

文章编号:1673-9469(2021)04-0034-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.006

## 临河岩质边坡地震抗倾覆稳定性拟动力分析

杨兵兵<sup>1</sup>, 孙树林<sup>1\*</sup>, 吴孙星<sup>2</sup>, 张岩<sup>3</sup>, 高诗钦<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 建华建材(中国)有限公司, 江苏 镇江 212413;

3. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

**摘要:** 基于拟动力法推导出不同工况条件下临河岩质边坡地震抗倾覆稳定安全系数计算公式。通过参数分析, 研究不同岩体放大系数下, 水平和垂直地震力、张裂缝积水深度、边坡超载、锚固效应、流水淘蚀等对岩质边坡地震抗倾覆稳定性的影响, 研究表明, 不同工况下, 张裂缝积水深度、水平地震力、流水淘蚀不利于岩质边坡地震抗倾覆稳定, 但竖向地震力、锚固力、锚固高度、坡顶超载等有利于岩质边坡地震抗倾覆稳定; 随着岩体放大系数的增加, 水平地震力、竖向地震力对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响增大, 坡顶超载、张裂缝积水深度、锚固应力、锚固高度、临河水位对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响减小, 而锚固倾角、坡脚淘蚀高度对边坡抗倾覆稳定性的影响基本不变。

**关键词:** 临河岩石边坡; 倾覆稳定; 拟动力法; 水压分布; 地震稳定

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

## Pseudo-dynamic Analysis of Stability Against Earthquake Overturning of Rock Slope Along Rivers

YANG Bingbing<sup>1</sup>, SUN Shulin<sup>1\*</sup>, WU Sunxing<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>3</sup>, GAO Shiqin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Jianhua Construction Materials, Zhenjiang, Jiangsu 212413, China;

3. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The stability evaluation of rock slopes in earthquake-prone areas is of great significance. Based on the pseudo-dynamic method, the calculation formulas of the stability safety factor of the rock slopes along river under different conditions was derived. Through parameter analysis, the impact of the seismic resistance of rock slopes such as horizontal and vertical seismic force, depth of cracking and fissure water, slope overload, anchoring effect, and flowing water erosion on the stability of rock slopes against overturning under different rock mass magnification factors was studied. Studies have shown that under different working conditions, the crack water accumulation, the horizontal seismic force, and the erosion of flowing water are not conducive to the stability of the rock slope against earthquake overturning, but the vertical seismic force, anchorage force, anchorage height, slope top overload, etc. are conducive to the seismic stability of rock slopes against overturning; with the increase of the rock mass amplification factor, the influence of horizontal and vertical seismic forces on the stability of rock slopes against overturning increases, slope crest overload, water depth of tension cracks, anchoring stress, anchoring height, and river water level have less influence on the anti-overturning stability of rock slopes, while the anchoring inclination angle and the height of scouring at the foot of the slope have less influence on the anti-overturning stability of the slope.

**Key words:** rock slope along river; overturning stability; pseudo-dynamic method; water pressure distribution; seismic stability

收稿日期: 2021-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41674113); 中央党校科研业务费专项资金资助项目(2109B42214)

作者简介: 杨兵兵(1997-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面的研究。

\* 通讯作者: 孙树林(1963-), 男, 江苏建湖人, 博士, 教授, 主要从事岩土力学与工程、环境岩土工程方面的研究。

岩质边坡是岩土工程中常见的结构之一,其稳定性直接关系到人身安全<sup>[1-2]</sup>,因此,其稳定性评价至关重要。在我国西部,山区公路因地形限制多沿临河边坡分布,山区河流河床狭窄,水位随季节变化非常明显,在雨季经常造成河水位的骤升与骤降,且水中夹杂大小不均的石块,对临河边坡产生极大的冲刷与侵蚀,因而,河水位骤升与骤降和冲刷与侵蚀是造成临河边坡失稳塌方的主要原因<sup>[3-4]</sup>。Hoek 等<sup>[5]</sup>研究了水流冲击力作用下典型岩质边坡的稳定性,得出在水流冲击力作用下其失稳概率更大。而临河岩质边坡长期受水流冲刷侵蚀,坡趾淘蚀严重,较其他边坡更易失稳,且临河水位骤降导致岩体内部水位和张裂缝水位上升,使得其稳定性降低,此外地震、坡顶超载、积水深度等也会影响其稳定性。赵炼恒等<sup>[6]</sup>基于极限平衡法研究了临河水位、水流淘蚀、地震力等多因素耦合对临河岩质边坡稳定性的影响,提出了分析其抗滑稳定安全系数计算公式。罗伟等<sup>[7-8]</sup>研究得出临河水位的升高对于边坡稳定有着积极作用。师化鹏等<sup>[9]</sup>研究得出了极端天气下,不同工况临河岩质边坡抗倾覆稳定性差异明显,且裂隙水冻胀作用对其影响很大。刘富有等<sup>[10]</sup>利用改进的静水压力分布形式,研究得出水流侵蚀不利于临河岩质边坡抗倾覆稳定,而适当增设锚杆可提高其抗倾覆稳定性。但是以上研究在关于地震力对临河岩质边坡稳定性的影响上都属于拟静力学范畴,忽略了地震力随时间、位置变化的动态特性,且未考虑地震引起的动水压力对其稳定性的影响。

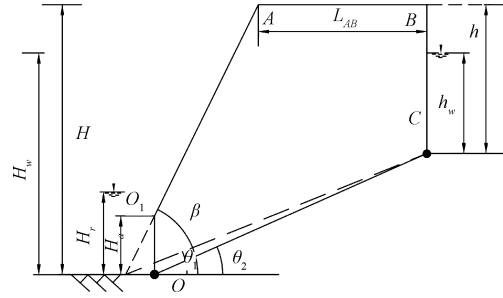
基于以上不足,本文根据极限平衡理论和拟动力法,推导出不同工况下临河岩质边坡抗倾覆稳定安全系数计算公式,且研究了不同岩体放大系数下,地震荷载、边坡超载、锚固效应等多个因素对临河岩质边坡地震抗倾覆稳定的影响,为其稳定性分析和工程建设提供参考。

### 1 计算模型及拟动力方法

根据师华鹏等<sup>[9]</sup>的研究,锚固岩石边坡平移滑动破坏机制的典型几何形式如图 1 所示。

#### 1.1 地震加速度

拟静法是将地震力等效作用在地质体质心上,忽略了地震力随时间、位置变化的动态特性,与实际情况不符。因此 Steedman 和 Zeng 提出拟动力分析法,并通过与离心模型试验结果比较,验证了拟动力法的有效性<sup>[11]</sup>。拟动力法是将地震



注: $H$ 为边坡高度, $H_r$ 为临河水位, $H_u$ 为坡脚淘蚀高度, $H_w$ 为总地下水水位, $\beta$ 为边坡倾角, $\theta_1$ 为坡趾淘蚀前边坡失稳角, $\theta_2$ 为淘蚀后边坡失稳角, $h$ 为张裂缝深度, $h_w$ 为张裂缝积水深度, $L_{AB}$ 为张裂缝到坡顶距离。

图 1 典型临河岩质边坡的几何要素<sup>[9]</sup>

Fig. 1 The geometric elements of a typical rock slope along river

时基岩振动加速度简化为正弦时程函数,同时考虑基岩地震波向地面传播过程中不同深度土层振动相位差以及振动加速度幅值放大效应的影响,Choudhury 在此基础上进行了改进,同时考虑了竖向地震力和水平地震力<sup>[12-13]</sup>。根据拟动力法,任意深度  $z$ ,任意时刻  $t$  的水平与竖向加速度分别为:

$$a_h(z, t) = \left[ 1 + \frac{H-z}{H}(f_s - 1) \right] K_h g \sin \omega \left[ t - \frac{H-z}{V_s} \right] \quad (1)$$

$$a_v(z, t) = \left[ 1 + \frac{H-z}{H}(f_s - 1) \right] K_v g \sin \omega \left[ t - \frac{H-z}{V_p} \right] \quad (2)$$

式中: $a_h(z, t)$ 、 $a_v(z, t)$ 分别为水平与竖向加速度; $K_h$ 、 $K_v$ 分别为水平与竖向地震系数; $g$ 为重力加速度; $f_s$ 为岩体放大系数; $\omega$ 为角速度, $\omega = 2\pi/T$ , $T$ 为地震震动的周期; $V_s = (G/\rho)^{1/2}$ 为横波波速; $V_p = [2G(1-\nu)/\rho(1-2\nu)]^{1/2}$ 为纵波波速, $V_s$ 、 $V_p$ 中  $G$ 为岩石的剪切模量,拟动力法假设其为一常数, $\rho$ 为岩体的密度, $\nu$ 为泊松比。

#### 1.2 地震力

任意深度岩石微分单元的质量为:

$$m(z) = \begin{cases} \frac{\gamma}{g} [L_{AB} + Z \cot \beta] d_z, & 0 < z < h \\ \frac{\gamma}{g} [(H-z)(\cot \theta_2 - \cot \beta)] d_z, & h < z < H - H_u \\ \frac{\gamma}{g} (H-z) \cot \theta_2 d_z, & H_u - H < z < H \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为岩石天然重度, 且结合图 1 和解析几何得出:  $\theta_2 = \arctan\left[\frac{H-z}{(H-z)\cot\theta_1 - \Delta x}\right]$ ,  $L_{AB} = [(H-h)\cot\theta_1 - H\cot\beta]$ ,  $H_a = \Delta x \tan\beta$ 。

根据不同深度岩石微分单元的表达式, 得出水平地震力  $Q_h(t)$  和竖向地震力  $Q_v(t)$  分别为:

$$Q_h(t) = \int_0^h a_h(z, t) m(z) + \int_h^{H-H_a} a_h(z, t) m(z) + \int_{H-H_a}^H a_h(z, t) m(z) \quad (4)$$

$$Q_h(t) = Q_{h1}(t) + Q_{h2}(t) + Q_{h3}(t) \quad (5)$$

$$Q_{h1}(t) = K_h \gamma \left[ \frac{L_{AB}(f_s - 1)}{H} - f_s \cot\beta \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2}{4\pi^2} a_1 + \frac{h\lambda}{2\pi} \cos\omega\xi_1 \right] + \frac{(f_s - 1) K_h \gamma \cot\beta}{H} \left[ \frac{\lambda^3}{8\pi^3} a_2 + \frac{h^2\lambda}{2\pi} \cos\omega\xi_2 - \frac{h\lambda^2}{2\pi^2} \sin\omega\xi_2 \right] + \frac{L_{AB} K_h \gamma f_s \lambda}{2\pi} a_2 \quad (6)$$

式中:  $\lambda = TV_s$ ,  $\xi_1 = t - \frac{H}{V_s}$ ,  $\xi_2 = t - \frac{H-h}{V_s}$ ,

$$a_1 = \sin\left(\omega\left(t - \frac{H}{V_s}\right)\right) - \sin\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_s}\right)\right),$$

$$a_2 = \cos\left(\omega\left(t - \frac{H}{V_s}\right)\right) - \cos\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_s}\right)\right)。$$

$$Q_{h2}(t) = \gamma K_h (\cot\theta_2 - \cot\beta) \left\{ \frac{f_s - 1}{H} \left[ \frac{\lambda^3}{4\pi^3} a_3 - \frac{\lambda^2 H_a}{2\pi^2} \sin\xi_3 + \frac{\lambda(H-h)^2}{2\pi} \cos\xi_2 + \frac{\lambda^2(H-h)}{2\pi^2} \sin\xi_2 - \frac{\lambda H_a^2}{\pi} \cos\xi_3 \right] + \left[ \frac{\lambda^2}{4\pi^2} a_4 - \frac{\lambda}{2\pi} (H_a \cos\xi_3 + (H-h) \cos\xi_2) \right] \right\} \quad (7)$$

式中:  $\xi_3 = t - \frac{H_a}{V_s}$ ,

$$a_3 = \cos\left(\omega\left(t - \frac{H_a}{V_s}\right)\right) - \cos\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_s}\right)\right),$$

$$a_4 = \sin\left(\omega\left(t - \frac{H_a}{V_s}\right)\right) - \sin\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_s}\right)\right)。$$

$$Q_{h3}(t) = \frac{K_h \gamma \lambda \cot\theta_2}{8\pi^3} (H_a \cos\xi_3 - \lambda \sin\omega t + \lambda \sin\xi_3) + \frac{\lambda \cot\theta_2}{8\pi^3 H} [2\lambda^2(f_s - 1) a_5 + H_a^2(f_s - 1) \cos\xi_3 +$$

$$2\lambda H_a(f_s - 1) \sin\xi_3] \quad (8)$$

式中:  $a_5 = \cos\omega t - \cos\omega\left(t - \frac{H_a}{V_s}\right)。$

$$Q_v(t) = \int_0^h a_v(z, t) m(z) + \int_h^{H-H_a} a_v(z, t) m(z) + \int_{H-H_a}^H a_v(z, t) m(z) \quad (9)$$

$$Q_v(t) = Q_{v1}(t) + Q_{v2}(t) + Q_{v3}(t) \quad (10)$$

$$Q_{v1}(t) = K_v \gamma \left[ \frac{L_{AB}(f_s - 1)}{H} - f_s \cot\beta \right] \cdot \left[ \frac{\delta^2}{4\pi^2} b_1 + \frac{h\delta}{2\pi} \cos\omega\psi_1 \right] + \frac{(f_s - 1) K_v \gamma \cot\beta}{H} \left[ \frac{\delta^3}{8\pi^3} b_2 + \frac{h^2\delta}{2\pi} \cos\omega\psi_2 - \frac{h\delta^2}{2\pi^2} \sin\omega\psi_2 \right] + \frac{L_{AB} K_v \gamma f_s \delta}{2\pi} b_2 \quad (11)$$

式中:  $\delta = TV_p$ ,  $\psi_1 = t - \frac{H}{V_p}$ ,  $\psi_2 = t - \frac{H-h}{V_p}$ ,

$$b_1 = \sin\left(\omega\left(t - \frac{H}{V_p}\right)\right) - \sin\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_p}\right)\right),$$

$$b_2 = \cos\left(\omega\left(t - \frac{H}{V_p}\right)\right) - \cos\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_p}\right)\right)。$$

$$Q_{v2}(t) = \gamma K_v (\cot\theta_2 - \cot\beta) \left\{ \frac{f_s - 1}{H} \left[ \frac{\delta^3}{4\pi^3} b_3 - \frac{\delta^2 H_a}{2\pi^2} \sin\psi_3 + \frac{\delta(H-h)^2}{\pi} \cos\psi_2 + \frac{\delta^2(H-h)}{2\pi^2} \sin\psi_2 - \frac{\delta H_a^2}{\pi} \cos\psi_3 \right] + \left[ \frac{\delta^2}{4\pi^2} b_4 - \frac{\delta}{2\pi} (H_a \cos\psi_3 + (H-h) \cos\psi_2) \right] \right\} \quad (12)$$

式中:  $\psi_3 = t - \frac{H_a}{V_p}$ ,

$$b_3 = \cos\left(\omega\left(t - \frac{H_a}{V_p}\right)\right) - \cos\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_p}\right)\right),$$

$$b_4 = \sin\left(\omega\left(t - \frac{H_a}{V_p}\right)\right) - \sin\left(\omega\left(t - \frac{H-h}{V_p}\right)\right)。$$

$$Q_{v3}(t) = \frac{K_v \gamma \delta \cot\theta_2}{8\pi^3} (H_a \cos\psi_3 - \delta \sin\omega t + \delta \sin\psi_3) + \frac{\delta \cot\theta_2}{8\pi^3 H} [2\delta^2(f_s - 1) b_5 + H_a^2(f_s - 1) \cos\psi_3 + 2\delta H_a(f_s - 1) \sin\psi_3] \quad (13)$$

式中:  $b_5 = \cos\omega t - \cos\omega\left(t - \frac{H_a}{V_p}\right)。$

## 2 岩质边坡受力分析及安全系数求解

### 2.1 边坡受力分析

根据师华鹏等<sup>[9]</sup>的研究,在考虑地震荷载、坡顶超载、锚固效应、裂隙水冻胀效应、静水压力、动水压力下,不同工况下临河岩质边坡受力状态如图 2、图 3 所示。

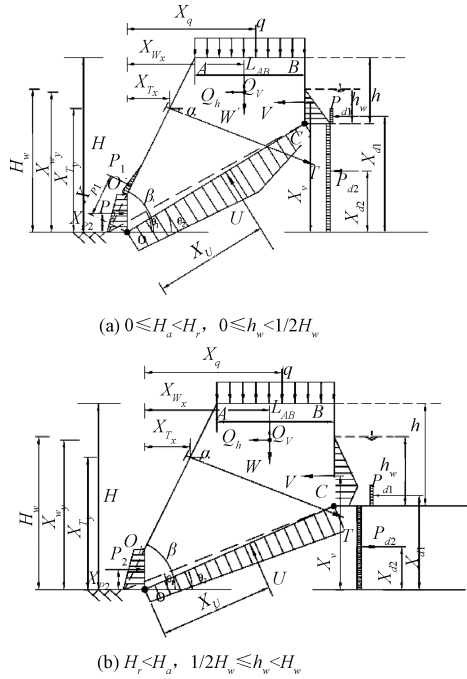


图 2 滑面出流缝未堵塞时临河岩石边坡受力状态<sup>[9]</sup>  
Fig. 2 Forced state of rock slope along river when the outflow joint of the slip surface is not blocked

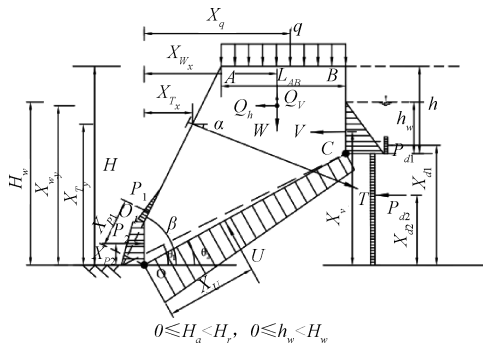


图 3 滑面出流缝堵塞时临河岩石边坡受力状态<sup>[9]</sup>  
Fig. 3 Forced state of rock slope along river when the outflow joint of the slip surface is blocked

图中,  $OC$  为滑裂面,  $q$  为坡顶均布超载,  $T$  为锚索拉力,  $\alpha$  为锚索倾角。  $Q_h$ ,  $Q_v$  分别为水平和竖向地震力。

#### 2.1.1 临河岩质边坡滑体重力及坡顶超载

滑体重力  $W$  及滑裂体质心至坡趾  $O$  的水平距离  $X_{w_x}$  和竖直距离  $X_{w_y}$  分别为:

$$W = \frac{\gamma}{2} [(H^2 - z^2) \cot\theta_2 - (H - H_a)^2 \cot\beta] \quad (14)$$

$$X_{w_x} = \frac{(H - h)^2 (H + 2h) \cot^2\theta_2 - (H - H_a)^3 \cot^2\beta}{3(H^2 - h^2) \cot\theta_2 - 3(H - H_a)^2 \cot\beta} \quad (15)$$

$$X_{w_y} = [(H - z) \cdot (2H^2 + 2Hh - h^2) \cot\theta_2 - (H - H_a)^2 \cdot (2H + H_a) \cot\beta] / [3(H^2 - h^2) \cot\theta_2 - 3(H - H_a)^2 \cot\beta] \quad (16)$$

坡顶超载  $Q$  及其绕坡趾  $O$  倾覆的力矩  $X_q$  为:

$$Q = q \cdot L_{AB} = q [(H - h) \cot\theta_1 - H \cot\beta] \quad (17)$$

$$X_q = \frac{H}{\tan\beta} - \Delta x + L_{AB}/2 \quad (18)$$

#### 2.1.2 坡顶张裂缝和滑裂面静水压力

本文关于静水的压力计算,根据李伟<sup>[14]</sup>提出的静水压力分布形式,具体可分为滑面出流缝未堵塞和堵塞两种工况。

(1) 当滑面出流缝未堵塞时

若  $h_w = 0$ , 则:

$$V = 0, U = \frac{1}{4} H_w \gamma_w (H_w + H_r) / \sin\theta_2 \quad (19)$$

式中:  $h_w = H_w + h - H$ ,  $V$  为张裂缝的静水压力,  $U$  为滑裂面静水压力。

若  $0 < h_w < H_w/2$ , 则:

$$V = \frac{1}{2} h_w^2 \gamma_w, U = \frac{1}{4} \gamma_w (H_w^2 + H_w H_r - 2h_w^2) / \sin\theta_2 \quad (20)$$

$$X_V = H_w - \frac{2}{3} h_w, X_U = \frac{3H_w^2 + 8h_w^3 + H_w^2 H_r - 2H_w h_w^2}{6(H_w^2 + H_w H_r - 2h_w^2) \sin\theta_2} \quad (21)$$

式中:  $X_V$  为张裂缝静水压力绕  $O$  点的倾覆力矩,  $X_U$  为滑裂面静水压力绕  $O$  点的倾覆力矩。

若  $H_w/2 < h_w < H_w$ , 则:

$$V = \frac{1}{4} \gamma_w (4H_w h_w - H_w^2 - 2h_w^2),$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w (H_w + H_r - h_w) \cdot (H_w - h_w) \quad (22)$$

$$X_V = \frac{24H_w h_w (H_w - h_w) + 8h_w^3 - 5H_w^3}{6(4H_w h_w - H_w^2 - 2h_w^2)},$$

$$X_U = \frac{(2H_w + H_r - 2h_w) \cdot (H_w - h_w)}{3(H_w + H_r - h_w) \sin\theta_2} \quad (23)$$

(2) 当滑面出流缝被堵塞时

若  $h_w = 0$ , 则:

$$V = 0, U = \frac{1}{2} H_w^2 \gamma_w / \sin\theta_2 \quad (24)$$

若  $0 < h_w < H_w$ , 则:

$$V = \frac{1}{2} h_w^2 \gamma_w, U = \frac{1}{2} \gamma_w (H_w^2 - h_w^2) / \sin \theta_2 \quad (25)$$

$$X_V = H_w - \frac{2}{3} h_w, X_U = \frac{(H_w + 2h_w) \cdot (H_w - h_w)}{3(H_w + h_w) \sin \theta_2} \quad (26)$$

### 2.1.3 临河静水压力

当  $0 \leq H_a \leq H_r$  时:

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma_w (2H_r - H_a) H_a, \quad P_2 = \frac{1}{2} \gamma_w (H_r - H_a)^2 / \sin \beta \quad (27)$$

$$X_{P1} = H_a \sin \beta + \frac{H_r - H_a}{3 \sin \beta}, X_{P2} = \frac{(3H_r - 2H_a) H_a}{3(H_r - H_a)} \quad (28)$$

$P_1, P_2$  分别为 0 至  $H_a$  段、 $H_a$  至  $H_r - H_a$  段临河静水压力,  $X_{P1}, X_{P2}$  分别为  $P_1, P_2$  绕  $O$  点的倾覆力矩。

当  $H_r \leq H_a \leq H$  时:

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma_w H_r^2, P_2 = 0 \quad (29)$$

$$X_{P1} = \frac{H_r}{3} \quad (30)$$

### 2.1.4 地震作用引起的动水压力

$$P_{d1} = \frac{7K_h \gamma_w h_w^2}{12}, P_{d2} = \frac{7K_h \gamma_w h_w (H - h)^2}{12} \quad (31)$$

式中:  $P_{d1}$  为张裂缝  $BC$  内动水压力,  $P_{d2}$  为滑裂面  $OC$  内动水压力。<sup>[15]</sup>

$P_{d1}, P_{d2}$  绕坡趾  $O$  倾覆的力矩为:

$$X_{P_{d1}} = H - h + 0.4h_w, X_{P_{d2}} = 0.4(H - h) \quad (32)$$

### 2.1.5 锚固应力

锚固应力  $T$  绕坡趾  $O$  倾覆的力矩为

$$X_{T_x} = H_r, X_{T_y} = H_r \cot \beta - \Delta x \quad (33)$$

式中:  $T_x, T_y$  分别为锚固应力  $T$  在水平方向和竖直方向上的分量。

## 2.2 安全系数求解

当  $Q_h(t) \geq 0$  时, 防止岩质边坡倾覆破坏的总力可表示为:

$$M_{\text{reist}} = (W + Q_v(t)) X_{W_x} + Q X_{q_y} + T [H_r \cos \alpha + (H_r \cot \beta - \Delta x) \sin \alpha] + P_1 X_{P1} + P_2 X_{P2} \quad (34)$$

引起岩质边坡倾覆破坏的总力可表示为

$$M_{\text{induce}} = Q_h X_{W_y} + V X_V + U X_U \quad (35)$$

当  $Q_h(t) \leq 0$  时, 防止岩质边坡倾覆破坏的总力可表示为:

$$M_{\text{reist}} = (W + Q_v(t)) X_{W_x} + Q_h(t) X_{W_y} + Q X_{q_y} + T [H_r \cos \alpha + (H_r \cot \beta - \Delta x) \sin \alpha] + P_1 X_{P1} + P_2 X_{P2} \quad (36)$$

引起岩质边坡倾覆破坏的总力可表示为:

$$M_{\text{induce}} = V X_V + U X_U \quad (37)$$

岩质边坡抗倾覆安全系数可以定义为:

$$FS_{\text{overturn}} = M_{\text{reist}} / M_{\text{induce}} \quad (38)$$

## 3 岩质边坡抗倾覆稳定性参数分析

由于本文主要研究的是临河岩质边坡在地震背景下的稳定性, 故基于 Ruan 等<sup>[16]</sup> 类似背景下的研究成果, 选取典型临河岩质边坡基本参数, 分别为:  $H=20$  m,  $h=4$  m,  $H_r=8$  m,  $H_a=4$  m,  $H_w=18$  m,  $H_r=10$  m,  $\beta=50^\circ$ ,  $\theta_1=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma_w=10$  kN/m<sup>3</sup>,  $\gamma=25$  kN/m<sup>3</sup>,  $T=200$  kN,  $q=100$  kN/m,  $K_h=0.2$ ,  $K_v=0.5 K_h$ ,  $t=0.15$  s,  $V_s=2055$  m/s,  $V_p=3695$  m/s。研究的参数变化范围如下:  $K_h$  为 0~0.3;  $K_v$  为 -0.2~0.2;  $h_w$  为 0~4 m;  $q$  为 0~300 kN/m;  $\alpha$  为 0~90°;  $H_r$  为 6~16 m;  $T$  为 0~400 kN;  $H_a$  为 0~10 m,  $H_r$  为 0~20 m;  $f_s$  为 1.0~1.6。

### 3.1 拟动力法与拟静力法

如图 4 所示, 采用拟动力法和拟静力法下安全系数随着时间变化的区别显而易见, 而实际中地震力会随着时间的变化而逐渐变化, 因此本论文采用改进的拟动力法分析临河岩质边坡地震抗倾覆稳定性, 更加符合实际情况, 参考价值也更大。

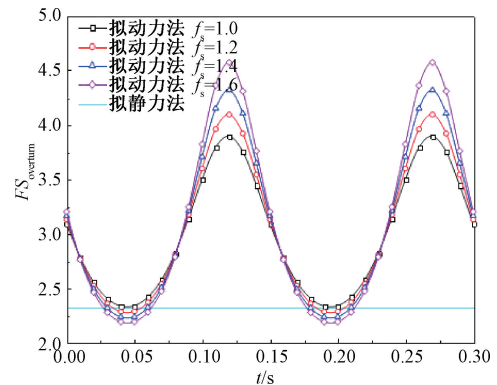


图 4 拟动力法与拟静力法对比

Fig. 4 Comparison of pseudo-dynamic method and pseudo-static method

### 3.2 地震荷载对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响

为了研究不同岩体放大系数下水平地震力对边坡抗倾覆稳定性的影响,取  $K_v = K_h/2$ ,  $K_h$  从 0 增加到 0.3,图 5 显示了出流缝堵塞和未堵塞时,不同  $f_s$  下  $K_h$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系,无论出流缝堵塞或未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $K_h$ 、 $f_s$  的增大而逐渐减小,当  $f_s = 1.0$  时,  $K_h$  从 0 增加到 0.3 时,出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  降低了 32.27%,出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  降低了 28.45%,而当  $f_s = 1.2$ 、1.4、1.6,出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别降低了 34.18%、35.95%、37.61%,出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别降低了 30.23%、31.89%、33.44%,随着  $f_s$  的增加,  $K_h$  对地震抗倾覆稳定安全系数影响增大。

为了研究不同岩体放大系数下竖向地震力对边坡抗倾覆稳定性的影响,取  $K_h = 0.2$ ,  $K_v$  从 -0.2 增加到 0.2,图 6 显示了出流缝堵塞和未堵塞时,不同  $f_s$  下  $K_v$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $K_v$  的增大而逐渐增大,随  $f_s$  的增大而逐渐减小,当  $f_s = 1.0$ 、1.2、1.4、1.6,  $K_v$  从 -0.2 增加到 0.2,出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$

分别增加了 24.75%、28.39%、32.15%、36.03%,出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加了 24.76%、28.39%、32.15%、36.03%,随着  $f_s$  的增加,  $K_v$  对地震抗倾覆稳定安全系数影响增大。

$K_h$  越大,  $K_v$  越小,  $FS_{\text{overturn}}$  就越小,当  $f_s = 1.0$ ,  $K_h = 0.2$ ,  $K_v = -0.2$ ,出流缝未堵塞和堵塞时,  $FS_{\text{overturn}}$  分别为 1.964 2、1.755 9,而当  $K_h = 0.2$ ,  $K_v = 0.2$ ,出流缝未堵塞和堵塞时,  $FS_{\text{overturn}}$  分别为 2.450 4、2.190 6,因此在地震高发地区对岩质边坡进行灾害防治时,应重点关注最不利的地震效应。

### 3.3 张裂缝积水深度对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响

为了研究不同岩体放大系数下张裂缝积水深度对边坡抗倾覆稳定性的影响,令  $h_w$  从 0 m 增加到 4 m,图 7 显示了出流缝堵塞和未堵塞时,不同  $f_s$  下  $h_w$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系,无论出流缝堵塞或未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $h_w$ 、 $f_s$  的增大而逐渐减小,当  $f_s = 1.0$ 、1.2、1.4、1.6,  $h_w$  从 0 m 增加到 4 m,出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别减少了 32.81%、32.01%、31.26%、31.18%,出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别减少

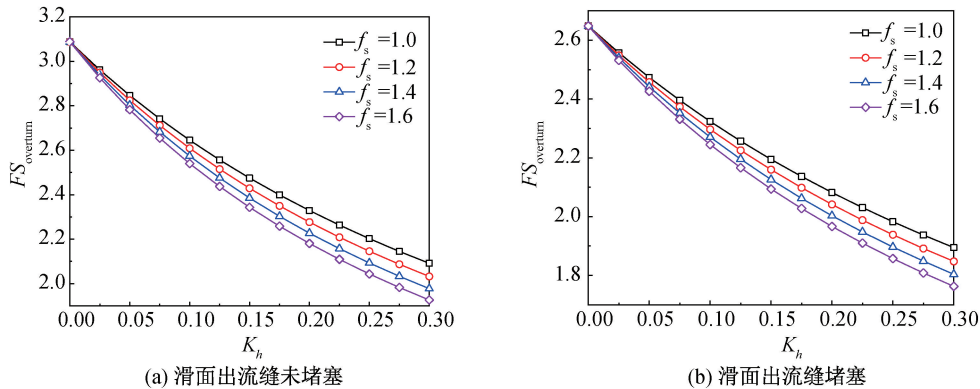


图 5 水平地震力对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 5 Influence of horizontal seismic force on anti-overturning stability of slope

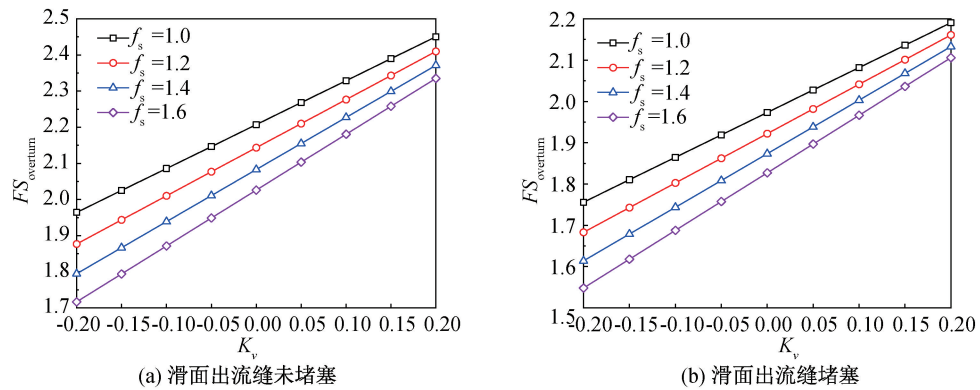


图 6 竖向地震力对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 6 Influence of vertical seismic force on anti-overturning stability of slope

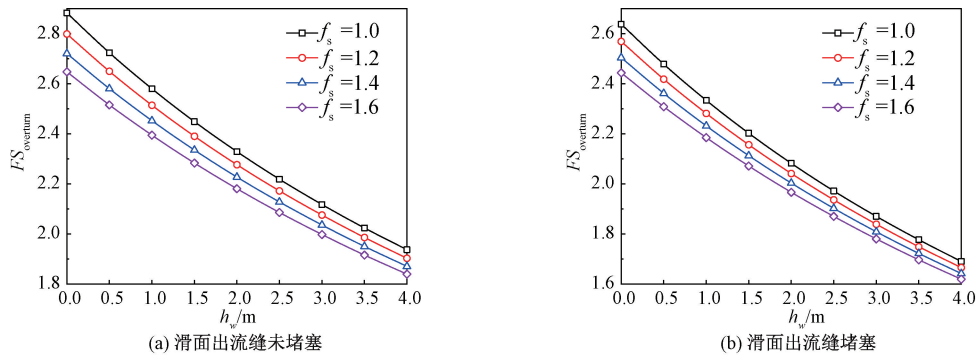


图7 张裂缝积水深度对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 7 The influence of the depth of water accumulation in the cracks on the slope stability against overturning

了 35.94%、35.17%、34.47%、33.74%，随着  $f_s$  的增加， $h_w$  对地震抗倾覆稳定性的影响减小。

### 3.4 坡顶超载对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响

为了研究不同岩体放大系数下坡顶超载对边坡抗倾覆稳定性的影响，令  $q$  从 0 kN/m 增加到 300 kN/m，图 8 显示了出流缝堵塞和未堵塞时，不同  $f_s$  下  $q$  与  $FS_{overturn}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或未堵塞， $FS_{overturn}$  均随  $q$  的增大而逐渐增大，随  $f_s$  的增大而逐渐减小，当  $f_s = 1.0、1.2、1.4、1.6$ ， $q$  从 0 kN/m 增加到 300 kN/m，出流缝未堵塞时

$FS_{overturn}$  分别增加了 92.06%、91.26%、90.47%、89.69%，出流缝堵塞时  $FS_{overturn}$  分别增加了 92.06%、91.26%、90.47%、89.70%，随着  $f_s$  的增加， $q$  对地震抗倾覆稳定性的影响减小。

### 3.5 锚固作用对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响

(1)为了研究不同岩体放大系数下锚固应力对边坡抗倾覆稳定性的影响，令  $T$  从 0 kN 增加到 400 kN，图 9 显示了出流缝堵塞和未堵塞时，不同  $f_s$  下  $T$  与  $FS_{overturn}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或未堵塞， $FS_{overturn}$  均随  $T$  的增大而逐渐增大，随  $f_s$  的

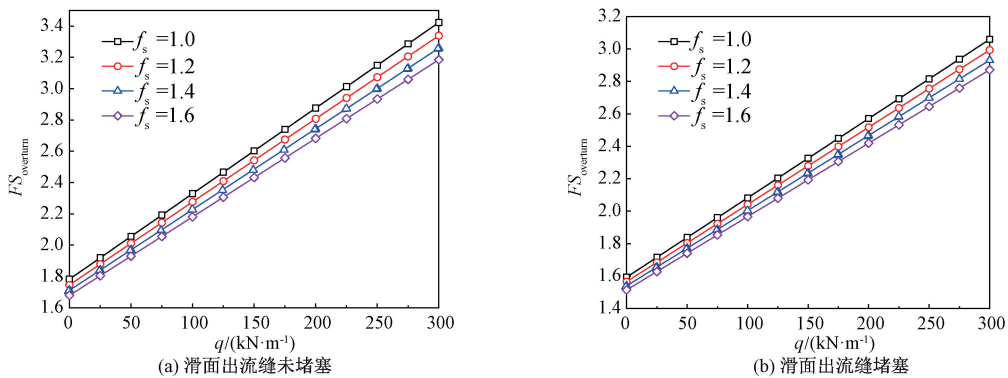


图8 坡顶超载对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 8 The influence of slope top overload on slope stability against overturning

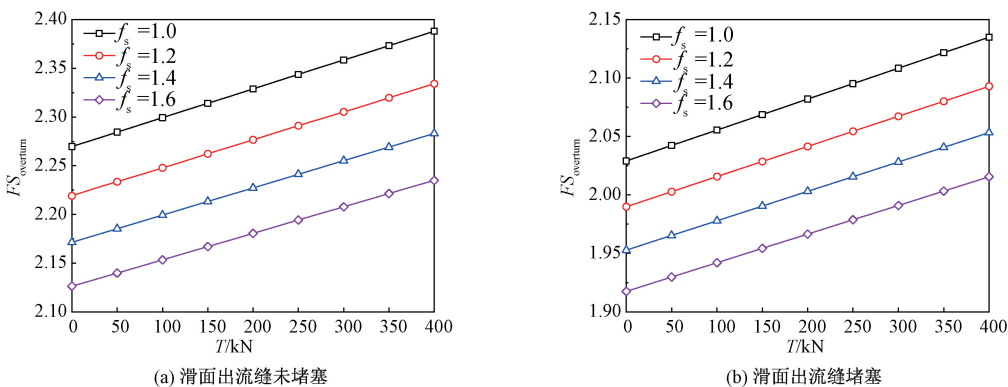


图9 锚固应力对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 9 The influence of anchoring stress on the slope stability against overturning

增大而逐渐减小,当  $f_s = 1.0、1.2、1.4、1.6$ ,  $T$  从 0 kN 增加到 400 kN, 出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加了 5.22%、5.18%、5.14%、5.11%, 出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加了 5.22%、5.18%、5.15%、5.11%, 随着  $f_s$  的增加,  $T$  对地震抗倾覆稳定性的影响减小。

(2) 为了研究不同岩体放大系数下锚固倾角对边坡抗倾覆稳定性的影响, 令  $\alpha$  从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$ , 图 10 显示了出流缝堵塞和未堵塞时, 不同  $f_s$  下  $\alpha$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $f_s$  的增大而逐渐减小, 随  $\alpha$  的增大先增大后减小, 当  $\alpha = 30^\circ$  时  $FS_{\text{overturn}}$  取极大值;  $f_s = 1.0、1.2、1.4、1.6$ , 出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  取得极大值分别为 2.328 9、2.270 5、2.221 4、2.174 9, 出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  取得极大值分别为 2.076 4、2.036 1、1.997 8、1.961 4, 随着  $f_s$  的增大, 地震抗倾覆稳定安全系数影响呈线性变化。

(3) 为了研究不同岩体放大系数下锚固高度对边坡抗倾覆稳定性的影响, 令  $H_T$  从 6 m 增加到 16 m, 图 11 显示了出流缝堵塞和未堵塞时, 不同  $f_s$  下  $H_T$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或

未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $H_T$  的增大而逐渐增大, 随  $f_s$  的增大而逐渐减小, 当  $f_s = 1.0、1.2、1.4、1.6$ ,  $H_T$  从 6 m 增加到 16 m, 出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加了 2.96%、2.94%、2.92%、2.90%, 出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加了 2.96%、2.94%、2.92%、2.90%, 随着  $f_s$  的增加,  $H_T$  对地震抗倾覆稳定性的影响减小。

综上可得, 锚固应力、锚固位置对于岩质边坡抗倾覆稳定性的影响较大, 锚固倾角则影响较小, 因此实际工程中对于稳定性较差的岩质边坡, 可适当设置锚杆, 调整锚固倾角跟位置, 使锚固效应达到最优。

### 3.6 临河水位升降和淘蚀作用对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响

为了研究不同岩体放大系数下坡脚淘蚀高度对边坡抗倾覆稳定性的影响, 令  $H_a$  从 0 m 增加到 10 m, 图 12 显示了出流缝堵塞和未堵塞时, 不同  $f_s$  下  $H_a$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系。无论出流缝堵塞或未堵塞,  $FS_{\text{overturn}}$  均随  $f_s$  的增大而逐渐减小, 随  $H_a$

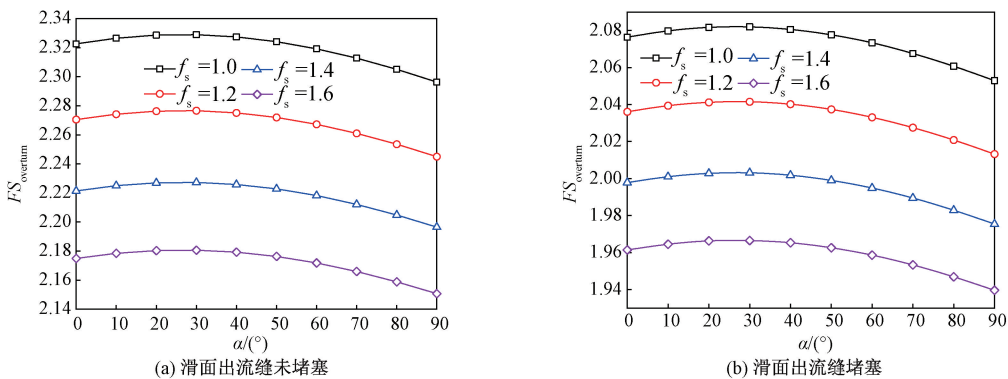


图 10 锚固倾角对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 10 The influence of anchoring inclination angle on slope stability against overturning

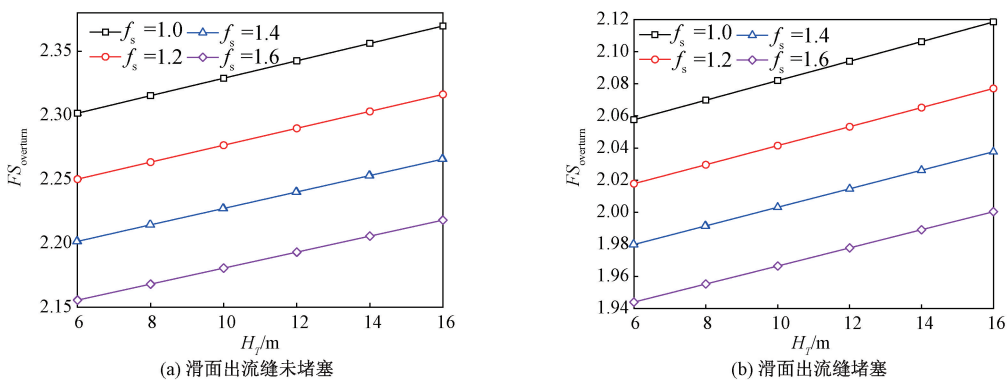


图 11 锚固高度对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 11 The influence of anchorage position on slope stability against overturning

的增大先增大后减小,当  $H_a = 3\text{ m}$  时  $FS_{\text{overturn}}$  取极大值;  $f_s = 1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ , 出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  取得极大值分别为 2.337 1、2.284 9、2.237、2.191 1, 出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  取得极大值分别为 2.087 9、2.048 2、2.010 5、1.966 5, 随着  $f_s$  的增大, 地震抗倾覆稳定安全系数影响呈线性变化, 且当  $H_a$  较大即坡趾侵蚀严重时, 抗倾覆稳定性急剧下降, 因此, 应对边坡做好防冲刷准备, 减少河岸侵蚀对边坡抗倾覆稳定性的影响。

为了研究不同岩体放大系数下临河水位对边坡抗倾覆稳定性的影响, 令  $H_r$  从 0 m 增加到 20 m, 图 13 显示了出流缝堵塞和未堵塞时, 不同  $f_s$  下  $H_r$  与  $FS_{\text{overturn}}$  之间的关系。当出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  随  $H_r, f_s$  的增大而逐渐减小, 当出流缝堵塞时,  $FS_{\text{overturn}}$  随  $H_r$  的增大而逐渐增大, 随  $f_s$  的增大而逐渐减小, 当  $f_s = 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, H_r$  从 0 m 增加到 20 m, 出流缝堵塞时,  $FS_{\text{overturn}}$  随  $H_r$  的增大而逐渐增大, 随  $f_s$  的增大而逐渐减小, 当  $f_s = 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, H_r$  从 0 m 增加到 20 m, 出流缝未堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别减少了 11.22%、10.69%、10.19%、9.72%, 出流缝堵塞时  $FS_{\text{overturn}}$  分别增加

了 12.05%、11.97%、11.89%、11.81%, 随着  $f_s$  的增加,  $H_r$  对地震抗倾覆稳定性的影响减小。

### 4 结论

- 1) 相比较于出流缝未堵塞, 出流缝堵塞更不利于边坡地震抗倾覆稳定。
- 2) 无论出流缝堵塞与否, 水平地震力、张裂缝积水深度均不利于岩质边坡抗倾覆稳定性, 而竖直向下的地震力、坡顶超载、锚固应力、锚固高度均有利于其稳定性。当出流缝未堵塞时, 临河水位不利于岩质边坡抗倾覆稳定性, 相反, 则有利于其稳定性。
- 3) 无论出流缝堵塞与否, 锚固倾角、坡脚淘蚀高度对岩质边坡抗倾覆稳定的影响均为先有利后不利。但锚固倾角的影响较小, 坡脚淘蚀高度的影响较大, 且坡趾侵蚀严重时, 抗倾覆稳定性会出现急剧下降, 因此, 实际工程中应对较大的坡脚淘蚀高度给予足够重视。
- 4) 无论出流缝堵塞与否, 随岩体放大系数的增大, 水平地震力、竖向地震力对岩质边坡抗倾覆稳定性的影响增大, 坡顶超载、张裂缝积水深度、

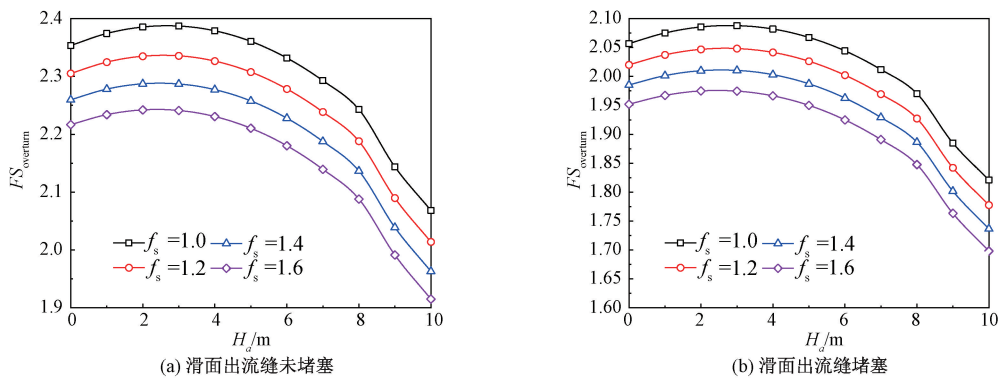


图 12 坡脚淘蚀高度对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 12 The influence of the scouring height of the slope foot on the slope stability against overturning

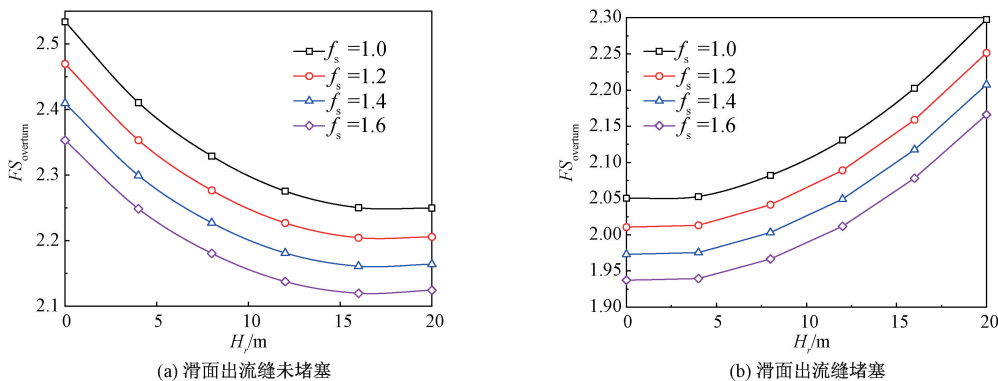


图 13 临河水位对边坡抗倾覆稳定性的影响

Fig. 13 Influence of along river water Level on slope anti-overturning stability

锚固应力、锚固高度、临河水位对其稳定性的影响减小,而锚固倾角、坡脚淘蚀高度对其稳定性的影响基本不变。

5)无论出流缝堵塞与否,岩质边坡抗倾覆稳定安全系数均随岩体放大系数的增大而减小。因此,实际工程中合理考虑岩体放大系数的大小有利于岩质边坡的抗震设计。

#### 参考文献:

- [1] BASAHEL H, MITRI H. Probabilistic Assessment of Rock Slopes Stability Using the Response Surface Approach Case Study[J]. International Journal of Mining and Technology, 2019, 29(3): 357-370.
- [2] MEDEIROS S A E, SABINO L M, EYER C I, et al. Evaluation of Rock Slope Stability Conditions Through Discriminant Analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37: 775-802.
- [3] 胡正, 刘馨, 薛凯, 等. 水位升降对库岸边坡稳定性的流固耦合数值分析[J]. 中国水能及电气化, 2021(7), 57-62+37.
- [4] 孙吉书, 邱博超, 肖田. 降雨作用下路堤边坡水毁机理及影响因素分析[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(4): 415-423.
- [5] HOEK E, BRAY J W. Rock Slope Engineering[M]. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [6] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 水位升降和流水淘蚀对临河路基边坡稳定性的影响[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 1-8.
- [7] 罗伟, 李亮, 赵炼恒, 等. 临河岩石边坡抗滑稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 23-42.
- [8] 罗伟, 李亮, 赵炼恒, 等. 基于改进水压分布的岩石边坡倾覆稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(9): 30-36.
- [9] 师华鹏, 余宏明, 陈鹏宇. 极端灾害天气下临河岩质边坡的倾覆稳定性分析[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 176-181.
- [10] 刘富有, 师华鹏, 余宏明, 等. 基于改进水压分布下临河岩质边坡倾覆稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 141-146+161.
- [11] STEEDMAN R S, ZENG X. The Influence of Phase on the Calculated of Pseudo-static Earth Pressure on a Retaining Wall[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 103-112.
- [12] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic Passive Resistance by Pseudo-dynamic Method[J]. Géotechnique, 2005, 55(9): 699-702.
- [13] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic Rotational Displacement of Gravity Walls by Pseudo-dynamic Method: Passive Case[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 242-249.
- [14] 李伟, 肖蓉, 吴礼舟. 岩质边坡中结构面上水压分布假设的改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 599-608.
- [15] WESTERGAARD H M. Water Pressures on Dams During Earthquakes[J]. Trans Asce, 1933, 98(2): 418-432.
- [16] RUAN Xiaobo, SUN Shulin, LIU Wenliang. Effect of the Amplification Factor on Seismic Stability of Expanded Municipal Solid Waste Landfills Using the Pseudo-dynamic Method[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2013, 14(10).

(责任编辑 周雪梅)