

高昂,张孟喜.边坡加固的抗震性能参数分析[J].地震工程学报,2019,41(1):94-100.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.094
GAO Ang,ZHANG Mengxi.Analysis of Seismic Performance Parameters for Slope Reinforcement[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(1):94-100.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.094

边坡加固的抗震性能参数分析

高 昂¹, 张孟喜²

(1. 浙江工业职业技术学院建筑工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 传统基于瑞典法的边坡加固抗震性能参数分析,通过建立强度参数与临界滑动面对应关系完成推导,由于因荷载过大,边坡建筑物抗震性能降低,准确率不高等问题,提出新的边坡加固抗震性能参数分析方法,对边坡加固的抗震性能参数进行分析,更好地通过加固提高其抗震性能。运用新型边坡加固抗震性能参数分析方法,采用基于极向条分的极限分析上限法和非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则,分析边坡加固措施对边坡抗震性能的影响,通过对比有、无加固措施状态下不同能量功率的运算确定边坡抗震性能,利用 MATLAB 软件获取边坡加固抗震性能参数的最优解。经实验证明,边坡潜在破坏范围受边坡坡顶受荷和边坡加固情况的作用较大,地震荷载系数及非线性系数越大,土体强度非线性越小,边坡抗震性能受地震荷载的作用也越大。边坡抗滑桩最优抗震支护方位位于 $X_F/L_x=0.7$ 处,在地震荷载从 0 上升至 0.2 的情况下,非线性系数为 1.2、1.4、1.6 以及 2.0 时的边坡抗震性能分别下降了 40.1%、46.8%、57.5% 以及 61.5%。新型的抗震性能参数分析方法有效地提高了结果准确率,对边坡加固的抗震性能能达到准确分析。

关键词: 边坡加固; 抗震性能; 参数分析; 上限法; 破坏准则; 土体非线性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0094-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.094

Analysis of Seismic Performance Parameters for Slope Reinforcement

GAO Ang¹, ZHANG Mengxi²

(1. School of Architecture and Engineering, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The relationship between strength parameters and critical sliding surface is established to complete derivation in the analysis of seismic performance parameters of slope reinforcement based on the traditional Swedish method. In this work, a novel method for the analysis of the seismic performance parameters of slope reinforcements is proposed to improve the seismic performance of slope reinforcements. The upper-bound limit analysis method based on polar slice and nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion is used to analyze the influence of slope reinforcement measurements on slope seismic performance. Slope seismic behavior is determined through the calculation of different energy powers in the presence and absence of reinforcement measures, and the optimal solution for the seismic performance parameters of slope reinforcement is obtained by

收稿日期:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372280)

第一作者简介:高 昂(1982—),男,河南周口人,博士,讲师,主要从事新型土工加筋技术及岩土工程研究工作。

E-mail:gaoangv@126.com.

using MATLAB software. Experiments prove that the potential failure range of the slope is greatly affected by loading on the top of the slope and the reinforcement of the slope. High seismic load coefficients and nonlinear coefficient are associated with the low nonlinear strength of soil and the intense effect of seismic load on slope seismic performance. The optimal seismic support orientation of slope antislide pile is located at $X_F/L_x=0.7$. When the seismic load increases from 0 to 0.2 with the nonlinear coefficients of 1.2, 1.4, 1.6, and 2.0, the seismic performance of the slope decreases by 40.1%, 46.8%, 57.5%, and 61.5%, respectively. The new seismic performance parameter analysis method can effectively improve the accuracy of results, and the seismic performance of slope reinforcement can be accurately analyzed.

Keywords: slope reinforcement; seismic performance; parameter analysis; upper bound method; failure criterion; soil nonlinearity

0 引言

我国地形较为复杂,土地有效利用率较低,因此,需要采用不同技术手段来增加土地的有效利用率,在边坡上实施建筑构建则成为利用山区地形的有效方法,不过在边坡上构建建筑物会影响边坡以及边坡建筑物的抗震性能^[1-2]。边坡抗震性能受基础边界与坡顶一侧边界的水平距离(G)、边坡坡度(α)、建筑物的埋深(d)与宽度(b)等基础因素的影响,同时还受边坡土体强度、外部诱因等因素的影响^[3]。当边坡承受荷载过大或者受到地震荷载影响时,边坡抗震性能降低,无法达到建筑物施工条件。在这种情况下,需要利用加固措施对边坡进行加固,提高边坡的抗震性能。

文献[4]提出多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验,研究多级锚索框架梁与双排抗滑桩组合结构加固含软弱夹层岩质边坡的地震动力特性,但计算量较大,所需时间较长,分析效率低;文献[5]提出极限平衡理论下边坡强度参数反演及加固稳定性分析,对边坡临界滑动面进行判别的情况下,以瑞典法为基础,通过建立强度参数之间及其与临界滑动面一一对应的关系推导得边坡强度参数反演的显式计算公式。然后,将反演结果用于锚索加固条件下的边坡稳定性研究,但却没有考虑滑坡体内部的摩擦能耗,研究结果不准确。文献[6]提出对高层建筑场地边坡的地震稳定性进行分析,运用二维和三维有限元分析模型对高层建筑河岸边坡场地进行了动力弹塑性时程分析,评价三水准地震作用下场地的地震稳定性,但过程较为复杂,误差较大;文献[7]提出某岩质高边坡稳定性分析及预应力锚索加固设计,采用极限平衡法对边坡整体稳定和块体稳定进行了分析计算,但却没有考虑边坡破坏形式,计算结果不全面。

针对上述文献中存在的各种问题,本文提出新的边坡加固抗震性能参数分析方法,对边坡加固的抗震性能参数进行分析。

1 边坡加固的抗震性能参数分析方法

1.1 基于极向条分的极限分析上限法和非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则

1.1.1 基于极向条分的极限分析上限法

边坡加固的抗震性能分析中多使用极限分析法^[8],依照相关联流动法则,地震作用下均质边坡的滑动面呈现对数螺旋线。在以往的极限分析法中将滑坡体看作是一个整体,没有考虑滑坡体内部的摩擦能耗^[9],研究人员为了解决这一问题,将滑坡体划分为数个等分竖直条块,各条块间平面上的能耗表示滑坡体内部的能耗,各条块间的能耗与底部平面上的能耗总和即滑坡体能耗总量。夏元友等^[10]在此基础上利用极向条分法,依照协调速度场对条块的速度实施获取,这种方法能够更快捷的对地震产生的对数螺旋线滑面进行计算,如图1所示。本文

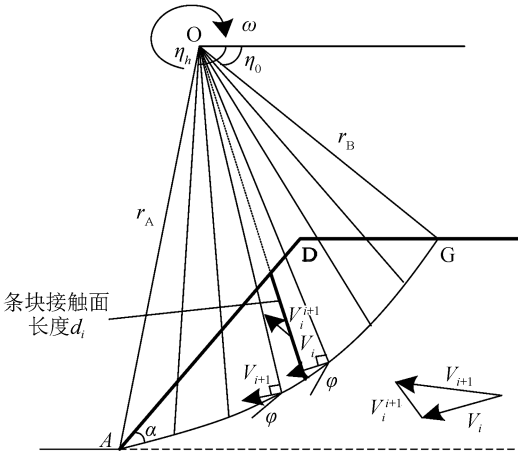


图 1 极向条分原理图

Fig.1 Diagram of polar slice principle

利用基于极向条分的极限分析上限法对滑坡体的内部能耗进行计算,将计算结果与未考虑坡体内部摩擦能耗的计算结果相比较,以分析地震作用产生的滑动面经过边坡坡脚的状态。

1.1.2 非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则

由于非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则的使用范围较广,是因为其指数形式实用性较强^[11],可以再现非线性的 Mohr 圆包络线。在工程计算中,岩土材料的强度通常用非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则表达,通过式(1)进行描述:

$$\tau = c_0 \cdot (1 + \sigma_n / \sigma_t)^{1/m} \quad (1)$$

式中: τ 表示破坏面的切向应力; σ_n 表示破坏面的法向应力; $c_0 (\geq 0)$ 、 $\sigma_t (\geq 0)$ 和 m 分别表示最初黏聚力、单轴拉伸力和控制强度曲线参数(即非线性参数),具体如图 2 所示。

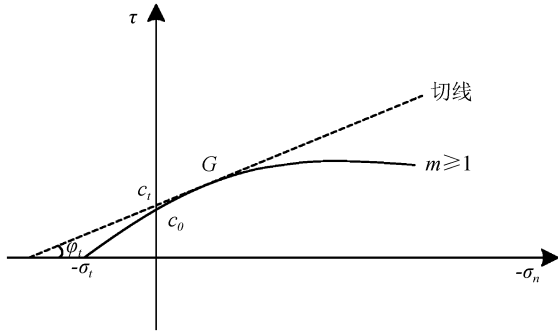


图 2 非线性 M-C 破坏准则示意图

Fig.2 Schematic diagram of nonlinear M-C failure criterion

曲线的弯曲状态与 m 值相关,在 $m = 1$ 的情况下,式(1)则为线性 M-C 破坏准则,将 $m = 1$ 代入式(1),即:

$$\tau = c_0 + \frac{c_0}{\sigma_t} \sigma_n \quad (2)$$

式中: c_0 和 c_0/σ_t 分别表示线性 M-C 强度理论内的黏聚力和线性 M-C 强度线内的斜率 $\tan\varphi$ ($c_0/\sigma_t = \tan\varphi$), φ 表示内摩擦角。

1.2 能耗计算与目标函数优化求解

1.2.1 无加固措施的边坡能耗计算

在未考虑边坡加固措施的情况下,土体重力功率、地震荷载功率、边坡坡顶基础外力功率和潜在滑动面上的内力功率共同组成了未加固边坡破坏模式的总功率^[12]。

依照未考虑边坡加固措施情况下地震破坏模式中的几何关系,采用叠加法对土体重力功率进行确定^[13],即为:

$$W_\gamma = \gamma \omega r_0^3 (f_1 - f_2 - f_3 - f_4) \quad (3)$$

其中: f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 表示不同区域的土体重力功率,分别为:

$$f_1 = \frac{1}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} [(3 \tan \varphi \cos \eta_h + \sin \eta_h) e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} - 3 \tan \varphi \cos \eta_0 - \sin \eta_0]; \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{1}{6} \frac{K}{r_0} \left(2 \cos \eta_0 - \frac{K}{r_0} \right) \sin \eta_0; \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{1}{6} e^{(\eta_h - \eta_0) \tan \varphi} \left[\sin(\eta_h - \eta_0) - \frac{K}{r_0} \sin \eta_h \right] \cdot \left[\cos \eta_0 - \frac{K}{r_0} + \cos \eta_h e^{(\eta_h - \eta_0) \tan \varphi} \right]; \quad (6)$$

$$f_4 = \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 \frac{\sin(\alpha - \alpha')}{2 \sin \alpha \sin \alpha'} \cdot \left[\cos \eta_0 - \frac{K}{r_0} - \frac{1}{3} \frac{H}{r_0} (\cot \alpha + \cot \alpha') \right] \quad (7)$$

在式(3)中, η_h 、 η_0 表示边坡破坏范围的角度; H 和 K 分别表示边坡高度和坡顶宽度到坡趾点的距离; ω 代表角速度, $\omega = 360^\circ - \eta_h$; r_0 表示潜在滑移面旋转中心到滑移面上侧的距离。

采用拟静力法地震荷载功率进行运算,得到:

$$W_{\gamma-k_n} = k_h \gamma \omega r_0^3 (f_5 - f_6 - f_7 - f_8) \quad (8)$$

其中: f_5 、 f_6 、 f_7 、 f_8 表示不同区域的地震荷载功率,分别为:

$$f_5 = \frac{1}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)} [(3 \tan \varphi \cdot \sin \eta_h - \cos \eta_h) e^{3(\eta_h - V_0) \tan \varphi} - 3 \tan \varphi \sin \eta_0 - \cos \eta_0]; \quad (9)$$

$$f_6 = \frac{1}{3} \frac{K}{r_0} \sin^2 \eta_0; \quad (10)$$

$$f_7 = \frac{1}{6} \frac{H}{r_0} e^{(\eta_h - \eta_0) \tan \varphi} \frac{\sin(\eta_h + \alpha')}{\sin \alpha'} \cdot \left[2 \sin \eta_h \cdot e^{(\eta_h - \eta_0) \tan \varphi} - \frac{H}{r_0} \right]; \quad (11)$$

$$f_8 = \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 \frac{\sin(\alpha - \alpha')}{6 \sin \alpha \sin \alpha'} \cdot \left[3 \sin \eta_h e^{3(\eta_h - \eta_0) \tan \varphi} - \frac{H}{r_0} \right] \quad (12)$$

式(8)~(12)中: k_h 和 H 分别表示横向地震荷载系数和坡高。

之后,坡顶条形基础作用下均布荷载产生的功率为:

$$W_q = \int_a^b q (r_0 \cos \eta_0 - G + x) dx = qb \left(\frac{b}{2} + r_0 \cos \eta_0 - G \right) \quad (13)$$

式中: q 和 I_{int} 分别表示基础下表面作用于边坡土体

中的均布荷载和潜在滑移面上的内能耗散; G 代表重力,且

$$I_{\text{int}} = \int_{\eta_0}^{\eta_h} cV \cos\varphi \frac{r d\eta}{\cos\varphi} = \frac{cr_0^2 \omega}{2 \tan\varphi} \{ \exp[2(\eta_h - \eta_0) \tan\varphi] - 1 \} \quad (14)$$

通过式(3)、(8)、(13)能够得到无加固措施边坡抗震性能的各项能耗和内部能量功率。在本文边坡

$$p(z) = cA \left(\frac{1}{N_\varphi \tan\varphi} \left\{ \exp \left[\frac{I_1 - I_2}{I_2} N_\varphi \tan\varphi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\pi}{4} \right) \right] - 2N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} - 1 \right\} + \frac{2 \tan\varphi + 2N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} + N_\varphi - 1/2}{N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} + N_\varphi - 1} \right) - c_h \left(I_1 \frac{2 \tan\varphi + 2N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} + N_\varphi - 1/2}{N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} + N_\varphi - 1} - 2I_2 N_\varphi - 1/2 \right) + \frac{\gamma z}{N_\varphi} \left\{ A \exp \left[\frac{I_1 - I_2}{I_2} N_\varphi \tan\varphi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\pi}{4} \right) \right] - I_2 \right\} \quad (15)$$

式中: $N_\varphi = \tan(\pi/4 + \varphi/2)$, $A = I_1(I_1/I_2)(N_\varphi \frac{1}{2 \tan\varphi} + N_\varphi - 1)$; I_1 表示边坡加固措施形心之间的距离, I_2 表示边坡加固措施形心之间的静距; N_φ 表示内摩擦角得力,同时 $I_1 - I_2 = I_{ia}$, I_{ia} 表示边坡加固措施截面直径。

在边坡加固措施功率运算过程中,对单位抗力沿滑动面以上的边坡加固措施长度实施积分后对总功率实施运算,即:

$$W_p = \omega \int_0^h \frac{p(z)}{I_1} l(z) dz \quad (16)$$

其中:

$$l(z) = r_h \sin\eta_h + X_F \tan\alpha + z. \quad (17)$$

综合上述过程可得总外力功率 $W_{\text{tot}} = W_\gamma + W_{\gamma-kh} + W_q - W_p$, 边坡加固的抗震性能分析过程中,抗震性能系数能够用 $F_s = I_{\text{int}}/W_{\text{tot}}$ 进行描述。其中 I_{int} 、 W_{tot} 和 F_s 分别表示总内能消耗功率、总外力功率和边坡抗震性能系数,若 $F_s < 1$,则边坡抗震性能较差,若 $F_s > 1$,则边坡抗震性能较好。

1.2.3 目标函数求解

按照本文所提破坏模式的几何关系确定优化过程的约束条件,在此基础上利用 MATLAB 软件能够得到边坡加固的抗震性能参数的最优解^[10,14],即合理的 F_s 最小解。在约束条件 $0 < \theta_0 \leq \theta_p \leq \theta_h < \pi$; $0 < h \leq H$; $B < L$; $b < L$ 下,能够确定边坡加固的抗震性能参数的最小解^[15],利用参数分析边坡加固措施的条形基础尺寸、边坡加固措施分布位置以及土体强度非线性等对边坡加固的抗震性能参数和潜在滑动面形状的作用。

2 示例分析

为了对本文方法与传统方法进行比较,选择了

加固的抗震性能参数分析过程内,兼顾了边坡加固措施对边坡的加固效果,所以需要根据边坡加固措施加固的边坡破坏模式计算边坡加固措施在边坡加固时的能量功率。

1.2.2 边坡加固措施能耗计算

边坡加固措施加固边坡的过程中,边坡加固措施提供的横向单位抗力用式(15)进行描述:

某一实际工程算例进行验证,设某边坡的材料服从非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则,岩土材料参数 c_0 为 90 kPa, σ_0 为 247.3 kPa。在基于非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则对本文进行极限分析时,计算时首先保证非线性参数 $m=1$ 的情况下,岩土材料则为线性 M-C 破坏准则,坡高作用力 T 为 0,坡角为 0,高度 H 为 20 m 时,土体强度非线性系数 m 分别为 1.6~2.5,并且 α 取 45°, 60° 和 90°。按照本文方法进行稳定性结果计算并与文献[3]的结果进行比较。结果如表 1 所示。

表 1 不同计算方法获得的边坡安全系数 F

Table 1 Values of safety factor F with different calculation methods

坡角 $\alpha/(^\circ)$	直线滑裂面	
	极限平衡法	本文方法
45	2.970	2.976
60	2.127	2.128
90	1.348	1.210

实验为验证边坡加固的抗震性能,以抗滑桩为例,采用本文方法对抗滑桩边坡加固的抗震性能参数进行分析。采用抗滑桩作为边坡加固措施时,首先要确定的是加固位置是否合理,实验采用边坡高度 14 m、坡度 25° 以及高度 9 m、坡度 40° 的两块边坡进行抗滑桩抗震性能分析,具体条件参照图 3。

分析图 3 可知,图中边坡抗滑桩最优抗震支护方位都位于 $X_F/L_x = 0.7$ 处, X_F/L_x 代表黏聚力,抗滑桩抗震支护作用受土体内摩擦角作用较明显,但抗滑桩抗震支护方位不受土体内摩擦角作用,也就是说土体强度参数任意变化,抗滑桩最优抗震支护方位固定。

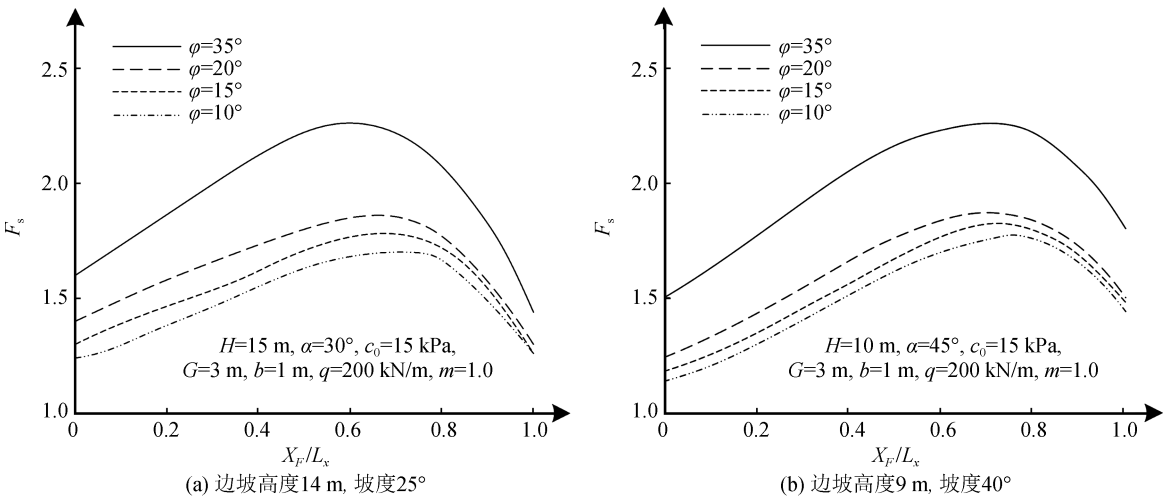


图3 抗滑桩支护位置对边坡抗震性能的影响

Fig.3 Influence of support location of antislide pile on the seismic performance of slope

实验为验证本文方法分析的土体强度非线性及地震荷载对边坡抗震性能的影响,采用高度为14 m、坡度为40°的边坡进行实验,将土体强度非线

性系数和地震荷载系数分别设置为1.2~2.0和0~0.3,其他具体参数如图4所示。

分析图4能够得到,本文方法分析得出边坡抗

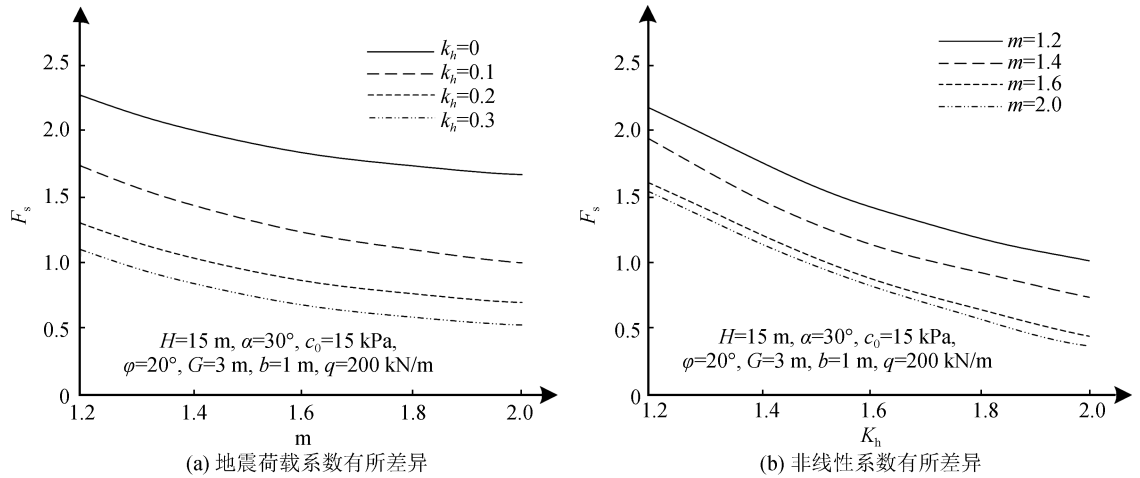


图4 土体强度非线性和地震荷载对边坡加固抗震性能的影响

Fig.4 Influence of soil strength nonlinearity and seismic load on seismic performance of slope reinforcement

震性能与地震荷载系数及非线性系数呈反比,即地震荷载系数及非线性系数越大,边坡抗震性能越差。同时,在非线性系数逐渐增大的条件下,边坡抗震性能降低的速率也越来越低。将非线性系数对边坡抗震性能的影响与地震荷载系数对边坡抗震性能的影响相比较,边坡抗震性能受地震荷载的作用较明显,在地震荷载从0上升至0.2的情况下,非线性系数为1.2、1.4、1.6以及2.0时的边坡抗震性能分别下降了40.1%、46.8%、57.5%以及61.5%。实验结果表明,本文方法分析得出土体强度非线性越大,边坡抗震性能受地震荷载的作用也越大。

实验为验证本文方法分析的边坡潜在滑动面受坡顶桩基础及土体强度非线性性的影响,将参数进行优化运算,得到能够体现边坡潜在滑动面大小的参数 θ_h 和 θ_0 等,根据这些参数绘制边坡潜在滑动面图,如图5所示。图5内,将边坡高度和坡度分别设置为15 m和45°。

分析图5(a)能够得到,本文方法分析得出潜在破坏面最浅,滑移块体体积最小的情况出现在边坡坡顶不存在条形基础作用,但存在抗滑桩抗震支护的条件下。当边坡坡顶条形块体数量有所提升、抗震支护条件有所下降时,潜在破坏面和滑移块体体

积开始分别加深、加大。分析图 5(b)能够得到,边坡潜在滑动面与非线性系数呈线性关系,即非线性系数越大,边坡潜在滑动面越深,破坏范围越大,边坡土体抗震性能变差。

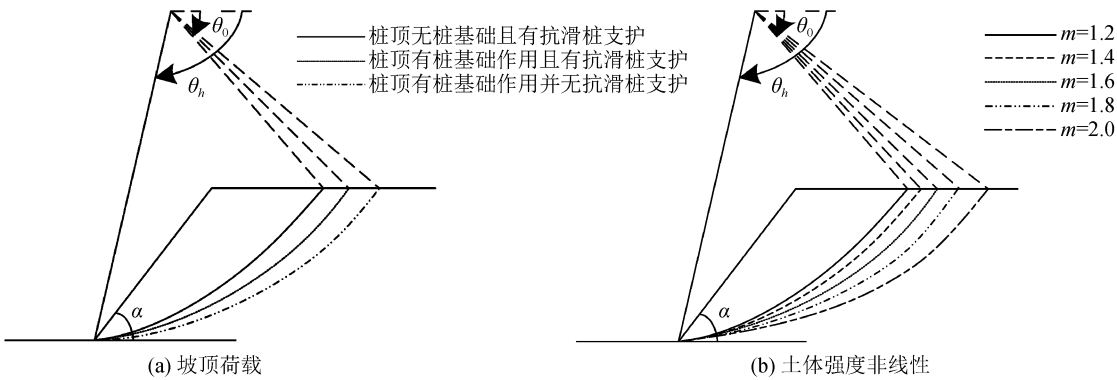


图 5 坡顶受荷及土体强度非线性对边坡潜在滑坡面的影响

Fig.5 Influence of top load and soil strength nonlinearity on slope potential landslide

为了验证本文方法的抗震性能的准确性,在某工程应用中将本文方法和传统方法的抗震性能准确率进行对比,如图 6 所示。

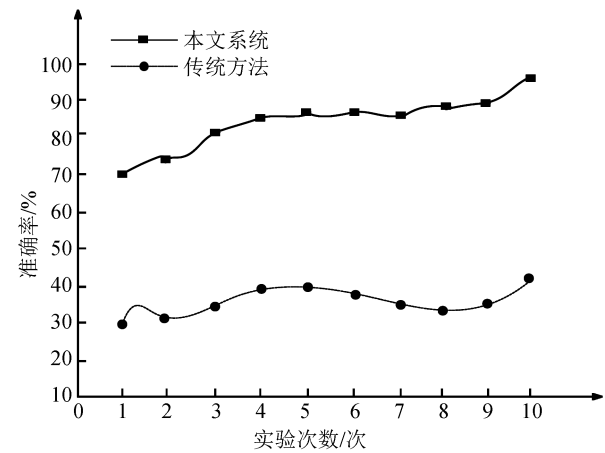


图 6 两种方法在某工程应用中的抗震性能准确率对比图

Fig.6 Comparison between the seismic performance accuracy of two methods in an actual project

由图 6 可知,当实验次数为 1 时,本文方法的准确率为 70%,传统方法的准确率为 30%;当实验次数为 5 时,本文方法的准确率为 85%,传统方法的准确率为 40%;当实验次数为 10 时,本文方法的准确率为 97%,传统方法的准确率为 46%。本文方法的抗震性能准确率比传统方法的准确率高,随着实验次数的增加,本文方法的稳定性能越好。

3 结论

针对传统边坡加固抗震性能参数分析方法中存在的各种问题,本文提出新的坡加固抗震性能参数

分析方法。新方法中采用基于极向条分的极限分析上限法和非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则分析了边坡加固措施对边坡抗震性能的影响,通过对无加固措施和有加固措施状态下不同能量功率的运算确定边坡抗震性能,利用 MATLAB 软件获取边坡加固抗震性能参数的最优解。本文方法经参数分析得到如下结论:

- (1) 边坡抗滑桩最优抗震支护方位位于 $X_F/L_x=0.7$ 处,土体强度参数任意变化,抗滑桩最优抗震支护方位固定。
- (2) 在地震荷载从 0 上升至 0.2 的情况下,非线性系数为 1.2、1.4、1.6 以及 2.0 时边坡抗震性能分别下降了 40.1%、46.8%、57.5% 以及 61.5%。地震荷载系数及非线性系数越大,边坡抗震性能越差;在非线性系数逐渐增大的条件下,边坡抗震性能降低的速率也越来越低;土体强度非线性越大,边坡抗震性能受地震荷载的作用也越大。
- (3) 边坡潜在破坏范围受边坡坡顶受荷和边坡加固情况的作用较大,当坡顶条形块体数量有所提升、抗震支护条件有所下降、土体非线性上升时,潜在破坏面和滑移块体体积开始分别加深、加大。
- (4) 在某工程应用中本文方法的抗震性能准确率比传统方法的准确率高,能够对边坡加固的抗震性能达到准确分析。

参考文献(References)

[1] 占昌宝,罗川,丁振坤,等.高层建筑抗震性能预测仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(8):397-402.
ZHAN Changbao,LUO Chuan,DING Zhenkun,et al.Research on Seismic Performance Prediction of High-rise Buildings[J].

- Computer Simulation, 2016, 33(8): 397-402.
- [2] 郭震山, 赵建斌, 赵紫阳. 降雨入渗条件下抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4): 47-52.
GUO Zhenshan, ZHAO Jianbin, ZHAO Ziyang. Stability Analysis of the Slope Reinforced with Anti-slide Pile Under the Condition of Rainfall Infiltration[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(4): 47-52.
- [3] 周晓军, 毛露露, 姜波, 等. 山岭隧道洞口边坡加固中锚杆(索)最优锚固角分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 123-128.
ZHOU Xiaojun, MAO Lulu, JIANG Bo, et al. Analysis of the Optimal Anchoring Angle of Anchor Bolts (Cables) for Slope Reinforcement at Mountain Tunnel Portal Sections[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 123-128.
- [4] 付晓, 张建经, 周立荣. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462-470.
FU Xiao, ZHANG Jianjing, ZHOU Lirong. Shaking Table Test of Seismic Response of Slope Reinforced by Combination of Anti-slide Piles and Multi-frame Foundation Beam with Anchor Cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 462-470.
- [5] 邓东平, 李亮. 极限平衡理论下边坡强度参数反演及加固稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 10-18.
DENG Dongping, LI Liang. Inversion of Strength Parameters and Stability Analysis of Reinforced Slope with Limit Equilibrium Theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 10-18.
- [6] 王亚勇, 岳茂光, 朱立刚, 等. 高层建筑场地边坡的地震稳定性分析和工程实践[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 165-172.
WANG Yayong, YUE Maoguang, ZHU Ligang, et al. Study and Engineering Practice on Seismic Stability of River Side Slope Beside High-rise Buildings' Site[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 165-172.
- [7] 刘瑞懿, 肖碧, 李洪斌, 等. 某岩质高边坡稳定性分析及预应力锚索加固设计[J]. 人民长江, 2016, 47(21): 77-80.
LIU Ruiyi, XIAO Bi, LI Hongbin, et al. Stability Analysis of a High Rocky Slope and Its Pre-stress Anchorage Cable Design[J]. Yangtze River, 2016, 47(21): 77-80.
- [8] 高先建, 谢强, 赵文, 等. 非预应力 BFRP 锚杆加固土质边坡设计参数确定试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 20-28.
GAO Xianjian, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Experimental Study on Determining Design Parameters of Non-prestressed BFRP Anchor for Supporting Soil Slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(7): 20-28.
- [9] 母传伟, 何方维, 裴恒. 三维有限元法强度折减法在某岩质边坡加固中的应用[J]. 中国矿业, 2015, 24(9): 137-140.
MU Chuanwei, HE Fangwei, PEI Heng. Numerical Simulation and Analysis of High Rock Slope Based on the Finite Element Method[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(9): 137-140.
- [10] 夏元友, 陈春舒. 考虑土体多参数非均质性及各向异性锚固边坡抗震稳定性极限分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 829-837.
XIA Yuanyou, CHEN Chunshu. Limit Analysis of Multi-parameter Heterogeneity and Seismic Stability of Anisotropic Anchored Slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 829-837.
- [11] 李红卫, 温树杰, 胡国保, 等. 抗滑桩加固三维多地层边坡最小势能稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(4): 153-157.
LI Hongwei, WEN Shujie, HU Guobao, et al. Stability Analysis of Anti-slide Pile Reinforced 3D Multi Stratum Slope Based on Minimum Potential Energy Method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(4): 153-157.
- [12] 杨念君. 各向异性和非均质边坡的桩板墙加固机理研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 182-186.
YANG Nianjun. Reinforcement Mechanism of Slab-pile Wall Acting on Anisotropic and Inhomogeneous Slope[J]. Highway Engineering, 2016, 41(3): 182-186.
- [13] 王晨玺杰, 邓华锋, 张恒宾, 等. 考虑劣化效应的三峡库区某岸坡抗震性能分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 112-116.
WANG Chenxijie, DENG Huafeng, ZHANG Hengbin, et al. Seismic Behavior of a Typical Bank Slope of Three Gorges Reservoir in Consideration of Degradation of Rock Mass Mechanical Properties[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 112-116.
- [14] 渠孟飞, 谢强, 赵文, 等. 土工格栅加固膨胀土路堤边坡稳定性的试验分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(7): 9-13.
QU Mengfei, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Experimental Analysis of Embankment Slope of Expansive Soil Strengthened by Geogrid[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7): 9-13.
- [15] 侯超群, 邓欣, 孙志彬, 等. 非线性准则下三维加筋边坡稳定性的上限分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 124-132.
HOU Chaoqun, DENG Xin, SUN Zhibin, et al. Upper Bound Analysis of Stability of 3D Reinforced Slope Under Nonlinear Criterion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 124-132.