

# 悬挂式止水在基坑工程中的应用

周火焱, 王华钦, 张维泉

(厦门辉固工程技术有限公司, 福建 厦门 361003)

**摘要:** 通过技术经济比较, 为在深厚透水层地质条件下的某基坑进行地下水控制设计选型; 利用干扰井群算法并考虑悬挂式止水帷幕影响条件, 对该基坑地下水控制进行设计。通过工程实践及现场监测, 表明悬挂式止水帷幕适用于深厚透水层地质条件且周边环境对变形控制要求不严的基坑地下水控制设计。

**关键词:** 基坑; 地下水控制设计; 悬挂式止水帷幕

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0470-04

**作者简介:** 周火焱(1981-), 男, 福建同安人, 硕士, 工程师, 主要从事基坑工程、边坡工程及地基处理等方面的研究与实践工作。E-mail: south\_xm\_cn@139.com。

## Application of pensile impervious curtain to excavations

ZHOU Huo-yao, WANG Hua-qin, ZHANG Wei-quan

(Xiamen Huigu Geotechnique Co., Ltd., Xiamen 361003, China)

**Abstract:** Through technical and economic comparison, the groundwater control design of an excavation under deep pervious layer geological conditions is selected. By using the interference well group algorithm and considering the effects of pensile impervious curtain, the underground control is designed. Through engineering practice and field monitoring, the pensile impervious curtain is applied to the groundwater control design of excavations under deep pervious layer geological conditions and no strict requirements of deformation control to the surrounding environment.

**Key words:** excavation; groundwater control design; pensile impervious curtain

## 0 引言

基坑工程中, 当地下水控制设计采用悬挂式止水时, 止水帷幕未插入到隔水层, 基坑内、外的地下水有水力联系, 坑外地下水可通过止水帷幕底端与隔水层之间的透水层进入基坑内, 导致坑内降水时, 将影响基坑周边环境。该方法既要设置止水帷幕, 又不能隔断与周边的水力联系, 影响周边环境, 在工程实践中较少采用, 一般适用于深厚透水层的地质条件且周边环境对变形控制要求不高的情况。

下面以漳州某基坑为例, 介绍了悬挂式止水设计的工程实践情况。

## 1 工程概况

某基坑工程位于龙海市石码镇锦江大道西南侧(锦江大道另一侧为九龙江)。拟建场地(B地块)西北和东南侧均为规划道路, 东北侧为已建锦江大道, 锦江大道外侧为九龙江, 西南侧为已建新华路, 新华路外侧为既有旧民房(2~3层), 见图1。地下室外墙轮廓线距离红线仅5~6m, 基坑支护空间有限。本工程设一层地下室, 地下室建筑面积约11000m<sup>2</sup>。基坑周长约450m, 地下室±0.00为黄海高程4.70m, 现地

面按设计标高-0.50整平。地下室底板、基础及筏板顶标高均为-5.25, 挖深考虑到底板、承台或筏板垫层底, 设计挖深为5.15~6.85m。

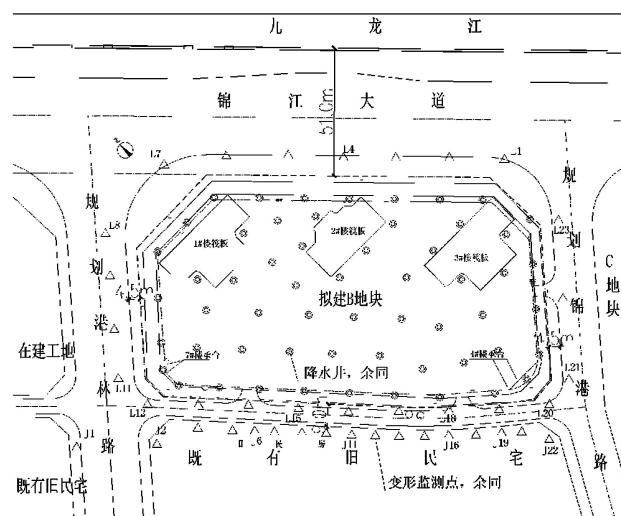


图1 拟建场地周边环境及监测点、降水井布置示意图

Fig. 1 Sketch of surrounding environment

### 1.1 建设场地工程地质条件

据地质勘察资料, 拟建场地岩土体分布较为复杂,

其分布、厚度及岩性变化大, 自上而下划分如下: ①杂填土( $Q_4^{ml}$ ), 揭露厚度 3.00~7.90 m; ②中细砂夹淤泥( $Q_4^{mc}$ ), 揭露厚度 0.60~8.70 m; ③中砂( $Q_4^{al-pl}$ ), 揭露厚度 1.65~20.40 m; ④砾卵石( $Q_3^{al-pl}$ ), 揭露厚度 8.20~36.60 m; ⑤中砂( $Q_3^{al-pl}$ ), 揭露厚度 2.90~10.60 m; ⑥残积砂质黏性土( $Q^l$ ), 顶板埋深 56.90~61.70 m, 见图 2、表 1。

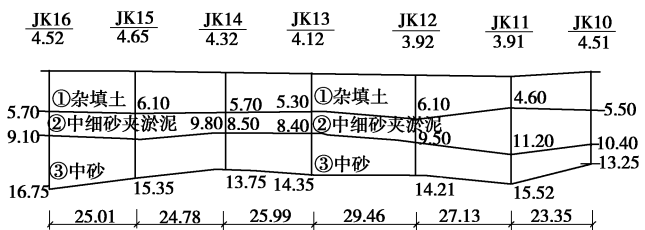


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Sketch of typical geological section

表 1 基坑支护设计岩土参数

Table 1 Parameters of support design for excavation

岩土层名称	天然重度 $\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ ( $\text{kPa}$ )	内摩擦角 $\varphi$ ( $^\circ$ )	渗透系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	岩土体与锚固体黏结强度特征值 $f_{tb}$ ( $\text{kPa}$ )
①杂填土	18	15	17	$8\times 10^{-4}$	15
②中细砂夹淤泥	17.5	8	16	$2\times 10^{-3}$	20
③中砂	18.5	5	24	$8\times 10^{-3}$	30
④砾卵石	20.5	3	35	$7\times 10^{-2}$	—
⑤中砂	19	3	28	$2\times 10^{-2}$	—

1.2 建设场地工程水文条件

场地临近九龙江, 地下水在高潮时主要接受九龙江流域补给, 其次为大气降水下渗补给; 而低潮时则主要接受外侧含水层侧向补给及大气降水下渗补给, 并向九龙江方向渗流、排泄。

据地勘资料, 场地地下水类型以潜水为主, 高平潮期测得地下水混合稳定水位埋深为 0.90~4.80 m, 相应黄海标高-0.61~2.45 m。根据区域水文地质资料及入海口水文特征推测, 场地地下水稳定水位全年变化幅度约 2~3 m。在勘察期间对地下水位进行了涨退潮周期性观测, 地下水与九龙江潮水存在较为密切的水力联系, 地下水水位随九龙江潮水的涨落呈规律性上下波动, 高平潮与低平潮的地下水水位变化幅度为 0.4~0.8 m, 地下水位峰值与低值较相应潮位滞后 1.5 h。另据当地居民了解, 该处天文大潮时, 地下水水位距道路路面仅 0.2 m。

2 地下水控制设计和施工

基坑大面积开挖深度仅为 5.15 m, 局部承台、筏板的开挖深度为 6.25~6.85 m, 挖深范围内岩土层主要为杂填土①及中细砂夹淤泥②, 坑底标高以下为深

厚的中砂层及砾卵石层 (约有 60 m 深, 属中、强—极强透水层)。根据本基坑工程的特点, 地下水控制的设计和施工是本基坑支护设计成败与否的关键。

2.1 设计选型

地下水控制方法可分为集水明排、降水、截水和回灌等型式单独或组合使用。根据本工程的地质条件及基坑特点, 地下水控制方法可采用以截水或降水为主的组合方法。

若采用截水, 止水帷幕须穿过透水层 (中砂层及卵石层), 常用的旋喷桩或搅拌桩均不能穿透该层, 须采用咬合桩或地下连续墙。该方法投资成本大, 工期长, 止水帷幕的施工质量难以控制。

采用降水的可行性。降水须解决的难题是其对周边环境的影响, 主要是东北侧的锦江大道和西南侧的民宅, 包括支护结构自身的安全。

经调查分析, ①锦江大道持力层为卵石层, 降水影响不大。②场地地质条件比较均匀, 而民宅仅 1~2 层, 差异沉降应该不大, 降水影响主要为均匀沉降。③场地在基坑施工影响范围内有中细砂及中砂, 应避免降水掏空砂层, 影响支护结构的安全。

综上所述, 本工程地下水控制设计采用悬挂式止水的组合方法, 既解决基坑降水的难题, 又满足基坑支护要求, 同时减少工程投资, 缩短工期, 可取得较好的经济效益。具体如下:

(1) 基坑周边设置水泥土搅拌桩作为悬挂式止水帷幕, 增加渗流路径, 降低基坑降水对周边环境的影响程度<sup>[1-3]</sup>, 同时兼具基坑支护结构。

(2) 坑内设置降水井, 进行强降水。

(3) 坑外新华路一侧设置若干回灌井, 抑制民宅的沉降。

(4) 坑顶、坑底设置集水明排系统, 及时收集、排泄坑内汇水等。

2.2 设计计算

设计步骤: 先进行支护结构设计, 确定各剖面的水泥土搅拌桩长度; 再根据各剖面的桩长 (即悬挂式止水帷幕的深度) 依次代入公式进行试算, 获取最优的悬挂式止水帷幕的深度; 最后对周边环境进行评估。

(1) 支护结构设计采用理正基坑工程软件 6.01 版计算。

(2) 降水计算。

《建筑基坑支护技术规程》<sup>[4]</sup>将基坑看作一口大井, 给出了基坑涌水量的估算公式及计算基坑内各点的水位方法, 但是由于假设井群中各井的流量相等, 计算结果与实际情况有较大出入。一般情况下基坑降水都是多井形成井群共同工作, 各井相互作用, 构成干扰井群。作为干扰井群, 其中各井涌水量和水位降深都随各井在井群中的位置不同而改变。因此, 基坑

降水设计按干扰井群的算法更符合实际<sup>[5]</sup>。

为了考虑悬挂式止水帷幕的作用,可近似认为处理范围内岩土层的水平渗透系数为零,其它岩土层的渗透系数取值不变,然后根据止水帷幕的设置深度重新划分渗透系数在竖直方向上的分布情况,按干扰井群(潜水)稳定流降深的方法进行计算。

①任意排列干扰井群公式:

$$\frac{Q_1}{2\pi} \ln \frac{R_1}{r_{w,1}} + \frac{Q_2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{r_{1,2}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi} \ln \frac{R_n}{r_{1,n}} = \varphi_k - \varphi_{w,1},$$

$$\frac{Q_1}{2\pi} \ln \frac{R_1}{r_{2,1}} + \frac{Q_2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{r_{w,2}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi} \ln \frac{R_n}{r_{2,n}} = \varphi_k - \varphi_{w,2},$$

...

$$\frac{Q_1}{2\pi} \ln \frac{R_1}{r_{n,1}} + \frac{Q_2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{r_{n,2}} + \dots + \frac{Q_n}{2\pi} \ln \frac{R_n}{r_{w,n}} = \varphi_k - \varphi_{w,n},$$

②潜水井群:

$$\varphi_k - \varphi_{w,i} = 0.5K(H_0^2 - h_{w,i}^2) = 0.5K(2H_0 - S_{w,i})S_{w,i},$$

③潜水井群稳定流降深:

$$S_i = H_0 - \sqrt{H_0^2 - \frac{Q_{\text{总}}}{1.366K} \left[ \lg R_0 - \frac{1}{n} \lg(r_{i1}r_{i2} \dots r_{in}) \right]}$$

式中,  $Q_i$  为第  $i$  号井的单井流量 (m/d);  $S_{w,i}$  为第  $i$  号井的水位降深 (m);  $S_i$  为  $i$  点 ( $x_i, y_i$ ) 的水位降深 (m);  $r_{ij}$  为计算点  $i$  ( $x_i, y_i$ ) 到  $j$  号井的距离 (m)。

根据计算结果(水位降深约为 6.0 m, 坑内设计水位降至坑底标高以下 1.0 m), 需设置 52 口降水井。考虑到局部电梯井等超深的水位降深较大, 实际共设置 57 口降水井, 其中主楼承台及筏板等超深位置加密布置, 降水井间距约 15~20 m, 见图 1。降水井的外径 550 mm, 内径 350 mm, 降水井深度(从地面以下)不小于 18 m。止水帷幕及支护结构典型剖面见图 3。

(3) 根据沉降计算公式<sup>[6-7]</sup>, 基坑降水引起的周边地面总沉降量为 82 mm。为了抑制基坑降水引起的地面沉降, 在民宅与基坑之间的道路邻基坑一侧设置了若干回灌井。

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E} \Delta P_i \Delta h_i,$$

式中,  $s$  为地面最终沉降量 (mm);  $E_i$  为第  $i$  层土的压缩模量 (MPa);  $\Delta P_i$  为第  $i$  层土因降水产生的附加应力 (kPa);  $\Delta h_i$  为第  $i$  层土的厚度 (m)。

## 2.3 施工注意事项

截止目前, 该工程主体已竣工验收, 地下室基坑围护工程及基坑降水设计方案成功实施, 取得较好经济效益。不过, 在工程实践中, 仍须注意以下几点: ①降水井施工前应编制详细的专项施工方案, 并严格执行, 以保证施工质量和降水效率, 避免基坑降水影响基坑安全并减少对周边环境的影响。②施工降水井时, 须重视洗井的步骤, 方可确保降水效果。降水系

统启用后, 发现部分降水井出水量很小。现场考察后发现, 这些降水井在成井后并未按设计要求洗井。施工单位按设计要求重新洗井后进行现场试抽水, 各个降水井均能出水, 水位降深可满足设计要求, 取得了较好的降水效果。③降水过程中, 须严格按设计要求控制基坑内地下水的水位, 地下水降深应控制在坑底以下 0.5~1 m, 以减小对周边环境的影响, 并保证施工进度。④基坑土方开挖过程中, 应在每一皮土方开挖前一个星期开始降水至设计开挖面标高以下 0.5~1.0 m。应避免将开挖时才开始降水, 影响施工进度; 或者直接将地下水位降至设计标高, 严重影响周边环境。⑤基坑工程及地下室工程施工过程中, 应严密监测基坑及周边环境的变化, 及时掌握地下水的变化情况、基坑与周边建(构)筑物的变形情况, 若发现险情及时采取安全措施, 避免发生事故。

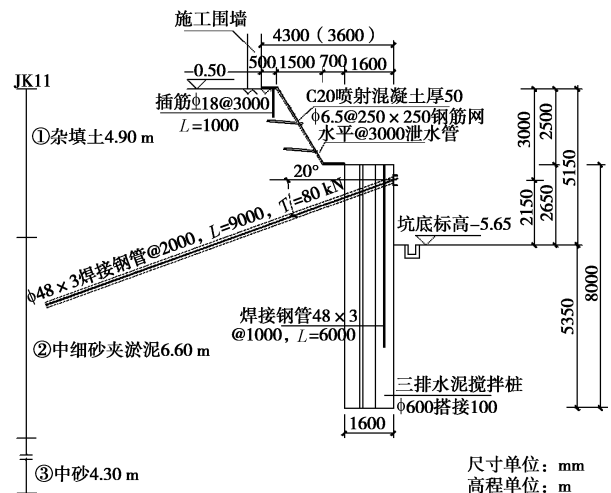


图3 降水及支护结构典型剖面图

Fig. 3 Typical section of dewatering and retaining structures

## 3 基坑监测及分析

由于某些原因, 本工程基坑监测资料不全, 基坑周边环境(建、构筑物沉降)监测结果显示: ①西南侧既有民宅(J1~J22, 测点编号, 见图1, 下同)的累计沉降量为 50~102 mm, 大致呈中间大, 两边小的分布趋势, 见图 4。既有民宅的局部倾斜量最大值为 1.6‰ (<2.0‰), 沉降差最大值为 30 mm (<0.005 L ≈ 40 mm), 均满足规范<sup>[8]</sup>的要求。②周边道路累计沉降量为 30~85 mm, 其中东北侧锦江大道(L1~L7)最大沉降约为 30 mm, 西北侧规划道路(L8~L11)最大沉降约为 52 mm, 西南侧新华路(L12~L20)最大沉降约为 85 mm, 东南侧规划道路(L21~L23)最大沉降约为 45 mm, 见图 5。③比较西南侧民宅和道路的沉降数据后发现, 距离基坑较远的既有民宅沉降量反而大于较近的道路沉降量约 17 mm。④经现场检查, 除了西南侧道路与民房之间的下水道局部出现开裂外, 其它市政设施和道路未发现损坏现象, 民宅亦

未发现明显开裂。

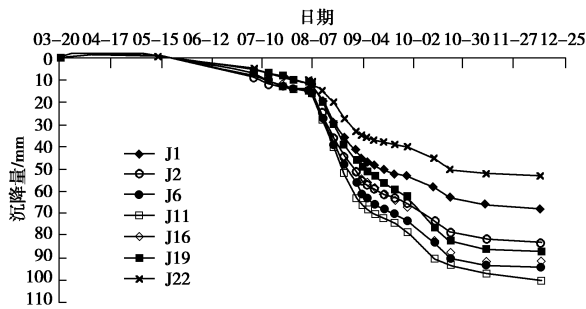


图4 既有民宅沉降量随时间变化图

Fig. 4 Variation of settlement of existing residential buildings with time

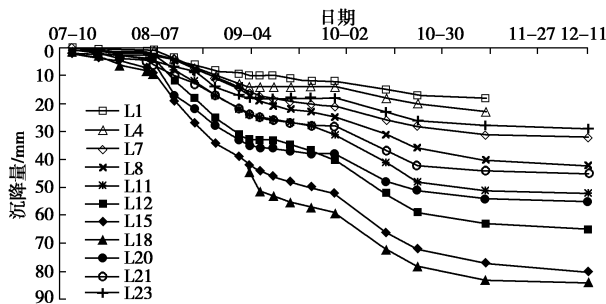


图5 周边道路沉降量随时间变化图

Fig. 5 Variation of settlement of adjacent roads with time

分析原因: ①西南侧既有民宅(1~2层)为老市区, 房屋及道路(新华路)的地基未经过专门地基加固处理, 故而沉降较大, 最大的累计沉降量为102 mm, 接近且大于估算值82 mm; ②其它锦江大道和规划道路的路基均经过专门地基处理, 故沉降量较小; ③西南侧新华路设置了若干回灌井, 对降水沉降起到一定的抑制作用, 道路的累计沉降量较相应断面上的民宅小了约17 mm, 而新华路与民宅之间的不均匀沉降也直接危害到其间的下水道; ④在透水性强的地质条件下, 降水影响半径大, 降水漏斗范围广, 导致回灌井的影响范围变小, 在设置回灌措施时应根据现场实际情况综合考虑, 慎重布置, 否则可能适得其反。

## 4 结 论

本工程地下水控制设计采用悬挂式止水帷幕+基坑内深井降水的组合方法并成功实施, 通过工程实践可得到以下几点结论。

(1) 类似地质条件下, 且周边环境对变形控制不严格时, 采用悬挂式止水帷幕+基坑内深井降水的组合方法, 可有效解决基坑地下水控制的问题, 可减少工期, 节省造价, 提高工程建设的效率。

该方法对周边环境存在一定影响, 必须在地下水控制设计选型前详细收集相关资料, 获取周边环境对变形控制的要求。

(2) 本文降水计算采用干扰井群的算法, 并考虑了

止水帷幕的作用, 比基坑规范的算法更接近实际情况。

(3) 为了保证降水效果, 成井施工时应严格按照设计要求洗井, 降水时应严格按照设计降深降水。

(4) 回灌井等回灌措施对抑制降水沉降有一定的作用, 但在布置回灌井时应充分考虑地质条件、既有建(构)筑物的变形敏感度等各种因素, 特别是在强透水层的地质条件下应验算回灌井的影响范围, 否则可能造成基坑周边地面发生不均匀沉降, 危害周边环境。

## 参考文献:

- [1] 王昆泰, 胡立强, 吕凯歌. 悬挂式帷幕条件下基坑渗流特性的计算分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(1): 81 - 84. (WANG Kun-tai, HU li-qiang, LÜ Kai-ge. Seepage characteristics analysis of pensile impervious curtain to excavations[J]. Building Science, 2010, 26(1): 81 - 84. (in Chinese))
- [2] 吴世兴. 深基坑悬挂式帷幕的渗流分析[J]. 福建建设科技, 2009(5): 4 - 5. (WU Shi-xing. Seepage Analysis of pensile curtain for deep pit[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2009(5): 4 - 5. (in Chinese))
- [3] 祝卫东, 韩同春. 悬挂式止水帷幕插入深度的数值分析[J]. 水利水电技术, 2009, 7(40): 19 - 21. (ZHU Wei-dong, HAN Tong-chun. Numerical annlysis of inserted depth of suspended impervious curtain[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 7(40): 19 - 21. (in Chinese))
- [4] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 赵剑豪. 干扰井群水位预测在基坑降水中的应用[J]. 福建建设科技, 2003(1): 8 - 10. (ZHAO Jian-hao. Application of interference well group water level forecast to excavation dewatering[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2003(1): 8 - 10. (in Chinese))
- [6] 《工程地质手册编委会》. 工程地质手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (The Editorial Board. Manual of engineering geology[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [7] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [8] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB 50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))