

液化场地桥梁桩基础震害及其抗震研究概述

郑新亮^{1,2}, 王东升¹, 唐 亮³, 凌贤长³

(1. 北华大学, 吉林 吉林 132000; 2. 大连海事大学; 3. 哈尔滨工业大学)

摘 要: 砂土液化是桥梁结构严重破坏甚至倒塌的重要影响因素。该文总结了几次大地震中液化场地桥梁桩基础震害情况, 简要评述了这一领域的研究现状。通过对比国内外桥梁抗震设计规范, 认为我国规范基础抗震设计部分明显不足。结合国内地震液化灾害分布特点和桥梁建设实际情况, 强调了深入开展液化场地桥梁桩基础抗震性能研究的必要性和紧迫性。

关键词: 桥梁; 桩基础; 液化场地; 震害; 抗震设计; 振动台试验

液化是指饱和砂土在反复剪应力的作用下, 砂土的颗粒结构发生破坏使孔隙水压力上升, 导致土体的有效应力接近于零, 以致土体丧失抗剪强度, 从固体状态变化为液体状态, 其宏观现象表现为“喷砂冒水”。砂土液化使土体丧失承载力, 同时在某些土层和场地条件下还会发生大范围的侧向流动, 与非液化场地相比, 将使桥梁遭受更大的破坏。由此本文对液化场地桥梁桩基础的震害及研究现状、抗震设计进行了总结, 强调了在国内深入开展相关研究的必要性和紧迫性。

1 液化场地桥梁桩基础震害

1.1 液化场地桥梁桩基础震害调查

桩基础一般被认为是作为预防地基失效的重要抗震措施, 然而近年来强烈地震震害经验表明: 砂土液化及相应产生的土体流动和大变形往往加重基础及桥梁的破坏, 并变得很难修复。下文仅对国内外几次大地震中液化场地桥梁桩基础破坏情况进行简单介绍。

1.1.1 海城地震桥梁桩基础震害

1975年在我国辽宁海城发生了7.3级强烈地震, 很多桥梁遭到不同程度的破坏。因地震区处于滨海冲积平原, 地下水位高, 饱和砂土液化广泛发生。中国地震局工程力学研究所对这次地震中的桥梁震害进行了总结, 其中液化场地典型桥梁破坏情况见表1。

1.1.2 唐山地震桥梁桩基础震害

1976年在我国唐山发生了7.8级强烈地震, 大约使24万人死亡, 损失极为惨重。其重要内因是唐山市对地震没有设防, 结构物都未经过抗震设计, 以致在强烈地震作用下酿成大灾。在这次地震中, 以简支梁桥为代表的公路、铁路桥梁遭到了严重破坏, 在7度至11度区内的130座大中型钢筋混凝土梁式桥中, 倒塌18座, 严重破坏20座, 中等破坏34座。唐山亦位于滨海冲积平原, 砂土液化在强震区广为分布, 倒塌的18座桥中有15座破坏原因可归结于此。液化场地几座典型桥梁破坏情况见表2。

1.1.3 新泻地震桥梁桩基础震害

1964年日本新泻发生了7.5级地震, 该次地震产生了大量砂土液化现象, 成为砂土液化研究的开端。位于市内的昭和公路大桥(图1), 12跨中有5跨因丧失支承而坠落河中, 中间两个桥墩卷入坠落的桁架之下而折曲, 其中一个桥墩顶部最大残余变形93 cm。桥址处是饱和砂土, 左岸较软, 右岸附近较硬。震害的原因是由于砂土液化, 左岸滑动, 墩柱移位, 中央桁架被强力推动而坠落, 因破坏发生在强烈地震停止2 min后而被认为是砂土液化及侧向流动使桩基础发生大的位移, 进而导致上部结构发生落梁破坏的典型案例。其他2座桥梁的倒塌也与砂土液化有直接关系。

收稿日期: 2008-05-29(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50378031, 50178027)

作者简介: 郑新亮, 男, 硕士研究生, E-mail: liangliangly@163.com

表 1 海城地震典型桥梁震害

桥名	桥址土层	基础结构形式	震害现象	震害原因分析
辽河大桥	粉砂与细砂互层	钢筋混凝土高桩承台 2 m, 桩长 21~50 m	全桥缩短 2.47 m, 各墩不同程度下沉, 墩向河心偏离	下层砂土液化和岸坡滑移
盘山桥	地层复杂, 粉细砂互层	4 柱式高桩承台基础, 承台厚 2 m, 桥墩桩基 $\phi 0.9$ m, 长 30 m	盘山一侧各墩双柱产生裂纹倾斜, 7 [#] 墩下沉 15 cm, 桥呈波浪形	地下 15 m 粉砂层可能液化, 地基承载力减弱, 桩长不足; 岸坡表面土体滑移
三岔河桥	粉细砂相间, 基底为细砂	6 桩式高桩承台基础, 桩基 $\phi 1.1$ m, 长 42~43 m	15 [#] 墩全部倒塌, 各墩支座倾斜, 锚栓拉弯	地基砂土液化, 上部倾斜土体流动, 结构侧向刚度不足
东方桥	粉细砂	4 桩式灌注桩基础, 桩基 $\phi 0.8$ m, 长 12~14 m	桥台下沉 2.2 m, 向两侧推移 20 m, 中墩下沉 1.1 m, 桥塌。桥墩地面四周喷砂冒水	砂土液化导致地基失效, 桩体下沉引起拱身变形, 桥面坍塌

表 2 唐山地震典型桥梁震害

桥名	桥址土层	基础结构形式	震害现象	震害原因分析
胜利桥	表层为 3~6 m 亚粘土, 下面为砂土	3 $\phi 1$ m 钻孔灌注桩, 桩长 18 m	两岸桥台向河心滑移, 桥墩变位倾斜或折断, 落梁	砂土液化, 河岸坍塌, 桩墩倾斜引起落梁
雷庄沙河桥	粉细砂	2 $\phi 0.8$ m 双柱钻孔桩基础, 桩入土层 12~16 m	桥墩呈八字形, 西岸桥墩沿桩周喷砂, 12 [#] 、13 [#] 孔落梁	砂土液化, 桩长不足
汉沽桥	表层 3 m 淤泥, 下为软粘土, 亚粘土含卵石	2 $\phi 0.8$ m 钻孔灌注桩, 深 24 m	河岸开裂、滑移, 喷砂冒水, 桥墩倾斜	地基土液化和软化, 桩长设计不足
王土桥	饱和粉细砂	2 $\phi 1$ m 钻孔灌注桩, 深 14 m	河岸滑移, 桥孔压缩, 桥墩倾斜, 落梁	砂土液化, 河岸滑移, 桩长不足

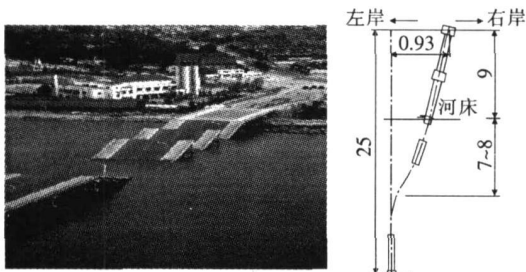


图 1 昭和公路大桥震害(日本新潟地震)(单位: m)

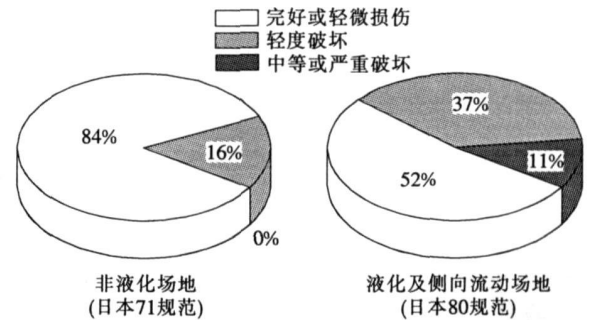


图 2 日本阪神地震中桥梁桩基础破坏统计

1.1.4 阪神地震桥梁桩基础震害

1999 年日本兵库县南部发生 7.2 级地震, 对(城市)桥梁造成了严重破坏, 共有 9 处落梁或接近落梁, 16 处发生严重破坏。桥梁震害主因有两点: 细部构造不足和地基失效。液化场地桥梁桩基础破坏形式有: 桩头及与承台节点处的弯曲或剪切破坏、桩体下沉、桩体弯曲开裂等。日本土木学会统计了阪神高速路 3 号线(非液化场地, 71 规范)109 根桩基础和 5 号线(液化场地并伴有侧向流动, 80 规范)153 根桩基础破坏情况(图 2)。在液化场地, 尽管采用了较新的抗震设计规范, 但仍有约一半左右的桩基础需要进行修复(发生轻度及以上破坏), 而非液化场地, 这一比例仅为 16%。

1.2 液化场地桥梁桩基础震害原因分析

刘惠珊等对土层液化引起(桥梁)桩基础损坏机制进行了总结(图 3), 认为对水平场地且无上覆非液化

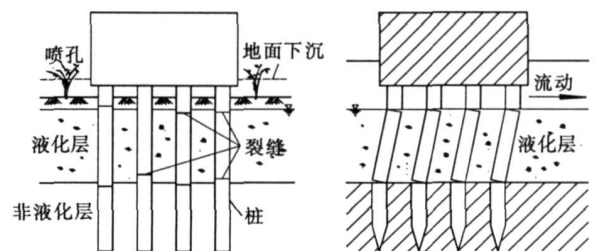


图 3 液化场地桩基础的破坏机制(引自文献[8]、[9])

土层(或较薄)时, 一般土层无侧向流动, 桩破坏主要发生在桩顶和液化与非液化土层交界处。前者主要是由于液化后土层对桩及承台的侧向支撑能力下降, 加之上部结构惯性力作用所致, 后者破坏机理尚需进一步研究。当为倾斜场地或上覆非液化土层时, 土层会发生侧

向流动, 桩基在桩顶、液化土层上下界和液化土层中部都有可能损坏。破坏的主因在于土体侧向位移引起的附加静应力。日本阪神地震表明液化后土层侧向流动对桩基础危害更大, 还可进一步引发主梁落梁、桥梁倒塌等毁灭性破坏。国内唐山、海城地震很多桥梁破坏都与此有关, 但限于当时认识, 并未引起足够重视。

2 液化场地桥梁桩基础抗震研究现状

由于地震灾害的教训, 在桥梁桩基础抗震方面各国学者开展了广泛研究, 文献[10]中有详细介绍。事实上液化场地桥梁桩基础抗震研究主要受益于20世纪几次大地震的直接推动, 在研究手段上大型离心机试验和模型振动台试验得到了较多的应用。例如由日本科技厅防灾研究所和美国的Wayne州立大学组织, 自1992年两国合作进行了EDUS(Earthquake Damage to Underground Structures)项目, 目的是通过试验研究深入认识与桩基础类似的地下结构的地震反应性能及其失效机理。期间日本在其15 m×15 m、载重500 t的大型振动台上设计了12 m(长)×3.5 m(宽)×6 m(高)的号称世界第一的剪切变形土箱, 作了大量的大比例尺甚至原形试验, 场地类型包括单层水平、多层水平和倾斜场地, 其中后两者涉及液化后土体侧向流动问题。同时日本还建造了一个20 m×15 m、载重1 200 t的更大的振动台(2005年建成), 3个重点研究工作之一便是土—结构动力相互作用。

液化场地桩—土—结构地震相互作用影响因素复杂, 试验费用较高, 合作研究就成为一种重要的科研组织形式。除上面提到的EDUS项目外, 美国加州大学San Diego分校和日本东京的Waseda大学2001年起合作开展了“液化及土体侧向流动对桩基础影响的大型振动台试验”项目, 目前已完成9组试验计划。加州大学San Diego分校还与日本港湾研究所合作2002年在日本—人工岛上采用“人工爆破”激发场地液化, 完成了包括1根单桩、4根群桩和9根群桩共3组原形桩基础在液化土体侧向流动下的抗震性能试验。

2005年美国土木工程学会在加州大学Davis分校举行了“液化和侧向流动土体中桩基础的抗震性能与数值模拟(Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground)”的专题国际学术研讨会, 共收到美国、日本等国的25篇论文, 可作为近些年试验和理论研究成果的集中体现。

我国学者也进行了一些振动台试验, 哈尔滨工业大学、大连海事大学和同济大学在国家自然科学基金项目资助下开始合作进行“液化场地桩—土—桥梁结构地震相互作用振动台试验”研究。在土木工程防灾国家重点实验室实现了考虑液化条件的桩—土—桥梁结构地震相互作用模型振动台试验, 再现了自由场地的地震液化和液化场地桥梁桩基础地震破坏全过程。

总体上看, 液化场地桥梁桩基础抗震性能研究目前已处于在震害分析、振动台及离心机试验基础上, 积极探索发展合适的数值模型的发展阶段。一方面完善现有的试验技术及方法, 继续开展试验研究以积累必要的的数据及认识; 另一方面以有效应力分析为基础的整体有限元分析模型、以非线性文克来地基梁假定为基础的实用 $p-y$ 曲线分析模型、以Biot双相介质动力学理论为基础的桩—土相互作用模型等为代表的数值分析技术也取得了长足进步, 一些简化方法将逐步被纳入相应设计规范。此外, 发展可考虑砂土液化及相应大变形机理, 适合数值分析的本构关系模型亦很重要。

3 液化场地桥梁桩基础抗震设计

我国目前桥梁抗震设计主要依据《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89), 然而该规范在液化或软弱场地的桩基础抗震方面还缺少设计的技术细节, 仅给出了若干定性规定, 计算上仍主要延续液化土层折减承载力的基于“力”的抗震设计方法, 而美国、日本桥梁抗震设计规范对基础设计则规定得比较详细, 还发展了基于“变形”的桩基础抗震设计方法。作为具体说明, 表3和表4分别对我国新近提出的《公路桥梁抗震设计规范》(JTJ 004-2005 征求意见稿)与日本桥梁抗震规范(1996)在场地液化和基础抗震设计方面进行了简单比较。1995年阪神地震后日本规范进行了全面修订, 增添了较多新的内容, 能够代表桥梁震害的最新认识与抗震设计的发展方向。2002年日本规范进行了修订, 增加了液化场地桥台抗震设计内容。可以看出: 在场地液化判别方面, 中日规范没有明显差距, 仅是具体判别方法不同。而在基础抗震设计方面, 总的来说我国规范规定得比较笼统, 可操作性较弱。

表3 中日桥梁抗震设计规范场地液化方面的比较

规范	液化判别	抗液化措施	承载力折减
中国规范	有	有	有
日本规范	有	有	有

表 4 中日桥梁抗震设计规范基础设计方面的比较

规范	设计思想	设计方法	扩大基础设计	桩基础设计
中国规范	桥梁总体“小震不坏，大震不倒”，具体到基础方面不明确	按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85)设计，为静力法，无明确设计流程	未区分	未区分
日本规范	在小震水准下，基础处于弹性工作，在大震水准下，允许基础发生可接受的塑性变形	拟静力法(震度法)和延性设计法(保有水平耐力法)，有明确设计流程	拟静力法(震度法)	延性设计法(保有水平耐力法)，进行强度、延性校核和基础位移、转角验算

4 砂土液化对我国桥梁的潜在威胁

从历史地震看，我国大面积砂土液化(必然存在侧向流动)主要发生在东部环渤海的滨海平原上，而小范围或局部的砂土液化现象在中西部发生的大多数地震中都有出现。可以说地震时砂土液化在全国范围内都有可能发生。

首先考虑地震危险性较高的西部地区，在一些地质盆地、河滩谷地和冲积平原等处都有大范围的饱和砂土分布。近年来发生的地震，如 1970 年云南通海 7.7 级地震、1996 年包头西 6.4 级地震、2001 年青海新疆交界 8.1 级地震和 2003 年新疆巴楚—伽师 6.8 级地震都有砂土液化现象发生，特别是后者砂土液化现象在强震区更是随处可见。考虑西部特殊的地形条件，上述这些地区也常常是城市所在和公路必经之处，桥梁分布较多，它们在强烈地震中将不可避免地面临场地液化问题。

其次考虑经济发达的中部和东部地区，这里大量公路桥梁处于大的河流中下游或滨海平原，场地软弱工程中大量采用了桩基础。上述地区通常地下水位较高，表层土又多为厚的饱和砂土，地震中易于液化。据中国地震次生灾害分布区划图，地震时我国大面积砂土液化及侧向流动潜在区域主要在东部环渤海、黄海，直至长江口(上海)的广大平原地带，涉及辽东半岛、京津唐及河北省、山东半岛、江苏省等广大地区，而这里又是当前中国公路网最密集的区域。一旦发生地震，砂土液化很可能会使大量桥梁、公路破坏。

最后考虑重大桥梁工程情况，笔者从发表的文献统计涉及地震砂土液化的长江上的大型桥梁工程就有：南京长江大桥、南京长江二桥、九江长江大桥、江阴长江大桥、苏通长江大桥、荆沙长江公路大桥等。

5 结语

砂土液化是桥梁结构严重破坏甚至倒塌的重要影

响因素，而我国历次强烈地震大都伴有砂土液化现象发生，加之我国规范基础抗震设计部分缺陷明显，桥梁结构在地震中是否会因场地液化而破坏已成为全国性的重要的工程问题。但是由于国内在桥梁桩基础抗震试验研究方面投入不足，科研进展与国外差距较大，这在很大程度上制约了我国桥梁抗震设计水平的提高。因此，基于试验深入研究液化场地—桩基—桥梁结构地震相互作用反应规律，探讨场地液化过程中桩的动力反应特性和桥梁结构破坏机理，在此基础上建立有效的数值模拟技术和实用的抗震设计分析方法显得尤为迫切。这对于促进桥梁抗震设计和全国桥梁建设发展都具有十分重要的意义。

参考文献：

- [1] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin Awajie Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges [J]. Strural Eng. Earthquake Eng. JSCE, 1996, 13 (2): 211~240.
- [2] 刘恢先. 唐山大地震震害 [M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [3] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害 [M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [4] 韦晓. 桩—土—桥梁结构相互作用振动台试验与理论分析 [D]. 同济大学博士学位论文, 1999.
- [5] John Berrill Susumu Yasuda. Liquefaction and Piled Foundations: Some Issues [J]. Journal of Earthquake Engineering 2002, Vol. 6 (Special Issue 1: 1~41).
- [6] 西山启伸, 小寺重郎, 著. 易建国, 林志兴, 译. 桥梁抗震计算 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1983.
- [7] 伍小平. 砂土—桩—结构相互作用振动台试验研究 [D]. 同济大学博士学位论文, 2001.
- [8] 刘惠珊. 桩基震害及原因分析 [J]. 工程抗震, 1999(1).
- [9] 刘惠珊. 桩基抗震设计探讨 [J]. 工程抗震, 2000(3).
- [10] 凌贤长, 王东升. 液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2002(4).

文章编号: 1671-2579(2008)04-0182-03

大跨悬臂空心桥墩病害成因分析及加固对策

单成林

(华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 通过空间实体有限元的计算, 分析了大跨度桥梁 T 形空心墩的病害成因, 根据病害情况、结构现状、现场条件、恢复能力、可靠程度等, 拟定并分析了各种加固方案的利弊, 推荐出最有效的加固对策。

关键词: 桥梁工程; 悬臂空心墩; 空间有限元; 病害分析; 加固对策

罗浮山东江大桥位于广东省博罗县, 于 1996 年建成, 大桥全长 1 346 m, 主跨为两联 60+100+60 m 的下承式钢筋混凝土系杆拱桥, 桥宽 26 m, 设计荷载为: 汽车—20 级, 挂车—100, 人群荷载 3.5 kN/m^2 。主墩为 4 个 100 m 跨与 60 m 跨相接的交接墩, 每个墩基础由双排 1.5 m 直径的 6 根嵌岩桩组成。主桥墩采用 T 字形大悬臂钢筋混凝土墩帽, 净悬臂长 4.25 m, 墩帽横向长 21.5 m, 顺桥向长 4.5 m, 高 2 m。墩身采用倾斜式的空心薄壁墩, 顺桥向长 4 m, 壁厚 0.5 m。墩帽在墩身部分也挖空, 墩帽顶厚 0.5 m, 悬臂部分为实心(图 1)。两跨上部结构均支承于悬臂墩帽的端部。

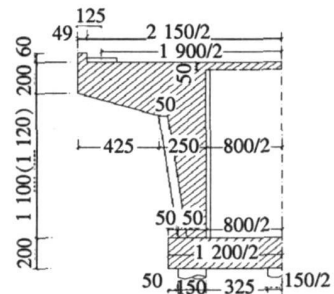


图 1 半空心悬臂墩横向剖面图(单位: cm)

mm, 裂缝由上至下开展, 竖向最长已达到墩帽底部, 虽然各主墩的病害程度不一样, 但病害性质都一样, 都是悬臂墩根部负弯矩产生的受力性裂缝(图 2)。该裂缝已严重威胁到主墩的安全。

2006 年 12 月开始讨论该桥的加固方案, 查阅原竣工图可知, 墩帽挖空部分太高, 导致墩帽顶面太薄, 受拉区截面产生突变, 配筋也严重不合理, 尽管悬臂实心段配筋较多, 但墩帽顶面实心部分与空心部分交接段

1 主墩病害及成因分析

根据现场观察及 2006 年 7 月检测报告结果可知, 在 4 个主墩两边的悬臂根部, 即悬臂实心段与空心段交接近出现贯穿墩帽的竖向裂缝, 最大缝宽超过 2.5

- [11] Scott A. A., Teerawat Juirnarongrit, Takahiro Sugano, Masanori Hamada. Soil—Pile Response to Blast—Induced Latero Spreading II: Analysis and Assessment of the p—y Method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(2): 163~172.
- [12] 凌贤长, 王东升, 王志强, 等. 液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2004(11).

- [13] 伊藤隆吉, 王君杰, 陆 锐, 等. 日本桥梁抗震设计规范——基础设计方法[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十四届年会论文集, 2003.
- [14] 刘明光. 中国自然地理图集(第 2 版)[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998.
- [15] 蒋 溥, 于克群, 戴丽思. 中国地震地质灾害及其宏观成因环境[J]. 地质灾害与防治, 1991(1).

收稿日期: 2008-05-25

作者简介: 单成林, 男, 硕士, 副教授. E-mail: shanchenglin@163.com