

某地铁右线隧道侧穿地下建筑物的影响研究

黎明 王哲强

中铁资源集团勘察设计有限公司, 河北 廊坊 065000

[摘要]天津地处华北地区滨海平原, 该区域地下水丰富, 近年修建了大量的地铁, 方便了人民群众的出行。现代城市中, 空间资源较为有限, 人们对城市空间的综合利用要求日渐拔高。地铁作为地下工程的代表之一, 能充分利用地下空间资源, 利用其独立性、封闭性和便捷性为人们出行提供方便, 是特殊的一种地下建(构)筑物。地下建(构)筑物位于地下一定深度, 荷载先于工程结构而存在, 工程地质条件的复杂性和不确定性较大, 受水文地质条件影响巨大, 其工程信息往往具有模糊性; 施工过程中对土方开挖将引起隧道围岩向开挖临空面产生变形, 隧道围岩应力重新分布, 对支护结构和施工安全产生影响。文中以天津某地铁右线隧道工程侧向穿越地下变电站为实例, 利用当前较为成熟的计算机有限元方法, 结合监测过程中所采集到的沉降监测数, 对某区间右线隧道侧向穿越既有地下变电站所引发的影响进行研究, 并对所产生的影响范围和大小进行定性定量的评估, 探讨其发展趋势, 与现有规范内容进行一些对比, 并希望借此对类似工程提供一些参考价值。

[关键词]地下空间资源; 地下建(构)筑物; 应力重分布; 监测数据; 有限元方法

DOI: 10.33142/sca.v8i9.17974

中图分类号: TU942

文献标识码: A

Research on the Influence of a Subway Right Line Tunnel Passing through Underground Buildings

LI Ming, WANG Zheqiang

China Railway Resources Group Survey and Design Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract: Tianjin is located in the coastal plain of North China, which is rich in groundwater. In recent years, a large number of subways have been built to facilitate people's travel. In modern cities, space resources are limited, and people's demand for comprehensive utilization of urban space is getting higher and higher. As one of the representatives of underground engineering, subway can make full use of underground space resources and provide convenience for people to travel by its independence, closeness and convenience. It is a special underground building. Underground buildings (structures) are located at a certain depth underground, and the load exists before the engineering structure. The complexity and uncertainty of engineering geological conditions are great, which are greatly influenced by hydrogeological conditions, and their engineering information is often fuzzy. During the construction process, the excavation of earthwork will cause the surrounding rock of tunnel to deform to the excavation face, and the stress of surrounding rock of tunnel will be redistributed, which will have an impact on the supporting structure and construction safety. In this paper, taking the right-line tunnel project of a subway in Tianjin as an example, the influence caused by the right-line tunnel crossing the existing underground substation in a certain section is studied by using the mature computer finite element method and combining with the settlement monitoring data collected in the monitoring process, and the scope and size of the influence are evaluated qualitatively and quantitatively, and its development trend is discussed, and some comparisons are made with the existing specifications, hoping to provide some reference value for similar projects.

Keywords: underground space resources; underground buildings (structures); stress redistribution; monitoring data; finite element method

引言

改革开放以来,我国城市建设得到了较程度的发展,城市空间资源日益紧张,人们对城市空间等资源的利用率要求越来越高。地铁作为可以缓解这一要求的有效方法,

得到了广泛应用。地铁施工问题除了较复杂的工程地质和水文地质条件外,同时也面临着地铁隧道施工技术问题所引发的建(构)筑物变形或沉降等问题^[1,2]。

笔者作为一名工程技术人员,有幸经历了其中某些地

铁项目的建设,在本文中将对天津地铁某线路某区间从侧面穿越地下建筑的影响进行研究,对地铁施工过程中的一些沉降等问题进行探讨,以期从实践中获得本项目相关数据与规范条文间的一些联系,为今后的工作提供参考价值。

1 工程概况

天津某地铁线路某区间左线和右线皆为单洞单线隧道,采用盾构法施工,隧道结构内径 6.0m,外径约 6.6m。R 站~X 站区间下穿沿线一处公园内池塘及沿线的酒店等建筑物,并下穿既有某运营地铁线路的附属结构 35kV 变电站后到达 X 站。区间竖曲线为“一”字坡,线路纵坡最大为 28‰(下坡)。

区间右线侧向穿越地下 35kV 变电站,该地下 35kV 变电站为地下两层结构的建筑,底板采用厚 1100mm 的混凝土结构,底板埋深约 12.4m,围护结构采用厚 800mm 的地下连续墙;右线隧道顶部埋深约 28.3m,距变电站底板竖向距离约 15.9m,与变电站外墙最小水平净距约 5.6m,见图 1 与图 2。

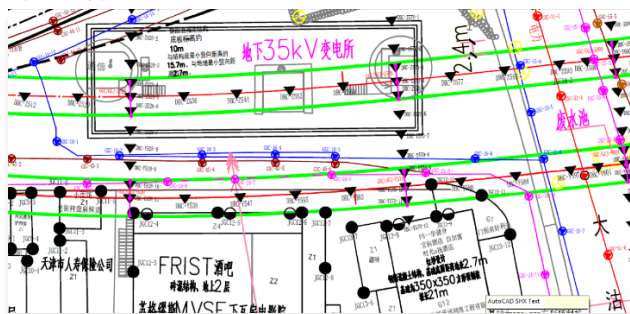


图 1 地铁隧道与地下建筑平面位置关系图

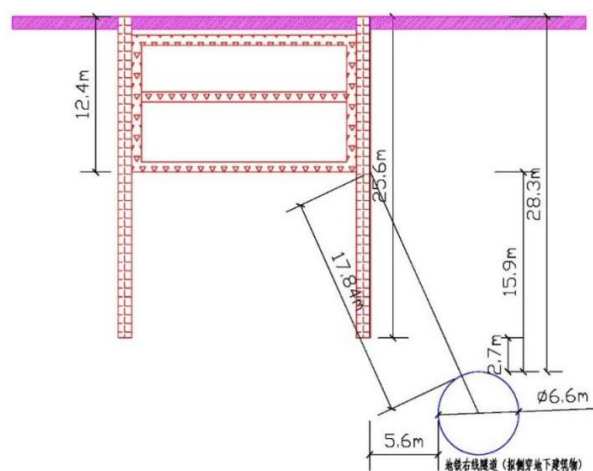


图 2 地铁隧道与地下建筑位置关系剖面图

2 工程地质与水文地质条件

2.1 工程地质条件

根据本项目岩土工程勘察资料,在场地埋深 60.00m

深度范围内,地基土按地层成因和年代等可分为以下 9 层,分别为:人工填土层(Q_{ml}),沟底新近淤积层(Q_4^3N),全新统上组陆相冲积层(Q_4^3al),全新统中组海相沉积层(Q_4^2m),全新统下组沼泽相沉积层(Q_4^1h),全新统下组陆相冲积层(Q_4^1al),上更新统第五组陆相冲积层(Q_3al),上更新统第四组滨海潮汐带沉积层(Q_3mc),上更新统第三组陆相冲积层(Q_3al)和上更新统第二组海相沉积层(Q_3m)。

按力学性质可进一步划分为 18 个亚(或次亚)层,分别为:①₁杂填土,①₂素填土,④₁粉质黏土,⑥₁粉质黏土,⑥₃砂质粉土,⑥₄粉质黏土,⑦粉质黏土,⑧₁粉质黏土,⑧₂砂质粉土,⑨₁粉质黏土,⑨₂粉砂,⑩₁粉质黏土,⑪₁粉质黏土,⑪₂粉砂,⑪₃粉质黏土,⑪₄粉砂,⑪₅粉质黏土,⑫₁粉质黏土。场地土多为正常固结土,局部为欠固结土。根据拟建场地地基土的物理力学性指标试验结果,综合分析后推荐各土层设计参数。

结合工程地质纵断面图图 3,确定盾构隧道在侧穿时主要位于第⑨₂粉砂,⑩₁粉质黏土,⑪₁粉质黏土中,对应的右线隧道位置约为 520 环~580 环。

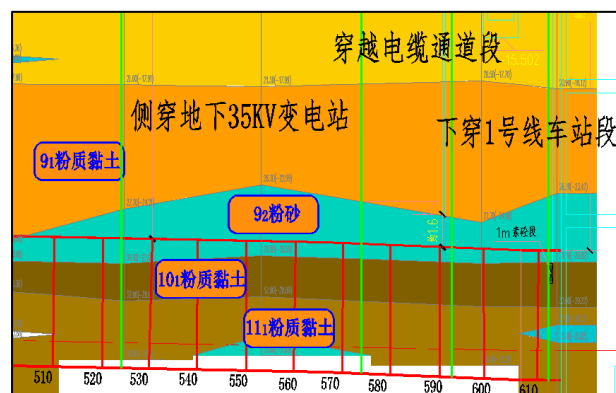


图 3 拟穿越地层纵断面位置示意图

2.2 水文地质条件

根据地基土的岩性分层、室内渗透试验结果,场地埋深 50.00m 以上可划分为 2 个水文地质岩土组,地下水类型分别为潜水和承压水^[3]:

(1) 潜水:据查,本场地内潜水含水层主要为人工填土(Q_{ml})、上组陆相冲积层(Q_4^3al)及中组海相沉积层(Q_4^2m),含水介质颗粒较细,水力坡度小,地下水径流较为缓慢,其排泄方式主要有蒸发、人工开采和向下部承压水、地表水体渗透,补给方式主要为降雨后地表渗入^[4]和河流侧向补给。

勘察期间测得场地内的潜水初见水位埋深 2.50~3.00m(大沽标高 1.04~0.35m),静止水位埋深 1.70~

2.40m（大沽标高 1.75~1.55m）。潜水水位一般年变幅在 0.50~1.00m 间。

（2）承压水：本区间场地勘探深度范围内，存在两层承压水，即第一层承压水层和第二层承压水层。

第一层承压水层主要存在于下组陆相冲积层（ Q_4^{al} ）砂质粉土（⑧₂）、上更新统第五组陆相冲积层（ Q_3^{al} ）粉砂（⑨₂）透水性好，为第一承压含水层。上更新统第四组滨海潮汐带沉积层（ Q_3^{dmc} ）粉质黏土（⑩₁）及第三组陆相冲积层（ Q_3^{al} ）粉质黏土（⑪₁）透水性相对较差，可视为承压含水层隔水底板。根据抽水试验水位观测结果，该承压水水位大沽标高约为 0.10m。

第二层承压水层主要存在于上更新统第三组陆相冲积层（ Q_3^{al} ）粉砂（⑪₂、⑪₄），其透水性好，为第二承压含水层。上更新统第三组陆相冲积层（ Q_3^{al} ）粉质黏土（⑪₅）、上更新统第二组海相沉积层（ Q_3^{bm} ）粉质黏土（⑫₁）透水性相对较差，可视为承压含水层隔水底板。根据抽水试验水位观测结果，该承压水水位大沽标高约为 -0.57m。

3 研究的理论依据与方法

在岩土工程界，主要依据土力学、弹塑性力学和岩体力学等理论方法，抓主要问题，忽略一些影响小的因素，建立本构关系。文中主要以太沙基等学者的土力学和岩体力学等理论为理论依据，将岩土体视为理想的各向同性材料，以有限元模拟计算的方法代替原本复杂的数学手工计算^[4]。

隧道开挖后，在岩土体中形成空洞洞室，此洞室周边一定范围内的岩土体将发生应力重分布，并产生变形或位移，洞室周边应力重分布影响的岩土体则称为围岩。

如果围岩单元体处于自身所受应力小于自身强度的状态，则围岩的变形属于弹性变形范畴；反之，如果围岩的应力已经超过了能承受的最大强度，那么围岩单元体的变形属于塑性变形，甚至因塑性变形过大而产生失稳等破坏，将在围岩中形成一个塑性区域。

根据极限相关理论，此时重分布应力应该在无穷远处才能趋近于 σ_0 ；而在工程实践中，当 $r=6R_0$ 时，周向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r 已经跟天然应力 σ_0 十分接近，相差约为 2.8%，因此一般可认为由于地下洞室引起的应力重分布范围是 $r=6R_0$ 范围内，超出这一范围将认为原岩土体应力状态基本不受洞室的影响，通常也以此作为有限元计算及模拟的边界范围，重分布应力随距离 r 的变化示意图如下图 4 所示^[5]。

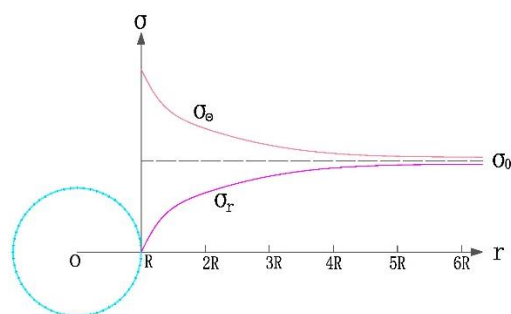


图 4 重分布应力随距离 r 的变化趋势示意图

可见，当隧道开挖形成空洞后，会对其周边一定范围的地面或地下既有建（构）筑物产生影响，导致影响范围内的建（构）筑物出现位移或变形^[6]，可能引起结构的内力变化。在现实生活中，地下洞室的截面形状一般以非圆形居多，但人们在长期的实践过程中，已经总结出了关于非圆形截面与圆形截面之间的一系列换算方法，可较为准确地知道重分布应力的分布情况，对此本文不再赘述。

4 数据分析与讨论

为便于观测建（构）筑物和地表的变形，监测人员在地下变电站上方及其附近布置了一系列观测点，分别观测各点的位移，地表沉降观测点号分别为 DBC-Z480、DBC-Z488-1~7、DBC-Z-496、DBC-Z-504、DBC-Z-512、DBC-Z-520、DBC-Z528-1~11、DBC-Z536、DBC-Z544、DBC-Z552、DBC-Z560、DBC-Z570-1~9、DBC-Z-577、DBC-Z-585、DBC-Y-480、DBC-Y-488-8~11、DBC-Y-497、DBC-Y-505、DBC-Y-538、DBC-Y547、DBC-Y555、DBC-Y563、DBC-Y580；建（构）筑物观测点主要为 JGC12-1~11、JGC13-1~12，同时布设若干管线沉降观测点。其中 DBC-Z528-1~11 和 DBC-Z570-1~9 分别形成监测断面 1（观测数据见图 5）和断面 2（观测数据见图 6），专门监测地下变电站的位移情况。

4.1 竖向位移分析

该地铁区间右线隧道于 2024 年 9 月 22 日开始推进至地下变电站附近（右线隧道之第 528 环，即 Y528 环），并于 2024 年 10 月 5 日完成侧穿（右线隧道之第 580 环，即 Y580 环），穿越期间在地下变电站上方及其附近的各地表监测点出现了不同程度的竖向位移，其中向下的最大位移量发生右线隧道正上方的 DBC-Y-528-11 号点（图 5），实测竖向位移值 -5.93mm，与竖向位移计算云图（图 7）上查询到的数值 -6.20mm 很接近。

穿越期间监测数据显示，发生在地下变电站正上方的 DBC-Y-528-7 号点（图 5），实测竖向位移量约 -1.61mm，

这与竖向位移计算云图（图 7）上查询到的数值-1.50mm 很接近；而地下变电站底板发生了约-1.50mm 的沉降，主要是隧道推进过程中开挖土方所致。

从工程地质条件看，侧穿时盾构隧道主要位于第⑨₂粉砂、⑩₁粉质黏土和⑪₁粉质黏土中，第⑨₂粉砂为无黏

性土，第⑩₁粉质黏土和⑪₁粉质黏土为可塑状中软土，上述土抵抗向隧道临空面变形的能力较弱，当下方土方被挖除后，土体在自重作用下向隧道临空面产生位移和变形，应力也随之重新分布（应力重分布），之后达到一个新的平衡。

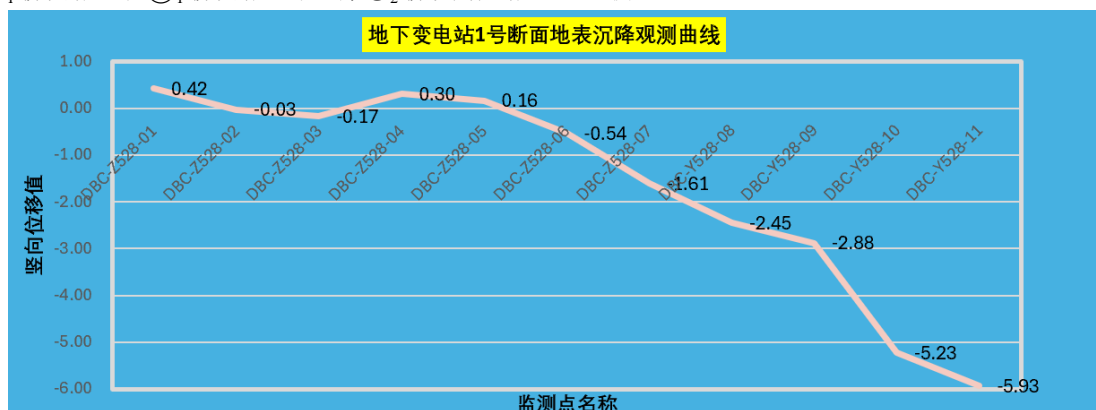


图 5 地下变电站 1 号断面地表沉降观测曲线

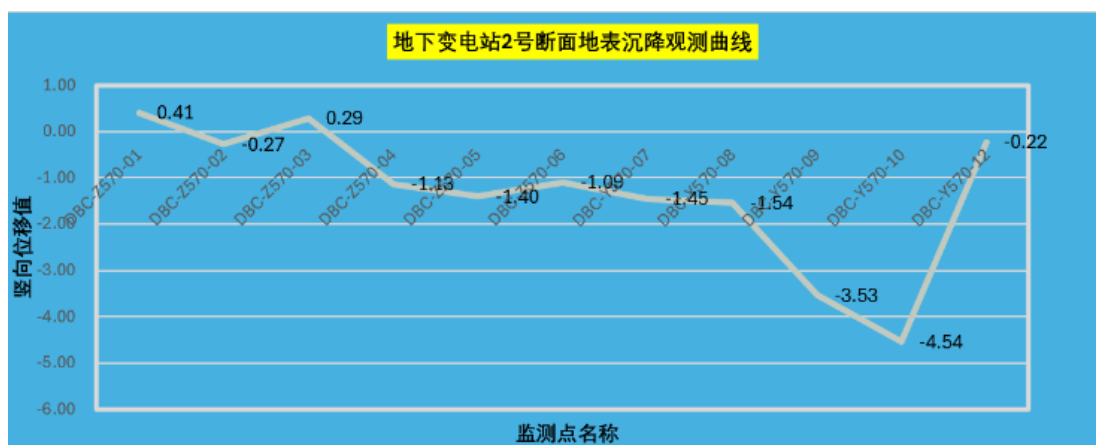


图 6 地下变电站 2 号断面地表沉降观测曲线

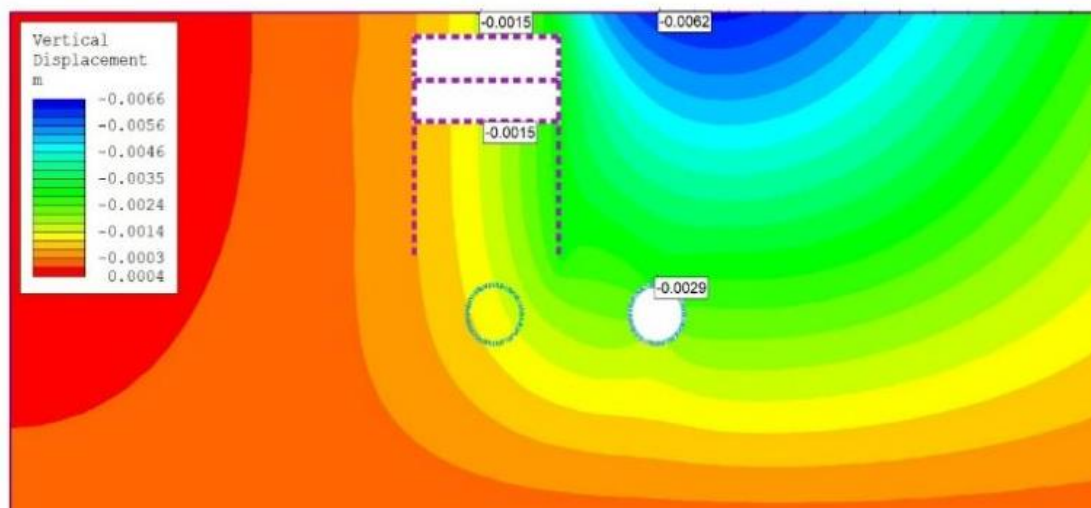


图 7 竖向位移云图

4.2 水平位移分析

从水平方向位移云图（图8）上看，右线隧道穿越期间，地下变电站右侧侧墙上水平位移几乎为零，与既有设施观测数据也基本吻合。这主要是因为地下变电站外侧支护结构采用了地下连续墙这样的大刚度支护结构，使其具有良好的抵抗侧向位移的能力，很好地保护了地下变电站，符合地下工程中的“两墙合一”原理^[7]。

4.3 总位移与剪切应变与影响范围的关系分析

地下变电站建完后，周边岩土体经过一段时间后达到了一个稳定的状态。在右线盾构隧道推进过程中，因土方的开挖将产生一个临空面，第⑨₂层粉砂为无黏性土，第⑩₁粉质黏土和⑪₁粉质黏土为可塑状中软土，上述土抵抗向隧道临空面变形的能力较弱，周边岩土体向临空面发生了变形或位移，最后又达到一个新的平衡状态，即应力进行了重新分布。

对于圆形断面隧道而言，它影响的范围一般是洞室外

侧3倍洞径范围（即3D），见总位移云图（图9），这与前面的理论研究结果较为一致。根据模拟数据的分析可推测，深埋隧道的主要影响范围与隧道断面的尺寸大小关系不大，主要受底板埋深（ $H=34.9\text{m}$ ）影响较大。

从监测及计算数据的角度上看，隧道顶部上方至隧道外侧约23.1m（约0.66H）为主要影响区，隧道外侧约23.1m（约0.66H）到57.1m（约1.64H）为次要影响区，其他区域视为可能影响区，地表点沉降的数值模拟计算数据统计曲线见图10。

应力状态的改变，对于一般的静定结构，大多只是产生变形或位移，不会引发新的内力；对于处于超静定状态下的地下变电站等地下建筑物，易在内部引发新的内力。故对起支撑作用的底板、中板和顶板等，在它们与侧墙的连接处应注意加强钢筋构件的连接质量和提高混凝土的浇筑质量。对梁这类构件，建议采用设置腋角的方式进行加强，避免发生过大的应力集中。

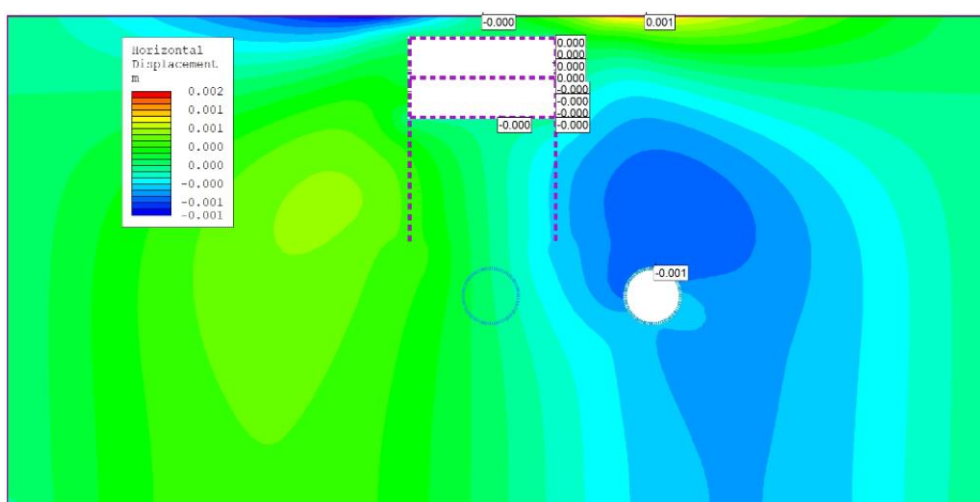


图8 水平位移云图

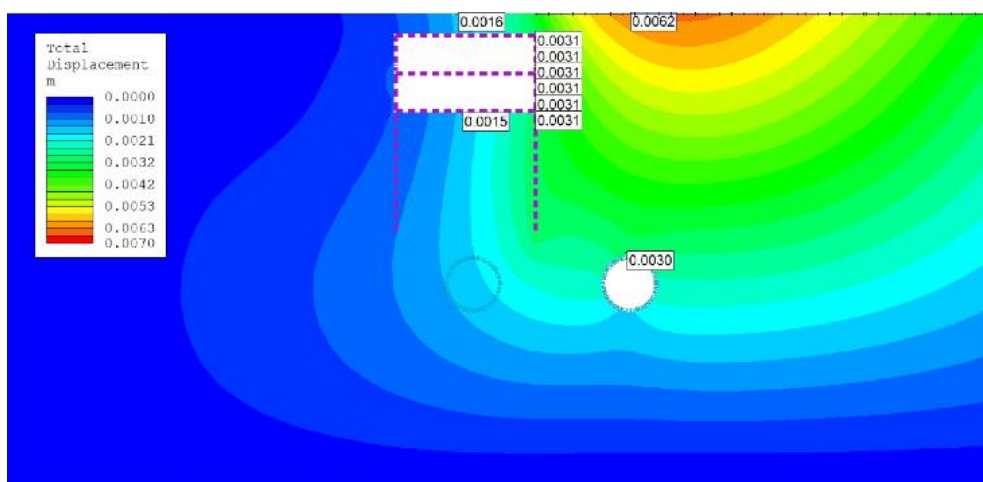


图9 总位移云图

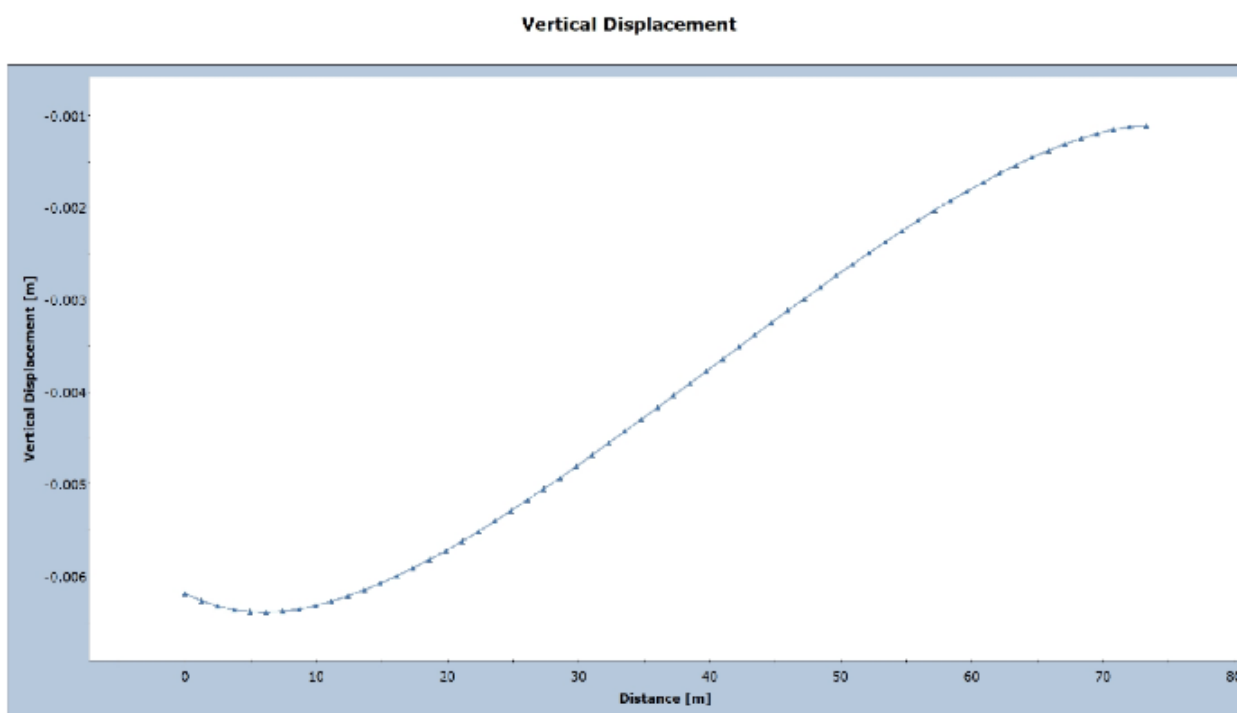


图 10 数值模拟地表沉降数据曲线

5 结论

(1) 对规范条文的佐证

据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911—2013)介绍,北京地区主要影响区可取隧道顶部上方至隧道外侧 $0.6H$, 隧道外侧 $0.6H$ 至隧道外侧 $1.5H$ 为次要影响区, 隧道外侧 $1.5H$ 之外为可能影响区。

本项目中,从监测及计算数据的角度上看,可取底板埋深为 H (本文中 $H=34.9\text{m}$), 隧道顶部上方至隧道外侧约 23.1m (约 $0.66H$) 为主要影响区, 隧道外侧约 23.1m (约 $0.66H$) 到 57.1m (约 $1.64H$) 为次要影响区, 其它区域可视为可能影响区。

这一分析结果与现场观测数据和工程经验较为吻合。北京地区的这些主要影响区、次要影响区和可能影响区相对于本项目而言范围稍小,这主要是因为北京地区的地层多为正常固结土,而天津的地层多为欠固结或正常固结的中软土。这类数据在天津地区较少搜集到,可对华北地区类似的地铁建设项目提供一些参考,便于在施工过程中进行监测和工艺控制,做到有的放矢。

(2) 对工程建设的启发

在城市发展过程中,各工程建设往往存在交叉,例如本文中所述的地下变电站与盾构隧道,先建的地下变电站将不可避免地受到后建的盾构隧道影响。从工程安全性出发,工程技术人员应该适当考虑到这些工况,在一些易产

生二次内力的部位采用设置腋角、增设变截面和加密配筋等方法进行加强,使已建工程在受到这类影响时也不影响其安全性或正常使用。

(3) 信息化施工的重要性

在本次侧向穿越地下建筑物(变电站)的过程中,施工组织得当,管片拼装及时,盾构隧道质量可靠,未发生盾构机泄压或较严重的地下水泄漏事件。但在该线的始发端曾发生过盾构机尾部漏水事件(约在 20 天后消警),导致地表出现了 $33.93\text{mm}\sim 85.88\text{mm}$ 的沉降,并引发周边建(构)物、路面和地下管线等发生较大沉降和不均匀沉降,所幸监测预警后处理及时,未引发较大工程事故。

在施工过程中,应实行信息化施工,加强对地表建(构)筑物、管线和地表等的沉降观测,及时反馈监测数据,应注重施工与监测的有机结合,及时发现异常情况并采取措施补救,这对有效提高盾构隧道在城市地铁建设中的施工安全性有着重要意义。

[参考文献]

- [1]赵栋山.隧道下穿水库设计与施工方案[J].山西交通科技,2010(4):48-50.
- [2]邱品茗,蔺安林.地铁超浅埋群洞数值模拟及施工相关问题研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [3]刘阳,周文革.天古崖水库与隧道的水文地质关系之分

析[J].甘肃科技,2005(21):62-64.

[4]严林,唐建新.石灰岩地区高速公路隧道围岩动态分级与支护合理性研究[D].重庆:重庆大学,2009.

[5]黎明.基于有限元方法的岩溶对大瑶山 1 号隧道影响研究[J].工程技术,2020,3(1):196-198.

[6]曾纪光.皂市水库隧道变形观测简易方法及数据处理[J].

探矿工程(岩土钻掘工程),2005(10):44-45.

[7]龚晓南.基础刚度对复合地基性状的影响[J].工程力学,2003(20):67-73.

作者简介:黎明(1986-),男,高级工程师,硕士,主要从事岩土工程方面工作与研究。王哲强(1985-),男,高级工程师,学士,主要从事工程监测方面工作与研究。