

地震与海啸作用下重力式岸墙旋转位移拟静力分析^①

林永亮¹, 李新星²

(1.上海大学土木工程系,上海 200072; 2.上海隧道工程轨道交通设计研究院,上海 200070)

摘要:被动状态下位移预测是挡墙地震工程设计中的关键,而岸墙后回填土的孔隙水压力对墙体运动具有一定影响。采用拟静力法计算墙后部分浸水土体的被动动土压力,根据静力水压力理论近似计算土颗粒里的动水压力;同时考虑地震荷载和海啸力的作用,根据力矩极限平衡确定旋转门槛加速度系数,采用旋转块体方法计算岸墙被动旋转运动下的地震位移。探讨回填砂土内摩擦角、墙体与土间摩擦角、地震加速度系数、回填土地下水位、海啸波浪高度等参数对旋转位移的影响。

关键词:海啸力;挡墙;旋转滑块;动水压力;位移

中图分类号:TU435

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)03-0840-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0840

Quasi-static Analysis of Rotational Displacement in a Gravity Retaining Wall During Earthquakes and Tsunamis

LIN Yong-liang¹, LI Xin-xing²

(1.Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2.Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design & Research Institute, Shanghai 200070, China)

Abstract: The prediction of seismic rotational displacements in retaining walls under passive conditions is an important design aspect in earthquake-prone regions. In this study, a rotating block method was developed to calculate the rotational displacements of quay walls based on rigid foundations under seismic loading, and tsunami forces for the passive earth pressure condition. The proposed method considered the combined effects of seismic forces, hydrostatic, and hydrodynamic pressures and tsunami forces acting on the quay wall. The tsunami force was considered to be an additional force acting on the upstream face of the wall, and was calculated using a simple formula. Variations of different parameters involved in the analysis suggested the sensitivity of the rotational displacements against the rotational slider of failure of the wall, which will provide a better guideline for design.

Key words: tsunami force; retaining wall; rotational slider; hydrodynamic pressure; displacement

0 引言

地震及海啸会对滨水区的挡墙造成很大影响,因此如何评价岸边挡墙的抗震稳定性至关重要。目前设计中主要有安全系数法和位移控制两种方法。Wu 等^[1]基于修正的剪切梁模型建立了刚性挡墙的

近似抗震计算方法;Caltabiano 等^[2]采用 Mononobe-Okabe 法计算动土压力,分析了超载对挡墙稳定性的影响。针对被动挡墙的抗震设计,已取得了许多的成果^[3-5],但仅适合墙后填土为干土的情况,未考虑静、动水压力的影响。Matsuzawa 等^[6]首次提

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51209132);上海大学创新基金项目(sdcx2012044)

作者简介:林永亮(1977—),男,山东栖霞人,讲师,从事土动力与土工加筋技术方面的研究。E-mail:lin_yiliang@163.com。

出将动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以及因受土颗粒约束而和土颗粒一起运动的受限水,根据已有的试验通过修正分别计算动土压力和动水压力。随之,许多学者针对动水压力的影响开展了系列研究^[7-9]。

众多震害实例表明,地震时岸边挡墙的位移是影响结构安全的重要因素。Zeng^[10]和 Choudhury^[11]等学者采用旋转块体法对挡土墙的旋转位移作了一些研究。Zeng^[12]对墙后回填土分别为干燥和饱和状态时进行了离心机实验,测试结果表明了孔隙水对重力码头岸墙侧向变形影响较大。刘汉龙等^[13]引入液化度概念,修正动主动土压力和动水压力的计算,建立了旋转与滑动耦合下挡墙的残余角位移算法。但这些研究却未考虑地震引起海啸的影响。为此,本文综合考虑孔隙水压力系数、静动水压力、海啸力的作用,针对被动状态,采用拟静力法建立岸边挡墙的旋转位移算法,并对几组重要参数的影响进行深入的分析。

1 计算模型

在地震与海啸作用下重力式岸墙向墙体下游运动,产生一定的残余变形。在此被动状态下作用于岸墙的力包括:地震引起的被动土压力、作用于岸墙的地震惯性力、静水压力、墙后土体内的动水压力以及海啸引起的波浪力。岸墙的受力模型如图 1 所示。为便于计算,采用如下的基本假定进行计算:

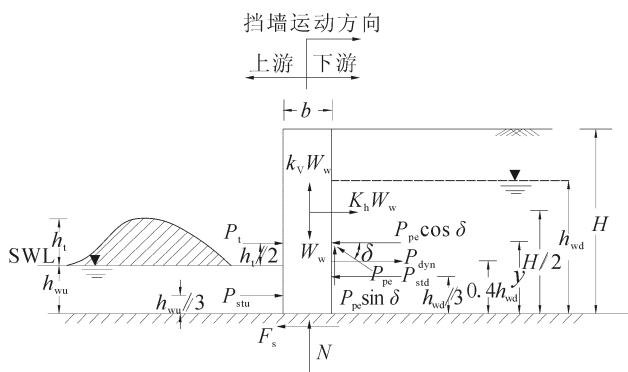


图 1 地震与海啸作用下岸墙的受力分析模型

Fig.1 Quay wall model subjected to different forces during earthquake and tsunami

- (1) 岸墙和支撑地基是刚性的,地震作用下岸墙被视为绕墙脚 O 点向内旋转;
- (2) 墙后土体为刚塑性的,不考虑墙体的反转;
- (3) 忽略地震被动土压力方向的变化。

1.1 上游水压力计算

由于岸墙前自由水体的存在,作用于岸墙的静水压力为:

$$P_{stu} = \frac{1}{2} \gamma_w (h_{wu})^2 \quad (1)$$

海啸引起作用于岸墙的波浪力为^[14]:

$$P_t = 4.5 \gamma_w (h_t)^2 \quad (2)$$

1.2 下游水土压力计算

土颗粒里一部分孔隙水受到限制而随土颗粒一起移动,地震过程中不产生孔隙水压力,只产生静水压力 P_{std} :

$$P_{std} = \frac{1}{2} \gamma_{we} (h_{wd})^2 \quad (3)$$

其中

$$\gamma_{we} = \gamma_w + (\bar{\gamma} - \gamma_w) r_u \quad (4)$$

$\bar{\gamma}$ 为墙后填土的等效容重,可表示为

$$\bar{\gamma} = \left(\frac{h_{wd}}{H} \right)^2 \gamma_{sat} + \left[1 - \left(\frac{h_{wd}}{H} \right)^2 \right] \gamma_{dry} \quad (5)$$

只有不受土颗粒约束的自由水才可以产生动水压力,墙后为强透水性填土时,可按 Westergaard^[15]公式求解:

$$P_{dyn} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w (h_{wd})^2 \quad (6)$$

为了考虑墙后填土地下水位和孔隙水压力的影响,被动土压力的计算采用 Kramer^[16]的方法计算:

$$P_{pe} = \frac{1}{2} K_{pe} H^2 \bar{\gamma} (1 - k_v) (1 - r_u) \quad (7)$$

其中动土压力系数 K_{pe} 和地震角 Ψ 分别为

$$K_{pe} = \frac{\cos^2(\varphi - \Psi)}{\cos \Psi \cos(\delta + \Psi) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \Psi)}{\cos(\delta + \Psi)}} \right]^2} \quad (8)$$

$$\Psi = \text{atan} \left(\frac{\gamma_{sat} k_h}{\gamma (1 - k_v)} \right) \quad (9)$$

1.3 旋转滑动体位移法

当码头开始倾斜瞬间,旋转弯距与抗倾覆弯距平衡,可表示为:

$$\begin{aligned} & \frac{k_{tr} W_w H}{2} + 0.4 P_{dyn} h_{wd} - \frac{P_{std} h_{wd}}{3} + \frac{P_{stu} h_{wu}}{3} + P_t (0.5 h_t + h_{wu}) \\ & = \frac{(1 - k_v) W_w b}{2} + P_{pe} y \cos \delta \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10)可确定旋转门槛加速度系数 k_{tr} 。如果地面最大加速度系数超过旋转门槛值,重力岸墙发生倾斜。地震时墙体向内旋转的加速度分布如图 2 所示,绕 O 点旋转的运动距方程为:

$$\sum M_O = y_C \left(\frac{W_w}{g} \right) (a_C)_x + x_C \left(\frac{W_w}{g} \right) (a_C)_y + I_C \alpha \quad (11)$$

式中: M 为绕旋转 O 点的弯矩, $(a_C)_x$ 和 $(a_C)_y$ 为岸墙的中心加速度 α_C 在 X 和 Y 向的分量; I_C 是墙绕质心的极惯性矩。质心 C 加速度为三部分之和:

$$\alpha_C = -\alpha_g + \alpha r_C - \omega^2 r_C \quad (12)$$

式中: α_C 是岸墙质心加速度向量; α_g 是地基表面加速度向量; r_C 为旋转点 O 到质心 C 的距离向量; α 为旋转角加速度; ω 为旋转角速度。以图 2 所示方向旋转时, 质心的水平和垂直向的加速度为

$$\begin{cases} (a_C)_x = -a_{gh} + \alpha y_C + \omega^2 x_C \\ (a_C)_y = a_{gv} + \alpha x_C - \omega^2 y_C \end{cases} \quad (13)$$

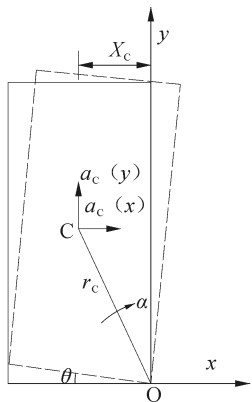


图 2 旋转加速度分析模型

Fig.2 Acceleration model for quay walls with rotation

将式(11)代入式(10)可得

$$\sum M_O = \alpha \left(\frac{W_w}{g} \right) r_C^2 - y_C \left(\frac{W_w}{g} \right) a_{gh} + x_C \left(\frac{W_w}{g} \right) a_{gv} + I_C \alpha \quad (14)$$

根据式(8)滑动瞬间可得

$$\begin{aligned} \sum M_O = & \frac{k_h W_w H}{2} + 0.4 P_{\text{dyn}} h_{\text{wd}} - \frac{P_{\text{std}} h_{\text{wd}}}{3} + \frac{P_{\text{stu}} h_{\text{wu}}}{3} + \\ & P_t (0.5 h_t + h_{\text{wu}}) - \frac{(1 - k_v) W_w b}{2} - P_{\text{pe}} y \cos \delta \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(14)和(15)可得旋转角加速度 α 为

$$\begin{aligned} \alpha = & [k_h W_w \cdot H/2 + P_{\text{dyn}} \cdot 0.4 h_{\text{wd}} - P_{\text{std}} \cdot h_{\text{wd}}/3 + \\ & P_{\text{stu}} \cdot h_{\text{wu}}/3 + P_t (0.5 h_t + h_{\text{wu}}) - (1 - k_v) W_w \cdot \\ & b/2 - P_{\text{pe}} y \cos \delta + (W_w/g) a_{gh} y_C - \\ & (W_w/g) a_{gv} x_C] / [I_C + (W_w/g) r_C^2] \end{aligned} \quad (16)$$

在计算旋转角加速度 α 时, 动土压力 P_{pe} 的计算中地震系数采用地基加速度系数。根据本文研究的假定, 通过对旋转角加速度的积分可得旋转角速度为:

$$\begin{cases} \omega = \int_0^t \alpha dt & \text{当 } \omega > 0 \\ \omega = 0 & \text{当 } \omega = 0 \end{cases} \quad (17)$$

对上式再次积分, 可得旋转位移为:

$$\theta = \int_0^t \omega dt \quad (18)$$

2 参数分析

为分析各影响因素对重力式岸墙旋转位移的影响, 假定一重力式岸墙, $H = 10$ m, $b = 2$ m, $h_{\text{wu}}/H = 0.4$; 墙体容重 $\gamma_C, \gamma_w, \gamma_{\text{sat}}$ 和 γ_{dry} 分别为 25、10、19 和 16 kN/m³; 地震持续时间为 0.5 s。

2.1 海啸浪高的影响

图 3 是 $\varphi = 30^\circ, \delta/\varphi = 0.5, h_{\text{wd}}/H = 0.75, k_h = 0.4, r_u = 0.2$ 情况下岸墙的旋转位移和海啸浪高之间的关系曲线。可以看出, 旋转位移随着浪高的增加而逐渐增大, 且随着竖向地震系数的增加而增加。如当 $k_v = 0.5 k_h, h_t/h_{\text{wu}} < 0.85$ 时墙体未发生转动; 当 $h_t/h_{\text{wu}} > 0.85$ 时墙体开始转动, 且旋转位移急剧增加。结果表明, 海啸力对结构的被动旋转稳定性不利。

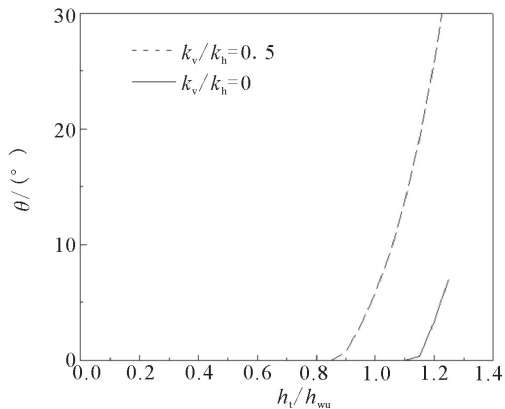


图 3 h_t/h_{wu} 对旋转位移的影响

Fig.3 Rotation displacements with different h_t/h_{wu}

2.2 回填土内摩擦角的影响

图 4 是 φ 分别在 $30^\circ, 35^\circ$ 和 40° 情况下 ($k_v = 0.5 k_h, h_t/h_{\text{wu}} = 1, \delta = 0, h_{\text{wd}}/H = 0.5, r_u = 0.2$) 旋转位移与水平向地震系数之间的关系。由图可以看出, 土体不液化时, 旋转位移随着回填砂土的内摩擦角的增大而逐渐减小, 且其变化趋势随着水平向地震系数的增加而增大。如当 $k_h = 0.4$ 、摩擦角为 40° 时, 墙体基本不发生转动; 内摩擦角 φ 从 35° 降低到 30° 时, 墙体的旋转位移增加了约 3.5 倍。

2.3 回填地下水水位的影响

图 5 给出了 $h_{\text{wu}} = 6$ m, $h_t = 4$ m, $\varphi = 30^\circ, \delta = 0$,

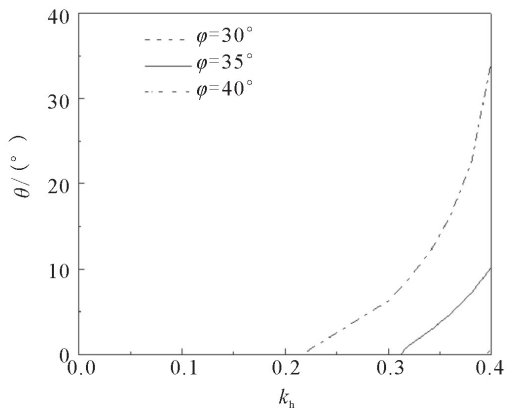


图 4 φ 对旋转位移的影响

Fig.4 Rotation displacements with different φ

$k_h = 0.2, k_v/k_h = 0.5$ 情况下岸墙的旋转位移和 h_{wd}/H 之间的关系曲线。由图中可见,回填土的地下水水位位置对旋转位移有一定的影响,当水位较低时, h_{wd}/H 对旋转位移的影响不敏感,随着 h_{wd}/H 的增加,旋转位移逐渐降低。随着墙后土体的液化,孔压逐渐增大,墙后水位的影响更加显著。如当 $h_{wd}/H = 0.2$ 时,孔压从 0 增大到 0.4 时,墙体的旋转位移增加了 8.88 倍; $h_{wd}/H = 0.6$ 时,当不考虑孔压作用 ($r_u = 0$),墙体不发生被动旋转,而当墙后土体液化 ($r_u = 1.0$) 时,墙体的旋转位移达到了 1.77° 。因此,工程中需合理考虑墙后土体的液化程度。

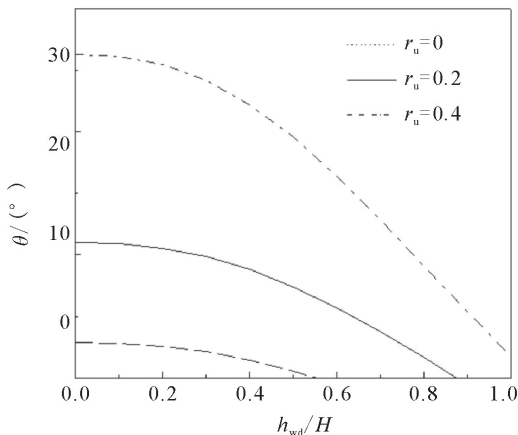


图 5 h_{wd}/H 对旋转位移的影响

Fig.5 Rotation displacements with different h_{wd}/H

2.4 墙体摩擦角的影响

本文对墙体摩擦角的研究参照土的内摩擦角而定。图 6 给出了 δ 分别为 $-0.5\varphi, 0, 0.5\varphi$ 情况下 ($k_v = 0.5k_h, h_t = h_{wu} = 4 \text{ m}, \delta = 0, \varphi = 30^\circ, h_{wd}/H = 0.5, r_u = 0.2$) 旋转位移与水平向地震系数之间的关系。由图可以看出,旋转角位移与墙摩擦角之间的变化规律类似于回填土的内摩擦角变化规律,即

随着墙体摩擦角的增大旋转位移逐渐减小。当墙土摩擦角为负值时,墙后土压力的作用方向与主动土压力一致,不利于被动挡墙的稳定。如当 $k_h = 0.4$, 墙体摩擦角 δ 从 -0.5φ 增大到 0.5φ 时,墙体的旋转位移降低了 60.3%。

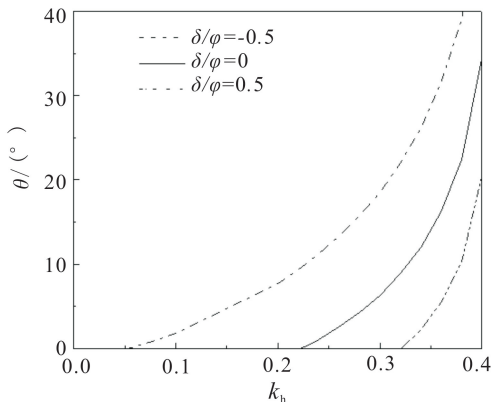


图 6 δ 对旋转位移的影响

Fig.6 Rotation displacements with different δ

2.5 孔隙水压力的影响

图 7 给出了孔隙水压力系数 r_u 分别在 0、0.2 和 0.4 情况下 ($k_v = 0.5k_h, h_t/h_{wu} = 1, \delta = 0, \varphi = 35^\circ, h_{wd}/H = 0.5$) 旋转位移与水平向地震系数之间的关系。可见,旋转位移随着孔隙水压力的增大而逐渐减小,如当 $k_h = 0.4, r_u$ 从 0 降低到 0.4 时,墙体的旋转位移增加了约 7.9 倍。

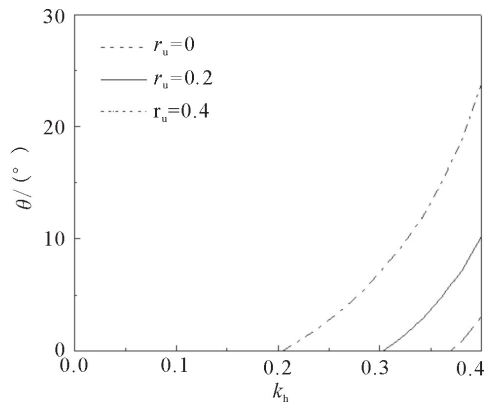


图 7 r_u 对旋转位移的影响

Fig.7 Rotation displacements with different r_u

3 结语

本文综合考虑孔隙水压力系数、静动水压力、海啸力的作用,针对被动状态,采用拟静力法建立岸边挡墙的旋转位移算法,并对几组重要参数的影响进行深入的分析。通过以上计算分析得到:

- (1) 墙后水位和孔隙水压力系数对位移的影响

较大。随着墙后土体的逐步液化,孔隙水压力系数增大,越不利于挡墙的被动旋转;在相同的液化程度下,墙后水位越高,对墙体的被动旋转位移越有利; h_{wd} 越大,孔压的影响越敏感。

(2) 地震荷载和海啸对墙体位移的影响显著。地震荷载越大、墙前水位越高、海啸浪高越大,则海啸力越大,越不利于墙体的被动旋转。

(3) 本文的研究未考虑土体强度随液化发展的变化,同时墙体的变位也不一定是单一的旋转,可能是旋转与滑动的耦合作用,需要再进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] Wu G, Finn W D. Seismic Lateral Pressures for Design of Rigid Walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 509-522.
- [2] Caltabiano S, Cascone E, Maugeri M. Seismic Stability of Retaining Walls With Surcharge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20: 469-476.
- [3] Morrison E E, Ebeling R M. Limite Quilibrium Computation of Dynamic Passive Earth Pressure [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 481-487.
- [4] Choudhury D, Subbarao K S. Seismic Passive Resistance in Soils for Negative Wall Friction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 971-81.
- [5] Subbarao K S, Choudhury D. Seismic Passive Earth Pressures in Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131: 131-135.
- [6] Matsuzawa H, Ishibashi I, Kawamura M. Dynamic Soil and Water Pressures of Submerged Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1161-1176.
- [7] Nimbalkar S, Choudhury D. Sliding Stability and Seismic Design of Retaining Wall by Pseudo-dynamic Method for Passive Case[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 497-505.
- [8] Kim S R, Kwon O S, Kim M M. Evaluation of Force Components Acting on Gravity Type Quay Walls During Earthquakes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(11): 853-866.
- [9] Nozu A, Ichii K, Sugano T. Seismic Design of Port Structures [J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4(3-special issue): 195-208.
- [10] Zeng X, Steedman R S. Rotating Block Method for Seismic Displacement of Gravity Walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(8): 709-717.
- [11] Choudhury D, Nimbalkar S S. Seismic Rotational Displacement of Gravity Walls by Pseudo Dynamic Method; Passive Case[J]. Geotechnique, 2005, 55(9): 699-702.
- [12] Zeng X. Dynamic Centrifuge Tests on Quay Walls[C]// Technical Report CUED/D-SoiMTR251. Cambridge University, England, 1992.
- [13] 刘汉龙, 王丽艳. 重力码头地震旋转与滑动耦合运动下的残余位移简易算法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 686-691.
LIU Han-long, WANG Li-yan. Seismic Residual Displacement of Gravity Quay Walls Under Coupled Motion between Rotation and Sliding by Simple Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 686-691. (in Chinese)
- [14] Crater. Coastal Risk Analysis of Tsunamis and Environmental Remediation[R]. Italian Ministry for the Environment and the Territory (IMET), 2006.
- [15] Westergaard H M. Water Pressures on Dams During Earthquakes[J]. Transactions, 1933, 98: 418-433.
- [16] Kramer S L. Geotechnical Earthquake Engineering[M]. New Jersey: Pearson Education Inc, 1996.