SMW 工法的研究进展

顾士坦[1]，施建勇[1]，刘敬爱[2]
(1. 河海大学岩土工程研究所，江苏 南京 210098；2. 山东省建设发展研究院，山东 济南 250001)

摘 要 随着城市建设的发展，地下空间得到大规模开发利用，带动了基坑工程的迅速发展，SMW 工法围护结构作为基坑围护的一种型式，相对于其他的围护型式具有大壁厚、大深度、抗渗性能好、环保等优点，是一种很有经济潜力的新型围护型式。对型钢劲性材料、减摩剂材料、水泥土特性、SMW 工法组合结构特性、设计计算方法等研究成果进行了分析总结，在此基础上提出了今后 SMW 工法的研究热点与方向。

关键词 基坑围护；SMW 工法；水泥土；型钢；共同作用
中图分类号：TU473.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1672－7428(2006)08－0004－04

Evolution of Research on SMW Engineering Method/*GU Shi-tan*[1], *SHI Jian-yong*[1], *LIU Jing-ai*[2] (1. Geotechnical Institute of Hehai University, Nanjing Jiangsu 210098, China; 2. Construction Institute of Shandong Province, Ji'nan Shandong 250001, China)

Abstract: With the development of urban construction, underground space is developed and exploited largely and excavation engineering is widely used. Compared with other support patterns, SMW is more economically potential with many advantages, such as large wall thickness, great depth, good impermeability and environmental protection performance. In this paper, formed steel, antifriction material, characteristic of soil－cement, combination of SMW engineering method and design calculating method are analyzed and summarized. Based on the above, the future of SMW is prospected.

Key words: confined support for foundation pit; SMW engineering method; cement soil; structural steel; combined effect

SMW(Soil Mixing Wall)工法，又称劲性水泥土搅拌桩，是把水泥土的止水性能和芯材(一般为 H 型钢，也可为混凝土等其他劲性材料)的高强度特性有效地组合而成的一种抗渗性好、刚度高、经济的围护结构，具有很大的经济潜力。自 20 世纪 70 年代在日本问世至今，取得了突飞猛进的发展，国内的研究与应用也取得了一定的进展。SMW 工法是在深层搅拌桩和地下连续墙工法基础上发展起来的，同其它围护型式相比，具有大壁厚、大深度、技术经济指标好、环保等优点，广泛用于地下建筑基坑围护、地下坝、地下处理场、环境保护工程等许多领域。

近年来，日本在普通 SMW 工法的基础上又开发了通水 SMW 工法——ONS 工法；国内则在 SMW 工法的基础上开发了 LXK 工法、水泥土复合式支挡结构等。

1 SMW 工法材料特性

1.1 芯材、减摩剂材料的特性

SMW 工法是水泥土与型钢等劲性芯材的组合结构，芯材一般采用型钢、钢板、混凝土桩或其他劲性材料。长期以来，对加筋芯材(型钢、混凝土桩)的研究成果比较深入，已经形成了一套成熟的设计施工规范，劲性材料在 SMW 工法围护结构中的主要作用是承受侧向水土压力，承担水土压力产生的弯矩。型钢的腹板和翼缘尺寸在 SMW 工法结构中有一定要求，总体来说，相对于型钢混凝土结构，考虑到水泥土的强度和刚度贡献，SMW 工法中型钢腹板和翼缘的厚度可以较小一些。工程应用时，可参考不同型号型钢对应的参数指标，并进行型钢的承载力、抗弯刚度试验。从经济的角度考虑，工程中有时采用其他劲性材料，如某地铁车站基坑工程中，SMW 工法组合结构的劲性材料使用铁路废弃钢轨作为芯材，或者在中小基坑工程中回收并不经济的情况下，不考虑芯材的回收，插入混凝土芯桩。

SMW 工法在临时围护结束后如果考虑型钢回收，施工时型钢一般要涂抹减摩剂，减摩剂的使用目的是型钢起拔容易，有利于型钢回收；同时应保证型钢在水泥土中的粘结强度，保证工程安全。文献[1]通过室内的不同减摩剂条件下型钢拔出模拟试验，以及现场试验，分析了 SMW 工法型钢拔出机理，把型钢的拔出过程分为 3 个阶段，给出了型钢拔出力的验算公式、对比分析了不同减摩剂的作用效

收稿日期：2006－03－30

作者简介：顾士坦(1978－)，男(汉族)，山东邹城人，河海大学博士研究生，岩土工程专业，研究方向为基坑工程支护，江苏省南京市西康路 1 号河海大学 549 信箱 7 舍 207，(025)83781395、13605144991，njgst@hhu.edu.cn。

万方数据

果。

1.2　水泥土搅拌桩材料特性

SMW 工法是深层搅拌桩和芯材的组合结构,深层搅拌桩水泥土的力学性质中最重要的是无侧限抗压强度,它是衡量水泥土加固效果的重要指标。一般情况下,水泥土的无侧限抗压强度比未加固前的天然土要大几十、数百倍。日本学者铃木健夫、国藤祚光等[2]通过室内试验研究,对试验结果回归分析,得到了无侧限抗压强度经验公式。国内学者贾坚等[3]通过大量水泥土室内试验,得到了水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入量的经验关系;水泥土龄期与无侧限抗压强度的关系。

SMW 工法在沿海软粘土地区应用较多,文献[4]研究了海相粘土水泥土的微结构与水泥土工程性质的关系。通过对试验数据的分析,得到了 7 天、28 天养护期的无侧限抗压强度 – 水泥含量的关系。如图 1 所示。

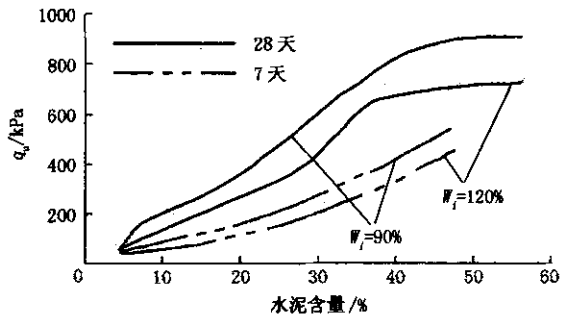

图 1　初含水率和养护时间对无侧限抗压强度影响

关于水泥土的变形特征,国内外学者曾作了大量的试验研究,其结论大都类似。图 2 为典型的水泥土应力 – 应变关系曲线[29],单轴压缩试验表明,水泥土从受力到破坏其应力 – 应变关系具有明显的非线性。

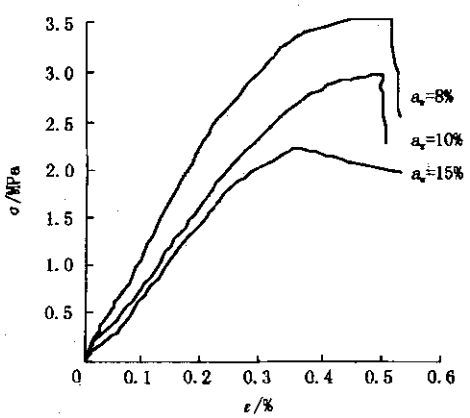

图 2　水泥土的应力应变关系

水泥土的压缩强度指标与水泥含量有密切的关系,文献[5]基于本质压缩曲线 ICL,认为对于特定的水泥固化土,压缩指标是常数,仅取决于水泥含量,而与粘土含水量无关。深层搅拌桩是 SMW 工法产生发展的基础,文献[6]基于圆孔扩张理论,得到了由于施工深层搅拌桩而引起的侧向位移计算方程,分别推导了打单桩和打群桩时的侧向位移,假设叠加原理满足施工水泥土桩引起的侧向位移,多桩在某一点侧向位移叠加,得到该点的侧向位移表达式。

SMW 工法是在搅拌桩中插入型钢等劲性材料,文献[7]基于自相关函数,通过空间相关结构考察了水泥搅拌桩横断面上的手动贯入试验导致的变异性,进行了变异数分析。同时还讨论了搅拌过程与力学系统的关系。

1.3　SMW 工法组合结构特性

水泥土组合结构试验结果表明:水泥土不但起止水的作用,还起到增加总体刚度的作用[8],一般定义水泥土的刚度贡献率为:

$$\alpha = E_c I_c / (E_s I_s) \qquad (1)$$

式中:α——水泥土的刚度贡献率;E_c、E_s——分别为水泥土搅拌桩 H 型钢混合体、H 型钢的弹性模量;I_c、I_s——分别为水泥土搅拌桩 H 型钢混合体、H 型钢的惯性矩。

型钢水泥土室内足尺模型试验[9]表明:(1)水泥土限制了 H 型钢的平面侧移和扭转,阻止了 H 型钢过早失稳,提高了结构的整体稳定性;(2)水泥土对 SMW 工法组合结构体的塑性极限承载力贡献比弹性极限承载力更明显,一般在 18% ~20%。

SMW 工法是芯材 – 水泥土的组合结构,本质是加筋水泥土,加筋水泥土试验[10]把型钢简化为钢筋,对加筋水泥土进行各项试验,研究了钢筋与水泥搅拌桩共同受力情况,进而分析型钢与水泥土的相互作用。

钢筋混凝土结构中,钢筋的粘结、滑移性能可通过钢筋的拔出试验进行分析,文献[11]通过试样试验,检验了单调荷载下,高强混凝土的粘结强度特性。水泥土的力学性质比较复杂,再加上减摩剂的作用,使得型钢 – 水泥土的粘结滑移机理更加复杂,一般认为,在无减摩剂作用下,型钢 – 水泥土的粘结作用由 3 部分组成:水泥胶体与型钢表面的化学胶结力、接触面上的摩擦阻力、型钢表面粗糙不平的机械咬合力。文献[12]通过型钢 – 水泥土的粘结滑移试验,得到了在不同法向荷载作用下,型钢 – 水泥土之间的粘结应力与相对滑移的关系以及粘结应力

万方数据

与法向应力之间的关系。文献[13]进行了型钢拔出室内模拟试验,进行了 H 型钢拔出物理模型分析,得到了 H 型钢拔出理想特征曲线(图 3)并与 H 型钢拔出实际特征曲线(图 4)进行了比较分析,进而分析了型钢的拔出机理。

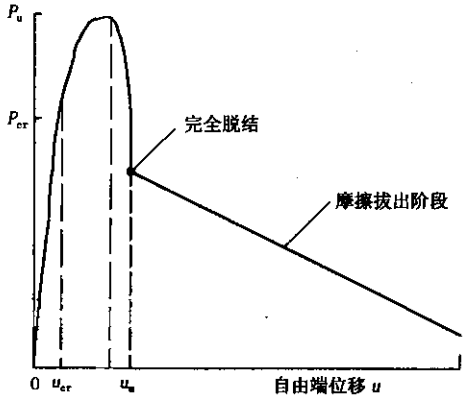

图 3 H 型钢拔出理想特征曲线

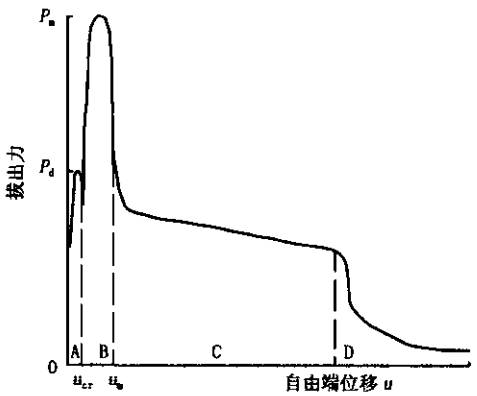

图 4 H 型钢拔出实际特征曲线

2 SMW 工法设计计算

日本的《SMW 工法设计施工指南》,其主要设计思想是当 SMW 作为挡土墙时,墙体的应力由芯材和水泥土来承担,但在设计中一般只考虑芯材的刚度作为墙体的刚度来计算而忽略水泥土的刚度,将水泥土的刚度贡献作为墙体的刚度储备。国内还没有成熟、正式的 SMW 工法设计计算规范,工程设计时,一般参考钢板桩和地下连续墙的设计计算方法。

文献[13]通过模型试验,得到 SMW 工法组合梁的模拟特征规律和单元截面组合刚度的简化计算公式。提出了水泥土刚度贡献系数 β 的概念,认为水泥土的刚度只有部分贡献出来,组合结构截面的抗弯刚度应为:

$$B = E_s I_s + \beta E_c I_c \tag{2}$$

通过对试验结果的线性回归分析,得出水泥土刚度贡献系数与荷载(弯矩)经验关系式为:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - bM_{cr}/M} - c \tag{3}$$

文献[15]将劲性水泥土连续墙体在荷载作用下的变形过程分为 5 个阶段,分析了各阶段结构有效截面和截面应力分布的演变情况,推导了 SMW 组合结构刚度的迭代计算公式:

$$B = E_s I_s + \xi E_c \frac{b(h-h_t)^3}{12} + \frac{h_t^2 E_s A_s E_c (A_c - bh_t)}{4[E_s A_s + E_c (A_c - bh_t)]} \tag{4}$$

$$f_t = \frac{E_c M}{B}\left[\frac{h}{2} - \frac{h_t}{2}\cdot\frac{2E_s A_s + E_c (A_c - bh_t)}{E_s A_s + E_c (A_c - bh_t)}\right] \tag{5}$$

式中 f_t——水泥土受拉区未开裂部分边缘处的应力;B——水泥土受拉区未开裂部分边缘处的截面抗弯刚度。

f_t 和 B 二者迭代即可求出 SMW 组合结构的刚度。

文献[22、23]分析了 SMW 工法建造的圆形工作井在顶力作用下的受力机理,提出承载半圆后背土体的竖向和环向反力分布呈拟正态分布,求得后背土体所能承受的最大土体反力计算公式。从整体角度研究了由顶推力反力引起的工作井后背土体反力分布。

SMW 工法围护结构在基坑开挖后,在无支撑的情况下,即形成类似钢板桩等悬臂式的围护型式[24],SMW 工法工程设计中一般参考钢板桩围护结构的设计方法。文献[25]介绍了在深层搅拌桩内插入混凝土桩作为劲性材料的 SMW 工法及详细的设计方法。

3 SMW 工法的研究热点

尽管 SMW 工法挡土墙构造简单,但其受力机理却相当复杂,目前,对 SMW 工法形成的 H 型钢和水泥土这种复合材料的工作机理认识不足,不能从一个客观的理论角度来分析该组合结构的工作机理。如何考虑桩体组合结构的复合刚度,在确保工程安全性的基础上最大限度利用水泥土的刚度贡献是工程设计中的一个难点。SMW 工法是一种典型的复合材料桩,从复合材料力学的角度[26~28]来分析芯材-水泥土的相互作用机理,可获得较好的理论解释,合理确定劲性水泥土连续墙的刚度,对正确计算墙体内力和位移,保证工程设计的合理性和安全性具有重要的意义。笔者认为 SMW 工法今后的研究热点与方向如下。

(1)水泥土材料的特性研究。加强对水泥土材

万方数据

料的特性试验研究,逐渐形成一套专用规范或标准。

(2)型钢 – 水泥土间的相互作用关系。包括型钢 – 水泥土接触界面摩擦、滑移及水泥土失效机理;SMW 组合结构从共同协调作用到水泥土开裂破坏演化过程与演化机理。

(3)建立更符合工程实际的 H 型钢拔出力的物理模型,考虑由于侧向水土压力作用而在型钢 – 水泥土接触面上存在弯曲变形阻力,分析 H 型钢的拔出作用机理。

(4)SMW 工法在软土地区深大基坑工程中的应用技术研究。

参考文献:

[1] 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.

[2] 铃木健夫,国藤祚光. ソィルセメント地中连续壁の材料特性に关ちろ基础实验[J]. 土と基础,1994,(3).

[3] 贾坚. 控制基坑变形的坑内加固机理研究及实践[D]. 上海:同济大学,2003.

[4] S. H. Chew, A. H. M. Kamruzzaman, F. H. Lee. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays [J]. Journal of Geotechinical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 696 – 706.

[5] S. HORPIBULSUK, D. T. BERGADO, G. A. LORENZO. Compressibility of cement-admixed clays at high water content [J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 151 – 154.

[6] Jin-Chun Chai, Norihiko Miura, Hirofumi Koga. Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-Cement Column Installation [J]. Journal of Geotechinical and Geoenvironmental Engineering. 2004, 130(5): 623 – 632.

[7] S. LARSSON, H. STILLE, L. OLSSON. On horizontal variability in lime-cement columns in deep mixing [J]. Geotechnique, 2005, 55(1): 33 – 44.

[8] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

[9] 南京地铁南北线一期工程珠江路站 SMW 工法设计与施工的应用技术研究——专题报告(1):试验研究报告[R]. 南京:河海大学,2004.

[10] 于宁,朱合华,等. 插钢筋水泥土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2004,37(11):78 – 84.

[11] M. Alavi-Fard, H. Marzouk. Bond of high-strength concrete under monotonic pull – out loading [J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56(7): 545 – 557.

[12] 吴飞. 型钢 – 水泥土组合梁抗弯试验模型的有限元分析及理论研究[D]. 南京:河海大学,2004.

[13] 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.

[14] Masahito IMAI, Fusao OKA, Shinichirou NAKASHIMA. Compression Characteristic of Thin Steel Pipe-soil Cement Composite Structure and Its Modeling [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 36(2): 103 – 118.

[15] 孔德志,等. 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):1935 – 1938.

[16] 刘刚,周顺华. 劲性桩围护结构侧土压力的模拟试验[J]. 上海铁道大学学报,2000,21(8).

[17] 周顺华,刘建国,等. 新型 SMW 工法基坑围护结构的现场试验和分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):692 – 695.

[18] 赵吉广. SMW 工法围护结构的计算模型和施工方法研究[D]. 上海:同济大学,2001.

[19] 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,2003.

[20] 朱大宇. 加筋水泥土支护结构的试验研究[D]. 上海:同济大学,2001.

[21] 张丽军,俞汝法,等. SMW 工法的实践与机理验证[J]. 铁道工程学报,2002,(9):96 – 99.

[22] 魏纲,徐日庆,宋金良. SMW 工法圆形工作井土体反力计算方法的研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,98(1):98 – 102.

[23] 宋金良. 环 – 梁分载计算理论及圆形工作井结构性状分析[D]. 杭州:浙江大学,2004.

[24] S. P. Gopal Madabhushi, V. S. Chandrasekaran. Rotation of Cantilever Sheet Pile Walls [J]. Journal of Geotechinical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 202 – 212.

[25] Yong Shao M. ASCE, Emir Jose Macari M. ASCE, Weiming Cai. Compound Deep Soil Mixing Columns for Retaining Structures in Excavations [J]. Journal of Geotechinical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1370 – 1377.

[26] ANDRZEJ SAWICKI. Mechanics of Reinforced Soil [M]. A. A. Balkema, 2000. 63 – 99.

[27] 杨庆生. 复合材料结构力学与设计[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.

[28] 张少实,庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[29] 张家柱,程钊,等. 水泥土性能的试验研究[J]. 岩土工程技术,1999,(3):38 – 40.

[30] 国藤祚光. 各种地盘の改良强度とゃメニト配合[J]. 基础工,1994,(5):20 – 25.

(上接第 3 页)

3　结语

总之,构建和谐社会,保证经济社会可持续健康发展,地质工作大有可为。

所以,我们必须抓住机遇,借《决定》之东风,坚持以科学发展观指导工作。在地热洁净能源勘查和开发利用方面,转变经济增长方式,调整和优化产业结构,提高自主创新能力,促进经济发展与人口、资源、环境相协调,为建设资源节约型、环境友好型社会作出积极贡献。

参考文献:

[1] 卢予北. 地热资源开发与问题研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.

[2] 卢予北. 地热:可再生绿色能源[J]. 科学研究,2005,1(12).

万方数据