第26卷第6期 同济大学学报 Vol.26 No.6
1998年12月 JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY Dec. 1998

软土地区钻孔灌注桩承载力的可靠度研究*

张鹏飞 高大钊

(同济大学道路与交通工程系,上海,200092) (同济大学地下建筑与工程系,上海,200092)

摘要 在充分研究钻孔灌注桩桩径变异和上部结构活载、恒载变化对承载力影响的基础上,建立钻孔灌注桩极限承载力非线性状态方程,用改进一次二阶矩法进行可靠度分析和分项系数研究,比较了总安全系数与分项系数两种桩基设计方法的优劣.收集了上海及沿海软土地区48根钻孔灌注桩资料并进行电算,分析研究了可靠性指标与各主要参数的关系.

关键词 可靠度;分项系数;总安全系数;非线性状态方程
分类号 TU 47

1 钻孔灌注桩承载力估算公式的可靠度分析

近似概率设计方法在我国土木工程界已进入了实用阶段,可靠性指数、分项系数也开始运用于上部结构设计中,预制桩计算分析也采用可靠性指标作为桩基可靠度的度量,而灌注桩由于影响参数多,受施工变异性影响大,往往更需要估算其可靠度,以检测和鉴定桩的质量.本文用改进一次二阶矩法[1]进行可靠度分析和分项系数研究,必须先建立钻孔灌注桩极限承载力非线性状态方程.

估算和预测桩的承载力方法有多种,当前工程界较多采用静力触探法估算钻孔灌注桩承载力,因此本文根据此法来进行可靠度分析.根据文献[2]静力触探 P_s 估算钻孔灌注桩承载力公式如下:

$$Q_u = \sum_{i=1}^{n} f_{si} L_i \pi D a_i + a_b P_{s_b} A_b \tag{1}$$

侧摩阻力估算公式为

粘性土

$$f_s = 0.035 P_s \qquad 0 < P_s \leqslant 1\,000\ \text{kPa} \tag{2}$$

$$f_s = 0.013\,75 P_s + 21.25 \qquad 1\,000 < P_s \leqslant 5\,000\ \text{kPa} \tag{3}$$

$$f_s = 90 \qquad P_s > 5\,000\ \text{kPa} \tag{4}$$

粉、细、中砂及粘、砂质粉土

$$f_s = 0.022\,5 P_s \qquad 0 < P_s \leqslant 2\,000\ \text{kPa} \tag{5}$$

$$f_s = 0.034\,6 P_s + 38.08 \qquad 2\,000 < P_s \leqslant 15\,000\ \text{kPa} \tag{6}$$

$$f_s = 90 \qquad P_s > 15\,000\ \text{kPa} \tag{7}$$

式(1)~(6)中:D 为设计桩径,m;l_i 为第 i 层中桩长,m;P_{sb}为桩端上 $4D$ 范围内和桩端下 $1D$ 范围内 P_s 值的平均值,kPa;A_b 为桩端截面积,m^2;f_{si} 为第 i 层土中桩侧的摩阻力;α_b 为桩端阻力的修正系数.

令式(2)~(7)由下式表示为

$$f_s = AP_s + B \tag{8}$$

式中:A,B 为根据不同类型土 P_s 的范围确定的系数.将式(8)代入式(1),得

$$Q_u = \sum_{i=1}^{n} (AP_{si}) \pi D a_i L_i + \alpha_b P_{sb} A_b \tag{9}$$

考虑上部结构荷载后桩极限状态方程为

收稿日期:1997-09-01 第一作者:男,1966年生,博士生
* 上海市地基基础可靠度设计规范研究资助项目

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\pi D\sum_{i=1}^{n}(AP_{si}+B)\pi D\alpha_i L_i+\alpha_b P_{sb}A_b-Q_G-Q_L=0 \tag{10}$$

式中:Q_G 为上部结构传到桩顶的恒载;Q_L 为上部结构传到桩顶的活载.

2　钻孔灌注桩承载力分项系数分析

通常情况下,总安全系数设计表达式可写成

$$Q_G+Q_L\leqslant Q_R/K \tag{11}$$

式中:Q_R 为桩对上部结构极限承载力,用分项系数设计可表达成

$$\gamma_G Q_{GK}+\gamma_L Q_{LK}\leqslant Q_{RK}/\gamma_R \tag{12}$$

式中:Q_{GK}为上部结构传到桩顶的恒载标准值;Q_{LK}为上部结构传到桩顶的活荷载标准值;Q_{RK}为桩对上部结构极限承载力标准值;γ_G 为恒荷载的分项系数;γ_L 为活荷载的分项系数;γ_R 为总抗力的分项系数.

令　$\rho=Q_L/Q_G$,　$\rho Q_G=Q_L$,

由式(11)、(12)可写成　　$Q_G(1+\rho)\leqslant Q_R/K$ (13)

$$Q_{GK}(\gamma_G+\rho\gamma_L)\leqslant Q_{RK}/\gamma_R \tag{14}$$

取 $Q_G=Q_{GK}$,$Q_R=Q_{RK}$,式(13)和式(14)相除得

$$\frac{1+\rho}{\gamma_G+\rho\gamma_L}\leqslant\frac{\gamma_R}{K} \tag{15}$$

令

$$\frac{1+\rho}{\gamma_G+\rho\gamma_L}=\xi \tag{16}$$

则总抗力分项系数 $\gamma_R=K\xi$.为了使给出的分项系数能与荷载规范配套,在进行可靠性分析时,采用上部结构规范的荷载分项系数,$\gamma_G=1.20$,$\gamma_L=1.40$,当 ρ 取不同值时,对应于总安全系数 $K=1.7$,或 $K=2.0$ 时,ξ 及总抗力分项系数 γ_R 值见表 1.

表 1　抗力分项系数 ξ 和 γ_R 值

ρ	$K=1.7$		$K=2.0$	
	ξ	γ_R	ξ	γ_R
0.2	0.81	1.38	0.81	1.62
0.5	0.79	1.34	0.79	1.58
1.0	0.76	1.29	0.76	1.52

Tab.1 Partial factors ξ and γ_R of pile resistance

总抗力分成桩端阻力与桩侧摩擦阻力,则式(12)可表达成

$$\gamma_G Q_G+\gamma_L Q_L\leqslant\sum_{i=1}^{n}\frac{f_{si}}{\gamma_{fsi}}L_i\pi D\frac{\alpha_i}{\gamma_{\alpha_i}}+\alpha_b P_{sb}A_b\gamma_b \tag{17}$$

式中:γ_{fsi} 为桩侧第 i 层土中由于 P_s 值变化影响下桩的摩阻力的抗力分项系数;$\gamma_{\alpha i}$为桩侧第 i 层土对应桩径变异所产生的侧摩擦阻力抗力分项系数,简称为桩径分项系数;γ_b 为桩端阻力的抗力分项系数.

将式(8)代入式(17)得

$$\gamma_G Q_G+\gamma_L Q_L\leqslant\sum_{i=1}^{n}\frac{(AP_{si}+B)}{\gamma_{fsi}}L_i\pi D\frac{\alpha_i}{\gamma_{ai}}+\alpha_b P_{sb}A_b\gamma_b \tag{18}$$

考虑到桩侧土分层 P_s 的变异性,式(19)可表示为

$$\gamma_G Q_G+\gamma_L Q_L\leqslant\sum_{i=1}^{n}\left(A\frac{P_{si}}{\gamma_{Psi}}+B\right)L_i\pi D\frac{\alpha_i}{\gamma_{ai}}+\alpha_b P_{sb}A_b\gamma_b \tag{19}$$

式中:γ_{Psi} 为第 i 层土 ρ_s 值随侧摩擦阻力的抗力分项系数,简称为比贯入阻力分项系数.

式(18)和式(19)是等价的,有

$$AP_{si}/\gamma_{Psi}+B=(AP_{si}+B)/\gamma_{fsi} \tag{20}$$

$$\gamma_{fsi}=\frac{(AP_{si}+B)\gamma_{Psi}}{AP_{si}+B\gamma_{Psi}} \tag{21}$$

在充分考虑桩径影响的基础上,桩总侧摩擦阻力分项系数 γ_{fs}的公式推导如下:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}f_{si}L_i\pi D\alpha_i}{\gamma_{fs}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{f_{si}}{\gamma_{fsi}}L_i\pi D\frac{\alpha_i}{\gamma_{ai}} \tag{22}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

总侧摩阻力分项系数

$$\gamma_{fs} = \sum_{i=1}^{n} f_{si} L_i \pi D \alpha_i / \sum_{i=1}^{n} \frac{f_{si}}{\gamma_{fsi}} L_i \pi D \frac{\alpha_i}{\gamma_{ai}} \tag{23}$$

桩径分项系数

$$\gamma_{ai} = \bar{\alpha}_i / (\bar{\alpha}_i + \beta \bar{\alpha}_i \delta_{ai} \cos\theta_{ai}) = 1/(1 + \beta \delta_{ai} \cos\theta_{ai}) \tag{24}$$

同理 $\gamma_{Psi} = 1/(1 + \beta\delta_{Psi}\cos\theta_{Psi})$，桩端阻力分项系数 $\gamma_b = 1/(1 + \beta\delta_{Psb}\cos\theta_{Psb})$．$\delta_{Psb}$ 为桩端以上 $4D$、以下 $1D$ 范围的 P_s 值变异系数；$\cos\theta_{Psb}$ 为桩端以上 $4D$、以下 $1D$ 范围的 P_s 值变化而形成的灵敏系数；由文献[4]可发现，桩径变异系数在 0.065 2～0.106 5 之间，和 P_s 值变异系数相比，虽影响不大，但也不能忽视．计算程序框图如图 1 所示．

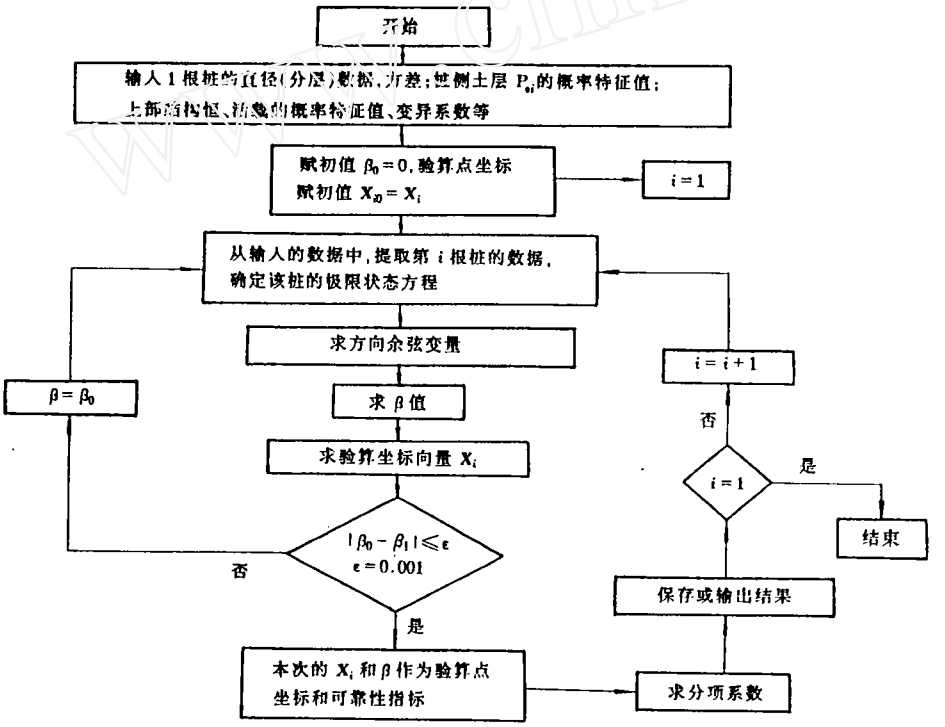


图 1 程序框图

Fig. 1 Program frame chart

3 计算结果分析

由于难以定量估计施工对承载力的影响，使钻孔灌注桩承载力的可靠性分析比预制桩困难．施工工艺引起的质量问题对于灌注桩的承载力影响非常大，所以其变异性比预制桩要大．其中，桩身几何尺寸的不确定性因素不容忽视，而桩身几何尺寸的变异取决于施工质量与土层的软硬程度．

桩身几何尺寸的变异集中反映在桩径的变异，桩径的变异又和本地区典型土层的土性密切相关．然而，由于桩径施工资料较难收集，本文只对收集到的上海广播大楼、上海海宏大楼、上海威京大厦 3 个工程试桩进行分析，得出桩径变异对分项系数和可靠性指标的影响．

3.1 桩径变异对 β 和分项系数的影响

上面所提及的 3 个工程实测桩径，是施工单位根据每灌注 1 m 高度桩身的混凝土数量分段反算出来的桩径，本文根据土层分层厚度计算出每根桩的桩径变异系数，见表 2．在充分考虑桩径变异的基础上，当总安全系数 $K = 2.0$ 且 $\rho = 0.2$ 时，得到 β 的最大值为 4.84，最小值为 2.17，桩径分项系数在 1.08～1.23 之间．表明桩径变异系数越大，可靠性指标 β 越小，桩径分项系数也越大．

由于绝大部分桩没有实测桩径资料，本文在假定 $K = 2.0, 1.7, \rho = 0.2$ 的前提下，令桩径变异系数 δ_D

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

=0.05,0.04,0.06,0.08,0.10,代入 58 根桩计算,统计出 $\delta_D - m_\beta$ 关系曲线,m_β 为 β 的平均值,如图 2 所示.以及 $\delta_D - \gamma_D$ 曲线,γ_D 为桩径分项系数.如图 3 所示.

3.2 ρ 和 K 对 β 和分项系数的影响

上部结构由于使用状况和结构类型的多样性,使得活载与恒载之比 ρ 产生变化,这对桩基可靠性指标 β 和桩侧、桩端阻力的分项系数影响颇大.

表 2　根据土层分层厚度计算出每根桩的桩径变异系数

桩　号	平均桩径 $\bar{D}$/cm	孔深/m	沉渣厚/cm	孔径均方差 σ_z/cm	孔径变异系数 δ_z	可靠性指标 β	桩径分项系数
4 - S1	84.0	42.85	13	6.13	0.073	2.55	1.18
4 - S2	99.6	43.02	7	6.57	0.066	2.92	1.08
SK1 - 80	74.8	43.20	35	0.24	0.017	4.34	1.25
SK2 - 80	75.2	44.50	13	2.09	0.028	3.74	1.21
SK2 - 85	75.4	45.30	15	4.44	0.059	3.07	1.10
HH - 1	80.0	54.70	9	6.08	0.076	2.17	1.05
HH - 2	80.0	54.70	11	2.56	0.032	3.21	1.13

Tab.2 Partial factors of pile diameter calculated by each soil thickness

总安全系数 K 取不同值,ρ 取 0.2,0.5,1.0 时,对 58 根桩进行电算,其结果见 $K - m_\beta$ 曲线和 $m_\beta - \rho$ 曲线.从图 4、图 5 中可看出,当总安全系数一定时,随着 ρ 增大,β 减小;反之,则 β 增大.同样,当 ρ 一定时,随着安全系数 K 的增大,可靠性指标 β 也增大,这和 K 越大,越保守,也越可靠相吻合.纵观两图,K 对 β 的影响不及 ρ 的影响大,也就是说,活载占总荷载比重越大,桩基承载力可靠度越低.本文在上部结构恒、活载分项系数取 $\gamma_G = 1.2$、$\gamma_G = 1.4$ 的情况下,桩基础采用分项系数法和总安全系数法,程序对 58 根桩的承载力可靠性指标 β 进行了分析比较,发现总安全系数设计方法得出的 β 相当离散,而分项系数设计法求出的 β 值分布相对集中,这也可从图 6 的 β 值分布直方图中看到.另外,从图 6b 可看出,按总安全系数法求解 β,β 分布相当离散,可能会出现不安全或过于保守的情况.而用分项系数计算可靠性指标 β,离散性就小,显得比较合理.

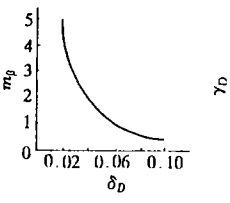


图 2　$\delta_D - m_\beta$ 关系

Fig.2 Relation of δ_D and m_β

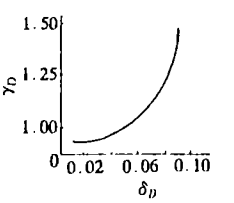


图 3　$\delta_D - \gamma_D$ 关系

Fig.3 Relation of δ_D and γ_D

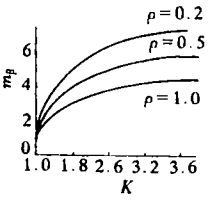


图 4　$K - m_\beta$ 关系

Fig.4 Relation of K and m_β

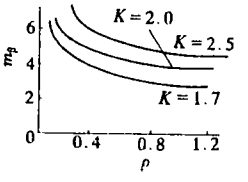


图 5　$m_\beta - \rho$ 关系

Fig.5 Relation of ρ and m_β

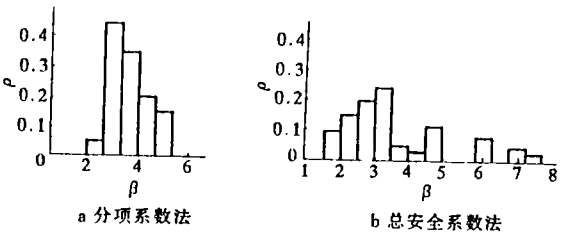


图 6　钻孔灌注桩承载力可靠性指标 β 分布直方图的比较

Fig.6 Comparison of β with total safety factor and partial factor for bored pile design

3.3 桩侧摩擦阻力的分项系数与桩端阻力的分项系数分析

实际上,为了反映出这些实际上的差异,本文在假定桩径变异系数为 0.02 的基础上,提出上海地区典型土层分层侧摩阻力分项系数和桩端阻力分项系数的建议值,如表 3 所示.根据分项系数定义及式(17)~(25),抗力分项占单桩总抗力的比例越大,抗力分项系数越大,这个结论的前提是上部结构荷载分项系数已定.从表 3 中可看出,上海地区粘性土抗力分项系数小,区域值较稳定,变异系数也越小;粉、砂性土表现出来桩侧摩阻力分项系数也不大.这表明,分层计算侧摩阻力分项取值对可靠性指标 β 的影响不大.而粉、砂性土作为持力层表现出来的较大桩端阻力分项系数,其取值对 β 的影响很大.因此,今后对桩端阻力取值应比桩侧摩阻力取值更为谨慎,否则会对单桩承载力可靠度分析造成很大影响.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现阶段,上部结构规范已明确,安全系数 K 通常取2.0或1.7,上部结构恒、活载的变异系数定为0.07和0.229(办公楼 $\delta_L=0.292$),荷载分项系数为 $\gamma_G=1.2$, $\gamma_L=1.4$.把以上已知值代入本文的桩基极限状态方程,经过对58根桩电算,统计出桩侧摩阻力、桩端阻力的分项系数均值,见表4.

表3 上海地区典型土层分层侧摩阻力分项系数和桩端阻力分项系数(桩径变异系数为0.02)

土 层 名	γ_{fsi} 值	$\bar{\gamma}_{fsi}$	γ_{fsi} 的变异系数	γ_b	$\bar{\gamma}_b$	γ_b 的变异系数
褐黄色粉质粘土②	1.093~1.187	1.140	0.001 9			
淤泥质灰色亚粘土③	1.191~1.215	1.203	0.002 0			
灰色淤泥质粘土④	1.219~1.247	1.232	0.002 9			
灰色砂质粘土⑤$_a$	1.155~1.369	1.262	0.003 5	1.19~3.18	2.039	0.079
灰色粉质粘土⑤$_b$	1.194~1.373	1.284	0.016 0	1.83~3.25	2.189	0.159
暗绿色粘土⑥	1.117~1.318	1.212	0.027 0	1.67~2.98	2.324	0.207
灰色亚粘土⑦$_a$	1.279~1.301	1.285	0.057 0	2.09~3.28	2.496	0.319
灰色粉砂⑦$_b$	1.039~1.297	1.119	0.067 0	2.13~3.37	2.941	0.229

Tab.3 Partial factors of pile sideways resistance and pile top resistance in Shanghai area

表4 桩侧摩阻力、桩端阻力的分项系数平均值

参 数	$K=1.7$		$K=2.0$	
	$\rho=0.2$	$\rho=0.5$	$\rho=0.2$	$\rho=0.5$
$\bar{\gamma}_{fs}$	1.252	1.194	1.541	1.464
γ_b	3.214	3.288	2.197	2.752
γ_{fsi} 的变异系数	1.126	0.139	0.161	0.217
γ_b 的变异系数	0.063	0.081	0.030	0.071

Tab.4 Average of partial factors of pile sideways resistance and pile top resistance

4 算 例

二轻局昌平高层,桩号1-S1,购物中心桩号14-S6,以及国际购物中心桩号14-S12,3根桩对表5检验.如桩14-S6,当 $\gamma_G=1.2$, $\gamma_G=1.4$, $K=2.0$、1.7, $\rho=0.2$ 时,总抗力分项系数 $\gamma_R=1.62$, $Q_u/\gamma_R=3\,864.41$ kPa/1.62=2 385 44 kPa, $Q_b/\bar{\gamma}_b=547.52$ kPa/2.197=249.21 kPa, $Q_{fs}/\bar{\gamma}_{fs}=3\,316.89$ kPa/1.54=2 152.43 kPa, $Q_u/\bar{\gamma}_{fs}+Q_b/\bar{\gamma}_b=2\,401.64\approx Q_u/\gamma_R=2\,385.44$ kPa,二者基本吻合,其它两根桩也吻合很好.以上计算中, $\bar{\gamma}_{fs}$, $\bar{\gamma}_b$ 取值于表4, Q_{fs}, Q_b 取值见文献[4].从表4中不难发现,上部结构活载、恒载之比 ρ 发生变化,对桩侧摩阻力分项系数影响不大,而对桩端阻力分项系数则有较明显的影响.可见,表1与表4的结果是相匹配的.

另外,由表4可见,当活载增大,即 ρ 变大,桩侧摩阻力在整个荷载分担比减小了,而桩端阻力提供的抗力大大增加,表现出分项系数较大的增加.因此,对上部结构活载较大的结构物,桩端承载力对可靠度影响很大.

5 结 论

(1)钻孔灌注桩桩径变异性对承载力可靠度分析有一定影响,桩径变异系数越大,钻孔灌注桩承载力可靠度越小.施工中采用设计直径作为钻头直径,可以大大减小桩径变异性,也可简化设计表达式.

(2)用分项系数计算可靠度指标比较合理,而用总安全系数法计算可靠度指标则比较离散.

(3)通过对分层侧摩阻力分项系数进行研究,发现其分项系数值差异不大,建议直接采用总土层侧摩阻力分项系数进行可靠度设计研究,实际应用也比较简单.

(4)影响钻孔灌注桩承载力可靠性指标的因素很多,建议进一步研究其内在联系.

参考文献

1 吴世伟.结构可靠度.北京:人民交通出版社,1990

2 陈强华,鲁智明,张鹏飞.静力触探估算钻孔灌注桩单桩极限承载力.见:石振华主编.第七届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1994.373~376

3 高大钊.土力学可靠性原理.北京:中国建筑工业出版社,1989

4 张鹏飞.估算钻孔灌注桩极限承载力的可靠度研究:[学位论文].上海:同济大学地下建筑与工程系,1994

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Reliability Analyses of Ultimate Bearing Capacity of Bored Piles in the Soft Clay Area

Zhang Pengfei

(Department of Road and Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Gao Dazhao

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract Depending on analysing diameters of bored piles and values of the vertical dead load and live load respectively, more reliable estimates of statistical parameters about ultimate bearing capacity of bored piles are obtained based on the nonlinear limit state equation of bored piles. Comparison of total safety factor and partial factor for bored pile deign. Based on 48 bored piles in Shanghai area, relations have been analyzed on factors of bored piles related to reliability of bearing capacity.

Keywords Reliability; Partial factor; Total safety factor; Nonlinear limit state equation

·下期文章摘要预报·

气浮浓缩污泥两相厌氧消化

高廷耀　周恭明　周增炎

研究了高温酸化(55 ℃)、中温甲烷化(35 ℃)两相和中温单相厌氧工艺处理气浮浓缩污泥的性能.研究结果表明,对于较高浓度的气浮浓缩污泥在水力停留时间(t_{HR})大于 10 d,挥发性固体(VS)的有机负荷小于 3.77 $kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$的条件下,两相厌氧消化系统去除率可超过 40%.当 t_{HR}降至 7 d,有机负荷升至 5.38 $kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$时,VS 去除率仍可达 35%.在 t_{HR}为 10 d,有机负荷为 3.77 $kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$的条件下,两相厌氧消化系统 VS 去除率要优于单相系统,但两相系统的甲烷化罐出现较高浓度的有机酸积累,其结果表明对于两相厌氧消化系统,不仅要强化产酸罐的水解和发酵的速率和效率,而且要避免酸化罐形成的有机酸对甲烷化罐的负影响,否则会导致两相系统比单相系统更差的处理性能,甚至运行的失败.

无铅皮蛋废水处理工艺的试验研究

张荣华　倪亚明　秦麟源

对无铅皮蛋废水处理工艺进行了试验研究,试验结果显示:原废水通过预处理调节 pH 值控制 Cl^-和重金属离子的浓度后,可以提高生化处理效率,取得较满意的结果,提出了达标处理的工艺流程.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net