

地铁站深基坑土体力学参数反演分析

朱云虎¹, 石晓燕²

(1. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:基于正交试验设计和 FLAC3D 建立的学习样本以及测试样本,通过工程现场获取的地铁站深基坑支护体系位移信息,在总结分析基坑变形受力特征的基础上,找出对地铁站深基坑变形起主要作用的因素,确定待反演土体力学参数,然后建立 BP 神经网络理论反演的参数同支护结构位移间潜在的映射关系。实例计算结果表明,利用 BP 神经网络的仿真预测功能实现地铁站深基坑土体力学参数反分析是较为准确可行的。

关键词:深基坑;土体力学参数;位移反分析;神经网络;地铁站

中图分类号:TU463

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)S1-0033-03

在整个地铁工程设计中,地铁站的设计和施工是整个工程中最为重要的环节。为确保地铁站深基坑工程的安全稳定,并尽可能避免由于支护设计保守造成投资浪费,需要对基坑工程支护设计进行正确而经济的定位。在进行基坑工程支护设计时,由于岩土体材料的各种特性,如非均匀性、非线性、不连续性等,以及各种工程、施工因素的影响,如何准确地选取岩土体的物理力学参数至关重要^[1]。基坑工程中对地下围护结构受力、变形影响比较直接的土体参数有弹性模量 E 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 以及泊松比 μ 。通过现场原位试验和室内实现所得到的上述土体力学参数都不可避免地带有任意性和局限性,不能全面反映岩土体的力学特性^[2-3]。基于此,工程中解决岩土体参数的选取问题一般采用反分析的方法。本文结合深圳地铁某地铁站深基坑的实测位移数据,利用 BP 神经网络对土体的力学参数进行反演。

1 位移反分析原理与方法

将位移反分析看作一个整体系统,则基坑工程施工过程中的各种施工活动为系统的输入,现场的监测位移量、变形量为对应的输出,其基本原理如图 1 所示。位移反分析的本质是利用基本原理建立从输出到输入的映射关系。BP 神经网络是一个复杂的动态非线性系统,有分布式和并行处理信息的能力,很强的学习联想和抗干扰能力及良好的自适应

能力,几乎可以模拟任何复杂的非线性系统^[4]。

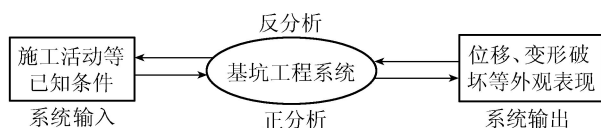


图1 位移反分析基本原理

本文基坑土体力学参数的位移反分析研究主要综合运用了正交试验法、有限差分法以及 BP 神经网络方法。根据正交试验对各土层土体力学参数进行分组设计,运用有限差分软件 FLAC3D 对基坑开挖工况进行模拟计算,根据计算结果构建 BP 神经网络训练样本,采用 BP 神经网络模型进行土体力学参数的位移反分析研究。

具体实施步骤如下:

a. 对实际量测数据进行分析,以确定待反演的参数,通过正交设计或者均匀设计等方式建立各待反演参数分组水平的组合。

b. 数值计算获得学习样本。具体方法为根据第一步骤各参数的组合,将每组参数组合值作为已知量代入正分析程序计算,得到相应的计算位移值。把参数组合值与对应的位移计算值作为一个输入与输出对,构建训练学习样本。

c. 将步骤 b 学习训练样本输入神经网络训练,通过试算法找出适合的网络结构,并依据计算机自身规模程度,设定输入与输出层节点数目。

d. 训练学习并检测。把样本导入网络的计算

作者简介:朱云虎(1962—),男,浙江东阳人,高级工程师,主要从事岩土工程与勘察工程技术研究。E-mail:spiritxi@163.com

模块实现机器学习,使网络训练成熟。

e. 参数反分析计算。把实际量测的位移值代入已训练成熟的网络中,通过优化法找寻目标函数最小值,与其相应的参数组合值即神经网络得出的反演参数。

f. 将步骤 e 反演得出的参数代入由 FLAC3D 建立的正分析模型,计算出深基坑支护体系的计算位移值。

g. 将计算位移值和实测的位移值对比分析,求解误差,验证其精度是否符合规定。

2 实例分析

选取深圳市地铁某地铁站深基坑为工程实例,车站外包长度 226.3 m,标准段宽度 17.91 m,车站主体及附属结构采用明挖法施工,主体围护采用直径 1000 mm、桩间距 1300 mm 的钻孔灌注桩作为基坑围护结构,桩顶设冠梁,桩间采用 C20 挂网喷混凝土保持桩间土稳定;采用直径 600 mm、 $\delta 12$ 钢管 3 道作为内支撑;钻孔灌注桩之间采用直径 800 mm 旋喷桩止水。出入口、通道围护结构采用直径 800 mm、桩间距 1200 mm 的钻孔灌注桩加钢支撑作为基坑围护结构,采用直径 600 mm、 $\delta 12$ 钢管 2 道作为内支撑。

2.1 数值模拟计算模型与初始计算参数

采用 FLAC3D 软件对地铁站深基坑进行三维建模。考虑基坑的支护结构类型、地面超载、开挖方法等一系列因素对基坑建模,进行有限差分计算,数值模型平面图和模型网格划分见图 2 和图 3。

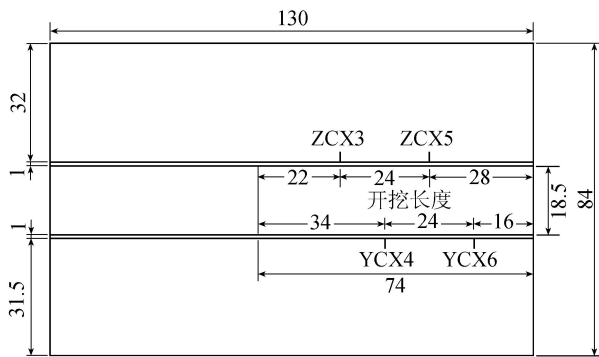


图 2 数值模型平面示意图(单位:m)

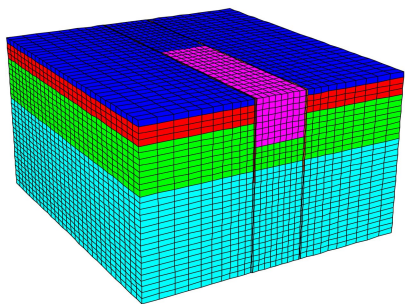


图 3 FLAC3D 计算模型

a. 计算域范围:基坑开挖深度为 16.4 m,当前开挖长 74 m,基坑宽 18.5 m。根据基坑开挖影响长度方向约为开挖深度的 3~4 倍,深度方向约为开挖深度的 2~4 倍,选取模型尺寸为 110 m \times 84 m \times 60 m (长 \times 宽 \times 高)。

b. 模拟单元:钻孔注桩和高压旋喷桩选取 3 节点的桩单元进行模拟,土体选取三维六面体 8 节点的实体单元进行模拟,钢支撑选取 3 节点梁单元进行模拟。

c. 边界约束:由于模型范围选取足够大,因此在基坑的长边方向(x 方向)两端($x=0$ m, $x=130$ m)施加 x 方向约束,基坑的短边方向(y 方向)两端($y=0$ m, $y=84$ m)施加 y 方向约束,而在模型的底面($z=-60$ m)施加了 x 、 y 、 z 3 个方向的约束。

d. 材料模型:土体选取弹塑性的莫尔-库伦模型,结构材料(钻孔灌注桩、高压旋喷桩和钢支撑)选取各向同性的弹性模型。

e. 荷载:重力、地应力场、地下水和施工荷载。对于场地内地下水下的土体采用有效应力的方式考虑地下水的影响。

分析工程地质勘察报告中的土层情况,考虑到提高数值模拟计算的收敛性及参数反演的精确性,将建模范围中的土层划分为 4 层,第 1 层为填土层,厚 2.6 m;第 2 层为粉质黏土层,厚 4.7 m;第 3 层为黏土层,厚 16.8 m;第 4 层为灰岩,厚 35.9 m,选取第 2 层粉质黏土层作为位移反分析的土层^[5]。该土层土体力学计算等效参数如下:层厚 4.7 m,密度 1.97 t/m³,压缩模量 8.7 MPa,黏聚力 32.5 kPa,内摩擦角 15.9°,泊松比 0.35。

2.2 构建 BP 网络学习样本

利用正交试验设计法构建 BP 网络学习样本,利用所建立的模型模拟计算得到岩土力学参数,每组参数输入到数值模拟程序计算得到对应的一组计算位移,16 组试验对应应有 16 组正分析位移值,这样便得到了 BP 神经网络的雏形样本集。在本工程实例中,输入模式为土体的力学计算等效参数,将其代入数值模拟模型,得到输出模式为深基坑支护体系中的两个监测点 CX12 和 CX16 分别在 -2 m 和 -6 m 的位移变形,这 16 组对应的输入和输出模式即为粉质黏土层土体位移反分析训练样本(表 1)。

2.3 基坑土体力学参数位移反分析

BP 神经网络输入层为现场实测的桩体位移,相应的输出层是填土层的土体力学参数。网络的结构为 4 \times 11 \times 4,其中输入层 4 个节点,输出层 4 个节点,隐含层 11 个节点,隐含层激活函数采用 tansig 函数,输出层激活函数采用 logsig 函数;采用 Lvenenberg-Marquart

表1 粉质黏土层神经网络训练样本

编号	输入模式				输出模式(位移)/mm			
	E/MPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	μ	CX16 (-6 m)	CX12 (-6 m)	CX16 (-2 m)	CX12 (-2 m)
1	8.2	30.5	15.1	0.33	12.13	8.96	13.72	11.18
2	8.2	32.1	15.7	0.34	11.88	8.91	13.66	11.08
3	8.2	33.7	16.3	0.35	11.65	8.71	13.17	11.05
4	8.2	35.3	16.9	0.36	11.32	8.87	13.12	10.92
5	8.6	30.5	16.3	0.36	11.43	8.55	12.96	10.87
6	8.6	32.1	16.9	0.35	11.29	8.13	13.05	10.76
7	8.6	33.7	15.1	0.34	11.05	8.10	12.91	10.61
8	8.6	35.3	15.7	0.33	10.87	7.96	12.83	10.44
9	9	30.5	16.0	0.34	10.66	8.03	12.75	10.32
10	9	32.1	16.3	0.33	10.61	7.97	12.55	10.17
11	9	33.7	15.7	0.36	10.32	7.82	12.53	10.11
12	9	35.3	15.1	0.35	10.17	7.76	12.47	10.02
13	9.4	30.5	15.7	0.35	10.12	7.71	12.36	9.89
14	9.4	32.1	15.1	0.36	10.39	7.69	12.43	9.93
15	9.4	33.7	16.9	0.33	9.97	7.57	12.31	9.88
16	9.4	35.3	16.3	0.34	9.63	7.63	12.29	9.84

优化算法进行网络训练。网络迭代 637 步收敛,收敛误差为 1×10^{-10} ,如图 4 所示。

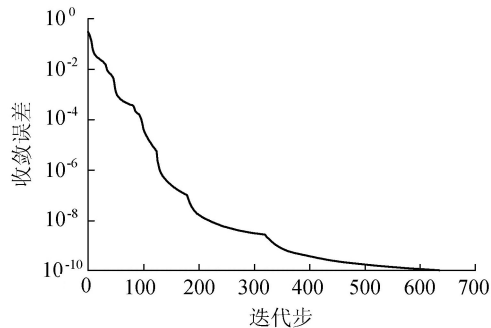


图4 BP 网络训练过程示意图

当基坑开挖到粉质黏土层时,测斜孔 CX12 和 CX16 在-6m 和-2m 位置的实测位移为 $u_0 = (8.25, 10.76, 11.43, 13.51)^T$ (单位:mm)。把 u_0 输入到训练好的神经网络中进行反分析,神经网络输出相应的黏土层土体力学参数 $R = (8.2, 30.5, 16.9, 0.33)^T$,把反演输出的力学参数代回正分析的模型中进模拟计算,得出相应测斜孔的位移为 $u_1 = (8.48, 11.19, 11.89, 13.18)^T$,实测位移与反分析的力学参数的计算位移误差见表 2。

表2 参数反分析结果

监测点	实测位移/ mm	计算位移/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/%
CX12(-6m)	8.25	8.48	0.23	2.74
CX16(-6m)	10.76	11.19	0.43	3.98
CX12(-2m)	11.43	11.89	0.46	4.01
CX16(-2m)	13.51	13.18	0.33	2.43

由表 2 可知,粉质黏土层反分析土体力学参数的计算位移与实测位移的误差符合规定的误差范围 (<5%),故可确定填土层土体力学参数为 $R =$

$(8.2, 30.5, 16.9, 0.33)^T$ 。

3 结 论

a. 通过对地铁站基坑现场监测数据的处理,在总结分析基坑变形受力特征的基础上,找出对基坑变形起主要作用的因素,确定了待反演参数。

b. 利用 FLAC3D 建立了地铁站基坑工程的数值模拟模型,模拟了基坑的开挖和支护,尽可能还原真实的工程过程,验证了所建模型能够用于土体参数反演正分析。

c. 应用 MATLAB 自带的神经网络工具箱,根据土体性质分层对基坑土体参数进行反演,逐层建立样本并反演,并将反演得出的参数代入正分析模型得出计算位移值,同实际监测值进行对比,验证了其用于地铁站深基坑位移反分析有着显著的优越性。

参考文献:

[1] 孙均,蒋树屏,袁勇,等. 岩土力学反演问题的随机理论与方法[M]. 汕头:汕头大学出版社,1996.
 [2] 李国蔚,李文彪. 基坑土性参数反分析及变形预报[J]. 重庆交通学院学报,2004,8(4):54-56.
 [3] 朱志伟. 深基坑工程土层参数反演及挡墙内力预报[J]. 岩土力学,1996,20(4):63-68.
 [4] 李立新,王建党,李造鼎. 神经网络模型在非线性位移反分析中的应用[J]. 岩土力学,1997,18(2):62-64.
 [5] 葛增杰,李锡菱. 深基坑开挖工程多层土体物性参数识别的 BP 法[J]. 大连理工大学学报,2000,40(3):271-275.

(收稿日期:2012-11-21 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

[2] 高加云,顾倩燕,李小军. 软土地基大跨度双排钢板桩围堰结构稳定性研究[J]. 水运工程,2009(增刊1):50-55.
 [3] 王加利,潘泓,曹洪,等. 基于监测数据的钢板桩围堰改进施工技术分析[J]. 施工技术,2011,40(24):74-77.
 [4] 叶三元,李衡,万启宣. 雁洲水(船)闸工程双排钢板桩围堰设计[J]. 人民长江,2011,42(1):22-25.
 [5] 熊江平,胡俊红,金勇,等. 秦淮河三汊河口闸工程钢板桩围堰设计[J]. 中国农村水利水电,2006(3):105-107.
 [6] 潘泓,曹洪,尹一鸣. 广州猎德大桥钢板桩围堰的设计与监测[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(11):2242-2248.
 [7] 骆冠勇,曹洪,潘泓,等. 新光大桥桥墩钢板桩围堰的优化设计与监测[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(2):124-129.

(收稿日期:2012-12-25 编辑:胡新宇)