

考虑轮胎尺寸影响的废旧轮胎挡土墙变形数值研究

黄留新¹, 王丽艳², 巩文雪², 余曜宏², 周爱兆²

(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, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对废旧轮胎资源化循环利用问题, 提出由废旧轮胎、回填料、基础和地基组成的轮胎墙结构, 代替传统的钢筋混凝土面板挡土墙。目前, 国内外没有关于废旧轮胎挡土墙的研究, 为了使废旧轮胎墙结构在挡土工程中合理化应用, 通过 FLAC^{3D} 建立废旧轮胎挡土墙结构数值计算模型。用实体单元模拟废旧轮胎, 考虑轮胎回填料间的接触面单元; 分析了废旧轮胎的半径和断面宽度对轮胎墙水平变形的影响, 为各影响因素提出了合理的取值范围, 可为废旧轮胎挡土墙的应用和推广提供设计依据。

关键词: 废旧轮胎挡土墙; 水平变形; 数值模拟; 轮胎断面宽度; 轮胎半径

中图分类号: TU533 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2020)02-0164-06

Numerical study on horizontal deformation of waste tire retaining wall considering effects of tire dimension

HUANG Liu-xin¹, WANG Li-yan², GONG Wen-xue², YU Yao-hong², ZHOU Ai-zhao²

(1. The Third Geology and Mineral Bureau of Jiangsu Province, Zhenjiang 212001, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to recycle waste tires, the tire wall structure, which consists of waste tire, backfill and foundation, is proposed to replace the traditional reinforced concrete face retaining wall. However, there is little research on the waste tire wall. In order to rationalize the application of waste tire wall structure in retaining engineering, the numerical model of waste tire retaining wall structure was established by FLAC^{3D}. The solid elements were used to simulate the waste tires, and the interfaces between tires and backfill were considered. The effects of section width and tire radius on the horizontal deformation of waste tire retaining wall were analyzed, and the reasonable ranges of values for influence factors were put forward. This study can provide basis for the design and application of waste tire retaining walls.

Keywords: waste tire retaining wall; horizontal deformation; numerical simulation; section width of tires; tire radius

0 引 言

墨西哥的边境城市蒂华纳堆积了大量的废旧轮胎, 当地居民将废旧轮胎构成围护墙, 如图 1 所示, 既解决了大量废旧轮胎堆积问题, 保护环境, 又降低了工程成本。近年来, 我国每年产生的废旧轮胎多年位居世界第一, 并且每年产生的废旧轮胎急剧增加。大量废旧轮胎长期露天堆放, 占用大量土地资源, 如何将其“变废为宝”是我们现在所面对的最大挑战^[1]。工程中对于废旧轮胎的利用方式主要为将轮胎颗粒或切割的轮胎条掺入土中, 以改善土体的力学性能^[2]。但是, 在将轮胎磨成颗粒过

程中会产生挥发性的污染物, 将废旧轮胎切割成条的工序也会增加工程成本。



图 1 墨西哥居民利用废旧轮胎构成的围护墙

Fig. 1 Retaining walls made up of waste tires by Mexicans

众多学者对废旧轮胎作为建筑材料的力学性能进行了广泛的试验研究。Yoon 等学者^[3-4]论证了废旧轮胎加固土体的可行性, 或将废旧轮胎切割成条应用于挡土墙墙后回填料中或者边坡中, 以起到加筋作用^[5]。废旧轮胎抗拉强度高、抗磨损、抗老化、韧性高、对环境的影响较小、防震性能优良、且施工快速简单、成本低廉、具有良好的变形适应性能和长期稳定性^[6]。因此, 将废旧轮胎作为支挡结构, 通过一定的连接方式形成力学性能优良的墙体, 从而代替传统的混凝土面板, 可大大减少工程成本, 变废为宝。

控制废旧轮胎挡土墙的变形是确保其强度与稳定性的重要指标, 而废旧轮胎挡土墙的变形与废旧轮胎的尺寸密切相关。本文通过数值模拟研究轮胎尺寸对废旧轮胎挡土墙变形的影响, 为废旧轮胎挡土墙水平变形的研究和施工设计提供参考和依据。

1 数值计算模型

1.1 几何模型

废旧轮胎挡土墙模型由废旧轮胎、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, 废旧轮胎之间通过强度较大且耐久性强的连接片连接, 形成轮胎墙。每铺设 1 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。

轮胎的直径用 D 表示, 墙后回填料的横向长度为 $20D$, 墙前地基土的横向长度为 $10D$, 地基深度为 $6D$, 用 $FLAC^{3D}$ 建立的三维模型如图 2 所示。轮胎和土体均采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 在二

者之间建立接触面以模拟非连续介质之间的接触, 接触面采用的是无厚度接触面单元, 接触面的本构模型采用库仑剪切模型^[7]。

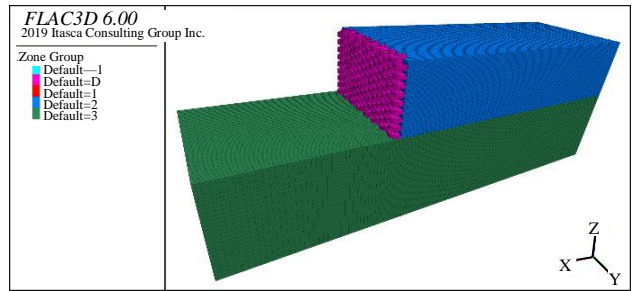


图 2 废旧轮胎挡土墙三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of waste tire retaining wall

1.2 材料参数和边界条件

轮胎内和轮胎外的回填料采用砂类土 (粉砂、黏砂除外)、砾石类土、碎石类土或废旧钢渣等性能较好的工业废料, 根据《地基与基础》和类似工程项目确定土体的弹性模量 E_s 和泊松比 ν ^[8], 并根据式 (1) 计算土体和废旧轮胎的体积模量 K 和剪切模量 G , 选取土体的黏聚力、内摩擦角和密度^[9]。数值模型中的材料参数如表 1 所示。

$$\begin{cases} K = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \\ G = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比。

根据相关的工程项目、查阅文献以软件自带的用户手册确定各个接触面的参数^[8], 接触面的取值参数如表 2 所示。

数值模型的边界条件为约束模型底部的位移和模型四周的法向位移。

表 1 废旧轮胎挡土墙的材料参数表

Tab. 1 Material parameters of waste tire retaining wall

	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	密度/(kg/m ³)	粘聚力/Pa	内摩擦角/°	抗拉强度/Pa	厚度/m
轮胎	1.96×10 ⁹	7.52×10 ⁸	1 250	1.5×10 ⁶	45	2×10 ⁶	0.02
回填料	2.38×10 ⁷	1.63×10 ⁷	1 850	1×10 ⁴	35	1×10 ³	—
基础	1.52×10 ¹⁰	1.28×10 ¹⁰	2 385	1.20×10 ¹⁰	55	1.78×10 ⁶	—
地基	4.94×10 ⁷	3.25×10 ⁷	2 400	3.5×10 ⁴	37	5.6×10 ³	—

表 2 接触面参数

Tab. 2 Parameters of interfaces

接触面	切向刚度/(N/m)	法向刚度/(N/m)	摩擦角/°	粘聚力/Pa
轮胎与回填料	4.55×10 ⁷	4.55×10 ⁷	29	8×10 ³
基础与地基	9.27×10 ⁷	9.27×10 ⁷	29.6	2.8×10 ⁴

2 废旧轮胎挡土墙水平变形的影响因素分析

2.1 废旧轮胎的半径对废旧轮胎挡土墙水平变形的影响

当 $q=10$ kPa 时, 不同轮胎半径的废旧轮胎挡土墙的水平变形云图及其局部放大图如图 3 所示。当外荷载 $q=10$ kPa 时, 挡土墙的最大水平变形随半径的增加而减小。半径 $r=0.42$ m 和 $r=0.52$ m 的挡土墙的较大水平变形主要集中在挡土墙的上部, 而半径 $r=0.32$ m 的挡土墙的较大水平变形沿墙高往下发展, 主要集中在挡土墙的中部及上部。表明当外荷载较大时, 废旧轮胎挡土墙的承载能力随轮胎半径的增大而增强, 在挡土墙的设计与施工中应优先选用轮胎半径较大的废旧轮胎。

轮胎尺寸列于表 3, 当外荷载 $q=0$ kPa、 $q=10$ kPa、

$q=30$ kPa、 $q=50$ kPa 和 $q=70$ kPa 时, 分别分析轮胎半径对废旧轮胎挡土墙水平变形的影响。

在不同外荷载作用下, 不同轮胎半径的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线如图 4 所示。当外荷载 $q \neq 0$ kPa 时, 废旧轮胎挡土墙的水平位移的分布规律是一致的, 即在同一高度处, 挡土墙的水平位移随废旧轮胎的半径增大而减小。这是由于废旧轮胎的半径越大, 轮胎的胎面及侧面的面积越大, 废旧轮胎“套箍”作用、相邻层废旧轮胎侧面之间的摩擦作用越强, 提高了废旧轮胎挡土墙的承载能力, 大大减小了挡土墙的水平变形。

表 3 轮胎尺寸

Tab. 3 Dimensions of waste tire

轮胎型号	半径 r/m	断面宽度 t/m
255/40R17	0.32	0.26
255/70R19.5	0.42	0.26
10R22.5	0.52	0.26

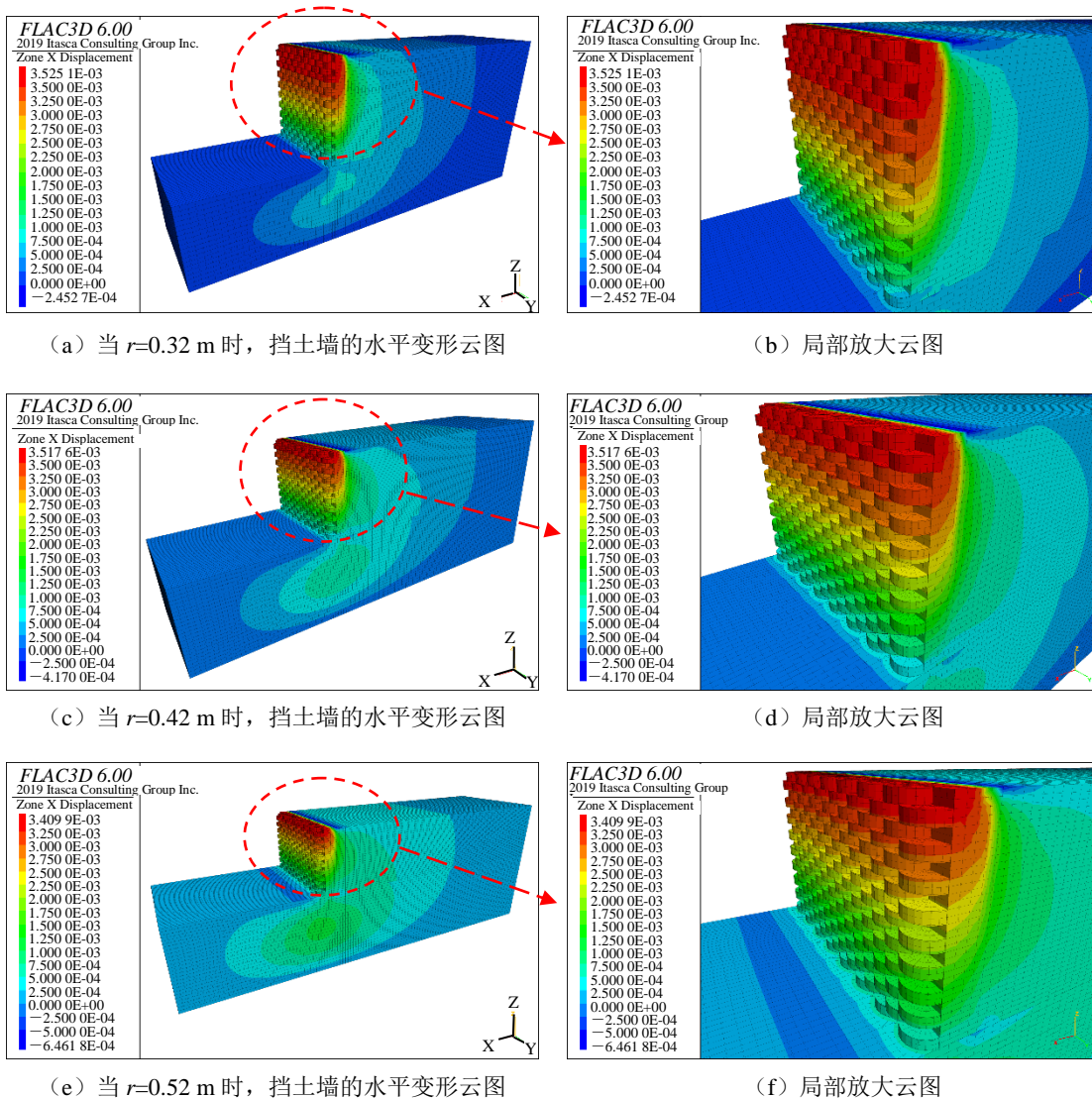
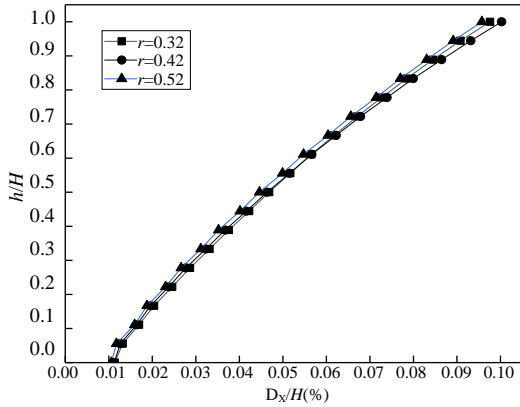
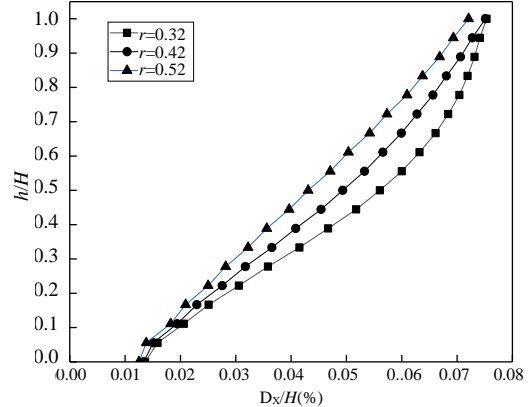


图 3 不同轮胎半径废旧轮胎挡土墙的水平变形云图 (外荷载 $q=10$ kPa)

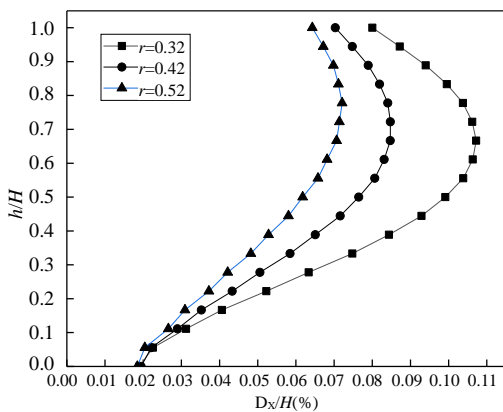
Fig. 3 Horizontal deformation contour of waste tire retaining wall with different tire radius (External load $q=10$ kPa)



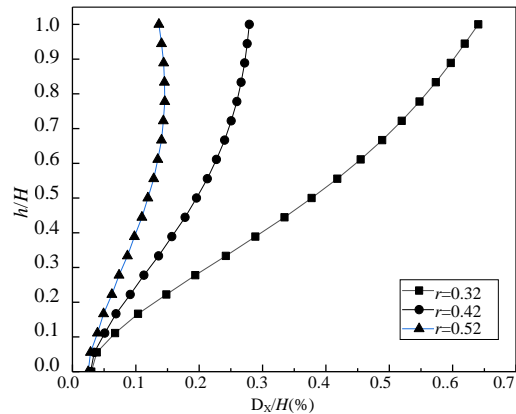
(a) $q=0$ kPa 时挡土墙的水平变形曲线



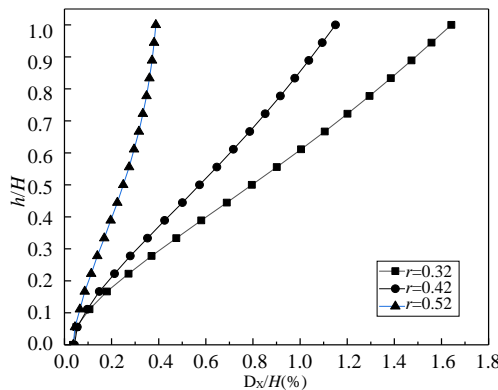
(b) $q=10$ kPa 时挡土墙的水平变形曲线



(c) $q=30$ kPa 时挡土墙的水平变形曲线



(d) $q=50$ kPa 时挡土墙的水平变形曲线



(e) $q=70$ kPa 时挡土墙的水平变形曲线

图 4 当外荷载不同时, 不同轮胎半径的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线

Fig. 4 Horizontal deformation of waste tire retaining wall versus tire radius under different external loads

当外荷载 $q=0$ kPa 时, 对于不同半径的废旧轮胎挡土墙, 水平变形的分布规律是一致的, 均沿墙高逐渐增大, 最大水平变形位于墙顶处, 挡土墙的水平变形曲线呈直线型。在同一高度处, 不同轮胎半径的挡土墙的水平变形曲线相差不大, 这是由于此时废旧轮胎挡土墙所受的侧向土压力较小, 挡土墙自身所具有的刚度足以抵抗水平变形, 并没有发挥轮胎对土体的“套箍”作用, 其变形模式类似于

重力式挡土墙。

当外荷载 $q=10$ kPa 时, 半径 $r=0.42$ m 和 0.52 m 废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线仍接近直线型, 而半径 $r=0.32$ m 的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线呈凹凸微小变化型, 表明废旧轮胎挡土墙的承载能力随轮胎半径的增大而增强。当侧向土压力较大时, 半径较小的废旧轮胎挡土墙发生较大的水平变形, 轮胎开始发挥其对土体的“套箍”作用。

当外荷载 $q=30$ kPa 时,对于不同半径的废旧轮胎挡土墙,挡土墙的水平变形曲线均呈“鼓腮”型,挡土墙的较大水平变形主要集中在 $0.55\sim 0.85 H$ 处。半径 $r=0.32$ m 的轮胎挡土的“鼓腮”变形最为明显,这是由于当外荷载较大时,挡土墙发生较大的水平变形,且废旧轮胎挡土墙的承载能力随轮胎半径的减小而降低,导致半径 $r=0.32$ m 的挡土墙的“鼓腮”变形最为明显。

当外荷载 $q=50$ kPa 时,半径 $r=0.52$ m 的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线仍为“鼓腮”型,其最大水平变形位于 $0.80 H$ 处。而半径 $r=0.32$ m 和 $r=0.42$ m 的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线由“鼓腮”型发展到凹凸微小变化型,其最大水平变形位于墙顶处。

当外荷载 $q=70$ kPa 时,废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线呈直线型,半径 $r=0.32$ m 和 $r=0.42$ m 的挡土墙计算模型不收敛,水平变形沿墙高迅速增大,挡土墙发生了破坏。

由以上分析可知,废旧轮胎挡土墙的承载能力随轮胎半径的增大而增强,基于安全角度,在工程预算合理的前提下,在废旧轮胎挡土墙的设计与施工中应选用半径较大的废旧轮胎。

2.2 废旧轮胎的断面宽度对废旧轮胎挡土墙水平变形的影响

轮胎尺寸列于表4。当外荷载 $q=0$ kPa、 $q=10$ kPa、 $q=30$ kPa 和 $q=50$ kPa 时,分别分析断面宽度对废旧轮胎挡土墙水平变形的影响。

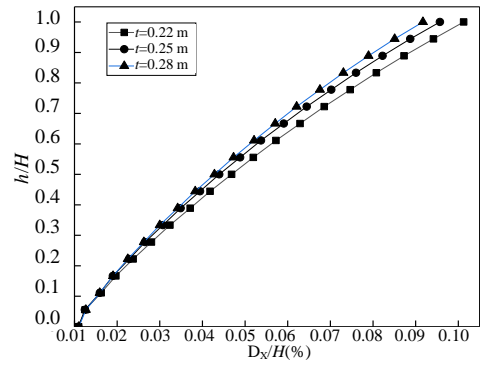
表4 废旧轮胎尺寸
Tab. 4 Dimensions of waste tire

轮胎型号	半径 r/m	断面宽度 t/m
215/65R16	0.34	0.22
245/45R18	0.34	0.25
275/35R19	0.34	0.28

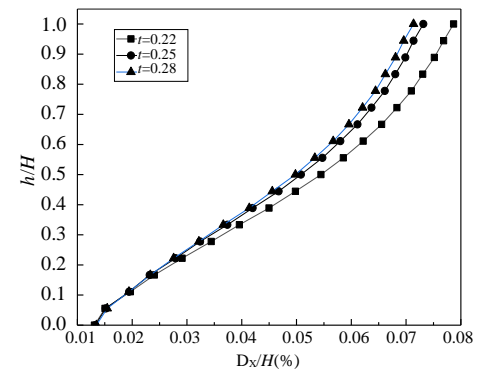
在不同外荷载作用下,不同轮胎断面宽度的废旧轮胎挡土墙的水平变形沿墙高的分布曲线如图5所示。

当外荷载 $q=0$ kPa 时,挡土墙的水平变形曲线呈直线型,这是由于废旧轮胎挡土墙所受的土压力较小,并没有发挥轮胎对土体的“套箍”作用,其变形模式类似于重力式挡墙。

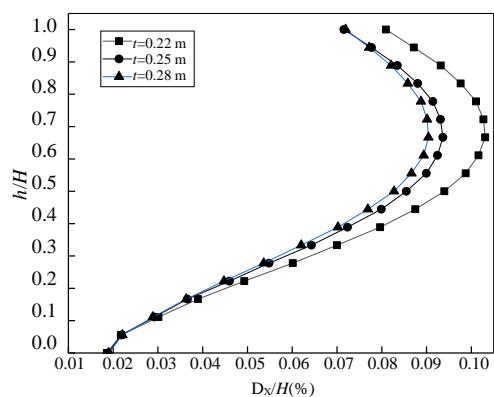
当外荷载 $q=10$ kPa 时,挡土墙的水平变形曲线呈凹凸微小变化型,这是由于当侧向土压力较大时,废旧轮胎挡土墙发生较大的水平变形,加之轮胎对土体的“套箍”作用,使其呈凹凸微小变化型。



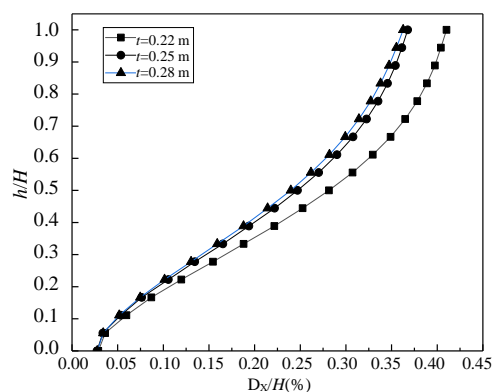
(a) $q=0$ kPa 时废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线



(b) $q=10$ kPa 时废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线



(c) $q=30$ kPa 时废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线



(d) $q=50$ kPa 时废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线

图5 当外荷载不同时,不同轮胎断面宽度的废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线

Fig. 5 Horizontal deformation of waste tire retaining wall versus section width of tire under different external loads

当外荷载 $q=30$ kPa 时, 废旧轮胎挡土墙的水平变形曲线呈“鼓腮”型, 较大的水平变形主要集中在 $0.55\sim 0.85 H$ 部位。

当外荷载 $q=50$ kPa 时, 挡土墙的水平变形曲线呈凹凸微小变化型。

当外荷载相同时, 在同一高度处, 挡土墙的水平位移随轮胎的断面宽度增大而减小, 表明废旧轮胎挡墙的承载能力随轮胎断面宽度的增加而增强。这是由于废旧轮胎的断面宽度越大, 废旧轮胎的胎面和侧面面积越大, 增强了废旧轮胎对土体的“套箍”作用以及相邻层轮胎侧面之间的摩擦作用。对于相同高度的废旧轮胎挡土墙, 轮胎的断面宽度越大, 所用轮胎层数越少, 废旧轮胎挡土墙的整体性越好, 刚度越大, 虽然减弱了相邻层轮胎侧面之间的摩擦作用, 但增强了轮胎对土体的“套箍”作用, 表明对于减小挡土墙水平变形的影响程度来说, 废旧轮胎对土体的“套箍”作用大于轮胎侧面之间的摩擦作用。设计与施工时应选用断面宽度较大的废旧轮胎, 以便增强废旧轮胎对土体的“套箍”作用。

由图 5 (c) ~ (d) 可知, 在较大外荷载作用下, 当断面宽度从 0.22 m 增大到 0.25 m 时, 挡土墙的水平变形显著减小, 但断面宽度为 0.25 m 和 0.28 m 的挡土墙的水平变形曲线几乎重合。表明当废旧轮胎的断面宽度增大到一定程度时, 一味地增大断面宽度并不能显著减小挡土墙的水平变形, 基于安全和工程成本, 在废旧轮胎挡土墙的设计与施工中不必选用断面宽度过大的废旧轮胎, 应根据所设计的废旧轮胎挡土墙结构的具体工程应用合理地选用废旧轮胎。

3 结 论

控制废旧轮胎挡土墙的水平变形是确保其强度与稳定性的重要措施, 本文分析了废旧轮胎的半径和断面宽度对废旧轮胎挡土墙水平变形的影响, 所得结论如下:

(1) 当侧向土压力较小时, 半径对废旧轮胎挡土墙的水平变形影响较小, 当侧向土压力较大时, 废旧轮胎挡土墙的水平变形随半径增大而显著减少。

(2) 当外荷载较小时, 挡土墙随断面宽度的增大而减小; 当外荷载较大时, 若断面宽度增大到一定程度后, 一味地增大断面宽度并不能显著减小挡土墙的水平变形。

(3) 基于安全角度, 在工程预算合理的前提下, 在废旧轮胎挡土墙的设计与施工中应选用半径较大的废旧轮胎。

(4) 基于安全和工程成本, 在废旧轮胎挡土墙的设计与施工中不必选用断面宽度过大的废旧轮胎, 应根据废旧轮胎挡土墙结构的具体工程应用合理地选用废旧轮胎。

参考文献

- [1] Huat B B K, Aziz A A, Chuan L W. Application of scrap tires as earth reinforcement for repair of tropical residual soil slope [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2008(13): 1-9.
- [2] 张正甫, 刘松玉, 蔡光华, 等. 废旧轮胎在道路工程中的研究进展[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(S2): 361-368.
- [3] Yeo W Y, Seung B H, Keun S K. Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(1): 100-107.
- [4] Keun S K, Yeo W Y, Gil L Y. Pullout behavior of cell-type tires in reinforced soil structures[J]. *Geotechnical Engineering*, 2012, 15(7): 1209-1217.
- [5] 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, 39(1): 81-88.
- [6] Say ã A S F J, Gerscovich D M S, Medeiros L V, et al. Scrap tire-an attractive material for gravity retaining walls and soil reinforcement [J]. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2009, 35(3): 135- 155.
- [7] 陈育民, 徐鼎平. *FLAC/FLAC3D 基础与工程实例*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [8] 顾晓鲁. *地基与基础*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [9] 何光春. *加筋土工程设计与施工*[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.