

饱和软土单桩沉桩超孔隙水压力分析

朱向荣^{1, 2}, 何耀辉^{1, 2}, 徐崇峰³, 王子伦³

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027;

3. 杭州市城市建设综合开发总公司, 浙江 杭州 310006)

摘要: 通过分析工程桩沉桩过程中的实测资料, 探讨了单桩桩周土体中产生的超孔隙水压力大小、分布规律及影响范围, 得到桩周土中超孔隙水压力的分布随距离呈对数型衰减, 影响范围约为 30 倍桩径。对实测值、理论值进行了比较, 分析结果表明: 从实测拟合直线中求得的塑性区半径代入圆柱孔扩张理论得到的估算值与实测值吻合较好。

关键词: 基础工程; 沉桩; 超孔隙水压力; 柱孔扩张理论; 实测值

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5740 - 05

EXCESS PORE WATER PRESSURE CAUSED BY SINGLE PILE DRIVING IN SATURATED SOFT SOIL

ZHU Xiang-rong^{1, 2}, HE Yao-hui^{1, 2}, XU Chong-feng³, WANG Zi-lun³

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Hangzhou Urban Construction Comprehensive Development Co., Hangzhou 310006, China)

Abstract: By analyzing the measured data during piles driving, distribution rules and range of the excess pore pressure caused in soil around single pile are discussed. Results indicate that the excess pore pressure declines in logarithm function with the distance from the pile, and the influencing range is about 30 times of the pile radius. The comparison between the theoretical results and the measured data shows that the measured results of the excess pore pressure fit better with the computed results by substituting the plastic area radius from fitting line of the measured data into the cylindrical cavity expansion theory.

Key words: foundation engineering; piles driving; excess pore water pressure; cylindrical cavity expansion theory; measured results

1 引言

饱和软土地基中沉桩会产生较高的超孔隙水压力, 过高的超孔隙水压力不仅影响沉入桩的承载力, 还会对周围的建筑物、构筑物、地下管线等产生不利的影响, 甚至会造成严重的后果。为了研究沉桩超孔隙水压力的产生和分布规律, 减少沉桩带来的不利影响, 以指导以后的工程实践, 对一工程进行了现场超孔隙水压力监测。通过对工程现场监测的超孔隙水压力数据进行整理、分析, 得到单桩

沉桩超孔隙水压力的分布规律和影响范围, 并对实测值、理论值进行对比分析。

2 沉桩时超孔隙水压力的理论解

饱和软土中沉桩可看作无限土体内圆柱孔的不排水扩张, 利用弹塑性理论求解平面轴对称问题, 得到扩张后桩周土体的应力、位移分布及弹塑性区的范围^[1~5]。

对于服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的饱和弹性 - 完全塑性材料, 圆柱孔扩张引起的总应力增量为

收稿日期: 2004 - 11 - 12; **修回日期:** 2005 - 04 - 05

作者简介: 朱向荣(1961 -), 男, 1982 年毕业于浙江大学建筑结构工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事软粘土力学与地基处理、桩基工程等方面的教学与研究。E-mail: zhuxr@nit.net.cn。

(1) 塑性区

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_r &= 2C_u \ln(R_p / r) + C_u \\ \Delta\sigma_\theta &= 2C_u \ln(R_p / r) - C_u \\ \Delta\sigma_z &= 2C_u \ln(R_p / r) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 弹性区

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_r &= C_u (R_p / r)^2 \\ \Delta\sigma_\theta &= -C_u (R_p / r)^2 \\ \Delta\sigma_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\Delta\sigma_r$ ， $\Delta\sigma_\theta$ ， $\Delta\sigma_z$ 分别为径向、切向和竖向的应力增量； r 为离开桩中心的距离； R_p 为塑性区半径； C_u 为土的不排水抗剪强度。

孔隙水压力增量可根据 Henkel 公式^[5, 6]计算

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \beta \Delta\sigma_{\text{OCT}} + \alpha_f \Delta\tau_{\text{OCT}} \\ \alpha_f &= 0.707(3A_f - 1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $\Delta\sigma_{\text{OCT}}$ ， $\Delta\tau_{\text{OCT}}$ 分别为八面体正应力增量和剪应力增量； β ， α_f 均为 Henkel 孔隙水压力参数，在饱和土中取 $\beta = 1$ ； A_f 为 Skempton 孔隙水压力参数。

将式(1)，(2)代入式(3)后，可得到桩周土中超孔隙水压力计算公式，即

(1) 塑性区

$$\frac{\Delta u}{C_u} = 2 \ln(R_p / r) + 1.73A_f - 0.58 \quad (4)$$

(2) 弹性区

$$\frac{\Delta u}{C_u} = 0.578(3A_f - 1) \ln(R_p / r) \quad (5)$$

(3) 桩身表面

$$\frac{\Delta u_{\text{max}}}{C_u} = \ln\left[\frac{E}{2(1+\mu)C_u}\right] + 1.73A_f - 0.58 \quad (6)$$

(4) 塑性区半径

$$\frac{R_p}{r} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)C_u}} \quad (7)$$

式中： E 为土的弹性模量， μ 为土的泊松比， r_0 为桩半径。

3 工程概况

场地位于杭州市笕桥镇，工程地质概况见表 1。地面高程 5~6 m，地下水位埋深 0.5 m 左右。本工程拟建建筑物有 10 多幢，本次取其中 10#楼作为试验场地。该幢楼为 6 层住宅，基础采用 $\phi 400$ mm 的预应力管桩，桩长 22.0 m，桩数 155 根。

为了对沉桩工程的孔隙水压力进行监测，在桩群内外不同位置和深度共埋设 26 个变磁阻调频式孔隙水压力计。各测点埋设位置、深度如图 1 所示。

4 实测结果与分析

4.1 桩周土中超孔隙水压力的分布及影响范围

为了分析单桩沉桩引起的超孔隙水压力分布及其影响范围，本文采用 2 种方法：(1) 某桩施工时，测得不同距离处同一埋置深度的各个孔隙水压力计的孔隙水压力增量，看成是单桩沉桩时距桩轴不同距离引起的超孔隙水压力；(2) 把距某一孔隙水压力计不同距离处沉桩时在孔隙水压力计上测得的孔隙水压力增量，看成是单桩沉桩时距桩轴不同距离引起的超孔隙水压力^[5]。本文根据埋设在③₁，③₂ 土层中的部分孔隙水压力计测得的孔隙水压力增量值，整理出 4 组孔隙水压力增量 Δu 与沉桩距离 r 的关系。实测结果经过归一化处理以半对数坐标系表达，如图 2 所示。图中 r_0 为桩半径， $\rho = r / r_0$ ； σ'_{v0} 为测点处土的上覆有效应力； n 为不同距离相同埋深的各个测点。从图 2 可看出，沉桩引起的超孔隙水压力随着离桩距离的增大而减小，并与距离的对数成线性关系。延长直线交于纵轴可推算出桩土界面处的超孔隙水压力；延长直线交于横轴可以得到沉桩产生的超孔隙水压力的影响范围。各个结果见表 2。

表 1 实测场地工程地质概况

Table 1 Engineering geological properties of subsoil at testing site

| 土层序号 | 土名 | 天然含水量 w/% | 天然重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 孔隙比 e | 塑性指数 I_p | 液性指数 I_L | 内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$ | 粘聚力 c / kPa | 不排水抗剪强度 C_u / kPa | 压缩系数 $a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$ |
|----------------|------------|--------------|--|------------|---------------|---------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| ① ₁ | 杂填土 | | (17.0) | | | | (18.0) | (8.0) | | |
| ② ₁ | 粘质粉土 | 31.6 | 19.0 | 0.874 | | | 30.4 | 7.6 | | 0.24 |
| ② ₃ | 砂质粉土 | 27.4 | 19.5 | 0.753 | | | 32.0 | 8.1 | | 0.12 |
| ② ₄ | 砂质粉土夹粉砂 | 24.7 | 19.8 | 0.691 | | | 32.7 | 7.3 | | 0.10 |
| ③ ₁ | 淤泥质粉质粘土夹粉土 | 39.8 | 18.0 | 1.104 | 12.6 | 1.72 | 16.2 | 9.8 | 16.1 | 0.70 |
| ③ ₂ | 淤泥质粉质粘土 | 38.6 | 18.1 | 1.081 | 12.9 | 1.61 | 16.1 | 10.6 | 19.6 | 0.68 |
| ⑥ ₁ | 粘土 | 37.2 | 18.7 | 0.984 | 24.2 | 0.51 | 14.5 | 33.6 | | 0.29 |
| ⑥ ₂ | 粘土 | 32.0 | 19.3 | 0.871 | 22.8 | 0.33 | 15.4 | 45.2 | | 0.23 |
| ⑥ ₃ | 粘土 | 31.9 | 19.2 | 0.882 | 22.3 | 0.39 | 15.8 | 30.2 | | 0.23 |

注：表中括号内数值为经验值。

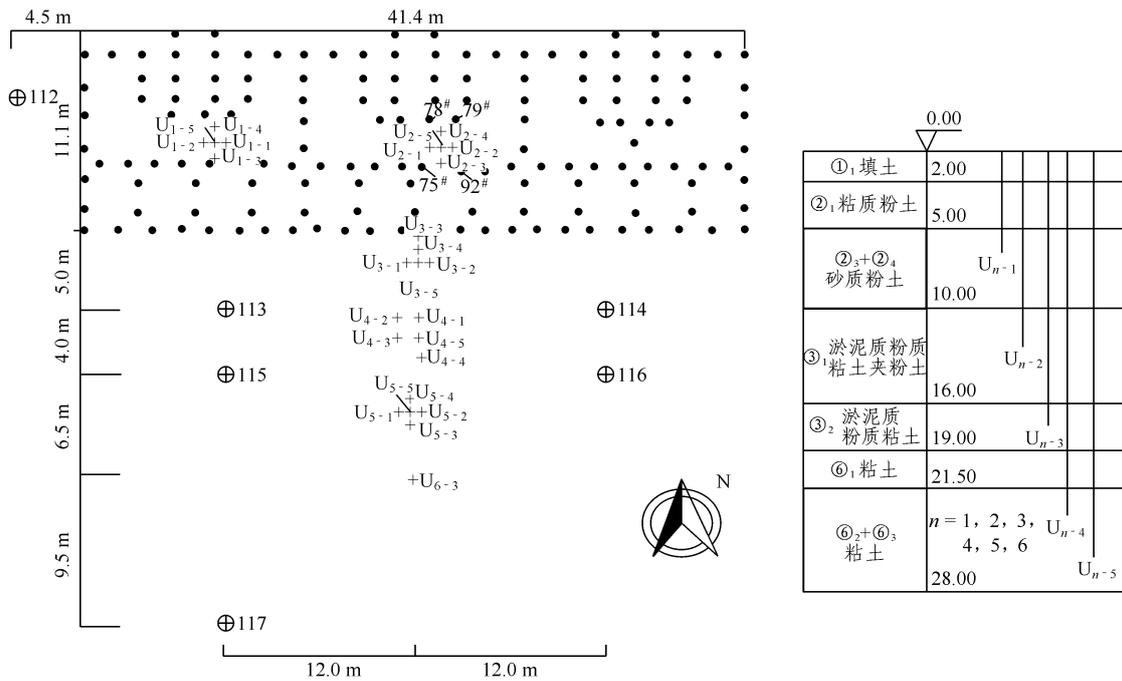


图1 测压计位置、埋深及对应土层图

Fig.1 Location and embedment depth of piezometers and corresponding soil profile

表2 桩周超孔隙水压力的分布及影响范围

Table 2 Distribution and range of influence of excess pore pressure around a pile

| 测点 | 埋深 /m | 上覆有效应力 σ'_{v0} /kPa | 直线回归方程 | 相关系数 | 桩土界面处的超孔隙水压力推算值 u_{ps} /kPa | 最大影响半径推算值 R_{max} /m | 孔隙水压力增量 >5 kPa 的影响半径 R /m |
|-----------|-------|----------------------------|--|------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| U_{n-2} | 12.5 | 109.8 | $\Delta u / \sigma'_{v0} = 0.47 - 0.30 \lg(r/r_0)$ | 0.91 | 51 | 7.62(38.1 r_0) | 5.34(26.7 r_0) |
| U_{n-3} | 17.5 | 150.8 | $\Delta u / \sigma'_{v0} = 0.59 - 0.36 \lg(r/r_0)$ | 0.94 | 90 | 8.85(44.3 r_0) | 7.16(35.8 r_0) |
| U_{2-2} | 12.5 | 109.8 | $\Delta u / \sigma'_{v0} = 0.39 - 0.25 \lg(r/r_0)$ | 0.89 | 43 | 7.26(36.3 r_0) | 4.79(24.0 r_0) |
| U_{2-3} | 17.5 | 150.8 | $\Delta u / \sigma'_{v0} = 0.43 - 0.27 \lg(r/r_0)$ | 0.71 | 65 | 8.18(40.9 r_0) | 6.16(30.8 r_0) |

注：有两列“()”内为影响半径与桩半径 r_0 的关系。

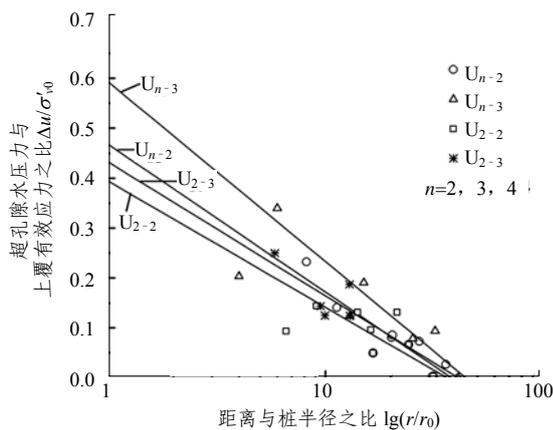


图2 桩周超孔隙水压力的分布

Fig.2 Distribution of excess pore water pressure around a pile

从表2可以看出，土质相差不大时，离沉桩相同距离点产生的超孔隙水压力随测点埋深的增加而增大较多；最大影响半径随土层埋深的增加而增大，

但增大不多。比较 U_{n-2} 与 U_{n-3} 两点的资料，桩土界面处超孔隙水压力推算值前者是后者的 57%，最大影响半径推算值前者是后者的 86%。

从图2可以看出，超孔隙水压力随离开桩距离的增大衰减很快。如对于地表下 12.5 m 处，离桩轴 5 m 左右以外，沉桩时产生的超孔隙水压力已小于 5 kPa，而对于实际工程问题，小于 5kPa 的超孔隙水压力增量可以忽略不计。据此，单桩沉桩引起的超孔隙水压力的影响半径约为 $30r_0$ ^[7]，即 $r/r_0 > 30$ 时，产生的超孔隙水压力可忽略不计。

从图2中2种不同分析方法得到的回归直线中还可以看出，方法(1)得到的离桩轴不同距离处超孔隙水压力比方法(2)得到的要大，超孔隙水压力最大影响半径也略大。其中原因可能为：方法(1)是把某桩沉入时测得的不同距离处同一埋置深度的各个孔隙水压力计的水压力增量，看成是单桩沉桩时引起

的超孔隙水压力, 先沉入桩对测点附近的土体扰动较少, 产生的竖直向及水平向裂缝均较少, 后沉入桩产生的超孔隙水压力不利消散; 而方法(2)是对同一孔隙水压力计不同距离处沉桩产生的孔压增量作为该单桩产生的超孔隙水压力, 由于在孔压计附近沉桩较多, 土体扰动较大, 先沉入桩使桩周土体产生较多的竖直向及水平向裂缝, 使后沉入桩产生的超孔隙水压力消散较快。

4.2 实测值、理论值的比较

按照表 1 中的土体参数, 正常固结土取为 $A_f = 0.85$, 不排水条件下取 $\mu = 0.5$, 根据上海软土室内试验结果及本场地室内试验结果, U_{n-2} 位置处淤泥质粉质粘土夹粉土的刚度比 $E/C_u \approx 90$, U_{n-3} 位置处淤泥质粉质粘土的刚度比 $E/C_u \approx 100$, 代入式(6)后可得到 2 个测点深度处对应的桩身表面 Δu_{max} 分别为 69.1 和 86.2 kPa。代入式(7)后可得到 U_{n-2} 塑性区半径 $R_p = 5.48 r_0$, 即 1.10 m; U_{n-3} 塑性区半径 $R_p = 5.77 r_0$, 即 1.15 m。由于沉桩过程中桩对土体剪切和振动产生的影响, R_p 实际值比理论值要大^[8~10]。根据式(4), (5), 在弹塑性区边界面上应有 $\Delta u = C_u(1.73A_f - 0.58)$ 。根据此式, 可以从图 2 中 U_{n-2} , U_{n-3} 拟合直线上求得塑性区半径 R_p 分别为 2.77, 4.22 m, 相当于 $13.9 r_0$, $21.1 r_0$ 。这与上面求得的理论值有较大差别, 埋深越深差别越明显。

图 3 分别是 U_{n-2} , U_{n-3} 测得的超孔隙水压力增量 Δu 与沉桩距离 r 的关系曲线。按式(4), (5)得到的结果, 将实测值与理论估算值进行比较, 二者的曲线形态并不很吻合, 在靠近桩身处, 实测结果与理论估算值比较接近, 差别不大, 离开桩身不远距离处, 实测值开始比理论估算值要大, 在距离 2 m 左右(即大于理论塑性区半径不远距离)处二者差别最明显。将从图 2 中 U_{n-2} , U_{n-3} 拟合直线上求得塑性区半径 $R_p(2.77 \text{ m}, 4.22 \text{ m})$, 代入式(4)和(5)中, 将得到的实测、理论综合值与实测结果进行比较, 二者的曲线形态基本吻合, 但在靠近桩身的塑性区中, 二组的实测值均比实测、理论综合值要小。将理论塑性区半径、图 2 拟合直线上求得的塑性区半径分别代入式(6), 可得 $r = r_0$ 桩土界面处的超孔隙水压力增量 Δu_{max} , $\Delta u'_{max}$ (见表 3)。再将理论估算值、实测理论综合值与表 2 中的实测结果推导值进行比较(见表 3), 可以看出, 在桩土界面处超孔隙水压力增量的实测结果推导值与理论估算值差别不太大, 而与实测、理论综合值比较, 则是其值的 52%~66%。

表 3 桩土界面处超孔隙水压力的比较
Table 3 Comparison of excess water pore pressure at interface of pile and soil

| 测点 | C_u | u_{ps} | 理论值 | 结合值 | u_{ps}/u_{max} | u_{ps}/u'_{max} |
|-----------|-------|----------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| | /kPa | /kPa | u_{max} /kPa | u'_{max} /kPa | /% | /% |
| U_{n-2} | 16.1 | 51 | 69 | 99 | 74 | 52 |
| U_{n-3} | 19.6 | 90 | 86 | 137 | 105 | 66 |

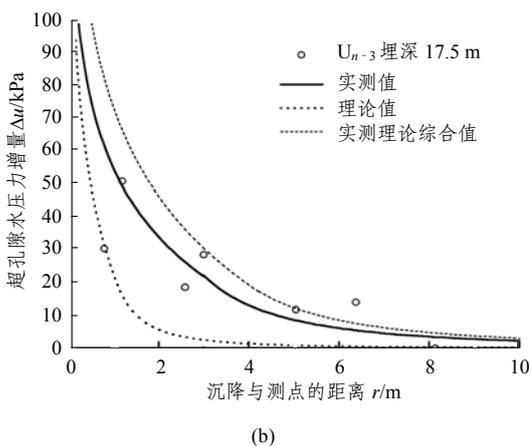
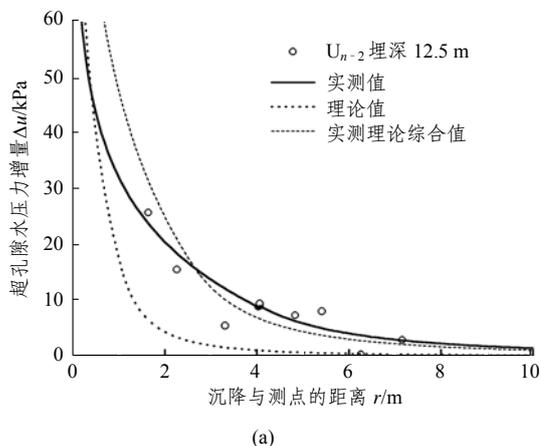


图 3 实测值、理论值的比较
Fig.3 Comparison between measured results and theoretical results

5 结 语

- (1) 采用 2 种不同方法分析单桩沉桩引起的超孔隙水压力分布规律及影响范围得到的超孔隙水压力的影响范围基本相同, 但方法(1)得到的桩土界面处及桩周土中的超孔隙水压力比方法(2)得到的要大;
- (2) 桩周土中超孔隙水压力随距离的分布呈对数型衰减。这一分布规律与采用理论塑性区半径代入的圆柱孔扩张理论估算结果并不大吻合, 而与从实测拟合直线中求得的塑性区半径代入圆柱孔扩张理论得到的估算结果吻合较好, 但在靠近桩身处,

后者估算得到的值要大于实测值，二者之比为52%~66%；

(3) 桩土界面处及桩周土中的超孔隙水压力值与土的上覆有效应力有关，随着埋深增加而增大；

(4) 桩周土中超孔隙水压力的影响范围约为 $30r_0$ 。

参考文献(References):

- [1] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. ASCE-JSMFD, 1972, 98(3): 265 - 290.
- [2] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.(Gong Xiaonan. Plastic Mechanics of Soil[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1999.(in Chinese))
- [3] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.(Hu Zhongxiong. Soil Mechanics and Environmental Soil Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.(in Chinese))
- [4] 王育兴, 孙 钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153 - 158.(Wang Yuxing, Sun Jun. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153 - 158.(in Chinese))
- [5] 唐世栋, 何连生, 傅 纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725 - 732.(Tang Shidong, He Liansheng, Fu Zong. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725 - 732.(in Chinese))
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Qian Jiahuan, Yin Zongze. Principles and Computing Methods in Civil Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [7] Hwang J H, Liang N, Chen C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939 - 949.
- [8] 许清侠. 沉桩的挤土效应对周边环境的影响[硕士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 1998.(Xu Qingxia. Effect of pile driving to environment[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 1998.(in Chinese))
- [9] 姚笑青, 胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 30 - 34.(Yao Xiaoqing, Hu Zhongxiong. Estimating method for excess pore-water pressure developed during pile driving[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4): 30 - 34.(in Chinese))
- [10] 徐永福, 傅德明. 结构性软土中打桩引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 53 - 55.(Xu Yongfu, Fu Deming. Excess pore pressure induced in piling in saturated structural soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 53 - 55.(in Chinese))