

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910071

黄土地基抗震处理技术研究进展与展望*

王 谦^{1,2,3}, 刘钊钊^{1,3}, 王兰民^{1,2,3}, 钟秀梅^{1,2}, 苏永奇², 马海萍^{1,2}

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对国内外黄土地基抗震处理技术研究历史和现状的介绍, 分析不同黄土地基抗震处理方法的物理化学机制及其研究的主要不足, 并根据地基处理研究的最新进展, 结合黄土地基抗震设计的任务需求, 探讨未来黄土地基抗震处理技术的研究方向。通过对现有研究和相关领域前沿性科学问题的总结发现: (1) 不同黄土地基抗震处理方法的内在机制均主要针对黄土内的架空孔隙和弱胶结等特殊不良结构, 通过增加土体密实度和土骨架结构强度, 提高地基的抗震性能; (2) 现有黄土地基抗震改良方法中, 针对强夯法、挤密桩法的研究和应用较为完备, 而在黄土地基设计中防灾目标的统一性、复杂应力及外营力条件下改良黄土的动力特性、新型环保加固材料在黄土地基抗震处理中的应用、黄土地基抗震处理技术的标准化等方面存在较大不足; (3) 微生物环保固化技术在黄土地基抗震处理中的应用、改良黄土地基地震动效应特征及动力条件下的土-结相互作用、基于性能的黄土地基抗震处理技术及其标准化应是今后黄土地基抗震处理领域可能取得突破的研究方向。

关键词: 黄土; 地基处理; 黄土地震灾害; 动力特性; 灾害防治

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1366-16

Review on Seismic Reinforcement of Loess Foundation

WANG Qian^{1,2,3}, LIU Zhaozhao^{1,3}, WANG Lanmin^{1,2,3}, ZHONG Xiumei^{1,2}, SU Yongqi², MA Haiping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration (CEA), Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration (CEA), Lanzhou 730000, China; 3. China Earthquake Administration (CEA) College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Seismic reinforcement of loess foundation is one of the frontier subjects in loess dynamics. Based on the review on seismic reinforcement of loess foundation, the physical and chemical mechanisms of different methods for seismic reinforcement of loess foundation are summarized. The main shortcomings of existing research are analyzed. According to the up-to-date research of foundation treatment and considering the demand of seismic reinforcement of loess foundation, the main directions of possible breakthroughs in the future of seismic reinforcement of loess foundation are discussed. The existing results show that the mechanism of different methods of seismic reinforcement of loess foundation is mainly aimed at the special structures of the soil such as overhead pores and weak cementation. The seismic performance of loess foundation is improved by increasing the compactness of soil

* 收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-12

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH20057)、国家自然科学基金项目(51778590)、兰州市科技计划项目(2018-1-123)、
中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费项目(2018IESLZ06, 2016IESLZ01)资助

作者简介: 王谦(1985—), 男, 副研究员。主要从事黄土动力学与黄土地震工程研究。E-mail: wangq0930@126.com

通讯作者: 刘钊钊(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事黄土力学与工程研究。E-mail: liuzhaozhao1994@163.com

and the structural strength of the soil skeleton. Among the existing methods for seismic reinforcement of loess foundation, the researches and applications of dynamic compaction and compaction pile are relatively complete. However, more problems in seismic reinforcement of loess foundation are still expected to be answered, such as the unity of disaster prevention target in loess foundation design, the dynamic characteristics of reinforced loess under the condition of complex stress and external forces, the application of new environmental protection reinforcement materials and the standardization of seismic reinforcement of loess foundation. In the future, research directions, which may be broken through in seismic reinforcement of loess foundation, include the application of bio-environmental protection solidification technology, seismic responses and soil-structure interaction under dynamic conditions, and performance-based seismic design and standardization.

Keywords: loess; foundation treatment; loess seismic hazard; dynamic behaviors; disaster prevention

引言

黄土是一种具有架空孔隙、弱胶结和富含可溶性盐的特殊第四纪松散沉积物,其在堆积过程中受物质来源、沉积环境和地质营力等因素的影响十分显著^[1-3]。黄土特殊的结构性决定了其在外部影响因素如水、地震等作用下表现出极强的易损性。我国黄土高原是世界上黄土分布最为集中、连续分布面积最大的区域,具有沟壑纵横、地形地貌条件复杂的特点,其位于我国华北地震区、南北地震带北段及其相间地带,新构造活动强烈,历史上受多次强震的影响,造成了极为严重的岩土地震灾害^[4]。随着国家“一带一路”倡议构想的深入实施,西部大开发、中部地区崛起进程的不断加快,黄土高原地区城镇化水平日益提高,因地震而触发的潜在黄土地基震陷以及地震与水共同作用下的黄土液化灾害导致黄土地区城乡建设和规划中所面临的地基安全隐患明显增加。

大量的科学研究和工程实践证明,对黄土地基进行抗震加固可有效缓解甚至消除黄土震陷性和液化势,解决地基的变形和沉降问题,从而减轻建、构筑物的震害。现有的黄土地基抗震处理技术包括物理加固(强夯法、挤密桩法、掺入黏土类物质和加筋处理等)、化学处理(掺入石灰、水泥、粉煤灰、赤泥矿渣、酸性溶液、木质素或化学灌浆等)和综合处理等。由于土的宏观力学性能取决于其组分和结构^[5],本质上,这些方法均是基于改善土的组成(增加胶结性物质,优化级配)和结构(消除孔隙,加强排列和增强连接)从而达到改善土力学性质的目的,即针对黄土内部所存在的架空孔隙、弱胶结和

易融性盐等特殊结构特征,通过物理、化学或综合的方法,改变土体内部孔隙、颗粒组分和排布形式,阻碍贯通的渗流通道形成,增加颗粒之间的接触面积和胶结强度,从而使地基土满足工程使用要求。

未来几十年,随着国家全面建成小康社会政策和“一带一路”倡议的进一步落实,黄土高原地区将逐步成为国家社会经济发展重心战略倾斜调整的重点区域。考虑黄土特殊的工程性质和黄土高原高危的地震背景和脆弱的生态环境,研发新型、有效、环保的地基处理理论与技术,提高黄土高原地区建设工程的灾害预防能力已成为岩土工程领域当前亟待解决的关键科学问题之一。本文总结了当前国内外有关黄土地基抗震处理方法及动荷载作用下改良黄土地基动力特性的主要研究进展,梳理了现有主要黄土地基抗震改良方法的加固机制,并参考国内外地基抗震处理领域的研究进展和黄土地区地基抗震处理的特殊需求,提出了黄土地基抗震加固领域今后应重点关注或可能取得突破的研究方向。研究结果对黄土高原地区的浅层地基改良处理、路基加固、隧道防护和边坡治理等建设工程项目中地基处理方法的选取具有一定的参考价值,对于上述领域的后续科学研究和技术创新具有一定的指示意义。

1 基于物理加固的黄土地基抗震处理技术

基于物理加固黄土地基抗震处理技术(表1),其处理机制主要是通过物理手段或掺入不与土产生化学反应的外部材料,对黄土的内部结构进行加固,对土的级配进行改良,从而改变黄土内部孔隙

表1 基于物理加固黄土地基抗震处理技术

Table 1 Seismic reinforcement of loess foundation based on physical methods

黄土地基物理改良处理方法	研究进展(阶段性成果)	存在问题/进步需求
强夯法	不同干密度、含水率和试验条件等因素下的压实黄土动力特性;强夯法处理黄土地基在有效深度范围内可以消除黄土地基的震陷性,并提高黄土地基的抗液化性能	Ⅷ度及以上烈度地震作用下无法消除地基土的液化势,处理深度不够时,在强地震作用下仍然可以产生较大沉降变形
挤密桩法	黄土地区挤密桩复合地基在动荷载作用下的动力响应分析和地基稳定性	复合地基的孔内填料,不宜采用散体材料,且在Ⅷ度及以上烈度地震作用下无法消除地基土的液化势
黏性土改良	增加黏粒含量改善黄土内部颗粒间的黏结作用,有效提升黄土的动弹性模量,减小动变形,提升抗震性能	当土中黏粒含量过高时胶结作用逐渐转化为润滑作用;有关黄土中掺入黏粒后改良土的抗液化特性的研究仍尚未开展
加筋处理	筋材的加入可以有效提高黄土的动弹性模量,并降低阻尼比;通过合理控制纤维状物质或筋材的掺量及其空间分布,可有效提升改良黄土地基的抗剪强度与抗震性能	加筋位置和加筋层数对抗震性能的影响和黄土中掺入纤维状筋材后改良土的抗液化特性的研究尚未开展

大小、颗粒组分和排布,同时阻碍黄土内部形成贯通的渗流通道。一些常规的物理改良方法,如强夯法、挤密桩法等被广泛应用于消除或减轻黄土地基的湿陷性,而试验及工程实践证明,上述方法应用于黄土地基抗震处理领域亦行之有效。除此之外,学者们还通过在黄土中掺入各种材料,改变了土体的物理性能,并辅助强夯等传统方法优化地基的力学性质,使其抗震性能更加优良。

1.1 强夯法

强夯法是通过重锤自由落下产生强大的夯击能在黄土地基中产生冲击波,促使土体内架空孔隙坍塌,颗粒重新排列组合。通过强夯处理,微观上,土体孔隙结构发生改变,原有的大、中孔隙减少,微、小孔隙增多,颗粒间接触面积显著增加;宏观上,土体密实度增加,孔隙比减小,压缩性降低,从而有效提升了地基的强度^[6-7]。何开明等^[6,8]通过对强夯处理后的湿陷性黄土地基开展野外剪切波速测试、室内动三轴试验和微结构观测,发现强夯法可以在有效深度范围内消除黄土地基的震陷性,并提高黄土地基的抗液化性能,但不能完全消除黄土地基的液化势。王军海等^[9]、周春梅等^[10]研究了不同含水率、干密度和加载频率等因素对非饱和压实黄土动强度、动弹性模量和阻尼比特性的影响,得出了压实黄土的动强度、动弹性模量和阻尼比等参数的主要影响因素及其变化规律。谷天峰等^[11]针对郑(州)—西(安)客运专线路基黄土震陷的特点,

提出了基于强夯法消除黄土震陷影响的路基处理措施,发现强夯可以有效减少地基黄土的沉降变形,但是当处理深度不够时,在强地震作用下仍然可以产生较大沉降。王谦等^[12]基于动三轴试验研究了不同干密度条件下饱和击实黄土的液化特性,得出了干密度对击实黄土抗液化强度和动残余应变的影响规律,提出了不同烈度条件下密实处理消除饱和黄土液化势的干密度阈值。王兰民等^[13]通过对不同干密度条件下的非饱和击实黄土进行震陷试验,得出了震陷系数与干密度的关系,并提出地震烈度不超过Ⅷ度时密实处理消除黄土震陷性的干密度临界值为 1.63 g/cm^3 。翁效林^[14]基于离心模型试验,定量评价了强夯处理黄土地基的震陷性,提出强夯法处理黄土地基在有效深度范围内可以完全消除黄土地基震陷性,含水率是影响强夯处理效果的重要因素,水平层强夯程度的差异性对黄土地基的震陷量的影响较小。王兰民等^[15]通过室内动三轴试验研究了强夯处理后黄土地基的动本构模型、弹性模量、阻尼比、震陷性和液化势,并进行波速和地脉动测试,评价了强夯处理对黄土地基抗震性能改善的效果,提出了将黄土地基湿陷性和震陷性一次性施工处理的技术标准。《地下结构抗震设计标准》^[16]中规定采用强夯法消除非饱和结构性黄土场地震陷时,处理深度应至震陷土层下界,且在结构边缘以外的处理宽度应超过结构底面下处理深度的 $1/2$ 以及不应小于结构宽度的 $1/5$ 。《甘肃省建筑抗震设计规程》^[17]中规定以整片或局部垫

层、强夯、挤密及其他复合地基消除黄土场地地基的全部或部分震陷量,当地震作用下有可能引起未处理软弱土层的液化、震陷和失稳时,应加深、加宽地基处理范围。

1.2 挤密桩法

挤密桩法具有土方量小、处理后地基承载力高和造价较低的特点,在黄土地基处理中应用广泛。挤密桩施工时,首先采用一定的排列形式对黄土地基进行预成孔,然后向孔内填充物料,再利用重锤在孔内挤压夯实,使填充物料侧向挤压,减小地基土的孔隙比,增大其密实度,从而提高地基的承载力。另一方面,挤密桩本身具有较高的强度,可与周围密实后的土层形成人工复合地基,共同承担上部荷载^[18-19]。根据填料的不同,挤密桩法又可分为素土挤密桩、砂石挤密桩、灰土挤密桩、水泥土挤密桩和CFG桩等。《甘肃省建筑抗震设计规程》^[17]中规定局部垫层或复合地基的孔内填料,宜选用有一定黏结强度的材料,如水泥粉煤灰碎石桩复合地基等,不宜采用散体材料。陈福江等^[20]针对水泥土挤密桩加固后的黄土隧道地基,通过有限元计算,模拟分析了高速列车荷载作用下隧道路基的沉降,并研究了地下水 and 水泥土挤密桩加固对黄土隧道地基稳定性的影响,发现水泥土挤密桩对控制大断面黄土隧道地基沉降作用明显。何开明^[8]研究发现碎石桩挤密处理后黄土地基的抗液化性能明显提升,但受黄土低渗透性的影响,通过增加碎石桩的直径改变改良土地基抗液化影响范围时效果甚微。许健等^[21]、张富钧^[22]基于时程分析法和有限元分析方法,对灰土挤密桩-黄土体模型进行了地震水平荷载和竖向荷载作用下的动力非线性分析,研究了黄土地基灰土挤密桩单桩-土体模型的动力特性,发现在地震荷载作用下,桩竖向中心节点的应力较小,桩侧土体应力较大并沿径向逐渐增大,桩底土体应力随深度增加其减小量不大,同时桩顶的位移最大,在桩与土接触位置桩的位移大于土的位移。张小燕^[23]对湿陷性黄土区的桩式复合地基进行了列车荷载和地震作用的动力响应分析,研究了CFG-水泥土挤密桩复合地基在动力作用下的位移和应力变化及应力分布,得到了复合地基的变形规律。许兴旺^[24]采用高速铁路CFG桩+挤密桩复合地基处理郑西客运专线的湿陷性黄土地基,结合工程实践系统研究了列车振动荷载条件下复合地基的布桩

组合形式、计算方法、施工工艺及沉降控制经验系数。赵秀绍等^[25]基于动三轴试验,从试样饱和、试样固结、围压、振动频率、破坏标准和振动波形等方面研究了和CFG桩施工密切相关的黄土动力特性,发现郑东新区黄土不同围压下起始破坏动应力与围压呈线性关系。

1.3 黏性土改良黄土的动力特性与抗震性能

研究表明,在天然黄土中掺入膨润土可以改变黄土原有的结构和颗粒组成,其实质是膨润土掺入黄土后,充填黄土颗粒间的架空孔隙,同时膨润土吸水膨胀有效降低黄土的孔隙性,使得改良黄土孔隙的平均直径、平均周长和总面积均明显减小,土体密实度增加,从而有效提升地基的承载力^[26-27]。而在黄土中掺入高岭土,通过土中黏粒含量的增加使得黄土的结构胶结性增强^[28]。袁中夏^[28]通过对不同掺量的高岭土加固黄土进行动三轴试验,发现改良土的动弹性模量随着高岭土掺量的增加而增大,动变形随着高岭土掺量的增加而减小;土体中黏粒的增加导致的黄土颗粒间的胶结作用增强是高岭土改良黄土抗震性能提升的主要原因。对于饱和黄土的液化特性,尽管李兰等^[29]基于不同黏粒含量原状黄土的动三轴试验,证实了黏粒含量的增大会有效提升黄土的抗液化强度,分析得出了饱和黄土中由于黏粒含量的增加使得其在土体中的作用由“润滑”转变为“胶结”是导致饱和黄土抗液化提升的内在机理,然而有关黄土中掺入黏粒后改良土的抗液化特性的研究仍尚未开展。

1.4 加筋处理技术

黄土的抗拉强度远低于其抗压强度,而周期动荷载对黄土的作用可近似为多次压-拉作用的组合。通过在黄土内部掺入适当的纤维状物质或筋材,可有效改善土体的抗拉性能,传递拉应力限制土体侧向位移。此外,纤维状物质或筋材可扩散土体内部的应力集中,增加土体和其他材料之间的摩阻力,其多孔结构还可有效吸附黄土中的细粒和游离水,从而形成相对稳定的团絮状结构^[30]。因此,通过合理控制纤维状物质或筋材的掺量及其空间分布,可有效提升改良黄土地基的抗剪强度与抗震性能^[30-33]。马闫等^[34]基于GDS动三轴,以玻璃纤维单丝窗纱为筋材,开展了4种围压下10种不同加筋方式的黄土动力特性试验,研究了黄土动弹性模量和

阻尼比随围压、加筋位置、加筋层数的变化规律。刘少文等^[35]通过数值模拟计算,研究了交通荷载振幅、频率和行车间隔条件下黄土地区非对称路堤未加筋、加格栅和加EPS板3种工况的动力特性,发现格栅加筋的黄土路堤变形控制效果优于EPS板,提出交通荷载振幅和频率对路堤变形影响较大,而行车间隔的影响较小。孙玲^[36]通过二维有限元数值模型,对不同黄土非对称加筋路堤在交通动荷载作用下的动力变形特性进行对比分析,分析了交通荷载大小、格栅刚度和加筋间距等因素对加筋路堤稳定性和动力响应的影响,发现格栅加筋可以有效控制非对称黄土路堤的沉降和侧向变形。

2 基于化学加固的黄土地基抗震处理技术

基于化学加固的黄土地基抗震处理技术(表2),主要是通过黄土中掺入改性材料,使之在水的作用下与黄土内在物质发生化学反应,从而提高土骨架的胶结强度,填充土中的大、中孔隙,封闭孔隙水的渗流通道,从而达到提高地基承载力和抗震性能的目的。与物理加固方法相比,化学加固从本质上改变了黄土的胶结性,经过水化反应或离子交换生成的晶体或胶体较为稳定,因而在密实处理的

基础上经化学加固的黄土地基稳定性和抗震性能更加优良。然而,由于加固时掺入了外部材料,其处理成本相对于物理加固更加高昂。传统的黄土地基化学加固处理掺料主要包括水泥、石灰、酸性溶液和水玻璃固化剂等,而近年来随着岩土工程可持续发展和生态文明建设理念的推广,粉煤灰、赤泥矿渣和木质素等工业废弃物也成为理想的黄土地基改良材料。

2.1 水泥改良黄土的动力特性

水泥改良是黄土地基处理中最常用的化学改良方法之一,其原理是利用水泥水化反应产生的水化硅酸钙等胶体的胶结增加黄土的结构强度,同时水泥与黄土的离子交换可促进改良土中团絮状胶结物的生成,进一步提高土体强度。此外,在土体混合压实过程中,黄土原有的架空孔隙破坏重组,中、小孔隙增加,胶结物和团絮状物质充盈于孔隙中形成凝块状胶结结构,土体渗透性显著减小,且细颗粒的增加导致的比表面积增大有利于对土中游离水的吸附,从而使得改良土的抗震性能显著提高^[37-40]。王家鼎等^[41-42]基于动三轴试验对不同水泥掺量、浸水条件、压实系数和动荷载频率下的水泥加固黄土动弹性模量和阻尼比特征的研究结果表明,水泥加固黄土的动力特性随着水泥掺量的增加而显著提高。王谦等^[37]开展了不同配比的饱和水

表2 基于化学加固的黄土地基抗震处理技术

Table 2 Seismic reinforcement of loess foundation based on chemical methods

黄土地基化学改良处理方法	研究进展(阶段性成果)	存在问题/进步需求
水泥 石灰	水泥及石灰改良黄土动力特性得到充分研究;水泥及石灰改良黄土作为基层填料在强震作用下的震陷量和长期稳定性得到验证;掺入水泥可以有效消除改良土地基的液化势	Ⅴ度及以上地震下水泥改良黄土仍会液化;石灰改良黄土的抗液化性能有待进一步研究
化学灌浆 酸性溶液	化学浆液和酸性溶液有效改善黄土的结构性,增强黄土地基的强度和承载力,使震陷变形系数明显降低,提升了黄土地基的抗液化能力,可完全消除黄土地基的液化势	成本高昂,对环境的影响尚不明确
粉煤灰	粉煤灰掺量20%时具有较好的抗震陷性能;粉煤灰改良能有效提升黄土地基抗震性能,减轻饱和黄土地基液化震害	水稳性较差
赤泥	赤泥的掺入提高了黄土抵抗动荷载的能力,并可有效改善过湿黄土的状态;赤泥改良土具有突然脆性破坏的特征	重金属含量高、碱性高、放射性等不良工程特性对其长期稳定性和环境效应有待进一步研究;赤泥改良黄土的抗液化性能有待进一步研究
木质素	有效提升黄土的抗压强度和抗侵蚀性	木质素改良黄土动力特性、长期稳定性和环境效应有待进一步研究

泥改良黄土的动三轴试验,发现在黄土中掺入一定量的水泥可以有效消除改良土地基的液化势,水泥掺量超过5%后,饱和改良黄土的动残余变形和动孔隙水压力均明显减小;并结合电镜扫描分析结果,提出了水泥改良消除黄土地基液化势的作用原理。张沛云等^[43]通过短时及疲劳动三轴试验,研究了水泥改良黄土的动力稳定性评价参数随水泥掺量、围压及固结比的变化规律,发现改良黄土的短时动剪应变门槛、动应力门槛及疲劳动剪应变门槛、动应力门槛均随着水泥掺量、围压及固结比的增大呈近似线性增加。马学宁等^[44]研究了列车动荷载作用下水泥改良黄土的动力特性,提出改良土的临界动应力和临界动弹性模量均随水泥掺量的增加而增加,改良土用于高速铁路路基可完全满足变形要求。X. N. Ma等^[45]研究了水泥改良黄土循环剪切应变阈值和临界动应力,评价了水泥改良黄土作为基层填料的长期动力稳定性,提出水泥改良黄土作为高速铁路路基层时的最优掺量为5%。买晓斌等^[46]分析了围压、频率、振动次数、动荷载大小等因素对水泥改良黄土动变形的影响,发现水泥改良后黄土路基的弹性变形和累积塑性变形均明显减小,并对不同水泥掺量的改良黄土路基累积塑性变形进行了预测。许书雅等^[47-48]基于室内动三轴试验,研究了强震动荷载作用下的水泥改良黄土动残余应变,估算出水泥加固黄土地基场地的震陷量,结合SEM细观结构测试,分析了强震荷载作用前后水泥加固黄土微观尺度的结构变形演化规律。

2.2 石灰改良黄土抗震处理技术

石灰是一种以氧化钙为主要成分的气硬性无机胶凝材料,其加入黄土后会和黄土发生离子化反应、离子交换—水胶连接作用、固结反应和碳酸化结晶作用,生成硅酸钙化合物、铝酸钙化合物以及钙铝黄长石水化物等,增加黄土颗粒间的黏聚力,并形成团粒结构,使黄土颗粒之间的咬合更加深入,从而显著提升黄土地基的承载力和长期稳定性^[49-51]。X. N. Ma等^[45]、买晓斌^[52]研究了作为铁路基层填料的石灰改良黄土的循环剪切应变阈值、临界动应力和长期动力稳定性,提出掺量为6%的石灰改良黄土可作为高速铁路路基层材料,但其动力稳定性低于5%的水泥改良黄土。M. Wang等^[53]基于室内动三轴试验研究了不同含水率、围压、振动频率、固结比和循环次数条件下石灰改良黄土的动力特性,提出石灰改良黄土的动应力—应变曲线

符合双曲线模型。胡大林等^[54]研究了不同振动频率、固结比和动应力幅值下石灰改良黄土动力特性,发现石灰加固黄土的阻尼比随频率的增加而增加,随固结比的增加而减小,动弹性模量和固结比正相关,且对振动频率不敏感。羊群芳^[55]研究发现,在黄土中添加石灰可有效降低土体的孔隙率和孔隙分布分维,石灰-粉煤灰改良黄土的孔隙分布分维相比于纯石灰改良黄土降低更为明显,其加固效果比单纯添加石灰时更优。

2.3 化学灌浆及酸改性黄土地基抗震处理技术

化学灌浆法是地基处理中常用的方法之一,其原理是将化学溶液泵压至土层中,填充土体孔隙,增强土体胶结,从而增加地基强度,减小地基土的渗透性。酸改性黄土的原理是通过在黄土中加入酸性溶液,溶解土体内的碳酸钙等盐晶胶结,破坏黄土中既有的不良孔隙结构,再通过胶结材料填充孔隙,增强土颗粒之间的胶结,以提高地基的稳定性^[56-57]。何开明等^[58]通过对兰州车辆整备场采用 NHC_1^{-3} 、 NHC^{-2} 化学灌浆处理后的路基黄土进行动三轴液化试验,发现化学浆液渗入胶结了黄土颗粒,从而改善了黄土的结构性,增强了黄土地基的强度和承载力,并且提升了黄土地基的抗液化能力,可以完全消除饱和黄土地基的液化势。邓津等^[59]采用酸改性方法处理黄土,加入有较强分散和胶结效果的硼化合物作为主要改性物质,进行震陷等试验测试对比,发现酸改性方法能有效改善黄土的微观结构,使得土样的震陷变形系数明显降低。邓津等^[60]通过对永登黄土添加重质碳酸钙、滑石粉、硼酸钡盐、轻质碳酸钙和10%的磷酸溶液等对饱和黄土地基进行了酸改性处理,控制地基土的干密度为 1.58 g/cm^3 ,可用于有效消除等效地震烈度小于Ⅷ度时饱和黄土地基的液化势。

2.4 工业废弃物加固黄土的抗震性能

近年来,工业废弃物(废渣、废液提取物等)改良逐渐成为工程地基改良处理的新趋向。在黄土地基处理领域,代表性的改良材料主要包括粉煤灰、赤泥矿渣和木质素等。

粉煤灰是燃煤电厂的主要固体废弃物,具有细粒、多孔、比表面积大等优点。粉煤灰改良黄土的固化机制主要借助于粉煤灰的短期水合作用、絮凝作用及长期硅酸化反应,生成水合硅铝酸钙等水硬性凝胶,同时通过粉煤灰与黄土的离子交换,促进

黄土胶粒絮凝,减薄黄土颗粒的结合水膜,从而使黄土的结构强度增强,刚度和水稳定性提高^[61-62]。王峻等^[63]通过动三轴试验,证明了不同掺量粉煤灰改良黄土的动本构关系均服从双曲线模型,且随着粉煤灰掺量的增加,在同一动应变条件下动弹性模量增加,阻尼比明显减小。王峻等^[61,64-65]通过动三轴震陷试验,探讨了粉煤灰和动荷载耦合作用下黄土的震陷问题,发现了在相同固结应力水平下,随着粉煤灰掺入量的增加,黄土震陷性逐渐减弱,黄土动变形模量随之增大,残余应变减小,并且动变形模量和动残余应变之间满足幂函数关系,提出了粉煤灰掺量 20% 时具有较好的抗震陷性能。王兆朋^[66]借助动三轴对不同围压、含水率和掺量条件下的粉煤灰加固黄土进行动强度试验,提出了在相同振次下,动强度随着围压的增大而增大,随着含水率的增大而减小,随着粉煤灰掺量的增加而增大,并且动摩擦角和动黏聚力都是随着振动次数的增加而逐渐减小。Q. Wang 等^[67]、高中南等^[68]基于动三轴试验研究了饱和粉煤灰改良饱和黄土的动模量、阻尼比和动本构关系,分析粉煤灰掺量对饱和改良黄土液化应力比、动残余变形和动孔隙水压力的影响规律,并结合微结构试验,探讨了饱和粉煤灰改良黄土抗液化的物理化学机制。许书雅等^[47-48]对粉煤灰加固黄土进行强震动荷载条件下的动三轴试验,得到了强震动荷载和动残余应变的定量关系,从变形特征和动载振次两个方面探讨了粉煤灰加固黄土地基的适用性并预估场地震陷量,分析了粉煤灰对土体微结构的影响以及和震陷系数之间的关系。

赤泥是从铝土矿中提炼氧化铝后排出的污染性工业固体废弃物,参照《危险废物鉴别标准通则》^[69]规定的检测项,赤泥不具有浸出毒性及腐蚀性,且明显不具有易燃性、反应性和感染性等危险特性,故不属于危险废物。对赤泥进行放射性检测,根据《放射性废物分类》^[70]鉴定,赤泥不属于放射性废物,可用于建筑物的外饰面及室外其他用途^[71]。赤泥的主要成分与硅酸盐水泥类似,且其所含的硅酸二钙和部分硅铝酸盐具水硬性和胶凝性,通过这些材料的水化和水解产生凝胶,达到填充和固化土体结构的效果^[72]。陈瑞锋等^[71-72]研究了循环加载条件下赤泥改良黄土的动力特性,分析了含水率、固结围压、动应力幅值和频率对改良土动应力—动应变关系、累积塑性应变、临界动应力、动弹性模量、阻尼比和动强度的影响,发现赤泥改良可有效改善

黄土破坏时的脆性,增大土体的抗动变形能力。董晓强等^[73]、张强^[74]研究了模拟交通荷载条件下赤泥改良黄土的动应力、动应变、动孔隙水压力、动强度、动弹性模量及阻尼比特征,分析了含水量、赤泥含量和围压对改良土主要动力特性参数的影响,分析了赤泥改良黄土的物化机制,并对其工程应用价值进行了探讨。

木质素作为造纸厂制浆废液中的主要成分,具备黏结性、水溶性、螯合性以及抗腐蚀性,能够有效改善散体材料的胶结性能,是一种兼具经济性和环保性的改性材料^[75]。土中掺入木质素后,其对土颗粒发生胶结包裹作用可使松散的土颗粒凝为一体,且细小的木质素可充填土粒间孔隙,降低孔隙比,提高密实度,但是当掺量过大时会降低土体强度^[76-78]。W. Liu 等^[79]基于三轴试验发现,随木质素掺量的增加,改良黄土的抗剪强度增加,孔隙水压力降低,应变硬化现象趋于明显,并从微观角度提出掺入木质素导致黄土黏聚力增大的机制。王谦^[80]研究了饱和木质素改良黄土的动弹性模量、阻尼比和动强度特性,发现掺入一定量的木质素可有效提升改良土刚度,降低阻尼比;木质素掺量达到 3% 时,改良黄土的抗液化性能最优,但木质素改良黄土抑制孔隙水压力增长的能力相对于水泥、粉煤灰改良黄土较弱。

3 存在的主要问题评述

近年来,随着黄土地区建设工程抗震需求和地基动力变形控制需求的不断加大,有关黄土地基抗震处理方法、改良黄土地基动力特性等方面的研究持续深入,多种先进的地基处理工艺在黄土地基抗震及动力变形防控领域开展了应用,并初步形成了有关黄土地基抗震处理的技术标准。然而,现有的黄土地基抗震处理技术依然存在着诸多问题,包括对改良黄土地基的动力特性、高含水率地基的震陷性和液化势研究不足,地基处理中的成本问题和环境效应,以及复杂条件下的地基长期稳定性以及处理技术的标准化问题等。因此,相比于黄土地基湿陷性处理技术研究进展,黄土地基抗震处理领域还存在较大的不足,集中起来,主要表现在以下四个方面。

3.1 黄土地基设计中防灾目标的统一性

新黄土具有湿陷性、震陷性和液化势。黄土的

湿陷性,本质上是水的作用导致黄土中可溶性胶结物的溶解流失,架空孔隙结构破坏,从而使得土体在自重或附加荷载作用下产生沉降的物理过程。黄土的震陷性,则是黄土在动荷载作用下导致土体原有胶结被破坏,架空孔隙坍塌而造成沉降的物理过程。黄土的液化,是指土体在饱和状态下由于动荷载作用而产生超孔隙水压力,从而使土体有效应力降低,结构破坏而导致的地层沉降或侧向扩展。可见,从土体结构破坏的角度,黄土的湿陷与震陷较为类似^[81-82],而黄土液化仅针对饱和状态这一特殊的情况,且已有的研究表明,饱和黄土液化时孔隙水压力难以达到有效围压,其宏观破坏以大变形为主^[83]。因此,在进行地基设计时,可以根据工程实际需求,对消除或减轻黄土地基的湿陷性、震陷性和液化势进行统一考虑。然而,现阶段有关黄土地基动力特性及抗震处理技术研究及应用相比于湿陷性黄土地基处理技术明显滞后,对于诸如强夯法、挤密桩法、水泥改良、石灰及二灰土改良等常规地基处理方法在黄土地基抗震处理中的研究尚不十分完备,对于抗疏力固化剂、SH固化剂、木质素等新型改良材料在黄土地基抗震处理中的应用明显不足^[76,84-85]。因此,后续研究中应注重对黄土地基的防灾目标进行统筹考虑,提出适用于消除多种灾害的黄土地基设计方法并对其进行标准化,从而更好地指导黄土地区的工程建设。

3.2 复杂应力及外营力条件下改良黄土的动力特性

自然界中土体的受力状态不是单一的,而是根据外界条件和土体内应力的传递表现出十分复杂的特性。随着土动力学研究的不断深入,复杂应力状态下土的动力特性成为当前土动力学研究的热点。黄土具有强烈的水敏性和震敏性,在外部荷载作用下土骨架的变形和土中水、气运移的相互影响导致其动力特性十分复杂,因而给抗震加固处理技术的具体应用带来了较大的挑战。同时,我国黄土主要分布于北方干旱-半干旱区域,夏季降雨较为集中,且黄土的主要分布区多处于季节性冻土区域,冬季昼夜温差大。对于地基而言,干湿、冻融循环造成的劣化对其稳定性和抗震性能影响显著。研究表明,经历多次干湿循环和冻融循环后,土体的结构性会发生明显改变,导致其强度衰减^[86-88]。而地基土强度的减弱将会影响其正常使用。然而,现阶段有关复杂应力和外营力条件下黄土地基的动

力特性研究十分欠缺。在后续研究中,运用当前土动力学领域先进的实验仪器和研究方法开展复杂应力条件下抗震加固黄土的动力特性研究,并考虑干湿、冻融等复杂外营力条件的作用,研究干湿、冻融循环对黄土地基抗震性能的影响规律,对于保障特殊复杂条件下黄土地基的使用安全很有必要。

3.3 新型环保加固材料在黄土地基抗震处理中的应用

当前,探索研发具有环境友好型和资源节约型的新型地基处理材料成为岩土工程领域的热门研究方向。同时,黄土高原高危的地震活动背景和黄土的强水敏性、动力易损性等特殊工程性质对黄土地基抗震加固材料提出了新的挑战。我国黄土高原具有土质疏松、地形支离破碎及降水集中且多暴雨等区域环境特点,加上乱砍滥伐和露天采矿等人类工程活动的影响,致使该地区的生态环境极其脆弱,工程建设带来的生态环境劣化作用十分显著。国内外学者对多种改性材料在加固土体提升抗震性能等领域取得了诸多成果,包括纳米颗粒、聚苯乙烯、煤矸石、离子稳定剂和土工合成材料等^[89-93]。然而,现有研究中有关新型环保的改良材料在黄土地基抗震处理中的应用明显不足。因此,综合考虑我国黄土高原地区建筑工程的抗震需求、脆弱的生态环境现状和新型环保改良材料在地基土加固中的优势,有关新型环保材料改良黄土的动力特性及其抗震性能研究工作亟待开展。

3.4 黄土地基抗震处理技术的标准化

有关黄土地基湿陷性处理技术方面,《湿陷性黄土地区建筑规范》^[94]对强夯法、挤密桩法、垫层法等地基处理方法的适用范围、处理深度和设计方面进行了详细说明。而在黄土地基抗震领域,现阶段所取得的成果主要针对单一的地基处理方法,而对工程实践中地基处理方法的选择依据及各种处理方法的适用性研究较少^[8,47-48,95-96],特别是对除强夯、挤密桩和化学灌浆法以外的地基处理手段的抗震设计方法研究不足。此外,国外相关的工程技术规范和我国现行的《建筑抗震设计标准》^[97]、《湿陷性黄土地区建筑规范》^[94]等工程规范尚缺乏黄土地基抗震处理的技术标准与规定,而《地下结构抗震设计标准》^[16]和《甘肃省建筑抗震设计规程》^[17]仅对黄土地基强夯、挤密桩处理的设计方法有专门论述,但对诸如黏性土改良、加筋改良等物理改良方法和

所有化学改良方法在黄土地基抗震设计中的应用尚未提及。因此,后续研究中,应结合室内、现场测试结果,对不同黄土地基抗震处理方法的适用性和处理范围开展专门研究和标准化,并结合建筑抗震设防等级、建筑重要性等级、建筑成本及环保需求,对各类处理方法在工程中的选择依据进行说明。

4 研究展望

4.1 微生物环保固化技术在黄土地基抗震处理中的应用

自然界中,土体内存在着大量的微生物,其活动能够影响土的形成和性质,如微观结构、强度、刚度和渗透性等^[98-99]。微生物生长的环境条件包括营养、温度、酸碱度、水、氧化还原条件等,这些条件既可能成为微生物改良技术中的制约因素,又可以成为控制微生物改良的手段,例如,可以通过调节营养物的量,来控制微生物反应的进度和有效产物的生产量^[100]。作为一个全新的研究领域,微生物改良技术在近十年间取得了快速进展,并已在砂性土和软土加固、防渗、砂土液化防治、土体抗侵蚀和污染土治理等领域开展一定的应用。在地基处理、文物保护等领域,采用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)进行的土体加固和文物修复已经成为一种新趋向。特别是其自然、环保的特性在岩土工程可持续发展的背景下具有广泛的应用前景。

利用微生物改善土体性能的机理主要包括通过微生物吸附、诱导微生物生成无机物沉淀、微生物表面活性剂附着和气体填充等方式改变土体的微观结构,使土颗粒之间的胶结增强,土体内团絮状物质增多,密实度增大和渗流通道的阻断等,而在宏观上主要表现为土体强度提升和渗透性降低^[100-101]。对于黄土而言,土体中的碳酸钙等可溶性盐是土颗粒之间的主要胶结物,且黄土湿陷、震陷和液化等主要灾害的本质是水、地震等外界因素导致土体结构失稳破坏。因此,微生物改良中有关生成碳酸钙沉淀对土体进行胶结、生成的团絮状胶结物对土体的充填和渗流通道的阻断等特性与黄土地基改良十分契合。此外,微生物改良所独具的天然、环保属性对于减轻工程建设对黄土高原生态环境的破坏十分有益。然而,现阶段有关微生物改良在黄土地基处理中的应用研究较少,有关微生物改良黄土的动力特性及其抗震性能研究几乎处于空白。因此,开展微生物环保固化技术在黄土地基抗

震处理中的应用,有望成为黄土地基抗震处理技术在未来取得突破的研究方向。

4.2 改良黄土地基地震动效应特征及动力条件下的土-结相互作用

近年来,随着黄土地区工程建设的震害防御需求不断加大,有关各类黄土地基抗震处理方法的研究取得了阶段性进展。然而,支撑现有研究成果的相关数据多为室内力学试验取得,而对成层改良黄土地基表面地震动幅值、频谱特征的研究开展较少,对于动力加载条件下改良黄土地基与结构的相互作用研究尚未开展,针对不同场地条件下各类黄土地基抗震改良方法的适用性研究也极少涉及。然而,地震作用下由于地基非线性而导致地基表面地震动特性的改变是地震工程领域普遍存在的问题,且动力加载条件下地基土与结构的相互作用对地基与结构的动力稳定性和抗震性能存在重要影响。因此,有关改良黄土地基地震动效应特征及动力条件下的土-结相互作用,也是未来黄土地基抗震处理领域可能取得突破的前沿方向。

4.3 基于性能的黄土地基抗震处理技术及其标准化

当前,作为有效提升土木工程抗震能力的核心技术,基于性态的抗震设计理论已成为抗震设计研究的主要发展方向,引起了学者们的广泛关注。针对基于性态的抗震理论,美国、日本及欧盟开展了较多研究,部分研究成果已被相关标准收录或被规范推荐使用。我国自20世纪90年代在抗震设计方法中引入了基于性态设计的理论,并结合实际开展了大量的研究工作,相关成果纳入《建筑抗震设计标准》^[97],并形成了《建筑工程抗震性态设计通则》^[102]、《建筑工程抗震性态设计规范》^[103]等一系列的技术标准。2017年,《国家地震创新工程》中提出了“韧性城乡”计划,旨在科学评估地震灾害风险的基础上研发并广泛应用新型抗震技术,提升城乡震害防御水平。基于新型材料的工程韧性技术和工程性态设计方法研究是“韧性城乡”计划的重点科学技术问题之一。然而,由于对黄土地基抗震处理理论与技术尚缺乏全面系统和深入的研究,且其抗震设计的分析研究实例也较为缺乏,我国现行相关规范中尚无专门针对黄土地基的性态抗震设计方法。因此,对于黄土地基的抗震设计而言,开展专门的研究工作,根据不同的抗震设防标准和等

级,综合考虑多种因素确定抗震性态设计目标,提出基于性态设计的地基抗震理论方法,并对其进行标准化,也将是未来黄土地基抗震处理亟待取得突破的研究方向。

5 结 论

(1)黄土地基抗震处理主要包括物理改良、化学改良和综合改良,且现有化学处理多建立在密实处理的基础上;不同的黄土地基抗震处理机制有所差异,但均主要针对黄土内的架空孔隙和弱胶结等特殊不良结构,土体密实度增加和由于胶结性增加、颗粒重排等导致的土骨架稳定性增强是黄土地基动力稳定性和抗震性能增强的主要原因。

(2)现有关黄土地基抗震改良方法中,针对强夯法、挤密桩法的研究较为完备,且部分研究成果已被抗震规范吸纳;而有关黏性土改良、加筋改良等物理改良方法和所有化学改良方法在黄土地基抗震设计中的应用涉及较少,有关不同抗震处理方法的工程适用性研究尚显不足。

(3)微生物环保固化技术在黄土地基抗震处理中的应用、改良黄土地基地震动效应特征及动力条件下的土-结相互作用和基于性能的黄土地基抗震处理技术及其标准化方法是未来黄土地基抗震处理技术研究领域可能取得突破性进展的主要方向。

(4)通过对现有黄土地基抗震处理技术进行总结评述,明晰了现有研究的存在问题及未来研究方向,对今后黄土地基抗震处理领域可能取得的突破具有一定的指示意义,对黄土地基抗震设计和工程应用具有一定的参考价值,有助于减轻黄土地基潜在震害风险,提升建、构筑物抗震能力。

参考文献:

- [1] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
Liu Z D. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [2] Derbyshire E, Dijkstra T A, Smalley I J, et al. Failure mechanisms in loess and the effects of moisture content changes on remolded strength[J]. Quaternary International, 1994, 24: 5-15.
- [3] Jefferson I F, Evstatiev D, Karastanev D, et al. Engineering geology of loess and loess-like deposits: a commentary on the Russian literature[J]. Engineering Geology, 2003, 68(3/4): 333-351.
- [4] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
Wang L M, Shi Y Ch, Liu X, et al. Loess dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 谢定义,姚仰平,党发宁.高等土力学[M].北京:高等教育出版社,2008.
Xie D Y, Yao Y P, Dang F N. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 何开明,周健,王兰民.强夯黄土地基抗液化性状的试验研究[J].地下空间与工程学报,2004,24(1):27-30.
He K M, Zhou J, Wang L M. Experimental study on anti-liquefaction of rammed loss ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2004, 24(1):27-30. (in Chinese)
- [7] 刘世奇,陈静曦,潘冬子.强夯法处理湿陷性黄土地基的效果分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(6):19-21.
Liu Sh Q, Chen J X, Pan D Z. Analyses on results of forced ramming in wet sinking loess foundation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(6):19-21. (in Chinese)
- [8] 何开明.经若干方法处理黄土地基抗液化性状的研究[D].杭州:浙江大学,2001.
He K M. Studies on the anti-liquefaction behavior of the loess ground improved by several methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [9] 王军海,刘亚明.基于动三轴试验的压实黄土动强度特性研究[J].地震工程学报,2016,38(3):439-444.
Wang J H, Liu Y M. Dynamic strength properties of compacted loess based on dynamic triaxial test[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3): 439-444. (in Chinese)
- [10] 周春梅,程月,王勇,等.压实黄土抗剪强度参数影响因素研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(2):258-264.
Zhou Ch M, Cheng Y, Wang Y, et al. Study on influencing factors of shear strength parameters of compacted loess[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2018, 38(2):258-264. (in Chinese)
- [11] 谷天峰,王家鼎,王峻.郑西客运专线黄土路基震陷研究[J].工程地质学报,2009,17(4):557-562.
Gu T F, Wang J D, Wang J. Laboratory and numerical studies on seismic subsidence of loess subgrade along Zhengzhou-Xian high-speed railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4):557-562. (in Chinese)

- [12] 王谦,王兰民,王峻,等.基于密度控制理论的饱和黄土地基抗液化处理指标研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):844-847.
Wang Q, Wang L M, Wang J, et al. Indices of anti-liquefaction treatment of saturated compacted loess foundation based on theory of density control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup 2) : 844-847. (in Chinese)
- [13] 王兰民,袁中夏,王峻,等.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 L M, Yuan Zh X, Wang J, et al. 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)
- [14] 翁效林.强夯黄土地基震陷性离心试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):1094-1097.
Weng X L. Studies on seismic subsidence of loess by centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (7) : 1094-1097. (in Chinese)
- [15] 王兰民,袁中夏,王峻,等.强夯处理后黄土地基的动力特性与抗震性能[J].岩石力学与工程学报,2003(增2):2840-2847.
Wang L M, Yuan Zh X, Wang J, et al. Dynamic characteristics and seismic resistance of loess ground treated with dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(Sup 2) : 2840-2847. (in Chinese)
- [16] 地下结构抗震设计标准:GBT51223—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [17] 甘肃省建筑抗震设计规程:DB62/T25-3055—2011[S].兰州:甘肃省住房和城乡建设厅,2012.
- [18] 刘志伟,申汝涛.钻孔挤密桩处理强湿陷性黄土地基试验研究[J].岩土力学,2009,30(增2):339-343.
Liu Zh W, Shen R T. Field tests on pre-bored compaction lime-soil pile (down-hole dynamic compaction method) to improve serious collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Sup 2) : 339-343. (in Chinese)
- [19] 郭小云,王敏,闫嘉庆,等.灰土挤密桩法和强夯法处理湿陷性黄土地基的效果对比[J].施工技术,2012,41(19):68-71.
Guo X Y, Wang M, Yan J Q, et al. Comparison of effect of lime-soil compaction pile and dynamic consolidation method to improve collapsible loess ground [J]. Construction Technology, 2012, 41 (19) : 68-71. (in Chinese)
- [20] 陈福江,刘金刚,方钱宝,等.水泥土挤密桩加固黄土隧道地基的稳定性研究[J].铁道建筑,2017(7):85-87.
Chen F J, Liu J G, Fang Q B, et al. Stability research of loess tunnel subsoil reinforced by cement soil compaction piles [J]. Railway Engineering, 2017 (7) : 85-87. (in Chinese)
- [21] 许健,温淑桥,梁媛,等.引水暗渠湿陷性黄土-灰土挤密桩复合地基动力特性[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):53-56.
Xu J, Wen Sh Q, Liang Y, et al. Dynamic characteristics of collapsible loess and lime-soil compaction pile composite foundation at underground water diversion canal [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2012,48(2):53-56. (in Chinese)
- [22] 张富钧.湿陷性黄土地基灰土挤密桩静动力特性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2011.
Zhang F J. Static and dynamic features research of lime-soil compaction pile in collapsible loess foundation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [23] 张小燕.湿陷性黄土区桩式复合地基设计选型及其动力响应—以宝兰客运专线天水南站段为例[D].兰州:兰州理工大学,2018.
Zhang X Y. Design selection and dynamic response of pile type composite foundation in collapsible loess region: A case study at Tianshui South Station of Baoji-Lanzhou passenger line[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [24] 许兴旺.高速铁路CFG桩+挤密桩工程实践及研究[J].铁道工程学报,2016,33(4):36-40.
Xu X W. Engineering practice and research on the high speed railway composite foundation with CFG pile+compaction pile[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016,33(4):36-40. (in Chinese)
- [25] 赵秀绍,刁心宏,孙瑞民.郑东新区饱和粉土动三轴试验研究[J].路基工程,2009(6):44-46.
Zhao X Sh, Diao X H, Sun R M. Dynamic triaxial test of saturated silty soil in Zhengdong new area[J]. Subgrade Engineering, 2009(6):44-46. (in Chinese)
- [26] 张虎元,赵天宇,吴军荣,等.膨润土改性黄土衬里防渗性能室内测试与预测[J].岩土力学,2011,32(7):1963-1969.
Zhang H Y, Zhao T Y, Wu J R, et al. Laboratory measurement and prediction to the permeability of bentonite-modified loess as a landfill liner[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):1963-1969. (in Chinese)
- [27] 杨博,张虎元,赵天宇,等.改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系[J].水文地质工程地质,2011,38(6):

- 96-101.
Yang B, Zhang H Y, Zhao T Y, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(6):96-101. (in Chinese)
- [28] 袁中夏. 黄土动残余变形的特性与机理研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
Yuan Zh X. Characteristics and mechanism of dynamic residual deformation of loess [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)
- [29] 李兰, 王兰民, 石玉成. 粘粒含量对甘肃黄土抗液化性能的影响[J]. *世界地震工程*, 2007, 23(4):102-106.
Li L, Wang L M, Shi Y Ch. Effect of clay on liquefaction of loess in Gansu [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2007, 23(4):102-106. (in Chinese)
- [30] 黄祥, 李劲松, 王丽艳, 等. 格栅加筋废弃钢渣的强度特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(5):844-849.
Huang X, Li J S, Wang L Y, et al. Experimental study on shear strength characteristics of geogrid reinforced waste steel slag [J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2018, 38(5):844-849. (in Chinese)
- [31] 晏长根, 顾良军, 杨晓华, 等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(10):17-24.
Yan Ch G, Gu L J, Yang X H, et al. Triaxial shear property of geocell-reinforced loess [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(10):17-24. (in Chinese)
- [32] 彭淑君, 谢婉丽, 马闫, 等. 含水率对不同加筋方式黄土强度的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4):275-278.
Peng Sh J, Xie W L, Ma Y, et al. Influence of moisture content on strength of loess with different reinforcements [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4):275-278. (in Chinese)
- [33] 李驰, 王东栋, 乌力吉那顺, 等. 黄土泥岩接触地带边坡的土工织物防护模型试验[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(3):442-448.
Li Ch, Wang D D, Wuliji N Sh, et al. Model experimental research on disaster prevention of slope stability in loess mudstone contacted zones using geotextile [J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2017, 37(3):442-448. (in Chinese)
- [34] 马闫, 谢婉丽, 彭淑君, 等. 加筋方式对黄土动力特性影响三轴试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4):50-56.
Ma Y, Xie W L, Peng Sh J, et al. Influence of the reinforcement scheme on dynamic properties of the reinforced loess with dynamic triaxial test [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, 44(4):50-56. (in Chinese)
- [35] 刘少文, 张军, 孙玲. 交通荷载下非对称加筋路堤动力特性研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(2):41-45.
Liu Sh W, Zhang J, Sun L. Study on dynamic behavior of asymmetric reinforced embankment under traffic load [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2014, 35(2):41-45. (in Chinese)
- [36] 孙玲. 黄土地区非对称加筋路堤作用机理及变形特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
Sun L. Study on mechanism and deformation behavior of asymmetric reinforced-embankment in loess area [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [37] 王谦, 刘红玫, 马海萍, 等. 水泥改性黄土的抗液化特性与机制[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(11):2128-2134.
Wang Q, Liu H M, Ma H P, et al. Liquefaction behavior and mechanism of cement-stabilized loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(11):2128-2134. (in Chinese)
- [38] Shan B, Wang Ch M, Dong Q Y, et al. Experimental study on improving collapsible loess with cement [J]. *Global Geology*, 2010, 13(2):79-84.
- [39] 王银梅, 张咸恭. 水泥对黄土湿陷灾害防治的机理分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1995, 6(2):50-53.
Wang Y M, Zhang X G. Analysis on controlling mechanism of loess collapse disaster of cement [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1995, 6(2):50-53. (in Chinese)
- [40] Kamruzzaman A H, Chew S H, Lee F H. Structuration and destructuration behavior of cement-treated Singapore marine clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(4):573-589.
- [41] Wang J D, Peng S J, Xie W L. Study on the cement-improved loess under the vibratory load by dynamic tests [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 838-841:1302-1308.
- [42] 王家鼎, 彭淑君, 马闫, 等. 高速列车振动荷载下水泥改良黄土动力学试验[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(1):35-41.
Wang J D, Peng Sh J, Ma Y, et al. Dynamic tests on the cement-improved loess under the vibratory load [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2013, 35(1):35-41. (in Chinese)
- [43] 张沛云, 马学宁. 水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2):

- 141-147.
- Zhang P Y, Ma X N. An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019,46(2):141-147. (in Chinese)
- [44] 马学宁,梁波.水泥改良黄土力学特性试验研究[J].*岩土工程技术*,2005,19(5):241-244.
- Ma X N, Liang B. Experimental study of mechanical performance of cement-improved loess[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005,19(5):241-244. (in Chinese)
- [45] Ma X N, Zhang Zh, Zhang P Y, et al. Study on the long-term dynamic stability of improved loess subgrade for high-speed railway[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*,2019,173(3):1-33.
- [46] 买晓斌,马学宁,李善珍.循环荷载作用下水泥改良黄土路基的变形特性[J].*铁道建筑*,2017,57(12):78-81.
- Mai X B, Ma X N, Li Sh Zh. Study on deformation characteristics of cement-improved loess subgrade under cyclic loading[J]. *Railway Engineering*, 2017,57(12):78-81. (in Chinese)
- [47] 许书雅,王平,钟秀梅,等.强震作用下抗震陷黄土改良地基的微观特征分析[J].*地震工程学报*,2019,41(3):724-730.
- Xu Sh Y, Wang P, Zhong X M, et al. Microscopic characteristics of improved aseismic subsidence loess foundations under strong earthquakes[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019,41(3):724-730. (in Chinese)
- [48] 许书雅,王平,王峻,等.强震作用下不同处理方式黄土地基抗震陷性能评价[J].*地震工程学报*,2018,40(6):1198-1205.
- Xu Sh Y, Wang P, Wang J, et al. Evaluation of aseismic subsidence of loess foundation with different ground treatments under strong earthquake [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018,40(6):1198-1205. (in Chinese)
- [49] 王随新,费月英,杨有海.郑西客运专线石灰改性黄土强度特性试验研究[J].*路基工程*,2007(4):76-77.
- Wang S X, Fei Y Y, Yang Y H. Experimental study on strength characteristics of lime-modified loess in Zhengzhou-Xi'an Dedicated Line [J]. *Subgrade Engineering*, 2007(4):76-77. (in Chinese)
- [50] 严旭德,张帆宇,梁收运,等.石灰固化黄土的比表面积和离子交换能力研究[J].*中山大学学报(自然科学版)*,2014,53(5):149-154.
- Yan X D, Zhang F Y, Liang Sh Y, et al. Characteristics of special surface area and cation exchange capacity of lime-stabilized loess [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014,53(5):149-154. (in Chinese)
- [51] 岳建平,杨有海.石灰及其与粉煤灰混合改良黄土强度特性试验研究[J].*兰州工业学院学报*,2013,20(5):41-45.
- Yue J P, Yang Y H. Experimental study on the strengthening behaviors of lime and flyash-lime [J]. *Journal of Lanzhou Higher Polytechnical College*, 2013,20(5):41-45. (in Chinese)
- [52] 买晓斌.循环荷载作用下高速铁路石灰改良黄土路基长期动力稳定性研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- Mai X B. Study on long-term dynamic stability of high-speed railway lime-improved loess subgrade in under cyclic load [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [53] Wang M, Kong L W, Wang X Y. Study on dynamical modulus and damping ratio of lime-treated soil[J]. *Advanced Materials Research*, 2012,487:534-538.
- [54] 胡大林,胡厚兰,郑娅娜.循环荷载作用下榆佳高速公路石灰稳定土的动力特性研究[J].*公路*,2013(6):6-14.
- Hu D L, Hu H L, Zheng Y N. Study on dynamic characteristics of lime stabilized soil of Yujia expressway under cyclic loading[J]. *Highway*, 2013(6):6-14. (in Chinese)
- [55] 羊群芳.基于湿陷、震陷、液化灾害的黄土微结构研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- Yang Q F. Microstructure of loess in collapsibility, seismic subsidence and liquefaction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)
- [56] 胡再强,沈珠江,谢定义.结构性黄土的变形特性[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(24):4142-4146.
- Hu Z Q, Shen Zh J, Xie D Y. Deformation properties of structural loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004,23(24):4142-4146. (in Chinese)
- [57] 张耀,胡再强,陈昊,等.酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J].*岩土工程学报*,2018,40(4):681-688.
- Zhang Y, Hu Z Q, Chen H, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018,40(4):681-688. (in Chinese)
- [58] 何开明,周健,王兰民.化学灌浆黄土地基的抗液化性状研究[J].*地震研究*,2003,26(4):396-399.
- He K M, Zhou J, Wang L M, et al. Research on the anti-liquefaction behavior of loess subsoil improved by

- chemical grouting [J]. *Journal of Seismological Research*, 2003, 26(4): 396-399. (in Chinese)
- [59] 邓津, 王兰民, 吴志坚, 等. 黄土抗震陷变形的酸改性方法及其微观结构分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3624-3631.
- Deng J, Wang L M, Wu Zh J, et al. Acid-modified method for loess aseismic subsidence and its microstructure analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3624-3631. (in Chinese)
- [60] 邓津, 王兰民, 程菊红, 等. 降低黄土液化势的改性技术分析[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(4): 820-823.
- Deng J, Wang L M, Cheng J H, et al. Analysis of modification technique for reducing loess liquefaction potential [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(4): 820-823. (in Chinese)
- [61] 王峻, 王谦, 钟秀梅, 等. 粉煤灰与动载耦合作用下黄土震陷试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 70-75.
- Wang J, Wang Q, Zhong X M, et al. Experimental study of loess seismic subsidence under the coupling effect of fly ash and dynamic loading [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(6): 70-75. (in Chinese)
- [62] 王东星, 高向云, 杜怡莹, 等. 活性MgO-粉煤灰固化黄土剪切特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(5): 822-829.
- Wang D X, Gao X Y, Du Y Y, et al. Experimental investigation on shear properties of reactive MgO-fly ash stabilized loess [J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2018, 38(5): 822-829. (in Chinese)
- [63] 王峻, 王谦, 王平, 等. 粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增1): 156-160.
- Wang J, Wang Q, Wang P, et al. Effect of adding amount of fly ash on dynamic constitutive relationship of modified loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup 1): 156-160. (in Chinese)
- [64] 王峻, 高中南, 车高凤, 等. 动荷载作用下粉煤灰改性黄土的震陷特性[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(5): 751-756.
- Wang J, Gao Zh N, Che G F, et al. Seismic subsidence behavior of fly-ash-modified loess under dynamic loading [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(5): 751-756. (in Chinese)
- [65] 王峻, 钟秀梅, 柴少峰, 等. 动荷载作用下粉煤灰改良黄土的动应力-应变关系研究[J]. *世界地震工程*, 2015, 31(1): 45-51.
- Wang J, Zhong X M, Chai Sh F, et al. Research on dynamic stress-strain relationship of flyash-modified loess under dynamic load [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2015, 31(1): 45-51. (in Chinese)
- [66] 王兆朋. 粉煤灰掺量对黄土动力特性的影响研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2016.
- Wang Zh P. Effect of fly ash the dynamic characteristics of loess [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [67] Wang Q, Wang L M, Zhong X M, et al. Dynamic behavior and constitutive relationship of saturated fly ash-modified loess [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 25(7): 1-16.
- [68] 高中南, 周仲华, 王峻, 等. 粉煤灰改良饱和黄土的抗液化特性[J]. *地震工程学报*, 2018, 40(1): 105-110.
- Gao Zh N, Zhou Zh H, Wang J, et al. Anti-liquefaction properties of saturated loess improved by fly ash [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(1): 105-110. (in Chinese)
- [69] 危险废物鉴别标准通则: GB 5085.7—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [70] 放射性废物分类: GB 9133—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [71] 陈瑞锋. 循环荷载作用下赤泥改良黄土的动力特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- Chen R F. Study on dynamic characteristics of loess modified by red mud under cyclic loading [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [72] 陈瑞锋, 田高源, 米栋云, 等. 赤泥改性黄土的基本工程性质研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增1): 89-97.
- Chen R F, Tian G Y, Mi D Y, et al. Study on the engineering properties of red mud modified loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(Sup 1): 89-97. (in Chinese)
- [73] 董晓强, 张强, 寇晓辉, 等. 赤泥黄土复合体的动参数试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(增1): 135-141.
- Dong X Q, Zhang Q, Kou X H, et al. Experimental study on dynamic parameters of red mud loess complex [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(Sup 1): 135-141. (in Chinese)
- [74] 张强. 赤泥作为路基材料的动力性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- Zhang Q. Study on dynamic properties of red mud as road material [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [75] 蒋挺大. 木质素[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- Jiang T D. Lignin [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)

- [76] Cai G J, Zhang T, Liu S Y, et al. Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data [J]. *Marine Geotechnology*, 2016, 34(4):331-340.
- [77] 贺智强,樊恒辉,王军强,等.木质素加固黄土的工程性能试验研究[J].*岩土力学*,2017,38(3):731-739.
He Zh Q, Fan H H, Wang J Q, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3):731-739. (in Chinese)
- [78] Vinod J S, Indraratna B, Mahamud M A A. Stabilization of an erodible soil using a chemical admixture [J]. *Ground Improvement*, 2010, 163(1): 43-51.
- [79] Liu W, Wang J, Lin G C, et al. Microscopic mechanism affecting shear strength in lignin-treated loess samples [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 1-12.
- [80] 王谦.饱和黄土地基震害改性处理变形控制技术[R].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2018.
Wang Q. Deformation control technology of seismic modification of saturated loess foundation [R]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2018. (in Chinese)
- [81] Yuan Z X, Wang L M. Collapsibility and seismic settlement of loess [J]. *Engineering Geology*, 2009, 105: 119-123.
- [82] 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):61-68.
Sun J J, Wang L M, Qiu R D, et al. A mathematical estimation model for seismic subsidence of loess based on physical-mechanical mechanism [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 61-68. (in Chinese)
- [83] 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 L M, Liu H M, Li L, et al. Laboratory study on the mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1):89-94. (in Chinese)
- [84] 张虎元,彭宇,王学文,等.抗疏力固化剂改性黄土进失水能力研究[J].*岩土力学*,2016,37(增1):19-26.
Zhang H Y, Peng Y, Wang X W, et al. Water entrance-and-release ability of loess soil modified by consolidated system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 1):19-26. (in Chinese)
- [85] 吕擎峰,吴朱敏,王生新,等.温度改性水玻璃固化黄土机制研究[J].*岩土力学*,2013,34(5):1293-1298.
Lyu Q F, Wu Zh M, Wang Sh X, et al. Mechanism of temperature-modification silicification grouted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1293-1298. (in Chinese)
- [86] 周春梅,王琴华,张静波,等.干湿和冻融循环对压实黄土路用性能影响的试验研究[J].*防灾减灾工程学报*,2019,39(3):533-540.
Zhou Ch M, Wang Q H, Zhang J B, et al. Experimental study on the influence of dry-wet and freeze-thaw cycles on compacted loess road performance [J]. *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3):533-540. (in Chinese)
- [87] Cui Z, He P, Yang W. Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing-thawing [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 98:26-34.
- [88] 袁志辉,倪万魁,唐春,等.干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究[J].*岩土力学*,2017,38(7):1894-1902.
Yuan Zh H, Ni W K, Tang Ch, et al. Experimental study of structure strength and strength attenuation of loess under wetting-drying cycle [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1894-1902. (in Chinese)
- [89] Huang Y, Wen Z, Wang L, et al. Centrifuge testing of liquefaction mitigation effectiveness on sand foundations treated with nanoparticles [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249:249-256.
- [90] Gao H, Bu C, Wang Z, et al. Dynamic characteristics of expanded polystyrene composite soil under traffic loadings considering initial consolidation state [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 102: 86-98.
- [91] Zhang X D, Ren K. Experimental study on dynamic elastic modulus and critical dynamic stress of cinder-improved soil subgrade [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2018, 12(4):25-32.
- [92] Lu X S, Xiang W. Experimental study on dynamic characteristics of ionic soil stabilizer reinforcing red clay [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 374-377: 1391-1395.
- [93] Shi W, Hu R G, Zhang L L, et al. Experimental study on geosynthetic reinforced soil dynamic characteristics under cyclic loading [C]//First International Conference on Transportation Infrastructure and Materials. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. USA: DEStech Publications, 2017.
- [94] 湿陷性黄土地区建筑规范:GB 50025—2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [95] Wang L M, Wu Z J, Xia K, et al. Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic

- ground motion and its seismic design methods[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.02.021.
- [96] Wang L M, Wang Q, Zhong X M, et al. Study on improvement methods of saturated loess ground[C]//The 7th China-Japan Geotechnical Symposium. New Advances in Geotechnical Engineering. Beijing: China Communication Press, 2018: 342-346.
- [97] 建筑抗震设计标准:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [98] Mitchell J, Santamarina J. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [99] 刘士雨,俞缙,韩亮,等.三合土表面微生物诱导碳酸钙沉淀耐水性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019, 38(9):1718-1728.
- Liu Sh Y, Yu J, Han L, et al. Experimental study on water resistance of tabia surface with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1718-1728. (in Chinese)
- [100]何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展[J].岩土工程学报,2016,38(4):643-653.
- He J, Chu J, Liu H L, et al. Research advances in biogeotechnology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4):643-653. (in Chinese)
- [101]张优龙,杨坪.微生物改善土体性能研究进展[J].微生物学通报,2014,41(10):2122-2127.
- Zhang Y L, Yang P. Research progress in microorganism improving soil properties[J]. Microbiology China, 2014,41(10):2122-2127. (in Chinese)
- [102]建筑工程抗震性态设计通则(试用):CECS 160—2004[S].北京:中国计划出版社,2004.
- [103]建筑工程抗震性态设计规范:DB37/T 5055—2016[S].济南:山东省住房和城乡建设厅,2016.

(本文责编:池营营)