

土动力学与岩土地震工程研究进展

杜修力^{1,2}, 路德春^{1,2}

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 指出了土动力学与岩土地震工程领域课题的特点与研究方法, 并从土的动力特性与本构理论、动荷载作用下饱和土的液化、岩土体的地震变形与稳定性分析、土与结构动力相互作用、数值分析方法、物理模型试验与技术 6 个方面评述了国内外研究进展与发展趋势, 建议了应着重研究的学科前沿与关键科学问题, 希望能对今后的科研工作有一定的启迪作用。

关 键 词: 土动力学; 岩土地震工程; 本构模型; 液化; 边坡; 土-结动力相互作用

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering

DU Xiu-li^{1,2}, LU De-chun^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For the problems in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering, their characteristics and methods for studying them are presented. The study advances and development trends are reviewed; and the frontiers and science problems required to study in this discipline are proposed, from the following six respects, i.e. the dynamic properties and constitutive theory of soil; the liquefaction of saturated soil under dynamic loading; the seismic deformation and stability analyses of soil-rock mass; the dynamic soil-structure interaction; the numerical analysis method; and the physical model test and technology. It hopes that this review can have a good effect on the future research works in this field.

Key words: soil dynamics; geotechnical earthquake engineering; constitutive model; liquefaction; side slope; dynamic soil-structure interaction

1 引 言

土动力学和岩土地震工程是岩土工程学科的一个重要分支, 围绕土木工程建设及可持续发展的国家需求, 研究地震、爆炸、波浪、交通等各种动荷载作用下土体的变形与强度特性, 以及土工建(构)筑物的抗震性能与灾变行为, 发展重大工程灾变评价方法与控制技术, 实现基础设施的安全服役。土动力学与岩土地震工程领域问题的特点, 其一是荷载复杂, 一方面是地震荷载的不可预测性; 另一方面是地震荷载作用显著地受场地条件影响, 并产生放大效应、方向性效应等。其二是研究对象复杂, 不单纯涉及岩土体, 还包括岩土体中的结构以及二者的动力相互作用。研究这一复杂问题时, 通常采用弹性波动理论定性和物理模型试验、数值方法或

经验统计定量相结合的技术思路。

近年来, 随着城市地下空间大规模的开发与利用, 交通、水利水电等重大工程的大规模修建, 人们对这些关系国计民生的重要基础设施的安全、长期服役性能和防灾减灾能力提出了更高要求。尤其是我国地处欧亚和环太平洋两大地震带之间, 重大工程的抗震防灾有着重大的国家需求, 重大工程在最大可信地震作用下的极限抗震能力是社会和工程建设者关注的重点。因此, 重大岩土工程的动力灾变行为与破坏机制, 已成为土动力学与岩土地震工程领域的核心问题, 涉及到的关键研究课题包括以下 6 个方面, 即土的动力特性与本构理论、动荷载作用下饱和土的液化、岩土体的地震变形与稳定性分析、土与结构动力相互作用、数值分析方法和物理模型试验与技术。

收稿日期: 2010-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 90715035, No. 50809001)。

第一作者简介: 杜修力, 男, 1962 年生, 教授, 主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

2 土的动力特性与动力学理论

土的动力特性与动力学理论是土动力学与岩土地震工程的基础理论, 研究各种动荷载作用下土的变形、强度和耗能等特性以及相应的分析理论与方法。地震、波浪、交通等动荷载对土体的作用特点通常表现为两种效应: (1) 速率效应, 即荷载在很短的时间内以很高的速率施加于土体所引起的力学响应; (2) 循环效应, 即荷载多次往复作用于土体所引起的力学响应。

土的速率效应, 尤其是饱和软黏土的速率效应, 由于软黏土的渗透性较低, 难以测试动荷载作用下的超静孔隙水压力, 无法采用有效应力原理分析, 长期以来鲜有创新成果报道, 一般利用共振柱测试土的剪切模量与阻尼比, 基于弹性理论采用等效线性模型分析。1961 年, 黄文熙^[1]开创了利用动三轴研究土动力特性循环效应的先河, 并通过超静孔隙水压力的增长、消散规律分析土坡的动力稳定性。现已开发出双向振动的动三轴仪, 可独立控制围压与轴压的动态变化, 模拟自然状态土的 K_0 固结状态与近场地震动场斜入射条件的作用模式; 空心圆柱扭剪仪可独立控制 3 个方向的应力条件, 模拟三维应力条件下的复杂动荷载, 如波浪荷载等。对土的动力特性研究已取得丰硕的成果, 如汪闻韶^[2-3]、Seed^[4]、Ishihara^[5]等对砂土液化特性的研究; 谢定义和张建民对砂土瞬态动力特性的研究^[6-8]; 张建民对地震土压力^[9]以及砂土可逆与不可逆剪胀特性^[10]的研究; 李广信^[11]关于土的卸载体缩特性的研究; 王兰民^[12]对黄土动力特性的研究等。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动力特性非常困难, 目前对土的动力学行为的认识与对静力特性的研究相比, 还很不深入。存在的主要问题有: (1) 针对自然状态土的动力特性研究很少, 其动力破坏机制的研究更少;

(2) 土、堆石料在不规则荷载作用下的力学特性研究不多, 尚不规则动荷载的合理等效方法; (3) 近期随着高速铁路、海洋平台的大量兴建, 长期动力循环荷载作用下土体动力特性的研究已引起工程界和学术界的广泛关注, 但研究成果很少; (4) 尚未开展液化后土的力学特性研究; (5) 近年随着 300 m 级高土石坝的兴建, 粗粒土、堆石料的颗粒破碎效应显著, 目前尚无考虑颗粒破碎的实用动力本构模型; (6) 考虑多种效应耦合的精细化动力本构模型研究不够深入, 也缺少能反映土的基本力学特性、参数少且物理意义明确简单实用的动力本构

模型。

土的动力学理论主要包括动力本构理论、动力渗透理论、动力固结理论等, 其核心是动力本构理论。20 世纪 50 年代剑桥大学 Roscoe^[13-14]等通过大量的室内三轴试验, 提出了土体屈服面和临界状态等概念, 将塑性力学理论引入到土力学中, 并建立了适合于正常固结或弱超固结黏土的剑桥模型, 后又修正了剑桥模型的剪胀方程, 进而建立了椭圆屈服面的修正剑桥模型。尽管后来提出了不同的屈服面形状或多重屈服面型的本构模型, 但目前岩土工程学术界和工程界的普遍认识是应该重新回到剑桥模型上来, 进一步完善剑桥模型, 同时发展实用性的计算方法, 将剑桥模型广泛用于工程实践中。但是剑桥模型是针对最简单的土 (正常固结黏土) 在最简单荷载条件下 (等向固结和常规三轴压缩) 建立的, 将其推广用于描述自然状态土在动荷载下的力学行为, 应该从土性条件与荷载条件两方面进行深入研究。

自然状态土最显著的特征是结构性与各向异性。结构性是指土体在形成过程中所具有的颗粒特性、孔隙特性、排列特性以及联结特性等。绝大多数天然土体都具有一定的结构性, 且它影响土体的工程性质, 目前主要从以下三方面进行研究: ①基于土体小变形范围内的受力变形性态来建立弹塑性本构模型。代表性的研究成果有, Wood^[15]通过等向压缩过程中同一回弹线上原状土体积应力和重塑土体积应力的比值来模拟土的结构性; Liu^[16]基于结构性土的一维压缩试验结果, 通过在修正剑桥模型中引入结构性参数来建立结构性土的模型。②通过增加一系列屈服面来描述土的应力历史和结构性影响的弹塑性本构模型。代表性的研究成果为, Rounania^[17]提出的移动硬化结构性模型是在参考屈服面外增加结构屈服面并随着结构性的逐渐丧失, 结构屈服面逐渐趋于参考屈服面并最终重合的演化规律来描述土的结构性; Asaoka^[18]将下加载面概念应用于剑桥模型, 推导出了下加载面的表达式, 并在此基础上, 提出了上加载面屈服面思想, 来描述具有结构性超固结土的应力应变特性。③将损伤理论引入到弹塑性模型中, 土颗粒间胶结力的逐渐破损用屈服面尺寸的逐渐减小来描述。代表性的研究成果为沈珠江^[19]将损伤力学应用于土体建立了结构性黏土的弹塑性损伤模型和非线性损伤力学模型以及蒋明镜^[20]基于广义吸力概念建立的结构性土体结构吸力模型; 谢定义^[21]在分析研究了土结构性对土力学特性影响的基础上, 提出了结构性的定量

化参数。现有结构性土的本构模型只能一定程度反映结构性土的应力-应变特性,与应力水平和结构性参数有关的结构性土的强度特性及临界状态应力比将成为主要研究方向。土的各向异性是指沿不同方向所表现出的力学参数、结构特性和应力应变关系不同,包括材料的初始各向异性和应力诱导各向异性。较早提出考虑土各向异性的模型是关口-太田模型,该模型定义了一个反映初始固结各向异性的相对应力比,并假定沿初始固结线不等向塑性体积硬化;孙德安^[22-23]在关口-太田模型的基础上,提出了一种考虑初始各向异性影响的不等向塑性体变硬化弹塑性模型;姚仰平^[24-25]提出的 UH 模型,通过在硬化参数中引入了与初始状态有关的状态应力比来反映土的初始应力各向异性特性,可较好地描述土的初始各向异性与应力诱导各向异性。在本构模型中,研究具有微观力学基础、简单合理地反映土的结构性与各向异性是今后研究的方向。

从荷载条件角度研究土的本构理论是当前的主要方向,即将适用于最简单的荷载(等向压缩和常规三轴压缩)条件下的本构模型扩展为三维动力荷载,一般通过静力本构模型结合移动硬化准则实现。目前主要的研究成果包括三方面:①边界面模型,基于各向异性运动硬化准则的嵌套屈服面模型可较好地描述循环荷载作用下土的动力学行为,但其对有限元计算要求过高,为了避免这一问题,Mroz^[26]将嵌套屈服面模型进行了简化,提出了双面模型;Dafalias^[27]提出了更为简化的边界面模型。为了描述循环加载过程中的记忆消失现象,Zienkiewicz^[28]根据临界状态模型,提出了一个能够描述土体在单调加载与循环加载条件下变形特性的边界面本构模型;Tabbaa^[29]将修正的剑桥模型推广为能够描述黏土在循环荷载作用下滞回反应特性的双面动力硬化模型;黄茂松^[30]基于临界状态土力学理论,引入了相对偏应力水平参数,考虑初始静应力、循环动应力和不排水极限强度的相互影响,研究了饱和软粘土的不排水循环累积变形特性;刘汉龙^[31]根据 Iai 多重剪切机构塑性模型及边界面塑性模型的特点,建立了一个砂土多机构边界面塑性模型;孔亮^[32]采用统一硬化参量 H 代替修正剑桥模型中的硬化参数塑性体积应变,建立了一个新的基于旋转硬化与统一硬化参量的改进的修正剑桥模型;路德春^[33-35]将任意应力路径转化为与其充分接近的等应力比微元与等平均应力微元,进而考虑土的应力路径相关性,并通过移动硬化规则反映土的动力特性。②下加载面模型,Hashiguchi^[36]将下加载面的概念引入

到土体的弹塑性本构模型中,并采用移动硬化规律来描述循环荷载作用过程中砂土真实的变形性能;Asaoka^[18]在模型中引入了旋转张量 β ,并给出旋转张量的演化规律,对基础沉降和稳定性进行分析;Zhang^[37]提出了一种旋转张量来描述土在循环加载条件下的特性;姚仰平^[25]基于 Hvorslev 面、当前屈服面和参考屈服面之间的相互关系,提出潜在强度的概念,并将其与特征状态应力比一起引入到统一硬化参数中来建立超固结土的本构模型,模型能够反映超固结土的硬化、软化、临界状态、剪缩和剪胀、循环荷载特性等。③三维化方法,即将适用于三周压缩条件下的本构模型扩展用于真三轴应力条件的方法。

目前主要的三维化方法有:(1)屈服条件和破坏条件均采用扩展 Mises 准则;(2)屈服条件采用扩展 Mises 准则,破坏条件采用 Mohr-Coulomb 准则;(3)形状函数的 $g(\theta)$ 方法,该方法是国际上最为流行方法,已用于多种商业软件;(4)屈服条件和破坏条件均采用 SMP 准则或 Lade 准则;(5)变换应力三维化方法^[38],该方法可将三维强度理论与剑桥模型合理结合,并且不改变剑桥模型的形式,也不增加任何新的土性参数,是一种具有广泛应用前景的方法。

3 动荷载作用下饱和土的液化

自 1964 年日本新潟地震人们开始研究地震液化以来,已经开展了大量的研究工作,包括震害调查分析、野外观测、动三轴试验与模型试验、理论分析等多个方面,在液化机制、液化危险性评价与减轻液化危害等方面取得了很大进展。

液化是造成岩土工程震害的主要因素之一,包括产生过大的地表破裂变形,使建筑物产生倾斜、沉陷或上浮,土工构筑物产生裂缝、塌落或土坡失稳等。2008 年我国汶川特大地震发生以来,震害调查发现了粗粒土的液化现象^[39],对液化引起的土体大变形问题也备受关注,但迄今为止对液化产生的变形还没有实用和有效的分析方法。对饱和砂土液化进行定性分析与评价的方法主要有 3 类:(1)经验或统计法,是以地震现场的液化调查资料为基础,给出判别实际液化与不液化的条件与界限,并且还可以给出液化程度的判别。该方法直观、简单,较容易被工程师接受,被多部抗震设计规范所采用。但也存在下述缺点:地震场地的液化调查资料多是由自由场地取得的,并且现场观测的数据以浅层液化为主,因而原则上这类方法也仅适用于浅层

自由场地的液化判别。(2) 简化分析法, 是以试验和土体动力反应分析作为基础来判别饱和砂土能否液化, 但不能分析饱和砂土液化的整个发展过程和应力-应变的变化过程, 只能给出最后的判别结果。简化分析方法中有 4 种方法影响较大, 分别是: ① Seed 简化方法^[4]; ② Poulos 液化估计法^[40]; ③ 剪切波速法; ④ 标准贯入击数法, 其中剪切波速法可以测试分析场地的数据, 不受场地条件限制, 并通过统计分析获得判断结果^[41], 不足在于基于弹性理论的剪切波速与实际弹塑性的土体不符, 外延判断液化的破坏问题缺乏理论依据。标准贯入击数法已经写入国家规范, 其主要优点是简单, 易操作; 其不足是无法反映液化机制。(3) 数值分析法, 该方法采用某种本构模型, 考虑土与结构的动力相互作用, 并能给出变形发展的全过程。通过室内试验确定模型参数时, 试样的扰动是关键因素, 在模型参数的质量得到保证的情况下, 其精度和准确性一般是优于简化方法, 因而在一些重要结构的设计中采用这种方法。对液化危险性的评价, 在实践中还主要依靠经验性的现场测试方法。震害调查表明液化后的大变形导致土体中的和地表上的结构物产生破坏, 破坏程度取决于液化可以引起的变形的大小。对土体液化后土体大变形的分析可以分为两类: 一类是把液化土体看作固体; 另一类是把液化土体看作流体。地震液化的直接危害之一就是地基的失效, 因此建(构)筑物地基液化的判别是岩土地震工程中的重要课题之一。同自由场地的液化相比, 建(构)筑物地基液化的研究工作相对要少的多。如何将自由场的液化分析方法用于分析地基液化将是今后研究的重要方向。

液化除造成地基失效外, 也会对土层上的地震动产生显著影响。对结构振动破坏产生附加作用。2011 年新西兰 6.3 级克萊斯特彻奇地震中, 液化现象严重, 已有地震记录分析表明液化使地表加速度反应谱周期明显延长。坎特伯雷电视大楼(CTV 大楼)是此次地震人员伤亡最严重的建筑物, 日本岩土工程调查团分析现场实测记录后指出, 土层液化使晃动周期开始变长、晃动程度变大, 对大楼的最终导致坍塌起到较大作用。新西兰方面正在打算修改其抗震规范液化影响部分, 而目前国际上已经注意到了液化土层对地震动特殊影响的重要性, 新版的美国 IBC 和 NEHRP 推荐标准已经有相关建议, 但因研究工作不够深入, 目前还没无法给出具体分析方法。

另外, 随着地震监测和实时减灾技术的发展,

近来国际上对减轻液化灾害也开始研究不同于传统做法的新技术, 即考虑破坏性大地震的罕遇性及由此带来避让或地基处理方式的不经济性, 将减轻其液化灾害技术重点部分放到液化实时监测和报警上。通过危险区布设谱烈度计, 震后立刻对场地是否液化进行识别, 及时修复可能破坏系统, 从而有效地减小地震次生灾害。此类地震实时监测系统核心是发展依据地震记录识别场地液化的方法, 其本质属于地震波反演, 需发展液化土层特征与地震动关联理论, 是一个难度较大的新问题。

土体的液化不仅由地震引起, 其他荷载的作用(如爆炸、波浪)也不容忽视。然而, 对爆炸、波浪等荷载下土体液化问题的研究相对较少。国外对爆炸荷载引起的液化研究主要集中在试验方面^[42], 理论分析采用非线性的弹性模型和弹塑性模型, 但效果不理想, 特别是对爆炸波的传播速度及粒子的运动速度随爆炸传播距离增加而衰减预测误差较大。

动荷载作用下饱和土的液化问题, 虽然已取得丰硕的研究成果, 但仍有许多问题尚未解决, 下述问题将是今后相当长时间内研究的主要方向:

(1) 初始各向异性、结构性对土液化特性的影响规律; (2) 粉土、含细粒砂土、黄土与砾石类土的液化机理与判别; (3) 爆炸、波浪荷载下土的液化特性; (4) 从场地液化到地基液化的判别准则; (5) 液化后土体大变形的预测与评价方法; (6) 液化与地震动关联理论, 液化对地震动影响机制和评价方法; (7) 先进的(如物理、化学、微生物)抗液化加固处理技术。

总体而言, 从土动力学与岩土地震工程的发展趋势来看, 关于液化问题的研究已逐渐从强度分析转向变形分析, 在危险性评价方面则从整体稳定性转向容许变形检验, 同时考虑土工建(构)筑物在震后的性能。

4 岩土体的地震变形与稳定性分析

2008 年汶川特大地震, 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^[43-44], 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。

岩土体的地震反应分析远比静力分析复杂得多, 地震反应不仅与岩土体自身的动力特性有关, 而且与输入地震动的特性密切相关。地震作用下岩土体稳定性评价的指标主要有两类: 地震永久变形和稳定安全系数。以地震永久变形作为评价指标是

由 Newmark^[45]于 1965 年提出,他从坝坡上滑动体在地震中受惯性力作用而运动或停止的规律出发,计算其刚体位移,从而推求坝体在地震时及地震结束后可能发生的永久变形量。Makdisi 和 Seed^[46]运用非线性黏弹性模型和 Newmark 刚塑性滑块模型估算潜在滑体的平均地震响应和地震永久变形,该方法未考虑地震动的不确定性影响,且不能反映土体强度的退化^[47]。Bray^[48-50]基于大量的地震动资料,利用完全非线性耦合滑块体模型,采用完全概率的方法弥补了地震动数据不足和采用解耦方法、非严格概率意义方法的缺陷。采用动力有限元法,对地震作用下有限元网格中各单元永久应变进行积分得到边坡的永久位移。郑颖人^[51]利用强度折减法分析岩土体的动力稳定性。地震作用下的岩土体稳定安全系数的计算大多采用拟静力法和有限单元法。拟静力法既没有考虑地震荷载的特性,如振动频率、次数和地震持续时间等因素,又没有考虑岩土体身材料的动力特性等,因而,无法反映岩土体在地震时的反应特性^[52]。建立在刚塑性模型和极限平衡理论基础上的圆弧滑动法所给出的稳定安全系数,并不能说明岩土体抗震安全储备的实际情况。近年来,又逐渐发展起计算地震永久变形和稳定安全系数的随机分析方法。通常可将输入地震动荷载视为平稳过程,在岩土体随机动力分析的基础上,计算地震永久变形或稳定安全系数的大小。岩土体地震稳定的时程分析方法是一种好的分析方法^[53],在确定潜在破坏面的同时可计算出永久位移,但时程分析方法采用不同的本构模型可能产生不同的结果,往往计算较复杂。

岩土体的地震变形与稳定性分析方法,经历了从拟静力法发展到地震反应时程分析法;从确定性分析发展到考虑随机地震的非确定性分析;从只分析地基的一维问题发展到岩土体的二维和三维问题。基于弹塑性本构模型的有效应力耦合分析方法和数值仿真模拟技术也越来越受到重视。从基于岩土材料的动力本构模型来分,岩土体地震反应分析方法可分为两大类:一类是基于等价黏弹性模型的等效线性分析方法;另一类是基于弹塑性模型的非线性分析方法。从是否考虑地震过程中孔隙水压力影响的角度来分,地震反应分析方法又可分为总应力地震反应分析方法和有效应力地震反应分析方法,而有效应力分析方法又可按考虑孔隙水压力消散和扩散与否,分为排水有效应力法和不排水有效应力法两种。

岩土体地震变形与稳定性分析是一个非常复杂

的问题,随着计算技术的发展,有许多问题还需要进行更深入的研究,如发展和完善多耦合三维非线性地震反应分析的理论和方法;地震动输入机制的研究;建立基于地震永久变形的安全评价方法;以及如何综合运用滑动破坏准则、永久变形破坏准则、液化破坏准则以及断裂破坏准则等全面定量判断岩土体的极限抗震能力、震害预测及防灾减灾对策研究等。

5 土与结构动力相互作用

土与结构动力相互作用指的是动荷载作用下结构与土体间的相互作用效应,本质上是指振动在结构介质与土体介质间传播产生的波动能量转移效应。地球介质通常被视为半无限体,因此,存在能量传递关系的土与结构动力相互作用这一波动体系是一个能量开放系统^[54]。人们一般只关心结构以及邻近结构区域的波动反应,土与结构动力相互作用可归属于近场波动问题。近场波动分为内源和外源两类问题。

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,相对于地基土的变形,动力机器基础可作为刚体处理,地基土的应变量子级也很小,土体多处于微小变形状态,基础与地基间一般也不发生脱开和滑移,研究对象被简化为线性模型,研究的内容包括基础形状、埋深、土介质参数等的影响,研究方法通常是在对模型进行一定的边界简化处理后采用解析法,这方面代表性的研究者有加拿大的 Novak 教授。麻省理工学院土木与环境工程系的 Kausel 教授^[55]评述了土与结构相互作用的早期成果。20 世纪 60 年代以来,由于计算技术软硬件、试验技术软硬件的飞速发展和军事、人防工程结构抗爆安全设计与建(构)筑物抗震安全设计的需要,土与结构动力相互作用研究在分析模型、计算方法等方面都取得了重大的进展。研究模型方面,由线性弹性、黏弹性土体发展到弹塑性等非线弹性土体;由均匀介质土体发展到非均匀介质土体;由单相介质土体发展到流、固、气多相介质土体;由刚性基础和结构发展到柔性基础和结构;由单纯的基础-地基相互作用发展到复杂的上部结构-基础-桩-土相互作用;由确定性模型发展到非确定性模型;土体、结构界面接触非线性,大变形,包括率相关和下降段的材料模型以及爆炸源、入射地震动场模拟等也取得了一定的进展。研究手段从最早的解析法发展到数值模拟法、模型试验法、原型观测法等,其中,尤以数值模拟法取得的进展最

为突出, 瑞典的 Wolf 教授为推动数值模拟法在土与结构动力相互作用研究中的发展和应用做出了卓越贡献^[56]。

近年来, 关于土与结构动力相互作用的研究已经取得了很大进展。但是, 由于问题的复杂性, 仍旧存在一些问题需进一步深入研究。

5.1 非线性问题

一是土体和结构材料的非线性; 二是几何非线性。在以往的研究中, 由于研究目的的不同, 人们对材料非线性的处理也不相同。以结构反应为研究目的时, 主要考虑结构材料的非线性, 而把土体看作为线弹性体; 以土体的反应为研究目的时, 通常把结构看作为“呆重”, 只是考虑土体的非线性。研究结构的动力反应时, 也应该考虑土体的非线性; 同样, 研究土层动力反应时不能只是把结构作为“呆重”处理。对材料非线性, 一般采用迭代解法或增量解法来处理, 也可以采用材料非线性有限元分析中常用的常刚度法或切线刚度法。对材料非线性的研究还需要加大土、结构材料本构模型的研究力度。

5.2 土与结构接触面的处理问题

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。早期分析土体与结构动力相互作用时, 一种认为接触面十分粗糙, 土体与结构之间完全粘结; 另一种简化则认为接触面十分光滑, 不可能产生剪应力以阻止土体与结构之间的相对移动。显然这两种假定都是理想化的, 不符合实际情况。影响土与结构相互作用界面行为的关键在于结构表面的粗糙度与有限薄层范围内土体材料的本构行为, 特别是接触带的厚度, 以及接触带内土变形的非均匀性。近年来, 国内外许多学者对接触面问题进行了深入的研究, 张楚汉等^[57]对相关成果已经做了系统的总结, 其中接触单元法概念简单, 具有与普通单元一样的处理方法, 更易同有限元模型相联, 比较适合于处理大面积接触问题, 对其研究也最为广泛, 研究成果也相对较多。这些研究集中于两方面, 即单元类型和接触面材料的本构关系。单元类型仍沿用 Goodman 零厚度接触面单元或 Desai 薄层单元。接触面材料的本构关系上, 通常采用刚-塑性模型、弹塑性模型、损伤力学模型。然而, Goodman 单元模型存在运动的不协调性, 从其扩展得到的三维接触面单元和传统的薄层固体单元以及其它很多接触面单元都存在此问题。Desai^[58]薄层单元模型相对于无厚度的 Goodman 单元有了一定的改善, 然而, 它仍存在有

两个主要问题没有解决好: 一是剪切模量的确定与 Goodman 单元方法相同, 并且与单元厚度有关, 而厚度的取值问题没有根本解决; 二是没有测定和反映法向和切向变形的耦合影响, 未能客观描述薄层单元的实际应力应变特征。因此, 对于接触面单元的研究还需开展深入的工作。

5.3 边界条件处理问题

岩土体的动载作用问题可以归结为无限域波传播问题, 其近场有限域的有限元分析需要采用人工边界条件模拟截去的远场无限域。近场有限域可以含有各种非线性和非均匀因素。远场无限域是“规则”的, 通常满足线性和均匀假定并且具有规则的几何形状。此时, 人工边界条件描述外行波通过人工边界从近场有限域进入远场无限域并向无穷远处传播这一物理过程, 因而也称作无反射、透射、吸收、辐射、单向或者开放边界条件。人工边界条件大致分为两类: 一类是精确的全局方法, 如边界元法^[59]、薄层法^[60]和 DtN 边界条件^[61-62], 该类边界条件精确地满足无限域内的所有场方程和物理边界条件, 但它们是时空全局的, 即某一边界结点的响应与全部边界结点之前所有时刻的响应耦合, 计算量和存储需求过大。另一类是近似的局部方法, 如 Engquist-Majda 边界^[63]、Bayliss-Turkel 边界^[64]、Higdon 边界^[65]、多次透射公式^[66]、黏性边界^[67]和粘弹性边界^[68-72]、比例边界有限元法^[73-74], 无限元法^[75-76]和完美匹配吸收层法^[77]也属于该类方法, 该类边界条件是时空局部的, 即某一边界结点在某一时刻的运动仅与其临近结点在临近时刻的运动有关, 因而实现简单、计算成本较低, 但它们是近似的, 通常需要设置于距离结构或者辐射源较远处, 导致近场有限域的计算成本增加。

近年来, 人工边界条件的发展趋势和研究热点包括两方面, 一是采用某种近似方法对精确的全局条件进行时间和空间(尤其是时间)的局部化处理, 显著提高人工边界条件的计算效率, 而其精度损失通常低于有限元法的离散误差; 二是引入辅助变量将近似的局部条件实现到任意高阶, 通过适度增加计算成本, 提高人工边界条件的精度。这样, 全局和局部条件的严格界限被打破, 具有对立优点和缺点的两类方法向着具有高精度和高效率的同一平衡点发展, 形成高阶精度人工边界条件。Givoli 等^[78-80]提出的高阶局部人工边界条件是后一类发展趋势的代表性工作; 杜修力等^[81-83]提出了构建时间局部高精度人工边界条件的系统方法, 是前一类发展趋势

的典型成果,该方法在频域内采用有理函数近似地替代动力刚度系数,然后等价地将其转化为时域高阶弹簧-阻尼-质量模型。对高阶精度人工边界条件仍需开展深入的研究。在理论和方法方面,需要建立适用于一般边界几何形状和成层介质的高阶精度人工边界条件;在实现和应用方面,在通用有限元程序中实现高阶精度人工边界条件并且应用其解决实际工程问题有待深入研究。

6 数值分析方法

数值分析方法可以归纳为两类:一类是连续介质分析方法,包括有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、无单元法(Meshless Method)、扩展有限元法(XFEM)和比例边界有限元法(SBFEM)等。另一类是离散介质力学方法,包括刚体极限平衡法、刚体弹簧元法(RBSM)、块体和颗粒体离散元(DEM,如商业软件 PFC)、不连续变形方法(DDA)等。

6.1 连续与非连续介质统一分析方法

以有限元、有限差分法为主的连续介质分析方法,在处理复杂介质的小变形本构行为如非线性、弹塑性、损伤断裂、流变、动态冲击、振动等问题有独特的优势,而以离散元为主离散介质分析方法在解决离散介质的破坏、倒塌等大变形问题上具有显著优点。为了研究岩土介质从小变形到大变形的破坏全过程,需要将两种类型的分析方法耦合,建立统一的连续介质-非连续介质分析方法,如有限差-离散元耦合、有限元-离散元耦合与边界元-离散元耦合等。

6.2 多相耦合介质分析方法

孔隙水渗流作用对岩土工程边坡、地下结构的变形和稳定的影响问题,以及核废料地下存储结构的热流-水力-岩石(THM 耦合问题)的相互作用问题等,引起了人们的极大关注,是研究热点之一。对于 THM 耦合问题仍以采用连续介质模型为多,如有限元、边界元、有限差与有限体积模型等,而非连续介质方法大多采用离散元方法。

6.3 宏观-细观-微观耦合模型分析方法

传统的宏观唯象模型不能完全反映岩土材料的物理本质,需要发展微观细观力学模型,从材料破坏机理的层面理解宏观力学现象^[84]。另外,岩土材料的多尺度效应也需要应用细观力学才能评价,多尺度宏-细-微观力学分析模拟将具有应用前景。发展宏观-细观-微观耦合模型的高效数值求解方法具有重要意义。

7 物理模型试验与技术

模型试验是研究自由场地、岩土体、地下结构地震响应与破坏机理较为有效的途径,振动台模型试验和离心机模型试验已经成为现有模型试验的主要手段。鉴于设备能力有限,地震模拟的模型试验只能以缩尺模型进行试验,为了尽量真实地反映原型的性状,必须考虑模型与原型的物理相似性。由于普通振动台试验是在 $1g$ 的重力加速度条件下进行的,且模型与原型相比几何尺寸缩小了数倍,因此在正常重力条件下,模型的应力水平尤其是自重应力水平与原型有一定差距。对于土与结构动力相互作用系统,由于土体为强非线性材料,其剪切模量为约束压力的函数,应力应变水平对土体承载力和变形有较大影响,因此振动台试验结果与实际情况相比可能会有一定差距。相对而言,离心机模型试验可以很好地考虑重力的影响,动力离心模型试验通过增加模型的场加速度,可以模拟出与原型相等或相近的应力水平,重现原型的物理特性,在再现动力反应、观测破坏机制、检验评价方法以及对比设计方案等方面具有突出的优越性,在欧美、日本等发达国家得到了广泛的应用。目前,国内动力离心模型试验技术已在岩土地震工程问题的研究中得到应用,并取得了良好的效果,但仍然有如下因素制约着离心机振动台试验的开展:(1)目前我国离心机振动台设备较少,这直接制约了离心机振动台试验的开展,因此目前国内离心机振动台试验的研究成果相对于普通振动台试验要少得多;并且由于仪器设备的能力所限,有些试验要求尚不能得到满足,比如在离心机振动台上不停机的情况下连续加载地震波。鉴于离心机振动台试验在土工模型试验方面巨大的优越性,因此可以考虑发展更多的较高规格的土工离心机振动台试验系统。(2)地下结构断面尺寸普遍较大,而土工离心机振动台尺寸相对较小,有些情况下几何尺寸相似关系并不能满足模型与原型应力水平相同的要求,因此还需不断完善这两类试验技术:对于普通振动台试验,需要在模型相似比设计、试验材料选取、配重施加等方面进行深入研究,以能更好地模拟原型结构与原型地基土体的应力水平;对离心机试验,需要在试验设备、试验技术和发展新的试验材料等方面开展进一步的研究工作,开展破坏性模型试验研究自由场地、岩土体、地下结构的破坏机制将是今后模型试验的发展方向。

在过去的几十年里,试验技术的改进与提高,

发展趋势大致可归纳为: (1) 复杂化, 即模拟土单元受力的复杂性。真三轴是一个前期的代表, 而模拟复杂应力路径的仪器、非饱和土的动力试验仪器、多室三轴仪等, 也会越来越得到科研人员的重视。(2) 大型化, 这是目前各实验室追求的主要目标。大型离心机以及大型振动台(台阵)等也越来越吸引各大学和研究机构的注意。(3) 自动化, 由于电子技术的提高, 对仪器设备自动化的要求也越来越高。多通道数据采集, 实时监控技术等在新的仪器中的需求越来越突出。(4) 实验人员技术的提高, 如何充分利用好现有的设备是科技人员共同面对的一个问题, 如离心机中动力荷载的模拟, 大型振动台试验中土工模型的边界处理, 相似率问题, 土工试验的模型制作等均有大量的问题值得研究, 而上述问题对试验结果均有着很大的影响, 不容忽视。

8 展 望

土动力学与岩土地震工程针对岩土体与地下结构, 研究动荷载的率效应与循环效应, 在分析其抗震性能的同时, 更强调其灾变行为, 以及发展重大工程灾变评价方法与控制技术。今后应着重研究学科前沿与关键科学问题, 笔者建议如下重点研究方向, 希望能对今后的科研工作有一定的启迪作用。

8.1 土、堆石料的动力特性与本构模型

土、堆石料的动力特性与本构模型有: (1) 自然状态土的动力特性与破坏机制; (2) 土、堆石料的速率效应与动强度理论; (3) 不规则动荷载的等效方法及其作用下土、堆石料的力学特性; (4) 土在长期循环荷载作用下的力学特性; (5) 液化后土的力学特性; (6) 考虑颗粒破碎的实用动力本构模型; (7) 土、堆石料精细化动本构模型研究与实用化, 本构模型的三维化方法。

8.2 动荷载作用下饱和土的液化

动荷载作用下饱和土的液化: (1) 初始各向异性、结构性对土液化特性的影响; (2) 粉土、含细粒砂土、黄土与砾石类土的液化机制与判别; (3) 爆炸、波浪荷载下土的液化特性; (4) 从场地液化到地基液化的判别准则; (5) 液化后土体大变形的预测与评价方法; (6) 液化与土层地震动关联性理论, 液化对地震动影响机制和评价方法; (7) 先进的(如物理、化学、生物)抗液化加固处理技术。

8.3 岩土体的地震变形与稳定性分析

稳定性分析方法包括: (1) 地震土压力计算理论与方法; (2) 非线性数值方法, 尤其是材料软化后数值方法的有效性; (3) 岩土体渐进破坏过程的

弹塑性模拟以及破坏机制与灾变模式; (4) 地基动承载力计算理论及方法; (5) 土质高边坡动力稳定性分析理论与震害预测方法。

8.4 土与结构动力相互作用

土与结构动力之间相互作用是 (1) 接触带厚度及接触带内土变形的非均匀性; (2) 土与结构接触界面能量反射与透射的数值模型与方法; (3) 高精度和高效率的人工边界条件; (4) 界面接触、滑移、开裂与闭合等几何非线性; (5) 近场非线性复杂波动问题数值模拟高效算法。

8.5 数值分析方法

目前数值分析的主要方法: (1) 连续与非连续统一分析法; (2) 多相耦合介质分析法; (3) 宏观-微观-微观耦合模型分析法。

8.6 物理模型试验与技术

物理模型的试验技术有: (1) 动力模型相似理论及设计; (2) 物理试验与数值试验耦合的动力模拟技术; (3) 破坏性模型试验技术; (4) 现场检测技术与信息数据采集。

致谢: 本文是国家自然科学基金委建筑、环境与土木工程学科发展战略研究报告中的土动力学与岩土地震工程专题报告。特别感谢清华大学张建民教授, 浙江大学陈云敏教授, 河海大学刘汉龙教授、高玉峰教授, 同济大学黄茂松教授、蒋明镜教授, 北京航空航天大学姚仰平教授, 大连理工大学孔宪京教授, 兰州地震研究所王兰民研究员, 南京水利科学研究院陈生水教授, 北京交通大学赵成刚教授, 南京工业大学陈国兴教授, 中国地震局工程力学研究所袁晓铭研究员对报告形成提供的建议与帮助。

参 考 文 献

- [1] HUANG W X. Investigation on stability of saturated sand foundations and slopes against liquefaction[C]//Proceedings of the Fifth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris: [s. n.], 1961: 629—631.
- [2] 汪闻韶. 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究[J]. 水利学报, 1962, (2): 37—49.
WANG Wen-shao. Study on pore water pressure of saturated sand during cyclic loading[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1962, (2): 37—49.
- [3] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [4] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1966, 92(6): 105—124.
- [5] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquake[J]. *Geotechnique*, 1993, 43(3): 351—415.
- [6] 谢定义, 张建民. 往返荷载下饱和砂土强度变形瞬态

- 变化的机理[J]. 土木工程学报, 1987, 20(3): 57—70.
- XIE Ding-yi, ZHANG Jian-min. Developing mechanism on transient strength-deformation of saturated sand under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1987, 20(3): 57—70.
- [7] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [8] 张建民. 饱和砂土瞬态动力学理论及其应用研究[博士学位论文 D]. 西安: 陕西机械学院, 1991.
- [9] ZHANG J M, SHAMATO Y, TOKIMATSU K. Seismic earth pressure theory for retaining walls under any lateral displacement[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(2): 143—163.
- [10] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 12—17.
- ZHANG Jian-min. Reversible and irreversible dilatancy of sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 12—17.
- [11] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 158—161.
- LI Guan-xin, GUO Rui-ping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible dilatation of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 158—161.
- [12] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [13] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of clay in states wetter than critical[J]. **Geotechnique**, 1963, 13(3): 211—240.
- [14] SCHOFIELD A N, WROTH C P. Critical state soil mechanics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [15] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [16] LIU M D, CARTER J P. A structured cam clay model[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(6): 1313—1332.
- [17] ROUAINIA M, WOOD D M. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(2): 153—164.
- [18] ASAKA A, MASAKI N, TOSHIHIRO N. Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(2): 99—110.
- [19] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21—28.
- SHEN Zhu-jiang. An Elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 21—28.
- [20] JIANG M J, SHEN Z J. A structural suction model for structured clays[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Soft Soil Engineering. Nanjing: [s. n.], 1996: 221—240.
- [21] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35—41.
- XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zheng-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 35—41.
- [22] 孙德安, 姚仰平, 殷宗泽. 初始应力各向异性土的弹塑性模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(9): 222—226.
- SUN De-an, YAO Yang-ping, YIN Zong-ze. An elasto plastic model for soil with initially stress induced anisotropy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(9): 222—226.
- [23] SUN D A, MATSUOKA H, YAO Y P, et al. An anisotropic hardening elastoplastic model for clays and sands and its application to FE analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31: 37—46.
- [24] 姚仰平, 侯伟, 周安楠. 基于 Hvorslev 面的超固结土模型[J]. 中国科学(E 辑), 2007, 37(11): 1417—1429.
- YAO Yang-ping, HOU Wei, ZHOU An-nan. Constitutive model for overconsolidated clay[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2007, 37(11): 1417—1429.
- [25] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: Three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. **Geotechnique**, 2009, 59(5): 451—469.
- [26] MROZ Z, NORRIS V A, ZIENKIEWICZ O C. An anisotropic critical state model for soils subjected to cyclic loading[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(4): 451—470.
- [27] DAFALIAS Y F. An anisotropic critical state soil plasticity model[J]. **Mechanics Research Communications**, 1986, 13(6): 341—347.
- [28] ZIENKIEWICZ O C, LEUNG K H, PASTOR M. Simple model for transient soil loading in earthquake analysis[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1985, 9: 453—476.
- [29] TABBAA A A, WOOD D M. An experimentally based “bubble” model for clay[C]//The 3rd International Symposium on Numerical Models in Geomechanics. Pande: Elsevier Science Publishers Ltd, 1989: 91—99.
- [30] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891—895.
- HUANG Mao-song, LI Jian-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 891—895.
- [31] 刘汉龙, 丰土根, 高玉峰, 等. 砂土多机构界面塑性模型及其试验验证[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 696—700.
- LIU Hao-long, FENG Tu-gen, GAO Yu-feng, et al. Multiple mechanism boundary surface plasticity model of saturated sand and its test validation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 696—700.
- [32] 孔亮, 惠治鑫, 王燕昌. 旋转硬化与统一硬化参量在修正剑桥模型中的应用[J]. 宁夏大学学报, 2008, 29(2):

- 139—143.
- KONG Ling, HUI Zhi-xin, WANG Yan-chang. Application of rotational hardening and unified hardening parameter in modified cambridge model[J]. **Journal of Ningxia University**, 2008, 29(2): 139—143.
- [33] 路德春, 姚仰平. 砂土的应力路径本构模型[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 451—459.
- LU De-chun, YAO Yao-ping. Constitutive model of sand considering complex stress paths[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2005, 37(4): 451—459.
- [34] 路德春. 基于广义非线性强度理论的土的应力路径本构模型[博士学位论文 D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [35] 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 De-chun, YAO Yang-ping, ZHANG Zai-ming, et al. Constitutive model for soils under the condition of cyclic loading[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(8): 907—915.
- [36] HASHIGUCHI K. Subloading surface model in unconventional plasticity[J]. **International Journal of Plasticity**, 1989, 25(8): 917—945.
- [37] ZHANG F, YE B, NODA T. Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy[J]. **Soils and Foundations**, 2007, 47(4): 635—648.
- [38] YAO Y P, SUN D A. Application of Lade's criterion to Cam-clay model[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2000, 126(1): 112—119.
- [39] 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 Xiao-min, CAO Zhen-zhong, 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.
- [40] POULOS S J. Liquefaction evaluation procedure[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1985, 111(6): 772—792.
- [41] ZHOU Y G, CHEN Y M. Laboratory investigation on assessing liquefaction resistance of sandy soils by shear wave velocity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2007, 133(8): 959—972.
- [42] ASHFORD S A, ROLLINS K M, LANE J D. Blast-induced liquefaction for full-scale foundation testing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2004, 130(8): 798—806.
- [43] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239—1249.
- HUANG Run-qiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by wenchuan 8.0 earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1239—1249.
- [44] 陈生水, 霍家平, 章为民. 5.12 汶川地震对紫平铺混凝土面板坝的影响即原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795—101.
- CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of "5.12" wenchuan earthquake on zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 795—101.
- [45] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(2): 139—160.
- [46] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1978, 104(7): 849—867.
- [47] 沈建, 陈新民, 魏平. 土质边坡地震稳定性研究进展[J]. 水运工程, 2009, 428(6): 40—46.
- SHEN Jian, CHEN Xin-min, WEI Ping. Review of study on seismic stability of soil slopes[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2009, 428(6): 40—46.
- [48] BRAY J D, RATHJE E M. Earthquake-induced displacements of soli-waste landfills[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(3): 242—253.
- [49] BRAY J D, RATHJE E M, AUGELLO A J, et al. Simplified seismic design procedure for geosynthetic-lined, solid waste landfills[J]. **Geosynthetics International**, 1998, 5(1-2): 203—235.
- [50] BRAY J D, TRAVASAROU T. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(4): 381—392.
- [51] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173—180.
- ZHENG Yin-ren, YE Hai-ling, HUANG Run-qiu, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2010, 30(2): 173—180.
- [52] 高玉峰, 范昭平. 多点、多向地震作用下非圆弧滑面边坡稳定分析通用条分法[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3816—3822.
- GAO Yu-feng, FAN Zhao-ping. Generalized slice method for stability analysis of slope with non-circular slide face under multipoint and multidirection seismic ground motions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3816—3822.
- [53] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553—557.
- LIU Han-long, FEI Kang, GAO Yu-feng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 553—557.
- [54] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社,

- 2009.
- [55] KAUSEL E. Early history of soil-structure interaction[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2010, 30: 822—832.
- [56] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [57] 张楚汉, 金峰, 侯艳丽, 等. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析[M]. 北京: 清华大学出版社.
- [58] DESAI C S. Evaluation of liquefaction using disturbed state and energy approaches[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2000, 126(7): 618—631.
- [59] HALL W S, OLIVETO G. Boundary element methods for soil-structure interaction[M]. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [60] KAUSEL E. Thin-layer method: Formulation in the time domain[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1994, 37: 927—941.
- [61] GIVOLI D. Recent advances in the DtN FE method[J]. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 1999, 6: 71—116.
- [62] GIVOLI D. Exact representations on artificial interfaces and applications in mechanics[J]. **Applied Mechanics Reviews**, 1999, 52: 333—349.
- [63] ENGQUIST B, MAJDA A. Radiation boundary conditions for acoustic and elastic wave calculations[J]. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, 1979, 32: 313—357.
- [64] BAYLISS A, TURKEL E. Radiation boundary conditions for wave-like equations[J]. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, 1980, 33: 707—725.
- [65] HIGDON R L. Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation[J]. **Mathematics of Computation**, 1987, 49: 65—90.
- [66] 廖振鹏. 工程波动理论导论(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [67] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, ASCE, 1969, 95: 869—877.
- [68] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, 1994, 120: 25—42.
- [69] 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—64.
LIU Jing-bo, LÜ Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1998, 31(3): 55—64.
- [70] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域黏弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46—51.
LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(6): 46—51.
- [71] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学(E辑), 2005, 35(9): 966—980.
LIU Jing-bo, LI Bin. A unified viscous-spring artificial boundary for 3D static and dynamic applications[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2005, 35(9): 966—980.
- [72] 杜修力, 赵密, 王进廷. 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 Xiu-li, ZHAO Mi, WANG Jin-ting. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2006, 38(1): 49—56.
- [73] SONG C, WOLF J P. The scaled boundary finite element method alias consistent infinitesimal finite element cell method for elastodynamics[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1997, 147: 329—355.
- [74] WOLF J P. The scaled boundary finite element method[M]. [S.l.]: Wiley, 2003.
- [75] ASTLEY R J. Infinite elements for wave problems: a review of current formulations and an assessment of accuracy[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000, 49: 951—976.
- [76] ZHAO C. Dynamic and Transient infinite elements: theory and geophysical[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [77] BÉRENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. **Journal of Computational Physics**, 1994, 114: 185—200.
- [78] GIVOLI D. High-order local non-reflecting boundary conditions: A review[J]. **Wave Motion**, 2004, 39: 319—326.
- [79] GIVOLI D, HAGSTROM T, PATLASHENKO I. Finite element formulation with high-order absorbing boundary conditions for time-dependent waves[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2006, 195: 3666—3690.
- [80] HAGSTROM T, MAR-Or A, GIVOLI D. High-order local absorbing conditions for the wave equation: Extensions and improvements[J]. **Journal of Computational Physics**, 2008, 227: 3322—3357.
- [81] DU Xiu-li, ZHAO Mi. Stability and identification for rational approximation of frequency response function of unbounded soil[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2010, 39(2): 165—186.
- [82] DU Xiu-li, ZHAO Mi. A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2010, 30(10): 937—946.
- [83] 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.
- [84] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modeling of deep penetration in granular soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(4): 335—36.