

DOI: 10.11779/CJGE20231282

考虑场地效应的多点地震动作用下边坡永久位移分析

宋 健^{1,2}, 潘驭航², 陆朱汐², 姬 建^{1,2}, 张 飞^{1,2}, 高玉峰^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 地震动引起的边坡土层非线性动力响应可能导致坡体不同位置的地震动加速度时程不一致, 从而对整个滑动体的极限平衡状态及之后的地震累积永久位移产生影响。为了研究场地效应对边坡地震永久位移的影响, 基于极限平衡条分法, 通过对不同土条赋予不同的水平和竖向地震动时程, 推导出一种考虑场地效应的圆弧和任意形状滑面的多点地震作用下边坡永久位移分析方法。通过与有限差分软件 FLAC 的数值模拟结果进行对比, 验证了该方法能够合理考虑地震动的场地效应。通过研究不同分布形式的多点地震动及竖向地震动对边坡永久位移的影响, 结果表明: 场地效应引起的水平地震动放大以及多点地震动不同分布模式会导致整个滑体平均地震惯性力作用位置发生改变, 从而影响地震作用下滑动体沿滑面的永久变形量, 竖向地震动对边坡地震位移影响较小。将方法应用于 Lexington 土石坝震后变形案例分析, 计算得到的坝坡地震永久位移与实际震后观测值相吻合, 证明了考虑场地效应的重要性及本文方法的合理性。

关键词: 地震边坡稳定性; 场地效应; 永久位移; 极限平衡条分法; 多点地震动

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)01-0065-11

作者简介: 宋 健(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土地震工程、边坡工程等方面的研究工作。E-mail: jiansonghh@163.com。

Permanent displacement of slopes under multi-point earthquake ground motions considering site effects

SONG Jian^{1,2}, PAN Yuhang², LU Zhuxi², JI Jian^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2}, GAO Yufeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The nonlinear dynamic response of slope soils caused by seismic motion may lead to inconsistent time histories of seismic acceleration at different positions of a slope. This will affect the limit equilibrium state and the cumulative seismic permanent displacement of the slope. In order to investigate the influences of site effects on the permanent displacement of slopes during earthquakes, a method for considering the multi-point earthquake ground motions is presented. The proposed method is derived based on the limit equilibrium slice method by considering different time histories of horizontal and vertical seismic motions for slices and can be used for circular and arbitrary-shaped slip surfaces. The method is capable to reasonably consider the site effects through a comparison with numerical results obtained by the FLAC. The effects of different distributions of multi-point ground motions and vertical ground motions on the permanent displacement of slopes are investigated. The results indicate that the amplification of horizontal ground motions and the different distributions of multi-point ground motions induced by the site effects have a significant impact on seismic slope displacement, while the influence of vertical ground motions are small. The method is then applied to a case study of post-earthquake deformation of the Lexington Dam. The calculated seismic permanent displacement agrees well with the observed post-earthquake values. This confirms the importance of considering the site effects and the rationality of the proposed method in this study.

Key words: seismic slope stability; site effect; permanent displacement; limit equilibrium method; multi-point earthquake ground motion

0 引言

中国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间, 地震活动强烈, 发震频率高、强度大、分布广, 同时中

国山区面积广阔, 地形起伏变化大, 这使得中国地震

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378335, 52178325, U22A20594)

收稿日期: 2023-12-28

滑坡灾害频发。由地震引发的滑坡对人民的生命财产安全造成了巨大的威胁。

在 1965 年朗肯讲座上, Newmark^[1]提出了一种基于地震位移的边坡地震稳定性评价方法, 其模型合理性和复杂程度均介于拟静力法和数值方法之间, 目前在国内外被广泛应用。国内外诸多学者对 Newmark 滑块分析法进行了研究与改进。在平面滑动模式方面, Makdisi 等^[2]提出了地震边坡非耦合滑块分析方法, 分别计算滑动体动力响应和滑动位移, 不考虑其相互影响。非耦合分析得到的结果一般偏于保守, 被广泛用在垃圾填埋场、土石坝等边坡工程抗震设计中^[3-4]。Rathje 等^[5]提出考虑土体非线性响应与地震边坡位移相互影响的耦合分析方法, 并对非耦合简化的合理性进行了系统分析。Song 等^[6-9]通过推导多块体滑移动力方程, 建立了用于无限长边坡模型的多滑动面地震位移分析方法, 并初步明确了地震多滑面滑移现象存在复杂的相互耦合作用。在非平面滑动模式方面, Bandini 等^[10]基于通用条分法提出一种考虑了剪切强度退化和几何结构重新排列的 Newmark 滑块模型。Ji 等^[11]基于简化 Bishop 条分法建立了改进的 Newmark 滑块位移模型, 研究了滑体转动破坏模式下滑体的地震永久位移。陈昌富等^[12]根据 Newmark 地震永久位移分析理论, 基于 Spencer 斜条分法提出了一种考虑滑面抗剪强度震动衰减的岩土边坡地震永久位移计算新方法。王家鑫等^[13]提出了考虑土体应变软化效应的边坡动态屈服加速度及震后位移改进计算方法。刘爱娟等^[14]提出了考虑动态临界加速度的地震边坡永久位移经验预测模型。宋健等^[15]基于 Spencer 极限平衡分析原理, 提出了一种滑面为非平面的双滑面土质边坡地震位移计算方法。

目前关于地震边坡永久位移的研究往往对边坡不同位置采用相同的地震动输入。实际地震动受到场地效应的影响, 地震动在空间上不同位置各不相同^[16-18]。基于强震动观测数据的场地反应研究已经证实地表沉积物和地形对地震动的幅值、频谱特性和持时都有显著的影响^[19]。地表沉积物的土层非线性动力反应对不同频率的地震波会引起放大或者减小作用^[20-22], 边坡场地效应引起的地震动变化对边坡本身的变形和稳定性也有重要影响^[23-25]。

本研究提出了一种考虑场地效应的多点地震作用下边坡永久位移分析方法。该方法综合考虑了由于边坡场地效应引起的地震动在空间和时间上的变化特性, 使得不同土条受到不同方向和大小的地震加速度作用, 能够更合理地进行边坡在地震作用下的永久位移分析。将本研究方法与有限差分软件 FLAC 的数值结果进行对比, 验证了该方法能够合理考虑地震动的

场地效应; 并将所提出的方法应用于 Lexington 土石坝震后变形案例分析。

1 多点地震动边坡永久位移计算方法推导

1.1 分析模型及假设条件

以一个均质简化边坡为例, 假设坡体为单相土体, 不存在孔隙水, 如图 1 (a) 所示。基于极限平衡条分法, 将滑体划分为 N 个土条, 每个土条受到不同大小的竖直和水平方向的地震动作用, 第 i 个土条受到的竖直方向等效地震动加速度为 $k_i^y g$, 水平方向等效地震动加速度为 $k_i^h g$ (其中 k_i 为地震动系数, g 为重力加速度)。图 1 (a) 中 e_i , r_i , h_i , v_i 为对圆弧滑面进行圆心取矩所需的几何参数。尽管在示意图中滑面呈圆弧形状, 但本研究的方法适用于任意形状的滑面, 后续推导将介绍针对不同滑面形状的地震位移计算方法。同时, 本研究方法也适用于分层土体边坡的地震位移分析。

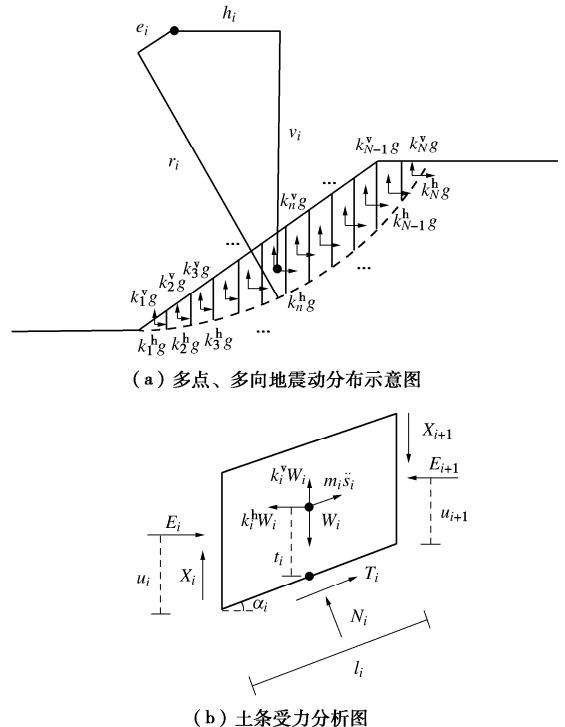


图 1 边坡分析模型

Fig. 1 Slope analysis model

本研究方法作了如下假定: ①为考虑地震动的场地效应, 地震动在不同土条内各不相同, 但在任一土条内部认为地震作用相同, 即任一土条的地震惯性力作用于土条质心; ②对于滑面为圆弧形状的边坡, 在滑动过程中, 滑体围绕圆弧滑面的圆心发生转动, 所有土条的角位移相等; ③对于滑面为任意形状滑面的边坡, 在滑动过程中, 土条沿着土条底部的滑面发生

滑动, 土条与土条之间既不重叠也不脱离, 认为所有土条在土条条分界面的法向(即水平方向)位移相同; ④Newmark 边坡地震永久位移通常只作为评价边坡的震后状态和性能的指标, 而不是用于预测边坡地震失稳后的大变形运动。由于地震诱发滑坡发生的临界滑体变形量(一般为几厘米到几十厘米量级^[26])远小于边坡尺寸(几十米量级), 因此为了简化, 在分析过程中忽略滑体永久位移引起的边坡几何形状变化的影响, 即在整个滑动过程中所采用的分析模型及条分位置不变。

第*i*个土条的受力分析如图1(b)所示, W_i 为土条重量, l_i 为土条底部长度, N_i 为土条底部法向力, T_i 为土条底部切向抗剪力, E_i 为土条法向条间力, X_i 为土条切向条间力, α_i 为土条基底的倾角, \ddot{s}_i 为土条发生滑动时沿滑面方向的滑动加速度。图1(b)中 u_i 为条间力作用点到土条侧边界底部端点的距离, t_i 为土条重心到土条底部中点的距离。

在滑体滑动过程中, 根据滑体滑动形式的不同, 存在以下两种位移协调方程来描述不同土条之间的关系。对于圆弧形状的滑面(如图2(a)所示), 滑体达到极限平衡状态后的运动变形可以看作是达到极限平衡状态后滑体围绕圆弧滑面圆心发生的转动。在这种情况下, 不同土条之间的转动角加速度是相同的^[11, 27-28], 表示为

$$\ddot{s}_i = \ddot{\theta} R_i \quad . \quad (1)$$

式中: $\ddot{\theta}$ 为滑体发生滑动时的转动角加速度; R_i 为滑面圆心到土条质心的距离。

对于任意形状的滑面, 由于假定土条是刚体, 在滑体滑动过程中, 不同的土条之间以及土条与滑面之间既不重叠也不脱离,(如图2(b)所示)。因而, 在土条的条分界面的法向^[29-30](水平方向), 不同土条滑体达到极限平衡状态后沿滑面的运动变形产生的滑动加速度相同, 表示为

$$\ddot{s}_h = \ddot{s}_i \cos \alpha_i \quad . \quad (2)$$

式中, \ddot{s}_h 为滑体发生滑动时的水平滑动加速度。

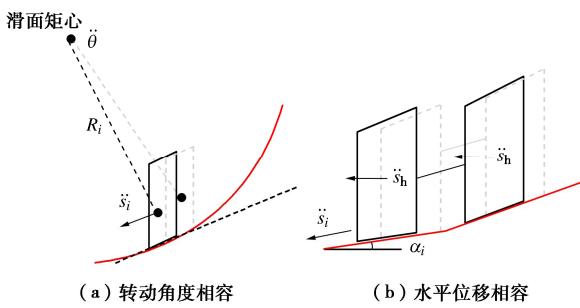


图2 位移相容条件

Fig. 2 Displacement compatibility conditions

1.2 滑体滑动加速度和滑动位移计算

对于圆弧形状滑面, 滑面的地震位移计算过程如

下。

土条*i*的水平方向受力平衡方程为

$$T_i \cos \alpha_i + m_i \ddot{s}_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i - \Delta E_i - k_i^h W_i = 0 \quad . \quad (3)$$

土条*i*的竖直方向受力平衡方程为

$$W_i - k_i^v W_i + \Delta X_i - m_i \ddot{s}_i \sin \alpha_i - T_i \sin \alpha_i - N_i \cos \alpha_i = 0 \quad . \quad (4)$$

其中, $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$, $\Delta X_i = X_{i+1} - X_i$ 。

当滑体处于滑动失稳状态时, 滑面处土体的抗剪强度将完全发挥。土条底部切向抗剪力 T_i 与法向力 N_i 满足莫尔库仑准则:

$$T_i = \tau_i l_i = (\sigma_i \tan \varphi_i + c_i) l_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i \quad . \quad (5)$$

式中: l_i 为土条*i*底面长度; τ_i 为土条*i*底部抗剪强度; σ_i 为土条*i*底部法向应力; φ_i 为土条*i*土体的内摩擦角; c_i 为土条*i*土体的黏聚力。

假定不同土条的条间力之间存在如下关系^[31]:

$$\lambda = X_i / E_i \quad . \quad (6)$$

联立式(3)~(6), 消去土条两侧的条间力 E_i 和 X_i , 可以得到土条底部法向力 N_i 的表达式:

$$N_i = [W_i(1 - k_i^v) - m_i \ddot{s}_i \sin \alpha_i - c_i l_i \sin \alpha_i - \lambda k_i^h W_i + \lambda c_i l_i \cos \alpha_i + \lambda m_i \ddot{s}_i \cos \alpha_i] / [\lambda(\sin \alpha_i - \tan \varphi_i \cos \alpha_i) + (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i)] \quad . \quad (7)$$

对整个滑体进行水平方向合力平衡分析, 得到

$$\sum_{i=1}^N T_i \cos \alpha_i + m_i \ddot{s}_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i - k_i^h W_i = 0 \quad . \quad (8)$$

整个滑体对滑面的圆心求矩, 若位移相容条件采用转动角度相容, 则得到滑体的转动角加速度为

$$\ddot{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N [k_i^h W_i v_i + (1 - k_i^v) W_i h_i + N_i e_i - T_i r_i]}{\sum_{i=1}^N (m_i h_i \sin \alpha_i + m_i v_i \cos \alpha_i) R_i} \quad . \quad (9)$$

若位移相容条件采用水平位移相容, 则得到滑体的水平方向滑动加速度为

$$\ddot{s}_h = \frac{\sum_{i=1}^N [k_i^h W_i v_i + (1 - k_i^v) W_i h_i + N_i e_i - T_i r_i]}{\sum_{i=1}^N (m_i h_i \tan \alpha_i + m_i v_i)} \quad . \quad (10)$$

联立式(8)~(10), 可以得到滑体的滑动加速度与条间力比值 λ 。对于滑面为圆弧形状的滑体, 计算滑动加速度的方法可以简化, 即假定 $\lambda=0$ (假定任意土条左右两侧的切向条间力大小相等, 作用方向相反, 从而在公式建立过程中忽略切向条间力^[32]), 结合式(9)或(10), 可以直接求得滑体的滑动加速度。在下文中将对比考虑切向条间力与否对滑面永久位移的影响。

对于任意形状滑面边坡, 其地震位移计算过程与上述不同之处在于将力矩平衡的矩心由滑面圆心改为

土条底部的中点^[33], 具体分析过程如下。

联立式(3)~(6), 消去土条底部法向力 N_i 和底部切向抗滑力 T_i , 可以得到土条法向条间力:

$$\Delta E_i = [k_i^h W_i (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) - c_i l_i - m_i \ddot{s}_i - (1 - k_i^v) W_i (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i)] / [\lambda (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i) - (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i)]。 \quad (11)$$

对不同土条的法向条间力求和, 由于第 $i-1$ 个土条的右侧法向条间力 E_i 和第 i 个土条的左侧法向条间力 E_i 大小相等、作用方向相反, 因而对所有土条的法向条间力 E_i 求和为 0。若滑体的位移相容条件采用转动角度相容(圆弧滑面视为任意形状滑面的一种), 则滑体的转动角加速度为:

$$\ddot{\theta} = \frac{[k_i^h W_i (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) - c_i l_i - \sum_{i=1}^N (1 - k_i^v) W_i (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i)]}{\sum_{i=1}^N \lambda (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i) - (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i)}。 \quad (12)$$

若滑体的位移相容条件采用水平位移相容, 则滑体的水平方向滑动加速度为:

$$\ddot{s}_h = \frac{k_i^h W_i (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) - c_i l_i - \sum_{i=1}^N (1 - k_i^v) W_i (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^N \lambda (\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i) - (\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i)}。 \quad (13)$$

再对土条底部中点建立力矩平衡方程(顺时针方向为正), 可得

$$-k_i^h W_i t_i + X_i \frac{l_i}{2} \cos \alpha_i + X_{i+1} \frac{l_i}{2} \cos \alpha_i - M_{i+1} - E_{i+1} \frac{l_i}{2} \sin \alpha_i + M_i - E_i \frac{l_i}{2} \sin \alpha_i + m_i \ddot{s}_i \cos \alpha_i t_i = 0。 \quad (14)$$

其中, $M_{i+1} = E_{i+1} u_{i+1}$, $M_i = E_i u_i$ 。与 ΔE_i 的求和类似, 由于 M_i 在两个相邻的土条中成对存在且大小相等作用方向相反, 因此对于整个滑体 $\sum(M_{i+1} - M_i) = 0$, 可得

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{i+1} + E_i) \frac{l_i}{2} \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^N (E_{i+1} + E_i) \frac{l_i}{2} \cos \alpha_i}。 \quad (15)$$

联立式(13)~(15), 可以得到滑体的滑动加速度与条间力比值 λ 。

传统的边坡地震位移分析方法通常使用屈服系数来判断滑体是否发生滑动, 该屈服系数表征了滑体能够承受的极限水平地震惯性力大小。然而在本研究中, 不同滑体受到不同大小的双向地震作用, 因此无法将某一固定的屈服系数作为地震动触发滑体发生

滑动的判断标准。为此, 本文提出了一种新的滑动触发判断方法: 假设滑体的抗剪强度完全发挥, 将当前时刻的地震动加速度直接作用于滑体, 并计算滑体在地震动作用下的滑动加速度, 若滑动加速度大于 0, 则说明该时刻地震动作用下滑体的抗剪强度无法抵抗滑体的下滑力, 因此滑体发生滑动, 反之, 若滑动加速度小于等于 0, 则认为滑体不发生滑动。若某个时刻滑动触发, 则加速度进行积分得到速度, 用于判断滑动是否终止。对整个地震动时程进行上述分析, 最终得到边坡地震滑动位移时程。具体分析流程见图 3。

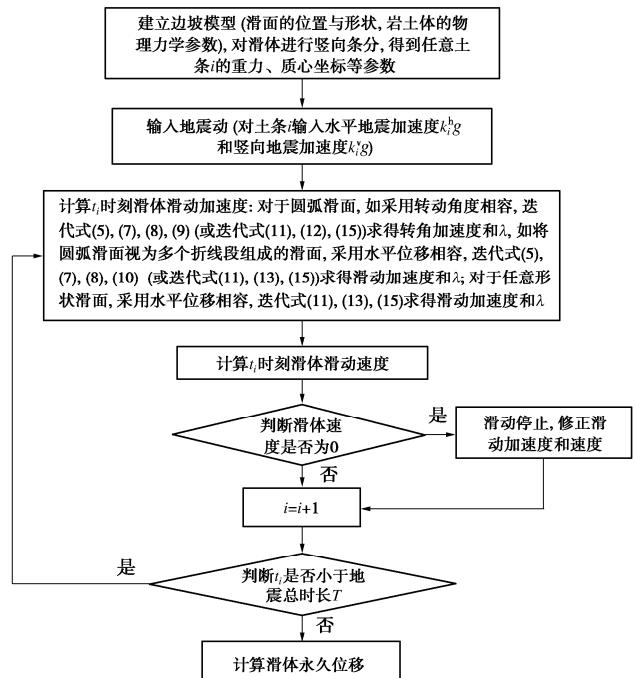


图 3 边坡地震位移分析流程图

Fig. 3 Flow chart of seismic slope displacement analysis

2 算例分析及与数值模拟结果对比

2.1 算例边坡模型及地震动

分析模型为均质土体简化边坡模型, 边坡高度取为 40 m, 土层深度为 80 m, 边坡的坡角为 35°, 土层底部为基岩。均质土体的重度为 20 kN/m³, 黏聚力为 35 kPa, 内摩擦角为 21°, 剪切波速为 400 m/s; 底部基岩的重度为 22 kN/m³, 剪切波速为 760 m/s。在所提出的考虑场地效应多点地震动作用的边坡地震永久位移分析方法中, 需要先得到不同土条的地震动系数 k_i , 本文通过对每个土条进行一维土层地震反应分析^[34]得到滑面位置深度的剪应力时程, 则水平地震动系数时程 k_i^h 可表示为^[35]

$$k_i^h(t) = \tau^h(t) / \sigma_v。 \quad (16)$$

式中: $\tau^h(t)$ 为滑面位置处的水平剪应力时程; σ_v 为滑面位置处的竖向应力, 可由土条深度和重度得到。

表1 地震动记录主要参数
Table 1 Main parameters of earthquake ground motions

地震动编号 (RSN)	地震名称	场地名称	矩震级	场地-断层 距离/km	峰值加速度		峰值速度		平均主导频率 ^[37]	
					PGA/g	水平向	竖向	水平向	竖向	f _m /Hz
4097	Parkfield-02, CA	Slack Canyon	6.00	2.99	0.21	0.11	25.94	8.72	1.40	1.74
1012	Northridge-01	LA 00	6.69	19.07	0.26	0.18	28.85	6.05	2.29	5.95
3932	Tottori, Japan	OKYH14	6.61	26.51	0.45	0.17	23.22	3.13	6.28	10.99

土体剪切模量和阻尼比与剪应变的非线性关系采用 Vucetic 等^[36]提出的黏土模型(塑性指数 I_p=30), 基岩阻尼比取为 0.5%。

同时, 为研究不同频率地震动引起的场地效应对边坡地震永久位移的影响, 从美国太平洋地震工程研究中心 NGA West2 地震数据库中选取了 3 组主导频率不同的水平方向地震动, 分别为 2004 年美国 Parkfield 6.0 级地震动(台站编号 RSN4097)、1994 年美国 Northridge 6.7 级(台站编号 RSN1012)地震动和 2000 年日本 Tottori 6.6 级地震动(台站编号 RSN3932)。地震动的水平方向加速度时程以及傅里叶谱结果如图 4 和图 5 所示, 地震动记录的主要参数如表 1 所示, 平均主导频率^[37]分别为 1.40 Hz(RSN4097)、2.29 Hz(RSN1012) 和 6.28 Hz(RSN3932)。

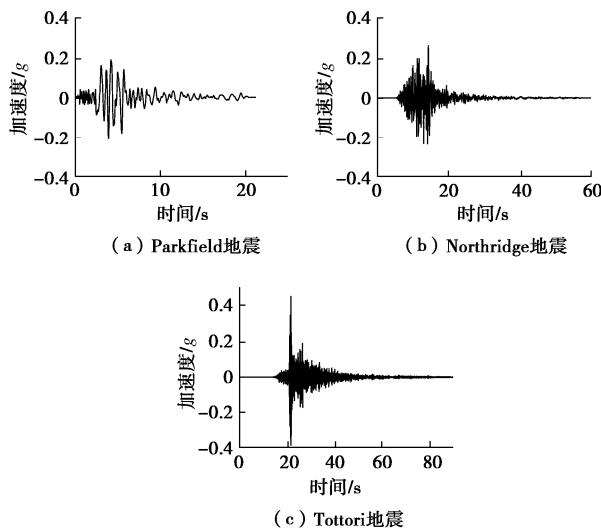


图 4 地震动的加速度时程(水平方向)

Fig. 4 Time histories of acceleration of seismic motion (horizontal direction)

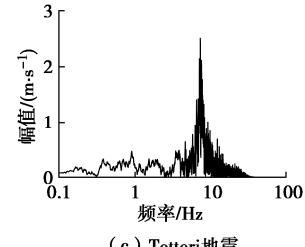
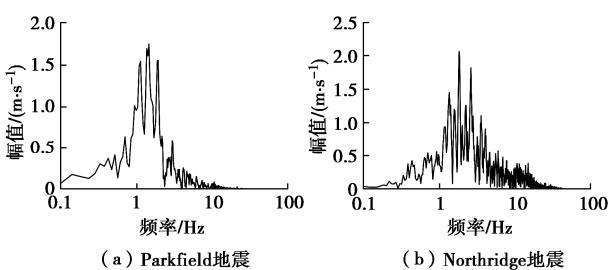
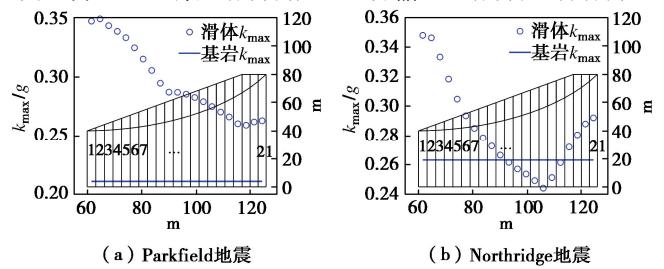


图 5 水平方向地震动加速度的傅里叶谱曲线(半对数坐标系)

Fig. 5 Curves of Fourier spectrum of seismic acceleration in horizontal direction (in semilog coordinate)

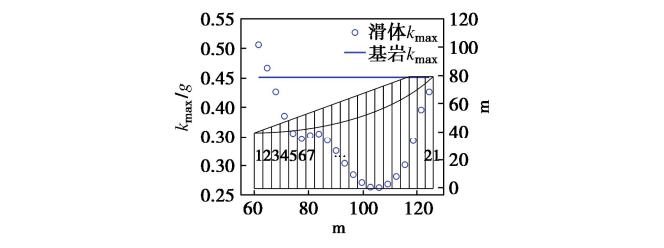
2.2 多点地震响应及永久位移结果分析

通过拟静力极限平衡方法获得坡体内最危险滑动面(土条编号从坡脚开始至坡顶), 将每一个土条视为一个土柱, 进行土层地震反应分析获取滑面处的剪应力时程进而得到水平地震动系数时程(滑体等效加速度)。不同土条的最大滑体等效加速度 k_{\max} 如图 6 所示, 基岩 k_{\max} 即为输入地震动的峰值加速度。可以看出, 不同频率的输入地震动将导致不同的场地地震响应及土条地震动系数分布。对于主导频率较小的 Parkfield 和 Northridge 地震波, 由于其频率与边坡土柱自振频率($v_s/4H$, 其中 v_s 为土体剪切波速, H 为土柱高度)范围接近(1.25~2.44 Hz), 引起了明显的土层放大效应; 而高频的 Tottori 地震波由于受到土层滤波效应明显, 土条地震动相比基岩输入地震动总体减小。



(a) Parkfield地震

(b) Northridge地震



(c) Tottori地震

Fig. 6 Maximum equivalent accelerations of different slices in sliding mass

通过输入上述分析得到的每个土条等效地震动时程, 基于提出的方法能够进行边坡地震永久位移计算。为了验证本文方法能够合理考虑场地效应对边坡地震变形的影响, 使用有限差分软件 FLAC^[38]进行数值模拟分析, 并将数值模拟得到的地震坡体变形结果与本研究方法的滑面地震位移计算结果进行对比。在数值模型中, 土体采用非线性弹塑性莫尔-库仑本构模型, 基岩采用线弹性模型。土体参数、剪切模量和阻尼比与剪应变的非线性关系及基岩参数与上述一维土层地震反应分析一致。为尽量减小动力分析中地震波在两侧边界处反射的影响, 边坡模型取 400 m 长 (10 倍边坡高度)。在静力分析时, 模型边界条件为侧边界的水平方向固定、底部边界的水平和竖直方向固定; 动力分析时, 模型侧边界为自由场边界、底部采用静态边界用于模拟弹性半空间基岩。为了保证地震波 20 Hz 以下频率分量在土层中的准确传播, 模型土体的网格尺寸满足 1/10 的最小波长。

图 7 为 FLAC 数值计算得到的不同地震作用下边坡的水平方向位移云图。可以看到, 不同地震动作用下坡体内部的滑面位置 (通过最大剪应变增量得到) 与拟静力分析结果较为接近。通过将数值模拟分析的滑动体内地震永久位移进行平均, 得到不同主导频率地震动作用下滑体相对于滑面水平相对永久位移的理论和数值计算结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 考虑场地对地震动的放大效应对滑体的地震永久位移具有显著影响。对于放大效应明显的 Parkfield 和 Northridge 地震波, 考虑场地放大效应计算得到的边坡地震位移相比原始地震动输入分别增大了 100% 和 28%, 并且考虑场地放大效应后的地震位移结果与 FLAC 数值模拟的结果也更为接近。对于高频的 Tottori 地震波, 由于场地滤波效应引起坡体地震动响应减小 (图 6 所示), 考虑场地效应的位移结果将小于原始地震动结果, 而数值模拟结果介于两者之间。实际应用中, 可基于提出的考虑和不考虑场地效应的分析分别进行计算, 取较大者作为最后的永久位移量来评价边坡地震性能。此外, 通过对不同位移相容条件情况下的位移结果, 可以发现不同的位移相容条件以及不同的切向和法向条间力比值 λ 对坡体的地震永久位移影响有限。因此, 通过与数值分析结果的对比证明了提出的理论方法能够考虑不同地震动频率对边坡变形响应的影响, 从而提供了数值方法之外的另外一种简化理论分析手段, 并能够更好揭示其地震滑动变形力学机理。

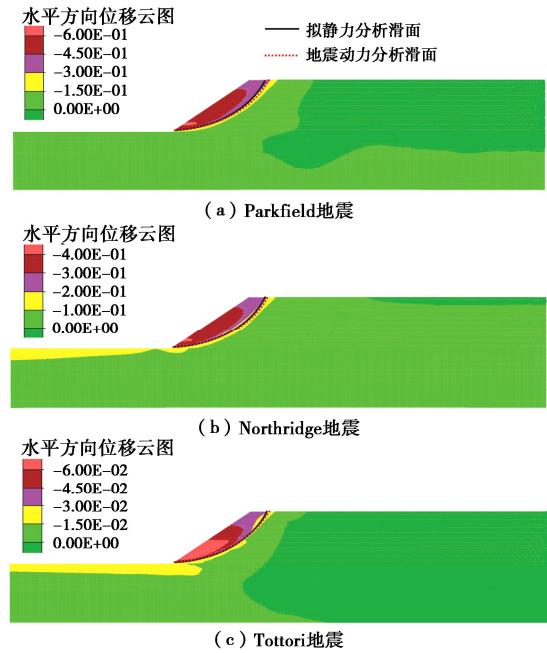


图 7 不同地震作用下边坡水平位移云图

Fig. 7 Contour map of horizontal displacement of slopes under different earthquake ground motions

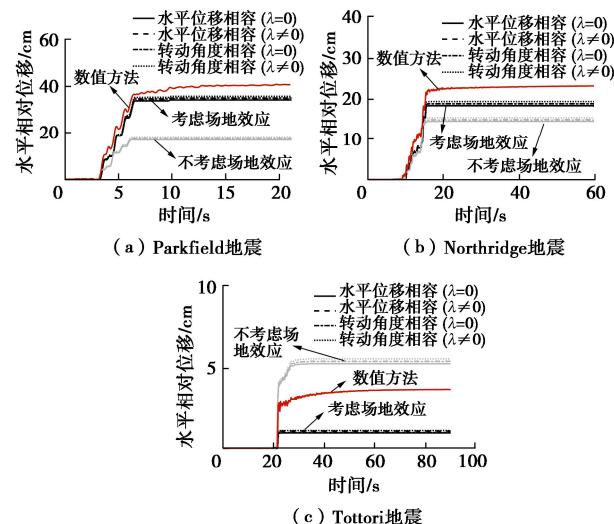


图 8 不同地震作用下边坡水平相对位移

Fig. 8 Horizontal relative displacements of slopes under different earthquake ground motions

3 坚向地震动对位移结果的影响

为进一步研究坚向地震动对边坡地震位移的影响, 对上述边坡模型进行考虑坚向地震动的地震位移分析。上述 3 条地震动记录的坚向分量加速度时程如图 9 所示。本节将分别对 3 种工况进行分析: 考虑坚向地震动及坚向多点放大、考虑原始坚向地震动的一致输入、仅考虑多点分布水平地震动。

定义放大系数如下:

$$AF_i = k_{i-\max} / k_{i-\text{基岩}} \quad (17)$$

式中: $k_{i-\max}$ 为第 i 个土柱的水平方向最大滑体等效加速度, $k_{i-\text{基岩}}$ 为第 i 个土柱底部基岩的水平方向最大加速度。将竖向地震动放大简化为与水平向放大相同, 通过将不同竖向地震动乘以水平向放大系数 AF_i 作为考虑竖向放大的竖向地震动输入, 采用水平位移相容条件 ($\lambda \neq 0$) 计算得到的边坡地震永久位移如图 10 所示。

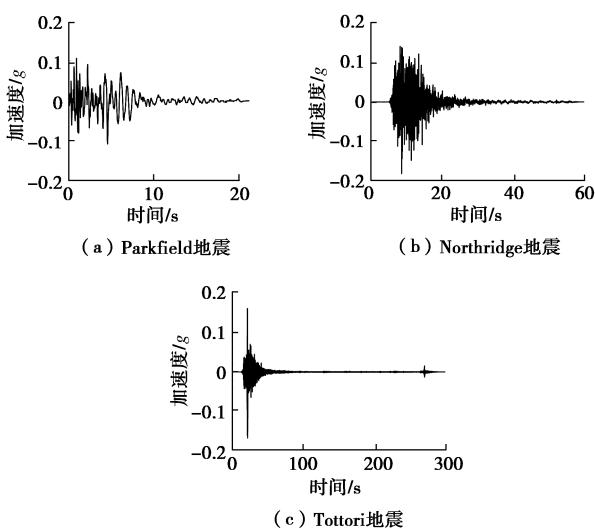


图 9 地震动的加速度时程 (竖直方向)

Fig. 9 Time histories of acceleration of seismic motion (vertical direction)

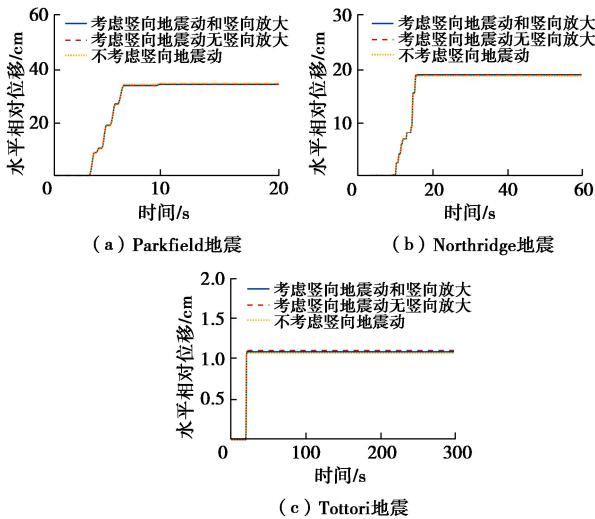


图 10 不同地震作用下边坡水平相对位移

Fig. 10 Horizontal relative displacements of slope under different earthquake ground motions

从图 10 可以发现, 对于分析的算例和地震动输入, 竖向地震动对边坡地震永久位移的影响有限, 不考虑竖向地震动、考虑竖向地震动但不考虑其放大和同时考虑竖向地震动及其放大 3 种情况下计算的边坡永久位移非常接近。已有关于考虑竖向地震动的 Newmark 分析方法得到的结论也表明竖向地震动的影响较小^[39]。因此, 相对于竖向地震动, 场地效应引起的坡体水平向地震动放大效应对边坡地震永久位移

的影响要更大。

4 多点地震动不同分布对位移结果的影响

通过上述分析可知, 由于场地效应的影响, 竖向条分的滑体在不同土条位置的滑面剪应力及滑体动力响应会有所差别, 且与地震动频率以及边坡几何和土体参数有关, 大体呈现类似于三角函数形状的分布, 放大系数范围可以达到 0.5~2.0。因此, 为了研究滑动体土条多点地震动不同分布形式对边坡永久位移的影响, 考虑实际地震波及边坡频率的多种可能性, 采用控制整个滑动体地震惯性力不变的方式生成不同分布的滑体地震动。以 Northridge 地震动为例, 在边坡滑体内部, 采用了 7 种不同的地震系数分布规律 (不同的放大系数分布) 来描述多点地震动的作用, 具体的分布形式如图 11 所示。尽管这些分布规律各不相同, 但保持作用于整个滑体的地震惯性力是相同的。

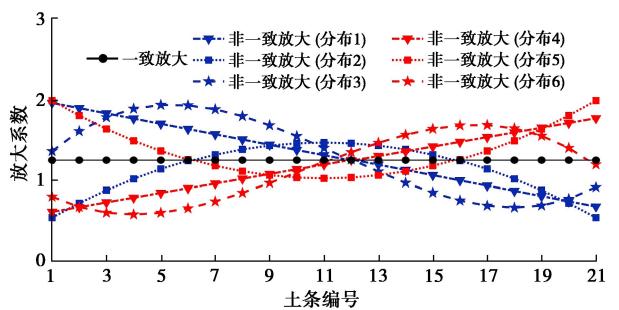


图 11 多点地震动的不同分布

Fig. 11 Different distributions of multi-point seismic motions

图 12 给出了不同分布规律下多点地震动对边坡的永久位移的影响结果。可以看到, 即使整个滑体的地震惯性力相同, 不同分布形式的土条多点地震动对滑体的永久位移也产生一定的影响。以分布 3 为例, 当滑体受到这种分布规律的多点地震动作用时, 整个滑体的地震惯性力作用点趋向于滑体的前端, 滑体在水平方向上的永久位移为 26.7 cm。而分布 6 的变化规律与分布 3 恰好相反, 滑体受到这种分布规律的多点地震动作用时, 整个滑体的地震惯性力作用点趋向于滑体的后端, 滑体在水平方向上的永久位移为 21.5 cm。对比分布 1 (线性下降) 和分布 4 (线性上升) 两种分布的多点地震动作用下的边坡永久位移, 同样可以看出当滑体整体地震惯性力的作用点趋于滑体前端时, 边坡的永久位移大于滑体整体地震惯性力的作用点趋于滑体后端时的情况。对比一致放大、分布 2 分布 5 的位移结果可以发现, 当整体地震惯性力作用点趋于滑体中心时, 不同分布规律计算得到的滑体永久位移较为接近。

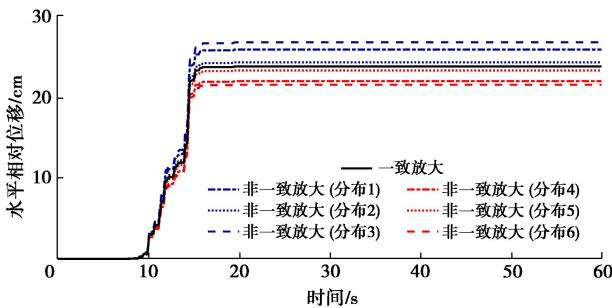


图 12 不同分布多点地震动下边坡永久位移

Fig. 12 Permanent displacements of slopes under multi-point seismic motions with different distributions

5 Lexington 土石坝震后变形案例分析

Lexington 土石坝（如图 13 所示）位于美国加利福尼亚州，该坝在 1989 年 10 月 17 日发生的 Loma Prieta 地震（矩震级 7.1 级）中受到严重破坏。Lexington 土石坝距离 Loma Prieta 地震破裂断层面约 3.6 km，地震导致上游和下游坝壳发生裂缝和变形。根据震后调查结果，坝顶下游水平方向位移约为 7.6 cm^[40]。坝体和坝基主要土体参数详见表 2^[41]。

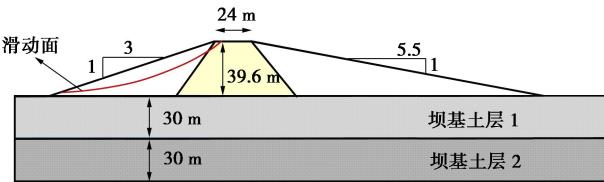


图 13 Lexington 土石坝剖面图^[41]

Fig. 13 Main section of Lexington Dam^[41]

本研究采用了 Loma Prieta 地震中的 Corallitos 强震台站（台站编号 RSN753）记录的地震加速度时程作为地震动输入（如图 14 所示），该地震记录台站与地震破裂断层的距离和坝体与破裂断层距离相当。

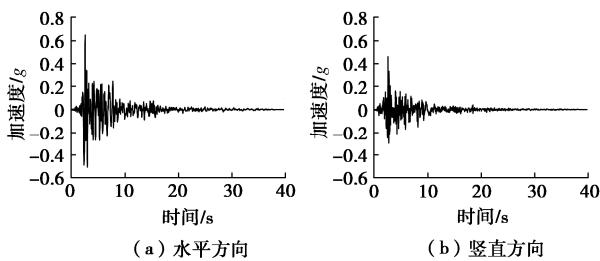


图 14 输入的地震动时程

Fig. 14 Time histories of input motion

通过拟静力法获得坝体最危险滑面后（如图 13 所示）。对每一个土条进行一维土层地震反应分析得到滑面位置深度的剪应力时程，进而获得每个土条的水平地震动系数时程。土体剪切模量和阻尼比与剪应变的非线性关系采用 Seed 等^[42]提出的模型，基岩阻尼

比取为 0.5%。土柱和滑面的高度信息及不同土条的最大滑体等效加速度如图 15 所示。

表 2 Lexington 土石坝主要土体参数^[41]

Table 2 Main soil parameters adopted for Lexington Dam^[41]

材料	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	剪切波速 $v_s/(m\cdot s^{-1})$
心墙	18	12.8	27.5	450
坝壳	18	0	36	549
坝基土层 1	20	0	40	762
坝基土层 2	20	0	40	914
基岩	22	—	—	1219

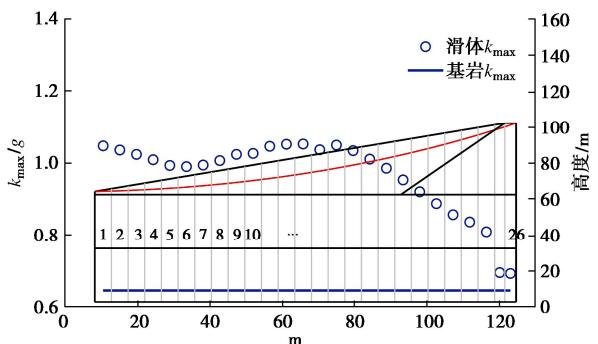


图 15 不同土条的最大滑体等效加速度

Fig. 15 Maximum equivalent accelerations of different slices in sliding mass

图 16 中给出了 Lexington 土石坝在不同地震动作用下的坝坡永久位移（采用水平位移相容条件及 $\lambda=0$ 计算）。从图 16 中可以看出，考虑场地放大力效应计算得到的边坡地震位移是原始地震动输入结果的 2~3 倍。仅考虑水平方向原始地震动作用下的边坡永久位移仅为 2.3 cm，考虑场地效应的水平地震动作用下的坝坡永久位移约为 7.2 cm。同时，考虑场地效应的坝坡地震永久位移计算结果与 Tropeano 等^[41]和 Harder^[40]报道的震后坝坡水平永久位移观测结果接近（两篇文献给出的观测值分别为 4.7~10.5 cm 和约 7.6 cm），证明了在边坡地震位移分析中考虑场地效应的重要性。

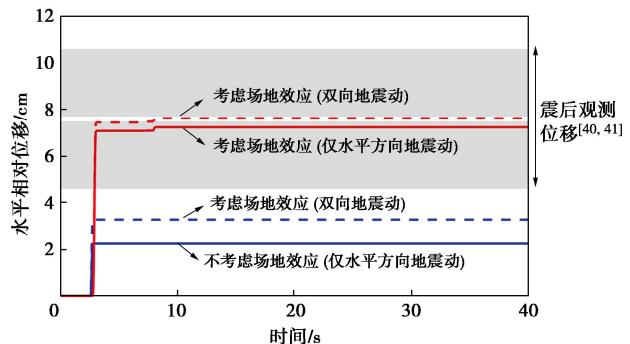


图 16 不同地震动作用下坝坡永久位移

Fig. 16 Permanent displacements of Lexington Dam under different seismic excitations

6 结 论

本文基于极限平衡原理提出了一种考虑场地效应的水平和竖向多点地震作用下边坡永久位移分析方法, 并基于算例分析研究了场地效应和多点地震动分布形式对边坡地震位移结果的影响。

(1) 基于条分法对不同土条赋予不同的水平和竖向地震动时程, 建立了基于转角相容和水平位移相容的圆弧滑面和任意形状滑面的边坡地震永久位移计算方法, 通过与有限差分软件 FLAC 的数值结果进行对比, 验证了本研究方法结果的可靠性, 从而提供了数值方法之外的另外一种简化理论分析手段。

(2) 研究了场地放大效应、竖向地震动及多点地震动不同分布对边坡地震永久位移的影响, 结果表明: 场地效应引起的水平地震动放大对边坡地震位移有显著影响, 多点地震动不同分布对边坡地震位移有一定影响, 当滑体整体地震惯性力作用点趋向于滑体前缘时边坡地震位移相对较大, 竖向地震动对边坡地震位移影响较小。

(3) 将所提出的方法应用于 Lexington 土石坝震后变形案例分析, 计算得到的考虑场地效应后的坝坡地震永久位移是原始地震动作用的 2~3 倍, 且与实际震后观测值相吻合, 证明了在边坡地震位移分析中考虑场地效应的重要性及本文方法的合理性。

(4) 本文分析中, 通过将提出的多点地震作用下边坡永久位移分析方法与一维土层地震反应分析相结合, 针对每一个土条进行土层地震反应分析获取滑面处的剪应力时程进而得到水平多点地震动时程, 且竖向地震动放大简化为与水平向放大相同, 对于本文分析的工况可以得到较为合理的结果。后续研究中, 可以通过更加严格的二维场地地震反应分析, 得到综合考虑土层和地形效应的水平和竖向多点地震动时程, 从而可以基于本文方法进行更加严格的研究。

参考文献:

- [1] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, 1965, **15**(2): 139-160.
- [2] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, **104**(7): 849-867.
- [3] RATHJE E M, BRAY J D. One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, **38**(4): 850-862.
- [4] PAPADIMITRIOU A G, BOUCKOVALAS G D, ANDRIANOPOULOS K I. Methodology for estimating seismic coefficients for performance-based design of earthdams and tall embankments[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, **56**: 57-73.
- [5] RATHJE E M, BRAY J D. Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(11): 1002-1014.
- [6] SONG J, FAN Q Q, FENG T G, et al. A multi-block sliding approach to calculate the permanent seismic displacement of slopes[J]. *Engineering Geology*, 2019, **255**: 48-58.
- [7] SONG J, WU K L, FENG T G, et al. Coupled analysis of earthquake-induced permanent deformations at shallow and deep failure planes of slopes[J]. *Engineering Geology*, 2020, **274**: 105688.
- [8] SONG J, LU Z X, JI J, et al. A fully nonlinear coupled seismic displacement model for earth slope with multiple slip surfaces[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **159**: 107353.
- [9] SONG J, LU Z X, PAN Y H, et al. Investigation of seismic displacements in bedding rock slopes by an extended Newmark sliding block model[J]. *Landslides*, 2024, **21**(3): 461-477.
- [10] BANDINI V, BIONDI G, CASCONE E, et al. A GLE-based model for seismic displacement analysis of slopes including strength degradation and geometry rearrangement[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, **71**: 128-142.
- [11] JI J, ZHANG W J, ZHANG F, et al. Reliability analysis on permanent displacement of earth slopes using the simplified Bishop method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, **117**: 103286.
- [12] 陈昌富, 李瑞芳. 基于 Spencer 法边坡地震永久位移计算斜条分法[J]. 公路工程, 2017, **42**(3): 1-5, 25. (CHEN Changfu, LI Ruifang. Seismic displacements analysis of slopes using inclined slices and newmark method[J]. Highway Engineering, 2017, **42**(3): 1-5, 25. (in Chinese))
- [13] 王家鑫, 夏元友, 王智德. 考虑滑面应变软化效应的边坡震后位移计算方法[J]. 计算力学学报, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/21.1373.O3.20231208.1400.032>. (WANG Jia-xin, XIA Yuan-you, WANG Zhi-de. Seismic displacement calculation method of slope with considering strain-softening effect of slip surface[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023. (in Chinese))
- [14] 刘爱娟, 崔玉龙, 刘铁新. 考虑动态临界加速度的地震边

- 坡永久位移预测模型研究[J]. 地震工程学报, 2021, **43**(2): 445-452. (LIU Aijuan, CUI Yulong, LIU Tiexin. A prediction model for permanent displacement of seismic slopes considering dynamic critical acceleration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, **43**(2): 445-452. (in Chinese))
- [15] 宋 健, 陆朱汐, 谢华威, 等. 基于极限平衡原理的地震边坡浅层和深层耦合滑移分析[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(6): 1141-1150. (SONG Jian, LU Zhuxi, XIE Huawei, et al. Analysis of coupled shallow and deep sliding of slopes induced by earthquake based on limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(6): 1141-1150. (in Chinese))
- [16] 高玉峰, 范昭平. 多点、多向地震作用下非圆弧滑面边坡稳定分析通用条分法[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3816-3822. (GAO Yufeng, FAN Zhaoping. Generalized slice method for stability analysis of slope with non-circular slide face under multipoint and multidirection seismic ground motions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3816-3822. (in Chinese))
- [17] 高玉峰. 河谷场地地震波传播解析模型及放大效应[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 1-25. (GAO Yufeng. Analytical models and amplification effects of seismic wave propagation in canyon sites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 1-25. (in Chinese))
- [18] 蒋乐英, 廖意辉, 王志明, 等. 河谷差异地震作用下拱式倒虹吸地震响应分析[J]. 长江科学院院报, 2022, **39**(12): 117-121, 140. (JIANG Leying, LIAO Yihui, WANG Zhiming, et al. Seismic response of arch inverted siphon under the excitation of river valley differential earthquake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, **39**(12): 117-121, 140. (in Chinese))
- [19] WANG G Q, ZHOU X Y, ZHANG P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(1): 73-96.
- [20] WANG H Y, XIE L L, WANG S Y, et al. Site response in the Qionghai Basin in the Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, **12**(2): 195-199.
- [21] BERESNEV I A, WEN K L; Nonlinear soil response: a reality?[J]. Bulletin of the Seismological Society of America 1996, **86**(6): 1964-1978.
- [22] 袁 吉. 基于日本 KiK-net 强震动数据的场地效应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021. (YUAN Ji. Study on site effect based on Japanese KiK-net strong earthquake data[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese))
- [23] DING Y, WANG G X, YANG F J. Parametric investigation on the effect of near-surface soil properties on the topographic amplification of ground motions[J]. Engineering Geology, 2020, **273**: 105687.
- [24] HE J X, FU H Y, ZHANG Y B, et al. The effect of surficial soil on the seismic response characteristics and failure pattern of step-like slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, **161**: 107441.
- [25] 王志颖, 郭明珠, 曾金艳, 等. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(9): 2566-2578, 2592. (WANG Zhiying, GUO Mingzhu, ZENG Jinyan, et al. Experimental study on dynamic response of bedding rock slope with weak interlayer under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(9): 2566-2578, 2592. (in Chinese))
- [26] JIBSON R W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes: a retrospective[J]. Engineering Geology, 2011, **122**(1/2): 43-50.
- [27] 栾茂田, 李 湛, 范庆来. 土石坝拟静力抗震稳定性分析与坝坡地震滑移量估算[J]. 岩土力学, 2007, **28**(2): 224-230, 236. (LUAN Maotian, LI Zhan, FAN Qinglai. Analysis and evaluation of pseudo-static aseismic stability and seism-induced sliding movement of earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(2): 224-230, 236. (in Chinese))
- [28] 李红军, 迟世春, 钟 红, 等. 考虑时程竖向加速度的 Newmark 滑块位移法[J]. 岩土力学, 2007, **28**(11): 2385-2390. (LI Hongjun, CHI Shichun, ZHONG Hong, et al. Effects of vertical acceleration time-histories on Newmark sliding block analyses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(11): 2385-2390. (in Chinese))
- [29] STAMATOPoulos C A, DI B F. Simplified multi-block constitutive model predicting earthquake-induced landslide triggering and displacement along slip surfaces of saturated sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **67**: 16-29.
- [30] SARMA S K, CHLIMINTZAS G O. Co-seismic & post-seismic displacements of slopes[C]//15th ICSMGE TC4

- Satellite Conference on " Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes. Adapazari, 2001.
- [31] SPENCER E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces[J]. *Géotechnique*, 1967, **17**(1): 11-26.
- [32] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. *Géotechnique*, 1955, **5**(1): 7-17.
- [33] KIM J, SITAR N. Direct estimation of yield acceleration in slope stability analyses[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(1): 111-115.
- [34] KOTTKE A R, RATHJE E M. Technical manual for Strata. PEER Report 2008/10, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering[R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2009.
- [35] SEED H B, MARTIN G R. The seismic coefficient in earth dam design[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1966, **92**(3): 25-58.
- [36] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, **117**(1): 89-107.
- [37] RATHJE E M, ABRAHAMSON N A, BRAY J D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(2): 150-159.
- [38] ITASCA CONSULTING GROUP. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. MN, USA: Itasca Consulting Group, Minneapolis, 2018.
- [39] DU W Q. Effects of directionality and vertical component of ground motions on seismic slope displacements in Newmark sliding-block analysis[J]. *Engineering Geology*, 2018, **239**: 13-21.
- [40] HARDER JR L F, BRAY J D, VOLPE R L, et al. Performance of earth dams during the Loma Prieta earthquake proceedings[C]//Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St Louis, 1991.
- [41] TROPEANO G, CHIARADONNA A, D' ONOFRIO A, et al. An innovative computer code for 1D seismic response analysis including shear strength of soils[J]. *Géotechnique*, 2016, **66**(2): 95-105.
- [42] SEED H B, WONG R T, IDRIS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, **112**(11): 1016-1032.