

DOI: 10.11779/CJGE2015S2037

TRD 工法型钢水泥土搅拌墙的承载变形性状分析

谭 轲, 王卫东, 邸国恩

(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)

摘 要: TRD (Trench cutting Re-mixing Deep wall) 工法构建的等厚度水泥土搅拌墙可内插型钢作为基坑止水和挡土结构, 在基坑工程实践中得到了越来越广泛的应用。作为两种刚度差异较大材料的组合结构, TRD 工法型钢水泥土搅拌墙承载变形性状和作用机理较为复杂, 现阶段的工程实践尚缺乏理论计算的支持。以上海典型软土地层为背景, 采用三维“*m*”法对型钢和水泥土的相互作用和承载变形性状进行了理论分析, 主要通过对其变形、弯矩分担和局部抗剪的规律研究, 对工程设计中的相关问题予以明确, 并结合实测工程墙体变形进行了对比。

关键词: TRD 工法; 等厚度型钢水泥土搅拌墙; 承载变形特性; 局部抗剪; 三维“*m*”法

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)S2 - 0191 - 06

作者简介: 谭 轲 (1986 -), 男, 湖北荆门人, 硕士, 工程师, 主要从事基坑工程的设计与研究工作。E-mail: ke_tan@ecadi.com。

Deformation and bearing characteristics of steel cement-soil wall constructed by TRD method

TAN Ke, WANG Wei-dong, DI Guo-en

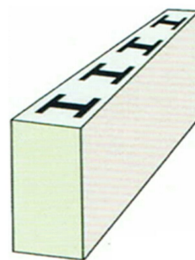
(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,
Shanghai 200002, China)

Abstract: The constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD method is a new type of retaining structure. It has already widely used in deep excavations. Because of the difference in stiffness between cement-soil and steel, complex interaction between the two materials exists in the steel cement-soil wall. The current engineering practices lack theoretical analysis and calculations. Based on the typical Shanghai soft soil strata, 3D “*m*” method is employed to analyze the interaction between cement-soil and steel, and the deformation and bearing characteristics of the constant thickness steel cement-soil wall is introduced, focusing on displacement, distribution of bending moment and local shear resistance. Those issues are also addressed for the design of steel cement-soil wall. Finally, the calculated and in-situ measured lateral displacements of wall are compared.

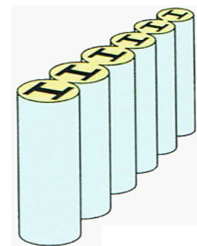
Key words: TRD construction method; constant thickness steel cement-soil wall; bearing and deformation characteristic; local shear stress; 3D “*m*” method

0 引 言

在近年来的基坑工程实践中, 等厚度型钢水泥土搅拌墙得到了越来越广的成功运用。这是 H 型钢和 TRD (Trench cutting Re-mixing Deep wall) 工法^[1]构建的等厚度水泥土搅拌墙组合形成的结构。TRD 工法将链锯切削刀具插入地基, 注入固化剂与原位土体混合, 并持续横向掘削、搅拌, 水平推进构筑成水泥土搅拌连续墙。相比传统的三轴水泥土搅拌桩, TRD 功法成墙深度可达 60 m、地层适应性更广、墙体无侧限抗压强度更高、深度范围内的水泥土强度更加均匀、连续成墙无接头、抗渗隔水性更为优良; 内插型钢间距可以根据设计需要调整, 不受桩位限制 (图 1)。



(a) TRD 工法型钢水泥土搅拌墙



(b) 三轴水泥土搅拌墙

图 1 TRD 工法型钢水泥土搅拌墙与三轴水泥土搅拌墙

Fig. 1 Steel cement-soil wall constructed by TRD method

在型钢水泥土搅拌墙组合结构体系, 水泥土主要

作为隔水帷幕、约束 H 型钢; H 型钢刚度、抗拉压强度高, 作为主要受力构件。尽管构造相对简单, 然而对于两种刚度差异较大的材料组合体系, 其受力机理复杂, 特别是其承载变形特性、型钢和水泥土相互作用、局部抗剪模式与传统的三轴型钢水泥土搅拌墙存在差异, 研究尚滞后于工程实践。本文选取上海典型软土地层, 根据大量工程实践经验所积累的参数, 采用三维“*m*”法建立模型, 对 TRD 工法型钢水泥土搅拌墙围护结构的承载和变形特性进行了分析和研究。

1 基本原理和计算模型

建立三维模型并采用三维“*m*”法^[2]进行分析。模型中挡土结构采用空间板壳单元, 支撑和被动区土体为弹簧单元, 施加坑外水土压力荷载。数值分析取上海典型软土地层, 见图 2。基坑挖深 10 m, 设 2 道支撑、间距 5.5 m。围护结构采用 850 mm 厚度的等厚度水泥土搅拌墙, 内插 H700×700×13×24 型钢、间距为 1.2 m。有限元计算取延长米为 7.2 m 的三维模型如图 3 所示, 模型中含 6 根 H700×700×13×24 型钢, 间距 1.2 m。模型底部约束竖向位移, 左右两端约束纵向位移。

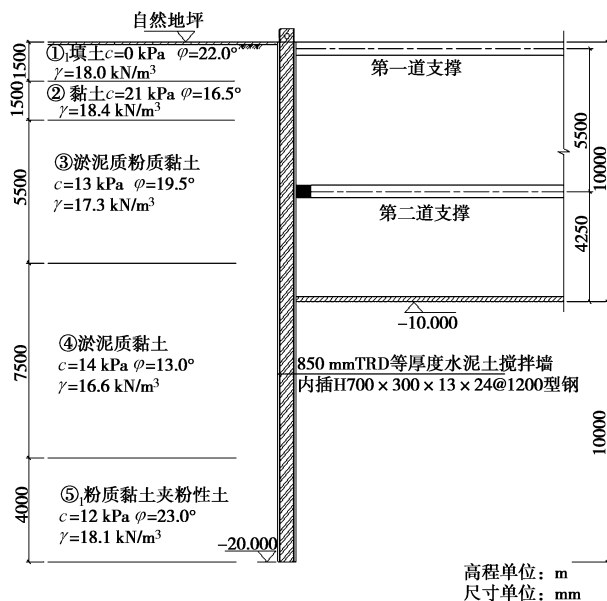


图 2 数值分析剖面

Fig. 2 Profile of soil strata for numerical analysis

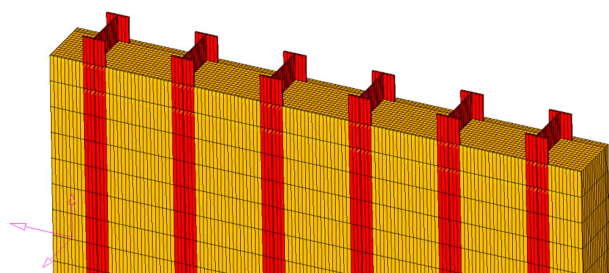


图 3 基坑支护结构的三维“*m*”法分析模型

Fig. 3 3D “*m*” method FEM model

2 变形和承载特性分析

2.1 变形特性

图 4, 5 分别为基坑开挖至基底后 H 型钢与水泥土墙的水平位移云图。可以看到, H 型钢最大侧移 36.3 mm, 水泥土最大侧移 45.2 mm。最大变形发生在坑底附近位置, 符合一般基坑围护结构水平位移形态。

图 6 分别为最大水平位移发生位置的平面云图。最大水平位移发生在型钢之间的水泥土处 (图中 B 点), 而由于型钢对周边水泥土的约束作用, 紧邻型钢附近的水泥土变形相对较小, 而型钢之间的水泥土变形随着型钢约束作用的减弱逐渐增大, 墙体变形的形态在水平面上呈波浪状分布。这种分布形态意味着在正常使用状态下, 型钢和水泥土之间的黏结和摩擦力已经得到了一定程度的发挥, 且沿垂直于墙体的方向, 水泥土墙体内有着明显的剪切应力存在。

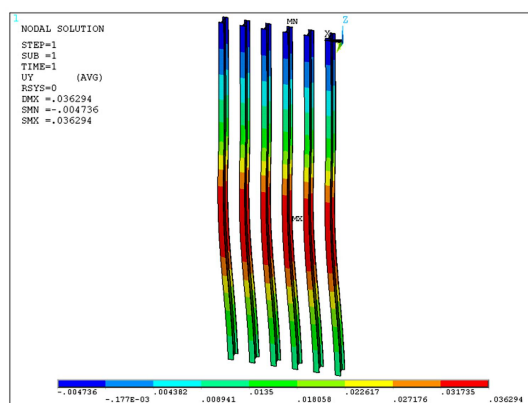


图 4 H 型钢水平位移云图

Fig. 4 Contours of lateral displacements for steel

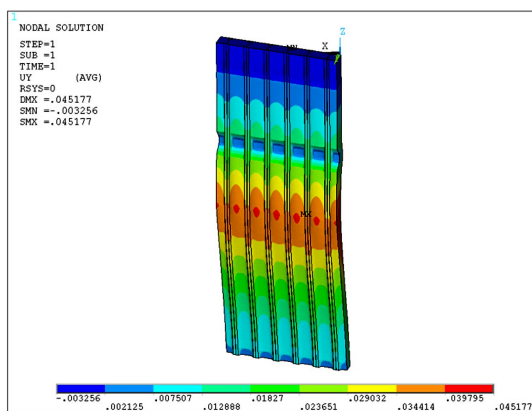


图 5 水泥土水平位移云图

Fig. 5 Contours of lateral displacements for cement-soil

图 7 描绘了型钢和水泥土的最大水平位移曲线, 其中水泥土取模型中部远离型钢位置节点的位移值

(图 6 中 A 点), 型钢取坑内侧翼缘中部 (图 6 中 B 点)。可以看到, 在接近坑顶和墙底的位置, 两处位置的水泥土和型钢的侧移差异相对较小, 在第二道支撑以下至坑底以下约 6 m 的范围内, 越接近坑底位置, A 、 B 点处的水平位移差异逐步增大。可知, 在变形较小时, 型钢和水泥土之间的变形较为协调, 而越接近坑底, 二者之间变形的差异逐步增大, 型钢和水泥土之间剪应力也相应增大 (详见下文)。

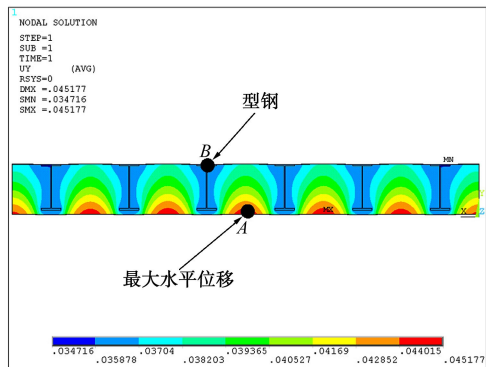


图 6 变形最大处位移平面云图

Fig. 6 Plane contours at maximum later displacement

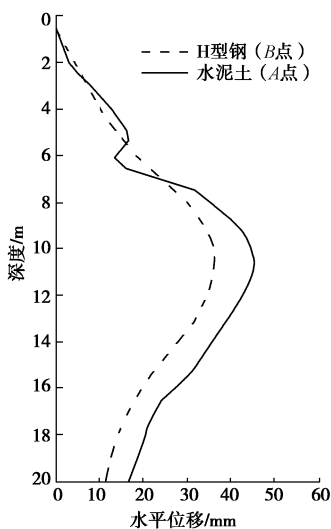


图 7 水泥土和型钢水平位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of lateral displacements of cement-soil and steel

2.2 型钢-水泥土应力和弯矩分担

(1) 应力分担

图 8 为 H 型钢竖向应力分布, H 型钢竖向应力呈坑内受拉, 坑外受压的规律分布, 最大拉应力为 137 MPa, 最大压应力为 138 MPa, 拉压应力基本保持一致, 且满足一般 Q235 标号钢材强度要求。取最大侧向位移位置局部水泥土和型钢单元, 其 Z 向应力如图 9 所示。由图可知, 型钢所承担的应力要远高于水泥

土 (见表 1, 正为拉力, 负为压力)。

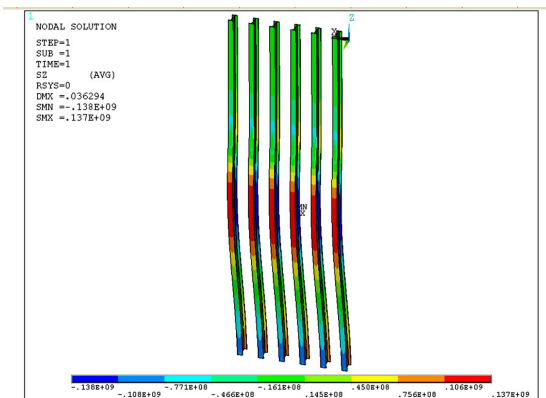


图 8 H 型钢竖向应力 S_z 云图

Fig. 8 Contours of vertical stress S_z for steel

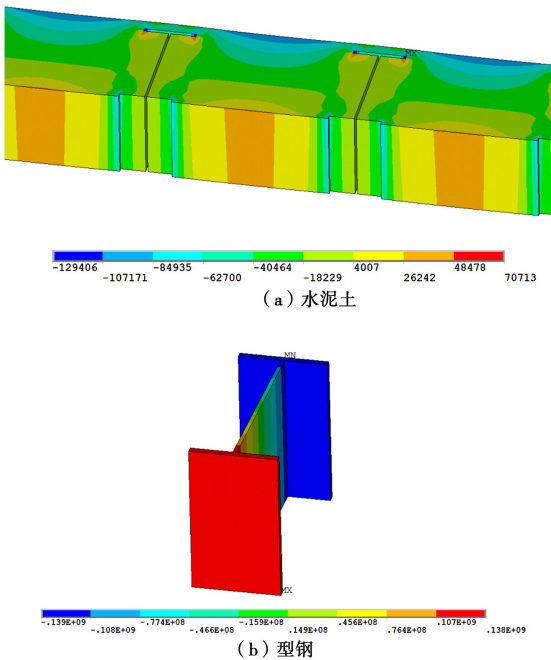


图 9 位移最大位置 Z 向应力 S_z

Fig. 9 Z-direction stress S_z at maximum lateral displacement

表 1 型钢和水泥土应力分担 (最大应力)

Table 1 Maximum stresses of cement-soil and steel

类型	应力/MPa	
	S_{z+}	S_{z-}
型钢	137.0	-138.0
水泥土	0.26	-0.25
应力比	527 : 1	552 : 1

(2) 弯矩分担

等厚度型钢水泥土搅拌墙属于典型的受弯构件。型钢附近的墙体整体抗弯刚度明显大于型钢之间的墙体, 这决定了等厚度型钢水泥土搅拌墙体的抗弯特性。

取水平范围内 1.2 延米区段内型钢和水泥土, 通过提取各深度截面单元节点上的应力并对中轴积分, 分别求得型钢、水泥土和总弯矩见图 10: 总弯矩图与

型钢弯矩图几乎一致,而水泥土承担的弯矩仅站总弯矩的极小部分。坑底位置弯矩达到最大,其中总弯矩 $M=765.4\text{ kN}\cdot\text{m}$,型钢弯矩 $M_{\text{st}}=760.8\text{ kN}\cdot\text{m}$,水泥土弯矩仅为 $M_{\text{cs}}=4.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。由此发现,在基坑开挖至坑底时,型钢分担的弯矩占总弯矩值的 99%、为组合结构中的主要抗弯构件,而水泥土对弯矩的贡献则可以忽略不计。水泥土的主要作用是为型钢提供了侧向约束,防止型钢在受弯状态下发生失稳,保证钢材强度的充分发挥。在计算组合墙体抗弯强度时不应计入水泥土的贡献,弯矩仅由型钢进行承担。

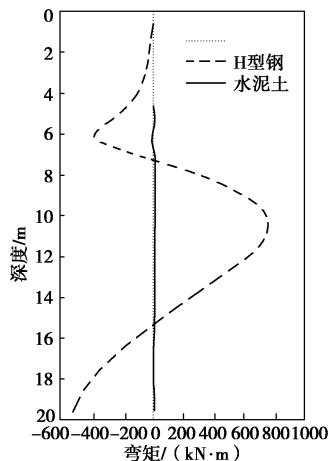


图 10 基坑开挖至坑底后等厚型钢水泥土搅拌墙弯矩图(1.2 延米)

Fig. 10 Distribution of bending moment (per 1.2 m)

2.3 水泥土局部抗剪

型钢和水泥土之间的错动剪力是二者间相互作用的一个重要指标。考虑到型钢和水泥土间的错动剪应力主要存在于XY平面方向,下文中主要对剪应力 S_{xy} 进行分析。最大剪应力发生在深度6.0~6.5 m即第二道支撑附近位置,取此处水泥土的剪应力云图如图11所示。错动剪应力主要集中在坑内一侧的型钢翼缘端部与水泥土的交界处,最大值约0.50 MPa。

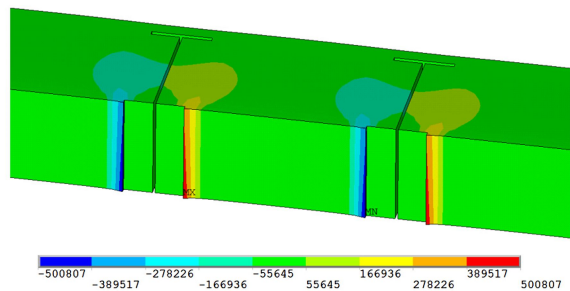


图 11 最大 S_{xy} 剪应力位置剪应力分布云图

Fig. 11 Contours of shear stress S_{xy} near maximum shear stress

对水泥土局部抗剪起决定作用的并非最大局部剪应力,而是型钢和水泥土错动面上平均错动剪应力的

大小。依照图12中型钢之间线框左右两端截面,作为型钢和水泥土之间发生错动变形的错动剪应力的截面,以截面平均剪应力与水泥土抗剪强度进行对比,确定局部抗剪是否满足要求。提取此计算截面上所有节点上的 S_{xy} 值见表2。

表 2 剪切面剪切应力值

Table 2 Shear stresses at shear plane			
节点号	S_{xy}/MPa	节点号	S_{xy}/MPa
6533	0.0352	6870	0.0152
6534	0.0154	6911	0.5821
6575	0.4692	6912	0.2697
6576	0.2278	43466	0.00299
6869	0.0358	45848	0.00283

表2中剪切面的平均剪应力为0.166 MPa。水泥土抗剪强度标准值可取搅拌墙28 d龄期无侧限抗压强度的1/3^[3]。上海地区的等厚度水泥土搅拌墙工程中,28 d无侧限抗压强度一般均能达到0.8 MPa,因此可取水泥土抗剪强度 $\tau_{\text{ck}}=0.8/3\approx0.2\text{ MPa}$,得 $S_{xy,\text{avg}}=0.166\text{ MPa}<\tau_{\text{ck}}=0.2\text{ MPa}$ 。可判定水泥土的局部抗剪满足要求。

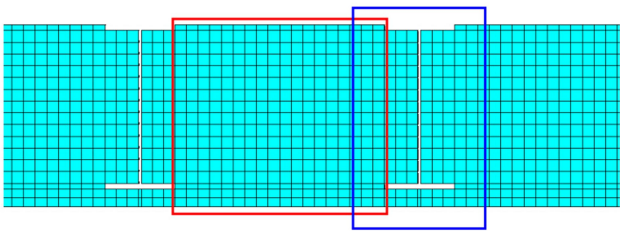


图 12 型钢间和型钢附近局部水泥土

Fig. 12 Soil cements between and adjacent to H-shaped steels

由上可知,等厚度型钢水泥土搅拌墙结构中,型钢两端翼缘端部间的型钢和水泥土交界面为最弱剪切面,在等厚度型钢水泥土搅拌墙的设计中,应以最弱面处的错动剪应力平均值为控制标准,对水泥土的抗剪强度提出设计要求。

3 工程实例

奉贤中小企业总部大厦项目位于上海奉贤区南桥镇,基坑总面积约为23000 m²、挖深约为11.85 m。基坑围护体采用TRD工法型钢水泥土搅拌墙,竖向设两道钢筋砼支撑,支护剖面见图13。等厚度水泥土搅拌墙厚度为850 mm,墙深为26.55 m,水泥掺量为25%、水灰比为1.5。墙体内插H700×300×13×24型钢,中心距为900 mm,有效长度为20.5 m。等厚度水泥土搅拌墙芯样28 d无侧限抗压强度平均值为

0.99 MPa, 且强度值沿深度方向均匀分布, 满足设计要求。

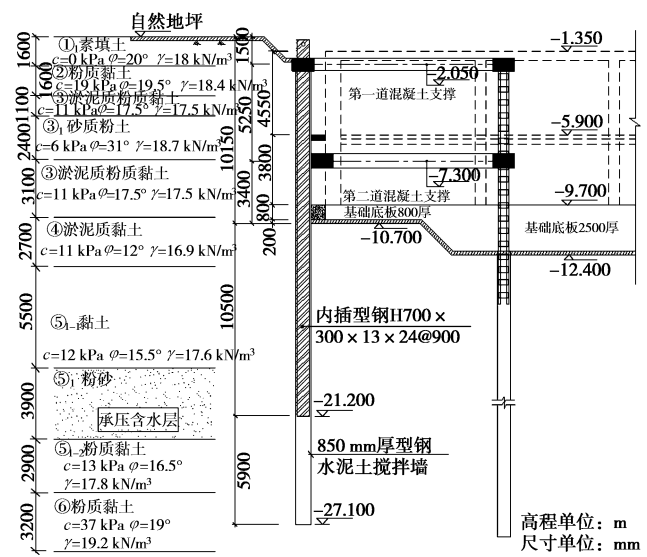


图 13 支护结构剖面图

Fig. 13 Profile of support system of excavation

本工程基坑已成功实施, 基坑开挖暴露面墙面较平整、无渗漏现象, 如图 14 所示。墙体水平位移、周边环境变形在允许范围内。采用本工程场地土层参数, 根据三维“*m*”法建立有限元模型进行数值分析, 计算围护体变形与实测墙体水平位移曲线对比见图 15。



图 14 等厚度型钢水泥土搅拌墙侧壁实景

Fig. 14 Photos of side wall

需要注意的是, 由于测斜管埋设位置贴近型钢, 因此应选取型钢附近的水泥土计算变形曲线。对比可知, 基坑开挖至坑底后, 计算和实测的围护体水平位移曲线总体趋势和分布形态基本一致, 三维“*m*”法

能够较好的反应等厚度型钢水泥土搅拌墙的变形趋势。实测围护体最大水平位移 26.4 mm, 发生在近坑底深度约 10.5 m 的位置。计算最大水平位移 36.1 mm, 位置与实测一致。计算位移稍大于实测值。在现场监测时, 一般将围护体(型钢)底部作为水平位移的零点处理, 而在三维“*m*”法计算中, 围护体底部被动区为土体弹簧, 并未约束底部水平位移, 因此在围护体底部的实测和计算位移有一定的差异。

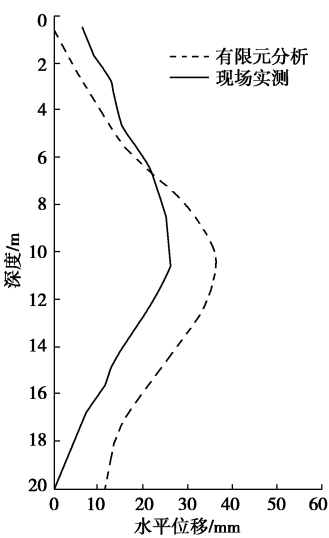


图 15 等厚度型钢水泥土搅拌墙实测与计算变形对比

Fig. 15 Comparison between FEM calculations and in-situ measurements of wall lateral displacements

4 结 论

本文基于上海典型软土地层, 采用三维“*m*”法对等厚度型钢水泥土搅拌墙的承载变形性状进行了理论分析, 并结合工程实测进行了对比, 得到以下结论:

(1) 等厚度型钢水泥土搅拌墙的最大水平位移发生在型钢之间的水泥土处, 紧邻型钢附近的水泥土变形相对较小, 而型钢之间的水泥土变形随着型钢约束作用的减弱逐渐增大, 墙体变形的形态在水平面上呈波浪状分布。墙体变形在竖向分布规律为: 越接近坑底, 型钢和水泥土之间变形的差异逐步增大。

(2) 由于刚度的差异, 型钢所承担的应力要远高于水泥土, 型钢分担的弯矩占总弯矩值的 99%, 为组合结构中的主要抗弯构件, 而水泥土对弯矩的贡献则可忽略不计, 主要为型钢提供侧向约束、防止失稳、保证钢材强度的充分发挥。等厚度水泥土搅拌墙在计算抗弯强度时不应计入水泥土的贡献, 弯矩仅由型钢进行承担。

(3) 等厚度型钢水泥土搅拌墙结构中, 型钢两端翼缘端部间的水泥土和型钢交界面为最弱剪切面, 在

等厚度型钢水泥土搅拌墙的设计中,应以最弱面处的错动剪应力平均值为控制标准,对水泥土的抗剪强度提出设计要求,即最弱面平均剪应力不应小于水泥土抗剪强度标准值。

(4) 三维“ m ”法有限元分析计算所得的等厚度水泥土搅拌墙体位移性态与实测较为符合,能够较好的模拟等厚度型钢水泥土搅拌墙体的变形特性。

参考文献:

- [1] 王卫东, 邸国恩, 王向军. TRD工法构建的等厚度型钢水泥土搅拌墙支护工程实践[J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 168 - 171. (WANG Wei-dong, DI Guo-en, WANG Xiang-jun. Engineering practice of the constant thickness steel cement-soil wall constructed by TRD method[J]. Building Structure, 2012, 42(5): 168 - 171. (in Chinese))
- [2] 沈健, 王建华, 高绍武. 基于“ m ”法的深基坑支护结构三维分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 530 - 533. (SHEN Jian, WANG Jian-hua, GAO Shao-wu. 3-D Analysis Method of Retaining Structure of Deep Excavation Based on “M” Method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 530 - 533. (in Chinese))
- [3] JGJ/T199—2010 型钢水泥土搅拌墙技术规程[S]. 2010. (JGJ/T199—2010 Technical specification for soil mixed wall[S]. 2010. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)