

# 考虑超静孔隙水压力消散的管桩承载力时效性研究\*

雷华阳<sup>①②</sup> 吕乾乾<sup>①</sup> 刘利霞<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>天津大学土木工程系 天津 300072)

(<sup>②</sup>滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学) 天津 300072)

**摘要** 沉桩引起的超静孔隙水压力消散是产生管桩极限承载力时效性的主要因素之一。结合天津东疆保税港区物流加工区二期工程,利用有限元模拟分析沉桩后超孔压的消散规律及管桩的极限承载力随时间变化的规律,提出吹填土中管桩时效承载力公式供工程参考使用,并进行吹填土现场各测点沉桩过程及沉桩后孔隙水压力的监测,验证模拟结果的同时探讨超静孔隙水压力的分布及消散规律。模拟得到沉桩后桩底超孔压随时间消散,20d后消散率达到97%;管桩的时效承载力随时间增长,并与超孔压的消散有着明显的对应关系;得到吹填土中管桩承载力的时效公式以供工程参考使用。现场孔压监测表明深度增加,超孔压增大;离桩越近,超孔压越大;土层渗透系数越小,超孔压消散越慢。施工对土体的有效影响范围为9~10倍桩径。

**关键词** 吹填土 管桩 极限承载力 时效性 超静孔隙水压力

中图分类号:TU443 文献标识码:A

## GROWTH OF PILE BEARING CAPACITY OVER TIME CONSIDERING THE DISSIPATING OF EXCESS PORE PRESSURE

LEI Huayang<sup>①②</sup> LV Qianqian<sup>①</sup> LIU Lixia<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(<sup>②</sup>Key Laboratory of Civil Structure and Safety of Binhai, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The dissipating of excess pore pressure caused by pile sinking is one of the main factors result in time effect of ultimate bearing capacity of pile. This paper discusses the change rule of pile bearing capacity with time through the finite element simulation under the geological conditions of the pile foundation in the second phase project of the free port logistics processing zone in Dongjiang, Tianjin. It finds that the formula of pile bearing capacity about time effect in dredge fill can be used as reference for engineering use. It monitors the excess pore pressure at each observing point in order to verify the numerical simulation results. It discusses the change law of the distribution and dissipation of excess pore water pressure. Numerical simulation shows that the dissipation rate at the tip of pile can reach 97% 20d after pile sinking. The ultimate bearing capacity of pipe pile increases over time basically in accord with the dissipation of excess pore water pressure. It also introduces a formula of pile aging bearing capacity in dredge fill. Measured results show that the effective range of construction on dredger fill around the pile is 9-10 times the diameter of pile. The excess pore pressure increases with the depth increasing. The closer it from the pile, the greater the excess pore pressure is. The smaller the permeability coefficient of soil is, the more slowly the excess pore pressure dissipates.

**Key words** Dredge fill, Pipe pile, Bearing capacity, Time effect, Excess pore water pressure

\* 收稿日期:2012-05-20;收到修改稿日期:2012-06-23.

第一作者简介:雷华阳,工程地质专业. Email: leihuayang74@yahoo.com.cn

## 1 引言

由于对土地资源的要求日益迫切,将疏浚出来的淤泥用来填海造陆得到吹填土,已经成为缓解沿海城市用地紧张的有效途径。吹填土有以下特性<sup>[1-2]</sup>:(1)强度低,短时间内仍处于欠固结状态。(2)均匀性差:由于吹填物质来源的不同及水力分选的作用,吹填土土性变化较大。(3)含水量高。由于管桩具有单桩承载力高、桩身耐锤击性好、穿透力强、造价便宜等特点,从工程质量、施工进度和工程费用三个方面与其他对吹填土地基的加固方案相比均为最佳选择,因为管桩在确保吹填土地基加固质量的同时,又可满足工程的造价控制。因此有必要针对吹填土中的管桩进行承载力时效性研究<sup>[3]</sup>。

针对管桩的极限承载力时效问题,国内外学者采用了模型试验或现场试验<sup>[4-6]</sup>,结合理论分析和数值模拟等方法,进行了诸多的研究和探讨。Titi (1996)基于 HiSS 方法和应变路径法得到了预测饱和和软黏土中桩基承载力随着时间的增长规律,并与数值模拟结果和现场试验结果对比来验证该方法的正确性。胡中雄<sup>[7]</sup>根据打入桩不同时间间隔的静载荷试验结果,推导了经验公式,并得出单桩承载力的增长主要来源于桩侧摩阻力的增长,桩端阻力对承载力时效的影响很小,强度呈双曲线增长。张明义等(2002)对静压桩进行了隔时隔压试验和静载荷试验,试验结果表明静压桩的极限承载力随时间呈双曲线增长,并提出了一种根据静压桩的压桩力及复压力推算桩的极限承载力的计算方法<sup>[8]</sup>。

管桩的时效性表现为入土后承载力随着时间的推移,有增大的趋势<sup>[9-12]</sup>,时效性在软土中表现尤为突出。在沉桩过程中,和桩的体积相等的桩边土向外挤出,从而形成了一定厚度的重塑区且产生了超静孔隙水压力,桩到位以后,超静孔隙水压力开始消散,重塑区的土开始固结,固结过程中土的强度有所提高,从而导致管桩的承载力大幅度提高<sup>[13]</sup>。沉桩引起的超静孔隙水压力消散是管桩承载力时间效应的主要因素之一,因此探讨超静孔隙水压力的分布与消散规律对管桩承载力时效性的研究具有重要意义。

在此通过数值模拟得到管桩极限承载力并与现场检测结果比较,验证计算模型的正确性,进而模拟桩底超孔压的消散规律,以及管桩的时效承载力,并由此得到吹填土中管桩承载力的时效公式。通过现

场实测得到管桩周围 1~3m 范围内超静孔隙水压力的分布和消散规律,验证数值模拟的同时得到更为全面的桩周超静孔隙水压力的分布与消散规律,以指导工程实践。

## 2 工程概况

工程位于天津东疆保税港区物流加工区,拟建厂房及动力中心均拟采用轻钢结构、预应力混凝土管桩基础。场地原为海面,经吹填成陆至现地坪,近期进行真空预压地基处理。

在此针对天津东疆保税港区二期用地 16<sup>#</sup>-1 厂房下的一根管桩进行数值模拟及现场监测,该厂房下对应的 26-26' 断面地质剖面如下图 1,土层的物理参数如表 1 所示。

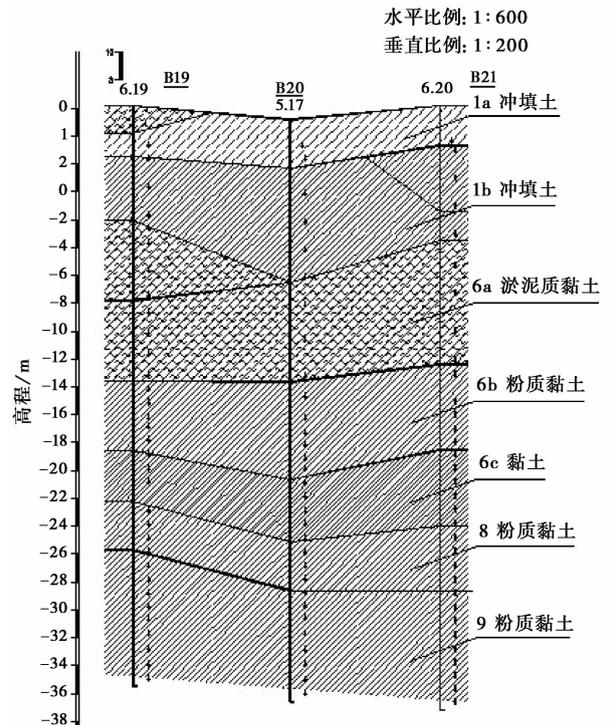


图 1 工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile

## 3 数值模拟分析

### 3.1 模型建立

利用有限元分析软件 ABAQUS,根据现场试验所得的土体参数,模拟一根桩长 27m、入土深度 25.3m、桩径 0.5m、壁厚 100mm 的位于正常固结饱和土层中管桩周围超孔压消散。

表 1 土层的主要物理力学指标

Table 1 The main physical and mechanical indexes of soil

地层编号	土层名称	平均厚度/m	$c/\text{kPa}$	$\Phi/(\text{°})$	$\omega/(\%)$	$\gamma/\text{kN}/\text{m}^3$	$e$	$I_L$	$a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{s1-2}/\text{kPa}$	桩身弹性模量/MPa
1a	冲填土	4	3	25.61	21.81	19.21	0.70	/	0.09	18.93	
1b	冲填土	5	1.092	9.61	38.99	18.23	1.11	0.93	0.67	3.42	
6a	淤泥质黏土	5	1.009	7.51	48.39	17.30	1.37	0.92	0.94	2.52	
6b	粉质黏土	5	1.374	17.52	32.75	18.86	0.92	0.91	0.45	4.28	2.00E+05
6c	黏土	4	1.283	9	34.93	18.61	0.99	0.78	0.52	3.85	
8	粉质黏土	3	1.494	18.46	22.39	19.78	0.63	0.47	0.28	5.79	
9	粉质黏土	24	1.578	18.95	23.93	20.12	0.67	0.53	0.28	6.13	

(1) 网格划分: 土体向下延伸约一倍桩长, 取 50m, 且延伸土体参数和桩底取值相同。径向向外延伸取 10 倍桩径, 模型尺寸为  $10 \times 10 \text{m} \times 50 \text{m}$ 。土体选用 D-P 模型, 选用 C3D8P 单元, 桩身采用线弹性模型<sup>[14]</sup>, 选用 C38DR 单元, 单元共划分 42256 个单元。

(2) 接触设置: 设置两组桩土接触组, 四个接触面。桩、土之间的接触通过接触对实现, 采用库仑摩擦模型来描述接触面间的摩擦行为, 桩土接触面摩擦因数取为 0.1。桩端与土体之间公用节点, 不设置接触单元。

(3) 加载方式: 在定义边界条件时, 在土体的四周设置法向约束, 底部设置  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的约束。不考虑土体的初始应力状态和施工引起的初始位移场和初始应力场。为模拟高承台管桩的快速加载, 使桩顶产生向下的位移 0.05m, 即  $0.1D$  ( $D$  是桩的直径)。加载时间为 30min, 时间很短, 土体为不排水边界。在土体固结超孔隙水压力消散时, 设为排水条件。模型网格见图 2。

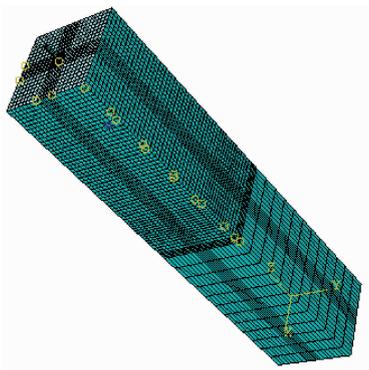


图 2 模型网格

Fig. 2 Mesh model

## 3.2 模拟结果分析

### 3.2.1 极限荷载的确定

载荷沉降曲线反映了桩的工作性状, 是桩破坏机理和破坏模式的宏观表现, 因而研究桩的载荷沉降曲线是研究桩的受力机理的重要途径之一。管桩在竖向荷载作用下将发生下沉, 促使桩周土发生相应的变形及抗力。当变形增大到一定程度时桩产生刺入变形, 即桩达到极限承载力。

利用数值模拟分析, 得到荷载沉降曲线如图 3。曲线在桩顶荷载为 1312kN 时出现拐点, 此后, 桩产生快速刺入变形, 沉降随载荷快速增加, 表示桩达到极限状态, 即桩的极限承载力为 1312kN。现场监测得到管桩的极限承载力为 1300kN, 相差 0.9%。由此说明, 数值模拟分析时选取参数是正确的。

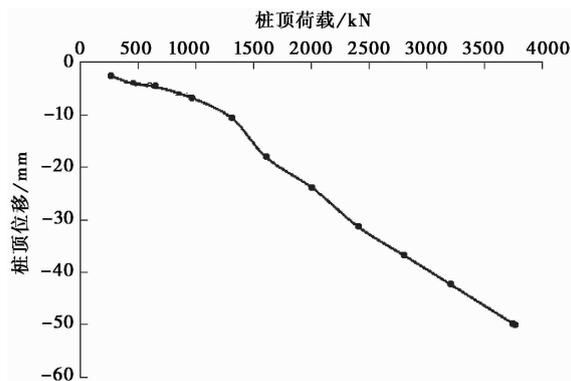


图 3 桩荷载-沉降曲线

Fig. 3 Pile load-settlement curve

数值模拟中达到极限承载力时管桩对应的沉降为 12.6mm, 在以下对管桩进行分析中以 12.6mm 的位移作为极限承载状态的标志。

### 3.2.2 超静孔隙水压力消散分析

超静孔隙水压力是由土的变形趋势引起的孔隙水压力,也就是说,土体本应发生应变,但由于一时排水受阻,土中产生孔隙水压力,使作用于土骨架上的有效应力发生变化,从而限制其变形。

模拟得到管桩在桩顶发生 12.6mm 位移时,沉桩后各时段超孔压云纹图,从而得到桩底超孔压随时间逐渐消散曲线(图 4)。

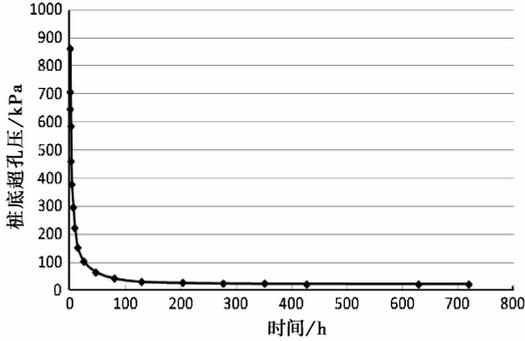


图 4 超孔压-时间曲线

Fig. 4 Excess pore water pressure-time curve

由图 4 可看出,超孔压在前期随时间迅速减小,至 20d 消散率达到 97%。

### 3.2.3 时效承载力分析

根据不同时刻桩顶沉降为 12.6mm 时对应的管桩承载力,得到管桩竖向极限承载力随时间变化的曲线(图 5)。土体固结 60d,时间点间隔根据需要由密到疏选取。计算得第 60d 管桩极限承载力与第 30d 相同,为得到较为明显的曲线趋势在此略去。

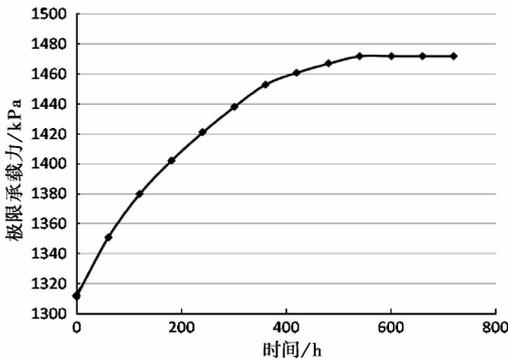


图 5 管桩极限承载力-时间曲线

Fig. 5 Ultimate bearing capacity of pile-time curve

从图 5 可以看出,土体固结的 60d 中,管桩的初始竖向极限承载力最小,然后承载力随时间增大,20d 内增长达到承载力总增长的 98%,到 30d 后达到稳定,最终竖向极限承载力为 1473kN。

这与超孔压随时间的消散对应。对比图 4 发现当超孔隙水压力基本消散时,管桩极限承载力增长也趋于稳定。管桩极限承载力随着超孔隙水压力的消散而增大,这是由于超孔隙水压力逐渐消散使得土体应力增大,地基承载力增强,管桩极限承载力增大,最后趋于稳定状态。

根据试桩资料统计分析,考虑时间效应的预制桩入土后任意间歇期的单桩极限承载力经验公式<sup>[15]</sup>如下

$$Q_{u,t} = Q_{u,0} + \alpha(1 + \lg t)(Q_{u,\infty} - Q_{u,0}) \quad (1)$$

$$Q_{u,t} = Q_{u,0}(1 + \alpha_t) \quad (2)$$

其中,  $Q_{u,0}$ ,  $Q_{u,\infty}$  为单桩初始、最终极限承载力;  $Q_{u,t}$  为间歇期  $t(d)$  时单桩极限承载力;  $\alpha_t$  为极限承载力增长系数;  $\alpha_t = t/(at+b)$ ,  $a$ ,  $b$  为与桩径、桩长和土质有关的经验系数。

根据(1)与(2)的经验公式及图 5,可确定吹填土中管桩时效承载力参数。

经过计算,吹填土中管桩时效承载力公式为:

$$\left. \begin{aligned} Q_{u,t} &= Q_{u,0}(1 + \alpha_t) \\ \alpha_t &= 0.0505t^2 + 3.61t + 90.02 (t \leq 22.5d) \\ \alpha_t &= 0.127 (t > 22.5d) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 4 现场监测

### 4.1 孔隙水压力现场监测

试验选取的是天津东疆保税港区二期用地 16<sup>1#</sup>-1 厂房场地东侧边缘的 1 根桩,工程地质剖面图见工程概况部分图 1。桩长 27m,桩径为 500mm,桩东侧布置 3 组孔隙水压力计(A1、B1、C1),A1、B1、C1 各组距离试验桩的中心距离分别为 750mm,1750mm,2750mm。结合地层特点,安排孔隙水压力计埋置深度,从距离地表 6m 开始,分别在 6m、11m、15m、18m 布置 1 个孔隙水压力计(图 6)。

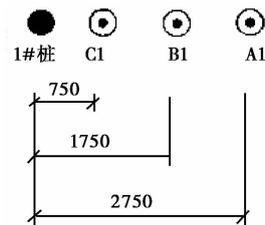


图 6 测点位置

Fig. 6 Measure point locations

## 4.2 结果分析

根据现场所得孔压数据可得各测点超孔隙水压力上升幅度和消散情况(表2)。

表2 各深度超孔压上升幅度与消散情况  
Table 2 Ascendant range and dissipation of pore water pressure at each depth

测点埋深/ m	孔压监测点	土层性质	超孔隙水压力最大值/ kPa	休止 20d 后的超孔隙水压力/ kPa	休止 20d 后的消散率
6	A1	人工填土	99.2	40.2	59.5
6	B1	人工填土	32.0	6	81.3
6	C1	人工填土	13.5	0.8	94.1
11	A1	淤泥质粉质黏土	158.1	32.2	79.6
11	B1	淤泥质粉质黏土	114.8	40.8	64.5
11	C1	淤泥质粉质黏土	7.1	1.5	78.9
15	A1	淤泥质黏土	175.7	11.5	93.5
15	B1	淤泥质黏土	128.9	2.8	97.8
15	C1	淤泥质黏土	89.4	1.2	98.7
18	A1	粉质黏土	199.2	15.4	92.3
18	B1	粉质黏土	145.6	0.9	99.4
18	C1	粉质黏土	113.9	0.9	99.2

(1)深度增加,超孔压增大;离桩越近,超孔压越大。水平方向超孔压线性插值,可得出施工对土体的有效影响范围约为5m,即9~10倍的桩径。

(2)除11m深度外,20d后各监测点超孔压消散率均达到80%(A1处6.0m深度的监测仪器故障,在此不做考虑)。11m深度监测点所处土层主要是渗透系数较小的淤泥质粉质黏土,因此超孔隙水压力消散较慢。

(3)最大超孔压在A1处的18m埋深,接近该深度超孔压警戒值。在C1(距沉桩2750mm即5.5d)处,超孔压仍可达到100kPa,而场地设计最小桩距为1750mm,为防止土体发生较大破坏,避免邻近桩打桩造成的超孔压叠加,应合理安排打桩顺序以。

(4)距桩底距离较近的几个监测点即C1,A1处的15m,18m埋深实测得到的20d后超孔压消散率均达到了95%以上,这与模拟得到的桩底20d后97%的消散率一致,验证了时效模拟的合理性。

## 5 结论

(1)通过数值模拟得到管桩极限承载力为

1312kN,与现场监测值1300kN相差仅0.9%。验证了数值模拟选取的参数正确性。

(2)模拟得到沉桩后桩底超孔压随时间消散,20d后消散率达到97%。

(3)模拟得到管桩的时效承载力随时间增长,并与超孔压的消散有着显著的对应关系。根据管桩时效承载力随时间变化规律,得到吹填土中管桩承载力的时效公式,供工程参考使用。

(4)由现场孔压监测可知:深度增加,超孔压增大;离桩越近,超孔压越大;土层渗透系数越小,超孔压消散越慢。施工对土体的有效影响范围为9~10倍桩径。距桩底距离较近的几个监测点20d后超孔压消散率均达到了95%以上,这与模拟得到的桩底20d后97%的消散率一致,验证了时效模拟的合理性。

## 参 考 文 献

- [1] 冯会芳. 新近吹填淤泥形成超软土地基的加固处理方法[J]. 港工技术, 2011, 48(5): 59~60.  
Feng Huifang. Reinforcement method of ultra soft foundation formed by fresh dredger filled mud. Port Engineering Technology, 2011, 48(5): 59~60.
- [2] 叶国良, 郭述军, 朱耀庭. 超软土的工程性质分析[J]. 中国港湾建设, 2010, 170(5): 1~9.  
Ye Guoliang, Guo Shujun, Zhu Yaoting. Analysis on engineering property of ultra soft soil. China Harbour Engineering, 2010, 170(5): 1~9.
- [3] 汪铁钧. 大厚度吹填土层的现浇箱梁地基加固方案比选[J]. 中国市政工程, 2011, 4: 46~49.  
Wang Tiejun. On strengthening plan selection of cast-in-situ box girder subgrade in dredger fill soil layer with large-thickness. China Municipal Engineering, 2011, 4: 46~49.
- [4] Jardine R J, Standing J R, Chow F C. Some observations of the effects of time on the capacity of piles driven in sand. Geotechnique, 2006, 56(4): 227~244.
- [5] Long J H, Kerrigan J A, Wysocky M H. Measured Time Effects for Axial Capacity of Driven Piling. Transportation Research Record 1663, 1999, Paper No. 99-1183, 8~15.
- [6] 张明义, 刘俊伟, 于秀霞. 饱和软黏土地基静压管桩承载力时间效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3005~3009.  
Zhang Mingyi, Liu Junwei, Yu Xiuxia. Field test study of time effect on ultimate bearing capacity of jacked pile in soft clay. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3005~3009.
- [7] 胡中雄. 饱和软黏土中单桩承载力随时间的增长[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(3): 58~61.  
Hu Zhongxiong. Growth of pile bearing capacity in saturated soft clay over time. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(3): 58~61.

- [8] 张明义, 时伟, 王崇革. 静压桩极限承载力的时效性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**: 2601 ~ 2604.  
Zhang Mingyi, Shi Wei, Wang Congge. Effect on the ultimate bearing capacity of static pressed pile. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**: 2601 ~ 2604.
- [9] Chow F C, Jardine R J, Nauroy J F et al. Time-related increase in shaft capacities of driven piles in sand[J]. Geotechnique, 1977, **47**(2): 353 ~ 361.
- [10] Doherty P, Gavin K. The shaft capacity of displacement piles in clay: A state of the art review[J]. Geotech Geol Eng, 2011, **29**: 389 ~ 410.
- [11] Bruey F, Meunier K, Neuroy J F. Behaviour of pile plug in sandy soils during and after driving[A]. 23rd Offshore Technology Conference[C], Houston, 1991, 145 ~ 154.
- [12] Ng W K, Selamat M R, Choong K K. Soil/pile set-up effects on driven pile in Malaysian soil. 2010, **14**: 1 ~ 12.
- [13] 姚笑青. 桩间土的再固结与桩承载力的时效[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1997, **18**(4): 91 ~ 94.  
Yao Xiaqing. The reconsolidation of the soil among piles and the time effect of pile bearing capacity. Journal of Shanghai Tiedao University(Natural Science), 1997, **18**(4): 91 ~ 94.
- [14] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
Fei Kang, Zhang Jianwei. The Application of Abaqus in Geotechnical Engineering. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010.
- [15] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
Pile Foundation Engineering Manuals Committee. Pile Foundation Engineering Manual. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

## 新书推荐

# 中国地质灾害区域预警方法与应用

刘传正 刘艳辉 温铭生 唐 灿 薛群威 著

## 内 容 提 要

本书概述了国内外地质灾害区域预警预报理论研究和应用服务发展动态, 阐述了中国地质环境和地质灾害分布特点, 提出了地质灾害区域预警划分为隐式统计预警、显式统计预警和动力预警原理。简单总结了采用临界降雨判据方法(隐式统计)建立的中国第一代国家级地质灾害预警系统及2003~2007年期间的应用经验。通过系统建立包括30个图层的全国地质环境信息系统、因子分析确定权重、多元统计和人工神经网络模型对比, 对中国大陆分区建立了显式统计预警模型, 研发了第二代国际级地质灾害预警系统, 经过2008年汛期地质灾害区域预警预报服务检验证明效果良好。概括提出了地质灾害区域预警预报的工作程序及其基本要求。

本书可供从事地质灾害防治和防灾减灾公共管理、科学技术研究、应用服务和教学培训人员参考使用。

