

UDC

中国土木工程学会标准

P

T/CCES XX—202X

建筑与市政基坑工程水文地质勘察 技术标准

Standard for hydrogeological investigation of deep excavation in building
and municipal engineering
(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国土木工程学会 发布

中国土木工程学会标准

建筑与市政基坑工程水文地质勘察
技术标准

Standard for hydrogeological investigation of deep excavation in
building and municipal engineering

T/CCES XX—202X

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：20XX 年 X 月 X 日

20XX 北 京

前 言

本标准是根据中国土木工程学会《关于发布<2020 年中国土木工程学会标准立项计划>的通知》（学标委〔2020〕31 号）的要求，由华东建筑设计研究院有限公司、上海广联环境岩土工程股份有限公司会同有关单位编制完成。

在本标准编制过程中，编制组广泛调查研究和总结了建筑与市政基坑工程水文地质勘察经验，参考了国内外有关标准，并在广泛征求意见基础上，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，最后经审查定稿。

本标准的主要技术内容是：总则，术语、符号与参考标准，基本规定，勘察纲要，水文地质勘察技术要求，水文地质参数计算，基坑工程水文地质分析评价，附录。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国土木工程学会学术与标准工作委员会负责管理，由华东建筑设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有修改意见或建议，请寄送华东建筑设计研究院有限公司（地址：上海市西藏南路 1368 号申都大厦 4 楼；邮政编码：200011；电子邮箱：yun_hu@arcplus.com.cn）。

本标准主编单位：华东建筑设计研究院有限公司
上海广联环境岩土工程股份有限公司

本标准参编单位：

本标准主要起草人员：

本标准主要审查人员：

目次

1	总则	1
2	术语、符号与参考标准	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
2.3	参考标准	8
3	基本规定	9
4	勘察纲要	12
4.1	一般规定	12
4.2	勘察工作布置	12
4.3	勘察成果要求	15
5	水文地质勘察技术要求	16
5.1	一般规定	16
5.2	水文地质调查与测绘	16
5.3	水文地质物探	18
5.4	水文地质勘探	19
5.5	水文地质试验	21
6	水文地质参数计算	29
6.1	一般规定	29
6.2	渗透系数	29
6.3	给水度和储水系数	31
6.4	单孔影响半径	31
6.5	单位出水量和群孔影响系数	32
6.6	回灌参数	32
7	基坑工程水文地质分析评价	34
7.1	一般规定	34
7.2	地下水对基坑工程影响的分析评价	35
7.3	地下水控制的环境影响分析评价	37
附录 A	地下水类型	41
附录 B	常用物探方法及测点间距	42
附录 C	土体岩体渗透性分级	43
附录 D	土体富水性分级	44
附录 E	含水层水力联系程度	45
附录 F	水文地质参数计算公式	46
附录 G	钻孔注水试验形状系数值	51
附录 H	岩溶发育区基坑涌水量预测	52
本标准用词说明		54
条文说明		55

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms, symbols and reference standards.....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	4
2.3	Reference Standards.....	8
3	Basic requirements.....	9
4	Investigation program.....	12
4.1	General.....	12
4.2	Layout of investigation work.....	12
4.3	Deliverables.....	15
5	Technical requirements for hydrogeological investigation.....	16
5.1	General.....	16
5.2	Hydrogeological survey and mapping.....	16
5.3	Geophysical exploration.....	18
5.4	Hydrogeological exploration.....	19
5.5	Hydrogeological test.....	21
6	Calculation of hydrogeological parameters.....	29
6.1	General.....	29
6.2	Coefficient of permeability.....	29
6.3	Specific yield and elastic storage coefficient.....	31
6.4	Influence radius of single hole.....	31
6.5	Specific yield of well and Influence coefficient of group wells.....	32
6.6	Reinjection parameters.....	32
7	Analysis and evaluation of hydrogeological conditions for deep excavation.....	34
7.1	General.....	34
7.2	Analysis of the impact of groundwater on deep excavation.....	35
7.3	Analysis and evaluation of environmental impact of groundwater control	37
	Appendix A Ground water classification.....	41
	Appendix B Spacing between survey points for geophysical prospecting.....	42
	Appendix C Permeability classification.....	43
	Appendix D Water yield property classification.....	44

Appendix E Hydraulic connection classification.....	45
Appendix F Calculation formulas of hydrogeological parameters.....	46
Appendix G Shape coefficient value of borehole water injection test.....	51
Appendix H Prediction of water inflow of deep excavation in Karst Area.....	52
Explanation for wording in the specification.....	54
Explanation of provisions.....	55

1 总 则

1.0.1 为规范建筑与市政基坑工程水文地质勘察，保障基坑工程安全，加强环境和水资源保护，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建、扩建、改建的建筑与市政项目基坑工程的水文地质勘察。

1.0.3 建筑与市政基坑工程水文地质勘察除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和地方现行有关标准的规定。

2 术语、符号与参考标准

2.1 术语

2.1.1 基坑工程水文地质勘察 hydrogeological investigation of deep excavation

为查明建设场地水文地质条件、分析基坑工程水文地质问题以及评估基坑工程地下水控制对环境的影响等进行的水文地质工作。包括水文地质调查与测绘、勘探、现场水文地质试验和室内试验等。

2.1.2 水文地质条件 hydrogeological conditions

建设场地及其周边的含水层、弱透水层和隔水层的空间分布规律、地下水的埋藏类型、地下水补给及径流与排泄特征、各含水层与弱透水层的水位埋深和变化幅度、含水层与弱透水层的水文地质参数、含水层之间的水力联系、水质和水量等的总称。

2.1.3 水文地质参数 hydrogeological parameters

用于表征地层水文地质特征的定量指标。主要包括渗透系数、导水系数、弹性释水系数或弹性贮水系数、压力传导系数、影响半径、给水度、越流系数等。

2.1.4 地下水控制 groundwater controlling

为保证基坑工程正常施工，控制和减少对周边环境的影响，而采取的排水、降水、截水或回灌等工程措施的统称。

2.1.5 水文地质概念模型 hydrogeological conceptual model

基于基坑工程实际水文地质条件（边界性质、内部结构、水力参数、水动力和水化学特征以及补给、径流和排泄条件等）概化的、用于数学建模的基本概念模式，包括蓄水构造、含水系统（含水层和隔水层）、渗流范围、水力参数、初始条件、边界条件和源汇等。

2.1.6 单孔抽水试验 single hole pumping test

没有观测孔而只有一个抽水孔的抽水试验。

2.1.7 多孔抽水试验 multiple-well pumping test

由一个抽水孔和若干个观测孔组成的抽水试验。

2.1.8 群孔抽水试验 multiple-hole pumping test

在两个或两个以上试验孔中同时抽水的水文地质试验。一般设置多个观测孔。

2.1.9 注水试验 injection test

向试验孔中连续注水，根据注水量、注水水位与时间的变化关系测定含水层参数的试验。

2.1.10 压水试验 pressure test

向试验孔中预定试验段压水，根据一定时间内压入的水量和施加压力大小的关系，测定岩土体相对透水性和了解裂隙发育程度的试验。

2.1.11 微水试验 slug test

采用瞬间增加或减少试验孔内微小水量并引起水位随时间变化，用于确定含水层水文地质参数的简易试验。

2.1.12 连通试验 connecting test

通过在上游投放指示剂，下游观测指示剂到达情况以查明地下水运动、地下水各通道分布和连通及地下水与地表水之间相互联系情况的野外试验。

2.1.13 水文地质单元 hydrogeological unit

具有统一边界条件和补给、径流、排泄条件的地下水系统。

2.1.14 富水性 water yield property

以一定降深、一定口径下的单井出水量来表征的含水层富水程度。

2.1.15 隔水层 aquifuge

一般指透水性极弱的岩土层。

2.1.16 水文地质钻探孔 hydrogeological exploration borehole

为查明水文地质条件，按水文地质钻探要求施工的钻孔。

2.1.17 稳定流抽水试验 steady-flow pumping test

抽水量和地下水位同时达到稳定标准并延续一定时间的抽水试验。

2.1.18 非稳定流抽水试验 unsteady-flow pumping test

保持抽水量稳定观察含水层水位变化的抽水试验，或保持水位降深固定观测抽水量和含水层中地下水水位变化的抽水试验。

2.1.19 单孔回灌试验 single hole recharge test

在一个试验孔中回灌的水文地质试验。可不设或设置多个观测孔。

2.1.20 群孔回灌试验 multiple-hole recharge test

在两个或两个以上试验孔中同时回灌的水文地质试验。一般设置多个观测孔。

2.1.21 地下水流数学模型 hydrogeological mathematical model

以水文地质概念模型为基础所建立的、能刻画和再现实际地下水系统结构、运动特征和各种渗透要素的一组数学表达式。地下水的数学模型分为分布参数模型和集中参数模型，或者分为确定型模型和随机型模型等。

2.2 符 号

- A —— 注水管内径截面积；
- A_C —— 地表汇水面积；
- A_R —— 基坑突涌系数；
- a —— 压力传导系数；
- a_0 —— 计算点至初始地下水位的垂直距离；
- b —— 土层厚度；
- B —— 越流因子；
- D —— 土层厚度；
- d —— 计算时段天数；
- d_3 —— 小于该粒径的含量占总土重 3%的颗粒粒径；
- d_5 —— 小于该粒径的含量占总土重 5%的颗粒粒径；
- d_{20} —— 小于该粒径的含量占总土重 20%的颗粒粒径；
- E_s —— 土的侧限压缩模量；
- F —— 钻孔注水试验形状系数；
- G_s —— 土的颗粒比重；
- H —— 水头高度；
- H_0, H_1 —— 新建、既有基坑工程开挖前静止地下水位至基底的高差；
- $H_{0\max}$ —— 孔内最大水位变幅；

H_s —— 涌水量计算时段的多年平均降水量；
 H_w —— 承压含水层顶面的压力水头高度；
 h —— 水位高度；
 h_i —— 抽水稳定后观测孔 i 处潜水含水层厚度；
 h_w —— 基坑内外土体渗流水头；
 i —— 拟合直线斜率；
 I —— 水力梯度（坡降）；
 I_{cr} —— 临界水力坡降；
 k —— 渗透系数；
 K_h —— 抗承压水突涌稳定性系数；
 K_f —— 抗流土或抗管涌稳定性系数；
 k' —— 弱透水层渗透系数；
 k_h —— 水平渗透系数；
 k_v —— 竖向渗透系数；
 L —— 最短渗流路径总长度；
 l —— 过滤器的长度；
 M —— 承压含水层的厚度；
 M' —— 弱透水层厚度；
 n —— 土的孔隙率；
 P —— 该试段压水时所加的总压力；
 Q —— 稳定流量；
 Q_0 —— 单孔涌水量或群孔涌水总量；
 Q_G —— 群孔试验单孔出水量；
 Q_h —— 单孔回灌量或群孔回灌总量；
 Q_P —— 基坑涌水量；
 Q_{P0}, Q_{P1} —— 新建、既有基坑工程涌水量；
 Q_s —— 单孔或多孔试验单孔出水量；
 Q'_G —— 群孔试验单孔回灌量；
 Q'_s —— 单孔试验单孔回灌量；

- $Q_{\text{计}}$ —— 计算涌水量；
- $Q_{\text{预}}$ —— 预测基坑涌水量；
- q —— 单位出水量；
- q' —— 透水率；
- R —— 影响半径；
- R_H —— 群孔回灌影响半径；
- R_h —— 单孔回灌影响半径；
- r —— 观测孔至抽水孔的距离；
- r_0 —— 拟合直线延长线与 r 轴的交点；
- r_w —— 抽水孔半径；
- r_c —— 井管内半径；
- r_s —— 过滤器外半径；
- S —— 承压含水层的储水系数或弹性释水系数；
- S_k —— 岩溶管道过水断面面积；
- S_P —— 基坑涌水断面面积；
- S_R —— 涌入基坑的水量占地下水径流总量的份额；
- S_0, S_1 —— 新建、既有基坑工程开挖前静止地下水位以下的基坑侧壁及底板面积；
- s —— 水位降深；
- s' —— 剩余降深；
- s_h —— 水位升幅；
- s_j —— 固结沉降量
- s_{max} —— 最大水位降深；
- s_w —— 抽水孔的水位降深
- T —— 导水系数；
- T' —— 滞后时间；
- t —— 时间；
- t' —— 水位恢复延续时间；
- t_c —— 抽水延续时间；

- t_0 —— 拟合直线延长线与 t 轴的交点；
 V —— 岩溶管道水流速；
 $W(u)$ —— 井函数；
 α_i —— 入渗系数；
 γ —— 土层天然重度；
 γ' —— 土的浮重度；
 γ_w —— 地下水的重度；
 Δh —— 动水位降深；
 Δh^2 —— 潜水含水层水位变化的平方差，即 H^2-h^2 ；
 Δs —— 一个对数周期的水位降深；
 $\Delta \sigma'_z$ —— 有效应力增量；
 δ_Q —— 水量回灌率；
 δ_{sh} —— 回灌水位回升率；
 δ_ε —— 回灌地层回弹效应；
 ε —— 回灌引起的地层竖向回弹变形；
 ς_i —— 群孔回灌影响系数；
 μ —— 潜水含水层的给水度；
 ξ_i —— 群孔影响系数；
 ψ_w —— 沉降经验系数；
 ω —— 单位吸水量；

2.3 参考标准

- 1 《岩土工程勘察规范》 GB 50021
- 2 《供水水文地质勘察规范》 GB 50027
- 3 《土工试验标准》 GB/T 50123
- 4 《管井技术规范》 GB 50296
- 5 《城市轨道交通工程监测技术规范》 GB 50911
- 6 《地下水质量标准》 GB/T 14848
- 7 《建筑变形测量规范》 JGJ 8
- 8 《建筑工程地质勘探与取样技术规程》 JGJ/T 87
- 9 《建筑与市政工程地下水控制技术规范》 JGJ 111
- 10 《建筑基坑支护技术规程》 JGJ 120
- 11 《地下水环境监测技术规范》 HJ 164

3 基本规定

3.0.1 基坑工程水文地质勘察应根据勘察任务和要求，搜集分析已有资料，确定水文地质勘察等级，编制勘察纲要。

3.0.2 基坑工程水文地质勘察宜基于岩土工程勘察成果或与岩土工程勘察配合实施，应注重对岩土工程勘察资料的借鉴和利用。

3.0.3 基坑工程水文地质勘察等级可根据基坑工程安全等级和水文地质条件复杂程度，按表 3.0.3 确定。

表 3.0.3 基坑工程水文地质勘察等级划分

基坑工程安全等级	水文地质条件复杂程度		
	简单	中等	复杂
一级	乙级	甲级	甲级
二级	丙级	乙级	甲级
三级	丙级	丙级	乙级

注： 1 对同一基坑的不同部分，可采用不同的勘察等级。
 2 当有特殊要求时，可提高一级或直接定为甲级。
 3 勘察过程中若发现实际水文地质条件与前期评估存在较大差异，影响到水文地质条件复杂程度划分的，应根据调整后的水文地质条件复杂程度，重新划分基坑工程水文地质勘察等级。

3.0.4 基坑工程应根据支护结构破坏可能产生后果（危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生影响等）的严重性，采用不同的安全等级。基坑工程安全等级的划分应符合表 3.0.4 的规定。

表 3.0.4 基坑工程安全等级

基坑安全等级	破坏后果
一级	很严重
二级	严重
三级	不严重

注： 对同一基坑的不同部分，可采用不同的安全等级。

3.0.5 建设场地水文地质条件复杂程度，可根据地下水类型和水文地质特征，按表 3.0.5 确定。

表 3.0.5 水文地质条件复杂程度划分

类型	复杂程度	水文地质特征
孔隙水	复杂	埋藏较深的多层含水层，或存在对基坑工程严重不利影响的承压含水层；岩性和厚度变化较大；含水层不稳定，其规模、补给和边界条件难以判定；及其他可能对基坑工程产生严重不利影响的地质水文地质条件
	中等	双层或多层含水层，或存在对基坑工程一般不利影响的承压含水层；岩性、厚度不很稳定，地下水形成条件较复杂，补给和边界条件不易查清；及其他可能对基坑工程造成一般不利影响的地质水文地质条件
	简单	浅埋的单层含水层，厚度比较稳定，补给、径流、排泄条件清楚
裂隙水	复杂	地质构造复杂，岩相变化极大，地貌形态多且难鉴别，含水层分布极不均匀，一般为构造裂隙水或断裂带脉状水；及其他可能对基坑工程产生严重不利影响的地质水文地质条件
	中等	岩相岩性不稳定，地貌形态多样，地质构造、补给条件及水质比较复杂，一般为深埋的断续分布的多层承压水或断裂带脉状水；及其他可能对基坑工程造成一般不利影响的地质水文地质条件
	简单	岩层水平或倾角很缓，岩性稳定均一，含水层比较稳定，补给、径流、排泄条件及水质较好，一般多为层间水或强烈风化带潜水
岩溶水	复杂	地质构造复杂，可溶岩组合及隔、含水层互层复杂，补给、径流、排泄条件及边界复杂，岩溶强发育；及其他可能对基坑工程产生严重不利影响的地质水文地质条件
	中等	地质构造较复杂，补给、径流、排泄条件及边界较复杂，岩溶中等发育；及其他可能对基坑工程造成一般不利影响的地质水文地质条件
	简单	地质构造简单，补给、径流、排泄条件及边界简单，岩溶微发育

- 注：
- 1 水文地质条件复杂程度应由复杂向简单推定，有任一地下水类型首先满足某较高等级时，水文地质条件复杂程度即为该等级。
 - 2 勘察过程中若发现实际水文地质条件与前期评估存在较大差异，影响到水文地质条件复杂程度划分的，应按实际情况重新划分水文地质条件复杂程度。
 - 3 基于存储介质的地下水类型划分参见附录 A。

3.0.6 基坑工程水文地质勘察应符合下列要求：

- 1 查明含水层的岩（土）性与结构、分布规律和地下水类型；
- 2 查明含水层与地表水，以及各含水层之间的水力联系；
- 3 查明地下水的补给、径流、排泄条件，以及地下水位动态特征；
- 4 提供地下水控制设计所需的水文地质参数；
- 5 分析地下水对基坑工程的影响，提出地下水控制措施的建议；

6 分析基坑工程地下水控制对周边环境或地下水资源的影响，提出相关保护措施的建议。

3.0.7 基坑工程水文地质勘察工作内容宜包括建设场地及周边的水文地质资料搜集、水文地质调查与测绘、水文地质物探、水文地质钻探、地下水动态观测、水文地质试验和室内试验，以及水文地质评价等。

3.0.8 水文地质物探、钻探、试验的方法与内容应根据勘察目的与基坑工程性质、工程场地水文地质条件、地下水控制需求、施工场地条件及环境条件等因素综合确定。相关成果应能为基坑工程及地下水控制提供设计参数，为分析评价地下水控制对环境的影响提供依据。

3.0.9 水文地质参数计算方法应基于水文地质条件和试验方法综合确定。水文地质勘察等级为甲级时，宜同时采用解析法和数值法计算水文地质参数。

3.0.10 现场勘探、试验前应进行危险源识别和环境调查，水文地质勘察现场作业应采取保护环境、预防污染的措施。

3.0.11 现场勘察工作结束后应及时按要求清理施工现场，对勘探孔和不再利用的试验孔应进行封孔处理，封孔施工应符合现行行业标准《建筑工程地质勘探与取样技术规程》（JGJ/T87）的规定。

3.0.12 水文地质勘察完成后应提供勘察报告。勘探、取样和现场试验、室内试验等的原始记录、影像资料和勘察报告均应归档保存，并应可追溯。

4 勘察纲要

4.1 一般规定

4.1.1 勘察纲要应在搜集、分析已有资料和现场踏勘的基础上，根据勘察目的和任务以及现行相关技术标准的要求，针对基坑工程特点和场地水文地质条件编制，并应满足基坑工程地下水控制设计要求。

4.1.2 勘察纲要编制前应具备下列资料：

- 1 勘察任务委托书，建设和设计单位对水文地质勘察的技术要求；
- 2 附有规划红线、建筑坐标、地形、 ± 0.00 高程的建筑总平面图；
- 3 基坑工程基本信息；
- 4 场地周边地下水控制影响范围内的环境条件；
- 5 既有地质资料。

4.1.3 勘察纲要应包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 既有地质和环境资料分析；
- 3 勘察目的、任务要求及需解决的主要技术问题；
- 4 编制依据；
- 5 勘察等级和勘察工作布置；
- 6 勘察报告主要技术内容；
- 7 质量控制、安全保证和环境保护措施；
- 8 勘察完成后的现场处置；
- 9 勘察进度计划、人员及机具安排等。

4.1.4 勘察纲要中应通过水文地质条件和基坑工程地下水控制预分析，明确水文地质试验方法和水文地质参数计算方法。

4.1.5 勘察期间出现下列情况时，应及时调整勘察纲要或编制补充勘察纲要：

- 1 设计方案发生较大变更；
- 2 勘察纲要中拟定的勘察工作量不能满足任务要求。

4.2 勘察工作布置

4.2.1 勘察工作布置应根据水文地质勘察等级、勘察目的、地下水类型、既有资料及场地条件综合确定，并宜包括下列内容：

- 1 调查和测绘的方法和布置；
- 2 物探、勘探和原位测试的方法和布置；
- 3 取样方法和取样器选择，土样和水样的储存、保护和运输；
- 4 水文地质试验方法和布置；
- 5 室内土（水）试验内容、方法和数量。

4.2.2 勘察范围及深度宜满足建立水文地质概念模型的要求。

4.2.3 建设场地所在区域性水文地质资料宜以搜集已有成果为主，已有资料不能满足需求或水文地质条件复杂时，宜开展补充调查和测绘。

4.2.4 建设场地内含水层岩土性质及分布宜采用物探、勘探等方法查明，勘探点应布置在勘察平面范围内水文地质条件典型区域及边界变化区域。

4.2.5 当水文地质试验场地在用地红线外时，应在试验场地和建设场地同步布置勘探点，试验场地与建设场地的地层应具有相似性。

4.2.6 控制性勘探孔、试验孔、观测孔的数量宜按表 4.2.6 确定，试验孔和观测孔数量应同时满足选用试验的相应要求。控制性勘探孔深度应能控制对工程有影响的含水层，并满足基坑地下水控制设计的要求。

表 4.2.6 控制性钻探孔、试验孔及观测孔数量表

水文地质勘察等级	控制性钻探孔（个）	单个试验含水层试验孔（个）	单个试验含水层观测孔（个）
甲级	≥ 4	≥ 3	≥ 3
乙级	≥ 2	≥ 2	≥ 2
丙级	≥ 1	≥ 1	≥ 1

注： 1 水文地质勘察控制性勘探孔应尽可能利用已有的工程地质勘察孔，且孔间距 $\leq 100\text{m}$ 。

2 遇古河道或地层起伏较大或岩溶裂隙时，控制性勘探孔数量宜适当增加。

4.2.7 物探工作的布置、参数的确定、检查点的数量和重复测量的误差，应符合国家现行有关标准的规定。

4.2.8 水文地质试验方法的选用应根据地下水类型与水文地质勘察等级按表 4.2.8 确定；当水文地质勘察等级为甲级时宜选用两种及以上试验方法。

表 4.2.8 水文地质试验方法适用性

地下水类型	勘察工作类别	水文地质勘察等级		
		甲级	乙级	丙级
孔隙水	单孔抽水试验	—	—	※
	多孔抽水试验	○	○	○
	群孔抽水试验	○	※	—
	注水试验	—	※	※
	压水试验	—	—	—
	微水试验	※	※	※
	回灌试验	○	※	—
	连通试验	※	—	—
裂隙水	单孔抽水试验	—	※	○
	多孔抽水试验	○	○	○
	群孔抽水试验	○	—	—
	注水试验	—	—	※
	压水试验	○	○	○
	微水试验	※	※	—
	回灌试验	※	—	—
	连通试验	※	—	—
岩溶水	单孔抽水试验	—	※	○
	多孔抽水试验	○	○	○
	群孔抽水试验	○	—	—
	注水试验	—	※	※
	压水试验	○	○	○
	微水试验	※	※	—
	回灌试验	※	—	—
	连通试验	※	—	—

注： 1 表中试验针对单个降水目的含水层；当拟建基坑工程涉及多个降水目的含水层时，应分别确定适用的水文地质试验方法；
2 表中符号含义如下：“○”表示推荐采用；“※”表示可采用；“—”表示不推荐采用。

4.2.9 降水目的含水层或目的含水层的上覆或下伏弱透水层为土体时，宜取样进行土工试验或原位测试，试验或测试内容应满足地下水控制环境影响分析评价需要。土层取样或原位测试数量及方法应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》（GB50021）的规定。

4.2.10 拟采取地下水回灌控制时，应分别采样分析回灌目的含水层和回灌水源水质，地下水水质采样应符合现行国家标准《地下水环境监测技术规范》（HJ164）的规定，水质分析内容可按《地下水质量标准》（GB/T14848）执行。开展地下水的腐蚀性评价时，地下水水质采样和分析内容应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》（GB50021）的规定。

4.3 勘察成果要求

4.3.1 水文地质勘察成果文件应依据原始资料编制；提供的成果文件应数据可靠、结论有据、建议合理；成果文件应包括文字报告、图表和必要的附件。

4.3.2 水文地质勘察文字报告宜包括下列内容：

- 1 拟建工程性质、勘察目的、工作依据、勘察手段及完成工作量；
- 2 场地水文地质条件和周边环境条件；
- 3 水文地质试验及成果分析；
- 4 地下水控制所需的水文地质参数建议值；
- 5 分析地下水对基坑工程的影响及地下水控制措施建议；
- 6 分析地下水控制对环境、水资源的影响；
- 7 结论与建议。

4.3.3 成果文件宜附下列图表：

- 1 包含周边环境的总平面图；
- 2 勘探点平面布置图与坐标汇总表；
- 3 控制孔的地质柱状图；
- 4 水文地质剖面图；
- 5 水文地质试验孔结构图；
- 6 水文地质试验成果图表；
- 7 沉降监测成果图表；
- 8 室内试验成果图表；
- 9 其它所需要的图表。

5 水文地质勘察技术要求

5.1 一般规定

5.1.1 水文地质调查与测绘范围应根据工程特点和水文地质条件确定，宜涵盖与基坑工程有关的一个或多个水文地质单元。

5.1.2 水文地质物探工作开展前应进行方法的有效性试验，试验位置应选择在有对比资料且具有代表性区域，并应布置验证性钻探孔。水文地质物探的实测资料应结合水文地质条件和钻探资料进行综合解释，并对场地水文地质条件作出评价。

5.1.3 水文地质试验前，宜针对项目场地的水文地质条件、评价所需参数及参数精度要求、现场实施条件等，开展水文地质试验设计，确定水文地质试验方法、内容和流程。

5.1.4 钻探、取样、原位测试应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》（GB50021）的规定，土工试验应符合现行国家标准《土工试验标准》（GB/T50123）的规定，水文地质试验孔施工应符合现行国家标准《管井技术规范》（GB50296）。

5.2 水文地质调查与测绘

5.2.1 水文地质调查与测绘实施前应基于已有资料分析基坑工程的主要水文地质问题，制定水文地质调查和测绘的工作要点，为水文地质勘探与试验工作布置提供依据。调查与测绘内容和方法，应根据任务要求、基坑工程特点和水文地质条件确定。

5.2.2 建设场地及周边水文地质资料搜集宜包括以下内容：

- 1 勘察场地所属的气候分带、气温及其昼夜和季节变化，大气降水量及其季节变化与多年变化、枯水期和丰水期、多年平均降水量、历年最小和最大降水量，大气降水入渗系数，暴雨、台风等灾害性天气等；
- 2 滨海地带的最低、最高和平均潮位，洪水、风暴潮等灾害情况；
- 3 地表水的水位和流量及其季节变化和多年变化；

- 4 地表水与地下水之间的补给、排泄关系；
- 5 含水层（带）的类型、埋藏条件、分布规律、富水性、补给、径流、排泄条件；
- 6 相邻工程资料及地下水控制经验；
- 8 地下水水质和污染情况；
- 9 地下水的开发与利用现状和开发规划。

5.2.3 建设场地及周边水文地质调查宜包括以下内容：

- 1 区域地形地貌、地层岩性、地层年代、地质构造、地表水系、植被分布等；
- 2 不同岩（土）组空间分布特征、物理性状及其渗透性；
- 3 含水介质类型、富水性以及含（隔）水层的划分；
- 4 场地所属水文地质单元特征；
- 5 大气降水渗透补给条件，地下水与地表水体、以及各含水层之间的水力联系特征、补给、排泄关系；
- 6 古河道（带）与河间洼地分布区的地貌特征及其对地下水的控制作用；
- 7 地下水露头（井、泉等）情况及动态特征；
- 8 人类活动对地表、地下水的影响；
- 9 影响基坑工程所在区域地下水补给、径流、排泄的既有地下结构和其他阻水体的分布情况及相关规划内容。

5.2.4 水文地质测绘的观测路线应符合下列要求：

- 1 场地及周边地下水露头较多时，应沿地下水露头分布方向布置；
- 2 含水层分布复杂地段应沿含水层走向布置；
- 3 场地及周边可划分为多个地貌单元时，应沿地貌变化方向，垂直和平行地下水流向布置；
- 4 场地存在顺层结构面时，应沿垂直岩层走向或地质构造线走向布置。

5.2.5 水文地质观测点宜布置在能反映水文地质特征的地下水天然出露或人工揭露点、构造和岩溶发育带、含水层与隔水层接触带、不同地貌单元分界处。

5.2.6 地下水动态观测线、观测孔的布置，应能控制场区影响范围内的地下水动态变化，宜利用已有的勘探孔、井和泉眼等。地下水动态观测的延续时间应

根据工程要求确定，地下水位年度变化幅度较大且缺少相关水位年度变化资料的地区，地下水动态观测不宜少于 1 个水文年。

5.2.7 工程规模较大且地表环境较复杂时，可利用遥感影像资料进行判释和填图。遥感影像比例尺和遥感影像填图的野外工作量应根据工程规模合理选择。

5.3 水文地质物探

5.3.1 水文地质物探宜用于基岩裂隙水富集区和岩溶发育区探测以下内容：

- 1 覆盖层厚度、古河床和掩埋的冲洪积扇的位置；
- 2 隐伏地貌和岩性分界线；
- 3 岩溶发育情况、地下暗河等的分布；
- 4 基岩风化带和断层破碎带、充水裂隙带、不同岩性接触带的位置、宽度和充填情况；
- 5 含水层的埋深和厚度、地下水流向；
- 6 地下水富水区和贫水分界线等；
- 7 滨海区咸淡水分界线。

5.3.2 水文地质物探的工作内容、方法应根据地质体的物性差异、工程所在区域的水文地质条件，结合勘察任务和实际地形条件因地制宜地选择，并宜符合附录 B.0.1 的规定。当水文地质勘察等级为甲级时，应采用两种及以上物探方法综合探测。

5.3.3 在地面开展水文地质物探工作时，工作布置应符合下列规定：

- 1 布置范围应覆盖整个场区并适当外延；
- 2 应重点布置在地面调查难以判断或钻探工作困难区域；
- 3 测线应垂直含水层走向、储水构造、裂隙、岩溶发育带走向布置，测试深度应能反映含水层厚度；岩溶强烈发育场地宜采用测网形式布置；
- 4 物探测线宜与地质勘探线一致，并应尽量避免地形或其他干扰的影响；
- 5 测网和工作比例尺的选择应能反映探测的目标体，并可在平面图上清楚地标识出其位置和形态；

6 物探测线的间距应根据水文地质复杂程度和基坑工程地下水控制需要确定，可按先疏后密，局部加密原则布置，且测线数量不应少于 3 条。测点间距应满足所使用方法的分辨率要求，并宜符合附录 B.0.2 的规定。

5.3.4 对于地面物探发现的岩溶异常区域，应在代表性位置布置钻孔进行验证，验证性钻孔应穿透探明的岩溶异常区域，且宜进入稳定岩层不少于 2m。

5.3.5 水文地质物探测井宜在代表性水文地质钻孔中进行，测井数量不宜少于水文地质控制性勘探孔的 1/2。

5.3.6 水文地质物探使用的仪器设备和主要传感器的性能、精度应符合相应方法的及现行有关标准的要求。

5.4 水文地质勘探

5.4.1 水文地质勘探孔间距可根据地下水类型按表 5.4.1 确定。

表 4.1 不同地下水类型勘探孔的间距取用表

地下水类型	勘探孔孔距（m）
孔隙水	20~35
裂隙水	15~30
岩溶水	15~25

注： 1 水文地质勘察等级为甲级时取小值、丙级可取大值；
2 勘探孔宜结合岩土工程勘察布置，当地层起伏较大时宜加密钻孔的布置；
3 多种类型地下水时，孔间距按按高标准执行；
4 岩溶型地下水勘探孔的间距还应根据岩溶含水层的复杂程度合理调整。

5.4.2 符合下列情况时，勘探孔的布置应加密：

- 1 地面塌陷或地表水消失地段；
- 2 地下水强烈活动地段；
- 3 可溶岩和非可溶岩接触地段；
- 4 可溶岩埋藏较浅且起伏较大的石芽发育地段；
- 5 构造导水断层或导水破碎带以及交汇地段；
- 6 溶蚀洼地、串珠状漏斗发育地段；
- 7 物探成果异常地段。

5.4.3 水文地质勘探孔深度应根据场地地层、地下水条件和基坑挖深确定，应满足建立水文地质概念模型和地下水控制的要求，并应符合下列要求：

1 对孔隙水，水文地质勘探孔深度宜为基坑开挖深度的 2~3 倍，若在此深度内遇坚硬弱透水岩土层，钻探孔深度可适当减小；一般性勘探孔深度应进入最下一层降水目的含水层不小于 1m；控制性勘探孔宜穿透最下一层降水目的含水层并进入下伏地层不小于 3m，无法钻穿时勘探孔深度不应小于基坑开挖深度的 2~3 倍；

2 对裂隙水和岩溶水，一般性勘探孔宜钻穿或钻达对工程有影响的含水层或含水构造；基底位于可溶岩层时，控制性勘探孔深度宜至岩溶主要含水层底板以下不少于 2m，无法钻穿时钻探孔深度不宜小于基坑开挖深度的 2~3 倍。

5.4.4 当有地区经验时，可布置适量动力触探试验孔或静力触探试验孔等勘察手段替代水文地质钻探，但钻探孔的比例不应少于水文地质勘探孔总数的 1/4。

5.4.5 针对松散岩土层，室内试验除提供各含水层的渗透系数外，还应根据工程需要提供各含水层的粒径级配曲线，提供 d_3 、 d_5 、 d_{10} 、 d_{20} 、 d_{30} 、 d_{50} 、 d_{60} 等粒径值，并提供地下水控制目的含水层及其上覆或下伏弱透水层的压缩指数、回弹指数和固结系数等。

5.4.6 在钻探过程中，应根据需要对水位、水温、冲洗液消耗量、漏水位置、自流水水头和自流量、孔壁坍塌、涌砂和气体逸出情况、岩（土）层变层深度、含水构造和溶洞的起止深度等进行观测和记录。

5.4.7 水文地质钻探孔施工宜以清水作为循环液，并宜采用套管护壁；当采用泥浆护壁钻进时，应采取有效措施保证钻进过程中水位量测和水文地质参数测定的可靠性。

5.4.8 用于分层量测地下水位和分层进行水文地质试验时，应做好各含水层上下的止水工作，并检查止水效果。

5.4.9 水文地质钻孔的直径应满足地层岩性鉴别、取样及水文地质试验的技术要求，且不宜小于 91mm。

5.4.10 钻进深度和岩土分层深度的量测精度不应低于 $\pm 5\text{cm}$ ；量测稳定应水位应读至厘米，精度不得低于 $\pm 2\text{mm}$ 。

5.5 水文地质试验

5.5.1 水文地质试验方法可按表 5.5.1 选用。

表 5.5.1 常用水文地质试验方法

试验方法		主要适用范围	主要用途
抽水 试验	单孔 多孔	渗透性为弱透水及以上且富水性为弱富水性及以上地层。	1. 获取水文地质参数； 2. 比选工程降水井结构；
	群孔		3. 评估工程降水效果； 4. 评估降水环境影响。
回灌试验		1. 渗透性为弱透水及以上且富水性为弱富水性及以上地层； 2. 需采取地下水回灌措施控制基坑周边环境变形或保护水资源时。	1. 获取水文地质参数； 2. 确定回灌参数； 3. 评估工程回灌效果。
微水试验		周边环境条件敏感不宜进行抽水试验时。	获取渗透系数、贮水系数等。
压水试验		岩层。	探查岩层裂隙性和渗透性。
注水试验		1. 地下水埋藏很深，不便于开展抽水试验时； 2. 地下水位以上的透水地层； 3. 地下水水位以下渗透性为弱透水层及以下的地层。	获取渗透系数
连通试验		1. 渗透性为弱透水及以上且富水性为弱富水性及以上地层； 2. 水平运动为主的裂隙水、岩溶水。	1. 测定地下水流速、流向和弥散度； 2. 查明地下水运动途径，判断场地不同部位裂隙或岩溶间连通性。

注： 1 土体岩体渗透性分级参建附录 C；
2 土体富水性分级参建附录 D。

5.5.2 当符合下列条件之一时，宜进行群孔抽水试验：

- 1 需验证拟建场地基坑工程降水的可行性和风险评估；
- 2 需分析单孔出水量受群井抽水后的影响；
- 3 需查明拟建场地基坑工程降水对地面沉降或周边环境的影响。

5.5.3 当需分析评估地下水控制对周边环境的影响时，应在抽水试验和回灌试验期间同步开展环境监测，环境监测内容宜包括地面沉降、周边环境沉降、土体分层竖向位移和孔隙水压力等。

5.5.4 环境监测应满足下列要求：

- 1 监测项目的初始值应在现场试验开始前 7d 测定，并取至少连续 3 次稳定测量值的平均值或中值；
- 2 地面沉降监测点间距不宜大于 10m，布置范围和方式能满足地面沉降预估需求，可采用方格网、米字形等方式布置；

- 3 包括水位恢复期在内的群孔抽水试验监测总时间不宜小于 15d;
- 4 土体分层竖向位移监测和孔压监测宜采用自动化监测,土体分层竖向位移自动化监测频率不宜大于 60min/次,孔压自动化监测频率不宜大于 5min/次;
- 5 地面沉降、周边环境沉降、土体分层竖向位移的人工监测频率不宜大于 1d/次,孔压人工监测频率宜与水位监测频率一致;
- 6 各种监测资料应能相互验证。

5.5.5 地面沉降、土体分层(深层)竖向位移及周边环境沉降的监测宜采用几何水准或静力水准测量等方法,并应符合现行行业标准《建筑变形测量规范》(JGJ8)的规定;孔隙水压力量测应符合现行国家标准《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911)的规定。

5.5.6 同一项目的监测宜符合下列要求:

- 1 采用相同的观测方法和观测路线;
- 2 使用同一型号监测仪器和设备;
- 3 在基本相同的环境和条件下工作。

I 抽水试验

5.5.7 抽水孔应符合下列要求:

- 1 抽水孔的布置根据工程性质、工程地质与水文地质条件、场地环境条件等因素综合确定;
- 2 开展群孔抽水试验时,抽水孔不宜少于 3 口,且宜按正多边形布设,孔间距宜为 10m~20m;
- 3 抽水孔结构应满足水文地质模型及水文地质参数计算的要求,并宜便于工程降水井的比选;
- 4 抽水孔过滤器内径在松散层中宜不小于 200mm,在基岩中宜不小于 100mm;
- 5 抽出地下水的稳定含砂量体积比应不大于 1/20000。

5.5.8 水位观测孔应符合下列要求:

- 1 对均质无限边界含水层,以抽水孔为原点,宜布置 1 条~2 条观测线,布置 1 条观测线时,宜垂直地下水流向布置;布置 2 条观测线时,宜分别垂直和平行地下水流向布置;

2 对水平方向非均质无限边界含水层，宜垂直和平行地下水流向布置 2~3 条观测线，或沿含水层非均质变化最大方向布置；对有界含水层应垂直、平行边界布置，宜在边界附近增设观测孔；

3 对岩溶水和基岩裂隙水，应分别考虑富水地段、水流方向、富水性弱的地段布置；

4 同一地层中每条观测线上的观测孔不宜少于 2 个，水文地质条件复杂或有特殊要求时，可适当增加；

5 观测孔与抽水孔的距离，应根据试验场地的水文地质条件确定，保证最远观测孔水位达到一定降深值，且应符合后期水文地质计算的要求；

6 各观测孔的过滤器长度宜相等，且内径不宜小于 75mm；

7 试验前检验观测孔灵敏度，确保观测水位数据的有效性。

5.5.9 抽水试验应符合下列要求：

1 对富水性强的大厚度含水层，垂向可划分几个试验段，根据需要可对其一段或几段进行分段抽水试验；对多层含水层作分层研究时，应进行分层抽水试验；

2 采用数值法分析场地水文地质条件时，宜进行大流量、大降深的多孔或群孔非稳定流抽水试验；

3 抽水试验前及抽水试验中，应同步测量抽水孔和观测孔、周边水文地质点的自然水位、动水位；自然水位的日动态变化较大时，应掌握其变化规律，并分析对抽水试验结果的影响；

4 水位测量应读数至 cm；当采用堰箱或孔板流量计测量抽水量时，水位测量应读数至 mm；当采用容积法测量时，量桶充满水所需时间不宜少于 15s，精度应达到 0.1s；采用水表测流量时，读数至 0.1m³；

6 水质分析水样宜在抽水试验结束前采集，根据水质分析要求确定采集件数和数量；

7 停止抽水后，应测量抽水孔与观测孔的恢复水位。

5.5.10 单孔或多孔的稳定流抽水试验、非稳定流抽水试验应符合现行国家标准《供水水文地质地质规范》（GB50027）的规定。

5.5.11 群孔抽水试验应符合下列要求：

1 群孔抽水试验的抽水孔数量、总抽水量及延续时间宜根据场地水文地质条件及试验目的确定；

2 进行群孔抽水试验时，应同步观测勘察区内及勘察区周边的水文地质点与地表水体的水位变化；

3 需评价工程降排水对周边环境的影响时，抽水时间不宜少于 7d，总时间不宜少于 15d；

4 群孔抽水试验的抽水量和动水位观测时间应符合下列规定：

1) 抽水量稳定后，抽水孔出水量波动值不宜大于平均值的 5%；

2) 进行抽水试验时，宜在抽水开始后的第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min 各观测 1 次水位，以后可每隔 30min 观测 1 次，超过 1d 后，可每隔 240min 观测 1 次；

3) 进行抽水试验时，宜在抽水开始后的第 10、20、30、60、120min 各观测 1 次抽水量，以后可每隔 120min 观测 1 次，超过 1d 后，可每隔 240min 观测 1 次。

4) 宜在停止抽水后的第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min 各观测 1 次水位，以后可每隔 60min 观测 1 次，超过 1d 后，可每隔 240min 观测 1 次。

5) 宜采用自动化测量方法进行水位观测。

II 注水试验

5.5.12 钻孔注水试验孔位及试验段应结合钻探资料确定，试验段应选择在同一土层中，不应跨越透水性相差悬殊的两种土层，且不应跨越地下水位线；试验段长度宜为 2m~5m；对孔壁稳定性较差的试验段宜采用过滤器护壁。

5.5.13 钻孔注水试验可分为定水头注水试验和降水头注水试验。定水头注水试验宜用于渗透性较强的土体及破碎岩体；降水头注水试验宜用于地下水位以下渗透性较弱的土体。

5.5.14 定水头注水试验应符合下列规定：

1 注水试验水位应高于地下水位 1m 且高于试验段顶部；

2 注水至试验水位后，应随时调整流量以保持水头稳定，水位变幅不应超过 $\pm 2\text{cm}$ ；

3 试验开始后应每隔 5min 量测一次注水流量，连续量测 5 次，之后每隔 20min 量测 1 次，连续量测不少于 6 次；

4 当连续 2 次量测的注入流量之差不大于最后一次注入流量的 10%，且无持续增减趋势时，可结束试验，取最后一次注入流量作为计算值；

5 应绘制流量 q 与时间 t 关系曲线，并检查流量是否稳定，确定流量计算值。

5.5.15 降水头注水试验应符合下列规定：

1 注水试验水位宜至工作管管口，注水至试验水位后，应停止注水，开始水位观测；

2 管中水位的观测时间，开始应每隔 1min 量测 1 次，连续量测 5 次；之后应每隔 10min 量测一次，连续量测 3 次；后期观测间隔时间应根据水位下降速度确定，可按 30min 间隔进行；

3 应在半对数坐标图上绘制水头比 H_t/H_0 与时间 t 的关系曲线，当观测点在图上未呈明显的线性关系时，应检查并重新试验。

4 当试验水头下降至初始试验水头的 0.3 倍，或连续观测点达到 10 个以上且在 $\ln(H_t/H_0) - t$ 关系曲线图上呈线性关系时，可结束试验。

III 压水试验

5.5.16 压水试验应根据工程要求，结合工程地质测绘和钻探资料，确定试验孔位，按岩层的渗透特性划分试验段。

5.5.17 试验孔孔径宜为 59mm~150mm，试验段长度宜为 5m；含断层破碎带、裂隙密集带、岩溶洞穴的孔段，应根据具体情况确定试验段长度，相邻试验段应相互衔接，残留岩芯可计入试验段长度之内；试验段应采用栓塞隔离。

5.5.18 压水试验应符合下列规定：

1 试验前应观测试验段的地下水水位，并应确定压力计算零线。地下水水位应每间隔 5min 观测 1 次，当连续 3 次读数的水位变幅小于 8cm/h，可视为稳定。如各试验段位于同一含水层中，可统一测定地下水水位。

2 压水试验应按三级压力、五个阶段进行，应按需要确定试验的起始压力、最大压力和压力级数。

3 试验时应同时观测压力和流量，宜每间隔 5min 观测一次，压力应保持稳定，当连续 4 次流量读数的最大值和最小值之差小于平均值的 10%或 1L/min 时即可结束；重要试验，稳定延续时间应超过 2h。

4 压水试验应绘制压力与压入流量 P-Q 关系曲线，确定流态。

5 试验中，应对受影响的井、洞、孔、泉等进行水位或流量观测。

IV 微水试验

5.5.19 试验前，应根据钻探资料，确定试验孔位和试验段，明确水头变化激发方式。

5.5.20 微水试验水头变化激发方式可分为振荡器式、气压式、注水式或抽水式，激发方式的选择宜符合下列规定：

1 强透水性岩土体宜使用气压式；

2 地下水位埋深较浅的中~微透水性岩土体宜使用振荡器式、注水式或抽水式；

3 地下水位埋深较深的中~微透水性岩土体宜使用注水式。

5.5.21 微水试验应符合下列规定：

1 使用振荡器式、注水式或抽水式激发时，激发过程时间应控制在 5s 以内，待水位恢复到初始水位，宜延长 1min~2min 结束试验；

2 使用气压式激发时，应向试验孔内充气至压力表读数或水头曲线相对稳定后，迅速打开放气阀；待水位恢复到初始水位，宜延长 1min~2min 结束试验。

3 注水式或抽水式微水试验记录数据应包括初始水位埋深、注水或抽水流量、激发水头、激发时间、水位变化等；

4 振荡器式微水试验记录数据应包括初始水位埋深、振荡器体积、激发水头、激发时间、水位变化等；

5 气压式微水试验记录数据应包括初始水位埋深、试验孔内压力、加压时间、水位变化等；

6 微水试验应采用自动化水位采集设备，传感器量程及精度应满足试验要求；

7 微水试验时，应根据试验进程绘制试验孔内恢复水位 H 与时间 t 关系曲线。

V 回灌试验

5.5.22 回灌试验应满足下列要求：

- 1 回灌孔的布置应根据勘察目的与勘察等级、水文地质条件和环境保护要求等因素确定；
- 2 观测孔布置应符合下列要求：
 - 1) 以回灌孔为原点布置 1~2 条观测线，宜垂直地下水流向布置；
 - 2) 沿观测线布置的观测孔不宜少于 3 个；
 - 3) 观测孔与回灌孔的距离，应根据试验场地的水文地质条件确定。
- 3 当需对多层含水层作分层回灌时，应进行分层回灌试验；
- 4 回灌孔的工后休止期应根据回灌试验方法确定；
- 5 在回灌试验前及回灌试验中，应同步量测回灌孔、观测孔、周边水文地质点的自然水位、动水位；自然水位的日动态变化较大时，应掌握其变化规律对回灌试验的影响；
- 6 回灌试验中，水位和回灌水量的监测应符合 5.5.11 条的规定；
- 7 停止回灌后，应测量回灌孔与观测孔的恢复水位，水位监测应符合 5.5.11 条的规定。

5.5.23 以承压含水层为回灌目的含水层时，回灌孔结构应符合下列要求：

- 1 滤料充填面应高出滤管顶部 3m 以上；
- 2 黏土球封闭层的竖向厚度不小于 5m；
- 3 黏土球封闭层顶至地面之间的井管外侧环状空隙宜采用注浆或混凝土充填。

5.5.24 回灌试验宜进行至水位趋于稳定，并应符合下列要求：

- 1 在回灌稳定延续期内，回灌孔的回灌量和动水位的时间关系曲线只在一定范围内波动，且无持续上升或下降的趋势；
- 2 观测孔内的水位在连续 2h 内的波动值不大于 20mm/h。

5.5.25 回灌水源可采用自来水或经水质处理后的同层地下水，也可采用各项水质指标不劣于回灌目标含水层的异层地下水。

5.5.26 回灌试验资料的现场整理应符合下列要求：

- 1 根据单孔回灌试验进程，绘制各试验孔的 Q_h-t 、 Q_h-S_h 曲线；

2 根据单孔回灌试验进程, 绘制 $\lg s_h - \lg t$ 、 $s_h - \lg t$ 曲线。当观测孔数量不少于 3 个时, 应绘制水位变化趋于稳定的 $s_h - \lg r$ 曲线;

3 根据群孔回灌试验进程, 绘制总回灌量的 $Q_h - t$ 历时曲线、各观测孔的 $Q_h - s_h$ 曲线。当有地层变形观测资料时, 应绘制对应观测孔的恢复水位与地层变形关系曲线 $s_h - \epsilon$ 。

VI 地下水连通试验

5.5.27 连通试验应根据试验的目的和具有的条件, 选择合适的方法。根据连通试验的传导介质不同可分为水位传递法、示踪剂法、气体传递法等。

5.5.28 水位传递法宜利用天然通道或钻孔, 进行闸水、放水、堵水或抽水、注水, 观测上下游水位、水量、水色之变化。

5.5.29 示踪剂法应根据地下水的流速、流态、流途长短的不同, 分别在上游投放浮标、指示剂等。

5.5.30 气体传递法宜在与地下水有联系的无水溶洞或裂隙内使用。

5.5.31 定量评价时, 应准确记录试验点和观测点的位置坐标、高程数据, 试验开始时间和观测到的初始时间, 峰值时间、消退时间等。对采用示踪剂法时, 可采用定量回收试验, 需同时观测地下水的流量等指标, 以便计算回收率。

5.5.32 定量回收试验应及时绘制指示剂的接收浓度历时曲线。多点回收的, 应分析各点的浓度变化比例。

6 水文地质参数计算

6.1 一般规定

6.1.1 水文地质参数计算前应根据勘察成果建立合理的水文地质概念模型，水文地质概念模型应正确反映场地水文地质条件。

6.1.2 水文地质参数计算方法的选用应符合下列要求：

- 1 可选用解析法或数值法；
- 2 岩溶发育区，宜采用径流模数法。

6.1.3 利用抽水试验资料计算水文地质参数时，应符合下列要求：

- 1 应采用同步精确计量的抽水量和观测孔水位资料；
- 2 应根据 $Q-s$ 或 $q-s$ 曲线判定含水层、边界及试验质量；
- 3 宜采用单孔或多孔抽水试验数据计算水文地质参数，可采用群孔抽水试验复核水文地质参数。

6.2 渗透系数

6.2.1 当具备稳定流抽水试验资料，且观测孔中的 $s-lgr$ 或 Δh^2-lgr 曲线呈线性关系时，可按附录 F 表 F.0.1 计算渗透系数。

6.2.2 当具备无越流的非稳定流抽水试验资料时，可按附录 F 表 F.0.2 计算渗透系数、导水系数和压力传导系数。

6.2.3 当具备有越流的非稳定流抽水试验资料时，可按附录 F 表 F.0.3 计算渗透系数、导水系数、压力传导系数和越流因子。

6.2.4 当具备抽水试验的水位恢复资料时，可按附录 F 表 F.0.4 计算渗透系数、导水系数和压力传导系数。

6.2.5 当具备微水试验测得的水位恢复资料时，可按附录 F 表 F.0.5 计算承压含水层的渗透系数。

6.2.6 当具备定水头注水试验资料时，可按式 6.2.6 计算渗透系数 k 。

$$k = \frac{Q}{FH} \quad (6.2.6)$$

式中： k —— 渗透系数（cm/min）；
 Q —— 稳定流量（cm³/min）；
 H —— 固定水头高度（cm）；
 F —— 钻孔注水试验形状系数，由钻孔和水流边界条件确定，按本标准附录 G 选用。

6.2.7 当具备降水头注水试验资料时，可按式 6.2.7-1 计算渗透系数 k 。

$$k = \frac{A}{FT'} \quad (6.2.7)$$

式中： A —— 注水管内径截面积（cm²）；
 T' —— 滞后时间（min）。

6.2.8 滞后时间可用 $H_t/H_0=0.37$ 时对应的时间，也可用图解法或计算法确定，并应符合下列要求。

1 采用图解法时，应取 $\ln(H_t/H_0)$ - t 关系图，最佳拟合直线与 1:0.37 横线相交点所对应的时间（滞后时间）；

2 采用计算法时，可按式 6.2.8 计算。

$$T' = \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)} \quad (6.2.8)$$

式中： H_1 —— 在时间 t_1 时的试验水头（cm）；
 H_2 —— 在时间 t_2 时的试验水头（cm）。

6.2.9 当具备压水试验资料时，可按式 6.2.9-1 或式 6.2.9-2 估算渗透系数 k 。

当试验段底部距离隔水层厚度大于等于试验段长度时：

$$k = 0.527\omega \lg \frac{0.66L}{r} \quad (6.2.9-1)$$

当试验段底部距离隔水层厚度小于试验段长度时：

$$k = 0.527\omega \lg \frac{1.32L}{r} \quad (6.2.9-2)$$

式中： ω —— 单位吸水量（L/(min·m²))， $\omega = Q/(LP)$ ；

Q —— 钻孔压水的稳定流量（L/min）；

L —— 试验段长度（m）；

P —— 试验段压水时所加的总压力（N/cm²）；

k —— 试验岩溶含水介质渗透系数 (m/d) ;

r —— 钻孔半径 (滤水半径) (m) 。

6.2.10 符合下列情形之一时, 宜采用数值法计算渗透系数:

- 1 含水层厚度不均匀, 且需要考虑含水层的非均质各向异性渗透性质;
- 2 含水层存在既有或新建地下结构, 以及其他阻水体;
- 3 试验数据为群孔抽水试验资料;
- 4 含水层存在越流, 观测井分布于不同含水层, 需同时计算多个含水层的渗透系数。

6.2.11 在采用数值法计算渗透系数时, 应符合以下规定:

- 1 宜根据当地经验和抽水试验解析法确定初值;
- 2 应基于抽水试验数据, 采用试算-修正法反演渗透系数;
- 3 应考虑地层各向异性。

6.2.12 勘察区存在基岩露头时, 可采用裂隙统计方法计算裂隙岩体渗透系数初值。

6.2.13 采用多种方法确定的渗透系数为同一数量级时, 宜按最不利工况取值; 不为同一数量级时, 应复核抽水试验边界并优先按数值法取值。

6.3 给水度和储水系数

6.3.1 当具备非稳定流抽水试验资料, 可按附录 F 表 F.0.6 计算给水度。

6.3.2 储水系数的计算应满足下列要求:

- 1 当具备非稳定流抽水试验资料时, 可按附录 F 表 F.0.2 和表 F.0.3 计算;
- 2 当具备稳定流或非稳定流抽水试验的水位恢复资料时, 可按附录 F 表 F.0.4 计算;
- 3 当具备微水试验的水位恢复资料时, 可按附录 F 表 F.0.5 计算。

6.3.3 当具备数值建模条件时, 给水度和储水系数可采用数值法反演计算。

6.4 单孔影响半径

6.4.1 当具备稳定流抽水试验资料时, 可按附录 F 表 F.0.7 计算单孔影响半径。

6.4.2 稳定流抽水试验的观测孔数不少于 3 个时，可采用 s-lgr 直线图解法确定单孔影响半径。

6.4.3 采用数值法确定单孔影响半径时，模型的平面范围应取至天然水力边界或水位降深为零处，宜取为影响半径解析值或经验值的 4~6 倍，且扣除自然波动幅度后边界处水位降深不宜大于 0.1m。

6.5 单位出水量和群孔影响系数

6.5.1 当具备稳定流抽水试验资料时，可按式 6.5.1 计算单孔单位滤管出水量。

$$q = \frac{Q}{l\Delta h} \quad (6.5.1)$$

式中： q —— 单孔单位出水量 ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$)；
 Q —— 抽水孔的稳定流量 (m^3/h)；
 l —— 抽水孔滤管长度 (m)；
 Δh —— 动水位降深 (m)。

6.5.2 当同时具备单孔（多孔）和群孔抽水试验资料时，可按式 6.5.2 计算群孔影响系数。

$$\xi_i = \frac{Q_G}{Q_s} \quad (6.5.2)$$

式中： ξ_i —— 群孔影响系数，i 为群孔抽水试验中抽水孔数量；
 Q_G —— 群孔抽水试验单孔出水量 (m^3/h)；
 Q_s —— 单孔或多孔抽水试验单孔出水量 (m^3/h)。

6.6 回灌参数

6.6.1 单孔回灌量可根据单孔回灌试验的回灌量历时曲线 Q_h-t 确定，取趋于稳定的曲线段的回灌量平均值或中值。

6.6.2 单孔回灌影响半径 R_h 的计算应符合下列规定：

- 1 当具备单孔回灌试验资料时，可按附录 F 表 F.0.7 计算；
- 2 当观测孔数量不少于 3 个时，可采用 $s_h\text{-lgr}$ 直线图解法确定。

6.6.3 群孔回灌影响半径 R_H 的计算应符合下列规定：

1 宜根据群孔回灌试验资料, 采用数值法确定以群孔中心为原点的群孔回灌影响半径;

2 不具备回灌试验资料时, 可采用“大井法”计算群孔回灌影响半径。

6.6.4 当同时具备单孔和群孔回灌试验资料时, 可按式 6.6.4 计算群孔回灌影响系数。

$$\varsigma_i = \frac{Q'_G}{Q'_S} \quad (6.6.4)$$

式中: ς_i —— 群孔回灌影响系数, i 为群孔回灌试验中回灌孔数量;

Q'_G —— 群孔回灌试验单孔回灌量 (m^3/h);

Q'_S —— 单孔回灌试验单孔回灌量 (m^3/h)。

6.6.5 当具备回灌试验资料时, 可按式 6.6.5-1 计算水量回灌率 δ_Q , 按式 6.6.5-2 计算回灌水位回升率 δ_{sh} 。

$$\delta_Q = \frac{Q_h}{Q_0} \times 100\% \quad (6.6.5-1)$$

$$\delta_{sh} = \frac{s_h}{s} \times 100\% \quad (6.6.5-2)$$

式中: Q_h —— 单孔回灌量或群孔回灌总量 (m^3/h);

Q_0 —— 单孔涌水量或群孔涌水总量 (m^3/h);

s_h —— 距回灌孔 $0.5R_h$ 处或距回灌孔群中心 $0.5R_H$ 处, 趋于稳定的恢复水位升幅 (m);

s —— 距回灌孔 $0.5R_h$ 处或距回灌孔群中心 $0.5R_H$ 处, 回灌前的稳定水位降深 (m)。

6.6.6 回灌地层回弹率 δ_ε 可根据回灌试验资料按式 6.6.6 计算。

$$\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_h} \quad (6.6.6)$$

式中: ε —— 距回灌孔 r 处或距回灌孔群中心 r 处, 回灌引起的地层竖向回弹变形 (mm);

ε_h —— 距回灌孔 r 处或距回灌孔群中心 r 处, 水位趋于稳定时的水位升幅 (m), 可根据水位观测或 $\lg s_h - \lg r^2$ 曲线确定。

7 基坑工程水文地质分析评价

7.1 一般规定

7.1.1 水文地质分析评价应具备下列条件：

- 1 基坑工程信息，包括基坑规模和支护型式等；
- 2 场地的水文地质条件；
- 3 基坑工程地下水控制影响范围内保护对象特性，包括建（构）筑物结构、基础型式和变形控制要求等；
- 4 影响基坑工程所在区域地下水补给、径流、排泄的既有地下结构和其他阻水体的分布情况；
- 5 类似工程的地下水控制经验，及相邻工程地下水控制措施对拟建工程、周边环境保护对象和水资源的影响。

7.1.2 基坑工程的水文地质分析评价应包含以下内容：

- 1 根据现场勘察成果及区域地质资料等，分析场地及周边地区含水层（组）的岩性、水平与竖向分布规律，明确含水层类型；
- 2 根据现场试验资料、现有地质资料按本标准附录 D、附录 E 的规定，评价各含水层的富水性、各含水层之间的水力联系；
- 3 根据基坑工程性质、场地水文地质条件，分析评价场地各层地下水对基坑工程设计与施工的影响；
- 4 根据基坑工程信息和水文地质勘察成果，依据勘察任务要求，分析评价地下水控制对周边保护对象和区域水资源的影响；
- 5 需采取回灌措施时，根据地下水水样分析结果，提出将同层地下水作为回灌水源的水质控制要求及水质处理的建议，提出回灌可行性分析；根据需要分析评价回灌对控制环境保护对象变形或保护地下水资源的有效性；
- 6 需调查场地地下水污染现状及基坑工程对污染源影响时，应根据地下水水样全分析结果，分析地下水的污染物质组分和浓度；应根据场地污染源调查与分析、地下水流速与流向等，分析场地地下水污染状况及污染物的扩散范围，评价基坑工程地下水控制对污染物的影响；

7 在岩溶、土洞、塌陷、滑坡、地面沉降等地质灾害发育地区，应根据工程需要和具体地质情况，评估基坑工程地下水控制对地质灾害隐患的影响。

7.1.3 当具备足够样本的试验结果时，水文地质参数取值应符合下列规定：

- 1 按不同的水文地质单元进行分层统计；
- 2 宜根据现有经验进行子样的取舍，并剔除异常值；
- 3 可提供含水层水文地质参数的范围值，并提出设计建议值；
- 4 可根据岩土工程勘察报告及地区经验，提出弱透水层渗透系数的设计建议值。

7.1.4 地下水控制方案应遵循保障工程安全、节约水资源和满足环境控制要求的原则，根据工程地质和水文地质条件、基坑周边环境保护要求及支护结构形式选用截水、降水、排水、回灌或其组合方法。

7.1.5 对于孔隙水和裂隙水，基坑涌水量可按现行行业标准《建筑与市政工程地下水控制技术规范》（JGJ111）的相关规定进行估算。

7.1.6 对于岩溶发育区，基坑涌水量可采用多种方法计算比较综合确定，并应分别评价丰水期、平水期和枯水期的基坑涌水量。当采用水均衡法、水文地质解析法或水文地质比拟法时，可按本标准附录 H 估算。

7.2 地下水对基坑工程影响的分析评价

7.2.1 地下水对基坑工程的影响分析评价应包括下列内容：

- 1 对有水头压差的粉细砂、粉土，应评价产生潜蚀、流土、管涌的可能性；
- 2 当基坑底面以下存在承压水时，应分析评价承压水产生突涌的可能性；
- 3 对地下水位以下用作永久结构的基坑围护结构，应评价地下水对其建筑材料的腐蚀性；
- 4 对软质岩、强风化岩、残积土、湿陷性土、膨胀岩土和盐渍岩土，应评价地下水位的变化所产生的软化、崩解、湿陷、胀缩和潜蚀等有害作用；
- 5 对冻土，应评价地下水对土的冻胀和融沉的影响。

7.2.2 采用降排水的基坑工程，应按式 7.2.2-1 和式 7.2.2-2 验算基坑开挖后地基土的抗流土或抗管涌稳定性。

$$\frac{I_{cr}}{I} \leq K_f \quad (7.2.2-1)$$

$$I = \frac{h_w}{L} \quad (7.2.2-2)$$

式中： K_f —— 抗流土或抗管涌稳定性系数，可按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120）或相关地方标准的规定确定；

I_{cr} —— 临界水力坡降；

I —— 最大水力坡降；

L —— 最短渗流路径总长度（m）；

h_w —— 基坑内外土体渗流水头（m），取坑内外地下水位差。

7.2.3 流土与管涌的临界水力坡降宜采用下列方法确定：

1 流土型宜采用式 7.2.3-1 和 7.2.3-2 计算：

$$I_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (7.2.3-1)$$

$$I_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \quad (7.2.3-2)$$

式中： γ' —— 土的浮容重（kN/m³）；

G_s —— 土的颗粒比重；

n —— 土的孔隙率。

2 管涌或过渡型可采用式 7.2.3-3 计算：

$$I_{cr} = 2.2(G_s - 1)(1 - n)^2 \frac{d_5}{d_{20}} \quad (7.2.3-3)$$

式中： d_5 、 d_{20} —— 分别为小于该粒径的含量占总土重 5%和 20%的颗粒粒径（mm）。

3 管涌型也可采用式 7.2.3-4 计算：

$$I_{cr} = \frac{42d_3}{\sqrt{\frac{k}{n^3}}} \quad (7.2.3-4)$$

式中： k —— 土的渗透系数（cm/s）；

d_3 —— 小于该粒径的含量占总土重 3%的颗粒粒径（mm）。

7.2.4 基坑开挖面以下存在承压含水层且其上部存在弱透水层时，应按式

7.2.4 验算开挖过程中此弱透水层的抗承压水突涌稳定性。

$$\frac{\sum D_i \gamma_i}{H_w \gamma_w} \geq K_h \quad (7.2.4)$$

式中： K_h —— 抗承压水突涌稳定性系数，可应按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120）或相关地方标准的规定确定；

D_i —— 承压含水层顶面至基坑底所分布的各土层厚度（m）；

γ_i —— 承压含水层顶面至基坑底所分布的各土层天然重度（ kN/m^3 ）；

H_w —— 承压含水层顶面的压力水头高度（m）；

γ_w —— 水的重度（ kN/m^3 ）。

7.3 地下水控制的环境影响分析评价

7.3.1 地下水控制设计应保证基坑开挖过程的正常施工，并应减少对周边环境的不利影响，且不得恶化地下水水质。

7.3.2 当基坑工程施工期间大量降排水时，应评价降排水引发的下列环境影响问题：

1 降排水形成区域性降落漏斗范围和引发地下水补给、径流、排泄条件变化；

2 降排水引发地面沉降和周边保护对象的附加沉降。

7.3.3 当基坑降排水会对周边建（构）筑物等造成危害或对工程环境造成长期不利影响时，可采用截水帷幕控制地下水，并应满足如下要求：

1 竖向截水帷幕平面布置宜沿基坑周边连续布置并呈封闭状；

2 当坑底以下存在连续分布、埋深较浅的隔水层时，应采用落底式竖向截水帷幕；当基坑底部以下含水层厚度较大，隔水层不连续或埋深较深时，可采用悬挂式截水帷幕，并应根据环境影响分析确定合理的截水帷幕深度，必要时可采取与水平截水帷幕相结合的措施。

7.3.4 降水方案应根据场地工程地质和水文地质条件、基坑规模、降水目的、基坑开挖工况及降水可能涉及的环境保护等因素等综合确定。

7.3.5 降水井的深度应根据设计水位降深、含水层的埋藏分布和降水井的出水能力等综合确定，过滤器宜设置在渗透性较好的土层中。

7.3.6 当坑底土体抗承压水稳定性不满足设计要求时，应进行承压水的减压降水，并应根据水文地质条件和基坑开挖深度确定基坑内承压水水头的安全埋深以及承压水水头的降深设计值。

7.3.7 宜基于水文地质概念模型构建基坑地下水渗流数学模型，采用数值分析方法预测地下水渗流场的时空分布，并应满足下列要求：

- 1 地下水渗流数学模型的构建应包括降排水影响范围内的地层、抽水井、回灌井、观测井、截水帷幕及阻隔地下水渗流的其它地下构筑物；
- 2 水文地质条件的概化以及计算域的大小，应能满足分析与评价的精度要求；
- 3 地下水流数学模型的输入数据能反映客观条件及实际降排水工况，包括初始地下水位，井的结构参数及空间坐标，抽（灌）水量的时空分布，地层空间分布参数，水文地质参数等。

7.3.8 当基坑涉及承压含水层并采用悬挂式截水帷幕结合坑内承压水减压的地下水控制方案时，应按如下方法评估地下水控制对周边环境的影响：

- 1 按本标准第 5.5 节的相关要求开展目标承压含水层的群孔抽水试验，并应同时进行土体变形监测；
- 2 建立群孔抽水试验的三维渗流分析模型，根据群孔抽水试验的成果，分别按本标准第 6.2.10 条和第 6.3.3 条的相关规定确定承压含水层的水文地质系数；
- 3 基于本条第 2 款得到的承压含水层的水文地质参数进行群孔抽水试验的三维渗流分析，获得各土层的水位降深并按本标准第 7.3.10 条的规定计算各土层有效应力增量，结合群孔抽水试验的地面沉降监测结果，按公式（7.3.9）反演分析群孔抽水试验的地面沉降经验系数；
- 4 结合群孔抽水试验的结果确定基坑的承压水降水方案，并按本标准第 7.3.7 条的规定开展基坑承压水降水的三维渗流分析，获得各土层的水位降深，在此基础上按本标准第 7.3.10 条的规定计算各土层有效应力增量；
- 5 按本标准第 7.3.9 条的分层总和法计算因地下水位下降引起的地面沉降，并在此基础上评价基坑工程减压降水对周边环境的影响。

7.3.9 降水引起的地面沉降量可采用分层总和法按式 7.3.9 计算。

$$s_j = \psi_w \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi} b_i}{E_{si}} \quad (7.3.9)$$

式中： s_j —— 降水引起的建筑物基础或地面的固结沉降量（m）；
 ψ_w —— 沉降经验系数；
 $\Delta\sigma'_{zi}$ —— 降水引起的地面下第 i 土层中点处的有效应力增量（kPa），对粘性土，应取降水结束时土的有效应力增量；
 b_i —— 第 i 层土的厚度（m）；
 E_{si} —— 第 i 层土的侧限压缩模量（kPa）；可取土的自重应力至自重应力与有效应力增量之和之间的压力段的压缩模量值；
对粉土、砂性，可根据原位测试指标换算确定。

7.3.10 降水引起土的有效应力增量可根据渗流计算得到的地下水位降深，按下列公式计算：

1 计算点位于初始地下水位以上时

$$\Delta\sigma'_{zi} = 0 \quad (7.3.10-1)$$

2 计算点位于降水水位与初始地下水位之间时

$$\Delta\sigma'_{zi} = \gamma_w a_0 \quad (7.3.10-2)$$

3 计算点位于降水水位以下时

$$\Delta\sigma'_{zi} = \gamma_w s_i \quad (7.3.10-3)$$

式中： s_i —— 计算点对应的地下水位降深（m）；
 a_0 —— 计算点至初始地下水位的垂直距离（m）。

7.3.11 当有可靠的工程经验时，可采用流固耦合方法分析基坑工程降排水对周边环境的影响，并应满足下列要求：

- 1 建立整个基坑的三维数值分析模型，包括各土层及坑内每层开挖土方、基坑围护墙及截水帷幕、水平支撑和竖向支承、基坑周边要保护的建（构）筑物等；
- 2 根据土层特性选择合理的土体本构模型并确定合理的计算参数；
- 3 设置符合实际的应力边界条件以及渗流的边界条件和初始条件；
- 4 按实际情况模拟基坑降水和土体开挖的施工过程。

7.3.12 当基坑外承压水水头降幅较大导致周边保护对象不能满足其变形控制要求，或需保护拟建场地及周边区域的地下水资源时，可采取回灌措施，并应符合下列要求：

- 1 应分析地下水回灌的可行性及回灌效应；
- 2 应开展回灌试验并确定回灌井结构参数、回灌井间距及单井回灌量、回灌压力值等；
- 3 应进行基坑截水-降水-回灌的一体化渗流场整体计算分析，并评估对周边环境的影响；
- 4 回灌宜首选同层地下水回灌；当采用非同层地下水回灌时，回灌水源的水质不应低于回灌目标含水层地下水的水质；当回灌目标含水层与饮用地下水联系较紧密时，回灌水源的水质应达到饮用水的标准。

7.3.13 当降水目标含水层富水性等级为中等富水～强富水时，应对地下水控制的运行提出如下建议内容：

- 1 提出预防断电、保证连续降排水的建议措施；
- 2 提出预防降排水不足或过量，保证按需降排水的建议措施；
- 3 提出控制降排水井施工质量、保证降排水能力的建议措施；
- 4 提出截水帷幕质量缺陷引起工程事故的应急抢险建议措施。

附录 A 地下水类型

表 A 地下水类型划分

地下水类型		特征
孔隙水	包气带水	包括非饱和带水、毛细水、上层滞水等
	潜水	存在于土的孔隙中，分布范围较大的，有统一水面的无压地下水
	承压水	存在于土的孔隙中，分布范围较大的层间有压地下水
裂隙水	包气带水	岩体裂隙带垂直入渗过程中的水
	潜水	存在于岩体裂隙中，分布范围较大的，有自由水面的无压地下水
	承压水	存在于岩体裂隙中的有压地下水
岩溶水	包气带水	溶隙和溶洞带垂直入渗过程的水
	潜水	存在于溶洞和溶隙中，分布范围较大的，有自由水面的无压地下水
	承压水	存在于溶洞和溶隙中的有压地下水

附录 B 常用物探方法及测点间距

B.0.1 水文地质物探方法应根据地质体的物性差异、基坑工程所在区域的水文地质条件，结合勘察任务和实际地形条件参考表 B.0.1 确定。

表 B.0.1 主要物探方法的应用范围

方法名称		应用范围
电法勘探	充电法	用于钻孔或水井中测定地下水流向、流速
	自然电场法	判定在岩溶及断裂带中地下水的活动情况
	激发极化法	测定含水层埋深和分布范围，评价含水层的富水程度
	电阻率剖面法	探测地层岩性在水平方向的电性变化，解决与平面位置有关的问题
	电阻率测深法	探测地层岩性在垂直方向的电性变化，解决与深度有关的地质问题
	高密度电法	探测浅部不均匀地质体的空间分布
电磁法勘探	音频电场法	探测断层、裂隙、地下洞穴及不同岩层界面
	瞬变电磁法	可在基岩裸露、沙漠、冻土及水面上探测破碎带、地下洞穴及水下第四系厚度
	探地雷达	探测地下洞穴、构造破碎带；划分地层结构
地震勘探	反射波法	探测不同深度的地层界面
	折射波法	探测覆盖层厚度及岩体埋深
	瑞雷波法	探测覆盖层厚度和分层
层析成像		探测溶洞、地下暗河、断裂破碎带等
综合测井	电测井	划分地层，区分岩性，确定裂隙破碎带的位置和厚度；确定含水层的位置、厚度；划分咸、淡水分界面；测定地层电阻率
	声波测井	区分岩性，确定裂隙破碎带的位置和厚度；测定地层的孔隙度
	放射性测井	划分地层；区分岩性，鉴别裂隙破碎带；确定岩层密度、孔隙度
	电视测井	确定钻孔中岩层节理、裂隙、断层、破碎带的位置；了解岩溶洞穴的情况

B.0.2 地面物探测点间距可根据物探方法按表 B.0.2 确定。

表 B.0.2 常用地面物探方法测点间距（单位：m）

物探方法	测点间距 (推荐值)	物探方法	测点间距 (推荐值)	物探方法	测点间距 (推荐值)
高密度电法	2~10 (5)	自然电位法	2~5 (5)	电磁波层析成像	0.5~2.0 (1.0)
电剖面法	2~10 (5)	电磁测深法	10~40 (25)	地震波层析成像	0.5~2.0 (1.0)
电测深法	5~20 (10)	瞬变电磁法	5~20 (10)	电阻率层析成像	1~5 (2)
激发极化法	5~20 (10)	音频电场法	1~5 (2)	氦气法 (a 卡法)	2~5 (5)
充电法	5~20 (10)	电磁感应法	1~5 (2)	核磁共振法	5~20 (10)

附录 C 土体岩体渗透性分级

表 C.0.1 土体渗透性等级划分

渗透性等级	渗透系数 k (cm/s)	土体性质
极微透水	$k < 10^{-6}$	黏土、淤泥质黏土
微透水	$10^{-6} \leq k < 10^{-5}$	粉质黏土、淤泥质粉质黏土
弱透水	$10^{-5} \leq k < 10^{-4}$	黏质粉土
中等透水	$10^{-4} \leq k < 10^{-3}$	黏质粉土、砂质粉土、
中强透水	$10^{-3} \leq k < 10^{-2}$	粉砂、细砂
强透水	$10^{-2} \leq k < 10^0$	中砂、粗砂、砾砂
极强透水	$k \geq 1$	均匀的漂砾

表 C.0.2 岩体渗透性等级划分

渗透性等级	透水率 q' (Lu)	岩体特征
极微透水	$q' < 0.1$	完整, 裂隙等价张开度 $< 0.025\text{mm}$
微透水	$0.1 \leq q' < 1$	裂隙等价张开度 $0.025 \sim 0.05\text{mm}$
弱透水	$1 \leq q' < 10$	裂隙等价张开度 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$
中等透水	$10 \leq q' < 100$	裂隙等价张开度 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$
强透水	$q' \geq 100$	裂隙等价张开度 $0.5 \sim 2.5\text{mm}$
极强透水		裂隙等价张开度 $> 2.5\text{mm}$, 连通孔洞

附录 D 土体富水性分级

表 D 土体富水性等级划分

富水性等级	单孔出水量 $Q(\text{m}^3/\text{h})$	单孔单位出水量 $q(\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m})$	土体性质
强	$Q \geq 30$	$q \geq 3$	中砂、粗砂
中等	$10 \leq Q < 30$	$1 \leq q < 3$	粉砂、细砂
弱	$1 \leq Q < 10$	$0.1 \leq q < 1$	粉土、黏性土粉砂互层、
极弱	$Q < 1$	$q < 0.1$	夹粉土、夹砂的黏性土

注：以水位降深为 10m、过滤管管径为 91mm 的单孔出水量及单孔单位出水量评价土体富水性、划分土体的富水等级。

附录 E 含水层水力联系程度

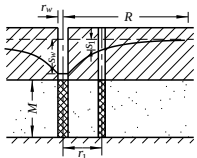
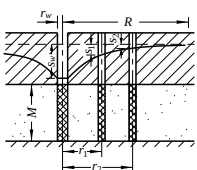
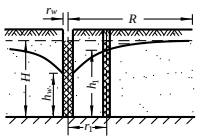
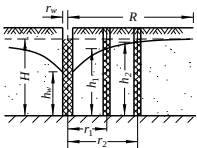
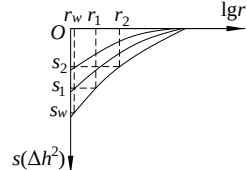
表 E 含水层水力联系程度

水力联系程度	含水层间弱透水层渗透系数	
	(m/d)	(cm/s)
强	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
较强	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
一般	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
弱	$< 10^{-4}$	$< 10^{-7}$

附录 F 水文地质参数计算公式

F.0.1 根据稳定流抽水试验资料计算含水层渗透系数，可按表 F.0.1 的要求进行。

表 F.0.1 稳定流抽水渗透系数计算

地下水类型	抽水孔类型	计算图式	计算公式	适用条件	说明
承压水	完整孔		$k = \frac{Q}{2\pi M (s_w - s_1)} \ln \frac{r_1}{r_w}$	1、1 个观测孔； 2、s-lgr 呈直线。	s ₁ —承压含水层观测孔 1 水位降深； s ₂ —承压含水层观测孔 2 水位降深； r ₁ —观测孔 1 至抽水孔距离；
			$k = \frac{Q}{2\pi M (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$	1、2 个观测孔； 2、s-lgr 呈直线。	r ₂ —观测孔 2 至抽水孔距离； h ₁ —抽水稳定后观测孔 1 处潜水含水层厚度； h ₂ —抽水稳定后观测孔 2 处潜水含水层厚度； s _w —抽水孔的水位降深； R—影响半径；
潜水	完整孔		$k = \frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_w^2)} \ln \frac{r_2}{r_w}$	1、1 个观测孔； 2、Δh ² -lgr 呈直线。	r _w —抽水孔半径； H—潜水含水层厚度； M—承压含水层厚度。
			$k = \frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$	1、2 个观测孔； 2、Δh ² -lgr 呈直线。	

F.0.2 利用非稳定流抽水试验资料，在无垂向越流的条件下，可采用标准曲线对比法（配线法）、直线图解法计算渗透系数、导水系数和压力传导系数，按表 F.0.2 的要求进行。

表 F.0.2 非稳定流抽水水文地质参数计算（无越流）

地下水类型	计算方法	示意图	计算公式	适用条件	说明
承压水	配线法 (Theis)	降深-时间配线法 	$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$ $S = \frac{4Tt}{r^2 (1/u)}$ $k = \frac{T}{M}$ $a = \frac{T}{S}$ $W(u) = \int_u^\infty \frac{1}{u} e^{-u} du$	1.无越流补给； 2.完整孔抽水或观测孔与抽水孔间距不小于 1.5M 的非完整孔抽水。	T—导水系数； S—储水系数； a—压力传导系数； M—承压含水层厚度； s—水位降深； r—观测孔至抽水孔距离； t—自抽水开始计的时间； W(u)—井函数； u—井函数自变量。 lgs-lgt 与 lgW(u)-lg(1/u) 拟合； lgs-lgr ² 与 lgW(u)-lg(u) 拟合。
		降深-距离配线法 		1.无越流补给； 2.完整孔抽水或观测孔与抽水孔间距不小于 1.5M 的非完整孔抽水； 3.有 3 个以上观测孔。	
	直线图解法 (Cooper-Jacob)	降深-时间直线图解法 降深-距离直线图解法 	$T = \frac{2.3Q}{4\pi i} = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s}$ $S = \frac{2.25Tt_0}{r_0^2}$	抽水时间足够长， u ≤ 0.01。	s-lgt 法：观测孔数 ≥ 1； s-lgr 法：观测孔数 ≥ 3； i—拟合直线斜率； Δs —一个对数周期的水位降深； t ₀ —拟合直线延长线与 t 轴的交点； r ₀ —拟合直线延长线与 r 轴的交点。
	配线法		$T = \frac{Q}{4\pi s} W\left(u, \frac{r}{M}, \frac{l}{M}\right)$ $S = \frac{4Tt}{r^2 (1/u)}$ $k = \frac{T}{M}$ $a = \frac{T}{S}$	1.无越流补给； 2.各向同性承压含水层； 3.非完整孔抽水，观测孔与抽水孔间距不大于 1.5M。	T—导水系数； S—储水系数； a—压力传导系数； M—承压含水层厚度； s—水位降深； r—观测孔至抽水孔距离； t—自抽水开始计的时间； W(u, r/M, l/M)—无越流补给各向同性非完整井函数； u—井函数的自变量； l—抽水井过滤器长度； lgs-lgt 与 lgW(u, r/M, l/M) - lg(1/u) 拟合。

F.0.3 利用非稳定流抽水试验资料，有垂向越流补给的条件下，可采用标准曲线法（配线法）或拐点对数法计算渗透系数、导水系数、压力传导系数及越流因子，按表 F.0.3 的要求进行。

表 F.0.3 非稳定流抽水水文地质参数计算（有越流）

地下水类型	计算方法	示意图	计算公式	适用条件	说明
承压水	配线法		$T = \frac{Q}{4\pi s} W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ $S = \frac{4Tt}{r^2(1/u)}, \quad B = \frac{r}{(r/B)}$ $\frac{k'}{M'} = \frac{kM}{B^2}$ $W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \int_u^\infty \frac{1}{u} \exp\left(-u - \frac{r^2}{B^2 u}\right) du$	1.有越流补给； 2.各向同性承压含水层。	T—导水系数； S—储水系数； M—承压含水层厚度； s—水位降深； r—观测孔至抽水孔的距离； t—自抽水开始计的时间； $W(u, r/B)$—越流井函数； u—井函数的自变量； B—越流因子； k'—弱透水层渗透系数； M'—弱透水层厚度
	拐点法		$T = \frac{2.3Q}{4\pi i_p} e^{-\frac{r}{B}}$ $S = \frac{2Tt_p}{r^2} \left(\frac{r}{B}\right)$	抽水时间足够长， $u \leq 0.01$ 。	i_p—s-$\lg t$ 关系曲线上拐点处的斜率； t_p—s-$\lg t$ 关系曲线上拐点的时 间； $s_{\max}$—最大水位降深； $\lg s$-$\lg t$ 与 $\lg W(u, r/B)$-$\lg(1/u)$ 拟合。

F.0.4 利用抽水试验的水位恢复资料，可采用图解法计算渗透系数、导水系数、压力传导系数，按表 F.0.4 的要求进行。

表 F.0.4 利用水位恢复资料计算含水层水文地质参数

地下水类型	计算方法	示意图	计算公式	适用条件	说明
承压水	直线图解法		$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s'}, \quad S = \frac{T}{a}$ $a = 0.44 \left(\frac{r^2}{t_c}\right) 10^{-\frac{s'}{t'}}$	停止抽水前，抽水孔动水位已稳定。	T—导水系数； S—储水系数； r—观测孔至抽水孔距离； t_c—抽水延续时间； t'—水位恢复延续时间； s'—剩余降深。
	/	/	$k = \frac{Q}{4\pi M s'} \ln\left(1 + \frac{t_c}{t'}\right)$	停止抽水前，抽水孔动水位仍呈直线下降。	

F.0.5 利用微水试验测得的水位恢复资料，可采用标准曲线对比法（配线法）计算承压含水层的渗透系数，按表 F.0.5 的要求进行。

表 F.0.5 利用微水试验资料计算含水层水文地质参数

地下水类型	计算方法	标准曲线 (H/H_0)- $\lg(Tt/r_c^2)$	计算公式	说明
承压水	配线法		$k = \frac{r_c^2}{Mt}$ $S = \frac{r_c^2 \alpha}{r_s^2}$	r_c —井管内半径(m); r_s —过滤器外半径(m); H — t 时刻孔内水位变幅; H_0 —孔内最大水位变幅; α —与 H/H_0 相关的参数; M —含水层厚度; S —储水系数; (H/H_0) - $\lg t$ 与标准曲线拟合, 匹配点为: $[Tt/r_c^2], [t], [a]$ 。

F.0.6 利用潜水含水层的非稳定流抽水试验资料，可采用标准曲线法（配线法）计算潜水含水层的给水度，按表 F.0.6 的要求进行。

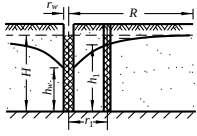
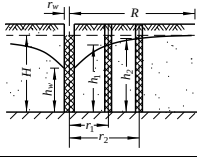
表 F.0.6 非稳定流抽水潜水含水层给水度计算

地下水类型	标准曲线	计算公式	适用条件	说明
潜水，无压水		$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u_A, u_B, \beta)$ $S = \frac{4Tt}{r^2(1/u_A)}$ $\mu = \frac{4Tt}{r^2(1/u_B)}$ $k_h = \frac{T}{H}$ $k_v = \frac{\beta HT}{r^2}$	完整孔抽水	T —导水系数; S —储水系数; μ —给水度; H —潜水含水层厚度; s —水位降深; r —观测孔至抽水孔的距离; t —自抽水开始计的时间; $W(u_A, u_B, \beta)$ —潜水含水层抽水井函数; u_A —表征 A 型曲线的自变量; u_B —表征 B 型曲线的自变量。 $\lg s$ - $\lg t$ 与标准曲线拟合，匹配点为: $[W(u_A, u_B, \beta)], [1/u_A], [1/u_B], [s], [t], [\beta]$

F.0.7 利用稳定流抽水试验资料计算影响半径时，可按表 F.0.7 的要求进行。

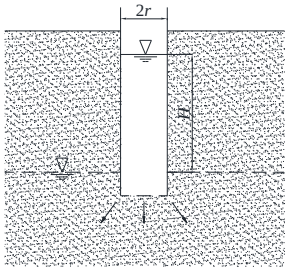
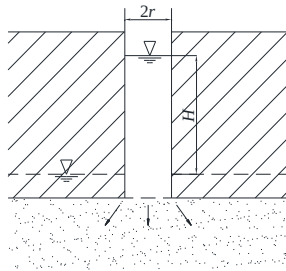
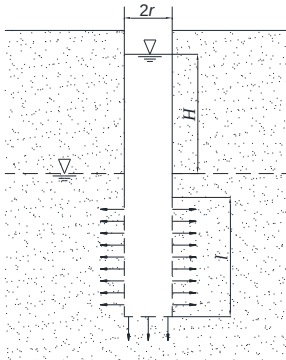
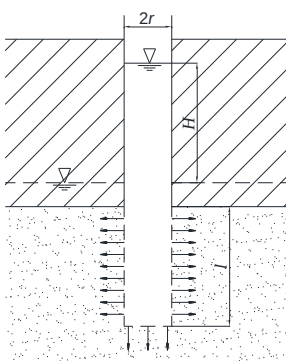
表 F.0.7 稳定流抽水影响半径计算

地下水类型	计算图式	计算公式	应用条件	说明
承压水		$\lg R = \frac{s_w \lg r_1 - s_1 \lg r_w}{s_w - s_1}$	1个观测孔	s_1 —观测孔 1 的水位降深; s_2 —观测孔 2 的水位降深; r_1 —观测孔 1 至抽水孔的距离; r_2 —观测孔 2 至抽水孔的距离;
		$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2}$	2个观测孔	h_1 —抽水稳定后观测孔 1 处潜水含水层的厚度; h_2 —抽水稳定后观测孔 2 处潜水含水层的厚度;

地下水类型	计算图式	计算公式	应用条件	说明
潜水		$\lg R = \frac{s_w (2H - s_w) \lg r_1 - s_1 (2H - s_1) \lg r_w}{(s_w - s_1)(2H - s_w - s_1)}$	1 个观测孔	s_w —抽水孔的水位降深; R —影响半径; r_w —抽水孔半径; H —潜水含水层厚度; M —承压含水层厚度
		$\lg R = \frac{s_1 (2H - s_1) \lg r_2 - s_2 (2H - s_2) \lg r_1}{(s_1 - s_2)(2H - s_1 - s_2)}$	2 个观测孔	

附录 G 钻孔注水试验形状系数值

表 G.0.1 钻孔注水试验形状系数值

试验条件	简图	形状系数 F	备注
试验段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水		$5.5r$	
试验段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水，试验土层顶板为不透水层		$4r$	
试验段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{ml}{r}}$	$\frac{1}{r} > 8$ $m = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ k_h 、 k_v 分别为试验土层的水平和垂直向渗透系数
试验段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水，试验土层顶板为不透水层		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{2ml}{r}}$	$\frac{1}{r} > 8$ $m = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ k_h 、 k_v 分别为试验土层的水平和垂直向渗透系数

附录 H 岩溶发育区基坑涌水量预测

H.0.1 水均衡法：当基坑所在的可溶岩地层基本出露于地表时，可按下式计算基坑涌水量。

$$Q_p = \frac{1000 \cdot \alpha_i \cdot A_C \cdot H_s}{d} S_R \quad (\text{H.0.1})$$

式中： Q_p —— 基坑涌水量 (m^3/d)；

α_i —— 入渗系数，一般可采用 0.3~0.6；

A_C —— 地表汇水面积；

H_s —— 涌水量计算时段的多年平均降水量 (mm)；

d —— 计算时段天数 (d)；

S_R —— 涌入基坑的水量占地下水径流总量的份额，根据区域经验取值，一般为 0.1~0.4。

集水面积 A 应同时考虑地表补给面积和地下补给面积，由于岩溶水的袭夺，有时地下补给面积大于地表补给面积，因此集水面积 A 时，应在综合研究区域岩溶水文地质条件基础上确定。

入渗系数 α_i 应基于实际观测资料，根据降雨量、蒸发量、地表及地下径流量的总均衡条件求取。同时应结合岩溶发育程度、岩体的渗透性和地下水动力条件综合分析。

H.0.2 水文地质解析法：岩溶发育地区基坑涌水量分为管道流涌水、扩散流涌水或两者的组合。

1 渗透性相对比较均匀的岩溶基坑，主要为扩散流涌水，其涌水量可按下式估算：

$$Q_{\text{计}} = k \cdot S_p \cdot I \quad (\text{H.0.2-1})$$

式中： $Q_{\text{计}}$ —— 计算涌水量 (m^3/d)；

k —— 渗透系数 (m/d)；

S_p —— 基坑涌水断面面积 (m^2)；

I —— 水力梯度。

2 岩溶管道发育的基坑，主要为管道流涌水，其涌水量可按下式估算：

$$Q_{\text{计}} = S_k \cdot V \quad (\text{H.0.2-2})$$

式中： S_k —— 岩溶管道过水断面面积（ m^2 ）；

V —— 岩溶管道水流速（ m/d ）。

3 当不考虑岩溶管道涌水时，相应计算涌水量和实际涌水量比较接近。但多数发生岩溶涌水的基坑工程的计算涌水量远小于实际涌水量，为充分考虑突水因素的影响，可将计算涌水量（ $Q_{计}$ ）乘以基坑突涌系数 A 来修正：

$$Q_{预}=A_R \cdot Q_{计} \quad (H.0.2-3)$$

式中： $Q_{预}$ —— 预测基坑涌水量（ m^3/d ）；

A_R —— 基坑突涌系数，一般取 1~10，其取值主要考虑如下因素：

1) 贯通基坑内外的岩溶渗漏通道的数量、规模和可能发生基坑岩溶涌水的性质；2) 基坑涌水的水源补给区大小，吸收降水和地表径流的特点；3) 溶洞充填物的充填程度、状态及其渗透性，特别应注意流塑、软塑及可塑状黏性土和砂砾填充的洞隙产生涌水的危害程度；4) 基坑内外水头差或可能产生的涌水水压力的的大小；5) 基坑内溶洞开挖处理方式及延续时间等因素对涌水的影响。

H.0.3 水文地质比拟法：类比岩溶水文地质条件相似的基坑工程，参照其实测涌水量，可采用式 H.0.3 进行类比估算新建工程基坑涌水量。

$$Q_{P0}=Q_{P1} \cdot \frac{S_0}{S_1} \cdot \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} \quad (H.0.3)$$

式中： Q_{P0} ， Q_{P1} —— 新建、既有基坑工程涌水量（ m^3/d ）；

S_0 ， S_1 —— 新建、既有基坑工程开挖前静止地下水位以下的基坑侧壁及底板面积（ m^2 ）；

H_0 ， H_1 —— 新建、既有基坑工程开挖前静止地下水位至基底的高差（ m ）。

本标准用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 标准中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中国土木工程学会标准

建筑与市政基坑工程水文地质勘察技术标准

T/CCES X—20XX

条文说明

制订（或修订）说明

《建筑与市政基坑工程水文地质勘察技术标准》T/CCES XXX-20XX，经中国土木工程学会 XXXX 年 XX 月 XX 日以 XX 号函文批准发布。

本标准制订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了我国建筑与市政基坑工程水文地质勘察领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规、技术标准。

为便于广大勘察、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，本标准编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	58
3	基本规定	60
4	勘察纲要	64
4.1	一般规定	64
4.2	勘察工作布置	65
4.3	勘察成果要求	66
5	水文地质勘察技术要求	68
5.1	一般规定	68
5.2	水文地质调查与测绘	68
5.3	水文地质物探	69
5.4	水文地质勘探	70
5.5	水文地质试验	71
6	水文地质参数计算	77
6.1	一般规定	77
6.2	渗透系数	78
6.3	给水度和储水系数	78
6.4	单孔影响半径	78
6.5	单位出水量和群孔影响系数.....	78
6.6	回灌参数	79
7	基坑工程水文地质分析评价	80
7.1	一般规定	80
7.2	地下水对基坑工程影响的分析评价.....	80
7.3	地下水控制的环境影响分析评价.....	81
附录 D	土体富水性分级	104

1 总 则

1.0.1 随着城市土地资源日益紧缺，向地下要空间成为解决城市用地、人口、交通、环境等问题，优化城市空间结构的重要手段，在此需求下城市建设由平面扩张逐渐进入全新纵向立体化开发阶段。随着现阶段较发达城市浅层地下空间的开发日趋饱和，开发利用中、深层地下空间是城市土地资源扩容、功能拓展、改造再生的战略需求和必然趋势，高层建筑地下室、地下商业综合体、地下轨道交通及地下环路、地下输变电站、深层蓄水隧道等建筑与市政的地下工程建设得到快速发展，带来大量的建筑与市政深基坑工程。如，上海金融交易广场项目基坑开挖深度 33m、上海世博 500kV 地下变电站基坑开挖深度 34m、上海硬 x 射线工作井基坑开挖深度 45m、苏州河深层蓄水隧道工作井基坑开挖深度更是达到了 56m。同时，近些年也产生了大量因多地块一体化开发、相邻地块同期建设或大规模地下综合交通枢纽所带来的基坑群工程。如，上海徐汇滨江西岸传媒港与梦中心项目，9 个地块及其内部道路共同开发，基坑总面积约 15.7 万平方米，分为 28 个基坑实施；上海小东门街道 616、735 街坊项目，10 地块共同开发，基坑总面积约 14.3 万平方米，分为 23 个基坑实施；武汉长江中心项目，11 个地块集中开发，基坑总面积 18 万平方米，分为 8 个分区实施；杭州萧山国际机场三期项目新建航站楼及陆侧交通中心工程，包括 T4 航站楼、综合交通中心和出租车蓄车楼等功能单体，基坑总面积超 25 万平方米，共划分 40 个基坑实施。

随着基坑工程的开挖深度越来越深、规模越来越大，地下水对基坑工程的影响越发凸显，控制难度更大，处理不当引发的后果也更为严重。特别是城市超深基坑工程和基坑群工程，降深大、降水周期长、叠加影响显著，大大加剧了基坑地下水特别是承压水控制对周边环境的影响。为实现安全可靠、经济合理的地下水控制，尤其在城市环境中同时满足对周边环境的保护要求，其前提条件之一是对地下水（包括孔隙水、裂隙水和岩溶水）的情况有全面和清晰的认识，为此需要对建设场地及周边的水文地质条件开展深入调查、勘探和测试，针对地下水对基坑工程安全和环境影响进行合理评估。其中，为应对复杂地貌、地质条件下的工程需求需进行针对性的水文地质调查与测绘，为获得渗透性较大的深厚潜水层、深层承压水、岩溶水全面的水文地质参数并评估其控制对环境的影响需要开展群井抽水试验等现场试验，为评估回灌的可行性需进行回灌试验，并可靠监测试验过程中水位和环境变化等，常规的岩土工程勘察已经不能满足上述需求。

本标准的制定，有利于统一建筑与市政基坑工程水文地质勘察基本技术要求，有效指导建筑与市政基坑工程的水文地质勘察工作，避免水文地质勘察工作及地下工程建设的不

必要投资；有利于保证基坑工程水文地质勘察成果的正确性与可靠性，保证基坑工程地下水控制设计与施工具备充分的依据，有利于加强基坑工程实施过程中对地下水的有效控制，规避工程建设与社会风险，保证基坑工程建设本体安全，保证周边环境安全；能有效指导基坑工程中的地下水抽排量控制，避免过度抽排地下水，有利于节约与保护城市地下水资源。

基坑工程及其上级学科岩土工程均是实践性或者是应用性的学科，工程经验占有相当重要的地位，往往是先实践，然后总结成功的经验和失败的教训，再通过大量的总结将其通过思考、抽象上升为理论，继而用于指导工程实践。因此在建筑与市政基坑工程水文地质勘察中，应推广应用成熟的经验，特别某些特殊地质条件下的地下水问题，如岩溶水，应充分尊重地方经验。同时，为适应我国高新技术的发展，鼓励采用新技术、新工艺、新方法，并采用信息化、智能化的数据采集和试验平台，有利于我国建筑与市政基坑工程水文地质勘察工作的质量、效率和水平的不断提高。

1.0.2 本条明确了本标准的适用范围。不同行业、不同工程水文地质勘察的目的和要求差别较大，本标准限定在各类建筑与市政项目的基坑工程，为满足其地下水控制设计要求所进行水文地质勘察，不包含为满足工程使用阶段要求，如选址、抗浮所进行的水文地质勘察。

1.0.3 为探明地下水埋藏、补给、径流、排泄条件，以及地下水位动态特征，获取地下水控制设计所需的水文地质参数，在水文地质勘察中需综合采用测绘、钻探、物探、室内土水试验、现场测试等多种手段，鉴于规范的分工和限制，本标准不可能将建筑与市政基坑工程水文地质勘察所有的技术问题都包括进来，勘察人员进行水文地质勘察工作时，还需遵循相应技术标准的规定。此外，全国各地地质条件差异较大，尚应遵守各地方相关标准的规定。

3 基本规定

3.0.1 为了使勘察工作的布置和评价具有明确的工程针对性，解决基坑工程地下水控制设计和施工中的实际问题，搜集有关工程资料，了解设计要求，是十分重要的工作。同时，基坑工程水文地质勘察与工程地质勘察一样，都具有继承性，因此要搜集分析类似工程的经验。

基坑工程水文地质勘察的目的是为基坑工程地下水控制设计施工提供依据，勘察工作量和采用的技术手段与地下水对基坑工程的影响密切相关，因此勘察工作开始前需确定水文地质勘察等级，以突出重点，区别对待，以利管理。同时，考虑到水文地质勘察是一种探索性和系统性的工作，编制勘察纲要是非常必要的。

3.0.2 水文地质条件和存在的水文地质问题是影响和决定基坑工程安全和造价的重要因素，因此它是岩土工程问题评价的重要组成部分。水文地质勘察可在进行岩土工程勘察时一并进行，水文地质勘察成果在岩土工程勘察报告中单列一章，也可在岩土工程勘察后，基于岩土工程勘察成果进行专项的水文地质勘察。对于上述两种情况均适用于本标准。不管是与岩土工程勘察同步进行或是在岩土工程勘察之后进行，水文地质勘察均应充分利用岩土工程勘察资料，避免重复工作。

3.0.3 划分基坑工程水文地质勘察等级，目的是突出重点，区别对待，以利管理。利用水文地质勘察等级指导水文地质勘察工作布置，满足最基本的勘察量，确保勘察成果文件的质量和成果的可靠性。

水文地质勘察的目的是探明地下水埋藏、补给、径流、排泄条件，为基坑工程地下水控制设计施工提供依据，并评估其对周边环境和水资源的影响，故基坑工程水文地质勘察的工作布置应与地下水对基坑工程的影响密切挂钩。常规来说，基坑工程挖深越深、规模越大，建设场地水文地质条件约复杂，探明水文地质条件、评估地下水对基坑工程影响所需进行的工作量越大。故本标准采用在基坑工程安全等级和建设场地水文地质条件复杂程度基础上划分基坑工程水文地质勘察等级。因同一基坑不同部分的安全等级可能不同，在相同的水文地质条件复杂程度下，也会出现不同的水文地质勘察等级。基坑工程安全等级为三级时，即基坑工程支护结构发生破坏后产生的后果不严重的，一般基坑开挖深度较浅且周边无重要环境保护对象，这种情况下即使场地水文地质复杂程度为中等，其对基坑工程影响较小或基坑工程地下水控制对环境影响不显著，水文地质勘察等级也可定为乙级。

当周边保护对象权属单位或相关管理单位有特殊要求时，也可结合其要求提高水文地质勘察等级，甚至直接定为甲级。

一般情况下，勘察等级应在勘察外业工作开始前，通过搜集已有资料确定。随着勘察工作的开展，对水文地质条件认识的深入，发现实际水文地质条件与前期评估存在较大差异的，勘察等级也可能发生改变。

3.0.4 《建筑与市政地基基础通用规范》（GB55033）和《建筑基坑支护设计规程》（JGJ120）将基坑支护（挡）结构分为三个安全等级，都是从设计角度考虑的。对于勘察，主要考虑基坑工程规模大小和特点，以及由于岩土工程问题造成破坏或影响正常使用的后果。由于涵盖全国各地不同的地层条件，涉及建筑与市政各种建（构）筑类型，很难做出具体划分标准，故本条做了比较原则的规定。当地方标准有更为清晰或划分界限更为明确的规定时，可参照地方标准执行。如，上海市《基坑工程设计标准》（DG/TJ 08-61-2018）根据基坑的开挖深度划分，将基坑开挖深度大于等于 12m 的划分为一级安全等级基坑工程，基坑开挖深度小于 7m 的划分为三级安全等级基坑工程，初次以外的划分为二级安全等级基坑。湖北省《基坑工程技术规程》（DB42/T 159-2012）由基坑开挖深度、保护对象与基坑距离及工程地质水文地质条件复杂程度综合确定基坑工程重要性等级，其中基坑开挖深度大于 15m，或基坑开挖深度在 10~15m 之间，且一倍挖深范围内存在重要保护对象的，划分为一级基坑工程。浙江省《建筑基坑工程技术规程》（DB33/T 1096-2014）将符合开挖度大于 10m，或支护结构作为主体结构的一部分，或在基坑开挖影响范围内有重要建（构）筑物、轨道交通、需严加保护的管线或其他重要设施，三个条件之一的，划分为一级基坑工程；开挖深度小于 5，且周围环境无特别要求时，划分为三级基坑工程，除此以外的划分为二级基坑工程。

同一基坑不同区域的开挖深度可能不同，不同侧环境条件也可能不同，支护结构破坏可能产生后果可能存在较大差异，故同一基坑的不同部分可采用不同的安全等级。

3.0.5 地下水的分类方法很多，根据地下水的埋藏条件，可分为包气带水、潜水、承压水，根据存储介质可以分为孔隙水、裂隙水、岩溶水等，从勘察角度，先探明岩土特性，再探明地下水埋藏条件，符合工程实践和常规认知，故本标准首先以存储介质划分地下水类型。不同行业对水文地质条件复杂程度划分标准不一，本标准从基坑工程的特点出发，参照《铁路工程水文地质勘察》（TB 10049）的划分标准并进行修改，作为本标准水文地质条件复杂程度的划分标准。

在每种地下水类型中按水文地质条件由复杂向简单推定，有任一地下水类型首先满足较高等级时，水文地质条件复杂程度即为该等级，故对于建设场地，其水文地质条件复杂程度只存在一种。

因水文地质勘察工作前即需评价水文地质条件复杂程度，此时评价的依据为已有资料和类似工程资料，随着勘察工作的进行，对场地水文地质条件认知的深入，可能出现实际水文地质条件与前期评估存在差异的情况，若差异较大且影响到水文地质条件复杂程度划分的，应按实际情况重新划分水文地质条件复杂程度。

3.0.6 本条明确了基坑工程水文地质勘察的目的，要在查明地下水的埋藏条件及补给、径流、排泄条件和动态特征基础上，提供地下水控制设计所需的水文地质参数，并基于分析提出基坑工程地下水控制和环境或水资源保护的措施建议。勘察工作应从工程需求出发，勘察成果应切实为工程设计和施工服务。

3.0.7 本条明确了基坑工程水文地质勘察的内容与范围。完整的水文地质单元区域相对于工程建设场地来说一般要大很多，当缺乏地区性水文地质资料时，只在工程建设拟建场地范围内进行勘察工作是不够的，但大范围的勘察对于工程建设来讲亦不现实，因此在工程建设场区内进行详细的勘察，而在拟建场区外采取必要的资料搜集、水文地质测绘以及物探等手段是可行的。

3.0.8 水文地质物探、钻探和试验水文地质勘察工作的重要手段。是否采用物探，及物探方法的选择因基于勘察目的、基坑工程性质、探测对象特性、施工场地条件及环境条件等因素综合确定。对于较大范围的水文地质勘察，采用物探手段既快速又经济，而对于一些特殊条件，如岩溶地区，物探方法有其不可替代的作用。但由于其应用受场地地形和岩土物性条件等的限制，探测成果往往具有多解性，有时较难得出明确地结论。因此实际应用中一是要采用有效的方法进行综合探测，二是探测成果要与钻探成果相互验证，以期获得最佳效果。水文地质试包括室外测试和室内试验，试验种类和方式较多，采用哪种或哪几种试验手段，与勘察目的和地下水埋藏条件等关系较大。

本条再次强调，应从基坑工程地下水控制设计、施工需求出发，有针对性的选择勘探和测试方法与内容，勘探和测试成果应能为设计、施工和评价提供依据。

3.0.9 水文地质参数计算方法由水文地质条件和所采用的试验方法两方面因素确定。首先水文地质参数计算方法应和所采用的水文地质试验相匹配，而为满足不同的勘察目的，所需的水文地质参数不同，所采用的试验方法可能不同，即使对于同一参数，当地下水埋藏条件和储存介质不同时，采用的水文地质试验方法也可能不同。

水文地质参数计算前还应根据勘察成果建立合理的水文地质概念模型，对应选择合适的水文地质参数计算方法。当水文地质概念模型符合解析解假设条件的，可采用解析法，采用解析法计算水文地质参数时，应考虑井损和水跃效应；当含水层为非均质各向异性，有分散补给和内部边界，初始水位水力梯度较大，不符合解析解条件，且具备建立数值模型条件时，可采用数值法。

3.0.10 水文地质勘察期间相比于基坑工程实施期间，处于无防护状态。例如，周边存在保护对象且需进行承压水降压的基坑工程，基坑工程实施期间设置了截水帷幕，但水文地质勘察进行群井试验期间，保护对象和试验区之间是没有帷幕的，水文地质勘探、试验的选择和实施过程更应注意对环境的保护。水文地质勘察工作应避免对周边环境保护对象产生不良影响，不应引发不良地质风险或污染物的扩散。故在现场勘察作业开展前，通过调查、探勘等方式查明周边环境情况、识别周边危险源，水文地质勘察现场作业应采取保护环境、预防污染的措施。

3.0.11 为保证拟建场地内试验孔不对后期工程建设产生不利影响，现场试验结束后应对勘探孔和不再利用的试验孔进行封孔处理，对于工程主体范围以外的不再利用的试验孔也应进行封孔处理。对于可利用作为降水井或观测井的试验孔，应做好交接和保护工作。

3.0.12 各阶段的勘察工作结束后，应将各项勘察资料及时整理，编制水文地质勘察报告或成果说明。

4 勘察纲要

4.1 一般规定

4.1.1 本条突出勘察服务的主要对象是基坑工程地下水控制设计，通过基于基坑工程特点和场地水文地质条件的地下水控制分析，有重点地开展勘察纲要的编制。

4.1.2 本条规定勘察纲要编制前，建设单位需提供给勘察单位的资料清单，以确保勘察单位合理选择勘察方法和布设勘察工作量。

基坑工程基本信息主要指拟建基坑面积和开挖深度，并宜提供拟采用围护型式以及施工顺序等。

场地周边地下水控制影响范围内的环境条件，包括周边建（构）筑物、道路、地下管线以及其他保护对象的空间分布性质及安全和变形控制要求等。勘察前地下水控制影响范围应以地区经验为主确定，无地区经验时宜以 3 倍基坑开挖深度为参考；勘察结束后，建设单位应以勘察确定的地下水控制影响范围为依据，收集完善相应的周边环境信息并提供给基坑工程地下水控制设计单位。

4.1.3 本条明确了勘察纲要应包括的内容。并强调勘察纲要中，应分析现场勘察工作可能对周边环境和水资源产生的不利影响，并制定拟采取的环境保护措施。勘察完成后现场处置中应明确钻探孔、试验孔等的封孔措施。

4.1.4 基坑工程地下水控制预分析是指勘察实施前，基于基坑工程基本信息、既有工程地质与水文地质条件、临近建（构）筑物资料及周边环境保护要求，分析地下水可能对周边环境的影响，预判地下水控制过程中主要风险，提出未来可能实施的一个或多个地下水控制方法及为设计提供计算所需的水文地质参数，在此基础上提出工程水文地质勘察的主要技术要求，确定水文地质试验方法和拟定后期水文地质参数计算方法。

4.1.5 勘察实施期间应实施动态化的勘察管控。本条说明了导致勘察纲要调整或补充的情况：1.设计变更导致勘察范围或勘察等级出现变化，需相应增加或减少原勘察工作量；2.实际勘察揭示的水文地质条件与预测情况差异较大，不能满足评价要求，需相应增加原勘察工作量。

本条中未说明另一种可能调整勘察纲要的情况，即通过现阶段的勘察成果已满足勘察任务时，可适当调整后续工作量。对于该类可能发生的情况，勘察纲要中应提出各项工作开展的计划及各工作间的相互制约性，现场勘察工作宜分步骤分阶段实施，确保勘察工作

可依据上阶段工作成果及问题针对性的动态调整，以相对最合理的勘察工作量完成勘察任务。

4.2 勘察工作布置

4.2.1 本条是对勘察工作布置具体内容的要求，根据勘察目的、场地条件、既有资料等选择相应工作内容。根据工程需要，部分基坑工程可能存在地下水动态观测布置需求，该部分内容应符合现行国家标准《供水水文地质勘察规范》（GB50027）的相关规定。

4.2.2 水文地质概念模型是指将含水层实际的边界性质、内部结构、渗透性能、水力特征和补给排泄等条件概化为便于进行数学与物理模拟的基本模式。针对基坑工程的特点概化模型需基本反映水文地质条件的实际情况，能反映基坑区域内降水对周边区域及水资源的影响。合理概化的模型可用工具进行计算分析，决定着后期地下水控制设计的合理性和准确性。简单操作的数值软件背后都需要构建相对合理的水文地质概念模型，才能获取相对可靠的分析与评估。

水文地质概念模型需具备实用性和完整性的特点，前者要求建立的水文地质概念模型须与一定时期的科学技术水平以及研究区的水文地质调查研究程度相适应，能用于解决工程所面临的地下水模拟问题，后者要求概念模型尽可能真实全面地反映实体系统的内部结构及动态特征，专业人员既要到现场进行调查，又要广泛收集有关的各种信息，必要时还要补充部分现场调查（包括观测、试验）等工作，详细分析系统的输入、输出、状态演变、功能作用以及它与周围环境的作用关系等，以达到对于真实系统全面深入的掌握，保证模型在理论上的完整性，提高地下水流系统模拟的精度。水文地质概念模型的建立主要包括5个步骤：确定研究范围、收集资料、边界概化、内部结构概化和完成模型概化图。

水文地质工程师应根据基坑特点、场地与区域水文地质条件、周边环境以及当地经验确定水文地质概念模型建设的精度要求，在此基础上确定勘察范围与深度。水文地质工程师应避免模型构建的过度复杂化，过度增加勘察范围和深度，过度增加工作量；但也应避免为减少工作量过度简化，影响分析评价的精度，影响地下水控制风险的预判。

4.2.3 一般基坑工程周边环境复杂，且受制于各种管理制度的制约，难以开展钻探和物探工作，本条规定了建设场地外勘察的主要手段以搜集已有成果为主，特殊情况补充调查和测绘。

4.2.4 本条规定了建设场地勘察的主要手段以物探、勘探为主。

4.2.5 鉴于较多的基坑工程其水文地质试验场地不适合或无法布设在用地红线以内，本条规定了针对水文地质试验场地的选址要求与勘探要求。

4.2.6 控制性勘探孔的数量宜参考水文地质勘察等级及基坑规模确定，控制性勘探孔间距不宜大于 100m。控制性勘探孔深度应以满足设计和评价为核心。

试验孔与观测孔应分层布设。场地水文地质条件复杂、含水层厚度大，且模型精度要求高时，宜分区、分层或分段布设试验孔和观测孔。考虑分区试验时，每个区试验孔和观测孔均宜满足本条中的规定。考虑不同含水层的水力联系时，应增设相邻含水层观测孔。

4.2.7 水文地质物探测井已被广泛应用，为提高钻探取样的精度，做到一孔多用，在控制性勘探孔中配合进行物探水文测井工作，是十分必要的。譬如采用视电阻率、自然电位、人工放射性同位素等方法测井，可为确定含水层深度、厚度和结构提供依据；在抽水试验过程中进行流量测井，可提高含水层渗透性和涌水量确定的精度。

4.2.8 本条给出了不同地下水类型在不同水文地质勘察等级条件下的水文地质试验方法选择建议。在甲级和乙级水文地质勘察中，在单孔和多孔两种抽水试验中，应首选多孔抽水试验，若抽水试验期间，观测孔水位基本无降深，则可按单孔试验方法进行数据处置及分析。当根据地方经验，多孔抽水试验无效或参数精度要求不高时，可采用单孔试验。在甲级水文地质勘察中，若多孔抽水试验无效，则应分区设置试验孔，分区开展单孔抽水试验，以更好的探明含水层区域分布特征及提高参数精度。

当环境条件要求高，采用抽水试验可能产生较大环境影响时，可采用微水试验或回灌试验。

4.2.9 当需考虑基坑降水对周边环境的影响时，应对影响变形的相关土层进行分析获取相关变形参数。

4.3 勘察成果要求

4.3.1 水文地质勘察成果文件（即勘察报告）是勘察工作的最终成果，是基坑工程地下水控制设计与施工的依据。水文地质勘察成果文件所依据的原始资料应真实可靠，严禁弄虚作假。勘察报告提出的水文地质参数应在剔除不合理、异常或离散数据的基础上，经综合分析后提出，以确保数据的可靠性。勘察报告应结合基坑工程特点、场地水文地质条件和周边环境条件等，对设计与施工可能涉及的水文地质问题进行针对性评价，并作出明确的结论，提出合理的建议，避免千篇一律。

4.3.2 此条是对水文地质勘察报告的基本技术要求。

5 水文地质勘察技术要求

5.1 一般规定

5.1.1 建筑和市政基坑工程大多位于城区或城市周边，气候、水文及区域水文地质资料相对较为全面，地下水控制具有较为成熟的经验，但对位于新城或新的开发区，以及位于岩溶等水文地质条件复杂区域的基坑工程区域资料相对较少，水文地质勘察工作前宜开展水文地质调查与测绘工作，以指导水文地质钻探工作的布置、物探方法的选择、水文地质试验位置的确定，提高水文地质勘察工作的针对性。

5.1.2 水文地质物探是岩溶水地区和裂隙水富集区水文地质勘察的基本方法，虽然天然介质对各种物探信息有一定的反应规律，但不同条件下会有一定差异，因此应布置一定数量钻探孔，在相互验证的基础上对物探资料进行综合解释。

5.1.3 水文地质试验是取得水文地质参数的主要手段，试验方法的选用应有针对性。抽水试验是确定准确的水文地质参数，为水文地质和环境评价提供依据的常用方法之一，根据任务不同，可以采用单孔、多孔或群孔抽水等。当抽水试验有困难或参数精度要求不高时，可采用钻孔注水试验。在岩溶或基岩裂隙地区，当需要查明溶洞或裂隙的连通情况时，可进行地下水连通试验。

5.2 水文地质调查与测绘

5.2.1~5.2.4 开展水文地质勘察工作前，应尽可能搜集建设场地周边已有地质、水文地质资料，确定水文地质调查和测绘范围。水文地质调查的内容、精度和范围应满足地下水控制的要求，应重点搜集和调查以下内容：

- 1 搜集区域气候资料，由于大气降水是地下水的主要补给来源，应重点调查降雨量及其季节和多年变化；
- 2 场地及周边地表水的水位及其季节变化和多年变化，地表水与地下水的水力联系；
- 3 场地及周边水文地质条件，包括地形地貌、地层岩性、地层年代及地质构造；地下水类型、补给、径流及排泄条件等。

5.2.5、5.2.6 这两条仅对水文地质测绘观测路线、观测点的布置做了一般性规定，具体的水文地质测绘工作应按照相应的测绘技术规范、标准的要求进行。

5.2.7 由于地下水位具有季节、年周期性变化的特点，勘察阶段短期观测资料难以代表地下水位的变化规律，因此勘察阶段应搜集邻近区域的长期观测资料，在地下水位年度变化幅度较大且缺少相关水位年度变化资料的地区，应进行地下水的动态观测，为地下水控制提供可靠的水文地质参数。

5.2.8 将遥感技术应用于水文地质勘察中，可以减少野外工作量、提高图件的精度和工作效率。

5.3 水文地质物探

5.3.1 水文地质物探的应用应符合下列基本要求：

- 1 探测对象与周围介质存在明显的物性差异；
- 2 探测对象相对于埋藏深度应具有一定的体积规模；
- 3 探测对象的异常场有足够的强度可从干扰背景中清晰可辨；
- 4 地形影响不应妨碍外业作业和资料解释，或对其影响能利用现有手段进行地形改正。

5.3.2 物探方法在解决水文地质问题时，有成功的经验，也有不理想的情况，宜采用多种方法互相对照，对获得正确的结果是有帮助的。

- 1 覆盖层勘探宜选用地震勘探法、高密度电法、瞬变电磁法、音频电场法；
- 2 浅埋岩溶勘探宜采用探地雷达法、地震反射法、地震映像法、地震面波法、地震折射法、直流电法、瞬变电磁法、层析成像法；
- 3 深埋岩溶勘探宜采用音频电场法；
- 4 孔壁岩溶宜采用综合测井、波速测试、钻孔全景数字成像、钻孔摄像、钻孔管波探测、孔洞三维激光探测等方法；
- 5 孔、洞间岩溶宜采用层析成像法、孔间探地雷达法；
- 6 渗漏及管涌探测宜采用伪随机流场法、充电法、自然电场法等。

5.3.3 在岩溶地区进行水文地质物探时，地面物探测线间距宜取 5~10m，物探点的间距宜取 1~5m。根据岩体结构和岩体破碎程度，跨孔孔中物探点间距 1.0~2.0m。

5.3.5 测井是一种垂直物探，包括电测井、放射性测井（核测井）、弹性波测井、热测井及钻井技术情况等类型，目前已有十余种方法，应根据基坑工程性质和勘察目的合理选择测井方法。

测井可以了解地层的垂向变化和某些水文地质参数,如采用视阻率、自然电位、人工放射性同位素等方法测井,可为确定含水层深度、厚度和结构提供依据;在抽水试验过程中进行流量测井、抽水后进行扩散法测井,可提高含水层渗透性和涌水量确定的精度。

物探测井配合钻探查明下列内容:

- 1 划分钻孔地质柱状剖面,进行地层对比;
- 2 确定主要含水层的层数,查明含水层的深度和厚度范围;
- 3 确定地层的孔隙度、透水性、给水度、含水量等;
- 4 确定岩溶含水层、断裂破碎带、裂隙含水带的位置和分布;
- 5 测定井径、井斜、井温;
- 6 估算地下水流速、流向、涌水量及影响半径等;
- 7 确定地下水涌出点位置、判定含水层之间的相互补给关系;
- 8 进行咸淡水垂直分界。

5.4 水文地质勘探

5.4.1 水文地质勘探的目的是查明场地地层和水文地质条件,勘探孔的布置可参照岩土工程勘察相关要求,但水文地质勘察不需要详细查明地层的力学性质,故勘探孔布置要求可适当低于岩土工程勘察相关规定。

不同地下水介质中,勘探孔的间距有所差异,本条在确定勘探孔间距时,综合参照了不同地区地方标准。上海地区属孔隙型地下水。根据上海市工程建设规范《建设工程水文地质勘察标准》(DG/TJ08-2308-2019)第 4.3.1 条:控制地层的勘探点间距不大于 35m,本条规定孔隙水的钻探孔间距小于 35m。

根据广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》(DBJ/T15-136-2018)第 4.3.5 条岩溶勘探孔的间距:复杂地基为 8~15m;中等复杂地基为 15~25m;简单场地为 25~40m。根据广西地方标准《广西壮族自治区岩土工程勘察规范》(DBJ/T45-066-2018)第 11.2.6 岩溶勘探点间距:复杂地基为 8~15m;中等复杂地基为 15~20m;简单场地为 20~25m。综合多地岩溶勘察经验确定岩溶水钻探孔间距为 15~25m。

裂隙水分布不均匀,可参考的勘察经验较少,钻探孔间距参照岩溶水要求。

5.4.4 动力触探试验孔和静力触探试验孔具有快速、连续、经济性好等优点,有地区经验时可替代水文地质钻孔进行地层划分,确定含水层。

5.4.5 室内试验项目应满足地层划分、现场水文地质试验，以及进行地下水控制对周边环境影响的分析和预测的要求。

5.4.6 水文地质钻探记录是重要的基础工作，也是有一定难度的技术工作，应由具备相应专业知识和经验的人员承担，应对钻探过程及变化进行观测并做好记录，掌握好第一手资料。

5.4.7 水文地质钻探是为了了解土层的水理特性，如采用泥浆护壁，对结果影响较大，一般应采用套管护壁、采用清水作为循环液进行钻进。

5.4.9 一般作为地层鉴别和取样的钻孔直径满足相应工艺要求即可，兼做水文地质试验钻孔，需要安装过滤器和安放抽、注水设备，直径应适当大些。

5.5 水文地质试验

5.5.1 本条列举了常用的几项水文地质试验方法，基于基坑工程地下水控制考虑，在后期涉及降水的地层中开展试验时，应首选抽水试验。如环境条件不允许，可采用微水试验、回灌试验、注水试验等方法。

当地下水流速或流向影响基坑工程地下水控制设计和施工，或需评估基坑工程地下水控制对污染物扩散影响时，可采用几何法、同位素稀释法、示踪剂法、充电法、显微照相技术法或声呐法等方法，测试地下水流速或流向。

5.5.2 群孔抽水试验属于两个或两个以上的抽水孔同时抽水的现场试验。当已获得部分单孔抽水试验资料与成果时，可利用群孔抽水试验检验单孔抽水试验资料与成果的可靠性，并据此调整后期现场试验方案与水文地质勘察方案，并可分析勘察区域的地下水动态平衡特性以及工程降水的可行性。当有与群孔抽水试验相对应的环境变形监测资料时，可借助于群孔抽水试验成果分析、预测勘察区工程降水对周边环境的影响。

5.5.3 现场抽水和回灌试验时对环境进行监测的目的主要是用以了解和分析地下水控制对环境的影响或地下水回灌对环境保护的可行性。监测内容一般包括地面沉降、地层变形以及既有建（构）筑物、管线的变形，也可以在地层中布置孔隙水压力计，以了解地层中水位（水头）变化及相互之间有无水力联系。常用环境监测方法如表 1 所示。

对于变形监测应保证必要的观测时间，通常时间不短于 15 天，时间太短尚不够反映变形情况。

表 1 常用环境监测方法选用表

监测方法	适用范围	主要用途
地面沉降监测	配套抽水试验或回灌试验开展，有变形控制需求	评估抽水或回灌过程中地面沉降规律
周边环境沉降监测	配套抽水试验或回灌试验开展，有变形控制需求且针对特定被保护对象	评估抽水或回灌过程中特定被保护对象变形规律
土体分层竖向位移	配套抽水试验或回灌试验开展，降水目的含水层与其它土层可能存在水力联系，或存在深埋被保护对象需评估抽水产生的影响	评估抽水或回灌过程中土体分层竖向位移变化规律
孔隙水压力监测	配套抽水试验或回灌试验开展，降水目的含水层与其它土层可能存在水力联系	评估抽水或回灌过程中土层孔隙水压力变化规律

5.5.4 为有效分析地面沉降的空间分布形态，地面沉降监测点间距不宜大于 10m，且监测剖面线不宜少于 4 条。

群井试验的目的之一，是为了获得含水层水位下降引起地面沉降的监测资料，以便分析、了解和掌握地面沉降机理。由于地层变形具有一定的滞后性，群井试验的时间不宜小于 10d。如现场条件许可，群井试验的持续时间延长至 15d 较为合适。

通过各种监测资料之间的相互验证与分析，能及时发现试验异常情况，便于分析原因及采取纠正措施。

5.5.6 监测工作是精度要求高而又多次重复作业的工作，应将监测中的系统误差在二次观测值之差中得以消除，相同的条件下观测，有利于监测精度的保证。因此在同一组试验中，应采用同一方法和工具进行水位、流量及变形等监测。水文地质勘察中的变形监测，由于时间短，总沉降量小，一般毫米级，最大也就一厘米多，对精度要求较高，因此对测量设备、测量人员的要求也要提高。

I 抽水试验

5.5.7 抽水孔的布置应尽量远离重要的或需要采取保护措施的建筑（构）筑物，以减小抽水试验产生的不利影响。当场地内水文地质条件复杂或变化较大时，应针对不同的水文地质单元，分布设置抽水孔进行抽水试验。抽水孔的结构形式及抽水试验含水层应根据工程性质及场地的地质与水文地质条件等因素确定。

地下水控制中单井涌水量受含水层性质、降水井结构以及成孔质量等多种因素的影响，难以通过理论计算确定后期降水井的合理涌水量。为了减小地下水控制设计误差与运营方案偏差，抽水孔的结构宜与拟采用的工程降水井结构基本一致，以便通过试验确定相同含水层中，相近成井质量与相似井结构的工程降水井的合理涌水量，为设计与施工提供依据。同时抽水孔的结构应与含水层的性质相对应，其设置应便于水文地质模型简化与应用，以便于选用合适的解析计算公式进行水文地质参数计算。

抽水孔是临时性抽水装置，运行时间短，与长期使用的供水井存在较大差异。因此抽水试验中抽出地下水的稳定含砂量体积比不大于 1/20000 即可满足要求。

5.5.8 本条规定了现场试验中水位观测孔的技术要求。

关于水位观测孔的布置方向：当地下水存在坡度（尤其是水力坡度较大时），在不同方向上的水头损失是不同的。因此，需要根据试验的目的确定观测线的布置方向。例如，为计算水文地质参数，观测线常垂直于地下水流向布置，以减少水力坡度对参数计算精度的影响；若为了测量不同方向的非均匀性和实测抽水的影响范围，可根据具体目的布置观测线；若需要查明边界条件时，应在边界有代表性的地段布置观测孔。

当地下水控制涉及多层含水层、需了解掌握各含水层性质时，应通过分层抽水试验及分析，评价各含水层的水文地质条件。

为计算参数所用的观测孔与抽水孔的距离，应取决于从观测孔中测得的水位降深值是否符合计算公式的要求。例如，常用的计算公式 $S = \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{r}$ 仅适用于地下水为层流和二维流的情况，不考虑在产生紊流和三维流时所造成的水头损失。因此，从观测孔中测得的水位下降值应满足上述公式的适用条件。

一般当观测孔与抽水孔的距离 $r \geq M$ （含水层厚度）时，紊流、三维流对观测孔中水位降深的影响很小，对计算精度的影响较小。所以，一般规定，最近的观测孔与抽水孔的距离不宜小于含水层厚度。三维流的影响与抽水孔的出水量及过滤器直径有关，如抽水孔出水量很小、过滤器直径较大时，则最近的观测孔与抽水孔的距离可适当减小。

关于最远观测孔与抽水孔的距离，应保证观测孔中测得的水位降深易于达到稳定且不受含水层边界的影响，以便于资料分析和采用多种方法计算水文地质参数，也可减小测量时的观测误差。距抽水孔最远的观测孔内水位下降值不宜小于 20cm，以保证试验成果的可靠性。

上述规定是为了利用观测孔中的水位下降值求解水文地质参数而制定的。若是为了实测影响范围或其他用途，则可不受其限制。

对观测孔过滤器的设置，要求置于同一含水层、同一深度，过滤器长度相同，以增加可比性，为分析、利用资料提供方便。

5.5.9 在富水性强的大厚度含水层中，对于设置有限长度过滤器的抽水孔而言，抽水试验的影响深度是有限的。因此，可将含水层沿垂向划分几个试验段，也可根据需要对其中一段或几段进行分段抽水试验。

采用数值法分析场地水文地质条件时，常需要反演水文地质参数，或识别和检验数值模型的合理性，因此需要模拟域的水量、水位和边界条件方面的资料。为满足这些要求，唯通过大流量、大降深的群孔抽水试验才能达到目的。

当水文地质条件简单，通过常规手段能够查明补给和边界条件，利用地下水的自然动态资料能满足数值法计算和分析要求，就不必进行群孔抽水试验；反之，当计算域地下水赋存条件复杂，其补给和边界条件难以查明时，则必须进行大流量、大降深的群孔抽水试验。

群孔抽水试验应以非稳定流抽水试验为主，因为建立数值模型所需要的含水层导水系数（ T ）、释水系数（ S ）、越流系数（ B ）及给水度（ μ ）等参数，用稳定流抽水试验是无法获得的。

为保证水样真实反映地下水水质，水质分析水样宜在抽水试验结束前采集。

考虑到利用恢复水位资料计算水文地质参数的需要，恢复水位的测量应按非稳定流试验的观测时间间隔进行。

5.5.10 某些非稳定流计算公式中，抽水试验的出水量可以不保持常量，或呈阶梯流量进行。所以不排除根据勘察工程的具体情况而选用相适应的抽水试验技术要求，以满足计算公式的需要。

稳定流抽水试验的稳定延续时间应符合下列要求：1.卵石、圆砾和粗砂含水层为 8h；2.中砂、细砂和粉砂含水层为 16h；3.粉性土含水层为 24h；4.基岩含水层（带）和岩溶含水层为 24h。

II 注水试验

5.5.12 本条所指注水试验只包括钻孔注水试验，试坑注水试验不作为常规试验方法，如涉及该类试验，可参考相应标准和技术手册。

5.5.13 对于渗透性较弱的土体，采用定水头注水试验时间较长，采用降水头注水试验可以缩短试验时间。将水头注水试验一般适用于为测定地下水位以下黏性土、粉性土和砂土的渗透系数。定水头注水试验也称为常水头注水试验。

注水试验应考虑试验操作的方便和孔壁稳定情况，宜采用自上而下分段注水，当孔壁稳定条件较好时也可采用自下而上分段注水。

5.5.14 定水头注水试验的时间主要从两方面考虑：对地下水位以下试段，土层不存在饱和过程，试验时间相对较短；对于地下水水位以上试段，在试验过程中，存在土层饱和时

间问题，试验时间相对要长一些。大部分注水试验在 1~2h 内完成，本条规定的注水试验不短于 145min，可满足大多数试验段试验要求。

5.5.15 当 $\ln(H_t/H_0) - t$ 关系曲线图上呈非线性关系时，需要及时调整试验。

III 压水试验

5.5.17 压水试验宜采用自上而下的分段压水，即每钻进一段，自上而下使用栓塞隔离进行试验。

5.5.18 钻孔压水试验应按三级压力、五个阶段进行，三级压力宜分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1.0MPa，对应五个阶段指按 0.3MPa---0.6MPa---1.0MPa---0.6MPa---0.3MPa 进行压水。但最大压力值需要根据钻孔具体情况确定，当试段埋深较浅时宜适当降低试段压力；当漏水量很大，不能达到试验规定的压力时，可按水泵的最大供水能力所能达到的压力进行试验。

IV 微水试验

5.5.19 微水试验与传统抽水试验相比具有的优势包括：对试验孔外环境影响小；在深厚覆盖层由于受水泵扬程的限制，不能进行常规抽水试验；地层适应性强，强~微透水性地层都能使用；所需仪器设备较少且试验用时较短。微水试验适用于试验孔附近小范围含水层的水文地质性质，因此试验孔应在多个有代表性的位置分别开展微水试验。

5.5.20 微水试验原理。将试验孔内的水体及其相邻含水层一定范围内的水体视为一个系统，采取某种激发方式使系统失去平衡，水位开始变化。

V 回灌试验

5.5.22 本条规定了回灌试验应满足的技术要求。

关于回灌孔的布置原则，与抽水孔基本相同。观测线垂直于地下水流向布置，是为了减小水力坡度对恢复水位观测资料及参数计算精度的影响；回灌孔数量不宜少于 3 个，主要是为了观测水位恢复规律及确定回灌影响半径；观测孔间距的限制是为了有效观测回灌后的恢复水位。一般回灌孔与最近观测孔的间距及外围观测孔之间的间距均不宜大于 10m。

当地下水回灌涉及多层含水层、需了解各含水层的回灌特征时，应针对回灌目的含水层分别进行独立的回灌试验。

回灌孔的工后休止期应根据回灌试验方法确定，如采用加压回灌时，工后休止期不宜小于 15 天；如采用自然回灌，工后休止期不宜小于 3 天。

回灌试验结束后应检查回灌孔内沉淀情况，孔内沉淀物较多时，应分析原因，必要时应进行处理。

5.5.23 本条规定了回灌试验孔应满足的结构要求。对滤料充填高度的要求，是为了预防滤料损失导致地下水回灌量下降及回灌孔淤塞。对黏土球封闭层厚度的要求，是为了预防回灌水串入相邻地层。强调在黏土球封闭层顶至地面之间的管外侧环状空隙内采用注浆或混凝土充填，其目的是避免加压回灌时的回灌水沿管壁外侧向地面喷溢。

5.5.24 回灌试验的目的之一，是为了观测回灌引起的水位抬升效果，因此，回灌试验宜进行至水位趋于稳定。

5.5.26 本条规定了现场整理回灌试验资料时应满足的技术要求。

1 在现场及时整理回灌试验资料后，根据试验曲线 Q_h-t 可初步分析地下水回灌的可持续性，为后期工程建设期间的回灌确定合适的回扬时间间隔提供依据；根据试验曲线 Q_h-s_h 可初步分析地下水回灌效果。

2 根据 $\lg s_h-\lg t$ 、 $s_h-\lg t$ 曲线，可分析回灌试验状态及确定合适的试验持续时间；根据水位变化趋于稳定的 $\lg s_h-\lg r^2$ 曲线，可初步判别回灌后的水位恢复形态及回灌影响半径。

3 当有地层变形观测资料时，根据对应观测孔的恢复水位与地层变形关系曲线 $s_h-\epsilon$ ，可分析地下水回灌对环境变形的影响。

VI 地下水连通试验

5.5.27 连通试验可用于测试岩溶地下水的下列内容：补给范围、补给速度、补给量与相邻地下水系的关系；径流特征，地下水流向、流速、流量；与地表水的转化、补给等关系；配合抽水试验等确定水文地质参数；为工程目的查明渗漏途径、渗漏量及洞穴规模、延伸方向。中也可采用部分连通试验方法，完成对应试验目的。

5.5.29 示踪剂法应用较广，除在岩溶地下水中使用，也可基岩地下水与孔隙地下水中使用，可配合抽水试验确定水文地质参数。

试验用指示剂应符合下列要求：1.应完全溶于水或易溶于水；2.应在水中保持稳定、无化学变化，不应沉淀、分解、挥发，不应被水中悬浮物或土颗粒吸附；3.应无毒性、无残留危害；4.应有成熟、灵敏、便利的测定方法；5.可测定浓度峰值不应低于地下水背景值的10倍。

5.5.30 气体法可通过放烟，用人工鼓风或自然通风，了解溶洞或裂隙的连贯情况，判断地下水系的连通情况。

6 水文地质参数计算

6.1 一般规定

6.1.1 建议提供的水文地质参数宜包括渗透系数、给水度、储水系数、单井影响半径、单位出水量、群井影响系数及回灌参数等。本标准提及的水文地质概念模型也称为数值模拟或物理模拟的基本模式，是所研究的地下水系统实际的边界性质、内部结构、水动力和水化学特征、相应参数的空间分布及补给排泄条件等概化为便于进行数值模拟或物理模拟的基本模式；在建立水文地质概念模型时，应抓住问题的主要方面，忽略问题的次要方面，对场地含水层以及地下水运移规律形成高度概括性认识；水文地质概念模型是建立数学模型的原理基础。建立的水文地质概念模型应能正确反映场地的蓄水构造、含水层的空间分布及渗透特性、地表水与地下水以及含水层之间的水力联系、初始条件、边界条件、人工及天然的源汇等水文地质条件。

6.1.2 水文地质参数计算可选用解析法、数值法以及径流模数法等。一般解析法和数值法适用于岩溶管道不发育的裂隙或孔隙介质。在场地条件简单，具有丰富地区经验时，可只采用解析法进行计算。在场地条件复杂或基坑工程复杂，需要控制环境影响时，宜同时采用解析法和数值法。解析法用于确定水文地质参数初值，数值法用于参数的反演。不能等效为连续介质的岩溶管道等应采用径流模数法进行计算。

地下径流模数法是一种用于涌水量预测的简化的水均衡法。径流模数指的是流域内单位面积上产生的径流量，其值可由实测资料直接求得，或由降雨资料间接推求。该方法用地下水径流模数一个参数反映地下水各种补给量、排泄量、及动储量等方面的因素，极大地简化了计算并得到广泛应用。但该方法未直接反映决定地下水运动规律，计算结果有时产生较大的偏差，在地下水流域难以查明或地下水排泄量无法准确确定时不具备使用条件。

6.1.3 现场抽水试验应重视抽水量的精确观测，且应配合水位观测提供抽水井水量数据。在抽水试验中，可同步进行数据整理，按 $Q-s$ 或 $q-s$ 曲线检验抽水试验成果质量，不可采用抽水试验异常数据进行参数计算。针对复杂场地，采用数值法进行参数反演时，直接使用群孔抽水试验数据可能导致拟合效果不佳，建议采用多孔抽水试验数据计算水文地质参数，采用多个多孔试验反演参数平均取值，再采用群孔抽水试验复核水文地质参数。

6.2 渗透系数

6.2.1~6.2.4 附录 F.0.1~F.0.4 只给出了完整井常用计算公式。非完整井计算公式较多，可参考相关规范或手册查找使用。

6.2.12 勘察区附近有同层含水层的地表露头时，可基于裂隙统计，利用统计方法生成裂隙网络并计算裂隙岩体渗透系数。由于裂隙网络一般具有非均质各向异性，计算得到的渗透系数一般为张量形式（渗透张量）。在地区经验不足或未开展相关水文地质试验时，可按照此方法估算渗透系数。

6.2.13 在计算参数取值时，应考虑极端不利工况，按最不利工况取值。渗流计算获得多个不同的渗透系数值时，应取大值以确保参数能反映不利的水文地质条件，保障工程安全。在开展数值仿真时，可取平均值，以使计算结果更加接近实际值。

6.3 给水度和储水系数

6.3.3 对水文地质勘察等级为甲级的基坑，一般同时采用解析法和数值法反演渗透系数，此时需具备数值建模条件。如采用非稳定流模型，则可采用渗透系数、给水度和储水系数进行联合数值反演，利用试算-校正法计算给水度和储水系数。

6.4 单孔影响半径

6.4.3 实际抽水试验中，可能不存在水位为零的理论边界，此时，当远场水位降深和近场水位降深相比可以忽略不计时，可认为水位降深为零。扣除自然波动幅度后，降深阈值可以取为 0.1m。

6.5 单位出水量和群孔影响系数

6.5.1 单孔单位出水量是指在抽水试验中单位时间单位水位降深对应的出水量。由于抽水试验井和实际降水井滤管长度不一定一致，所以，这里将单孔单位出水量除以滤管长度，引入单孔单位滤管出水量。可采用抽水试验单孔单位滤管出水量乘以降水井滤管长度来估算降水井的单井出水量。

6.5.2 考虑降水井的群井干扰效应，可采用群孔影响系数，基于抽水试验估算实际降水井的单井出水量。

6.6 回灌参数

6.6.3 采用“大井法”计算群孔回灌影响半径时，可参照抽水试验单井出水量进行折减，按经验估算单井回灌量。

6.6.4 群孔回灌试验单孔回灌量和单孔回灌试验单孔回灌量可参照抽水试验单位出水量，换算为单位回灌量，用于考虑试验井和回灌井的滤管差异。

6.6.5 回灌试验计算回灌水位回升率是指在不漏斗初始条件下的水位回升，有漏斗情况下，可参照此值按照现行叠加进行换算。

6.6.6 回灌地层回弹效应率是基于现场回灌试验给定的，未充分考虑实际回灌的时间效应。实际运用时建议按地区经验进行修正，考虑回灌和试验的时效问题。

7 基坑工程水文地质分析评价

7.1 一般规定

7.1.1~7.1.3 这几条主要规定了基坑工程水文地质分析评价所需的基本条件以及主要工作思路。水文地质分析评价应重视收集类似工程的地下水控制经验，重视现场水文地质试验以及与地层结构相关的原位测试结果，并注意含水层骨架的不均匀性造成水文地质参数的不确定性。

7.1.4 高水位地区的基坑工程一般都会涉及地下水控制问题。当基坑开挖深度较小，通常仅需将浅层潜水位控制在坑底以下。当基坑开挖深度较大，常常会涉及承压水控制，需通过有效的减压降水措施，将承压水位降低至安全埋深以下。为避免基坑侧壁、坑底发生流砂、渗漏等不良现象，以及满足基坑周边环境的保护要求，需在基坑周边以及坑底局部区域设置可靠的截水或防渗措施。为控制基坑周边地下水位下降引起的地面沉降，可采取坑外地下水回灌措施来控制地下水位，达到减小地层压缩变形与地面沉降的目的。

7.1.6 在岩溶发育区，根据岩性组合关系、地质构造发育特征以及水文地质条件，在结合物探及钻探基础上，可初步判断地下涌水的可能性及涌水形式。岩溶区易发生涌水的蓄水形式主要有裂隙岩溶蓄水形式、溶腔溶潭蓄水形式、断层岩溶蓄水形式、地下河及岩溶管道蓄水形式等。涌水量可选用水文地质比拟法、洼地渗入量法、水均衡法、动态观测法、地下水动力学法、实测法等多种方法计算比较确定，需要注意的是，由于每一种方法、公式的提出都是基于特定地质条件之上的，因此岩溶地区地下涌水评价必须注重水文地质条件的研究，选取与地质条件相匹配的计算分析方法。

7.2 地下水对基坑工程影响的分析评价

7.2.1 本条第 1~第 2 款列出了地下水力学评价的主要内容，以下各条则规定了各种力学作用的评价方法；本条第 3~第 5 款列出了地下水的物理、化学作用的评价内容。应在充分了解地下水赋存环境和岩土条件的前提下做出合理的预测和评价。

7.2.2 高地下水位地区的基坑工程，当采用截水帷幕控制地下水时，基坑开挖过程中在渗透力的作用下易产生土体的渗透破坏。本条以渗流水力坡降 I 不大于地基土的临界水力坡降 I_{cr} 来判别坑底土体的抗渗流稳定性， I_{cr} 通常由坑底土体的性质确定。当抗渗流稳定性

验算不满足要求时，应通过增加截水帷幕插入深度，或坑外增加降水或减压措施（如条件允许）。

7.2.3 基坑工程中，土体在渗流作用下发生破坏，由于土体颗粒级配和土体结构的不同，存在流土、管涌等破坏模式。其中流土是指在上升的渗流作用下，局部土体表面的隆起、顶穿，或者粗细颗粒群同时浮动而流失的现象，前者多发于表层为黏性土与其他细粒土组成的土体或较均匀的粉砂层中，后者多发生在不均匀的砂土层中。管涌是指在土体中的细颗粒在渗流作用下，由骨架孔隙通道流失的现象，多发生在砂砾石地层中。

土的颗粒级配和土的孔隙率对临界水力坡降的影响明显，本条参考行业标准《水利水电工程地质勘察规范》（GB50487），列出了几种通用的临界水力坡降的计算方法，可根据土层的地质条件选择或进行综合比较。需指出的是，留土的临界水力坡降计算式（7.2.3-2）对无黏性土比较合适，而对黏性土或泥化夹层等则不适用。

7.2.4 本条基于考虑上覆土层重量与承压含水层中承压水头的平衡，判别坑底抗承压水头的稳定性，未考虑上覆土层与围护墙间的摩阻力影响。抗承压水突涌稳定性系数各地的经验不尽相同，可按现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120）或相关地方标准的规定确定。当验算不满足要求时，可在坑内设置管井井点，降低承压水的水头，保障基坑的安全。

对于岩溶地区基坑抗承压水突涌稳定性分析，宜根据基坑工程范围内岩溶总体发育程度、溶洞分布特征及岩溶涌水量、基坑底板以下溶蚀裂隙或串珠状溶洞发育特征等因素，采用工程类比、理论分析、数值模拟等方法进行综合判断。

7.3 地下水控制的环境影响分析评价

7.3.1 仅从基坑安全性、经济性的角度考虑，降水可减小水压力从而降低作用在支护结构上的荷载，降低地下水渗透破坏的风险。但降水后，随之会带来对周边环境影响的问题。在一些地质条件下，降水会造成基坑周边建筑物、市政设施沉降而影响其正常使用甚至损坏。另外，我国地下水资源非常紧缺，保护和合理利用地下水是国家节水政策；减少地下水开采，防止污染地下水，是国家可持续发展的要求。地下水控制方案应正确处理基坑工程施工与环境保护、节约水资源的关系，并优先选用对地下水资源和周边环境影响小的控制方案。

7.3.3 当采用截水方式控制地下水时，一般设置竖向截水帷幕。截水帷幕应连续，作为截水帷幕的垂直度、桩（墙幅）间的搭接尺寸应保证深层截水帷幕的连续、截水可靠。基坑开挖面标高变化时，截水帷幕插入深度应满足不同开挖深度区域的疏干降水设计要求。若基坑不同区域高差相差较大，宜分别形成封闭截水帷幕。

当坑底以下存在连续分布、埋深较浅的隔水层时，采用落底式截水帷幕可直接隔断承压含水层。弱透水层是相对的，相对所隔含水层而言其渗透系数较小，但在有水头差时，弱透水层内也会发生渗流，因此，落底式截水帷幕应进入下卧弱透水层一定长度，以满足地下水绕过帷幕底部的渗透稳定性要求。

当基坑底部以下含水层厚度较大而无法隔断时，可采用悬挂式截水帷幕布置，帷幕必须插入坑底以下足够深度，满足抗渗流稳定性验算的要求，否则容易出现坑内水头降深难以达到设计要求而无法开挖。此外，通过加大插入深度，可以加大绕流路径，减小坑外水头降深，从而减少对周边环境的影响。

当基坑规模不大，或针对基坑局部落深坑，也可设置水平截水帷幕封底，相当于构筑了相对不透水层，满足抗承压水突涌稳定性要求。

7.3.4 在基坑工程水文地质勘察阶段，为方便开展地下水控制对周边环境影响的评价，需建议基坑的降水方案。降水方案涉及降水井类型选择、降水井数量确定、降水井的平面布置、降水井结构确定等，需要根据场地工程地质和水文地质条件、基坑规模、周边环境保护要求等因素综合确定。常用降水井类型包括轻型井点、喷射井点、降水管井、真空降水管井等，可根据土层性质及其渗透系数选择；有降水工程经验时也可根据以往工程资料，对现场地质条件认真校核后采用合适的降水方案。

7.3.6 依据减压降水井滤水管、含水层和截水帷幕的相对关系，降水可分为封闭型降水、悬挂型降水和敞开型降水 3 类，其中封闭型降水和悬挂型降水均属于坑内减压降水，敞开型降水包括坑外降水和“形式上的坑内减压降水”，实际应用中 3 类降水也可组合使用，如悬挂型+敞开型降水。

1 封闭型减压降水

如图 1 所示，减压井布设于坑内，属于典型的坑内降水，当截水帷幕进入承压含水层，并进入承压含水层底板以下的相对隔水层中，隔水帷幕已阻断了基坑内外承压含水层之间的水力联系。

降水井滤水管长度应综合水位降深幅度和含水层厚度确定，采用完整井或非完整井。

隔水帷幕虽然形式上完全隔断了含水层，但还存在多种因素的渗漏，如随着基坑深度的加深，截水帷幕两侧的水头差越来越大，其渗漏风险及渗漏量也越来越大。

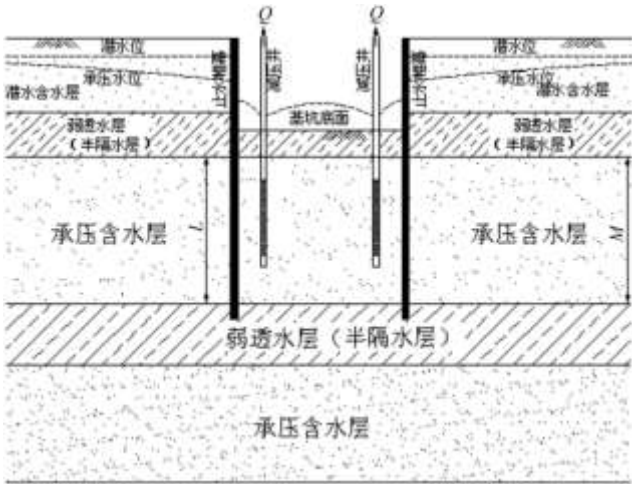


图 1 封闭型减压降水

2 悬挂型减压降水

如图 2 所示，截水帷幕部分插入含水层中，减压井布置在基坑内部，且减压井滤水管底端的深度不超过截水帷幕底端的深度。坑内井群抽水后，坑外的承压水需绕过截水帷幕的底端，绕流进入坑内，同时下部含水层中的水垂向经坑底流入基坑，在坑内承压水位降到安全埋深以下时，坑外的水位降深相对下降较小，从而因降水引起的环境变形也较小。

坑内减压降水必须合理设置减压井滤水管的位置，充分利用截水帷幕的挡水(屏蔽)功效，以较小的抽水流量，使基坑范围内的承压水水头降低到设计标高以下，并尽量减小坑外的水头降深，以减少因降水而引起的环境变形。

悬挂型降水设计时要重点关注滤水管底与截水帷幕的关系，合理设置滤水管长度。考虑到截水帷幕阻隔效应与基坑尺度、含水层厚度、含水层渗透性、滤水管的经济性长度等相关，应通过试验和数值计算进行分析。

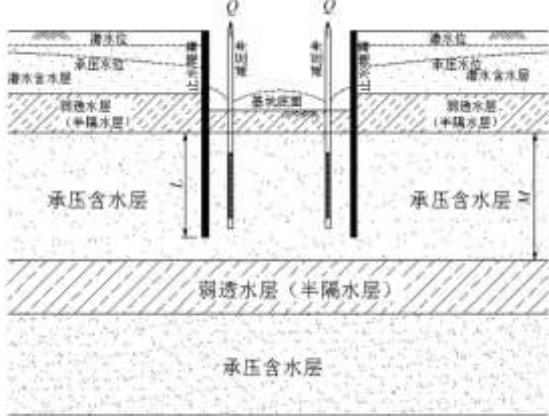


图 2 悬挂型减压降水

3 敞开型减压降水

敞开型减压降水在无截水帷幕条件下或滤水管底深于截水帷幕幕底的降水类型，包括以下 3 种情况：

1) 无截水帷幕或截水帷幕幕底浅于承压含水层层顶，如图 3 (a) 和 3 (b) 所示，坑内外布井均可以，当基坑宽度不大于 30.0m 时，可坑外布设减压井、观测井和备用井为主；当基坑宽度大于 30.0m 时，宜坑内外联合布设减压井，坑内布设观测井和备用井。

2) 如果仅将减压井布置在坑内，但降水井滤水管底端的深度超过截水帷幕底端的深度，伸入承压含水层下部，则抽出的大量地下水来自于截水帷幕以下的水平径向流，不但使基坑外侧承压含水层的水位降深增大，降水引起的环境变形也增大，失去了坑内减压降水的意义，成为“形式上的坑内减压降水”，如图 3 (d) 所示。

3) 减压井布置在基坑围护体外侧，而且要使减压井过滤器底端的深度不小于截水帷幕底端的深度，才能保证坑外减压降水效果，如图 3 (c) 所示。如果坑外减压井滤水管埋藏深度小于截水帷幕深度，则坑内地下水需绕过截水帷幕底端后才能进入坑外降水井内，抽出的地下水大部分来自于坑外的水平径向流，导致坑内水位下降缓慢或降水失效，不但使基坑外侧承压含水层的水位降深增大，降水引起的环境变形也增大。换言之，坑外减压降水必须合理设置减压井滤水管的位置，减小截水帷幕的挡水(屏蔽)功效，以较小的抽水流量，使基坑范围内的承压水水头降低到设计标高以下，尽量减小坑外水头降深与降水引起的环境变形。

4 悬挂型+敞开型联合减压降水

当现场客观条件不能完全满足前述关于悬挂型减压降水或敞开型减压降水的选用条件时，可综合考虑现场施工条件、水文地质条件、截水帷幕特征以及基坑周围环境特征与保护要求等，选用合理的联合减压方案。

开挖深度内的承压水降压应综合考虑环境因素，遵守“按需减压”的原则，根据工况分阶段制定承压水水位控制标准，制定降水运行方案。

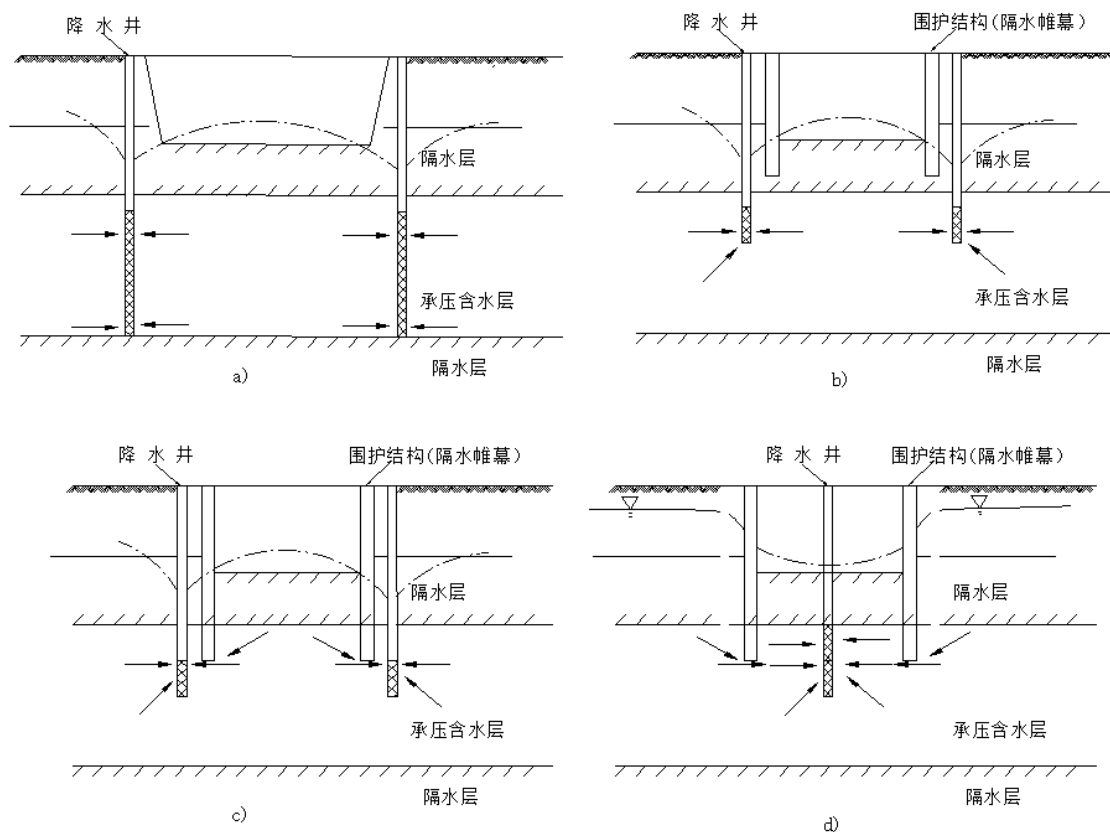


图 3 敞开型减压降水结构示意图

7.3.7 地下水渗流数值模型应真实反映拟建场地的水文地质条件、工程性质及工况条件、降排水运行条件等，以保证较准确预测受地下水控制影响后的地下水渗流场时空分布。在地下水渗流数值模拟中，应重视以下方面：

1 在进行地下水渗流模拟前，应认真做好技术准备工作，以保证模型输入参数的真实可靠性。这些技术准备工作包括：分析现有岩土工程勘察成果和水文地质勘察成果文件；分析地下水控制目的含水层（组）的性质，包括各项物理力学性质指标及原位测试指标等；在分析区域水文地质资料、拟建项目的现场抽水试验资料及类似工程地下水控制经验的基础上，综合把握地层的水力特性，给定地下水渗流数值模拟所需的计算参数。

2 建立物理模型时，应遵循以下原则：可将与降水目标含水层水力联系较弱的若干地层作适当合并，减少地质层；地下水控制目标含水层一般采用岩土工程勘察成果文件的地质分层；对厚度较大的地下水控制目标含水层，在岩土工程勘察成果文件中未划分的粘性土薄层等水力特性有较大差异的亚层对渗流场有较大影响时，建模时宜根据真实地质条件将地下水控制目标含水层划分为若干地质层。

3 确定数值分析计算范围（计算域）时，应满足以下要求：在设置模型的定水头边界条件时，定水头边界与降排水中心的距离应根据含水层的水力特性确定；定水头边界处

的释水量，不宜超过总释水量的 15%，可以此为原则检查设置定水头边界的合理性；物理模型的竖向底边界应延伸至地下水控制降水目的含水层的下伏隔水层顶面。

4 数值模型的网格剖分应满足以下要求：网格的长宽比不宜太大；降排水区域及观测井附近，宜适当加密网格；隔水帷幕底端位置处，宜设置层单元线；降水井及回灌井的滤管底端位置处，宜设置层单元线。

5 初始地下水位的输入值需遵循以下原则：依据场地监测孔某一时刻的监测值，运用合适的插值方法确定数值计算网格中每个节点的地下水位值，作为初始流场，初始水位取值应满足以下要求：承压含水层的初始水位，根据实测初始水位取值；潜水含水层的初始水位，可取与其竖向距离最近的承压含水层的实测初始水位值。

6 模型校正应满足以下要求：应根据现场抽水试验资料，对模型参数进行识别；可采用地下水数值模拟软件中的参数优化模块试估调试法进行分析；根据校正模型，对原方案进行复核，校正模型可作为设计依据。

7 计算结果核查和分析包括以下内容：对隔水边界两侧的水位降深进行核查；对地下水质量平衡进行核查；对降排水区域的渗流场进行核查，经查询、确定降排水能力薄弱区段后，根据经验判断进行降水井数量与平面位置调整；对比分析降排水区域内外的水位降深比例关系，并根据工程经验判断其是否合理；当计算单元出现干涸现象时，该层单元内的井的滤管不再工作，渗流场出现异常，应采用简化方法消除（可在特定应力期设置零流量）。

7.3.8 当基坑涉及到承压水问题且抗突涌稳定性不满足要求时，需根据地层条件确定是采用截水帷幕隔断承压水层还是设置悬挂帷幕，然后进行坑内减压的承压水处理方案。当采用截水帷幕隔断承压水层时，坑内减压对周边环境的影响一般很小，可以不用分析降承压水对周边环境的影响。当采用悬挂帷幕方案时，需评估承压水降水对周边环境的影响。本条提出了基坑采用悬挂式截水帷幕结合坑内减压的承压水控制方案时，评估地下水控制对周边环境影响的流程和方法。

1 群孔抽水试验、反演分析与计算参数的确定。在评估承压水降水对周边环境的影响之前，需根据本标准第 5.5 节的规定开展现场群孔抽水试验。可在承压含水层和上部潜水含水层设置水位观测井，观测承压水层抽水过程中各土层的水位变化，并确定承压含水层和其它土层的水力联系；通过设置地表沉降和深层沉降观测点，观测得到抽水过程中土层的沉降情况。结合抽水试验得到的水头下降实测数据，根据本标准第 6.2.10 条和第

6.3.3 条的相关规定反演分析确定承压含水层的渗透系数和储水系数。同时，根据抽水试验测得的地表沉降数据，按公式（7.3.9）反演分析地面沉降经验系数。

2 基坑降水引起周边环境的变形分析。结合群孔抽水试验结果确定承压水降水方案，即确定合理的承压水减压井数量、井深等，然后根据降水方案进行承压水降水的环境影响分析。本条提出的是采用三维渗流分析结合分层总和法来进行分析，即建立符合实际的基坑降水三维渗流分析模型进行渗流分析，得到基坑承压水降水产生的各土层水头变化情况，在此基础上按本标准第 7.3.10 条的规定计算各土层有效应力增量，然后按本标准第 7.3.9 条的基于土体单向压缩的分层沉降总和法计算得到总的地表沉降情况，从而预估周边环境的变形。

3 计算分析实例。

（1）项目概况。某项目位于南京市河西地区，设 3 层地下室，基坑面积约 40000 m²，普遍区域挖深 15.5 m，酒店式公寓挖深 16.5 m~17.0 m，办公楼基坑挖深 18.0 m。基坑北侧为地铁 1 号线区间隧道，埋深约 11.5 m，与基坑最近距离约 12.0 m。基坑北侧、东侧、南侧为道路及众多市政管线，且管线与基坑的距离较近。基坑西侧与另一新建项目基坑之间留设 50 m 宽的下沉式广场区域，并待两侧基坑回筑完毕之后再施工。基坑环境平面如图 4 所示。

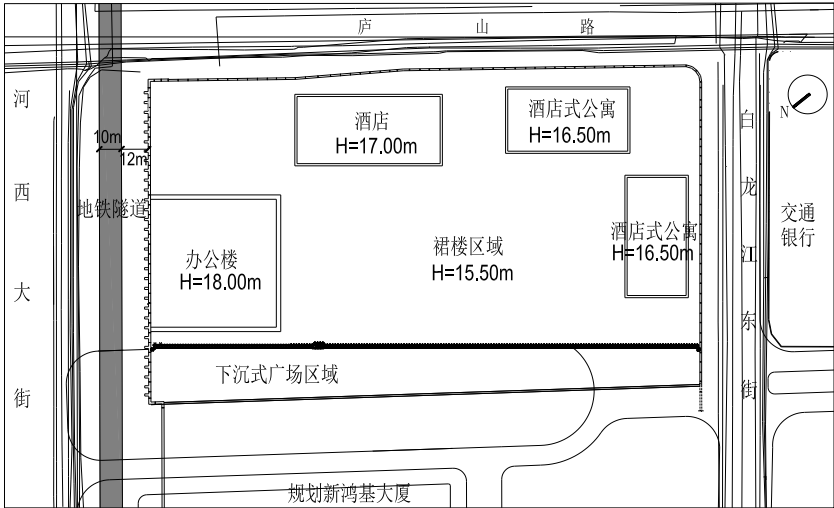


图 4 基坑环境平面图

（2）工程地质及水文地质条件。项目场地属长江漫滩地貌单元。勘察揭示，表层①为人工填土，其下为第四系全新统 Q₄ 新近沉积的粘土、淤泥质粘土；中部为一般沉积的粉细砂、中细砂，下部为 Q₃ 上更新统沉积的砂砾石层；下覆基岩为白垩统浦口组（K_{2p}）粉砂质泥岩。自上而下土层依次为①₁ 杂填土、①₃ 素填土、饱和~软塑的②粘土、饱和~流塑的

③淤泥质粉质粘土、中密的④₁ 粉细砂、密实的④₂ 中细砂、局部夹软~可塑的④_{2a} 粉质粘土、密实的④₃ 含砾中细砂、结构已破坏的⑤₁ 强风化粉砂质泥岩、结构基本未破坏的⑤₂ 中~微风化粉砂质泥岩层。场地典型地质剖面如图 5 所示。

场地地下水可分为两类：一类为孔隙潜水，赋存于上部①层填土中，勘察测得该水位埋深在 0.95m 左右。另一类为承压水，主要赋存于④₁ 粉细砂、④₂ 中细砂、④₃ 含砾中细砂中，其中④₁ 粉细砂顶板埋深 15.2m~19.1m，层厚 11.4m~16.3m；④₂ 中细砂顶板埋深 29.7m~50.8m，层厚 2.6m~26.7m；④₃ 含砾中细砂顶板埋深 52.7m~59.8m，层厚 1.5m~7.1m。总体上，承压含水层具有水平沉积层理，层厚巨大、富水性好、透水性强、水量丰富，水位变化主要受侧向径流补给影响，补给来源主要为长江，勘察阶段承压水位埋深 7.0m。其余各岩土层含水微弱，为相对隔水层。

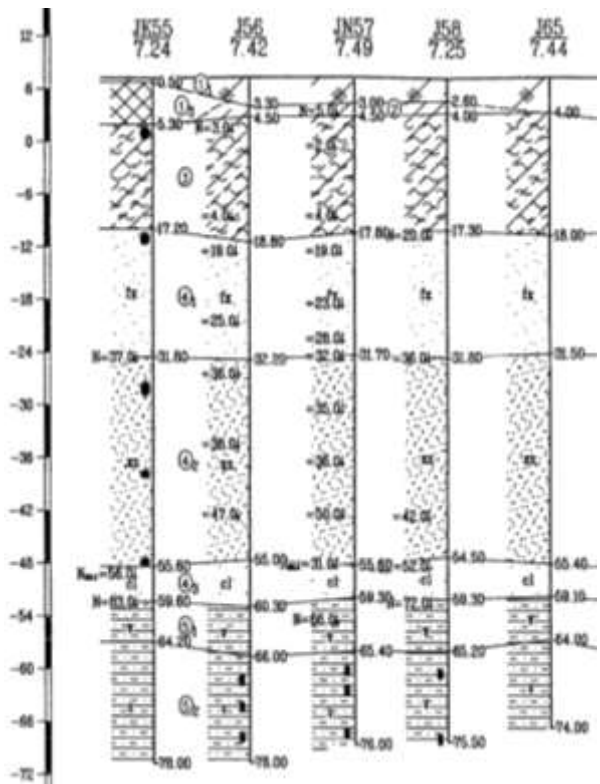


图 5 典型地质剖面图

(3) 群孔抽水试验。由于基坑基底已接近④₁ 粉细砂层，需进行坑内承压水降水方能保证基坑的抗突涌稳定性。又由于承压含水层深厚，需评估是采用悬挂帷幕还是隔断承压水的方式，因此在基坑实施前开展了现场群孔抽水试验，以确定合理的水文地质参数，并为基坑的隔水方案和减压降水方案提供依据。

抽水试验场地布置在拟建办公楼区域，承压含水层主要赋存于④₁ 粉细砂、④₂ 中细砂、④₃ 含砾中细砂中，但由于④₃ 很薄，因此目标抽水层考虑为连通的④₁、④₂ 承压含水层，

共设 6 口抽水井（井号 J1~J6，呈六边形布置，井距 18m~20m，均布置在该承压含水层内）进行群孔抽水试验。为获取准确的水文地质参数和研究上部含水层与④₁层的水力联系，观测井分别布置在④₂层（井号 G1）、④₁层（井号 G2、G4~G6）、③层（井号 G3）。抽水井和观测井的平面布置图如图 6 所示，井的结构大样见图 7。

进行了 1 组群孔抽水试验，试验方法如下：开启 J1~J6 六口井持续抽水 6 天，同时观测其它观测井内的水位变化；J1~J6 井的平均出水量分别为 28.0 m³/h、44.0 m³/h、57.0 m³/h、24.0 m³/h、43.0 m³/h、58.0 m³/h。之后，加开启 G1 井为抽水井，G2~G6 为观测井持续降水 4 天，J1~J6、G1 井的平均出水量分别为 25.0 m³/h、41.0 m³/h、73.0 m³/h、23.0 m³/h、41.0 m³/h、75.0 m³/h、72.0 m³/h。群孔抽水试验共持续 10 天，各井的出水能力无衰减，群井恢复试验时间为 8 天。

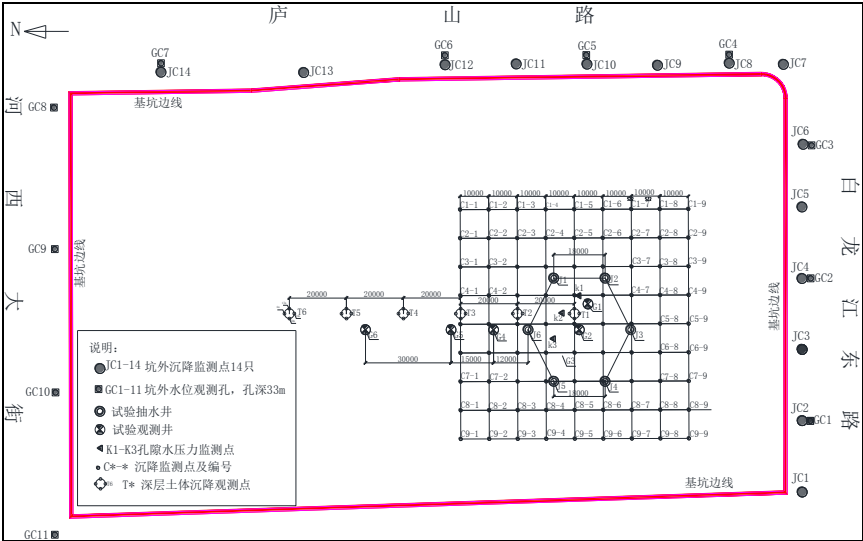


图 6 抽水井和观测井的平面布置图

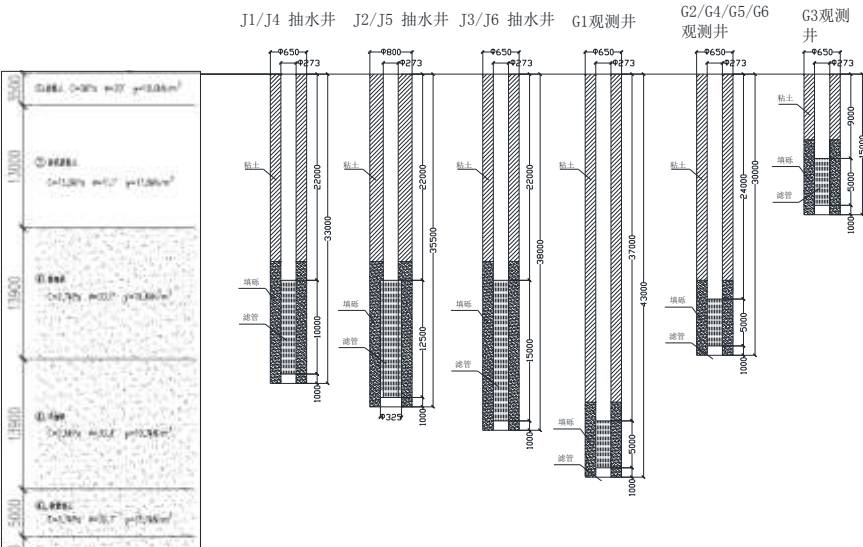


图 7 抽水井和观测井的结构图

观测井 G2~G6 的水头降深时程曲线如图 8 所示，随着降水的开展，各观测井水位逐步下降，降水结束后，水位快速恢复，抽水期间 G2~G6 井内最大水位降深分别为 6.0 m、1.6 m、4.2 m、3.3 m、2.5 m。位于群井围成区域内部的 G2 井水位降深明显大于位于外部区域的 G4、G5、G6 的降深；G3 位于③淤泥质粉质粘土层中，其降深仅 1.6m，说明浅部的弱透水层与承压含水层存在一定的水力联系。图 9 为降水区域外围观测井 GC1~GC11 的水位降深时程曲线，可以看出，各井的时程曲线与图 9 所示的观测井的时程曲线形态大致相似，抽水期间各观测井的水位降深随着时间的推移逐渐增大，降水结束后水位有所恢复，但由于距离抽水群井较远而恢复速度较慢。

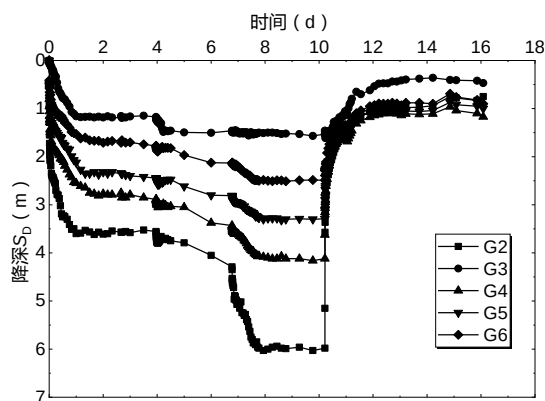


图 8 降水区域内观测井水位降深时程曲线

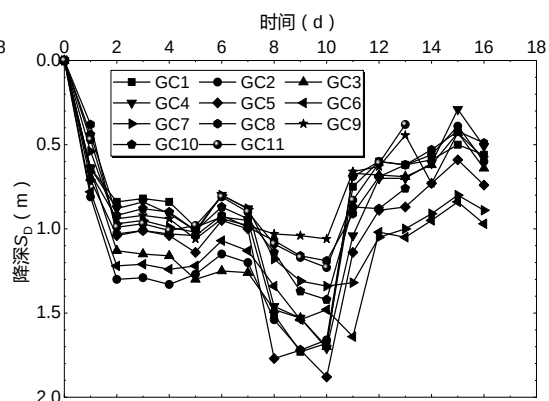


图 9 降水区域外观测井水位降深时程曲线

图 10 为根据各地表沉降监测点的监测数据绘制的地表沉降等值线图。可以看出，群孔抽水后地面均会产生一定量的沉降，抽水中心的沉降值比较大，周边的沉降相对较小，总体上沉降大致呈现出对称的规律，且随着与群孔抽水区域中心距离的增大，地面沉降有逐渐减小的趋势。抽水区域中心位置的实测最大沉降约 47.7 mm。

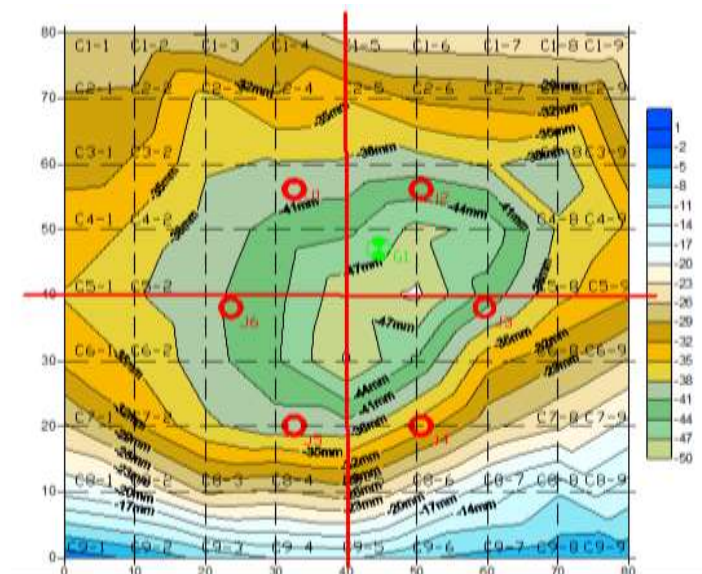


图 10 实测地表沉降等值线图

(3) 根据群孔抽水试验的水文地质参数和地表沉降经验系数反演分析。建立三维渗流分析模型对群孔抽水试验进行模拟，将浅部①填土、②粘土、③淤泥质粉质粘土层统一概化为 18m 厚的浅部弱透水粘土层；深部依次为埋深 18m~32m④₁ 粉细砂、埋深 32m~56m④₂ 中细砂、埋深 56m~60m④₃ 含砾中细砂；为保证计算渗流场分析的模拟精度，于 35m、38m 深度处增加亚层分层，提高网格划分密度；底部埋深 60m~70m 范围为⑤₁ 强风化粉砂质泥岩。模型以整个基坑的边线范围为基准各边再往外扩约 1000m 距离，即实际计算平面尺寸为 2250m×2150m。每层剖分为 99 行、121 列，剖分网格共 83853 个，三维模型和模型俯视图分别如图 11 和图 12 所示。

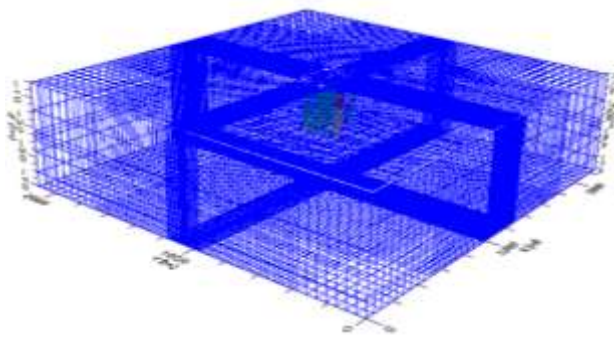


图 11 三维计算模型网格图

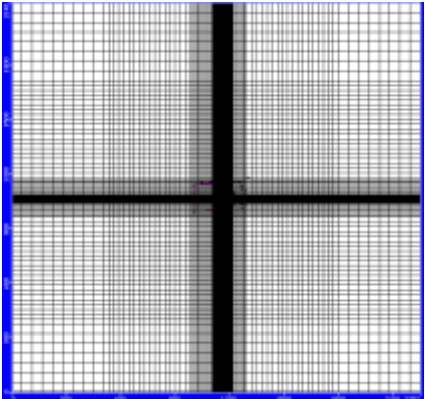


图 12 模型俯视图

根据勘察报告提供的室内渗透试验参数、单井抽水试验确定的初步水文参数以及相关经验确定各土层的初步渗透系数、贮水系数、初始水位如表 2 所示，表中参数即为模型初步赋值。考虑各向异性，按经验设定④₁ 层、④₂ 层和④₃ 层的水平向渗透系数考虑为竖向渗透系数的 1.25 倍。需指出的是，开展群孔抽水试验时的承压水头埋深约为 10.5 m。

表 2 模型初始参数

层号	土层名称	土层厚度 (m)	渗透系数平均值 (m/d)		初始 水位 (m)	贮水系数 S	数据来源
			水平向	竖向			
①~③	浅部粘土层	18	1.30×10^{-3}	8.38×10^{-4}	-1.0	1.8×10^{-4}	勘察报告
④ ₁	粉细砂	14	25	20	-10.5	2.1×10^{-2}	单井试验
④ ₂	中细砂	24	28	22.4	-10.5	2.1×10^{-2}	单井试验
④ ₃	含砾中细砂	4	50	40	-10.5	1.0×10^{-2}	经验取值
⑤ ₁	粉砂质泥岩	10	0.01	0.001	-10.5	1×10^{-4}	经验取值

减压井根据实际情况设置过滤器长度、出水量等参数。将抽水过程中的实测流量作为计算中的抽水井出水量；将抽水试验观测井水位实测值设置为模型中各层初始条件。模型

边界在降水井影响范围以外，考虑将模型侧边界定义为定水头边界。数值模拟的模拟期为 15 天，将整个模拟期划分为 5 个计算周期，分别为 2d、7d、10d、12d、15d。在每个计算周期中，所有外部源汇项的强度保持不变。其中，0~7 天，开启 J1~J6 共六口井进行持续抽水；8~10 天，开启 J1~J6 及 G1 共七口井进行持续抽水；11~15 天，停抽，为水位恢复阶段。

通过反演分析得到④₁及④₂层渗透系数和贮水系数如表 2 所示。G2、G4 观测井的实测和模拟分析的水头时程曲线对比如图 13 所示。可以看出，图中各观测井点的数值模拟水头变化和实测水头变化规律基本一致，数值模拟结果基本反映了群孔抽水试验降水过程中的观测井水位的变化，满足工程精度要求。

表 3 反演分析所得的④₁及④₂层水文地质参数

层号	土层名称	渗透系数平均值 (m/d)		贮水系数 S
		水平向	竖向	
④ ₁	粉细砂	25.0	21.8	2.3×10^{-3}
④ ₂	中细砂	28.0	24.3	2.4×10^{-3}

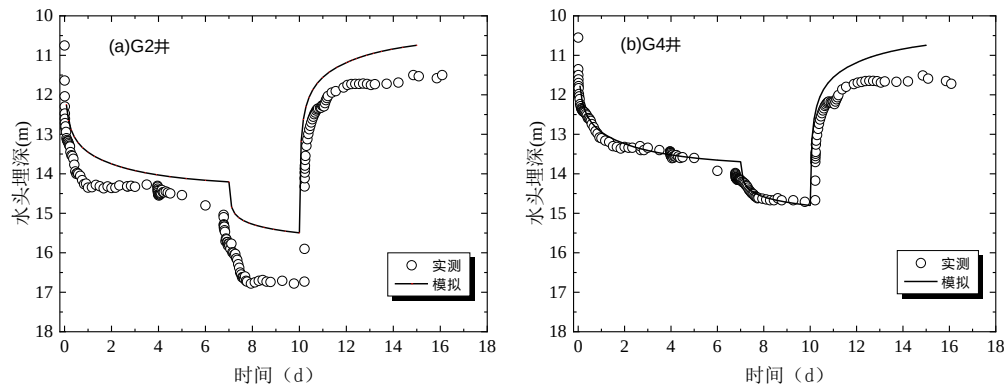


图 13 部分观测井实测和模拟分析得到的水头埋深时程曲线对比

结合上述三维渗流计算得到的群孔抽水稳定的水位降深，采用本标准公式（7.3.9）的分层总和法计算公式，计算最终地表沉降。具体计算过程如表 4 所示。忽略浅部粘性土层降水引起的沉降压缩作用，计算得到④₁、④₂、④₃层固结度达到 100%时的长期沉降量值分别为 71.6 mm、131.8 mm、16.6 mm，求和所得的地表沉降量值为 220 mm。实测地表最大沉降量值为 47.7 mm，其与计算值的比值即降水引起地表沉降的经验系数 $\psi_w = 0.22$ 。

表 4 群孔抽水试验地表沉降经验系数计算

土层编号	土层厚度 (m)	水头降深 (m)	压缩模量 (MPa)	分层沉降 (mm)	地表沉降计算值 (mm)	地表沉降实测值 (mm)	沉降经验系数 ψ_w
④ ₁	14	6.5	12.72	71.6	220	47.7	0.22
④ ₂	24	6.5	11.83	131.8			
④ ₃	4	5	12.06	16.6			

(4) 承压水控制的初步方案。基坑面积巨大，拟采用两墙合一地下连续墙结合三道钢筋混凝土支撑支护。结合详勘报告及群孔抽水试验，坑内减压井深度需达到 31.5 m；普遍区域基坑挖深 15.5 m，地下连续墙厚度 800 mm，地下连续墙插入基底以下的深度应至减压井底部 7.5 m 左右，即插入基底以下约 22.5 m，方可有效起到坑内降压对抗外地下水的遮拦效应，因此普遍区域初步设计地下连续墙深度 38 m。北侧邻近地铁，该侧地下连续墙厚度 1000 mm，为控制基坑开挖对隧道的影响，该侧地下连续墙考虑进入⑤₁ 强风化粉砂质泥岩层，深度达 60.5 m，以完全隔断承压水。普遍区域基坑围护剖面如图 14 所示。

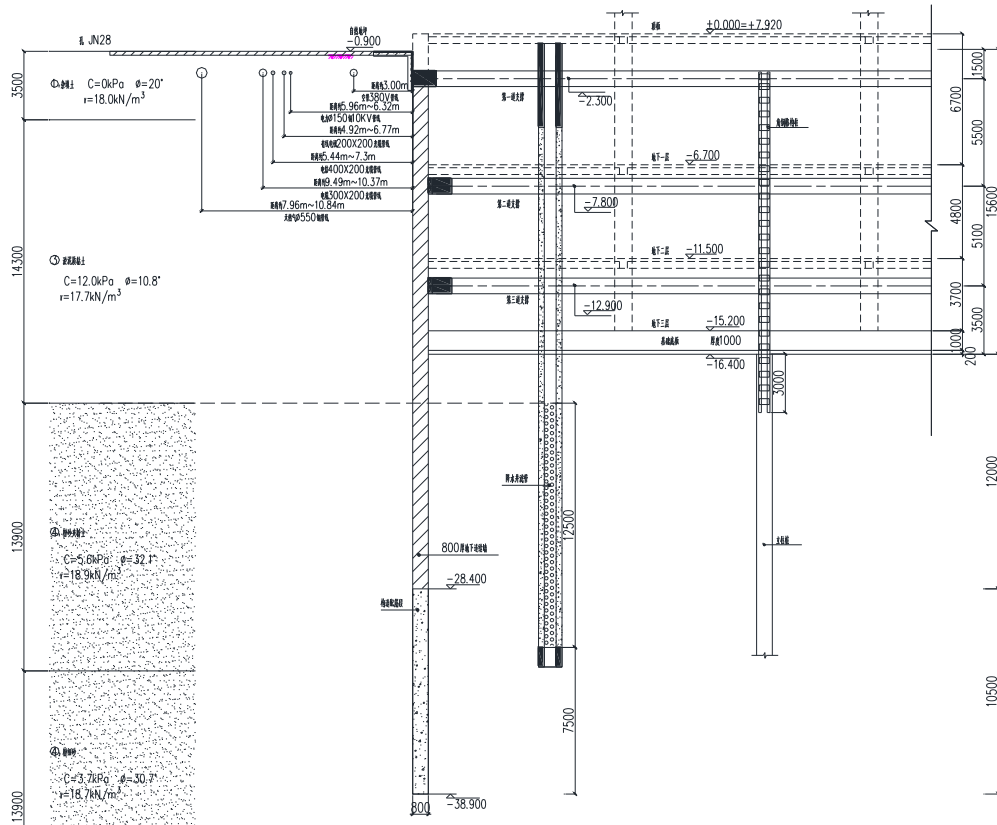


图 14 普遍区域支护结构剖面图

经计算，基坑承压水降深达 9.8 m~12 m，坑内拟采用疏干井和减压井两套独立系统。潜水疏干井采用真空深井，每 250 m² 布设 1 口，井深 15 m，滤头设置在③淤泥质粘土层中。减压井也采用真空深井，其中塔楼区域设置 28 口深度为 35 m 的减压井，酒店区域设置 23

口深度为 33 m 的减压井，其他区域设置 59 口深度为 31.5 m 的减压井。考虑坑内布置 18 口应急备用井，坑外观测井暂时利用抽水试验阶段的观测井。井的平面布置和结构大样分别如图 15 和图 16 所示。

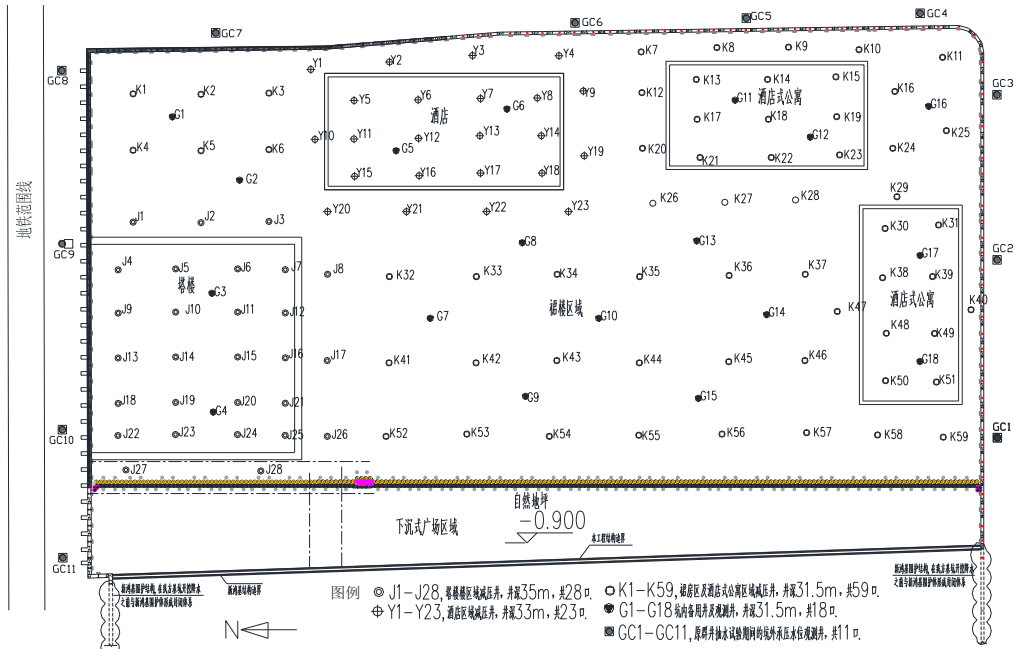


图 15 减压井平面布置图

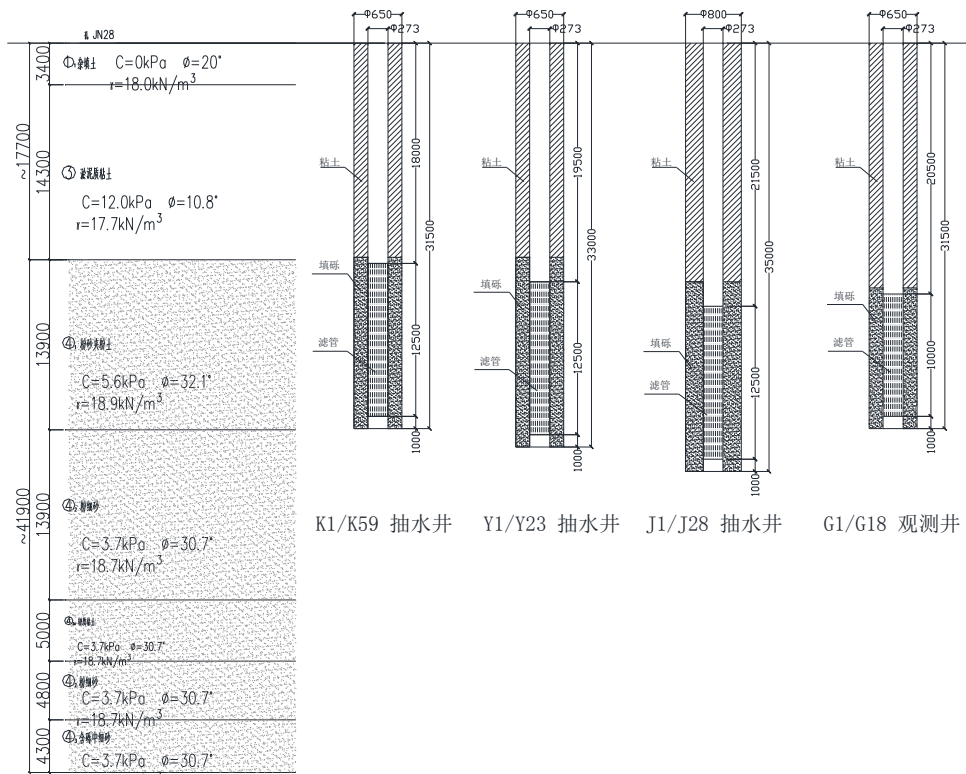


图 16 减压井及观测井结构剖面

(5) 承压水降水的环境影响分析。在根据群孔抽水反分析取得的计算参数和制定的基坑降水初步设计方案的基础上，建立基坑施工阶段降压降水的三维整体渗流模型，进行基坑降水计算分析，预测评估基坑施工阶段在一定隔水边界条件下坑内减压对周边环境条件的影响。三维渗流分析模型在竖向的土层分层情况与前述群孔抽水试验反分析中的计算模型相同。通过试算，以整个基坑的东、西、南、北最远边界点为起点，各边再向外扩展约 1000 m，即实际计算平面尺寸为 2250 m×2150 m。每层剖分为 137 行、175 列，剖分网格共 191800 个。计算模型的三维网格剖分如图 17 所示，坑内减压井的模型如图 18 所示。

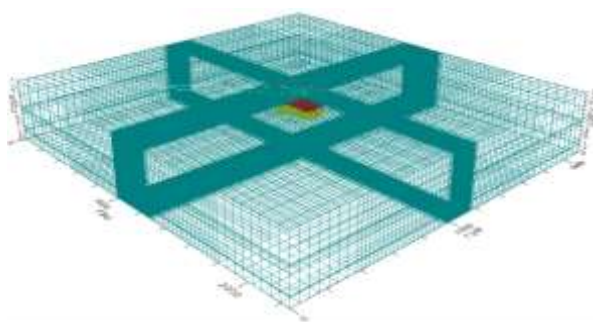


图 17 离散模型的三维网络

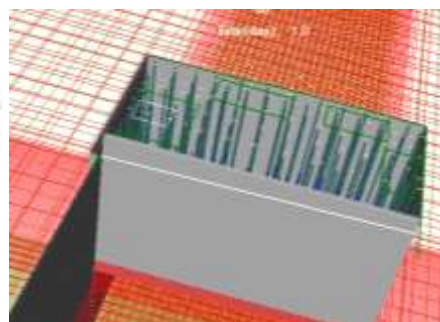


图 18 坑内减压井模型图

分析中①~③、④₃和⑤₁层土的水文地质参数根据勘察报告或经验确定，最重要的④₁层和④₂层的参数采用前述群孔抽水试验反演分析得到的参数。分析中需对各减压井设置合理的参数，减压井的过滤器参数根据初步设计方案确定，出水量根据群孔抽水试验结果确定如下：基坑普遍区域 59 口减压井（K1~K59）的单日抽水量为 120~200 m³；酒店式公寓 23 口减压井（Y1~Y23）单日抽水量为 180 m³；办公楼 28 口减压井（J1~J28）单日抽水量为 140~180 m³。经试算，抽水 5 天基本上就可以达到稳定状态，因此将整个模拟期设置为 5d。在每个计算周期中，所有外部源汇项的强度保持不变。模型边界在降水井影响边界以外，故可将模型边界定义为定水头边界，水位不变。基坑四周设置了止水帷幕，帷幕深度根据初步方案确定，帷幕渗透系数设置为 1.0×10^{-10} m/d。

计算结果表明，基坑降水 5 天后可以将坑内承压水位降至安全水位面以下，坑内及周围环境的承压水头降深模拟结果如图 19 所示。可以看出，北侧由于地下连续墙进入基岩层隔断了承压水，但由于南侧地下连续墙未隔断承压水引起绕流，导致坑外承压水最大降深为 2.0 m，坑内外水位降深比约为 6:1；南侧由于采用悬挂帷幕，坑外承压水降深达 6.0 m，坑内外水位降深比约为 2:1。

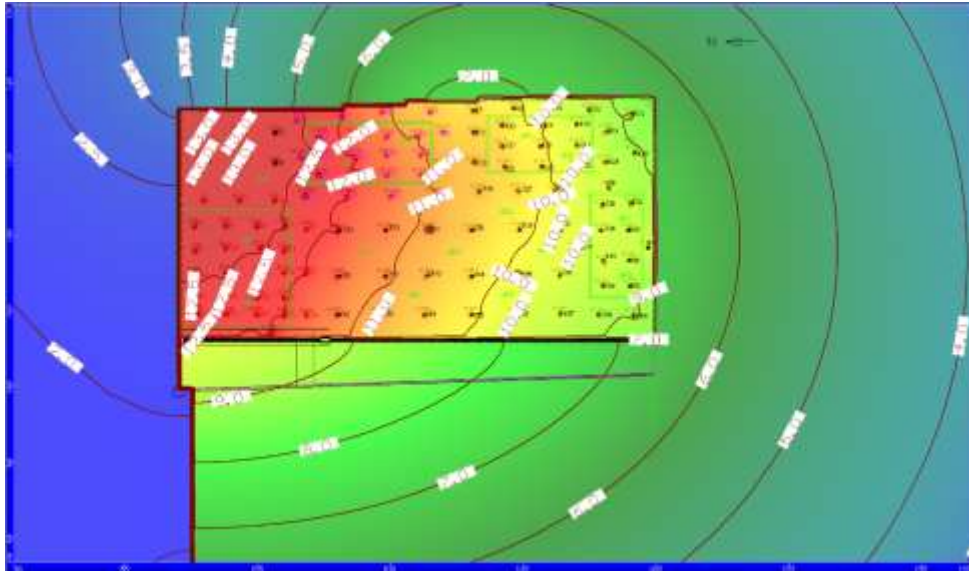


图 19 预测减压井运行 5 天后的水头降深分布图（单位：m）

根据基坑减压降水数值模拟计算分析所得的④₁、④₂、④₃层的水头降深结果，采用本标准公式（7.3.9）的分层总和法计算地表沉降。各土层的压缩模量参数详见表 4，结合群孔抽水试验反演分析所得的短期降水沉降计算经验系数 $\psi_w=0.22$ ，计算得到基坑周边地表沉降预测等值线如图 20 所示。可以看出北侧地铁范围的地表沉降达 16 mm~25 mm，而南侧和东侧地表沉降达 45 mm~50 mm。

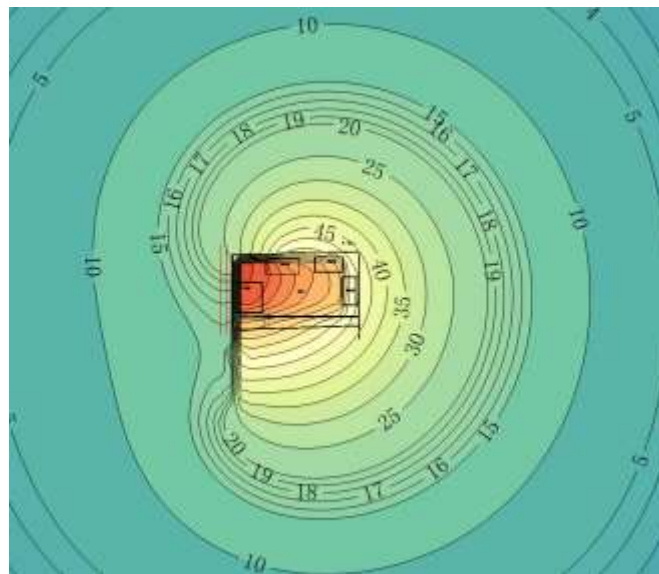


图 20 预测基坑减压降水引起的地表沉降分布图（单位：mm）

上述分析表明，北侧靠近地铁侧、东侧和南侧地表短期沉降都较大，考虑实际降水时间可能达 120 天，长期地表沉降会更大，因此变形不能满足环境保护要求。后续结合地铁管理部门的要求，将东侧和南侧地下连续墙全部插入⑤₁强风化粉砂质泥岩层以完全隔断承压水，并以此作为依据进行最终施工图设计。

7.3.11 本标准第 7.3.8 条评价承压水降水的环境影响方法是结合三维渗流分析和土体沉降分层总和法的一种分析方法，是一种非耦合分析方法。事实上，基坑降水过程中，土体孔隙中的水排出，孔隙水压力消散，土体的有效应力增加，土体因此产生固结，宏观上表现为土体发生沉降。这个过程是渗流场的改变引起应力场的改变，而应力场改变又引起位移场的改变的过程。反过来，土体固结在微观上反映为土骨架被压密，土体的孔隙减小，引起土体渗透性降低，从而又会对渗流场产生影响。因此深基坑降水与地面沉降过程是渗流场与应力场相互影响的复杂过程，考虑渗流场与应力场的耦合作用，也就是建立地下水流动连续性方程与力学平衡方程之间的耦合关系，才更符合实际情况。

本条提出了在有可靠工程经验时，采用流固耦合方法分析基坑开挖和降排水联合作用下对周边环境的影响的原则性规定。这里列举一个实例，说明基坑开挖和承压水降水联合作用下的流固耦合分析的过程及结果。

1 基坑工程概况。某基坑设置 3 层地下室，基坑面积约 2366 m²，塔楼区域开挖深度为 18.4 m，裙楼区域开挖深度为 16.4 m。基坑北侧临近市政道路，道路下存在多条市政管线，与基坑的最近距离为 16.8 m。东侧邻近既有的技术中心大楼，为 8 层钢筋混凝土框架结构，采用柱下独立承台桩基础，桩长 30 m，无地下室，地基埋深约 2.7 m，基坑与技术中心大楼桩基承台距离约 3.7 m。

场地为滨海平原地貌类型，土层依次为：①杂填土；②粉质粘土，可塑状态；③淤泥质粉质粘土，流塑状态；④淤泥质粘土，流塑状态，高等压缩性；⑤粉质粘土，软塑状态；⑥粉质粘土，硬塑状态；⑦₁砂质粉土，中密~密实状态，平均层厚约 10.5 m；⑦₂粉砂，密实状态，平均层厚约 29.6 m；⑨₁粉砂，密实状态，平均层厚约 11.8 m；⑨₂粉砂夹中砂，密实状态，平均层厚约 36.5 m；⑩粉质黏土夹粉土，可塑或密实状态。

地下水主要有浅层潜水和承压水。潜水主要赋存于浅部填土、粘性土、粉土中，水量贫乏，水位埋深为 1.2 m~2.1 m。承压水主要有第一承压含水层（第⑦层）、第二承压含水层（第⑨层）分布，含水层水量较为丰富，导水性较强，主要接受侧向径流和上部空隙潜水越流补给，侧向径流为主。第⑦层和第⑨层相互连通形成承压含水层组，厚度达 80 m，测得承压水水位埋深为 6.2 m~6.8 m。

2 基坑支护方案与承压水控制方案。基坑工程采用两墙合一地下连续墙结合四道水平钢筋混凝土支撑的支护方案。邻近 8 层技术中心大楼位置的东侧和邻近钣金车间的南侧采用 1000 mm 厚地下连续墙；西侧和北侧采用 800 mm 厚地下连续墙。由于承压含水层组厚度达 80 m，本工程采用悬挂帷幕并在坑内设置减压井进行降水的承压水处理方案，东侧

地下连续墙深度为 47 m，其余侧深度为 44 m。结合群井抽水试验结果，坑内仅需布置 4 口减压井即可，同时考虑在坑外布置 6 口承压水观测井兼回灌备用井，井深均为 39 m。对于潜水，坑内设置 9 口潜水疏干井，并在坑外设置 6 口潜水观测井。

3 基坑开挖和降水对环境影响的流固耦合分析。

(1) 计算模型。根据实际的基坑支护设计方案建立考虑土与结构共同作用的三维数值分析模型。基坑的最大平面尺寸约为 56 m×46 m，主楼开挖深度为 18.4 m，考虑基坑本身的规模及边界条件的影响，三维数值分析模型的尺寸为 156 m×146 m×80 m。土体采用实体单元模拟，计算模型中实体单元总数为 301782 个，节点总数 315684 个。基坑结构单元包括地下连续墙、四道钢筋混凝土支撑、立柱和立柱桩。地下连续墙和底板采用板单元模拟，支撑杆件采用梁单元模拟，立柱和立柱桩采用桩单元模拟，结构单元总数为 9754 个。基坑东侧存在已建的八层技术中心大楼，且在基坑的一倍开挖深度影响范围内，应考虑其存在与基坑的相互影响。为简化建模，技术中心大楼采用筏板结合桩基础进行模拟，上覆荷载取 15 kPa/层，共 120 kPa。整体三维分析模型如图 21 所示，其中基坑支护结构和技术中心大楼桩基模型如图 22 所示。计算模型的上边界为自由边界，底部约束水平和竖向位移，侧边约束水平方向位移。

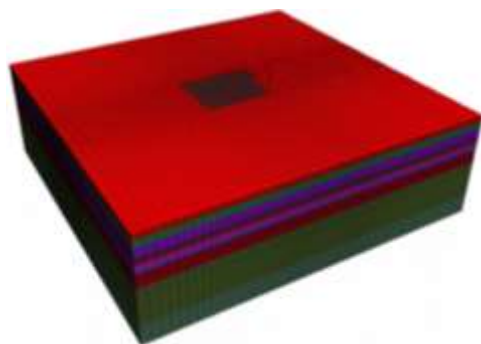


图 21 整体三维分析模型

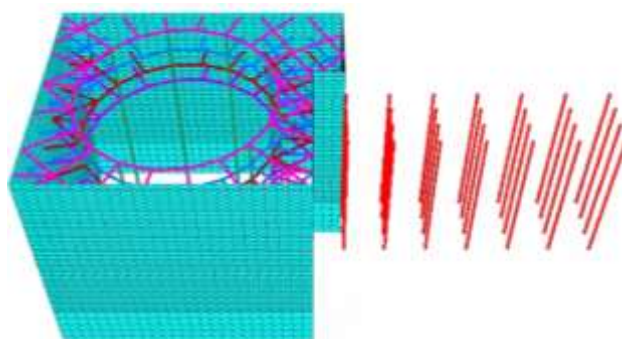


图 22 支护结构及邻近建筑桩基模型

(2) 计算参数。计算中土体采用 HS-Small 本构模型来模拟，各土层计算参数如表 5 所示。降水涉及的主要土层即第⑦₁ 和⑦₂ 层的渗透系数取前期的群孔抽水试验反演得到的水平渗透系数，其他各层渗透系数根据勘察报告或经验确定。地下连续墙和钢筋混凝土支撑等材料均采用线弹性模型模拟，其弹性模量均取值 3.0×10^{10} kPa，泊松比为 0.2。

表 5 土层计算参数

土层序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦ ₁	⑦ ₂	⑨ ₁
γ (kN/m ³)	18	18.8	18	16.9	17.7	19.8	18.9	18.9	18.9
c' (kPa)	3	3	4	6	4	2	1	1	1
ϕ' (°)	29	29	29	24	29	30	35	35	36
ψ (°)	0	0	0	0	0	0	5	5	6
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	4.4	4.4	3.1	1.9	3.5	6.3	12.2	12.8	13.2
E_{50}^{ref} (MPa)	5.2	5.2	3.8	2.3	4.2	7.6	12.2	12.8	13.2
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	26.1	26.1	25.1	15.6	21	38	49	51	53
G_0^{ref} (MPa)	90.4	90.4	83.7	43.2	54.8	189.8	245	255	264.8
$\gamma_{0.7}(10^{-4})$	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
p_{ref} (kPa)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
K_0	0.52	0.52	0.52	0.59	0.52	0.50	0.43	0.43	0.41
m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5
R_f	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
k (m/d)	4.3×10^{-3}	4.3×10^{-3}	4.3×10^{-3}	1.7×10^{-4}	4.3×10^{-3}	4.3×10^{-3}	2.8	3.5	3.7

(3) 降水与开挖模拟

每层土方的开挖通过对移除土体单元赋予“空模型”(null model)的方法来模拟。根据土方开挖与降水要求,每一层土方开挖之前,需对坑内潜水进行疏干降水,降水深度为开挖面以下 1 m。为真实反映施工进度对基坑变形的影响,每一步降水、土方开挖和支撑施工的时间都按照实际施工进度进行模拟。具体各工况的进度时间如表 6 所示。计算时,在渗流分析模式下每计算一个时间步长后,就进行一定步数的力学分析,直到总时长达到规定值或误差小于限定值为止。

分析时第⑦₁、⑦₂和⑨层承压含水层组初始水头设置为地表以下 7 m。开挖至 13 m 后开始启动坑内减压降水,采用定水头方法来模拟减压降水,即将 4 个减压井位置在 29 m~39 m 深度滤管范围内对应的网格点的孔压设定为目标值,由于压差产生渗流场从而达到降水效果。随着基坑开挖深度增加逐步减小设定的孔压值,最终坑内普遍区域承压水头降深能满足基底抗突涌稳定性要求。在坑内开启减压降水的同时,坑外的承压水观测井兼备用井进行常压回灌,以减小降水带来的环境影响,将回灌井在滤管顶位置对应的网格点的水头设定为 29 m,以模拟常压回灌。分析中采用了 Biot 流固耦合分析理论。

表 6 模拟的施工工况

阶段	工况	持续时间 (d)
Stage 1	潜水水位降至 2 m，土体开挖深度 1 m	7
	施工第一道混凝土支撑	3
Stage 2	潜水水位降至 7 m，土体开挖深度 6 m	23
	施工第二道混凝土支撑	3
Stage 3	潜水水位降至 11 m，土体开挖深度 10 m	19
	施工第三道混凝土支撑	3
Stage 4	潜水水位降至 14 m，土体开挖深度 13 m，开始减压降水； 潜水水位降至 15 m，土体开挖至 14 m	19
	施工第四道混凝土支撑	3
Stage 5	潜水水位降至 19 m，继续减压降水；开挖至坑底	19
	浇筑混凝土底板	3

(4) 分析结果及与实测对比

图 23 给出了承压含水层顶部的水头降深分布情况。可以看出，在坑内 4 口减压井附近承压水降深最大，达到 9 m 左右，随着与减压井距离的增大降深逐渐减小，普遍区域降深达到 7 m~8 m，基本能满足基底抗突涌稳定性要求。在坑外，由于坑外进行了回灌，且东侧地下连续墙深度较其余侧深 3 m，增大了绕流路径，因此东侧的承压水位还略有抬升，为 0.3m 左右；西北角位置的降深最大，最大达到 0.8m。图 24 给出了东西向剖面的水头降深分布情况。可以看出，坑内在减压井深度范围内的降深较大，在深度方向，随着与减压井滤管底部距离的增大，承压水降深逐渐减小，在地下连续墙底附近的降深约为 3 m；坑外主要发生沿着水平方向的渗流，随着与基坑水平距离的增加，坑外降深也逐渐减小。总体而言，地下连续墙的插入深度较大，且坑外进行了回灌，因此坑内减压抽水对坑外影响较小，同时也说明地下连续墙的插入深度是合理的；计算分析得到的承压水头分布情况符合基坑工程中渗流场的认知，说明采用流固耦合的分析方法能较好地模拟地下水的运动规律。

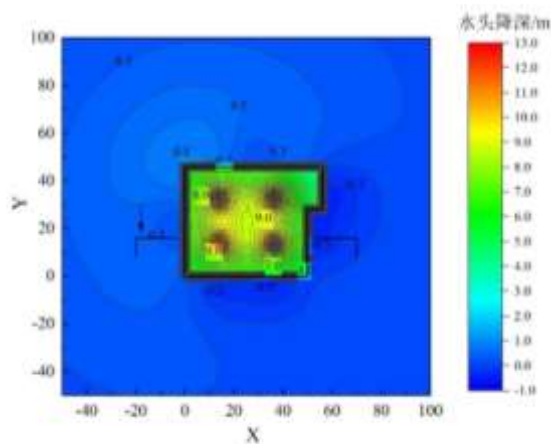


图 23 承压水层顶部水头降深云图

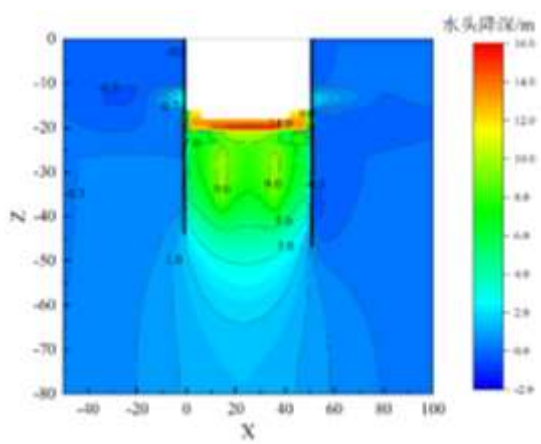


图 24 Y = 16 m 处水头降深剖面云图

图 25 给出了开挖结束后围护结构东西方向的侧向变形云图。可以看出，地下连续墙最大侧移主要出现在各边中点靠近开挖面的附近，西侧计算最大侧移为 29.4 mm。东侧坑外虽然有一幢 8 层的技术中心大楼，超载更大，但由于该建筑为桩基础建筑物，且该侧有一处拐角，相对而言空间效应更为显著，其最大侧移仅 15.3 mm，该侧变形仍然小于西侧的变形。总体上，计算得到的变形能较好地反映基坑变形的空间效应。图 26 为西侧中点附近地下连续墙测点 CX-4 在各个工况下侧移的计算值与实测值的对比情况。可以看出，计算值和实测结果都表明，随着开挖的进行，地下连续墙的侧移不断增大，发生最大位移的位置也逐渐下移，并大致位于开挖面附近。数值分析结果显示，开挖结束后，CX-4 计算和实测的最大侧移分别为 28.7 mm 和 29.6 mm，总体而言数值模拟结果与监测结果吻合得较好。

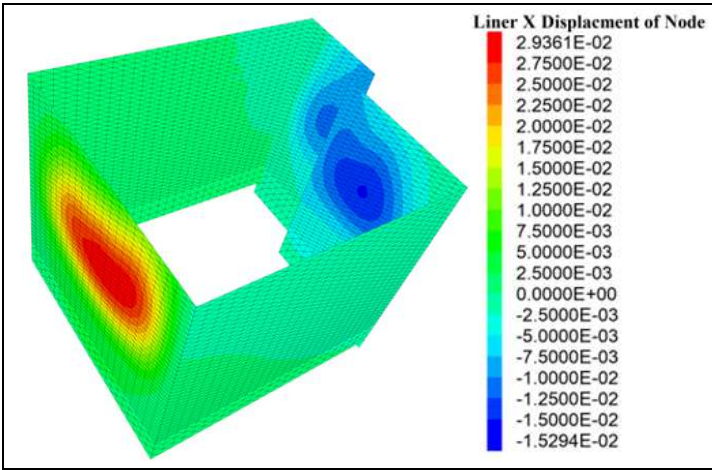


图 25 地下连续墙计算侧向变形（东西方向）

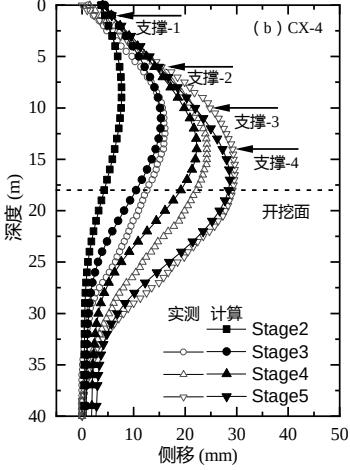


图 26 计算与实测变形对比

图 27 为开挖结束后计算得到的土体竖向位移分布云图。从图中可以看出，坑底土体整体向上隆起明显，基坑中部塔楼开挖深度较周边区域开挖深度大，因此其隆起量也大于周边区域，坑底最大隆起约 91.4 mm。基坑四周地表位移表现为沉降，且每边的中点外侧沉降最大，而基坑角部沉降最小，最大沉降出现在基坑北侧，最大沉降约为 21.2 mm。基坑东侧由于围护墙的变形较小，因此坑外地表沉降也最小。

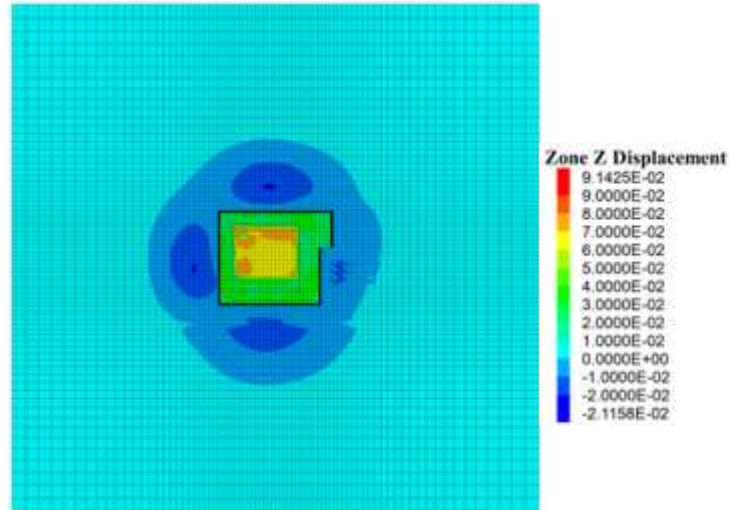


图 27 土体竖向位移云图

图 28 为坑外 DB-3 断面测点各个工况下的地表沉降计算值与监测数据的对比情况。可以看出，计算与实测的地表沉降形态较为吻合，计算值略大于实测值。计算与实测结果均表明，坑外地表沉降整体呈凹槽型分布，且随着开挖和降水的进行沉降不断增大。在最后一层土方开挖时，受减压降水的影响，计算地表沉降有明显的增长，最大地面沉降点出现在距离基坑约 9 m 的位置，最大沉降约 18.6 mm，而实测最大沉降为 14.7 mm。在距离基坑 45 m 之外，地表沉降不明显，说明基坑的降水和开挖对周边环境的影响范围主要是在三倍开挖深度以内，同时也说明回灌对地表沉降也起到了一定的控制作用。

图 29 为东侧技术中心大楼的两个测点 JC21、JC28 和南侧钣金车间测点 JC33 计算和实测沉降发展对比情况，其中 20180725 表示第二道支撑施工完毕的日期，20180818 表示第三道支撑施工完毕的日期，20180910 表示第四道支撑施工完毕的日期，20181110 表示底板施工完毕的日期。可以看出，计算值略小于实测值，但沉降总体发展趋势是一致的。由于较好地控制了承压水和地下连续墙的变形，因此建筑物沉降并不大，JC33 和 JC21 测点的实测最大沉降分别仅为 6.2 mm 和 4.7 mm。

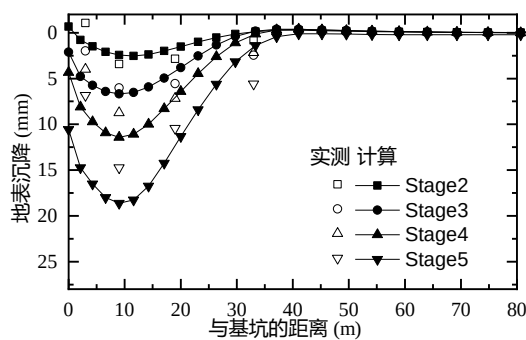


图 28 地表沉降计算值与实测值对比

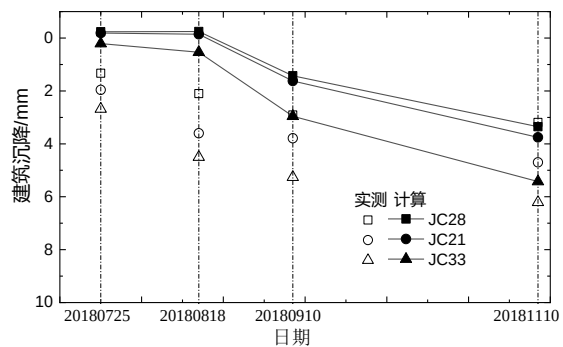


图 29 既有建筑物沉降计算值与实测值对比

上述关于承压水位降深、地下连续墙侧移、地表沉降以及邻近建筑物的沉降的相关规律分析，以及计算与实测的对比表明，总体而言，采用流固耦合的分析方法能较好地模拟基坑开挖和降水的联合作用对基坑支护结构和周边环境的影响。

7.3.12 本条规定了地下水回灌建议应满足的基本要求。

1 根据含水层性质、单孔与群孔的回灌量、试验过程中的回灌量变化特征等，评价地下水回灌可行性。根据地下水回灌率、地下水位回灌效应及地层回弹回灌效应等指标，评价地下水回灌效应。

2 提出地下水回灌建议时，应提供回灌设计参数建议值，包括拟采用的回灌井结构参数、回灌井间距及单井回灌量、回灌压力等，为回灌设计提供依据。

3 为防止地下水回灌引起地下水污染，对采用的回灌水源提出水质控制要求。

4 保障地下水能持续、有效回灌的相关措施包括：回灌井的质量控制措施、回灌井的维护、合理的回扬措施和合适的回灌压力建议值等。

7.3.13 本条主要针对富水性等级为中等富水～强富水的含水层，通过分析评价，提出预防与控制地下水风险的相关措施。

1 预防断电、保证连续降排水的措施一般包括设置双电源及断电时的电源切换措施及相关应急措施等。

2 预防降排水不足或过量，保证按需降排水的措施一般包括：地下水位与抽排水量的实时监控、降水井和抽水设备的安全储备及运营维护、降排水出现异常时的应急反应措施等。

3 控制降排水井施工质量、保证降排水能力的措施一般包括：成井施工工艺选择，施工参数控制要求，施工材料规格要求，洗井质量控制要求以及单井涌水量控制要求等。

4 从地下水平衡角度出发，提出当隔水帷幕质量缺陷引发渗漏、流砂等事故时，为应急抢险服务的辅助降排水措施。

附录 D 土体富水性分级

表 D 以水位降深为 10m、过滤管管径为 91mm 的单孔出水量及单孔单位出水量评价土体富水性、划分土体的富水等级。若口径、降深与上述不符时，应当进行换算后再比较富水性。换算方法：先根据抽水时涌水量 Q 和降深 S 的数据，用最小二乘法或者图解法确定曲线，根据 Q - S 曲线确定降深 10m 时抽水孔的涌水量，再用下面的公式计算口径为 91mm 时的涌水量，最后除以 10m 即单位涌水量。

$$Q_{91}=Q\left(\frac{\lg R-\lg r}{\lg R_{91}-\lg r_{91}}\right) \quad (\text{式 } 1)$$

式中： Q_{91} 、 R_{91} 、 r_{91} —— 口径为 91mm 的试验孔的涌水量、影响半径和钻孔半径；
 Q 、 R 、 r —— 拟换算试验孔的涌水量、影响半径和钻孔半径。