人工岛余震再液化数值模拟研究。

胡记磊1.2,唐小微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. 大连理工大学土木工程学院岩土工程研究所,辽宁大连 116024)

摘要:主震结束后,余震引起的再液化会对土工结构物带来进一步的严重灾害。以人工岛为研究对 象,基于 FE-FD 耦合有限元方法,考虑有无余震、不同余震大小和主余震不同时间间隔因素,探讨 对人工岛再液化灾害的影响规律。研究结果表明:主震结束后,随着超孔隙水压力的消散,人工岛 砂土层液化区域逐渐减小,余震发生时液化区域又开始扩展,甚至可能大于主震结束时的液化区域 面积,且其灾害程度比无余震发生时的要大得多;随着主、余震的时间间隔增加,间隔期的土层固结 排水很大程度地提高人工岛的抗再液化能力,当超孔隙水压力消散完后,在相同余震等级情况下很 难再次达到完全液化;随着余震峰值加速度的增加,人工岛的沉降量和水平侧移量都随之增加,再 次液化时间点会向前提前数秒,主震结束后,随着土层的固结排水,人工岛的沉降会继续增加,甚至 超过主震引起的沉降量,而水平侧移的产生主要发生在地震液化过程中,在后续的固结排水中几乎 不变;余震发生前,如果人工岛的砂土土层仍处于液化状态,则液化层可能会起到隔震作用,减轻余 震对岛体造成的灾害。

Numerical Simulation Study of Re-liquefaction of Artificial Island Induced by Aftershocks

HU Ji-lei^{1,2}, TANG Xiao-wei^{1,2}, ZAHNG Xi-wen^{1,2}

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

Abstract: Re-liquefaction induced by aftershocks causes serious hazards on soil structures after the end of the main shock. In this study, the influences of aftershocks on an artificial island are discussed based on the FE-FD coupling finite element analysis method at different scales of aftershocks and interval time between the main shock and aftershock. The results indicate that with dissipation of excess pore-water pressure after the main shock, liquefied areas in the sand layer of the artificial island gradually decrease; however, the liquefied areas expand rapidly when an aftershock occurs, and can possibly be larger than the liquefied areas induced by the main shock; the extent of damage to the artificial island is much worse when an aftershock occurs than when it does not. The increasing of the interval time between the main shock and aftershock results in the drainage consolidation during this time significantly improving the ability of the artificial island to re-liquefy; thus, full-scale re-liquefaction in the artificial island is difficult when the excess pore-

① **收稿日期:**2014-05-14

water pressure entirely dissipates. Settlement and horizontal displacement of the artificial island increases with increase of the peak acceleration of the aftershock and the liquefaction point-in-time of the sand layer occurs a few seconds early. After the main shock, with drainage by consolidation in the soil, settlement of the artificial island continues to increase, and is even larger than the settlement induced by the main shock, but the horizontal displacement barely changes. Before the aftershock, if the sand layer of the artificial island is still liquefiable, the sand layer may play a role in seismic insulation and reduce the hazards caused by the aftershock to the artificial island. Therefore, it is necessary to consider multiple seismic fortifications during a period of time for offshore structures, especially for artificial islands.

Key words: artificial island; re-liquefaction; aftershock; horizontal displacement; settlement; disaster

0 引言

余震再液化是主震中发生液化的场地在余震中 再次发生液化的现象。对于地震液化灾害问题已取 得了很多研究成果,但对余震再液化问题研究甚少。 在历史地震案例中出现过数次余震再液化现象,也 在很大程度上带来了人员伤亡和财产损失。例如, 2003年2月24日新疆巴楚 Mw6.8 地震中有场地 发生余震再液化迹象[1];2008年5月12日四川汶 川 M_w8.0 地震后不到一周时间内,共发生 9 130 次 余震,其最大震级达到 6.4 级,大大加重了地震灾 害,距离震中较远、Ⅲ度区域的德阳市帕隆镇果园村 在 M_w6.4 余震中再次发生液化^[2]:2011 年 3 月 11 日日本东北地区太平洋近海 M_w9.0 地震后发生了 一系列余震,分别发生在主震后22分钟(7.4级)、29 分钟(7.6级)和 39 分钟(7.5级)时,调查发现福岛 县和千叶县浦安市等地余震再液化现象普遍发生, 余震的喷砂冒水面积明显大于主震(见图 1),房屋 破坏数量也明显多于主震过程中的破坏数量[3]。 2011 年 6 月 13 日 Christchurch Mw 6.0 余震中许 多区域发生了严重的反复液化现象,造成大量居民 住宅、桥梁及堤坝严重破坏^[4]。目前对于余震再液 化问题的研究主要从场地调查、室内试验和数值模 拟三方面进行研究:(1)在日本"3·11大地震"中, Yasuda^[5]对福岛县和千叶县等地余震再液化进行 了调查,分析发现余震过程中场地发生液化的持续 时间比主震中要短,但平均喷冒高度却更高,造成的 沉降量更大;Onoue 等[6-7] 对千叶县朝阳市的液化震 害调查发现,在主震中由液化导致的房屋破坏有5 栋,未伴随喷砂冒水现象,而在余震中由液化导致的 房屋破坏增加至9栋,且伴随喷砂冒水现象。(2) 1992年 Ohara 等^[8]通过试验验证了砂土再液化所 需要的震级比主震液化时的震级要小,他认为在主 震液化中振动系数小,而且持续时间短的情况下,土 体的抗再液化能力才会变小。Oda 等^[9]通过循环加 载试验探讨了砂土的各向异性、孔隙不均匀分布和 残余剪应变对再液化的影响,并从微观角度解释了 再液化机理,认为土体在循环加载过程中液化后会 产生微观结构各向异性,在剪切带上会形成连贯的 孔洞,当再次进行不排水循环加载时,主应力轴发生 旋转,土体会变得极其不稳定,超孔隙水压力急剧上 升,土体更易液化。Yamada 等^[10] 通过一系列三轴 剪切试验验证了土体的抗再液化能力主要取决于土 体的各向异性的变化,当液化后土体的各向异性变 高时,尽管液化后的土层会因固结沉降造成相对密 实度增加,但土体的抗再液化能力还是会随之降低。 Ha 等[11] 通过1g 振动台试验证实了土体的抗液化 和抗再液化能力与相对密实度或孔隙比没有太大关 联,因为土体的抗液化和抗再液化能力不可能由某 单一的指标或颗粒特征完全确定。他建议将固结系 数 c_v 或系数 $D_{10}^2 D_r^{28}$ 或 D_{10}/C_U 作为土体抗再液化 能力指标。(3)Onoue 等^[6-7]采用 UWLC 软件模拟 了日本千叶县朝阳市液化场地在主震和余震后超孔 隙水压力比随时间的变化。模拟结果发现,在主震 中场地的超孔隙水压力在峰值加速度处急剧上升达 到液化,由于主震和余震的间隔时间只有大约1分 钟,主震中形成的超孔隙水压力只消散了微小部分, 在余震中超孔隙水压力继续上升,场地达到完全液 化。森河等[12-13] 通过数值模拟方法对比分析了有、 无余震对场地沉降量的影响,分析结果表明,有余震 发生时地面沉降量比无余震时要多约20%,同时通 过余震后的静力计算分析得出余震对地面沉降的影 响将长达50年。

人工岛是在近海岸填筑起来的陆地,在地震或 波浪荷载下容易引起岛体的回填砂或海床下部砂土



图1 主震、余震液化范围对比[3]

Fig.1 Comparison of liquefaction ranges in main shock and aftershock^[3]

层超孔隙水压力迅速聚集产生液化,进而对岛体上 部结构产生影响。1995年日本阪神发生了 M_s7.2 地震,Port 和 Rokko 人工岛填土大面积液化,导致 大量港口设施与建筑物严重破坏^[4],海岸线向海移 动 2~3 m、地表下沉约 1 m。人工岛的抗液化设防 非常重要,但现有抗震设计只考虑单次抗震设防情 况,对余震设防考虑不足。由于地震发生后的相当 长时间内仍有可能发生较大的余震,强余震所带来 的累计震害效应会进一步造成人员伤亡和财产损 失。因此,本文采用循环弹塑性本构模型,以有限 元-有限差分(FD-FE)耦合方法考虑有无余震、余震 强度和不同主余震间隔时间对近海人工岛的震害进 行模拟分析。

1 数值方法

Akai和 Tamura^[14]于 1978 年提出了一种 FD-FE 耦合方法,并将其应用于饱和土体的分析中。 随后 Oka 等^[15]采用无限小应变假定将该方法扩展 至饱和砂土动力液化分析中,并考虑了非线性移动 硬化准则及塑性剪切模型的应力-剪胀特性关系和 应变依赖特性,提出了一种有效循环弹塑性本构模 型来模拟土体的液化过程。该本构模型的基本假设 和其他弹塑性本构模型基本相同,不同之处在于它 采用的是黏塑性非关联流动法则,其屈服函数与势 函数不一致。Osamu Matsuo 等^[16]基于一系列含 有可液化砂土层的土坝动力离心机试验试验结果及 1993 年 Hokkaido Nansei-oki 地震中土坝地震破坏 实例验证了该本构模型的正确性和有效性。

2 人工岛模型及地震波

某人工岛断面简化模型如图 2 所示,为了消除

边界效应,在该模型两侧再分别增加长为100 m的 超长单元。模型网格全划分为四边形单元,单元总 数为8273,节点总数为8519。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条件,海床面为自 由排水边界。本算例主震峰值加速度为 0.3 g,持续 时间为 21 s,余震峰值加速度分别为 0.1 g、0.05 和 0.01 g,持续时间都为 21 s。主震和余震间隔时间分 别为 60 s、3 600 s、86 400 s 和 259 200 s。计算工况 见表2所示。工况1~工况4保持主、余震的峰值 和持续时间不变,改变其主、余震的间隔时间;工况 5~工况 8 只有主震发生,采用不同液化后的固结持 续时间与相应有余震的工况进行对比;工况9和工 况 10 的主震波相同,改变其余震峰值加速度大小, 对比不同余震对人工岛再液化的影响程度。其中工 况2的地震加速度时程曲线如图3所示。在有限元 计算过程中采用多步长分段计算,主震和余震计算 增分采用 0.001 s, 中间间隔时间内的超孔隙水压力 消散计算增分采用1s。



图 2 某人工岛断面图(单位:m)



3 计算结果分析

3.1 超孔隙水压力比

工况 2 中人工岛在主震结束时、余震开始时和 余震结束时的超孔隙水压力比对比云图如图 4 所 示。主震结束时砂土层完全液化,随着超孔隙水压 力的消散,液化区域逐渐减小,当余震发生时液化区 域又开始扩展,甚至大于主震结束时的液化区域面 积。

人工岛在不同时间间隔情况下单元 B 的超孔 隙水压比(EPWP)对比如图 5 所示。图 5(a)中间隔 时间较短,为 60 s,由于超孔隙水压力来不及消散, 余震发生时土层将持续保持完全液化。但随着间隔 时间的增长,超孔隙水压力开始逐渐消散,在图 5(b)中,虽然人工岛仍然处于液化状态,但其砂土 层的超孔隙水压力比在 1 小时内降低了 0.1,随后在 余震的作用下又再次达到完全液化。当超孔隙水压

表 1 模型材料参数

材料参数	混凝土	人工回填土	淤泥碎石土	砂土	粉质黏土	黏土	基岩
密度 p/(kg・m ⁻³)	2.55E03	2.02E03	1.74E03	1.94E03	1.90E03	1.77E03	2.94E03
初始孔隙比 e ₀	0.25	0.90	2.00	0.456	1.20	0.72	0.50
压缩指数 λ	1.5E07	0.02	0.35	0.025	0.16	0.25	1.0E03
膨胀指数κ	1.5E07	0.002	0.02	0.002 5	0.02	0.02	1.0E03
渗透系数 k/(m・s ⁻¹)	1.0E-10	2.0E-04	1.0E-06	6.0E-05	6.0E-06	3.0E-07	5.0E-10
初始剪切模量比 $G_0/\sigma_{ m m0}$	-	907.0	514.2	1 280.0	514.2	514.2	-
变相应力比 M _m	-	1.158	1.336	0.910	1.336	1.336	-
破坏应力比 M _f	-	1.013	1.169	1.250	1.169	1.169	-
硬化参数 B ₀	-	2 700	1 756	3 000	1 756	1 756	-
硬化参数 B1	-	135	77	60	77	77	-
硬化参数 C _f	-	1 500	1 500	0	1 500	1 500	-
超固结比 OCR	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
膨胀系数 D ₀	-	0	0	1.0	0	0	-
膨胀系数 n	-	0	0	4.0	0	0	-
基准塑性应变 γ Ρ	-	1 000	1 000	0.01	1 000	1 000	-
基准弹性应变 $\gamma_{\rm E}$	-	1 000	1 000	0.20	1 000	1 000	-

表 2 模型工况表

Table	2	C	ases	of	the	model	l

工况 编号	主震持 续时间/s	主震峰值 加速度/g	时间间 隔/s	余震持 续时间/s	余震峰值 加速度/g
1	21	0.3	60	21	0.1
2	21	0.3	3 600	21	0.1
3	21	0.3	86 400	21	0.1
4	21	0.3	259 200	21	0.1
5	21	0.3	81	-	-
6	21	0.3	3 621	-	-
7	21	0.3	86 421	-	-
8	21	0.3	259 221	-	-
9	21	0.3	86 400	21	0.01
 10	21	0.3	86 400	21	0.05

注:表中"-"表示无余震



图 3 地震波加速度时程曲线

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





力小于 0.7 时砂土层开始不液化^[17],图 5(c)中的人 工岛砂土层已经不处于液化状态。当时间间隔达到 3 天时(图 5(d)),人工岛砂土层的超孔隙水压力已 基本消散,当在相同的余震大小作用下砂土层未达 到完全液化状态,这说明当液化后的人工岛在长时 间的固结沉降后,其抗液化能力得到了一定提高,在 小余震作用下很难再次达到完全液化。当余震大小 不同,其他条件相同时,单元 B的超孔隙水压力比会 随着余震大小的增加而增加,再次液化时间将有所 提前,如图 6 所示,余震峰值加速度为 0.1 g 时砂土 层液化时间比余震峰值加速度为 0.01 g 时的液化时 间要早约 5 s。



Fig.5 Comparison of EPWPR at different interval time





3.2 人工岛沉降及水平侧移

人工岛在有无余震和不同间隔时间情况下节点 A的沉降量对比如图 7 所示。从图中可以明显看出 有余震发生时,人工岛沉降量要比无余震时大得多, 余震引起的沉降量随主、余震时间间隔长短而不同, 有可能比主震引起的沉降要大,如图 7(d),排水固 结引起的沉降量大约达 0.7 m,此值略大于主震液 化引起的沉降量,因此液化后土体的流动和固结造 成的破坏不容忽视。图 7(a)、(b)中人工岛砂土层 的超孔隙水压力比大于 0.7, 所以土层仍处于液化状 态,图 7(a)中余震引起的沉降明显小于图 7(b),这 可能是因为当余震发生时,处于液化中的砂土层起 到了隔震作用,吸收了部分余震能量,减轻了上部结 构的破坏,液化引起的地基失效和隔震作用是同时 起作用的^[18]。图 7(c)、(d)对应的工况中砂土层随 着超空隙水压力的消散已经不处于液化状态,随着 土层排水固结,余震引起再次液化相对困难,而且引 起的沉降量也会有减小。

人工岛在有无余震及不同间隔时间情况下节点

A 的水平侧移对比如图 8 所示。从图中可以明显看 出有余震发生时,人工岛的水平侧移量要比无余震 时的大得多。岛体的水平侧移量在主震结束后的短 时间内会略有增加,但不会随着后续的土层固结排 水而继续变化。在余震过程中不同间隔时间对人工 岛水平侧移的影响规律和图 7 中沉降规律一致,在 此不赘述。

当主余震间隔时间为 86 400 s,仅余震大小不同时,余震大小对人工岛再液化的沉降量和水平侧移量对比如图 9 所示。从图中可以看出随着余震峰值加速度的增加,人工岛的沉降量随之增加。而人工岛水平侧移在余震为 0.01 g时,由于余震震级较小,此时液化区域非常小,在地震的作用下砂土层以上土体整体向右侧移动,随着余震震级的增加,砂土层液化区域逐渐扩展至完全再次液化,此时会在砂土层形成一个滑移面,其上土层在后续余震的负加速度(方向向左)的运动趋势下,向左侧发生"有限"流滑,造成地基土层大面积错移,进而对人工岛造成整体液化破坏。

4 结论

本文通过 FE-FD 耦合有限元方法,探讨了有无 余震和不同余震大小因素对人工岛液化灾害的影 响。初步结论与建议如下:

(1)有余震发生的人工岛要比无余震的震害大 得多,所以人工岛的抗震设防不应该只考虑单震设 防。

(2)主震结束后,由土层排水固结引起的沉降量 也相当大,对于松散的土体而言,其固结沉降量甚至 可以超过主震引起的沉降量,而水平侧移的产生主 要发生在地震液化过程中,在后续的固结排水中几





Comparison of horizontal displacements at different interval time with aftershock and without aftershock Fig.8



不同余震大小沉降与水平侧移云图 图 9

Fig.9 Cloud diagrams of settlement and horizontal displacements at different scales of aftershock

乎不变。因此,在地震发生后,土层排水固结的过程 中应尽早进行液化处理,以减小后续灾害。

(3) 随着余震峰值加速度的增加,人工岛的沉 降量和水平侧移量都随之增加。在余震发生时,若 土层仍处于液化状态,则液化土层可能会对上部结 构产生隔震作用,减小余震对岛体造成的灾害。对 于这种隔震现象具体在什么情况下发生,还有待进 一步研究。

参考文献(References)

 $\lceil 1 \rceil$ 袁晓铭,曹振中.汶川地震液化的特点及带来的新问题[J].世 界地震工程,2011,27(1):1-8.

YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Features and New Aspects of Liquefaction in the Wenchuan Earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1):1-8. (in Chinese)

- [2] 曹振中,袁晓铭,陈龙伟,等.汶川地震液化宏观现象概述[J]. 岩土工程学报,2010,32(4):645-650. CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming, CHEN Long-wei, et al, Summary of Liquefaction Macrophenomenna in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(4):645-650.(in Chinese)
- 黄雨,于森,孙锐,等.2011年日本东北地区太平洋近海地震地 [3] 基液化灾害综述[J].岩土工程学报,2013,35(5):834-840. HUANG Yu, YU Miao, SUN Rui, et al. Review on Liquefaction-induced Damages of Soils and Foundations During 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5), 834-840. (in Chinese)
- 陈国兴,金丹丹,常向东,等.最近20年地震中场地液化现象的 [4] 回顾与土体液化可能性的评价准则[J].岩土力学,2013,34 (10):2737-2755.

CHEN Guo-xing, JIN Dan-dan, CHANG Xiang-dong, et al. Review of Soil Liquefaction Characteristics During Major Earthquakes in Recent Twenty Years and Liquefaction Susceptibility Criteria for Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10); 2737-2755.(in Chinese)

安田進.液状化関係の報告[C]// 浦安市における液状化なら [5] びに対策技術の調査?検討に関する報告会.日本:公益社団 法人地盤工学会.2012.2.20.[2012.5.30]. http://www.jiban. or.jp/file/organi/2_0.pdf.

YASUDA S.Report on Liquefaction[C]// Meeting Report on the Investigation and Study of Liquefaction Countermeasure Technology in Urayasu. Japan: The Japanese Geotechnical Society, 2012.2.10. [2012.5.30]. http://www.jiban.or.jp/file/ organi/2_0.pdf.(in Japanese)

尾上篤生,蔡飛,中島美代子,等.緩い砂埋戻し地盤の辺縁部 [6] の液状化に伴う地盤変状の特徴[J].地盤工学ジャーナル,

2012,7(1):175-184.

Onoue A, Cai F, Nakajima M, et al. Behavior of Liquefied Soil at Brink of Backfilled Basin[J].Japanese Geotechnical Journal, 2012,7(1):175-184.(in Japanese)

- [7] Atsuo Onoue, Fei Cai, Miyoko Nakajima, et al. Behavior of Liquefied Soil Near Boundary of Backfilled Basin Due to Main and Following Maximum Aftershock [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, Japan: [s. n.], 2012:777-788.
- [8] S Ohara, T Yamamoto, H Yurino. Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit[J]. Earthquake Engineering, 1992;1425-1429.
- [9] Masanobu Oda, Ken Kawamoto, Kiichi Suzuki, et al. Microstructural Interpretation on re-liquefaction of Saturated Granular Soils Under Cyclic Loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvionmental Engineering, 2001, 127:416-423.
- [10] Shotaro Yamada, Tomoko Takamori, Kenichi Sato. Effects on Reliquefaction Resistance Produced by Changes in Anisotropy During Liquefaction[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(1):9-25.
- [11] Ik-soo Ha, Scott M Olson, Min-woo Seo, et al. Evaluation of Reliquefaction Resistance Using Shaking Table Tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31:682-691.
- [12] 森河,由紀弘,包小華,等.震度の小さい余震による再液状化 のメカニズムと3DFEM 解析による解釈[J].盤工学ジャー ナル,2012,24:15-22.

Yukihiro Morikawa,Xiaohua Bao,Feng Zhang,et al.Explanation of Re-liquefaction Due to a Small Aftershock Using Numerical 3D FEM Analysis[J].Japanese Geotechnical Journal, 2012,24:15-22.(in Japanese) [13] 森河,由紀弘,包小華,等.余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性[J].地盤工学ジャーナル,2012,7(2):389-397.

> Yukihiro Morikawa, Xiaohua Bao, Kenichi Maeda, et al. Importance of Liquefaction Analysis Considering Re-liquefaction Due to Aftershocks of Earthquake[J].Japanese Geotechnical Journal,2012,7(2):389-397.(in Japanese)

- [14] Akai K, Tamura T. Numerical Analysis of Multidimensional Consolidation Accompanied with Elastic-plastic Constitutive Equation[C]//Proceedings of the Society of Civil Engineering, JSCE.1978,269(III):95-104.
- [15] Oka F, Yashima A, Shibata T, et al. FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Porous Soil Using an Elastic-plastic Model[J]. Applied Scientific Research, 1994, 52: 209-245.
- [16] Osamu Matsuo, Takao Shimazu, Ryosuke Uzuoka, et al. Numerical Analysis of Seismic Behavior of Embankments Founded on Liquefaction Soils[J]. Soils and Foundations, 2000, 40 (2):21-39.
- [17] 王丽艳,刘汉龙,蔡艳.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):452-456.
 WANG Li-yan, LIU Han-long, CAI Yan. Discussion on Assessment of Earth-structrue Liquefaction Deformation Based on the Concept of Degree of Liquefaction[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2007,27(4):452-456.(in Chinese)
- [18] 张荣祥,顾宝和,汪敏,等.建筑场地地震液化危害评价及地基处理[J].工程地质学报,1998,6(3):205-210.
 ZHANG Rong-xiang,GU Bao-he,WANG Min, et al. Hazard Assessment of Seismic Liquefaction for Sonstruction Sites and Ground Treatment[J].Journal of Engineering Geology,1998, 6(3):205-210.(in Chinese)