

边坡地震系数剪切梁计算方法研究

王梦晨, 邓亚虹, 慕焕东, 杨楠, 钱法桥

Study on the calculation method of seismic coefficient for slope stability using shear beam theory

WANG Mengchen, DENG Yahong, MU Huandong, YANG Nan, and QIAN Faqiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202410024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

黄土地震滑坡研究综述与展望

A review of earthquake-induced loess landslides research and future prospects

钱法桥, 邓亚虹, 刘凡, 门欢 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 5-20

数值模拟交通荷载作用下黄土边坡动力响应研究

Study on the dynamic response characteristics of loess slope under traffic load based on numerical modelling

杜国梁, 刘俊江, 丛璐, 谷丽莹, 乐婧瑜, 王闫超 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 59-66

地震条件下悬臂式挡墙主动土压力的极限分析方法

Limit analysis method of active earth pressure on cantilever retaining wall subjected to earthquake

李志浩, 肖世国 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 79-87

考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics

李晋鹏, 汪磊, 王俊, 陈洋, 徐永福 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 29-36

地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析

Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake

王来贵, 孙颖聪, 赵娜, 向丽 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 26-35



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202410024

王梦晨, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 边坡地震系数剪切梁计算方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 98-105.

WANG Mengchen, DENG Yahong, MU Huandong, et al. Study on the calculation method of seismic coefficient for slope stability using shear beam theory[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 98-105.

边坡地震系数剪切梁计算方法研究

王梦晨¹, 邓亚虹^{1,2}, 慕焕东³, 杨楠¹, 钱法桥¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 拟静力法是评价地震边坡稳定性的常用方法之一, 该方法中地震系数的选择直接关系到评估结果的准确性。因此, 深入研究拟静力法中地震系数的确定方法和取值具有重要的理论与工程实际意义。文章依据剪切梁理论, 推导了直角梯形边坡的地震边坡响应加速度公式, 同时分析了各因素对边坡响应加速度的影响, 并确定了不同地震烈度下的地震系数推荐值。最终确定地震烈度分别为 VI、VII、VIII、IX 度时, 所对应的地震系数推荐值分别为 0.04, 0.07, 0.11, 0.21。研究结果能够反映边坡的动力响应特征, 为地震系数的选择提供科学的理论支持。

关键词: 地震边坡稳定分析; 拟静力法; 剪切梁理论; 边坡动力响应; 地震系数

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2024)06-0098-08

Study on the calculation method of seismic coefficient for slope stability using shear beam theory

WANG Mengchen¹, DENG Yahong^{1,2}, MU Huandong³, YANG Nan¹, QIAN Faqiao¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, MNR, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Pseudo-static method is a common used approach to evaluate the seismic stability of slopes, where the choice of seismic coefficients directly affects the accuracy of the evaluation. Therefore, thoroughly exploring the determination methods and values of seismic coefficients in the quasi-static method is of great significant both theoretically and in engineering practice. Based on shear beam theory, this paper derives the formula for the seismic response acceleration for rectangular trapezoidal slopes and analyzes the impact of various factors on slope response acceleration. Recommended seismic coefficients under different seismic intensities were determined as follows: 0.04 for Intensity VI, 0.07 for Intensity VII, 0.11 for Intensity VIII, and 0.21 for Intensity IX. The research results reflect the dynamic response characteristics of slopes and provide scientific theoretical support for the selection of seismic coefficients.

Keywords: seismic slope stability analysis; pseudo-static method; shear beam theory; slope dynamic response; coefficient of earthquake

收稿日期: 2024-10-21; 修订日期: 2024-11-04

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772275)

第一作者: 王梦晨(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事地震边坡稳定性分析研究工作。E-mail: 2020226082@chd.edu.cn

通讯作者: 邓亚虹(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与地震工程方面的研究。E-mail: dgdyh@chd.edu.cn

0 引言

我国地处世界最大的陆、海板块交界处^[1],地震活动频繁,其危害程度在全球位居首位^[2-3]。地震引发的滑坡、泥石流等次生灾害,常导致建筑和基础设施严重受损,以及众多人员伤亡^[4-7]。以2008年汶川8.0级地震为例,该地震诱发了众多山体滑坡,致使超过2.2万人丧生,占地震总死亡人数的33%左右^[8-11]。鉴于此,对地震引发的边坡稳定性进行评估显得尤为关键。

目前,定量评估地震边坡稳定性的最常用方法是拟静力法^[12-14],该方法通常与极限平衡法并用,以评估地震对边坡稳定性的影响^[15-16]。拟静力法是一种用于分析结构在地震作用下响应的简化方法,该方法将地震力简化为一个等效的静力荷载^[17],然后按照静力分析的方法来计算结构的动力响应。由于概念清晰、计算简单、能够快速评估给出结构在地震作用下的响应评估,已被纳入众多行业规范^[18]。然而,随着拟静力法的广泛应用,地震系数的不同取值将直接影响评估结果。因此,确定合适的地震系数取值成为拟静力法中的核心问题。

关于地震系数的取值,有不少学者做了大量相关工作。1950年, Terzaghi 等^[17]提出了不同级别地震对应的水平地震系数,分别为0.1、0.2、0.5,对应于“强烈性”、“破坏性”、“灾害性”地震;1981年, Marcuson 等^[19]提出,若边坡安全系数超过1,则拟静力水平地震系数应取基岩峰值加速度的1/3至1/2; Hynes-Griffin 等^[20]建议,在边坡稳定性安全系数超过1的情况下,水平地震系数应为基岩峰值加速度的1/2; Baker 等^[21]则提出将基岩峰值加速度的3/4作为地震系数。Seed 等^[22]建议,当安全系数超过1.15时,水平地震系数应在0.1至0.2之间选取。这些地震系数的确定主要基于两种思路:一种是 Terzaghi 等人依据震级提出的,但这种方法随着距离震源的增大,其适用性会减弱;另一种是基于区域地震烈度,更贴近实际情况。但这两种方法给出的地震系数取值并不一致,并且关于地震系数的确定方法,还未形成统一的理论公式。因此,深入研究地震系数的取值及其确定方法显得格外重要

本文利用剪切梁理论,推导出直角梯形边坡在地震作用下的加速度响应公式;深入分析了多种因素对地震放大系数的作用;构建了 R_g 与 PGA 的关联表达式;进一步得到了地震系数的取值公式,并明确了不同地震烈度下的地震系数具体数值;提出了一种理论公式和统计方法相结合的计算方法,为直角梯形边坡地震系数的确定提供了坚实的理论支持。

1 基于剪切梁法的边坡响应加速度公式推导

1.1 剪切梁法的基本原理及公式推导

剪切梁理论将土体结构当作一系列串联的剪切弹簧和阻尼装置,形成一个连续的薄层振动模型(图1)。在地震引发的横向剪切震动作用下,该理论采用二维应力状态对土体进行解析研究^[23]。Mononobe^[24]、Gazetas^[25]、Dakoulas^[26]等学者曾利用有限元法验证了此方法用于大坝地震动力响应分析的合理性,本文旨在利用剪切梁计算边坡地震系数的研究,故不在此做验证工作。剪切梁法的基本假设如下:

- (1) 边坡为无限长的直角梯形断面,坡体嵌固在刚性地基上;
- (2) 土体为各向同性体;
- (3) 边坡的宽高比(B/H)很大,仅考虑横向地震作用下的剪力,忽略弯矩的影响。

在图1所示中, G 指剪切模量, ρ 代表材料密度, c 表示阻尼系数, B 是边坡顶端宽度, α 为坡角, β 指的是边坡顶端与垂直线的夹角, H 为坡高, h 为计算深度, \ddot{u}_g 为地震波加速度时程曲线。

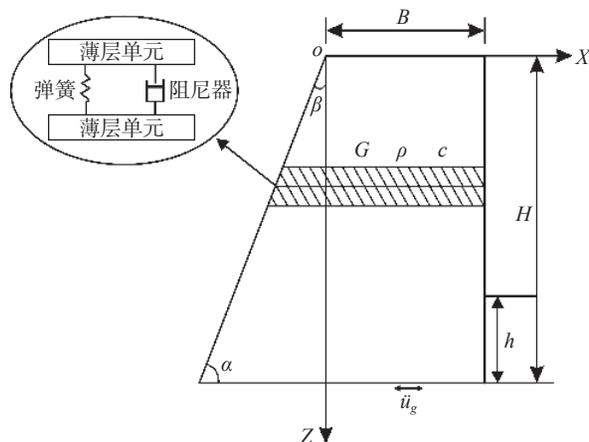


图1 二维边坡剪切梁模型

Fig. 1 Two-dimensional slope shear beam model

在边坡的地震响应分析中,采用的剪切梁模型与图1所示相同,取一微小单元进行受力分析(图2),当考虑阻尼及地震荷载作用下,得到的平衡方程为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{B/\tan\beta + z} \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{c}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t} = -\ddot{u}_g \quad (1)$$

求解得到边坡在地震作用下的相对于地面的位移公式:

$$u = - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2J_0 \left[\beta_{0i} \frac{B/\tan\beta + z}{B/\tan\beta + H} \right]}{\beta_{0i} J_1(\beta_{0i}) \omega_0} \int_0^t e^{-\lambda \omega (t-\tau)} \frac{d^2 u_g}{d\tau^2} \sin[\omega_0(t-\tau)] d\tau \quad (2)$$

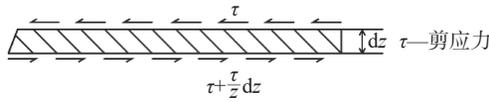


图 2 剪切梁微元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a shear beam microelement

对上式求二阶导数, 得到边坡相对于地面的加速度:

$$\frac{d^2 u_a}{dt^2} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\omega J_0 \left[\beta_{0i} \frac{B/\tan(90-\alpha)+z}{B/\tan(90-\alpha)+H} \right]}{\beta_{0i} J_1(\beta_{0i})} \int_0^t e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \frac{d^2 u_g}{dt^2} \sin[\omega_0(t-\tau)] d\tau \quad (3)$$

式中: J_0, J_1 ——0、1 阶贝塞尔函数;

β_{0i} ——零阶贝塞尔函数的根, 其中前 5 个根为

2.404 8、5.520 1、8.653 7、11.791 5、14.930 9;

ω ——边坡的固定角频率, $\omega = \omega_0 \sqrt{1-\lambda^2}$;

λ ——边坡的阻尼比;

\ddot{u}_g ——地震加速度;

α ——坡角 ($\alpha = 90^\circ - \beta$)。

1.2 地震动数据处理及分类

在 PEER Ground Motion Database 随机收集了 435 条地震动加速度时程数据, 后进行滤波(0 ~ 15 Hz)与基线校正, 将处理后的地震动数据按照 PGA 大小进行分类。具体分类为: PGA 小于等于 0.05g 视为 I 区、0.05g ~ 0.1g(包括 0.1g)之间视为 II 区、0.1g ~ 0.2g(包括 0.2g)视为 III 区、0.2g ~ 0.4g(包括 0.4g)视为 IV 区、大于 0.4g 视为 V 区(表 1)。

表 1 PGA 与烈度对应关系及地震波基本信息表

Table 1 Correspondence between PGA and intensity and basic information on seismic waves

PGA/g	≤0.05	(0.05,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.4]	>0.4
区域	I	II	III	IV	V
数量/条	163	82	117	52	21
PGA _{max} /g	0.049 34	0.099 49	0.2	0.394 81	1.233 07
PGA _{min} /g	0.002 9	0.050 77	0.101 55	0.200 21	0.401 12
平均PGA/g	0.03	0.072	0.143	0.298	0.647
平均卓越周期/s	0.481	0.41	0.241	0.221	0.238
平均卓越频率/Hz	2.08	2.4	4.149	4.52	4.2

注: PGA_{max}、PGA_{min}分别为所划分区域的地震动数据PGA的最大值与最小值。

数据显示, 在 5 个不同区域 I 至 V 中, 分别记录到 163、82、117、52 和 21 次地震动信息, 这些区域对应的地面峰值加速度 (PGA) 均值依次为 0.03g、0.072g、0.143g、0.298g 和 0.647g。PGA 的极值范围在 0.002 9g 至 1.233 07g 之间。地震波的卓越频率集中在 2 ~ 4 Hz, 而卓越周期的均值介于 0.2 ~ 0.5 s。在 PGA 值较小的情况下, 地震波呈现出较长的卓越周期和较低的卓越频率; 而在 PGA 值较大的情况下, 则表现出较短的卓越周

期和较高的卓越频率。

2 地震边坡的动力响应特征分析

为直观、简单的表示各因素的对边坡响应加速度的影响, 定义边坡地震峰值响应加速度 (peak respond acceleration, PRA) 和输入地震动峰值加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 的绝对值之比为 Rg, 见式(4)。

$$Rg = \frac{PRA}{PGA} = \frac{\left| \max \left\{ \frac{d^2 u_a}{dt^2} \right\} \right|}{\left| \max \left\{ \frac{d^2 u_g}{dt^2} \right\} \right|} = \frac{\left| \max \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\omega J_0 \left[\beta_{0i} \frac{B/\tan(90-\alpha)+z}{B/\tan(90-\alpha)+H} \right]}{\beta_{0i} J_1(\beta_{0i})} \int_0^t e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \frac{d^2 u_g}{dt^2} \sin[\omega_0(t-\tau)] d\tau \right\} \right|}{\left| \max \left\{ \frac{d^2 u_g}{dt^2} \right\} \right|} \quad (4)$$

由上式可知, Rg 体现了输入地震波在坡体内传播之后所产生的放大效应。本文的计算工况及参数见表 2, 边坡的密度统一取 1 794.1 kg/m³[26]。

2.1 输入地震动峰值加速度 (PGA)

选取 Kobe 地震波, 将放大因子分别调整为 0.5、1.0、1.5、2.0, 以获得不同 PGA 大小而频率相同的地震

表 2 计算参数汇总表

Table 2 Summary table of calculation parameters

H/m	B/m	$\alpha/(\circ)$	阻尼比	E/MPa
5/10/15/20/25/ 30/35/40/45/50	70	30	0.1	15
15	70	20/30/40/50/60/70	0.1	15
15	70	30	0.1/0.15/0.2/0.25/0.3	15
15	70	30	0.1	3~25

波。PGA 与 PRA 的关系如图 3 所示。PRA 的大小与输入地震动 PGA 大小关系为同增同减, 且变化相同的倍数, 说明 PRA 会随着 PGA 的改变而改变, 但两者的比值 R_g 始终为一定值, 为 0.941 2。因此, 不同大小的 PGA 会产生不同大小的 PRA; PGA 越大, 所产生的 PRA 也越大, 边坡所受的地震力也越大, 所对应的地震系数也越大。

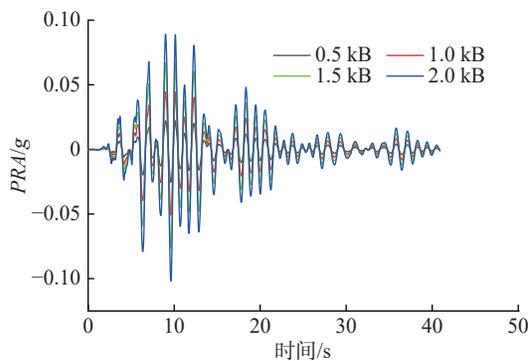


图 3 不同 PGA 放大因子下边坡响应加速度曲线图

Fig. 3 Acceleration curves of slope response under different PGA amplification factors

2.2 边坡材料特性

2.2.1 弹性模量

言志信^[27]研究表明, 在边坡几何参数不变的情况下, 其频率主要受其边坡弹性模量的影响, 并与其固有频率成正比, 不同几何形态边坡的固有频率计算公式如下式(5)。本文在分析不同几何尺寸的边坡动力响应时, 均采用了式(5)所计算的结果。

$$f = \frac{E^{0.5} \cdot \theta^{0.277}}{e^{3.432} \cdot h \cdot \rho^{0.497}} \quad (5)$$

式中: f ——边坡的固有频率/Hz;

θ ——边坡的坡角/ \circ ;

E ——弹性模量/Pa;

h ——坡高/m;

ρ ——材料密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;

e ——自然指数。

边坡弹性模量对 R_g 的影响如图 4 所示(图中频率由弹性模量计算得到), 所采用的地震波信息如表 3 所示。结果显示, R_g 的峰值是由地震波的卓越频率所决定的, 在其左右两侧, 总体上呈现出一种先升高、后降低的趋势。倘若边坡固有频率和地震波的卓越频率相近, 那么就会发生“同频共振”效应, 相应的地震力达到最大值。

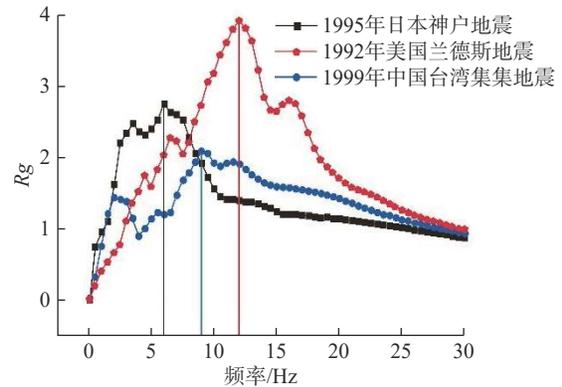


图 4 R_g 随弹性模量变化图

Fig. 4 Variation of R_g with elastic modulus

表 3 地震波信息表

Table 3 Seismic wave information table

地震名称	卓越周期/s	卓越频率/Hz
1995年日本神户地震	0.16	6.25
1992年美国兰德斯地震	0.08	12.5
1999年台湾集集地震	0.12	8.3

2.2.2 阻尼比

如图 5 所示, 随着阻尼比的增加, R_g 逐步降低。这是由于阻尼比的增加有助于高效吸收地震波在边坡介质中传递的动能。当边坡的阻尼比较高时, 它能显著减少地震引发的震动幅度, 此时边坡在阻尼比影响下所消

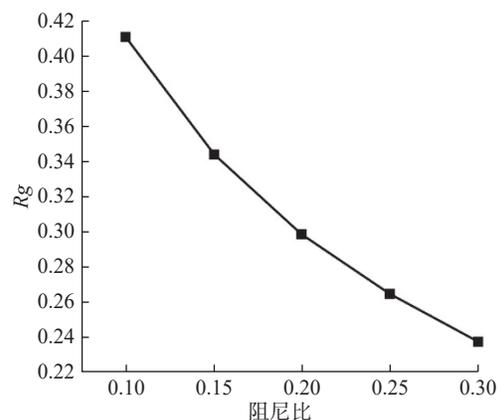


图 5 R_g 随阻尼比变化图

Fig. 5 Variation of R_g with damping ratio

耗的能量增多,进而导致在地震影响下边坡的峰值加速度减小。

2.3 边坡几何特性

图 6、7 结果分别显示 R_g 随坡高与坡角的变化关系。

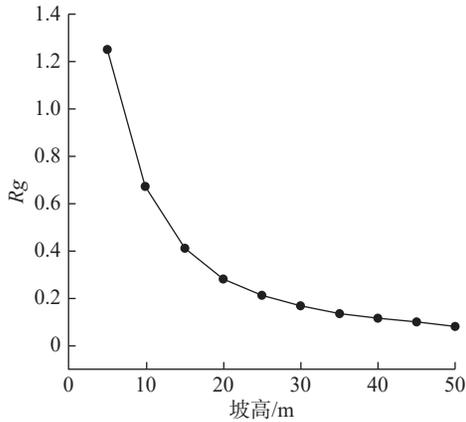


图 6 R_g 随坡高变化图

Fig. 6 Variation of R_g with slope height

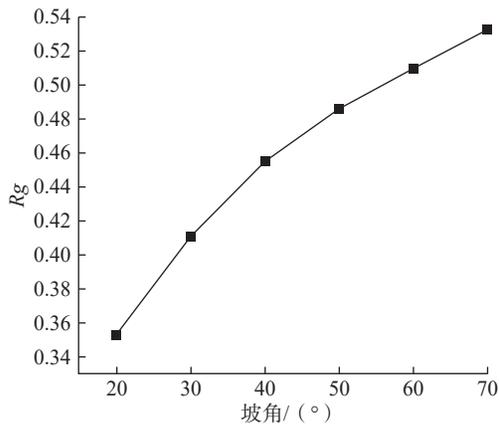


图 7 R_g 随坡角变化图

Fig. 7 Variation of R_g with slope angle

在分析中发现 R_g 与坡高之间存在一种负相关关系。起初,坡高增大, R_g 的减少速度很快,曲线的倾斜度非常明显;然而,随着坡高的进一步增加, R_g 的减少速度逐渐减慢,曲线的倾斜度变得平缓。可以发现,当坡高无限增加时, R_g 趋向于 0,说明高位和极高位边坡不适合利用剪切梁法来计算地震系数。同时,由于剪切梁法是将地震力作为剪切力来(类似于地震波的横波),横波作用下的低层构筑物响应大于高层构筑物。此外, R_g 与坡度角呈正相关性。与坡高相反, R_g 随坡角增大而增加,这是因为起初,小坡角边坡的卓越频率远小于地震波的卓越频率,边坡响应加速度较小;随着坡角的增大,边坡的固有振动频率逐渐接近地震波的卓越频率,从而使得边坡的加速度响应增强。

3 拟静力法中的地震系数取值

地震边坡稳定性分析中拟静力法的基本原理如图 8 所示, Kramer 将拟静力法中边坡所受的地震力概括为地震系数与滑块质量的乘积^[28], 见式(6)。

$$\begin{cases} F_h = \frac{a_h w}{g} = k_h w \\ F_v = \frac{a_v w}{g} = k_v w \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_h 、 F_v ——水平、竖直地震力;

a_h 、 a_v ——水平、竖直拟静力加速度;

w ——滑体的重量;

k_h 、 k_v ——水平、竖直地震系数。

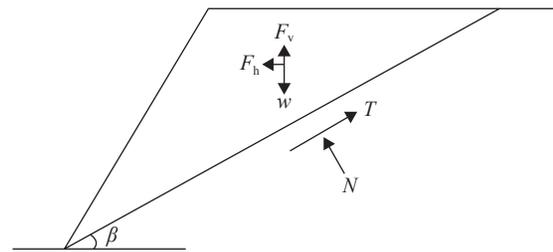


图 8 简化边坡模型的拟静力法原理图

Fig. 8 Schematic diagram of the pseudo-static method for a simplified slope model

根据上述地震系数的定义以及本文的研究,因此可用边坡的 $PRA(R_g$ 与 PGA 的乘积)作为地震系数的取值依据。地震系数的选取应满足一般基本工程的需求,这就要求所取的地震系数具有广泛性以及合理性。第 2 部分讨论了边坡几何特性、材料特性、输入地震动 PGA 对 R_g 的影响,为满足地震系数的广泛性及合理性,应按最不利因素考虑原则,使边坡的响应加速度达到最大值。然而,地震波是客观存在的,无法预先得知地震动有关参数,因此边坡响应加速度大小可归因于边坡固有频率的影响。根据以上分析结果,最终选择坡高为 5 m、坡角为 70°、坡宽为 70 m、阻尼比为 0.1、边坡弹性模量取 15 MPa、密度为 1 794.1 kg/m³ 作为最终的计算参数(确定边坡的几何形态后,用此弹性模量计算得到固有频率接近地震波的卓越频率)。此方法得到的地震系数仅为理论解,不考虑此参数的边坡模型与野外实际边坡几何形状之间的差异。

435 条地震动数据在上述参数下的计算结果如图 9 所示。计算结果得到 I、II、III、IV、V 区的平均 R_g 值分别为 1.714、1.586、1.266、1.133、1.139,总体上 R_g 随 PGA 的增大而减小。然而,鉴于图 9 中各个区域的 PGA 平均值并未达到地震烈度分别为 VI、VII、VIII、IX

区所对应的设计基本加速度值(0.05g、0.1g、0.2g、0.4g), 需将图中 R_g 与 PGA 两者的平均值进行非线性拟合, 用拟合函数计算当地震烈度为 VI、VII、VIII、IX 时, 其设计基本加速度值所对应的 R_g 值。

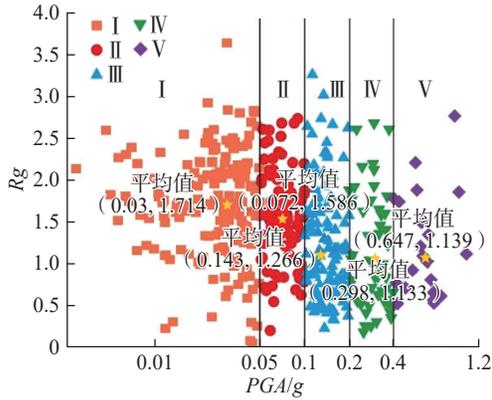


图 9 R_g 与 PGA 关系图
Fig. 9 Plot of R_g versus PGA

图 10 为 R_g 平均值与 PGA 的拟合曲线, 所对应的拟合方程为式(7)。拟合所得到的相关系数(R^2)是 0.944 69 (大于 0.9), 能够利用拟合函数去计算未知点的函数值。

$$R_g = 0.858 0e^{-\frac{PGA}{0.096 48}} + 1.113 49 \quad (7)$$

将 PGA 分别为 0.05g、0.1g、0.2g、0.4g 带入式 7 中计算所对应的 R_g 值, 计算结果如表 4 所示。从表 4 可以看出地震烈度为 VI、VII、VIII、IX 区所对应的 R_g 分别为 1.62、1.42、1.22、1.13, 所对应的地震系数取值分别为 0.04、0.07、0.11、0.21。表 4 中的地震系数是综合影响系数 0.45、 PGA 、 R_g 三者的乘积与重力加速度的比值, 可用式(8)来表示地震系数的取值公式(其中 PGA 的单位为 g)。其中综合影响系数是考虑结算结果与宏观震害之间差异的影响^[29], 即在边坡响应加速度最大值的一瞬间, 边坡可能不会立刻产生破坏。本文采用的综

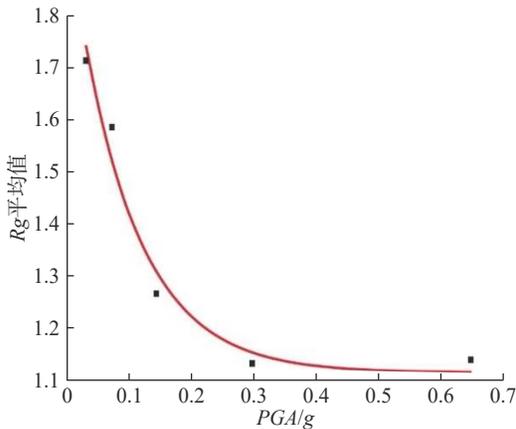


图 10 R_g 与 PGA 关系曲线拟合图
Fig. 10 R_g versus PGA curve fitting plot

表 4 地震系数建议取值表

Table 4 Table of recommended values for seismic coefficients

地震烈度	VI	VII	VIII	IX
PGA/g	0.05	0.10	0.20	0.40
R_g	1.62	1.42	1.22	1.13
地震系数	0.04	0.07	0.11	0.21

合影响系数是边坡响应加速度时程中, 阿里亚斯强度为 5%~95% 之间所对应的有效时间内, 边坡响应加速度的平均值与 PRA 比值的统计值, 图 11 为综合影响系数的物理参数示意图。

$$k = (0.45 \cdot R_g \cdot PGA) / g \quad (8)$$

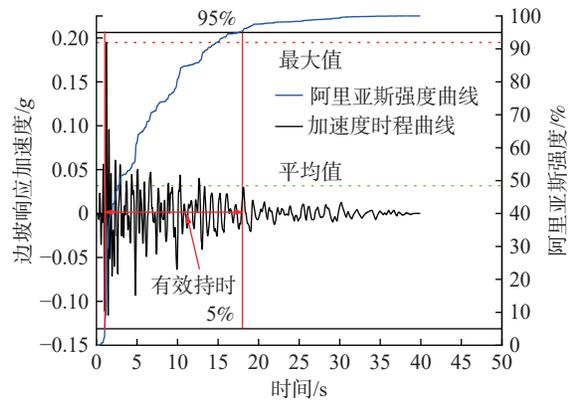


图 11 综合影响系数物理示意图

Fig. 11 Physical schematic diagram of the comprehensive impact coefficient

4 讨论

将本文得出的地震系数与前人研究成果对比如表 5 所示。本文地震系数与 Marcuson 等^[24]、Hynes-Griffin 等^[20]、Baker 等^[21]等学者提出的地震系数规律一致, 随着烈度的增加而增加, 基本上烈度增加一度, 地震系数的取值几乎增加一倍, 且取值整体上小于 Terzaghi^[18]、Seed^[22]等人提出以震级为依据的地震系数取值。图 12 结果显示本文的计算结果大于 Marcuson 等^[24]、Hynes-Griffin 等^[20]所给出的地震系数; 小于 Baker 等^[21]提出的地震系数。其中与 Hynes-Griffin 等^[20]、Marcuson 等^[24]地震系数上限接近。本文给出的地震系数值分别为 VI、VII、VIII、IX 区设计基本加速度的 0.8、0.7、0.55、0.525 倍, VI、VII 区整体上大于 Marcuson 等^[24]、Hynes-Griffin 等^[20]、Baker 等^[21]学者给出的取基岩峰值加速度的 1/3~1/2、1/2、3/4, VIII、IX 区基本上差别不大。总体而言: 本文得到的地震系数与前人给出的地震系数相对吻合, 具有一定的参考价值。

迄今为止, 虽然在评价地震边坡稳定性分析方面有

表 5 地震系数对比表
Table 5 Comparison table of seismic coefficients

来源	取值依据和条件	地震系数
Terzaghi ^[18]	地震震级	对于“严重”“破坏性”和“灾难性”地震,水平地震系数分别为0.1、0.2和0.5
Seed ^[22]	地震震级且安全系数 $F_s > 1.15$	当震级 $M=6.5$ 时, $k=0.1$;当震级 $M=8.5$ 时, $k=0.2$
Hynes-Griffin ^[20]	地震烈度且安全系数 $F_s > 1$	VI: 0.025、VII: 0.05、VIII: 0.1、IX: 0.2
Marcuson ^[24]	地震烈度且安全系数 $F_s > 1$	VI: 0.017 ~ 0.025、VII: 0.03 ~ 0.05、VIII: 0.06 ~ 0.1、IX: 0.13 ~ 0.2
Baker ^[21]	地震烈度	VI: 0.037 5、VII: 0.075、VIII: 0.15、IX: 0.3
本文计算结果	地震烈度	VI: 0.04、VII: 0.07、VIII: 0.11、IX: 0.21

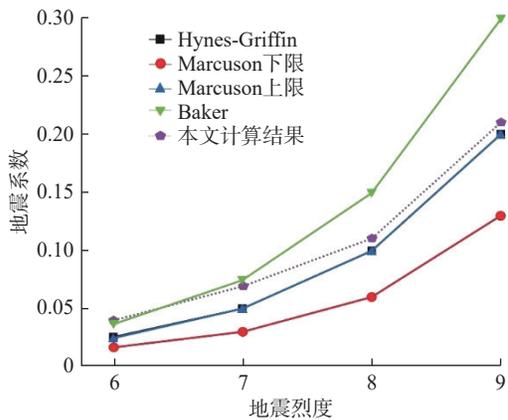


图 12 地震系数对比图

Fig. 12 Comparison diagram of seismic coefficients

更加合理的拟动力、Newmark 等方法。然而,由于拟静力法的物理概念明晰,计算方式较为简便,计算工作量较小,而且积累了丰富的使用经验,仍是工程界分析地震边坡稳定性分析的最常用方法。作者受前人工作的启发,利用剪切梁理论来分析边坡的动力响应特征,旨在探求一种求解地震系数的理论方法,为促进相关领域的发展贡献出自身力所能及的力量。

本文提出的方法也存在一定的局限性,例如将边坡简化为平面应变问题并不符合实际,现实边坡并非是二维均质与各向同性的;只从总体上简单考虑了频谱信息,并没有深入讨论频谱对边坡动力响应的影响;综合影响系数的取值只进行了统计,并没有从相关理论上验证其取值的合理性。针对本文方法的不足之处,后续还需进一步研究,将拟静力法中地震系数的取值更为精确,用于解决实际的工程问题。

5 结论

(1) 边坡高度、阻尼比与 R_g 值呈现反比关系;斜坡角度与 R_g 值则呈现正比关系;而 PGA 会影响 PRA , 对 R_g 无影响,对于 Kobe 地震波, R_g 比值始终为 0.941 2;

(2) 拟合得到边坡动力放大系数与地震输入峰值加速度之间的关系式。确定地震烈度为 VI、VII、VIII、IX 度时,推荐相应的地震系数分别为 0.04、0.07、0.11、0.21。

参考文献 (References):

- [1] 阎渊. 青海门源 M_s 6.9 地震同震破裂的隧道破坏效应与启示 [J]. 地质力学学报, 2023, 29(6): 869 - 878. [YAN Yuan. The tunnel damage effects and implications of the coseismic rupture of the Menyuan M_s 6.9 earthquake in Qinghai, China [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(6): 869 - 878. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ZHU Y Q, LIU F, ZHANG G Q, et al. Development and prospect of mobile gravity monitoring and earthquake forecasting in recent ten years in China [J]. Geodesy and Geodynamics, 2019, 10(6): 485 - 491.
- [3] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1607 - 1620. [ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2013, 43(10): 1607 - 1620. (in Chinese with English abstract)]
- [4] LU L, WANG Z J, SONG M L, et al. Stability analysis of slopes with ground water during earthquakes [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 288 - 296.
- [5] ZHANG D X, WANG G H. Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China) [J]. Engineering Geology, 2007, 94(1/2): 76 - 88.
- [6] 张辉, 徐珂, 李珺, 等. 三维地震数据模型驱动下的超深全层系复杂构造地应力建模 [J/OL]. 地质通报, 2024 (2024-10-12) [2024-11-11]. [ZHANG Hui, XU Ke, LI Jun, et al. 3D full-layer Geomechanical modeling of complex structures in the ultra-deep system driven by 3D seismic data [J/OL]. Geological Bulletin of China, 2024 (2024-10-12) [2024-11-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20241012.1119.002.htm>. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KEEFER D K, WARTMAN J, NAVARRO OCHOA C, et al. Landslides caused by the M 7.6 tecoman, Mexico earthquake of January 21, 2003 [J]. Engineering Geology, 2006, 86(2/3): 183 - 197.
- [8] ZHANG S, LI C, ZHANG L M, et al. Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using Bayesian network [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105436.

- [9] 赵佳忆,田述军,李凯,等.岷江上游汶川地震前后泥石流易发性评价 [J].中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 51 - 59. [ZHAO Jiayi, TIAN Shujun, LI Kai, et al. Susceptibility assessment of debris flow in the upper reaches of the Minjiang River before and after the Wenchuan earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 51 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 韩继冲,张朝,曹娟.基于逻辑回归的地震滑坡易发性评价——以汶川地震、鲁甸地震为例 [J].灾害学, 2021, 36(2): 193 - 199. [HAN Jichong, ZHANG Hao, CAO Juan. Assessing earthquake-induced landslide susceptibility based on logistic regression in 2008 Wenchuan earthquake and 2014 Ludian earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 193 - 199. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 许冲,徐锡伟,周本刚,等.同震滑坡发生概率研究——新一代地震滑坡危险性模型 [J].工程地质学报, 2019, 27(5): 1122 - 1130. [XU Chong, XU Xiwei, ZHOU Bengang, et al. Probability of coseismic landslides: A new generation of earthquake-triggered landslide hazard model [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1122 - 1130. (in Chinese with English abstract)]
- [12] CALLISTO L, RAMPOLLO S, FARGNOLI P. Evaluation of slope performance under earthquake loading conditions [J]. Rivista Italiana di Geotecnica, 2010, 44(4): 29 - 41.
- [13] 姚生海,盖海龙,殷翔,等.青海门源 M6.9 级地震地表破裂特征及区域地震活动趋势分析 [J].地质通报, 2024, 43(2): 340 - 349. [YAO Shenghai, GAI Hailong, YIN Xiang, et al. Analysis on the characteristics of surface rupture and regional seismicity trend of Mengyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(2): 340 - 349. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 蒋青江,邓亚虹,杨楠,等.基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究 [J].地震工程学报, 2023, 45(3): 716 - 723. [JIANG Qingjiang, DENG Yahong, YANG Nan, et al. Pseudo-dynamic seismic slope stability analysis based on rigorous slice method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(3): 716 - 723. (in Chinese with English abstract)]
- [15] DENG D P, LI L. Limit equilibrium analysis of slope stability with coupling nonlinear strength criterion and double-strength reduction technique [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(6): 04019052.
- [16] SENGANI F, MULENGA F. Application of limit equilibrium analysis and numerical modeling in a case of slope instability [J]. Sustainability, 2020, 12(21): 8870.
- [17] TERZAGHI K. Mechanism of landslides [J]. 1950.
- [18] 杨楠,邓亚虹,慕焕东,等.一种基于拟动力法和剩余推力的地震边坡稳定性分析新方法 [J].工程地质学报, 2023, 31(2): 607 - 616. [YANG Nan, DENG Yahong, MU Huangdong, et al. A new method of seismic slope stability analysis based on pseudo-dynamic method and residual thrust method [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 607 - 616. (in Chinese with English abstract)]
- [19] MARCUSON W F. Moderator's report for session on earth dams and stability of slopes under dynamic loads [C] //Proc. , Int. Conf. on recent adv. In Geotech. Earthquake Engrg. And Soil Dyn., Univ. of Missouri. 1981, 3.
- [20] HYNES-GRIFFIN M E, Franklin A G. Rationalizing the seismic coefficient method [J]. Miscellaneous Paper GL-84-13, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MI, 1984.
- [21] BAKER R, SHUKHA R, OPERSTEIN V, et al. Stability charts for pseudo-static slope stability analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(9): 813 - 823.
- [22] 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.
- [23] 陈国兴.岩土地震工程学 [M].北京:科学出版社, 2007. [CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)]
- [24] MONONOBE N, TAKATA A, MATUMURA M. Seismic stability of earth dam [A] // Proceedings of the 2nd Congress of Large Dams [C]. Washington D C, USA, 1936, 4.
- [25] GAZETAS G. A new dynamic model for earth dams evaluated through case histories [J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 67 - 78.
- [26] DAKOULAS P, GAZETAS G. A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments [J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1985, 4(4): 166 - 182.
- [27] 言志信,张学东,张森,等.基于双向地震作用下边坡共振特性与固有频率研究 [J].水文地质工程地质, 2011, 38(2): 46 - 51. [YAN Zhixin, ZHANG Xuedong, ZHANG Sen, et al. Study on resonance characteristics and natural frequency of slope under bi-directional seismic action [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 46 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [28] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB50011-2010 [S].北京:中国建筑工业出版社, 2010. [People's Republic of China Ministry of Housing and Urban-Rural Development, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese with English abstract)]