

中国工程建设标准协会

T/CECS 55—202×

孔隙水压力测试规程

Specifications for Poer Pressure Measurement

(征求意见稿)

202×—××—××发布

202×—××—01 实施

中国工程建设标准化协会 发布

中国工程建设标准协会

孔隙水压力测试规程

Specifications for Poer Pressure Measurement

T/CECS 55—202×

主编单位：上海勘察设计研究院（集团）有限公司

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期： 20 ×× 年 × 月 1 日

中国建筑工业出版社

20×× 北 京

前 言

本规程系根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2017 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2017]031 号）的要求，对协会标准《孔隙水压力测试规程》CECS55：93 进行修订而成。

在修订过程中，编制组进行了广泛调查研究，认真总结了近年来实践经验，吸取了有关国内外成熟的科技成果和标准的先进经验。

本规程主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、地下水位测试、水量测试、孔隙水压力测试、流向流速测试、水质测试、注水试验、抽水试验、回灌试验、野外弥散试验、自动化测试系统等。

本规程由中国工程建设标准化协会工程勘测专业委员会归口管理，由上海勘察设计院（集团）有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送上海勘察设计院（集团）有限公司（地址：上海市杨浦区水丰路 38 号，邮政编码：200093）。

本 规 程 主 编 单 位： 上海勘察设计院（集团）有限公司

本 规 程 参 编 单 位： 上海长凯岩土工程有限公司

长安大学

同济大学

常州金土木工程仪器有限公司

基康仪器股份有限公司

上海新地海洋工程技术有限公司

本规程主要起草人员：

本规程主要审查人员：

目 次

1	总 则.....	10
2	术语和符号.....	11
2.1	术语.....	11
2.2	符号.....	13
3	基本规定.....	15
4	地下水位测试.....	17
4.1	一般规定.....	17
4.2	观测孔结构要求.....	18
4.3	埋设方法.....	20
4.4	测试技术要求.....	20
4.5	成果资料整理.....	21
4.6	不同工程中的水位测试.....	21
5	水量测试.....	23
5.1	一般规定.....	23
5.2	安装方法.....	23
5.3	测试技术要求.....	26
5.4	成果资料整理.....	27
5.5	不同工程中的水量测试.....	27
6	孔隙水压力测试.....	29
6.1	一般规定.....	29
6.2	仪器设备.....	29
6.3	埋设方法.....	31
6.4	测试技术要求.....	34
6.5	成果资料整理.....	37
6.6	不同工程中孔隙水压力测试.....	38
7	流向流速测试.....	51
7.1	一般规定.....	51

7.2	测试孔和测点布置.....	51
7.3	埋设及测试技术要求.....	52
7.4	成果资料整理.....	53
7.5	成果应用.....	55
8	水质测试.....	56
8.1	一般规定.....	56
8.2	测试孔和测点布置.....	56
8.3	埋设方法.....	57
8.4	测试技术要求.....	57
8.5	成果资料整理.....	59
9	注水试验.....	61
9.1	一般规定.....	61
9.2	试验方法.....	62
9.3	成果资料整理.....	65
9.4	成果应用.....	69
10	抽水试验.....	70
10.1	一般规定.....	70
10.2	井点和测点布置.....	73
10.3	埋设方法.....	74
10.4	测试技术要求.....	75
10.5	成果资料整理.....	79
10.6	成果应用.....	81
11	回灌试验.....	89
11.1	一般规定.....	89
11.2	井点和测点布置.....	90
11.3	埋设方法.....	91
11.4	回灌试验测试技术要求.....	93
11.5	成果资料整理.....	95
11.6	成果应用.....	96
12	野外弥散试验.....	97

12.1	一般规定.....	97
12.2	测试孔和测点布置.....	98
12.3	埋设方法.....	99
12.4	测试技术要求.....	100
12.5	成果资料整理.....	102
12.6	成果应用.....	105
13	自动化测试系统.....	107
13.1	一般规定.....	107
13.2	自动化测试方法.....	107
13.3	自动化测试仪器设备.....	107
13.4	数据采集与传输.....	108
13.5	安装与调试.....	110
13.6	数据管理与数据分析发布.....	110
附录 A	水位观测孔、抽水井、回灌井施工记录单.....	112
附录 B	地下水位观测记录表.....	113
附录 C	孔隙水压力观测记录表.....	114
附录 D	地下水水质测试（含标定）记录单.....	115
附录 E	试坑单环注水试验记录表.....	116
附录 F	试坑双环注水试验记录表.....	117
附录 G	抽水试验方法和应用范围.....	118
附录 H	抽水试验水位、水量观测人工记录.....	120
附录 I	抽水试验渗透系数计算公式.....	121
附录 J	封井技术要求.....	124
J.1	黏土球封孔.....	124
J.2	灌浆法封孔.....	124
附录 K	野外弥散试验电导率人工记录.....	127
	本规程用词说明.....	128
	引用标准名录.....	129

Contents

1 General Provisions	11
2 Terms and Symbols.....	12
2.1 Terms	12
2.2 Symbols.....	14
3 Basic Requirements	16
4 Water table Test	18
4.1 General Requirements.....	18
4.2 Layout of Testing holes and Testing points	19
4.3 Method of Embedment	21
4.4 Technical Requirements of Testing.....	22
4.5 Test Data Interpretation.....	22
4.6 Application of watertable test in different conditions	22
5 Water Yield Test	24
5.1 General Requirements.....	24
5.2 Method of Embedment	24
5.3 Technical Requirements of Testing.....	27
5.4 Test Data Interpretation.....	28
5.5 Application of water yield test in different conditions	28
6 Pore Pressure Test.....	30
6.1 General Requirements.....	30
6.2 Method of Embedment	32
6.3 Technical Requirements of Testing.....	35
6.4 Test Data Interpretation.....	38
6.5 Application of pore pressure test in different conditions.....	39
7 Flowing Direction and Flowing Velocity Test.....	52
7.1 General Requirements.....	52
7.2 Layout of Testing holes and Testing points	52
7.3 Method of Embedment and Technical Requirements of Testing	53
7.4 Test Data Interpretation.....	54
7.5 Application.....	56
8 Water Quality Test.....	57
8.1 General Requirements.....	57

8.2 Layout of Testing holes and Testing points.....	58
8.3 Method of Embedment	58
8.4 Technical Requirements of Testing.....	58
8.5 Test Data Interpretation.....	60
9 Injection Test.....	62
9.1 General Requirements.....	62
9.2 Method of Testing.....	63
9.3 Test Data Interpretation.....	66
9.4 Application.....	70
10 Pumping Test.....	71
10.1 General Requirements.....	71
10.2 Layout of Testing holes and Testing points.....	74
10.3 Method of Embedment	75
10.4 Technical Requirements of Testing.....	76
10.5 Test Data Interpretation.....	80
10.6 Application of watertable test in different conditions	82
11 Recharge Test.....	90
11.1 General Requirements.....	90
11.2 Layout of Testing holes and Testing points.....	91
11.3 Method of Embedment	92
11.4 Technical Requirements of Testing.....	94
11.5 Test Data Interpretation.....	95
11.6 Application.....	97
12 Field Dispersion Test.....	98
12.1 General Requirements.....	98
12.2 Layout of Testing holes and Testing points.....	99
12.3 Method of Embedment	100
12.4 Technical Requirements of Testing.....	101
12.5 Test Data Interpretation.....	103
12.6 Application of watertable test in different conditions	106
13 Test Automation.....	109
13.1 General Requirements.....	109
13.2 Automatic Testing Methods.....	109
13.3 Automatic Testing Instrumenttation.....	109

13.4 Data Acquisition and Transmission.....	110
13.5 Installation and Degugging.....	112
13.6 Data Management and Publishing.....	112
Appendix A	114
Appendix B	115
Appendix D	116
Appendix E	117
Appendix F	118
Appendix G	119
Appendix H	120
Appendix I	122
Appendix J	126
Appendix K	129
Explanation of Wording in This Code	130
List of Quoted Standards	131

1 总 则

1.0.1 为了统一地下水原位测试的技术要求，提高测试的技术水平，保证测试质量，制定本规程。

【条文说明】1.0.1 地下水测试工作是地下工程、水土环境保护的重要内容之一，随着地下工程建设、运营以及环境保护日益发展，地下水原位测试技术在地下水资源勘察、地下水长期监测、岩土工程基坑降水等多个领域中不断的广泛应用，设计施工单位、地下水传感器单位在从事与地下水原位测试相关的工作中积累了许多新的工程经验。

本标准在地下水原位测试长期工程实践的基础上，结合现行国家标准、行业标准中有关地下水原位测试技术的相关内容，为提升地下水原位测试相关工作质量与技术应用水平，实现各专业地下水原位测试技术要求的统一化、标准化，在原《孔隙水压力测试规程》CECS 55：93 基础上进行了修编工作。

1.0.2 本规程适用于工程建设中地下水理化性质以及含水层水文地质参数原位测试。

1.0.3 地下水原位测试仪器的选择和埋设以及测试方法的确定，应符合质量可靠、操作简便、经济有效的原则。

1.0.4 地下水原位测试除执行本规程外，尚应符合国家及相关行业现行标准的有关规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 地下水 groundwater

狭义指埋藏于地面以下岩土孔隙、裂隙、岩溶饱和层中的重力水，广义指地表以下各种形式的水。

2.1.2 地下水原位测试 groundwater in situ test

为获得地下水物理力学化学参数或含水层水文地质参数而在含水层原来所处的位置上或基本在原位状态应力、水力边界条件下对地下水进行的测试。

2.1.3 重力水 gravity water

岩土中在重力作用下能自由运动的地下水。

2.1.4 含水层 aquifer

能够贮存、渗透的饱水岩土层。

2.1.5 隔水层 aquifuge

结构致密、透水性极弱的导水速率不足以对井或泉提供明显水量的岩土层。

2.1.6 潜水 phreatic water

地表以下、第一个稳定隔水层以上具有自由水面的地下水。

2.1.7 承压水 confined water

充满于上、下两个相对隔水层之间的含水层，对顶板产生静水压力的地下水。

2.1.8 孔隙水压力 pore water pressure

由岩土体中孔隙水产生的压力。

2.1.9 孔隙水压力消散率 pore water pressure dissipation rate

各级荷载下孔隙水压力消散累计值与孔隙水压力增量累计值之比。

2.1.10 超静孔隙水压力 excess static pore water pressure

饱和土体内一点的孔隙水压力中超过静水压力的那部分水压力，它由作用于土体荷载的变化而产生，随着排水固结而消散。

2.1.11 扬压力 uplift pressure

建（构）筑物及其地基内的渗水对某一水平计算截面的浮托力与渗透压力之和。

2.1.12 水文地质条件 hydro-geological condition

地下水埋藏、分布、补给、径流和排泄条件，水质和水量及其形成地质条件等的总称。

2.1.13 地下水水位 groundwater table

自由水面相对于某一基面的高程。

2.1.14 静止水位 static water level

一定时间、区间内变化极微小的水位。

2.1.15 动水位 dynamic water level

井孔内某一时刻地下水的变动水位。

2.1.16 涌水量 water inflow

单位时间内流出地下水的总量。

2.1.17 单位涌水量 specific water inflow

井孔内水位每下降一米时的涌水量。

2.1.18 给水度 specific yield

从饱和岩土层中流出的水体积与岩土体体积之比。

2.1.19 地下水流速 groundwater velocity

指达西流速，即在任意包含骨架与空隙在内的微小断面上，单位时间内实际流量与该断面面积的比值，也称之为宏观平均流速或渗透流速。

2.1.20 野外弥散试验 field dispersion test

通过在投源井投入示踪剂，在相邻监测井中测试不同条件下示踪剂浓度，从而确定地下水迁移参数的原位测试方法。

2.1.21 弥散度 dispersion degree

溶质在含水层孔隙中的弥散能力，是含水层的内在参数。

2.1.22 弥散系数 dispersion coefficient

溶质在地下水运动下的弥散强度。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应

A ——孔隙水压力计的测定值；
 A_0 ——孔隙水压力计的初始值；
 c ——示踪剂的观测浓度；
 c_0 ——示踪剂的背景浓度；
 c_m ——示踪剂的峰值浓度；
 D_T ——横向弥散系数；
 D_L ——纵向弥散系数；
 f_0 ——孔隙水压力计在零压时的频率；
 f ——孔隙水压力计在量测时的频率；
 J ——地下水水力坡度；
 p ——压力值、压力表读数；
 U ——自然电位值；
 U_0 ——测点相对中心基点的电位差值；
 u ——孔隙水压力值、孔隙水压力测定值；
 v ——地下水流速；
 V ——地下水实际流速；
 ε_i ——孔隙水压力计的测读值；
 ε_0 ——孔隙水压力计在受压前的初读数；
 λ_i ——应变光栅当前的波长值；
 λ_0 ——应变光栅初始的波长值；

2.2.2 材料性能和抗力

a_k ——压力表标定系数；
 c_k ——压力表标定常数；
 k ——渗透系数；
 K_A ——差动变压式孔隙水压力计的率定系数；
 K_f ——振弦式孔隙水压力计的灵敏度；
 K_ε ——电阻式孔隙水压力计的灵敏度；
 K_λ ——应变计应变系数；

n ——含水层有效孔隙度；
 Q ——流量、涌水量、注入流量；
 q ——单井涌水量；
 q_0 ——单位涌水量；
 S ——承压含水层的释水系数（或贮水系数）；
 T ——含水层的导水系数；
 α_L ——纵向弥散度；
 γ_w ——水的重度；

2.2.3 几何参数

F ——试环面积；
 H ——潜水含水层厚度、含水层厚度；
 h ——高度、地下水位埋深、标高、水头；
 h_0 ——初始水头；
 h_a ——试验土层的毛细上升高度；
 h_t ——试验时间 t 测得的水头；
 l ——过滤器工作部分的长度；
 R ——影响半径；
 r ——半径、观测孔的距离；
 s ——水位降深值；
 M ——承压含水层厚度；

2.2.4 设计参数和计算系数

A ——形状系数；
 α ——导压系数、渗压强度系数、超径系数；
 α_1 ——扬压力强度系数；
 α_2 ——残余扬压力强度系数；
 Pe ——Peclet 数；
 ψ_w ——降水沉降计算经验系数。

3 基本规定

3.0.1 地下水原位测试可分为地下水参数以及含水层水文地质参数的原位测试。

3.0.2 地下水原位测试及适用测试方法可按表 3.0.2 执行。

表 3.0.2-1 地下水参数原位测试方法

测试项目	测试方法		适用对象
地下水水位	水尺法		人工测读
	电测水位计法		人工测读
	电测孔压计法		人工及自动化测读
出水量	量筒法（容积法）		水量很小， $\leq 1\text{L/s}$
	流量计法	电磁流量计、水表、超声流量、孔板流量计	水量 $\geq 2\text{L/s}$
	堰测法	三角形	水量 $1\text{L/s} \sim 70\text{L/s}$
		梯形	水量 $>50\text{L/s}$
		矩形	水量 $>10\text{L/s}$
孔隙水压力	封闭式	电测式孔压计、光纤光栅式孔压计	各种渗透性质的土层
	开口式	测压管	适用于渗透系数大于 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 的土层
流向流速	三角形法		平面渗流状态
	水文物探法	自然电位法	
		充电法	
水质	原位电测式测试仪		地下水溶解氧、pH、浊度、水温 和电导率

表 3.0.2-2 含水层水文地质参数原位测试方法

测试方法		测试项目		适用对象
注水 试验	试坑单环法	渗透系数		地下水位埋深大于 5m 的黏性土和粉性土层
	试坑双环法			地下水位埋深大于 5m 的砂土层、砂卵砾石层
	钻孔常水头法			渗透性较强的砂土层
	钻孔变水头法			渗透性较弱的粉性土、黏性土层
抽水试验		渗透系数、影响半径、 给水度、导水系数		各种类型含水层
回灌试验				
野外弥散试验		天然流场 弥散试验	弥散参数	具有一定水力坡度的场地

	径向收敛 流弥散试 验	水文地质 参数、弥散 参数、弥散 度	人工抽水形成稳定的地下水 流场
--	-------------------	-----------------------------	--------------------

3.0.3 测试前应根据确定的测试目的,进行现场调查,现场调查宜包括下列内容:

- 1 收集工程或临近工程的岩土工程勘察资料、区域性水文地质资料、环境调查资料;
- 2 调查周边环境,分析测试可能产生的环境影响;
- 3 调查测试项目现场实施的可行性。

3.0.4 测试单位应根据调查结果,选择合适的测试方法,制定测试方案。

3.0.5 测试前应对仪器设备检查调试。测试用计量器具必须在计量检定周期的有效期内。

3.0.6 地下水原位测试工作量宜结合测试目的及现场条件布置,测试点位置及深度的确定应能真实反映地下水特征。

3.0.7 地下水测试不应地下水造成污染,对工程或环境有影响时,测试不应造成含水层串连。测试完成后宜结合场地要求进行封孔及场地恢复。

【条文说明】3.0.7 本条对地下水测试提出环境保护原则性要求。目前大部分地下水测试均涉及钻孔、埋管、投放测试仪器或试剂、封孔,在进行上述操作过程中,由于各种原因,均有可能对环境或后续工程造成影响,因此应采取必要措施保护环境,同时封孔及环境恢复也是确保后续工程安全、环境友好的重要工作。

3.0.8 当现场操作环境不符合仪器设备使用要求时,应采取有效的防护措施。

3.0.9 长期测试项目应采取必要防护措施,并定期巡视保护。

4 地下水位测试

4.1 一般规定

4.1.1 地下水水位可通过地下水水位观测孔采用测试仪器进行测试。测试仪器可采用水尺、电测水位仪、电测孔隙水压力计等。

【条文说明 4.1.1】本条文所指地下水水位包含潜水、承压水水头。承压水赋存于两个隔水层之间，普遍具有一定压力，承压水水头的观测一般通过在承压水层中设置水位观测孔观测其稳定水位来反映。

地下水位观测除通过设置地下水水位观测孔观测外，也可通过在土层中埋设电测式、光纤光栅式孔隙水压力计测试静水压力来实现。当采用孔隙水压力计时，孔隙水压力计埋设深度应深于最大降水深度，若小于水位降深，将失去测试作用。根据孔隙水压力测定值计算地下水位埋深可按下式进行：

$$h = h_j - \frac{u}{\gamma_w} \quad (4.1.1)$$

式中： h ——地下水位埋深(m)；

h_j ——孔隙水压力测点埋设深度(m)；

γ_w ——水的重度(kN/m³)；

u ——孔隙水压力测定值(kPa)。

根据现场观测条件和测试精度与频率要求，可按表 4.1.1 选择不同类型的地下水位测试仪器。

表 4.1.1 地下水位测试仪器

序号	仪器类型	测试原理	特点
1	水尺	测试时，用干的钢尺直接伸入水位观测井，记录湿迹与管顶的距离，完成水深的测试。	主要为人工监测。水尺测量水位最为直观。水尺的长度应大于地下水位与孔口的距离。
2	电测水位计	电测水位计由测头、电缆、滚筒、手摇柄和指示器等组成。当测头接触水面时，两极是电路形成通路，信号经电缆传到指示器及触发蜂鸣器或指示灯。	主要为人工监测。电测水位计电缆长度可以定制，测试水位深度范围大，测试分辨率较高。
3	电测孔隙水压力计	仪器由电测孔隙水压力计、水位显示器及数字记录仪等组成，测量静水压力实	可实现自动监测，测试量程取决于传感器压力测试

		现水位测量。测试时，应将电测式孔隙水压力计固定在水位孔可变水位以下某一位置。	的大小。测试水位数据可远传连续显示，测试分辨率较高。
--	--	--	----------------------------

4.1.2 观测孔可以利用生产井，试验井或专门设置，观测孔的结构应满足观测要求。

【条文说明 4.1.2】从经济性角度出发，可以利用生产井（含工程降水井和回灌井）、试验井作为观测孔，但其井的结构应满足 4.2 节的要求。

4.1.3 根据工程实际需求，水位监测可采用人工监测或自动化监测。

【条文说明 4.1.3】水位监测方式有人工监测和自动化监测。自动化监测效率高，有利于可能产生的异常得到及时的识别和控制，是监测的发展方向。不同工程项目对水位的敏感性不同，对于敏感性高的工程项目，可采用自动化监测。如超深基坑工程中，承压水对工程安全性影响较大，承压水水位监测宜采用自动化监测。

4.2 观测孔结构要求

4.2.1 观测孔的结构应满足观测目的和要求，井结构宜按图 4.2.1 设置。



图 4.2.1-1 潜水水位观测孔示意图 图 4.2.1-2 承压水水头观测孔示意图

【条文说明 4.2.1】观测井的是否正确设置关系到地下水位测试能否正常开展。由于观测井设置不正确导致测试水位反映其他含水层的水位，或者观测孔与含水层连通性不好导致测试结果偏差等情况的发生。本条给出了潜水水位和承压水水位观测孔的结构示意图，本章 4.2.2~4.2.8 对观测孔结构提出了详细要求。

4.2.2 观测孔的井管内径根据工程需要不宜小于 70mm。

【条文说明 4.2.2】在透水性差的土层中，观测孔孔径越大，水位观测孔内水位变化灵敏度越低，上海市工程建设规范《基坑工程施工监测规程》(DG/TJ 08-2001)第 7.9.3 条规定地下水位监测水位管直径不宜小于 70mm。《城市地下水动态观测规程》(CJJ 76-2012)第 5.1.2 条规定，观测孔的井管内径不宜小于 100mm。水位观测目的、场地地质条件不同，对内径要求不同，为保证水位观测工作顺利实施，观测孔井管的最小直径规定为不宜小于 70mm。

4.2.3 观测孔井管的管材，应根据地下水水质、管材强度、观测孔的口径与深度，以及技术经济等因素确定，宜选用金属管、混凝土管及塑料管等。

4.2.4 观测孔深度应根据观测目的、含水层类型、含水层埋深和厚度，并应符合下列规定：

1 对于潜水含水层，观测孔宜深入整个含水层，或深入最低动水位以下 3m~5m；

2 对于承压含水层，观测孔宜进入整个含水层，当含水层厚度较大时，观测孔深入其厚度不宜小于 4m。

4.2.5 观测孔应设置过滤器，过滤器的长度应能保证有效获取含水层水位变化。过滤器孔隙率应满足使用要求。

【条文说明 4.2.5】过滤器长度设置，应结合含水层的类型、厚度及埋深确定。过滤器孔隙率的要求可参照行业标准《建筑与市政工程地下水控制技术规范》(JGJ111)。

4.2.6 观测孔井管的底部应安装不少于 1m 的沉淀管，管底应保持密封。

【条文说明 4.2.6】井管下端安装沉淀管，是为了容纳进入井中泥沙。为防止沉淀管内的泥沙堆积过高而堵塞过滤器，应定期进行洗井，可采用空压机洗井的方式将管井内泥沙等沉淀物清除到井外。

4.2.7 选作观测孔的生产井，在条件许可的情况下，宜在井管内安装水位观测管，进行水位观测。

【条文说明 4.2.7】兼做观测井的生产井、试验井，在观测孔井管设置观测孔可以保证水位观测仪器设备的使用安全。

4.2.8 观测孔孔口应采取防渗措施，在孔口应设置固定的测点标志。

4.3 埋设方法

4.3.1 观测孔宜采用清水钻进或水压钻进；当使用泥浆作冲洗介质时，泥浆指标应符合现行有关规定要求。不得向孔内投入粘土块，并应在成孔后及时进行清洗。

4.3.2 对于地层条件不明的情况，钻进过程中，应及时、详细、准确地描述和记录地层岩性及变层深度，并应准确测定初见水位。岩（土）样采取与地层编录，应符合行业现行有关规定。观测孔施工记录表式可参考附录 A。

4.3.3 观测孔钻至规定深度后停钻，经校验孔深无误后，方可向井（孔）中下井管。

4.3.4 观测孔过滤器周围应回填砾料，砾料底部宜低于过滤器下端但不应低于目标含水层底面，砾料上部宜高于过滤器上端，但不应高于目标含水层顶面。对于多层含水层，目标层与其他土层应严格止水。观测孔口以下应做好孔口隔水措施。

【条文说明 4.3.4】对于多层含水层做好分层止水工作，是确保分层观测资料准确性的关键。松散含水层宜用黏土球封闭，基岩裂隙水宜用水泥浆封闭，应根据地下水的赋存条件确定封闭段长度。

4.3.5 下管填砾结束后应选用有效的方法及时进行洗井，洗井的质量应符合现行标准的有关规定。观测孔内水头应与地层水头一致，且连通良好。

【条文说明 4.3.5】观测井埋设后，可采用向观测井灌水进行观测井成活测试。国标《地下水监测工程技术规范》（GB/T51040）第 4.9 条条文说明：“当向监测井内注入 1m 井管容积的水量时，水位恢复时间超过 15min 时，应进行洗井。”观测井是否成活可参照上述指标。

4.4 测试技术要求

4.4.1 水位管埋设稳定后应测定孔口高程并采用水位计逐日连续观测水位，取至少 2d 稳定值作为初始值。

4.4.2 水位观测时应测定管内水位面至管口的深度，并根据管口绝对高程计算水位高程，管口高程应定期检核。

4.4.3 地下水位监测的精度不宜低于 10mm。

4.4.4 监测水位时应连续测量两次，取两次水位的平均值，两次测量允许偏差为 $\pm 20\text{mm}$ 。当两次测量的偏差超过 $\pm 20\text{mm}$ 时，应重复测量。

4.5 成果资料整理

4.5.1 水位测试成果应在对原始资料进行检查、计算、分析，确认无误后，及时进行汇总整理，并与其它观测资料综合分析后编写测试报告。

4.5.2 测试总结报告内容应包括下列内容：

- 1 工程概况及周围环境概述；
- 2 场地水文、工程地质条件；
- 3 测试目的和要求；
- 4 测试数据采集方法；
- 5 布设与量测；
- 6 成果资料综合分析。

4.5.3 布设与量测内容应包括下列内容：

- 1 测试孔和测点布置原则；
- 2 测试孔和测点布置位置与数量；
- 3 仪器性能及测试方法；
- 4 初始值的测定；
- 5 工作量及进度。

4.5.4 成果资料的综合分析，宜包括下列内容：

- 1 水位随时间变化规律；
- 2 水位变化与施工及周边环境等的关系；
- 3 结论应包括测试工作所起的作用，主要经验及教训等；
- 4 分析水位对工程的危害，提出防治措施与建议；
- 5 根据需要提出地下水位、降水量、水压力动态变化曲线；
- 6 预测地下水水位变化趋势。

4.6 不同工程中的水位测试

4.6.1 工程降水的水位观测应符合下列要求：

- 1 工程降水水位观测孔数量不宜小于 3 个；
- 2 当需测定工程降水的影响范围时，水位观测孔应沿抽降漏斗的长、短轴方向布置；

3 当监测降水对邻近建筑物的影响时，应选择离建筑物最短的半径方向布设水位观测孔，间距宜为 5m~10m。

【条文说明 4.6.1】水位观测孔间距 5m~10m，主要按降水的影响半径考虑。当降水深，影响半径大时取大值，反之取小值。以 1 个轴向布置 3-5 个测试孔为宜。

4.6.2 基坑工程围护结构外的水位观测应符合下列要求：

1 水位监测孔宜布置在邻近搅拌桩施工搭接处、转角处、相邻建（构）筑物处、地下管线相对密集处等，并宜布置在止水帷幕外侧约 2m 处；

2 潜水水位监测孔间距宜为 20m~50m，基坑每侧边监测孔不应少于 1 个（边长小于 10m 的除外），水文地质条件复杂处应适当加密；

3 对需要降低承压水水头的基坑工程，承压水位监测孔宜布置在止水帷幕外侧约 2m 处，间距不宜超过 50m，每侧边监测孔不应少于 1 个（边长小于 10m 的除外）。

4.6.3 边坡工程的水位观测应符合下列要求：

1 地下水位监测孔宜与边坡土体深层位移等其他监测项目布置在同一区域，并形成监测断面；

2 边坡监测断面宜选择地质条件差、变形大、可能破坏的部位；在边坡最高处和不同高程马道处、监测断面与各排水洞交汇处宜布设地下水位观测孔，孔深应达到最低水位以下 3m~5m；

3 边坡有临近地表水体时，应对临近水体区域土层水位进行观测。

5 水量测试

5.1 一般规定

5.1.1 水量测试方法应根据观测对象、现场条件和测量精度要求等确定；水量测试可采用人工、自动、调查等方法。

5.1.2 水量测试应包括出水量及回灌量的观测，出水量应包括实测的泉水（地下水）流量、各类试验井的抽水量、各种生产井的开采量和工程施工的排水量等，回灌量应包括各类试验井、水井的人工回灌量、回扬量等。

【条文说明 5.1.2】本规程中提出的水量观测的目的就是要查明不同类型含水层中抽出或排出的总水量以及回灌到含水层中的水量，评价含水层赋水状态。

在回灌过程中为防止管井和回灌层堵塞导致的回灌量减少，需在回灌一段时间后进行回扬，以抽汲走管井滤水管处的堵塞物（如悬浮物、混浊物等）。初期回灌回扬次数为1次/(2d~3d)（视含水层颗粒和回灌水的混浊度与悬浮物浓度而定），以后逐步延长回扬时间，因此，回灌量包括净回灌量和回扬量。

5.1.3 流量测量器具可采用量桶、量水堰计、流量计或水表等。当流量小于1L/s时，可用容积法；当流量大于2L/s时，应用量水堰计（三角堰、梯形堰或矩形堰）、流量计或水表等直接进行测量。

【条文说明 5.1.3】管井施工、安装及抽水试验完成后，按照管井出水量的大小，选择测定流量的方法，为合理选择抽水设备提供依据。

5.1.4 采用量水堰计或孔板流量计测量水量时，水位测量读数应精确到毫米；采用容积法时，量桶充满水所需的时间不宜小于15s，读数应精确到0.1s；采用水表、流量计时，读数应精确到0.1m³。

5.1.5 水量测试所使用的量测设备应每年校测不少于1次。校测方法和精度要求应符合国家相关计量管理规定。

5.2 安装方法

5.2.1 采用堰测法测量流量应符合下列规定：

- 1 根据量水堰计的形状及结构原理，可采用三角堰、梯形堰、矩形堰等；
- 2 量水堰计宜采用不锈钢板制作，量水堰计的刃口厚度不宜大于1mm，并应呈45°角，其坡面应位于跌落水流的方向，量水堰计内应安设挡水板；

3 量水堰计应安装稳固、周正、水平，并使堰口垂直，溢流水应以跌落形式流出堰口；

4 堰口的最低点应高出溢水口跌落面 20mm 以上；

5 堰口旁应安设毫米刻度的标尺，可采用电测式测读。抽水前应校正标尺零点，其误差不应大于 1mm。

【条文说明 5.2.1】当采用堰测法观测时，可采取自动化测读，设置电测式堰流量计，测量精度误差要求可参考本规程第 13.3 条有关条款内容。

5.2.2 采用孔板流量计测量流量应符合下列规定：

- 1 使用前应根据测量精度要求检查孔板流量计；
- 2 使用 6 个月后，应对孔板直径尺寸进行校核，出现磨损的应更换；
- 3 测压时，应将测压胶管内的空气排除；
- 4 冬寒季节使用时，应使测压管水柱不断溢流；
- 5 孔板的测压水头宜为 0.15m～1.8m，测尺数值应精确到 1mm；
- 6 使用完毕后，应将孔板流量计清洗涂油。

【条文说明 5.2.2】孔板流量计是一种应用很广泛的节流式流量计。在管道里插入一片与管轴垂直并带有通常为圆孔的金属板，孔的中心位于管道中心线上，这样构成的装置称为孔板流量计。孔板称为节流元件。当流体流过小孔以后，由于惯性作用，流动截面并不立即扩大到与管截面相等，而是继续收缩一定距离后才逐渐扩大到整个管截面。流动截面最小处称为缩脉。流体在缩脉处的流速最高，即动能最大，而相应的静压强就最低。因此，当流体以一定的流量流经小孔时，就产生一定的压强差，流量愈大，所产生的压强差也就愈大，所以根据测量压强差的大小来度量流体流量。

安装孔板流量计时，通常要求上游直管长度 50d，下游直管长度 10d。孔板流量计是一种容易制造的简单装置。当流量有较大变化时，为了调整测量条件，调换孔板亦很方便。它的主要缺点是流体经过孔板后能量损失较大，并随 A_0/A_1 的减小而加大。而且孔口边缘容易腐蚀和磨损，所以流量计应定期进行校正。

5.2.3 采用人工测量的水表或自动测量的超声波流量计、电磁流量计等进行流量测量时，应按仪表产品说明书要求进行安装与使用。

【条文说明 5.2.3】地下水测量流量的观测仪器设备可按表 5.2.3 选择。

表 5.2.3 地下水量观测仪器设备

观测方法	主要仪器设备及结构原理	使用方法及适用条件	设备特征
堰测法	三角堰	1.观测堰口水位,查三角堰流量表; 2.在出水量较小时采用。	大流量时误差较大
	梯形堰	1.观测堰口水位,查梯形堰流量表; 2.在出水口较大时采用。	水面波动大时误差较大
	矩形堰	1.观测堰口水位,查矩形堰流量表; 2.在出水量很大时采用。	水面波动大时误差较大
孔板流量计法	1. 孔板用 5mm~8mm 厚钢制圆片或铜制圆片,中央有孔; 2. 管长 500mm~700mm; 3. 根据流量大小选用不同孔眼孔板;	1.孔板流量计与出水管相接; 2.距出水口 250mm~300mm 设一测压管, (可用胶皮管) 其头部接 100mm 长的玻璃管,测压管旁立有刻度的标尺。	1.可就地加工; 2.精度较高读数误差 5mm 仅差 12m ³ /d; 3.标尺 0 点要设在水管一侧中心线上; 4.流量计要持水平;
水表测量法	叶轮式累计读数流量表	1.为使水表正常工作,水流中不得含砂计砾石等杂物; 2.无单位时间流量值。	水表允许误差为 ± (2%~3%)
全自动流量仪	1.涡轮流量传感器; 2.信号放大整形器; 3.单片机; 4.数据保护电路; 5.程序数据储存器; 6.实时时钟;	1.流量计使用时接于管路中; 2.观测时能记录抽水启动时间,抽水时间及停抽时间; 3.随时视读单位时间平均流量和本次开泵后的累计流量; 4. 量 程 8m ³ /h~120m ³ /h , 25m ³ /h~200m ³ /h, 45m ³ /h~300m ³ /h (由传感器决定); 5.测量精度 2.5%;	1.仪器可采用市电及直流电,二者可自动切换,保证数据的安全可靠; 2.安装要求与自来水管相同; 3.停泵后可显示仪器类累计开采

	7.液晶显示器; 8.RS232 串行接口;	6.每月可记录 256 条数据,一个月采集一次数据,通过接口输入计算机中; 7.不能设定时间,按要求存储流量数据。	量数据。
--	---------------------------	--	------

5.3 测试技术要求

5.3.1 应在观测水位的同时观测水量,水量监测频率应与水位观测频率一致,并应记录水量、水流特征:

- 1 对区域水量观测孔,宜在每月末观测或调查一次累计出水量;
- 2 对专项抽水试验、施工降水及回灌井的观测,应调查相应月份的实际抽水量、排水量和回灌量;
- 3 泉水流量宜每 10d 观测 1 次,遇流量变化大时,应每日观测 1 次,并应换算成月累计出水量。

5.3.2 采用堰测法测量流量时,当涌水量为 1L/s~70L/s 时,宜用三角堰;大于 50L/s 时,宜采用梯形堰或矩形堰测量。

【条文说明 5.3.2】采用堰测法测量流量时,为了工作方便,几种常用的堰都有专门换算表,测算时应符合下列要求:

- 1 在离出水口处不少于 1m~2m 距离上进行测量;
- 2 当流量与流速很大时,应让水流出一定距离后进行测量;
- 3 堰板应垂直放置。

5.3.3 当利用计量仪表进行水量监测时,可采用固定量测法或随机量测法,并应符合下列规定:

- 1 当采用固定量测法时,可在每口抽水井或排水总管上安装流量计进行计量;
- 2 当采用随机量测法时,可采用超声波流量计随机进行计量。

【条文说明 5.3.3】固定量测法是指在排水管路上固定位置进行有效的测量;随机量测法是指在排水管路上不固定具体位置进行有效的测量。

5.3.4 进行同抽同灌试验或群井抽水试验时,应在同一时间测量流量。地下水回灌时应安装流量计,并应根据分级回灌压力条件下记录回灌量、回扬量。

【条文说明 5.3.4】地下水回灌时应安装流量计主要是保证在回灌过程中，应对回灌井的流量观测进行分析，应根据地下水位的变化及时调整回灌水量，保证回灌平衡，必要是调整回灌相关参数。

5.3.5 水量观测过程中当水量突然出现异常时，应及时查找、分析原因，并应采取有效措施，确保观测数据的准确性。

5.4 成果资料整理

5.4.1 抽降水期间的水位、水量应同时监测，绘制涌水量（ Q ）、单井涌水量（ q ）与水位降深（ s ）关系曲线（ $Q-s$ 曲线和 $q-s$ 曲线），并应分析水位、水量下降趋势。

【条文说明 5.4.1】在抽降期间的记录应及时整理，并绘制相关的过程曲线

1 绘制水位降深（ s ）、涌水量（ Q ）与时间（ t ）的过程曲线，此图应在抽水观测过程中绘制，以便及时发现抽水过程中的异常，及时处理。同是可根据 $Q-t$ 、 $s-t$ 曲线变化趋势，合理判定稳定延续时间的起点和确定稳定延续时间。

2 绘制涌水量与水位降深关系曲线 $Q=f(s)$ ，其目的在于了解含水层的水力特征、钻孔出水能力，推算钻孔的最大涌水量与单位涌水量，并检验抽水试验成果是否正确。

5.4.2 采用堰测法测量流量时，应测得堰口高度 h 及堰口宽度 b ，并根据选用堰类型选用对应的公式计算。

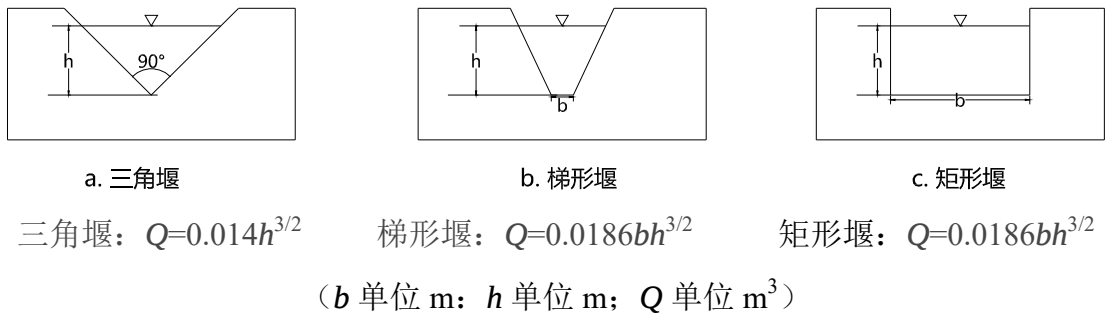


图 5.3.2 堰测法计算示意

5.5 不同工程中的水量测试

5.5.1 抽水试验、回灌试验、工程降水、水利水电工程、环境工程等水量测试侧重点不同，应采用不同的水量测试仪器和方法。

【条文说明 5.5.1】流速仪测量河渠流量是利用面积~流速法，即用流速仪分别测出若干部分面积的垂直于过水断面的部分平均流速，然后乘以部分过水面积，求得部分流量，再计算其代数和得出断面流量。从水力学的紊流理论和流速分布理论可知，每条垂线上不同位置的流速大小不一，而且同一个点的流速具有脉动现象。所以用流速仪测量流速时，应测算出点流速的时间平均值和流速断面的空间平均值。即通常说的测点时均流速、垂线平均流速和部分平均流速。

5.5.2 抽水试验、回灌试验、工程降水水量测试宜采用水表、堰测法、电磁式、超声波式流量计等进行测试。

5.5.3 环境工程水量测试宜采用水表、堰测法、流速仪等进行测试。

5.5.4 水利水电工程水量测试宜采用水表、流速仪等进行测试。

5.5.5 通过测定抽水孔时间涌水量、单位涌水量，绘制涌水量特征曲线及推断和计算最大可能涌水量，评价各含水层（组）的富水性。根据含水层的单位涌水量 q_0 的数值大小，可按表 5.5.5 判断评价各含水层（组）的富水性。

表 5.5.5 含水层（组）的富水性分级

q_0 (L/m.s)	$q_0 \leq 0.1$	$0.1 < q_0 \leq 1.0$	$1.0 < q_0 \leq 5.0$	$q_0 > 5.0$
富水性分级	弱富水性	中等富水性	强富水性	极强富水性

【条文说明 5.5.5】单位涌水量是抽水试验时井孔内水位每下降一米时的涌水量，它是对比含水层出水能力大小的重要指标，其值越大，表明井的产水能力越高，单位涌水量的单位为 L/(s•m)。

井的结构特征和含水层导水系数都对井的单位涌水量有影响。即使含水层具有高的导水系数，施工不良或未正确开发的井也可能产水量很低。

测定井的单位涌水量的方法如下：

- (1)测出井的静水位；
- (2)查出排水管路上的水表底数并启动水泵；
- (3)测定抽水稳定后，井中水位下降值后即停泵，记下开泵运转时间；
- (4)查看水表数字，求出流量值，即为井的单位涌水量。

6 孔隙水压力测试

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于饱和土层中孔隙水压力的原位测试。

【条文说明 6.1.1】饱和土为土体内的孔隙基本上被水充满的土。参照《土工试验方法标准》（GB/T50123）饱和土指的是“饱和度不低于 95%”的土体。

6.1.2 孔隙水压力计仪器的精度、灵敏度和量程应满足测试要求。孔隙水压力计在使用前应经过检验和系统标定。

【条文说明 6.1.2】测试元件的有效性是测试的基础，在测试前应对其进行检查，保证埋设的元件能正常工作。

6.1.3 孔隙水压力测试应根据工程需要，可与水位测试、土压力测试、竖向和水平位移测量、静力触探、标准贯入、十字板试验等测试手段结合进行，综合分析评价。

【条文说明 6.1.3】土体受到施工等外界影响，土体中孔隙水压力增高或降低后，土体产生变形，孔隙水压力的变化是土体变形的先兆，反应了土体内部应力应变信息，同时又传递到地表从而使周边环境发生变形。故需要多种测试手段，测试数据相互印证，进行综合判断，从而得到合理的结论。

6.2 仪器设备

6.2.1 孔隙水压力计类型的选择，应根据工程测试的目的、土层的渗透性质和测试期的长短等条件，选用封闭式（电测式、光纤光栅式）或开口式（包括各种开口测量管、水位计）。

【条文说明 6.2.1】孔隙水压力计以测试原理不同大致分为封闭式（包括电测式和光纤光栅式）和开口式。孔隙水压力变化时测头产生的机械变化转换成电量变化信号量测时称为电测式；孔隙水压力计直接以液体或气体介质传递孔隙水压力进行量测时称为流体压力式；光纤光栅式孔隙水压力计将光纤光栅埋植传感器变形材料中，光纤光栅与传感器变形材料同步发生形变，光纤光栅的反射波长等信号会发生变化，变化的数值再经过温度补偿便可由标定数据计算出压力。《孔隙水压力测试规程》（CECS55：93）第 2.0.1 条中指出封闭式还包括流体式孔隙水压力计，因流体式孔隙水压力计运用较少，故未将流体式孔隙水压力计的运用进行规定。

开口式一般使用金属器或塑料的量测管，用水位计量测。竖管式渗压计是结构最简单的渗压计，下部有进水段，上部连竖管引至地面，简称为测压管，一般采用钻孔法埋设。测量时采用水位计或测深锤等仪器测量，也可在孔中设置孔隙水压力计进行测量。本规程将测压管定义为开口式测试设备。钻孔的相关技术要求可参照本规程第四章。

表 6.2.1 各类孔隙水压力计性能

孔隙水压力计类型		优点	缺点
电测式	差动电阻式	长期稳定性较好。结构牢固不受埋设深度影响。施工干扰小，能实现自动化，无冰冻问题，测读方便。	内阻小，对电缆长距离传输要求高，要用五芯电缆消除电缆电阻对测值的影响。小量程的精度低，无气压补偿，温度修正系数不稳定。
	振弦式	读数方便，维护简易，响应快，灵敏度高，能测负孔隙水压力，能实现自动化。测头高程与测井高程无关，无冰冻问题。输出频率信号可长距离传输，电缆要求较低，使用寿命长。	偶有零点漂移，有时会停振，对气压敏感。
	电阻应变片	响应快，灵敏度高，可长距离传输，易实现自动化。加工制作简单，无冰冻问题，测头高程与观测井高程无关，能测负孔隙压力，适宜动态监测。	对温度敏感，有零点漂移可能，对温度电缆长度和连接方式的改变敏感。
光纤光栅式		测量精度高，传输距离远。能够实现高速动态在线监测。抗腐蚀、能够在高水压、潮湿、高温等恶劣施工环境下工作，传感器寿命长。	现场应注意光纤光栅传感器信号传输光纤以及传输光纤与采集设备的接口的保护。采集设备费用较高。
测压管		构造简单，观测方便，测值可靠，使用耐久。	埋设复杂，钻孔费用高，易受施工干扰破坏，存在冰冻问题。竖管易堵塞失效。

6.2.2 电测式、光纤光栅式孔隙水压力计适用于各种渗透性质的土层。当量测分辨力要求小于等于 0.2%F.S 时，宜使用电测式、光纤光栅式孔隙水压力计；使用期大于 1 个月，测试深度大于 10m 或在一个观测孔中多点同时量测时，宜选用电测式、光纤光栅式孔隙水压力计。

6.2.3 开口式孔隙水压力计适用于渗透系数 k 大于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 的土层。

【条文说明 6.2.2~6.2.3】测试仪器的适用性主要从土层渗透性影响、量测系统精度及使用期限等方面考虑。

(1) 土层的渗透性影响测定时间。当仪器规格确定后,测试值与实际值之间的关系取决于土层渗透系数和测定时间。当要求测试值与实际值之比一定时(通常要求 90%以上),则渗透系数越小,所需测定时间就越长。

(2) 量测系统精度。不同类型孔隙水压力计的量测精度。一般电测式及光纤光栅式测量精度较高可达传感器测试量程的 0.1%~0.2%,水位计测试精度可控制在 50mm 以下。传感器量测精度与量程密切相关,在进行仪器选型时,根据预估的孔隙水压力进行选择。

(3) 测试期。光纤光栅式、电测式孔隙水压力计为封闭式,因此长期使用时不易受到地下水渗入侵蚀的影响。电阻式要受到贴片效果的制约。

(4) 电测式的测头与测读仪之间由一根完整的导线相联。当在垂直线上多点同时量测时,电测式可分层埋设测头,但不必增加测读仪器,所以当测试深度大,或垂直线上同时多点量测时,使用电测式孔隙水压力计较为便利。

6.2.4 孔隙水压力计量程应大于静水压力值与预估的超孔隙水压力值之和。

【条文说明 6.2.4】由于孔隙水压力计量程和精度成反比关系,为兼顾二者所选的仪器量程上限值不宜过大。

6.2.5 仪器设备在使用前应进行检查。电测式孔隙水压力计应绝缘可靠,埋入土中的导线不宜有接头,所使用电源的电压值应在允许范围内。

【条文说明 6.2.5】电测式孔隙水压力计的绝缘性较重要,漏电会导致错误的读数或完全失效。土中埋设的导线,长期使用,接头处的绝缘程度会逐渐降低,所以宜使用无接头的导线。电压值不符合仪器规定时也会产生错误的读数或损坏零件。

6.3 埋设方法

6.3.1 孔隙水压力计埋设方法应根据测试孔、测点布设的数量及土的性质等条件,选用钻孔埋设法、压入埋设法、坑式埋设法、挂布法和顶出法。

【条文说明 6.3.1】测压管一般采用钻孔法埋设,测压管下部为进水段,用连竖管引至地面,测量时采用水位计等仪器测量,也可在孔中设置孔隙水压力计进行测量。采用测压管进行孔隙水压力观测时,钻孔埋设应满足本规程第四章相关技术要求。本章节主要规定了封闭式孔隙水压力计埋设要求。

6.3.2 孔隙水压力计在埋设安装前,必须排除孔隙水压力计内及管路中的空气。

【条文说明 6.3.2】孔隙水压力计内或管路中存在气体,会造成测试结果的失真。孔隙水压力计中的透水石在安装前应进行饱和处理。中华人民共和国水利行业标准《大坝安全监测仪器安装标准》(SL531-2012) 4.1.2 条规定在埋设前“将透水石煮沸 1h~2h”,以达到饱和的效果。对于透水石的饱和处理也可采用浸泡的方式进行,不同仪器厂商的设备特性各有不同,浸泡时间也略有不同,编制组采用基康仪器股份有限公司生产的孔隙水压力计进行透水石饱和试验,试验数据表明经过 4 小时的浸泡,透水石达到饱和。故本条对采取何种方式进行饱和处理不进行规定,但要求测试前必须排除孔隙水压力计内空气,以保证测试数据的准确。

6.3.3 采用钻孔埋设法应符合下列要求:

1 钻孔埋设法适用于硬土、软土、岩石、混凝土及其它硬性质的建筑物中孔隙水压力计的安装;同一测试孔中设置多个孔隙水压力计时,宜采用钻孔埋设法;

2 钻孔应垂直,孔径宜为 110mm~130mm;

3 在填土层或其它松散不稳定的土层中,应下套管护孔,护孔套管应保证垂直;

4 岩体钻孔后应做压水试验;

5 孔内应无沉淤和稠浆;

6 钻探应有完整的原始记录,包括回次进尺、地层分层深度和岩土(石)的性质描述等;

7 测试孔安装单只孔隙水压力计时,在钻孔中投入干净的、粒径在 0.8mm~1.2mm 的中粗砂,厚度宜为 300mm~500mm,孔隙水压力计放置预定位置后再次投入 300mm~500mm 厚度中粗砂;

8 同一测试孔中设置多只孔隙水压力计时,上下两个孔隙水压力计之间应有高度不小于 2m 的隔水填料分隔。隔水填料应充分填实后再安装下一个孔隙水压力计;

9 测试孔口应用隔水填料填实封严,防止地表水渗入;

10 测试孔口应设置有效的防护装置,并设立明显的标志;

11 埋设工作应有详细记录,并附有埋设柱状图,图中应标明各孔隙水压力计安放位置、透水填料层和黏土球隔水层的实际深度等。

6.3.4 采用压入埋设法应符合下列要求:

1 压入埋设法适用于软土、淤泥中孔隙水压力计的安装。压入埋设法有半压入埋设法和全压入埋设法；

2 半压入埋设法是先钻进成孔到埋设预定深度以上 0.5m 处，再将孔隙水压力计缓慢压入到预定深度，压入过程中，应测读孔隙水压力计，当读数接近量程的 90%时，应暂停压入，待压力消散后，继续压入，直至预定深度；

3 全压入埋设法是直接将孔隙水压力计缓慢压入到预定深度，可单只孔隙水压力计压入，也可多只孔隙水压力计串连压入。

6.3.5 采用坑式埋设法应符合下列要求：

1 坑式埋设法适用于基坑垫层下、衬砌间、井筒侧壁、基岩表面、混凝土施工缝、填筑层中单坑单只安装；

2 以埋设点为中心预先设置埋设坑。安装前，在坑底部铺上洗净的、粒径 0.8mm~1.2mm，厚度 200mm~300mm 的中粗砂，将孔隙水压力计放入砂中，再铺上 200mm~300mm 厚的砂，浇水使砂饱和，并封严坑口；

3 电缆线在预设的电缆沟中纵向呈 S 型向前牵引，电缆线之间应相互平行排列，电缆线上、下铺 200mm~300mm 厚细砂压实后把电缆线引出。

6.3.6 采用挂布法应符合下列要求：

1 挂布法可用于基坑围护结构侧孔隙水压力测试；

2 挂布应具有一定的宽度和高度，在围护结构钢筋笼制作完成后，将挂布固定在相应位置；

3 在钢筋笼吊装前，将孔隙水压力计挂布上布袋内，导线固定在钢筋笼上引至钢筋笼顶端，孔隙水压力计随钢筋笼一起吊入槽（孔）内。

6.3.7 采用顶出法埋设孔隙水压力计应符合下列要求：

1 顶出法可用于基坑围护结构侧孔隙水压力测试，采用液压顶出法或气压顶出法；

2 在钢筋笼制作过程中，将孔隙水压力计与加压装置安装在钢筋笼相应位置，安装完成后，应进行仪器和加压装置性能测试，测试合格后进行电缆和压力管的绑扎；

3 钢筋笼安装好后，启动加压装置，将孔隙水压力计顶至围护结构槽壁；

4 加压装置的压力应保持到混凝土初凝。

6.4 测试技术要求

6.4.1 测试孔和测点的布置，应根据测试目的与要求，结合场地地质条件、周围环境及施工工艺综合考虑确定，并应符合下列要求：

- 1 每项工程测试孔的数量，应不少于 3 个。
- 2 在平面上测试孔宜沿着孔隙水压力变化最大方向并结合监测对象位置布设。
- 3 在垂直方向上测点应根据应力分布特点和地层结构布设，宜每隔 2m~5m 布设 1 个测点；当分层设置时，每个测试孔每层应不少于 1 个测点。
- 4 对需要提供孔隙水压力等值线的工程或部位，测试孔应适当加密，且埋设同一高程上的测点高差宜小于 0.5m。

【条文说明 6.4.1】测试孔是指平面上布置的孔隙水压力计埋设孔；测点是指测试孔中沿深度方向上布设的各个孔隙水压力计。每个测试孔中可有 1 至多个测点。

测试孔和测点布置依据测试对象、施工因素、地质条件及周围环境等综合考虑确定。每项工程测试孔和测点的布设位置与数量规定是基于以下因素：

(1) 加载预压、打桩、强夯、降水和边坡等监测工程在其纵横方向的不同部位，其应力大小不同，在最大应力方向上为最敏感部位、同时又有监测对象存在，应着重考虑布设孔隙水压力测孔。

(2) 施工影响土体变形和孔隙水压力变化的影响范围可作为不易恢复的土体塑性变形考虑。如打桩工程，据上海某工程监测经验，若以大于 20mm 垂直位移为塑性变形，则这个塑性变形范围为群桩基础宽度 B 的 1.7~2.4 倍(从群桩基础中心算起)。在这个范围内，孔隙水压力增量十分显著(见图 6.4.1-1 和图 6.4.1-2)，超出 1.7~2.4 B 范围可称为弹性变形影响区，一般危害程度不大。

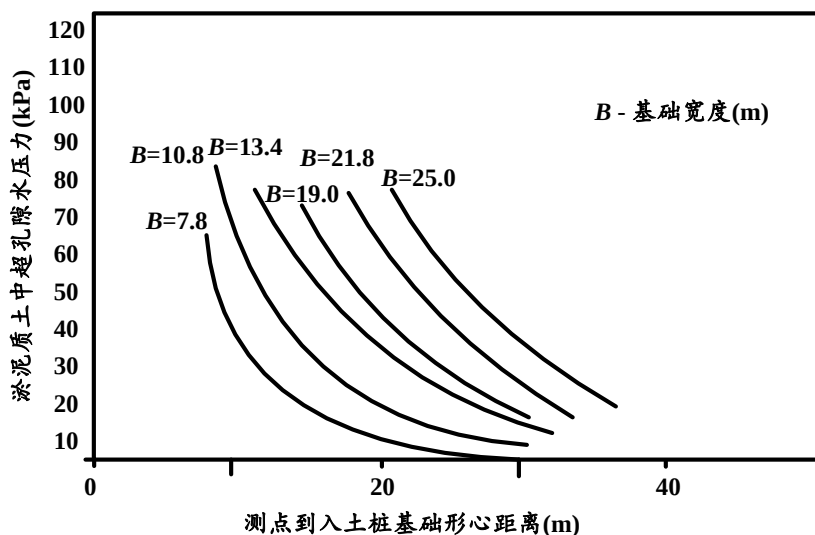


图 6.4.1-1 超静孔隙水压力随基础深度、距离的变化（上海某工程）

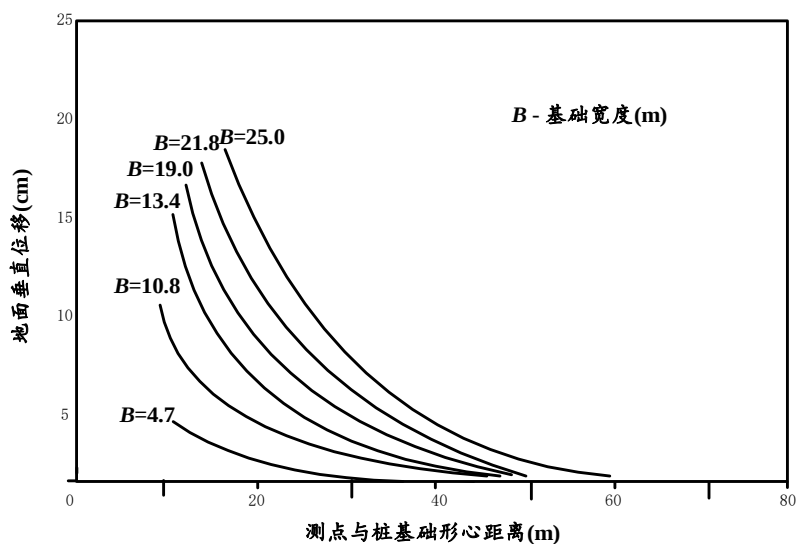


图 6.4.1-2 地面垂直位移与桩基础距离关系（随打入桩基础宽度增加变化）

（3）测点在垂直方向上的布置间距，对强夯加固，因其影响深度较小，点距宜取 2m；对打桩监测，影响深度相对较大，宜取 5m 间距布设或每层布设；对滑坡应考虑潜在滑动面的最大深度。

测试孔和测点间距过小会因其数量太多而不够经济，间距过大又可能测不到影响程度最大的数据。因此，一般测试工程，测试孔均在 3 个以上。

6.4.2 对控制性的测点，埋设后如遇下列情况时必须及时补点：

- 1 测定的初始值不稳定或孔隙水压力计失效。
- 2 因施工等原因遭受损坏且无法修复。

6.4.3 必须准确测定孔隙水压力初始值，并应满足下列要求：

- 1 埋设结束后，即逐日定时量测，以观测初始值的稳定性。
- 2 初始值应取稳定后读数的平均值或中值。

【条文说明 6.4.3】采用钻孔埋设法时，将使土体原有孔隙水压力改变，而回填材料的形状不可能与周围土体一致，因此钻孔埋设会使原位土体变形而在一定程度上影响了孔隙水压力量测精度。压入埋设法时，孔隙水压力计在压入过程中，亦会对周围土体产生挤压作用而引起孔隙水压力变化。因此，要求在埋设过程中尽可能减少对土体的扰动，同时在施工前较早地埋好孔隙水压力计，一般提前1周时间才能稳定。

6.4.4 孔隙水压力测定方式应根据变化规律，采用跟踪、逐日或多日等不同的观测频率，并应符合下列要求：

- 1 孔隙水压力上升期间，应逐日定时测定。当上升值接近控制标准时，应进行跟踪观测。
- 2 超静孔隙水压力消散期间的观测，可根据工程要求和消散规律确定测定方式。
- 3 每次量测，均应及时做好记录，完整填写日报表。
- 4 应绘制孔隙水压力与时间及荷载等有关因素关系曲线图。
- 5 测试过程中应随时计算、校核、分析测试数据。当出现异常值时，应及时复测，并分析原因，提出意见和建议。

【条文说明 6.4.4】应根据量测目的、施工方式和速率、地质和环境条件等因素，捕捉超静孔隙水压力峰值和掌握超静孔隙水压力增长——消散规律变化，选择恰当的量测方法。

对于监测工程，因荷载增加、打桩入土数量增多、强夯能量增大，特别是在施工速率较快的情况下，超静孔隙水压力将急剧增高，当接近允许的控制标准时，可能产生不安全的影响，又因超静孔隙水压力峰值出现时间短暂，应采用跟踪观测并提出限速和其它施工措施的建议。一般情况下，可在当日施工结束时即时量测。

在日常现场量测中，应了解每天施工情况，如施工进度、施工速率、流程、荷载等，结合测试成果进行分析，并提出有关意见和建议。

因施工累积的超静孔隙水压力往往较高，特别是在饱和软粘性土中，累积的超静孔隙水压力越高，消散时间就越长。为掌握其消散的规律，仍应在施工结束后继续测定孔隙水压力，但可逐渐延长量测时间间隔。根据许多测试实例得出的超静孔隙水压力消散规律为：初期消散较快，以后逐渐缓慢，当有设置袋装砂井和塑料排水板等排水措施时，消散较快。

6.5 成果资料整理

6.5.1 孔隙水压力测试成果应在对原始资料进行检查、计算、分析，确认无误后，及时进行汇总整理，并与其它观测资料综合分析后编写测试报告书。

【条文说明 6.5.1】孔隙水压力根据量测读数分别按下列公式计算：

振弦式孔隙水压计：

$$u = K_f(f_0^2 - f^2) \quad (6.5.1-1)$$

光纤光栅孔隙水压计（以布拉格光栅传感器为例）：

$$u = K_\lambda(\lambda_i - \lambda_0) \quad (6.5.1-2)$$

电阻式孔隙水压计：

$$u = K_\varepsilon(\varepsilon_i - \varepsilon_0) \quad (6.5.1-3)$$

差动变压式孔隙水压计：

$$u = K_A(A - A_0) \quad (6.5.1-4)$$

液压式孔隙水压计：

$$u = p + \gamma_w \cdot h_b \quad (6.5.1-5)$$

气压式孔隙水压计：

$$u = c_k + a_k p \quad (6.5.1-6)$$

式中 u ——孔隙水压力(kPa)；

K_f ——振弦式孔隙水压力计的灵敏度(kPa·Hz⁻²)；

f_0 ——孔隙水压力计在零压时的频率(Hz)；

f ——孔隙水压力计在量测时的频率(Hz)；

K_λ ——应变计应变系数(kPa/nm)；

λ_i ——应变光栅当前的波长值(nm)；

λ_0 ——应变光栅初始的波长值(nm)；

K_ε ——电阻式孔隙水压力计的灵敏度(kPa/με)；

ε_i ——孔隙水压力计的测读值($\mu\varepsilon$);

ε_0 ——孔隙水压力计在受压前的初读数($\mu\varepsilon$);

K_A ——差动变压式孔隙水压力计的率定系数(kPa/V);

A ——孔隙水压力计的测定值(V);

A_0 ——孔隙水压力计的初始值(V);

p ——压力表读数(kPa)

γ_w ——水的重度(kN/m³);

h_b ——孔隙水压力计至压力表基准面的高度(m);

a_k ——压力表标定系数;

c_k ——压力表标定常数(kPa)

6.5.2 测试报告书内容应根据测试任务要求、工程特点、环境和地质条件等确定,其主要内容应包括:

- 1 工程概况及周围环境概述;
- 2 场地水文、工程地质条件;
- 3 测试目的和要求;
- 4 测试数据采集方法;
- 5 布设与量测,包括测试孔和测点布置原则、测试孔和测点布置位置与数量、仪器性能及孔隙水压力计埋设工作、初始值的测定、工作量及进度;
- 6 成果资料的综合分析,包括孔隙水压力在垂直、水平方向上随时间增长和消散的规律,孔隙水压力与荷载、位移(水平、垂直)、时间、降雨、施工速率、土的性质等的关系,结论应包括测试工作所起的作用,主要经验及教训等。

6.6 不同工程中孔隙水压力测试

【条文说明 6.6】孔隙水压力分为静孔隙水压力和超静孔隙水压力。静孔隙水压力指的是水的自重应力,为静水压力;超静孔隙水压力是指由于外部作用或边界条件变化,饱和土体内超过静水压力的那部分水压力,超静孔隙水压力在有排水条件下会逐渐消散,在消散的过程中伴随土体的体积变化。

在工程施工中,土体中的超静孔隙水压力对周边环境或者地基土承载力造成影响,对超静孔隙水压力消散控制不力往往会造成工程事故。例如,在静压挤密桩沉桩过程中超静孔隙水压力使得地基土体膨胀隆起,若不加以控制,可能造成

周边管线断裂、道路不能正常使用、建筑物开裂等。通过孔隙水压力监测，确定外部作用或边界条件变化引起的超静孔隙水压力大小、分布规律及消散过程，是指导工程施工有效手段。

土体中某点的超静孔隙水压力为在某一时刻的孔隙水压力减去静水压力的差值，在测试时应应对土体静水压力进行监测以获得准确超静孔隙水压力值。例如对于紧邻江、河、湖、海的加载预压工程，陆域的地下水位通常受域外水体潮位变化影响，影响量与土层渗透系数、水位差及距离有关。涨潮会引起测点处产生负超静孔隙水压力，落潮会产生正超静孔隙水压力。电测传感器所测孔隙水压力减去静水压力就是超静孔隙水压力，是加载与域外水体潮位变化形成的超静孔隙水压力综合量，对工程安全是不利的，因此宜在监测点周边适量布置地下水位监测孔（其距孔隙水压力监测点的距离不宜超过 3m），工程施工前宜 24 小时连续观测临近水体水位与监测孔水位，绘制临近水体与水位监测孔处的水位历时过程曲线，确保工程安全，判断下一级加荷量时应充分考虑外河水位引起的超静孔隙水压力。

6.6.1 加载预压工程中为控制加载速率时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

1 孔隙水压力测试孔宜按纵横轴线进行布置。对油罐充水预压地基，其孔距宜为 5m~10m；对大面积堆载预压地基，其孔距可放宽至 15m~30m；在堆载边坡区，测试孔应按本规程第 6.6.5 条第 2 款加密。

2 孔隙水压力测点的布置深度可根据加载后的应力分布确定，在加载影响深度范围内的各软弱土层均应布置测点，其垂直间距宜为 3m~5m。

3 加载等级宜按各级加载引起的孔隙水压力增量与荷载增量之比确定，其比值宜按土的特性通过试验确定。

4 加载间隙时间的控制，应满足超静孔隙水压力的消散率达到 70%。

【条文说明 6.6.1】（1）油罐的直径一般为 30m~40m。如上海某油罐充水预压实例，该油罐直径为 31.4m，测试孔间距 5m~10m，能较好反映地基土充水预压效果。对大面积堆载预压的要求不如油罐严格，因此其间距可放宽至 15m~30m。当面积大于 100000m² 时，间距还可放宽至 50m 以上。当大面积场地其软土厚度有较大变化时，布孔轴线应位于软土厚度最大的部位，并在局部软土厚度大的地区增设测试孔。在堆载边坡区进行监测及边坡稳定性分析时应按本规程第 6.6.5 条的要求加密。

(2) 为了控制整个软土层的加载预压效果，须在不同深度布置测试点，间距不宜过大、但间距小于 3m 时则难于同孔埋设，因此规定宜为 3m~5m。

(3) 确定加载等级目的在于将各级加载控制在地基土未达剪切破坏前予以停止。由图 6.6.1-1 所示。土中某天然状态 O 点由于加载而有效应力路径沿 OA 发展至 A 点，如不等超静孔隙水压力 u 消散而继续加载，则很快就到达 K_f 破坏包线的 A' 点，地基土将会因发生剪切破坏而失稳。如到达 A 点时就停止加载，让超静孔隙水压力 u 消散，应力路径沿 AB 发展到 B 点，土的有效应力增长，就可进行第二次加载，待到应力路径到达 C 点时再停止加载，让超静孔隙水压力消散，应力路径到达 D 再加载。如此多次加载预压就可使加载后的应力路径始终保持在 K_f 破坏包线以内发展，土的有效应力不断增长。

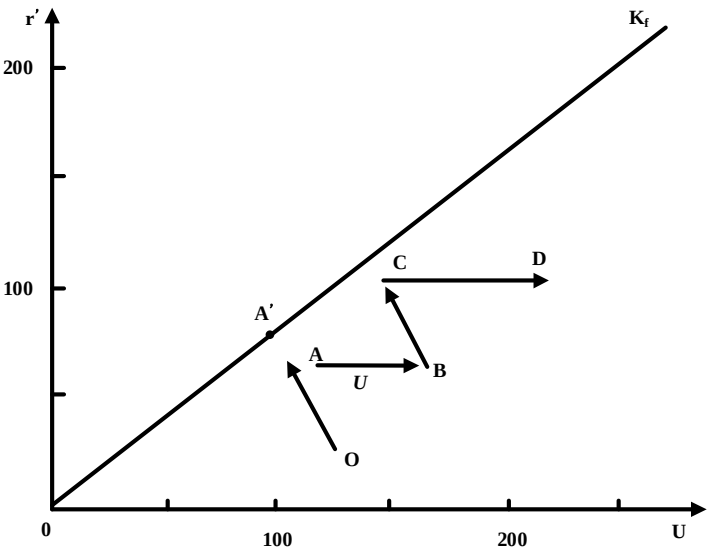


图 6.6.1-1 地基土加载预压应力路径图

例如：某工程地基土属淤泥——冲积层，有两层淤泥，该工程地面设计荷载大于 65kPa，对地面沉降要求严格，天然地基不能满足要求。场地附近有大量吹填砂可作为荷载，故选择超载预压法加固地基。

第一级加载堆砂高度 h_1 为 4m， $P_1=65.7\text{kPa}$ 。淤泥 1 的 $\Delta u/\Delta p=0.24$ ；淤泥 2 的 $\Delta u/\Delta p=0.63$ ；地面最大沉降速率为 30mm/d。堆载区外地面升高仅 1.92mm，表明地基土未破坏。随着超静孔隙水压力逐步消散，经 13d 后地基上强度提高，淤泥 1 的 $c_u=26\text{kPa}$ ，比加载前提高 98%，淤泥 2 的 $c_u=22\text{kPa}$ ，比加载前提高 39%，固结度为 70%，可进行第二级加载。

第二级加载堆砂累计高度 6m, $\Delta p = 41.3\text{kPa}$ 。淤泥 1 的 $\Delta u / \Delta p = 0.11$, 淤泥 2 的 $\Delta u / \Delta p = 0.54$, 地面最大沉降速率为 24.5mm/d, 堆载区外地面下沉 1.75mm, 地基未破坏。在第二级荷载预压过程中, 地面沉降速率逐步减小, 超静孔隙水压力逐渐消散, 约 100d 后地面下沉速率为 0.22mm/d~0.45mm/d, 淤泥 1 的固结度 $U_v > 95\%$, 淤泥 2 的 $U_v > 85\%$, 已达到了设计要求而卸载。堆载预压速率及孔隙水压力变化详见图 6.6.1-2。

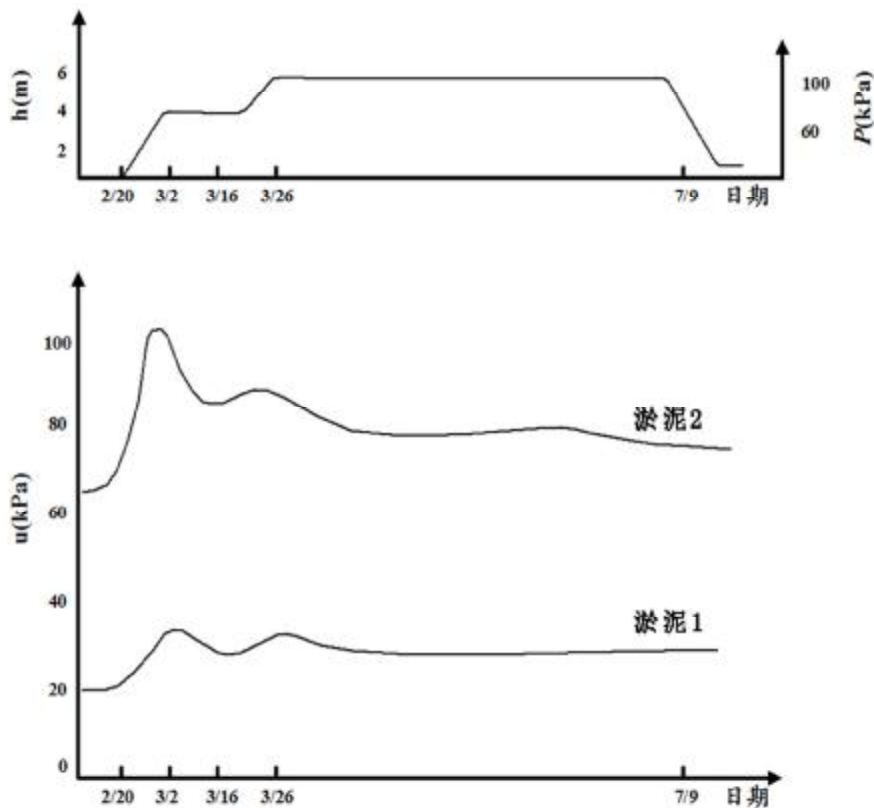


图 6.6.1-2 堆载预压速率及孔隙水压力变化曲线

除上述工程外, 根据在上海数个工程的经验, 控制各级加载内孔隙水压力增量与荷载增量之比为小于 0.6。其它地区可根据当地经验确定。

(4) 在加载预压地基加固工程中, 地基土的固结度是确定加载和卸载的主要标准之一。在现场可用超静孔隙水压力消散率估算固结度, 超静孔隙水压力的消散率为各级荷载下超静孔隙水压力消散量累计值与孔隙水压力增量累计值之比。根据工程实践, 以固结度大于 70%来控制加载间歇时间是合适的。

例如: 某工程场地原为渔业养殖场, 地势低洼, 渔塘底面下有一层厚约 0.5m~0.7m 的植物层。植物层下为一层厚度为 0.5m~13.4m 的淤泥质粉质粘土。该土层强度低, 压缩性高, 承载力小, 不能满足使用要求。为此采用塑料排水板

堆载预压进行大面积地基加固。为控制加荷速率，防止地基失稳而布置了现场孔隙水压力测试及地面沉降观测。在地基堆载加固期间用实测孔隙水压力消散率估算土层固结度，经与实测沉降计算的固结度及理论计算的固结度相比较，三者是十分接近的。详见图 6.6.1-3 及表 6.6.1。

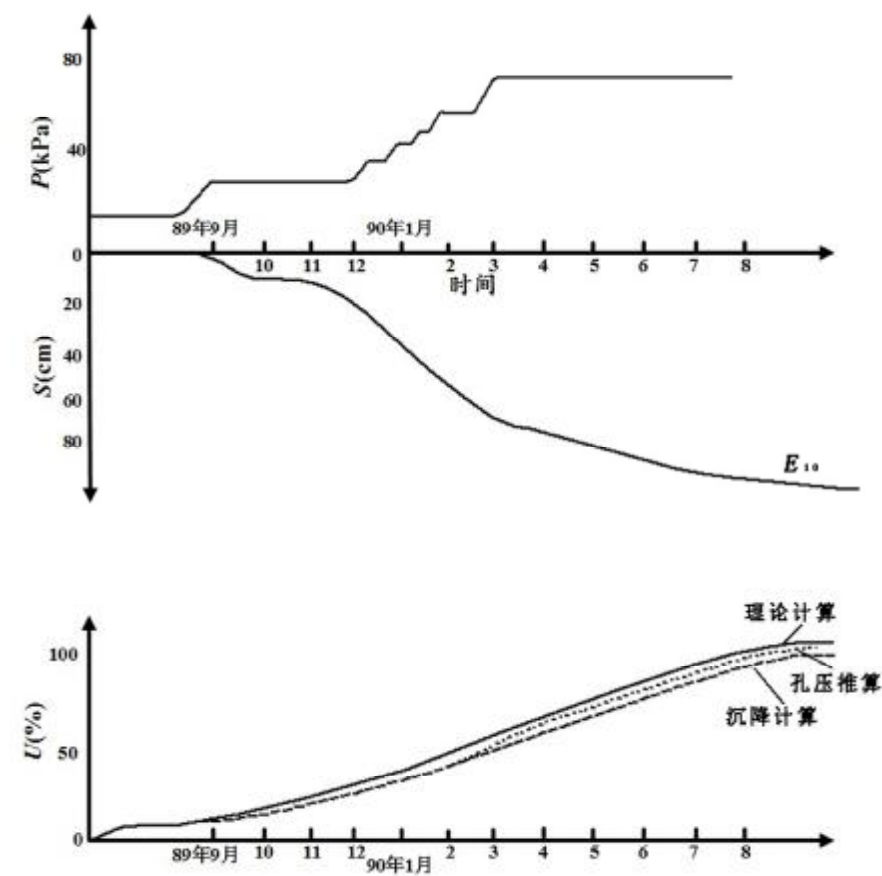


图 6.6.1-3 堆载、沉降、固结度曲线

表 6.6.1 固结度计算对比表 (%)

计算方法	测点号		
	E7	E10	E14
理论计算	98.2	94.8	
实测沉降计算	95.3	91.8	92.5
实测孔隙水压力计算	95.7	92.0	95.7

6.6.2 沉桩工程中为控制沉桩速率时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

1 孔隙水压力测试孔应布置在被监测建筑物及地下管线的近旁不大于 3m 处。当被监测的建筑物及地下管线之某部位位于沉桩区的中轴线或打桩流程方向上时，必须在该部位布置测试孔。

2 在软土地区，孔隙水压力测试孔应布置在沉桩影响范围内，其范围宜为 $0.5l \sim 1.5l$ (l 为桩的入土深度，单位 m)。

3 孔隙水压力测试孔的间距宜为 20m~30m，对重要的监测对象或重要的部位应增设测试孔，其间距可加密至 5m~10m。

4 孔隙水压力测点的垂直布置应根据土层的性质确定，对沉桩范围内各层饱和软土均应布设，其垂直间距宜为 3m~5m。

5 沉桩速率的控制，应根据沉桩引起的超静孔隙水压力与有效覆盖压力之比确定，其比值宜小于 60%。

【条文说明 6.6.2】(1) 根据上海多个沉桩工程孔隙水压力测试实践，当距离大于 3m 时就难以反映原点的孔隙水压力消长情况，因此，规定测试孔距离被监测的建筑物或管线不大于 3m。而沉桩区的中轴线及打桩流程方向均为应力较集中的部位、受打桩影响最大，因此必须在该部位布孔。

(2) 在软土地区沉桩影响范围为 $0.5l \sim 1.5l$ ，主要系参照《上海市地基基础设计规范》给出的经验数值。详见表 6.6.2。

表 6.6.2 沉桩影响范围表

被监测的建（构）筑物类型	L
陈旧的三层以下砌体结构房屋	$\leq 1.5l$
采用条基的多层建筑物、砖砌人防、脆性材料构成的管道和接头等	$\leq l$
采用筏基、箱基的建筑物	$\leq 0.5l$

注： L —保护对象至沉桩区近侧边缘的距离， l 为桩的入土深度。

(3) 从数个沉桩工程的孔隙水压力测试实例及工程经费等方面考虑，对同一建（构）筑物或管线，测试孔间距 20m~30m，基本可反映出起孔隙水压力大小对建筑物产生的变形和对管线产生挠曲的影响大小，而对于重要建筑物或重要管线则需根据其重要程度及工程经费等具体情况加密控制。

(4) 沉桩对饱和软土影响最为显著，因此孔隙水压力测试应以饱和软土为重点，测点垂直间距规定为 3m~5m，既要控制不同深度的孔隙水压力消长情况。又便于同孔多测点的施工埋设。

(5) 当孔隙水压力增长达到警戒值时，将会造成地基土有较大的位移或失稳。影响到周围建筑物或管道产生位移、倾斜、挠曲、裂缝甚至破坏，因此需要报警并提出相应的建议，采取跳打、减速或间歇停打等适当的措施。根据以往数个沉桩工程的孔隙水压力测试实例，确定超孔隙水压力与有效覆盖压力之比达 60%时为警戒值。

6.6.3 强夯加固工程中为控制间隔时间时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

- 1 孔隙水压力测试孔宜布置在强夯范围的纵横轴线上，间距宜为 5m~10m。
- 2 孔隙水压力测点的深度应与预计强夯加固深度一致，垂直间距宜为 2m~3m。
- 3 强夯间歇时间可按每遍加夯后超静孔隙水压力的消散率控制，其消散率宜大于 70%。

【条文说明 6.6.3】(1) 间距过大不宜控制整个场地的强夯效果，间距太小又会使施工造成困难，因此定为 5m~10m。

(2) 由于强夯的影响深度较小，因此垂直间距定为 2m~3m。如小于 2m 则难以埋设，也无必要。

(3) 根据强夯加固工程经验，如采取连续强夯而无一定的间歇时间让孔隙水压力消散，则难以达到好的加固效果，当超静孔隙水压力消散率达 70%后再进行下一遍强夯效果较好。

6.6.4 边坡稳定性监测时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

- 1 在滑坡监测及进行边坡稳定性分析时，宜进行原位孔隙水压力测试，测试孔应平行于垂直主滑方向布置，测点深度应考虑滑动面位置。
- 2 孔隙水压力测试孔宜垂直和沿边坡的走向布置。纵向间距宜为 10m~20m；在横向应适当加密，并考虑潜在滑动区的范围。
- 3 孔隙水压力计应埋设于边坡及其外侧部分，并应考虑潜在滑动面的最大深度。

【条文说明 6.6.4】孔隙水压力测试孔的横向间距不宜太大，否则将难以控制潜在滑动区的范围，因此应适当加密。其加密间距可根据潜在滑动区的范围确定，一般宜为 5m。

6.6.5 基坑工程、隧道工程监测时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

- 1 孔隙水压力监测宜选择在支护结构受力和变形较大、存在饱和软土和易产生液化的粉细砂层等有代表性部位进行布设；
- 2 孔隙水压力测点宜与土压力、支护结构变形、受力监测点布设在同一监测断面；
- 3 监测点宜在水压力变化影响深度范围内按土层布置，竖向间距宜为 4m~5m，涉及多层承压水层时应适当加密。

6.6.6 围堤工程为控制加载速率时，孔隙水压力测试应符合下列要求：

- 1 围堤原位观测主控断面应布置孔隙水压力测试孔，测试孔沿堤身横断面进行布置，数量不少于 3 处，堤身中部应布置监测点，堤身内外侧一级平台位置宜布置监测点，合拢段、堤基地质地形条件复杂地段及堤基软土层厚度较大时，应进行孔隙水压力的监测。

- 2 孔隙水压力监测孔宜与堤基（用语是否规范）沉降监测点、分层沉降监测点及原位十字板剪切试验孔相邻。

- 3 孔隙水压力测点的布置深度可根据加载后各土层的理论压缩量确定，在加载影响深度范围内的各软土层均应布设测点，其垂直间距宜为 3m~5m。

- 4 当堤坝地基为软土层时，测点布置深度以上 1m 深度土层压缩量与各土层压缩总量之比应不大于 0.025；当堤坝地基为淤泥或淤泥土层时，布置深度处地基土的垂直附加应力与该深度处地基土的自重应力之比应不大于 0.2。

- 5 加载等级宜按各级加载引起的孔隙水压力增量与荷载增量之比确定，其比值宜控制在 60%以内。

- 6 加载间歇时间的控制，应满足孔隙水压力的消散率达到 70%。

【条文说明 6.6.6】（1）我国沿海地区广泛分布着深厚软粘土，地基具有含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、流变性大及灵敏度高等特点，围堤工程具有荷载大，长度长等特点，沿海围堤加载过程中应在软土层较厚、荷载较大的典型位置设置主控监测断面。主控监测断面必须设置孔隙水压力监测项目，结合堤基沉降监测及十字板剪切成果综合分析堤基加固效果。

(2) 当堤坝地基为一般软土层时, 计算深度处向上取厚度 1m 的土层压缩量应符合下式要求:

$$\Delta S_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (6.6.6-1)$$

式中: ΔS_n ——计算深度处向上取厚度为 1m 的土层压缩量(mm);

ΔS_i ——在深度范围内第 i 层土的计算压缩量 (mm)。

当堤坝地基为淤泥或淤泥质土层时, 计算深度应符合公式(6.6.6-2)的要求。当计算深度以下仍有软土层时, 则应继续计算至软土层底, 并符合公式(6.6.6-3)的规定:

$$\sigma_{zn} \leq 0.2\sigma_{sn} \quad (6.6.6-2)$$

$$\sigma_{zn} \leq 0.1\sigma_{sn} \quad (6.6.6-3)$$

式中: σ_{zn} ——压缩层计算深度处地基土的垂直附加应力(kPa);

σ_{sn} ——压缩层计算深度处地基土的自重压力(kPa);

(3) 孔隙水压力系数在堤基稳定性分析中较为重要, 在现场监测控制数据分析过程中常以孔压的消散趋势作为堤基稳定与否的重要指标之一, 应以加荷初期 2~3 天内的深层水平位移速率、堤基表面沉降、孔压变化趋势综合判定堤基土的稳定性的稳定性。

6.6.7 水工建(构)筑物的抗滑稳定性监测中, 孔隙水压力测试应用于扬压力测试时应符合下列要求:

1 水工建(构)筑物的抗滑稳定性监测时, 宜进行扬压力监测。

2 水工坝基扬压力监测应根据坝基类型、规模、基底地质条件、防渗设施等进行布置, 纵向和横向断面应结合布置, 宜设纵向监测断面 1~2 个, 横向监测断面至少设 3 个。

3 水工坝基扬压力纵向监测断面宜布置在第一道排水帷幕线上, 每个坝段应至少设一个测点; 水工坝基横向监测断面应选择最大坝高坝段、岸坡坝段、地质构造复杂坝段和灌浆帷幕折转坝段, 横断面间距一般为 50m~100m, 每个横向断面设置 3~4 个测点, 测点宜布置在各道排水帷幕线上。

4 水工坝基扬压力监测孔在建基面以下深度不宜大于 1m。

5 水工坝体扬压力监测断面宜布设在水平施工缝上或两层水平施工缝之间的混凝土内, 低于 70m 混凝土坝应布设 2 个水平截面的监测断面, 高于 70m 以

上的混凝土坝应布设 3~4 个水平截面的监测断面，测点距上游面的距离宜为 0.2m、0.5m、1.0m、3.0m、6.0m。

6 水闸扬压力监测点的数量及位置应以能测出闸底扬压力的分布及其变化为原则，测点宜布置在地下轮廓线有代表性的转折处。

7 应根据实测水位、上下游水位、测点高程计算测点处的渗透强度系数 α 、主排水孔前的扬压力强度系数 α_1 、残余扬压力强度系数 α_2 ，其数值大小应满足《水工建筑物荷载设计规范》（SL744）相关要求。

【条文说明 6.6.7】1 扬压力指建筑物及其地基内的渗水对某一水平计算截面的浮托力与渗透压力之和。孔隙水压力是指土壤或岩石中地下水的压力，该压力作用于微粒或孔隙之间。地基渗透系数较小时，孔隙水压力与渗透压力基本相当；地基渗透系数较大时，孔隙水压力一般小于渗透压力；挡水建筑物下游水位低于建筑物基面且地基渗透系数较小时，孔隙水压力在数值上与基底扬压力相当。

2 水工建筑物的扬压力应按垂直作用于计算截面全部截面上的分布力计算，作用于建筑物计算截面上的扬压力分布图形，应根据水工结构型式、上下游计算水位、地基地质条件及防渗、排水措施等实际情况确定。

3 岩基上混凝土坝坝底面的扬压力分布图形可按下列情况确定：

1) 当坝基设有防渗帷幕和排水孔时，扬压力分布图形可按图 6.6.7 (a) ~ (d) 确定。渗透压力强度系数可按表 6.6.7 取值。

2) 当坝基设有防渗帷幕和上游主排水孔，并设有下游副排水孔及抽排系统时，扬压力分布图形可按图 6.6.7 (e) 确定。扬压力强度系数，残余扬压力强度系数可按表 6.6.7 取值。

3) 当坝基未设防渗帷幕和排水孔时，扬压力分布图形可按图 6.6.7 (f) 确定。

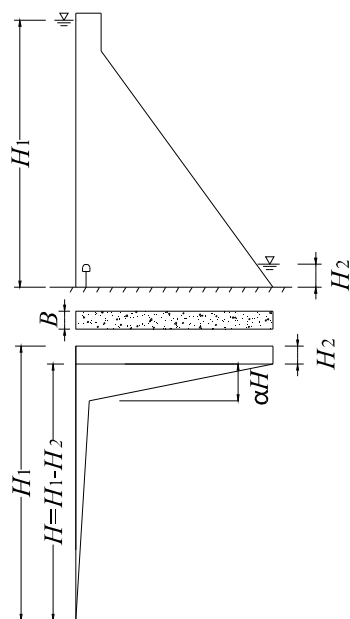
4) 当坝基仅设排水孔而未设防渗帷幕时，渗透压力强度系数可按表 6.6.7 中规定值相应提高 0.05~0.2。

5) 当坝基仅设防渗帷幕而未设排水孔时，渗透压力强度系数可取 0.5~0.7，必要时进行渗流计算分析复核。

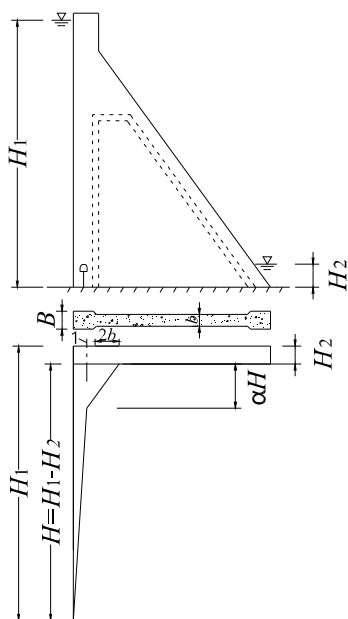
表 6.6.7 坝底面的渗透压力、扬压力强度系数

坝型及部位	坝基处理情况
-------	--------

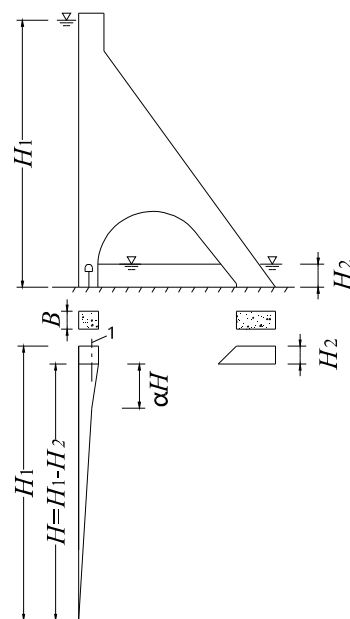
		设置防渗帷幕及排水孔	设置防渗帷幕及主、副排水孔	
部位	坝型	渗透压力强度系数 α	主排水孔前的扬压力强度系数 α_1	副排水孔前的扬压力强度系数 α_1
河床坝段	实体重力坝	0.25	0.20	0.50
	宽缝重力坝	0.20	0.15	0.50
	大头支墩坝	0.20	0.15	0.50
	空腹重力坝	0.25	—	—
	拱坝	0.25	0.20	0.50
岸坡坝段	实体重力坝	0.35	—	—
	宽缝重力坝	0.30	—	—
	大头支墩坝	0.30	—	—
	空腹重力坝	0.35	—	—
	拱坝	0.35	—	—



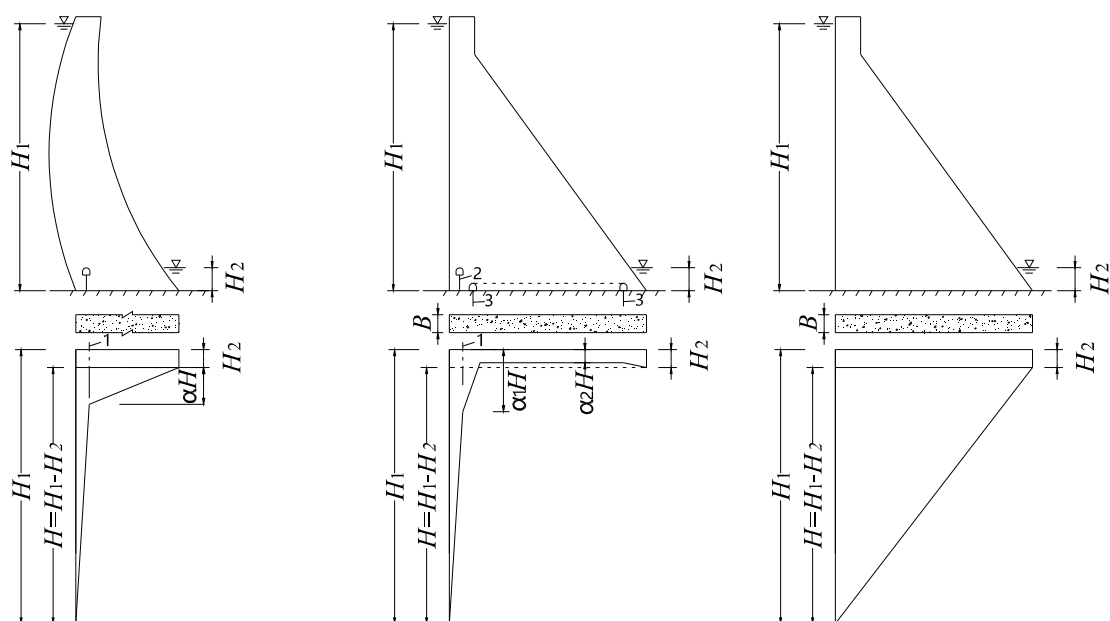
(a) 实体重力坝



(b) 宽缝重力坝及大头支墩坝



(c) 空腹重力坝



(d) 拱坝

(e) 坝基设有抽排系统

(f) 未设帷幕及排水孔

1—排水孔中心线；2—主排水孔；3—副排水孔； h_1 —上游作用水头； h_2 —下游作用水头； B —沿坝轴线计算宽度； b —宽缝处坝体宽度； α —渗透压力强度系数； α_1 —扬压力强度系数； α_2 —残余扬压力强度系数；

图 6.6.7 坝底扬压力分布图

(4) 混凝土坝坝地质条件和防渗、排水措施均对坝基扬压力分布图形有较大影响，情况十分复杂，因此通常根据已建工程的实测资料，统计分析排水孔处的扬压力水头与上、下游水位的关系，确定扬压力的分布基本图形。

根据防渗、排水条件的不同，可分为以下两种情况：

(a) 当坝基设有防渗帷幕和排水孔时，统计分析排水孔处的渗透压力强度系数 α ，并定义为：

$$\alpha = \frac{h_i - h_2}{h_1 - h_2}$$

式中： h_i —排水孔处的实测水头；

h_1 、 h_2 —坝底面上的上、下游计算水头。

(b) 当坝基设有防渗帷幕和上游主排水孔，并同时设有下游副排水孔及抽排系统时，分别统计分析主排水孔处的扬压力强度系数 α_1 和副排水孔处的残余扬压力系数 α_2 ，并定义为：

$$\alpha_1 = \frac{h_i}{h_1}$$

$$\alpha_2 = \frac{h_{ii}}{h_2}$$

式中： h_{ii} -副排水孔处的实测水头。

7 流向流速测试

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于工程建设中平面渗流状态下地下水流向和流速的测定。

7.1.2 测定平面渗流状态下地下水流向和流速前应查明地段水文地质条件,编制测定方案,准备好测试仪器、设备、水位计、测量电极、导线等。

7.1.3 平面渗流状态下场地尺度地下水流向可采用三角形法、水文物探法(自然电位法、充电法)进行测定,地下水流速测定在确定地下水流向的基础上,可采用抽水试验法,按照达西公式进行计算,也可采用充电法流速计算公式进行计算。

【条文说明】7.1.3 地下水流向和流速的确定还可采用示踪剂法和流速流向仪法进行确定。但考虑到时间和工程费用等因素,推荐优先使用三角形法和水文物探法。示踪剂法通常适用于地下水流速较快的岩溶地区地下水流向和流速的测定,流速流向仪适用于 $0.02\text{m/s}\sim 7.00\text{m/s}$ 范围内的流速测定。

7.1.4 地下水流向和流速的测定结果可应用于预测地下水中污染物的运移、进行地下水流数值模拟、确定松散层各含水层(组)地下水流速流向情况以及为工程建设提供可靠水文地质参数等。

7.2 测试孔和测点布置

7.2.1 试验前应进行现场勘察和搜集资料,确定测试场地地质条件以及水文地质结构以及地下水的物理化学性质,当场地地质条件与水文地质结构不清时,应进行专门的地质与水文地质勘察。

7.2.2 三角形法确定场地尺度平面渗流状态下的地下水流向,其观测孔和测点的布置应满足以下条件:

- 1 应建立至少三口不在同一条直线上的地下水位观测井(孔)。
- 2 地下水位观测井(孔)宜按三角形分布,观测井(孔)分别位于三角形的三个顶点,孔距宜根据水文地质条件确定,宜为 $50\text{m}\sim 200\text{m}$ 。
- 3 每个观测井(孔)应至少布置一个水位计,用于测定地下水位。
- 4 每个观测井(孔)口应进行高程测量,水准测量标准按照《水文测量规范》SL 58 执行。

7.2.3 水文物探法测定地下水流向和流速,应以测点为中心,按照 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 等 8 个方位用经纬仪定出 8 条测线(图 7.2.3)。

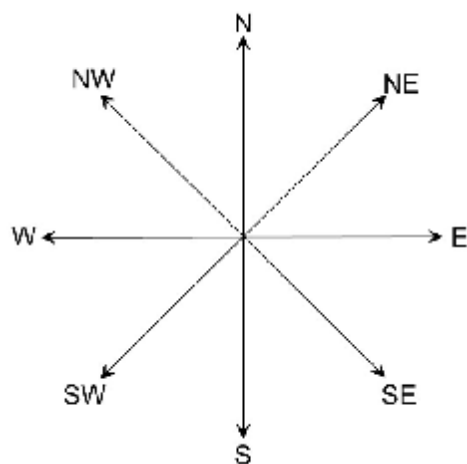


图 7.2.3 水文物探法确定地下水流向流速导线布置方位

7.3 埋设及测试技术要求

7.3.1 地下水位可按第 4 章要求采用人工或水位自动监测仪进行监测。

7.3.2 三角形法确定地下水流向和流速，应符合下列要求：

- 1 确保三个观测井（孔）水位为天然状态，未受到人工抽水的影响；
- 2 井管应由坚固、耐腐蚀、对地下水水质无污染的材料制成，孔径可根据实际需要确定。观测井可结合抽水试验或弥散试验等工作井布置，其观测井井管设计应满足抽水试验和弥散试验的相关要求。

7.3.3 水文物探法确定地下水流向和流速，应符合下列要求：

- 1 导线的布设应以观测钻孔为中心呈辐射状分布，按照 45°等方位间隔布置测线；
- 2 水文物探法测定地下水流向，在预先测定好的测线上（如图 7.2.3 所示），呈环形布置电极，每条测线测量电极距应均等一致，自然电位法电极距大小宜为 30m~50m，充电法电极距大小宜为 5m~10m，各电极入土深度应大于 200mm，并使其接地良好。
- 3 充电法供电电极（A 极）应置于中心钻孔内待测含水层的中部，无穷远电极（B 极）为一电极组。测量电极（M 极）应置于钻孔孔口处，另一测量电极（N 极）置于事先布置好的测线上。
- 4 充电法的供电电极 B 极和 A 极的距离应为测区对角线长度的 2 倍以上，无穷远电极（B 极）距应不低于充电点至边缘测点距离的 10 倍，测量电极宜使用紫铜电极。

5 采用自然电位法测试地下水流向时，地下水位埋深宜在 20m 以内；采用充电法测试地下水流向时，地下水位埋深宜在 50m 以内，介质电阻率应为地下水电阻率 3 倍及以上。

6 水文物探法测试地下水流向和流速，自然电位等参数宜连续测试 3 次以上，测量相对误差应不超过 5%。

7.3.4 采用自然电位法确定平面渗流状态下地下水流向，测试过程应符合下列要求：

1 根据观测线平面布置图和电极平面布置图布设测点和电极，；

2 将不极化电极 M 设置在测线的中点，另一个不极化电极 N 在事先布置好的测线上移动，依次测量与不极化电极 N 之间的自然电位差。

7.3.5 采用充电法确定平面渗流状态下地下水流向，测试过程应符合下列要求：

1 测量电极 M 设置在井口，盐化地下水前，测量电极 N 在事先布置好的测线上移动，依次追踪寻找与 M 极等电位的点，得到正常电场下等电位点；

2 利用测井电缆将食盐（NaCl）投入钻孔中的待测含水层，并记下时间。在间隔一定时间后，再沿各条测线依次测定盐化后的等电位点，记下时间和该点距中心点的距离，地下水盐化后观测等电位点不应少于三次；

3 地下水盐化后，观测的等电位点相对正常场等电位点的最大位移方向为地下水的流向，经矢量转换后计算出地下水流向的方位角。

7.4 成果资料整理

7.4.1 采用三角形法确定地下水流向和流速，其成果资料的整理应符合下列要求：

1 根据观测井（孔）位置，绘制观测井（孔）平面布置图；

2 根据观测井（孔）地下水位标高 h ，采用内插法，绘制场地等水位线；由标高高的等水位线向标高低等的等水位线引垂线，垂线方向即为流向，如图 7.4.1 所示；；

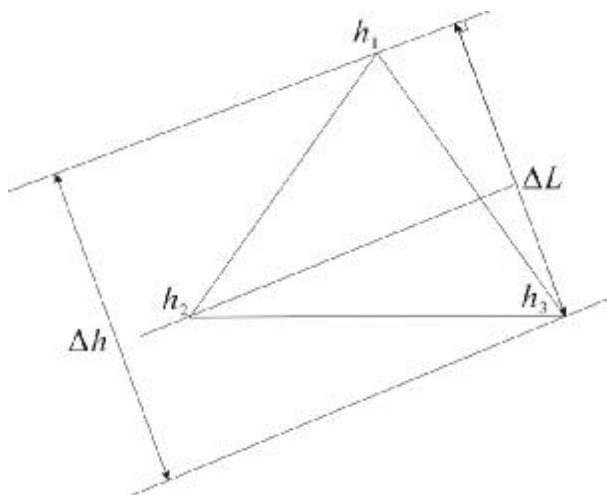


图 7.4.1 三角形法确定地下水流向

图中， $h_1 > h_2 > h_3$ ，单位：米。

3 地下水水力坡度应根据垂线两端的水位差与垂线的长度，按式 7.4.1-1 计算

$$J = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (7.4.1-1)$$

式中， J ——地下水水力坡度；

Δh ——垂线两端的水位差（m）；

ΔL ——垂线的长度（m）。

4 根据抽水试验确定的渗透系数，以及由等水位线图计算得到的水力坡度，可采用式 7.4.1-2 计算地下水流速。

$$v = kJ \quad (7.4.1-2)$$

式中， v ——地下水流速(m/d)；

k ——土层渗透系数(m/d)；

J ——地下水水力坡度。

7.4.2 三角形法确定地下水流向和流速成果报告应包括下列图表：

- 1 观测井（孔）平面布置图；
- 2 地下水等水位线图；
- 3 地下水流向和流速计算成果表。

7.4.3 采用自然电位法确定平面渗流状态下地下水流向，其成果资料的整理应符合下列要求：

- 1 根据测点位置，绘制观测线平面布置图和电极平面布置图；

2 按照下式计算自然电位值:

$$U = U_0 - U_1 - U_2 \quad (7.4.3)$$

式中: U —自然电位值 (mV);

U_0 —测点相对中心基点的电位差值 (mV);

U_1 —活动电极相对固定电极在开工前时的电位差 (mV);

U_2 —从开工到收工时极差的变化值, 按时间对各测点线性分配的数值 (mV)。

3 将经计算机数字处理后的电位值, 用绘图软件按一定比例尺制图。测点相应的方位上直线长短代表自然电位值, 各直线的端点联成封闭的曲线, 其长轴方向为地下水的流向, 经矢量转换后计算出地下水流向的方位角。

7.4.4 采用充电位法计算地下水实际流速公式如下:

$$V = \frac{1}{2} \times \left[\frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} + \frac{R_3 - R_2}{t_3 - t_2} \right] \quad (7.4.4)$$

式中: t_1, t_2, t_3 — 三次测定等电位点的时间 (s);

R_1, R_2, R_3 — 三次测得的等电位点距中心点的距离 (m);

V — 地下水实际流速 (m/s)。

【条文说明 7.4.4】地下水实际流速是地下水在含水层介质中流动的真实速度, 即在任意微小断面上, 单位时间内实际流量与该断面孔隙所占面积的比值, 也称之为地下水实际平均流速, 与地下水渗透流速的关系为 $v = V \times n$, n 为含水层有效孔隙度。

7.4.5 水文物探确定法确定地下水流向流速成果报告应包括下列图表:

- 1 观测线平面布置图;
- 2 电极平面布置图;
- 3 地下水流向和流速计算成果表。

7.5 成果应用

7.5.1 采用地下水流向流速测定结果, 可参照环保部《环境影响评价技术导则—地下水环境》(HJ 610) 进行地下水修复模拟计算。

7.5.2 采用地下水流向流速测定结果, 可参照中华人民共和国水利行业标准《地下水资源勘察规范》(SL454) 计算地下水资源量。

8 水质测试

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于地下水溶解氧、pH、浊度、水温和电导率五参数的原位测试。

【条文说明 8.1.1】溶解氧、pH、浊度、水温和电导率是最为常规且易现场实测的地下水水质测试参数，其他地下水水质参数包括氧化还原电位、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 HCO_3^{-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、溶解性固体、总硬度、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、挥发性酚、总氰化物、高锰酸盐指数、氟化物、砷、汞、镉、六价铬、铁、锰等。如需对地下水质量进行评价，应参照《地下水质量标准》（GB/T 14848）的要求。地下水如作为饮用水供水，监测项目应参照《生活饮用水卫生标准》（GB5749）。

8.1.2 水质五参数宜采用测试仪器人工或自动在地下水水质测试孔进行测试。水质测试方法应根据现场条件、测量精度、工程需求等综合确定。

8.1.3 测试孔可以利用农用水井、生产井或专门设置监测井，测试孔的结构及深度应满足测试目的和要求。

8.1.4 测试仪器的精度、灵敏度和量程应满足测试要求，并具有防水、防潮、屏蔽措施。测试结果需与监测井取样送实验室测试结果进行比较校正。

8.2 测试孔和测点布置

8.2.1 测试孔施工前应收集施工区域地下构筑物、管线图等，水质测试前，应采用定位设备确认测试孔的位置。

8.2.2 测试孔的布置应按照《地下水监测工程技术规范》（GB/T 51040）中的要求布置。

8.2.3 测试孔直径和深度应根据测试的目的和用途、场地的地质条件等确定，若需观察不同深度的地下水，应建立测试孔群。测试孔应根据测试目的和用途等建立统一的编号，并测量其标高与坐标。

8.2.4 涉及污染区域布设测试孔时，应在污染严重区域根据地下水的流向、污染物的迁移规律等布置测试孔，同时应设置对照测试孔，确定污染程度和污染范围时，应结合土壤的污染情况在较严重的污染区域加密布点。

【条文说明 8.2.4】为了解地下水未受到污染条件下的水质状况，需在污染区域外围地下水水流上游垂直水流方向的非污染地段设置对照测试孔。对照测试孔的设置深度、孔径等信息同目标区域内的测试孔一致。

8.2.5 涉及到污染区域布设点时，若场地面积大，地下水丰富，可在场内地下水流向的上游和下游各增加 1~2 个测试孔。

8.3 埋设方法

8.3.1 人工测试可将测试仪器悬挂于地下水测试孔中指定深度后记录测试仪器读数或取水样至地面后采用测试仪器现场测试，自动化测试应将测试仪器埋入地下水测试孔指定深度后采用软件自动采集数据。

8.3.2 人工测试可采用地下水五参数测试仪或各参数单独的测试仪，自动化测试可采用溶解氧测试探头、pH 测试探头、水温测试探头、浊度测试探头和电导率测试探头及其相应的采集系统。

8.3.3 地下水测试孔钻孔成井除应满足现行国家标准及行业标准的成井要求外，尚应符合下列要求：

- 1 钻孔时，应采用跟管钻进方式或其他隔离措施，将钻进揭露段中目标测试深度的土层与其他段土层分层隔离；
- 2 钻孔成井应垂直，水质测试孔孔径宜为 110mm~130mm；
- 3 在填土层或其它松散不稳定的土层中，应下套管护孔，护孔套管应保证垂直；
- 4 成井后应进行洗井，确保孔内应无沉淤和稠浆，满足要求后放置测试仪器；
- 4 同一测试孔中设置多个测试仪器时，仪器之间应在垂向上分深度设置，高度不小于 0.5m；
- 5 测试孔口应设置有效的防护装置，并设立明显的标志。

8.4 测试技术要求

8.4.1 对于污染区域，监测井井管材料应具有防腐性能，且不能对地下水造成污染，成井时应注意污染隔离。

8.4.2 监测井建成至少 24h 后（待井内的填料得到充分养护、稳定后），才能进行洗井。洗井时控制流速不宜超过 3.8L/min。

【条文说明 8.4.2】成井洗井达标直观判断水质基本上达到水清砂净（即基本透明无色、无沉砂），同时监测 pH 值、电导率、浊度、溶解氧、温度等参数值达到稳定（连续三次监测数值浮动在±10%以内），或浊度小于 50 NTU。洗井不宜采用大流量抽水或高压气提的洗井设备，以免损坏滤水管和滤料层。

8.4.3 人工取样测试仪器和自动化测试探头应符合下列要求：

- 1 优先选用成熟的测试仪器和测试探头，使用前应进行标定；
- 2 测试仪器和测试探头的精度和测试频率应满足相关规范及测试要求；
- 3 自动化采集系统的网络传输方式、数据存储与备份等应满足本规程第 13 章要求。

8.4.4 测试过程应符合下列要求：

- 1 在成井洗井 48h 后，进行地下水样品采样前应对测试孔进行清洗，可采用贝勒管或自吸洗井设备等超量抽吸地下水，抽吸量不得小于井内水体积的 2~3 倍，并进行 pH 值、电导率、溶解氧、浊度、氧化还原点位等指标测试，连续测试不应少于 3 次，待连续监测 3 次的水质指标满足稳定标准后 2 小时内进行地下水采样测试，其测试值偏差范围参见表 8.4.4，现场测试记录表式可参考附录 D。

表 8.4.4 地下水水质指标测值偏差范围

水质参数	稳定标准
pH	±0.1
电导率	±3%
溶解氧	±0.3mg/L
温度	±0.5℃
浊度	±10%（当浊度大于 10NTUs 时）
氧化还原电位	±10mV

- 2 依据不同的水文地质条件和地下水监测井使用功能，结合污染情况，力求以最低的测试频次，取得最有代表性的样品。

- 3 测试深度宜位于测试孔水面 0.5m 以下，但涉及到低密度非水溶性有机污染物与高密度非水溶性有机污染物时，应分别在测试孔水面和测试孔的底部位位置布置测试仪器或采样。

【条文说明 8.4.4】为保证现场测试指标的基本稳定，取得有代表性的水样测试数据，需进行洗井并确保水质稳定。对于洗井的要求和水质稳定的标准，不同规

范的要求有一定的差异性，下表列举了部分规范对现场测试指标、稳定标准和洗井水量的具体要求。

表 8.4.4 洗井测试指标和稳定标准一览表

规范或标准名称	现场测试指标	稳定标准规定
《地下水环境监测技术规范》HJT164-2004	水位、水量、水位、pH、电导率、浑浊度、色臭、味、肉眼可见物等	水位：连续两次差值 $\leq \pm 10\text{mm}/10\text{m}$ ； 水温：连续两次差值 $\leq 0.4^{\circ}\text{C}$
《场地环境监测技术导则》HJ5.2-2014		
《上海市场地环境监测技术规范》2016		
《地下水污染地质调查评价规范》DD2008-01	水温、pH、电导率、氧化还原电位、溶解氧	
《地下水样品采集技术指南》	pH、温度、溶解氧、电导率	洗井期间水质指标参数测量至少 5 次以上,直到最后连续三次符合稳定标准； pH ± 0.1 , 电导率 $\pm 3\%$ 溶解氧 $\pm 0.3\text{mg/L}$ 氧化还原电位 $\pm 10\text{mV}$
《建设场地污染土勘察规范》DG/TJ 08-2233-2017	pH、温度、溶解氧、电导率	三次误差小于 10%

8.5 成果资料整理

8.5.1 资料收集应符合下列要求：

- 1 布点方案与测试孔施工记录；
- 2 水质测试记录、测试仪器和测试探头标定记录；
- 3 采用自动化测试的，应提供人工测试验证数据；
- 4 现场各阶段的影像资料。

8.5.2 水质测试结束后,应编制水质原位测试报告,报告内容应包括:任务由来、测试目的及依据、测试内容与频次、布点原则与布点方案、测试结果曲线与分析评价等。

8.5.3 宜开发地下水原位在线测试系统,按自动化测试要求进行全过程信息化管理。

9 注水试验

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于试坑单环注水试验、试坑双环自流注水试验、钻孔降水头注水试验或钻孔常水头注水试验测定土层渗透系数。

【9.1.1】注水试验是用人工抬高水头，向试坑或钻孔内注入清水，测定岩土体渗透性的一种原位试验方法。根据试验方法和使用岩土层条件不同，注水试验分为试坑注水试验和钻孔注水试验两大类。试坑注水试验又分为单环注水试验和双环注水试验。

本章编制时参考了行业标准《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007、《注水试验规程》YS 5214-2000 和上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》DGJ08-37-2012 等。

9.1.2 试坑单环注水试验可用于地下水位埋深大于 5m 的砂土层、砂卵砾石层；试坑双环自流注水试验可用于黏性土和粉土层；钻孔降水头注水试验适用于地下水位以下黏性土、粉土和砂土；钻孔常水头注水试验适用于地下水位以下的砂土层、砂卵砾石层。

【9.1.2】试坑单环注水试验是野外测定包气带非饱和岩土层渗透系数的简易方法之一。其装置简单，未消除侧向渗透影响，故试验成果精度稍差，适用条件为测定毛细管作用不大的砂土层、砂卵砾石的渗透系数。

试坑双环注水试验也是一种野外测定包气带非饱和岩土层渗透系数的简易方法。相对于试坑单环注水法，其装置较复杂，由于内环水只产生垂直渗入，基本排除了侧向渗透的影响，其试验成果精度较高，适用条件为测定毛细力作用较大的黏性土、粉土的渗透系数。

钻孔降水头注水试验其渗流假定符合达西定律，渗入土层的水等于钻孔套管内的水位下降后减少的水体积。对于渗透系数较小的岩土层，采用常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。适用条件为测定适用于地下水位以下黏性土、粉土和砂土的渗透系数。

钻孔常水头注水试验在试验过程中水头保持不变，适用条件为测定地下水位以下的砂土层、砂卵砾石层的渗透系数。

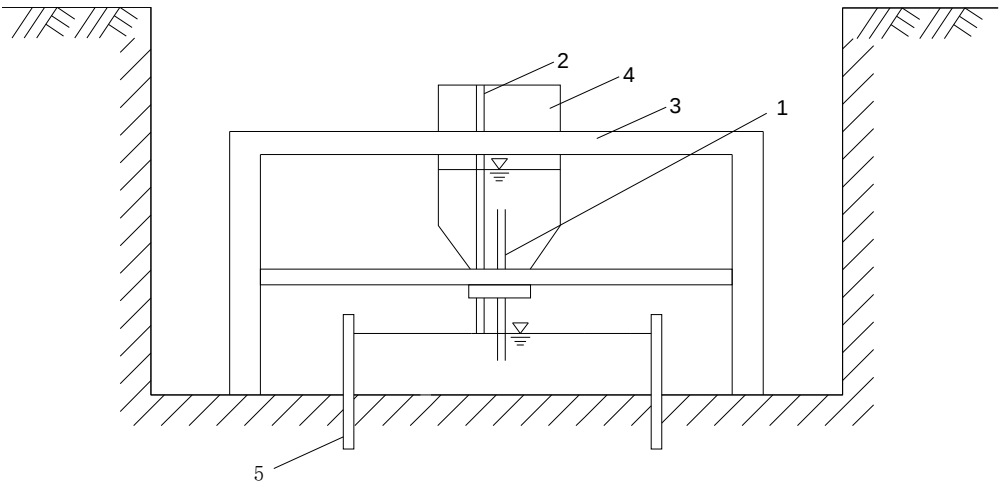
9.1.3 注水试验前应搜集场地工程地质资料和现场踏勘，编制试验方案，并准备好下列仪器设备：

- 1 试坑单环和双环注水法：铁环、水箱、流量水桶、量杯、胶皮管、支架、钟表和记录纸等；
- 2 钻孔降水头或常水头注水法：水箱、水泵、水表、量桶、瞬时流量计、秒表、卷尺、栓塞、套管、电测水位计等。

9.2 试验方法

9.2.1 试坑单环注水试验应按下列步骤进行：

- 1 在选定的试验位置，挖一个圆形或方形试坑至试验层，在坑底部再挖一个深 150mm~200mm 注水试坑，坑底应修平，并确保试验土层的结构不被扰动；
- 2 在注水试坑内放入铁环，环外用黏土填实，确保四周不漏水，在环底铺 20mm~30mm 厚的粒径 5mm~10mm 砾石或碎石作为缓冲层；
- 3 向环内注水，当环内水深达到 100mm 时，开始记录量测时间和注水量，在试验过程中，应保持水深 100mm，波动幅度不应大于 5mm。



1—出水管；2—进气管；3—瓶架；4—流量瓶；5—试环

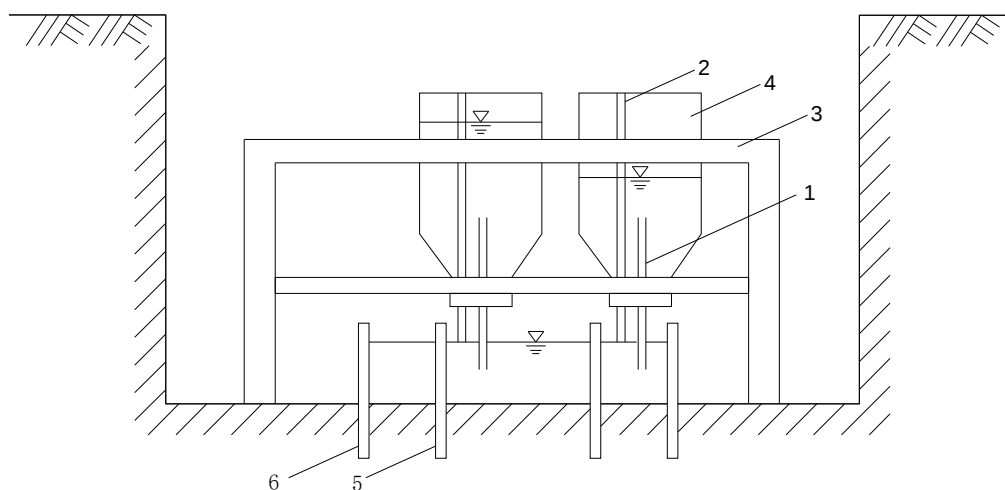
图 9.2.1 试坑单环注水试验示意图

【9.2.1】 试坑单环注水试验技术要求应符合下列规定：

- 1 试坑开挖的直径宜大于单环直径的 1.5 倍，这样便于操作。试坑深度深度根据试验深度而定，要确保土的原状结构；
- 2 铁环放入前要对其进行检查，保证与底部接触良好；
- 3 试验过程中，必须保持 100mm 水头，按规定时间间隔进行记录。

9.2.2 试坑双环自流注水试验应按下列步骤进行：

- 1 在选定的试验位置，挖一个圆形或方形试坑至试验层，在坑底部再挖一个深 150mm~200mm 注水试坑，坑底应修平，并确保试验土层的结构不被扰动；
- 2 在注水试坑内放入试环，将直径分别为 250mm 和 500mm 的两个试环按同心圆状压入坑底，深约 50mm~80mm，并确保试验土层的结构不被扰动，试环周边不漏水；
- 3 在内环及内、外环之间环底铺上厚 20mm~30mm、粒径 5mm~10mm 的砾石或碎石作为缓冲层；
- 4 安装瓶架、流量瓶、出水管和进气管。流量瓶应装满清水，用带 2 个孔的胶塞塞住，孔中分别插入长短不等的 2 根管端切成斜口的进气管和出水管。流量瓶进气管管口距坑底应为 100mm，以保持试验水头不变；
- 5 试验过程中，两个流量瓶应同时向内环和内、外环之间注水，水深约 100mm；
- 6 试验前在距试坑 3m~5m 处打一个比坑底深 3m~4m 的钻孔，并每隔 200mm 取土样测定其含水率。试验结束后，应立即排出环内积水，在试坑中心打一个同样深度的钻孔，每隔 200mm 取土样测定其含水率。



1—出水管；2—进气管；3—瓶架；4—流量瓶；5—内环；6—外环

图 9.2.2 试坑双环注水示意图

【9.2.2】 试坑双环自流注水试验结束后钻孔中取样测得的含水率与试验前资料进行对比，以确定注水试验的渗入深度。

9.2.3 钻孔降水头注水技术要求应符合下列规定：

1 试验段应采用清水钻进，将孔内泥质物清除干净，孔底沉淀物不应大于 50mm，并应减少对试验段土层的扰动；如考虑孔壁进水，对孔壁稳定差的试验段可采用过滤器护壁；

2 非试验段可用套管隔离，为保证止水效果，应采用套管打入黏性土 1m~2m 或用黏土球充填套管与孔壁间隙，确保套管与孔壁之间不漏水，套管接头应密合止水；

3 试验段隔离以后，向套管内注入清水，使管中水位高出地下水位一定高度或至套管顶部作为初始水头，停止供水并开始记录管内水位变化情况；

4 有条件时，试验前应进行地下水位观测。

【9.2.3】 在粉性土较重的土层中进行注水试验，提高试验质量十分重要，故试验时应严格按照要求进行。从实际试验经验来看，影响注水试验结果的主要因素为成孔质量和止水效果。成孔形状不规则和过量沉渣均使试验条件产生偏差，泥皮过厚或孔内含泥量过多会堵塞渗水通道，影响土的渗透性能。有现场试验反映注水试验开始时渗透情况正常，但黏土颗粒逐渐堵塞渗水通道时，渗透十分缓慢；或套管接头不密合、套管与孔壁不止水等，渗流速度很快。即当实际渗流情况不符合试验设定条件时，易造成计算结果的严重偏差。

9.2.4 钻孔常水头注水试验技术要求应符合下列规定：

1 注水试验前应进行地下水观测，水位观测间隔为 5min，当连续 2 次观测数据变幅小于 100mm 时，水位观测即可结束，用最后一次观测值作为地下水位计算值；

2 试验止水可采用栓塞或套管脚黏土等止水方法，应保证止水可靠；

3 对孔壁稳定性差的试验宜采用花管护壁，试验长度不宜大于 5m，且同一试验段不宜跨越透水性相差悬殊的两种岩土层；

4 试验段隔离以后，向套管内注入清水，使管中水位高出地下水位一定高度并保持固定不变，用流量计或量桶量测注入流量。

【9.2.4】 钻孔常水头注水试验技术要求应符合下列规定：

1 进行地下水位观测的目的是确定注水试验水头的计算零点。地下水位观测的稳定标准，主要是考虑试验所能达到精度确定的，参照相关规范，采用水位变幅 20mm/min 的标准；

2 一般在土层中采用套管脚黏土止水是比较可靠的，在基岩中常用栓塞止水，其中气压、水压栓塞的止水效果优于顶压式栓塞；

3 对孔壁稳定性差的试段，要求及时下入护壁花管以避免塌孔。

9.2.5 钻孔降水头注水试验管内水位观测应符合下列规定：

1 开始间隔时间应为 1min，连续观测 5 次，然后间隔 5min 观测 5 次，间隔 10min 观测 3 次，最后按照水头下降速度，间隔 30min~60min 进行观测；

2 当水头比与时间关系 $\ln(h_t/h_0) \sim t$ 不呈直线时（ h_t ，为试验时间 t 测得的水头， h_0 为试验初始水头），应进行检查重新试验；

3 当试验水头下降到初始试验水头的 0.3 倍或在半对数坐标纸上连续 10 个以上观测点水头比与时间关系呈直线时，可结束试验。

【9.2.5】 当事先测得地下水位埋深时，不必等到试验结束后判断，可根据水头比与时间关系 $\ln(h_t/h_0) \sim t$ 进行判断，当不呈直线时应重新进行试验，当 $\ln(h_t/h_0) \sim t$ 呈直线时可提前结束测试。

9.2.6 钻孔常水头注水试验注水量量测应符合下列规定：

1 开始每隔 5min 量测一次，连续量测 5 次，以后每隔 20min 量测一次并至少连续量测 6 次；

2 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% 时，试验即可结束，取最后一次注入流量作为计算值。

【9.2.6】 关于钻孔常水头注水试验的试验时间，主要从两方面考虑：对于地下水位以下试段，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。据一些单位钻孔注水试验时间统计，大部分试验在 1h 内完成。为了留有余地，积累资料，本次规程规定观测时间控制在 2h，是可以满足大多数试段试验要求的。

9.3 成果资料整理

9.3.1 试坑单环注水试验成果资料整理应符合下列要求：

1 绘 $Q \sim t$ 关系曲线；

2 试验土层的渗透系数可按式（9.3.1）计算：

$$k = \frac{16.67Q}{F} \quad (9.3.1)$$

式中： k ——土层渗透系数（cm/s）；

Q ——注入流量（L/min）；

F ——试环面积 (cm^2)。

【9.3.1】 试坑单环注水试验成果资料整理应符合下列要求：

1 $Q \sim t$ 曲线宜在现场绘制，可以了解注水试验注入流量随时间的变化情况，保证试验结束时，注入流量已达到基本稳定；

2 式 (9.3.1) 中的系数，是为了便于计算，把流量单位由 L/min 换算成 cm^3/s 得来的。

9.3.2 试坑双环自流注水试验成果资料整理应符合下列要求：

1 绘 $Q \sim t$ 关系曲线；

2 试验土层的渗透系数可按式 (9.3.2) 计算：

$$k = \frac{16.67Qz}{F(h+z+0.5h_a)} \quad (9.3.2)$$

式中： Q ——内环注入流量 (L/min)；干燥炎热条件下应扣除蒸发水量；

F ——内环的底面积 (cm^2)；

h ——试验水头 (cm)；

h_a ——试验土层的毛细上升高度 (cm)，可测定或按表 9.3.2 取值；

z ——从试坑底算起的渗入深度 (cm)，可通过试验前后两个钻孔土的含水量变化对比确定。

表 9.3.2 毛细上升高度

土层名称	毛细上升高度 (cm)
黏土	200
粉质黏土	160
粉土	80~120
粉砂	60
细砂	40

【9.3.2】 试坑双环自流注水试验成果资料整理应符合下列要求：

1 $Q \sim t$ 曲线宜在现场绘制，可以了解注水试验注入流量随时间的变化情况，保证试验结束时，注入流量已达到基本稳定；

2 式 (9.3.2) 中的系数，是为了便于计算，把流量单位由 L/min 换算成 cm^3/s 得来的。试验土层的毛细上升高度可采用直接观测法或土样管法，具体可按《水利水电工程土工试验规程》DL/T 5355 进行测定。

9.3.3 钻孔降水头注水试验成果资料整理应符合下列要求：

- 1 绘制 $\ln(h_t/h_0) \sim t$ 关系曲线；
- 2 试验土层的渗透系数可按式（9.3.3-1）或（9.3.3-2）计算：

$$k = \frac{\pi r^2}{A} \cdot \frac{\ln(h_1/h_2)}{t_1 - t_2} \quad (9.3.3-1)$$

$$k = \frac{\pi r^2}{AT_0} \quad (9.3.3-2)$$

式中： t_1 、 t_2 ——注水试验某一时刻的试验时间（s）；

T_0 ——注水试验的特征时间（s），即 $\frac{h_t}{h_0} = 0.37$ 时所对应的 t 值；

h_1 、 h_2 ——试验时间 t_1 、 t_2 时的试验水头（cm）；

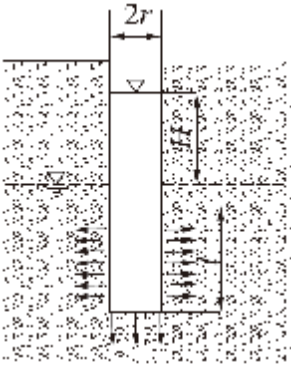
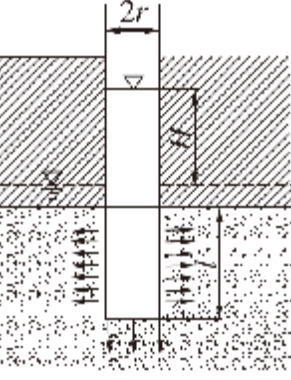
r ——套管内半径（cm）；

l ——试验段长度（cm）；

A ——形状系数（cm），其取值按表 9.3.3。

表 9.3.3 钻孔注水试验的形状系数 A 取值

试验条件	简图	形状系数 A	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		$\frac{2\pi l}{\ln(ml/r)}$	$\frac{l}{r} > 8$ $m = \sqrt{k_h/k_v}$ 式中： k_h 、 k_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数
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		$\frac{2\pi l}{\ln(2ml/r)}$	

【9.3.3】 钻孔降水头注水试验假定渗流符合达西定理，渗入土层的水等于套管内下降的水的体积。

式（9.3.3-2）是式（9.3.3-1）在 $\ln(H_t/H_0)=1$ 或 $H_t/H_0=0.37$ 和 $T_0 = t_1 - t_2$ 时的特定条件下的简化形式。

为了保证根据 $\ln(H_t/H_0)-t$ 曲线求得的 T_0 的准确性，要求试验结束时间必须满足 9.2.5 条的规定。

9.3.4 钻孔常水头注水试验成果资料整理应符合下列要求：

- 1 绘制流量 Q 与时间 t 的关系曲线；
- 2 当试验段位于地下水位以下时，按式（9.3.4-1）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{16.67Q}{AH} \quad (9.3.4-1)$$

式中： Q ——注入流量（L/min）。

A ——形状系数（cm），其取值按表 9.3.3。

- 3 当试验段位于地下水位以上，且 $50 < H/r < 200$ 、 $H \leq l$ 时，可按式（9.3.4-2）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{7.05Q}{lH} \lg \frac{2l}{r} \quad (9.3.4-2)$$

式中： r ——为钻孔内半径（cm）。

【9.3.4】 钻孔常水头注水试验的形状系数 A 与钻孔降水头注水试验相同。

9.3.5 注水试验成果报告应附下列图表：

- 1 测试点平面布置图；
- 2 测试孔结构剖面图；
- 3 注水试验成果图表。

9.4 成果应用

9.4.1 注水试验测定的土层渗透系数可应用于岩土工程勘察、水文地质勘察等。

【9.4.1】 土层渗透系数对基坑工程、隧道工程等影响很大，勘察阶段测定土的渗透系数，可采用注水试验。但在沿海等地下水丰富地区为深大基坑工程建水设计提供水文地质参数，应根据具体情况，开展相关水文地质专项勘察。

9.4.2 试坑单环注水试验可用于测定垃圾填埋场、厚层填土等松散非饱和土层的渗透参数。

10 抽水试验

10.1 一般规定

10.1.1 本章适用于确定地下水控制设计、施工水文地质参数所进行的抽水试验。

10.1.2 抽水试验应查明场地及其周边区域的水文地质条件、搜集已有资料和现场踏勘后制定实施方案，并在洗井满足要求后进行。

【条文说明 10.1.2】抽水试验前，抽水井和观测井均应按降水管井设计与施工的要求达到降水管井的质量要求，进行彻底洗井。

就抽水试验井洗井工序和管井洗井工序的质量要求而言，两者并无差别，因此，管井洗井质量标准同样适用于抽水试验井。

10.1.3 抽水试验根据不同需要，进行单孔或多孔、群孔抽水，分层或混合抽水，完整井或非完整井抽水，稳定流与非稳定流抽水，试验方法可按附录 G 选择。

10.1.4 需查明降水对周边环境的影响，了解土层分层沉降的时空分布特征，提供地表和土层深层沉降的时程曲线时宜进行一次大流量、大降深的群孔抽水试验，并应以非稳定流抽水试验为主。群孔抽水试验应通过分析试验区水位的变化，查明停止抽水试验后，水位以及沉降回弹与时间关系。

【条文说明 10.1.4】采用群井抽水试验时，可采用数值法计算反求参数，或识别和检验数值模型的合理性。因此需要有模拟区域的水量、水位和边界条件方面的资料。为了满足这些要求，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，通过常规勘察手段能够查明补给和边界条件，利用地下水自然动态资料能满足数值法计算要求，就不必进行群孔抽水试验；反之，当计算区域地下水赋存条件复杂，其补给和边界条件难以查明时，则应进行开采性的群孔抽水试验。

强调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、释水系数、越流参数及给水度等水文地质参数，用稳定流抽水试验是无法获得的。

10.1.4 抽水试验中应做好地面排水，并应将抽出的水排至试验孔（井）影响范围以外。

10.1.5 抽水试验前和抽水试验时，必须同步测量抽水孔和观测孔的自然水位和动水位。如自然水位的日动态变化很大时，应掌握其变化规律。抽水试验停止后，必须按照本规

范第 10.4.4 条的要求测量抽水孔和观测孔的恢复水位。抽水试验结束后，应检查孔内沉淀情况。必要时，应进行处理。

【条文说明 10.1.5】每个抽水孔和观测孔在抽水试验开始前应测量自然水位，宜 1 小时测一次，连续三次测得的数字相同或 2 小时内水位相差 $<20\text{mm}$ 时，可作为抽水前的自然水位。对于地下水位受动态变化的或受潮汐影响明显的地区应有一天以上的观测记录，观测时间可选择 30min~60min 一次。需要时应在抽水试验影响区外同一水文地质单元内设观测孔，掌握试验期间地下水位的天然变化。自然水位的观测要求精度达到 5mm，动水位观测主孔精度 $\leq 10\text{mm}$ ，观测孔精度 $\leq 5\text{mm}$ 。抽水结束或发生故障停止抽水时应测恢复水位。应防止抽出的水又回到抽水含水层中去。

抽水试验结束后，应测量抽水试验前后的孔（井）深，其目的是核查抽水段深度、层位、孔（井）是否坍塌、沉淀和淤塞。淤塞严重会影响资料的精度，引起孔（井）类型的变化（如完整井转变为非完整井等）。

10.1.6 抽水设备选用，应根据钻孔的出水量、地下水位（头）的深度、含水层的埋深，钻孔内动水位、钻孔直径，要求降低地下水位的深度，动力条件等综合考虑。

【条文说明 10.1.6】抽水试验选用的设备的性能和安装方法的差异，导致抽水试验过程中出现异常的分析与处理。

表 10.1.6 抽水试验异常现场的分析与处理

现象	原因	处理
s 不变，Q 渐增或骤增；Q 不变，s 渐升或骤升	1.地表水补给地下水：① 水池塘补给（池塘水渐小，甚至干涸）； ② 永久性河流补给； 2.排水的反补给； 3.岩溶通道进水断面扩大(出现浑水)； 4.抽水出砂量大，部分含水层被“抽空”，增大了过水断面； 5.洗孔不合要求，抽水中途“泥浆皮”脱落（出现浑水）	1.① 疏干小池塘水后，再转入正式抽水；② 相对稳定 4 小时停抽，但应查明河流历年最大最小和一般流量，以作抽水点开采水量的评价依据； 2.检查排水渠道，如有漏失，应及时堵塞，或改变排水方向； 3.延长时间； 4.延长时间； 5.延长时间；

s 不变, Q 骤减或 Q 不变, s 骤增	1.由于含水层局部被抽空, 顶部隔水土层突然坍塌(出现水浑), 将过滤器部分“糊死”; 2.补给水源不足, 水位连续下降不恢复; 3.含水层中细小颗粒或岩溶裂隙中的充填物淤塞过滤器; 4.岩溶、裂隙充填物大量坍塌(出现水浑), 堵塞过水断面	1.停抽或延长抽水时间, 直到 Q、s 与 t 关系曲线与变化前相近时为止; 2.经试抽确属此因, 不必转入正式抽水(可根据水位下降速度反算井的最大出水量); 3.① 将风管喷头直接对准过滤器部分送风冲洗; ② 抽水顺序由小到大进行; 4.① 向孔内送水送风, 再抽水, 反复进行, 至出水量正常; ② 将孔口封闭, 用压风机压入空气, 使水气混合物冲向裂隙、溶洞, 使堵塞物稀疏再抽水
s 与 Q 的相应变化无常	1.抽水机械运转不正常; 2.压风机抽水时, 风管喷头以上漏气; 3.离心泵抽水时, 动水位以上之吸水管进气	1.检查抽水机械; 2.检查风管, 重新上紧丝扣; 3.检修密封吸水管;
s 改变, 而测水管水位基本不变	1.水管堵塞(下管前未检查); 2.测水管与孔底间距太小, 抽水过程中孔内沉淀物堵塞测水管	用压风机将压缩空气送入测水管, 将堵塞物冲出, 提出测水管, 逐根检查
s 渐降, Q 也逐渐变小	1.地下水补给源不足; 2.随抽水进行, 堵在滤网上的砂粒增多, 使过水断面渐渐减小	1.按非稳定流处理, 查清阻水边界或降低抽水强度; 2.停抽, 向孔内注水或用风管对准过滤器工作部分冲洗;

注: s ——水位降深; Q ——出水量。

10.1.7 水位和水量测试技术要求具体按照本规程第 4 章、第 5 章执行。

10.2 井点和测点布置

10.2.1 抽水试验井结构应符合下列规定：

- 1 深度应能够控制对工程有影响的含水层；
- 2 抽水试验井宜为完整井；
- 3 井管直径在松散层中不应小于 200mm，在基岩中不应小于 150mm；
- 4 过滤器结构应符合现行国家标准《供水水文地质勘察规范》（GB50027）的有关要求规定，沉淀管长度宜为 1m~2m；
- 5 水泵置入设计降水深度以下不应少于 2m。

10.2.2 抽水试验观测孔的布置方向，应符合下列要求：

- 1 以抽水孔为原点，宜布置 1~2 条观测线；1 条观测线时，宜垂直地下水流向布置；2 条观测线时，其中一条宜平行地下水流向布置；
- 2 均质无限大含水层，可在垂直与平行地下水流向的方向上布置观测孔；非均质无限大含水层，除在垂直与平行地下水流向上布孔外，在 45° 方向上可增设观测孔或在含水层颗粒级配变化较大的方向上布置；
- 3 脉状裂隙含水层应沿着富水带和垂直富水带的方向上布孔；岩溶裂隙含水层既要考虑富水地段和地下水流向，又要考虑在弱富水性地段布孔；
- 4 有界含水层主要应垂直、平行边界布置观测孔，必要时在边界附近增设观测孔。

10.2.3 抽水试验观测孔的数量方向，应符合下列要求：

- 1 同一方向的观测线上位于抽水含水层中的观测孔宜为 3 个。
- 2 非稳定抽水，用 $s-lgt$ 或 $lgs-lgt$ 曲线计算时布置 1~2 个位于抽水含水层中的观测孔；用 $s-lgr$ 曲线计算时，应有 3 个或 3 个以上位于抽水含水层中的观测孔。半承压含水层中抽水还应考虑在上、下弱透水层和上、下越补含水层中布置观测孔。
- 3 为考虑估算因抽水引起附近地面变形，宜在因抽水引起地面变形的主要压缩层中布置观测孔或孔隙水压力观测孔。

10.2.4 抽水试验观测孔的距离，应符合下列要求：

- 1 距抽水井近的第一个观测孔，宜避开三维流的影响，其距离不宜小于含水层的厚度，应保证各观测孔内有一定的水位下降值。

2 各观测孔的水位下降要明显,最远的观测孔水位下降不宜小于 10 倍的观测误差,相邻二观测孔的水位差不宜小于 0.1m。

3 多个观测孔的距离由近到远应由密到疏。在与抽水含水层相邻的越补含水层和弱透水层中的观测孔应离主孔较近。

4 非稳定流抽水,用 $s\text{-lgr}$ 曲线计算时,观测孔的距离应考虑在对数轴上分布均匀。

5 脉状含水层或岩溶发育地区,最远的观测孔应能控制富水带方向上的扩展半径。

6 对工程影响范围内的多层含水层,需分层研究时,应分层进行抽水试验,并查明相互之间的补给关系。

【条文说明 10.2.4】

1 对承压含水层来说,抽水含水层中的观测孔宜避开因主孔抽水在抽水孔附近形成的三维流和紊流的影响。稳定抽水试验时观测孔的距离 r ,宜控制在 $1.5M \leq r \leq 0.187R$,其中 M ——承压含水层的厚度(m); R ——影响半径(m)。

2 对潜水含水层,观测孔位于降落漏斗水力坡度小于 0.25 处时,也适用上述原则。

3 非完整井抽水,为避开非完整井影响,将在含水层中的观测孔布置在离主孔(1~1.5) M 以上,可以用该观测孔的资料以完整井公式计算参数;为测定含水层的各向异性,则观测孔应布置在离主孔 $1M$ 以内。

10.2.5 地表沉降布置应符合下列规定:

- 1 地表沉降监测点应呈射线状、十字状或者网格状布置。
- 2 地表沉降监测点间距应结合试验井的间距布置,不宜大于 10m。
- 3 地表沉降点布置观测范围不宜小于 2~3 倍抽水井与最远观测井的距离。
- 4 沉降观测半径应远离抽水区域,沉降观测点必须牢靠埋设。
- 5 试验区影响范围内尚应对重要构筑物的角点位置布置相应的沉降点。

10.3 埋设方法

10.3.1 抽水井和观测井的埋设应符合下列规定:

1 抽水(观测)井施工可根据地层条件选用冲击钻进、正循环钻进、反循环钻进、冲击回转钻进或螺旋钻进等方法钻进成孔,施工过程中应做好成孔施工记录。抽水井和观测井施工记录表式可参考附录 A。

2 抽水（观测）井的过滤器、滤料、止水、泥浆要求，应符合《供水水文地质钻探与管井施工操作规程》（CJJ/T13）标准的规定。

3 吊放井管时应平稳、垂直，并保持井管在井孔中心，严禁猛墩，井管宜高出地表 200mm 以上；试验井的施工与安装应符合现行国家相关标准的规定。

4 抽水试验孔完成后应及时进行洗井，宜采用空压机与活塞交替洗井。抽水设备安装后，应先进行试抽，满足试验要求后，再正式抽水；

10.3.2 抽水试验观测孔过滤器的位置，应符合下列要求：

1 各观测孔的过滤器长度宜相等，并安置在同一含水层和同一深度；

2 抽水含水层中的观测孔的过滤器的位置宜与抽水孔一致；

3 在非完整井抽水的情况下，为测定含水层的各向异性，位于抽水含水层中距抽水孔距离小于 1~1.5 倍含水层厚度的观测孔的过滤器位置应置于抽水孔过滤器顶部以上或底部以下。

10.3.3 孔隙水压力计的埋设应按照本规程第 6 章相关要求执行。

10.3.4 土体深层沉降点应布置在水位降深变化最大的区域内的主要抽水层及相邻层，宜采用多点位移计或分层沉降标进行埋设，深层沉降点的埋设参见有关监测规范规定。

【条文说明 10.3.4】土体深层沉降点的埋设分为成孔工艺和成标工艺两部分。

10.3.5 地表沉降点的埋设应参见有关监测规范规定。

10.4 测试技术要求

10.4.1 抽水试验主要包括明确抽水试验目的、选择合适的抽水试验仪器设备、抽水试验分类、稳定流抽水试验、非稳定流抽水试验、抽水试验资料整理等步骤。

10.4.2 稳定流抽水试验测试（主要适用于单井）宜符合下列规定：

1 抽水试验时，水位下降的次数应根据试验目的确认，宜进行 3 次，其中最大下降值可接近孔内的设计动水位，其余 2 次下降值宜分别为最大下降值的 1/3 和 2/3，每次下降值之差不宜小于 1m，各次下降的水泵吸水管口的安装深度应相同。

2 抽水试验的稳定标准，应符合在抽水稳定延续时间内，抽水孔出水量和动水位与时间关系曲线只在一定的范围内波动，且没有持续上升或下降的趋势。

3 抽水试验的稳定延续时间，宜符合表 10.4.1 要求。

表 10.4.1 抽水试验的稳定延续时间

含水层土性	稳定延续时间 (h)
卵石、圆砾和粗砂含水层	≥ 8
中砂、细砂和粉砂含水层	≥ 16
粉性土含水层	≥ 24
基岩含水层 (带)	≥ 24

注：根据含水层的类型，补给条件、水质变化和试验的目的等因素，稳定延续时间可适当调整。

4 抽水试验时应观测抽水（观测）井水位、抽水井出水量，观测记录可参考附录 H。动水位和出水量观测的时间，宜在抽水开始后的第 5、10、15、20、25、30min 各测一次，以后每隔 30min 或 60min 测一次。水温、气温观测的时间，宜每隔 2h~4h 同步测量一次。

【条文说明 10.4.2】稳定流抽水试验宜进行 3 次或 3 次以上抽降，当抽水孔抽水量很小，试验时的出水量已达到抽水孔极限出水能力时，水位下降次数可适当减少。

（一）抽水试验的稳定标准和水位流量的波动范围：

1. 出水量与动水位没有持续上升或下降趋势（判定时应尽量消除其他干扰因素）。
2. 用水泵抽水位波动 20mm~30mm，流量波动 $\leq 3\%$ ；用空压机抽水，水位波动 100mm~150mm，流量波动 $\leq 3\%$ 。设观测孔时，最远的观测孔水位波动小于 20mm~30mm。
3. 当有观测孔时，应以最远观测孔的动水位判定。在判定动水位有无上升或下降趋势时，应考虑自然水位测量的影响。

（二）对于不同含水层稳定延续时间（抽降由小到大）要求进行了规定；多孔抽水试验要求最远的观测孔稳定达到上述要求。稳定延续时间应根据抽水试验的目的、场地和区域水文地质的研究程度和水文地质条件的不同而异。在场地水文地质研究程度较高，单纯为了测定渗透系数，稳定延续时间可短些，相反在岩溶地区，水位受潮汐影响的地区，受地表水补给明显动态变化较大的地区和进行群孔抽水时稳定延续时间可长些。

10.4.3 非稳定流抽水试验测试（主要适用于群井）宜符合下列规定：

- 1 采用定流量时，流量变化幅度不宜大于 3%；采用定降深抽水时，水位变化幅度不宜超过 1%。

2 抽水试验的延续时间可根据含水层的导水性、储水能力、观测孔的数量及距抽水孔（井）的距离，结合所采用的非稳定流计算方法和实际需要来确定，承压水应根据水位下降值与时间对数 $s\text{-lgt}$ 关系曲线确定，潜水应根据含水层变化平方差与时间对数 $\Delta h^2\text{-lgt}$ 关系曲线确定；当曲线呈直线状，延续时间在 lgt 轴上的投影数值不应少于两个对数周期；当曲线有拐点时，宜延续时间至拐点后出现水平线的最初时刻。

3 试验时应观测动水位和出水量观测的时间，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 各测一次，以后每隔 30min 或 60min 测一次，直至结束。水温、气温观测的时间，宜每隔 2h~4h 同步测量一次。

4 抽水停止后应进行恢复水位观测，观测时间间隔同抽水试验。

【条文说明 10.4.3】非稳定流抽水试验，抽水试验前应观测自然水位，并精确测量主孔与观测孔的距离。非稳定抽水试验宜只作一次抽降，但为了测定井损失需进行 3 次或 3 次以上的抽降，每次抽降开始前应测静止水位，取每次抽降开始相同的累计时间的流量和动水位，绘制 $Q\text{-}s$ 曲线。

抽水试验的延续时间，为了满足计算的需要，非稳定抽水试验的延续时间应根据观测孔的水位下降与时间的半对数曲线，即 s （或 Δh^2 ）- lgt 曲线来判定。当 s （或 Δh^2 ）- lgt 曲线可以出现拐点时，抽水试验应延续到拐点以后，曲线出现平缓段，并能正确推出稳定水位下降值时试验即可结束；当 s （或 Δh^2 ）- lgt 曲线不出现拐点，呈直线延伸时，其直线延伸段在 lgt 轴上的投影不少于二个对数周期时可以结束试验；当有几个观测孔时应以最远的观测孔的 s （或 Δh^2 ）- lgt 曲线判定。

Δh^2 是指潜水含水层在自然情况下的厚度 H 和抽水试验时的厚度 h 的平方差，即 $\Delta h^2 = H^2 - h^2$ 。

10.4.4 群井非稳定流抽水试验应符合下列规定：

1 群井抽水试验井应根据工程性质、地质与水文地质条件、场地环境条件等因素确定，一般不宜不少于 3 口，井间距宜为 5m~10m，可呈圆形、三角形或矩形布置。

2 当一个抽水孔抽水时，对另一个最近的抽水孔产生的水位下降值，不宜小于 200mm。

3 抽水孔的水位下降次数应根据试验目的而定。

4 当抽水孔附近有地表水或者地下水露头时，应同步观测其水位、水质和水温。

5 群井抽水试验时间应与土体沉降变化相对应，抽水持续时间要视试验区的沉降稳定区域而定。

【条文说明 10.4.4】群井抽水试验时，抽水主井可呈三角形、矩形、圆形布置（图 10.4.4-1~10.4.4-3），抽水主井一般不少于 3 口，多得可以达到 6 口或者 8 口，观测井一般不少于 3 口，对工程影响范围内的多层含水层，需分层研究时，应分层布置观测井，并查明相互之间的补给关系。

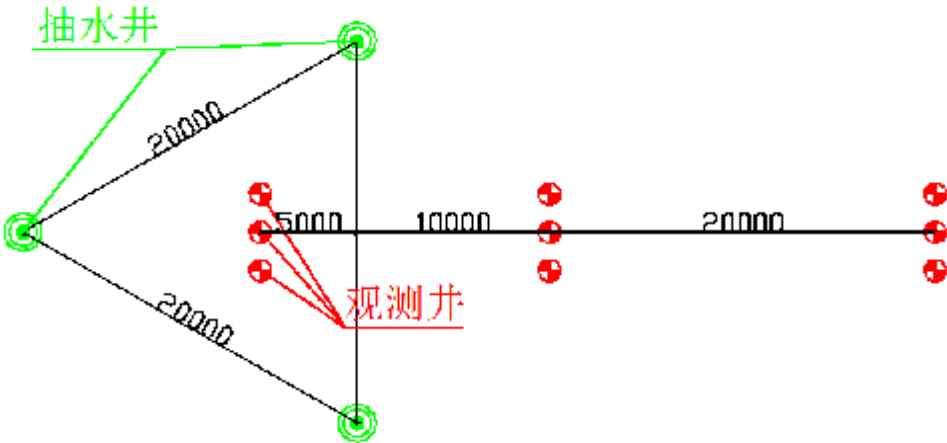


图 10.4.4-1 抽水试验井呈三角形关系布置示意图

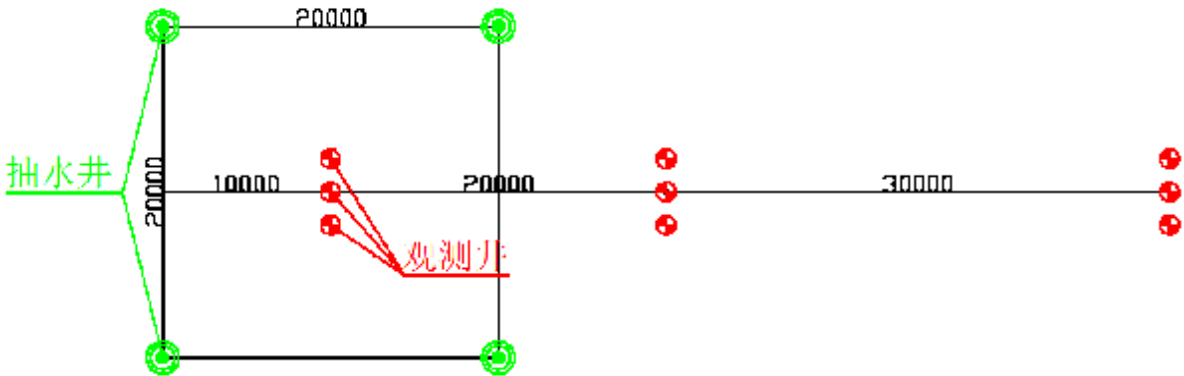


图 10.4.4-2 抽水试验井呈矩形关系布置示意图

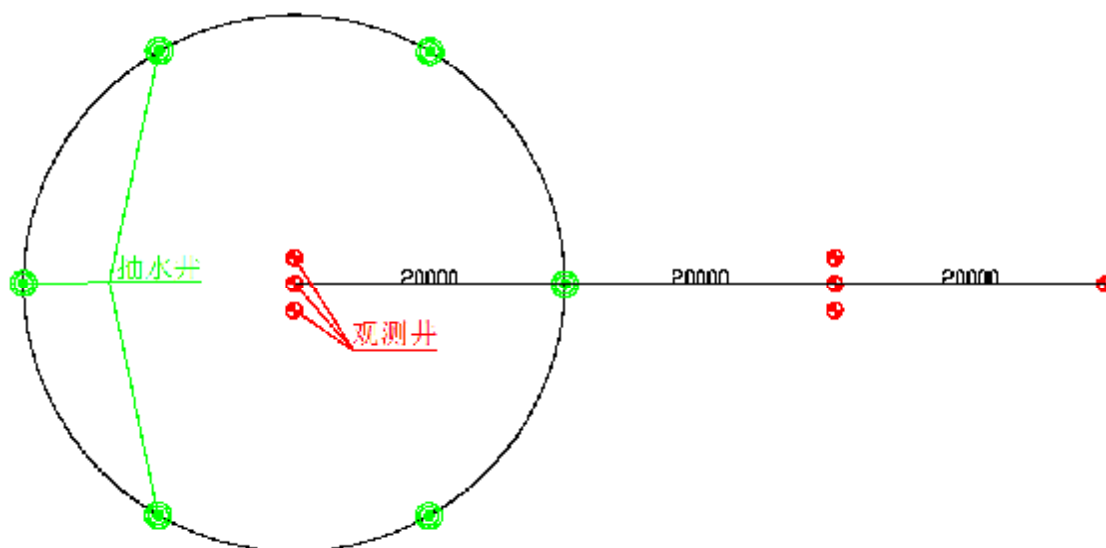


图 10.4.4-3 抽水试验井呈圆形关系布置示意图

10.4.5 土体深层沉降点宜采用人工或静力水准进行沉降测量。

10.5 成果资料整理

10.5.1 抽水试验的成果记录包括流量、水位、孔隙水压力、沉降等观测记录。

10.5.2 抽水试验应编制相应的历时曲线（ $Q-t$ 曲线、 $s-lgt$ 曲线）、 $q-s$ 曲线、并通过解析法或者数值法计算相关的参数，包括水平/垂直渗透系数、给水度和释水系数、影响半径、降水入渗系数等，计算公式可参考附录 I。

【条文说明 10.5.2】在抽水过程中，应根据所测得的资料及时进行现场整理，以便了解试验进行情况，检查有无反常现象并及时纠正处理，为室内整理提供正确可靠的原始资料。进行稳定流抽水时应在现场绘制 $Q-s$ 、 $Q-t$ 、 $q-s$ 曲线、 $s-t$ 历时曲线见图（10.5.2-1、10.5.2-2）。在有 3 个或 3 个以上的观测孔时，应绘制 $\lg s-lgr^2$ 曲线（10.5.2-3）；在进行稳定抽水时，现场应绘制某一稳定位置时的 $\lg s-lgt$ 、 $s-lgt$ 曲线，随测随绘，以检查实测曲线是否与理论曲线一致，进行多次抽降的阶梯试验时应根据每次抽降开始相同累计时间时的 Q 和 s 值，绘制 $Q-s$ 曲线。

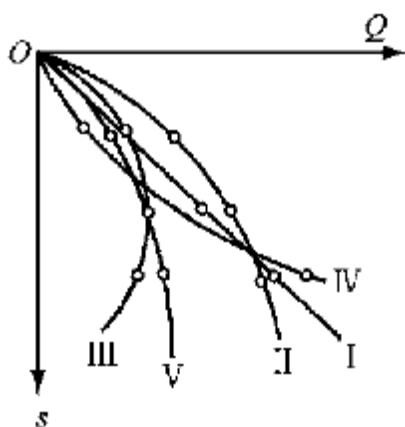


图 10.5.2-1 $Q-s$ 关系曲线图

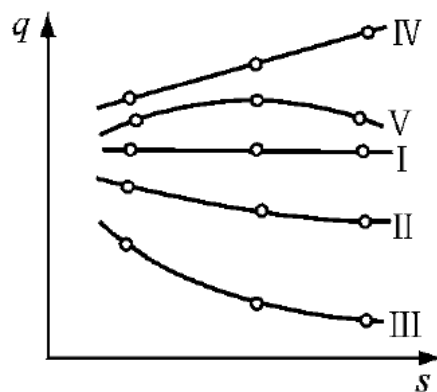


图 10.5.2-2 $q-s$ 关系曲线图

在图 10.5.2-1、10.5.2-2 中, I 为承压水; II 为潜水或承压水受井管(包括滤管)阻力和三维流、紊流的影响; III 表示水源不足或滤水管过水断面受堵塞; IV 为当吸水龙头位于滤水管部位时, 表示受三维流、紊流的影响属正常现象, 当吸水龙头置于滤水管以上时, 表示抽水有误, 为非正常现象, 应找出原因, 重做试验; V 表示在某降深值以下, S 增大, 而 Q 增加甚微, 宜调整抽水流量与减小降深。

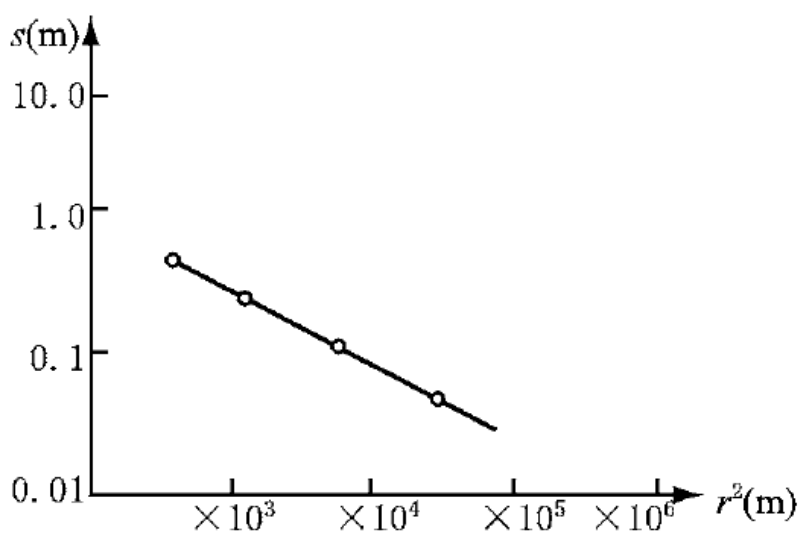


图 10.5.2-3 $\lg s - \lg r^2$ 关系曲线图

当观测孔较多时可将某一时间不同观测孔(至抽水孔距距离不同)的水位降深值和观测孔至抽水孔的距离绘于双对数座标纸上与标准曲线配合, 计算水文地质参数。

10.5.3 抽水试验期间孔隙水压力现场量测后,应及时对原始资料进行核查、分析,并根据率定曲线换算孔隙水压力值,绘制孔隙水压力的动态变化曲线。当同层或相邻含水层同步观测地下水位时,应同时绘制其地下水动态变化曲线。

【条文说明 10.5.3】自然条件下饱和弱透水层中的孔隙水压力主要取决于其相邻含水层中地下水的水头,同步观相邻含水层的地下水水位可了解其相互关系,为孔隙水压力动态变化的分析研究提供基础资料。

10.5.4 抽水试验应分析水位下降变化与土体沉降的变化规律曲线。

10.5.5 观测由含水层水位下降引起的上部超孔隙水压力时,应同时记录对应的各土层沉降动态变化情况,并应绘制孔隙水压力与土体固结的关系曲线。

【条文说明 10.5.5】以孔隙水压力为纵坐标,固结沉降为横坐标绘制孔隙水压力与固结沉降的关系曲线,根据曲线可以了解和预测抽水期间土体中孔隙水压力的变化情况,以便控制抽水降深。

10.5.6 通过对现场水位、孔压、地表沉降以及土层沉降的监测和数据分析,绘制各阶段的含水层降深曲线、孔压消散曲线、地面沉降等值线和各点的时程曲线,初步探讨抽汲含水层诱发的土层沉降和地表沉降的规律。

10.5.7 根据数值法模拟计算得到的地下水渗流场变化以及相邻地面沉降监测结果,建立沉降与水位降深变化关系,预测抽水试验阶段和降水设计阶段引起的地面的沉降量。

10.6 成果应用

10.6.1 抽水试验成果可从下列方面分析各含水层的水位下降和恢复规律:

1 通过群井抽水试验,根据实测数据反演相关水文地质参数,将水文地质计算的数值模型精度进一步提升后,可以根据计算制定出在不同工况、基坑开挖范围和深度条件下,需要开启抽水井的数量和组合的最优方案。

2 通过抽水试验,检验隔水帷幕的止水效果与其渗漏情况(包括确认渗漏位置,大小等),在可能渗漏的范围,通过其他检测方法较精确的判断渗漏的具体位置与大小,并建议补救方案。

3 通过群井抽水试验的水位恢复资料确定双电源切换的时间极限,承压水的降水必须连续进行,一旦发生停电,必须启动备用电源以最短的时间切换电源,这个时间就是以停泵后水位恢复速度来确定;

【条文说明 10.6.1】含水层的水位下降和恢复规律

1 根据场区的岩土工程地质和水文地质相关参数和条件，建立场区地下水渗流三维计算数值模型，结合群井抽水试验结果，对抽水井的实测资料进行整理，在三维数值计算模型中设置抽水井，将抽水试验井出水量代入三维数值模型中，进行群井抽水试验的数值模拟计算。通过对比计算结果和实测的观测井水位变化，不断调整并优化相关水文地质参数，得到合理试验场区的水文地质反演分析参数如图（10.6.1）所示。

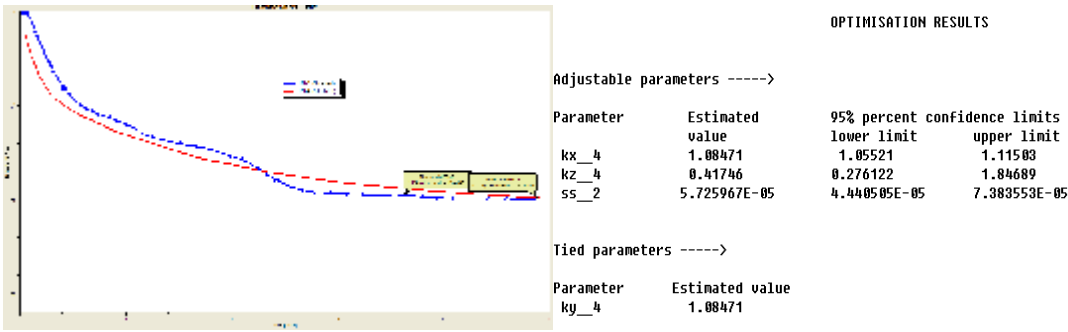
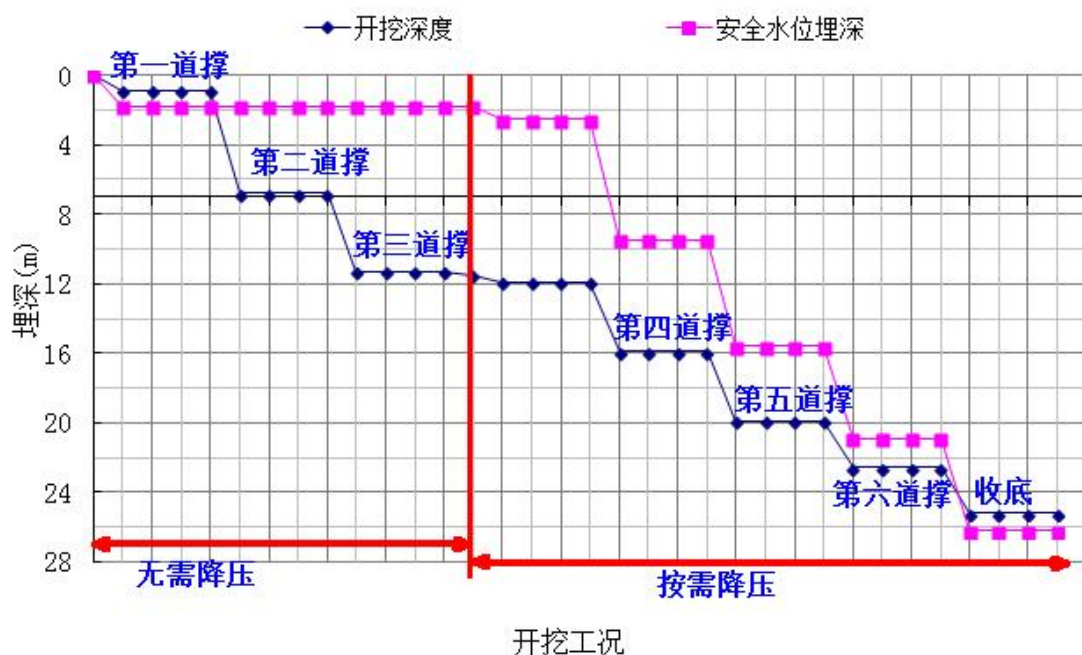


图 10.6.1-1 某试验井实测降深曲线与模拟降深曲线拟合对比图和反演参数

利用群井抽水试验中观测井实测水位拟合，反演出合理的计算模型水力学参数，再采用反演出的参数进行工程基坑降水施工时候在不同工况下根据基坑开挖的范围和深度，编制出需要开启的抽水井的数量和组合的最优方案，例如表 10.6.1 某车站降水运行工况和开挖工况图。

表 10.6.1 某车站降水运行工况

开挖分层	开挖深度(m)	需降承压水(m)	控制水位埋深(m)
临界开挖	11.47	0	1.8
第三道撑底 0.5m (标准段)	11.90	0.75	2.55
第四道撑底 0.5m (标准段)	15.90	7.68	10.48
第五道撑底 0.5m (标准段)	110.90	13.79	15.59
第六道撑底 0.5m (标准段)	22.60	110.13	20.93
底板（标准段）	25.22	降低承压水位至基坑底下 1m	



注：开挖深度按各支撑底下 0.5m 取值

2 通过抽水试验阶段坑内外观测井降深与时间观测曲线图 10.6.1-2 可看出，坑内基坑外各观测井水位约在 3 天左右已逐渐趋于稳定，水位变化呈现一定的规律性，坑内水位降幅较大，普遍降深 20m~24m，最大水位降深超过 26m。

坑外水位观测井在同一时间不同位置观测井水位出现较大差异，坑外的观测井水位降深普遍 1.0m~2.0m 之间，个别位置水位降深较大，如 G1 超过 3m，已超过试验方案中确定的坑外承压水水位累计下降 2000mm 的判别标准，可以总体认为隔水帷幕对深度在 34m~42m 范围内的深层承压水隔水效果比较明显，但在 G1 位置承压水层发现明显的渗漏点，应在后期基坑开挖时做好应急准备，加强日常巡视，发现渗水时及时进行有效的堵漏。

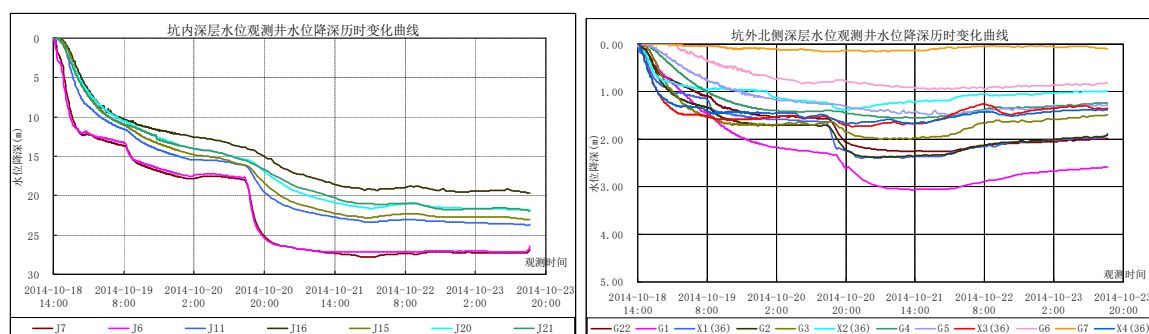


图 10.6.1-2 坑内外观测井水位降深与时间关系曲线图

3 整个降水过程中应备有双电源，以确保降水连续进行，如电源供电无法保证会造成基坑坑底突水，后果不堪设想。后期通过群井抽水试验的水位恢复数据，并结合基坑抗突涌验算的安全系数来确定双电源切换的时间极限。

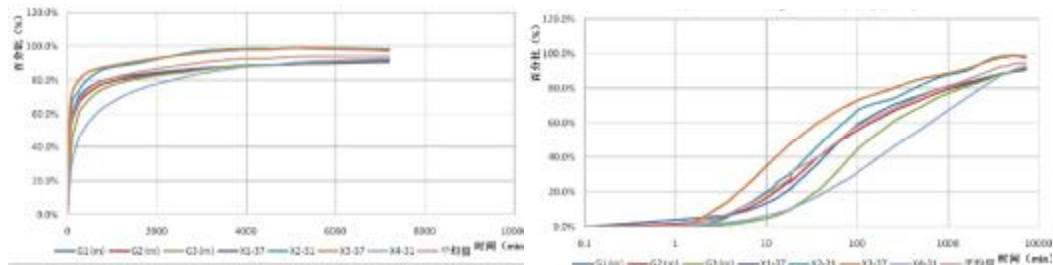


图 10.6.1-3 某项目群井抽水试验的水位恢复曲线（s-lgt）

如图 10.6.1-3 某项目群井抽水试验的水位恢复曲线上看，群井抽水在停止抽水后，短时期水位急剧上升，水位恢复最快约 5 分钟可达 5%，接近 10 分钟，水位恢复近 10%。所以，后期应根据基坑抗承压水突涌安全系数的取值，若安全系数取 1.10 时，应当预备的备用电源（发电机），切换时间可以控制在 10 分钟以内，否则会影响基坑开挖安全。

10.6.2 抽水试验成果可从下列方面分析与评价潜水与承压含水层、承压含水层之间的水力联系关系：

- 1 通过地下水位受动态变化的或受潮汐影响明显的地区对于地下水位受动态变化的或受潮汐影响明显的地区，应有一天以上的持续观测，评判受动态变化的影响程度。
- 2 通过抽水试验，解决了岩土工程勘察阶段只能定性分析承压含水层的水力联系，无法定量判断承压含水层的水力联系程度。

【条文说明 10.6.2】分析与评价潜水与承压含水层、承压含水层之间的水力联系

1 对于地下水位受动态变化的或受潮汐影响明显的地区，如图 10.6.2-1 为上海临近黄浦江的地下水的日动态变化，含水层在 24 小时内出现二次高峰和低谷，以第I、II、III承压含水层中最为明显，其变化与潮水位的变化一致且灵敏。近江边的井变化幅度大，在冲刷岸的井，水头变化幅度可达 1m 多，在堆积岸和越远离江边的井水头变化幅度越小，甚至很不明显。由于黄浦江与下部承压含水层并没有发现直接的水力联系，（江底未切穿承压含水层的顶板）造成的原因可能是江内潮水位的涨落，引起河床内水体积的变化，则作用在江底的荷载相应变化，这种荷载的变化，使下卧承压含水层受到压缩（涨潮时，承压水头上升）和膨胀（落潮时，承压水头下降），引起承压水头随潮位的变化

而涨落，由于承压含水层的导压系数较大，压力传递快，因此变化的滞后现象不明显，我们称之为似潮汐变化。

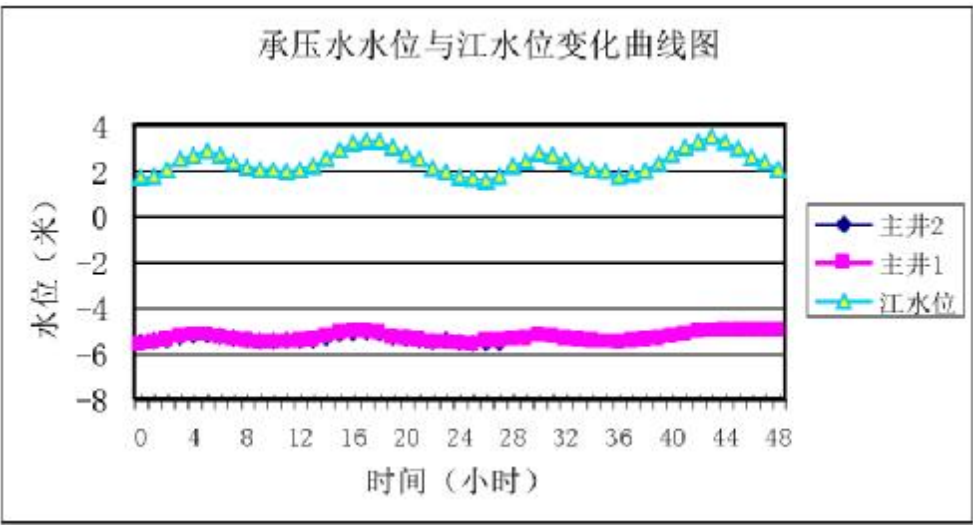


图 10.6.2-1 承压水水位与黄浦江水位变化曲线图

2 岩土工程勘察阶段，受取土条件的限制，只能定性分析各承压含水层的水力联系，无法定量判断各承压含水层的水力联系程度。如某项目，据岩土工程勘察报告描述，拟建场地内微承压水分布于第⑤ 2-1、⑤ 2-3、⑤ 2-4 层，承压水分布于第⑦ 2 层。见图 10.6.2-2 静探曲线剖面，场地第⑤ 2-2 层夹粉性土较多，透水性较大，故拟建场地第⑤ 2-1 层、第⑤ 2-2 层、第⑤ 2-3 层、第⑤ 2-4 层及第⑦ 2 层地下水宜按互相连通考虑。

后期通过现场抽水试验显示，如图 10.6.2-3 第⑤ 2-1 层和第⑤ 2-3 层观测井水位变化历时曲线对比图，第⑤ 2-1 层的抽水时，同层观测井水位下降明显，而不同层的第⑤ 2-3 层水位下降不明显；当距离抽水井最近的 G5-21-1 的水位最大降深为 10.57m，而同距离的第⑤ 2-3 层观测井 G5-23-1 的水位最大降深仅为 0.34m；当距离抽水井最远的 G5-21-2 的水位降深为 4.73m，而同位置的 G5-23-2 的水位降深仅为 0.11m。离抽水井距离相同的两个不同层位的观测井水位降深差距较大，说明第⑤ 2-1 层与第⑤ 2-3 层水力联系不密切，第⑤ 2-2 层灰色粉质粘土夹粘质粉土层的透水效果较差，第⑤ 2-1 层和第⑤ 2-2 层地下水不能按照相互连通考虑。

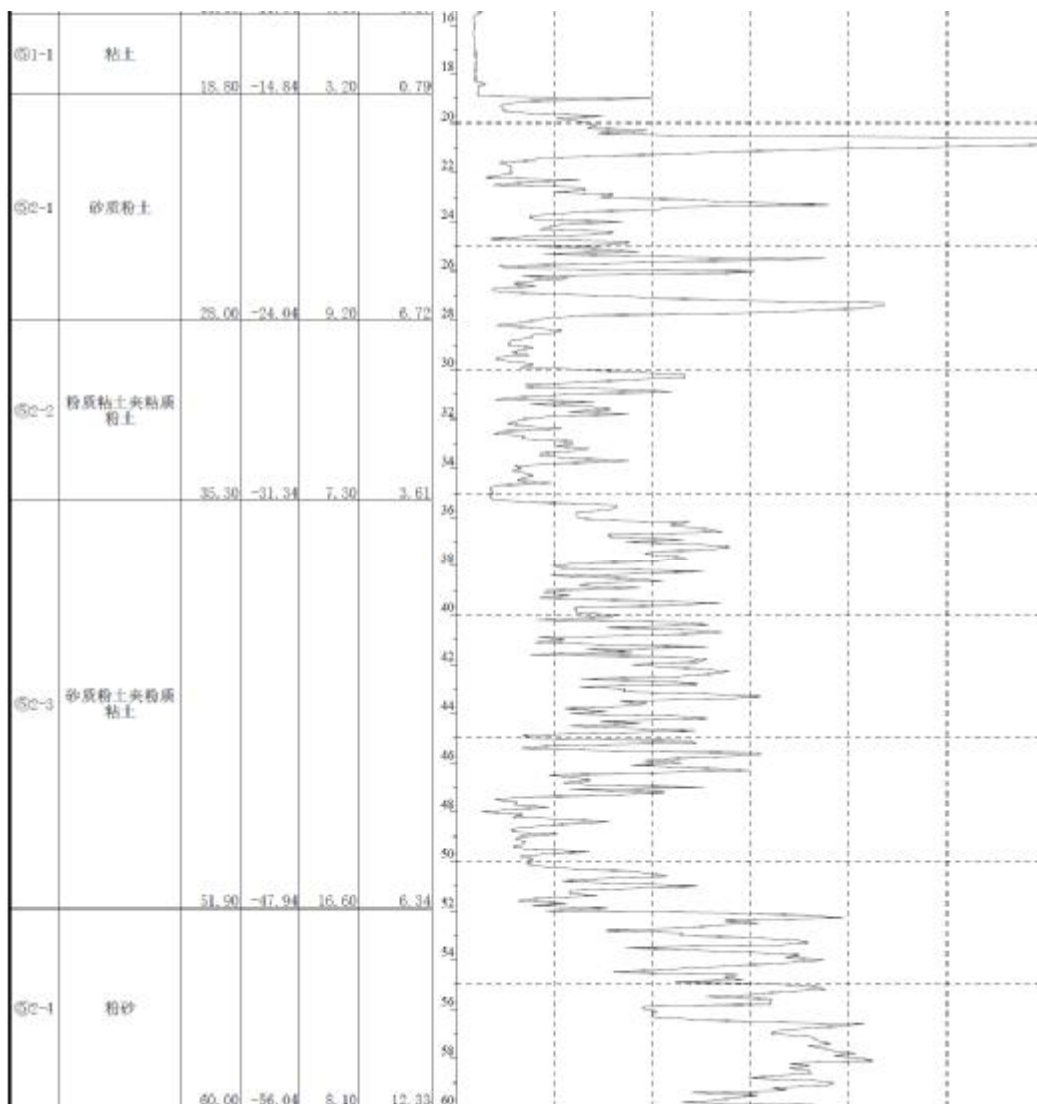


图 10.6.2-2 静探曲线剖面

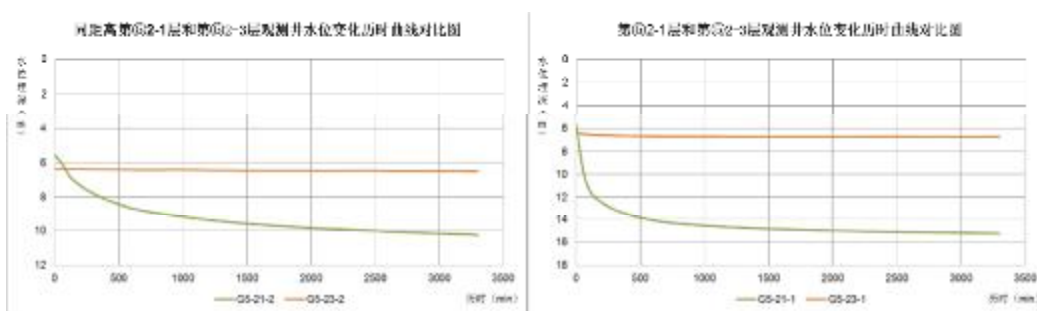


图 10.6.2-3 第⑤2-1层和第⑤2-3层观测井水位变化历时曲线对比图

10.6.3 抽水试验成果可从下列方面应用于基坑围护工程:

1 通过基坑隔水帷幕与承压含水层的相对关系, 基坑工程减压降水渗流类型可分为落底式帷幕基坑减压降水类型、落顶式帷幕基坑减压降水类型和悬挂式帷幕基坑减压降水类型。应结合基坑减压降水渗流类型, 根据地下水流态规律布设减压降水深井。

2 通过抽水试验期间水位与土体变化的时空分布特征后，提出满足坑外承压水位降幅控制值时的隔水帷幕深度建议。

3 通过抽水试验期间的抽灌一体化试验，评估需要采取工程回灌时，提出合理的抽灌方案建议。

【条文说明 10.6.3】根据环境条件和围护方案，评估地下水控制对周边环境的影响

1 基坑的开挖和围护，在天然含水层及其自然存在的边界以外，在含水层内部形成了一个人为的边界。无隔水帷幕的基坑开挖排水时，基坑四边形成了一个排泄边界，有隔水帷幕的基坑开挖时在一定深度内形成了一个隔水边界，在降水管井抽水条件下，这些管井都在含水层中形成了一个个点状的排泄边界。深基坑在群井抽水的情况下，隔水帷幕深入含水层的什么部位，减压降水深井的平面布置和过滤器放在什么深度范围内，形成的地下水渗流场形态是不同的，由于渗流场的形态变化，减压降水时，在基坑内承压水头降到安全深度时，不同的设计就会使坑外承压水头的下降不同，同时对坑外环境影响的程度也不同。

落底式帷幕基坑减压降水即隔水帷幕进入承压含水层的隔水底板，完全隔断承压含水层，一般多为周边环境条件复杂，保护要求高的基坑；落顶式帷幕基坑减压降水即隔水帷幕完成不进入承压含水层，一般多为环境保护要求低的基坑；悬挂式帷幕基坑减压降水隔水帷幕插入承压含水层但未隔断承压含水层，一般多为周边环境条件复杂，保护要求高的基坑；

2 涉及减压降水时，基坑隔水帷幕的深度应满足保障基坑坑外承压水位降幅小于设计控制值的要求。已实施抽水试验的，可参考抽水试验建议的隔水帷幕深度值考虑，同时需要参考周边环境的变形允许值。

隔水帷幕深度与坑内减压降水管井的高差（ Δ ）宜满足以下原则：

- (1) 当坑内承压水水位降深设计值大于 10.0m， $\Delta \geq 5.0\text{m}$ ；
- (2) 当坑内承压水水位降深设计值介于 5.0m~10.0m 之间， $3.0\text{m} \leq \Delta < 5.0\text{m}$ ；
- (3) 当坑内承压水水位降深设计值小于 5.0m， $1.0\text{m} \leq \Delta < 3.0\text{m}$ ；

3 通过抽水试验期间的抽灌一体化试验，评估需要采取工程回灌时，提出合理的抽灌方案建议；

当坑外承压水位降幅大于控制值或环境允许值时宜在坑外布置回灌管井，回灌水源应优先采用经处理后的同源地下水或自来水，回灌目的层应与减压降水目的层相同，回灌管井的深度不宜超过隔水帷幕深度。

如某项目，根据岩土工程勘察报告由于基坑开挖范围内潜水含水层和承压水含水层互相连通，基坑的隔水帷幕部分未能完全插入隔水层，基坑内外水层连通，采用坑内降水更为优先，减压井的过滤器不超过隔水帷幕的深度，即“悬挂式止水帷幕降水”，群井抽水后含水层的地下水通过隔水帷幕底部绕流进入井内，由于地下水流程增加，水力坡度变小，基坑范围内含水层顶板处地下水位达到设计降深时，抽水量要比坑外降水小。坑外的承压水头下降小，对抗外因降水引起的环境影响小，坑内降水的优点得到充分发挥。

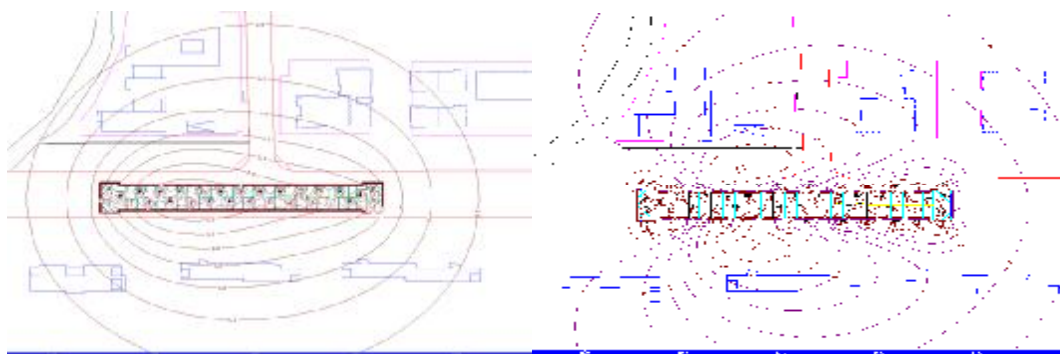


图 10.6.3-1 降水运行后预测基坑水位降深等值线图对比图

后期通过数值模型分析，图 10.6.3-1，单独采用坑内减压降水的方式后，在坑内水位降至设计降深后，坑外最大降深约为 3.5m；在坑内减压降水同步坑外采用回灌的抽灌一体化降水方式后，在坑内水位降至设计降深后，坑外的最大降深从 3.5m 减少到 1.2m，周边天然基础的建筑物附近的水位降深减少值至 1m 左右满足环境允许值的要求。

11 回灌试验

11.1 一般规定

11.1.1 回灌试验应在抽水试验基础上进行，可采用单井回灌试验和群井回灌试验。

11.1.2 符合下列条件之一时，应进行地下水回灌试验：

- 1 需要采取地下水回灌作为保护工程周边环境的措施；
- 2 需要采取地下水回灌保护拟建场地及周边地区的地下水资源，确保水资源平衡，保护水资源和景观；
- 3 需要采取地下水回灌措施处理浅层污染地下水或防止海水入侵等导致环境灾害和水质恶化。
- 4 需要采取地下水回灌措施确保地下水水温没有大的变化，防止水温环境恶化。

【条文说明 11.1.2】回灌试验的目的是综合考虑试验段场地工程性质、基坑特征、围护设计、水文地质条件和环境保护标准等，探明承压水含水层的空间分布规律、相关水文地质参数及各层之间的水力联系性质，并预测地下水水位下降产生的附加沉降规律及其对周边环境的不良影响，进行合理、可靠的基坑降水环境风险评估，并提出有效的预防与控制措施，同时实现基坑安全与环境保护的双控制。

11.1.3 符合下列条件之一时，宜进行群井回灌试验：

- 1 验证勘察区内地下水回灌可行性；
- 2 验证勘察区局部地段阶段性成果，调整后续回灌试验方案；
- 3 需查明地下水回灌对周边环境的影响或控制环境变形的效率；
- 4 需要对地下水回灌作地下水资源均衡评价分析计算时；
- 5 基坑支护结构的安全等级为一级时。

11.1.4 地下水回灌试验方案编制之前除应满足抽水试验井布置要求外，尚应收集下列资料：

- 1 地下水已有开采情况，开采层次、用途和开采动态，统计地下水年、季、月的开采量。
- 2 地下水人工补给的水源及水质。

11.1.5 群井回灌试验的回灌孔数量与深度、总回灌量及延续时间宜根据勘察目的与项目等级、工程性质、场地水文地质条件及环境条件确定。试验过程中应对勘察区内及勘察区周边水文地质点、地表水体水位、水温和流量等进行同步观测。

11.1.6 回灌水源可采用自来水或经水质处理后的同层地下水，也可采用经水质处理后水质不劣于回灌目标含水层的不同层地下水。当回灌目标含水层与饮用地下水联系较密切时，回灌水水源的水质应达到饮用水的标准，且不会造成回灌井堵塞，不腐蚀回灌系统的机械和设备。

11.1.7 地下水回灌应采取有效措施，防止恶化回灌目的层的地下水水质。

11.2 井点和测点布置

11.2.1 回灌孔的布置，应根据勘察目的与项目等级、工程性质、工程地质条件、水文地质条件、环境保护要求等因素确定；

11.2.2 观测孔布置以回灌井为原点布置 1 条观测线，宜垂直地下水流向布置；沿观测线布置的观测孔不宜少于 2 个；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，最近观测孔与回灌孔的间距及外围观测孔之间的间距均不宜大于 10.0m。

11.2.3 采用非完整井计算参数时，第 2 个观测井到回灌井的距离等于第 1 个观测井到回灌井距离的 3 倍。

11.2.4 回灌井位应布置在基坑外侧，优先布设在对地下水下降沉降敏感区。

11.2.5 回灌井位应避开基坑外主要地基加固区域。

11.2.6 回灌布置宜考虑抽灌一体化。回灌井宜布置在止水帷幕与保护对象之间，尽量靠近保护对象一侧。

11.2.7 坑外回灌井根据基坑形状采用线状或梅花形布置。

【条文说明 11.2.7】坑外回灌井沿基坑外缘根据基坑形状采用一排、二排或三排线状平行交叉或垂直布置，当基坑附近有既有建（构）筑物需要保护时，根据回灌需要，回灌井可适当加密加深，且应在既有建（构）筑物与基坑之间布置回灌井。

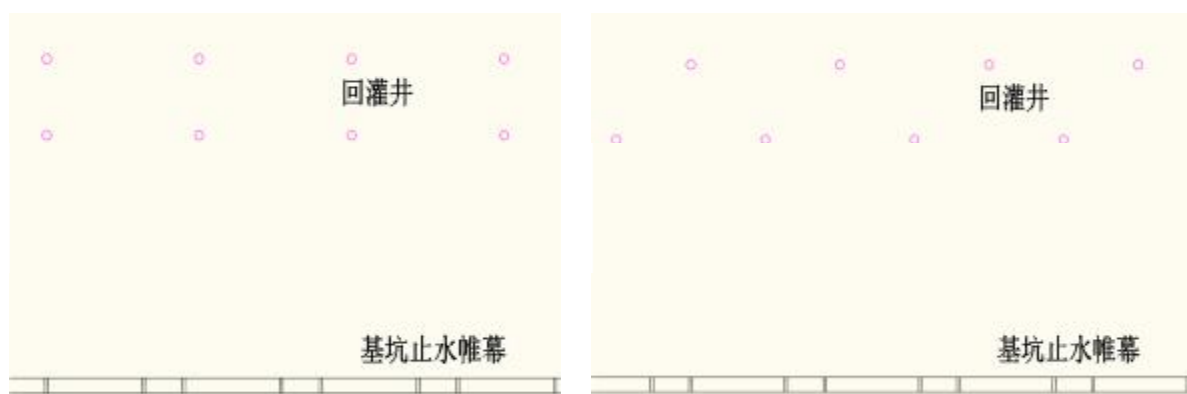


图 11.2.7 坑外回灌井线状（左）或梅花形（右）布置图

11.2.8 井间距按面积均匀布置，可根据含水层和环境变化调整井距。

11.2.9 回灌井邻近建（构）筑物时，回灌井宜成对布置，每一对的间距不宜大于 10m。回灌运行时，成对布置的回灌井可利用其中一个井作为观测井和回扬井。

11.2.10 回灌井应尽量远离抗突涌稳定不满足要求的区域。

11.2.11 布设回灌井时，坑内外应同时布设观测井，对降压安全水位和回灌效果水位宜进行动态监测。

【条文说明】坑外观测井沿基坑外缘分层布置，潜水观测井间距宜在 20m~60m，承压水观测井间距宜不小于 30m，当基坑附近有既有建（构）筑物时，根据观测需要，观测井可适当加密，且应在既有建（构）筑物与基坑之间布置观测井。坑内布置承压水观测井，不宜用于抽水减压，兼做备用减压井时应在有减压必要的情况下方可开启。

回灌井井深可按下列公式确定：

$$L_p = H_{w1} + L_2 + L_1 + 2$$

式中： L_p ——回灌井深度，m； H_{w1} ——承压含水层顶板埋深的最小值，m； L_2 ——降压井滤水管工作长度（参考承压含水层厚度和止水帷幕深度），m。 L_1 ——沉淀管长度，m。

11.3 埋设方法

11.3.1 回灌井成孔施工除应符合抽水试验成井规定外，钻进过程中泥浆密度控制在 $1.08\text{g/cm}^3 \sim 1.20\text{g/cm}^3$ ，当提升钻具或停工时，孔内必须压满泥浆，以防止孔壁坍塌。

【条文说明 11.3.1】回灌井成孔施工

根据地层条件，成孔施工可选用冲击钻、螺旋钻、正循环回转钻或反循环钻进。

泥浆指标：黏度：当位于粘性土层时宜为 15s~16s，位于粉性土或粉细砂土层时宜为 17s~18s；密度：钻进成孔阶段正循环时不宜大于 1.20g/cm^3 ；终孔后清孔阶段宜为 $1.08\text{g/cm}^3\sim 1.10\text{g/cm}^3$ ；当井管设置后且滤料围填前宜为 $1.05\text{g/cm}^3\sim 1.08\text{g/cm}^3$ 。

11.3.2 回灌井成井施工除应符合抽水试验成井施工要求外，尚应确保滤料规格、止水密闭和洗井时间满足回灌井技术要求，井外止水密闭宜采用优质黏土球，质量应符合附录 J.1 要求。

【条文说明 11.3.2】1 填滤料阶段，检查回灌井滤料的规格和数量，不符合规格的滤料不得超过设计数量的 15%。冲填滤料前孔内泥浆密度不应大于 1.08g/cm^3 。应按井的构造设计要求填入滤料，并随填随测滤料顶面标高，至预定位置为止。滤料围填的料柱面标高不应低于设计标高，且滤管顶端以上料柱高度应不小于 2.0m；围填量应不小于料柱计算容积的 95%。填滤料可采用静水填滤料法、动水填滤料法和抽水填滤料法，填料过程中应保证滤料均匀填充。

滤料数量按下式计算：

$$V=0.785\cdot(D^2-d^2)\cdot L\cdot\alpha$$

式中：V—滤料数量 (m^3)；D—填滤料段井径 (m)；d—过滤器外径(m)；L—填滤料段的长度(m)； α —超径系数，宜为 1.2~1.5。

2 止水阶段，回灌井采用两级止水方法，即黏土球止水和上段注浆止水。井壁外注浆止水施工宜在回灌井成井施工结束 1 星期后进行。黏土球止水层应选在上下相邻含水层间的粘土隔水层处，止水段长度不得小于 5.0m。采用优质粘土搓成直径 15~30mm 的风干黏土球止水。注浆止水宜采用“品”字形注浆，在黏土球充填形成的止水封闭层上部回填石硝，在回灌井管周围埋设 3 个注浆管均匀注浆至地表，形成注浆封填段。

注浆止水宜采用“品”字形注浆，形成注浆封填段。在井壁管外侧采取止水措施，防止注浆时浆液沿井壁管注入下部滤料层内。

3 洗井阶段，回灌井采用空压机与活塞交替洗井，先进行空压机抽水初步清淤，待井能出水后再进行活塞洗井；当活塞拉出的水清澈后，换用空压机抽水洗井，清除井管底部沉淤，做到水清砂净。采用活塞洗井时，活塞直径与井管内径之差不宜大于 5mm；活塞杆底部加活门；洗井时，活塞必须从滤水管下部向上拉，将水呈井喷状拉出

井口。对出水量很少的井，可将活塞在过滤器部位上下窜动，并同时向井内注水。当井距离建（构）筑物距离小于 10m 且建（构）筑物对沉降要求严格时，洗井过程中要进行建（构）筑物沉降观测。

回灌井成井施工回灌井采用空压机与活塞交替洗井，采用活塞洗井时，回灌井施工时，活塞全程提拉次数应不少于 60 次，持续时间应不少于 6h，并至井内泛水变清；空压机洗井应清除沉淀管中的沉渣。

11.3.3 当采用抽取的地下水为回灌水源，回灌前应进行水质分析及水质处理。

【条文说明 11.3.3】地下水回灌装置能够确保基坑周边不会因为降水引起地面沉降，或确保地下水资源平衡不流失，同时实现优化回灌水的水质，回灌水回灌后不会引起区域地下水的水位下降、水质变坏和污染。

当采用抽取的地下水进行回灌，应通过水质处理降低或消除回灌水源中富含的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 离子，并清除固态悬浮物。简易水质处理可在现场采用曝气池增氧处理方法降低 Fe^{2+} 含量，采用复合锰砂、SS 滤料、PP 棉等滤料层和石英砂滤层过滤池降低 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量及消除固态悬浮物。

11.4 回灌试验测试技术要求

11.4.1 回灌试验应符合下列要求：

- 1 当需对多层含水层作分层回灌时，应进行分层回灌试验。
- 2 回灌试验前及回灌抽水试验中，应同步测量回灌孔、观测孔、周边水文地质点的自然水位、动水位；当自然水位的日动态变化较大，应掌握其变化规律对回灌试验的影响。
- 3 回灌量急剧减少时，应分析原因，及时回扬。

【条文说明 11.4.1】回灌试验在抽水试验基础上，可采用单井回灌试验和群井回灌试验。

1 回灌试验测试技术要求：

回灌试验停止后，应测量回灌孔与观测孔的恢复水位。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。

2 群井回灌试验

加压回灌要求计算最大压力，以井壁外不冒水为前提。地下水水位较低、渗透性好的含水层采用自然重力回灌，厚度较大、渗透性较好的含水层采用真空回灌，地下水水位高、渗透性差的含水层采用压力回灌。

11.4.2 回扬应根据回灌井布置情况，间隔实施，避免一定范围内集中回扬。对于邻近建（构）筑物成对布置的回灌井，应在其中一个井回扬时，另一个井实施回灌，避免保护区地下水水位下降。

11.4.3 回灌试验宜进行至水位趋于稳定，在回灌稳定延续期内，确保回灌孔的回灌量和动水位的时间关系曲线在一定范围，且无持续上升或下降的趋势。回灌量和动水位变化在连续 2h 内的波动值小于 5%，最远观测孔内的恢复水位在连续 2h 内的波动值不大于 10mm/h。

11.4.4 地下水回灌工艺可采用自然重力回灌、真空回灌和加压回灌。

11.4.5 回灌井施工完成后宜先进行稳定水位观测。

11.4.6 回灌井施工完成后进行抽水试验，检验回灌井的成井质量和出水效果。

11.4.7 回灌井回灌试验期间准确记录试回灌时每口井的回灌量、压力及观测井水位。

11.4.8 回灌试验应符合下列要求：

1 自开始回灌时刻起，水位观测时间间隔为：1min、2min、3min、4min、6min、8min、10min、15min、20min、25min、30min、40min、50min、60min，以后每隔 30min 观测一次，至 6h 后每 1h 观测一次，至 20h 后每 2h 观测一次，直至回灌停止。

2 回灌期间的水量观测时间间隔为 30min，采用流量表读数，精度应读到 0.1m^3 。若发现水量过小而水位回升缓慢，可改用加压回灌。分三级及三级以上加压回灌。每次压力下回灌超过 6 小时以上，直到流量或水位稳定为止。

3 回灌井的回灌量应保持常量，若前后两次观测的流量变化超过 $\pm 5\%$ 时，应及时回扬调整。

4 停止抽水后，恢复水位观测时间间隔与抽水试验的水位观测时间间隔相同，至水位趋于稳定止。

11.4.9 回灌井封井时，滤管部位宜用压密注浆封填，滤管以上部位可用素混凝土封填，封孔方法可参考附录 J.2。

11.5 成果资料整理

11.5.1 现场数据收集应符合下列要求:

- 1 现场流量、水位和沉降等数据仪器要求年检和率定,有权威机构检验报告。
- 2 采用自动仪器采集数据,要求人工同时和定时监测复核验收。
- 3 现场回灌试验资料的编录、检查及验收,应符合相关规范。

11.5.2 承压含水层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 $Q-t$ 、 $Q-s$ 曲线;
- 2 根据单孔回灌试验进程,绘制 $\lg s-\lg t$ 、 $s-\lg t$ 曲线;
- 3 根据回灌试验进程,绘制回灌量、水位降深与回灌压力曲线 $Q-p$ 、 $Q-s$ 曲线;
- 3 当观测孔数量不少于 3 个时,应绘制水位变化趋于稳定的 $\lg s-\lg r^2$ 曲线;
- 4 根据群孔回灌试验进程,绘制总回灌量的 $Q-t$ 历时曲线、各观测孔的 $Q-s$ 曲线。

11.5.3 回灌试验资料室内整理分析应符合下列要求:

- 1 编制回灌试验成果图表;
- 2 根据回灌试验成果,确定单井坐标、影响半径、回灌量、地下水位抬升值等参数;
- 3 对回灌试验成果的应用方面作出评价。

11.5.4 利用回灌试验资料,可按下列方法确定回灌影响半径 R :

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (11.5.4-1)$$

1 潜水

$$\lg R = \frac{s_1 (2H - s_1) \lg r_2 - s_2 (2H - s_2) \lg r_1}{(s_1 - s_2)(2H - s_1 - s_2)} \quad (11.5.4-2)$$

2 承压水

式中: R —影响半径 (m);

s_1 —观测孔 1 的水位降深 (m);

s_2 —观测孔 2 的水位降深 (m);

r_1 —观测孔 1 至回灌井的距离 (m);

r_2 —观测孔 2 至回灌井的距离 (m);

h_1 —回灌稳定后观测孔 1 处潜水含水层的厚度 (m);

h_2 —回灌稳定后观测孔 2 处潜水含水层的厚度 (m)；

H —潜水含水层厚度 (m)；

M —承压含水层厚度 (m)。

11.5.5 回灌试验其他公式参照第 10 章抽水试验中计算公式。

【条文说明 11.5.9】当有地层变形观测资料时，应绘制对应观测孔的水位与地层变形关系曲线 $sh-\varepsilon$ 。

封井通过井内渗水试验检验封井质量。

回灌试验资料室内整理分析对回灌试验成果的可靠性作出评价。

11.6 成果应用

11.6.1 回灌试验成果可应用于下列方面：

- 1 根据回灌成果求出相应的水文地质参数；（参见附录 I 抽水试验渗透系数计算公式）
- 2 确定回灌参数，提出回灌井结构；
- 3 抽灌一体化试验，优化基坑降水方案；
- 4 抽灌一体化方案计算，强化环境保护；
- 5 回灌测试试验，优化回灌方案，应急演练；
- 6 对地下水单元作分析，确保回灌对地下水的生态保护。

12 野外弥散试验

12.1 一般规定

12.1.1 本章适用于天然流场下的弥散试验和人工流场下的径向收敛流弥散试验。

【条文说明 12.1.1】根据野外弥散试验地下水流场的形成条件，可将野外弥散试验分为天然流场下的野外弥散试验和人工流场下的野外弥散试验。

天然流场下的野外弥散试验主要依赖于示踪剂注入井与观测井之间的天然水力坡度进行。当在天然状态下，地下水具有一定的水力坡度，一般情况下，在地下水径流的上游方向设置示踪剂注入井，根据需要，在下游一定距离一定方向上设置示踪剂观测井。人工径向流场可分为径向发散流场和径向收敛流场（见图 12.1.1），径向发散流场是通过钻孔向含水层中注水形成的，而收敛流场则是在抽水情况下形成的。与发散流场相比，收敛流场下的弥散试验具有以下几个优点：（1）径向收敛流弥散试验与抽水试验同时进行，可以同时求解水文地质参数和弥散参数；（2）流速稳定且能人为控制，地下水流速大，试验所需时间少，且示踪剂溶质信息检测成功率高；（3）投放到地下水中的示踪剂，通过抽水试验重新被抽离含水层，避免了含水层的人为污染。由于上述几个优点，近年来，径向收敛流野外弥散试验越来越多地被用于野外弥散参数的确定，故本章仅介绍天然流场下的弥散试验和人工流场下的径向收敛流弥散试验。

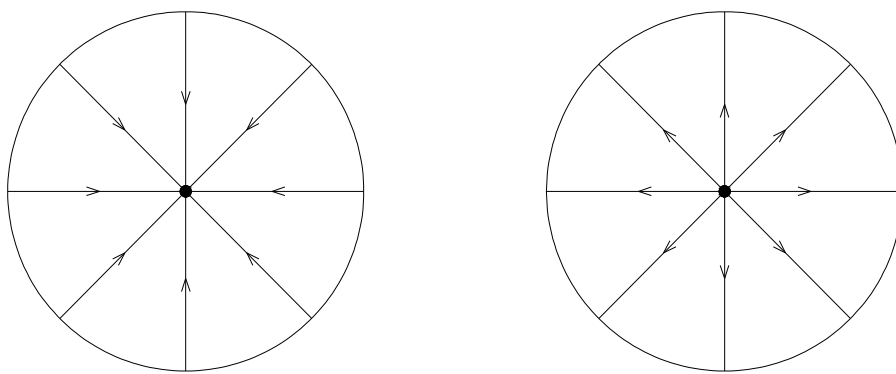


图 12.1.1 径向收敛流场（左）和径向发散流场（右）

12.1.2 野外弥散试验前应搜集场地水文地质资料和现场踏勘，编制试验方案，准备好测试仪器、设备、盛水器、示踪剂及其投放器、取样瓶和采样瓶等。

12.1.3 对于水力坡度小于 0.5 或土层渗透系数小于 10m/d 的场地不宜采用天然流场弥散试验。

【条文说明 12.1.3】尽管天然流场弥散试验能获得较准确的含水层弥散参数，但在地下水平缓、水力坡度较小、水流方向未知的情况下，试验将很难进行。故野外弥散试验前应测定地下水的流向和流速，当场地具有明显的地下水流向时（水力坡度和土层渗透系数分别要达到 0.5 和 10m/d），才可进行天然流场下的野外弥散试验。也就是说至少应该是粗砂，甚至砂卵石层才会成功，细粒物质含水层条件下试验时间长，成功率低。

12.1.4 径向收敛流弥散试验适用于通过人工抽水形成稳定地下水流场的情况。

【12.1.4】由于径向收敛流弥散试验需结合抽水试验，故可同时求解水文地质参数和弥散参数。

12.1.5 天然流场弥散试验可根据直线图解法计算弥散参数，径向收敛流弥散试验可采用配线法计算含水层的弥散度。

12.1.6 野外弥散试验成果可应用于污染物在土壤及地下水中迁移转化的研究。

12.2 测试孔和测点布置

12.2.1 试验前应获得试验场地地层岩性、地下水特征，地下水的流速、流向无法确定时，应进行地下水流速、流向测定试验。

【条文说明 12.2.1】在进行弥散参数测定之前，应通过钻探或原位测试等手段，查明含水层的层数和顶底板埋深，含水层的岩性和结构，含水层的延伸方向及其稳定性，为预测弥散通道提供依据。地下水特征主要是弄清地下水的承压性能及其补给、径流、排泄条件和主要化学成份。地下水的天然流向可用于比选野外弥散试验的方法。通过抽水等手段，了解主要含水层的富水性、渗透系数、流速、流向等水文地质参数，用以选择试验范围、示踪剂注入浓度、注入形式和采样时间等。

12.2.2 天然流场弥散试验注入井和观测井应沿地下水的天然流向布置，观测井应布置 1~3 层，各试验井井结构应相同，且均为完整井，各井之间的间距应根据水文地质条件确定。

【条文说明 12.2.2】为保证注入井的示踪晕并提高试验进度，观测井一般布置 1~3 层，每层不少于 3 口井，注入井与侧面观测井连线与主流线间构成的夹角应小于 $7^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 。由于试验在天然水力坡度下进行，示踪剂注入井和观测井之间的距离不宜过大，以避免试验时间过长，具体应根据水文地质条件确定，建议砂土井间距宜为 3m~6m；碎石土井间距宜为 5m~10m。

12.2.3 径向收敛流弥散试验不应少于 2 口试验井，其中注入井和抽水井各 1 口，宜布置不少于 1 口的观测井，各试验井井结构应相同，且均为完整井。

【条文说明 12.2.3】径向收敛流弥散试验至少应布置 1 口注入井和 1 口抽提井，可通过观测抽提井中示踪剂浓度计算弥散参数。因野外弥散试验周期长、成本较高，为防止抽提井中示踪剂浓度观测数据异常导致试验失败，故本条规定还建议布置不少于 1 口观测井，可同时通过观测井中示踪剂浓度观测数据计算弥散参数，进一步确保试验成功。

12.2.4 径向收敛流弥散试验注入井、观测井和抽水井宜沿场地地下水流向布置在一条直线上，各井之间的间距应根据水文地质条件确定。

【条文说明 12.2.4】如地下水无明显的流向，则各井也可以不沿着地下水流向，因为径向收敛流是人工形成的流场，应保证在一条线上。黏性土、粉性土各井间距宜为 2m~4m；砂土各井间距宜为 3m~6m；碎石土各井间距宜为 5m~10m。

12.2.5 试验期间，各试验井应测定地下水位变化。

【条文说明 12.2.5】孔隙水压力计的测试技术要求详见本规程第 6 章。

12.2.6 各试验井应人工取样或布置示踪剂测试探头测定示踪剂浓度，示踪剂测试探头宜在垂直方向每隔 2m~5m 布设 1 个测点。

【条文说明 12.2.6】由于不同深度示踪剂浓度可能不一致，故根据经验间隔 2m~5m 布设一个测点，具体根据试验井深度、水文地质条件等综合确定。

12.3 埋设方法

12.3.1 井管应由坚固、耐腐蚀、对地下水水质无污染的材料制成，井直径宜控制在 200mm~300mm 之间。

【条文说明 12.3.1】井直径应满足示踪剂注入和观测的要求，井直径 200mm 可满足一般抽水泵尺寸的要求，弥散试验示踪剂的注入量一般大于 100L，井直径小于 200mm 则不利于示踪剂的瞬时注入，也可能使示踪剂注入后井内的水位发生较大变化。弥散试验要求示踪剂投放井直径与该井到抽水井之间的距离相比很小，而各试验井的间距最小可为 2m~3m，故当井直径超过 300mm 时，将不满足上述要求。

12.3.2 滤水管和钻孔之间应先用滤料充填，其上用膨润土泥球封孔，最后用水泥砂浆填至地表。

【条文说明 12.3.2】滤水管滤水孔尺寸、数量及滤料要求等应符合《供水水文地质钻探与管井施工操作规程》（CJJ/T13）标准的规定，滤料、膨润土泥球和水泥砂浆等填料在使用前应进行检测，确保不对示踪剂浓度检测产生不利影响。

12.3.3 成井完成后应先进行洗井，洗井水位恢复后，进行试抽水，确保成井质量达到设计要求。

【12.3.3】 当采用径向收敛流弥散试验时，试抽水还可为正式试验估算抽水流量。

12.3.4 径向收敛流弥散试验抽水井中孔隙水压力计应埋设在水位降深以下至抽水泵中间位置；注入井和观测井中孔隙水压力计应埋设在水位降深以下一定深度。

【12.3.4】 孔隙水压力计的埋设方法见本规范第 6 章。

12.3.5 孔隙水压力计埋设后应测试初值，并根据实际水位埋深进行标定。

12.3.6 当采用 NaCl 溶液作为示踪剂时，应通过埋设电导率探头测定示踪剂浓度变化，埋设应符合下列规定：

- 1 电导率探头的量程应满足测试要求，精度应满足 $\pm 1.0\%FS$ ；
- 2 同一测试井中应埋入不同深度的电导率探头；
- 3 各测试井中电导率探头埋设深度应一致。

12.3.7 电导率探头埋设后应测试初值，并与取水样测试进行对比。

12.4 测试技术要求

12.4.1 试验采用的示踪剂应符合下列要求：

- 1 完全溶于水或易溶于水；
- 2 在水中保持稳定，无化学变化，不沉淀、分解、挥发，不被水中悬浮物或土颗粒吸附；
- 3 无毒性，无残留危害；
- 4 有成熟、灵敏、便宜的测定方法；
- 5 地下水中不存在或低浓度存在该种物质。

【条文说明 12.4.1】理想的示踪剂应当是无毒、廉价、能随水移动，即使以痕量存在也容易被测定出来且不改变地下水的天然流向，在所需要的时间内化学性质稳定，在所研究的含水层中不被所通过的固体吸附和滤出，同时又不在地下水中大量存在。

12.4.2 针对选用的不同示踪剂，应符合下列要求：

- 1 当采用离子化合物示踪剂时，宜选择氯化物或溴化物；

- 2 当采用稳定同位素示踪剂时，宜采用质谱仪等分析仪器；
- 3 当采用放射性示踪剂时，宜选择 ^3H ；
- 4 当采用易被吸附有机染料作示踪剂时，应在含水层渗透性大的区域使用。

【条文说明 12.4.2】示踪剂包括离子化合物、稳定同位素、放射性物质和有机染料：

1 离子化合物，从成本低，不易吸附、易于检测方面来看，氯化物 (Cl^-) 和溴化物 (Br^-) 为最好；

2 稳定同位素，它需要特殊的分析仪器，并且分析费用昂贵，一般需要根据实际情况选用；

3 放射性示踪剂，其中氚 (^3H) 应用最广，因为它能构成水分子的一部分与地下水一起运动，天然含量低，易于检测；

4 有机染料，成本低、毒性低、灵敏度高、容易检测，实际浓度在几个 10^{-6} 时也可以肉眼看出，但它容易被固体物质吸附，只适合渗透性非常好的情况下使用。

12.4.3 示踪剂应在注入井中瞬时注入，浓度应根据水文地质条件、示踪剂的背景浓度值等综合确定。

【条文说明 12.4.3】示踪剂的注入方式分连续式（连续注入）和脉冲式（瞬时注入）两种，连续注入所需示踪剂溶液用量大、体积大、投放时间长，不但会引起地下水物理性质（密度、黏度）的改变，且流场性质也不好控制，故很少采用。注入示踪剂的浓度应确保能够测量到，且可进行相关的定量计算，可根据经验公式进行估算，并应考虑地下水流量、介质的吸附作用、渗流速度、示踪剂运移距离及背景浓度等。

12.4.4 径向流野外弥散试验应结合抽水试验开展，并应符合下列要求：

1 正式抽水试验开泵前，应对抽水井、注入井和观测井进行水位观测和示踪剂背景值测试，测试记录表式可参考附录 K；

2 在抽水井中进行定流量抽水，水位观测按照非稳定流抽水试验的要求进行，待抽水井、注入井和观测井水位达到稳定状态，稳定延续时间按本规程表 10.4.1；

3 定流量抽水稳定后，在注入井中瞬时注入示踪剂溶液，并上下搅拌均匀；

4 定时测定抽水井、观测井和注入井中示踪剂的浓度。

【条文说明 12.4.4】1 正式抽水试验开泵前，应对抽水井、注入井和观测井进行 2~3 次水位观测，以确定无明显的天然地下水流向，各井进行 2~3 次示踪剂背景值测试，确定井中地下水拟用示踪剂物质的背景值；

2 需注意观测抽水井和观测井示踪晕前缘到达及峰值达到这两个时刻，并在其将要到来之前，增加观测频率，以准确测定示踪剂前缘和峰值达到监测井的时间。当采用

示踪剂探头时，示踪剂浓度的测定时间间隔一般不大于 1min；采用人工取样测定示踪剂浓度时，时间间隔一般为 5min~30min，当示踪剂浓度开始发生变化时，采用较小值。

12.4.5 试验的延续时间应根据示踪剂浓度随时间的变化曲线来确定，要求示踪剂浓度从背景值达到峰值并且再次逐渐降低到起始背景值为止。

12.5 成果资料整理

12.5.1 天然流场弥散试验弥散参数可采用直线图解法求解弥散参数，并应符合下列要求：

- 1 从地下水流向（ x 轴）上的观测井中实测的 $c-t$ 数据系列中找到 c_m 、 t_m ；
- 2 按式（12.5.1-1）、（12.5.1-2）计算出两组 X 、 Y ，并将其绘制在直角坐标系中，求取斜率 k ；

$$X = \frac{(t-t_m)^2}{t} \quad (12.5.1-1)$$

$$Y = \ln \frac{c_m t_m}{ct} + \frac{t-t_m}{t} \quad (12.5.1-2)$$

式中： X 、 Y ——直角坐标系的横坐标和纵坐标， $Y = kX$ ， k 为直线的斜率；

t ——累计观测时间（h）；

t_m ——对应最大观测浓度的时间（h）；

c ——示踪剂的观测浓度（g/L）；

c_m ——示踪剂的峰值浓度（g/L）；

- 3 按式（12.5.1-3）、（12.5.1-4）计算出 D_L 与 V 值；

$$D_L = \frac{x^2}{4t_m(kt_m+1)} \quad (12.5.1-3)$$

$$V = 2\sqrt{kD_L} \quad (12.5.1-4)$$

式中： D_L ——纵向弥散系数（m²/h）；

V ——地下水实际流速（m/h）。

- 4 利用不在 x 轴上的观测井资料，求出其 t'_m ，即可根据式（12.5.1-5）计算出 D_T ；

$$D_T = -\frac{y'^2 D_L}{x'^2 - V^2 t'^2_m - 4t'_m D_L} \quad (12.5.1-5)$$

式中： D_T ——横向弥散系数（m²/h）；

x' 、 y' ——分别为观测井的坐标（m）；

t'_m ——对应最大观测浓度的时间（h）。

【条文说明 12.5.1】天然流场弥散试验弥散参数的求解可采用逐点求参法、直线图解法、标准曲线法、弥散晕面积法、 $\ln c - t$ 曲线拐点法、优选拟合法等，本章主要介绍直线图解法。

当观测数据较少时，可先做出 $c - t$ 曲线，从曲线上查出 c_m 、 t_m 。

12.5.2 径向收敛流弥散试验纵向弥散度的求解可采用配线法，并应符合下列要求：

1 绘制以 Peclet 数 P_e 为参数，以无因次浓度 c_r 和无因次时间 t_r 分别为纵横坐标的标准曲线，如图（12.5.2）所示；

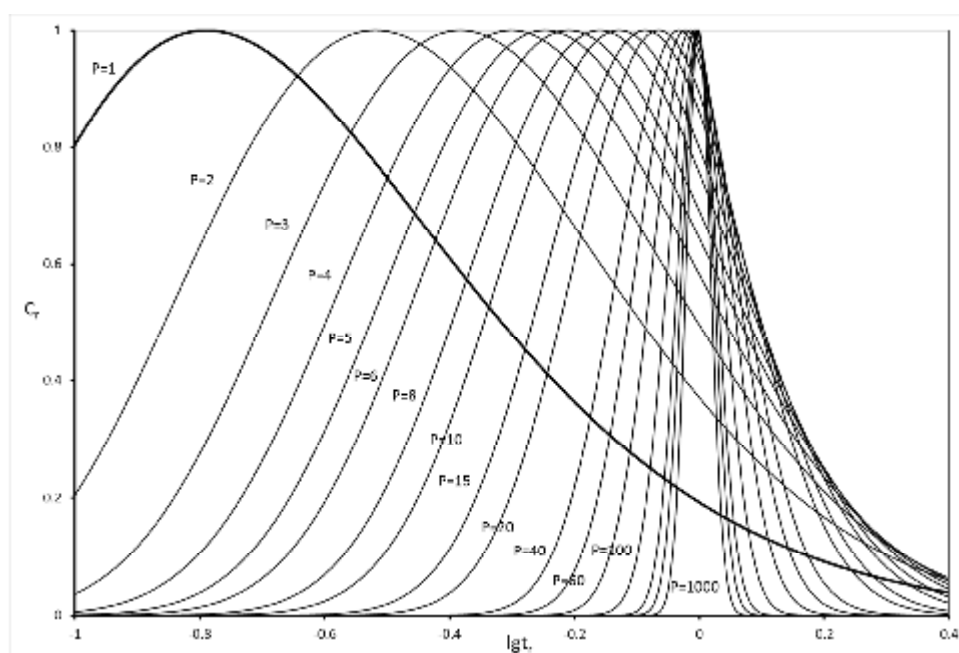


图 12.5.2 径向收敛流场标准曲线

2 将试验观测浓度按式（12.5.2-1）换算成无因次浓度 c_r ，观测时间按式（12.5.2-2）换算成无因次时间 t_r ；

3 与标准曲线相同模数的半对数坐标纸上绘制 $c_r - \lg t_r$ 关系曲线；

4 移动两曲线，直至实测的 $c_r - \lg t_r$ 关系曲线与某一 Peclet 数 P_e 值的标准曲线配合得最好。

$$c_r = \frac{c - c_0}{c_m - c_0} \quad (12.5.2-1)$$

$$t_r = \frac{t}{t_0} \quad (12.5.2-2)$$

式中： c_0 ——示踪剂的背景浓度（g/L）；

t_0 ——纯对流时间（h）。

纯对流时间 t_0 由式 (12.5.2-3) 计算:

$$t_0 = \frac{p r^2 h n}{Q} \quad (12.5.2-3)$$

式中: Q ——抽水井抽水量 (m^3/h);

r ——示踪剂注入井至抽水井的距离 (m);

H ——含水层的厚度 (m);

n ——含水层有效孔隙率。

当观测井位于示踪剂投放井与抽水井之间时, 纯对流时间 t_0 由式 (12.5.2-4) 计算:

$$t_0 = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2) H n}{Q} \quad (12.5.2-4)$$

式中: r_1 ——观测井至抽水井的中心距 (m);

r_2 ——示踪剂注入井至抽水井的中心距 (m)。

5 通过配线得到合适的 Peclet 数 P_e 后, 采用式 (12.5.2-5) 计算纵向弥散度 α_L :

$$\alpha_L = \frac{r}{P_e} \quad (12.5.2-5)$$

式中: r ——示踪剂注入井至抽水井的中心距 (m), 当观测井位于示踪剂注入井与抽水井之间时, r 为观测井至示踪剂注入井的中心距。

【条文说明 12.5.3】 径向收敛流弥散试验的解析解十分复杂, 难以用于参数的计算, 目前参数的求解主要依靠配线法:

弥散度是多孔介质的内在参数, 不依赖于流场, 可应用于其它水动力条件。径向收敛流场是在抽水条件下形成的, 地下水由四周向抽水孔流动, 流动速度比天然状态下要大很多, 示踪剂的横向弥散与纵向弥散相比很小, 因此径向收敛流弥散试验在实际应用时常常用来获取含水层的纵向弥散参数。

12.5.4 野外弥散试验成果报告应附下列图表:

- 1 测试点平面布置图;
- 2 测试孔结构剖面图;
- 3 弥散试验成果图。

【条文说明 12.5.4】 弥散试验成果图宜包括各井水位变化曲线、示踪剂浓度变化曲线及标准曲线配线图 (径向收敛流弥散试验) 等。当采用径向收敛流弥散试验时, 成果报告还应提供抽水试验成果图

12.6 成果应用

12.6.1 应用野外弥散试验成果前应检查试验是否满足相应的假设条件。

【条文说明 12.6.1】径向收敛流弥散试验运用径向收敛流溶质运移模型，应满足如下假设条件：

- 1 含水层为均质、等厚、各向同性，顶底板水平；
- 2 忽略天然或人为诱导的区域地下水运动，在试验开始前，采用定流量抽水使水位达到稳定，以抽水井为中心，得到一个等温、稳定的径向水平流场；
- 3 各井孔均为完整井，瞬时注入示踪剂对含水层及其它井孔没有干扰，或产生干扰可以忽略不计；
- 4 示踪剂投放井直径与该井到抽水井之间的距离相比很小；
- 5 示踪剂一经注入则立即与井中水完成混合均匀，且示踪剂浓度较小，可忽略密度对地下水运动的影响；
- 6 示踪剂在向抽水孔运移过程中只考虑对流和机械弥散，忽略分子扩散，机械弥散满足 Fick 定律；
- 7 示踪剂不发生任何反应或者只被吸附于含水层固体颗粒表面，但吸附作用被认为是可逆的，满足瞬时线性等温吸附方程；
- 8 抽水井中示踪剂的浓度对含水层中示踪剂的浓度影响很小，可以忽略不计；
- 9 常见土层的弥散度见表 12.6.1 所示。

表 12.6.1 国内外已有研究测得的弥散度

序号	岩土层名称	野外弥散试验测得的 纵向弥散度 α_L (m)
1	凝灰岩、白云岩、花岗岩等	0.50~44.00
2	砂砾石	1.25~25.00
3	粉细砂、砂砾石、卵石	0.50~1.90
4	砂和砂岩与一些淤泥和黏土	0.50~1.50
5	黏土、砂子和碎石	0.30~6.90
6	砂土	0.54~0.75
7	粉砂和砂质粉土	0.61
8	粉土、粉质黏土、细砂	1.49

12.6.2 野外弥散试验成果可用于地下水溶质迁移对流-弥散数学模型方程的输入参数。

【条文说明 12.6.2】地下水中的溶解组分一方面可以随着地下水的运动而移动，同时它们也可以在自身浓度梯度的作用下进行迁移，影响溶质运移的主要因素是对流、机械弥散、分子扩散、固相—溶质间的相互作用（如溶解、吸附等），溶液内部的化学反应，溶质的其他源、汇作用（如放射性元素的衰减，作物根系对某些溶质的吸收等），而其中野外弥散试验获得的弥散参数是进行地下水污染物迁移规律研究与水质预测的重要基础。地下水中污染溶质运移的数学模型如下：

$$\frac{\partial(qC^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(qD_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (qV_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

式中： C^k ——地下水中组分的溶解相浓度；

θ ——含水介质的孔隙度；

t ——时间；

x_i ——沿直角坐标系轴向的距离；

D_{ij} ——水动力弥散系数张量；

V_i ——孔隙水平平均实际流速；

q_s ——含水层内源/汇的体积流量；

c_i^k ——源汇项中组分 K 的浓度；

x_i ——沿直角坐标系轴向的距离；

R_n ——化学反应项。

12.6.3 野外弥散试验的成果应用须考虑试验的尺度效应。

【条文说明 12.6.3】国内外已有研究测得的野外弥散试验弥散度呈现出随着试验尺度的增加而增大的现象。主要原因是：对于理想的均匀介质，弥散度是一个常数，而实际含水层都不存在绝对的均质。正像测量海岸线的长度，用航测和卫测得出不同长度结果一样，用不同尺度（溶质运移距离）去测量空隙介质中的水动力弥散过程可得出不同的弥散度。

13 自动化测试系统

13.1 一般规定

13.1.1 地下水原位自动化测试应以满足地下水原位测试需要为目的，遵循“实用、可靠、先进、经济”原则进行。

13.1.2 地下水原位自动化测试系统宜包括监测传感器、数据采集装置、数据传输和相关供电设施等设备，以及数据管理和数据发布系统。

13.1.3 自动化监测设备应具有较强的环境适应性，能在高温差、潮湿、电磁干扰、振动等条件下连续稳定工作。

13.1.4 实施自动化监测应具备自校或人工校核措施，宜建立人工监测体系，确保自动化设备发生故障时能获取测值。应定期进行对自动化设备进行检查，发现异常及时修复。

13.2 自动化测试方法

13.2.1 地下水原位自动化测试实施前，应编制自动化测试方案。

13.2.2 自动化测试方案主要内容应包括：

- 1 项目概况；
- 2 自动化监测项目、监测点数量及布设位置；
- 3 自动化设备技术指标及设备选型；
- 4 自动化设备安装调试；
- 5 配套的数据传输方案与供电系统方案及实施；
- 6 测试安排和数据采集、传输与管理、分析发布等内容。

13.3 自动化测试仪器设备

13.3.1 水位自动化监测传感器主要技术参数应符合下列要求：

- 1 选用的电测水位传感器分辨力不大于 10mm 或 0.05%FS。
- 2 水位传感器的准确度按其测量误差在水位变幅不大于 10m 时，其允许误差应为 $\pm 10\text{mm}$ ；在水位变幅超过 10m 时，其允许误差不大于 0.1%FS。

13.3.2 水量自动化监测传感器主要技术参数应符合下列要求：

- 1 当采用流量计或流量计时，其准确度等级值宜优于 0.5 或基本误差限优于 $\pm 0.5\%FS$ 。在注水试验中，水量量测精度应达 0.1L。

2 当采用堰测法或孔板流量计观测时，应设置电测式堰流量计，测量精度误差应为 $\pm 1\text{mm}$ 或 $\pm 0.1\%\text{FS}$ ，传感器分辨力应不大于 $0.05\%\text{FS}$ 。

3 采用全自动流量仪其测量精度应不大于 $2.5\%\text{FS}$ 。

13.3.3 孔隙水压力自动化监测传感器主要技术参数应符合下列要求：

1 优先选用电测式孔隙水压力计。

2 孔隙水压力计量程的上限值宜比静水压力值与预估超孔隙水压力值之和大 $100\text{kPa}\sim 300\text{kPa}$ ，仪器分辨力应不大于 $0.05\%\text{FS}$ ，非线性度应不大于 $0.5\%\text{FS}$ 。

13.3.4 在试验区进行沉降观测时，各监测用传感器主要技术参数应符合下列要求：

1 深层沉降采用钻孔安装多点位移计时，测量仪器应选用电测式位移传感器，仪器分辨力应不大于 $0.05\%\text{FS}$ ，非线性度应不大于 $0.5\%\text{FS}$ ；

2 表面沉降采用静力水准系统测量时，应选用电测式仪器，仪器分辨力应不大于 $0.05\%\text{FS}$ ，非线性度应不大于 $0.1\%\text{FS}$ 。

13.3.5 地下水水温自动化监测传感器主要技术参数应符合下列要求：

1 应选用电测温度计监测；

2 温度计观测分辨力应不大于 0.1°C ，测量精度应不大于 0.5°C 。

13.3.6 水质自动化监测仪器精度要求可参照《地下水环境监测技术规范》（HJ/T164）附录B相应监测指标的检出限来确定。

13.3.7 环境量自动化监测传感器主要技术参数宜符合下列要求：

1 环境监测要素宜根据测试要求确定，如降雨量和气温等；

2 降雨量可通过设置简易自动雨量观测站进行在线观测。雨量传感器宜选用翻斗式雨量计，分辨率不大于 0.5mm ；

3 气温监测传感器分辨力应不大于 0.1°C ，测量精度应不大于 0.5°C 。

13.4 数据采集与传输

13.4.1 数据采集设备应具备下列要求：

1 数据采集设备应通过国家授权的质检机构或其他机构的产品型式实验检测；

2 具备接入地下水原位测试所要求的传感器类型及一定的通道数量；

3 支持多种测量方式，如巡测、选测，触发加密测量等功能，测量周期可达 1min ，能依据需要可调设置；

- 4 测量准确度满足所接入仪器关键指标或相关标准的各项指标要求;
- 5 数据采集装置应具备可靠的存储空间, 确保测试过程数据不丢失;
- 6 设备具备多种通信接口, 满足现场各种应用环境的需要, 优选同时具备无线和网络有线的数据采集设备;
- 7 支持多种数据上报方式, 如自动上报、应答上报和读取历史数据功能, 单次测量数据应可在 10min 内报送完毕;
- 8 具有较强的环境适应性, 具备防雷、防潮、抗振、抗电磁干扰等性能;
- 9 可支持远程操控, 可对设备校时、参数设置调整。

【条文说明 13.4.1】结合数据采集设备“物联网+”的发展应用, 数据采集与传输向智能化方向发展将使数据采集设备集成具备多种数据传输方式, 以适应本地有线组网、无线公网实现数据实时远传的需要, 因而地下水原位测试中可优先选用具有物联网特性的数据采集装置。

13.4.2 数据传输系统应具备下列要求:

- 1 地下水原位测试自动化系统的数据传输应包括数据采集设备至采集监控主机以及至监测中心的通信联络。
- 2 依据数据传输的需要既可利用本地的 RS485、TCP/IP 有线数据传输网络和无线数据传输网络, 也可利用无线公网实现的数据通信, 具体选择的数据传输方式应满足地下水测试的监测需要, 应能在 10min 中内完成所有监测量的单次测量数据传输。
- 3 根据项目测试方案选定的数据传输方案, 如有必要, 可选择多种通信方式构成主备通信系统, 应能实现通信方式间无缝自动切换。

【条文说明 13.4.2】本条款仅对自动化系统的通信功能提出了要求, 而对系统组网型式未作具体规定, 是考虑到其向智能化方向发展的趋势, 对具体组网型式依据测试项目自身特点去选取。数据传输系统除了本地的通信联络, 如果有要求尚可包括数据远程传输。

13.4.3 自动化测试设备的供电系统应符合下列要求:

- 1 自动化测试系统设备应配置可靠的供电系统, 如条件许可应配置专门的供电系统。
- 2 数据采集设备应设置备用电源确保在外电中断时能保证数据采集正常。
- 3 设备供电系统应设置稳压装置和防雷设施, 确保测试期间设备的正常工作。

4 在没有电力电源时，自动化测试系统可依据配置的蓄电池或利用太阳能浮充式直流供电完成地下水原位测试整个过程的测量工作。

13.5 安装与调试

13.5.1 各监测仪器设备的安装埋设应按上述各章节要求及仪器安装使用手册的要求进行。

13.5.2 在正式测试数据采集设备前，对接入的监测仪器应进行快速连续测试，以检查测值的稳定性。对有条件的测点可人工干预给予一定物理量变化，检查自动化测值是否出现相应变化。

13.5.3 自动化测试系统设备应配置防水等级不低于 IP65 的机箱，机箱应便于安装，内部各部件装配牢固，电缆进口应采取密封措施。

13.5.4 自动化测试设备机箱安装于室外时应采取必要的保护措施，其安装支座及支架应安装牢固，监测仪器电缆布线应整齐并适当保护。

13.5.5 自动化测试系统设备安装后应对其运行工况进行全面检查，包括数据采集设备的功能联调测试、各项运行参数配置、数据的存储和发送等。

13.5.6 自动化测试系统安装调试完成后，应编制相应的系统安装调试报告作为测试试验资料归档备查。

13.6 数据管理与数据分析发布

13.6.1 地下水原位测试自动化的数据管理和数据发布系统应满足基于通用的操作环境、具有图文并茂的用户界面，能随计算机操作环境和系统工具软件的版本升级而更新等功能。

13.6.2 数据管理与数据发布系统作为地下水原位自动化测试的有机组成部分，包括但不限于：

- 1 数据接收与发送；
- 2 数据处理与入库；
- 3 数据查询与发布；
- 4 数据分析图表展示；
- 5 数据库管理与维护。

13.6.3 地下水原位测试自动化的数据管理和数据发布系统宜采用数据库管理，确保采集的数据及时入库，并应具备数据备份管理功能。

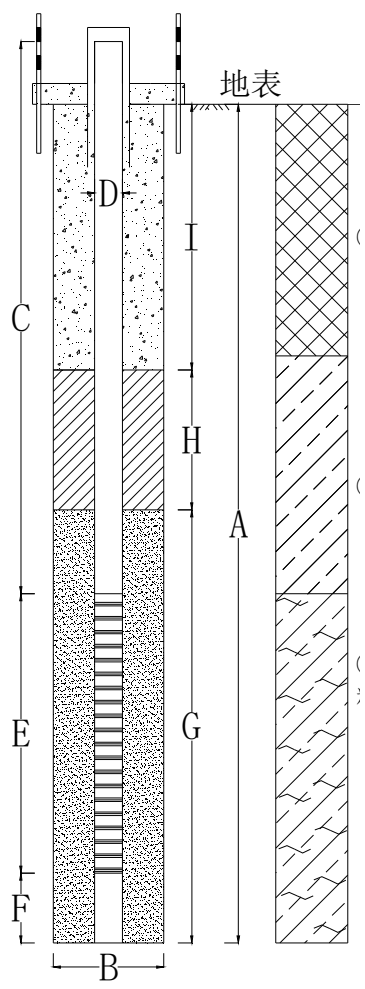
13.6.4 数据管理与数据发布系统应支持人工数据录入，并支持对有关气象、水文等其他数据资料的管理。

13.6.5 数据管理与数据发布系统应具备异常数据判别处理、数据查询、过程线图表绘制、报表生成、自动报警等功能。

13.6.6 数据管理与数据发布系统应具备用户管理、加密认证机制，以确保数据安全。

13.6.7 数据管理与数据发布系统应方便用户导出系统管理的各类数据，对监测数据处理、分析后编制的专题报告应满足各专题测试要求。

附录 A 水位观测孔、抽水井、回灌井施工记录单

工程地点		施工日期		
测试孔编号		孔口标高/m		
水位/m		井坐标	X	
			Y	
监测井结构信息		监测井柱状及井结构示意图		
监测井类型		 注：现场井结构及地层图需按比例绘制。		
A. 钻井深度	地表下_____m			
B. 井孔直径	_____mm			
监测井结构				
C. 井壁管总长	_____m			
井管型号				
管口距地表高度	地表上_____m			
D. 井管直径	_____mm			
E. 滤水管总长	_____m			
滤水管型号				
开筛孔区间	井顶下____m 至____m			
筛孔尺寸				
F. 沉淀管	地表下____m 至____m			
沉淀管型号				
G. 滤料层	地表下____m 至____m			
滤料类型				
滤料粒径				
不均匀系数 Cu				
H. 止水层	地表下____m 至____m			
止水材料类型				
I. 回填层	地表下_____m			
项目负责人： 施工负责人： 记录员：				

附录 B 地下水位观测记录表

工程名称：_____

天气：_____

仪器型号：_____

仪器编号：_____

日期：_____年_____月_____日

共_____页第_____页

孔号	时间	孔口高程(m)	本次水位深度(mm)	孔号	时间	孔口高程(m)	本次水位深度(mm)
备注							

量测者：_____

检查者：_____

附录 C 孔隙水压力观测记录表

工程名称：_____

天气：_____

仪器型号：_____

仪器编号：_____

日期：_____年_____月_____日

共_____页第_____页

孔号	传感器编号	埋设深度	初始读数	本次读数	备注
备注					

量测者：_____

检查者：_____

附录 D 地下水水质测试（含标定）记录单

基本信息										
地块名称：										
测试日期：					测试单位：					
测试孔井编号：					测试孔/井是否完整： 是 ☐ 否 ☐					
天气状况：					48 小时内是否强降雨： 是 ☐ 否 ☐					
测试点地面是否积水： 是 ☐ 否 ☐										
洗井资料										
洗井设备/方式：					水位面至井口高度（m）：					
测试孔水深度（m）：					测试孔水体积（L）：					
洗井开始时间：					洗井结束时间：					
pH 检测仪 型号		电导率检测仪 型号		溶解氧检 测仪型号		氧化还原电位 检测仪型号		浊度仪 型号		温度检测仪 型号
现场检测仪器校正										
pH值校正，使用缓冲溶液后的确认值： _____										
电导率校正：1.校正标准液： _____ 2.标准液的电导率： _____ $\mu\text{S}/\text{cm}$										
溶解氧仪校正：满点校正读数 _____ mg/L ，校正时温度 _____ $^{\circ}\text{C}$ ，校正值： _____ mg/L										
氧化还原电位校正，校正标准液： _____，标准液的氧化还原电位值： _____ mV										
测试记录										
时间 (min)	洗井汲 水速率 (L/min)	水面 距井 口高 度(m)	洗井 出 水 体积 (L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	pH 值	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	溶解氧 (mg/L)	氧化还 原电位 (mV)	浊度 (NT U)	地下水性 状（颜色、 气 味、杂 质）
第一次										
第二次										
第三次										
第四次										
.....										
洗井水总体积（L）：						洗井结束时水位面至井口高度（m）：				
现场测试照片：										
洗井人员：										
测试人员：										
项目负责人：										

附录 E 试坑单环注水试验记录表

试验土层名称:

[illegible]

年 月 日

附录 F 试坑双环注水试验记录表

工程名称: _____ 试验点编号: _____ 试验深度: _____
 水头高度 (cm): _____ 试验土层名称: _____ 铁环压入深度 (cm): _____
 内环直径 (cm): _____ 外环直径 (cm): _____
 试验土层渗入深度 (cm): _____ 试验土层毛细上升高度 (cm): _____

序号	试验时间				流量桶刻度		流量 (Q)		备注
	日	时	分	持续时间 (min)	读数 (cm)	与前读数 之差(cm)	本段时间 内总注入 量 (L)	单位时间 内的注入 量(L/min)	

观测者: _____ 记录者: _____ 校核者: _____ 年 月 日

附录 G 抽水试验方法和应用范围

试验方法		应用范围和适用 条件	目的	备注
根据	类型			
抽水孔 与观测 孔的数 量	单孔抽水 (无观测孔 或 1 个以上 观测孔)	在方案制订和优 化方案阶段	确定含水层的富水性、渗透 性及流量与水位降深的关 系	方法简单， 成本低，但 有些参数不 能取得
	多孔、群孔抽 水(1 个到几 个观测孔，多 到几十个观 测孔)	在优化方案阶 段，观测井布置 在抽水含水层和 非抽水含水层内	确定含水层的富水性、渗透 性和各向异性，漏斗的影响 范围和形态，补给带的宽 度，合理的井距，流量与水 位降深的关系，含水层与地 表水之间的联系，含水层之 间的水力联系，进行流向流 速测定和含水层给水度的 测定等	根据不同的 目的布设观 测井，测得 的各项参数 较正确，但 成本较高
含水层 的厚度 和数量	分层抽水	含水层的水文地 质特征尚未查明 的地区，选择典 型地段进行	确定含水层的水文地质参 数，了解各含水层之间的水 力联系	含水层之间 应严格分 层、止水
	混合抽水	含水层各层的水 文地质特征已基 本查清的地区	确定某一含水层组的水文 地质参数	
抽水孔 滤水管 长度与 含水层	完整井抽水	含水层厚度不大 于 25m~30m，宜 进行完整井抽水	确定含水层的水文地质参 数	滤水管长度 与含水层厚 度之比超过 90%

厚度的 比值	非完整井抽水	含水层厚度大， 不宜进行完整井 抽水的地区	确定含水层的水文地质参数，确定含水层的各向异性	滤水管长度 小于含水层 厚度的 90%
考虑水位降深 或流量 是否随 时间变化	稳定流抽水	单孔抽水，用于 方案制订或优化 方案阶段	测定含水层的渗透系数，井 的特性曲线，井损失	成本低，不 考虑抽水后 水位随时间 变化的关系
	非稳定流抽水	宜包括 1 个以上 观测井，用于优 化方案阶段	测定含水层的水文地质参数，了解含水层的边界条件，顶底板弱透水层的水文地质参数、地表水与地下水含水层之间的水力联系	考虑抽水开始后水位 （流量）随 时间变化的 全过程，能 测定稳定抽水无法测到的某些参数

附录 H 抽水试验水位、水量观测人工记录

工程名称：井号：天气：
井口基准点标高： m 静止水位（基准点以下）： m

观测日期 月、日	观测时间 时、分	观测累计 时间分	水位深度 m	水位下降 m	水表读数				抽水量 m ³ /h	备 注
					起读时间 时、分	起读数 m ³	终读时间 时、分	终读数 m ³		

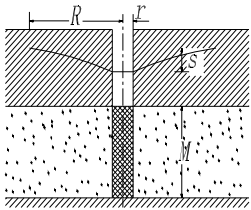
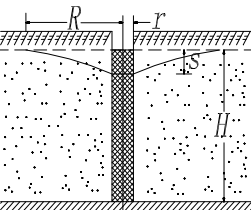
观测者：记录者：校核者：年 月 日

附录 I 抽水试验渗透系数计算公式

I.0.1 稳定流完整孔抽水试验的渗透系数宜选用下列公式进行计算：

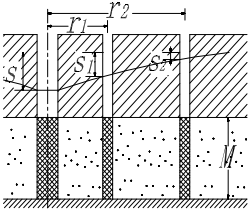
1 完整孔单孔抽水试验的渗透系数计算公式见表 I.0.1-1。

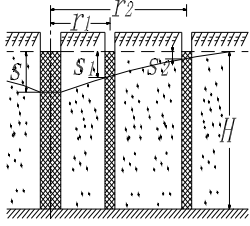
表 I.0.1-1 稳定流完整孔单孔抽水试验渗透性参数计算公式

示意图	计算公式	适用条件
	$k = \frac{0.366Q}{Ms} \lg \frac{R}{r}$	承压水
	$k = \frac{0.732Q}{(2H-s)s} \lg \frac{R}{r}$	1. 潜水； 2. 远离河流

2 完整孔多孔抽水试验的渗透系数计算公式见表 I.0.1-2。

表 I.0.1-2 稳定流完整孔多孔抽水试验渗透系数计算公式

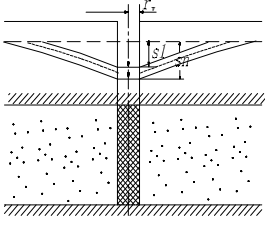
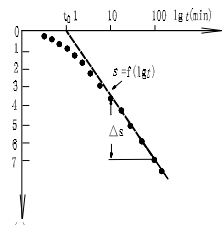
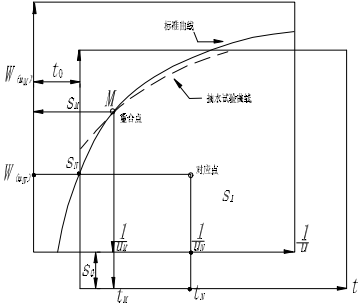
示意图	计算公式	适用条件
	$k = \frac{0.366Q}{M(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1}$	承压水

	$k = \frac{0.732Q}{(2H - s_1 - s_2)(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1}$	潜水
---	--	----

I.0.2 非稳定流抽水试验的渗透系数宜选用下列相应公式进行计算:

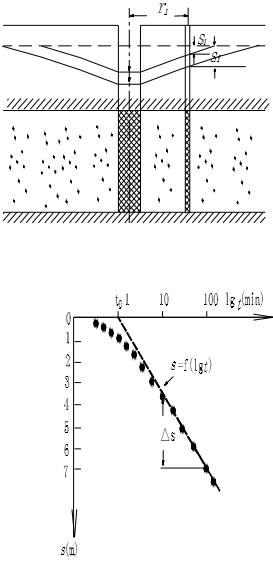
1 承压含水层完整孔非稳定流抽水试验渗透系数计算公式见表 I.0.2-1:

表 I.0.2-1 承压含水层完整孔非稳定流抽水试验渗透系数计算公式

示意图	计算公式	适用条件	工作步骤
 	$T = \frac{0.183Q}{i}$ $S = \frac{2.25Tt_0}{r_w^2}$ $k = \frac{T}{M}$	承压水，无越流，平面分布为无限含水层，单孔定流量抽水，并且 $\frac{r_w^2}{4at} \leq 0.05$ (时间~降深直线图解法)	1. 根据抽水孔在抽水开始后不同时间观测到的水位降深资料绘制 $s \sim \lg t$ 直线; 2. 求直线的斜率 i 和直线在 $s=0$ 轴上的截距 t_0 ; 3. 计算 T 、 S 、 k 。
	$k = \frac{Q}{4pM[s]} [W(u)]$ $S = \frac{4T[t]}{r_1^2 \left[\frac{1}{u} \right]}$	无越流，承压完整孔，有一个观测孔定流量抽水 (时间~降深配线法)	1. 选取同标准曲线 $W(u) \sim 1/u$ 模数相同的双对数坐标纸，绘出一个观测孔 $s \sim t$ 关系曲线; 2. 保持两图坐标轴平行: s 平行 $W(u)$, t 平行 $1/u$ 情况下，移动 $s \sim t$ 曲线，直到野外测试点与图中标标准曲线全部或大部分重合为止; 3. 在重合曲线上任取一点，读出相应的坐标值, $[s]$, $[t]$, $[W(u)]$, $[1/u]$; 4. 将重合点坐标代入公式计算出 k , S 。

2 承压含水层完整孔非稳定流抽水试验水位恢复法渗透系数计算公式见表 I.0.2-2。

表 I.0.2-2 承压含水层完整孔非稳定流抽水试验水位恢复法渗透系数计算公式

示意图	计算公式	适用条件	工作步骤
	$T = \frac{0.183Q}{i}$ $a = 0.44 \frac{r_1^2}{t_p} 10^{-\frac{t_p}{i}}$ $S = \frac{T}{a}$ $k = \frac{T}{M}$	无越流承压完整孔在无限含水层中固定流量抽水, 有一个观测孔 时并且 $\frac{r_1^2}{4at} \leq 0.05$	1. 利用水位恢复资料绘出 $s-lgt/t'$ ($t' = t-t_p$, 停抽前抽水的总时间) 曲线, 求得其直线段斜率 i, 由此可以计算参数 T; 2. 利用停抽时刻的降深 S_p 求出导压系数 a、贮水系数 S 和渗透系数 k。

附录 J 封井技术要求

J.1 黏土球封孔

J.1.1 封孔止水所用黏土球宜采用粘土，不应采用粉性土或砂性土，形状宜为球形、椭圆形，其技术指标应符合表 J.1.1 的规定。

表 J.1.1 封孔黏土球技术指标

项目	序号	技术指标	允许值	测试方法
主控 指标	1	直径	20mm~30mm	游标卡尺测量
	2	粘粒含量	不小于 50%	颗粒分析试验
	3	渗透系数	不大于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$	固结压力为 100kPa 条件下的渗透试验
	4	含水率	不大于 10%	含水率试验
	5	塑性指数	不小于 17	界限含水率试验
一般 指标	6	自由膨胀率	不小于 40%	自由膨胀率试验
	7	溶解时间	不大于 30min	黏土球在清水中溶解后通过 40 目标准筛后残余质量不大于 5% 时所需时间

J.1.2 采用黏土球进行封孔止水宜进行现场溶解试验以确定黏土球溶化时间是否满足封井要求。

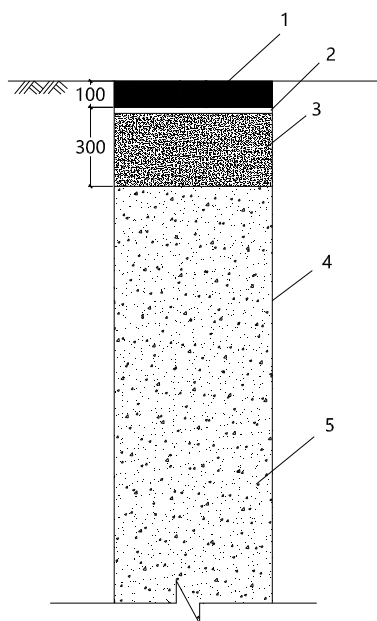
J.1.3 黏土球应缓慢均匀地从井管周围填入，不可用小推车或抬筐向井中倾倒，应将不同直径大小的黏土球掺杂填入。填充约 5m~10m 后应停工 1 小时，再进行下一段填充。

J.2 灌浆法封孔

J.2.1 灌浆法封井应满足下列要求：

- 1 先浇筑微膨胀混凝土至地面以下 300mm，
- 2 上部清理干净且无渗水后，填注快干水泥，

3 在离底地面以下约 100mm 处，采用圆形钢板与井管壁满焊，钢板上再填注水泥砂浆，详见图 J.2.1。

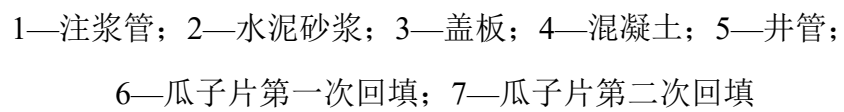


1—水泥砂浆；2—盖板；3—快干水泥；4—井管；5—微膨胀混凝土

图 J.2.1 疏干井封井示意图

J.2.2 坑内降压井封井应采用灌浆法封井，见图 J.2.2 所示，其中封口钢板应满焊。不得采用直接浇筑混凝土的方法。

J.2.3 封井过程要有记录，封井质量以不漏水、不渗水为准。



126

附录 K 野外弥散试验电导率人工记录

第 页, 共 页

[illegible]

年 月 日

本规程用词说明

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：

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：

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：

正面词采用“宜”；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 规程中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- (1) 国家标准《供水水文地质勘察规范》（GB 50027-2001）；
- (2) 国家标准《地下水监测工程技术规范》（GB/T 51040-2014）；
- (3) 行业标准《建筑与市政降水工程技术规范》（JGJ/T111-2016）；
- (4) 行业标准《城市地下水动态观测规程》（CJJ 76-2012）；
- (5) 行业标准《地下水监测规范》（SL183 2005）
- (6) 行业标准《地下水动态监测规程》（DZ/T 0133-1994）；
- (7) 行业标准《供水水文地质钻探与管井施工操作规程》(CJJ/T 13-2013)
- (8) 行业标准《供水管井设计、施工及验收规范》（CJJ 10-86）
- (9) 行业标准《水文测量规范》（SL 58-2014）
- (10) 上海市标准《软土地层降水工程施工作业规程》（DG/TJ 08-2186-2015）。