

地铁工程先盾后扩穿越西安地裂缝设防段 隧道扩挖方案研究^{*}

杨万精¹ 高 强²

(1. 西安市建设工程质量安全监督站, 710061, 西安; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:为优化地铁工程穿越西安地裂缝段常规“竖井暗挖+盾构空推”施工方法,开展基于“先盾后扩”新型建造技术的扩挖方案研究。方法:依托西安地铁 15 号线府君庙村站—祝村站区间隧道穿越 F9 和 F'9 两条地裂缝带设防工程,进行新型建造技术试点应用。介绍了“先盾后扩”法的施工基本流程和设计要点,提出了 6 种设防段盾构扩挖方案,重点讨论了各方案可行性及优缺点,并综合施工便利性、地面沉降控制和结构受力特性给出了推荐方案。结果及结论:“先盾后扩”法省去了竖井和洞内端头土体加固工程量,确保了盾构作业连续性,解决了设防段地面作业条件受限的问题,不考虑盾构空推的扩挖断面也可大幅减小,进而降低了工程造价;设防段盾构扩挖时,横向及竖向支撑能改善扩挖隧道支护结构变形,但临时仰拱或横撑发挥的作用较为有限,在地层降水措施有保障的条件下设置的必要性不强;竖撑能明显改善扩挖隧道支护结构受力,应予以保留;综合横向及竖向支撑切割断面引起的施工干扰问题,推荐“全断面+双竖撑法扩挖”为依托工程扩挖方案。

关键词 地铁隧道;西安地裂缝;先盾后扩;扩挖方案

中图分类号 U455.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.024

Tunnel Expansion Excavation Scheme for Metro Engineering with STFE through Xi'an Ground Fissure Control Section

YANG Wanjing, GAO Qiang

Abstract **Objective:** To optimize the conventional construction method of 'vertical shaft underground excavation + shield tunneling with forward thrust' for metro engineering crossing ground fissure sections in Xi'an, an excavation scheme based on the new construction technique of 'shield tunneling followed by expansion' (abbreviated as STFE) is studied. **Method:** Based on the protection and control project of Xi'an Metro Line 15 Fujunmiaocun Sta. to Zhucun Sta. (Fu-Zhu) interval

tunnel that crosses F9 and F'9 two ground fissure belts, a pilot application of the new construction technique is conducted. The basic process and design principles of the STFE method are introduced. Six shield tunnel expansion excavation schemes for the control section are proposed by focusing on the feasibility, advantages and disadvantages of each scheme. Taking into account construction convenience, land subsidence control, and structural stress behavior, a recommended scheme is presented. **Result & Conclusion:** The STFE method eliminates the amount of vertical shafts and the reinforcement soil mass at tunnel ends, ensuring continuous shield tunneling operation, and solving the problem of limited ground operation conditions in control sections. Thus, the expansion excavation cross-section can be significantly reduced without considering forward thrust, thereby reducing engineering costs. During shield tunnel expansion excavation in the control sections, lateral and vertical supports can improve tunnel support structure deformation. However, the role of temporary invert arches or horizontal struts is relatively limited, and it is not substantial for setting under the conditions of guaranteed ground dewatering measures. Vertical struts can significantly improve the stress conditions of the expansion excavated tunnel supporting structure and should be retained. Considering the construction disturbance problems caused by cutting sections with lateral and vertical support, the 'full-section + double vertical struts expansion excavation' is recommended for the project.

Key words metro tunnel; Xi'an ground fissure; shield tunneling followed by expansion; expansion excavation scheme

First-author's address Xi'an Construction Engineering Quality and Safety Supervision Station, 710061, Xi'an, China

地裂缝是西安地区最典型的、也是最突出的不良地质现象之一^[1]。地铁工程穿越西安地裂缝段

^{*} 西安市轨道交通集团有限公司科技项目(D15-YJ-152021006);广州地铁设计研究院股份有限公司科技项目(KY-2020-003)

目前基本采用“扩大断面,分段设缝”方案,防治理念为:按照一定的设防量提前预留额外净空,地裂缝错动后再调整轨道纵坡来抵消列车运行的建筑限界侵入^[2-3]。

建造技术层面,地裂缝设防段基本采用“增设竖井暗挖+盾构空推”的施工方法^[4],该施工方法自 2006 年西安首条地铁线路(2 号线)开建以来经过多次优化,但施工复杂性等问题仍未得到完美解决^[5-6]。本文依托西安地铁 15 号线府君庙村站—祝村站区间(以下简称“府祝区间”)隧道穿越地裂缝设防段工程,介绍了一种先盾后扩的新施工方法,将“增设竖井暗挖+盾构空推”调整为“盾构直接穿越+洞内扩挖”,并提出了新施工方法的设计细节;重点讨论了地裂缝设防段多个盾构隧道扩挖方案的可行性及优缺点,并给出了推荐方案,尝试以新思路解决地铁工程穿越地裂缝施工的相关问题。

1 工程概况

西安地铁 15 号线府祝区间隧道总长 1 318 m,共穿越 F9 和 F'9 两条地裂缝带。地勘资料揭示预估位错量为 200 mm,根据 DBJ 61/T 113—2016《城市轨道交通隧道穿越地裂缝段技术规范》相关规定,盾构不能直接穿越地裂缝带,需进行结构设防。设防段区间隧道左线长 211.314 m,右线长 219.037 m,原计划采用增设竖井+CRD(交叉中隔壁)暗挖施工,设防段贯通后再盾构空推通过,该区间平面布置如图 1 所示。

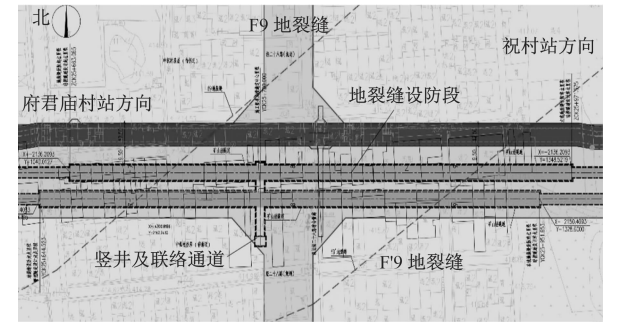


图 1 西安地铁 15 号线府祝区间地裂缝设防段平面图
Fig.1 Plan of ground fissure control section in Xi'an Metro Line 15 Fu-Zhu interval

钻孔揭露的地表至隧道底部范围内地层参数详见表 1。府祝区间设防段隧道拱顶埋深为 15.4~17.2 m。潜水位埋深为 10.50~15.50 m,实测地下水位在 14.00 m 左右。含水层主要位于粉质黏土层及粗砂层。

表 1 扩挖段地层结构物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of stratum structure in expansion excavation section

地层	埋深/m	密度/(g/cm ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
杂填土	0~3.0	1.90	25.0	15.0	0.39
粗砂	8.0~11.0	2.12	0	34.9	0.25
新黄土	11.0~21.0	1.75	30.7	21.9	0.33
古土壤	21.0~25.0	1.92	35.7	23.0	0.33
粉质黏土	25.0~60.0	2.01	26.3	21.0	0.30

府祝区间面临的一个突出问题是设防段民房拆迁进度缓慢,无竖井施工作业条件,按照常规建造流程已不可能按时贯通。因此在该区间开展“先盾后扩”新型建造技术试点应用。

2 设防段先盾后扩施工基本流程

府祝区间地裂缝设防段先盾后扩施工流程图如图 2 所示。

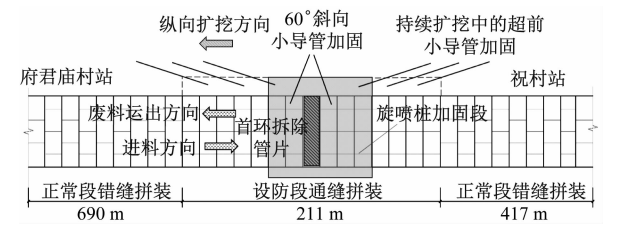


图 2 先盾后扩施工流程示意图
Fig. 2 Construction flow diagram of shield tunneling followed by expansion

基本施工流程如下:
1) 旋喷桩地表加固。首环管片扩挖段采用地面三重管高压旋喷桩加固,加固段同时作为 2[#]联络通道施工位置。加固范围为扩挖成型隧道外侧、上部各 3 m、下部 1 m,覆盖首环扩挖位置附近 6 环管片。在盾构到达 28 d 前完成旋喷桩施工,加固后土体无侧限抗压强度不小于 0.8 MPa,渗透系数≤1.0×10⁻⁶ cm/s。

2) 盾构穿越。扩挖设防段 200 多 m 盾构隧道采用通缝拼装,封顶块置于拱顶正中央,其余段落正常错缝拼装,管片环宽为 1.5 m。

3) 扩挖前准备工作。①地表降水。共设 43 口管井进行降水,降水深度为隧底 1 m 以下。②洞内小导管二次加固。在首环拆除位置两侧管片上打孔,采用长度为 3 m 的超前小导管二次加固,外插角 60°~65°,起到棚架作用。③盾构管片纵向拉紧

和背后二次注浆。采用 14b 槽钢拉紧与扩挖设防段两侧紧邻的错缝拼装管片,拉紧范围为 10 环。再在管片背后进行二次注浆,防止纵向应力损失引起营运期盾构环缝防水性能降低。

4) 扩挖作业。由于无需考虑盾构空推,扩挖断面由 $9.50\text{ m} \times 9.57\text{ m}$ (宽 \times 深) 减小为 $7.88\text{ m} \times 8.02\text{ m}$ (宽 \times 深)。总体扩挖方向为设防段中间位置向两侧。先开展府君庙村站方向扩挖,该侧施工完成后再进行祝村站方向盾构扩挖。离开旋喷桩加固范围后,采用长度为 3 m 的 $\phi 42\text{ mm}$ 注浆小导管进行超前加固。

3 盾构隧道断面扩挖方案分析

3.1 主要扩挖方案

3.1.1 方案一:全断面扩挖

方案一扩挖示意图如图 3 所示。一次性拆除整环管片,扩挖至设计轮廓线,再迅速进行喷锚支护,闭合成环,然后开展下环管片扩挖作业。

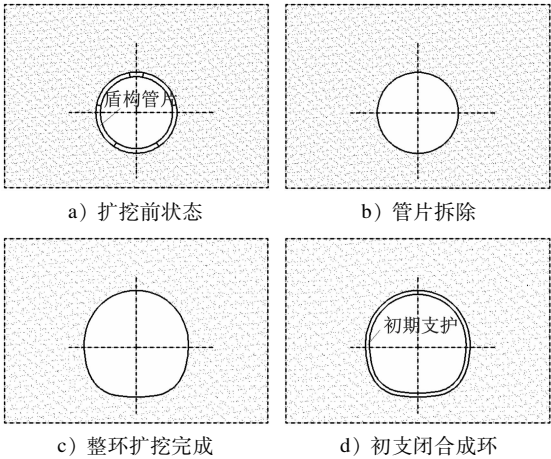


图 3 方案一(全断面法)扩挖示意图

Fig. 3 Diagram of scheme I (full-cross-section method) expansion excavation

3.1.2 方案二:台阶+临时仰拱法扩挖

方案二扩挖示意图如图 4 所示。首先拆除上台阶封顶块和 2 个邻接块,环形扩挖的土体和废管片不直接运出洞外,临时回填形成下台阶;然后进行上台阶支护并打设锁脚锚杆,设置临时仰拱使上台阶闭合成环;上台阶扩挖 3~4 环后再进行下台阶扩挖,扩挖初支闭合成环。

3.1.3 方案三:全断面+临时横撑法扩挖

方案三扩挖示意图如图 5 所示。在全断面法基础上设置临时横撑,起到临时仰拱的效果。横撑支

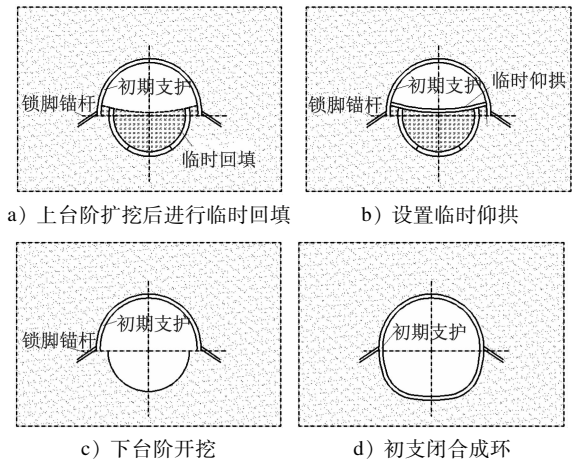


图 4 方案二(台阶+临时仰拱法)扩挖示意图

Fig. 4 Diagram of scheme II (step + temporary invert arch method) expansion excavation

架可通过液压杆伸缩并沿盾构管片上的轨道移动,横撑固定后再进行上半环管片拆除、扩挖、喷锚支护并设置锁脚锚杆。横撑液压杆收缩前移并进行下半断面扩挖,闭合成环后开展下环管片扩挖。需要注意的是,上半断面在前 2 环作业时先拆后挖,待创造工作面后先掏挖支护,再拆除封顶块和邻接块。

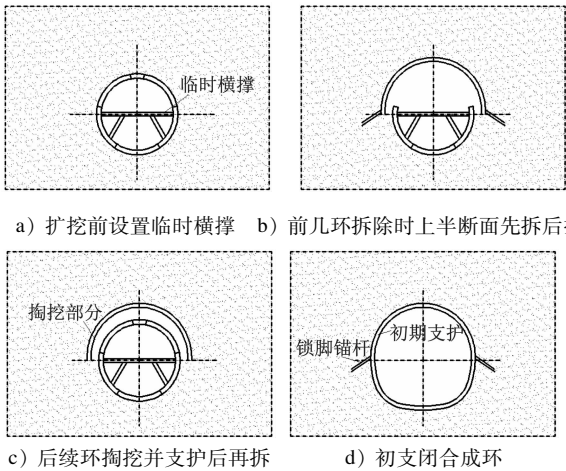
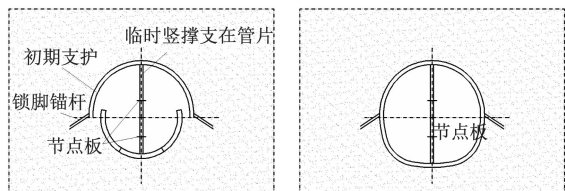


图 5 方案三(全断面+临时横撑法)扩挖示意图

Fig. 5 Diagram of scheme III (full-cross-section + temporary lateral struts method) expansion excavation

3.1.4 方案四:全断面+单竖撑法扩挖

方案四扩挖示意图如图 6 所示。在全断面法基础上设置临时单竖撑,上半断面扩挖并支护后,临时竖撑先支在下半断面管片上,竖撑由带节点板的钢拱架拼接而成;下半断面扩挖时先拆掉最下端竖撑,待闭合成环后再将竖撑落在初支结构上形成整体。



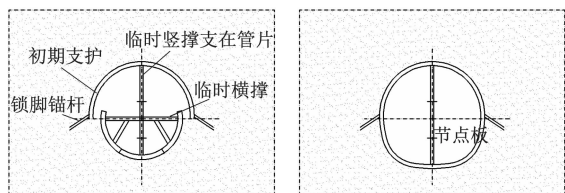
a) 临时竖撑支在下半环管片 b) 临时竖撑支在闭合成环初支

图6 方案四(全断面+单竖撑法)扩挖示意图

Fig. 6 Diagram of scheme IV (full-cross-section + single vertical strut method) expansion excavation

3.1.5 方案五:全断面+临时横撑+单竖撑法扩挖

方案五扩挖示意图如图7所示。结合方案三和方案四特点,同时设置临时横撑和单竖撑。上半断面扩挖流程与方案三类似,增设的单竖撑先临时支在下部管片上;下半断面扩挖后,竖撑再与初支结构连接成整体。



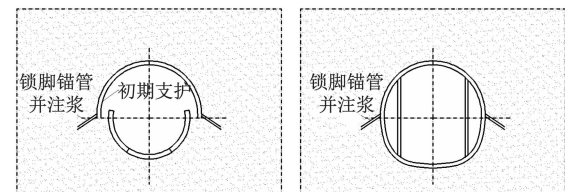
a) 临时竖撑支在下半环管片 b) 临时竖撑支在闭合成环初支

图7 方案五(全断面+临时横撑+单竖撑法)扩挖示意图

Fig. 7 Diagram of scheme V (full-cross-section + temporary lateral strut + single vertical strut method) expansion excavation

3.1.6 方案六:全断面+双竖撑法扩挖

方案六扩挖示意图如图8所示。为了规避横、竖撑对施工的影响,采用长度为3.0 m的 $\phi 42$ mm锁脚锚管并注浆强化上半环锁脚措施;同时,将单竖撑优化为双竖撑(间距约5.0 m),改善对扩挖断面的空间切割,增加一定的通过性。单次扩挖进尺为管片环宽的一半(0.75 m),以加强地层变形控制。



a) 上半断面管片拆除、扩挖及支护 b) 初支闭合成环后设置双临时竖撑

图8 方案六(全断面+双竖撑法)扩挖示意图

Fig. 8 Diagram of scheme VI (full-cross-section + double vertical struts method) expansion excavation

3.2 方案比选

方案一工序简单、施工便利,但由于整环拆除和扩挖的时间相对较长,造成支护闭合成环的及时性较差,地层变形控制难度大、风险高。方案二将大断面切割成2个小断面,增加临时仰拱能加快断面闭合成环速度,但由于回填土体的密实性难以保证,临时仰拱与下半环管片开口位置易出现应力集中,会承担额外的剪力和弯矩作用,下台阶扩挖时反而易出现突发风险;上下台阶单个断面作业空间不足4 m,施工工效也难以保障。

方案二中临时仰拱主要是限制地层水平收敛,其作用与横撑类似。此外,借鉴郑州地铁1、2号线联络线盾构扩挖案例,考虑设置竖撑改善地层沉降。因此,方案三至方案六通过横撑、竖撑及锁脚措施相互组合对方案一和方案二进行优化。

图9为Midas软件计算的不同扩挖支护结构(35 cm厚C25喷射混凝土+75 cm间距格栅钢架)、横撑及竖撑(均为20a工字钢,间距75 cm)组合工况下的弯矩图。无横撑及竖撑工况下,最大弯矩为190 kNm。在拱顶位置,水平方向结构受力不明显;增设横撑后,拱顶位置受力改善不明显,弯矩仅减少约4.74%。综合西安地区地铁暗挖相关工程案例可知,在降水效果有保障的条件下,地层结构自身的稳定性较好,实测的水平土压力较小^[7]。因此,设置横撑及临时仰拱的必要性不强。

DBJ 61-98—2015《西安城市轨道交通工程监测技术规范》要求地铁施工总沉降应控制在30 mm以内。先盾后扩法有多次扰动,因此应严格控制盾、拆、扩各流程的地表沉降值。增设单竖撑后,最大弯矩在拱顶两侧,约为94 kNm;结构受力改善较为明显,也更有利于地表沉降控制,应予以保留。

综上所述,在降水措施辅助下,西安地区地层水平收敛较小,不考虑设置横撑或临时仰拱,排除扩挖方案二、方案三、方案五;保留竖撑有利于地层沉降控制,排除方案一;单道竖撑设于断面中间会造成施工干扰,排除方案四;双竖撑方案六优势较明显,为依托工程最终选定的扩挖方案。

4 结语

1) “竖井暗挖+盾构空推”是现阶段地铁工程穿越西安地裂缝设防段的主要施工方法,除增设竖井和洞内端头加固的工程量外,建造工序相对复杂,可能出现因竖井施工条件受限而影响整个区间

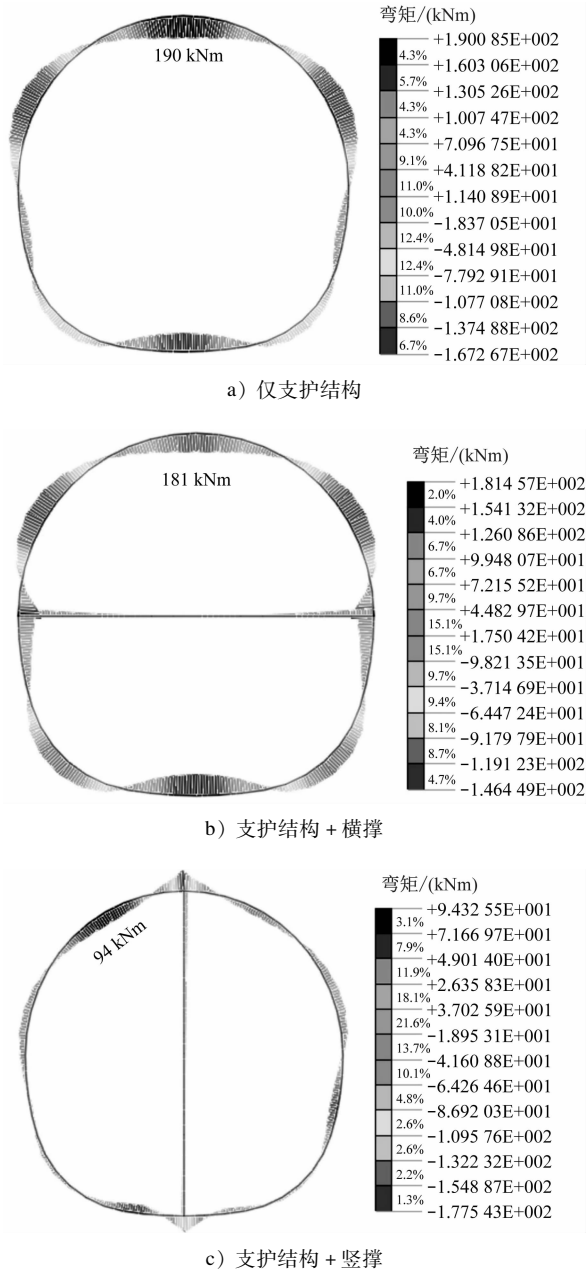


图9 扩挖隧道支护结构弯矩图

Fig.9 Bending moment diagram of expansion excavated tunnel supporting structure

隧道贯通的特殊情况。

2) 采用“先盾后扩”法开展地铁工程穿越地裂缝设防段施工可确保盾构穿越的连续性,扩挖隧道断面不考虑盾构空推建筑限界也可大幅减小,是穿越地裂缝段地铁建造技术的一次探索和尝试。

3) 在地表降水措施辅助下,西安地区浅埋隧道施工地层横向土压力较小,设置临时仰拱和横撑的必要性不强,竖撑有利于扩挖结构受力和地层沉降

控制,应予以保留。综合考虑施工干扰问题,“全断面+双竖撑法扩挖”为依托工程15号线府祝区间地裂缝设防段的推荐扩挖方案。

参考文献

- [1] 黄强兵. 地裂缝对地铁隧道的影响机制及病害控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
HUANG Qiangbing. Study on effect of the active ground fissure on metro tunnel and its hazards control[D]. Xi'an: Changan University, 2009.
- [2] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781.
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 781.
- [3] 陕西省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通隧道穿越地裂缝段技术规范: DBJ 61/T 113—2016[S]. 西安: 陕西锦绣印务有限责任公司, 2016: 5.
Housing and Urban-Rural Development Department of Shaanxi Province. Technical specification for urban rail transit tunnel crossing ground fracture belt: DBJ 61/T 113—2016[S]. Xi'an: Shaanxi Jinxiu printing Co., Ltd., 2016: 5.
- [4] 樊红卫. 西安地铁2号线穿越地裂缝的技术措施[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(4): 19.
FAN Hongwei. Technical measures for Xi'an Subway Line 2 to traverse ground fissures[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(4): 19.
- [5] 来弘鹏, 姚毅, 高强, 等. 地铁隧道穿西安地裂缝的研究进展及“先后后扩”法的应用展望[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 23.
LAI Hongpeng, YAO Yi, GAO Qiang, et al. Research progress of subway tunnel passing through Xi'an ground fracture and application prospect of 'shield tunnelling before expansion' method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 23.
- [6] 杨招. 地裂缝场地地铁隧道暗挖施工沉降及工法优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
YANG Zhao. Study on settlement and construction method optimization of underground excavation of subway tunnel in ground fissure site[D]. Xi'an: Changan University, 2021.
- [7] 来弘鹏, 郑甲佳, 谢永利. 黄土地区浅埋暗挖地铁隧道围岩压力特征研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 99.
LAI Hongpeng, ZHENG Jiajia, XIE Yongli. Study on characteristics of surrounding rock pressure of undercut metro tunnel with shallow buried excavation in loess region[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 99.

(收稿日期: 2022-11-22)