

# 虎跳峡金沙江大桥隧道锚现场模型试验研究<sup>\*</sup>

王中豪<sup>1</sup>, 马健<sup>2</sup>, 武文祥<sup>2</sup>, 郭喜峰<sup>1</sup>

(1. 长江科学院 重庆分院, 重庆 400026; 2. 云南省交通规划设计研究院, 昆明 650011)

**摘要:** 香丽高速虎跳峡金沙江大桥香格里拉岸采用隧道式锚碇, 为了全面认识隧道锚的受力变形特性及安全稳定性, 本文依据相似原理开展了与隧道锚实际受力状态相适应的缩尺模型试验, 研究了现场试验加载及测试方法, 获得了各级加载荷载下的位移、应力和应变结果, 试验成果表明: 在 9.5P 荷载下, 模型锚基本处于线弹性阶段, 锚体和围岩变形均较小, 锚体的变形以夹持围岩一起变形为主, 而锚/岩接触面的错动变形很小。受夹持效应的影响, 锚体后部 1/3 范围的围岩承受了约一半荷载, 是受力的关键部位。综合承载力、变形和应力状态分析结果可知, 该隧道锚稳定性较好。

**关键词:** 虎跳峡金沙江大桥; 隧道锚; 现场模型试验; 稳定性分析

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1179-06

## Tunnel-type Anchorage Field Model Test of Hutiaoxia Jinsha River Bridge

Wang Zhonghao<sup>1</sup>, Ma Jian<sup>2</sup>, Wu Wenxiang<sup>2</sup>, Guo Xifeng<sup>1</sup>

(1. Chongqing Branch of Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, P.R. China; 2. Yunnan Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650011, P.R. China)

**Abstract:** Hutiaoxia Jinsha River Bridge of Shangri-La-Lijiang Expressway adopts tunnel-type anchorage at the Shangri-La bank. In order to fully understand the deformation characteristics after loading and stability of tunnel-type anchorages, a field scale model test system in accordance with the actual mechanical status of the tunnel-type anchorages was designed using the similarity principle. This article studies the loading and test methods for the field tests and obtains the displacement, stress and strain testing results after different levels loading. The results indicate that the deformation of anchorage model is still in linearelastic phase when the load is less than 9.5 times design load. This moment, deformation of the anchor and the surrounding rock is small. The deformation of the anchorage is dominated by the deformation of the surrounding rock. But the deformation of interface of the anchorage / rock is very small. Influenced by the clamping effect, the surrounding rock of the 1/3 range of the rear of the anchorage bears about half of the load and is the key part of the force. The result of comprehensive analysis on bearing capacity, deformation and stress state show that the stability of tunnel-type anchorage is all right.

**Keywords:** Hutiaoxia Jinsha River Bridge; tunnel-type anchorage; field model test; stability analysis

## 0 引言

随着国家高速公路建设的迅速发展, 大跨径悬索桥在西部高山峡谷地区深得青睐。锚碇是悬索

桥的核心受力构件, 主要分为隧道式锚碇和重力式锚碇。隧道式锚碇方案以其经济环保的显著优势而被越来越多地采用, 尤其是在软岩中成功修建的隧道锚长江大桥<sup>[1-2]</sup> 案例, 颠覆了过去只能在岩体

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-21 (修改稿)

作者简介: 王中豪 (1990-), 男, 湖南永州人, 硕士, 工程师, 主要从事岩石力学试验与稳定性分析研究工作。

E-mail: 779475836@qq.com

较完整的坚硬岩体中修建隧道锚悬索桥的认识。但是隧道锚承载机制复杂(缆索将桥梁载荷先传递给锚体,锚体再通过与围岩的嵌固作用将荷载传递给围岩,最终形成锚体和围岩共同承担缆索拉力协同体系),再加上隧道锚碇结构布置形态和地形地质复杂性的影响,目前,隧道锚技术理论研究得不够成熟,进而制约了隧道锚的广泛应用。

采用隧道锚方案面临的主要问题就是稳定性评价,目前隧道锚稳定性评价方式主要采用3种不同的方式。一是从锚体与岩体的力学关系入手,试图获得隧道锚稳定安全系数的解析方式,如朱玉<sup>[3]</sup>将锚杆与岩土锚固机理推广到隧道锚与岩体的相互作用,进而推导出了锚体长度和安全系数的关系式;曾钱帮等<sup>[4]</sup>将锚体与岩体建立多个块体破坏机构的力学模型,用虚功原理推导出表达式来求解安全系数;廖明进等<sup>[5]</sup>根据岩-锚接触面的受力关系,建立接触面的力学平衡条件,进而推导出了两种不同破坏模式下的隧道锚承载力计算公式。但是三维隧道锚模型的复杂性使得在推导解析方程时必须对模型进行简化和忽略部分次要因素才能进行下去(即三维模型简化为平面问题),同时推导出的解析方程中的参数也在使用中遇到如何与实际工程条件联系和如何取值的问题。第二种稳定性评价方式是采用三维有限元或有限差分进行数值计算,如董志宏等<sup>[6]</sup>采用FLAC3D对矮寨大桥吉首岸隧道锚碇系统进行稳定性分析;卫军等<sup>[7]</sup>采用有限元计算软件Abaqus模拟了四渡河特大悬索桥宜昌岸隧道式锚碇;胡波等<sup>[8]</sup>对坝陵河大桥西锚碇进行了三维有限差分数值模拟。数值模拟跳出了复杂的数学物理方程推导的束缚,适用于任意边界条件的工程,但其结果受模型概化合理性和参数取值准确性的严重影响,目前在工程领域也仅将数值模拟作为分析工程问题的辅助手段。

模型试验是一种可靠性高的稳定性验证和分析方法,通过试验结果可直接获得变形和承载力结果,同时获得各关键点的应力位移特征,进而可分析出变形机理与破坏模式。肖本职等<sup>[9]</sup>进行了重庆鹅公岩长江大桥东锚碇1:12.5的实地模型张拉试验,依据试验结果评估了锚碇围岩的稳定性;庞正江等<sup>[10]</sup>通过现场1:10缩尺模型试验分析了某悬索桥隧道锚的变形和应力特性;汤华等<sup>[11]</sup>则在室内通过配比材料加工制作了锚碇与围岩的模型,研究了隧道锚抗拉作用机理;余美万等<sup>[12]</sup>则在普立特大桥隧道锚碇勘探平洞内分别进行了圆柱形

锚体和圆台形锚体两种不同锚体形状的对比缩尺模型试验,研究了夹持效应对普立特大桥隧道锚的贡献。本文通过在香丽高速虎跳峡金沙江大桥隧道锚碇区附近地表岩体开展1:10缩尺隧道锚模型试验,研究隧道锚的稳定性。

## 1 工程概况

虎跳峡金沙江大桥是香丽高速公路重点控制性工程。该桥为双向四车道,总长1 020 m,主跨为766 m,桥位处河谷深切,山势陡峭,桥面距江面260 m,桥位区域地质情况极其复杂。丽江岸采用重力式锚碇,香格里拉岸采用隧道式锚碇。隧道锚碇两根主缆最不利荷载组合下最大缆力为 $3.73 \times 10^5$  kN。隧道锚碇体设计为前小后大的楔形,前锚面到IP点的纵向长度为30 m,锚碇体纵向长度为30 m,与水平线的倾角为 $20.2^\circ$ ,最大埋深约103 m。横断面顶部采用圆弧形,侧壁和底部采用直线形,两锚碇中心距为26 m,前锚面尺寸为 $9.8 \text{ m} \times 11.2 \text{ m}$ ,顶部圆弧半径为4.9 m,后锚面尺寸为 $15.2 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ ,顶部圆弧半径为7.6 m。根据地质勘察结果,锚碇地区基岩为玄武岩,锚碇体埋设位置位于未卸荷带岩体较完整的Ⅲ级围岩中,围岩受边坡卸荷影响严重,从地表到25 m深度范围的岩体为节理裂隙发育、较破碎V级和Ⅳ级岩体。

## 2 现场缩尺模型试验设计

### 2.1 现场缩尺模型试验原理

现场缩尺模型锚碇设计是基于弹性力学的相似原理来实现的。根据相似原理,模型与原型应采用相同的材料制作,模型几何尺寸由原型结构尺寸按一定的比例缩小,当不计体力时,模型与原型的参数之间存在如下关系:

$$\text{强度: } R_m = R_p \quad (1)$$

$$\text{弹性模量: } E_m = E_p \quad (2)$$

$$\text{几何尺寸: } L_m = \frac{L_p}{C} \quad (3)$$

$$\text{荷载: } N_m = \frac{N_p}{C^2} \quad (4)$$

式中: $R_m, R_p$ 分别为模型及原型的强度; $E_m, E_p$ 分别为模型及原型的弹性模量; $L_m, L_p$ 分别为模型及原型的几何尺寸; $N_m, N_p$ 分别为模型及原型的荷载; $C$ 为几何相似比,本模型为10。

为了保证模型材料相似,模型试验地点选择在实桥锚碇区附件地表岩体进行,使模型锚的围岩与

原型锚的围岩地质条件相近,模型锚浇筑混凝土采用与原型锚的相同标号混凝土。模型锚洞和边界条件的开挖按照原型尺寸按 1:10 缩小进行,模型锚试验建造场景如图 1 所示。

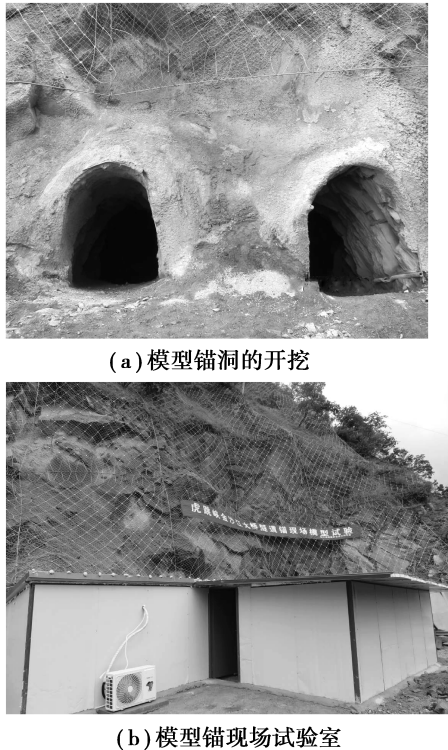


图 1 隧道锚模型建造图景  
Fig.1 Photo of tunnel-type anchorage scale model construction

2.2 加载系统与加载方法

加载系统采用后推法来模拟锚碇的实际受力状态,先在锚碇后部浇筑混凝土和传力钢板,而后紧靠钢板安装千斤顶,再将每台千斤顶的油路并联后连接在同一台油泵上,整个加载出力系统完全封闭在模型锚后端,通过锚体预留孔引出油管并安装压力传感器。每个模型锚碇底部用 9 台 3 000 kN 千斤顶向外施加,共计 18 台千斤顶。千斤顶规格、型号都相同,确保千斤顶均匀出力,同时使千斤顶合力方向与锚碇体设计拉力方向一致(成 20.2°倾角),且合力作用点在钢板的形心。

油泵采用智能化的气液式微机伺服控制,具有施加荷载高、压力伺服控制精度高、控制方便等特点。18 台千斤顶采用多通油路并联,通过高压油路开关任意平滑转换,整个加卸载试验过程通过压力传感器和采集系统自动采集。

加载采用分级加(卸)荷单循环方法进行,从零开始分级加载,试验加载方案为 1*P* 大循环加

载、3.5*P* 大循环加载、7.0*P* 大循环加载和极限加载。对 1.0*P*、3.5*P* 和 7.0*P* 大循环加载试验,每一级大循环加载试验按照 0.5*P* 级差分级加载,如按 0.5*P*、1.0*P*、1.5*P*、2.0*P*、2.5*P*、3.0*P*、3.5*P*、……方式划分荷载步,施加到相应压力后,按同样步数逐次退压至 0;对极限加载试验,继续按 0.5*P* 级差划分荷载步,施加到模型锚破坏压力或加载设备所能承受的最大极限后,缓慢匀速退压至 0。

2.3 监测布置

在锚体和围岩中布置了位移计、位错计、应力计和应变计,监测仪器布置如图 2 所示。将各种监测仪器通过数据线连接到模型锚现场试验室中的操作计算机上,实现全过程智能加(卸)载和监测操作,如图 3 所示。

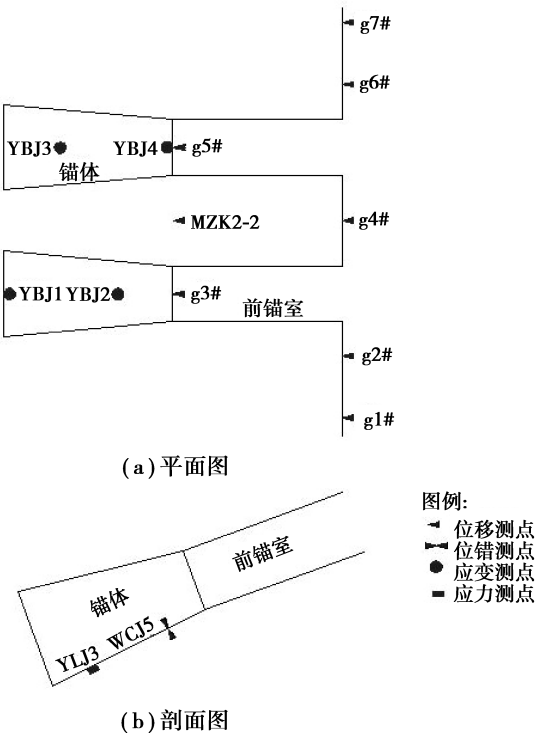
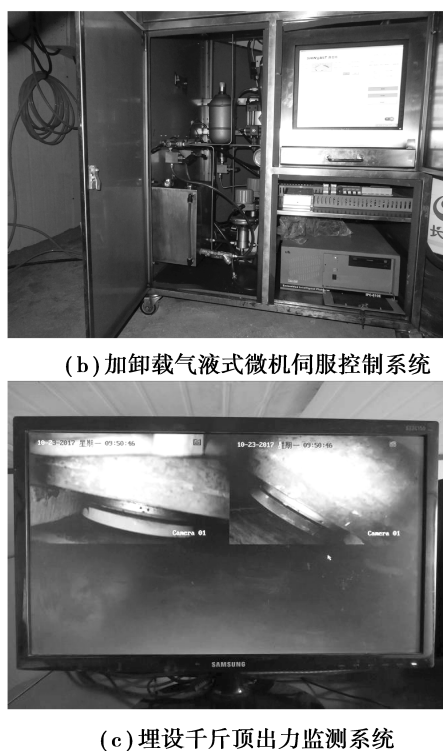


图 2 监测仪器布置图  
Fig.2 Layout of monitoring instruments



(a) 数据自动采集系统





(b) 加卸载气液式微机伺服控制系统

(c) 埋设千斤顶出力监测系统

图3 模型隧道锚智能监控实验室

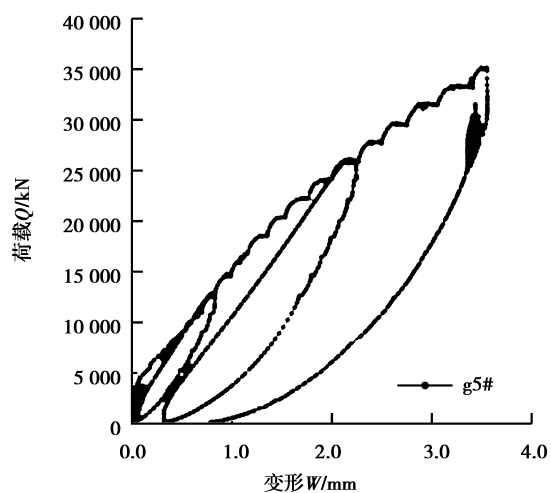
Fig.3 Intelligent monitoring test room for scale model of tunnel-type anchorage

### 3 缩尺模型试验结果与分析

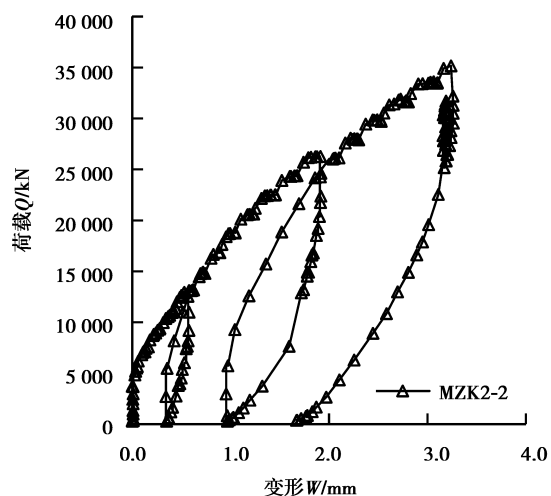
#### 3.1 变形分布规律

对锚体、围岩和锚体/围岩接触面的变形分别取典型测点作荷载-位移曲线,如图4所示。由图可知,1P荷载( $P$ 为1倍荷载,3 730 kN)下,锚体变形为0.118 mm,围岩变形为0.004 mm,锚体/围岩接触面错动变形为0.014 mm。9.5P荷载(35 435 kN)下,锚体变形为3.550 mm,围岩变形为3.240 mm,锚体/围岩接触面错动变形为0.513 mm。在低倍荷载下,锚体/围岩接触面错动变形比围岩的变形大,表明此时锚体在锚/岩接触面中发生错动、调整位置,应力较小,还不足以使围岩产生显著的变形。随着荷载的增加,锚体、围岩和锚体/围岩接触面的变形都在增加,但是锚体和围岩变形的增长幅度相近,且在高倍荷载下锚体和围岩的变形基本相当,而锚体/围岩接触面错动变形增长幅度很小,表明在高倍荷载下倒锥型锚体的变形以夹持围岩一起变形为主,锚体/围岩接触面的错动变形几乎可以忽略。

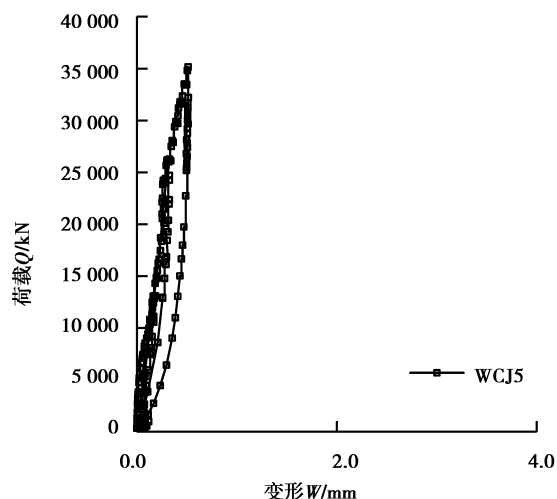
对前锚面及左右地表围岩进行变形与位置关



(a) 锚体变形曲线



(b) 围岩变形曲线



(c) 锚体/围岩错动变形曲线

图4 荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves

系作曲线如图5所示,研究锚体及左右围岩在各级

荷载下的变形差异与位置的关系。由图 5 可知:

(1)在各级荷载下,锚体的变形最大,其次是中隔墩围岩的变形,再次是距离锚体 1 倍洞径的左右两侧围岩变形,最后是距离锚体 2 倍洞径围岩的变形,整个曲线呈双驼峰形。这是锚体受到荷载后向周围岩体逐渐传递应力所致。位移以锚体为中心向四周衰减扩散,首先锚体发生变形,变形最大,中隔墩岩体受到两个锚体荷载的叠加而产生较大的变形。

(2)以锚体中心为轴线,距离锚体中心位置相同的左右两侧对称围岩的测点变形量基本一致,但受岩体不均质的影响而略有差异。

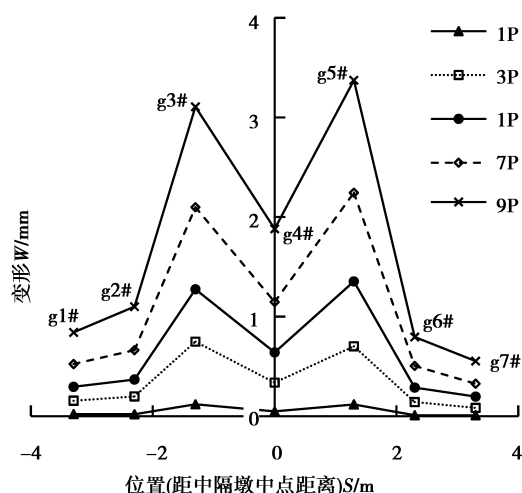


图 5 前锚面及围岩不同部位变形对比曲线

Fig.5 Displacement curves of different parts of anchorage

### 3.2 应力应变分布特征

在模型锚碇体与底部围岩接触面布置一只压力计,作荷载-接触应力曲线如图 6 所示。在较低荷载下,锚碇体与底部围岩的接触应力出现负值,表现为锚体向上抬的微弱运动趋势,这主要是锚体在斜向上的推力下向上运动的结果。随着荷载的增大,锚体的向上运动受到围岩的限制而产生挤压接触应力,并通过挤压接触应力将缆绳荷载传递到围岩上,且随着施加荷载的增大,挤压接触应力越大,9.5P 荷载锚体与围岩的最大接触应力为 50 kN。

取右锚碇后部监测点作荷载-微应变曲线如图 7 所示,以压应变(轴向应变)为正,在加载到最高荷载 9.5P 的情况下,荷载-微应变曲线基本处于线性关系,并在卸载后应变归零,基本未有残余应变,锚碇处于弹性变形阶段。

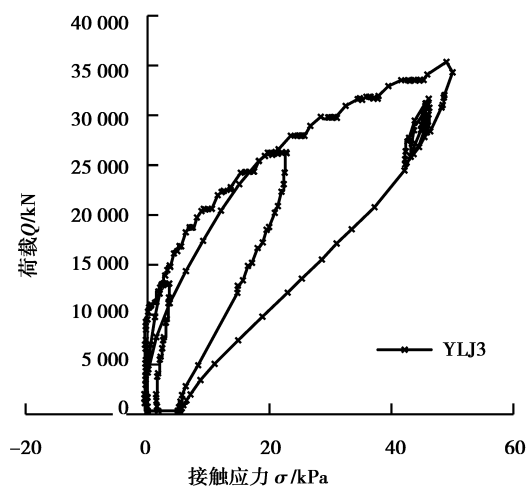


图 6 锚/岩接触面荷载-接触应力曲线

Fig.6 Load-stress curves of the interface between anchorage and rock

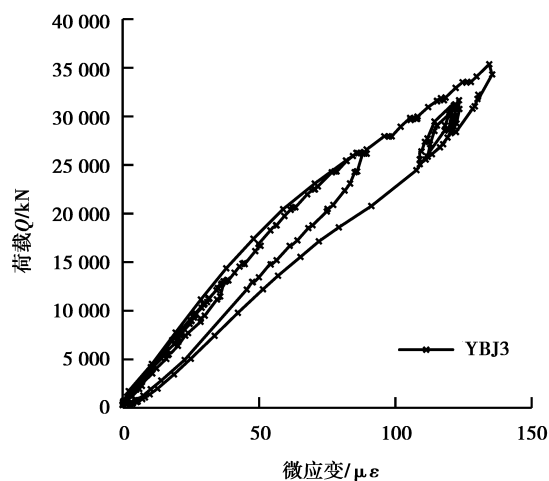


图 7 锚体荷载-应变曲线

Fig.7 Load-strain curves of the anchorage

锚体各位置的应变与锚体混凝土弹性模量的乘积反映了锚体各位置受到的应力大小,进而反映应力沿着锚体轴线方向的损失,也间接反映应力沿着锚体轴线方向向围岩传递的过程。将锚体在不同荷载下各测点应变与距后锚面的距离作曲线,如图 8 所示。锚体上的轴向应变在锚体后部比锚体前部大,后锚面的应变最大。在距后锚面 1 m 距离时,微应变减小到约 50%,表明距后锚面 1 m 距离时,约 50%的应力已经传递到围岩并由围岩承担。在距后锚面 2 m 距离时,微应变减小到约 20%,表明距后锚面 2 m 距离时,约 80%的应力已经传递到围岩并由围岩承担。在前锚面处,微应变已经很小,减小到约 2%,表明约 98%的应力已经传递到

围岩并由围岩承担。结果表明,缆索荷载几乎全部传递到围岩并由围岩承担,其中在越靠近锚体底部,向岩体传递的应力越大,则该部位的岩体承担更高的应力并首先发生局部屈服破坏。

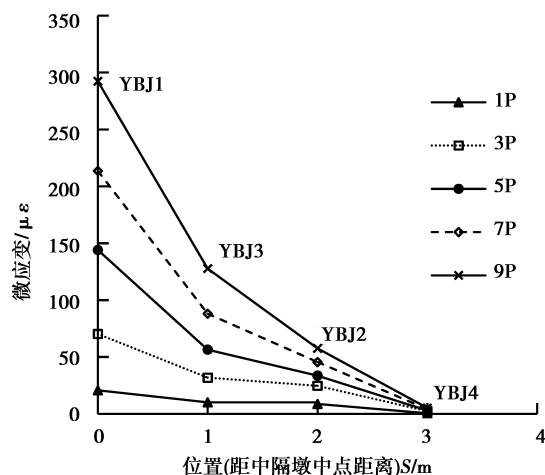


图8 锚体不同部位应变对比曲线

Fig.8 Strain curves of different parts of anchorage

### 3.3 承载特性

综合图4锚体、围岩和锚体/围岩接触面的变形曲线、图6锚体/围岩接触应力曲线和图7锚体应变曲线可知,在加载到9.5P荷载时,其曲线基本线性关系,仍未出现屈服,同时在试验过程中未发现岩体破坏的迹象。结果表明,该隧道锚承载力能达到9.5P,同时9.5P荷载下锚体变形为3.550 mm,变形满足要求。

## 4 结论

对虎跳峡金沙江大桥香格里拉岸隧道锚进行了现场1:10隧道锚缩尺模型试验,以试验中监测到的变形、应力和应变成果进行综合对比分析,取得如下主要研究成果:

(1)当荷载为9.5P时,锚碇模型仍处于弹性变形阶段,且锚体变形仅为3.550 mm,在该荷载下隧道锚碇是安全的,可为虎跳峡金沙江大桥的设计和施工提供参考。

(2)受倒锥型锚体结构形式的影响,锚体的变形主要是以夹持围岩一起运动的变形,而锚/岩接触面的错动变形很小,预测该桥隧道锚的破坏模式为锚体带动一定范围的周边岩体发生整体拉剪复合破坏。

(3)荷载通过锚/岩接触面传递到围岩,并几乎全部由围岩承担,锚体后部1/3范围的围岩承担了50%左右的荷载,该部位岩体成了受力的关键

部位,可作为考虑加固补强和监测的重点区域。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘新荣,李栋梁,吴相超,等.泥岩隧道锚承载特性现场模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,39(1): 161-169. (Liu Xinrong, Li Dongliang, Wu Xiangchao, et al. Field model test research on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 39(1): 161-169. (in Chinese))
- [2] 于新华,王丽新,付环宇,等.南溪长江大桥隧道锚原位模型试验及参数反演分析[J]. 科学技术与工程, 2015,15(4): 160-165. (Yu Xinhua, Wang Lixin, Fu Huanyu, et al. Test and parameter inversion analysis of tunnel-type anchorage orthotopic model of Nanxi Yangtze River Bridge[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(4): 160-165. (in Chinese))
- [3] 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. Study on the framework of tunnel-type anchorage design and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese))
- [4] 曾钱帮,王思敬.基于虚功原理的悬索桥隧道式锚碇边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报,2007,15(1): 22-32. (Zeng Qianbang, Wang Sijing. Stability analysis of a fractured rock mass slope used as the foundation for a tunnel type anchorage of suspension brige at Baling River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 15(1): 22-32. (in Chinese))
- [5] 廖明进,王全才,袁从华,等.基于楔形效应的隧道锚抗拔承载能力研究[J]. 岩土力学,2016,37(1):185-202. (Liao Mingjin, Wang Quancai, Yuan Conghua, et al. Research on the pull-out capacity of the tunnel-type anchorage based on wedge-effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 185-202. (in Chinese))
- [6] 董志宏,张奇华,丁秀丽,等.矮寨悬索桥隧道锚碇稳定性数值分析[J]. 长江科学院院报,2005,22(6): 54-58. (Dong Zhihong, Zhang Qihua, Ding Xiuli, et al. Numerical analysis of rockmass stability in tunnel anchoring of Aizhai Bridge[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(6): 54-58. (in Chinese))
- [7] 卫军,李昊,朱玉,等.四渡河特大悬索桥隧道锚固系统数值分析[J]. 公路,2005(5):48-51. (Wei Jun, Li Hao, Zhu Yu, et al. Numerical analysis of tunnel-type anchorage system of Sidu River Suspension Bridge[J]. Highway, 2005(5): 48-51. (in Chinese))

(下转第1212页)