

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.21

加筋土结构动力特性研究现状综述

任非凡^{1,2,3}, 何江洋²

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 加筋土结构优越的抗震性能已在众多历史震害中得到证明, 随着公路等级的提高、列车的提速以及加筋土结构应用领域的拓宽, 对加筋土结构在地震和交通循环荷载作用下动力特性的研究具有重要的理论意义和工程应用价值。本文在大量文献分析的基础上, 从试验研究、数值模拟和理论分析方法三个方面论述了已有加筋土动力特性的研究现状, 分析了目前加筋土结构动力特性的研究进展, 并认为考虑复杂动荷载作用、地震-降雨耦合作用及筋材蠕变条件下的加筋土结构变形及破坏机理研究将成为本领域今后的研究重点和发展方向。

关键词: 加筋土结构; 动力特性; 研究现状

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0120-10

Research status review on dynamic properties of reinforced earth structure

REN Feifan^{1,2,3}, HE Jiangyang²

(1. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China*; 2. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 3. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China*)

Abstract: The excellent seismic performance of Geosynthetic reinforced soil has been proved by many historical earthquake damages, with the improvement of highway classification and train speed raising, the reinforced earth structure is widely applied in engineering activities. Therefore, it has the important theoretical significance and engineering application value to study the dynamic characteristics and deformation nature of reinforced soil under earthquake and traffic cyclic load. Based on studying a host of papers and books, this paper discussed the current research status of GRS's dynamic performance from three aspects: experimental studies, numerical simulation and theoretical analysis. At last it proposed the research about GRS's deformation and failure mechanism under the condition of complicated dynamic loading, coupling of earthquake and rainfall, or the creep of reinforcements will be the research focus and developmental trend in this field in the future.

Keywords: reinforced soil structure; dynamic properties; research status

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302221, 41001331); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120072120033); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLGP2012K017); 中央高校基本科研业务费专项资金资助; 湖北省交通科学研究计划项目(2011-700-3-42)

第一作者: 任非凡(1980-), 男, 山西芮城人, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为岩土锚固和加筋土结构。E-mail: feifan_ren@tongji.edu.cn

0 引言

加筋土(GRS, Geosynthetic Reinforced Soil)自法国工程师 Henri. Vidal^[1]于20世纪60年代提出以来,已被广泛应用于水利、铁路、城建、公路和港口等领域,取得了显著的经济效益、社会效益和环境效益。通过在土中埋设土工格栅、土工织物、土工格室等加筋体,不仅改善了土体强度及其变形稳定性,显现出良好的静力性能,而且其优越的动力性能也被越来越多的历史震害所证明,如美国 LomaPrieta 地震(1989)^[2]、Northridge 地震(1994)^[3-4]、Nisqually 地震(2001)^[5]、日本的阪神地震(1995年)^[7]、台湾吉吉大地震(1999年)^[8-10]、土耳其的 Koceli 地震(1999)^[11]、巴西萨尔瓦多地震(2001)^[12]、和汶川地震(2008年)^[13]中,传统的支挡结构几乎全部被破坏,而加筋土挡墙和边坡却很少发生稳定性破坏,保持着良好的结构和外形。尽管如此,仍然存在一些加筋土挡墙破坏的案例,通过对加筋土结构动力性能的震后调查可以检验其动力设计是否充分,Koerner(2013)^[14]对171座破坏后的加筋土挡墙进行调查后并建立了数据库,认为失败原因主要为以下方面:1)回填土未充分压实;2)基础材料过差;3)筋材间距过大($s > 800$ mm);4)筋材长度不够($L < 0.7H$);5)结构承受的动荷载过大。

目前,对加筋土结构在静力作用下的变形破坏特征研究已颇为成熟,但对其在动力作用下的性能尚处于积极探索阶段,甚至已经出现设计理论远远落后于工程应用的现象。主要原因如下:1)加筋土结构及其所受外力荷载影响因素复杂。加筋土结构动力特性不仅和自身的筋材、面板、填土的性质有关,而且受外界动力荷载振幅、频率、加速度放大系数等因素的影响。其中任何一个因素的改变都会影响加筋土结构的性能;2)动力作用下加筋土结构的土压力计算理论还不成熟,大多计算仍在一定的假设前提下进行。因此,在近期全球地震频发和国家大力发展高速铁路及有轨电车等基础设施的背景下,研究加筋土结构在动力作用下的性能已成为必然的趋势。

目前学者主要采用如下方法对加筋土挡墙的动力特性进行研究:1)利用试验去研究加筋土结构的动力特性,包括离心模型试验、动三轴试验、原型观测试验和振动台试验等,研究土的动应变、阻尼比、动强度与振动孔压等特性,以及加筋土结构在缩尺、足尺模型试验和接近实际应力场条件下的变形及破坏机理;2)采

用理论分析方法。主要有以极限平衡分析法为基础的拟静力分析法、拟动力分析法、简化条件解析法以及极限位移法等,其中对于拟静力法应用较多;3)借助数值分析方法对加筋土结构动力特性进行分析研究。由于数值分析成本低、效率高,其分析结果也具有一定的参考作用,但参数取值往往决定着分析结果的可靠性。本文结合文献调查主要从试验研究、数值计算以及理论分析三个方面阐述了加筋土结构动力特性研究进展,并进行了简要的评价和展望。

1 试验研究

试验方面以 Gregory N. Richardson(1974)^[15]等研究较早,该研究利用爆炸振动作为动力来源,对大尺寸加筋土挡墙在随机激励荷载作用下的动力行为进行现场试验研究,其试验结果对于后来学者的试验和数值分析有着较高的参考价值。近年来加筋土结构动力特性的模型试验研究及其细节汇总见表1:

1.1 动三轴试验研究

动三轴试验能比较方便的对影响加筋土单元动力特性的主要因素进行分析,揭示加筋土单元的动应力-应变关系、动强度特征,为深入研究加筋土结构(挡墙、边坡、路堤等)动力特性提供依据。众多研究者^[18-28]通过控制各因素(主要包括:筋材材料、加筋层数、围压、固结应力比、动应力幅值、频率等)对加筋体动强度、动弹性模量、阻尼比、动残余变形等动力特性进行了研究。

孙晋(2007)^[17]、杨燕(2007)^[18]分别用窗纱、软钢丝和塑料模拟土工格栅,对加筋粉土展开了动三轴试验,模拟了加筋路基在交通荷载作用下的动力特性;杨帅东(2010)^[19]用窗纱、薄土工布对加筋粉土进行了动三轴试验;李文旭(2011)^[22]、卢萍、王宁等(2013)^[23]对加筋黏性土进行动三轴试验,认为筋材能提升加筋土体的动强度,在较大的围压下性能提升越明显;潘越(2013)^[24]利用动三轴分析了加筋粉土和黏土在交通荷载下的动力特性,总结了动模量和阻尼比随围压和筋材层数的变化规律;Naeni(2014)^[25]对土工织物加筋的砂土与不同含量粉土的混合物(0%~50%)进行了动三轴试验,认为在加筋体中仍然存在“临界细粒含量”,从而对加筋土动模量和阻尼比产生了规律性的变化影响。此外,一些学者也对加筋特殊土的动力特性进行了研究,主要包括粉煤灰土^[26]、石灰改良土^[27]、黄土^[28]、黏质砂土^[22,23,29]等。

表 1 加筋土结构模型试验研究汇总
Table 1 Summary of GRS structure dynamic model tests

参考文献	试验类型	模型高度 (cm)/ 原型高度 (m)	长高比	输入激励	填土类型	筋材 (面板材料)	破坏原因或研究因素
Richardson&Lee (1974,1975)	W/(振动台)	28~42/3.4~5.2	1.3~1.5	正弦	砂土	聚酯薄膜/铝条(铝)	内部破坏;拉拔破裂
Richardson 等(1977)	W/(全尺)	610/6.1	0.8	爆炸源	砾石砂	钢带(混凝土面板)	无明显破裂面 (向外倾斜 5.5%)
Wolf 等(1978)	W;dW/ (振动台)	31~61/3.7~7.1	0.5~2.5	正弦波	砂土	铝条(铝)	内部外部稳定性, 拉拔破坏
Sakaguchi 等(1992)	W;S/(振动 台;离心)	30,150/-	0.3~0.8	正弦波	砂土	纸/纤维/格栅 (泡沫模块)	发生柔性较大变形
Murata(1994)	dS;dW/ (1/2 缩尺)	248/5	0.4	正弦波	砂土	格栅(格宾; 混凝土面板)	基础液化;沉降
Bathurst 等(1996)	W&S/ (振动台)	102/6.1	0.7	正弦波	砂土	土工格栅(混凝土)	倾倒/上部面板滑移
Nova-Roessing(1999)	S/dW(离心)	15,38/7.3	0.7~0.9	正弦波, 地震波	砂土	土工织物金属格栅 (包裹式/金属格栅)	柔性较大变形;拉拔破坏
El-Eman 和 Bathurst (2004,2005,2007)	W/(振动台)	100/6	2.4	正弦波	标准砂	土工格栅(空心钢)	筋材长度/间距/刚度;筋材 总拉力;加速度放大效应
Ling 等(2005)	mW/ (振动台)	280/-	1.23	kobe 地震波	细砂土	土工格栅 (混凝土砌块)	侧向/竖向土压力;面板位移, 筋材应变;加速度放大系数
Nova-Roessig(2006)	S;dS;dW/ (离心)	80/7.3	坡比 2V:1H	正弦波, 地震波	蒙特利 #30 砂	无纺土工织物 & 金属丝网(包裹式)	坡面水平位移;侧向 位移;加速度放大效应
Latha 和 Krishna(2008)	W/(振动台)	60/-	0.6	正弦波	印度砂土	有纺土工织物(包裹 式 & 刚性面板)	填土密度影响;挡墙面板 形变;加速度放大效应
刘华北(2010)	W/离心	195/7.8	1.15	正弦波、 kobe 地震波	粉质黏土 /砂土	土工织物(铝块)	残余侧向位移;填土表 面沉降;加速度放大效应
Kuo-Hsin Yang(2013)	dS/(离心)	160/8	0.44	正弦波	细石英砂	无纺土工织物 (包裹式)	加速度放大效应

注:W—加筋土挡墙;S—加筋土边坡;dW—(双面)路堤式加筋土挡墙;dS—(双面)路堤式加筋土边坡;mW—模块式加筋土挡墙。

以上研究受仪器设备条件或受场地地质条件限制,主要针对细粒土,并利用其他相似材料替代真实筋材,而国内外相关规范明确规定加筋土结构(特别是加筋土挡墙)应使用级配较好的粗颗粒填料^[16]。因此,为避免尺寸效应带来影响,近年来一些科研单位引入大尺寸三轴试验仪对加筋土的动力特性进行研究,毕静(2009)^[20]利用大型三轴仪对应用于坝坡的土工格栅加筋砂砾料的动力特性展开了研究,认为改进的沈珠江模型较好的模拟加筋粗粒土的残余变形规律;韩冬极(2013)^[21]对土工格栅加筋碎石土进行了大型动三轴试验,分析固结压力、动应力和振动频率等因素对震动作用下加筋体的应变软化的影响,并建立了相应的软化模型。

已有研究表明^[17,19,27]:加筋土结构的动强度受动应力幅值、围压和加筋层数的影响比较大;1)在较小的应变范围内($<10^{-3}$),随着动应变的增大,加筋土的动弹性模量减小、阻尼比逐渐增大;当动应变超过 0.001 时,动弹性模量逐渐趋于稳定;2)随着围压的增大,加筋土的动弹性模量增大、阻尼比减小;3)筋材层数对土体阻尼比有着明显的影响,随着加筋层数的上

升,阻尼比逐渐变大,但对动弹性模量影响不大。

1.2 振动台试验

振动台试验通过输入不同的模拟动荷载,可以相对容易的控制和研究各种因素对于加筋土结构动力性能的影响。Richardson 和 Lee(1975)^[30]对 300 mm 高的加筋土挡墙进行了模型试验,受试验条件的限制,仅简单分析了影响加筋土挡墙动力特性的因素。Ramakrishnan 等(1998)^[40]利用振动台研究了土工织物包裹式面板和模块式面板挡墙,认为模块式挡墙的临界加速度大约是包裹式挡墙的两倍;后来的学者在此基础上改进并深入研究各个影响因素,El-Eman 和 Bathurst(2004,2005,2007)^[31-33]通过一系列振动台试验,系统的研究了面板类型、筋材间距、筋材长度、筋材硬度等因素对加筋土挡墙动力特性的影响,研究表明:随着筋材间距减小、筋材长度以及刚度的增加,侧向位移随之明显的减小;Sabemahani 等(2009)^[34]通过试验提出主导加筋土挡墙动力性能的参数是筋材刚度,而不是筋材的抗拉强度;Zarnani 和 Bathurst(2007)^[35]认为动土压力可以通过在挡墙面板后设置土工泡沫来降低。

目前,多数研究者均采用缩尺振动台试验对加筋土结构动力特性进行研究,模型尺寸相对较小(如 $H = 0.7\text{ m}^{[36]}$ 、 $0.35\text{ m}^{[37]}$ 、 $0.5\text{ m}^{[38]}$ 、 $0.6\text{ m}^{[39]}$),而尺寸效应对测量参数的准确反馈有着明显的影响。因此,也有一些学者进行了足尺振动台试验;Ling 等(2005)^[52]对三组大尺寸模块式加筋挡墙($H = 2.8\text{ m}$)使用 Kobe 地震波激励进行振动台试验,试验观察出地震作用下的挡墙性能随着顶部筋材层数的增多、筋材间距的减少、顶部模块注浆强化连接而得到提升;朱宏伟等(2012)^[41]通过大型振动台试验对面板条带式 and 包裹式加筋土挡墙的动力响应特性进行比较,结果表明,在相同试验条件下,包裹式面板挡墙无论是形变还是水平加速度放大系数都小于条带式加筋土挡墙,并建议在抗震设防区(特别是是高地震烈度区)包裹式加筋土挡墙应作为一种优选结构;Latha(2015)^[39]采用振动台试验,对比研究了模块式面板和刚性面板加筋土挡墙的动力性能,主要通过分析在不同级别的正弦震动激励下,填土密度、筋材层数、筋材类型对于面板形变、最大沉降和不同高度的加速度放大系数等因素的影响,认为筋材类型和数量对于两种挡墙的动力性能都有着显著的影响,位移随着密度的增加而下降。由于模块间的错开堆放,使得模块式挡墙的动力性能优于刚性面板挡墙。

1.3 离心模型试验

离心振动台试验可真实反映挡墙在接近真实应力场下的动力特性,因此对动力作用下加筋土结构的变形规律和破坏机理的研究相对更为准确和可靠。Sakaguchi(1994)^[43]利用动力离心模型研究了填土密实度对于加筋土挡墙的影响,认为随着填土密实度的提高,面板位移减小;此外,Takahashi(1999)^[44]采用动力离心模型试验研究了加筋长度、加筋间距以及回填土密实度等因素对加筋土结构残余变形的影响;Nova Roessig(2006)^[45]分别对不同加筋材料(金属网和土工织物)的加筋土边坡进行动力离心模型试验,揭示其变形破坏机理,确定影响加筋土边坡动力变形的主要影响因素;贺会团(2007)^[46]通过离心振动台研究加筋挡土墙筋材长度、间距、刚度等因素对加筋挡墙变形特征以及动力特性影响进行了研究。研究表明:加筋土挡墙侧向位移量随着加筋层间距的缩小而减小;加筋作用增强了填土的抗剪强度,大幅度减小了填土对刚性面板的作用,使挡墙整体稳定性得到提升;Jun Izawa(2008)^[47]利用动力离心试验研究了回填土饱和度对加筋土挡墙动力特性的影响,在震动作用下,非饱和填土表现出了较好的动力稳定性、未出现明显的形变,而饱和状态填土的挡墙出现

大的残余变形,表现出较低的动力稳定性,并认为主要原因是由于孔压的上升导致填土刚度的降低、以及筋材有效围压的降低导致筋土间抗拔力的下降;Liping Wang(2011)^[48]通过离心模型试验研究了土工织物加筋路堤在地震作用下的动力特性,主要考虑了(斜坡坡率、填土含水率、筋材间距和输入震动波的影响,认为土工织物能有效的降低路堤的变形、限制内部发生滑移破坏,通过增加筋材层数、降低含水率、降低斜坡坡率、降低地震波振幅能降低筋材应变和加筋路堤的水平位移。

动力离心模型试验虽然能够较真实的模拟应力场,可以较容易的控制试验条件和影响因素,但是其模型的建立需严格满足相似定律,因此,寻找合适的试验替代材料是试验成功与否的首要任务。另外,动力离心模型试验一般模型尺寸较小,因此,合理安设应力应变及加速度传感器等相关监测元件也很大程度上影响试验结果的可靠性。

2 数值分析研究

众所周知,试验手段易受测试技术影响,且试验工况相对简单,成本花费较高,具有一定的局限性。随着计算机性能的日益提升,数值分析方法以其独特的优越性受到了广泛的应用,目前研究人员运用此方法对加筋土结构的动力特性做了较多研究。但是,由于数值模拟结果的精确程度取决于参数的合理性,因此仍需要试验对参数进行确定和验证,不同学者对加筋土结构的数值研究汇总于表2。

Bathurst 和 Hatami(1998)^[49]、Viera 等(2006)^[50]利用数值方法分析边界条件和基底加速度对加筋土挡墙动力特性的影响;Hatami(2000)^[51]研究了各种设计参数对于加筋土挡墙自然频率的影响。后来,其他学者继续对土体特性和筋材布置方式的影响进行了探索^[52],Rowe 和 Ho(1998)^[53]通过数值分析得出筋材刚度对加筋土挡墙的变形有着显著的影响;刘华北(2006,2008)^[54-55]分别使用动力弹塑性、非线性动力有限元研究各种参数对挡墙变形、筋材拉力的影响,主要包括竖向地震、筋材长度、层间距、填土与面板之间的摩擦角等因素;Lee(2010,2012)^[56]用非线性有限元模拟加筋土挡墙在真实的多向地面震动条件下的性能,并进行设计参数研究(包括墙高、填土摩擦角、筋材间距和筋材刚度等),给出了面板水平位移、挡墙最大沉降的预估公式;匡希龙等(2013)^[57]建立了加筋土的黏弹塑性力学响应模型,能较好的模拟加筋土结构在循环荷载作用下的变形性能。

表 2 加筋土结构动力特性数值研究汇总

Table 2 Summary of GRS structure numerical analysis

	加筋土结构	软件(方法)	筋材模型	填土模型	界面模型(单元)	输入激励	验证	研究因素
EI-Emam 等(2001)	W	FLAC(FD)	弹塑性	摩尔库伦弹塑性	——	正弦波	缩尺振动台	位移;筋材拉力;形变;加速度;墙趾
Helwany 等(2001)	W	DYNA3D(FE)	线弹性	Ramberg-Osgood	Penalty based interface element	正弦波	全尺振动台	加速度;位移;土压力
Ling(2004)	W	DIANA-SWANDYNE(FE)	Bounding surface plasticity model	广义塑性	Elastic perfectly plastic interface	正弦波	离心试验	加速度位移;竖侧向土压力
Fujii 等(2006)	W	FLIP(FE)	弹性	Multi-spring	Joint element	Kobe 波	离心试验	加速度;位移;土压力
刘华北(2006,2009)	modW	DIANA-SWANDYNE(FE)	Bounding surface plasticity model	Pastor-Zienkiewicz III	Tin-layer element	神户地震波	动三轴	加筋长度/间距/蠕变, H/V 地震作用(挡墙变形/筋材内力/内部稳定性)
Lee(2012)	W	LS-NYDA(FE)	plastic-kinematic model	Geologic cap model	Penalty based interface element	地震波	振动台	墙高,填土摩擦角,筋材间距和筋材刚度(面板水平位移/挡墙最大沉降预估公式)
匡希龙(2013)	E	ANSYS(FE)	Kelvin 黏弹性模型	Ducker-Prager elastic plasticity	——	交通循环荷载	离心试验	水平竖向位移
刘华北等(2014)	mulW	DIANA-SWANDYNE(FE)	Bounding surface plasticity model	广义塑性	Thin-layer element	kobe 波	离心试验	面板残余侧向位移;筋材拉力/面板连接荷载

注:1) W—加筋土挡墙;S—加筋土边坡;modW—模块式加筋土挡墙;mulW—多级加筋土挡墙;E—加筋土路基

2) FD:有限差分法;FE:有限元法。

随着加筋土挡墙在国内外广泛的应用,结构设计高度和复杂程度也在不断增加,由于缺乏对超高加筋土挡墙($H > 6\text{ m}$)动力性能的研究,每年都有许多这种类型的挡墙由于在动力设计方面的缺乏而发生破坏事故。但由于模型试验成本消耗较大,数值分析法被成功的运用到研究超高和复杂结构的加筋土挡墙的动力特性之中(如多级挡墙),在以往的研究中,对于土体和筋材的简单或者复杂的本构模型都有涉及,摩尔-库伦非线性弹塑性模型对研究加筋土结构的动力特性较为适用;Guler(2004)^[59]与 Fakharian(2007)^[60]研究了复杂形式加筋土挡墙的面板和桥台在动力作用下的特性;刘华北(2014)^[61]运用有限元法研究多级与单级面板挡墙动力特性的异同点,取 9 米高的三级和垂直面板加筋土挡墙和作为研究对象,得出挡墙的共振频率随着不同面板层间水平距离的增加而增大,认为多级面板布置可以降低残余侧向位移和筋材平均荷载;在相同的筋材长度和间距条件下,多级面板挡墙筋材与面板连接处的拉力要小于单级垂直面板挡墙,研究成果展示了此类挡墙独特的动力性能。

3 理论分析研究

3.1 拟静力分析

在试验研究和数值分析研究的基础上,许多研究

人员也从理论分析的角度去研究加筋土结构的动力特性,主要有拟静力分析方法(极限分析、极限平衡法)和拟动力分析方法。其中,拟静力方法是一种工程上常用的动力分析方法,该方法以加筋土挡墙静力极限平衡法为基础,将地震作用简化为一个惯性力系附加在研究对象上,其核心是设计地震加速度的确定问题。

Basha 和 Babu(2009)^[62]用拟静力法分析了地震作用下加筋土挡墙抵抗拉、拔的内部稳定性;Chouhury 和 Ahmad(2009)^[63]使用拟静力极限平衡法分析了涉水加筋土挡墙在动力作用下的内部稳定性;杨有海(2002)^[64]用拟静力法研究了加筋土挡墙在水平地震作用下的稳定性,并给出在外界荷载作用下的筋条临界长度;Nouri(2006,2007)^[65-66]使用考虑水平条分法的极限平衡分析计算加筋土边坡和挡墙的强度和稳定性,与试验结果相符合;赵炼恒(2009)^[67]基于塑性极限上限理论,同时考虑水平和竖向地震影响,假定不同的破坏面,并结合不同加筋模式,推导了一定边坡高度条件下的临界加筋强度计算公式和不同加筋强度条件下的边坡临界高度;王丽艳(2015)^[68]使用拟静力法推导出加筋土挡墙在地震作用下水平形变的理论计算方法,对预测地震作用下土工格栅加筋土挡墙的水平位移较为有效。

3.2 拟动力分析

针对拟静力法在动力分析中的上述缺陷,Steedman

(1990)^[69]提出了比较贴近地震动力特性的拟动力法,在动力分析中得到较多的应用。此后学者利用拟动力法分析了加筋土结构在动力作用下的性能,Nimbalkar (2006)^[70]等用基于水平条分法的拟动力法去分析加筋土挡墙的内部稳定性;Choudhury (2008)^[71]等用拟动力法对涉水加筋土挡墙抵抗基底滑移和倾覆破坏模式的外部稳定性进行了分析;Shekarian (2008)^[72]等发展了Nimbalkar^[70]的研究成果,推导了加筋土挡墙的筋材拉力总和、对面板的合力、临界破裂角的计算公式;Ahmad (2008)^[73]同时考虑了线性和多线段的破坏面,提出了涉水加筋土挡墙动力稳定性的计算公式,Narasimha (2009)^[74]考虑了滑动块体在动力拉拔作用下的位移,研究了加筋土挡墙的动力稳定性;Basha (2010)^[75]利用拟动力法,提出了在经历水平和竖向正弦波激励下的加筋土结构基于可靠性的最优设计。通过将填土特性、筋材的形状和强度设定为变量,主要考虑如土摩擦角、水平/竖向地震加速度、剪切波速、加速度放大系数等影响因素,计算出系统在拉拔破坏下可能的破坏面,并强调了剪切波速在结构可靠性分析的重要性;程亚男 (2013, 2014)^[76]在同时考虑水平和竖向地震作用条件下,采用拟动力法和水平条分法分析加筋挡墙和加筋边坡的动力稳定性,研究填土内摩擦角、填土重度、地震加速度系数、上部超载等因素对加筋效果的影响,得到了不同筋材条件下的拉力总和、挡墙破裂角的解析解;孙树林 (2015)^[78]采用拟动力法和水平条分法,分析了涉水挡土墙在地震和浪涌作用下的动力稳定性,通过简化破裂面形式求出了计算筋材拉力总和和临界破裂角的公式。

综上所述,拟静力法物理概念清晰,与全面考虑结构物动力相互作用的分析方法相比,计算方法较为简单,计算工作量很小、参数易于确定。但是,拟静力法也存有一些弊端,如假设块体为刚性、整个挡墙的加速度是恒定的,忽略了地震荷载的动力性质,也没有考虑震动作用时间和频率、挡墙顶底部震动波的相位差、填土中加速度的放大效应等因素的影响。而拟动力分析法克服了拟静力法的上述缺陷,可以部分地反映土体与结构物之间的动力耦合关系。

4 评价与展望

4.1 评价

加筋土结构由于其优越的抗震性能已在工程中得到广泛应用,对其动力特性的研究已成为岩土工程界的热点之一。本文对加筋土结构动力特性的研究现状进行了详细的分析。尽管国内外岩土界认识对于加筋土结构的应用有着较大的关注,但是现阶段对于加筋

土结构的研究尚处于经验积累的过程中,相比于工程实践,加筋土结构的理论研究远远落后,且对加筋土结构动力特性的研究对象大多局限于加筋土挡墙,且研究方法上多以数值分析手段为主,迫切需要在深度和宽度上提升对加筋土结构特性的认识。

在试验方面,尽管国内外学者针对加筋土结构的动力特性及其影响因素展开了许多试验研究,并获得了丰硕成果,然而在试验方法和测试结果分析等方面还存在诸多问题和争议:

(1) 由于对加筋土动力特性的研究方法不同,研究人员所用的试验方法、试验设备试验手段、筋材物理参数及性质标准不统一,因此不同研究人员得出的加筋土动力特性规律差别较大。

(2) 试验中采用的筋材和填土类型不同、尺寸效应较明显,需要更多的研究去探究如何真实的反应加筋土结构在动力作用下的特性。如:在利用室内三轴试验分析加筋体的强度和应力关系时,由于试样直径过小,存在较大的尺寸效应,筋材的水平约束作用等无法充分发挥,筋材加筋作用在测试结果中无法充分的表现出来。

(3) 由于加筋土挡墙结构特性和影响因素的复杂性和多样性,试验结果数据的参考性和可比性不高。

在加筋土动力特性数值分析和理论分析方面,研究加筋土的动力变形特性时可以综合考虑真实的加载方式以及围压等周边环境因素带来的影响,因此需要建立更贴近真实情况下的加筋土本构计算模型,合理确定筋土界面相互作用参数。对于数值分析,方法不应局限于有限元法,需要根据实际情况,更多的引入边界元、离散元等方法到加筋土动力特性的数值模拟中来,从而比较论证各种方法的适用性和准确性,同时对于加筋土的本构模型以及筋-土界面作用也需要更深的试验和理论研究。鉴于以上原因,尽管有限元法有诸多优点,但在工程设计中的应用往往不多。通常情况下,对于一般加筋土工程,主要在极限平衡理论的基础上结合实际工程的具体边界条件建立半经验半理论分析方法进行设计;对于工程条件特殊、复杂的工程,在考虑筋材性质和界面相互作用的基础上,采用岩土有限元法进行分析,并应用观测和模型试验配合检验比较,即理论和实验相结合,并辅以数值方法进行模拟。

4.2 展望

土工合成材料加筋土结构被广泛用于桥台、道路边坡等工程实践中,道路车辆引起的循环荷载和地震作用对加筋土结构的影响在结构设计中不容忽视。动荷载作用下,受惯性力和阻尼作用的影响,土的受力状态比

静载作用下复杂的多,同时,车辆行驶对路堤产生的竖向荷载、水平荷载、路面的不平整度、交通荷载的随机性及荷载空间位置的变化等影响因素也不容忽视。这些因素最接近真实条件下的公路结构荷载情况,研究周边环境因素和真实车辆往复荷载影响下加筋土结构的特性,就应该建立更加贴近现实情况的模型。

(1)随着高速铁路、高速公路的建设和发展,考虑高频动荷载作用下铁路加筋基床或路堤以及复杂交通荷载作用下公路加筋土结构的动力特性已成为重要的热点研究课题,因此,加筋土结构在复杂动荷载作用下的动力性能将会是日后研究的方向之一。

(2)我国幅员辽阔,存在着许多不同土类,且不同土类有不同的工程性质,可考虑对不同土类(如软土、黄土、盐渍土、膨胀土等)进行系统的加筋土动力特性测试,研究土体加筋后的动强度特性。

(3)由于地震和降雨经常同时发生,如何定量评估地震-降雨耦合作用下加筋土结构的变形及破坏特征也是需要关注的方向,此外,土工合成材料及加筋土结构在城市垃圾填埋场及核废料处置工程中日益得到广泛应用,筋材的物理力学特性在长期的高温或腐蚀性化学溶液中将发生蠕变和消弱,在此情况下,加筋土结构的动力响应和变形特征也将是研究热点和方向。

参考文献:

- [1] 陈忠达.公路挡土墙设计[M].北京:人民交通出版社,1999.
CHEN Zhongda. The design of highway retaining wall [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [2] Eliahu U, Watt S. Geogrid-reinforced Wall Withstands Earthquake [J]. Geotechnical Fabrics Report, 1991, 9(2): 8-13.
- [3] Sandri D. A performance summary of reinforced soil structures in the Greater Los Angeles area after the Northridge earthquake [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(4-6): 235-253.
- [4] White D M, Holtz R D. Performance of geosynthetic-reinforced slopes and walls during the Northridge, California Earthquake of January 17, 1994. In: Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan, 1997, 2: 965-972.
- [5] Kramer S L, Paulsen, S. B. Seismic performance of MSE structures in Washington State. In: Seismic Design and Performance of Mechanically Stabilized Earth Retaining Structures. International Geosynthetics Engineering Forum, Taipei, Taiwan, 2001: 145-174.
- [6] Tatsuoka F, Tateyama M, Mohri Y, et al. Remedial treatment of soil structures using geosynthetic-reinforcing technology [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, (25): 204-220.
- [7] Nishimura J, Hirai T, Iwasaki K, et al. Earthquake resistance of geogrid-reinforced soil walls based on a study conducted following the southern Hyogo earthquake. In: Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Kyushu, Japan, 1996, 1: 439-444.
- [8] Chen R H, Liu C N, Chen K S. et al. Seismic performance and failure analysis of mechanically stabilized earth retaining structures during the Chi-Chi earthquake. In: Seismic Design and Performance of Mechanically Stabilized Earth Retaining Structures [J]. International Geosynthetics Engineering Forum, Taipei, Taiwan, et al: 3-20.
- [9] Ling H, Leshchinsky D, Tatsuoka, F. (Eds.). New York: Reinforced Soil Engineering Advances in Research and Practice [M]. Marcel Dekker, : 378-385.
- [10] Huang C C, Chou L H, Tatsuoka F, Seismic displacement of geosynthetic reinforced soil modular block walls [J]. Geosynthetics International, 2003, 10(1): 2-23.
- [11] Koseki J, Bathurst R J, Guler E, et al. Seismic stability of reinforced soil walls [J]. Proceedings of the Eighth International Conference on Geosynthetics, 2006, 1: 51-77.
- [12] Race R, del Cid H. Seismic performance of modular block retaining wall structures during the January 2001 El Salvador Earthquake [A]. In: Seismic Design and Performance of Mechanically Stabilized Earth Retaining Structures [C]. International Geosynthetics Engineering Forum, Taipei, Taiwan, 2001, 125-144.
- [13] 周德培, 张建经, 汤涌. 汶川地震中道路边坡工程震害分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 565-576.
ZHOU Depei, ZHANG Jianjing, TANG Yong. Seismic damage analysis of road slopes in Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 565-576.
- [14] Robert M. Koerner, George R. Koerner. A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 40: 20-27.
- [15] Richardson G N, Lee K L. Seismic design of reinforced earthwalls [J]. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(2):

- 167-188.
- [16] JTGT D32—2012. 公路土工合成材料应用技术规范[S].
JTGT D32—2012. Technical specifications for application of geosynthetics in highway [S].
- [17] 孙晋. 加筋土动力特性试验研究[D]. 太原理工大学, 2004.
SUN Jin. The experimental study on the dynamic behavior of reinforced soil [D]. Taiyuan University of Technology, 2004.
- [18] 杨燕. 加筋路基在重复车辆荷载作用下的变形性状研究[D]. 长沙理工大学, 2007.
YANG Yan. Dynamic deformation behavior of reinforced embankment under repeated traffic loads [D]. Changsha University of Science and Technology, 2007.
- [19] 杨帅东. 加筋土动弹性模量的动三轴试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26: 65-69.
YANG Shuaidong. Triaxial test study on dynamic elastic modulus of reinforced soil [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26: 65-69.
- [20] 毕静. 加筋粗粒土变形和强度特性的研究[D]. 大连理工大学, 2009.
BI Jing. Study on the deformation and strength behavior of coarse grained soil reinforced with geogrid [D]. Taiyuan University of Technology, 2009.
- [21] 韩冬极. 加筋粗颗粒土本构关系的大型三轴试验研究[J]. 同济大学, 2013.
HAN Dongji. Research on the constitutive relationship of reinforced coarse grained soil by large-scale triaxial tests [J]. Tongji University, 2013.
- [22] 李文旭, 王宁, 韩志型, 等. 土工格栅加筋黏性土动力性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2011; 41(7).
LI Wenxu, WANG Ning, HAN Zhixing, et al. Test research on dynamic behavior of geo-grid reinforced clays [J]. Industrial Construction, 2011, 41(7).
- [23] 卢萍, 王宁, 韩志型, 等. 交通荷载作用下加筋粘性土强度的影响因素试验研究[J]. 建筑科学, 2013(3): 81-83.
LU Ping, WANG Ning, HAN Zhixing, et al. Factors of dynamic strength test research on geogrid reinforced clays under cyclic loading [J]. Building Science, 2013(3): 81-83.
- [24] 潘越. 循环荷载作用下土工合成材料加筋土动力特性研究[D]. 青岛理工大学, 2013.
PAN Yue. The dynamic characteristics research of geosynthetic materials reinforced soil under cyclic loading [D]. Qingdao Technological University, 2013.
- [25] S A Naeini, N Gholampoor. Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014(42): 611-619.
- [26] 梁波. 加筋粉煤灰的静动强度指标试验与研究[J]. 实验力学, 1998, 13(1): 85-91.
LIANG Bo. Experiment and analysis of static and dynamic strength index for reinforced flyash [J]. Laboratory Mechanics, 1998, 13(1): 85-91.
- [27] 楼增焕. 交通循环荷载下加筋灰土动三轴试验研究[D]. 同济大学, 2009.
LOU Zenghuan. dynamic triaxial test of reinforced lime-stabilized soil under cyclic traffic loads [D]. TONGJI University, 2009.
- [28] 谢婉丽. 加筋土动力特性的三轴试验研究[J]. 灾害学, 2008, 23(S).
XIE Wanli. Triaxial test on dynamic properties of reinforced soil [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(S).
- [29] Masoud M S, Farhad H B. Bynamic behavior of reinforced clayey sand under cyclic loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014 (42): 564-572.
- [30] Bathrust R J, Hatami K. Seismic response analysis of a geosynthetic reinforced soil retaining wall [J]. Geosynthetics International, 1998, 5 (1-2): 127-166.
- [31] El-Emam M, Bathrust R J. Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(1): 33-49.
- [32] El-Emam M M, Bathurst R J. Facing contribution to seismic response of reduced-scale reinforced Soil Walls [J]. Geosynthetic International, 2005, 12(5): 215-238.
- [33] El-Emam M M, Bathurst R J. Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table [J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2004, 4: 13-32.
- [34] Sabermahani M, Ghalandarzadeh A, Fakhre A. Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2): 121-136.
- [35] Zarnani S, Bathurst RJ. Experimental investigation of EPS geofom seismic buffer using shaking table tests [J]. Geosynthetics International, 2007, 14 (3): 165-177.
- [36] Wang L, Chen G, Chen S. Experimental study on seismic response of geogrid reinforced rigid retaining walls with saturated backfill sand [J]. Geotext Geomemb, 2015, 43(1): 35-45.
- [37] Lo Grasso A S, Maugeri M, Recalcatti P. Seismic behavior of geosynthetic reinforced slopes with overload by shaking table tests. Slopes and retaining

- structures under static and seismic conditions. In: ASCE Geotechnical Special Publication. 2005, 140.
- [38] Watanabe K, Munaf Y, Koseki J, et al. Behaviors of several types of model retaining walls subjected to irregular excitation[J]. Soils Found, 2003, 43 (5): 13 - 27.
- [39] Latha GM, Krishna AM. Seismic response of reinforced soil retaining wall models: influence of backfill relative density [J]. Geotext. Geomemb, 2008, 26 (4): 335 - 349.
- [40] Ramakrishnan K, Budhu M, Britto A. Laboratory seismic tests on geotextile wrap-faced and geotextile-reinforced segmental retaining walls [J]. Geosynth. 1998, 5 (12): 55 - 71.
- [41] 朱宏伟,姚令侃,张旭海. 两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J]. 岩土工程学报, 2012 (11): 2072 - 2080.
- ZHU Hongwei. Comparison of dynamic characteristics between netted and packaged reinforced soil retaining walls and recommendations for seismic design [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012 (11): 2072 - 2080.
- [42] Latha G M, Santhanakumar P. Seismic response of reduced-scale modular block and rigid faced reinforced walls through shaking table tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43 (4): 307 - 316.
- [43] Sakaguchi M, Yamada K, Tanaka M. Prediction of deformation of geotextile reinforced walls subjected to earthquakes [J]. Geomembranes and Related Products, Singapore. 1994, 521 - 524.
- [44] Takahashi A, Takemura J, Izawa J. Dynamic behavior of vertical geogrid-reinforced soil during earthquake [J]. Earthquake Engineering Symposium, 1999 (2): 1551 - 1556.
- [45] Nova-Roessig L, Sitar N. Centrifuge model studies of the seismic response of reinforced soil slopes [J]. Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, 2006, 132 (3): 388 - 400.
- [46] 贺会团. 加筋挡土墙关键技术研究 [D]. 南京水利科学研究院, 2007.
- HE Huituan. Key techniques of reinforced retaining wall [D]. Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007.
- [47] Jun Izawa. Centrifuge shaking table tests on saturated reinforced soil walls. In: Proceeding of The 4th Asian Regional Conference On Geosynthetics, Shanghai, China. 2008.
- [48] Liping Wang, Ga Zhang, JianMin Zhang. Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011 (29): 222 - 232.
- [49] Bathurst RJ, Hatami K. Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall [J]. Geosynthetics International, 1998, 5 (1 - 2): 127 - 166.
- [50] Vieira CS, Lopes ML, Caldeira LMMS. Numerical modeling of a geosynthetic reinforced soil retaining wall subjected to seismic loading. In: Proceedings of the Eighth International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, 2006, 4: 1365 - 1370.
- [51] Hatami K, Bathurst RJ. Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19 (3): 137 - 157.
- [52] Hoe I Ling, Huabei Liu, Yoshiyuki Mohri. Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131 (10): 1056 - 1065.
- [53] Rowe RK, Ho SK. Horizontal deformation in reinforced soil walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35 (2): 312 - 327.
- [54] 刘华北. 水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡墙动力分析 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (5): 594 - 599.
- LIU Huabei. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (5): 594 - 599.
- [55] 刘华北. 地震作用下模块式面板土工合成材料加筋土挡墙的内部稳定分析 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (2): 278 - 283.
- LIU Huabei. Internal stability analysis of segmental geosynthetic-reinforced soil retaining walls subjected to seismic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (2): 278 - 283.
- [56] KZZ Lee, NY Chang, HY Ko. Numerical simulation of geosynthetic-reinforced soil walls under seismic shaking [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010 (28): 317 - 334.
- [57] 匡希龙,周志刚,李雨舟. 循环荷载下加筋土黏弹塑性力学模型与数值分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013 (4): 1672 - 1677.
- KUANG Xilong, ZHOU Zhigang, LI Yuzhou. Viscoelast-plasticity model and numerical analysis of reinforcement engineering under cycle load [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013 (4): 1672 - 1677.
- [58] Liu H, Wang X, Song E. Reinforcement load and deformation mode of geosynthetic-reinforced soil walls subject to seismic loading during service life [J]. Geotext Geomembr, 2011, 29 (1): 1 - 16.

- [59] Guler E, Bakalei E. Parametric seismic analysis of tiered geosynthetic reinforced segmental retaining walls. In: Proceedings of the Third European Geosynthetic Conference, Munich, Germany. 2:625-630.
- [60] Fakharian K, Attar I H. Static and seismic numerical modeling of geosynthetic-reinforced soil segmental bridge abutments [J]. *Geosynthetics International*, 2007, 14 (4): 228-243.
- [61] Huabei Liu, Guangqing Yang, Hoe I Ling. Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 61-62: 1-12.
- [62] B Munwar Basha, G L Sivakumar Babu. Reliability based design optimization for internal stability of reinforced soil structures using pseudo-static method [J]. *International Foundation Congress and Equipment*, 2009: 364-371.
- [63] Choudhury D, S M. Ahmad External stability of waterfront reinforced soil structures under seismic conditions using a pseudo-static approach [J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16 (1): 1-10.
- [64] 杨有海. 地震作用下加筋土挡墙稳定性分析[J]. *兰州铁道学院学报(自然科学版)*, 2002, 21(4): 9-11.
YANG Youhai. Stability analysis on the reinforced earth retaining wall under earthquake loadings [J]. *Journal of Lanzhou Railway University (Natural Sciences)*, 2002, 21(4): 9-11.
- [65] Nouri H, Fakher A, Jones C J F P. Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24 (3): 175-187.
- [66] Nouri H, Fakher A, Jones C J F P. Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium horizontal slices method [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 26(3): 263-278.
- [67] 赵炼恒, 李亮, 杨峰, 等. 加筋土坡动态稳定性拟静力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009(9): 1904-1917.
ZHAO Lianheng, LI Liang, YANG Feng, *et al.* Dynamic stability pseudo-static analysis of reinforcement soil slopes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009(9): 1904-1917.
- [68] 王丽艳. 土工格栅加筋土挡墙水平变形的拟静力计算方法[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(3):
WANG Liyan. Pseudo-static method for horizontal deformation of geo-grid reinforced soil retaining wall under earthquake [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(3):
- [69] STEEDMAN R, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(1): 103-112.
- [70] S S Nimbalkar D. Choudhury J N. Mandal Seismic stability of reinforced-soil wall by pseudo-dynamic method [J]. *Geosynthetics International*, 2006, 13 (3): 111-119.
- [71] Choudhury D, Ahmad S M. Stability of waterfront retaining wall subjected to pseudo-dynamic earthquake forces [J]. *J of Waterway Port Coastal and Ocean Eng ASCE*, 2008, 134(4): 252-260.
- [72] S Shekarian, A Ghanbari, A Farhadi. New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill [J]. *Geotex Geomemb*, 2008, 26 (4): 350-356.
- [73] SM Ahmad, D Choudhury. Pseudo-dynamic approach of seismic design for waterfront reinforced soil wall [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26 (4): 291-301.
- [74] GV Narasimha Reddy, D Choudhury, M R Madhav, *et al.* Pseudo-dynamic analysis of reinforced soil wall subjected to oblique displacement [J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16(2): 61-70.
- [75] BM Basha, GLS. Babu. Reliability assessment of internal stability of reinforced soil structures: a pseudo-dynamic approach [J]. *Soil Dyn Earth Eng*, 2009, 30(5): 336-353.
- [76] 程亚男. 加筋土挡墙地震稳定性的拟动力分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(12): 3573-3579.
CHENG Yanan. Pseudo-dynamic analysis of seismic stability of reinforced soil walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3573-3579.
- [77] 程亚男. 加筋土坡地震稳定性的拟动力分析 [J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(2): 102-105.
CHENG Yanan. Pseudo-dynamic approach of seismic stability analysis of reinforced soil slope [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science)*, 2014, 33(2): 102-105.
- [78] 孙树林. 库岸加筋土挡墙在地震和涌浪作用下的稳定性分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(12): 92-97.
SUN Shulin. Analysis of surge under earthquake effects on the stability of reinforced soil retaining wall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15 (12): 92-97.