

山岭隧道病害整治方案效果对比研究与分析

殷世宏

宁波市北仑区公共项目建设管理中心, 浙江 宁波

收稿日期: 2021年12月26日; 录用日期: 2022年1月11日; 发布日期: 2022年1月26日

摘要

本文以某山岭隧道病害整治为背景, 以数值模拟的方法对比分析研究波纹钢结构的加固效果。首先聚焦隧道拱顶空洞和二衬厚度不足的病害类型, 建立隧道有限元模型, 再根据粘贴纤维布、粘贴钢板与波纹钢加固三种加固方案的特点, 分别将其改进, 建立加固后的有限元模型, 最后对比分析计算结果, 以探究波纹钢加固方案的加固效果。结果表明: 1) 三种加固方式均无法有效控制拱顶沉降, 但可有效限制水平收敛与二衬应力, 波纹钢加固效果略好于钢板; 2) 病害发生后波纹钢较钢板应力大, 且拱肩处的应力和变形偏大, 拱顶处沉降较大但应力偏小; 3) 芳纶纤维布不适合在山岭隧道中用作加固结构。

关键词

山岭隧道, 波纹钢加固, 有限元模型, 对比研究

Analysis and Comparative Study on the Effect of Disease Treatment Schemes of Mountain Tunnels

Shihong Yin

Beilun District Public Project Construction Management Center, Ningbo Zhejiang

Received: Dec. 26th, 2021; accepted: Jan. 11th, 2022; published: Jan. 26th, 2022

Abstract

Based on the disease repair of a mountain tunnel, this paper compares and studies the safety of corrugated steel structure reinforcement schemes by numerical simulation. Firstly, the finite element model is established by focusing on the diseases of vault cavity and insufficient thickness of secondary lining of high-speed railway tunnel. Then, according to the characteristics of three reinforcement schemes of pasting fiber cloth, pasting steel plate and corrugated steel reinforcement,

the strengthened finite element model is improved and established respectively based on the above model, and then the calculated structure is cross compared to analyze the reinforcement effect of corrugated steel reinforcement scheme. The results show that: 1) The reinforcement cannot effectively limit the vault settlement, but can effectively limit the horizontal convergence and secondary lining stress, and the reinforcement effect of corrugated steel is slightly better than that of steel plate; 2) After the disease, the stress of corrugated steel is larger than that of steel plate, and the stress and deformation at the arch shoulder are larger. Although the settlement at the arch crown is larger, the stress is smaller; 3) Aramid fiber cloth is not suitable to be used as reinforcement structure in mountain tunnel.

Keywords

Mountain Tunnel, Corrugated Steel Reinforcement, Finite Element Model, Comparative Study

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国交通事业的快速发展,隧道的数量急剧增长,目前我国已成为世界隧道大国。通过克服各类恶劣环境条件,我国的隧道建设技术取得了长足的进步,安全事故逐年下降,施工质量逐步提升,但在已经开通运营的部分山岭隧道中,仍存在许多拱顶掉块、拱背空洞、涌水、仰拱上拱等衬砌病害现象[1][2][3][4]。鉴于山岭公路、铁路隧道对运营环境的高安全性和高保通压力的要求,对于存在安全隐患而尚未发生事故的区域,急需一种能够快速施工且有足够安全保证的加固方案。

本文主要针对因施工期超挖出现拱顶空洞和二衬厚度不足问题。目前国内外关于该类隧道病害具有较高施工效率的方法主要有:粘贴纤维布加固法、粘贴钢板加固法和波纹钢加固法[5][6]。国内外学者对其进行了系列研究:粘贴钢板加固法以满足净空复核、较好提升结构刚度及承载力的优点而被普遍采用。国内外学者主要针对粘钢加固工法进行介绍和讨论[7][8];柳献等[9][10]针对上海通缝拼装盾构隧道,开展了二次受力模式下整环与半环钢板加固盾构隧道的足尺试验。粘贴纤维布因施工便利、造价低、加固效果良好而得到广泛应用。潘军[11]通过数值计算对芳纶纤维布的加固效率进行对比研究;周大举[12]将碳纤维加固设计由以往的安全系数法转变为基于概率理论的设计方法,提出碳纤维加固衬砌单个截面的失效模式及极限状态方程。波纹钢作为装配式结构,因其良好的力学性能及高效的施工方式而逐渐引起学者的注意,可有效解决衬砌开裂漏水[13]、厚度不足掉落[14]等问题。

本文以某山岭隧道中出现的病害为背景,通过数值计算,对波纹钢加固后隧道结构面对灾害的响应进行分析,并将粘贴纤维布加固法、粘贴钢板加固法与波纹钢加固法的加固效果进行对比,为既有山岭隧道病害整治加固方案提供建议。

2. 有限元模型建立

2.1. 病害隧道概况

某线山岭隧道,隧道全长 3592 m,单线隧道。隧道属低山地段,地形起伏较大,冲沟发育,地表横坡大,坡面植被茂盛。地面高程 75~370 m,相对高程约 50~300 m。衬砌病害整治施工过程中发现严重病

害,对隧道运营安全存在一定影响。病害处衬砌裂纹与空洞叠合,拱顶部位空响约 3.5 m,二衬厚度最小 2 cm,最大厚度 10 cm。此处病害初步判定为超挖地段,拱顶施工缝处存在局部开裂、掉块,在清理过程中发现背后防水板下部 30 cm 高空洞,上部 70 cm 高空洞,空洞宽约 4 m,上述空腔轴向贯穿整板衬砌、环向延伸至拱腰。示意图见图 1。

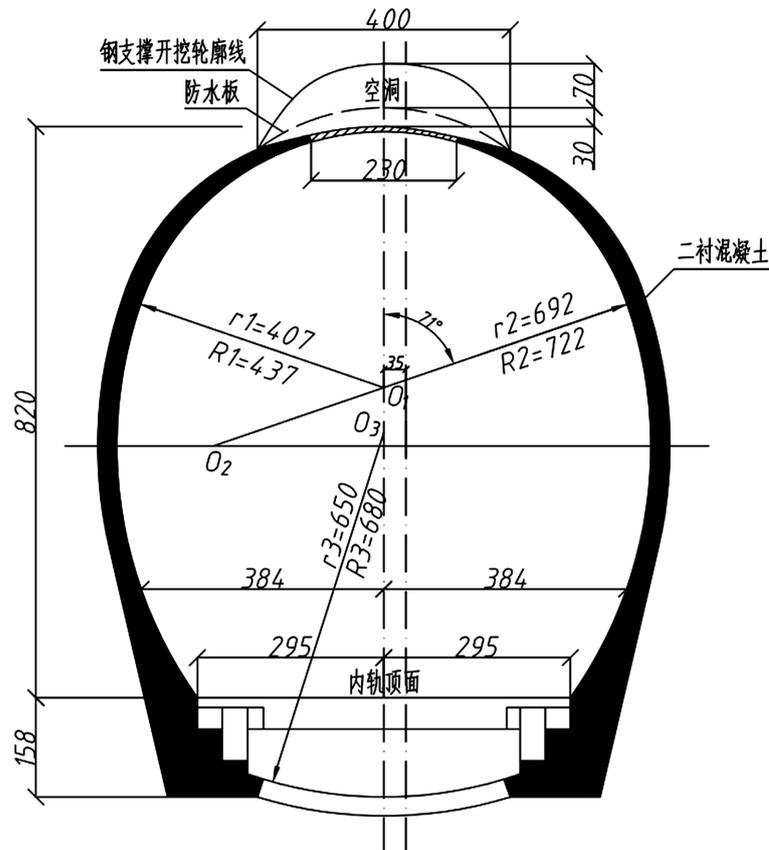


Figure 1. Sectional dimension of damaged tunnel
图 1. 病害隧道截面尺寸图

2.2. 隧道模型建立

本次数值模拟采用 Abaqus 有限元软件进行,以 2.1 节所述实际隧道病害情况为模型,建立三维精细化实体模型进行模拟分析。隧道模型所有单元均采用 8 节点线性六面体减缩积分单元 (C3D8R) 模拟。

模型中地层按均质土体建立,根据勘测资料,确定隧道上边界距离地表为 150 m 进行计算,隧道单洞宽约 9 m,高约 10 m,故地层模型边界选择高、宽均 280 m、长 73 m 的立方体,左右两面约束水平位移,前后约束纵向位移,底面约束所有位移。土体按 V 级围岩考虑。二衬轮廓按照图 1 所示建立,二衬完整部分厚度 30 cm。为保证模拟尽可能接近工程实际,隧道初衬施作采用等效法,将待开挖核心土外厚 3 m 内的土体模量增强(详见图 2),以实现施作初衬效果。具体材料参数见表 1,除围岩采用 Mohr-Coulomb 塑性本构外,所有材料均采用弹性模型。

隧道二衬厚度不足区域段长 13 m,为考虑真实结构的三维空间效应,在二衬厚度不足区域两端分别建立二衬厚度正常区域各 30 m。二衬与围岩接触面法向采用硬接触,切向采用罚摩擦,摩擦系数取 0.4。隧道二衬在厚度方向网格划分两个单元。拱背空洞仅存在于二衬不足区域。二衬有限元模型见图 3。

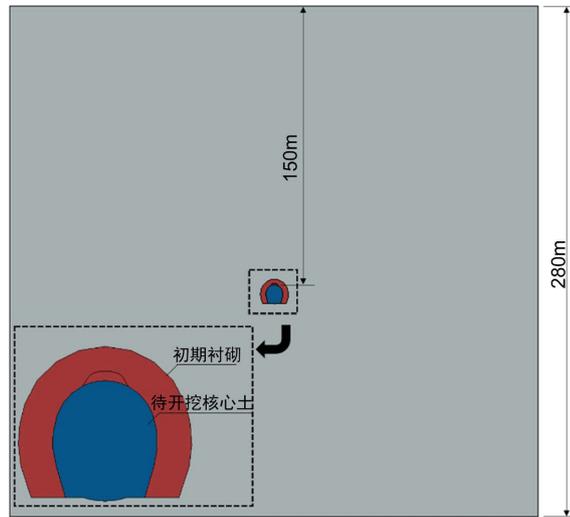


Figure 2. Schematic diagram of finite element model of surrounding rock
图 2. 围岩有限元模型示意图

Table 1. Formation and material parameters

表 1. 地层与材料参数

材料	重度 γ /(kN/m ³)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	内摩擦角 φ /°	粘聚力 c /MPa
V级围岩	22	3000	0.4	25	0.2
第一次应力释放	22	1500	0.4	25	0.2
第二次应力释放	22	600	0.4	25	0.2
C25 素混凝土	20	28,000	0.2	-	-
钢材	78	300,000	0.3	-	-
初期衬砌	20	20,000	0.3	-	-
芳纶纤维布	0.2	119,000	0.2	-	-

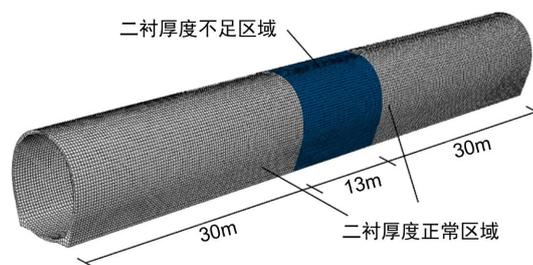


Figure 3. Schematic diagram of finite element model of tunnel secondary lining
图 3. 隧道二衬有限元模型示意图

2.3. 加固模型建立

本文中加固区设置为二衬厚度不足区域，纵向长度 13 m，与二衬厚度正常区域无搭接。加固结构尺寸按工程中常用尺寸选取。实际工程中波纹钢通过化学螺栓与衬砌连接，钢板与芳纶布均通过粘结剂与衬砌相连，因本文主要考虑结构的加固效果，不对连接导致的性能弱化加以讨论，故所选用加固结构与混凝土二衬均以绑定约束加以相连。

作为钢结构，波纹钢与钢板即可承压亦可承拉，故在加固时整环铺设，而纤维布材料仅能提供良好的抗拉性能，故仅在拱顶 90°范围内铺设，铺设范围示意图见图 4。

因波纹钢、钢板和芳纶纤维布厚度较整体结构尺寸极小，故加固结构均采用四结点曲面薄壳减缩积分单元(S4R)模拟，厚度方向设置 5 个积分点，网格划分近似尺寸为 0.3 m。

1) 波纹钢结构加固模型建立

波纹钢波型采用 300~110 mm，板厚 6 mm，波纹钢板环向扫掠路径曲线按二衬内轮廓线选取，以保证波纹钢结构与二衬连接紧密。

2) 粘贴钢板结构加固模型建立

加固钢板板厚选用 20 mm，环向扫掠路径曲线按二衬内轮廓线选取。

3) 粘贴纤维布加固模型建立

加固纤维布材料选用芳纶布，厚度取 0.286 mm [15] [16]，环向扫掠路径曲线按二衬内轮廓线选取。



Figure 4. Schematic diagram of laying range of reinforced structure
图 4. 加固结构铺设范围示意图

2.4. 模拟计算过程

计算过程模拟应尽可能与实际一致，但因施工运营过程比较复杂，故将其步骤简化，以达到尽量减少模拟计算工作量，同时又能够反映加固效果的目的。具体步骤如下：

- 1) 初始地应力的平衡；
- 2) 第一次应力释放；
- 3) 设置初衬，第二次应力释放；
- 4) 设置二衬，隧洞开挖；
- 5) 设置加固结构；
- 6) 拱背围岩失稳塌落；

采用折减待开挖核心土模量的方法进行应力释放，初衬施作前后各一次，具体模量折减值见表 1。为考虑最不利工况——加固完成后空洞围岩即发生失稳塌落导致灾害，在计算步(6)将拱背空洞填满。为考虑冲击效应，将填充材料的重度取为围岩重度的 5 倍。

3. 计算结果分析

将未实施任何加固方案工况(即取消计算步(5))设置为对照组，与三种加固方案计算结果进行对比分

析。通过对比计算结果的应力云图发现不同的加固方案下二衬的应力与位移分布规律相近,数值大小不同,限于篇幅仅放置未实施加固工况下二衬的 Mises 云图(详见图 5),由图易见受力最不利区段为二衬厚度不足区域,故在之后的对比中仅提取二衬不足区段进行讨论。

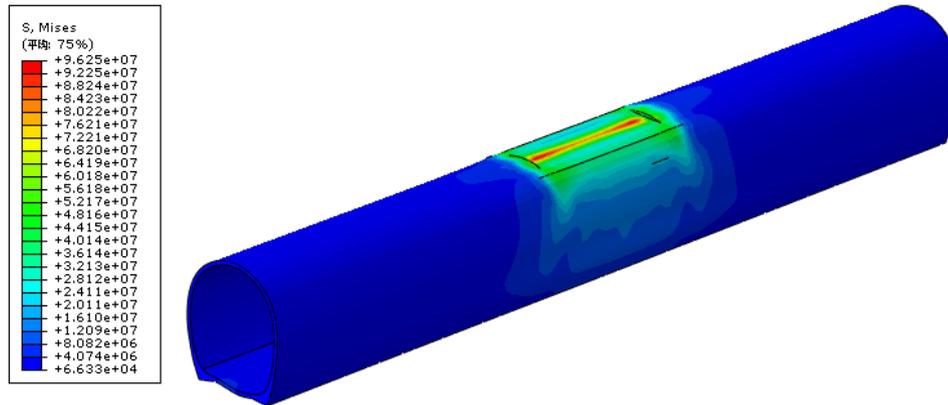


Figure 5. Stress nephogram of secondary lining under unreinforced condition
图 5. 未加固工况二衬应力云图

根据计算结果,在设置加固结构之后,结构的内力、变形的变化幅度小于 0.1%,故将病害前后的应力、变形差值作为评判加固效果的直接指标。

因不同加固方案在病害发生后隧道的应力与位移分布规律相近,数值大小不同,限于篇幅仅防止波纹钢加固方案的二衬应力与位移云图。

3.1. 加固后衬砌结构竖向变形对比

由图 6 可见,经波纹钢加固的二衬结构在拱背围岩失稳塌落前,二衬竖向位移场梯度较缓,拱顶最大沉降出现在拱顶偏左位置,而在失稳塌落后拱顶薄弱处沉降值陡增,可见拱背围岩失稳塌落在成型共同承载之前会使二衬产生较大变形。

由图 7 可见,从沉降差的角度考虑,钢板加固的效果最好,加固后的竖向位移沉降差减少了 9.3%,其余两种加固方式效果相当,变化小于 2%。从效果上看三种加固方式都不尽人意。

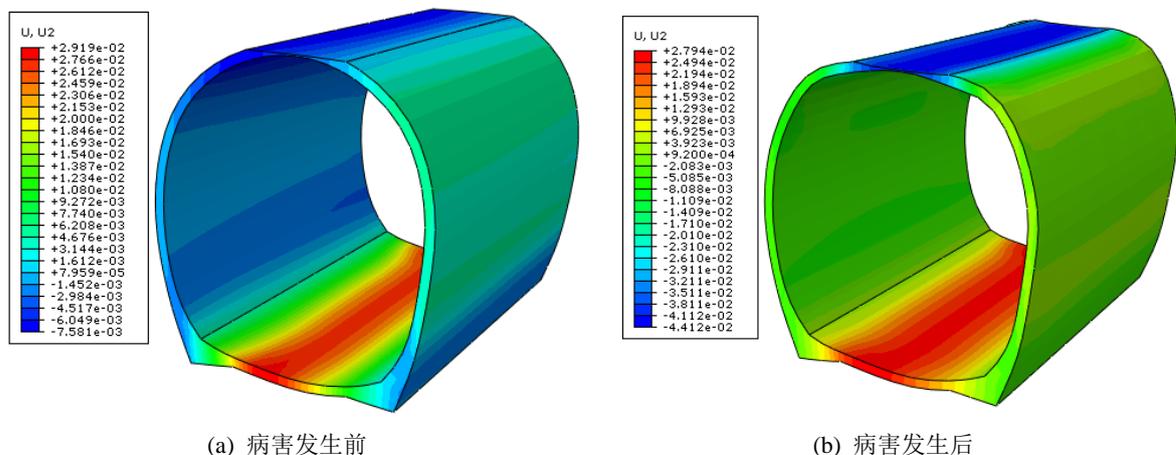


Figure 6. Cloud diagram of vertical deformation of corrugated steel reinforced structure
图 6. 波纹钢加固结构竖向变形云图

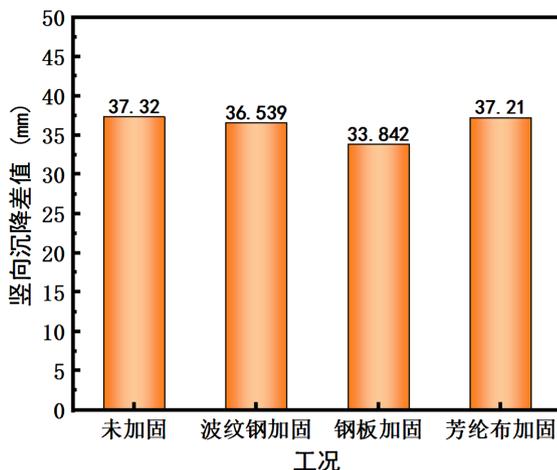


Figure 7. Histogram of structural settlement difference under different working conditions
图 7. 不同工况结构沉降差值柱状图

3.2. 加固后衬砌结构水平收敛对比

因隧道结构较为对称，水平变形方向区分明显，为方便及保守起见，将结构水平最大正、负位移绝对值之和记为结构水平收敛值，对其进行分析。

由图 8 可见，经波纹钢加固的二衬结构在拱背围岩失稳塌落后，二衬水平位移场梯度较缓，正、负方向最大水平位移在拱脚处，而在失稳塌落后拱肩两侧水平位移陡增，可见拱背围岩失稳塌落在成型共同承载之前会对二衬上半拱圈部分产生主要影响。

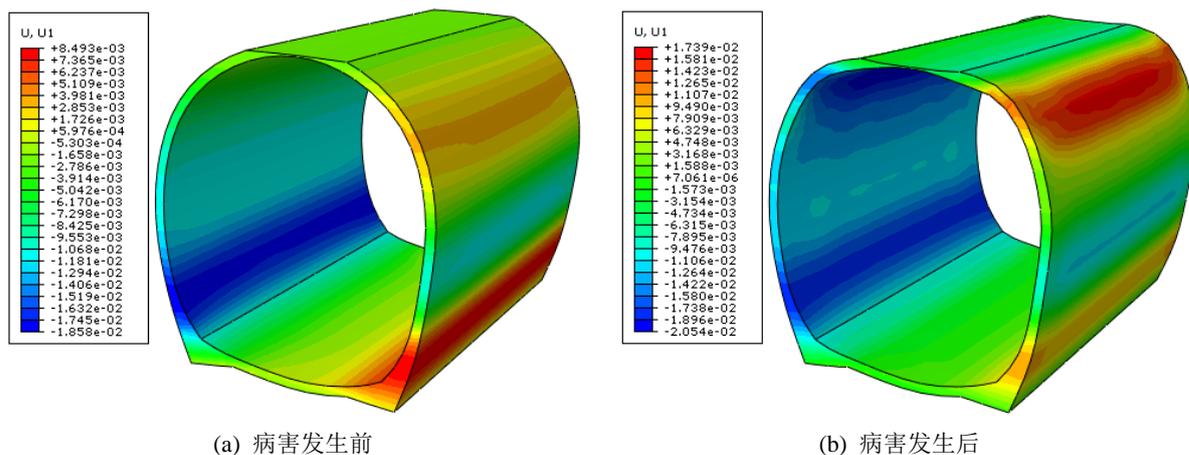


Figure 8. Cloud diagram of horizontal deformation of corrugated steel reinforced structure
图 8. 波纹钢加固结构水平变形云图

由图 9 可见，从水平收敛差的角度考虑，波纹钢加固的效果最好，加固后的竖向位移沉降差减少了 42.6%，钢板加固次之(39.8%)，芳纶布加固最少(10.5%)。从加固效果上看两类钢结构加固效果较好。

3.3. 加固后二衬最大应力对比

由图 10 可见，经波纹钢加固的二衬结构在拱背围岩失稳塌落后，二衬应力场梯度较缓，应力较大处位于拱底，而在失稳塌落后拱顶即拱肩应力陡增，可见拱背围岩失稳塌落在成型共同承载之前会对二衬上半拱圈部分产生主要影响。

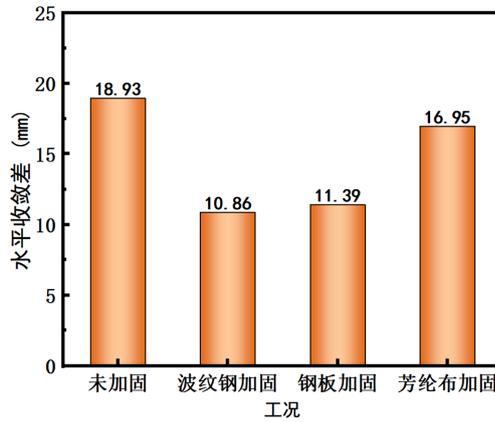


Figure 9. Histogram of structural horizontal convergence difference under different working conditions
图 9. 不同工况结构水平收敛差值柱状图

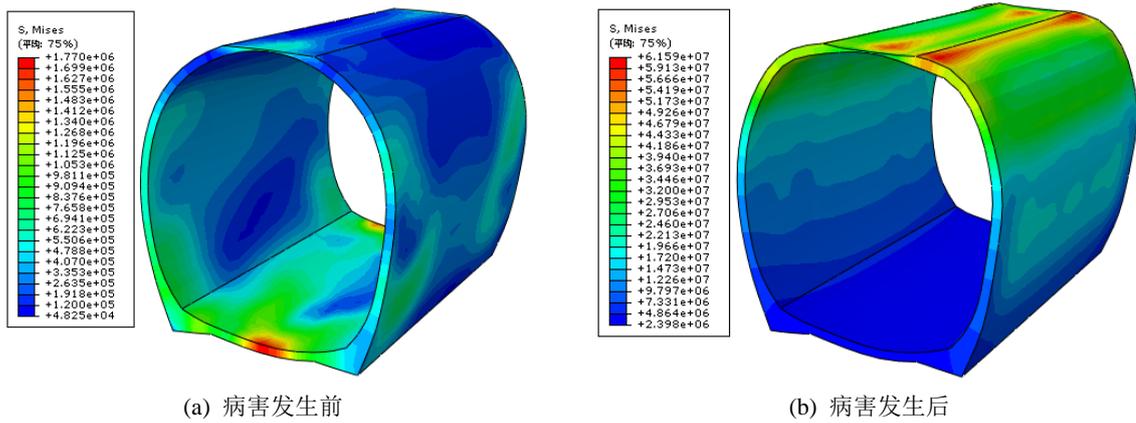


Figure 10. Cloud diagram of Mises of corrugated steel reinforced structure
图 10. 波纹钢加固结构 Mises 应力云图

由图 11 可见，从二衬应力的角度考虑，波纹钢加固的效果最好，加固后的应力差减少了 36.7%，钢板加固次之(34.5%)，芳纶布加固最少(1.2%)。从加固效果上看两类钢结构加固的效果较好，芳纶纤维布的加固效果极低。

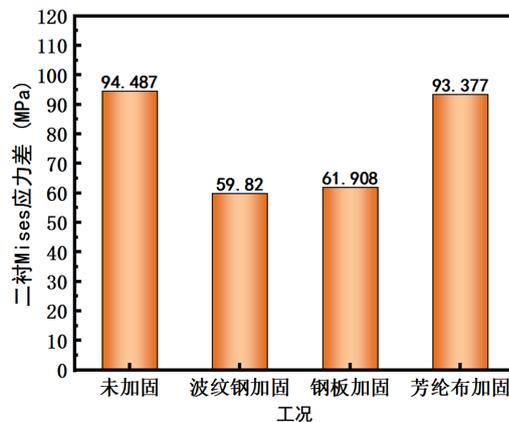


Figure 11. Histogram of stress difference of secondary lining of structure under different working conditions
图 11. 不同工况结构二衬应力差值柱状图

3.4. 加固后加固结构最大应力对比

由图 12 可见，三类加固结构均在拱肩膀处有较大变形，且产生最大应力，这与前文对结构水平位移分析相一直；拱顶部分虽有较大竖向位移，但应力较拱肩小，说明主要是拱肩变形导致的刚性位移，而非钢材变形导致。

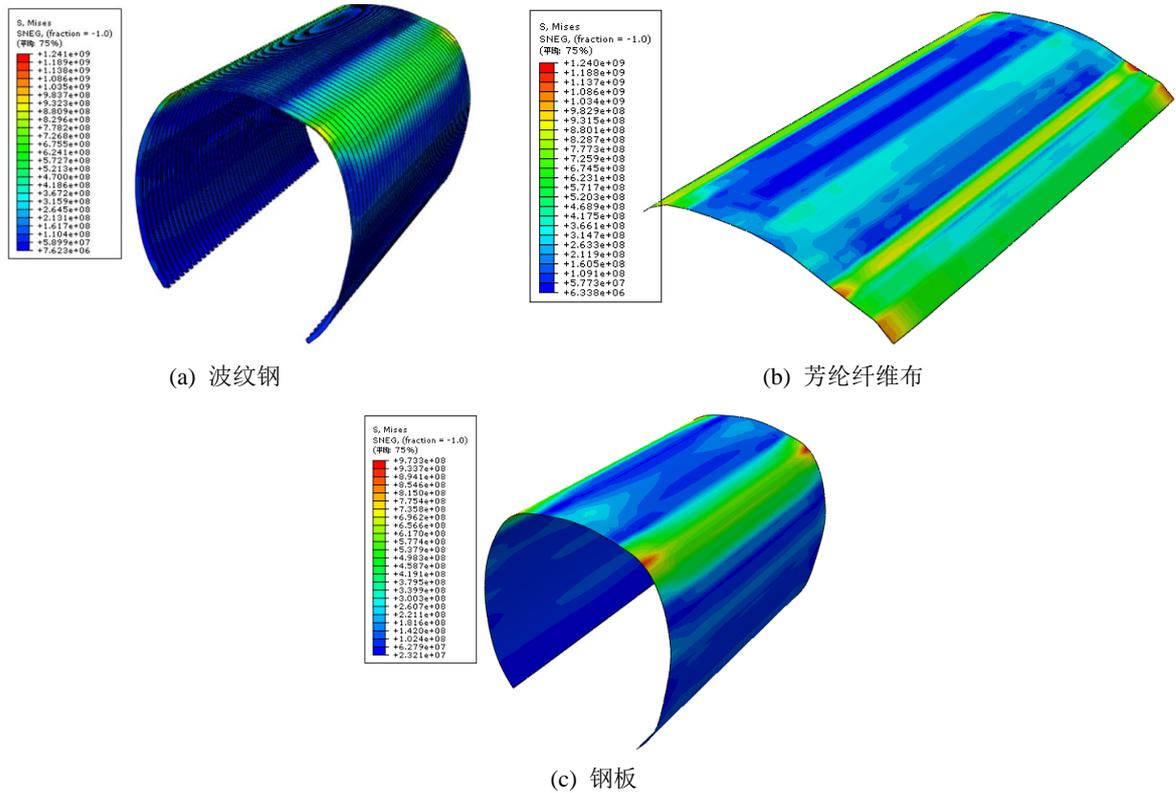


Figure 12. Cloud diagram of Mises stress of reinforced structure after collapse
图 12. 加固结构失稳塌落后 Mises 应力云图

由图 13 可见，在拱背围岩失稳塌落完成后，波纹钢与芳纶布的应力最大，均在 1.2 GPa 左右，钢板最小，为 972.05 MPa。说明钢板的整体性最好，加固承载过程中不易出现应力集中现象。

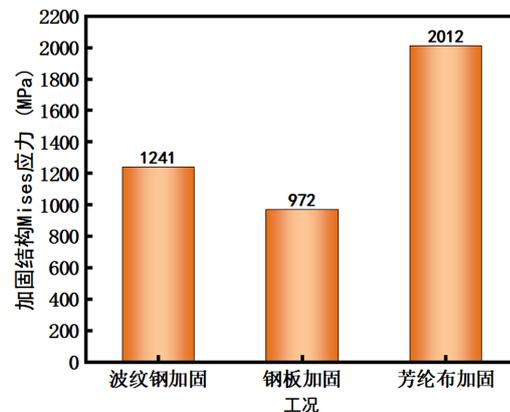


Figure 13. Mises stress histogram of reinforced structure
图 13. 加固结构 Mises 应力柱状图

4. 结论

本文通过对三种山岭隧道病害加固方案及施工过程有限元模型的建立,从病害发生前后变形差、应力差及加固结构受力状态角度对波纹钢加固效果进行分析与对比研究,得到结果如下:

1) 从结构竖向沉降角度,三种方法都不能有效减少隧道的竖向变形。从水平收敛角度,灾害发生后拱肩的水平位移陡增,波纹钢的加固效果最好,钢板其次,芳纶布最差。在实际施工时遇到拱背空洞与二衬脱落病害应考虑适当措施减小拱顶沉降。

2) 从二衬应力角度,两类钢结构加固效果好于芳纶纤维布,能大幅度为二衬承担病害荷载,

3) 病害发生后加固结构的内力明显大于二衬内力,波纹钢和芳纶布内力偏大;三类加固结构均在拱肩膀处有较大变形,且产生最大应力,拱顶部分位移大应力小,拱顶位移是拱肩变形导致的刚性位移,而非钢材变形导致。

4) 芳纶纤维布是盾构隧道中常用的加固结构,作用效果与受力筋类似,可有效限制盾构接头张开。但山岭隧道中二衬为整体现浇结构,需要加固结构有一定整体刚度,故芳纶纤维布不适用于山岭隧道加固。

参考文献

- [1] 肖广智. 从当前铁路隧道衬砌典型病害谈设计施工改进措施[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1416-1422.
- [2] Zhao, D., Tan, X. and Jia, L. (2014) Study on Investigation and Analysis of Existing Tunnel Diseases. *Applied Mechanics & Materials*, **580-583**, 1218-1222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.1218>
- [3] Zhang, Q., Wang, W.Y., Bai, S.S. and Tan, Y.-H. (2019) Response Analysis of Tunnel Lining Structure under Impact and Fire Loading. *Advances in Mechanical Engineering*, **11**, Article ID: 168781401983447. <https://doi.org/10.1177/1687814019834473>
- [4] 刘宇, 王鹏宇, 王述红, 凌爽. 隧道结构病害机理及理论量化方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8): 1185-1190.
- [5] 刘德军, 黄宏伟, 岳清瑞, 薛亚东, 张明波, 许庆. 隧道衬砌张拉裂缝开裂机制及快速修复方法初探[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 236-243.
- [6] 吴秀清. 隧道衬砌致害机理与加固措施研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 秦洲, 田正, 刘宝华. 公路隧道二次衬砌粘贴钢板加固技术研究[J]. 公路, 2016, 61(8): 266-270.
- [8] Liu, X., Jiang, Z.-J., Yuan, Y. and Mang, H.A. (2018) Experimental Investigation of the Ultimate Bearing Capacity of Deformed Segmental Tunnel Linings Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates. *Structure and Infrastructure Engineering*, **14**, 685-700. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1354892>
- [9] 柳献, 张浩立, 唐敏, 鲁亮, 王秀志. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究——半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131-137.
- [10] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 王秀志, 朱雁飞. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究——整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2300-2306.
- [11] 潘军. 芳纶纤维布加固地铁盾构隧道承载性能数值研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [12] 周大举. 基于可靠度理论的碳纤维加固公路隧道衬砌计算方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [13] 叶子健, 刘德华, 宋延旭. 波纹钢板加固隧道衬砌的应用研究——某隧道工程实例分析[J]. 北京建筑大学学报, 2020, 36(4): 71-78.
- [14] 陈望祺, 刘保东, 刘瑞, 井立江. 波纹钢板套衬解决隧道衬砌掉落病害的效果分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(z2): 384-388.
- [15] 刘梓圣, 张冬梅. 软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 155-160. <https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2014.05.024>
- [16] Ko, H., Kim, J.H., Lee, C. and Bang, M.S. (2018) Experimental Study on Seismic Performance of Cut-and-Cover Railroad Structure Columns Reinforced with Flame-Retardant Aramid Sheets. *Korean Society of Hazard Mitigation*, **18**, 39-46. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.7.39>