

地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展

陈卫忠^{1,2}, 宋万鹏¹, 赵武胜¹, 杨典森¹, 赵 坤¹, 盛 谦¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;

2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 地下工程震害及其抗震性能研究是当前国内外学者研究结构抗震的一个热点方向。由于受周围岩土体的约束, 地震作用下地下结构的动力响应特征与地面建筑存在较大差异。针对地下结构特殊的动力响应特征, 国内外学者展开了一系列抗震理论分析和模型实验研究。在论述地下结构地震破坏特征及破坏机制的基础上, 总结目前地下结构抗震性能评价的研究进展并指出其存在的问题, 提出地下工程抗震分析研究重点及全寿命周期抗震的下一步研究方向, 以期为我国强震区地下工程震害机制分析和抗震性能设计提供有益帮助。

关键词: 地下工程; 地震破坏; 理论分析; 模型实验; 性能评价

中图分类号: TU 94

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)02-0310-16

Research progress of seismic analysis methods and performance evaluation in underground engineering

CHEN Weizhong^{1,2}, SONG Wanpeng¹, ZHAO Wusheng¹, YANG Diansen¹, ZHAO Kun¹, SHENG Qian¹

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*)

Abstract: The seismic damage and seismic performance in underground engineering is a hot spot of research home and abroad. Due to the constraints of surrounding rock and soil, there is a big difference in the dynamic characteristics between the underground structures and ground constructions under earthquake. Because of the special deformation characteristics of underground structures, a lot of research have been carried out on theoretical and experimental study of seismic response. Furthermore, the damage characteristics and failure mechanism of underground structures have been analyzed, the current achievements of seismic performance evaluation of underground structures have been summarized, and important issues have been pointed out. The life cycle seismic response and performance evaluation indexes of underground engineering should be emphasized, especially the life cycle damage mechanism and the seismic performance design of underground engineering constructed in the strong earthquake zone.

Key words: underground engineering; earthquake damage; theoretical analysis; experimental model; performance evaluation

收稿日期: 2016-05-31; **修回日期:** 2016-06-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057906); 国家杰出青年科学基金项目(51225902); 国家自然科学基金青年基金项目(51409245) Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2015CB057906), National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(Grant No. 51225902) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51409245)

作者简介: 陈卫忠(1968-), 男, 博士, 1990年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0577

1 引言

过去人们普遍认为地下结构受周围岩土体的约束其抗震性能优于地面结构,特别是 20 世纪 90 年代以前,由于地下结构的破坏情况很少见诸报端,日本地震学者甚至一度认为日本的结构抗震技术已达顶峰,结构安全没有问题^[1],直到 1995 年日本 Kobe 大地震^[2]城市地铁大开车站(Daikai)和上泽车站(Kamisawa)的严重倒塌破坏将沉浸在“安全神话”里的人们惊醒,这也是有史以来地震作用导致地下结构大量倒塌破坏的第一个相关记录^[3]。之后关于地震作用下结构破坏的报道逐渐增多。如 1999 年土耳其 Duzce7.8 级大地震^[4],1999 年我国台湾集集 7.3 级地震^[5],2008 年汶川 8.0 级地震^[6],2013 年雅安 7.0 级地震^[7]等。这些强震区地下工程的大量破坏促进了各国学者对地下结构抗震问题的重新理解和认识,推动了地下结构抗震分析和评价理论的进步和发展。

目前地震问题的研究手段主要有原型观测、理论分析及模型实验等^[8-11]。在原型观测基础上,国内外学者开展了大量的振动台模型实验,深入分析了地下结构地震动破坏机制,提出了一些实用的抗震分析方法。在地下结构抗震性能评价方面,由于地下结构一旦发生破坏将给人类带来无法估量的损失,因此,地下结构抗震性能评价就显得尤为重要。本文在详细评述国内外学者提出的各类抗震实用分析方法和性能评价指标的最新研究成果的基础上,提出了强震区地下工程全生命周期抗震设计理论和性能评价的研究重点和发展方向。

2 地下结构地震动破坏特征及机制

地下结构由于埋置于岩土体中,地震作用时将与周围岩土体一起承担变形,这是地下结构区别于地面建筑变形最显著的特征。美国土木工程协会(ASCE)根据 1971 年圣费尔南多地震中洛杉矶地下结构的破坏情况给出了地震动作用下地下结构破坏的形式,M. S. Power 等^[12-14]根据已有的地下结构破坏记录总结了地下结构地震动反应特征。马险峰^[2]以日本 Kobe 地震为背景,研究了地铁车站、地下给排水管道等地下工程的震害形式并分析了其响应特征及规律。王秀英等^[15]通过分析大量地下结构的震害情况,将地下结构的破坏特征进行了分类。李

天斌^[16]根据汶川地震中山岭隧道的震害调查与分析,概括了山岭隧道变形破坏的基本类型。历史上几次大地震导致地下结构破坏的情况如下:

1995 年日本 Kobe 发生 7.2 级直下型地震,神戸市地面峰值加速度普遍在 0.5 g 以上,造成多处地下结构包括地下管道、地下商场和地铁结构等发生破坏,其中地铁车站和区间隧道发生了大范围的破坏,大开车站和上泽站破坏情况最为严重,车站半数以上的中柱发生了弯曲、剪切或弯剪联合破坏,中柱的破坏继而导致了车站顶板结构发生坍塌,造成上覆土体大面积沉降,沉降深度可达 2.5 ~ 4.0 m^[1](见图 1~3)。



图 1 大开车站中柱弯曲破坏

Fig.1 Bending failure of column in Daikai station



图 2 大开车站顶板坍塌导致的路面沉降

Fig.2 Surface subsidence caused by roof collapses in Daikai station



图 3 大开车站中柱弯剪联合破坏

Fig.3 Bending and shearing damage of column in Daikai station

1999年台湾集集发生7.3级地震，震区内多座山岭隧道遭受严重破坏，包括位于断层错动区的1座引水隧道、断层上盘区域的50座隧道及下盘区域内的3座隧道，其中位于台湾中部苗栗县的三义壹号铁路隧道的二次衬砌受损最为严重^[17](见图4)。

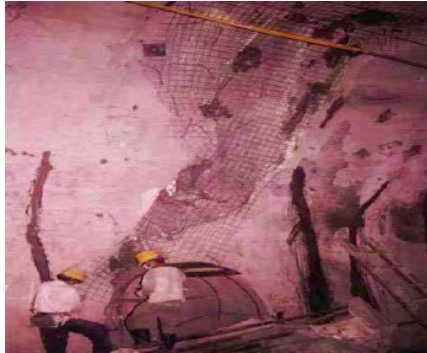


图4 三义壹号铁路隧道边墙破坏
Fig.4 Sidewall damage in Sanyi railway tunnel

2008年四川汶川发生8.0级大地震，造成震区37条国道省干线及高速公路不同程度受损，其中都映高速、G213都江堰—映秀公路、青川—剑阁公路、S105北川—青川公路及都江堰—龙池公路这5条线路隧道受损严重，经现场调查发现隧道震害大多集中于断层破碎带，包括衬砌开裂、渗水、错台、剥落，隧道垮塌等，其次集中在洞口段，包括洞口边坡失稳，端墙开裂，衬砌破坏等^[18](见图5~8)。



图5 龙洞子隧道出口处边坡崩塌
Fig.5 Slope failure at the exit of Longdongzi tunnel



图6 桃关隧道入口端墙开裂
Fig.6 The end wall cracking at the entrance of Taoguan tunnel



图7 龙溪隧道垮塌
Fig.7 The collapse in Longxi tunnel



图8 酒家垭隧道衬砌开裂、渗水
Fig.8 Lining crack and water seepage in Jiujiaya tunnel

根据已有历史的震害资料和赵冬冬等^[19-21]的研究成果，地下结构地震动破坏类型和特征归纳成如表1所示。

地下结构破坏的原因除了有地质条件、施工方法等外在因素外，其更深层次的影响因素可以分为以下2类：一是由地震动引起的破坏，即由地震动产生的惯性力在结构中造成的破坏，M. A. Hashash等^[22]提出影响地下结构抗震安全性的主要因素包括：(1) 结构形式、尺寸及埋深；(2) 结构材料特性；(3) 地震动强度。二是由地层破坏引起的地下工程破坏，其破坏形式主要包括土体液化、断层位移和边坡失稳。在导致地下结构破坏的因素中，地层往往起着控制性作用，这在以往地震灾害调查中已得到证实。

3 地下结构抗震分析方法

3.1 理论分析

地下结构抗震理论分析方法的提出与人们对地震认识的发展和科学技术的进步有着密切的联系。20世纪50年代以前，地下结构研究主要沿用大森房吉提出的适用于地面建筑的静力理论模型^[23]，60年代末，T. R. Kuesel^[24]针对地铁结构提出了基于延性的抗震设计准则。70年代后，基于大量地震观测资料，伴随着世界上几次大地震的发生、地震监测设备的发展以及研究手段的进步，刘祥庆等^[25-26]提出了适用于地铁车站结构的基于位移的地下结构分析理论和方法。

表 1 地震作用下地下工程破坏类型及特征

Table 1 Damage types and characteristics of underground engineering under earthquake

地下结构类型	破坏类型及特征
地下管道	管道接口破坏, 管段破坏, 管道附件以及管道与其他地下结构连接处破坏
地铁车站	混凝土中柱开裂倒塌, 顶板断裂坍塌, 侧墙开裂
地铁区间隧道	弯曲裂缝、竖向裂缝及混凝土脱落、钢筋外露等
地铁盾构隧道	不均匀沉降, 管片接头处混凝土剥落, 渗漏严重, 二衬表面有环向和纵向裂缝, 内衬出现裂缝等
山岭隧道	洞口及洞门的破坏, 浅埋地段及不良地质区间二次衬砌的破坏, 断层穿过隧道造成的剪切破坏
地下厂房	弯曲破坏、剪切破坏及弯剪联合破坏, 线性折断, 滑坡导致厂房倒塌、纵横向破裂、倾斜断裂等

3.1.1 抗震分析实用方法

(1) 地震系数法

地震系数法是在大森房吉静力理论上发展而来, 类似于地面建筑, 将地震动加速度产生的惯性力和结构一侧的主动侧压力施加于地下结构, 根据静力理论分析地下结构的地震响应。

(2) 自由场变形法

自由场变形法于 20 世纪 60 年代提出, 经 C. M. St. John 和 T. F. Zahrah^[27]发展起来的一种简单有效的抗震分析方法。该方法曾用于美国 20 世纪 60 年代末修建的旧金山海湾快速地铁运输系统和 80 年代洛杉矶地下铁道设计中。20 世纪 90 年代, Power 等进一步引入弹性梁模型来计算结构变形, Wang 则提出了基于地震波垂直入射作用下隧道横截面变形的计算方法^[28]。

(3) 等效侧力法

等效侧力法将地震动荷载用静载形式代替, 然后根据静力分析理论计算结构内力。龚成林^[29]利用数值模拟的方法计算了等效侧力法和动力时程法的地震动下结构响应, 认为等效侧力法仅适用于土层变形模量相对固定的一定深度地层中, 当约束条件改变时结构反应值离散性较大。

(4) 土-结构拟静力相互作用法

该方法的主要思想是基于地震波动场分析, 在自由场变形基础上乘以一个土-结构相互作用系数得到结构的变形, 再将该变形施加于结构上, 然后根据静力理论计算结构内力反应^[30]。

(5) 反应位移法

反应位移法最早在 20 世纪 70 年代被日本学者应用于地下结构的抗震设计中, 将地震作用下岩土体的变形通过地基弹簧以静载形式施加在结构上, 然后依据静力理论计算结构地震响应^[31]。该方法的理论基础是日本学者根据地震观测和实验研究证实

的地震动下地下结构与岩土体协同变形规律, 由于该方法能较好的反映地下结构地震动响应特点, 因此被广泛应用于地下结构抗震设计规范中^[32], 如日本的《核电厂耐震设计技术指南》及《沉管隧道抗震设计规范》以及我国的《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)等。但是该方法存在一定缺陷, 首先是对结构内力影响较大的岩土体弹簧刚度取值存在较大困难, 目前还没有很好的方法解决这个问题。其次, 计算模型不能真实体现岩土体对结构的动态作用, 从而影响结构周围的荷载分布, 这给计算结果带来一定误差。近年来, 有许多学者对该方法进行了改进与扩展。刘晶波等^[33]提出了一种整体式反应位移法来避免计算岩体弹簧刚度, 但仍很难准确的计算地震动土压力。

(6) 地下结构 Pushover 分析法

基于地面建筑的 Pushover 方法, 刘晶波等^[34-35]提出了一种适用于地铁等地下结构抗震分析的弹塑性分析方法, 在给出水平荷载分布形式和确定目标位移后进行结构在地震动作用下的全过程分析, 通过与动力时程分析方法进行对比研究, 验证了该方法的可靠性和良好精度。该方法具有参数确定简单、荷载施加方便等特点, 是地下结构抗震分析中行之有效的办法。但是该方法给出的 3 种水平荷载分布形式不能完全体现地震动荷载的实际情况, 认为定义的荷载分布容易导致计算结果与实际情况之间的差异。

(7) 动力时程分析法

动力时程分析法按照其模拟方法的不同可以分为有限元法、有限差分法、离散元法、边界元法、杂交法、非连续变形分析法及耦合法等, 被认为是解决地震作用下结构动力响应最精确的方法。针对分析过程中涉及到的人工边界、地震动输入及材料非线性动力本构模型等问题, 国内外学者进行了广

泛的研究。目前已有的人工边界大致可以分为局部人工边界、无限元边界和吸收边界，其中，局部人工边界包括 Engquist-Majda 边界、Bayliss-Turkel 边界、Higdon 边界、多次透射边界、黏性边界和黏弹性边界等^[36]。在地震动输入方面，何建涛等^[37]提出了适合于黏弹性人工边界地震动输入的方法，赵武胜等^[38]在分析目前已有人工边界原理及地震动输入方法的基础上，重点研究了地震动输入方法与人工边界间的相互作用，提出了适用于无限元人工边界的地震动输入方法。关于岩土体非线性动力本构模型，目前应用较为广泛的是等效黏弹性模型和弹塑性模型。等效黏弹性模型可以反映土体动荷载作用下的非线性和滞后性特点，但与实验结果和现场监测数据存在一定差异。弹塑性模型能真实反映土体动荷载作用下的非线性、滞后性和变形累积效应，因此具有较好的应用前景。

3.1.2 抗震分析方法评价

地下结构抗震分析方法的发展与人们对地震认识水平的提升有很大关系，早期的抗震分析方法如地震系数法、等效侧力法等主要沿用地面建筑的抗震分析理论而来，该类方法物理参数定义清晰，计算过程简单，在早期的地震结构抗震分析中发挥了重要作用。但忽视了地震作用下地下结构主要受土体变形影响这一事实。自由场变形法不考虑地震作用下地下结构与周围岩土体之间复杂的相互作用关系和地下结构存在对土体变形的影响，但由于没有考虑岩土体与结构之间的相互作用，不能真实反映地震作用下结构的荷载效应，主要适用于地下结构刚度与周围岩土体接近的工程。土-结构拟静力相互作用法是在自由场变形法基础上改进而来，计算模型与自由场变形法类似，不能真实反映地下结构的地震荷载作用，另一方面，它只是简单的采用一个相互作用系数来表征地下结构与岩土体之间的刚度差异，没有全面考虑其复杂的动力响应，因此一般适用于结构形式简单的地下工程抗震理论分析。目前应用较多的理论分析方法主要有反应位移法、地下结构 Pushover 分析法和动力时程分析法等，前 2 种方法能基本满足地下结构复杂的应力需求，得到较为满意的计算结果，后一种方法能精确模拟地震作用下地下结构的真实响应，因此这 3 种方法都得到了广泛应用。但是，它们也存在一些目前难以解决的问题，比如反应位移法中岩土体弹簧刚度的取值难于确定，地震作用下的动土压力难于准确计算，地下结构 Pushover 分析法中水平荷载分布形式

不能体现复杂的地震作用，动力时程分析法中的人工边界、地震动输入和动本构模型等问题还没得到彻底解决，这些都制约着这些方法的推广应用。

地下工程抗震分析方法按照分类方式的不同，可以分为不同的类别，但其内容基本相同^[39-41]。地下结构抗震分析应当包括 浅埋地下工程抗震分析，含建筑地基、城市地铁隧道和埋深较浅的土体隧道等，和深埋地下工程抗震分析，含赋存于岩体中的地下厂房洞室群和岩石隧道等。浅埋地下工程抗震分析的研究对象主要是周围土体液化、土体动力本构关系和土体-结构相互作用等问题，而深埋地下工程则侧重于岩体动力本构关系、围岩动力稳定性和围岩-结构相互作用等方面。各类方法进行了对比分析并给出了其适用场地条件，如表 2 所示。

表 2 地下结构抗震分析方法比较

Table 2 Seismic analysis comparison of underground structures

类别	分析方法	前提条件	适用场地条件
地震系数法		各向同性的线弹性假设；	浅埋地下工程，土体与结
		忽略土体与结构的相互作用	构刚度差异较大，结构变
相互作用法		各向同性的线弹性假设；	浅埋地下工程，结构断面
		水平地震作用简化为集中力或倒三角分布	形式简单、刚度大
基于力的方法	等效侧力法	各向同性的线弹性假设；	浅埋地下工程，地层变形的
		忽略土体与结构的相互作用	模型相对固定，断面形式简单
地下结构 Pushover 法		水平地震作用简化为倒三角加速度分布或水平绝对惯性峰值加速度或水平等效惯性加速度分布	需建立目标位移与地震加速度之间的对应关系，适用于场地均匀、断面形式简单的浅埋或深埋地下工程
		线弹性假设；忽略土体与结构的动力作用；地震作用简化为集中力或倒三角分布	深埋地下工程，结构与围岩刚度接近，断面形式简单
基于位移的方法	反应位移法	各向同性的线弹性假设；忽略土体自身相互作用；考虑地震剪应力和结构惯性力	浅埋地下工程，场地均匀，剪切波作用较小
基于地层-结构整体分析法	动力时程分析法	人工边界；地震动输入；材料非线性动力本构关系	各类地层条件复杂、结构形式多样的浅埋和深埋地下工程

3.2 模型实验

地下结构模型实验主要有 人工震源实验和室内振动台实验，近年来随着土工离心实验技术的发展，离心机振动台实验被广泛应用于地下结构地震响应分析。下面将分别介绍人工震源实验和室内振

动台实验在地下结构抗震分析中的应用进展。

3.2.1 人工震源实验

人工震源实验是通过人工激震或爆破的方式来模拟地震作用下地下结构的动力反应特性,由于不存在人为截断模型边界和地震波输入机制的问题,能较为准确地模拟地下结构的动力响应特性,因此常用来研究波源问题和结构自振特性问题^[42]。Phillips 最早在美国内华达州某核实验场周边的一条隧道中监测地下核爆炸过程中隧道的震动响应,但是由于受技术条件和其他因素限制,人工震源实验的激震力较小,无法模拟地震作用下结构的真实应力状态,而且实验消耗的人力及物力成本较高,因此该类实验方法应用较少^[28]。

3.2.2 室内振动台实验

依据模拟地下结构重力场环境的不同可以将室内振动台实验分为普通振动台实验和离心机振动台实验。

(1) 振动台类型发展

最早出现的振动台是机械式振动台,由英国剑桥大学 D. V. Morris 等首先研制成功,该系统由弹簧激振,只能输入正弦波,不能实现反复加载,之后 Kutter 等和日本工业大学相继研制出了颠簸道路式振动台和杆式振动台等机械式振动台。法国 Zelikson 等成功研制了电控炸药爆炸以激发振动的爆炸式振动台,美国加州大学戴维斯分校 Arulanandan 等研制了由多层压电陶瓷元件叠加的压电式振动台,日本中央大学 Fujii 等研制了通过 2 个交流磁线圈极性变化产生振动的电磁式振动台。振动台系统发展历史上的一个重要里程碑是由美国加州理工大学 Aboim 等研制的电液式振动台,这是目前为止应用范围最广的振动台系统^[43]。该系统能模拟任意振幅和频率的振动波形,灵活方便,可控性好,能重复利用。

(2) 普通振动台实验

室内振动台实验具有主动控制地震动输入、方便数据采集等优点,被广泛应用于地下结构震害分析中。

T. Iwatate 等^[44-45]针对阪神地震中大开车站及区间隧道的破坏情况开展了一系列大型振动台模型实验,初步探讨了地下结构的破坏机制。宫必宁和赵大鹏^[46]采用有机玻璃制作了矩形地下框架结构模型,开展了不同埋深工况下的振动台实验,实验过程中测定了结构的加速度放大系数、压力和位移响应,讨论了竖向地震激励下的地下结构响应和不

同埋深下结构的抗震性能问题。A. L. Che 等^[47]开展了嵌入式隧洞振动台模型实验和数值模拟研究,结果发现周围土体对模型结构产生较大的侧向地震土压力作用。G. X. Chen 等^[48-50]基于不同场地条件(可液化土、软土)、车站结构、材料模型及地震动输入情况下,开展了地下结构的破坏性和非破坏性模型实验,这也是国内外首次进行的饱和砂土和软土地基下车站结构大型振动台实验。

季倩倩^[51]针对上海软土条件开展了自由场振动台、典型地铁车站结构振动台和地铁车站接头结构振动台模型实验研究地下结构的变形特性,认为结构模型中柱部位的应变较大,应适当加强地铁车站结构中柱的强度。庄海洋^[52]开展了南京地区含液化土层的深厚场地下地铁区间隧道和车站结构的大型振动台模型实验,研究了地铁的非线性地震反应规律,基于测得的结构水平位移、加速度和内力结果分析,提出了在深厚软土地下结构的抗震优化设计方法。陈国兴等^[53]针对南京可液化场地进行了类似的振动台实验,通过分析实验数据后认为地震作用下地基土存在低频放大现象,地下结构的存在对自由场土体的地震动特性有显著影响。边金等^[54-55]对北京地区常见的粉质黏土等场地条件开展了相关振动台实验,通过分析记录的结构加速度时程、应变和应力分布情况,研究了北京地区地铁结构的地震响应问题。申玉生等^[56]针对雅泸高速公路高烈度地震区某隧道首次开展了山岭隧道大型振动台实验研究,模型采用几何相似比 1:30 和弹性模量相似比 1:45 作为独立设计参数,分别以粉煤灰、河砂和机油配置围岩和以石膏、石英砂、重晶石和水配置隧道结构,采用四川地震局合成的人工波作为地震输入波,研究了地震作用下山岭隧道的动力响应,指出隧道地震作用下的薄弱部分是拱顶和仰拱部位。史晓军等^[57-59]针对研究较为缺乏的浅层软土矩形地下综合管廊开展了系统的一致激励和非一致地震激励振动台台阵模型实验,为了模拟地下结构受到地震波作用的连续性影响和行波效应,采用 2 个地震激励和 2 个振动台开展模型实验,研究了地震作用下结构的动力响应及接触面和地基土的响应规律,验证了一致激励和非一致激励下结构动力响应的不同之处。徐炳伟^[60]以天津站交通枢纽工程为背景,开展了包含土、群桩、地下结构和地上结构等多个部分组成的大型复杂体系振动台实验,全面分

析了桩、地下结构和地上结构等的地震动响应。刘晓敏等^[61]以大渡河流域的大岗山水电站地下洞室群为原型,设计了国内外第一个洞室群大型振动台模型实验,研究了大型地下洞室群在地震过程中的动态响应特征。除此之外,袁俊^[62]也对地下结构的抗震研究进行了有益的探索。

近年来,在断层影响的强震区岩石地下工程中,本课题组对地下结构抗震进行了相关研究。针对区域存在的断层影响,提出了研制模拟断层错动实验装置的设想(见图9),通过开展断层错动+强震双重作用下的隧道物理模型实验,揭示断层错动区隧道的破坏机制。

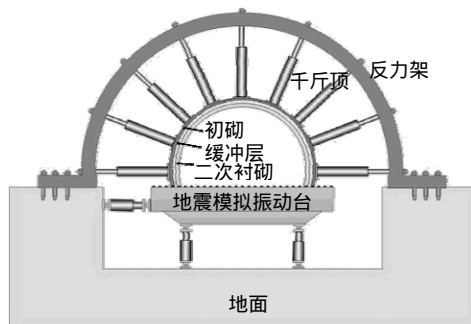


图9 物理模型实验装置

Fig.9 Physical model test equipment

室内普通振动台实验是物理模型实验的一大进步,弥补了之前强震资料相对缺乏的遗憾,通过大量的振动台实验结果分析,揭示了地震作用下地下结构的动力响应特征,包含不同场地和埋深条件下结构的动力响应及土体与结构间的相互作用关系,指出了地震作用下结构的薄弱部位,提出了不同场地条件下的结构抗震优化设计方法。由于普通振动台实验很难准确模拟地下结构的实际破坏特征,因此观察到的实验结果也以变形特性为主。

(3) 离心机振动台实验

普通振动台实验只能模拟1g环境下结构的动力响应,存在重力失真效应,因此,能模拟与原型重力场接近的离心机振动台实验受到广泛关注和应用。已有研究表明:离心机振动台在模拟结构动力响应特性、液化场隧道上浮机制等方面均具有良好效果。

D. Yang等^[63]利用离心机振动台研究了George Massey隧道在地震作用下的动力响应以及场地液化对隧道的的影响规律。C. J. Lee等^[64]通过离心机振动台实验研究了地震动下沉箱的动力响应和地基土的变形特性,研究认为土-结构作用区域内和岸墙

下地基土的超孔隙水压力小于远场液化区域,深层土体和浅层土体内的超孔隙水压力和土压力变化分别由转动模式和平移模式控制,土体平均剪切波速迅速减小到振动开始时波速的1/8。B. L. Kutter等^[65]利用离心机振动台实验模拟了高烈度地区浅埋明挖隧道的地震动响应,与数值模拟研究的上覆土体膨胀性、超孔隙水压力和结构截面形式等对隧道的变形影响进行对比分析,探讨了隧道的上浮机制。E. Bilotta等^[66-67]也开展了类似的不同场地条件下离心机振动台实验,实验结果验证了在动力和静力条件下结构内力分布存在较大的差异,分析了不同激励作用下结构的内力和位移情况及影响实验结果的一些内外在因素。U. Cilingir和S. P. G. Madabhushi^[68-69]分别开展了50g环境下浅埋圆形和矩形隧道的动力离心机实验,通过与数值模拟对比分析表明:地震动峰值加速度的影响作用较大,而地震动频谱特性则影响较小;隧道埋深对结构变形模式影响不大,主要影响着地震土压力和结构内力。J. C. Chou等^[70-71]开展了可液化土层中浅埋隧道上浮特性的系列动力离心机实验,探讨了其上浮机制,研究了结构埋深及尺寸对上浮特性的影响。T. Tobita等^[72-73]分别开展了20g加速度环境下污水井和市政检修井的动力离心机模型实验,表明周围土体有效应力的降低是导致污水井和检修井上浮的主要原因。Z. Y. Chen和H. Shen^[74]开展了50g加速度下含隔震层的矩形隧道离心机模型实验,研究表明:矩形隧道的角部响应最大,隔震层能显著减小隧道的变形。

刘光磊等^[75]利用离心机振动台研究了砂土中地铁区间隧道的地震响应,重点分析了隧道结构的上浮及变形特性。刘晶波等^[76]基于Bockingham π 定理,综合考虑了土与结构的相对刚度、模型材料的性质、模型箱的边界影响等因素,采用量纲分析法对离心机振动台模型实验进行了相似关系设计,相关研究成果可以为离心机振动台实验的模型设计提供参考。王永志^[43]在系统介绍和总结国内外离心机的发展及应用基础上,阐述了我国发展大型离心机振动台的必要性,结合中国地震局工程力学研究所拟建设的大型离心机振动台,提出了该所离心机系统设计的详细技术指标和结构布局,完成了实验辅助系统的基本设计,可以为我国离心机振动台的建设提供参考。韩超等^[77-78]利用浙江大学新建的ZJU400离心机振动台开展了不同激励下饱和砂土自由场和含圆形隧道场地的振动台实验,研究了地震作用下自由场应力折减系数沿深度的变化规律和

圆形隧道的动力响应规律,通过与数值模拟结果对比分析,验证了基于修正自由场变形的抗震设计方法的合理性。凌道盛等^[79]通过离心机振动台模拟了相似比为 1:50 的 50 米单层双跨地铁隧道的地震破坏过程,通过分析记录到的地基土加速度、孔压、动土压力和车站模型的响应特性,指出压弯联合作用下地铁车站最薄弱部位是立柱底部,车站结构发生水平剪切变形主要是由地震导致的左右非对称土压力作用引起。

离心机振动台具有的优势是能模拟地下结构在真实重力状态下的动力响应,能较为准确的模拟实际地震作用下结构的破坏特性,包括液化场地下的结构上浮机制和非液化场地下的破坏模式等,不存在由于模型相似关系带来的与实际重力不一致而导致结构受力存在偏差的情况,因此在研究结构的破坏模式和上浮机制等方面更加令人信服。

受技术条件限制,目前离心机振动台实验对象多是简单结构类型,模型尺寸较小,结构模型相似材料不能完全代替实际情况,也不能模拟地震的行波效应,实验过程中存在的科里奥利效应还没得到彻底解决,这些都是制约离心机振动台进一步发展的因素。

3.2.3 存在的问题

目前国内外学者已开展了不同场地条件、不同破坏机制和不同结构形式下的普通振动台和离心机振动台实验并取得了许多成果,这在一定程度上弥补了强震观测资料的不足,但是应该注意到模型实验毕竟是诸多假设条件下理想化了的实验,与实际情况存在较大差异。而模型实验成功的关键因素在于模型箱的选取、相似关系的确定、结构模型材料的选择及尺寸效应和地震动输入问题等,下面分别介绍其研究情况及存在的问题。

(1) 模型箱选取问题

国内外研究者采用的模型箱按结构形式可以分为刚性模型箱(Mizuno)、柔性模型箱(Meymand)和层状剪切模型箱(Matsuda)等^[80]。在早期振动台实验研究中,模型箱一般采用刚性结构形式,箱体由钢框架和木板组成,G. X. Chen 等^[48-51, 55, 80]开展的振动台实验都采用了此种箱体。早期刚性模型箱设计的目的是模拟土在地震作用下的真实剪切变形,经过一系列实验研究后认为箱体材料刚度过大将限制土体的变形,过小将导致土体发生显著的弯曲,因此目前常用的做法是在刚性模型箱箱体内加设柔性材料,比如橡胶、海绵和聚苯乙烯泡沫等,楼梦麟等^[81-82]

研究表明,箱体内衬的柔性材料过厚将影响土体的变形,过薄则达不到减小箱体边界效应的效果,因此合理选取柔性材料的厚度是关系到振动台实验成功的重要因素。

柔性模型箱多为圆筒形容器,采用柔性材料制作主体部分,并在侧壁外包纤维带或钢丝,能模拟多个方向平动的剪切变形。Meymand 首次在模拟土-桩-上部结构相互作用的振动台实验中设计了圆筒形柔性模型箱^[80]。陈跃庆等^[83]也研制了类似的柔性模型箱,实验研究后认为柔性模型箱能较好地模拟土体的剪切变形。但是,柔性模型箱外包纤维带或钢丝间距不好控制,间距过小则近似变成刚性模型箱,间距过大则导致箱体刚度不够,可能引起土体的弯曲变形。

层状剪切模型箱是目前模拟土体剪切变形的理想箱体结构,通常由若干个矩形或圆形层状框架和滚轴叠合而成,层状框架间设置一定数量的滚轴,用以模拟土体在振动方向上的剪切变形。日本 Matsuda 最早研制了该类模型箱并用于饱和砂土的振动台实验中^[80],伍小平等^[84]研制了钢制矩形层状剪切模型箱并应用于自由场实验中,结果表明所研制的箱体能较好地模拟土体侧向变形边界条件,A. L. Che 等^[85]采用自己研制的层状模型箱应用到地下管道的振动台实验中,刘光磊^[86]研制了用于离心机振动台的叠环式模型箱,史晓军^[87]研制了一种模拟土体在水平相互垂直的 2 个方向上剪切变形的层状模型箱,陈国兴等^[88]研制了一种模拟自由场边界条件的叠层剪切型模型箱,研究认为比较理想地削弱了边界上地震波的反射或散射效应。已有成果普遍认为层状模型箱的模拟效果优于刚性模型箱和柔性模型箱,但是大震情况下,层状剪切模型箱的边界效应仍不能很好的消除。

模型箱的边界效应在实验过程中是无法避免的,已有的模型箱在消除边界效应方面仍存在一定困难,而且只能满足单向地震动输入,因此未来研制可多向地震动输入且能减小边界效应的模型箱是热点方向。国内已有学者对此类模型箱做了有益尝试,杜修力等^[89-90]研制了一种能满足双向地震动输入的悬挂式层状多向剪切模型箱。

(2) 相似关系确定问题

为了满足振动台台面尺寸和承载能力的限制要求,实验设计时必须考虑缩尺模型的动力相似关系条件,迟世春和林少书^[91]将动力相似换算关系总结为弹性相似、重力相似和弹性-重力相似等情况。

弹性相似不考虑重力加速度的相似条件,适合于研究结构的自振特性及动力反应问题,重力相似则需满足原型与模型之间的惯性力和重力相似,适合于研究结构的破坏情况,弹性-重力相似则介于两者之间。N. S. Kim等^[92-93]提出了一种考虑几何比例系数来修正等效弹性模量和最终应变比值的相似律,可以减小缩尺模型下结构的地震响应误差。S. B. Zheng等^[94]推导了不同载重条件下缩尺模型与原型之间的动力相似关系,认为重力影响结构的弯曲刚度,对剪切刚度影响。当然,要求所有的模型参数同时满足相似关系是不可能的,这就要求在实验设计阶段合理地选择影响实验结果的主要因素,适当放弃一些次要因素,确保实验地顺利进行。P. J. Meymand等^[95-97]给出的相似比设计参数具有一定参考性。

(3) 结构模型材料选择问题

目前常用的结构模型材料主要有有机玻璃、铝合金、微粒混凝土、石膏等,根据各自材料特性的差异,应用于不同的振动台实验中。有机玻璃、铝合金一般用来模拟结构弹性范围内的变形规律,微粒混凝土则用于模拟结构的强度变化和动力相互作用,石膏由于其强度较低,常用于模拟结构的破坏形态,但需注意防水处理。合理的选择结构模型材料,是确保实验达到预期要求的必要条件,已有的模型材料还不能满足所有的实验需求,一般只适合于某类特定的实验类型,因此研制一种能模拟结构变形破坏特性并且适用于不同结构形式的新材料是振动台实验面临的又一问题。

(4) 尺寸效应和地震动输入问题

模型尺寸的缩小将导致结构材料的力学性能提高,这将影响实验结果的合理性和真实性。关于如何评价模型实验中的尺寸效应,已有的研究方法主要分为2种类型:一是基于概率分布的分析方法;二是基于断裂力学和实验相结合的半理论半经验分析方法^[98]。但是这些理论方法的前提条件与实际情况差异较大,并不能完全解决尺寸效应导致结构地震动的差异性等问题。地震动输入是振动台实验中的一个关键步骤,已有的地下结构振动台实验由于受实验设备的限制均采用一致地震动输入,研究表明当模拟隧道、地下管道等长大线型结构时,不能忽视地震的行波效应影响。史晓军等^[57-58, 87]开展了国内外第一个非一致地震动综合管廊振动台实验并研究了其地震动响应,认为忽视地震的行波效应将对结构地震响应产生较大影响。其他关于非一致地

震动输入下地下结构的振动台实验研究鲜见报道,因此开展不同结构形式的非一致地震振动台实验将是下一步的工作重点。

4 地下结构抗震性能研究

开展地下结构抗震分析理论研究和模型实验的主要目的是研究地震作用下结构的变形破坏特性,在抗震结构设计过程中,合理的地下结构形式和抗震性能评价指标是确保结构的安全可靠的重要内容。地震动作用对结构造成的变形和破坏主要集中在2个方面:体现结构变形破坏最大值效应的首次超越破坏和体现地震动持时效应的累积损伤破坏。目前,国内外关于结构抗震性能评价指标的相关规范和研究主要集中在首次超越破坏方面,即以结构变形的位移角作为指标来评价结构的抗震性能。

美国 Vision Seacoc 2000等^[99-100]报告针对框架结构分别以层间位移角和顶点位移角给出了不同性能水准下结构破坏与位移角限值之间的关系。日本地震工程学会研究报告也以层间位移角为性能指标给出了结构不同性能水准下的限值^[101]。Q. W. Wang等^[102]从理论上推导了计算钢筋混凝土复合结构的层间位移角公式,计算结果与实验数据相符,验证了计算公式的正确性,并进一步给出了四级抗震性能水准下的层间位移角限值。T. Sato和K. Suzuki^[103]针对柱主要承担轴向荷载的功能,分析了地震作用下柱破坏的过程,给出了适用于任何结构形式的层间位移角限值的建议。我国第一部专门的地下结构抗震设计规范^[104]以层间位移角和直径变形率为性能指标对地铁车站及区间隧道进行整体性能评价,针对城市地铁结构的特殊抗震要求给出了三级设防水准下的变形限值,分别用层间位移角和直径变形率评价矩形和圆形地下结构的抗震性能。规范^[105]针对上海地区特有的软土地场,给出了车站矩形结构抗震变形验算要求:弹性层间位移角限值取为1/550,弹塑性层间位移角限值取为1/250,而关于区间隧道的抗震变形验算则要求其径向变形的最大值不超过接缝安全使用确定的允许值。顾丽江和张冬梅^[106]通过对盾构隧道衬砌结构受力的分析,研究了隧道直径变化量与混凝土应力、螺栓受力及纵缝张开量之间的关系,以上海软土地区盾构隧道为例,运用ABAQUS软件进行模拟研究后给出了他们之间的临界范围。王国波等^[107]基于已有的震害资料和相关研究,建议对地下框架结构进行变形和截面承

承载力 2 个方面验算以评价其抗震性能。通过数值模拟研究,认为地下结构弹性层间位移角取 $1/550$ 过于保守,而弹塑性层间位移角取 $1/250$ 限值应更严格。王文晖^[108]根据相关规范规定、实验统计分析和北京地区典型地铁地下结构数值模拟分析,对矩形地铁结构给出了 4 个性能水准下的层间位移角限值,其值分别为: $1/1\ 000$, $1/600$, $1/400$, $1/200$ 。董正方等^[109]提出了以强度和整体变形为指标的城市轨道交通地下结构抗震性能评价体系,考虑到地下结构地震破坏特点将地下结构划分为 2 个性能水准。通过统计和分析国内地面框架结构的实验数据,给出了不同性能下矩形结构的层间位移角限值,分别为 $1/550$, $1/250$, $1/70$, 采用增量分析法计算后给出了圆形隧道的直径变形率限值,分别为 3.40% 和 6.40% 。

目前,地下结构的抗震性能评价指标仍沿用地面建筑体系,对于指标限值的研究一般通过统计分析已有地面建筑的实验数据和数值模拟推导得来,由于地下结构破坏模式与地面建筑存在着较大差异,地面建筑的性能指标及其限值不能准确表征地下结构的整体变形性能,因此,研究符合地下结构地震响应和破坏特点的性能指标及其限值是亟待解决的问题。

5 地下工程抗震分析方法及性能评价进一步研究方向

5.1 地下工程抗震分析方法

目前已有的理论分析方法在逻辑推导方面有着严密的数学理论基础,但是在场地条件、地震波处理、动力本构模型及土-结构相互作用等方面存在较大的简化,而且都没有考虑地震持时效应的影响,这在一定程度上影响了计算结果的准确性和适用性。动力时程分析法能考虑到岩土体的非线性特征及土-结构动力相互作用。因此,抗震理论分析研究的下一步热点将集中在以下几个方面:(1) 提出能适应各类场地特点的地下结构动力响应分析方法;(2) 目前已有的拟静力分析法中地震水平作用一般都简化成矩形或三角形分布,这与实际地震作用存在较大差异,如何将地震作用进行合理有效的简化,促进拟静力分析的推广应用;(3) 地震的持时效应将导致结构的低周疲劳破坏,研究考虑地震持时效应的相关参数的取值方法;(4) 动力时程分析法能很好模拟地下结构地震作用下的响应,但是

在人工边界、地震动输入、材料动力本构模型及土-结构接触问题等方面需要进一步深入研究,完善动力时程分析方法。

模型实验研究方面:(1) 提高离心机振动台的承载能力,开展大尺寸的地下结构振动台离心实验,减小相似比例关系带来的误差;(2) 模型实验中的岩土材料已得到广泛研究,下一步需研发替代隧道初支等结构的相似材料,减小材料相似性带来的误差;(3) 振动台实验中地震动输入将对实验结果产生较大影响,选择合适的地震动输入以及考虑非一致性和多向地震动输入将是下一步研究重点;(4) 振动台实验时需要考虑地下结构的初始地应力场,应当对振动台进行适当的改造才能满足实验要求。

5.2 地下工程抗震性能评价

已有的规范和研究一般都集中在层间位移角或直径变形率等单因素指标上,单因素变形指标只能描述结构在动力作用下发生变形或破坏的最大值,不能体现地震的持时效应,这样可能会低估幅值较小的持续性地震对结构的破坏作用。近年来随着基于损伤性能的抗震设计方法的发展,能体现首次超越破坏和累积损伤破坏的双参数指标在地面结构抗震性能评价中已得到了大量应用^[110-112]。因此,地下结构抗震性能指标研究的下一步研究方向是将双参数指标体系引入到地下结构抗震分析中,建立符合地下工程的抗震评价体系。

抗震性能评价的另一个重要问题是性能指标的细化及不同性能水准下指标限值的确定,大多数规范中只有两级性能水准指标,即弹性状态指标和弹塑性状态指标,其限值多是基于地面结构实验数据的统计分析。如何建立适合地下工程不同抗震性能要求的水准指标,是未来地下工程抗震研究工作者需要努力去解决的一个难点。如何根据岩石地下工程地震响应机制与灾变机制,建立岩石地下工程抗震性能水平及量化指标,开展非线性动力损伤演化理论对地下工程抗震性能分析研究;提出不利地质条件和支护结构性能劣化对岩石地下工程全寿命服役期岩石地下工程抗震性能的多目标综合评价方法。

除此之外,系统总结国内外工程抗震设防水准研究成果与工程实践经验,建立基于近场地震动特征和强震灾变模式与临界条件的岩石地下工程全寿命服役期面向性能的抗震设防目标及其设防水准;研究岩石地下工程抗震设防地震动参数的确定方法,提出各级设防水准下的地震动参数。另外,基

于岩石地下工程地震响应的时空效应和灾变模式，研究地下结构动力损伤演化与抗震性能间的关系，提出面向灾变动力学过程和抗震性能的地下工程设计理论与方法；研究围岩、结构、减震体系协同工作机制及其抗震性能，提出抗、减震相结合的地下工程设计理论与方法，形成面向性能和灾变动力学过程的岩石地下工程全寿命服役期抗震设计理论与方法。

迄今为止，关于指标限值研究的振动台实验相对较少，已有的振动台实验也主要是针对地铁车站等简单矩形结构，基本未见马蹄形隧道及地下厂房等复杂断面形式的振动台实验，且大部分实验中均未观察到结构破坏现象，这将影响结构变形极限状态下指标限值的确定。因此，实验数据的匮乏和实验对象的简单化是制约地下结构抗震性能评价指标限值确定的重要因素，大力开展针对不同结构形式、能反映地下工程位错、初始地应力等条件的振动台实验将推动地下结构抗震性能评价及评价指标等相关研究工作。

6 结 论

由于地下工程建设的特殊性和复杂性，目前还没有一种模型和理论方法能准确模拟和计算复杂场地条件下结构的地震动响应。现代振动台实验技术的发展，为下一步开展大尺度模型、多点多向地震动输入及同时考虑弹性和重力相似关系等振动台实验提供了技术保障。数值模拟技术的进步为研究复杂场地地下结构动力响应提供了有效途径，考虑近、远场地震动的差异性、结构非线性化动力本构模型的精细化及人工边界的处理等将是未来精确模拟地下工程动力响应的热点。鉴于目前地下工程开发的迫切需求，提出适用于复杂场地及结构形式条件下多向地震动作用的抗震结构理论分析方法显得尤为重要。

地下结构抗震性能评价是确保人类生命和财产安全的有效保障，目前关于性能指标的研究大多集中在基于变形的单一参数指标，地震持时效应的影响未引起高度重视；细化地下工程设防水准下抗震性能评价指标的限值将是一大热点。随着基于损伤的抗震分析理论的发展，建立基于变形理论的层间位移角和基于能量理论的损伤指标等双参数体系将是下一步完善地下结构抗震性能评价的途径。

参考文献(References)：

- [1] 冯 谦, 黄 江. 大跨度地下结构震害特征及破坏机制探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(增1): 98-102.(FENG Qian, HUANG Jiang. Exploration of disaster characteristics and damage causes of large span underground structure[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(Supp.1): 98-102.(in Chinese))
- [2] 马险峰. 地下结构的震害研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2000.(MA Xianfeng. The earthquake disaster research for underground structure[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2000.(in Chinese))
- [3] JIANG L, CHEN J, LI J. Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(4): 555-567.
- [4] MENKITI C O, MAIR R J, MILES R. Highway tunnel performance during the 1999 Duzce earthquake[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [S.l.]: A A Balkema, 2001: 1365-1368.
- [5] 王文礼, 苏灼谨, 林峻弘, 等. 台湾集集大地震山岳隧道受损情形之探讨[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 52-60.(WANG Wenli, SU Zhuojin, LIN Junhong, et al. Discussion on damaged extent of mountainous tunnels due to earthquake, Taiwan[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(2): 52-60.(in Chinese))
- [6] 崔光耀, 王明年, 林国进, 等. 汶川地震区典型公路隧道衬砌震害类型统计分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 122-127.(CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Statistical analysis of Earthquake damage types of typical highway tunnel lining structure in Wenchuan seismic disastrous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 122-127.(in Chinese))
- [7] 兰恒星, 周成虎, 高 星, 等. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 499-504.(LAN Hengxing, ZHOU Chenhu, GAO Xing, et al. Secondary geological hazard assessment and hazard mitigation countermeasures in Lushan, Ya'an Earthquake, Sichuan Province[J]. Progress in Geography, 2013, 32(4): 499-504.(in Chinese))
- [8] JIANG Y, WANG C, ZHAO X. Damage assessment of tunnels caused by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake using Hayashi's quantification theory type II[J]. Natural Hazards, 2010, 53(3): 425-441.
- [9] RAMAZI H, HOSSEINNEJAD M. The Silakhor(Iran) earthquake of 31 March 2006, from an engineering and seismological point of view[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(2): 224-232.
- [10] BHALLA S, YANG Y W, ZHAO J, et al. Structural health monitoring of underground facilities—Technological issues and challenges[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 487-500.

- [11] LIU H ,SONG E. Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(4) : 223 – 244.
- [12] POWER M S , ROSIDI D , KANESHIRO J Y. Seismic vulnerability of tunnels and underground structures revisited[C]// *Proceedings of the North American Tunneling Conference*. Brookfield : Balkema , 1998 : 243 – 250.
- [13] KANESHIRO J Y ,POWER M ,ROSIDI D. Empirical correlations of tunnel performance during earthquakes and aseismic aspects of tunnel design[C]// *Proceedings of Conference on Lessons Learned from Recent Earthquakes*. Turkey : [s.n.] , 1999 : 461 – 480.
- [14] KONTOGIANNI V A , STIROS S C. Earthquake and seismic faulting : effects on tunnel[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences* , 2003 , 12(1) : 153 – 156.
- [15] 王秀英, 刘维宁, 张 弥. 地下结构震害类型及机制研究[J]. *中国安全科学学报*, 2003 , 13(11) : 59 – 62.(WANG Xiuying , LIU Weining ,ZHANG Mi. Study on the categorization and mechanism of seismic damage of underground structures[J]. *China Safety Science Journal* , 2003 , 13(11) : 59 – 62.(in Chinese))
- [16] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. *工程地质学报* ,2008 ,16(6) :742 – 750.(LI Tianbin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology* , 2008 , 16(6) : 742 – 750.(in Chinese))
- [17] 于媛媛. 山岭隧道衬砌结构震害机理研究[博士学位论文][D]. 哈尔滨 : 中国地震局工程力学研究所, 2013.(YU Yuanyuan. Seismic damage mechanism of secondary lining of mountain tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Harbin : Institute of Engineering Mechanics , China Earthquake Administration , 2013.(in Chinese))
- [18] 陈永前, 王成虎, 李开洋. 地震对隧道及地下工程影响简介[C]// *地壳构造与地壳应力文集*. [S.l.] : [s.n.] , 2014 : 125 – 140.(CHEN Yongqian , WANG Chenghu , LI Kaiyang. Introduction to the earthquake impact on the tunnel and underground engineering[C]// *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*. [S.l.] : [s.n.] , 2014 : 125 – 140.(in Chinese))
- [19] 赵冬冬. 城市地铁地下结构地震反应的试验研究与数值模拟[博士学位论文][D]. 北京 : 清华大学, 2013.(ZHAO Dongdong. Experimental study and numerical simulation on seismic response of urban underground subway structures[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Tsinghua University , 2013.(in Chinese))
- [20] 陈正勋, 王泰典, 黄灿辉. 山岭隧道受震损害类型与原因之案例研究[J]. *岩石力学与工程学报* , 2011 , 30(1) : 45 – 57.(CHEN Chengsun , WANG Taitien , HUANG Tsanhwei. Case study of earthquake-induced damage patterns of rock tunnel and associated reason[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2011 , 30(1) : 45 – 57.(in Chinese))
- [21] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 汶川地震断层破碎带隧道结构震害分析及震害机制研究[J]. *土木工程学报*, 2013 , 46(11) : 122 – 127.(CUI Guangyao , WANG Mingnian , YU Li , et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in Wenchuan seismic disastrous area[J]. *China Civil Engineering Journal* , 2013 , 46(11) : 122 – 127.(in Chinese))
- [22] HASHASH Y M A , HOOK J J , SCHMIDT B , et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* , 2001 , 16(4) : 247 – 293.
- [23] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京 : 地震出版社, 2006 : 216 – 219.(HU Yuxian. *Earthquake engineering*[M]. Beijing : Seismological Press , 2006 : 216 – 219.(in Chinese))
- [24] KUESEL T R. Earthquake design criteria for subways[J]. *Journal of the Structural Division* , 1969 , 95(6) : 1 213 – 1 231.
- [25] 刘祥庆. 地铁地下结构地震反应分析方法与试验研究[博士学位论文][D]. 北京 : 清华大学, 2008.(LIU Xiangqing. Research on analysis method and experimental study of seismic response of underground subway structures[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Tsinghua University , 2008.(in Chinese))
- [26] UENISHI K , SAKURAI S. Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu(Kobe) , Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 2000 , 29(6) : 813 – 822.
- [27] ST JOHN C M , ZAHRAH T F. Aseismic design of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* , 1987 , 2(2) : 165 – 197.
- [28] 王文沛. 浅埋地下结构地震反应分析及设计方法研究[博士学位论文][D]. 北京 : 北京工业大学, 2012.(WANG Wenpei. Study on seismic analysis and design of shallow underground structures[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Beijing University of Technology , 2012.(in Chinese))
- [29] 龚成林. 地铁地下结构抗震设计方法评价与研究[硕士学位论文][D]. 北京 : 清华大学, 2007.(GONG Chenglin. Evaluating and research on seismic design methods of underground subway structures[M. S. Thesis][D]. Beijing : Tsinghua University , 2007.(in Chinese))
- [30] 王 璐. 地下建筑结构实用抗震分析方法研究[博士学位论文][D]. 重庆 : 重庆大学, 2011.(WANG Lu. Study on practical seismic analysis method for underground structures[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing : Chongqing University , 2011.(in Chinese))
- [31] 郑永来, 杨林德, 李文艺, 等. 地下结构抗震[M]. 上海 : 同济大学出版社, 2005 : 3 – 9.(ZHENG Yonglai , YANG Linde , LI Wenyi , et al. *Earthquake resistance of underground structures*[M]. Shanghai :

- Tongji University Press, 2005 : 3 – 9.(in Chinese))
- [32] KIYOMIYA O. Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(4) : 463 – 475.
- [33] 刘晶波, 王文晖, 张小波, 等. 地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1) : 161 – 167.(LIU Jingbo, WANG Wenhui, ZHANG Xiaobo, et al. Research on response deformation method in seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1) : 161 – 167.(in Chinese))
- [34] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4) : 73 – 80.(LIU Jingbo, LIU Xiangqing, LI Bin. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4) : 73 – 80.(in Chinese))
- [35] 刘晶波, 刘祥庆, 薛颖亮. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 方法适用性研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1) : 49 – 57.(LIU Jingbo, LIU Xiangqing, XUE Yingliang. Study on applicability of a pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1) : 49 – 57.(in Chinese))
- [36] 赵密. 近场波动有限元模拟的应力型时域人工边界条件及其应用[博士学位论文][D]. 北京 : 北京工业大学, 2009.(ZHAO Mi. Stress-type time-domain artificial boundary condition for finite-element simulation of near-field wave motion and its engineering application[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Beijing University of Technology, 2009.(in Chinese))
- [37] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震输入方法及实现[J]. 水利学报. 2010, 41(8) : 960 – 969.(HE Jiantao, MA Huaifa, ZHANG Boyan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8) : 960 – 969.(in Chinese))
- [38] 赵武胜, 陈卫忠, 郑朋强, 等. 地下工程数值计算中地震输入方法选择及实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8) : 1 579 – 1 587.(ZHAO Wusheng, CHEN Weizhong, ZHENG Pengqiang, et al. Choice and implementation of seismic wave input method in numerical calculation for underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8) : 1 579 – 1 587.(in Chinese))
- [39] 刘璐. 地铁结构地震风险源辨识及抗震计算实用方法研究[博士学位论文][D]. 北京 : 北京工业大学, 2013.(LIU Lu. Study on the seismic risk source recognition and practical method of seismic analysis for metro structures[M. S. Thesis][D]. Beijing : Beijing University of Technology, 2013.(in Chinese))
- [40] 陈韧韧, 张建民. 地铁地下结构横断面简化抗震设计方法对比[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增 1) : 134 – 141.(CHEN Renren, ZHANG Jianmin. Comparison of simplified seismic design methods for cross-section of underground structures of subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Supp.1) : 134 – 141.(in Chinese))
- [41] PITILAKIS K, TSINIDIS G. Performance and seismic design of underground structures[M]. Switzerland : Springer International Publishing, 2014 : 279 – 340.
- [42] 薛素铎, 刘毅, 李雄彦. 土-结构动力相互作用研究若干问题综述[J]. 世界地震工程, 2013, 29(2) : 1 – 9.(XUE Suduo, LIU Yi, LI Xiongyan. Review of some problems about research on soil-structure dynamic interaction[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(2) : 1 – 9.(in Chinese))
- [43] 王永志. 振动离心机系统工作原理与初步设计[硕士学位论文][D]. 哈尔滨 : 中国地震局工程力学研究所, 2010.(WANG Yongzhi. Working principle and preliminary design of centrifugal shaker system[M. S. Thesis][D]. Harbin : Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010.(in Chinese))
- [44] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand : New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000 : 1 043 – 1 051.
- [45] CHE A L, IWATATE T. Shaking table test and numerical simulation of seismic response of subway structures[C]// Seventh International Conference on Structures under Shock and Impact. [S.l.] : [s.n.], 2002 : 367 – 376.
- [46] 宫必宁, 赵大鹏. 地下结构与土动力相互作用试验研究[J]. 地下空间, 2002, 22(4) : 320 – 324.(GONG Bining, ZHAO Dapeng. Experimental study on dynamic interaction of underground structure and soil[J]. Underground Space, 2002, 22(4) : 320 – 324.(in Chinese))
- [47] CHE A L, IWATATE T, GE X R. Study on dynamic response of embedded long span corrugated steel culverts using scaled model shaking table tests and numerical analysis[J]. Journal of Zhejiang University : Science A, 2006, 7(3) : 430 – 435.
- [48] CHEN G X, WANG Z, ZUO X, et al. Shaking table test on the seismic failure characteristics of a subway station structure on liquefiable ground[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2013, 42(10) : 1 489 – 1 507.
- [49] CHEN G X, CHEN S, QI C, et al. Shaking table tests on a three-arch type subway station structure in a liquefiable soil[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(6) : 1 675 – 1 701.
- [50] CHEN G X, CHEN S, ZUO X, et al. Shaking-table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76 : 13 – 28.
- [51] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[博士学位论文][D]. 上海 : 同济大学, 2002.(JI Qianqian. Shaking table testing on

- underground subway station structures[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai : Tongji University , 2002.(in Chinese)
- [52] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[博士学位论文][D]. 南京:南京工业大学, 2006.(ZHUANG Haiyang. Study on nonlinear dynamic soil-underground structure interaction and its large-size shaking table test[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing : Nanjing University of Technology , 2006.(in Chinese))
- [53] 陈国兴, 左 熹, 王志华, 等. 地铁车站结构近远场地震反应特性振动台试验[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(10): 1 955 - 1 961.(CHEN Guoxing ,ZUO Xi ,WANG Zhihua ,et al. Shaking table model test of subway station structure under far field and near field ground motion[J]. Journal of Zhejiang University : Engineering Science , 2010 , 44(10) : 1 955 - 1 961.(in Chinese))
- [54] 边 金. 地铁地下结构的震动动力响应研究[博士学位论文][D]. 北京:北京工业大学, 2006 .(BIAN Jin. Study on earthquake performance of subway structure[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Beijing University of Technology , 2006.(in Chinese))
- [55] 陶连金, 王沛霖, 边 金. 典型地铁车站结构振动台模型试验[J]. 北京工业大学学报, 2006 , 32(9) : 798 - 801.(TAO Lianjin , WANG Peilin , BIAN Jin. A shaking table test method on the representative subway station structure[J]. Journal of Beijing University of Technology , 2006 , 32(9) : 798 - 801.(in Chinese))
- [56] 申玉生, 高 波, 王峥峥, 等. 高烈度地震区山岭隧道模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2008 , 45(5) : 38 - 43.(SHEN Yusheng , GAO Bo , WANG Zhengzheng , et al. Model test for a road tunnel in the region of high seismic intensity[J]. Modern Tunnelling Technology , 2008 , 45(5) : 38 - 43.(in Chinese))
- [57] 史晓军, 陈 隽, 李 杰. 地下综合管廊大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008 , 28(6) : 116 - 123.(SHI Xiaojun , CHEN Jun , LI Jie. Shaking table test of underground utility tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2008 , 28(6) : 116 - 123.(in Chinese))
- [58] 史晓军, 陈 隽, 李 杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(I)——试验方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010 , 30(1) : 147 - 154.(SHI Xiaojun , CHEN Jun , LI Jie. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic excitations(I) : Experimental setup[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2010 , 30(1) : 147 - 154.(in Chinese))
- [59] 陈 隽, 史晓军, 李 杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(II)——试验结果[J]. 地震工程与工程振动, 2010 , 30(2) : 123 - 130.(CHEN Jun , SHI Xiaojun , LI Jie. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations(II) : Experimental results[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2010 , 30(2) : 123 - 130.(in Chinese))
- [60] 徐炳伟. 大型复杂结构-桩-土振动台模型试验研究[博士学位论文][D]. 天津:天津大学, 2009.(XU Bingwei. Shaking table test studying large-scale soil-pile-complex structure interaction[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin : Tianjin University , 2009.(in Chinese))
- [61] 刘晓敏, 盛 谦, 陈 健, 等. 大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究(II):试验方案设计[J]. 岩土力学, 2015 , 36(6) : 1 683 - 1 690.(LIU Xiaomin , SHENG Qian , CHEN Jian , et al. Seismic shaking table test for large-scale underground cavern group(II) : Test scheme[J]. Rock and Mechanics , 2015 , 36(6) : 1 683 - 1 690.(in Chinese))
- [62] 袁 俊. 城市轨道交通隔振减振机制及措施研究[博士学位论文][D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.(YUAN Jun. Mechanisms and countermeasures of vibration isolation and damping in urban rail transit[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology , 2010.(in Chinese))
- [63] YANG D , NAESGAARDE , BYRNE P M , et al. Numerical model verification and calibration of George massey tunnel using centrifuge models[J]. Canadian Geotechnical Journal , 2004 , 41(5) : 921 - 942.
- [64] LEE C J. Centrifuge modeling of the behavior of caisson-type quay walls during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 2005 , 25(2) : 117 - 131.
- [65] KUTTER B L , CHOU J C , TRAVASAROU T. Centrifuge testing of the seismic performance of a submerged cut-and-cover tunnel in liquefiable soil[C]// Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. ASCE. [S.l.] : [s.n.] , 2008 : 1 - 29.
- [66] BILOTTA E , LANZANO G , RUSSO G , et al. Seismic analyses of shallow tunnels by dynamic centrifuge tests and finite elements[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria ,Egypt :Balkema , 2009 : 474 - 477.
- [67] CAO J , HUANG M S. Centrifuge tests on the seismic behavior of tunnel[C]// 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Zurich , Switzerland : [s.n.] , 2010 : 537 - 542.
- [68] CILINGIR U , MADABHUSHI S P G. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 2011 , 31(3) : 452 - 462.
- [69] CILINGIR U , MADABHUSHI S P G. Effect of depth on the seismic response of square tunnels[J]. Soils and Foundations , 2011 , 51(3) : 449 - 457.
- [70] CHOU J C , KUTTER B L , TRAVASAROU T , et al. Centrifuge modeling of seismically induced uplift for the BART Transbay Tube[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2010 , 137(8) : 754 - 765.
- [71] CHIAN S C , MADABHUSHI S P G. Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 2012 , 41 : 181 - 190.
- [72] TOBITA T , KANG G C , IAI S. Centrifuge modeling on manhole

- uplift in a liquefied trench[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(6): 1091–1102.
- [73] KANG G, TOBITA T, IAI S, et al. Centrifuge modeling and mitigation of manhole uplift due to liquefaction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2013, 139(3): 458–469.
- [74] CHEN Z Y, SHEN H. Dynamic centrifuge tests on isolation mechanism of tunnels subjected to seismic shaking[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 67–77.
- [75] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 等. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2070–2076.(LIU Guanglei, SONG Erxiang, LIU Huabei, et al. Dynamic centrifuge tests on seismic response of tunnel in saturated sandy foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2070–2076.(in Chinese))
- [76] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲. 地基-地下结构系统动力离心模型试验相似设计方法研究[J]. *后勤工程学院学报*, 2008, 24(3): 1–6.(LIU Jingbo, LIU Xiangqing, WANG Zonggang. Study on similitude theory of dynamic soil-structure interaction test on shaking table system for geotechnical centrifuge[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2008, 24(3): 1–6.(in Chinese))
- [77] 韩超. 强震作用下圆形隧道响应及设计方法研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2011.(HAN Chao. Study on the response and design method of circular tunnel under severe earthquakes[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.(in Chinese))
- [78] HAN C, ZHOU Y G, CHEN Y M. Numerical simulation of centrifuge-shaking table test on saturated sand[C]// E-Product E-Service and E-Entertainment(ICEEE), 2010 International Conference on IEEE. [S.l.]: [s.n.], 2010: 1–4.
- [79] 凌道盛, 郭恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2012, 46(12): 2201–2209.(LING Daosheng, GUO Heng, CAI Wujun, et al. Research on seismic damage of metro station with centrifuge shaking table model test[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2012, 46(12): 2201–2209.(in Chinese))
- [80] 袁勇, 黄伟东, 禹海涛. 地下结构振动台试验模型箱应用现状[J]. *结构工程师*, 2014, 29(1): 38–45.(YUAN Yong, HUANG Weidong, YU Haitao. Status of model container applications in shaking table test for underground structures[J]. *Structural Engineers*, 2014, 29(1): 38–45.(in Chinese))
- [81] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤, 等. 土-结构体系振动台模型试验中的土层边界影响问题[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 30–36.(LOU Menglin, WANG Wenjian, ZHU Tong, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 30–36.(in Chinese))
- [82] MOTAMED R, TOWHATA I. Shaking table model tests on pile groups behind quay walls subjected to lateral spreading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(3): 477–489.
- [83] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 分层土-基础-高层框架结构相互作用体系振动台模型试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2001, 21(3): 104–112.(CHEN Yueqing, LU Xilin, LI Peizhen, et al. Shaking table testing for layered soil-foundation-structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(3): 104–112.(in Chinese))
- [84] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. *同济大学学报*, 2002, 30(7): 781–785.(WU Xiaoping, SUN Limin, HU Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(7): 781–785.(in Chinese))
- [85] CHE A L, TAKAHIRO I, GE X R. Study on dynamic response of embedded long span corrugated steel culverts using scaled model shaking table tests and numerical analyses[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2006, 7(3): 430–435.
- [86] 刘光磊. 饱和地基中地铁地下结构地震反应机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2007.(LIU Guanglei. Research on the seismic response mechanism of underground subway structures in saturated soil[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.(in Chinese))
- [87] 史晓军. 非一致地震激励地下综合管廊大型振动台试验研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2008.(SHI Xiaojun. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2008.(in Chinese))
- [88] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 89–97.(CHEN Guoxing, WANG Zhihua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 89–97.(in Chinese))
- [89] 杜修力, 李霞, 陈国兴, 等. 悬挂式层状多向剪切模型箱的设计分析及试验验证[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3): 424–432.(DU Xiuli, LI Xia, CHEN Guoxing, et al. Design and test verification of suspension multidirectional laminar shear model box[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3): 424–432.(in Chinese))
- [90] 李霞, 许成顺, 杜修力. 悬挂式层状多向剪切变形模型箱的研制[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(1): 118–126.(LI Xia, XU Chengshun, DU Xiuli. Development of suspension laminar multidirectional shear box[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(1): 118–126.(in Chinese))
- [91] 迟世春, 林少书. 结构动力模型试验相似理论及其验证[J]. *世界*

- 地震工程, 2004, 20(4): 11–20.(CHI Shichun, LIN Shaoshu. Validation of similitude laws for dynamic structural model test[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(4): 11–20.(in Chinese))
- [92] KIM N S, LEE J H, CHANG S P. Equivalent multi-phase similitude law for pseudodynamic test on small scale reinforced concrete models[J]. Engineering Structures, 2009, 31(4): 834–846.
- [93] BOURNAS D A, NEGRO P, MOLINA F J. Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: Behavior of the mechanical connections and floor diaphragms[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 609–627.
- [94] ZHENG S B, JIANG S P, WANG X W. The deduction of similarity relationships in tunnel model test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 198: 737–740.
- [95] MEYMAND P J. Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [96] IAI S, TOBITA T, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests[J]. Geotechnique, 2005, 55(5): 355–362.
- [97] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 452–462.
- [98] 叶涛萍. 振动台试验结构模型若干相似问题研究[硕士学位论文][D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.(YE Taoping. The studying of some similar problems in shaking table test structure model[M. S. Thesis][D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.(in Chinese))
- [99] VISION SEAOC 2000. A framework for performance-based engineering[R]. California: Structural Engineering Association of California, 1995.
- [100] COUNCIL B S S. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[S]. Washington, D C: Report FEMA–356, 2000.
- [101] GUAN M S, HAN D J, DU H B, et al. A new seismic performance index for reinforced concrete frame structures[J]. Shenzhen University Science and Engineering Edition, 2011, 28(3): 200–206.
- [102] WANG Q W, SHI Q X, WANG P. Theoretical analysis research on story drift limit for steel reinforced concrete composite structures[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275: 1 123–1 126.
- [103] SATO T, SUZUKI K. Proposal on story drift limit based on axial behavior of column under seismic loads[C]// Composite Construction in Steel and Concrete II. ASCE. [S.l.]: [s.n.], 2015: 710–725.
- [104] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.(in Chinese))
- [105] 中华人民共和国行业标准编写组. DG/TJ08–2064–2009 地下铁道建筑结构抗震设计规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会文件, 2009.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DG/TJ08–2064–2009 Code for seismic design of subway structures[S]. Shanghai: Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Committee Documents, 2009.(in Chinese))
- [106] 顾丽江, 张冬梅. 盾构隧道结构受力及变形评价指标研究[C]// 第八届全国土木工程研究生学生论坛. 杭州: [s.n.], 2010: 922–927.(GU Lijiang, ZHANG Dongmei. Performance-based evaluation index of shield tunnel[C]// The 8th National Civil Engineering Forum for Graduate Students. Hangzhou: [s.n.], 2010: 922–927.(in Chinese))
- [107] 王国波, 谢伟平, 孙明, 等. 地下框架结构抗震性能评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 593–598.(WANG Guobo, XIE Weiping, SUN Ming, et al. Evaluation method for seismic behaviors of underground frame structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 593–598.(in Chinese))
- [108] 王文晖. 地下结构实用抗震分析方法及性能指标研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2013.(WANG Wenhui. Research on practical seismic analysis methods and performance index of underground structures[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.(in Chinese))
- [109] 董正方, 王君杰, 姚毅超. 城市轨道交通矩形地下结构层间位移角研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增2): 1 848–1 852.(DONG Zhengfang, WANG Junjie, YAO Yichao. Research on story drift angle of urban mass transit rectangular underground structures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Supp.2): 1 848–1 852.(in Chinese))
- [110] ALHADDAD M S, WAZIRA K M, AL-SALLOUM Y A, et al. Ductility damage indices based on seismic performance of RC frames[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 226–237.
- [111] 管民生. 基于性能的钢筋混凝土框架结构抗震性能评价方法与应用研究[博士学位论文][D]. 广州: 华南理工大学, 2011.(GUAN Minsheng. A research on seismic performance assessment method and application to performance-based design of reinforced concrete buildings[Ph. D. Thesis][D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.(in Chinese))
- [112] HARIRI-ARDEBILI M A, FURGANI L, MEGHELLA M, et al. A new class of seismic damage and performance indices for arch dams via ETA method[J]. Engineering Structures, 2016, 110: 145–160.