

宁波市轨道交通 1 号线一期工程抽水试验分析*

叶俊能^① 朱庆海^② 朱敢为^②

(^①宁波市轨道交通工程建设指挥部 宁波 315012)

(^②宁波冶金勘察设计研究股份有限公司 宁波 315041)

摘要 对宁波市轨道交通 1 号线一期工程勘察进行水文地质抽水试验,包括单孔抽水试验和多孔抽水试验。根据试验适用的环境及条件的不同,运用单孔抽水、多孔抽水及水位恢复计算公式,获得了典型站点主要含水层的渗透系数,在此基础上,得出全线各站点含水层的渗透系数,从而为拟建车站的基坑开挖和降水设计提供依据。

关键词 抽水试验 渗透系数 水文地质 轨道交通

中图分类号:P641 **文献标识码**:A

ANALYSIS OF PUMPING TEST ON THE FIRST PHASE OF NO. 1 IN NINGBO URBAN RAIL TRANSIT

YE Junneng^① ZHU Qinghai^② ZHU Ganwei^②

(^①Ningbo Rail Transit Project Construction Headquarter, Ningbo 315012)

(^②Ningbo Metallurgical Investigation & Design Research Co., LTD., Ningbo 315041)

Abstract The pumping tests on the hydrogeology, including one-drill pumping tests and multi-drill pumping tests, were carried out for the first phase of No. 1 in Ningbo Urban Rail Transit. According to the differences of environment and conditions, the formulas for one-drill, multi-drill pumping and water level recovery, were applied to obtain the permeability coefficients of the main aquifers in the typical sites. In the end, the permeability coefficients of the aquifers along the line were came up with, that put forward the basis for excavation and dewatering of the planned stations.

Key words Pumping test, Permeability coefficient, Hydrogeology, Urban rail transit

1 引言

渗透系数是反映多孔介质透水性的一个重要的水文地质参数,它的正确选取对模拟地下水渗流场、工程设计起着至关重要的作用。根据现场稳定流抽水试验资料确定含水层水文地质参数是水文地质工

作中经常采用的方法之一。

于传宁等^[1]根据抽水试验取得的数据,分别采用稳定流公式法、降深-距离配线法、漏斗疏干法和直线解析法四种方法,计算了黄河侧渗补给浅层地下水的各项水文地质参数。郭建青等^[2]提出了一种分析含水层抽水试验水位恢复过程数据的新方法。该法对水位恢复阶段降深表达式中的两个井函

* 收稿日期: 2010-04-14; 收到修改稿日期: 2010-06-20.

第一作者简介:叶俊能,岩土工程专业,从事岩土工程研究与管理工作. Email: yjn75@139.com

数分别采取了不同的简化方式。周志芳等^[3]基于承压不完整井稳定流抽水试验资料提出了一种确定含水层水文地质参数的方法,并采用该方法通过一次稳定流抽水试验可以同时确定出主承压含水层的导水系数、弱透水层的渗透系数和弱透水层的越流因素。计算实例表明,该方法不仅简单易行,而且可以通过一次抽水试验资料获得较多的水文地质参数。

宁波市轨道交通1号线一期工程,地下车站的设计埋深约为16~24m,大部分基坑下部存在③₁层含黏性土粉砂、粉砂,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土。本次水文地质试验为了解其渗透性,防止在开挖过程中基坑底部发生突涌,对部分站点③₁层含黏性土粉砂、粉砂,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土和⑥_{2T}层砂质粉土进行了单孔抽水试验和多孔抽水试验,共完成水文地质试验点30个,其中单孔抽水试验点6个,多孔抽水试验7组(1个主孔,2个观测孔),注水试验点17个,为拟建车站的基坑开挖、降水设计提供依据。

2 工程概况

宁波市轨道交通1号线一期工程全长21km,设车站20座,其中:地下站15座,高架站5座。设综合基地1座、车场1座,一个控制中心。

2.1 工程地质条件

根据地基土成因类型、物理力学性质不同将场地地基土划分成8大层若干亚层,其中①层为近现代人工填筑形成,②、③及④层属全新世海相沉积层,⑤、⑥、⑦、⑧层为海相、湖相沉积层,各地层具体的工程特性情况如表1所示。

2.2 水文地质条件

根据地下水含水层介质、水动力特征及其赋存条件,场地范围内与工程有关的地下水可分为潜水和承压水两类。潜水主要赋存于浅部黏性土中。浅层黏性土富水性、透水性均差,渗透系数为 $1 \times 10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,水量贫乏,单井出水量小于 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。场地内潜水主要接受大气降水入渗补给和地表水的侧向入渗补给,多以蒸发方式排泄。水位受季节及气候条件等影响,但动态变化不大,潜水位变幅一般在0.5~1.0m之间。

表1 各土层工程特性一览表

Table 1 The list of engineering properties of soil

层号	土层名称	层厚范围 /m	颜色	状态 /密实度
① ₁	杂填土	0.6~4.4	杂色	/
① ₂	黏土	0.3~2.0	灰黄色	软塑
① ₃	淤泥质黏土	2.8~6.7	灰色	流塑
② ₁	黏土	0.5~2.5	灰色	软塑
② ₂₋₁	淤泥	1.5~6.4	灰色	流塑
② ₂₋₂	淤泥质黏土	1.4~6.6	灰色	流塑
③ ₁	含黏性土粉砂、粉砂	0.9~5.9	灰色、浅灰绿色	稍密、中密
③ ₂	粉质黏土夹粉砂	1.2~4.9	灰色	软塑
④ ₁	粉质黏土、 淤泥质粉质黏土	1.0~12.0	灰色	软塑
④ ₂	黏土	0.5~3.1	灰色	软塑
⑤ ₁	黏土	1.8~6.6	暗绿色	硬塑
⑤ ₂	粉质黏土	0.8~5.2	灰黄色	软塑
⑤ ₃	砂质粉土	1.0~8.6	灰黄色	中密
⑤ ₄	黏土、粉质黏土	2.6~7.6	灰色	软塑
⑤ ₅	砂质粉土	0.5~8.8	灰色	稍密、中密
⑥ ₁	黏土	1.1~8.5	灰黄色	软塑
⑥ ₂	粉质黏土	0.9~7.4	灰色	软塑
⑥ _{2T}	砂质粉土	1.6~7.0	灰色	中密
⑥ ₃	黏土	1.0~7.9	灰色	软塑
⑦ ₁	粉质黏土	2.0~6.9	灰绿色	硬塑
⑦ ₂	粉质黏土	1.0~4.9	灰色	可塑
⑧ ₁	粉细砂	未穿透	灰色	密实

根据区域水文地质资料,拟建场地承压水含水层主要为浅部含黏性土粉砂、粉砂层和深部砂质粉土、粉细砂。

(1)微承压水:浅层微承压水赋存于③₁层含黏性土粉砂、粉砂层中,含水层一般厚度为2~4m,局部夹较多薄层黏性土,透水性一般,水量相对较小,单井出水量在 $6 \sim 15 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,渗透系数在 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)承压水:承压水赋存于⑤₃砂质粉土、⑤₅层砂质粉土、⑧₁层粉细砂中。其中⑧₁层粉细砂透水性好,水量丰富,单井开采量 $500 \sim 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,含水层顶板埋深一般为40.0~50.0m左右,含水层厚度5~10m,动态变化不明显。

本工程勘察揭露的含水层为:③₁层含黏性土粉砂、粉砂,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土和⑥_{2T}层砂质粉土。上述含水层均呈局部分布,各含水层在各站点分布情况不一。

3 水文地质试验方法

为了给设计方案提供可靠的水文地质参数,本次试验按水文地质单元,根据场地水文地质条件,采用抽水试验和注水试验两种试验方法。抽水试验分单孔抽水试验和多孔抽水试验(1个主孔,2个观测孔)。根据轨道交通施工特点,在基坑开挖前和开挖过程中必须对饱和粉土(粉砂)进行止水处理,为较准确得到下部承压含水层的渗透性,本次水文地质试验重点为③₁层含黏性土粉砂、粉砂,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土承压水含水层中进行。

3.1 试验孔的结构

依据规范^[4,5],第一个观测孔与抽水孔的最近距离宜等于含水层厚度,第二个观测孔与抽水孔的距离宜为1.5倍含水层厚度。以一个试验孔为例,考虑到含水层厚度约4.0~5.0m,抽水孔采用完整孔。第1个观测孔与抽水孔孔距为3.05m,第2个观测孔与抽水孔孔距为6.3m。过滤器长度为含水层厚度的1倍左右。抽水孔和观测孔孔径均为Φ230mm,沉淀管长度为2.2m,地面下37.0~42.0m深度范围内采用砾砂(2号砂)作为过滤层填料,地面下37.0m深度以上采用黏土球封孔,试验孔布置如图1所示。

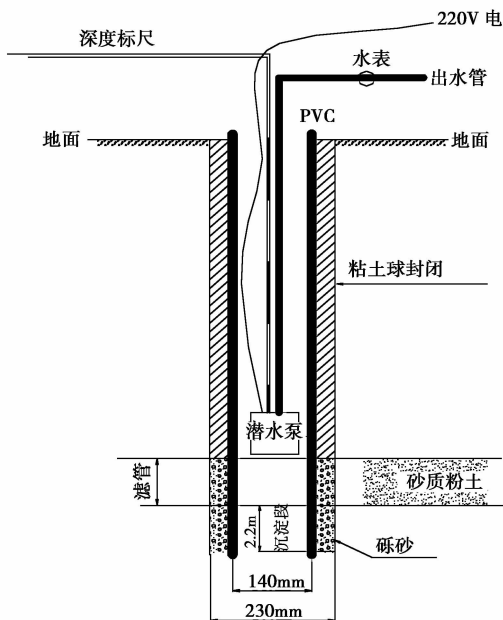


图1 试验孔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drilling

3.2 计算原理

(1)无补给条件下承压完整孔稳定流单孔抽水:对于单孔抽水试验采用下列裘布依承压水完整孔相关公式:

$$K = \frac{0.366Q}{M \cdot S} \lg \frac{R}{r} \quad (1)$$

式中: Q 为抽水井的出水量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); M 为含水层厚度(m); S 为抽水孔水位降深(m); r 为抽水孔半径; R 为影响半径(m)。

影响半径 R 采用吉哈尔特公式:

$$R = 3000S\sqrt{K} \quad (2)$$

(2)承压水带两个观测孔抽水:对于多孔抽水试验采用下列裘布依承压水完整孔相关公式:

$$K = \frac{0.366Q}{M(S_1 - S_2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

式中: Q 为抽水井的出水量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); M 为含水层厚度(m); S_1 、 S_2 为观测孔降深(m); r_1 、 r_2 为观测孔与抽水孔距离(m)。

影响半径 R

$$\lg R = \frac{S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1}{S_1 - S_2} \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_2 为观测孔降深(m); r_1 、 r_2 为观测孔与抽水孔距离(m)。

(3)根据水位恢复速度计算渗透系数计算公式(承压水、大口径平底井)

$$k = \frac{1.57r_w(h_2 - h_1)}{t(s_1 + s_2)} \quad (5)$$

式中: r_w 为抽水井半径(cm); k 为渗透系数($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); h_1 、 h_2 为分别为 t_1 、 t_2 时刻水位距含水层顶板距离(cm); s_1 、 s_2 为分别为 t_1 、 t_2 时刻水位距静止水位线距离(cm); t 为 t_2 和 t_1 时间间隔,即 $t_2 - t_1$ (s)。

求得一系列与水位恢复时间有关的数值 k 后,则可作 $k=f(t)$ 曲线,根据此曲线,可确定近于常数的渗透系数值。

4 抽水试验计算结果

以大卿桥站、天一广场站、海晏路站的③₁层含黏性土粉砂、粉砂层,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土的试验结果为例,计算如下。

4.1 大卿桥站抽水试验计算结果

DQQ-CS1号孔为多孔抽水试验孔,距离西塘河

约 5.5m。地表填土经处理后,含水层③₁层与西塘河无水力联系,基本不接受地表水补给,含水层③₁层厚度为 1.7m(11.4~13.1m),含水介质为含黏性土粉砂,静止水位为 2.00m。DQQ-CS1 号孔抽水流量、降深与时间关系如图 2 所示。

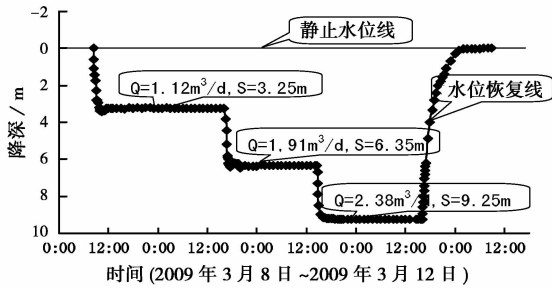


图 2 大卿桥站多孔抽水流量、降深与时间关系
Fig. 2 The relation of multi-drills pump output, drawdown and time at Daqing Bridge

利用主孔 DQQ-CS1 单孔资料,采用公式(1)、(2)分别计算渗透系数和影响半径(表 2)。

表 2 大卿桥站抽水试验单孔计算结果

Table 2 The results of one-drill pumping at Daqing bridge

$Q/m^3 \cdot d^{-1}$	S_w/m	$k/10^{-4} cm \cdot s^{-1}$	R/m
$Q_1 = 1.12$	3.25	2.00	13.51
$Q_2 = 1.91$	6.35	1.96	26.13
$Q_3 = 2.38$	9.25	1.77	36.14

利用 2 个观测孔 DQQ-CS1-观 1、DQQ-CS1-观 2 资料,采用公式(3)、(4)分别计算渗透系数和影响半径,计算结果见表 3。

表 3 大卿桥站抽水试验多孔计算结果

Table 3 The results of multi-drills pumping at Daqing bridge

$Q/m^3 \cdot d^{-1}$	$S1/m$	$S2/m$	$k/\times 10^{-4} cm \cdot s^{-1}$	R/m
$Q_1 = 1.12$	1.30	0.58	1.17	10.49
$Q_2 = 1.91$	2.30	0.85	0.99	9.01
$Q_3 = 2.38$	3.44	1.50	0.92	10.25

利用主孔 DQQ-CS1 水位恢复数据,选择 3 个时段根据水位恢复速度计算渗透系数(公式 5),计算结果见图 3。

根据以上曲线,可确定近于稳定的渗透系数 $k = 1.05 \times 10^{-4} cm \cdot s^{-1}$ 。

4.2 天一广场站抽水试验计算结果

TY-CS1 号孔为多孔抽水试验孔,周围无地表水。含水层⑤₃+⑤₅层厚度为 11.7m(30.4~

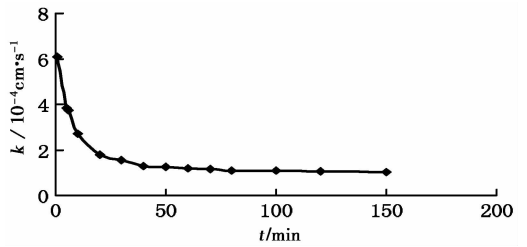


图 3 大卿桥站多孔抽水水位恢复 k-t 曲线
Fig. 3 The k-t curve of water level recovery of multi-drills pumping at Daqing bridge

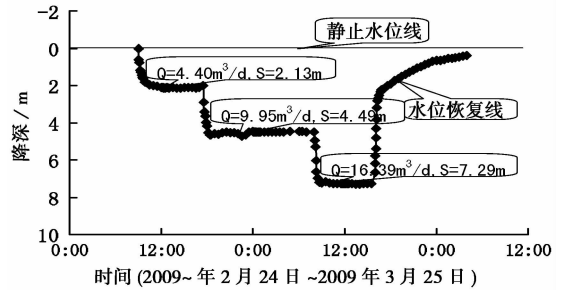


图 4 天一广场站多孔抽水流量、降深与时间关系
Fig. 4 The relations of multi-drills pump output, drawdown and time at Tianyi Square

42.1m),含水介质为砂质粉土,静止水位为 3.135m。利用抽水量、降深与时间关系(图 5),可计算多孔抽水试验和水位恢复速度的渗透系数。

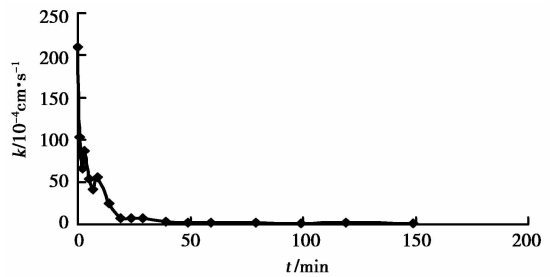


图 5 天一广场站多孔抽水水位恢复 k-t 曲线
Fig. 5 The k-t curve of water level recovery of multi-drills pumping at Tianyi Square

利用主孔 TY-CS1 单孔资料,采用公式(1)、(2)分别计算渗透系数和影响半径,计算结果见表 4。

利用二个观测孔 TY-CS1-观 1、TY-CS1-观 2 资料,采用公式(3)、(4)分别计算渗透系数和影响半径,计算结果见表 5。

利用主孔 TY-CS1 水位恢复数据,选择 3 个时段根据水位恢复速度计算渗透系数(公式 5),计算结果见图 6。

根据以上曲线,可确定近于稳定的渗透系数 k

表4 天一广场站抽水试验单孔计算结果

Table 4 The results of one-drill pumping at Tianyi Square

$Q/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	S_w/m	$k/\times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	R/m
$Q_1=4.40$	2.13	1.48	7.62
$Q_2=9.95$	4.49	1.89	18.15
$Q_3=16.39$	7.29	2.11	31.10

表5 天一广场站抽水试验多孔计算结果

Table 5 The results of multi-drills pumping at Tianyi Square

$Q/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$S1/\text{m}$	$S2/\text{m}$	$k/\times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	R/m
$Q_1=4.40$	0.93	0.49	1.03	16.23
$Q_2=9.95$	2.33	1.34	1.06	19.50
$Q_3=16.39$	2.99	1.89	1.56	25.12

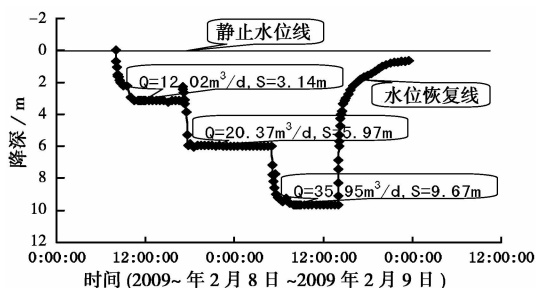


图6 海晏路站多孔抽水流量、降深与时间关系

Fig. 6 The relations of multi-drills pump output, drawdown and time at Haiyan Road

$$=1.25 \times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4.3 海晏路站抽水试验计算结果

HYL-CS5号孔为多孔抽水试验孔,距离河约70~130m。地表填土经处理后,含水层③₁+⑤₃层与河水无水力联系,基本不接受地表水补给,含水层③₁+⑤₃层厚度为11.0m(③₁层12.5~17.0m,⑤₃层32.7~39.2m),含水介质为粉砂、砂质粉土,静止水位为0.83m。利用抽水量、降深与时间关系(图7),可计算多孔抽水试验和水位恢复速度的渗透系数。

利用主孔 HYL-CS5 单孔资料,采用公式(1)、(2)分别计算渗透系数和影响半径,计算结果见表6。

利用二个观测孔 HYL-CS5-观1、HYL-CS5-观2 资料,采用公式(3)、(4)分别计算渗透系数和影响半径,计算结果见表7。

利用主孔 HYL-CS5 水位恢复数据,选择3个时

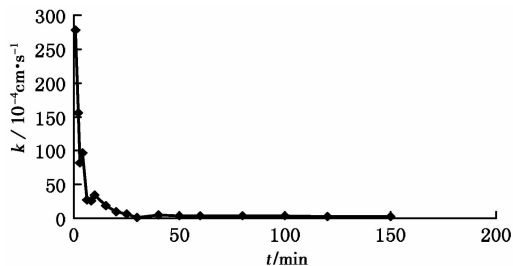
图7 海晏路站多孔抽水水位恢复 $k-t$ 曲线Fig. 7 The $k-t$ curve of water level recovery of multi-drills pumping at Haiyan road

表6 海晏路站抽水试验单孔计算结果

Table 6 The results of one-drill pumping at Haiyan road

$Q/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	S_w/m	$k/\times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	R/m
$Q_1=12.02$	3.14	3.43	17.12
$Q_2=20.37$	5.97	3.44	32.50
$Q_3=35.95$	9.67	4.09	57.50

表7 海晏路站抽水试验多孔计算结果

Table 7 The results of multi-drills pumping at Haiyan road

$Q/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$S1/\text{m}$	$S2/\text{m}$	$k/\times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	R/m
$Q_1=12.02$	1.09	0.59	2.62	13.43
$Q_2=20.37$	3.14	2.05	2.04	21.28
$Q_3=35.95$	6.08	4.36	2.27	32.21

表8 各站点中含水层渗透系数建议表

Table 8 The suggestion form for the permeability coefficients of the main aquifers in the stations

站点名称	层号	土层名称	$k/\times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
大卿桥站	③ ₁	含黏性土粉砂	2.0
大卿桥站	⑤ ₃	砂质粉土	0.3
西门口站	③ ₁	含黏性土粉砂	2.0
市府~天一广场	⑤ ₃ +⑤ ₅	砂质粉土	4.0
天一广场站	⑤ ₃ +⑤ ₅	砂质粉土	2.0
樱花公园站	⑥ _{2T}	砂质粉土	6.0
福明路站	⑤ ₃	砂质粉土	6.0
世纪大道站	③ ₁	粉砂	14.0
海晏路站	③ ₁	粉砂	12.0
海晏路站	③ ₁ +⑤ ₃	砂质粉土	4.1
海晏路站	⑤ ₃	砂质粉土	2.7
盛莫路站	③ ₁	粉砂	12.0

段根据水位恢复速度计算渗透系数式(公式5),计算结果见图7。

根据以上曲线,可确定近于稳定的渗透系数 $k=$

$2.21 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5 抽水试验结果分析

从以上试验计算结果可看出,利用单孔抽水试验所计算的渗透系数和影响半径比较离散,且计算值均偏大,而利用两个观测孔的抽水试验所计算的渗透系数和影响半径比较合理,计算精度可靠。

在各个站点现场试验结果的基础上,结合室内试验资料,并参考区域水文地质资料和地区经验,各含水层的渗透系数建议按表 8 使用。

从表 8 可以看出,各站点中③₁层的渗透系数离散性较大,这主要是由于③₁层在空间分布的不均匀性,岩性本身变化较大,在不同站点可能分别是含黏性土粉砂和粉砂,从而在不同站点渗透系数差异较大。

6 结 论

宁波市轨道交通 1 号线一期工程,大部分站点的设计埋深约为 16 ~ 24m,大部分基坑下部存在③₁层含黏性土粉砂、粉砂,⑤₃层砂质粉土,⑤₅层砂质粉土,了解该地层的渗透性对拟建车站的设计至关重要。本次水文地质试验严格按照规范要求实施,水文地质模型均为二元结构,上部为淤泥质土隔水层,下部为含黏性土粉砂、粉砂、粉土及淤泥质粉质黏土夹粉土(砂)透水层。利用抽水试验数据,采用承压完整井单孔抽水、多孔抽水和水位恢复计算

公式获得了相关土层的水文地质参数,提出了设计建议值,从而对指导宁波轨道交通工程的基坑开挖和降水设计提供重要依据。

参 考 文 献

- [1] 于传宁,宗先国,张利红,等.利用抽水试验资料确定水文地质参数[J].地下水,2006,(2):44~46.
Yu Chuanning,Zong Xianguo,Zhang Lihong,et al. Confirmation of hydro-geological parameters by pumping test. Ground Water, 2006,(2):44~46.
- [2] 郭建青,李彦,王洪胜,马健.含水层抽水试验水位恢复过程数据的直线图解分析法[J].水利学报,2004,(10):22~26.
Guo Jianqing,et al. New method for estimating aquifer parameters according to the data of water level recovery in pumping test. Journal of Hydraulic Engineering,2004,(10):22~26.
- [3] 周志芳,汤瑞凉,汪斌.基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数[J].河海大学学报,1999,27(3):5~8.
Zhou Zhifang,Tang Ruiliang,Wang Bin. Determination of hydro-geological parameters of leaky aquifer based on pumping test data of partially penetrating well near the boundary. Journal of Hohai University. 1999,27(3):5~8.
- [4] GB50307-1999,地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S].
GB50307-1999, Code on Geotechnical Investigations for Metro and Light Rail Transit
- [5] 工程地质手册编委会.工程地质手册(第四版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
Engineering Geology Editorial Handbook. Handbook of engineering geology (fourth edition). Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

(上接第 108 页)

参 考 文 献

- [1] 郭锡斌.某地下室基坑开挖变形观测与分析[J].林业勘察设计,2005,2,122~125.
Guo Xibin. Deformation observation and analysis in underground space excavation. Forestry Prospect and Design, 2005,2,122~125.
- [2] 林跃忠,王铁成,王来.深基坑施工的侧向位移预报模型及其应用[J].《工程力学》,2003(suppl.),1633~1636.
Lin Yuezhong,Wang Tiecheng,Wang Lai. Prediction model for lat-

eral displacement of deep-excitation and its application. Engineering Mechanics, 2003, 1633~1636.

- [3] 廖俊展,黄茂松.深基坑开挖侧向位移的有限元分析研究[J].建筑科学,2006,122(3):31~35.
Liao Junzhan,Huang Maosong. Study on lateral displacements of excavation by using FEA. Building Science. 2006,122(3):31~35.
- [4] 李涛,刘波,陈宝军,陈立.近距离高层建筑作用下深基坑变形分析[J].地下工程及深基坑,684~688.
Li Tao,Liu Bo,Chen Baojun,Chen Li. Analysis of deformation of deep foundation pit under near distance tall building structure. Underground Engineering and Dip Foundation, 684~688.