

# 一种无中隔墙连拱隧道衬砌病害分析及整治技术

唐生炳<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 王康云<sup>2</sup>, 刘伟龙<sup>3</sup>

(1. 云南建设基础设施投资股份有限公司, 云南昆明 650500; 2. 云南丽香高速公路投资开发有限公司, 云南昆明 650217; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 云南香丽高速开达古隧道采用一种无中隔墙连拱隧道设计, 在施工期间先行洞衬砌出现大量宽度不等、形态各异的裂缝。针对隧道衬砌裂损病害, 通过调查分析手段统计了隧道衬砌裂缝空间分布、宽度、形态、类型随施工过程的变化规律, 分析了衬砌病害产生机理及原因, 提出了相应的整治技术。该工程在此研究基础上成功解决隧道衬砌病害, 可为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 连拱隧道; 衬砌裂损; 原因分析; 整治技术

**中图分类号:** U459.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 06—0141—04

连拱隧道因其线间距较近、引线占地面积小, 在特殊地质及地形条件、线桥隧衔接处大量使用, 但其结构较为特殊, 受力更为复杂, 在运营和在建期间易产生衬砌裂损等病害<sup>[1-2]</sup>, 危及隧道运营和施工安全。研究表明, 不均匀沉降、偏压荷载、不合理的施工工序是连拱隧道衬砌开裂的主要成因<sup>[3-5]</sup>, 应根据开裂的类型、产生的部位及严重程度给出针对性的处治措施<sup>[6]</sup>。本研究以开达古隧道无中墙连拱段为工程背景, 基于对现场施工过程中裂缝分布规律的现场调研, 探讨了衬砌裂损的主要原因, 提出了相应的整治方法。

## 1 工程概况

开达古隧道位于三江并流核心区, 以构造侵蚀高山地貌为主, 隧道自小里程至大里程为无中导连拱~小净距~分离式隧道, 平面线型呈“Y”型分岔形状; 隧道右线里程为 YK80+049.73—YK83+195, 全长 3145.27 m; 隧道左线里程为 ZK80+060—ZK83+205, 全长 3145 m。其中无中导连拱左幅自进口至 ZK80+460, 右幅自进口

至 YK80+449.73, 该段洞身围岩主要为强、中风化板岩和强、中风化玄武岩, 岩体破碎、呈片状, 节理裂隙发育, 连拱段支护结构采用复合式衬砌(图 1), 左右幅隧道先后按台阶法从小里程往大里程方向掘进。

## 2 施工过程中衬砌裂损调查分析

### 2.1 裂损调查情况

开达古隧道在左幅先行洞进口正常施工过程中, 于 2018 年 7 月 26 日在监控量测过程中发现先行洞 ZK80+373—ZK80+403 衬砌中墙底部出现纵向裂缝(图 2(a)), 而后该段衬砌出现混凝土剥落、钢筋弯曲现象; 2018 年 8 月 14 日, 先行洞 ZK80+403—ZK80+420 段衬砌右侧出现纵向裂缝, 其中 ZK80+410 里程人行横通道处裂缝呈网状分布, 且拱顶出现掉块现象; 2018 年 8 月 25 日至 9 月 10 日, 先行洞 ZK80+427.2—ZK80+469 段再次出现裂缝并持续向大里程方向发展, 裂缝呈纵向及网状分布, 其中 ZK80+445—ZK80+455 段中墙顶部混凝土显著开裂, 向外突出, 产生严重掉块(图

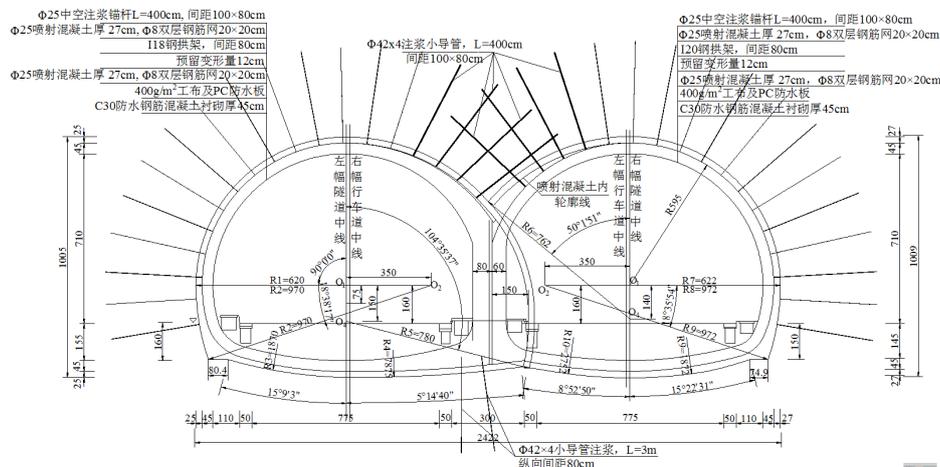


图 1 无中导连拱段衬砌断面图(单位: cm)



图2 开达古隧道左幅先行洞衬砌受损情况

2(b)；2018年11月2日至2018年12月25日，先行洞 ZK80+481—ZK80+498 段衬砌右侧再次出现裂缝，同时 ZK80+481—ZK80+498 段中墙混凝土剥落掉块、钢筋外露，护拱弯曲变形。

## 2.2 衬砌裂损规律统计及分析

(1) 裂缝空间分布规律。先行洞衬砌裂缝展布如图3所示，从裂缝分布范围来看，裂缝主要位于中墙底部往上1m至右拱腰的范围。从裂缝形态来看，以纵向裂缝为主，在纵向裂缝之间发育有少量环向裂缝，其中右拱腰和中墙底部纵向裂缝连续发育贯通整段衬砌，中墙顶部纵向裂缝和环向裂缝断续分布。从裂缝发育严重程度来看，纵向裂缝的长度及宽度远大于环向裂缝，而三组纵向裂缝中，中墙顶部纵向裂缝破损最为严重，其伴随着混凝土大面积剥落掉块及二衬钢筋弯曲。

(2) 裂缝宽度变化规律。现场在裂缝发现后便采用表贴式混凝土应变计对裂缝宽度进行监测，并在9月4日对所有裂缝进行加密观测，共布置26个测点，测量结果见表1。可以看出，在监测时间段内裂缝宽度持续扩展，具有累计扩展值大、扩展速率快的特点，裂缝宽度累计扩展值最大为54.08 mm，最大扩展速率为10.78 mm·d<sup>-1</sup>，均发生在ZK80+438断面。

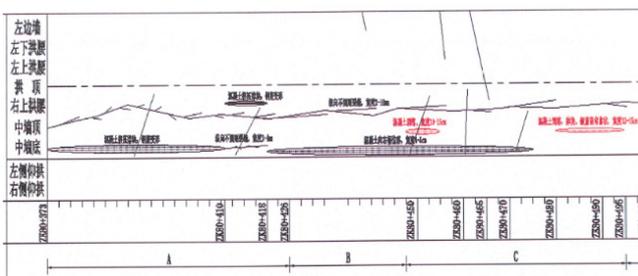


图3 开达古隧道先行洞进口裂缝展布图

表1 开达古隧道先行洞进口衬砌裂缝宽度监测情况

序号	里程桩号	监测时间	监测点数	累计扩展最大处里程号	累计扩展最大值/mm	平均扩展速率/mm·d <sup>-1</sup>	扩展速率大值/mm·d <sup>-1</sup>
1	ZK80+373—ZK80+399	2018年7月31日—8月23日	5	ZK80+379	-12.52	-1.39	-6.39
2	ZK80+409—ZK80+440	2018年8月26日—9月5日	6	ZK80+438	-46.75	-4.68	-10.78
3	ZK80+377—ZK80+480	2018年9月4日—9月11日	15	ZK80+438	-54.08	-3.18	-10.78

(3) 先行洞裂缝随后行洞施工扰动变化规律。通过对比隧道左幅先行洞裂缝发育过程与右幅后行洞施工过程可以看出，后行洞上台阶施工至YK80+397断面时，先行洞衬砌对应的ZK80+407断面（隧道左右幅里程相差10m）后方30m的范围内右拱腰出现纵向张拉裂缝，后行洞下台阶施工至YK80+383.7时，先行洞衬砌对应断面前后20m范围内中墙底部出现纵向压裂缝，以及混凝土掉块、钢筋弯曲变形现象，表明先行洞衬砌裂损与后行洞施工扰动密切相关，后行洞上台阶开挖后会引引起先行洞拱部右侧围岩受到二次扰动，围岩出现卸荷变形产生较大松散压力，导致先行洞右拱腰处应力集中而产生张拉裂缝。后行洞下台阶开挖后，先行洞中墙失去右侧围岩约束，产生向后行洞侧位移，中墙底部受压出现明显纵向压裂缝和混凝土挤压掉块现象。

## 3 衬砌裂损原因分析

(1) 开达古隧道连拱开裂段掌子面主要为强风化板岩和强风化玄武岩，其中强风化板岩约占掌子面的三分之二，岩体呈褐灰色，岩芯呈角砾状、碎石状结构，强风化玄武岩约占掌子面的三分之一，岩体为灰白色，呈片状结构，地下水呈股状流出，岩石遇水软化严重，围岩自稳能力弱、完整性差，施工扰动后围岩易破碎溜塌，形成的松散压力直接作用在支护结构上。

(2) 连拱隧道施工工序复杂，左幅先行洞开挖后围岩与支护结构相互作用处于稳定状态，在隧道右幅后行洞开挖后，先行洞与后行洞相交处围岩受到二次扰动发生应力重分布，加剧围岩的卸荷松动变形，作用在支护结构上的松散压力增大，同时由于后行洞围岩开挖，先行洞中墙失去右侧围岩的约束抗力，导致支护结构受力后在右拱腰出现张裂，而在中墙位置发生压溃。

## 4 衬砌裂损整治方法

根据施工现场衬砌裂损原因、严重程度及围岩情况，提出中墙严重破坏段进行拆除重置，一般段进行原位加固，其他不影响结构安全的轻微裂缝进行表面封闭的处治方案。

### 4.1 拆除重置

对中墙破坏严重段落（ZK80+438—ZK80+462、ZK80+474—ZK80+498），先支撑、再加固后进行拆除重置，施工步序及操作要点如下。

(1) 采用钢拱架护拱+木刹+门型钢管柱等组合

型式进行临时支撑，竖向支撑应靠近中墙侧设置。临时支撑施作范围包括先行洞拆除范围及后行洞相应段落，并应超出每次拆除范围前后各 10 m 左右。

(2) 如图 4 所示，左右幅隧道拱部施作  $\Phi 51$  自进式锚杆进行径向注浆加固，长度为 9 m，间距为  $100 \times 80$  cm；中墙底部设置树根桩恢复连接及改善墙脚受力，树根桩采用  $\Phi 89 \times 6$  mm 钢花管，长 4.5 m，间距  $100 \times 100$  cm，梅花形布置。

(3) 逐段拆除先行洞中墙侧临时支撑，留出拆除中墙的施工空间，并增加左侧拱顶及拱腰的竖向支撑。

(4) 拆除破坏段中墙，单次不应大于 0.8 m，并对初支的完整性进行检查，侵限部分进行换拱，当换拱段初支变形稳定后，重新铺设排水系统。

(5) 浇筑中墙二次衬砌，单次浇筑长度为 3 m，二衬采用 C40 钢筋混凝土，环向主筋为  $\Phi 25@200$  mm。中墙混凝土达到设计强度后，中墙粘贴热轧镀锌钢带，其规格为  $6 \text{ mm} \times 250 \text{ m}$ ，纵向间距 50 cm，并采用  $\Phi 25$  精轧螺纹钢对拉锚杆加固，间距  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  (图 5)。

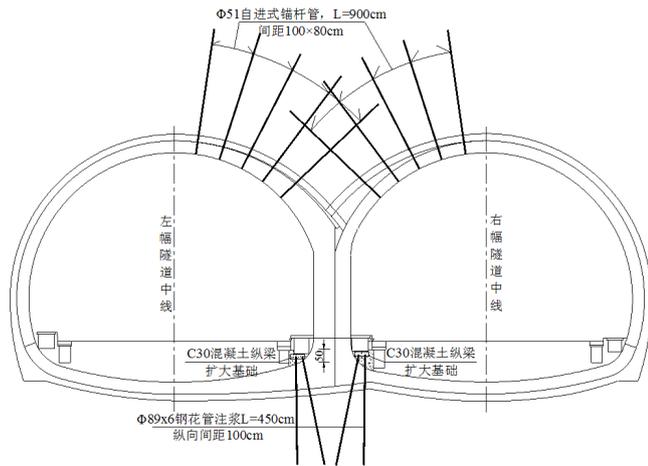


图 4 中墙严重破坏段注浆加固示意图

#### 4.2 原位加固

对于一般病害段落 (ZK80+350—ZK80+438、ZK80+462—ZK80+474、ZK80+498—ZK80+540)，采用先行洞拱部施作自进式锚杆径向注浆加固，中墙脚设置树根桩恢复连接及改善墙脚受力，左右幅隧道中墙粘贴热轧镀锌钢带并使用对拉锚杆连接的原位加固方式进行补强，并对裂缝进行封闭。

#### 4.3 表面封闭

对其他轻微裂缝 (ZK80+350—ZK80+540)，且不

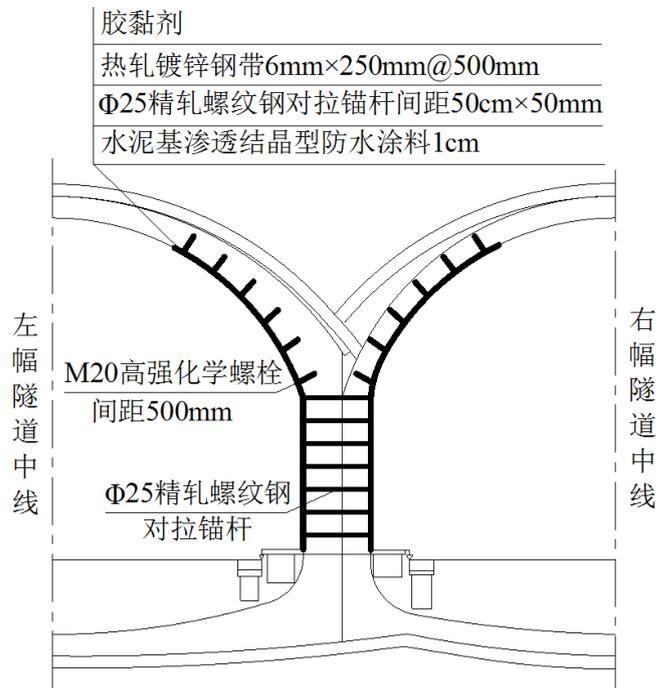


图 5 中墙对拉锚杆加固示意图

影响结构安全，根据裂缝宽度进行封闭灌浆修补加固的方法进行处治。

(1) 对于宽度小于 0.2 mm 的裂缝，采用改性环氧树脂砂浆表面封闭法处治。

(2) 对于宽度介于 0.2 mm—0.5 mm 之间的裂缝，采用改性环氧树脂胶低压注浆法处治。

(3) 对于宽度大于 0.5 mm 的裂缝，采用改性环氧树脂砂浆凿槽填充法处治。

## 5 结论

(1) 连拱隧道开裂段围岩破碎、节理裂隙发育，层间结合差。隧道施工过程中，先行洞二衬先行施作，后行洞施工频繁扰动围岩，加剧了围岩卸荷松动破坏，同时先行洞靠近后行洞侧结构失去围岩约束抗力，导致衬砌结构受力后出现张裂、压溃等破坏，裂缝主要以纵向裂缝形态集中分布在中墙底部至右拱腰的范围内。

(2) 采用中墙严重破坏段进行拆除重置，一般段进行原位加固，其他不影响结构安全的轻微裂缝进行表面封闭的病害处治方案，保证了隧道的稳定性与耐久性。

参考文献：

[1] 刘庭金，朱合华，夏才初，等. 云南省连拱隧道衬砌开裂和渗漏水调查结果及分析 [J]. 中国公路学报，2004，

# 基于荷载试验的自锚式悬索桥有限元模型修正

欧代军<sup>1</sup>, 李传友<sup>2</sup>

(1. 浙江鼎盛交通建设有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 利用 Midas/civil 建立叠合梁自锚式悬索桥有限元模型, 将该桥前 6 阶自振频率作为状态变量, 选择合理的目标函数进行设计参数灵敏度分析, 筛选出主梁弹模、主缆弹模、主梁密度、桥面铺装四种灵敏度较高的设计参数并进行修改, 使得调整后的有限元模型计算结果与现场脉动测试结果偏差在 10% 以内。同时开展该桥静载试验方案设计与测试, 以主梁挠度值为分析对象, 试验实测值与修正后模型计算值误差总体在 10% 以内, 表明修正后的模型更加真实反应结构真实受力状态, 验证了基于动力测试结果修正后的有限元模型的可靠性。

**关键词:** 自锚式悬索桥; 动载试验; 静载试验; 模型修正

**中图分类号:** U445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 06—0144—03

目前, 结构有限元模型修正已经成为许多学者研究的热点。外国学者 Snanyi<sup>[1]</sup> 等基于静载试验对某钢结构模型进行修正; 任伟新<sup>[2]</sup> 采用响应面法对桥梁结构进行有限元模型修正, 该方法可以显著提高修正效率; 邓苗毅等<sup>[3]</sup> 基于静载试验对五跨连续箱梁桥进行有限元模型修正, 修正后的模型更真实反应桥梁结构受力状态; 方志等<sup>[4]</sup> 基于静动载试验对斜拉桥有限元模型修正。本文基于动载试验测前 6 阶自振频率, 采取灵敏度分析对有限元模型修正, 同时静载试验结果与修正后的模型相吻合, 表明该方法的正确性, 可以为该桥型今后运营状态评估提供参考<sup>[5]</sup>。

## 1 脉动试验方案

某自锚式悬索桥跨径布置为 (30+60+150+60+30) m, 主梁采用叠合梁, 主梁悬吊部分钢梁全长 270m, 桥面板全宽为 25.5m。两根大缆间距 28.5m, 矢跨比为 1/5.5, 主缆采用预制平行钢丝索股, 每根主缆由 19 股索股组成, 每股由 127 根直径 5mm 镀锌高强钢丝组成。

全桥吊索共 46 对, 92 根吊索。主塔采用门型, 塔顶处主缆 IP 点高程为 45.614m, 主塔位于水中, 均采用分离式基础。

脉动试验选择夜间安静、外界环境干扰小的条件下进行, 测试断面及测点布置见图 1, 脉动试验采用无线模态测试系统, 模态分析得到桥梁结构的自振特性参数。

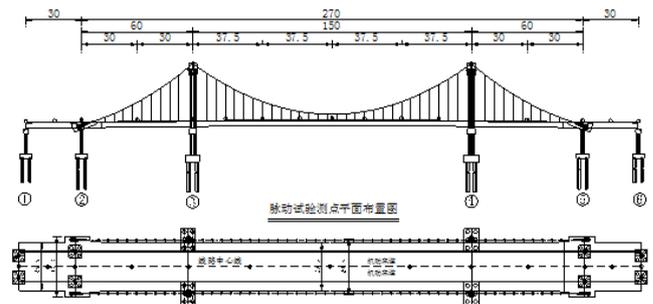


图 1 脉动试验测试断面与测点布置 (单位: m)

## 2 自锚式悬索桥有限元模型的建立

### 2.1 初始有限元模型

采用 Midas/Civil 建立某自锚式悬索桥有限元模型,

17(02):65—68.

[2] 秦臻. 连拱隧道衬砌裂缝现场调查与数值模拟分析 [J]. 中外公路, 2016, 36(06): 199—203.

[3] 张永兴, 阳军生, 晏莉. 某浅埋偏压连拱隧道二衬开裂原因分析 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2007, 4(03):44—48.

[4] 王健宏, 陈维, 沈东, 等. 一种无中导洞连拱隧道衬砌开裂原因分析及结构优化 [J]. 公路交通科技, 2019, 36(06): 79—

85, 111.

[5] 王建秀, 朱合华, 唐益群, 等. 双连拱公路隧道裂缝成因及防治措施 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(02): 195—202.

[6] 苏生瑞, 朱合华, 李国峰. 连拱隧道衬砌病害及其处治 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003(S1): 2510—2515.