

强地震荷载作用下临水挡土墙的 拟动力法稳定性分析

周小平¹, 季璇¹, 钱七虎²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 假设墙后填土破坏面为曲面, 用正弦波模拟地震加速度时程曲线, 采用拟动力法对临水挡土墙进行稳定性分析, 确定了挡土墙和墙后填土所受的阻尼力和惯性力, 获得地震荷载作用下挡土墙的被动土压力、抗滑和抗倾覆稳定性系数的封闭形式解析解。定量分析地震加速度、放大系数、墙后填土的物理力学参数和动水压力对挡土墙的滑动位移、挡土墙的抗滑和抗倾覆稳定性系数的影响, 得出当地震加速度、放大系数越大, 水位越高, 内摩擦角越小, 临水挡土墙的稳定性越差。

关键词: 土力学; 拟动力法; 被动土压力; 地震加速度; 动水压力; 放大系数; 动力稳定性系数

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)10 - 2071 - 11

STABILITY ANALYSIS OF WATER FRONT RETAINING WALL SUBJECTED TO SEISMIC LOADS USING PSEUDO-DYNAMIC METHOD

ZHOU Xiaoping¹, JI Xuan¹, QIAN Qihu²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Engineering Institute of Engineers Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: It is assumed that failure surface of backfill soil is composite curved one. Pseudo-dynamic method, in which time-history curves of acceleration was simulated by sinusoidal motions, was adopted to research the stability of the water front retaining wall subjected to seismic loads. The damping force and the inertial force acting on retaining wall and backfill soil were investigated. The closed-form solutions of passive earth pressure and dynamic factor of safety against sliding and rotation of the retaining wall during earthquake were obtained. Finally, effects of seismic acceleration, amplification factor, wall height, physico-mechanical parameters of backfill soil and hydrodynamic pressure acting on water front retaining wall on sliding displacement, dynamic factor of safety against sliding and rotation of the retaining wall were quantitatively analyzed. It is concluded that the stability of the water front retaining wall is getting worse when the earthquake speeds up, the water level gets higher and the internal friction angle gets smaller.

Key words: soil mechanics; pseudo-dynamic method; passive earth pressure; seismic acceleration; hydrodynamic pressure; amplification factor; dynamic factor of safety

1 引言

地震荷载作用下临水挡土墙的破坏威胁到人们生命、财产以及基础设施的安全。近年来, 随着地震的频繁发生, 这一岩土工程灾害问题备受关注。传统的临水挡土墙稳定性分析多采用拟静力法, 拟

静力法假设墙后填土的破坏面为平面, 将挡土墙和墙后填土中的地震加速度等效为水平和竖直方向的单向加速度, 施加在潜在不稳定的挡土墙以及土楔体的重心上, 进而确定挡土的拟静力稳定性系数^[1]。然而地震力是随时间和空间变化的, 地震加速度不仅随着时间 t 和竖直高度 z 变化, 也和地震放大系数 f 有关^[2]。拟静力法忽略了以上问题, 不能反映

收稿日期: 2012-04-10; **修回日期:** 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078371); 重庆市杰出青年基金资助项目(CSTC, 2009BA4046)

作者简介: 周小平(1970-), 男, 博士, 1992年毕业于南方冶金学院采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: zhouxiaoping@sina.com

挡墙与填土之间的动力响应和动力耦合关系，因此局限性很大，不能满足工程要求。近年来，国内外许多学者做了大量的理论和实验研究，提出了许多地震荷载作用下临水挡土墙稳定性分析的理论和方法。R. S. Steedman 和 X. Zeng^[3]于 1990 年对地震荷载作用下临水挡土墙的性质做了相关实验。R. M. Ebeling 和 E. E. J. Morrison^[4]在 1992 年提出了临水挡土墙在地震荷载作用下主动土压力以及动水压力的计算方法。D. Choudhury 和 S. M. Ahmad^[5-6]于 2007 年研究了临水挡土墙在地震荷载作用下被动土压力的计算方法。上述方法是在假设墙后填土的破坏面为平面的基础上进行的稳定性分析。K. Terzaghi 等^[7-8]研究表明，采用平面滑动面假设得到的被动土压力系数往往会偏大，计算误差有时可达 2~3 倍，甚至更大，因此采用曲面滑动面或者组合滑动面更为合理。B. M. Basha 和 G. L. S. Babu^[9]假设墙后填土的破坏面为组合曲面，运用拟动力法对地震荷载作用下重力式挡土墙的旋转位移进行了计算，该方法以组合曲面为破坏面的假设更符合实际工程中地震荷载作用下墙后填土的破坏模式。由于阻尼系数的确定比较困难以及阻尼力的计算较复杂，为了简化计算，上述方法往往假设地震波在挡墙和填土中发生振幅永不衰减的无阻尼自由振动。但在实际情况中，空气、水、挡墙和填土均会引起振幅逐渐减小，这些都说明应该通过阻尼力来考虑地震过程中能量衰减问题。当临水挡土墙所在地区遭受罕遇地震时，如果从地震发生那一时刻起的半个周期内，地震波产生的地震力方向是从临水一侧传向填土一侧时，在强地震荷载作用下水会产生较大的动水压力，挡墙自身也会产生较大的水平方向惯性力，并且动水压力和水平方向惯性力均指向填土一侧，此时挡土墙将产生向填土方向的位移或变形，使填土逐渐压密而失去原来的弹性平衡状态；当混凝土挡土墙产生的位移量使填土压密到一定程度，且发生明显隆起或发生超强度破坏时，挡土墙将发生被动土压力破坏。因此，需要研究强地震荷载作用下临水挡土墙的被动土压力破坏问题。采用拟动力法分析临水挡土墙稳定性时，考虑地震的幅值、周期和放大系数、动水压力等动力特性，用正弦波来模拟地震波，在挡土墙和滑动土楔体的重心处施加水平和垂直方向的惯性力，并在水位高度的 1/3 处施加动水压力，通过该方法来考虑拟动力法的动荷载输入，这样能更真实地反映地震荷载作用下挡墙的性质。本文在前人研究的基础上，通过考虑阻尼力的影响来表征地震过程中能量耗散问题，假设墙

后填土的破坏面为组合曲面，对地震荷载作用下临水挡土墙的被动土压力、滑移位移、抗滑和抗倾覆稳定性系数进行拟动力法分析。

2 拟动力计算方法

目前拟动力法多采用正弦波来模拟地震加速度的输入，原因是正弦波具有地震波所具有的大多数特性，同时还具备了简化计算的优点^[9]。B. M. Basha 和 G. L. S. Babu^[10-11]验证了选用正弦波的合理性。水平和垂直方向的正弦加速度随着高度 z 、时间 t 和放大系数 f 变化的表达式^[10-11]分别为

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

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

式中： $a_h(z, t)$ 和 $a_v(z, t)$ 分别为水平和垂直方向地震加速度； k_h 和 k_v 分别为水平和垂直方向的地震加速度系数； g 为重力加速度； ω 为角速度， $\omega = 2\pi/T$ ； v_s 和 v_p 分别为横向和纵向地震波在填土中的传播速度。

2.1 受力分析

如图 1 所示，挡墙高为 H ，墙面 H_1G 是垂直的，挡墙左侧临水的一面 OL 与竖直面之间的夹角为 α 。挡墙右侧填土高度与挡墙上部表面 OH_1 齐平，墙后填土为无黏性土，其自然重度为 γ ，饱和重度为 γ_{sat} ，假设墙后填土的内摩擦角、墙背与填土之间的外摩擦角分别为 φ 和 δ ，填土中有地下水，水的重度为 γ_w ，假定地下水和挡墙左侧的水处于同一水位线，其高度均为 h 。假定挡墙发生被动土压力破坏，破坏面为组合曲面，其中滑楔体 H_1GJ 中 GJ 段为对数螺旋线曲线， JN 段为直线，曲线 GJ 与直线 JN 在 J 点相切。对数螺旋曲线的位置由挡墙高度 H_1G 和对数螺旋曲线弧心 A 确定。对数螺旋曲线的初始半径 AG 和最终半径 AJ 之间的夹角为中心角 θ_1 。在被动土压力作用下挡墙的运动方向如图 1 所示。

将滑楔体 H_1GJN 分解为 H_1GJ 和 H_1JN 两部分进行受力分析。如图 2 所示，滑楔体 H_1GJ 所受的力包括：滑楔体重力 W_1 ，水平和垂直方向的惯性力 Q_{h-H_1GJ} 和 Q_{v-H_1GJ} ，左右方向的动水压力 P_{dyn} ，阻尼力 F_{H_1JN} ，被动土压力 P_{pe} ，对数螺旋曲线 GJ 下部的不动土体对滑楔体 H_1GJ 的法向力和切向力的合力 F ，滑动土楔体 H_1GJ 和 H_1JN 之间的相互作用力 N_3 。

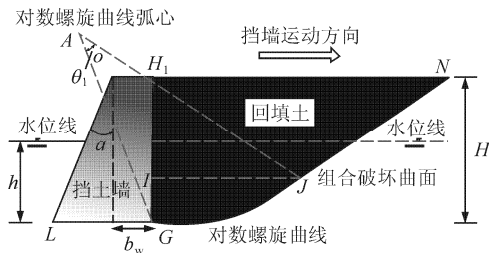


图 1 地震荷载作用下挡墙运动方向及组合破坏曲面

Fig.1 Movement of retaining wall toward the backfill and formation of a composite curved rupture surface subjected to seismic loads

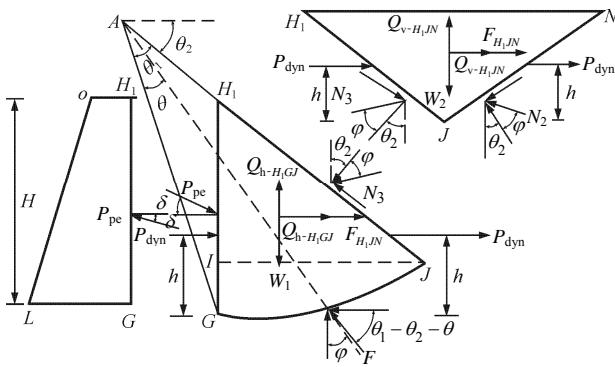


图 2 滑楔体 H₁GJ 和 H₁NJ 拟动力分析图

Fig.2 Sketch of forces acting on H₁GJ and H₁NJ

同理，滑楔体 H₁JN 所受的力包括：滑楔体重力 W₂，水平和垂直方向的惯性力 Q_{h-H₁JN} 和 Q_{v-H₁JN}，左右方向的动水压力 P_{dyn}，阻尼力 F_{H₁JN}，滑动土楔体 H₁GJ 和 H₁JN 之间的相互作用力 N₃，滑动土楔体 H₁NJ 与右侧土体之间的相互作用力 N₂。

2.2 各部分力的确定

下面分析作用于墙背上的水压力、各土楔体及挡墙所受的惯性力、重力和阻尼力等。

(1) 作用于挡土墙墙背和填土上的水压力

由于挡土墙左右两侧水位线的高度一致，墙背和填土受到的左右方向的静水压力相互抵消，故只需考虑作用于墙背和填土上的动水压力的影响。根据 Westergaard 的方法^[12]，作用于挡土墙墙背上的动水压力为

$$P_{dyn} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w h^2 \tag{3}$$

(2) 作用于滑楔体 H₁GJ 上的惯性力

由于水的存在，水平和垂直方向的惯性力都要分层计算。如图 2 所示，将土楔体 H₁GJ 分解为 H₁IJ 和 IGJ 两部分，土楔体 H₁GJ 的惯性力可表示为

$$Q_{h-H_1GJ}(t) = Q_{h-H_1IJ}(t) + Q_{h-IGJ}(t) \tag{4}$$

$$Q_{v-H_1GJ}(t) = Q_{v-H_1IJ}(t) + Q_{v-IGJ}(t) \tag{5}$$

式中：Q_{h-H₁IJ}(t)，Q_{v-H₁IJ}(t)，Q_{h-IGJ}(t) 和 Q_{v-IGJ}(t) 分别为作用于土楔体 H₁IJ 和 IGJ 上的水平和垂直方向的惯性力。

① 作用于土楔体 H₁IJ 上的水平、垂直方向惯性力

如图 3 所示，作用于土楔体 H₁IJ 上的水平方向惯性力为

$$Q_{h-H_1IJ}(t) = \int_0^{H-h} \frac{\gamma}{g} z \cot \theta_2 \left[f + \frac{z}{H} (1-f) \right] k_h g \cdot \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] dz + \int_{H-h}^G \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{g} \cot \theta_2 \cdot z \left[f + \frac{z}{H} (1-f) \right] k_h g \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] dz \tag{6}$$

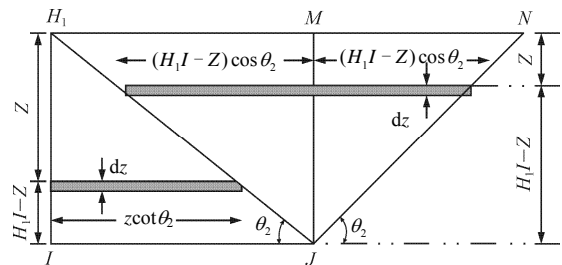


图 3 土楔体 IGJ 的惯性力计算详图

Fig.3 Sketch for inertial force acting on H₁IJ and H₁NJ wedges

化简式(6)可得

$$Q_{h-H_1IJ}(t) = \frac{\cos \theta_2 k_h v_s}{H \omega^3} (\xi_{1s} + \xi_{2s} + \xi_{3s}) \tag{7}$$

其中，

$$G = H_1I = r_0 \sin \theta_2 \left[1 - e^{-\theta_1 \tan \varphi \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_2}} \right]$$

$$\xi_{1s} = (2f - 2)v_s^2 \gamma \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] - \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) \right] \right\} + (2f - 2)v_s^2 (\gamma_{sat} - \gamma_w) \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] - \cos \frac{\omega(G - H + tv_s)}{v_s} \right\}$$

$$\xi_{2s} = [(2f - 2)h - (f - 2)H] \gamma \omega v_s \left\{ \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] - fH \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) \right] \right\} + \omega v_s (\gamma_{sat} - \gamma_w) [(2 - 2f)h + (f - 2)H] \left\{ \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] + (2G - 2fG + fH) \cdot \sin \frac{\omega(G - H + tv_s)}{v_s} \right\}$$

$$Q_{v-IGJ}(t) = \sin \left\{ \frac{1}{\theta_1 v_p} [\omega r_1 \cos \varphi \cos(\theta_2 + \varphi) - \omega r_1 \cos \varphi \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \varphi) + \omega \cos \varphi \theta_1 m_6 v_p] \right\} \cdot \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w) k_v}{2} \left\{ \theta_1 m_1 + m_2 [\cos(\theta_1 + \theta_2) - \cos \theta_2] - m_3 \csc \theta_2 \csc(\theta_1 + \theta_2) \sin \theta_1 + m_4 \lg \left(\cos \frac{\theta_2}{2} \right) - m_4 \lg \left(\cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - m_4 \lg \left(\sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right\} \quad (11)$$

其中,

$$m_6 = \omega t + \frac{G\omega - \omega H - \omega R \sin \theta_2}{v_p}$$

(3) 作用于土楔体 H_1NJ 上的惯性力

如图 3 所示, 作用于土楔体 H_1NJ 上的水平方向惯性力为

$$Q_{h-H_1NJ}(t) = 2 \int_0^{H-h} \frac{\gamma}{g} (G-z) \cot \theta_2 \left[f + \frac{z}{H} (1-f) \right] \cdot k_h g \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] dz + 2 \int_{H-h}^G \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{g} \cdot (G-z) \cot \theta_2 \left[f + \frac{z}{H} (1-f) \right] k_h g \cdot \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] dz \quad (12)$$

化简式(12)可得

$$Q_{h-H_1NJ}(t) = \frac{2 \cos \theta_2 k_h v_s}{H \omega^3} (\delta_{1s} + \delta_{2s} + \delta_{3s}) \quad (13)$$

其中,

$$\delta_{1s} = \gamma \omega v_s [(1-f)(G+2h) + fH - 2H] \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] \cdot (fG - G + fH) \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) \right] \gamma \omega v_s + \omega v_s (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot [2H - fH + (G+2h)(f-1)] \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] + \omega v_s \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) (fG - G - fH) \sin \frac{\omega G - \omega H + \omega t v_s}{v_s} \delta_{2s} = v_s^2 \gamma (2f-2) \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] - \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) \right] \right\} + (\gamma_w - \gamma_{sat}) (2f-2) v_s^2 \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right) \right] - \cos \frac{\omega G - \omega H + \omega t v_s}{v_s} \right\}$$

$$\delta_{3s} = \omega^2 fGH \gamma \cos \omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) - \omega^2 (G+h-H) \cdot (H+fh-h)(\gamma - \gamma_{sat} - \gamma_w) \cos \omega \left(t - \frac{h}{v_s} \right)$$

同理, 作用于土楔体 H_1NJ 上的竖直方向惯性力为

$$Q_{v-H_1NJ}(t) = \frac{2 \cos \theta_2 k_v v_p}{H \omega^3} (\delta_{1p} + \delta_{2p} + \delta_{3p}) \quad (14)$$

其中,

$$\delta_{1p} = \gamma \omega v_p (fG - G + fH) \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_p} \right) \right] + \gamma \omega v_p \cdot [(1-f)(G+2h) + fH - 2H] \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_p} \right) \right] + \omega v_p (\gamma_{sat} - \gamma_w) [2H - fH + (G+2h)(f-1)] \cdot \sin \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_p} \right) \right] + \omega v_p (\gamma_{sat} - \gamma_w) (fG - G - fH) \cdot \sin \frac{\omega G - \omega H + \omega t v_p}{v_p} \delta_{2p} = v_p^2 \gamma (2f-2) \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_p} \right) \right] - \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_p} \right) \right] \right\} + (\gamma_w - \gamma_{sat}) (2f-2) v_p^2 \left\{ \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_p} \right) \right] - \cos \frac{\omega G - \omega H + \omega t v_p}{v_p} \right\}$$

$$\delta_{3p} = \omega^2 fGH \gamma \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_p} \right) \right] - \omega^2 (G+h-H) \cdot (H+fh-h)(\gamma - \gamma_{sat} - \gamma_w) \cos \left[\omega \left(t - \frac{h}{v_p} \right) \right]$$

(4) 作用于土楔体 H_1GJ 和 H_1NJ 的重力 W_1 和 W_2 作用于土楔体 H_1GJ 和 H_1NJ 的重力分别为

$$W_1 = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{2} [(-1 + e^{\theta_1 \tan \varphi}) r_1^2 \cot \varphi - r_1 H \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)] + \frac{(H-h)^2 (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cot \theta_2}{2} \quad (15)$$

$$W_2 = \cot \theta_2 [(2G+h-H)(H-h)\gamma + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(G+h-H)^2] \quad (16)$$

(5) 作用于各土楔体上的阻尼力

阻尼力大小与速度大小成正比, 其方向与速度方向相反。竖直方向的地震加速度系数相对于水平方向地震加速度系数较小; 地震波在竖直方向的传播速度较水平方向传播速度大, 根据阻尼力公式可知, 竖直方向的阻尼力比水平方向阻尼力小很多,

故忽略竖直方向的阻尼力。

采用Rayleigh阻尼模型，忽略刚度*K*的影响，水平方向的阻尼力可表示为

$$F = \int \alpha m v_h(t, z) dz \quad (17)$$

式中： α 为与质量成比例的阻尼常数； $v_h(t, z)$ 为地震波在土楔体中的水平方向传播速度，且有

$$v_h(t, z) = \int_0^t \left[f + \frac{z(1-f)}{H} \right] k_h g \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] \cdot dt = \frac{(fH - fz + z)k_h g}{H\omega} \left(\cos \frac{\omega z - \omega H}{v_s} - \cos \frac{\omega z - \omega H + \omega t v_s}{v_s} \right) \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得作用在土楔体 H_1IJ 上的阻尼力为

$$F_{H_1IJ} = \int_0^{H-h} \frac{\alpha(fH - fz + z)k_h g}{H\omega} \left(\cos \frac{\omega z - \omega H}{v_s} - \cos \frac{\omega z - \omega H + \omega t v_s}{v_s} \right) z \frac{\gamma}{g} \cot \theta_2 dz + \int_{H-h}^G z \alpha \cdot \cot \theta_2 \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{g} \frac{(fH - fz + z)k_h g}{H\omega} \left(\cos \frac{\omega z - \omega H}{v_s} - \cos \frac{\omega z - \omega H + \omega t v_s}{v_s} \right) dz \quad (19)$$

化简式(19)可得

$$F_{H_1IJ} = \frac{\alpha \cot \theta_2 k_h v_s}{H\omega^4} \left\{ \omega^2 (H-h)(H-h+fh)(\gamma_{sat} - \gamma_w - \gamma) \cdot \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] + \omega^2 (\gamma_{sat} - \gamma_w)(fG^2 - G^2 - fHG) \cos \left(\frac{\omega t}{2} + \frac{G\omega - H\omega}{v_s} \right) + \omega v_s (2h + fH - 2fh - 2H)(\gamma_{sat} - \gamma_w - \gamma) \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] - \gamma \omega v_s \cdot fH \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_s} \right) \right] + \omega v_s (\gamma_{sat} - \gamma_w)(2G - 2fG + fH) \sin \left(\frac{\omega t}{2} + \frac{G\omega - H\omega}{v_s} \right) - 2v_s^2 (f-1) \cdot \left\{ (\gamma_{sat} - \gamma_w - \gamma) \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] + 2v_s^2 (f-1) \gamma \cdot \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] - 2v_s^2 (f-1)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot \right. \right.$$

$$\left. \cos \left(\frac{\omega t}{2} + \frac{G\omega - H\omega}{v_s} \right) \right\} \quad (20)$$

同理，作用于土楔体 IGJ 上的阻尼力可表示为

$$F_{IGJ} = \frac{\alpha \cos s_7}{-H\omega} [H\omega s_3 \cot \theta_2 + H\omega s_3 \cot(\theta_1 + \theta_2) - H\omega s_4 \lg \left(\sin \frac{\theta_2}{2} \right) - H\omega s_4 \lg \left(\sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + H\omega s_4 \lg \left(\cos \frac{\theta_2}{2} \right) + H\omega s_4 \lg \left(\cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + \theta_1 H\omega s_5 - s_6 \cos \theta_2 - s_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (21)$$

其中，

$$s_1 = \omega t + \frac{\omega G - \omega H - \omega r_0 \sin \theta_2}{v_s}$$

$$s_2 = \frac{f}{\omega} + \frac{(G - r_0 \sin \theta_2)(1-f)}{H\omega}$$

$$s_3 = s_2 r_0^2 (\sin \theta_2)^2, \quad s_4 = \frac{(1-f) \bar{r} r_0^2 (\sin \theta_2)^2}{H\omega}$$

$$s_5 = s_2 \bar{r}^2, \quad s_6 = \frac{\bar{r}^3 (1-f)}{H\omega}$$

$$s_7 = \frac{r_1 \omega \cos \varphi}{v_s \theta_1} [\cos(\theta_2 + \varphi) - \cos(\theta_1 + \theta_2 + \varphi) e^{\theta_1 \tan \varphi}] + s_1$$

作用在土楔体 H_1NJ 上的阻尼力 F_{H_1NJ} 可表示为

$$F_{H_1NJ} = \frac{4\alpha \cot \theta_2 k_h v_s}{H\omega^4} \sin \frac{\omega t}{2} \left\{ \omega v_s (1-f)(G+2h) + \omega v_s \cdot (fH - 2H)\gamma \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] + \omega v_s (fG - G + fH)\gamma \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_s} \right) \right] + \omega v_s (\gamma_{sat} - \gamma_w)[(f-1) \cdot (G+2H) - fH + 2H] \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] + \omega v_s \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w)(fG - G - fH) \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_s} \right) \right] + 2v_s^2 (f-1)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \left\{ \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] - \cos \frac{\omega t}{2} + \frac{G\omega - H\omega}{v_s} \right\} + \omega^2 fHG\gamma \cdot \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_s} \right) \right] - \omega(G+h-H)(H-h+fh) \cdot (\gamma - \gamma_{sat} + \gamma_w) \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2h}{v_s} \right) \right] \right\} \quad (22)$$

(6) 被动土压力 P_{pe}

分别列出土楔体 H_1GJ 和 H_1NJ 水平和竖直方向的平衡方程, 解方程组即可求出作用在挡墙和填土接触面上的被动土压力 P_{pe} , 其平衡方程组如下:

$$\left. \begin{aligned} Q_{h-H_1GJ} + 2P_{dyn} + P_{pe} \cos \delta - N_3 \sin(\theta_2 + \varphi) - \\ F[\sin(\theta_1 + \theta_2) - \sin \theta_2] - F_{H_1GJ} = 0 \\ (W_1 - Q_{v-H_1GJ}) - F[\cos \theta_2 - \cos(\theta_1 + \theta_2)] + P_{pe} \sin \delta + \\ N_3 \cos(\theta_2 + \varphi) = 0 \\ Q_{h-H_1NJ} + 2P_{dyn} + N_3 \sin(\theta_2 + \varphi) - N_2 \sin(\theta_2 + \varphi) - \\ F_{H_1NJ} = 0 \\ (W_2 - Q_{v-H_1NJ}) - N_2 \cos(\theta_2 + \varphi) - N_3 \cos(\theta_2 + \varphi) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

解式(23), 被动土压力可表示为

$$P_{pe} = \frac{\csc\left(\delta - \frac{\theta_1}{2} - \theta_2\right)}{2} \left[4 \cos \theta_2 \sin \frac{\theta_1}{2} P_{dyn} + 4 \cos \frac{\theta_1}{2} \cdot \right. \\ \left. \sin \theta_2 P_{dyn} + 2 \sin\left(\frac{\theta_1}{2} + \theta_2\right) (Q_{h-H_1GJ} - F_{H_1GJ}) + \right. \\ \left. \cos\left(\varphi - \frac{\theta_1}{2}\right) \csc(\varphi + \theta_2) (2P_{dyn} - F_{H_1NJ} + Q_{h-H_1NJ}) + \right. \\ \left. 2 \cos\left(\frac{\theta_1}{2} + \theta_2\right) (Q_{v-H_1GJ} - W_1) + \cos\left(\varphi - \frac{\theta_1}{2}\right) \cdot \right. \\ \left. \sec(\varphi + \theta_2) (Q_{v-H_1NJ} - W_2) \right] \quad (24)$$

被动土压力系数可表示为

$$K_{pe} = 2P_{pe} / (\gamma H^2) \quad (25)$$

(7) 挡土墙上的惯性力、重力和阻尼力

图5为挡墙受力分析图, 作用于挡墙水平方向上的惯性力 Q_{hw-OH_1GL} 为

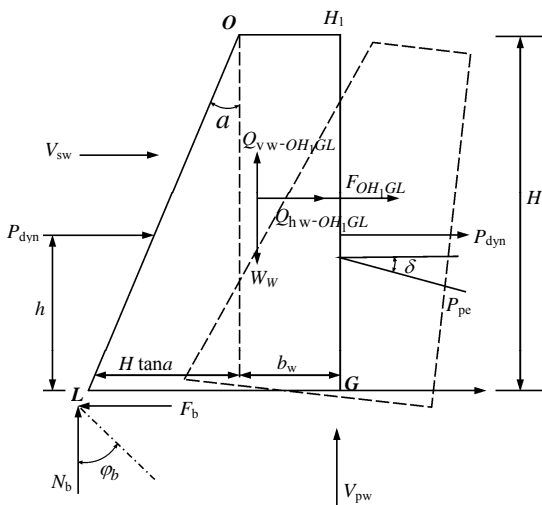


图 5 被动土压力作用下挡土墙滑动详图

Fig.5 Sliding sketch of the retaining wall toward backfill under passive earth pressure

$$Q_{hw-OH_1GL} = \int_0^H \frac{\gamma_w}{g} (b_w + z \tan a) \left[f + \frac{z}{H} (1-f) \right] \cdot k_h g \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_{sw}} \right) \right] dz \quad (26)$$

化简上式可得

$$Q_{hw-OH_1GL} = -\frac{\gamma_c k_h v_{sw}}{H \omega^3} \left\{ H \omega^2 b_w \cos(\omega t) - H \omega^2 b_w \cdot \right. \\ \left. \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{sw}} \right) \right] + \omega b_w v_{sw} (f-1) \cdot \right. \\ \left. \left\{ \sin(\omega t) - \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} + H \omega v_{sw} \tan a \cdot \right. \\ \left. \left\{ (f-2) \sin(\omega t) + f \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} + 2v_{sw}^2 \cdot \right. \\ \left. \tan a (f-1) \left\{ \cos(\omega t) - \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} + \right. \\ \left. H^2 \omega^2 \tan a \cos(\omega t) \right\} \quad (27)$$

同理, 作用在挡墙竖直方向上的惯性力为

$$Q_{vw-OH_1GL} = -\frac{\gamma_c k_v v_{pw}}{H \omega^3} \left\{ H \omega^2 b_w \cos(\omega t) - \right. \\ \left. \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{pw}} \right) \right] H \omega^2 b_w + \omega b_w v_{pw} (f-1) \cdot \right. \\ \left. \left\{ \sin(\omega t) - \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{pw}} \right) \right] \right\} + H^2 \omega^2 \tan a \cdot \right. \\ \left. \cos(\omega t) + \tan a H \omega v_{pw} \left\{ (f-2) \sin(\omega t) + \right. \right. \\ \left. \left. f \sin \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{pw}} \right) \right] \right\} + 2v_{pw}^2 \tan a (f-1) \cdot \right. \\ \left. \left\{ \cos(\omega t) - \cos \left[\omega \left(t - \frac{H}{v_{pw}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (28)$$

式中: γ_c 为挡墙混凝土的重度, v_{sw} 和 v_{pw} 分别为水平和竖直方向的地震波在挡墙中的传播速度。

挡土墙所受的重力为

$$W_w = \frac{1}{2} \gamma_c H (2b_w + H \tan a) \quad (29)$$

作用在挡土墙上的阻尼力为

$$\begin{aligned}
 F_{OH_1GL} = & \frac{2\alpha k_h v_{sw} \gamma_c}{H\omega^4} \sin \frac{\omega t}{2} \left\{ \omega b_w H \left[\cos \frac{\omega t}{2} - \right. \right. \\
 & \left. \left. f \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_{sw}} \right) \right] \right] \right\} + \omega b_w v_{sw} (f-1) \cdot \\
 & \left\{ \sin \frac{\omega t}{2} - \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} + H^2 \omega^2 \tan a \cdot \\
 & \cos \frac{\omega t}{2} + H\omega v_{sw} \tan a \left\{ (f-2) \sin \frac{\omega t}{2} + \right. \\
 & \left. f \sin \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} + \tan a (2f-2) \cdot \\
 & \left\{ \cos \frac{\omega t}{2} - \cos \left[\frac{\omega}{2} \left(t - \frac{2H}{v_{sw}} \right) \right] \right\} \quad (30)
 \end{aligned}$$

2.3 挡土墙稳定性分析

当挡土墙受到的地震加速度大于临界地震加速度时,挡墙将绕基底点 G 运动,发生倾覆破坏或滑移变形。下面分析拟动力抗滑稳定性系数、滑移位以及拟动力抗倾覆稳定性系数。

2.3.1 拟动力抗滑稳定性系数

拟动力抗滑稳定性系数可用滑动力和抗滑力表示为

$$FSS_{dyn} = \frac{F_b}{F_d} = \frac{[W_w - P_{pe} \sin \delta - Q_{vw-OH_1GL}(t)] \tan \varphi_b}{Q_{hw-OH_1GL}(t) + 2P_{dyn} - P_{pe} \cos \delta - F_{OH_1GL}} \quad (31)$$

式中: F_b , F_d 分别为抗滑力和滑动力; φ_b 为挡土墙与基底不动土体接触面的最大摩擦角。

根据挡墙所受滑动力等于挡墙所受抗滑力,即 $F_b = F_d$, 可以求出临界地震加速度系数 k_{cr} 。当挡土墙受到的地震加速度系数大于临界加速度系数时,滑移位移 s 可通过下式^[10]求解:

$$s = \int_0^t (k_h - k_{cr}) g dt \quad (32)$$

2.3.2 拟动力法抗倾覆稳定性系数

挡土墙的重心坐标可表示为

$$\begin{aligned}
 (x_c, y_c) = & \left[\frac{0.5Hb_w^2 + 0.5H^2 \tan a [b_w + (1/3)H \tan a]}{b_w H + 0.5H^2 \tan a}, \right. \\
 & \left. \frac{H}{3} \left(\frac{3b_w + H \tan a}{2b_w + H \tan a} \right) \right] \quad (33)
 \end{aligned}$$

当挡土墙的抗倾覆力矩 M_r 小于倾覆力矩 M_d 时,挡土墙发生倾覆破坏,所以挡土墙拟动力抗倾覆稳

定性系数可表示为

$$FSR_{dyn} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{[W_w - Q_{vw-OH_1GL}(t)]x_c + F_{OH_1GL}(t)y_c}{Q_{hw-OH_1GL}(t)y_c + \frac{2h}{3}P_{dyn} - P_{pe}h_{he} \cos \delta} \quad (34)$$

式中: h_{he} 为被动土压力 P_{pe} 的作用点高度,其值为

$$h_{he} = \frac{P_a \frac{H}{3} + (P_{pe} - P_a)0.6H}{P_{pe}} \quad (35)$$

$$P_a = \frac{1}{2}H^2 \left[\left(1 - \frac{h^2}{H^2} \right) \gamma + \frac{h^2 \gamma_{sat}}{H^2} \right] \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)^2 \quad (36)$$

3 算例分析

假定挡土墙高度 $H = 12$ m, 倾角 $a = 15^\circ$, 地下水位高 $h = 0.5H$ 或 $0.75H$, 挡土墙的上底宽 $b_w = 0.2H$, 对数螺旋曲线的初始半径 $r_1 = 20$ m, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 33^\circ$, $\varphi_b = 50^\circ$, 填土自然重度 $\gamma = 16$ kN/m³, 饱和重度 $\gamma_{sat} = 21$ kN/m³, 水的重度 $\gamma_w = 10$ kN/m³, 混凝土挡土墙的重度 $\gamma_c = 24$ kN/m³, 填土的内摩擦角 φ 取值范围为 $20^\circ \sim 40^\circ$, 墙背与填土之间的外摩擦角为 $\delta = 0, 0.33\varphi, 0.5\varphi, 0.67\varphi$ 和 φ 。地震波参数的取值为: 加速度幅值放大系数 f 取值范围为 $1 \sim 2$, 周期 $T = 0.2$ s, 水平加速度系数 $k_h = 0 \sim 0.7$, 竖向加速度 $k_v = 0.5k_h$ 。地震波在填土中传播的横波波速 $v_s^{[13-14]} = H/(0.3T)$, 纵波波速 $v_p^{[13-14]} = H/(0.16T)$, 地震波在挡土墙中传播的横波波速 $v_{sw} = H/(0.012T)$, 地震波在挡土墙中传播的纵波波速 $v_{pw} = H/(0.0077T)$, 阻尼系数 $\alpha^{[15]} = 0.5$ 。

3.1 本文方法与 Basha 和 Babu^[10]中的方法比较

为了便于将本文方法与 Basha 和 Babu^[10]的方法(以下简称现有方法)对比分析,2种方法计算参数取值相同,且分别采用2种方法计算被动土压力系数。如图6所示,墙后填土的内摩擦角 φ 分别取 20° 和 40° , 墙土接触面的外摩擦角 δ 从 5° 变化到 φ , 从图中可以看出,由于本文对挡土墙进行稳定性分析时考虑了阻尼力的影响,本文方法计算的被动土压力系数 K_{pe} 要低于现有方法求出的 K_{pe} 值。故采用本文方法对挡土墙进行稳定性分析偏于安全。

3.2 拟动力抗滑稳定性系数与 k_h , φ , h 的关系

如图7(a)所示,水位高 $h = 0.75H = 9$ m, $f = 1.6$, 取任意时刻 $t = 0.1$ s, $\delta = 0.5\varphi$ 。随着水平地震加速

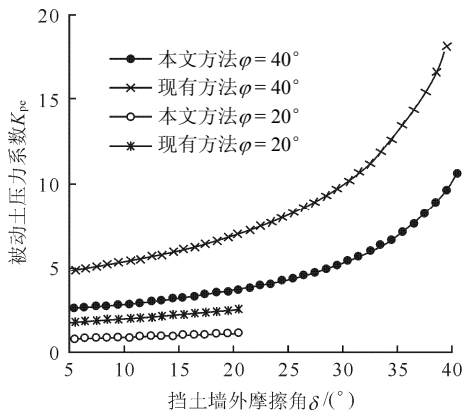
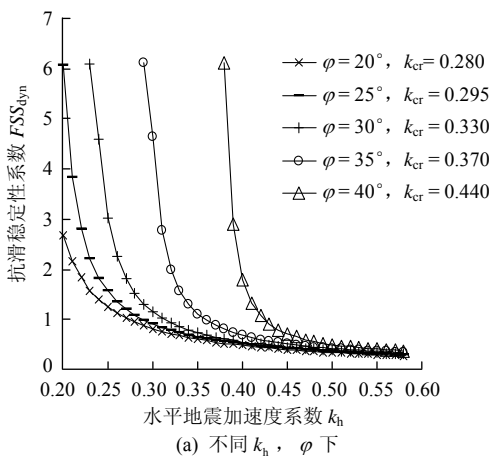
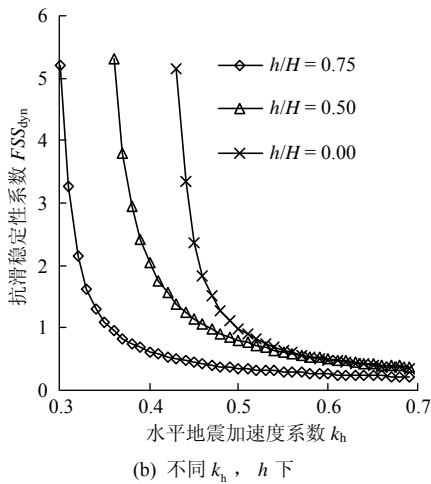


图 6 2 种方法的挡土墙被动土压力系数的比较

Fig.6 Comparison of static passive earth pressure coefficients K_{pe} of two methods



(a) 不同 k_h , φ 下



(b) 不同 k_h , h 下

图 7 不同条件对挡墙拟动力抗滑稳定性系数的影响

Fig.7 Effects of different conditions on dynamic factor of safety against sliding FSS_{dyn} of retaining wall

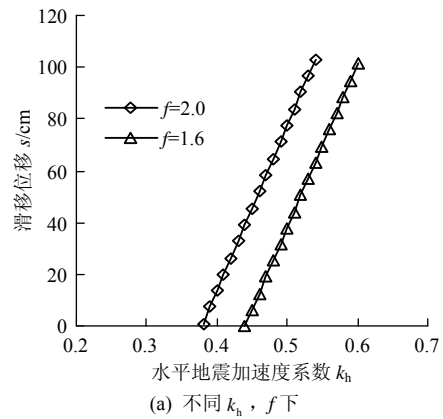
度系数 k_h 取值从 0.2 到 0.6 递增, 挡墙拟动力抗滑稳定性系数 FSS_{dyn} 递减; 当土的最大内摩擦角 φ 从 20° 到 40° 递增时, FSS_{dyn} 递增。由此可见, 当 k_h 越大、 φ 越小时, 挡土墙发生滑移破坏的可能性越大。

图 7(a)中各 φ 值对应曲线与直线 $FSS_{dyn} = 1$ 相交点的横坐标即为临界加速度系数 k_{cr} 。由图 7 可知, 当 φ 值增大时, k_{cr} 增大, 挡墙稳定性增强。

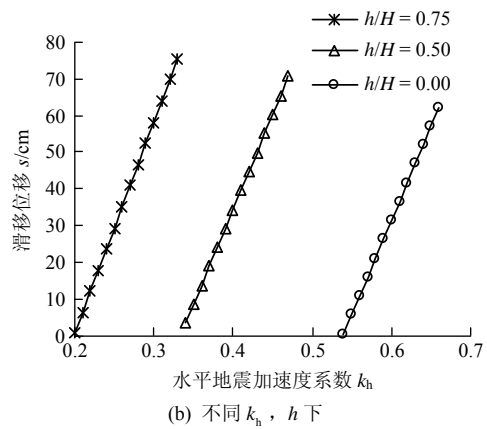
如图 7(b)所示, 取 $\varphi = 25^\circ$, $f = 1.6$, $\delta = 0.5\varphi$ 。当水平地震加速度系数 k_h 取值从 0.2 到 0.7 递增时, 挡墙的拟动力抗滑稳定性系数 FSS_{dyn} 呈现递减规律; 当水位高度从 $h = 0.75H$ 到 $h = 0$ 递减时, FSS_{dyn} 呈现递增规律。由此可见, 当 k_h 和 h 越大时, 挡墙发生滑移破坏的可能性越大。当 $h = 0$ 时, 也就是不考虑水的作用时, 挡土墙的抗滑稳定性系数比同等条件下考虑水的作用时高, 因此临水挡墙设计时必须考虑水的作用, 否则设计出来的挡土墙安全储备较低。

3.3 滑移位移 s 与 k_h , f , h , δ/φ 的关系

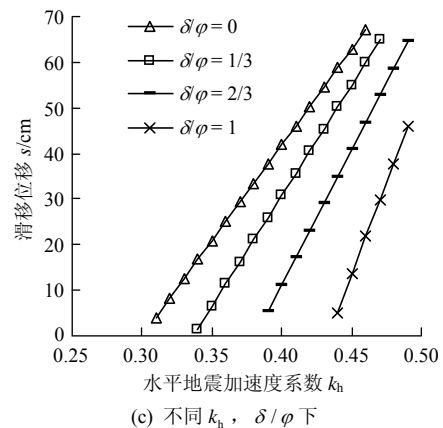
如图 8(a)所示, $h = 0.5H$, $\varphi = 25^\circ$, 地震作用持时 t 为 0.5 s, $\delta = 0.5\varphi$ 。当水平地震加速度系数 k_h



(a) 不同 k_h , f 下



(b) 不同 k_h , h 下



(c) 不同 k_h , δ/φ 下

图 8 不同条件对挡土墙滑移位移 s 的影响

Fig.8 Effects of different conditions on sliding displacement s of retaining wall

取值从 0.2 到 0.6 递增时, 挡墙的滑移位移 s 递增; 当地震放大系数 f 从 1.6 到 2.0 递增时, s 呈现递增规律。因此, 当 k_h 和 f 越大时, 地震荷载作用在挡墙上持时为 t 时, 挡墙发生的滑移位移 s 越大。

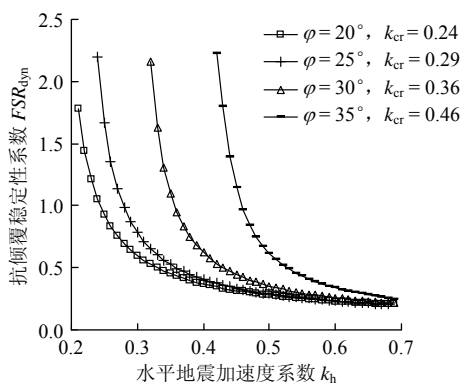
如图 8(b)所示, $\varphi = 30^\circ$, $f = 1.6$, $\delta = 0.5\varphi$ 。当水平地震加速度系数 k_h 取值从 0.2 到 0.6 递增时, 挡墙的滑移位移 s 呈现递增规律; 当水位高度 h 由 $h = 0$ 到 $h = 0.75H$ 递增时, s 递增。由此可见, 当 k_h 和 h 越大时, 地震荷载作用在挡墙上持时为 t 时, 挡土墙发生的滑移位移 s 越大。当 $h = 0$ 时, 也就是不考虑水的作用时, 挡土墙的滑移位移要比同等条件下考虑水的作用时小。

如图 8(c)所示, $h = 0.75H$, $\delta = 0.5\varphi$, $\varphi = 30^\circ$, $f = 1.6$ 。当水平地震加速度系数 k_h 从 0.2 到 0.5 递增时, 挡墙的滑移位移 s 呈现递增规律; 当外摩擦角与内摩擦角比值 δ/φ 由 0 增加到 1 时, s 递减。因此, 当 k_h 越大、 δ/φ 越小时, 地震荷载作用在挡墙上持时为 t 时, 挡墙发生的滑移位移 s 越大。

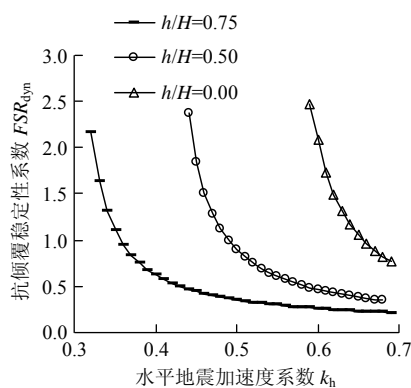
3.4 拟动力抗倾覆稳定性系数与 k_h , φ 和 h 的关系

如图 9(a)所示, 水位高取 $h = 0.75H$, $f = 1.6$, $\delta = 0.5\varphi$ 。当 k_h 从 0.2 到 0.7 递增时, 挡墙的抗倾覆稳定性系数 FSR_{dyn} 递减; 当土的内摩擦角 φ 从 20° 变化到 40° 时, FSR_{dyn} 呈现递增规律。由此可见, k_h 越大、 φ 越小时, 挡土墙发生倾覆破坏的可能性越大。

如图 9(b)所示, $f = 1.6$, 取任意时刻 $t = 0.1 s$, $\varphi = 30^\circ$, $\delta = 0.5\varphi$ 。随着水平地震加速度系数 k_h 取值从 0.2 到 0.7 递增, 挡墙的抗倾覆稳定性系数 FSR_{dyn} 呈现递减规律; 当水位高从 $h = 0$ 到 $h = 0.75H$ 递增时, FSR_{dyn} 呈现递减规律。由此可见, k_h 和 h 越大, 挡土墙的稳定性的越差。当 $h = 0$ 时, 即不考虑水的作用, 挡土墙的抗倾覆稳定性系数要比考虑水的作用时高, 故临水挡墙设计时, 必须考虑水的影响, 否则设计出来的挡土墙安全储备较低。



(a) 不同 k_h , φ 下



(b) 不同 k_h , h 下

图 9 不同条件对挡土墙抗倾覆稳定性系数 FSR_{dyn} 的影响
Fig.9 Effects of different conditions on dynamic factor of safety against base rotation FSR_{dyn} of retaining wall

4 结 论

(1) 本文采用拟动力法对临水挡墙进行稳定性分析, 通过考虑正弦波来模拟地震波的输入。假设墙后填土的破坏面为组合曲面, 并考虑动水压力、挡土墙和墙后填土的惯性力、阻尼力的影响, 获得了挡墙的滑移位移、抗滑移和抗倾覆稳定性系数的封闭形式解析解, 进而对地震荷载作用下临水挡墙的稳定状况进行参数化研究。

(2) 采用正弦波来模拟地震波, 既可使问题简化, 又考虑了地震参数的动力特性。放大系数 f 越大、水平和垂直方向的地震加速度系数 k_h 和 k_v 越大时, 挡墙的稳定性的越差。

(3) 墙后填土的内摩擦角 φ 及墙背与填土之间的外摩擦角 δ 也对挡土墙的稳定性的起着关键作用。当 φ 和 δ/φ 增大时, 挡土墙的稳定性的增强。

(4) 在地震荷载作用下, 由于水的存在, 产生附加的动水压力, 使挡土墙的稳定性的变差。当不考虑水的作用时, 即 $h = 0$, 挡土墙的稳定性的比考虑水的作用时高, 故临水挡墙设计时, 必须考虑水的影响, 否则设计出来的挡土墙安全储备较低。当水位高度 h 越大, 挡土墙的稳定性的越差, 因此在临水挡土墙设计中, 应采取措施降低水位线高度。

参考文献(References):

[1] 李承亮, 冯 春, 刘晓宇. 拟静力方法适用范围及地震力计算[J]. 济南大学学报, 2011, 25(4): 431 - 436.(LI Chengliang, FENG Chun, LIU Xiaoyu. The application range of pseudo-static method and the calculation of earthquake force[J]. Journal of University of Jinan, 2011, 25(4): 431 - 436.(in Chinese))

- [2] 杜修力, 路德春. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 2): 10 - 20.(DU Xiuli, LU Dechun. Advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.2): 10 - 20.(in Chinese))
- [3] STEEDMAN R S, ZENG X. The seismic response of waterfront retaining walls[C]// Proceedings of ASCE Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structure. New York: Special Technical Publication, Cornell University, 1999: 872 - 886.
- [4] EBELING R M, MORRISON E E J. The seismic design of waterfront retaining structures[R]. Washington District of Colombia: United States of America Army Technical Report, 1992.
- [5] CHOUDHURY D, AHMAD S M. Design of waterfront retaining wall for the passive case under earthquake and tsunami[J]. Applied Ocean Research, 2007, 112(29): 37 - 44.
- [6] CHOUDHURY D, AHMAD S M. Stability of waterfront retaining wall subjected to pseudo-static earthquake forces[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(14/15): 1 947 - 1 954.
- [7] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943: 24 - 26.
- [8] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 37 - 39.
- [9] BASHA B M, BABU G L S. Seismic rotational displacements of gravity walls by pseudo dynamic method with curved rupture surface[J]. ASCE International Journal of Geomechanics, 2010, 10(3): 93 - 105.
- [10] BASHA B M, BABU G L S. Computation of sliding displacements of bridge abutments by pseudo-dynamic method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(1): 103 - 120.
- [11] BASHA B M, BABU G L S. Reliability assessment of internal stability of reinforced soil structures: a pseudo-dynamic approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(5): 336 - 353.
- [12] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98(3): 418 - 433.
- [13] BASHA B M, BABU G L S. Seismic reliability assessment of external stability of reinforced soil walls using pseudo-dynamic method[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(3): 197 - 215.
- [14] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996: 66 - 69.
- [15] 布占宇. 斜拉桥地震响应分析中的索桥耦合振动和阻尼特性研究 [博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2005.(BU Zhanyu. Cable-deck coupled vibration and damping characteristic research in the seismic response analysis of cable-stayed bridges[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 川西北跨度 23 年的原地应力实测数据特征及其地壳动力学意义分析;
- (2) 中国岩石力学与工程若干进展;
- (3) 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价;
- (4) 基于水平集坐标的二维节理动态扩展过程无网格法模拟研究;
- (5) 中尺寸岩石真三轴试验系统研制与应用;
- (6) 岩石高边坡开挖爆破动力损伤的数值仿真;
- (7) 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究;
- (8) 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析。

基坑工程