

吴燕开,李纪兴,石玉斌,等.地震荷载作用下加筋土挡墙动力特性分析[J].地震工程学报,2017,39(3):0475-0480.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0475

WU Yan-kai, LI Ji-xing, SHI Yu-bin, et al. Dynamic Characteristic Analysis of Reinforced Earth Retaining Walls under Seismic Load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0475-0480. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0475

地震荷载作用下加筋土挡墙动力特性分析^①

吴燕开¹, 李纪兴², 石玉斌¹, 金洪东³, 胡晓士¹

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东青岛 266590; 2. 山东华鉴工程检测有限公司, 山东 济南 250101;
3. 滕州建设集团有限公司, 山东 滕州 277500)

摘要:利用有限元软件对加筋土挡墙在地震荷载作用下的动力特性进行模拟分析,重点分析其在不同加筋长度、加筋间距以及峰值加速度条件下的动力响应特性。通过有限元分析一个高6 m、底部为基础土的加筋土挡墙在地震荷载作用下的行为,针对理想化墙体研究加筋土挡墙的某些动力特性。模拟计算结果表明加筋土挡墙的加筋长度、加筋间距以及峰值加速度的变化对其水平位移、沉降及受力有较大影响。采用长度大的加筋材料可以有效减小加筋土挡墙的水平位移,但这样将导致加筋拉伸荷载的增大,同时也将导致加筋土挡墙的隆起增大。峰值加速度的大小对加筋土挡墙的水平位移有很大影响,当峰值加速度增大时水平位移也随之增大,但并不呈线性增长关系。减小加筋间距会有效地限制加筋土挡墙面板整体的水平位移,但在一定范围内减小加筋间距也会使加筋区域内土体底部挡墙的水平位移出现相对增大的现象,因此通过减小加筋间距来限制加筋土挡墙的位移在一定程度上具有局限性。

关键词:地震荷载;加筋长度;加筋间距;峰值加速度;有限元分析

中图分类号: TU472.34

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)03-0475-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0475

Dynamic Characteristic Analysis of Reinforced Earth Retaining Walls under Seismic Load

WU Yan-kai¹, LI Ji-xing², SHI Yu-bin¹, JIN Hong-dong³, HU Xiao-shi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
2. Shandong Huajian Engineering Testing Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China;
3. Tengzhou Construction Group Co., Ltd., Tengzhou 277500, Shandong, China)

Abstract: In this study, the dynamic properties of reinforced earth retaining walls under seismic load were analyzed by using Plaxis, a finite element analysis software program. The analysis focused on the dynamic response characteristics of the wall under the influence of different reinforcement lengths, reinforcement spacing, and peak acceleration, assuming an ideal wall with a height of 6 m and a base in foundation soil. Through simulations, it was determined that changes in reinforcement length, reinforcement spacing, and peak acceleration had the strongest influence on the horizontal displacement, vertical settlement, and stress in the reinforcement materials of the earth retaining wall. The horizontal displace-

① 收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372288);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2015KYTD104)

作者简介:吴燕开(1976—),男,广西贵港人,博士,副教授,主要从事加筋土方面的研究工作。

通信作者:石玉斌(1987—),男,山东临沂人,硕士,主要从事加筋土方面的研究工作。E-mail:baige109@126.com。

ment of a wall can be effectively reduced by using reinforced materials of longer length. However, this will lead to an increase in reinforced tensile load, and an uplift of reinforced earth retaining wall. The value of peak acceleration has the greatest influence on the horizontal displacement of wall. Although increases in horizontal displacement result from increases in peak acceleration, it is not a linear relationship. Decreases in reinforcement spacing can also effectively limit the overall horizontal displacement of wall, however, across a certain range, it can result in a relative increase in bottom of wall horizontal displacement. Therefore, reducing the displacement of a wall by decreasing the reinforcement spacing is only useful to a limited extent.

Key words: seismic load; reinforcement length; reinforcement spacing; peak acceleration; finite element analysis

0 引言

加筋土挡墙是“面板-筋材-填土”的三元柔性结构,其依靠筋材与土体的摩擦力来平衡墙后土体的土压力,是一种耗散能量的结构体系,具有较好的抗震性能。随着我国西部大开发的开展,在高烈度地震区域的水利、交通及城建等领域中,加筋土挡墙技术得到了越来越广泛的应用。但当前对加筋土挡墙的抗震机理还未十分清晰,与此同时,在加筋土挡墙抗震设计方面也没有为业界所接受的合理规范。因此需要对加筋土挡墙复杂的动力特性和抗震机理展开广泛而深入的研究。

近年来,国内外对加筋土挡墙的研究工作日益增多。Sitar 等^[1]设计并采用数值研究动力荷载对加筋土墙的影响,认为加筋刚度、加筋竖直间距、面板类型和加筋区填料类型对加筋挡墙有影响。刘华北等^[2-3]应用动力弹塑性有限元方法研究了各种设计参数对土工格栅加筋土挡墙动力响应的影响,指出加大加筋长度可以降低墙体在地震作用下的变形及加筋层的内力,但降低幅度随长度的增加而减少,因此过长的筋材长度并不能明显改善加筋土挡土墙的动力性质。吴燕开等^[4]应用有限元分析方法研究了黏性土加筋土挡墙的动力特性,指出高强度的加筋材料可以减小加筋土挡墙的水平位移,峰值加速度对挡墙的行为有重要影响,而排水性能良好的黏性土填料可以显著减小墙体的水平位移。本文在前人研究的基础上,针对加筋土挡墙中加筋体的长度、间距变化以及动荷载作用对其影响,利用有限元数值模拟的方法探讨其受力及变形问题,从而揭示出动荷载作用下加筋土挡墙的变形机理并提出对应的处理措施,这对扩展其应用具有重要的意义。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型

数值模拟采用 Plaxis 有限元软件,单元采用

Plaxis6 节点单元进行模拟^[5]。模型的几何结构如图 1 所示,加筋材料以及面板的端部放大图如图 2 所示。根据目前大多加筋土挡墙的高度,本文模拟计算中选取具有一定代表性的加筋土挡墙高度为 6 m。为简化计算,将模型中土体划分 3 个部分:基础土体、填料土体和自然土体。填料土体主要是位于面板和自然土体之间的土体,模型中填料区域延伸至自然土体中,顶部长度为 9 m,底部长度为 6 m,最后按与自然土体 1:2 的斜坡连接,填料土体采用黏性土。模型最下面是基础土体,即加筋土挡墙的持力层土体,为了强调墙体自身的响应选用硬黏土而不是基础土的影响。

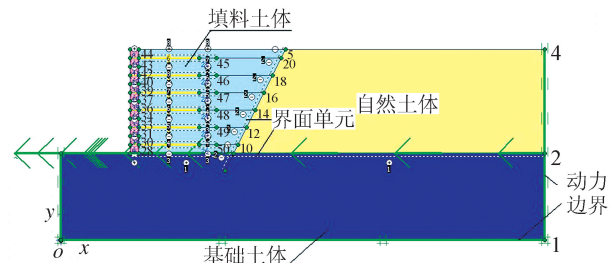


图 1 模型的几何结构

Fig.1 Geometric structure of the finite element model

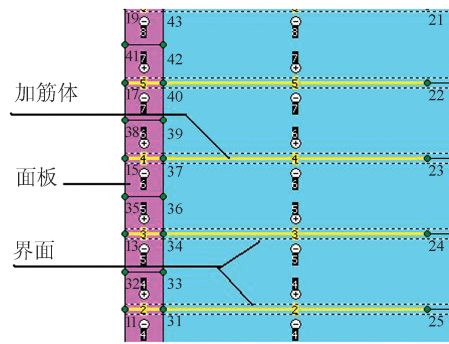


图 2 挡墙端部放大图

Fig.2 Enlarged drawing of the end of retaining wall

模型网络剖分采用 Plaxis 自动生成网格功能,本文采用中等粗疏度进行网格剖分。剖分好网格

后,对加筋材料、面板及基础线处进行绕线加密。网格划分图如图 3 所示,其中三角形单元个数为 541 个,节点数为 3 246 个。

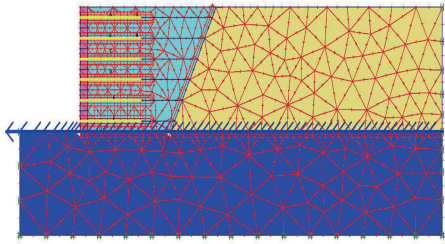


图 3 挡墙模型的网格划分图

Fig.3 Finite element mesh of the retaining wall model

1.2 模型计算参数

(1) 加筋材料及面板参数选择

目前工程上常用的加筋材料有土工格栅、土工布(无纺织物)及金属等。由于这些加筋单元只能提供持续的拉伸力,却没有弯曲强度,因此在模拟中采用加筋单元来模拟加筋体。模拟中,选用土工格栅为加筋材料来研究不同加筋长度、加筋间距下加筋土挡墙的动力特性。其中土工格栅的拉伸强度为

10 000 kN/m,加筋长度取 3、4、5 及 6 m,加筋间距取 0.5、1.0 及 1.5 m。

加筋土挡墙的面层采用宽 0.5 m、高 0.5 m 的拼装混凝土面板。面板干重度 $\gamma=20\text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E=3\times10^{-4}\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.2$,采用线弹性模型进行模拟。

(2) 土层参数研究

由于摩尔库伦模型能够成功预测振动模型试验中土体的行为,因此采用该模型进行参数研究。摩尔库伦模型有许多优点,且其参数不是很复杂,特别是在比较两种不同填料土体时用它进行参数分析才能够很好地预测土体的行为。模拟计算中有 6 个主要参数需输入:弹性模量 E 、泊松比 ν 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 及剪切模量 G 。在整个模拟过程中,自然土体和基础土体的材料属性在所有模型中都固定不变;本文选用的填土是黏性土填土,这里所说的黏性土填土并不是纯粹的黏性土,而是含有一定量砂的黏性土。这种黏性土在实际工程应用当中非常常见,它能允许一定的变形,并能提供足够的刚度。其具体参数见表 1。

表 1 数值模拟中土体计算参数

Table 1 Soil parameters for numerical simulation

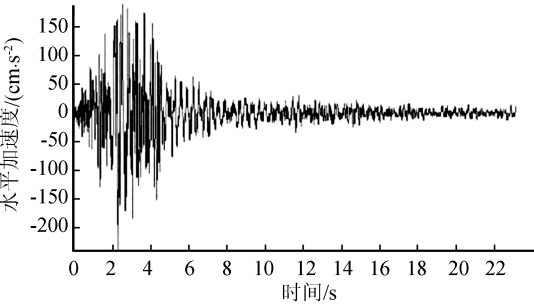
土体	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	内摩擦角 φ /($^\circ$)	剪切模量 G /MPa
黏性填土	19.3	15.1	0.35	35.0	10.0	7.2
自然土	18.3	8.6	0.32	20.0	5.0	3.1
基础土	20.5	25.1	0.3	25.0	15.0	9.8

(3) 动荷载参数研究

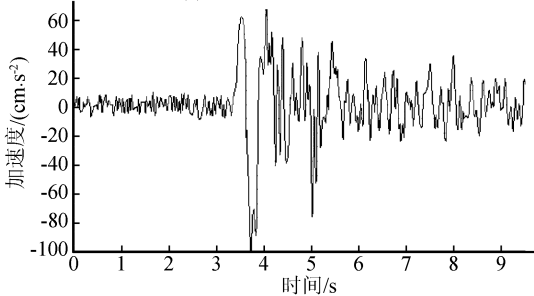
在对动荷载的分析研究中,动荷载的输入是依靠 Plaxis 读入 SMC(Strong Motion CD-ROM)格式的文件来实现的。为便于比较,本次选用的动荷载一次为 1989 年 Loma Prieta 发生地震时的数据,峰值加速度大小为 239 cm/s^2 ,约为 $0.2g$ ^[6];另一次为某一地震数据,峰值加速度为 102 cm/s^2 ,约为 $0.1g$ 。地震波型如图 4 所示。

1.3 分步施工模拟

加筋土挡墙的分步施工模拟是按其实际施工过程进行的。每填筑一层填料土后,铺设一层土工格栅加筋材料,然后再浇筑混凝土面板,即加筋材料和面板的施工都是在填料土体填筑完成后进行的。对于加筋土挡墙的每一层都重复上述工序,当加筋间距不同时,每层的填筑高度也不同,但最终填筑高度都将达到 6 m。分步施工模拟能够实现与实际施工过程相符的模拟,在分步施工的最后,加筋土挡墙达



(a) 1989年Loma Prieta地震波



(b) 某地震波

图 4 输入地震波

Fig.4 Input seismic wave

到了极限平衡状态,所以墙体能够承受循环荷载。在分步施工最后,压实效果应因为超载应力而消失,因此土体的压实不能在分布施工中模拟,这是本文数值模拟的一个缺陷。

2 模拟计算结果分析

用墙体的水平和竖直位移以及拉筋的拉伸荷载来评定参数研究的结果。将水平位移点和应力点选取在与加筋材料一样高度的节点上。程序完成了加筋土挡墙的塑性计算之后,在施加基础激励荷载前将位移重置为 0,以便单独考虑动荷载作用的影响。加筋材料的拉伸荷载值为分析过程中加筋所承受拉力的最大值。

2.1 不同加筋长度下加筋土挡墙动力特性分析

本文研究以最大加速度 $a=0.2g$ 的地震荷载为动荷载,采用土工格栅($EA=10\ 000\text{ kN/m}$)为加筋材料,将加筋间距设为 1 m ,分别对加筋长度为 $3、4、5$ 及 6 m 的加筋土挡墙进行数值模拟计算,并对其结果进行对比,从而分析动荷载作用下加筋土挡墙在不同加筋长度下的动力响应规律。

(1) 加筋材料受力分析

图 5 为不同加筋长度的加筋土挡墙在动荷载作用下其加筋材料在不同挡墙高度上所受的力。由图可知,4 种加筋长度的加筋材料在挡墙顶部位置所受的力几乎相同;在挡墙底部加筋材料所受的力随加筋长度的增大而减小。

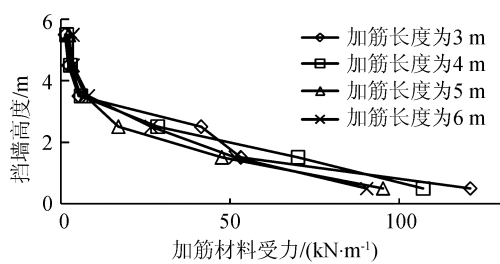


图 5 加筋材料受力与挡墙高度关系曲线

Fig.5 Relationship between the stress in reinforcement materials and the height of retaining wall

(2) 水平位移分析

由图 6 可知,加筋土挡墙顶部的水平位移随加筋长度的增大而依次减小,且在加筋长度为 $3、4、5$ 及 6 m 时其最大值分别为 $120、151、160$ 及 195 mm ;加筋土挡墙底部的水平位移在加筋长度为 3 m 时约为 140 mm ,而当加筋长度为 $4、5$ 及 6 m 时其值相差不大,约为 65 mm 。由此可知,加筋长度越大对加筋土挡墙加筋区域水平位移的发展限制越大,

特别是对其顶部水平位移的限制作用更大。

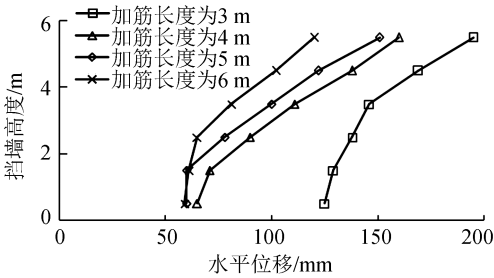


图 6 不同加筋长度的加筋土挡墙水平位移与挡墙高度关系曲线

Fig.6 Relationship between the horizontal displacement and the height of retaining wall with different reinforcement lengths

(3) 竖直位移分析

由图 7 可知,加筋土挡墙在动荷载作用下的竖直位移为正值,说明加筋土挡墙在动荷载作用下发生了隆起,产生这种现象的原因在于相比素土来说,加筋土作为筋-土复合材料约束了土体的侧向变形,因而其抗剪强度有了很大提高。在承受剪力时,土体的体积先减小,当剪力不断增大时,土体在剪力作用下发生剪胀,剪应力引起土颗粒间相互位置的变化,使土体颗粒排列发生变化、颗粒间的孔隙加大,体现在加筋土挡墙的沉降量上表现为隆起。图 7 中加筋土挡墙的隆起量随加筋材料长度的增大而增大,这是因为加筋长度越长加筋材料对土体的加筋作用越明显,从而使加筋土的剪胀性越明显。

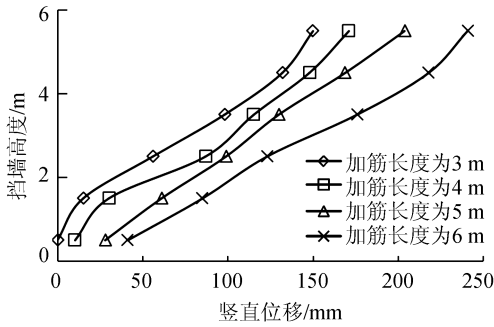


图 7 竖直位移与挡墙高度关系曲线

Fig.7 Relationship between the vertical displacement and the height of retaining wall

因此,综合加筋材料的受力、加筋土挡墙的水平位移及竖直位移三点因素,在本次数值模拟条件下取加筋长度为 4 m 是最合适的。一般情况下,对于中等高度的加筋土挡墙,加筋材料的加筋长度一般取墙高的 0.7 倍,本文选用 4 m 的加筋材料也正符

合这样的规律。

2.2 不同加筋间距下加筋土挡墙动力特性分析

(1) 加筋材料受力分析

图 8 为加筋土挡墙在动荷载作用下的加筋材料受力与挡墙高度的关系曲线。由图可知,3 种加筋间距下,加筋材料在加筋土挡墙顶部位置所受的力几乎相同;且 3 种不同的加筋间距下加筋材料受力随挡墙高度变化的走势基本相同。在加筋间距为 0.5 m 时,相较于加筋间距为 1.0 m 和 1.5 m 时加筋材料的受力在高度约 1.5 m 处出现较大转折。出现这种现象的原因在于加筋间距为 0.5 m 时加筋材料数量变大,因此加筋材料所受的平均力减小。

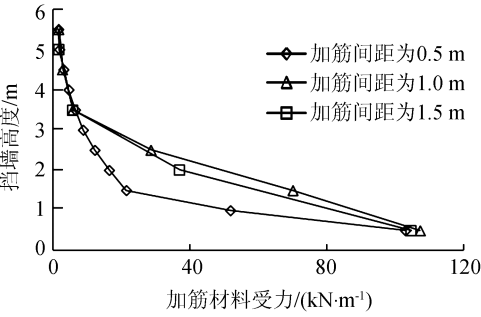


图 8 不同加筋间距下加筋材料受力

Fig.8 The stress in reinforced materials under different reinforcement spacing

(2) 水平位移分析

由图 9 可知,加筋间距为 0.5 m 时加筋区域内底部土体挡墙发生相对较大的水平位移,而加筋间距为 1.5 m 时加筋区域土体挡墙面板整体发生较大水平位移。这是因为加筋间距过大不能很好地限制面板水平位移的发展,造成加筋土挡墙面板的水平位移过大。因此选择一个合适的加筋间距既能保证加筋区域的水平位移不会过大而产生土体内部的破坏,又能较好地限制加筋土挡墙面板水平位移的发展而避免加筋土挡墙外部的破坏。在本次研究中,加筋间距为 1.0 m 时,加筋区域土体及加筋土挡墙面板的水平位移都得到了很好地控制,因此在已知条件下的加筋土挡墙,本文选择加筋间距为 1.0 m 是最合适的。

(3) 竖直位移分析

由图 10 可知在动荷载作用下不同加筋间距加筋土挡墙的竖直位移均表现为隆起。加筋间距为 1.5 m 时加筋土挡墙的最大隆起约为 156 mm;加筋间距为 1.0 m 时约为 171 mm;加筋间距为 0.5 m 时约为 198 mm。由此可知,加筋土挡墙在动荷载作

用下的隆起随着加筋间距的减小而增大。这是由于加筋间距减小时,加筋材料对填土的约束作用加大,这使得加筋土的剪胀性加强,从而在受到剪力作用时加筋土挡墙的隆起量会加大。

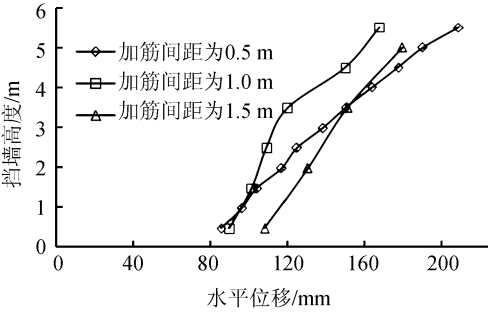


图 9 加筋土挡墙水平位移与挡墙高度关系曲线

Fig.9 Relationship between the horizontal displacement and the height of retaining wall

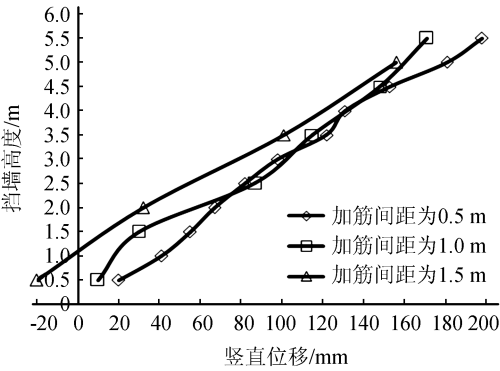


图 10 竖直位移与挡墙高度关系曲线

Fig.10 Relationship between the vertical displacement and the height of retaining wall

2.3 不同峰值加速度下加筋土挡墙动力特性分析

以上分析了地震峰值加速度为 0.2g 时加筋土挡墙的动力响应特性。但当地震峰值加速度变化后,挡墙的动力响应特性也随之变化。以下在峰值加速度分别为 0.1g 和 0.2g 条件下对挡墙的动力响应特性分析。

(1) 不同峰值加速度下挡墙加筋材料受力分析

图 11 为不同峰值加速度条件下加筋体的受力情况。由图 11 可知,当峰值加速度为 0.2g 时加筋土挡墙底部是加筋材料受力最大处,而当峰值加速度为 0.1g 时在加筋土挡墙高约 4.5 m 处是加筋材料受力最大处。结合加筋土挡墙在动荷载作用下的水平位移云图可知,在加筋土挡墙的这个高度处(4.5 m)其水平位移较小,而加筋材料的受力却较大,这正好说明了加筋材料为限制加筋土挡墙水平位移的发展而承受了较大的力。由此可知,加筋材

料受力较大处往往是加筋土挡墙水平位移较小处，加筋材料受力较小处是加筋土挡墙水平位移较大处。出现这种现象的原因在于加筋材料受力较小处的土体在动荷载作用下已经发生破坏或局部发生破坏，导致土体与加筋材料相互作用的减小，从而使加筋材料的受力减小。

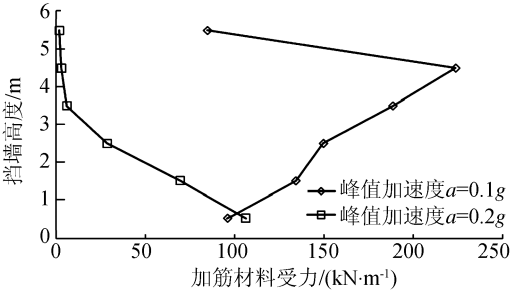


图 11 不同峰值加速度下加筋材料受力

Fig.11 The stress in reinforced materials under different peak acceleration

(2) 不同峰值加速度条件下挡墙水平位移分析

由图 12 可知，加筋土挡墙的最大水平位移在峰值加速度为 0.1g 时约为 75 mm，在峰值加筋速度为 0.2g 时则约为 160 mm。由此可知，当峰值加速度增大时，加筋土挡墙的水平位移也会随之增大，但并不是成倍增加。由图还可知，峰值加速度的增大对加筋土挡墙顶部的位移影响更加明显。因此做好加筋土挡墙顶部的抗震工作是加筋土挡墙整个抗震设计的关键所在。

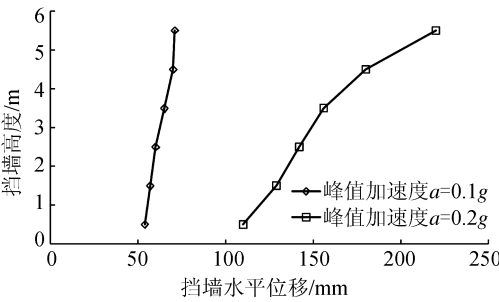


图 12 加筋土挡墙高度与位移关系曲线

Fig.12 Relationship between the horizontal displacement and the height of retaining wall

3 结论

通过分析一高 6 m、底部为基础土的加筋土挡墙在承受地震荷载作用下的行为，针对理想化墙体研究加筋土挡墙的某些动力特性，得出如下结论：

(1) 采用长度大的加筋材料可以有效地减小加筋土挡墙的水平位移，但这样将导致加筋拉伸荷载的增大，同时也将导致加筋土挡墙的隆起增大。峰值加速度的大小对加筋土挡墙的水平位移有很大影响，当峰值加速度增大时水平位移也随之增大，但并不成线性增长关系。

(2) 减小加筋间距会有效限制加筋土挡墙面板整体的水平位移，但在一定范围内减小加筋间距也会使加筋区域内土体底部挡墙的水平位移出现相对增大的现象。因此通过减小加筋间距来限制加筋土挡墙的位移在一定程度上有局限性。现有的结果不能说明这种局限性，需要更加深入的研究。

参考文献(References)

[1] Sitar N, Nova-Roessig L. A Review of Experimental Studies of Seismic Behavior of Reinforced Soil Structures [C]//Seco e Pinto, PS, (ed.) Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, 1999: 1083-1088.

[2] 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)

[3] 刘华北, LING H I. 土工格栅加筋土挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 668-673.

LIU Hua-bei, LING H I. Elasto-plastic Finite Element Study for Parameters of Geogrid-reinforced Soil Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 668-673. (in Chinese)

[4] 吴燕开, 李纪兴. 循环荷载作用下黏性土加筋挡墙有限元动力特性分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2014(4): 1-7.

WU Yan-kai, LI Ji-Xing. Dynamic Properties Analysis of Clay Soil Reinforced Retaining Wall under the Circulating Load by the FEM [J]. Journal of Qindao Technological University, 2014 (4): 1-7. (in Chinese)

[5] Guler E, Hamderi M, Demirkan M M. Numerical Analysis of Reinforced Soil-retaining Wall Structures with Cohesive and Granular Backfills [J]. Geosynth Int, 2007, 14(6): 330-345.

[6] Segrestin P, Bastick M. Seismic Design of Reinforced Earth Retaining Walls the Contribution of Finite Element Analysis [C]//Proceedings of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Fukuoka Kyushu, Japan, 1988: 577-582.