

地铁车站端头井施工数值模拟参数的确定

杨 妍, 徐金明

(上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 数值模拟能够有效分析深基坑开挖引起的围护结构变形和地表沉降问题, 但模拟时所用主要参数目前还没有公认的确定的方法。以上海市某地铁车站新建深基坑工程端头井段为例, 使用有限元软件 ABAQUS 对施工过程进行模拟, 使用正交试验方法研究了数值模拟所用土层参数的重要性, 分析了不同土层参数对围护结构水平位移影响的敏感性, 使用反分析方法提出了基坑开挖过程有限元数值模拟时参数的确定方法。结果表明: 有限元数值模拟时对连续墙水平位移影响最大的参数为弹性模量、泊松比; 数值模拟时, 淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土的模量比 (弹性模量与压缩模量的比值) 可取 3.25~3.35, 黏土和粉质黏土的模量比分别可取 3.67, 5.69~5.81, 粉土、粉砂的模量比分别可取 6.14, 6.17~6.44, 模量比取值从小到大对应的土层分别是黏性土、粉性土、砂性土; 淤泥质土泊松比与勘察所得泊松比的比值为 1.05~1.12, 其他土层的泊松比与勘察结果的比值为 0.90~1.05。

关键词: 围护结构; 有限元数值模拟; 参数确定; 正交试验; 反分析

中图分类号: TU 447 **文献标志码:** A

Determination of parameters used in numerical simulation for construction of the end wall of a subway station

YANG Yan, XU Jinming

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Numerical simulation may efficiently analyze the deformation of the envelope structure and surface settlement caused by the excavation of deep foundation pits. However, there are no common recognition for determining the parameters of the layered soil mostly used in the numerical simulation. Taking the end well section of the deep foundation pit in a subway station in Shanghai as an example, the construction process was simulated using the finite element software ABAQUS. After estimating the importance of each parameter by using orthogonal test, the sensitivity of the influence of the parameters of various soil layers on the horizontal displacement of the envelope structure was analysed. The back analysis was furthermore conducted to determine the parameters used in the finite element simulation for the pit excavation. It is shown that two parameters, i.e., the elastic modulus and Poisson's ratio, have the greatest influence on the horizontal displacement of the continuous wall in the numerical simulation.

收稿日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41472254)

第一作者: 杨 妍 (1996-), 女, 硕士研究生。研究方向: 岩土工程。E-mail: yangyan20189@163.com

通信作者: 徐金明 (1963-), 男, 教授。研究方向: 工程地质与岩土工程。E-mail: xjming@163.com

In the finite element simulation, the modulus ratios (ratios of the elastic modulus to compressive modulus) for the sludgy clay and sludgy silty clay can be taken as 3.25~3.35, those for the clay and silty clay can be taken as 3.67 and 5.69~5.81, while those for the silt and silty sand can be taken as 6.14 and 6.17~6.44. The modulus ratios for the corresponding soil layers from small to great are cohesive soil, silty soil, and sandy soil in order. The ratio of the Poisson's ratio to survey ratio for silty soil is 1.05~1.12, while those of other soil layers are 0.90~1.05.

Keywords: *envelope structure; finite element simulation; parameter determination; orthogonal test; back analysis*

随着我国城市化建设的发展, 地下工程不断增多, 对基坑的安全性和稳定性要求也进一步提高。目前, 基坑工程设计多利用大型商业有限元软件, 通过建立基坑计算模型进行相应的数值模拟, 对基坑稳定性进行分析。但是, 受到试验方法、试验周期等方面的影响, 模拟计算所用参数还没有公认的确切方法, 对计算结果准确性造成了很大影响。因此, 有必要研究有限元数值模拟过程中的参数取值问题。

基坑问题有限元分析的参数取值, 已经有一些成果。杨敏等^[1]通过分析上海地区 68 根打入式桩的试验结果, 认为数值模拟时上海地区土的弹性模量 E_s 可取为 $(2.5\sim3.5)E_{0.1\sim0.2}$ ($E_{0.1\sim0.2}$ 由勘察报告给出, 是外荷 0.1~0.2 MPa 时的压缩模量)。贾堤等^[2]探讨了利用场地岩土勘察报告获得数值分析中土体弹性模量的方法, 认为利用压缩模量换算弹性模量时两者比值取 8.2 比较合适。徐伟等^[3]分析了特殊平面形状下深基坑受力和变形对土力学性质参数的敏感程度。李圃林^[4]建立了弹性模量计算的线弹性模型, 给出了黏性土和砂土的修正系数公式, 并进行了有限元计算分析与监测值的对比验证。冉涛等^[5]对基坑开挖变形的主要岩土参数进行了极差分析和方差分析, 为位移反分析奠定了一定的基础。

然而, 由于试验环境和试样尺寸效应等因素的影响、土体自身结构的复杂性、土的力学性质的空间变异性, 室内和现场试验获得的力学性质参数与土体实际参数通常有较大偏差。研究人员利用现场监测信息, 借助一定的力学模型和数值计算来反推土体力学参数, 为解决土体计算参数取值问题提供了重要途径。Papon 等^[6]采用确定性算法和随机算法, 通过反分析得到了土的弹性模量、内摩擦角和黏聚力。Finno 等^[7]利用反分析软

件对土的硬化模型计算参数进行反分析, 取得了良好效果。Juang 等^[8]采用贝叶斯计算框架, 利用现场监测数据对基坑土层参数进行了反分析。赵香山等^[9]采用 AMALGAM 算法对基坑工程中的土体性质参数进行了反分析。王洪德等^[10]基于差异进化多参数反分析方法, 对深基坑土层参数进行静态和动态位移优化, 取得了较好效果。近年来, 智能反分析方法(如遗传算法^[11-12]、BP 网络^[13]等)得到了一些实际应用。

在确定数值模拟所用土体参数时, 弹性模量等参数一般难以从勘察报告直接得到, 大部分学者只考虑某一种参数或只考虑单一土层, 这不符合土层实际分布, 也不能反映不同土层性质相差很大的情况, 降低了模拟计算的准确性^[14-15]。本文以上海市某地铁车站基坑作为研究对象, 利用有限元软件 ABAQUS, 在用正交试验分析不同参数重要性的基础上, 通过反分析方法确定有限元数值模拟所用的主要参数。

1 有限元模型的建立

1.1 工程概况

研究对象为上海市一地铁车站深基坑工程。工程场地位于古河道沉积区, 地基土属第四纪晚更新世及全新世沉积物, 主要由黏性土、粉性土和砂土组成, 分布较稳定, 具有成层分布的特点。车站主体是叠合墙结构, 为地下 3 层岛式车站, 尺寸为 486.37 m×22.84 m, 主体结构分为 6 个施工区域(A, B, C, D, E, F 区), 20 段结构, F 区又分为标准段和端头井段。站台中心处基坑深约 25.8 m, 车站两端各设一端头井, 南端端头井(F 区端头井)基坑深约 27.8 m。车站基坑工程安全等级为一级, 环境保护等级为一级, 设计使用年

限为 100 a。

本文将以 F 区为主要研究对象。F 区基坑宽度为 20 m，开挖深度为 27.427 m，采用框架逆作法施工。基坑左右两侧采用厚 1200 mm、深 59 m 的地下连续墙进行围护。基坑主体采用混凝土撑+钢支撑的支护方式，第一道为混凝土撑，尺寸为 1200 mm×1300 mm，其余 7 道支撑采用 800/20 的钢支撑(即钢支撑半径和厚度分别为 800 mm 和 20 mm)，8 道支撑中心分别位于地表下 0.6, 3.4, 6.6, 12.337, 15.837, 18.937, 21.427, 24.727 m。

F 区场地共有 6 个主要土层，从上至下依次是填土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、一般黏性土、第二砂层及第三砂层，缺失上海市统编的第⑥层暗绿色黏性土层及第⑧层黏性土层，埋深达 78.3 m。

1.2 几何模型

选取 F 区端头井段基坑截面，使用有限元软件 ABAQUS 进行二维建模分析。周围土体影响区域取基坑深度 5 倍左右，整个模型的长×宽为 150 m × 78.3 m。土体左右两边采用水平位移约束，土体底部采用固定约束。建立的基坑有限元模型如图 1 所示。

基坑采取分层开挖的方式，主要分 13 个开挖工况，具体支护结构设计和开挖步骤如下：

- a. 架设第 1 道混凝土支撑，开挖至第 2 道钢支撑底；
- b. 架设第 2 道钢支撑，开挖至第 3 道钢支撑底；
- c. 架设第 3 道钢支撑，浇筑顶框架，开挖至下

一层板下 2 m；

- d. 拆除第 3 道钢支撑，架设于第 4 道钢支撑处；
- e. 浇筑下一层框架，开挖至第 5 道钢支撑底；
- f. 拆除第 4 道钢支撑，架设于第 5 道钢支撑处；
- g. 开挖至第 6 道钢支撑底；
- h. 拆除第 2 道钢支撑，架设于第 6 道钢支撑处；
- i. 浇筑下二层框架，开挖至第 7 道钢支撑底；
- j. 拆除第 6 道钢支撑，架设于第 7 道钢支撑处；
- k. 开挖至第 8 道钢支撑底；
- l. 拆除第 5 道钢支撑，架设于第 8 道钢支撑处；
- m. 开挖至坑底。

1.3 物理性质参数

基坑截面主要土层分为 10 层，土体均采用弹性本构模型，各土层分布及物理力学指标如表 1 所示。表 1 中， μ ， $E_{0.1\sim 0.2}$ ， γ ， c ， φ 分别为泊松比、压缩模量、天然重度、黏聚力、内摩擦角。

由于基坑开挖之前 20 天对坑内实施了疏干降水措施，降水后水位位于开挖面下 1.0 m，所以，建模时不考虑地下水对结构变形的影响。

采用有限元软件 ABAQUS 进行基坑开挖变形的数值模拟计算。建模时，土体采用摩尔库伦屈服准则，地下连续墙和支撑采用线弹性本构模型。混凝土强度等级均为 C30(弹性模量、泊松比、重度分别取 25 GPa, 0.2, 25 kN/m³)。钢支撑采用 Q235 型钢，弹性模量和泊松比分别取 200 GPa 和 0.26。

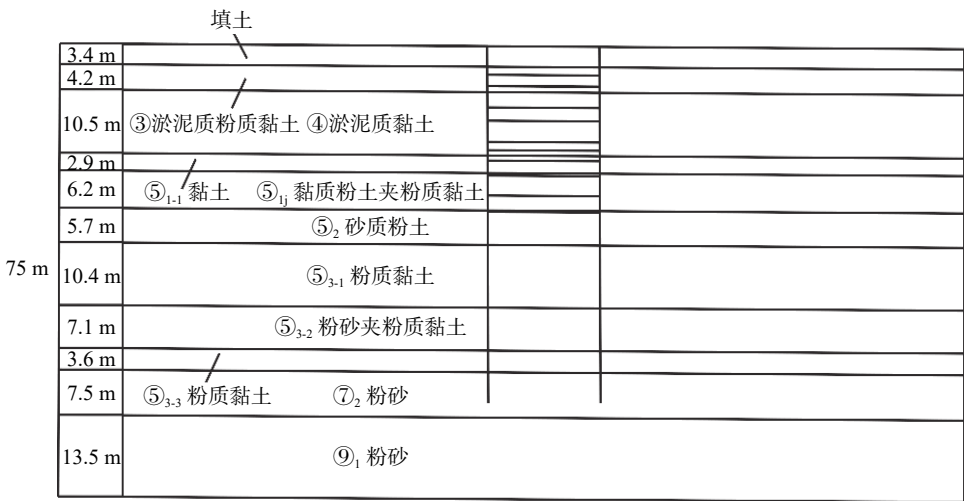


图 1 基坑的有限元模型
Fig.1 FEM model of the foundation pit

表 1 端头井段土层分布及物理力学参数

Tab.1 Distribution and mechanical parameters of soil layers on end well

土层编号	土层名称	土层序号	土层厚度/m	μ	$E_{0.1\sim 0.2}/\text{MPa}$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
③	淤泥质粉质黏土	Q01	4.2	0.34	2.72	17.1	12	13
④	淤泥质黏土	Q02	10.5	0.36	2.34	16.5	13	11
⑤ ₁₋₁	黏土	Q03	2.9	0.34	3.04	17.2	15	16
⑤ _{1j}	黏质粉土夹粉质黏土	Q04	6.2	0.32	4.43	17.9	12	21
⑤ ₂	砂质粉土	Q05	5.7	0.28	9.18	17.9	4	31
⑤ ₃₋₁	粉质黏土	Q06	10.4	0.31	4.50	17.8	18	20
⑤ ₃₋₂	粉砂夹粉质黏土	Q07	7.1	0.27	8.36	18.2	3	30
⑤ ₃₋₃	粉质黏土	Q08	3.6	0.32	5.17	17.9	25	16.5
⑦ ₂	粉砂	Q09	7.5	0.26	11.50	18.4	0	32
⑨ ₁	粉砂	Q10	13.5	0.27	12.04	19.0	0	34

2 数值模拟使用参数重要性的确定

土体使用摩尔库伦屈服准则进行数值建模时,需用到弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力等参数。这些参数可以通过反分析进行确定。若将这 4 个参数都进行反分析确定,计算量太大。因此,首先使用正交试验方法确定地下连续墙变形的主要影响参数,进而据此进行有针对性的参数反演,这将大大减小工作量、提高计算效率。

2.1 参数确定的正交试验方案

根据正交试验设计原理,选取地下连续墙的水平位移作为目的指标,以影响基坑开挖变形的 4 个主要力学参数作为影响因素,将每个参数划分为 5 个水平。根据贾堤等^[2]的研究成果,将黏性土的弹性模量基准值取为弹性模量与压缩模量比值为 4.5 时对应的弹性模量值,砂性土的基准值取为 5 倍的压缩模量,弹性模量水平分别取为基准值、基准值增加 20%、基准值增加 40%、基准值减少 20%、基准值减少 40%。由于内摩擦角、黏聚力和泊松比变化一般不会太大,因此,将这 3 个因素水平取为前述基坑模拟参数值(基准值)、基准值增加 10%、基准值增加 20%、基准值减少 10%、基准值减少 20%。采用 6 因素 5 水平正交表 $L_{25}(5^6)$ (25 表示需进行的模拟试验的次数,5 表示每一个因素的水平数,6 表示因素数目),由于本文针对 4 个参数进行敏感性分析,因此,设置一列误差列,取前 5 列进行正交试验设计。不同水平下的正交试验参数取值方案如表 2 所示。表 2 中,各数值表示模型基准值的倍数。

表 2 不同水平下正交试验参数的取值

Tab.2 Parameters in orthogonal tests at various levels

水平	弹性模量A	泊松比B	内摩擦角C	黏聚力D
1	0.6	0.8	0.8	0.8
2	0.8	0.9	0.9	0.9
3	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.2	1.1	1.1	1.1
5	1.4	1.1	1.1	1.1

根据表 2 进行正交试验设计,进行 25 次数值计算。具体计算方案及模拟结果如表 3 所示。

2.2 不同参数重要性的确定

使用极差分析方法,得到不同参数对地下连续墙最大水平位移影响程度的大小,如表 4 所示,表 4 中的 K_1, K_2, K_3, K_4 和 K_5 分别表示每个因素第 1, 2, 3, 4, 5 水平试验结果的总和, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 分别代表每个因素第 1, 2, 3, 4, 5 水平试验结果的平均值, R_j 代表每个因素的极值。由表 4 可以看出,泊松比、弹性模量极值较大,对地下连续墙水平位移影响较敏感;不同参数对地下连续墙水平位移影响程度由大到小的顺序依次是:弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力。

图 2 显示了不同参数水平对地下连续墙水平位移的影响。由图 2 可以看出,弹性模量、内摩擦角与地下连续墙最大水平位移呈负相关,泊松比与地下连续墙最大水平位移呈正相关,黏聚力对地下连续墙最大水平位移的影响较小。其中,

表 3 正交试验方案及结果

Tab.3 Scheme and results of orthogonal tests

试验编号	因素				误差列	位移/mm
	弹性模量A	泊松比B	内摩擦角C	黏聚力D		
1	0.6	0.8	0.8	0.8	1	74.49
2	0.6	0.9	0.9	0.9	2	70.07
3	0.6	1.0	1.0	1.0	3	68.83
4	0.6	1.1	1.1	1.1	4	74.00
5	0.6	1.2	1.2	1.2	5	83.34
6	0.8	0.8	0.9	1.0	5	51.61
7	0.8	0.9	1.0	1.1	1	51.25
8	0.8	1.0	1.1	1.2	2	48.80
9	0.8	1.1	1.2	0.8	3	58.27
10	0.8	1.2	0.8	0.9	4	88.81
11	1.0	0.8	1.0	1.2	4	38.26
12	1.0	0.9	1.1	0.8	5	52.12
13	1.0	1.0	1.2	0.9	1	41.06
14	1.0	1.1	0.8	1.0	2	71.76
15	1.0	1.2	0.9	1.1	3	67.98
16	1.2	0.8	1.1	0.9	3	32.59
17	1.2	0.9	1.2	1.0	4	32.08
18	1.2	1.0	0.8	1.1	5	59.82
19	1.2	1.1	0.9	1.2	1	51.44
20	1.2	1.2	1.0	0.8	2	57.20
21	1.4	0.8	1.2	1.1	2	26.08
22	1.4	0.9	0.8	1.2	3	49.27
23	1.4	1.0	0.9	0.8	4	49.06
24	1.4	1.1	1.0	0.9	5	74.49
25	1.4	1.2	1.0	0.9	1	70.07

弹性模量和泊松比的变化幅度较大，对地下连续墙变形的影响较大。

为了进一步检验各影响因素的显著性水平，在极差分析基础上对试验结果进行方差分析。选取显著性水平 $\alpha=0.01, 0.05$ ，根据 F 分布分位数表得到

$F_{0.99}(4,4)=6.59, F_{0.95}(4,4)=4.11$

定义因素相关关系符合 $F>F_{0.99}(4,4)$ 时为高度显著，符合 $F_{0.95}(4,4)\leq F\leq F_{0.99}(4,4)$ 时为显著，符合 $F<F_{0.95}(4,4)$ 时为不显著。具体方差分析结果如表5所示。

表 4 正交试验结果的均值和极差 (1)

Tab.4 Mean and range of orthogonal test results (1)

试验指标	因素				误差列
	弹性模量A	泊松比B	内摩擦角C	黏聚力D	
K_1	370.73	223.03	344.15	291.14	266.63
K_2	298.74	254.79	295.92	275.81	274.37
K_3	271.18	267.57	258.82	272.23	293.04
K_4	233.13	304.51	255.46	279.13	273.14
K_5	215.64	345.28	240.83	276.87	288.00
k_1	74.15	44.61	68.83	58.23	53.33
k_2	59.75	50.96	59.18	55.16	54.87
k_3	54.24	53.51	51.76	54.45	58.61
k_4	46.63	60.90	51.09	55.83	54.63
k_5	43.13	69.06	48.17	55.37	57.60
R_j	31.02	24.45	17.74	0.21	4.27
排序	1	2	3	4	

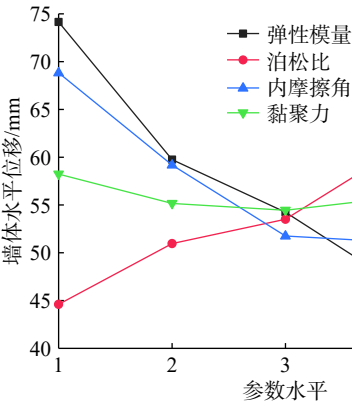


图 2 不同参数水平下地下连续墙水平位移

Fig. 2 Horizontal displacements of the continuous wall at various levels of soil parameters

表 5 正交试验结果的均值和方差 (2)

Tab.5 Mean and variance of orthogonal test results (2)

因素	偏差平方和	方差	F 值	显著性
A	2995.51	748.88	46.36	高度显著
B	1779.97	444.99	27.55	高度显著
C	1391.15	347.79	21.53	高度显著
D	42.91	10.73	0.66	不显著
误差	98.71	24.68		

由表5中的 F 值可以看出，弹性模量、泊松比对地下连续墙最大水平位移的影响最为显著，所有因素显著性水平由大到小的顺序为：弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力，这一顺序与极

差分析结果相同。

3 主要数值模拟参数的确定

由表5可知,弹性模量、泊松比对地下连续墙最大水平位移具有显著影响。为了得到这些参数的影响程度且充分考虑土的成层性特点,现根据现场地下连续墙水平位移实测值,利用反分析方法分别研究数值模拟时这2个参数的具体确定方法。

3.1 弹性模量的确定

根据室内土工试验获得的各土层压缩模量(表1)、有限元数值模拟时的弹性模量基准值,将土层弹性模量与压缩模量比定义为 R ,弹性模量基准值与压缩模量之比定义为基准模量比 r ,得到 $r=0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ 时的模拟结果(图3)。图3中, Q01, Q02, ..., Q10 为土层序号, 对应于从地面向下的实际土层③, ④, ..., ⑨₁(见表1), Q 对应于所有土层参数同时改变的情况。

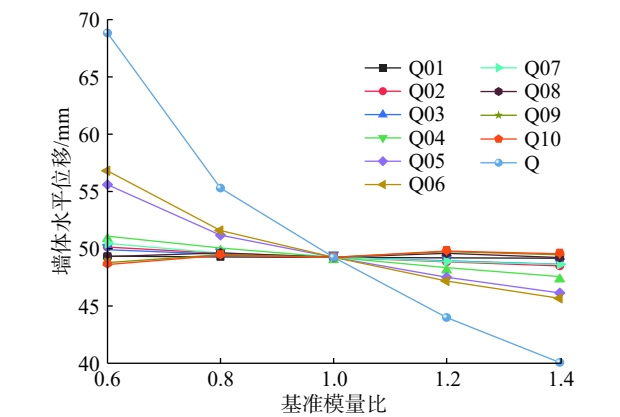


图3 不同土层不同基准模量比时的地下连续墙水平位移
Fig.3 Horizontal displacements of the continuous wall of various soil layers with various modulus ratio

从图3可以看出,所有土层弹性模量同时改变时,地下连续墙水平位移基本上随着弹性模量增大而减小。同时,不同土层弹性模量单独变化对地下连续墙水平位移的影响程度并不相同,所有土层中,土层Q05和Q06对水平位移的影响最大。这2个土层 r 都取1.4时地下连续墙水平位移比基准值对应模型分别减少了12.88%和15.32%;而 r 为0.8时地下连续墙水平位移分别增大6.30%和7.27%;其他土层对地下连续墙水平位移的影响较小。

为了确定符合实际情况的模量比 R ,假设土体

弹性模量与地下连续墙变形呈抛物线关系^[16],将各土层弹性模量与围护结构水平位移关系用不带交叉项的二次函数 $S(X)$ 表示。

$$S(X)=A+\sum_{i=1}^nB_iX_i+\sum_{i=1}^nC_iX_i^2\tag{1}$$

式中: X_i 为待反分析参数弹性模量($i=1, 2, \cdots, 10$); S 为地下连续墙的位移; A, B_i, C_i 为待定系数。

为了求解式(1)中的21个系数,将各土层弹性模量基准模量比分别取为0.9和1.1,得到21个系数对应的21组弹性模量计算值,如表6所示。

表6 各土层弹性模量的数值模拟结果
Tab.6 Simulated results of the elastic modulus for various soil layers MPa

系数序号	土层									
	Q01	Q02	Q03	Q04	Q05	Q06	Q07	Q08	Q09	Q10
1	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
2	10.20	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
3	14.69	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
4	12.24	8.78	13.68	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
5	12.24	12.64	13.68	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
6	12.24	10.53	11.40	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
7	12.24	10.53	16.42	19.94	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
8	12.24	10.53	13.68	16.61	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
9	12.24	10.53	13.68	23.92	45.90	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
10	12.24	10.53	13.68	19.94	38.25	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
11	12.24	10.53	13.68	19.94	55.08	20.25	37.62	23.27	57.50	60.20
12	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	16.88	37.62	23.27	57.50	60.20
13	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	24.30	37.62	23.27	57.50	60.20
14	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	23.27	57.50	60.20
15	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	45.14	23.27	57.50	60.20
16	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	19.39	57.50	60.20
17	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	27.92	57.50	60.20
18	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	23.27	47.92	60.20
19	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	23.27	69.00	60.20
20	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	23.27	57.50	50.17
21	12.24	10.53	13.68	19.94	45.90	20.25	31.35	23.27	57.50	72.24

根据表6(21组弹性模量计算值)和使用有限元数值模拟所得对应弹性模量下21组地下连续墙的水平位移,假设不同深度处地下连续墙水平位

移与弹性模量为二次函数关系，算出二次函数的21个系数值。根据所得函数关系，令地下连续墙水平位移值等于实际监测值，得到各土层弹性模量反演值，如表7所示。同时将反演结果与李圃林^[4]所建立的砂性土和黏性土的弹性模量模型计算值进行对比，去掉误差大于50%的反演值，得到最终的反演值。表7列出了这些反演值的模量比。

表 7 不同土层弹性模量反演值
Tab.7 Inverse calculation results of the elastic modulus ratio for various soil layers

土层序号	弹性模量模型计算值/MPa	反演值/MPa	模量比
Q01	8.881	8.867	3.26
Q02	7.727	7.839	3.35
Q03	10.398	11.157	3.67
Q04	17.639	24.580	5.55
Q05	55.532	56.366	6.14
Q06	17.537	25.600	5.69
Q07	45.125	48.160	5.76
Q08	22.863	30.020	5.81
Q09	78.310	71.000	6.17
Q10	88.621	77.538	6.44

由表7可以看出，数值模拟时各土层的模量比可取为3.2~6.5，模量比取值从小到大对应的土层分别是黏性土、粉性土、砂性土。淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土的模量比可取3.25~3.35，黏土和粉质黏土的模量比分别可取3.67，5.69~5.81，粉土、粉砂的模量比分别可取6.14，6.17~6.44。

3.2 泊松比的确定

泊松比是体现土体侧向变形的重要指标，直接反映土体的强度与变形特性。不同土层的泊松比与基准值的比值分别取0.8，0.9，1.0，1.1，1.2，得到不同土层泊松比下的地下连续墙水平位移数值模拟结果，如图4所示。

从图4可以看出：同时改变所有土层泊松比时，随着泊松比的增大，地下连续墙水平位移呈现增大趋势，且变化趋势较大；所有土层的泊松比与基准值的比值变为1.2后，地下连续墙水平位移比基准值模型增大29.55%，说明增大泊松比导致地下连续墙发生较大位移；同时，改变不同土层泊松比对地下连续墙水平位移的影响远小于所有土层同时改变引起的变化；土层Q02和土层

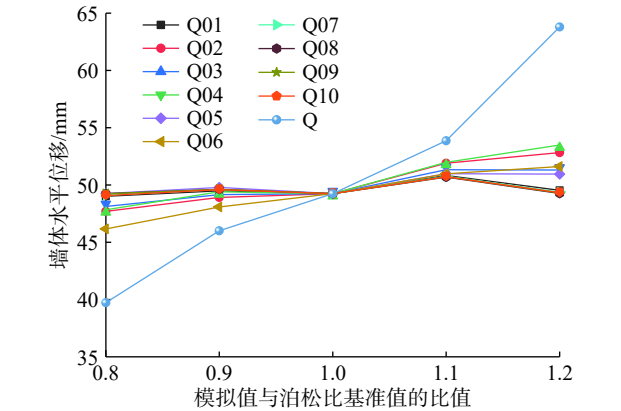


图 4 不同土层不同泊松比下地下连续墙水平位移的有限元模拟结果
Fig. 4 Horizontal displacements of the continuous wall with various Poisson's ratio of various soil layers

Q04的泊松比与基准值的比值增大到1.2时，地下连续墙水平位移分别增大7.26%和8.62%，位移增大程度相对较大，其余土层泊松比改变引起的地下连续墙水平位移的改变减小，均小于5%。

假设泊松比与地下连续墙位移呈线性变化关系，类似于前述模量比R确定方法，由反分析方法得到各土层的泊松比如表8所示。

表 8 各土层泊松比反演值
Tab.8 Inverse calculation results of the Poisson's ratio for various soil layers

土层序号	泊松比反演值	反演值与基准值的比值
Q01	0.408	1.10
Q02	0.392	1.09
Q03	0.382	1.12
Q04	0.345	1.08
Q05	0.291	1.04
Q06	0.291	0.94
Q07	0.251	0.93
Q08	0.323	1.01
Q09	0.236	0.91
Q10	0.255	0.94

由表8可以看出，泊松比与勘察结果的比值为0.90~1.12，淤泥质土土层的泊松比与勘察结果的比值为1.05~1.12，其他类型土层的泊松比改变范围不明显，与勘察结果的比值为0.90~1.05。

3.3 使用反分析方法得到的参数的准确性分析
选择均方根误差RMSE对使用上述参数后的数值模拟结果与实测结果的吻合程度进行评价^[17]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{mi} - y_{pi})^2}{N}}$$

(2)

式中： y_{mi} 为地下连续墙水平位移的实测值； y_{pi} 为地下连续墙水平位移的模拟结果； N 为对比数据的点数。

使用上述反分析得到的土层参数值进行有限元数值模拟，得到各土层单独改变时不同工况下的墙体水平位移曲线，进而对所有土层同时改变

得到的土层参数进行有限元模拟。图 5 是工况 9 和工况 13 不同参数下的墙体水平位移曲线。

从图 5 可以看出，采用各土层单独改变方法得到的模拟结果较所有土层同时改变方法得到的模拟结果效果要好，与实测值更为吻合。

表 9 为对基坑工程土层分别采用各土层单独改变及所有土层同时改变这两种方法的模拟结果的吻合程度，改变率为各土层参数分别改变和所有土层参数同时改变所得均方根误差减小值与所有土层参数同时改变时均方根误差的比值。

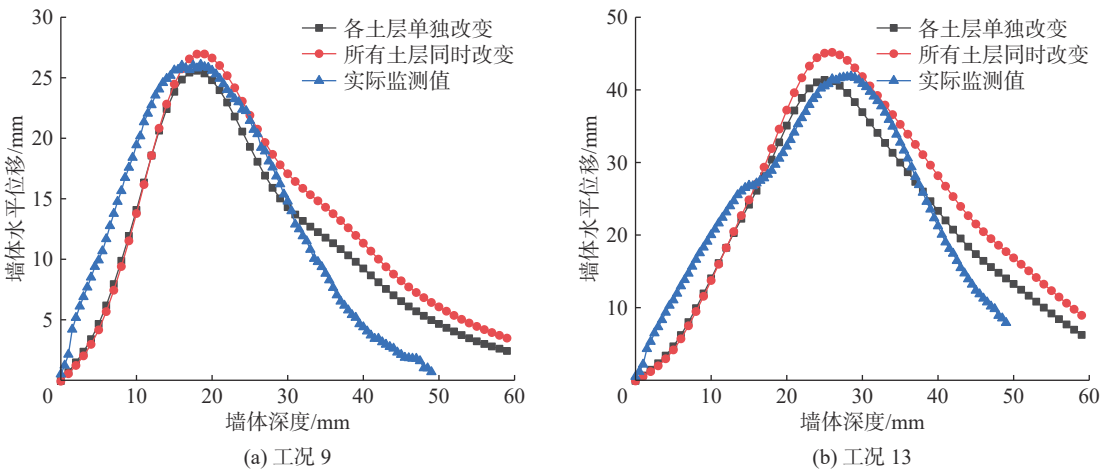


图 5 不同参数下不同深度的墙体水平位移

Fig.5 Horizontal displacement of the wall at different depths with different parameters

表 9 不同方法的均方根误差

Tab.9 Root mean square errors in different methods

土层编号	工况9			工况13		
	所有土层参数同时改变时	各土层参数单独改变时	改变率/%	所有土层参数同时改变时	各土层参数单独改变时	改变率/%
③	4.3	3.83	0.11	4.31	4.03	0.06
④	6.79	5.52	0.19	6.99	4.64	0.34
⑤ ₁₋₁	4.7	3.86	0.18	4.79	3.65	0.24
⑤ _{1j}	4.7	0.69	0.85	6.6	7.85	-0.19
⑤ ₂	3.93	1.77	0.55	9.84	4.43	0.55
⑤ ₃₋₁	3.87	1.39	0.64	8.66	8.91	-0.03
⑤ ₃₋₂	8.25	3.99	0.52	10.04	6.95	0.31
⑤ ₃₋₃	9.16	4.31	0.53	10.76	0.83	0.92

从表 9 可以看出，采用本文各土层参数单独反分析所得参数进行数值模拟后，各土层的均方根误差 $RMSE$ 显著减小。工况 9 中土层⑤_{1j}，⑤₃₋₁ 的 $RMSE$ 分别减小了所有土层同时改变参数时的 85% 和 64%，地下连续墙的水平位移模拟值与监测值的吻合程度提高比较明显。

4 结 论

以上海市某地铁车站深基坑工程为例，利用正交试验确定了有限元数值模拟时对地下连续墙水平位移影响最大的参数。根据实测数据和数值模拟结果，使用模量比表示土层弹性模量与压缩

模量的比值，使用反分析方法提出了这些参数的取值方法。结果表明：

a. 对地下连续墙水平位移影响最大的参数为不同土层的弹性模量和泊松比；

b. 数值模拟时不同土层宜使用不同的模量比，模量比取值从小到大对应的土层分别是黏性土、粉性土、砂性土，淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土的模量比可取 3.25~3.35，黏土和粉质黏土的模量比分别可取 3.67，5.69~5.81，粉土、粉砂的模量比分别可取 6.14，6.17~6.44；

c. 数值模拟时，不同土层的泊松比与勘察报告所得泊松比的比值宜取为 0.90~1.12，其中，淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土的泊松比与勘察结果的比值为 1.05~1.12，其他土层的泊松比与勘察结果的比值为 0.90~1.05。

参考文献：

[1] 杨敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法 [J]. 同济大学学报, 1992, 20(4): 421-428.

[2] 贾堤, 石峰, 郑刚, 等. 深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 155-158.

[3] 徐伟, 李靖祺, 段朝静. 某特殊平面形状深基坑围护结构对土层参数敏感性分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 173-176.

[4] 李圃林. 土体弹性模量在基坑工程有限元计算中的应用研究 [J]. 绿色科技, 2014(10): 237-239.

[5] 冉涛, 毛江南, 梅松华, 等. 基于正交试验法重力锚基坑岩土参数敏感性分析 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 101-106, 111.

[6] PAPON A, RIOU Y, HICHER P Y, et al. Identifying soil parameters by inverse analysis of field testing[C]// Biennial Asce Aerospace Division International Conference on Engineering. 2008: 1-8.

[7] FINNO R J, CALVELLO M. Supported excavations:

observational method and inverse modeling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(7): 826-836.

[8] JUANG C H, LUO Z, ATAMTURKTUR S, et al. Bayesian updating of soil parameters for braced excavations using field observations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(3): 395-406.

[9] 赵香山, 陈锦剑, 黄忠辉, 等. 基坑变形数值分析中土体力学参数的确定方法 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 1-7.

[10] 王洪德, 曹英浩, 朱贵东. 基于差异进化算法的土层多参数动态反分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 464-470.

[11] HUANG Z H, ZHANG L L, CHENG S Y, et al. Back-analysis and parameter identification for deep excavation based on Pareto multiobjective optimization[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(6): 1-11.

[12] MAJDI A, BEIKI M. Evolving neural network using a genetic algorithm for predicting the deformation modulus of rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 246-253.

[13] 王春波, 丁文其, 王军. 深基坑工程土层参数反分析方法探讨研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S2): 1638-1642.

[14] 肖明清, 刘浩, 彭长胜, 等. 基于神经网络的深厚软土地层参数反演分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 279-286.

[15] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4021-4029.

[16] 王进, 许娟. 土体参数对地表沉降影响的数值模拟分析 [J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2012, 25(2): 55-58.

[17] 刘贺, 张弘强, 刘斌. 基于粒子群优化神经网络算法的深基坑变形预测方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1609-1614.

(编辑：石 瑛)