

强夯作用下饱和软土地层的沉降和变形性状*

刘利平, 刘晶晶, 石明禄

(河北建设勘察研究院有限公司, 石家庄 050031)

摘要: 结合饱和软土地层强夯现场测试结果, 分析了不同强夯能量施工条件下地层内部沿深度方向的分层沉降随单点强夯次数和遍数的变化过程, 给出了距离强夯中心点不同水平距离处的侧向位移沿深度方向随强夯次数增加的变化过程。利用这些结果, 进一步分析强夯冲击荷载作用对饱和土地基的扰动影响。同时, 论文还对软土地层中强夯法的加固机理、强夯能量的合理使用以及加固效果进行了分析。

关键词: 强夯荷载; 分层沉降; 侧向位移; 扰动

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2011)06-1222-05

The Characteristics of Settlement and Deformation of Saturated Soft Soil under Dynamic Loading

Liu Liping, Liu Jingjing, Shi Minglu

(Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co. Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Using various magnitudes of dynamic energy in field tests of saturated soft ground, this paper analyzed the changes of settlement of various layers with increasing the numbers of drops and the numbers of passes. Furthermore, the horizontal displacements along depth in various distances from the dynamic point are compared. Using these test results, the disturbance effects on saturated soft soil layers due to dynamic loading are discussed. Besides, the improvement mechanism and the choices of dynamic energy are analyzed.

Keywords: dynamic loading; settlement of various layer; lateral displacement; disturbance

1 引言

利用强夯法加固饱和软土(如淤泥、淤泥质土)地基已在很多工程中得到应用,并取得了良好的效果,是一种经济而简便的地基加固方法^[1,2]。对于新近吹填土,由于其含水量很高,一般呈流动状态,强度极低、变形极大,必须进行处理以满足工程需要,而采用强夯法加固该类地基是一种可行的方法。

由于强夯加固机制与土体本身的复杂性,强夯加固效果的评价、加固设计参数的取值、夯点的合理布置等问题,至今仍然未得到完全解决,仍然需要大量的现场试验进行研究^[3]。孟庆山等^[4]结合

室内试验和现场测试对动力排水固结法的机理进行过探索。郑颖人等^[5]对该法加固饱和软土地基的施工参数进行了研究。周健等^[6]采用真空动力固结联合扩底旋喷桩加固饱和软粘土地基,对加固过程的设计方案及现场测试结果进行研究。赵建华等^[7]通过室内模型试验,提出了动力排水固结软土地基有效加固深度确定方法。李丽慧等^[8]通过所研制的室内试验装置模拟了动力排水固结法加固吹填粘性土过程。王安明等^[9]尝试了非常接近于现场实际情况的室内模型试验,进一步研究动力排水固结的加固机理。连峰等^[10-12]通过现场试验和室内试验验证了爆夯加固软土地基的有效性,并结合沉降数据推算了爆夯设计参数。可见,目前

* 收稿日期:2011-07-14(修改稿)

作者简介:刘利平(1972-),男,内蒙古人,本科,工程师,主要从事岩土工程设计与施工。E-mail:hbjk2010@126.com

关于强夯法加固软土地基的机理和施工参数还没有得到很好的解决,需要进一步的研究。

针对东营港某堆场区吹填土地基,本文结合不同大小的强夯能量的现场测试结果,分析了不同强夯能量施工条件下地层内部沿深度方向的分层沉降随强夯次数和遍数的变化过程,给出了距离强夯中心点不同水平距离处的侧向位移沿深度方向随强夯次数的增加的变化过程。利用这些结果,进一步分析强夯冲击荷载作用对吹填土地基的扰动影响。

2 试验基本情况

2.1 工程地质特征

场区地层主要为表层新近素填土和第四系全新统陆相冲击、海相沉积和海陆交互相沉积形成的粉土层、粉质粘土层及砂土层。结合地基土的物理力学性质,现将场区地层自上而下依次划分为7层:

①层素填土:灰黄色,稍湿,土质较均匀,厚度1.70~2.30 m。

②层粉土:灰黄~黄褐色,湿~饱和,呈松散~稍密状态,土质较均匀,厚度1.60~3.30 m。

③层淤泥质粉质粘土:灰黄~黄褐色,呈软塑~流塑状态,厚度3.00~3.90 m。

④层粉土:灰黄~灰黄色,饱和,呈中密~密实状态,土质较均匀,厚度8.8~11.6 m。

⑤层粉质粘土:黄褐色,呈软塑状态,厚度2.90~4.00 m。

⑥层粉质粘土:褐灰色,呈可塑~软塑状态,厚度3.00~5.40 m。

⑦层粉砂:灰褐色,饱和,呈中密状态,此次最大揭露厚度5.90 m。

2.2 测试点布置

作为比较,在三个试验区进行不同大小能量的强夯试验,所采用的强夯能量分别为1 000 kN·m和2 000 kN·m、3 000 kN·m。该三个试验区位置相邻,其工程地质条件十分接近。表1为三个试验区(第1,2,3试验区)第1遍强夯时测斜管(测试水平位移变化)距离夯点中心(基准点)的水平距离。利用测斜仪测定深部地层水平位移,埋设深度为12 m。

利用分层沉降管测定加固地层不同深度的沉降。在距离强夯中心点不同距离处埋设沉降管(见表1),埋设深度均为12 m,保证沉降管底部无

位移。采用ABS分层沉降管($\Phi 70$)以及沉降磁环。采用钢尺沉降仪(30 m)进行探测。

表1 元器件布置方案

Table 1 Laying sketch of displacement measuring points

试验方案	测斜管径向距离(m)	分层沉降管径向距离(m)	磁环埋设深度(m)
1	2.65, 2.95, 5.65		2,4,6,8,10
2	1.87, 2.07, 3.64, 6.7	2,2.75	2,4,6,8,10
3	2.07,3.19,5.85	2	2,4,6,8,10

3 分层沉降测试分析

图1和图2给出第2,3试验区第1,2,3遍强夯以及满夯过程中(包括每遍强夯荷载作用后),不同深度土层的沉降变形量随时间变化曲线(正值表示沉降,负值表示隆起)。

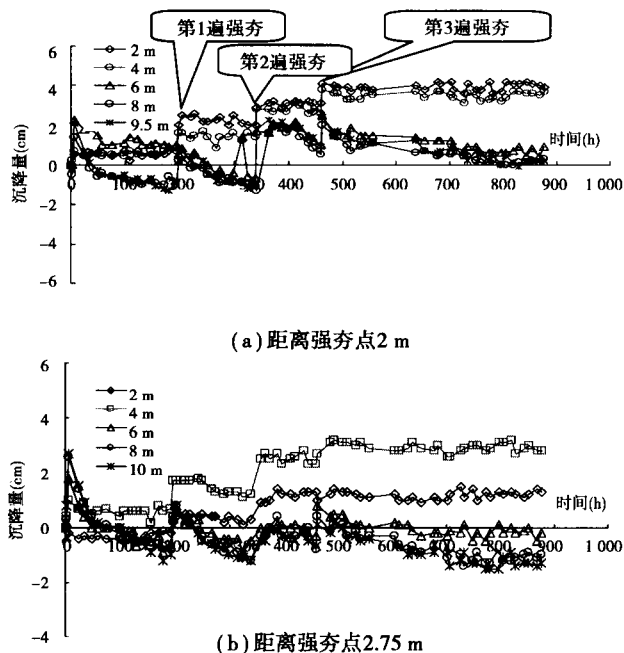


图1 强夯过程中地层不同深度处的沉降或隆起(第2试验区)

Fig. 1 Settlement or rising during dynamic processes (test 2)

可见,由于分层沉降管位于距强夯点不同的水平距离,在强夯过程中随夯击次数和遍数的增加和相应位置变化,地层深度处产生不同程度的挤压和弯曲。因此,在强夯过程中不同深度处的地层会产生沉降或隆起现象,其变化规律十分复杂,甚至呈现沉降和隆起的反复变化过程。实际上,由于沉降观测点离开夯点有一定距离,所以其沉降量只是离开强夯夯点一定距离处的沉降。

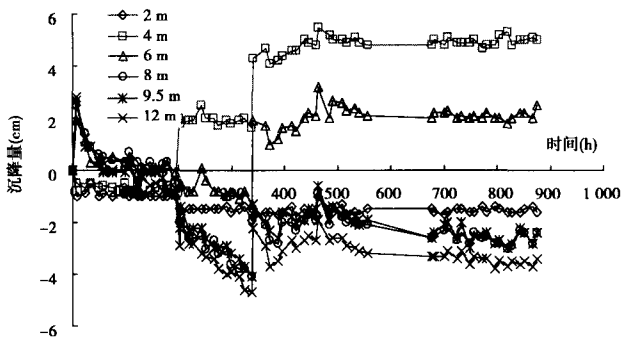


图2 强夯过程中地层不同深度处的沉降或隆起(第3试验区)

Fig.2 Settlement or rising during dynamic processes (test3)

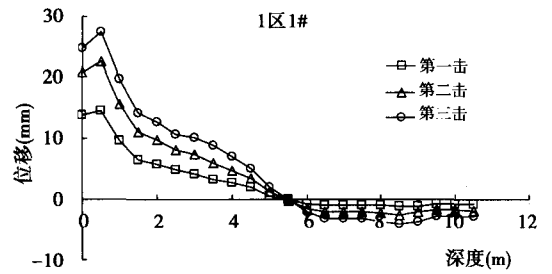
对于第2个试验区,由图1(a)可见,在强夯荷载作用下,在深度2 m和4 m深度处深层土层也有较大的沉降(最终沉降量为4.2 cm和3.6 cm),表明地基深层土的密实度得到一定改善。第2个试验区的两个分层沉降量(即图1(a)和图1(b))比较接近。值得注意的是,在较深层处反而有较大的隆起量(如图1(b)),10 m深度处的土层隆起量为1.4 cm),表明该处有侧向挤出的效应。此外,有的沉降管在强夯荷载的挤压下会发生翘曲变形,使测试结果也出现一定偏差。由图1可以清楚地看到,每遍强夯荷载作用下(如时间为204 h,341 h,460 h)地层均有一个阶梯式变化,然后沉降随时间平稳变化。

对于第3个试验区,由图2可见,在强夯荷载作用下,在深度4 m深度处深层土层有较大的沉降(最终沉降量为5.1 cm),表明地基深层土的密实度得到显著改善。然而,在深度8 m,9 m,12 m处则产生了明显的隆起(分别为2.4 cm、2.4 cm和3.4 cm),这与该试验区较大的强夯能量引起的土层的侧向挤压作用有关。

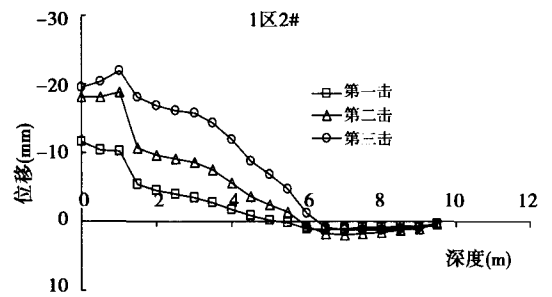
4 深层水平位移测试分析

4.1 第1试验区

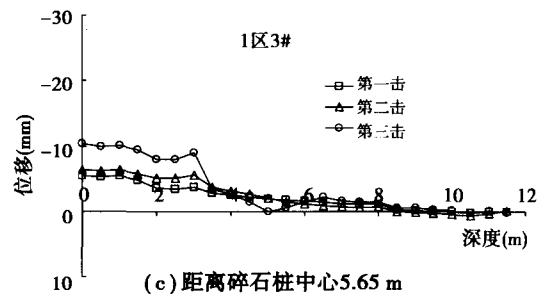
图3给出第1试验区不同径向距离处(水平距离2.65 m, 2.95 m和5.65 m)沿地层深度方向的水平位移随强夯过程(即随强夯击数的增加)的发展变化。可见,在第1次夯击作用下,周围土层就产生明显的向夯点外的侧向挤压作用(表现为侧向水平位移),在离开夯点水平距离2.65 m地表处的水平位移可以达到13.7 cm。然而,该位置处的最大水平位移出现在地表下的0.5 m深度处,这表明测斜管有较小的向内翘曲(即向内位移)的变化。然后,随着深度的增加,侧向位移明显减小。



(a) 距离碎石桩中心2.65 m



(b) 距离碎石桩中心2.95 m



(c) 距离碎石桩中心5.65 m

图3 地层深层水平位移随深度分布(第1试验区)

Fig.3 Horizontal displacement along depth (test 1)

图3(a)表明,强夯引起的侧向变形的影响深度大致在5.5 m范围内,在更深处测斜管甚至产生一定的向强夯点方向的变形(即向内水平位移),这主要是由于测斜管的翘曲引起的。图3(b)表明,在离开强夯点水平距离较远处(如2.95 m处),强夯引起的水平位移仍然比较大(地表处为11.5 mm),而其影响深度大约为6 m,似乎比离开强夯点水平距离2.75 m处的水平位移还大些。图3(c)表明,在离开强夯点水平距离5.65 m处,仍然有较大的侧向位移(如地表处为5.4 mm),其影响深度可达到5 m。由图3中三个图的比较可以看出,离开强夯点水平距离愈远,则沿深度方向水平位移的变化趋势愈加平缓。

由图3可以看出,随着强夯次数的增加,土层

不同深度处的水平位移也不断增大。例如在离开强夯点水平距离 2.65 m 处,三次强夯后的水平位移可以达到 24.7 cm。而在离开强夯点水平距离 5.65 m 处的水平位移仍然可以达到 10.4 cm。可见,强夯的侧向挤压效应是非常显著的,它是判断强夯加固效果的一个有效指标,因此在分析强夯加固饱和土机理时值得重视。

4.2 第2 试验区

图 4 给出第 2 试验区不同径向距离处(如 1.87 m, 2.07 m, 3.64 m 和 6.7 m)地层深度方向的水平位移随强夯过程(即强夯击数的增加)的发展变化。同样可以看到,在第 1 次夯击次数作用下,周围土层即产生明显的向夯点外的侧向挤压作用,在离开夯点水平距离 1.87 m 地表处沿深度方向的水平位移可以达到 58.9 cm。然后,随着深度的增加,侧向位移明显减小。

图 4(a)表明,强夯引起的侧向变形影响深度大致在 6.5 m 内,而在离开强夯点水平距离较远处(如图 4(b),即 2.07 m 处),强夯引起的水平位移仍然比较大(地表处为 32.9 cm),而其影响深度大约为 6 m。

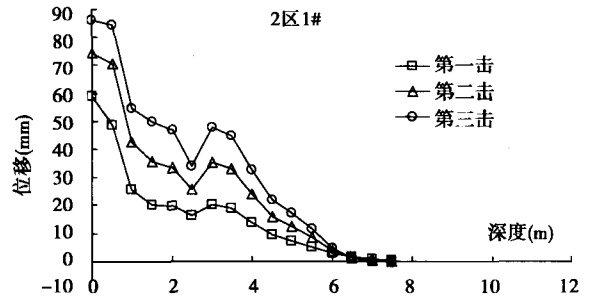
图 4(d)表明,在离开强夯点水平距离 6.7 m 处,也有较大的侧向位移(如地表处为 19.2 cm),其影响深度可达到 8 m。由图 4 可以看出,离开强夯点愈远,则沿深度方向水平位移的变化趋势愈加平缓。而且,随着强夯次数的增加,土层不同深度处的水平位移也不断增大,这一结果与第 1 试验区类似,进一步表明强夯的侧向挤压效应是非常显著的。

4.3 第3 试验区

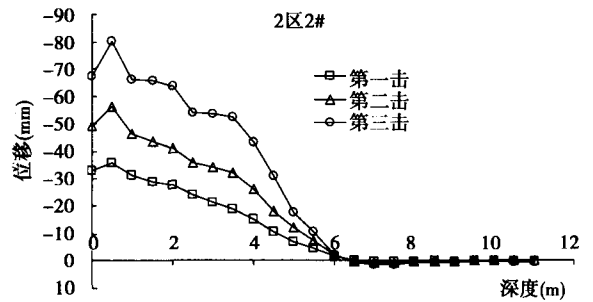
图 5 给出第 3 试验区不同径向水平距离处(如 2.07 m, 3.59 m 和 5.85 m)地层深度方向水平位移随强夯过程(即强夯击数的增加)的发展变化。同样可以看到,在第 1 次夯击次数作用下,周围土层即产生明显的向夯点外的侧向挤压作用,在离开夯点水平距离 2.07 m 地表处沿深度方向的水平位移可以达到 34.2 cm。然后,随着深度的增加,侧向水平位移明显减小,而强夯引起的侧向变形影响深度大致在 6.0 m 内。

4.4 深层水平位移变化分析

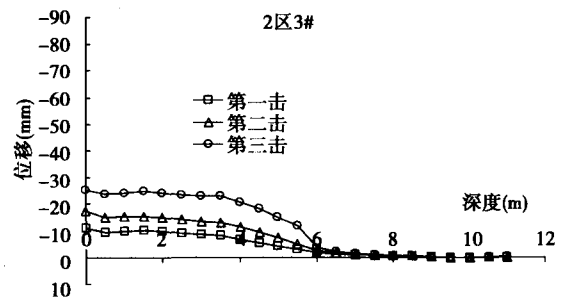
实际上,上述三个试验区的工程地质条件十分接近。但不同能量下三个试验区的试验结果均表明,离开强夯点水平距离愈远,则沿深度方向水平位移的变化趋势愈加平缓,并且随着强夯次数的增



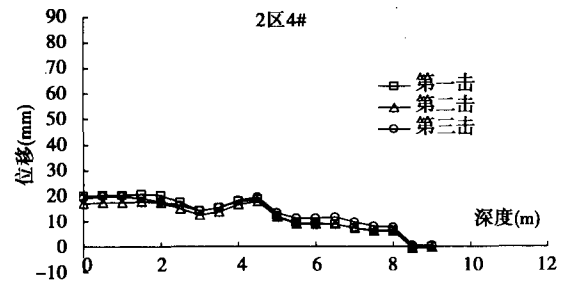
(a) 距离碎石桩中心 1.87 m



(b) 距离碎石桩中心 2.07 m



(c) 距离碎石桩中心 3.64 m



(d) 距离碎石桩中心 6.7 m

图 4 地层深层水平位移随深度分布(第 2 试验区)

Fig. 4 Horizontal displacement along depth (test 2)

加,土层不同深度处的水平位移也不断增大。结合深层沉降结果可以看出,强夯荷载作用下引起的地层的位移过程十分复杂,影响深度也较大。

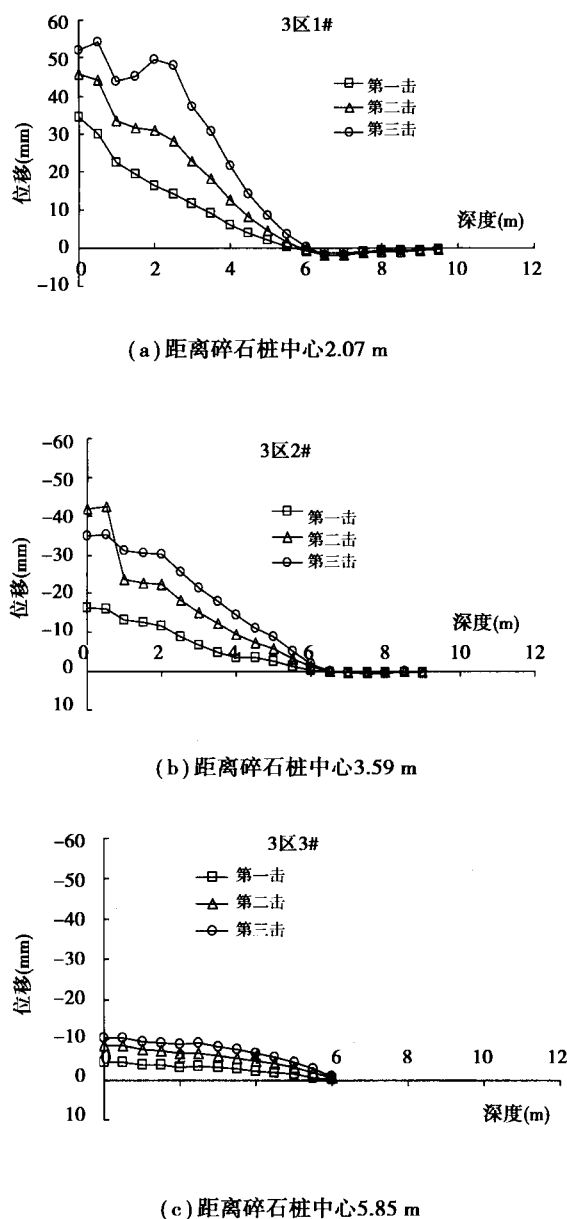


图5 地层深层水平位移随深度分布(第3试验区)

Fig.5 Horizontal displacement along depth (test 3)

由图3~图5可以看出,强夯荷载所引起的土层的影响深度可以达到12 m。这主要是由于土层的挤压所引起的。此外,随强夯能量的增大,强夯作用的影响深度似乎相差不多,实际上当强夯能量增大到一定程度时,其作用主要表现为土层的侧向位移的明显增大。而且,当强夯能量过大时,在地层深处(如深度12 m处)的地层竖向位移甚至表现为明显的隆起,这对土层的加固是不利的。

5 结论

(1)在强夯过程中不同深度处的地层会产生沉降或隆起现象,所以其变化规律十分复杂,甚至

呈现沉降和隆起的反复变化过程。

(2)观测结果表明,强夯荷载所引起的土层深层的沉降或隆起量是非常明显的,影响深度可以达到12 m。这主要是由于土层的挤压所引起的。当强夯能量过大时,在地层深处(如深度12 m处)的地层竖向位移甚至表现为明显的隆起,这对土层的加固是不利的。

(3)在强夯荷载作用下,周围土层就产生明显的向夯点外的侧向挤压作用。然后,随深度的增加,侧向位移明显减小,即强夯的侧向挤压效应是非常显著的。

(4)随着强夯能量的增大,强夯作用对土层的侧向挤压位移明显增大,但它们的影响深度似乎相差不多。

参考文献(References)

- [1] Menard L, Broise Y. Theoretical and Practical aspects of dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1975, 25(1): 3-18.
- [2] Lopez-Querol S, Fernandez-Merodo J A, Mira P, Pastor M. Numerical modeling of dynamic consolidation on granular soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, 32(12): 1 431-1 457.
- [3] Bai Bing. Consolidation characteristics and undrained shear strength under repeated impact loading. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29(4): 289-297.
- [4] 孟庆山, 汪稔. 冲击荷载下饱和软土动态响应特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 17-21. (Meng Qingshan, Wang Ren. Experimental study on dynamic characteristics of saturated soft clay under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 17-21. (in Chinese))
- [5] 郑颖人, 陆新, 李学志. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 18-22. (Zheng Yingren, Lu Xin, Li Xuezhi. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 22(1): 18-22. (in Chinese))
- [6] 周健, 姚浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1 685-1 688. (Zhou Jian, Yao Hao, Jia Mincai. Research on technology for shallow treatment of large-area soft soils [J]. *Rock and soil mechanics*, 2005, 26(10): 1 685-1 688. (in Chinese))

- [5] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 225-2 945. (Zheng Hong, Tian Bin, Liu Defu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 225-2 945. (in Chinese))
- [6] 赵志峰. 基于位移监测信息的岩石高边坡安全评价理论和方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (Zhao Zhifeng. Theory and method reasearch of safety assessment of high rock slope based on displacement information [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [7] 刘怀恒. 地下工程位移反分析—原理、应用及发展[J]. 西安矿业学院学报, 1988, (3): 1-11. (Liu Huaiheng. Back analysis of measured displacement of underground engineering—theory, application and development[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1988, (3): 1-11. (in Chinese))
- [8] 刘一波, 屠厚泽, 陆文兴. 现场量测位移反分析及在地下工程中的应用[J]. 地质与勘探, 1997, 33(3): 48-52. (Liu Yibo, Tu Houze, Lu Wenxing. Back analysis of measuring displacements on the spot and application to underground engineering. [J]. Geology and Prospecting, 1997, 33(3): 48-52. (in Chinese))
- [9] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利水电出版社, 1980. (Pan Jiazheng. Sliding stability of buildings and landslide analysis[M]. Beijing: China Waterpower Press, 1980. (in Chinese))
- [10] 吴曙光, 张永兴, 康明. 超载法在岩石边坡地基稳定性分析中的应用[A]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集(上册)[C]. 北京: 科学出版社, 2006. (Wu Shuguang, Zhang Yongxing, Kang Ming. Application of surcharge method in analysis of rock slope stability[A]//Proc. of the 2th National Geotechnical and Engineering Conference(Volume I)[C]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))

(上接第 1226 页)

- [7] 赵建华, 陈晓斌. 动力排水固结软基处理模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 60-66, 73. (Zhao Jianhua, Chen Xiaobin. Model testing study on dynamic drainage consolidation method for soft soil foundation treatment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 60-66, 73. (in Chinese))
- [8] 李丽慧, 王珊珊, 魏欣. 动力排水固结模型试验装置的研制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 574-579. (Li Lihui, Wang Shanshan, Wei Xin. Development of experimental apparatus for large dynamical consolidation test with drain [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 574-579. (in Chinese))
- [9] 王安明, 黄志全, 李彰明, 等. 动力排水固结模型试验设计研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 60-66, 73. (Wang Anming, Huang Zhiqian, Li Zhangming, et al. Study on design of model test of dynamic drainage consolidation method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 60-66, 73. (in Chinese))
- [10] 连峰, 龚晓南, 徐杰, 等. 爆夯动力固结法加固软基试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 859-864. (Lian Fen, Gong Xiaonan, Xu Jie, et al. Experimental research on soft foundation treatment by blasting ramming dynamic consolidation[J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(3): 859-864. (in Chinese))
- [11] 邓志勇, 张志毅, 汪旭光. 软黏土地基爆夯动力固结法试验研究[J]. 工程爆破, 2006, 12(3): 1-10, 52. (Deng Zhiyong, Zhang Zhiyi, Wang Xuguang. Experimental research on dynamic consolidation by blasting ramming in soft clay foundation [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(3): 1-10, 52. (in Chinese))
- [12] 李俊如, 李海波, 高建光, 等. 抛石基床爆夯振动效应监测与分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 417-1 420, 1 426. (Li Junru, Li Haiibo, Gao Jianguang, et al. Monitoring and analysis of vibration effects due to underwater explosive ramming [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 417-1 420, 1 426. (in Chinese))