

# 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究

罗 恒, 邹金锋, 李 亮, 杨小礼, 郭乃正, 何长明, 赵炼恒

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 利用4种不同的夯击能量(840, 960, 1 080, 1 200 kN·m)对红砂岩填土路基分别进行动应力扩散和夯后路基的沉降试验研究。试验结果表明: 强夯对红砂岩填土路基的加固效果明显, 动应力在水平方向上的有效加固宽度从2~3 m变化至3~4 m, 在竖直方向上的有效加固深度从3.5~4.0 m变化至5.0~6.0 m; 随着夯击次数的增加, 动应力在有效加固范围内的增加亦更加明显, 但在3~5击后基本稳定; 4种夯击能量在土体中产生的变形为4.0~6.0 m的变化比较显著, 但当深度超过6.0 m之后, 产生的沉降量就几乎相等, 而且在不同夯击能量以及在不同夯击次数下, 其最终的下沉位移在5.5 m处都为5.0~7.0 cm, 因此这4种夯击能量在红砂岩碎石土高填方路基中的有效加固深度基本上都在4.0~6.0 m之间。这些试验成果可为以后同种条件下的山区公路加固提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 大颗粒; 红砂岩; 强夯; 动应力; 夯沉量

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增1 - 2701 - 06

## TEST STUDY ON SOIL DYNAMIC STRESS DIFFUSION AND DEFORMATION DURING DYNAMIC COMPACTION IN ROADBED PRIMED WITH LARGE GRANULE RED SANDSTONE

LUO Heng, ZOU Jinfeng, LI Liang, YANG Xiaoli, GUO Naizheng,

HE Changming, ZHAO Lianheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** The dynamic stress diffusion and the roadbed settlement after tamp are studied in four classes of tamping energy, i. e. 840, 960, 1 080, 1 200 kN·m, respectively, in roadbed primed with large granule red sandstone. The test results show that the effective reinforcement distance ranges from 2 - 3 m to 3 - 4 m and the effective reinforcement depth ranges from 3.5 - 4.0 m to 5.0 - 6.0 m. The dynamic stress change is more markedable with the tamp time increasing, but it approaches stable when the tamping time increases 3 - 5 times. The deformation change markedable with the above different classes of tamping energy in depth of 4.0 to 6.0 m, but when the depth excesses 6.0 m, the settlements are almost equal, and the final deformation at depth of 5.5 m is 5.0 - 7.0 cm. The reliability and validity of the tamper construction design are proved by a series of tests.

**Key words:** soil mechanics; large granule; red sandstone; dynamic compaction; dynamic stress; settlement

**收稿日期:** 2006 - 04 - 04; **修回日期:** 2006 - 05 - 28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50408020); 湖南省交通厅科技开发项目(04SK2009)

**作者简介:** 邹金锋(1978 - ), 男, 现为博士研究生, 主要从事软土地基处理及岩土灌浆技术应用方面的研究工作。E-mail: zoujinfeng\_0@163.com

# 1 引言

常(德)一吉(首)高速公路湘西段位于山区地段,沿途山高沟深,地形复杂,路基强度极不均匀,填方路基的高度一般为 4~20 m,最高的可达 58 m。全线主要处在红砂岩地区,少数路段为石灰岩,而且地表覆盖层较浅,所以路基填料主要为红砂岩,碎石含量为 60%~90%,虽然进行了大规模的改石工作,但路基填筑后孔隙仍然较大,压实质量难以控制,极易产生较大的工后沉降和不均匀沉降。同时,新实施的设计规范对路堤压实度要求有所提高<sup>[1]</sup>,下路堤和上路堤压实度分别从原来的 90%和 93%提高到 93%和 94%,而该段路基的填筑在新规范实施以前均按旧规范要求填筑<sup>[2]</sup>。又由于红砂岩高填方路基的工后沉降周期长,如果处理不当就会造成极大的危害。为了缩短沉降周期,减少工后沉降量并考虑到该段路基的特殊性,决定采用强夯机械对路基进行强夯加固,以提高路基的压实度,减少路基的工后沉降和不均匀沉降<sup>[1, 3]</sup>。

强夯法自 1969 年由法国工程师 Menard 提出并应用于加固地基以来,得到了广泛的发展<sup>[3, 4]</sup>。虽然国内外对强夯动应力的扩散进行了大量的数值模拟,但真正对土体中进行动应力的测试的还是比较鲜见,尤其是在山区公路中进行强夯加固时。如孔令伟和袁建新<sup>[5]</sup>、蒋鹏等<sup>[6]</sup>、童小东等<sup>[7]</sup>对强夯的边界接触应力进行的研究;H. Brandl 和 W. Sadgorski 等在奥地利连接东西欧的一条公路路基强夯试验测出了土中动应力的分布图<sup>[8]</sup>;T. Nakaoka 等<sup>[9, 10]</sup>也分别对强夯的现场效果进行了测试和研究;但由于测点有限,且没有涉及到连续夯击过程中动应力的变化特征,很难全面说明夯锤影响区域的动应力分布特征。因此,为了更好地掌握强夯法在对红砂岩高填方路基的加固效果和加固机制,在常(德)一吉(首)高速公路开发总公司的帮助下,中南大学进行了大型的动应力现场测试试验<sup>[1]</sup>。在试验路段埋设了 43 个土压力盒,用动态应变仪完整地记录了强夯每一击的动应力分布特征及其衰减规律,同时还对多次夯击后夯点下不同深度处的土体的沉降量进行了定量的监测。这次的试验成果可为今后的同类地质条件下的强夯施工、设计和科研提供参考。

## 2 单点夯击试验

### 2.1 试验槽的开挖

如图 1 所示,试验所用试验槽是在试验区开挖的一个尺寸为 25.0 m×14.0 m(长×宽),深度约为 8.5 m 的深沟,试验槽的开挖尺寸完全满足试验精度的要求。

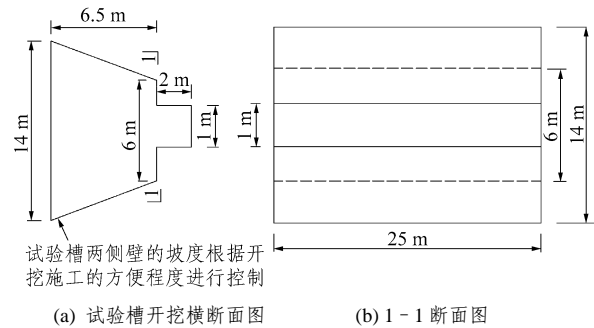


图 1 试验槽横断面布置示意图

Fig.2 Sketch of trail trough section

### 2.2 数据采集方法及仪器埋设方案

为了更好的了解大颗粒填料在夯击作用下动应力扩散和土体变形规律,特选择 4 个点(分别为 A, B, C, D, 其平面位置在路基中心线上,距离路面两边约有 25.0 m)分别用 4 种不同的夯击能量(分别为:1 200, 1 080, 960, 840 kN·m)进行试验。动应力扩散的测试选用丹东虬龙 BY-1 型土压力传感器,而土体变形规律量测选用沉降板,它们的埋设方法见图 2。

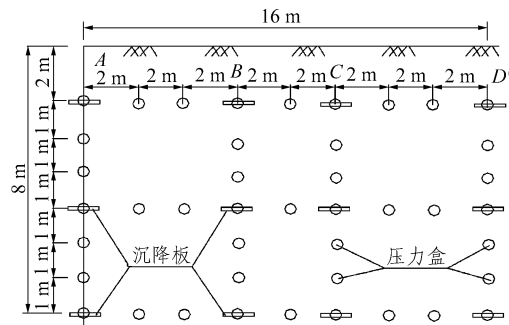


图 2 试夯试验仪器布置方案图

Fig.2 Layout sketch of apparatus in tamping test

仪器的规格分别为:

(1) 土压力盒的量程分为 0.6, 0.4 和 0.3 MPa 的 3 种型号。对于水平方向上的埋设方法为:最上面一层埋设量程为 0.6 MPa 的土压力盒,中间一层埋设量程为 0.4 MPa 的土压力盒,最底下一层埋设 0.3 MPa 的土压力盒。

(2) 对于每个夯点垂直方向上:沿着深度方向,上面埋设 2 个量程为 0.6 MPa 土压力盒,向下再埋

设 2 个量程为 0.4 MPa 的土压力盒, 最下面埋设 3 个量程为 0.3 MPa 压力盒, 其沿深度方向上的间距为 1 个土压力盒/m。

(3) 在每个夯点下沿着深度方向上每 2 m 埋设一块沉降板(共计 4 层 4 个点 16 块沉降板)并记录其初始标高, 其布置方法见图 2 所示。

(4) 土压力盒在埋设时, 采取砂袋覆盖以防土石混填料中的石头造成土压力测量的不准确, 同时要保护传感器的线路。

夯点的夯击顺序依次为: A, C, B, D; 夯击次数分别为: 9, 7, 5, 5 次, 夯点间距见图 2 所示。在夯击过程中, 每次夯击所产生的动应力都要记录下来。在 4 个点的夯击试验都完成之后, 再对这 4 个点进行开挖并量测每个沉降板的标高, 然后计算出每个沉降板的沉降量。通过上述两种测试仪器就可以得出每个夯点下不同深度处的沉降量以及每个夯点在每次夯击过时的动应力扩散情况。

### 2.3 填土要求

对于尺寸为 1 m×2 m(宽×深)的深槽, 采用级配良好的碎石进行填筑。对于其他土层, 填土厚度为松铺 50 cm, 然后用光轮压路机碾压 5 遍, 光轮压路机碾压完毕后再用羊角碾压路机碾压 3 遍。而且在铺设的过程中, 要尽量减少不符合规范要求的大颗粒填料在填料中出现保证试验过程中测试工作的有效性和准确性。填土的密度约为 2.18 g/m<sup>3</sup>, 含水量约为 0.136%。

### 2.4 试验步骤

(1) 使试验设备就位, 夯锤对准夯点位置, 测量夯前锤顶高程, 同时使测试仪器处于待测状态, 以便可以随时准备测量。

(2) 将夯锤吊起到预定高度, 待夯锤脱钩自由下落后, 测量夯击时各个压力盒的动应力。

(3) 重复步骤(2), 按设计规定的夯击次数及控制标准完成一个夯点的夯击。

(4) 待所有点的夯击完成后再对各夯点开挖并测出各沉降板的标高。

## 3 试验成果分析

试验结果中的等压力曲线是经过插值法而得到的。

### 3.1 夯击能量为 1 200 kN·m 时路基中产生的动应力扩散情况分析

夯击能量为 1 200 kN·m 时路基中产生的动应力等压分布曲线如图 3 所示。

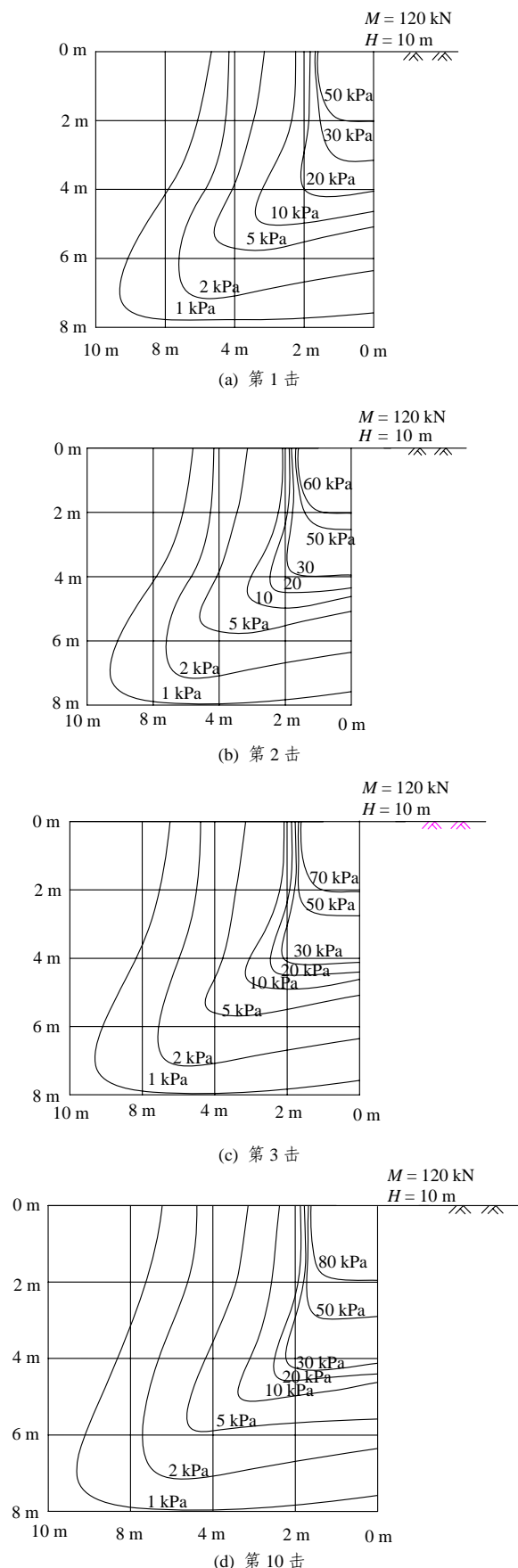


图 3 夯击能量为 1 200 kN·m 时其动应力等压分布曲线图

Fig.3 Curves of equal dynamic stresses under energy of 1 200 kN·m

### 3.2 夯击能量为 1 080 kN·m 时路基中产生的动应力扩散情况分析

作用的夯击能量为 1 080 kN·m 时路基中产生的动应力等压分布曲线如图 4 所示。

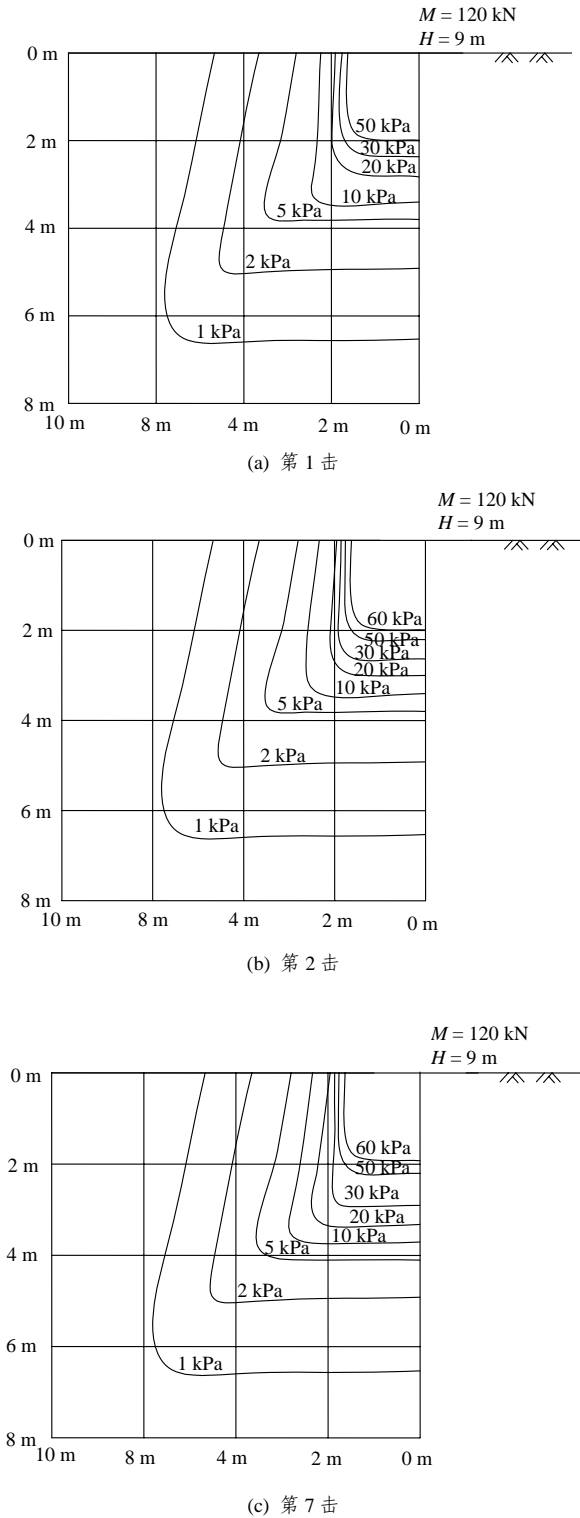
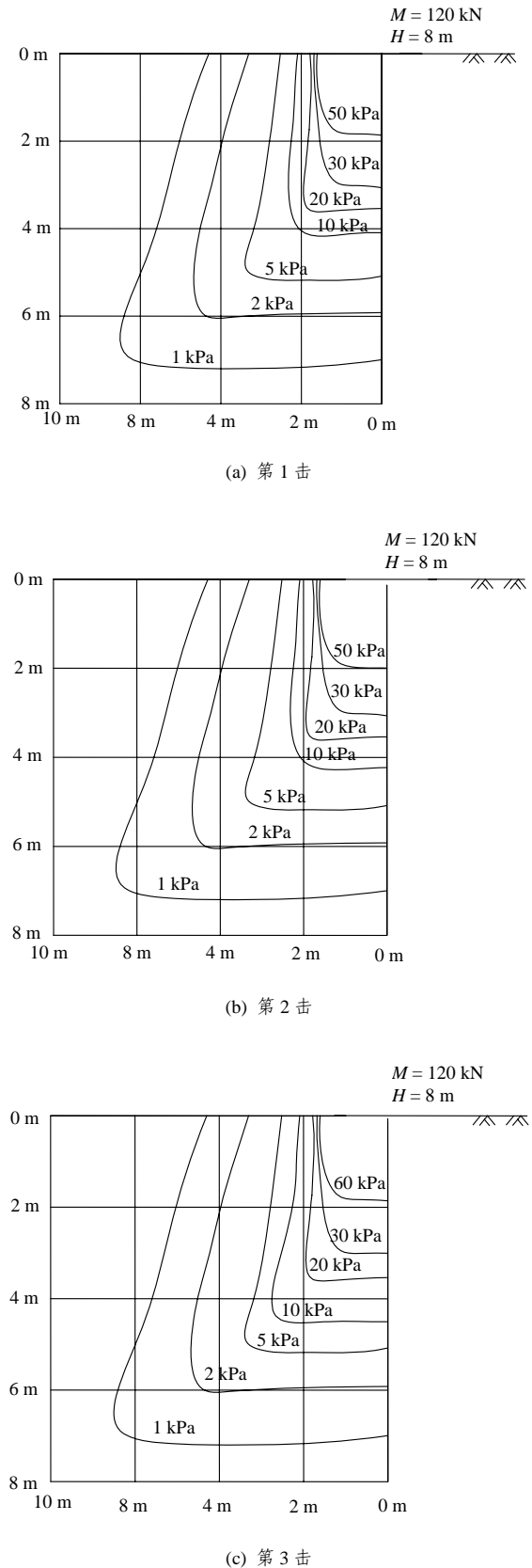


图 4 夯击能量为 1080 kN·m 时其动应力等压分布曲线图

Fig.4 Curves of the equal dynamic stresses under energy of 1 080 kN·m

### 3.3 夯击能量为 960 kN·m 时路基中产生的动应力扩散情况分析

作用的夯击能量为 960 kN·m 时路基中产生的动应力等压分布曲线如图 5 所示。



(c) 第 3 击

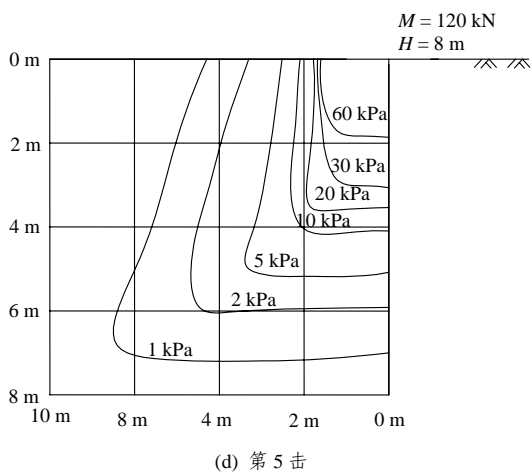


图 5 夯击能量为 960 kN·m 时其动应力等压分布曲线图

Fig.5 Curves of equal dynamic stresses under energy of 960 kN·m

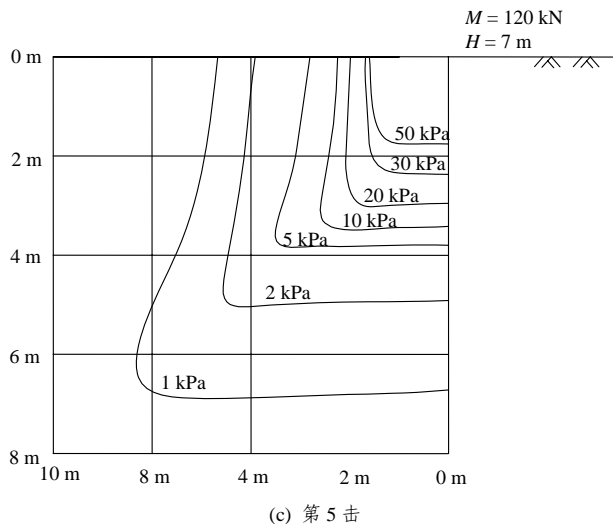


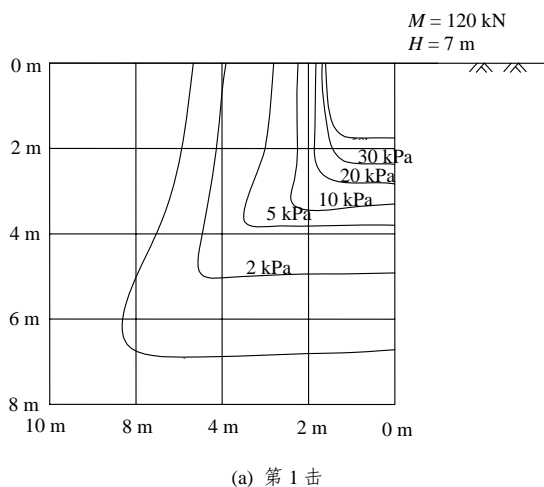
图 6 夯击能量为 840 kN·m 时其动应力等压分布曲线图

Fig.6 Curves of equal dynamic stresses under energy of 840 kN·m

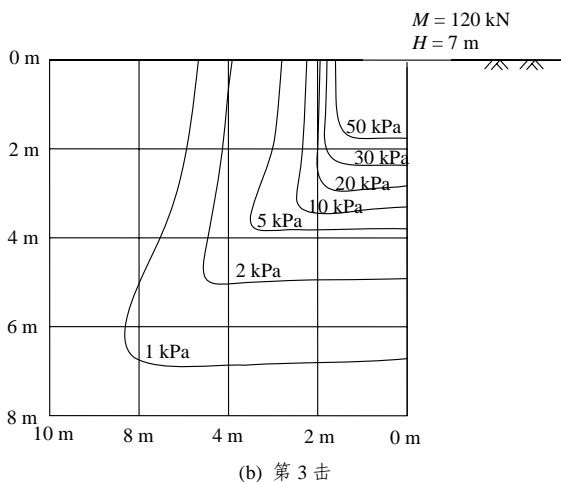
### 3.4 作用的夯击能量为 840 kN·m 时路基中产生的动应力扩散情况分析

作用的夯击能量为 840 kN·m 时路基中产生的动应力等压分布曲线如图 6 所示。

由图 3~6 可知: (1) 当等压线分布在 10 kPa 以上时, 动应力的衰减较快; 当等压线分布在 10 kPa 以下时, 特别是在 1~2 kPa 时, 动应力在很大的一个范围内的衰减都较缓慢。(2) 当夯击能分别为 1 200, 1 080, 960, 840 kN·m 时, 锤下 2 m 处的等压线由原来的 50 kPa 分别为 80, 60, 60, 50 kPa。(3) 各点的等压线图近似梨形, 上小下大, 且竖直方向衰减速度比水平方向快。(4) 由此可知, 在 1 200 kN·m 的夯击能量作用下, 竖向加固深度为 5.0~6.0 m 时的等压力为 10 kPa 左右, 而此时在水平方向加固范围为 3.0~4.0 m。(5) 在 1 080 kN·m 的夯击能量作用下, 竖向加固深度在 4.0 m 左右时的等压力为 10 kPa 左右, 而此时在水平方向加固范围在 3.0 m 左右。(6) 在夯击能为 960 kN·m 的夯击能量作用下, 竖向加固深度为 3.0~4.0 m 时的等压力为 10 kPa 左右, 而此时在水平方向加固范围在 3.0 m 左右。(7) 在夯击能为 1 080 kN·m 的夯击能量作用下, 竖向加固深度为 3.5~4.0 m 时的等压力为 10 kPa 左右, 而此时在水平方向加固范围为 2.0~3.0 m。



(a) 第 1 击



(b) 第 3 击

### 3.5 不同夯击能力作用下夯点不同深度处土体的夯沉量分析

为了更好了解大颗粒填料在强夯后其不同深度处的夯沉量在不同夯击能量下的变化特性, 特在每个夯点下的不同深度处预埋了 4 块沉降板, 在夯击完成后进行开挖并测出它们的最终夯沉量, 最终

得出的在不同能量作用下不同深度处的夯沉量随深度变化曲线如图 7 所示。

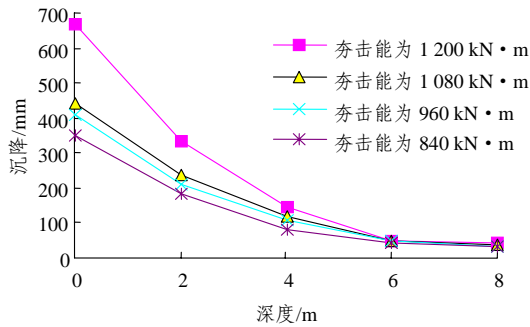


图 7 不同夯击能量下夯沉量随深度变化图

Fig.7 Curves of settlements along with depth under different tamping energies

由图 7 的试验结果可知：(1) 在同一深度上，能量越大，其产生夯沉量就越大，夯沉量随深度的变化与夯击能量的关系是非线性关系，能量越大，其非线性关系就越显著，反之则不是很明显，但是当达到一定深度后，夯沉量的变化几乎相同，这也从侧面说明了夯击能量在土体中传播是有一定影响深度的。(2) 4 种夯击能量的有效影响深度一般都为 4.0~6.0 m，超过 6.0 m 的深度之后，其产生的沉降量几乎相等。(3) 夯点之下的土体在夯击作用下发生了整体的下沉，在不同夯击能量下以及在不同夯击次数下，其最终的下沉位移在 5.5 m 处达到了 5.0~7.0 cm 左右。需要说明的是，上述结论是在单点夯击次数为多次夯击之后的结论，而不只是夯击一次的试验结果。

## 4 结 论

本文通过分析和总结现场强夯试验成果得出以下结论：(1) 对于同一个夯点而言，其等压线图的分布规律为：上部密集、下部稀疏，整体等压线呈现出上小下大的梨型形状。而且随着夯击次数的增加，锤底有效加固范围内的动应力提高值相当明显，但在达到 3~5 击后就基本趋于稳定。(2) 对于同一个夯点而言，在竖直方向上，动应力的衰减速度相当快并与距离夯锤的距离成反比，且动应力值越大，衰减的速度也就越快，其影响深度较大。在水平方向上，动应力的衰减较慢，且影响范围也较小。同时，随着夯击次数的增加，在有效的加固范围内(动应力大于 10 kPa 时)，动应力的增幅较为显著明显，反之则不然。而且同一种夯击能量作用下其加固的影响深度远大于有效影响深度。(3) 随着夯击能的增加(840, 960,

1 080, 1 200 kN·m)，强夯加固效果的变化相当显著，它们在水平方向上的有效加固宽度从 2.0~3.0 m 变化至 3.0~4.0 m，在竖直方向上的有效加固深度从 3.5~4.0 m 变化至 5.0~6.0 m。(4) 从夯击后土体产生的变形上看：4 种夯击能量在土体中产生的变形在 4.0~6.0 m 变化比较显著，但当深度超过 6.0 m 的之后，他们产生的沉降量就几乎相等，因此这 4 种夯击能量在红砂岩碎石土高填方路基中的有效加固深度基本上都为 4.0~6.0 m，而且在不同夯击能量下以及在不同夯击次数下，其最终的下沉位移在 5.5 m 处都为 5.0~7.0 cm。(5) 上述试验成果可以为以后同类条件下路基加固施工提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 中南大学. 强夯试验报告[R]. 长沙: 中南大学, 2006.(Central South University. Testing report of dynamic compaction[R]. Changsha: Central South University, 2006.(in Chinese))
- [2] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.(Editorial Board of Ground Treatment Handbook. Ground treatment handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994.(in Chinese))
- [3] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.(WANG Tiehong. Case histories in ground treatment of great engineering of China[M]. Beijing: China Construction and Building Press, 2005.(in Chinese))
- [4] 冶金工业部建筑研究总院. 地基处理技术(1)强力夯击法与振动水冲法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.(Design Institute of Central Research Institute of Building and Construction of MML. Technology of ground treatment (1) dynamic consolidation and vibro-compaction[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1989.(in Chinese))
- [5] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 86 - 92.(KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 86 - 92.(in Chinese))
- [6] 蒋 鹏, 李荣强, 孔德坊. 强夯大变形冲击碰撞数值分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 222 - 226.(JIANG Peng, LI Rongqiang, KONG Defang. Numerical analysis of large deformation impact and collision properties during dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 222 - 226.(in Chinese))
- [7] 童小东, 蒋永生, 龚维明, 等. 解决动力接触问题的一种新方法[J]. 工程力学, 2000, 17(6): 82 - 86.(TONG Xiaodong, JIANG Yongsheng, GONG Weiming, et al. A new method for dynamic contact analysis[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(6): 82 - 86.(in Chinese))
- [8] 徐至钧. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.(XU Zhijun. Dynamic compaction and dynamic replacement for reinforcing ground[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.(in Chinese))
- [9] NAKAOKA T, MOCHIZUKI A. Field compaction test at a fill of weathered granite by dynamic compaction method, ground improvement geo-synthetics[M]. London: Thomas Telford, 1997: 83 - 88.
- [10] KANATANI M, YOSHIDA Y. Model tests on densification of sandy ground by dynamic consolidation method with rotational ram[J]. Densification of Soil, 2000, 13(1): 61 - 75.