

基于反分析法的基坑开挖引起的土体位移分析

木林隆^{1, 2}, 黄茂松^{1, 2}, 吴世明³

(1. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 浙江浙大网新集团有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 目前基坑开挖引起的土体自由场位移的计算方法主要为有限单元法, 而要利用有限单元法较为准确的计算土体的位移场, 除了对有限单元法理论以及土体本构知识有较为充足的储备外, 模型参数的选取也是重要因素。室内试验确定模型参数受到诸多因素的影响, 很多时候在利用这些参数预测基坑变形时并不准确。反分析方法可以有效的解决模型参数的选取问题, 因此本文将基于实测数据, 采用考虑土体小应变特性的 HSS 模型, 利用反分析方法对基坑开挖引起的土体位移进行研究。研究表明考虑土体小应变采用反分析方法可以较为准确的计算基坑开挖引起的土体位移。

关键词: 基坑开挖; 反分析; HSS 模型; 土体变形

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0060-05

作者简介: 木林隆(1984-), 男, 浙江温州人, 讲师, 从事岩土与岩石力学研究。E-mail: mulinlong@Tongji.edu.cn。

Soil responses induced by excavations based on inverse analysis

MU Lin-long^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, WU Shi-ming³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Insigma group Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: Evaluation of soil responses induced by excavations, which are now mainly computed by finite element method, is required to estimate the damages of potential buildings caused by excavations. Using proper soil parameters is a key ingredient when computing soil responses, assuming the model represents the actual soil responses in a reasonable way. The soil parameters are usually identified from laboratory experiments performed on tube samples or from in-situ tests, but large uncertainties are associated with these methods for most projects. The inverse analysis is a quantitative technique which allows one to select parameters to fit the responses of soil from field observations. The technique is applied to the results of field performance data collected from an excavation made through Chicago clays. The results of the computed soil responses based on the hardening soil model (HS) and hardening model-small (HSS) model found in the computer code PLAXIS are compared to illustrate the problems likely encountered in practical application of finite element simulations. Based on the well chosen parameters, the soil movements induced by the excavation are computed reasonably.

Key words: excavation; inverse analysis; HSS model; soil deformation

0 引言

随着城市化建设的发展, 地下空间的开发越来越重要, 特别是在城市地区, 建筑密集, 基坑开挖对周边环境的影响引起了国内外学术与工程界的广泛关注。因而, 国内外学者对基坑开挖引起的围护墙变形以及墙后土体变形进行了不少研究。

通过对大量的实测资料的统计, 学者们提出了一些估算基坑开挖引起的围护墙变形以及墙后地表沉降的经验方法 (Mana 等^[1]、Clough 等^[2]、Kung 等^[3]), 但是经验方法往往局限于特定的支护形式且具有地域局限性。而对墙后土层的位移, 更是缺乏较为准确的计算方法, 目前仅限于规律性的探讨。如 Peck^[4]、

Blackburn 等^[5]、Wang 等^[6]等对基坑周边土体移动机理以及规律做的研究。所以目前基坑开挖引起的土体变形主要通过借助有限元方法来估计。

有限元方法能否正确估计基坑开挖引起的土体位移取决于两个重要因素: 土体模型的选择和输入参数的选择。自 Burland^[7]提出岩土工程中土体小应变特性对基础工程的影响之后, 学术界对土体的小应变特性以及其对基坑工程的影响展开了大量研究 (如 Whittle 等^[8]、Kung 等^[9]、Clayton^[10]), 研究表明合理地考虑土体的小应变特性才能准确地预测基坑开挖引起的围

护体系以及土体的变形。有限元分析中土体参数的选取一直是实践中的难题, 参数输入不合理将导致造成计算结果的错误, Calvello^[11]、Finno 等^[12]、Hashash 等^[13]等研究表明反分析方法可以有效地解决土体参数的选取问题。

本文基于有限元方法, 采用考虑土体小应变特性的 HS-small 模型, 利用芝加哥地区的一个基坑工程的实测资料进行反分析, 并对下一步计算进行优化。

1 反分析方法

本文的反分析方法, 采用 Matlab 与 Macro 耦合编程, 可以调用任意有限元程序。图 1 为该反分析算法的详细流程图。

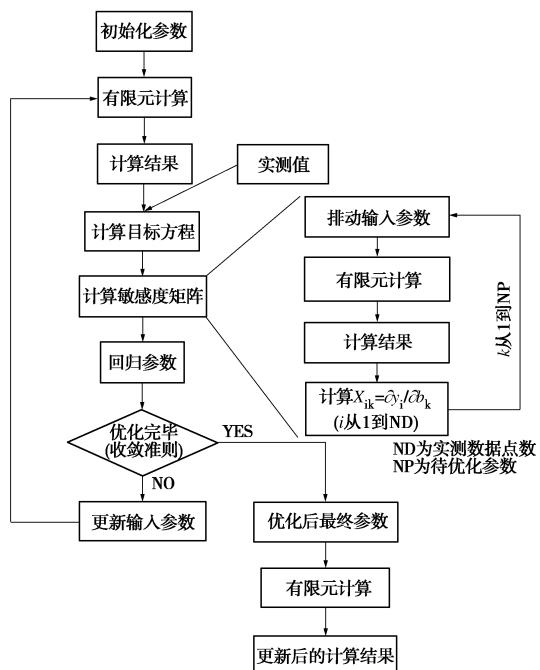


图 1 优化过程流程图

Fig. 1 Flow chart of optimization

该程序采用加权最小二次方差方程来评估分析结果, 即控制方程如下:

$$S(b) = [y' - y'(b)]^T \omega [y' - y'(b)] = e^T \omega e \quad (1)$$

式中 b 为需要优化的参数向量, y 为实测结果向量, $y'(b)$ 为计算结果向量, ω 为权重矩阵, e 为残差向量。

该程序运用如下两条收敛准则来判断优化结果是否收敛, 何时停止迭代过程: ①迭代过程中, 最大的参数变化值小于用户定义的数值, 则该迭代收敛, 停止迭代过程; ②目标方程的改变值小于用户定义的数值, 则该迭代收敛, 停止迭代过程。

当优化过程停止时, 利用优化后参数进行最后一次计算得到最后计算结果。

2 Block37 基坑概况

2.1 工程场地概况

本文研究的背景工程为位于芝加哥市区的 Block 37 基坑项目, 该项目为一多层建筑的地下室, 同时也将作为原有地铁新的地铁站, 场地周围是大范围的商业区, 对环境变形控制要求较高。基坑开挖深度为 15 m, 因为场地中有大量原先的建筑遗留的基础, 所以开挖前, 场地需要预先开挖移除原有基础并且回填。Block37 采用厚 1 m, 长 35 m 水泥土搅拌桩墙和结构板作为水平支撑的围护系统, 并采用从上至下逆作法施工。现场土体沿深度可以分为 6 层: 杂填土、Blodgett、Deerfield、Park Ridge、Tinley 和 Hardpan, 其中 Blodgett、Deerfield 和 Park Ridge 为研究基坑周边土体变形时主要需要考虑的压缩土层。

2.2 实测结果

本工程在基坑周边埋设了大量测量设备来监测基坑的围护结构和周边土体的变形, 监测设备主要包括测斜仪和沉降仪。由于基坑北侧边长较长, 周边情况较为均一, 因此可认为基坑北侧中间处围护墙和土体变形为平面应变。因此本文主要讨论基坑北面的测试仪器所测得的结果。

如图 2 所示, 紧临围护墙体位移 (与围护墙体位移一致), 从图上可见, 预开挖移除原有基础然后回填造成的墙后土体水平位移最大值大于 10 mm, 因此有必要在分析中考虑预开挖与回填的影响。从地面开挖至第一道支撑处时, 最大位移达到 35 mm, 占了最终位移最大值的绝大部分。围护墙由钢筋混凝土楼板支撑, 板与围护墙之间由弯矩抵抗装置链接, 且可认为板与围护墙之间被牢固刚接, 所以当混凝土发生收缩和徐变时, 混凝土板有可能拉着围护墙往坑内变形。因为混凝土的收缩和徐变有可能会造成围护墙及墙后土体额外变形, 所以开挖至第一道支撑时记录位移值, 相对来说较真实地反映基坑开挖引起的土体位移。

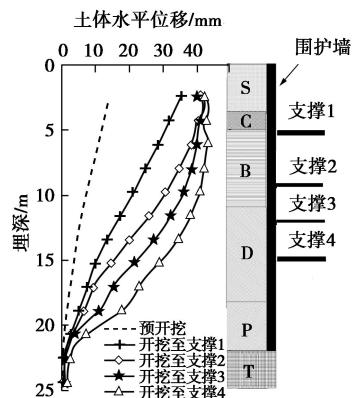


图 2 基坑开挖周边土体侧向位移实测值

Fig. 2 Measured soil deformations around excavation

图 3 为基坑北侧 3 个截面测得的开挖至坑底时沉降绘制的等值线图。3 个截面都记录了从 2006 年 9 月

18 日到 2008 年 10 月 31 日这段时间内土体沉降位移的增量, 可以看到, 在接近围护墙的位置, 最大位移为 37.5 mm, 而距离墙体 25 m 左右的地方, 沉降几乎为 0。

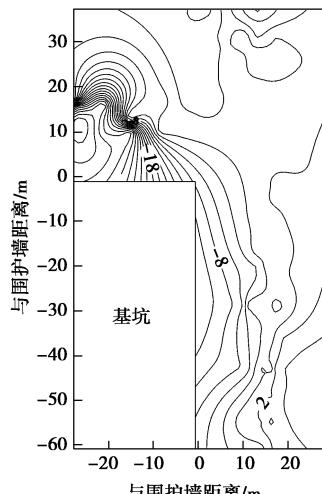


图 3 基坑周边土体沉降

Fig. 3 Measured settlement of soil around excavation

3 有限元模型

3.1 HSS 模型简介

本文反分析方法基于有限元模型计算, 因此本构模型的选择对于计算结果至关重要。既有文献指出考虑土体的小应变特性对计算基坑周边土体自由场位移具有重要的意义, 且由于 HS 模型被广泛应用于实践计算中, 其在基坑工程中的适用性已经得到普遍承认, 因此本文选取了 HS-Small(HSS)模型作为基本模型来进行分析。HSS 模型能够全面考虑岩土工程中, 各种

应变分布条件下土体的刚度。PLAXIS 中, HSS 模型和 HS 模型具有基本相同的参数, 但是 HSS 模型多了 2 个参数来控制小应变状态下土体的刚度: 初始剪切模量 G_0 和当剪切模量 G_s 减小到 $0.722G_0$ 时剪切应变 $\gamma_{0.7}$ 。

3.2 基坑开挖的有限元模型

本文采用 PLAXIS 建立模型, 模型示意图如图 4 所示。坑外临近围护墙有一通电缆的隧道, 坑内 4 道楼板支撑, 与一般基坑不同的是, 第一道支撑并不在临近地面的深度, 而是在地下 6 m 左右的位置, 围护墙和土体之间设置接触面。其中预开挖的网格如图 5 所示。有限元模型中, Blodgett、Deerfield 和 Park Ridge 采用 HSS 模型, 其他土层采用 HS 模型, 初始土体参数如表 1 所示。

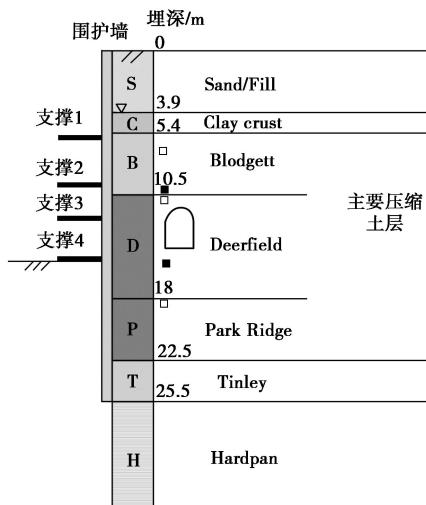


图 4 计算模型示意图

Fig. 4 Computational model of excavation

表 1 有限元模型初始参数

Table 1 Initial parameters for FEM model

Soil layer	Sand Fill	clay crust	Blodgett	Deerfield	Park Ridge	Tinley	Hardpan
type	Drained	Undr.	Undr.	Undr.	Undr.	Undr.	Undr.
$E_{50}^{\text{ref}} / \text{kPa}$	2299	618	362	750	2568	3851	7663
$E_{\text{ref}} / \text{kPa}$	2299	618	362	750	2568	3851	7663
$E_u^{\text{ref}} / \text{kPa}$	6897	1853	1085	2251	7701	11552	22989
OCR	1.5	1.5	1.5	1.37	1.7	1.5	1.5
$C^{\text{ref}} / \text{kPa}$	19.16	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29
$\phi / (^{\circ})$	35	32.8	29	30.6	30.6	45	45
$\psi / (^{\circ})$	5	0	0	0	0	0	3
v_{ur}	0.33	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
$p^{\text{ref}} / \text{kPa}$	5	5	5	5	5	5	5
m	0.5	0.85	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85
K_{0}^{NC}	0.6	0.458	0.603	0.568	0.458	0.6	0.6
c_{incr}	0	0	0	0	0	0	0
R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
T-Strength	0	0	0	0	0	0	0
R_{inter}	0.67	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5
Interface Perm	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
d-inter	0	0	0	0	0	0	0
$G_0^{\text{ref}} / \text{kPa}$	—	—	78000	95000	83400	—	—
$\gamma_{0.7}$	—	—	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}	—	—

4 反分析

4.1 反分析参数选取

反分析中参数的选取包括两部分: 第一部分为实测数据的选取, 即样品选取; 第二部分待分析参数的选取。以下对这两部分的选取加以说明。

实测数据的选取是否合理直接决定了反分析结果的合理性, 因此有必要对大量的实测数据进行筛选, 选取较为合理的测试结果作为依据进行反分析。如前所述, 实测数据中包含了预开挖结束、回填以及基坑各步开挖的结果, 需要在其中寻求最能反映由土体特性造成的变形的实测结果。因为预开挖的尺寸由现场原有废弃基础的尺寸决定, 设计时没有详细资料, 该次计算经过多次拟合来确定的预开挖尺寸, 所以预开挖的位移可能不能准确反映开挖引起的土体位移; 由于该基坑施工时间较长, 且现场测试时观测到地下室混凝土板存在较大的收缩徐变, 因此在基坑开挖从第一道支撑到坑底的时候, 认为围护墙和土体的变形不仅受开挖影响且受混凝土板收缩徐变的影响, 该部分变形不是作为反分析实测数据的最理想实测结果; 从预开挖结束到开挖至第一道支撑之间的位移增量由于受到的其他因素影响较小, 可认为是开挖卸载引起的位移, 因此本文采用开挖至第一道支撑时与预开挖结束时之间的位移增量作为反分析的实测值来进行参数分析。

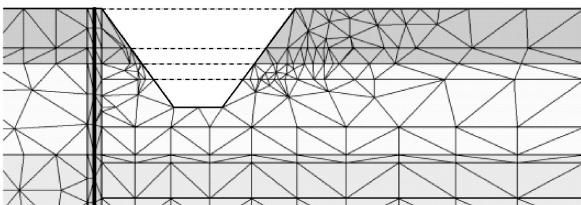


图 5 预开挖网格示意图

Fig. 5 Mesh of potholing

由于 HSS 模型具有 13 个输入参数, 同时对 13 个输入参数进行反分析是不现实。这是因为各参数间存在相关性, 对具有相关性的参数同时进行反分析容易造成结果的非唯一性。Calvello^[11]通过对 HS 模型参数相关性分析, 以及其对基坑开挖周边土体变形的影响分析指出 E_{50}^{ref} 对基坑开挖引起的土体位移的影响最为显著, 对其进行反分析可满足准确估算基坑开挖引起的土体位移的要求。同时 HSS 模型增加的 2 个参数 (G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$) 中, 因为现场实测 G_0^{ref} 和室内试验所得 G_0^{ref} 较为接近, 因此认为室内实测结果可以较为准确的反映土体的初始剪切刚度。所以本文基坑开挖仅对 E_{50}^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 进行优化分析。

4.2 反分析结果分析

图 6 为优化后计算结果和实测结果的对比。图中所示位移为该阶段位移与预开挖产生的位移的差值, 即位移增量。从图上可见在第一阶段, 无论是用 HSS 模型或者 HS 模型, 侧向位移均与实测值一致, 这说明反分析的结果是正确的。利用反分析所得参数计算预开挖以及开挖至坑底时的位移。从图 6 可见, HSS 模型能够较好地计算预开挖引起的位移, 与实测值基本一致, 而 HS 模型计算值要明显小于实测值。同样, 在开挖至坑底后, HS 模型的计算值也要小于实测值, 这是因为在第一步开挖的时候位移还较小, 土体还处于小应变状态, 因此基于 HS 模型用第一步开挖的位移增量来进行反分析时高估了土体的刚度, 因此计算得到的其他阶段的位移均要比实测位移值小。而用 HSS 模型计算最终位移时, 在开挖面以下计算位移与实测位移一致, 而在开挖面以上, 埋深越小的位置计算值与实测值差异越大, 最大差异达到 10 mm 左右。这是因为混凝土板的收缩徐变使开挖面以上围护墙体位移及墙后土体位移大于开挖卸载引起的位移。

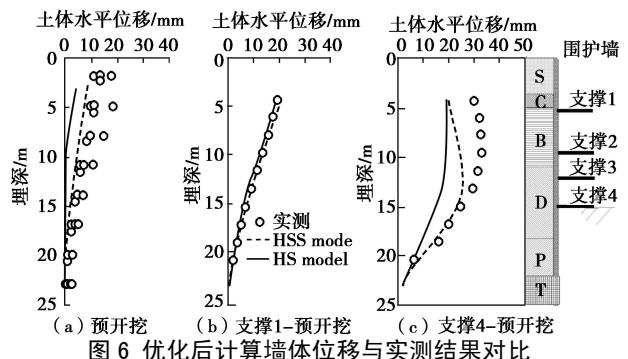


Fig. 6 Comparison of wall deflections based on initial parameters and optimized parameters

图 7 为采用优化后参数计算所得墙后土体沉降与实测值对比。从图上可见, 在第一阶段 HS 模型计算所得沉降曲线要比 HSS 模型计算得到的沉降曲线相近, 与实测结果较为接近, 最大沉降值与实测值一致; 而在最终阶段 HS 模型计算所得沉降曲线要比 HSS 模型计算得到的沉降曲线浅且平, 但是无论是 HSS 模型还是 HS 模型计算所得结果都要比实测结果小很多, 这是因为混凝土收缩徐变造成了额外的围护墙水平位移, 同时也引起的墙后土体的额外沉降。

表 2 为基坑反分析得到的参数。从表上可见, 在基坑分析中基于 HSS 模型分析得到的 E_{50}^{ref} 值要明显小于基于 HS 模型得到的 E_{50}^{ref} 。这是因为反分析采用的实测值是第一阶段的土体位移, 该阶段土体还处于小应变阶段, 土体刚度要明显高于大应变时的刚度, 此时采用 HS 模型分析高估了土体的刚度, 造成在土体进入变形较大的情况时, 采用 HS 模型所得变形结果明显偏小。因此在基坑开挖分析中考虑土体的小应变

对准确预测结果来说是尤为重要的因素。

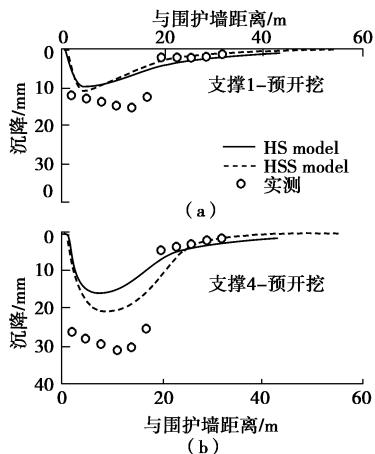


图 7 优化后计算墙后土体沉降与实测结果对比

Fig. 7 Comparison of soil settlements based on initial parameters and optimized parameters

表 2 基坑反分析结果

Table 2 Optimized parameters

	HSS 模型		HS 模型
	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\gamma_{0.7}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$
Blodgett	393	7.64×10^{-5}	479
Deerfield	364	6.56×10^{-5}	670
Park Ridge	1608	7.21×10^{-5}	1533

注: $p^{\text{ref}}=5 \text{ kPa}$ 。

5 结语

本文基于芝加哥地区 BLOCK37 基坑工程实测资料,采用反分析方法对基坑周边土体的 HSS 模型参数进行了反分析,并利用其进行了下一步计算。分析表明,考虑土体小应变特性对准确预测基坑开挖引起的变形非常必要,当不考虑土体的小应变特性的时侯土体刚度会被高估造成下一步计算的误差。反分析方法能有效确定土体的参数,利用反分析所得参数可以有效的估计基坑下一步开挖引起的土体变形。

参考文献:

- [1] MANA A L, CLOUGH G W. Prediction of movement for braced cuts in clay[J]. J of Geotech, Div, ASCE, 1981, **107**(GT6).
- [2] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proc Desigh and Performance of Earth Retaining Structure, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE, NEW YORK: 439 - 470.
- [3] KUNG G T C, JUANG C H, HSIAO E C L, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(6): 731 - 747.
- [4] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proc7th ICSMFE, Mexico, 1969: 225 - 290.
- [5] BLACKBURN J T, FINNO R J. Three-Dimensional responses observed in an internally braced excavation in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(11): 1364 - 1373.
- [6] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(7): 985 - 994.
- [7] BURLAND J B. Ninth Laurits Bjerrum Memorial lecture: "Small is beautiful"-the stiffness of soils at small strain[J]. Can Geotech, 1989, **26**: 499 - 516.
- [8] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in Boston[J]. J Geotech Eng, 1993, **119**(1): 69 - 90.
- [9] KUNG G T C, HSIAO E C L, JUANG C H. Evaluation of a simplified small-strain soil model for analysis of excavation-induced movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(6): 726 - 736.
- [10] CLAYTON C R I. Stiffness at small strain: research and practice[J]. Géotechnique, 2011, **61**(1): 5 - 37.
- [11] CALVELLO M. Inverse analysis of supported excavations through Chicago glacial clays[D]. Northwestern University, 2002.
- [12] FINNO R J, CALVELLO M. Supported excavations: observational method and inverse modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(7): 826 - 836.
- [13] HASHASH Y M A, SONG H, OSOULI A. Three-dimensional inverse analyses of a deep excavation in Chicago clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 2011, **35**: 1059 - 1075.

(本文责编 孙振远)