

DOI: 10.11779/CJGE202202010

横向地震作用下土工合成材料加筋土挡墙筋材拉力分析

刘华北

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 土工合成材料加筋土挡墙具备优良的抗震性能, 但是, 国内外现行的加筋土挡墙筋材动拉力计算方法存在地震动参数选用不尽合理的问题, 一方面可能带来结构安全隐患, 另一方面也造成了工程界的疑虑。基于此, 在前期工作的基础上应用非线性动力有限元法分析了高加筋土挡墙在不同地震激励作用下的地震响应, 重点讨论了强震作用下筋材拉力的影响因素。分析结果表明, 加筋土挡墙的地震响应同时决定于地震动频谱特性、强度、以及加筋土挡墙对地震动的放大效应, 这种综合效应是地震波的传播特点与填土的弹塑性性质共同决定的。加筋土挡墙主动区质心处的根方加速度 a_{rs} 可用于计算加筋土挡墙主动区的地震惯性力, 用于估计加筋土筋材地震拉力。

关键词: 土工合成材料; 加筋土挡墙; 横向地震作用; 筋材拉力; 根方加速度

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)02-0288-07

作者简介: 刘华北(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值分析、地震岩土工程、加筋土结构及地下结构等方面的研究。E-mail: hbliu@hust.edu.cn。

Reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls under horizontal earthquake loading

LIU Hua-bei

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The geosynthetic reinforced soil (GRS) retaining walls generally exhibit good seismic performance. However, the existing design specifications generally make use of seismic loading parameters that are not totally rational when it comes to the estimation of seismic reinforcement loads. The inaccurate estimation of the seismic reinforcement loads may then result in an unsafe structure and lead to hesitations in the applications of this type of earth structures. In this study, based on the previous research results by the author, a validated finite element approach is employed to analyze the seismic responses of a tall GRS retaining wall under different earthquake loadings. The important influencing factors on the seismic reinforcement loads are pinpointed, which include the frequency characteristics of the earthquake excitation, its intensity and the amplification of seismic motion in the retaining wall. The combined effects are basically determined together by the characteristics of seismic wave propagation and the elasto-plastic properties of backfill soils. The root-square acceleration a_{rs} at the gravity center of the active soil mass in the retaining wall is a proper seismic loading parameter and can be used to estimate the seismic reinforcement loads.

Key words: geosynthetics; reinforced soil retaining wall; horizontal earthquake loading; reinforcement load; square-root acceleration

0 引言

土工合成材料加筋土挡墙施工方便、适应性强且力学性能优良。跟其他挡土构筑物相比, 加筋土挡墙用料省、能耗低, 其建设运营大大减小了对环境及生态的破坏^[1], 契合绿色发展的国家战略要求。与此同时, 近年来国内外的大量震害记录表明, 土工合成材料加筋土挡墙的抗震性能优于其它功能类似土工构筑物^[2-3]。因此, 随着中国基础设施建设的大规模展开, 大型土工合成材料加筋土挡墙在中国高烈度地震区的

公路、铁路及市政建设等工程领域有着非常广阔的应用前景。但是, 目前国内外学术界及工程界对加筋土挡墙抗震机理还存在不少模糊认识, 现有加筋土挡墙抗震设计方法也存在不合理的地方: 一方面可能带来结构安全隐患^[4]; 另一方面也造成了工程界的疑虑^[5]。

以加筋土挡墙的内部稳定分析设计为例, 国内外现有设计规程大多在地震动参数的选用方面不尽合

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778259)

收稿日期: 2021-05-05

理。中国前不久出版的《土工合成材料加筋土结构应用技术指南》^[6]以美国联邦公路局(FHWA)2001年的规程^[7]为基础,建议采用下述公式计算加筋土挡墙的地震惯性力 P_1 :

$$P_1 = (1.45 - k_{\max}) k_{\max} W_A, \quad (1)$$

式中, k_{\max} 为场地峰值加速度系数, W_A 为主动区土体的重量。应用上述地震惯性力 P_1 ,每层筋材的最大内力 $T_{i\max}$ 为

$$T_{i\max} = K_a \sigma_v S_v + P_1 \frac{L_{ci}}{\sum_{i=1}^n L_{ci}}, \quad (2)$$

式中, K_a 为填土主动土压力系数, σ_v 为潜在破坏面处填土竖向土压力, S_v 为筋材竖向间距, L_{ci} 为筋材锚固长度。可以看出,式(1),(2)未考虑地震动频谱特性、持时及强度对加筋土结构筋材内力的影响,也未充分考虑不同加筋土挡墙高度对地震动放大的差异性。美国联邦公路局2009年的加筋土结构设计规程对筋材地震内力计算进行了修正^[8]。根据该规程,加筋土挡墙的地震惯性力 P_1 为

$$P_1 = \left\{ 1 + 0.01H \left[0.5 \frac{S_1}{k_{\max}} - 1 \right] \right\} k_{\max} W_A, \quad (3)$$

式中, H 为墙高(英尺), S_1 为场地地震设计反应谱对应于1s周期的谱加速度系数。可以看出,跟式(1)相比,式(3)考虑了地震动的一些频谱特性,也一定程度考虑了墙高对加速度放大差异性,但是仍忽略了地震加速度时程持时以及强度特性的作用。需要指出,对于建于岩石或硬土基础的中低高度挡墙,FHWA规程建议忽略加速度的放大效应, $P_1 = k_{\max} W_A$ 。此外,2009年的FHWA规程规定加筋土地震动内力沿着高层均匀分布。这种规定也与近年来大量研究发现的筋材动拉力分布规律不符^[9-14]。

近30a来,加筋土结构地震动力特性及抗震机理研究为国内外研究者所重视,涌现了大量的研究成果^[9-20]。学者们应用离心机振动台模型试验、大型振动台模型试验、震害调查、数值模拟、理论分析等研究手段,试图揭示筋土动力相互作用机理,弄清加筋土结构地震响应及机理,评估加筋土结构的抗震能力,并发展加筋土结构抗震设计方法。国内外的研究表明,设计合理的加筋土挡墙具备优越的抗震性能;加筋土中地震动力变形呈弥散状,内部滑移面之外的填土也存在较大的剪切变形;加筋与非加筋填土的振动压缩是加筋土结构的一种重要变形模式;目前国内外学者提出的简化分析方法大多基于等效地震加速度系数,但如何根据场地地震情况及加筋土结构参数合理确定等效地震加速度系数仍未有研究结论。

在地震动参数对加筋土挡墙地震动力响应的影响

方面,Hatami等^[21]早期的有限元分析表明,加筋土挡墙自振频率对其结构地震响应的影响非常显著。徐鹏等^[22]也指出了加筋土结构基频对其抗震性能的影响并提出了一种刚性面板加筋土挡墙的基频计算方法。笔者和一些合作者通过数值模拟分析发现^[23-24],即使地震激励的峰值加速度PGA相同,结构在不同地震作用下的筋材拉力仍有较大差别;强震作用下,加筋土挡墙筋材拉力与加筋土挡墙顶部水平加速度时程强度 I_a (Arias intensity)之间存在很强的相关性。

分析已有的研究结果可以发现,加筋土挡墙作为一种土工结构物,其地震响应跟一般的结构类似,同时受到结构自振性质以及地震动频谱特性的影响;与此同时,填土作为一种弹塑性材料,其地震变形存在累积效应,由于筋土相互作用及共同承载,这种变形累积又直接决定了筋材地震内力跟地震动时程强度的相关性。因此,合理的加筋土挡墙抗震设计必须考虑上述两个重要地震响应机理。

基于此,本文以经过严密验证的非线性动力有限元法为基础,开展了直立加筋土挡墙在不同地震作用下的地震动力响应分析,重点研究了筋材拉力与地震动参数的关系,探讨了合理的筋材地震内力拟静力分析方法。下文将首先介绍非线性动力有限元模型及其验证,在其基础上,对一个9m高直立加筋土挡墙开展5种不同地震动作用下的动力分析,然后结合笔者前期数值模拟研究结果,研究强震作用下筋材内力与主动区土体质心处根方加速度 a_{rs} 的关系,最后探讨地震作用下筋材拉力的拟静力分析方法。

1 有限元模型

本文有限元模型以文献[9, 10, 17]中的平面应变非线性动力有限元模型为基础,但应用一种新的方法模拟筋土相互作用,同时对筋材模型予以简化。在本研究的有限元模型中,假定填土为无黏性密实砂土,应用八节点平面应变单元进行模拟,其本构模型为广义塑性模型^[25];土工格栅筋材假定为线弹性,应用三节点杆单元模拟;面板模块为线弹性;面板与填土之间接触面、面板模块之间、以及筋材与面板之间的接触面仍采用薄层滑移单元(slip element)模拟^[26],但筋土接触面应用薄层固体单元模拟,其本构模型与填土相同,亦为广义塑性模型,但其模型参数以填土模型参数为基础予以折减^[27]。广义塑性模型能够描述砂土的滞回阻尼性质,但砂土即使在极微小应变下亦具有一定阻尼,因此本研究的有限元模型在滞回阻尼之外,对填土单元施加5%的Rayleigh阻尼^[27]。混凝土模块面板的阻尼亦为5%的Rayleigh阻尼。上述有限

表 1 填土及筋土接触面材料参数

Table 1 Model parameters for backfill soils and soil-reinforcement interface															
材料	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\phi/(^{\circ})$	M_g	M_f	G_0/MPa	K_0/MPa	H_0/MPa	H_{u0}/MPa	k_s	β_{10}	β_0	α	r	r_u	r_d
填土	43.7	4.9	1.25	0.688	86.1	88.6	500	400	0.015	1.1	15	0.5	3	1	3000
筋土接触面	32.5	3.3	0.83	0.459	151.3	151.3	333.3	266.7	0.015	1.1	15	0.5	3	1	3000

元模型的合理性已经在文献[27]中应用两套大型振动台试验结果予以验证，模型的其他细节可参见文献[27]。

本文分析的加筋土挡墙模型如图 1 所示。挡墙模型高 9 m，建于岩石地基上，为了消除边界效应，加筋区后挡土宽 53.7 m。挡墙面板模块宽 0.3 m，高 0.2 m。填土假定为密实丰浦砂，填土重度为 18 kN/m³。其模型参数如表 1 所示，本构模型细节及模型参数意义参见文献[24, 25]，本文因篇幅限制不予赘述。筋材假定为单向土工格栅，其在地震短期荷载作用下的刚度为 1300 kN/m，筋材的竖向间距为 0.6 m，长 6.6 m，与面板通过摩擦连接。筋材与填土之间接触面模型参数如表 1 所示，接触面的强度、刚度、剪胀性约为相邻填土的 67%。面板模块之间、面板与填土之间的接触面参数参见文献[24]，本文不再重复。在施加动力荷载之前，模拟了加筋土挡墙的填筑过程，逐层激活筋材和填土，生成加筋土挡墙的初始应力场和变形场。

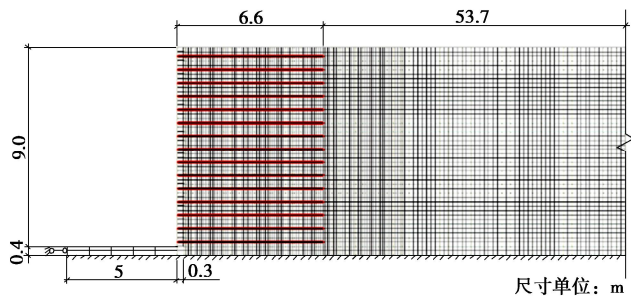


图 1 有限元模型网格

Fig. 1 Finite element mesh

为了能够比较全面理解加筋土挡墙的地震动特性，本文应用图 2 (a) 所示的 5 条地震动时程作为横向地震激励，由模型底部基岩边界输入。这些地震激励时程来自于美国太平洋地震工程研究中心(PEER)的线上数据库，其中 4 条为 1999 年中国台湾集集地震的记录（用 C 表示），1 条为 1979 年美国帝国谷（Imperial Valley）地震的记录（用 I 表示）。所有地震动均调幅为 $\text{PGA}=0.4g$ 。这些地震动的 5% 阻尼反应谱如图 2 (b) 所示。需要指出的是，这些地震动的强度 I_a 分别为 1.846 (C1182)，3.671 (C1193)，3.203 (C1244)，3.880 (C1482)，3.091 m/s (I173)，其频谱特性也有较大差别，如图 2 (b) 所示。

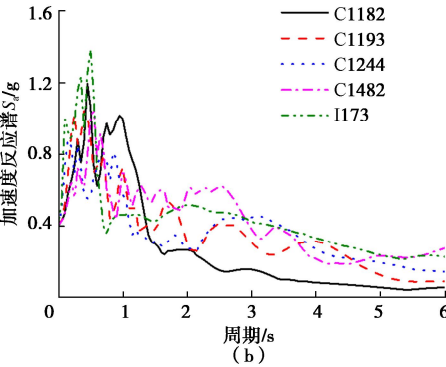
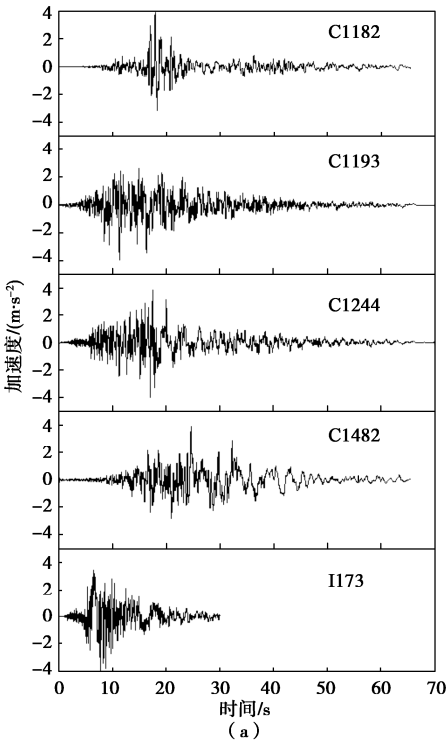


图 2 输入地震动

Fig. 2 Input earthquake excitations

2 不同地震动作用下加筋土挡墙地震响应分析

图 3 给出了加筋土挡墙中水平加速度沿墙高的放大效应。可以看出，不同地震激励下，加筋土结构中的加速度放大效应有较大差别，其中 C1244 和 I173 的地震放大系数远大于 C1182 和 C1482 的放大系数，而加筋土区因加筋及面板反射作用，其加速度放大系数略大于自由场处^[11]。在一些地震动作用下，加速度的放大沿着墙高有较大的变化，这可能源于不同高度

处加筋土刚度的差异,从而改变了地震波的放大性质。

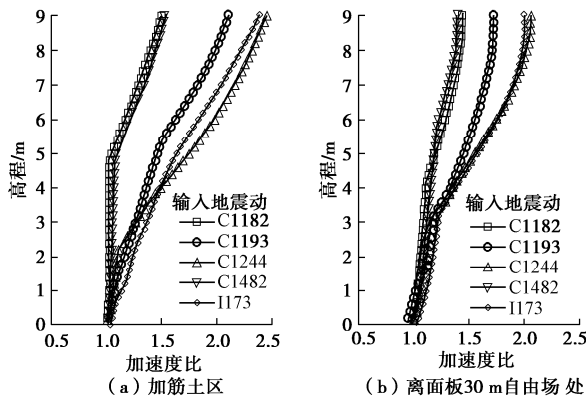


图3 加速度沿墙高放大系数

Fig. 3 Acceleration amplifications along wall height

从结构动力学及土层剪切波传播的角度分析,上述结果是不难理解的。加筋土挡墙的地震加速度响应,一方面决定于其自身自振特性或卓越频率,另一方面也决定于地震动的频谱特性。图4比较了两种不同地震输入作用下模型顶部加速度反应谱的差别。可以看出,在本文地震激励强度作用下,本文加筋土挡墙的卓越周期约为0.2 s,而I173在0.2 s周期附近的地震动成分多于C1482,因而其地震加速度放大效应远大于C1482。

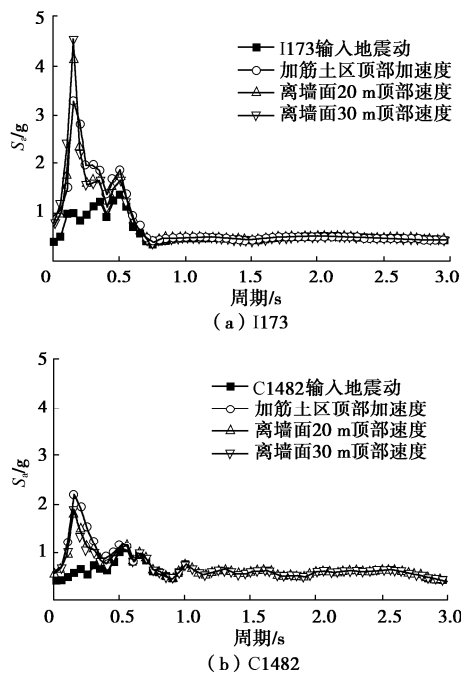


图4 加筋土挡墙地震加速度反应谱比较

Fig. 4 Comparison of acceleration response spectra of reinforced soil wall

但是,加筋土挡墙地震响应并不是仅决定于结构和地震动的频率特性。图5,6分别给出了加筋土挡墙在地震作用下的最大筋材拉力以及挡墙面板震后横向残余位移。比较C1182和C1482的位移和筋材拉力可以看出,虽然它们的加速度放大效应基本相同,但加

筋土挡墙的横向位移及筋材内力均有较大差别。究其原因,是由于这两条地震激励的 I_a 有较大差别,C1182的 I_a 为1.846 m/s,而C1482的 I_a 为3.880 m/s。

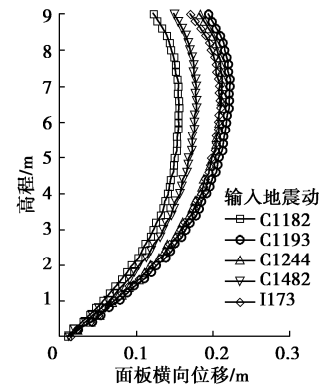


图5 加筋土挡墙面板横向残余位移

Fig. 5 Lateral residual displacements of reinforced soil wall

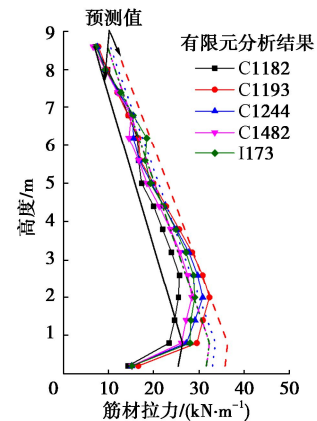


图6 地震作用下的加筋土挡墙筋材拉力

Fig. 6 Reinforcement loads of reinforced soil walls under earthquake loadings

因此,加筋土挡墙的地震响应同时决定于地震动频谱特性、强度以及加筋土挡墙对地震动的放大效应。

3 筋材拉力与地震动根方加速度 a_{rs} 的关系

上述分析结果表明,在强震作用下,加筋土挡墙的内部稳定分析需要综合考虑设计地震动频谱特性、强度、以及加筋土挡墙结构对地震动的过滤及放大作用。文献[24]中分析了两座加筋土挡墙(高分别为6, 9 m, 筋材间距分别为0.6, 0.4 m)在一系列强震作用下(PGA均为0.4g)的地震响应,研究结果发现,挡墙内所有筋材层的最大内力 T_{max} 于加筋土挡墙顶部横向加速度时程的 I_a 呈正相关的关系, I_a 越大, T_{max} 越大。但是 I_a 的单位为m/s,不能用于计算地震惯性力。

文献[28]中提出了地震动时程根方加速度 a_{rs} 的定义:

$$a_{rs} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_f} a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2gI_a}{\pi t_0}} \quad (4)$$

式中， t_f 为加速度时程 $a(t)$ 持时， t_0 为单位时间，本文中取 1 s。可以看出，根方加速度 a_{rs} 与 $\sqrt{I_a}$ 呈正比关系，因此可以比较全面地描述地震加速度的性质。

为了研究 a_{rs} 跟加筋土地震挡墙内部稳定的关系，本文将文献[24]的分析结果与上述结果结合在一起，统一进行分析。有限元分析方法与本文的方法相同，文献[24]研究的两座加筋土挡墙的填土、筋材、面板、筋土接触面等的模拟方法与本文的加筋土挡墙模型类似，所采用的参数也相同，但是其中 9 m 高加筋土挡墙的筋材间距为 0.4 m。文献[24]的两座挡墙的有限元分析分别应用了 24 条和 15 条地震动作为激励（包括本文采用的 5 条地震激励），地震激励的峰值加速度亦为 0.4g。本文提取了这两座墙在加筋土主动区质心处的加速度时程进行分析，获得它们的根方加速度 a_{rs} ，并建立该加速度与挡墙筋材拉力的关系。

图 7 (a) 给出了加筋土挡墙主动区质心处横向根方加速度 a_{rs} 与加筋土挡墙内总拉力 $\sum T_{max}$ 之间的关系，其中 $\sum T_{max}$ 为各层筋材潜在滑移面处最大筋材拉力之和。可以看出，它们之间的相关性非常强。对于相同的挡墙， a_{rs} 与加筋土挡墙最大筋材内力 T_{max} 之间的相关性也非常强，如图 7 (b) 所示。需要指出的是，文献[24]中 9 m 墙的筋材间距为 0.4 m，而 6 m 墙的筋材间距为 0.6 m，因此两者筋材最大拉力差别较小。

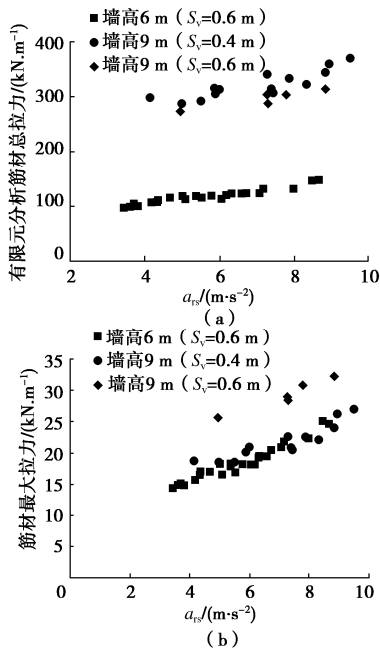


图 7 筋材拉力跟加筋土主动区质心处地震动根方加速度的关系

Fig. 7 Relationship between reinforcement loads and root-square acceleration a_{rs} at gravity center of active soil mass

4 强震作用下土工合成材料加筋土挡墙筋材拉力分析

上述分析结果为土工合成材料加筋土挡墙在强震作用下的内部稳定分析提供了一种合理的可能性。基于此，本文提出计算加筋土挡墙主动区的地震惯性力的表达式为

$$P_1 = \frac{a_{rs}}{g} W_A \quad (5)$$

式中， a_{rs} 为加筋土挡墙主动区质心处横向根方加速度。而各层筋材的最大拉力仍采用式 (2) 进行计算。图 8 给出了应用本文方法预测的筋材总拉力 $\sum T_{max}$ 与有限元计算结果的比较。可以看出，式 (5) 能比较准确合理地计算筋材的地震动拉力。图 6 还比较了结合式 (5) 和式 (2) 的筋材拉力预测结果与有限元分析的结果。可以看出，本文所采用的拟静力分析方法能较准确地预测筋材地震拉力分布。

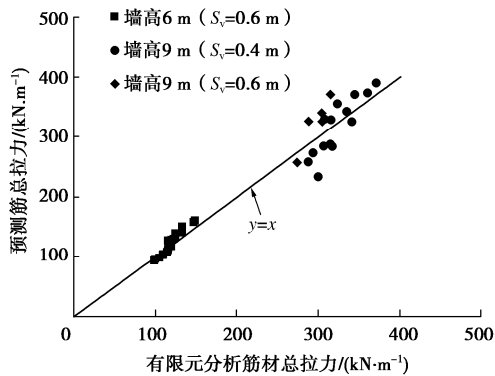


图 8 预测筋材总拉力跟有限元分析筋材总拉力的比较
Fig. 8 Comparison between predicted and numerical total reinforcement loads

与 FHWA 的方法相比，本文的方法具有更高的准确度。表 2 给出了图 2 中 5 种地震动作用下筋材总动拉力与几种计算方法的对比。可以看出，2001 年 FHWA 的方法得到的筋材总动拉力是一样的^[7]，而 2009 年 FHWA 方法的结果虽然有一定差别^[8]，但两者都大大低估了加筋土挡墙的筋材动拉力，而本文的方法跟有限元计算结果比较接近，且大多偏于保守。

表 2 本文方法与 FHWA 两种方法估算地震筋材动拉力的比较
Table 2 Comparison of reinforcement loads by proposed method and FHWA (kN/m)

地震动	有限元分析	FHWA 2001	FHWA 2009	本文方法
C1182	160.51	120.60	122.52	144.50
C1193	201.50	120.60	112.00	258.65
C1244	190.63	120.60	106.21	227.75
C1482	174.90	120.60	111.64	213.24
I173	191.13	120.60	101.75	212.82

5 讨 论

虽然本文的研究发现, 根方加速度 a_{rs} 可以合理估计加筋土挡墙的地震惯性力, 但其在各筋材层中间的分配仍需要进一步深入研究。对于等长分布的加筋层, $P_l \frac{L_{ei}}{\sum_{i=1}^n L_{ei}}$ 可以比较合理地获得筋材动拉力沿高程的分布, 但该方法不适用于筋材非等长分布的情况。以往大量的试验及数值模拟分析结果表明, 筋材地震动拉力沿高程呈上小下大的分布, 但具体的分布形式仍无定论。与此同时, 式(2)也不一定适用于地震较小或地震很大的情况。在地震较小时, 填土的强度可能尚未完全发挥出来, 筋材需承担更多荷载; 而在地震很大时, 填土可能已经进入应变软化, 应用峰值强度计算主动土压力系数也是不合适的。笔者在文献[23]中的有限元分析结果发现, 筋材刚度也影响筋材地震拉力分布, 而文献[29]的结果表明, 填土软化会带来更大筋材地震拉力。上述两个因素是图8中预测结果与有限元分析结果存在一定差别的原因之一, 如何在拟静力方法中考虑这些因素亟需研究解决。

此外, 虽然本文的研究结果表明, 加筋土挡墙主动区质心处的根方加速度可用于计算筋材动拉力, 但如何应用简洁方法获得根方加速度亦为需深入研究的课题之一。

6 结 语

本文应用经过验证的非线性动力有限元法, 分析了土工合成材料高加筋土挡墙在不同地震激励作用下的地震响应, 重点讨论了加筋土挡墙筋材拉力与加筋土结构振动性质、地震激励强度、以及地震激励频谱特性的关系。本文的研究结果表明, 加筋土挡墙的地震响应同时决定于地震动频谱特性、强度以及加筋土挡墙对地震动的放大效应。这种综合效应是地震波的传播特点与填土的弹塑性性质共同决定的。加筋土挡墙作为一种土工结构物, 其地震响应同样受到结构自振频率及地震动频谱特性的共同影响, 而填土作为一种弹塑性材料, 其地震变形存在累积效应, 地震持时越长, 其累积变形越大, 筋材地震拉力也越大。

本文研究发现, 加筋土挡墙主动区质心处的根方加速度 a_{rs} 可以比较综合地反映结构振动响应、地震激励持时以及地震激励频谱特性的共同作用, 可用于计算加筋土挡墙主动区的地震惯性力, 用于估计加筋土筋材地震拉力。

致 谢: 笔者的研究生朱俊涛和曹建洲, 在本文的研究过程中

协助进行数据处理, 在此对他们表示感谢。

参考文献:

- [1] HEERTEN G. Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **30**: 43 - 49.
- [2] 李广信. 地震与加筋土结构[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(7): 1 - 8. (LI Guang-xin. Earthquake and earth reinforcement[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(7): 1 - 8. (in Chinese))
- [3] KOSEKI J. Use of geosynthetics to improve seismic performance of earth structures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **34**: 51 - 68.
- [4] 陈 强, 杨长卫, 张建经, 等. “5.12”汶川地震中高大加筋土挡墙破坏机理研究[J]. 铁道建筑, 2010, **50**(9): 73 - 77. (CHEN Qiang, YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing, ZHOU Xin-wen. Damage mechanism study of a high reinforced soil retaining wall in Wenchuan Earthquake[J]. Railway Engineering, 2010, **50**(9): 73 - 77. (in Chinese))
- [5] 公路工程抗震规范: JTG B02—2013[S]. 2013 (Specifications of Seismic Design for Highway Engineering: JTG B02—2013[S]. 2013 (in Chinese)).
- [6] 杨广庆, 徐 超, 张孟喜. 土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016. (YANG Guang-qing, XU Chao, ZHANG Meng-xi. Geosynthetics Reinforcement Soil Structure Application Guidance[M]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese))
- [7] ELIAS V, CHRISTOPHER B R. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines Publication[R]. Washing D C: FHWA-NHI-00-043, 2001.
- [8] BERG R, CHRISTOPHER B, SAMTANI N. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes - Volume I [R]. Washing D C: FHWA-NHI-10-024, 2009.
- [9] LING H I, LIU H B, KALIAKIN V N, et al. Analyzing dynamic behavior of geosynthetic-reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, **130**(8): 911 - 920.
- [10] LING H I, LIU H B, MOHRI Y. Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, **131**(10): 1056 - 1065.
- [11] LING H I, MOHRI Y, LESHCHINSKY D, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining

- walls[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(4): 465 – 476.
- [12] LING H I, LESHCHINSKY D, MOHRI Y, et al. Earthquake response of reinforced segmental retaining walls backfilled with substantial percentage of fines[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **138**(8): 934 – 944.
- [13] 蔡晓光, 李思汉, 黄 鑫. 水平地震作用下双级加筋土挡墙格栅应变及破裂面分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(8): 1528 – 1534. (CAI Xiao-guang, LI Si-han, HUANG Xin. Geogrid strain and failure surface of two-stage reinforced soil retaining wall under horizontal seismic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(8): 1528 – 1534. (in Chinese))
- [14] 徐 鹏, 蒋关鲁, 邱俊杰, 等. 整体刚性面板加筋土挡墙振动台模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(3): 998 – 1004. (XU Peng, JIANG Guan-lu, QIU Jun-jie, et al. Shaking table tests on reinforced soil retaining walls with full-height rigid facing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(3): 998 – 1004. (in Chinese))
- [15] NIMBALKAR S S, CHOUDHURY D, MANDAL J N. Seismic stability of reinforced-soil wall by pseudo-dynamic method[J]. *Geosynthetics International*, 2006, **13**(3): 111 – 119.
- [16] EL-EMAM M M, BATHURST 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.
- [17] 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 Hua-bei. 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. (in Chinese))
- [18] 蒋建清, 杨果林. 加筋土挡墙地震稳定性分析的水平条分方法[J]. *中国铁道科学*, 2009, **30**(1): 36 – 40. (JIANG Jian-qing, YANG Guo-lin. Horizontal slice method for analyzing the stability of the reinforced retaining wall under seismic load[J]. *China Railway Science*, 2009, **30**(1): 36 – 40. (in Chinese))
- [19] 程亚男, 孙树林, 阮晓波, 等. 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 Ya-nan, SUN Shu-lin, RUAN Xiao-bo, et al. Pseudo-dynamic analysis of seismic stability of reinforced soil walls[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(12): 3573 – 3579. (in Chinese))
- [20] 卢 谅, 张均均, 马书文, 等. 预应力返包式加筋土挡墙的动力响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(2): 344-353. (LU Liang, ZHANG Jun-jun, MA Shu-wen, et al. Dynamic response of prestressed wrap-reinforced earth retaining walls[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(2): 344 – 353. (in Chinese))
- [21] HATAMI K, BATHURST R J. Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, **19**(3): 137 – 157.
- [22] 徐 鹏, 蒋关鲁, 胡耀芳, 等. 整体刚性面板加筋土挡墙基频影响因素计算分析[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(12): 4475 – 4481. (XU Peng, JIANG Guan-lu, HU Yao-fang, et al. Calculation of fundamental frequencies of reinforced retaining walls with full-height rigid facing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4475 – 4481. (in Chinese))
- [23] LIU H B. Analyzing the reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil walls subject to seismic loading during the service life[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2009, **23**(5): 292 – 302.
- [24] LIU H B, HUNG C, CAO J Z. Relationship between Arias intensity and the responses of reinforced soil retaining walls subjected to near-field ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, **111**: 160 – 168.
- [25] LING H I, LIU H B. Pressure-level dependency and densification behavior of sand through generalized plasticity model[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, **129**(8): 851 – 860.
- [26] CHAN A H C. User manual for DIANA SWANDYNE-II[R]. Glasgow: University of Glasgow, 1989.
- [27] LIU H B, YANG G Q, LING H I. Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, **61/62**: 1 – 12.
- [28] NAU J M, HALL W J. An Evaluation of Scaling Methods for Earthquake Response Spectra [R]. Structural Research Series No. 499 Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, IL, 1982.
- [29] LIU H B, LING H I. Seismic responses of reinforced soil retaining walls and the strain softening of backfill soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2012, **12**(4): 351 – 356.