

文章编号:1001-4179(2009)16-0049-04

# 地铁建设中地下水与环境岩土体相互作用研究

毛邦燕<sup>1,2</sup> 许模<sup>2</sup> 唐万春<sup>1</sup> 杨红兵<sup>1</sup>

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610071; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**地铁建设中地下水与环境岩土体相互作用会产生一系列环境岩土体问题,对这些问题展开定性研究具有十分重大的理论和实践意义。以地下水动力学为基础,利用一维固结理论探讨了地铁建设过程中疏干排水造成的地面沉降问题;根据太沙基极限荷载理论对由于地铁结构造成的水位壅高给地铁沿线迎水面浅基础建筑物地基承载力带来的影响进行了研究。建立起了一套研究地铁建设过程中地下水与环境岩土体相互作用的定量化评价体系。以成都地铁2号线为例,研究成果表明,成都地铁2号线各地铁车站在施工过程中由基坑疏干排水引起的地面沉降量在0.01~0.07 m范围内,沉降值较小;地铁车站迎水面方向由水位壅高导致的浅基础建筑物的承载力会受到一定的影响,影响最大的为东门大桥车站附近的浅基础建筑物,承载力仅为修建前的86.84%。

**关键词:**环境岩土; 工程问题; 地面沉降; 浅基础建筑; 地下水; 地铁建设

**中图分类号:** P641.2 **文献标识码:** A

随着人类社会不断向前发展,城市化的进程逐渐加快,人口向城市高度集中,交通拥挤就表现得尤为突出。地铁作为一种快速、正点、安全、舒适、运量大、能耗低、污染小<sup>[1]</sup>的交通工具应运而生,并可能成为未来城市主要的公共交通工具。而在未来的10余年内,规划在北京、上海、天津、重庆、广州、成都等15个城市建设轨道交通线路总长约1700 km,总投资达到6200亿元<sup>[2]</sup>。

但地铁建设的过程必将对人类生存的地表、浅地表环境产生较为深远的影响。而作为两类环境问题之一的环境岩土工程问题受到了人们广泛的重视<sup>[3-7]</sup>。资料表明,地铁建设直接或间接地干扰地下水,地下水与周围的环境岩土体相互作用(图1),从而产生一系列的环境岩土工程问题,如施工过程中隧道疏干排水引起的地表沉降,运营期内地铁隧道和车站地下结构对地下水的阻碍导致地下水位壅高给浅基础建筑物带来的安全问题等。

徐则民<sup>[3]</sup>,邢崑崑<sup>[4]</sup>,庄乾城<sup>[5]</sup>,张希腾<sup>[6]</sup>,徐岩<sup>[7]</sup>等人都对地铁建设中由于地下水与环境岩土体之间相互作用而产生的环境岩土体问题进行了研究。但他们对这一问题的研究仅从宏观上进行了定性的分析与评价,没有进行定量化的研究。因此,展开地铁建设中地下水与环境岩土体相互作用研究,定量地评价由此产生的一系列环境岩土体问题具有十分重要的理论和实践意义。

## 1 疏干排水对环境岩土体作用

在地铁隧道和车站施工过程中对基坑进行疏干排水是必需

的,地下水被抽出后将可能导致隧道及车站附近发生地面沉降。究其主要原因为<sup>[8-10]</sup>:①在疏干排水过程中周围含水层中的泥、沙等固体物质大量的被带出,破坏了地层结构,造成地面沉降;②水位下降使得地层孔隙中的静水压力减少,给地基土施加一个附加应力,导致土层压缩而引起地面沉降。

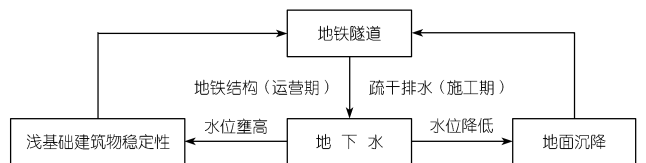


图1 地铁隧道与环境岩土体相互作用

目前,对疏干排水引起地面沉降的研究已相当完善。根据文献[8~14]可以确定不同土层中由于降水引起的地表沉降值。

(1) 粘性土层及粉土层沉降计算。

$$S_{\infty} = \sum \left( \frac{a_i}{1 + e_{0i}} \mu_i \Delta H'_i \gamma_w H_i \right) \quad (1)$$

式中  $S_{\infty}$  为最终固结沉降量, cm;  $a_i$  为  $i$  层粘性土或者粉土的压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $e_{0i}$  为  $i$  层粘性土或者粉土的原始孔隙比;  $H_i$  为第  $i$  计算土层的厚度, cm;  $\mu_i$  为第  $i$  含水层的给水度;  $\Delta H'_i$  为第  $i$  计算点的水位下降值;  $\gamma_w$  为水的重度。

(2) 沙土层沉降计算。

$$S = \frac{\Delta H' \gamma_w H_M}{E} \quad (2)$$

收稿日期:2009-03-18

基金项目:四川省教育厅自然科学项目重点实验室专项(07ZZ001)

作者简介:毛邦燕,男,中国中铁二院工程集团有限责任公司,高级工程师,博士。

式中  $S$  为沙土层的沉降量, cm;  $H_M$  为计算土层的厚度, cm;  $\Delta H'$  为计算点的水位下降值, 与  $\Delta H'$  意义相同;  $E$  为砂土的弹性模量  $E = \frac{1 + e_0}{a}$ , MPa。

## 2 隧道结构对环境岩土体作用

隧道结构的防水按文献[15, 16]执行, 车站及人行通道防水等级为一级, 结构不允许渗水, 表面无湿渍。区间、辅助线隧道防水等级为二级, 结构不允许漏水, 表面可有少量偶见的湿渍。按照设计, 隧道结构以自防水为本, 采用有效措施增强混凝土的抗渗、抗裂性, 减少地下水对混凝土的渗透性, 且对接缝防水、注浆系统、附加防水层等都有严格的规定。因此, 地铁建成后地铁隧道和车站就像植入地下含水层中的一道隔水墙, 阻碍地下水的径流, 造成地铁隧道和车站迎水面地下水位升高, 背水面地下水位降低。从而引起地铁附近浅基础建筑物不均匀沉降, 给建筑物的安全带来隐患。正确地评价这种由于地下水壅高造成的环境岩土体问题就是人们普遍关注的问题之一。

### 2.1 隧道结构引起的地下水壅高

一般可以采用地下水动力学方法和模型方法来计算由于地铁隧道结构引起的地下水壅高。前者简单、方便, 计算精度相对较低, 但一般能满足评价精度; 后者繁琐、参数需求较多, 计算精度相对较高, 如文献[17]利用数值模拟方法对成都地铁2号线隧道区间和车站地下水壅高进行了模拟。综合考虑通用性、可行性等多种因素, 选择前者作为隧道结构引起的地下水壅高计算方法。

在地铁修建前, 地下水通过地铁沿线过水断面的流量为:

$$Q_1 = K_1 J_1 \omega_1 \sin \theta_1 \quad (3)$$

在地铁建成后, 地下水通过地铁沿线过水断面的流量为:

$$Q_2 = K_2 J_2 \omega_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

式中  $K_1$ 、 $K_2$  分别为地铁修建前和建成后过水断面的渗透系数;  $J_1$ 、 $J_2$  分别为地铁修建前和建成后过水断面的水力坡度;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为地铁修建前和建成后过水断面的面积;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为地铁修建前和建成后地下水流方向与地铁的夹角。

在稳定流条件下, 有:

$$Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

一般来说含水层的渗透性不会随过水断面的变化而变化, 因此  $K_1 = K_2$ ,  $Q_1 = Q_2$ , 则有:

$$J_2 = J_1 \omega_1 / \omega_2 \quad (6)$$

地下水水位壅高量  $\Delta h$ :

$$\Delta h = (J_1 - J_2) \times L \quad (7)$$

式(7)中  $L$  指区间隧道或者车站的长度。

### 2.2 壅高地下水对浅基础建筑物的影响

通常情况下, 地下水对浅基础地基承载力的影响主要表现在: ① 地下水水位的升高, 使得水位以下的土体失去由毛细管应力或弱结合水形成的表面凝聚力, 使承载力降低; ② 由于地下水的浮力作用, 使得土体的有效重力减小, 使土的承载力降低<sup>[18]</sup>。目前, 前者仅仅处于理论研究阶段, 无法运用到工程实践中。因此, 都假定土体的表面凝聚力不发生变化, 而只考虑由于水的浮力作用对浅基础承载力的影响。

### 2.3 最大影响深度的确定 ( $Z_{\max}$ )

研究表明, 地下水对浅基础的影响主要可以分为4种情况(图2), 现分述如下<sup>[18, 19]</sup>:

(1) 当地下水位处于所要确定的基底最大影响深度  $Z_{\max}$  以下时, 不考虑地下水对地基土的重度影响, 如图2(a)所示。

(2) 当地下水位介于基底与  $Z_{\max}$  之间时, 基底下的土体重度取在最大影响深度  $Z_{\max}$  内, 水中土体采用有效重度的加权平均重度  $\gamma_m$ , 图2(b)。

$$\gamma_m = \frac{\gamma Z + \gamma'(Z_{\max} - Z)}{Z_{\max}} \quad (8)$$

(3) 地下水位于基底平面时, 基底面以下土取有效重度  $\gamma'$ ; 地下水位于基底平面以上的土体(即在基础埋置深度  $D$  的范围内), 采用土的天然重度  $\gamma$ , 如图2(c)。

(4) 地下水位于基础埋深  $D$  内时, 土体的重度, 水下部分采用有效重度  $\gamma'$ , 水上部分采用天然重度  $\gamma$ , 如图2(d)。

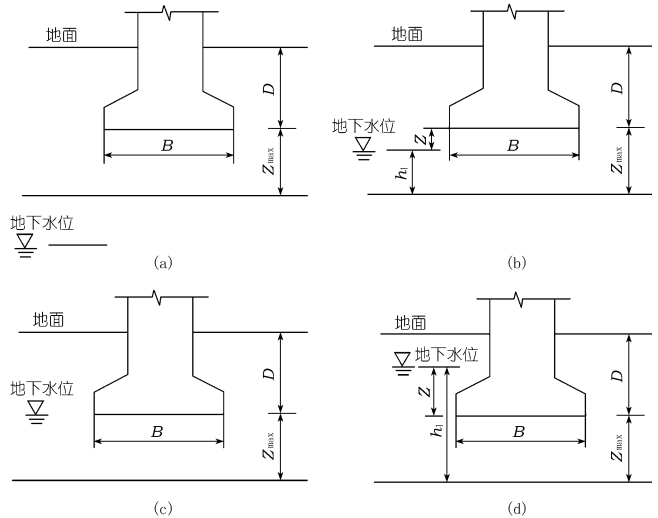


图2 地下水影响深度的4种情况<sup>[18]</sup>

其中  $\gamma$  与  $\gamma'$  可以用下式表示:

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s(1 + w)} \quad (9)$$

式中  $\gamma'$  为土的有效重度;  $\gamma$  为土的重度;  $\gamma_s$  为土颗粒的重度;  $\gamma_w$  为土的干重度;  $w$  为土的天然含水量。

根据太沙基的极限荷载理论可以推导出  $Z_{\max}$ :

$$Z_{\max} = \frac{B}{2} e^{\frac{\pi \tan \phi}{2}} \quad (10)$$

### 2.4 水位壅高后浅基础承载力的变化

水位壅高后, 地铁隧道或车站附近的浅基础受到地下水的影 响有4种可能性。太沙基极限荷载可以用以下公式表达。

粘性土地基承载力为:

$$P_{cr} = \frac{1}{2} \gamma B N_r + q N_q + c N_c \quad (11)$$

沙土地基承载力为:

$$P_{cr} = \frac{1}{2} \gamma B N_r + q N_q \quad (12)$$

式中  $N_r$ 、 $N_q$ 、 $N_c$  为太沙基承载力系数。

令  $Z_{\max} = aB$

下面以沙性土地基为例, 推导水位壅高后地基承载力的变化。将式(8)代入式(11), 并根据不同情况下  $q$  的取值, 可以得出4种不同情况下水位壅高后对浅基础建筑物地基承载力的影响。

(1) 原始水位位于  $Z_{\max}$  以下, 水位壅高后位于  $Z_{\max}$  以上基

底以下。

$$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}} = \frac{\frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{\Delta h (\gamma' - \gamma)}{aB} \right] BN_r + \gamma DN_q}{\frac{1}{2} \gamma_m BN_r + qN_q} \quad (13)$$

$$P_{\Delta h} = \frac{1}{2a} N_r \Delta h (\gamma - \gamma') \quad (14)$$

(2) 原始水位和壅高后水位都位于  $Z_{max}$  以上基底以下。

$$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}} = \frac{\frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{(h_1 + \Delta h) (\gamma' - \gamma)}{aB} \right] BN_r + \gamma DN}{\frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{h_1 (\gamma' - \gamma)}{aB} \right] BN_r + \gamma DN_q} \quad (15)$$

$$P_{\Delta h} = \frac{N_r \Delta h (\gamma - \gamma')}{2a} \quad (16)$$

(3) 原始水位位于  $Z_{max}$  以上,基底以下,水位壅高后位于基底以上。

$$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma BN_r + [(\gamma - \gamma') (aB - (h_1 + \Delta h)) + \gamma D] N_q}{\frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{h_1 (\gamma' - \gamma)}{aB} \right] BN_r + \gamma DN_q} \quad (17)$$

$$P_{\Delta h} = (\gamma' - \gamma) \left[ \frac{1}{2} N_r h_1 + N_q (aB - h_1 - \Delta h) \right] \quad (18)$$

(4) 原始水位和壅高后水位都位于基底以上。

$$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma BN_r + [(\gamma - \gamma') (aB - (h_1 + \Delta h)) + \gamma D] N_q}{\frac{1}{2} \gamma BN_r + [(\gamma - \gamma') (aB - h_1) + \gamma D] N_q} \quad (19)$$

$$P_{\Delta h} = N_q (\gamma - \gamma') \Delta h \quad (20)$$

式(13)~(20)中,  $h_1$ 、 $B$ 表示的距离如图2所示; $a$ 为最大影响深度系数; $\Delta h$ 为水位壅高值; $P_{\Delta h}$ 为水位壅高后浅基础承载力降低值;

$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}}$ 为涌水前后承载力对比值,其它同上。

### 3 典型实例

成都市地铁2号线一期工程为东西方向的主干线,东起经干院站,西止于成灌客运站,线路全长为22.795 km,共设20座车站,地下线19.813 km,地下车站18座。其中,天府广场站为与1号线公用车站,从东门大桥车站以南的地下车站基岩埋深较浅,地下水与环境岩土体的相互作用较弱,本次不计算。根据设计,所有地下车站,采用明挖法施工,成灌客运站—东洪路站的17段区间采用盾构法施工,线路东段的十洪大道站、经干院站及相邻的三段区间为高架敷设方式施工。

成都市地处岷江冲积扇状平原的南东边缘,区内地形平坦,地势受扇状平原控制。地铁围岩为饱水的  $Q_3 + Q_4$  沙卵砾石,车站埋深5.9~14.6 m、区间隧道埋深2~15 m。地铁线路经过区域地下水具有埋藏浅、变幅小、季节性变化明显等特征。城区一环路以内地下水平均埋深3.67 m,城区二环路以内地下水平均埋深3.92 m,二环路以外地下水平均埋深3.69 m。区内地下水的径流方向主要是由西北向东南方向,与地铁走向线呈大角度相交(图3)。

#### 3.1 疏干排水引起的地面沉降

地铁2号线沿线主要的含水层为  $Q_3 + Q_4$  沙卵砾石层,为潜水含水层。根据各地下车站的规模,用式(1)~(11)可以计算

出由于疏干排水造成的车站附近地面沉降值。计算过程中弹性模量( $E$ )采用的综合平均值47 MPa。

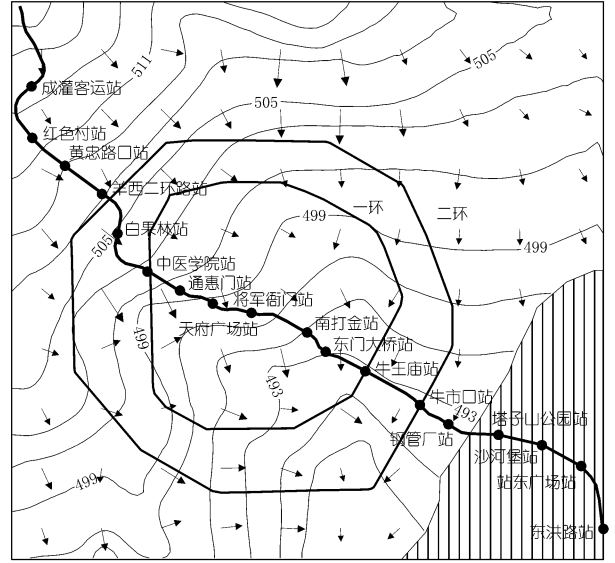


图3 成都市丰水期地下水水位等值线、流线及车站分布

表1 地铁2号各站疏干排水引起的地表沉降值计算(距抽水井10 m)

站名	S/m	H/m	h/m	r <sub>0</sub> /m	k/(m·d <sup>-1</sup> )	R <sub>0</sub> /m	ΔH'/m	沉降值/m
成灌客运站	16.20	81.10	64.90	77.58	15.0	1130.06	16.1503	0.0557
红色村站	17.30	84.80	67.50	58.44	15.0	1234.01	17.2425	0.0635
黄忠路口站	16.90	77.00	60.10	62.12	30.0	1624.51	16.8485	0.0606
羊西二环路站	17.60	62.10	44.50	90.40	30.0	1519.32	17.5564	0.0657
白果林站	17.30	49.00	31.70	58.77	30.0	1326.58	17.2368	0.0634
中医学站	12.60	36.50	23.90	76.22	30.0	833.89	12.5373	0.0336
通惠门站	16.40	31.80	15.40	63.38	30.0	1013.09	16.3209	0.0569
将军衙门站	12.40	20.30	7.90	59.21	22.2	526.47	12.2794	0.0324
南打金站	15.30	19.30	4.00	79.93	15.0	520.65	15.1332	0.0493
东门大桥站	11.60	11.60	0.00	53.18	15.0	306.03	10.5771	0.0261

表1为距抽水井10 m处各地铁车站疏干排水引起的地面沉降计算表。由表1可以看出,地铁车站在施工过程中基坑的疏干排水引起的地面沉降一般都在0.01~0.07 m范围内,地面沉降值较小。究其原因主要是,地铁2号隧道沿线主要的含水层为  $Q_3 + Q_4$  沙卵砾石,砾石之间充填了不同粒径的沙,局部还充填有粘性土颗粒,在抽水过程中不易被带走。另外,由于砾石在其间起到骨架的作用,使得含水层不易被压缩。

#### 3.2 地铁隧道结构对环境岩土体的作用

地下水流向与地铁隧道结构之间的夹角关系将直接影响迎水面水位壅高的幅度。其中,地铁2号线从东门大桥站—钢管厂隧道走向与地下水流向呈正交关系;成灌客运站两端、白果林站两端、通惠门站—天府广场站呈大角度相交。这些呈正交或者大角度相交的地段,尤其是地下车站,地下水位的壅高更为显著。可以利用式(3)~(7)计算出各车站地下水水位壅高值(表2)。

由于区内地下水埋深较浅,根据式(10)可以判断,地铁2号线沿线浅基础建筑物大部分基础位于地下水位以下,因此,水位壅高后属于上述的第4种情况。利用式(9)和式(16)可以计算出各车站由于地下水水位壅高后浅基础承载力的降低值,结果见表2。

表 2 地铁 2 号部分隧道水位壅高及对周围浅地基承载力影响计算

地下车站	修建前/ m <sup>2</sup>	修建后/ m <sup>2</sup>	L/ m	Jl	壅高值/ m	$P_{\Delta h}$ / kPa	$\frac{P'_{cr}}{P_{cr}}$
成灌客运站	18104.49	15320.88	240.00	0.0020	0.0872	13.25	0.9753
红色村站	2074.38	1764.70	176.60	0.0010	0.0310	4.71	0.9895
黄忠路口站	2067.83	1734.65	190.00	0.0010	0.0365	5.54	0.9844
羊西二环路站	2562.32	2059.05	287.00	0.0004	0.0281	4.26	0.9911
白果林站	7710.67	5745.97	176.60	0.0017	0.1027	15.59	0.9662
中医学院站	1431.85	938.24	225.60	0.0006	0.0712	10.82	0.9775
通惠门站	1058.52	637.12	192.60	0.0007	0.0892	13.55	0.9733
将军衙门站	3908.57	1821.79	177.40	0.0008	0.1626	24.70	0.9482
南打金站	2008.95	934.86	154.70	0.0015	0.2666	40.50	0.9183
东门大桥站	1806.26	467.81	151.60	0.0008	0.3470	52.72	0.8684

注:每个车站附近选取一个浅基础为计算点。

通过以上的计算表明(表 2),由于受到地铁结构的影响,地铁车站迎水面方向由水位壅高导致的浅基础建筑物的承载力受到了一定的影响,影响最大的为东门大桥站附近的浅基础建筑物,承载力仅为修建前的 86.84%。但总的来说,浅基础建筑物承载力减少较小,对浅基础建筑物的安全不会造成影响。

## 4 结 语

在地铁的建设过程中难免直接或间接地干扰地下水,使之与周围的环境岩土体相互作用,从而产生一系列的环境岩土工程问题,如施工过程中隧道疏干排水引起的地表沉降,运营期内地铁隧道和车站地下结构对地下水的阻碍导致地下水位壅高给浅基础建筑物带来的安全问题等。

(1) 疏干排水过程中含水层中的泥、砂等固体物质大量地被带出,水位下降使得地层孔隙中的静水压力减少都会导致地面沉降。以地下水动力学为基础,利用一维固结理论探讨了地铁建设过程中疏干排水造成的地面沉降。

(2) 地铁结构导致迎水面水位壅高,产生一定的浮力作用,使得土体的有效重力减小,承载力降低,从而影响浅基础建筑的承载力。根据太沙基极限荷载理论对由于地铁结构造成的水位壅高给地铁沿线迎水面浅基础建筑物地基承载力带来的影响进行了研究。

(3) 以成都地铁 2 号线为例,对地铁建设中地下水与环境岩土体相互作用进行了研究,结果表明,成都地铁 2 号线各地铁车站施工过程中由基坑疏干排水引起的地面沉降量在 0.01~0.07 m 范围内,沉降值较小;地铁车站迎水面方向由水位壅高导致的浅基础建筑物的承载力会受到一定的影响,影响最大

的为东门大桥车站附近的浅基础建筑物,承载力仅为修建前的 86.84%。

## 参考文献:

- [1] 黄润秋,戚国庆. 地铁隧道盾构法施工对环境的影响研究. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S1): 2464-2468.
- [2] 郭陕云,万姜林. 我国地铁建设概况及修建技术. 现代隧道技术, 2004, 41(4): 1-6, 21.
- [3] 徐则民,张俾元等. 成都地铁环境工程地质评价. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 63-69.
- [4] 邢巍巍,阎长虹. 南京市地铁工程环境地质评价. 工程地质学报, 2004, 12(3): 298-302.
- [5] 庄乾城,罗国煜等. 地铁建设对城市地下水环境影响的探讨. 水文地质工程地质, 2003, (4): 102-105.
- [6] 张希腾. 浅论地铁建设与地质环境. 广州建筑, 2006, (5): 55-57.
- [7] 徐岩,赵文等. 地铁建设中的环境岩土工程问题分析. 工程勘察, 2007, (7): 11-14.
- [8] 许锡金,李东霞. 基坑降水引起地面沉降计算方法研究. 岩土工程技术, 2004, 18(4): 194-198.
- [9] 施成华,彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测. 土木工程学报, 2006, 39(5): 117-121.
- [10] 乔焕新,白学敏,尹洪武等. 基坑降水引发周围地面沉降的实例分析. 华北科技学院学报, 2007, 4(3): 41-51.
- [11] 中国建筑科学研究院. JGJ 120-99 建筑基坑支护技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [12] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [13] 李俊亭,王俞吉. 地下水动力学. 北京: 地质出版社, 1987.
- [14] 陈希哲. 土力学地基基础(第三版). 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [15] 首都规划建设委员会. GB 50157-92 地下铁道设计规范. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [16] 国家人民防空办公室. GB50108-2001 地下工程防水技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [17] 成璐,许模,毛邦燕. 成都地铁 2 号线地下水壅高的数值模拟. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(1): 93-96.
- [18] 周健,屠洪权,缪俊发. 地下水位与环境岩土工程. 上海: 同济大学出版社, 1995.
- [19] 黑瑞文,郭彦龙,赵春香. 地下水对浅基础地基承载力的影响. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(5): 633-635.
- [20] 张在明. 地下水与建筑工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

(编辑:赵凤超)

发 展 水 利 改 善 民 生