

DOI: 10.11779/CJGE2024S10019

复合式衬砌隧道模型试验及其承载特性研究

吴 鹏^{1,2}, 陈 健^{*1,2,3,4,5}, 崔 岚^{1,2}, 徐 晨^{5,6}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡; 5. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 6. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 中国山岭隧道常采用复合式衬砌支护, 探究复合式衬砌的承载特性对矿山法隧道支护设计具有重要意义。设计了大型隧道结构模型试验系统, 开展了毛洞、喷锚组合支护和复合式衬砌支护的大尺寸隧道模型试验, 通过监测隧道破坏全过程, 分析不同支护形式下隧道的破坏模式和支护结构受力特征, 揭示了复合式衬砌的承载特性。结果表明: 复合式衬砌支护较喷锚组合支护相比设计承载力提高了 33.3%; 两种支护形式下, 围岩可承受约 60%~75% 的外荷载, 施加二次衬砌后, 二次衬砌可分担约 15%~80% 的围岩压力; 喷锚组合支护较复合式衬砌相比能更好的发挥锚杆的效果。

关键词: 复合式衬砌; 模型试验; 承载特性; 荷载分担比例

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0102-05

作者简介: 吴 鹏(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土力学及工程方面的研究。E-mail: wupeng21@mails.ucas.ac.cn。

Model tests and bearing characteristics of composite lining of tunnel

WU Peng^{1,2}, CHEN Jian^{1,2,3,4,5}, CUI Lan^{1,2}, XU Chen^{5,6}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan; 5. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunneling Technology, Wuhan 430063, China; 6. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The mountain tunnels in China often use composite lining support. To explore the bearing characteristics of the composite lining to guide the design of the mining method tunnel is of great significance. A large tunnel structural model test system is designed to carry out large-size model tests on the unsupported, spray-anchor combined support and composite lining support. The whole process of tunnel damage is monitored, and the damage modes of tunnels under different forms of support and the stress characteristics of the support structure are analyzed so as to reveal the bearing characteristics of composite lining. The results show that the composite lining support increases the design bearing capacity by 33.3% compared with the combined spray-anchor support. Under the two forms of support, the surrounding rock can withstand about 60% ~ 75% of the external load, and after its application, the secondary lining can share about 15% ~ 80% of the pressure of the surrounding rock. The combined spray-anchor support can better use the effects of anchors compared to the composite lining.

Key words: composite lining; model test; bearing characteristic; load-sharing ratio

0 引言

中国山岭隧道以钻爆法施工为主, 结构形式一般采用复合式衬砌^[1-2]。复合式衬砌中各层结构相辅相成, 但目前世界各国对其设计理念大相径庭, 有的将二次衬砌作为承载主体, 有的将初期支护作为承载主体, 因此明确复合式衬砌的承载特性, 对指导复合式衬砌结构设计, 保证隧道运营安全起到重要作用。

目前国内外诸多学者对于复合式衬砌进行了大量

的试验研究。李荣锦等^[3], Wang 等^[4]通过开展模型试验, 揭示了隧道衬砌的结构变形分布、内力特性及其破坏过程。何灏典等^[5]针对复合式双层衬砌开展了原位加载试验, 分析了该结构在内压加载中的联合承载和结构失效过程, 并对多种围岩强度下结构的受力变

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(52079135); 中国铁建股份有限公司科研计划项目(2021-B18); 铁四院科技计划项目(2021K038)

收稿日期: 2024-04-30

*通信作者 (E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

形规律进行了探讨。Guo 等^[6]基于实际工程, 通过进行现场监测, 分析了隧道变形特征及二次衬砌背后压力的分布规律。

尽管目前大量学者对复合式衬砌进行了大量的研究, 但仍存在下述 2 方面不足: ①目前大部分试验研究多为开挖试验, 探究复合式衬砌在开挖过程中的受力特征, 对于复合式衬砌承载力及其承载特性的试验研究尚不多见。②国内外现有隧道模型试验采用的几何相似比较大, 断面尺寸大概都在 20~60 cm, 尺寸相对较小, 不利于隧道支护结构的受力监测与破坏现象的观察。

因此, 本文设计了大型隧道结构模型试验系统, 制备了围岩、喷层、二次衬砌以及锚杆材料, 开展了毛洞、喷锚组合支护和复合式衬砌支护下的大尺寸隧道模型试验。试验中将支护结构与围岩组合体视为拱结构, 通过监测其破坏全过程, 分析支护结构的受力特征, 揭示复合式衬砌支护的承载特性, 相关结果可为隧道支护结构设计提供参考。

1 模型试验方法

1.1 模型试验系统

试验设备采用自制的大型隧道支护结构承载能力模型试验系统, 见图 1。由反力架、模型箱和液压千斤顶组成, 可实现左右与上部千斤顶独立伺服加载, 最大荷载 1 MPa。

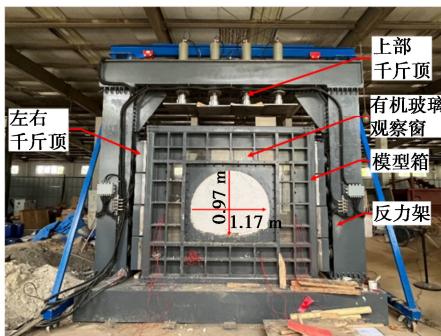


图 1 模型试验系统

Fig. 1 Model test system

1.2 试验设计与工况设定

(1) 试验设计

试验以时速 350 km 高铁双线隧道结构断面为模拟对象, 断面内轮廓高度为 12.1 m, 跨度为 14.6 m。试验设计时, 几何相似比取 12.5, 经换算试验中隧道的外轮廓断面宽 1.17 m, 高 0.97 m。图 2 为试验时模型箱内部结构示意图, 本试验为结构试验, 考虑到围岩自身的承载能力, 因此将围岩材料做成一个拱结构, 通过逐级加载的方式, 获取围岩与支护结构的承载能

力和力学行为。试验中以阶梯型近似模拟拱型, 拱结构厚度为 36 cm, 外围填筑用于传力的细砂, 将千斤顶的荷载传递到拱结构上。加载时, 侧向荷载与竖向荷载的比例为 0.44, 竖向荷载从 50 kPa 开始施加, 每级增加 20 kPa, 横向荷载从 22 kPa 开始施加, 每级增加约 8 kPa, 每级荷载维持 20 min, 直至隧道垮塌, 试验结束。

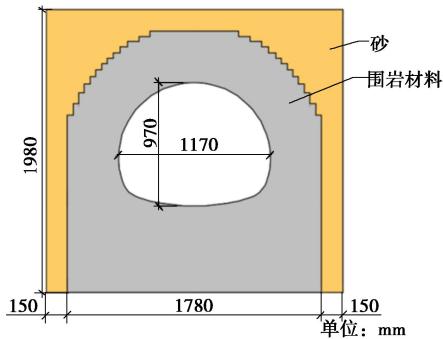


图 2 模型箱内部结构

Fig. 2 Internal structure of model box

(2) 工况设置

为对比二次衬砌的支护效果, 且考虑到实际工程中二次衬砌施作较为滞后, 本文中设置了喷锚组合支护和复合式衬砌共 3 种试验工况。具体如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Test programs

序号	工况
工况一	毛洞
工况二	喷锚组合支护 (锚杆间距 17.6 cm × 17.6 cm)
工况三	复合式衬砌 (锚杆间距 17.6 cm × 17.6 cm)

1.3 试验材料

在配置材料时, 围岩、支护结构等材料的基本物理力学参数按照相似准则进行换算确定。围岩材料以重晶石、河砂和粉煤灰作为骨料, 并添加松香酒精溶液和机油作为黏结材料。喷层与二次衬砌的模拟材料相同, 主要采用速凝石膏, 混有重晶石与河砂, 并掺入适量减水剂与甲基纤维素, 具体物理力学参数见表 2。

表 2 模型试验材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of model test materials

类型	密度/ (g·cm ⁻³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/GPa	单轴抗压 强度/MPa	泊松 比
围岩	2.23	46.0	38.20	1.39	0.186	0.36
喷层	2.30	396.8	32.96	5.09	1.430	0.29
细砂	1.75	0	38.74	—	0.079	0.30

选择锚杆材料时, 难以保证所有物理力学参数相似, 本文主要考虑抗拉刚度 (弹性模量×截面积) 满

足相似关系, 经换算选用直径为 3 mm 的锌棒, 弹性模量 9.2 GPa, 抗拉强度 50.3 MPa, 锚杆黏结剂选用环氧树脂 AB 胶。喷锚支护中挂有钢丝网, 钢丝网为 304 不锈钢, 网丝直径 1 mm, 网格间距为 20 mm。

1.4 监测方案

监测主要包括围岩内部应力应变、喷层与二次衬砌受力、锚杆应变以及隧道位移。沿隧道轴向 0.225 m 位置处布设一个断面监测围岩内部应力应变, 总计 9 个土压力盒, 6 个应变砖, 并在砂与围岩接触界面上布置 7 个土压力盒监测围岩的受力。在隧道轴向 0.125, 0.35 m 处各布设 1 个断面监测喷层与二次衬砌受力, 每个断面布置 8 个土压力盒, 详见图 3。

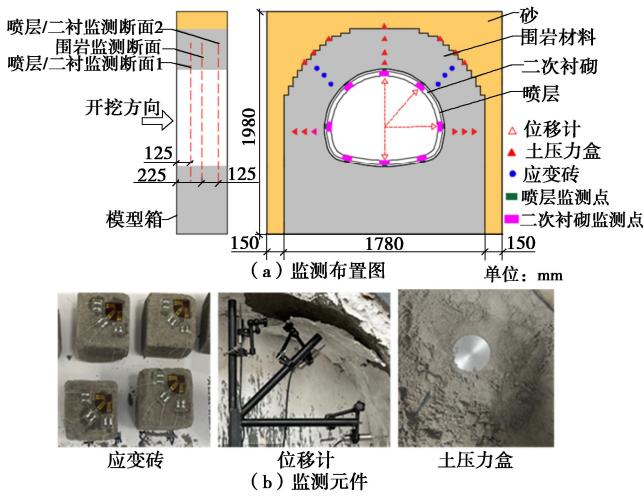


图 3 监测布置图

Fig. 3 Layout of monitoring instruments

沿隧道轴向布设两个断面监测锚杆应变, 在 6 根锚杆的头部、中部与尾部分别粘贴应变片, 并将 6 根锚杆布置于两个断面的拱顶、拱肩与拱腰 (图 4)。

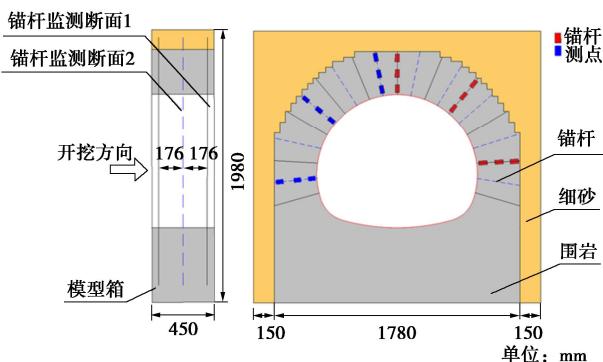


图 4 锚杆监测图

Fig. 4 Schematic diagram of prefabricated cubes

2 模型试验结果分析

在试验中, 将毛洞出现局部坍塌或喷层出现第一条裂缝时的荷载, 定义为设计承载能力, 此时虽然隧道仍未垮塌, 但已丧失隧道基本功能。继续增加荷载,

当隧道发生整体垮塌或二次衬砌垮塌时, 将此时的荷载定义为极限承载能力。

2.1 破坏现象

(1) 工况一, 毛洞工况, 当竖向荷载达到 130 kPa 时, 拱顶围岩发生破坏, 出现大面积脱落掉块, 此时隧道原有断面形状改变, 认为其已达到设计承载能力 (图 5)。当竖向荷载增加至 170 kPa 时, 隧道整体垮塌, 此时达到极限承载能力状态。

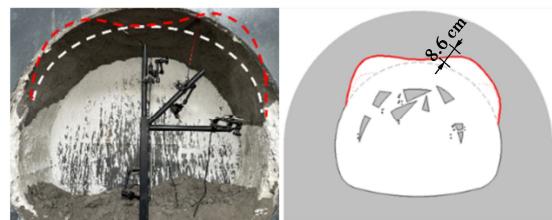


图 5 毛洞 (竖向荷载 130 kPa)

Fig. 5 Unsupported tunnel (Vertical load of 130 kPa)

(2) 工况二, 喷锚组合支护工况, 当竖向荷载为 310 kPa 时, 左拱肩喷层出现一条明显裂缝, 此时达到设计承载能力 (图 6)。当竖向荷载达到 450 kPa 时, 喷层裂缝扩展, 数目增多, 最终无法承受上覆荷载从而破坏垮塌, 此时达到极限承载能力。



图 6 喷锚组合支护 (竖向荷载 310 kPa)

Fig. 6 Combined spray-anchor support (Vertical load of 310 kPa)

(3) 工况三, 复合式衬砌工况。当竖向荷载为 370 kPa 时达到设计承载能力, 二次衬砌左拱肩位置处出现一道明显裂缝 (图 7)。荷载增大, 既有裂纹逐渐扩展, 新生裂缝也不断增多, 当荷载达到 550 kPa 时, 二次衬砌完全断裂垮塌, 达到极限承载能力。

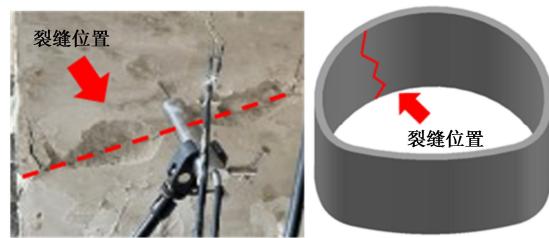


图 7 复合式衬砌 (竖向荷载 370 kPa)

Fig. 7 Composite lining (Vertical load of 370 kPa)

2.2 承载能力

根据破坏现象可知各工况承载能力如表 3 所示。

此表表 3 中给出了各工况承载力与毛洞承载力的差值, 该值代表了支护结构的承载能力以及施加支护后围岩承载能力的提高值, 即各支护方式的支护效果。由表中结果可知, 对于设计承载能力, 工况二和工况三分别为毛洞的 2.4 倍, 2.8 倍, 极限承载力分别为毛洞的 2.6 倍, 2.9 倍, 喷锚组合支护和复合式衬砌支护能有效提高承载能力。对比工况二和三, 工况三支护效果更好, 施加二次衬砌后设计承载力提高了 33.3%。

表 3 各工况承载能力

Table 3 Bearing capacities under various working conditions

工况	设计承载能力/kPa	较毛洞提高值/kPa	极限承载能力/kPa	较毛洞提高值/kPa
工况一	130	—	170	—
工况二	310	180	450	280
工况三	370	240	490	320

2.3 复合式衬砌支护承载特性

(1) 围岩应力

由前述试验现象可知破坏均从拱肩位置处发生, 因此根据应变砖监测数据, 计算得到了隧道拱肩位置约 13 cm 处围岩应力 (图 8)。由图 8 可知, 在相同荷载下, 工况三径向应力最大, 约为工况二的 (1.4~3.2) 倍。径向应力表征了支护结构对围岩的支护力, 支护力增大会改善围岩的受力状态, 提高围岩自身的抗压能力, 从而提高隧道的承载能力。结果表明施加二次衬砌能提供较大的支护力, 显著增加隧道的承载能力。

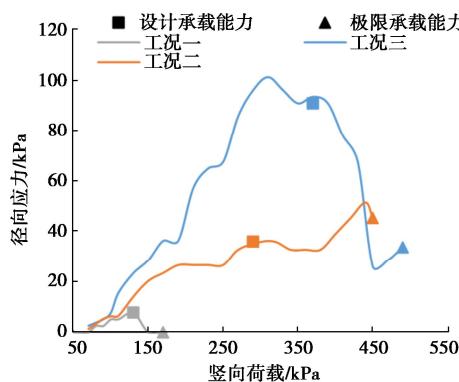


图 8 围岩径向应力

Fig. 8 Radial stresses of surrounding rock

(2) 围岩荷载分担比例

为明晰围岩发挥的作用, 根据围岩与喷层之间的接触应力和砂与围岩之间的接触应力, 可计算得到围岩分担外荷载的比例:

$$\kappa = 1 - \frac{q_2}{q_3} \quad (1)$$

式中: κ 为围岩荷载分担比; q_2 , q_3 分别为围岩与喷层之间的接触应力与砂与围岩之间的接触应力。

图 9 为拱顶位置围岩荷载分担比例随竖向荷载的

变化曲线。由图 9 可以看出工况三围岩荷载分担比例较大, 说明施加二次衬砌后围岩自承载能力提高。在两种支护形式下, 围岩均可承受约 60%~75% 的荷载, 变化曲线呈“下凹形”变化趋势。初始加载阶段, 荷载基本由围岩承担, 随荷载增大, 围岩变形, 支护结构承担荷载增大, 因而曲线呈下降趋势。当支护结构逐渐发生破坏, 位移增大, 支护结构承担荷载减小, 故而围岩荷载分担比例增大。

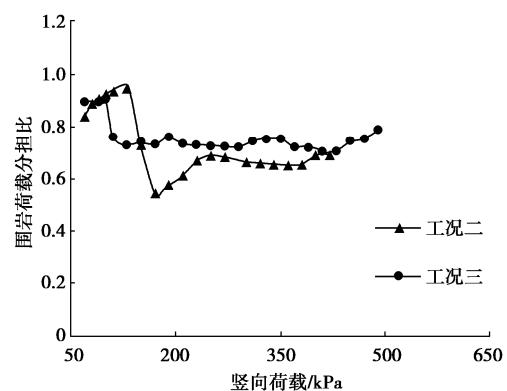


图 9 围岩荷载分担比例

Fig. 9 Load-sharing ratios of surrounding rock

(3) 二次衬砌围岩压力分担比

复合式衬砌中, 喷层与二次衬砌共同构成了抵抗围岩变形的承载体系, 为了解二者分担的围岩压力, 明确各自发挥的承载作用。根据下式计算得到二次衬砌的围岩压力分担比:

$$\eta = \frac{q_1}{q_2} \quad (2)$$

式中: η 为二次衬砌围岩压力分担比; q_1 , q_2 分别为喷层与二次衬砌之间接触应力和围岩与喷层之间接触应力。

图 10 为二次衬砌围岩压力分担比随竖向荷载的变化曲线。由图 10 可知, 工况三拱顶与拱肩处二次衬砌分担的围岩压力比例分别在 15%~80%, 8%~88% 的范围内。随竖向荷载增加, 拱顶与拱肩围岩压力分担比均呈现出先增大后减小的趋势。上述说明, 当竖向荷载较小时, 二次衬砌分担围岩压力较小, 此时喷锚支护为主要承载结构, 随着荷载增大, 二次衬砌受力增大与喷锚支护共同承担围岩压力。

(4) 锚杆发挥效果

由拉伸试验可知, 锚杆的极限强度为 355 N, 进而根据下式可计算得到锚杆的发挥程度:

$$\lambda = \frac{N_1}{N_s} \quad (3)$$

式中: λ 为二次衬砌荷载分担比; N_1 , N_s 分别为实测锚杆轴力以及锚杆的极限强度。

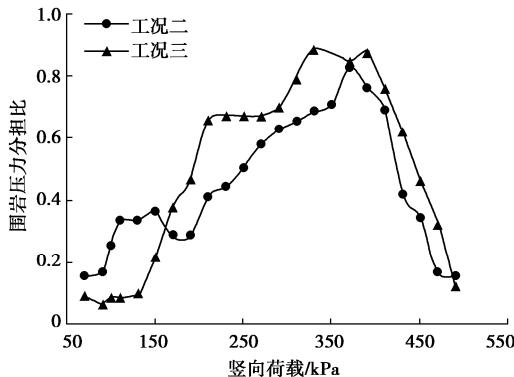


图 10 二次衬砌围岩压力分担比

Fig. 10 Load-sharing ratios of secondary lining

图 11 绘出了随着竖向荷载增加，各工况锚杆极限强度发挥百分比。由图 11 可知，工况二，工况三锚杆发挥程度分别在 56%~78% 和 51%~76%，各工况锚杆均可有效发挥自身的径向约束作用。在相同荷载下，工况三的锚杆发挥程度较小，分析认为这是由于二次衬砌分担了部分荷载，限制了围岩的变形，因而降低了锚杆的发挥程度。

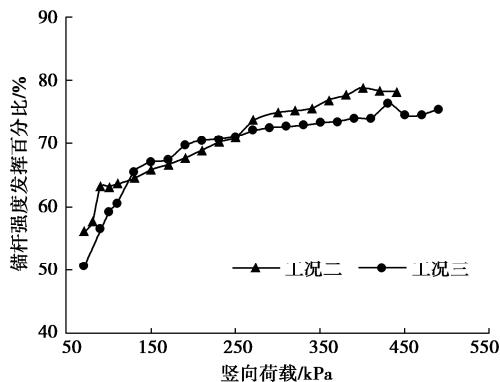


图 11 锚杆强度发挥百分比

Fig. 11 Percentages of anchor strength

3 结 论

开展了大尺寸隧道模型试验，探讨了毛洞、喷锚组合支护和复合式衬砌支护的承载能力与承载特性。得到 3 点结论。

(1) 喷锚组合支护和复合式衬砌支护能有效提高隧道承载能力。复合式衬砌工况较喷锚组合支护工况相比设计承载力提高了 33.3%。

(2) 两种支护形式下，围岩可承载 60%~75% 的荷载，施加二次衬砌后，二次衬砌与喷锚支护共同承

担围岩压力，可分担约 15%~80% 的围岩压力。

(3) 喷锚组合支护工况和复合式衬砌工况均可有效发挥自身的径向约束作用，但喷锚组合支护工况能更好的发挥锚杆的效果。

参 考 文 献：

- [1] 肖明清. 复合式衬砌隧道的总安全系数设计方法探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1): 84-88. (XIAO Mingqing. Discussion on design method of general safety factor of composite lining tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 84-88. (in Chinese))
- [2] 王建宇. 对隧道衬砌结构计算问题的思考[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 1-4. (WANG Jianyu. On calculation of tunnel lining structure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 1-4. (in Chinese))
- [3] 李荣锦, 邹鑫, 李荣建, 等. 半嵌泥岩半覆黄土隧道模型试验及承载特性评价[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 1): 98-103. (LI Rongjin, ZOU Xin, LI Rongjian, et al. Model test and bearing characteristics evaluation of semi-embedded mudstone and semi-covered loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 98-103. (in Chinese))
- [4] WANG S M, WANG Y, LIN Z Y, et al. Analysis of the influence of the thickness insufficiency in secondary lining on the mechanical properties of Double-layer lining of shield tunnel[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106663.
- [5] 何灏典, 唐欣薇, 严振瑞, 等. 复合式衬砌结构联合承载的原位试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 560-568. (HE Haodian, TANG Xinwei, YAN Zhenrui, et al. In-situ tests and numerical analysis of composite lining structures with joint bearing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 560-568. (in Chinese))
- [6] GUO X L, FAN X S, TAN Z S. Deformation control benchmarks and secondary lining construction timing in squeezing phyllite tunnels: a case study of Chengdu-Lanzhou Railway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2024, 143: 105454.

(编校: 胡海霞)