

DOI: 10.11779/CJGE2018S1017

地震作用下加筋挡土墙内部稳定性分析

贾亮¹, 贺世开¹, 李刚², 郭健¹, 梁荣¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 719000)

摘要: 为分析地震作用下加筋挡土墙的内部稳定性, 根据加筋挡土墙分层填筑、分层压实及筋带水平布置特点, 基于水平条分法, 选用对数螺旋滑动面, 建立地震作用下加筋挡土墙内部稳定性分析方法。推导出筋带拉力和所需锚固长度计算公式; 筋带所受最大拉力为线性规划最优解, 借助 MATLAB 软件编写程序, 求得筋带所受最大拉力和对应的最危险滑动面。将提出的计算方法用于一工程实例, 进行了筋带拉力计算, 并用有限元软件 ABAQUS 进行了计算对比, 验证提出计算方法的合理性, 表明该计算方法安全、可靠。

关键词: 加筋挡土墙; 水平条分法; 动力稳定性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0107-05

作者简介: 贾亮(1978-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 副教授。E-mail: jialiang1949@163.com。

Internal stability of reinforced retaining wall under earthquake loads

JIA Liang¹, HE Shi-kai¹, LI Gang², GUO Jian¹, LIANG Rong¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 719000, China)

Abstract: To analyze the internal stability of reinforced retaining wall under earthquake loads, according to the characteristics of layered filling, stratified compaction and horizontal layered arrangement of reinforcement strip, by selecting the logarithmic spiral as the integral slip surface, an analysis method for the internal stability of reinforcement retaining wall under earthquake loads is set up based on the horizontal slice method. The formula for calculating the tensile strength of bar strip and anchorage length are derived. The maximum tensile of bar strip is regarded as the linear programming optimal solution. By using MATLAB software a program is written to obtain the maximum tension of the bar strip and the corresponding most dangerous sliding surface. The proposed method is applied in an engineering example, and the tension value of the bar strip is calculated and compared with that of the finite element ABAQUS software. The rationality of the method is verified, and it is indicated that the proposed method is safe and reliable.

Key words: reinforced retaining wall; horizontal slice method; dynamic stability

0 引言

加筋挡土墙指的是由填土、筋带及面板组成的承担土体压力的结构物。通过在土体中加入筋带, 利用筋带与土体之间的摩擦作用, 改善土体的变形条件, 从而达到稳定土体的目的^[1]。加筋挡土墙性能优良、施工方便且造价低, 特别是由于其具有较好的抗震性能, 在国内外高烈度地震地区得到了广泛应用; 但其涉及到结构与土的相互作用问题, 由于相互作用机理甚是复杂, 所以内部稳定性分析还不够完善^[2]。

1926年, Okabe提出了 Mononobe-Okabe方法, 该方法后来被用于加筋挡土墙的动力稳定性分析中^[3]。Ling等基于拟静力法, 对地震作用下加筋土结构物的竖向反应进行了分析^[4]。2001年, Shahgoli等用水平条分法分析了地震作用下加筋挡土墙的稳定性^[5]。

Choudhury等用拟静力法计算了地震作用下挡土墙墙背的主动土压力^[6]。1993年, Zeng等基于拟动力法研究了横波在挡墙墙背填土中的传播过程, 同时通过理论结果与离心试验结果的对比, 验证了拟动力法在挡土墙稳定性分析中的可靠性^[7]。Erol等^[8]在伊斯坦布尔大学地震研究所大型振动台上、Magdil等^[9]在加拿大皇家军事学院振动台上做了加筋挡土墙稳定性试验, 得出失稳破坏面接近对数螺旋线。

笔者基于前人研究成果, 选取对数螺旋线为破裂面^[7-13]; 运用水平条分法, 对地震作用下加筋挡土墙的内部稳定性、筋带所受拉力及筋带所需锚固长度做

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568044)

收稿日期: 2018-02-24

了探讨。

1 水平条分法及基本假设

1.1 水平条分法

加筋挡土墙内部失稳破坏简化模型如图 1 所示。

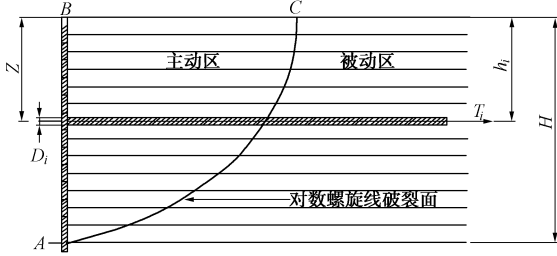


图 1 土体滑动面剖面图

Fig. 1 Slip surface of reinforced retaining wall

图 2 为第 i 个土条的受力图，图中 $F_{N,i}$ 、 $F_{N,i+1}$ 、 $F_{t,i}$ 、 $F_{t,i+1}$ 分别是第 i 个土条上下两侧的法向条间作用力和切向条间力， $N_{t,i}$ 、 $N_{N,i}$ 分别为滑动面的法向反力和切向反力， α_i 为第 i 水平土条破裂面与水方向的夹角， Q_{hi} 和 Q_{vi} 分别为作用在第 i 个土条上水平方向的地震作用力和竖向的地震作用力， T_i 为第 i 层筋带所受的拉力。

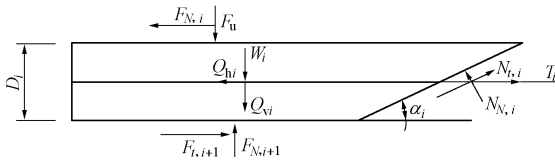


图 2 第 i 条筋带受力图

Fig. 2 Forces acting on i -th slice

1.2 基本假定

- (1) 破裂面是对数螺旋线^[7-13]；
- (2) 假设滑动体处于极限平衡状态；
- (3) 假设破裂面通过墙趾；
- (4) 水平和竖向地震作用在土条的重心上；
- (5) 第 i 个土条下法向条间力为 $F_{N,i}$ ， $F_{N,i+1}$ 为土条上部的超载；

(6) 每一层滑动安全系数相同，安全系数 $F_s = \frac{\tau_f}{\tau_r}$ ， τ_f 是破裂面上抗剪强度， τ_r 是破裂面上剪切应力。

2 水平条分法分析方法

2.1 地震作用

地震作用下，剪切波速 $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ ，基础波速

$V_p = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)}{\rho(1-2\nu)}}$ ，式中 ν 为泊松系数，对大部分土工

材料而言， $\frac{V_p}{V_s} = 1.87$ ，横向震动的周期 $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{4H}{V_s}$ ，

$T = 0.3$ s， ω 是角速度。

假设 α_h 和 α_v 为水平和竖向地震加速度，则 t 时刻深度 z 处的水平和竖向地震加速度可表示为

$$\alpha_h(z, t) = \alpha_h \sin \omega \left(t - \frac{H-z}{V_s} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_v(z, t) = \alpha_v \sin \omega \left(t - \frac{H-z}{V_p} \right) \quad (2)$$

由图 1、2 知，深度 z 处厚度为 dz 的微元体质量为

$$m_i(z) = \frac{\gamma}{g} \frac{H-z}{\tan \alpha_i} dz \quad (3)$$

第 i 个土条的质量：

$$W_i = \gamma \left(\frac{l_i + l_{i+1}}{2} \right) dz \quad (4)$$

式中， γ 为墙后填土重度， l_i 为第 i 个土条上底长度， l_{i+1} 为第 i 个土条下底长度。

作用在第 i 个微元体上的水平惯性力 q_{hi} 可表示为

$$q_{hi} = m_i(z) \alpha_h(z, t) \quad (5)$$

作用在加筋挡土墙上水平方向总地震力为

$$\begin{aligned} Q_h &= \int_0^H q_{hi} dz = \int_0^H m_i(z) \alpha_h(z, t) dz \\ &= \int_0^H \frac{\gamma}{g} \frac{H-z}{\tan \alpha_i} \alpha_h \sin \omega \left(t - \frac{H-z}{V_s} \right) dz \\ &= \frac{\lambda \gamma k_h}{4\pi^2 \tan \alpha_i} [2\pi H \cos \omega \xi + \lambda (\sin \omega \xi - \sin \omega t)] \quad (6) \end{aligned}$$

作用在第 i 个微元上的竖向地震力 q_{vi} 可表示为

$$q_{vi} = m_i(z) \alpha_v(z, t) \quad (7)$$

作用在加筋挡土墙上竖向总地震力为

$$\begin{aligned} Q_v &= \int_0^H q_{vi} dz = \int_0^H m_i(z) \alpha_v(z, t) dz \\ &= \int_0^H \frac{\gamma}{g} \frac{H-z}{\tan \alpha_i} \alpha_v \sin \omega \left(t - \frac{H-z}{V_p} \right) dz \\ &= \frac{\lambda \gamma k_v}{4\pi^2 \tan \alpha_i} [2\pi H \cos \omega \psi + \lambda (\sin \omega \psi - \sin \omega t)] \quad (8) \end{aligned}$$

式中， λ 为竖向传播的剪力波速波长， $\lambda = TV_s$ ； η 为基础波在竖向传播的波长， $\xi = t - \frac{H}{V_s}$ ； $\psi = \frac{H}{V_p}$ ，仅考

虑作用在微元体临界方向上的 q_{hi} 和 q_{vi} ，Ling 等^[4]对 Q_h 和 Q_v 取极限如下：

$$\lim_{V_s \rightarrow \infty} (Q_h)_{\max} = \frac{\gamma H^2 \alpha_h}{2g \tan \alpha} = \frac{\alpha_h}{g} W = k_h W \quad (9)$$

$$\lim_{V_p \rightarrow \infty} (Q_v)_{\max} = \frac{\gamma H^2 \alpha_v}{2g \tan \alpha} = \frac{\alpha_v}{g} W = k_v W \quad (10)$$

其中， $\alpha_h = k_h g$ ， $\alpha_v = k_v g$ 。

2.2 基本方程

第 i 个土条处于极限平衡状态时, 土条竖向受力平衡, $\sum F_y = 0$, 则有

$$F_{N,i+1} - F_i - W_i - Q_{v,i} + N_{t,i} \sin \alpha_i + N_{N,i} \cos \alpha_i = 0. \quad (11)$$

同理, 第 i 个土条水平方向受力平衡, $\sum F_x = 0$, 可得

$$\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n N_{t,i} \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^n N_{N,i} \sin \alpha_i - \sum_{i=1}^n Q_{h,i} = 0. \quad (12)$$

3 内部稳定性分析

3.1 筋带所受拉力

由滑动安全系数的定义知:

$$N_{t,i} = \frac{1}{F_s} (cl_i + N_{N,i} \tan \varphi), \quad (13)$$

式中, c 为填土的黏聚力, φ 为土的内摩擦角。

将式 (13) 代入式 (11) 可得

$$N_{N,i} = \frac{F_{N,i+1} + W_i + Q_{v,i} - F_{N,i} - \frac{\sin \alpha_i cl_i}{F_s}}{\frac{\tan \varphi}{F_s} \sin \alpha_i + \cos \alpha_i}. \quad (14)$$

将式 (13) 和式 (14) 代入式 (12) 可得

$$\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{F_s} (cl_i + N_{N,i} \tan \varphi) - \sum_{i=1}^n Q_{h,i} - \sum_{i=1}^n \frac{F_{N,i+1} + W_i + Q_{v,i} - F_{N,i} - \frac{\sin \alpha_i cl_i}{F_s}}{\frac{\tan \varphi}{F_s} \sin \alpha_i + \cos \alpha_i} \sin \alpha_i = 0. \quad (15)$$

由式 (15) 可得筋带的拉力为

$$\sum_{i=1}^n T_i = Q_h - \frac{cH \cos \alpha_i}{F_s \sin \alpha_i} - \frac{\left[\frac{\cos \alpha_i \tan \varphi}{F_s} - \sin \alpha_i \right] - \left[F_{N,0} + W + Q_v - \frac{cH}{F_s} \right]}{\frac{\sin \alpha_i \tan \varphi}{F_s} + \sin \alpha_i}, \quad (16)$$

式中, W 为滑动体 ABC 的质量, α_i 为破裂面切线方向与水平方向的夹角。

将挡土墙内部稳定计算所需筋带拉力总和 $\sum_{i=1}^n T_i$ 无量纲化参数为 K , K 的表达式为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{0.5\gamma H^2}, \quad (17)$$

式中, H 为挡墙的高度。

各层筋带的拉力可得

$$T_i = K\gamma h_i S_{y,i}, \quad (18)$$

式中, $S_{y,i}$ 为筋带节点垂直间距, h_i 为筋带到墙顶的距离。

3.2 筋带锚固长度

筋带所需锚固长度为

$$L_{ei} = \frac{T_i}{2\sigma_{vi} B_i f^* \tan \varphi}, \quad (19)$$

式中, σ_{vi} 为加筋体第 i 层筋带深度 h_i 处的竖向应力, B_i 为挡土墙单位宽度内第 i 层筋带的宽度, f^* 为筋土拉拔摩擦系数。

第 i 层筋带筋带的总长度为

$$L_i = L + L_{ei}, \quad (20)$$

式中, L 为滑动面到面板筋带长度, L_{ei} 为锚固长度。

3.3 筋带断面积

各层筋带断面面积为

$$A_i = \frac{T_i \times 10^3}{K^* [\sigma_L]}, \quad (21)$$

式中, A_i 为第 i 单元筋带断面面积, $[\sigma_L]$ 为筋带容许应力, K^* 为筋带容许应力提高系数。

4 最危险滑动面的确定

式 (16) 中筋带所受的拉力随着对数螺旋线破裂面与水平方向的夹角 α_i 的变化而变化, 当筋带所受最大拉力所对应的破裂面即为最危险滑动面, 此问题为线性规划最优解求解问题。笔者借助 MATLAB 中自带的遗传算法 (GA) 工具箱, 编写程序进行迭代求解可得筋带所受最大拉力和对应的最危险滑动面。

5 实例分析

5.1 工程概况

兰州某市政道路, 挡墙高度为 6.0 m, 选用金属条带, 筋带规格 5 cm × 1 cm, 摩擦系数 $f' = 0.35$, 筋带容许应力提高系数 1.5, 筋带抗拔稳定系数 1.2, 地震加速度峰值 0.2g; 土体内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 、黏聚力 $c = 18$ kPa、重度 $\gamma = 16$ kN/m³。

5.2 筋带布置

加筋挡土墙设计断面如图 3 所示, 筋带布置结果如表 1 所示。

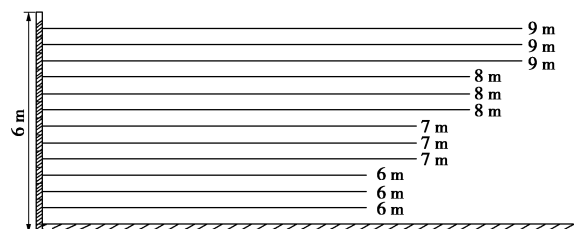


图 3 加筋挡土墙设计断面图

Fig. 3 Cross section design of reinforced soil wall

表 1 加筋挡土墙设计结果表
Table 1 Design results of reinforced soil wall

筋带 编号	水平间 距/m	垂直间 距/m	筋带规格 /(mm×mm)	筋带的 长度/m
1	0.5	0.5	50×10	9
2	0.5	0.5	50×10	9
3	0.5	0.5	50×10	9
4	0.5	0.5	50×10	8
5	0.5	0.5	50×10	8
6	0.5	0.5	50×10	8
7	0.5	0.5	50×10	7
8	0.5	0.5	50×10	7
9	0.5	0.5	50×10	7
10	0.5	0.5	50×10	6
11	0.5	0.5	50×10	6
12	0.5	0.5	50×10	6

5.3 理论计算

根据工程实例，利用自己所编的程序计算出筋带所受的最大拉力及最危险滑动面对应的 α_i ，筋带最大拉力为 $\sum_{i=1}^{12} T_i = 769.37$ ，利用式（17）可得 $K = 2.38$ ，然后利用式（18）计算可得各层筋带所受拉力如图 4 所示。

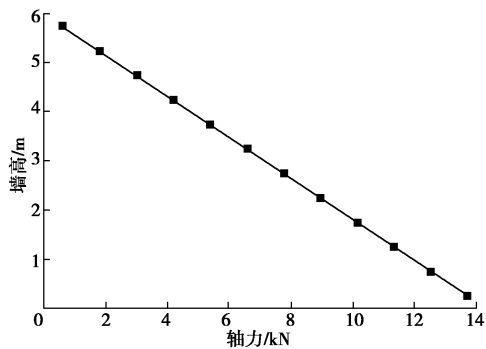


图 4 各层筋带所受的拉力

Fig. 4 Distribution of tension of bar strips

5.4 数值验证

为验证本文所提出筋带拉力计算方法的正确性，采用 ABAQUS 软件进行数值模拟。模型中土体采用三维实体 8 节点单元，筋带采用壳单元，地震波采用兰州波，筋带面板连接如图 5 所示，所建立的计算模型如图 6 所示，计算得各层筋带最大拉力如图 7 所示。比较图 4，7 筋带拉力计算结果，可得出用本文建立的筋带拉力计算方法所得结果和数值模拟结果比较接近，二者之间误差值如表 2。说明基于水平条分法建立的筋带拉力计算方法对地震作用下加筋挡土墙内部稳定性分析是可行的。



图 5 筋带面板连接示意图

Fig. 5 Connection of bar strip and concrete front-panel

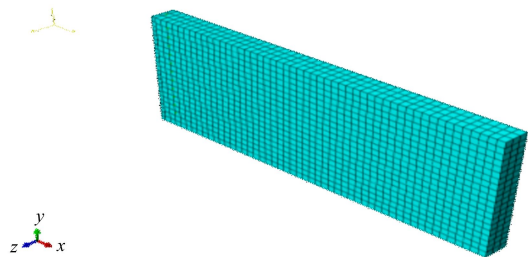


图 6 有限元整体计算模型

Fig. 6 Finite element model

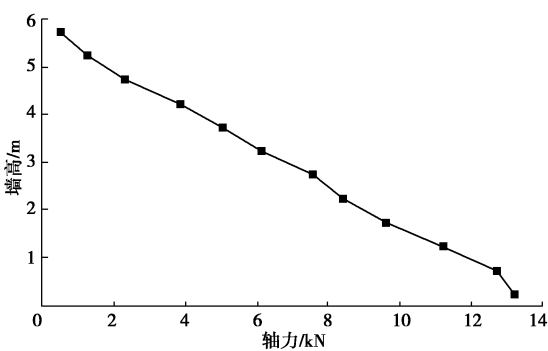


图 7 各层筋带最大拉力分布图

Fig. 7 Distribution of maximum tension of bar strips

表 2 理论计算和数值模拟筋带最大拉力的对比

Table 2 Comparison between theoretical and numerical maximum

tension values of bar strips					
筋带编 号	水平间距 /m	垂直间距 /m	理论计算 值	数值模 拟值	模拟理论误 差/%
1	0.5	0.5	0.595	0.573	4
2	0.5	0.5	1.785	1.698	5
3	0.5	0.5	2.975	2.262	4
4	0.5	0.5	4.165	3.978	4
5	0.5	0.5	5.335	5.004	6
6	0.5	0.5	6.545	6.289	4
7	0.5	0.5	7.735	7.569	2
8	0.5	0.5	8.925	8.589	4
9	0.5	0.5	10.115	9.592	5
10	0.5	0.5	11.305	11.205	1
11	0.5	0.5	12.495	12.689	2
12	0.5	0.5	13.685	13.208	3

6 结 论

通过地震作用下加筋挡土墙内部稳定性分析，得出以下结论：

(1) 基于水平条分法, 建立地震作用下加筋挡土墙筋带受力平衡方程; 并推导出筋带拉力计算公式和筋带长度所需锚固长度计算公式。

(2) 用 MATLAB 软件编写程序计算了某一加筋挡土墙的筋带拉力, 并用有限元软件 ABAQUS 对此结果进行了对比验证, 结果表明本文提出的筋带拉力计算方法适用于地震作用下加筋挡土墙内部稳定性分析。

参考文献:

- [1] 王 钊. 土工合成材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WANG Zhao. Synthetic geotechnical material[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [2] JTJ015—91 公路加筋土工程设计规范[S]. 1991. (JTJ015—91 Code for design of highway reinforced earth engineering[S]. 1991. (in Chinese))
- [3] OKABE S. General theory of earth pressure[J]. Journal of Japanese Society of Civil Engineers, 1926, **12**(1): 103 – 114.
- [4] LING H I, LESHCHINSKY D. Effects of vertical acceleration on seismic design of geosynthetic reinforced soil structures[J]. Géotechnique, 1998, **47**(3): 347 – 373.
- [5] SHAHGHOLI M, FAKHER A, JONES C J F P. Horizontal slice method of analysis[J]. Géotechnique, 2001, **51**(10): 881 – 885.
- [6] CHOUDHURY D, SINGH S. New approach for estimation of static and seismic active earth pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, **21**(4): 121 – 132.
- [7] ZENG X, STEEDMAN R S. On the behavior of quay walls in earthquakes[J]. Geotechnical, 1993, **43**(3): 103 – 112.
- [8] EROL GULER, ALI K. Investigation of dynamic behavior of geo-synthetic reinforced soil retaining structures under earthquake load[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, **7**(3): 737 – 777.
- [9] MAGDIL M, EI-EMEMAM B J. Experiment design instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response of shaking table[J]. Physical Modeling in Geotechnics, 2004, **4**(4): 13 – 32.
- [10] NOURI H, FAKHER A, JONES C J F P. Evaluating the effect of magnitude and amplification of pseudo static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium horizontal slices method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, **28**(3): 350 – 356.
- [11] 贾 亮, 朱彦鹏, 来春景. 地震作用下加筋挡土墙稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, **51**(4): 698 – 703. (JIA Liang, ZHU Yan-peng, LAI Chun-jing. Stability analysis of reinforced earth retaining wall under earthquake[J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2016, **51**(4): 698 – 703. (in Chinese))
- [12] 蒋 薇, 苏 谦, 张晓曦, 等. 地震作用下加筋土边坡滑裂面的确定方法[J]. 西南交通大学学报, 2015, **50**(1): 157 – 159. (JIANG Wei, SU Qian, ZHANG Xiao-yun, et al. Determination method of slip surface of reinforced soil slope subjected to seismic load[J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2015, **50**(1): 157 – 159. (in Chinese))
- [13] CHUNGSIK YOO, A M ASCE, et al. Case history of geosynthetic reinforced segmental retaining wall failure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(12): 1538 – 1548.
- [14] BATHURST R J, ALLEN T M, WALTERS D L. Reinforcement loads in geo-synthetic walls and the case for new working stress design method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, **23**(4): 287 – 322.
- [15] CHOUDHURY D, SINGH S. New approach for estimation of static and seismic active earth pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, **21**(4): 121 – 132.
- [16] 蒋建清, 杨果林. 加筋挡土墙地震稳定性分析的水平条分法[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(1): 36 – 40. (JIANG Jian-qing, YANG Guo-lin. Horizontal slice method for analyzing the stability of the reinforced retaining wall under seismic load[J]. China Railway Science, 2009, **30**(1): 36 – 40. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)