

小半径隧道盾构施工对铁路桥梁的影响

杜明芳, 李贞贞, 陈家豪, 田栋梁
(河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:随着城市轨道交通线网的完善,单一的直线型隧道已不能满足需求,而新建隧道也不可避免地近接建构筑物,势必危及建构筑物,甚至引发严重的安全问题。基于郑州地区某工程,运用有限元软件 Midas GTS NX 进行数值模拟,研究小半径隧道盾构施工期间隔离桩防护措施的作用效果,并结合监测数据验证数值计算的准确性。研究结果表明:1)在无隔离桩防护措施下,小半径盾构隧道施工会引起地表横向沉降变形,危及铁路线路运营安全;2)在隔离桩防护措施下,小半径盾构隧道施工对铁路桥梁的影响在可控范围内,能有效降低盾构隧道施工引起的铁路桥梁变形及其附加内力,有利于铁路线路的运营安全;3)监测数据与数值计算的对比表明,隔离桩防护措施对于保障铁路线路的运营安全是有效的。本文研究结果可为盾构隧道安全穿越铁路桥梁施工提供重要的工程实用价值。

关键词:铁路桥梁; 盾构施工; 小半径隧道; 隔离桩; 现场监测; 数值模拟

中图分类号:U455.4

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0028-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.033

Impact of small radius tunnel shield construction on railroad bridge

DU Mingfang, LI Zhenzhen, CHEN Jiahao, TIAN Dongliang
(School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: With the improvement of the urban rail transit network, single straight tunnel can no longer meet the demand, and the new tunnel is inevitably close to the buildings, which is bound to endanger the buildings and even cause serious safety problems. Therefore, based on a project in Zhengzhou, the finite element software Midas GTS NX is used to carry out numerical simulation to study the effect of isolation pile protection measures during the construction of small-radius shield tunnel, and the accuracy of numerical calculation is verified based on monitoring data. The results show that: 1) Under the absence of shelter pile protection measures, the construction of small radius shield tunnel will cause the lateral settlement deformation of the ground surface, which endangers the operation safety of the railway line; 2) Under the shelter pile protection measures, the impact of the small radius shield tunnel construction on the railway bridge is within the controllable range, which can effectively reduce the deformation of the railway bridge caused by the construction of the shield tunnel and its additional internal force, which is conducive to the operation safety of the railway line; 3) The comparison of monitoring data and numerical calculation shows that the isolation pile protection measures are effective for ensuring the operation safety of the railway line. The results can provide important engineering practical value for the construction of shield tunnels crossing railway bridges safely.

Key words: railroad bridge; shield construction; small radius tunnel; shelter pile; numerical simulation; on-site monitoring

目前,我国城市轨道交通建设正处于以地下线 路为主的高速发展期。盾构法作为暗挖法施工中的

收稿日期:2023-06-28

作者简介:杜明芳(1964—),女,教授,从事地下工程与复杂地基处理技术的研究工作。

通信作者:李贞贞(1999—),男,硕士研究生,从事地下空间工程方面的研究。

一种全机械化施工方法，具有掘进速度快、自动化程度高、不影响地面交通设施、施工劳动强度低等优点^[1]。但盾构法施工会改变周围土体的位移场与应力场，土体应力重分布，危及周围建构筑物，如何最大程度地减弱新建隧道对周围建构筑物的影响是隧道工程的首要目标。不少学者对盾构法施工对周围土体变形的影响和盾构隧道穿越铁路桥梁对结构变形的影响进行了研究。如：DONG 等^[2]以杭州市 6 号线某双线隧道区间盾构法施工工程为例，研究了粉土地表的地表变形规律以及双线型 Peck 公式的适用性，并对 Peck 公式进行修正；郭社军等^[3]以石家庄市 3 号线水上公园站：柏林庄站区间小半径盾构隧道施工为研究背景，结合 Peck 公式，分析其在小半径条件下的适用性，并对 Peck 公式进行修正；吴镇等^[4]依托济南地铁 R1 线某小半径盾构隧道穿越京沪高速铁路施工工程，运用有限元分析软件 FLAC^{3D}、模型试验及现场监测相结合的方法，研究了隔离桩设计参数对桩基变形的影响，确定了其合理的设计参数；ZHAO 等^[5]以乌鲁木齐市 1 号线某区间盾构隧道穿越铁路桥梁施工工程为研究背景，通过正交试验分析和方差分析，运用有限元分析软件 FLAC^{3D}模拟施工并做相关优化，发现加固方案更能保证工程的安全性。

本文基于郑州地区某区间小半径盾构隧道穿越郑机城际铁路桥梁的施工工程，利用有限元软件 Midas GTS NX 模拟了有无隔离桩情况下盾构隧道穿越铁路桥梁的施工，研究穿越施工对地表和桥梁结构的变形特征、桥墩内力变化和隔离桩防护措施的作用效果，通过对现场监测数据进行比较，验证数值计算的准确性，以期工程实践提供一定的借鉴与参考。

1 工程概况及施工方法

1.1 工程概况

郑州地区某隧道区间线路以右线半径为 350 m（左线半径为 365 m）的小半径穿越郑机城际铁路高架桥。线路最小埋深约为 16.55 m，最大埋深约为 29.24 m。管片外径为 6 200 mm，内径为 5 500 mm，宽度为 1 500 mm，厚度为 350 mm，采用 C50 混凝土，抗渗等级为 P12。隧道管片横断面如图 1 所示。

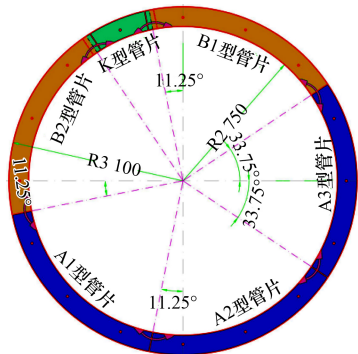


图 1 隧道管片横断面 mm

郑机城际铁路地上段为有砟轨道，地下段为无砟轨道，设计时速为 200 km/h。铁路与小半径隧道交叉点位于高速铁路高架桥 215[#]~217[#]桥墩处，该处桥梁为 32.6 m 高简支梁。铁路桥梁形式及尺寸如表 1 所示，郑机城际铁路现状如图 2 所示。

表 1 郑机城际铁路桥梁形式及相关尺寸 m

墩号	墩高	结构形式	轨面高程	桩长
215 [#]	11.0	简支梁	164.496	40.0
216 [#]	10.0	简支梁	164.496	44.0
217 [#]	11.5	简支梁	164.496	44.0



图 2 郑机城际铁路现状 mm

隧道区间左线从 216[#]、217[#]墩间穿过，与铁路交叉角度为 52°，隧道结构埋深约为 26.2 m，右线从 215[#]、216[#]墩间穿过，与铁路交叉角度为 55°，隧道结构埋深约为 26.2 m。隧道与铁路之间最小净距如表 2 所示。

表 2 隧道外侧与铁路桥梁桩基的最小净距 m

桥墩号	隧道	
	左线	右线
215 [#]	—	6.21
216 [#]	4.67	4.82
217 [#]	5.17	—

1.2 施工方法

根据工程施工环境，该工程选择盾构法进行施工。盾构法是一种全机械化的施工工法，与其他工法相比，具有以下几点优势：1) 在盾构机的支撑下，

掘进和衬砌拼装可安全高效地进行；2) 地下施工不会影响地面交通，河底施工不会影响河道通航；3) 气候条件不会影响施工进度；4) 施工期间的振动、噪声等环境污染较少；5) 施工对地面建筑物及地下管线的影响较小；6) 施工的掘进、出土和管片拼装过程可实现自动化作业，劳动强度低。

在我国隧道盾构法施工中，常用的设备有土压平衡式盾构机和泥水平衡式盾构机。土压平衡式盾构机切削的土体会进入土舱被充填，其被动土压力与掌子面前方土体的水土压力基本相等，以维持开挖面的稳定。泥水平衡式盾构机则使用泥浆作为支护材料，在开挖面形成一层泥膜，依靠该泥膜平衡作用在开挖面上形成的水土压力来维系开挖面的稳定。

相比土压平衡式盾构机，泥水平衡式盾构机需要配套泥浆处理设备，因此对环境污染较大。泥水平衡式盾构机多用于砂卵石、高透水层及隧道上方有水体的地层，土压平衡式盾构机多用于粉土、黏土和粉砂等地层。根据土层渗透系数的不同，选择不同的盾构机类型。一般而言，渗透系数不大于 10^{-7} m/s 的地层应优先选择土压平衡式盾构机，超过 10^{-4} m/s 的地层则应选择泥水平衡式盾构机^[6-8]。结合工程地质勘察资料、施工成本、施工效率和环境保护要求，该工程选用土压平衡式盾构机。

2 数值仿真模拟

2.1 数值模型及计算参数的选择

考虑到盾构机的掘进只会对 5 倍洞径以内的土体产生影响，因此选择的数值计算模型尺寸为

180 m×70 m×55 m(长×宽×高)。范围之外的土体不会发生变形，但在数值计算模型中会将其作为限制各个面之间垂直面方向变形的因素。土体采用 3D 单元模拟，并赋予其弹塑性材料属性；对于管片和盾构机钢壳，分别采用 2D 板单元模拟，并选用厚度为 350 mm 的 Q345b 材料。由于桥梁桩基在盾构隧道施工过程中会发生水平和竖直方向的变形，同时内力也会随之变化，因此采用 1D 梁单元模拟。注浆范围限定在管片外 0.2 m。经过加固处理后，土的无侧限抗压强度为 0.8 MPa，弹性模量为 70.0 MPa，黏聚力为 40.0 kPa，内摩擦角为 40°，容重为 20.0 kN/m³，泊松比为 0.3。模型中的土体计算参数如表 3 所示。

2.2 数值模型建立

为了研究隔离桩防护措施的有效性，利用有限元软件 Midis GTS NX 建立模型，模拟有无隔离桩情况下的盾构隧道施工，并根据后期工程中地表变形的监测点位置，将其简化为点，添加到模型中相应的位置。地表竖向变形监测点的平面布置如图 3 所示，其中编号 1~22 沿着 Y 轴正方向递增。无隔离桩防护措施下的工况 1 模型网格单元数为 214 217，设有隔离桩防护措施下的工况 2 模型网格单元数为 200 932，具体如图 4 所示。铁路桥墩和隔离桩模型如图 5、6 所示。

盾构机掘进作业时的受力情况可分为掘进压力、千斤顶力、注浆压力，具体如图 7 所示。掘进压力是指在盾构机掘进作业时掌子面对开挖面土体施加的压力，以维持开挖面的稳定。为方便计算，假设其均匀地分布在掌子面前方土体，如

表 3 土体计算参数

土层名称	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比
杂填土	1.0	17.5	8	16	5	0.38
粉砂	4.3	18.5	0	26	10	0.28
黏质粉土	3.0	18.5	12	20	7	0.33
黏质粉土	1.5	18.8	13	20	9	0.35
粉质黏土	8.0	19.0	25	17	9	0.31
粉质黏土	5.0	19.5	22	18	10	0.30
细砂	18.2	20.5	0	32	28	0.27
弱钙质胶结	1.6	22.5	33	28	25	0.34
粉质黏土	10.4	20.0	33	18	19	0.29
粉质黏土	2.0	20.0	34	18	14	0.30

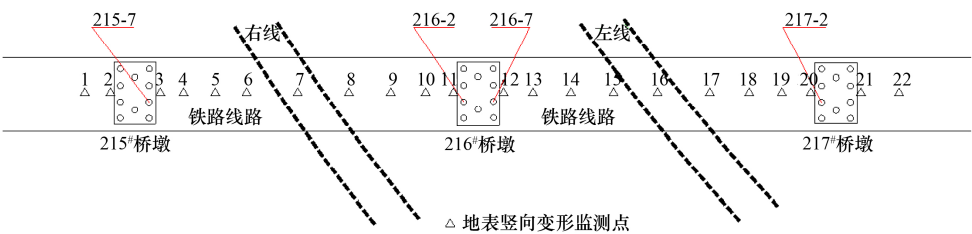


图 3 地表竖向变形监测点布置平面

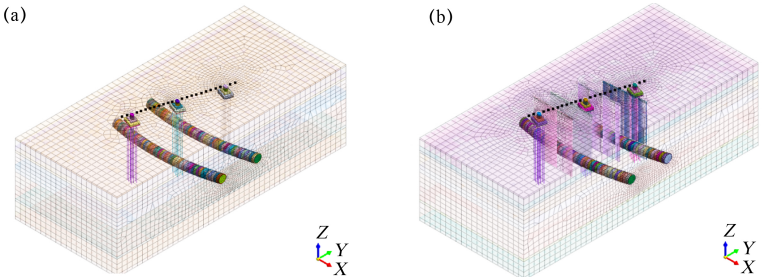


图 4 两种工况整体三维模型

时，管片受到的压力。为便于计算，假设其为沿环宽均匀分布的面荷载，如图 10 所示。

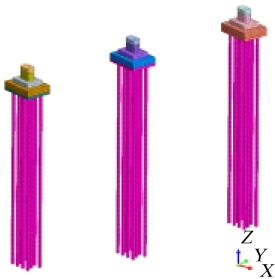


图 5 铁路桥梁桩基模型

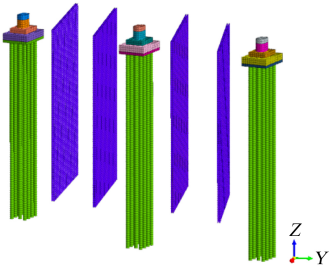


图 6 铁路桥梁桩基与隔离桩模型

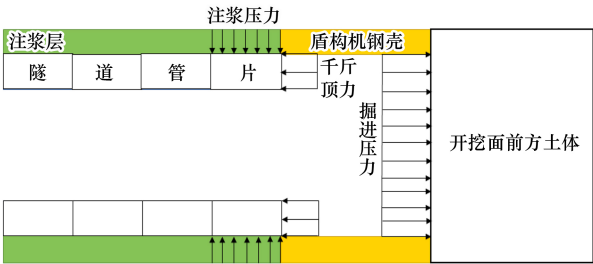


图 7 盾构机掘进作业时的受力

图 8 所示。千斤顶力是指在管片拼装时，盾构机千斤顶对管片施加的顶推力。为便于计算，假设其为沿管片圆环均匀分布的线性荷载，如图 9 所示。注浆压力是指在管片拼装结束进行同步注浆

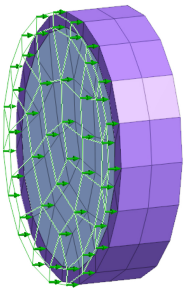


图 8 开挖面承受掘进压力

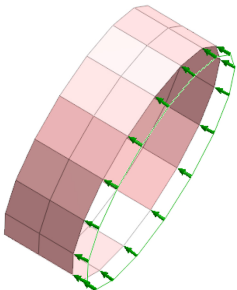


图 9 管片承受千斤顶力

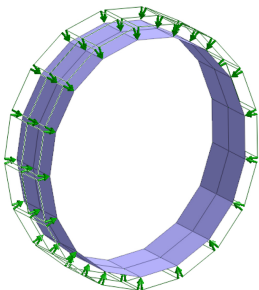


图 10 管片因注浆承受的压力作用

3 模拟结果分析

3.1 无隔离桩防护措施

工况 1 盾构隧道施工后的竖向(z 向)位移云图如图 11 所示,桥梁墩台竖向变形矢量如图 12 所示。由图 11 中可知:在盾构隧道穿越施工结束后,地表最大沉降变形值约为 6 mm。由图 12 可知:距离隧道越近的桥墩墩台,其竖向变形受盾构隧道施工的影响越大,变形量也越大。

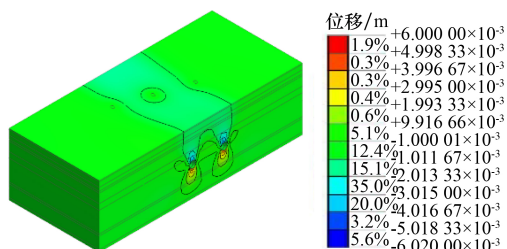


图 11 盾构隧道施工后的工况 1 竖向变形云图

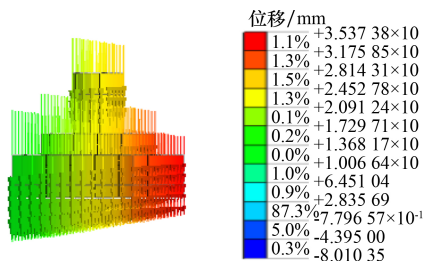


图 12 桥梁墩台竖向变形矢量

根据工况 1 的计算结果,从第十二步序开始,墩台沉降变形增幅明显,而在第四十四步序之后,墩台沉降变形趋向稳定。为确保铁路线路在施工期间的安全运营,有必要设置安全防护措施。

3.2 设隔离桩防护措施

工况 2 盾构隧道施工后的竖向(z 向)位移云图如图 13 所示,墩台竖向变形矢量如图 14 所示。由图 13 可知:在盾构隧道穿越后,地表沉降变形的最大值约为 2.97 mm,相较于工况 1,下降了约 50.5%。由图 14 可知:距离盾构隧道越近的桥墩墩台,其竖向变形受到的盾构隧道施工影响越大,而且其竖向变形也越大。

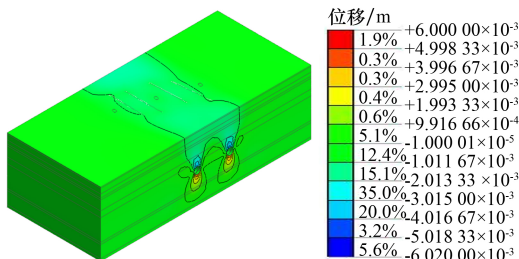


图 13 盾构隧道施工后的工况 2 竖向变形云图

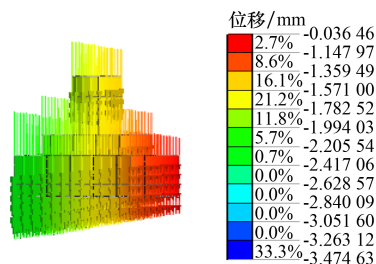


图 14 工况 2 施工结束后既有铁路桥梁墩台竖向变形矢量

根据以上计算结果可知,隔离桩防护措施对于铁路运营安全具有显著作用。在小半径隧道穿越铁路桥梁施工中,从第十二步序开始,墩台沉降和变形增幅显著;而在第四十四步序之后,墩台的沉降和变形逐渐趋于稳定。铁路桥梁结构受盾构隧道施工的影响范围大约为沿着盾构掘进方向前后 $3D$ (D 为隧道直径) 范围内。

4 检测与监测数据分析

现场监测作为工程安全风险控制的手段之一,能够实时监测盾构隧道施工影响范围内的土体和铁路桥梁结构变形情况,并预测周围土体和桥梁结构的安全状况和变形趋势。通过搜集和整理工程监测数据,与数值计算结果进行对比,以验证隔离桩防护措施和数值计算的有效性,具体结果如下。

根据监测数据可知:215#~217#墩台的沉降变形最大值分别约为 2.6、3.2、2.1 mm,与数值计算结果相一致。小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工引起的相邻墩台差异沉降变形:215#墩台与 216#墩台、216#墩台与 217#墩台的差异沉降变形最大值分别约为 1.1、1.5 mm,与数值计算结果吻合。综上,隔离桩防护措施能够确保小半径盾构隧道穿越铁路桥梁工程安全顺利实施,能有效降低小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工对临近铁路桥梁结构的不利影响。

5 结 论

本文依托郑州地区某小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工工程,采用数值计算与现场监测相结合的方法,研究了小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工引起的墩台沉降变形、桥桩桩身的内力变化以及桥桩水平方向、竖直方向的变形规律,分析了隔离桩防护措施在穿越施工期间对铁路桥梁结构的保护效果,得出主要结论如下。

(1) 无隔离桩防护措施下的小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工会引起地表横向沉降变形,施工期间很可能危及铁路线路运营安全。而设置隔离桩防护措施下的小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工也会引起地表横向沉降变形,但未超出桥梁结构变形控制标准。因此,设隔离桩防护措施更有利于施工期间铁路线路的运营安全。

(2) 将有无隔离桩防护措施的数值计算结果进行对比,发现隔离桩防护措施分担了一部分盾构隧道施工对铁路桥梁结构的不利影响,起到了一定的挡土与阻隔效用,有效降低小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工引起的铁路桥桩变形及其附加内力。

(3) 将监测数据与数值计算结果进行对比,发现数值计算结果准确性高,小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工期间隔离桩防护措施能有效保障铁路线路的运营安全,隔离桩防护措施有效。

参考文献:

[1] 董齐蕾. 浅析地铁盾构法施工技术[J]. 现代物业

(中旬刊),2018(4):181.

- [2] DONG Y Q, DING Z, JIANG Y, et al. Measured analysis on surface deformation and influence of cutter torque for twin shield tunnelling in silty sand[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022(3):301–320.
- [3] 郭社军,郝晓龙,舒国明. Peck 公式在小半径曲线隧道沉降分析的应用[J]. *公路*, 2020, 65(8):405–408.
- [4] 吴镇,张秀山,王磊. 小半径曲线叠落盾构隧道下穿京沪高铁隔离桩设置参数研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(9):88–94.
- [5] ZHAO B Y, WANG X P, ZHANG C, et al. Structural integrity assessment of shield tunnel crossing of a railway bridge using orthogonal experimental design [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020(114):313–324.
- [6] 范海龙. 浅谈地铁盾构机的选型[J]. *机械工程与自动化*, 2013(5):223–224.
- [7] 黄健. 盾构机的选型依据[J]. *工程机械与维修*, 2008(12):130–131.
- [8] 王梦恕. 不同地层条件下的盾构与 TBM 选型[J]. *隧道建设*, 2006(2):1–3;8.

(上接第 27 页)

(2) 通过数值模拟对沉降的关键部位和关键点进行重点关注,并采取合适的措施减少沉降形变。数值模拟虽然在施工过程中为地表沉降的发展趋势预测提供了数据支撑,但由于实际工程中各个因素的叠加,其精准度不高,因此需要进行实时监测和控制分析,以确保隧道施工的安全。

(3) 机械法联络通道施工过程需要设置试验段并进行现场监测,对每一个施工段都需要进行试验和施工参数的动态调整,并结合试验结果对整体施工参数进行调整优化。运用优化施工参数的方法,进一步控制联络通道隧道施工时的沉降,减小与主隧道间的不均匀沉降。

参考文献:

- [1] 丁修恒. 地铁区间联络通道盾构法修建关键技术[J]. *建筑施工*, 2019, 41(4):667–671.
- [2] 李建强,梁鑫勇,朱金贤. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降的研究[J]. *工程建设*, 2023, 55(2):29–35.
- [3] 黄大维,陈后宏,徐长节,等. 联络通道施工盾构机接

收对已建盾构隧道影响试验研究[J/OL]. *岩土工程学报* [2023–08–18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20230816.1741.006.html>.

- [4] 黄毅,刘正好,马险峰,等. 机械法联络通道管片切削试验与数值模拟研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(S1):93–103.
- [5] 丁修恒,文毅然,郑明飞,等. 机械法联络通道-隧道系统地震荷载响应分析[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(S2):193–200.
- [6] 柳献,高一民,张姣龙,等. 机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5):951–960.
- [7] 白中坤,李鹏,王祥祥,等. 机械法联络通道特殊衬砌环结构的有限元计算分析[J]. *工程技术研究*, 2023, 8(1):18–21.
- [8] 王儒,翟五洲,倪海波,等. 盾构隧道机械法联络通道破洞施工中管片衬砌洞门结构力学响应的数值模拟研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(S1):178–188.
- [9] 孙海明,汤友生,鲜少华,等. 基坑开挖对邻近多管隧道结构变形的影响[J]. *工程建设*, 2023, 55(4):13–18.