

文章编号: 1000-7598(2009)增刊2-0560-05

土钉墙数值模拟在干船坞坞墙中应用探讨

蔡枫, 郑永来

(同济大学 土木工程学院水利工程系, 上海 200092)

摘要: 从减少基坑开挖过程中坞墙位移和控制坞壁渗水角度出发, 利用数值模拟分析, 探讨在深基坑开挖中得到广泛应用的普通土钉墙和用于船坞坞室基坑开挖中的复合土钉墙技术, 将联合劲性水泥土搅拌桩的复合土钉墙用于干船坞的坞墙结构。从工程探讨角度, 研究土钉联合劲性水泥土搅拌桩、预应力锚杆的复合土钉墙在干船坞这一特定条件下的应用问题, 并通过分析模拟结果, 为干船坞坞墙设计施工过程中安全问题提出一些注意点。

关键词: 土钉墙; 干船坞坞墙; FLAC; 数值模拟; 预应力锚杆; SMW

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Application research on numerical simulation of soil nailing wall for dry dock wall

CAI Feng, ZHENG Yong-lai

(Department of Hydraulic Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: From the perspectives of reducing displacements of dry dock walls during the process of pit excavation, and controlling the seepage of dock walls in the course of using, the application of techniques of soil nailing wall and composite soil nailing wall widely used in deep excavation, the construction of dry dock by using numerical simulation are explored emphatically. FLAC is one of methods of numerical simulation, which is widely used in rock-soil engineering field. The FLAC is used to simulate the working condition of soil nailing wall in pit excavation of dock chamber; and the application of stiffened cement soil mixing pile(SMW) prestressed anchor plus soil nail structure to dock walls is studied. According to the simulation results, some conclusions at the construction of dry dock walls are drawn.

Key words: soil nailing wall; dry dock wall; FLAC; numerical simulation; prestressed anchor; SMW

1 引言

随着国际航运事业的发展和我国对外贸易的迅速增长, 所需的船舶不断增大, 修造船用的干船坞也顺应着不断地变大、变深。干船坞是供修造船舶使用的水工建筑物之一, 其坞底低于水面, 坞壁三面封闭, 而坞墙是干船坞的主体部分, 是修造船舶的工作场所。

干船坞的构建中, 坞墙形式的选择很重要, 其不仅要满足受力、防渗、变形的要求, 还应考虑成本和工期等各方面的因素。此外, 干船坞坞室基坑开挖是干船坞建设中重要的环节, 其关系到施工安全及今后总体结构的变形和安全性, 因此, 所选择的基坑开挖支护要能保证结构安全、变形合理, 且

若能与坞墙结构相结合, 就能实现经济、安全双赢。土钉支护结构具有施工简便、快速及时、机动灵活、适用性强、安全经济的优势, 若将其应用到船坞结构中, 将有利船坞建设的发展。

本文以某造船厂干船坞为例, 探讨土钉墙在干船坞坞室侧墙结构中的应用, 从减少基坑开挖过程中坞墙位移和控制坞壁渗水角度出发, 利用有限差分分析软件FLAC2D^[1]进行数值模拟分析, 从工程探讨角度, 研究土钉联合劲性水泥土搅拌桩与预应力锚杆的复合土钉墙作为干船坞坞墙的应用问题。

2 干船坞工程概况

某造船厂位于长江下游左岸, 项目工程主要建设造船坞两座, 原坞墙采用拉锚式钢板桩结构, 现

对其中一座干船坞的基坑开挖及侧墙结构进行数值模拟,主要相关参数为:长 520 m,宽 85 m,深 12.8 m;坞顶标高 5.00 m,坞底标高-7.8 m,基坑实际开挖深度为 8.3 m,坞墙后的最高地下水位为 2.015 m;根据工程勘察报告及相关资料^[3],各土层的物

理力学性质见表 1。

本文将土钉与劲性水泥土搅拌连续墙联合,作为干船坞的坞墙结构,采用拉锚式结构,进行数值模拟分析比较,并根据模拟结果,对坞墙结构进行改进。

表 1 土层物理力学性质指标统计表
Table 1 Physico-mechanical indexes of soils

地层编码	地层名称	含水率 $\omega / \%$	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	饱和度 $S_r / \%$	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
①	素填土	33.2	17.9	1.009	88.8	6.33	36.0	18.7
②	粉质黏土夹粉土	43.9	17.5	1.239	94.7	3.13	13.8	10.0
③	粉土夹粉砂	32.4	18.9	0.876	95.3	8.89	7.2	28.8
④	粉砂	28.3	19.1	0.843	91.5	17.82	3.4	33.5
⑤	粉质黏土夹粉土	32.8	18.3	0.953	92.8	5.16	17.5	17.0
⑥	粉土夹粉砂	32.5	17.8	0.994	86.1	9.01	9.5	25.8
⑦	粉砂与粉土互层	32.0	18.1	0.958	88.4	6.17	10.7	24.5
⑧	粉砂~粉细砂	25.2	19.5	0.717	73.1	22.60	2.0	35.6

3 干船坞数值模拟

3.1 计算模型及数值模拟参数选择

本文采用 65×58 的网格,共计 3 770 个单元,计算域长 40 m,宽 25.5 m,如图 1 所示。在不同条件下的计算均采用同一个网格,以便比较。假设计算域两侧设有水平链杆,底部设有铰支座,顶部取为荷载已知的自由边界^[2];模型顶部在坞室开挖阶段的超载取 10 kPa,在 20 m 的范围内施加,而在干船坞使用阶段模拟时,将根据地面使用荷载(15 kPa)与 0.5 m 高程以上土体压力换算成超载予以施加;模型内部作用有土体自重荷载。对模型施加了初始应力场,以使模型的不平衡力得以快速收敛。允许土体变化产生大变形。本模拟土体采用摩尔-库仑模型。

经多次模拟比较后,根据以往复合土钉墙设计中的一些经验、结论,选用土钉+预应力锚杆+劲性水泥土搅拌桩(SMW 工法)的复合土钉墙,同时采用先施作上部结构,待锚碇结构稳定后再开挖基坑的施工方案,并将设计参数设计如下:①^[4-6]采用 6 排土钉支护,除第 3、5 排土钉外,其他排土钉参数为:土钉长 12 m,水平间距为 1.8 m,竖向间距为 1.4 m,倾角为 10°,采用 2 级钢筋,直径为 25 mm。土钉直径为 100 mm,注浆采用 C30 水泥浆,面层采用 C25 水泥浆。永久性土钉应根据一定要求进行设计,永久性土钉钢筋直径为 32 mm,土钉直径为 120 mm,混凝土面层厚度为 200 mm,设 2 层钢筋网,分 2 次喷成。②^[4-6]第 3 排及第 5 排土钉改为预应力锚杆,分别施加预应力 360 kN,锚杆的锚固段长度 12 m,非锚固段长度为 5.5 m,采用

1×7 标准型钢绞线,直径为 15.2 mm。锚杆水平间距为 1.8 m,倾斜角度为 15°,锚杆孔直径为 100 mm;采用 C30 水泥浆。预应力锚杆按永久锚杆设计,即锚杆杆体钢筋截面面积和锚固长度应乘以锚杆永久性系数,锚杆永久性系数 γ_1 根据结构重要程度取值,本例取 1.28^[7]。锚杆采用 2 索钢绞线,锚固段的钻孔直径为 130 mm,锚固长度 16 m。预应力锚杆有利增加基坑的边坡稳定性。③^[8]水泥搅拌连续墙采用高标号 C52.5 混凝土;墙的厚度为 1.2 m,总高度为 14.3 m,入土深度为 5 m,型钢采用 2 级钢,长 14 m,入土深度为 4.5 m,布置方式为全位满堂。采用 Beam 单元模拟搅拌墙。为简化处理,在施工阶段与使用阶段的模拟均采用同一网格,不同的是,在施工阶段,墙顶为自由端,地下水位经降水后为基坑顶面下 0.5 m 处。在使用阶段,简化上部结构的作用,将墙顶设定为固定端,并将地面使用荷载及 0.5 m 高程上土体压力换算为新荷载作用在网格顶面上。

对设计参数进行适当的修正,以适应二维平面有限差分计算(FLAC)的输入参数。

由于劲性水泥土搅拌桩复合土钉墙不仅要用于船坞坞室基坑开挖支护中,还要作为坞墙结构参与船坞使用,因此,在施工阶段可采用经永久性修正后的土钉及锚杆设计参数,而在设计阶段要采用正常设计参数(非永久性设计参数)来保证使用过程中结构的安全。

3.2 开挖过程模拟

坞室基坑底部及边坡土体在开挖时的力学状态变化,视为原始应力场在土体开挖面应力释放而引起的^[10]。模型采用空单元模拟开挖。

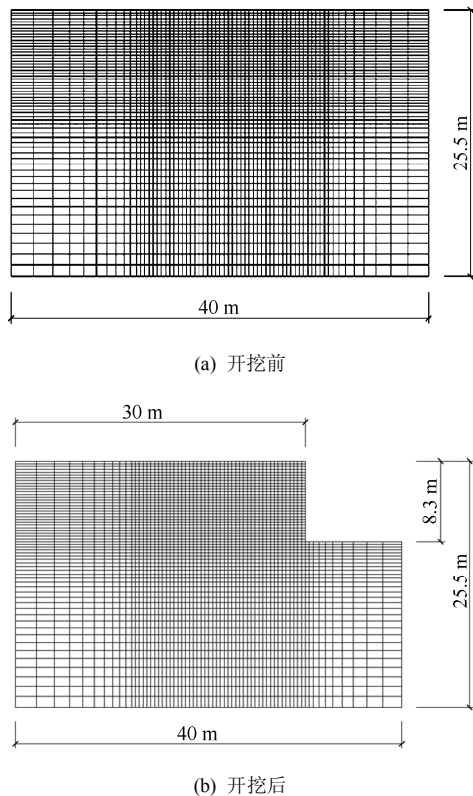


图1 网格划分
Fig.1 Grid partitioning

干船坞的基坑开挖过程采用分步施工,先施作劲性水泥土搅拌连续墙,施工步骤见表2。

表2 基坑开挖分步表
Table 2 Steps of pit excavation

施工阶段	基坑开挖 高程/m	基坑开挖 厚度/m	施工内容
1	-1	1.5	土钉、喷射混凝土
2	-2.4	1.4	土钉、喷射混凝土
3	-3.8	1.4	土钉、喷射混凝土、施加预应力锚杆
4	-4.9	1.1	土钉、喷射混凝土
5	-6.3	1.4	土钉、喷射混凝土、施加预应力锚杆
6	-7.5	1.2	土钉、喷射混凝土
7	-7.8	0.3	喷射混凝土

3.3 模拟结果及分析

图2为施工阶段与使用阶段下的土钉轴力分布图。由图可见,施工阶段的最大土钉轴力值(69.3 kN)和使用阶段的土钉轴力值(62.4 kN)分别小于各自条件下的土钉设计拉力(按永久性设计的土钉设计轴力值为241.1 kN,屈服轴力值为269.4 kN;按非永久性设计的土钉设计轴力值为147.3 kN,屈服轴力值为164.4 kN),且对比两图可知,使用阶段的土钉、锚杆轴力值均小于施工阶段,可见底板对土钉内力减少有一定作用。各排土钉的轴力随着其施加的深度的增加而增加,最下面一排的土钉受到

的轴力最大,向上递减。

对于同一根土钉,最大轴力的位置不再同普通土钉墙一样出现在土钉中部附近,几乎都在土钉的靠近开挖面的一侧出现最大内力,因此,在施工时,要做好土钉与面层、土钉与搅拌墙之间的连接工作。

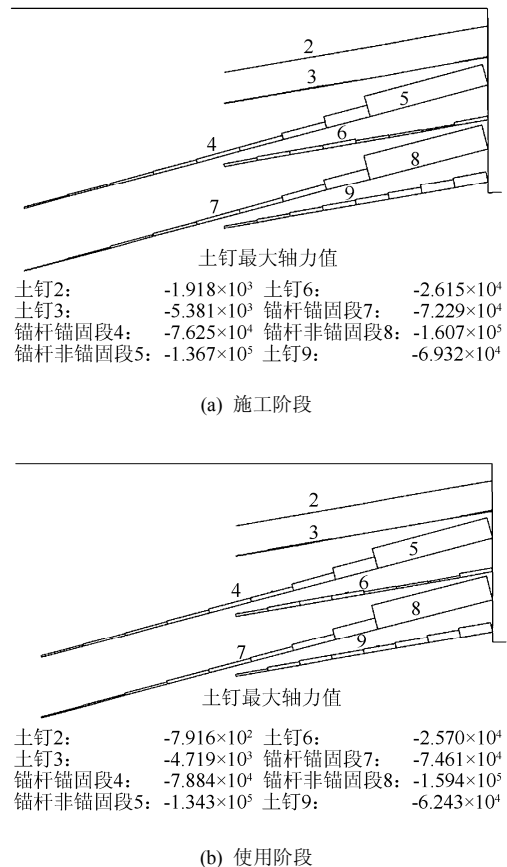


图2 土钉轴力分布图(单位: N)
Fig.2 Distribution of soil nailing axial forces (Unit: N)

施工阶段与使用阶段水泥土搅拌墙面的水平和竖向位移比较如图3所示。从图可知,搅拌墙顶端位移最小,向下逐渐增大,在基坑底部产生最大水平位移,而最大竖向位移出现在基坑底部以下靠近开挖底面位置。基坑底部位移量较大,表明基坑坑角所受应力非常大,此范围应为基坑危险区域,并且在基坑开挖底面以下的位移量依然较大。基坑底部附近区域的水平位移及隆起明显,施工时在底板施工前应对开挖底面采取一些必要措施,如施加荷载,来达到控制变形的目的。图4为基坑开挖完成后的最大应力状态图。由图4可以明显看出,在土钉加固区域内的最大主应力相对减小,尤其在靠近坑面处,应力减小尤为明显,这是因为土钉对土体起到主动加固的作用,增加其抗变形能力。因此,土钉墙对基坑的变形有很大的约束作用。同时从图中可看出在基坑坑角处应力集中现象十分显著。

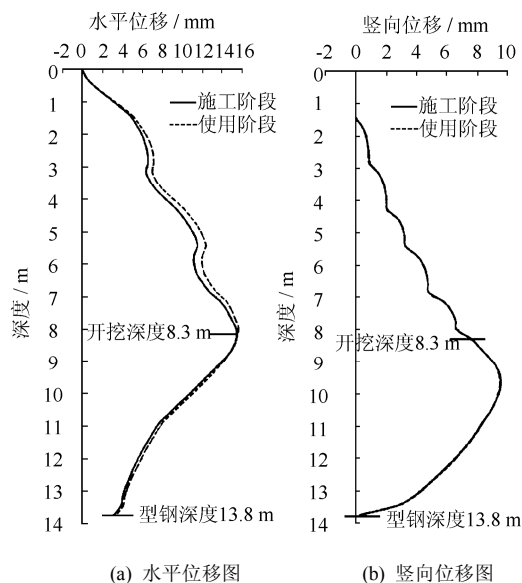


图3 水泥土搅拌桩面位移比较图
Fig.3 Displacement of stiffened cement soil mixing pile

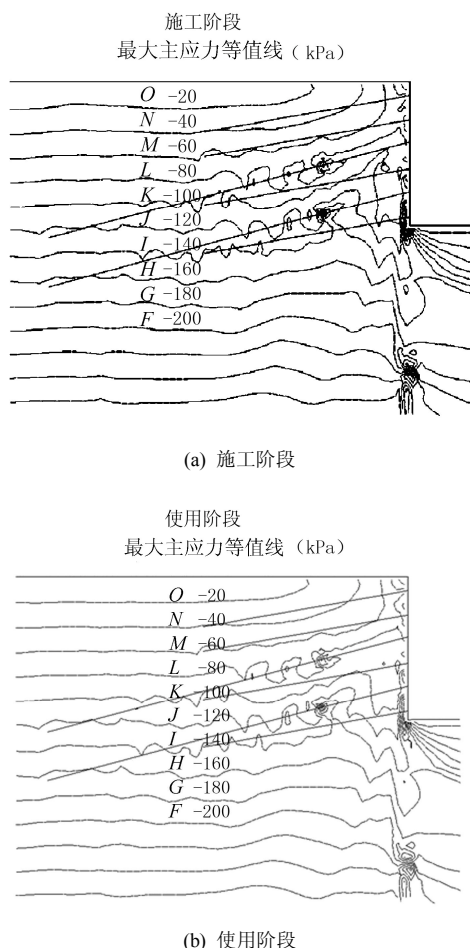


图4 最大主应力状态图 (单位: kPa)
Fig.4 Statement of the maximum principal stress (unit: kPa)

土体塑性区如图5所示。由图可见,在施工阶段,在第1、2道土钉后出现较大面积的塑性屈服区域,而在使用阶段,土钉墙后亦出现塑性屈服区域

点状分布,但在2个阶段塑性区域均未形成贯穿型分布,基坑在安全稳定范围内。两个阶段均在边界处形成拉伸屈服区域,这是由于人工边界的影响。比较两图可知,在施工阶段的安全稳定性低于使用阶段的安全稳定性,而由计算可得,施工阶段的安全系数为1.31,使用阶段的安全系数远高于此值,均满足基坑施工的安全稳定性要求。

基坑最大水平位移(16 mm)和竖向位移(8 mm)都满足基坑开挖要求的安全范围(基坑深度的4%,本例约为30 mm)^[9]。施工阶段的最大土钉轴力值为69.3 kN,使用阶段的最大土钉轴力值为62.4 kN,均小于土钉设计轴力147.3 kN,可见,土钉的内力得到很好的控制。由于荷载增加(使用阶段0.5 m高程以上的土层)的原因,使用阶段的位移量较施工阶段的大,但土钉及锚杆的轴力却更小,这是因为在使用阶段,底板对搅拌桩产生一定的嵌固作用,限制其位移。

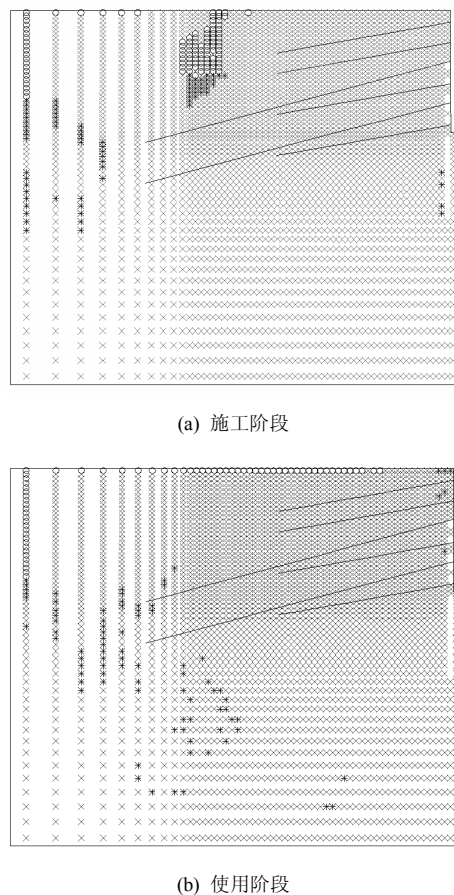


图5 塑性区图
* 剪切屈服区域, x 先前屈服的弹性区域, o 拉伸屈服区域
Fig.5 Plastic zone in surrounding of excavation

因此,对于土钉墙+锚杆+劲性搅拌桩复合土钉墙而言,施工阶段最为危险。在此阶段,要注意控制施工荷载,并在施工时要加强对变形的监测。

4 结 语

本文模拟分析将土钉与劲性水泥土搅拌桩、预应力锚杆结合用于干船坞坞墙结构后的土钉内力情况和基坑位移情况。

目前的研究对于复合土钉墙的受力情况了解并不十分清楚,而且也缺乏相关的规范来指导设计,而数值模拟的方法可以模拟分析复合土钉墙在不同组合条件下的工作状态,可用以辅助复合土钉墙式坞墙的设计。

因干船坞一般所处的地理位置的关系,其地下水位较高,坞墙受力较大,这对坞墙结构的变形及稳定性均有不利影响,采用复合土钉墙来作为坞墙结构,主要是出于减少变形及有效挡水考虑。但由于土钉长期在高水位环境下工作,要注意采取相应措施进行永久性土钉的保护工作。

复合土钉墙式坞墙在底板完成前的施工阶段的稳定性比在使用阶段的低,这是由于底板对水泥土搅拌桩有较好的抵挡作用,能限制其变形。因此,在底板未施工前,应注意坞室基坑的变形,条件允许情况下,要采取必要措施来控制底部的隆起变形;且此时坞墙的安全性最低,应注意限制地面超载,避免结构变形破坏,影响正常使用。

参 考 文 献

- [1] FLAC-2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions), Version 3.4, User manual[M]. USA: Itasca Consulting Group, 1996.
- [2] 周川杰. FLAC-2D 进行复合土钉支护稳定性分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(6): 39—41.
- [3] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [4] 程良奎, 杨志银. 喷射混凝土与土钉墙[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 中国工程建设标准化协会标准. CECS96: 97 基坑土钉支护技术规程[S]. 北京: 中国城市出版社, 1997.
- [7] 赵继承, 郭玉荣, 邹银生. 永久性土层预应力锚杆设计探讨[J]. 路基工程, 2007, (2): 100—101.
- [8] 赵志缙, 应惠清. 简明深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 冶金工业部建筑研究院. YB 9258—97 建筑基坑工程技术规范[S]. 北京: 冶金工业冶金出版社, 1998.
- [10] 刘瀛. 复合型土钉支护结构的数值模拟及工程应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2002: 48—51.