

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1181-06

近间距双线大直径泥水盾构施工相互影响研究

林 志¹, 朱合华², 夏才初²

(1. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 对上海复兴东路越江公路隧道——近间距双线盾构隧道同向施工时相互影响的现场监测进行了研究。首先简要介绍了工程背景及其概况, 然后介绍了为研究近间距盾构隧道相互影响而布设的监测项目, 包括深层土体水平位移、地表沉降以及深层土体沉降、北线隧道三维位移、圆周变形、接缝宽度、北线隧道所受水土压力、北线隧道衬砌内力和土体中的超孔隙水压力。对监测数据进行了详细研究, 得到了后建隧道推进时对地面沉降、深层土体位移变化、超孔隙水压力产生和消散、先建隧道衬砌位移、变形、内力的影响规律。从现场监测的分析结果来看, 后建隧道对周围土体和先建隧道的影响是十分明显的。研究结果可以为大直径近间距双线推进的越江盾构隧道的设计和施工提供更加科学的指导。

关 键 词: 近间距; 盾构; 隧道; 相互影响

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Study of field monitoring on interaction between twin slurry shield tunnels in close space

LIN Zhi¹, ZHU He-hua², XIA Cai-chu²

(1. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is important to evaluate the interaction between the twin large tunnels in close space to facilitate its economical and safe design and construction. The paper mainly involves the field monitoring on interaction between the twin large diameter slurry shield tunnels in close space—East Fuxing Road Tunnels across the Huangpu River. Firstly, it introduces the origin and background of the subject, the engineering situation. Then, it introduces the field monitoring including horizontal displacement of deep soil, settlements of ground surface and deep soil, three-dimensional displacements and deformation of the north tunnel, the water-soil load acting on the north tunnel, internal force of the north tunnel, the excess pore water pressure in soil. Through analyzing the field monitoring data, the rule that the constructing shield affects the settlement of ground surface, the displacement of deep soil, the excess pore water pressure, the displacement and deformation and internal force of the existing tunnel, are obtained. Obviously, the interaction is very more than estimated. And the actual internal force could be much than the adopted for the design.

Key words: close space; shield; tunnel; interaction

1 引 言

近些年来随着上海城市地铁建设的快速发展, 新的盾构隧道结构型式和相应的施工方法不断地涌现。为减少投资, 优化线形, 人们探索用近间距隧道、双圆盾构隧道等新的形式。目前我国已建成有双圆盾构隧道, 也有近间距盾构隧道成功的例子。

对于近间距隧道的计算理论、设计方法、施工工艺技术和施工参数等应当进行系统地研究, 有许多问题仍待优化、完善和改进, 其中重要的工艺参数, 则需通过系统研究, 给出具体的控制范围, 以

便在设计 and 施工时有据可依。因此, 依托上海复兴东路越江隧道工程(图略), 实测了施工过程中隧道邻近土体的水土压力和变位以及邻近隧道的内力和变位, 为研究邻近隧道施工对土体的扰动规律以及后续推进的隧道施工对先行推进隧道的影响积累了宝贵的现场监测资料。本文主要介绍对现场监测数据的分析结果。

2 工程概况

复兴东路越江隧道是上海市实施“三隧一桥”建设的一项重大工程项目, 全长 2 580 m, 盾构隧

道段长 1 215 m, 两岸为暗埋段、敞开段。隧道采用日本三菱重工制造的直径为 11.22 m 泥水平衡式盾构进行掘进施工, 双线隧道外壁最小净距仅 6.5 m, 小于 1 倍的隧道直径。隧道外径为 11.0 m, 内径为 10.04 m^[1]。该双层隧道在国内外隧道建设中将创造多个第一, 即第一次采用高难度的双层隧道同步道路施工; 第一次建造 4 条双层联络通道; 第一次采用带牛腿的管片^[2]。

3 现场监测

为了解后推进南线隧道盾构对北线隧道的影响, 在南、北线隧道中间范围内 60~100 m 间埋设测斜管 6 个, 孔隙水压力计 4 个, 静力触探孔 10 个; 235~280 m 之间埋设测斜管 8 个, 孔隙水压力计 4 个。图 1 为深层土体沉降和水平位移监测、北线隧道管片三维位移、隧道圆周变形监测断面和管片接缝宽度、内力和水土接触压力监测布置剖面图。

隧道衬砌每环由封顶块 F (1 块)、邻接块 L (2 块: L_1 、 L_2) 及标准块 B (5 块: $B_1 \sim B_5$) 共 8 块管片, 环宽 15.0 ± 33.0 mm (33 mm 为每环可调整量)。管片内径为 10.04 m, 外径为 11.00 m, 厚度为 4.8 m。管片纵向和环向均采用弯螺栓连接。为了结构需要及同步施工, 该隧道管片在 B_1 、 B_5 块上有预制牛腿。

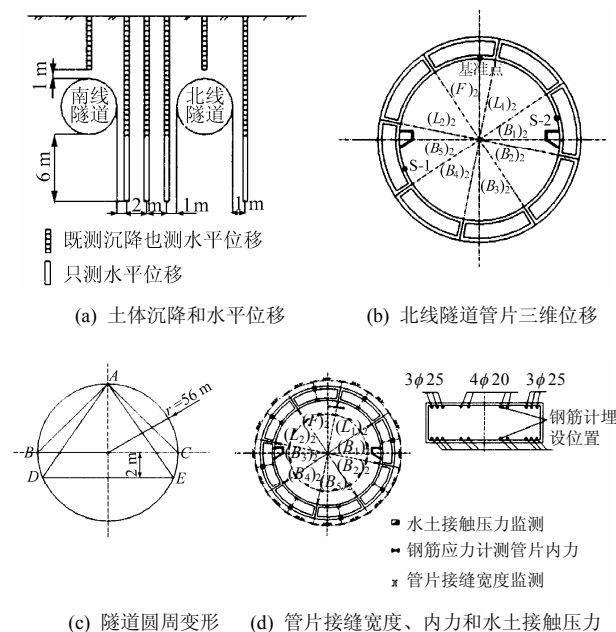


图 1 监测布置剖面图(单位: mm)

Fig.1 Monitoring distribution cross-sections (unit: mm)

4 土体和隧道的行为特点

由现场监测结果可知: 近距离双线盾构隧道同

向施工时, 后建隧道对先建隧道产生了很明显的影 响, 而后建隧道在先建隧道扰动后的土体中施工, 也与单条隧道施工不同。后建隧道对先建隧道的影 响又由于距离后建隧道盾构开挖面的距离远近不同 而存在不同的影响规律, 主要分为盾构开挖面到来 之前、盾构通过中和盾尾通过之后 3 个阶段^[3]。南 线盾构推进时, 土体在盾构开挖面到达之前和通过 中受挤压或卸载作用, 其作用时间和范围都比较小; 而盾尾通过之后土体向南线隧道移动, 作用时间和 范围都大于前面两个阶段, 这也是北线隧道受南线 隧道施工影响最大的阶段。

4.1 土体沉降

在近间距平行隧道先、后推进的过程中, 地表 沉降变化规律在南线盾构开挖面到来之前、盾构通 过中和盾尾通过之后 3 个阶段中地面纵断面沉降规 律与单条隧道时一致^[4]。

北线隧道先期施工, 南线隧道则在北线隧道扰 动后的土体中施工^[5]。从图 2 可见, 南线隧道施工 时的地表沉降明显大于北线隧道施工时的沉降值, 而且, 南线隧道施工时的地表沉降是不对称的, 靠 北线隧道一侧地表沉降远大于另一侧。因此, 近间 距双线隧道施工造成的地表沉降远大于单条隧道施 工的, 地表最大沉降发生在两条隧道间靠近后建隧 道一侧。

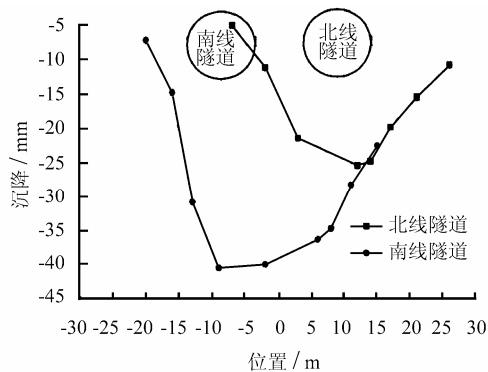


图 2 北、南线盾构通过后地表沉降横断面曲线

Fig.2 Settlement curves

此外, 深层土体沉降监测数据反映出深层土体 有 2 个沉降极大区: 一个位于深度为 5~9 m 的区 域, 量值最大, 另一个位于 15~20 m 的区域。第 一个极大区主要为淤泥质粉砂层, 容易受到扰动, 扰动后超孔隙水压力的产生和消散都强于周围土 层, 固结沉降很快, 第二个极大区位于盾构断面的 深度范围内, 受其扰动最强, 受到的卸荷作用也最 强, 故其沉降也较大。

4.2 深层土体水平位移

测斜管都埋设在两条隧道之间^[6], 以 X7 号测斜孔为例, 分析在后进隧道通过测量断面时深层土体水平位移的变化规律, 具体变化过程如下。

阶段一: 在后进南线隧道影响范围还未到达测量断面时, 测量断面处的土体又远离了先建北线隧道的扰动影响, 北线隧道引起深层土体位移已经很小, 所测得的位移小于 2 mm, 这种位移随深度增大如图 3 所示。

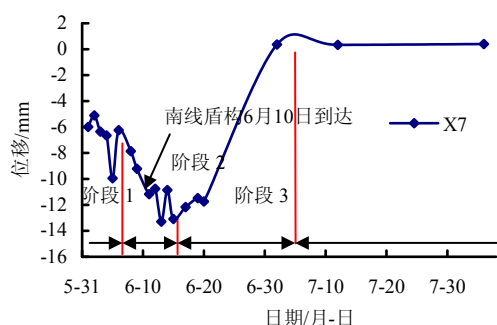


图3 X7 垂直于隧道轴线位移随时间的变化曲线
Fig.3 Horizontal displacements in vertical direction

阶段二: 在南线盾构影响范围到达测量断面以后, 通过测量断面的过程中, 当切口水压和总推力大于土体压力, 造成前方土体挤压, 两隧道间深层土体被南线盾构向侧前方推。从图 5 可以看出, 在南线盾构通过测量断面的过程中深层土体受挤压向北线隧道移动, 位移值不超过 20 mm。

阶段三: 在南线盾构盾尾通过测量断面以后, 两隧道间深层土体并没有因为盾尾孔隙而马上发生回弹, 而是间隔 2~10 d 后才开始向南线隧道移动, 最终回到初始位置。这是在盾尾注浆和扰动后固结作用的共同作用结果。

最终, 两隧道间的土体在受北、南线隧道先后影响之后, 又回复到了初始的位置。由于土体位移反映了土体的受力情况, 可以看出北线隧道在南线隧道的推进过程中也经受了相同的受力过程。

4.3 三维位移

从图 4 可以看出, 在陆上段南线隧道推进过程中北线隧道很明显受到了扰动。水平位移在南线盾构推进的过程中, 北线隧道被挤远, 垂直轴线方向被推开 20 mm 左右; 平行轴线方向向后位移了 10 mm 左右。从分别位于北线隧道两内侧的测点位移差亦见, 这种挤压作用随着离南线隧道的距离增加而有所增大^[7]; 在南线盾构通过测量断面后, 挤压作用逐渐消失, 北线隧道逐渐回弹, 但不能回复到原位,

残余变形在 5 mm 左右。

在垂直方向, 在南线盾构面推进的过程中, 北线隧道受南线隧道开挖形成的卸载作用影响向上抬升 8 mm 左右, 而且这种抬升也是不对称^[8], 近南线隧道一侧大于另一侧; 在南线盾构通过测量断面后, 扰动后的土体逐渐固结沉降, 北线隧道稳定下沉。

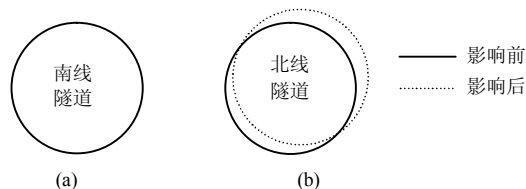


图4 典型陆上段北线隧道位移示意图
Fig.4 North tunnel displacement map of exhibition on land

从图 5 可见, 位于江中段的北线隧道管片环受南线隧道施工影响也很大, 主要体现在垂直位移上。在南线盾构为到达测量断面之前, 北线隧道处于自身施工引起的沉降趋势中。但是, 随着南线盾构面逐渐靠近, 距离 80 m 时北线隧道停止沉降, 开始缓慢抬升; 距离 20 后, 抬升速度加快^[9]; 当南线盾构面离开后 40~50 m 后, 达到最大值 30~50 mm 左右; 其后抬升趋于稳定。南线盾构施工对北线隧道远近两侧的沉降影响相差很小。

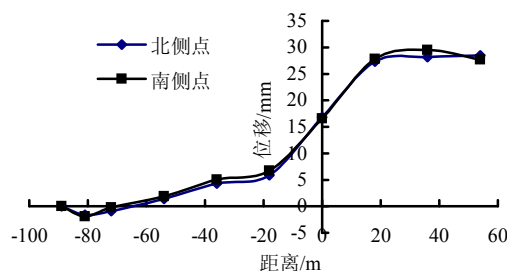


图5 典型北线隧道江中段垂直位移图
Fig.5 North tunnel settlement map of exhibition under river

4.4 圆周变形与接缝宽度

采取收敛位移来进行圆周变形监测, 其断面布置图见图 1(c)。北线隧道受南线盾构推进影响的圆周变形相对于隧道的位移来讲, 量值较小。管片环的收敛变形一般不超过 10 mm, 小于管径的 0.9 %。其规律是管片环水平直径方向比较明显的增长, 而垂直直径以减小为主。

管片环之间的接缝宽度变化受其位移和圆环变形影响, 其断面布置图见图 1(d)。南线盾构通过北线隧道断面时, 北线隧道被其挤开, 所以北线隧道靠近南线隧道一侧管片宽度增大, 而远侧则减小,

其值约为 0.6 mm; 随着南线盾构的远离, 北线隧道向南线隧道移动, 管片宽度也回复到初始状态。

4.5 水土压力

从图 2(d)可见, 北线隧道上安装了土压力盒和钢筋计, 可以详细记录南线盾构推进对北线先建隧道在所受土压力和内力方面的影响。从图 6 可见, 北线隧道靠南线隧道一侧受南线盾构推进的影响可以分为 4 个阶段^[1]。

第一阶段: 在北线隧道未受到南线盾构影响之前, 北线隧道自己施工时造成的土体扰动导致其所受土压力缓慢下降;

第二阶段: 在北线隧道土压力测量断面进入南线盾构推进面的影响范围时 L2 管片外所受土压力迅速升高。从图 7 可见, 整个隧道衬砌断面上土压力增加最大的是靠南线隧道的北线隧道 45° 和 135° 附近, 水土压力增大了;

第三阶段: 在南线盾尾通过测量断面后 L2 管片外所受土压力又迅速降低;

第四阶段: 在南线盾构推进面逐渐远去之后, L2 管片外所受土压力又回复到第二阶段的水平。然后与第阶段一样, L2 管片外所受土压力又缓慢下降。

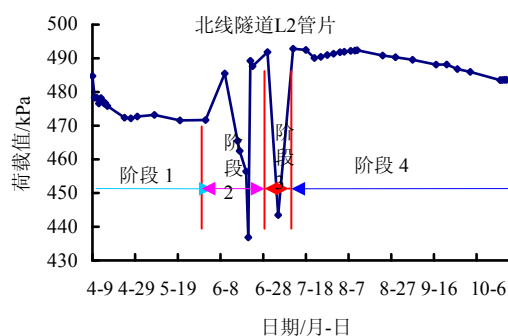


图 6 典型的北线隧道土压力时间曲线
Fig.6 Earth pressure change on north tunnel

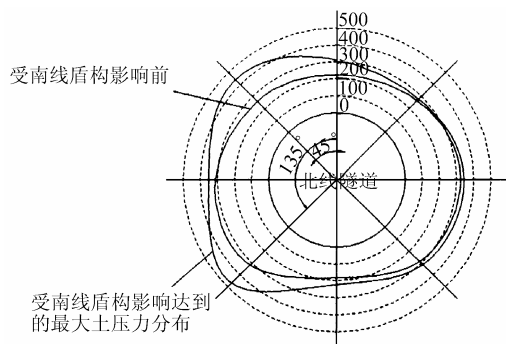


图 7 北线隧道 237 环土压力分布曲线 (单位: kPa)
Fig.7 Earth pressure change of 237 ring in north tunnel (unit: kPa)

4.6 衬砌内力

将管片内钢筋计测得的应力值换算成管片的弯矩和轴力^[10], 从图 8 可见对应于土压力的变化情况, 北线隧道管片内力受南线盾构推进的影响也有 3 个阶段。与图 9 深覆土衬砌结构设计内力^[1]相比 (图中圆结构中心线左边数据为轴力, 右边数据为弯矩), 部分北线隧道断面的实测内力值在受南线盾构推进过程中, 增加近 50%, 超过了设计值。以北线隧道 237 环为例, 受南线隧道影响, 其 B5 管片弯矩超过了设计值; L1 管片的轴力超过了设计值。

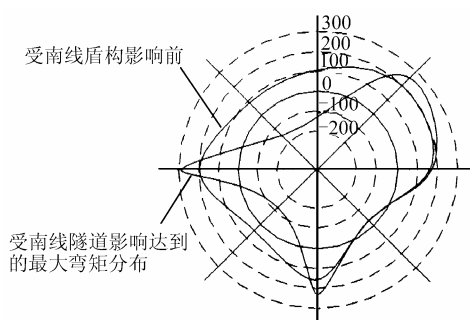


图 8 北线隧道 237 环弯矩分布曲线 (单位: kN·m/m)
Fig.8 Bending moment distribution of 237 ring in north tunnel (unit: kN·m/m)

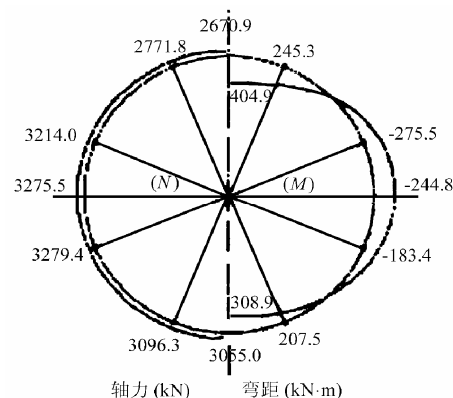


图 9 深覆土衬砌结构设计内力
Fig.9 Designed inner force distribution of lining under deep cover

4.7 超孔隙水压力

超孔隙水压力是反映盾构施工时对土体扰动最灵敏的指标^[11]。孔隙水压力计(k06456, k06463)位于两隧道轴线之间, 分别处在灰色黏土层⑤-1-1 和粉质黏土层⑤-1-2 中。图 10 反映出孔隙水压力计所反映的孔隙水压力变化规律基本一致。后推进南线盾构未到达测量断面之前, 由北线盾构掘进引起的超孔隙水压力仍在继续消散, 消散速度随时间而缓慢减小; 南线盾构掘进面距离测量断面还有 1 倍隧道直径时, 在盾构推进和盾尾注浆两种作用下孔隙

水压力开始升高,由于盾构循环施工的特点,导致超孔隙水压力在升高过程中有很多次一级起伏升降^[12],期间超孔隙水压力最大值可达45 kPa;而后隧道下部土体由于卸载作用超孔隙水压力降低很快,出现负的超孔隙水压力,也随时间消散。

土体中超孔隙水压力达到负值最小前,超孔隙水压力变化速度很快,此后超孔隙水压力缓慢消散,而且在这个时间点以前,土体固结沉降速度也是最快的,其后的沉降速度逐渐减小。所以可以得出结论,即确定土体中超孔隙水压力达到负值最小值的时间是土体固结沉降基本稳定的时间是合理的。

图10也反映出,不同渗透系数的土层超孔隙水压力消散的时间是不同的。当土体的渗透系数为 1.26×10^{-5} m/h(以淤泥质黏土为代表)时,以k06456为例,土体固结沉降基本稳定是在盾构通过后25~30 d,而当土体渗透系数为 1.26×10^{-4} m/h(以粉质黏土为代表)时,以k06463为例则是在15~18 d。

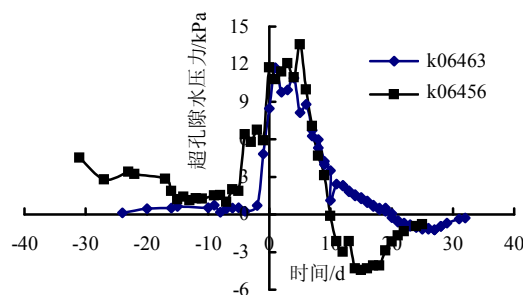


图10 超孔隙水压力与时间曲线
Fig.10 Excess pore water pressure change

5 近间距隧道相互影响的机理分析

从监测结果分析可以得出,近距离双线盾构隧道同向施工时后建隧道对先建隧道影响的机理:

(1) 后建隧道盾构机的泥水压力和作用在刀头上的推力。在后建隧道向前推进的过程中,作用在前方土体上的这两种力通过土体传递到近距离相邻的先建隧道衬砌上,使先建隧道发生位移,衬砌环发生变形,其外侧所受土压力增加,衬砌内力也发生变化。

(2) 后建隧道盾尾注浆对先建隧道的影响。如果盾尾注浆量过大或注浆压力过大都会通过隧道之间的土体传递到先建隧道衬砌上;如果盾尾注浆量过小,没有充分填充盾尾空隙,先建隧道向后建隧道移动。

(3) 后建隧道施工必然导致其周围土体的扰动。土体强度降低,先建隧道在这种性质不对称的

土体中,其应力-应变关系也将是不对称的,靠后建隧道一侧受影响较大。

(4) 在江中段,后建隧道施工不仅会导致本身已建隧道段上浮,还会导致邻近的先建隧道发生大于30 mm的上浮量。后进隧道推进和盾尾注浆都导致了土体中超孔隙水压力的产生,加上隧道开挖本身的卸载作用以及注浆不当产生的浆液聚集在隧道底部,这些都会导致后建隧道施工致使先建隧道上浮。

6 结 论

本文通过对上海复兴东路隧道施工现场监测的分析研究,得到以下研究成果:

(1) 获得近间距盾构隧道施工监测的经验。其切实可行和有效的监测项目中是:地表沉降、深层土体沉降、深层土体水平位移、孔隙水压力、隧道衬砌收敛、隧道衬砌三维位移、隧道衬砌内力和隧道所受水土压力。

(2) 近间距双线盾构隧道同向施工时后建隧道对先建隧道的影响,由于距离后建隧道盾构开挖面的距离远近不同而分为盾构开挖面到来之前、盾构通过中和盾尾通过之后3个阶段。

(3) 得到了近间距隧道相互影响作用机理:后建隧道盾构机泥水压力和刀头上的推力;后建隧道盾尾注浆对先建隧道的影响;先、后建隧道施工对周围土体的反复扰动。

(4) 在近间距盾构施工中,后推进的盾构对周围土体的位移场、先建隧道的位移、变形及其内力都产生了较大影响。孔隙水压力是评价盾构推进对周围土体影响的一个灵敏准确的指标。

本文研究结果可以对大直径近间距双线推进的越江盾构的设计和施工提供更加科学的指导。

参 考 文 献

- [1] 同济大学. 大直径近间距越江盾构双线推进施工相互影响控制技术研究现场监测报告[R]. 上海: 同济大学隧道及地下工程研究二室, 2003.
- [2] 林志. 双线盾构隧道施工过程相互影响三维弹塑性固结耦合研究[博士学位论文D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [3] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani Y. Study of 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] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [5] 曾晓清. 地铁工程双线隧道平行推进的相互作用及施工力学的研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 1995.
- [6] Addenbrooke T I, Potts D M. Twin tunnels construction-ground movements and lining behavior[A]. **Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground**[C]. Edited by R.J. Mair & R.N. Taylor, London: Balkema, 1996. 441—446.
- [7] 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[A]. 地下铁道新技术文集 2003[C]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002. 523—527.
- BAI Ting-hui, YOU Xu-dong, LI Wen-yong. Safeguard technology during shield crossing Metro tunnel in close space[A]. **Underground Railways Symposium 2003**[C]. Chengdu: South-west Jiaotong University Publication, 2002. 523—527.
- [8] Kim S H, Burd H J, Milligan G W E. Interaction Between Closely Spaced Tunnels in Clay[A]. **Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground**[C]. Edited by R.J. Mair & R.N. Taylor, London: Balkema, 1996. 543—548.
- [9] 项兆池, 楼如岳, 傅德明. 最新泥水盾构技术[M]. 上海: 上海隧道工程股份有限公司, 2003. 370—379.
- [10] 徐迎伍. 平行管道顶进施工的相互影响与设计方法和施工工艺的优化研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [11] Yi X, Rowe R K, Lee K M. Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30: 476—490.
- [12] Kim S H. Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay[D]. U.K.: University of Oxford, 1996.

“十一五”期间长三角轨道交通投资达 2000 亿元

在刚刚闭幕的 2006 亚太轨道交通高端论坛上, 上海铁路局局长刘涟清作了主题演讲, 描绘了未来 5 年长三角铁路网发展规划的美好蓝图。“十一五”期间, 长三角将对轨道交通投资 2000 亿元, 规划建设以“一个网络、五大通道、四个中心”为标志的高等级铁路网, 届时将形成以上海、南京、杭州为中心的“1~2 小时交通圈”, 而以沪宁、宁杭、宁安城际铁路和沪杭甬客运专线为构架的长三角新型快速客运网浮出水面。现状: 铁路客运量仅占 5%——有数据显示, 长三角地区, 公路交通承担着地区 90% 以上的客运量和 60% 以上的货运量。而铁路客货运量的市场占有率却呈下降趋势。2004 年, 长三角地区铁路完成客运量 1.42 亿人次, 仅占区域内总量的 5.0%; 铁路货运量完成 0.62 亿吨, 仅占区域内总量的 2.2%。规划: 建公文化城际快速网——目前国家已经批准了《中长期铁路网规划》和《长三角地区城际轨道交通网规划》, 国务院提交全国人大十届四次会议审议的《国民经济和社会发展“十一五”规划纲要》中明确提出要加快发展铁路。根据规划, “十一五”期间, 长三角地区规划建设以“一个网络、五大通道、四个中心”为标志的高等级铁路网。一个网络: 建 4 条区域内快速通道——一个网络是指以沪宁、宁杭、宁安城际铁路和沪杭甬客运专线为构架的长三角新型快速客运网, 其主要包括上海至南京的沪宁城际铁路、南京至杭州的宁杭城际铁路、南京至安庆的宁安城际铁路和上海至杭州、宁波的沪杭甬客运专线。线路设计时速均在 250 公里以上。以上客运网络建成后, 与既有电气化、提速改造线路一起, 将构成覆盖区域内主要城市的多功能、多层次、公文化城际快速客运网, 届时, 长三角将形成以上海、南京、杭州为中心的多个“1~2 小时交通圈”。上海到长三角任一中心城市 3 小时; 长三角 16 城市中任意两个城市之间 4 小时。届时, 每一个城市都是“网格”上的节点, 届时到长三角各个城市坐火车就像乘公交一样快捷。五大通道: 新建五条对外辐射通道——长三角不仅规划发展快速客运铁路网, 还将建设五大路网性通道。据了解, 这五大通道为: 北京到上海、上海到昆明、上海至武汉、成都、沿海铁路和南北二通道, 这将促进长三角与京津地区的经济互动、形成上海至西南地区的客流、货流大进大出的运输通道、逐步贯通东部沿海铁路, 将长三角的辐射能力进一步拓向外围。在加快路网建设的同时, 大型枢纽中心的建设也被铁路纳入规划。刘涟清说, 为了适应区域经济发展, 增强铁路客货运的集聚辐射能力, 铁路还规划在长三角地区建设客货运枢纽中心和集装箱枢纽中心以及车辆检修中心和大型养路机械检测中心机检四大枢纽中心。

(摘自河海岩土网)