et al. Estimation of earthquake motion incident angle at rock site[C]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: National Society for Earthquake Engineering, 2000: 1-8.
- [24] Ghahari S F, Abazarsa F, Jeong C, et al. Blind identification of site effects and bedrock motion from surface response signals[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 322-331.
- [25] Liang J W, Zhang A J, He Y, et al. 2D nonlinear inversion of bedrock motion from the surface motion of a layered half-space[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 106: 149-159.
- [26] Cen W J, Du X H, Li D J, et al. Oblique incidence of seismic wave reflecting two components of design ground motion[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 4127031.
- [27] 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.
- [28] 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.
- 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): 913-924.
- [29] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [30] 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.

3D time domain inversion of incident waves in the bedrock and free field construction

WANG Fei^{1,2}, SONG Zhi-qiang¹, LIU Yun-he¹, LI Chuang¹

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

2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The one-dimensional and two-dimensional time-domain inversions of the bedrock incident waves cannot reflect the spatial arbitrariness of the incident azimuth and oblique incident angles, and the free field constructed based on these two methods might deviate is far from reality. It is necessary to carry out a three-dimensional time-domain inversion of the bedrock incident waves. Based on the wave function combination method, the free field of the ground surface control point is expressed by the time histories of the incident waves of P, SV and SH waves. A three-dimensional time-domain inversion method of bedrock incident waves based on design ground motions is established. Then, the spatially non-uniform free field under the oblique incidence of multi-wave combination is constructed. Finally, the free field deviations constructed based on one-dimensional and two-dimensional inversion methods are analyzed, and the influence mechanisms of different inversion and free field construction methods on the seismic response of the asphalt concrete core dam are revealed. The results show that the free field constructed based on the three-dimensional inversion method of ground motion has spatial inconsistency and can reflect the site ground motion field more comprehensively. Compared with the ground motion field constructed based on three-dimensional inversion, when the incident azimuth angle is $0^\circ \sim 60^\circ$ and the oblique incident angle is $40^\circ \sim 90^\circ$, the feature point free field in the x -direction constructed by the one-dimensional inversion method has a large deviation with the maximum deviation 55.8%; When the incident direction is parallel to a certain horizontal coordinate axis, the other horizontal free field deviation of the feature point constructed by the two-dimensional inversion is larger, and the maximum deviation is 100%; When the Poisson's ratio of the medium increases, the deviation of the x -direction free field decreases under the one-dimensional inversion, and the free-field deviation of the x -direction increases under the two-dimensional inversion, and the maximum deviations of the feature points are 46% and 36%, respectively. Compared with the maximum tensile stress of the core wall based on the three-dimensional inversion method of ground motion, the maximum tensile stresses under the two-dimensional and one-dimensional inversion methods are reduced by 83.3% and 20.0%, respectively. Therefore, it is necessary to perform a three-dimensional inversion of bedrock incident waves and construct a spatially non-uniform free field based on the design ground motion in the seismic design of dams.

Key words: oblique incident wave; asphalt concrete core dam; three-dimensional time-domain inversion; free field; non-uniform characteristic

作者简介: 王 飞(1993—),男,博士,讲师。E-mail: feiwang201268@163.com。

通讯作者: 宋志强(1981—),男,博士,教授。E-mail: zqsong@xut.edu.cn。