

场地液化震害

CHANGDI YEHUA
ZHENHAI TUJI

图集



洪海春 编著

地震出版社

中南大学图书馆



101159504

场地液化震害图集

CHANGDI YEHUA ZHENHAI TUJI

洪海春 编著◆



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

场地液化震害图集 / 洪海春编著. — 北京 : 地震出版社, 2017.5

ISBN 978-7-5028-4851-4

I. ①场… II. ①洪… III. ①地震液化—图集 IV. ①TU435-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 117861 号

地震版 XM3925

场地液化震害图集

洪海春 编著

责任编辑 : 张 宏

责任校对 : 刘 丽

出版发行 : 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

发行部 : 68423031 68467993

门市部 : 68467991

总编室 : 68462709 68423029

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编 : 100081

传真 : 88421706

传真 : 68467991

传真 : 68455221

经销 : 全国各地新华书店

印刷 : 北京地大彩印有限公司

版 (印) 次 : 2017 年 5 月第一版 2017 年 5 月第一次印刷

开本 : 889 × 1194 1/16

字数 : 392 千字

印张 : 14.25

印数 : 001 ~ 500

书号 : ISBN 978-7-5028-4851-4/TU (5551)

定价 : 88.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

《场地液化震害图集》

编委会

主 编：洪海春

副主编：侯建盛 曹振中 杨伟林

编 委：

洪海春	侯建盛	曹振中	杨伟林	殷跃平	宋立军
许汉刚	非明伦	姚大全	姚 鑫	郭春明	尤 捷
薄 涛	熊 振	毕雪梅	范小平	章熙海	陶小三
彭小波	王恒知				

前言

场地液化及其震害是土动力学研究的重要课题之一，预防和减轻场地液化震害是岩土地震工程中的热点问题，历来受到国内外学者、专家和工程界的高度关注和重视。液化是造成岩土工程震害的主要因素之一。液化现象主要表现为在地表的喷水冒砂和通过地裂缝涌出的泥水，从而引起建（构）筑物和基础设施的开裂、倾斜、沉陷或隆起，地下管线与水槽上浮，河岸侧移与桥梁倒塌，堤坝/堤岸滑移，地下结构与码头设施损坏，地表破裂、变形、沉降等严重的地震地质灾害。同时，在国内外的绝大多数地震中，液化不一定导致惨重的集中损失，但却会导致广泛分布的灾害。

21 世纪以来，大面积的液化震害现象及其引起的建（构）筑物和地下结构设施等严重破坏在世界各地的灾难性地震中屡屡发生，一些学者和专家对这些灾难性地震中土体的液化现象及其引起的破坏进行了广泛和深入的现场调查与研究，发表了许多有重要价值的研究成果，对灾难性地震的宏观液化震害现象和液化震害特征等进行了总结。例如，2008 年四川汶川 8.0 级特大地震中，成都、德阳、绵阳地区建（构）筑物液化震害严重，大多数为裂缝穿越建（构）筑物地基，从而导致结构性较差的建（构）筑物直接倒塌，设有圈梁、构造柱的房屋，液化也会导致其整体倾斜、下沉、开裂。部分场地发生大面积喷水冒砂，且有地裂缝伴随产生，液化震害十分严重。由此可知，场地液化震害危险性较高，对其开展相关研究是迫切需要解决的问题。同时，《场地液化震害图集》的出版，对于研究场地液化震害特征和抗液化措施等，具有重要的科学意义、工程意义和实际意义。

《中国地震烈度表》（GB/T 17742—2008）将地震烈度划分为 12 个等级，当地震烈度为Ⅵ度时可能发生喷砂冒水，即出现场地液化现象。然而，液化不仅与震动幅度有关，而且与震动的频率和震动的持续时间等有关联。（特）大地震在远场的震动幅度可能不是很大，但频率较低，震动的持续时间较长，同样会引起喷水冒砂。因此，对于震后现场考察队员而言，地震烈度的评定，需要注意综合分析判断。《场地液化震害图集》的出版，对于地震现场工作人员辅助确定宏观地震烈度是切实可行的。

本图集共含四章（共收集和整理国内外 10 次破坏性地震）：第一章为场地液化震害定量研究及其应用，举例说明相关的宏观液化等级划分依据和划分标准等；第二章为特大地震（ $M_s \geq 8$ ）震害，主要汇集了日本东北地区太平洋近海 $M_w 9.0$ 特大地震、智利 Maule（莫尔） $M_w 8.8$ 特大地震和四川汶川 $M_s 8.0$ 特大地震的场地液化震害；第三章为大地震（ $7 \leq M_s < 8$ ）震害，主要汇集了新西兰 Darfield（达菲尔德） $M_w 7.1$ 大地震及其 Christchurch（克赖斯特彻奇）余震、青海玉树 $M_s 7.1$ 地震和四川芦山 $M_s 7.0$ 地震的场地液化震害；第四章为中等地震（ $5 \leq M_s < 7$ ）震害，主要汇集了新疆巴楚—伽师 $M_s 6.8$ 地震、云南景谷 $M_s 6.6$ 地震、云南盈江 $M_s 5.8$ 地震、江西九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 地震的场地液化震害。每幅图均给出了场地液化震害的发生地点、震害描述、宏观液化现象、液化程度和建议地震烈度等，可供地震现场工作人员参考，亦可促进防震减灾科技人员深化认识场地液化震害特征和规律性，进一步完善抗液化地基处理的工程加固措施等。同时，图集也有助于警示人们关注防震减灾事业，宣传防震减灾知识。

本图集由编委会成员集体编著完成。图集中有的照片是直接引用国外研究文献中的，已一一标明出处；有的照片是编委会成员拍摄的；其余照片系地震灾区相关政府部门和企、事业单位提供。图集的编制得到中国地震局震灾应急救援司和工程力学研究所的支持，由江苏省地震局资助出版，在此表示衷心的感谢。

由于编著人员水平所限，书中难免存在不足之处，敬请批评指正。

编 者

2016 年 12 月 17 日

目 录

第 1 章 场地液化震害定量研究及其应用 *	1
1.1 引言	1
1.2 场地液化与液化震害相关性	1
1.3 场地液化震害定量研究	2
1.4 场地液化震害实例分析	2
1.4.1 东日本 9.0 级大地震场地液化震害	3
1.4.2 新疆巴楚—伽师 6.8 级地震场地液化震害	3
1.4.3 云南盈江 5.8 级地震场地液化震害	6
1.4.4 云南景谷 6.6 级地震场地液化震害	6
1.5 结语	8
参考文献	8
第 2 章 特大地震 ($M_s \geq 8$) 液化震害	10
2.1 日本东北地区太平洋近海 $M_w 9.0$ 地震	10
2.1.1 概述	10
2.1.2 场地液化震害	12
2.2 智利 Maule $M_w 8.8$ 地震	39
2.2.1 概述	39
2.2.2 场地液化震害	41
2.3 四川汶川 $M_s 8.0$ 地震	67
2.3.1 概述	67
2.3.2 场地液化震害	69
参考文献	103
第 3 章 大地震 ($7 \leq M_s < 8$) 液化震害	105

3.1	新西兰 Darfield M_w 7.1 大地震及其 Christchurch 余震	105
3.1.1	概述	105
3.1.2	场地液化震害	108
3.2	青海玉树 M_s 7.1 地震	128
3.2.1	概述	128
3.2.2	场地液化震害	130
3.3	四川芦山 M_s 7.0 地震	141
3.3.1	概述	141
3.3.2	场地液化震害	143
	参考文献	153
第 4 章	中等地震 ($5 \leq M_s < 7$) 液化震害	154
4.1	新疆巴楚—伽师 M_s 6.8 地震	154
4.1.1	概述	154
4.1.2	场地液化震害	156
4.2	云南景谷 M_s 6.6 地震	170
4.2.1	概述	170
4.2.2	场地液化震害	172
4.3	云南盈江 M_s 5.8 地震	189
4.3.1	概述	189
4.3.2	场地液化震害	191
4.4	江西九江—瑞昌 M_s 5.7 地震	202
4.4.1	概述	202
4.4.2	场地液化震害	204
	参考文献	217

第1章 场地液化震害定量研究及其应用*

1.1 引言

地震液化及其震害在以往历次大地震破坏中占有相当的比重。场地液化及其震害是土动力学研究的重要课题,预防和减轻场地液化震害是岩土地震工程中的热点课题,历来受到国内外学者、专家和工程界的高度关注和重视^[1~7]。

液化是造成岩土地震工程震害的主要因素,液化现象主要表现在地表的喷水冒砂和通过地裂缝涌出的泥水,从而引起建(构)筑物和基础设施的开裂、倾斜、沉陷或隆起,地下管线与水槽上浮,河岸侧移与桥梁倒塌,堤坝/堤岸滑移,地下结构与码头设施损坏,地表破裂、变形、沉降等严重的地震地质灾害^[4, 8]。

场地液化震害的影响因素主要包括以下几个方面:一类是地震因素或称地震条件,一类是土层自身因素或称埋藏条件^[9~10],一类是场地本身条件及其建(构)筑物。本文根据不同程度、不同规模、不同形式的宏观液化现象和震害程度等资料,定量研究场地液化震害,同时结合国内外的实际震例进行应用分析。

1.2 场地液化与液化震害相关性

震害调查表明,液化后的大变形导致土体中的和地表上的结构物产生破坏,其破坏程度取决于液化可以引起的变形的大小^[8]。相对于自由场地的液化而言,建(构)筑物地基液化的研究工作相对要少得多。如何将自由场地液化分析方法用于分析地基液化将是今后研究的重要方向。液化除造成地基失效外,也会对土层的地震动产生显著影响,对结构震动破坏产生附加作用。

场地液化导致建(构)筑物遭到破坏的震害主要表现为地基失效,破坏形式包括倒塌、开裂、沉降、滑移和隆起等。场地液化效应具有双重性,一方面地基作为建筑结构的支承体,液化使地基失效或建筑物不能承受过大震陷而加重震害,是震害的正效应;另一方面地基是传播地震波的介质,地震波通过地基传给上部结构,由于液化而产生隔震作用减轻震害,是震害的负效应。建造在液化地基上的建(构)筑物,其反应如何,取决于这两种效应的综合结果^[11~13]。液化场地的震害,有所谓“湿震不重于震重”、“小震不轻,大震不重”的经验总结,1964年日本新潟地震、1970年通海地震、1976年唐山地震均是如此。

因此,场地液化造成的震害,在低烈度区和高烈度区的作用效应是不同的(地基失效或者隔震作用)^[14~15],场地液化程度与震害并不是绝对的正相关性,工程地质条件决定着场地液化的分布范围和震害特性等。

* 本章内容(略有修改)已发表在第九届全国防震减灾工程学术研讨会论文集《工程防震减灾新技术、新进展和新应用》,合肥:合肥工业大学出版社,2016,179~188。



1.3 场地液化震害定量研究

鉴于震害调查工作的需求和现有规范的欠缺,通过对汶川地震实际液化考察过程中所遇到问题的思考,王维铭(2013)提出宏观液化指数和宏观液化等级的概念和划分标准^[3],为震害液化调查和震害评估提供一套便于参考的指标,也为液化研究积累可靠全面的基础资料提供了必要的手段^[2~3]。宏观液化指数是指从宏观方面来定义液化的程度,表明是地震后现场调查中场地宏观液化程度的评价指标,而宏观液化等级则用于区分液化程度及其造成的破坏程度^[3]。在文献[3]和[11~13]中,宏观液化现象和宏观液化指数的等级划分分别为6级和4级,这与《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)^[16]、《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)^[17]、《生命线工程地震破坏等级划分》(GB/T 24336—2009)^[18]等不同规范并不协调,不利于地震现场工作中地震烈度的评定^[16]。

借鉴生命线工程和建(构)筑物地震破坏等级划分和震害指数等,并考虑《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)^[16]、《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)^[17]、《生命线工程地震破坏等级划分》(GB/T 24336—2009)^[18]等不同规范间的衔接以及震害现场宏观调查的需要,为地震灾后快速评估场地液化震害提供依据,参考王维铭(2013)等研究成果^[3,11~13,16~18],建议将宏观液化划分为5个等级:基本完好、轻微液化、中等液化、严重液化和毁坏,对应的震害指数范围分别为[0.00, 0.10)、[0.10, 0.30)、[0.30, 0.55)、[0.55, 0.85)、[0.85, 1.00],具体的宏观液化现象和宏观液化指数的划分标准参见表1-1,每个等级有相应具体的建议地震烈度、地表变形和破坏以及建筑结构破坏宏观液化现象,包括地表裂缝宽度、地基沉降大小以及结构墙体裂缝、修复情况等。

1.4 场地液化震害实例分析

根据场地液化震害定量研究的成果,结合2011年东日本9.0级地震、2003年新疆巴楚—伽师6.8级地震、2010年云南盈江5.8级地震和2014年云南景谷6.6级地震进行应用分析,以验证研究成果的可靠性、合理性和实用性。

表1-4-1 宏观液化等级与宏观液化指数划分标准

宏观液化等级	液化程度	建议地震烈度	宏观液化现象	液化引起的震害	指数范围
I级	基本完好	VI	在潮湿的河岸、湖岸、塘岸、海岸等松软土地面出现明显的、零星的裂缝或喷水冒砂现象	地基没有明显沉降,墙体裂缝小于1cm,建筑物基本完好,不加修理可继续使用	[0.00, 0.10)
II级	轻微液化	VII	河岸出现局部塌方,饱和土层常见轻微喷水冒砂;松软土地面地裂缝较多,地表裂缝宽度小于10cm	危害性小,地基不均匀沉降小于5cm,墙体裂缝宽度1cm以上(含)、小于5cm,建筑物轻微破坏,需要进行维护	[0.10, 0.30)
III级	中等液化	VIII	饱和土层绝大多数中等喷砂冒水,多处出现直径小于100cm的陷坑;干硬土地上出现明显裂缝,地表裂缝宽度10cm以上(含)、小于20cm	危害性较大,地基不均匀沉降5cm以上(含)、小于20cm,墙体裂缝宽度5cm以上(含)、小于10cm,建筑物中等破坏,需要进行维修	[0.30, 0.55)

续表

宏观 液化等级	液化 程度	建议 地震烈度	宏观液化现象	液化引起的震害	指数范围
Ⅳ级	严重 液化	Ⅸ	饱和土层广泛地严重喷砂冒水，多处出现直径100cm以上（含）的陷坑；干硬土地上多处出现明显裂缝，地表裂缝宽度20cm以上（含）、小于50cm	危害性大，地基不均匀沉降20cm以上（含），墙体裂缝宽度10cm以上（含），高重心结构产生不容许的倾斜，建筑物严重破坏，必须经过大修方能正常使用	[0.55, 0.85)
Ⅴ级	毁坏	Ⅹ	大范围液化引起地表形态变化；大面积喷砂冒水成湖塘	液化引起局部区域烈度强烈异常，所在区域结构和基础设施大多丧失使用功能，需重建	[0.85, 1.00]

1.4.1 东日本 9.0 级大地震场地液化震害

2011 年 3 月 11 日东日本 M_w 9.0 地震发生后，东京湾 Urayasu（浦安市）的液化破坏最为严重，约 85% 的面积发生液化，并导致建筑物、生命线设施、堤防、港口和道路的严重破坏^[5-7]，人工填土形成的地面被液化产生的喷砂所覆盖（如图 1-4-1，图 1-4-2）。同时，Urayasu 市严重受损的房屋 3 680 栋，部分房屋毁坏，产生大的沉降与严重倾斜（图 1-4-3）。

根据液化震害范围、程度及结构和基础设施的功能破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.95，宏观液化等级为Ⅴ级，即毁坏。对照表 1-4-1 的内容，建议 Urayasu 市的场地液化震害最重地区的地震烈度为Ⅹ度。实际上，由于 Urayasu 市的房屋建筑抗震性能良好，其地震烈度相当于中国地震烈度表的Ⅸ度。

1.4.2 新疆巴楚—伽师 6.8 级地震场地液化震害

2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师发生 6.8 级强烈地震，极震灾区及以东广大地区为叶尔羌河北岸地势低洼地带，地下水埋深浅，砂土液化广泛分布。场地土主要为全新世—晚更新世晚期厚度较



图 1-4-1 海堤的内陆地沉陷



图 1-4-2 液化导致地面破坏



图 1-4-3 液化导致房屋沉降和倾斜

大的冲积粉砂、细砂、粉土和粉质黏土，产生了大面积的喷砂冒水和地裂缝等地震地质灾害^[19]。

在极震灾区，出现大面积喷水冒砂和地裂缝发育。最大的喷砂孔直径 3m（图 1-4-4），据目击者介绍，该孔喷出水柱高达 3m。直径 1 ~ 2m 的喷砂孔多处可见。柏油路面多处裂缝，松软地面出现不规则张裂缝。在伽师、巴楚县交界的沙漠地带发现有北西向排列的地裂缝带。砖柱厂房、粮库遭到严重破坏。大部分水塔遭受破坏，塔筒身出现斜裂或环裂，部分水塔倒塌。根据液化震害范围、程度及喷砂孔直径、建（构）筑物的破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.75，宏观液化等级为Ⅳ级，即严重液化，建议极震区的地震烈度为Ⅸ度。



图 1-4-4 最大的喷砂孔直径 3m



图 1-4-5 操场被喷砂冒水淹没

在重灾区，巴楚县的英吾斯塘乡 13 村多处出现孔径 10cm 以下的喷水冒砂口，形成长约 100m、宽约 30m（断续状）的水塘；琼库尔恰克乡 18 村的中学操场被喷水冒砂淹没（图 1-4-5）；在塘巴扎—色力布亚之间的低地上，喷水冒砂造成玉米、棉花苗被覆盖（图 1-4-6）。大多数砖柱厂房遭到中等破坏。部分水塔遭受破坏，塔筒身出现斜裂或环裂，近一半水塔基本完好。根据液化震害范围、程度及喷砂孔直径、建（构）筑物的破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.48，宏观液化等级为Ⅲ级，即中等液化，建议色力布亚镇、英吾斯塘乡和琼库尔恰克乡等重灾区的地震烈度为Ⅷ度。



图 1-4-6 喷水冒砂造成农田被覆盖

在较重灾区，伽师县卧里托克拉克乡龙口村克孜河岸边分布有小面积喷水冒砂，喷砂孔直径 20 ~ 30cm，而在龙口以南约 6km，克孜河南岸沼泽地带见到规模较大的喷水冒砂现象，并伴随有地裂缝。砖砌围墙有部分倒塌，砖混结构平房墙体倾斜或出现较宽裂缝（交叉裂缝和斜裂缝）。根据液化震害范围、程度及喷砂孔直径、建（构）筑物的破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.25，宏观液化等级为Ⅱ级，即轻微液化，建议巴楚县西南部、伽师县南部等较重灾区的地震烈度为Ⅶ度。

1.4.3 云南盈江 5.8 级地震场地液化震害

2011 年 3 月 10 日云南盈江发生 5.8 级地震，极震灾区南部弄璋镇贺哈村一带出现多条长数千米、宽度参差不齐的地裂缝^[20]。其中：沿大盈江南岸江堤公路分布的地裂缝规模及变形强度最大，该地裂缝长约 3km，缝宽 1 ~ 40cm，部分垂向落差可达 40cm（图 1-4-7）。砂土液化产生的地裂缝随处可见，这些地裂缝延展至房屋、围墙等处，多数会造成上部房屋建筑开裂。贺哈村及其附近农田、大盈江河堤两侧，长约 3km、宽约 500m 范围内出现喷水冒砂。由于砂土液化，引起小规模的地面沉陷，沉陷范围约 6m²，下沉量 10 ~ 20cm。沙丘状喷水冒砂孔，其堆积高度不超过 30cm，直径 10 ~ 50cm，在液化较多的区域成群分布。根据液化震害范围、程度及喷砂孔直径、地基沉降、建（构）筑物的破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.50，宏观液化等级为Ⅲ级，即中等液化，建议极震灾区（盈江县平原镇与弄璋镇的部分村庄等）的地震烈度为Ⅷ度。

1.4.4 云南景谷 6.6 级地震场地液化震害

2014 年 10 月 7 日云南景谷发生 6.6 级地震，极震灾区永平镇芒费村亮山组距勐嘎河约 150m 处，农田中 20m 深度范围内分布有饱和砂土，在地震作用下发生了局部砂土液化，液化砂土在地下水、孔隙水压力作用下，沿地表裂缝产生喷砂冒水现象，延绵约 50m，间断分布，喷砂孔的直径约 10cm（图

1-4-8)。永平镇迁营村新寨组出现灰白色砂土液化，喷砂冒水孔呈条带状，其全长约 10m；而勐嘎村那茂组则出现灰绿色椭圆形砂土液化喷砂孔，其最大孔径约 50cm。在勐嘎村老街一组，深度 6m、直径 1m 的水井被喷砂填充至深度 4m 左右，同时，井圈沉降、地面出现下陷，造成水泵被埋、水井被废。总体而言，此次景谷地震造成的砂土液化点较多，其范围较广，对学校建筑、农村民居、农业生产和农民生活等造成一定的不良影响。根据液化震害范围、程度及喷砂孔直径、建（构）筑物的破坏等，结合宏观液化指数及宏观液化等级的评定标准，综合判定宏观液化指数为 0.40，宏观液化等级为Ⅲ级，即中等液化，建议极震灾区永平镇的地震烈度为Ⅷ度。



图 1-4-7 盈江河堤路面开裂和下沉



图 1-4-8 喷砂冒水形成地表裂缝（岳永峰提供）



1.5 结 语

(1) 场地液化程度与震害并不是绝对的正相关性, 工程地质条件决定着场地液化的分布范围和震害特性等。

(2) 借鉴生命线工程和建(构)筑物地震破坏等级划分和震害指数等, 并考虑不同规范间的衔接以及震害现场宏观调查的需要, 为地震灾后快速评估场地液化震害提供依据, 参考前人研究成果, 建议宏观液化等级划分为 5 个等级: 基本完好、轻微液化、中等液化、严重液化和毁坏, 对应的震害指数范围分别为 $[0.00, 0.10)$ 、 $[0.10, 0.30)$ 、 $[0.30, 0.55)$ 、 $[0.55, 0.85)$ 、 $[0.85, 1.00]$, 同时给出具体的建议地震烈度、宏观液化现象和震害程度等。

(3) 场地液化震害与地震烈度有着较好的相关性, 场地液化震害可以帮助地震现场工作者辅助判定地震烈度。结合 2011 年东日本 9.0 级地震、2003 年新疆巴楚—伽师 6.8 级地震、2010 年云南盈江 5.8 级地震和 2014 年云南景谷 6.6 级地震进行应用分析表明, 本文研究成果具有较高的可靠性、合理性和实用性。

(4) 由于国内外房屋建筑抗震设防要求和抗震性能的差异性, 场地液化震害定量研究成果更适用于辅助确定国内地震的地震烈度图的快速圈定和发布等。

参考文献

- [1] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 陈龙伟, 孟上九, 董林, 王维铭, 孟凡超, 陈红娟, 张建毅, 蔡晓光. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (6): 1288 ~ 1296.
- [2] 曹振中. 汶川地震液化特征及砂砾土液化判别方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [3] 王维铭. 场地液化特征研究及液化影响因素评价 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [4] 陈国兴, 金丹丹, 常向东, 等. 最近 20 年地震中场地液化现象的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, 2795.
- [5] Yasuda S, Harada K, Ishikawa K, et al.. Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake[J]. Soils and Foundations, 2012, 52 (5): 793-810.
- [6] 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: 1618-1628.
- [7] Ishihara K, Araki K, Bradley B. Characteristics of liquefaction-induced damage in the 2011 Great East Japan Earthquake[OL]. [S. l.]: Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, 2011, [Http://hdl.handle.net/10092/6249](http://hdl.handle.net/10092/6249).
- [8] 杜修力, 路德春. 土动力学与岩土地震工程研究进展 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (S2): 10 ~ 20.
- [9] 刘金韬, 金晓娟. 饱和砂土液化判别方法中问题浅析 [J]. 工程地质学报, 2000, 8 (3): 379 ~ 384.
- [10] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [11] 顾宝和, 张荣祥, 石兆吉. 地震液化效应的综合评价 [J]. 工程地质学报, 1995, 3 (3): 1 ~ 10.
- [12] 石兆吉, 张荣祥, 孙锐. 液化土层隔震和地基失效共同作用下多层砖房震害分析 [J]. 自然灾害学报, 1995, 4 (1): 55 ~ 63.
- [13] 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.
- [14] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (3): 90 ~ 98.

- [15] 杜国云, 邢秀臣. 龙门山山前砂土液化初步研究 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (1): 108 ~ 112.
- [16] 中华人民共和国国家标准. GB/T 17742—2008. 中国地震烈度表 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] 中华人民共和国国家标准. GB/T 24335—2009. 建(构)筑物地震破坏等级划分 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国国家标准. GB/T 24336—2009. 生命线工程地震破坏等级划分 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] 张云峰. 中国新疆巴楚—伽师 6.8 级地震图集 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
- [20] 姚鑫, 张加桂, 张永双, 等. 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震诱发砂土液化灾害特征研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (2): 152 ~ 161.