

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0687

铁路悬索桥隧道式锚碇设计计算方法研究

江 南^{1,2}, 黄 林¹, 冯 君^{1,2}, 张圣亮¹, 王 铎¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 悬索桥锚碇分为隧道式锚碇和重力式锚碇, 采用隧道锚能较好地利用锚址区的地质条件, 工程量相对重力锚小, 性价比高且对周边环境扰动小。然而, 隧道锚尚未形成相对完整的定量设计方法, 其设计和施工主要依靠工程经验。结合我国首座铁路悬索桥隧道式锚碇工程, 总结分析了隧道锚的 4 种破坏模式, 即锚碇体侧壁界面破坏、倒圆锥台破坏、边坡整体滑移及锚碇体压缩破坏; 建立了隧道锚典型破坏模式的计算模型, 并基于极限平衡理论推导出相应的承载力计算公式; 使用有限元法对关键设计参数进行敏感性分析; 给出了隧道锚设计计算操作流程及方法, 并针对依托工程给出了一个较为完整的设计范例。研究成果对铁路悬索桥隧道式锚碇设计具有指导意义。

关 键 词: 隧道式锚碇; 破坏模式; 设计方法; 有限元法; 极限平衡

中图分类号: U 448.25; U443.24

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2020) 03—0999—12

Research on design and calculation method of tunnel-type anchorage of railway suspension bridge

JIANG Nan^{1,2}, HUANG Lin¹, FENG Jun^{1,2}, ZHANG Sheng-liang¹, WANG Duo¹

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The anchorage of suspension bridge is divided into tunnel-type anchorage and gravity anchorage. The tunnel-type anchorage can effectively use the geological conditions of the anchored area and requires less engineering in comparison with the gravity anchorage. It is also characterized with high cost performance and low disturbance to surrounding environment. However, the tunnel-type anchorage has yet to form a relatively complete, quantitative design method with its current design and construction mainly depend on engineering experience. Combined with the tunnel-type anchorage project of China's first railway suspension bridge, four failure modes of tunnel-type anchorage are summarized and analyzed, that is, the interface failure of side wall of anchorage, the failure of inverted cone platform, the failure of slope sliding, and the compression failure of anchorage. The calculation model is established according to the typical failure mode, and the corresponding simplified calculation formula of bearing capacity is derived based on the limit equilibrium theory. The sensitivity analysis of the key design parameters is carried out by using the finite element method. The design and calculation method of tunnel-type anchorage are given, and a relatively complete design for the project is provided to set an example. The research results can help future design of tunnel-type anchorage of railway suspension bridge.

Keywords: tunnel-type anchorage; failure mode; design method; finite element method; limit equilibrium

1 引 言

对于悬索桥的设计, 我国有公路悬索桥设计规范^[1], 其他国家只有总体的桥梁规范^[2-4], 而专门针对铁路悬索桥的规范尚未编制。在我国公路悬索桥设计规范中, 只给出了对隧道锚应进行空间结构受

力分析, 验算混凝土及洞壁的强度及锚碇体的抗拔力的原则。其他国家规范, 如美国国家高速公路和交通运输协会(AASHTO)规范根本无相关条文^[4]。可以看出, 隧道锚尚未形成相对完整的定量设计方法, 其设计和施工主要依靠工程经验。

目前已有一些成功的悬索桥隧道锚工程实例,

收稿日期: 2019-04-16

修回日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51408495)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation(51408495).

第一作者简介: 江南, 女, 1978 年生, 博士, 主要从事大跨桥梁受力分析的研究工作。E-mail: jn2838237@126.com

可供隧道锚设计参考。隧道锚几何尺寸拟定方面,朱玉^[5]结合沪蓉国道四渡河大桥隧道锚,将锚体尺寸拟定分为截面设计和锚体长度两方面,相比而言,锚体长度拟定较为困难;在选择隧道锚截面形式时,江南等^[6]采用有限元方法对比马蹄形和圆形两种截面形式,结果表明圆形断面承载性能优于马蹄形断面。关于隧道锚稳定性,汪海滨等^[7]结合国道 214 线角笼坝大桥,提出了隧道式复合锚碇(隧道式锚碇+预应力锚索)的设计计算流程,并给出了后部锚索设计方法、锚碇拉杆抗拔极限承载力计算方法以及锚碇整体稳定的计算方法。

综上所述,诸多学者对隧道锚的力学性能进行了研究,在其破坏模式、承载机制、设计计算方法等方面取得了进展,但仍存在以下问题亟待解决^[8]:①关于隧道锚破坏模式的研究距离量化分析阶段尚有距离,分类依据不够充分;②隧道锚尚未形成较为完备的设计计算理论,如承载力计算方法、锚碇体与岩体界面剪应力计算方法等尚不成熟。本文依托我国在建的首座铁路悬索桥(丽江至香格里拉铁路云南金沙江大桥),在总结和分类隧道锚破坏模

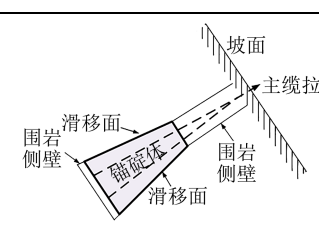
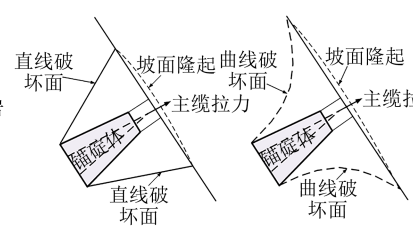
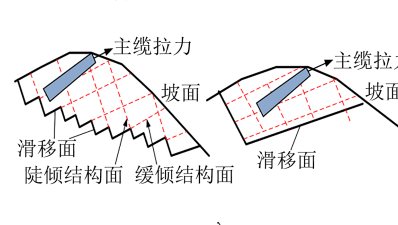
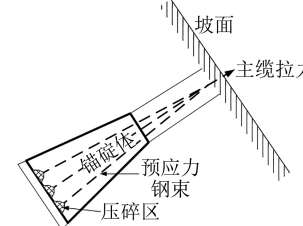
式的基础上,建立较为典型的破坏模式计算模型,推导相应的简化承载力计算公式,并给出了隧道锚设计计算的操作流程和方法。与此同时,结合具体工程实例,给出了较为完整的设计实例,可供铁路悬索桥隧道锚设计参考。

2 隧道锚破坏模式

在悬索桥的大缆荷载作用下,隧道锚的荷载从锚碇体逐渐转移到围岩中。随着荷载的增加,锚碇体和围岩的变形逐渐增大,这受到围岩的力学性质和锚碇体的几何形状的影响。最后,隧道锚将表现出不同的变形破坏模式。模型试验、数值分析及工程实践表明,隧道锚的破坏模式可以概括为表 1。据表可知,隧道锚破坏模式的分类与隧道锚的荷载传递机制密切相关^[8]。主缆的张拉力首先作用在锚体上,然后通过锚体与围岩的接触传递到围岩体内。锚碇体、接触面和围岩的相对强度决定了破坏模式的转变过程。对于相同的隧道锚,在相同的结构尺寸和埋深条件下,如果锚体强度较低,则容易首先发生锚体破碎的破坏模式。如果混凝土的强度足够,

表 1 隧道锚破坏模式分类

Table 1 Classification of failure modes of tunnel anchorage

破坏模式	发生条件	破坏机制	破坏位置	示意图
锚碇体侧壁界面破坏	当围岩完整性较好、质量较高,隧道锚埋深较大,锚碇体与围岩接触界面的结合程度较低时	这是隧道锚最为常见的破坏模式,锚碇体与围岩界面的结合程度差是导致发生该类破坏模式的主要原因,严格来讲,该滑移破坏面实际上是一个具有一定厚度的剪切破裂带。	锚碇体与围岩侧壁接触部位	
倒圆锥台破坏	当围岩完整性较差、质量较低,节理裂隙发育,而且隧道锚埋深较小,但锚碇体与围岩接触面结合程度较好时 ^[8]	破坏面主要出现在围岩之中,破坏面的平面形态可能为直线(立体形态为倒圆锥台形),也可能为曲线(立体形态为喇叭形倒圆锥台形),围岩体的破坏形态可能与围岩的完整性和节理裂隙发育程度有关 ^[8] 。	靠近锚碇体围岩内部	
边坡整体滑移	隧道锚所在坡体中含优势软弱结构面	软弱结构面构成不利组合,缆力荷载作用下,锚碇体连同附近围岩作为边坡的一部分发生整体性滑移破坏,具体可能表现为两种模式,一种是沿由两组软弱结构面形成的台阶状滑面破坏,另一种是沿缓倾结构面切断岩桥而形成的反倾平面滑面破坏 ^[9] 。	含锚碇体所在边坡	
锚碇体压缩破坏	主要由锚碇体混凝土强度不足引起	在施加预应力阶段,锚碇体前后端面均承受压应力,施加缆力直至超载阶段,锚碇体前端的压应力减小,后端压应力增加,如果混凝土强度不足,则可能在锚碇体后端面预应力钢束的锚固处将混凝土材料压碎 ^[8] 。	锚碇体后端面受压区	

且锚体与围岩之间的界面强度相对较弱, 则转化为锚体侧壁界面的滑动破坏模式。如果接触面的接触程度足够好, 很容易出现围岩破裂的破坏模式, 甚至边坡的整体滑移破坏模式。

3 隧道锚极限承载力计算方法

隧道锚的几何破坏形态与机制决定了计算方法的选择, 不存在统一的、可以普遍适用的承载力计算公式。另外, 构成隧道锚承载能力的各部分的不同步性使得计算公式过于复杂, 并且实际意义不大^[8]。因此, 下文针对较为常见的隧道锚破坏模式, 采用传统的极限平衡理论推导其承载力计算公式。

3.1 锚碇体侧壁界面破坏模式

假设在主缆荷载作用下, 锚碇体侧壁与围岩界面处整体达到极限平衡状态, 此时作用在锚碇体底端面的总荷载即为隧道锚的极限承载力 P_u , 锚碇体的受力如图 1 所示^[8]。

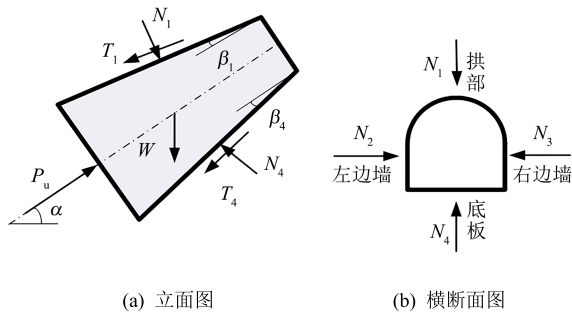


图 1 结合处破坏时隧道锚受力示意图

Fig.1 Force schematic diagram of tunnel-type anchorage when contact joint failed

根据沿锚碇体轴向的受力平衡条件, 可以得到隧道锚的极限承载力 P_u 的计算公式为

$$P_u = \sum_{i=1}^4 (T_i \cos \beta_i + N_i \sin \beta_i) + W \sin \alpha \quad (1)$$

式中: T_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为作用在锚碇体拱部、左边墙、右边墙和底板接触界面上的摩阻力^[8]; β ($i=1, 2, 3, 4$) 为锚碇体拱部、左边墙、右边墙和底板侧面与锚碇体轴向的夹角, 即扩展角; W 为锚碇体自身的重量; α 为锚碇体轴向与水平面的夹角, 即倾斜角。 N_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为作用在锚碇体拱部、左边墙、右边墙和底板侧壁上的法向合力 (如图 1(b)所示)。 N_i 可表示为

$$N_i = \sigma_i A_i \quad (2)$$

式中: σ_i 为作用在锚碇体各侧壁上的平均法向应力; A_i 为各侧壁的面积。要准确地计算法向应力

σ_i 的量值比较困难, 因其数值大小受隧道围岩质量、隧道施工方法、锚碇体埋深以及锚碇体浇筑材料性质等因素影响, 此处将其视为隧道围岩压力, 根据铁路隧道围岩级别加以估算^[10]。围岩压力按松散压力考虑, 垂直均布应力 $q = \gamma h$, $h = 0.41 \times 1.79^S$, 其中, γ 为围岩重度, h 为围岩压力计算高度 (m), S 为围岩级别。水平均布应力按表 2 确定。

表 2 隧道围岩水平均布应力^[10]
Table 2 Average stress of surrounding rock^[10]

围岩级别	I~II	III	IV	V	VI
水平均布应力	0	<0.15q	(0.15~0.30)q	(0.30~0.50)q	(0.50~1.00)q

由此得到, 作用在锚碇体表面的法向应力 σ_i 根据作用方向和部位可分为垂直法向应力 (拱部 σ_1 及底板 σ_4) 和水平法向应力 (左边墙 σ_2 及右边墙 σ_3), 垂直法向应力与隧道围岩竖向压应力相对应, 有拱部 $\sigma_1 = q$, 底板应力 σ_4 由于受锚碇体自重的影响, 一般较拱部应力 σ_1 要大, 偏于安全同时便于计算取 $\sigma_1 = \sigma_4$, 因此有^[8]

$$\sigma_1 = \sigma_4 = 0.41\gamma \times 1.79^S \quad (3)$$

锚碇体水平法向应力与隧道围岩水平应力对应, 因此有

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \eta \times 0.41\gamma \times 1.79^S \quad (4)$$

式中: η 为水平应力与竖向应力的比例系数, 根据铁路隧道围岩级别 S 确定。

假设接触面的力学行为服从摩尔-库仑抗剪强度定律, 有

$$T_i = N_i \tan \mu + c A_i = (\sigma_i \tan \mu + c) A_i \quad (5)$$

式中: c 、 μ 分别为锚碇体与围岩接触面的黏聚力和摩擦角。

将式 (2) ~ (5) 代入式 (1) 中, 并假设锚碇体各侧壁表面与轴向的夹角相等, 即扩展角 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta$, 得到隧道锚极限承载力的简化表达式为^[8]

$$P_u = 0.41\gamma 1.79^S (A_1 + \eta A_2 + \eta A_3 + A_4) (\cos \beta \tan \mu + \sin \beta) + c (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \cos \beta + W \sin \alpha \quad (6)$$

3.2 倒圆锥台破坏模式

倒圆锥台破坏模式的破坏面主要出现在围岩之中, 破坏面的平面形态可能为直线, 也可能为曲线, 本文以文献^[8]的试验中观测到的喇叭形倒圆锥台

形破坏面为例研究其极限承载力。此时隧道锚的破坏形态及受力如图2所示。

根据文献[8]可知,隧道锚发生喇叭形岩体破坏时,其实际破坏面为 $FABE$ (见图2(a)),其中 AF 和 BC 为侧滑面, AB 为锚碇体底面, EF 为坡面,由此包围形成一个完整的喇叭形破裂体,破裂面上均达到极限平衡状态,此时作用在锚碇底面 AB 上的法向力即为隧道锚的极限承载力 P_u 。由破裂体的力学平衡条件分析可知,极限承载力 P_u 主要由两部分组成,一是喇叭形破裂体的自重分量,二是破裂面周围岩体对破裂体的摩阻力。为便于工程应用,将非规则几何体的喇叭形破裂体根据重量等效原则转化为倒圆锥台体,即将实际的曲线型破坏面 (AF 、 BE) 等效为直线型破坏面,称为计算破坏面 (AD 、 BC),如图2(a)所示。计算破坏面与锚碇体底面的夹角 θ 值需根据计算破裂体与实际破裂体重量相等来加以确定,该 θ 值与隧道锚围岩特征及锚碇体几何形态相关,根据文献[8]开展的隧道锚室内试验结果分析,计算破坏面与锚碇体底面夹角 θ 值为 73° 。据此,将喇叭形破坏 ($FABE$) 隧道锚分析转化为倒圆锥台体 ($DABC$) 分析。

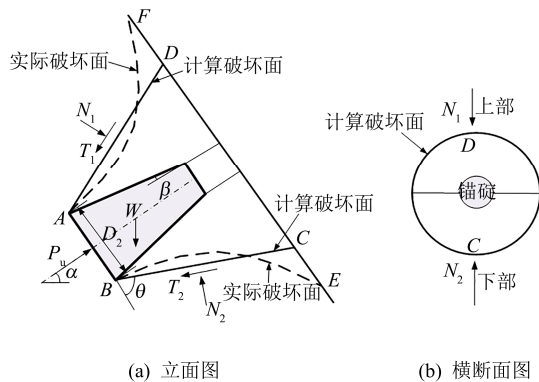


图2 喇叭形破坏时隧道锚受力示意图

Fig.2 Force schematic diagram of tunnel-type anchorage when trumpet-shaped damage happened

根据破裂体 $DABC$ 沿底滑面方向受力的平衡条件,可得

$$P_u \cos(90^\circ - \theta) = T + W_{\text{锥}} \sin(\theta + \alpha - 90^\circ) \quad (7)$$

式中: T 为作用于滑面方向的总切向力; $W_{\text{锥}}$ 为破裂锥体总重量。

根据垂直于底滑面方向受力平衡条件,有

$$W_{\text{锥}} |\cos(\theta + \alpha - 90^\circ)| = N + P_u \sin(90^\circ - \theta) \quad (8)$$

式中: N 为作用于底滑面上的总法向力, $|\cos(\theta + \alpha - 90^\circ)|$ 表示取其绝对值,以确保隧道锚倾

角较小时法向受力仍为正值。

假设滑面上岩体受力服从摩尔-库仑破坏准则,则有

$$T = N \tan \varphi + c' \cdot A' \quad (9)$$

式中: A' 为底滑面的有效接触面积,计算时可近似取计算破裂倒圆锥体的下半部面积 (如图2(b)所示); c' 、 φ 分别为围岩的黏聚力和内摩擦角。

联合式 (7) ~ (9) 可得:

$$P_u \sin \theta = W_{\text{锥}} \sin(\theta + \alpha - 90^\circ) + W_{\text{锥}} |\cos(\theta + \alpha - 90^\circ)| \tan \varphi - P_u \cos \alpha \tan \varphi + c' A' \quad (10)$$

将上式简化,可得隧道锚极限承载力的计算公式:

$$P_u = \frac{W_{\text{锥}} \sin(\theta + \alpha - 90^\circ) + W_{\text{锥}} |\cos(\theta + \alpha - 90^\circ)| \tan \varphi + c' A'}{\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi} \quad (11)$$

4 隧道锚设计参数敏感性分析

影响隧道锚承载力的主要因素可分为两类[8]:

一类是隧道锚所在区域岩体的地质条件,包括围岩质量和锚碇体/围岩接触界面强度;另一类是锚固结构的几何特征,包括断面尺寸、断面形式、扩展角 β 、轴向长度 L 、锚碇体倾斜角 α 等。典型隧道锚的主要几何特征如图3所示。

工程实践表明,锚碇体的倾斜角 α 对隧道锚夹持能力影响不大,在此处将倾斜角 α 作为恒定参数,即统一将锚碇体竖直放置。建立的隧道式锚碇计算模型如图4(a)所示。根据文献[8]将锚碇体尺寸确定为前端面直径为 14.0 m,后端面直径为 18.8 m。模型周边距锚碇体中轴线径向距离为 60 m,总高度为 105 m,其中锚碇体轴向长度为 45 m,上覆岩体厚为 50 m,锚碇体后端面以下为 3 m 深的后锚洞室。

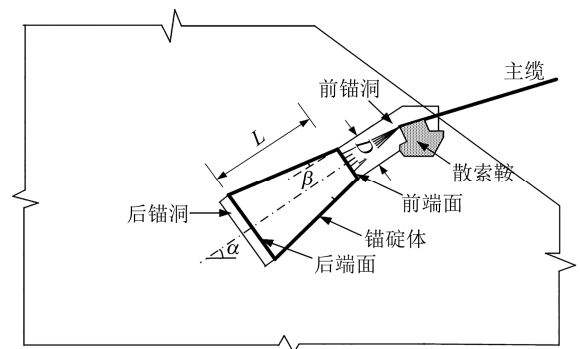
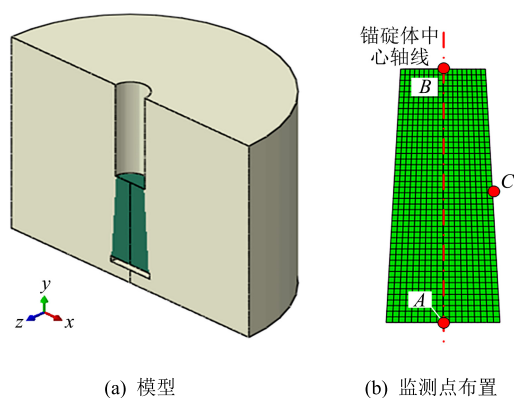


图3 典型隧道锚的几何特征

Fig.3 Geometric characteristics of typical anchorage



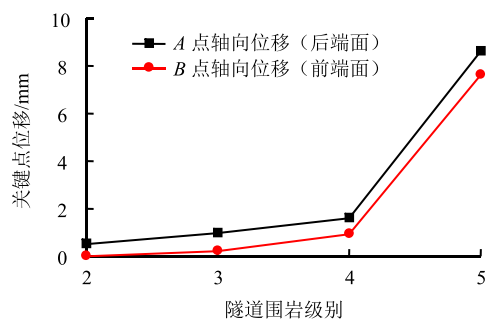
(a) 模型

(b) 监测点布置

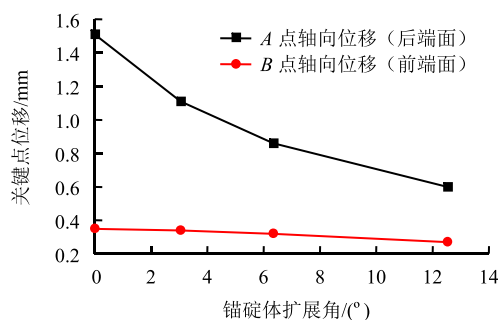
图4 影响因素分析有限元模型

Fig.4 Finite element model for analysis of influencing factors

荷载包括初始地应力场和主缆加载, 初始地应力按自重应力场考虑, 主缆荷载则处理为均布压应力作用在锚碇体后端面。锚碇体与围岩接触面视为完全粘结, 无相对滑移, 岩体本构采用文献[8]建立的损伤模型。另为便于结果分析, 在锚碇体上布置3个监测点, 其中A点位于锚碇体后端面中心位置, B点位于前端面中心位置处, C点位于锚碇体中部侧壁处, 具体分布如图4(b)所示。由此得到在设计缆力为310 419 kN荷载作用下, 围岩级别和锚碇体扩展角对隧道锚轴向位移和接触面剪应力的影响结果见图5~8。由图6、8可以看出, 在不同围岩级别



(a) 隧道围岩级别的影响



(b) 锚碇体扩展角的影响

图5 围岩级别和锚碇体扩展角对关键点位移的影响
Fig.5 Impacts of surrounding rock level and anchorage expansion angle on displacement of key points

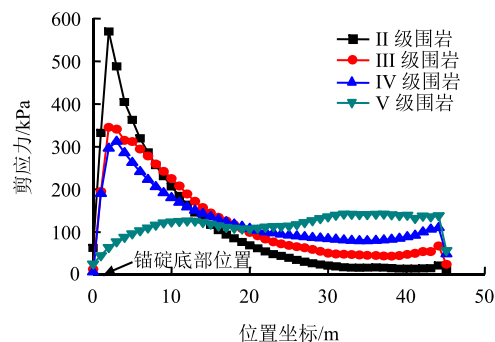
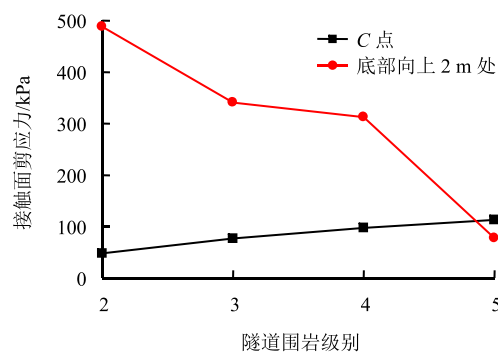
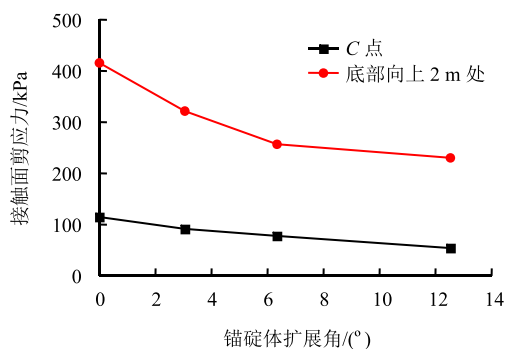


图6 围岩级别对接触面剪应力分布的影响

Fig.6 Shear stress distribution curves of interface between anchorage and surrounding rock



(a) 隧道围岩级别的影响



(b) 锚碇体扩展角的影响

图7 围岩级别和锚碇体扩展角对关键点剪应力的影响
Fig.7 Impacts of surrounding rock level and anchorage expansion angle on shear stress of key points

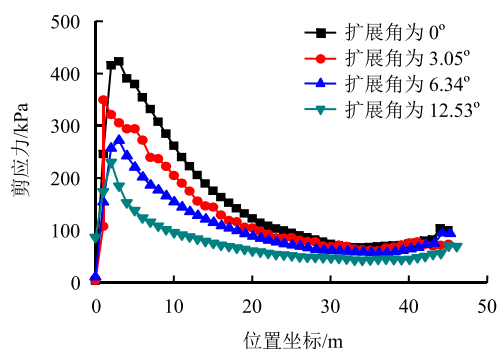


图8 锚碇体扩展角对接触面剪应力分布的影响
Fig.8 Influences of anchorage expansion angle on shear stress distribution of contact surface

和不同锚碇体扩展角因素下, 接触面剪应力峰值基本都出现在锚碇体底部向上 2 m 左右, 故数据分析时选择该点及 C 点同时进行剪应力分析。

4.1 铁路隧道围岩级别影响

根据《铁路隧道设计规范》(TB10003—2016)^[10], 围岩可分为 6 级, 除去完整的 I 级极硬岩和严重破碎的 VI 级断层带, 仅考虑 II~V 级围岩的影响。由于规范给出的各级围岩的参数均为一范围值, 因此在有限元计算中取范围中间值作为参考值计算, 见表 3。

表 3 计算采用的各级围岩物理力学指标
Table 3 Physical and mechanical indicators of surrounding rock at all levels engaged in calculation

围岩级别	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 E/GPa	泊松比	内摩擦角 $\mu/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa
II	26.0	26.5	0.23	55	1.80
III	24.0	13.0	0.27	44	1.10
IV	21.5	3.65	0.32	33	0.45
V	18.5	1.50	0.40	24	0.12

由图 5 可以看出, 围岩性质越好, 锚碇体的轴向位移越小; 围岩级别与轴向位移关系曲线以 IV 级围岩为拐点, 围岩性质好于 IV 级时位移变化较小, 差于 IV 级时位移陡增。由此说明围岩性质越好, 隧道锚的承载性能越好。在确定隧道锚的埋置位置时, 应尽可能地选择性质不差于 IV 级围岩的岩体, 这样就为在不改良岩体的前提下获取更高的承载力提供了地质基础^[8]。

图 6 给出了不同围岩级别情况下, 锚碇体与围岩接触面剪应力沿轴线方向的分布曲线图。图中显示, 围岩综合力学性质的好坏对接触面的应力分布有着显著影响。从整体来看, 围岩性质越差, 剪应力的分布越趋向均匀化。当围岩性质降低为 V 级时, 剪应力分布曲线与 II、III、IV 级相比发生本质变化。II、III、IV 级的剪应力分布曲线在峰值以后基本为指数衰减型, 具有弹性受力状态特征, 表明隧道锚安全裕度还较高; 而 V 级在峰值以后基本为一直线, 表明整个接触面已进入塑性状态, 抗剪强度已经得以充分发挥, 隧道锚接近极限状态。因此, 对于该隧道锚而言, 其围岩的性质不宜差于 IV 级围岩^[8]。

4.2 锚碇体扩展角影响

锚碇体前端面直径 $D_1 = 14 \text{ m}$ 保持不变, 扩展角 β 按 0° 、 3.05° 、 6.34° 、 12.53° 变化。由图 5 可知, 随着扩展角的增加, 锚碇体的轴向位移相应减少, 由图 7 和图 8 可知, 接触面上的剪应力峰值降低,

应力集中现象得以改善。扩展角 β 体现了围岩对锚碇体的夹持能力^[11]。随着扩展角的增加, 锚碇体与围岩接触面上的正应力增大, 摩擦阻力得以发挥, 因此扩展角的增大有利于锚碇体的承载。

5 隧道锚设计计算流程及方法

5.1 隧道锚埋置条件设计

5.1.1 锚碇体埋深确定

根据《铁路隧道设计规范》(TB10003—2016)^[10] 将围岩分为 I~VI 共计 6 个级别, 级别编号越小则岩体质量越好。

根据前述围岩对隧道锚承载性能影响分析已知, 围岩性质越好, 隧道锚的承载性能越好, 在确定隧道锚的埋置位置时, 应至少选择性质不差于 IV 级围岩的岩体。另外, 不同卸荷程度带内岩体的完整性、均匀性区别较大, 隧道锚受力较大, 应尽可能地选择均匀性较好的地层作为隧道锚持力层。因此, 在设计锚碇体埋深时, 应综合考虑卸荷带划分情况及围岩级别, 由此确定出锚碇体的埋深。

5.1.2 岩体力学参数确定

锚碇体埋深确定后, 接下来就是围岩物理力学参数的确定。目前在工程设计中一般将围岩等效为连续均质材料加以处理, 设计使用的力学参数实质上属于一种平均化的宏观力学参数。因此, 在确定力学参数时, 可遵循以下两个原则: 一是将围岩视为类均质材料, 通过力学试验获取其宏观力学参数; 二是针对一些较大尺度的软弱带 (如断层、层间挤压错动带等), 则需单独测试其力学参数并在计算模型中单独加以考虑。

5.2 锚碇体结构设计

锚碇体结构设计包括锚碇体倾斜角设计, 锚碇体横断面设计, 锚碇体扩展角设计, 锚碇体轴向长度设计, 锚碇体与围岩接触面处理方法设计等。

5.2.1 锚碇体倾斜角设计

锚体的倾斜角 α 是指锚体的轴向与水平面之间的角度。倾斜角越大, 锚碇体重力分量的承载贡献增大, 对隧道锚承载有利, 但是散索鞍基础受力增加, 对地基承载力要求提高, 因此, 该倾斜角应该控制在一定范围内, 一般设计为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内比较合适^[7]。

5.2.2 锚碇体横断面设计

对于锚碇体横断面设计主要应考虑 3 个方面^[12]: ①锚碇体断面要足够大以满足大缆散索后锚固空间的需要。②锚碇体的截面不应太大, 左右锚体之间的距离太近, 以致锚体之间的围岩受到严重

干扰, 强度降低太多。③锚碇体部分的外轮廓有利于岩体开挖阶段的稳定性, 可用于参考传统的隧道部分。关于锚碇体横断面形状问题, 文献[6]采用三维有限元方法研究了断面形状对隧道锚承载性能的影响, 结果表明, 在保持断面面积相同的条件下, 圆形锚碇的极限承载力高出马蹄形锚碇约 18%。然而, 马蹄形设计一般用于铁路隧道, 其建设积累了许多成功经验, 因此, 为保证隧道施工方便同时又能改善隧道锚承载性能, 设计时可尽量使隧道断面接近于圆形, 例如令隧道高度和宽度相等。

5.2.3 锚碇体扩展角设计

扩展角 β 是指锚碇体侧面与轴线之间的角度, 扩展角反映了围岩对锚碇体的夹持能力。本文研究表明, 当扩展角为 0 时, 锚碇体相当于等截面的短粗抗拔桩, 主缆荷载主要通过锚碇体与围岩接触面上的黏结摩阻力来平衡; 随着扩展角的增加, 接触面上的正应力增大, 摩擦摩阻力得以发挥, 因此扩展角的增大有利于锚碇体的承载。但是扩展角的增大会导致锚碇体后端面面积增大, 尤其是锚碇较长时, 开挖工程量及施工难度急剧增加。另外, 由文献[9]中锚碇体几何因素的影响分析可知, 锚碇体的扩展角 β 、轴向长度 L 及断面直径 D 对隧道锚的承载性能均具有积极影响, 但三者的敏感程度排序应为: $\beta > D > L$, 也就是说, 在隧道锚设计中, 应该首先考虑增加 β , 然后是 D , 最后是 L 。

因此, 对于设计缆力较大的铁路悬索桥, 建议采用一定的扩展角, 但不宜过大, 可设计为 $2^\circ \sim 10^\circ$ 。

5.2.4 锚碇体轴向长度设计

在锚碇体横断面、扩展角等初步拟定后, 可根据隧道锚的抗滑稳定要求设计锚碇体的轴向长度。假设由上部结构要求确定的设计缆力为 P (单缆), 抗滑稳定安全系数为 K , 隧道锚的极限承载力为 P_u , 则应满足下式:

$$P \leq \frac{P_u}{K} \quad (12)$$

工程实践表明, 沿锚碇体侧壁界面破坏是最为常见的破坏模式, 因此, 在初拟锚碇体长度时, 可按该破坏模式考虑, 此时极限承载力 P_u 的计算公式见式(6), 将该公式变换形态, 并将锚碇体断面近似按等截面考虑, 可得到锚碇体长度的初拟公式:

$$L = \frac{KP}{0.2\gamma_l 1.79^S (1+\eta) \tan \mu U_1 + cU_1 + S_1 \gamma_m \sin \alpha} \quad (13)$$

式中: γ_m 为锚碇体重度。 S 取值范围 $1 \sim 6$; η 根据

S 确定。 S 为 I~II 级时 $\eta = 0$, S 为 III 级时 $\eta = 0.15$, S 为 IV 级时, $\eta = 0.15 \sim 0.30$, 具体参考表 2。 U_1 、 S_1 分别为锚碇体前端面的周长、面积; K 可取为 $4.00 \sim 8.00$ 。

关于 K 值的选取, 目前在有关规范中尚无明确规定, 只是通过对一些隧道锚实例的研究, 获得了一些经验。对于重庆鹅岩大桥^[13], 通过实地结构试验结果预测其安全系数为 $6.09 \sim 6.15$; 沪蓉国道四渡河大桥隧道锚安全系数的数值分析^[14-15]结果为 7.00 , 模型拉拔试验^[16]结果为 7.60 ; 渝湘高速矮寨大桥^[17]隧道锚安全系数为 7.00 ; 国道 214 角笼坝大桥^[11]隧道锚安全系数为 4.22 (未考虑锚碇体自重); 广东虎门大桥隧道锚(初设方案)现场结构模型试验^[18]结果表明, 其安全系数为 4.80 。

关于本文提出的锚碇体长度拟定公式与文献[5]提出的锚长拟定公式的对比说明。文献[5]根据锚碇体周围剪应力分布特点及最大剪应力准则得到了锚碇体长度的拟定公式, 该公式将锚体截面近似按等截面考虑, 同时略去锚碇体的自重, 且不考虑接触面摩擦强度即 μ 的贡献, 公式简单明了, 易于使用, 计算结果偏于保守; 本文提出的公式则考虑了锚体自重及接触面摩擦强度。文献[5]所提公式是根据点破坏准则推求, 该公式所反映的承载力实际相当于临塑荷载, 即任意一点达到塑性状态时所对应的荷载; 本文所提公式则是根据锚碇体整体破坏准则推得, 其所反映的承载力相当于极限荷载, 即整体达到塑性状态对应的荷载。因此, 在拟定锚碇体长度时, 本文公式和文献[5]的公式均可使用, 只是在选取 K 时需注意: 应用本文公式宜取高值, 应用文献[5]公式宜取低值。

5.2.5 锚碇体与围岩接触面处理方法设计

锚碇体是在隧道开挖完成后现场浇筑而成, 锚碇体与围岩之间将形成一个人工接触界面, 由隧道锚的荷载传递规律可知, 该接触界面的力学性质对隧道锚的承载性能起控制作用, 因此接触面的处理方法设计就显得十分重要。就接触面的几何形态而言, 处理方法大致可以分为两类, 一是锚碇体表面与围岩表面平直型接触; 二是锚碇体与围岩之间设置防滑齿坎。文献[8]采用模型试验方法对接触面力学特性对隧道锚承载性能的影响进行了对比分析, 结果表明通过增加防滑齿坎, 隧道锚的极限承载力较平直型光面情况增加幅度达 50%, 另外, 锚杆的增设对提高隧道锚极限承载力作用虽然有限, 然而它有助于提高隧道锚的整体刚度(抗变形性)。因此, 在实际设计时, 可在锚碇体与围岩的接触面位置设

置防滑齿坎,有条件时,可在此基础上增加隧道洞周的系统锚杆。

5.3 锚固系统设计

据锚固系统所采用结构材料的不同,可分为无预应力的预埋型钢锚固型式和有预加力的预应力钢束锚固型式^[12],目前主要采用预应力钢束锚固型式。从锚固系统着力点位置的差别又可分为前锚式和后锚式。前锚式是将钢缆锚固于锚碇体的前端面,而后锚式则是将钢缆穿过锚碇体,直接锚固于锚碇体后端面。前锚式的钢缆一般与混凝土黏结为一体,而后锚式的钢缆穿过预埋于锚碇体中的管道中,钢缆与混凝土之间无黏结。从受力角度分析,前锚式相当于拉力型锚杆,荷载由锚碇体前端向后端传递,锚碇体混凝土倾向于受拉状态,受泊松比效应影响,锚碇体发生径向收缩,从而导致锚碇体与围岩界面结合程度降低,这些均对隧道锚承载不利;而后锚式相当于压力型锚杆,荷载由后向前传递,锚碇混凝土受压承载,即充分利用了混凝土较高的抗压强度,又由于泊松比效应使锚碇体侧向膨胀从而增大了接触正应力,因此后锚式锚固系统要好于前锚式锚固系统。因此,建议采用后锚式锚固系统。

5.4 隧道锚承载性能检算

隧道锚承载性能检算包括整体承载力计算、变形检算、锚碇体及围岩局部强度检算等。承载力计算方法应根据隧道锚破坏模式选择,如无法确定破坏模式时,可对多种可能破坏模式进行计算,取其最小值作为承载力计算值。关于隧道锚的变形检算,由于隧道锚力学体系属于复杂的三维力学问题,尚无简便的解析计算方法,可采用三维数值分析方法进行检算。值得说明的是,工程实践表明,隧道锚的抗滑安全度一般较高,工作状态时所对应的变形一般较小(多为 mm 级),而悬索桥对位移的适应能力较强,如日本本四联络公团以中孔跨径为 1 000~1 500 m 的悬索桥为对象,规定长大吊桥锚碇水平变位的容许值 $\delta = 0.017L_s$ (cm), L_s 为悬索桥中跨跨度(m),相当于允许位移范围为 17.0 cm~25.5 cm;江阴大桥参照《日本本四联络桥下部结构设计基准同解说》^[19]中的做法,即变位引起的塔底应力不超过容许应力的 5%,由此确定出:水平位移限值 $\Delta x = 10$ cm,沉降限值 $\Delta y = 20$ cm。

因此隧道锚检算可以抗滑稳定检算为主,以变形检算为辅。

6 实例分析

丽(江)香(格里拉)铁路金沙江特大桥初设

方案为双线钢桁梁悬索桥,线间距为 5 m,桥式桥跨采用 132 m+660 m+132 m,主梁采用钢桁梁桥面方案,主塔采用混凝土门式框架结构,主缆及吊索均采用镀锌高强钢丝,设计速度目标值为 120 km/h,线路标准为铁路双线。单个锚碇主缆张拉荷载为 310 419 kN (其中恒载为 251 816 kN,活载为 58 603 kN)。初步选用隧道式锚碇方案,桥梁两岸工程地质条件类似,下面以丽江岸为例进行设计计算。

6.1 隧道锚持力层的选择

桥址区斜坡较陡,坡角为 40°~50°,岩体以弱、微风化在为主。根据钻探、平硐、物探等资料显示,水平方向强卸荷带深约为 40~50 m,弱卸荷带深约为 70~80 m。强卸荷带内岩层产状较平缓,节理裂隙发育且多呈张开状,贯通性较好,裂隙充填物以次生黄泥和岩屑为主,岩体松弛掉块明显,岩体强度低,自然岸坡基本稳定。弱卸荷带内岩层产状逐渐变陡为 45°~60°,节理裂隙较发育多呈闭合状,贯通性较差,岩体松弛不明显,强度较高,岸坡较稳定,能够承受较大的压应力,但存在节理密集带。未卸荷带岩体强度高、岸坡稳定性好。

桥址区主要为片理化玄武岩,薄层状为主,局部为块状,岩层倾角较陡,为硬质岩石,岩质均一。隧道锚围岩分级如表 4 所示。最终选择未卸荷带作为隧道锚的持力层,隧道锚埋深约为 50 m (锚碇体前端面距坡面垂直距离)。

表 4 隧道锚围岩分级表

Table 4 Table of tunnel-type anchorage surrounding rock classification

位置	丽江端/m	香格里拉端/m
V 级	0~10	0~15
IV 级	10~35	15~25
III 级	>35	>25

6.2 隧道锚围岩力学参数的确定

根据工程地质条件分析,在室内岩石力学试验参数的基础上,结合现场原位试验参数,考虑到工程重要性及岩体完整程度,锚碇区岩体强度参数选取如表 5 所示。

6.3 锚碇体结构设计

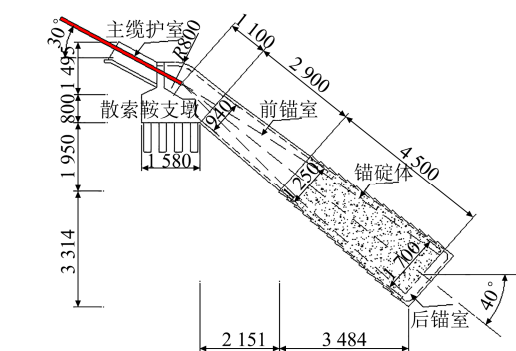
锚碇体倾斜角 α 一般设计为 30°~45° 范围内比较合适,本工程将倾斜角设计为 40°。考虑到满足大缆散索后锚固空间的需要以及左右锚体的距离,借鉴常规的铁路隧道断面,锚碇体横断面采用马蹄形,前端面尺寸宽为 12 m、高为 12.5 m。扩展角 β 按平均值 2.5° 考虑。

表5 锚址区岩体强度参数
Table 5 Strength parameters of rock mass in anchorage area

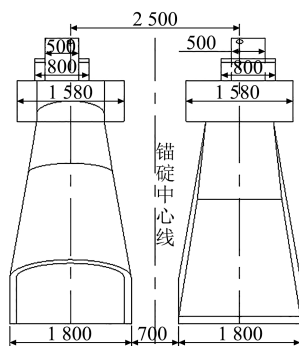
分类	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /MPa	摩擦系数 f
强卸荷带	25	0.4	0.4
弱卸荷带	26	0.9	0.5
未卸荷带	27	1.35	0.74
锚碇体/围岩接触面	—	0.9	0.5

$$L = \frac{6 \times 310\,419}{0.2 \times 26 \times 1.79^3 \times (1 + 0.15) \times 0.5 \times 43.9 + 900 \times 43.9 + 134.6 \times 25 \times \sin 40^\circ} = 43.9 \text{ m}$$

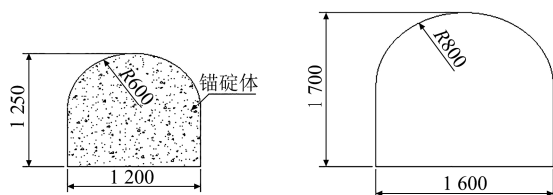
最终选取锚碇体长度 $L = 45 \text{ m}$ 。另外, 根据扩展角的取值, 可拟定出后端面尺寸为宽 16 m 、高 17 m 。由此绘制的隧道锚结构尺寸如图9所示。



(a) 立面图



(b) 平面图



(c) 前端面断面图

(d) 后端面断面图

图9 隧道锚结构尺寸图 (单位: cm)

Fig.9 Structure drawing of tunnel-type anchorage

下面计算锚碇体长度。单个锚碇的设计缆力为 $P = 310\,419 \text{ kN}$, 取抗滑安全系数 $K = 6$; 围岩重度 $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$, 围岩为III级, 即 $S = 3$, 水平应力与竖向应力的比例系数 $\eta = 0.15$; 锚碇体重度 $\gamma_m = 25 \text{ kN/m}^3$, 前端面周长 $U_1 = 43.9 \text{ m}$, 断面面积 $S_1 = 134.6 \text{ m}^2$; 锚碇体与围岩接触面的黏聚力 $c = 900 \text{ kPa}$, 摩擦系数 $\tan \mu = 0.5$ 。将上述参数代入锚碇体长度初拟公式(13)中, 可得

为提高锚碇体与围岩接触面的抗剪强度, 在其间设置抗滑齿坎, 单个齿坎高度为 0.5 m , 长度为 3.0 m , 如图9(a)所示。隧道开挖采用系统锚杆支护。散索鞍支墩、主缆护室和前锚室采用C45混凝土, 锚碇体采用C35聚丙烯纤维网抗渗混凝土。

6.4 锚固系统设计

锚固系统由索股锚固连接构造和预应力钢束锚固系统组成, 采用后锚式设计。索股锚固连接构造由拉杆组件、连接器组成; 预应力钢束锚固构造由管道、预应力钢绞线及锚具等组成。拉杆上端与索股锚头连接, 另一端与前锚面的连接器连接。锚固系统布置如图10所示。

6.5 隧道锚承载力检算

根据初拟的隧道锚几何关系可知: A_1 为马蹄形断面隧道的拱部侧面积, A_2 和 A_3 分别为隧道左、右边墙面积, A_4 为隧道底部侧面积, 分别计算其面积为: $A_1 = 989 \text{ m}^2$; $A_2 = A_3 = 348 \text{ m}^2$; $A_4 = 630 \text{ m}^2$ 。锚碇体体积为 $9\,574 \text{ m}^3$, 锚碇体重度 $\gamma_m = 25 \text{ kN/m}^3$, 因此锚碇体自重 $W = 239\,350 \text{ kN}$ 。扩展角 $\beta = 2.5^\circ$, 倾斜角 $\alpha = 40^\circ$ 。围岩重度 $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$, 围岩为III级, 即 $S = 3$, 水平应力与竖向应力的比例系数 $\eta = 0.15$ 。锚碇体与围岩接触面的黏聚力 $c = 900 \text{ kPa}$, 摩擦系数 $\tan \mu = 0.5$ 。

将上述各参数代入式(6)中, 可得该隧道锚的极限承载力为

$$P_u = 0.41\gamma 1.79^S (A_1 + \eta A_2 + \eta A_3 + A_4) (\cos \beta \tan \mu + \sin \beta) + c(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \cos \beta + W \sin \alpha = 57\,229.11 + 2\,081\,516.97 + 153\,851.22 = 2\,292\,597 \text{ kN}$$

单个锚碇的设计缆力为 $P = 310\,419 \text{ kN}$, 可见其最终的抗滑稳定安全系数 $K = P_u/P = 7.38$, 满足隧道锚的抗滑稳定要求。从极限承载力组成分析可知, $57\,229.11 \text{ kN}$ 为摩擦强度贡献部分, 占承载力

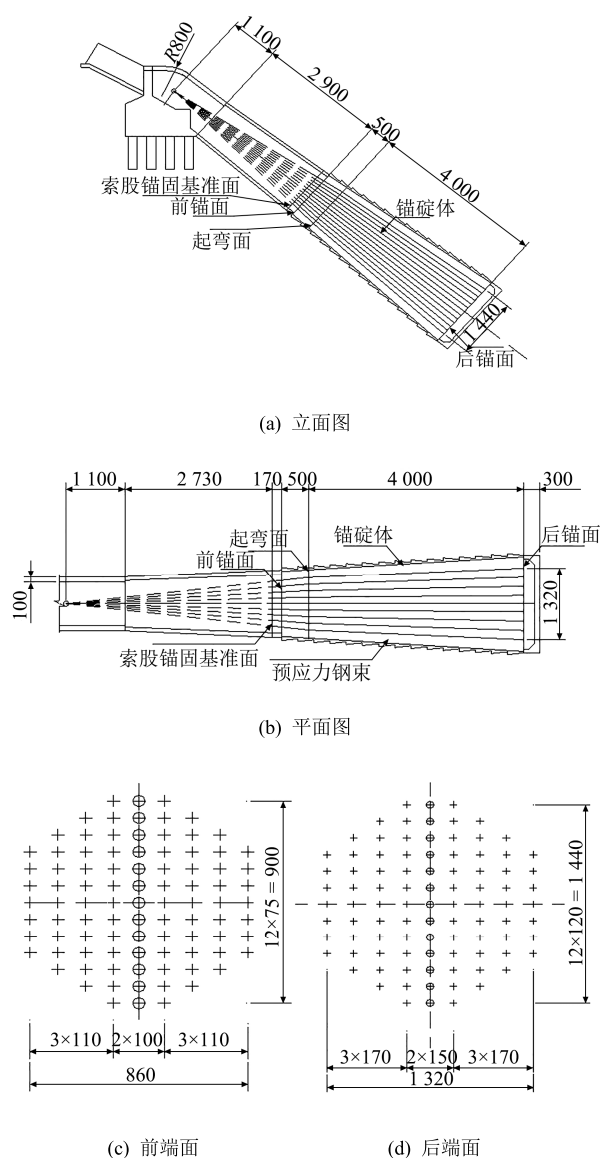


图 10 锚固系统布置图 (单位: cm)
Fig.10 Layout of anchorage system(unit: cm)

的比例约为 3%; 2 081 516.97 kN 为黏结强度贡献部分, 占承载力的 91%; 153 851.22 kN 为锚碇体自重贡献部分, 占承载力的比例约 6%, 可见锚碇体与围岩接触面的黏结强度对隧道锚的承载力起控制作用。

以上极限承载力检算的前提是假设隧道锚破坏模式为沿锚碇体侧壁界面滑移破坏, 采用该假设的原因在于该隧道锚设计埋深较大 (约 50 m), 如发生围岩体内倒锥体型的破坏模式则需克服破裂锥体巨大的自重和摩阻力作用, 按此破坏模式计算出的承载力将远远大于前者确定的承载力, 这并非真实的承载力。为验证以上结论, 下面按围岩破坏模式来计算隧道锚的极限承载力, 计算公式见式 (11)。模型试验结果^[10]表明计算破坏面与锚碇体底面的夹角 $\theta = 73^\circ$, 破裂锥体体积 $V_{\text{锥}}$ 可按圆台体积公式

计算, 圆台高度 $h = 95 \text{ m}$ (锚碇体底端面到坡面垂直距离), 下底半径 $r = 8 \text{ m}$, 上底半径 $R = 23.29 \text{ m}$, 由此可得破裂锥体总体积 $V_{\text{锥}} = \pi(R^2 + Rr + r^2)h/3 = 78\ 865 \text{ m}^3$; 锚碇体体积为 $9\ 574 \text{ m}^3$, 自重为 $239\ 350 \text{ kN}$; 破裂锥体中的岩体体积等于总体积 $V_{\text{锥}}$ 扣除锚碇体体积 ($9\ 574 \text{ m}^3$) 和前锚洞的体积 ($5\ 652 \text{ m}^3$), 可得岩体体积为 $63\ 639 \text{ m}^3$, 其自重为 $1\ 590\ 975 \text{ kN}$; 由此可得破裂锥体总重量 $W_{\text{锥}} = 1\ 830\ 325 \text{ kN}$; 底滑面有效接触面积 $A' = 4\ 667 \text{ m}^2$; 岩体强度平均按弱卸荷带考虑。将以上各参数代入式 (11) 中, 可得:

$$P_u = \frac{W_{\text{锥}} \sin(\theta + \alpha - 90^\circ) + W_{\text{锥}} |\cos(\theta + \alpha - 90^\circ)| \tan \varphi + cA'}{\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi} = 5\ 224\ 933 \text{ kN}$$

按此计算该隧道锚的抗滑稳定安全系数为 16.83, 远远大于按锚碇体侧壁界面破坏模式计算得到的 7.38。可见, 本文采用界面滑移破坏模式进行隧道锚承载力检算是合理的。

7 结 论

(1) 总结了隧道锚的 4 大类破坏模式, 即锚碇体侧壁界面破坏、倒圆锥台破坏、边坡整体滑移及锚碇体压缩破坏, 并指出了各自的发生条件及表现特征。该研究成果为隧道锚计算模型的建立提供了理论依据。

(2) 基于极限平衡理论, 针对锚碇体侧壁界面破坏和倒圆锥台破坏两类典型破坏模式, 提出了隧道锚的极限承载力计算方法。

(3) 针对隧道锚围岩地质条件 (围岩级别) 和锚碇体几何特征 (扩展角) 进行了敏感性分析, 发现围岩性质越好, 隧道锚的承载性能越好, 在确定隧道锚的埋置位置时, 应尽可能地选择性质不差于 IV 级围岩的岩体。当隧道围岩比较破碎时, 建议采取工程措施 (如喷锚注浆等) 增加围岩刚度及黏结力, 可较为显著地改善隧道锚的承载性能; 扩展角 β 体现了围岩对锚碇体的夹持能力, 随着扩展角的增加, 锚碇体的轴向位移相应减少, 接触面上的剪应力峰值降低, 应力集中现象得以改善。

(4) 提出了铁路悬索桥隧道锚的设计计算流程和方法, 并结合丽香铁路金沙江特大桥隧道锚给出了设计范例。对于锚碇体结构设计, 倾斜角选择 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围内为宜, 扩展角可设计为 $2^\circ \sim 10^\circ$, 隧道断面设计时可尽量接近于圆形, 例如令隧道高度和宽度相等; 在实际设计时, 可在锚碇体与围岩

的接触面位置设置防滑齿坎, 有条件时可增加隧道洞周的系统锚杆, 并采用后锚式锚固系统。

(5) 按锚碇体侧壁界面破坏, 根据极限承载力推导了初拟锚碇体长度公式, 该公式考虑了锚体自重及接触面摩擦强度, 其所反映的承载力相当于极限荷载, 即整体达到塑性状态对应的荷载, 但为偏安全考虑, 在选取安全系数 K 时宜取高值。

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院. JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG/T D65—05—2015 Specification for design of highway suspension bridge[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] British Standards Institution. BS5400—9.2 Steel, concrete and composite bridges[S]. London: [s. n.], 1985.
- [3] Standards Association of New Zealand. NZS4203. Code of practice for general structural design and design loadings for buildings[S]. Wellington: [s. n.], 1992.
- [4] The American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO). LRFD-8. Bridge design specifications[S]. Washington D C: [s. n.], 1996.
- [5] 朱玉. 隧道锚设计体系中的关键问题研究与实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
ZHU Yu. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [6] 江南, 冯君. 悬索桥隧道式锚碇横断面形状对其承载性能影响[J]. 重庆交通大学学报, 2012, 31(4): 755-759.
JIANG Nan, FENG Jun. Effect of cross section type of tunnel anchorage on its mechanical behavior for suspension bridge[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)**, 2012, 31(4): 755-759.
- [7] 汪海滨, 高波. 悬索桥隧道式复合锚碇承载力计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(增刊): 89-94.
WANG Hai-bo, GAO Bo. Calculation method of bearing capacity of compound tunnel anchorage system of suspension bridge[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2005, 35(Suppl.): 89-94.
- [8] 江南. 铁路悬索桥隧道式锚碇承载机理及计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
JIANG Nan. The carrying mechanism and calculation method of the tunnel anchorage of railway suspension bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [9] 程鸿鑫, 夏才初, 李荣强. 广东虎门大桥东锚碇岩体稳定性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 131-135.
CHENG Hong-xin, XIA Cai-chu, LI Rong-qiang. Stability analysis of the rock mass in the esat anchoring area of Guangdong Humen bridge[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science Edition)**, 1995, 23(3): 131-135.
- [10] 铁道第二勘察设计院. TB10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. TB10003—2016 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Press, 2016.
- [11] 汪海滨. 悬索桥隧道式复合锚碇系统作用机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
WANG Hai-bin. Mechanism research on compound tunnel anchorage of suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [12] 朱玉, 廖朝华, 彭元诚. 悬索桥隧道锚设计[J]. 公路, 2007(11): 21-27.
ZHU Yu, LIAO Chao-hua, PENG Yuan-cheng. Design of tunnel-type anchorage of suspension bridge[J]. **Highway**, 2007(11): 21-27.
- [13] 肖本职, 吴相超. 鹅公岩长江大桥东锚碇围岩极限承载力 GM(1, 1)模型预测研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(1): 35-38.
XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao. Limit bearing capacity forecast of anchorage surrounding rock of Egongyan Changjiang bridge with GM(1, 1) model[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2005, 22(1): 35-38.
- [14] 张利洁, 黄正加, 丁秀丽. 四渡河特大桥隧道锚碇三维弹塑性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4971-4974.
ZHANG Li-jie, HUANG Zheng-jia, DING Xiu-li. Numerical analysis with Flac^{3D} of a tunnel anchorage of sidu river bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Suppl.2): 4971-4974.