

格型地连墙在超深船坞坞墙结构中的应用

宣庐峻, 周杰鑫

(中船第九设计研究院工程有限公司, 上海海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 为了适应船坞大型化的发展, 对超深船坞坞墙结构进行创新设计研究是非常必要的。目前, 在超深型船坞坞墙中使用格型地连墙结构案例较少, 尚须对其受力特性和稳定性方面进一步研究。结合长江口某超深型船坞工程实例, 通过有限元模型计算和实测数据, 验证格型地下连续墙相较于传统挡土结构具有刚度大、位移小的优点, 明确其在超深船坞工程中的适用性, 并对格型地连墙中间隔墙、前墙深度等因素进行敏感性分析。结果表明, 适当降低中间隔墙深度可减小前墙内力; 前墙插入深度并非越深越好, 适当减小深度可使结构受力更均匀。

关键词: 超深型船坞; 坞墙; 有限元; 格型地下连续墙

中图分类号: TU 476⁺.3; U 673.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0177-08

Application of lattice diaphragm wall in ultra-deep dock wall structure

XUAN Lu-jun, ZHOU Jie-xin

(China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai Engineering Research Center
of Ocean & Shipbuilding Maritime Engineering, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to adapt to the large-scale development of dock, it is necessary to carry out innovative design research on the dock wall structure of ultra-deep dock. At present, there are few cases of using lattice diaphragm wall structure in dock wall of ultra-deep dock, and further research on its force characteristics and stability is still needed. Based on an example of an ultra-deep dock project in the Yangtze River estuary, we verify the advantages of greater rigidity and less displacement of the lattice diaphragm wall than the traditional retaining structure through the calculation of the finite element model and measured data, clarify its applicability in ultra-deep dock, and carry out the sensitivity analysis of factors such as the depth of the partition wall and the front wall in the lattice diaphragm wall. The results show that the internal force of the front wall can be reduced by appropriately reducing the depth of the partition wall. The insertion depth of the front wall is not as deep as possible, the appropriate reduction of the depth can make the structure more uniform.

Keywords: ultra-deep dock; dock wall; finite element; lattice diaphragm wall

船坞坞墙的结构形式往往与船坞深度、岩土工程条件、建造方法等密切相关。随着世界航运业和造船工业的迅猛发展, 常规的结构形式和建造方法已不能适应船坞向更深、更大型的方向发展。因此, 在超深型船坞工程中, 对坞墙结构进行创新设计研究是非常必要的, 其对船坞工程的

技术进步意义深远。

格型地下连续墙(简称格型地连墙)坞墙结构形式的构思出自格型钢板桩岸壁的概念, 是一种半重力式挡土结构。格型地下连续墙由前墙、后墙以及连接前、后墙的中间剪力隔墙组成^[1]。格型地下连续墙前、后墙槽段间一般采用锁口管等

收稿日期: 2021-05-31

作者简介: 宣庐峻(1982—), 男, 硕士, 研究员, 从事水运工程及地下工程的设计管理。

柔性接头连接，中间剪力隔墙采用十字钢板等刚性接头连接。格型地下连续墙作为坞墙结构，其前墙紧邻船坞基坑开挖面，是直接承受坑内外水、土压力的主要挡土构件，它通过剪力墙与后墙连接，以实现结构的整体性。由于其特殊的空间结构效应，格型地下连续墙与其内部土体共同组成的挡土结构具有整体刚度大、开挖深度较深、无需内部支护的特性，非常适用于常规的挡土结构在技术经济上不能满足要求或受周边环境条件限制的船坞工程^[2]。

本文结合上海长江口某超深型船坞工程实例，对格型地连墙在超深船坞工程中的应用进行了相关研究，通过建立简化模型对格型地连墙坞墙进行内力分析，提出格型地连墙坞墙的简化模型方式；对格型地连墙设计采用了各参数的敏感性分析方法进行结构优化；通过建立三维整体模型，进行格型地连墙变形特征的有限元分析，进一步指导施工。

1 工程概况

上海长兴岛某超深船坞工程，船坞规模为240 m×40 m×17.7 m(长×宽×深)，是目前国内最深的船坞工程，使用期挡土高度达17.7 m，施工期基坑开挖深度近20 m。

因船坞深度较深，常规的坞墙结构形式难以满足其受力及变形控制要求，在经过多方案比选后，确定采用格型地连墙坞墙结构方案，船坞坞墙平面布置如图1所示。

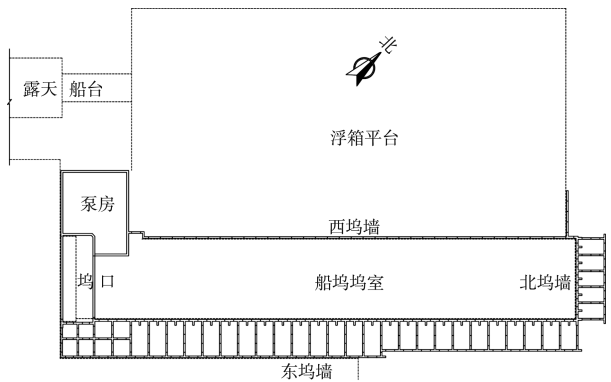
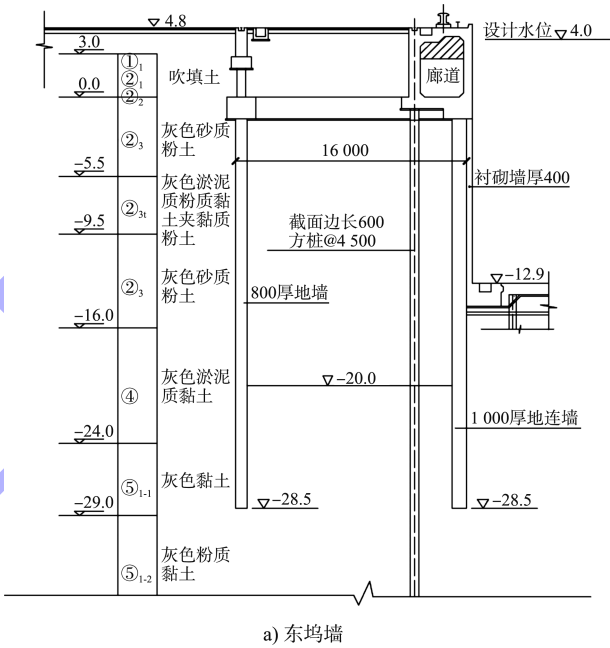


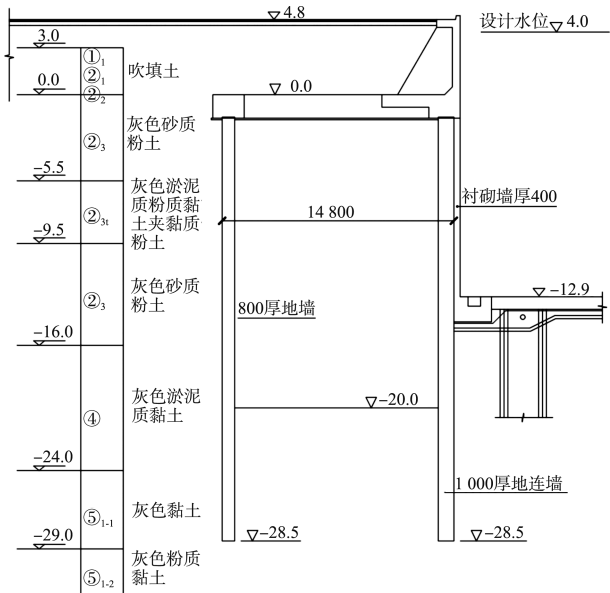
图1 船坞坞墙平面布置

2 设计方案

东坞墙及北坞墙均采用格型地下连续墙结构，墙顶高程为4.8 m，坞底板面高程为-12.9 m，使用期挡土高度为17.7 m，坞墙上设公用廊道。东坞墙格型地连墙因为考虑吊车道桩基，采用宽度为16.0 m；北坞墙格型地墙宽14.8 m；东坞墙南段150 m范围格型地墙内与舾装码头结合在一起考虑，总宽19.2 m，码头前沿设计泥面高程-6.0 m。各坞墙的格型地连墙断面见图2。



a) 东坞墙



b) 北坞墙

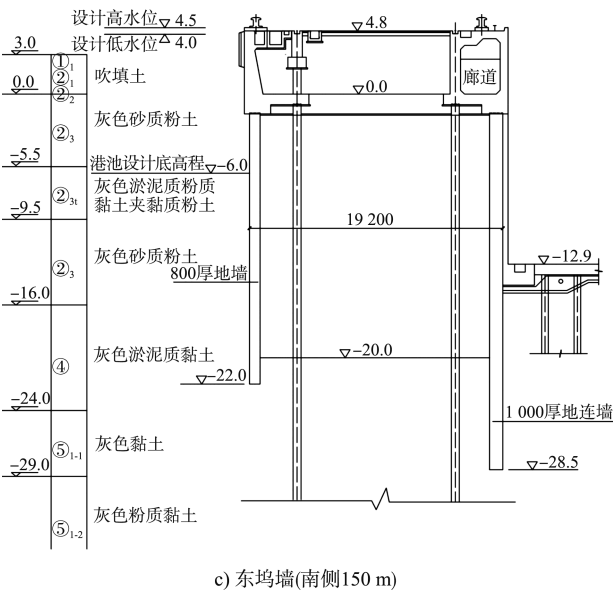


图 2 格型地连墙断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3 格型地墙内力计算方法

3.1 计算假定

选取北坞墙作为典型计算断面进行格型地连墙内力计算。在槽段平面上, 截取一个隔墙间距为计算单元长度。其中前墙、后墙、隔墙模拟成板单元, 顶圈梁模拟成梁单元。由于结构的对称性, 边界设在两个隔墙中间位置, 并且限定边界所有节点沿墙轴线方向的水平位移为零。其中前后墙锁口管接头模拟成铰接, 隔墙中间刚性接头模拟成刚接^[3]。前后墙底只有竖向弹簧。模型平面假定见图 3。

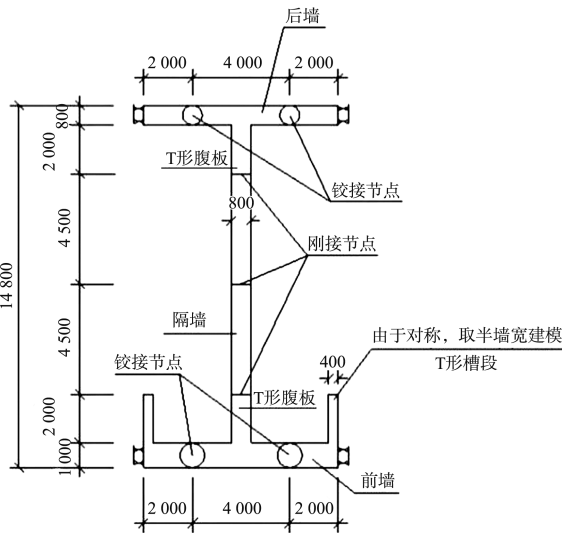


图 3 模型平面假定 (单位: mm)

对于格型地连墙上的土压力, 前墙内侧采用谷仓压力, 土压力自开挖面以下拉直; 前墙外侧采用水平基床系数模拟土抗力, 基床系数开挖面处为 0, 开挖面以下一定深度内三角形分布, 其下按矩形分布。后墙内侧同样采用水平基床系数模拟土抗力, 土抗力弹簧从前墙坑底位置沿土的内摩擦角与后墙相交之处开始; 后墙外侧采用静止土压力。水土分开计算, 水压力直接加在前墙, 模型剖面假定见图 4。

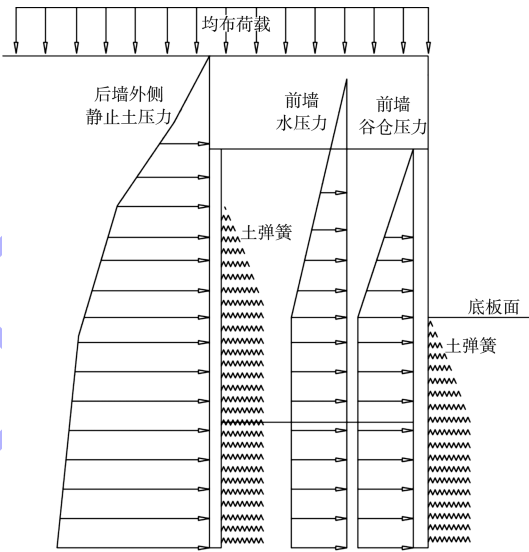


图 4 模型剖面假定

3.2 计算工况及内力结果

作为船坞坞墙的格型地连墙结构, 内力计算主要分施工期及使用期两种工况。

施工期, 卸土至高程 0.0 m, 挖土至 -7.0 m 开始坑外降水, 降水至 -5.0 m。地连墙顶高程为 0.0 m, 坞底板面高程为 -12.9 m, 考虑底板厚度及减压排水系统, 超挖 1.6 m, 即施工期开挖深度为 14.5 m, 且不考虑底板水平约束作用。

使用期, 回填土至高程 4.8 m, 上部结构完成。0.0~4.8 m 填土重力按超载考虑。填土及水荷载对挡墙或廊道的作用力, 以集中力的形式作用在地连墙墙顶。模型中简化挡墙及廊道, 在计算中不考虑其刚度。考虑底板水平约束作用。

计算采用 Super-SAP5 软件, 按空间体系计算, 内力结果见表 1。

表 1 施工期及使用期内力计算结果

阶段	前墙位移/ mm	前墙水平弯矩/ (kN·m)	前墙竖向弯矩/ (kN·m)	后墙位移/ mm	后墙水平弯矩/ (kN·m)	后墙竖向弯矩/ (kN·m)	圈梁弯矩/ (kN·m)
施工期	22	769	436	18	233	202	2 381
使用期	27	888	550	24	273	260	3 333

与一般坞墙由施工期控制的情况不同，由于本工程施工工期从 4.8 m 卸土至 0.0 m，且降水至 -5.0 m，故由使用期工况控制。

4 结构计算的敏感性分析

4.1 中间隔墙深度的敏感性分析

在格型地连墙计算过程中，中间隔墙的深度、前后墙的深度对计算结果有一定影响。为了使工程的设计更为合理，采用 FLAC3D 软件对相关因素进行敏感性分析。

最初中隔墙设计底高程为-18.0 m，为减小前后墙的应力集中现象，将其降低 2 m 至-20.0 m，数值分析结果表明，此举仅在数值上有略微减小，但尚未达到预期效果，为此有必要对结构进一步优化。经多次分析，通过把前后墙 T 形段腹板部分加深，即 T 形地连墙体整体底高程做成一致的构造处理，对前后墙的墙体受力更为有利。前后墙体没有沿高度方向上的刚度突变，因而没有位移上的突变，使得前后墙体的应力集中现象大幅缓和，墙体弯矩分布更为合理。

优化前后格型地墙的应力分布见图 5。可以看出，在降低隔墙深度后，格型地墙的前墙内力最大值减小约 10%，且分布更为均匀，效果较为明显。

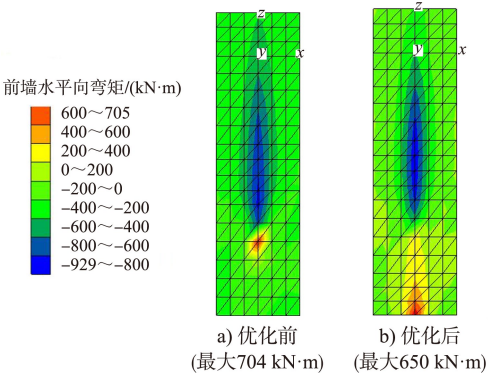


图 5 中隔墙优化前后格型地连墙前墙水平弯矩

4.2 前墙深度的敏感性分析

根据板桩理论，本工程位于砂性较重的土质中，且前墙为刚度较大的地连墙，前墙若作为底端嵌固的工作状态模拟恐怕无法完全真实体现前墙在实际受力中的情况，而采用竖向弹性地基梁的方法模拟介于底端嵌固和底端自由支承二者之间的工作状态是较为可行的。在进一步优化设计过程中，在软件中对前墙深度从 28 m 减小至 26 m，优化前后格型地连墙前墙水平弯矩见图 6。可以看出，结构内力略有减小。

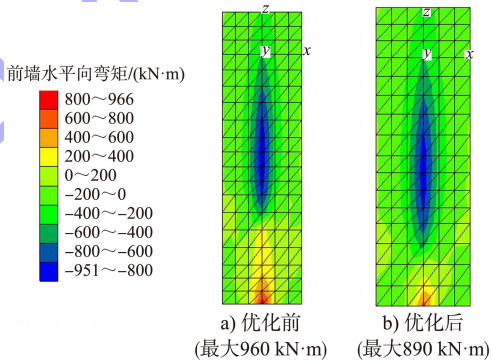


图 6 前墙优化前后格型地连墙前墙水平弯矩

一般的板桩开挖工况，插入比越小，围护的相对位移越大，结构的内力因而越大。此次格构地墙的施工工况中，前墙出现了与预期相反的情况，即插入比越小内力越小。经分析认为，由于格型地连墙的中间隔墙对于前墙前位移的限制。由于中间隔墙的限制，插入比虽然减少，围护的相对位移并不会因此而增大，增大的仅仅是绝对位移，而力平衡点又因为插入比减少而位置向上移动，所以最后出现了内力反而减小的情况。故而在控制整体稳定、同时监控施工期工况内力的基础上，合理减少前墙插入深度，使设计做到更合理、更优化。

5 格型地连墙变形特性三维整体模型分析

5.1 模型构成

为了预测坞室开挖过程中坞墙的变形特性,需要对坞室建立有限元整体模型进行分析。由于坞室的坞墙与泵房、浮箱平台结合在一起形成整体刚度,因此分析坞室整体开挖时需要考虑泵房及西侧浮箱平台结构。另一方面,由于想了解坞室开挖过程中先期开挖的泵房连续墙的变形特性,模型中需要考虑泵房的先期开挖情况。因此,需要建立整体模型考虑坞室的开挖状况。

整体模型采用 Abaqus 有限元分析软件建立(包括东、北格型地墙以及西坞墙及浮箱平台),考虑浮箱平台及泵房基坑,整体模型尺寸为 407 m×255 m×100 m(长×宽×高),可以充分考虑基坑开挖对周围土体扰动的影响。土体采用八节点等参单元;连续墙、地下室各层楼板采用空间板单元模拟;工程桩、格构柱、连续墙圈梁、各道梁支撑及支撑圈梁采用空间梁单元模拟。模型总单元数 13.133 6 万个,总节点数 11.246 4 万个。分析过程中对周围边界约束水平向位移,底部边界位移全约束。整体模型土体开挖见图 7。

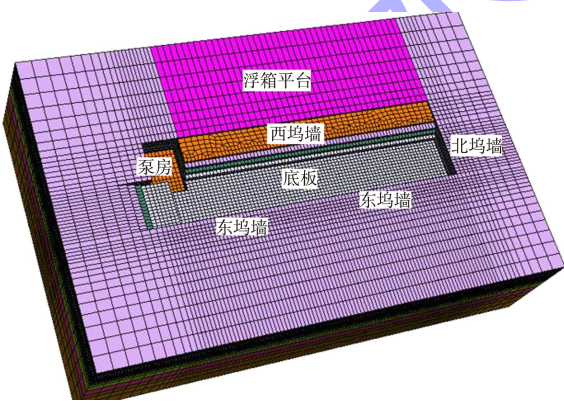


图 7 整体模型土体开挖

5.2 计算参数

卸荷状态下土的工程性质与加荷状态有很大差异。基坑开挖过程中,土体主要是处于卸荷状态,因此,土体的模量应该取其回弹模量。土体竖向回弹模量取其压缩模量的 5 倍,水平向回弹模量为压缩模量的 3 倍。对于开挖面以上的土体,考虑应力诱发各向异性,通过试算,确定水平向

回弹模量取压缩模量的 2 倍。由于结构构件的刚度相对土体较大,所以也相应地假定为线弹性材料。土层计算取值见表 2。

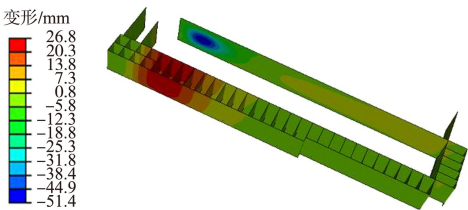
表 2 各土层计算取值

土层编号	层厚/m	密度/(t·m ⁻³)	压缩模量 E _s /MPa	水平回弹模量/MPa	竖向回弹模量/MPa
①	3.0	1.88	9.79	48.95	19.58
② ₃	6.0	1.84	6.68	33.40	13.36
② _{3t}	3.5	1.79	5.47	27.35	10.94
② ₃	7.1	1.84	6.68	33.40	20.04
④	7.4	1.68	2.28	11.40	6.84
⑤ ₁₋₁	5.0	1.74	2.98	14.90	8.94
⑤ ₁₋₂	8.0	1.80	4.33	21.65	12.90
⑤ ₃₋₁	9.0	1.80	4.70	23.50	14.10
⑤ ₃₋₂	14.0	1.83	5.92	29.60	17.76
⑨	40.0	1.95	18.65	93.25	55.95

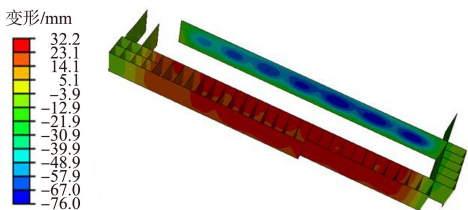
5.3 施工期计算分析

5.3.1 土体及连续墙变形

由于坞室基坑开挖过程中没有任何内部支撑,特别是西侧的坞墙,仅依靠坑外卸土以及 30m 宽浮箱平台限制其自身变形,可能会发生较大变形,坞室 1、2 区开挖结束及全部开挖结束坞墙变形见图 8。可以看出,坞室分区开挖过程中,沿坞室长度方向的坞墙侧向变形也分区发展。其中西侧的坞墙变形较大,且最大侧向变形发生在基坑开挖面附近;东侧的格型地下连续墙整体刚度较大,因此其侧向变形整体向坑内移动,没有明显的最大、最小变形。



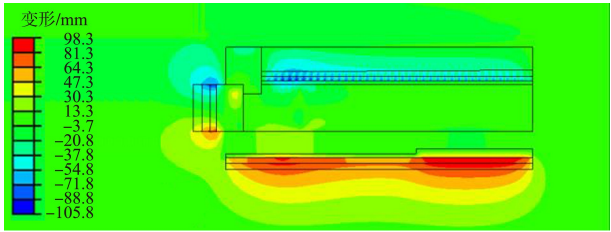
a) 坞室1、2区开挖结束



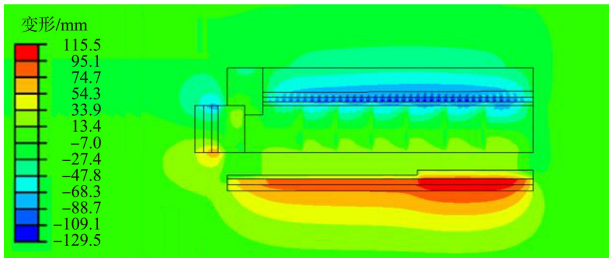
b) 坞室区全部开挖结束

图 8 坞室分区开挖的坞墙变形

开挖过程中土体的侧向变形见图 9。可以看出，随着坞室基坑的开挖，坞墙周围的土体侧向变形开始发展，由于坞室为分区开挖，开挖结束时土体侧向变形也呈现区域性。



a) 坞室1、2区开挖结束



b) 坞室区全部开挖结束

图 9 开挖过程中土体的侧向变形

5.3.2 位移实试验验证分析

由施工工况可知，坞室开挖过程中由于坞室内部没有任何支护，而且分区开挖过程中直接挖至坞底后浇筑底板，势必导致西坞墙产生指向坑内的较大变形。而东坞墙由格型墙构成，因此整体刚度很大，加之墙后有卸土，其指向坑内的变形较小，比较安全。

为了能直观地表示坞墙整体的变形情况，选取每个分区的中心位置作为一个测点，各分区测点依次为测点 1~7，测点平面布置见 10。

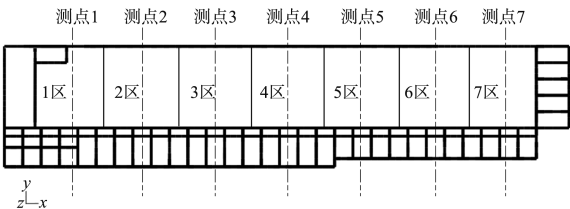


图 10 观测点布置

同时对于格型地下连续墙的侧向变形也采用各分区中心位置，对应测点 1~7。各分区测点的

变形情况如图 11 所示。

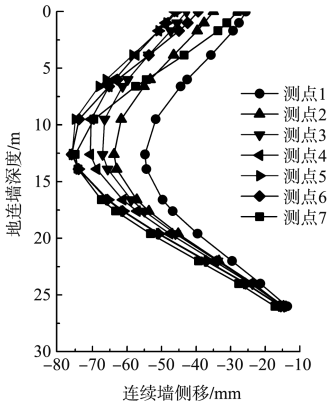
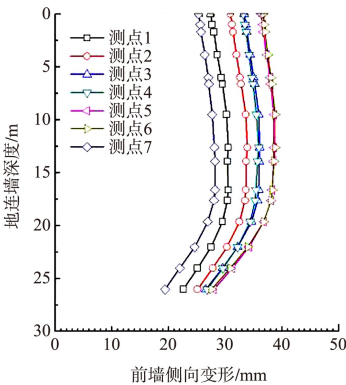


图 11 坞室开挖结束坞墙各测点位移

由图 11 可见，各分区开挖后，其对应的西坞墙达到一定变形，最大位移位于开挖面附近。随着坞室的继续开挖，已经开挖的分区对应的坞墙变形继续发展，其发展规律为：开挖面以上部分变形继续增大，而开挖面以下部分基本保持不变。坞室开挖结束后，由各测点变形对比可见，最靠近泵房的测点 1 侧移最小，坞墙中部的测点 4、5 侧移最大。这主要是由于西坞墙两端分别与泵房及格型墙相连，其变形受到约束，充分体现了基坑变形的空间效应。

坞室开挖结束格型地下连续墙前墙与后墙各测点的侧向变形见图 12。可以看出，实测结果很好地验证了模型计算结果的变形趋势。格型地连墙因几何形状特殊而具有很大的整体刚度，其前墙与后墙各测点沿连续墙深度方向变形基本一致，只有在地连墙底端没有隔墙的作用，地连墙变形才与上部有一定差异。



a) 前墙

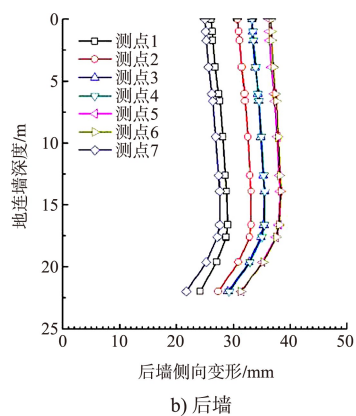


图 12 坞室开挖结束前墙及后墙侧向变形

由于坞室基坑长度很大, 因此格型地下连续墙侧向变形具有一定的空间效应, 位于基坑两端的测点 1 和 7 的侧向变形较其他测点小。格型地下连续墙沿长度方向不等宽(5、6、7 区格型墙宽度较小), 其中 5、6 区格型地下连续墙的侧向变形最大, 3、4 区其次, 2 区较小, 基本反映了格型地下连续墙的空间变形效应。另外, 格型地下连续墙本身刚度较大导致其最大侧向变形仅为 38.8 mm。

5.4 使用期计算分析

船坞坞室开挖结束, 格型墙后进行土体回填的高度与格型墙墙顶高度一致。使用期间墙后土体回填以及使用荷载的作用, 使得格型地连墙的变形较施工期进一步发展, 见图 13, 格型地连墙在回填土及堆载的作用下, 最大位移由坞室开挖结束时的 32.15 mm 发展为 40.95 mm。

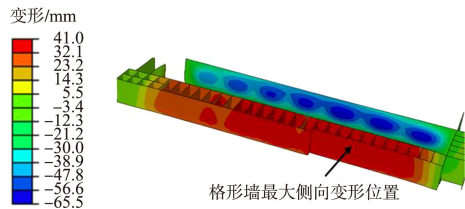


图 13 使用期地连墙侧向变形

格型地连墙前墙与后墙在施工结束和使用期的侧向变形见图 14。可以看出, 墙后回填土以及使用荷载的施加使得地连墙的变形进一步发展, 但由于整体结构刚度较大, 且坞室底部大底板的存在限制了坞室底部地连墙的变形, 使用期的变

形与施工结束时相比没有较大增加。坞室底板刚度较大限制了格型墙的侧向变形, 导致最大侧向变形发生于底板以下。格型地下连续墙最大侧向变形由 27.1 mm 增大至 35.5 mm, 最大侧向位移仅增加 8.4 mm, 而底板以下位移较墙顶位移增大得较多, 墙顶位移较施工完成时增大了 20.3%, 墙底位移较施工完成时增大了 53%。

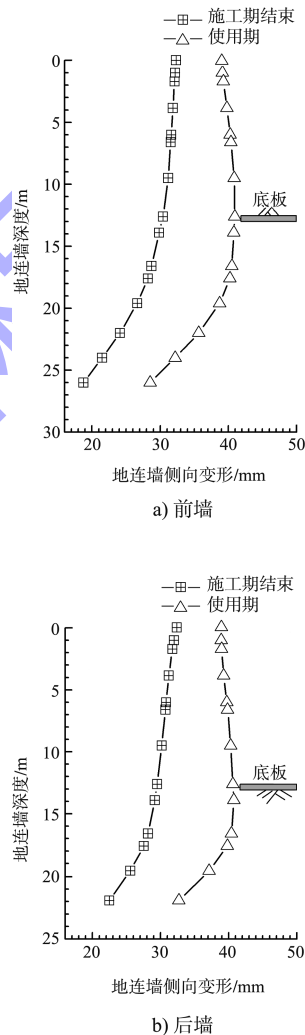


图 14 施工期结束格型地连墙侧向变形最大位置变形发展

5.5 综合分析

1) 坞室基坑东坞墙采用了格型地连墙的形式, 由前、后墙以及隔墙构成很大的整体刚度; 而且在坞室开挖过程中坑外进行了开挖卸荷, 因此坞室基坑开挖过程中格型地连墙侧向变形较小, 最大侧移仅为 38.8 mm。另外, 隔墙的存在使得格型地连墙竖向抗弯刚度大幅提高, 隔墙范围内前、

后墙沿深度的侧向变形差异不大。

2)使用期格型地连墙受回填土及使用荷载的影响,其变形进一步发展。使用期格型地连墙最大侧向变形增大至 41 mm,其最大侧移发生位置由地连墙顶下移至坞室底板以下。

6 结语

1)本文探讨研究格型地连墙在超深船坞坞墙结构中的整体建模计算方法,为同类型项目的设计提供了工作思路和方法,对采用格型地连墙挡土的永久结构设计技术进步起到了积极的推动作用。

2)通过对格型地连墙中间隔墙、前墙深度等因素的敏感性分析,总结各个因素对格型地连墙结构受力的影响,对同类型结构设计和尺寸确定

提供借鉴和参考。

3)通过建立整体三维模型,与实测数据对比东西侧坞墙在坞室开挖过程中的变形特性,验证了格型地连墙相较于传统挡土结构具有刚度大、位移小的优点,明确了其在超深船坞工程中的适用性。

~~~~~  
(上接第 150 页)

3)依托长江干线武汉—安庆段 6 m 水深航道整治工程,将构件级模型与工程进度、质量和投资信息关联,通过三维可视化的效果,既能展示当前进度、质量、投资执行情况,也可以清晰反映项目目标动态控制的全过程。

参考文献:

[1] 谭昆,何传金,周生利.动态管理在长江航道整治工程中的应用[J].水运工程,2012(10):169-175.

[2] 倪寅.BIM 技术在水运工程中的应用[J].水运工程,2018(4):128-133.

[3] 何洋,唐明,夏冬,等.BIM 技术在黑沙洲航道整治二期工程中的应用[J].水运工程,2017(S2):70-74.

[4] 李国杰,刘松,郭涛,等.BIM 技术在航道整治工程全生

参考文献:

[1] 顾倩燕.船坞工程结构设计技术创新与实践[J].水运工程,2011(1):75-86.

[2] 李小军,顾倩燕.中船长兴造船基地水工构筑物设计关键技术[J].水运工程,2009(S1):43-49.

[3] 赵洪琼.新型十字钢板接头在超深格形地下墙中的设计应用[J].建筑技术开发,2015,42(6):54-57.

(本文编辑 王璁)

命期的应用[J].水运工程,2018(8):118-122,134.

[5] 董思远,范海文,张金刚.BIM 技术在内河航道工程中的应用[J].水运工程,2019(11):127-132.

[6] 钱丽,刘松,孙子宇,等.BIM 技术在水运基础设施的应用及发展战略[J].水运工程,2017(10):80-85.

[7] ATKINSON R.Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria[J].International journal of project management, 1999(17):37-42.

[8] 刘尔烈,张艳海.建筑施工项目进度、成本和质量目标的综合优化[J].天津理工学院学报,2001(2):90-93.

[9] 赵瑞,刘晓君,申金山.建设项目多目标优化方法研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(6):858-862.

(本文编辑 郭雪珍)