

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.011

玄武岩纤维复合材料波纹板力学性能及其套衬结构性能分析

吴小波

(中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京 102600)

摘要: 为了解玄武岩纤维复合材料(BFRP)波纹板各向异性对波纹板套衬性能的影响,开展了BFRP波纹板的多轴向拉伸、弯曲和剪切性能试验研究,并通过有限元模型模拟分析了波纹板波高、波距、壁厚、材料等参数对波纹板套衬在正常使用状态和极端情况下挠度、应力峰值的影响。结果表明:纤维方向对BFRP波纹板的拉伸、弯曲和剪切强度和模量有显著影响,垂直纤维方向的弯曲强度比平行纤维方向的弯曲强度低90%以上,最大变形降低68%;在挠度相近的条件下BFRP波纹板套衬比波纹钢板套衬质量减轻40%~60%,结构安全系数提高1.7~1.9倍,结构的弹性变形能力大大提升。

关键词: 玄武岩纤维复合材料;隧道衬砌;波纹板;套衬结构;有限元分析

中图分类号: U454;TU502+.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)01-0087-08

Mechanical properties of basalt fiber composite corrugated plates and analysis of their lining structure performance

WU Xiaobo

(China Railway Fifth Survey and Design Group Co. Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: To investigate the impact of the anisotropy of BFRP corrugated plates on the performance of corrugated plate linings, experimental studies on the biaxial tensile, bending, and shear properties of BFRP corrugated plates were conducted. Additionally, a finite element model was used to simulate and analyze the effects of parameters such as wave height, wave spacing, thickness, and material on the deflection and stress peaks of the corrugated plate lining under both normal and extreme conditions. The results show that the fiber orientation significantly influences the tensile, bending, and shear strength and modulus of BFRP corrugated plates. The bending strength perpendicular to the fiber direction is more than 90% lower than the bending strength parallel to the fiber direction, and the deformation capacity is reduced by 68%. Under similar deflection conditions, the BFRP corrugated plate lining is more than 40%-60% lighter than the corrugated steel plate lining, resulting in 1.7-1.9 times increase in structural safety factor and a significant improvement in the elastic deformation capacity of the structure.

Key words: basalt fiber reinforced plastics; tunnel lining; corrugated plate; lining structure; finite element analysis

近年来,我国各地的交通隧道得到了快速发展,到2022年已建成的公路隧道总里程达到26784 km,铁路隧道总里程达到21978 km。其中,衬砌是保证隧道安全稳定运营的重要保障^[1-4]。在许多运营隧道内,衬砌在力学、地质和环境等多方面因素共同作用下产生裂缝,严重缩短了隧道的使用寿命^[5]。此外,在地震的作用下,由于衬砌的变形能力不足,会导致断裂带附近的隧道衬砌大面积剥落、掉块,中断交通且修复困难^[6]。因此,提高衬砌的环向刚度以及纵向变形能力是隧道安全运行的保障。

隧道衬砌常采用的加固增强方法包括裂缝注浆、粘贴纤维布或钢板、嵌入钢拱架、喷射混凝土等^[7]。在隧道衬砌出现浅裂缝以及渗漏水时,宜采用水泥砂浆或环氧树脂注浆,可有效抑制裂缝的发展,快速止渗,施工迅速,对隧道内交通无影响;但对衬砌的承载能力贡献有限^[8-9]。在隧道衬砌出现混凝土碳化及小范围混

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司系统性重大项目(P2022G056)

作者简介: 吴小波(1982—),男,高级工程师,主要从事隧道与地下工程研究。E-mail:wuxiaobo_wy@crcc.cn

引用本文: 吴小波. 玄武岩纤维复合材料波纹板力学性能及其套衬结构性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):87-94.

WU Xiaobo. Mechanical properties of basalt fiber composite corrugated plates and analysis of their lining structure performance[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(1):87-94.

凝土剥落掉块时,宜采用粘贴纤维布或钢板的方式,可有效抑制衬砌剥落部位蔓延,施工快捷方便,对隧道内交通影响较小;但钢板及胶层易受地下水等腐蚀介质的影响,耐火性能较差,且对衬砌承载能力的贡献较小^[10-12]。在隧道衬砌发生大面积混凝土剥落掉块和局部塌陷时,宜采用嵌入钢拱架或喷射混凝土等方式,包括挂网喷射纤维混凝土、超高性能混凝土等,以有效提升衬砌的承载能力及刚度,但侵占隧道内部空间较多^[13],新旧混凝土之间的黏结强度难以保证^[14-15]。此外,喷射混凝土在拱顶、拱肩、拱腰及拱脚处的厚度分布不均,力学性能会受影响^[16]。目前,也有学者尝试采用纤维复合材料网格加固衬砌,在小范围内加固效果较好^[17]。

波纹板套衬作为一种成熟的加固方式,在公铁隧道工程中应用广泛,尤其用作涵洞结构中的支撑部件^[18-20]。波纹板套衬结构形式相比于其他套衬结构有着不可替代的优势:①波纹钢板在工厂集中生产,不受施工环境影响,利于控制质量;②波纹钢板的惯性矩较大,对二次衬砌的刚度提升明显^[21];③波纹钢板质量轻,便于运输,可缩短施工周期^[22-23]。目前,应用于隧道加固的波纹钢板主要材料为 Q235 或 Q355 低碳钢,厚度为 3~8 mm,具有较强的塑性及延展性,使结构具有很好的变形能力,在发生大变形时,拱顶会发生侧向变形,使应力重新分配,重新形成环向受压状态^[24]。

波纹板应用在隧道中不可避免地被地下水及土壤侵蚀,容易发生锈蚀,造成结构的破坏。此外,高铁隧道中的高压电网对加衬砌的加固材料有很高的绝缘要求。为解决上述问题,可采用高耐久性的电绝缘复合材料(fiber reinforce plastic, FRP)制成的波纹板代替传统的波纹钢板^[25-27]。FRP 型材相比于传统钢材具有强度高、密度低、耐久性和电绝缘性能好等优点^[28],目前广泛应用于土木工程中。FRP 型材包括碳纤维复合材料(CFRP)、玻璃纤维复合材料(GFRP)、芳纶纤维复合材料(AFRP)以及玄武岩纤维复合材料(BFRP)^[29],其中,CFRP 和 AFRP 的性能最优,但是价格昂贵^[30],无法在岩土工程中大量使用。BFRP 材料由一定比例的玄武岩纤维和树脂复合成型,玄武岩纤维以纯天然火山岩为原料,具有绿色环保的优点,在我国已产业化^[31]。玄武岩纤维的短期力学性能比玻璃纤维高 30% 左右,且蠕变断裂应力高(0.54 倍极限强度)、蠕变率低(<3%),耐高温性能与碳纤维接近,但价格仅为碳纤维的 1/7^[32];同时具有突出的耐腐蚀和耐疲劳性能,是应用到结构工程中的一种高性价比的结构材料^[33-34]。因此,本文提出将 BFRP 制成波纹板型材应用于套衬结构,但 BFRP 波纹板是由多层玄武岩纤维布堆叠铺设而后真空辅助方式成型的,属于典型的正交异性结构,且复合材料本身为正交异性材料^[35],进一步增加了波纹板的各向异性,其对波纹板套衬性能的影响目前还缺乏研究。为此,本文对 BFRP 进行了多项力学性能测试,并进行了 BFRP 波纹板套衬结构的有限元分析,从多角度对 BFRP 波纹板套衬结构进行了评价。

1 BFRP 波纹板多向力学性能试验

如图 1 所示,提取 BFRP 波纹板中条状试样为研究对象,进行多轴向力学性能试验研究。试验用 BFRP 波纹板由多轴向玄武岩纤维布平铺并采用真空辅助成型(PCM 工艺),由于 BFRP 波纹板在隧道套衬中受力形式复杂,因此本文对其拉伸性能、弯曲性能和剪切性能进行试验研究。

1.1 试样设计

拉伸、弯曲和剪切试样尺寸如图 2 所示。其中,拉伸试样包括 T-A、T-B、T-C 3 种,BFRP 波纹板厚度为 2 mm;弯曲试样包括 B-A 和 B-B 2 种,BFRP 波纹板厚度为 6 mm;剪切试样包括 S-A 和 S-B 2 种,BFRP 波纹板厚度为 10 mm。

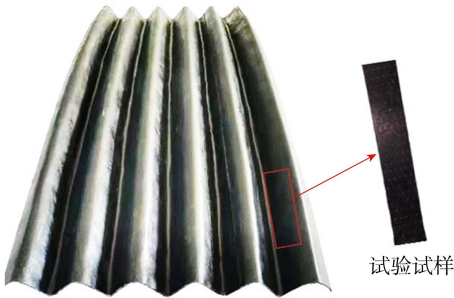


图 1 BFRP 波纹板制品
Fig. 1 BFRP corrugated plate products

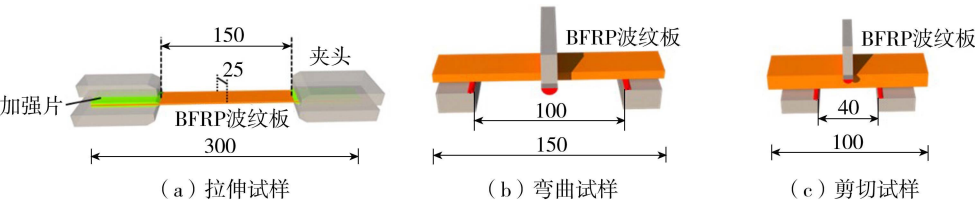


图 2 试样及加载装置示意图(单位:mm)
Fig. 2 Sample and loading device diagram (unit: mm)

试样 T-A 和 T-B 由 7 层 380 g/m^2 的玄武岩纤维单向布平铺而成,纤维体积分数为 50.19%,纤维方向分别 0° 和 90° ;T-C 由 8 层 300 g/m^2 的玄武岩纤维平纹布平铺而成,纤维体积分数为 45.28%,纤维方向为 0° 和 90° 等比例混合。试样 B-A 和 B-B 由 20 层 380 g/m^2 的玄武岩纤维单向布铺设而成,纤维方向分别为 0° 和 90° 。试样 S-A 和 S-B 由 14 层 650 g/m^2 的玄武岩纤维单向布以及 2 层 450 g/m^2 的玄武岩纤维平纹布铺设而成,纤维体积分数为 37.74%,纤维方向分别 0° 和 90° 。拉伸试样和加强片的黏结表面需先用细砂纸打磨,后用酒精擦拭,待酒精蒸发后用韧性较好的环氧树脂黏结,对试样黏结部位加压 7 d 完成固化。

1.2 试验方案

拉伸性能试验依据 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》,加载仪器为 Instron 8002 液压疲劳试验机,加载速率为 1 mm/min 。采用 BX120-3AA 应变片以及东华动态采集仪 DH3816N 采集 BFRP 波纹板应变。弯曲性能试验依据 GB/T 1449—2005《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》,加载仪器为岛津电伺服加载器 (AG-Xplus,shimadzu),加载速率为 10 mm/min 。剪切性能试验依据 GB/T 30969—2014《聚合物基复合材料短梁法测定层间剪切强度试验方法》,加载仪器为岛津电伺服加载器 (AG-Xplus,shimadzu),加载速率为 1.5 mm/min 。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 拉伸性能

试样 T-A 拉伸破坏现象如图 3(a) 所示,呈现典型的炸丝破坏。临近极限荷载时纤维断裂声加剧且密集。试样 T-C 的拉伸破坏现象如图 3(b) 所示,破坏位置相对集中,表现为 BFRP 波纹板内部的纵向纤维被拉断,断口以外其他部位无明显变化。加载过程较为安静,达到极限荷载时发出巨响。

拉伸试样的荷载-位移曲线如图 4 所示,试样 T-A 和 T-C 的断裂位移相近,表明试样断裂均由试样长度方向的纤维发生损伤所致。试样 T-B 的拉伸荷载与断裂位移是由试样的树脂强度和延伸率所决定的。

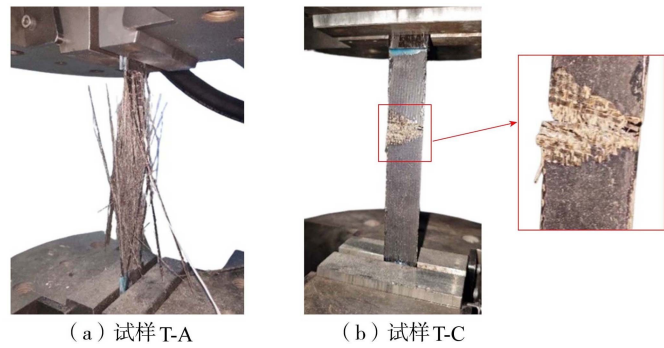


图 3 拉伸试样破坏现象

Fig. 3 Tensile failure diagram of specimen

拉伸试样试验结果如表 1 所示,试样 T-C 的拉伸弹性模量为试样 T-A 的 53.66%,拉伸强度为试样 T-A 的 46.88%。

对于 BFRP 单向波纹板,其纤维方向的拉伸强度和弹性模量分别为垂直纤维方向的 26.4 倍和 3.4 倍,有较大差距。因此波纹板生产过程中,纤维铺设方向宜与波纹板主受力方向相同,即垂直波纹方向,从而更好地发挥其力学性能。

1.3.2 弯曲性能

试样 B-A 破坏时呈现层间分离现象,出现较长的横向水平裂缝,波纹板有较大变形;此外,在弯折过程中,波纹板发生多次分层现象,在图 5 中表现为荷载的阶段性的突降。试样 B-B 破坏时出现纵向弯曲裂缝,为树脂剪切破坏,破坏时波纹板变形较小。各试样的荷载-位移曲线如图 5 所示,试样 B-A 的承载力为试样 B-B 的 15 倍,弯曲变形能力为试样 B-B 的 5 倍,在达到峰值荷载后表现出一定的延性特征。图 6 展示了 BFRP 波纹板弯曲试样的测试结果,试样 B-A 能承受较大的弯曲变形,最大弯折角度达到 22.6° 。

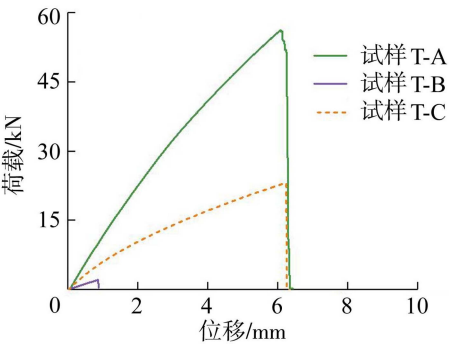


图 4 拉伸试样荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of tensile specimen

表 1 BFRP 波纹板拉伸性能

Table 1 Tensile properties of BFRP laminates

试样	极限荷载/kN	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa	伸长率/%
T-A	49	41	975	2.39
T-B	2	12	37	0.31
T-C	23	22	457	1.97

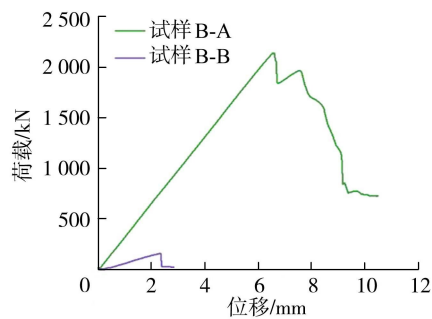


图 5 弯曲试样荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of bending specimen

每种试样进行了 5 次重复试验,试验结果如表 2 所示。试样 B-B 在长度方向仅靠树脂的黏结,其弯曲强度仅为试样 B-A 的 6.61%。因此,BFRP 波纹板在生产中必须采用多轴向设计以满足大变形和强抗弯性能要求。

1.3.3 剪切性能

BFRP 波纹板在拉伸过程中(沿波纹方向),外侧弧段受压,内侧弧段受拉,其最大变形能力取决于层间剪切性能。试样 S-A 和 S-B 的剪切破坏模式相近,均为加载点附近发生分层破坏,其荷载-位移曲线如图 7 所示。

每种试样进行了 6 次重复试验,试样 S-A 的平均剪切强度为 51 MPa,试样 S-B 的平均剪切强度为 8 MPa。与弯曲性能相似,试样 S-A 的剪切强度为试样 S-B 的 6.4 倍,层间剪切强度与纤维方向关系紧密。图 8 展示了 FRP 波纹板的剪切变形,弯折角度达到 6.8°时发生层间剪切破坏,即多层纤维布之间黏结失效。

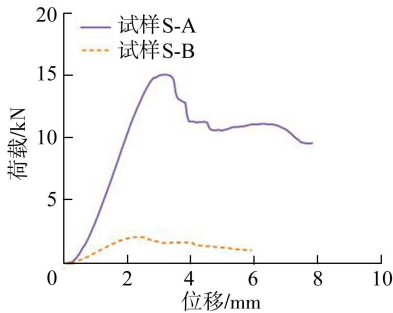


图 7 剪切试样荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of shear specimen

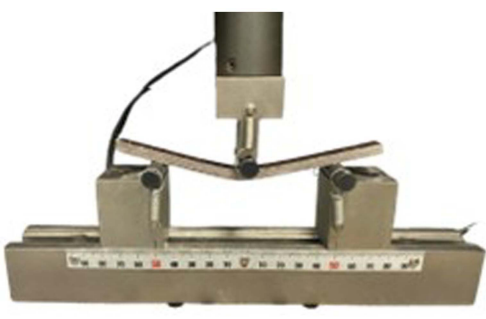


图 6 弯曲性能试验结果

Fig. 6 Bending performance test results

表 2 BFRP 波纹板弯曲性能

Table 2 Bending properties of BFRP laminates

试样	极限荷载/N	弯曲模量/GPa	弯曲强度/MPa	底层极值应变/%
B-A	1 987	35	772	2.35
B-B	122	7	51	0.68

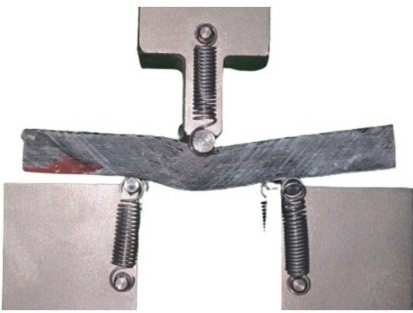


图 8 剪切性能试验结果

Fig. 8 Shear performance test results

综上,纤维方向对 BFRP 波纹板的拉伸性能、弯曲性能及剪切性能影响显著,其拉伸强度与 0°纤维含量成正比。BFRP 波纹板弯曲和剪切变形在 0°纤维方向上有一定的延性,而在 90°方向上呈现脆性破坏;因此,在后续有限元分析中基于 BFRP 双向板设计波纹板套衬,双向板在 0°和 90°两个方向上的纤维含量相同,因此两方向的基本力学性能相似。BFRP 波纹板所包含的纤维布层数越多,在弯曲和剪切过程中内、外层纤维应变差值越大,更易发生不理想的分层破坏。参考 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》波纹钢板套衬的规格标准,波纹钢板壁厚通常为 5~12 mm,且随波纹截面的增大而增大。因此 BFRP 波纹板中玄武岩纤维布层数宜控制在 20 层以内,采用双向纤维布以提升波纹板的抗剪承载力,保证剪切强度不低于 50 MPa,通过纤维布的质量规格控制板材壁厚。

2 BFRP 波纹板套衬结构有限元分析

2.1 规格设计

BFRP 波纹板套衬及波纹板的构造如图 9 所示,波纹板与二次衬砌之间为填充介质,采用化学锚栓连接

波纹板与二次衬砌。高铁隧道加固常用的波纹钢板规格为:波距 200 mm,波高 55 mm,壁厚 5 mm,记为 200 mm×55 mm×5 mm。

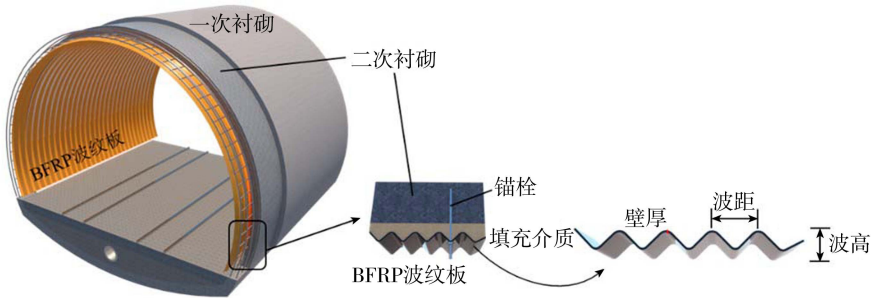


图 9 BFRP 波纹板套衬加固隧道衬砌示意图

Fig. 9 Schematic diagram of tunnel lining reinforced by BFRP corrugated plates

本文以 V 级围岩下时速 250 km 的双线隧道复合式衬砌(无砟轨道)为例,对既有隧道内二次衬砌进行波纹板套衬加固,200 mm×55 mm×5 mm 波纹钢板单位面积的质量为 45.96 kg/m²。由于 BFRP 弹性模量为 Q235 低碳钢的 1/4,因此拟采用规格为 200 mm×100 mm×10 mm 的 BFRP 波纹板从而达到与 200 mm×55 mm×5 mm 波纹钢板相近的刚度,其单位面积的质量为 30.72 kg/m²。

2.2 有限元模型的构建

围岩压力采用 V 级围岩浅埋隧道的最大埋深处荷载(最不利荷载)进行计算,拱顶部 60°范围内混凝土完全失效,围岩压力及自重完全施加在 BFRP 波纹板上。根据 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范:第一册 土建工程》,二次衬砌结构荷载承担比例为 60%~80%,本文假定二次衬砌分担总围岩压力的 70%。依据 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》中的浅埋隧道荷载计算方法计算围岩压力。以 V 级围岩地段进行套衬结构安全性分析,V 级围岩地层容重为 18.5 kN/m³,内摩擦角为 45°,弹性反力系数为 150 MPa/m。

计算得到隧道受到的垂直土压力为 329.54 kPa。钢筋混凝土二次衬砌的厚度为 40 cm,容重为 23.52 kN/m³,完全作用在波纹板表面的垂直压力为 10.584 kPa(取 45 cm 厚)。水泥浆厚度为 7.75 cm,容重为 20 kN/m³,作用在波纹板表面的垂直压力为 1.550 kPa。建立的荷载-结构有限元模型如图 10 所示,BFRP 波纹板采用 S4R 壳单元,BFRP 波纹板材料采用弹性工程常数本构关系,纤维方向(环向)和隧道方向(纵向)的弹性模量均为 22 GPa。波纹钢板材料采用弹塑性模型,Q235 钢的弹性模量为 200 GPa,屈服应力为 335 MPa。BFRP 波纹板套衬底部由于内嵌于混凝土中,因此约束 6 个自由度,同时约束纵向变形以及法向变形,以模拟 BFRP 波纹板套衬外侧二次衬砌的约束作用。

有限元模型的荷载分布如图 11 所示。拱顶 60°以外二次衬砌性能良好,承担全部围岩压力,BFRP 波纹板与衬砌连接良好,因此约束 BFRP 波纹板径向变形、底部的切向变形和边缘的纵向变形,简化为一次超静定的曲梁求解计算。在隧道套衬服役过程中,正常使用阶段 BFRP 波纹板只承受二次衬砌混凝土重量、水泥砂浆重量(12.134 kPa)以及波纹板自重,在极端情况下还需承担二次衬砌外 70%的围岩压力。

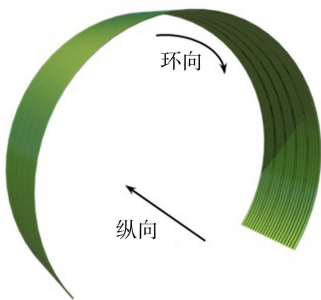


图 10 有限元模型示意图

Fig. 10 Finite element model diagram

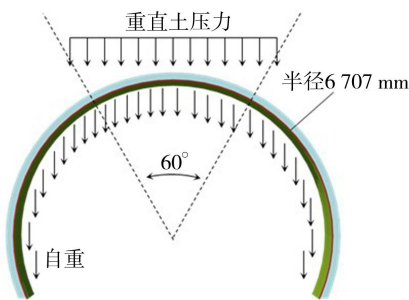


图 11 有限元模型的荷载分布示意图

Fig. 11 Finite element model load distribution diagram

为研究波纹规格对 BFRP 波纹板套衬的影响,本文针对 13 种规格的 BFRP 波纹板套衬进行了有限元模拟,分析正常使用阶段和极端情况下的应力分布情况,有限元模型参数如表 3 所示。

2.3 有限元模型模拟结果分析

BFRP 平板与 BFRP 波纹板套衬在顶部 60° 范围内局部荷载作用下的应力云图如图 12 所示,在二次衬砌失效部分的边缘有明显的应力集中现象。相较于波纹板套衬,平板套衬的应力分布面域更大,因此主拉应力和主压应力的数值较小;而波纹板套衬的应力集中现象则更显著。这是由于平板的刚度小,在相同荷载下易产生大变形,从而增大应力分布的面积并减少应力的局部集中;而波纹板的刚度较大,因此应力分布较集中于受力或约束位置。

有限元模型模拟结果如表 4 所示。极端情况下,波纹板套衬的挠度和应力显著增大,BFRP 波纹板套衬在极端情况下的挠度为正常使用阶段挠度的 27~28 倍;波纹钢板套衬在极端情况下的挠度为正常使用阶段挠度的 22~57 倍。

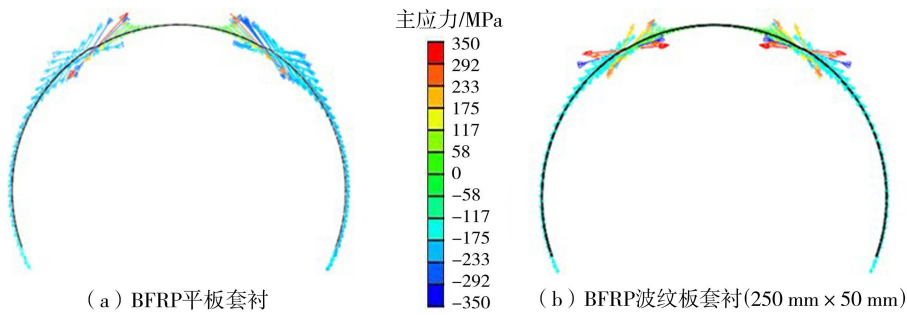


图 12 BFRP 平板与波纹板套衬最大主应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Nephogram of maximum principal stress of BFRP plate and corrugated plate lining (unit: MPa)

表 4 波纹板套衬有限元模拟计算结果

规格编号	正常使用阶段			极端情况		
	主压应力/MPa	主拉应力/MPa	拱顶挠度/mm	主压应力/MPa	主拉应力/MPa	拱顶挠度/mm
1	8.3(48.2)	10.2(78.4)	2.94	231.2(1.73)	286.3(2.79)	81.2
2	9.4(37.8)	5.4(65.7)	0.17	190.1(1.87)	192.9(1.84)	9.8
3	10.4(34.1)	8.9(39.9)	0.07	274.6(1.29)	187.2(1.90)	3.3
4	7.4(48.0)	6.7(53.0)	0.05	192.4(1.85)	162.1(2.19)	1.2
5	6.2(57.3)	6.2(57.3)	0.04	159.7(2.22)	146.6(2.42)	0.9
6	15.0(26.7)	7.7(103.9)	2.02	416.6	213.9(3.74)	56.2
7	8.7(46.0)	6.1(131.1)	0.82	239.9(1.67)	164.2(4.87)	22.4
8	8.6(46.5)	6.0(133.3)	0.55	235.1(1.70)	161.9(4.94)	15.0
9	4.1(97.6)	2.5(320.0)	0.27	111.9(3.57)	66.5(12.03)	7.1
10	18.9(21.2)	9.8(81.6)	1.57	526.8	271.4(2.95)	43.7
11	9.2(43.5)	7.1(112.7)	0.82	255.3(1.57)	194.1(4.12)	22.6
12	7.2(55.6)	5.6(142.9)	0.42	196.3(2.04)	149.5(5.35)	11.4
13	12.4(32.3)	8.3(96.4)	0.85	343.5(1.16)	228.4(3.50)	23.5

注:括号中数据为安全系数。

对比规格编号 3 和 13 的模拟结果,波纹板的材料对极端情况下的应力有较大影响,由于 BFRP 弹性模量低于 Q235,因此在正常使用阶段,BFRP 波纹板套衬的拱顶挠度约为波纹钢板的 12 倍;而在极端情况下,BFRP 波纹板套衬拱顶挠度约增大为波纹钢板套衬的 7 倍,应力极值增大约 22%。BFRP 波纹板套衬对荷载更为敏感,变形量更大。

对比规格编号 8 和 13 的模拟结果,BFRP 波纹板壁厚提升 67%时,极端情况下挠度降低约 36%,应力降低约 29%。对比规格编号 3 和 4 的模拟结果,波纹钢板壁厚提升 67%时,极端情况下挠度降低约 64%,应力

降低约 13%。因此,波纹钢板的挠度对波纹板厚度更为敏感,BFRP 波纹板的应力峰值对波纹板的厚度更为敏感。

采用规格编号为 8 和 12 的 BFRP 波纹板,在极端情况下拱顶挠度可控制在 2 cm 以下,安全系数为波纹钢板的 2.7~2.9 倍,有较大的安全冗余度。波高不超过 100 mm,减小对净空的影响。正常使用阶段套衬挠度低于 1 mm,极端情况下套衬挠度为 15 mm,其质量为传统套衬中波纹钢板的 40%~60%。在特殊环境中可使用规格为 200 mm×100 mm×10 mm 的 BFRP 波纹板,在质量增大 10%的条件下,刚度提升 67.4%,从而实现挠度控制。

3 结 论

- a. 纤维铺层方向对 BFRP 波纹板的拉伸、弯曲、剪切性能影响显著,0°方向的拉伸强度、弯曲强度和剪切强度较 90°方向的强度分别提高 25 倍、14 倍和 5 倍。
- b. BFRP 波纹板沿波纹方向的拉伸性能取决于 BFRP 波纹板的剪切性能,宜增加横向纤维占比以避免 BFRP 波纹板过早在波峰或波谷发生剪切破坏。
- c. 提出了一种适用于高铁隧道的 BFRP 波纹板套衬结构加固方式,相比传统波纹钢板套衬质量降低 40%~60%,结构的安全系数提高 1.7~1.9 倍。
- d. 波纹钢板套衬挠度对壁厚较敏感,壁厚提升 67%的情况下,BFRP 波纹板套衬挠度降低 36%,而波纹钢板套衬挠度降低 64%。

参考文献:

[1] 杜博英,孙鹏,刘凯丰. 基于运行安全的公路隧道线形设计[J]. 公路,2018,63(3):278-282. (DU Boying, SUN Peng, LIU Kaifeng. Highway tunnel alignment design based on operation safety[J]. Highway,2018,63(3):278-282. (in Chinese))

[2] 王田. 兰新高铁隧道运营安全风险评价及预警方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.

[3] 易金舫,卢松柏,饶军应,等. 贵阳地铁多溶洞隧道安全施工技术[J]. 施工技术,2016,45(13):101-104. (YI Jinfang, LU Songbai, RAO Junying, et al. Safety construction technology for the multi-cavern tunnel of Guiyang subway[J]. Construction Technology,2016,45(13):101-104. (in Chinese))

[4] 汪心渊,郑奇,吴晨. 隧道防二次事故综合安全预警系统研究[J]. 浙江交通职业技术学院学报,2016,17(3):20-24. (WANG Xinyuan, ZHENG Qi, WU Chen. Research on safety early warning system for preventing secondary accidents of tunnel [J]. Journal of Zhejiang Institute of Communications,2016,17(3):20-24. (in Chinese))

[5] 韦猛,袁晨瀚,蒋勇,等. 隧道衬砌开裂机理及加固措施研究[J]. 煤矿安全,2019,50(1):52-57. (WEI Meng, YUAN Chenhan,JIANG Yong,et al. Study on cracking mechanism and reinforcement measures of tunnel lining[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(1):52-57. (in Chinese))

[6] SHI Xinwei,FENG Xin,SHI Tianqing. Novel corrugated tube-rubber-concrete flexible joint for lining water conveyance tunnels crossing reverse faults: numerical analysis of dislocation resistance performance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2024,144:105556.

[7] 刘泾堂,王迎超,邱成虎,等. 公路隧道装配式仰拱结构形式优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):55-64. (LIU Jingtang, WANG Yingchao, QIU Chenghu, et al. Optimal design of prefabricated inverted arch structure for highway tunnels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):55-64. (in Chinese))

[8] 李欣欣. 钢波纹板桥涵设计与实例分析[D]. 广州:华南理工大学,2013.

[9] 叶飞,何川,夏永旭. 公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J]. 土木工程学报,2010,43(7):97-104. (YE Fei, HE Chuan, XIA Yongxu. Post-construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(7):97-104. (in Chinese))

[10] 罗立娜. 碳纤维补强条件下公路隧道衬砌计算方法的研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[11] YOSHIKAWA H, ZHISHEN W. Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened RC member subject to tension [C]//Proceedings of the Third International Symposium, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures 1997. Sapporo:Japan Concrete Institute,1997:287-294.

[12] ZHAO Huiling, LIU Xian, BAO Yihai, et al. Simplified nonlinear simulation of shield tunnel lining reinforced by epoxy bonded Steel Plates[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,51:362-371.

[13] CHANG Chite, WANG Mingjun, CHANG Chientzen, et al. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system

- [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 167-173.
- [14] 李佳翰, 王泰典, 薛文城, 等. 隧道维修补强技术与案例探讨[J]. 隧道建设, 2010, 30(增刊1): 113-119. (LI Jiahao, WANG Taidian, XUE Wencheng, et al. Tunnel maintenance & rehabilitation technology and cases[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(Sup1): 113-119. (in Chinese))
- [15] 付黎龙. 偏压连拱隧道衬砌病害分析及加固研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [16] 陈平燕. 隧道衬砌欠厚病害检测及处治措施技术要点探索[J]. 福建交通科技, 2019(2): 92-96. (CHEN Pingyan. Exploration on technical key points of detection and treatment of tunnel lining underthickness disease[J]. Fujian Transportation Technology, 2019(2): 92-96. (in Chinese))
- [17] 苏臣宏, 安楠楠, 王志丰. 公路隧道喷射混凝土套拱加固结构力学特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 203-213. (SU Chenhong, AN Nannan, WANG Zhifeng. Mechanical characteristics of shotcrete arch reinforcement structure in highway tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 203-213. (in Chinese))
- [18] LIU Dejun, SHANG Qi, LI Meng, et al. Cracking behaviour of tunnel lining under bias pressure strengthened using FRP Grid-PCM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 123: 104436.
- [19] 赵国虎, 齐宏学, 王志宏. 公路建设钢波纹管涵设计与施工关键技术分析[J]. 公路, 2017, 62(8): 107-112. (ZHAO Guohu, QI Hongxue, WANG Zhihong. Analysis of key techniques in design and construction of steel corrugated culvert for highway construction[J]. Highway, 2017, 62(8): 107-112. (in Chinese))
- [20] 宋飞. 波形钢板在公路超浅埋隧道的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(6): 206-208. (SONG Fei. Study on application of corrugated steel plate in highway ultra-shallow buried tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(6): 206-208. (in Chinese))
- [21] 穆安志. 浅谈钢波纹管涵在公路工程中的研究进展及应用[J]. 西南公路, 2016(2): 206-210. (MU Anzhi. Research progress and application of steel corrugated culvert in highway engineering are discussed[J]. Southwest Highway, 2016(2): 206-210. (in Chinese))
- [22] 任希庆. 钢波纹管在公路工程中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2015(3): 127-128. (REN Xiqing. Application of corrugated steel plate in highway engineering[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2015(3): 127-128. (in Chinese))
- [23] 徐子良. 装配式波纹钢管涵结构设计及应用[J]. 交通世界, 2017(29): 130-132. (XU Ziliang. Design and application of fabricated corrugated steel pipe culvert structure[J]. Transpworld, 2017(29): 130-132. (in Chinese))
- [24] 廖晨宇. 暗挖隧道装配式波纹板初支力学特性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [25] 汪昕, 常鑫泉, 吴智深. 纤维复合材料套衬、隧道加固结构及加固方法: CN117027849A[P]. 2023-11-10.
- [26] 湛启发, 吴智深, 丁祥, 等. 多轴向玄武岩纤维复合材料波纹板的制备方法及其制备设备: CN116728835A[P]. 2023-09-12.
- [27] 罗章波, 吴智深, 胡玉林, 等. 一种多轴向玄武岩纤维复合材料波纹板及其制备方法: CN116728900A[P]. 2023-09-12.
- [28] 常鑫泉, 汪昕, 刘长源, 等. 预应力 FRP 板加固 RC 梁抗弯性能有限元模型可靠性评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 318-328. (CHANG Xinquan, WANG Xin, LIU Changyuan, et al. Reliability evaluation of finite element model for flexural behavior of RC beams reinforced with prestressed FRP laminates[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(3): 318-328. (in Chinese))
- [29] ELREFAI A, WEST J, SOUDKI K. Fatigue of reinforced concrete beams strengthened with externally post-tensioned CFRP tendons[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 246-256.
- [30] CHANG Xinquan, WANG Xin, LIU Changyuan, et al. Parametric analysis on the flexural behaviour of RC beams strengthened with prestressed FRP laminates[J]. Structures, 2023, 47: 105-120.
- [31] JAMSHAI D H, MISHRA R. A green material from rock: basalt fiber-a review[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107(7): 923-937.
- [32] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.
- [33] 赵杏. FRP 拉索疲劳损伤演化规律和寿命可控设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [34] 王海涛, 马明磊, 许国文, 等. 预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 58-63. (WANG Haitao, MA Minglei, XU Guowen, et al. Flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 58-63. (in Chinese))
- [35] LIU Lulu, WANG Xin, WU Zhishen, et al. Effect of fiber architecture on tension-tension fatigue behavior of bolted basalt composite joints[J]. Engineering Structures, 2023, 286: 116089.