

基于数值模拟的超深基坑降水设计与应用

商兆涛

芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站, 安徽 芜湖 241000

[摘要] 针对安徽沿长江流域的复杂水文地质条件, 以沿江某过江隧道工作井开挖为例, 深基坑临近长江, 地下水在长江河道区直接与江水相通, 地下水丰富、水位高, 渗透性、富水性良好, 基坑开挖过程中由于水压的作用, 地下水可能会从围护结构缺陷处渗入基坑, 造成流水流砂甚至基坑底管涌现象, 基坑降水的成败极易影响基坑自身稳定及施工人员安全。文章详细介绍了该工程超深基坑降水设计思路及方法, 通过数值模拟确定了基坑涌水量及井数等关键技术参数, 对类似地质条件、场地环境的超深基坑降水工程有一定的参考意义。

[关键词] 超深基坑; 降水设计; 数值模拟。

DOI: 10.33142/ec.v2i7.508

中图分类号: TU753.66;TU433

文献标识码: A

Design and Application of Ultra-deep Foundation Pit Dewatering Based on Numerical Simulation

SHANG Zhaotao

Wuhu Railway (Tunnel) Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Anhui Wuhu, 241000 China

Abstract: In view of the complex hydrogeological conditions along the Yangtze River Basin in Anhui Province, taking the excavation of a tunnel along the Yangtze River as an example, the deep foundation pit is close to the Yangtze River. The groundwater is directly connected with the river water in the Yangtze River area, the groundwater is rich, the water level is high, the permeability is good, and the groundwater may infiltrate into the foundation pit due to the action of water pressure in the excavation process of the foundation pit. Due to the phenomenon of flowing sand and even piping at the bottom of the foundation pit, the success or failure of foundation pit dewatering can easily affect the stability of the foundation pit and the safety of the construction personnel. In this paper, the design idea and method of ultra-deep foundation pit dewatering are introduced in detail, and the key technical parameters such as foundation pit water inflow and well number are determined by numerical simulation, which has certain reference significance for ultra-deep foundation pit dewatering project with similar geological conditions and site environment.

Keywords: Super deep foundation pit; Dewatering design; Numerical simulation

1 工程概况

安徽某过江隧道起于江北规划新民路, 沿滨江大道南线位布线, 在长江大堤内向拐向东南方向, 穿越长江后在江南接大工山路, 路线终点位于中山南路交口前 190m 处, 隧道全长 5956m。江北工作井及明挖段包括江北工作井、江北明挖暗埋段、江北敞开段, 设计里程 YK1+900~YK2+422.6, 全长 522.6m, 围护结构采用地下连续墙、SMW 工法桩, 主体结构采用明挖顺作法施工, 主线明挖暗埋段采用双向六车道+中间管线廊道的横断面布置, 明挖敞开段采用 U 型结构。

江北工作井设计里程 YK2+357.1~YK2+422.6。工作井外包尺寸 25.5m×45.8m, 基坑开挖深度为 27.4m, 采用 1.2m 厚 51.5m 深地下连续墙作围护结构, 支撑体系采用 4 道钢筋混凝土支撑+1 道钢支撑。NMW14 地下连续墙入岩, 宽 31.773~33.594m, 深 22.275~23.959m, 长 42.4m, 4 层混凝土撑, 工作井采用明挖顺作法施工, 工作井内部净尺寸 41m×20.2m, 工作井总建筑面积 9038.86m², 共分为四层。基本情况见表 1:

表 1 工作井基本概况

| 里程 | 基坑深度 | 基坑宽度 | 支护类型 | 支撑形式 |
|--------------------|-------|-----------|------------|-------------------|
| | (m) | (m) | | |
| YK2+400~K2+422.6 | 27.4 | 45.8 | 1200mm 地连墙 | 4 道钢筋混凝土支撑+1 道钢支撑 |
| YK2+357.1~K2+399.5 | 22~24 | 30.3~34.8 | 1000mm 地连墙 | 4 道混凝土支撑 |

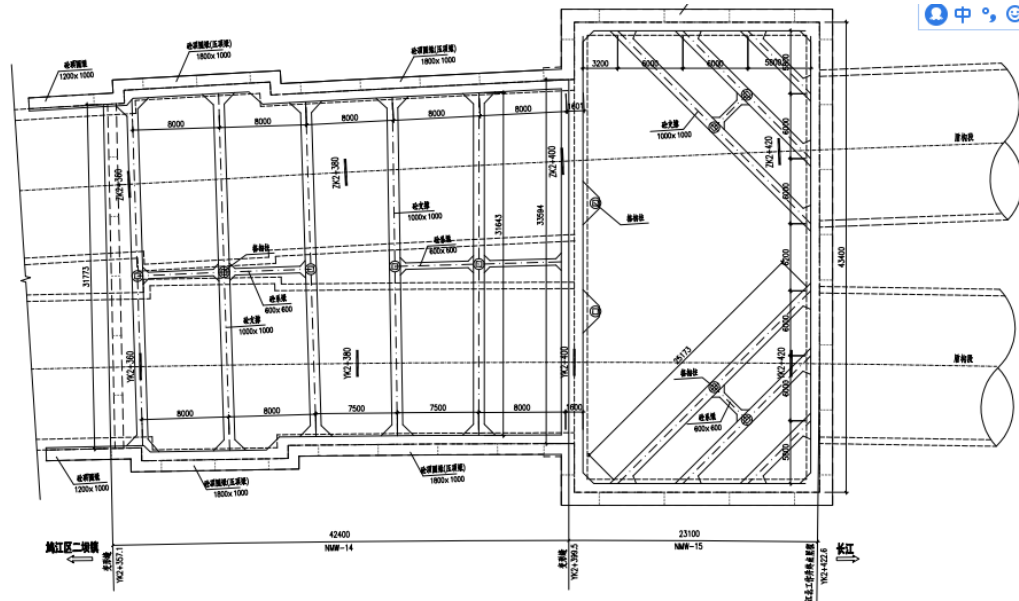


图1 工作井基坑平面图

2 工程与水文地质条件

2.1 工程地质

江北工程场区地貌属长江中下游冲积平原，场区覆盖层主要以第四系全新统长江冲（洪）积层（长江冲积平原）为主，覆盖层总体厚度发育较厚，厚度在 49m~55m 左右，岩性呈较为典型的二元结构，以流塑状淤泥质土、稍密~中密状粉、细砂为主，底部为基岩。

2.2 水文地质

对本工程有影响的地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙潜水，主要含水层为（5）粉砂、（6）细砂层，根据详勘地质纵断面图，含水层底板埋深约为 47m~48m，水位标高约为 3.8~5.3m（地表整平标高 5.5m）。地下水在长江河道区直接与江水相通，渗透性和富水性良好，近长江处水位随江水位变化明显。

3 工程难点分析

3.1 基坑深度大、承压水头高

工作井深度 27.4m，属于危险性较大的深基坑工程，整个施工过程要确保基坑自身稳定及施工人员安全。基坑临近长江，地下水丰富、地下水位高，采用明挖法施工。基坑开挖过程中由于水压的作用，地下水可能会从围护结构缺陷处（接缝处夹泥、地连墙开叉）渗流入基坑，造成流水流砂甚至基坑底管涌现象；或者基坑底出现突涌事故，危及自身稳定及施工人员安全。

3.2 基坑跨度大

江北工作井及明挖段，基坑宽度 29.5~47.4m、开挖深度最深处 27.4m。内支撑体系第 1 道为混凝土冠梁+混凝土支撑，剩余第 2~5 道为 $\phi 609 \times 16$ mm 钢支撑或者混凝土支撑。基坑跨度大，开挖结构施工时间长，确保基坑变形可控、安全是重难点。

4 降水方案设计

4.1 设计思路

对本工程有影响的地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙潜水，主要含水层为（5）粉砂、（6）细砂层，根据详勘地质纵断面图，含水层底板埋深约为 47~48m，水位标高约为 3.8~5.3m（地表整平标高 5.5m）。地下水在长江河道区直接与江水相通，渗透性和富水性良好，近长江处水位随江水位变化明显。工作井及整体始发明挖段（NMW14~ NMW15）围护结构已经深入到含水层下部的基岩，可以理解为含水层被隔断，降水类型为坑内疏干降水，但通常情况下，50m 深的地连墙常会出现止水缺陷，所以不能把该段视为完全隔水，降水设计必须考虑其渗漏。

根据水文地质条件及工程特征，结合类似工程降水经验，设计采取以下策略：

(1) 在基坑内布置管井降水, 将地下水位降低至开挖面以下 1.0m 的同时, 对开挖范围内地层进行有效疏干。

(2) 降水井滤管主要布置在基坑底板以下, 底板以上为实管, 便于后期封井; 同时为增加地层的垂向渗透性能, 降水井全孔回填滤料, 对开挖范围内地层起到引渗疏干效果。为增加疏干效果, 可取部分疏干井在开挖面以上加设滤管。

(3) 坑外设置水位观测兼备用井, 具有三重作用: ①平时作为坑外水位观测井使用, 监测坑外水位变化情况, 并提前判断围护结构止水效果; ②一旦围护结构出现渗漏或者管涌, 且因坑外水头压力过大难以封堵时, 可开启坑外备用井适当降低坑外水头压力后进行封堵, 避免问题的进一步恶化; ③根据工程经验, 围护结构实际施工时, 达不到 100% 的止水效果, 当坑外水位降深过大时, 可对坑外井进行回灌, 控制坑外水位降深。

(4) 基坑开挖过程中, 需严格保护好降水井, 降水井仅靠砼支撑布置, 制作维护平台, 开挖过程中井管保留至封井结束。

(5) 降水井正式施工前, 进行现场抽水试验, 验证降水方案; 正式开挖前, 进行生产性验证抽水试验, 确保水位能满足开挖要求。

4.2 水文地质概念模型

根据已有的岩土工程勘察报告、水文地质条件、钻孔资料, 模拟区平面范围按下述原则确定: 以基坑为中心, 边界布置在降水井影响半径以外。因模拟范围较小, 场地离水文地质自然边界较远, 为了克服边界的不确定性对计算结果造成的影响, 以基坑各边向外扩展约 800m 人为设定为定水头补给边界, 模拟区范围为 2000m×1650m, 见图 4.2-1。

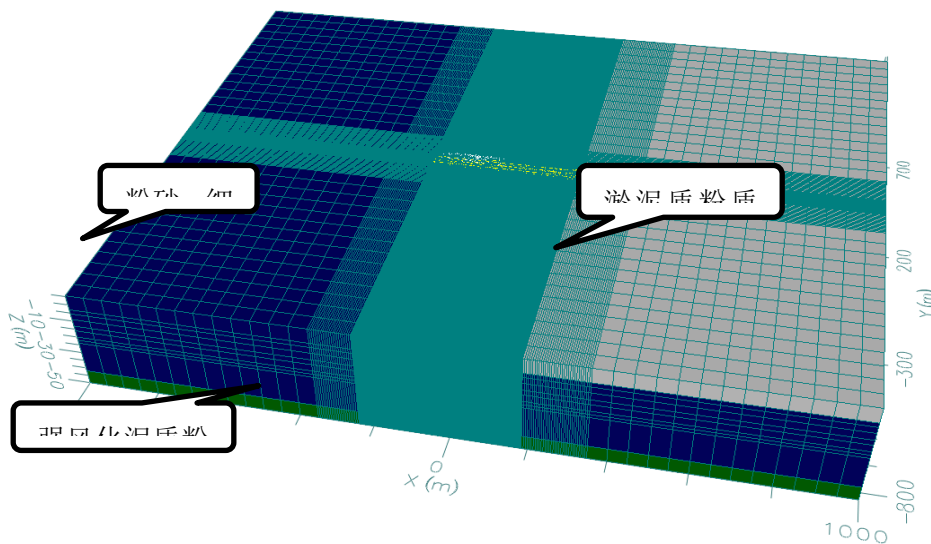


图 4.2-1 三维模型含、隔水层概化图

剖面上, 根据勘察资料, 将场区在垂向上概化为 3 个模拟层, 自上而下分别为:

第 1 层为 (2)1 淤泥质粉质粘土层 (NMW11 节往小里程方向缺失);

第 2 层为 (5) 粉砂、(6) 细砂组成的潜水含水层;

第 3 层为 (7)3-2 强风化泥质粉砂岩。

4.3 地下水流模型

由于围护所形成的含水层的边界条件影响, 降水设计采用解析法不易计算, 采取数值法效果较好。本次采用 Visual MODFLOW 软件根据围护及开挖状况, 分 3 段进行计算。根据以上建立的概念模型, 在不考虑水的密度变化的前提下, 可以给出相应的地下水流数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\text{其中 } E = \begin{cases} S & \text{承压含水层} \\ S_y & \text{潜水含水层} \end{cases}; \quad T = \begin{cases} M & \text{承压含水层} \\ B & \text{潜水含水层} \end{cases}; \quad S_s = \frac{S}{M}$$

式中： K_{xx} 、 K_{yy} 和 K_{zz} 为平行于主轴 x 、 y 和 z 方向的渗透系数 (L/T)； W 为单位体积流量，用以代表流进或流出的源汇项 (m^3/d)； h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水位 (m)； S_s 为储水率 (1/m)； S 为贮水系数； S_y 为给水度； M 为承压含水层厚度 (m)； B 为潜水含水层厚度 (m)。

初始条件：

$$H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, 0) \quad (x, y, z) \in \Omega$$

边界条件：第一类边界条件：

$$H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1$$

第二类边界条件：

$$K \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t)$$

其中： Ω 为立体时间域； $H_0(x, y, z, 0)$ 为研究区各层初始水头值； $H_1(x, y, z, t)$ 为研究区各层第一类边界 Γ_1 上的已知水头函数 (L)； $q(x, y, z, t)$ 为第二类边界 Γ_2 上的单位面积法向流量 [L^2T^{-1}]；对于隔水边界， $q = 0$ 。

4.4 模型参数

4.4.1 渗透系数

地下水数学模型涉及的模型参数主要为渗透系数 (K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz})，其值的大小直接决定概念模型与实际水文地质模型的拟合程度以及基坑涌水量预测的大小。本次结合地层经验参数、地勘资料等，充分考虑地层的各向异性，模型参数取值见表 4.4-1。

表 4.4-1 各模型概化层渗透系数取值表

| 概化层 | 主要地层 | K_{xx} (m/d) | K_{yy} (m/d) | K_{zz} (m/d) | 备注 |
|-------|------------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 第 1 层 | (2) 1 淤泥质粉质粘土 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 弱透水层 |
| 第 2 层 | (5) 粉砂、(6) 细砂 | 20 | 20 | 5 | 潜水含水层 |
| 第 3 层 | (7) 3-2 强风化泥质粉砂岩 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 基岩 |

4.4.2 围护结构

在模型中，利用 Wall 模块来表征围护结构，可设置墙的厚度及渗透性能。

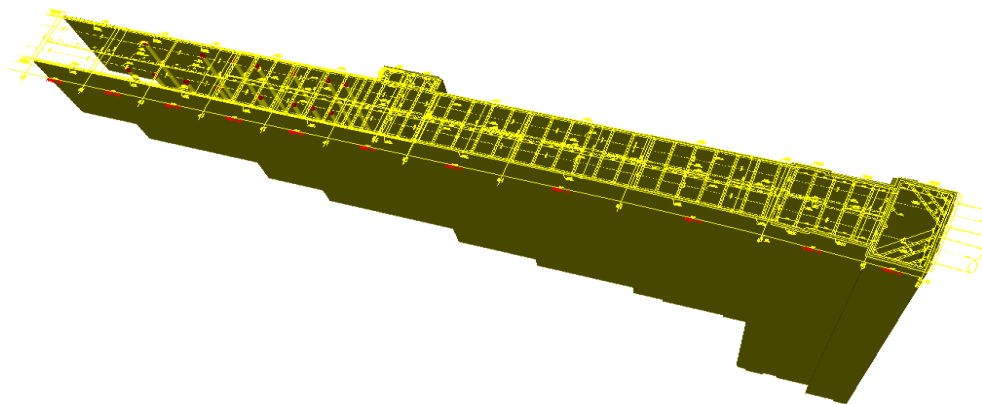


图 4.1-5 围护结构三维概化图

4.5 源汇项

(1) 边界条件

本次对模型边界人为设置为定水头边界，根据勘察资料，初始地下水位按标高+5.0m考虑。

(2) 降水井

在 Visual Modflow 软件中，抽水井可设置过滤器长度、层位、抽水量等参数，与实际数据具有很强的对比性。

根据《管井技术规范》，降水井的单井出水能力可按下式进行计算：

$$q' = 120\pi r l \sqrt{k}$$

式中： q' —单井出水能力 (m^3/d)；

r —滤管半径 (0.1365m)；

l —有效滤管长度 (m)；

K —含水层渗透系数 (20m/d)。

降水井有效滤管长度约为6m~11m。受围护结构和干扰抽水影响，实际单井出水量将小于理论计算的单井出水能力。理论计算单井出水量为999~1831 m^3/d ，实际抽水时按720~1440 m^3/d 考虑。

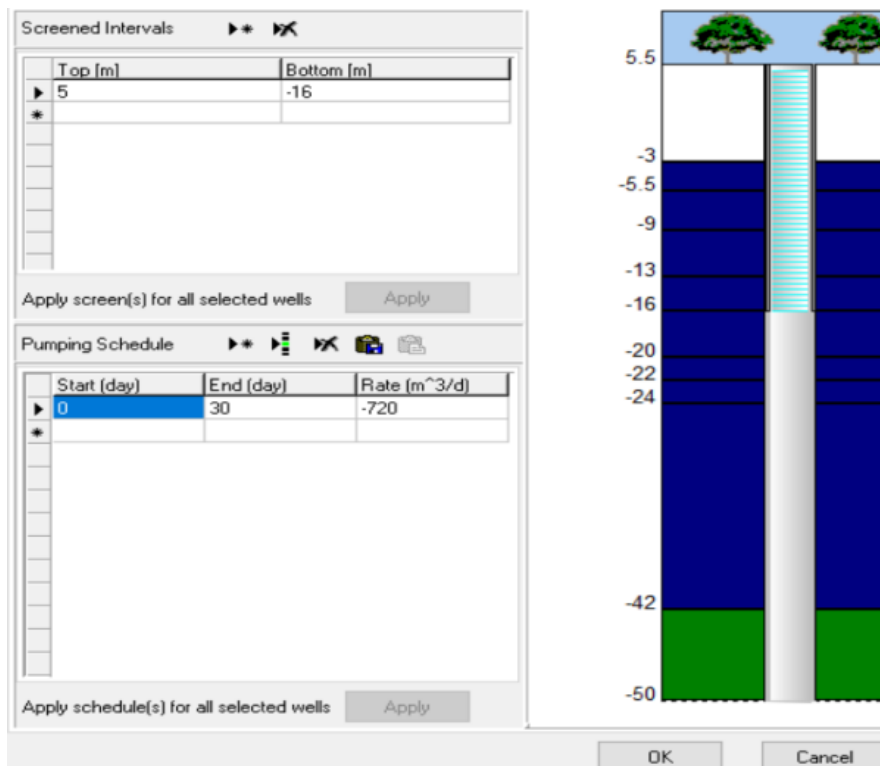


图 4.1-6 降水井概化示意图

4.6 模型预测结果及降水井数量

4.6.1 NMW14~NMW15 段

基坑开挖深度22.1~27.2m，基底标高为-16.6~-21.7m，水位标高需降至-17.6~-22.7m以下。NMW14~NMW15段地墙进入(7)1-3中风化粉砂岩约1m，理论上隔断了含水层坑内、外水力联系，只需要抽掉地下水静储量即可。但在实际施工过程中，如此深的地连墙施工质量控制难度大，往往存在一定缺陷，特别是接缝处易发生渗漏。基坑实际涌水量取决于地墙止水效果。

本次对地连墙赋予不同的渗透系数 ($K=0.01m/d$ 、 $0.1m/d$)，模拟在不同止水效果下的基坑总涌水量及坑外水位下降情况(见表4.6.1-1)。从安全角度考虑，本次按基坑最大涌水量12000 m^3/d 考虑，坑内布置12口降水井(含2口备用兼观测井)。

NMW14~NMW15段围护结构为落底式帷幕，一旦围护结构存在缺陷，在坑外高水头压力作用下，易出现渗水、流砂、

管涌等现象, 严重时会导致地层掏空、坑外地面塌陷, 甚至基坑自身结构失稳。本次按约 20m 间距布置 9 口坑外备用井, 一旦出现围护结构渗漏, 可开启备用井, 平衡基坑内、外水头差。

表 4.6.1-1 地连墙不同止水效果下的基坑涌水量及井数一览表

| 序号 | 地墙渗透系数 (m/d) | 总涌水量 (m ³ /d) | 单井出水量 (m ³ /d) | 井数 (口) | 坑外水位标高 (m) | 备注 |
|----|--------------|--------------------------|---------------------------|--------|------------|-------------|
| 1 | 0.01 | 3600 | 720 | 6 | 2.0 | 含 1 口备用兼观测井 |
| 2 | 0.1 | 12000 | 1200 | 12 | -5.0 | 含 2 口备用兼观测井 |

4.7 降水井结构

根据《管井技术规范》, 降水井的深度应根据经计算得出的设计动水位 (压力水头) 埋深、最下一个降水目标层的埋深、最下一段过滤器工作部分的长度和沉淀管的长度等综合确定。降水管井的深度可按下列公式计算:

$$H_w = H_{w1} + H_{w2} + H_{w3} + H_{w6}$$

$$H_{w2} = ir_0$$

式中: H_w ——降水井深度 (m);

H_{w1} ——自地面算起至设计要求的动水位间的深度 (基底下 1m);

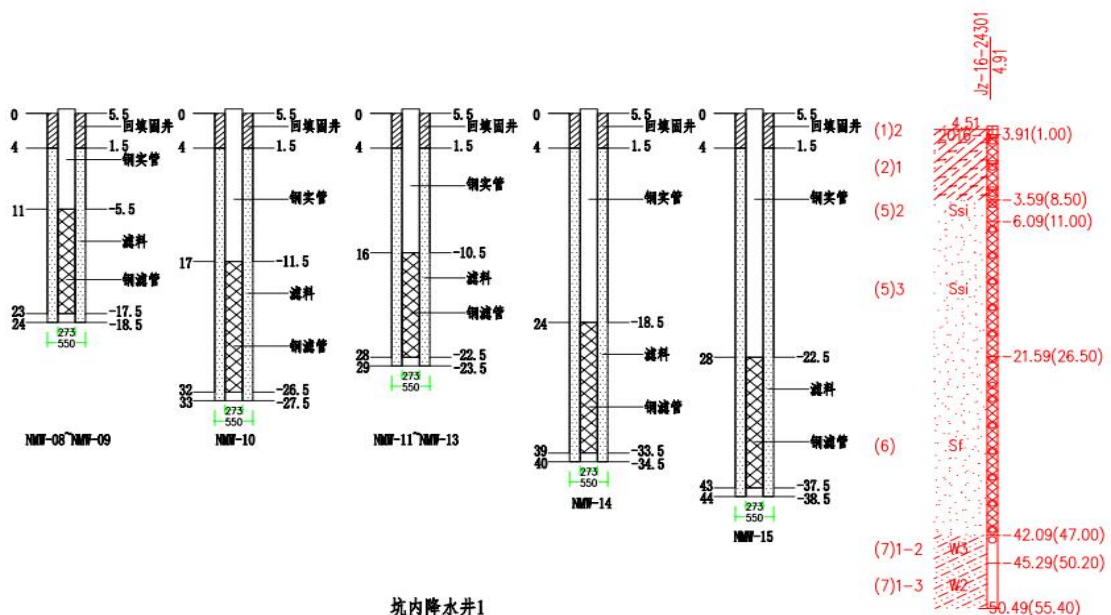
H_{w2} —— ir_0 ; i 为水力坡度, 在降水井分布范围内宜为 1/10~1/15;

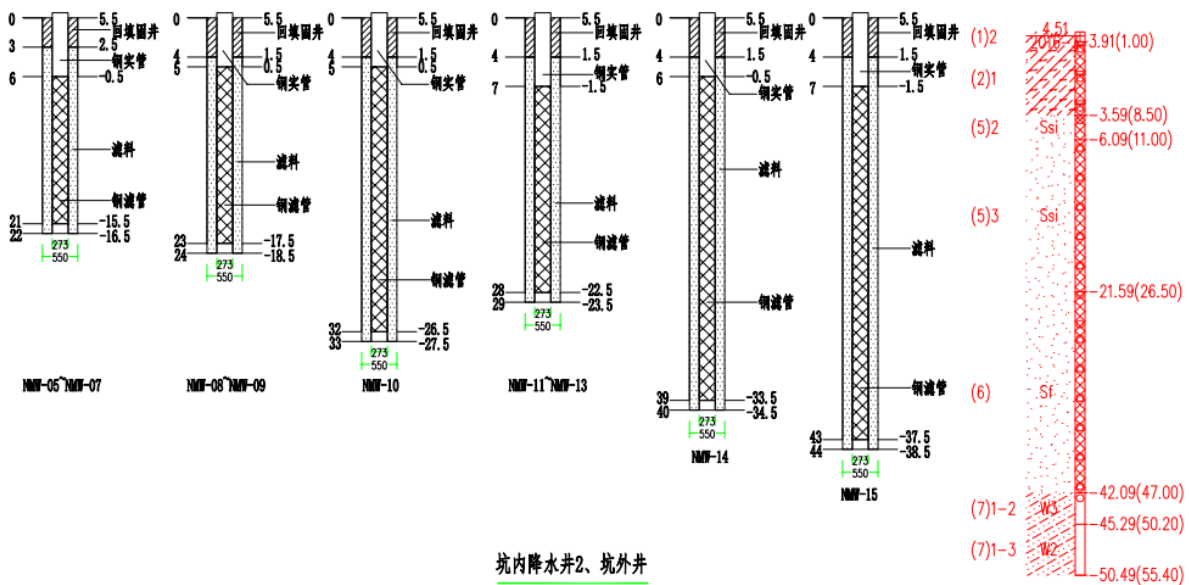
r_0 为降水井分布范围内的等效半径或降水井排间距的 1/2 (m); 取 1m;

H_{w3} ——从 H_{w2} 以下算起至最下部过滤器底端的长度 (不小于 9m);

H_{w6} ——沉淀管长度 (m), 取 1.0m。

综合考虑基坑开挖深度、围护深度及地层特征, 降水井深度暂定 22~44m, 各节段坑内、外井深度相同。坑内井分为 2 种: 坑内降水井 1 底板以上不设滤管, 以便于封井; 坑内降水井 2 开挖范围内设置滤管, 以利于地层疏干。具体结构如下: 泥孔径 550mm; 井管为管径 273mm、壁厚 3~4mm 钢管 (NMW06~NMW13 段壁厚 3mm, NMW14~NMW15 段壁厚 4mm), 滤管为同规格桥式滤水管, 外包 80 目锦纶滤网; 滤料为中粗砂, 回填至滤管顶部以上, 上部回填粘性土或原地层土固井。见图 4.7-1。





坑内降水井2、坑外井

图 4.7-1 降水井结构示意图

5 施工监测

为避免工程施工对周边环境及工程本身的危害，采用先进、可靠的仪器及有效的监测方法，对工程本身和周围环境的变形及应力应变情况进行监控，为工程动态化设计和信息化施工提供所需的数据，从而使工程处于受控状态，确保工程本身及周边环境的安全。

(1) 促进工程安全技术管理工作的系统化、规范化和信息化，最大限度地规避风险，避免人员伤亡和环境损害，降低工程经济和工期损失，为工程建设提供安全保障服务；

(2) 在施工过程中对周边环境监测，基本掌握周边环境、围护结构体系的变形、应力应变动态，获取监测数据，为施工单位提供参考依据；

(3) 为工程建设风险管理提供支持，通过监测工作、安全巡视和监测管理服务，较全面地掌握明挖基坑的施工安全控制程度，为风险管理提供基础数据，对施工过程实施全面监控和有效控制管理；

(4) 提供精确的监测数据和相关分析资料，可成为处理风险事故和工程安全事故的重要参考依据；

(5) 积累资料和经验，为今后的同类工程设计提供类比依据。

6 结语

超深基坑降水方案设计及施工是一项理论与实践结合紧密的工作。降水设计需根据工程地质、水文地质资料和设计资料，结合该地区施工降水经验合理选取技术参数，优化井型布置。该工程基于数值模拟对基坑涌水量进行估算，确定了降水井数量、深度等关键技术参数，通过基坑监测对工程本身和周围环境的变形及应力应变情况进行监控，为工程动态化设计和信息化施工提供所需的数据，结果表明，降水设计方案效果良好，能满足工程要求。对类似地质条件、场地环境的超深基坑降水工程有一定的参考意义。

[参考文献]

- [1] 冯晓腊. 武汉某工程超深基坑降水设计与技术应用[J]. 施工技术, 2015, 12(44): 11.
[2] 吕超. 滨江超大超深基坑施工风险分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 12(10): 6.
作者简介: 商兆涛 (1983-), 男, 安徽芜湖人, 高级工程师, 硕士研究生。