

## 强夯加固废弃铁矿渣路基的动应力 扩散规律实验研究

孟祥彬<sup>1</sup>,姚凯<sup>2\*</sup>,吴庆东<sup>3</sup>,刘吉山<sup>3</sup>,窦志刚<sup>2</sup>

(1. 山东大学齐鲁医院基建处, 山东 济南 250012;

2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061;

3. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250021)

**摘要:**结合青临高速公路强夯加固废弃铁矿渣高填方路基工程,在实验段埋设48个土压力计,采用不同夯击能(2 000、2 250、2 500、2 800 kN·m)对设计夯点进行多次夯击,通过采集仪得到的数据,分析强夯时动应力的扩散规律。实验结果表明:强夯加固废弃铁矿渣路基的效果比较明显,强夯引起的动应力也很明显;锤底动应力的消散速度极快,加上余波仅有0.5 s左右的时间;不同夯击能引起的动应力不同,夯击能越大,动应力值也越大;动应力在竖向的影响距离远大于径向,锤底8 m仍有10 kPa以上的动应力;有效加固深度的临界动应力值为20 kPa;动应力在径向的衰减速度快于竖向,有效加固宽度约3 m;随着夯击次数的增加,在有效加固范围内动应力的增加比较明显,但在3击后基本保持稳定。实验结果可为今后相似条件下强夯加固工程施工参数的设计提供参考。

**关键词:**强夯;废弃铁矿渣;动应力;实验研究

**中图分类号:**TU472 **文献标志码:**A

## Test study on soil dynamic stress diffusion of a waste iron slag embankment during dynamic consolidation

MENG Xiang-bin<sup>1</sup>, YAO Kai<sup>2\*</sup>, WU Qing-dong<sup>3</sup>, LIU Ji-shan<sup>3</sup>, DOU Zhi-gang<sup>2</sup>

(1. Infrastructure Management Department of Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. Shandong Luqiao Group Co. Ltd, Jinan 250021, China)

**Abstract:** A large field test was conducted in the project of the Qing-Lin Expressway. Forty-eight soil pressure cells were embedded in the test section of the road. Different classes of tamping energy(2 000, 2 250, 2 500, 2 800 kN·m) were used in this test. A dynamic strain gauge was used to record the dispersion and decay of the stress caused by dynamic compaction. The results showed that the reinforce effect on the waste iron slag embankment and the dynamic stress were both obvious. The dynamic stress decayed very fast and increased with the tamping energy. The vertical influence distance of dynamic stress was larger than that of the horizontal, and the dynamic stress was more than 10 kPa at 8 m under the rammer. The critical dynamic stress of the effective impacting depth was about 20 kPa. The decay speed of the horizontal dynamic stress was faster than that in the vertical. The effective horizontal impacting distance was about 3 m. With the compaction numbers increased, the dynamic stress in the reinforced range obviously increased and tended to be stable after about the third hit.

**Key words:** dynamic consolidation; waste iron slag; soil dynamic stress; test study

收稿日期:2011-06-06

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2007F35)

作者简介:孟祥彬(1975-),男,山东成武人,工程师,主要研究方向为建筑工程管理. E-mail: wasai2003@126.com

\* 通讯作者:姚凯(1988-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为地基处理,路面病害等. E-mail: yz20032006@163.com

### 0 引言

强夯法又称动力固结法,是用起重机将夯锤起吊至一定高度后使其自由落下,给土体以强大的冲击,使土中产生冲击波和冲击应力,迫使土体孔隙压缩,并在夯击点周围产生裂隙,形成良好的排水通道,使孔隙水和气体逸出,土颗粒重新排列,经时效压密达到固结,从而提高土体承载力的加固方法<sup>[14]</sup>。

虽然国内外学者对强夯时动应力的传递规律进行了大量的数值模拟研究<sup>[5-8]</sup>,但在工程现场进行动应力测试的研究还相对较少。Thilakasiri H S 等通过室内实验测得强夯动应力时程曲线<sup>[9]</sup>;Brandl H 等在奥地利连接东西欧的一条公路路基强夯实验测出了土中动应力的分布图,但其测点均不在强夯作用的有效范围内<sup>[10]</sup>;裘以惠和郭玉玲在山西潞城对夯锤冲击地面的作用过程进行了实测<sup>[11]</sup>,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;何长明等在红砂岩碎石土路基中进行过现场动应力测试<sup>[12-13]</sup>,但由于其填料的特殊性,其结论不一定具有普遍的适用性。

为了更清楚地了解强夯加固废弃铁矿渣路基时动应力(即动土压力)的扩散规律以及加固效果,在青临高速公路进行了大规模的现场实验,在实验段埋设了48个土压力计,通过电阻应变仪记录每一次夯击时动应力的传播及衰减情况。

### 1 工程概况

国家高速公路网长春至深圳线青州至临沭(鲁苏界)公路工程第九合同段位于山东潍坊境内,此地盛产铁矿,有大量的废弃铁矿渣堆积,其堆积时间均在一年以上。对铁矿渣取样进行实验分析,筛分实验结果表明其级配良好,不均匀系数  $C_u = 12.7$ ;击实实验测得其最佳含水率为 8.1%,最大干密度为  $2.18 \text{ g/cm}^3$ 。如果将这些铁矿渣作为路基填料,就能实现变废为宝,不仅能降低工程造价,而且还能提高施工效率。由于铁矿渣饱和度较低,渗透性好,强夯时不会产生明显的超孔隙水压力,非常适合采用强夯法加固处理。

相反,如果先将堆积的铁矿渣清理后再分层填筑路基,不仅提高了工程成本,而且延长了工期。由于可借鉴的工程实例较少,希望能通过本次现场实

验证明强夯法处理废弃铁矿渣路基的合理性与可行性,并且能根据动应力的扩散规律为强夯施工参数的设计提供理论依据。

### 2 现场测试

#### 2.1 现场实验方案

本次实验选用的压力传感器是电阻应变式土压力计,该种传感器测量精度高,适应性好。数据采集系统选用动静态应变测试系统,该系统具有稳定性好、抗干扰能力强、软件完善等优点。

在实验路段开挖长、宽各 12 m,深 4 m 的实验槽。在实验槽中分层埋设土压力计,共 7 层,土压力计埋设方案如图 1、图 2 所示。当填土至设计标高(距实验槽底部 8 m)时,用 2 000、2 250、2 500、2 800  $\text{kN} \cdot \text{m}$  的夯击能分别夯击夯点 A、B、C、D,每个夯点夯击 10 次。

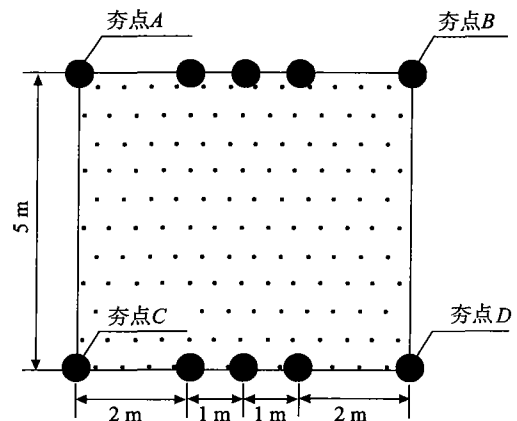


图 1 土压力计埋设位置俯视图  
Fig. 1 The top viewport of soil pressure cells embedding positions

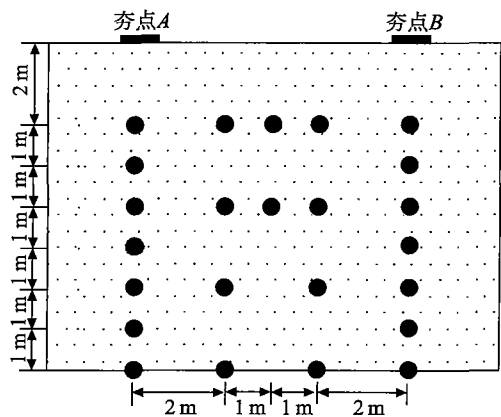


图 2 土压力计埋设位置侧视图  
Fig. 2 The strokes of soil pressure cells embedding positions

#### 2.2 实验步骤

(1) 整平实验路段的场地,用水准仪测量整平面高程并记录。

(2) 用全站仪定出土压力计的埋设位置并加以标记。

(3) 用细沙堆埋住土压力计,既能固定土压力计的位置,又能使其受力均匀、读数准确。此外,还需注意土压力计的测线应弯曲布置,以免夯击时挣断。

(4) 在实验路段填筑废弃的铁矿渣并整平、碾压,使其能够达到或接近天然堆积状态时的性状。

(5) 当填土至 1 m 时,重复上述操作埋设第二层土压力计。

(6) 待填土至 8 m 后,连接土压力计、电阻应变仪和计算机,对测试系统进行接地、平衡、清零等调试工作后,按设计方案进行夯击,测试系统会自动记录夯击时刻、动应力曲线等数据。每次夯击后用水准仪测量夯沉量并记录。

### 3 实验成果分析

#### 3.1 夯锤底的动应力传播及衰减规律

图 3 是强夯过程中土压力计的响应曲线。每支土压力计出厂时,都附有压力-微应变标定数据及工作直线方程,工作直线方程为  $P = a(L - b)$ ,式中  $P$  代表土压力值, $L$  代表微应变值, $a$ 、 $b$  为每支土压力计特有的系数。该 8 m 深处土压力计的工作直线方程为

$$P = 6.5604 \times 10^{-4}(L + 7.6191)。(1)$$

将  $L = 17.2$  代入式(1),得  $P = 0.0163 \text{ MPa} = 16.3 \text{ kPa}$ ,即为 2 250 kN·m 夯击能作用下锤底 8 m 深处的动应力值。由图 3 中数据可计算动应力消散时间为  $X_2 - X_1 = 36.69 - 36.63 = 0.06 \text{ s}$ ,加上余波也仅有 0.5 s,可见动应力在夯锤底消散速度极快,表明强夯引起的振动是一种瞬时的冲击振动。

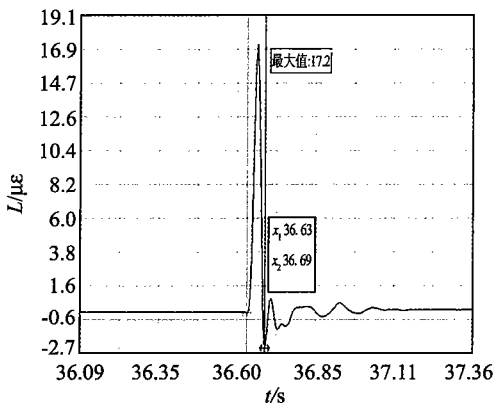


图 3 土压力计响应曲线(2 250 kN·m,锤底 8 m 深)  
Fig. 3 The response curve of soil pressure cell  
(2 250 kN·m, 8 m under hammer)

根据强夯施工技术规范,对于透水性较强的砂

性土,连续夯击的时间间隔应在 60 ~ 120 s 之间。由于该处的铁矿渣含水率低且渗透性好,孔隙水压力的消散也很快,故可设计较短的夯击时间间隔(只要满足规范要求即可),这样既能加快施工进度,也不会出现相邻两击波形叠加的问题。此外,动应力曲线并未出现第二峰值,说明夯锤下土体只受压缩波作用,没有其他波的干扰。

图 4 显示了动应力竖向衰减规律,可以看出,强夯动应力在竖直方向的分布与离夯锤的距离成反相关关系,其衰减速度相当快,且动应力值越大,衰减的速度也越快,锤下 3 m 处动应力值约为锤下 2 m 处动应力值的 1/2,锤下 4 m 处动应力值约为锤下 2 m 处动应力值的 1/3。随着夯击能的增加(2 000、2 250、2 500、2 800 kN·m),动应力的增加比较明显。

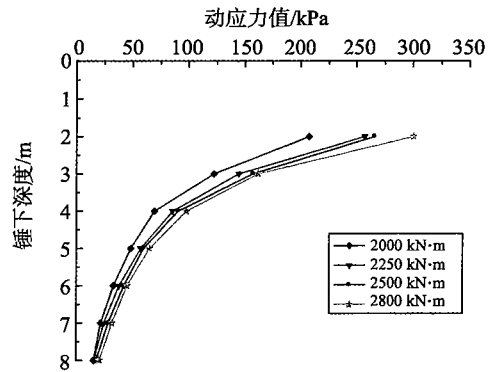


图 4 动应力竖向衰减规律  
Fig. 4 The vertical decay of dynamic stress

强夯的影响深度和有效加固深度是两个不同的概念,目前关于两者尚无统一的说法。多数学者认为,“影响深度”指在强夯法处理后的地基中,土性指标有所变化的深度;“有效加固深度”是指在正常的施工条件下,地基土的控制指标满足设计要求的深度。由图 4 可知,夯击时在锤下 8 m 深处仍有 10 kPa 以上的动应力,这就说明强夯产生的冲击波等作用到锤下 8 m 深的地方,冲击波作用的地方就会引起土性指标的变化,表明强夯加固废弃铁矿渣路基的影响深度超过 8 m。一般来说,强夯的影响深度大于其有效加固深度,但目前有效加固深度  $h$  的判别指标也尚不统一<sup>[14]</sup>。有效加固深度的取值标准以强夯加固处理的目的而定。粉细砂地基以抗地震液化为主要目的,取经强夯后不再发生地震液化土层的最大深度;湿陷性黄土地基,取经强夯后不再具有湿陷性黄土土层的最大深度;而对于其它以减小地基沉降为目的的地基,参照建筑地基规范关于压缩层厚度的规定<sup>[15-16]</sup>。对于一般土,压缩层厚度自基础底面算起,算到附加应力与自重应力比值为 0.2 处,即  $\sigma_z/\sigma_c \leq 0.2$  处<sup>[17]</sup>。本文通过确定压

缩层厚度来界定有效加固深度,经计算,在夯击能为 2 000 kN·m 时,强夯有效加固深度为 6.5 m;在夯击能为 2 500 kN·m 时,强夯有效加固深度为 7 m;在夯击能为 2 800 kN·m 时,强夯有效加固深度为 7.5 m。虽然该种确定有效加固深度的方法比传统的经验公式法更适合本工程,但关于强夯动力压实作用下压缩层厚度如何确定、 $\sigma_z/\sigma_c$  比值的选取等问题还有待进一步论证。就上述计算结果而言,本工程中强夯加固废弃铁矿渣路基有效加固深度的临界动应力值可定为 20 kPa,即强夯加固时,土体内部动应力值大于 20 kPa 的深度区域属于有效加固深度范围。

### 3.2 夯锤周边的动应力衰减规律

图 5、图 6 显示了锤下 2 m、4 m 深处动应力径向衰减规律,可以看出,强夯产生的冲击波在土体中由振源向外传播,引起夯锤周边土体的振动,相对于竖直方向,动应力在水平方向衰减速度更快,径向 2 m 处动应力值约为夯锤中心下动应力值的 1/3,而径向 3 m 处动应力值仅为夯锤中心下动应力值的 1/8(夯锤直径 2.4 m)。还可以看出,夯击时动应力径向的影响宽度小于竖向的影响深度。

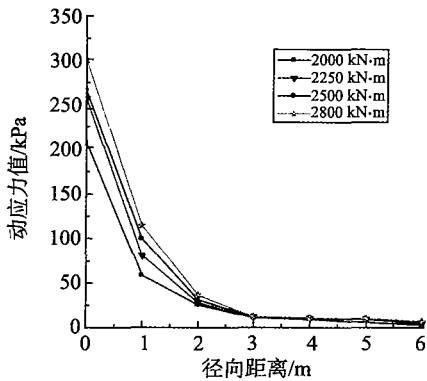


图 5 锤下 2 m 深处动应力径向衰减规律  
Fig. 5 The horizontal decay of dynamic stress (2 m under hammer)

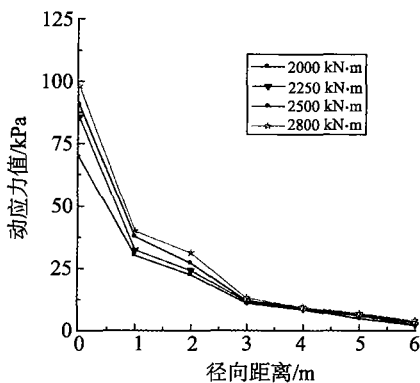


图 6 锤下 4 m 深处动应力径向衰减规律  
Fig. 6 The horizontal decay of dynamic stress (4 m under hammer)

如果以上述定义的有效加固深度临界动应力值

20 kPa 来确定强夯有效加固宽度的话,径向有效加固宽度仅为 3 m 左右。故在强夯施工时,为了达到更好的加固效果,同遍各夯点间距不宜过大,建议取 3 m 左右<sup>[18]</sup>。

### 3.3 动土压力的空间分布规律

图 7 为土体中动应力的空间分布规律图。图 7 中纵坐标表示锤下深度,横坐标表示与夯锤中心的径向距离(向左为 -, 向右为 +),曲线为 2 000 kN·m 夯击能作用下动应力等值线。从该图中可以看出,强夯作用下,土体中动应力似心形分布;随着离夯点距离的增大,动应力衰减速度减慢;竖向加固深度 7 m 左右时等压力为 20 kPa,而此时径向加固距离仅为 3 m,再次说明强夯竖向加固深度远大于径向加固距离。

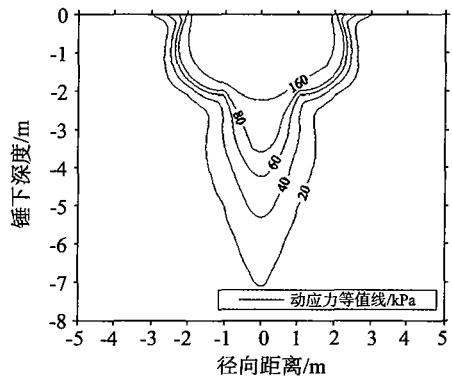


图 7 土体中动应力的空间分布规律  
Fig. 7 The spatial distribution of dynamic stress

在目前的数值模拟计算时,强夯加固后土体参数的选取是一个难点,也是决定数值模拟结果准确性的重要因素。土体加固实际就是由于强夯引起的动力密实,因此图 7 所示的强夯时的土体中动应力的空间分布规律能够反映强夯加固土体的范围,为计算参数的选取提供一定的依据。在动应力值大的地方,强夯加固效果好,密度及弹性模量等参数也相应地会较大。

此外,还通过数值计算模拟了强夯后土体竖向位移的变化情况,图 8 所示土体内部各层位移云图反映出的强夯加固土体的范围与图 7 土体中动应力的空间分布规律所反映出的强夯加固土体的范围基本吻合。

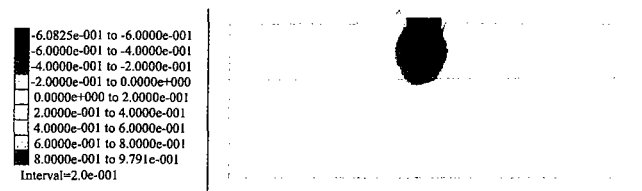


图 8 强夯后土体内部位移云图  
Fig. 8 The spatial distribution of vertical movement

### 3.4 连续夯击时动应力变化规律

图9是2 250 kN·m夯击能作用下,锤下4 m处动应力随夯击次数的变化规律。随着夯击次数的增加,锤底范围内的动应力提高值相当明显,但在第3击后基本稳定。如夯击能2 250 kN·m时,锤底4 m处的动土压力第1击、第2击、第3击、第6击、第10击依次为64.3 kPa、84.2 kPa、96.1 kPa、98.6 kPa、100.1 kPa。这说明,对同一夯点,随着夯击次数的增加,夯点下土体逐渐密实,便于强夯时压力波的传播,使动应力相应增大。但夯击到一定程度时,土体密实度增加的程度会逐渐降低,这也是3击后动应力稳定的原因。因此,不能单纯地通过提高夯击次数来增强夯击效果,尤其是遇到粉土时,过度夯击反而会导致粉土液化,造成不必要的损失。本工程建议采用以最后两击夯沉量的平均值小于5 cm作为止夯标准。

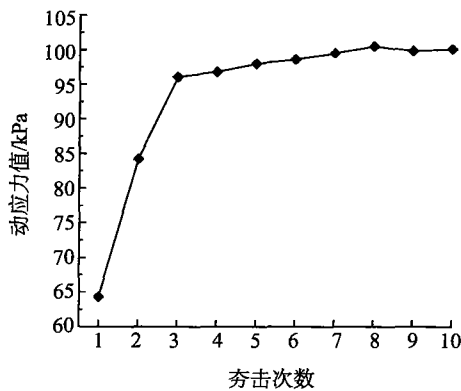


图9 动应力值随夯击次数变化规律

Fig. 9 Relationship between compacting numbers and dynamic stress

### 3.5 单点夯沉量实验分析

在夯点C(见图1)进行了单点10击的夯击实验,夯击能量为2 250 kN·m,平均每击夯沉量为6.08 cm,最终夯沉量达到了60.8 cm,最后一击的夯沉量为2.5 cm,说明土体已经比较密实。图10反映了夯沉量随夯击次数的变化规律,可以看出,随着夯击次数的增加,单击夯沉量处于逐渐减小的趋势,累计夯沉量不断增加,但增幅减小,说明土体的密实程度得到了提高。个别点夯沉量出现波动可能是由于夯锤偏心作用的结果。

此外,为了进一步验证强夯加固废弃铁矿渣路基的效果,还对实验段强夯后路基压实度进行了测量。测试结果表明,经过强夯处理,路基压实度明显提高,平均值在97%左右,局部测点甚至出现超密(压实度超过100%)的现象。

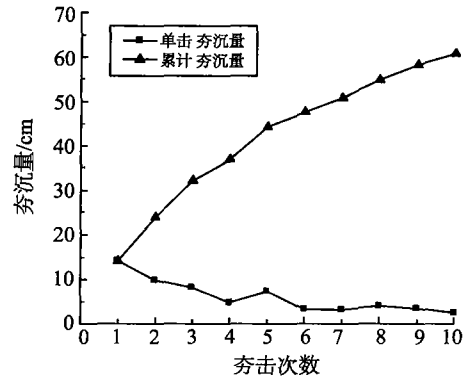


图10 夯沉量随夯击次数变化规律

Fig. 10 Relationship between compacting numbers and settlements

## 4 结论

(1) 强夯对废弃铁矿渣填土路基的加固效果明显,强夯引起的动应力也相当明显,锤下8 m深处仍有10 kPa以上的动土压力。

(2) 强夯时锤底动应力的消散速度极快,加上余波仅有0.5 s左右的时间,可以此作为设计夯击时间间隔的依据。

(3) 本工程中强夯的影响深度大于8 m,有效加固深度在7 m左右。通过计算,强夯加固废弃铁矿渣路基有效加固深度的临界动应力值可定为20 kPa,即强夯加固时,土体内部动应力值大于20 kPa的深度区域属于有效加固深度范围。

(4) 强夯作用下,土体中动应力似心形分布;动应力的径向衰减速度大于竖向衰减速度,径向影响宽度也远小于竖向影响深度,径向有效加固宽度约3 m。故在强夯施工时,为了达到更好的加固效果,同遍各夯点间距不宜过大,建议取3 m左右。

(5) 由于强夯的动力密实作用,对同一夯点,随着夯击次数的增加,锤下土体逐渐密实,单击夯沉量逐渐减小,累计夯沉量逐渐增大,动应力值也逐渐增大,但3击后动应力值比较稳定。

### 参考文献:

- [1] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic compaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1975, 25(1): 3-18.
- [2] LOPEZ-QUEROL S, FERNANDEZ-MERODO J A, MIRA P, et al. Numerical modeling of dynamic consolidation on granular soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(12): 1431-1457.
- [3] 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.
- [4] 王钊, 姚政法, 范景相. 强夯在高路堤填筑上的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 498-503.  
WANG Zhao, YAO Zhengfa, FAN Jingxiang. Application of dynamic compaction to fill of high road embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 498-503.
- [5] 宋修广, 李英勇, 韩军. 强夯法加固地基的多重耦合分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 471-474.  
SONG Xiuguang, LI Yingyong, HAN Jun. Multi-coupling analysis of dynamic consolidation method for reinforcing foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 471-474.
- [6] 王克忠, 冯耀奇, 张延新, 等. 强夯加固路基的瞬态动力数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(6): 53-56.  
WANG Kezhong, FENG Yaoqi, ZHANG Yanxin, et al. Instantaneous dynamic numerical modeling of collapsible loess foundation consolidated by ramming[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(6): 53-56.
- [7] 孟庆山, 汪稔. 强夯法处理层状软基的动态响应分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 23-28.  
MENG Qingshan, WANG Ren. Dynamic response analysis of stratified soft soil foundation treating with dynamic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 23-28.
- [8] 牛志荣, 杨桂通. 冲击作用下土体动力特性研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 118-127.  
NIU Zhirong, YANG Guitong. Dynamic characteristics of soils during and after dynamic consolidation[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 118-127.
- [9] THILAKASIRI H S, GUNARATNE M, MULLINS G, et al. Investigation of impact stress induced in laboratory dynamic compaction of soft soil[J]. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 20(10): 753-767.
- [10] 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.
- [11] 裘以惠, 郭玉玲. 强夯法加固地基的土体动应力量测[J]. 太原工学院学报, 1984(1): 45-52.  
QIU Yihui, GUO Yuling. The in-situ measurement of dynamic stress in soil mass during heavy tamping by dynamic consolidation method in ground improvement[J]. Journal of Taiyuan Institute of Technology, 1984(1): 45-52.
- [12] 何长明, 邹金锋, 李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007(4): 628-632.  
HE Changming, ZOU Jinfeng, LI Liang. Field tests on measurement of dynamic stress of dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(4): 628-632.
- [13] 罗恒, 邹金锋, 李亮, 等. 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[J]. 岩土力学与工程学报, 2007(7): 2701-2706.  
LUO Heng, ZOU Jinfeng, LI Liang, et al. Test study on soil dynamic stress diffusion and deformation during dynamic compaction in roadbed primed with large granule red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(7): 2701-2706.
- [14] 张平仑, 汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 76-80.  
ZHANG Pingcang, WANG Ren. A study of dynamic consolidation depth in engineering practice[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 76-80.
- [15] 叶观宝, 陈望春, 徐超. 强夯法地基处理有效加固深度的分析研究[J]. 上海地质, 2003(3): 22-25.  
YE Guanbao, CHEN Wangchun, XU Chao. Analysis on effective improvement depth of dynamic consolidation[J]. Shanghai Geology, 2003(3): 22-25.
- [16] 刘平. 强夯法有效加固深度的估算[J]. 港工技术, 2003, 40(1): 48-51.  
LIU Ping. Calculation of effect consolidation depth in dynamic compaction[J]. Port Engineering Technology, 2003, 40(1): 48-51.
- [17] 吴雪婷, 徐光黎. 软土地基沉降计算中压缩层厚度控制标准分析[J]. 人民长江, 2009, 40(5): 49-51.  
WU Xueting, XU Guangli. Analysis on the control standard of the compressible stratum thickness during the settlement calculation of soft soil foundation[J]. Yangtze River, 2009, 40(5): 49-51.
- [18] 杨建国, 彭文轩, 刘东燕. 强夯法加固的主要设计参数研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1335-1339.  
YANG Jianguo, PENG Wenxuan, LIU Dongyan. Research of choosing tamping factors for dynamic consolidation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1335-1339.

(编辑:孙培芹)