

2011年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述

黄 雨^{1, 2}, 于 森², BHATTACHARYA Subhamoy^{3, 4}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 布里斯托尔大学土木工程系, 布里斯托尔 BS8 1TR; 4. 萨里大学土木与环境工程系, 萨里 GU2 7XH)

摘要: 2011年3月11日, 日本太平洋东海岸发生 M_w 9.0 级大地震, 并引发巨大海啸, 导致了日本东北和关东地区大面积的地基液化灾害。通过现场震害调查和最新资料分析, 首先较为系统地介绍了日本地震受灾区的液化宏观现象和典型震害特征。其次, 研究了余震再液化和地震-海啸耦合灾害的破坏机制和特征, 指出余震再液化受地震力大小、应力历史及超孔隙水压力消散程度的影响, 并将地震和海啸耦合破坏过程分为3个阶段: 震后液化阶段、间歇期恢复阶段、海啸流滑破坏阶段; 最后, 对此次强震中有关抗液化地基处理方法的有效性进行了分析与探讨, 以期为今后的地基抗液化设计提供参考与借鉴。

关键词: 地震; 液化; 再液化; 地震海啸; 地基处理

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)05-0834-07

作者简介: 黄 雨(1973-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程的教学和研究工作。E-mail: yhuang@tongji.edu.cn。

Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan)

HUANG Yu^{1, 2}, YU Miao², BHATTACHARYA Subhamoy^{3, 4}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol BS8 1TR, United Kingdom; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, Surrey GU2 7XH, United Kingdom)

Abstract: On March 11th, 2011, an earthquake with magnitude of M_w 9.0 occurred off the Pacific Coast of Tohoku, and triggered widespread liquefaction in Tohoku and Kanto regions of Japan. Based on the field investigation and data analysis, the characteristics of liquefaction, liquefaction-induced damages, different failure mechanisms, characteristics of re-liquefaction in the aftershocks and seismic tsunami hazards are presented. The study also shows that re-liquefaction resistance is greatly affected by the intensity of earthquakes, stress history and dissipation of excess pore-water pressure. The damage process due to the seismic tsunami hazards is divided into three stages, the post-earthquake liquefaction stage, the recovery stage of soil strength and the flow-sliding failure stage. Finally, the effectiveness of ground improvement methods (sand compaction pile and sand drain method) in this massive earthquake is summarized for liquefaction mitigation in the future.

Key words: earthquake; liquefaction; re-liquefaction; seismic tsunami; ground improvement

0 引言

地基液化是地基基础地震破坏的主要原因之一。在地震动荷载作用下, 土体中超孔隙水压力急剧上升, 而有效平均应力降低直至为零, 土颗粒处于悬浮状态, 此时砂土就发生了液化。由于液化后土体的抗剪强度和剪切模量显著降低, 将导致地基承载力不足、震陷过大, 直至破坏失稳。近年来全球发生的多起强震, 如2008年中国汶川地震^[1]、2010年智利地震^[2]等, 均有大量的地基液化震害发生, 并造成了巨大生命和财

产损失。

2011年3月11日, 日本当地时间14时46分, 日本太平洋东海岸发生 M_w 9.0 级大地震, 震中位置如图1所示(图中的“烈度”已根据文献[3]中的“中国和日本烈度表对应关系”转化为中国的地震烈度)。这次地震是日本地震观测史上最大的地震, 被日本气象厅

命名为“2011年日本东北地区太平洋近海地震”(The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake)。震中位于日本东北地区大鹿半岛以东的太平洋海域约130 km处, 震源深度约24 km。地震引发了一系列的余震, 其中7级以上余震6次, 6级以上余震上百次^[4]。同时, 此次地震还引发了巨大的海啸, 最高浪高39 m, 为历史所罕见^[5]。此次地震在日本东北和关东地区引发了大规模的地基液化, 是造成震害的主要原因之一。再加之余震和海啸的耦合作用, 加剧了主震液化受灾区的变形破坏。

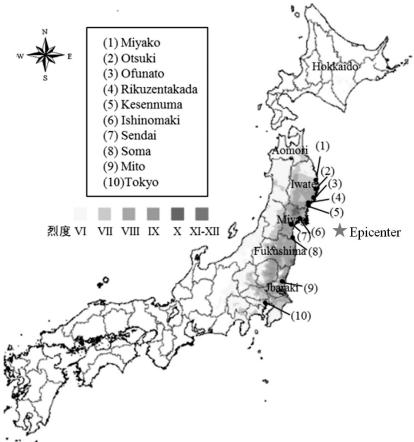


图1 日本东北和关东地区的液化震害分布图 (修改自文献[5, 6])

Fig. 1 Distribution of liquefaction damage in Tohoku and Kanto regions of Japan (based on Reference [5] and Reference [6])

中国沿海地区多位于破坏性海啸发生频率占全球75%以上的环太平洋地震带, 同样也面临着类似地震和海啸的威胁^[7]。因此, 认识地震地基液化灾害的特征, 总结有效的地基抗液化防范措施, 对减轻和防治建(构)筑物震害是非常重要的。本文以现场震害调查和最新资料分析为基础, 首先总结了日本东北地区太平洋近海地震的液化宏观现象和典型震害特征, 探讨了余震再液化现象; 其次, 分析了地震和海啸耦合灾害的破坏特征和机制; 最后, 对地震中有效防治液化的地基处理方法进行了归纳介绍。

1 地震液化震害概况

1.1 地震液化宏观特征

地震液化主要广泛分布在日本东北和关东地区的围海造陆^[8]、古河道^[9]等平坦低地。值得注意的是, 此次地震动持续时间长达100~200 s, 使土体反复承受剪切力作用, 是造成地震液化严重的主要原因之一^[9]。即使在距离震中较远的日本关东地区(震中距约300~400 km, 地面峰值加速度150~200 cm/s²), 也产生了大范围的液化^[8]。

喷砂冒水是地震液化最直观的表现。此次地震液化中, 地表喷出物主要是浅层软弱的吹填土和冲积土, 涵盖了粉砂、细砂、中砂、粗砂, 甚至细砾。喷砂冒水形式主要有两种: 一是形似火山的喷出砂堆, 如图2(a)所示单个砂堆的直径约30~60 cm, 呈线状排列; 二是液化砂土通过地裂缝喷出地表, 如图2(b)为液化砂土散布在长约3 m, 宽2~5 cm不等的地裂缝周边。较为特别的是喷砂冒水以沿地裂缝喷出地表为主^[10]。



(a) 形似火山的喷出砂堆

(b) 地裂缝中的喷水冒砂

图2 形似火山的喷出砂堆和地裂缝中的喷水冒砂

Fig. 2 Sand volcanoes and sand injecting from ground fissure

日本沿海地区较多围海造陆的软弱地基, 因此与以往地震相比, 此次地震液化喷砂量非常大, 如浦安市一公园喷砂堆积量约75000 m³^[9], 千叶县喷砂最大堆积厚度约60 cm^[11]。图3是震后的迪斯尼乐园停车场, 几乎所有场地都发生了液化, 喷砂厚度约10~20 cm, 并伴有大量涌水。



图3 大面积液化的迪斯尼乐园停车场

Fig. 3 Widespread liquefaction in parking area of Disneyland

1.2 液化震害特征分析

(1) 液化沉降

液化震害调查发现, 建(构)筑物的破坏程度主要与基础形式有关, 采用天然地基浅基础的低层建筑物和轻型结构破坏较大, 而采用桩基础的建(构)筑物破坏较小。

一般低层建筑物的基础形式为天然地基上的浅基础, 基础埋置深度一般在0.5~1.0 m, 易因地基液化发生不均匀沉降^[8]。如图4所示, 一低层民房发生了

0.2~1.0 m 的不均匀沉降^[12]。Kim 等^[13]通过对千叶县、茨城县等 160 栋因地基液化破坏的房屋调查统计, 得出 52% 的破坏房屋采用筏形基础, 41% 采用条形基础。

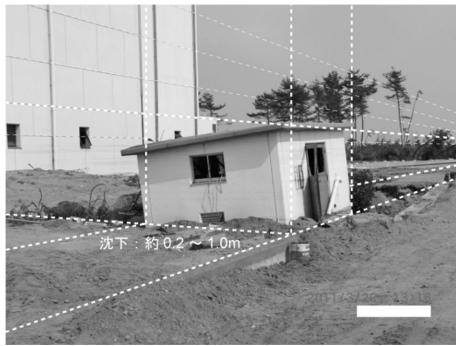


图 4 低层民房倾斜沉降^[12]

Fig. 4 Settlement and tilting of a low-rise building^[12]

对于轻型结构, 例如电线杆、路灯、交通标志等, 一般采用小型基础, 容易因地基液化产生沉降, 并伴有不同程度的倾斜。如图 5 (a)、(b) 所示的路标和电线杆等, 发生了明显的沉降倾斜, 且周边喷砂冒水现象明显。图 5 (c) 为舞滨车站附近的一变压器基础, 出现了 5~15 cm 的不均匀沉降^[14]。

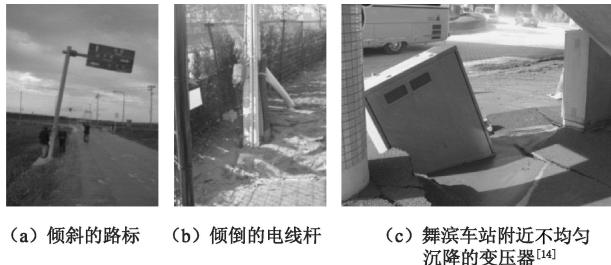


图 5 倾斜的路标、倾倒的电线杆以及舞滨车站附近不均匀沉降的变压器^[14]

Fig. 5 Tilting of a signal post, tilting of a utility pole and differential settlement of a transformer box near Maihama Station^[14]

液化震害调查表明, 采用桩基础的中高层建筑、高架公路和高架桥等破坏比较轻微。Ishikara 等^[8]和 Yasuda 等^[15]发现采用桩基础的中高层建筑和高架桥几乎没有破坏, 而道路、广场、停车场等由于液化变形严重。Bhattacharya 等^[14]调查了舞滨区一个采用桩基础的高架公路, 如图 6 为高架公路桩基础周边的破坏情况。其中, 桩基础周边的地面产生了约 10~30 cm 的不均匀震陷, 而桩基础几乎没有发生沉降, 保证了上部结构的整体稳定性。

(2) 液化上浮

对于浅埋在土中的地下结构, 如地下管道、地下停车场等, 单位体积重量轻于液化后的砂土, 且其上方的填土由于液化抗剪强度显著减低, 因此地下结构

上浮冒出地面的现象非常普遍。而且 Ishihara 等^[8]认为下水管道窨井的周边土层在回填过程中往往都未进行充分的压实, 因此下水管道窨井由于地基液化而浮出地面的现象非常常见。如图 7 (a) 为下水管道窨井浮出地面约 1 m^[10], 图 7 (b) 为一空燃油箱因地基液化上浮冒出地面^[15]。



图 6 高架公路基础周边的破坏

Fig. 6 Damage around footing of elevated highway

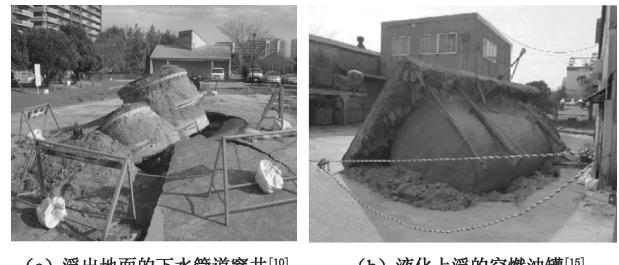


图 7 浮出地面的下水管道窨井^[10]和液化上浮的空燃油罐^[15]

Fig. 7 Uplift of manhole^[10] and uplift of an empty fuel tank^[15]

2 地基余震再液化

2.1 再液化机理

历史的地震案例证明土体在余震时会再次发生液化, 目前已有不少学者对余震再液化的机理开展了研究工作。Ha 等^[16]采用振动台试验评价砂土再液化强度, 得出由于初始液化后土体原有的结构遭到破坏, 再次达到液化所需的振动次数大大减小, 抗液化强度明显减低。Oda 等^[17]通过试验证明土体液化后会形成不稳定的各向异性结构, 在余震作用下极易破坏。而且液化后土体的抗液化强度取决于超孔隙水压力的消散程度。如果超孔隙水压力能完全消散, 那么抗液化强度就会增强, 反之, 余震发生时, 土体的抗液化强度会明显降低。因此, 余震再液化受地震力大小、应力历史及超孔隙水压力消散程度的影响。

此次地震后发生了一系列的余震, 分别在主震后的 22 min (7.4 级)、29 min (7.6 级)、39 min (7.5 级)^[4]。由于主震和余震的间歇期非常短, 超孔隙水压力来不及完全消散。当余震发生时, 超孔隙水压力再次急剧

上升, 而有效应力却难以恢复。因此, 在较小的余震作用下, 土体容易再次发生液化。

Onoue 等^[11]采用有限元方法 (FEM) 模拟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, 结果如图 8 所示。其中, B, D 分别为浅层土和深层土, 其超孔隙水压力比有相同的变化趋势。以 B 层土为例, 在主震后超孔隙水压力比上升达到 0.95, 然后在间歇期下降到 0.85, 在余震作用下, 再次上升到 1.0, 发生完全液化。

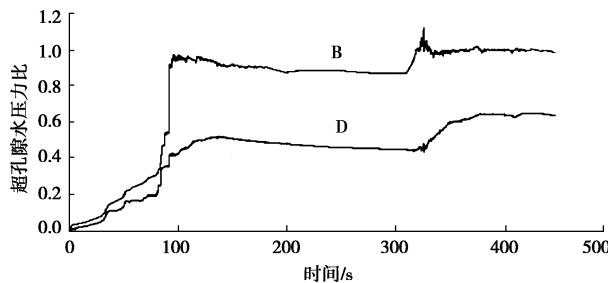


图 8 超孔隙水压力比随时间的变化^[11]

Fig. 8 Variation of excess pore water pressure ratio with time^[11]

2.2 余震再液化特征

在福岛县、千叶县浦安市等地余震再液化现象普遍发生。很多学者通过现场震害调查, 对比分析了主震和余震后的液化震害情况。

Yasuda^[18]对主震和余震后的喷水发生时间、喷水高度、房屋沉降量等进行了对比分析, 得出余震后发生液化的时间更短, 平均喷水高度更高, 造成的沉降量更大。

浦安市液化对策技术调查委员会^[19]调查了入船中学和黎明中学在余震中的再液化现象。如图 9 为黎明中学内的同一液化观测点, 将主震和余震后的液化范围进行对比, 发现余震的喷砂冒水面积明显大于主震^[19]。



图 9 主震和余震液化范围对比 (改自文献[19])

Fig. 9 Comparison of liquefaction ranges in main shock and aftershock (based on Reference [19])

张锋^[20]通过数值模拟方法对比分析有、无余震对地面沉降量的影响。当有余震发生时, 地面沉降量明

显增加, 增加量约为没有余震时地面沉降量的 20%, 并且计算结果表明余震影响地面沉降的时间长达 50 a。

Onoue 等^[11]调查了千叶县朝阳市的液化震害情况后发现: 由于主震液化导致的房屋破坏有 5 栋, 没有喷砂冒水现象; 而由于余震液化导致的房屋破坏却有 9 栋, 且有喷砂冒水现象。

因此, 余震也是造成此次地震液化严重的主要原因之一。尽管余震强度远小于主震, 但是由于间隔时间短, 频度高, 再液化更加容易发生, 造成的喷砂冒水范围更广, 地面沉降量更大, 破坏更加严重。由于地震后相当长时间内仍有可能发生较大的余震, 余震再液化的震害问题应引起足够的重视。

3 地震和海啸的耦合灾害

地震和海啸的耦合灾害, 主要集中在日本东北沿海地区, 以堤防工程和码头的地基流滑破坏失稳最为严重。地基流滑破坏失稳是由于下层饱和土体液化, 造成抗剪强度降低, 剪应变持续发展, 其运动和变形性质与粘性流体相似, 且影响范围往往较大, 呈区域性特征^[21]。

Mori 等^[12]调查发现堤防工程由于地基震动液化, 产生竖向沉降和侧向变形, 加之海啸的作用, 堤防工程的侧向变形进一步加大, 最终发生流滑破坏失稳。如图 10 为宫城县南部一长约 25 km 的钢筋混凝土海堤, 由于地震液化沉降约 50 cm, 在海啸过后多处发生了侧向流滑破坏失稳^[12]。

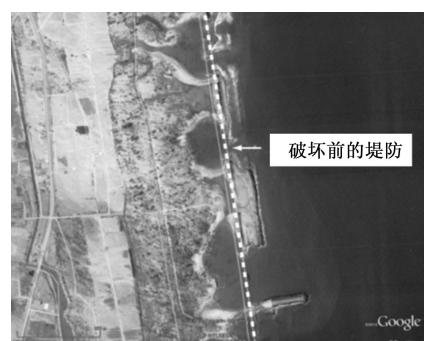


图 10 宫城县南部堤防流滑破坏失稳^[12]

Fig. 10 Liquefaction flow slide of a dike foundation in the south of Miyagi Prefecture^[12]

Hazarika 等^[22]调查表明青森县和岩手县的堤防和码头在地震和海啸耦合作用下发生了严重的破坏。图 11 为岩手县一港口码头发生了流滑破坏失稳, 主要是由于海啸在码头地基液化的基础上, 进一步加剧了地基的变形破坏^[22]。

表 1 地震和海啸耦合灾害的破坏机制

Table 1 Failure mechanism of seismic tsunami hazards

序号	破坏阶段	破坏机制
1	震后液化阶段	随着地震循环荷载作用, 土中超孔隙水压力逐渐积累上升, 有效应力不断减小甚至为零, 使土颗粒处于局部或全部悬浮状态, 抗剪强度局部或完全丧失, 即出现不同程度的变形或完全液化。
2	间歇期恢复阶段	震后的液化土体在无荷载作用的状态下, 呈现超孔隙水压力逐渐消散, 强度、刚度逐渐恢复的趋势。但是地震和海啸的间歇期一般比较短, 在海啸来袭时, 土体强度、刚度并未完全恢复。
3	海啸流滑破坏阶段	由于深层土体的超孔隙水压力消散较慢, 当波速极快、并伴随巨大质量迁移的海啸, 瞬间作用于土体后, 深层、大范围的液化区迅速扩展, 发生无限制的流滑破坏失稳。

图 11 岩手县一码头流滑破坏失稳^[22]Fig. 11 Liquefaction flow slide of a pier in Miyagi Prefecture^[22]

Ishikara 等^[8]对浦安市围海造陆地基上的海堤调查发现, 多处海堤在地震和海啸过后发生了侧向流滑破坏。

Kazama^[23]认为海啸对沿海建(构)筑物的影响与地震液化的分布密切相关。地基液化是导致流滑破坏失稳的先决条件。

综合相关震害调查资料, 地震和海啸耦合破坏机制可以分为 3 个阶段, 如表 1 所示。

地基发生流滑破坏失稳后, 土体强度和刚度在短期内难以恢复, 再加之余震的作用, 破坏将更加严重。因此, 堤防工程和码头在主震—海啸—余震耦合作用下, 地基发生流滑破坏失稳的机理及其流态化特征, 在今后值得进一步研究。

4 抗液化地基处理方法

通过本次地震液化震害调查, 发现地基处理可以有效消除地基液化沉陷, 减少液化造成的地基破坏失稳。但也发现了少量虽经地基处理, 仍然发生地基震害的案例。

Yasuda 等^[9]调查发现, 浦安市入船一住宅区, 由于分别采用了挤密砂桩法(桩径 800 mm, 桩长 10 m, 桩间距 2 m)和砂井排水固结法(直径 400 mm, 间距 1.8 m), 因此在地基处理的区域内几乎没有发生液化

灾害。而场地周边未经地基处理的道路的液化沉陷明显。

Toyota 等^[10]调查浦安市今川一住宅区发现, 通过挤密砂桩法(桩长 10 m, 桩间距 2 m)处理地基后, 仅在路面交接处有少量的喷砂冒水, 而周边未经地基处理的公路及停车场等喷砂冒水严重, 最大喷砂堆积厚度约 10 cm。

Bhattacharya 等^[14]调查千叶县花见川区一工地发现, 经过挤密砂桩法处理的场地完全没有液化, 而同一场地没有经过处理的地基则液化严重。

但在液化震害调查中, 也发现有些场地虽经地基处理, 但仍然发生了地基液化破坏。Kim 等^[13]调查了 160 栋因地基液化破损的房屋, 发现虽然绝大多数没有进行过地基处理, 但其中 15 栋房屋地基曾经进行过搅拌桩法加固, 2 栋曾进行过微型桩加固, 1 栋曾进行过浅层地基压实。

总体而言, 本次地震证明了通过地基处理可以有效消除地基液化沉陷, 其中经过挤密砂桩法、砂井排水固结法处理的场地液化现象轻微。但在此次日本 9.0 级强震作用下, 液化震害调查发现了少量虽经地基处理, 仍然发生地基震害的案例。因此, 今后应加强地基处理方法在强震作用下抗液化效应的研究和检验。

5 总 结

本文总结了 2011 年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害特征及其出现的新问题, 主要得出以下 4 点结论。

(1) 液化主要分布在围海造陆、古河道等平坦低地。地震动持续时间长和震后一系列的余震, 是造成地基液化震害严重的主要原因。液化震害的程度主要与基础形式有关, 以采用浅基础或小型基础的低层建筑物和轻型结构为主, 而采用桩基础的建(构)筑物破坏较小。

(2) 余震再液化受地震力大小、应力历史及超孔

隙水压力消散程度的影响。当主震和余震间歇期较短,且主震产生的超孔隙水压力来不及完全消散时,余震再液化更加容易发生,喷砂冒水范围更广,地面沉降量更大,破坏更加严重。因此,今后应重视余震再液化的机理及变形破坏研究。

(3) 地震和海啸的耦合灾害,主要集中在日本东北沿海地区,以堤防工程和码头的破坏最为严重。地震和海啸耦合破坏过程可以分为3个阶段:震后液化阶段、间歇期恢复阶段、海啸流滑破坏阶段。

(4) 本次地震液化震害调查发现,地基处理可以有效消除地基液化沉陷,减少液化造成的地基破坏失稳。其中经过挤密砂桩法、砂井排水固结法处理的场地液化现象轻微。但也发现了少量虽经地基处理,仍然发生地基震害的案例。因此,今后应加强地基处理方法在强震作用下抗液化效应的研究和检验。

参考文献:

- [1] HUANG Y, JIANG X M. Field-observed phenomena of seismic liquefaction and subsidence during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Natural Hazards*, 2010, **54**(3): 839 - 850.
- [2] VILLALOBOS F, OVANDO E, MENDOZA M, ORÓSTEGUI P. Damages observed in the 2010 concepción earthquake related to soil phenomena[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago. 2011.
- [3] 夏坤, 张令心, 刘洁平. 中外烈度表“人的感觉”和“器物的反应”对比研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, **31**(5): 21 - 29. (XIA Kun, ZHANG Ling-xin, LIU Jie-ping. Comparative study on the criteria “effects on humans” and “effects on objects” in the seismic intensity scales at home and abroad[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, **31**(5): 21 - 29. (in Chinese))
- [4] Japan Meteorological Agency. Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake[OL]. 2012. [2012.6.19].http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html.
- [5] MIMURA N, YASUHARA K, KAWAGOE S, YOKOKI H, KAZAMA S. Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - a quick report[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2011, **16**(7): 803 - 818.
- [6] 气象厅. 推計震度分布図[OL]. 2011. [2012.11.06].http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikai/201103111446_288/201103111446_288_1.html. (Japan Meteorological Agency.
- [7] Distribution of estimated Japan's intensity of ground motion[OL]. 2011. [2012.11.06]. http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikai/201103111446_288/201103111446_288_1.html. (in Japanese))
- [8] ISHIHARA K, ARAKI K, BRADLEY B A. Characteristics of liquefaction-induced damage in the 2011 Great East Japan Earthquake[C]// *Proceedings of the International Conference on Geotechnics for Sustainable Development*. Hanoi, Vietnam, 2011: 1-22.
- [9] 安田進, 原田健二, 石川敬祐. 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害[J]. *地盤工学ジャーナル*, 2012, **7**(1): 103 - 115. (YASUDA S, HARADA K, ISHIKAWA K. Damage to structures in Chiba Prefecture during the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake[J]. *Japanese Geotechnical Journal*, 2012, **7**(1): 103 - 115. (in Japanese))
- [10] 豊田浩史, 原忠, 竹澤清一郎, 等. 簡易動的貫入試験と表面波探査による浦安市の液状化被害分析と応急対策への適用性[J]. *地盤工学ジャーナル*, 2012, **7**(1): 207 - 218. (TOYOTA H, HARA T, TAKEZAWA K, et al. Liquefaction damage analysis and application to emergency measures in Urayasu City using portable cone penetration test and surface wave method[J]. *Japanese Geotechnical Journal*, 2012, **7**(1): 207 - 218. (in Japanese))
- [11] 尾上篤生, 蔡飛, 中島美代子, 等. 緩い砂埋戻し地盤の辺縁部の液状化に伴う地盤変形の特徴[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))
- [12] 森友宏, 飛田善雄, 今西肇. 東北地方太平洋沖地震による宮城県南部地区における地盤災害[J]. *地盤工学ジャーナル*, 2012, **7**(1): 67 - 78. (MORI T, TOBITA Y, IMANISHI H. Seismic damages to geo-structures in the southern district of Miyagi Prefecture during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake[J]. *Japanese Geotechnical Journal*, 2012, **7**(1): 67 - 78. (in Japanese))
- [13] 金哲鎬, 藤井衛, 品川恭一, 等. 東北地方太平洋沖地震の液状化地域における戸建住宅の基礎の被害[J]. *地盤工学ジャーナル*, 2012, **7**(1): 195 - 205. (KIM C, FUJII M,

SHINAGAWA K, et al. Damage of foundation for detached houses in liquefied areas by the Tohoku Region Pacific Coast Earthquake[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2012, 7(1): 195 - 205. (in Japanese))

[14] BHATTACHARYA S, HYODO M, GODA K, et al. Liquefaction of soil in the Tokyo Bay area from the 2011 Tohoku (Japan) Earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1618 - 1628.

[15] 安田進, 原田健二. 東京湾岸における液状化被害[J]. 地盤工学会誌, 2011, 59(7): 38 - 41. (YASUDA S, HARADA K. Liquefaction-induced damage in the reclaimed lands along Tokyo Bay[J]. The Japanese Geotechnical Society, 2011, 59(7): 38 - 41. (in Japanese))

[16] HA I S, OLSON S M, SEO M W, et al. Evaluation of reliquefaction resistance using shaking table tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(4): 682 - 691.

[17] ODA M, KAWAMOTO K, SUZUKI K, et al. Microstructural interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 416 - 423.

[18] 安田進. 液状化関係の報告[C]// 浦安市における液状化なら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))

[19] 浦安市液状化対策技術検討調査委員会. 地盤特性の把握・液状化の要因分析 [R]. 日本. 2011.9.12. [2012.5.30].http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/04_siryo2-4-1jibanntokuseinohaaku.pdf. (Investigation Committee on Liquefaction Countermeasure Technology in Urayasu City. Analysis of the characteristics of geological conditions and liquefaction[R]. Japan. 2011.9.12. [2012.5.30].http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/04_siryo2-4-1jibanntokuseinohaaku.pdf. (in Japanese))

[20] 張 鋒. 余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性[C]// 発足記念シンポジウム. 日本: 名古屋工業大学高度防災工学センター. 2012.1.10. [2012.5.30]. www.salagrande.net/cho.pdf. (ZHANG F. The importance of the re-liquefaction in aftershocks to the evaluation of liquefaction resistance [C]// Memorial Conference on Renewal. Japan: Advanced Disaster Prevention Engineering Center, Nagoya Institute of Technology. 2012.1.10. [2012.5.30]. www.salagrande.net/cho.pdf. (in Japanese))

[21] 黄 雨, 毛无卫. 液化后土体的流态化特性研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 501 - 506. (HUANG Yu, MAO Wu-wei. State of art of fluidization behavior of post-liquefied soils[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(4): 501 - 506. (in Chinese))

[22] ハザリカ・ヘマンタ, 片岡俊一, 笠間清伸, 等. 青森県・岩手県北部における地震と津波による複合地盤災害[J]. 地盤工学ジャーナル, 2012, 7(1): 13 - 23. (HAZARIKA H, KATAOKA S, KASAMA K, et al. Compound geotechnical disaster in Aomori Prefecture and northern Iwate Prefecture due to the earthquake and tsunami[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2012, 7(1): 13 - 23. (in Japanese))

[23] 風間基樹. 2011 年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題[J]. 地盤工学ジャーナル, 2012, 7(1): 1 - 11. (KAZAMA M. Overview of the damages of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and its geotechnical problems[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2012, 7(1): 1 - 11. (in Japanese))