

超小间距非对称浅埋隧道施工监控量测及分析

王云龙¹, 谭忠盛¹, 陈 鹰²

(1. 北京交通大学土木建筑工程系, 北京 100044; 2. 中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江湖州 313000)

[摘要] 以青岛胶州湾海底隧道团岛段小间距隧道为例, 通过现场监测结果分析了小间距非对称浅埋隧道的围岩压力特征及支护受力, 结果表明该隧道后行洞围岩压力及支护受力都较大, 这种结果有别于大部分小间距对称隧道的理论预测及实测结果。为有效缓解这些问题, 对支护参数进行及时调整, 增强后行洞的径向支护能力并对中间岩柱采取加固措施。继后施工中的监测结果显示, 后行洞的稳定性得到了有效的控制, 为类似小间距隧道的设计和施工提供了借鉴和参考。

[关键词] 隧道; 超小间距; 非对称; 浅埋; 监测

[中图分类号] U459.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0024-05

1 前言

小间距隧道开挖支护导致两隧道间岩土体的移动方向不一样, 相互影响作用剧烈, 较之标准分离式隧道, 其应力重分布更加复杂, 多次扰动使得岩石容易发生失稳, 因此特别需要研究以找到合理的开挖支护方法和支护措施。在我国, 小间距隧道的出现和研究较晚, 目前还没有较明确的规范, 仍处于边施工边探讨的总结阶段, 理论研究滞后于工程建设需求的发展^[1-3]。陈先国等利用有限元分析两平行近距离隧道施工的力学行为, 初步探讨了小间距隧道地表和拱顶的下沉规律^[4]; 靳晓光等利用数值模拟分析了小间距隧道同一开挖方法不同支护形式下围岩变形特征, 认为同一开挖方法时采用不同支护形式对围岩变形影响不大, 但该结论只局限于相应工程^[5]; 秦峰结合数值模拟及实践经验对净距 5 m 左右的小间距隧道进行分析, 给出了不同围岩条件下隧道开挖方法的建议, 有较大的参考价值^[6]; 李云鹏等对不同围岩类别小间距隧道的施工过程进行模拟研究, 通过中隔墙的变形与塑性破坏规律分析, 比选出了三车道隧道中隔墙最小间距的工程参考

值^[7]; 龚建伍等通过对浅埋小间距隧道围岩压力的解析和实测, 分析了小间距隧道的围岩压力特征^[8,9]。近些年来对于小间距隧道理论及施工方法的探索较多, 且都具有较大的意义, 但小间距隧道因其围岩、间距的不同存在较多的差别, 青岛胶州湾海底隧道团岛段小间距隧道最小间距为 25 cm, 且两隧道断面大小不一, 这种超小间距不对称隧道鲜有实例, 因此对其施工过程中的稳定性控制方法进行总结对小间距隧道的设计和施工有较大的借鉴意义。

2 工程概况

青岛胶州湾海底隧道团岛段大断面处小间距隧道的剖面图如图 1 所示。小间距隧道的最小间距为 25 cm, 对于如此小的间距, 维护施工期间中间岩柱的稳定性以及两隧道上覆岩层的稳定性都是较为重大的课题。

隧道左洞宽 15.82 m, 高 11.89 m, 右洞宽 11.8 m, 高 9.67 m, 该断面所处地势较平坦, 覆盖层主要为杂填土及强风化花岗岩, 隧道埋深 16 ~ 19 m。隧道上部到地表共 18 m, 其中第一层为 2.5 m

[收稿日期] 2012-03-20

[基金项目] 国家自然科学基金“面上”项目(C11A300120)

[作者简介] 谭忠盛(1963—), 男, 广西蒙县人, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作;

E-mail: zstan@vip.sina.com

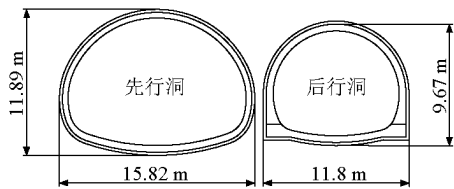


图1 小间距隧道剖面图
Fig.1 Profile of the tunnel

的杂填土,其下为强风化岩石,隧道围岩裂隙较为发育,裂隙被泥质胶结物充填,遇水强度降低严重。根据小间距隧道的实践经验,率先对隧道左洞进行开挖,在左洞进行30 m后右洞开始施工。鉴于文献[9]中先行洞受后行洞影响较大的计算结果,对两隧道尤其是先行洞进行了较强的支护设计,设计图如图2和图3所示。设计中为控制围岩稳定性采取的最主要措施即为先行洞布设间距为40 cm的 $\phi 108$ 大管棚,后行洞布设环向间距40 cm的 $\phi 42$ 超前小导管。

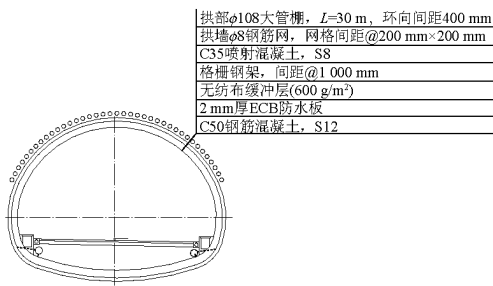


图2 先行洞的支护参数
Fig.2 Support parameters of the first-excavation tunnel

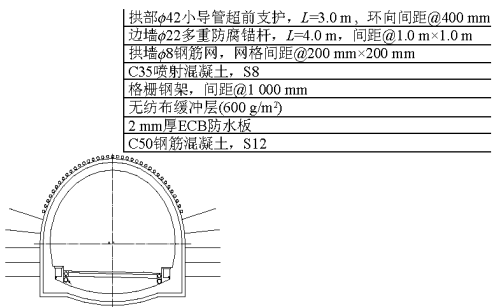


图3 后行洞的支护参数
Fig.3 Support parameters of the after-excavation tunnel

3 施工过程监测

利用以上支护参数,对先行洞采用三台阶法进

行施工,前进30 m后对后行洞利用中隔壁法(CD)施工,但后行洞开挖后因掌子面岩过于破碎,加之监测结果显示后行洞左侧拱腰围岩压力较大,立即对掌子面进行封闭。选取刚刚进入小间距时断面的监测结果,如图4~图8所示。

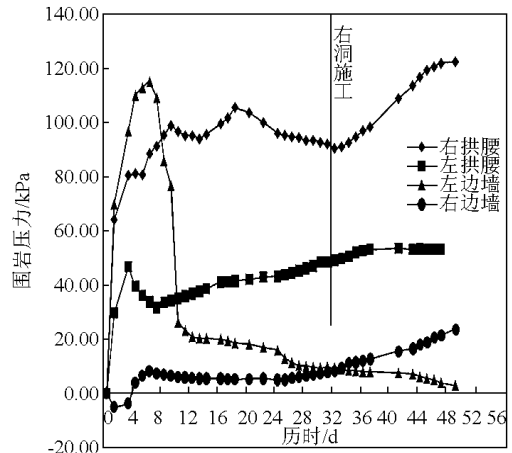


图4 先行洞围岩压力历时曲线
Fig.4 Rock pressure of the first-excavation tunnel

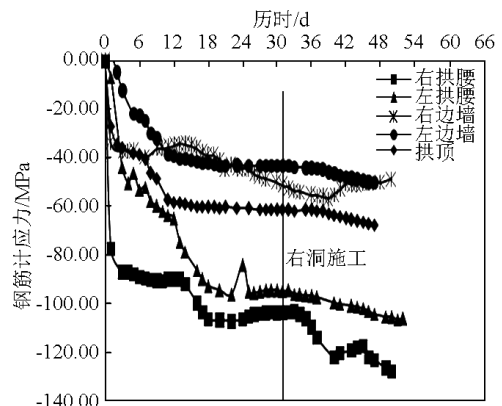


图5 先行洞拱架钢筋应力历时曲线
Fig.5 Steel stress of the first-excavation tunnel

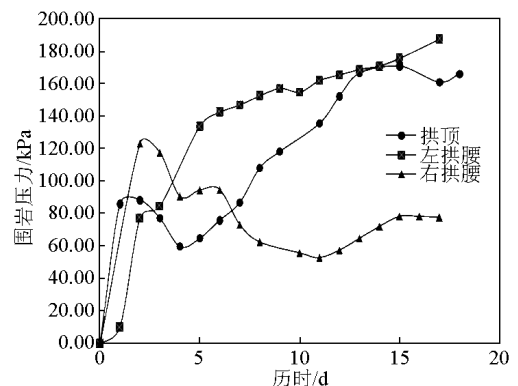


图6 后行洞围岩压力历时曲线
Fig.6 Rock pressure of the after-excavation tunnel

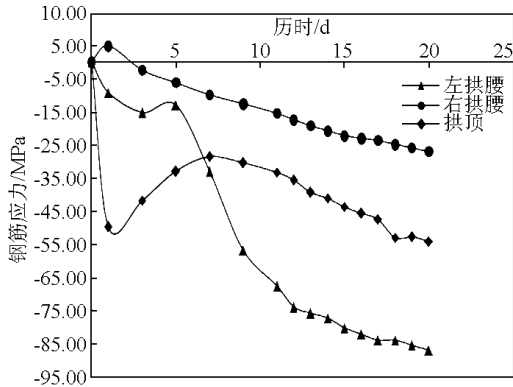


图7 后行洞钢筋应力历时曲线

Fig. 7 Steel stress of the after-excavation tunnel

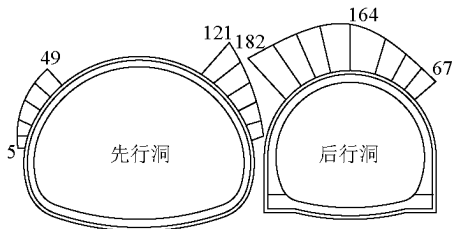


图8 围岩压力分布特征(单位:kPa)

Fig. 8 Distribution characteristic of rock pressure (unit:kPa)

通过以上图示可以看出如下几点。

1) 先行洞的监测结果显示,在施工 20 m (2 倍洞径) 左右后,监测断面的围岩压力结果与钢拱架钢筋应力已经达到稳定阶段,稳定后围岩压力基本呈现左右两拱腰处最大,拱顶次之,边墙压力最小的状态,而钢筋应力的监测结果与围岩压力结果基本符合。稳定时的围岩压力最大值为 90 kPa,钢拱架最大轴力为 103 MPa,围岩压力较小,钢拱架钢筋处于安全状态,可见在较强的支护前提下,先行洞的进洞过程是安全的。

2) 后行洞施工后,先行洞各处围岩压力均发生变化,边墙处变化不显著,其中变化最明显处为右侧拱腰,在 15 d 内围岩压力增加 30 kPa,并仍有继续增加的势头;先行洞钢拱架钢筋轴力以右拱腰处变化最大,应力值达 129 MPa。可见后行洞的开挖对先行洞影响最大处为右侧拱腰即靠近后行洞一侧,考虑到上覆土层共厚 16 m,其整体松动产生的极限压力值为 320 kPa 左右,而钢筋应力仍离屈服应力较远,加之先行洞二次衬砌已经跟进,先行洞的稳定性仍在控制范围。

3) 后行洞的围岩压力监测结果表明,在其进洞

初期围岩压力即快速增长,当在 10 d 左右发现掉块现象后,左侧拱腰及拱顶的围岩压力仍呈增长态势,左侧拱腰最大围岩压力达 182 kPa,拱顶围岩压力也达 160 kPa,表明围岩稳定并未得到良好控制,而钢筋应力虽最大值为 93 MPa,但仍处于高速增长状态。

从监测结果可以看出,后行洞临近先行洞一侧是稳定控制的重点区域。

4 后行洞稳定性控制

4.1 支护参数优化

依据文献[9]的分析结果,小间距隧道后行洞开挖后先行洞左侧与后行洞右侧的围岩压力可表示为

$$\begin{cases} q' = \gamma H \left| 1 - \frac{H}{B} \lambda' \tan \theta \right| \\ q = \gamma H \left| 1 - \frac{H}{B} \lambda \tan \theta \right| \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, q' 和 q 分别为先行洞左侧与后行洞右侧的垂直围岩压力; r 为围岩重度; H 为隧道埋深; B 为隧道跨度; λ 和 λ' 为水平侧压力系数。

按照文献[9]的推演过程,因 λ' 小于 λ ,后行洞开挖后,先行洞的垂直压力受到较大的影响。但是青岛胶州湾海底隧道小间距隧道的监测结果(见图8)显示,本隧道后行洞围岩压力明显大于先行洞,这与理论分析结果略有出入。为分析这一现象,运用FLAC^{3D}软件建立相应的分析模型,得到后行洞开挖后围岩的变形趋势,如图9所示。

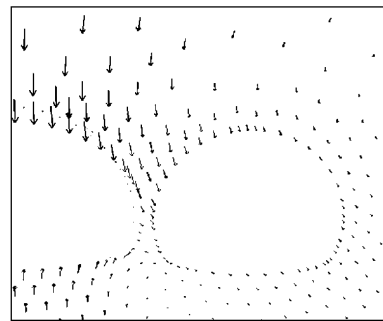


图9 围岩速度流向

Fig. 9 Velocity of surrounding rock

通过分析结果可以看出,后行洞开挖后两隧道上方的“三角区域”围岩变形趋势多向后行洞集中,这时更多的变形压力作用于后行洞左侧,导致其围岩压力大于其他部分,因此必须对后行洞左侧的径向支护能力进行加强以制约围岩的变形趋势。在设

计中增加间距 40 cm 的 $\phi 108$ 大管棚以控制围岩稳定性,如图 10 所示。

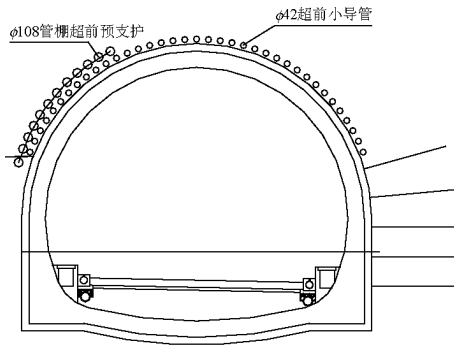


图 10 后行洞增设管棚示意图

Fig. 10 After-excitation tunnel additional pipe roof

4.2 稳定性控制效果

为保证及时反馈施工过程中围岩及衬砌的受力变化并分析支护参数优化后的支护效果,对两隧道的围岩压力、钢拱架钢筋应力和先行洞二衬混凝土应力进行监测,监测结果分别如图 11 ~ 图 15 所示。

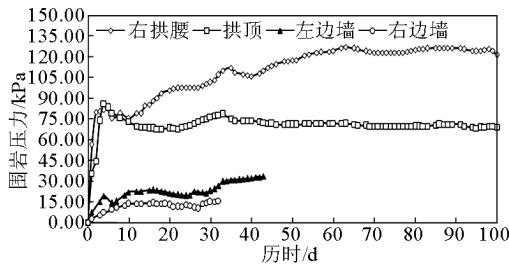


图 11 调整参数后先行洞围岩压力曲线

Fig. 11 Rock pressure of the first-excitation tunnel after adjusting the support parameters

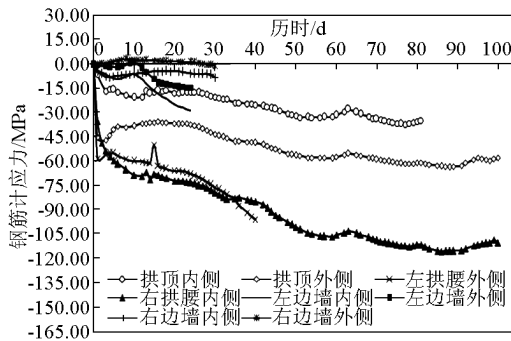


图 12 调整参数后先行洞钢筋计应力曲线

Fig. 12 Steel stress of the first-excitation tunnel after adjusting the support parameters

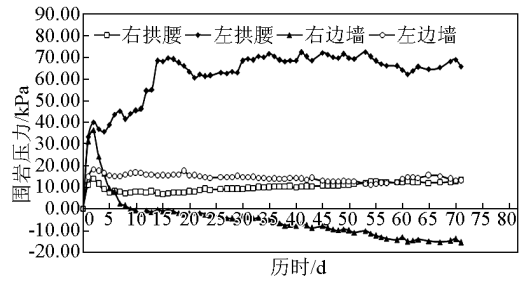


图 13 调整参数后后行洞围岩压力曲线

Fig. 13 Rock pressure of the after-excitation tunnel after adjusting the support parameters

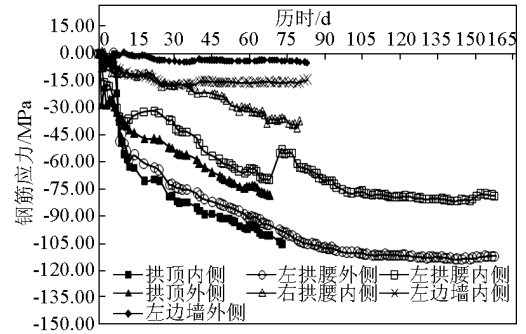


图 14 调整参数后后行洞钢筋应力曲线

Fig. 14 Steel stress of the after-excitation tunnel after adjusting the support parameters

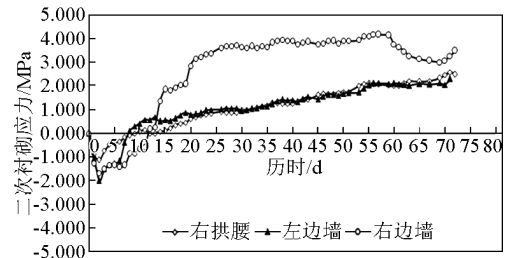


图 15 调整参数后后行洞二衬混凝土应力曲线

Fig. 15 Concrete stress of the after-excitation tunnel after adjusting the support parameters

从以上监测数据可以看出如下几点。

1) 两隧道临近中间岩柱一侧的拱腰处围岩压力较其他部位大很多,说明即使有超前管棚的径向支护作用,小间距隧道“三角区域”处仍有较大压力,但其数值比未加径向支护的应力值有明显减小。从数值上看,先行洞的围岩压力值最大为 122 kPa,与未作后行洞管棚支护时相当,可见后行洞管棚支护对先行洞围岩压力影响甚微;后行洞围岩压力最大值不足 70 kPa,较增加管棚前明显减小,可见增强

后行洞的径向支护能力对于维护隧道稳定意义重大。

2)通过先行洞钢拱架钢筋应力可以看出,拱腰、拱顶、边墙处的钢筋应力监测值有明显差异,规律为:右侧拱腰(临近小间距) > 左侧拱腰 > 拱顶 > 边墙。钢筋应力值多在钢拱架施作 70 d 后稳定,监测最大值为 120 MPa,远低于钢筋抗拉强度。而后行洞钢筋应力与先行洞钢筋应力大小相当,左侧拱腰处(临近小间距)应力值最大,但均处于安全状态。

3)二衬混凝土受力经历 3 d 左右受拉过程后,拉应力逐渐减小甚至受压(即初凝完成后),这与混凝土的初期收缩有关,二衬混凝土拉力值较小。

施工过程中,并未再出现围岩掉块等现象,且经过长期观察,初支与二衬均无破坏迹象。

5 结语

经过对非对称超小间距隧道的现场测试研究得出以下结论。

1)后行洞开挖使先行洞围岩压力增加 20 kPa 左右,由于本隧道施工时考虑了这种影响,对先行洞进行超前管棚支护,施工中先行洞稳定性较好。

2)对于非对称小间距隧道,后行洞开挖后其自身临近岩柱一侧围岩压力大于其他部位,实测结果表明岩柱上方的“三角区域”稳定性较差,制约着小

间距隧道围岩的整体稳定。

3)通过增设后行洞管棚进而提高后行洞的径向支护能力,能够有效维护小间距隧道围岩的稳定性,利用这一方法保证了青岛胶州湾海底隧道小间距段的顺利贯通。

参考文献

- [1] 蔚立元,李术才,徐帮树. 青岛小间距海底隧道施工优化的有限差分分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3564-3570.
- [2] 王建宇. 隧道工程的技术进步[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [3] 关宝树,国兆林. 隧道及地下工程[M]. 成都:西南交通大学出版社,2000.
- [4] 陈先国,高波. 地铁近距离平行隧道有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1330-1334.
- [5] 靳晓光,刘伟. 小净距公路隧道施工过程的数值模拟[C]//2003年全国公路隧道学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003:118-124.
- [6] 秦峰. 小净距隧道开挖方法浅论[J]. 现代隧道技术,2003,40(6):39-42.
- [7] 李云鹏,王银芝,韩常领,等. 不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J]. 岩土力学,2006,27(1):11-16.
- [8] 龚建伍. 扁平大断面小净距公路隧道公路隧道施工力学研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [9] 龚建伍,夏才初,雷文学. 浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 岩土力学,2010,29(增2):4139-4144.

Field measurement and analysis of asymmetric shallow-buried twin tunnels with ultra-small spacing

Wang Yunlong¹, Tan Zhongsheng¹, Chen Ying²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Third Engineering Co. Ltd., China Railway 16th Bureau Group Co. Ltd., Huzhou, Zhejiang 313000, China)

[Abstract] The ultra-small spacing tunnel of Jiaozhou Bay seabed tunnel in Qingdao is took for example; the surrounding rock pressure features and support force are analyzed through the field measurement. Results show that the surrounding rock pressure and support force of the after-excitation tunnel are larger than others of the tunnel. This result is different from the theoretical predictions and experimental results of most of the small spacing symmetry tunnel. To alleviate these problems effectively, support parameters are adjusted opportunely; the radial support capacity of the after-excitation tunnel is enhanced, and reinforcement measures of rock pillar are made at the same time. The monitoring results show that the stability of the after-construction tunnel has been effectively controlled, which provides useful reference for the design and construction of similar tunnels with small spacing.

[Key words] tunnel; ultra-small spacing; asymmetric; shallow-buried; field measurement