

软弱岩层悬索桥隧道锚建设现状综述

权 强

重庆交通大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月5日; 发布日期: 2026年5月15日

摘 要

本文聚焦软弱岩层悬索桥隧道锚, 深入剖析其现状。悬索桥结构独特, 隧道锚优势显著, 应用广泛。国外自1932年起, 美国率先应用于乔治·华盛顿大桥, 随后英国、挪威、日本等国相继跟进, 多集中于欧美地区, 20世纪末日本应用较多, 且多应用于大跨度桥梁, 技术相对成熟。国内早期应用较少, 自2016年起数量逐年递增, 主要分布于西南地区, 但锚塞体轴向长度较国外偏小。我国大跨度悬索桥多采用重力式锚碇, 复杂地质条件下隧道锚碇应用比例低。学术研究方面, 以有限元数值分析等为主要研究方法, 涵盖施工技术及方案、承载特性、破坏模式与稳定性分析等内容, 成果颇丰。邻近工程与隧道锚相互作用显著, 间距不同影响各异。当前, 软弱岩层隧道锚结构工程稀缺, 施工技术欠成熟, 研究深度不足, 需优化结构、改进技术与方案, 增强抗拔和抗震能力, 拓展研究领域, 以充分发挥其在实际工程中的作用。

关键词

隧道锚, 软弱岩层, 有限元数值分析, 模型试验

A Review of the Current Situation of Tunnel-Type Anchorage Construction of Suspension Bridges in Weak Rock Formations

Qiang Quan

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: April 13, 2026; accepted: May 5, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

This paper focuses on tunnel-type anchorage of suspension bridges in weak rock strata. Suspension

文章引用: 权强. 软弱岩层悬索桥隧道锚建设现状综述[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 163-173.

DOI: 10.12677/hjce.2026.155126

bridges have unique structures and tunnel-type anchorage have significant advantages and wide applications. Since 1932, the US first used them on the George Washington Bridge. Later, countries like the UK, Norway, and Japan followed. In the late 20th century, Japan used them more often for long-span bridges with mature technology. In China, early applications were few. Since 2016, the number has increased annually, mainly in the southwest. But the axial length of anchor plugs is smaller than abroad. In China, long-span suspension bridges mostly use gravity anchorages. The application ratio of tunnel anchorages in complex geological conditions is low. In academic research, finite element numerical analysis is the main method, covering construction technology, bearing characteristics, failure modes, and stability analysis with abundant results. Adjacent projects interact significantly with tunnel anchors, and different spacings have different effects. Currently, tunnel-type anchorage projects in soft rock strata are scarce, construction technology is immature, and research depth is insufficient. We need to optimize structures, improve technology and schemes, enhance pull-out and seismic resistance, and expand research fields to give full play to their roles in practical engineering.

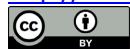
Keywords

Tunnel-Type, Weak Rocks, Finite Element Numerical Analysis, Model Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

人类发展到现在离不开人类超凡的创造性，也因为人类有创造性才推动了人类科学的发展。纵观历史，人类交通工具的发展和更替也代表着人类文明的发展和进步。人类早期依靠双脚行走，到后来人类使用马车作为交通工具，极大地提高了人们出行的效率，再到后来进入工业时代，蒸汽机火车的发明再一次推动交通工具的发展，在今天，各类交通工具层出不穷，海陆空交通已经全方位普及。随着我国经济的迅速发展，我国的基础交通建设已经走在世界前列，有很多世界一流的项目和工程由我们自主设计和建设，逐步实现交通强国。

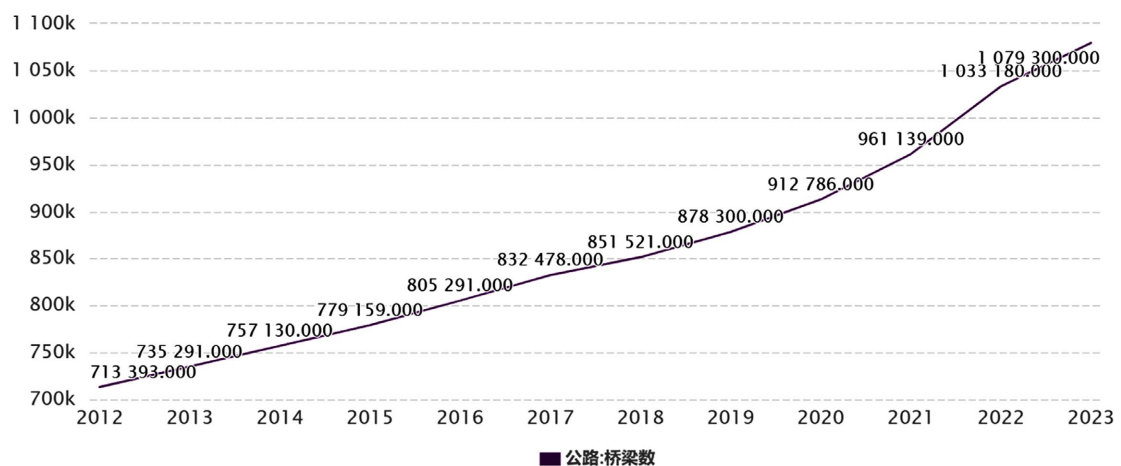


Figure 1. Statistics on the number of highway bridges in China from 2012 to 2023

图 1. 2012~2023 我国公路桥梁数量统计

近十几年以来我国桥梁建设取得卓越的成就，保持了 3 万座桥梁的年平均增长速度，大跨度桥梁建设进入了辉煌的时期[1]。目前，大跨度桥梁结构主要有 3 种类型：悬索桥、拱桥和斜拉桥，其实其中悬索桥采用了柔性的悬索作为承重结构，是一种具有较强跨越能力和承载力的桥梁类型。悬索桥因为其主体结构不承受弯矩，只承受拉力的受力特点，所以悬索桥结构的受力更加合理，能实现更长的跨度，因此在大跨度桥梁的设计中优先应用。我国 2012 年到 2023 年公路桥梁数量统计见图 1。

2. 隧道锚(TTA)的基本介绍

悬索桥的主要是由锚具、主梁、塔墩以及缆索等结构组成[2]，锚具对悬索桥的结构稳定和运行安全起到关键的作用。根据主缆锚固方式的不同，悬索桥分为自锚式悬索桥和地锚式悬索桥。自锚式悬索桥的缆索连接在加筋梁的两端，加筋梁在水平方向或竖直方向上承受缆索拉力的分力，地锚式悬索桥通过锚具将缆索张力传递到岩土上，或利用锚具本身的重量直接抵抗缆索张力。地锚式悬索桥的锚固类型可分为重力式锚碇(GTA)和隧道式锚碇(TTA)两种[1][3]-[5]。重力式锚碇通过使用混凝土结构的重量作为承受荷载的主要结构，具有较为简单的承受荷载的原理，对锚址区地层岩性和地质条件的要求比较低。然而，重力式锚碇的缺点是需要大量的混凝土以及对锚碇放置区进行大量的挖掘。隧道式锚碇是通过相对较好的岩体中挖掘隧道结构状的锚碇来承受主缆荷载的方法，利用锚碇主体自重和土层产生的摩擦阻力和粘聚力将锚碇固定。与重力式锚碇相比，隧道式锚碇的经济成本较低，对周围环境的影响也比较小，所以在实际工程中应用更具优势。根据 Hanetal 等在 2019 年的统计，在中国 113 座跨度超过 90 米的悬索桥中地锚式悬索桥占比为 70.8%，而其中隧道锚悬索桥占比为 36.25%。因此，研究悬索桥中隧道锚的应用很有意义。重力式锚碇和隧道式锚碇见图 2 和图 3。

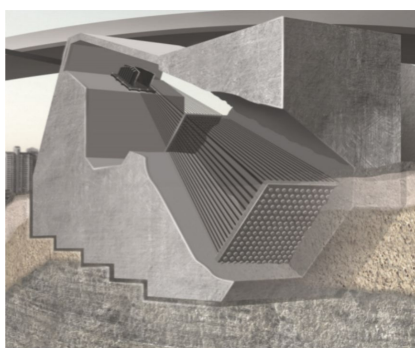


Figure 2. Gravity-type anchorage
图 2. 重力式锚碇

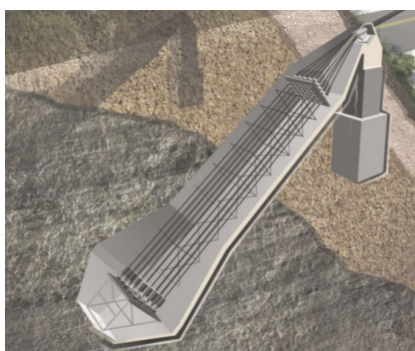


Figure 3. Tunnel-type anchorage
图 3. 隧道式锚碇

3. 隧道锚(TTA)应用与现状

3.1. 国外隧道锚碇工程应用

美国 1932 年修建的乔治·华盛顿大桥(George Washington Bridge)是世界上第一座采用隧道式锚碇的悬索桥,开启了应用隧道式锚碇的先例,这座悬索桥也成为当时世界上跨度最大的悬索桥[6]。英国在 1964 年修建福斯公路桥(Forth Road Bridge),成为了世界上第二个采用隧道式锚碇建设悬索桥的国家。挪威在 1977 年建成的科瓦尔松大桥(Kvalsund Bridge)标志着成为世界上第三个采用隧道式锚碇修建桥梁的国家,这座大桥也成为世界上第一座最北边的悬索桥。在 1988 年,日本建成了亚洲第一座采用隧道式锚碇的悬索桥——下津井濑户大桥(Shirao-ura Seto Ohashi Bridge),该桥跨越了濑户内海。

表 1 统计了国外部分采用隧道锚固的悬索桥,从统计可以看出隧道式锚固技术集中在 20 世纪开始应用于实际工程当中,主要集中在欧美地区应用,到 20 世纪末,在亚洲地区隧道锚固技术日本应用较多。在国外采用隧道锚固的悬索桥多为大跨度的桥梁,均超过了 500 米,桥梁所采用的隧道锚的锚体长度大多数都超过了 45 米,部分桥梁的隧道锚的锚体长度在 80 米左右。说明了国外隧道式锚碇大多应用在承载力条件比较高的大跨度桥梁当中,也说明隧道锚固技术在国外发展的相对成熟。国外部分采用隧道锚固的悬索桥见表 1。

Table 1. Suspension bridges anchored by tunnels in some foreign countries

表 1. 国外部分采用隧道锚固的悬索桥

地区	中文名	英文名	建成时间	主跨/m	锚体长度/m
美国	乔治·华盛顿大桥	George Washington Bridge	1931 年	1067	45.7
美国	旧金山·奥克兰海湾大桥	San Francisco-Oakland Bay Bridge	1936 年	704	86
英国	福斯公路桥	Forth Road Bridge	1964 年	1006	80
挪威	科瓦尔松大桥	Kvalsund Bridge	1977 年	525	62
日本	下津井濑户大桥	Shirao-ura Seto Ohashi Bridge	1988 年	940	77.2
日本	来岛第三大桥	Third Kurushima Kaikyo Bridge	1999 年	1030	
日本	明石海峡大桥	Akashi Kaikyo Bridge	1998 年	1991	
韩国	仁川大桥	South Korea Incheon Bridge	2009 年	800	50

3.2. 国内隧道锚碇工程应用

表 2 调查统计了国内部分采用隧道锚碇结构的桥梁,其中大部分为大跨度悬索桥。表中统计的工程大多数分布于我国西南地区以及长江中上游,重庆地区分布最多,高达 11 座,其次是云南省,四川省以及贵州省,分别拥有 4~5 座,东部也有少量分布,由此可见隧道锚固结构的桥梁主要分布于我国西南地区。国内部分采用隧道锚固的悬索桥见表 2。

Table 2. Partial suspension bridges using tunnel anchoring in China

表 2. 国内部分采用隧道锚固的悬索桥

地区	桥梁名称	通车时间/年	主跨/m	岩层条件
重庆	丰都长江大桥	1997	450	隧道锚区围岩以强 中等风化泥岩为主,岩体完整,局部裂隙发育,IV~V 级围岩
重庆	鹅公岩大桥	2000	600	锚址区为软 较软泥岩及砂岩互层,岩体破碎

续表

重庆	忠县长江大桥	2001	560	锚碇区地层以砂岩和泥岩、泥质粉砂岩互层为主，地质构造简单
重庆	万州长江大桥	2003	580	锚碇址所在地层岩性以黏土岩和泥质粉砂岩为主，且呈相间层状分布，局部夹有透晶体状粉砂岩和长石砂岩
西藏	角笼坝大桥	2005	345	锚碇区围岩以玄武岩为主，岩体极破碎，节理发育，完整性较差，IV级围岩
湖北	四渡河大桥	2009	900	锚碇区围岩为坚硬较坚硬灰岩，裂隙少且多被钙泥质充填，III~IV级围岩
贵州	坝凌河大桥	2009	1088	锚址区围岩以弱风化微新泥晶灰岩和白云岩为主，围岩较破碎，IV~III级围岩
四川	江油哪吒大桥	2010	252	锚址区为石灰岩，基岩稳定，地质条件好
四川	南溪长江大桥	2012	572	弱~强风化砂质泥岩，岩体较完整，IV~V级围岩
湖南	矮寨大桥	2012	1176	锚碇区围岩为微风化层状灰岩，地表溶蚀裂隙发育
云南	澜沧江大桥	2013	700	锚碇区围岩以中风化砂岩为主，岩体破碎
贵州	乌江大桥	2014	325	锚碇区围岩以完整性好且强度较高灰岩为主，III级围岩
浙江	官山大桥	2015	580	锚址区为微风化流纹斑岩，次生节理密集，后锚室位于海面标高以下，锚塞体有被海水浸蚀的可能
云南	普利特大桥	2015	628	锚塞体总体位于III级灰岩中
湖南	张家界大峡谷玻璃大桥	2015		锚碇区围岩以微风化灰岩为主，属于III级围岩
重庆	几江长江大桥	2016	600	隧道锚区围岩以强中等风化泥岩为主，岩体完整，局部裂隙发育，IV~V级围岩
重庆	万州驸马长江大桥	2017	1050	锚址区为软，较软泥岩及砂岩互层，岩体破碎
广东	虎门二桥	2018	1666	隧道锚所在岩体为花岗岩，承载能力强，提高了锚碇系统的稳定性，避免大体积混凝土锚碇对施工工期的延误
四川	泸定大渡河特大桥	2018	1100	锚址区围岩为中，强风化二长花岗岩
云南	丽香铁路金沙江大桥	2019	660	锚址区以薄中厚板岩和片理化玄武岩为主，片理发育 丽江岸：锚体长45 m，锚址区围岩以厚冰碛层为主，浸水后强度显著降低
四川	叙古高速赤水河大桥	2019	1200	灰岩与泥岩为主，含软弱夹层
湖北	水布垭清江大桥	2019	420	
重庆	太洪长江大桥	2020	808	锚址区为软极软泥岩，遇水易软化，IV~V级围岩
湖北	伍家岗长江大桥	2020	1160	锚址区地层以微风化软岩为主，完整性好
重庆	江津区白沙长江大桥	2021	590	该桥西岸隧道锚基岩岩性为侏罗系中统沙溪庙组砂岩和砂质泥岩互层，属于软岩和较软岩互层
云南	玉楚高速绿汁江特大桥	2021	780	主要为白云质灰岩
贵州	开州湖特大桥	2021	1100	隧道锚塞体上半部嵌入微风化灰岩层、下半部嵌入微风化泥岩层中，前锚室及散索鞍支墩基础均嵌入微风化灰岩层

续表

重庆	江津油溪长江大桥	2022	760	主要地层为三叠系上统须家河组五段(T3xj5)、三叠系上统须家河组六段(T3xj6), 岩性以砂岩为主
云南	金安金沙江大桥	2022	1386	锚址区围岩以玄武岩为主, 含多层软弱夹层
重庆	白帝城长江大桥	2024	916	下伏基岩主要为泥灰岩和泥质灰岩, 风化裂隙发育, 岩体破碎或较破碎
重庆	合川渠江景观大桥		400	

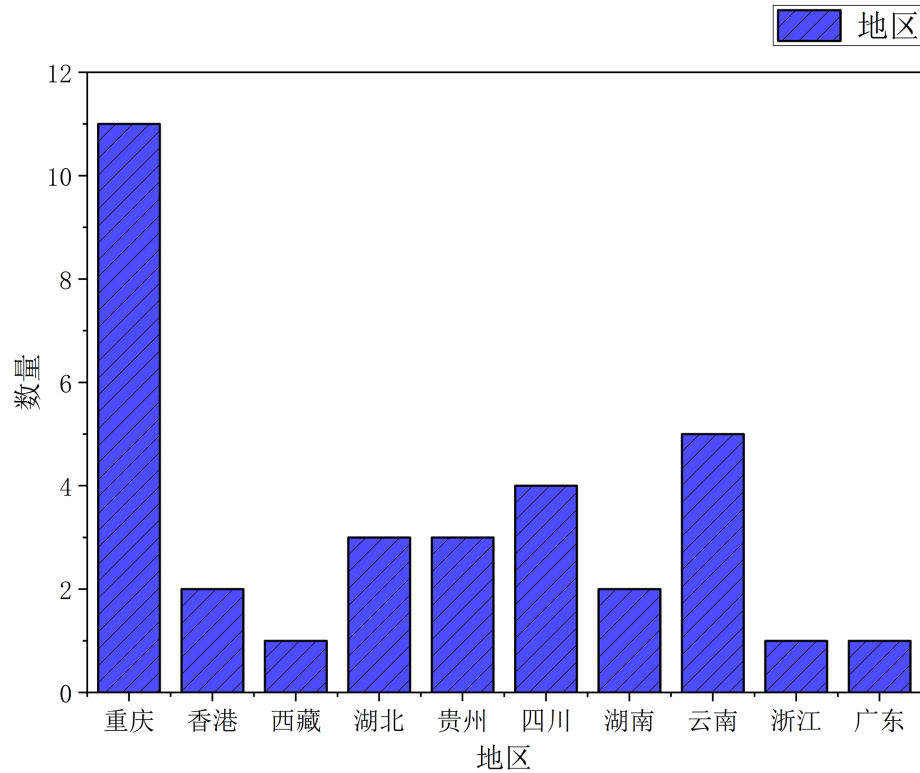


Figure 4. Construction of tunnel-type anchorage in China
图 4. 中国隧道锚建设情况

通过对各个时期隧道锚建设数量进行统计, 在 2016 年之前, 隧道锚锚固技术多采用于跨度相对不太大的桥梁, 说明当时隧道锚锚固技术在我国发展不太成熟, 隧道锚在工程中应用不太广泛。在 2016 以后我国建设多座采用隧道锚的桥梁, 隧道锚的桥梁数量逐年增加, 仅在 2018~2021 年之间, 就建成多达十多座, 也说明隧道锚技术在我国已经越来越受到重视, 积极地应用于工程实践当中。在 2016 年以后特大跨度桥梁也逐步采用隧道锚锚固, 也从侧面说明我国隧道锚技术已经有了一定的发展, 我国不断对隧道锚技术难题进行突破, 隧道锚的应用范围越来越广泛, 无论是从数量上还是从质量上都有了很大的进步。

表中统计的隧道锚锚塞体的轴向长度与国外的隧道锚相比, 尺寸整体偏小。国内大多数采用轴向长度为 30~50 m 的隧道锚结构, 国外更多采用轴向长度为 50~80 m 的隧道锚, 这是因为我国接触隧道锚较晚, 早期保守设计只在短跨度桥梁中使用, 而随着我国在隧道锚技术的进步, 今后会有更大型的桥梁采用。中国隧道锚建设情况见图 4。

4. 隧道锚(TTA)的材料组成

4.1. 隧道锚的组成

隧道锚主体部分主要包括：鞍室、混凝土锚体、系统锚杆、锚固系统、后锚室、散鞍基础等[1] [3]。此外还有门洞、步梯、防、排水构造，检修通道等附属设施，不参与结构的受力。隧道锚是一种能较好地利用锚址区的地质条件，工程量相对较小(体量仅为重力锚的 20%~25%)，性价比高、对周边环境扰动小的锚碇结构形式，多用于山区高速公路上的悬索桥。

隧道锚锚体材料一般为混凝土，一般单个锚体的混凝土方量都比较大，需要采取严格的温控措施以防止混凝土温度裂缝的产生。为了将悬索桥主缆的巨大拉力传递到基岩需要隧道锚的锚塞体与周围的基岩紧密结合，所以在锚塞体施工时应在混凝土中掺入适量的膨胀剂，对混凝土收缩进行补偿，增强锚塞体混凝土与周围基岩的紧密联系。隧道式锚碇结构组成见图 5。

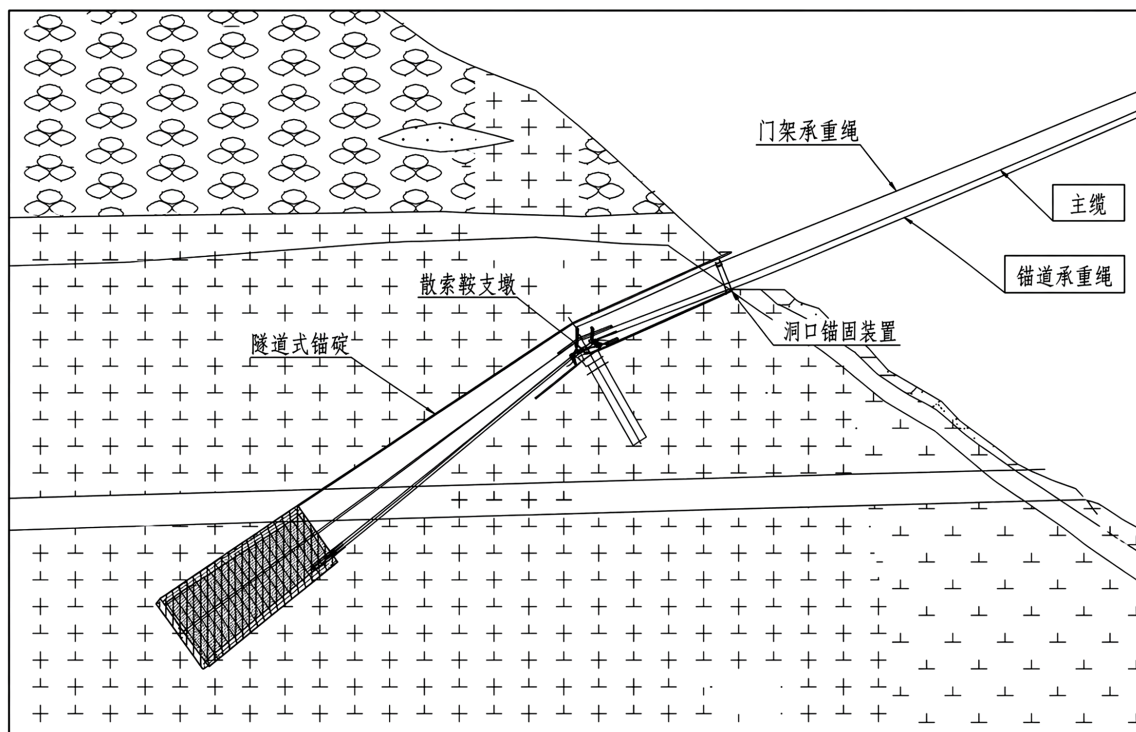


Figure 5. Composition of tunnel-type anchorage structure

图 5. 隧道式锚碇结构组成

4.2. 隧道锚的发展现状

目前我国国内现存的采用隧道锚结构的悬索桥整体来说数量还比较少，大跨度悬索桥大多数采用重力式锚碇，只有部分基岩条件比较好的悬索桥采用隧道式锚碇。以虎跳峡金沙江大桥为例，香格里拉岸地形陡峻，基岩完整，采用了隧道锚碇，而丽江岸的地质条件比较复杂，对锚碇的选型有比较大的挑战，最后根据地质条件和其他条件综合考虑选用重力式锚碇，因此两岸的锚碇建设成本以及对周围环境的影响有显著的不同[7]。我国现阶段对复杂地质，基岩条件不太好的工程中使用隧道锚碇的比例相对来说比较少，学界对软弱地层和复杂地层的隧道锚研究比较少，研究不够深入，现有的研究很少能支撑大跨度悬索桥的隧道锚碇的设计，学者需要在隧道锚上投入更多的研究[3]。

5. 隧道锚(TTA)学术研究

对隧道锚的研究在研究方法上,现阶段以有限元的数值分析为主,其次是原位试验、缩尺模型试验和现场监测;在研究内容上主要集中在承载力,力学行为,破坏模式等方面。早期隧道锚研究的围岩性质主要为硬岩,随着隧道锚承载能力研究的逐步深入,近年来开始有了对软岩底层下的隧道锚的研究,但是目前对软岩区隧道锚的研究方法比较单一,尤其对多种岩性的复杂底层条件下的隧道锚缺少模型试验的研究,数字模拟数据缺乏说服力。

5.1. 隧道锚的施工技术及施工方案

在悬索桥隧道锚碇开挖施工中,软质岩层容易引起围岩失稳、坍塌,影响施工安全和整体结构的稳定性。深入研究悬索桥隧道锚的施工技术,制定科学的开挖方案能够降低安全事故发生几率,保证整体施工质量。[8]以某双塔筒支钢箱梁悬索桥隧道锚为依托工程,研究发现在软岩地层隧道锚开挖按照管超前、严注浆、短进尺、弱爆破和强支护的原则,宜采用两台阶或者三台阶钻爆法进行施工。许登根[9]等以宜昌伍家岗长江大桥北侧隧道锚为依托工程,深入研究设置于软岩层的隧道锚开挖方法,隧道锚开挖通过爆破试验采集被保护对象质点振动速度、围岩松动圈深度、隧道锚拱顶下沉、洞内收敛等数据进行分析论证,隧道锚软岩采用光面爆破和微差爆破技术,应用电子雷管新技术不受隧道锚锚塞体超大变截面和雷管梯段的限制,可以在现场设置各炮孔间和排间的雷管延时时间,延时精度高,减震效果好,并有效防控了软岩层隧道锚开挖容易造成围岩失稳及坍塌的风险[10]。王世彬[11]等根据现场监测和数值模拟分析得,相比于普通喷锚支护,采用锚注联合支护可明显提高深埋软弱围岩隧道壁变形的控制效果,并且还可以缩短围岩趋稳时间。这种支护方法把锚杆支护和围岩注浆加固结合起来,遵循“改善围岩强度为主,增强支护为辅”的联合支护理念[12]。隧道锚台阶开挖见图6。

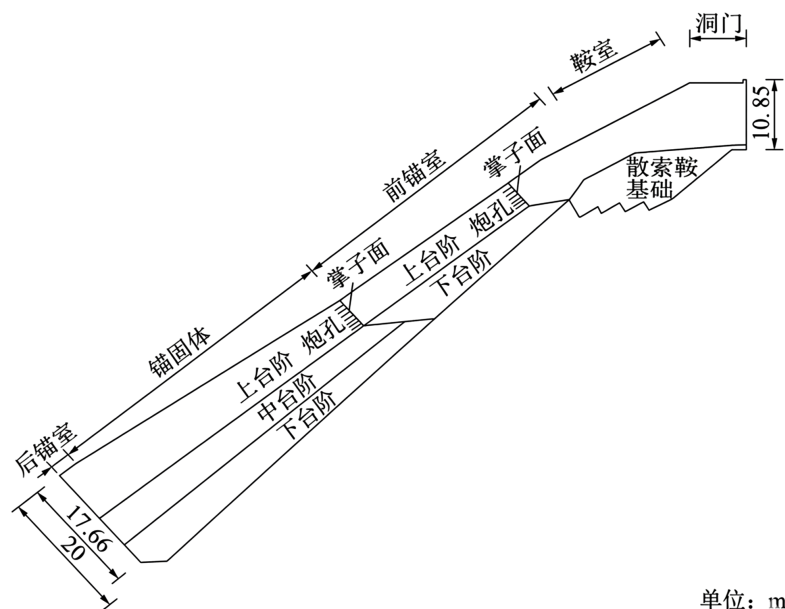


Figure 6. Bench-cut excavation of tunnel-type anchorage
图6. 隧道锚台阶开挖

目前隧道锚在复杂地层条件下的开挖技术还不够完善,相关的基础理论研究也不够成熟,而隧道锚建设地层条件比较复杂,单一岩性较多,以灰岩、玄武岩、砂岩和泥岩为主,也存在复杂地质条件下的

隧道锚建设，其中以泥岩和砂岩为主。

5.2. 隧道锚的承载特性

隧道锚具有类似于抗拔桩的力学特性，Hyunsung Lim [13]等根据岩石节理特性评估隧道锚的拔出行为，对隧道锚进行了一系列有限元分析，研究了岩石节理的扩大部分，锚固间距，节理方位，节理间距和抗剪强度等，并认为这些因素影响隧道锚的力学的承载特性。沈志金[14]等采用模型试验分析隧道锚锚体后表面、锚体中部和锚体前表面的变形大小，发现锚体中部位变形相对较大，其次是锚体后表面和锚体前表面。说明在大荷载作用下，隧道锚有可能发生破坏导致其功能失效。江南[8]等根据荷载传递曲线计算了隧道锚锚体与接触面的剪应力，推导出剪应力沿锚塞体轴向分布不均匀，此外锚塞体与围岩之前的接触条件对隧道锚的承载能力有很大的影响。悬索桥隧道锚在依靠自身重力承载的同时，也会调动周围岩体协同承载，其作用机理相对复杂，荷载的大小也影响隧道锚周围岩体的协同承载。文丽娜[15]等研究发现在软弱岩土中当隧道锚荷载达到一定值时会发生蠕变，当隧道锚周围岩层蠕变过大时会严重影响隧道锚结构以及桥梁结构的稳定性和安全性。

5.3. 隧道锚的破坏模式

李玉杰等[2]通过有限元分析研究发现当隧道锚具中没有扩大部分时，锚具表现为播出破坏模式，如果隧道锚具有扩大部分时，表现为楔形破坏模式。此外，还证实了随着隧道锚固件之间的间距变窄，锚固件的拔出阻力降低。江南[8]等以丽江香格里拉铁路金沙江悬索桥隧道锚为原型，在锚塞体与围岩三种不同接触条件下进行隧道锚的实验室缩尺模型试验，研究发现平面接触表面的失效原因是锚塞体与周围岩石的接触界面的剪切滑动失效，防滑齿脊与防滑齿脊+锚杆的接触面的失效方式为喇叭形状的倒锥形破坏，破坏面主要发生在围岩中，研究发现两种破坏形式发生的条件与锚塞体的埋深深度也存在一定关系。王东英[16]等通过开展锚碇的二维室内模型试验，针对锚碇的楔形角和埋深等几何要素对锚碇的承载力和破坏特性的影响做了分析，在一定程度上揭示了隧道锚“夹持效应”的本质，大量的数值模拟和缩尺模型试验揭示了隧道锚的传力机制和破坏形式有以下共性：主缆荷载下的锚碇自身重力首先发挥作用，此时可称为“自重应力”；当拉拔力达到摩擦阻力极限时，围岩夹持效应发挥作用；锚碇通常发生剪切-拉破坏，剪切面出现在买定围岩界面或者围岩内部，当出现在围岩内部时，剪切面呈现倒锥形，剪切面出现位置与埋深深度和围岩内部状况有关。李栋梁[17]等开展了缩尺比例为 1:10 的隧道锚现场模型试验，提出了浅埋碎裂岩体中隧道锚可能出现的 5 种破坏模式，分别为标准倒楔形破坏、非标准倒楔形破坏、半倒楔形破坏、山体失稳破坏和锚塞体自身破坏。余家富[18]等针对隧道锚在碎裂岩体中的成洞特性、主缆力作用下的围岩响应特性进行研究，结果表明：围岩变形受地层岩性影响显著，隧道锚破坏模式为锚-岩接触周边围岩的剪切破坏，隧道锚在碎裂岩中同样具有很强的适应性。

5.4. 隧道锚的稳定性分析

沈志金[14]等通过设计了荷载试验、超载试验、超载流变试验和极限承载力破坏试验并依据现场模型试验中结构变形观测和应力观测，对锚塞体和周围岩石的应力变形特性和流变特性进行了分析，研究了隧道锚锚塞体的变形失效机理、变形失效过程和应力变形特性。杨国俊[19]等研究发现静载是围岩产生塑性破坏的主因，动荷载“门槛值”为 7 倍的静力荷载，超过此值会影响围岩承载能力，加速塑形区发展，降低隧道锚极限承载力，相较于静载，动荷载作用下承载力的平均降低幅度约为 27%。王鹏宇[4] [20]等通过现场缩尺模型试验结果表明锚塞体间岩体沿拉力方向，锚塞体间岩体变形规律与锚塞体基本一致，在 7P 荷载时的最大变形为 0.45 m，强度特性分析说明沿锚塞体拉力方向 3.5 P 为锚塞体的比例荷载特征

点, 8 P 为锚塞体的屈服荷载特征点, 10 P 为锚塞体的破坏变形特征点。江南[8]等也通过缩尺模型试验研究隧道锚加载时的破坏特性, 在加载过程中, 锚洞两侧与前锚面的周围岩石变形随荷载的增加而增大, 当增大至 8P 时, 围岩变形发生偏转点。

6. 邻近工程与隧道锚的作用

游春华[21]等根据相关研究及工程经验提出隧道近接施工过程中, 新开挖隧道于原有隧道工程之间的间距越大, 两工程相互影响的程度越小, 反之, 两隧道之间间距越小, 相互作用影响越大, 在不同的地层岩性、不同断面尺寸工程中, 这种相互影响的作用范围差异较大。[7]等按照两隧道相互影响由大到小的顺序, 将接近度影响程度分为强影响区、弱影响区和无影响区 3 个等级区域。陈芳平等[22]人通过数值模拟分析得出隧道锚在与连拱隧道近接区域, 如处于全、强风化地层中, 并伴随连拱隧道施工造成围岩应力条件的恶化, 隧道锚洞施工时会引起大面积的围岩破坏, 锚洞围岩塑性区与地表相连, 必须采用预支护措施确保隧道锚隧道施工安全。梁宁慧[23]等以玉楚高速白石岩 I 号隧道下穿绿汁江大桥楚雄岸隧道锚为依托工程, 采用模型试验和数值分析方法, 分析近接施工过程中围岩变形演化特征, 研究表明下穿隧道接近施工过程中锚塞体的沉降主要发生在先行洞掘进时期。下穿隧道接近施工过程中锚塞体底部沉降量与隧道拱顶沉降量随锚-隧间距的减小、隧道埋深的增加均呈增加趋势, 其中隧道拱顶沉降量和锚塞体底部沉降对隧道埋深的变化最为敏感。锚-隧间距的变化对隧道拱顶沉降的影响程度较小, 对锚塞体沉降影响较大, 近接施工扰动区面积也随围岩等级与埋深的增加而逐渐增大[22]。张浩[24]等以小川大桥为例, 研究表明小川大桥的窄间隙双洞隧道应在开挖后及时进行支护施工, 不宜全部开挖后进行支护, 隧道锚在开挖过程中的变形较小, 最大变形出现在隧道底部。施工过程中隧道基本处于受压状态, 在洞底位置有小范围的应力集中, 但集中区域和塑性区域均很小, 满足稳定性和安全性的要求。

7. 讨论

软弱地层区的悬索桥隧道锚工程比较少, 施工技术不够成熟, 学者对软岩地层隧道锚的研究不够深入。为此, 我国从事相关行业的工程师和研究人员还需要投入更多的精力研究更加经济、可靠的隧道锚结构, 更加合理的施工技术和施工方案。

目前, 对隧道锚的力学性能普遍认为类似于抗拔桩的性能, 为了提高隧道锚的抗拔力可以在隧道锚锚塞体底部设置剪力块, 在锚塞体中心线纵向设置加筋工字钢支架可以增加防滑能力, 在隧道锚锚塞体上设置防滑齿和径向锚杆也可以提高抗滑能力。

为了提高隧道锚的使用寿命, 现阶段的研究应对软岩底层隧道锚的抗震性能有所深入, 提高隧道锚的抗震能力, 对悬索桥结构的稳定也会相应提高。

8. 结论

近年来, 隧道锚具有显著优势, 国内工程应用广泛, 以西南地区为中心, 呈现出跨度更广、大尺寸小尺寸共存的特点, 数量和质量都有较大的提升。

隧道锚的工程应用大多数还是在硬岩地层区域和地质条件相对好的地区, 软岩地层区域和复杂地层地区的工程应用较少, 软岩地层及复杂地层的隧道锚研究也较少, 需要高校和科研院所对软岩地层隧道锚的研究更加深入, 注重培养相关人才。

隧道锚的研究手段主要是缩尺模型试验、有限元数值分析和现场监测, 研究内容集中在受力和施工技术上, 对隧道锚的研究应该扩展更多的领域展开研究。对隧道锚有了更加清晰和准确的认识, 在实际工程应用中才能充分发挥其功能。

参考文献

- [1] 刘新荣, 罗维邦, 肖宇, 等. 悬索桥隧道锚工程应用与研究现状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 207-219.
- [2] Li, Y., Luo, R., Zhang, Q., *et al.* (2017) Model Test and Numerical Simulation on the Bearing Mechanism of Tunnel-Type Anchorage. *Geomechanics and Engineering*, **12**, 139-160. <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.1.139>
- [3] 杨国俊, 吕明航, 唐光武, 等. 考虑不同破坏形式下隧道锚承载力及破坏阶段研究[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(3): 273-286.
- [4] 王鹏宇. 软岩地区悬索桥隧道锚设计研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 51-55.
- [5] 张锐. 水作用下软岩隧道锚承载力试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [6] Seunghwan, S., Hyungsung, L. and Moonkyung, C. (2021) Evaluation of Failure Mode of Tunnel-Type Anchorage for a Suspension Bridge via Scaled Model Tests and Image Processing. *Geomechanics and Engineering*, **24**, 457-470.
- [7] Jiang, N., Wang, D., Feng, J., *et al.* (2021) Bearing Mechanism of a Tunnel-Type Anchorage in a Railway Suspension Bridge. *Journal of Mountain Science*, **18**, 2143-2158. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6162-8>
- [8] <https://doi.org/10.7666/d.y530223>
- [9] 许登根, 周昌栋, 赵航. 悬索桥软质岩隧道锚开挖施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2022, 50(3): 45-51.
- [10] 张健, 马建林, 王钦科, 等. 碎裂岩夹层中大跨度悬索桥隧道锚稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(4): 149-156.
- [11] 王世彬. 基于新奥法理念的软弱地层深埋隧道锚注联合支护效果研究[J]. 四川水泥, 2024(8): 234-238.
- [12] Li, R., Zhou, J., Qin, Q., *et al.* (2024) Study of the Static Response and Zoning of the Existing Tunnel Adjacent to the Suspension Bridge's Tunnel-Type Anchorage. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 21402. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72384-1>
- [13] Lim, H., Seo, S., Ko, J., *et al.* (2021) Effect of Joint Characteristics and Geometries on Tunnel-Type Anchorage for Suspension Bridge. *Applied Sciences*, **11**, Article 11688. <https://doi.org/10.3390/app112411688>
- [14] Shen, Z., Jia, J., Jiang, N., *et al.* (2022) Field-Scale Experiment on Deformation Characteristics and Bearing Capacity of Tunnel-Type Anchorage of Suspension Bridge. *Energies*, **15**, Article 4772. <https://doi.org/10.3390/en15134772>
- [15] 文丽娜, 程谦恭, 程强, 等. 悬索桥隧道锚原位缩尺模型蠕变试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 202-209.
- [16] 王东英, 尹小涛, 杨光华. 悬索桥隧道式锚碇夹持效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1003-1011.
- [17] 李栋梁, 刘新荣, 周火明, 等. 下卧软弱夹层的软岩隧道式锚碇承载特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2457-2465.
- [18] 余家富, 吴勇进, 王腾飞, 等. 隧道式锚碇在碎裂岩体中成洞及承载特性数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 101-106.
- [19] 杨国俊, 张树涛, 吕明航, 等. 动荷载作用下隧道锚承载性能及影响因素敏感性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 207-218.
- [20] 王鹏宇. 软岩地区悬索桥隧道式锚碇受力机理及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [21] 游春华. 隧道近接施工的力学原理及工程应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [22] 陈芳平, 张玉广, 周科. 变质岩隧道锚下穿隧道稳定性分析及工程应用[J]. 交通科技, 2024(3): 115-119.
- [23] 梁宁慧, 韩亚峰, 肖宇, 等. 下穿隧道近接施工引发上覆隧道锚沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 1938-1947.
- [24] 张浩, 窦巍. 窄间隙双洞隧道锚施工期安全性能分析[J]. 建筑施工, 2024, 46(7): 1018-1021.