

文章编号: 1000 - 7598 - (2006) 05 - 0754 - 05

预制桩施工的振动影响分析

周青春¹, 李海波¹, 李晓斌², 刘 博¹, 李俊如¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.中交第二公路勘察设计院, 武汉 430071)

摘 要: 动力打桩过程中, 地面质点的振动可能引起地面建筑物和构筑物的损坏。通过对电厂工程的试桩施工的全程监测, 建立了桩尖入土深度与地面质点振动关系曲线, 揭示了桩尖土的特性是控制地面振动的主要因素。地面的振动与波的特征有关, 因而近场和远场有不同的衰减规律, 即近场振动衰减快, 远场衰减慢。动力打桩过程中, 由于土层的振源在桩尖处, 且由浅到深, 通过远场在被保护对象附近设置减振沟是一项有效的减振措施。

关 键 词: 预制桩; 动力贯入; 振动; 衰减规律; 减振

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Analysis of vibration caused by prefabricated pile's dynamic driving

ZHOU Qing-chun¹, LI Hai-bo¹, LI Xiao-bing², LIU Bo¹, LI Jun-ru¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute, Wuhan 430052, China)

Abstract: The vibration caused by the pile's dynamic driving may result in damage to the structure near the site. A vibration monitoring has been completed in a power plant project where prefabricated piles are driven dynamically. Based on the monitoring data, the relationship between the depth of the pile's tip in the soil and the peak velocity of vibration on the ground has been established; and the property of the soil at the pile's tip is thought to be the main factor for the vibration. In addition, the vibration on the ground is related to the character of elastic waves, thus the decay laws are different at vicinity and there far from the pile. Moreover, the damping ditch near the object to be protected is more effective to reduce the magnitude of vibration on account of the epicentre being in the deep soil.

Key words: prefabricated pile; dynamic driving; vibration; decay law; damping

1 引 言

高强度预制管桩由于受力性能好, 节省材料, 加上制作工艺的特殊性, 适合工厂化大批量生产, 且现场施工速度快, 近年来在软土地区得到大规模的应用。但是, 采用锤击法施工产生的振动及噪音往往对环境造成不良影响^[1-3], 特别在人口稠密的城区和对环境要求高的生产区, 预制桩的动力贯入有可能造成临近房屋开裂、机械设备运行故障等。因此, 为保证桩基的正常施工, 同时将施工对环境的影响控制在安全范围, 在施工前期, 必须通过对试桩施工造成的环境振动进行分析, 以确定适当的机具和施工工艺及减振措施。

本文以华能上安电厂三期工程为背景, 研究预制桩施工过程中地面振动特征, 分析减振沟的减振

效果, 旨在为类似工程提供参考。

2 工程概况

华能上安电厂位于石家庄市以西的井陘县, 现有装机为 2×350 MW 的一期工程和 2×300 MW 的二期工程, 拟建的三期工程位于二期场地的东侧, 与二期场厂房最近距离为 26 m。根据勘察结果, 场地地层自上而下可以分成 6 层: 层: 素填土; 层第四系上更新统坡-洪积黄土状粉土 (Q_3); 层第四系中更新统坡-洪积老黄土 (Q_2), 其中: -1 层为黄土状粉土: 结构较致密, 含少量铁锰结核及氧化物, 岩性不均一, 上部夹薄层黄土状粉质黏土, 为中低压缩性土; -2 层为黄土状粉质黏土: 浅棕红~棕红色, 硬塑(局部坚硬), 岩性不均一, 上部夹薄层黄土状粉土, 下部黏性较高, 含大量铁锰质

收稿日期: 2005-10-27

修改稿收到日期: 2006-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (No.50439030)。

作者简介: 周青春, 男, 1967 年生, 在职博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: qczhou@whrsm.ac.cn

斑点，见少量铁锰结核，为中低压缩性土；层为碎石层：分布不连续，呈中密状态，碎石成分为灰岩；层为黏土，局部分布；层为基岩：岩性以石灰岩为主，深灰色，强~中等风化，岩石坚硬性脆，节理裂隙发育。

三期主厂房和烟囱基础拟采用 $\phi 600/110$ mm 预应力钢筋混凝土管桩 (PHC 桩)，桩长 20 m，试桩采用型号为 D408S 动力打桩机施工，配以 D-62 柴油锤，锤击落高 2.5 m。

3 测试系统及测点布置

振动测试系统包括 891- 传感器及放大器、WS_USB 数据采集、VIB SYS 分析系统等，如图 1 所示。

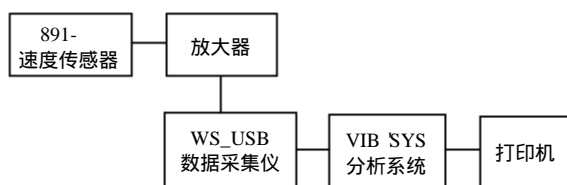


图 1 测试系统框图

Fig.1 Frame of monitoring system

为分析桩基施工过程中地面振动衰减规律，根据场地具体情况，在试桩与二期厂房之间布置 3 个测点 (1#~3#)，每测点布置垂直和水平径向速度传感器。另外，为测试减振沟的减振效果，在靠近二期厂房围墙的地方开挖减振沟 (距围墙 43 m)，并在减振沟两侧各布置一组传感器 (4#，5#)，测点布置见图 2 所示。

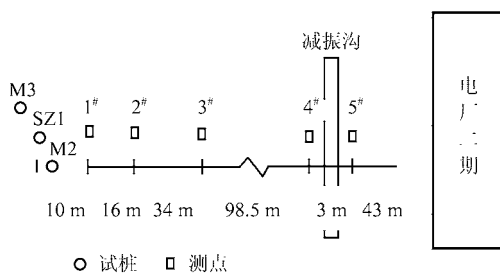


图 2 测点布置

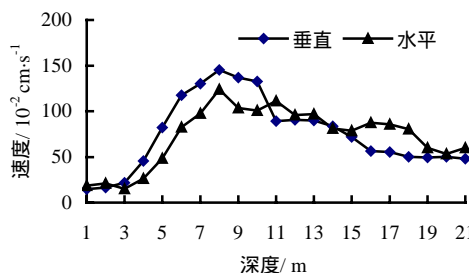
Fig.2 Disposal of monitoring sensors

4 测试结果及分析

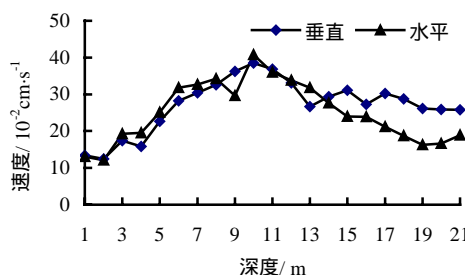
共对 3 根桩 (SZ1、M2 及 M3) 的施工过程进行了全程监测，监测过程中，桩身每入土 1 m 记录一组测点处质点振动速度数据，取每组数据中的最大速度峰值进行分析。监测结果表明，3 根桩施工过程中个测点的振动规律基本相似。限于篇幅，本文仅分析 SZ1 桩施工过程的振动监测结果。

4.1 地面质点振动峰值速度与桩入土深度关系

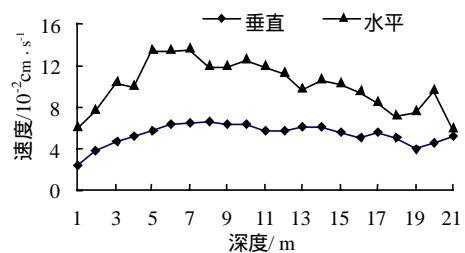
图 3 为 SZ1 桩施工过程中各测点的振动峰值速度与桩的入土深度关系曲线，由图可见桩尖入土



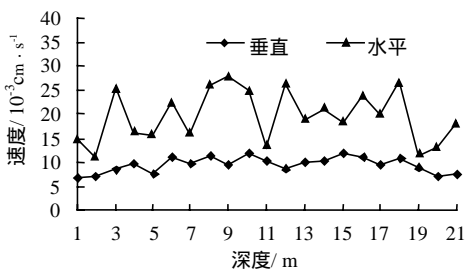
(a) 1#测点



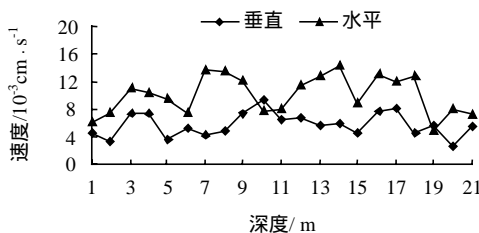
(b) 2#测点



(c) 3#测点



(d) 4#测点



(e) 5#测点

图 3 SZ1 桩各测点峰值速度与桩尖入土深度关系
Fig.3 Relationship of peak velocities and the depth of pile's tip in soil

3~8 m 范围内, 1#测点的水平和垂直振动速度逐步增大, 其 8~10 m 范围内基本上稳定在最高值, 之后逐渐减小, 并在一定范围内波动。近距离测点具有相同的特点, 而距离较远的 3#测点, 这种特点不明显, 更远的 4#测点似乎与桩的入土深度无关。

近距离测点振动速度与桩尖土的土层特性相关。图 4 为 1#测点振动监测结果与静力触探结果的关系, 从图中可以看出, 静力触探 q_c-z 曲线在 0~8 m, 锥尖阻力 q_c 随深度增加而增大, 8~10 m 范围 q_c 稳定在较高值, 10 m 后开始下降, 11 m 后基本上稳定在较低的量值, 因此, q_c 的分布与近场地面质点的振动情况极其相似。一般认为, 动力打桩过程中, 由于机械提供给桩的每一击能量相等, 作用在桩身的能量一部分通过与土间的相互作用转化为变形能(主要是桩尖处土体变形), 另一部分能量则通过弹性波的形式向四周传播。如果土体获得的变形能大, 则弹性波的能量就小, 反之亦然。由于 q_c 大小反映土体的抗变形能力, q_c 大, 桩尖进入该土层每击贯入度小, 使土体产生的变形能也小, 由桩尖向周围传播的弹性波能量大, 从而引起地面质点较大的振动。

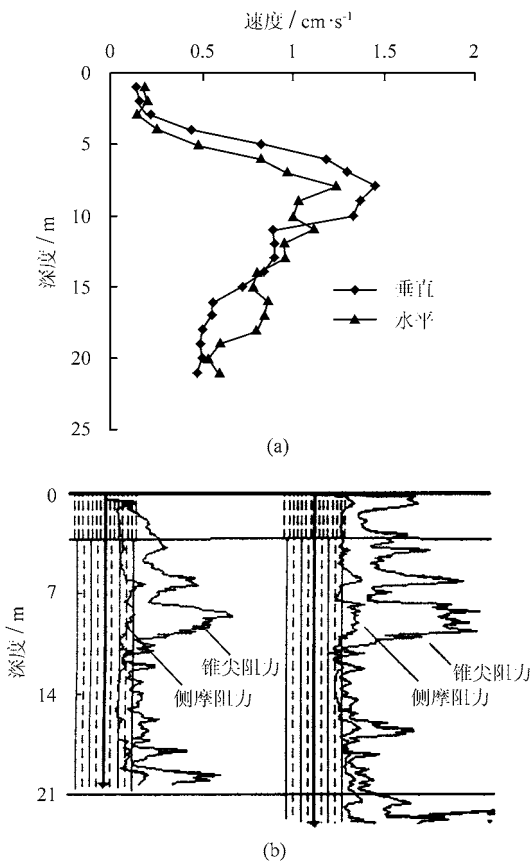


图 4 1#测点峰值速度与静力触探曲线关系
Fig.4 Relationship of peak velocity and cone penetration curves

另外, 从图 4 还可以看出, 近场地面振动不仅与桩尖处 q_c 有关, 而且桩尖以下一定深度范围的 q_c 对地面质点的振动也起着一定作用。从图 4(b)可以看出, 当 q_c 出现大幅度增长时(入土深度 0~8 m), 地面振动没有出现类似的现象图 4(a), 相反, 在深度为 10~11 m 左右, 地面测点振动速度急剧下降, 应该是由该处以下土层的 q_c 稳定在较低水平。

4.2 振动衰减规律

对于土体来讲, 振源来自桩尖, 靠近振源的近场主要由体波控制, 这些体波以球面的方式向外传播。在振源一定距离的地方, 体波中的 P 波(压缩波)和 S 波(剪切波)在半空间界面处相干涉, 产生 R 波(面波)^[4,5]。在远场地面质点的振动主要为 R 波引起。根据弹性波的传播特征, 体波衰减快, 面波衰减慢。由于引起近场和远场地面质点振动的波的性质不同, 振动衰减将有一个由快到慢的过程。

图 5 为桩尖进入不同土层时(图中 H 为桩尖入土深度)地面质点振动垂直和水平速度衰减曲线。可以看出, 桩基施工时地面垂直和水平方向振动速度随测点与振源水平距离的增加呈现衰减趋势。当水平距离小于 60 m 时, 振动速度随水平距离的增加衰减较快, 同时, 衰减幅度与速度相对大小有关, 相对速度越大, 衰减越快; 当水平距离超过 60 m 后, 振动速度随水平距离的增加衰减较慢, 同时衰减幅度与速度相对大小关系不大。

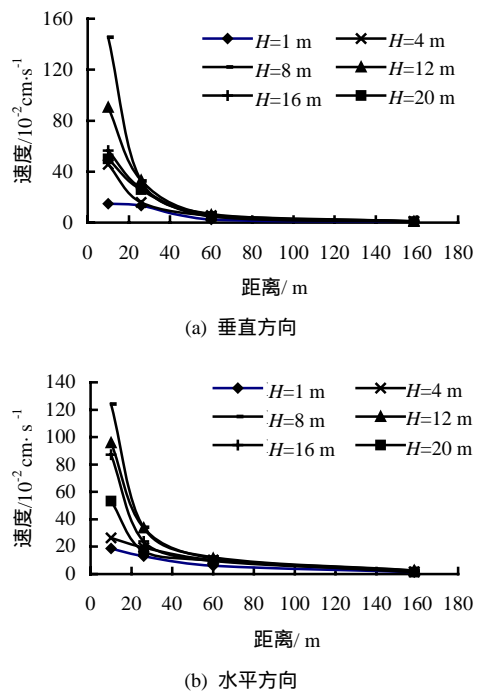


图 5 SZ1 桩桩尖不同入土深度测点速度衰减曲线
Fig.5 Decay curves of velocity

由于桩尖进入各土层地面质点有不同的衰减规律，其衰减过程可以用不同的函数进行拟合。图 6 为采用负幂函数对 $H=8\text{ m}$ 时衰减过程进行的拟合，拟合曲线与实测结果吻合得非常好，拟合函数见式 (1) 和式 (2)。

$$v_{\text{垂直}} = 92.385r^{-1.769}, R^2 = 0.9983 \quad (1)$$

$$v_{\text{水平}} = 31.544r^{-1.388}, R^2 = 0.9974 \quad (2)$$

式中 r 为测点与振源间的水平距离 (m); $v_{\text{垂直}}$ 为与参考点间水平距离为 r 处测点的垂直振动速度 (cm/s); $v_{\text{水平}}$ 为与参考点间水平距离为 r 处测点的水平径向振动速度 (cm/s); R 为相关系数。

由式 (1) 和式 (2) 可以看出，垂直向振动速度比水平方向衰减快。这一点可以从整个监测过程中各个测点垂直和水平向速度特征得到进一步验证 (见图 3)，在整个监测过程中，1#测点垂直方向振动速度基本上大于水平方向速度；2#测点垂直与水平速度基本相等；3#，4#测点水平方向速度明显大于垂直方向速度。

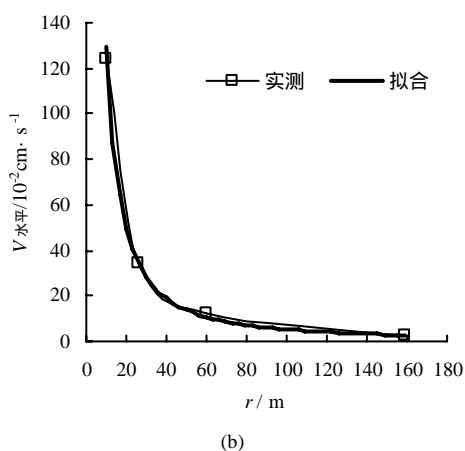
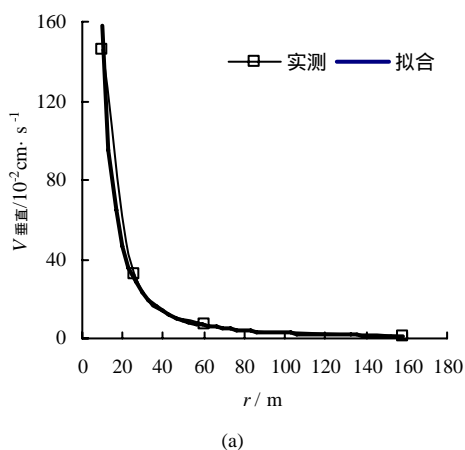


图 6 SZ1 桩桩尖入土深度 $H=8\text{ m}$ 时实测速度衰减曲线与拟合曲线

Fig.6 The simulation curves and the monitoring results

4.3 减振沟的减振效果分析

由于土质与空气的阻抗差异阻隔波的传播路径，在振源与被保护对象间设置减振沟，具有明显的隔振效果^[6,7]。但是对于来自桩尖的振动，由于振源深，常用的在振源附近开挖减振沟的方法不一定有效，而在远离振源，靠近被保护对象附近开挖减振沟，往往有很好的效果。

图 7 反映减振沟两侧测点振动速度随桩的入土深度变化情况，减振沟后的 5#测点垂直和水平速度明显小于减振沟前的 4#测点垂直和水平速度。表 1 为减振沟两侧测点速度比值。设置减振沟后，垂直方向速度的平均值为减振前的 0.58~0.63，速度水平径向分量的平均值为减振前的 0.53~0.85，可见，增设减振沟后，质点的振动速度明显降低。

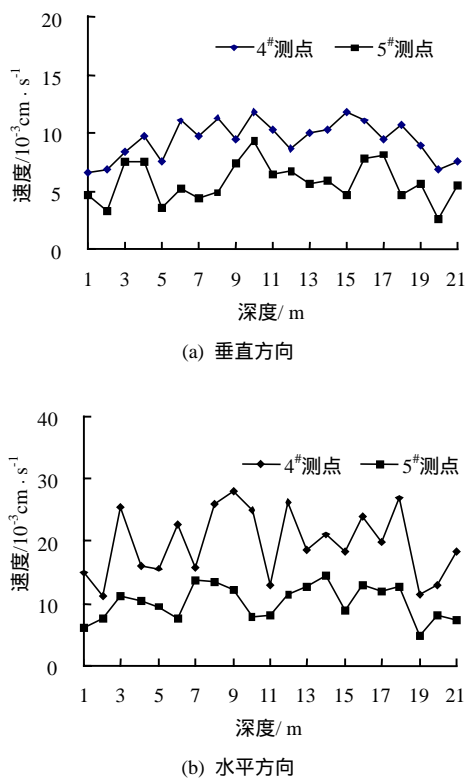


图 7 SZ1 桩施工时减振沟两侧质点振动比较
Fig.7 Comparison of vibration at the different sides of damping ditch

表 1 减振沟两侧速度比较 (V_5/V_4)

Table 1 Comparison of V_5/V_4 at the different sides of damping ditch

M1		M2		SZ1	
垂直	水平径向	垂直	水平径向	垂直	水平径向
0.63	0.85	0.58	0.72	0.62	0.53

5 结 论

分析预制桩施工过程中地面振动特征,可以得到如下初步结论:

(1) 动力打桩过程中,地面质点的振动影响来源于桩尖,振动大小与桩尖以下一定深度土的性质有关,土层强度和刚度越大,导致地面质点的振动速度峰值越大。因此,可以根据静力触探结果合理调整施工参数,将地面振动控制在安全范围。

(2) 桩基施工时地面垂直和水平方向振动速度随测点与振源水平距离的增加由快到慢,其衰减规律可以用负幂函数较好地拟合。

(3) 对于振源较深的振动,在保护对象附近开挖减振沟是一种有效的减振方法。

参 考 文 献

- [1] 许锡昌,徐海滨,陈善雄. 桩基施工振动对环境影响的研究与对策[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 957 - 960.
XU Xi-chang, XU Hai-bin, CHEN Shan-xiong. Research on influence of vibration caused by pile construction on environment and countermeasures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 957 - 960.
- [2] 陈云敏,凌道盛,周承涛. 打桩振动近场波动的数值分析和实测比较[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 178 - 184.
CHEN Yun-min, LING Dao-sheng, ZHOU Cheng-tao. Numerical analysis and test of pile driving vibration[J].

上接第 753 页

目前对在式(6)中非饱和边界上的入渗或蒸逸流量 q_0 的确定还研究得很少,文献[2,4]由此定义了蒸逸系数和极限含水率2个土质材料的非饱和渗流特性参数,从而在理论上提出了非饱和渗流边界的理论与处理方法。但是因受各种条件的限制,有关这2个材料特性参数的试验研究目前还没有进行,因此,在本文的计算中就不得不进行了相应的简化与假定。

参 考 文 献

- [1] Neuman S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. **Journal of Hydraulic Division, ASCE**, 1973.
- [2] 朱岳明,龚道勇. 三维饱和-非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 67 - 71.
ZHU Yue-ming, GONG Dao-yong. Solution to 3-D unsteady saturated-unsaturated seepage problem and accurate treatment of saturated and unsaturated exit surfaces of seepage[J]. **Advances in Water Science**, 2003, 14(1): 67 - 71.
- [3] M Th van Genuchten. A closed-form equation for the

Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 178 - 184.

- [3] 吴铁生. 打桩振动效应观测及振动安全指标探讨[J]. 高原地振, 2004, 16(1): 40 - 44.
WU Tie-sheng. Discuss on pile driving vibration effects monitoring and vibration limits[J]. **Earthquake Research in Plateau**, 2004, 16(1): 40 - 44.
 - [4] 孙业志,吴爱祥,黎剑华,等. 振动场中散体介质波的传播规律[J]. 矿冶工程, 2001, 21(2): 12 - 15.
SUN Ye-zhi, WU Ai-xiang, LI Jian-hua, et al. Characters of waves propagation in granular media[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2001, 21(2): 12 - 15.
 - [5] 高彦斌,费涵昌. 打桩引起的地面振动的测试与分析[J]. 地下空间,
GAO Yan-bing, FEI Han-chang. Monitoring and analysis of pile driving vibration[J]. **Under Ground Space**, 2004, 24(2): 190 - 193.
 - [6] 方向,高振儒,李的林,等. 降低爆破地振效应的几种方法[J]. 爆破器材, 2003, 32(3): 22 - 26.
FANG Xiang, GAO Zhen-ru, LI De-lin. Several methods of reducing ground vibration effects from blasting[J]. **Explosive Materials**, 2003, 32(3): 22 - 26.
 - [7] 蔡袁强,王大力,徐长节,等. 强夯加固机理及其环境影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 25(增1): 159 - 162.
CAI Yuan-qiang, WANG Da-li, XU Chang-jie, et al. Numerical analysis of dynamic compaction and environmental effect caused by the impacting vibration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 25(Supp.1): 159 - 162.
- predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science, Society of America Journal**, 1980, 44: 39 - 58.
- [4] 朱岳明,张燎军. 渗流场求解的改进排水子结构法[J]. 岩土工程学报, 1997, 18(3): 69 - 76.
ZHU Yue-ming, ZHANG Liao-jun. Solution to seepage field problem with the technique of improved drainage substructure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 18(3): 69 - 76.
 - [5] 张超然. 三峡双线五级船闸高边坡工程的实践及验证[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 22 - 27.
ZHANG Chao-ran. Practice and experimental verification of TGP's permanent shiplock slope[J]. **Engineering Sciences**, 2001, 3(5): 22 - 27.
 - [6] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 三峡船闸关键技术[R]. 武汉: 长江水利委员会, 2004.
 - [7] 郑宏,戴会超,刘德富. 改进的有自由面渗流问题的Bathe算法[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 505 - 512.
ZHENG Hong, DAI Hui-chao, LIU De-fu. Improved Bathe algorithm of unconfined seepage problem[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 505 - 512.