

上海地区板式支护体系基坑变形预测简化计算方法

王卫东^{1, 2}, 王浩然^{1, 3}, 徐中华²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基坑变形预测是分析基坑开挖对环境影响的核心内容之一。收集了上海地区 65 个常见的板式支护体系基坑工程案例, 并对其进行了分类。对不同类型的板式支护体系基坑建立不同的基于土体 HS-Small 模型的平面应变有限元模型进行分析。根据室内土工试验结果与基于实测数据的参数反演分析, 确定了上海软土地区典型土层土体的 HS-Small 模型计算参数。通过对 108 个有限元计算结果的分析及归一化, 推导了能够综合考虑基坑系统刚度、基坑深度和基坑宽度的上海地区板式支护体系基坑围护结构最大侧移和地表最大沉降的简化计算公式, 并且提出了基坑围护结构侧移曲线和地表沉降曲线, 同时也给出了上海地区板式支护体系基坑变形的预测流程。采用本文给出的简化方法预测了上海地区的 7 个工程的变形并与实测结果进行了比较, 结果表明该方法能较好地预测上海地区的板式支护体系基坑的变形。

关键词: 板式支护体系基坑; 变形预测; 简化方法; HS-Small 模型; 有限元

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)10-1792-09

作者简介: 王卫东(1969-), 男, 辽宁人, 博士, 同济大学兼职教授, 博导, 华东建筑设计研究院教授级高级工程师, 从事地下工程、深基坑工程、高层建筑地基基础的设计与理论分析。E-mail: weidong_wang@ecadi.com。

Simplified method of deformation prediction for excavations retained by embedded walls in Shanghai soft soil

WANG Wei-dong^{1, 2}, WANG Hao-ran^{1, 3}, XU Zhong-hua²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Underground Structure &

Geotechnical Engineering, East China Architectural Design & Research Institute, Shanghai 200002, China; 3. Key Laboratory of

Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Deformation prediction of excavations is one of the core contents in analyzing their effect on environment. 65 case histories of excavations retained by embedded walls in Shanghai are collected and divided into different groups. Plane strain finite element models are set up to simulate the construction procedures of excavations retained by embedded walls of different groups. The parameters of HS-Small model for Shanghai typical soil layers are got from laboratory tests and back analysis. The simplified calculation formulas considering system stiffness, excavation depth, excavation width for the maximum lateral deformation of embedded walls and the maximum ground surface settlement are deduced by normalizing 108 FEM results. The lateral deformation profile of embedded walls and the ground surface settlement profile behind the embedded walls are provided. The procedure of adopting the simplified analysis method is also illustrated. Comparison of the monitored deformations of 7 case histories and predicted deformations using the simplified analysis method reveals that the proposed simplified method is suitable for analyzing deformation of deep excavations in Shanghai.

Key words: embedded wall; deformation prediction; simplified method; HS-Small model; FEM

0 引言

基坑开挖引致的地层移动会使得周边的建(构)筑物发生附加变形, 当附加变形过大时会引起结构的开裂和破坏, 从而影响周边建(构)筑物的正常使用。随着上海大量地下空间工程建设的发展, 由基坑工程引起的环境保护问题变得日益突出。在这种情况下,

基坑设计的稳定性及承载力仅是必要条件, 变形往往成为主要的控制条件, 从而使得基坑工程的设计从强度控制转向变形控制。基坑变形预测是分析基坑开挖

基金项目: 上海市青年科技启明星计划 B 资助项目 (11QB1400400)

收稿日期: 2011-10-20

对环境影响的核心内容之一。根据新编制的上海市《基坑工程技术规范》(DG/TJ08—61—2010)^[1], 地下连续墙、钻孔灌注桩、钢板桩和型钢水泥土搅拌墙等统称为板式支护体系围护墙。目前板式支护体系基坑变形预测常用的方法主要有连续介质有限元方法^[2-4]和弹性地基梁法^[5]。连续介质有限元方法需要选择合适的土体本构模型、确定准确的模型计算参数以及正确的有限元分析方法。弹性地基梁方法中的地基土水平抗力系数的确定有时需要依赖工程经验, 并且该方法无法计算墙后地表的沉降。以上两种方法都不便于工程师的使用。上海市《基坑工程技术规范》^[1]按照环境保护等级和已成功实施的工程实践的统计资料确定围护结构的最大侧移、地表最大沉降以及墙后地表沉降曲线, 由于基坑工程的复杂性, 该方法只是一个较粗略的方法。同时, 上海市《基坑工程技术规范》也没有给出围护结构侧移曲线的确定方法, 国内也未见围护结构侧移曲线研究的相关报道。

本文首先收集了上海地区 65 个常见的板式支护体系基坑工程案例, 根据基坑的开挖深度和竖向支撑的道数, 对收集到的板式支护体系基坑进行了分类。然后对不同类型的板式支护体系基坑建立不同的平面应变有限元模型进行分析。有限元分析模型中土体采用 HS-Small 模型, 并根据室内土工试验结果与基于实测数据的参数反分析, 确定了上海软土地区典型土层土体的 HS-Small 模型的计算参数。通过对 108 个有限元计算结果的分析, 推导了能够综合考虑基坑系统刚度、基坑开挖深度和开挖宽度的上海地区板式支护体系基坑围护结构最大侧移和地表最大沉降的简化计算公式, 并且提出了基坑围护结构侧移曲线和地表沉降曲线, 同时也给出了上海地区板式支护体系基坑变形的预测流程。最后采用本文提出的简化方法对上海地区 7 个板式支护体系基坑进行了计算, 以验证本文简化方法的适用性。

1 板式支护体系基坑工程案例

通过对上海地区已经成功实施的 65 个板式支护体系基坑工程案例的调查发现, 上海地区常见的板式支护体系基坑一般可分为如下 4 类: A 类, 基坑的开挖深度一般小于 7 m, 坑内采用 1 道支撑支护, 围护结构底部一般位于软弱的第④层淤泥质黏土层, 围护结构插入比范围约为 1.2~1.9; B 类, 基坑的开挖深度一般为 7~12 m, 坑内采用 2 道支撑支护, 围护结构一般需穿越软弱的淤泥质黏土层, 进入第⑤层黏土或更深的土层中, 围护结构插入比范围约为 1.0~1.5;

C 类, 基坑的开挖深度一般为 12~17 m, 坑内采用 3 道支撑支护, 围护结构一般进入第⑤₂、⑤₃、⑤₄ 等黏土层中, 围护结构插入比范围约为 0.9~1.1; D 类, 基坑开挖深度一般为 17~23 m, 坑内采用 4 道支撑支护, 围护结构基本进入土层条件较好的第⑥层黏土或第⑦层粉细砂, 围护结构插入比范围约为 0.7~0.9。

2 影响板式支护体系基坑变形的主要因素

为了便于论述, 定义基坑的几何变量和变形变量如图 1 所示。其中 H_e 为基坑的开挖深度; h_i 为支撑的竖向间距; H_w 为围护结构深度; h_u 为悬臂开挖深度; T 为围护结构插入深度; s 为支撑的水平间距; B 为基坑的开挖宽度; L 为基坑的长度; h 为支撑的平均竖向间距; ρ 为基坑的系统刚度; δ_{hmax} 为围护结构最大侧移; δ_{vmax} 为地表最大沉降。

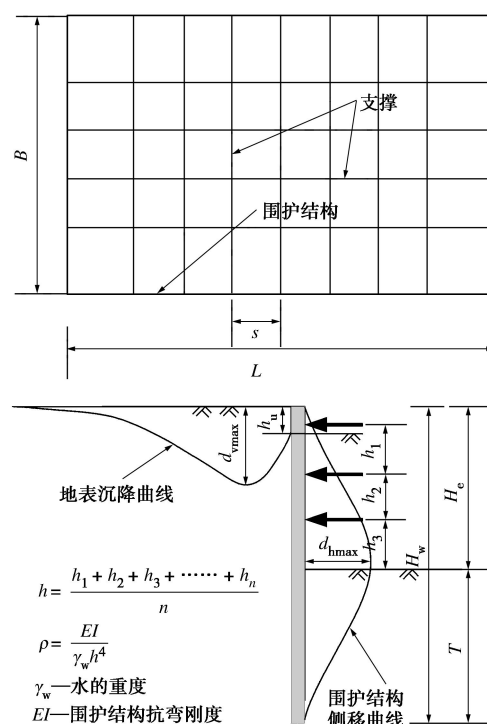


图 1 板式支护体系基坑几何变量及变形变量的定义

Fig. 1 Definition of parameters to describe deformation and geometry of excavations retained by embedded walls

影响板式支护体系基坑变形的因素一般有: 基坑所处场地的土层条件、开挖深度、开挖宽度、支撑竖向间距、支撑水平间距、围护结构的抗弯刚度 EI 、围护结构的插入深度等。Long^[6]和 Moormann^[7]分别分析了全世界大量基坑的实测数据, 发现土层条件对基坑变形有重大影响。根据 Clough^[8]的研究, 基坑系统刚度对围护结构的变形有较大影响。Wong^[9]的研究表

明, 基坑的开挖深度、开挖宽度和围护结构的抗弯刚度对围护结构的变形影响较大。Kung^[10]通过大量平面有限元计算也证实了在计算围护结构变形时需要考虑系统刚度、开挖深度和开挖宽度。Medina^[11]通过三维有限元计算发现, 正常布局下的支撑水平间距对基坑变形的影响基本可以忽略。Hashash^[2]指出, 在深厚软土中, 围护结构的插入深度达到一定程度后, 再增加围护结构的插入深度对围护结构的变形影响不大。通过对收集到的上海地区常见的板式支护体系基坑工程案例的调查发现, 坑内水平支撑的竖向平均间距约为 4~5 m, 该间距变化不大, 因此本文在后续有限元分析中, 不单独考虑支撑竖向间距的变化对基坑变形的影响, 而是在基坑系统刚度中考虑支撑竖向间距对基坑变形的影响。根据以上分析可以得出, 场地的土层条件、基坑系统刚度、开挖深度和开挖宽度是影响板式支护体系基坑变形的主要因素, 因此本文在后续基坑开挖的有限元分析中仅限于分析基坑系统刚度、开挖深度和开挖宽度对基坑变形的影响, 基坑其它的几何变量按照上述分类的上海地区板式支护体系基坑所具有的一般设计尺寸进行输入, 基坑变形有限元模型中输入的上海典型土层土体 HS-Small 本构模型参数亦可以反映上海地区土层条件对基坑变形的影响。

3 有限元分析模型

3.1 有限元几何模型

有限元模型共有 A, B, C, D 4 个基本模型, 分别对应于上述上海地区 A, B, C, D 4 类板式支护体系基坑。基本模型中均假定基坑的平面形状为 120 m × 80 m 的矩形, 如图 2 所示。选取 A-A 剖面 (见图 2) 作为平面应变分析对象, 考虑对称性取 1/2 模型。

A 类基坑开挖深度为 6 m, 墙体深度为 15 m, 插入比为 1.5; B 类基坑开挖深度为 11 m, 墙体深度为 24 m, 插入比为 1.2; C 类基坑开挖深度为 16 m, 墙体深度为 32 m, 插入比为 1.0; D 类基坑开挖深度为 21 m, 墙体深度为 42 m, 插入比为 1.0。所有基本模型的首道支撑均位于地表以下 1 m 处, 支撑竖向间距均为 5 m。

基本模型中上海地区各典型土层的厚度取上海市岩土工程勘察规范^[12]给出的上海市区滨海平原区域土层厚度的平均值。上海潜水水位埋深, 一般离地面约 0.3~1.5 m, 因此有限元模型中的地下水位设在地表以下 1 m 处。

根据 Roboski^[13]的研究, 基坑边缘到模型边界为 5 倍的基坑开挖深度时, 边界条件对基坑的变形可以忽

略。为尽可能减小模型边界对基坑变形的影响, 基本模型 A, B 和 C 的几何尺寸取为 120 m × 50 m, 基本模型 D 的几何尺寸取为 140 m × 80 m。

模型的边界条件为: 竖向边界约束水平方向位移, 底面为固定边界。土体采用 15 结点三角形单元模拟, 基坑围护结构采用梁单元模拟, 水平支撑系统采用弹簧单元模拟, 围护结构与土体的相互作用采用接触面单元模拟。图 3 为 4 个基本模型的有限元网格划分图。

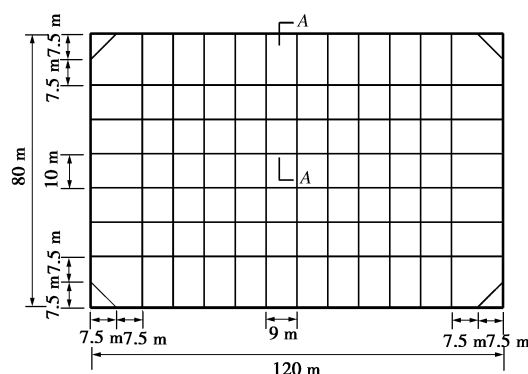


图 2 基本模型平面图

Fig. 2 Plane view of excavation model

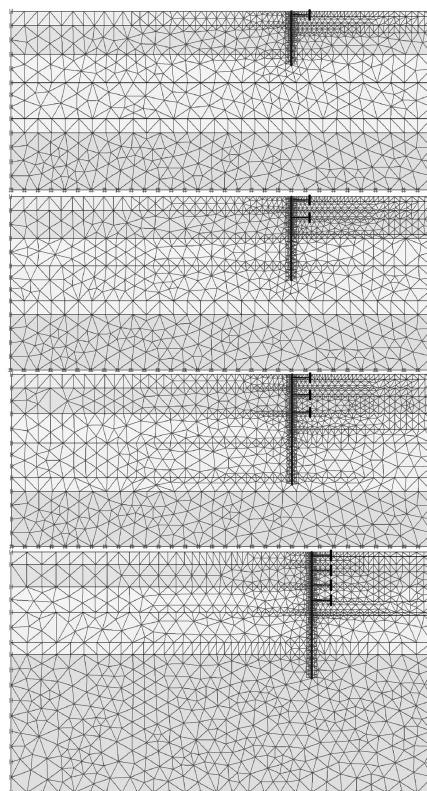


图 3 有限元基本模型网格划分

Fig. 3 Meshes of FEM model

3.2 结构参数

围护结构的抗弯刚度 EI 和抗压刚度 EA 以及支撑的抗压刚度 EA 是基本模型中 3 个重要的结构输入参数。对于 A 类基坑, 由于其开挖深度较浅, 实际工程中一般采用直径 700~800 mm 的灌注桩进行围护, 为

了便于建模, 此处采用 800 mm 的灌注桩, 并将其等效成每延米相同抗弯刚度的 600 mm 厚地下连续墙; 对于 B 类、C 类和 D 类基坑, 围护结构分别采用 800 mm、800 mm 和 1000 mm 厚的地下连续墙。模型中的竖向支撑均采用钢筋混凝土支撑。详细的结构输入参数如表 1 所示。

表 1 基本分析模型的结构参数

Table 1 Parameters of structures of FEM model					
基本 模型	围护结构			支撑系统	
	厚度	EI	EA	截面	EA
	/mm	$/(MN\cdot m^2\cdot m^{-1})$	$/(MN\cdot m^{-1})$	/mm	$/(MN\cdot m^{-1})$
A	600	540	18000	800×700	1867
B	800	1280	24000	900×800	2400
C	800	1280	24000	1000×800	2667
D	1000	2500	30000	1000×800	2667

3.3 土体 HS-Small 模型参数

HS-Small 模型是由 Benz^[14]在 HS 模型的基础上修正而来。修正后的 HS 模型不仅继承了 HS 模型可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化的特点而且可以考虑剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为。HS 模型适合于敏感环境下的基坑开挖数值分析^[15], HS-Small 模型较 HS 模型具有更好的适用性, 计算结果能给出更为合理的墙体变形及墙后土体变形^[16]。

HS-Small 模型参数包含了 11 个 HS 模型参数和 2 个小应变参数。各参数的含义可参考文献[14]。王卫东等^[17]通过大量室内土工试验给出了上海典型土层的 11 个 HS 模型参数的取值方法。小应变参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 需要特殊的土工试验才能确定, 目前国内还未见有确定 HS-Small 模型小应变参数方法的报道。

根据 Benz^[14]和 Schweiger^[18]的研究, 黏土的 $\gamma_{0.7}$ 一般介于 $2\times 10^{-4}\sim 3\times 10^{-4}$, 砂土的 $\gamma_{0.7}$ 约为 2×10^{-4} 。本文取上海典型的黏性土层 (②、③、④、⑤、⑥) 的 $\gamma_{0.7}$ 为 3×10^{-4} , 第⑦层砂土的 $\gamma_{0.7}$ 为 2×10^{-4} 。通过 3 个基坑工程的实测数据反演分析 (见图 4) 发现, 当黏性土的 G_0^{ref} 为 $4E_{ur}^{ref}$, 砂土的 G_0^{ref} 为 $5E_{ur}^{ref}$ 时, 计算值与实测值吻合得较好。因此本文计算时, 黏土层考虑取 $G_0^{ref}=4E_{ur}^{ref}$, 砂土层考虑取 $G_0^{ref}=5E_{ur}^{ref}$ 。上海典型土层土体详细的 HS-Small 模型参数如表 2 所示。

4 有限元计算结果分析

分析过程中, 认为基坑开挖时间较短, 因此采用不排水分析法^[18]模拟黏土的短期行为, 即在分析过程中, 黏土中的超静水压力无法消散, 其体积变化为零, 同时采用排水分析法^[18]模拟砂土的行为, 即认为在分析过程中, 砂土中的超静水压力完全消散。

首先改变基本模型的开挖宽度 B , 用以分析 B 对基坑变形的影响。然后在每个开挖宽度下, 改变基本模型的系统刚度 ρ , 用以分析 ρ 对基坑变形的影响。由于 4 个基本模型已经代表了上海地区 4 种典型的开挖深度, 因此计算结果亦可以反映开挖深度 H_e 对基坑变形的影响。

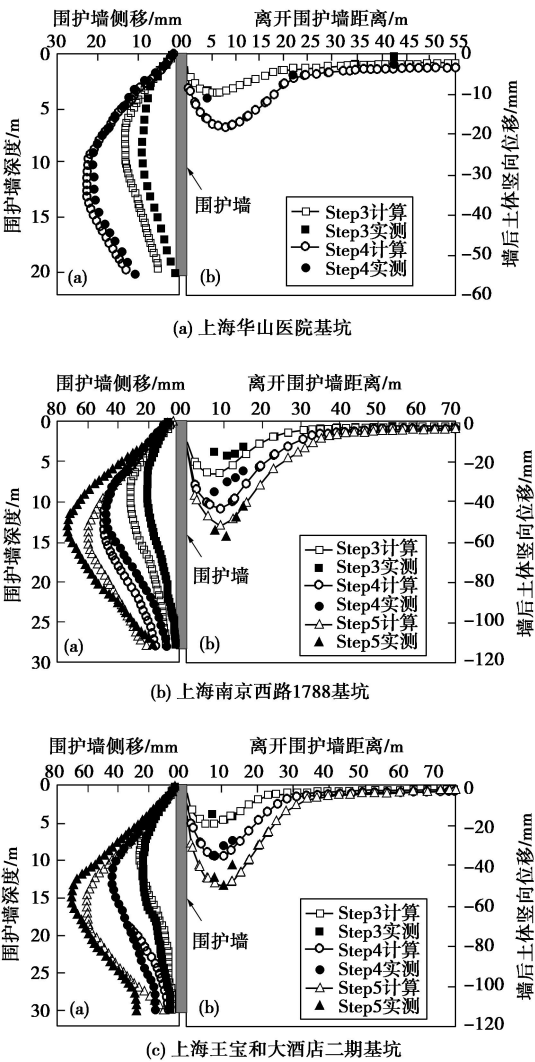


图 4 连续墙侧移与地表沉降计算值与实测值的对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured results of wall deformation and ground surface settlement

4.1 围护结构最大侧移计算结果分析

图 5 是不同开挖宽度下围护结构最大侧移同开挖深度比值与系统刚度的关系。从图 5 (a)、5 (b)、5 (c) 均可以看出, 保持开挖宽度不变, 当 $25\leq \rho\leq 400$ 时, 围护结构最大侧移与开挖深度的比值随着开挖深度的增大而增大, 当 $\rho<25$ 或 $\rho>400$ 时, 围护结构最大侧移与开挖深度的比值与开挖深度没有明显的规律, 但是在某一系统刚度下, 围护结构最大侧移总是随着开挖深度的增大而增大。同时, 在每个开挖宽度每个开挖深度下, 围护结构最大侧移与开挖深度的

表 2 上海地区典型土层土体 HS-Small 模型参数
Table 2 Parameters of HS-Small model for Shanghai typical soil layers

序号	土层名称	层厚/m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c' /kPa	φ' /($^\circ$)	ψ /($^\circ$)	$E_{\text{od}}^{\text{ref}}$ /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$	ν_{ur}	p^{ref} /kPa	K_0	m	R_{inter}	R_{f}
②	黏土	4	18	10	30	0	4.5	5.4	31.5	126	2×10^{-4}	0.2	100	0.5	0.8	0.65	0.9
③	淤泥质粉质黏土	8	17	3	27	0	2	2.4	14	56	2×10^{-4}	0.2	100	0.54	0.8	0.65	0.6
④	淤泥质黏土	8	17	3	27	0	2	2.4	14	56	2×10^{-4}	0.2	100	0.54	0.8	0.65	0.6
⑤	黏土	10	18	10	30	0	4.5	5.4	31.5	126	2×10^{-4}	0.2	100	0.5	0.8	0.65	0.9
⑥	黏土	4	19	30	32	0	7.2	8.6	50	200	2×10^{-4}	0.2	100	0.47	0.8	0.65	0.9
⑦	粉细砂	16	19	1	35	5	12	12	48	240	2×10^{-4}	0.2	100	0.43	0.5	0.7	0.9

深度的比值与系统刚度之间的关系均可用幂函数表达, 判定函数 R^2 可达 0.99。

4.2 地表最大沉降计算结果分析

图 6 是不同开挖宽度下地表最大沉降与开挖深度比值与系统刚度的关系。从图 6 可以看出, 最大地表

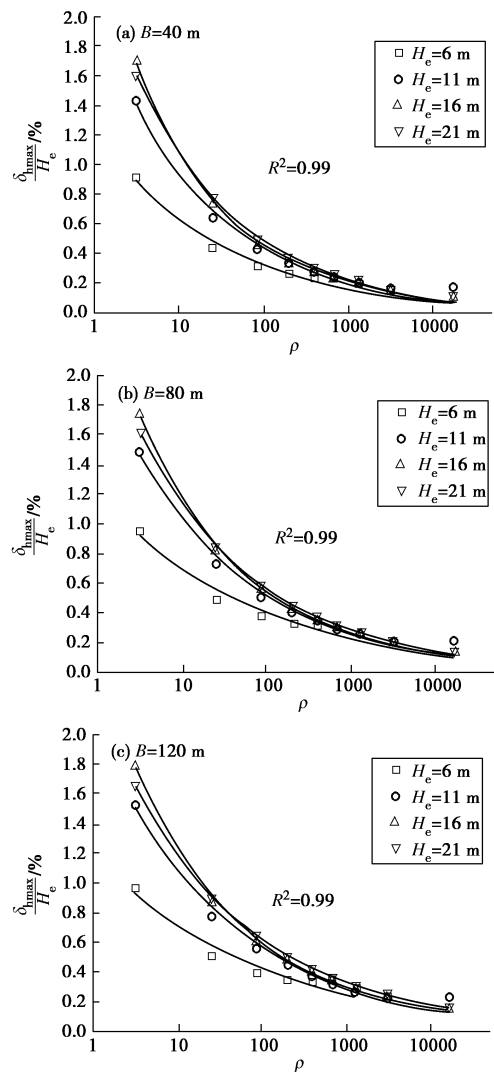


图 5 围护结构最大侧移与开挖深度比值与系统刚度的关系
Fig. 5 Relationship between normalized maximum lateral wall deformation and ρ

比值总是随着系统刚度的增大而减小, 但是当系统刚度超过 1000 时, 围护结构最大侧移与开挖深度的比值随系统刚度增大而减小的幅度逐渐减缓, 这表明当系统刚度足够大后再无限制地增加系统刚度不能够达到减小围护结构侧移的效果。图 5 中的最大侧移与开挖

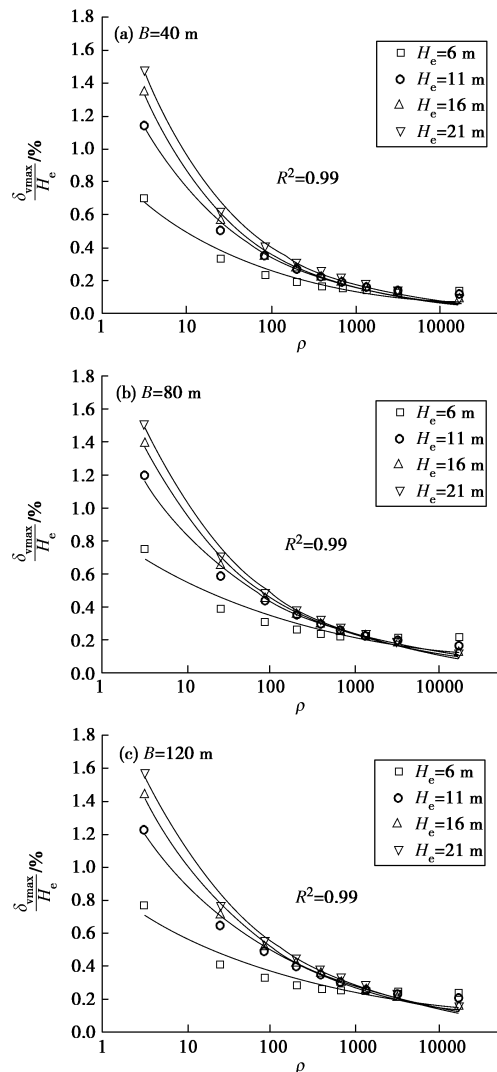


图 6 地表最大沉降与开挖深度比值与系统刚度的关系
Fig. 6 Relationship between normalized maximum ground surface settlement and ρ

沉降与开挖深度的比值与开挖深度的关系和围护结构最大侧移与开挖深度的关系相似。同时, 地表最大沉降与开挖深度的比值与系统刚度之间的关系亦可用幂函数表达, 判定函数 R^2 可达 0.99。

5 板式支护体系基坑变形简化计算方法

5.1 围护结构最大侧移与地表最大沉降计算公式

把图 5 和图 6 中的有限元计算结果进行数学拟合 (详细的拟合过程此处不再介绍), 总结出了可以考虑基坑系统刚度、开挖深度和开挖宽度对基坑变形影响的计算基坑变形的公式。式 (1) 为计算围护结构最大侧移的公式, 计算地表最大沉降的公式为式 (2)。

$$\delta_{h\max} = (0.49 + 0.13H_e) \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4} \right)^{\left(\frac{-0.164B}{-13.671+B} - 0.008H_e \right)} \times \frac{H_e}{100}, \quad (1)$$

$$\delta_{v\max} = \frac{4.57H_e}{21.414 + H_e} \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4} \right)^{\left[\frac{-0.42H_e}{-14.541 \exp(\frac{B}{-26.987}) + 6.611 + H_e} \right]} \times \frac{H_e}{100}. \quad (2)$$

5.2 围护结构侧移曲线

图 7 是把 4 个基本分析模型在不同开挖宽度下的围护结构侧移计算结果无量纲化后绘制成的围护结构侧移预测曲线。图中, 横坐标为围护结构侧移与围护结构最大侧移的比值 ($\delta_h/\delta_{h\max}$), 纵坐标为围护结构任意点距围护结构顶部的距离与围护结构深度的比值 (z/H_w)。如图 7 (a) 所示, 当开挖深度小于 7 m 时, 选用折线 IJK 预测围护结构任意点的侧移, 围护结构顶部的侧移为 0.2 倍的围护结构的最大侧移, 最大侧移发生于 0.5 倍的围护结构深度处, 围护结构底部的侧移为 0.7 倍的最大侧移; 当开挖深度大于或等于 7 m 时, 选用折线 LMN 预测围护结构任意点的侧移, 围

护结构顶部的侧移为 0.05 倍的最大侧移, 最大侧移发生于 0.5 倍的围护结构深度处, 围护结构底部的侧移为 0.1 倍的最大侧移, 如图 7 (b) 所示。

5.3 地表沉降曲线

图 8 是把 4 个基本分析模型在不同开挖宽度下的地表沉降计算结果无量纲化后绘制成的地表沉降预测曲线。图 8 中, 横坐标为墙后地表沉降点距围护结构的距离与开挖深度的比值 (d/H_e), 纵坐标为地表沉降与地表最大沉降的比值 ($\delta_v/\delta_{v\max}$)。借鉴 Hsieh^[19]把地表沉降预测曲线分成主影响区域和次影响区域的思想, 把绘制成的地表沉降预测曲线进行了划分。如图 8 (a) 所示, 当基坑最终开挖深度小于 7 m 时, 选用折线 ABCD 预测地表沉降, 主影响区域的范围为 3 倍的开挖深度, 次影响区域为主影响区域之后的 3 倍开挖深度, 最大沉降发生在距离墙后 $0.8H_e$ 的位置处, 而紧靠墙体处的沉降为最大沉降 0.5 倍; 当基坑最终开挖深度大于 7 m 时, 选用折线 EFGH (见图 8 (b)) 预测地表沉降, 主影响区域的范围为 2 倍的开挖深度, 次影响区域为主影响区域之后的 3 倍开挖深度, 最大沉降发生在距离墙后 $0.5H_e$ 的位置处, 而紧靠墙体处的沉降为最大沉降 0.5 倍。

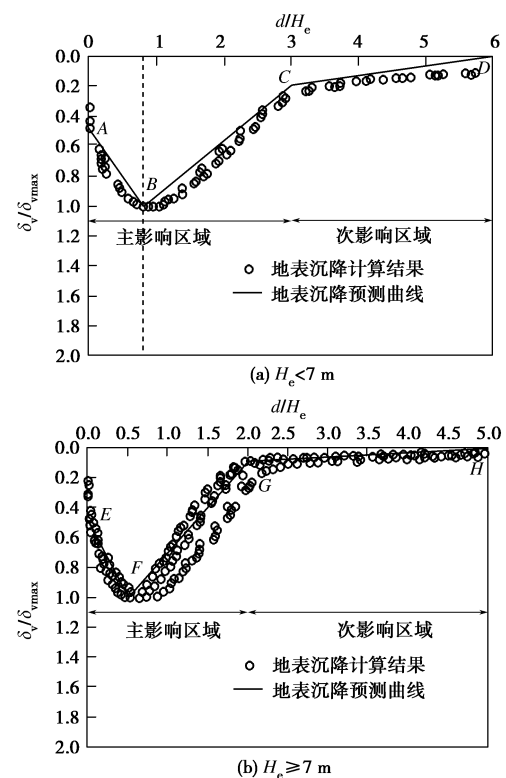


图 8 墙后地表沉降曲线

Fig. 8 Curves of ground surface settlement behind walls

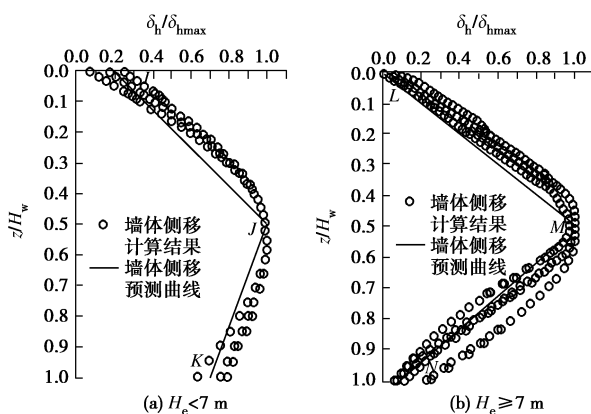


图 7 围护结构侧移曲线

Fig. 7 Curves of lateral deformation of embedded walls

6 预测流程及验证

6.1 板式支护体系基坑变形预测流程

前面给出了围护结构最大侧移和地表最大沉降的简化计算公式,同时也分别给出了最终开挖深度小于7 m和最终开挖深度大于或等于7 m时的地表沉降曲线和围护结构侧移曲线,因此可根据上述公式和曲线预测板式支护体系基坑的变形,其预测步骤如图9所示。

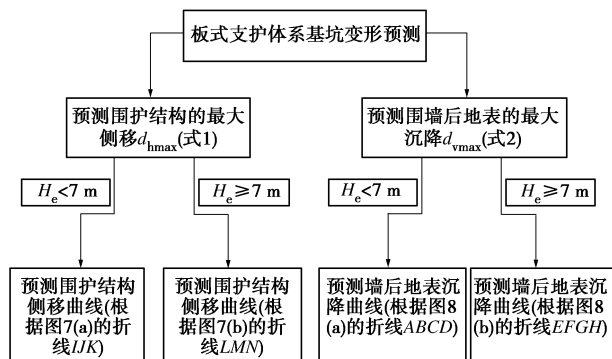


图9 预测板式支护体系基坑变形步骤

Fig. 9 Flow chart for estimating deformation of excavations retained by embedded walls

6.2 板式支护体系基坑变形预测简化方法验证

为了验证式(1)、(2)、图7所示的围护结构侧移预测曲线以及图8所示的地表沉降预测曲线是否适合于上海地区的板式支护体系基坑的变形预测,收集了上海地区7个板式支护体系基坑的地表沉降以及围护结构侧移的实测数据。图10中,(a)、(b)和(h)基坑的详细信息和实测结果可参考文献[20],图10(c)可参考文献[21],图10(d)和(f)可参考文献[22],图10(e)可参考文献[23],图10(g)为华东建筑设计研究院内部资料。

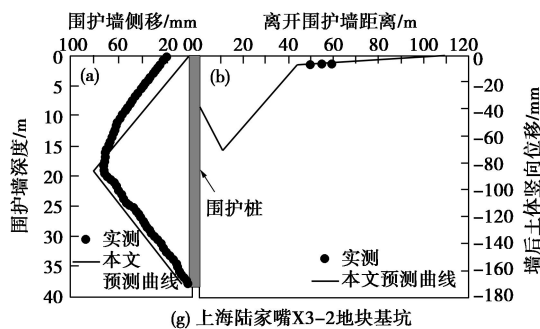
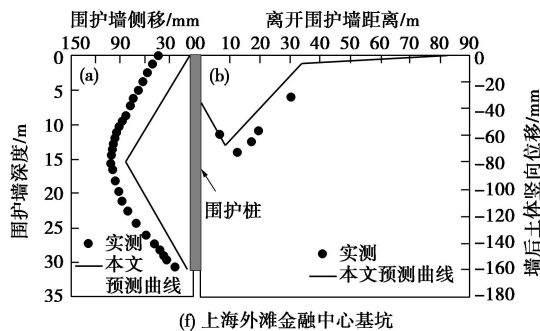
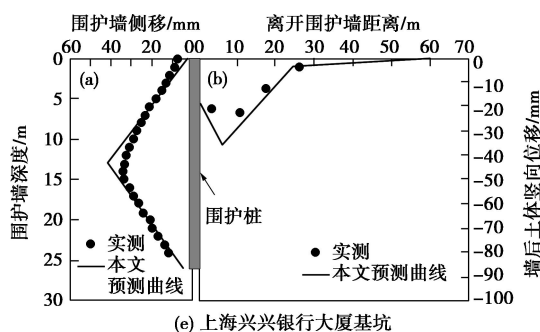
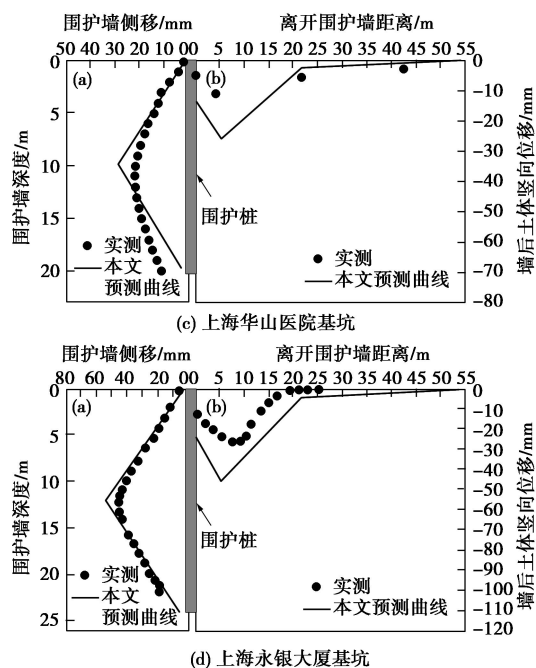
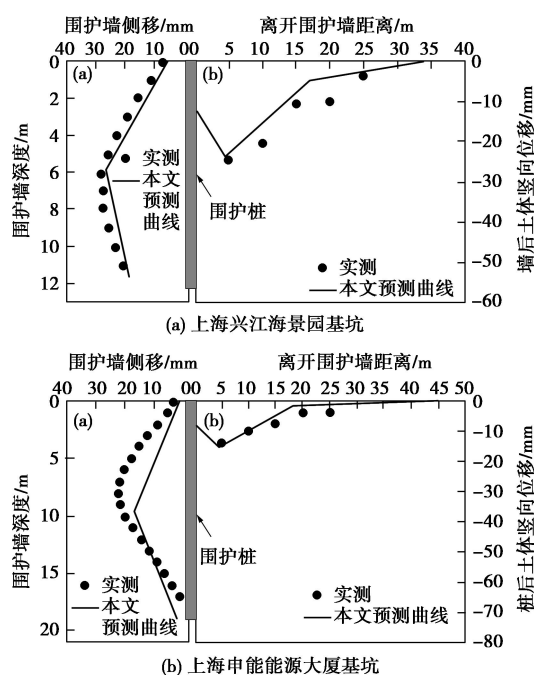


图10 预测的板式支护体系基坑变形与实测变形的对比

Fig. 10 Comparison of estimated deformations and observed results of excavations retained by embedded walls

按照图9所示的预测板式支护体系基坑变形步骤

预测各基坑围护结构侧移曲线和地表沉降曲线, 并与实测结果对比。采用本文方法预测的结果与实测结果的对比如图 10 所示。图中的对比可以看出, 本文方法预测的围护结构侧移曲线和地表沉降曲线基本上能与上海地区的实测结果相吻合。因此, 采用本文的方法来预测上海地区板式支护体系基坑的变形是合理的。

7 结 语

通过对基于土体 HS-Small 模型的 108 个板式支护体系基坑开挖有限元计算结果的分析及归一化, 推导了能够综合考虑基坑系统刚度、基坑开挖深度和开挖宽度的上海地区板式支护体系基坑围护结构最大侧移和地表最大沉降的简化计算公式, 并且提出了基坑围护结构侧移曲线和地表沉降曲线, 同时也给出了上海地区板式支护体系基坑变形的预测流程。采用本文给出的简化方法预测了上海地区的 7 个工程的变形并与实测结果进行了比较, 结果表明该方法能较好地预测板式支护体系基坑的变形, 从而为上海地区板式支护体系基坑工程设计提供了一种预估基坑变形的实用分析方法。

参考文献:

- [1] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [2] HASHASH Y M, WHITTLE A J. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(6): 474 - 486.
- [3] 徐中华, 王建华, 王卫东. 主体地下结构与支护结构相结合的复杂深基坑分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1355 - 1359. (XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Analysis of a complicated deep excavations supported by substructures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1355 - 1359. (in Chinese))
- [4] 应宏伟, 郭 跃. 某梁板支撑体系的深大基坑三维全过程分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1670 - 1675. (YING Hong-wei, GUO Yue. 3D analysis on a deep beam-slab braced foundation pit considering effect of construction process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1670 - 1675. (in Chinese))
- [5] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1885 - 1896. (YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1885 - 1896. (in Chinese))
- [6] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, **127**(33): 203 - 224.
- [7] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, **44**(1): 87 - 98.
- [8] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE. New York, 1990: 439 - 470.
- [9] WONG K S, BROMS B B. Lateral wall deflections of braced excavation in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1989, **115**(6): 853 - 870.
- [10] KUNG T C, JUANG H, HSIAO 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, ASCE, 2007, **133**(6): 731 - 747.
- [11] MEDINA D G Z. Semi-empirical method for designing excavation support systems based on deformation control[D]. Kentucky: University of Kentucky, 2007.
- [12] DGJ08—37—2002 岩土工程勘察规范[S]. 2002. (DGJ08—37—2002 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2002. (in Chinese))
- [13] ROBOSKI J F. Three-dimensional performance and analyses of deep excavations[D]. Illinois: Northwestern University, 2004.
- [14] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.
- [15] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 258 - 264. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 258 - 264. (in Chinese))
- [16] BENZ T, SCHWAB R, VERMEER P. Small-strain stiffness in

- geotechnical analyses[J]. *Geotechnical Engineering*, 2009, **86**(S1): 16 - 27.
- [17] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体 HS 模型参数的试验研究与分析[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(8): 2283 - 2290. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Laboratory test and analysis of the parameters of the Hardening Soil model used for numerical analysis of deep excavations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(8): 2283 - 2290. (in Chinese))
- [18] SCHWEIGER H F, VERMEER P A, WEHNERT M. On the design of deep excavations based on finite element analysis[J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2009, **2**: 333 - 344.
- [19] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(6): 1004 - 1017.
- [20] 王卫东, 徐中华, 常林越. 深大基坑变形控制设计与施工技术及其环境影响评估方法研究背景工程与应用研究分报告[R]. 上海, 2010. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, CHANG Lin-yue. Case histories of performance-based design and construction of deep excavations and analyzing the deformation of excavations in close proximity to sensitive properties[R]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [21] 王浩然, 王卫东, 徐中华. 基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, **5**(增刊 2): 1512 - 1517. (WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Three dimensional analysis of the influence of deep excavation on adjacent building[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, **5**(S2): 1512 - 1517. (in Chinese))
- [22] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(增刊 1): 32 - 38. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(S1): 32 - 38. (in Chinese))
- [23] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese))