

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

刘汉龙^{1, 2}, 王丽艳³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 江苏科技大学土木学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 预测重力码头的地震残余位移是码头工程地震设计的关键, 而码头墙后回填砂土因地震引起的超静孔隙水压力发展水平对码头墙体运动具有一定的影响。引用液化度概念考虑超静孔隙水压力影响来修正 Mononobe-Okabe 拟静力法计算的动主动土压力和回填土地震孔隙水产生的动水压力; 同时考虑水平和竖向地震载荷, 采用 Steedman 的旋转块体法, 根据力与力矩极限平衡确定码头的滑动与旋转门槛加速度系数, 分别对码头滑动先开始与倾斜先开始两工况下的耦合运动模式进行详细分析, 修正码头因耦合运动影响的滑动与旋转门槛加速度系数, 计算码头耦合运动下的地震残余位移计算。选用正弦脉冲的地震运动特征, 应用该计算方法对码头耦合运动的残余位移的闭合解进行了推算, 分析了码头残余位移随着液化度变化的规律。

关键词: 重力式码头; 地震; 拟静力法; 液化度; 门槛加速度系数; 旋转块体; 残余旋转位移; 残余滑动位移

中图分类号: U653.5; P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0686-06

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与地基基础工程教学与科研工作。E-mail: hliuhhu@163.com。

Seismic residual displacement of gravity quay walls under coupled motion between rotation and sliding by simple method

LIU Han-long^{1, 2}, WANG Li-yan³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Jiangsu

University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Predicting the residual displacements induced by earthquake loading is a key to the seismic design of quay walls, and the motion of quay walls is influenced to some extent by the excess pore water pressure in the backfill acting on the back of quay walls. Considering the effect of excess pore water pressure in the backfill acting on the back of quay walls, the Mononobe-Okabe equivalent static method of calculating the dynamic active earth pressure and the dynamic water pressure in backfill soil is modified by the index of extent of liquefaction. Considering both the horizontal and vertical earthquake waves, the rotation block method of Steedman is applied. The sliding and rotation threshold acceleration coefficients are confirmed by the equilibrium of forces and moments respectively. Two situations of coupled motion with sliding starting first and rotation starting first are analyzed, the sliding and rotation threshold acceleration coefficient are modified because of the effect of coupled motion, and the calculation method of residual displacement of gravity quay walls is developed primarily. An example is shown by the present method under a sine wave of ground motion, and some laws are discussed simply between the extent of liquefaction and the seismic residual displacement.

Key words: gravity quay wall; earthquake; pseudo-static method; extent of liquefaction; threshold acceleration coefficient; rotating block method; residual rotational displacement; residual sliding displacement

0 引 言

重力式码头作为兼具挡土和挡水的土工结构, 具有整体性好, 抗震性能强, 地基应力较小, 耐久性

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639010); 江苏省青蓝工程
创新团队资助项目

收稿日期: 2008-03-12

及适应性强等优点在工程中得到应用。尤其近年来我国引进国外先进技术,采用深层水泥搅拌法加固海上软基来探索与尝试建设重力式码头,使得重力式码头仍会在以后的工程中得到广泛应用^[1]。但在重力式码头地震安全设计中,地震载荷引起的码头残余位移的预测是目前很重要的研究课题。因为大地震中码头产生的较大残余位移不仅造成码头本身的破坏,而且也给附近的土构造物带来毁坏,最近有很多这方面震害实例,如1995年阪神地震中就有多处码头发生很大的残余位移。多数震害实例和动力试验研究表明饱和砂土里含有的孔隙水对码头侧向变形影响较大,侧向变形是工程中很关注的问题,液化砂土地基也影响码头的变形,尤其是沉降上较显著,为研究方便,这里暂不考虑液化地基的孔隙水对码头地震变形的影响。

国外许多学者基于 Newmark 滑块法修改和延伸建立滑动位移计算方法应用到堤坝地震设计中。R S Steedman、X Zeng^[2-3]和 D Choudhury^[4-5]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。但码头墙后填土不能如上述滑块法和旋转块法视为干土,回填土地下水水位下的超静孔隙水压力发展水平对码头墙体运动具有一定影响。

本文引入液化度概念考虑超静孔隙水压力影响,由于问题的复杂性,先从拟静力法着手做一些初步研究,且只分析码头墙体的主动运动状态,耦合运动看成是由码头墙绕基础转动的 RB (rotation about the base of the wall) 模式和水平变位的 T (translation) 模式组成。

1 计算方法

1.1 液化度概念和计算表达式

动荷作用下砂性土超静孔隙水压力的上升是土强度降低、土体发生软化和岩土结构发生变形的根本因素。为简单方便地解决实际工程问题,便于工程设计人员的理解与应用,用液化度 E_l (extent of liquefaction) 来衡量超静孔隙水压力比发展水平^[6],

$$E_l = 1 - \sigma'_v / \sigma'_{v0} = \Delta u / \sigma'_{v0}, \quad (1)$$

式中, σ'_v , σ'_{v0} 分别代表当前和初始平均有效应力, Δu 代表孔隙水压力增量。

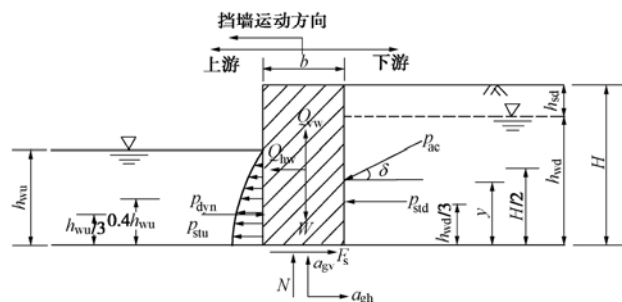
1.2 计算模型与基本假定

工程震害中经常出现码头背离回填土方向向着墙体上游运动,产生一定的残余变形。在这一状态下,码头岸墙的受力模型如图1所示,回填土对墙体产生地震主动土压力,码头前自由水体产生的动水压力向也是朝着码头外,为利于问题的分析,作了如下一些基本假定:

(1) 码头墙和支撑它的地基是刚性的,地震作用下码头被视为绕着墙脚趾 O 点向外旋转和滑动,作 RB 运动和 T 运动模式。

(2) 回填土跟着码头墙体向外运动,即认为墙体不能往回旋转。

(3) 忽略地震主动土压力方向的变化。



注: p_{ac} 为作用在码头上的动土压力; W , Q_{hw} 和 Q_{vw} 为作用在墙体上的重力、水平和垂直惯性力; p_{dyn} 为墙动水压力; p_{stu} 和 p_{std} 为上下游静水压力; N 为基础法向力; b 和 H 为码头的宽和高; h_{sd} 和 h_{wd} 分别为回填砂土地下水位之上和之下的深度, h_{wu} 为墙前水深; a_{gh} 和 a_{gv} 为地基的水平 and 竖向加速度; δ 为墙体摩擦角。

图1 码头地震作用下受力分析模型

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

1.3 计算载荷

(1) 动主动土压力

采用最新国际规范中方法^[7-8],应用拟静力 Mononobe-Okabe 公式计算地震条件下作用在码头墙上动主动土压力,考虑有地下水时回填砂土地震时的土重度的变化及超孔隙水压力 $\Delta u / \sigma'_{v0}$ 对码头墙体运动的影响,国外学者 Ebeling、Morrison 和 Kramer 作了一些工作^[9-10]。本文引入液化度 E_l 修正动主动土压力 p_{ac} , y 视位于码头 $H/3$ 处,

$$\begin{aligned} p_{ac} &= \frac{1}{2} K_{ac} H^2 \gamma_e (1 - k'_v) (1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}}) \\ &= \frac{1}{2} K_{ac} H^2 \gamma_e (1 - k'_v) (1 - E_l). \end{aligned} \quad (2)$$

等效土重度 γ_e 采用计算式

$$\gamma_e = \gamma_{wet} [1 - (\frac{h_{wd}}{H})^2] + \gamma_b (\frac{h_{wd}}{H})^2. \quad (3)$$

动主动侧压力系数 K_{ac} 和修正的水平地震系数 k'_h 与地震角 ψ 计算式如下:

$$K_{ac} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi)}{\cos \psi \cos(\psi + \delta) [1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta + \psi)}]}, \quad (4)$$

$$\psi = \tan^{-1} [\frac{k'_h}{1 - k'_v}], \quad (5)$$

$$k'_h = \frac{\frac{1}{2}\gamma_{wet}h_{sd}^2 + \gamma_{wet}h_{wd}h_{sd} + \frac{1}{2}\gamma_{sat}h_{wd}^2}{\frac{1}{2}\gamma_{wet}h_{sd}^2 + \gamma_{wet}h_{wd}h_{sd} + \frac{1}{2}\gamma_b h_{wd}^2} k_h \quad (6)$$

式中 γ_{wet} 为回填土的湿重度; γ_b 为回填土的浮重度 ($\gamma_{sat} - \gamma_w$); φ 为水平回填土的内摩擦角; δ 为回填土与墙面间的摩擦角; ψ 为地震惯性角, 即地震作用时合成加速度与竖直线交角 ($^\circ$); k_v 为竖向加速度地震系数。

(2) 上游水压力计算

因为码头前的自由水体的存在, 故作用在墙前静水压力计算式为

$$p_{stu} = \frac{1}{2}\gamma_w h_{wu}^2 \quad (7)$$

地震引起码头前水体震动, 作用在码头墙上的动水压力采用 Westergaard 提出的计算式

$$p_{dyn} = \frac{7}{12}k_h \gamma_w h_{wu}^2 \quad (8)$$

(3) 下游水压力计算

土颗粒里的孔隙水受到土颗粒的限制而随土颗粒一起移动称为受限水, 不会产生动水压力, 只有静水压力

$$p_{std1} = \frac{1}{2}\gamma_w h_{wd}^2 \quad (9)$$

而土颗粒在地震过程中随着液化度的升高逐渐由动土压力转变为拟似的流体压力, 但仍用求解静水压力观念, 用液化度 E_l 对土颗粒的重度进行修正来考虑超静孔隙水压力对水压力的影响,

$$p_{std2} = \frac{1}{2}\gamma_w E_l H^2 \quad (10)$$

故随着液化度的增长, 下游的流体压力

$$\begin{aligned} p_{std} &= p_{std1} + p_{std2} = \frac{1}{2}\gamma_w h_{wd}^2 + \frac{1}{2}\gamma_w E_l H^2 \\ &= \frac{1}{2}\left(\gamma_w \frac{h_{wd}^2}{H^2} + \gamma_w E_l\right) H^2 \end{aligned} \quad (11)$$

当液化度达到 1.0 时, 式 (11) 即变为饱和土重度的静水压力。

引用 Steedman 研究挡土墙时所采用的旋转块体法推导码头的残余位移, 在其基础上考虑墙后回填砂土在地震过程中的液化度随着时程发展的特征以及竖向的地震载荷, 具体如下所述。

1.4 确定滑动与旋转门槛加速度系数

当码头开始滑动瞬间, 码头底端上的运动摩擦力达到最大值, 计算力参见图 1, 水平向力平衡表达式为

$$\begin{aligned} Q_{hw} \gamma_c + p_{ac} \cos \delta y + p_{dyn} 0.4 h_{wu} + p_{std} h_{wd} / 3 - p_{stu} h_{wu} / 3 \\ = (W_w - Q_{vw}) x_c + p_{ac} \sin \delta b \end{aligned} \quad (12)$$

式中, x_c 和 y_c 为码头质心到旋转点 O 的水平与垂直距离, b 为墙宽, y 为动主动土压力的作用点高度, $Q_{hw} = k_h W \sin \omega t$, $Q_{vw} = k_v W \sin \omega t$ 。这里, 地基水平与竖向输入加速度采用正弦脉冲形式, 即 $a_{gh} = k_h g \sin \omega t$, $a_{gv} = k_v g \sin \omega t$ 。通过式 (12), 计算出旋转门槛加速度 $a_{th} = k_{th} g \sin \omega t$, k_{th} 为旋转门槛水平加速度系数, 同理可得竖向的加速度系数 k_{tv} 。

当码头开始倾斜瞬间, 旋转弯距与抗倾覆弯距平衡, 弯距平衡表达式如下:

$$\begin{aligned} Q_{hw} + p_{ac} \cos \delta + p_{dyn} + p_{std} \\ = p_{stu} + [W_w - Q_{vw} + p_{ac} \sin \delta] \tan \delta_b \end{aligned} \quad (13)$$

式中, W 为码头自重, δ_b 为码头基础与墙身间的摩擦角, 滑动门槛加速度 $a_{ts} = k_{ts} g \sin \omega t$, k_{ts} 为滑动门槛水平加速度系数, 同理可得竖向的加速度系数 k_{tsv} 。

1.5 旋转与滑动耦合残余位移计算

当地基运动加速度峰值既大于滑动门槛加速度又大于旋转门槛加速度时, 码头的侧向运动与旋转运动会同时产生; 之后两种运动相互作用和影响, 问题相对复杂。为了确定整个位移, 需弄清哪个运动先发生, 先根据式 (12) 与式 (13) 确定滑动与旋转的各自门槛加速度。

(1) 滑动先开始的耦合位移计算

当 $k_{ts} < k_{tr}$ 时, 码头先滑动, 已开始滑动的码头旋转门槛加速度计算式 (12) 需要进行修改, 因为码头倾斜的瞬间, 码头墙体的水平加速度系数为 k_{ts} , 故式 (12) 变为

$$\begin{aligned} k_{ts} W \sin \omega t \cdot y_c + k_{tsv} W \cdot x_c + p_{ac} (\cos \delta \cdot y - \sin \delta \cdot b) \\ = W_w \cdot x_c - (p_{dyn} \cdot 0.4 h_{wu} + p_{std} \cdot h_{wd} / 3 - p_{stu} \cdot h_{wu} / 3) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, k_{ts} 和 k_{tsv} 分别为水平和竖向滑动门槛系数, 旋转门槛加速度系数 k_{tr} 包含在动土压力 p_{ac} 计算中, 可通过反复试算上式得到。对于给定的计算工况, 右端项为一恒定值, 显然, 滑动先开始使得码头因惯性作用的旋转弯距减少, 相应土压力作用弯距增加, 旋转门槛加速度系数增大, 将引起较低的旋转移位。由于认为码头墙后土楔跟着墙体一起运动, 故作用在码头墙身最大的动土压力不会超过因为滑动门槛加速度引起的动土压力, 因而码头再旋转是不可能的, 与单独挡土墙结论类似。

(2) 倾斜先开始的耦合位移计算

当 $k_{tr} < k_{ts}$ 时, 码头先向外旋转, 旋转码头的加速度分布如图 2 所示。

当旋转开始时, 绕 O 点旋转的运动距方程为

$$\sum M_o = -y_c (W/g)(a_c)_x + x_c (W/g)(a_c)_y + I_c \alpha \quad (15)$$

M_o 绕旋转 O 点的弯距, $(a_c)_x$ 和 $(a_c)_y$ 为码头墙的中心加速度 $\bar{a}_c$ 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,

$$\vec{a}_c = \vec{a}_g + \alpha \times \vec{r}_c - \omega^2 \vec{r}_c, \quad (16)$$

式中, $\vec{a}_c$ 是码头墙质心加速度向量, $\vec{a}_g$ 是地表面加速度向量, $\vec{r}_c$ 旋转点 O 到质心 C 的距离向量, α 旋转角加速度, ω 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

$$(a_c)_x = a_{gh} - \alpha y_c - \omega^2 x_c, \quad (16a)$$

$$(a_c)_y = a_{gv} + \alpha x_c - \omega^2 y_c. \quad (16b)$$

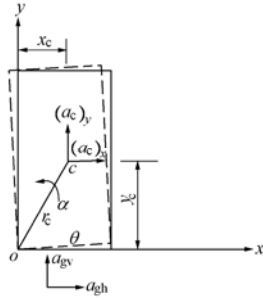


图 2 码头地震作用下旋转加速度分析模型

Fig. 2 Acceleration model for quay walls with rotation

将式 (16) 代入到式 (15) 中和计算 $\sum M_o$ 得

$$Q_{hw} \cdot y_c + p_{ac} \cos \delta \cdot y + p_{dyn} \cdot 0.4 h_{wu} + p_{std} \cdot h_{wd} / 3 - p_{stu} \cdot h_{wu} / 3 - Q_{vw} \cdot x_c - p_{ac} \sin \delta \cdot b = (W_w / g) x_c^2 \alpha + (W_w / g) y_c^2 \alpha + (W_w / g) a_{gv} x_c - (W_w / g) a_{gh} y_c + I_c \alpha. \quad (17)$$

根据上式得出旋转角加速度

$$\alpha = [Q_{hw} \cdot y_c + p_{ac} \cos \delta \cdot y + p_{dyn} \cdot 0.4 h_{wu} + p_{std} \cdot h_{wd} / 3 + (W_w / g) a_{gh} y_c - p_{stu} \cdot h_{wu} / 3 - (W_w - Q_{vw}) \cdot x_c - p_{ac} \sin \delta \cdot b - (W_w / g) a_{gv} x_c] / [(W_w / g) x_c^2 + (W_w / g) y_c^2 + I_c], \quad (18)$$

式中, $I_c = bH(b^2 + H^2)(\gamma_c / g) / 12$, $k_h = a_g / g$ 。

角速度与角位移分别通过角加速度与角速度对时间积分可得:

$$\omega = \int_0^t \alpha dt, \quad (19)$$

$$\theta = \int_0^t \omega dt. \quad (20)$$

接着滑动发生时, 滑动门槛加速度系数需对式(9)进行修改确定 k'_{ts} , 方程变为

$$(k'_{ts} g \sin \omega t - \alpha y_c - \omega^2 x_c)(W_w / g) + p_{ac} \cos \delta + p_{dyn} + p_{std} = p_{stu} + [W_w - (W_w / g)(k'_{ts} g \sin \omega t + \alpha x_c - \omega^2 y_c) + p_{ac} \sin \delta] \tan \delta_b. \quad (21)$$

随着滑动的发生, 旋转运动使得滑动门槛加速度升高, 因而减少了整个滑动位移。

滑动与倾斜耦合运动的方程如下三个:

$$\sum F_x = (W / g)(a_c)_x, \quad (22)$$

$$\sum F_y = (W / g)(a_c)_y, \quad (23)$$

$$\sum M_o = -y_c(W / g)(a_c)_x + x_c(W / g)(a_c)_y + I_c \alpha. \quad (24)$$

基础摩擦力 $F_s = N \tan \delta_b$, N 为基础上的法向力,

代入各计算载荷后运动方程变为

$$N \tan \delta_b + p_{stu} - Q_{hw} - p_{ac} \cos \delta - p_{dyn} - p_{std} = (W_w / g)(a_c)_x, \quad (25)$$

$$N + Q_{vw} - W_w - p_{ac} \sin \delta = (W_w / g)(a_c)_y, \quad (26)$$

$$Q_{hw} \cdot y_c + p_{ac} \cos \delta \cdot y + p_{dyn} \cdot 0.4 h_{wu} + p_{std} \cdot h_{wd} / 3 - p_{stu} \cdot h_{wu} / 3 - (W_w - Q_{vw}) \cdot x_c - p_{ac} \sin \delta \cdot b = -y_c(W_w / g)(a_c)_x + x_c(W_w / g)(a_c)_y + I_c \alpha. \quad (27)$$

方程中含有五个未知变量: α , ω , N , $(a_c)_x$ 和 $(a_c)_y$, k_v 是由 k_h 经验而定, 而 $(a_c)_y$ 和 ω 也是 α 的函数, 如式 (16b) 和 (19) 所示。

由于假定了地基是刚性的, 故这里所计算的滑动位移是指的码头墙角 O 处的水平向位移, 墙角 O 处的水平加速度可通过式 (16a) 改写为

$$a_{oh} = (a_c)_x + \alpha y_c + \omega^2 x_c. \quad (28)$$

墙角 O 处的速度和滑动位移分别为 (当 $v_{oh} \leq v_{gh}$):

$$v_{oh} = \int_0^t a_{oh} dt, \quad (29)$$

$$s = \int_0^t (v_{gh} - v_{oh}) dt. \quad (30)$$

判断每个运动结束的标志如下: 当 $\omega=0$, 旋转结束; 当 $v_{oh} = v_{gh}$, 滑动结束。当任何一个运动结束时, 耦合运动将减为单个运动。

由于地震动为正弦脉冲, 码头是滑动运动还是旋转运动先开始, 以及开始后受耦合运动的影响, 门槛加速度又发生改变, 每一时刻都不一样, 对每一时刻都要进行门槛加速判别确定码头运动模式。

2 算例

应用上述计算方法举一倾斜先开始的耦合运动的码头算例。重力式码头 ($H=10$ m, $B=5$ m, γ 取 24 kN/m³), 模型见图 1, 地下水位在回填土表面 2.5 m 以下, 回填砂土的物理特性: $\varphi=30^\circ$, $\delta=\varphi/2=15^\circ$, $\delta_b=35^\circ$, $\gamma_{sat}=20$ kN/m³, $\gamma_{wet}=18$ kN/m³, $h_{wu}/H=0.8$, 相对密实度为 40% , 平均粒径为 0.10 mm, 渗透系数为 1.0×10^{-4} m/s, 输入的加速度频率 f 为 1 Hz 正弦波, 荷载循环数目设为 10 , 相应于震级 $6.5 \sim 7$ 级的地震, 峰值为 $0.4g$ (相当于 9 度地震), 持续时间为 10 s, 地基时程曲线如图 3 所示, 竖向加速度取为 0.5 倍的水平向加速度。

采用 Seed (1975) 等根据饱和砂土的动三轴试验资料提出的一种计算超孔隙的应力模式计算液化度时程变化, 计算结果如图 4。

根据式 (12) 与 (13) 推算出码头的旋转和滑动运动的门槛加速度系数, 所得时程分布计算结果见图 5

所示。每一个时刻,滑动门槛加速度系数比旋转的要大得多,显然,码头先开始旋转;旋转后的码头滑动门槛加速度系数需根据修正式(21)来确定,时程变化结果绘于图5中,修正后的滑动门槛加速度系数相对减小。根据每一时刻的门槛地震系数来判别码头的运动形式以及计算耦合运动的残余变形。

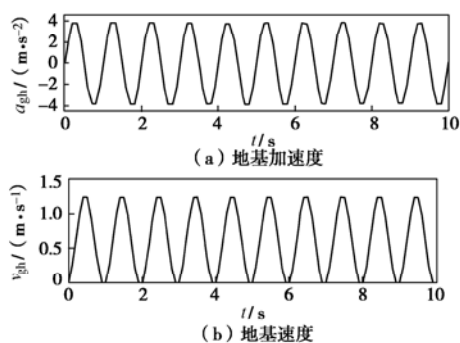


图3 水平加速度和速度时程曲线

Fig. 3 Ground acceleration and velocity time history

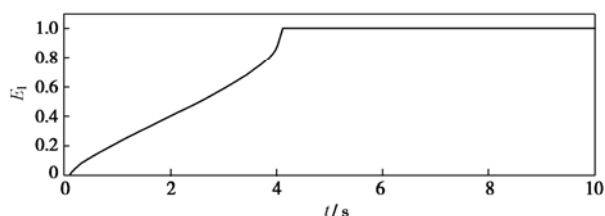


图4 回填砂土液化度计算时程曲线(\$a_{max}=0.40g\$)

Fig. 4 Time history of calculated excess pore pressure ratio

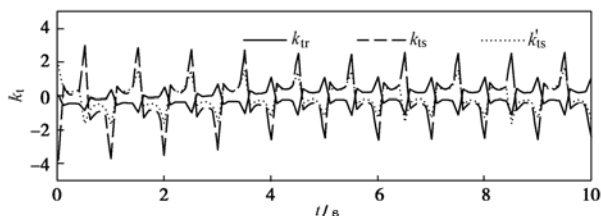


图5 滑动与旋转门槛加速度系数计算值的时程变化

Fig. 5 Time history of calculated sliding and rotational threshold acceleration coefficients

由式(18)计算角加速度 α 时程曲线如图6(a)所示,角加速度在0~4 s时段随着时程的增加和液化度的升高,波动幅度逐渐减弱,4 s后波动趋于稳定。

码头旋转的角速度 ω 和角位移 θ 的计算时程曲线分别为图6(b)与(c)。角速度在0~4 s时段内波幅逐渐减小,小于未考虑液化度的波幅,数值也是持续增加,但增加的幅度大于未考虑液化度的,4 s后角速度的波幅变为一致,而数值增加的幅度变得更大。角位移的时程发展规律基本一致,随着时程逐渐增大,4 s之前,增加缓慢,之后由于饱和砂土达到液化,角位移增加很快,在地震动结束时刻,旋转角位移为 14.1° 。

图7(a)为码头旋转点O的水平向加速度 a_{oh} 的时

程曲线,4 s之前逐渐减弱,4 s之后波动幅度稳定变化,但数值大小逐渐增加,波动范围由原来的 $0 \sim 1.0 \text{ m/s}^2$ 变为 $0.5 \sim 1.2 \text{ m/s}^2$ 。图7(b)和(c)为码头旋转点O的水平向速度和滑动变形的变化曲线,水平速度在4 s之前增加得较快,此时段由于液化度较低,码头速度较小,相对地面的速度较大,使得滑动变形也迅速增加;4 s后回填砂土达到了液化,码头速度变大,但相对地面具有较小的速度,致使滑动趋势减弱,滑动位移增加的缓慢,在地震动结束时,码头滑动位移为0.82 m。

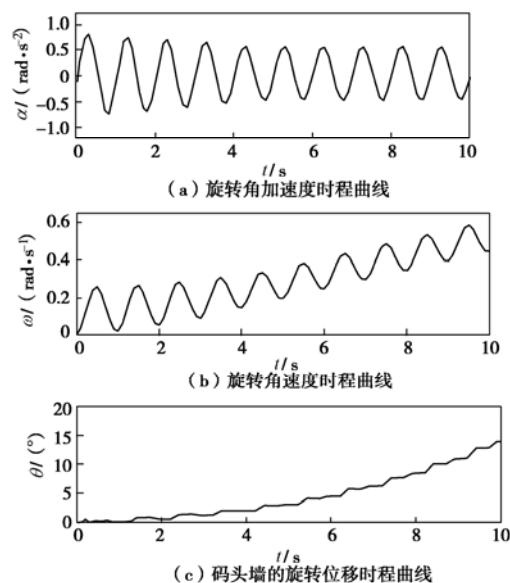


图6 旋转角加速度、旋转速度和旋转变形时程图

Fig. 6 Time history of angular acceleration, angular velocity and angular displacement

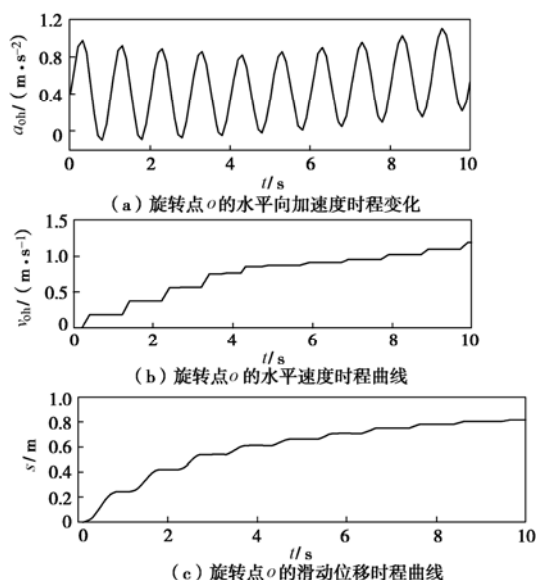


图7 旋转点O的加速度、速度和滑动变形时程图

Fig. 7 Time history of acceleration, velocity and sliding displacement at rotation center

地震波动结束后,角加速度变为 -0.43 rad/s^2 ,旋转角速度 ω 从 0.22 rad/s 减速到0还需要 0.5 s ,即码头在 10.5 s 停止旋转,码头最后的残余旋转位移为 17.3° ,计算结果说明码头运动停止时刻与地震动结束时刻相差不大,但在这较短的时间段里仍产生一部分不容忽视的角位移,约占残余旋转位移的18%。

3 结 论

从拟静力法着手,考虑码头后回填砂土的液化度影响计算作用在码头墙体上的动土压力和地下水的动水压力,采用旋转块体法计算重力式码头地震旋转和滑动复杂耦合运动下的残余位移,主要成果如下:

(1) 用液化度指标简单考虑回填砂土地震过程中的超静孔隙水压发展水平,将作用在墙体上的作用力视为从固体土的动土压力逐渐转变为类似流体土的水压力;基于拟静力 Mononobe-Okabe 法计算随着液化度变化的动土压力,基于静水压力观点计算随着液化度变化的动水压力,同时考虑水平与竖向地震载荷,简单推求重力式码头的地震残余角位移。

(2) 与 Steedman 分析单独的挡土墙类似,当 $k_{\text{ts}} < k_{\text{tr}}$ 时,码头滑动先发生,之后作用在码头墙身的动土压力不会再超过由开始滑动门槛加速度引起的动土压力,因而码头滑动后再发生旋转是不可能的,即根据本文的计算法基本假定,先滑动再倾斜的耦合运动模式是不存在的;当 $k_{\text{tr}} < k_{\text{ts}}$ 时,倾斜先发生时会产生滑动而进入耦合运动状态。

(3) 码头的旋转角位移随着时程的增加而逐渐增大;开始由于液化度较低,码头产生了相对较小的角位移,但达到液化后,呈流体流动特性的回填砂土促进了码头产生了较大的残余角变形;码头旋转运动停止时刻与地震动结束时刻相差不大,但在这较短的时间段里仍产生一部分不容忽视的角位移。

(4) 码头的滑动位移也是随着时程的增加而逐渐增大;初始阶段,液化度较低时码头速度较小,相对地面的速度较大,使得滑动运动迅速增加;后来,码头的速度较大,相对地面的速度较小,使得滑动趋

势有所减弱,滑动位移随着时程增加得缓慢。

参考文献:

- [1] 交通部第三航务工程勘察设计院. 码头新型结构[M]. 1999. (The third investigation and design navigational fairs in ministry of communications. New-type quay wall structure[M]. 1999. (in Chinese))
- [2] STEEDMAN R S, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 103 - 12.
- [3] ZENG X, STEEDMAN R S. Rotating block method for seismic displacement of gravity walls[J]. J Geotechn Geoenviron Eng, ASCE, 2000, 126(8): 709 - 17.
- [4] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S S. Seismic passive resistance by pseudo dynamic method[J]. Geotechnique, 2005, 55(9): 699 - 702.
- [5] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S S. Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudo dynamic method: passive case[J]. Geotechnique, 2005, 55(9): 699 - 702.
- [6] 王丽艳, 刘汉龙. 用液化度概念评价岩土结构地震液化变形的探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 451 - 456. (Wang Li-yan, Liu han-long. Discussion in Assessment of Geo-structure liquefaction deformation based on degree of liquefaction[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 451 - 456. (in Chinese))
- [7] PIANC. Seismic design guidelines for port structures[S]. Japan: Balkema, 2001.
- [8] ISO, 23469. Bases for design of structures-seismic actions for designing geotechnical works[S]. Japan: Working Group No.34 of the Maritime Navigation Commission International Navigation Association, 2005.
- [9] EBELING R M, MORRISON E E Jr. The seismic design of waterfront retaining structures[R]. Washington D C: 1992.
- [10] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New Jersey: Pearson Education Inc, 1996.