

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3729-07

地下水开采引起的次压缩对隧道长期沉降的影响

刘国彬¹, 李 青², 吴宏伟²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港)

摘 要: 软土地区盾构隧道建成后往往伴随有明显的长期沉降, 较大的隧道沉降会严重影响地铁系统的运营及安全。然而, 目前对于软土地区隧道长期沉降机制的认识尚不明确。以上海地区地铁盾构隧道 1999—2007 年间的隧道沉降为例, 通过室内试验及现场监测对引起隧道长期沉降的因素, 特别对地下水开采引起的软土及砂土层次压缩进行了研究。结果表明, 第 4 含水砂层具有明显的次压缩特性, 抽取地下水引起的第 4 含水层的压缩, 特别是其次压缩变形, 是引起隧道长期沉降的主要原因之一。因此, 严格控制该承压含水层地下水开采是目前缓解上海地铁隧道长期沉降的主要措施。

关 键 词: 隧道长期沉降; 第 4 含水层; 次压缩; 地下水开采

中图分类号: TU 46

文献标识码: A

Influence of secondary compression due to groundwater mining on long-term tunnel settlement

LIU Guo-bin¹, LI Qing², NG C W W²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Large long-term tunnel settlements are generally observed after the completion of shield tunnel construction in soft clay. It is well-recognized that significant tunnel settlements may pose a threat to the serviceability and safety of underground metro systems. However, the mechanisms of the observed large long-term tunnel settlement in soft clay are still not fully understood. Measured tunnel settlements of a metro line in Shanghai from 1999 to 2007 are studied. Several possible causes, especially secondary compressions of clay and sand layers due to groundwater mining, are investigated based on laboratory test and field monitoring results. Noticeable secondary compression of Aquifer IV was found in some areas in Shanghai. The compression of Aquifer IV, especially the secondary compression due to groundwater mining is one of the principal reasons for long-term tunnel settlement. Controlling groundwater mining in Aquifer IV is vital to minimize large tunnel settlement in Shanghai.

Key words: long-term tunnel settlement; aquifer IV; secondary compression; groundwater mining

1 引 言

随着上海城市规模及社会经济的发展, 修建地铁已成为缓解城市交通拥堵的有效途径。自 1995 年 1 号线开通以来, 截至 2010 年 6 月上海已开通运营 11 条线路、267 座车站, 运营里程达到 410 km。预计到 2020 年上海将建成 877 km 的轨道交通网络。然而, 上海地铁 1、2 号线实测数据显示, 隧道沉降呈持续发展的趋势。较大的隧道沉降可能会引起隧道管片的破坏、渗漏及移位^[1], 危及轨道交通

系统的安全。随着越来越多的地铁建成并投入使用, 地铁隧道长期沉降的问题也将日益突出。

由于现场监测通常时间跨度较大且成本昂贵同时影响隧道长期沉降的因素复杂, 因此, 关于隧道长期沉降的实测数据相对较少, 对沉降机制的认识尚不明确。Grantz^[1-2]报道了沉管式隧道使用过程中的长期沉降, 并总结了引起沉管隧道沉降的可能因素, 其中包括: 下卧层地质条件、泥砂淤积、隧道基础施工方法、超载等。陈基炜等^[3]以上海地铁 1 号线隧道变形数据为背景, 分析了 1995~1999 年间

收稿日期: 2011-09-22

基金项目: 香港研究资助局 (RGC) 资助项目 (No. GRF-618006)。

第一作者简介: 刘国彬, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程变形预测和控制、地下工程的相互作用的理论研究, 地铁工程及相关领域的设计理论、施工技术和建设管理等方面的工作。E-mail: tj_liuguobin@126.com

隧道沉降规律,指出上海地区隧道沉降是受地铁运营、地铁沿线施工及地表沉陷等因素综合作用的结果。黄宏伟等^[4]对上海软土盾构隧道因长期沉降引起的纵向变形和结构性状进行了研究,指出不均匀的下卧土层分布及邻近隧道的施工荷载是引起隧道纵向变形不均匀的主要因素。但目前对引起上海软土地区地铁隧道长期沉降的主要原因尚无定论。

本文以韦凯等^[5]报道的上海 2 号线(1 期)隧道沉降为例,结合地下水开采历史,通过室内试验及现场监测对可能引起隧道长期沉降的因素,特别是对地下水开采引起的软土及砂土层次压缩进行了研究。确定了引起上海软土地区隧道长期沉降的主要原因,并提出了缓解隧道长期沉降的措施。

2 2 号线地质条件

上海坐落于长江三角洲最东部,与江苏、浙江两省相邻。地铁 2 号线(1 期)所处位置如图 1 所示。1 期工程于 1995 年 12 月开工建设,1999 年 2 月全线贯通,隧道西起中山公园,东至龙阳路,线路全长 16.4 km,沿线分布了 12 座车站。经过多次延伸,目前 2 号线(徐泾东—浦东国际机场)全长约 60 km,投入运营车站 31 座,是一条横贯上海市连接黄浦江两岸的东西线路。本文 2 号线特指 2 号线 1 期工程。图中同时标示出了地质勘察剖面 A-A 的位置,沿该剖面分布了 5 个深达基岩的钻孔(BH₁~BH₅)。

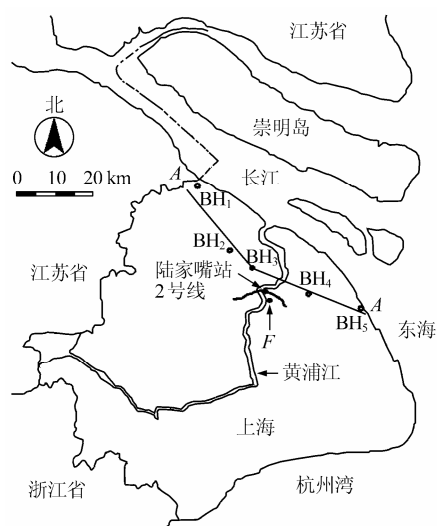


图 1 地铁 2 号线(1 期)及沿 A-A 剖面的钻孔位置
Fig.1 Locations of Metro Line 2 (phase I) and bore holes along sections A-A

图 2 所示为沿 A-A 剖面的地质条件。上海地区广泛分布着 200~350 m 的第四纪松散沉积物。受

地质历史时期冷热气候交替及海平面升降变化的影响,形成了 6 个黏土层及 5 个承压含水层(砂层)交替出现的地质条件。上述含水层、黏土层在局部缺失,如第 5 承压含水层主要分布在北部的谷沟凹陷区。从图中可以看出,第 1、2、3 承压含水层在局部地区相互联通,不同区域第 4 含水层厚度差异明显。图中还显示了 2 号线的投影位置。地铁 2 号线隧道中心线至地表的平均深度约为 13 m,隧道外径为 6.2 m,因此,隧道覆土厚度 C 与隧道直径 D 的比值约为 1.6。

上海地下水位埋深约为地面以下 1 m 左右。50 m 范围内为地下工程中常见土层。地表以下 2 m 为填土层,3~22 m 深度范围内普遍分布着淤泥质黏土层^[6],地铁 2 号线就位于这一软弱黏土层中。软土层下为 20 m 厚的粉质黏土层,第 1 承压含水层为粉细砂,位于地表下 40 m。尽管各承压含水层厚度及埋深各有不同,第 2、3、4、5 承压含水层大约分布在地表以下 60、110、170、260 m 处。

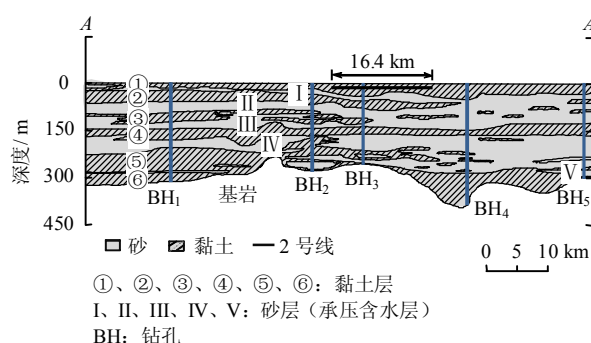


图 2 A-A 剖面工程地质剖面图
Fig.2 Shanghai geological profile along section A-A

3 隧道施工方法及监测仪器布置

上海地铁隧道均采用土压平衡盾构法施工,盾构机身长为 6.24 m,直径为 6.34 m,并配备了同步注浆系统以减少因土体扰动引起的地表沉陷。上海地铁单条隧道因施工引起的地层损失率约为 0.5%~2%^[7]。2 号线隧道衬砌外径为 6.2 m,内径为 5.5 m,每环由 6 块宽为 1.0 m,厚为 0.35 m 的钢筋混凝土预制管片拼装而成。

图 3 为本文所用测量仪器布置图。测压管记录承压含水层水位,用以计算其孔隙水压力的变化。通过布置在地表的水准点来监测 2 号线隧道沿线的地表沉降值。各黏土及承压含水层均安装了一对分层沉降标,测量土体压缩(或回弹)量。如图 4 所示,隧道沉降测量以地铁附近基岩标为高程控制点,利用地铁车站附近的水准点将地面高程精确传至地

铁站台水准点, 隧道内按照 II 级水准测量规范进行全程观测。隧道内的水准点为不锈钢材质, 每隔 5 m 左右将监测点埋设于整体道床轨枕中间。2 号线隧道监测始于 1999 年 12 月, 监测频率约为半年一次。本文所述为 2 号线 1999 年 12 月至 2007 年 5 月间的隧道沉降。

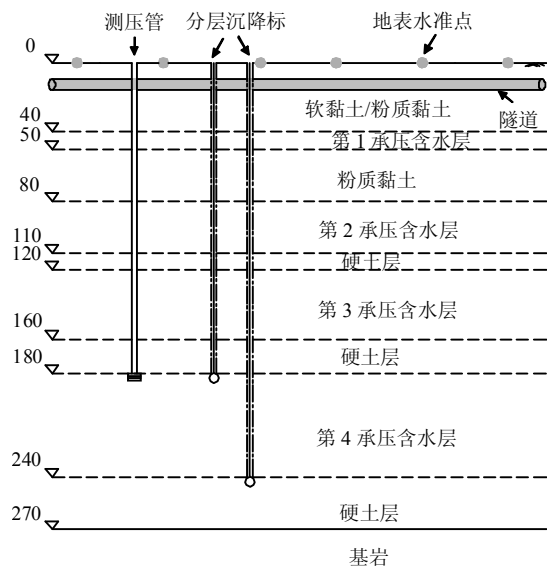


图 3 测量仪器布置图 (单位: m)

Fig.3 Layout of installed instruments (unit: m)

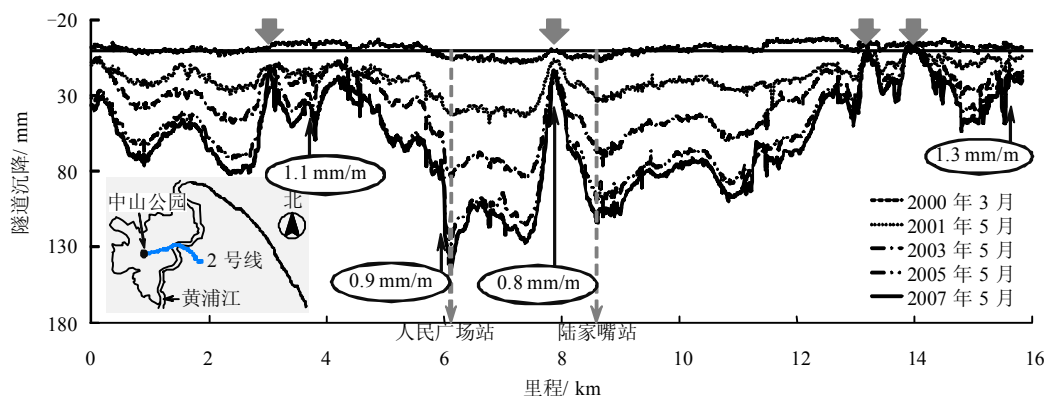


图 5 2 号线上行线隧道沉降曲线^[5]

Fig.5 Measured tunnel settlements along upline of Metro Line 2

2 号线沿线的地质条件差异明显 (见图 2), 因此, 隧道的不均匀沉降 (或隆起) 十分明显。然而, 在图中箭头所示位置隧道沉降量均小于 25 mm, 甚至小于 2 号线人民广场站附近隧道施工后 90 d 内的短期固结沉降量^[8]。目前没有足够的地质勘查资料证明箭头所示地区的地质条件与其他地方存在明显差异, 因此, 这些区域隧道沉降较小的具体原因尚不明确, 可能与隧道施工条件有关。从 2 号线隧道沉降曲线还可以看出, 隧道在监测初期发生了隆起。

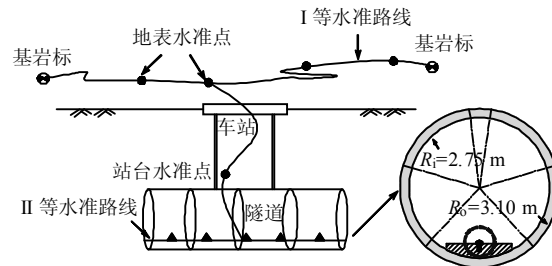


图 4 隧道沉降测量示意图

Fig.4 Schematic diagram of tunnel settlement measurement

4 2 号线隧道长期沉降实测结果及分析

图 5 为 2 号线上行线隧道沉降曲线^[5] (以中山公园站为参考点计算里程)。因为东、西行隧道中心线相距约为 17 m, 两条隧道沉降具有相似的变化趋势, 所以文中用上行线实测隧道沉降为例进行分析。

2007 年 5 月上行线隧道沉降最大值发生在 6.1 km 处 (靠近人民广场), 其大小约为 144 mm。值得注意的是, 隧道沉降监测始于 1999 年 12 月, 距隧道全线贯通 (1999 年 2 月) 已经 10 个月, 因此, 实际的隧道沉降可能大于图中所示隧道沉降量。

2000 年 3 月 (距隧道全线贯通已 14 个月) 上行线隆起量最大值约为 8.9 mm。从 2000 年 7 月开始, 由于黏土的固结作用, 初期隆起的隧道逐渐开始沉降。

隧道的差异沉降对于隧道的运营及安全至关重要。图 5 标出了 2 号线沿线坡度最大的 4 个位置, 其坡度大小分别为 0.11%、0.09%、0.08%、0.13%。隧道坡度 (亦称角变形) 是指隧道两点间差异沉降与其之间距离的比值。Grantz^[2]在对美国贝敦 (Baytown)

沉管隧道的监测中发现,角变形约为 0.16%处的隧道接缝发生了渗漏。但 2 号线隧道坡度均小于 0.16%,尽管 2 号线隧道接缝处能够承受的最大角变形尚不明确,但其随时间不断增大的趋势应该引起足够的重视。

5 隧道施工及循环荷载的影响

软土中隧道开挖不可避免会引起周围土体的扰动而导致沉降,同时盾尾注浆材料的固结也会引起地表和隧道沉降。Lee 等^[8]对 2 号线人民广场附近盾构施工引起的地表沉降进行了监测,发现施工过程中隧道上方的地表沉降大都发生在盾构机通过监测断面后的 60 d 内,因为采用了同步压力注浆,所以这一阶段的沉降主要是由浆液及扰动土体的固结引起的。随后由于扰动土体的次固结,地表沉降有少量的增加。在盾构通过后的 2 个月内,浆液和扰动土体的主固结基本完成,软土次固结对地表沉降的影响很小。盾构通过后的 3 个月后,地表沉降仅为 25 mm。由此可以看出,仅凭盾构施工引起的浆液及扰动土体的固结并不能解释监测开始后 2 号线隧道沉降一直发展,人民广场附近上行线的最大长期沉降(7.5 a)高达 144 mm 这一现象。

地铁运营过程中,隧道及其周围软黏土必然会受到列车运行所产生的循环荷载的作用。为了研究列车循环荷载对软弱黏土压缩特性的影响,刘明^[9]对取自上海某基坑 10 m 深的原状黏土进行了不排水循环三轴试验。在较低的循环荷载下,试样轴向应变在 1 000 个循环后基本趋于稳定,最终的轴向应变小于 0.05%。而 2 号线列车产生的循环荷载小于试验中采用的循环荷载^[10],因此,列车循环荷载的作用有限,也不可能是引起 2 号线隧道沉降的主要因素。

6 地下水开采引起的软土及承压含水层层次压缩的影响

上海地下水开采历史已有百年之久,主要为维持工业及经济发展所用。但由于管理无序,地下水开采量逐年增大,使上海饱受地面沉陷的困扰。如前所述,2 号线隧道埋深仅为 13 m,从承压含水层抽取地下水势必会引起相应含水层(砂层)及黏土层的固结压缩,进而引起 2 号线隧道的沉降。为了研究抽取地下水是否为引起 2 号线隧道长期沉降的主要因素,对陆家嘴站隧道沉降以及附近的 *F* 点不同土层沉降进行了分析(陆家嘴站及 *F* 点的相对位置如图 1 所示)。根据距 *F* 点最接近的 BH₃ 的钻孔

资料,*F* 点的地质剖面如图 3 所示,下文中隧道长期沉降的分析均以该地质条件为准。*F* 点安装了测压管及分层沉降标以监测承压水位变化及各土层压缩量。

6.1 *F* 点实测承压水头及土层压缩

1965 年以前,上海地区地下水开采主要集中在第 2、3 承压含水层,为了减小地表沉降,1965 年开始主要开采层转为深层的第 4、5 承压含水层^[11]。

图 6(a)为 1985—2007 年 *F* 点各承压含水层实测水头埋深的变化曲线。1985—1990 年间第 1~3 承压含水层水头大小相近(约地表下 1 m)且保持不变,由此可知,地表以下 160 m 范围内实测水压压力接近静止水压力。1990 年之后,由于开采量的不断增大,含水层水头逐渐下降,到 2007 年水头下降至地表下约 5 m 处。而第 4 含水层 1985 年的水头位于地表下 13 m 处,因为第 4 含水层是当时最主要地下水开采层。随后第 4 承压含水层水头急剧降低,1997 年水头下降至地表下 32 m。由于对开采量进行了控制,1997 年以后水头逐渐升高,特别是 2004—2007 年间水头上升了 4 m。

图 6(b)为 *F* 点各土层压缩量随时间的变化曲线,括号中数字显示了各土层的厚度。如图所示,第 1~3 承压含水层压缩量随时间线性增大,与图 6(a)中水头变化基本一致。第 4 含水层的压缩量远大于其他土层,与这一层较大的水头变化密切相关。

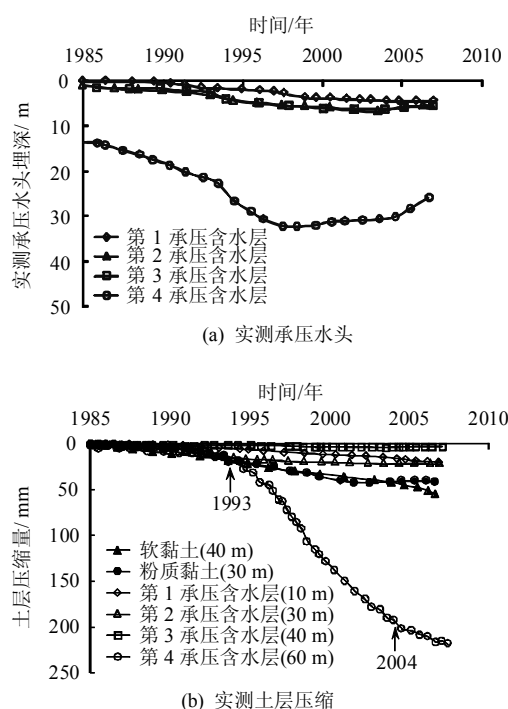


图 6 *F* 点实测承压水头及土层压缩

Fig.6 Measured pressure head of each aquifer and compressions of soil layers at location *F*

虽然第 4 含水层水头在 1985—1993 年间下降了 9 m, 但砂层压缩量只有 15 mm 且随时间线性增大, 与前三个承压含水层的变化规律相同。而 1993—2007 年间虽然水头仅下降 4 m, 但砂层的压缩却达到了 203 mm。尤其是 1997 年后第 4 含水层水头下降趋势已得到控制, 并略有回升, 但砂层仍呈持续压缩的状态。第 4 含水层压缩量的突然增大可能由这一砂层的塑性变形产生。

6.2 软弱黏土层的次压缩

如前所述, 2 号线隧道恰好位于软弱黏土层内。为了研究上海软弱黏土层的次压缩特性及其对隧道长期沉降的影响, 对取自上海某基坑 8.5~15.5 m 深度范围内的原状土样进行一维固结及长期压缩试验。固结试验试样直径为 69 mm, 高为 19 mm。共进行了 6 组试验, 包括 2 组常规固结试验及 4 组长达 70 d 的长期压缩试验。同时为了比较, 还进行了 1 组重塑土样的常规压缩试验^[12]。

次压缩系数被广泛用于评价土体的次压缩特性。次压缩系数 ε_α 可以定义为

$$\varepsilon_\alpha = \frac{C_\alpha}{1+e} = \frac{\Delta e / \Delta \lg t}{1+e} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \lg t} \quad (1)$$

式中: C_α 为主固结完成后 $e-\lg t$ 曲线的斜率, 即 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \lg t$; e 为孔隙比; ε 为竖向应变; t 为时间^[13]。图 7 为基于一维常规压缩及长期压缩试验的上海软黏土次压缩系数与天然含水率的关系曲线。与其他 13 种天然土体相比, 上海黏土的次压缩系数相对较小。Mesri^[13]将土体次压缩系数大小划分为极低至极高 6 个等级。从图中可以看出, 上海软弱黏土的次压缩系数主要分布在 0.2%~0.8%, 按照 Mesri 提出的土体次压缩分类标准, 上海软黏土可以划分为低至中等压缩性土。Liu 等^[14]在对上海某深基坑的监测中发现基坑附近的地表沉降在开挖后的 60 d 内主要是由超孔隙水压力消散而非软土次固结(蠕变)引起的。这与一维固结试验的结果基本相符。同时 Lee 等^[8]对 2 号线人民广场附近隧道的监测也证明上海软黏土次压缩对地表及隧道沉降的影响不大。根据以上室内试验及现场监测结果, 有理由相信上海软黏土的次压缩并非引起隧道长期沉降的主要原因。

6.3 地下水开采引起的承压含水层的次压缩

众所周知, 引起上海地面沉降的主要原因是地下水开采^[11, 15]。考虑到第 4 含水层压缩远大于其他土层压缩, 因此, 有理由相信第 4 含水层的持续压缩是引起隧道长期沉降的主要原因。

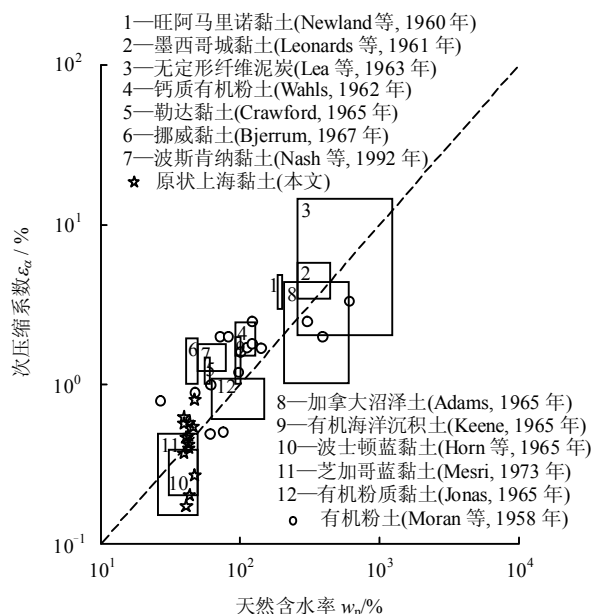


图 7 上海黏土与其他天然黏土的次压缩系数对比曲线^[12]
Fig.7 Comparison of coefficient of secondary compression between Shanghai Clay and other natural soil deposits

图 8 为各承压含水层压缩量与竖向有效应力关系曲线, 各砂层平均竖向有效应力由承压含水层水头变化(见图 6(a))估算得出。如图所示, 第 1~3 承压含水层压缩量大致随着竖向有效应力增大而线性增加, 说明前 3 个砂层为弹性压缩。据 Shi 等^[11]报道, 1965 年第 2、3 承压含水层水头下降到历史最低位(地表下 30 m), 随后逐渐回升至地表下 5 m 左右。从图 6(a)可以看出, 1985~2007 年间第 2、3 含水层水头均未超过历史最低水头, 因此, 这两个砂层应力始终位于弹性区域内。随着水头的下降, 有效应力不断增大, 含水层砂层发生弹性压缩。

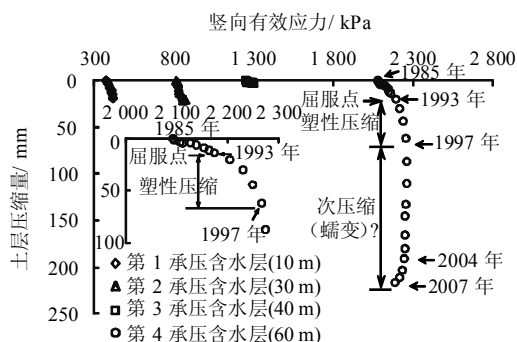


图 8 实测承压含水层压缩量-竖向有效应力关系曲线
Fig.8 Relationships of measured compression and estimated vertical effective stress of each aquifer from 1985 to 2007

第 4 含水层在 1985—1993 年间也表现出弹性压缩(见图 8 小图), 但 1993 年后砂层的压缩突然增

大。第4含水层历史最低水头为地下21 m^[11],随着开采量的增加,1993年水位下降至地下22 m,低于历史最低水位。因此,该承压含水层的竖向有效应力超过了砂层的屈服应力,砂层开始塑性变形。据此,可以估算出第4承压含水层的平均屈服应力约为2 174 kPa。1993—1997年随着水头的下降,有效应力不断增大,砂层发生塑性压缩。1997—2004年由于限制了开采量,第4承压水层水位有所上升(见图6(a)),导致该砂层有效应力基本不变,甚至在2004年之后有所减小。在此期间第4含水层不但没有出现回弹、反而产生了持续压缩,这说明第4含水层不但有塑性变形还有与时间有关的次压缩(蠕变)变形。

如果F点第4含水层确实发生了次压缩变形,那么这一特性是否是上海地区第4含水层的普遍性质?图9为上海地区不同地点第4含水层的压缩曲线。如图所示,3个不同地方的压缩曲线非常相似,屈服应力大致分布在2 174~2 205 kPa范围内。显然,与过去认为承压含水砂层的弹性变形不同,这些地点砂层的变形不仅包含了塑性压缩而且还有次压缩变形。张云等^[16]在上海其他地区也发现了类似的现象。因此,上海某些地区第4含水砂层具有明显的次压缩特性,所以较大的隧道长期沉降可能主要由第4含水层的次压缩变形引起。

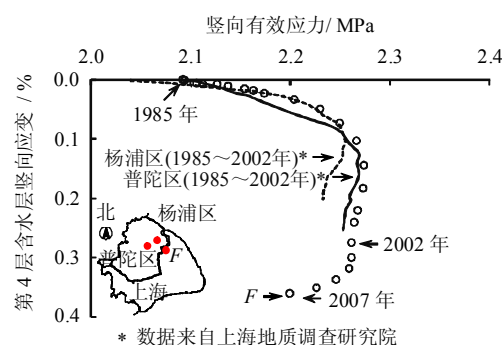


图9 上海地区不同地点的第4含水层压缩曲线
Fig.9 Comparison of compressions of aquifer IV at various locations in Shanghai

7 隧道长期沉降的预测

较大的隧道沉降不仅会危及地铁系统的安全运营,而且还会影响隧道上方的建筑物的使用。若能预测隧道长期沉降的发展趋势,将能帮助岩土工程师采取有效措施以减缓沉降的不断发展。Fujita^[17]指出,盾构通过后任意时刻 t 隧道上方地表长期沉降 d_t 可用如下双曲线公式表示:

$$\delta_t = \frac{t}{a + bt} \quad (2)$$

式中: a 为 t 和 t/δ_t 线性拟合曲线在纵坐标上的截距; b 为该拟合曲线的斜率。

Tan等^[18]指出,双曲线公式对于预测黏土、砂层夹杂的复杂土层的地表沉降同样适用。如前所述,2号线隧道沉降主要是由地下水开采引起的黏土及承压砂层引起的,且隧道埋深较浅,因此,隧道沉降应与地表沉降具有相似的规律。式(2)可以改写为 $t/\delta_t = a + bt$,本文用该式预测2号线隧道长期沉降。 a 、 b 分别是初始沉降速率和隧道最终沉降的倒数,因此,根据该双曲线公式,隧道的最终沉降为: $\delta_u = 1/b$ 。

图10为2号线近人民广场站(6.1 km)及陆家嘴站(8.7 km)隧道的长期沉降。因为目前关于隧道沉降的实测数据较少,图中用台北地铁盾构施工后地表长期沉降作为比较。如图所示,上海2号线两处截面隧道沉降明显大于台北地铁,且呈不断增大的趋势。2号线拟合参数 a 、 b 也与台北地铁隧道存在较大差异,可能与其地质条件不同有关。根据双曲线公式,人民广场和陆家嘴处隧道的最终沉降分别为333、250 mm。而在2007年5月(距监测开始7.5 a)时两处的沉降仅为144、113 mm,分别占最终沉降的43%和45%。而第4含水层的压缩量就占到实测隧道沉降的75%左右。由此可以看出,若维持目前地下水开采量,2号线隧道沉降量将会持续增大,可能会严重危及地铁的安全运营。因此,目前减缓2号线隧道的沉降当务之急是要合理控制地下水开采,特别是第4承压含水层的开采。

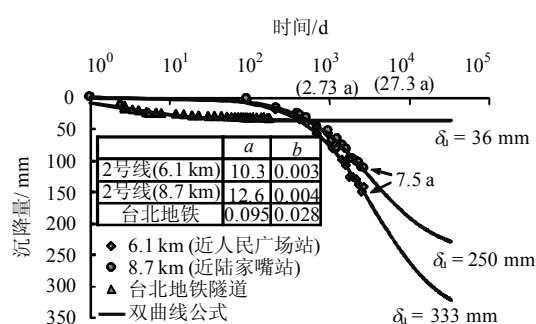


图10 2号线隧道长期沉降预测
Fig.10 Prediction of long-term tunnel settlement of Line 2

2号线隧道沉降速率在2004年后有减小的趋势。如近人民广场站,1999年12月后的4.5 a内隧道沉降了83 mm (18.4 mm/a); 2004—2007年间,隧道沉降从83 mm增大到113 mm (10 mm/a)。隧道沉降速率的减小与上海对地下水开采采取了严格的限制措施有关,说明目前采用的地下水回灌措施能一定程度上减缓隧道的长期沉降。

8 结 论

(1) 上海地区第 4 含水层变形不仅包含塑性变形, 同时还具有与时间有关的次压缩(蠕变)变形。相较于软弱黏土层, 抽取地下水引起的第 4 承压含水砂层的次压缩尤为明显。

(2) 地下水开采引起的黏土层和承压含水层压缩是引起上海地铁盾构隧道长期沉降的主要因素。特别是第 4 含水层的压缩约占隧道沉降的 75% 左右。

(3) 合理控制地下水开采, 特别是第 4 含水层的开采对缓解隧道长期沉降至关重要。目前上海地区采用的地下水回灌措施能够一定程度上减缓隧道的长期沉降。

参 考 文 献

- [1] GRANTZ W C. Immersed tunnel settlements Part 1: Nature of settlements[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16(3): 195—201.
- [2] GRANTZ W C. Immersed tunnel settlements Part 2: Case histories[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16(3): 203—210.
- [3] 陈基伟, 詹龙喜. 上海地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J]. **上海地质**, 2000, 21(2): 51—56.
CHEN Ji-wei, ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of Shanghai metro line 1[J]. **Shanghai Geology**, 2000, 21(2): 51—56.
- [4] 黄宏伟, 臧小龙. 盾构隧道纵向变形研究分析[J]. **地下空间**, 2002, 22(3): 244—251.
HUANG Hong-wei, ZANG Xiao-long. Research and analysis on longitudinal deformation characteristics of shield tunnel[J]. **Underground Space**, 2002, 22(3): 244—251.
- [5] 韦凯, 宫全美, 周顺华. 隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2009, 37(8): 993—998.
WEI Kai, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Ant colony algorithms of long-term uneven settlement prediction in tunnel[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2009, 37(8): 993—998.
- [6] 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司. DGJ08—37—2002 上海市岩土工程勘察规范[S]. 上海: 上海科学出版社, 2002.
- [7] 陈越峰, 张庆贺, 张颖, 等. 近距离三线并行盾构隧道施工实测分析[J]. **地下空间与工程学报**, 2008, 4(2): 336—340.
CHEN Yue-feng, ZHANG Qing-he, ZHANG Yin, et al. In-situ monitoring and analyzing on construction of three closely spaced shield tunnels[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(2): 336—340.
- [8] LEE K M, JI H W, SHEN C K, et al. Ground response to the construction of Shanghai Metro Tunnel-Line 2[J]. **Soils and Foundations**, 1999, 39(3): 113—134.
- [9] 刘明. 饱和软黏土动力本构模型研究与地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] NG C W W, LI Q, LIU G B. Long-term tunnel settlement mechanisms of Metro Line 2 in Shanghai[C]//Proceedings of 7th International Symposium on "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground", Rome: [s. n.], 2011.
- [11] SHI X, WU J, YE S, et al. Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai city, China[J]. **Engineering Geology**, 2008, 100(1—2): 27—42.
- [12] NG C W W, LI Q, LIU G B. Characteristics of one-dimensional compressibility of Shanghai Clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(4): 630—636.
- [13] MESRI G. Coefficient of secondary compression[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1973, 99(1): 123—137.
- [14] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(8): 1004—1013.
- [15] CHAI J C, SHEN S L, ZHU H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai[J]. **Géotechnique**, 2004, 54(2): 143—147.
- [16] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 抽灌条件下上海砂土层的变形特征和变形参数[J]. **水利学报**, 2006, 37(5): 560—566.
ZHANG Yun, XUE Yu-qun, WU Ji-chun, et al. Characteristics and parameters of sand strata deformation due to groundwater pumping in Shanghai[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(5): 560—566.
- [17] FUJITA K. Prediction of surface settlements caused by shield tunneling[C]//Proceedings of International Conference on Soil Mechanics. Mexico City: [s. n.], 1982, 1: 239—246.
- [18] TAN T S, INOUE T, LEE S L. Hyperbolic method for consolidation analysis[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(11): 1723—1737.