

文章编号: 1000-7598-(2006) 04-0566-05

有地下水时刚性挡土墙的动主动土压力

刘忠玉, 闫富有

(郑州大学 土木工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 基于 Mononobe-Okabe 假定, 在合理考虑土体孔隙中受限水含量的基础上, 利用水平层分析法推导了填土中有地下水时刚性挡土墙平移模式下的动主动土压力强度的一阶微分方程, 并求得非线性分布解; 探讨了地下水位、受限水含量、填土的内摩擦角、墙背的摩擦角和地震系数等参数对土压力强度分布、合力作用点高度以及倾覆力矩的影响。所提出的方法可考虑填土的孔隙率、渗透性和地震动周期的影响。

关 键 词: 刚性挡土墙; 地下水; 地震系数; 动主动土压力

中图分类号: TU 476.4

文献标识码: A

Dynamic active earth pressure on rigid retaining walls with submerged soils

LIU Zhong-yu, YAN Fu-you

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on Mononobe-Okabe's postulation and the reasonable consideration for the restricted pore water, a first-order differential equation of the dynamic active earth pressure on rigid retaining walls with submerged backfills in the translational movement mode under earthquake loads is set up by using the method of level-layer analysis. And the theoretical answers to the nonlinear distribution of the dynamic active earth pressures are obtained. The analytical results indicate that some parameters such as the groundwater level, the content of restricted pore water, the internal friction angle of backfills, the angle of wall friction and the earthquake coefficient have influence on the distribution of the dynamic earth pressure, the application point of the resultant earth pressure and the overturning moment. The present procedure incorporates the effect of the porosity and the permeability of backfills and the period of ground vibration.

Key words: rigid retaining wall; groundwater; earthquake coefficient; dynamic active earth pressure

1 引 言

作为计算地震力作用下挡土墙上极限土压力的常用方法之一, Mononobe-Okabe 的拟静力法是静力条件下 Coulomb 土压力理论的推广。该法假定墙后填土均匀, 滑裂面为通过墙踵的平面, 而且地震力以惯性力的形式作用在滑楔的形心上。通过考虑作用于滑楔上的力平衡得到了动土压力的合力, 并认为动土压力呈线性分布, 且当墙后填土是无黏性土时合力作用点在距墙底 $1/3$ 墙高处。模型试验证明了这样计算出来的合力大小是合理的, 但动土压力的分布形式和合力作用点与实际出入很大^[1~4], 其原因主要是由于该法仅考虑了力的平衡, 因而据此是不能确定土压力的分布形式和合力作用点位置

的^[2], 因此有学者根据实验或理论分析结果, 从实用出发建议了合力作用点的位置^[1~4]。文[5]中的王云球法和文[6]将计算静力条件下极限土压力的水平层分析法推广至地震荷载作用下的刚性挡土墙, 得出了与 Mononobe-Okabe 法相同的合力公式以及非线性分布形式的动土压力。但上述文献都没有考虑地下水的影响。

当墙后填土中有地下水时, 文[7]首先将地震荷载作用下孔隙中的水分分为两类: 不受土颗粒约束并可以产生动水压力的自由水(free water)以及因受土颗粒约束而和土颗粒一起运动的受限水(restricted water), 然后根据已有的试验通过修正 Westergaard 解答和 Matsuo-Ohara 公式来计算动水压力, 并通过引入广义地震角修正了 Mononobe-Okabe 理论。另

收稿日期: 2005-01-26

修改稿收到日期: 2005-06-27

基金项目: 河南省高校青年骨干教师资助计划项目; 河南省教育厅科技攻关项目(No. 2004601068)。

作者简介: 刘忠玉, 1968 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学方面的教学和科研工作。E-mail: zhyliu@zzu.edu.cn

外,文[8]讨论了墙后填土为不透水和透水性极强的情况,可视为文[7]的特例。但它们仅能用于地下水与填土面平齐的情况,不能得到合力作用点的位置,也不能解释土压力分布的非线性。

本文拟在 Mononobe-Okabe 和文[7]假定的基础上,引入水平层分析法来计算墙后地下水位为任意位置时的动土压力。考虑到实际工程中刚性挡土墙的一般不高,暂忽略土体对地震的放大效应,即认为地震系数沿高度不变,同时鉴于问题的复杂性,仅讨论墙体平移时的主动土压力。

2 动水土压力计算

假定刚性墙背竖直,墙高为 h ,墙后无黏性土填土面水平,地下水位距离墙底为 h_w (图1)。土粒相对密度为 d_s ,孔隙比为 e ,地下水位以上土的重度为 γ ,内摩擦角为 φ ,墙背与填土间的内摩擦角为 δ ,地面作用均布超载为 q_0 ,水平向和竖向地震系数分别为 k_h 和 k_v 。地震时作用在墙背上的总侧压力 E 可分为三部分:动主动土压力 E_{aE} 、动水压力 P_{wE} 和静水压力 P_{ws} ,其中 P_{ws} 作用在距墙底 $h_w/3$ 处,其大小为

$$P_{ws} = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2 \quad (1)$$

式中 γ_w 为水的重度。

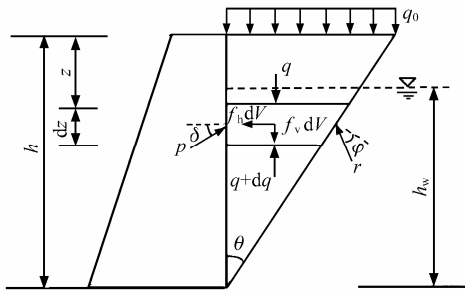


图1 分析模型

Fig.1 Scheme adopted for a retaining wall

对于动水压力 P_{wE} ,文[8]考虑了两种极限情况:墙后为不透水填土时, P_{wE} 为零;墙后为强透水性填土时, P_{wE} 可按 Westergaard 公式求解,即

$$P_{wE} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w h_w^2 \quad (2)$$

其作用点在距墙底 $0.4h_w$ 处。一般情况下,考虑到部分孔隙水受到土颗粒的限制而随其一起移动为受限水,不会产生动水压力,只有不受土颗粒约束的

自由水才可以产生动水压力^[7],因此式(2)的右边应乘以修正系数 $(1-m)$,其中 m 为孔隙中受限水的体积含量,可按修正 Matsuo-Ohara 公式计算^[7],即

$$m = 0.5 + 0.53 \tanh \left(\log \frac{2\pi n \gamma_w h_w^2}{7E_w K T} \right) \quad (3)$$

式中 n 为土体孔隙率; K 为渗透系数; T 为地震周期; E_w 为水的压缩模量。

不计毛细水影响,在地下水位以上作用在填土上的水平向和竖向惯性体积力分别为

$$f_H = k_h \gamma; f_V = (1 - k_v) \gamma \quad (4)$$

在地下水位以下,因为水平地震加速度同时作用在土颗粒和受限水上,所以水平惯性体积力为^[7]

$$f_H = k_h \frac{d_s + me}{1 + e} \gamma_w \quad (5)$$

而竖向惯性体积力则应扣除作用在土颗粒和受限水上的浮力,即

$$f_V = (1 - k_v) \gamma' \quad (6)$$

式中 γ' 为墙后填土的有效重度。

为了求出动主动土压力 E_{aE} ,假定滑裂面为通过墙踵的平面,且与墙背夹角为 θ 。考虑极限状态下滑动楔体距填土面为 z ,厚度为 dz 的水平微元块的平衡,墙体平移时该微元块所受到的作用力如图1所示:顶面分布的竖向压力为 q ,底面分布的竖向反力为 $q + dq$,挡土墙背的分布反力为 p ,滑裂面以下土体的分布反力为 r 以及水平和竖向惯性体积力的合力为 $f_H dV$, $f_V dV$ 。其中微元块的体积为

$$dV = (h - z) \tan \theta dz \quad (7)$$

考虑该微元块力和力矩的平衡可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{rdz}{\cos \theta} \cos(\theta + \varphi) &= p \cos \delta dz - f_H dV; \\ p \sin \delta dz + \frac{rdz}{\cos \theta} \sin(\theta + \varphi) - f_V dV + \\ &\quad (h - z) \tan \theta dq - q \tan \theta dz = 0; \\ (h - z) \tan \theta dq - f_V dV + 2p \sin \delta dz &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

消去式中 r , 即

$$\left. \begin{aligned} p &= Aq + Bf_H(h - z); \\ \frac{dq}{dz} - \frac{aq}{h - z} &= b \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\tan \theta \cos(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi - \delta)}; B = \frac{\tan \theta \sin(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi - \delta)}; \\ a &= \frac{-2 \cos(\theta + \varphi) \sin \delta}{\sin(\theta + \varphi - \delta)}; b = f_v - 2f_H \frac{\sin(\theta + \varphi) \sin \delta}{\sin(\theta + \varphi - \delta)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

解上述微分方程, 并考虑到边界条件 $z=0$ 时, $q=q_0$, 可得在地下水位以上

$$q = \frac{bh^{1+a}}{(1+a)(h-z)^a} - \frac{b(h-z)}{1+a} + \frac{q_0 h^a}{(h-z)^a} \quad (11)$$

地下水位处 q 是连续的, 记为 q_1 , 则地下水位以下

$$q = \frac{bh_w^{1+a}}{(1+a)(h-z)^a} - \frac{b(h-z)}{1+a} + \frac{q_1 h_w^a}{(h-z)^a} \quad (12)$$

所以土压力在地下水位以上及以下可分别为

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{Abh^{1+a}}{(1+a)(h-z)^a} - \frac{Ab(h-z)}{1+a} + \frac{Aq_0 h^a}{(h-z)^a} + Bk_h \gamma(h-z); \\ p_2 &= \frac{Abh_w^{1+a}}{(1+a)(h-z)^a} - \frac{Ab(h-z)}{1+a} + \frac{Aq_1 h_w^a}{(h-z)^a} + Bk_h \frac{d_s + me}{1+e} \gamma_w(h-z) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

对式 (13) 关于 z 从 0 到 h 积分可得作用在墙背上的动土压力合力:

$$E_E = E_1 + E_2 \quad (14)$$

式中 E_1 和 E_2 分别为地下水位以上和以下的土压力合力, 即

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \int_0^{h-h_w} p_1 dz = \frac{Ab(h^2 - h^{1+a} h_w^{1-a})}{1-a^2} - \frac{Ab(h^2 - h_w^2)}{2(1+a)} + \frac{Aq_0(h - h^a h_w^{1-a})}{1-a} + \frac{1}{2} Bk_h \gamma(h^2 - h_w^2); \\ E_2 &= \int_{h-h_w}^h p_2 dz = \frac{Abh_w^2}{1-a^2} - \frac{Abh_w^2}{2(1+a)} + \frac{Aq_1 h_w}{1-a} + \frac{1}{2} Bk_h \frac{d_s + me}{1+e} \gamma_w h_w^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

对式 (14) 关于 θ 求导, 并令 $\frac{\partial E_E}{\partial \theta} = 0$ 可得使该式取最大值时的破裂角 θ_{cr} , 将它代入该式即为动主动土压力 E_{aE} 。特别地, 当 $h_w=0$, $q_0=0$ 时, 令

$\tan \eta = \frac{k_h}{1-k_v}$, 可得破裂角 θ_{cr} 和动主动土压力 E_{aE} :

$$\theta_{cr} = \frac{\pi}{2} + \eta - \arctan \left[\frac{s \sin \eta + \cos(\eta + \varphi + \delta)}{s \cos \eta - \sin(\eta + \varphi + \delta)} \right] \quad (16)$$

$$E_{aE} = \frac{1}{2} (1-k_v) \gamma h^2 K_{aE} \quad (17)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} s &= \sqrt{\frac{\cos(\delta + \eta) \sin(\varphi + \delta)}{\sin(\varphi - \eta)}}; \\ K_{aE} &= \frac{\cos^2(\varphi - \eta)}{\cos \eta \cos(\delta + \eta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \eta)}{\cos(\delta + \eta)}} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

很明显, 式 (17) 和 Mononobe-Okabe 公式完全相同。同样, 当 $h_w=h$ 和 $q_0=0$ 时, 也可得到与文[7]一样的动主动土压力合力公式。最后, 土压力合力作用点的高度可按式计算:

$$y = \frac{\int_0^{h-h_w} p_1(h-z) dz + \int_{h-h_w}^h p_2(h-z) dz}{E_{aE}} \quad (19)$$

3 参数分析

3.1 动主动土压力的非线性分布

式 (13) 表明, 只要 $a \neq 0$ (或 $\delta \neq 0$), 动土压力强度 p 的分布形式就不是线性的, 且地震系数对此有很大影响。图 2 为某无地面超载的挡土墙 ($\varphi=30^\circ$, $\delta=\varphi/2$, $k_v=0$, $k_h=0.1$ 和 0.15), 墙后填土中无地下水 ($h_w=0$) 和地下水位与填土面平齐 ($h_w=h$) 两种情况下的计算结果。可以看出, p 的最大值的位置随水平地震系数 k_h 的增大而向墙顶移动, 同时靠近墙下部的局部范围内 p 却有所减小。可以推断, 当水平地震系数增大到一定程度, 按式 (13) 计算的 p 在墙下部局部范围内可能出现负值, 即可能出现墙与填土分离的现象, 而实际上对于无黏性填土这是不可能的。按式 (16) 计算对应的破裂角就会发现, 出现这种现象时均有 $\theta_{cr} > 90^\circ - \varphi$ 。这意味着此时墙背不再是滑裂面, 在填土中将会出现第二滑裂面。因此, 本文公式的适用范围应限制在 $\theta_{cr} \leq 90^\circ - \varphi$ 。实际上 Mononobe-Okabe 公式也应该有此限制。

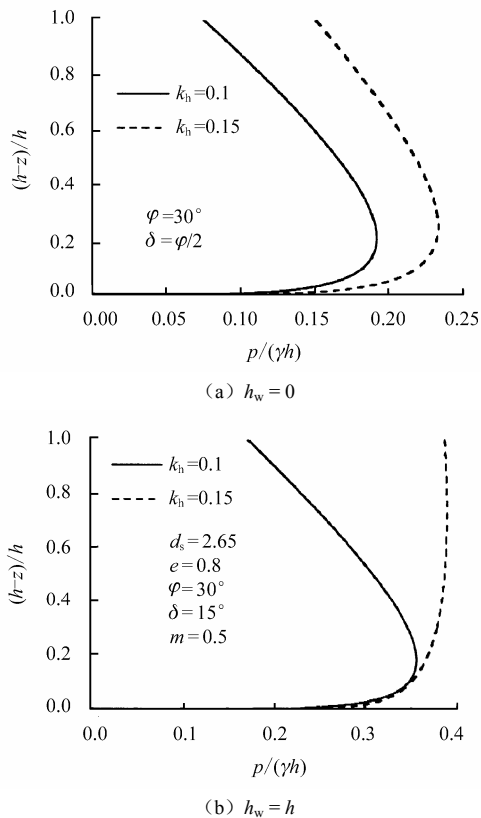


图2 动土压力强度分布

Fig.2 Distribution of dynamic active earth pressure

3.2 动主动土压力合力作用点的位置

以某无地面超载的挡土墙为例,探讨填土内摩擦角 φ 、墙背摩擦角 δ 以及水平地震系数 k_h 对动主动土压力合力作用点高度 y 的影响。考虑填土中无地下水($h_w=0$)和地下水位与填土面平齐($h_w=h$)两种情况的计算结果如图3所示。可以看出, y 随 k_h 的增大而增大,对于同一 φ , y 随 δ 的增大而增大;对于同一 δ ,当 k_h 较小时, y 随 φ 的增大而增大;但当 k_h 较大时, y 反而随 φ 的增大而减小。而且,对于任意的 φ 和 δ ,只要考虑地震力, y 值一般都在墙高的 $1/3 \sim 2/3$ 之间,这与大量的模型试验结果相符^[1~4]。另外,对比图3(a)与图3(b)可以发现,在相同条件下墙后有地下水时的动主动土压力合力作用点明显高于无地下水的情况。因此,若按Mononobe-Okabe理论,认为无黏性填土时合力作用点距墙底的距离等于墙高的 $1/3$ 进行设计,对于平移模式下的挡土墙,不论是否考虑地下水的影响,其抗倾覆稳定性都是偏于危险的。

3.3 受限水含量的影响

从前节推导过程可以看出,受限水含量 m 对土压力影响很大,是一个很重要的参数,它综合了孔隙率、渗透系数、地震动周期以及地下水位的影响。以某挡土墙为例,假设 $h=10\text{ m}$, $d_s=2.65$, $e=0.8$,

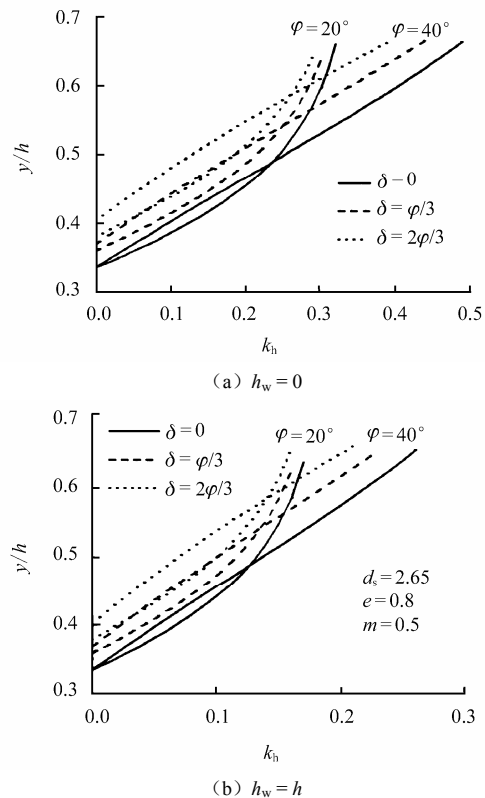


图3 动主动土压力合力作用点的高度

Fig.3 Height of application points of the resultant earth pressure

$\varphi=30^\circ$, $\delta=\varphi/2$, 地下水位与填土面平齐,不计地面超载和竖向地震系数,此时作用在墙背上的总侧压力 E 和倾覆力矩 M 与 m 的关系如图4所示。该图表明,侧压力总是受限水含量的减函数,但倾覆力矩在不同的地震系数时却表现出不同的规律:当水平地震系数较小($k_h=0.1$)时, M 随 m 的增加而减小;而当水平地震系数较大($k_h=0.18$)时,却正好相反。这说明,在较小的水平地震系数时受限水越多,越有利于挡土墙的抗滑移和抗倾覆稳定性;而在较大的水平地震系数时,受限水越多,越不利于挡土墙的抗倾覆稳定性。所以在常规挡土墙设计中忽略受限水含量的影响是不恰当的。

3.4 地下水位的影响

假定某挡土墙高 $h=10\text{ m}$, $d_s=2.65$, $e=0.8$, $\varphi=30^\circ$, $\delta=\varphi/2$, $m=0.5$, $k_h=0.2$, $k_v=0$,地下水位变化幅度为 $0 \sim h$,不计地面超载。按本文方法计算的总侧压力 E ,倾覆力矩 M 与 h_w 的关系如图5所示。很明显,尽管动土压力 E_{ae} 随着地下水位的升高而略有减小,但由于静水压力和动水压力随着地下水位的升高而增大,所以总侧压力 E 和倾覆力矩 M 都随之增大。这说明较高的地下水位对挡土墙的抗倾覆和抗滑移稳定性都是很不利。

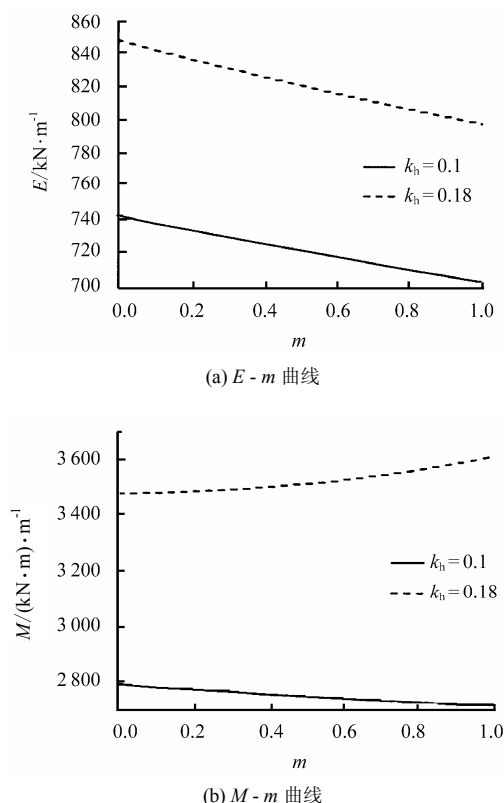


图4 受限水含量对侧压力和倾覆力矩的影响

Fig.4 Effect of restricted water content on lateral pressure and overturning moment

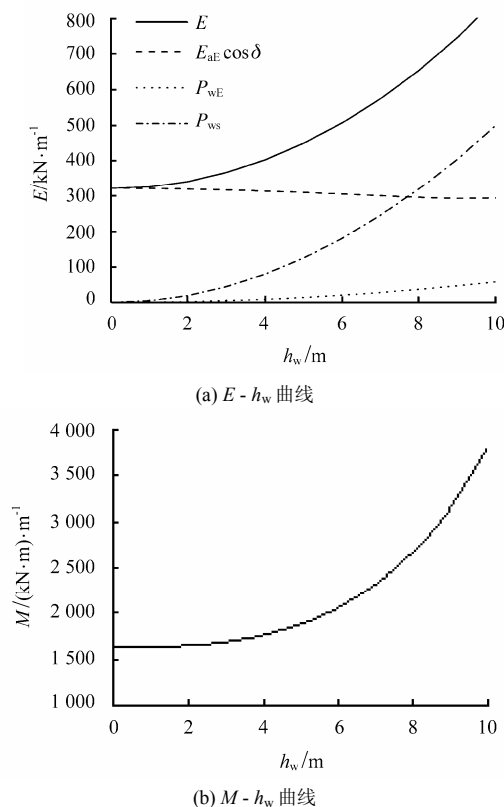


图5 地下水位对侧压力和倾覆力矩的影响

Fig.5 Effect of groundwater table on lateral pressure and overturning moment

4 结 论

(1) 以 Mononobe-Okabe 假定为前提, 考虑受限水含量的影响, 利用文[7]修正的 Westergaard 公式和 Matsuo-Ohara 公式来计算动水压力, 利用水平层分析法推导了地下水影响下刚性挡土墙平移模式下的地震主动土压力公式。所得合力在不计地下水影响时, 与 Mononobe-Okabe 公式完全一样, 在地下水位和填土面平时, 与文[7]修正的 Mononobe-Okabe 公式也完全相同, 但土压力强度沿墙高一般呈非线性分布, 并显著地受地震系数和地下水的影响。另外, 本文和 Mononobe-Okabe 公式的适用范围应限制在 $\theta_{\alpha} \leq 90^\circ - \varphi$ 。

(2) 动主动土压力合力作用点的位置明显受到填土性质、墙背的摩擦性质、地震系数以及地下水的影响, 一般都在墙高的 1/3~2/3 之间, 而且墙后有地下水时明显高于无地下水的情况。

(3) 较高的地下水位对挡土墙的抗倾覆和抗滑移稳定性都是不利的。

(4) 受限水含量 m 综合了孔隙率、渗透系数、地震周期以及地下水位等参数对动水压力的贡献, 对总侧压力和倾覆力矩有着较大的影响, 需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Ishibashi I, Fang YS. Dynamic earth pressures with different wall movement modes[J]. *Soils and Foundations*, 1987, 27(4): 11-22.
- [2] Richards R, Huang C, and Fishman KL. Seismic earth pressure on retaining structures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(9): 771-778.
- [3] Wu GX, Fin WDL. Seismic lateral pressures for design of rigid walls[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36: 509-522.
- [4] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] 刘惠珊, 张在明. 地震区的场地与地基基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [6] 刘忠玉, 杨会朋, 何盛东. 刚性挡土墙地震主动土压力的非线性分布[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2004, 25(2): 36-38.
- LIU Zhong-yu, YANG Hui-peng, HE Sheng-dong. Nonlinear distribution of seismic active earth pressure on rigid retaining walls[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2004, 25(2): 36-38.
- [7] Matsuzawa H, Ishibashi I, Kawamura M. Dynamic soil and water pressures of submerged soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1985, 111(10): 1161-1176.
- [8] Wu Yingwei, Prakash S. Effect of submergence on seismic displacements of rigid retaining walls[A]. *Earthquake Geotechnical Engineering*[C]. Pinto P S. Rotterdam: Balkema, 1999. 277-283.