

土动力学与土工抗震研究进展

刘汉龙^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 综述了当前国内外土动力学与土工抗震方面的研究进展, 包括土体动力特性与本构关系、土工地震反应分析、土体动力测试、土体振动液化、土地地震永久变形、交通荷载作用下土体动力特性和土工抗震措施等内容。对各种方法的优缺点进行了比较和评述。进一步阐述了今后的研究方向。

关键词: 土动力学; 土工抗震; 液化; 本构关系

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A (黑小五加粗)

文章编号: (此编号投稿时空)

Advances in Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake

Liu Hanlong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China)

Abstract : Advances in soil dynamics and geotechnical earthquake are summarized including soil dynamic properties and constitutive relation, geotechnical earthquake response analysis, soil dynamic testing, soil vibration liquefaction, soil earthquake permanent deformation, soil traffic loading properties, geotechnical aseismic measures and et al. The advantages and disadvantages of each method are discussed. The further research directions are expounded.

Keywords : soil dynamics; geotechnical earthquake; liquefaction; constitutive relation

E-mail: hliuhhu@163.com

引 言

土动力学是土力学的一个分支, 是研究动荷载作用下土的动变形、动强度和稳定性的一门学科。岩土地震工程作为岩土工程的一个重要领域, 一直处于研究的前沿。1964年日本新潟地震和1976年我国唐山地震等许多实践课题促进了该学科的发展; 1995年日本神户地震等使得该学科的研究达到一个新的高潮。近年来在世界范围内相继发生的许多强烈地震, 如2007年8月秘鲁8.0级地震、2008年5月中国汶川8.0级地震、2011年3月日本本州岛9.0级特大地震等, 给人民生命和物质财产造成极大的损失。尤其是2008年汶川地震, 死亡和失踪人数接近9万人, 直接经济损失8千多亿元, 使得抗震减灾已经成为全世界共同关注的问题, 岩土地震工作者需要面临前所未有的严峻的考验。

近年来第14届世界地震工程会议, 第17届土力学与岩土工程国际会议和第八届全国土动力学学术会议等一系列重大会议的召开, 进一步推动了土动力学与土工抗震的发展。研究领域涉及土体动力特性、动力分析、振动液化、动力基础和地震波理论等。本文对其研究进展进行综合评述, 主要涉及土体动力特性与本构关系、土工地震反应分析、土体动力测试、土体振动液化、土地地震永久变形和土工抗震措施等内容。

1 土的动力特性与动本构关系

1.1 土的动力特性

土的动力特性是土动力学与岩土地震工程的基础, 主要研究动荷载作用下土的变形和强度特性的变化规律。近年来随着双向振动三轴仪、空心扭剪仪等大量设备的开发和使用, 对土体动力特性的研究已经由简单循环荷载逐步转变为复杂应力路径和不规则荷载作用下土的动力特性研究。为模拟海床及海洋建筑物遭受波浪荷载时所引起的循环应力, 栾茂田等^[1]开展了饱和松砂的双向耦合剪切试验研究, 侧重分析双向耦合剪切试验中竖向应力与剪应力幅值的变化对饱和

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (编号: 50825901);

作者简介: 刘汉龙, 博士, 教授, 长江学者, 主要从事土动力学与地基基础工程方向研究。

收稿日期: 2011-08-26

松砂变形特性的影响。张健等^[2]为探寻波浪荷载作用下饱和粉土振动孔隙水压力发展规律,开展了不同相对密度、偏应力比及振动频率下循环三轴-扭剪耦合试验。蔡袁强等^[3,4]对单、双向激振下各向同性与各向异性软黏土进行了试验研究,结果表明:与单向激振相比,双向激振下土体的动强度曲线更为陡峭,土体强度衰减更快。径向循环应力对动模量和阻尼的变化规律有显著的影响,随着径向循环应力比的增加,动模量降低,阻尼比增加。

黄土因具有弱胶结、多孔隙等特点,使其具有很高的地震易损性,黄土震陷是黄土地区普遍存在的严重地基病害。王兰民等^[5]基于数字扫描电镜获得微观架空孔隙面积量化数据,建立了黄土震陷系数的计算公式。利用黄土物性参数进行震陷判定是黄土震陷研究的一个主要途径,徐舜华等^[6]分析了含水量、孔隙比、埋深等几个重要影响的物性参数对黄土震陷性的影响规律。邵生俊等^[7]采用最小二乘法原理分析了黄土的动力学参数和湿陷性指标与黄土的物性指标和固结围压之间的关系。

粗粒土研究过程中,一个较为关注的研究热点是土体的最大剪切模量。研究表明,在微小应变(一般为 10^{-6})水平下,动剪切模量基本为常数。常规动三轴试验仪器,无法直接获得该值,一般通过共振柱试验进行确定或根据动三轴试验外延确定。往往两者存在较大的差别。在有条件的基础上,通过对现有的试验设备进行改造,安装高精度的位移传感器和稳定的加载设备,也能测得微小的应变,如:中国水科院^[8]在大型振动三轴仪上安装激光微小应变仪,其测试精度可达到 10^{-6} 。土体在动力荷载作用下阻尼比的研究由来已久,目前仍采用等效阻尼比进行描述。受试验仪器本身控制精度的影响,试验数据离散性较大。随着试验仪器本身动力加载部件之间控制精度的提高,以及动态位移测试技术的发展,阻尼比和动剪切模量的研究将逐步深入。

粗粒土在地震荷载作用下的残余变形特性已经成为当前研究的热点之一,特别是汶川地震发生后,紫坪铺大坝虽然经受了地震的考验,但本身也发生了1米左右的永久变形^[9]。关于这方面的研究主要通过循环动三轴试验研究粗粒土在饱和不排水、饱和排水和风干排气状态不同加载条件下的残余剪应变和残余体应

变的变化规律。残余剪应变随着振次的增加而增大,在相同围压和循环荷载条件下,随着固结比的增加而增大。残余体应变随着振次的增加而增大,随固结比变化不明显。邹德高等^[10]分析了不同坝高对永久变形模型结果的影响。坝高增大以后,坝顶动位移较大,地震荷载作用下坝坡处的抗滑稳定安全系数降低。实际工程中采用各种加筋技术进行处理,但对在动力荷载作用下的变形机理研究较少,刘汉龙等^[11]开展了加筋堆石料动力变形特性研究,加筋后堆石料的残余变形变小,且随加筋层数增加残余变形的降低愈明显。受仪器本身的限制,关于永久变形体应变测试精度方面还不够精确,有待进一步研究。

目前关于砂土和黏性土动力特性方面的研究成果较为丰富,在粗粒土动力特性方面的研究还不够。其原因一方面在于试验仪器条件的限制,另一方面在于粗粒土本身力学特性的复杂性。粗粒土存在明显的尺寸效应^[12]和颗粒破碎特性,关于这方面的研究相对比较薄弱,尤其是复杂应力条件下的动力特性。

1.2 动本构关系

土体动力本构关系的研究一直是岩土工程的研究热点,国内外很多学者开展了大量的理论和试验研究工作,建立了众多的本构关系。就目前建立的本构关系而言,可分为两大类,即粘弹性理论和弹塑性理论。

1.2.1 粘弹性理论

自1968年Seed提出用等价线性方法近似考虑土的非线性以来,粘弹性理论已有了较大的发展。沈珠江^[13]对等价粘弹性模型进行了较为全面的研究,认为一个完整的粘弹性模型应该包含四个经验公式:平均剪切模量、阻尼比、永久体积应变和永久剪切应变。当饱和土体处于完全不排水及部分排水条件下,还需要给出孔隙水压力增长和消散模型。采用常规的粘弹性模型在计算过程中不能同时拟合各种应变水平下的剪切模量和阻尼比随剪应变的变化曲线。

粘弹性理论是目前生产应用中的主流理论,尽管还存在多方面的不足,但它毕竟是试验结果的归纳,形式上也比较直观简单,经过适当的处理和改进后结合动力有限元程序,同样可以计算出循环荷载下土工构造物的孔隙水压力和永久变性的平均发展过程,且在参数的选取过程中积累了丰富的经验。

1.2.2 弹塑性理论

弹塑性模型建立在弹性理论和塑性增量理论的基础上, 将土体的应变分解为可恢复的弹性应变和不可恢复的塑性应变, 并分别由弹性理论和塑性理论进行计算。

土体的应力应变关系与应力路径密切相关, 姚仰平等^[14]通过定义两个应力状态参量, 分别描述等应力比循环加载和等平均应力循环加载条件下土的塑性变形, 建立了循环加载条件下土的应力路径本构模型。庄海洋等^[15]在广义塑性力学的基础上, 通过记忆任一时刻的加载反向面、破后面和与加载反向面内切的初始加载面, 建立了土体黏塑性记忆型套嵌面本构模型。

多屈服面模型是在经典塑性理论基础上, 放弃单屈服面的描述, 采用各向同性硬化和运动硬化相结合的多屈服面模型。Iwan 模型作为一维经验模型, 它基于运动硬化和多重屈服面理论, 采用一组弹塑性元件模拟给定的应力-应变骨干曲线。不管是对试验数据还是数学表达式, Iwan 模型都能够很容易地模拟。该模型未考虑循环累积塑性应变, 而只能模拟较少的循环荷载次数。蔡袁强等^[16]通过应力控制的动三轴试验建立考虑不同动应力、初始偏应力情况下正常固结软粘土的软化指数经验模型, 对 Iwan 模型进行修正。高广运等^[17]基于塑性硬化模量场理论和多重屈服面模型, 结合各向同性硬化和移动硬化准则, 建立了不排水循环荷载作用下多屈服面模型。

界面模型是在多屈服面模型的基础上, 只采用初始加载面和界面, 在两个面之间的套叠屈服面场用解析内插函数以形成双屈服面模型。界面模型允许在界面内发生塑性变形, 避免了从弹性状态到塑性状态的突变, 能够更好的描述界面内的应力应变响应。张建民等^[18]在界面塑性理论的框架内, 将剪胀体应变分为一个可逆的体应变分量和一个不可逆的体应变分量构成, 建立了一个可描述可逆剪胀与不可逆剪胀的粗粒土本构模型。黄茂松等^[19]在界面塑性理论的基础上, 提出可描述循环荷载作用下饱和软黏土力学特性的各向异性模型。通过对典型结构性软黏土及上海软黏土循环三轴试验结果的模拟, 初步验证了模型的合理性和有效性。杨超等^[20]在界面弹塑性模型基础上, 借助胶结体损伤理论与非饱和土力学, 将结构损伤与应变增量联系起来, 提出一个可描述循环荷载作用下非饱和黄土力学特性的本构模型。针对

多屈服面模型在共轭点出的奇异性和界面模型在确定硬化模量场上的经验性, 熊玉春等^[21]基于混合硬化塑性模量场理论, 建立了一个总应力形式的、屈服面连续变化的饱和黏土不排水增量弹塑性动本构模型。

2 土体地震反应分析

土体动力反应分析方法主要有两种: 解析方法和数值分析方法。解析方法一般只能用于求解模型结构比较简单的情形。如: 高广运等^[22]基于圆柱形薄壳结构理论, 采用积分变换对无限弹性介质中隧道内爆炸的动力响应进行了分析, 得出爆心处隧道位移以及最大正应力变化规律。蔡袁强等^[23]采用双层弹性 Euler 梁来模拟板式轨道中钢轨和轨道板, 采用弹簧-阻尼器来模拟轨下垫圈, 研究了饱和土体在列车荷载下的动力响应。

随着计算机水平的快速发展, 数值分析方法得到了广泛应用, 已成为研究土体地震反应的有效工具。根据计算中对动荷载的不同处理方式, 土体地震反应分析可分为: 拟静力分析和动力反应分析。根据采用的动力本构模型可分为: 基于等价粘弹性模型的等效线性分析方法和基于弹塑性模型的非线性分析方法。从是否考虑孔隙水压力影响的角度来分又可分为: 总应力法和有效应力法; 而有效应力法又可分为: 排水有效应力法和不排水有效应力法。

2.1 数值分析方法

等效线性方法由 Seed 等人提出, 计算过程中将土体视为粘弹性模型来模拟土的滞回特性, 计算所耗资源较小, 效率高, 自 1970 年代以来一直是土石坝动力反应分析中的主流方法。起初是总应力分析方法, 不能考虑孔压的增长及对单元刚度的影响。若在分析中根据振动孔隙水压力增长的经验公式估算孔压, 也可进行有效应力分析。计算过程中一般不考虑孔压的消散, 这是由于地震过程持续时间短, 心墙较厚, 动孔压消散程度很有限, 这种处理方法基本符合实际。计算中估算孔压的方法可采用不耦合和部分耦合的方法。

张艳美等^[24]对饱和砂土地基进行了完全耦合的三维排水有效应力动力分析, 考虑土体的非线性引入吸收边界, 探讨了不同地震输入、不同土性参数和土层构成等因素对地基抗液化性能的影响。唐亮等^[25]采用满足 Masing 准则的修正双曲线土体模型, 孔压模型采

用 Ishibashi 和 Sherif 等提出的等效循环孔压模式, 并进行了自由液化场地振动台试验模拟。岑威钧等^[26]采用顾淦臣提出的计算土质堤坝地震过程中动孔隙水压力增长的方法, 开展了土坝动力响应分析。

直接非线性分析方法又称真非线性分析方法, 该方法要求追踪土体剪应力应变历史, 状态点必须处于加载曲线或者卸载曲线上, 围绕滞回圈进行计算。加、卸载曲线通常为一曲线, 以此模拟非线性; 加、卸载时采用不同的切线模量, 依次模拟土体应力应变的滞回性。分析中必须更新当前的应力状态, 判断是否发生转折(加载到卸载, 或卸载到加载), 计算比等效线性方法要繁琐一些。

弹塑性分析方法的求解思路是采用能够反映土体真实应力应变关系的弹塑性本构模型进行动力反应分析, 可以直接获得地震过程中孔压、塑性变形等重要地震响应量。吕西林等^[27]利用大型商业软件 FLAC3D 进行了土体振动液化的流固耦合分析, 计算中采用弹塑性 Mohr-Coulomb 屈服准则, 并与振动台试验数据进行了对比分析。

2.2 模型边界处理

在对土工静力问题分析中, 地基对结构的作用一般可通过增大地基范围来模拟地基的影响。但在动力分析过程中, 由于地震波向无限远处传播, 采用增大地基范围也不能有效地模拟地基与结构的动力相互作用, 必须采用人工边界来吸收边界处的反射波从而近似处理无限域的问题。

人工边界条件大致分为两类: 一类是精确的全局方法; 另一类是近似的局部方法。这里主要介绍近似局部方法, 目前常用的人工边界有: 黏性边界、黏弹性边界、叠加边界和透射边界等。黏性边界最早由 Lysmer 提出, 通过沿人工边界设置一系列阻尼器来吸收射向人工边界的波动能量, 从而达到模拟波射出人工边界的投射过程。粘性边界虽然只有一阶精度, 但概念清楚、易于程序实现, 应用也比较广泛, 它的缺点是仅考虑了对散射波能量的吸收, 不能模拟半无限地基的弹性恢复能力, 在低频力作用下可能发生整体漂移。刘晶波等^[28, 29]基于柱面波动力方程和球面波动力方程, 建立了能够模拟半无限介质弹性恢复能力的二维和三维黏弹性人工边界。张顺福等^[30]在黏性边界的基础上提出黏性边界单元, 通过构造相同阻尼矩阵的方

式提出了能够实现黏性边界功效的等效黏性边界单元。黏弹性边界与黏性边界在原理上非常相近, 只是在计算精度和数值稳定性上均有所提高。

透射边界的概念最早由廖振鹏提出, 并建立了一阶投射边界, 经进一步研究提出了适用于声波和弹性波的多次透射边界。此后学者们在此基础上开展了大量研究, 提出了多向透射边界^[31], 双渐近多向透射边界^[32]等。王立涛等^[33]对粘弹性边界和透射边界进行了对比分析, 发现透射边界的最大稳定时间步长小于黏弹性边界条件, 且网格依赖性很强, 而黏弹性边界并不依赖于网格。杜修力等^[34]采用平面波和远场散射波混合透射, 引入无限介质线性弹性本构关系建立了一种应力人工边界条件, 边界精度高于现有的黏性边界、黏弹性人工边界和一、二阶透射人工边界。

近年来随着边界元、无限远、无穷元等一系列程序的出现, 不少学者将其与有限元进行耦合, 近似模拟无限域问题, 取得丰富的研究成果。如: 张琪玮等^[35]采用有限元与边界元耦合的振型分解法进行了高层建筑地基、基础及上部结构动力共同作用的研究。

2.3 土与结构相互作用

土与结构动力相互作用研究最早始于 1936 年, 早期研究的重点是动力机器基础的振动。Reissner^[36]通过对 Lamb 解的积分, 研究了刚性圆形基础板在竖向荷载作用的简化边界条件下的振动问题, 标志着土-结构物动力相互作用研究的开始。此后, 很多学者对此开展了大量的研究。Cai 等^[37]基于土的 HISS 模型模拟了循环荷载下土的弹塑性性质, 对桩-土-结构体系的进行了三维动力有限元分析, 从而第一次从岩土工程和结构工程的双重重要性角度考察了结构和桩-土系统的抗震性能。Takewaki 等^[38]从能量的角度出发, 提出以结构吸收的能量与输入土-结构动力相互作用系统的总能量的比值作为结构抗震性能的一个指标, 而不是以往单纯的以加速度反应谱幅值为指标。陈国兴等^[39]采用大型振动台针对地基土-高层建筑结构动力相互作用开展了一系列的试验研究。吕西林等^[40]对带桩基础的地基-结构相互作用体系进行了振动台模型试验, 分析了软土地基与刚性地基条件下结构体系的振动特性。

土与结构相互作用中的界面接触问题, 显著地影响土与结构系统动力响应的模拟精度。接触面动力特

性试验的研究,一般是采用动单剪试验,该试验能够保持剪切面为恒定,且能够较好的测量接触面剪应力和相对切向位移,破坏形式较为单一,与真实情况有时存在差别。Fakharian 等^[41]用循环三维接触面剪切仪开展了砂土于钢板接触面三维力学特性研究。张建民等^[42]自行研制了大型接触面循环单剪试验仪,从而克服了试验过程中破坏面。土与结构物在外力荷载作用下的动力特性与土体本身的强度有关,动力荷载作用下接触面的破坏位置不是发生在接触面处,而是存在于土体内部。粗粒土与结构接触面在循环剪切荷载作用下表现出明显的颗粒破碎及法向变形,剪切引起的接触面相对法向位移可划分为可逆部分和不可逆部分两个分量,相对法向位移和相对切向位移关系呈现出明显的异向性。张嘎等^[43]在阐明接触面受载过程中的物态演化的机理和规律基础上,建立了一个可统一描述单调和循环荷载作用下粗粒土与结构接触面力学响应的弹性损伤模型。刘平等^[44]采用中型循环动单剪仪开展了粗粒土与掺砾黏土的接触面动力特性试验,研究表明:初始剪应力加载方向对相对位移有明显影响,相对位移总是沿着初始剪应力加载方向一侧较大。接触面边界条件的不同,对试验结果存在明显的影响,冯大阔等^[45]采用三维多功能土工试验机开展了粗粒土与结构面在不同法向边界条件下接触面的力学特性。

3 土工动力测试

土工动力测试包括室内测试技术和原位测试技术两部分。

3.1 室内测试技术

动三轴试验和共振柱试验是目前研究土体动力特性的主要手段,特别是动三轴试验。目前国内用于研究粗粒土动力特性试验的最大试样直径为 30cm。空心扭剪仪被认为是研究土体动力特性最好的研究手段,由于试验尺寸的限制,目前主要集中于砂土和黏性土动力特性方面的研究,在粗粒土方面的研究还不够。

振动台试验是 20 世纪 70 年代发展起来的试验技术,主要用于研究土体在动力荷载作用下的液化特性以及结构的动力响应。目前国内外常用的主要是单向和双向振动台。土体和结构在地震荷载作用下的动力特性具有明显的三维特征,要想真实了解其动力特征需要开展三维试验研究。目前只有美国、日本和德国等几个少数发达国家进行过三向振动台的研究。如:

日本于 2005 年安装了一个台面尺寸为 20m×15m 的三向六自由度 MTS 振动台^[46]。近年来在国内出现了一批大型振动台,如:中国建筑科学研究院^[47]于 2004 年安装了目前国内最大的三向六自由度 MTS 振动台,挤身于国际领先行列,台面尺寸为 6m×6m。国家地震局工程力学研究所自行研制了 5m×5m 的三向振动台,是目前我国自行研制的第一台三向振动台^[48]。

普通振动台试验在高土石坝地震规律研究方面得到了广泛的应用,从二维模型到三维模型,从规则波形到不规则波形的试验研究,取得丰富的研究成果。如:陈国兴等^[49]在总结国内外振动台模型箱的基础上,研制了叠层剪切型模型箱,该模型箱能较好的模拟自由场地的边界条件。周健等^[50]采用室内振动台模型试验对液化过程中饱和砂土颗粒的细观组构进行研究,指出在循环荷载作用下,砂土颗粒不断重新排列定向以适应新的应力状态,导致累积配位数的丧失、孔隙率增大,继而导致液化的发生。孔宪京等^[51]针对垃圾填埋场的工程特性,开展了大型振动台试验研究,由于垃圾土密度低、压缩性高、具有特殊的防渗结构,从而导致在堆填体内部不容易出现明显的滑裂面。

值得注意的是,普通振动台无法合理模拟土体的自重效应,其研究结果的合理性还有待进一步论证。离心振动台试验克服了该缺点,通过施加不同大小的离心加速度,达到原型应力场使得模型的变形和破坏机制与原型相似,成为岩土工程领域的一个重要的研究手段。目前已广泛应用于岩土工程的各个领域。近年来,动力离心模型试验无论在基础理论还是试验设备和模拟技术方面都取得了很大的进展,并取得丰富的研究成果。南京水利科学研究院于 2002 年建成的小型离心振动台^[52],其特点在于能够施加较大的离心加速度 100g;王年香等^[53]利用该设备完成了长河坝在不同地震加速度下的地震加速度反应、坝顶沉降和破坏模式等试验研究。清华大学于 2004 年研制开发的离心振动台系统^[54],其特点在于振动历时长、振幅大,能够模拟正弦波和任意地震波;马立秋等^[55]使用该系统对水平地基进行了爆炸荷载试验和浅埋地铁隧道的爆炸模型试验研究,分析了隧道口区域在爆炸荷载作用下土体-结构物系统的动力响应规律。同济大学联合中国工程物理研究院研制开发了一台岩土离心机,同时配备了一维电液控制振动台^[56],其特点在于能够在

100g 离心加速度场下进行打桩、拔桩和挖洞等操作。在水利部科研院所基础设施建设项目的支持下,中国水利水电科学研究院与美国安科公司联合研制的 R500B 大型离心机双向振动台系统于 2010 年 12 月 20 日通过专家验收。该离心机振动台是国内第一个、也是世界上第一个能够实现水平和垂直耦合振动的大型离心机振动台。

在仪器设备取得重大进展的同时,图像测量和位移测量方面也有了重大提高。在位移精度的测量上,可采用各种高精度仪器,如:光栅、弯曲元等进行测量,大大提高了试验精度,使得常规动三轴试验也能够进行微小应变的测量。岩土材料在小应变情况下的剪切模量是动力荷载作用下土体应力应变分析的关键性参数。如何准确测量这一参数一直是本领域研究的重点和难点。近年来发展起来的压电弯曲元剪切波速测试技术由于原理简明、操作便捷及具备无损检测等特点,被广泛应用于各种试验设备中进行土样小应变剪切模量的测量研究。浙江大学岩土工程研究所从 1999 年开始着手研究弯曲元技术,并与 2001 年研制了基于多功能三轴仪的弯曲元剪切波测试系统,并把该系统应用于固结仪、静三轴仪^[57]。陈云敏等^[58, 59]对弯曲元的振动机理进行了深入探讨,开展了一系列剪切波密切相关的土动力学理论及试验研究,并将该技术应用于离心模型试验中,成功测量了离心机旋转过程中模型土体的剪切波速,为土工离心模型试验中土体刚度的实时监测提供了有效的技术手段。

周健等^[60]对常规振动三轴仪进行了可视化改进,试验过程中利用显微数码摄录技术全程动态摄录整个试验过程中砂土细观结构的变化。PIV(Particle image velocimetry)技术在流场试验和土体静力变形试验中已经得到广泛应用,并取得良好的测试分析效果,但在大型振动台模型试验中未得到广泛应用。刘君等^[61]结合边坡稳定大型振动台模型试验,将该技术应用于振动台试验,并成功的测试了模型试验中观察面内任意点在任意时刻的位移,并可获得边坡变形直至破坏的完整过程。

3.2 原位测试技术

原位测试技术是指岩土工程勘察现场,在不扰动或基本不扰动土层的情况下对土层进行测试,以获得测试土体的物理力学性质及划分土层的一种土工勘察

技术。其测试结果具有较好的可靠性及代表性。土体的原位测试技术包含两类:一类是波速测试法,通过观测场地地层的剪切波速,计算土体的动力特性参数;另一类是动力荷载试验,用于测试较大应变式的编写特性参数。

动力触探试验已成为我国粗粒土的地基勘察测试的主要手段。在汶川地震中,出现了砂砾石土层的液化现象,袁晓铭等^[62]提出了基于重型动力触探试验的砂砾石液化判别方法,并建立了相应的计算模型和公式,把砂砾土液化判别分为:初判和复判两部分。

李飒等^[63]将现场波速试验与室内试验判别液化的结果相比较,对混黏土的粉土、粉砂的液化进行了研究。阮元成^[64]通过室内大型三轴试验激光微小应变测试结果与现场单孔法、跨孔法及面波法波速试验测试结果的比较,指出在一定条件下,最大动剪模量压力效应关系曲线可以通过室内试验获得,也可以通过现场波速试验经换算获得。林万顺^[65]提出了多道瞬态面波勘探技术。刘发祥等^[66]分析单孔法、跨孔法及室内试验的不足之处,提出了采用面波-声波联合法进行现场动力参数的测试方法。

4 土体振动液化

砂土液化一直是岩土地震工程中的一个热点和难点,一般认为饱和砂土或粉土才回发生液化现象,而历次发生的地震(海城,坂神,唐山等)中都发现有砂砾石液化的现象,但未引起广泛的关注,1999 年台湾集集地震和 2008 年汶川地震的调查表明地震中砂砾石液化现象十分普遍,逐渐引起研究者们研究兴趣^[67]。袁晓铭等^[68]总结了汶川 8.0 级大地震液化及其损害科学考察结果,发现 VI 度区内出现显著液化及其损害现象,同时存在深层土液化问题,覆盖层厚度达到 20m 以上。

4.1 液化判别与机理

对饱和砂土液化进行定性分析与评价的方法,杜修力教授将其分为三类:(1)经验或统计法;(2)简化分析法,代表性的主要有:①Seed 简化方法;②Poulos 液化估计法;③剪切波速法;④标准贯入击数法;(3)数值分析法。近年来又出现可靠度^[69]、聚类分析^[70]和支持向量机^[71]等智能分析方法。

关于土体液化特性的研究多采用室内动三轴试验、动单剪试验和动扭剪试验。试验过程中,一般采

用轴向应变 5% 作为液化判别标准, Mohtar 等^[72]研究发现, 对于常规的液化土体, 采用孔压液化和轴向应变液化差别不大, 对于特殊的土体则差别较大。Chalandarzadeh 等^[73]开展了淤泥-砂混合物的抗液化特性试验研究, 分析了初始应力和应力旋转对材料各项异性的影响。近年来, 振动台和离心振动台也逐步应用于液化问题的研究。Towhata 等^[74]开展了板桩码头后侧群桩基础的振动台模型试验研究, 分析液化变形的机理和群桩的侧向变形特性。室内试验有其自身的优点, 但也存在无法克服的缺点, 如: 试样尺寸较小、扰动试样以及边界条件等。付海清等^[75]采用人工激振技术, 开展了简单工况下的现场液化试验研究, 试验结果与振动台试验结果基本一致。

在液化机理的研究方面, 日本学者根据流体力学的思路, 开展了一系列试验研究, 如: 振动台拖球试验^[76]、振动台拖管试验^[77]、三轴试验^[78]、离心机试验^[79]等试验, 得出液化砂土的表现黏度的大小变化规律。陈育民等^[81]在液化流动大变形三轴扭剪试验成果的基础上分析了液化及液化后砂土的流动特性, 得出液化状态下的砂土是一种剪切稀化非牛顿流体的结论, 并采用振动台拖球试验验证了这一结论。

已有的研究对饱和砂土液化状态和液化后状态下的流动特性开展了试验研究, 而对液化前的状态尚未进行探讨。饱和砂土在发生完全液化之前也会存在一段高孔压状态, 在这种状态下, 砂土中的超孔隙水压力逐渐上升, 而消散缓慢, 土体的有效应力很小, 但是并没有达到完全液化下的零有效应力状态。砂土在高孔压状态下, 砂土的抗剪强度极低, 在剪应力作用下也会发生流动大变形。因此, 有必要对这种介于未液化和完全液化状态之间的高孔压状态下的砂土开展其流动特性的试验研究, 揭示砂土液化的机理、充实砂土液化流动变形理论。陈育明等^[82]开发了饱和砂土液化前高孔压状态下流动特性的试验装置和试验方法, 并开展了相关的试验, 为液化前砂土的流动特性研究提供了试验支持。

4.2 液化后变形分析

关于液化问题的研究, 过去的工作主要集中于液化产生的机理、影响因素、判别方法等方面。随着近年来多次出现的大地震, 以及在地震过程中发生的地震灾害, 人们对于液化问题的研究已逐步由强度分析

转变为变形分析。

近年来的关于砂土液化本构模型的研究, 绝大多数都是针对初始液化前的有效应力路径和应力应变, 对初始液化后的应力应变行为研究较少。利用数值分析方法计算液化后土体变形, 关键在于液化后土体本构模型的选取及对大变形发生机理的解释。Elgamal 等^[83]建立了着重于描述饱和砂土循环活动性和剪应变积聚反应的塑性本构模型, 同时用土体-液体两相耦合有限元计算程序来计算液化后的地面位移。其计算结果与室内试验和离心机试验进行了验证。张建民等^[84]研究发现, 饱和砂土液化后的剪应变由一个非零有效应力状态下产生的、依赖于现实剪应力变化的剪应变分量和一个零有效应力状态下产生的、依赖于剪切历史的剪应变分量组成; 在此基础上建立了一个模拟饱和砂土初始液化前后不排水循环剪切变形行为的非线性弹性本构模型。王刚等^[85]经过进一步研究, 在界面本构理论的基础上建立了一个弹塑性循环本构模型, 该模型不仅可以模拟饱和砂土循环荷载条件下从液化到液化后、从小剪应变到大剪应变的变形发展过程, 同时可以模拟饱和砂土液化后再固结的体变累积特性。刘汉龙等^[86]基于饱和砂土振动三轴试验成果, 提出了一个描述砂土液化后应力应变关系的双曲线模型。王艳丽等^[87]从砂土受振动荷载结束后所处的拉伸、压缩两种状态出发, 分析了液化程度和围压对饱和砂土液化后不排水变形特性的影响, 提出了统一描述两种状态下砂土液化后应力应变关系的三阶段模型。张建民等^[88]研究了有效围压和密度对饱和砂土液化后单调加载应力应变的影响, 改进了 Shamoto 等^[89]建立的模拟饱和砂土液化后单调加载的本构方程。陈育民等^[90]根据试验得到了一个液化后砂土的流体本构模型, 并将其加入了有限差分程序 FLAC^{3D} 中, 在 Finn 模型的基础上改进了其液化后处理的功能, 得到了能够反映土体液化及液化后变形的 PL-Finn(Post Liquefaction Finn)模型。Yuan 等^[91]将有限元、有限差分法相结合, 利用有效应力循环弹塑性本构模型建立了饱和土液化大变形的实用数值方法。荚颖等^[92]采用无网格法开展了液化分析, 避免了由于单元变形扭曲而引起的计算中断, 节约了计算时间。黄雨等^[93]基于 Biot 两相饱和多孔介质动力耦合固结理论, 采用 Oka 等提出的砂土循环弹塑性本构模型, 对这两种具有不

同持时特征的强震所导致的河流堤防液化性状进行计算分析。

4.3 场地液化识别技术

由于具有破坏性的大地震为罕遇事件，因而利用地基处理方式提高地基抗液化能力有时很不经济，对于诸如地下管线这样的生命线系统，采用传统方式减轻或消除液化带来的灾害损失更是很大难题。随着强震观测和监测技术的发展，国际上开始将液化实时监测和报警作为减轻液化灾害的新技术手段。场地液化实时监测和报警技术的核心是建立依据强震记录对液化场地进行反演识别的方法，这是一个难度较大的新问题，目前研究成果还十分有限。胡聿贤等^[94]利用 HHT 方法定义了一种地震加速度记录的瞬时频率时程，能够在一定程度上将原始加速度记录的频率非平稳特性予以量化，以此为依据提出了一种根据地震加速度记录对场地液化进行识别的方法。袁晓铭等^[95, 96]提出了一个以频率下降率为基本指标的依据强震记录快速识别场地液化的方法，不同于以往的经验方法，通过建立可液化场地动力响应理论分析模型，给出了液化导致场地水平自振频率下降的计算公式，初步解决了目前识别方法将液化场地与非液化的软土地场混淆的问题。

5 交通荷载作用下土体动力特性

近年来由于高速公路、铁路的飞速发展，交通荷载作用下土体动力特性越来越受到广泛重视。特别是在深厚软弱地基上，交通荷载引起地基的不均匀累积沉降，导致各种病害。如：上海地铁一号线建成未通车的 2 年 3 个月内沉降基本稳定，但通车后 8 个月内沉降达到 30~60 mm，4 年内甚至达到 140 mm^[97]。

交通荷载与地震荷载和波浪荷载不同，是一种低频、低幅和长期循环荷载，循环应力水平远小于临界循环应力^[98]。对于地震荷载、波浪荷载的作用下土体动力特性的试验研究已经得到长足的发展，而对于交通荷载作用下土体的动力特性的研究明显不足。

目前关于这方面的研究，多基于常规循环三轴仪和循环扭剪仪开展试验；研究对象主要集中于粘土，分析循环荷载作用下土体的残余应变、孔压的发展规律。在动荷载的处理过程中一般采用正弦荷载和半正弦荷载。刘添俊等^[99]对珠江三角洲的淤泥质饱和软粘土进行了循环三轴试验，提出了应变速率对数与时间

对数间线性关系。针对常规循环三轴仪不能很好的反应交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土特性的影响，王常晶等^[100]采用双向振动三轴仪开展了静偏应力影响下的饱和软黏土试验研究，给出了不同静偏应力下土体的转折应变-破坏振次的半对数关系曲线。黄博等^[101]开展了交通荷载作用前后饱和粉质粘土强度特性研究，提出长期交通荷载作用下产生的累积轴向应变和孔压均可作为试样破坏程度的表征。

对于结构性粘土，不少学者对其开展了研究。赵俊明等^[102]结合连盐高速低路堤，对路堤进行了动应力、振动响应等现场测试和室内试验，得出原状土的临界循环应力比远大于重塑土，承受循环应力能力高于重塑土。雷华阳等^[103]提出了结构性粘土破坏的 3 种典型类型：稳定型、过渡型和破坏型，指出在半正弦波形条件下动弹性模量和动剪切模量随着固结压力值的变化存在一个转折点。雷华阳等^[104]得出振动波型对于结构性软土的动应力—应变类型影响不大，但是最大动弹性模量和动剪切模量的相差可达 2.5 倍左右。姜岩等^[105]提出了在动荷载作用后孔隙分布 3 种类型，指出可利用 Menger 海绵模型研究交通荷载作用下结构性软土的孔隙分布。

对饱和粘土在循环荷载作用下的动力特性，目前已有大量的研究。而对非饱和粘土在循环剪切荷载作用下的动力特性研究则相对较少。钟辉虹等^[106]根据列车荷载作用下地基土现场测试的动应力幅值大小，开展了室内试验研究，得出随着饱和度的增加，累积残余应变急剧增加。此外，Gidel 等^[107]利用动三轴仪研究了粗颗粒土在不同静偏应力比下的动力特性，提出了土的累积塑性应变与振动次数、应力水平的经验公式。

交通荷载所引起地基沉降越来越受到人们的重视。李进军等^[108]针对交通荷载作用下软土地基的变形问题，采用累积应变的经验公式计算上海地区典型软土地基的累积沉降。魏星等^[109]基于试验规律分析，提出了一个描述软土在长期重复荷载作用下残余变形发展过程的经验模型，通过了上海软土的循环三轴试验的模拟，初步验证了模型的合理性。

6 土体地震永久变形

5.12 汶川特大地震造成了数以万计的山体滑坡以及震区高土石坝的损伤与局部破坏，岩土体的地震变

形与极限抗震能力已成为人们关注的焦点，并将在相当长的时间内成为研究热点。

根据输入地震波的特性，可分为确定性永久变形分析和非确定性永久变形分析。

6.1 确定性永久变形分析

所谓确定性永久变形分析，就是对某一条或几条已知的地震波进行确定性数值积分，求得加速度、动应力和动位移，进而求得地震永久变形的办法。包括滑动体变形分析、整体变形分析和弹塑性分析三种方法。

滑动体变形分析方法认为当土体内某一点加速度超过材料的屈服加速度时，沿破坏面就会发生滑动，向下滑的位移被认为是不可恢复的，因此位移是逐步累加的，这就是永久位移。此后 Ambraseys^[110]，Stamatopoulos^[111]等人对该方法进行了改进和发展。由于滑动体变形法假定永久位移沿潜在的滑动面累积，因此，在采用该模型计算时必须先确定滑裂面的位置及形状。就目前的研究成果而言，主要有三种滑裂面破坏机制：平移机制；圆弧机制；对数螺线机制。不同的破坏机制对永久变形的影响很大，在实际工程中应根据需要选取合适的破坏形式。

整体变形分析方法是将地震前后坝体及坝基均假定为连续体，先通过室内试验得到残余应变模型，再按照连续介质的有关理论来进行计算。土体的永久变形一般是由两种变形所引起的：一是球应力作用下产生的体积变形，可用初应力法求解；二是偏应力作用下产生的形状变形，可采用初应变法计算。目前常用的计算方法有：

(1) 软化模量法：震后的软化模量是软化模量法的关键，通常是根据应变势来计算。孟上九^[112]在软化模量法的基础上，提出了一个分时段的逐步软化模型，用于分析不规则荷载下土体或地基所产生的永久位移。计算中未直接考虑地震惯性力的作用，仅仅在应变势中作了间接的反映。李湛等^[113]把等效节点力法与软化模量法相结合，提出了等效结点力-逐步软化有限元模型。

(2) 等效节点力法：认为地震对土体变形的影响可用一组作用于单元节点上的静节点力代替，永久位移即为在等效节点力作用下产生的附加变形。代表性的有：张克绪^[114]，刘汉龙等^[115]提出的方法。该类方

法在计算过程中未考虑残余体应变对永久变形的影响。沈珠江等^[116]，赵剑明等^[117]在大量试验的基础上提出了可考虑残余体应变的永久变形计算模型。此后邹德高等^[118]对沈珠江模型进行了改进。

弹塑性分析法是在计算过程中采用弹塑性模型直接进行计算，获得残余变形。尽管这种方法在理论上比较严密，但是计算过程非常复杂，耗时很长，而且受应力路径的影响很大，本构模型及参数的合理性直接影响计算结果的精度，工程应用较少。汪闻韶院士和李万红^[119]建立了一个二维的适用于土石坝的粘弹塑性动力本构模型。此后，赵剑明等^[120]将二维问题推广到三维问题，并建立了三维粘弹塑性动力本构模型，开发了相应的真非线性分析方法。

6.2 随机性永久变形分析

该类方法是将随机振动理论应用于土地震反应分析中，计算加速度、动应力和动应变等变量的概率统计特性，继而求得永久变形的概率统计特性，进一步进行动力可靠性或危险性分析。在实际工程中，一般通过一条或几条地震波来进行确定性计算。根据 Makdisi 等^[121]的研究结果可知，即使地震波的控制参数(如最大加速度、主振频率及强震持续时间等)完全等效，不同波形的地震波引起同一坝体的永久变形有时也有数倍之差。Pal 等^[122]针对地震反应分析中涉及的某些内在不确定因素，提出了一种评价地震永久变形的随机性分析方法，但由于该模型采用了一些简化假定，如加速度为正弦波、滑动服从泊松分布等，使其运用受到了限制。刘汉龙^[123]，徐建平^[124]在确定性分析的基础上，建立了随机地震永久变形危险性分析方法。

7 土工抗震措施研究

地震作为一种严重的自然灾害，一旦发生将会带来惨重的损失。汶川地震和日本本州岛 9.0 级特大地震都已造成严重的灾害，因此，加强土工抗震措施研究十分必要。

7.1 土石坝抗震研究

高土石坝震害和研究表明，坝顶附近的地震反应最大，是抗震设计的关键部位。地震中坝体的鞭鞘效应，会使坝体顶部上、下游的堆石体出现松动、滚落，甚至浅层滑动，进而危及大坝的整体安全。

孔宪京等^[125]提出减缓下游坝坡并在坝顶区选用

抗剪强度较高的筑坝材料,后来又提出一种在下游马道(4/5坝高)以上采用钉结护面板的抗震措施。沈珠江^[126]建议了三种抗震加固方案:①放缓1/5坝高以上的下游坝坡;②1/5坝高以上的堆石改用碾压混凝土;③坝顶下20m范围内每隔4m加一根直径5cm的钢筋拉条贯通上、下游。我国已建的124.5m高的南桠河冶勒沥青混凝土心墙堆石坝,在约占坝高3/4以上的部位采用土工格栅加固,土工格栅用于水利水电大坝工程,并作为高土石坝抗震体系尚属首例^[127]。泸定、毛尔盖等高土石坝在坝体一定高度也采用铺设土工格栅的抗震加固措施。我国在建的糯扎渡高土石坝在坝顶部位采取埋设钢筋网,坝面铺设混凝土护面板的抗震措施^[128]。洪家渡工程为避免坝体填筑在与陡峭岩坡接触带产生相对较大的变形,在距趾板及边岸较近的区域,在自然填筑料中增加少量水泥,形成干硬性堆石进行抗震处理^[129]。在糯扎渡土石坝顶部1/5范围内,采用堆石体中加筋、并加盖护面板的抗震措施,虽然坝体填筑造价增加,但顺河向和竖向残余变形降低明显,这种抗震措施对提高糯扎渡高心墙堆石坝的抗震性能十分有利^[130]。

地震的不确定性和高土石坝的复杂性,使土石坝抗震设计在很大程度上仍然依赖于工程经验类比。尽管目前土石坝抗震措施研究取得了一些成果,但是大部分工作还仅仅是初步和定性阶段,缺乏理论指导和设计参数。因此,有必要在加筋机理和新的加筋措施方面进一步开展研究。

7.2 道路抗震措施

道路作为生命线工程在震后的救援工作中起到至关重要的作用,汶川地震严重破坏了通往灾区的道路,使得灾后初期救援人员只能通过空降这唯一的途径才能抵达受害地点,这大大增加了救援难度和灾后损失。

地震造成的道路震害主要有滑坡和崩塌,路基边坡失稳,支挡结构破坏,路基沉陷、扭曲变形和路面隆起、破损等,地震区的道路工程要采取以下抗震措施^[131-133]:

①路线规划时应尽量避开可能发生大规模崩塌、滑坡等地震灾害的不利地段,对于岩体松散,易发生崩滑、落石的地段,必须采取有效的加固措施。

②选择合适的路基支挡结构,路基的支挡结构应优先采用形体简单、受力明确、自重轻、刚度和质量

匀称、重心低、抗震变形协调能力强的构筑物。在地震烈度大于6度区域,支挡结构应进行抗震强度和稳定性验算。

③在软弱地基和可液化地层上修筑路基时,可先采取一定的预处理措施,达到提高地基承载力、抗液化能力和降低沉降的要求。同时路基填筑尽量采用优质填料,避免使用低塑性的粉土和砂土,并严格控制路基压实质量。

7.3 地下结构抗震措施

随着经济的迅速发展和城市化进程的加速,城市轨道交通状况日趋恶化。由于地铁具有方便、快捷、运量大等优点,成为解决公共交通问题的重要途径。近年来,我国各大城市正在建设或即将建设的地铁和隧道等地下结构工程得到了迅猛发展,作为生命线工程的重要组成部分,其抗震措施研究显得尤为重要。

通过对地铁和隧道等地下结构的震害分析,地下结构可采取以下抗震措施^[134-136]:

①采用对称结构,避免截面尺寸变化过大,结构中的结点应尽量用弹性结点,隧道转弯处交角不应过大,加强出口处的抗震设防,采用抗震性能好的材料作为支护材料,如锚杆、钢纤维混凝土等。

②设置减震层和抗震缝,增加隧道管段间的柔性接头,降低隧道整体区间长度。

③隧道洞口避免建在滑坡、岩堆和泥石流处,在洞门端墙与衬砌环墙、端墙与洞口土墙或翼墙间的施工接缝处加设短钢筋或设置榫头等抗震连接措施。

8 结语

经过土动力学学者的艰苦努力,有关土动力学与岩土地震工程的理论和应用已取得了一定的成果;但是由于土的动力特性非常复杂,要全面反映不同动荷载作用下的真实特性非常困难。本文简要回顾了土体动力特性与本构关系、动力反应分析与测试、土体液化、永久变形和土工抗震措施等方面的研究进展,续而提出了今后有待加强和深入的研究方向。

(1)建立高精度、高效率的人工边界条件等数值建模理论。

(2)进一步开展粗粒料缩尺前、后动力特性的对比研究,分析其动力循环荷载作用下的变形和破坏机理,从而建立适合于工程实际应用的动力本构模型。

(3) 深入开展复杂应力状态以及主应力轴旋转条件下, 高速公路、高速铁路路基动力变形特性。

(4) 进一步完善接触面动力特性与动本构模型研究。

(5) 建立液化后大变形预测和评价方法, 以及开展爆炸等其它动力荷载作用下土体液化特性和低烈度区液化机理等方面的研究。

(6) 加强在大型动力试验设备方面的研制与开发, 完善动力模型试验的相似理论和高精度测试技术与方法。

(7) 开展地震荷载作用下高土石坝动力稳定性分析, 变形理论以及抗震措施研究。

随着土动力学及岩土地震工程研究的逐步深入, 内容和范围越来越广泛, 由于篇幅的限制, 本文仅涉及其中部分内容, 存在不足之处, 敬请批评指正。

参考文献

- [1] 栾茂田, 金丹, 张振东, 等. 饱和松砂的双向耦合剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 319-325 (Luan Maotian, Jin Dan, Zhang Zhendong, et al. Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 319-325(in Chinese))
- [2] 张健, 高玉峰, 沈扬, 等. 波浪荷载作用下饱和粉土反正弦孔压拟合参数影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 727-732 (Zhang Jian, Gao Yufeng, Shen Yang, et al. Factor analysis of fitting parameter for saturated silt arcsin pore water pressure under wave loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 727-732(in Chinese))
- [3] 蔡袁强, 王军, 海钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 495-504 (Cai Yuanqiang, Wang Jun, Hai Jun. Study on strength and deformation behavior of soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 27(3): 495-504 (in Chinese))
- [4] 王军, 蔡袁强, 丁光亚, 等. 双向激振下饱和软黏土动模量与阻尼变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 423-432 (Wang Jun, Cai Yuanqiang, Ding Guangya, et al. Experimental research on changing rules of dynamic modulus and damping ratio of saturated soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 29(2): 423-432 (in Chinese))
- [5] 王兰民, 邓津, 黄媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3025-3031 (Wang Lanmin, Deng Jin, Huang Yuan. Quantitative analysis of microstructure of loess seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(s1): 3025-3031(in Chinese))
- [6] 徐舜华, 王兰民, 孙军杰. 基于几个黄土物性参数的震陷判定研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 90-93(Xu Shunhua, Wang Lanmin, et al. Study on determination of loess seismic subsidence based on several physical parameters[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(s): 90-93(in Chinese))
- [7] 杨春鸣, 邵生俊, 王超. 黄土动力特性参数的相关性分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 70-74. (Yang Chunming, Shao Shengjun, Wang Chao. Correlation analysis of loess dynamic characteristic parameters[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(s): 70-74(in Chinese))
- [8] 阮元成, 陈宁, 刘小生, 等. 覆盖层土体最大动剪切模量室内外试验比较分析[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 496-500(Ruan Yuancheng, Chen Ning, Liu Xiaosheng, et al. Comparative analysis on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus of overburden layers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4):496-500(in Chinese))
- [9] 章为民, 陈生水. 紫坪铺面板堆石坝汶川地震永久变形实测结果分析[J]. 水力发电, 2010, 36(8): 51-53(Zhang Weimin, Chen Shengshui. Analysis on Permanent Deformation Monitoring Data of Zipingpu Concrete Faced Rockfill Dam after Wenchuan Earthquake[J]. Water Power, 2010, 36(8): 51-53(in Chinese))
- [10] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807-812 (Zou Degao, Meng Fanwei, Kong Xianjing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807-812(in Chinese))
- [11] 刘汉龙, 林永亮, 凌华, 等. 加筋堆石料的动残余变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1418-1421 (Liu Hanlong, Lin Yongliang, Ling Hua, et al. Residual deformation behaviors of reinforced rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1418-1421(in Chinese))
- [12] 杨贵, 刘汉龙, 陈育民, 等. 堆石料动力变形特性的尺寸效应研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 121-126 (Yang Gui, Liu Hanlong, Chen Yumin, et al. Research on size effect of rock-fill materials on dynamic deformation property[J].

- Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 121-126(in Chinese))
- [13] 沈珠江. 一个计算砂土液化变形的等价粘弹性模型[A]. 第四届全国土力学及基础工程学术会议论文集, 北京: 建筑工业出版社, 1986: 199-207.
- [14] 路德春, 姚仰平, 张在明, 等. 循环加载条件下土的应力路径本构模型[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 907-915 (Lu Dechun, Yao Yangping, Zhang Zaiming, et al. Constitutive model for soils under the condition of cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8): 907-915(in Chinese))
- [15] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力黏塑性记忆型套嵌面本构模型及其验证[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1267-1272 (Zhuang Haiyang, Chen Guoxing, Zhu Dinghua. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1267-1272(in Chinese))
- [16] 蔡袁强, 柳伟, 徐长节, 等. 基于修正 Iwan 模型的软黏土动应力-应变关系研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1314-1319 (Cai Yuanqiang, Liu Wei, Xu Changjie, et al. Study on dynamic stress-strain relationship of soft clay based on modified Iwan's model under undrained cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1314-1319(in Chinese))
- [17] 高广运, 时刚, 顾中华, 等. 一个考虑循环荷载作用的简化模型[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1195-1199 (Gao Guangyun, Shi Gang, Gu Zhonghua, et al. A simplified elastoplastic constitutive model under undrained cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1195-1199(in Chinese))
- [18] 张建民, 罗刚. 考虑可逆与不可逆剪胀的粗粒土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 178-814 (Zhang Jianmin, Luo Gang. A new cyclic constitutive model for granular soil considering reversible and irreversible dilatancy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 178-814(in Chinese))
- [19] 黄茂松, 刘明, 柳艳华. 循环荷载下软黏土的各向异性界面模型[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 188-192 (Huang Maosong, Liu Ming, Liu Yanhua. Anisotropic bounding surface model for saturated soft clay under cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 188-192(in Chinese))
- [20] 杨超, 崔玉军, 黄茂松, 等. 循环荷载下非饱和结构性黄土的损失模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 805-810 (Yang Chao, Cui Yujun, Huang Maosong, et al. Damage model for unsaturated structural loess under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(4): 805-810(in Chinese))
- [21] 熊玉春, 陈久照. 考虑各向异性影响的循环弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1165-1170 (Xiong Yuchun, Chen JiuZhao. Cyclic elasto-plastic constitutive model considering anisotropic effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1165-1170(in Chinese))
- [22] 高广运, 高盟, 冯世进. 无限弹性介质中隧道内爆炸动力响应的解析解[J]. 西北地震学报, 2008, 30(2): 124-127 (Gao Guangyun, Gao Meng, Feng Shijin. Analytical solution for the dynamic response of tunnel to an internal explosion in infinite elastic medium[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(2): 124-127(in Chinese))
- [23] 蔡袁强, 王玉, 曹志刚. 移动荷载作用下饱和地基上板式轨道动力分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(1): 48-54 (Cai Yuanqiang, Wang Yu, Cao Zhigang. Dynamic analysis of a slab track on the poroelastic soil subjected to moving loads[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(1): 48-54(in Chinese))
- [24] 张艳美, 张旭东. 饱和砂土地基三维地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(5): 109-113 (Zhang Yanmei, Zhang Xudong. Three dimension earthquake response analysis of saturated sand foundation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(5): 109-113(in Chinese))
- [25] 唐亮, 凌贤长, 徐鹏举, 等. 土体液化动力分析数值模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 521-524 (Tang Liang, Ling Xianchang, Xu Pengju, et al. Numerical model for dynamic analysis of soil liquefaction[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 521-524(in Chinese))
- [26] 岑威钧, 睦峰, 顾滢臣. 土质堤坝地震反应的简化有效应力计算方法[J]. 水力发电, 2007, 33(12): 35-37 (Ceng Weijun, Sui Feng, Gu Ganchen. FEM analysis on resistance of earthquake impact for earth dike and dam[J]. Water Power, 2007, 33(12): 35-37(in Chinese))
- [27] 吕西林, 任红梅, 李培振. 地震作用下可液化土的数值模拟与试验验证[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 1-6 (Lv Xilin, Ren Hongmei, Li Hongmei. Numerical simulation and test verification of liquefiable soil under seismic action[J]. Journal of Architect and Civil Engineering, 2009, 26(4): 1-6(in Chinese))
- [28] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-63 (Liu Jingbo, Lv Yandong. A direct method for analysis of dynamic

- soil-structure interaction[J], China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-63(in Chinese))
- [29] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075 (Liu Jingbo, Wang Zhenyu, Du Xiuli. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075(in Chinese))
- [30] 张顺福, 王海波, 杨会臣. 等效黏性边界单元及黏性边界波动输入方法[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1248-1255 (Zhang Shunfu, Wang Haibo, Yang Huichen. Equivalent viscous boundary elements and the method of wave input for viscous boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1248-1255(in Chinese))
- [31] Liao Z P, Yang G. Multi-directional transmitting boundaries for steady-state SH waves[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(3): 361-371
- [32] Wolf J P, Song C. Doubly asymptotic multi-directional transmitting boundary for dynamic unbounded medium structure interaction analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(2): 175-188
- [33] 王立涛, 马怀发, 陈厚群. 人工黏弹性边界与透射边界数值处理稳定性分析[A]. 和谐地球上的水工岩石力学--第三届全国水工岩石力学学术会议, 上海: 2010: 405-410
- [34] 杜修力, 赵密, 王进挺. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 49-56 (Du Xiuli, Zhao Mi, Wang Jinting. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56(in Chinese))
- [35] 张琪伟, 陈鹏郎, 牛荻涛. 高层建筑地基、基础与上部结构动力共同工作的 BEM/FEM 耦合分析[J]. 长安大学学报 (建筑与环境科学版), 2003, 20(1): 16-20 (Zhang Weiqi, Chen Penglang, Niu Ditao. Analysis of BEM/FEM coupling method applied to kinematic interaction of soil-foundation-superstructure of high-rise building[J]. Journal of Chang'an University (Architecture and Environment Science Edition), 2003, 20(1): 16-20(in Chinese))
- [36] Reissner E. Station are axialsymmetrice druch eine elastischen halb raues[J]. Ingenieur Archiv, 1936, 7(6): 381-396
- [37] Cai Y X, Gould P L, Desai C S. Nonlinear Analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure systems and application[J]. Engineering Structures, 2000, 22(2): 191-199
- [38] Takewaki I. Bound of earthquake input energy to soil-structure interaction systems[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7): 741-752
- [39] 庄海洋, 陈国兴, 宰金珉. 土-地下结构的非线性动力相互作用——理论及应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 174-181 (Zhuang Haiyang, Chen Guoxing, Zai Jinmin. Nonlinear dynamic interaction between soil and underground structure: theory and application[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 174-181(in Chinese))
- [40] 李培振, 程磊, 吕西林, 等. 可液化土-高层结构地震相互作用振动台试验[J]. 同济大学学报, 2010, 38(4): 467-474 (Li Peizhen, Cheng Lei, Lv Xilin, et al. Shaking table testing on high-rise buildings considering liquefiable soil-structure interaction[J]. Journal of Tongji University, 2010, 38(4): 467-474(in Chinese))
- [41] Fakharian K, Evgin E. Elasto-plastic modeling of stress-path-dependent behaviour of interface[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(2): 183-199
- [42] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149-153 (Zhang Ga, Zhang Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 149-153(in Chinese))
- [43] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1175-1179 (Zhang Ga, Zhang Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1175-1179(in Chinese))
- [44] 刘平, 杨贵, 高德清, 等. 循环荷载作用下粗粒料与掺砾粘土接触面单剪试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(1): 91-95 (Liu Ping, Yang Gui, Gao Deqing, et al. Cyclic Simple-shear Tests on the Interface between Granular Material and Gravel-clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(1): 91-95(in Chinese))
- [45] 冯大阔, 候文峻, 张建民, 等. 不同法向边界条件接触面三维力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2419-2424 (Feng Dakuo, Hou Wenjun, Zhang Jianmin, et al. Experimental study of 3D cyclic behavior of interface under different normal boundary conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2419-2424(in Chinese))
- [46] 沈德建, 吕西林. 地震模拟振动台及模型试验研究进展[J]. 结构工程师, 2006, 22(6): 55-58 (Shen Dejian, Lv Xilin. Research advances on simulating earthquake shaking tables and model test[J]. Structural Engineers, 2006, 22(6): 55-58(in Chinese))
- [47] 程烧革, 张自平, 贺军, 等. 大型高性能振动台模拟地震

- 实验室[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 39-42 (Cheng Shaoge, Zhang Ziping, He Jun, et al. Introduction of large scale & high performance shaking table earthquake simulation laboratory[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(5): 39-42(in Chinese))
- [48] 胡宝生. 我国自行研制的第一个大型三向地震模拟振动台[J]. 世界地震工程, 1995, (4): 44-46 (Hu Baosheng. A large-scale of 3-dimentional earthquake simulation shaking table being developed by China independently[J]. World Earthquake Engineering, 1995, (4): 44-46(in Chinese))
- [49] 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))
- [50] 周健, 杨永香, 刘洋. 饱和砂土液化过程细观组构的模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 466-470 (Zhou Jian, Yang Yongxiang, Liu Yang. Model testing of meso-fabric of saturated sand liquefaction[J]. Journal of Tongji University(natural science), 2009, 37(4): 466-470(in Chinese))
- [51] 孔宪京, 邓学晶. 城市垃圾填埋场地震变形机理的振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(5): 65-74 (Kong Xianjing, Deng Xuejing. Shaking table test on the mechanism of seismically induced deformation of municipal waste landfills[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 65-74(in Chinese))
- [52] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研制[J]. 水利水运工程学报, 2002, (1): 63-66 (Zhang Weimin, Lai Zhongzhong, Xu Guangming. Development of an electrohydraulic shake table for the centrifuge[J]. Hydro Science and Engineering, 2002, (1): 63-66(in Chinese))
- [53] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 长坝坝动力离心模型试验研究[J]. 水力发电, 2009, 35(5): 67-70 (Wang Nianxiang, Zhang Weimin, Gu Xingwen, et al. Dynamic Centrifuge Model Test for Changhe Dam[J]. Water Power, 2009, 35(5): 67-70(in Chinese))
- [54] 张建民, 于玉贞, 濮家骝, 等. 电液伺服控制离心机振动台系统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 843-845 (Zhang Jianmin, Yu Yuzhen, Pu Jialiu, et al. Development of an electrohydraulic shake table for the centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 843-845(in Chinese))
- [55] 马立秋, 张建民, 张嘎, 等. 爆炸离心模型试验系统研究与初步试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 946-950 (Ma Liqiu, Zhang Jianmin, Zhang Ga, et al. Research of blasting centrifugal modeling system and basic experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 946-950(in Chinese))
- [56] 马险峰, 何之民, 林明. 同济大学岩土离心机的研发[A]. 中国水利学会 2007 学术年会, 苏州: 2007: 5-10
- [57] 陈云敏, 周燕国, 黄博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 874-880 (Chen Yunmin, Zhou Yanguo, Huang Bo. International parallel test on the measurement of shear modulus of sand using bender elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 874-880(in Chinese))
- [58] Chen Y M, Han K E, Chen R P. Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(6): 461-469
- [59] 周燕国, 陈云敏, 社本康广. 弯曲元剪切波速测试技术在土工离心模型试验中的应用[A]. 中国水利学会 2007 学术年会物理模拟技术在岩土工程中的应用分会场论文集, 苏州: 2007: 37-40
- [60] 周健, 史旦达, 吴峰, 等. 基于数字图像技术的砂土液化可视化动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 81-87 (Zhou Jian, Shi Danda, Wu Feng, et al. Visualized cyclic triaxial tests on sand liquefaction using digital imaging technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 30(1): 81-87(in Chinese))
- [61] 刘君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 368-374 (Liu Jun, Liu Fuhai, Kong Xianjing, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 368-374(in Chinese))
- [62] 袁晓铭, 曹振中. 砂砾石液化判别的基本方法及计算公式[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 509-519 (Yuan Xiaoming, Cao Zhenzhong. Fundamental method and formula for evaluation of liquefaction of gravel soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 509-519(in Chinese))
- [63] 李飒, 孙兴松, 要明伦. 混黏土的粉土、粉砂室内试验液化判别标准的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 360-364 (Li Sa, Sun Xingsong, Yao Minglun, et al. Study of liquefaction evaluation used in indoor test of silt, silty sand mixed clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 360-364(in Chinese))
- [64] 阮元成, 陈宁, 刘小生, 等. 覆盖层土体最大动剪模量室内外试验比较分析[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 495-499 (Ruan Yuancheng, Chen Ning, Liu Xiaosheng, et al. Comparative analysis on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus of overburden layers[J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2005, 36(4): 495-499(in Chinese))
- [65] 林万顺. 多道瞬态面波技术在水利及岩土工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2000, (4): 34-40
- [66] 刘发祥, 何鹏, 伍锡举, 等. 面波-声波联合法测定岩基的动力参数[J]. 土工基础, 2007, 21(5): 66-68 (Liu Faxiang, He Peng, Wu Xiju, et al. Calculate dynamical parameters of rock subgrade by the surface wave & sound wave testing[J]. Soil Eng. and Foundation, 2007, 21(5): 66-68(in Chinese))
- [67] 洪小星, 陈国兴, 孙田, 等. 砂砾石动力特性的室内试验研究进展[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 47-53 (Hong Xiaoxing, Chen Guoxing, Sun Tian, et al. Research progress of laboratory tests on the dynamic characteristics of gravel soil[J]. World Earthquake engineering, 2011, 27(1): 47-53(in Chinese))
- [68] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 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 (Yuan Xiaoming, Cao Zhenzhong, Sun Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6):1288-1296(in Chinese))
- [69] 汪明武, 罗国焯. 可靠性分析在砂土液化势评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 29-31 (Wang Mingwu, Luo Guoyu. Application of reliability analysis to assessment of sand liquefaction potential[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 29-31(in Chinese))
- [70] 刘勇健. 饱和砂土地震液化判别的可拓聚类预测方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1939-1943 (Liu Yongjian. Extension clustering prediction method for evaluation of seismic liquefaction of saturated sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1939-1943(in Chinese))
- [71] 师旭超, 韩阳. 砂土地震液化判别的支撑向量机多分类模型[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 191-195 (Shi Xuchao, Han Yang. Model of multi-class support machine on identifying sand seismic liquefaction[J]. Water Power, 2010, 29(3): 191-195(in Chinese))
- [72] Mohtar C S E. Evaluation of the 5% double amplitude strain criterion[A]. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Egypt: 2009,1: 80-83
- [73] Chalandarzadeha, Ahmadi. Effect of silt percents on liquefaction potential and anisotropic behavior of saturated sand-silt mixtures[A]. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Egypt: 2009,1: 11-14
- [74] Motamed R, Towhata I. Shaking table model tests on pile groups behind quay walls subjected to lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2010, 136: 477-489
- [75] 付海清, 陈龙伟, 李雨润, 等. 人工激振下现场液化试验初步研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 235-240 (Fu Haiqing, Chen Longwei, Li Yurun, et al. Preliminary study on in-situ liquefaction tests under artificial dynamic loading[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(s): 235-240(in Chinese))
- [76] Miyajima M, Kitaura M, Koike T, et al. Experimental study on characteristics of liquefied ground flow[A]. The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, 1995: 969-974.
- [77] Towhata I, Vargas-Monge W, Orense R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(347-361
- [78] Nishimura S, Towhata I, Honda T. Laboratory shear tests on viscous nature of liquefied sand[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(4): 89-98
- [79] 佐藤, 大保直人, 浜田政则. 動的遠心模型試験装置による砂地盤の側方流動現象に関する基礎実験[A]. 日本土木學會第 49 回年次學術演講會, 1994: 520-521
- [80] 陈育民. 砂土液化后流动大变形试验与计算方法研究:[D]. 南京: 河海大学, 2007 (Chen Yumin. Laboratory study and calculating method of large spreading deformation induced by post-liquefied sand[D]. Nanjing: Hohai University, 2007)
- [81] 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1139-1143 (Chen Yumin, Liu Hanlong, Zhou Yundong. Analysis on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1139-1143(in Chinese))
- [82] 陈育民, 沙小兵, 林奔, 等. 饱和砂土液化前高孔压状态的流动特性试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 267-272 (Chen Yumin, Sha Xiaobing, Lin Ben. The flow character of pre-liquefied sand under high excess pore pressure[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(s): 267-272(in Chinese))
- [83] Elgamal A, Yang Z, Parra E. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 259-271
- [84] 张建民, 王刚. 评价饱和砂土液化过程中小应变到大应变的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 546-552 (Zhang Jianmin, Wang Gang. A constitutive model for evaluating small to large cyclic strains of saturated sand during liquefaction process[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2004, 26(4):546-552(in English))
- [85] 王刚, 张建民. 砂土液化后大变形的弹塑性循环本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 51-59 (Wang Gang, Zhang Jianmin. A cyclic elasto-plastic constitutive model for evaluating large liquefaction-induced deformation of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 51-59(in Chinese))
- [86] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 142-146 (Liu Hanlong, Zhou Yundong, Gao Yufeng. Study on the behavior of large ground displacement of sand due to seismic liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 142-146(in Chinese))
- [87] 王艳丽, 王勇. 饱和砂土液化后强度与变形特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 667-672 (Wang Yanli, Wang Yong. Experimental study on strength and deformation characteristics of saturated sand after liquefaction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 667-672(in Chinese))
- [88] 张建民, 王富强. 考虑围压和密度的饱和砂土液化后单调加载本构方程[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2044-2047 (Zhang Jianmin, Wang Fuqiang. Monotonic loading constitutive model of saturated liquefied sand considering the density and confining stress[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008, 48(12): 2044-2047(in Chinese))
- [89] Shamoto Y, Zhang J M, Goto S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sands[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(2): 71-80
- [90] Chen Y M, Liu H L. Coupled hydraulic- mechanical analysis of large deformation of post-liquefied sand[A]. International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems, Nanjing: 2006: 700-705
- [91] Yuan D, Sato T. A practical method for large strain liquefaction analysis of saturated soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24: 251-260.
- [92] 莢颖, 唐小微, 栾茂田. 砂土液化变形的有限元-无网格耦合方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2643-2647 (Jia Ying, Tang Xiaowei, Luan Maotian. Finite-element free Galerkin coupling method for sand liquefaction-induced deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2643-2647(in Chinese))
- [93] 黄雨, 八嶋厚, 杉戸, 等. 强震持时对河流提防液化特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 1313-1318 (Huang Yu, Yashima Atsushi, Sugito Masata. Effects of strong ground motion duration on liquefaction behavior of river levee[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(10): 1313-1318(in Chinese))
- [94] Hu Y X, Zhang Y S, Liang J W, et al. Recording-based identification of site liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(2): 181-189
- [95] 孙锐, 袁晓铭. 基于强震记录快速识别场地液化的频率下降率法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1372-1379 (Sun Yue, Yuan Xiaoming. The method of frequency decrease rate for fast identification of site liquefaction from surface acceleration records[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1372-1379(in Chinese))
- [96] Yuan X M, Sun R, Chen L W, et al. A method for detecting site liquefaction by seismic records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(4): 270-279
- [97] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通荷载下路基土的动力学行为研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 248-255 (Liu Xuezhuzhu, Chen Guoxing. Advances in researches on mechanical behavior of subgrade soils under repeated-load of high-speed track vehicles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 248-255(in Chinese))
- [98] Madshus C, Kaynla A M. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 689-701
- [99] 刘添俊, 莫海鸿. 长期循环荷载作用下饱和软黏土的应变速率[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 37-42 (Liu Tianjun, Mo Haiou. Strain rate of saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(10): 37-42(in Chinese))
- [100] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1742-1747 (Wang Changjing, Chen Yunmin. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1742-1747(in Chinese))
- [101] 黄博, 丁浩, 陈云敏, 边学成. 交通荷载作用后粉质黏土不排水强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学, 2010, 29(增 2): 3986-3993 (Huang Bo, Ding Hao, Chen Yunmin, Bian Xuecheng. Experimental study of undrained strength property of saturated silty clay after traffic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s2): 3986-3993(in Chinese))
- [102] 赵俊明, 刘松玉, 石名磊, 等. 交通荷载作用下低路堤动力特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 921-925 (Zhao Junming, Liu Songyu, Shi Minglei, et

- al. Experimental study on dynamic response of low embankment under traffic load[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2007, 37(5), 921-925(in Chinese))
- [103] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 3052- 3057 (Lei Yanghua, Jiang Yan, Lu Peiyi, et al. Experimental study of dynamic stress-strain relation of structural soft soil under traffic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(s1): 3052-3057(in Chinese))
- [104] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动本构关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3788-3792 (Lei Yanghua, Jiang Yan, Lu Peiyi, et al. Experimental study of dynamic constitutive relation of structural soft soils under traffic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3788-3792(in Chinese))
- [105] 姜岩, 雷华阳, 郑刚, 等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3075-3080 (Jiang Yan, Lei Yanghua, Zheng Gang, et al. Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3075-3080(in Chinese))
- [106] 钟辉虹, 汤康民, 黄茂松. 铁路粘土路基动力特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(5): 488-490 (Zhong Huihong, Tang Kangmin, Huang Maosong. Dynamic performance of clayey railroad subgrade[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(5): 488-490(in Chinese))
- [107] Gidel G, Hornych P, Chauvin J J. A new approach for investigating the permanent deformation behavior of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus[J]. Bulletin Des Laboratoires des Ponts et Chaussees, 2001, 6(8): 5-21
- [108] 李进军, 黄茂松, 王育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 1-5 (Li Jinjun, Huang Maosong, Wang Yude. Analysis of cumulative plastic deformation of soft clay foundation under traffic loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 1-5(in Chinese))
- [109] 魏星, 黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3342-3346 (Wei Xing, Huang Maosong. A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3342-3346(in Chinese))
- [110] Ambraseys N, Srbulov M. Earthquake induced displacements of slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(1): 59-71
- [111] Stamatopoulos C A, Velgaki G, Sarma S K. Sliding-blocking analysis of earthquake - induced slides[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(6): 61-75
- [112] 孟上九. 不规则动荷载下土的残余变形及建筑物不均匀震陷研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002 (Meng Shangjiu. Study on residual deformation of soils under irregular dynamic loading and earthquake-induced differential settlements of building[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2002)
- [113] 李湛, 栾茂田. 土石坝地震永久变形计算方法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 63-70 (Li Zhan, Luan Maotian. Computation method for seismically-induced permanent deformation of earth-rock dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 63-70(in Chinese))
- [114] 张克绪, 李明宰, 常向前. 地震引起的土坝永久变形分析[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(1): 91-100 (Zhang Kexu, Li Mingzai, Chang Xiangqian. Analysis of earthquake induced permanent deformations for earth dams[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1989, 9(1): 91-100(in Chinese))
- [115] 刘汉龙, 陆兆溱, 钱家欢. 土石坝地震永久变形[J]. 河海大学学报, 1996, 24(1): 91-96 (Liu Hanlong, Lu Zhaozhen, Qian Jiahuan. Earthquake-induced permanent deformation of earth-rock dams[J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(1): 91-96(in Chinese))
- [116] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学, 1996, (2): 143-150 (Shen Zhujiang, Xu Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-science and Engineering, 1996, (2): 143-150(in Chinese))
- [117] 赵剑明, 陈宁, 常亚屏, 等. 龙首二级面板堆石坝地震永久变形分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(44): 57-62 (Zhao Jianming, Chen Ning, Chang Yaping, et al. Study on earthquake-induced permanent deformation of Longshou CFRD[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(44)(in Chinese))
- [118] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807-812 (Zou Degao, Meng Fanwei, Kong Xianjing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807-812(in Chinese))
- [119] 李万红, 汪闻韶. 无粘性土动力剪应变模型[J]. 水利学报,

- 1993, (9): 11-17 (Li Wanhong, Wang Wenshao. A model for cyclic shear strain of cohesionless soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (9): 11-17(in Chinese))
- [120] 赵剑明, 汪闻韶, 常亚屏, 等. 高土石坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J]. 水利学报, 2003, (9): 12-18 (Zhao Jianming, Wang Wenshao, Chang Yaping, et al. 3-D authentic nonlinear method for dynamic analysis of high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (9):12-18(in Chinese))
- [121] Makdisi F I, Seed H B. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(7): 849-867
- [122] Pal S K, Rathman M S, Tung C C. A probabilistic analysis of seismically induced permanent movements in earth dam[J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 47-59
- [123] 刘汉龙. 随机地震作用下地基及土石坝永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 19-27 (Liu Hanlong. Permanent deformation of foundation and embankment dam due to stochastic seismic Excitation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 19-27(in Chinese))
- [124] 徐建平, 谢伟平, 白冰. 随机地震作用下土坡的永久变形研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(9): 55-58 (Xu Jianping, Xie Weiping, Bai Bing. Research on the permanent displacement of soil slope influenced by the stochastic earthquake[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(9): 55-58(in Chinese))
- [125] 韩国城, 孔宪京, 李俊杰, 等. 面板堆石坝动力模型试验与动力分析方法研究[R]. 大连理工大学, 1989
- [126] 沈珠江, 酆能惠, 孔宪京, 等. 高土石坝动力分析及抗震工程措施研究[R]. 南京水利水电科学研究院, 1993
- [127] 马家燕. 土工格栅应用于水工大坝初探[J]. 四川水力发电, 2007, 26(6): 84-92
- [128] 王伯乐. 中国当代土石坝工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 3004
- [129] 王伯乐, 刘瑛珍, 吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 63-65 (Wang Bole, Liu Yingzhen, Wu Hehe. New development of China earth and stone dam project construction[J]. Water Power, 2005, 31(1): 63-65(in Chinese))
- [130] 杨光, 雷红军, 于玉贞, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝的抗震措施研究[J]. 水力发电学报, 2008, 25(4): 89-93 (Yang Guang, Lei Hongjun, Yu Yuzhen, et al. Research on aseismatic measures of Nuozhadu high core rockfill dam[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2008, 25(4): 89-93(in Chinese))
- [131] 侯超群, 王晓谋, 石恒俊. 道路的地震灾害与抗震措施探讨[J]. 路基工程, 2008, (5): 193-195
- [132] 董清林, 杨绪连. 地震对公路的危害及防震原则[J]. 灾害学, 2004, 19(增): 57-60 (Dong Qinglin, Yang Xulian. Earthquake hazard on highway and principle of earthquake hazard prevention[J]. Journal of Catastrophology, 2004, 19(s): 57-60(in Chinese))
- [133] 刘汝明. 云南公路的环境地质灾害及工程对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 57-60 (Liu Ruming. Environmental geological hazards along Yunnan highway and engineering countermeasures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 57-60(in Chinese))
- [134] Asakura T, Sato Y. Damage to mountain tunnels in hazard area[J]. Soils and Foundations, 1996, 301-310
- [135] 高妍妍, 刘剑雄. 盾构法隧道结构震害及其抗震措施浅析[J]. 泰州职业技术学院学报, 2006, 6(6): 17-20 (Gao Yanyan, Liu Jiandun. Analysis of tunnel earthquake protection[J]. Journal of Taizhou Polytechnical Institute, 2006, 6(6): 17-20(in Chinese))
- [136] 张玉娥, 白宝鸿, 张耀辉, 等. 地铁区间隧道震害特点、震害分析方法及减震措施的探讨[J]. 振动与冲击, 2003, 22(1): 70-74 (Zhang Yu'e, Wang Baohong, Zhang Yaohui, et al. Study on subway tunnel's behavior due to seismic damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(1):70-74(in Chinese))