

隧道锚原位缩尺模型试验的施力方式研究\*

李维树,王帅,吴相超,周火明

(长江水利委员会长江科学院重庆分院,重庆 400026)

**摘 要:**介绍了隧道锚原位缩尺模型试验两种施力方法的原理及方法,剖析了不同施力方式对缩尺模型锚试验的影响。缩尺后模型尺寸变小,前拉法的散索难以可靠实施,直接影响拉拔效果,同时,拉拔中需要设置巨大的反力梁,不仅大大增加试验成本,而且对围岩变形测量影响大。为此研究了一种替代方法——后推法。以实例为基础剖析了前拉法的优缺点,介绍了后推法的原理、方法及实施要点,并以重庆几江长江大桥为例,采用有限差分法对模型锚不同施力方式作用后的塑性区分布、变形特征及破坏特征进行了比较分析,两种施力方法作用于模型锚后的塑性区分布和变形分布上有细微差别,通过重庆几江长江大桥 1:10 缩尺模型试验验证,其破坏模式基本吻合,表明后推法可以替代前拉法。目前该方法得到了推广应用。

**关键词:**隧道锚原位模型试验;施力方式;前拉法;后推法;重庆几江长江大桥

中图分类号:TD325      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)02-0453-06

Loading Mechanism Research on In-situ Reduced Scale Model Test of Tunnel Anchorage

Li Weishu, Wang Shuai, Wu Xiangchao, Zhou Huoming

(Chongqing Branch of Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, P.R.China)

**Abstract:** Two loading methods and mechanisms were compared in in-situ reduced scale model test of tunnel anchorage, influence of different loading methods on reduced scale tunnel model was analyzed. Reducing the size of model, it is unreliable to apply anchorage cables in front-pull method and directly effects the pull-out result, and huge anti-force beam has to be set up to fix it, increasing the cost of test and affecting the monitor of surrounding rock deformation. Therefore, back-stepping method was put forward as a substituted way. The case was analyzed to elaborate the merits and drawbacks of front-pull method. At the same time, Jijiang yangtze river bridge in Chongqing was analyzed as an example to introduce the mechanism, the way and the taking points of back-stepping method. Finite difference method was taken to study the distribution of plastic zone in different loading conditions of model cable, to compare with the deformation characteristic and failure behavior. Finally, it concludes that there is a few distinctions between plastic zone distribution and deformation of model cable under two forcing conditions. The Jijiang yangtze river bridge model test in scale 1:10 proves that the failure mechanism of front-pull method and back-stepping method basically tallies, which indicates front-pull method can be substituted by back-stepping method.

**Keywords:** in-situ model test; loading method; front-pull method; back-stepping method; Jijiang yangtze river bridge in Chongqing

\* 收稿日期:2016-03-14(修改稿)  
作者简介:李维树(1963-),男,教授级高级工程师,主要从事岩土力学试验与研究工作。  
E-mail:lws\_lwslws13608377695@163.com  
基金项目:国家青年科学基金(51409013)

## 0 引言

随着我国交通工程的快速发展,涌现出大量的桥梁隧道。其中悬索桥与其他桥型相比有诸多优点,跨越江河、沟谷的特大型悬索桥梁越来越多。如桥都重庆市已建的重庆鹅公岩长江大桥、丰都长江大桥、忠县长江公路大桥、万州长江二桥,在建的有几江长江大桥、驸马长江大桥,即将建设的重庆太洪长江大桥等。此外还有在建的雅康高速大渡河泸定特大桥、金沙江金东大桥等,且首次应用于铁路上,如拟建的丽香铁路金沙江大桥<sup>[2]</sup>。

国外,如美国的乔治华盛顿大桥、旧金山奥克兰海湾大桥,英国的福斯大桥,日本的下津井濑户大桥等悬索桥,其全部或一侧锚碇均采用隧道式锚碇。国内首次成功采用单侧隧道锚的大桥为重庆鹅公岩大桥<sup>[3]</sup>,隧道锚碇区为软岩,之前广东虎门大桥拟采用隧道锚方案,但通过150缩尺的隧道锚模型试验后最终桥梁设计采用了重力锚方案<sup>[4]</sup>。由此说明隧道式锚碇对地质条件的要求较为苛刻,必须通过现场模型试验予以验证。

采用隧道锚技术解决山区悬索桥主缆载荷的承载问题,是山区桥梁建设在技术上的一个重大发展。隧道锚与围岩承载特性及相关设计标准是桥梁建设在岩石力学方面提出的新课题。目前,国内有关隧道锚的实际工程经验相对较少,有关机制研究主要是在某一方面进行,未见系统性研究成果<sup>[1]</sup>。

通过一定缩尺比例开展隧道锚模型试验研究从20世纪90年代末开始,经过十多年的探索与发展积累了一些经验,如四渡河大桥从隧道锚岩石力学试验、模型锚原位试验及稳定分析计算方面较为系统地研究了硬质岩隧道锚的工程特性<sup>[5-9]</sup>。

然而,如何成功开展原位缩尺模型试验至今尚未见到相关的文献,施力方法一般都是模拟拉拔方法,但分析文献发现,模拟拉拔方法难以使模型锚达到预期的荷载,且费用高、难度大<sup>[3-4,6]</sup>。

## 1 模型锚碇分析

实桥锚的受力条件是通过散索鞍将缆索的拉力均匀分布在锚体前部,利用围岩对楔型锚体的“夹持”作用提供反力。模型锚是按一定的几何比例缩尺,根据相似原理,力的作用方式不变,因此,

对模型锚的施力应采用拉拔方法(以下简称前拉法)。其方法是在缩尺模型锚外端,采用反力梁作用于洞口外一定距离的岩体上,通过缆绳将张拉千斤顶的出力施加于模型锚上,原理如图1。该方法由于模型锚碇受力状态与实际工作状态一致而被普遍采用<sup>[10]</sup>。如重庆鹅公岩长江大桥、广东虎门大桥、四渡河大桥等,都采用了前拉法进行不同缩尺模型隧道锚试验。

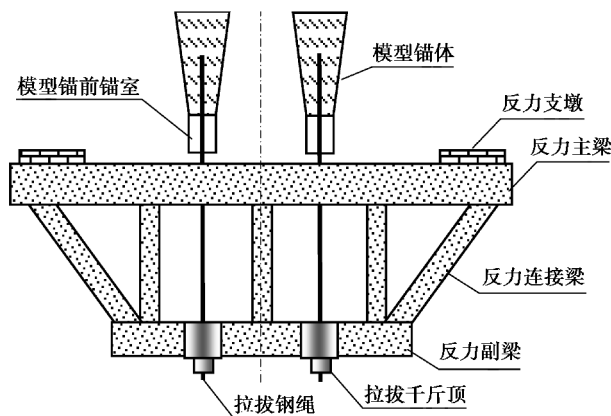


图1 模型锚拉拔试验概念图

Fig.1 Structure of anchorage model in pull-out test

重庆鹅公岩长江大桥锚碇区地层与几江大桥地层最接近,1998年进行了112.5缩尺模型试验,其中的反力梁为钢筋混凝土构件,反力梁长度约8m,试验加载到 $4.6P$  ( $P$ 为设计荷载,下同)时钢绞线断裂而被迫终止;四渡河大桥隧道锚围岩为灰岩,进行了112缩尺模型试验,试验采用前拉法,反力梁为钢筋混凝土构件,长度约10m,受反力梁承受能力限制,只施加到 $7P$ ,未能达到极限破坏。(虎门大桥因其比例为150,模型尺寸及荷载均很小,可比性不强)。

可见,前拉法需要庞大的反力梁,由于工程量大,已开展的试验所使用的反力梁长度在缩尺模型锚断面尺寸的3~4倍以内,则巨大的反力作用于围岩上,对缩尺锚围岩有较大的影响。理论上,反力梁支点至少应在缩尺模型锚断面最大尺寸的3倍以外,若考虑锚碇前室距离加上发散角因素,则反力梁尺寸更大,显然已进行过拉拔试验的反力梁尺寸都远未达到。由于反力梁尺寸不够,这就给模型锚在拉拔过程中所监测到的围岩位移带来误差。另外,反力梁的允许承载能力、钢绞线与锚碇之间、钢绞线与千斤顶之间的结合工艺等是决定试验是

否成功的关键,往往因为其中某个环节出现问题就导致试验失败或未达到试验设计要求。

重庆几江长江大桥地层岩性为软岩,若采用拉拔方式,则通过反力梁支墩作用于岩体上引起的变形较大,钢筋混凝土反力梁由于受力不均匀可能导致破坏。为了尽量减小反力对围岩的作用,反力梁长度至少应为20 m(26 m为宜),则土石方开挖量及混凝土浇制量比四渡河大桥缩尺模型锚大2~3倍,制作巨大的反力梁需要至少2个月工期。因此,反力梁不宜采用钢筋混凝土现浇方法。

2 模型锚碇后推法

基于前拉法存在诸多困难,近年来,先后分别在浙江官山大桥、云南普立特大桥等采用后推法获得成功。浙江官山大桥进行了110缩尺模型试验,在后锚室采用16台150 t千斤顶,理论出力可达到14.45*P*,实际试验达到10.5*P*。云南普立特大桥进行了125缩尺模型试验,在后锚室采用6台300 t千斤顶,理论出力可达到59*P*,实际试验达到50*P*,因达到压力表最大值而终止加载。可见,后推法通过增加千斤顶的数量或增加单台千斤顶的出力,可以达到较高的荷载,比前拉方法的实际出力高得多,不仅如此,由于省去了巨大的反力梁,大大节省了试验工期和安装难度,其可靠性也比前拉法高得多。

所谓后推法,是将出力设备置于模型锚后部,利用模型锚的后部岩体提供的反力,通过千斤顶给锚体提供推力,施力原理及方法如图2。

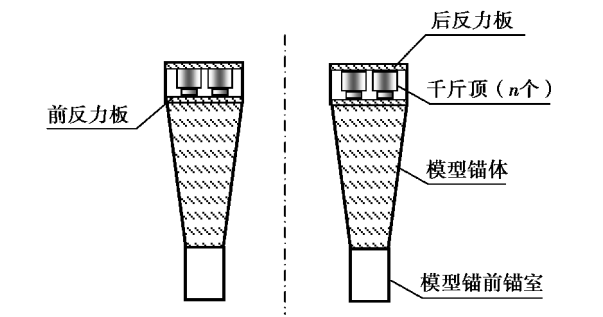


图2 后推法施力原理及方法示意图

Fig.2 Method and mechanism of back-stepping method

图3为重庆几江长江大桥北岸隧道锚采用后推法的千斤顶安装照片,单锚采用8台3 000 kN的千斤顶,双锚的16台千斤顶并联出力,最大出力

达到设计荷载的22倍。最终荷载施加至11.5*P*时模型锚完全破坏。对于1:10的缩尺模型锚试验,采用前拉法至今尚未超过10*P*。可见,通过改进模型锚施力方式确保了几江长江大桥缩尺模型锚达到极限破坏,为研究软岩隧道锚破坏机理提供了技术支持。



图3 单锚体千斤顶安装照片

Fig.3 Pictures of lifting jack single anchorage body

3 后推法与前拉法数值分析比较

为了研究两种施力方式对岩锚共同作用产生的效果,对几江长江大桥模型锚采用有限差分法(Flac程序)进行了前拉和后推数值模拟计算。

3.1 几江长江大桥工程概况

几江长江公路大桥位于重庆市江津区,桥梁全长1 738 m,主桥为主跨600 m双索面悬索桥,双向6车道,设计时速为50 km/h。桥跨布置为50+600+65 m三跨连续方案,主跨加劲梁采用扁平型钢箱梁,桥塔采用门式框架结构,塔柱为钢筋混凝土空心结构,横系梁为预应力空心薄壁结构,塔基采用承台加桩基础,南岸采用重力式锚碇,北岸采用隧道式锚碇,边跨采用Y型桥墩加桩基础。北岸隧道锚碇锚塞体设计为前小后大的楔形,纵向长度为60 m,与水平线的倾角为35°,最大埋深约68 m,锚体中心间距为26.7 m。横断面顶部采用圆弧形,侧壁和底部采用直线形,前锚面尺寸为10 m×10 m,顶部圆弧半径为5 m,后锚面尺寸为14 m×14 m,顶部圆弧半径为7 m。标准组合下,单根主缆拉力为108 000 kN,通过散索鞍将荷载传递至锚碇中后部。锚碇地区基岩为侏罗系上统遂宁组泥岩,局部夹砂岩,中等风化程度。

3.2 塑性区分布比较

后推法和前拉法在超载情况下,锚碇围岩状态均经历初始压密、地表产生拉应力区、塑性区扩展、锚碇上部塑性区贯通、锚碇下部塑性区贯通、完全

破坏 6 个阶段,对应的荷载分别为  $1P$ 、 $3P$ 、 $6P$ 、 $10.5P$ 、 $11P$ 。从围岩破坏形式来看,地表产生拉伸破坏,锚碇上部围岩先有剪切破坏发展到拉剪复合破坏,锚碇下部和后端围岩主要产生剪切破坏。

在荷载施加至  $1P$  时,前拉和后推均未产生塑性区,表明围岩处于弹性状态;荷载在  $2P \sim 5P$  期

间,在前端上部地表上开始出现塑性区,随着荷载的增加塑性区范围增大,前拉和后推产生塑性区的范围基本一致,其中前拉法先于后推法出现塑性区,且前拉法出现塑性区范围略大于后推法; $5P$  以后,两种方法出现塑性区的位置及范围也基本一致。

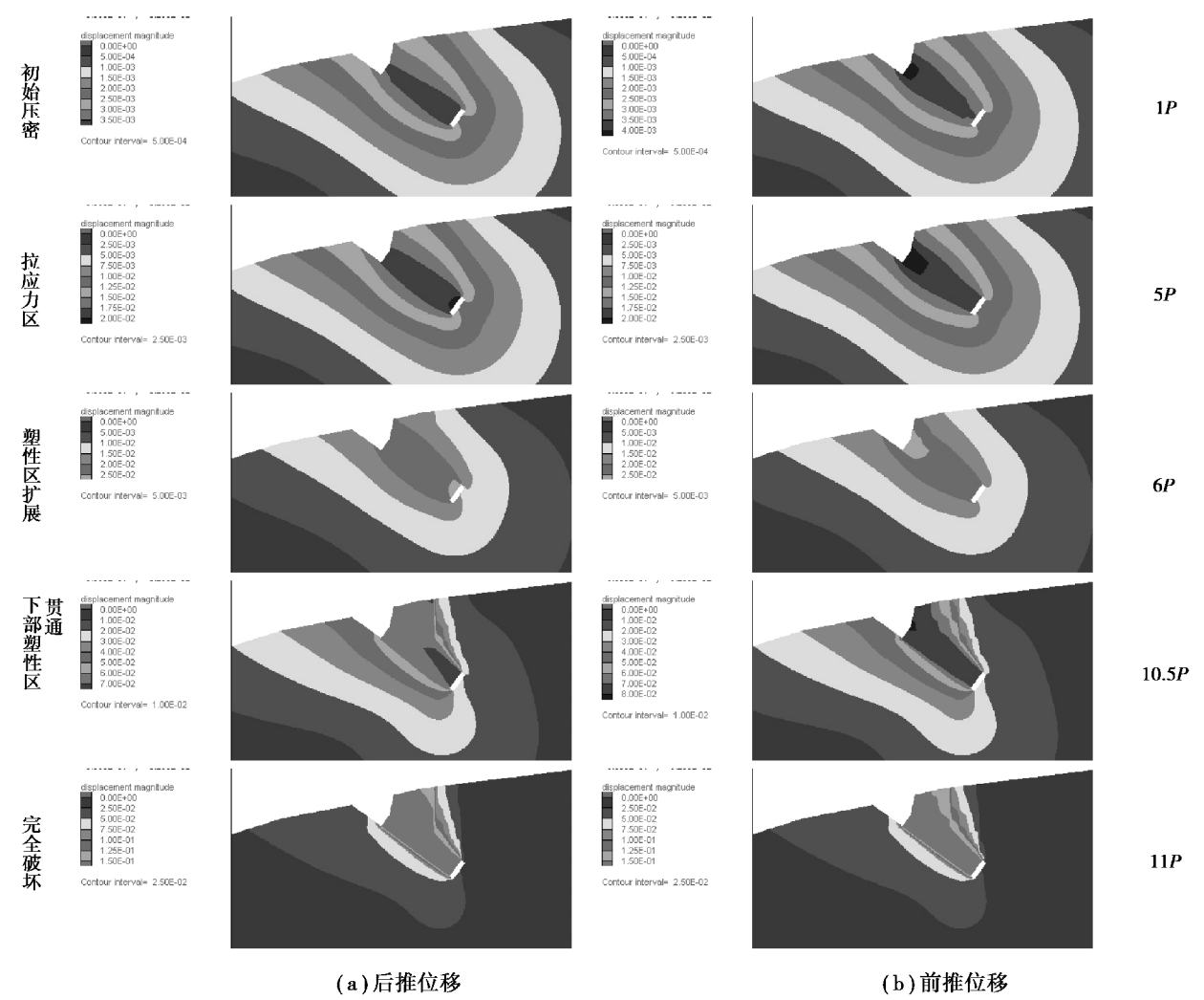


图 4 几江长江大桥隧道锚后推法与前拉法塑性区比较

Fig.4 Contrast of plastic zone under front-pull method and back-stepping method in Jijiang yangtze river bridge tunnel anchorage model

3.3 位移分布比较

在前拉和后推两种荷载情况下,锚碇和围岩位移分布规律总体上差别不大,只是锚碇前端和后端、锚碇上部地表局部区域位移量值有所不同。这是因为锚碇与围岩刚度比达到  $15:1$ ,锚碇相当于刚性体,前拉或后推时锚碇变形总体上以刚性位移为主,只是局部受力位置变形不同,因此,两种荷载作用时传递到围岩中应力基本相同,相应围岩位移

分布差别也不大。位移分布云图略。

在后推和前拉荷载下, $6P$  之前锚碇体位移随荷载增大线性增大,各部位位移量值基本相同, $6P$  后锚碇体位移曲线呈现上凹型,到  $10.5P$  时,锚碇体位移急剧增大,荷载与位移关系曲线如图 5。

锚碇前端监测点上,后推法与前拉法位移差值主要在  $-1 \sim -12\text{ mm}$  范围内;锚碇后端监测点上,后推法与前拉法位移差值在  $1 \sim 5\text{ mm}$  范围内;锚碇



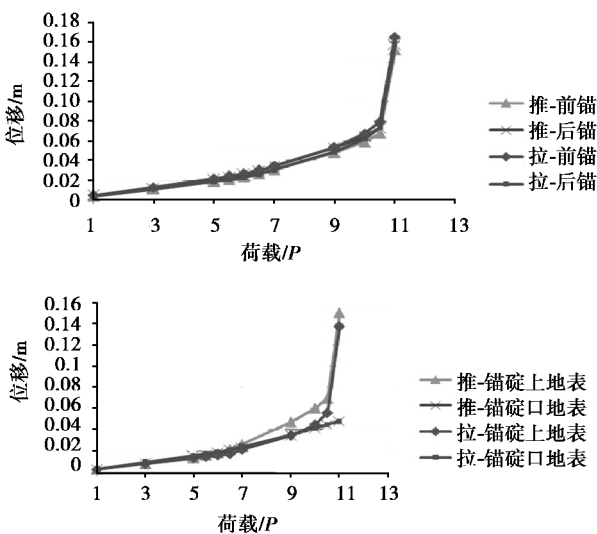


图5 几江长江大桥模型锚荷载位移曲线比较

Fig.5 Contrast of load-displacement curves of Jijiang yangtze river bridge tunnel anchorage model

上部地表监测点上,后推法与前拉法位移差值在6P后逐渐增大,范围在1~15 mm;锚碇口地表监测点上,后推法与前拉法位移差值在0~−3 mm范围。可见前拉法和后推法在位移量值表现出细微差别。

数值计算结果说明,在前拉和后推两种施力方式条件下,锚碇围岩状态均经历初始压密、地表产生拉应力区、塑性区扩展、锚碇上部塑性区贯通、锚碇下部塑性区贯通、完全破坏6个阶段,从围岩破坏形式来看,二者的破坏模式基本一致,即首先是地表产生拉伸破坏,锚碇上部围岩先有剪切破坏发展到拉剪复合破坏,锚碇下部和后端围岩主要产生剪切破坏;在11P荷载范围内,前拉和后推两种荷载工况下锚碇和围岩位移分布规律差别不大,两者差别主要体现在位移量值细微差别上。由此说明,后推法可以替代前拉法。

## 4 后推法实施注意事项

### 4.1 适用范围

后推法是将千斤顶置于锚体后部,因此,必须满足人工能操作的空间。一般而言,后锚面的尺寸应不小于1.5 m,否则安装极为困难,也难于保证安装质量。基于此,后推法适用于后锚面最小尺寸大于14 m的隧道锚,且模型试验缩尺比例以1/10为宜。

### 4.2 千斤顶数量

千斤顶的数量与实桥锚单缆最大荷载、缩尺模型锚比例系数 $C$ 、单台千斤顶最大出力 $p$ 及试验达到设计荷载的倍数 $k$ 有关,千斤顶数量按照下式估算:

$$N = 2Q / (pC^2k)$$

(当 $N$ 为奇数时,调整 $k$ 或 $p$ 使其为偶数)

式中: $N$ 为单锚千斤顶数量,台; $p$ 为千斤顶最大出力,kN; $C$ 为缩尺比例; $k$ 为期望达到的最大荷载比例。

以重庆几江长江大桥缩尺模型锚试验为例,

$$N = 2 \times 108\,000 / (3\,000 \times 10^2 \times 22) = 15.84 \text{ 台} \approx 16 \text{ 台}。$$

### 4.3 千斤顶的安装及要求

- 千斤顶安装如图3。安装要求要点如下:
- (1)每个千斤顶出力应均匀,安装前对所有千斤顶进行标定,标定时将用于输送压力的接头及高压油管连接好,最大荷载应为千斤顶最大出力的1.1倍。标定完成后,千斤顶与相应配件编号。选择出力系数一致的对称放在两个锚室,确保综合出力系数一致。
  - (2)安装时应尽量保证组合千斤顶的出力中心位于锚体中心,出力方向位于锚体轴线上,因此,千斤顶前端应设置球头。
  - (3)千斤顶前后应设置钢筋混凝土垫层,千斤顶前后应设置足够刚度的钢板,确保在高荷载下后座变形不均匀使力的中心改变或使单个千斤顶损坏。
  - (4)在封闭前,将所有油路连通,空载条件下加卸载1次,观察油路的可靠性及活塞的伸缩性。

### 4.4 监测设施布置要求

在进行模型锚荷载试验时,一般都需要埋深钻孔多点位移计,多点位移计的基准点针一般设置在钻孔的底端。由于后推法的巨大反力将作用于锚体后部岩体,为了确保变形监测的准确性,拉力向多点位移计的钻孔深度应大于后锚面最大尺寸的15倍,铅直向多点位移计钻孔深度应大于后锚面最大尺寸的10倍。

5 结论

(1)比较前拉法和后推法表明,后推法可以替代前拉法开展隧道锚原位模型试验,并具有缩短试验工期、减小试验投资、提高试验可靠性等诸多优点。

(2)通过数值计算分析比较表明,两种施力方法对同一模型锚作用后的塑性区分布和变形分布上有细微差别,通过重庆几江长江大桥 110 缩尺模型试验验证,其破坏模式基本吻合。

(3)现场缩尺模型试验是一项复杂的大型岩土试验工程,要做到精准可靠还有很多试验技术有待深入研究和完善,本文提供的新方法同样还需大量实践和理论分析验证。

参考文献(References)

[1] 黄东,姚建军,汪宏.山区公路悬索桥隧道锚设计[J].桥梁建设,2010(3):47-50. (Huang Dong, Yao Jianjun, Wang Hong. Design of tunnel-type anchorage for highway suspension bridge in mountainous region [J]. Bridge Construction, 2010 (3): 47-50. (in Chinese))

[2] 江南,冯君.铁路悬索桥大吨位隧道锚承载性能分析[J].铁道学报,2013,35(8):88-92. (Jiang Nan, Feng Jun. Analysis on bearing performance of large-tonnage tunnel-type anchorage of railway suspension bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35 (8): 88-92. (in Chinese))

[3] 肖本职,吴相超,彭朝全.重庆鹅公岩大桥隧道锚锭围岩稳定性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增2):5591-5597. (Xiao Benzhi, Wu Xiangchao, Peng Chaoquan, et al. Stability of the anchorage wall rock of tunnel for Chongqing Egongyan bridge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (Supp.2): 5591-5597. (in Chinese))

[4] 夏才初,程鸿鑫,李荣强.广东虎门大桥东锚锭现场结构模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,1997,16(6):571-576. (Xia Caichu, Cheng Hongxin, Li Rongqiang. Testing study on field structure model of the east anchorage of Guangdong Humen bridge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

1997,16(6):571-576. (in Chinese))

[5] 程鸿鑫,夏才初,李荣强.广东虎门大桥东锚锭岩体稳定性分[J].同济大学学报,1995,23(3):338-342. (Cheng Hongxin, Xia Caichu, Li Rongqiang. Stability analysis of the rockmass in the east anchoring area of Guang Dong Humen bridge [J]. Journal of Tongji University, 1995,23(3):338-342. (in Chinese))

[6] 朱杰兵,邬爱清,黄正加,等.四渡河特大悬索桥隧道锚模型拔拉试验研究[J].长江科学院院报,2006,23(4):51-55. (Zhu Jiebing, Wu Aiqing, Huang Zhengjia, et al. Pulling test of anchorage model of Siduhe suspension bridge[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006,23(4):51-55. (in Chinese))

[7] 邬爱清,彭元诚,黄正加.超大跨度悬索桥隧道锚承载特性的岩石力学综合研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):433-441. (Wu Aiqing, Peng Yuancheng, Huang Zhengjia. Rock mechanics comprehensive study of bearing capacity characteristics of tunnel anchorage for super-large span suspension bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(3):433-441. (in Chinese))

[8] 罗莉娅,卫军.岩体蠕变对悬索桥隧道锚围岩稳定性的影响分析[J].中南公路工程,2007,32(3):133-136. (Luo Liya, Wei Jun. The effect of rock creep on the long term stability of wall rock of tunnel-style anchor in a suspension bridge [J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(3):133-136. (in Chinese))

[9] 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2):4971-4974. (Zhang Lijie, Huang Zhengjia, Ding Xiuli. Numerical analysis with Flac3d of a tunnel anchorage of Sidu river bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4971-4974. (in Chinese))

[10] 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,2017,39(1):161-169. (Liu Xinrong, Li Dongliang, Wu Xiangchao, et al. Filed model tests on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1):161-169. (in chinese))