

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.030

# 隧道锚-围岩系统承载特性的室内模型 试验及畸变纠正

邓 琴<sup>1,2</sup>, 汤 华<sup>2</sup>, 吴振君<sup>2</sup>, 尹小涛<sup>2</sup>, 袁从华<sup>2</sup>

(1. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041 ;  
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 为研究隧道锚-围岩系统的承载特性, 依托云南普立特大桥普立岸隧道锚, 开展锚塞体不同大小和埋深的室内模型试验研究。试验结果表明, 试验荷载作用下和锚塞体接触部位的围岩首先发挥抗剪作用直至到极限状态, 锚塞体发生微小变形, 然后荷载产生的应力逐步向围岩中扩散, 围岩表面出现变形, 最终锚塞体位移发生突变, 围岩表面出现放射性裂纹。根据锚塞体和围岩表面的荷载-位移曲线以及围岩中的附加应力变化情况, 研究了隧道锚-围岩系统的承载力确定方法。针对相似材料中 III 类围岩黏聚力不满足相似比的情况, 提出采用数值仿真的方法对进行畸变修正, 得到与原始地质模型匹配的相似模型允许荷载是  $30f$  ( $f$  为设计荷载), 极限荷载是设计  $50f$ 。研究结果可为大桥隧道锚的修建及类似的工程设计提供参考。

**关 键 词:** 隧道锚; 承载特性; 模型试验; 荷载-位移曲线

**中图分类号:** U 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0247 - 08

## Research on capacity characteristics of tunnel anchorage and distortion correction

DENG Qin<sup>1,2</sup>, TANG Hua<sup>2</sup>, WU Zhen-jun<sup>2</sup>, YIN Xiao-tao<sup>2</sup>, YUAN Cong-hua<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory For Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Yunnan Provincial Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** In order to study the capacity characteristics of surrounding rock system, laboratory model tests with different sizes and embedded depths of anchorage are conducted. The results show that the contact area of anchorage and surrounding rock first reaches its limits; the anchorage has small deformation; the stress gradually spreads to surrounding rock; the deformation occurs on the surface. Eventually, the anchorage has catastrophe displacement; and the cracks appear on the surface of surrounding rock. According to the load-displacement curve of anchorage and rock surface and internal additional stress, the bearing capacity has been studied. Because the III surrounding rock does not satisfy the similar ratio, the numerical method has been proposed for distortion correction. Consequently, for the similarity model test of original geological model, the allowable load is  $30f$  where,  $f$  is the design load, and the ultimate load is  $50f$ . The research results can provide reference for the design and construction of similar projects.

**Keywords:** tunnel anchorage; capacity characteristics; model test; load-displacement curve

## 1 引 言

锚碇是悬索桥主要承载的结构之一, 主要有重力式和隧道式两类结构型式<sup>[1-2]</sup>。隧道式锚碇(后面简称隧道锚)通过在岩体中开挖隧道并浇注混凝土,

在承受外部荷载时可以调动周边岩土体一起承载而得到广大工程人员的青睐。自美国在 George Washington 桥<sup>[3]</sup>使用隧道锚之后, 日本、挪威、英国和中国等国家均在悬索桥设计中尝试采用隧道锚来承担主缆荷载, 自丰都长江大桥<sup>[4]</sup>首次采用隧

收稿日期: 2016-08-21

基金项目: 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开放基金(No. 201601); 国家自然科学基金(No. 51608518); 云南省交通运输厅科技项目(云交科2011(LH)12-a号, 云交科2014(A)01)。

This work was supported by the open foundation of National Engineering Laboratory for surface Transportation Weather Impacts Prevention(201601), the National Natural Science Foundation of China(51608518), and Science and Technology Projects of the Transportation Department of Yunnan Province(2011(LH)12-a, 2014(A)01).

第一作者简介: 邓琴, 女, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事工程岩体稳定性分析方面的研究工作。E-mail: dengqin\_x@163.com

道锚后隧道锚结构在我国悬索桥锚碇结构中蓬勃发展,到目前为止,约有20座大桥采用隧道锚<sup>[5-8]</sup>,但与目前悬索桥数量相比,采用隧道锚的悬索桥仅是一小部分,设计上通常考虑在裂隙较少、完整性较好的坚硬岩体中采用。这是由于目前对于隧道锚-围岩系统在主缆设计及超载下的变形、荷载传递及破坏模式的认识不足,制约了对锚碇系统工作性状和承载能力的认识,阻碍了隧道锚稳定设计及计算方法的发展,限制了隧道锚的广泛使用<sup>[9]</sup>。

针对隧道锚-围岩系统的研究主要采用现场模型试验和数值仿真的方法,其中现场模型试验是最直观、最可信的研究手段之一,目前有6座大桥开展了隧道锚的现场缩尺模型试验<sup>[10-17]</sup>,为认识锚碇围岩承载能力和变形破坏特征提供了珍贵的资料,但是,除了耗费大量的人力和物力,现场试验的“尺寸效应”一直困扰着科学工作者,并且受制于现场加载条件,一般很难达到围岩破坏,无法揭示隧道锚-围岩系统在试验荷载下的变形、破坏形态和极限承载力。数值仿真根据实际地质情况针对隧道锚的开挖、回填及加载的施工过程,分析隧道锚设计及超载下隧道及围岩的位移及应力变化和传递规律<sup>[19-22]</sup>,但计算中很难准确地获取围岩的参数、岩体和结构面的本构关系,导致计算结果的准确度大打折扣,其结果是否可以真正反映其受力形态,还需要其他试验辅助研究。室内相似模型试验可使工程中的现象在实验室中再现,而且可控制主要因素,具有省事、省力的优点。宁波庆丰悬索桥<sup>[23]</sup>和江阴长江公路大桥<sup>[24]</sup>均进行了重力锚的室内相似模型试验,讨论了结构的变形规律和破坏机制。隧道锚的室内相似模型试验鲜见相关报道,仅有1篇本团队关于云南普立特大桥隧道锚的科研论文<sup>[25]</sup>,本文以普立特大桥的普利岸隧道锚为工作背景,开展4组隧道锚室内模型试验,研究试验荷载下锚碇位移、围岩表面位移和内部附加土压力的变化关系,确定锚碇系统的允许荷载和极限荷载,并修正因材料参数引起的误差,研究结果为大桥隧道锚的修建及类似的工程设计、施工等提供参考。

## 2 工程概况

普立至宣威高速公路是曲靖市和宣威市高速公路网中的重要路段,是宣威市完善“三纵三横一环”骨架公路的依托基础和区域内重要的横向干线公路。普立特大桥是普立至宣威高速公路上的控制性工程,主桥桥型采用628 m单跨双塔钢箱梁悬索桥方案,主缆横桥向中心间距为26 m。普立岸采用

隧道锚结构进行锚固。普立岸锚碇处主缆实际恒载缆力为161 684 kN(2根主缆),最不利荷载组合下最大缆力为191 648 kN(2根主缆)。隧道锚的几何参数长度为35 m,倾角为42°,横截面为城门洞型,前锚面和后锚面的高度均为9.5 m,宽度分别为9.5 m和13 m。

桥址区位于构造剥蚀、侵蚀深切峡谷地貌单元区,普立大沟由北西向南东贯穿,深切沟谷两侧谷坡地形陡峭,呈“V”形谷。根据现场查勘和勘察可知,隧道锚所在区域地表溶蚀强烈,裂隙非常发育,岩体破碎;下部岩体逐渐完整,并且根据斜洞勘探发现少量溶洞。综合分析钻探和斜洞资料,隧道锚轴线0~31 m岩体为强卸荷、强风化溶蚀带岩体,围岩分类Ⅴ类;31~44 m岩体位于弱卸荷、中风化溶蚀带,围岩分类以Ⅳ类为主,44 m以下岩体为微风化溶蚀带,围岩分类为Ⅲ类,部分Ⅱ类,如图1所示<sup>[22]</sup>。

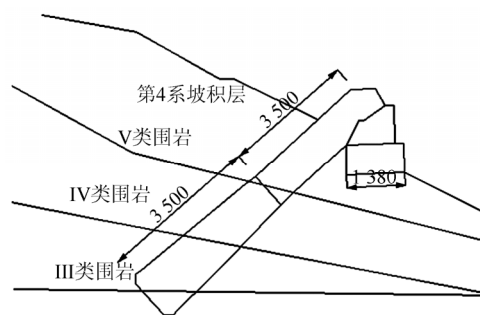


图1 隧道锚纵断面示意图(单位: cm)  
Fig.1 Sketch of longitudinal section of tunnel anchorage(unit: cm)

## 3 室内模型试验

### 3.1 相似材料

#### 3.1.1 相似常数

模型试验的相似理论是指为达到模型和原型相似的目的,模型和原型的有关参数间应满足的条件。相似条件包括几何相似,所研究对象的发展变化过程的相似及单值条件的相似<sup>[26]</sup>。

在相似模型试验中一般取2~3个相互独立物理量的相似常数为基本相似常数,其他物理量的相似常数可以根据物理量的量纲和基本相似常数导出<sup>[23]</sup>。考虑到试验场地和模型尺寸,本文取几何相似常数 $C_l = 200$ ,重度相似常数 $C_\gamma = 1$ ,其他物理量的相似常数见表1,其中各参数的含义见文献<sup>[25]</sup>。

#### 3.1.2 岩土材料

根据现场隧道锚位置的围岩条件,锚碇周边围岩为Ⅲ类围岩,上部为Ⅳ类围岩。采用粗砂、石膏、

重晶粉和水经过大量的配比试验最终获取获得比较合理的相似材料，其物理力学参数见表2。

表 1 各相关相似常数值

Table 1 Different related similar constant values

$C_G$	$C_c$	$C_f$	$C_E$	$C_c$	$C_\phi$	$C_\mu$	$C_r$	$C_\delta$	$C_p$
200	1	1	200	200	1	1	200	200	$200^3$

表2 室内模型试验的相似材料参数

Table 2 Parameters of simulation materials in laboratory model tests

围岩级别	材料类别	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
III 类	原型材料	27	$5 \times 10^3$	0.35	$1.4 \times 10^3$	38
	设计材料	27	25	0.35	7	38
	实际材料	21	28	0.30	23	35
IV 类	原型材料	18	$3 \times 10^3$	0.24	$0.75 \times 10^3$	35
	设计材料	18	15	0.24	3.75	35
	实际材料	18	20	0.20	2	33

根据相似定义，I 类围岩的室内模型参数和相似比折减的参数基本吻合，III 类围岩的室内模型参数和理想相似比参数 ( $c = 7 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 38^\circ$ ) 差异较大。如果修改相似材料的配比使得  $c$  值进一步降低， $\phi$  值明显降低，模型材料内部也难以测到相应的应力、应变结果，也观测不到极限荷载条件下的破坏特征。目前选取的 III 类参数，既接近现实材料按相似比要求后的结果，配比材料有一定的黏接强度，便于模型材料内测试不同荷载条件下的应变和应力变化，也能通过模型试验观测极限荷载条件下的破坏面特征。

3.1.3 锚碇材料

锚塞体模型的基本尺寸按照实际模型尺寸和几何相似比 (1:200) 进行缩小，并简化为变直径圆柱体 (前锚面直径为 4.5 cm，后锚面直径为 6.5 cm，长 17 cm)。本试验主要考虑围岩相似材料的破坏，不考虑锚塞体模型的破坏，锚塞体采用刚性材料制作，模型外表面设置凹槽，并在安装前在外表面涂一层环氧砂浆泥浆，以改善锚塞体模型和围岩相似材料之间的摩擦性能。锚碇形状见图 2。

3.1.4 试验装置

根据目前三维数值仿真普立特大桥的模拟范围为  $216 \text{ m} \times 255 \text{ m} \times 236 \text{ m}^{[22]}$  和几何相似常数 ( $C_l = 200$ )，在室内模型试验中建立隧道锚试验装置，见图3。包括模型试验箱(尺寸为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ )、反力支架、千斤顶和加力装置，其中试验荷载时通过在锚塞体内穿过钢绞线，通过反力支架和千斤顶施

加，实际锚塞体的倾斜状态可通过将模型箱倾斜一定角度实现。



图 2 锚塞体模型

Fig.2 Anchor models



图 3 模型试验箱、反力框架和拉拔千斤顶

Fig.3 Model test chamber, frame and jack

3.2 试验方案

由于隧道锚室内模型试验未查阅到相关文献，为了保证试验结果的可靠性和试验规律的可信度，本次共设计了 4 组方案，见表 3。方案 2、4 的锚塞体前锚面和后锚面直径和方案 1、3 的一致，分别为 4.5 cm 和 6.5 cm，方案 3 是真实地质模型的相似模型。实施方案时设计荷载按慢速维持荷载法施加。需要说明的是，方案 3、4 在加载过程中考虑了流变。

表 3 室内模型试验方案

Table 3 Testing schemes of laboratory model test

方案编号	锚塞体长度 / cm	锚塞体底面埋深 / cm	围岩性质
1	17	90	III 类围岩
2	8.5		
3	17	32	上部 15 cm 为 IV 类围岩，下部为 III 类围岩
4	8.5		

3.3 量测系统

观测的物理量包括锚塞体和围岩表面的位移和围岩内部附加土压力。锚塞体的位移是在锚塞体上

通过一个刚性杆件引出到地表来测量的。模型表面的位移是通过在模型表面按照一定间距设置的百分表获取，土压力是通过埋设的土压力盒测定。需要说明的是，由于锚塞体具有轴对称的性质，且锚体的直径和周围岩土体模型的长度之比为1:7.5(大于1:3)，说明岩土体的模型尺寸远远大于锚体受力的影响范围，不存在边界效应。

### 4 结果分析

#### 4.1 位移分析

图4为百分表在模型表面的布置情况，其中上、下和右监测线的测点布置和左线一致。后续分析中选取规律比较明显的其中一条测试线的数据分析。下述分析中 $P$ 代表试验荷载。方案1、2属于深埋深试验试验，图5(a)、5(b)为方案1、2试验荷载与地表变形关系曲线。从图中可以看出，当试验荷载较小时，当 $P=1.0\text{ kN}$ 时，锚体和围岩基本无变形，方案1、2没有明显的差别，随着荷载增加，锚体有明显的位移并且带动围岩出现变形，且方案1的位移明显小于方案2的位移。方案1，当荷载加至 $P=7.0\text{ kN}$ 时，稳定一段时间后，由于钢丝绳从锚塞体内部滑脱而停止加载，此时地表点变形量基本小于 $0.30\text{ mm}$ ，锚塞体的变形为 $0.80\text{ mm}$ ，未达到破坏条件。方案2，当荷载加至 $P=7.0\text{ kN}$ 时，模型表面的累计变形 $0.20\sim 0.50\text{ mm}$ ，地表产生裂缝，分析可知方案1锚碇与围岩的接触面积是方案2的2倍。在相同埋深和相同试验荷载下方方案1的锚碇与围岩产生的滑动较小，带动的围岩材料传递体积大，方案1测得的变形比方案2小。随着荷载的增加，这种变形差异继续扩大。最终在方案2达到破坏状态时(即 $P=7.0\text{ kN}$ )，方案1在相同荷载下仍未出现破坏迹象。因此，增加锚塞体的长度可以有效地提高隧道锚-围岩系统的极限承载力。

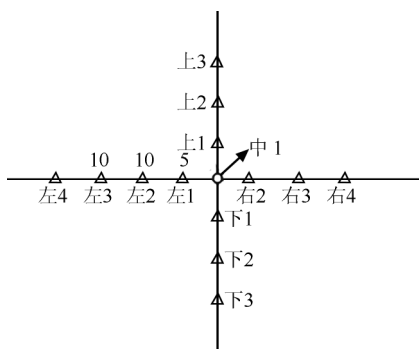
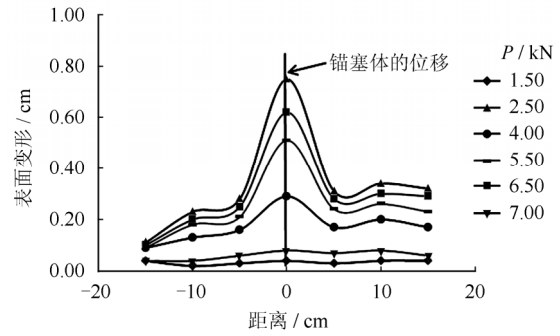
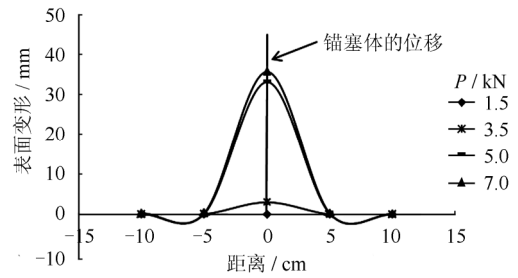


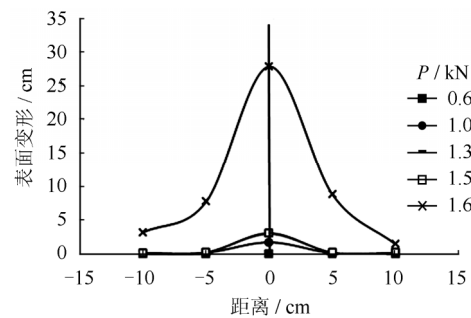
图4 百分表布置示意图(单位: cm)  
Fig.4 Installed dial gauge (unit: cm)



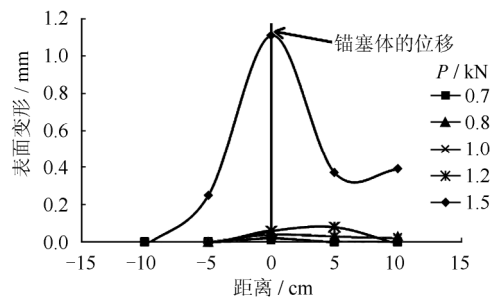
(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3



(d) 方案4

图5 方案1~4表面测点的变形曲线  
Fig.5 Deformation curves of measured points on surface of schemes 1-4

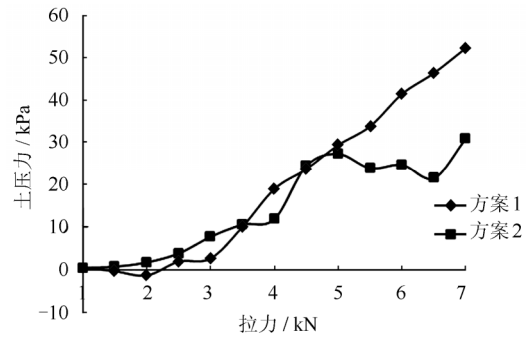
方案3、4属于浅埋深试验。图5(c)、5(d)为方案3、4试验荷载与地表变形关系曲线。当试验荷载较小时，当 $P=0.6\text{ kN}$ 时，锚塞体内基本无变形，两者没有明显差别。随着荷载增加，锚塞体出现较明显的位移，继续增加荷载至 $P=1.50\text{ kN}$ 时，变形均是平稳发展；当 $P=1.60\text{ kN}$ 时，模型材料表面增加明显的裂纹，锚塞体和其他表面测点变形急剧增加，模型材料达到破坏。方案4，在 $P=0.7\sim 1.0\text{ kN}$ 荷载作用期间，虽有变形，但变形量不大。当 $P=$

1.20 kN 长期流变稳定后,继续施加试验荷载时变形仍然较小;当荷载  $P = 1.50$  kN 时,出现 2 条明显的放射性裂纹,环向上也有模型材料隆起破坏,分析可知方案 3、4 的破坏荷载差异很小,且方案 3 破坏荷载的位移远远大于方案 4。分析试验材料及过程可知,这是由于两个试验模型材料的养护期不同,方案 3 试验的模型材料养护期较短,模型材料的含水率较高。试验结束后选取锚塞体附近的材料进行含水率测试,发现方案 3、4 的含水率分别为 4.87% 和 4.03%。根据模型材料  $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$  (符号意义同表 1) 与含水率关系可知,方案 3 试验模型材料的  $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$  略低于方案 4 模型材料的  $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$ ,由于  $E$  对含水率更敏感, $E$  值随含水率下降明显。方案 3 随着荷载的增加变形明显,也显示出隧道锚承载力对围岩的强度和变形参数更敏感。

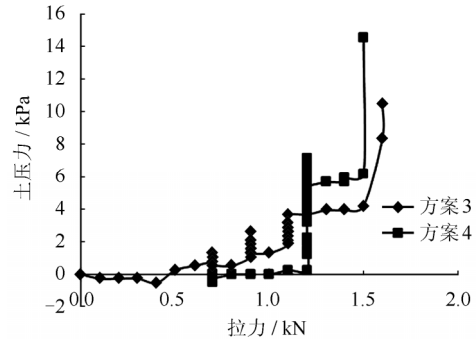
从工作方案可以看出,锚塞体的埋深和长度对隧道锚-围岩系统有显著的影响。在试验荷载作用下,与锚塞体接触部位的围岩首先发挥抗剪作用直至到极限状态,锚塞体发生微小变形。荷载产生的应力逐步向围岩中扩散,围岩表面出现变形,最终锚塞体位移发生突变,围岩表面出现放射性裂纹,模型发生破坏。

#### 4.2 附加应力分析

这里选取锚塞体前锚面附近的点进行(与前锚面的中心点距离约为 15 cm)分析,结果如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,方案 1 测点的附加土压力一直处于增加状态,在试验荷载  $P = 7$  kN 时,附加土压力接近 50 kPa,是此处自重应力的 3 倍左右。说明此时试验荷载引起的锚塞体周边的应力集中程度极高;方案 2 在试验荷载  $P < 4.5$  kN 的时候附加土压力一直稳步增长,当  $P = 4.5$  kN 时附加土压力增大至 27 kPa,为自重应力的 1.5 倍,当  $P = 6$  kN 时,附加土压力减小到 21 kPa,此时锚塞体位移为 47 mm。这是由于锚塞体下部形成空洞,应力释放,导致靠近锚塞体下端压力传感器随上拔变形形成空洞,应力释放,附加应力减小。方案 3、4 进行了流变试验,从图 6(b)可以看出,方案 3 在  $P = 0.7$ 、 $0.9$  kN 和  $1.1$  kN 流变期间,附加土压力均有所增加,在试验荷载从 1.5 kN 持续增大时,附加土压力急剧增加,与前述的位移曲线描述的现象吻合。方案 4 中,当  $P = 0.7$  kN 时附加土压力变化很小;当  $P = 1.2$  kN 流变时附加土压力先增加后减小,说明流变期间应力由于内部裂纹的产生在进行不断调整;在荷载  $P = 1.50$  kN 时,附加土压力发生急剧突变,和围岩表面位移的反映一致。



(a) 方案 1、2



(b) 方案 1、2

图 6 方案 1~4 附加土压力-荷载曲线

Fig.6 Additional earth pressure-load curves of schemes 1~4

#### 4.3 承载力分析

模型试验得到锚塞体的位移曲线、模型材料的表面变形曲线,并参考模型土压力数据,综合确定允许荷载、极限荷载和破坏荷载。允许荷载一般限定锚塞体的变形量小于 0.01~0.10 mm。极限荷载一般对应锚塞体的位移量在 0.15~0.50 mm。此阶段内,后一级荷载引起的变形增量略大于前一级荷载的变形增量,位移平稳增长,模型材料表面无可见微裂纹,模型材料内部的附加应力、应变也是平稳变化的。极限荷载之后,锚塞体和模型材料的位移量明显增大,荷载位移曲线一般出现明显拐点,模型材料表面也开始出现微裂纹,荷载位移曲线的拐点为破坏荷载。荷载确定示意图如图 7 所示。

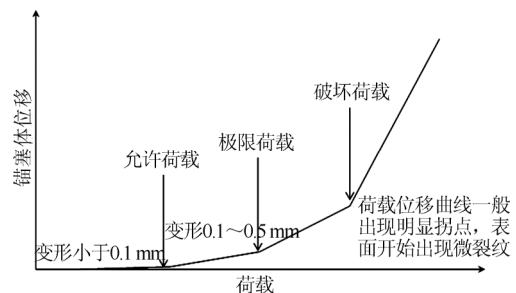


图 7 承载力确定方法

Fig.7 Method for determining bearing capacity

根据图 7 可以确定上述试验方案对应的允许荷

载和极限荷载,见表4、5。从表中可以看出,增加锚塞体的埋深可以有效提高系统的允许荷载和极限

荷载;锚塞体的长度对系统的允许荷载影响很小,对极限荷载的影响明显。

表4 方案1、2试验结果对比  
Table 4 Results comparison of schemes 1 and 2

方案编号	锚塞体长度/cm	锚塞体底面埋深/cm	不同荷载 $P$ (kN)下的锚塞体变形/mm			允许荷载 $P_1$ /kN	极限荷载 $P_2$ /kN	极限荷载下锚周的附加应力与自重应力之比
			1.0	1.5~2.5	3.0~4.5			
1	17	90	0	0.01~0.10	0.22~0.40	1	2.5	2~3
2	8.5		0	0.01~0.54	1.46~16.48	1	1.5	1

表5 方案3、4的试验结果对比  
Table 5 Results comparison of schemes 3 and 4

方案编号	锚塞体长度/cm	锚塞体底面埋深/cm	不同荷载 $P$ (kN)下锚塞体的位移/mm			允许荷载 $P_1$ /kN	极限荷载 $P_2$ /kN	极限荷载下锚周的附加应力与自重应力之比
			0.6	0.7~1.0	1.1~1.5			
3	17	90	0	0.1~1.74	1.85~3.08	0.6	1	2~3
4	8.5		0	0.02~0.07	0.08~1.22	0.6~0.7	0.9~1.0	2~3

#### 4.4 畸变修正

由于室内 III 类围岩的材料参数和理想相似比的材料参数差异较大,即相似模型试验出现畸变<sup>[27]</sup>。模型试验的结果并不能直接采用。因此本文结合数值仿真的方法来获取在理想相似比下模型试验的允许荷载和极限荷载。首先采用和模型试验一致的参数进行数值分析,然后再使用理想相似比的材料参数进行数值分析,将数值仿真得到的允许荷载和模型试验对比分析,估算理想相似比情况下锚碇系统的允许荷载和极限荷载。

根据章节 4.2 隧道锚室内模型试验的承载力确定方法,这里数值试验以保守状态估算,采用锚体位移 0.1 mm 确定锚碇系统的允许荷载  $P_1$ ,锚体位移 0.5 mm 确定锚碇系统的极限荷载  $P_2$ 。4 种试验方案的计算结果见表 6。

室内模型试验、模型试验材料参数数值计算得到的允许承载力之间的关系为  $P_1$  室内试验/ $P_1$  试验参数数值计算 = 1.2~1.4。模型试验材料参数、理想相似比的材料参数数值计算的允许承载力之间的关系为  $P_1$  试验参数数值计算/ $P_1$  理想参数数值计算 = 1~1.16。根据这两个关系式,可以得到理想相似比条件下隧道锚的允许承载力为式(1)。

$$P_1 \text{ 理想参数} = P_1 \text{ 室内试验} (1.2 \sim 1.6) \quad (1)$$

鉴于两者之间的比例系数范围较小,偏于安全考虑,取  $P_1 \text{ 理想参数} = P_1 \text{ 室内试验} / 1.6 = P_1 \text{ 室内试验} \times 0.625$ ,即理想相似比条件下隧道锚的允许承载力和极限承载力约为室内试验结果的 62%。通过修正得到的结果见表 7 ( $f$  为模型试验的设计荷载  $f = 0.0125$  kN)。

表6 4种试验方案的试验和数值计算结果  
Table 6 Results of test and numerical calculation of 4 schemes

方案编号	锚塞体长度/cm	锚塞体底面埋深/cm	分析类型	允许荷载 $P_1$ /kN	极限荷载 $P_2$ /kN
1	17	90	室内试验	1.00	2.50
			室内试验参数的计算	0.83	2.25
			理想相似比的数值计算	0.75	1.75
			室内试验	1.00	1.50
			室内试验参数的计算	0.80	1.50
			理想相似比的数值计算	0.74	1.25
3	17	32	室内试验	0.60	1.00
			室内试验参数的计算	0.50	1.25
			理想相似比的计算	0.50	1.13
			室内试验	0.6~0.7	0.9~1.0
			室内试验参数的计算	0.50	1.30
			理想相似比的数值计算	0.43	1.13

表7 4种试验方案的承载力修正结果  
Table 7 Correction results of bearing capacity of 4 schemes

方案编号	锚塞体长度/cm	锚塞体底面埋深/cm	允许荷载 $P_1$ /kN	允许荷载和设计荷载的比值 $P_1/f$	极限荷载 $P_2$ /kN	极限荷载和设计荷载的比值 $P_2/f$
1	17	90	0.63	50	1.56	125
2	8.5		0.63	50	0.94	75
3	17	32	0.38	30	0.63	50
4	8.5		0.38~0.44	30~35	0.56~0.94	45~75

与原始隧道锚-围岩系统对应的相似模型试验通过修正后的允许荷载是设计荷载的 30 倍, 极限荷载是设计荷载的 50 倍。张奇华等<sup>[9]</sup>对普立特大桥隧道锚开展了相似比 1:25 的抗拔能力现场模型试验, 得出当超载 50 倍设计荷载时围岩仍处于弹性状态而锚体混凝土产生了较明显的塑性变形。这也从一定程度说明室内模型试验和畸变修正的可行性。

## 5 结 论

(1) 在试验荷载作用下锚塞体与围岩接触部位首先达到极限, 锚塞体发生微小变形。然后荷载产生的应力逐步向围岩中扩散, 围岩内部和表面出现变形。最终锚塞体位移发生突变, 围岩表面出现放射性裂纹, 模型发生破坏。

(2) 根据承载力分析方法, 增加锚塞体的埋深可以有效地提高系统的允许荷载和极限荷载。锚塞体的长度对系统的允许荷载影响很小, 对极限荷载的影响明显。

(3) 由于室内模型试验材料参数很难达到理想相似比, 本次提出采用数值仿真的方法来进行畸变修正, 获取理想相似比下模型试验的允许荷载和极限荷载。修正结果和现场隧道锚缩尺试验结果是一致的。

## 参 考 文 献

- [1] 周世轩. 悬索桥隧道锚数值分析与工程应用研究[硕士学位论文 D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
ZHOU Shi-xuan. Research on the numerical analysis and engineering application of suspension bridge's tunnel anchorage[Master's Thesis D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [2] 江南. 铁路悬索桥隧道式锚碇承载机理及计算方法研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
JIANG Nan. Research on bearing mechanism of tunnel anchorage of railway suspension bridge and its calculation method[Ph.D. Thesis D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] 周孟波, 刘自明, 王邦楣. 悬索桥手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
ZHOU Meng-bo, LIU Zi-ming, WANG Bang-mei. Suspension bridge handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [4] 胡波, 赵海滨, 王思敬, 等. 隧道锚围岩拉拔模型试验研究及数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1575 - 1582.  
HU Bo, ZHAO Ha-bin, WANG Si-jing, et al. Pull-out model test for tunnel anchorage and numerical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1575 - 1582.
- [5] 黄东. 山区公路悬索桥隧道锚碇作用机理及应用研

究[硕士学位论文 D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.

- HUANG Dong. The principles and pragmatic research of suspension bridge tunnel-type anchorage in mountainous areas [Master's thesis]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [6] 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<sup>3D</sup> of a tunnel anchorage of Sidu River bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2004, 23(Supp.2): 4971 - 4974.
  - [7] 吴相超, 刘新荣, 李栋梁, 等. 软岩泡水隧道锚变形破坏模型试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1023 - 1030.  
WU Xiang-chao, LIU Xin-rong, LI Dong-liang, et al. Failure model test on soaked tunnel anchor in soft surrounding rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2016, 37(4): 1023 - 1030.
  - [8] 汪海滨. 悬索桥隧道式复合锚碇系统作用机理研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
WANG Hai-bin. Mechanism research on compound tunnel anchorage of suspension bridge[Ph.D. Thesis D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
  - [9] 张奇华, 余美万, 喻正富, 等. 普立特大桥隧道锚现场模型试验研究——抗拔能力试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 93 - 103.  
ZHANG Qi-hua, YU Mei-wan, YU Zheng-fu, et al. Field model on pullout capacity of tunnel-type anchorages of Puli Bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2015, 34(1): 93 - 103.
  - [10] 夏才初, 程鸿鑫, 李荣强. 广东虎门大桥东锚碇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 Cai-chu, CHENG Hong-xin, LI Rong-qiang. 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.
  - [11] 肖本职, 吴相超, 彭朝全. 重庆鹅公岩大桥隧道锚碇围岩稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5591 - 5597.  
XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao, PENG Chao-quan. 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.
  - [12] 汪海滨, 高波, 孙振. 悬索桥隧道式锚碇系统力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2728 - 2735.  
WANG Hai-bin, GAO Bo, SUN Zhen. Study on mechanical behavior of tunnel anchorage system for suspension bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2728 - 2735.



- [13] 朱杰兵, 邬爱清, 黄正加, 等. 四渡河特大悬索桥隧道锚模型拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 51 - 55.  
ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, HUANG Zheng-jia, et al. Pulling test of anchorage model of Siduhe suspension bridge[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2006, 23(4): 51 - 55.
- [14] 邬爱清, 彭元诚, 黄正加, 等. 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 Ai-qing, PENG Yuan-cheng, HUANG Zheng-jia, et al. 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.
- [15] 胡波, 曾钱帮, 饶旦, 等. 锚碇 - 围岩系统在拉剪复合应力条件下的变形规律及破坏机制研究——以坝陵河特大岩锚悬索桥为例[J]. 岩石力学工程学报, 2007, 26(4): 712 - 719.  
HU Bo, ZENG Qian-bang, RAO Dan, et al. Study of deformation law and failure mechanism of anchorage-surrounding rock system under tensile-shear complex stresses——Taking super-large suspension bridge on Baling River for example[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 712 - 719.
- [16] 余美万, 张奇华, 喻正富, 等. 基于夹持效应的普立特大桥隧道锚现场模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 261 - 270.  
YU Mei-wan, ZHANG Qi-hua, YU Zheng-fu, et al. Field model experiment on clamping of tunnel-type anchorage at Puli Bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(2): 261 - 270.
- [17] 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 Xin-rong, LI Dong-liang, WU Xiang-chao, et al. Filed model test research on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(1): 161 - 169.
- [18] 刘锦. 悬索桥隧道锚数值模拟分析研究[硕士学位论文D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.  
LIU Jin. Numerical simulation of suspension bridge's tunnel anchorage analysis[Master's thesis D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [19] 张利洁, 黄正加, 丁秀丽. 四渡河特大悬索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, HAUNG Zheng-jia, DING Xiu-li. Numerical analysis with FLAC<sup>3D</sup> of a tunnel anchorage of Sidu river bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.2): 4971 - 4974.
- [20] 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 Zhi-hong, ZHANG Qi-hua, DING Xiu-li, 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.
- [21] 张明. 山区悬索桥隧道锚围岩质量评价与破坏模式研究[硕士学位论文D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
ZHANG Ming. Reasearch of tunnel anchorages' rock mass quality evaluaution and failure mode in mountain areas[Master's thesis D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. 2013.
- [22] 汤华, 熊晓荣, 邓琴, 等. 普立特大桥隧道式锚碇围岩系统的变形规律及破坏机制[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 961 - 967.  
TANG Hua, XIONG Xiao-rong, DENG Qin, et al. Study on deformation law and failure mechanism of anchorage-surrounding rock system of Split Bridge[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**. 2015, 49(7): 961 - 967.
- [23] 李家平, 张子新, 黄宏伟, 等. 宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1011 - 1016.  
LI Jia-ping, ZHANG Zi-xin, HUANG Hong-wei, et al. Research on similarity model test of anchorage of Qingfeng suspension bridge in Ningbo[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**. 2005, 33(8): 1011 - 1016.
- [24] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(2): 134 - 140.  
LI Yong-sheng. Experimental study of the North anchorage of the Jiangyin Yangtze Bridge[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 1995, 23(2): 134 - 140.
- [25] 汤华, 熊晓荣, 吴振君, 等. 隧道锚抗拔作用机理的室内模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 935 - 939.  
TANG Hua, XIONG Xiao-rong, WU Zhen-jun, et al. Laboratory model test study of pullout mechanism of tunnel anchor[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**. 2015, 49(7): 935 - 939.
- [26] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.  
GU Da-zhao. Equivalent materials and similitude models[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 1975.
- [27] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 2008.  
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water & Power Press. 2008.