

# 劲性水泥土桩连续墙的工作机理分析

孔德志, 冯娇伟, 宋艳香

(河南大学材料与结构研究所, 河南 开封 475004)

**摘要:** 劲性水泥土连续墙由相互交接的搅拌桩和内插的型钢组成, 墙后水土压力引起的墙体弯矩主要由型钢承担, 水泥土对型钢的承载能力具有重要作用。通过分析型钢的受弯整体稳定性和型钢间水泥土的受力状态, 探讨了水泥土约束作用对型钢整体稳定承载力的影响, 对劲性水泥土连续墙中水泥土的强度提出了控制原则, 并分析了施工偏差对型钢受力带来的影响, 提出了劲性水泥土连续墙设计和施工的技术控制措施。

**关键词:** 劲性水泥土连续墙; 整体稳定; 临界弯矩; 斜压破坏

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2011)S2 - 0043 - 04

作者简介: 孔德志(1966 - ), 博士, 副教授。研究方向深基础和深基坑工程。E-mail:dezhikong@126.com。

## Working mechanism of reinforced soil-cement mixing wall

KONG De-zhi, FENG Jiao-wei, SONG Yan-xiang

(Institute of Material and Structure, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The reinforced cement-soil mixing wall is composed of cement-soil piles connecting each other and shape steel. The moment induced by soil and water pressure is carried mostly by the shape steel. The cement-soil has contributed to carrying capacity of the shape steel. By analyzing the overall stability of the shape steel and mechanical status of cement-soil the effect of restriction of cement-soil on unitary stable capacity of the shape steel is studied. The principle about how to use the strength of cement-soil is proposed. The influence of constructing error on bearing force of the shape steel is analyzed. The technical measures in the design and construction of reinforced cement-soil mixing wall are proposed.

**Key words:** reinforced cement-soil mixing wall; overall stability; critical moment; tilting pressure failure

## 0 引言

劲性水泥土连续墙又称为 SMW 工法, 是一种将土体与水泥浆就地搅拌后插入型钢所组成的一种挡墙结构型式。该法于 20 世纪 50 年代起源于美国, 之后在日本得到发展并逐渐成熟<sup>[1-2]</sup>, 90 年代被引入我国, 由于其具有施工方便、经济性好的特点迅速在基坑工程中推广应用<sup>[3-5]</sup>。但对劲性水泥土连续墙应用技术的研究严重滞后于工程实践, 使得工程应用中出现了许多问题, 2000 年后, 在一些开挖深度仅为 10 多 m 深的基坑中, 出现了许多倒塌事故, 曾一度引起工程界对这种围护结构可靠性的疑问, 而一方面应用基坑工程开挖深度不断增大, 国内应用基坑深度已达 20 多 m<sup>[6-7]</sup>, 因此需要进一步加强对劲性水泥土连续墙工作机理的分析和认识, 加强其应用技术的研究。

## 1 劲性水泥土桩连续墙抗弯机理分析

设计中认为劲性水泥土连续墙为柱列式挡墙结

构, 由水土压力产生的墙体弯矩主要由墙中插入的型钢承担, 水泥土有一定的贡献, 这种贡献作为安全储备, 因此对承载力验算采用下式:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq f \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为型钢的应力;  $M$  为每榀型钢承受的弯矩;  $W_x$  为每榀型钢的截面抵抗矩;  $f$  为钢的强度。

这一设计思想受到众多质疑, 认为设计中应当考虑水泥土对刚度的贡献, 一些文献<sup>[8-10]</sup>研究提出了型钢水泥土组合结构抗弯刚度计算式为

$$B = E_s I_s + \alpha E_c I_c \quad (2)$$

式中  $E_s$ ,  $I_s$  分别为型钢的弹性模量与惯性矩;  $E_c$ ,  $I_c$  分别为水泥土的弹性模量与惯性矩;  $\alpha$  为水泥土刚度贡献系数, 与水泥土质量和弯矩作用下开裂程度有关。

按照式 (2), 组合结构的刚度有两部分组成, 前

一部分为型钢的刚度,后一部分为水泥土对刚度的贡献,根据工程中劲性水泥土连续墙的含钢率和水泥土的性能情况,采用式(2)计算所得的水泥土对刚度的贡献并不明显。这与一些实验对比研究<sup>[11-12]</sup>的结果有一定的出入,经分析可发现这些实验中,采用的组合结构含钢率较低,其型钢厚度仅为1 mm,故水泥土的刚度贡献相对较大。

事实上劲性水泥土连续墙中弯矩主要由型钢承担,当弯矩达到某一临界值时,型钢受压区在压力作用下将发生侧向位移,伴随着型钢的扭转而失去承载能力,这一现象称为型钢的失稳现象。按照《钢结构设计规范》,型钢作为竖向受弯构件,其承载力除满足强度要求外,还应满足整体稳定性要求,这一问题在当前设计中却未考虑,为工程留下隐患。从一些工程事故现场(如图1,2)可看到,发生工程事故时,型钢均出现了不同程度的侧移和扭转现象。文献[13,14]采用与深基坑中劲性水泥土连续墙尺度均减半的多型钢水泥土组合板进行模拟试验,发现水泥土对刚度的贡献并不明显,通过对板件上裂缝情况分析,可发现在破坏前,边部型钢发生了不同程度的侧移。因此型钢水泥土组合结构中,水泥土主要贡献应是限制型钢的侧移,使型钢的强度得到有效发挥。



图1 某基坑工程事故情况

Fig. 1 Accident of an excavation



图2 基坑倒塌时型钢扭曲情况

Fig. 2 Distorted shape steel in a failing excavation

按照《钢结构设计规范》,钢结构受弯整体稳定计算式为

$$\sigma = \frac{M}{\varphi_b W_x} \leq f \quad (3)$$

式中,  $\varphi_b$  为钢梁的整体稳定系数,其他符号意义同前。

对于劲性水泥土连续墙中型钢,由于其侧向为水泥土连续约束,侧向计算长度难以确定,使得型钢的整体稳定承载力无法采用式(3)进行计算。文献<sup>[15]</sup>假定水泥土对型钢的约束反力与型钢侧向位移成正比,并假定劲性水泥土连续墙中型钢的侧移呈正弦曲线,由此导出劲性水泥土连续墙中型钢整体失稳时的临界弯矩为

$$M_{cr} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 E_s I_y}{l_y^2} + \frac{kh_s^2 l_y^2}{\pi^2}\right) \left(G_s I_t + \frac{\pi^2 E_s I_\omega}{l_y^2} + \frac{kh_s^3 l_y^2}{12\pi^2}\right)} \quad (4)$$

式中  $l_y$  为侧向计算长度;  $E_s$  为型钢的弹性模量;  $G_s$  为型钢的剪切模量;  $I_y$  为型钢截面对  $y$  轴的惯性矩;  $I_t$  为型钢截面的抗扭惯性矩;  $I_\omega$  为截面翘曲常数,对于常用的 H 型钢,可取  $I_\omega = \frac{I_y h_s^2}{4}$ ;  $h_s$  为型钢截面高度;  $k$  为水泥土对型钢的反力系数。

为了保证型钢的强度能够得到有效的发挥,水泥土应具有足够的强度,使型钢的临界弯矩不小于按强度计算的承载力,即

$$M_{cr} \geq W_x f \quad (5)$$

## 2 型钢间水泥土受剪分析

劲性水泥土连续墙属柱列式挡土结构,在墙背水、土压力作用下,型钢间水泥土将承受由此产生的剪力作用,对此按《型钢水泥土搅拌墙技术规程(试行)》,设计中建议按下式进行计算:

$$\frac{pL_0}{2h} \leq \frac{\sigma \tan \varphi + c}{K} \quad (6)$$

式中  $p$  为土压力;  $L_0$  为型钢间净距;  $h$  为水泥土厚度;  $\varphi$ ,  $c$  为水泥土的内摩擦角和黏聚力;  $\sigma$  为挡墙纵向应力,不确定时可偏于保守地取为零值;  $K$  为安全系数,一般取为 1.5。

根据 1988 年日本学者吉成元申、国藤祚光对 H 型钢间水泥土的变形情况进行的试验研究,发现随着荷载的增加,最先在跨中受拉区出现曲张裂缝,剪切斜裂缝由于型钢翼脚的约束出现较滞后,但最终剪切斜裂缝扩展至壁面而破坏。

根据这一结果可知型钢间水泥土破坏实际上类似于混凝土梁斜截面破坏情况,因此仅按(6)式计算是不够的,建议按下式进行补充计算:

$$\frac{pL}{2} \leq 0.7f_t h \quad (7)$$

式中,  $L$  为型钢中心间距,  $f_t$  为水泥土抗拉强度,

其它符号意义同前。

在工程中,如能满足型钢的间距不超过墙体厚度的三倍,在受拉区水泥土开裂后,型钢间水泥土形成了拱效应,随着荷载增加,水泥土将主要承受斜压应力,这样对水泥土抗拉强度要求不高,可不进行按式(7)的验算。

### 3 施工的影响

对于劲性水泥土连续墙施工技术,已取得了较大的成就。在施工机械方面,先后开发出单轴、双轴、三轴、四轴、五轴、六轴等各类施工钻机,能够较容易地实现水泥土桩的相互交接,满足止水要求;减摩剂的研制成功,实现了型钢的回收<sup>[16]</sup>,极大提高了劲性水泥土连续墙的经济性能。但在施工中对于型钢的垂直度、插入位置的偏差等方面,目前尚无一定的控制标准。

劲性水泥土连续墙属于柱列式挡土结构,应用于基坑工程其支撑体系一般由连续围檩和支撑组成。当插入型钢位置和垂直度偏差较大时,使得部分型钢与围檩之间存在一定的空隙,在墙后水土压力作用下,位置偏差较大的型钢将产生较大位移后,支撑的作用才有效,这样造成了型钢受力不均,由受力较大的型钢率先破坏,从而引发墙体的连锁破坏,这是工程中值得注意的又一个问题。

因此在工程中,应严格控制插入型钢的放线位置,尤其是向坑内外的相对位置,同时还应控制型钢插入时的垂直度;在基坑开挖设置围檩和支撑时,对于型钢与围檩之间存在较大空隙时,应在围檩与型钢间加设钢板等充填物,确保型钢与围檩的有效接触,使支撑的作用得到有效发挥。

### 4 结 语

通过前述分析,对于劲性水泥土连续墙在工程中应用,提出以下几方面技术建议:

(1) 水泥土除应保证止水性外,应具有一定的强度,施工中还应保护好型钢间的水泥土,禁止超挖,以达到水泥土对内插型钢的有效约束,防止型钢发生整体失稳破坏。

(2) 内插型钢各板件厚度应满足钢结构板件稳定要求,由于水泥土抗拉强度较低,型钢在劲性水泥土连续墙中型钢水平间的间距应控制在墙体厚度 3 倍以内,防止型钢间水泥土的受拉破坏。

(3) 施工中应采取控制插入型钢的定位位置和垂直度的方式,同时注意对型钢与围檩空隙的充填,

确保支撑体系的作用得到有效发挥,防止型钢受力不均出现薄弱环节而引发的连锁破坏。

### 参考文献:

- [1] 史佩栋. 日本 SMW 工法地下连续墙[J]. 地基基础工程, 1995, 5(1): 59 - 65. (SHI Pei-dong. SMW method underground continuous wall in Japan[J]. Ground and Foundation Engineering, 1995, 5(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [2] 史佩栋. SMW 工法地下连续墙[J]. 施工技术, 1995, 25(2): 52 - 53. (SHI Pei-dong. SMW method underground continuous wall[J]. Construction Technology, 1995, 25(2): 52 - 53. (in Chinese))
- [3] 吴杏弟. SMW 工法在“环球世界大厦”基坑工程中的应用[J]. 建筑施工, 1996, 18(2): 22 - 24. (WU Xing-di. The application of SMW construction method to “Universe Mansion” foundation project[J]. Building Construction, 1996, 18(2): 22 - 24. (in Chinese))
- [4] 张 璞, 柳荣华. SMW 工法在深基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(增刊 1): 1104 - 1106. (ZHANG Pu, LIU Rong-hua. The application of SMW method to foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(S1): 1104 - 1106. (in Chinese))
- [5] 傅德明. SMW 围护桩在上海地区的开发和应用[J]. 江苏地质, 2002, 26(2): 101 - 105. (FU De-ming. Development and application of SMW enclosure piles in Shanghai region[J]. Jiangsu Geology, 2002, 26(2): 101 - 105. (in Chinese))
- [6] 孔德志, 朱悦明, 刘 良. SMW 工法在大型深基坑工程中的应用[J]. 建筑技术, 2006, 37(12): 910 - 912. (KONG De-zhi, ZHU Yue-ming, LIU Liang. Application of SMW construction method to large-sized pit[J]. Architecture Technology, 2006, 37(12): 910 - 912. (in Chinese))
- [7] 周希圣, 陈裕康, 张 伟. SMW 围护深基坑逆筑法设计研究与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 511 - 515. (ZHOU Xi-sheng, CHEN Yu-kang, ZHANG Wei. Design and practice of SMW top-down construction method in deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 511 - 515. (in Chinese))
- [8] 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, 2004, 23(11): 1335 - 1338. (KONG De-zhi, ZHANG Qing-he, SONG Jie. Study on bending stiffness of reinforced continuous cement-soil wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1335 - 1338. (in Chinese))
- [9] 郑 刚, 陈 辉. 型钢水泥土组合梁抗弯模型试验的有限

- 元分析[J]. 建筑科学, 2003, **19**(4): 39 - 42. (ZHENG Gang, CHEN Hui. Finite element analysis of bending models experiments on section steel soil-cement compound beams[J]. Building Science, 2003, **19**(4): 39 - 42. (in Chinese))
- [10] 陈 辉. SMW 工法中型钢 - 水泥土共同作用的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. (CHEN Hui. Research on interaction of shaped steel and cement-soil of SMW engineering method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [11] 王 健, 夏明耀, 傅德明. 型钢水泥土组合梁抗弯模型试验研究[J]. 地下工程与隧道, 1997(3): 21 - 25. (WANG Jian, XIA Ming-yao, FU De-ming. Test and study on bending models of composite beam with shaped steel and cement-soil[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997(3): 21 - 25. (in Chinese))
- [12] 王 健. H 型钢 - 水泥土组合结构试验研究及 SMW 工法的设计理论与计算方法[D]. 上海: 同济大学, 1998. (WANG Jian. Physical tests and analysis composite structure with H-shaped steel and cement-soil & design and calculation of SMW engineering method[D]. Shanghai: Tongji University, 1998. (in Chinese))
- [13] 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. (GU Shi-tan, SHI Jian-yong. Simulation test & performance mechanism analysis of SMW engineering method in deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(4): 1121 - 1126. (in Chinese))
- [14] 孔德志. 加劲水泥土支护结构的模型试验研究[J]. 建筑结构, 2007, **37**(6): 59 - 61. (KONG Dezhi. Model test study on reinforced soil-cementing timbering structure[J]. Building Structure, 2007, **37**(6): 59 - 61. (in Chinese))
- [15] 孔德志. 加劲水泥土地下连续墙中水泥土强度分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1600 - 1604. (KONG De-zhi. Analysis of strength of soil-cement in reinforced soil-cement mixing diaphragm wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1600 - 1604. (in Chinese))
- [16] 张冠军, 徐永福, 傅德明. SMW 工法型钢起拔试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 444 - 448. (ZHANG Guan-jun, XU Yong-fu, FU De-ming. Testing study and application of shape steel pullout in SMW construction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 444 - 448. (in Chinese))

(本文责编 明经平)