

防波堤前短峰波引起的底床失稳

林 緬

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要 分析了波浪斜入射时防波堤前土床可能发生的破坏区域及破坏深度, 分别针对两种工程中最常见的粗砂质底床和细砂质底床, 讨论了土层中的液化和剪切破坏随入射角、加载波周期、水深的变化, 为工程应用提供参考。

关键词 防波堤, 短峰波, 底床失稳

引 言

预防防波堤失稳是沿岸工程设计中一个重要问题。长期以来, 关于防波堤的失稳, 人们一直把研究重点放在冲刷所造成的防波堤失稳, 而忽视了对波浪作用下堤前土层中应力状态的研究。我们知道, 建筑物的存在往往改变了其周围波浪和水流的动力学特征, 同时也改变了土床中应力场的分布, 所以研究防波堤前土层的应力状态是非常有必要的。在大多数情况下防波堤和入射波成一定角度, 这样防波堤前形成短峰波系。因此, 本文将就短峰波作用下, 防波堤前底床中产生的液化势及剪切破坏进行仔细地探讨, 预测堤前可能发生的破坏区域及破坏深度。

1 建立模型

假设坐标系的原点在堤上, x 轴平行于堤坝, y 轴是堤的法向, z 轴在水土交界面上, 向上为正, 入射波和 x 轴成一夹角。 L_x 和 L_y 分别为波长和波峰间距, L 是入射波和反射波的波长, θ 为入射角。当入射角为 0° 时, 堤前形成驻波, 入射角为 90° 时, 堤前产生行波。我们考虑非全反射情况 (图 1)。

考虑三维情况。假设波面方程为

$$\eta = a_i e^{i(\alpha x - \tilde{k}_x x - \tilde{k}_y y)} + K_r a_r e^{i(\alpha x - \tilde{k}_x x + \tilde{k}_y y)}$$

a_i 为入射波波幅, $K_r = a_r / a_i$ 为反射系数, a_r 为反射波波幅, $\tilde{k}_x = \tilde{k} \sin \theta$, $\tilde{k}_y = \tilde{k} \cos \theta$ 。那么

上层波浪速度势满足

$$\nabla^2 \phi = 0$$

考虑一阶短峰波, 利用自由面 $z=h$ 上边界条件

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

得到

$$\phi = i a_i \frac{g}{\omega} \left\{ \cosh \tilde{k}(z-h) + \frac{\omega^2}{kg} \sinh \tilde{k}(z-h) \right\} [(1+K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1-K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha t - \tilde{k}_x x)}$$

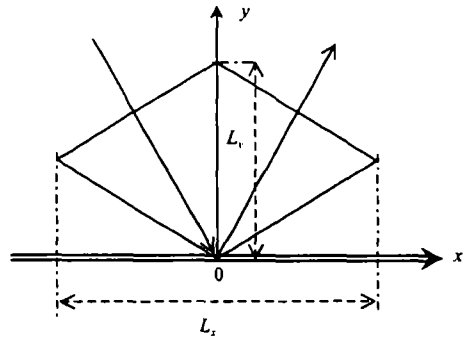


图 1 短峰波波系平面图

在界面 $z=0$ 上满足

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial w_z}{\partial t}, \quad p = -\rho_f \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$\tau_{zz} + p = 0, \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

在床底 $z=-d$ 上满足

$$\mathbf{u} = \mathbf{w} = 0, \quad \partial p / \partial z = 0$$

海洋土看作为具有库仑摩擦的多孔弹性介质，土骨架和孔隙水的运动方程为^[1]

$$\tilde{\mu} \nabla^2 \mathbf{u} + (\tilde{H} - \tilde{\mu}) \nabla e - \tilde{C} \nabla \zeta = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho \mathbf{u} + \rho_f \mathbf{w})$$

$$\nabla (\tilde{C} e + \tilde{M} \zeta) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_f \mathbf{u} + m \mathbf{w}) + \frac{\eta_f}{k_s} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t}$$

利用边界条件可以得到以下关系式

$$\tilde{p} = \{(\tilde{a}_{11} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z})[\tilde{C} + \tilde{c}_1 \tilde{M}] \tilde{k}_1^2 + (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z})[\tilde{C} + \tilde{c}_2 \tilde{M}] \tilde{k}_2^2\} \\ [(1 + K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1 - K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{xx} = \{(\tilde{a}_{12} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_1 \tilde{C}) \tilde{k}_1^2 - 2\tilde{\mu} \tilde{\lambda}_3^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}_y^2] + \\ (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_2 \tilde{C}) \tilde{k}_2^2 - 2\tilde{\mu} \tilde{\lambda}_3^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}_y^2] - \\ (\tilde{a}_{31} e^{\tilde{\lambda}_3 z} - \tilde{a}_{32} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{\lambda}_3\} [(1 + K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1 - K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{yy} = \{(\tilde{a}_{12} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_1 \tilde{C}) \tilde{k}_1^2 - 2\tilde{\mu} \tilde{\lambda}_1^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}_x^2] + \\ (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_2 \tilde{C}) \tilde{k}_2^2 - 2\tilde{\mu} \tilde{\lambda}_2^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}_x^2] - \\ (\tilde{a}_{31} e^{\tilde{\lambda}_3 z} + \tilde{a}_{32} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_y \tilde{\lambda}_3\} [(1 + K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1 - K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{zz} = \{(\tilde{a}_{12} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_1 \tilde{C}) \tilde{k}_1^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}^2] + \\ (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z})[-(\tilde{H} + \tilde{c}_2 \tilde{C}) \tilde{k}_2^2 + 2\tilde{\mu} \tilde{k}^2] - \\ (\tilde{a}_{31} e^{\tilde{\lambda}_3 z} + \tilde{a}_{32} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{\lambda}_3\} [(1 + K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1 - K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{xz} = \{-\tilde{a}_{11} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z}\} 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{\lambda}_1 + \{-\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}\} 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{\lambda}_2 + \\ (\tilde{a}_{31} e^{\tilde{\lambda}_3 z} + \tilde{a}_{32} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) (-\tilde{k}_x^2 - \tilde{\lambda}_3^2) \tilde{\mu} \} [(1 + K_r) \cos \tilde{k}_y y - i(1 - K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{yz} = \{(\tilde{a}_{11} e^{\tilde{\lambda}_1 z} - \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z}) 2\tilde{\mu} \tilde{k}_y \tilde{\lambda}_1 + (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} - \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) 2\tilde{\mu} \tilde{k}_y \tilde{\lambda}_2 - \\ (\tilde{a}_{31} e^{\tilde{\lambda}_3 z} - \tilde{a}_{32} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{k}_y\} [i(1 - K_r) \cos \tilde{k}_y y - (1 + K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

$$\tilde{\tau}_{xy} = \{-(\tilde{a}_{11} e^{\tilde{\lambda}_1 z} + \tilde{a}_{12} e^{-\tilde{\lambda}_2 z}) 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{k}_y - (\tilde{a}_{21} e^{\tilde{\lambda}_2 z} + \tilde{a}_{22} e^{-\tilde{\lambda}_3 z}) 2i \tilde{\mu} \tilde{k}_x \tilde{k}_y\} \\ [i(1 - K_r) \cos \tilde{k}_y y - (1 + K_r) \sin \tilde{k}_y y] e^{i(\alpha x - \tilde{k} x)}$$

其中系数 $\tilde{a}_{1n}, \tilde{a}_{2n}, \tilde{a}_{3n}$ ($n=1,2$) 可参看文献[1]。下面我们将利用以上关系式对防波堤前土床内可能的破坏状态进行分析, 并和已有的一些实验结果进行比较。

2 计算结果及分析

利用三维土层液化准则^[2]及 Mohr-Coulomb 破坏准则, 针对两种不同砂质土床—粗砂和细砂, 讨论两方面的问题, 其一, 提前的破坏区域; 其二, 最大破坏深度。整个计算中取防波堤的反射系数为 0.8。

首先, 我们来看一下一个波长内土床可能发生破坏的区域。考虑入射角分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 三种情况下。沿 x 方向液化区域的分布如图 2(a)所示 (图中实线为粗砂底床, 虚线为细砂底床)。当水深为 40m, 加载波周期分别为 10s 和 15s 时, 粗砂底床在一个波长内的液化区域均发生在 $0.25 < x/L_x < 0.75$ 之间, 不随入射角变化。在细砂底床中, 加载波周期及入射角的变化使得底床的液化区域也随之而变。对不同入射角下, 一个波长内剪切破坏区域的计算结果分析发现(图 2(b)), 粗砂底床的剪切破坏区域不随入射角的不同而有所变化。这和液化情形一样, 不同的是此时剪切破坏深度随入射角变化。而细砂底床的剪切破坏区域完全取决于入射角的大小, 比如: 入射角为 30° 时破坏区域为 $0 < x/L_x < 0.26$ 和 $0.74 < x/L_x < 1.0$ 。

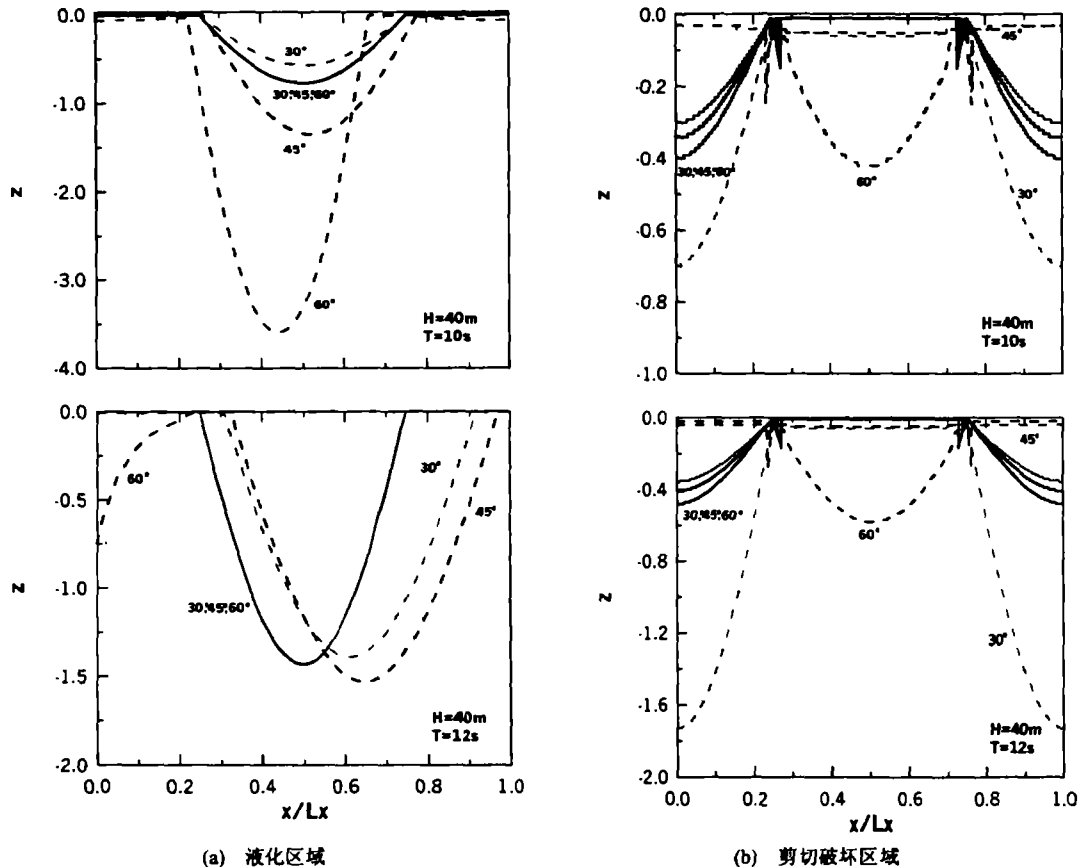


图2 不同入射角下破坏区域

然后, 计算了最大破坏深度随加载波周期和水深的变化 (图 3)。为便于比较我们还增加

了入射角为 0° 和 90° 两种情况。很明显，随着加载波周期的增加无论是粗砂底床还是细砂底床的液化深度都随之而增加。在粗砂底床液化深度不随入射角而变，Jeng(1997)^[3]也得到同样的结论。在细砂底床，液化深度随入射角而变。当入射角为 90° 时，液化深度小于入射角为 60° 的情况，这说明当入射角比较大时，在细砂底床中短峰波所造成的破坏深度要大于行波情况。对剪切破坏来说，不同入射角下粗砂底床的最大剪切破坏深度略有不同，入射角增加时破坏深度加深；而细砂底床下的破坏深度随入射角变化非常剧烈，入射角为 60° 时，破坏深度最大。另外从破坏深度随加载波周期变化曲线我们发现，当 $T < 2s$ 时，破坏深度随周期的增加而减少， $T > 2s$ 破坏深度随周期的增加而增加，这一结果与谢世楞(1983)^[4]和 Jan(1999)^[5](图 3(a), Jan 的实验结果依赖于右坐标轴)的实验结果比较，发现实验曲线和计算结果变化趋势基本吻合。

同时我们还注意到，随着相对水深 H/L 的增加，粗砂底床的液化深度单调减少，而细砂底床液化深度随水深的变化不是单调的，在一定水深下有峰值。比较而言，当入射角小于 45° 时，粗砂底床的液化深度比细砂底床要大，但是当入射角为 60° ， $T > 6.6s$ 或 $H/L > 0.18$ 时，细砂底床中产生较大的液化势，其液化深度大于粗砂底床，所以在工程中要特别注意。从图 3(b)中还可以看到，在粗砂底床中最大剪切破坏深度随着水深的增加而减少，而细砂底床，破坏深度随水深的变化不是单调的。当 $H/L \sim 0.1$ ，破坏深度达到最大。

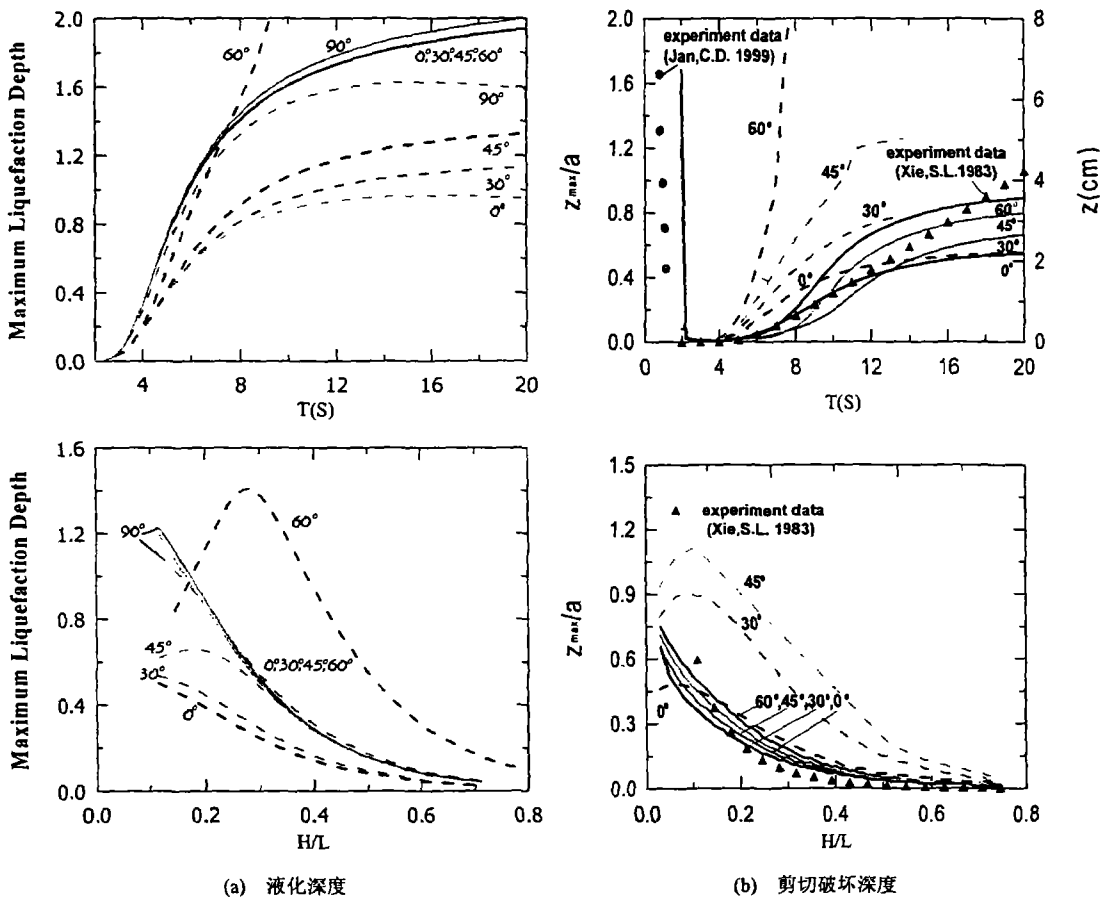


图 3 不同入射角下最大破坏深度随加载波周期和水深变化曲线 (虚线为粗砂底床, 实线为细砂底床)

3 小 结

归纳起来,防波堤前的粗砂底床有以下几个特点:破坏区域不随加载波周期和入射角变化;液化破坏深度不随入射角而变;剪切破坏深度随着入射角的增加而增加;破坏深度随加载波周期的增加而增加,随着水深的增加而减少;当 $T < 2s$ 时,剪切破坏深度随着加载波周期的增加而减少。

而在细砂底床则有:入射角的变化影响着破坏区域;在不同的入射角下,加载波周期的增加导致液化深度增加,入射角越大液化深度也越大;水深的增加引起底床破坏深度变化是非单调的,入射角越大这一现象越明显。

参 考 文 献

- 1 林 纘. 海床对水表面波动态响应的研究. 博士论文, 中国科学院力学研究所, 2000
- 2 Zen K, Yamazaki H. Wave-induced liquefaction in a permeable seabed. Report of the Port and Harbours Research Institution, Japan, 1993, 31. 155-192
- 3 Jeng DS. Wave-induced seabed instability in front of a breakwater. *Ocean Engng*, 1997, 24 (10): 887-917
- 4 谢世榜. 直立堤前的冲刷形态及其对防波堤整体稳定的影响. *海洋学报*, 1983, 5(6): 808-823
- 5 Jan CD, Lin MC. Bed forms generated on sandy bottom by oblique standing waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1998, 124(6): 295-302