

盾构施工对邻近建筑物的沉降影响研究

杨景凯^{1,2,3}, 陈安^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093;

3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 为了分析地铁盾构施工对邻近建筑物沉降的影响情况, 本文依托东莞市虎门镇一盾构施工区间为研究对象, 通过现场监测及 Flac^{3D} 软件建立既有建筑物与盾构的计算模型, 研究了在不同情况下盾构施工开挖对既有建筑物的沉降影响情况。结果表明随着隧道埋深由 15.2 m 增大到 23.2 m, 建筑物的最大沉降量由 16.41 mm 减少至 11.02 mm; 隧道中线与建筑物的距离从 14 m 降至 8 m, 建筑物最大沉降量从 8.15 mm 升至 20.98 mm。表明盾构施工时需要保证隧道的埋深与其和建筑物之间的距离来确保施工后既有建筑物的继续使用。

关键词: 盾构施工; 建筑物沉降; 数值模拟

中图分类号: P642; U231; U455 **文献标识码:** A

IMPACT OF SHIELD CONSTRUCTION ON SETTLEMENT OF ADJACENT BUILDINGS

YANG Jing-kai^{1,2,3}, CHEN An^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to analyse the impact of underground shield construction on the settlement of adjacent buildings. Based on the construction section of a shield structure in Humen Town, Dongguan City, this paper establishes the calculation model of the existing building and shield structure through site monitoring and Flac^{3D} software. The influence of shield excavation on settlement of existing buildings under different conditions is studied. The results show that with the tunnel depth increasing from 15.2 m to 23.2 m, the maximum settlement of the building decreases from 16.41 mm to 11.02 mm. The distance between the middle line of the tunnel and the building is reduced from 14m to 8m, and the maximum settlement of the building is increased from 8.15mm to 20.98mm. It shows that the distance between the buried depth of the tunnel and the building should be ensured to ensure the continued use of the existing building after construction.

Key words: shield tunneling construction; building settlement; numerical simulation

1 引言

随着国家建设的不断发展,城市隧道工程也得到了大量的兴建。而盾构因为施工方便、施工安全、对周围环境造成的影响较小等优点成为隧道施工的主要施工方法^[1-2]。盾构施工技术也随着现代工程的进步而迅速发展,现今的盾构施工也在不断挑战一系列复杂地质条件,同时这也使其所处的施工环境越来越恶劣,施工对邻近建筑物带来的影响也不断涌现,严重甚至会导致建筑物破坏,对城市经济带来极其严峻的挑战^[3-5]。李鹏飞^[6]等通过建立动态预测模型,并且根据开挖对沉降的影响程度划分区域,为现场监测提供了重要的理论帮助。Mroue^[7]等通过使用三维有限元方法比较了隧道上方存在建筑物的情况下的盾构穿越的影响与忽略隧道上方结构物情况下的影响,发现后者的沉降结果明显变小,这其中的不足之处在模拟中未考虑盾构引发的结构物地基反力的变化规律和建筑物底板的存在,导致地表沉降在独立基础处发生突变。刘联伟^[8-9]博士通过理论计算、数值模拟、现场监测三者相结合的方法“复合地层条件下盾构隧道地表沉降规律”的研究,得到了地表沉降的影响因素及其变化规律,并将成果应用于广州地铁的实际工程中,并推导出简洁并且能够有效地反应出地表沉降规律的准则拟合方程,此拟合方程对盾构施工中预测地表沉降有着重大意义。杨广武、关龙、刘军、郑知斌^[10]等,研究了地基变形模量对于建筑物沉降的关系,发现地基变形模量提高可以有效减小既有建筑物的沉降。

盾构的施工过程是隧道周围岩土体介质被破坏、应力调整、自我适应重新恢复稳定的过程,既是地层有形变形、地下水水迁移的过程,也是地层应力重新分布的过程^[11]。当地层变形、应力调整超出了岩土体能够承受的范围后,则会引起施工事故^[12]。因此应当加强此方面的探究,采取有效的措施来降低盾构施工对邻近建筑物的影响是十分有必要的^[13]。本文以虎门镇一盾构区间施工为依托,通过现场监测并运用 Flac^{3D} 构建数值模拟模型,研究在不同隧道埋深与不同隧道中线和建筑物之间的距离的情况下,既有建筑物的沉降状况。并通过分析计算后得出该盾构区间的一系列参数之间的规律来给以后的盾构施工一些建议。这将大大降低现实中盾构施工所带来的安全风险,并且对节约造价成本及安全施工有重大意义。

2 工程概况

2.1 工程简介

本工程为东莞市虎门镇穗莞深城际轨道交通项目工程东莞至深圳段,由东莞洪梅为起点,经过沙田、厚街、虎门、长安,最后以深圳松岗为终点。本文选取的区间为虎长区间左线盾构 ZDK53+800 至 ZDK53+910 段。该段长 110 m,邻近的 7 栋既有建筑物为本文主要监测对象。盾构施工与房屋的平面位置关系如图 1 所示。

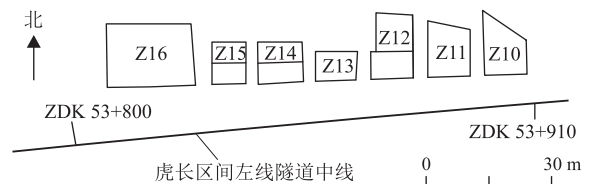


图 1 盾构施工与既有建筑物平面示意图

该盾构区间侧穿此 7 栋既有建筑,本文选取 Z13 为研究对象。Z13 为一个 3 层 10 m 高的框架结构房屋建筑;基础为条形基础,埋深 1 m;隧道盾构管片外径为 6 m。本文中盾构隧道与目标建筑的剖面关系如图 2 所示。

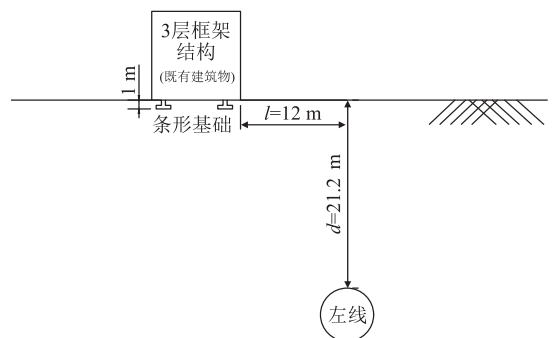


图 2 隧道与既有建筑物剖面示意图

2.2 工程地质条件

根据相关地质资料及施工线路地质勘察报告,该区地层按成因可分为 5 大类,这些大类按其成份和结构的不同又可分为 19 个亚层。其中盾构主要涉及地层的地质特征如下表 1 所示。

此段地下水稳定水位埋深介于 0.10~6.80 之间(此为旱季所测),地下水位变化幅度约为 1.00~2.40 m。

3 工程现场监测

3.1 监测点布置

监测点布置如图 3 所示。

表 1 土层地质特征描述

大类名称	亚层层号	亚层名称	土层特征
第四系人工填筑土层	1-1	杂填土	杂色,稍湿,松散,未固结,主要由黏性土、砂土、碎石混大量建筑垃圾或含生活垃圾组成,为新近人工填筑土,均匀性较差,层厚 1.00~5.80 m
	1-2	素填土	灰色、灰黄等色,稍湿-湿,松散-稍密,未固结,主要以黏性土为主,局部含少量碎石、碎砖块等建筑垃圾,为新近人工填筑土,均匀性较差,层厚 0.70~10.00 m
第四系海陆交互沉积层	2-2	粉质黏土	褐红、灰黄等色,可塑,成份以粉黏粒为主,黏性较好,含铁锰质氧化斑,含少量砂粒。无摇振反应,干强度中等,韧性中等,切面稍光滑。层厚 0.50~9.10 m
	2-3	细砂	局部过渡为中砂、粗砂,呈灰色、灰黄、灰白色,饱和,松散-稍密,局部中密状,成份主要以石英、长石为主,颗粒级配较差,泥质含量约 10%,局部含少量有机质。层厚 0.60~11.00 m
	2-4	粉质黏土	灰白、灰黄色,软塑为主,局部呈可塑状,成份以粉黏粒为主,含少量石英砂粒及高岭土,土质不均匀。无摇振反应,干强度中等,韧性中等,切面稍光滑。层厚 0.70~15.50 m

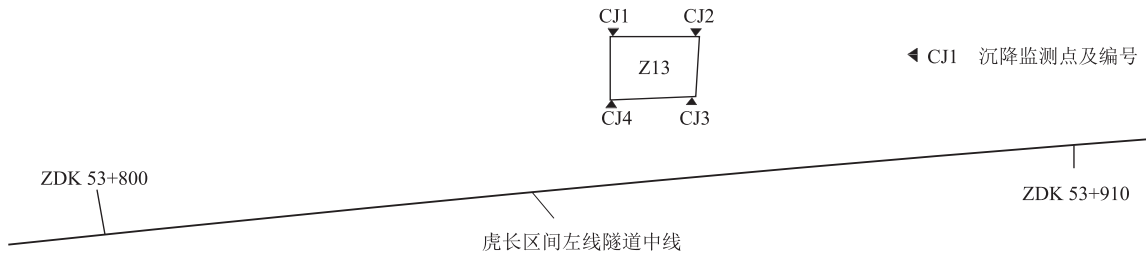


图 3 监测点布置平面示意图

3.2 监测方法

首先需要在现场附近设置水准控制网,埋设时间在沉降监测前的一个月,水准控制网可以由两个或两个以上的水准点组成。水准控制网埋设后需要定期校核以保证水准控制网本身的准确性,这样可以保证沉降监测数据的准确性。建筑物的沉降监测所使用的仪器为电子精密水准仪,测量精度为二等水准测量精度。

3.3 监测数据

对盾构隧道施工过程中所监测到的数据进行处理分析,施工日期从 2011 年 10 月 17 日到 2011 年 11 月 28 日,共计 43 d,监测数据主要为目标建筑物的变形沉降。4 个监测点的数据随时间变化曲线如图 4 所示。

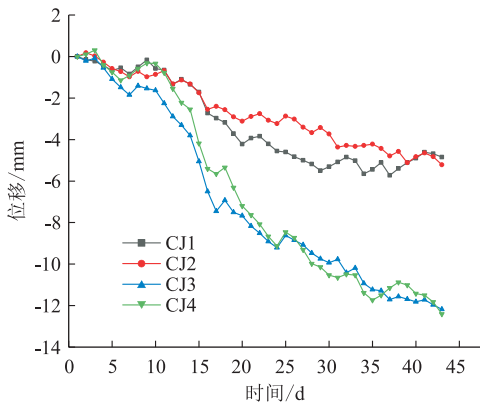


图 4 房屋沉降监测数据折线图

3.4 监测数据分析

被监测建筑物位于线路右侧,且在施工影响范围内,其中 CJ3 与 CJ4 监测点位于靠近盾构施工隧道一侧,CJ1 与 CJ2 监测点位于远离盾构施工隧道一侧。由图 4 可得,对比内侧 CJ1 及 CJ2 测点(距离盾构施工较远的一侧)与外侧 CJ3 及 CJ4 测点各值可知,内侧沉降小于外侧沉降,内侧 CJ1 最大沉降值为 5.72 mm;CJ2 最大沉降值为 5.22 mm,外侧 CJ3 最大沉降为 11.96 mm;CJ4 最大沉降为 12.41 mm,表明盾构施工对既有建筑物沉降有着明显的影响,并且随着与盾构隧道施工距离的缩短,施工对其造成的影响增大。

CJ1 监测点的沉降数据在后期有明显回弹的趋势,图中不难看出 CJ2 也有同样的回弹,不过幅度要比 CJ1 小很多。这样的沉降量回弹是因为随着盾构施工过程中对地层及邻近建筑物的影响是复杂多变的,其中力学受多方条件影响,出现些许隆起现象也是正常的。不过随着盾构施工的进行,其沉降量必然是继续增加,这也可以从后面沉降量开始继续增大可以看出。

4 有限元数值建模

4.1 土体计算参数

土体计算参数如表 2 所示。

4.2 基本假定

(1) 鉴于既有建筑物已使用的年份,认定其基

表2 土体计算参数

名称	重度 γ /kN·m ⁻³	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /°	变形模量 E_0 /MPa	压缩模量 E_s /MPa	泊松比
1-1 杂填土	18.5	12.0	6.8	0.71	3.2	0.3
1-2 素填土	17.7	12.0	8.0	0.80	3.9	0.31
2-2 粉质黏土	18.5	15.6	7.8	2.2	5.3	0.33
2-3 细砂	19.0	0	19.8	2.0	5.1	0.24
2-4 粉质黏土	18.9	20.9	6.6	1.5	5.5	0.35

础的固结沉降已经完成。

(2) 建模范围内,认为各土层呈均质水平层状分布,且同一土层为各向同性,隧道衬砌的变形与受力均在弹性范围内。

(3) 地下水的影响通过调整土体参数来实现。

(4) 不考虑盾构结束后土体的缓慢固结(工后沉降)和蠕变作用。

(5) 既有建筑上部结构的荷载,按 15 kPa/层等效分配到各基础上。

4.3 三维模型的建立

本次模型使用 Flac^{3D} 软件进行数值模拟,建立的模型为有限拆分模型,查阅相关资料并根据相关的实际工程经验可知,为了避免隧道开挖产生的应力、变形等影响并结合实际工程需要,模型宽度需要达到隧道直径 d 的 6~10 倍,而模型的深度则需要达到隧道直径以下的部分达到 3~4 倍的隧道直径^[14]。因此,本文盾构单线隧道模型 X、Y、Z 方向的尺寸设定为 106 m×30 m×52 m。根据上文中基本假定中的第二点,本模型中土体的本构模型使用的是摩尔-库伦本构模型。本工程中隧道直径为 6.4 m,内径为 5.4 m,埋深为 21.2 m,衬砌所使用的是预制钢筋混凝土管片,这些管片宽度为 1.2 m,厚度为 0.35 m,管片与围岩之间需要通过注浆来填充管片与围岩形成的建筑空隙,注浆层的厚度为 0.2 m,弹性模量取 2 MPa,泊松比取 0.2。三维模型如图 5 所示。

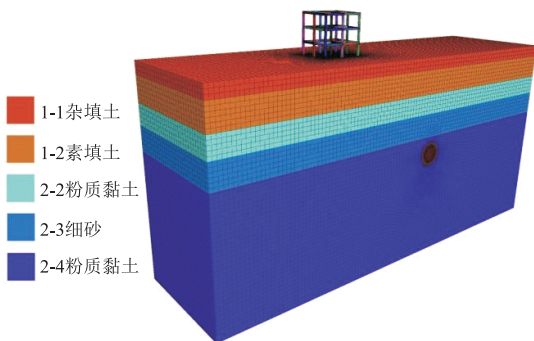


图5 三维模型示意图

4.4 边界条件

Flac^{3D} 软件内设有多种边界条件,但本模型由于地下水的影响通过折减系数实现,因此主要考虑力学边界条件:模型的上边界视为地表,即为自由边界,前后左右 4 个方向的侧面以及底部则均受法向约束。

4.5 模拟结果分析

图 6 给出了施工阶段建筑物竖向沉降的位移云图。

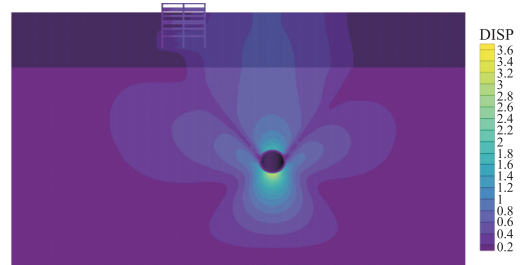


图6 建筑物竖向沉降位移云图

为了分析模型与实际工程是否相符合,将工程监测数据与模拟所得数据进行对比分析。工程监测数据由第三节可得。CJ1~CJ4 的工程监测与 Flac^{3D} 模拟最大沉降量如表 3 所示。

表3 各监测点最大沉降量汇总表

	现场监测/mm	模拟计算/mm
CJ1	5.72	5.39
CJ2	5.22	5.46
CJ3	12.18	11.22
CJ4	12.41	11.98

对比工程监测数据与 Flac^{3D} 模拟计算数据可得,CJ1 处模拟最大沉降量为 5.39 mm,工程监测最大沉降量为 5.72 mm,模拟数据比监测数据小 5.86%;CJ2 处模拟最大沉降量为 5.46 mm,工程监测最大沉降量为 5.22 mm,模拟数据比监测数据大 4.6%;CJ3 处模拟最大沉降量为 11.22 mm,工程监测最大沉降量为 12.18 mm,模拟数据比监测数据小 7.88%;CJ4 处模拟最大沉降量为 11.98 mm,工程监测最大沉降量为 12.41 mm,模拟数据比监测数据小 3.46%。由此可知,模拟得出的数值结果与实际工程监测所得出的数值结果相差不大,均在 10% 的合理范围之内,因而可以看出本模型还是比较正确的,故该模型与实际工程相符合程度较高,可以使用该模型继续进行下面的数值计算。

5 隧道埋深对建筑物沉降影响

盾构施工过程中,土体必然会因为施工所导致

变形,这种变形在开挖时尤为明显。而当变形传递至地面上建筑物时,必然会导致地面建筑物原有的应力平衡遭到破坏,这时建筑物整体必须要经历一系列,诸如位移、沉降、倾斜等变化来达到重新平衡的状态。这些由于受到外力而引起的变化和施工中的许多因素都有或多或少的关系,例如隧道的基础形式、隧道的深度、隧道距离建筑物的距离、土体的各种性质等。本节将通过上文所验证的模型,不断改变隧道埋深 d (图 2)来进行数值模拟计算,再将所

得到的数据进行处理分析,以此讨论隧道埋深与邻近既有建筑物沉降的影响关系。

由于上文模型埋深 d 取值为 21.2 m,故通过 Flac^{3D}将 d 的取值分别改为 15.2 m、17.3 m、19.2 m、23.2 m,共计 4 种工况,模型中除隧道埋深 d 外的所有条件均不变。分别对这 4 种工况进行数值模拟计算,计算结果如下图 7 所示(为了方便比较,图 7 中也增加了 d 取值为 21.2 m 时的数据)。

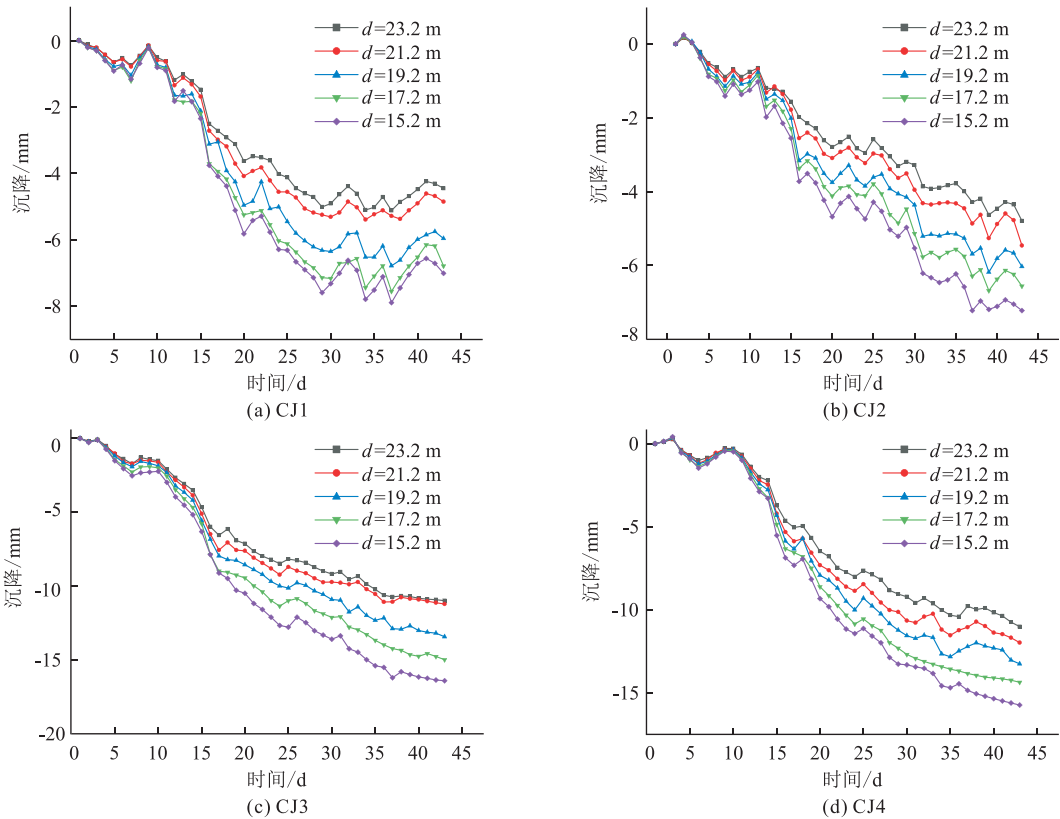


图 7 同一监测点不同隧道埋深 d 下房屋沉降变化曲线

图 7 中(a)、(b)、(c)、(d)分别为监测点 CJ1、CJ2、CJ3、CJ4 在不同隧道埋深 d 下的房屋沉降变化折线图。折线图显示 CJ1 监测点在隧道埋深 d 为 23.2 m、21.2 m、19.2 m、17.2 m、15.2 m 的情况下最大沉降量分别为 5.12 mm、5.39 mm、6.78 mm、7.55 mm、7.89 mm; CJ2 监测点在这些隧道埋深 d 的情况下最大沉降量分别为 4.79 mm、5.46 mm、6.18 mm、6.68 mm、7.22 mm; CJ3 和 CJ4 监测点的最大沉降量分别为 10.99 mm、11.22 mm、13.43 mm、14.98 mm、16.41 mm 和 11.02 mm、11.98 mm、13.25 mm、14.36 mm、15.73 mm。

将模拟监测得到的既有建筑物最大沉降量与隧道埋深 d 之间的关系绘制成点线图,如图 8 所示。

通过图 8 可以非常直观地看出不同埋深 d 下房

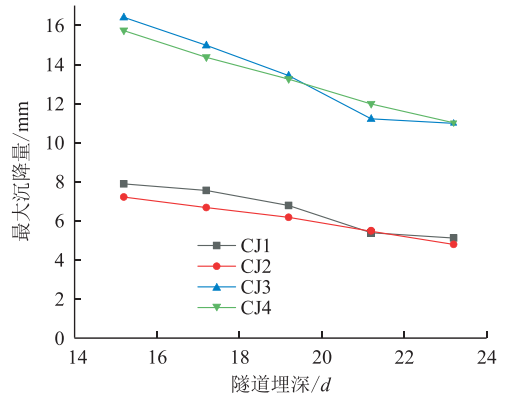


图 8 隧道埋深 d 与建筑物最大沉降量关系图

屋沉降的变化情况。纵观整体而言,隧道埋深 d 的变化对于既有建筑物的竖向沉降的影响还是比较大

的,并且房屋沉降量的大小与隧道埋深 d 成反比关系。

外侧(距离盾构施工较近的一边)监测点 CJ3 与 CJ4 的斜率明显大于内侧监测点 CJ1 与 CJ2 的斜率,并且外侧在 15.2~17.2 m 段的斜率明显大于内侧。这说明外侧更加容易受到盾构施工的影响,并且随着埋深 d 的减小,两侧受影响的相异程度也越来越大。这也间接表明随着隧道埋深 d 的降低,建筑物更容易发生由于两侧沉降不一样而导致的开裂等问题。

6 隧道中线到建筑物的距离对其沉降的影响

在上文中我们较为详细地讨论了隧道埋深对邻近建筑物沉降的影响,本节主要讨论隧道中线与既有建筑物之间的距离对既有建筑物沉降所带来的影响。依旧使用 Flac^{3D} 软件进行数值模拟计算,计

算模型依旧沿用第四节,固定隧道埋深 d ,改变隧道中线到建筑物的距离 l (如图 2),其余条件均不变,分别进行模拟计算。

由于上文模型隧道中线与既有建筑物之间的距离 l 为 12 m,故将 l 的取值分别改成 8 m、10 m 以及 14 m,其余条件均不变,隧道埋深固定为 21.2 m,共计 3 种工况,分别对这 3 种工况进行模拟,得到的结果如图 9 所示。

图 9 中(a)、(b)、(c)、(d)与上文同样,分别为监测点 CJ1、CJ2、CJ3、CJ4 在不同距离 l 的情况下的房屋沉降变化点线图。点线图显示 CJ1 监测点在隧道中线与建筑物距离 l 为 14 m、12 m、10 m、8 m 的情况下最大沉降量分别为 3.82 mm、5.39 mm、6.93 mm、8.96 mm; CJ2 监测点在这些距离 l 的情况下最大沉降量分别为 3.73 mm、5.46 mm、6.88 mm、8.62 mm; CJ3 和 CJ4 监测点的最大沉降量分别为 7.86 mm、11.22 mm、15.08 mm、19.88 mm 和 8.15 mm、11.98 mm、16.02 mm、20.98 mm。

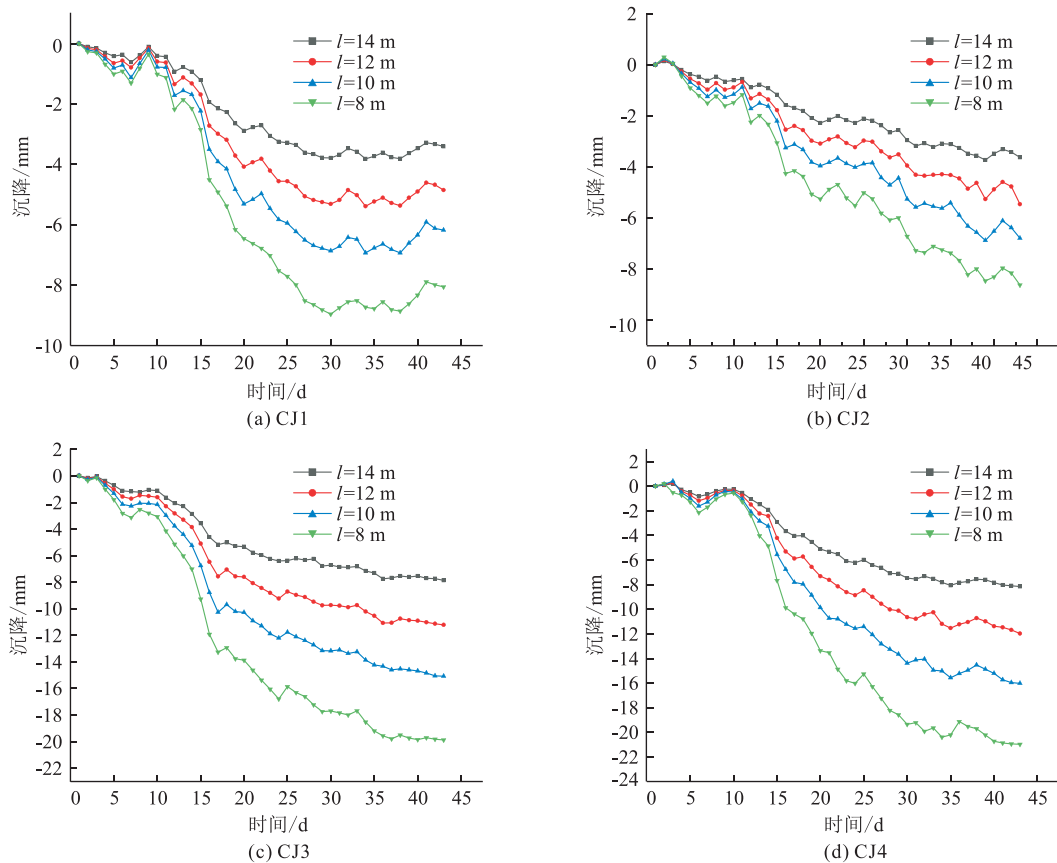


图 9 同一监测点不同距离 l 房屋沉降变化曲线

将模拟监测得到的既有建筑物最大沉降量与距离 l 之间的关系绘制成点线图,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,随着距离 l 的缩减,盾构施工对既有建筑物带来的影响越来越大,并且比隧道

埋深 d 的减小带来的影响程度还要大。图中可以看出当距离 l 从 10 m 降到 8 m 时,那段最大沉降量的变化的斜率明显大于 l 其他大小时的变化,因此也可以大胆预测再次缩短距离 l 时,建筑物受到的

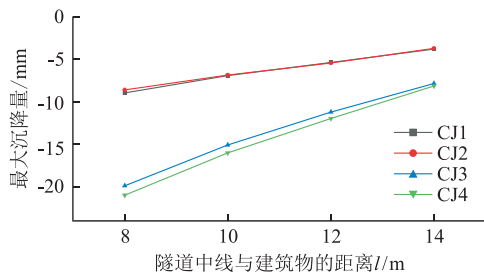


图10 距离 l 对建筑物最大沉降量的影响示意图

影响将进一步增大,并且程度将继续高于其他距离的变化。由此可得,当盾构施工时必须保证其与附近建筑物的距离,如果距离无法保证,则需要对既有建筑物进行一些别的保护措施,以此来保证盾构施工后既有建筑物可以继续使用。

此外,图10中CJ3与CJ4的斜率明显高于CJ1与CJ2,并且在8~10 m与10~12 m段尤为明显,这说明建筑物靠近施工的一侧受施工影响的程度更大,与隧道埋深 d 的影响相似,因此也需要注意建筑物会否因为两边沉降不均匀而导致开裂的情况。

7 结论

本文结论主要有以下3点:

(1) 该工程在实际施工过程中,现场监测得出既有建筑物最大沉降量为-12.41 mm,而在数值模拟中为-11.98 mm,二者相差3.46%;模拟数据与实测数据最大差异为7.88%,故使用Flac^{3D}进行的模拟计算还是比较准确的,可以用于工程方面的模拟工作。

(2) 现场监测中远离盾构施工的一侧的监测点最大沉降量为5.72 mm,比靠近施工的一侧的监测点最大沉降量12.41 mm小了53.9%,说明远离盾构施工的一侧受影响程度远小于靠近盾构施工的一侧。

(3) 盾构施工的邻近建筑物沉降量随隧道埋深

的减少而增大;建筑物的最大沉降量与隧道中线到建筑物的距离成反比,并且隧道埋深 d 在同样上升6 m的情况下,建筑物的最大沉降量上升了98.4%,表明隧道中线到既有建筑物的距离 l 对于既有建筑物的影响程度要大于隧道埋深 d 对其的影响程度。

参考文献

- [1] 洪开荣,冯欢欢.近2年我国隧道及地下工程发展与思考(2019~2020年)[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1259-1280.
- [2] 路雅君,唐振刚.浅析盾构隧道施工引起的地面沉降机理与控制措施[J].黑龙江科技信息,2017,(4):255-256.
- [3] 邓小鹏,李启明,周志鹏.地铁施工安全事故规律性的统计分析[J].统计与决策,2010,(9):87-89.
- [4] 荣雅楠.盾构施工安全事故案例分析研究[J].市政技术,2019,37(4):125-128.
- [5] 郑刚,崔涛,程雪松,等.某地铁区间盾构法施工隧道事故实例与分析[J].岩土工程学报,2017,39(S2):132-135.
- [6] 李鹏飞,勾宝亮,朱萌,等.基于镜像法的隧道地表沉降时间效应计算方法[J].岩土力学,2022,43(3):799-807.
- [7] Kim C Y, Bae G J, Hong S W, et al. Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunnelling[J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(6):517-547.
- [8] 刘联伟.复合地层中盾构法建设地铁地表沉降规律研究[D].中国矿业大学,2009.
- [9] 刘联伟.复合地层中盾构法建设地铁地表沉降规律研究[M].广东省建筑工程集团有限公司,2009-03-21.
- [10] 杨广武,关龙,刘军,等.盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J].中国铁道科学,2009,30(6):54-60.
- [11] 李东海.复杂环境下盾构隧道施工引起的地表沉降分析[A]//中国岩石力学与工程学会工程实例专业委员会.中国岩石力学与工程实例第一届学术会议论文集[C].爆破编辑部,2007:6.
- [12] 杨晨,张佐汉.深圳地铁二期工程建设期安全事故分析[J].铁道建筑,2013,(1):45-48.
- [13] 余勇利,罗晓娟,王永军.北京地区隧道盾构法施工中地表沉降影响因素分析[J].地质灾害与环境保护,2012,23(1):21-24.
- [14] 张颖,许鹏,尹亮亮,等.沈阳地铁盾构法施工的三维数值模拟研究[J].地质灾害与环境保护,2015,26(1):108-112.

作者简介: 杨景凯(1998—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事工程地质和灾害防治研究。E-mail:1374355086@qq.com

通讯作者: 陈安(1971—),男,河南潢川人,博士,高级工程师,主要研究方向为水文地质、工程地质、环境地质及地下水工程水害防治。

E-mail:373034075@qq.com