

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0007-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.002

悬臂式挡土墙地震主动土压力拟动力分析

吴孙星¹, 孙树林^{1*}, 张岩², 张磊³

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

3. 安徽省华电工程咨询设计有限公司, 安徽 合肥 230009)

摘要: 地震作用下悬臂式挡土墙主动土压力的计算十分重要。为了分析悬臂式挡土墙在地震荷载作用下主动土压力分布情况, 基于滑楔体平衡理论, 考虑水平、竖向地震力随时间变化对地震主动土压力的影响, 运用拟动力学方法, 推导出地震主动土压力、第二临界破裂角的计算公式, 并研究挡土墙后填土的内摩擦角和粘聚力、挡土墙与后填土之间的摩擦角和粘聚力、墙体倾角等参数对地震主动土压力系数和临界破裂角的影响。研究表明: 第二临界破裂角随竖向地震力系数、挡土墙后方填土内摩擦角的增大而增大, 随水平地震力系数、挡土墙与后方填土摩擦角的增大而减小; 地震主动土压力随水平、竖向地震力系数的增大而增大, 随挡土墙后方填土内摩擦角的增大而减小。

关键词: 悬臂式挡土墙; 地震主动土压力; 拟动力学; 临界破裂角; 主动土压力系数

中图分类号: U459.3

文献标识码: A

Pseudo-dynamic Analysis of Active Earth Pressure of Cantilever Retaining Wall in Earthquake

WU Sunxing¹, SUN Shulin^{1*}, ZHANG Yan², ZHANG Lei³

(1.School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3.Anhui Huadian Engineering

Consulting&Design Co. Ltd, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: It is very important to calculate the active earth pressure of cantilever retaining wall under earthquake. To analyze the active earth pressure distribution of cantilever retaining wall under seismic load, by applying the proposed dynamic method and considering the impact of variation of horizontal and vertical earthquake force on seismic active earth pressure, the calculating formulas of the critical Angle of rupture and seismic active earth pressure were deduced, and the influence of parameters on the seismic active earth pressure coefficient and the critical Angle of rupture were also investigated. The results show that the second critical fracture Angle increases with the increase of the vertical seismic force coefficient and decreases with the increase of the horizontal seismic force coefficient. The active earth pressure increases with the increase of horizontal and vertical seismic force coefficients.

Key words: cantilever retaining wall; earthquake active earth pressure; pseudo-dynamic method; critical fracture angle; active earth pressure coefficient

悬臂式挡土墙的施工和设计属于较典型的工程问题^[1], 以往计算悬臂式挡土墙主动土压力的常用方法是朗肯土压力和库伦土压力计算理论, 该理论

以过墙踵的垂直面作为假想墙背来计算主动土压力, 但忽略了墙后填土破裂面出现情况^[2-3]; 李永刚等^[4]利用极限平衡理论建立了墙后四边形土楔体力平衡

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 中央高校科研业务费专项资金资助 (2109B42214)

作者简介: 吴孙星 (1997-), 男, 安徽亳州人, 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, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程、环境岩土工程方面的研究。

方程,得到了第一、二破裂面位置;张勇等^[5]通过水平微元法计算悬臂式挡土墙主动土压力,但该方法未考虑挡土墙主动土压力随地震荷载作用的影响;Asadollah等^[6]利用上限分析法对悬臂式挡土墙进行拟静力分析,但该方法未考虑地震荷载随时间的变化,与实际情况差别较大。

综上,本文运用拟动力学方法,考虑了水平、竖向地震力随时间变化的影响,以及挡土墙后方填土的内摩擦 ϕ 、挡土墙与后方填土之间的摩擦角 δ 、后方填土的粘聚力 c 、挡土墙与后方填土之间的粘聚力 c_a 、墙体倾角 θ 等对第二临界破裂角、地震主动土压力的影响。推导了悬臂式挡土墙地震主动土压力计算公式,并计算出临界破裂角解析解以及地震主动土压力系数。与Mononobe-Okabe法对比验证,得到了较合理的结果。同时,文中考虑了悬臂式挡土墙地震主动土压力随时间的变化,与实际情况更相符。

1 模型分析与计算方法

1.1 计算模型的建立

悬臂式挡土墙主要由立板、趾板及踵板三部分组成。由于悬臂式挡土墙结构的特殊性,当挡土墙处于极限平衡状态时,墙后填土将出现第一、第二

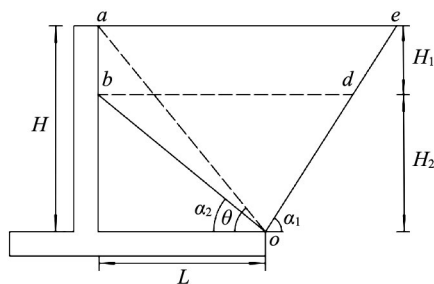


图1 挡土墙四边形土楔体

Fig1. Quadrilateral earth wedge of retaining wall

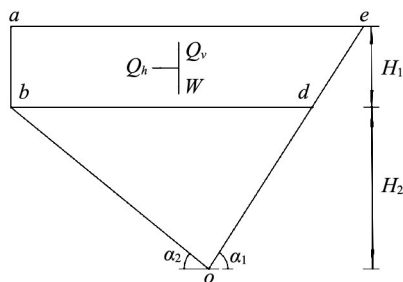


图2 四边形滑动土楔计算模型

Fig. 2 Calculation model of quadrilateral sliding soil wedge

两个破裂面。

图1为典型悬臂式挡土墙墙后破裂面四边形土楔体示意图,图1中,墙体高为 H 、墙踵板宽度为 L 、 o 点为墙踵点、 oe 面为第一破裂面、 ob 面为第二破裂面、此时挡墙后填土滑动土楔体为四边形 $obae$ 、 α_1 为第一破裂面倾角、 α_2 为第二破裂面倾角。破裂面 oba 上的地震土压力即为所求的地震主动土压力。

四边形滑动土楔计算模型如图2,为了计算挡土墙后破裂面 oba 上的地震主动土压力,连接 bd ,将四边形土楔 $obae$ 分割成上下两部分,上半部分为梯形土楔体 $abde$ 、下半部分为三角形土楔体 obd ,分别计算上下两部分土楔体地震主动土压力,再求得四边形土楔体 $obae$ 上地震主动土压力合力。上下两部分土楔体高度分别为 H_1 、 H_2 。由朗肯土压力理论^[7]可知,第一破裂面倾角 α_1 与水平面的夹角为 $45^\circ + \phi/2$ 。

1.2 拟动力学

拟动力学是假设挡土墙后回填土的剪切模量 G 不随地震力的变化而变化,为一确定常数。并在此基础上考虑了地震波波速、相位以及地震加速度的大小随挡土墙高度的变化。其中横波波速 $V_s = (G/\rho)^{1/2}$,纵波波速 $V_p = [2G(1-\nu)/\rho(1-2\nu)]^{1/2}$, ρ 为岩石密度, ν 为泊松比^[8]。考虑地震波由地底传播至地表时振动的放大效应,假设水平和竖向地震加速度从地底到地表传播沿深度呈线性变化,则土体任意深度 y 、任意时刻 t 的水平与竖向地震加速度分别为^[9]:

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

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

式中: K_h 、 K_v 分别为水平与竖向地震力系数, g 为重力加速度, ms^{-2} ; f_s 为土体放大系数, ω 为角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; T 为地震波振动的周期, s 。当 $f_s = 1.0$ 时,即不考虑土体放大系数的影响。

1.3 地震主动土压力推导

1.3.1 梯形土楔体地震主动土压力计算求解

作用在四边形滑动土楔体上的力,如图3所示。

别为:

$$Qh_2(t) = \int_0^{H_2} a_h(y,t)m(y)_2 d_y =$$

$$\frac{(\cot\alpha_1 + \cot\alpha_2)k_h\gamma\lambda}{4H_2\pi^3} \{ [2\pi^2 H_2 L \tan\alpha_1 - \lambda^2 (f_s - 1)] (\cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda}) - \cos 2\pi\frac{t}{T}) + \lambda\pi[(f_s - 1)L \tan\alpha_1 + H_2] \{ [2\pi^2 H_2 L \tan\alpha_1 - \lambda^2 (f_s - 1)] (\sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda}) - \sin 2\pi\frac{t}{T}) + \pi\lambda H_2 (f_s - 1) (\sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda}) + \sin 2\pi\frac{t}{T}) + 2\pi^2 H_2 [H_2 \cos 2\pi\frac{t}{T} + L \tan\alpha_1 (f_s - 1) \cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda})] \} \}$$
(11)

式中: $\lambda = TV_s$ 为横波波长, m。

$$Qv_2(t) = \int_0^{H_2} a_v(y,t)m(y)_2 d_y =$$

$$\frac{(\cot\alpha_1 + \cot\alpha_2)k_h\gamma\xi}{4H_2\pi^3} \{ [2\pi^2 H_2 L \tan\alpha_1 - \xi^2 (f_s - 1)] (\cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\xi}) - \cos 2\pi\frac{t}{T}) + \xi\pi[(f_s - 1)L \tan\alpha_1 + H_2] \{ [2\pi^2 H_2 L \tan\alpha_1 - \xi^2 (f_s - 1)] (\sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\xi}) - \sin 2\pi\frac{t}{T}) + \pi\xi H_2 (f_s - 1) (\sin 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\xi}) + \sin 2\pi\frac{t}{T}) + 2\pi^2 H_2 [H_2 \cos 2\pi\frac{t}{T} + L \tan\alpha_1 (f_s - 1) \cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{H}{\xi})] \} \}$$
(12)

式中: $\xi = TV_p$ 为纵波波长, m。

1.3.3 四边形土楔体地震主动土压力求解

地震土压力主动土压力合力为 P_{AE} ,

$$P_{AE}(t) = [P_1^2(t) + P_2^2(t) + 2P_1(t)P_2(t)\sin(\delta + \alpha_2 - \phi)]^{\frac{1}{2}}$$
(13)

由朗肯土压力理论, 地震主动土压力系数 K_{AE} 可表示为:

$$K_{AE} = [P_1^2(t) + P_2^2(t) + 2P_1(t)P_2(t)\sin(\delta + \alpha_2 - \phi)]^{\frac{1}{2}} \cdot [\gamma H^2(1 - K_v)]^{-1}$$
(14)

1.3.4 临界破裂角求解

对于地震主动土压力 $P_{AE}(t)$, 由 $\frac{\partial P_{AE}(t)}{\partial \alpha_2} = 0$,

可以求出第二临界破裂角 α_2 。

$$[\cos\delta(d_{33}(\tan^2\alpha_2 + 1) + d_{22}(2\tan\alpha_1\tan^2\alpha_2 + 1) + 2f)] + a_{11}\cos(\delta - \alpha_2) - a_{22}\sin(\delta - \alpha_2) + [2a_{33}\sin\delta + 2a_{11}\cos(\delta - \alpha_2)] \cdot [a_{22}\cos(\delta - \alpha_2) + \sin\delta] \cdot [f + d_{33}(2\tan\alpha_1 \cdot \tan^2\alpha_2 + 1) + f] + f(d_{22} + 1) + a_{11}\sin(\delta - \alpha_2) \cdot \{2[a_{33}\sin\delta + a_{11}\cos(\delta - \alpha_2)]^2 + a_{11}\cos\delta - a_{11}\sin(\delta - \alpha_2)\}^{-1/2} = 0$$
(15)

式中:

$$f = 2\tan\alpha_2(\tan^2\alpha_2 + 1)$$

$$a_{11} = b_{22} \cdot \sin^{-1}(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi) +$$

$$b_{11}(3\tan\alpha_1\tan\alpha_2 + 2\tan^2\alpha_2) + CL(1 -$$

$$\sin\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi)) \cdot [\sin(\alpha_1 + \alpha_2 -$$

$$2\phi)\cos\alpha_2]^{-1}$$

$$a_{22} = \{b_{11}[3\tan\alpha_1(\tan^2\alpha_1 + 1)] +$$

$$4\tan\alpha_1(\tan^2\alpha_1 + 1) - b_{22}\cos(\alpha_1 + \alpha_2 -$$

$$2\phi) \cdot \sin^{-2}(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi) -$$

$$CL\cos\phi\cos(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi) \cdot [\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2 -$$

$$2\phi)\cos\alpha_2]^{-1} - CL\cos(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi) \cdot$$

$$(\tan^2\alpha_1 + 1) \cdot \sin^{-1}(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi) +$$

$$CL\tan\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2 - \delta)\cos(\alpha_1 + \alpha_2 -$$

$$2\phi)CL\cos\phi\sin\alpha_2 \cdot [\sin(\alpha_1 + \alpha_2 -$$

$$2\phi)\cos^2\alpha_2]^{-1} \cdot \sin^{-2}(\alpha_1 + \alpha_2 - 2\phi)$$

$$a_{33} = d_{11} + d_{22}(2\tan\alpha_1\tan\alpha_2 + \tan^2\alpha_2) +$$

$$d_{33}\tan\alpha_2$$

$$b_{11} = \gamma L^2 \sin(\alpha_2 - \phi) / 2\tan\alpha_1$$

$$b_{22} = \gamma(2HL\tan\alpha_1 + H^2) / 2\tan\alpha_1 -$$

$$Qv_2(t)\sin(\alpha_1 - \phi) + Qh_2(t)\cos(\alpha_1 - \phi)$$

$$d_{11} = \{[Qh_1(t)\cos(\alpha_1 - \phi) +$$

$$\gamma(2HL\tan\alpha_1 + H^2) - Qv_1(t) -$$

$$c_a H] \sin(\alpha_1 -$$

$$\phi) - cH\cos\phi / \sin\alpha_1 \} / \cos(\delta + \phi - \alpha_1)$$

$$d_{22} = \gamma L^2 \sin(\alpha_1 - \phi) / 2 \tan \alpha_1 \cos(\delta + \phi - \alpha_1)$$

$$d_{33} = (C_1 L \cos \phi + C_{A1} L \sin(\alpha_1 - \phi) \sin \alpha_1) / (\sin \alpha_1 \cos(\delta + \phi - \alpha_1))$$

表1 不同地震系数下临界破裂角

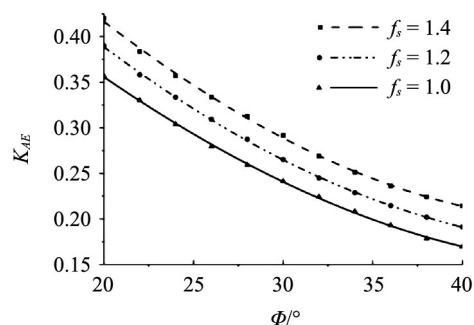
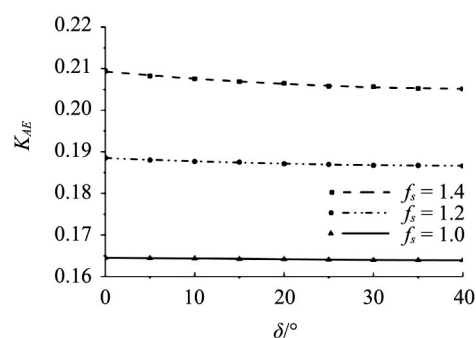
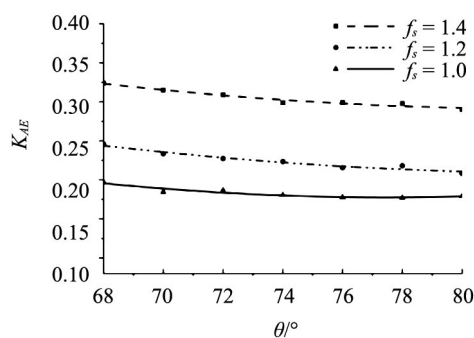
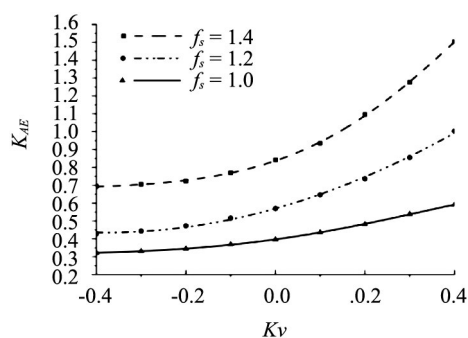
Tab. 1 Critical fracture Angle under different seismic coefficients

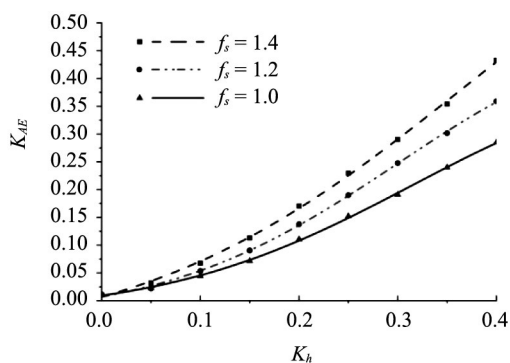
K_h	K_v	本文方法 $\alpha_2/^\circ$			M-O 方法 $\alpha_2/^\circ$
		$f_s = 1.0$	$f_s = 1.2$	$f_s = 1.4$	
0.1	-0.1	44.07	43.27	42.36	43.59
	-0.05	44.93	44.22	43.23	44.76
	0	45.86	45.11	44.12	45.63
	0.05	46.81	45.99	45.04	46.84
	0.1	47.68	46.87	45.86	47.52
0.2	-0.2	41.87	39.74	37.88	41.35
	-0.1	42.64	41.65	39.65	41.95
	0	43.62	42.52	41.25	42.89
	0.1	44.75	43.56	42.47	44.12
	0.2	45.67	44.68	43.41	45.24

表2 不同后填土的内摩擦角或者挡土墙与后填土之间的摩擦角条件下的临界破裂角

Tab.2 Critical rupture angles for different internal friction angles of backfill or friction angle between backfill and retaining wall

$\Phi/^\circ$	δ	$\alpha_1/^\circ$	本文方法 $\alpha_2/^\circ$			M-O 方法 $\alpha_2/^\circ$
			$f_s = 1.0$	$f_s = 1.2$	$f_s = 1.4$	
20	0		33.47	30.69	25.64	31.17
	$\Phi/4$		31.88	28.85	24.42	29.25
	$2\Phi/4$	55	29.56	26.54	22.78	27.93
	$3\Phi/4$		27.45	24.34	20.12	25.28
	Φ		25.11	21.75	18.74	22.56
30	0		46.14	43.28	40.32	44.14
	$\Phi/4$		44.25	41.86	37.84	42.33
	$2\Phi/4$	60	42.45	38.8	36.45	40.01
	$3\Phi/4$		40.35	36.59	34.24	37.96
	Φ		38.17	34.97	32.78	36.47
40	0		54.58	52.45	50.24	53.15
	$\Phi/4$		52.84	50.79	48.34	51.67
	$2\Phi/4$	65	50.86	49.43	46.78	50.46
	$3\Phi/4$		49.13	47.58	44.95	48.41
	Φ		46.85	45.39	42.32	46.56

图5 地震主动土压力系数随 ϕ 的变化Fig. 5 Seismic active earth pressure coefficient along with the change of ϕ 图6 地震主动土压力系数随 δ 的变化Fig. 6 Change of active earth pressure coefficient with δ 图7 地震主动土压力系数随 θ 的变化Fig.7 Change of active soil pressure coefficient with θ 图8 地震主动土压力系数随 K_v 的变化Fig. 8 Variation of active earth pressure coefficient with K_v

图9 地震主动土压力系数随 K_v 的变化Fig. 9 Variation of active earth pressure coefficient with K_v

2 算例分析

查阅相关文献知岩土材料 V_p/V_s 值大约为 1.87^[10-12], 因此 $H/\lambda = 0.3$, $H/\zeta = 0.16$ 。为了便于计算分析, 取填土重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, 挡土墙高度 $H = 5 \text{ m}$, 墙踵板宽度 $L = 3.3 \text{ m}$ 。

2.1 临界破裂角求解

对于式 (15), 令 t/T 在 $0 \sim 1$ 之间变化, 利用 MATLAB 计算求解第二临界破裂角 α_2 。

案例分析 1: 挡土墙后方填土内摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、挡土墙与后方填土之间的摩擦角 $\delta = 15^\circ$ 、第一破裂面倾角 $\alpha_1 = 60^\circ$ 、后方填土的粘聚力 $c = 0$ 、挡土墙与后方填土之间的粘聚力 $c_a = 0$ 。当水平地震力系数 K_v 和竖向地震力系数 K_h 都等 0 时, 采用本文计算方法与 Mononobe - Okabe 法计算的第二临界破裂角 α_2 均为 50.36° 。当 $K_h = 0.1, 0.2$, $K_v/K_h = -1, -0.5, 0, 0.5, 1$ 时, 计算结果如表 1, 从表 1 可以得出, 随着 K_h 的增大, α_2 在逐渐减小, 而随着 K_v 的增大, α_2 在逐渐增大, 随着 K_h 的增大, K_v 对第二临界破裂角的影响也逐渐增大。

案例分析 2: 后方填土的粘聚力 $c = 0$, 挡土墙与后方填土之间的粘聚力 $c_a = 0$, 水平地震力系数 $K_h = 0.1$, 竖向地震力系数 $K_v = 0.2$, 挡土墙后方填土的内摩擦角 $\phi = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, 挡土墙与后方填土之间的摩擦角 $\delta = 0, \phi/4, \phi/2, 3\phi/4, \phi$, 第一破裂面倾角 $\alpha_1 = 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ 时第二临界破裂角 α_2 的变化如表 2。从表 2 可以得出, 随着 ϕ 的增大, α_2 逐渐增大, 而随着 δ 的增大, α_2 在逐渐减小。 ϕ 越小, δ 对 α_2 的影响越大。

根据以上两个案例分析可以得到, 随着土体放大系数 f_s 的增大, α_2 在逐渐减小, 当 $f_s = 1.2$ 时, α_2

的值比较接近 Mononobe - Okabe 方法计算出的临界破裂角值。

2.2 地震主动土压力系数

在图 5 中, $\delta = 0.5\phi$, $c = 20 \text{ kPa}$, $c_a = 10 \text{ kPa}$, $K_h = 0.2$, $K_v = 0.1$, ϕ 在 $20^\circ \sim 40^\circ$, α_1 在 $55^\circ \sim 75^\circ$ 之间变化。从图 5 中可以看出, K_{AE} 随着 ϕ 的增大逐渐减小, 随着 f_s 的增大逐渐增大。 ϕ 逐渐增大时, 对 K_{AE} 的影响也逐渐变大。

在图 6 中, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_1 = 60^\circ$, $c = 20 \text{ kPa}$, $c_a = 10 \text{ kPa}$, $K_h = 0.2$, $K_v = 0.1$, δ 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 之间变化。从图中可以看出, K_{AE} 随着 δ 的增大逐渐减小, 随着 f_s 的增大逐渐增大。但 K_{AE} 随 δ 变化的幅度不大, 这是由于土楔体第二破裂面与挡土墙的接触面积很小所致。

在图 7 中, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_1 = 60^\circ$, $c = 20 \text{ kPa}$, $c_a = 10 \text{ kPa}$, $K_h = 0.2$, $K_v = 0.1$, 在 $68^\circ \sim 80^\circ$ 之间变化。从图中可以看出, K_{AE} 随着 θ 的增大逐渐减小, 但减小的幅度较小。 K_{AE} 则随着 f_s 的增大而增大。

在图 8 中, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_1 = 60^\circ$, $\delta = 20^\circ$, $c = 20 \text{ kPa}$, $c_a = 10 \text{ kPa}$, $K_h = 0.4$, K_h 在 $-0.4 \sim 0.4$ 之间变化。从图中可以看出, K_{AE} 随着 K_v 的增大逐渐增大, 随着 f_s 的增大也逐渐增大。当 K_v 、 f_s 逐渐增大时, 对 K_{AE} 的影响也逐渐增大。

在图 9 中, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_1 = 60^\circ$, $\delta = 20^\circ$, $c = 20 \text{ kPa}$, $c_a = 10 \text{ kPa}$, $K_v = 0.5K_h$, K_h 在 $0 \sim 0.4$ 之间变化。从图中可以看出, K_{AE} 随着 K_h 的增大逐渐增大, 因竖向地震力向下时, 能为土楔体提供更大的主动土压力。 K_{AE} 随着 f_s 的增大也逐渐增大。

3 结论

1) 第二临界破裂角随着挡土墙后方填土内摩擦角、竖向地震力系数的增大逐渐增大, 但随着挡土墙与后方填土摩擦角、水平地震力系数的增大逐渐减小。

2) 地震主动土压力系数随着地震力系数的增大逐渐增大, 随着挡土墙后方填土内摩擦角的增大逐渐减小, 随着墙体倾角、挡土墙与后方填土摩擦角的增大略微减小。

3) 第二临界破裂角随着土体放大系数的增加逐渐减小、地震主动土压力系数随着土体放大系数的增加逐渐增加。

(下转第 77 页)

- Additives: A case Study of Southern Vietnam [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 143(1): 1315-1755.
- [9] CHEN F. Strength and Deformation Characteristics of Basalt Fiber Cement-Soil at Early age [J]. Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban), 2017, 34(6): 611.
- [10] 董金梅, 朱华, 边疆, 等. 高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4326-4333.
- [11] 谌文武, 张起勇, 刘宏伟, 等. 高分子材料 SH 渗透加固遗址土的效果研究[J]. 工程地质学报, 2017(5): 1307-1313.
- [12] 刘瑾, 冯巧, 孙少锐, 等. 聚氨酯型固化剂加固砂性土抗压试验及破坏模式[J]. 地球科学与环境学报, 2017(5): 124-130.
- [13] WEI Y, YANG G S, YE W J. Impact of Freezing Temperature on Mechanical Properties of Loess under Cyclic Freezing and Thawing [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8): 61-66.
- [14] 赖远明, 张耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3665-3670.
- [15] 牛江宇, 靳鹏伟, 李栋伟, 等. 冻结盐渍砂土单轴强度特性研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 428-433.
- [16] 罗飞, 何俊霖, 朱占元, 等. 考虑颗粒破碎的冻结砂土非线性本构模型研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(6): 139-146.
- [17] 邵玉娴, 施斌, 刘春, 等. 黏性土水理性质温度效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1576-1582.
- [18] 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土渗流和变形强度特性的温度效应[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 147-156.
- (责任编辑 李新)

(上接第12页)

参考文献:

- [1] 管枫年, 薛广瑞, 王殿印. 水工挡土墙设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 杨锐锐. 有限土体土压力理论及其在工程中的应用研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [3] 徐利敏, 孙若飞, 孙勇. 地震条件下挡土墙被动土压力及其分布的微分薄层计算方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(6): 32-37.
- [4] 李永刚, 侯俊清. 悬臂式挡土墙主动土压力分析[J]. 中国农村水利水电, 2001(12): 134-135.
- [5] 张勇, 李永刚, 杜琼. 悬臂式挡土墙主动土压力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(6): 131-134.
- [6] ASADOLLAH R K, NAVID G, FARAJOLLAH A. 采用上限分析方法对悬臂式挡土墙进行伪静力分析[J]. 中南大学学报, 2019, 26(1): 241-255.
- [7] 王景环, 卢义玉, 郭建强, 等. 二级新型悬臂式挡土墙主动土压力计算方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(a01): 82-87.
- [8] 阮晓波, 於汝良, 孙树林, 等. 基于拟动力方法的地震条件下挡土墙主动土压力研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 25-30.
- [9] 阮晓波, 孙树林, 刘文亮. 锚固岩石边坡地震稳定性拟动力分析[C]// 第13届全国岩石动力学学术会议. 重庆: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013: 293-300.
- [10] SANTHOSHKUMAR G, GHOSH P. Seismic Passive Earth Pressure on an Inclined Cantilever Retaining Wall Using Method of Stress Characteristics - A New Approach[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 107: 77-82.
- [11] GHOSH P. Seismic Passive Earth Pressure Behind Non-vertical Retaining Wall Using Pseudo-dynamic Analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(6): 693-703.
- [12] GHOSH P, KOLATHAYAR S. Seismic Passive Earth Pressure Behind Non Vertical Wall with Composite Failure Mechanism: Pseudo-Dynamic Approach[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(3): 363-373.
- (责任编辑 李新)