

# 无填料振冲法在液化粉细砂中的应用研究

叶观宝<sup>1,2</sup>, 苕红涛<sup>1,2</sup>, 徐超<sup>1,2</sup>, 邢皓枫<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 结合某电厂工程大面积吹填土的地基处理实践, 从振冲法处理地基的加固机理出发, 根据振动荷载作用下孔隙水压力的增长方式, 由理论公式推导孔压变化的解析式, 并由此得到砂土地基达到临界液化状态所需条件。考虑到孔压解析式为单调波动函数, 求解困难, 故在计算过程中将其分解为单调函数及波动函数两部分, 利用图解法求解, 得到一定条件下砂土地基临界液化时间的精确值。根据文献中最优密度的概念, 经分析认为临界液化时间即为砂土达到最优密度所需的时间, 据此可对振冲法施工中的留振时间进行优化设计。对振冲法的预振效应进行了分析, 认为预振效应的机理是经过振动处理后, 砂土地基的微观结构得到了优化。最后结合工程实例, 探讨了无填料振冲法处理液化粉细砂地基的适宜性及处理效果。

**关键词:** 地基处理; 无填料振冲法; 临界液化时间; 预振效应

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)06-0917-05

**作者简介:** 叶观宝(1964-), 男, 安徽歙县人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理与托换技术研究。E-mail: cht1978@gmail.com。

## Application of vibroflotation without backfill in liquefiable silty and fine sand

YE Guan-bao<sup>1,2</sup>, CHANG Hong-tao<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>1,2</sup>, XING Hao-feng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The application of vibroflotation without backfill in the improvement of liquefiable silty and fine sand at a power plant ground treatment is presented. On the basis of vibroflotation strengthening principle and the rising mode of vibration pore water pressure, the analytic solution of pore water pressure is deduced from the theoretical formula, and the sand critical liquefaction condition is presented. In view of the monotonic fluctuation function, the analytic solution is detached as monotonic function and fluctuation function and solved by the graphical method to get the exact solutions of sand critical liquefaction time. The paper takes the critical liquefaction time as the time to get the best density of sand and then optimization design for the vibroflotation load time can be made on the basis of the critical liquefaction time. The underlying mechanism of pre-vibration effect is also discussed, which is thought to be useful to improve the microstructure of sand. Finally, the suitability and effectiveness of vibroflotation without backfill on silty and fine sand are discussed.

**Key words:** ground treatment; vibroflotation without backfill; critical liquefaction time; pre-vibration effect

## 0 引言

振冲法是振动水冲法(Vibrofloatation)的简称, 是通过对土体的挤密、置换、排水和预振等效应, 达到提高地基土剪切模量和承载力、降低场地液化势的目的。由于技术和经济上的优越性, 振冲法适用于处理砂土、粉土、粉质黏土、素填土和杂填土等地基, 尤其适用于处理各类可液化土的加密和抗液化处理。与有填料振冲法相比, 不加填料的振冲法具有省工、省料等优点。不过一般认为, 无填料振冲法仅适用于处理黏粒含量低于 10% 的松散中、粗砂地基<sup>[1-2]</sup>。由于粉细砂在宏观力学特性和微观颗粒结构方面都和中粗砂

有所不同, 不能简单套用加固中粗砂地基的经验。周健等通过室内模型试验及现场试验认为, 对于黏粒含量少于 5% 的饱和松散粉细砂, 采用无填料振冲法加固是可行的<sup>[3-4]</sup>, 并通过工程实践论证了其加固浅层吹填粉细砂及下卧软黏土层双层地基的适宜性<sup>[5]</sup>。牟宏彬等相关实际工程经验, 介绍了无填料振冲法加固粉细砂地基的成功案例<sup>[6]</sup>。

本文从无填料振冲法加固机理出发, 对砂土地基

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B308)

收稿日期: 2008-07-02

的临界液化时间进行了推导和求解，并结合某近海电厂试验区地基处理工程，对无填料振冲法处理液化粉细砂地基的适用性及处理结果进行了探讨。

### 1 无填料振冲法加固机理

#### 1.1 加固效应分析

无填料振冲法处理液化粉细砂地基，主要有振密效应、挤密效应及预振效应。振冲器凭借高频振动以及高压水流的冲切作用，慢慢贯入地基并沉入孔底。周围土体得到了初步的挤密，并产生了较高的超孔隙水压力。振冲器沉至孔底，进行孔底留振、振动上拔并分段留振。振密使得饱和粉细砂在动剪应力作用下孔隙体积减小，通常认为孔隙水是不可压缩的，饱和砂体积减小要求有相应体积的水从孔隙中排出。从孔隙中排出的水量取决于砂的渗透系数、渗透路径以及排水时间。一般的留振时间约持续几十秒，而粉细砂的渗透系数在  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm/s。在这样的条件下，饱和砂的孔隙水不能及时排出，引起孔隙水压力升高，有效应力降低。随着孔隙水压力不断升高，土体的抗剪强度不断降低，当孔隙水压力升高到上覆压力时，饱和砂的抗剪强度完全丧失，形成液化。随着时间的增长，超孔隙水压力消散，土体结构逐渐恢复并得到强化，土颗粒趋于更密实的状态，地基土强度得到提高。

#### 1.2 振动荷载作用下孔压增长解析

根据多孔介质渗流理论及土动力学原理，在振动荷载作用下，砂土层中孔隙水压力的增长可用理论模型来描述<sup>[7]</sup>。假设砂土层：均质各向同性，压缩系数为常数，地下水渗透符合达西定律。由此假定条件，可推导超孔隙水压积累的微积分方程和定解条件：

$$\left. \begin{aligned} c_v \frac{\partial^2 u_t}{\partial z^2} &= \frac{\partial u_t}{\partial t} - (\gamma_p H_p + \gamma_0 z) A \omega \cos \omega t, \\ u_{t=0} &= 0, \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H_p} = 0, u_{t=0} = u_0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $c_v$  为竖向固结系数， $c_v = k_v / \gamma_w m_v$ ， $\gamma_w$  为水的重度， $m_v$  为体积压缩系数， $m_v = a(1+e)$ ， $a$  为压缩系数， $e$  为孔隙比； $\gamma_p$  为上覆土重度，地下水位以下取浮重度； $H_p$  为上覆土层厚度； $\gamma_0$  为砂土层重度； $z$  为砂土层某一深度； $\omega$  为振动源频率； $A$  为地面加速度峰值。

用分离变量法求得式(1)通解为

$$u_t(z,t) = (C_1 \cos \lambda z + C_2 \sin \lambda z) e^{-\lambda^2 c_v t} + (\gamma_p H_p + \gamma_0 z) A \sin \omega t + C_3, \quad (2)$$

式中， $\lambda$  为与埋深有关的系数，应用边界条件， $z=0$  时， $\lambda = \beta / H_p$ ， $\beta$  为待定系数，与震区液化界限条件有关； $C_1, C_2, C_3$  为任意常数项。此时特解为

$$\begin{aligned} u_t &= \gamma_p H_p \left\{ g \left[ 1 - \exp(-\beta^2 c_v t / H_p) \right] + A \sin \omega t \right\} \\ &= \gamma_p H_p g \left[ 1 - \exp(-\lambda^2 c_v t) \right] + \gamma_p H_p A \sin \omega t, \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $g$  为重力加速度。由式(3)看出，振动产生的超孔隙水压力是波动上升的，由两部分组成：①平均振动孔隙水压力，即指数函数项，为单调递增函数；②振动孔隙水压力幅值，即正弦函数项，为波动函数。两部分综合在一起，就形成了孔隙水压力整体呈波动上升的增长形式。由式(3)可知，若不考虑正弦函数项，则只有在  $t \rightarrow \infty$  时，超孔隙水压力才能上升至上覆土层有效应力，达到液化，即只有当振动无限持续时，土层才能发生液化。若加上正弦函数项，振动时间则不需要无限持续，而是在振动一段时间后，超孔隙水压力呈波动形式达到上覆有效压力。

#### 1.3 临界液化时间

由砂土液化机理可知，当  $u_t = \gamma_p H_p g$  时砂土层达到液化状态。由此得砂土层达到临界液化状态的条件：

$$\left. \begin{aligned} e^{-\lambda^2 c_v t} &= A / g \sin \omega t, \\ t &= e^{-\lambda^2 c_v t}, \\ t &= A / g \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)中等式两端分别转换为  $t = f(t)$  的函数形式，如式(5)，并将其图形绘于同一坐标系中(图1)。由式(4)可知，当两条函数曲线相交时，砂土层达到临界液化状态。具体的临界液化时间可根据图解法，编程求得。

由式(5)及图1可知，砂土层达到临界液化状态所需的时间，并不一定是正弦函数  $\sin \omega t$  为极大值的时间<sup>[7-8]</sup>，而是随着各个参数的不同，两条函数曲线相交于不同的时间刻度处。详细分析如下：砂土层的固结系数  $c_v$  越大，砂土达到临界液化状态所需的时间越短，反之则越长。所以在利用振冲法处理松散饱和砂土地基时，留振时间应根据具体地层来确定，固结系数大的地层，留振时间相应缩短；固结系数小的地层，留振时间相应延长。砂土层的埋深  $H_p$  越大，其达到临界液化状态所需时间越长，反之则越短。故在工程中必须保证足够的留振时间，在埋深较浅处可以较快

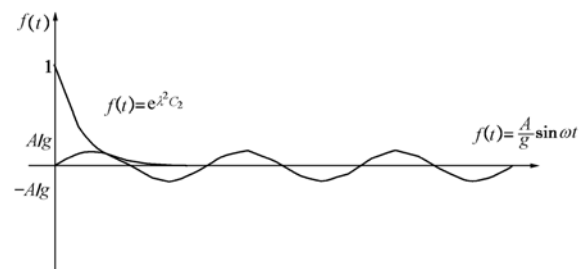


图1 砂土临界液化条件图

Fig. 1 Critical liquefaction condition for sand

速度施工, 在较深的地方放慢施工速度, 以保证工程质量。对于一定埋深的砂土层, 地面加速度峰值  $A$  越大, 其达到临界液化状态所需时间越短, 反之则越长。振冲器的振动频率  $\omega$  值对砂土层达到临界液化状态的时间也有影响, 由于其是以正弦波的形式传播, 影响比较复杂, 影响结果需要根据实际情况来定。

周健等<sup>[3]</sup>认为, 对于人工吹填的松砂, 在一定的振动频率和功率下进行振冲加固时, 存在一个最优密度, 砂土密度在达到这个最优密度后, 就在这个平衡位置摇摆, 再继续振动下去对于提高砂土的密度意义已经不大。从式(3)及图1中可以看出, 当埋深一定时, 随着振动的持续, 平均振动孔隙水压力(指数函数项)不断上升并逐渐趋于稳定, 振动孔隙水压力幅值(正弦函数项)则始终呈波动形式变化。当某一深度范围内的砂层达到临界液化状态时, 超孔隙水压力则围绕某一个压力值上下波动, 不再有明显上升, 此时继续振动对此深度处砂土层的影响已经不大。笔者认为, 这个时间即为砂土密度达到最优密度的时间, 称为临界液化时间; 超孔隙水压力消散后, 砂土颗粒重新排列, 此时砂土密度即为最优密度。针对目前国内外进行振冲法施工时, 留振时间完全根据经验所定的现象, 由此结论, 可把砂土的临界液化时间作为振冲法留振时间的设计依据, 从而优化设计与施工。

#### 1.4 预振效应分析

Seed<sup>[9]</sup>等在试验中发现, 在一定的应力循环次数下, 当两试样的相对密度相同时, 经过振动处理的土体, 其抗液化剪应力要比未经过预振的试样大 46%; 相对密度为 54% 的经振动处理的试样, 其抗液化能力与相对密度为 80% 的未经振动处理的试样相当。这说明土体的抗液化能力与其应力历史有关, 存在预振效应。周健<sup>[3]</sup>等在室内试验中发现, 经过预振, 砂土相对密度稳定后, 继续对其振动, 其静力触探值还能有较大的增长, 这也就是 Seed 试验中相对密度相同而抗液化剪应力不同的原因, 并且也说明了预振效应的存在。汪闻韶<sup>[10-11]</sup>根据三轴试样在振动前排水固结和振动后排水固结测得的压缩系数相等的试验事实, 认为不排水条件下孔隙水压力的变化是振动作用下由于颗粒的重新排列导致无黏性土的压缩曲线平移的结果。刘洋等<sup>[12]</sup>利用颗粒流软件进行了循环荷载下松砂变

形的细观数值模拟, 其研究表明宏观的液化对应于细观组构上配位数的连续累计丧失和粒间接触力的不断减小, 根本原因在于循环荷载往返过程中, 组构各向异性与应力各向异性发展的不匹配。综合以上结论, 笔者认为: 预振效应表明了振冲法加固砂土地基不仅限于振密、挤密效应, 而且土体颗粒的排列结构发生改变, 使得砂土地基的承载力及抗液化能力均得到提高。从这种意义上来说, 经振冲法处理后的土体已经成为另外一种砂土, 不仅孔隙率降低、干密度和内摩擦角增大, 有可能其最大孔隙比  $e_{\max}$  及最小孔隙比  $e_{\min}$  均发生了变化, 故在相对密度稳定后, 其静力触探值仍能随振动的持续而继续增长。

振动停止后, 随着超孔隙水压力逐渐消散, 土体再次固结, 砂土颗粒重新排列而趋向密实状态, 地基土物理力学性能得到改善。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

拟建场地为海堤外滩涂, 围滩造地建厂。场地地形比较平缓, 整个滩地向海倾斜。场地上部地层分布及其基本物理性质详见表 1。场区地震基本烈度为 7 度, 地下水稳定水位在地表下 0.5 m, 根据规范<sup>[13]</sup>判定, 场地第一层吹填粉细砂在 7 度抗震设防烈度下为可液化土层, 液化等级为中等—严重, 综合考虑可按严重液化采取地基抗液化措施。方案论证后, 拟采用振冲法进行地基处理, 处理深度不小于 7 m。

### 2.2 试验方案

施工采用的振冲器型号为 ZCQ-30, 功率为 30 kW, 转速 1450 r/min, 振幅 4.2 mm, 额定电流 60 A, 外形尺寸  $\phi 351 \times 2150$  mm, 双点强迫式振冲施工。

场地第一层吹填粉细砂天然重度  $\gamma_p = 18.2$  kN/m<sup>3</sup>, 固结系数  $c_v = 2.67 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, 地面加速度峰值  $A = 0.1g = 0.98$  m/s<sup>2</sup>, 重力加速度  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>, 振冲器振动时频率为振动源频率  $\omega = 24$  Hz,  $\beta = 91.2$ 。由场地工程地质资料可知, 液化砂层为第一层吹填粉细砂, 故仅给出砂层深度范围内计算所得的临界液化时间。根据以上参数, 不同深度处液化粉砂层达到临界液化状态所需的时间结果见表 2。由表 2 可知, 随着粉砂层

表 1 地基土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties for soil

土层名称	平均厚度 /m	不同颗粒所占比例/%					天然含水率 /%	天然重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
		>0.25 mm	>0.075 mm	>0.05 mm	>0.005 mm	<0.005 mm		
④ <sub>1</sub> 粉砂	4.0	0.5	24.6	27.8	41.3	5.8	27.9	18.2
① <sub>1</sub> 粉细砂	4.5	0.7	70.6	14.8	11.8	2.2	28.6	19.2
① <sub>2</sub> 粉砂	4.8	0.1	33.8	20.5	39.2	6.4	30.0	19.1

埋深的增加, 临界液化时间不断增长。这与上文由理论模型推导所得的结论以及周健等<sup>[3]</sup>通过室内试验得到的结论相一致。在本工程中, 实际留振时间随深度不同而不同: 0.5 m, 留振时间 5 s; 1.0~1.5 m, 留振时间 15 s; 2.0~2.5 m, 留振时间 25 s; 3.0~4.0 m, 留振时间 35 s。由下文的加固效果检测结果可知, 不同的留振时间虽然减少了总的留振时间, 但加固效果仍然良好。

表 2 粉砂层临界液化时间一览表

Table 2 Critical liquefaction time for silty sand

$H_p/m$	$\lambda$	$t/s$
0.5	182.4	4.453
1.0	91.2	9.166
1.5	60.8	13.878
2.0	45.6	18.590
2.5	36.5	23.565
3.0	30.4	28.277
3.5	26.1	32.989
4.0	22.8	37.702

### 2.3 加固效果检测

#### (1) 标准贯入试验

地基处理前后场地土的标准贯入试验数据如表 3。根据表 3 中地基处理前后标准贯入试验的检测结果表明, 振冲法加固地基的效果比较明显, 尤其是地层上部的吹填粉砂, 标贯击数平均值提高了 2.61 倍。

表 3 标准贯入试验数据一览表

Table 3 Results of standard penetration tests

土层名称	处理前平均值/击	处理后平均值/击	提高倍数
① <sub>1</sub> 粉砂	3.7	11.5	2.6
① <sub>1</sub> 粉细砂	12.4	14.5	1.1
① <sub>2</sub> 粉砂	12.2	24.0	1.5

根据规范<sup>[12]</sup>, 饱和粉土或粉砂液化临界标准贯入击数的公式为

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (6)$$

式中  $N_{cr}$  为液化判别标准贯入锤击数临界值;  $N_0$  为液化判别标准贯入锤击数基准值, 取 6;  $d_s$  为标准贯入点深度 (m);  $d_w$  为地下水位深度 (m), 取 0.5 m;  $\rho_c$  为黏粒含量百分率, 取 3.0。

标贯试验实测击数大于  $N_{cr}$ , 地基土为非液化土, 反之则为液化土。经计算, 本场地  $N_{cr}=6$ 。在振冲法进行地基加固后, 实测标贯击数最低为 8 击, 判别场地土为非液化土, 即已消除了地基液化现象。

#### (2) 静力触探试验检测

在地基处理之前先期进行了一组静力触探试验, 测得了场地地基土的强度初值。为了检测地基处理的效果, 在振冲法施工完成 1 周后, 在前期进行的静力

触探孔旁边进行了另外一组静力触探试验。为了便于对比, 将场地地基土初始强度值及处理后的强度值变化曲线置于同一图中, 见图 2。

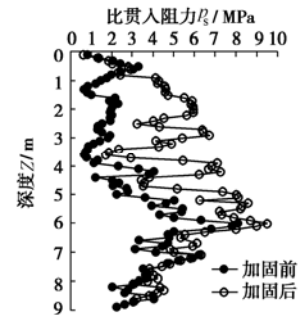


图 2 静力触探试验曲线

Fig. 2 Curves of static penetration tests

从图 2 中曲线可以看出, 经过振冲法地基加固后, 在地基土深度 7 m 范围内, 地基处理效果比较明显。在地基处理前地基土的比贯入阻力平均值为 1.58 MPa, 经过振冲法加固之后, 地基土的比贯入阻力平均值达到了 4.51 MPa, 提高了 1.85 倍。值得一提的是, 经振冲法加固后, 地表以下 0.8 m 深度范围内的  $p_s$  值反而有所降低。这是由于地表附近上覆有效应力较小, 在振动作用下, 土体反而松动。对于这部分松动土体, 进行振动碾压, 处理效果也能达到设计要求。

根据上海市岩土工程勘察规范<sup>[14]</sup>, 利用单桥静力触探来判别液化。锥尖阻力临界值计算如下:

$$p_{scr} = p_{s0} \left[ 1 - 0.06d_s + \frac{d_s - d_w}{a + b(d_s - d_w)} \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (7)$$

式中  $p_{scr}$  为比贯入阻力临界值;  $p_{s0}$  为比贯入阻力基准值, 可取 2.60 MPa;  $d_s$  为静探试验点深度 (m);  $d_w$  为地下水年平均水位深度 (m);  $a$  为系数, 可取 1.0;  $b$  为系数, 可取 0.75;  $\rho_c$  为黏粒含量百分率, 取 3。

利用式 (7), 对本场地处理后的①<sub>1</sub>吹填粉砂层进行加权平均,  $p_{scr}=4.31 < p_s=4.68$ , 判别场地土为非液化土, 即消除了地基液化现象。

### 2.4 加固效果分析

振冲施工结束后, 综合两种现场原位测试的检测结果, 经计算、判断可知, 利用静力触探试验进行液化判别得到的结果与标准贯入试验得到的判别结果是一致的。经过无填料振冲法进行地基处理, 不仅消除了砂土液化现象, 而且地基土强度得到了较大程度提高, 场地的均匀性得到了优化, 振冲加固效果显著。

## 3 结 论

(1) 无填料振冲法用于处理液化粉细砂地基是可行的。经地基处理后, 不仅消除了液化现象, 而且地基土强度及均匀性都得到了较大程度的提高。

(2) 砂土层的固结系数越大,临界液化时间越短;砂土层的埋深越大,临界液化时间越长;地面加速度峰值越大,临界液化时间越短;振冲器的振动频率对砂土层的临界液化时间影响比较复杂,需要根据实际情况来定。

(3) 预震效应的实质是在振冲过程中,使得土体颗粒的排列结构发生改变,优化了土体的结构性,使得其承载力及抗液化能力得到提高。

(4) 砂土层的临界液化时间,即为砂土层达到最优密度所需要的时间。具体的临界液化时间可由图解法求得,并可根据计算结果对振冲法的留振时间进行优化设计与施工。

### 参考文献:

- [1] 叶书麟,叶观宝.地基处理与托换技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.(YE Shu-lin, YE Guan-bao. Ground treatment and underpinning technique[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 林宗元.岩土工程治理手册[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1993.(LIN Zong-yuan. Geotechnical investigation and design[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [3] 周健,胡寅,林晓斌,等.粉细砂的室内无填料振冲试验研究[J].岩土力学,2003,24(5):790-795.(ZHOU Jian, HU Yin, LIN Xiao-bin, JIA Min-cai, et al. Laboratory test of vibroflotation on hydraulic backfilled silty and fine sand without backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 790 - 794. (in Chinese))
- [4] 周健,贾敏才,池永.无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1350-1355.(ZHOU Jian, JIA Min-cai, CHI Yong. Vibroflotation compaction of silty fine sands without additional backfill materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1350 - 1355. (in Chinese))
- [5] 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):1685-1688.(ZHOU Jian, YAO Hao, JIA Min-cai. Research on technology for shallow treatment of large-area soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1685 - 1688. (in Chinese))
- [6] 牟宏彬,章奕峰,杨小宝,等.振冲法在加固粉细砂地基中的应用[J].浙江建筑,2006,23(10):33-35.(MOU Hong-bin, ZHANG Yi-feng, YANG Xiao-bao, et al. The application of vibroflotation on silty and fine sands[J]. Zhejiang Construction, 2006, 23(10): 33 - 35. (in Chinese))
- [7] 刘金韬,金晓媚,武强.地震液化饱和砂土层内部超静孔压理论分析[J].工程勘察,2000(5):6-8.(LIU Jin-tao, JIN Xiao-mei, WU Qiang. Analysis of the ultra-static pore water pressure theory in earthquake liquefaction saturated sands[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000(5): 6 - 8. (in Chinese))
- [8] 缪林昌,刘松玉.振冲动力法加固地基的机理[J].东南大学学报(自然科学版),2001,31(4):71-74.(MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Mechanism of vibro-flotation dynamic method for improving foundation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(4): 71 - 74. (in Chinese))
- [9] MARTIN G H, FINN W D, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Division. American Society of Civil Engineering, 1975, 101(5): 427 - 437.
- [10] 汪闻韶.饱和砂土震动孔隙水压力的产生、扩散和消散[C]//中国土木工程学会第一届土力学及基础工程学术会议论文集.天津:中国工业出版社,1964.(WANG Wen-shao. The generation, diffusion and dissipation of vibration pore water pressure in saturated sands[C]// The Memoir of the First Soil Mechanics and Foundation Engineering Academic Conference of China Civil Engineering Society. Tianjin: China Industry Press, 1964. (in Chinese))
- [11] 汪闻韶.土的液化机理[J].水利学报,1981(5):22-34.(WANG Wen-shao. The liquefaction mechanism of soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981(5): 22 - 34. (in Chinese))
- [12] 刘洋,周健,吴顺川.循环荷载下砂土变形的细观数值模拟 I:松砂试验结果[J].岩土工程学报,2007,29(7):1035-1041.(LIU Yang, ZHOU Jian, WU Shun-chuan. Micro-numerical simulation of cyclic biaxial test I: results of loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1035 - 1041. (in Chinese))
- [13] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001.(GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. 2001. (in Chinese))
- [14] DGJ08—37—2002 上海市岩土工程勘察规范[S]. 2002.(DGJ08—37—2002 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2002. (in Chinese))