

文章编号:1672-3961(2025)05-0165-14

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.256

厚度缺陷对初支结构安全性的影响及风险评价

刘启明¹, 王文辉¹, 潘英楠¹, 高要辉², 郑程程³, 贺鹏^{3*}

(1.浙江磐安抽水蓄能有限公司, 浙江 金华 322300; 2.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014;
3.山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为探究混凝土厚度缺陷对初支结构造成的损害,以实际工程为背景,考虑厚度缺陷发生的具体位置与范围,对其在隧道中的分布特征进行统计。运用有限元数值模拟,对不同厚度缺陷类型下初支结构的力学特征进行深入分析;采用 CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation) 权重分析法,对影响初支结构安全性的缺陷跨度与位置等风险指标进行综合评价,确定了各指标对结构安全性的影响程度。研究表明,缺陷出现在拱顶位置或缺陷跨度大于 25° 时,对初支结构安全性影响最大。研究结果可为同类隧道的病害防治提供借鉴和参考。

关键词:初支结构;厚度缺陷;现场检测;数值模拟;权重分析

中图分类号:TU921 文献标志码:A

引用格式:刘启明,王文辉,潘英楠,等.厚度缺陷对初支结构安全性的影响及风险评价[J].山东大学学报(工学版),2025,55(5):165-178.

LIU Qiming, WANG Wenhui, PAN Yingnan, et al. Influence of thickness defects on the stability of the primary support structure and risk assessment[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5):165-178.

Influence of thickness defects on the stability of the primary support structure and risk assessment

LIU Qiming¹, WANG Wenhui¹, PAN Yingnan¹, GAO Yaohui², ZHENG Chengcheng³, HE Peng^{3*}

(1. Zhejiang Pan'an Pumped Storage Co., Ltd., Jinhua 322300, Zhejiang, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 3. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: To investigate the damage that thickness defects caused to the initial support structure, this study adopted an actual engineering background, considered the specific locations and extents of thickness defects, and conducted a statistical analysis of their distribution characteristics within the tunnel. Finite element numerical simulation was employed to deeply analyze the mechanical characteristics of the initial support structure under different types of thickness defects. Additionally, the CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation) method was used to comprehensively evaluate various risk indicators (such as the span and location of defects) affecting the safety of the initial support structure, determining the degree of influence of each indicator on structural safety. Research indicated that either located at the vault position or spanning more than 25 degrees exerted the most significant impact on the safety of the primary support structure. The research results could provide references and insights for the prevention and control of similar tunnel diseases.

Keywords: primary support structure; thickness defects; field inspection; numerical simulation; weight analysis

收稿日期:2024-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51909150);中国博士后科学基金资助项目(2022M711962);国网新源集团有限公司科技资助项目(SGXJKJ-2021-141)

第一作者简介:刘启明(1987—),男,湖北鄂州人,高级工程师,主要研究方向为水利水电开发与应用。E-mail:429477163@qq.com

*通信作者简介:贺鹏(1988—),男,山东莱芜人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail:hepenghank@163.com

0 引言

随着我国经济建设的蓬勃发展,对高效、便捷的交通网络体系的需求日益凸显。鉴于我国地域辽阔、地形复杂多变,尤其是山川密布的地理特征,对交通设施建设构成了显著挑战。隧道工程在设计、施工乃至运营阶段,均面临着复杂的技术挑战与潜在风险,其中衬砌厚度不足作为一种常见病害,严重威胁着隧道结构的整体安全与稳定^[1-4]。

针对初支衬砌厚度不足这一缺陷,现有研究涵盖了室内模型试验、理论推导与数值模拟等多个维度。文献[5]借助物理模型深入探讨了连拱隧道中初支厚度不足对支护性能的影响机制;文献[6]通过不同条件下的模型试验,进一步揭示了初支厚度对支护结构安全性的影响。在理论层面,文献[7]构建了考虑地下结构特性的支护性能分析模型,文献[8]提出的直接弹性抗力法为初期支护承载机制提供了新的视角。在数值模拟方面,FLAC^[9-10]与MIDAS^[11-13]等先进工具广泛应用于隧道开挖与支护过程的具体分析中。

初期支护在隧道施工期间承担着抵御围岩压力的主要角色,因此,准确评估其性能状态至关重要。地质雷达作为非破坏性检测技术,在隧道工程质量监控中发挥着不可替代的作用^[14-15]。此外,为全面管控隧道病害引发的安全风险,需将风险因素量化为具体指标,并依托层次分析法^[16]、模糊综合评价法^[17]、贝叶斯网络^[18-19]、灰色关联理论^[20]等多元分析方法,构建科学的风险评估体系,实现对隧道安全状况的精准判断与有效防控^[21-23]。

既有研究中,往往只对单一拱顶或其他位置进行分析,对衬砌厚度缺陷所处的多种位置及范围鲜有涉及。鉴于此背景,聚焦隧道工程在初支厚度不足条件下的力学行为,以某实际项目为背景,采用有限元数值模拟技术,深入探讨不同工况下初期支护的性能变化,并运用CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)权重分析法,对影响隧道初支厚度的各项风险因素进行细致而全面的权重评估。本研究不仅丰富了隧道工程理论,更为实际工程的安全施工与运维管理提供科学依据和技术支撑。

1 隧道初支厚度缺陷的分布特征

1.1 混凝土厚度检测方法

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)作为

土木水利行业中工程质量检测的主要方法,贯穿隧道的施工、验收和养护全过程,是保证隧道建设与运营质量的重要手段。其方法是利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式由地面通过发射天线送入介质内部,经目标体的反射后回到表面,由接收天线接收回波信号。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度以及波形所通过的介质的电性性质随物体界面几何形态而变化,根据接收反射回波的走时、幅度及相位等信息,对结构内部进行研判。

在对初支混凝土厚度进行检测时,通常选取拱顶、左右拱肩以及左右边墙共5条测线,如图1所示。

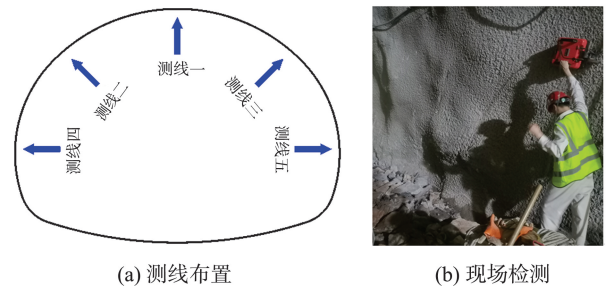


图1 衬砌质量检测

Fig.1 Quality inspection of lining

现场检测获取数据后,通过零偏校正、数据滤波、道间平均及数据叠加等步骤,得到所需的解译图像。对这些图像进行判定,即可分辨出在该测线上初期支护的厚度是否满足要求,同时还能判断出钢拱架等支护结构的位置,如图2所示。

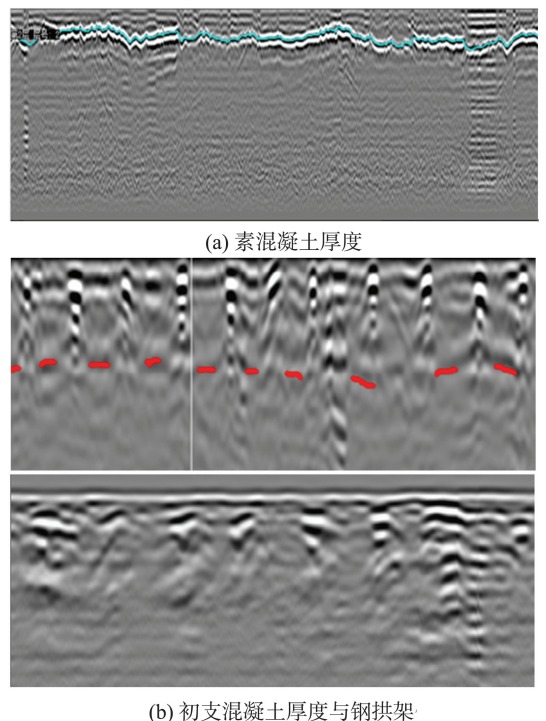


图2 典型初支检测的图像判别

Fig.2 Image discrimination for typical primary lining inspection

1.2 初支厚度不足分布特征

浦清高速位于广西壮族自治区,其沿线某隧道为双向四车道右侧偏压隧道,如图 3 所示。

隧道围岩分级采用现行规定的围岩质量指标 BQ 值判别法^[24]。隧道左线围岩级别长度所占比例情况为:V 级围岩段长度总计约为 963 m,占隧道总长的 35.2%;IV 级围岩段占隧道总长的 55.3%;III 级围岩段占隧道总长的 9.5%。隧道右线围岩级别长度所占比例情况为:V 级围岩段长约 983 m,占隧道总长的 36.5%;IV 级围岩段占隧道总长的 53.9%;III 级围岩段占隧道总长的 9.6%。各级围岩物理力学指标如表 1 所示。



图 3 隧道现场情况
Fig.3 On-site conditions of the tunnel

表 1 各级围岩物理力学指标标准值

Table 1 Standard values of physical and mechanical indexes of surrounding rock at all levels

围岩级别	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性抗力系数/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	变形模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	计算摩擦角/ ($^{\circ}$)
III	2 300	500	6.0	0.25	39	0.70	60
IV	2 000	200	1.3	0.30	27	0.20	50
V	1 700	100	1.0	0.35	20	0.05	40

在实际隧道工程中,初支厚度缺陷存在多种形式。结合相关研究及现场调研,选取初支厚度缺陷沿洞周出现的位置 P 及跨度 θ (缺陷处左右两侧端点与隧道轴心连线的夹角)两种指标作为研究对

象。根据现场测量的初支厚度数据,收集了该隧道左、右线近 1 000 m 的初支厚度缺陷情况,如表 2 所示。

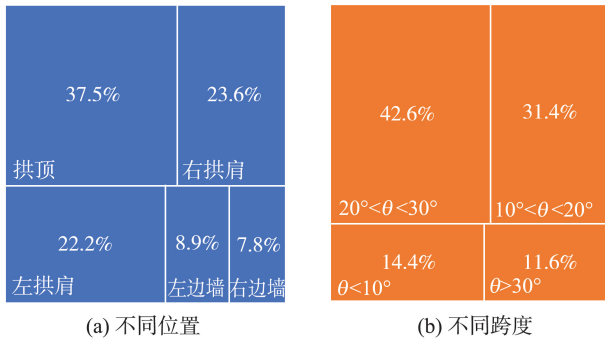
表 2 隧道左右线初支厚度不足的现场实测分布情况

Table 2 Field-measured distribution of insufficient initial support thickness in the tunnel's left and right lines

位置与跨度	拱顶	左拱肩	右拱肩	左边墙	右边墙	$\theta \leq 10^{\circ}$	$10^{\circ} < \theta \leq 20^{\circ}$	$20^{\circ} < \theta \leq 30^{\circ}$	$\theta > 30^{\circ}$
数量(处)	1 178	697	742	279	246	564	1 235	1 673	457

初支厚度缺陷在不同情况下的占比情况如图 4 所示。

例达到 74%。



(a) 不同位置 (b) 不同跨度

图 4 不同条件下初支厚度缺陷所占比例

Fig.4 Statistical results of the initial support thickness issues under different defect forms

由图 4 可知,在拱顶处,厚度缺陷出现的概率远高于其他位置,出现在边墙处的概率最低。这是由于在喷射混凝土的过程中,混凝土受其自身重力的影响,出现轻微的下滑现象。同时,缺陷在 $\theta < 10^{\circ}$ 和 $\theta > 30^{\circ}$ 时所占比例较小,为 26%; θ 在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时的比

2 不同厚度缺陷对初支结构的影响

2.1 有限元数值模型

采用软化模量法建立数值模型,即模拟衬砌施工前先降低开挖单元模量,并依次进行应力释放。首先,在地应力平衡分析阶段将衬砌单元移除;其次,衰减模量分析阶段中将开挖单元的弹性模量降低,以此假设开挖单元已移除;然后,在激活衬砌分析阶段选用无应变激活方式重新将衬砌单元激活,这一激活方式会将单元恢复到移除前的初始位置,无需考虑单元节点的位置变化;最后,在开挖分析阶段中将土体完全移除。

2.1.1 基本假定

实际隧道工程中所选用的材料及结构构造较为复杂,因此需对模型进行合理假设以简化计算,假设如下。

(1)假设围岩及支护结构是均质、连续且各向同性的;

(2)由于隧址区地表水及地下水不发育,因此假设隧道不受水力条件影响;

(3)由于在实际隧道中初期支护与二次衬砌是分开进行的,且在二次衬砌施作之前主要是由初期支护承担围岩荷载,因此在截取一段隧道进行模拟时不考虑二衬对模型的影响;

(4)在实际隧道中初支结构包含混凝土、钢拱架以及锚杆等多种部分,因此假设混凝土、钢拱架等部分均匀分布在初支结构中,并采用等效加强法进行计算;

(5)根据圣维南原理,模型左右两侧各取约4倍隧道直径,用以避免边界效应。

2.1.2 参数选取

依托隧道尺寸运用 ABAQUS 进行三维建模,该隧道的断面设计及所建立的数值模型如图 5 所示。隧道为三心圆曲墙隧道,轮廓净高为 8.85 m,净宽为 12.33 m, V_a 岩体处初支混凝土的设计厚度为 27 cm。本研究所建模型尺寸为 $100\text{ m} \times 10\text{ m} \times 80\text{ m}$,为更好地模拟隧道工程中围岩和衬砌结构的力学行为,选取八节点线性六面体结构单元 C3D8R 划分网格。同时,在远离隧道开挖区域,网格尺寸

适当增大,以减少计算量;而在隧道衬砌和开挖轮廓附近,采用较小的网格尺寸,使模型能够更准确地模拟这些关键部位的力学响应。左右边界施加 X 方向的约束,前后边界施加 Z 方向的约束,下边界施加 Y 方向的约束,在计算过程中围岩与混凝土均采用实体单元线弹性模型。围岩力学参数以隧址区现场实际岩体性质为准,现场所用混凝土为 C30 素混凝土,具体力学参数如表 3 所示。在模拟过程中,为提升模拟结果的准确性,将钢拱架的刚度按等效原则折算到混凝土中,通过提高混凝土的弹性模量实现等效加强。

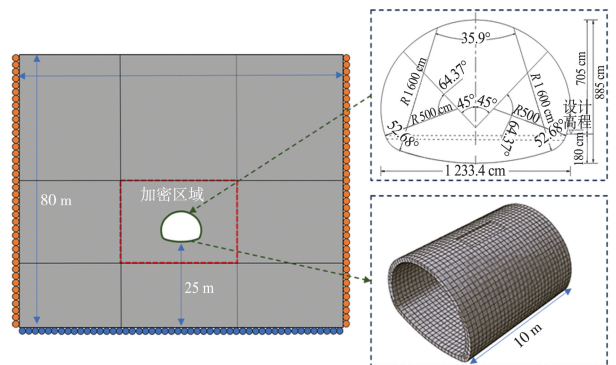


图 5 隧道断面及数值模型示意图
Fig.5 Schematic diagram of tunnel section and numerical model

表 3 围岩与混凝土的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and concrete

介质	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
围岩	2	0.39	27	0.20	2 000
混凝土(折算后)	27	0.20			2 700

2.2 无厚度缺陷

为与其他不同条件下的初支厚度缺陷情况进行对比,设置无厚度缺陷的对照组进行模拟。无厚

度缺陷时初支结构的压应力 S 、水平位移 U_1 及竖向位移 U_2 分布云图如图 6 所示。

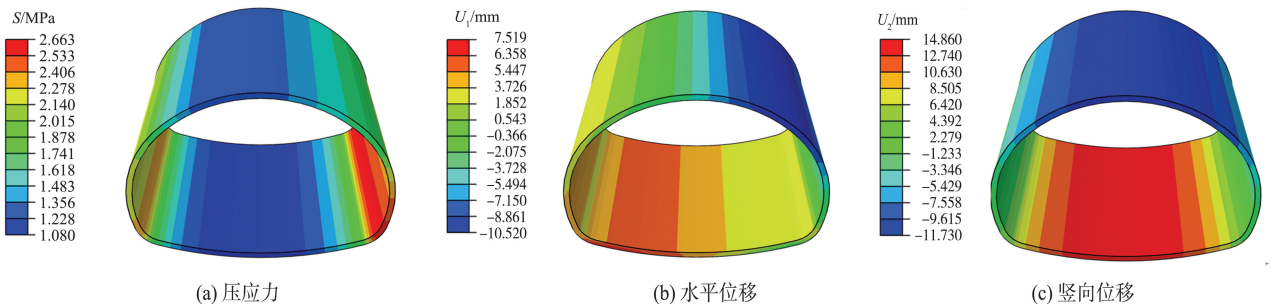


图 6 无厚度缺陷下的初支结构
Fig.6 Primary support structure without thickness defects

由图 6 可知,初支结构在隧道中整体受压应力作用。其中,在拱顶及拱底处所受应力较小,在拱脚处受力较大。这是因为三心圆隧道中拱脚处圆弧的半径更小且曲率更大,更容易产生应力集中。

在图 6(b)中,水平位移多发生在拱肩与边墙处。初支在右拱肩处产生水平向左位移约 9.7 mm。在左拱肩处产生水平向右位移约 1.1 mm,总收敛变形约为 10.8 mm;在右边墙处产生水平向左位移约

1.1 mm,在左边墙处产生水平向右位移约4.6 mm,总收敛变形约为 5.7 mm。可以发现,相比于左拱肩,右拱肩处产生水平向左且较大的位移。这主要是受围岩偏压荷载的影响,使得初支结构在右侧所承受的荷载较大。同时,从图6(c)可以看出,初支结构在拱顶及拱底处的竖向位移较大,分别为 10.6、13.7 mm;拱肩处次之;在边墙处的竖向位移较小,仅为 2.0 mm 左右。造成初支结构在拱顶及拱底的竖向位移较大的主要原因是拱顶承压以及拱底回弹。

从模型中提取出各监测点的内力如图 7 所示。

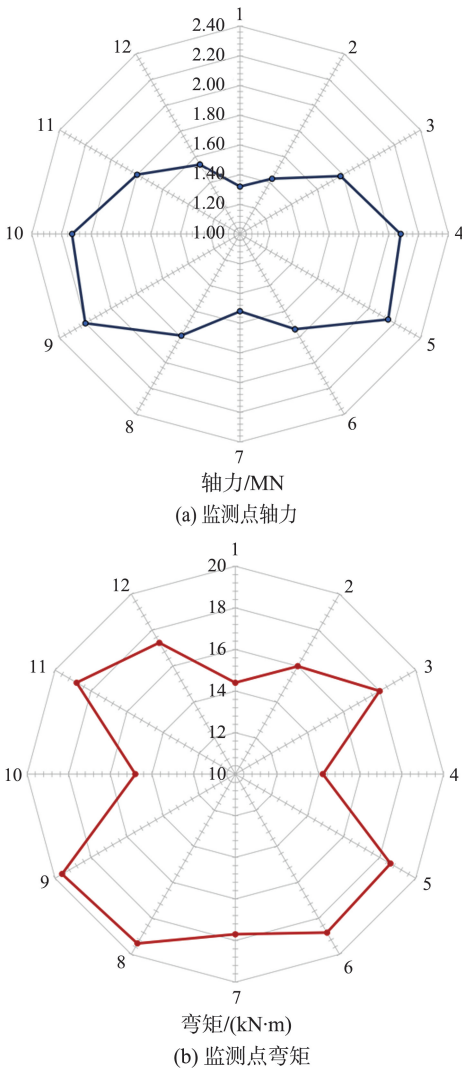


图 7 各监测点的内力

Fig.7 Internal forces at various monitoring points

图 7 中,数字 1~12 代表初支结构上所设监测点,其在雷达图中所处位置代表在隧洞轮廓中所处位置。可以看出,在代表拱顶的 1 号位置处结构的轴力最小,在代表拱脚的 5、9 号位置处结构的轴力最大;从拱顶到拱脚再到拱底,轴力由小变大再变小。弯矩则是在代表边墙的 4、10 号位置处最小,5、

9 号位置处最大。受偏压荷载的影响,初支结构左右两侧各点的轴力和弯矩也不尽相同。在得到各点的内力之后,将其代入安全系数公式即可求出各点的安全系数。

各监测点的安全系数如图 8 所示。

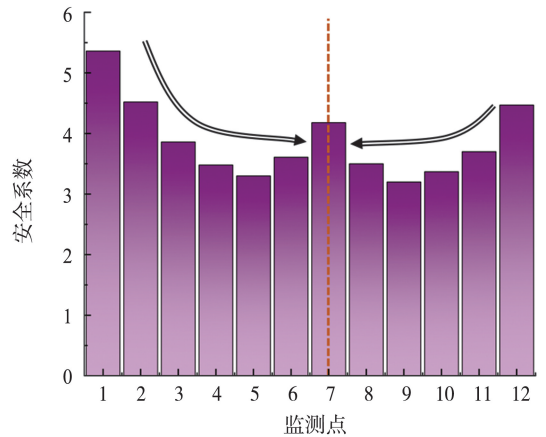


图 8 各监测点安全系数

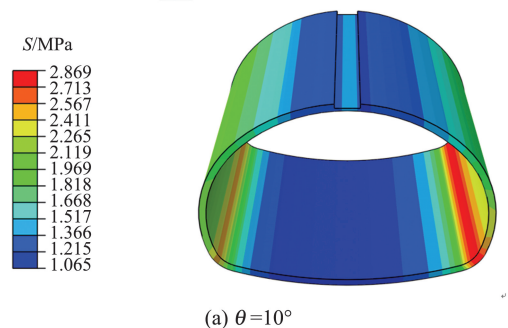
Fig.8 Safety factors at various monitoring points

由图 8 可知,在代表拱顶的 1 号位置的安全系数最大,代表拱脚的 5、9 号位置的安全系数最小。即从拱顶到拱脚再到拱底,安全系数由大变小再变大。这与拱脚处应力集中现象相符。此外,右侧初支结构整体的安全系数小于左侧初支结构整体的安全系数,可能是受到偏压荷载的影响,使得右侧初支结构承受的荷载较大,反映到初支结构上即为右侧更容易发生破坏变形。

2.3 不同厚度缺陷跨度 θ

根据 1.2 节中的统计结果可以发现,该隧道初期支护厚度的不足跨度主要为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。因此,在进行数值模拟计算时,将厚度缺陷的跨度从 10° 开始,每隔 5° 设置一组模拟,观察模拟结果下初支的受力、变形及安全系数,为后续施工提供依据。

当模拟条件为 V_a 级围岩、缺陷厚度为 20 cm 且发生在拱顶处时,不同 θ 对应的压应力云图如图 9 所示。



(a) $\theta=10^\circ$

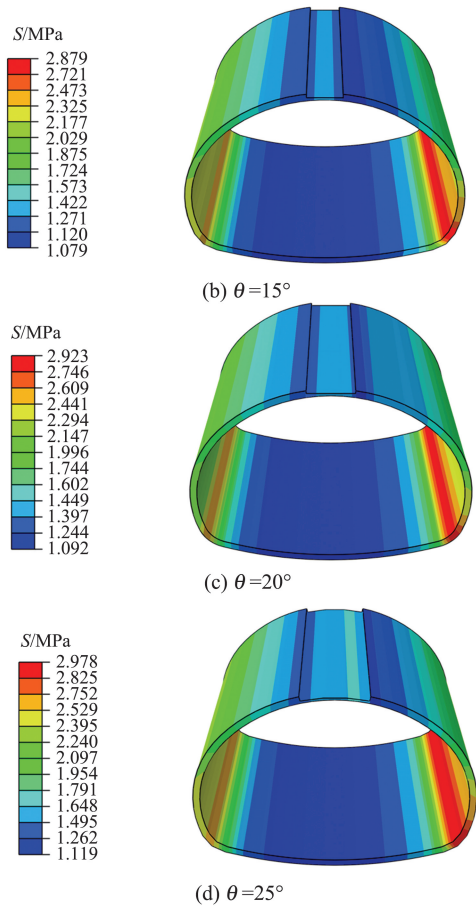


图9 不同缺陷跨度下初支结构的压应力云图
Fig.9 Compressive stress nephogram of initially supported structure under different thinning ranges

由图9可知,在不同的 θ 下,与无厚度缺陷时相比,在拱顶缺陷处的压应力明显变大。这是由于拱顶处初支厚度的不足使得该处成为整个初支结构的薄弱点,在薄弱点处会产生应力集中现象,并且随着 θ 的逐渐扩大,拱顶所承受的压应力也在逐渐增大,从 θ 为 10° 时的1.43 MPa到 θ 为 25° 时的1.71 MPa。这是由于 θ 增大导致隧道初支结构的薄弱处与围岩的接触面积逐渐增大,使其最终承受的围岩压力逐渐增大。除此之外,受偏压荷载影响,初支结构右侧承受的压应力普遍大于左侧承受的压应力,在模拟结果中主要体现为拱顶缺陷位置以及拱脚处的应力较为集中。从图9可以看出,在拱顶处偏右侧的应力更大,在右拱脚处的色条为红色,而在左拱脚的色条为橙色。

不同缺陷跨度下初支结构的位移云图如图10所示。图10中 U_1 为水平位移, U_2 为竖向位移。随着 θ 的扩大,拱顶到右边墙之间向左的收敛位移逐渐减少,而拱顶到左边墙之间向左的位移逐渐增加。这是由于拱顶厚度不足使得一部分围岩荷载通过缺陷处向两侧传递,在右侧产生的右位移逐渐增加,与隧道偏压所造成的左位移相叠加,最终导致右侧向左的位移逐渐减小;而在左侧产生的左位移逐渐增加,与原本的左位移叠加,最终导致左侧的左位移依旧逐渐增加。

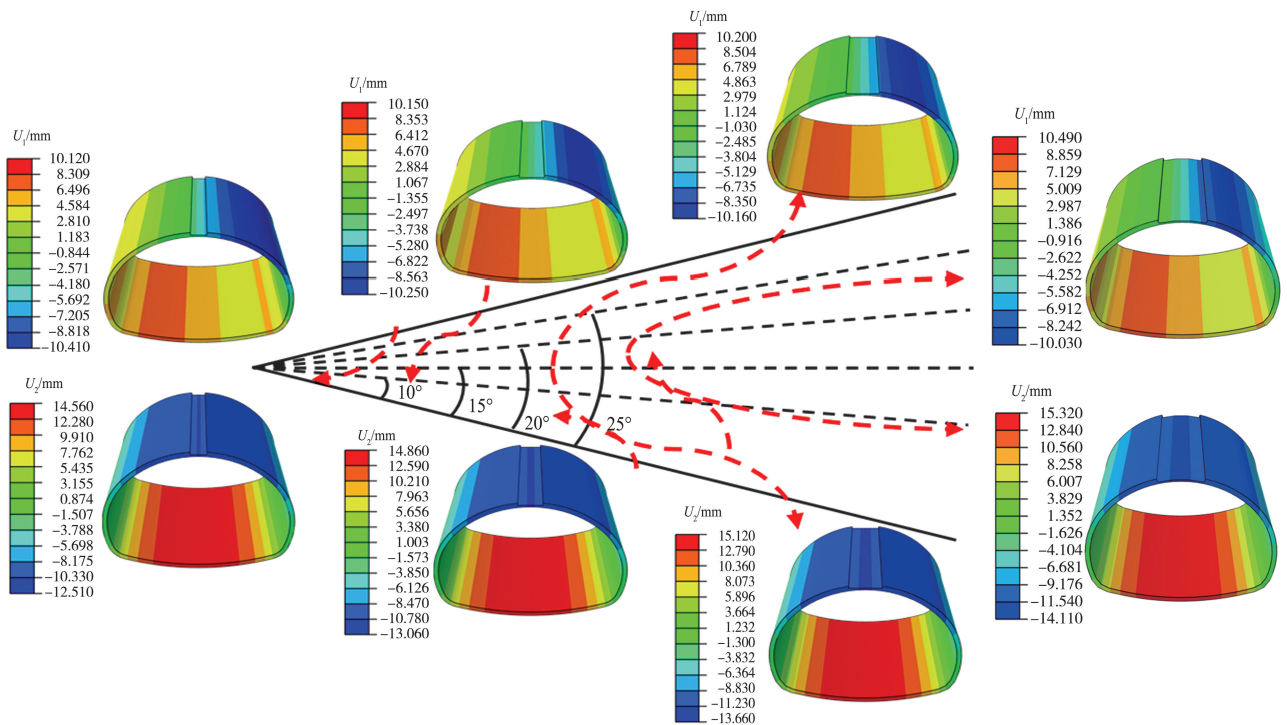


图10 不同缺陷跨度下初支结构的位移云图
Fig.10 Displacement nephogram of initially supported structure under different thinning ranges

随着 θ 的扩大,拱顶处竖向位移也相应增大。 θ 从 10° 扩大到 25° 之后,拱顶的竖向位移分别为 11.4、11.8、12.4、12.8 mm。在各云图的拱顶缺陷位置处出现的深蓝色区域也随之扩大。这是因为拱顶厚度不足使得拱顶位置处初支结构的刚度较完整结构有所下降。 θ 越大,下降的幅度越大,拱顶位置处的竖向位移越大,初支结构越容易产生破坏。

不同缺陷跨度下初支各监测点的轴力及弯矩对比如图 11 所示。

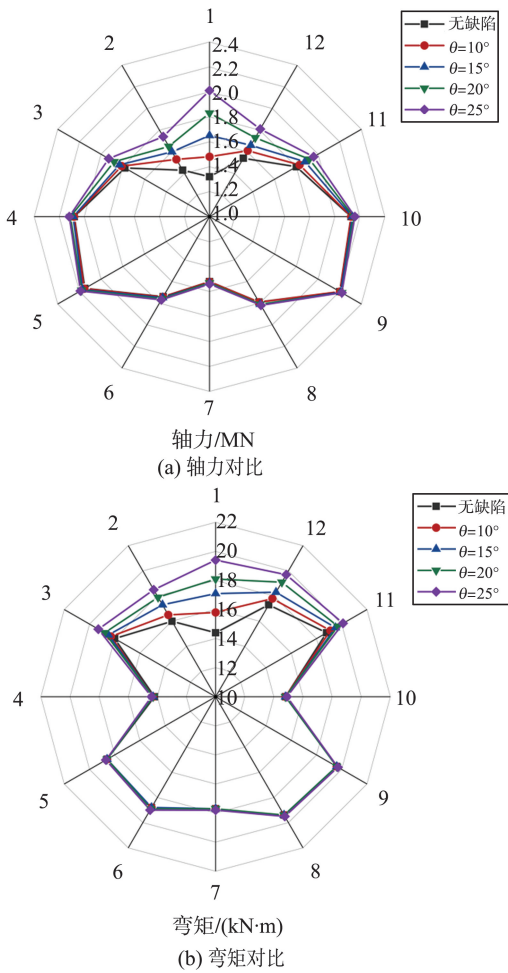


图 11 不同缺陷跨度下初支各监测点内力对比
Fig.11 Comparison of internal forces of each monitoring point of initial support under different thinning ranges

与正常情况相比,拱顶处的初支结构厚度不足时,初支结构整体所受的轴力更大。随着初支结构在拱顶处缺陷跨度不断扩大,从 10° 增加到 25° 时,拱顶处的轴力也在逐渐变大,其变化速度与距离缺陷处的远近有一定关联。从拱顶位置开始,随着监测点与缺陷位置的距离逐渐增大,初支结构轴力变大速率逐渐减小,边墙以下部位的轴力几乎不变。且受应力集中影响,轴力在拱脚处始终处于较大的水平。这是因为缺陷跨度 θ 增大,初支结构与围岩

接触薄弱区域扩大,围岩压力更多集中在缺陷附近,导致轴力增大。距离缺陷处较远时,荷载传递分散,轴力变化速率减小。不同 θ 下各监测点的弯矩对比如图 11 (b) 所示。由图 11 (b) 可以看出,初支结构所受弯矩和 θ 的关系与轴力相似,均是在边墙以上的位置变化较大,且随着 θ 的扩大,初支结构所受弯矩也在逐渐变大。值得注意的是,弯矩在边墙处始终保持较小的水平,这与轴力情况相反。

不同 θ 下各监测点的安全系数曲线如图 12 所示。

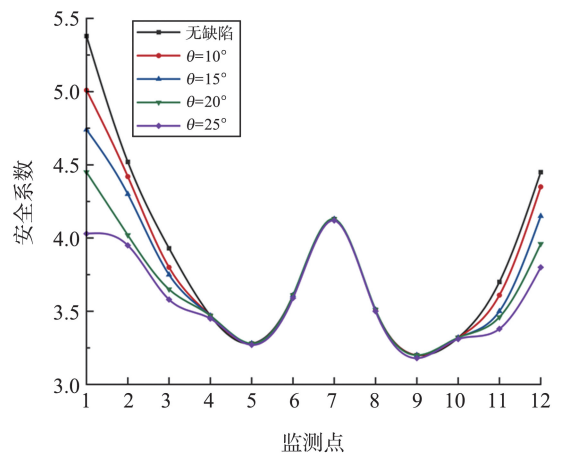


图 12 不同缺陷跨度下初支各监测点安全系数对比图
Fig.12 Comparison of safety factors of each monitoring point of initial support under different thinning ranges

由图 12 可知,拱顶处存在厚度缺陷时的安全系数较正常情况显著降低,拱顶处初支厚度不足使得该位置的结构承载能力降低,进而导致安全系数降低。随着 θ 的扩大,各监测点的安全系数均有所减小,但在不同位置其减小的速度也有所不同。2~12 号点的曲线有明显向中心靠拢的趋势,2~4 号点以及 12~10 号点的曲线向中心靠拢的趋势相对较缓,4~10 号点的曲线只是略微向中心移动。这可能是由于 2 号点和 12 号点所代表的拱肩位置距离拱顶厚度缺陷处较近,受传递荷载影响较为严重,因此其变化幅度较大;在拱肩以下,随着距离拱顶缺陷处越来越远,受影响也越来越小,因此减小的幅度越来越小,二者相叠加,导致该段曲线在不同位置处的差异较大。

2.4 不同厚度缺陷位置 P

初期支护厚度缺陷沿隧道环向主要分布在拱顶、左右拱肩以及左右边墙等 5 个位置,设定缺陷发生在此 5 个位置且 $\theta = 20^\circ$,研究相应的初支结构力学行为。

缺陷发生于初支结构环向不同位置时的压应力云图如图 13 所示。

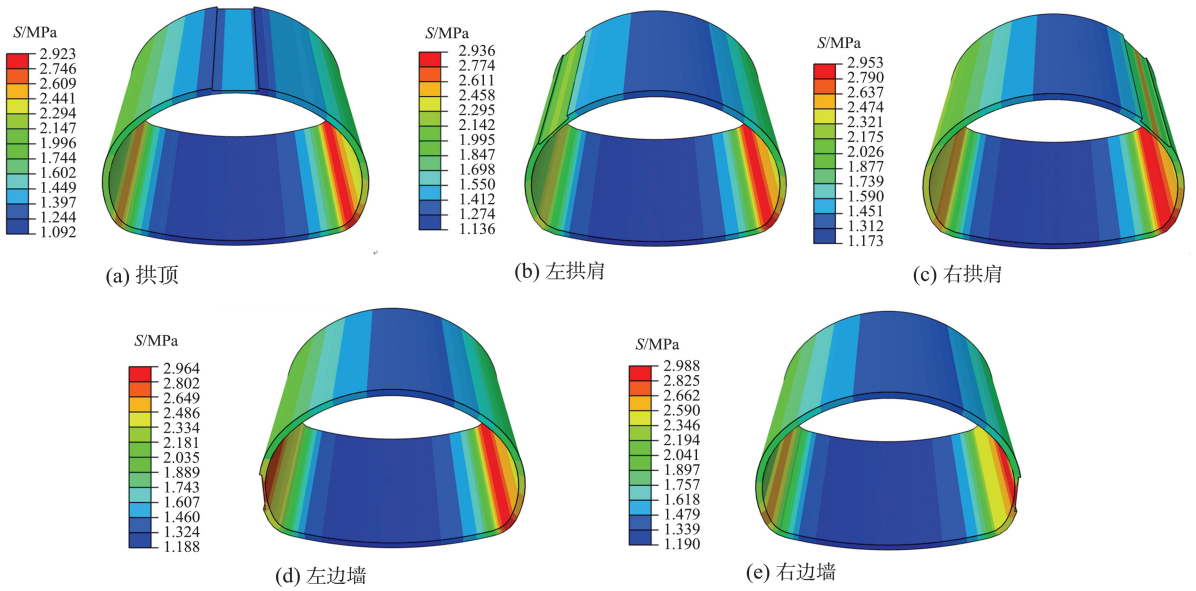


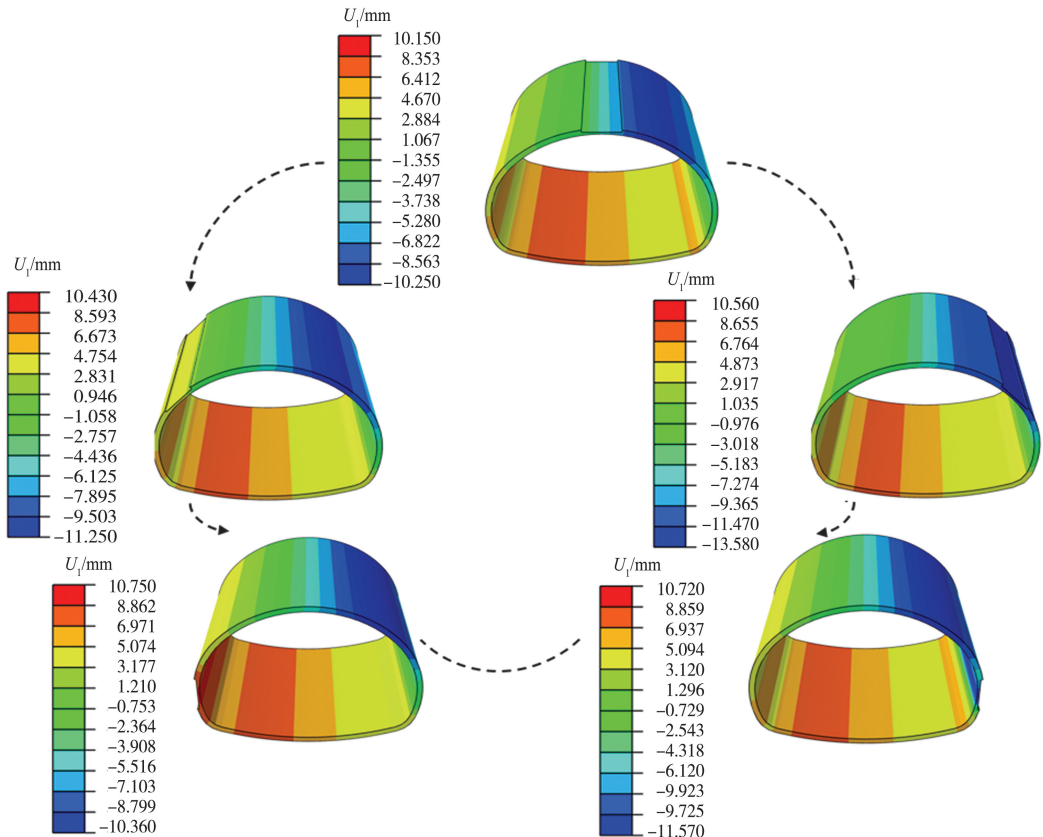
图 13 不同缺陷位置处初支结构的压应力云图

Fig.13 Compressive stress nephogram of initially supported structure at different circumferential thinning positions

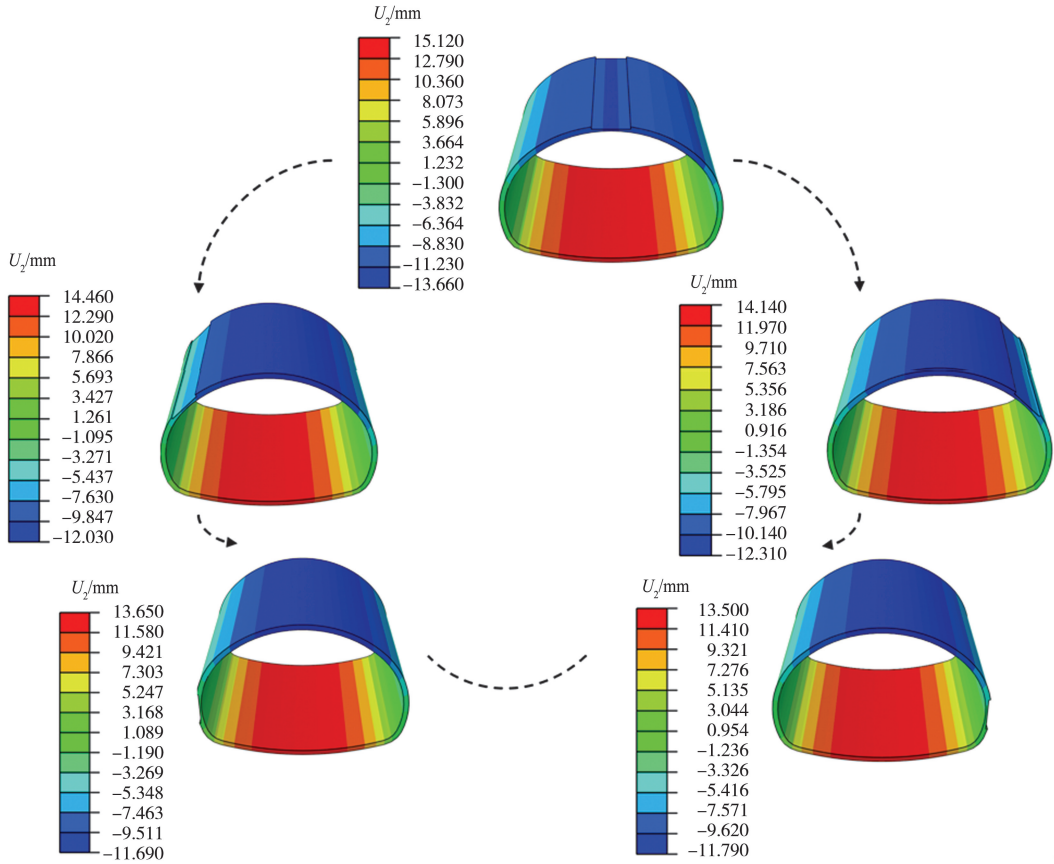
由图 13 可知,初支结构在不同环向位置处存在厚度缺陷时,其整体依然承受压应力作用。与无厚度缺陷相比,各缺陷位置的压应力明显变大,但在其他远离缺陷处的位置压应力变化相对较小。在右拱肩和右边墙处增加的应力要大于在左拱肩和左边墙处增加的应力。此外,由于初支厚度不足,使得缺陷位置及其附近区域的应力重新

分布,原本在该位置处由完整的初支结构承担的围岩荷载会通过缺陷处向两侧传递,导致在不足两侧边缘处的初支结构承担了较大的应力,而在远离不足处的位置荷载传递较少,因此其受到的影响也较小。

缺陷发生位置对初支拱顶位移的影响也不尽相同,如图 14 所示。



(a) 水平位移



(b) 竖向位移

图 14 缺陷处在不同位置条件下初支结构的位移云图

Fig.14 Displacement nephogram of initially supported structure at different circumferential thinning positions

由图 14 可知,当缺陷发生的位置不同时,对初支结构各位置处水平位移的影响也不同。如拱顶的厚度缺陷对初支结构各部位的水平位移影响较小;左拱肩的厚度缺陷对初支结构各部位的水平位移影响较大,尤其会使得左拱肩处水平向右的位移变大,而右拱肩处水平向左的位移变小。这主要是因为通过左拱肩缺陷处向右传递的较小荷载与右侧因偏压而产生的向左的较大荷载相抵消,使右拱肩处水平向左的位移变小;同时,在边墙处出现缺陷时,对缺陷位置另一侧的影响小于拱肩处。

从图 14(b) 可以看出,在拱顶的缺陷会使拱顶的竖向位移变大。当缺陷发生在初支结构右侧,由于偏压作用,使得原本就因缺陷而薄弱的部位承受更大的应力。在这种情况下,偏压加剧了缺陷对拱顶竖向位移的影响,使得竖向位移进一步增大。当缺陷发生在初支结构的左侧,且偏压导致左侧承受的荷载较小,两种因素相互抵消,使得其对拱顶附近竖向位移的影响较小。但由于结构整体受力的改变,也会对拱顶竖向位移产生一定影响。除此两项因素,缺陷处距拱顶的距离也对拱顶的竖向位移

有较大影响,按距离排布分别是 12.4、11.2、11.3、10.8、10.9 mm。可以发现,相较于发生在边墙,拱肩处缺陷所造成的拱顶竖向位移更大,原因就是拱肩距离拱顶更近,对拱顶的影响更大。因此,缺陷位置距离拱顶越近就越容易产生破坏。

当初期支护在某一位置处出现厚度不足时,所承受的轴力会远远大于其它条件下同样位置的轴力。不同缺陷位置初支各监测点的内力对比如图 15 所示。

在图 15(a) 中,随着监测点与缺陷间距离的增大,轴力增长的速率逐渐降低,当到达一定位置时,轴力几乎不变。如当缺陷出现在左拱肩时,2 号点处的轴力最大,1、3 号点次之,而在与左拱肩位置相对较远的点,其轴力与正常情况相比几乎不变。此外,除拱脚位置,左拱肩处的轴力也较大,主要是因为发生了应力集中现象。缺陷位置影响轴力分布,不同位置缺陷会改变初支结构受力路径。拱顶缺陷使轴力急剧增加,边墙处缺陷对轴力分布影响范围小且变化幅度小于拱顶和拱肩位置。

由图 15(b) 可知,弯矩的变化与轴力类似,均是

在缺陷处最大,随着监测点与缺陷距离的不断增大,弯矩增长的速率越来越小。在整体初支结构中,弯矩在拱脚处与缺陷处最大,在边墙处最小。

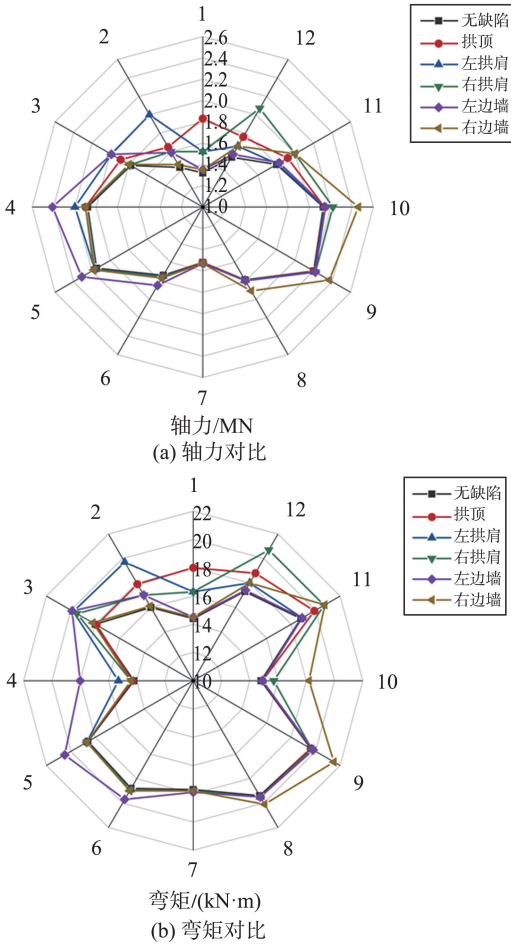


图 15 不同缺陷位置初支各监测点的内力对比
Fig.15 Comparison of internal forces at various monitoring points of the initial support for different defect locations

环向不同缺陷位置处初支各监测点的安全系数数对比如图 16 所示。

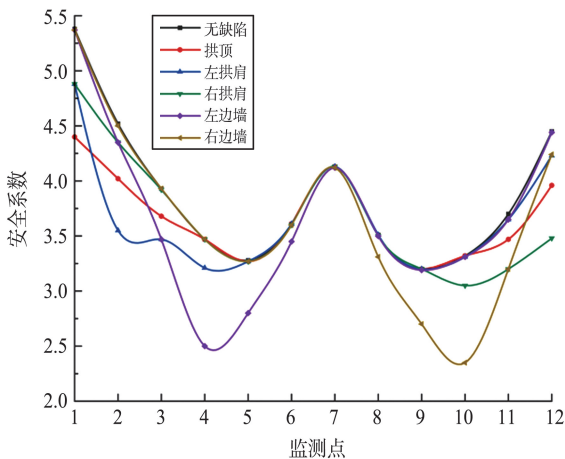


图 16 不同缺陷位置初支各监测点的安全系数对比
Fig.16 Comparison of safety factors at various monitoring points of the initial support for different defect locations

由图 16 可知,当缺陷出现在不同位置时,对应

的安全系数变化规律也有所不同。缺陷位置的安全系数明显下降,随着与缺陷距离的增大,其余位置安全系数下降的幅度逐渐变缓。相较于其他位置出现缺陷,当缺陷出现在左边墙时,4 号监测点处的安全系数最小;3、5 号监测点处的安全系数虽同样降低,但其变化的幅度较小;随着与 4 号监测点距离的逐渐增大,其余各点安全系数下降的幅度逐渐变小。同理,缺陷发生在其他位置时,因为缺陷处厚度不足会使该位置的初支结构承载力降低,进而导致安全系数降低。

3 隧道初期支护风险评价

隧道初支厚度缺陷是由多种因素共同导致的,直接关系到隧道初支的结构安全,因此在对隧道初支结构进行安全风险评价时要综合考虑多种因素的共同作用。采用 CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation) 权重分析法确定各风险指标权重的最优评价模型,再根据相关算法得到各指标的具体评价分数,将该评价分数作为最终的评价结果,探究各风险因素对初支结构安全性的影响程度。

3.1 隧道初支结构安全风险因素的权重计算

基于前文数值模拟及现场数据统计结果,分析初支厚度缺陷对隧道初支结构安全性的影响。并将影响隧道初支安全的风险因素按详细程度划分成两级指标。第一级为不同初支厚度缺陷跨度、位置,第二级为第一级的详细划分。将初支厚度缺陷记为 R ,将 2 种一级指标分别记为 $I_1、I_2$,将 9 种二级指标分别记为 $I_{11}、I_{12}、I_{13}、I_{14}、I_{21}、I_{22}、I_{23}、I_{24}、I_{25}$ 。

在使用 CRITIC 分析法计算指标权重时,需要用到一定的原始数据。从隧道左线截取 900 m 范围作为观察对象(桩号 ZK58+125~ZK59+025),每 150 m 进行一次统计,记录该段隧道内各指标所占的相应比例,如表 4 所示。

由于表 4 中各风险指标的度量单位均是百分数且数值较为繁琐,不利于各指标之间相互比较计算,因此需在使用 CRITIC 分析法之前对相关原始数据进行标准化处理,此处选择极值法,各指标的标准化公式为

$$x = 40 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + 60, \quad (1)$$

式中, x 为数据标准化后的数值, x_i 为任意指标的数值, x_{\min} 为最小指标, x_{\max} 为最大指标。经数据标准化后得到的新数据如表 5 所示。

表 4 原始风险指标
Table 4 Original risk factor

桩号	风险指标/%								
	I_{11} ($\theta \leq 15^\circ$)	I_{12} ($15^\circ < \theta \leq 20^\circ$)	I_{13} ($20^\circ < \theta \leq 25^\circ$)	I_{14} ($\theta > 25^\circ$)	I_{21} (拱顶)	I_{22} (左拱肩)	I_{23} (右拱肩)	I_{24} (左边墙)	I_{25} (右边墙)
ZK58+125~ZK58+275	21.53	29.34	30.05	19.08	24.89	21.64	20.83	15.71	16.93
ZK58+275~ZK58+425	22.33	29.91	28.12	19.64	28.61	19.79	21.64	14.25	15.71
ZK58+425~ZK58+575	20.48	30.87	29.94	18.71	27.59	20.03	22.84	15.05	14.49
ZK58+575~ZK58+725	21.98	29.85	31.35	16.82	28.07	21.56	20.46	14.85	15.06
ZK58+725~ZK58+875	21.74	31.42	30.49	16.35	31.48	17.92	21.63	15.01	13.96
ZK58+875~ZK59+025	21.73	30.25	28.28	19.74	27.95	19.29	21.65	17.38	13.73

表 5 标准化后的风险指标
Table 5 Standardized risk factor

桩号	风险指标/%								
	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	I_{25}
ZK58+125~ZK58+275	83.90	92.21	60.00	100.00	66.22	78.66	100.00	94.35	100.00
ZK58+275~ZK58+425	60.00	98.82	82.58	80.11	79.83	60.00	84.75	100.00	93.07
ZK58+425~ZK58+575	82.54	87.85	76.39	82.69	100.00	70.22	69.50	60.00	60.00
ZK58+575~ZK58+725	100.00	65.55	79.30	99.14	60.00	67.67	76.63	74.96	65.59
ZK58+725~ZK58+875	89.35	60.00	100.00	60.00	79.66	69.71	62.88	70.53	74.30
ZK58+875~ZK59+025	61.98	100.00	78.57	74.73	80.00	100.00	60.00	67.63	72.96

CRITIC 分析法中最重要的 2 个基本概念为对比强度和冲突性。

对比强度由标准差 δ_j 表示,在对风险指标进行数据标准化处理之后,可进一步求出每个指标的标准差,具体公式为

$$\delta_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}, \quad (2)$$

式中 n 为所计算指标的总数。

经相关计算后可得每个指标的标准差,如表 6 所示。标准差反映了指标的离散程度,标准差越大表示该指标的差异性越大,所表达出的信息量越多。冲突性由相关系数 r_{ij} 表示,通过使用数据处理软件 SPSS 计算获得,结果如表 7 所示。

表 6 各风险指标的标准差
Table 6 Standard deviations between risk factors

δ_{11}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{14}	δ_{21}	δ_{22}	δ_{23}	δ_{24}	δ_{25}
21.026 5	22.525 8	24.346 6	26.624 8	19.862 1	23.564 8	21.438 9	21.546 0	23.231 3

表 7 各风险指标之间的相关系数
Table 7 Correlation coefficient between risk factors

风险指标	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	I_{25}
I_{11}	1.00	-0.37	0.23	-0.04	0.24	-0.02	-0.66	-0.14	0.18
I_{12}	-0.37	1.00	0.13	-0.48	0.80	-0.84	0.63	-0.08	-0.78
I_{13}	0.23	0.13	1.00	-0.84	0.06	0.32	-0.38	-0.32	0.07
I_{14}	-0.04	-0.48	-0.84	1.00	-0.57	0.17	0.29	0.38	0.27
I_{21}	0.24	0.80	0.06	-0.57	1.00	-0.83	0.23	-0.26	-0.70
I_{22}	-0.02	-0.84	0.32	0.17	-0.83	1.00	-0.53	-0.09	0.73
I_{23}	-0.66	0.63	-0.38	0.29	0.23	-0.53	1.00	-0.01	-0.46
I_{24}	-0.14	-0.08	-0.32	0.38	-0.26	-0.09	-0.01	1.00	-0.34
I_{25}	0.18	-0.78	0.07	0.27	-0.70	0.73	-0.46	-0.34	1.00

在得到各风险指标之间的标准差与相关系数之后,求出隧道初期支护安全风险评价体系中各风险指标的权重,计算公式分别为

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad (3)$$

$$C_j = \delta_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad (4)$$

$$W_j = C_j / \sum_{i=1}^n C_j, \quad (5)$$

式中, R_j 为第 j 个风险指标与其他风险指标冲突性的对比强度, C_j 为第 j 个风险指标所包含的信息量, W_j 为第 j 个风险指标的权重。

将各风险指标之间的标准差与相关系数代入公式(3)~(5),即可求出各指标的 R_j 、 C_j 以及 W_j ,如表8所示。

表8 隧道初期支护评价体系中各风险指标的权重
Table 8 Objective weight of risk factors in tunnel initial support evaluation system

风险指标	R_j	C_j	W_j
I_{11}	12.25	257.57	0.066 5
I_{12}	13.63	307.03	0.079 3
I_{13}	13.05	317.72	0.082 0
I_{14}	12.35	328.82	0.084 9
I_{21}	13.54	268.93	0.069 4
I_{22}	12.74	300.22	0.077 5
I_{23}	13.24	283.85	0.073 3
I_{24}	12.85	276.87	0.071 5
I_{25}	12.28	285.28	0.073 7

3.2 隧道初支结构安全风险评价

基于各风险指标的标准化数据及权重,计算各指标在不同情况下的具体评价分数 Q ,以该评价分数作为最终的评价结果,可更加直观地比较不同指标对初支结构的影响。不同里程段下各风险指标的具体评价结果如图17所示,其中里程1~6分别代表了所划分的6个里程段。评价分数越高,代表该指标与初支厚度缺陷的相关性越高,对初支结构安全性产生的影响也就越大。

由图17可以看出,在 $\theta \leq 15^\circ$ 时不同里程段的评价分数相对较小,并且该评价分数的变化幅度也较小;而在 $\theta > 25^\circ$ 时,不同里程段的评价分数与变化幅度较大。因此,在4个缺陷跨度的指标中, $\theta > 25^\circ$ 这一指标对初支不足的影响最大。对于缺陷位置这一指标,出现在左边墙时,不同里程段的评价分数与变化幅度相对较小;而当出现在拱顶时,不同里程段的评价分数与变化幅度相对较大。因此,缺陷出现在拱顶的影响最大。此外,针对不同里程

段,不同环向位置存在缺陷时较不同缺陷跨度的整体评价分数更高。因此可以判定,不同缺陷发生位置这一指标与厚度缺陷之间的相关性更高,对初支结构安全性的影响也更大。在实际施工中,需通过细化标准、加强监测、严控质量、及时补浆等措施,应对潜在的安全风险。特殊情况下可考虑增设临时支撑或加强钢筋,以进一步提升初支结构的整体稳定性和安全性。

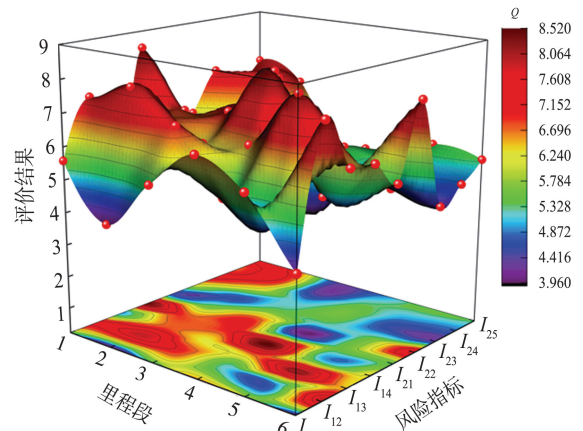


图17 各风险指标最终评价结果

Fig.17 Final evaluation results of each risk index

4 结论

通过数值模拟及权重分析,结合现场工程实例,对隧道初支结构在不同厚度缺陷条件下的力学行为进行研究。得到的相关结论如下:

(1)在正常情况下,初支结构压应力在拱脚处最大,安全系数在拱脚处最小,且受偏压影响,初支结构右侧的压应力普遍大于左侧,同时右侧的安全系数小于左侧。此外,初支结构的竖向位移在拱顶处最大,拱肩的水平位移大于边墙处的水平位移。

(2)随着拱顶处缺陷跨度的不断扩大,其力学响应呈现出显著的变化趋势。压应力在拱顶处持续累积并达到峰值,伴随着拱顶竖向位移及拱顶到左边墙之间向左的位移显著增加,而安全系数以及拱顶至右边墙间向左的位移则呈现出减少的趋势。缺陷位置本身就是压应力集中的高发区,且随着与缺陷距离的增加,压应力、竖向及水平位移的变化速率均逐渐放缓。拱顶缺陷对竖向位移的影响最为显著,而拱肩及边墙处的缺陷则主要影响水平位移,这一发现可为支护设计优化提供重要依据。

(3)在评估影响初支结构安全性的多项指标中,不同缺陷位置的评价分数最高,对初支结构安全性的影响最大。特别是当缺陷跨度大于 25° 或出现在拱顶位置时的评价分数较高,其对初支结构安全性的负面影响也较大。在初期支护过程中应注意这两种情况,着重对出现在不同位置,尤其是拱顶处的厚度缺陷进行治理。

(4)出于简化模型与突出核心问题的考虑,本研究默认无超欠挖现象。深入探究爆破施工等不同开挖方式导致的超挖或欠挖对初支厚度的影响,进一步完善隧道初支结构安全性的研究体系,是未来重要的研究方向。

参考文献:

- [1] MEGUID M A, DANG H K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2008, 24(3):278-286.
- [2] WANG J F, HUANG H W, XIE X Y, et al. Void-induced liner deformation and stress redistribution [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2014, 40: 263-276.
- [3] 张志刚, 陈佳, 姬海, 等. 东欧公路隧道复合式衬砌结构设计与实践[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(增刊1): 127-136.
ZHANG Zhigang, CHEN Jia, JI Hai, et al. Design and practice of composite lining structure on road tunnel in Eastern Europe [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(Suppl.1): 127-136.
- [4] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. *力学学报*, 2017, 49(1): 3-21.
ZHANG Dingli. Essential issues and their research progress in tunnel and underground engineering [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 3-21.
- [5] ZHANG X, SU J, XU Y J, et al. Experimental and numerical investigation the effects of insufficient concrete thickness on the damage behaviour of multi-arch tunnels [J]. *Structures*, 2021, 33: 2628-2638.
- [6] 宫艳萍. 衬砌厚度不足对隧道结构安全性影响研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
GONG Yanping. Study on the tunnel structure safety under the impact of the lining thickness deficiency [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] LU W, SUN H B, ALEJANO L, et al. Study on support characteristic curve of primary support structures in underground excavation considering bond-slip behavior [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(3): 1-12.
- [8] 刷仲林. 直接弹性抗力法及其在隧道初期支护结构计算中的应用[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(3): 372-387.
JU Zhonglin. Direct elastic resistance method and its application to calculation of primary support structure of tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(3): 372-387.
- [9] 潘凯锋. 观音阁水库输水工程软岩隧洞初期支护厚度优化分析[J]. *东北水利水电*, 2019, 37(7): 34-37.
PAN Kaifeng. Optimization analysis of initial support thickness of soft rock tunnel for water conveyance project of Guanying reservoir [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 2019, 37(7): 34-37.
- [10] 孙润方, 杨凯, 晏启祥, 等. 不同喷射混凝土厚度对隧道围岩变形影响分析[J]. *四川建筑*, 2020, 40(6): 115-116.
SUN Runfang, YANG Kai, YAN Qixiang, et al. Analysis of the influence of different shotcrete thicknesses on the deformation of tunnel surrounding rock [J]. *Sichuan Architecture*, 2020, 40(6): 115-116.
- [11] 韩荣杰, 欧湘萍, 闫志濠, 等. 初期支护参数对断层破碎带隧道围岩稳定性的影响研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(2): 330-335.
HAN Rongjie, OU Xiangping, YAN Zhihao, et al. Study on the influence of initial support parameters on the stability of tunnel surrounding rock in fault fracture zone [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 45(2): 330-335.
- [12] 吕鸿, 王建. 隧道爆破冲击对不同厚度初期支护 mis 应力的影响[J]. *公路*, 2016, 61(10): 268-270.
LÜ Hong, WANG Jian. Analysis of the influence of tunnel blasting impact on mis stress of initial support with different thicknesses [J]. *Highway*, 2016, 61(10): 268-270.
- [13] 李德军, 于程硕, 谢东武. 大跨度城市山岭隧道初期支护参数优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(增刊1): 387-393.
LI Dejun, YU Chengshuo, XIE Dongwu. Optimization of initial support parameters of large-span urban mountain tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(Suppl.1): 387-393.
- [14] ZHANG M M, ZHANG X D. Application of ground penetrating radar in tunnel concrete lining quality detection [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 3696: 1065-1069.

- [15] FENG D S, WANG X, ZHANG B. Improving reconstruction of tunnel lining defects from ground-penetrating radar profiles by multi-scale inversion and bi-parametric full-waveform inversion [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 41: 100931.
- [16] 胡群芳, 周博文, 王飞, 等. 基于模糊层次分析的公路隧道结构安全评估技术[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(4): 41-49.
HU Qunfang, ZHOU Bowen, WANG Fei, et al. Structural safety assessment technology of long highway tunnel based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(4): 41-49.
- [17] 周兵, 王传生, 刘芳亮, 等. 城市交通隧道运营安全风险评估模型及管理系统研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(1): 97-103.
ZHOU Bing, WANG Chuansheng, LIU Fangliang, et al. Study on risk assessment model and management system for urban traffic tunnel operation safety [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(1): 97-103.
- [18] SOUSA R L, EINSTEIN H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian networks: Porto Metro case study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2012, 27(1): 86-100.
- [19] 吴贤国, 刘茜, 陈虹宇, 等. 基于模糊贝叶斯证据理论的盾构下穿既有隧道安全风险评价[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(5): 713-720.
WU Xianguo, LIU Xi, CHEN Hongyu, et al. Preassessment of safety risk of shield tunneling underneath existing tunnel based on fuzzy Bayesian networks and evidence theory [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(5): 713-720.
- [20] SUN J J, SHI L, SHEN Y, et al. Research on the safety risk management of the operation of the long river-crossing tunnels based on fuzzy analytic hierarchy process evaluation method [C]// *Proceedings of CICTP 2021*. Xi'an, China: ASCE, 2021: 1118-1129.
- [21] ZHOU B, WANG C S, LIU F L, et al. Whole risk assessment system and management system of urban road tunnel operation stage [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2020, 14(1): 94-101.
- [22] LIN C J, ZHANG M, LI L P, et al. Risk assessment of tunnel construction based on improved cloud model [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(3): 1-13.
- [23] XIAO M W, CHANG D H, LI J Z. Study on multi-level safety risk assessment of two-line three-step construction of long-span shallow buried and hidden excavation tunnel [C]// *Proceedings of ICCREM 2021*. Beijing, China: ASCE, 2021: 73-84.
- [24] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
(编辑: 郭少华)

(上接第164页)

- LIU Li, ZHU Xiaoming, LIU Zhaohui, et al. Effect of steel slag content on performance of rubber mixture ARAC-13 [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(10): 66-72.
- [19] 张彩利, 王超, 李松, 等. 钢渣沥青混合料水稳定性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(1): 207-214.
ZHANG Caili, WANG Chao, LI Song, et al. Research on water stability of steel slag asphalt mixture [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(1): 207-214.
- [20] 何亮, 詹程阳, 吕松涛, 等. 钢渣沥青混合料应用现状 [J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(2): 15-33.
HE Liang, ZHAN Chengyang, LYU Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(2): 15-33.
- [21] WU J W, WANG J, LIU G, et al. Giant room-temperature magnetodielectric coupling in spark plasma sintered brownmillerite ceramics [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(22): 222906.
- [22] SHI C J. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(3): 230-236.
- [23] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢渣中游离氧化钙含量测定方法: YB/T 4328—2012 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
(编辑: 郭少华)