

文章编号: 1000-1301(2002)04-0053-07

# 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

凌贤长<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 本文在全面归纳与总结液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验及与之相关领域的国内外研究进展基础上, 直接针对我国桥梁工程中的主要震害问题, 提出在我国开展液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究的必要性, 并阐述作者对液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验中若干问题的认识。

**关键词:** 振动台试验; 桩—土—桥梁结构动力相互作用; 桥梁震害; 液化场地

**中图分类号:** P315.982      **文献标识码:** A

## Study on shaking table test for seismic interaction of pile-soil-bridge structure in case of soil liquefaction caused by earthquake

LING Xian-zhang<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In this paper, the researches of shaking table test for seismic interaction of pile-soil-bridge structure in case of soil liquefaction caused by earthquake are reviewed, and based on seismic damage to domestic bridge engineering, the authors point out that it is necessary to carry out the test in our country, and some issues of the test are presented.

**Key words:** shaking table test; seismic interaction of pile-soil-bridge structure; seismic damage to bridge, ground soil liquefaction

## 1 前言

在最近几次的城市破坏性地震中, 许多现代化桥梁遭到极其严重的破坏, 甚至倒塌, 从而造成巨额的经济损失。以 1995 年日本阪神地震为例, 仅就阪神高速路和东海道本线估计, 桥梁震害的直接经济损失达 50 亿美元, 而由此造成的间接经济损失接近 100 亿美元, 这其中因场地液化导致桩基础乃至整个桥梁结构破坏的占相当大比重<sup>[1, 2]</sup>。在国内, 1976 年唐山地震倒塌的 18 座桥梁中就有 15 座是因场地液化而导致桥台、岸

收稿日期: 2002-04-28; 修回日期: 2002-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178027)

作者简介: 凌贤长(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土地震工程及冻土工程方面研究工作。

坡滑移及地基失效引起的<sup>[3]</sup>。由于大多数建桥区段的地下水位均较高,表层土往往为很厚的饱和砂土,地震中极易液化,桥梁结构在地震中是否会因场地液化而破坏已成为一个重要的工程问题。因此,基于地基—桥梁结构共同工作的抗震试验,深入研究液化条件下场地—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的桩动力反应特性和桥梁结构破坏机理,并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。这对于加深震害理解、促进桥梁抗震及岩土地震工程的发展均具有十分重要的意义。

## 2 国内外研究现状

由于桥梁震害的教训,各国学者对桥梁抗震均十分重视,并相继开展了广泛而卓有成效的研究工作。在场地液化方面,自1964年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震之后,开始受到人们的重视。早期的研究工作主要集中于室内液化试验、液化判别、液化影响因素及液化势分析等方面,并在此基础上发展了非线性有效应力分析技术,一批学者对此作出了重要的贡献<sup>[4~5]</sup>,其中桥梁抗震应用的研究成果主要有液化判别、抗液化措施、建立在“m”法基础上的桩基抗震设计方法及液化场地桥台抗震设计等。进入二十世纪90年代,受几次大地震震害的直接推动作用,砂土液化研究工作又呈现出新的特点<sup>[8~9]</sup>,具体表现为:(1)场地液化对结构的危害性研究受到重视,包括坝体、桥梁、码头、建筑及基础等各类工程;(2)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,例如日本和美国自1992年起合作进行了EDUS(Earthquake Damage to Underground Structures)研究<sup>[8]</sup>(该计划仍在执行中),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,工作中既注意试验本身的研究,也重视与数值方法的结合;(3)抗液化工程措施的研究逐渐得到加强;(4)在涉及液化问题研究中,早期倾向于采用离心机试验,以准确模拟应力条件,近来振动台试验受到重视。

事实上,即使是砂土液化对桥梁结构危害性的试验研究,广义上讲仍属于土—结构动力相互作用研究范畴,然而在很长一段时间内二者则在各自的领域中独立发展。土—结构动力相互作用在地震工程中的应用研究得益于20世纪70~80年代的核电站、海洋平台及大坝等一些重大工程的抗震需求,并因有限元及边界元等数值分析技术的引入,使得土—结构动力相互作用的研究获得了很大的发展,一些著名的程序,如FLUSH程序等至今仍被工程界广为应用。在土—结构动力相互作用分析中,直接法与子结构法相比获得了更多的应用,在处理土体的非线性时采用了等效线性化的方法<sup>[9]</sup>。目前,土—结构动力相互作用研究工作的主要困难在于:(1)有限元波动理论分析的数值稳定性和人工边界处理(特别是直接引入土体非线性之后),计算工作量大还在其次;(2)缺少强震记录的验证和试验数据的支持,特别是土层以下部分的基础结构和土体。

液化和软弱场地对包括桥梁在内的结构地震反应影响很大,甚至是直接控制因素,已为众多震害现场调查所证实。因此,液化和软弱场地的土—结构动力相互作用理应成为研究的重点。EDUS就是针对以上问题而展开的试验研究课题。在EDUS试验研究中<sup>[8]</sup>,主要采用离心机试验和模型振动台试验,还发展了一种模型桩截面测试仪器(Model Pile—Section Test Device)用于测试静力或动力试验的桩—土相互关系曲线。由于受到边界条件、科氏效应及试验技术等的影响,近年来模型振动台试验受到重视。振动台试验首先不存在离心机试验中的所谓科利奥利效应问题,可以在较短的时间内进行为数较多的模型试验以消除一些随机因素的影响,可以研究边界条件的变化对模型动力响应的约束,以及可以进行二维、三维振动的模拟,因而振动台试验有其自身的很多优势,是研究桩—土—桥梁结构动力相互作用的一种极其有效的方法。在刚结束的12WCEE上,涉及液化的模型振动台试验就有16篇论文,研究对象与内容亦相当广泛,部分属于EDUS研究项目。其中与液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究相近的工作有:日本 Tamura 等在其最大的振动台上,完成了液化场地—钢筋混凝土双柱墩大比例尺地震破损和失效机理试验<sup>[10]</sup>,指出在场地液化前结构破损由惯性力控制,液化后结构破损与液化密切相关,结构整个破坏过程由液化控制;Funahara 等利用有效应力分析技术对试验过程进行了数值模拟,结果较为吻合。

关于模型振动台试验,从目前国内文献来看,虽然进行了桩—土—结构动力相互作用的振动台试验研究,但是尚未做过液化场地条件下的桩—土—桥梁结构动力相互作用的振动台试验研究工作。在场地液化方面,我国冶金研究院刘惠珊等(2000)曾进行了正弦波输入下自由场地液化模型振动台试验和考虑建筑地

基影响的场地液化模型振动台试验; 石兆吉<sup>[3]</sup>进行了地震动输入下自由场地液化模型振动台试验。在国外, 对桩—土—结构动力相互作用振动台试验研究已取得不少研究成果。从大量的文献资料来看, 国外对桩—土—结构动力相互作用的振动台试验研究可以归纳为三个阶段: 第一阶段是早期振动台试验探索性研究阶段, 1964 年新潟地震和阿拉斯加地震中大量桩基破坏是促使利用振动台试验研究桩基抗震的最直接因素, 但是当时因实验条件等所限而只进行了一些简单的没有考虑模型相似比及边界条件等影响的试验, 日本的 Kubo<sup>[12]</sup>是第一个进行桩—土—结构动力相互作用振动台缩尺试验的学者; 第二阶段振动台试验研究主要开展于 20 世纪 80 年代, 开始注意模型相似比和边界条件对试验结果的影响, 但是只单纯将试验结果与原型结构分析进行比较, 日本的 Mizuno 和 Iiba<sup>[13]</sup>是首先采用地震波激励完成桩—土—结构动力相互作用振动台试验的学者; 第三阶段振动台试验研究开展于 20 世纪 90 年代, 是桩—土—结构动力相互作用振动台试验研究的新阶段, 砂土液化条件下桩—土动力相互作用振动台试验是这一阶段研究的一个热点, 洛马普里埃塔地震和神户地震中桩基的大量破坏进一步促进了动力相互作用的试验研究, 不仅注重对试验装置和模型相似比的研究, 而且越来越多地将试验结果与理论分析结果进行比较以检验理论分析中土性参数选取的合理性。在这一阶段美日开始了 EDUS 联合研究项目, 并进行了大量的振动台试验研究<sup>[8]</sup>, 其研究工作已很难区分传统的液化与土—结构动力相互作用研究领域, 这反映了学科内部之间的交叉和融合。在这些研究工作中, 1995 年以前主要是小比例尺试验, 1995 年后日本在 15m×15m、载重 500 吨的大型振动台上作了大量的大比例尺甚至原形试验, 场地涉及软土和饱和砂土。EDUS 研究成果目前已陆续发表, 对研究工作的重要启示是: (1) 模型振动台试验可以得到与离心机试验十分一致的结果, 应该大力发展经济的小比例尺模型振动台试验和提高离心机试验技术水平; (2) 在场地液化条件下桩—土—结构数值模拟和理论研究方面, 建立在有效应力分析基础上的整体分析方法和基于非线性文克尔地基梁假定的并联弹簧—阻尼器分析方法得到了发展, 并获取了与试验相吻合的结果, 这些也是今后的进一步发展方向。关于国内外桩—土—桥梁结构相互作用试验研究的更详细情况, 范立础教授作了很好的总结<sup>[14]</sup>, 在此不再赘述。

在桥梁抗震领域, 如果将国内工作与国外工作在整体上做一对比, 作者认为, 20 世纪 90 年代以前及初期, 国内工作基本上与国外相一致, 甚至取得了一些领先的成果, 例如中国是世界上最早将饱和砂土及粉土液化判别纳入抗震设计规范的国家, 何度心教授关于桥台在液化场地下分析理论和振动台试验研究等<sup>[15]</sup>; 而此后, 国内研究工作则与国外的差距较大, 以大跨度桥梁(斜拉桥或悬索桥)抗震为例, 国内更多的研究工作放在上部结构抗震方面(当然, 这是必需的), 而桩—土—结构动力相互作用的分析仍停留在 20 世纪 80 年代初期日本规范的水平上(液化场地折减土层  $m$  值)<sup>[16]</sup>, 对于可能液化场地这是很粗糙的。1995 年日本阪神地震中, 尚未完工的明石海峡大桥基础(沉井)遭到破坏, 基础因受断层及其周围土层液化的影响而发生较大的位移, 事后对基础详细的数值模拟得到了与地震观测记录及震害调查一致的结果, 全桥分析表明该结构地震反应由基础及其周围土层控制, 并由此获得“精细的上部结构分析很可能由于粗糙的土—结构动力相互作用模型而使结果无效”的启示。详细分析产生这种状况的原因, 作者认为, 试验研究投入不足是其关键之所在。目前, 我国部分学者已经认识到这一问题的严重性, 范立础教授和韦晓博士(1999)在国内率先进行了桩—土—桥梁结构动力相互作用模型振动台试验, 并用 SHAKE 程序对自由场试验结果进行比较, 试验结果与理论分析在反应频谱特性及峰值方面十分吻合, 从而得到一些有益的结论。吕西林教授和陈跃庆博士进行了地基—基础—建筑结构动力相互作用的振动台试验<sup>[17, 18]</sup>。但是, 这些试验未考虑砂土液化问题。

### 3 在我国开展研究的必要性

美、日总结震害经验认为, 在大地震发生后, 交通系统对减少地震经济损失方面有着十分重要的作用<sup>[1, 2]</sup>。桥梁是交通系统的重要元件, 在交通系统防震减灾中处于核心地位。我国是一个发展中国家, 随着经济及基本建设规模不断扩大, 我国桥梁建设发展日益加快, 在跨越大的江河及东部沿海地区均已建设了不少桥梁, 并且工程中大量采用了桩基础。21 世纪将在现有铁路和公路网主干线(二纵二横)的基础上全面完成铁路复线工程和五纵七横的骨干公路网, 其中包括大量的桥梁工程。一些大城市也要发展立体交通和高架交通, 特别是沿江(河)城市更要建立许多跨江(河)桥梁以形成多重环线交通。在沿海地区的渤海湾、长江口、杭州湾、珠江口、伶仃洋及琼州海峡等地建立跨海大桥也在酝酿之中。此外, 在此基础上以上海为中心的连接周边港口、城市、岛屿的高速公路网和环太平洋海岸的南北公路干线亦可能建成。详细的大地构造、地

震地质及地球物理研究表明, 20世纪60—70年代以来, 地球岩石圈已进入了新的强烈活动与调整时期(人类历史以来的第五个强烈地震活动期), 由于特殊而复杂的大地构造背景决定我国是一个地震多发的国家, 地震烈度为Ⅶ度的地区占国土面积一半以上, 仅地震烈度超过Ⅶ度的大、中城市已达110座之多, 其中沿海地区城市88座, 具有地震触发砂土或粉土液化条件的城市为54座。海洋底面、沿海地区及大江河下游地区的软土和饱和砂土广泛分布, 而这些地区城市分布密集, 一旦遭受强震袭击, 桥梁震害的后果将不堪设想。20世纪80年代末, 九江大桥北引桥因场地烈度为Ⅶ度即判别为中等液化<sup>[19]</sup>, 也遇到了类似的问题, 至今为止尚未能对该桥在液化条件下的抗震性能给出明确的回答, 这是非常危险的。另一方面, 我国现行的桥梁抗震设计规范在液化或软弱场地的地基基础抗震方面还缺少设计的技术细节, 与目前桥梁建设的发展速度极不适应, 很可能造成大量新建桥梁马上成为抗震加固对象。总之, 可以预计液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究在我国将拥有十分广阔的应用空间, 其潜在的社会及经济效益无疑是巨大的。

如上所述, 场地液化条件下桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台模型试验研究对于准确预测液化场地桥梁结构地震反应具有极其重要的现实意义, 也是目前国内外桥梁结构抗震设计理论研究所关注的热点问题之一。此外, 在计算技术高度发达的今天, 可以将振动台模型试验结果与数值模拟计算分析结果相结合, 并利用一些辅助试验来研究一些因素的影响特性, 以期对试验结果进行有效的修正; 随着非线性动力分析软件大量产生, 对桥梁结构进行非线性分析, 了解其在地震荷载作用下的响应与破坏趋势已不十分困难。当前由于缺少必要的在液化场地实际结构上的强震观测资料, 影响了液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用研究的进一步深化与完善。振动台模型试验研究为解决这一问题提供了另一个重要手段, 但是目前由于我国尚未开展液化条件下桩—土—桥梁结构动力相互作用的振动台试验研究, 因而进行这项工作对我国研究桩—土—桥梁结构动力相互作用更具有重要的现实意义。虽然国外部分试验工作可供我们参考, 但是在我国优先开展桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台模型试验研究仍很必要, 只有这样才能获得完整的定量数据, 以用于检验和发展我们的数值模拟方法、并为桥梁抗震设计提供指导, 也可以发展我们的试验装备和试验技术, 更好地培养人才; 另一方面, 由于有国外可借鉴的成功经验, 将使我们的此项振动台模型试验研究少走弯路, 经济上也是合算的。鉴于此, 国家自然科学基金2001年首次资助本文作者“液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究”的立项申请。

## 4 关于研究的若干思考

(1) 目前, 在我国城市立交桥、高架桥及高速公路桥梁设计中, 较多采用钢筋混凝土柱式桥墩, 有双柱式和独柱式, 基础一般采用钻孔灌注桩, 有单桩和承台桩(群桩)两种形式。考虑循序渐进的试验研究路线和建立一般理论的需要, 首先宜采用目前对桥梁结构延性抗震能力研究较为充分的独柱墩作为研究对象, 利用模型振动台试验手段和数值模拟相对照的方式, 研究液化条件下桩—土—桥梁结构动力相互作用问题; 在进行自由场液化和液化场地单桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究基础上, 再进一步扩展到群桩问题。

(2) 应该特别明确的是, 在场地液化条件下导致桩基及桥梁结构体系的失效因素大致有两类: 其一, 是砂土液化引起土体滑移和地基沉降, 使得桩体产生很大的附加荷载, 部分桩墩承载力不足或丧失承载力; 其二, 是桥梁结构体系本身的设计缺陷, 如桩基埋深较浅、桩帽与承台连接构造细部配筋设计不当等。显然, 前者是液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究的着眼点。从桥梁结构体系的安全设计角度来看, 地基承载力的评估与安全性分析是桥线勘察设计阶段就要解决的问题或作相应的补强处理。经过上述设计阶段仍不能解决的问题就需要在桥梁的桩墩基础设计或下部结构设计中予以考虑。因此, 对由于砂性地基液化导致的桥梁桩墩基础承载力失效及其应对策略的厘定, 液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用性状与失效机理的研究就是非常必要的。根据上述认识: 整个桥梁结构的失效是桩基由于地基液化发生侧向大位移和受力改变, 进而耦合上部桥梁结构在复杂地震激励作用下发生的非线性振动所致; 所以, 应针对整个桥梁结构—桩—液化地基的破坏失效过程进行地震动输入下模型试验和数值模拟研究, 其影响因素是复杂的。技术路线的难点主要在于模型试验相似条件的确立和各影响因素的有效控制上。

(3) 约束液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究的模型相似比是需要解决的一个主要问题<sup>[33]</sup>。特别是如何基于有限尺寸和振动台承载力限制条件, 考虑桩—土—桥梁结构动力相互作用, 降

低边界条件和土层条件的影响, 从而保证模型试验结果在很大程度上代表原型反应, 是小比例模型相似设计中需要考虑的一个关键问题。

(4) 在液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究中, 试验砂箱制作、砂料制备、模型桩柱墩(含承台)设计制作及模型试验条件控制等将涉及加载、固结、饱和、安全等诸多因素。这对于试验结果与原型结构之间是否具有可比性也有很大影响。土体液化边界条件模拟是保证试验成功的重要条件。此外, 土压力时程和桩基位移时程测试主要涉及测试设备与传感器类型、试验条件控制、试验标定及测点布置等问题。特别值得注意的是, 砂土液化试验具有大变形及大应力等特点, 因而传感器和测试设备的选用与调节必须与此相适应, 以保证测试精度和灵敏度。

(5) 对于与液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究密切相关的理论分析来说, 砂土液化数值模拟的土动反应本构模型是一个重要问题。对于这一问题, 已有不少研究成果可供参考<sup>[20]</sup>, 并且有的可以直接引用。不过, 在具体选择已有的土动反应本构模型时, 值得考虑的一个重要问题是模型参数易测、数值实现容易, 最好是能够根据具体砂样的动三轴试验曲线选择本构模型, 而无需在理论上过于复杂。基于这一点, 对于此类课题研究可采用目前广泛应用的等价非线性粘—弹性模型<sup>[21]</sup>, 因为该模型不仅具有物理概念清楚、能够考虑土的非线性动力性能、数值实现容易及计算量较小等优点, 而且其所需的参数易于用普通共振柱仪、动扭剪仪、动剪切仪及动三轴仪等试验可靠测定。合理选取数值模拟的参数是需要很好解决的又一重要问题, 其较为全面的观点是参数的选取完全取决于计算模型本身, 大致可以分为三类参数, 其一是由土体本构模型所决定的参数, 其二是由桩墩基础结构动力损伤分析模型所决定的参数, 其三是阻尼模型参数, 目前对这一问题已作了很多研究, 并且在一些方面已经成熟或较为成熟, 具体选用时再结合必要的参数试验与优化工作即可以。此外, 土—结构动力相互作用本质上属于波动问题, 而在数值模型中由于所取的计算域总是有限的, 怎样更好地设定分析的人工边界以反映辐射阻尼影响将直接影响理论工作的本身及其结论的可靠性, 对于这一问题, 前人亦已做了不少探索性的工作<sup>[22, 23]</sup>, 常用粘性边界、或者非反射的透射边界来近似处理实际物理模型中无穷远的动力学边界, 并且近年来 Dasgupta G<sup>[24]</sup> 建议的 Cloning 单元能够对无穷远的边界进行数值模拟, 可以运用到此类课题的研究中。

(6) 合理选择砂土液化判别准则, 不仅是砂土液化理论分析所必需的, 而且也是液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究中要求明确的一个重要问题。目前已有很多种前人较为有效的地震触发砂土液化判别方法可供选用<sup>[35, 40]</sup>。此外, 本文作者曾在二维应力状态下基于最大剪切作用面原理提出的能够同时考虑地震动水平剪应力、竖向动正应力及水平动正应力共同作用的砂土液化判别准则, 以及在二维应力状态下基于莫尔—库伦强度准则采用总应力法提出的另一能够同时考虑地震动水平剪应力、竖向动正应力及水平动正应力共同作用的砂土液化判别准则, 均比较有效, 可以用于此类课题的研究<sup>[25, 26]</sup>。

(7) 液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用的计算模型和计算方法研究是此类课题工作的一个难点。目前, 国际上解决该问题主要有以下三种思路: (1) 假定土的非线性本构模型(例如双曲线模型)和孔隙水压增长模型, 在土层有效应力分析基础上建立液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用的二维模型及其数值模拟方法<sup>[11]</sup>, 其优点在于建立模型与现有的土—结构相互作用分析的直接法一致, 应用方便, 但是关键问题在于人工边界条件处理、显式有限元波动理论分析数值稳定性及桩—土非线性耦合作用模拟等三方面; (2) 基于非线性文克尔地基梁假定的并联弹簧—阻尼器分析方法<sup>[27, 28]</sup>, 该方法建立在目前常用的 Penzien 桩—土相互作用模型基础上, 通过非线性文克尔地基梁假设, 并将桩—土结构相互作用区域分为近场、远场和自由场, 分别利用非线性弹簧与并联库仑阻尼表示桩—土非线性相互作用, 粘滞阻尼器并联线性弹簧反映土层的辐射阻尼作用, 自由场分析作为多点输入, 近年来这种方法发展很快, 故 EDUS 计划发展了一种模型桩截面测试仪器(Model Pile—Section Test Device)用于测试静力或动力试验的桩—土相互作用关系(P—Y)曲线; (3) 采用二相饱和介质模型的桩—土相互作用动力有限元分析方法<sup>[29]</sup>, 该方法建立在多相孔隙介质波动理论基础上。1952年 Biot 建立了液体饱和多孔介质的动力方程, 20世纪80年代监凯维奇等发展了其有限元分析理论, 1993年钱令希首次将海洋土筒简化为二相饱和介质模型进行地基—海洋平台结构相互作用的动力有限元分析。这种方法理论上是最合理的, 但是计算量大, 尚不能很好考虑土体非线性的影响, 此外在其研究中假定土与结构满足位移连续条件亦值得商榷。本文作者认为上述方法(2)适合于工程应用, 而方法(1)和方法(3)较适合于理论研究, 其中方法(3)尚处于起步阶段, 还有相当的工作要做, 而土层地震反应分析的有效应力分析技术目前已经趋于成熟, 比较适合于此类课题的研究。另外, 考虑试验研究工作需要对桩柱

破损有一细致的了解,在理论分析中桩柱宜采用分析精度较高的钢筋混凝土结构纤维单元模型或多弹簧模型<sup>[28]</sup>。这种详细的分析结果还能够为试验工作中的模型桩柱设计与制作提供更可靠的参考,使之发生延性破坏,而不是脆性破坏,确保试验安全。

(8)考虑此类课题研究内容涉及面广、客观制约因素复杂及探索一般规律的需要等,所以具体的技术路线宜采用模型振动台试验与计算机数值模拟及工程震害事例检验相结合的办法。因为,一方面数值模拟作为一种低成本、低消耗、高技术投入的研究手段,具有理论探索范围广、各种影响因子可控性强及成果外推性好等特点;另一方面振动台试验及震害事例检验虽然具有个别性强等弱点,但是具有条件真实性好、结果可靠性大及实测参数可信度高等优点。所以,振动台试验与数值模拟及震害事例检验的三者有机结合恰好可以弥补彼此的不足,使研究工作既具有理论深入探索的特点,又具有较强的实践指导意义,从而保证课题研究的社会及经济效益。

(9)应该指出,砂土液化过程中液化后后期因土体流动对桩基和桥梁结构地震反应的影响不在此类课题的研究之列。现有的土层试验研究表明,由液化造成的土层流动易在斜坡场地和液化层上覆非液化粘土层的情况下发生<sup>[31]</sup>。当然,砂土液化过程中及液化后的土动反应本构模型也值得考虑。该问题是这样的:一般当砂土发生液化时,孔隙水压力超过有效应力,砂土颗粒开始悬浮在流体中,这时的砂土、孔隙流体所构成的混合物已不再是一种具有骨架特征的多孔介质,因此它的力学响应也不能再用常规的连续介质力学理论的本构模型来描述,更恰当地说,它是一种具有一定表面张力和粘性效应的非牛顿多相流体,关于这种特殊混合物本构行为的描述将是在此类课题研究基础上未来进一步探索的问题<sup>[32]</sup>。

## 5 结语

液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验国外早已取得了不少很有价值的科研成果,而国内则刚刚开始。桥梁震害调查表明,场地液化和结构延性不足是引起桥梁严重破坏的重要原因。然而,在过去的研究中,往往将二者割裂开来,加之桩—土—桥梁结构动力相互作用分析的复杂性,致使在科研及实际应用中往往采用较简化的模型,更多地侧重于结构延性抗震方面,由此获得的结论在某些情况下是偏于危险的。本文作者认为,基于液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验,将结构的延性破坏过程与液化场地的作用有机结合起来,并利用数值模拟手段进行深入研究,提出符合实际的场地液化条件下钢筋混凝土桩柱延性抗震分析方法。这对于进一步加深震害理解和提高桥梁抗震设计水平,无疑具有极其重要的意义,也有很高的学术价值。

## 参考文献:

- [1] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin/Awajie Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges[J]. *Structural Eng./Earthquake Eng.* JSCE 1996, 13(2): 211—240.
- [2] Buckle I G, Cooper J D. Mitigation of Seismic Damages to Lifelines: Highways and Railroads[A]. Schiff A. T. Edited. *Critical Issues and State of Art in Lifeline Earthquake Engineering*[C]. New York: ASCE, 1995: 121—126.
- [3] 刘恢先. 唐山大地震震害(三)[M]. 北京:地震出版社, 1986.
- [4] 石兆吉, 王兰民. 土壤动力特性—液化势及危害性评价[M]. 北京:地震出版社, 1999.
- [5] 陈文化, 孙巨平, 徐兵. 砂土地震液化的研究现状及发展趋势[J]. *世界地震工程*, 1999, 15(1): 16—24.
- [6] Harry G C, James K M. Guide to Remedial Measures for Liquefaction Mitigation at Existing Highway Bridge 13 Site[R]. Technical Report NCEER-99-0015, State University of New York at Buffalo, 1999.
- [7] Kagawa T, Minowa C, Mizuno H. et al. Shaking Table Testing on Piles in Liquefying Sand[A]. *Proc. of 5th U S National Conf. On Earthq. Eng.*, Chicago, 1994, 4: 107—116.
- [8] Kagawa T, Minowa C, Abe A. EDUS Project (Earthquake Damage to Underground Structures) [A]. *12WCEE*[C], New Zealand, 2000, Reference NO. 0329.
- [9] Lysmer J. FLUSH—A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil—Structure Interaction Problems[R]. Technical Report EERC-75-30, University of California at Berkeley, 1975.
- [10] Tamura S, Suzuki Y, Tsuchiya T, et al. Dynamic Response and Failure Mechanisms of a Pile Foundation during Soil Liquefaction by Shaking Table Test with a Large-scale Laminar Shear Box[A]. *12WCEE*[C]. New Zealand, 2000, Reference NO. 0903.
- [11] Funahara H, Fujii S, Tamura S. Numerical Simulation of Pile Failure in Liquefied Soil Observed in Large-scale Shaking Table Test[A]. *12WCEE*[C]. New Zealand, 2000, Reference NO. 0927.

- [12] Kubo K. Vibration Test of a Structure Supported by Pile Foundation[ A] . 4WCEE[ C] . Chile, 1969, 3; A6—1—A6—12.
- [13] Mizuno H, Iiba M, Kitagawa Y. Shaking Table Testing of Seismic Building—pile—two—layered—soil Interaction[ A] . 8WCEE[ C] . USA, 1984, 3; 649—656.
- [14] 范立础, 韦晓. 桩—土—结构动力相互作用试验研究现状[ A] . 大型复杂结构的关键科学问题研究文集[ C] . 大连理工大学, 1999, 170—178.
- [15] 何度心. 桥梁振动研究[ M] . 北京:地震出版社, 1989.
- [16] 范立础. 桥梁抗震[ M] . 上海:同济大学出版社, 1997.
- [17] Ganve T, Yamazaki F, Ishizak H, et al. Response Analysis of the HIGASHI—KOBE Bridge and Surrounding Soil in the 1995 HYOOGOKEN—NANBU Earthquake[ J] . Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1998, 27(3); 557—576.
- [18] 吕西林, 陈跃庆, 陈波. 结构—地基动力相互作用体系振动台模拟试验研究[ J] . 地震工程与工程振动, 2000, 20(4); 20—29.
- [19] 顾金钧. 九江长江大桥引桥墩体抗震模型试验研究[ J] . 桥梁建设, 1982, (4); 21—27
- [20] 项海帆. 21 世纪世界桥梁工程的展望[ J] . 土木工程学报, 2000, 33(3); 1—6.
- [21] R O Davis, J B Berrill. Energy Dissipation and Seismic Liquefaction in Sands[ J] . Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10(1); 117—129.
- [22] K Takeshi, I Yoshito. Correlation between Nonlinear Response of Bridge Piers and Natural—Period—Dependent Spectrum Intensity[ A] . 12WCEE[ C] . New Zealand, 2000, Reference NO.0806.
- [23] W Smith. Non—reflecting Plane Boundary for Wave Propagation Problems[ J] . J. Comp. Phys., 1973, 15.
- [24] 廖振鹏, 黄孔亮, 杨柏坡, 袁一凡. 暂态透射边界[ J] . 中国科学, 1984, 4(6); 109—115.
- [25] 凌贤长, 张克绪. 在二维应力状态下地震触发砂土液化动应力条件[ J] . 地震工程与工程地震, 2000, 20; 85—91.
- [26] 凌贤长, 王丽霞, 周宏. 地震触发砂土液化总应力判别法[ J] . 地震工程与工程震动, 2001, 21(1); 99—104.
- [27] Stark T D, Olson S M. Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories[ J] . J. Geotech. Engng., ASCE, 1995, 121(12); 107—114.
- [28] Ohtsuki A, Fukutake K, Sato M. Analytical and Centrifuge Studies of Pile Groups in Liquefiable Soil before and after Site Remediation[ J] . Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1998, 27(1); 1—14.
- [29] Shaomin W, Kutter B L, Chacko J, et al. Nonlinear Seismic Soil—Structure Interaction[ J] . Earthquake Spectra, 1998, 14(2); 377—396.
- [30] Spacone E, Fillppou F C, Taucer F F. Fiber Beam—Column Model for Nonlinear Analysis of RC Frame[ J] . Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1996, 25(4); 711—742.
- [31] Sasaki Y. Experimental Study on Lateral Flow of Ground Induced by Soil Liquefaction[ A] . Proceedings of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium[ C] . 1990, Vol(1); 825—830.
- [32] Tokida K. Simplified Procedure to Estimate Flow by Soil Liquefaction[ J] . Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1993, (6); 381—396.
- [33] Kagawa T, Minowa C, Mizuno H, et al. Shaking Table Testing on Piles in Liquefying Sand[ A] . Proc. of Fifth U S National Conf. on Earthq. Eng [ C] . Chicago, 1994, 4; 109—117.
- [34] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[ J] . 大连理工大学学报, 2000, 40(1); 1—8.
- [35] 楼梦麟, 王文剑, 朱杉, 等. 土—结构体系振动台模拟试验中土层边界影响问题[ J] . 地震工程与工程振动, 2000, 20(4); 30—36.
- [36] 吕西林, 陈跃庆. 结构—地基相互作用体系的动力相似关系研究[ J] . 地震工程与工程振动, 2001, 21(3); 85—92.
- [37] Fukutake K, et al. Analysis of Saturated Dense Sand—structure System and Comparison with Results from Shaking Table Test[ J] . Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(7); 977—992.
- [38] Konagai K, Nogami T. Analog circuit to simulate dynamic soil—structure interaction in shaking table test[ J] . Soil dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17; 279—287.
- [39] Ohtsuki A, et al. Three dimensional Effective Analysis For Evaluating Response of Group Pile Foundation under Liquefaction[ J] . Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, 1994, 28; 101—110.
- [40] Yasuda S, et al. Large—scale Shaking Table Tests on Pile Foundations in Liquefied Ground[ A] . 12 WCEE[ C] . New Zealand, 2000, Paper No. 1474.