DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.03.045

北江清远枢纽二线船闸基坑关键技术研究

高君杰[1]，郑跃[2]

（1. 广东省北江航道开发投资有限公司，广东 广州 510000；2. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210000）

摘　要：清远枢纽二线船闸工程，由于周围复杂环境的制约，船闸主体建筑物的基坑需采用带撑支护结构对其进行支护，本文介绍了带撑深基坑[1]支护设计方案、施工步骤及要求，并采用有限元软件 Plaxis 对其进行数值模拟，模拟结果与实际监测数据进行对比分析，为类似工程提供了一定的参考。

关键词：带撑支护结构；深基坑；支护设计方案；数值模拟；对比分析

中图分类号：U61　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）03-0134-03

1 船闸工程概况及特点

1.1 船闸工程概况

新建清远水利枢纽二线船闸建设规模：按1000 吨级船闸（Ⅲ级船闸）建设，船闸有效尺度为 220m × 34m × 4.5m（闸室有效长度 × 闸室有效宽度 × 槛上水深）。通航净高为 10m。考虑过坝货运量需求，将新建清远水利枢纽二线船闸按照单线船闸设计。

二线船闸布置在一线船闸右岸、两闸中心距 90m。二线船闸上闸首与右岸船闸上闸首及门库段前沿（坝轴线）平齐，上闸首左侧通过地连墙支护与现有一线船闸门库段相连接，右侧与清远水利枢纽土坝相连接。

1.2 船闸基坑工程特点

根据本项目工程地质报告、船闸建设方案以及周边建筑物分布情况，本船闸基坑围护工程具有如下特点：

（1）本基坑纵向长度约为 517m，横向宽度为 65.5m。

（2）本基坑最大开挖深度为 22.52m，属深基坑，基坑最大水头差为 22.05m。

（3）本基坑位于原一线船闸的右侧，与一线船闸平行，两闸中心距 90m，

（4）本基坑开挖影响范围内土层自上而下大致为填砂、中粗砂、淤泥质粉质黏土混粉砂、卵石土、中风化灰岩，不良地质现象主要为岩溶，场地区粘性土混粉砂，较多表现为流塑～软塑，地基承载力差，开挖后边坡稳定性也相对较差，易发生边坡坍塌等不良地质现象，局部粉砂含量较多处，存在管涌、流砂的可能性。

2 工程地质及水文地质

根据建设场地地质勘察报告，船闸基坑开挖范围内土层至上而下构成如下：①素填土：软塑，土质不均，局部含碎石，层厚约 0.5m~2.5m；②填砂：稍湿，松散～稍密，层厚约 2.0~19.0m；③卵石土：中密～密实，地基承载力较好，渗透性强，层厚约 3.0~9.0m；④中风化灰岩：岩芯呈柱状，局部呈块状，溶洞较发育，层厚约 8.0~19.0m，场地地质参数见下表。

表 1　地质参数表

土层	密度（$t·m^{-3}$）	φ（°）	C（kPa）	压缩模量 E_s（Mpa）
素填土	1.91	13.5	12	4.8
填砂	1.9	22	0	12.0
卵石土	2.02	36	0	32.0
中风化灰岩	2.76	50	70	80.0

3 基坑支护设计及关键技术

3.1 施工导流标准

上游全年围堰位于枢纽右岸土坝上游库内，施工导流标准按清远水利枢纽土坝设计标准，即上游围堰建筑物级别为 2 级，洪水标准为 50 年一遇设计，300 年一遇校核。

下游全年围堰为枢纽右岸土坝下游，下游围堰建筑物级别为 4 级，考虑到清远水利枢纽实测水文资料可靠，且上游有飞来峡水利枢纽防洪调度，洪水标准为 10 年一遇，相应坝下水位为▽ 12.91m。

3.2 基坑支护方案

本项目基坑支护由上游导航墙段、上闸首段、闸室段、下闸首段和下游导航墙段组成，本文以闸室段基坑支护为例。闸室段支护结构采用地下连续墙 + 钢筋混凝

土支撑系统的设计方案，地下连续墙混凝土强度等级为C30。基坑典型断面见下图。

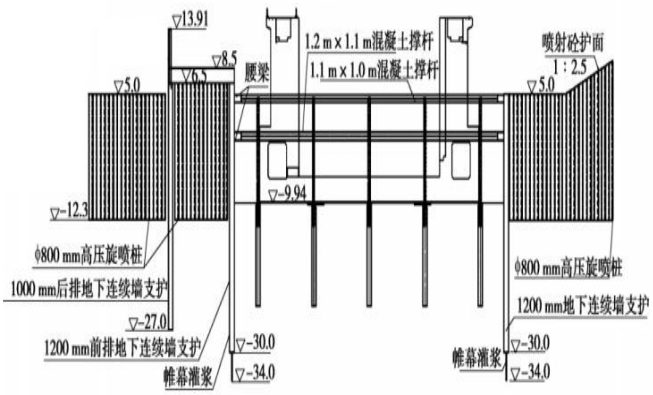

图 1　清远二线船闸闸室段基坑典型断面图

3.3 水平支撑体系

本基坑内支撑主要采用水平对撑、八字斜撑、联系梁等组合桁架形式，为土方的挖运和施工提供较为开阔的空间。本基坑内支撑设计为两层。支撑砼构件强度等级为 C40。对撑最大间距 8.5m，最小间距 4.25m，具体支撑信息见表 2。

表 2　闸室钢筋混凝土支撑信息表

项目	冠梁腰梁 (mm×mm)	主撑 (mm×mm)	八字撑 (mm×mm)	连杆 (mm×mm)	支撑中心高程 (m)
第一道支撑系统	1600×1000	1100×1000	800×800	800×800	4.35
第二道支撑系统	1600×1100	1200×1100	800×950	800×800	-0.74

3.4 水平支撑系统施工步骤

第一步：开挖至第一道支撑底高程，其后浇筑第一道冠梁和支撑

第二步：待第一道支撑达到设计强度的 100% 后，分层、分块、对称、平衡地开挖至第二道内支撑底高程，并浇筑第二道钢筋混凝土腰梁和支撑；

第三步：以此类推，开挖至基底，及时浇筑底板。

4 数值模拟分析

4.1 模型建立

数值模拟计算采用 Plaxis 有限元软件。根据实际尺寸，分别建立各个控制断面的数值模型。各岩土层均采用弹塑性模型，屈服准则参考相关文献采用 Mohr-Coulomb 准则，地下连续墙及内撑结构采用弹性模型，水平与竖向边界均采用位移约束边界。结合基坑开挖全过程，在初始应力场下进行逐步开挖。边界条件为：模型的侧面和底面为位移边界，限制侧面水平位移，限制底面竖直位移；上面为原地面，取为自由边界，其中典型断面模型如图 2。

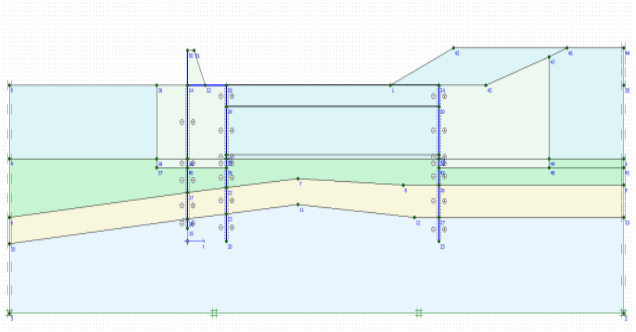

图 2　闸室段典型断面有限元模型图

地连墙和钢筋混凝土水平支撑的单元参数详见下表。

表 3　结构单元参数表

结构名称	尺寸（mm）	单元类型	密度（tm^{-3}）	弹性模量（KNm^{-2}）	泊松比	惯性矩（m^4）
地连墙	1200	板	25	3×10^7	0.3	0.144
第一道撑	1100×1000	梁	24	3×10^7	0.17	-
第二道撑	1200×1100	梁	24	3×10^7	0.17	-

4.2 施工过程的模拟

基坑在施工过程中工序繁多，工艺也比较复杂，施工时既需要理顺基坑施工各工序间的先后顺序[3]，又需要确定基坑施工和主体结构施工之间的顺序。该模型模拟的施工过程为利用设计水位生成初始孔压→利用“K0过程”生成初始应力→激活各土层单元→激活地连墙单元→激活第 1 道内支撑体系→依次开挖土体并激活内支撑直至坑底。在基坑每层土开挖前，需把坑内地下水位降到开挖面以下 0.5m。计算工况为两个最不利工况（①对于左岸地连墙最不利工况：左岸外侧水位▽ 12.91m，右岸外侧水位▽ 4.5m，内侧水位基坑底以下 0.5m；②对于右岸最不利工况：左岸外侧水位▽ 5.0m，右岸外侧水位▽ 4.5m，内侧水位基坑底以下 0.5m）进行计算。

5 监测数据分析

根据现场对应监测点的监测数据，与数值模拟计算值进行对比分析，本文对闸室挡水侧（左岸）前排地连墙水平位移、闸室非挡水侧（右岸）地连墙水平位移和水平撑轴力进行对比分析，具体对比值详见以下图表。

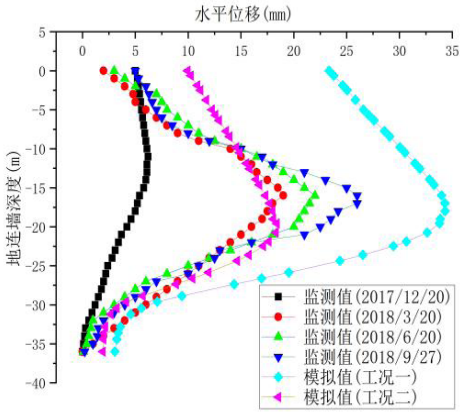

图 3　挡水侧（左岸）前排地连墙水平位移图

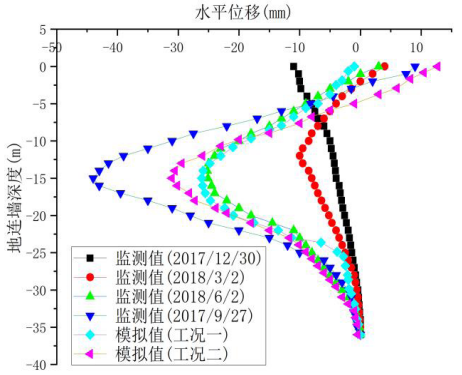

图 4　非挡水侧（右岸）地连墙水平位移图

表 4　每道撑轴力值对比表

测点	轴力值（KN）	
	监测值	模拟值
Y1-15	-5413	-4444
Y2-15	-10305	-7395

由以上图表可以看出，地连墙的水平位移特性表现为中间大、两端小的弓形特征，该特征符合典型的深厚软弱土中带内支撑开挖基坑地连墙的变形规律，随着时间和开挖深度的增加，地连墙的最大水平位移逐渐下移，最终移到基坑底部位置附近。挡水侧（左岸）前排地连墙最大水平位移各工况模拟值为 34.3mm、18.4mm，其各时间点监测值分别为 6.2mm、19.1mm、22.3mm、25.2mm，模拟值与监测值大致符合；非挡水侧（右岸）地连墙最大水平位移各工况模拟值为 26.2mm、31.1mm，其各时间点监测值分别为 11.0mm、10.3mm、25.2mm、44.0mm，由于右岸监测水位没有到达设计洪水位，故监测值最大水平位移大于模拟值最大水平位移，整体变形趋势与监测值大致符合；每道撑的轴力值模拟值与监测值相比都相对较小，是由于模拟值没有考虑温度应力对水平支撑轴力的影响，若采用支撑因温度产生的附加轴力公式对模拟值进行修正，其计算结果为第一道撑轴力值为 5544kN，第二道撑轴力值为 11355kN，与监测值基本符合。

6 结语

本文在分析了依托工程的工程地质和水文地质特点的基础上，对带撑深基坑支护设计方案、施工步骤及要求进行了总结，并研究了关于深基坑内撑施工的关键技术，主要包括：

（1）本文提出了水平支撑系统的施工步骤、立柱施工定位控制要求以及水平支撑施工的控制要素。

（2）本文利用有限元软件 Plaxis 对依托工程的闸室段基坑支护进行了模拟，模拟结果得出：设计水平支撑计算轴力时应适当考虑温度应力对内撑轴力的影响，这样与实际监测的数据更加吻合，这对实际工程应用有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 徐彦举 . 富水软土区紧邻既有运营地铁车站深基坑设计关键技术研究 [J]. 市政技术 ,2021,39(06):63-68.

[2] 崔青玉 . 复杂城市环境下地铁深基坑设计关键技术研究 [J]. 现代城市轨道交通 ,2021(07):67-73.

[3] 杨琛 , 苟学登 , 苏轩彬 , 等 . 深厚软土地层深基坑降水方案设计与施工关键技术研究——以绍兴市轨道交通 2 号线越王路站为例 [J]. 中国建材科技 ,2021,30(02):102-104.

[4] 邵晨晨 . 复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术 [J]. 钻探工程 ,2021,48(06):102-108.

[5] 王卫东 , 刘国彬 , 徐中华 , 等 .《基坑工程手册》第二版 [Z].2009.