

# 大拱脚暗挖隧道安全系数强度折减识别及变形—破坏响应研究

蒙伟<sup>1</sup> 张学富<sup>1</sup> 董文斌<sup>2</sup> 凡文廷<sup>3</sup> 王亮<sup>4</sup> 邹光炯<sup>5</sup>

1. 重庆交通大学土木工程学院; 2. 重庆轨道交通运营有限公司; 3. 重庆交通建设管理有限公司;  
4. 中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司; 5. 重庆市轨道交通设计研究院有限责任公司

**摘要:** 建立典型大拱脚车站隧道三维有限元模型, 在围岩抗剪强度参数逐级折减过程中, 基于监测特征点塑性应变增量折减曲线的尖点 / 突变区间识别剪切失稳临界范围。结果表明: 隧道在  $w=3.5 \sim 3.6$  时发生突变, 插值得剪切安全系数约 3.56, 与位移突变法结果基本一致。临界区间附近高危部位由侧墙向拱脚脚趾下部迁移, 潜在破坏面主要分布于侧墙与脚趾附近, 最大塑性应变约 0.0061。引入拱顶下沉 2.2 cm 允许变形约束后, 建议安全系数由 3.56 修正为约 3.36。研究表明, 该方法可降低失稳判定主观性, 并为整体稳定评价与关键部位加固提供依据。

**关键词:** 大拱脚; 暗挖车站隧道; 强度折减法; 安全系数; 应变特征

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.02.019

## 引言

大断面暗挖车站隧道因跨度大、开挖扰动强及结构—围岩相互作用显著, 整体失稳通常首先发生于侧墙—拱脚区域, 并进一步演化为局部剪切破坏及大范围变形坍塌<sup>[1]</sup>。整体稳定安全系数是评价地下结构安全储备与支护合理性的关键指标, 强度折减法因可在统一框架下同步折减围岩黏聚力与内摩擦角, 从而获得临界折减系数而被广泛采用<sup>[2]</sup>。然而, 现有临界点判定多依赖位移突变、计算不收敛或曲线拐点的人工判读, 易受折减步长、监测指标及经验因素影响, 结果可重复性不足; 同时, 单一剪切失稳判据亦难以兼顾工程允许变形要求<sup>[3]</sup>。基于此, 本研究以典型大拱脚车站隧道为对象, 引入塑性应变增量折减曲线识别剪切失稳临界区间, 结合衬砌受力、破坏接近度、潜在破坏面及允许变形约束, 建立面向工程应用的整体稳定评价方法。

## 1 数值模型与方法原理

### 1.1 数值模型与参数设置

以某典型大拱脚暗挖车站隧道为原型, 考虑结构与荷载对称性, 建立三维有限元半模型, 尺寸约为  $250 \text{ m} \times 70 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ , 覆土厚度约 25 m, 纵向长度取 12 m。侧向及底部边界均满足距洞径 3 ~ 5 倍要求。地表荷载采用等效均布荷载表示, 并按荷载分担比 0.5 施加。结构布置见图 1, 关键材料参数见表 1。

为捕捉大断面结构典型失稳位置, 在拱脚脚趾下部、侧墙中部及拱顶等部位布置监测特征点。

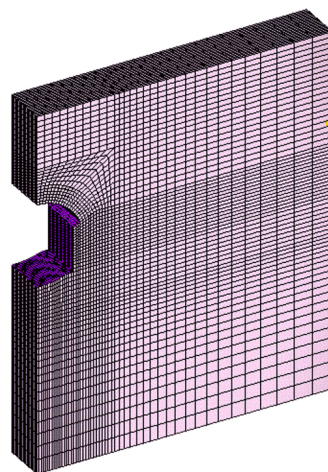


图 1 典型大拱脚车站隧道三维模型 (自绘)

表 1 主要材料物理力学参数 (典型值)

材料	重度	弹性模量	泊松比	抗压强度	抗拉强度
	$\gamma (\text{kN/m}^3)$	$E (\text{MPa})$	$\mu$	$f_t (\text{MPa})$	$f_c (\text{MPa})$
砂泥岩	25.6	1400	0.37	—	—
初衬	22	23000	0.2	—	—
二衬	25	33500	0.2	26.8	2.40

### 1.2 剪切安全系数计算方法

强度折减法通过逐级增大折减系数  $w$  同步降低围岩抗剪强度参数<sup>[4]</sup>, 黏聚力与内摩擦角采用常用折减关系:

$$c = c_0 / w, \varphi = \arctan(\tan \varphi_0 / w) \quad (1)$$

在折减过程绘制  $\Delta \varepsilon_p - w$  折减曲线, 当曲线出现明显尖点 / 突变区间时, 将其作为剪切失稳临界区间,

基金项目: 重庆市建设科技计划项目 (编号: 城科学 2023 第 5-15 号)。

对离散  $w$  取值进行插值确定剪切安全系数<sup>[5]</sup>。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 剪切安全系数

塑性应变增量在  $w \approx 3.5$  附近出现尖点/突变区间。由图 2 判定剪切失稳临界区间为  $w=3.5 \sim 3.6$ ，线性插值得剪切安全系数约为 3.56，与位移突变/折线拟合法所得 3.58 基本一致，表明该判据可降低主观性且结果可靠。结合拱顶下沉限值线性插值得  $w \approx 3.36$ 。由此若考虑允许变形控制，建议安全系数由 3.56 修正为约 3.36。

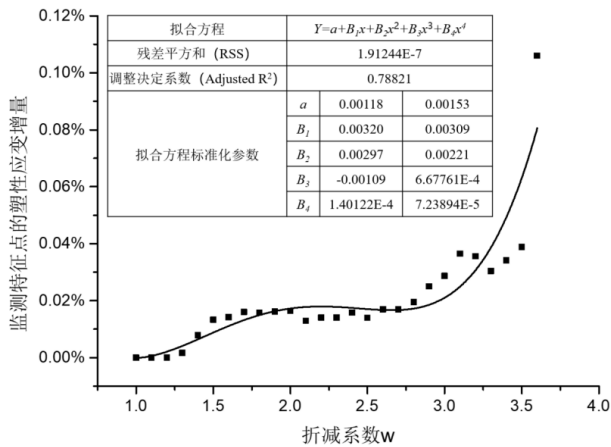


图 2 监测特征点塑性应变增量与折减系数曲线图

### 2.2 破坏特征与塑性演化

选取  $w=1.0$  和  $w=3.6$  分别作为低折减与临界折减工况，分析塑性变形的空间演化规律。

#### 2.2.1 破坏接近度

当  $w=1.0$  时侧墙附近破坏接近度最大约为 0.7815；当  $w=3.6$  时最大增至约 1.7327，且高危区转移并集中于拱脚脚趾下部围岩。具体结果如图 3。随折减系数

增大，薄弱部位由侧墙向脚趾下部迁移。

#### 2.2.2 潜在破坏面

在  $w=3.6$  时，潜在破坏面主要分布于侧墙与脚趾附近，最大塑性应变约为 0.0061，峰值位置与脚趾下部高危区一致，见图 4。

### 2.3 位移特征与变形控制

#### 2.3.1 监控面侧向位移演化

沿拱脚外缘竖向向下布置监控面提取 X 向位移。随  $w$  增大侧向位移整体增大， $w=1.0-1.5$  区间增幅较小；当  $w$  较大时位移增幅加快， $w=3.6$  与  $w=3.0$  相比差异显著，呈现位移突变特征，与  $\Delta \varepsilon_p$  的突变识别相吻合，见图 5。

#### 2.3.2 竖向位移特征与变形模式

$w=1.0$  时 Y 向最大位移约 1.95 cm，小于 2.2 cm 限值，竖向变形以仰拱隆起为主； $w=3.6$  时 Y 向最大位移增至约 2.54 cm 且拱顶下沉超限，变形模式转为拱顶下沉主控。具体结果如图 8。因此，引入允许变形约束可将安全系数由 3.56 修正为 3.36，更贴近工程控制目标。

## 3 讨论

强度折减法得到的安全系数受失稳判据影响显著。本研究基于塑性应变增量突变识别临界折减系数，该方法主观性低、重复性好<sup>[6]</sup>，得到剪切安全系数约 3.56；结合拱顶下沉限值时修正为 3.36，表明稳定性评价应兼顾强度与变形控制。

薄弱部位由侧墙与拱脚脚趾共同控制，临界区附近高危区向脚趾下部集中，侧向位移加速增长，竖向响应由仰拱隆起转为拱顶下沉主控。工程中应优先加固脚趾下部与侧墙，并将拱顶下沉与拱脚侧向位移作为重点监测指标。

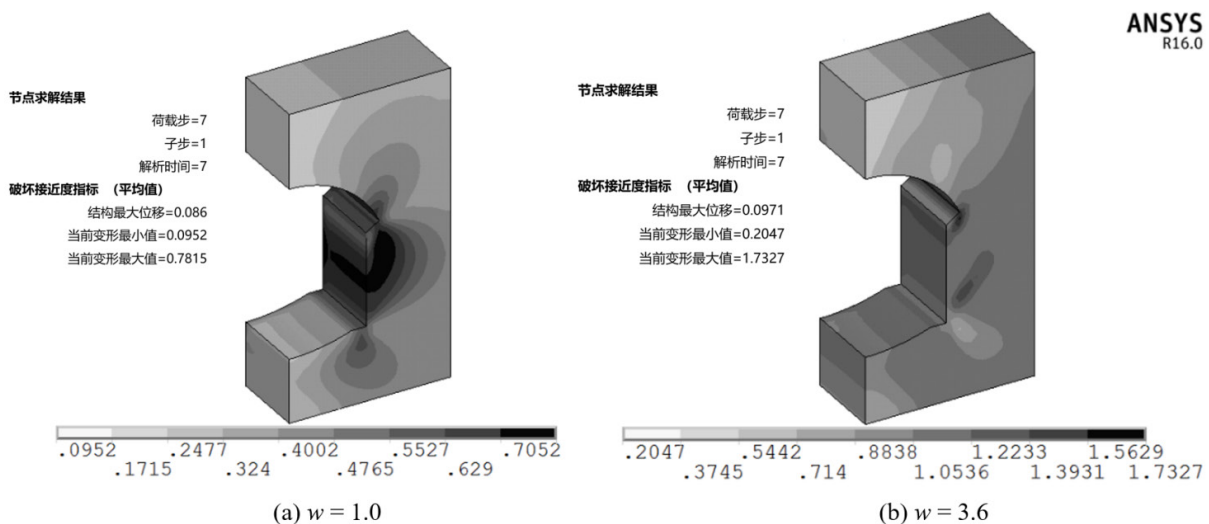


图 3 破坏接近度云图

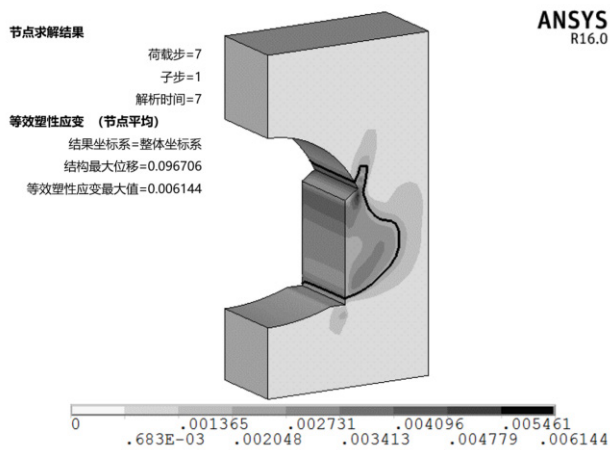


图 4 潜在破坏面与塑性应变等值线 (w=3.6)

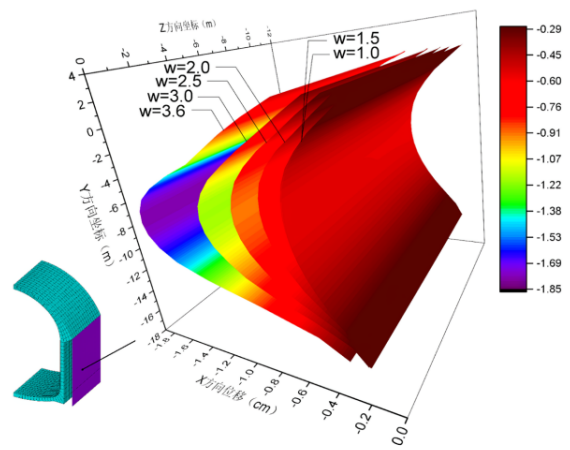
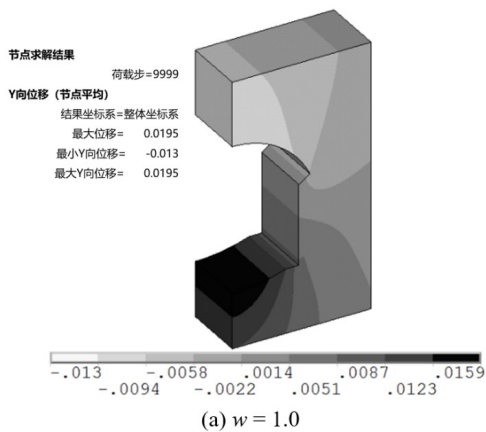
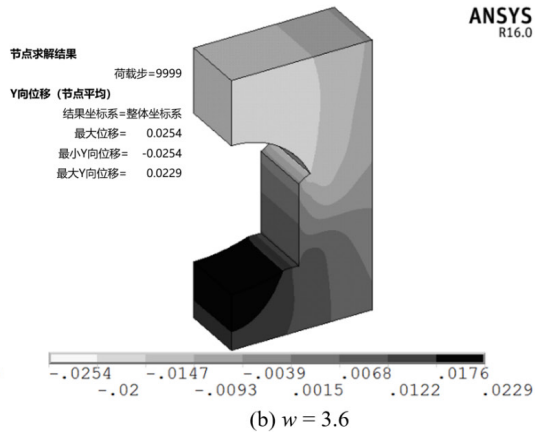


图 5 监控面侧向位移分布及演化



(a) w = 1.0



(b) w = 3.6

图 6 Y 方向位移

### 4 结论

(1) 基于塑性应变增量折减曲线突变区间识别剪切失稳临界范围, 可有效降低人工判读的主观性。典型大拱脚车站隧道在  $w=3.5 \sim 3.6$  区间出现突变, 插值得剪切安全系数约为 3.56, 与位移突变判据结果基本一致。

(2) 临界区间附近危险部位具有明显迁移特征: 高危区由侧墙逐步向拱脚脚下部集中, 潜在破坏面主要分布于侧墙与脚趾附近, 最大塑性应变约为 0.0061。

(3) 仅以剪切失稳点对应安全系数进行工程控制存在局限。考虑拱顶下沉 2.2 cm 的允许变形约束, 建议安全系数由 3.56 修正为约 3.36。对大拱脚车站隧道应将安全系数、变形控制联合作为整体稳定评价。

### 5 未来展望

本研究基于典型大拱脚暗挖车站隧道模型, 探讨了塑性应变增量曲线识别安全系数及其变形—破坏特征, 可为同类工程提供参考。不同埋深、围岩等级、地下水等条件下, 大断面隧道失稳模式与控制指标可能存在差异。后续可结合复杂地层、施工监测数据, 完善强度变形联合判据, 拓展其在多种工程体系中的

反演应用, 提升方法的普适性与实用价值。

### 参考文献:

- [1] 曹平, 王亮, 田定胜, 等. 超大断面深埋暗挖地铁车站主动支护参数与施工工法优化研究 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62(S1): 413-427.
- [2] 杨雨荷, 艾啸韬, 陈议城, 等. 富水地层中矿山法隧道的坍塌机理与安全系数研究 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-14 [2026-02-02].
- [3] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(09): 136-146.
- [4] 袁永才, 王美霞, 石少帅, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的山岭隧道围岩力学参数估计 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(01): 22-28.
- [5] 郑颖人, 邱陈瑜, 张红, 等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, (10): 1968-1980.
- [6] 雷瑞德, 周林森, 顾清恒, 等. 基于改进尖点突变理论的裂隙砂岩破裂预警模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(10): 2638-2653.