



深厚软土地区深基坑支护优化设计与分析

张国才¹, 王炳文¹, 曹洪², 陈平山¹, 邱青长¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;

2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 沙井泵站基坑位于深厚软土地区, 淤泥层厚, 开挖深度大。通过用加虚拟拉力的方法对基坑原支护方案进行模拟计算, 认为原方案中局部支护桩的位移和弯矩不能满足规范要求, 为此对支护方案设计提出优化建议。将现场施工监测数据与该基坑的计算数据进行对比分析, 证明优化后方案的合理性。

关键词: 深厚软土; 深基坑; 支护结构设计; 预应力锚索; 变形监测

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0051-06

Optimized design of supporting for deep foundation pit located in deep soft soil

ZHANG Guo-cai¹, WANG Bin-wen¹, CAO Hong², CHEN Ping-shan¹, QIU Qing-chang¹

(1. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,

CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The foundation pit of Shajing pumping station, which is with a deep silt layer and deep excavation, locates in the deep thick soft ground area and. The simulated calculation for the support scheme by adding virtual tension indicates that the internal stress bending moment can't meet the requirement for the retaining pile of deep foundation pit stipulated in the code. So, we propose an optimized scheme for the foundation pit. By the comparative analysis of the site construction monitoring data and the calculation data, we prove the reasonableness of optimized program.

Keywords: deep soft soil; deep foundation pit; supporting structure design; pre-stressed anchor rod; deformation monitoring

随着基坑深度和开挖面积越来越大以及受周边环境等因素影响, 基坑支护难度越来越大。特别是在深厚软土层地区, 深基坑的支护设计是一个基坑能否顺利施工的关键。本文通过对深圳沙井泵站基坑原支护设计的计算分析提出优化措施, 通过与实测数据的对比研究认为, 优化措施能满足施工要求, 可为今后深厚软土地区深基坑的设计提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

沙井河片区位于深圳市宝安区的西北部, 该

片区的主要河道沙井河经宝安区松岗街道、沙井街道辖区注入茅洲河。沙井河泵站位于沙井河下游与茅洲河交界处, 该泵站主要是解决河道沿线低洼区雨季受淹问题, 总装机流量达 170 m³/s, 每小时抽水量达 60 万 m³, 至目前为止是亚洲最大的排涝泵站。

泵站基坑北边为临时修建的导流明渠, 西边为茅洲河, 东南为沙井河, 基坑距茅洲河最近距离仅为 20 m。基坑宽 68 m, 长 220 m, 开挖深度 5.5~15 m。建设场地分布有深厚淤泥层, 水文条件复杂, 增加了基坑支护设计和施工的难度(图 1)。

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 张国才(1982—), 男, 硕士, 注册岩土工程师, 从事岩土工程设计、监测工作。

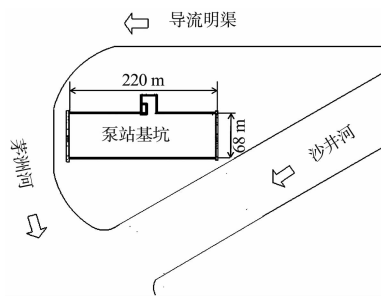


图1 沙井泵站基坑平面

1.2 工程地质条件

沙井泵站基坑所在场地原始地貌为河道及海陆相堆积、冲击平原，各土层物理参数及厚度见表1。据钻孔揭露，场地内自上而下分布为^[1]：

①₁素填土：层厚1.1~3.6 m。主要分布在河道两岸，为堤身填土和堆积台地填土。

①₂填石（抛石）：分布在沙井河堤岸，一般厚1 m左右，为堤岸护坡砌石。

②₁淤泥：灰黑色，灰褐色，为场地的不良地层；

层厚11.4~17.3 m，层底高程-12.0~-15.5 m。

②₂粉质黏土：局部夹粉细砂，软塑-可塑为主。层厚1.0~2.0 m，层底高程-15.6~-16.0 m。

②₃粉砂（颗粒筛分表明主要为细粒土质粉砂、粉土）：灰色，局部夹薄层淤泥及黏土，场地不连续分布，或透镜体状分布于淤泥中，或分布在淤泥底部；层厚1.9~5.5 m，层底高程-14.28~-16.85 m。

②₄中粗砂：浅黄色，灰白色，松散状，局部夹少量黏性土。主要分布在左岸河堤，层厚2.2~6.7 m，层底高程-18.2~-18.8 m。

②₅砾砂：灰白色、浅黄色，含少量黏性土，局部夹细砂或粗砂，砾径2~5 mm。层厚一般3.8~9.7 m，层底高程-21.7~-23.5 m。

②₆卵石：灰白色，稍密，呈棱角状，粒径2~7 cm。左岸河堤下局部分布，最大厚度4.9 m，底层高程-23.7 m。

表1 各土层物理参数及厚度

土层编号	土层名称	厚度/m	密度/(t·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
① ₁	素填土	2.4	1.8	15.0	18.0	4.67
② ₁	淤泥	14.0	1.6	13.6	10.3	1.38
② ₂	粉质黏土	1.5	1.9	16.4	13.4	4.75
② ₃	粉砂	3.7	2.0	8.0	16.0	6.68
② ₄	中粗砂	4.5	2.1	0	28.0	6.34
② ₅	砾砂	6.7	2.0	0	32.0	7.52

1.3 工程水文条件

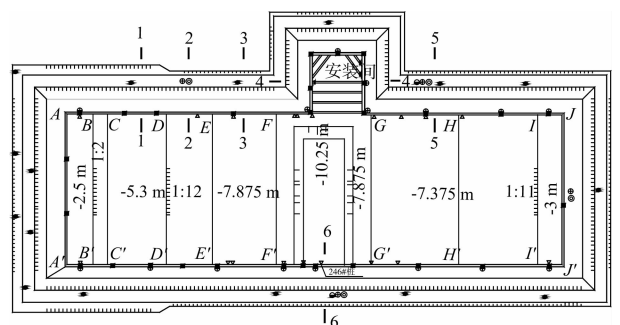
建设场地被沙井河、茅洲河和导流明渠包围，场地地下水类型主要为第四系孔隙潜水。河水位受涨落潮影响较大，工作期间水位高程0.5~2.5 m。河道两岸地下水位高程基本与河水位高程一致。建设场地临近河道，并存在强透水层，地下水与河道水力联系紧密。

2 基坑设计方案

2.1 原基坑设计方案

基坑底部呈阶梯形，根据不同的挖深划分为不同的区段，各区段开挖深度如图2所示，冠梁高程-0.5 m，基坑开挖最深位置坑底高程为-10.25 m。

场地内地质情况如表2所示，场地内存在深厚淤泥层。



注：● 土体沉降及位移点；△ 锚索应力计；◎ 孔隙水压计；
 ● 水管；■ 桩顶沉降及位移点；⊕ 测斜管；| 钢支撑反力计；
 ↗ 指北针。

图2 基坑区段划分

表2 基坑各区段地质情况及开挖深度

区段	剖面	素填土顶高程	淤泥顶高程	粉质黏土顶高程	细砂顶高程	中粗砂顶高程	砾砂顶高程	残积土顶高程	坑底高程
CD	1-1	4.3	0.7				-11.1		-5.300
DE	2-2	2.4	0.1	-10.5	-11.0	-12.1	-13.3	-21.0	-5.300 ~ -7.875
EF	3-3	2.3	0.1		-11.8	-12.6	-14.1	-21.8	-7.375
FG	4-4	2.5	0.1	-9.3	-11.0		-13.3	-21.0	-7.875 ~ -10.250
GH	5-5		0.2	-8.9	-10.8		13.5	-20.9	-7.375
F'G'	6-6	2.5	0.1	-9.3	-11.0		-13.3	-21.0	-10.250

为了保证施工进度和经济效益,基坑原支护方案采用放坡开挖和灌注桩+预应力锚索(安装间基坑局部采用钢管支撑)相结合的方式。基坑上部填土层放坡开挖至 -0.5 m , -0.5 m 以下采用桩锚支护方式,桩底高程 -16 m ; -0.5 m 以下采用桩锚支护方式,桩底高程 -16 m ,灌注桩后利用水泥搅拌桩止水。基坑两端开挖深度较浅,采用水泥土挡墙支护。

灌注桩的桩径为 $1\ 200\text{ mm}$,桩间距为 $1\ 600\text{ mm}$,桩长 15.5 m 。灌注桩均匀配筋,主筋采用HRB335,灌注桩正截面受弯承载力设计值为 $1\ 739\text{ kN}$ 。

预应力锚索采用低松弛高强钢绞线,一桩一锚,锚索的水平倾角均为 35° 。各区段锚索设置层数如表3所示,第1层锚索设置在冠梁处,长 35 m ,自由段长度 17 m ;第2层锚索与第1层锚索间距为 3.5 m 或 5 m (不同区段、间距不一致),长 25 m ,自由段长度 12 m 。锚索设计拉力均为 380 kN ,锁定值均为 250 kN 。

表3 各区段锚索分布

区段	剖面	锚索层数	竖向间距/m
AC		1	
CD	1-1	1	
DE	2-2	2	3.5
EF	3-3	2	3.5
FG	4-4	采用2层钢支撑	3.5
GH	5-5	2	3.5
HJ		1	
F'G'	6-6	2	5.0

基坑的安装间(基坑北边凹凸部分)采用钢管支撑,钢管支撑采用 $\phi 609\delta 14$ 钢支撑,支撑间

距为 4.5 m ,共设2层,层间距为 3.5 m ,每层设有4根支撑(剖面4-4)。

2.2 原基坑设计方案计算分析

基坑底部呈台阶状,基坑开挖最深位置坑底高程为 -10.25 m ,支护结构设置1~2层锚索可能会出现锚索拉力过大,而引起支护桩位移和弯矩超出规范允许值。所以对不同开挖深度区段选择剖面进行计算,其剖面位置见图2。

基坑支护结构的内力和变形计算采用华南理工大学曹洪教授自行开发的有限元计算程序,该程序通过加虚拟拉力的全量方法模拟加撑和张拉锚索的施工过程^[2]。通过有限元对施工过程的模拟计算显示,1-1至5-5的计算剖面中,剖面3-3的灌注桩弯矩和桩顶变形最大,剖面3-3弯矩和变形如图3所示。从图中可以看出剖面3-3的最大弯矩、最大桩顶变形均出现在基坑开挖到坑底高程时,桩顶最大变形为 45 mm ,最大弯矩为 $1\ 570\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。虽然桩顶最大变形 45 mm 超出了规范允许值,但考虑到软土地区基坑采用锚索时支护结构变形会较大,所以剖面1-1至剖面5-5的支护设计基本能满足施工要求^[3]。

F'G'区段剖面6-6的有限元模拟计算结果见图4。从图中可以看出该区段内当开挖面高程为 -9.06 m 时,最大弯矩为 $1\ 815\text{ kN}\cdot\text{m}$;当开挖面高程取为 -10.25 m ,最大弯矩为 $2\ 310\text{ kN}\cdot\text{m}$,灌注桩弯矩远大于灌注桩的弯矩设计值 $1\ 739\text{ kN}\cdot\text{m}$,支护桩的最大变形可达到 90 mm 。过大的弯矩和变形均有可能引起灌注桩的断裂,影响基坑的安全施工。为了保证基坑的顺利施工必须对支护设计方案进行优化设计。

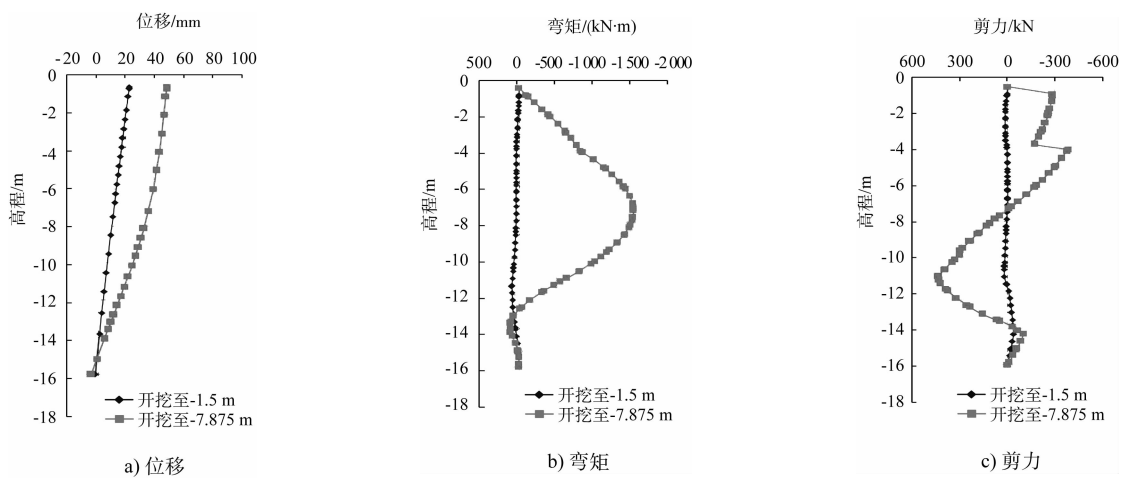


图3 灌注桩剖面 3-3 的桩位移、内力曲线

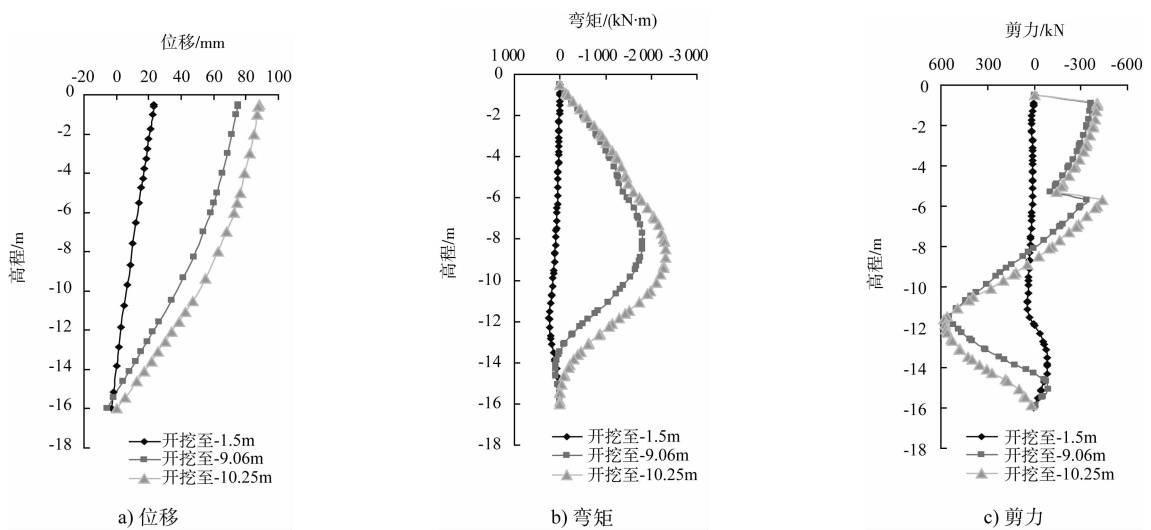


图4 灌注桩产剖面 6-6 的桩位移、内力曲线

2.3 基坑设计优化方案

$F'G'$ 段计算剖面 6-6 的原支护设计经过变形、内力计算之后，发现灌注桩弯矩和变形均不能够满足规范要求，支护结构不安全，不能保证基坑的顺利施工。由于这个剖面的基坑很深，两层锚索的间距达到 5 m，因此对 EG 和 $F'G'$ 区段设 3 层锚索(安装间除外)，能明显改善支护结构的位移和灌注桩的桩身弯矩，并且延长的工期不超过 2 个月。优化方案的 3 层锚索布置如图 5 所示，即第 1 层锚索的位置不变，第 2 层锚索的高程为 -3.5 m，第 3 层锚索高程 -6.5 m，即第 2、3 层锚索的竖向

间距为 3 m。第 1 层锚索的总长度及锚固段长度都不变，第 2 层锚索的总长度和锚固段长度分别为 30 m 和 17 m，第 3 层锚索的总长度和锚固段长度分别为 25 m 和 13 m，3 层锚索的水平倾角都是 35° 。

设置 3 道锚索后，剖面 6-6 灌注桩的内力和变形计算结果见图 6。从图中可以看出， $F'G'$ 段支护桩的最大位移为 36.8 mm，最大变形出现在桩顶位置；灌注桩的最大弯矩为 1 604 kN·m，位置在坑底附近；锚索的最大内力 291 kN；均能满足设计要求，保证基坑的安全施工。

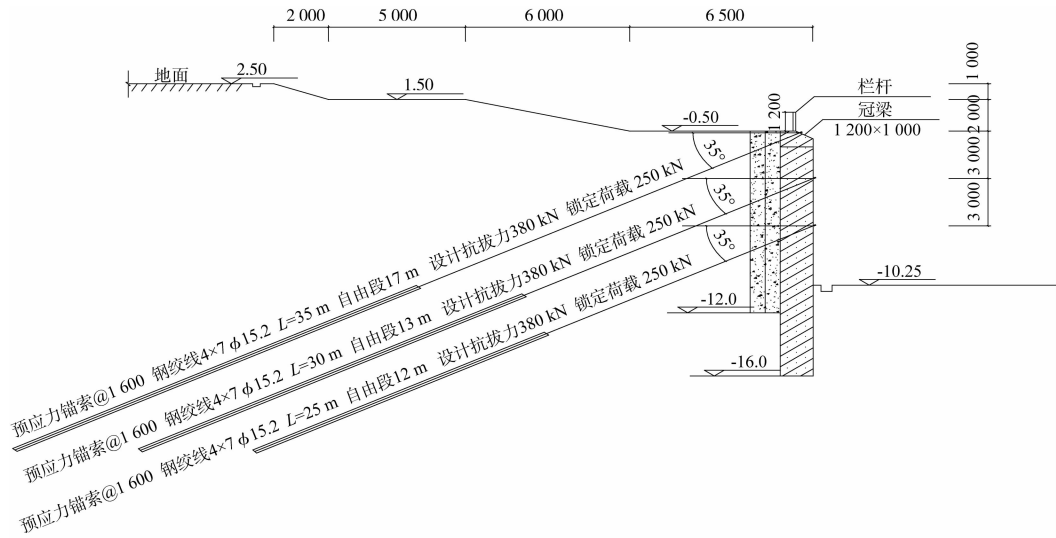


图 5 剖面 6-6 的优化支护方案 (尺寸单位: mm, 高程单位: m)

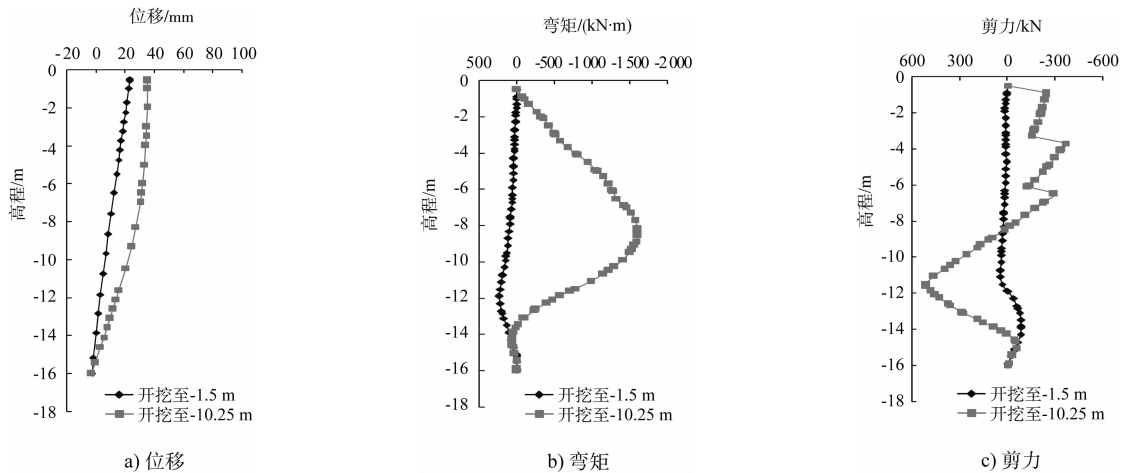


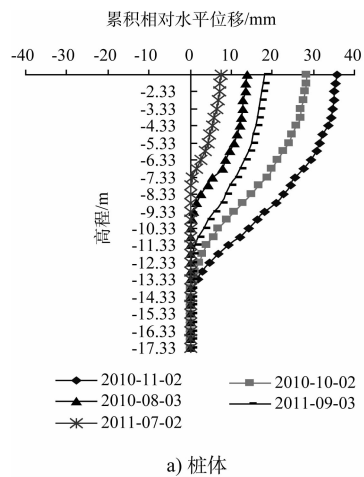
图 6 优化支护方案剖面 6-6 支护结构的桩位移、内力曲线

3 实测数据对比分析

为了保证基坑支护结构的安全,在基坑开挖和后续结构施工阶段对基坑支护结构和周边环境进行监测,监测点平面布置见图 2。

基坑开挖最深段 $F'G'$ 监测点布置在 246# 灌注桩上,测斜孔深度与灌注桩深度相同。246# 灌注桩变形监测数据见图 7,从图中可以看出桩顶位移和桩体位移都是随着基坑深度的增加而增加,但位移发展有一定的滞后性。10 月份开挖到基坑底部 -10.25 m,桩顶(冠梁顶)位移达到 38 mm,桩体位移最大出现在桩顶(冠梁底)位移为 36 mm,主体结构施工时灌注桩位移趋于稳定。从数据分

析中可以看出 $F'G'$ 段的实测数据与有限元模拟计算结果相吻合。



a) 桩体

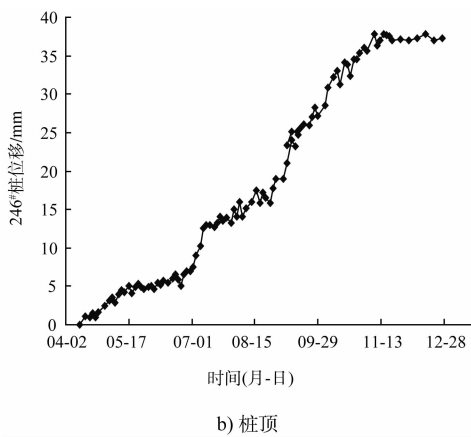


图7 基坑246#桩位移曲线

4 结论

1) 本基坑处于深厚的淤泥层中, 开挖最深区段超过 10 m; 两层锚索间距为 5 m 时, 灌注桩弯矩和桩顶位移均无法满足要求。

2) 支护方案改为布置 3 道锚索, 锚索竖向间距均为 3 m 时, 基坑支护桩的弯矩和变形均能满

足要求, 并且能取得较好的经济效益。

3) 在深厚软土层中采用锚-撑结构具有施工进度快、费用低的优点, 可为类似深厚软土地区深基坑工程支护结构设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 深圳市水利规划设计院. 沙井河片区排涝工程河口泵站基坑支护结构图[R]. 深圳: 深圳市水利规划设计院, 2008.

[2] 曹洪. 宝安区沙井河片区排涝工程泵站、水闸基坑咨询报告[R]. 广州: 华南理工大学, 2010.

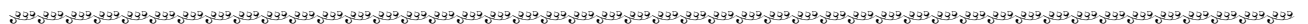
[3] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[4] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

[5] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].

[6] GB 50497—2009 建筑基坑工程监测技术规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 50 页)

3) 基于 $GM(1,1)$ 模型的预测沉降量, 可用于对土体固结情况做出合理的评价和符合实际的预测, 同时也为类似工程设计和施工提供了参考依据。

参考文献:

[1] 贺迎喜, 文辉辉, 梁小丛, 等. 基于 Asaoka 法的非等间隔真空预压土体沉降数据处理[J]. 水力发电, 2014, 40(3): 23-25.

[2] 文辉辉, 尹建民, 秦志光, 等. BP 神经网络在围岩力学

参数反演中的应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(2): 47-51.

[3] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[4] 彭涛, 杨岸英, 梁杏, 等. BP 神经网络-灰色系统联合模型预测软基沉降量[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1 810-1 814.

[5] 谢仁红, 邹朋高, 文辉辉. BP 神经网络在隧道监控量测数据处理中的应用[J]. 水力发电, 2013, 39(9): 20-22.

(本文编辑 武亚庆)