

# 考虑地震强度与外荷载影响的胎面挡土墙抗震性能分析

姚宝宽<sup>1</sup>, 王丽艳<sup>2\*</sup>, 吉文炜<sup>2</sup>, 巩文雪<sup>3</sup>

(1. 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院;  
3. 江苏筑森建筑设计有限公司)

**摘要:**为了促使废旧轮胎胎面挡土墙推广应用,需研究废旧轮胎胎面挡土墙的抗震性能。该文基于 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算方法,考虑地震强度和外荷载的影响,采用自由场边界条件、地震波滤波确定最大网格尺寸和局部阻尼等方法,通过 El-centro 地震波分析不同地震强度和外荷载强度下的废旧轮胎挡墙的地震残余水平变形、残余沉降和墙动土压力等地震反应特征的响应规律。根据数值计算结果得出胎面挡墙可在地震烈度不超过Ⅷ度的区域推广,不适用于地震烈度大于Ⅷ度的区域;并基于墙顶轮胎面的地震残余变形作为位移指标,提出废旧轮胎胎面挡土墙抗震设计的三级设防标准,为胎面挡土墙的工程应用提供参考依据。

**关键词:**废旧轮胎胎面挡土墙; 抗震性能; 地震强度; 外荷载; 地震响应; 设防标准

数量庞大的废旧轮胎无处存放是中国乃至世界面临的严重问题。从全球来看,废旧轮胎作为土建材料在美国尤为盛行,其次是欧洲、加拿大、日本,中国则正在起步。针对废旧轮胎在工程中的应用,国内外学者研究的内容主要为两个方面:① 将废旧轮胎磨成橡胶颗粒,再掺入其他材料中,形成物理力学性能优良的复合材料;② 将轮胎加工成条状作为加筋材料置于土体中形成加筋土体。

从废旧轮胎的循环利用解决途径来看,废旧轮胎胎面挡土墙是有效利用废旧轮胎的一种理想途径。废旧轮胎胎面挡土墙的工作性能研究成果目前相对较少,才处于起步阶段,基本集中在静力性能方面的研

究。其中,Garga 和 O'Shaughnessy 研究废旧轮胎挡墙的工作性能,塞土轮胎间用聚丙烯绳索连接在一起进行现场测试;Taya 给出了废旧轮胎挡墙的各种类型及其设计方法;马源以 Taya 给出的废旧轮胎胎面重力式挡墙中的“梯形”墙型为研究对象,开展了力学性能的二维数值计算;李春强通过有限元数值分析软件对废旧轮胎复合单元体挡土墙的最大水平位移、垂直位移进行了模拟计算。但是,目前还未查找到关于废旧轮胎挡土墙抗震性能方面的研究。而作为一种交错叠放的模块式挡土墙结构,轮胎模块作为挡土墙面板在地震动荷载下极易不稳定,会引起轮胎脱落,因此,研究废旧轮胎挡墙的抗震性能具有重要意义。该文将

\*\*\*\*\*

[9] 陈宙翔,叶咸,张文波,等. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价[J]. 地震工程学报,2019(1).

[10] 薛爱新,刘晏玲,王培玉,等. 近景摄影测量技术在斜拉桥桥塔健康监测中的应用研究[J]. 中外公路,2017(3).

[11] 张勤,黄观文,杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报,2017(10).

[12] 吴玉苗,李伟,王树东. GNSS 在变形监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2017(9).

[13] 罗勇,唐华伟,管贵平,等. 基于综合监测技术的大型岩堆边坡防治研究[J]. 中外公路,2016(6).

[14] 陈贺,汤华,葛修润,等. 基于深部位移的蠕滑型滑坡预警指标及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019(增1).

[15] 叶咸,高瑜,潘俊良. 边坡深部位移监测孔测斜装置埋设方法探究[J]. 公路,2019(4).

[16] 抗兴培,孟凡成,曾超,等. 强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J]. 中外公路,2019(3).

收稿日期:2021-10-28(修改稿)

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20201454);镇江市重点研发计划—社会发展项目(编号:SH2021011);河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(编号:2020013)

作者简介:姚宝宽,男,大学本科,高级工程师. E-mail:264456728@qq.com

\* 通信作者:王丽艳,女,教授. E-mail:wly\_yzu@163.com

针对静力最稳定工况,通过 FLCA<sup>3D</sup> 数值计算的方法,考虑地震强度和外荷载的影响对废旧轮胎胎面挡土墙的抗震性能进行研究。

## 1 数值计算模型

### 1.1 几何模型

废旧轮胎胎面挡土墙由废旧轮胎、胎内塞土、回填料、基础和地基组成。废旧轮胎横向水平铺设,纵向交错叠放,形成轮胎墙,每铺设一层轮胎后,在轮胎内和轮胎墙后回填土,并振捣碾压密实,基础为预制钢筋混凝土底板。计算断面和 FLAC<sup>3D</sup> 三维数值几何模型如图 1 所示。模型网格中“基础”网格组被遮挡是由于有轮胎的周边多建了一层单元,这样可以包住轮胎,计算模型才可以不收敛。

### 1.2 接触面参数

轮胎内和轮胎墙后的回填料使用同一种材料,材料和接触面参数见文献[13]。一般土工格栅的抗拉强度远大于其在土体中所受的拉应力,因此,可以将土工格栅视为各向同性的线弹性材料,不存在破坏极限。土工格栅单元采用 FLAC<sup>3D</sup> 内嵌的 Geogrid 单元,可以抵抗薄膜应力,但不能抵抗弯曲应力。土工格栅参数如表 1 所示。根据相关工程项目、查阅文献以软件自带的用户手册确定各个接触面的参数,接触面参数如表 2 所示。

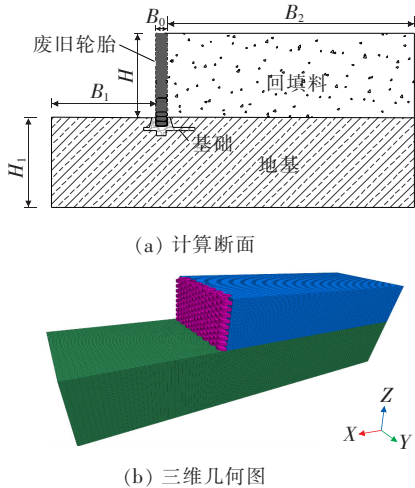


图 1 废旧轮胎挡墙计算模型

表 1 土工格栅参数

| 弹性模量/Pa            | 泊松比  | 厚度/m  | 切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> ) | 摩擦角/(°) | 耦合弹簧黏聚力/Pa          | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|--------------------|------|-------|---------------------------|---------|---------------------|--------------------------|
| 2×10 <sup>10</sup> | 0.33 | 0.002 | 4×10 <sup>7</sup>         | 30      | 2.4×10 <sup>3</sup> | 650                      |

表 2 接触面参数

| 接触面   | 切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> ) | 法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> ) | 摩擦角/(°) | 黏聚力/Pa              |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------------|
| 轮胎与填料 | 4.55×10 <sup>7</sup>      | 4.55×10 <sup>7</sup>      | 29.0    | 8.0×10 <sup>3</sup> |
| 基础与地基 | 9.27×10 <sup>7</sup>      | 9.27×10 <sup>7</sup>      | 29.6    | 2.8×10 <sup>4</sup> |

### 1.3 边界条件

在动力计算之前需要对模型进行初始地应力计算,静力计算中的边界条件:模型底部平面固定,约束模型底部的位移,约束模型四周所对应的法向位移。地基为弹性模量较大的岩土,动力计算中模型底部不设置静态边界条件,模型的四周采用自由场边界条件。

### 1.4 滤波及最大网格尺寸

输入的地震波为 El-centro 波,El-centro 波的加速度时程曲线如图 2 所示。地震波在离散介质中传播时受传播上限频率的限制,只有当输入的地震波频率小于上限频率时,数值模拟的计算结果才有意义。而且为满足地震波传播的精度,网格尺寸  $\Delta l$  必须小于与输入波的最高频率  $f$  相对应的波长  $\lambda$  的  $1/10 \sim 1/8$ ,即满足下式: $\Delta l \leq \lambda (1/10 \sim 1/8)$ 。地震波的频率  $f$  越大,则对应的波长  $\lambda$  越小,从而导致网格尺寸  $\Delta l$  过小,势必会导致模型计算时间过长,甚至不收敛。为避免上述情况发生,需过滤掉原有地震波中的高频分量,过滤后的加速度频率与幅值关系如图 3 所示,简称为加速度幅值谱(Acceleration Amplitude Spectrum)。将频率较高的地震波波段进行过滤后,若对输入的加

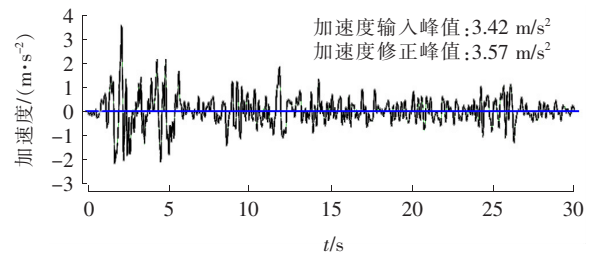


图 2 El-centro 波加速度时程曲线

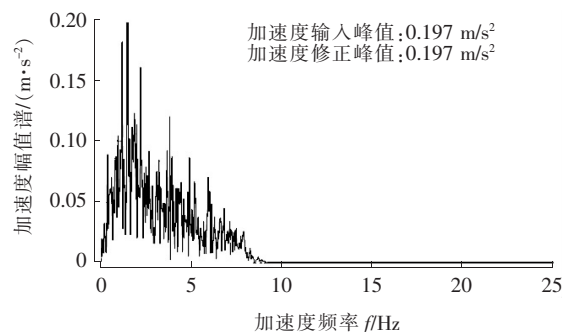


图 3 过滤后的加速度频率与幅值关系

速度积分得到的最终速度和最终位移不为零,需要对加速度时程进行基线修正。

最大网格尺寸的计算结果如表 3 所示,由表 3 可知网格尺寸  $\Delta l$  满足要求。

表 3 最大网格尺寸

| 土体种类 | $G/\text{Pa}$      | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $f/\text{Hz}$ | $(\lambda = C_s/f)/\text{m}$ | $(\Delta l = 1/10\lambda)/\text{m}$ |
|------|--------------------|--|--|---------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 地基   | $7.70 \times 10^8$ | 2 600                                  | 544.20   | 10            | 54.42                        | 5.44                                |
| 回填料  | $1.63 \times 10^7$ | 1 850                                  | 93.87  | 10            | 9.39                         | 0.94                                |
| 轮胎   | $7.52 \times 10^8$ | 1 250                                  | 775.63   | 10            | 77.57                        | 7.76                                |

## 1.5 力学阻尼

材料的内部摩擦以及接触面的滑动是产生阻尼的主要原因,FLAC<sup>3D</sup> 动力计算中提供了 3 种形式的阻尼:瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼。该文采用局部阻尼,在振动循环中,局部阻尼通过在节点或者结构单元节点上增加或者减小质量的方法达到收敛,由于增加的单元质量和减小的单元质量相等,因此系统保持质量守恒。

## 2 数值计算结果

### 2.1 考虑地震强度影响

废旧轮胎挡墙作为一种新型支挡结构,与传统重力式挡墙相比,其墙面板占地面积小,对地基承载力要求低,废旧轮胎具有抗拉强度高、耐久性强及施工方便等优点,使其可以作为一种优良的土工材料而被广泛地应用于土建工程中以改善其力学性能。该文主要考虑不同峰值加速度对废旧轮胎挡墙的动力响应的影响,采用 El-centro 地震波,加速度峰值分别设置为 0.1g、0.2g 和 0.4g,以分析在不同地震强度下废旧轮胎挡墙的动力响应。

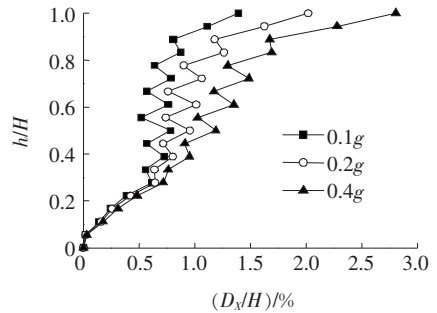
#### 2.1.1 残余水平变形

在挡墙的抗震设计中,在不影响挡墙正常使用功能和美观的前提下,必须控制震后挡墙变形量在合理范围内,位移指数为震后挡墙最大水平变形与墙高的比值,可作为反映挡墙抗震性能状态的重要指标。

在不同加速度峰值大小作用下,废旧轮胎挡墙的残余水平变形曲线如图 4 所示。当地震波加速度峰值为 0.4g 时,模型不收敛,但为了分析废旧轮胎挡墙的残余水平变形特性,仍记录了模型不收敛时的残余水平变形。

由图 4 可知:残余水平变形沿墙高的分布曲线呈锯齿状逐渐增加,最大残余水平变形位于墙顶;加速度峰值越大,挡墙的残余水平变形越大,当峰值加速度为

0.1g、0.2g 和 0.4g 时,挡墙的最大残余水平变形分别为 1.39% $H$ ( $H$  为墙高)、2.02% $H$  和计算不收敛,这是由于在动荷载作用下,废旧轮胎挡墙内部没有筋一土之间的摩擦力,不能平衡动土压力,导致原有的应力平衡状态被破坏,挡墙产生较大的残余水平变形。



注: $h/H$  为挡墙高度位置; $D_x/H$  为残余水平变形

图 4 不同地震强度下废旧轮胎挡墙的残余水平变形曲线

#### 2.1.2 残余沉降

因废旧轮胎挡墙墙后回填料表面的残余沉降较大,因此着重分析墙后回填料表面的残余沉降。当峰值加速度不同时,墙后回填料表面的残余沉降如图 5 所示。

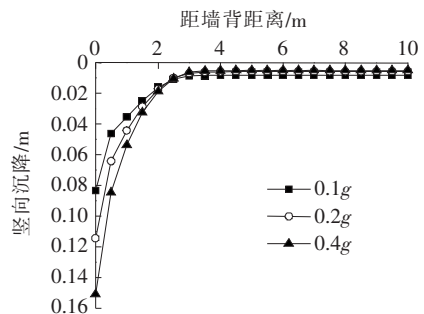


图 5 不同地震强度下废旧轮胎挡墙墙后回填料表面的残余沉降

由图 5 可知:轮胎墙附近的土体发生较大的残余沉降,距轮胎墙越远,残余沉降越小,且趋于平稳;峰值

加速度越大,土体的残余沉降越大,当峰值加速度为  $0.1g$  和  $0.2g$  时,最大残余沉降分别为  $0.083$ 、 $0.114$  m,当峰值加速度为  $0.4g$  时,计算模型发生了破坏,可见峰值加速度对废旧轮胎挡墙的残余沉降影响较大,这是由于废旧轮胎挡墙的上部结构仅由废旧轮胎和回填料组成,墙后回填料内部没有加筋材料,导致该结构的刚度不高,在强震作用下,由于回填料的压缩变形以及轮胎墙与墙后回填料的连接强度低,造成轮胎墙与回填料之间发生较大的沉降差。

### 2.1.3 墙背动土压力

在不同峰值加速度作用下,废旧轮胎挡墙墙背的水平土压力曲线如图6所示。

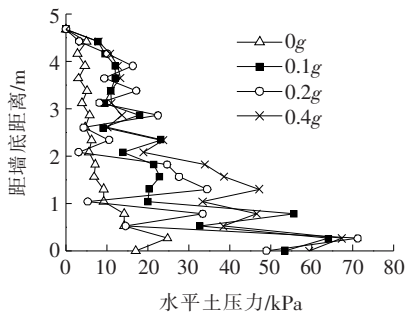


图6 不同地震强度下废旧轮胎挡墙墙背动土压力

由图6可知:在地震作用下墙背水平动土压力大于水平静土压力,且距墙底越近,水平动土压力与水平静土压力的差别越大;水平动土压力呈锯齿状分布,较大动土压力集中在废旧轮胎挡墙的中下部,这是由于废旧轮胎挡墙的中下部水平变形较小,上部水平变形较大,上部土体应力得以释放。

### 2.2 考虑外荷载影响

挡墙的水平变形大小是衡量挡土墙性能稳定的首要指标,这里主要考虑外荷载对地震作用下废旧轮胎挡墙的残余水平变形的影响。当外荷载为  $0$ 、 $10$  和  $30$  kPa 时,在不同峰值加速度作用下废旧轮胎挡墙的残余水平变形曲线如图7所示。

由图7可知:墙顶以下部位,在同一水平高度处,挡墙的残余水平变形随外荷载的增大而增大;墙顶残余水平变形(即最大残余水平变形)随外荷载的增大而减小;当峰值加速度为  $0.1g$  时,随外荷载的增大,挡墙的最大残余水平变形依次减小了  $5.1\%$  和  $4.4\%$ ,当峰值加速度为  $0.2g$  时,随外荷载的增大,挡墙的最大残余水平变形依次减小了  $5.2\%$  和  $1\%$ ,当峰值加速度为  $0.4g$  时,在外荷载  $10$ 、 $30$  kPa 作用下残余水平变形曲线几乎重合(挡墙已破坏)。可见,在挡墙顶部施加一定的外荷载有利于减小最大地震残余水平变形,却

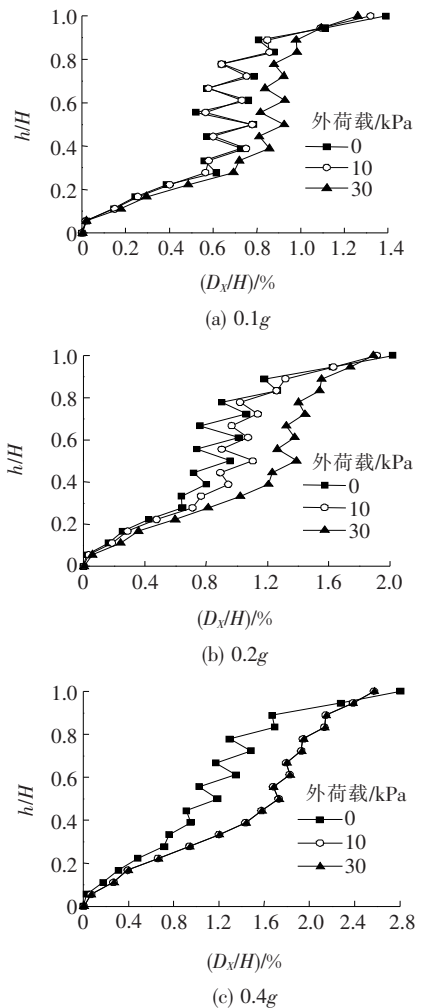


图7 不同外荷载强度下废旧轮胎挡墙的残余水平变形曲线  
会增大挡墙其他部位的残余水平变形。

### 3 设防标准

因该文提出的废旧轮胎挡墙为新型支挡结构,未曾有相关的规范,该文基于张建经所提出的支挡结构抗震设计的三级设防标准,并结合大量数值模拟结果,将位移指标折减  $0.7$ ,提出废旧轮胎挡墙抗震设计的三级设防标准,如表4所示。

表4 废旧轮胎挡墙抗震设计的三级设防标准

| 位移指标         | 性能要求                          |
|--------------|-------------------------------|
| $0.7\%H$ 以内  | 地震后墙体不损坏或轻微损坏,能保持正常使用功能       |
| $2.45\%H$ 以内 | 地震后可能损坏,经修补能在短期内恢复正常使用功能      |
| $4.2\%H$ 以内  | 地震后可能产生较大破坏,但不会整体倒塌,经抢修后可限速通车 |



由表 4 可知:当地震烈度为Ⅶ度(峰值加速度为  $0.1g$ )和地震烈度为Ⅷ度(峰值加速度为  $0.2g$ )时,挡墙的最大残余水平变形为  $0.7\%H \sim 2.45\%H$ ,该挡墙在地震后可能损坏,经修补能在短期内恢复正常使用功能;当地震烈度为Ⅸ度(地震波峰值加速度为  $0.4g$ )时,模型计算不收敛,废旧轮胎挡墙发生破坏。可见,当峰值加速度较小时,挡墙可以通过废旧轮胎对土体的“套箍”作用来维持结构的稳定性,此时挡墙的残余水平变形较小,当峰值加速度较大时,废旧轮胎对土体的“套箍”作用不足以维持结构的稳定性,挡墙的残余水平变形超过设计允许值,因此废旧轮胎挡墙结构仅适用于地震烈度不大于Ⅷ度的区域。

## 4 结 论

基于目前废旧轮胎胎面挡土墙抗震性能方面研究的空白,分析了在不同峰值加速度和外荷载作用下废旧轮胎挡墙的抗震性能,得到以下结论。

(1) 废旧轮胎胎面挡土墙地震残余水平变形沿墙身向上逐渐增加,最大残余水平变形位于墙顶;墙顶回填土残余沉降距轮胎墙背越远,残余沉降越小,紧靠墙背的回填土沉降最大。

(2) 墙背水平动土压力沿墙身向下逐渐增大,呈锯齿状分布,较大动土压力集中在废旧轮胎挡墙的中下部,且大于静土压力,距墙底越近,水平动土压力与水平静土压力的差别越大。

(3) 墙顶残余水平变形(即墙体最大残余变形)随外荷载的增大而减小,在挡墙顶部施加一定的外荷载有利于减小最大地震残余水平变形,却会增大墙身其他部位的残余水平变形。

(4) 挡墙的水平变形大小是衡量挡土墙性能稳定的首要指标,基于废旧轮胎胎面挡土墙的地震残余水平变形,提出废旧轮胎挡墙抗震设计的三级设防标准,胎面挡墙可在地震烈度不超过Ⅷ度的区域推广,不适用于地震烈度大于Ⅷ度的区域。

## 参 考 文 献:

- [1] 曾玉珍. 废旧轮胎在国外道路工程中的应用[J]. 国外公路, 2000(1).
- [2] Yue Huang, Roger N. Bird, Oliver Heidrich. A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt-pavements Resources [J]. Conservation and Recycling, 2007, 52: 58-73.
- [3] Tsai Wen-Tien. Analysis of the Sustainability of Reusing Industrial Wastes as Energy Source in the Industrial Sector of Taiwan [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18: 1440-1445.
- [4] Adam J. Kardos a, Stephan A. Durham. Strength, Durability, and Environmental Properties of Concrete Utilizing Recycled Tire Particles for Pavement Applications [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98(15): 832-845.
- [5] Mohsen Abbaspour, Esmail Aflaki, Fereidoon Moghadas Nejad. Reuse of Waste Tire Textile Fibers as Soil Reinforcement [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207(10): 1059-1071.
- [6] 杨超. 废旧轮胎加筋路堤边坡抗震性能研究[D]. 湖北工业大学硕士学位论文, 2015.
- [7] 李丽华, 肖衡林, 郑俊杰, 等. 废旧轮胎加筋路堤边坡模型试验研究[J]. 工程力学, 2015(11).
- [8] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2017(1).
- [9] Garga Vinod K. and O'Shaughnessy Vince. Tire-Reinforced Earthfill. Part 1: Construction of a Test Fill, Performance, and Retaining Wall Design [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(3): 75-96.
- [10] Taya Ann Retterer. Gravity and Mechanically Stabilized Earth Wall Using Whole Scrap Tires [D]. Texas Tech University, 2000.
- [11] 马源. 废旧轮胎-土复合体力学性能及工程应用研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2018.
- [12] 李春强, 付海洋. 废旧轮胎加筋土在支挡结构中位移影响因素分析研究[J]. 公路, 2019(7).
- [13] 巩文雪. 废旧轮胎+土工格栅加筋土挡墙的工作性能数值模拟与理论方法研究[D]. 江苏科技大学硕士学位论文, 2020.
- [14] Maxime Soude, Bastien Chevalier, Michel Grediac, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Response of Geocell Reinforced Walls to Horizontal Localized Impact [J]. Geotextile and Geomembranes, 2013, 39: 39-50.
- [15] 朱宏伟, 姚令侃, 赖军. 基于性能的重力式挡墙地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2020(1).
- [16] 张建经, 冯君, 肖世国, 等. 支挡结构抗震设计的 2 个关键技术问题[J]. 西南交通大学学报, 2009(3).