

改进隧道式锚碇变形破坏机制与安全性研究

张秋实

(中国十九冶集团有限公司,四川 成都 610200)

摘要:隧道锚具有承载力大,造价低,对周边环境影响小等优点。为探究改进新型隧道锚碇与传统重力式锚碇在正常设计缆力和超缆力荷载下力学响应规律,利用有限元方法建立围岩-锚塞体模型,系统监测荷载前后锚塞体的应力、变形及塑性区发展趋势,并结合安全系数对隧道锚承载力进行评估。研究表明:新型改进隧道式锚碇与传统重力式锚碇相比承载力提升约5.92%;锚塞体与围岩最优倾角约为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,改进新型隧道锚的极限承载力约为10倍设计缆力。

关键词:隧道式锚碇;岩体塑性区;安全系数;数值分析

中图分类号:TU457

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)02-0007-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.02.016

Formation-destruction mechanism and safety study of the improved tunnel anchorage

ZHANG Qiushi

(China 19th Metallurgical Group survey and design company, Chengdu 610200, Sichuan, China)

Abstract: Tunnel anchor has the advantages of large bearing capacity, low cost and little influence on the surrounding environment. In order to explore the mechanical response law of the improved new tunnel anchorage and the traditional gravity anchorage under normal design cable force and super cable force load, the finite element method is used to establish the surrounding rock-anchor body model, and the stress, deformation and plastic zone development trend of the anchor body before and after the load are systematically monitored. Combined with the safety factor, the bearing capacity of tunnel anchor is evaluated. The results show that the bearing capacity of the new improved tunnel anchorage is about 5.92% higher than that of the traditional gravity anchorage. The optimal inclination angle between the anchor body and the surrounding rock is about $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, and the ultimate bearing capacity of the improved new tunnel anchor is about 10 times the design cable force.

Key words: tunnel anchorage; plastic zone of rock mass; safety factor; numerical simulation

隧道锚是悬索桥中常用锚固方式,具有受力合理,造价低,对周边环境影响小等特点。其力传导过程:主缆→锚塞体→岩体,充分发挥围岩与锚体间“加持效应”,进而达到共同抵消主缆荷载的效果。由于隧道锚对围岩要求较高,国内可参考的工程案例较少,因此研究隧道锚的受力变

形特征,对于探索改进隧道锚设计以及围岩受力特征有重要参考意义^[1]。

国内外大量学者对隧道锚与围岩共同受力机理等问题进行了不同程度的研究。其中席晨等^[2]采用数值分析手段,分析了锚塞体长度及坡比对极限承载力的影响。樊火印等^[3]以某隧道式锚碇

收稿日期:2023-05-01

基金项目:中国十九冶集团有限公司科研计划课题项目(2022-2-12)

作者简介:张秋实(1994—),男,助理工程师,从事隧道与地下工程相关工作。

工程实例为依托,探究结构在设计缆力荷载下的受力变形特征,结合规范进行安全系数评价,得出了该工程隧道锚结构极限承载力取值范围。颜冠峰等^[4]通过数值分析方法建立非线性数值模型,通过监测荷载前后锚塞体单元主应力、相对位移、塑性区变化趋势等,提出了预测隧道锚极限承载力方法,结合工程实例通过超缆力分析预测了该工程隧道锚结构的极限承载力。文丽娜等^[5]基于弹塑性相似理论,开展原位缩尺模型蠕变试验,探究模型锚和岩体不同荷载下蠕变规律,利用有限元差分软件 FLAC^{3D}进行弹塑性分析验证,数值计算结果与试验结果吻合,进而得出了该工程锚体、围岩、锚岩接触面蠕变规律。周程等^[6]以矮寨悬索桥隧道锚工程为依托,进行现场原位试验得出围岩相关参数,并带入进行数值计算验证,对薄层状岩体隧道锚的开挖、正常加载、超载工况变形破坏机理进行分析,进而达到对该隧道锚工作状态进行全面评估。

本文以某悬索桥隧道式锚碇项目为依托,对传统重力式锚碇采用增加锚索的方式优化改进,并借助有限元方法研究正常荷载及超荷载工况下锚碇体、锚索及围岩的受力及变形特征,结合安全系数法进行承载力评估。

1 安全系数计算方法

超载法的理念为通过给岩土体不断施加同等荷载使其达到极限平衡状态,此时安全系数为达到极限平衡状态下的超载与原始荷载的比值^[3]。根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05/2015)^[7]规定,隧道锚抗拔安全系数按下式计算:

$$K = \frac{f' W_F + C' A + W_L}{P} \quad (1)$$

式中: K 为抗滑(拉拔)稳定系数; f' 为接触面抗剪断摩擦系数; C' 为接触面(或结合面)的抗剪

断黏聚力, kPa; A 为接触面积, m^2 ; P 为主缆拉力设计值, kN; W_F 为结构自重垂直于滑动面的分量, kN; W_L 为结构自重沿拉拔方向的分量, kN。

2 围岩-锚碇体数值模型的建立

2.1 模型的建立

采用有限元软件 (ABAQUS) 进行数值计算,通过计算不同级别缆力作用下传统隧道锚和改进后隧道锚的受力表征,进而对改进后隧道锚进行承载能力评估。模型在考虑计算精度及速度的基础上,结合现有计算条件采用二维实体单元建立围岩-锚塞体模型。模型底边长为 130 m, 最大高度为 102 m, 最小高度约为 57 m, 设计缆力为 3 000 kN。锚塞体加载简图如图 1 所示。

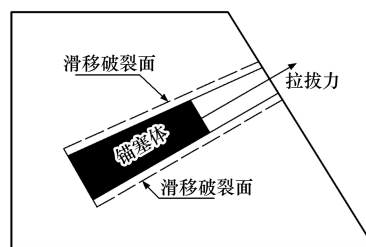


图 1 传统重力式锚碇简图

模型材料参数根据文献 [8] 选取,如表 1 所示。围岩采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构计算,假设围岩为理想状态各向同性,忽略岩层间节理裂隙等因素。锚索基于规范采用双折线模型,锚塞体为 C40 钢筋混凝土结构,短边长度约为 16.15 m,长边长度为 19.3 m,高度约为 32.5 m。围岩和锚塞体网格划分采用四结点双线性 (CPE4R) 平面应变单元,每个单元边长为 200 cm,共 3 265 个单元;锚索采用 T3D2 桁架单元,每个单元边长为 100 cm,共 120 个锚索单元。围岩-锚塞体之间接触面之间采用“面-面”接触,接触属性为切向采用库伦摩擦,设置“罚”公式,摩擦系数取 0.1。锚索与岩体和混凝土锚塞体间设置内置嵌入 (Embedded) 连

表 1 模型材料参数

分类	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa	抗拉强度 MPa
围岩	2 500	1	0.35	37	400	0.05
混凝土 C40	2 700	30	0.25	—	—	—
锚索	7 800	206	0.3	—	—	206 000
锚岩接触面	—	—	—	35	350	—

接,忽略两者间的相对滑移。锚塞体数值模型如图 2 所示。

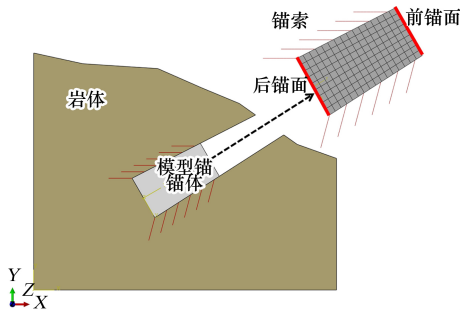


图 2 改进型锚塞体数值模型

2.2 监测点布置

根据文献可知,隧道锚的承载力主要来源于围岩与锚塞体周围的侧向摩阻力,(即围岩的“夹持效应”)。基于此,选取锚塞体为监测对象,探究锚塞体在不同缆力作用下,前、后锚面与围岩的相对位移、主应力变化及塑性区发展规律等,以此揭示改进后锚塞体与传统锚塞体的受力特征。

2.3 模型计算步骤

模型的计算工况详细步骤如下:

(1) 对模型施加自重荷载,计算自重荷载下结构地应力平衡。

(2) 根据设计文件中锚塞体尺寸,对岩体隧道锚进行开挖。

(3) 浇筑钢筋混凝土锚塞体以及锚索。

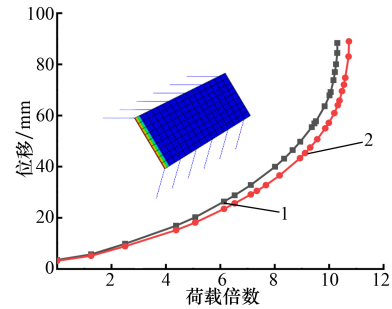
(4) 在锚塞体后锚面沿结构面方向,依次施加正常设计缆力 P 和超缆力 nP , ($1.0P$ 、 $5.0P$ 、 $10.0P$ 、 $12.0P$),直至结构破坏,以此模拟缆索作用于结构后锚室。

边界条件设置:在计算地应力平衡分析步中设置底边 X 、 Y 方向约束 ($U_1 = U_2 = 0$);在计算设计缆力分析步中设置模型两侧边高度 X 向约束 ($U_1 = 0$)。

3 计算结果

3.1 锚塞体承载力分析

在设计缆力与超荷载缆力作用下,传统隧道锚与新型改进隧道锚承载力变化曲线如图 3 所示。



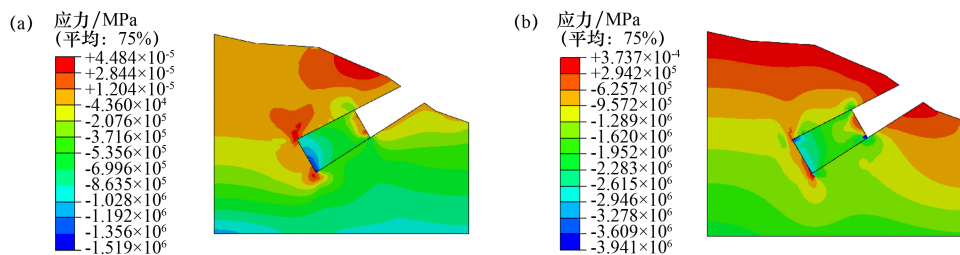
1—传统重力式隧道锚;2—新型改进隧道锚。

图 3 新型隧道锚承载力荷载-位移曲线

由图 3 可以看出两种类型结构的荷载-位移变化规律总体一致,总体可分为弹性阶段,塑性阶段和屈服破坏阶段。锚碇体在大约 5 倍设计荷载前为弹性阶段,结构变形随荷载大致呈线性增加;当荷载位于 5~10 倍时,曲线斜率急剧增大,结构处于塑性阶段;当荷载增至 10~12 倍时,曲线达到峰值变形开始出现下降段,表明结构处于破坏阶段。两种类型结构的峰值承载力分别为 80 640.4 kN 和 85 416.5 kN,改进后新型隧道锚较传统隧道锚承载力提升约 5.92%。

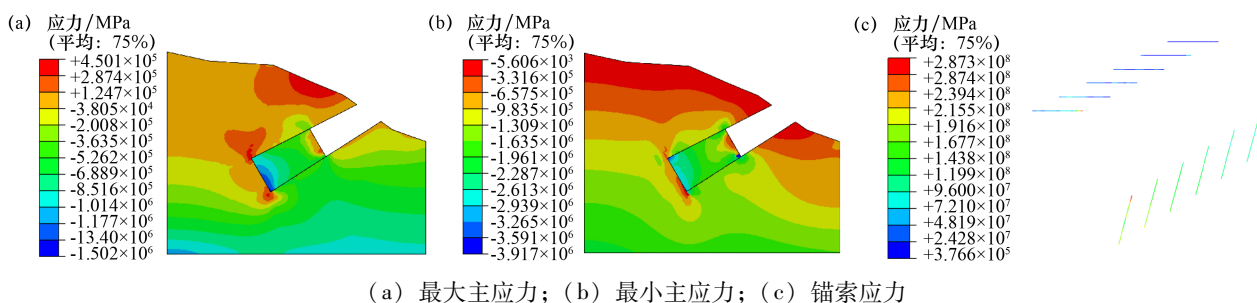
3.2 锚塞体受力与塑性区变化分析

$1.0P$ 设计荷载缆力作用下,改进后新型隧道锚和传统隧道锚结构的主应力云图分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可以看出:两种类型结构的最大/最小主应力分布规律趋于一致。最大主应力方面:两种结构中锚塞体以及锚塞体下部围岩区域大多处于受压状态,锚塞体前锚面及拱顶上部区于域围岩处受拉状态,最大拉应力约为 0.5 MPa;最



(a) 最大主应力; (b) 最小主应力

图 4 传统隧道锚 $1.0P$ 缆力荷载结构主应力云图



(a) 最大主应力; (b) 最小主应力; (c) 锚索应力

图 5 新型隧道锚 1.0P 缆力荷载结构主应力云图

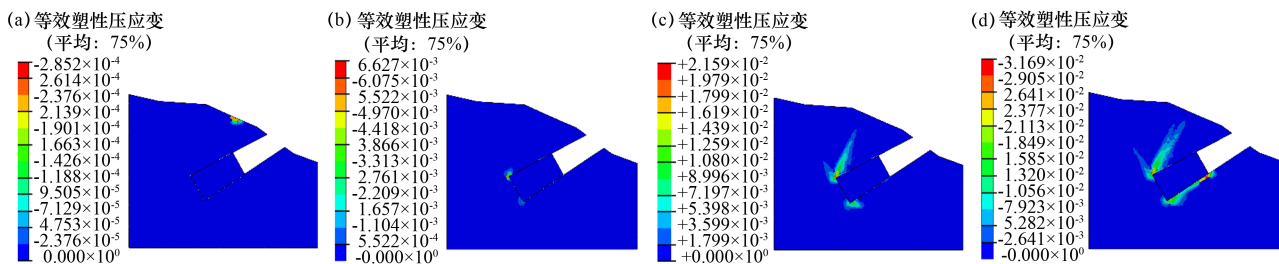
小主应力方面: 锚塞体前锚面拱底及后锚面为主要受压区, 最大压应力分别为 3.94 MPa 和 3.92 MPa; 锚索最大拉应力产生在锚碇体右侧埋深最大处约为 287.3 MPa; 在设计缆力荷载下, 新型锚体结构的主应力略大于传统锚体结构, 是由于锚索在拉拔力作用下承担了锚体内部分拉应力, 增大结构抗拔力所导致。

不同级别超荷载缆力 (1.0P、5.0P、10.0P、20.0P) 作用下, 改进后新型隧道锚和传统隧道锚塑性区变化规律分别如图 6、7 所示。由图 6、7 可以看出: 两种类型结构围岩和锚碇体塑性区发展规律近似。在正常设计荷载 (1.0P) 作用下, 结构地应力平衡后开挖导致锚碇体拱顶上部围岩区域最早产生塑性区; 同时随着荷载增加至 5.0P ~ 10P 时, 塑性区逐步发展至锚碇体后锚面与围岩相交的拱顶和拱底处。锚碇体拱顶上部塑性区面

积大于拱底, 且与围岩形成大约呈 25° 夹角。结合荷载 - 位移图可知此时结构处于弹性阶段。超载 12P 缆力作用下, 对图 6(d)、7(d) 可知, 锚碇体上部拱顶处围岩塑性区面积显著扩大, 近乎形成区域贯通区; 传统隧道锚拱底区塑性区沿滑移破裂面发展贯通锚体接触面, 新型隧道锚则主要集中于后锚面拱底处, 此时结构达到承载力极限处于破坏阶段。塑性区发展图与承载力特征曲线具有一致性, 表明所建立模型合理。

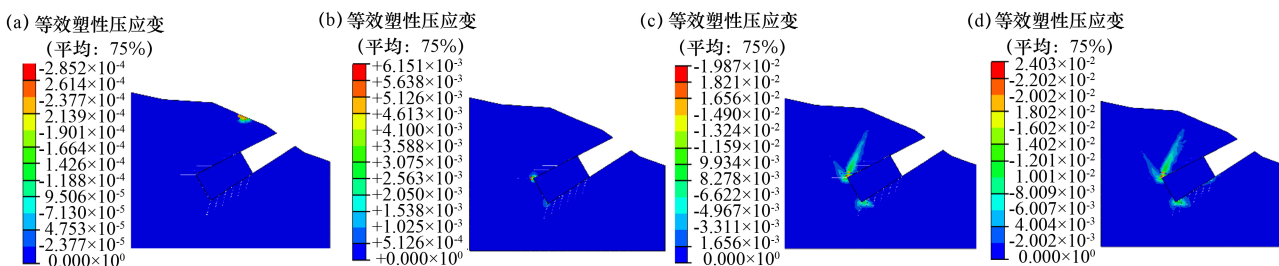
3.3 隧道锚影响因素分析

依据 3.1 节计算结果, 将锚塞体和锚索作为研究对象, 以 15° 作为基础梯度, 研究锚碇体和锚索的最大承载力及所对应的安全系数, (其中: 锚塞体面积 $A = 4\,260\text{ m}^2$; 抗剪摩擦系数 $f' = 0.6$, 抗剪断黏聚力为 $C' = 1\,200\text{ kPa}$;) 计算结果如表 2 所示。



缆力作用: (a) 1.0P; (b) 5.0P; (c) 10P; (d) 12P

图 6 传统重力式隧道锚塑性区发展变化



缆力作用: (a) 1.0P; (b) 5.0P; (c) 10P; (d) 12P

图 7 新型隧道锚塑性区发展变化

表 2 不同工况下锚塞体轴向位移与安全系数

锚体倾角/(°)	轴向位移/mm							
	锚索夹角(15°)	安全系数	锚索夹角(20°)	安全系数	锚索夹角(25°)	安全系数	锚索夹角(30°)	安全系数
20	87	7.8	82	9.0	83	8.9	80	9.0
30	82	9.0	74	9.4	75	9.5	71	9.7
40	76	9.5	79	9.3	70	9.8	76	9.4
50	85	8.5	80	9.2	81	9.1	82	9.0

由表 2 可知，锚塞体安全系数均大于 2，满足 JTG/TD65—05—2015 相关要求，表明锚碇体结构初步设计合理。锚体倾角与轴向位移呈负相关，与结构安全系数呈正相关；即锚体与水平面倾角的增加，锚体最大轴向位移逐级减小，结构安全系数增大；倾角最大不宜超过 40°，最优锚塞体与围岩倾角约为 30°~40°；锚索夹角对结构安全系数影响较小。综上所述，锚碇体倾角对结构安全性影响远大于锚索。

4 结 语

(1) 两种类型结构受力与塑性区发展规律相似，增加锚索后新型锚碇可大幅减少锚体拱底区域滑裂面形成贯通区；增加锚索后改进型隧道锚相较于传统隧道锚承载力提升约 5.92%。

(2) 锚碇体倾角对结构安全性影响远大于锚索，锚塞体与围岩最优倾角约为 30°~40°。

(3) 根据锚碇体结构的受力和变形情况可知，最不利位置主要位于锚碇体拱顶上部受拉区域和后锚面锚岩接触面，在设计和维修加固过程中应当重点关注。

参考文献：

[1] 腾曼,邓盛涛,高益辉,等. 峨汉高速隧道开挖与采空区静力交互作用影响[J]. 工程建设,2021,53(8):50-55.

[2] 席晨,刘芳炜. 基于 ABAQUS 的隧道锚极限承载力及影响因素研究[J]. 四川建筑,2022,42(2):244-246;249.

[3] 樊火印,师启龙,过超. 贵州花江北盘江大桥隧道式锚碇基础承载特性研究[J]. 公路,2020,65(3):126-131.

[4] 颜冠峰,王明年,李睿峰,范宇,刘大刚. 大渡河桥隧道锚力学响应研究及承载力判定[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(4):1149-1155.

[5] 文丽娜,程谦恭,程强,等. 提供兴康特大桥反力的隧道锚蠕变试验研究[J]. 工程科学与技术,2019,51(6):124-133.

[6] 周程,景锋,边智华,等. 薄层状灰岩区大型隧道锚碇承载力特性的岩石力学综合研究[J]. 中外公路,2011,31(6):41-45.

[7] 公路悬索桥设计规范:JTG/T D65—05—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

[8] 文丽娜. 藏区高速兴康特大桥隧道锚岩体力学性质及稳定性分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。