

[文章编号] 1003-4684(2020)04-0094-05

# 型钢水泥土搅拌墙(桩)在某基坑中的应用

苏林林, 龚少飞, 王翠英

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 分析型钢水泥土搅拌墙(桩)复合结构的作用机理可知:在一定荷载作用下,型钢水泥土搅拌墙(桩)复合结构刚度为型钢和水泥土刚度之和。型钢水泥土的抗弯试验结果表明:水泥土对复合结构的刚度贡献达到 20% 以上,并给出相应的计算方法;利用抗剪强度标准值和 28 d 无侧限抗压强度值的相对数值关系再次证明水泥土的刚度贡献不可忽略。以武汉琴台美术馆基坑工程为依托,采取“双排桩内插 H 型钢”支护方式,分别对型钢及型钢水泥土搅拌墙(桩)承载力进行了计算,并对支护结构稳定性进行验算,辅以天汉软件进行复核验算,均满足规范要求。

**[关键词]** 型钢水泥土搅拌墙(桩); 抗剪强度; 抗拉强度; 整体稳定性

**[中图分类号]** TU47 **[文献标识码]** A

近年来,伴随着基坑开挖规模的不断增加,基坑支护问题层出不穷,基坑开挖支护方案也越来越复杂。水泥土搅拌墙(桩)施工便捷、造价经济广受业界认可。目前,不少学者对该支护方法提出了自己的研究见解,孔德志,张庆贺等人<sup>[1]</sup>通过模型试验分析了型钢水泥土复合结构在应力作用下的工作机理;王红雁<sup>[2]</sup>对型钢水泥土的刚度进行了研究,认为型钢与水泥土共同承受墙后水土压力并根据试验结果将复合结构在荷载下的应变情况分为五个阶段;顾士坦,施建勇等<sup>[3]</sup>通过模拟试验和工程实例进行了研究,证明了水泥土对复合结构的刚度贡献不可忽略,从工程的角度看,节省了钢材的使用量;凌同华,谷淡平,曹峰等<sup>[4]</sup>对型钢水泥土搅拌墙(桩)的相互作用进行试验研究,结果表明,水泥土和型钢的组合结构承载力及刚度明显优于型钢,且二者的变形协调性较好;梁志荣,李忠诚<sup>[5]</sup>对型钢水泥土搅拌墙(桩)进行抗弯试验并给出了水泥土刚度计算方法;日本 SMW 协会<sup>[6]</sup>研究水泥土的抗剪强度和抗压强度的关系,给出了合理的数值关系以使复合结构更加安全合理且能够最大化利用水泥土刚度。目前由于工程建设项目工期紧数量大,型钢水泥土搅拌墙(桩)相互作用机理及理论计算研究相对滞后,设计及施工通常单纯依靠工程经验,缺乏完善的理论作为支撑。通过对型钢水泥土的作用机理、型钢水泥土的抗弯试验结果、水泥土抗剪强度和抗压强度关系等进行分析,采用型钢水泥土搅拌墙(桩)复合结

构的刚度计算方法及强度、稳定性验算法展开研究;结合天汉软件对搅拌墙顶的位移、剪力、弯矩、稳定性进行验算,为类似工程提供参考。

## 1 型钢与水泥土搅拌墙(桩)相互作用机理

### 1.1 型钢与水泥土的作用过程

孔德志、张庆贺、王红雁等<sup>[1-2]</sup>曾对型钢与水泥土之间的作用效果进行了一些模型试验,实验结果表明,型钢与水泥土在荷载作用下截面的应变分 5 个阶段,如图 1 所示。

1) 加载初期复合结构弯矩较小,复合结构中型钢和水泥土的截面应力呈线性分布,如图 1a 所示;

2) 当荷载逐渐增加弯矩增大,复合结构受拉区水泥土开裂失效,中性轴略微上移,如图 1b 所示;

3) 继续加载至受拉区型钢屈服失效,受压区存在水泥土的分担作用,型钢并没有屈服,但水泥土随着荷载增加很快开裂失效,如图 1c 所示;

4) 连续加载至受压区型钢屈服,中性轴上移,截面应力呈明显的非线性分布,如图 1d 所示;

5) 荷载继续增加至受压区,水泥土开裂失效,中性轴不断上移,型钢进入塑性变形阶段直至结构破坏,如图 1e 所示。

由图 1 可知,因型钢和水泥土的受力性能不同,随着荷载的增大,水泥土会提前屈服而失效,但水泥土仍有一定的受荷能力。

[收稿日期] 2019-11-15

[第一作者] 苏林林(1993-),男,河南信阳人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程

[通信作者] 王翠英(1965-),女,内蒙古包头人,湖北工业大学教授,研究方向为岩土工程

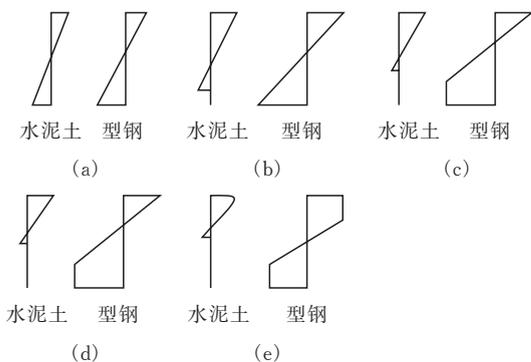


图 1 型钢-水泥土截面应力变化

### 1.2 型钢水泥土搅拌墙(桩)的复合刚度

水泥土对复合结构的刚度贡献在学术界饱受争议,梁志荣、李忠诚<sup>[5]</sup>对型钢水泥土搅拌墙(桩)进行抗弯试验得出,在相同荷载作用下,水泥土对复合结构的刚度贡献不可忽略,且型钢与水泥土的复合结构刚度要比单型钢刚度大 20% 以上,并得出水泥土的刚度贡献系数和复合结构刚度计算公式:

$$\alpha = \frac{E_c I_c}{E_H I_H}$$

$$EI = E_H I_H (1 + \alpha)$$

式中:  $E_H$ 、 $E_c$  分别为型钢和水泥土的弹性模量, MPa;  $I_H$ 、 $I_c$  分别为型钢和水泥土的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  $\alpha$  为水泥土的刚度贡献系数。

应当注意的是,型钢插入水泥土之前会涂刷减摩剂,因此二者之间的作用机理会变得更加复杂。通过对墙体进行等效组合梁的模拟试验可得复合结构的受力规律,并且发现对于不同水泥土截面的复合结构,水泥土的刚度贡献系数有着很大区别,涂刷减摩剂的复合结构的水泥土刚度贡献系数  $\alpha$  取值应根据实际施工中的墙体最大变位率  $\Delta_m / l_H$  确定,针对没有涂刷减摩剂的工况,可适当提高  $\alpha$  的取值。图 2 为  $\alpha$  取值参考图。当变位率大于等于 1% 时,  $\alpha$  取 0 且认为水泥土完全失效退出工作<sup>[7]</sup>。

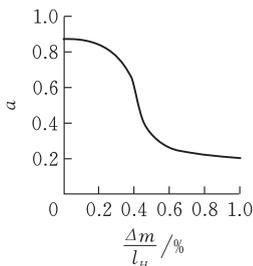


图 2  $\alpha$  取值图

## 2 型钢水泥土搅拌墙(桩)设计与验算

### 2.1 型钢截面设计

合理的型钢截面设计不仅能够满足基坑承压需求,更能节省钢材。在基坑支护设计中通常预先选

择几种合适的型钢截面,然后进行抗弯和抗剪强度验算,选择最合适的截面形式。

#### 2.1.1 抗弯强度验算 型钢的抗弯强度验算:

$$\frac{1.25 \gamma_0 M_k}{W} \leq f \tag{1}$$

式中:  $\gamma_0$  为结构重要系数;  $M_k$  为复合结构弯矩标准值,  $\text{N}/\text{mm}$ ;  $W$  为型钢截面模量,  $\text{mm}^3$ ;  $f$  为型钢抗弯强度设计值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

#### 2.1.2 抗剪强度验算 型钢的抗剪强度验算:

$$\frac{1.25 \gamma_0 Q_k S}{I \cdot t_w} \leq f_v \tag{2}$$

式中:  $Q_k$  为型钢水泥土搅拌墙(桩)的剪力标准值,  $\text{N}$ ,  $S$  为剪应力处的面积矩,  $\text{mm}^3$ ;  $I$  为型钢的截面惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  $t_w$  为型钢腹板厚度,  $\text{mm}$ 。

实际工程中,内插型钢截面形式一般都是 H 型,型钢的具体型号及规格要求按《热轧 H 型钢和部分 T 型钢》和《焊接 H 型钢》选用。

### 2.2 水泥土搅拌墙(桩)的强度验算

传统的强度计算方法将型钢水泥土考虑成理想的复合结构进行验算是不全面的,在分析了型钢与水泥土的粘结作用之后,可将复合结构的抗剪验算细分为型钢与水泥土之间的错剪和水泥土最薄弱截面处的局部剪切验算,如图 3 所示。

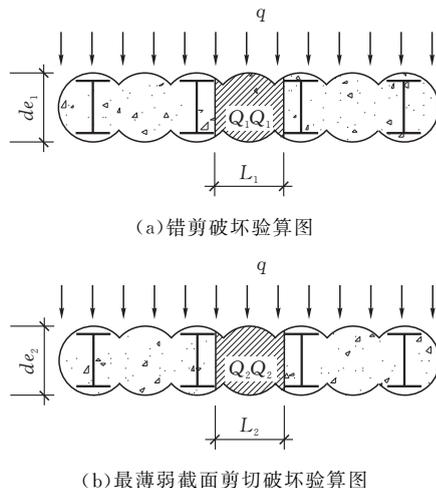


图 3 水泥土搅拌墙(桩)局部抗剪计算示意图

1) 型钢与水泥土间错剪破坏承载力按下式验算:

$$\tau_1 = \frac{1.25 \gamma_0 Q_1}{d_{e1}} \leq \tau \tag{3}$$

$$Q_1 = \frac{q_k L_1}{2}$$

$$\tau = \frac{\tau_{ck}}{1.6}$$

式中:  $Q_1$  为型钢水泥土间单位深度错动剪力标准值,  $\text{N}/\text{mm}$ ;  $q_k$  为计算截面处作用的侧压力标准值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $L_1$  为型钢翼缘之间的净距,  $\text{mm}$ ;  $d_{e1}$  为墙体的有效厚度,  $\text{mm}$ ;  $\tau_{ck}$  为水泥土抗剪强度标准值,

N/mm<sup>2</sup>。

2) 水泥土搅拌墙(桩)最薄弱处局部抗剪强度验算按下式验算

$$\tau_2 = \frac{1.25 \gamma_0 Q_2}{d_{e2}} \leq \tau \quad (4)$$

$$Q_1 = \frac{q L_2}{2}$$

式中:  $Q_2$  为最薄弱截面处单位深度剪力标准值, N/mm;  $L_2$  为最薄弱截面的净距, mm;  $d_{e2}$  为最薄弱截面处墙体的有效厚度, mm。

3) 水泥土搅拌墙(桩)的抗剪强度与抗压强度的关系

水泥土的力学性能复杂,常受到水泥掺入量、地质情况、养护环境等因素影响。正常情况下,水泥土的强度比天然土高数十倍以上,无侧限抗压强度为 0.3~5.0 MPa。工程实际应用中一般取 28 d 无侧限抗压强度试验值作为水泥土搅拌墙(桩)的抗压强度标准值,根据《型钢水泥土搅拌墙技术规程》(JGJ/T199-2012)<sup>[8]</sup>可知:水泥土 28 d 无侧限抗压强度值不得小于 0.5 MPa。

日本 SMW 工法学会<sup>[6]</sup>根据直剪试验和无侧限抗压强度试验结果如图 4 所示。

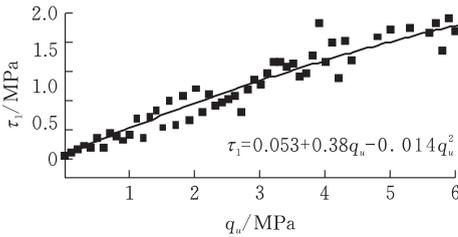


图 4 抗剪强度和单轴抗压强度的关系

由图 4 可知,随着抗压强度的提高,水泥土抗剪强度的增加趋于平缓。由此可知:水泥土在垂直应力不断增加的情况下,抗剪强度达到一定值后不会再有明显的增长,抗剪强度值  $\tau$  约为 0.3~0.5  $q_u$ , 即可理解为水泥土的刚度贡献是有理论意义的,更加确定了水泥土对复合结构的刚度贡献不可忽略。

结合图 1 的分析结果可知,外荷载达到水泥土屈服强度后只剩型钢单独工作,所以为确保水泥土达到最大刚度贡献值,对于水泥土的抗剪强度标准值  $\tau$  和 28 d 无侧限抗压强度  $q_u$  的相对数值关系,取  $\tau = q_u/3$  较为合理和安全,同时能够最大化利用水泥土的刚度。

## 2.3 型钢水泥土搅拌墙(桩)支护结构稳定性验算

2.3.1 整体稳定性验算 采用瑞典圆弧简单条分法,对型钢水泥土搅拌墙(桩)复合支护结构整体稳定性进行分析,确定复合支护结构的嵌固深度,如图 5 所示。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-

2012)<sup>[9]</sup>知一级基坑支护结构整体稳定性安全系数如下:

$$K = \frac{M_k}{M_q} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n (q_0 b_i + \omega_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i}{\sum_{i=1}^n (q_0 b_i + \omega_i) \sin \theta_i} > 1.30 \quad (5)$$

式中:  $M_k$  为抗滑力矩;  $M_q$  为滑动力矩;  $C_i$ 、 $\varphi_i$  分别为第  $i$  土条滑动面上土的黏聚力和内摩擦角;  $l_i$  为第  $i$  土条滑裂面的弧长;  $l_i = b_i / \cos \theta_i$ ,  $b_i$  为第  $i$  土条宽度;  $q_0$  为地面超载,取 25 kN/m<sup>2</sup>;  $\omega_i$  为第  $i$  土条的重量,  $\theta_i$  为第  $i$  土条沿圆弧中点的切线和水平线的夹角。

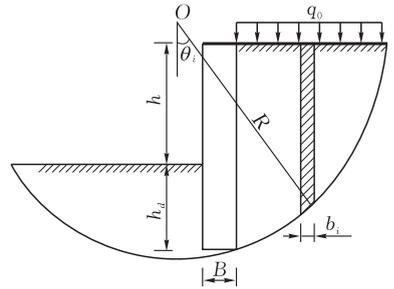


图 5 基坑整体稳定性分析

2.3.2 抗倾覆稳定性验算 根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)知型钢水泥土搅拌墙(桩)复合支护结构的抗倾覆稳定性安全系数如下:

$$K_s = \frac{M_{E_d} + M_T}{M_{E_a}} \quad (6)$$

式中:  $M_{E_a}$  为支护结构底部以上主动侧水土压力对支护结构最底部点的弯矩;  $M_{E_d}$  为支护结构底部以上被动侧水土压力对支护结构最底部点的弯矩;  $M_T$  为锚杆拉力对支护结构底部点的弯矩。

应当注意的是,在进行抗倾覆稳定性验算时,桩墙的自重验算时不予考虑。此外,双排桩的抗倾覆稳定性验算应等效为一个单排桩来计算主动土压力和被动土压力,计算方法应与单桩相同。

2.3.3 抗隆起稳定性验算 以围护墙底作为基准面,按基坑开挖后坑内外土体自重和竖向荷载作用下,防止墙底及其下地基土的承载力和稳定性丧失。

普朗特基坑抗隆起计算如图 6 所示,根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)知抗隆起安全系数应满足:

$$K_L = \frac{\gamma D N_q + c N_c}{\gamma(H+D) + q} \quad (7)$$

$$N_q = \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) e^{\pi \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \frac{1}{\tan \varphi}$$

式中:  $c$  为滑裂面深度内土体的加权粘聚力;  $\gamma$  为各土层天然重度的加权平均值;  $N_q, N_c$  为地基承载力系数;  $B$  为桩墙计算宽度;  $T$  为土层的埋深距基坑开挖底面的距离;  $D$  为墙底至坑底深度;  $q$  为基坑外侧地面超载;  $\varphi$  为墙底土体内摩擦角。

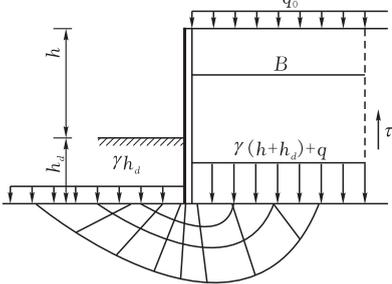


图 6 普朗特抗隆起计算简图

### 3 工程案例

#### 3.1 工程概况

拟建琴台美术馆项目位于湖北武汉汉阳月湖艺术博览区,建筑面积约 4.2 万  $m^2$ ,地上 2 层,地下 1 层,基坑普挖深度为 5.5~7.5 m,开挖面积约 23 665  $m^2$ ,开挖周长约为 963 m,基坑支护平面如图 7 所示。

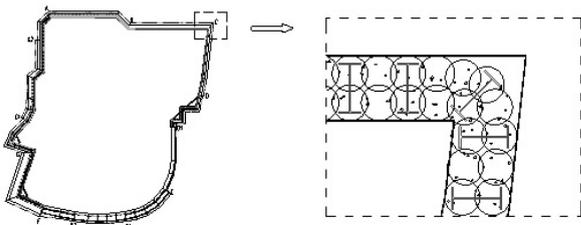


图 7 琴台美术馆基坑支护及局部详图

该工程基坑初始支护方案采用上部放坡+下部支护桩+止水帷幕形式,由于临江地段土质条件较差,现场不具备施工条件,综合考虑之后,以安全施工、绿色施工为宗旨,该基坑支护总体方案是:基坑采取 1:1 放坡至 -2.0 m 处并挂网喷锚,基坑采取“双排桩内插 H 型钢+坑内被动区加固”支护方式,具体支护方案:

- 1) 挂网短土钉采用  $\varphi 16$  螺纹钢筋,长度 400~600 mm,间距 1500 mm@2000 mm;
- 2) 喷射混凝土强度为 C20;
- 3) 双排桩采用  $\varphi 500$  mm 搅拌桩,内插 H 型钢, H 型钢采用 700 mm $\times$ 300 mm $\times$ 13 mm $\times$ 24 mm, Q235B 级钢,布置形式为插一跳一,转角处加强处理。
- 4) 冠梁采用 C30 混凝土,梁顶标高为 -2.000 m,支撑采用 Q235B 双拼型钢。
- 5) 泄水孔间距 2500 mm $\times$ 2500 mm,现场可根

据实际情况调整。现场排水采用集水井加排水沟明排的方式。

#### 3.2 型钢水泥土搅拌墙(桩)墙稳定性验算

设计开挖深度为 7.5 m,双排桩长为 18.00 m,坡顶硬化处理后与冠梁顶部垂直距离 2.00 m,取 2 m 厚杂填土层视为超载,地面施工荷载取 10 kPa,故总荷载取 25 kPa,选取 BC 段进行验算,支护结构剖面图如图 8 所示。

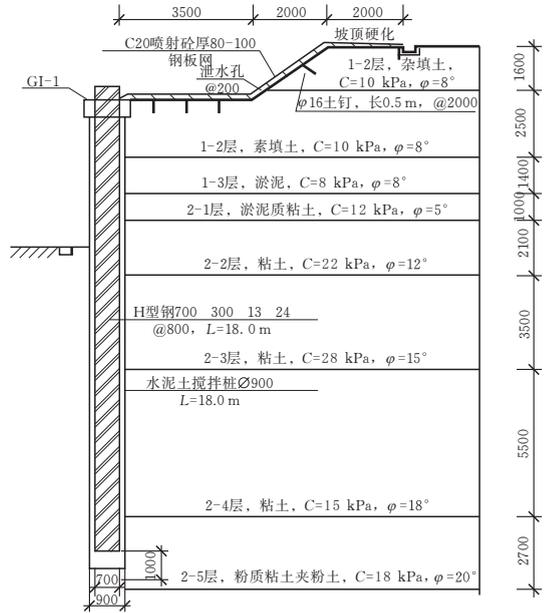


图 8 BC 段支护结构剖面图 mm

BC 段实际施工过程中共有两种工况。工况一,放坡卸载开挖至 -2.00 m,挂网喷射 80~100 mm 厚 C20 混凝土,施工双排桩水泥土搅拌墙(桩)并内插 H 型钢+坑内被动区加固;工况二,直接挖土至设计深度 -7.5 m。工况一安全系数很大,验算过程略,工况二验算:

1) 根据式(1)验算型钢抗弯强度

$$\frac{1.25 \times 1.0 \times 560.41}{92666.7} =$$

$$75.59 \text{ N/mm}^2 < f = 215.00 \text{ N/mm}^2$$

满足要求。

2) 根据式(2)验算型钢抗剪强度

$$\frac{1.25 \times 1.0 \times 254.75 \times 3124.0}{324343.31 \times 13} \times 10^2 =$$

$$23.59 \text{ N/mm}^2 < f_v = 125.00 \text{ N/mm}^2$$

满足要求。

3) 根据式(3)验算型钢与水泥土间错动剪应力

$$\tau_1 = 1.25 \times \gamma_0 \times q_k L_1 / 2 d_{e1} =$$

$$0.06 < \tau = \tau_{ck} / 1.6 = 0.62$$

满足要求。

4) 根据式(4)验算水泥土搅拌墙(桩)局部抗剪承载力

$$\tau_2 = 1.25 \times \gamma_0 \times q_k L_2 / 2 d_{e2} =$$

$$0.05 < \tau = \tau_{ck} / 1.6 = 0.62$$

满足要求。

5) 根据式(5)验算型钢水泥土搅拌墙(桩)整体稳定性

$$K = \frac{M_k}{M_q} = \frac{560.41}{306.23} = 1.83 > 1.30$$

满足要求

6) 根据式(6)验算型钢水泥土搅拌墙(桩)抗倾覆稳定性

$$K_s = \frac{M_{E_p} + M_T}{M_{E_a}} = \frac{924.21 + 0}{405.36} = 2.28 > 1.30$$

满足要求。

7) 根据式(7)验算型钢水泥土搅拌墙(桩)抗隆起稳定性

$$K_L = \frac{\gamma DN_q + c N_c}{\gamma(H+D) + q} = \frac{101.28 + 24.36}{114.38} = 1.86 > 1.60$$

满足要求。

### 3.3 天汉软件验算结果

支护结构参数:设计桩长 18.0 m,圆形截面,桩径 500 mm,嵌入坑底深度为 12.5 m。土压力、位移如图 9 所示。

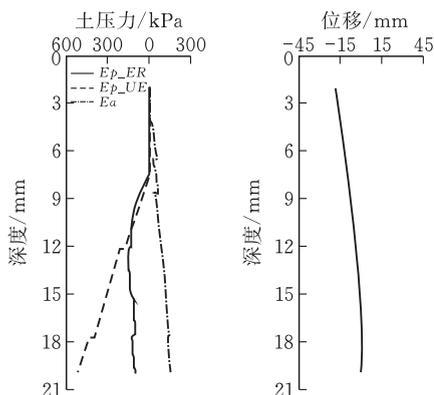


图 9 型钢水泥土搅拌墙(桩)土压力及位移图

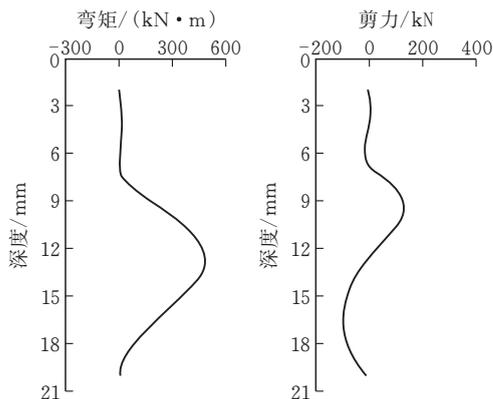


图 10 弯矩及剪力包络图

图 9、图 10 可知,随着深度的增加,弯矩总体呈“弓”字型变化,最大正弯矩为 475 kN·m,发生在 -12.7 m 处。随着开挖深度的增加,剪力总体呈现出“S”型变化,最大剪力为 131 kN,发生在 -9.3 m

处。最大位移为 18.2 mm,发生在相对标高 -2 m 处,被动区弹性抗力安全系数为 2.24,满足规范要求;整体稳定性安全系数  $K=1.78$ ,抗倾覆稳定性系数  $K_s=2.41$ 。

## 4 结束语

型钢水泥土搅拌墙(桩)在我国工程应用已有多,但在实际应用中,因为工况复杂,在结构设计时不考虑水泥土的强度贡献,而将水泥土用做止水帷幕,这种做法是不全面的。本文通过对型钢水泥土的作用机理、型钢水泥土的抗弯试验结果、水泥土抗剪强度和抗压强度关系等进行分析,确定了水泥土的刚度贡献率能够达到整体刚度的 20%,说明相应计算方法和型钢水泥土搅拌墙(桩)复合结构的稳定性验算方法,为工程应用中合理使用钢材提供了一定参考。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孔德志,张庆贺,宋杰. 劲性水泥土连续墙的抗弯刚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 23(11): 1935-1935.
- [2] 王红雁. 劲性搅拌桩应用技术研究[C]//2010 年学术研讨会论文集. 河南省土木建筑学会, 2010: 609-611.
- [3] 顾士坦,施建勇. 深基坑 SMW 工法模拟试验研究及工作机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1121-1126.
- [4] 凌同华,谷淡平,曹峰,等. 软土地区型钢水泥土搅拌墙-土相互作用试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(03): 409-418.
- [5] 梁志荣,李忠诚. 型钢水泥土连续墙在基坑工程应用中的关键问题及新发展[J]. 岩土工程学报, 2010(s1): 290-296.
- [6] 日本 SMW 协会. SMW 工法标准预概算资料(设计、施工、概预算)[S]. 东京: SMW 协会, 2008.
- [7] 王建,夏明耀,傅德明. H 型钢与水泥土搅拌桩围护结构的设计与计算[J]. 同济大学学报, 2006(6): 636-639.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 型钢水泥土搅拌墙技术规程: JGJ/T199-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ/T120-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(下转第 103 页)