

含倾斜砂土夹层的人工岛地震液化灾害分析

胡记磊^{1,2}, 唐小微^{*1,2}, 白旭^{1,2}, 张西文^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 强地震易造成地基中倾斜砂土夹层液化后产生永久变形和位移, 并诱发流滑现象, 进而对上部结构产生严重破坏. 基于 FE-FD 耦合有限元方法, 综合考虑倾斜砂土夹层的坡度、厚度、埋深以及海水水位因素, 对某近海人工岛二维结构模型进行了数值模拟分析. 结果表明: 砂土层的坡度、厚度、埋深以及水位因素对人工岛的地震液化灾害有着不同程度的影响, 其中坡度的影响最显著, 而水位的影响最不明显, 特别是水位对超孔隙水压力增长的影响非常小. 人工岛的侧向扩展是在地震过程中饱和倾斜砂土夹层完全液化被触发后才得以发生, 而且是在地震作用过程中某段时间内沿液化层斜面的有限滑动, 其灾害程度比水平砂土层液化造成的破坏要大得多, 而且易造成岛体不均匀沉降, 对护岸造成严重破坏. 该分析结论可为近海岸工程地震液化灾害评价分析提供参考依据.

关键词: 人工岛; 地震; 数值模拟; 液化; 倾斜砂土夹层; 侧向滑移; 沉降

中图分类号: TU433

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201505009

0 引言

强地震作用易导致海底饱和松散的砂土层发生液化, 诱发海床的侧移和不均匀沉降, 特别是对于含倾斜砂土层的地基, 液化后甚至会造成大规模的流滑现象, 其破坏性比液化造成的地面破坏要大得多. 海岸工程特别易于遭受这种破坏. 1989 年美国加州 Loma Prieta 地震引起 150~300 m 海岸液化变形, 使许多交通和生命线工程遭到破坏^[1]; 1995 年日本阪神地震导致神户市 Uozaki-hama 人工岛砂土液化, 造成挡墙后 100 m 范围内发生不同程度永久侧移, 最大水平侧向位移达到 1.6~4.0 m, 同时, 由于液化扩展导致土体滑裂带内各点受力不均, 出现了严重的竖向不均匀沉降现象, 给近岸结构造成了很大损害^[2]; 1999 年中国台湾南集集地区地震造成水库垮坝, 地表侧向变形量达 3~4 m^[3]; 1999 年土耳其 Kocaeli 地震造成 Izmit 海湾发生大面积液化, 引起海岸侧向位移达到 2.4 m^[4]. 这些震害都造成了巨大

的经济损失, 因此, 研究地震诱发海底砂土层液化, 特别是倾斜砂土层液化导致的地基侧移和沉降等灾害特性对近海工程的防震减灾有着重要的意义.

近几年, 有关学者对人工岛液化引起的土层侧向位移数值模拟有较深入的研究. 蔡晓光和袁晓铭等^[5-7]根据震害现象和实验探讨了近岸水平场地液化侧向大变形机理, 并利用改进软化模量分析方法, 对阪神地震中人工岛砂土液化侧向大变形进行了数值模拟, 并和震后实测结果进行了对比, 验证了该方法的适用性. Noda 等^[8]研究了人工岛回填砂土的易损性, 基于剑桥本构模型, 利用水土耦合有限变形分析软件 GEOASIA 对人工岛模型进行了数值模拟. 但这些研究关于近海岸工程场地的液化影响因素的分析还不够完善, 而且未对含倾斜砂土层液化的情况进行深入分析. 人工岛通常建设在距岸边较近的近海区域, 海床中各土层易呈倾斜分布, 含倾斜可液化土层在强震中发生较大的水平侧移和不均匀沉降, 对上

收稿日期: 2014-12-05; 修回日期: 2015-05-28.

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013605-2); 国家自然科学基金资助项目(51078062).

作者简介: 胡记磊(1986-), 男, 博士生, E-mail: ray_1986@163.com; 唐小微*(1968-), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: tangxw@dlut.edu.cn.

部人工岛结构造成严重灾害. 本文针对含倾斜可液化砂土层的海床地基,考虑倾斜砂土层的坡度、厚度、埋深和海水水位因素,基于 Biot 两相饱和多孔介质动力耦合理论,采用 FE-FD 耦合循环弹塑性本构模型^[9]对坐落于含倾斜可液化土层海床上的人工岛模型进行地震液化影响因素分析及人工岛灾害机理探讨.

1 循环弹塑性本构模型简述

本循环弹塑性本构模型是 Oka^[10]将 FE-FD 耦合法扩展到饱和土体应力-应变关系的动力分析中. 在空间上,分别用有限元方法(FEM)和有限差分方法(FDM)对水土二相混合平衡方程和连续方程的孔压相关项进行空间离散化,降低了方程的自由度,得到以土骨架位移 u 和孔压 p 为未知变量的控制方程,有效地避免了位移和孔压的插值形函数阶数不一致带来的麻烦;在时间上,采用 Newmark- β 法再对该控制方程进行时间离散化,最后得到了水土耦合的动态有限元方程.

该循环弹塑性本构模型的基本假设和其他弹塑性本构模型的假定基本相同,不同之处在于该本构模型采用的是非相关流动法则和改进的 Armstrong-Frederick 型非线性运动硬化规律,修正了应力-应变特征曲线. 引入膨胀系数 D_0 和 n 的非线性表达式,更好地描述了应力路径特性. 塑性应变增量以非线性方式调整硬化参数 B_0 、 B_1 和 C_f , 进而改变屈服面位置,以达到混合硬化法则的要求,很好地描述了土体在动荷载作用下的液化过程. Tateishi 等^[11]和张锋^[12]对该循环弹塑性本构模型进行了详细描述. 此外, Matsuo 等^[13]基于一系列含有可液化土层的土坝动力离心机试验结果与 1993 年 Hokkaido Nansei-oki 地震中土坝地震破坏实例的对比分析,验证了该本构模型的正确性和有效性.

2 人工岛计算模型

本文人工岛二维简化模型如图 1 所示,该人工岛坐落于含倾斜可液化层的海床上. 由于近海域海底土层多为缓坡($\leq 5^\circ$),本文选用平坡、 1° 、 3° 和 5° 缓坡模型,同时考虑不同砂土层厚度、砂土层埋深以及海水水位因素对人工岛液化灾害的影响进行深入分析. 为了消除模型两侧的边界效应,

在该模型两侧分别再增加长为 200 m 的超长单元(图 1 中未显示). 模型网格划分为四边形单元,单元总数为 7 400,节点总数为 7 649,网格划分如图 2 所示(超长单元未显示). 主要计算参数见表 1. 模型底部采用完全固定的不排水边界,两侧采用水平固定、竖向自由的不排水边界,海床面为自由排水边界. 地震波来源于振动台试验的人工合成地震波,持续时间为 18 s,最大加速度为 41.78 m/s^2 . 地震波是以加速度的形式加载到模型单元中的. 加速度时程曲线如图 3 所示. 模型初始应力由土体固结计算得到.

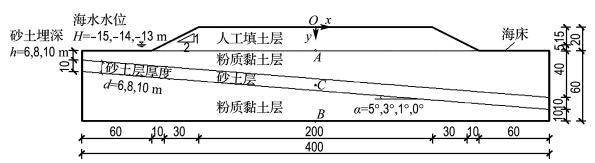


图 1 人工岛模型示意图(单位:m)

Fig. 1 Sketch map of an artificial island model (unit:m)

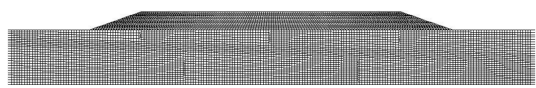


图 2 人工岛模型网格图

Fig. 2 Mesh diagram of the artificial island model

表 1 各土层参数

Tab. 1 Parameters for soil layers

土层	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	初始孔隙比 e_0	压缩指数 λ
粉质黏土	1 700	1.0×10^{-6}	2.000	0.200 0
砂土	1 857	1.7×10^{-5}	0.856	0.026 4
人工填土	1 900	1.0×10^{-3}	0.900	0.020 0
土层	膨胀指数 κ	初期剪切模量比 $G_0/\sigma'_{\text{m}0}$	变相应力比 M_{m}	破坏应力比 M_{f}
粉质黏土	0.020 0	514.2	1.336	1.169
砂土	0.005 5	829.0	1.000	0.910
人工填土	0.002 0	907.0	1.158	1.013
土层	硬化参数 B_0	硬化参数 B_1	硬化参数 C_f	超固结比
粉质黏土	1 756	77	1 500	—
砂土	1.120	3 000	60	1.0
人工填土	2 700	135	1 500	—
土层	基准塑性应变 γ^p	基准弹性应变 γ^e	膨胀系数 D_0	膨胀系数 n
粉质黏土	—	—	—	—
砂土	0.010	0.030	5.00	1.20
人工填土	—	—	—	—

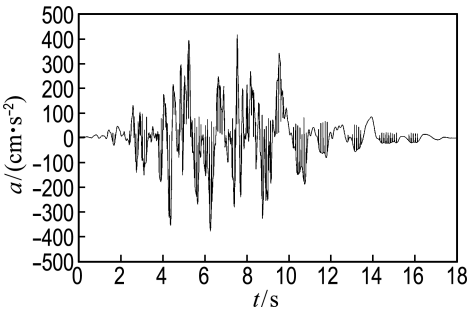


图 3 地震加速度时程图

Fig. 3 Ground surface acceleration time history curve of seismic wave

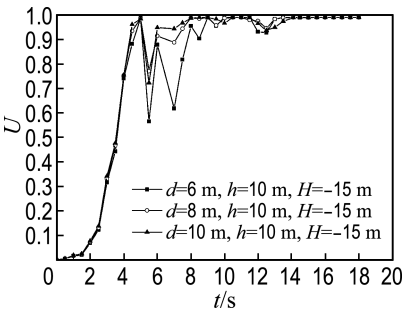
3 人工岛地基地震液化灾害模拟结果与分析

3.1 人工岛倾斜可液化地基土层液化进程分析

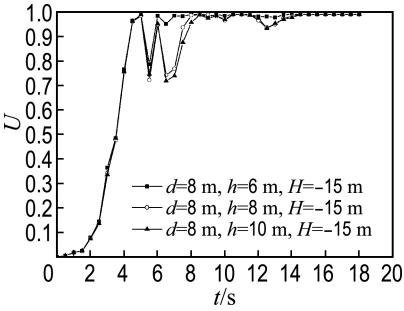
取倾斜砂土层坡度为 3° 的模型, 分别考虑不同可液化层厚度 d 、埋深 h 和水位 H 对超孔隙水压力比^[14] (以下简称超孔压比 U) 的影响, 计算得到倾斜液化层正中间单元 (图 1 中 C 点所在单元) 的超孔压比的时程曲线如图 4 所示. 在地震荷载作用的前 4 s 内, 倾斜砂土层孔隙水压力迅速增长, 在第 4 s 时, 超孔压比达到 0.7 以上, 土层呈初始液化状态. 4~8 s 内土层的超孔压比上下浮动, 出现往复液化现象, 8 s 后土层完全液化, 这一现象与 Seed 的初始液化观点一致. 图 4(a) 中, 倾斜可液化层越厚, 地震发生后的孔隙水压力增长越快, 土层越容易被液化, 液化时间点也会略微提前. 图 4(b) 中, 倾斜砂土层埋深越大, 其初始竖向有效固结应力越大, 孔隙水压力的增长相对越慢, 故土层越难被液化, 因此, $h=10$ m 的工况中土层完全液化时间点相对于 $h=6$ m 的工况要滞后大约 2 s. 图 4(c) 中, 相对于倾斜砂土层厚度和埋深的影响而言, 水位的小幅度变化对土层液化的影响较小, 3 种工况中的超孔压比增长基本一致.

3.2 人工岛侧向位移结果分析

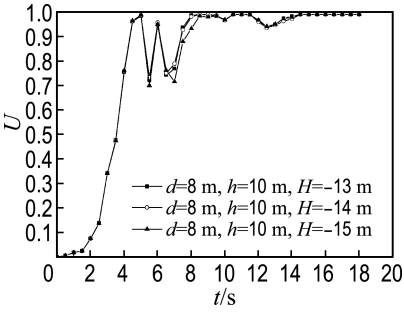
取倾斜砂土层坡度分别为 0° 和 3° 的模型, 倾斜砂土层厚度、埋深和海水水位保持不变. 地震在 4、8 和 18 s 时的人工岛土体侧向位移云图如图 5 所示. 在 0° 模型中, 人工岛砂土层从初始液化时刻 4 s 到地震结束时刻 18 s 岛体两侧水平位移基本对称, 左侧最大侧向位移为 -3.654 m (负号表



(a) 厚度



(b) 埋深



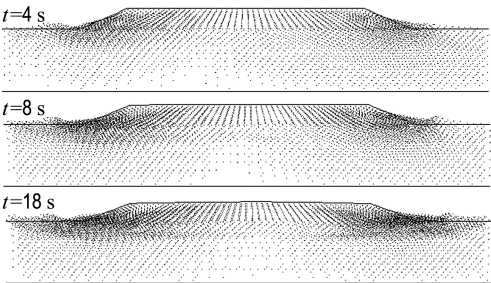
(c) 水位

图 4 不同因素影响下超孔压比时程曲线

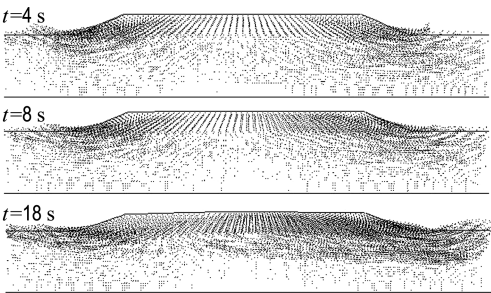
Fig. 4 Time histories curves of excess pore pressure ratio at different factors

示向左, 下同), 右侧最大侧向位移为 3.567 m. 在 3° 模型中, 人工岛砂土层从初始液化时刻 4 s 到完全液化时刻 8 s 岛体两侧水平位移也基本对称, 但在倾斜砂土层完全液化后, 人工岛平台侧移呈非对称, 左侧土层最大侧向位移为 -3.681 m, 该值略大于 0° 模型中的左侧最大侧向位移, 而右侧土层最大侧向位移为 4.106 m, 比 0° 模型中的右侧最大侧向位移多出了 0.539 m, 带来的灾害也大得多. 这说明倾斜砂土层完全液化后, 滑动土体在地震的惯性力作用下沿滑移面向坡下发生相对滑动. 这也就是震害调查中已被观察到的液化土体侧向扩展 (lateral spreading) 现象^[15]. 这种现象

在地震结束后一段时间内液化土层会随着上覆土体的重力作用继续扩展. 地震作用结束时的位移矢量图如图 6 所示, 可以明显看出人工岛的右半侧沿着液化土层发生侧向流移, 最终导致人工岛平台侧移破坏.



(a) 0°模型



(b) 3°模型

图 5 不同时刻人工岛侧向位移矢量图(单位:m)
Fig. 5 Vector diagram of lateral displacement of artificial island at different time (unit: m)

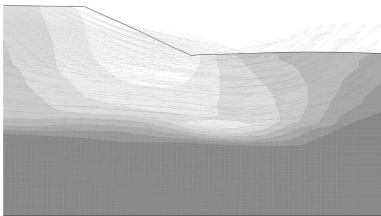


图 6 人工岛侧向位移云图及位移矢量图
(局部放大)
Fig. 6 Lateral displacement contour and vector diagram of artificial island (local amplification)

仅改变倾斜砂土层坡度 α , 液化层正中间节点(图 1 中 C 点)侧向位移时程如图 7 所示. 随着倾斜角度的增大, 液化层侧向位移量明显增大, 其中, 3° 和 5° 坡的液化层侧向位移相对于其他角度显著. 砂土层液化前, 在地震作用下土层的动应变较小, 侧向位移往复变动, 而土层完全液化后, 侧

向位移迅速向一个方向累计增长, 这说明地基的侧向扩展是在地震过程中饱和砂土层液化被触发后才得以发生, 而且是在地震作用过程中某段时间内的有限滑动.

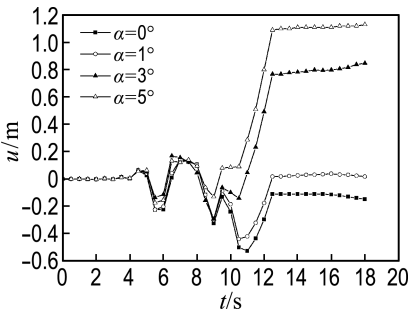


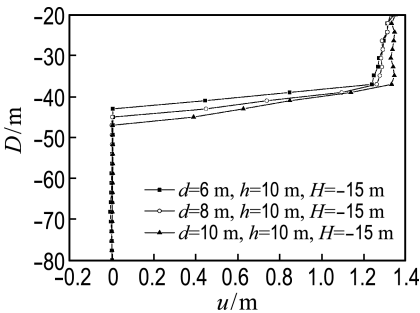
图 7 液化层不同坡度的侧向位移时程
Fig. 7 Time histories for lateral displacements at different slope angle of liquefiable layer

取倾斜砂土层坡度为 3° 模型, 改变倾斜砂土层厚度 d , 地震结束时刻模型中轴线(图 1 中的 A、B 两点的连线)的侧向位移如图 8(a)所示. 液化层越厚, 土层液化后发生的侧向位移越大. 模型中, 砂土层($-37 \sim -47$ m)的侧向位移斜率相对于其他土层深度 D 的侧向位移斜率而言非常小, 侧向位移变化非常明显, 这说明整个土层的滑移是发生在砂土层的倾斜面上.

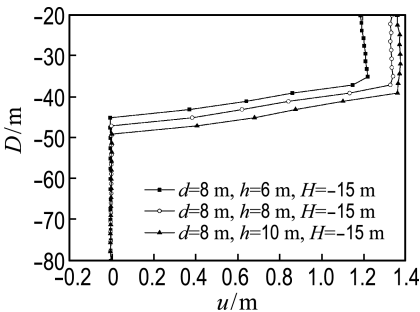
取倾斜砂土层坡度为 3° 模型, 改变倾斜砂土层埋深 h , 地震结束时刻 AB 段的侧向位移如图 8(b)所示. 同样, 砂土层的侧向位移量相对于其他土层而言非常大. 倾斜土层随着埋深的增大, 液化后的侧向位移量随之增大, 对上部建筑物的破坏越大, 但砂土层埋深越深, 其越难被液化. 所以, 在实际工程中, 对于这种含有倾斜可液化层, 而且其埋深较深的地基, 工程界应该引起高度重视, 如果预测在强震下会发生液化, 则应采取合理施工处理方案, 如桩基处理或围封法, 提高地基的抗液化能力, 减小其液化侧移扩展带来的灾害.

取倾斜砂土层坡度为 3° 模型, 改变水位 H , 地震结束时刻 AB 段的侧向位移如图 8(c)所示. 随着水位的升高, 倾斜砂土层的侧向位移也随之增大, 由于水位的上升会导致上覆有效应力随之降低, 砂土层更容易发生液化, 从图中可以看到水位 $H = -13$ m 时土层完全液化的时间点相对于

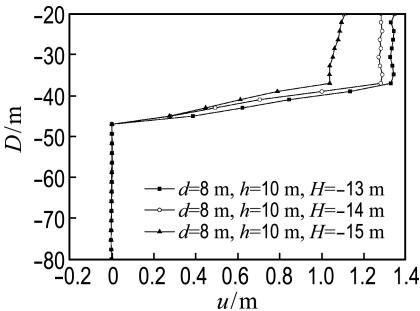
水位 $H=-15\text{ m}$ 时土层液化时间点略有提前,这样增长了土层相对滑移时间,所以滑移位移也随之增大。



(a) 厚度



(b) 埋深



(c) 水位

图 8 不同因素对土层侧向位移的影响
Fig. 8 Effects of different factors on the lateral displacements of soil layer

3.3 人工岛竖向位移结果分析

取倾斜砂土层坡度为 3° 的模型,地震在 4、8 和 18 s 时的人工岛竖向位移矢量图如图 9 所示.饱和砂土层初始液化时,由于地震作用造成的人工岛平台沉降量非常小,此时沉降量为 -0.105 m ;随着土层完全液化后倾斜砂土层发生流滑,人工岛两侧护岸的沉降量迅速增大,而且明显大于岛体中部区域的沉降量.当地震结束时,岛体最大沉降量达到 -2.747 m ,在土层中呈一个倒马鞍

形.由于模型两侧 x 方向固定,当人工岛两侧护岸下沉分别向两侧挤压海床表面,造成海床面隆起,右侧隆起区域明显大于左侧,最大隆起位移为 1.469 m .

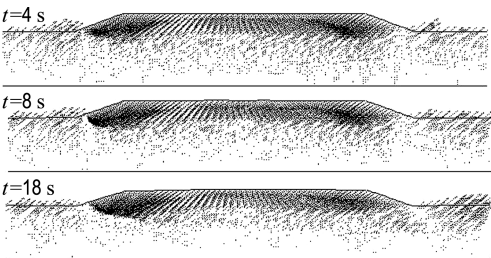


图 9 不同时刻人工岛竖向位移矢量图
Fig. 9 Vector diagram of vertical displacement of artificial island at different time

分别考虑倾斜砂土层坡度、厚度 d 、埋深 h 和水位 H 对竖向位移的影响,计算结果见表 2.人工岛的沉降会随着液化层倾斜角和厚度的增大而增大,随液化层埋深和水位的增大而减小.

表 2 不同因素对人工岛竖向位移的影响
Tab. 2 Effects of different factors on the vertical displacement of artificial island

影响因素		竖向最大沉降 位移/m	竖向最大隆起 位移/m
液化层倾斜角	0°	-2.096	0.994
	1°	-2.122	0.850
	3°	-2.747	1.469
	5°	-2.820	1.313
液化层埋深	6 m	-2.808	1.233
	8 m	-2.747	1.469
	10 m	-2.613	1.452
液化层厚度	6 m	-2.287	1.030
	8 m	-2.527	1.087
	10 m	-2.747	1.469
水位	-15 m	-2.747	1.469
	-14 m	-2.642	1.358
	-13 m	-2.587	1.320

4 结 论

(1)倾斜砂土层的坡度、埋深、厚度以及水位条件因素对人工岛地震灾害有着不同程度的影响,其中坡度的影响最显著,水位的影响最不明显.特别是水位对超孔隙水压力增长的影响非常

小。另外,砂土层的埋深越大,越难被液化,而地震液化后的砂土层侧向位移却随埋深的增大而增大,岛体的沉降随之减小,这种影响的复杂性在工程地基处理过程中应该综合考虑,以选择合理的处理措施。

(2)地基的侧向扩展是在地震过程中饱和倾斜砂土层液化被触发后才得以发生,而且是在地震作用过程中某段时间内沿液化层斜面的有限滑动。在地震结束后一段时间内液化土层会随着上覆土体的重力作用继续扩展,其灾害程度比水平砂土层液化造成的破坏要大得多。

(3)含倾斜砂土层的人工岛发生液化后,由于液化层的侧向扩展以及岛体的下沉挤压,易发生严重的不均匀沉降,护岸处的沉降量远大于平台中部区域,且在平台下方形成一个倒马鞍形。因此,人工岛护岸应该作为抗液化处理重点考虑的对象。

我国近海岸工程地区分布大面积的倾斜可液化土层,地震诱发地基液化大变形灾害研究对工程的危害评价工作有着重要的实际意义。因此,综合考虑以上各因素对海岸工程的灾害影响,可为近海岸工程的合理抗液化方案以及液化后的灾害评价提供参考依据。

参考文献:

- [1] Boulanger R W, Mejia L H, Idriss I M. Liquefaction at Moss Landing during Loma Prieta earthquake [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, **123**(5):453-467.
- [2] Inagaki H, Iai S, Sugano T, *et al.* Performance of caisson type quay walls at Kobe Port [J]. **Soils and Foundations**, 1996(S):119-136.
- [3] Chu D B, Stewart J P, Youd T L, *et al.* Liquefaction-induced lateral spreading in near-fault regions during the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, **132**(12):1549-1565.
- [4] Cetin K O, Youd T L, Seed R B, *et al.* Liquefaction-induced lateral spreading at Izmit Bay during the Kocaeli (Izmit)-Turkey earthquake [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, **130**(12):1300-1313.
- [5] 蔡晓光,袁晓铭,刘汉龙,等. 近岸水平场地液化侧向大变形影响因素分析[J]. **世界地震工程**, 2007, **23**(2):20-25.
CAI Xiao-guang, YUAN Xiao-ming, LIU Han-long, *et al.* Influence factors on liquefaction - induced lateral spreading of ground near bank [J]. **World Earthquake Engineering**, 2007, **23**(2):20-25. (in Chinese)
- [6] 蔡晓光,袁晓铭,刘汉龙,等. 近岸水平场地液化侧向大变形机理及软化模量分析方法[J]. **地震工程与工程振动**, 2005, **25**(3):125-131.
CAI Xiao-guang, YUAN Xiao-ming, LIU Han-long, *et al.* Mechanism and softening modulus approach for liquefaction-induced lateral spreading of ground near bank or seashore [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, **25**(3):125-131. (in Chinese)
- [7] 袁晓铭,蔡晓光. 人工岛地基液化侧移分析[J]. **水利学报**, 2005(增刊):541-545.
YUAN Xiao-ming, CAI Xiao-guang. Analysis for liquefaction-induced lateral spreading of artificial island [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005(S):541-545. (in Chinese)
- [8] Noda Toshihiro, Asaoka Akira, Nakai Kentaro. Modeling and seismic response analysis of reclaimed artificial ground [J]. **Geotechnical Special Publication**, 2010(201):294-299.
- [9] Oka Fusao. Cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule [C] // **Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992.
- [10] Oka F, Yashima A, Kato M, *et al.* Constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application [C] // **Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992: 2529-2534.
- [11] Tateishi A, Taguchi Y, Oka F, *et al.* Cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions [C] // **Proceedings of the 1995 1st International Conference on Earthquake**

- Geotechnical Engineering, Part 1 (of 2)**. Tokyo: [s n], 1995:399-404.
- [12] 张 锋. 计算土力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- ZHANG Feng. **Computational Soil Mechanics** [M]. Beijing:China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [13] Matsuo Osamu, Shimazu Takao, Uzuoka Ryosuke, *et al.* Numerical analysis of seismic behavior of embankments founded on liquefaction soils [J]. **Soils and Foundations**, 2000, **40**(2):21-39.
- [14] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- CHEN Yu-min, XU Ding-ping. **FLAC/FLAC3D Basis and Engineering Examples** [M]. Beijing:China Water Power Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 黄 雨, 八嶋厚, 沢田和秀, 等. 堤防地基地震液化的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, **24**(12):82-87.
- HUANG Yu, Yashima Atsushi, Sawada Kazuhide, *et al.* Numerical modeling of earthquake liquefaction in earth embankment foundations [J]. **Engineering Mechanics**, 2007, **24**(12):82-87. (in Chinese)

Analyses of seismic liquefaction induced disaster in artificial island with sloping sand layer

HU Ji-lei^{1,2}, TANG Xiao-wei^{*1,2}, BAI Xu^{1,2}, ZHANG Xi-wen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Liquefaction due to strong earthquake easily causes permanent displacement and strain of sloping sand layer in the fundament and induces the phenomena of flow slides, and then brings serious damages to the superstructure. Considering sloping sand layers' gradient, thickness, depth and seawater level synthetically, a two-dimensional offshore artificial island model was simulated numerically by FE-FD coupling finite element analysis method. The experimental results indicate that these four influence factors have different effects on the large deformation of artificial island in the course of seismic liquefaction. The influence of gradient is the greatest, and the influence of seawater level is the most non-obvious, and especially, its effect on excess pore water pressure is very small. Lateral spreading of artificial island just occurs after total liquefaction of saturated sloping sand layer in the course of seismic, which is a limit slide along the slope during a period of time. Its degree of damage is much bigger than that of damage induced by liquefaction of horizontal sand layer, and it easily causes serious differential settlement and damage of revetment of artificial island. These analytical results can provide reference for hazard evaluation of offshore engineering due to seismic liquefaction.

Key words: artificial island; earthquake; numerical simulation; liquefaction; sloping sand layer; lateral spreading; settlement