近断层地震动方向性对边坡地震响应与抗震稳定性的影响研究*

杨凯

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099)

摘要:由于近断层地震动强度特性在不同方向上存在显著差异,以典型近断层地震记录为例,选用三种地震动强度参数比较了地震动强度在各个方向上的变异性;基于OpenSees有限元软件分析了不同方向地震作用下的边坡地震响应差异;考虑土体应变软化特性,探讨了地震动方向性效应对边坡抗震稳定性的影响。研究结果表明:不同方向的峰值加速度PGA变异性达到62.5%;PGA最大值所在方向地震作用下的边坡坡顶位移响应相较于实测水平地震动记录的两条分量分别增大了20.5%和86.5%;不同方向地震作用下的边坡安全系数的变化范围为0.93~1.15,忽略地震方向性可能会高估边坡的抗震能力,增加地震失稳风险。研究成果可为边坡抗震设计及灾害防治提供参考。

关键词:边坡;地震动方向性;地震响应;安全系数;OpenSees

中图分类号:TD854.6;P315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0129-09

Influence of Near-Fault Ground Motion Directivity on Seismic Response and Seismic Stability of Slopes

YANG Kai

(China Railway Northwest Science Research Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730099, China)

Abstract: Due to the significant differences in the intensity characteristics of near-fault ground motion in different directions, taking typical near-fault seismic records as an example, three ground motion intensity parameters were selected to compare the variability of ground motion intensity in various directions. Based on OpenSees finite element software, the difference of seismic response of slopes under different directions of seismic was analyzed. Considering the strain softening characteristics of soil, the influence of directional effects of seismic motion on the seismic stability of slopes was explored. The results show that the PGA variability of peak acceleration in different directions reaches 62.5%. The displacement response of the slope top in the direction of the maximum PGA under seismic action increases by 20.5% and 86.5% respectively compared to the two components recorded in the measured horizontal seismic motion. The variation range of slope safety factor under different directions of seismic action is 0.93-1.15. Ignoring the seismic direction may overestimate the seismic capacity of the slope and increase the risk of seismic instability. The research results can provide reference for slope seismic design and disaster prevention.

Key words: Slope, Ground motion directivity, Seismic response, Safety factor, OpenSees

0 引言

矿山边坡、公路及铁路沿线边坡等作为维系工程建设区安全的关键工程地质体,其抗震稳定性直接决定着地震活跃区重大基础工程的防灾韧性和可持续运维能力[1]。近断层区域因具备显著区别于远场的地震动频谱特性和能量释放模式,往往易诱发高密度震害链式反应[2],这在2008年汶川地震中得到有力印证——地震滑坡主要集中在近断层区域,超过80%的滑坡位于距发震断层5 km范围内,且随着断层距增大,滑坡数量和面积明显减少[3]。近年来,随着对近断层区域地震动特性研究的逐步深入,部分学者发现,受断层机制、破裂传播和震源辐射等因素影响,近断层地震动强度在不同方向上存在显著差异[4-5]。谢俊举等[6]对2008年汶川地震中近断层水平地震动加速度峰值特征进行了统计,结

* **收稿日期**:2025-04-15
基金项目:中铁科学研究院重大专项课题基金资助项目(YJEJ-GCFB-2018-16)
作者简介:杨凯(1982—),男,山东郓城人,工程师,主要从事岩土地震工程与地质灾害防控方面的研究。E-mail:xc202426@163.com

果显示,水平地震动加速度峰值的东西方向分量明显大于南北方向分量,而当断层距大于 60 km 时,东西和南北方向分量的差别不再显著。姜永正等[7]对 2016 年意大利地震的研究也观测到,近断层地震动强度特征在不同方向上存在显著差异,西北方向与东南方向的强度分布不均。XIE 等[8]对 2016 年日本熊本地震的研究表明,近断层西南方向的峰值地面速度仅为平均值的 0.3～0.8 倍,而东北方向则达到 1.2～1.5 倍。

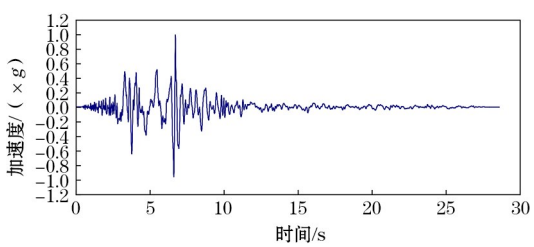
鉴于近断层区域地震动强度分布呈现出独特的方向性效应,诸多学者已将其纳入工程结构抗震设计的考量范畴,分析了近断层地震方向性效应对工程结构抗震性能的影响,研究发现地震动的方向差异性会显著影响工程结构的震害分布及动力响应,在进行结构抗震设计时,若仍采用地震台站实测地震记录作为输入,则难以保障工程结构在地震中的安全运行[9-15]。梁海安等[9]基于汶川地震中土石坝震害统计数据,发现土石坝震害存在显著的方向性效应,认为地震加速度方向与土石坝走向的夹角不同是造成汶川土石坝震损方向性的主要原因之一。李小军等[10]对云南漾濞地震中的房屋震害特征进行了现场调查,结果表明地震动方向性效应是导致房屋在不同朝向表现出不同破坏程度的内在原因。周长东等[11]通过 ABAQUS 软件建立烟囱结构动力分析有限元模型,分析了地震方向性对高耸烟囱结构地震响应的影响,建议在烟囱结构抗震设计中考虑地震动方向性的影响。陈志强等[12]采用数值方法分析了地震脉冲方向性对大跨斜拉桥地震响应的影响,数值结果表明,在对大跨斜拉桥进行抗震分析时,应以最强脉冲方向上的地震动作为输入,若直接采用实测地震记录,将严重低估桥梁结构的地震响应。苏鹏等[13]和陈彦江等[14]通过振动试验分别研究了近断层方向性效应对曲线桥梁和装配式混凝土桥墩的影响,试验结果表明,近断层地震动方向性效应对结构响应的影响显著。龚俊等[15]总结了地震方向性效应对土木工程结构影响的研究进展,认为地震入射方向性对结构的抗震影响不容忽视。

尽管地震方向性效应研究在建筑结构领域已取得长足进展,但在岩土工程领域的研究却显著滞后。NIE 等[16]研究了两个相互垂直方向的近断层地震动对砂土震陷的差异性,结果表明,地震动方向性显著影响砂土沉降量。这进一步证实了近断层地震动方向性效应可能对边坡抗震稳定性的潜在影响。鉴于此,本文以典型近断层地震记录为例,通过合成和旋转同一地震台站记录的 2 条互相垂直的水平地震动,对比不同方向上地震动强度的差异;随后以某边坡工程为依托,基于数值方法系统探讨近断层地震动方向性对边坡地震响应及抗震稳定性的影响,以期为近断层地区边坡工程的抗震设计及灾害防治提供科学参考。

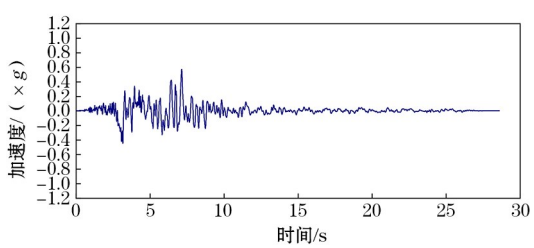
1 近断层地震动记录处理

1.1 近断层地震动记录选取

目前,近断层尚无统一且严格的定义,本文依据 ATC-63 报告[17],采用震中距 $R=10$ km 作为近断层与远断层的划分阈值。在此基础上,结合依托工程的场地类型、设计地震分组等参数(详见 2.1 节),从美国太平洋地震研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)发布的 NGA-West2 强震数据库中筛选出符合场地特征的近断层地震记录,即 JFPGB 台站记录于 1994 年 1 月 17 日的美国北岭地震期间的一组地震动数据。该记录包含 2 条相互垂直的水平地震动分量和 1 条竖直分量。鉴于本文旨在探究近断层地震动方向性对边坡地震响应的影响,因此暂不考虑竖向地震动的作用,选取了该组记录的 2 条水平分量作为研究的输入地震动,其加速度时程曲线如图 1 所示。



(a) N68° W 方向加速度时程曲线



(b) N22° E 方向加速度时程曲线

图 1 所选地震记录加速度时程曲线

Fig.1 Acceleration time-history curves of the selected earthquake records

从图 1 中可以看出,N68°W 方向和 N22°E 方向的峰值加速度(PGA)分别为 0.98g 和 0.58g,二者差值达 0.4g,这一显著差异表明,当以 PGA 作为衡量地震动强度的参数时,地震动方向性效应显著。需要进一步说明的是,张江伟等[18]研究表明,不同地震动强度参数对边坡地震响应的影响存在差异,其中峰值速度(PGV)、阿里亚斯强度(Ia)和峰值加速度(PGA)与边坡位移响应具有较高的相关性,鉴于此,本文选取 PGV、Ia 和 PGA 作为分析近断层地震动方向性对边坡地震响应及抗震稳定性影响的地震动强度参数。

1.2 近断层地震动合成与旋转方法

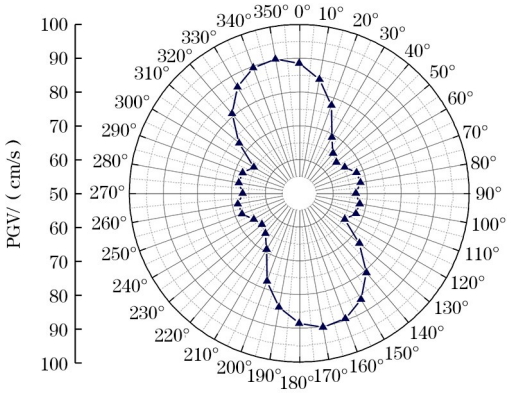
传统边坡抗震分析通常直接采用地震台站的地震记录的方向作为输入,然而,由于地震台站与发震断层的相对位置在地震发生期间存在不确定性,地震台站实测方向未必对应地震动强度极值方向。为进一步确定 JFPGB 地震台站所记录地震动的最强作用方向,并分析不同方向间的地震动强度差异性,本文采用平行四边形法则将 2 条水平地震动分量按照一定方位角合成目标方向地震动[19],合成公式如下:

$$\alpha_{\mathrm{rot}}(t;\theta)=\alpha_1(t)\cos(\theta)+\alpha_2(t)\sin(\theta) \quad (1)$$

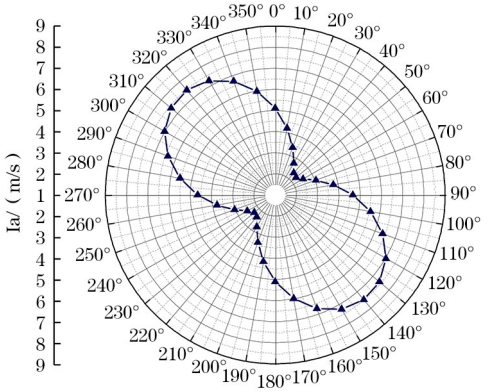
式中:θ 为方位角,以正北方向为 0°,顺时针旋转角度增加;$\alpha_1(t)$和 $\alpha_2(t)$分别为水平方向上相互垂直的 2 条地震记录的加速度时程曲线,$\alpha_{\mathrm{rot}}(t,\ \theta)$为对应 θ 方向的加速度时程曲线。

通过对 2 条地震动记录进行合成与旋转,可以获得任意方向上的地震动强度。本文以 10°为间隔对合成地震动进行旋转,并计算不同方向上的 PGV、Ia 和 PGA 值。

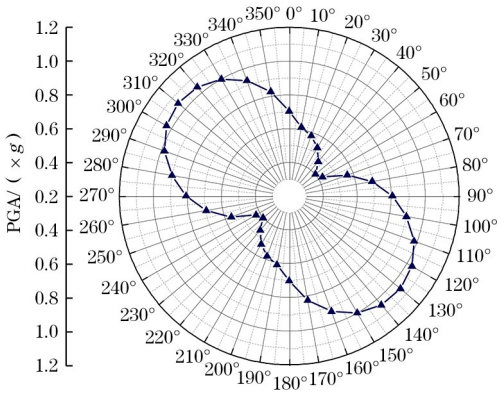
图 2 展示了各方向上的地震动强度参数分布情况。结果表明,不同方向上地震动水平分量的强度差异显著,均存在一个对应地震动强度峰值的关键方向(Critical Orientation, CO)。其中,PGV、Ia 和 PGA 的关键方向分别为 170°、140°和 130°,这些方向与实测记录中两条水平分量的方向存在显著差异。以 PGA 为例,在 140°方向 PGA 达到最大值 1.05g,而在 50°方向 PGA 降至最小值 0.40g,变异性达到了 62.5%,这表明进行边坡抗震设计时若直接采用原始记录方向(如 N22°E)输入,可能严重低估边坡地震响应,导致抗震设计存在潜在安全隐患。



(a) PGV 分布图



(b) Ia 分布图



(c) PGA 分布图

图 2 不同方向上所选地震记录峰值参数

Fig.2 Peak parameters of the selected earthquake records in different orientations

2 边坡动力数值分析模型

2.1 工程背景

某边坡工程为人工削坡开挖所形成的高陡边坡,自上部开挖线至下部设计路面标高的最大高差达 110 m,设计开挖后坡率为 1∶0.75。边坡地层自上而下主要分为填土层和中风化砂岩层。场地抗震

设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20g,场地类别为 I1 类。边坡的典型断面尺寸及土层分布情况如图 3 所示。

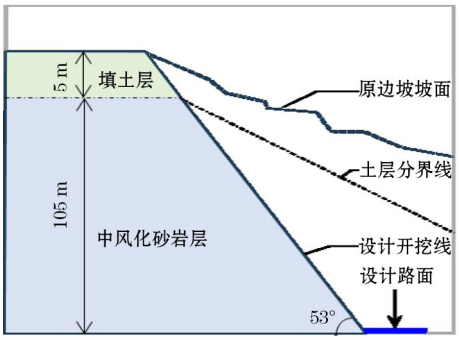
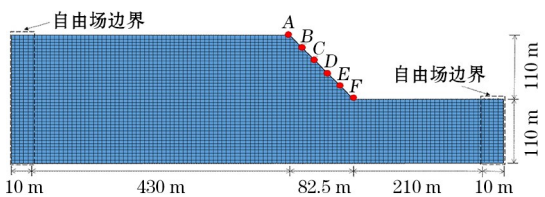


图 3 边坡典型断面示意

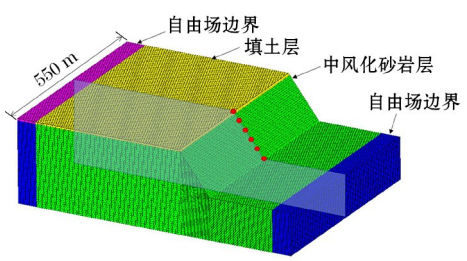
Fig.3 Typical cross-section diagram of the slope

2.2 边坡数值模型建立

为分析近断层地震方向性对边坡地震响应的影响,借助地震工程领域国际知名的有限元数值模拟平台 OpenSees[20],建立了三维边坡动力分析模型(见图 4)。图 4(a)展示了三维边坡模型的横断面图,模型的水平土域范围为 742.5 m,其中边坡前缘和后缘土域范围分别取 2 倍和 4 倍坡高,以减弱模型边界效应对坡体动力响应的影响[21],模型总高为 220 m,其中坡高为 110 m,边坡角为 53°,沿坡面方向均匀布置了 6 个监测点。图 4(b)为三维边坡模型的整体视图,模型宽度设置为 550 m。根据 KUHLEMEYER 等[22]的建议,在有限元分析中,传播方向上的单元长度应小于最短波长的 1/8,为有效表征边坡三维动力响应特征的同时,兼顾计算精度与效率,设置网格尺寸为 1 m×1 m。



(a) 三维边坡模型横断面



(b) 三维边坡有限元模型

图 4 三维边坡动力计算数值模型

Fig.4 3D numerical model for dynamic analysis of slope

2.2.1 土体材料选择

本文选取 OpenSees 材料库中的 Pressure Independ Multi Yield(PIDMY)模型来模拟边坡中的岩土材料[23]。PIDMY 是一种非线性弹塑性材料模型,其塑性仅在偏应力-应变响应中表现出来,其体积应力-应变响应是线性弹性的,与偏向响应无关。该模型用于模拟剪切行为对约束变化不敏感的材料的单调或循环响应。PIDMY 模型包括 6 个主要参数,分别为质量密度 ρ、黏聚力 c、内摩擦角 φ、峰值剪切应变 ε、剪切模量 K 与体积模量 B,上述参数依据室内力学试验及现场岩土体参数综合确定,见表 1。

表 1 数值计算岩土体参数

Table 1 Geotechnical parameters for numerical calculation

土层	质量密度 ρ/(t·m^{-3})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	峰值剪切应变 ε	剪切模量 K/MPa	体积模量 B/MPa
填土层	1.93	5	35	0.1	48	148
中风化砂岩层	2.75	15	38	0.1	60	160

2.2.2 边界条件设置

为了有效减弱沿震动方向截断边界对地震波的反射与折射效应,本文将 Lysmer 和 Kuhlemeyer[24]提出的黏性动力边界条件引入到上述边坡动力分析三维模型中。在模型左右两侧分别设置一个宽度为 10 m、高度与边坡左右边界相等的土柱,土柱的计算参数与边坡模型对应高度的土层相同。将土柱同一高度节点的位移自由度通过 equalDOF 命令绑定在一起,以模拟自由场地的一维剪切效应,同时在边坡模型左右边界的土柱节点上附加远远大于模型内部节点的质量(10 000 倍),从而建立边坡模型的周期性边界与自由场边界条件,真实模拟实际无限场地条件下的地震传播特性。地震动以速度-时间历程的形式施加于模型底边界,为确保地震动作用于整个底部边界,所有底部节点的水平位移自由度均通过 equalDOF 命令绑定在一起,而底部边界单元节点的竖向位移自由度则使用 fix 命令固定。此外,为模拟模型底部弹性半空间状态,在模型底部施加地震动的节点处定义了一个 Lysmer 阻尼器[24],该阻尼器由带有黏性单轴材料的零长度单元实现,从而可进一步提高模型的地震波传播模拟精度。

3 近断层地震动方向性边坡响应机制

3.1 方向性效应量化模型

为研究近断层地震方向性对边坡地震响应的影

响,分别将图 1 中 N68°W 和 N22°E 方向的原始地震记录,以及图 2 中 PGV、Ia 和 PGA 关键方向的地震记录输入至边坡数值模型中,通过非线性时程分析获得边坡的地震响应。为了进一步量化近断层地震动方向性对边坡地震响应的影响,基于非线性时程分析结果,构建地震动强度方向性对边坡响应的放大系数 F_d:

$$F_d=\frac{R_{coi}}{R_j} \tag{2}$$

式中:R_{coi} 为地震动强度关键方向作用下边坡地震响应的峰值,$i=1,2,3$ 分别对应于 PGV、Ia 和 PGA 关键方向;R_j 为原始地震方向作用下的边坡地震响应峰值,$j=1,2$ 分别对应于 N68°W 和 N22°E 方向。放大系数 F_d 表示地震动方向性对边坡响应的影响程度,F_d 越大,说明方向性对边坡地震响应的影响越显著。

3.2 坡面位移响应特性

在 N68°W 方向地震作用下,边坡坡脚处的水平位移、竖向位移和总位移的时程曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,坡脚竖向位移整体呈现先逐渐增大后趋于稳定的趋势(竖直向上为正方向),而水平位移与总位移时程曲线波形较为相似,在 7 s 处水平位移和总位移出现峰值,随后逐步趋于稳定,形成累积位移。对比图 1(a)中 N68°W 方向的地震加速度时程曲线,在 6.7 s 处加速度达到峰值,而边坡坡脚总位移峰值在时间上略滞后于加速峰值,表明边坡地震响应具有一定滞后效应,这与地震动传播规律相一致。

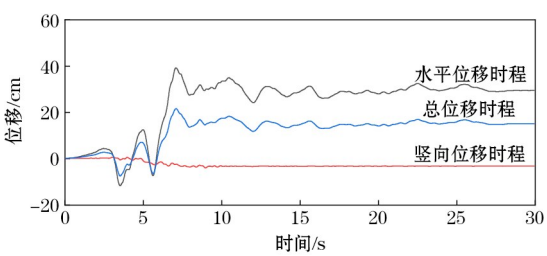


图 5 坡脚处位移时程曲线

Fig.5 Displacement time-history curves at the slope toe

图 6 展示了在上述 5 个不同方向地震作用下边坡坡面的累积位移响应峰值包络线,图 7 给出了地震动方向性对边坡坡面位移响应的放大系数 F_d。从图 6 可以看出,在不同方向的地震作用下,边坡的最大累积位移均发生在坡顶,且累积位移自坡脚向坡顶逐渐增大。以坡顶处为例,N22°E 方向、PGV 关键方向、N68°W 方向、Ia 关键方向及 PGA 关键方向地震作用下的总位移依次增大,分别为 22.4 cm、29.71 cm、34.65 cm、40.13 cm 和 41.77 cm,相较于原始 N22°E 方向地震记录,PGV、Ia 和 PGA 关键方向地震作用下的坡顶位移分别增大了 32.6%、79.2% 和 86.5%;与 N68°W 方向原始地震记录相比,Ia 和 PGA 关键方向作用下位移分别增大了 15.8% 和 20.5%,而 PGV 关键方向地震作用下坡顶位移反而减小了 14.3%。这一现象表明,不同地震动强度参数表征的地震方向性对边坡位移响应的影响存在显著差异。在 PGA 和 Ia 关键方向作用下,边坡位移响应显著大于原始记录的水平分量;而在 PGV 关键方向作用下,边坡位移响应略低于 N68°W 方向,但略高于 N22°E 方向,分析其原因是,这一差异主要与不同方向地震记录对应的 PGA 水平密切相关。PGV 关键方向对应的 PGA 为 0.83g,介于 N22°E 方向与 N68°W 方向的 PGA 之间,这导致了 PGV 方向位移响应在两者之间呈现出中间状态。

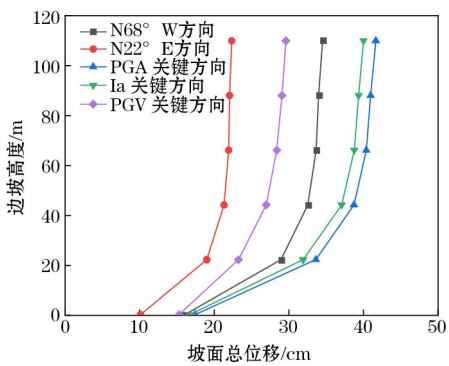


图 6 边坡坡面累积位移响应

Fig.6 Cumulative displacement response of slope surface

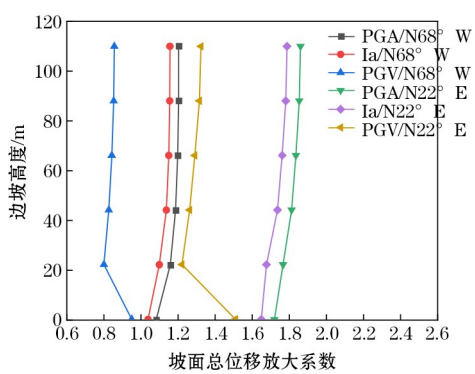


图 7 不同方向地震下边坡坡面位移响应放大系数

Fig.7 Amplification factor of slope surface displacement response under earthquakes from different orientations

3.3 坡面加速度响应特性

在 N68°W 方向地震作用下,边坡坡脚水平加速度、竖向加速度和总加速度的时程曲线如图 8 所示(曲线颜色标识见电子版)。从图 8 可以看出,这三种加速度的波形变化规律与输入地震动加速度时程一致,且水平加速度的峰值显著高于竖向加速度和总加速度,这同样符合地震动传播规律。

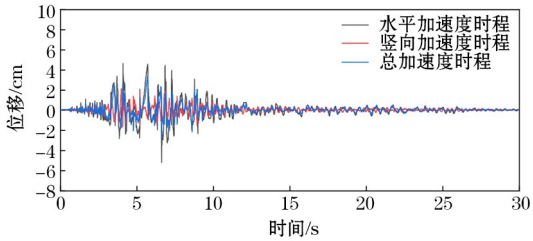


图 8 坡脚处加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time-history curves at the slope toe

图 9 展示了 5 个不同方向地震作用下边坡坡面加速度响应的峰值包络线,图 10 则给出了地震动方向性对坡面加速度响应的放大系数 F_d。结果显示,与位移响应类似,峰值加速度自坡脚向坡顶逐渐增大,在坡顶处,PGA 关键方向地震作用下的加速度峰值达到 5.12 m/s^2,较 N68°W 和 N22°E 方向分别增大了 13.3%和 22.8%。需要注意的是,在不同方向地震作用下,边坡坡面加速度响应的放大效应在不同位置表现出差异。加速度响应放大系数在坡脚处达到最大值,此放大系数随着坡高增加先逐渐减小,随后在坡顶位置略微增大。这表明近断层地震动方向性对坡脚处加速度响应的放大作用尤为显著,反映出坡脚区域对地震动方向性更为敏感。然而该差异性在边坡坡面位移响应中表现并不显著。

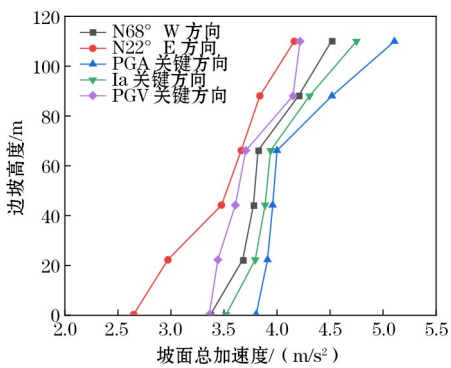


图 9 边坡坡面加速度响应

Fig.9 Acceleration response of slope surface

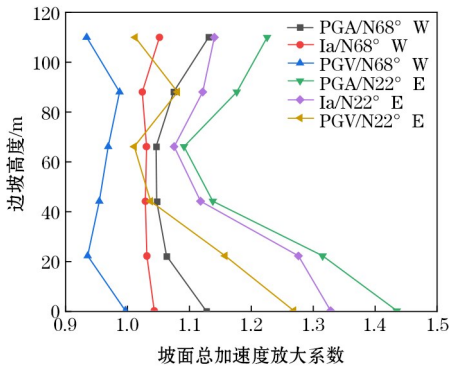


图 10 不同方向地震下边坡坡面加速度响应放大系数

Fig.10 Amplification factor of slope surface acceleration response under earthquakes from different orientations

4 考虑地震方向性的边坡稳定性计算

4.1 边坡稳定性计算方法

强度折减法是一种广泛应用于边坡稳定性分析的数值方法,该方法通过逐步降低土体或岩体的强度参数,直至边坡达到极限平衡状态,此时对应的折减系数即为边坡安全系数。强度折减的计算公式如式(3)和式(4)所示[25]:

$$c'=\frac{c}{F_s} \tag{3}$$

$$\varphi'=\arctan\frac{\tan\varphi}{F_s} \tag{4}$$

式中:c、φ、c'、φ'分别为折减前、后岩土体的黏聚力和内摩擦角;F_s为折减系数。

为确保边坡稳定性分析中强度折减法失稳判定的客观性,本文采用迟世春等[25]提出的以边坡滑动面监测点位移增量为标准的失稳判别准则。将滑动面监测点的水平位移迅速增长前的强度折减系数定义为边坡安全系数,相关公式如式(5)所示:

$$\frac{\Delta U}{\Delta F_s}\geqslant S_c \tag{5}$$

式中:ΔU 为边坡滑动面上监测点位移增量;ΔF_s为折减系数增量;S_c为失稳状态的斜率控制值,取 0.7。

4.2 土体应变软化特性

边坡在受到地震荷载后发生形变,产生塑性应变。根据应变软化理论,边坡产生塑性应变时边坡土体的强度会发生显著衰减,当塑性应变超过 20%时,土体的残余强度可能衰减至初始强度的 10%[26],边坡安全系数也会随着强度的降低而下降。基于此,考虑地震动作用下土体应变软化特性,并基于地震后的土单元应变计算残余强度,计算公式如式(6)至式(7)所示[26]。图 11 展示了边坡在原

始 N68°W 方向地震作用下的安全系数变化情况。在位移为 6.2 mm 时,地震作用前后的边坡安全系数分别为 1.32 和 0.99,在地震作用下安全系数降低了 25%。这一变化表明,地震动对边坡稳定性有显著的负面影响,且土体强度的衰减效应是造成安全系数下降的主要因素之一。

$$c=c_r+(c_p-c_r)e^{-\eta\varepsilon_q} \tag{6}$$

$$\varphi=\varphi_r+(\varphi_p-\varphi_r)e^{-\eta\varepsilon_q} \tag{7}$$

式中:c_r和 c_p分别为土体黏聚力的残余强度参数和峰值强度参数;φ_r和 φ_p分别内摩擦角的残余强度参数和峰值强度参数;η 为应变软化参数;ε_q 为累积偏差应变。上述参数依据室内力学试验确定。

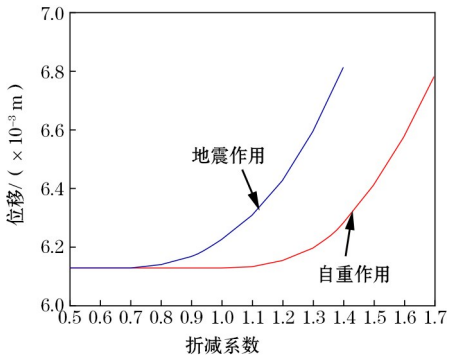


图 11 边坡安全系数

Fig.11 Slope safety factor

4.3 边坡稳定性计算结果

考虑土体应变软化特性,并采用前述边坡稳定性计算方法,计算了不同方向地震作用下的边坡安全系数,如图 12 所示。在 N22°E 方向的地震作用下,边坡的安全系数为 1.11,边坡在该方向地震作用下保持稳定;在 PGV 关键方向和 N68°W 方向的地震作用下,边坡安全系数分别下降至 0.96 和 0.94;在 PGA 关键方向的地震作用下,边坡安全系数进一步降至 0.93,此时边坡失稳。

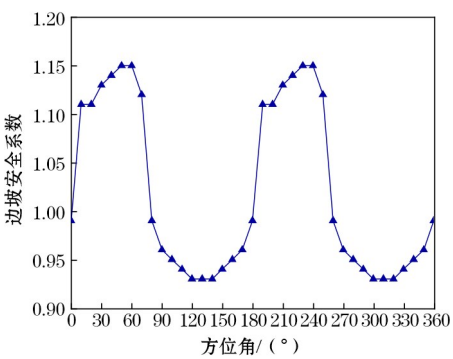


图 12 不同方向地震作用下的边坡安全系数

Fig.12 Slope safety factor under earthquakes from different orientations

上述数值计算结果表明,地震动方向性对边坡稳定性评价有显著影响。具体而言,不同方向的地震动作用下边坡的安全系数显著不同,尤其在 PGA 关键方向地震动的作用下,边坡的安全系数显著低于原始地震记录下的安全系数,因此,在近断层地区的边坡抗震分析时应该以 PGA 关键方向上的地震动作为输入,若忽视地震动的方向性效应,可能会高估边坡的抗震能力,进而使抗震设计存在潜在的安全风险。建议在边坡稳定性分析中引入地震动方向性效应,以提高设计的安全性。

5 结论

本文以某边坡工程为背景,通过数值方法研究了不同方向地震作用下边坡的地震响应规律,并结合考虑地震作用下土体应变软化特性的强度折减法,探讨了近断层地震动方向性对边坡抗震稳定性的影响,得到如下的一些主要结论。

(1) 近断层地震动强度的方向性差异显著。对同一台站记录的两条水平地震动分量,采用平行四边形法则旋转至不同方向后,PGV、Ia 和 PGA 的最大值与最小值之比分别可达到 1.4, 3.28 和 2.63。

(2) 地震动方向性对边坡地震响应具有重要影响。以 PGA 为例,相比于原始台站记录的两条水平地震动分量,PGA 关键方向地震作用下边坡坡顶位移响应分别增大了 20.5%和 86.5%,坡顶加速度响应分别增大了 13.3%和 22.8%。当输入 PGV 关键方向的地震动时,边坡坡面位移和加速度响应均小于原始台站记录方向地震动输入时的响应;而在 PGA 关键方向输入地震动时,边坡坡面位移和加速度响应显著大于原始记录方向的响应。该现象表明,地震动的方向性对边坡的位移和加速度响应具有显著影响,且不同方向地震记录对应的 PGA 水平是影响响应差异的关键因素。

(3) 考虑土体应变软化特性后,边坡稳定性显著下降,在原始 N68°W 方向地震作用下,边坡安全系数下降了 25%。当进一步考虑地震动方向性时,边坡稳定性评价结果显示出明显差异。具体而言,在不同方向的地震作用下,边坡安全系数的最大值为 1.15,最小值则降至 0.93。研究结果表明,忽视地震动方向性可能导致对边坡抗震能力的高估,进而增加边坡失稳的风险。因此,在边坡抗震设计和稳定性分析中,必须充分考虑地震动的方向性效应,以确保评估结果的可靠性。

参考文献(References):

[1] TIAN S Z, GARDONI PAOLO, YUAN W Z. Coseismic deformation of the 6 February 2018 M_w 6.2 Hualien earthquake based on strong-motion recordings [J]. Seismological Research Letters,2019,90(1):108-117.

[2] ZHANG Y B, WANG J M, X Q, et al. DDA validation of the mobility of earthquake-induced landslides [J]. Engineering Geology,2015,194:38-51.

[3] 许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J].工程地质学报,2010,18(6):818-826.
XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology,2010,18(6):818-826.

[4] XIE Junju. Strong motion directionality and evidence of rupture directivity effects during the Chi-Chi M_w 7.6 earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2019,109(6):2367-2383.

[5] 赵晓芬,温增平,谢俊举,等.2018年台湾花莲 M_w 6.4 地震近断层地震动方向性差异[J].振动与冲击,2021,40(10):235-243.
ZHAO Xiaofen, WEN Zengping, XIE Junju, et al. Ground motion directionality in the 2018 Taiwan Hualien M_w 6.4 earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10):235-243.

[6] 谢俊举,温增平,高孟潭,等.2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J].地球物理学报,2010,53(8):1796-1805.
XIE Junju, WEN Zengping, GAO Mengtan, et al. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics,2010,53(8):1796-1805.

[7] 姜永正,王宏伟,任叶飞,等.2016年8月24日意大利 M_w 6.2地震近场地震动方向性效应[J].地震学报,2017,39(1):132-142+155.
JIANG Yongzheng, WANG Hongwei, REN Yefei, et al. Rupture directivity effect of near-field ground motions in Italy M_w 6.2 earthquake on August 24, 2016[J]. Acta Seismologica Sinica,2017,39(1):132-142+155.

[8] XIE J J, ZIMMARO P, LI X J, et al. Rupture directivity effects on strong ground motion during the 15 April 2016 M_w 7.0 Kumamoto Earthquake in Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2017,107(3):1265-1276.

[9] 梁海安,景立平,李永强,等.汶川地震土石坝震损方向性问题研究[J].世界地震工程,2010,26(增刊1):197-201.
LIANG Haian, JING Liping, LI Yongqiang, et al. Researches on the direction problem of earthquake dam age of earth-rock fill dams in Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering,2010,26(Suppl.1):197-201.

[10] 李小军,孙晓燕,荣棉水,等.云南漾濞6.4级地震房屋震害特征受地震动方向性和场地条件的影响[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(3):650-662.
LI Xiaojun, SUN Xiaoyan, RONG Mianshui, et al. Characteristics of building seismic damages in Ms6.4 Yangbi earthquake affected by ground motion directivity and site conditon[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2023,31(3):650-662.

[11] 周长东,田苗旺,王朋国,等.考虑地震方向性的高耸RC烟囱结构易损性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(11):11-22.
ZHOU Changdong, TIAN Miaowang, WANG Pengguo, et al. Analysis on structural fragility of a high-rise RC chimney considering ground motion directionality [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(11):11-22.

[12] 陈志强,郑史雄,陈志伟,等.近断层脉冲方向性对大跨斜拉桥地震响应的影响[J].铁道科学与工程学报,2018,15(12):3127-3134.
CHEN Zhiqiang, ZHENG Shixiong, CHEN Zhiwei, et al. Influence of directivity of near-fault impulse effect on seismic response of long spancalbe stayed bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2018,15(12):3127-3134.

[13] 苏鹏,陈彦江,闫维明.近断层方向性效应地震作用下曲线梁桥试验[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):148-155.
SU Peng, CHEN Yanjiang, YAN Weiming. Experimental study on curved girder bridge under near-fault ground motion with directivity effect[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(6):148-155.

[14] 陈彦江,梁金宝,许维炳,等.近断层地震破裂方向性效应对装配式混凝土桥墩抗震性能影响试验研究[J].工程抗震与加固改造,2020,42(6):158-168.
CHEN Yanjiang, LIANG Jinbao, XU Weibing, et al. Experimental study on influence of rupture directivity effect of near-fault earthquake on seismic behavior of fabricated concrete bridge piers[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2020,42(6):158-168.

[15] 龚俊,支旭东,邵永波,等.土木工程结构地震入射方向性效应研究进展[J].工程力学,2025,42(8):1-18.
GONG Jun, ZHI Xudong, SHAO Yongbo, et al. State-of-the-art of research on seismic incident directionality effect of civil engineering structures [J]. Engineering Mechnaics, 2025,42(8):1-18.

[16] NIE C X, CHEN Q S, GAO G Y, et al. Determination of seismic compression of sand subjected to two horizontal components of earthquake ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2017,92:330-333.

[17] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors: ATC-63 Project Report-90 Draft[M]. Redwood City: ATC,2008.

[18] 张江伟,李小军,齐剑锋,等.地震动参数对突破地震响应的影响权重研究[J].振动与冲击,2018,37(6):225-230.
ZHANG Jiangwei, LI Xiaojun, QI Jianfeng, et al. Effect of influence weights of ground motion parameters on soil slope seismic responses[J]. Journal of Vibration and Shock,2018, 37(6):225-230.

[19] BOORE D M. Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2010,100(4):1830-1835.

[20] 冯志仁,唐亮,凌贤长,等.堤坝边坡地震反应数值模拟平台与计算方法[J].世界地震工程,2015,31(4):128-134.
FENG Zhiren, TANG Liang, LING Xianchang, et al. Numerical platform and analysis of seismic response of three-dimensional slope[J]. World Earthquake Engineering, 2015,31(4):128-134.

[21] 张江伟,周爱红,迟明杰,等.边坡地震响应数值模拟中最优边界范围研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(1):34-41.
ZHANG Jiangwei, ZHOU Aihong, CHI Mingjie, et al. Research on boundary range in seismic response simulation of slop[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2022,42(1):34-41.

[22] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(5): 421-427.

[23] MROZ Z. On the description of anisotropic work hardening [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids,1967,15: 163-175.

[24] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics Division,1969,95:859-878.

[25] 迟世春,关立军.基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J].岩土工程学报,2004(1):42-46.
CHI Shichun, GUAN Lijun. Slope stability analysis by Lagrangian difference method based on shear strength reduction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(1):42-46.

[26] FENG K W, WANG G, HUANG D R, et al. Material point method for large-deformation modeling of coseismic landslide and liquefaction-induced dam failure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2021,150:106907.