

DOI: 10.11779/CJGE2017S1048

冲击碾压荷载下砂土位移特征试验研究

陈忠清^{1,2}, 吕越^{1,2}, 徐超³

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院岩石力学与地质灾害实验中心, 浙江 绍兴 312000;
3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 冲击碾压技术是一种高效、经济的新型动态压实技术, 已广泛应用于公路、机场等工程的路基压实、软基处理等领域。采用自行研制的冲击碾压模拟设备进行了模拟试验, 主要研究了冲击碾压荷载下砂土位移分布总体特征以及冲击区域中心两侧砂土位移分布特征与冲击区域砂土位移随冲击作用时间的变化特征。结果表明: ①冲击区域内砂土位移分布呈近似半椭圆形, 其砂土位移沿深度方向的分布范围是碾压区域砂土位移分布范围的2.5倍左右; ②冲击轮滚动冲击作用产生的砂土位移沿冲击作用中心两侧非对称分布; ③随着冲击作用时间增加, 砂土竖向位移明显增大, 并在冲击区域左侧砂土浅部出现最大位移。

关键词: 地基处理; 冲击碾压; 模拟试验; 位移; 砂土

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0241-05

作者简介: 陈忠清(1984-), 男, 浙江永康人, 博士, 讲师, 主要从事地基处理等方面的教学和科研工作。E-mail: Q_CHEN_YK@163.com。

Experimental tests on displacement characteristics of sand subjected to impact roller compaction

CHEN Zhong-qing^{1,2}, LÜ Yue^{1,2}, XU Chao³

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Centre of Rock Mechanics and Geological Disaster, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The impact roller (IR) compaction method is an efficient and cost-effective compaction technique, which has been widely used in highway and airport engineering for subgrade compaction and ground improvement of soft foundation. The simulation tests are carried out based on the self-developed impact roller simulation device. The general displacement distribution characteristics of sand as well as the displacement distribution characteristics of sand at both sides of impact center and displacement variation characteristics of sand with impact time are studied. The results show that: (1) The shape of displacement distribution of sand in the impacting area appears to be semi-elliptical, and the displacement distribution range of sand is 2.5 times the distribution range of sand in the rolling area; (2) The displacement distribution of sand subjected to IR compaction is not symmetrical around the impact center; (3) The vertical displacement of sand increases with the increasing impact time, and the maximum displacement of sand appears at the left side of the impacting area.

Key words: ground improvement; impact roller compaction; simulation test; displacement; sand

0 引言

冲击碾压技术是一种利用冲击压路机的非圆形冲击轮快速滚动冲击土体来实现浅层地基加固的新型地基处理技术。与传统的静碾压实及振动压实相比, 冲击碾压具有高振幅、低频率的特点, 在施工工期、施工费用以及地基加固效果等方面具有明显的优势^[1-2]。目前冲击碾压技术已在国内外公路、机场以及港口等工程的地基加固中得到广泛应用, 并引起工程界和学术界越来越多的关注。

虽然冲击碾压技术已在实际工程中得到广泛应用, 并开展了不少冲击碾压加固地基的工程应用研究, 但总体上关于冲击碾压技术的理论研究明显滞后于工程实践^[3-4]。现有相关研究如下: 卞学良等^[5]采用有限元法模拟三边形冲击压路机的压实过程, 得到冲击轮

基金项目: 绍兴文理学院科研启动项目(20155010); 绍兴市公益技术应用研究计划项目(2015B70034); 浙江省公益技术应用研究计划项目(2016C33052)

收稿日期: 2016-12-02

的外轮廓曲线形状对其压实效果有较明显的影响；王生新等^[6]研究路基黄土在冲碾前后的微观结构和孔隙特征，表明浅层黄土（0.6 m 深度）的微观结构发生明显变化并且小孔隙明显增多；Avalle 等^[7]通过现场试验得到冲击荷载为单脉冲形式，时程约为 0.1s，同时得到冲击轮与地面的接触应力分布不均匀；Kim^[8]通过有限元数值模拟分析得到冲击碾压的压实效果与冲击作用时的接触面积以及接触应力相关；Jaksa 等^[9]在澳大利亚某露天采煤区进行了冲击碾压加固尾矿填土的现场试验，在不同的填土深度共埋设了 4 个土压力盒，对冲击碾压过程中填土内的应力场进行分析；Kuo 等^[10]进行了冲击碾压加固尾矿填土的数值模拟，对不同冲击碾压遍数下土中密度和应力随深度的变化进行分析；陈忠清等^[11-12]研制了冲击碾压模拟试验设备，并采用该设备对冲击能量的传递规律以及冲击碾压加固效果影响因素等进行了试验研究。可以看到，目前关于冲击碾压荷载下土体位移场分布特征的研究还没有展开。

本文基于自行研制的冲击碾压模拟试验设备对冲击碾压加固砂土进行了模拟试验研究，主要分析了冲击碾压作用过程中砂土位移分布总体特征以及冲击区域中心两侧砂土位移分布特征与冲击区域砂土位移随冲击作用时间的变化特征。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验土样为上海某地的吹填砂，其颗粒级配曲线如图 1 所示。由图 1 可得，该吹填砂颗粒级配比较均匀，其中粒径为 0.5~1.0 mm 粗砂颗粒占 5.9%，粒径为 0.25~0.5 mm 中砂颗粒占 77.3%，粒径为 0.075~0.25 mm 细砂颗粒占 16.6%，粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量仅为 0.2%，平均粒径（ D_{50} ）为 0.33 mm，颗粒比重（ G_s ）为 2.67。试验前对砂土进行风干处理，使其含水率接近零。

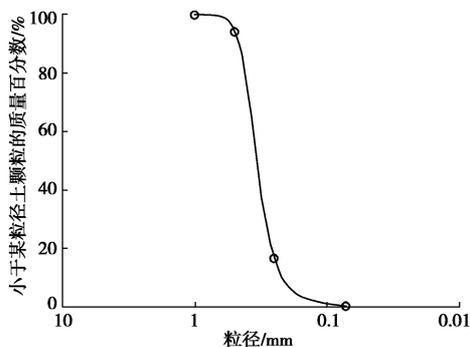


图 1 试验所用砂土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test sand

1.2 试验设备

(1) 冲击碾压模拟试验设备

冲击碾压模拟试验设备由模型箱、模型冲击轮、简易缓冲装置以及支架与牵引系统四部分组成，通过电机提供牵引动力，使模型冲击轮在试验土体表面滚动，实现对实际冲击碾压过程的模拟^[11]。模拟试验设备和原型应满足如下相似指标：

$$C_m / (C_\rho C_t^3) = 1, \quad (1)$$

$$(C_v C_t) / C_l = 1. \quad (2)$$

式中 C_l 为冲击轮几何相似常数； C_m 为冲击轮质量相似常数； C_ρ 为冲击轮密度相似常数； C_t 为时间相似常数； C_v 为牵引速度相似常数。综合考虑模型冲击轮选用的材料、模型箱的尺寸以及牵引难易程度等因素， C_l 取为 10， C_ρ 为 1。试验中模型冲击轮为三边形，其外接圆直径和轮宽分别为 200 mm 和 45 mm（如图 2 所示），质量为 2.75 kg。模型箱内部长、宽为 1300 mm 和 500 mm，高度为 550~600 mm，如图 3 所示。

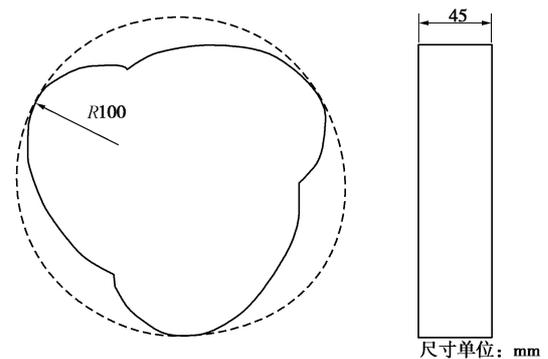


图 2 模型冲击轮形状示意图

Fig. 2 Side view of model impact wheel

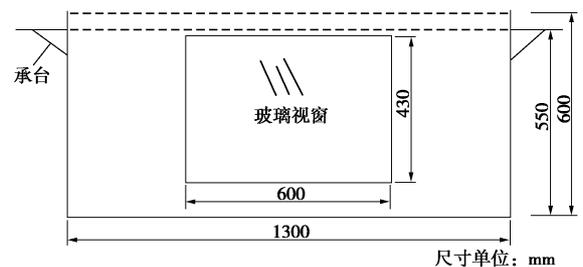


图 3 模型箱示意图

Fig. 3 Side view of test tank

(2) 粒子图像分析设备（PIV 设备）

PIV 设备主要由硬件和软件组成，其中硬件包括配置图像采集板的计算机、无频闪照明灯和高速数字相机，软件包括集成化的粒子图像测速系统和数字相机控制系统。高速数字相机的图像采集频率为 140 幅/s，通过千兆网线与图像采集板连接。

1.3 试验过程

采用落雨法制备土样，制样过程中砂土颗粒的落

距控制为 60 cm。砂土样最终高度 (H) 为 55 cm, 干密度为 1.48 g/cm^3 。模型冲击轮以相同初始位置与相同速度在砂土表面重复滚动, 滚动一遍记为冲碾一遍, 可完成 5 次冲击作用。冲击碾压过程中对模型箱玻璃视窗区域进行连续拍照。

2 试验结果分析

采用 PIV 设备的粒子图像测速系统对模拟试验过程中采集的照片进行图像标定和预处理, 然后采用 Tecplot 软件进行数据分析。

2.1 冲击碾压荷载下砂土位移分布总体特征

冲击碾压荷载下砂土位移分布情况如图 4 和图 5 所示 (以第 2 遍冲碾为例), 不同冲碾遍数下冲击区域和碾压区域中心位置砂土位移沿深度变化情况如图 6~9。从图 4~9 可以看出: ①砂土位移分布呈现出冲击区域和碾压区域分区的特点, 其中冲击区域内砂土位移分布呈近似半椭圆形, 位移大小明显大于碾压区域; ②冲击区域的砂土位移竖向分量总体上大于水平分量, 而碾压区域的砂土位移竖向分量则总体上小于水平分量, 其它不同冲碾遍数下的砂土位移具有相似的变化规律; ③冲击区域的砂土位移主要分布在浅部 150 mm 左右深度范围内, 而碾压区域的砂土位移主要分布在浅部 60 mm 左右深度范围内。

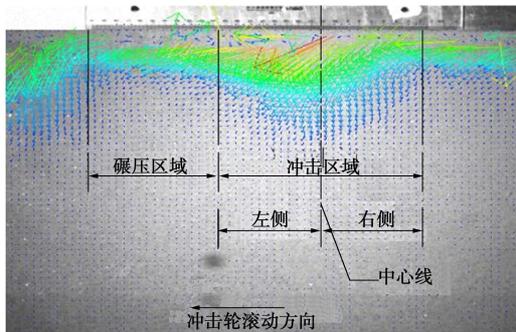


图 4 第 2 遍冲碾时砂土位移矢量分布图

Fig. 4 Distribution of displacement vectors of sand after second pass of IR compaction

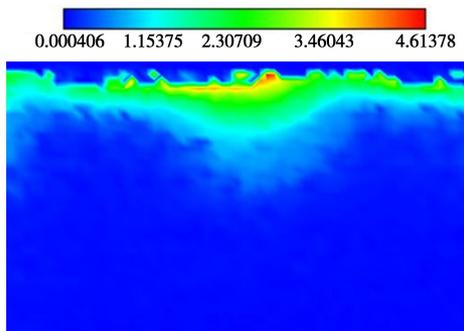


图 5 第 2 遍冲碾时砂土位移分布云图 (单位: mm)

Fig. 5 Distribution clouds of displacement of sand after second pass of IR compaction

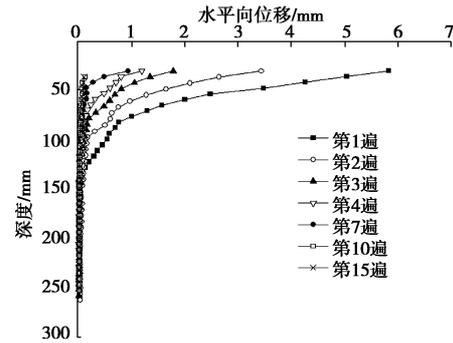


图 6 不同冲碾遍数下冲击区域水平向位移比较

Fig. 6 Comparison of horizontal displacements in impacting area after different passes of IR compaction

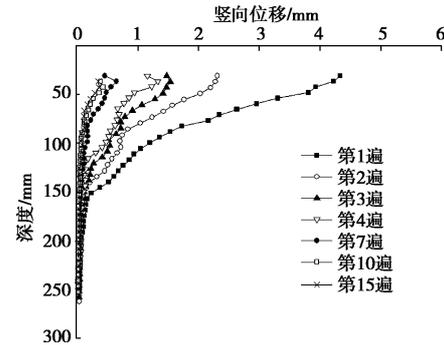


图 7 不同冲碾遍数下冲击区域竖向位移比较

Fig. 7 Comparison of vertical displacements in impacting area after different passes of IR compaction

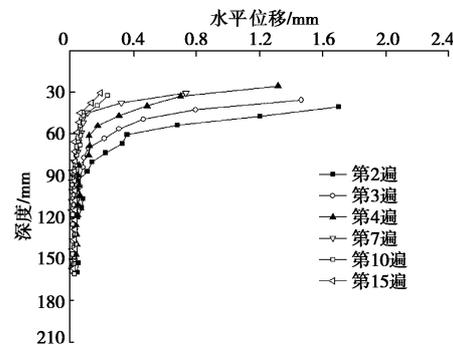


图 8 不同冲碾遍数下碾压区域水平向位移比较

Fig. 8 Comparison of horizontal displacements in rolling area after different passes of IR compaction

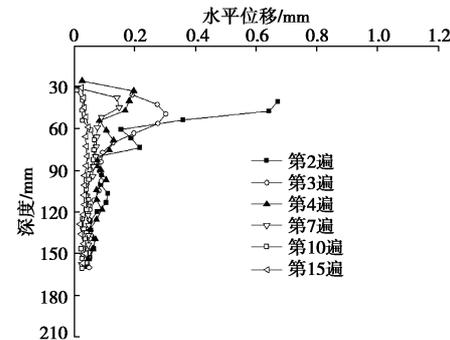


图 9 不同冲碾遍数下碾压区域竖向位移比较

Fig. 9 Comparison of vertical displacements in rolling area after different passes of IR compaction

由此可得，冲击碾压荷载下砂土位移分布总体上具有如下特征：

(1)不同冲碾遍数下冲击区域的位移明显大于碾压区域的位移，并有冲击区域竖向位移总体上大于水平向位移，碾压区域的竖向位移则总体上小于水平向位移。

(2)冲击区域的位移分布范围明显大于碾压区域的位移分布范围，其中冲击区域内砂土位移沿深度方向的分布范围是碾压区域的2.5倍左右。

2.2 冲击区域中心两侧砂土位移分布特征

以第2遍冲碾为例，冲碾作用下冲击区域中心两侧砂土水平向位移和竖向位移如图10和图11所示(其它冲碾遍数下的砂土位移变化特征类似)。从图10和图11可以看出：①冲击区域左侧(参见图4)距离中心20 mm和40 mm位置处，砂土位移在浅部30~40 mm深度范围内表现为水平向位移明显大于竖向位移，40~150 mm深度范围内表现为竖向位移逐渐大于水平向位移；②冲击区域右侧(参见图4)距离中心20 mm和40 mm位置处，砂土位移在150 mm深度范围内总体表现为竖向位移大于水平向位移。

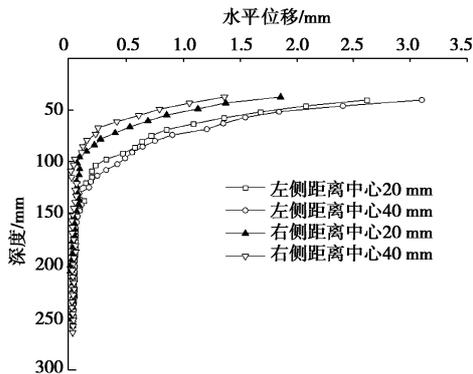


图10 第2遍冲碾下冲击区域不同位置水平向位移比较
Fig. 10 Comparison of horizontal displacements at different positions in rolling area after different passes of IR compaction

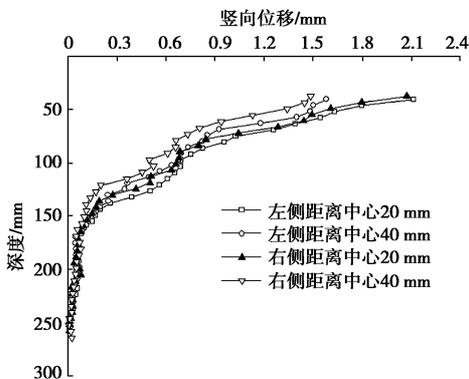


图11 第2遍冲碾下冲击区域不同位置竖向位移比较
Fig. 11 Comparison of vertical displacements at different positions in rolling area after different passes of IR compaction

由此可得，冲击区域中心两侧不同位置的砂土位

移具有如下特征：

(1)冲击轮滚动冲击作用产生的砂土位移沿冲击作用中心两侧非对称分布，其中冲击区域左侧的砂土水平向位移明显比右侧大，砂土竖向位移也总体上略大于右侧，且左右两侧的水平向位移方向均沿冲击轮滚动方向，竖向位移方向均向下。

(2)冲击区域左侧浅层30~40 cm深度范围砂土水平向位移明显大于竖向位移，且距离冲击区域中心较远处的砂土水平向位移相对较大，而冲击区域右侧砂土水平向位移总体上小于竖向位移。

2.3 冲击区域砂土位移随冲击作用时间的变化特征

以第2遍冲碾为例，单次冲击过程中冲击区域中心位置砂土竖向和水平向位移沿深度的变化情况如图12, 13所示。从图12, 13可以看出：①冲击作用起始阶段，位移矢量的方向明显为沿水平向；②冲击作用阶段，位移矢量的分布范围明显增大，并呈现出半椭圆形，浅部砂土位移矢量仍主要沿水平方向，冲击区域内位移矢量整体上沿冲击轮的滚动方向一侧倾斜；③冲击作用结束阶段，砂土位移矢量的分布范围不再增加，同时浅部位移有所减小。

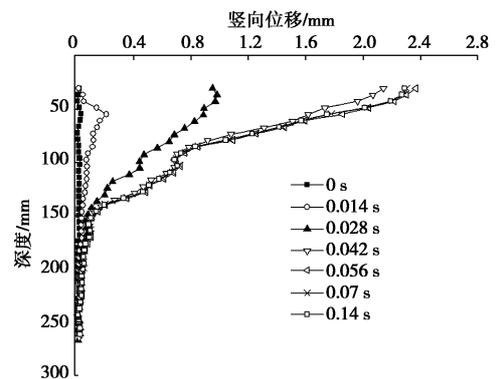


图12 冲击区域中心位置砂土竖向位移沿深度变化曲线
Fig. 12 Curves of variation of vertical displacement of sand in impact center along depth of sand

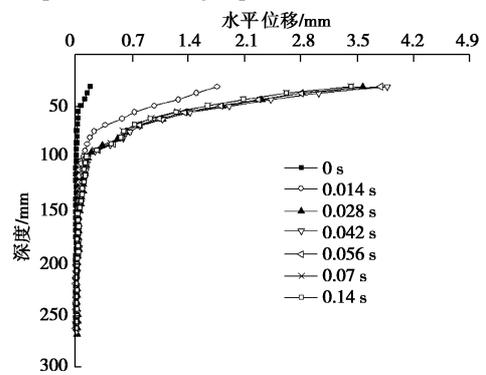


图13 冲击区域中心位置砂土水平向位移沿深度变化曲线
Fig. 13 Curves of variation of horizontal displacement of sand in impact center along depth of sand

由此可得，冲击区域砂土位移随冲击作用时间的变化具有如下一些特征：

(1) 冲击作用起始阶段, 浅部砂土位移接近水平方向, 竖向位移分量很小。该位移主要受冲击轮对碾压区域表层土体的揉压作用影响。

(2) 冲击作用阶段, 砂土位移分布范围明显扩大并呈现出半椭圆形, 竖向位移明显增大, 位移方向总体上表现为沿冲击轮滚动方向倾斜, 并且最大位移出现在冲击区域左侧砂土浅部。

(3) 冲击作用结束阶段, 砂土浅部位移有所减小, 表现出冲击结束后砂土浅部有所回弹。

3 结 论

采用模拟试验方法对冲击碾压荷载下砂土位移特征进行研究, 得到如下结论:

(1) 不同冲碾遍数下的砂土位移分布呈现出冲击区域和碾压区域分区的特点, 其中冲击区域的位移明显大于碾压区域的位移, 并有冲击区域竖向位移总体上大于水平向位移, 而碾压区域的竖向位移则总体上小于水平向位移。

(2) 冲击区域内砂土位移分布呈近似半椭圆形, 其砂土位移沿深度方向的分布范围是碾压区域砂土位移分布范围的 2.5 倍左右。

(3) 冲击轮滚动冲击作用产生的砂土位移沿冲击作用中心两侧非对称分布, 其中冲击区域左侧砂土水平向位移明显比右侧砂土水平向位移大, 竖向位移也总体上略大于右侧砂土竖向位移。

(4) 冲击作用过程中先在砂土浅部产生水平向位移, 随着冲击作用时间增加, 砂土位移分布范围逐渐扩大, 同时砂土竖向位移明显增大, 位移方向总体上表现为沿冲击轮滚动方向倾斜, 并且在冲击区域左侧砂土浅部出现最大位移。

参考文献:

- [1] 史保华, 杨晓娟, 王宏伟. 冲击压实机及其技术在土基处理中的应用分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3): 1 - 5. (SHI Bao-hua, YANG Xiao-juan, WANG Hong-wei. Application of impact compaction machine in soil subgrade treatment[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(3): 1 - 5. (in Chinese))
- [2] 车胜创. 冲击式压实机的应用、研究与发展前景. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3): 10 - 12. (CHE Sheng-chuang. Application, research and development of impact compaction machine[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(3): 10 - 12. (in Chinese))
- [3] 陈忠清, 徐超, 吕越. 冲击碾压技术的发展及最新研究进展[J]. 施工技术, 2015, 44(增刊): 100 - 104. (CHEN Zhong-qing, XU Chao, LÜ Yue. Development and prospect for impact roller compaction technique[J]. Construction Technology, 2015, 44(S0): 100 - 104. (in Chinese))
- [4] 周国钧. 岩土工程治理新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (ZHOU Guo-jun. New technology of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [5] 卞学良, 南传立, 肖汾阳, 等. 非圆柱形压实轮压实效果有限元分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 158 - 162. (BIAN Xue-liang, NAN Chuan-li, XIAO Fen-yang, et al. FEM analysis of impaction effect of non-column wheels of compacting roller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 15 - 162. (in Chinese))
- [6] 王生新, 韩文峰, 谌文武, 等. 冲击压实路基黄土的微观特征研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 939 - 944. (WANG Sheng-xin, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu, et al. Microstudy on roadbed loess improvement by impact compaction technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 939 - 944. (in Chinese))
- [7] AVALLE D L, SCOTT B T, JAKSA M B. Ground energy and impact of rolling dynamic compaction - results from research test site[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering-The Academia & Practice of Geotechnical Engineering, Alexandria, 2009: 2228 - 2231.
- [8] KIM K. Numerical simulation of impact rollers for estimating the influence depth of soil compaction[D]. Texas: Texas A&M University, College Station, 2010.
- [9] JAKSA M B, SCOTT B T, MENTHA N L, et al. Quantifying the zone of influence of the impact roller[C]// International Symposium on Recent Research, Advances and Execution Aspects of Ground Improvement Works. Brussels, 2012.
- [10] KUO Y L, JAKSA M B, SCOTT B T, et al. Assessing the effectiveness of rolling dynamic compaction[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013.
- [11] 陈忠清, 徐超, 叶观宝, 等. 冲击碾压模拟试验设备研制[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 279 - 285. (CHEN Zhong-qing, XU Chao, YE Guan-bao, et al. Development of an impact roller simulation device[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 279 - 285. (in Chinese))
- [12] 陈忠清, 徐超, 吕越. 冲击碾压加固砂土模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015b, 36(增刊 2): 525 - 531. (CHEN Zhong-qing, XU Chao, LÜ Yue. Development of an impact roller simulation device. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 525 - 531. (in Chinese))