

公路隧道衬砌病害加固措施研究

吕荔炫

(福州市规划设计研究院集团有限公司, 福建 福州 350108)

摘要: 研究了国道G316线长乐漳港至营前段董奉山隧道的病害治理。针对隧道现有病害,采用地基加固、钢带加固和纤维布加固3种方法提升安全性能,并对加固效果进行比较。研究结果表明:(1)隧道安全系数空间分布表现为“拱脚>拱腰、仰拱>拱顶”,其中拱脚和仰拱安全系数提升显著,拱顶提升较小;(2)在裂缝病害治理中,3种加固方法均满足安全标准,但钢带加固和纤维布加固效果更佳,尤其是纤维布加固在拱顶处安全系数提升明显;(3)对于既有裂缝和保护层超厚的复合病害,单纯地基加固无法满足拱顶安全需求,需结合纤维布加固。加固后,拱顶安全系数提高至8.87,效果显著。

关键词: 公路隧道;衬砌裂缝;不利回填;断面加固;数值模拟

中图分类号: U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0206-06

Study on Disease Control and Reinforcement Measures of Highway Tunnel Lining

LYU Lixuan

(Fuzhou Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

Abstract: The disease control of Dongfengshan Tunnel in the section of Changle Zhanggang to Yingqian on the national highway G316 is studied. In view of the existing diseases of the tunnel, three methods of foundation reinforcement, steel belt reinforcement and fiber cloth reinforcement are adopted to improve the safety performance of the tunnel. The reinforcement effects are compared. The results show that the spatial distribution of tunnel safety factors presents the “arch foot > arch waist, and inverted arch > vault”, in which the safety factors of arch foot and inverted arch are significantly improved, while the improvement at the vault is smaller. In the crack disease treatment, three reinforcement methods all meet the safety standard. But the effects of steel strip reinforcement and fiber cloth reinforcement are better, especially the safety factor of fiber cloth reinforcement at the vault is obviously improved. And for the composite diseases of the existing cracks and super-thick protective layer, the simple foundation reinforcement can not meet the safety needs of vault, which must be reinforced with the fiber cloth. After reinforced, the safety factor of vault is improved to 8.87 with the obvious effect.

Keywords: highway tunnel; lining crack; unfavorable backfill; section reinforcement; numerical simulation

0 引言

近些年来,我国基础设施建设迅速发展,公路隧道的数量也在日趋增加。然而,在隧道施工过程中由于工程实践经验不足以及隧道周围施工环境的不断变化,隧道出现了一系列病害问题,如保护层超厚、不均匀沉降以及衬砌裂缝等。这些病害问题轻则导致隧道内部变形,降低了隧道的安全性能和承载能力;而重者则可能威胁到隧道的运营和行车安全,给人民的生命财产安全带来巨大损失。

学者围绕隧道病害整治措施已展开了部分研究,贺志勇等^[1-3]构建了裂缝隧道衬砌的力学模型,并探讨了裂缝的几何特征、数量及分布对裂缝扩展和衬砌承载能力的影响。乔雄等^[4-8]采用调查分析和监控量测的方法,对黄土隧道衬砌二次开裂机制研究方法、开裂原因和整治措施方面的现状进行了阐述和分析;王志杰等^[9]通过对比分析隧道左右线衬砌结构病害,研究了其在横断面和纵向里程上的分布规律与差异,并提出基于地质条件和病害成因的整治措施,利用数值模拟方法验证了其有效性。蒋春红^[10]针对钢筋保护层厚度控制进行了研讨,提出保护层厚度过小会使钢筋暴露于露天环境中过早碳化,从而加速钢筋锈蚀。保护层超厚会大大降低

收稿日期: 2024-07-26

作者简介: 吕荔炫(1981—),男,硕士,高级工程师,从事道路工程设计与施工管理方面的研究工作。

构件的承载力,造成严重的结构安全隐患;

综上,目前针对公路隧道复合病害加固整治措施研究较少,本文以国道 G316 线董奉山隧道为例,对复合病害采取不同的加固整治措施。

1 工程概况

1.1 隧道概况

国道 G316 线长乐漳港至营前段董奉山隧道为四洞并行大跨径、特长、小间距隧道群,其进口端为 145 m 明洞段及均长 303 m 的浅埋段,地层复杂多变且地层起伏较大,主要为坡积粉质黏土、全风化和砂土状强风化花岗岩(凝灰熔岩)、碎块状强风化花岗岩,土层结构松散,自稳定性差,遇水易软化导致土层物理力学性质急剧下降,且隧址区地下水位较高,易发生坍塌、突泥等灾害。

1.2 病害概况

1.2.1 不均匀沉降

董奉山隧道局部沉降较大且不均匀沉降较多,主洞明洞拱顶沉降 2~10.4 cm,仰拱变形-7~1 cm,其中以拱脚沉降大于中间的不均匀沉降和单侧不均匀沉降为主,仰拱横断面上变化不规律,换拱处仰拱开裂。辅洞明洞拱顶沉降 1.5~9 cm,仰拱沉降 0~5 cm,其中以拱脚沉降大于中间的不均匀沉降为主,仰拱竖向变形在-2~3 cm 之间,其横断面变形差异性不大,主洞和辅洞在明暗交接处沉降均突变明显。

1.2.2 保护层超厚

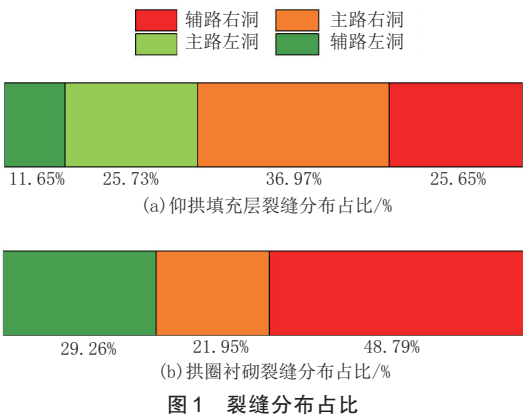
钢筋保护层是指从受力钢筋外边缘到结构构件的外边缘之间的距离,起到隔绝空气的作用,防止钢筋锈蚀。在施工过程中由于施工经验不足,会出现保护层过厚的情况,轻则导致混凝土构件承载力降低,重则会致使构件破坏坍塌。

1.2.3 裂缝

隧道衬砌开裂是隧道病害的主要形式,它破坏了隧道结构的稳定性,降低了衬砌结构的安全可靠性,影响正常使用,严重时可能导致衬砌剥落,危及行车及人身安全。

董奉山隧道现场施工过程中发现的主要裂缝病害包括仰拱填充层纵向裂缝和拱圈衬砌细微裂缝。

仰拱填充层纵向裂缝,裂缝往往较长,且开裂宽度较大。拱圈衬砌裂缝包括不同类型的裂缝,以横向裂缝与纵向裂缝为主,其中危害较大的为拱顶纵向裂缝,裂缝现状统计,见图 1。



2 模型构建

针对隧道结构的病害问题,提出了 3 种加固措施:地基加固、纤维布加固和钢带加固,同时构建了不同断面的三维有限元模型,并详细说明了数值模拟的计算步骤。

2.1 原型隧道

原型采用四洞双车道结构形式,宽度为 12.86 m、高度为 9.72 m、厚度为 80 cm,见图 2。二衬结构为 C25 混凝土,抗压和抗拉强度标准值分别为 17.0 MPa 和 2.0 MPa。钢筋型号为 HRB400,直径为 25 mm,配筋率满足 $\rho \geq 0.2\%$,见图 2。

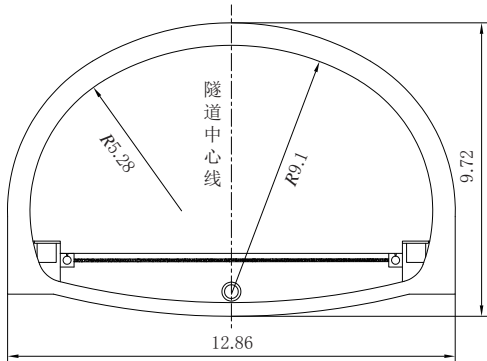


图 2 原型隧道衬砌断面尺寸示意(单位:m)

2.2 安全系数

依照公路隧道设计规范(JTG-3370-1—2018),隧道断面各部位截面的安全系数计为 2.40。

2.3 加固方式

(1)地基加固

针对隧道病害,本文采用锁脚钢管桩和仰拱隧底地基加固的方法。具体措施如下:在隧道两侧电缆沟底各设 3 根 $\Phi 108\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 、长 9 m 的锁脚钢管桩,纵向间距 80 cm。钢管内置 3 根 $\Phi 22\text{ mm}$ 钢筋,采用等效刚度法将其换算为 $\Phi 108\text{ mm} \times 29.8\text{ mm}$ 的新钢管桩。锁脚钢管注浆浆液为水灰比 0.5~0.8 的单液水泥浆液,扩散半径 0.7 m,水灰比取 0.8,浆液密度约

为 $1\,610\text{ kg/m}^3$,硬化后土层弹模为 120 MPa ,仰拱隧底地基采用 $\Phi 50 \times 4\text{ mm}$ 注浆钢花管垂直施作,呈梅花型布置,间距 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,长度 7 m ,注浆浆液与锁脚钢管桩相同,扩散半径 1 m ,见图3。

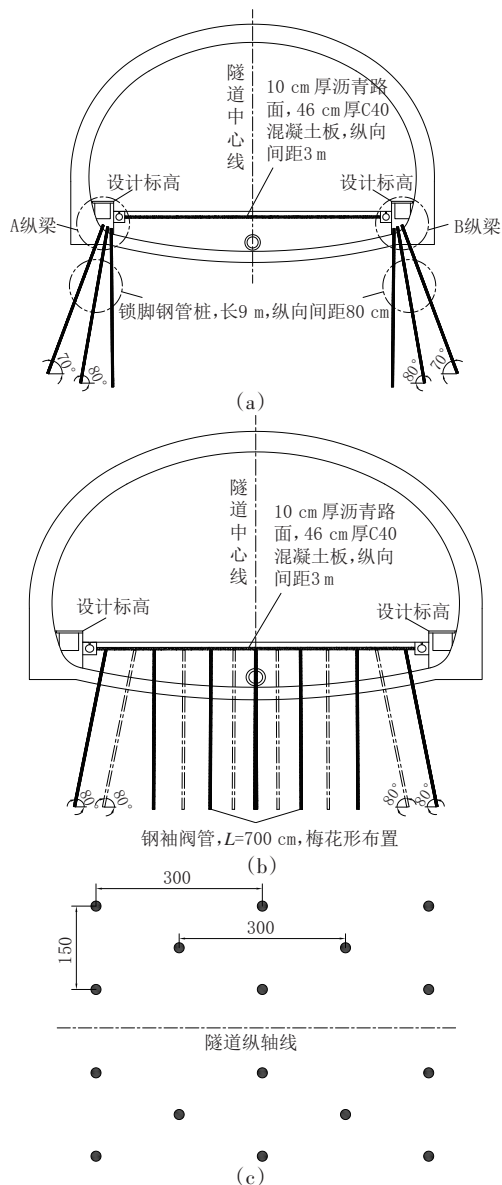


图3 仰拱隧底地基加固

(2) 钢带加固

在地基加固的基础之上施作钢带,即钢带加固,钢带起到的作用是进行机械隔离,即采用涂层材料包覆在待保护材料的表面,使之与水、氧气等产生腐蚀的物质隔离以达到防腐的目的,加固后断面图,见图4。

(3) 纤维布加固

在地基加固的基础之上施作纤维布,即纤维布加固,纤维布密度小,弹性模量大,抗拉强度高,因此采用壳单元模拟,加固采用单层碳纤维布,加固后断面图,见图5。

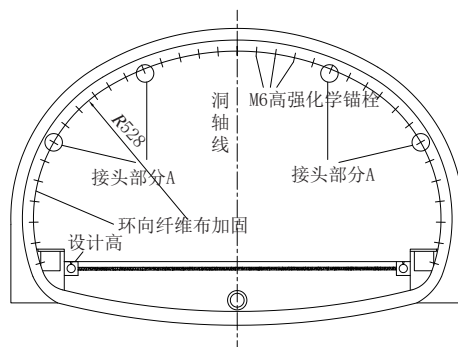


图4 钢带加固

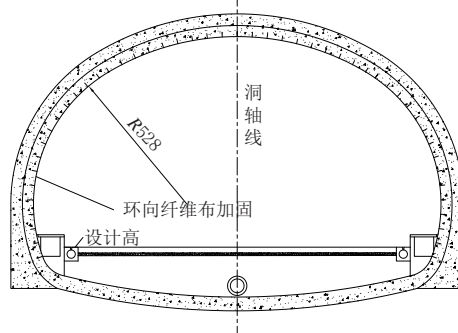


图5 纤维布加固

2.3 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 建立既有病害下公路隧道三维计算模型,衬砌厚度取 80 cm ,纵向取 8 m 。衬砌结构和内置钢筋分别采用 C3D8R 单元和 T3D2 单元模拟,并通过嵌入方式建立与混凝土间相互作用关系,不考虑两者之间的相对滑移,地基、纤维布和钢带加固采用梁单元模拟,通过变材料属性来分别模拟纤维布和钢带,混凝土与纤维布、混凝土与钢带之间的接触行为采用面-面接触,法向为硬接触,切向罚函数,摩擦系数为 0.5 ,见图6(a)、图6(b)。

裂缝病害通过板壳对衬砌实体切割生成,见图6(c)。采用 XFEM 模拟其扩展特征,裂缝扩展依据最大周向拉应力准则,保护层超厚病害采用增加实体单元来模拟超厚衬砌,见图6(c)。

本文采用地层-结构法进行分析,所用本构模型为摩尔库伦本构,土层的物理力学参数详见表1。考虑边界效应,以隧道圆心为原点到左、右边界为 40 m ,下边界距隧道底部取 30 m ,上边界取至地表,地表边界条件设置为自由边界,左侧、右侧、前面、后面边界设置为垂直边界的位移约束,下边界设置全约束。

3 病害断面加固分析

对病害断面进行了分类,将其分为裂缝病害断面和复合病害断面。针对这些不同类型的断面采取了相应的加固方法,并对加固效果进行了安全系数

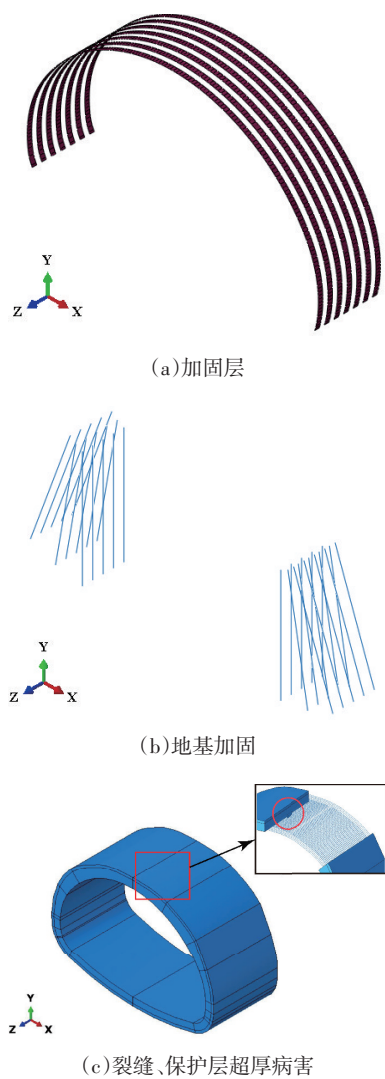


图6 隧道三维模型

表1 土层物理力学参数

土层	厚度/m	天然重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
坡积粉质粘土	2.7	16.6	14.6	25.1	17.0
全风化凝灰 熔岩	12.7	19.0	40.0	25.0	25.0
砂土状强风化 凝灰熔岩	14.6	20.0	60.0	35.0	35.0
碎块状强风化 凝灰熔岩	—	22.0	80.0	40.0	40.0

分析,提出了相应的整治措施。

3.1 选取典型断面

基于1.2病害数据和现场情况,本节选取FZK6+070、YK12+240、ZK12+260断面作为典型断面进行数值分析,以上断面病害裂缝宽度及保护层超厚具体数据见表2。

3.2 裂缝病害断面加固分析

3.2.1 地基加固

本节选取FZK6+070断面进行分析,断面数据见

表2 典型断面数据

断面桩号	围岩 级别	二衬 厚度/cm	钢筋 直径/mm	病害特征
FZK6+070	V	80	25	拱顶纵缝宽2.4 mm,仰拱填充层裂缝宽3.65 cm
YK12+240	V	80	25	拱顶纵缝宽2.3 mm,仰拱填充层裂缝宽3.47 cm
ZK12+260	V	80	25	拱顶纵缝宽2.5 mm,仰拱填充层裂缝宽3.47 cm,拱腰超厚11.7 cm

表2。本断面采用地基加固的方式,根据2.3节计算过程,计算FZK6+070断面的内力值,根据数值分析结果,计算其安全系数,见表3,可以看出,加固后安全系数最低为拱顶的2.43,超过标准值2.40,加固后结构满足安全性要求。

表3 地基加固后的安全系数

截面位置	拱顶	仰拱	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚
加固后安全系数	2.43	3.29	3.18	3.20	3.58	3.58
安全系数标准值	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40

3.2.2 钢带加固

由3.2.1节可以看出,地基加固显著提高了隧道的安全性。为进一步探讨钢带和纤维布的加固效果,本节选取YK12+240断面进行研究,断面数据见表2。首先采用钢带加固的方式,根据2.3节计算过程,计算固后的应力云图见图7。

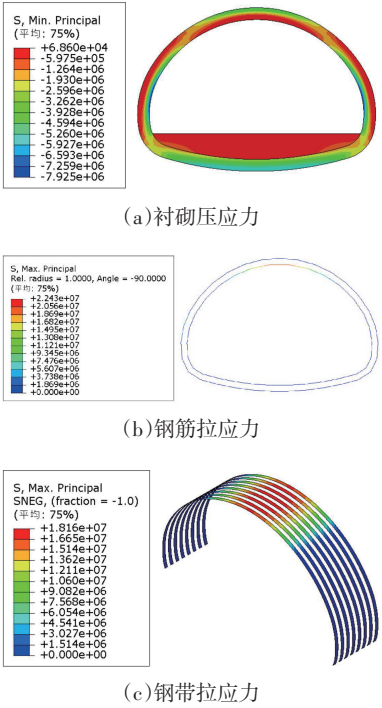


图7 YK12+240断面钢带加固应力云图(单位:Pa)

根据数值分析结果,计算其安全系数,如表4所列,可以看出,加固后拱顶的安全系数最低为2.84,大于2.40,加固后结构满足安全性要求。

表4 钢带加固后的安全系数

截面位置	拱顶	仰拱	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚
加固后安全系数	2.84	4.61	5.27	5.09	13.2	12.67
安全系数标准值	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40

3.2.3 纤维布加固

其次采用纤维布加固的方式,根据2.3节计算过程,计算YK12+240断面的内力值,加固后的应力云图,见图8。

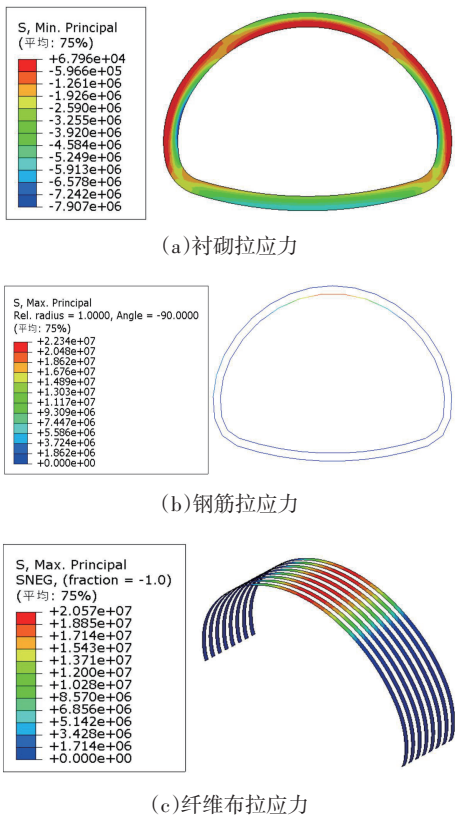


图8 YK12+240断面纤维布加固应力云图(单位:Pa)

根据数值分析结果,计算其安全系数,见表5,可以看出,加固后拱顶的安全系数最低为2.83,大于2.40,加固后结构满足安全性要求。

表5 纤维布加固后的安全系数

截面位置	拱顶	仰拱	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚
加固后安全系数	2.83	7.20	5.51	5.71	17.65	18.34
安全系数标准值	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40

由图9对比三者相对提升率可知,3种加固方式均显著提升了既有结构的安全系数。拱顶作为隧道中受力较均匀的区域,主要承受竖向压力,应力通过

拱圈传递至拱腰和拱脚,因此集中应力较小,3种加固方式在拱顶的提升效果相差不大且均不明显,导致安全系数提升有限。在其余截面位置,钢带和纤维布加固显著优于地基加固,此外,在仰拱、左拱腰和右拱腰等处,纤维布加固效果显著大于钢带加固。且相比较于钢带加固,纤维布具有很好的抗拉伸性能,其韧性也很大,且重量较轻便于搬运,施工简单。综合比较,在裂缝病害加固时可以优先考虑纤维布加固。

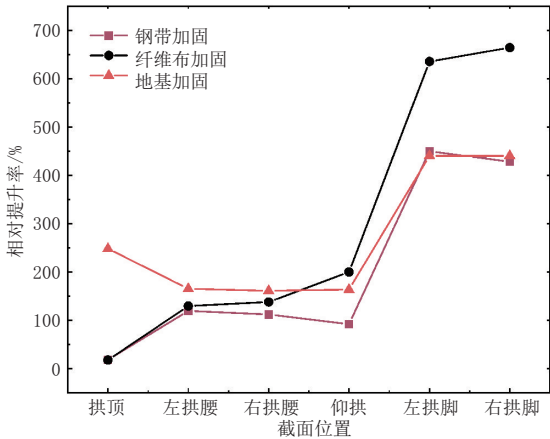


图9 不同加固方式安全系数相对提升率

3.3 复合病害断面加固分析

3.3.1 地基加固

本节选取ZK12+260断面进行分析,断面数据见表2。该断面是复合病害断面,既有裂缝病害,又有保护层超厚病害。

根据数值分析结果,计算其安全系数,见表6,可以看出,拱顶的安全系数最低为2.01,略低于2.40。对于存在复合病害的结构,地基加固在拱顶处加固效果不显著,原因在于超厚保护层削弱了加固层与主体结构的粘结,使得加固无法有效传递至拱顶。同时,超厚保护层引发的应力集中进一步降低了整体补强效果。

表6 地基加固后的安全系数

截面位置	拱顶	仰拱	左拱腰	右拱腰	左拱脚	右拱脚
加固后安全系数	2.01	3.81	3.97	3.97	15.63	12.15
安全系数标准值	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40

针对复合病害断面,地基加固未能达到预期效果,应采用钢带加固或纤维布加固。

3.3.2 纤维布和钢带加固对比

针对ZK12+260断面分别采用纤维布加固、钢带加固的方式,根据2.3节计算过程,计算了该断面的内力值,加固后的应力云图,见图10。

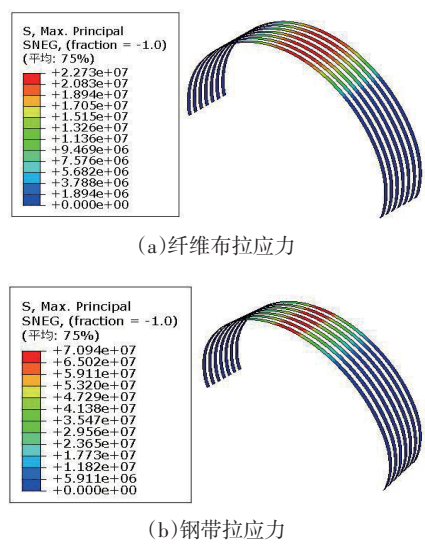


图 10 ZK12+260 断面加固体应力云图(单位:Pa)

纤维布加固相比于钢带加固,具有更好的柔性贴合性,能够更紧密地贴合隧道表面,从而有效提高裂缝的控制效果。如图 10 所示,钢带在拱顶处的拉应力显著大于纤维布加固的应力表现,由于纤维布加固具有优异的粘结性能,加固层能更好地与主体结构结合,确保应力的有效传递,减少应力集中现象。

此外,纤维布加固在应力分散方面表现更为优异,能够均匀分布外部荷载。因此,在复合病害隧道的加固处理中,纤维布加固显著提升了结构的安全系数,见图 11,在处置复合病害时,应优先考虑纤维布加固方案。

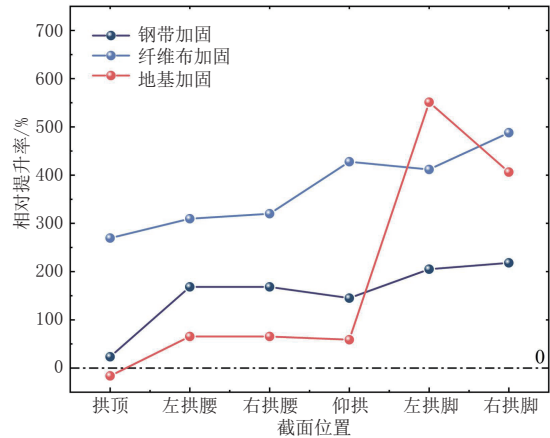


图 11 不同加固方式安全系数相对提升率

4 结 论

本文对不同类型的病害断面进行了加固,系统

分析了不同断面的加固效果,主要得到以下结论:

(1)结构安全系数分布特点:加固后的数值分析揭示了结构安全系数在空间分布上的特点,表现为“拱脚>拱腰、仰拱>拱顶”。这是由于地基加固采用了锁脚钢管桩结合仰拱隧底加固,显著提升了注浆加固区的围岩支撑能力,而拱顶主要依赖侧面结构支撑,安全系数提升幅度相对较小。

(2)裂缝病害加固效果:对于裂缝病害断面,比较了地基加固、钢带加固和纤维布加固的效果。结果显示,钢带加固和纤维布加固均优于单纯的地基加固,且纤维布加固在拱顶位置的安全系数提升效果明显高于钢带加固。纤维布凭借其优良的抗拉拉伸性能、高韧性和轻重量,在裂缝病害加固中具有显著优势,同时施工操作的便捷性也使其受青睐。

(3)复合病害加固效果:对于复杂的复合病害断面(如 ZK12+260 断面),地基加固后拱顶的安全系数仅为 2.01,未达到结构安全的基本要求(2.40)。由于纤维布在提高拱顶安全性能方面的显著优越性,在整治复合病害时应优先考虑纤维布加固。加固后拱顶的安全系数提升至 8.87,显著增强了隧道结构的稳定性。

参考文献:

[1] 贺志勇,钟宏武,陈振华.带裂缝隧道衬砌的安全评价及有限元分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(增刊2):69-77.

[2] 张晓东,曹忠良.某公路隧道衬砌裂缝成因分析及其治理[J].公路,2019,64(8):246-249.

[3] 李博,金建伟,葛宏亮.公路隧道二衬加固安全系数分析[J].公路,2021,66(3):383-386.

[4] 乔雄,杨鑫.黄土隧道二次衬砌开裂原因及防治措施现状与发展[J].隧道建设(中英文),2023,43(10):1657-1676.

[5] 李治国,张玉军.衬砌开裂隧道的稳定性分析及治理技术[J].现代隧道技术,2004(1):26-31,40.

[6] 石继训,冉利刚.隧道二次衬砌开裂原因分析及加固方案比选[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1):575-580.

[7] 唐超,刘春,冯笑雨.既有隧道衬砌裂缝扩展机理现状分析[J].四川建筑,2022,42(6):112-114.

[8] 杨川福,陈斌.黄土隧道仰拱填充层致裂原因及处治措施研究[J].公路交通科技,2023,40(4):151-159.

[9] 王志杰,徐海岩,周平,等.高速公路隧道衬砌结构病害整治技术研究[J].铁道标准设计,2017,61(10):125-132.

[10] 蒋春红.建筑工程检测中钢筋保护层检测技术的应用要点[J].房地产世界,2024(14):155-157.