

废旧轮胎挡土墙与传统挡土墙 稳定性能对比研究

姚宝宽¹, 王丽艳², 谢红梅², 巩文雪³

(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;
3. 江苏筑森建筑设计有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 为了探讨废旧轮胎挡土墙稳定性能, 推广废旧轮胎挡土墙在工程中的应用, 本文将废旧轮胎挡土墙与传统挡土墙的稳定性能进行了对比研究。基于 FLAC3D 数值计算方法, 设置轮胎与回填料、基础与地基的接触面参数以及土工格栅计算参数, 对比研究废旧轮胎挡土墙与三类传统挡土墙的稳定性能异同, 分析墙体水平变形、竖向沉降和水平土压力等稳定性特征, 揭示废旧轮胎挡土墙稳定性能。

关键词: 废旧轮胎挡土墙; 传统挡土墙; 水平变形; 竖向沉降; 水平土压力

中图分类号: TU53

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0283-07

Comparative study on stability of waste tire retaining wall and traditional retaining wall

YAO Bao-kuan¹, WANG Li-yan², XIE Hong-mei², GONG Wen-xue³

(1. The Third Geological Brigade, Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangsu Province, Zhenjiang, Jiangsu 212001, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China;
3. Design of Century Architecture Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China)

Abstract: In order to explore the stability performance of waste tire retaining wall and promote the application of waste tire retaining wall in engineering, the stability performance of waste tire retaining wall and that of traditional retaining wall are compared in this paper. Based on FLAC3D numerical calculation method, the parameters of contact surface between tire and backfill, foundation and subsoil contact surface and the calculation parameters of geogrid are set. The similarities and differences of stability performance between waste tire retaining wall and three types of traditional retaining walls are compared. The stability characteristics of horizontal deformation, vertical settlement and horizontal earth pressure of the wall are studied to reveal the stability performance of waste tire retaining wall.

Key words: waste tire retaining wall; traditional retaining wall; horizontal deformation; vertical settlement; horizontal earth pressure

0 引言

目前废旧轮胎作为建筑材料已广泛投入到建筑工程中使用, 对于轮胎及轮胎颗粒混合材料的力学性能研究也十分丰富。张广泰等^[1]进行了单轴受压试验和极限承载试验, 研究了叠层废旧轮胎隔振垫在不同尺寸及设计压力下的单轴受压性能和竖向力学性能。Yoon 等^[2-3]采用平板荷载试验研究废旧轮胎垫相对密度、嵌入深度和轮胎类型等多种因

素对砂土加固作用的影响以及在不同组合形式和各种条件下的增强效果; Kim 等^[4]进行现场拉拔试验分析了有效锚固长度、轮胎数量等对轮胎拉拔性能的影响; 李朝晖等^[5]采用专门设计的环刀击石设备对比研究了轮胎颗粒-黄土混合料的压实性能, 并给出不同混合料击实指标的建议值; 李丽华等^[6-8]采用室内模型试验研究了废旧轮胎加筋对土体强度以及边坡稳定的影响, 发现废旧轮胎加筋明显, 可显著改善路堤沉降, 同时对比分析了与土工

格室加筋机理的异同,为废旧轮胎加筋土的应用提供理论基础,并分析废旧轮胎加筋机理,给出了关于废旧轮胎加筋地基承载力的计算方法。LaRocque等^[9]进行直剪试验研究了轮胎捆的加固作用。

现阶段对废旧轮胎挡墙的有关研究成果甚少。黄留新和王丽艳等^[10]采用FLAC3D数值模拟建立了废旧轮胎挡土墙模型,研究了废旧轮胎尺寸对挡土墙水平变形的影响。Garga和O'Shaughnessy两位学者^[11]首次研究了废旧轮胎挡墙,采用约10000只整轮胎建立了一个4m高的轮胎挡土墙开展现场测试,进行了无黏性土和黏性土回填轮胎的工况的研究。Retterer^[12]给出了各种废旧轮胎挡墙类型及其设计方法,马源^[13]运用二维数值计算对废旧轮胎胎面重力式挡墙进行研究(以Retterer给出的“梯形”墙型为主要研究对象),为数值模拟提供参数依据。李春强等^[14]采用Plaxis有限元数值分析软件模拟计算了废旧轮胎复合单元体挡土墙的最大水平、垂直位移并对最大位移的各影响因素进行敏感性分析,给出工程应用上的建议。

挡墙结构在工程实际中广泛应用,主要应用于工程领域,随着时代发展,挡墙结构形式逐渐丰富化,重力式挡墙、悬臂式挡墙和面板式土工格栅加筋土挡墙是工程实践中最为常见的三种挡墙结构。为研究废旧轮胎挡墙的工程优势,揭示废旧轮胎挡土墙稳定性能。本论文对比分析废旧轮胎挡墙和以上三种传统挡墙的变形与墙背受力特性。

1 数值模型建立

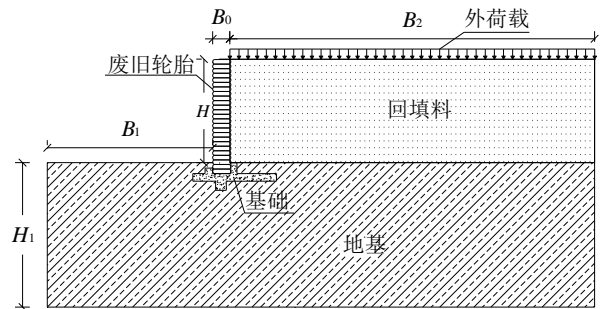
选取轮胎型号为10R22.5,轮胎直径 D 为1.04 m,废旧轮胎断面宽度 t 为0.26 m。经多次试算,划定挡土墙的数值模拟边界范围,取轮胎墙的纵向计算长度 $8D$ 较为合理;同理,取墙面面向前距离 $10D$ 和地基深度向下距离 $6D$ 处作为墙前地基计算边界。不同的是墙宽尺寸,选取性能较好的重力式挡土墙和经济型的悬臂挡土墙进行对比研究。

为了对比,四类挡墙的高度 H 均为4.68 m,重力式挡墙墙体的平均宽度与废旧轮胎挡土墙保持一致,取为1.04 m。根据规范中的规定^[15],重力式挡墙的混凝土墙顶宽度必须大于0.4 m,取墙顶宽度 B_0 为0.58 m,则取墙底宽度 B_3 为1.5 m;取基础埋置深度最小值1.0 m,基础宽度为3.0 m,厚度为1 m。查阅相关规定^[15],悬臂式挡墙墙顶宽度 B_0 取规定宽度最小值为0.2 m;基础埋置深度为1 m,基础宽度为3.0 m,厚度为1 m。土工格栅铺设在悬

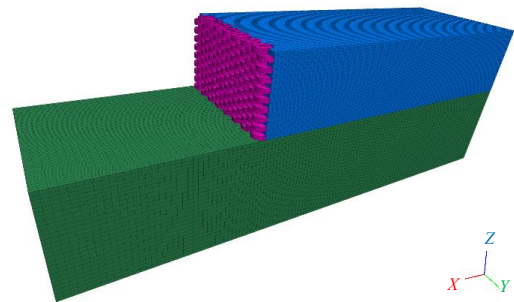
臂式挡墙墙后回填料中,悬臂式挡墙和土工格栅结合共同形成面板式土工格栅加筋挡土墙。为了比较,取面板式土工格栅加筋挡土墙墙顶宽度 B_0 为0.2 m。土工格栅的加筋长度为 $0.7H$,竖向加筋间距为 $2t$ 。

四类挡墙墙长均为8.32 m,墙前地基宽度 B_1 为10.4 m,墙后回填料宽度 B_2 为20.8 m,地基深度 H_1 为6.24 m。

四种挡墙结构示意图分别如图1~4。



(a) 结构示意图



(b) 计算模型图

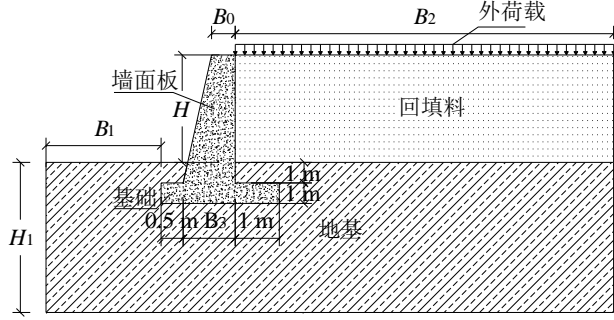
图1 废旧轮胎挡墙结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of waste tire retaining wall

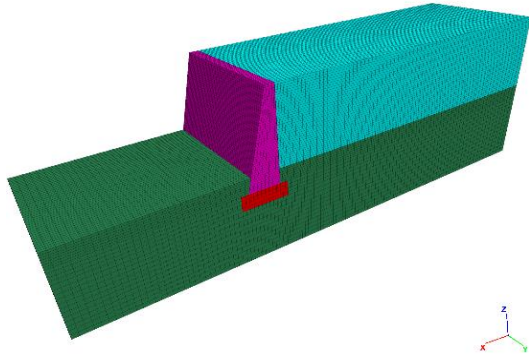
图2为重力式挡墙结构示意图,图3为悬臂式挡墙结构示意图。

除废旧轮胎挡墙外,其余三种挡墙的墙面均为混凝土面板。查阅工程项目资料及相关文献,取墙面板体积模量为49.4 MPa,剪切模量为21.9 MPa,密度为1900 kg/m³,黏聚力为10 kPa,内摩擦角为40°,抗拉强度为138 kPa。轮胎内回填料与轮胎墙后的回填料材料相同且均采用砂类土^[15]。取回填料体积模量为23.8 MPa,剪切模量为16.3 MPa,密度为1850 kg/m³,内摩擦角为35°,抗拉强度为1 kPa。

四类挡墙所用混凝土材料、地基和墙后回填料相同。根据《地基与基础》确定基础与地基参数取值^[16],基础的材料参数取体积模量为15.2 GPa,剪切模量为112.8 GPa,密度为2385 kg/m³。地基材料参数取体积模量为49.4 MPa,剪切模量为32.5 MPa,密度为2400 kg/m³,黏聚力为3.5 kPa,



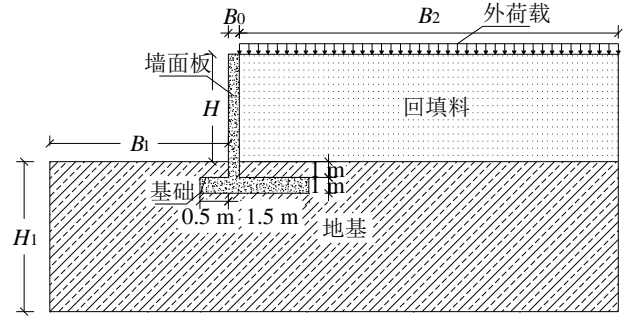
(a) 结构断面示意图



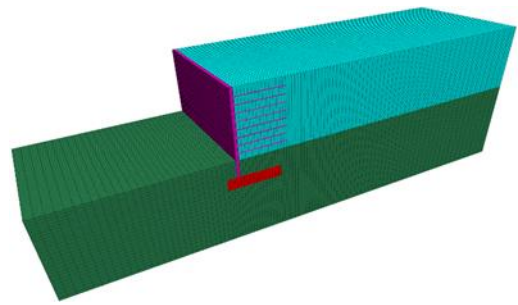
(b) 计算模型三维图

图 2 重力式挡墙结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of gravity retaining wall



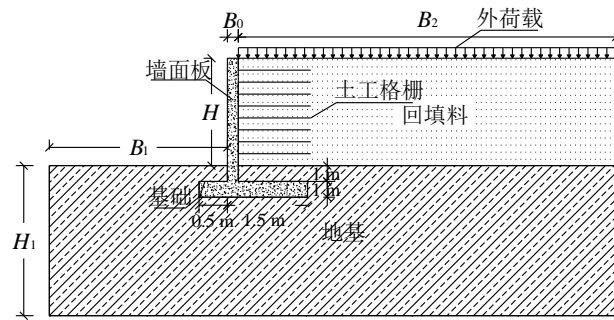
(a) 结构断面示意图



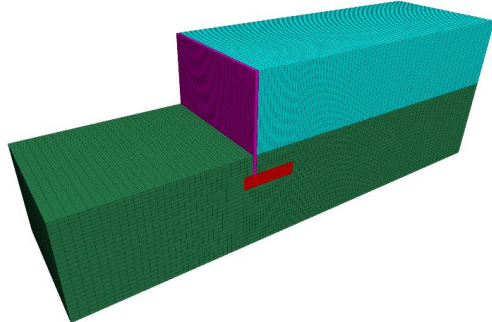
(b) 计算模型三维图

图 4 面板式土工格栅加筋土挡墙结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of panel geogrid reinforced soil retaining wall



(a) 结构断面示意图



(b) 计算模型三维图

图 3 悬臂式挡墙结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of cantilever retaining wall

内摩擦角为 37°, 抗拉强度为 5.6 kPa。

根据相关文献选取轮胎参数^[17]。轮胎体积模量取为 1.96 GPa, 剪切模量取为 0.75 GPa, 密度为

1 250 kg/m³, 厚度为 20 mm。

参考相关文献和相关工程项目资料, 结合 FLAC3D 用户手册以确定轮胎与回填料、地基与地基之间的接触参数^[18-19]。轮胎与回填料的接触面刚度为 4.55×10⁴ kN/m, 摩擦角为 29°, 黏聚力为 8 kPa, 基础与地基接触面刚度为 9.27×10⁴ kN/m, 摩擦角为 29.6°, 黏聚力为 28 kPa。

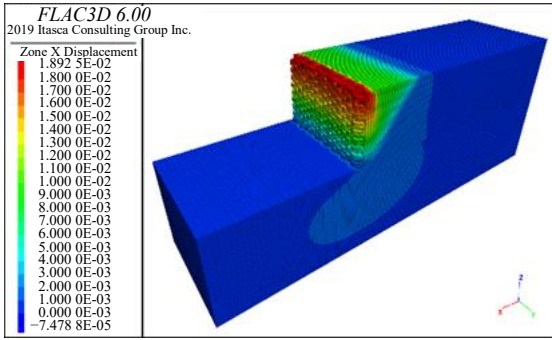
根据相关的工程项目以查阅文献^[20], 选取土工格栅的材料参数, 取弹性模量为 20 GPa, 泊松比为 0.33, 切向刚度为 4×10⁴ kN/m, 摩擦角为 30°, 黏聚力为 2.4 kPa, 密度为 650 kg/m³, 厚度为 2 mm。

分析四种挡墙在静力作用下的稳定性能, 四种挡墙边界条件相同, 固定模型四周和底部, 仅在模型上部施加均匀外荷载。

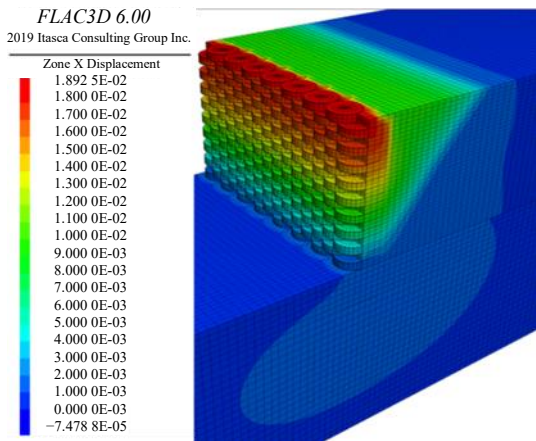
2 稳定性能对比分析

2.1 水平变形

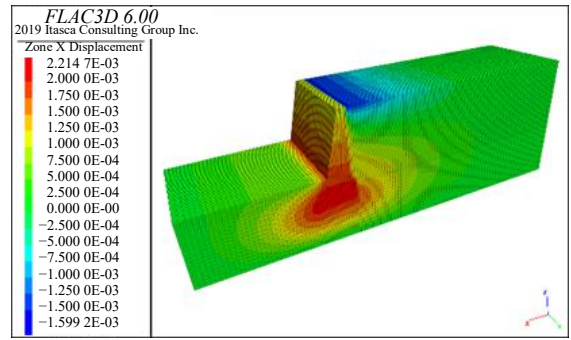
外荷载 q=70 kPa 时, 如图 5 为四种挡墙的水平变形云图。重力式挡墙的水平变形均在墙面均匀分布, 挡墙整体产生变形, 这与面板式土工格栅加筋土挡墙水平变形分布是一致的, 而另外两类挡墙的水平变形分布均沿墙高逐渐增大, 较大水平变形发生在挡墙上半部分。



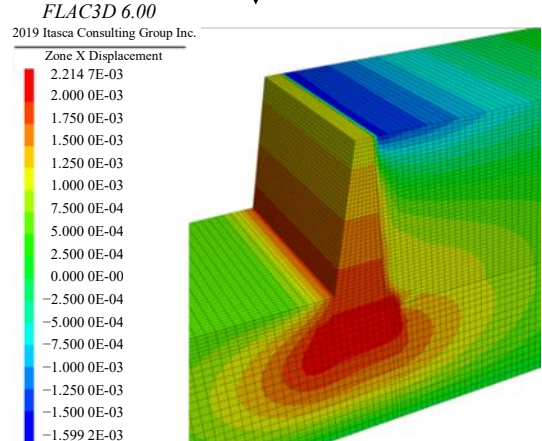
↓ 局部放大



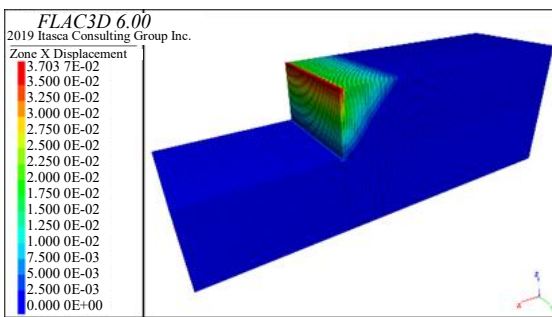
(a) 废旧轮胎挡墙的水平变形云图



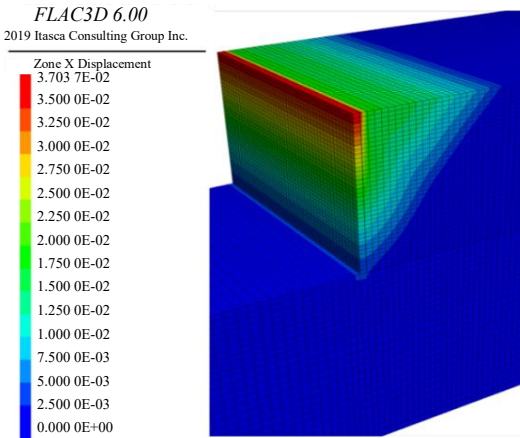
↓ 局部放大



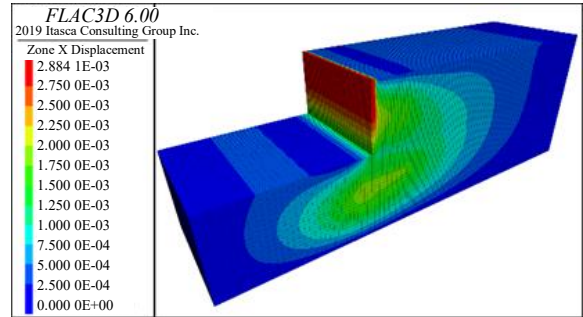
(b) 重力式挡墙的水平变形云图



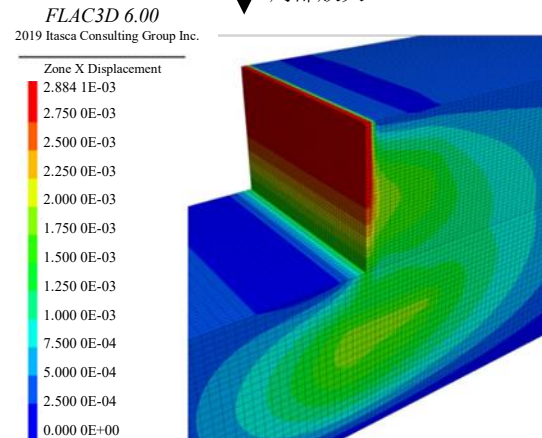
↓ 局部放大



(c) 悬臂式挡墙的水平变形云图



↓ 局部放大



(d) 面板式土工格栅加筋土挡墙的水平变形云图

图5 不同挡墙的水平变形云图

Fig. 5 Contours of horizontal deformation of different retaining walls

当 $q=70\text{ kPa}$ 时, 四种挡墙的水平变形分布曲线如图 6。在同一水平高度处, 悬臂式挡墙的水平变形最大, 废旧轮胎挡墙次之, 重力式挡墙有最小水平变形; 重力式挡墙和土工格栅面板式挡墙的水平变形沿墙高呈线性增加; 废旧轮胎挡墙水平变形反之。悬臂式挡墙的水平变形最大, 水平变形沿墙高呈不断增大的趋势。

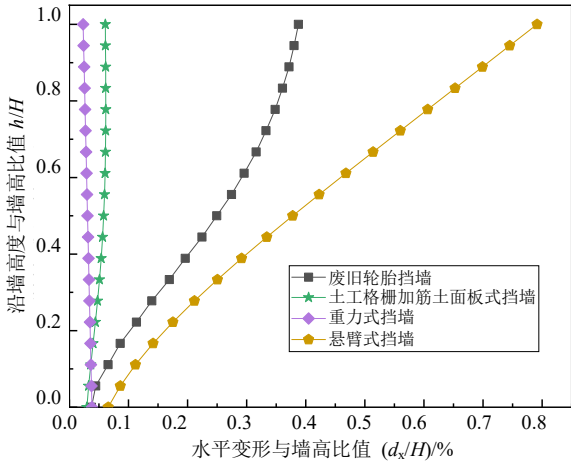


图 6 四种挡墙的水平变形曲线

Fig. 6 Curves of horizontal deformation of four retaining walls

最大水平变形由小到大依次为: 重力式挡墙、土工格栅加筋土面板式挡墙、废旧轮胎挡墙、悬臂

式挡墙, 对应的最大水平变形分别为 0.11、0.2、1.82、3.70 cm。在静力条件下, 上述挡墙抵抗水平变形依次变差。

2.2 竖向沉降

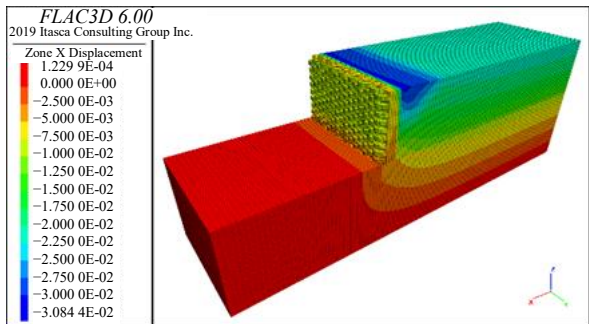
四种挡墙在外荷载为 70 kPa 时的竖向沉降云图如图 7。

废旧轮胎挡墙墙后回填料较大竖向沉降发生在靠近墙面处, 竖向沉降在距墙面较远处较小, 这与悬臂式挡墙墙后回填料竖向沉降的变化是一致的; 其余两种挡墙随距墙面距离的增大, 墙后回填料的竖向沉降逐渐增大, 在距墙面较远处, 逐渐保持平稳。

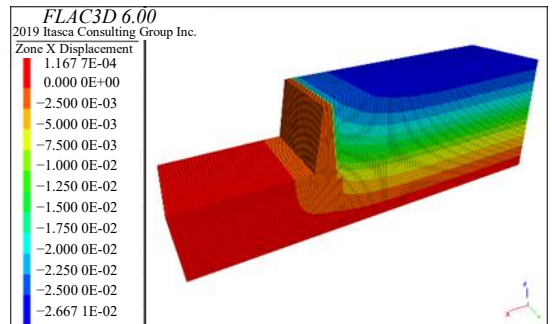
当 $q=70\text{ kPa}$ 时, 四种挡墙的竖向沉降分布曲线如图 8。

废旧轮胎挡墙和悬臂式挡墙回填料在对于距墙面板 0~4 m 处, 随距墙面距离的增大, 竖向沉降逐渐增大, 后随距墙面距离的增大而减小, 最后趋于平稳; 在距墙面板 0~4 m 处, 其余两种挡墙回填料随距墙面距离的增大, 其竖向沉降随之增大, 最后变化趋势逐渐达到平稳。

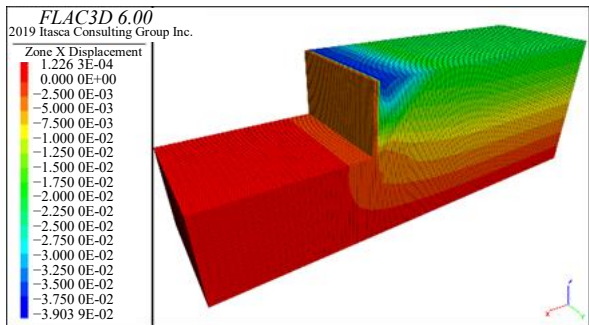
悬臂式挡墙、废旧轮胎挡墙、重力式挡墙和面板式土工格栅加筋土挡墙的最大竖向沉降分别为 3.66、3.00、2.66、2.17 cm, 竖向沉降依次减小。



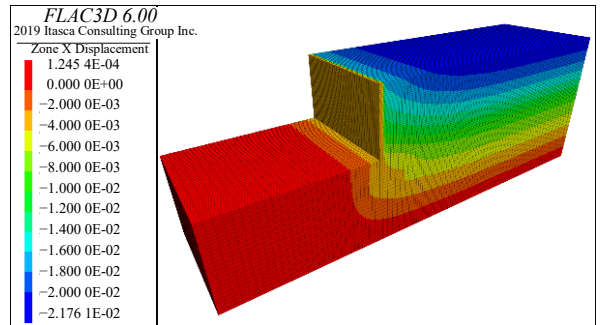
(a) 废旧轮胎挡墙的竖向沉降云图



(b) 重力式挡墙的竖向沉降云图



(c) 悬臂式挡墙的竖向沉降云图



(d) 面板式土工格栅加筋土挡墙的竖向沉降云图

图 7 四种挡墙竖向沉降云图

Fig. 7 Contours of vertical settlement of four retaining walls

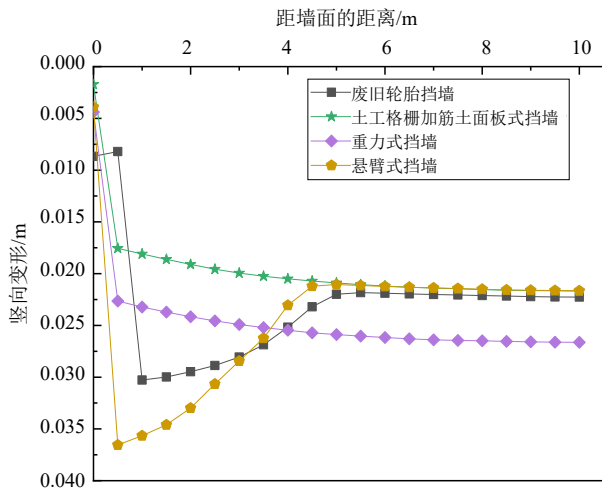


图8 四种挡墙的竖向沉降曲线

Fig. 8 Curves of vertical settlement of four retaining walls

2.3 水平土压力

图9为四类挡墙在 $q=70$ kPa下的水平土压力分布曲线。由图知：自墙顶向下，废旧轮胎挡墙和重力式挡墙的水平土压力先增加后减小，再增加又减小，由此可见这两种挡墙抵抗土压力的工作性能相似；其余两种挡墙沿墙沿墙顶向下，其水平土压力先增后减；重力式挡墙的水平变形小，土体应力无法释放，导致在挡墙下半部分，其水平土压力大。

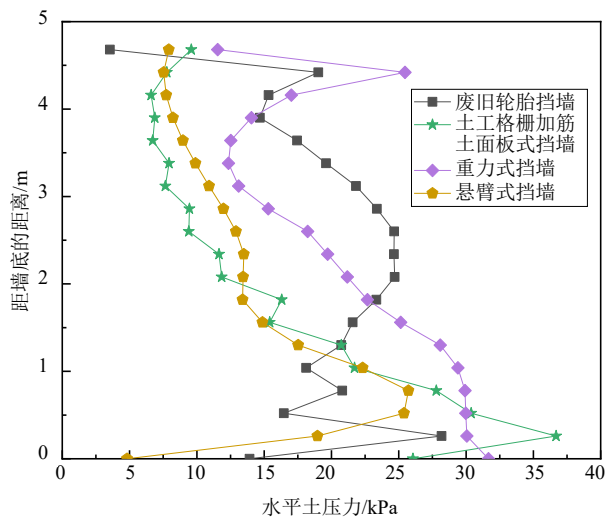


图9 四种挡墙的水平土压力分布曲线

Fig. 9 Curves of horizontal soil pressure of four retaining walls

3 结 论

(1) 对比废旧轮胎挡墙与三类传统挡土墙工作性能，得出静载条件下，结构形式不同的挡墙工作性能由优到差依次为：重力式挡墙>面板式土工格栅加筋土挡墙>废旧轮胎挡墙>悬臂式挡墙。

(2) 废旧轮胎挡墙墙后回填料较大竖向沉降

发生在靠近墙面处，竖向沉降在距墙面较远处较小，这与悬臂式挡墙的变化是一致的；其余两种挡墙随距墙面距离的增大，墙后回填料的竖向沉降逐渐增大，在距墙面较远处，逐渐保持平稳。悬臂式挡墙、重力式挡墙，废旧轮胎挡墙、面板式土工格栅加筋土挡墙竖向沉降依次降低。

(3) 废旧轮胎挡墙和重力式挡墙的水平土压力沿墙顶向下，先增后减，再增又减，其余两种挡墙的水平土压力沿墙顶向下，水平土压力先增后减。

参考文献

- [1] 张广泰, 章金鹏, 王明阳, 等. 叠层废旧轮胎隔震垫单轴受压性能及尺寸效应研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(4): 79-85, 98.
- ZHANG Guang-tai, ZHANG Jin-peng, WANG Ming-yang, et al. Study on uniaxial compression performance and size effect of laminated waste tire isolation pad[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(4): 79-85, 98.
- [2] YOON Y W, CHEON S H, KANG D S. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 22(5): 439-453.
- [3] YOON Y W, HEO S B, KIM K S. Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 100-107.
- [4] KIM K S, YOON Y W, YOON G L. Pullout behavior of cell-type tires in reinforced soil structures[J]. Geotechnical Engineering, 2012, 15(7): 1209-1217.
- [5] 李朝晖, 张虎元. 废轮胎颗粒与黄土混合物压实性能研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3715-3720, 3726.
- LI Zhao-hui, ZHANG Hu-yuan. Compaction properties of granulated rubber and loess mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3715-3720, 3726.
- [6] 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, 32(11): 79-85.
- LI Li-hua, XIAO Heng-lin, ZHENG Jun-jie, et al. The model test of waste tire reinforced slope[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 79-85.
- [7] LI L H, XIAO H L, FERREIRA P, et al. Study of a small scale tyre-reinforced embankment[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 44(2): 201-208.
- [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, 39(1): 81-88.

- LI Li-hua, CUI Fei-long, XIAO Heng-lin, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 81-88.
- [9] LAROCQUE C J, ZORNBERG J G, WILLIAMMEE R. Direct shear testing of tire bales for soil reinforcement applications[J]. Geosynthetic Research and Development, 2008: 1-5.
- [10] 黄留新, 王丽艳, 巩文雪, 等. 考虑轮胎尺寸影响的废旧轮胎挡土墙变形数值研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 164-169.
- HUANG Liu-xin, WANG Li-yan, Gong Wen-xue, et al. Numerical study on horizontal deformation of waste tire retaining wal considering effects of tire dimension[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 164-169.
- [11] GARGA V K, O'SHAUGHNESSY V. Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 75-96.
- [12] RETTERER T A. Gravity and mechanically stabilized earth wall using whole scrap tires[D]. Lubbock: Texas Tech University, 2000.
- [13] 马源. 废旧轮胎-土复合体力学性能及工程应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- MA Yuan. Study on mechanical properties and engineering application of scrap tyre-soil[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [14] 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, 64(7): 16-20.
- LI Chun-qiang, FU Hai-yang. Analysis on displacement influence factors of reinforced earth in retaining structure[J]. Highway, 2019, 64(7): 16-20.
- [15] 中华人民共和国铁道部. 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2006[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [16] 顾晓鲁. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [17] 李丽华, 杨超, 肖衡林, 等. 废旧轮胎加筋路堤边坡数值模拟计算分析[J]. 公路工程, 2017, 42(1): 4-8.
- LI Li-hua, YANG Chao, XIAO Heng-lin, et al. Numerical simulation analysis of waste tires reinforced embankment slope[J]. Highway Engineering, 2017, 42(1): 4-8.
- [18] 杨超. 废旧轮胎加筋路堤边坡抗震性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- YANG Chao. The seismic properties of waste tire reinforced embankment[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
- [19] WANG L Y, CHEN G X, CHEN S. Experimental study on seismic response of geogrid reinforced rigid retaining walls with saturated backfill sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(1): 35-45.
- [20] 汪益敏, 闫岑, 于恒, 等. 静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 311-317.
- WANG Yi-min, YAN Cen, YU Heng, et al. Experimental study of soil stress characteristics of geogrid-reinforced widened embankment under static loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 311-317.