

文章编号: 1006 - 2106(2012) 01 - 0051 - 06

富水复杂地质围岩稳定性评价与支护系统优化^{*}

章元爱^{1**} 梅志荣¹ 张军伟¹ 陈永照²

(1. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 611731; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要: 研究目的: 富水复杂地质隧道施工过程中, 不良地质带受水 - 岩相互作用的影响, 开挖过程中拱顶、拱腰等部位极易产生块体失稳, 且隧底压力经常大于垂直地压, 造成仰拱断裂、边墙下部内移错动甚至衬砌失稳破坏, 从而给隧道施工造成很大的安全隐患, 因此很有必要对围岩稳定性进行评价, 并以此为基础对围岩支护系统进行优化探讨。

研究结论: (1) 隧道在弱风化的花岗岩中掘进时应尽快施作仰拱, 使衬砌闭合成环; (2) CD 法开挖段仰拱紧跟、衬砌尽早封闭成环很有必要; (3) 文兴隧道与水库之间具有水力联系的可能性, 对于隧道内的渗、涌水应及时采集水样进行必要的水化学及同位素分析, 判断隧道内渗、涌水的来源。 (4) 隧道在断层破碎带的软弱围岩中掘进时, 应尽早施做二次衬砌, 必要时做专项的抗水压复合式衬砌设计; (5) 一旦证实水库水与隧道之间存在水力连通, 隧道的断层破碎带为力学和形变不良段, 车行横洞应尽量避免该位置, 适宜前移或后移数十米至微风化岩层段内。

关键词: 富水隧道; 优化; 围岩稳定性

中图分类号: U451 **文献标识码:** A

Rock Stability Evaluation and Supporting System Optimization in Water - Rich and Complex Stratum

Zhang Yuan - ai¹, Mei Zhi - rong¹, Zhang Jun - wei¹, Chen Yong - zhao²

(1. China Railway Southwest Research Institute Co. Ltd chengdu, Sichuan 610031, China 2. China academy of railway sciences, Beijing 100081)

Abstract: Research purposes: During the tunnelling in water - rich and complex stratum, the bad geology was effected by the mutual effect of water and rock, the arch and arch side were easy to lose stability of block, and the impressure of bottom was bigger than that of vertical, which cause invert cracking, side wall displacement or even lining instability, so there were great security of hidden danger for tunnelling. It's important support for rapid and safety tunnelling to do optimization discusses on rock supporting system which based on accurately evaluation of rock stability.

Research conclusions: (1) The tunnel invert should be constructed to make the lining into closure condition as soon as possible during tunneling in the weak weathered granite rock section. (2) It is necessary for the CD method followed by invert excavation section and making the lining into a closure condition as early as possible. (3) Because of the possibility for the hydraulic connection between Wenxing tunnel and the reservoir, water samples should be collected in time to make a necessary chemistry and isotopic analysis to determine where the water seepage and gushing are from. (4) The secondary lining should be applied as soon as possible during tunneling in weak rock of the fracture zone. If necessary, a special anti water pressure composite lining design should be made. (5) Once the hydraulic connection between the tunnel and reservoir was confirmed and the deformation and mechanical condition of the tunnel in fault fracture zone was

* 收稿日期: 2011 - 11 - 23

** 作者简介: 章元爱, 1978 年出生, 女, 工程师。

poor. The cross-hole for vehicle should be kept away from the weak point, it is suitable to change forward or backward 10 meters to the weak weathered granite section.

Key words: water-rich tunnel Optimization rocks stability

隧道工程由于受场地环境、施工技术、地下水及岩土性状等诸多不确定因素的影响,设计、施工难度大。近年来,随着经济建设的发展和城市化进程的加快,为了满足日益增长的交通运输需要,许多国家投资兴建了大量长、大型隧道。国内外隧道的设计、施工和运营实践证明,在富水复杂地层中修建隧道,地下水处理是一个非常重要且复杂的问题,地下水在施工中的涌突水问题和对衬砌的作用将直接关系到隧道施工的安全性、结构的耐久性以及后期运营的安全^[1-2]。目前,关于隧道涌突水灾害的研究主要集中在山岭隧道,而对于城市特殊环境下隧道涌突水研究成果和实测资料相对较少。随着我国城市现代化的迅猛发展,进一步开展城市富水复杂地层隧道围岩稳定性评价和支护系统优化的研究具有重要现实意义。

本文以厦门市文兴隧道为工程背景,重点研究东山水库对隧道施工的影响,全面考虑该工程地质条件和施工工艺,采用三维有限元分析系统 FLAC3D 进行数值分析,模拟了该工程的开挖与支护过程中力学形的变化,得出了富水复杂地层条件下围岩稳定性评价与支护系统优化方法。

1 工程概况及工程地质

厦门市文兴路道路工程 A 标段位于厦门市思明区,为山岭分离式双线城市隧道,开挖洞径约 11 m,全长约 2 km。隧道沿线地貌单元属丘陵山地,山坡起伏较大,隧道沿线高程 25.2 ~ 162.0 m,自然坡角 5° ~ 40°,部分地段大于 50°,隧道左、右双线有两处下穿民房,一处下穿冲沟。山体由燕山期花岗岩构成,由花岗岩球状风化形成的孤石形态各异,石球、石蛋十分发育。该区构造节理、裂隙发育,隧道沿线穿越破碎带 1 条,构造裂隙发育带 6 条,构造带岩体破碎,压剪性节理十分发育,岩石蚀变强烈,具绿泥石化、硅化现象,沿断裂带多处见泉水出露。

文兴隧道左线 ZK 1+200 ~ +600 段东侧临近东山水库,枯水期水深 3 ~ 4 m,库容量 5 万 ~ 6 万 m³,雨季期水库最大容量 75 万 m³;前期勘查表明,隧道洞身钻孔抽水与东山水库库水无直接水力联系,但不排除其它局部裂隙水与东山水库地表水连通的可能性,以及施工或发生地震影响造成隧道地下水与东山水库地表水连通的可能性。

2 隧道施工过程数值模拟与结果分析

2.1 数值模型选择

充分考虑各种最不利因素影响,以靠近水库 60 m 隧道段建立如图 1 所示的三维计算模型,上边界取 140 m,纵向长度取 60 m,左边界取 106 m。模型左右两侧施加水平方向约束边界条件;底部施加竖直方向约束边界条件;顶部为自由边界。

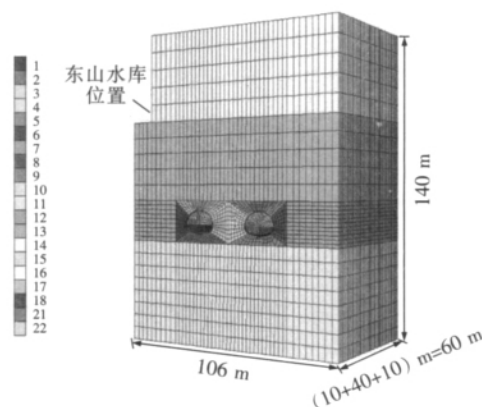


图 1 隧道计算模型

围岩材料采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型模拟,开挖采用 Null 模型,复合式支护中的初期支护采用 Shell 结构单元,二次衬砌采用实体单元,利用弹性本构关系进行模拟分析,围岩的初始地应力场只考虑自重应力的影响。施工中锚喷支护和围岩加固注浆措施通过适当提高围岩加固区的参数来实现。具体围岩和支护材料参数如表 1 所示。

表 1 围岩和支护材料参数

项目	重度/(kN/m ³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比	变形模量/MPa	渗流系数/(cm/s)
强风化花岗岩	20.5	30	35	0.35	75	8.5×10^{-5}
弱风化花岗岩	25	—	—	0.24	1.2×10^4	8.5×10^{-5}
断层破碎带	25	35	100	0.2	5×10^2	8.5×10^{-5}
初期支护	25	—	—	0.2	19×10^3	—
二次衬砌	25	—	—	0.2	25×10^3	—

隧道采用紧急停车带的大断面设计,隧道施工工程方向的前、后 10 m 弱风化岩区段采用短台阶法开挖,中间 40 m 断层破碎带区段采用 CD 法开挖,每个开挖循环为 2.5 m。开挖顺序为先开挖左洞,当左洞开挖至 50 m 时,再同时开挖右洞,保持左、右洞的掌子面始终相距 50 m。计算过程中开挖阶段围岩应力释放 30%,初期支护阶段围岩应力释放 60%,二次衬砌阶段围岩应力释放 10%。

上台阶开挖完成后,立即在隧道的拱部喷射 25 cm 厚的素混凝土,梅花型布设 3 m 长的砂浆锚杆;下台阶开挖后,边墙和隧道底部也喷射同样厚度的素混凝土,二次衬砌滞后初期支护 2.5 m。

2.2 开挖过程的数值模拟与结果分析

2.2.1 左隧道 0 ~ -10 m 台阶法开挖模拟结果

Y 向应力分布如图 2 所示。

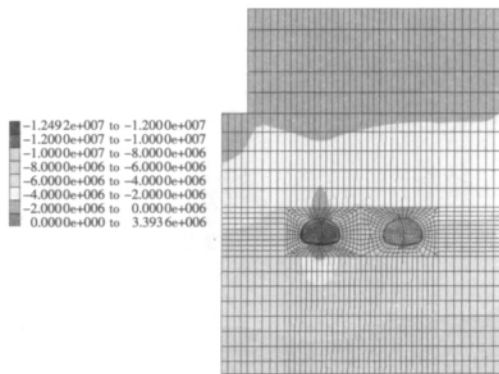


图2 整体 Y 向应力分布图

由计算结果和图 2 可以看出,左侧隧道使用台阶法开挖 10 m 后,隧道周边围岩在拱顶和隧底处出现轻微的局部应力集中现象,周边围岩的最大拉应力约为 0.1 MPa,最大压应力为 13 MPa,隧道周边的最大水压力约为 0.75 MPa,说明隧道在弱风化花岗岩中掘进时,围岩、初期支护的位移、应力都处于可控范围,隧道施工安全。另一方面,由于较高的渗流水头使得隧底有局部隆起现象,所以要尽快施作仰拱,使衬砌闭合成环。

2.2.2 左隧道 CD 法开挖 -10 ~ -50 m 的模拟结果

基于隧道施工最不利的力学影响因素以及模型简化的考虑,计算过程中假设模型中的隧道里程 -10 ~ -50 m 段全部穿越断层破碎带。Y 向应力分布如图 3 所示。

由计算结果和图 3 可以看出,左侧隧道使用 CD 法开挖 40 m 后,由于断层破碎带围岩级别低和高水压的影响,隧道开挖后围岩在拱顶、隧底处出现明显局部应力集中现象,且有向隧道内移动的趋势,使得这些部

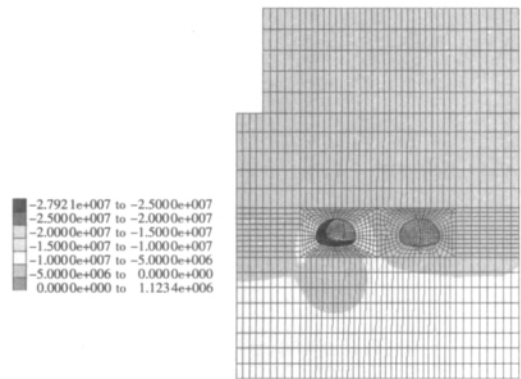


图3 整体 Y 向应力分布图

位的围岩从压应力状态向拉应力状态转变。该段初期支护的最大压应力约为 29 MPa,出现在边墙附近;而最大拉应力约为 3 MPa,出现在拱顶和隧底附近。因此,隧道在断层破碎带的软弱围岩中掘进时,围岩、初期支护的应力较大,为了使初期支护压力减小至安全稳定状态,应尽早施做二次衬砌,使隧道应力进一步重新分布,充分发挥二次衬砌安全储备的功能,必要时做专项抗水压复合式衬砌设计。

考虑到该区与水库之间存在水力联系的可能性,为保证隧道施工安全与质量的可靠性,应采取超前预注浆等加固措施,对于隧道内的渗、涌水点应及时采集水样进行必要的水化学与同位素分析,检测水库水与隧道内渗、涌水的连通性。

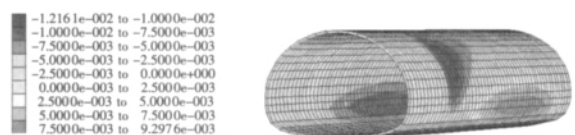


图4 初期支护 X 向位移

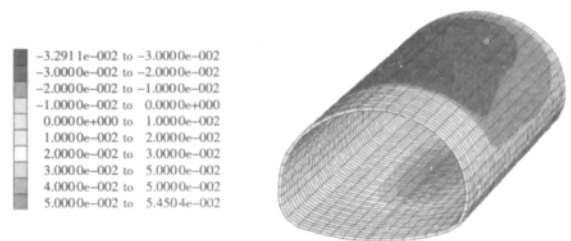


图5 初期支护 Y 向位移

图 4、图 5 分别为初期支护 X 向、Y 向位移。从图 4、图 5 可以明显地看出隧道拱顶和隧底朝隧道内收敛以及边墙朝隧道外侧的深部岩体位移的趋势,这和图 3 的围岩应力重分布图准确地对应起来。由于断层破碎带处围岩级别低,围岩的物理力学参数小,以及渗流水头大,这些因素导致此阶段的隧道衬砌位移较

大隧道的最大拱顶沉降约为 32 mm,隧底最大隆起约为 50 mm,位移总量已处于警戒范围,施工过程中采用仰拱紧跟、衬砌尽早封闭成环的措施显得尤为必要。

此外,从围岩和衬砌的位移、应力云图以及渗流水压力云图,可以看出:一旦证实水库水与隧道之间存在水力连通,隧道的断层破碎带里程段为力学、形变不良段,车行横洞应尽量避免该位置,车行横洞因适宜前移或后移数十米至微风化的岩层里程段。

2.2.3 左隧道台阶法开挖 -50 ~ -60 m 以及右隧道台阶法开挖 0 ~ -10 m 后的计算结果

当左侧隧道开挖 50 m 后,同时进行右侧隧道的开挖,因此,左、右两隧道的掌子面间距为 50 m。

Y 向应力分布如图 6 所示。

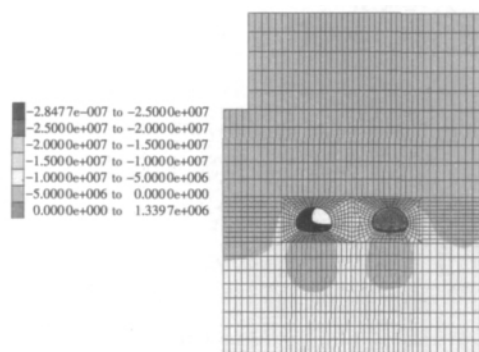


图 6 整体 Y 向应力分布图

在此阶段,左侧隧道挖通,右侧隧道台阶法开挖完初始的 10 m。由图 6 可以看出,左侧隧道挖通后,在隧道的断层破碎带区段,左侧隧道周边的围岩应力再一次重分布的变化不大,仍然在拱顶、隧底处出现局部的应力集中现象。右侧隧道应力特征与相对应里程的左侧隧道的应力特征相似。围岩的“压力拱效应”在岩体深部已经基本稳定在左、右隧道周边的围岩变化范围内,基本没有围岩应力叠加区。

2.2.4 右隧道 CD 法开挖 -10 ~ -50 m 后的计算结果

Y 向应力分布如图 7 所示。

本阶段,右侧隧道 CD 法开挖完中间的 40 m。由图 7 可以看出,左侧隧道贯通后,在隧道的断层破碎带区段,应力云图显示局部拉应力出现在仰拱与边墙接线处,因此,隧道在断层破碎带的软弱围岩中掘进时,要确保仰拱钢筋与边墙钢筋的搭接质量,并严格按设计控制混凝土强度等级。

图 8、图 9 分别为初期支护 X 向、Y 向位移。从图 8、图 9 仍然可以明显地看出在断层破碎带区段的隧道拱顶和隧底朝隧道内收敛以及边墙朝隧道外侧的深部岩体位移的趋势。由于断层破碎带处围岩级别低,围

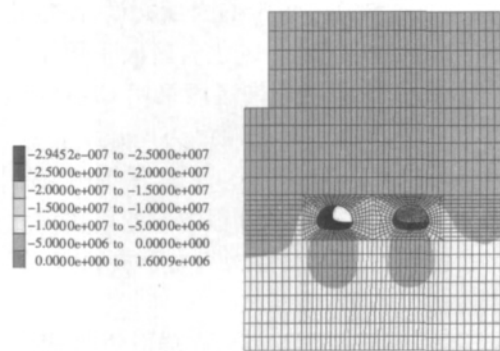


图 7 整体 Y 向应力分布图

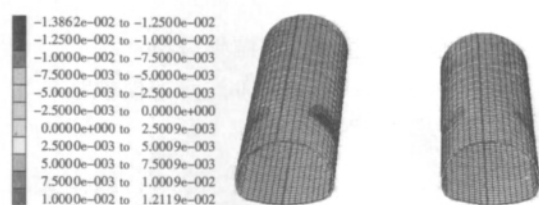


图 8 初期支护 X 向位移

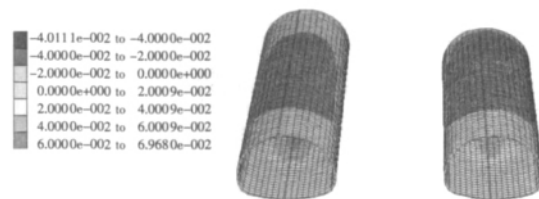


图 9 初期支护 Y 向位移

岩的物理力学参数差,以及渗流水头大,这些因素导致此阶段的隧道衬砌位移较大,计算结果显示隧道的最大拱顶沉降约为 40 mm,隧底最大隆起约为 60 mm,因此,此阶段施工过程中注意仰拱紧跟,衬砌尽早封闭成环的同时要加强施工现场断面监测的频度,对于左、右线收敛观测点的位移变化速率进行仔细分析,任何一次监测数据结果的异常都要引起足够重视。

2.2.5 右隧道台阶法开挖 -50 ~ -60 m 后的计算结果

Y 向应力分布如图 10 所示。

本阶段,右侧隧道台阶法开挖完最后的 10 m。由图 10 可以看出,整个隧道开挖完后的右侧隧道应力特征与相对应里程的左侧隧道的应力特征基本相似,对于弱风化岩层区段的左、右隧道衬砌的应力特征基本一致,都表现为弹性变化特性。

右侧隧道挖通后,在隧道的断层破碎带区段,右侧隧道周边的围岩应力再一次重分布的变化不大,此时,围岩的“压力拱效应”在岩体深部已稳定;在此区段内,隧道边墙周边的围岩仍然有一定的压应力集中现

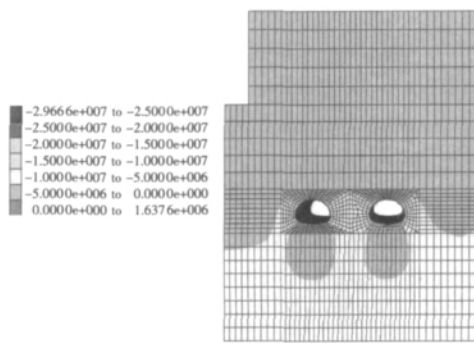


图10 整体Y向应力分布图

象,最大的边墙周边围岩压应力约为14 MPa。而在隧道的弱风化岩区段,围岩总体呈现弹性变形的应力—应变特征,在隧道的开挖轮廓局部边界上出现围岩拉应力现象。

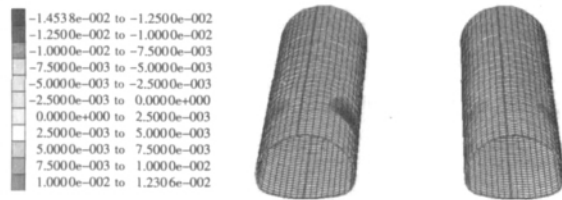


图11 初期支护X向位移

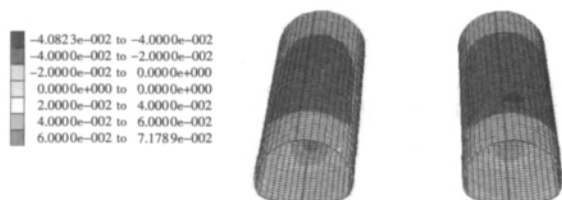


图12 初期支护Y向位移

图11、图12分别为初期与支护X向、Y向位移。图11、图12显示,开挖完成后,断层破碎带区段的隧道拱顶和隧底有朝隧道内收敛以及边墙朝隧道外侧的深部岩体位移的趋势。计算结果显示拱顶沉降最大值约为40 mm,隧底最大隆起约为71 mm。考虑到数值模拟不可能完全符合现场实际地质条件及地下水渗流情况,实际施工过程中应精细制定本工程的地下水“防、排、堵”的措施。

3 结论

通过以上分析,可得出如下主要结论:

(1) 隧道在弱风化的花岗岩中掘进时,围岩、初期支护的应力处于可控范围之内,但由于较高的渗流水头使得隧底有局部的隆起现象,所以要尽快施作仰拱,使衬砌闭合成环;

(2) CD法开挖段由于断层破碎带围岩级别低和高水压的影响,隧道开挖后围岩在拱顶、隧底处出现局部应力集中现象,隧道的拱顶和隧底有向隧道内位移的趋势,使得这些部位的围岩应力状态从压应力状态向拉应力状态转变,从而促使围岩的“压力拱效应”向岩体深部发展;

(3) CD法开挖段由于受拱顶和隧底朝隧道内收敛的作用,相当于对隧道边墙产生向隧道外侧的作用,从而导致隧道边墙周边的围岩有一定的压应力集中现象,拱顶沉降和隧底隆起都较大,因此,施工过程中仰拱紧跟,衬砌尽早封闭成环显得尤为必要;

(4) 文兴隧道与水库之间具有水力联系的可能性,常规地质预报方法很难准确判断洞内渗、涌水来源,为保证周边居民生命财产安全与隧道施工质量,对于隧道内的渗、涌水应及时采集水样进行必要的水化学及同位素分析,判断隧道内渗、涌水的来源。

(5) 隧道在断层破碎带的软弱围岩中掘进时,初期支护的压力较大,为了使初支的压力减小至安全稳定状态,应尽早施作二次衬砌,使得隧道应力进一步重新分布,充分发挥二次衬砌安全储备的功能,必要时做专项的抗水压复合式衬砌设计;

(6) 从围岩和衬砌的位移、应力云图以及渗流压力云图可以得出:一旦证实水库水与隧道之间存在水力连通,隧道的断层破碎带为力学和形变不良段,车行横洞应尽量避免该位置,适宜前移或后移数十米至微风化岩层段内;

(7) 根据现场施工的实际地下水渗流情况,精细制定本工程的地下水“防、排、堵”的措施。

参考文献:

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1981.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of Engineering Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [2] 冯文凯,石豫川,王兴平,等. 高速公路隧道水平层状围岩支护优化[J]. 中国公路学报, 2009(2): 66-70.
Feng Wenkai, Shi Yuchuan, Wang Xingping, etc. Support Optimum on Horizontal Bedded Surrounding Rock of Expressway Tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009(2): 66-70.
- [3] 张军伟,梅志荣,唐与,等. 大伙房输水工程特长隧洞TBM选型及支护系统优化研究[J]. 铁道工程学报, 2010(3): 61-65.
Zhang Junwei, Mei Zhirong, Tang Yu, etc. TBM Type - selection and Study on Optimization of Support

- System for Super Long Dahuofang Water Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society 2010 (3): 61 – 65.
- [4] 张军伟 梅志荣 唐与. 特长隧洞 TBM 施工与锚喷支护应用研究[J]. 铁道工程学报 2011(1): 39 – 46.
Zhang Junwei, Mei Zhirong, Tang Yu. Study on TBM Construction and Application of Bolt – shotcrete Support in Construction of Long Water Transfer Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society 2011(1): 39 – 46.
- [5] 傅立磊 梅志荣 张军伟 等. 排桩内支撑支护技术在厦门淤泥地层深基坑中的应用研究[C]//中国土木工程学会第十四届年会暨隧道及地下工程分会第十六届年会, 2010.
Fu Lilei, Mei Zhirong, Zhang Junwei, etc. The Application Study on Supporting Techniques for Bore – piles in Deep Foundation Pit of Xiamen. [C]//The 14th Annual Conference of the China Civil Engineering Society and the 16th Annual Conference of the Tunnel and Underground Works Branch 2010.
- [6] 陈永照 梅志荣 等. 富水隧道超前地质预报与地下水连通试验研究[C]//2011 隧道及地下工程新发展国际论坛 2011.
Chen Yongzhao, Mei Zhirong, etc. Geological Prediction and Groundwater Connectivity Test Study on Water – Rich Tunnel [C]//2011 International Forum of New Development on Tunnel and Underground Engineering 2011.
- [7] 厦门市市政建设开发总公司 等. 厦门富水复杂地层城市隧道修建关键技术研究[R]. 厦门: 厦门市市政建设开发总公司, 2011.
The Controlling Company of Municipal Construction and Development in Xiamen, etc. Research on the Key Technique of City Tunnel in Water – rich and Complex Stratum of Xiamen [R]. Xiamen: The Controlling Company of Municipal Construction and Development in Xiamen, 2011.
- [8] 傅立磊. 富水复杂地层城市隧道地下水连通试验方法及其工程应用研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院 2011.
Fu Lilei. Research on the Groundwater Connectivity Test and Engineering Application of City Tunnel in Water – rich and Complex Stratum [D]. China Academy of Railway Sciences 2011.

(上接第 29 页)

5 结论

本文仅就无缝线路稳定性及有效措施进行了论述, 在传统的提高无缝线路稳定性措施的基础上, 通过采用外侧支挡或内侧加拉杆, 以及使用整体道床、小阻力扣件、伸缩调节器和设置道床插板等措施, 可以有效地解决无缝线路的稳定性问题。应该强调的是, 对于轨道结构而言, 路基的稳定也至关重要。日本东海道新干线由于路基问题, 影响了轨道结构的稳定性, 不得不花费巨大的力量进行整治, 我国某线已运营了几十年, 为适应提速的需要, 对路基进行了全面的整治, 采取灰土挤密桩等, 目的就是为了保证轨道的稳定性, 因此无缝线路的稳定性还必须建立在路基稳定的基础上才能得以保证。

参考文献:

- [1] 广钟岩 高慧安. 铁路无缝线路[M]. 北京: 中国铁道出版社 2005.
Guang Zhongyan, Gao Huian. Continuously Welded Rail Tracks [M]. Beijing: China Railway Publishing House 2005.
- [2] 陈秀方 姜平 向延年 等. 无缝线路原始弯曲的极值概率分析[J]. 中国铁道科学 1999 (1): 17 – 22.
Chen Xiufang, Lou Ping, Xiang Yannian. The Probability Analysis of the Extreme Values of Initial Inflections in CWR [J]. China Railway Science, 1999 (1): 17 – 22.
- [3] 赵志军 陈秀方. 无缝线路稳定性计算模型的研究[J]. 长沙铁道学院学报 2001(3): 31 – 36.
Zhao Zhijun, Chen Xiufang. The New Development for Stability Calculation Model in CWR [J]. Journal of Changsha Railway University, 2001(3): 31 – 36.
- [4] 卢耀荣. 无缝线路研究与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社 2004.
Lu Yaorong. Research and Application of Continuous Welded Rail Track [M]. Beijing: China Railway Publishing House 2004.
- [5] 罗信伟 雷晓燕 冯青松. 小半径曲线无缝线路稳定性有限元分析[J]. 铁道工程学报 2006(3): 8 – 12.
Luo Xinwei, Lei Xiaoyan, Feng Qingsong. Finite Element Method for Analyzing the Stability of Continuous Welded Rail Track on Minor Radius Curve [J]. Journal of Railway Engineering Society 2006(3): 8 – 12.