

DOI: 10.11779/CJGE201511026

黄土动力学研究进展与前缘科学问题

田文通¹, 孙军杰^{1, 2, 3}, 王兰民^{1, 2, 3}, 徐舜华^{1, 2, 3}, 刘琨^{1, 2, 3}, 孙昱¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局甘肃省黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过分析黄土动力学的研究进展, 概括已有研究的切入点和存在的问题, 结合黄土动力学向定量化和理论化发展的需求, 提出关键的前缘科学问题。分析结果表明, 饱和黄土液化与非饱和黄土震陷的客观存在性和危害性不容质疑; 现有的相关工作, 基本以动三轴试验为基础, 研究切入点集中于土体物性参量、微观结构特征和动荷载类型等因素的影响分析之上, 在引入黄土动力问题的物理过程和力学机制方面普遍欠缺, 定量乃至理论化仍嫌偏弱。未来的研究中, 定量描述动荷载的加载效应、基于固水气微观作用的黄土动力响应机制、黄土固相动力响应与其宏观强度的定量关系、地震与降雨对黄土体动力响应的耦合影响、黄土体动力灾害风险的概率性评价等, 应是值得关注的科学问题。

关键词: 黄土动力学; 震陷; 液化; 地震滑坡

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2119-09

作者简介: 田文通 (1977-), 男, 甘肃清水人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事岩土工程和地震工程方面的研究工作。E-mail: tianwt@gssb.gov.cn。

Research progress and frontier scientific problems in loess dynamics

TIAN Wen-tong¹, SUN Jun-jie^{1, 2, 3}, WANG Lan-min^{1, 2, 3}, XU Shun-hua^{1, 2, 3}, LIU Kun^{1, 2, 3}, SUN Yu¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research progress of loess dynamics, the train of their thoughts and the deficiency of the existing results are summarized. Based on the relative requirements of quantification and theorization of loess dynamics, the frontier scientific problems in researches on loess dynamics in the future are put forward. The results show that the reality of saturated-loess liquefaction and unsaturated-loess seismic subsidence is not doubtful. For the existing researches, the dynamic triaxial test in laboratory is the main approach to investigate loess dynamics. Based on the laboratory data, more attention is paid to influences of three aspects, i.e., physical properties of loess, microstructural characteristics of soil, and types of dynamic loadings. Almost all researches fail to consider the physical process and mechanical mechanism of dynamic behaviors of loess, and thus both the quantification and the theorization are relatively weak. According to the review and analysis, it is believed that the future frontier scientific problems in loess dynamics should include five aspects: quantitative description of loading effect caused by ground motion on loess, dynamic responding mechanism of loess based on micro interaction of three phases of solid, water and air, quantitative relationship between dynamic response of solid-phase and macro structure strength of loess, coupling influence of earthquake and rainfall on dynamic responding of loess mass, and probability-based assessment of dynamic hazard risk of loess mass.

Key words: loess dynamics; seismic subsidence; liquefaction; earthquake-induced landslide

0 引 言

黄土在第四纪的堆积过程中, 受限于特殊的地质营力、生成环境和物质来源等因素, 形成了孔隙发育、胶结薄弱的特殊结构类型。涉及黄土工程力学性质的研究时, 它被归结为一类特殊土。在地震等外荷载作

用下, 黄土表现出极强的动力易损性, 这已为地震现

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项 (2013IESLZ01); 国家自然科学基金项目 (51209186); 甘肃省科技计划项目 (145RJZA152)

收稿日期: 2014-09-08

场考察、室内试验等结果所例证^[1]。与黄土有关的地震灾害,主要表现形式可概括为三类:震陷、液化和地震滑坡。黄土地震灾害的统计数据显示,与之相关的人口伤亡达百万以上^[1]。

20世纪70年代,黄土动力学研究引起关注,至今已取得了诸多进展。通过历史地震考证、地震现场考察等手段获取了宏观黄土地震灾害现象资料,进而基于室内和现场爆破试验研究现象产生的机理,并衍生出黄土震陷、液化、地震滑坡灾害的预测预防方法及相应结果。期间发表的文献,也推进黄土动力学向理论化、定量化方向发展的进程。

黄土高原地区是中华文明的发源地,也是未来国家社会经济建设的战略高地。随着西部大开发战略和“一带一路”新兴战略的不断推进以及城镇化建设的深入,黄土地区的重大工程,无论在数量还是在规模上都有变化。黄土高原城镇化发展过程中,既有城市、新建城市的用地以削山造地的方式获取,使城市坐落于巨厚填层之上或毗邻于高边坡之侧^[2]。黄土高原是世界范围内黄土分布最广、层厚最大、地形地貌最为复杂的区域,也是中国强震多发区^[1]。相较以往,黄土动力学问题,已成为决定应用基础研究领域着眼于服务西部黄土地区可持续发展成败的必须解决的关键课题之一。

本文基于黄土动力学在岩土地震工程领域的重要性,通过评述已有进展,分析以往研究的切入点及其存在的不足,结合未来黄土动力学研究对问题关涉条件复杂性的综合考虑及其简约分析探究的需求,提出黄土动力学研究的前缘性科学问题。笔者相信,此项工作对推进黄土动力学乃至岩土地震工程领域的相关研究颇有裨益。

1 黄土动力学研究及其进展

1.1 黄土震陷、液化、地震滑坡现象与例证

黄土震陷现象,是黄土动力变形的典型宏观表现形式,是对黄土场地竖向变形的描述。20世纪80年代,张振中等^[3-4]搜集分析1556年陕西华县8级大震、1718年通渭7.5级地震史料发现,极震区地裂缝遍地,部分地面下沉超过1m的“平地裂陷”现象。前苏联将此震害统称为残余变形,美国、日本等国家的黄土或弱胶结土层中也发现了类似的震害^[1]。王兰民等^[1]通过开展室内试验进一步验证黄土震陷可能性,并提出黄土震陷的概念。起初的黄土震陷概念,是基于历史地震考证和室内试验的结果,缺少现场震例支持,客观性被学界质疑。有学者指出,1995年永登地震现场考察时发现的山梁裂缝,因其地貌原因也只能是疑

似例证。王兰民等^[5]在甘肃省临洮县的黄土场地上实施爆破模拟地震动原位观测试验,充分证实黄土震陷现象在实际场地中的存在性^[6]。

饱和黄土液化研究始于20世纪80年代初期。1982年,Prakash等^[7]通过对美国中部黄土状土的振动三轴试验,首次涉及黄土液化问题。Ishihara等^[8]考察前苏联塔吉克斯坦境内5.5级地震引起的黄土滑移现象时,认为该滑坡是黄土在灌溉后由其液化所引起,并进行机理分析。白铭学等^[9]考察1920年宁夏海原8.5级地震石碑黄土塬缓坡滑移遗迹,提出黄土液化是其主因;Seed^[10]也将该事件推断为黄土因结构破坏引起土体崩溃所致的“液化”或“气化”现象。由于现场条件的复杂性,以上例证仅基于室内试验、推断和历史考证得出,饱和黄土液化现象与早期的震陷现象一样,缺乏震例支持。2012年王兰民等开展的大尺寸天然黄土液化的振动台试验,证明黄土液化时的超孔隙水压力的增长与砂土在趋势性上具有一致性,二者之间的最大差异应归结于构成土体的粒径尺度与天然结构性之上。2013年,甘肃岷县—漳县6.6级地震中,永光村泥流状黄土滑坡则是黄土液化及其影响边坡稳定性的典型例证^[11]。

地震和降雨是诱发滑坡的两大自然因素。对于黄土滑坡而言,天然诱因也不例外。虽然先期缺乏确凿的震例来验证,近年来有关地震与降雨耦合作用对边坡稳定性的影响也被关注^[12]。2013年发生的甘肃岷县—漳县6.6级地震,出现地震与降雨耦合诱发滑坡的实际震例^[11]。

1.2 黄土动力学研究的进展评述

(1) 黄土震陷研究进展

由于天然黄土多处非饱和状态,黄土震陷研究是黄土动力学领域中最受关注的工作。从研究关注点的脉络上看,黄土震陷研究有3条主线:物性参量对震陷的影响分析;黄土微结构特征与震陷性的关系;基于物理过程与力学机制的定量化研究。

早期的黄土震陷研究,主要集中于物性参量对震陷的影响分析之上。这些工作以室内动三轴试验为基础,获取若干动残余应变数据,通过独立一组黄土震陷的应力应变曲线及其节选数据,统计分析土体物性参量、循环动应力强度及加载次数对震陷的定性或定量影响。张振中等^[3]、李启鹏等^[13]、何光等^[14]、王兰民等^[15]、徐舜华等^[16]开展过类似的研究工作,给出黄土震陷与含水率、孔隙比、干密度、塑限、初始动应力、振次等参量的关系。陈永明等^[17]依据土体密度和波速的关系,厘定土层剪切波速与震陷的联系。王兰民等^[18]以既有研究为基础,补充大量的原状黄土震陷

试验, 统计分析并建立综合考虑黄土物性参数、固结应力、地震动应力和振次等因素的西北黄土动残余应变的经验公式, 基于分层总和法思路提出地震作用下黄土层震陷量的估算方法。为明晰真实地震波时程的频率、峰值、持时与震陷的关系, Ishihara等^[19]、王兰民等^[20]研究地震波输入动三轴仪的试验方法, 确定随机地震荷载条件下土体的动强度。王兰民等^[1]、王峻等^[21]、邓龙胜等^[22]开展随机地震荷载下黄土震陷的基本特征, 并对比分析相关结果与等幅正弦荷载条件下震陷特性的差异。

借助微观结构分析手段, 构成黄土震陷研究的另一条主线。结构性对土的工程力学性质的影响, 被认为是 21 世纪土力学的核心问题^[23]。黄土的结构性是它区别于其它土类的重要标志, 其特点表现为天然赋存状态下骨架联接的可稳性强, 而在外荷载作用下颗粒联接弱化时具有可变性。湿陷性黄土研究方面, 根据黄土结构性与湿陷性关系的主次地位, 高国瑞^[24]将黄土划分为 12 种显微结构。考虑到黄土湿陷和震陷在结构变化方面的相似性, 王兰民等^[1]研究认为这种结构分类基本能反应黄土的震陷性。近年来, 随着电子显微技术的发展, 应用于土体结构量化研究日渐增多。王兰民等^[25]基于数字扫描电镜获得土体微观几何量化数据, 建立黄土震陷系数计算模型, 并认为黄土震陷是由于架空孔隙不断破坏的多个突变过程的宏观表现。石玉成等^[26]通过微结构电镜扫描结果, 应用统计细观损伤力学和结构力学的理论建立黄土震陷的结构损伤模型。谷天峰等^[27]、裘国荣等^[28]、邓津等^[29]基于震陷前后的孔隙和颗粒排列几何性状的对比, 研究孔隙的有效直径、孔径分维、连通率和颗粒定向度等微结构参数变化与震陷系数的相关性。

近年来, 基于物理过程与力学机制对黄土震陷开展量化的研究, 构成第三条主线。此方面研究的特点, 是以震陷的物理力学机制为切入点, 引入土力学强度和变形理论, 结合非饱和土相关理论开展震陷研究。张冬丽等^[30]引入有限元方法定量研究黄土地基地震沉陷特性与场地条件、土动力特性、基础形式等因素的相关关系。孙军杰等^[31-32]通过分析黄土动残余应变物理力学机制, 引入广义吸力概念, 将影响黄土动残余应变的关键参量归纳为表征土体强度特征的黏聚力与内摩擦角, 表征土体沉降特征和能量输入特征的孔隙比及外部荷载特性, 建立基于物理力学机制的震陷估算模型。

(2) 黄土液化研究进展

黄土液化的研究主要围绕两个层面展开。第一个层面是通过考证历史地震灾害资料和围绕现今震例资

料对液化现象的研究。国内学者白铭学等^[9]、美国土力学家Seed等^[10]通过考察1920年宁夏8.5级地震石碑黄土塬缓坡遗迹, 认为是由黄土液化或气化所引起; Ishihara等^[8]研究1989年前苏联塔吉克境内5.5级地震黄土地震液化引起的流滑现象的内在机理。

第二个层面基于室内和爆破模拟地震动现场试验对黄土液化而进行, 是液化机理和量化研究主要途径。国外学者Prakash等^[7]基于美国中部黄土状土的振动三轴试验, 最早关涉黄土液化问题, 并给出饱和黄土起始液化轴向应变标准和孔隙水压力标准; Puri^[33]、Prakash等^[34]以循环荷载动三轴研究美国中、西部原状和重塑黄土液化与塑性指数、孔压、初始孔隙比、振次等相关关系; 国内学者王兰民等^[35-37]、石兆吉等^[38]、杨振茂等^[39]、余跃心等^[40]基于动三轴试验和电镜扫描试验等研究饱和黄土液化的机理, 影响液化的土性条件、初始应力条件和荷载形式等因素以及应变和孔压标准和增长规律, 对比分析饱和黄土与砂土液化的差异性。王兰民等^[41]采用毫秒级微差爆破方式对人工饱和黄土场地进行野外液化试验, 并结合室内动三轴试验和数值计算研究黄土液化的影响因素和孔压及变形的增长模式。

(3) 黄土地震滑坡研究

黄土地震滑坡的研究有其特殊的复杂性, 不仅需要带入黄土物性参量以及地震动的不确定性, 同时必须考虑场地应力、边界条件的影响。相比黄土的震陷、液化等涉及黄土动力学基本问题的研究, 有关黄土地震滑坡的文献相对要少。由于仅从岩土地震滑坡引入方法借鉴, 对黄土地震滑坡开展研究获得相应创新性进展极具难度。整体来看, 黄土地震滑坡的研究仍处起步阶段, 尤其是如何将黄土的特殊性从地震滑坡当中予以体现, 应是未来研究的关注点。

张振中^[42]对1920年海原地震和1718年通渭地震滑坡密集区的考察研究, 归纳地震诱发滑坡的震陷崩塌失稳机理、液化失稳机理、地震力与重力叠加作用下的剪切, 并将黄土地震滑坡类型划分为震陷型滑坡、液化型滑坡和地震力诱发滑坡。邓龙胜等^[43]针对此次地震考虑黄土特殊性的结构特征及动力特性, 将滑坡破坏划分为振动软化-剪切破坏、振动液化-流动破坏、振动崩塌破坏和蠕变破坏。Sassa^[44-45]基于现场滑坡模拟试验以及室内试验, 提出结构破坏—孔压上升—液化的土质滑坡发生机理。王兰民等^[46]提出随机地震荷载作用下黄土地震滑坡的预测方法。王家鼎等^[47]提出一种强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理, 并从力学机制方面加以探讨。

与黄土地震滑坡相关的已有研究中, 另有部分涉

及黄土地震滑坡的文献, 由于并未以揭示黄土动力学特性为基础, 仅针对黄土边坡的几何形态及其影响作用进行分析, 考虑篇幅文内未加列入。

2 黄土动力学已有研究存在的问题

作为典型的非饱和土, 吸力特性决定黄土的渗透特性、应力特性和强度特性、变形特性和固结特性^[48]。20世纪末又一次活跃的非饱和土力学理论不得不涉及黄土特殊的力学性质, 而长期以来以总应力分析为基础的黄土力学特性的研究, 也不能不从当代非饱和土力学理论中寻求自身发展的新途径^[49]。把黄土力学研究作为非饱和土力学特殊的一支相互借鉴, 彼此推动, 已经成为一个适应形势, 顺理成章的趋势^[49]。

综合以上黄土动力学的已有进展不难发现, 基于动三轴试验的黄土震陷研究, 以分析黄土物性参量或动荷载特性与震陷的关系为主。方法上, 已有研究偏于简单, 领域自主创新性偏弱; 深入程度上, 缺乏基于黄土动力响应的物理过程与力学机制的定量化、理论化分析。如此问题, 在黄土液化、地震滑坡方面同样有所体现。这可能与黄土动力学的关注时长有关, 也与土动力学问题的复杂性不无关联。总的来看, 黄土动力学研究, 如何既能引入土力学与岩土工程领域的已有成果、又能突出自身特色而形成独特的理论体系, 是目前欠缺也是未来发展的方向。

基于微观结构对黄土震陷的研究, 主要借助于震陷前后孔隙变化和固相颗粒排列几何特征来揭示黄土震陷的机理。其结果不能有效反映震陷过程中土体结构变化、固体颗粒间的胶结弱化、土体内应力传递等相关土力学的基本范畴。最为关键的一点, 如何建立微观力学至宏观力学的过渡架构模型, 目前尚少关注。为更好模拟土体的真实变形特性, 寻求能代表结构性的关键指标, 建立关联土体结构变化与应力应变的定量关系应是一种可能的新途径^[50]。

已有的工作中, 少量基于黄土动力学物理过程与力学机制的震陷研究, 可能是目前偏于定性化的黄土震陷研究逐步趋至理论层面的迹象。相关研究结果对黄土动力变形的关键参量和相互关联作用做了分析, 对建立宏观应力应变本构关系具有意义, 但这些研究尚处起步阶段, 理论化和定量化仍嫌薄弱。

黄土液化的既有研究中, 主要围绕震例考察和室内动三轴试验而展开, 由此建立一系列黄土液化与土性条件、初始应力条件、荷载形式等因素相关关系, 并提出应变和孔压标准及增长规律。考虑到黄土液化试验的土体边界条件, 动三轴试验的尺寸效应使其对边界条件考虑有限, 相应试验研究结果如何用于真实场地成为难点

(黄土震陷问题同样如此^[51])。随着岩土测试技术的不断发展, 大型振动台试验已广为普及, 开展较大尺寸试样的液化试验成为可能。由于黄土的特殊性带来的制备原状试样的复杂性, 此方面的研究尚少。如何解决大尺寸原状黄土的制备问题, 是将来黄土液化研究必须克服的难点。上文对黄土液化研究进展的评述, 提及其研究层面问题。不可否认, 黄土液化的第一层面研究, 对发现可能存在的新现象是补充。不过, 就目前来看, 黄土液化的研究应当从第一层面中走出, 将关注点放在第二层面的研究之上。

黄土地震滑坡的工作中, 已有针对滑坡破坏类型划分及其作用机制的研究。不过, 土体结构的特殊性对黄土地震滑坡的特别影响, 仍不够深入, 虽然目前已有部分黄土地震滑坡的研究开始考虑黄土的特殊结构性。但如何厘定结构性相对地震动加载的尺寸效应, 关注较少。黄土具备水敏性与动力易损性, 这可能为水的作用和地震作用产生耦合效应提供条件。地震与降雨耦合诱发黄土滑坡失稳的研究, 应是未来的关注方向。

黄土震陷、液化和地震滑坡等三类现象, 是土体特殊性、动力加载复杂性以及场地条件多样性的综合结果。对于这一复杂问题, 如何从定量化乃至理论化的层面加以理解, 由问题关涉条件的复杂性加以综合考虑并应用逻辑或经验对求解过程给予简约分析, 可能是根本的达成途径。

3 黄土动力学研究的前缘科学问题

中国经济社会的发展战略格局, 对黄土动力学研究的科技支撑作用, 提出了更高要求。面对现实需求, 应关注厘清黄土动力学涉及问题的实质所在。笔者以黄土动力学研究的根本对象为基础, 综合理论厘定黄土体动力响应基本规律的需求, 将黄土动力学研究在未来可能需要关注的前缘科学问题总结如下。

3.1 定量描述动荷载的加载效应

黄土动力学问题的一个关注点, 即是动荷载的加载效应问题。因其简便性, Seed提出的等效循环剪应力被土动力学研究广为采用; 也因考虑动荷载的非完备性, 随机荷载作用的研究大量出现。不过, 在复杂问题的定量化、理论化求解过程中, 随机荷载的复杂性一直是难以逾越的问题。

基于动荷载的加载作用方式及其特点, 从能量角度入手对其加载效应进行整体性描述, 可能是消减动荷载复杂性的有效途径。有关于此的研究尝试已有一些, Houlsby^[52]、Jommi^[53]、Vaunat等^[54]对饱和与非饱和土变形的表达形式进行讨论, 提出变形功表达有

效应力的原则和具体方式; Zhao等^[55]基于连续介质理论推演得到非饱和土变形功的表达式, 提出非饱和土广义有效应力原理。

虽然难度很大, 不过基于能量原理描述动荷载强度、频谱和持时的综合特征, 是一项十分必要的研究尝试^[31]。加载效应可依据能量的传递和耗散原理, 建立动荷载作用于土体的加载效应理论评价模型, 可解决地震动时程的随机性问题, 从而适度简约土体动力响应理论研究工作, 有助黄土动力条件下的应力-应变本构关系的建立。

3.2 基于固水气微观作用的黄土动力响应机制

固水气三相介质的赋存特性是刻画天然黄土力学性态的关键要素。介质吸力在试验操作中的量测难度和在理论上被赋予的特殊重要性, 使非饱和土理论建立在较为脆弱的基础上^[48]。沈珠江^[56]针对基质吸力的问题, 提出广义吸力概念。据此, 可以考虑将与土体固相介质颗粒关联密切能够产生吸力的水相部分归入广义固相介质范畴, 其余水、气两相部分在非饱和土力学机制分析中的作用将得到极大简化, 使基于固水气微观作用研究黄土动力学问题成为可能。

固水气三相介质赋存特性对黄土动力响应的控制作用和力学机制尚不明确, 尤其是对非饱和与饱和状态下动力响应力学机制的统一理解鲜有提及。考虑土体固相介质直接响应外部荷载应力传递, 以水气两相的被动受荷以及由固相结构约束下的挤压效应累积为前提, 结合加载效应的理论描述, 建立水相或水气两相势能累积的数理关系, 是明晰土体动力变形过程中应力传递及其能量累积作用的物理基础, 有助黄土震陷、液化、地震滑坡现象的深入理解。

3.3 黄土固相动力响应与其宏观强度的定量关系

天然黄土类属散粒体, 生成条件使固体颗粒形成特有的骨架结构, 水气两相则填充于其间孔隙。黄土震陷、液化和地震滑坡等现象, 皆是动力响应的直观表现形式。黄土固相介质是其强度的根本来源^[32], 基于固相介质赋存特性的动力响应属于关键问题。从理论完备性上讲, 水气两相的作用不容忽视, 但如何考虑是其重点方向。

从固水气三相赋存特性的角度而言, 无疑固相介质的特征决定着水气两相的赋存特征^[31]。这一点, 对于黄土的动力响应过程, 也应具有适用性。因此, 强调黄土动力响应过程中, 固相介质的核心关注地位尤为必要, 而其与宏观强度的定量关系, 也将是明晰黄土动力响应问题的关键所在。

3.4 地震与降雨对黄土体动力响应的耦合影响

天然场地条件下的黄土, 多处于非饱和状态。黄土

具有的水敏性和动力易损性, 使地震与降雨之间的可能耦合作用也应予以关注。这一点, 从目前黄土高原地区城镇化建设发展的现实需求^[2], 以及近年来的地震灾害现场考察结果^[11]来看, 都已成为可能。

在此前缘科学问题之下, 黄土动力响应过程中可能涉及的地震与降雨耦合作用的模式, 必然是根本问题^[9]。降雨作用的影响, 可以简单考虑为对于黄土内部含水率的改变, 但如何能够建立其与降雨强度之间的定量关联, 需要强化黄土渗透性的研究工作, 尤其是对介于非饱和与饱和状态之间的黄土渗透性的理解。同时, 由于牵扯多场耦合作用, 数值分析方法的有效引入也是需要关注的方向。

3.5 黄土体动力灾害风险的概率性评价

虽然具有极大的现实需求, 但是岩土动力灾害的风险评价, 一直是相当困难的问题。这其中涉及诸多复杂条件的厘定与控制, 如土体物性参量在实际场地当中分布的复杂性、动荷载效应的复杂性以及场地应力、边界条件的复杂性等。由于问题包含过多的仍待解决的问题, 问题本身属于难以涉及的工作。

从研究的带动性上来讲, 对于任何复杂待解的问题, 即使内部存在很多仍未解决的问题, 但也可尝试从宏观上给出解决这一问题的基本方法^[51]。如此尝试, 对推动黄土动力学领域的研究, 是有益的。如何使问题的解决不是建立在空泛的探讨之上, 做好理论与经验之间平衡可能是一个切入点, 即要在综合考虑黄土动力学问题关涉条件复杂性的同时, 必须对实现定量化或理论化的简约分析加以关注。

4 结论与讨论

(1) 黄土动力学研究关注的三类现象当中, 涉及震陷的文献最多, 液化次之, 地震滑坡最少。作为土体动力特性的基本问题, 黄土的震陷和液化对其地震滑坡具有控制作用, 这在相关研究中已有体现。

(2) 黄土震陷、液化的研究方法, 偏于简单, 定量化、理论化程度偏弱。这是目前黄土动力学领域研究的最大不足, 也是未来需要给予加强的关键方向, 尤其是基于黄土动力响应物理过程与力学机制的定量化乃至理论化研究方面。

(3) 黄土地震滑坡方面, 如何引入黄土结构性的特殊影响, 是解决此项研究不易得出创新性结果的优先关注问题。考虑黄土具有的水敏性和动力易损性, 合理引入地震与降雨耦合作用对黄土边坡稳定性的影响, 也是适应目前黄土高原地区城镇化建设及国家经济社会发展战略布局现实需求的特色方向。

(4) 未来黄土动力学领域可能应予以关注的前缘科学问题包括: 定量描述动荷载的加载效应; 基于固水气微观作用的黄土动力响应机制; 黄土固相动力响应与其宏观强度的定量关系; 地震与降雨对黄土体动力响应的耦合影响; 黄土体动力灾害风险的概率性评价。

参考文献:

- [1] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 1 - 181. (WANG Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu, et al. Loess dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003: 1 - 181. (in Chinese))
- [2] 王兰民, 孙军杰. 黄土高原城镇建设中的地震安全问题[J]. 地震工程与工程振动, 2014, **34**(4): 115 - 122. (WANG Lan-min, SUN Jun-jie. Seismic safety issues in the process of urban development in Loess Plateau[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, **34**(4): 115 - 122. (in Chinese))
- [3] 张振中, 段汝文. 黄土震陷研究与震害[J]. 西北地震学报, 1987, **9**(增刊): 63 - 69. (ZHANG Zhen-zhong, DUAN Ru-wen. Study on seismic subsidence and seismic hazards of loess[J]. Northwest Seismological Journal, 1987, **9**(S0): 63 - 69. (in Chinese))
- [4] 张振中, 张冬丽, 刘红玫. 黄土震陷灾害典型震例的综合研究[J]. 西北地震学报, 2005, **27**(1): 36 - 41. (ZHANG Zhen-zhong, ZHANG Dong-li, LIU Hong-mei. Comprehensive study on seismic subsidence of loess under earthquake[J]. Northwest Seismological Journal, 2005, **27**(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [5] 王兰民, 孙军杰, 徐舜华, 等. 爆破模拟地震动条件下黄土场地震陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 913 - 921. (WANG Lan-min, SUN Jun-jie, XU Shun-hua, et al. Characteristics of seismic subsidence of loess site induced by blasting ground motion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 913 - 921. (in Chinese))
- [6] 汪国烈. 对湿陷性黄土场地地震作用工程影响的几点看法[J]. 西北地震学报, 2007, **29**(1): 96 - 98. (WANG Guo-lie. Some opinions on effect of engineering under earthquake action in site of collapsible loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, **29**(1): 96 - 98. (in Chinese))
- [7] PRAKASH S, PURI V K. Liquefaction of loessial soils[C]// Anon. Proc. The Third International Conference on Seismic Microzonation, Seattle, Wash. (Vol. II). [s. l.]: [s. n.], 1982: 1101 - 1107.
- [8] ISHIHARA K, OKUSA S, OYAGI N, et al. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in soviet Tajik[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(4): 73 - 89.
- [9] 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J]. 工程勘察, 1990(6): 1 - 5. (BAI Ming-xue, ZHANG Su-min, Liquefied mobile of Loess strata during High intensity earthquake[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1990(6): 1 - 5. (in Chinese))
- [10] SEED H B. Landslides during earthquake due to soil liquefaction[J]. Journal Soil Mechanics Foundations Division, ASCE, 1968, **94**(5): 1055 - 1122.
- [11] 徐舜华, 吴志坚, 孙军杰, 等. 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及其诱发机制[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(3): 471 - 476. (XU Shun-hua, WU Zhi-jian, SUN Jun-jie, et al. Study of the Characteristics and Inducing Mechanism of Typical Earthquake Landslides of the Mianxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(3): 471 - 476. (in Chinese))
- [12] 孙军杰, 王兰民, 龙鹏伟, 等. 地震与降雨耦合作用下区域滑坡灾害评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(4): 752 - 760. (SUN Jun-jie, WANG Lan-min, LONG Peng-wei, et al. An assessment method for regional susceptibility of landslides under coupling condition of earthquake and rainfall[J]. Chinese Journal of Rock and Mechanics and Engineering, 2011, **30**(4): 752 - 760. (in Chinese))
- [13] 李启鹏, 呈显瑶, 蔡东艳. 地震荷载下黄土的动力特性[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985, **43**(3): 9 - 37. (LI Qi-yao, CHENG Xian-yao, CAI Dong-yan. Dynamic characteristic of loess under seismic load[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgical and Construction Engineering, 1985, **43**(3): 9 - 37. (in Chinese))
- [14] 何光, 朱鸿博. 黄土震陷研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(5): 99 - 103. (HE Guang, ZHU Hong-bo. Study on loess seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(6): 99 - 103. (in Chinese))
- [15] 王兰民, 袁中夏. 干密度对击实黄土震陷性影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(1): 75 - 80. (WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia. Laboratory study of effect of dry density on seismic settlement of compacted loess[J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2000, **20**(1): 75 - 80. (in Chinese))
- [16] 徐舜华, 王兰民. 黄土震陷初判指标的界定研究[J]. 西北

- 地震学报, 2006, **28**(2): 140 - 143. (XU Shun-hua, WANG Lan-min. Study on initial judging criterions of loess seismic subsidence[J]. Northwest Seismological Journal, 2006, **28**(2): 140 - 143. (in Chinese))
- [17] 陈永明, 王兰民, 刘红玫. 剪切波速预测黄土地震陷量的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊 2): 2834 - 2839. (CHEN Yong-ming, WANG Lan-min, LIU Hong-mei. Prediction method of seismic of subsidence of loose ground with shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2834 - 2839. (in Chinese))
- [18] 王兰民, 张振中. 地震时黄土振陷量的估算方法[J]. 自然灾害学报, 1993, **2**(3): 85 - 94. (WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong. A method of estimating the quantity of seismic subsidence in loess deposits during earthquakes[J]. Journal of Natural Disasters, 1993, **2**(3): 85 - 94. (in Chinese))
- [19] ISHIHARA K, KOYAMACHI N, KASUDA K. Strength of a cohesive soil in irregular loading[C]// Proc 8WCEE, 1984: 7 - 14.
- [20] 王兰民, 张振中, 王 峻, 等. 随机地震荷载作用下黄土动强度的试验方法[J]. 西北地震学报, 1991, **13**(3): 50 - 55. (WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong, WANG Jun, et al. A test method of dynamic strength of loess under random seismic loading[J]. Northwest Seismological Journal, 1991, **13**(3): 50 - 55. (in Chinese))
- [21] 王 峻, 石玉成, 王杰民, 等. 不同地震荷载作用下黄土震陷特性的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 102 - 106. (WANG Jun, SHI Yu-cheng, WANG Jie-min, et al. Comparative analysis of characters of loess subsidence under different seismic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 102 - 106. (in Chinese))
- [22] 邓龙胜, 范 文. 随机地震荷载作用下黄土震陷的影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(9): 1924 - 1931. (DENG Long-sheng, FAN Wen. Study of influencing factors of loess seismic subsidence induced by stochastic seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(9): 1924 - 1931. (in Chinese))
- [23] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(1): 95 - 97. (SHEN Zhu-jiang. Structural mathematics model of soil. The central problem of soil mechanics in 21th century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(1): 95 - 97. (in Chinese))
- [24] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学: A 辑, 1980, **23**(12): 1203 - 1208. (GAO Guo-rui. Microstructure of loess in China[J]. Science in China: Series A, 1980, **23**(12): 1203 - 1208. (in Chinese))
- [25] 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**(增刊 1): 3025 - 3031. (WANG Lan-min, 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))
- [26] 石玉成, 裘国荣. 基于微结构的黄土震陷本构关系研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 7 - 12. (SHI Yu-cheng, QIU Guo-rong. Constitutive relation of seismic subsidence of loess based on microstructure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 7 - 12. (in Chinese))
- [27] 谷天峰, 王家鼎, 郭 乐, 等. 基于图像处理的 Q₃ 黄土的微观结构变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 3185 - 3192. (GU Tian-feng, WANG Jia-ding, Guo Le, et al. Study of Q₃ loess microstructure changes based on image processing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3185 - 3192. (in Chinese))
- [28] 裘国荣, 石玉成, 刘红玫. 黄土震陷时微观结构随动应力变化分析[J]. 西北地震学报, 2010, **32**(1): 42 - 46. (QIU Guo-rong, SHI Yu-cheng, LIU Hong-mei. Analysis on microstructural variety in seismic subsidence of loess with dynamic stress[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, **32**(1): 42 - 46. (in Chinese))
- [29] 邓 津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 542 - 548. (DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 542 - 548. (in Chinese))
- [30] 张冬丽, 王兰民, 王玉华, 等. 有限元分析方法在黄土地基震陷预测中的应用[J]. 西北地震学报, 2002, **24**(3): 208 - 214. (ZHANG Dong-li, WANG Lan-min, WANG Yu-hua. Application of FEM to prediction of seismic subsidence of loess ground[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, **24**(3): 208 - 214. (in Chinese))
- [31] 孙军杰, 徐舜华, 王兰民, 等. 非饱和黄土动残余应变关键影响参量与量值估算[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 382 - 391. (SUN Jun-jie, XU Shun-hua, WANG Lan-min, et al. Critical influence parameters and magnitude estimation of dynamic residual strain of unsaturated loess[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 382 - 391. (in Chinese))
- [32] 孙军杰, 王兰民, 秋仁东, 等. 基于物理力学机制的黄土震陷数学估算模型[J]. 工程力学, 2012, **29**(5): 53 - 60. (SUN Jun-jie, WANG Lan-min, QIU Ren-dong, et al. A mathematical estimation model for seismic subsidence of loess based on physical-mechanical mechanism[J]. Engineering Mechanics, 2012, **29**(5): 53 - 60. (in Chinese))
- [33] PURI V K. Liquefactzon behauzor and dynamic properties of loessial (Silty) soils[D]. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1984.
- [34] PRAKASH S, GUO T, KUMAR S. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures[C]// Anon Geotechnical Earthguake Engineering and Soil Dynamics III. Londong: Elsevier, 1998: 337 - 348.
- [35] WANG L M, ZHANG Z Z, LI Lan, et al. Laboratory study on loess liquefaction[C]// Anon Proc Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 3). Acapulco, Mexico, London: Elsevier, 1996.
- [36] HWANG H, WANG L M, YUAN Z X. Comparison in liquefaction potential of Loess between Lanzhou, China and Memphis, USA[C]// Anon Proc The 9th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Noway, London: Elsevier, 1999.
- [37] 王兰民, 刘红玫, 李 兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 89 - 94. (WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, el at. Laboratory study on the mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 89 - 94. (in Chinese))
- [38] 石兆吉, 王兰民. 土壤动力特性-液化势及危害性评价[M]. 北京: 地震出版社, 1999. (SHI Zhao-ji, WANG Lan-min. The dynamic characteristics of soil liquefaction potential assessment[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (in Chinese))
- [39] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 黄土与砂土液化特性的对比-土液化与防灾减灾[J]. 中国安全科学学报, 2004, **14**(11): 3 - 7. (YANG Zhen-mao, ZHAO Cheng-gang, WANG Lan-min. Comparison on liquefaction performance between loess and sand-Soil liquefaction and prevention of seismic disaster[J]. China Safety Science Journal, 2004, **14**(11): 3 - 7. (in Chinese))
- [40] 余跃心, 刘汉龙, 高玉峰. 饱和黄土孔压增长模式与液化机制的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 395 - 399. (SHE Yue-xin, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Study on liquefaction mechanism and pore water pressure mode of saturated original loessf[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 395 - 399. (in Chinese))
- [41] WANG L M, HE K M, SHI Y C, et al. Study on liquefaction of saturated loess by in-situ explosion test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, **1**(1): 50 - 56.
- [42] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999. (ZHANG Zhen-zhong. Earthquake induced hazards forecast in loess area[M]. Beijing: Earthquake Press, 1999. (in Chinese))
- [43] 邓龙胜, 范 文. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征和发育机理[J]. 灾害学, 2013, **28**(3): 30 - 37. (DENG Long-sheng, FAN Wen. Deformation breakage characteristics and development mechanism of loess landslide triggered by Haiyuan M8.5 earthquake in Ningxia[J]. Journal of Catastrothology, 2013, **28**(3): 30 - 37. (in Chinese))
- [44] SASAA K. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows[C]// Proceeding of 4th International Symposium Landslide. Toronto, 1984: 349 - 354.
- [45] SASAA K. The mechanism of debris flows[C]// Proceeding of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985: 1173 - 1176.
- [46] WANG Lan-min. Analysis of loess seismic landslides under irregular seismic loading[C]// Proceeding of the First International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, 1991(1): 511 - 518.
- [47] 王家鼎, 刘 悦. 高速黄土滑坡、蠕滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 1999, **29**(1): 79 - 82. (WANG Jia-ding, LIU Yue. A further study on the mechanism of high-speed loess landslide in state of creeping land sliding liquefaction[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1999, **29**(1): 79 - 82. (in Chinese))
- [48] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [49] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 13. (in Chinese))

- [50] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. 力学与实践, 1998, **20**(6): 1 - 6. (SHEN Zhu-jiang. Fundamental problems in the modern soil mechanics[J]. Mechanics and Practices, 1998, **20**(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [51] 孙军杰, 田文通, 徐舜华, 等. 概率性分析在黄土场地动力沉降评价中的应用[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2158 - 2165, 2173. (SUN Jun-jie, TIAN Wen-tong, XU Shun-hua, et al. Application of probability analysis method to quantitative evaluation of dynamic settlements of natural loess field[J]. Rock and Mechanics, 2013, **34**(8): 2158 - 2165, 2173. (in Chinese))
- [52] HOULSBY G T. The work input to an unsaturated granular material[J]. Géotechnique, 1997, **47**(1): 193 - 196.
- [53] JOMMI C. Remark on the constitutive modeling of unsaturated soil[C]// Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils. Proc of an International Workshop. Trento, 2000.
- [54] VAUNAT J, ROMERO E, JOMMI C. An elastoplastic hydro-Mechanical model for unsaturated soils[C]// Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Proc. of an International Workshop. Trento, 2000.
- [55] ZHAO C G, LIU Y. Work and energy and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods In Geomechanics, 2010, **34**(6): 920 - 936.
- [56] 沈珠江. 非饱和土力学实用化之路探索[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 256 - 259. (SHEN Zhu-jiang. Exploitation of practical use of unsaturated soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 256 - 259. (in Chinese))
-

本期广告索引

- 封 2 南京嘉兆仪器设备有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司
后插 1 台州建元勘察仪器有限公司
后插 2 西安力创材料检测技术有限公司