

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0334-06

地震条件下挡土墙主动土压力及其分布的新分析法

张国祥

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 采用旋转挡土墙计算模型的变换法, 将在地震和拟静力法条件下主动土压力的求解问题转化为在静力条件下主动土压力的求解问题。根据在静力条件下水平层分析法的主动土压力推导结果, 直接获得在地震条件下主动土压力强度分布、土压力合力及其作用点位置的表达式, 并运用图解法得到了临界破裂角的解析解。公式可考虑水平和垂直地震加速度、不同墙背倾角、墙背和坡面倾角与填料存在黏结力和外摩擦角、存在均布超载等诸多因素的影响, 公式可以适用于在常用边界和地震条件下黏性土的主动土压力计算。旋转地震角法是将在地震和拟静力法条件下挡土墙计算模型旋转为在静力条件下挡土墙计算模型, 但旋转挡土墙计算模型并不改变挡土墙和墙后填土的应力状态, 按在静力条件下挡土墙主动土压力求解方法求解在地震和拟静力法条件下主动土压力, 该方法大大简化了在地震和拟静力法条件下的主动土压力计算公式推导过程, 统一了在拟静力法条件下的地震土压力求解, 理论更加完善。

关 键 词: 地震动土压力; 黏性土; 水平层分析法; 土压力分布; 旋转地震角法

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

New analysis method of seismic active earth pressure and its distribution on a retaining wall

ZHANG Guo-xiang

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The seismic active earth pressure calculations problem with pseudo-static method is translated into non-seismic active earth pressure calculations problem in this paper using the transform method with rotating calculation model of retaining wall. Depend on the non-seismic active earth pressure formulations with differential layer method, the analytical formulas of resultant force of seismic earth pressure, application position of resultant force and distribution of seismic earth pressure with differential layer method are obtained directly, and the analytical solution of critical rupture angle by graphic method. The influencing factors including horizontal and vertical seismic accelerations, batter angle of wall back, cohesion and external friction angle between filler and back of retaining wall, equispaced overloading can be considered. The formulas can be used for seismic active earth pressure calculations of cohesive soil or non-cohesive soil with common border condition. The rotating seismic angle method in this paper is that the seismic active earth pressure calculation model with pseudo-static method is firstly rotated into static active earth pressure calculation model, and the stress states of retaining wall and soil behind retaining wall are not changed, and then the seismic active earth pressures with pseudo-static method are solved by the calculation methods of static active earth pressures. The deducing process of seismic active earth pressure formulations with pseudo-static method is simplified and unified greatly by using the new method. The seismic active earth pressure theory with pseudo-static method is perfected much more.

Key words: seismic earth pressure; cohesive soil; horizontal slices analysis method; earth pressure distribution; rotating seismic angle method

1 引 言

挡土墙土压力的计算一直是工程界的一大课题, 特别是地震条件下土压力计算问题, 国内外学者专家均做过大量的研究。地震土压力的计算方

法主要有 2 类^[1-2]: 一是考虑墙土相互作用和土体实际应力应变性质; 二是假设墙与墙后填土的相对位移较大, 土体处于极限平衡状态, 其典型代表为著名的 Mononobe-Okabe 理论。

Mononobe-Okabe 发展了 Coulomb 土压力理

收稿日期: 2012-11-25

作者简介: 张国祥, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土极限分析的教学与研究工作。E-mail: gxzh@mail.csu.edu.cn

论, 在推导时假定墙后填土为无黏性土, 但公式的适用范围有限, 因此 Mylonakis 等^[3]对其进行了修正和发展。取墙后土楔体进行整体受力平衡分析, 只能求解土压力合力而无法得到合力作用点位置和土压力强度分布情况, 因此, 对于无黏性土, Mononobe-Okabe 假设土压力强度为直线分布, 土压力合力作用点位置在距墙底 $1/3$ 墙高处。大量的试验研究成果^[4-8]表明, 地震土压力合力大小与 Mononobe-Okabe 公式计算结果非常接近, 但土压力强度分布通常是非线性的, 而且作用点位置要比线性分布假设得要高。

王渭漳^[9]以及其他学者用水平层分析法解决了在静力条件下的土压力强度分布和作用点位置问题。林宇亮等^[10]将水平层分析法扩展用于在地震条件下土压力强度分布和作用点位置的求解, 但只适用于水平填土面, 推导过程复杂。孙勇^[11]将水平层分析法扩展用于在地震条件下土压力强度分布和作用点位置的求解, 但在扩展应用中为简化计算附加了一些假定, 且推导过程复杂, 求解比较麻烦, 最危险破裂面需迭代求解。为此, 本文在已有研究成果的基础上, 采用旋转挡土墙计算模型的方法, 旋转角度正好为地震角, 将在地震条件下土压力的求解问题转化为在静力条件下土压力的求解问题。

本文采用旋转挡土墙计算模型的变换法, 根据在静力条件下水平层分析法的主动土压力结果^[9], 比较方便地获得在地震条件下主动和被动土压力强度分布、土压力合力及其作用点位置的公式。公式可以适用于目前所见的边界和地震条件下黏性土的主动土压力计算。简化了主动地震土压力问题, 统一了地震土压力的求解, 完善了地震土压力理论。

2 拟静力分析法

在地震荷载作用下挡土墙土压力计算时, 一般采用拟静力分析法进行分析。地震过程中作用在破坏土楔体中的水平方向和竖直方向体积力分别为 F_h 和 F_v , 如图 1 所示。

$$F_h = k_h \rho g \quad (1)$$

$$F_v = (1 - k_v) \rho g \quad (2)$$

式中: k_h 为水平地震系数; k_v 为竖直地震系数; ρ 为破坏土楔体的密度; g 为重力加速度。

地震过程中作用在破坏土楔体中的总体积力方向与竖直方向的夹角为 η , 即地震角为 η , 如图 1 所示, 满足:

$$\tan \eta = \frac{F_h}{F_v} = \frac{k_h \rho g}{(1 - k_v) \rho g} = \frac{k_h}{1 - k_v} \quad (3)$$

地震过程中作用在破坏土楔体中的总体积力为

$$F = \frac{(1 - k_v) \rho g}{\cos \eta} \quad (4)$$

根据拟静力法的特点, 计算时假设地震不影响土体的基本力学特性。

3 地震土压力理论导出

3.1 基本假定

建立如图 1 所示的地震条件下主动土压力计算模型, 在该模型中, 作如下假定:

(1) 密度为 ρ 的填料是单一的和各向同性的, 且存在黏聚力 c 和内摩擦角 φ 作用; (2) 破裂面 $\overline{BC}$ 为平面; (3) 三角形破裂楔体 ABC 为刚体并作为一个整体而移动, 即各处加速度值是相同的; (4) 墙摩擦角 δ 存在于墙与填料的接触面 $\overline{AB}$ 上; (5) 与填料表面 $\overline{AC}$ 平行的截面 $\overline{ed}$ 和 $\overline{fg}$ 上的合力 q 和 $q + dq$ 方向与竖直方向成一地震角 η ; 此两合力 q 和 $q + dq$ 由填土竖向重力和地震力产生; (6) 黏聚力 c 、 c' 分别沿破裂面 $\overline{BC}$ 和 $\overline{AB}$ 均匀分布。

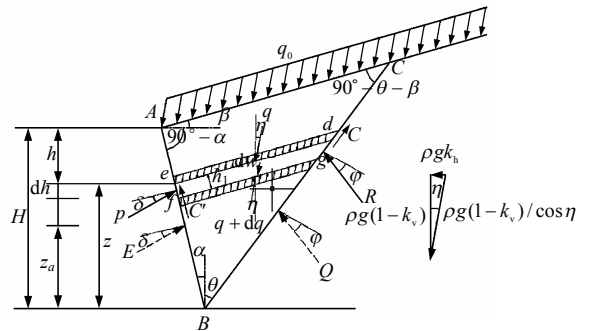


图 1 挡土墙计算模型

Fig.1 Calculation model of retaining wall

3.2 地震与非地震条件下土压力计算模型的转换

图 1 所示为地震条件下主动土压力计算模型, 在该模型中, 土的自重和地震力的合力方向、以及与填料表面 $\overline{AC}$ 平行的截面 $\overline{ed}$ 和 $\overline{fg}$ 上的合力 q 和 $q + dq$ 方向均与竖直方向成一地震角 η , 与非地震情况不一样。

将图中挡土墙逆时针转一地震角 η , 即变为如图 2 所示的挡土墙计算模型。在图中, 土的自重和地震力的合力方向、以及与填料表面 $\overline{AC}$ 平行的截面 $\overline{ed}$ 和 $\overline{fg}$ 上的合力 q 和 $q + dq$ 方向均为竖直方向, 土重度和地震力的合力 $\rho g (1 - k_v) / \cos \eta$ 以及填土表面超载 q_0 的方向均变为垂直。此时, 可套用非地震情况下的主动土压力计算公式 (2), 但挡土墙计算模型中相关的计算参数应用图 1 中的计算参数作

变量都是图1所示的变量,图2是用于说明变换关系的,因此,在使用土压力计算公式时,只需参考图1。

对于黏性填土,可能出现拉裂缝问题,根据土压力强度 $p=0$ 的条件可试算求得裂缝深度,然后将拉裂缝深度范围内的土重(包括地震力)按超载处理,有关论文已有相应的处理方法。

3.4 合力及其作用点高度

在图1中,土压力合力 E 为

$$E = \int_0^H \frac{p}{\cos \alpha} dh = \frac{n_1 H^2 (1 - k_v) \rho g \cos(\alpha - \beta)}{2(1-a) \cos^2 \alpha \cos \eta} + \frac{H}{(1-a) \cos \alpha} (q_0 n_1 + b n_1) + \frac{H}{\cos \alpha} (c_1 n_2 - c n_3) \quad (10)$$

如将式(10)中有关参数还原经化简,主动土压力合力可表达为

$$E = \frac{H^2 \rho g (1 - k_v) \cos(\alpha - \beta)}{2 \cos \eta \cos^2 \alpha} K_0 + \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \frac{(q_0 K_0 - cK - c'K')}{\cos \alpha} \quad (11)$$

其中,

$$K_0 = \frac{\sin(\theta + \alpha) \cos(\theta - \eta + \varphi)}{\cos(\theta + \beta) \sin(\theta + \varphi + \alpha + \delta)};$$

$$K = \frac{\cos \varphi \cos(\alpha - \beta)}{\cos(\theta + \beta) \sin(\theta + \varphi + \alpha + \delta)};$$

$$K' = \frac{\cos(\theta + \varphi + \alpha)}{\sin(\theta + \varphi + \alpha + \delta)}$$

在图1中,合力作用点高度 z_a 可由下式求得

$$z_a = \frac{\int_0^H \frac{pz}{\cos \alpha} dh}{\int_0^H \frac{p}{\cos \alpha} dh} = \frac{\frac{-m_1}{2-a} + \frac{m_2}{3} + \frac{m_3}{2}}{\frac{-m_1}{1-a} + \frac{m_2}{2} + m_3} H \quad (11)$$

即

$$z_a = \frac{3(b + 2q_0)n_1 + 3(2-a)(c_1 n_2 - c n_3) + 2HK_m}{2(b + q_0)n_1 + 2(1-a)(c_1 n_2 - c n_3) + HK_m} \cdot \frac{1-a}{2-a} \frac{H}{3} \quad (12)$$

其中, $K_m = n_1(1 - k_v) \rho g \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cos \eta}$

3.5 破裂面及其相应的总土压力

对于破裂面不受限制的填土情况,理论上,令 $dE/d\theta = 0$ 似可求得最破裂角及其相应的主动土压力,但运算过程中将遇到难于求解的超越方程,为此,利用图3作变换,将各变量代换成 $\overline{BN}$ 的关

系式,然后求解。

如图3所示,过 B 作 $\overline{BD}$ 与水平面呈 $\varphi - \eta$ 角,并交填料表面于 D ; 作 $\overline{BQ}$, 使之与 $\overline{BA}$ 呈 $(\varphi + \delta)$ 的夹角; 过 A 作 $\overline{AM}$ 平行于 $\overline{QB}$; 过 C 作 $\overline{CN}$ 平行于 $\overline{QB}$; 作 $\overline{BT}$, 使之与水平线呈 η 的夹角; 过 C 、 N 分别作 $\overline{BT}$ 线的垂线交于 R 、 S 。

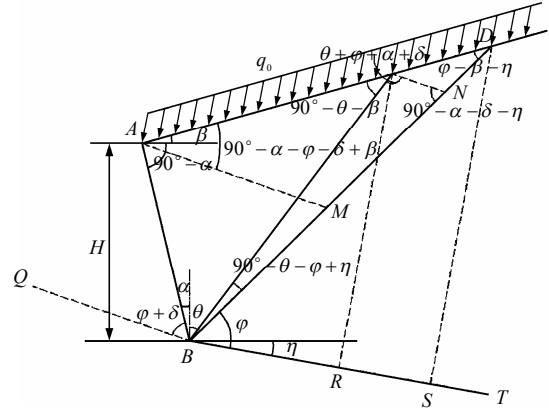


图3 主动土压力临界破裂角的图解法
Fig.3 Graphic method for critical rupture angle of active earth pressure

式(11)用 $\overline{BN}$ 可改写为

$$E = I_3 - I_2 \frac{1}{\overline{BN}} - I_1 \overline{BN} \quad (13)$$

其中,

$$I_1 = \frac{\cos(\alpha + \eta + \delta)}{\cos^2(\varphi + \alpha + \delta - \beta)} \left[\frac{\rho g (1 - k_v) H \cos(\alpha - \beta)}{2 \cos \eta \cos \alpha} \cdot \sin(\varphi - \beta - \eta) + q_0 \sin(\varphi - \beta - \eta) + c \cos \varphi \right];$$

$$I_2 = \frac{H^2 \cos(\alpha - \beta)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta + \eta) \cos^2(\varphi + \alpha + \delta - \beta)} \cdot \left[\frac{\rho g (1 - k_v) H \cos(\alpha - \beta)}{2 \cos \eta \cos \alpha} \sin(\varphi + \delta) \cdot \cos(\alpha + \delta + \eta) + q_0 \sin(\varphi + \delta) \cos(\alpha + \eta + \delta) + c \cos \varphi \cos(\alpha - \beta) + c' \cos \delta \cos(\varphi + \alpha + \delta - \beta) \right];$$

$$I_3 = \frac{H}{\cos \alpha \cos^2(\varphi + \alpha + \delta - \beta)} \left\{ \frac{\rho g (1 - k_v) H}{2 \cos \eta} \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} + q_0 \left[\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \eta) + \cos(\alpha + \eta + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] + 2c \cos \varphi \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \sin(\varphi + \alpha + \delta - \beta) + c' \sin(\varphi + \alpha - \beta) \cos(\varphi + \alpha + \delta - \beta) \right\}$$

对式 (13) 求极值, 可得

$$E = I_3 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (14)$$

$$\overline{BN} = \sqrt{I_2/I_1} \quad (15)$$

最不利破裂角则由 $\tan(\theta_a - \eta) = \frac{\overline{BR}}{CR}$ 得到:

$$\theta_a = \tan^{-1} \left[\frac{\overline{BN} \cos(\alpha + \eta + \delta) \cos(\alpha + \eta) \cos(\beta + \eta) - H \frac{\cos(\alpha + \eta) \sin(\varphi + \alpha + \eta + \delta) \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \overline{BN} \cos(\alpha + \eta + \delta) \cos(\alpha + \eta)} \cdot \frac{\sin(\beta + \eta) + H \frac{\cos(\alpha + \eta)}{\cos \alpha}}{\cos(\varphi + \alpha + \eta + \delta) \cos(\alpha - \beta)} \right] + \eta \quad (16)$$

3.6 用库仑主动土压力校核

在静力作用下无黏性土的库仑主动土压力为

$$E_a = \frac{\rho g}{2} H^2 K_a \quad (17)$$

其中,

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta) \left[1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sqrt{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2}$$

按本文所述方法进行变换得在地震力作用下无黏性土的库仑主动土压力为

$$E_a = \frac{\rho g(1 - k_v)}{2 \cos \eta} H^2 K_a \quad (18)$$

其中

$$K_a = \left[\cos^2(\varphi - \alpha - \eta) \right] / \left\{ \cos^2 \alpha \cos(\alpha + \eta + \delta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \eta)}{\sqrt{\cos(\alpha + \eta + \delta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2 \right\}$$

在静力作用下无黏性土的库仑主动土压力中恰好可以作如下变换:

$$\varphi \rightarrow \varphi - \eta, \quad \delta \rightarrow \delta - \eta, \quad \rho g(1 - k_v) \rightarrow \frac{\rho g(1 - k_v)}{\cos \eta}$$

同样可得在地震力作用下无黏性土的库仑主动土压力式 (18)。这就是过去求地震力作用下无黏性土库仑主动土压力的变换法, 对于无黏性土以往的方法获得正确结果只是巧合。但不适应黏性土, 对于黏性土, 要用本文的方法进行变换才行。

3.7 计算步骤

(1) 给出原始数据。包括挡土墙高 H 、填料密

度 ρ 、水平地震系数 k_h 、竖向地震系数 k_v 、填料内摩擦角 φ 、填料黏聚力 c 、(当 c 值较大时, 应考虑裂缝开展深度, 可将开裂部分土体作为均布超载处理)、墙背仰角 α (对于折线墙背或填土分层的情况, 应在求出可能的破裂角 θ 后, 再分段进行计算)、墙背摩擦角 δ 、填料表面倾角 β 、填料与墙背的凝聚力 c' 、填料表面均布超载强度 q_0 等。如填土范围有限, 尚需给出填土限定角 θ_0 及相应的 c 、 φ (一般情况下, 作用于填土限定面上的 c 、 φ 值较填土内部低)。

(2) 确定最不利破裂角。根据原始数据依次计算确定 I_1 、 I_2 、 I_3 、 $\overline{BN}$ 、 θ_a 、 θ (用式 (16) 算得 θ_a 后与 θ_0 进行比较, 如 $\theta_a < \theta_0$, 则取 $\theta = \theta_0$, 否则取 $\theta = \theta_a$)、 n_1 (若 $n_1 < 0$, 则应校验第 2 破裂面及有关原始数据的取值是否合理)、 n_2 、 n_3 、 m_1 、 m_2 、 m_3 。

(3) 计算土压力。当 $\theta = \theta_0$ 时, 用式 (10)、(11) 计算土压力合力大小 E (或 E_a); 当 $\theta \neq \theta_0$ 时, 用式 (14) 或 (10) 或 (11) 计算土压力合力大小 E (或 E_a); 利用式 (5) 和 (12) 分别计算主动土压力的分布强度 p 及其作用点高度 z_a 。

4 结 论

本文采用旋转挡土墙计算模型的变换法和根据在静力条件下水平层分析法的主动土压力结果^[9], 直接得到了地震条件下土压力强度沿墙背非线性分布解答, 并给出了土压力合力及其作用点位置、临界破裂角的解析解。公式考虑了水平和垂直地震加速度的影响, 适用于黏性土、无黏性土、不同墙背倾角、墙背与填料存在黏结力和外摩擦角、存在均布超载等复杂条件下的主动土压力计算。公式在相应简化假设条件下与 Mononobe-Okabe 公式、Coulomb 和 Rankine 主动土压力公式完全一致, 是对 Mononobe-Okabe 和 Coulomb 土压力公式的发展。

本文方法将在地震条件下主动土压力的求解问题转化为在静力条件下主动土压力的求解问题, 大大简化了在地震条件下的主动土压力计算公式推导过程, 统一了地震土压力的求解, 理论更加完善。本文成果便于工程技术人员掌握, 易于在工程设计和应用中推广。

参 考 文 献

- [1] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 中国建材工业出版社, 2005.