

钢管水泥土围护墙等效弹性模量的有限元计算

许海勇, 陈龙珠

(上海交通大学船建学院安全与防灾工程研究所, 上海 200240)

摘要:分析了水泥土围护墙弹性模量对于控制基坑变形的重要性、根据上海某钢管水泥土墙基坑支护的工程实例建立 ABAQUS 平面二维有限元模型, 计算钢管水泥土围护墙等效弹性模量, 量化了内插钢管对提高水泥土重力式围护结构的支护强度所起到的作用, 并对钢管长度、外径、间距和插入位置进行了参数分析。

关键词: 水泥土围护墙; 钢管; 有限元; 等效弹性模量; 参数分析

中图分类号: TU476⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)03-0261-04

Finite Element Analysis on the Equivalent Elastic Modulus of Cemented Soil Retaining Wall Embedded with Steel Pipes

XU Hai-yong, CHEN Long-zhu

(Institute of Engineering Safety & Disaster Prevention, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The importance of the elastic modulus of cemented soil retaining wall to controlling deformation of foundation pits is analyzed. A 2D ABAQUS plane finite element model is set up on the basis of a excavation project in Shanghai. The equivalent elastic modulus of the wall embedded with steel pipes are calculated. The result quantifies the effect of steel pipes in raising strength of the retaining wall. Some parameters of the steel pipes such as length, external diameter, insert position and distance between two pipes, are also analyzed.

Key words: Cemented soil retaining wall; Steel pipe; Finite element; Equivalent elastic modulus; Parameter analysis

0 引言

在基坑工程中, 水泥土重力式围护墙是由专用施工机械将原状土和水泥浆强制搅拌后形成的、沿坑边布置的连续加固体, 用以抵抗因基坑开挖引起的坑边地基土重力、水压力和地面荷载的作用, 阻止地下水的渗流, 为地下工程的施工提供安全的空间, 防止坑边建(构)筑物因地基变形过大而遭受损伤。在上海软土地区, 开挖深度在 7 m 内的基坑经常采用这种围护形式。根据上海市基坑工程技术规范^[1], 开挖深度小于 7 m 的基坑属于三级安全等级, 但为了更好地保护周围建筑物或地下管线安全性或者局部加大开挖深度, 工程上经常采用水泥土内插毛竹或者钢管的支护形式, 这和深基坑支护形式中

常见的 SMW 工法具有一定的相似性。钢管长度一般超过开挖深度, 但不贯穿墙体, 钢管横截面积与水泥土墙体横截面积相比也很小。所以 SMW 工法是水泥土辅助 H 型钢起到止水和防止型钢失稳的作用, 而钢管水泥土围护墙则是钢管辅助水泥土提高整体的抗变形能力和防止受拉区混凝土开裂。

钢管组合桩法最早由日本土木研究中心研制, 后在欧美等地区广泛使用^[2]。钢管表面及桩端钢管内侧设有螺旋状螺纹以提高桩身各部位水泥土与钢管的粘结性能, 使水泥土与钢管形成一个整体。目前只有少数关于钢管水泥土组合支护结构极限承载力和钢管粘结性能的实验研究^[3], 工程中也只是定性性地认为插入钢管对控制变形有一定的作用, 还没

有理论或者试验来定量地表明内插钢管对水泥土围护墙体变形的控制情况如何,减少的变形量有多少。本文基于 ABAQUS 有限元计算软件,对上海华浙外滩某基坑工程的钢管水泥土墙采取加钢管和不加钢管的有限元计算对比,量化钢管在水泥土围护墙中起到的作用。

1 墙体等效弹性模量

在基坑变形中一般以弯曲变形为主,水泥土墙体的抗弯刚度 EI 就成为了控制变形的主要因素。其中 E 是水泥土的弹性模量, I 是横截面的惯性矩。对于一定尺寸的墙体,其截面的 I 也是既定的,影响墙体强度和控制变形的主要因素就成了弹性模量 E 。本文作者在总结相关文献并推导水泥土重力式围护墙水平位移的简化计算公式时,也需要确定墙体 E 的取值。对于水泥土围护墙内部插入钢管时强度的提高,现有文献的理论解析解或者数值计算结果都近乎寥寥。本文就以弹性模量 E 为切入点,采用已为广泛应用的有限元^[4]方法来计算和比较,把不插钢管的水泥土墙体的弹性模量提高到多少才能和插钢管的水泥土墙支护变形结果相同或相近,将提高后的弹性模量作为等效弹性模量,把提高的百分率定量地作为评价钢管支护效果的标准。

2 计算方法和过程

2.1 计算模型

常用的有限元计算软件有 ANSYS^[5], Abaqus, Plaxis 等,本文采用 Abaqus 软件,选取上海华浙外滩某基坑的钢管水泥土墙为算例,钢管布置情况和开挖模型如图 1 所示,开挖深度和墙体参数见表 1,钢管参数见表 2。

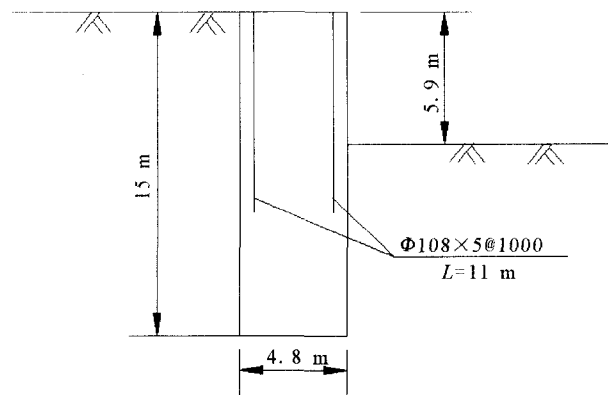


图 1 基坑开挖模型

Fig. 1 Model of excavation pit.

表 1 基坑开挖深度和墙体参数

开挖深度/m	墙体	
	深度/m	宽度/m
5.9	15	4.8

表 2 钢管参数

外径/mm	壁厚/mm	长度/m	间隔/m	距墙侧/m
108	5	11	1	0.1

由于本文目的在于计算插入钢管后水泥土围护墙体性质的改变,与周围土层环境关系不大,所以考虑单独地把墙体作为一个弹性的悬臂梁来建模,底部采用固端约束,如图 2。

在单元选取方面,文献[6]中详细说明了对于宽度较小的墙体,采用板单元或梁单元模拟挡土墙比较准确,而对于水泥土墙这类宽度较大的墙体,采用实体单元模拟则更为准确,加之本文要在墙体中插入钢管,所以墙体和土体都采用实体单元,每个都是高 0.5 m、宽 0.3 m 的矩形单元,墙体单元共 480 个。对于钢管,ABAQUS 软件中有对应的 pipe 梁单元可以选用并可定义钢管材料属性、外径和壁厚。

2.2 计算假定

(1) 将墙体单独列出作为弹性悬臂梁计算,达到计算目的的同时,在很大程度上简化了计算模型,减少了计算量。

(2) 整个计算过程墙体都处于安全的工作状态,墙体和钢管采用线弹性材料。根据工程实际经验,水泥土围护墙体的弹性模量在 300~400 MPa 之间,本文选取均值 350 MPa。钢管的弹性模量取 2.1×10^5 MPa。

(3) 不考虑钢管和水泥土之间的相对滑移。钢管内外都有土体,为实体单元。钢管为 pipe 型梁单元,ABAQUS 软件中可以设置语言命令将梁单元植入实体单元,并默认两种单元之间没有相对滑动,做到在计算过程中钢管和土体始终保持粘结状态。

(4) 由于弹性模量是墙体本身的性质,与外界环境和外力无关,本文将墙体两侧的主、被动土压力系简化为主动侧的水平均布荷载,大小为 20 kPa,如图 2。

2.3 计算精度验证

为了说明本文单元划分的准确性和计算的精度,本节中引入结构力学中一个经典的悬臂梁自由端位移的解析解,模型和受力情况同图 2,结构力学的解析解计算结果为

$$s = \frac{ql^4}{8EI} \quad (1)$$

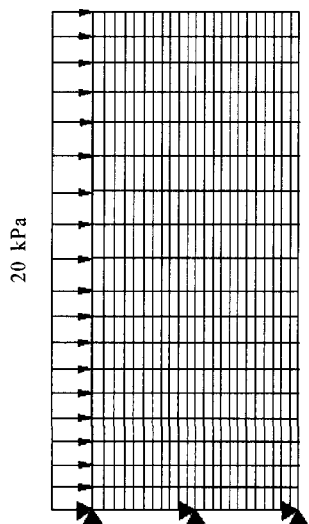


图2 计算模型的网格划分及边界条件

Fig. 2 Mesh and boundary conditions of the model.

其中 s 为自由端水平位移; q 为均布荷载; l 为悬臂梁高度。代入本算例中的计算参数, 解析解为 39.237 mm, 本文模型 Abaqus 软件计算结果为 38.704 mm, 偏差为 1.36%, 证明本文模型的计算精度是可信的, 可以用来进行下一步的对比计算和分析。

3 计算结果

在钢管水泥土支护和水平均布荷载的作用下, 墙体水平变形放大后的云纹图如图 3, 墙顶的水平位移最大, 位移值沿深度逐渐减小。从墙顶至以下 6 m 深度内水平变形对应所处深度的曲线如图 4, 最大水平变形出现在墙顶, 为 34.129 mm。

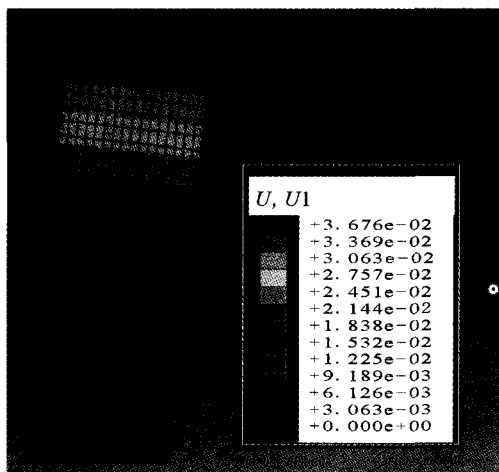


图3 水平位移云纹图

Fig. 3 Moire pattern of the lateral displacements.

在没有钢管而单独计算水泥土围护墙的情况下, 墙体从墙顶至以下 6 m 深度内水平变形随深度

变化的曲线如图 4, 最大水平变形同样出现在墙顶, 为 38.704 mm。

通过上述对比, 加钢管的水泥土墙顶水平位移比无钢管的情况下减小了 4.575 mm, 即减小了 11.8%。保持截面的惯性矩 I 不变, 加大无钢管水泥土墙体的弹性模量, 当 E 提高到 390 MPa 左右时, 墙体的水平位移和加钢管情况下的水平位移相近, 如图 4, 即该钢管水泥土墙等效体弹性模量提高了约 11.4%。计算结果表明, 插入钢管有助于控制变形, 但效果有限, 工程上这一做法更多的作用是提高整体的承载力和稳定性。

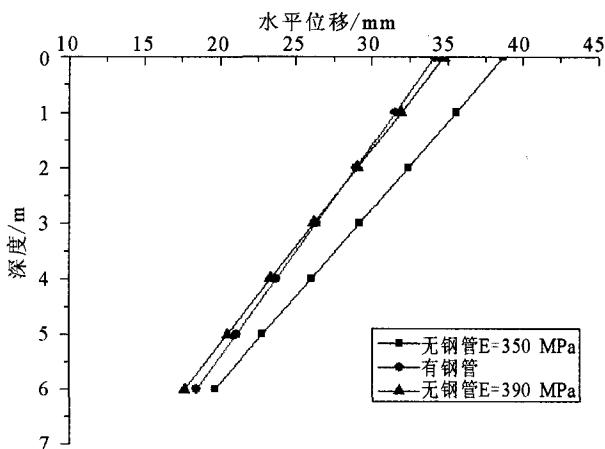


图4 不同情况下的墙身水平位移

Fig. 4 Lateral displacements of the retaining wall in different situations.

4 参数分析

基于上述的平面应变模型, 钢管的长度, 外径、间距以及插入的位置可能是影响加固效果的重要因素, 本文也对此进行参数分析。

保持其它参数不变, 钢管长度分别为 9~13 m 时, 对应的墙顶位移计算结果对比如图 5。随着钢管长度的增大, 墙顶位移加速减小, 当钢管长度为 13 m, 即差 2 m 贯穿墙身时, 墙顶的位移为 29.694 mm。

保持其它参数不变, 钢管长度为 13 m, 如图 6。计算两侧钢管插入位置和墙中心之间的距离 x 分别为 0.1~2.3 m 时对应的墙顶位移, 对比结果如图 7。随着钢管插入位置远离墙侧靠近中心, 墙顶的位移近似呈线性增大, 当布置在最靠近中心时, 墙顶位移与不加钢管时几乎相同。

保持其他参数不变, 钢管长度取 11 m, 外径分别取 50~160 mm。随着外径的增大, 水泥土围护

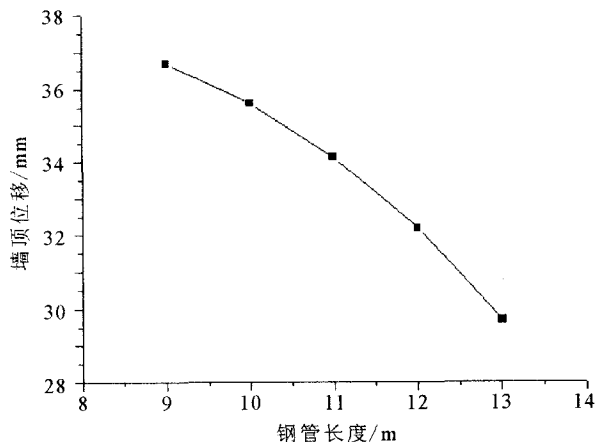


图5 不同钢管长度对应的墙顶位移变化

Fig.5 Displacements at top of the wall versus the lengths of steel pipe.

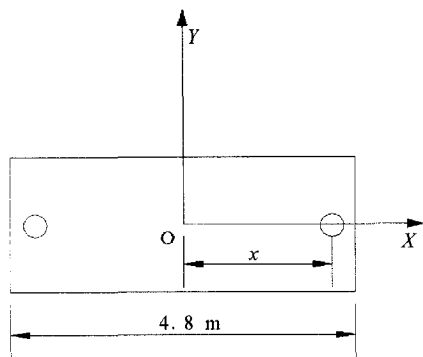
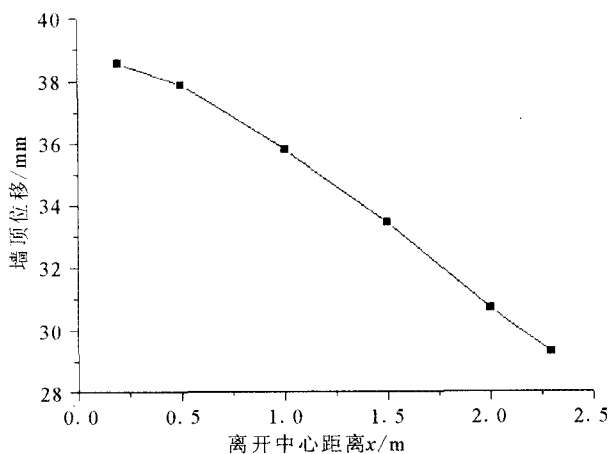
图6 钢管插入位置和墙中心的距离 x Fig.6 Distance x between the insert position and the center of the wall.

图7 不同插入位置对应的墙顶位移

Fig.7 Displacements at top of the wall versus the insert position of the steel pipe.

效果并不明显。

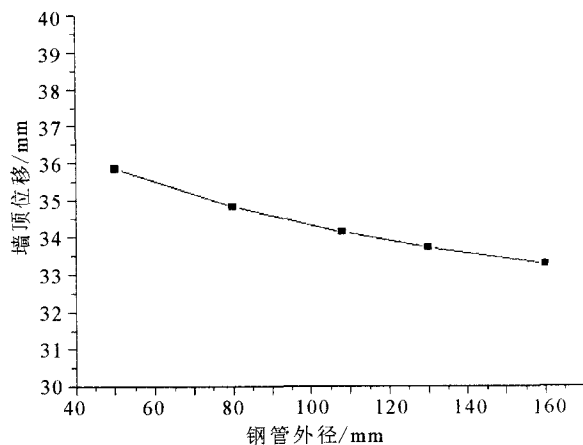


图8 不同钢外径对应墙顶的位移

Fig.8 Displacements at top of the wall versus the external diameter of the steel pipe.

保持其他参数不变,钢管长度取 11 m,钢管间距分别取 0.6~1.2 m 时,墙顶位移随着钢管间距增大而近似线性增大,变化幅度较小。钢管管径很小,加大埋置密度效果也不明显,如图 9。

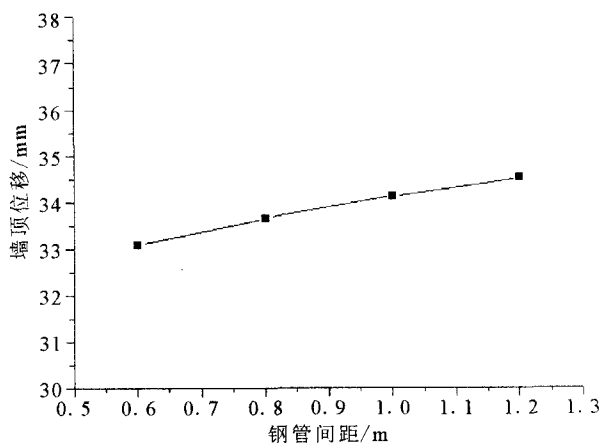


图9 不同钢管间距对应的墙顶位移

Fig.9 Displacements at top of the wall versus the distance of each two pipes.

(下转 274 页)

墙顶部位移在减小,如图 8,但减小的局势逐渐放缓,且墙顶位移变化的幅度也较小,可见加大管径的

向位移(图 5),其中第四根柱柱端位移最大,其相对水平横向位移见图 6。由图 5、6 可见:

(1) 在横向剪切地震波作用下,结构顶板的横向变形最大,底板次之,表明浅埋不利于地下结构的抗震;

(2) 中震时,第三列第四根柱子顶端与柱子底端相对位移最大,其大小为 3.6 mm;

(3) 大震时,第三列第四根柱子顶端与柱子底端相对位移最大,其大小为 5.8 mm。

4 抗震性能评价结果

表 2 为中震、大震时该人防工程的层间位移角值。由表 2 可见:

(1) 在中震水平的地震作用下,该人防工程的变形均处于弹性阶段(层间位移角小于 1/550),表明该结构在中震水平下具有良好的抗震性能;

(2) 在大震水平的地震作用下,该人防工程的变形(1/517)进入了塑性变形阶段,但小于 1/250,即结构的安全仍有保障。

由此可见,该人防工程具有良好的抗震性能。

表 2 最大层间位移角

层高/m	中震		大震	
	柱端相对位移/mm	层间位移角	柱端相对位移/mm	层间位移角
3	3.6	1/833	5.8	1/517

(上接 264 页)

5 结语

本文基于 ABAQUS 软件模拟了一个二维的钢管水泥土围护墙支护下基坑开挖引起墙体变形的有限元计算模型,对比了是否插有钢管情况下墙体的水平变形值并计算了钢管水泥土墙体的等效弹性模量。计算结果表明水泥土墙体中插钢管或其它型钢,有助于减少位移,但效果有限,相比之下适当地加长钢管以及将钢管的插入位置尽量靠近墙体的两侧能更明显地控制基坑的变形。

[参考文献]

5 结语

本文基于地下结构地震响应的特点及已有相关规范,建立了以结构变形为评价指标的地下结构抗震性能评价方法。然后以某人防工程作为研究对象,建立了其三维计算模型,分析了其地震响应特点,并采用本评价方法对其抗震性能进行了评价,评价结果表明:该人防工程具有良好的抗震性能。本文的评价方法可供其它相关地下工程参考应用。

[参考文献]

- [1] Huo H, Bobet A, Fernández G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [2] 马险峰. 地下结构的震害研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [3] 王国波. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [4] 王国波. 上海软土地震响应的振动台模型试验及其三维数值拟合分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 27-30.
- [5] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.
- [6] 孔戈. 盾构隧道地震响应分析及抗减震措施研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

- [1] 上海市勘察设计行业协会, 上海现代设计(集团)有限公司, 上海建工(集团)总公司. DG/TJ08-61-2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海建筑建材业市场管理总站, 2010.
- [2] 董平, 陈征宙, 秦然. 砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 204-207.
- [3] 李希元. 水泥土钢管组合桩的设计、试验及应用[J]. 港工技术与管理, 1993, (1): 48-57.
- [4] 张胜利. 构造应力场模拟——有限元理论、方法和研究进展[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 405-410.
- [5] 张学东, 言志信, 张森. ANSYS 在岩质边坡动力响应分析中的应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 117-121.
- [6] R A DAY. Modelling sheet pile retaining walls[J]. Computers and Geotechnics, 1993, 15: 125-143.