

废弃橡胶轮胎构造地基有限元分析

王凤池¹, 田裴裴¹, 冯旭宁¹, 王新波²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省建设科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110005)

摘要 目的 分析废弃橡胶轮胎构造地基在上部荷载作用下的受力性能,探索地基加固新方法,解决废弃橡胶轮胎构造地基应力传递问题.方法 通过 ABAQUS 有限元软件建立废弃橡胶轮胎构造地基三维模型,研究不同空间构造形式、不同橡胶轮胎直径及不同水平置换长度对废弃橡胶轮胎构造地基附加应力分布、承载性能和位移场的影响,得到附加应力、荷载-位移、侧向位移分布规律曲线.结果 废弃橡胶轮胎构造地基的承载性能远优于天然地基;不同空间构造形式和不同水平置换长度对废弃橡胶轮胎构造地基的受力性能影响较大;不同橡胶轮胎直径对废弃橡胶轮胎构造地基的受力性能影响较小.结论 由于废弃橡胶轮胎对地基土的环箍效应,废弃橡胶轮胎构造地基能将上部荷载传递下来的应力均匀地扩散在构造地基内部,从而提高地基承载性能.

关键词 废弃轮胎;构造地基;附加应力;承载性能;侧向位移

中图分类号 TU47

文献标志码 A

Finite Element Analysis on Construction Foundation by Waste Rubber Tire

WANG Fengchi¹, TIAN Peipei¹, FENG Xuning¹, WANG Xinbo²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Province Building Science Research Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110005)

Abstract: The purpose of this paper is to analyze the mechanical properties of the waste rubber tire foundation under the upper load, and then explore a new method of foundation reinforcement and solve the stress transfer problem of the waste rubber tire foundation. The methods is adopted to establish the three-dimensional model of waste rubber tire construction foundation was through ABAQUS finite element software. The effects of different spatial structures, different rubber tire diameters and different horizontal displacement lengths on the additional stress distribution, bearing capacity and displacement field of the waste rubber tire foundation are studied, and the additional stress, load-displacement and lateral displacement distribution curves are obtained. The results show that the load-bearing performance of the waste rubber tire construction foundation is much better

收稿日期:2019-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51578348)

作者简介:王凤池(1970—),男,教授,博士,主要从事复合地基、桩基等方面研究.

than that of the natural foundation, different spatial construction forms and different horizontal displacement lengths have great influence on the mechanical performance of the waste rubber tire construction foundation, different rubber tire diameters have little influence on the mechanical performance of the waste rubber tire construction foundation. Because of the hoop effect of the waste rubber tire on the foundation soil, the stress transferred from the upper load can be evenly diffused in the foundation, thus improving the bearing capacity of the foundation.

Key words: waste tire; structural foundation; additional stress; bearing capacity; lateral displacement

随着现代汽车产业的飞速崛起及我国经济的快速发展,每年都会产生大量的废弃橡胶轮胎,废弃橡胶轮胎占用土地资源,污染环境,治理废弃轮胎所带来的“黑色污染”已迫在眉睫^[1-3]. 目前,在土木工程领域,橡胶轮胎变废为宝分为整形再利用和粉碎成胶粉或碎片作为掺合料再使用即非整形利用. 整形再利用方面,主要是将废弃橡胶轮胎应用于边坡加固^[4-7]. 王凤池^[8]提出一种废弃橡胶轮胎群桩复合地基形式,通过室内试验及有限元分析发现,该复合地基能有效地增大地基承载性能且具有减震的作用;S. Hos-sain^[9]、K. Huat^[10]使用废旧轮胎修筑挡土墙;K. S. Kim 等^[11]通过现场试验研究了轮胎在增强土壤中的拉拔性能;S. N. M Tafreshi 等^[12]通过室内试验确定了轮胎加筋土复合地基的承载力. 非整形利用方面,主要是将废弃轮胎橡胶粉掺入到水泥土^[13-14]、混凝土^[15-16]、沥青^[17]、砂土、黏土等^[18]材料中,制成新型土工材料加以应用.

目前的村镇建筑普遍存在因地基基础不均匀沉降而导致的建筑倾斜、墙体开裂等现

象. 地基基础问题已经成为影响村镇建筑安全性能的关键因素之一. 鉴于此,笔者提出了一种面向村镇建筑的新型人工地基形式—废弃橡胶轮胎构造地基. 通过有限元软件分析废弃橡胶轮胎构造地基在上部荷载作用下的受力性能,得到废弃橡胶轮胎构造地基的承载性能要远优于天然地基,且得到了废弃橡胶轮胎构造地基的最优形式.

1 有限元模型的建立与计算过程

1.1 有限元模型的建立

笔者利用有限元软件 ABAQUS 建立废弃橡胶轮胎构造地基三维模型. 模型中存在轮胎与地基土接触的模拟,为使模型与实际工况更加接近,采用大尺寸模型来保证废弃橡胶轮胎构造地基模型为半无限空间体. 在模型中将废弃橡胶轮胎、胎内土、胎间土分别建立模型进行计算,胎内土指废弃橡胶轮胎胎腔内回填土体,胎间土指轮胎与轮胎之间空隙内回填土体,有限元模型如图 1 所示.

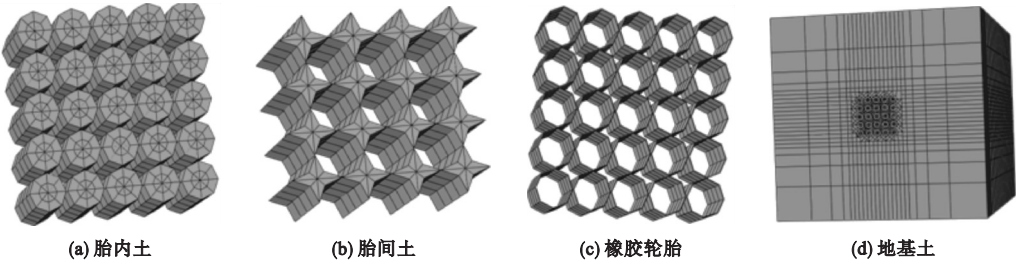


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.2 有限元模型参数

在废弃橡胶轮胎构造地基有限元模型中,橡胶轮胎取 800 mm、600 mm、480 mm、400 mm、300 mm 五种直径,橡胶轮胎壁厚取 10 mm;为简化计算,将橡胶轮胎模型简化为圆环体;构造地基水平置换长度(即为橡胶轮胎外径与水平摆放个数的乘积)分别取 1.2 m × 1.2 m、1.8 m × 1.8 m、2.4 m ×

2.4 m、3.0 m × 3.0 m、3.6 m × 3.6 m;空间构造形式为四边形和梅花形;构造地基深度为 2 m;基础尺寸为 2.4 m × 2.4 m × 0.4 m,选用刚性矩形基础.模型中地基土单元体采用 C3D8R 单元,橡胶轮胎单元采用 C3D8I 单元.地基土选用砂土,地基土采用 Mohr – Coulomb 弹塑性模型,模型基本力学参数见表 1,模型参数由课题组通过试验研究所得.

表 1 模型基本力学参数
Table 1 Basic mechanical parameters of model

组成部分	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
矩形基础	2 500	2 000 000	0.15	—	—
橡胶轮胎	1 500	150 000	0.35	—	—
砂土	1 800	20 000	0.35	0	30

橡胶轮胎 – 地基土的接触界面可同时传递切向应力和法向应力,考虑到地基土及橡胶轮胎对界面的影响,在有限元模型中,橡胶轮胎 – 地基土接触面法向接触关系采用硬接触,切向接触关系采用 Penalty.

考虑到模型的边界效应对计算结果的影响,在有限元模型中设置足够大的边界尺寸,即整个地基土体模型取 5 倍构造地基深度,5 倍构造地基水平置换长度.在地基土整个区域底面的三个方向设置位移约束,在四个侧面设置径向方向的位移约束.

天然地基在自然状态下存在初始地应力,所建立的数值模型中缺乏本身受重力或边界条件所产生的地应力场.因此建模时,应对所建立的几何模型施加与实际模型相同的重力场以及边界条件进行计算,得到变形后的内力,并重新将其施加于几何模型,再次施加重力以达到平衡,如此建立与实际情况一致的模型,以便较为精确地模拟实际应力.

笔者研究不同空间构造形式、不同橡胶轮胎直径及不同水平置换长度对废弃橡胶轮胎构造地基内附加应力、承载性能和位移场的影响.当分析空间构造形式对废弃橡胶轮胎构造地基影响时,轮胎直径取 480 mm,水平置换长度取 2.4 m × 2.4 m;当分析橡胶轮

胎直径对废弃橡胶轮胎构造地基的影响时,空间构造形式取四边形,水平置换长度取为 2.4 m × 2.4 m;当分析水平置换长度对废弃橡胶轮胎构造地基的影响时,空间构造形式取为四边形,橡胶轮胎直径取 480 mm.

2 有限元计算分析

为确保有限元模型的合理性与可行性,笔者利用竖向荷载下废弃橡胶轮胎构造地基的试验数据与数值模拟结果进行对比验证,荷载 – 沉降(*p* – *s*)曲线如图 2 所示.由图可知,有限元计算结果和试验结果较为接近,说明数值模拟计算精确度较高,具有可行性.

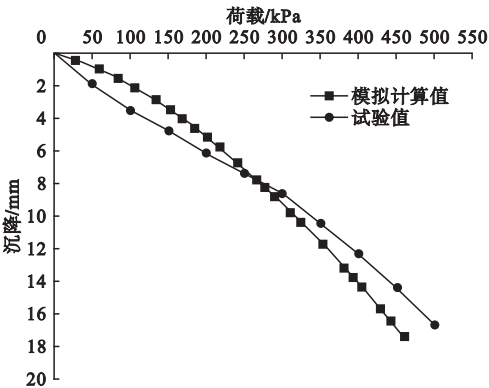


图 2 废弃橡胶轮胎构造地基 *p* – *s* 曲线

Fig. 2 *p* – *s* curves of waste rubber tire construction foundation

2.1 不同因素对废弃橡胶轮胎构造地基内附加应力分布影响分析

2.1.1 空间构造形式对构造地基内附加应力分布影响

在竖向荷载为 300 kPa 时,不同空间构造形式的废弃橡胶轮胎构造地基附加应力分布曲线如图 3 所示.从图中可看出,与天然地基相比,废弃橡胶轮胎构造地基能有效地使

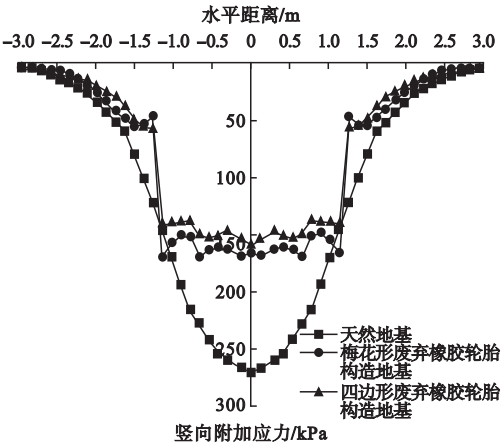


图 3 不同空间构造形式的附加应力分布曲线

Fig. 3 Additional stress distribution curves for different spatial structure

上部荷载均匀地扩散在构造地基底部.橡胶轮胎作为一种超弹性体,受到环向挤压时会产生“环箍效应”,阻止地基回填土向外迅速扩张,即橡胶轮胎对地基土的环箍作用能使其中的附加应力进行重分布,此时下卧层能平均地承担上部结构传递下来的荷载,从而提高地基的承载性能.

四边形废弃橡胶轮胎构造地基的平均附加应力略小于梅花形,且在构造地基边缘处附加应力突变较小.这是由于两种构造地基空间构造形式的不同(见图 4),导致两种地基的胎内土所受到的环箍作用有所不同:梅花形废弃橡胶轮胎构造地基中的橡胶轮胎连接形式为三角形结构,三角形构造与四边形构造相比具有在受到外力作用时不会轻易变形的性质,即三角形具有在承受较大应力时仍可保持原形的性质,因此梅花形废弃橡胶轮胎构造地基中的橡胶轮胎对胎内土的环箍作用不明显.故四边形废弃橡胶轮胎构造地基为最优空间构造形式.

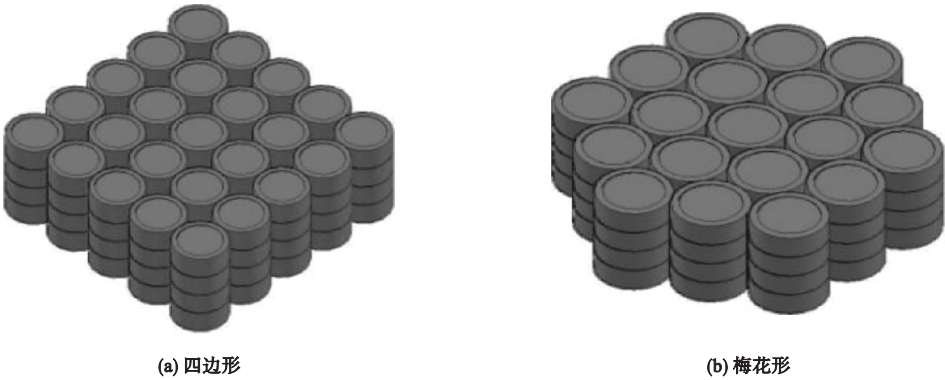


图 4 空间构造形式三维图

Fig. 4 3D map of spatial structure

2.1.2 橡胶轮胎直径对构造地基内附加应力分布影响

在竖向荷载为 300 kPa 时,不同橡胶轮胎直径的废弃橡胶轮胎构造地基附加应力分布曲线如图 5 所示.从图中可以看出,当直径为 800 mm 或 480 mm 时,废弃橡胶轮胎构造

地基基础中心下方为胎内土,附加应力在橡胶轮胎胎壁处和橡胶轮胎中心处产生突变,即在橡胶轮胎边缘处的地基土竖向附加应力较小,在橡胶轮胎中心处的地基土竖向附加应力较大,这是因为地基土在胎壁处受到橡胶轮胎的环箍效应较为明显.当直径为

600 mm、400 mm 或 300 mm 时,废弃橡胶轮胎构造地基基础中心下方为胎间土,附加应力分布较均匀,且比基础下方为胎内土时的附加应力要小一些,说明基础中心下方为胎间土时,废弃橡胶轮胎构造地基内附加应力扩散效果最优。

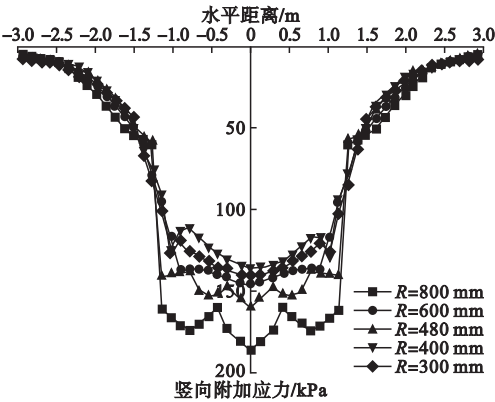


图5 不同橡胶轮胎直径的附加应力分布曲线
Fig. 5 Additional stress distribution curves for different rubber tire diameters

基础中心下方为胎内土或胎间土时,平均竖向附加应力随着橡胶轮胎直径的减小而减小.这是由于随着橡胶轮胎直径的逐渐减小,轮胎数量在逐渐增多,构造地基的体积含胶率在逐渐增大,含胶率的提升能增强橡胶轮胎对地基回填土的环箍作用,使废弃橡胶轮胎构造地基的附加应力扩散效果更好。

2.1.3 水平置换长度对构造地基内附加应力分布影响

在竖向荷载为 300 kPa 时,不同水平置换长度的废弃橡胶轮胎构造地基附加应力分布曲线如图 6 所示.从图中可看出,随着水平置换长度的逐渐增加,竖向附加应力在逐渐减小,且分布范围在逐渐增大.这是由于随着水平置换长度的逐渐增加,橡胶轮胎置换数量在逐渐增多,地基内的体积含胶率在逐渐增大.由图可知,废弃橡胶轮胎构造地基在水平置换长度为 3.6 m 时的水平向附加应力最小,且分布范围最大.因此,当水平置换长度为 3.6 m 时最优。

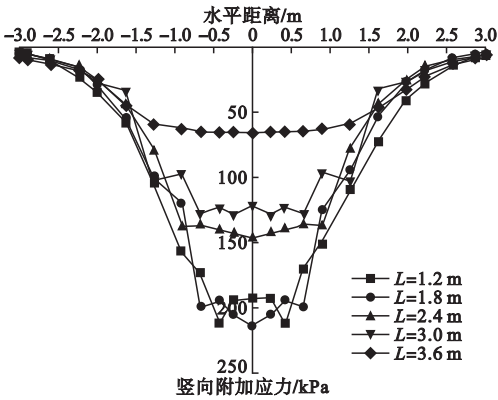


图6 不同水平置换长度的附加应力分布曲线
Fig. 6 Additional stress distribution curves for different horizontal displacement lengths

2.2 不同因素对废弃橡胶轮胎构造地基承载性能影响分析

2.2.1 空间构造形式对构造地基承载性能影响分析

图 7 为不同空间构造形式的废弃橡胶轮胎构造地基 $p-s$ 曲线.由图可知,当 $p < 200$ kPa 时,天然地基曲线呈线性关系,可认为 200 kPa 为天然地基承载力比例极限.当 $p > 200$ kPa 时,天然地基曲线呈现出非线性变化特征,沉降量急剧增加,最终达到破坏,曲线具有较明显的拐点.而废弃橡胶轮胎构造地基在承受较大荷载时,曲线依然呈近似线性关系,且无明显拐点,故废弃橡胶轮胎构造地基可很大程度上提高地基承载性能。

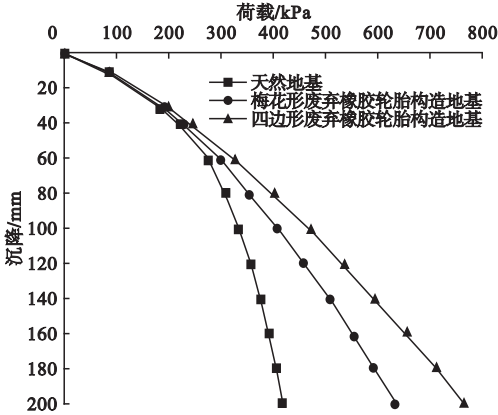


图7 不同空间构造形式的 $p-s$ 曲线
Fig. 7 $p-s$ curves of different spatial structure

当竖向荷载为 400 kPa 时,三种地基的沉降量依次为 174.26 mm、101 mm、82.101 mm,两种废弃橡胶轮胎构造地基承载力较天然地基分别提高了 42.04% 和 52.89%,四边形废弃橡胶轮胎构造地基承载力较梅花形提高了 18.71%。故四边形废弃橡胶轮胎构造地基为最优空间构造形式。

2.2.2 橡胶轮胎直径对构造地基承载性能影响分析

图 8 为不同橡胶轮胎直径的废弃橡胶轮胎构造地基 $p-s$ 曲线,由图可知,橡胶轮胎直径的大小对废弃橡胶轮胎构造地基的承载能力影响不大。当竖向荷载为 600 kPa,橡胶轮胎直径为 800 mm、600 mm、480 mm、400 mm、300 mm 时,构造地基沉降量分别为 148.851 mm、147.106 mm、142.669 mm、145.788 mm、152.853 mm,各沉降量相差不大。随着橡胶轮胎直径逐渐变小,构造地基承载力呈现出先增大后减小的趋势,即橡胶轮胎直径为 480 mm 时构造地基的承载力最大,且最优直径的构造地基承载力较最差直径构造地基承载力提高 6.66%。

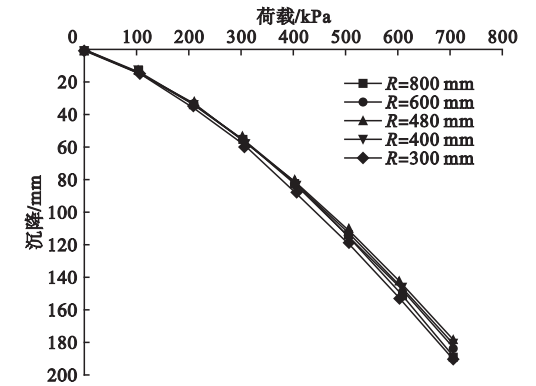


图 8 不同橡胶轮胎直径的 $p-s$ 曲线

Fig. 8 $p-s$ curves of different rubber tire diameters

2.2.3 构造地基水平置换长度对地基承载性能影响分析

图 9 为不同水平置换长度的废弃橡胶轮胎构造地基 $p-s$ 曲线。由图可知,增大废弃橡胶轮胎构造地基水平置换长度可以显著提高构造地基承载性能。当竖向荷载为

300 kPa,水平置换长度为 1.2 m、1.8 m、2.4 m、3 m、3.6 m 时,构造地基的沉降量依次为 102.98 mm、73.28 mm、63.38 mm、55.46 mm、48.62 mm,即随着水平置换长度的增加,构造地基承载力分别提高了 28.84%、13.51%、12.50%、12.33%。

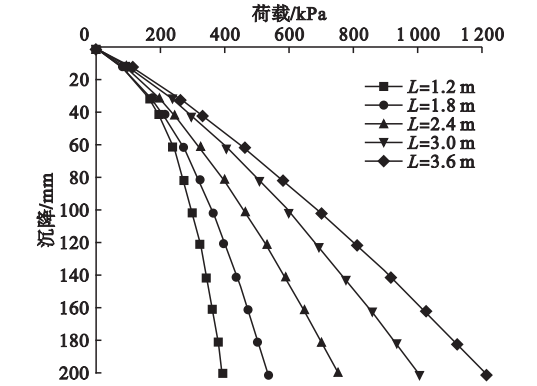


图 9 不同水平置换长度的 $p-s$ 曲线

Fig. 9 $p-s$ curves of different horizontal displacement length

分析可知,随着水平置换长度逐渐增加,废弃橡胶轮胎构造地基承载力逐渐提高。因此水平置换长度的提高能够增强废弃橡胶轮胎构造地基的承载性能,现提出废弃橡胶轮胎构造地基水平置换率,即废弃橡胶轮胎构造地基水平置换长度与基础宽度之比。增大水平置换率能够显著提高构造地基的承载力。模型中水平置换率换算见表 2。

表 2 废弃橡胶轮胎构造地基水平置换率表

Table 2 Horizontal displacement rate of structure of waste-tire foundation

水平置换长度/m	水平置换率
1.2	0.5
1.8	0.75
2.4	1.0
3.0	1.25
3.6	1.5

2.3 不同因素对废弃橡胶轮胎构造地基位移场影响分析

2.3.1 空间构造形式对构造地基位移场的影响

图 10 为水平方向距离构造地基中心点

1.2 m 处,不同空间构造形式的地基沿深度方向的侧向位移曲线.由图可知,在水平距离为 1.2 m 时,废弃橡胶轮胎构造地基的侧向位移小于天然地基的侧向位移,且分布更加均匀,四边形构造地基侧向位移小于梅花形构造地基的侧向位移.

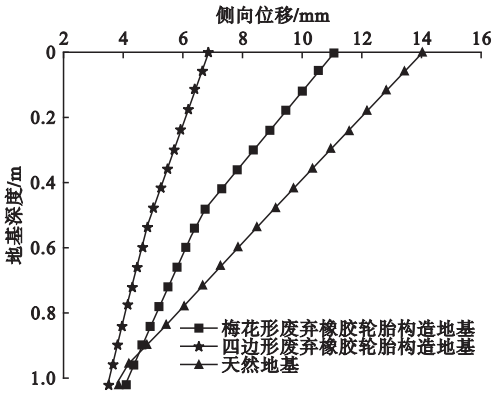


图 10 不同空间构造形式的侧向位移曲线

Fig. 10 Lateral displacement curves of different spatial structure

2.3.2 橡胶轮胎的直径对构造地基位移场的影响

图 11 为水平方向距离构造地基中心点 1.2 m 处,不同橡胶轮胎直径的地基沿深度方向的侧向位移曲线.由图可知,在水平距离为 1.2 m 时,随着废弃橡胶轮胎直径的不断减小,废弃橡胶轮胎构造地基的侧向位移呈现先减小后增大的趋势,整体相差不大.

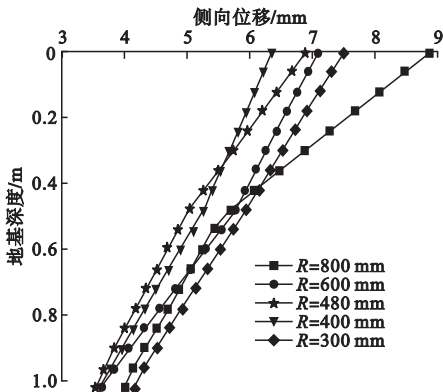


图 11 不同橡胶轮胎直径的侧向位移曲线

Fig. 11 Lateral displacement curves of different rubber tire diameters

2.3.3 水平置换长度对构造地基位移场的影响

图 12 为水平方向距离构造地基中心点 1.2 m 处,不同水平置换长度的地基沿深度方向的侧向位移曲线.由图可知,在水平距离为 1.2 m 时,随着废弃橡胶轮胎构造地基水平置换长度的不断增大,构造地基的侧向位移在逐渐减小,且侧向位移沿构造地基深度方向的分布更加均匀.

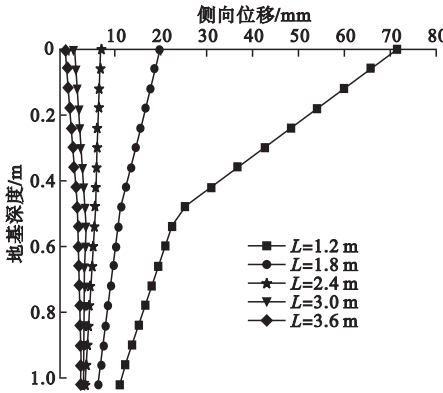


图 12 不同水平置换长度的侧向位移曲线

Fig. 12 Lateral displacement curves with different horizontal displacement lengths

在水平置换率小于 1 时,基础下方处构造地基的侧向位移要远大于图 10 中天然地基的侧向位移.由于此时构造地基中橡胶轮胎数量过少,使得构造地基两边变形大,中间变形小,构造地基内附加应力不能很好地扩散,导致其侧向变形更加明显.因此在实际工程应用中,应避免出现水平置换率小于 1 的情况.

3 结 论

(1)废弃橡胶轮胎构造地基的受力性能远优于天然地基.在承受竖向载荷时,由于废弃橡胶轮胎对地基土的环箍效应,废弃橡胶轮胎构造地基能将上部荷载传递下来的应力均匀地扩散在构造地基内部,从而提高地基承载性能.

(2)四边形废弃橡胶轮胎构造地基的受力性能要优于梅花形废弃橡胶轮胎构造地基.

(3)综合考虑轮胎直径对废弃橡胶轮胎构造地基附加应力分布、承载性能和位移场的影响,当橡胶轮胎直径为480 mm时,废弃橡胶轮胎构造地基的受力性能最佳。

(4)随着水平置换长度的增加,废弃橡胶轮胎构造地基附加应力、侧向位移逐渐减小,承载性能不断提高。

参考文献

- [1] 李钊.我国废旧轮胎资源化现状、问题与对策[J].中国轮胎资源综合利用,2018,12:41-43.
(LI Zhao. Current situation, problems and countermeasures of recycling waste tyres in China [J]. China tire resources recycling, 2018,12:41-43.)
- [2] WILLIAM K, KRISHNA B. Recycling of rubber; an overview [J]. Rubber world, 1998 (218):41.
- [3] 荣慧,李南,李志强.废旧轮胎的回收与利用[J].北方环境,2005,30(1):39-41.
(RONG Hui, LI Nan, LI Zhiqiang. Recycling and utilization of waste tires [J]. North environment, 2005, 30(1):39-41.)
- [4] CETIN H, FENER M, GUNAYDIN O. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material [J]. Engineering-geology, 2006, 88(1):110-120.
- [5] GHAZAVI M. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber [J]. Geotechnical and geological engineering, 2004, 22(3):401-416.
- [6] 马文记.废旧外胎胎缘圈在道路工程中的应用[J].国外公路,1991(6):31-33.
(MA Wenji. Application of waste tire rim in road engineering [J]. Foreign highway, 1991 (6):31-33.)
- [7] 曾玉珍,廖正环.废旧轮胎在国外道路工程中的应用[J].国外公路,2000(1):40-42.
(ZENG Yuzhen, LIAO Zhenghuan. Application of waste tires in foreign road engineering [J]. Foreign highway, 2000(1):40-42.)
- [8] 王凤池,高寰,张倍川,等.内填散体材料废弃轮胎叠合承载能力研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):72-77.
(WANG Fengchi, GAO Huan, ZHANG Beichuan, et al. Bearing capacity of composite columns of waste tires filled with granular material [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2016, 14(1):72-77.)
- [9] HOSSAIN S, JAYAWICKRAMA P W. Use of whole tires in earth retaining structures [R]. Texas: Texas Tech University, 2000.
- [10] HUAT K, BUJANG B K, AZIZ A, et al. Application of scrap tires as earth reinforcement for repair of tropical residual soil slope [J]. Electronic journal of geotechnical engineering, 2008 (13):1-9.
- [11] KEUN Soo Kim, YEO Won Yoon, GIL Lim Yoon. Pullout behavior of cell-type tires in reinforced soil structures [J]. KSCE journal of civil engineering, 2011, 15(7):1209-1217.
- [12] TAFRESHI S N M, NOROUZI A H. Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire-An experimental investigation [J]. Construction and building materials, 2012(35):547-556.
- [13] 王凤池,燕晓,刘涛,等.橡胶水泥土强度特性与机理研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(2):46-51.
(WANG Fengchi, YAN Xiao, LIU Tao, et al. Research on strength characteristics and mechanism of rubberized cement soil [J]. Journal of Sichuan university (engineering science edition), 2010, 42(2):46-51.)
- [14] WANG F C, SONG W. Effects of crumb rubber on compressive strength of cement-treated soil [J]. Archives of civil engineering, 2015, 61(4):59-78.
- [15] 王凤池,丁军胜,刘凤起,等.橡胶混凝土砖砌体力学性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(1):50-55.
(WANG Fengchi, DING Junsheng, LIU Fengqi, et al. The experiment of basic mechanical properties of CRB masonry [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(1):50-55.)
- [16] AHMET T, CAFERC, ABDULKADIR C A. Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete [J]. Building and environment, 2005, 40(11):1492-1504.
- [17] Anonymous. Scrap tire reuse approaching 90% [J]. Rubber world, 2009, 240(5):9.
- [18] 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(增刊2):361-368.
(ZHANG Zhengfu, LIU Songyu, CAI Guanghua, et al. Research progress of scrap tires used in road engineering [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(S2):361-368.)
- [19] 王凤池,高寰,张明,等.轮胎桩复合地基承载性能研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):54-57.
(WANG Fengchi, GAO Huan, ZHANG Ming, et al. Numerical Simulation research on bearing capacity of rubber tire pile composite foundation [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2015, 13(6):54-57.)
- [20] 曹文贵,刘海涛,张永杰.散体材料桩复合地基沉降计算的分层和法探讨[J].水利学报,2010,41(8):984-990.
(CAO Wengui, LIU Haitao, ZHANG Yongjie. Study on layer-wise summation method of settlement computation for composite foundation with friable material piles [J]. Journal of hydraulic engineering, 2010, 41(8):984-990.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)