

双线盾构越江隧道合理间距优化与分析

王 伟^{1,2}, 夏才初^{1,2}, 朱合华^{1,2}, 范明星³

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 上海市政二公司, 上海 200092)

摘要: 以上海复兴东路双线盾构越江隧道为背景, 利用 Marc 有限元软件, 通过建立盾构隧道江中段的三维弹塑性有限元模型, 对隧道不同间距的情况进行了模拟分析, 并着重研究后建隧道施工对先建隧道的影响, 得出了该隧道合理间距的建议值, 为隧道间距的优化设计提供了依据。然后在施工过程中对先建隧道的内力和变形及作用在先建隧道上的荷载等进行了监测, 并将监测结果与数值模拟的优化结果进行了比较分析, 验证了有限元模型的有效性。得出了一些有意义的结论, 对类似工程具有重要的参考价值。

关键词: 隧道工程; 越江隧道; 盾构法; 优化设计; 合理间距; 相互影响

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 3311 - 06

OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF REASONABLE DISTANCE OF TWIN-TUBE RIVER-CROSSING SHIELD TUNNEL

WANG Wei^{1,2}, XIA Caichu^{1,2}, ZHU Hehua^{1,2}, FAN Mingxing³

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

2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai No.2 Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Crossing-river tunnel of Fuxingdong road in Shanghai City is the first twin-tube and double-layer tunnel in China. The full length of the project is 2 785 m and the outer diameter of tunnel lining structure is 11.22 m. Based on this tunnel, a 3D elastoplastic finite element model of twin-tube shield tunnel, which bears water pressure, was developed. The general software, Marc, is adopted to build the finite element model and simulate a 90 m long tunnel section, whose diameter is 11 m. Drucker-Prager material model is used as the strength criterion for soil. Soil mass in a same layer is considered as an isotropic body based on the geological condition that the soil is basically homogeneous, and is horizontal layered. In the modeling, water pressure is applied as load acting on the upper soil layer's surface of the model. Models simulating various circumstances with different tunnel distances are analyzed, on which the researches emphasizes the influence rules of subsequent tunnel to antecedent tunnel through analyzing the following indices: settlement of ground surface, axial force and moment of lining, soil pressure of lining and diameter deformation of different direction. Reasonable tunnel distance is drawn, which can be a reference to optimal design of similar projects. During the construction, the internal force of lining, soil pressure of lining and displacement of key issues of antecedent-building tunnel are monitored. To verify the validity of the finite element model, monitoring and computing results are compared and analyzed. The significant results obtained provide a better understanding of excavation process of twin-tube tunnel, and it is helpful in guiding future design and construction in similar conditions.

收稿日期: 2005 - 05 - 20; **修回日期:** 2005 - 09 - 14

基金项目: 上海市重点学科(岩土工程)资助项目

作者简介: 王 伟(1979 -), 女, 2001 年毕业于安徽理工大学土木工程系, 现为同济大学博士研究生, 主要从事岩土隧道和地下结构方面的研究工作。E-mail: wangwei766@163.com

Key words: tunnelling engineering; crossing-river tunnel; shield method; optimal design; reasonable distance; interaction

1 引言

上海隧道建设快速发展,新的盾构隧道结构形式和施工方法不断涌现,出现了多个双线盾构隧道工程。近间距隧道在工作井的布置和投资、平面线形、土地占用、对地面建筑和地下管线的影响等方面有较大的优越性。我国地下铁道工程施工及验收规范^[1]和日本盾构隧道标准规范^[2]中都将隧道的最小间距规定为至少大于一倍的隧道直径。近十几年来,随着隧道设计和施工技术的发展,国内外均有隧道间距小于规范标准而建设成功的先例,例如,日本京都建成的4条近间距施工的盾构地铁隧道,隧道间最小处间距0.729 m^[3, 4];新加坡高速公路系统采用四孔平行隧道穿越回填土和海相黏土冲积层^[4, 5];上海地铁2#线与1#线在人民公园站附近空间交叉,隧道间垂直净距1 m左右^[6];上海外滩观光行人隧道从地铁二号线的两条隧道上方斜向穿越,其最小距离为1.2 m^[7]。但是,这些工程只是在局部和个别交点上间距较小。盾构法施工的上海大连路越江隧道,东、西两线盾构直径11.22 m,东、西线隧道在始发段间距6.5 m,小于1倍的洞径^[8]。因此,有必要进一步探讨隧道间距的合理确定问题。

双线盾构平行隧道的净距,应根据工程地质条件、埋置深度、盾构类型等因素确定。选择出合理净距,可以保证隧道施工及运营的安全,以及经济上的合理。隧道间距选择过大,会导致需要两组工作井或工作井过大而增加投资,且使道路线形变差,影响行车速度和安全;而间距过小,两条隧道相互影响过大,又会使得隧道在施工以及运营期间发生危险。据查,国内外文献中未见到用有限元分析的方法对隧道合理间距进行优化设计。因此,对双线盾构隧道间距进行优化,具有十分重要的意义。

本文依托上海复兴东路双线盾构越江隧道工程,利用 Marc 有限元软件,对双线隧道合理间距进行了优化设计,利用现场监测结果,对计算和监测结果进行了比较分析,得出了合理间距的建议值,为类似工程提供了间距的优化设计方法。

2 有限元计算模型与参数

2.1 工程概况

上海市复兴东路越江隧道是我国第一条双管双层越江盾构法隧道,也是世界上第一条投入正式运营的双层式盾构法隧道。工程全长2 785 m,其中隧道全长1 214 m,岸边段长1 571 m(浦西645 m、浦东926 m)。隧道衬砌结构外径为11.00 m,上覆土层较浅,江中段覆土的设计厚度小于一倍的隧道直径。该隧道断面的总体布置详见图1。

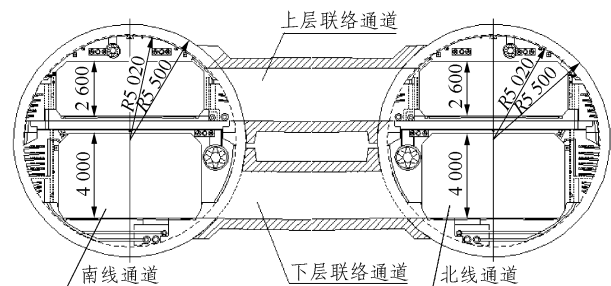


图1 复兴东路双线盾构隧道横断面布置图(单位: mm)
Fig.1 Layout map of cross-section for twin-tube shield tunnel in Fuxingdong road(unit: mm)

2.2 计算模型与参数

本文采用 Marc 软件,对江中段长约90 m的隧道进行了模拟(见图2),分析不同隧道间距下后建隧道施工时对先建隧道的影响。土体采用 Drucker-Prager 的强度准则,土体单元采用实体单元。由于土层基本呈均质水平层状分布,所以同一土层视为各向同性。土体与结构之间满足变形协调,忽略土体与盾构和衬砌之间的相互滑动,不考虑衬砌管片分块之间的横向连接及各管片环之间的纵向连接。盾构和衬砌视为一体,为弹性体,单元类型采用薄壳单元。开挖面支护压力以边界条件的形式施加,采用动态施加的形式在每步施加。利用软件中多载荷步和单元生死的功能,模拟土体开挖和隧道衬砌的组装过程。土体以及隧道衬砌的计算参数见表1,模型参数见表2。

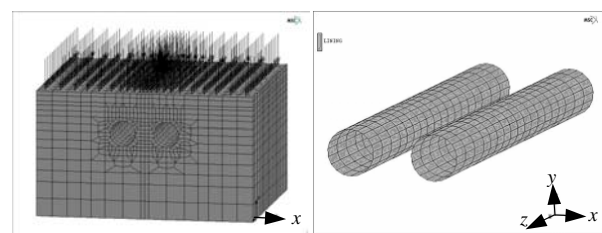


图2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

表1 模型物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of model

土层名称	重度 /(g · cm ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
土体	1.92	40	0.30	17	15
注浆土体	2.00	100	0.30		
混凝土衬砌	2.50	35 000	0.15		

表2 建模参数

Table 2 Parameters of model establishment

名称	隧道埋深	土体弹性模量 /MPa	切口水压 /MPa	地层损失率 /%	水深 /m
数值	1.2D	20	0.26	2.0	18

注: D为隧道直径, 下同。

2.3 模拟过程

盾构的实际推进过程见图 3, 在计算中对其进行了简化, 分成 4 个阶段来模拟, 分别如下:

(1) 盾构开挖面对前方土体的影响: 首先将本步开挖的土体挖去, 即令这部分土体单元失效; 然后在开挖面土体上施加垂直于开挖面的支护力。

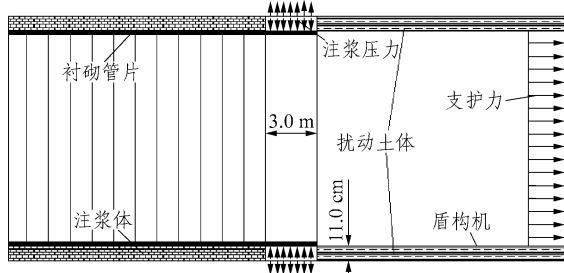


图3 盾构的推进过程

Fig.3 Driving processes of the shield

(2) 盾构机通过开挖区域: 用薄板单元作为盾构机来支护盾构周围土体(考虑盾构机的自重); 由于超挖和扰动, 盾构周围 30 cm 为扰动带, 以低弹性模量土体单元代替原有单元。

(3) 盾尾注浆: 在本阶段, 在衬砌脱出壳体后, 对衬砌外的土体施加注浆压力。

(4) 盾尾注浆体的硬化固结: 在本阶段, 用注浆体单元代替扰动带的低弹性模量土体单元。

2.4 计算结果与分析

为研究隧道间距对近间距隧道施工的影响, 分别分析 8 种不同间距(0.3D, 0.5D, 0.7D, 0.8D, 1.0D, 1.2D, 1.5D 和 2.0D)下江底的土体沉降、衬砌内力、土压力以及直径变形。

(1) 江底土体沉降

图 4 反映了不同隧道间距下, A 点的土体沉降。当两隧道的间距大于 0.3D 时, 江底最大的沉降为 18 cm。随着隧道间距的增加, 先建隧道轴线顶部江底 A 点沉降逐渐减小, 且后建隧道对 A 点沉降的影响越不明显, 当两隧道的间距大于 1.0D 时, 沉降减小的趋势逐渐变慢。

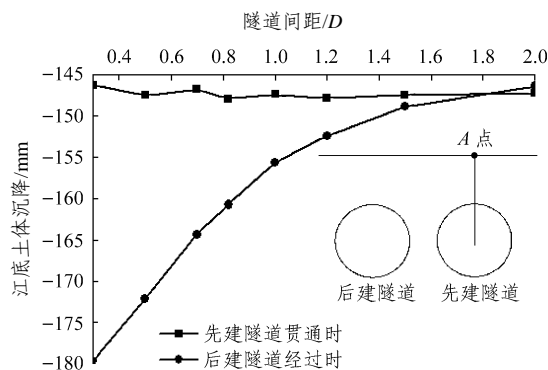


图4 江中段隧道江底沉降随隧道间距的变化

Fig.4 Settlements of ground surface in river vs. tunnel distances

(2) 衬砌内力

后建隧道经过时, 先建隧道的轴力有较大幅度的增长, 特别是靠近后建隧道一侧的腰部(图 5 中 D, C 点); 弯矩也有所变化, 如靠近后建隧道一侧腰部的下方(图 6 中 D, C 点), 但增长幅度不大, 且分布曲线整体发生偏转(见图 7)。

隧道间距从 0.3D 增大到 2.0D, 除先建隧道内侧腰部(图 5 中 D 点)的轴力外, 其他部位轴力的变化均小于 25%, 该点在隧道间距大于 0.8D 后, 衬砌轴力的变化也小于 25%; 当隧道间距大于 0.5D 后, 衬砌轴力的变化均小于 50%。后建隧道对先建隧道底部(图 6 中 C 点)和内侧腰部(图 6 中 D 点)的弯矩

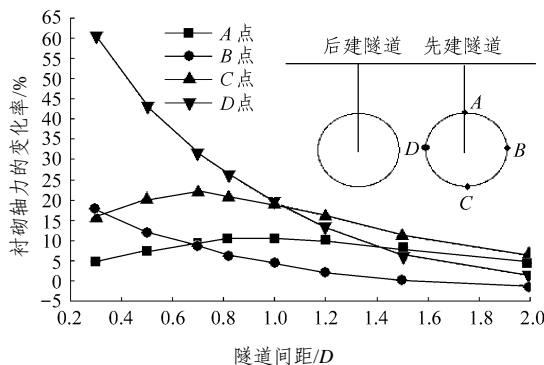


图5 不同隧道间距衬砌轴力影响的变化率

Fig.5 Change rate of lining's axial forces vs. distances

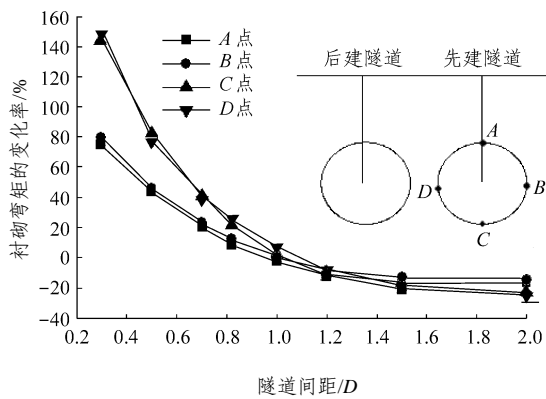


图6 不同隧道间距衬砌弯矩影响的变化率

Fig.6 Change rate of lining's moments vs. distances

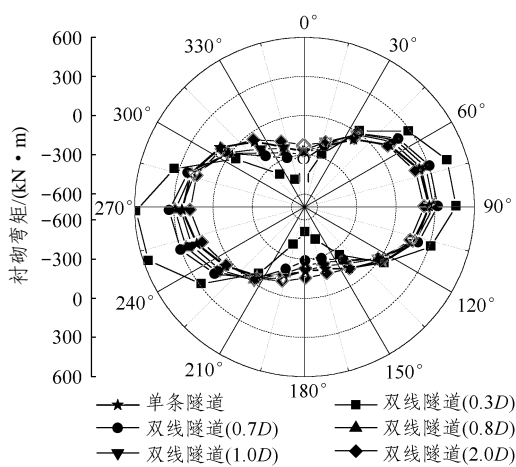


图7 不同间距隧道江中段先建隧道衬砌弯矩

Fig.7 Lining's moments of antecedent tunnel in river vs. tunnel distances

影响比较大,而且随着两隧道间距的增大,后建隧道引起的先建隧道衬砌弯矩的变化率减小,当隧道间距大于 $0.7D$ 后,后建隧道引起的先建隧道衬砌弯矩的变化率均小于50%(见图6,7)。

(3) 衬砌上的土压力

对不同的隧道间距,后建隧道经过时作用在先建隧道衬砌上的土压力均有增大。虽然隧道间距从 $0.3D$ 增大到 $2.0D$,作用在先建隧道衬砌上土压力的变化率均小于45%,但由于隧道内外两侧腰部的变化率差异较大,引起作用在隧道衬砌上压力的不均匀性增大,会在隧道衬砌上引起更大的弯矩(见图8,9)。所以,从该角度观察,隧道间距不宜过大。

(4) 直径变形

随着隧道间距的增大,隧道水平向和竖直向直径变化率的绝对值均变小。其中,水平向直径变化率较大,竖直向直径变化率较小。当隧道间距小于

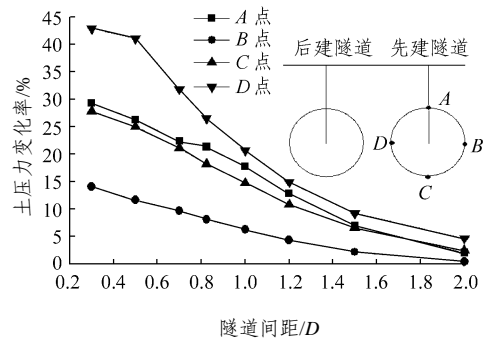


图8 隧道衬砌土压力影响的变化率与隧道间距的关系

Fig.8 Change rate of soil pressures vs. tunnel distances

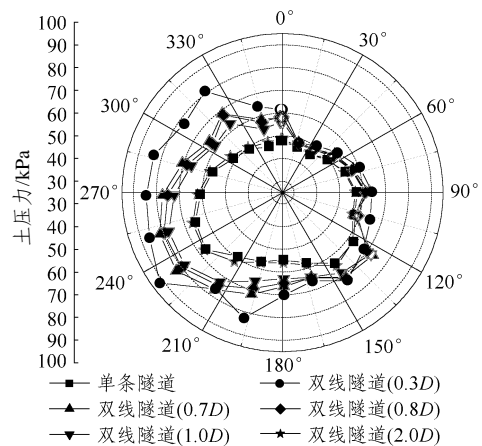


图9 不同间距隧道作用在先建隧道上的土压力

Fig.9 Lining's soil pressures of antecedent tunnel in river vs. tunnel distances

$1.0D$ 时,直径变化率为正值,且值不断减小;当隧道间距大于 $1.0D$ 时,直径变化率为负值,且绝对值不断增长。隧道间距大于 $0.8D$ 时,由后建隧道施工引起的隧道水平向直径变形的变化率均小于50%,竖直向直径变形的变化率均小于5%(见图10)。

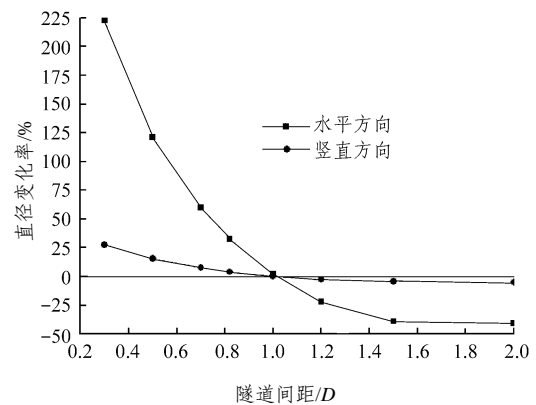


图10 不同隧道间距衬砌直径变形影响的变化率

Fig.10 Change rates of diameter deformation vs. tunnel distances

(5) 优化分析结果

作用在衬砌上的土压力、内力和衬砌的直径变形, 是反映盾构受力状态和判断其稳定性的重要指标。作用在衬砌上的土压力增大, 会导致其内力和变形加大; 而土压力的不均匀增大, 则会引起衬砌更大的弯矩, 最终使得衬砌超出其承载范围而发生失稳, 甚至会引起衬砌的整体翻转。目前国内外相关规范并没有明确规定后建隧道引起的先建隧道各项指标增幅的控制范围, 实际工程中一般以后建隧道施工引起先建隧道各项指标的增加率小于 50% 为合理准则。以此为标准, 那么江中段的隧道间距取为 $0.8D$ 最为合理; 取为 $0.7D$, 则基本合理, 并要采取较严格的施工控制措施; 如取为 $0.5D$, 则有相当的风险。

3 监测与计算结果的比较

为了获得后建隧道施工对先建隧道影响的实测数据, 在江中 90 m 的优化分析段选取了第 360, 375 和 380 环, 对作用在管片上的衬砌内力、土压力和直径变形进行了监测。该监测段的隧道埋深为 12.54~15.40 m, 两隧道间距为 $0.82D$, 约 9.1 m。江底表面土层坡度 4.66%, 隧道坡度 1.16%。

3.1 隧道管片内力特征

隧道衬砌弯矩的计算值与监测结果基本吻合(见图 11); 先建隧道建成时, 先建隧道衬砌轴力的实测值比计算值略小, 但分布规律基本一致; 后建隧道经过时, 先建隧道在衬砌腰部以上, 轴力的实测值比计算值略小, 衬砌腰部以下, 轴力的实测值比计算值大, 但分布规律基本一致。

3.2 土压力特征

后建隧道经过时, 作用在先建隧道上的土压力有较大幅度的增加, 尤其是靠近后建隧道侧, 而在另一侧则增幅较小(见图 12)。土压力的计算值的变化较为平缓, 从衬砌顶部向腰部逐渐减小, 从腰部至底部又逐渐增大; 实测数据变化较大, 在计算值周围上下波动(见图 12)。

3.3 监测点位移

图 13 比较了特征点位移的计算值和监测值(在隧道推进过程中, 土体开挖是分段进行的, 因此在计算中采用多荷载步模拟分段开挖, 在图中用横坐标“开挖荷载步”表示)。特征点位移的变化主要表现在: 隧道施工完成后, 垂直方向位移变化大,

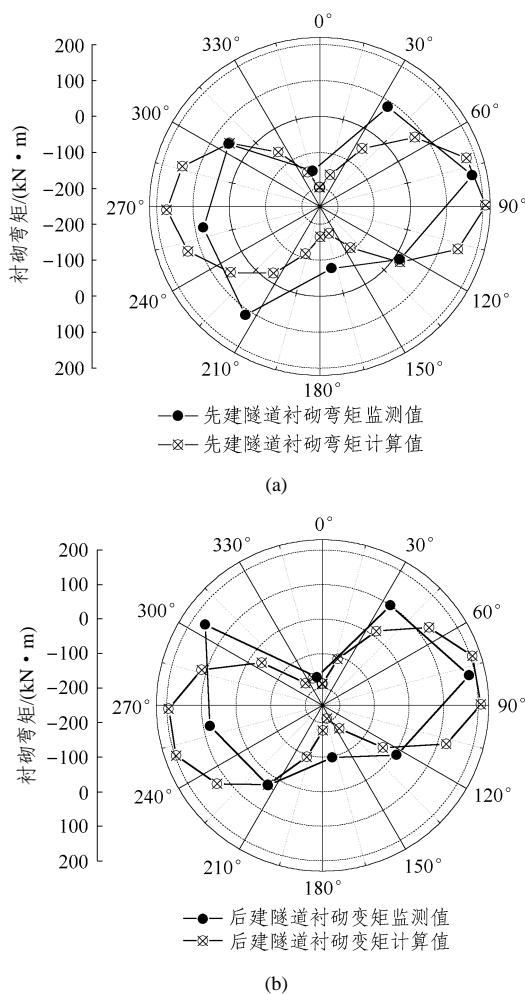


图 11 隧道衬砌弯矩计算值与监测值比较
Fig.11 Comparisons between computing and monitoring results of antecedent tunnel lining's moments

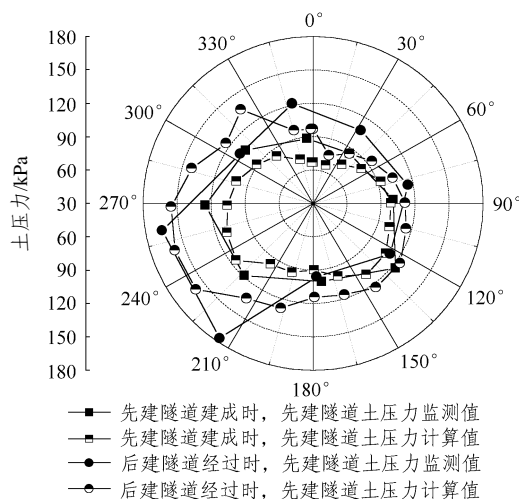


图 12 隧道衬砌上的土压力计算值与监测值比较
Fig.12 Comparisons between computing and monitoring results of antecedent tunnel soil pressure

水平方向变化较小, 后建隧道施工使先建隧道竖向位移进一步变大, 水平方向进一步变小。

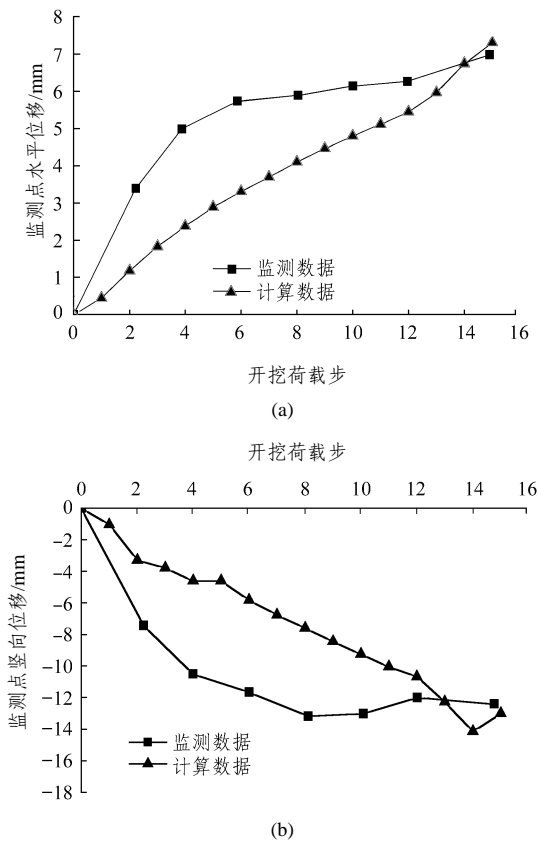


图 13 特征点位移的监测值与计算值比较

Fig.13 Comparisons between computing and monitoring results of key point

3.4 比较结果

在施工过程中和计算过程中衬砌位移的监测值与计算值有一定的误差，这可能与管片拼装误差和管片间的拼装间隙有关；但在施工结束后和计算结束后衬砌位移的监测值与计算值基本一致。由此说明，本文通过建立有限元模型的方法，模拟实际工程，对隧道合理间距进行优化设计，该模型是有效的，优化结果是可靠的，可以为工程服务。

4 结 论

本文利用有限元数值模拟的方法对上海复兴路越江隧道双线盾构的合理间距进行了优化分析，得出了合理间距的建议值。通过对后建隧道施工引起的先建隧道上土压力、隧道衬砌内力和变形变化的综合分析比较，认为江中段的隧道间距取为 $0.8D$ 最为合理；取为 $0.7D$ ，则基本合理，并要采取较严格的施工控制措施；如取为 $0.5D$ ，则有相当的风险。

在岩土工程中，利用有限元方法进行优化分析，目前正广泛应用于实际工程中。通过将监测结果和计算结果进行对比分析，证明了该有限元模型的有效性，并为其他近似工程提供了设计方法。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家标准编写组. 地下铁道工程施工及验收规范(GB50299-1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Construction and Acceptance of Metro Engineering(GB50299-1999)[S]. Beijing: China Planning Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 日本土木工程师学会. 日本盾构隧道标准规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(Japan Society of Civil Engineers(JSCE). Japanese Shield Tunnel Standard[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [3] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani Y. Study on ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289 - 304.
- [4] 陈卫军, 朱忠隆. 近距离交叠隧道研究现状及评析[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(1): 42 - 47.(Chen Weijun, Zhu Zhonglong. Current situation and analysis of short-distance overlap tunnel[J]. Modern Tunnelling Technique, 2002, 39(1): 42 - 47.(in Chinese))
- [5] Lo K W, Chong L K, Leung L F, et al. Field instrumentation of a multiple tunnels interaction problem[J]. Tunnels and Tunnelling, 1998, 18: 4 - 16.
- [6] 白廷辉, 尤旭东, 李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下空间, 2000, 3: 2 - 6.(Bai Tinghui, You Xudong, Li Wenyong. Protection technique for close-distance shield crossing subway tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000, 3: 2 - 6.(in Chinese))
- [7] 上海隧道工程股份有限公司. 外滩观光隧道施工技术研究报告[R]. 上海: 上海隧道工程股份有限公司, 1999.(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd. Research report of construction technique for Shanghai sightseeing tunnel at the bund[R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., 1999.(in Chinese))
- [8] 上海隧道工程股份有限公司, 同济大学. 大型泥水平衡盾构并向推进相互影响研究[R]. 上海: 上海隧道工程股份有限公司, 同济大学, 2003.(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Tongji University. Research report of interaction of tunnels by large-scale slurry shield in tunneling in the same direction[R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Tongji University, 2003.(in Chinese))