

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.251133

HSS 模型在某基坑变形分析中的应用研究

杜 辉

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 随着城市的发展,城市用地空间日益紧张,基坑开挖支护受空间地形限制,对周边结构造成较大影响。为有效降低基坑开挖对周边环境的影响,结合工程情况,利用现状挡墙结构进行骑跨式加固改造,并在墙后新建 SMW (soil mixed wall) 工法桩支护作为围护结构,建立 Plaxis 有限元模型,采用 HSS (hardening soil with small strain stiffness) 模型对基坑开挖过程中引起的周边环境位移进行数值模拟。结果表明,该方法有效可行,能够减少现状结构拆除量,施工引起周边环境位移在允许范围之内。相较于一般土体本构模型,基于 HSS 模型的基坑变形数值模拟结果偏安全,更接近监测值,具有一定的工程意义。

关键词: 基坑开挖;HSS 模型;有限元;Plaxis;数值模拟

中图分类号: TU46*3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0120-04

Research on Application of HSS Model in Deformation Analysis of a Foundation Pit

DU Hui

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the urban development, the urban land space is becoming increasingly tight. The excavation and support of foundation pit are limited by spatial topography, which will significantly affect the surrounding structures. To effectively reduce the impact of foundation pit excavation on the adjacent environment, combined with the engineering conditions, the existing retaining wall structure is utilized to conduct a straddle-type reinforcement and reconstruction, and a SMW (soil mixed wall) pile support is newly constructed behind the wall as the enclosing structure. A finite element model of Plaxis is established, and the HSS (hardening soil with small strain stiffness) model is adopted to perform numerical simulations of the surrounding environmental displacement caused by the foundation pit excavation. The results indicate that the proposed method is feasible, which can reduce the volume of demolition required for the existing structure, and the surrounding environmental displacement caused by the construction is within the allowable range. Compared with conventional soil constitutive models, the numerical simulation results of foundation pit deformation based on the HSS model are relatively safe and closer to the monitored values, which has certain engineering significance.

Keywords: excavation of foundation pit; HSS model; finite element method; Plaxis; numerical simulation

0 引 言

北泗塘位于上海市宝山区,北起马路河,南至蕴藻浜,全长 6.06 km,沿河与涓浦、沙浦次干河道相连接,是嘉宝北片蕴北地区主要的引排水通道,现状河口宽为 37.5~50.0 m,两岸为直立式混凝土挡墙,距蕴藻浜约 4 km 处设有一座北泗塘水闸,建于 1998 年,属小(1)型水闸,闸孔净宽为 10 m。

随着吴淞创新城的开发,区域内防洪保障需要

进一步提高,同时随着地块的建设开发,需要进一步提高区域内水体的亲水性,因此对北泗塘水闸的外移产生强烈需求。水闸外移后,规划口门宽度为 18 m,水闸闸室距蕴藻浜河道中心线约 267 m,相对现状闸址南移约 3.9 km,管理区布置于西岸(见图 1)。

新建水闸基坑距周边现状房屋建筑较近,桩基施工、基坑支护施工、基坑开挖等会对现状邻近结构产生一定影响。为分析研究水闸基坑施工对基坑周边现状建筑结构的影响,通过 Plaxis2D 软件建立 HS-small (小应变刚度硬化模型)有限元模型进行研究。

小应变硬化土模型(HSS 模型)是 Benz^[1]以 HS 模型为基础提出的^[2-3],在继承 HS 模型优点的同时,考

收稿日期: 2025-11-24

作者简介: 杜辉(1993—),男,硕士,工程师,从事水利工程设计工作。



图 1 项目区位图

虑了土体小应变的非线性变化特性,引入了反映土体小应变特性的小应变参数,可以模拟包括软土和硬土在内的不同类型土体行为,如土体剪切硬化、压缩硬化、加卸载、小应变等方面的力学特性^[4-5]。隧道开挖等工程中的变形分析实践表明,HSS模型有较好的变形预测能力,与莫尔库伦模型、HS模型相比,其计算结果更为准确^[6],是一种可用于变形数值分析的高级本构模型^[7]。该模型已被嵌入到PLAXIS、Z-SOIL等有限元商业软件中,被广泛应用于基坑开挖数值模拟分析^[8]。

本工程通过建立 HSS 模型,计算基坑开挖对周边结构的影响情况,进而指导工程施工。

1 工程概况

拟建水闸位于北泗塘河道内,距离蒹藻浜河约 125 m。水闸工程平面布置采用中孔开敞式+边孔胸墙式水闸的布置方案,水闸布置在河道中心线位置。顺水流方向总长度为 119.76 m,垂直水流方向总长度为 23.2 m。水闸防冲槽末端距离现状河口约 125 m。

墙后为现状码头及居民生活区,场地较为平整,高程约为4.5 m,墙前河底高程为-1 m;闸室开挖高程为-2.40 m,外河消力池开挖高程为-3.30 m,内外河海漫开挖高程为-1.55 m,外河防冲槽开挖高程为-3.00 m。

本工程基坑围护结构为东西走向,东西向长约 76 m,南北向长约 138 m,基坑最大开挖深度为 7.80 m,采用改造挡墙结构+墙后 SMW 工法桩围护方案作为主体结构的围护方案(见图 2)。

2 基坑设计

2.1 基坑设计标准

本工程基坑安全等级为二级(基坑开挖深度为 $7 \leq h \leq 12 \text{ m}$), 环境保护等级为二级。

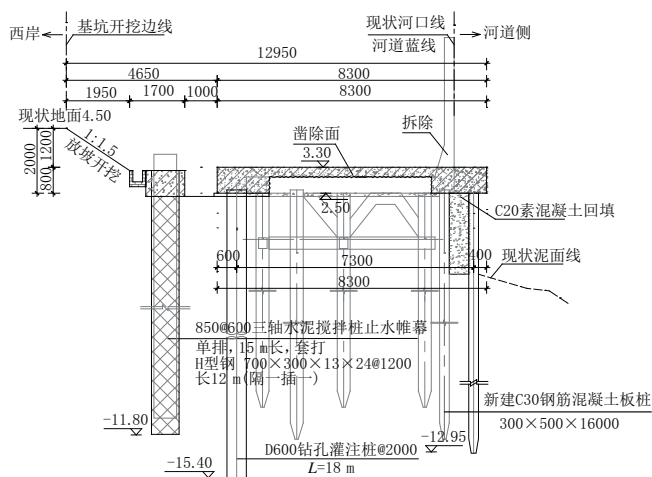


图2 基坑围护断面图[单位:mm(尺寸);m(高程)]

2.2 基坑深度

现状场地高程约为 4.5 m, 外河消力池开挖高程为 -3.30 m, 基坑最大深度为 7.8 m。

2.3 基坑围护型式

根据本文工程的规模和具体特点,采用改造挡墙结构+墙后SMW工法桩围护方案。

基坑位于河道内,现状挡墙年代较久,基础桩基结构不一定可靠,利用现状挡墙进行骑跨式加固改造后,作为双排桩围护结构,于挡墙底板前新建 300 mm×500 mm×16 000 mm C30 钢筋混凝土板桩,挡墙后新建 $L=18$ m、 $\phi 600$ mm 钻孔灌注桩,间隔 2 m,墙后新增一排长 15 m SMW 工法桩支护,直径为 850 mm@600 mm 三轴水泥搅拌桩止水帷幕,H 型钢 700 mm×300 mm×13 mm×24 mm@1 200 mm,长 12 m,隔一插一。

2.4 基坑围护施工步骤

- (2)墙后卸土及施打SWM工法桩。墙后按照1:1.5放坡至现状高程,并施打SMW工法桩,如图3所示。

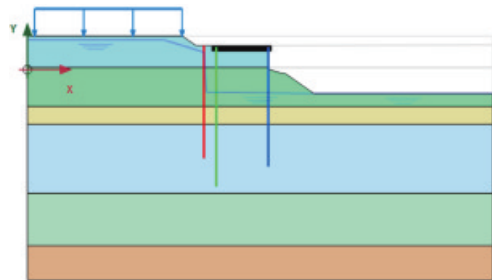


图3 方案1计算模型

- (3)改造现状防汛墙。将墙前水位降至底板以下,拆除立墙,墙前施打钢筋混凝土板桩,墙后新建钻孔灌注桩,并对现状底板进行加固。
- (4)将河道水位降至河底。

(5)扩挖河底。河底按照1:1.5的坡度放坡至基坑底部-3.30 m。

3 建模分析

3.1 计算断面及方案

选取最不利断面外河消力池段作为计算断面,分析水闸结构施工对岸边现状结构的影响。基坑计算参数如表1所示。

表1 基坑断面计算参数				单位:m
序号	基坑底高程	双排桩支护高程	基坑顶高程	基坑深度
1	-3.30	3.30	4.50	7.80

本研究采用方案1,支护组合为双排桩+工法桩,采用Plaxis软件内嵌的HSS模型。为进行对比,同时给出方案2、方案3。方案2采用一般模型进行计算,支护组合为双排桩+工法桩,同方案1;方案3采用HSS模型进行计算,支护组合为双排桩。具体如表2所示。

表2 基坑计算模型及支护组合			
序号	计算软件	支护组合	土体本构模型
1	Plasix 2D	双排桩+工法桩	HSS模型
2	FRWS	双排桩+工法桩	一般模型
3	Plasix 2D	双排桩	HSS模型

3.2 模型构建

3.2.1 方案1计算模型

计算软件采用Plaxis 2D有限元软件。竖直向影响深度一般取坑底下 $\geq 2H$ (H 为基坑开挖深度),水平向影响范围一般为 $\geq 4H$ (H 为基坑开挖深度)。本模型水平方向总长取64 m,竖直方向深度取地表下30 m。水平方向为 x 向,竖直方向为 y 向,且对模型底部边界施加 x 、 y 向位移约束,两侧竖向边界施加 x 向约束。土体本构模型为HSS模型。计算模型如图3所示。

3.2.2 方案2计算模型

计算软件采用同济启明星深基坑支挡结构设计计算软件FRWS。将SWM工法桩设为一级支护,改造挡墙结构作为双排桩结构设为二级支护。计算模型如图4所示。

3.2.3 方案3计算模型

计算软件采用Plaxis 2D有限元软件。模型范围及土体本构模型同方案1。计算模型如图5所示。

3.3 计算参数

HSS模型共13个参数,其中11个为HS模型参数以,2个为小应变参数^[10]。HS模型参数为有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、剪胀角 ψ 、三轴排水剪切测定

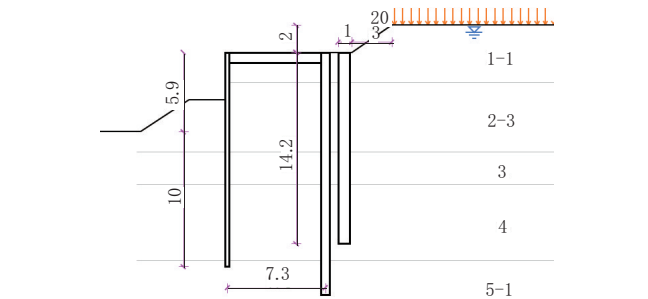


图4 方案2计算模型(单位:m)

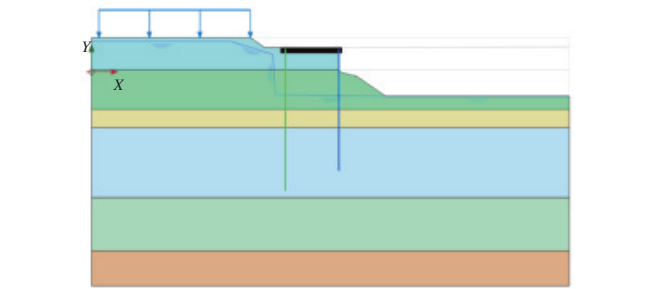


图5 方案3计算模型

的土体破坏比 R_f 、三轴固结排水剪切试验测定的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、模量应力水平相关幂指数 m 、三轴固结排水加卸载试验测定的加卸载模量 E_{ur}^{ref} 、加卸载泊松比 ν_{ur} 、初始静止侧压力系数 K_0 、参考应力 p^{ref} (建议采用土层的现场应力值,有需要时可再换算到100 kPa下的模量)、标准固结试验测定的参考应力下的切线模量 E_{oed}^{ref} ;小应变参数为:剪切模量衰减到初始剪切模量0.7倍时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ 和动剪切初始模量 G_0^{ref} 。

方案1、3计算本构模型采用HSS模型,土体为弹塑性,围护体系采用线弹性模型。HSS模型参数取值依据文献[9-10]。

3.3.1 计算土体本构模型参数

计算中土体参数见表3、表4。

表3 土体基本物理力学性质				
层号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi'/(^{\circ})$
① ₁	18.5	10	10.0	0
② ₃	18.4	6	28.5	0
③	17.5	3	23.0	0
④	16.7	2	17.0	0
⑤ ₁	17.4	4	30.5	0

表4 HSS模型土体参数						
层号	E_{oed}^{ref}/MPa	E_{50}^{ref}/MPa	E_{ur}^{ref}/MPa	G_0^{ref}/MPa	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m
① ₁	15.0	15.0	45.0	86.3	2	0.83
② ₃	3.5	4.2	24.3	97.0	2	0.80
③	3.3	4.4	40.2	52.0	3	0.53
④	1.8	2.0	15.1	34.0	4	0.71
⑤ ₁	3.6	4.3	25.2	100.8	2	0.80

3.3.2 荷载和地下水位

基坑顶部荷载按照 20 kPa 计。
地下水位取地坪以下 1 m,取 3.50 m,河道水位取开挖基坑底高程-3.30 m。

3.3.3 HSS 模型模拟工况

根据施工方案,本次计算对施工步骤模拟如下。
第一步:初始地应力场计算;
第二步:施加施工荷载;
第三步:底板上土体开挖,模拟底板土体开挖;
第四步:激活围护桩基础(板桩、灌注桩、工法桩);
第五步:分层开挖土层至基坑底。

3.4 计算结果

经计算,各方案基坑开挖对周边环境位移影响及施工期位移监测值如表 5 所示(水平位移向右为正,反之为负;竖直位移向上为正,反之为负)。方案 1 位移计算结果如图 6、图 7 所示。方案 3 的位移计算结果如图 8、图 9 所示。

表 5 基坑断面计算结果				单位:mm
方案	水平位移		竖向位移	
	计算值	允许值 (0.3%H)	计算值	允许值 (0.25%H)
方案 1	15.02	23.7	-9.72	19.75
方案 2	11.10	23.7	-5.40	19.75
方案 3	26.88	23.7	-19.90	19.75
监测值	12.44	23.7	-8.93	19.75

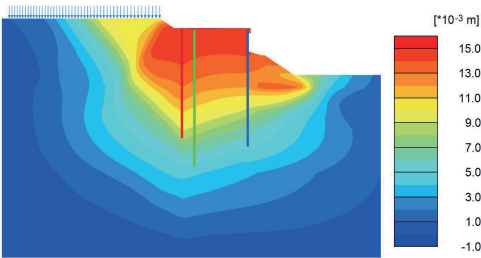


图 6 方案 1 基坑水平位移云图 u_x (单位:m)

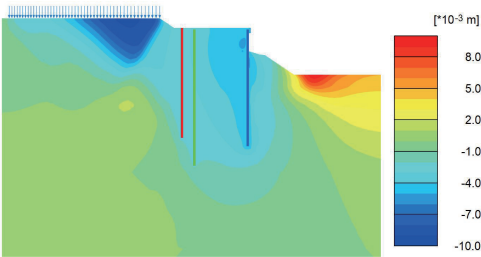


图 7 方案 1 基坑竖向位移云图 u_y (单位:m)

对于方案 3,当不设置 SMW 工法桩时,基坑水平、竖向最大位移值分别为 26.88、19.90 mm,均超过允许值,故需设置 SMW 工法桩加强围护结构。

由表 5 可知,对于方案 1,基坑开挖引起的周边

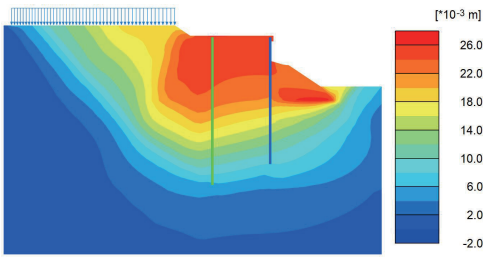


图 8 方案 3 基坑水平位移云图 u_x (单位:m)

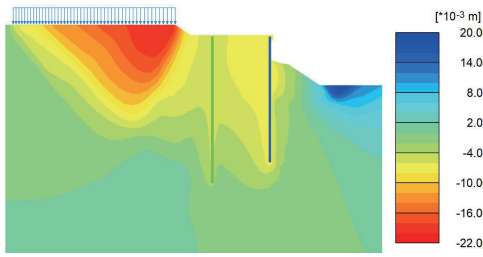


图 9 方案 3 基坑竖向位移云图 u_y (单位:m)

环境最大竖向位移为 9.72 mm,水平位移为 15.02 mm,均小于施工期监测值,均小于该基坑环境保护等级的变形控制值。

方案 1 的 HSS 模型计算位移值较方案 2 偏大,且与施工期监测值较吻合,计算结果偏安全,这更好地反映了 HSS 模型有较好的变形预测能力。

4 结 语

本文结合实际工程情况,研究利用现状挡墙结构进行骑跨式加固改造、并结合墙后新建 SMW 工法桩支护作为围护结构的可行性。建立了基于 HSS 的土体本构模型与一般本构模型的计算模型,对基坑开挖过程中引起的周边环境位移进行数值模拟。

结果表明,利用现状挡墙进行骑跨式加固改造并在墙后增设 SMW 工法桩作为支护结构可行。该方法可利用现状结构,减少现状结构拆除量;施工引起的周边环境位移较小,位移值在基坑环境保护等级的变形控制值之内。相较于一般土体本构模型,基于 HSS 模型的基坑变形数值模拟结果偏安全,更接近监测值,可用于指导工程实践。

参考文献:

[1] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
[2] 褚峰. 土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(增刊 1): 3184-3192.
[3] 尹曦. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(增刊 1): 166-172.
[4] 罗敏敏, 陈赞, 周江. 小应变土体硬化模型参数取值研究现状与展望[J]. 工业建筑, 2021, 51(4): 172-180.
[5] 顾晓强, 陆路通, 李雄威, 等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J].

(下转第 136 页)