

软土地区地铁不同结构间差异沉降特点分析

黄大维¹, 周顺华¹, 宫全美¹, 韦 凯²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 分析软土地区 46 个地铁车站与隧道连接处、34 个联络通道两端线路处以及 4 个 U 型槽与隧道连接处运营约 10 年后线路的长期沉降观测数据。结果表明: 约 70% 的地铁车站与隧道连接处车站沉降少, 且出站一侧沉降槽的深度与宽度大于进站一侧; 联络通道旁线路产生了不均匀沉降的约占 80%, 其中约 90% 为沉降槽; U 型槽与隧道连接处的差异沉降很小。

关键词: 地铁结构; 长期沉降; 不均匀沉降; 差异沉降

中图分类号: U231

文献标志码: A

Characteristic Analysis of Non-uniform Settlement for Different Structures of Metro in Soft Soil Districts

HUANG Dawei¹, ZHOU Shunhua¹, GONG Quanmei¹, WEI Kai²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: An analysis was made of a long-term settlement of the metro line in service for about ten years, 46 joints between the stations and the tunnels in soft soil districts, 34 locations beside the subway connection aisles, and 4 joints between the U-shaped grooves and the tunnels. Analysis results show that about 70% of the settlements occur in tunnel joints rather than in the station joints. The depth and width of settlement groove on the pull-out side are larger than on the pull-in side. About 80% of differential settlements occur on the railway line beside the subway connection aisles, and about 90% of the differential settlements are settlement groove. The non-uniform settlement at the joint between the U-shaped groove and the tunnel is little.

Key words: metro structures; long-term settlement; differential settlement; non-uniform settlement

引起盾构隧道长期沉降的因素有很多, 包括结构设计、隧道施工、地铁运营、周边环境等。地铁隧道长期沉降过程中必然会导致线路的不均匀沉降, 由此造成道床与管片的分离脱空、道床开裂、管片破损, 进而导致结构渗漏水、轨道状态恶化、列车动荷载加大等, 最终将影响地铁的正常使用与行车安全。关于地铁线路长期沉降的机理研究较多, 主要集中在动力因素^[1-4]、地质因素^[5]及排水固结因素^[6]等, 但关于由沉降结果反分析导致沉降的因素的相关研究还很少^[7-8]。地铁不同结构间的差异沉降早已受到了关注, 但由于其影响因素的复杂性与现场实测的长期性, 地铁不同结构间差异沉降特点与防治措施方面的分析较少。本文通过统计与分析软土地区 46 个地铁车站与隧道连接处、34 个联络通道两端线路处以及 4 个 U 型槽与隧道连接处运营约 10 年后线路的长期沉降观测数据, 对结构间差异沉降的规律进行了总结, 通过差异沉降规律及其发生与发展的特点, 分析了导致差异的因素, 并提出了防治差异沉降的措施和在设计、施工及运营中需要解决的问题。

1 车站与其邻接隧道间差异沉降

1.1 车站沉降小于隧道沉降

图 1~4 为车站与其邻接隧道的累积沉降曲线(图底的箭头方向为行车方向, 图中竖线对应的里程为车站与隧道连接处的里程, 图 5~7 同)。从图 1 可以看出, 同一车站的上下行线, 车站与其邻接隧道的累积沉降曲线相似。从所统计的其他车站来看, 同一车站的上下行线中, 车站与其邻接隧道的差异沉降趋势非常相似, 且上下行线的总沉降量也接近。

图 1~4 均为车站累积沉降小于两侧隧道累积沉降(在隧道一侧取约 50 m 的累积沉降与车站端头的累积沉降进行比较), 从图中可以看出, 软土地区

收稿日期: 2011-12-26

第一作者: 黄大维(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为岩土与地下工程。E-mail: 321huangdawei@tongji.edu.cn

通讯作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通结构设计理论与施工技术、线路工程系统动力学等。E-mail: zhoushuh@tongji.edu.cn

多数地铁运营不到1年,在车站与隧道连接处出现了沉降槽,差异沉降值一般在5 mm以内(差异沉降值为沉降槽最低点与沉降槽车站一侧最高点的高程差值),极少数差异沉降值大于5 mm,但在10 mm以内。有个别车站与隧道连接处的差异沉降是在运营多年后才出现,如图1a进站一侧、图1b进站一侧、图3进站一侧、图4进站一侧。在车站与隧道连接处差异沉降出现后,在隧道一侧形成沉降槽,沉降槽内沉降速率比两侧要大,因此车站与隧道的差异沉降值也将继续增长,而且在车站与隧道的沉降达到相对稳定后沉降槽的深度继续加大,沉降槽的影响范围也在不断扩大,往往最终导致车站内的线路也出现不均匀沉降,即线路在车站两端沉降大于中间,使车站内的线路呈现出中间高两侧低的趋势。从所统计的软土地区的地铁车站与隧道连接处的差异沉降来看,车站的后续沉降小于其邻接隧道的约占70%。

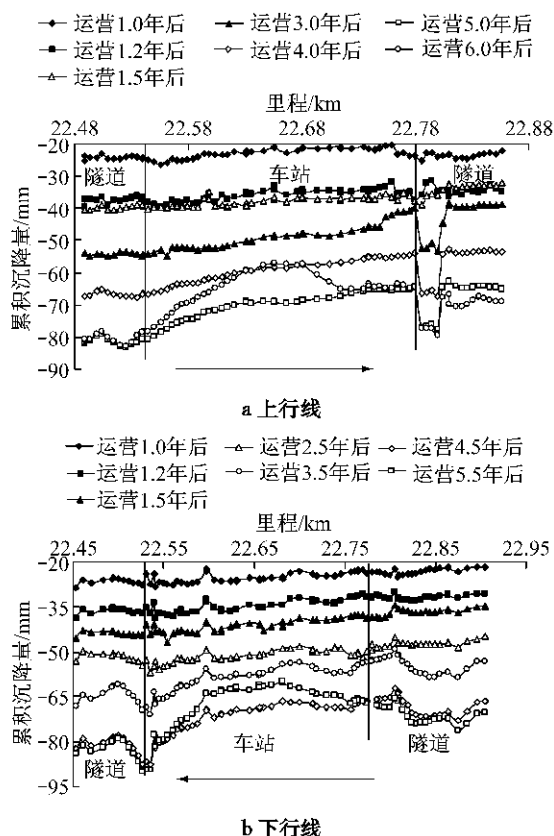


图1 车站A与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.1 Accumulative settlement curves of station A and the adjacent tunnel

从图1~4还可以看出,同一车站的两端一般在出站一侧先出现沉降槽,且在运营多年后出站一侧的沉降槽一般要大于进站一侧的沉降槽,同一车站两端的沉降槽深度相差约15~35 mm,沉降槽的影

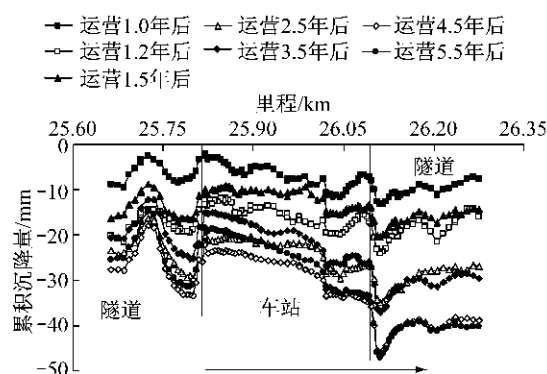


图2 车站B与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.2 Accumulative settlement curves of station B and the adjacent tunnel

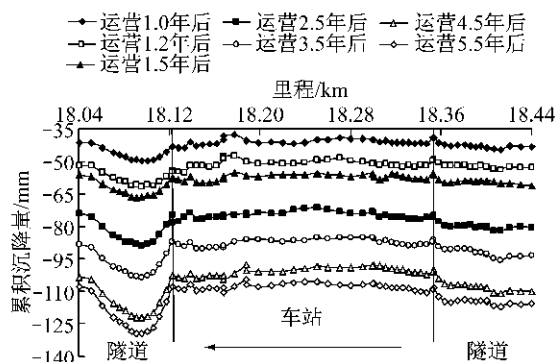


图3 车站C与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.3 Accumulative settlement curves of station C and the adjacent tunnel

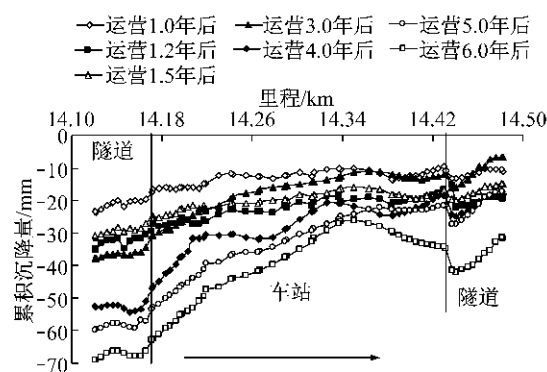


图4 车站D与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.4 Accumulative settlement curves of station D and the adjacent tunnel

响范围相差约为20~50 m。由此可见,在地铁设计时,在隧道一侧应进行一定范围加固,确保线路刚度与后期沉降的良好过渡,且进站端头井与出站端头井的加固应区别对待,出站端头井的加固深度与长度应大于进站端头井。

1.2 车站沉降大于隧道沉降

图5~7表明,在车站与隧道连接处车站比其邻

接隧道沉降较多。从图中可以看出,车站与隧道在连接处的差异沉降值不大,在连接处未形成明显的沉降槽。在线路累积沉降增长过程中,差异沉降值变化不大,车站与隧道的连接处累积沉降曲线形状变化也不大。从图中还可以看出,车站内的线路累积沉降基本是车站的中间大于两端,从所统计的结果来看,约有25%的车站比其邻接隧道沉降较多。

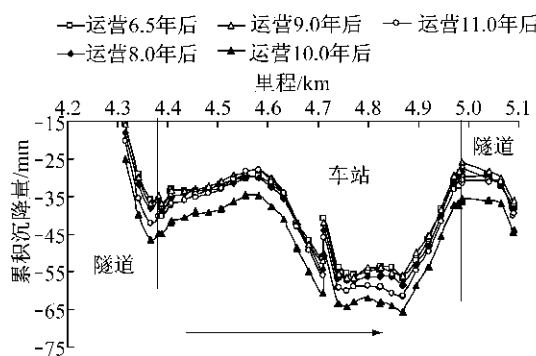


图5 车站E与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.5 Accumulative settlement curves of station E and the adjacent tunnel

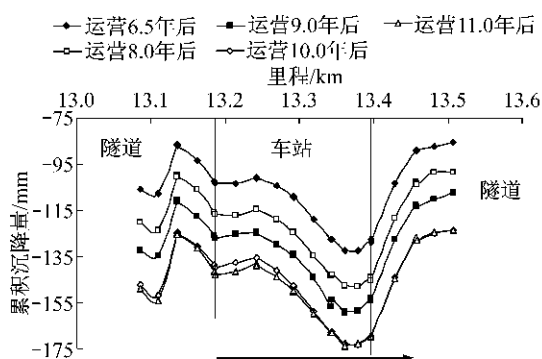


图6 车站F与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.6 Accumulative settlement curves of station F and the adjacent tunnel

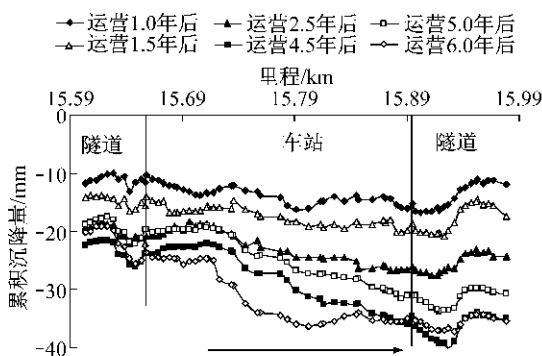


图7 车站G与邻接隧道累积沉降曲线

Fig.7 Accumulative settlement curves of station G and the adjacent tunnel

所有车站与隧道在连接处的差异沉降相对该处线路的总沉降而言,差异沉降值占总沉降值的比例

很小。从整个地铁线路的长期累积沉降曲线来看,车站与隧道连接处结构间差异对线路的总沉降影响不大。由此可见,地铁车站与端头井的加固对减小长期沉降的作用非常小,因此在地铁车站与端头井的加固过程中,应主要从两者的刚度过渡及减小结构间差异沉降来考虑。

2 联络通道旁线路不均匀沉降

2.1 联络通道旁线路沉降大于两侧

从图8~10可以看出,联络通道旁线路出现的累积沉降大于两侧,即出现了沉降槽(图中竖线对应的里程为联络通道中线的里程,图11~12同)。从图8a可以看出,线路运营在1.5~2.5年期间出现不均匀沉降,而图8b是在运营不到1.0年就已产生了不均匀沉降,即同一联络通道两端的线路不均匀沉降不是同时发生,同时,沉降槽的深度相差较多,累积沉降曲线的形状差别较大。图9a,b表明,线路运营到9.0年后,基本同时产生了不均匀沉降;图10a,b显示线路运营不到1.0年就已经产生不均匀沉降,即图9和10中联络通道两端的线路基本是同时产生不均匀沉降,而且同一联络通道两端的线路沉降槽深度与影响范围接近,累积沉降曲线形状相似。从软土地区地铁联络通道两端的线路来看,也存在一端线路出现不均匀沉降而另一端运行约10.0年后线路平顺性仍良好的情况。

从图8~10可以看出,对于同时出现不均匀沉降的线路,同一联络通道两端线路的沉降槽深度与影响范围比较接近,累积沉降曲线形状也接近;对于不同时出现不均匀沉降的线路,同一联络通道两端线路沉降槽的深度与影响范围及累积沉降曲线的形状相差较大。对于同一联络通道两侧线路同时出现的不均匀沉降,可以认为导致不均匀沉降的因素为共同因素,如:联络通道施工对周围土体的扰动,尤其是采用冻结法施工时,解冻后周围土体强度降低较多;周围环境影响导致同时在隧道管片上出现渗漏水;在联络通道内出现渗漏水等。同一联络通道两侧线路不同时出现不均匀沉降,可以认为导致不均匀沉降的因素为非共同因素,如某一侧线路出现了渗漏水而另一侧未出现渗漏水,或出现渗漏水的时间不同。

从所统计的联络通道旁线路出现沉降槽的情况来看,在线路产生沉降槽后,沉降槽的深度与影响范围基本都会随着运营时间的增长而加大。在软土地

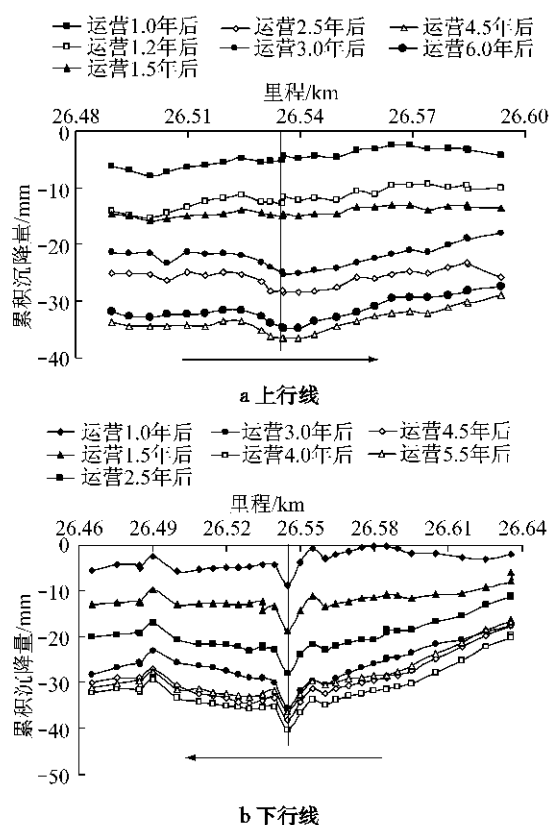


图 8 联络通道 A 旁线路累积沉降曲线

Fig.8 Accumulative settlement curves of the railway beside the subway connecting aisle A

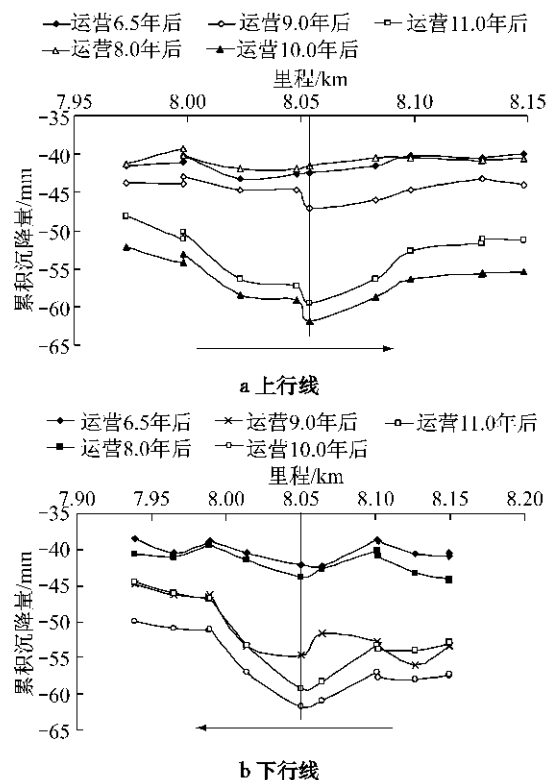


图 9 联络通道 B 旁线路累积沉降曲线

Fig.9 Accumulative settlement curves of the railway beside the subway connecting aisle B

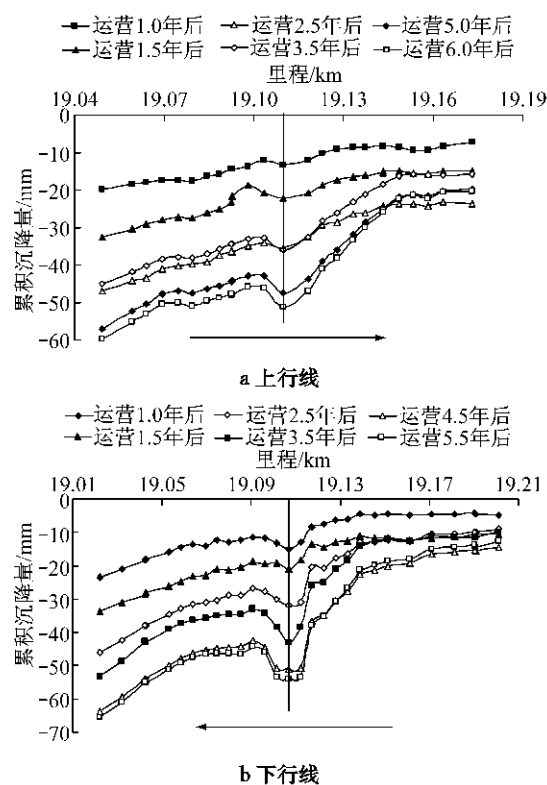


图 10 联络通道 C 旁线路累积沉降曲线

Fig.10 Accumulative settlement curves of the railway beside the subway connecting aisle C

区运营超过 10.0 年的地铁中联络通道旁线路的沉降槽深度可达 40 mm 之多,影响范围也可达到 50 m 以上.在统计的联络通道旁线路累积沉降中,约 80% 的联络通道旁线路出现了不均匀沉降,其中约 90% 为沉降槽.

2.2 联络通道旁线路沉降小于两侧

在统计的联络通道旁线路的累积沉降中,也存在部分线路在联络通道旁的累积沉降小于两侧,如图 11a, b 和图 12a.当联络通道旁线路累积沉降小于两侧时,说明联络通道处的地质较好,很可能联络通道周围土体在盾构隧道施工前进行了永久加固,如三重管旋喷桩、深层搅拌桩、SMW 等水泥系工法加固,而不是冻结法加固.图 12b 为联络通道 E 对应的另一端,从图中可以看出,尽管在联络通道旁线路出现了沉降槽,但沉降槽的深度与影响范围都不大,相比图 8~10 而言,其发展程度也小得多.由此推断联络通道 E 周围土体很可能进行了永久加固.在统计的联络通道旁线路出现的不均匀沉降中,约 10% 的联络通道旁的线路长期累积沉降都小于两侧.

从所统计的联络通道两端的线路的累积沉降中,不管联络通道两端线路是否都出现了不均匀沉降,也不管两端线路不均匀沉降是否同时产生,上下

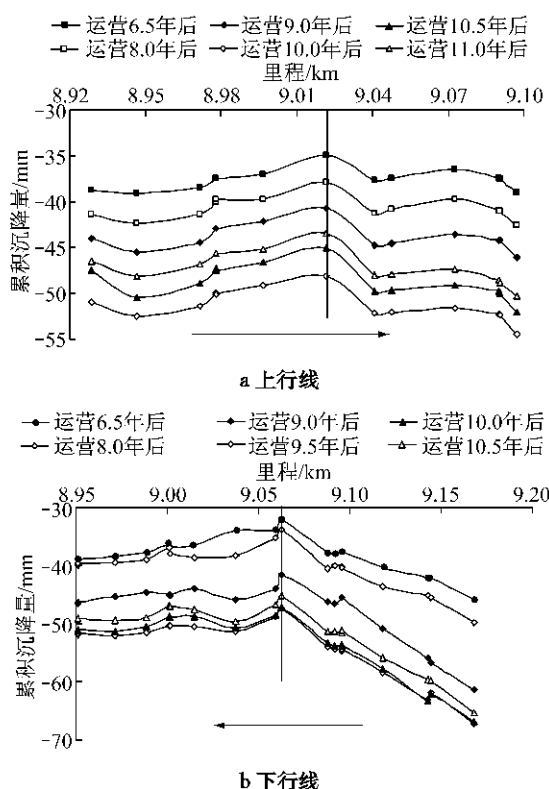


图11 联络通道D旁线路累积沉降曲线

Fig.11 Accumulative settlement curves of the railway beside the subway connecting aisle D

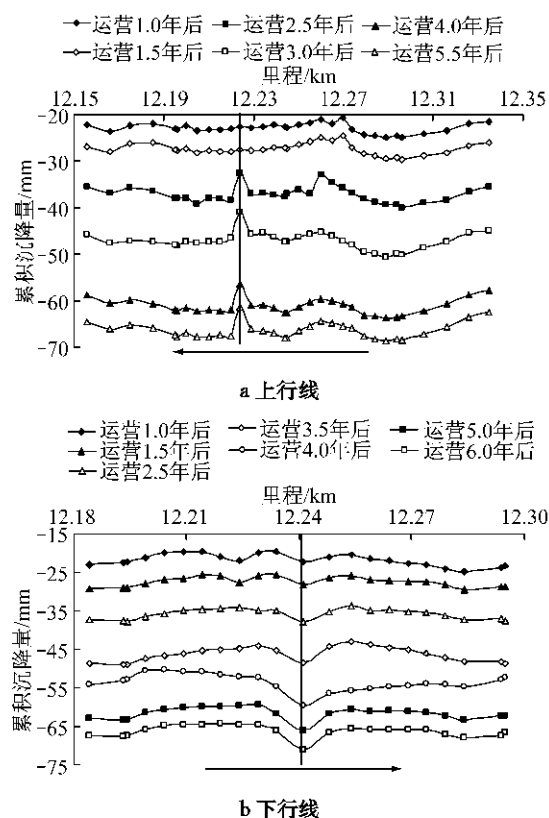


图12 联络通道E旁线路累积沉降曲线

Fig.12 Accumulative settlement curves of the railway beside the subway connecting aisle E

行线的累积沉降值在联络通道两侧接近,且线路的沉降趋势也相同(即大里程一侧与小里程一侧的累积沉降变化趋势相同),联络通道旁线路不均匀沉降值相对线路的累积沉降值而言很小,因此可以认为联络通道对线路不均匀沉降的影响相对线路的总体沉降而言影响较小,可见决定线路总体沉降的因素为该处的地质及周围环境。

3 隧道与U型槽间差异沉降

图13和14为隧道与U型槽连接处的累积沉降,从图中可以看出,隧道与U型槽连接处(图中竖线对应的里程为隧道与U型槽连接处的里程)的差异沉降非常小。图14在隧道一侧随着里程增加累积沉降值有所增大,对此可认为是地质均匀变化所致,并非结构差异所致,且可认为对轨道的平顺性影响不大。从累积沉降来看,同一地铁的上下行线隧道与U型槽连接处的差异沉降与线路的总沉降非常相似。

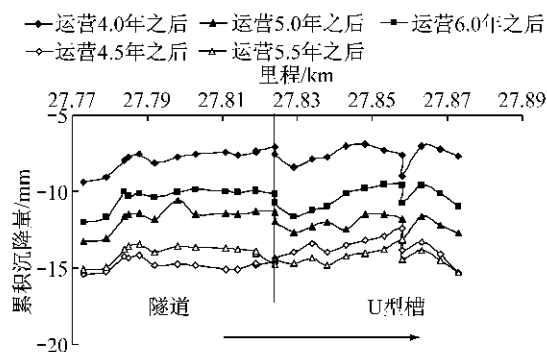


图13 隧道与U型槽A连接处的累积沉降曲线

Fig.13 Accumulative settlement curves of railway at the joint of tunnel and U-shaped groove A

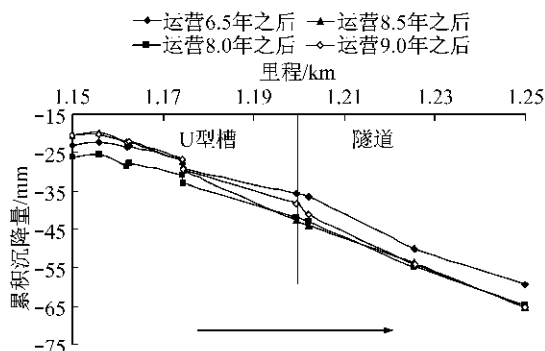


图14 隧道与U型槽B连接处的累积沉降曲线

Fig.14 Accumulative settlement curve of railway at the joint of tunnel and U-shaped groove B

与U型槽连接的隧道一般采用明挖法施工,当采用明挖法施工时一般采用矩形隧道,因此U型槽

与矩形隧道的结构形式非常接近,两者的基底应力与结构刚度相差不大,因此两种结构间的差异沉降不大.从图13与14中还可以看出,U型槽的后续总沉降不大,这是因为U型槽基底应力较小,有利于减小后续沉降.

4 减小不同结构间差异沉降措施

车站与隧道连接处产生差异沉降的主要原因包括车站与隧道结构差异导致的刚度差异、车站与隧道的基底加固方式不同、车站与隧道出现差异沉降后轨道不平顺导致的行车振动、连接部位易出现渗漏水等.为了减小甚至避免车站与隧道连接处差异沉降的发生,应该设置一定长度的刚度过渡段,长度一般设置为15~20 m,刚度过渡段的做法可借鉴高速铁路的线路刚度过渡段设置方法;对进站端头井与出站端头井的加固应区别对待,出站端头井的加固深度与长度应适当加大;此外还可以考虑在车站与隧道连接处一定范围内采用减振型轨道结构.在运营阶段应加强车站与隧道连接处的监测,在发现渗漏水时要尽快治理^[9],发现轨道不平顺时要及时调整轨道,以防恶性循环发生.

联络通道旁线路的不均匀沉降产生可分为两类,一类是线路刚开始运营就产生不均匀沉降;另一类是在线路运营数年后才产生不均匀沉降.刚开始运营就产生不均匀沉降的主要原因为联络通道施工过程中对周围土体产生了扰动;运营数年后才出现差异沉降的主要原因为联络通道处发生了渗漏,进而导致周围土体产生固结沉降.在线路不均匀沉降出现后,线路的平顺性受到影响,同时管片间发生相对位移后易出现渗漏,最终多因素形成恶性循环,这也是线路一旦发生不均匀沉降后,不均匀沉降值与影响范围往往要增大的原因.为了减小联络通道旁线路的不均匀沉降发生,建议在盾构隧道施工前将联络通道周围的土体进行永久性加固,如采用旋喷法或深层搅拌法.当条件不允许而必须采用冻结法施工联络通道时,应尽量采取措施来减小冻结法施工对土体的扰动,如:降低冷却温度、增大冻结速度,把冻结范围控制在必要的最小限度内^[10],通过增加孔隙水的黏性来控制向冻结面的水分迁移量^[11-12]等,并在施工完后加强壁后注浆.

从结构间的差异沉降来看,在局部出现差异沉降后,随着运营时间的增长,在沉降槽的附近线路往往会形成新的不均匀沉降,其主要原因是列车在沉

降槽附近出现了颠簸,因此应加强线路的平顺性监测^[13],当线路出现差异沉降后应及时采取措施,以防止多因素恶性循环导致更大的不均匀沉降.

5 结论

(1) 同一车站两端的沉降槽一般是出站一侧先出现,而且沉降槽的深度与影响范围基本都是出站一侧大于进站一侧.沉降槽产生后其深度与影响范围一般要增大,并可能导致车站内的线路呈现出中间高两侧低的趋势.

(2) 从所统计的软土地区地铁车站与隧道连接处差异沉降来看,车站沉降小于其邻接隧道的约占70%;车站沉降大于其邻接隧道的约占25%.当车站比其邻接隧道的沉降大时,连接处差异沉降值较小,且沉降槽的影响范围不大.

(3) 导致同一联络通道两端线路不均匀沉降的因素有共同因素与非共同因素,对于共同因素导致不均匀沉降的,沉降槽的深度与影响范围及累积沉降曲线的形状非常接近;对于非共同因素导致的不均匀沉降,不均匀沉降值与累积沉降曲线的形状相差较大.在统计的联络通道旁线路中约80%出现了不均匀沉降,其中约90%为沉降槽.

(4) 在联络通道旁线路沉降小于两侧时,不均匀沉降值与影响范围基本能保持稳定.在联络通道一端线路中出现的沉降小于两侧时,在联络通道另一端即使出现了沉降槽,沉降槽的深度与影响范围也基本能保持稳定.在统计的联络通道处线路出现了不均匀沉降中,约10%的联络通道处的长期累积沉降小于两侧.

(5) 隧道与U型槽连接处差异沉降值很小,基本无明显的沉降槽出现,且U型槽的累积总沉降一般较小.

参考文献:

- [1] 唐益群,王艳玲,黄雨,等.地铁行车荷载下土体动强度和动应力-应变关系[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(6):701.
TANG Yiqu, WANG Yanling, HUANG Yu, et al. Dynamic strength and dynamic stress-strain relation of silt soil under traffic loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(6): 701.
- [2] 唐益群,黄雨,叶为民,等.地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1566.

(下转第158页)