

DOI: 10.11779/CJGE202211003

# 隧道锚与下穿隧道相互影响的模型试验研究

刘新荣<sup>1,2</sup>, 肖宇<sup>1,2</sup>, 韩亚峰<sup>1,2,3</sup>, 罗维邦<sup>1,2</sup>, 张刚<sup>4</sup>, 冯超<sup>4</sup>, 赖国森<sup>4</sup>, 王开敏<sup>4</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;  
3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 4. 中铁北京工程局集团有限公司, 北京 102308)

**摘要:** 为研究下穿隧道近接施工对上部隧道锚力学响应特征的影响及隧道锚承载阶段下穿隧道受力特点, 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工程为研究对象, 开展了隧道锚与下穿隧道间相互影响规律的 1:100 室内模型试验研究。研究表明: ①锚塞体沉降主要由下穿隧道先行洞开挖导致, 后行洞掘进对锚塞体的扰动不明显。②锚-隧间围岩的应力经历“应力集中—应力转移—趋于稳定”3 个发展阶段, 围岩水平应力发生急剧变化的时间要早于竖向应力。③隧道开挖过程中初支承载作用明显, 随着隧道临时支护的拆除, 初支承担的围岩压力逐渐转向中隔墙。④施加主缆拉力的隧道锚会使锚-隧间部分围岩进入塑性状态, 并导致下穿隧道拱肩和拱顶处产生较大的拉应力。

**关键词:** 连拱隧道; 隧道式锚碇; 室内模型试验; 隧道施工; 变形特征

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)11-1978-10

**作者简介:** 刘新荣(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: liuxrong@126.com。

## Model tests on interaction between tunnel-type anchorage and underpass tunnel

LIU Xin-rong<sup>1,2</sup>, XIAO Yu<sup>1,2</sup>, HAN Ya-feng<sup>1,2,3</sup>, LUO Wei-bang<sup>1,2</sup>, ZHANG Gang<sup>4</sup>, FENG Chao<sup>4</sup>,  
LAI Guo-sen<sup>4</sup>, WANG Kai-min<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center of  
Geohazards Prevention in the Reservoir Areas (Chongqing), Chongqing 400045, China; 3. School of River & Ocean Engineering,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. China Railway Beijing Engineering Bureau Group Co., Ltd., Beijing  
102308, China)

**Abstract:** In order to study the influences of approaching construction between underpass tunnel and tunnel-type anchorage on the mechanical characteristics as well as the stress characteristics of the underpass tunnel in the bearing stage of the tunnel-type anchorage, taking the project of Baishiyan tunnel I under the tunnel-type anchorage of Lüzhijiang bridge of Yuxi-Chuxiong Expressway as the research object, a 1:100 scaled model test is carried out. The main conclusions are drawn as follows: (1) The settlement of the anchor plug is mainly caused by the excavation of the advanced tunnel of the multi-arch tunnel, and the disturbance by the following tunnel excavation is not obvious. (2) The stress of the surrounding rock between anchorage and tunnel has experienced three development stages: stress concentration, stress transfer and stabilization. The time of abrupt change of the horizontal stress of the surrounding rock is earlier than that of the vertical stress. (3) The bearing effect of the initial support is obvious during tunnel excavation. With the removal of temporary support, the pressure of the surrounding rock borne by the initial support gradually turns to the middle wall. (4) When the cable tension is applied to anchorage, the surrounding rock between anchorage and tunnel will enter the plastic state, and leading to large tensile stress at the spandrel and vault of the tunnel.

**Key words:** multi-arch tunnel; tunnel-type anchorage; laboratory model test; tunneling; deformation characteristic

## 0 引言

悬索桥连接穿山隧道的组合建造方式在中国以山地地质环境为主的西南地十分常见<sup>[1-2]</sup>。同时, 隧道锚因体量小、承载力高和对环境影响小等优点也越来越多地被应用于悬索桥的建设中<sup>[3-9]</sup>, 因此, 施工过程中会时常出现隧道下穿隧道锚的施工工况。隧道锚与下

穿隧道间的近接施工力学效应将会对其各自的稳定性产生重要影响, 因此, 研究下穿隧道与隧道锚间的相互影响规律对于确保施工安全、节省投资、缩短工期

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41772319; 41972266); 重庆市研究生科研创新项目(CYS20023)  
收稿日期: 2021-11-03

等具有重要的现实意义<sup>[10-14]</sup>。

目前国内已建成的采用隧道下穿隧道锚的悬索桥主要有四渡河大桥<sup>[15]</sup>、矮寨大桥<sup>[16]</sup>、金安金沙江大桥<sup>[17]</sup>、虎跳峡金沙江大桥<sup>[18]</sup>等, 且施工顺序为先开挖下穿隧道, 后开挖隧道锚。针对先开挖下穿隧道后开挖隧道锚这一施工顺序, 朱玉等<sup>[15]</sup>最早以四渡河大桥为背景, 采用数值模拟的方法对隧道锚与下穿隧道间的相互作用进行了研究。张奇华等<sup>[16]</sup>对矮寨大桥基岩的稳定问题进行了数值模拟分析, 表明设计荷载不会引起岩体产生明显变形, 隧道与下穿隧道之间的相互影响不明显。云瑞俊等<sup>[17]</sup>以金安金沙江大桥丽江侧隧道锚为依托, 针对隧道锚开挖和加载阶段的应力、变形和塑性破坏区分布特征等使用数值模拟的方法进行了研究, 同时还分析了隧道锚施工对下方公路隧道变形和稳定性的影响, 得出塑性区分布范围无明显变化, 隧道锚开挖对公路隧道围岩变形的影响较为有限的结论。

从上述分析可知, 目前针对隧道锚与下穿隧道近接施工相互影响的研究重点主要放在先施工下穿隧道, 后施工隧道锚这一施工工序, 而很少关注先施工隧道锚, 后施工下穿隧道这一施工工序。虽然先施工下穿隧道, 后施工隧道锚避免了隧道开挖对隧道锚的扰动, 降低了隧道锚后位移量, 但实际施工中往往为了协调桥隧建设进度, 不可避免地会出现先施工隧道锚后施工下穿隧道的施工顺序。鉴于此, 本文通过相似模型试验, 在充分考虑下穿隧道施工工法、锚址区地形特征、隧道锚受力特点以及锚-岩接触面材料特性等关键因素的基础上, 对隧道锚、隧道以及围岩变形响应与应力传递特征进行系统地分析, 研究下穿隧道施工对锚塞体沉降和围岩应力的影响规律, 分析隧道锚承载状态下下穿隧道力学响应特征, 相关结论可为隧道锚与下穿隧道的优化设计和安全施工提供借鉴与参考。

## 1 工程概况

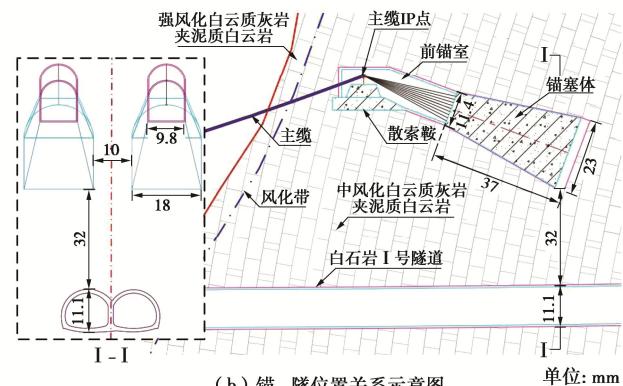
绿汁江大桥是玉溪至楚雄高速公路的控制性工程, 为主跨 780 m 的单塔单跨钢箱梁悬索桥, 桥梁全长 798 m, 两岸均采用隧道式锚碇且均直接与隧道连接。下穿连拱隧道与上部隧道锚间关系如图 1 所示。因此, 与其相连接的白石岩隧道必然近距离下穿该隧道锚, 锚-隧最小间距仅为 32 m。

该岸隧道式锚碇锚塞体长 37 m, 为城门洞形构造, 锚塞体前锚面宽 9.8 m, 高 11.4 m, 顶部圆弧形半径 4.9 m; 后锚面宽 18 m, 高 23 m, 顶部圆弧形半径 9 m; 锚塞体扩展角 8.9°, 中轴线水平倾角 18.7°。

两锚塞体中心线间距 28 m, 平均埋深 107 m, 单根主缆设计荷载为 164.3 MN。下穿白石岩隧道为双车道公路连拱隧道, 隧道开挖轮廓宽 25.46 m(双洞), 高 11.1 m。连拱隧道开挖工法采用单洞先行, 扩挖后行洞的方法, 在单洞中分别采用 CD 法进行施工, 单步开挖进尺 2.5 m。



(a) 锚址区岸坡实景图



单位: mm

图 1 隧道锚和下穿隧道位置关系示意图

Fig. 1 Location relationship between tunnel-type anchorage and underpass tunnel

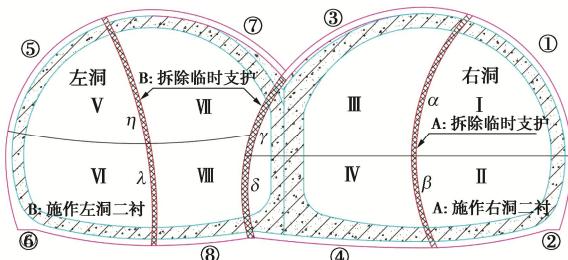


图 2 连拱隧道掘进工法示意图

Fig. 2 Excavation method for multi-arch tunnel

该工法如图 2 所示, 优先开挖右洞右侧上台阶 I 并施作初支①及临时支护  $\alpha$ , 随后开挖右洞右下台阶 II 并施作初支、仰拱②及临时支护  $\beta$ , 照此顺序对右洞进行开挖、支护, 施作二衬的同时拆除相应位置临时支护, 随后按照同样的顺序施工左洞。开挖过程中下台阶施工步滞后上台阶 2 个进尺; 单洞临时初支内侧施工步滞后外侧 6 个进尺; 左洞施工步滞后右洞 36

个进尺。

锚洞及下穿连拱隧道围岩均为薄至中厚层状中风化白云质灰岩夹泥质白云岩, 岩质较软, 属IV级围岩。绿汁江大桥楚雄岸隧道式锚碇锚址区及下穿白石岩隧道隧址区的围岩参数及锚、隧支护参数如表1所示。

表1 围岩及混凝土物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock and concrete

项目	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	单轴抗 压强度 $p/MPa$	弹性 模量 $E/GPa$	泊松 比 $\mu$	黏聚力 $c/MPa$	内摩 擦角 $\phi/^\circ$
中风化白云 质灰岩	22.0	33.0	3.2	0.3	1.18	34.6
锚塞体 C40 混凝土	25.0	26.8	32.5	0.2	—	—
隧道初支 C25 喷混	24.0	16.7	26.0	0.2	—	—
隧道中隔墙 C30 混凝土	25.0	20.1	30.0	0.2	—	—

## 2 室内模型试验设计

### 2.1 相似模型试验系统

隧道锚与下穿隧道间相互影响规律的相似模型试验主要分为隧道开挖阶段和隧道锚承载至超载破坏阶段两部分。经综合考虑该工程可能的影响范围及实验室场地条件, 模型与原型的相似比尺设计为1:100。依据该相似比, 设计了如图3所示的钢质模型箱。模型箱长2 m, 宽、高均为1.4 m, 其前面板设有1.2 m  $\times$  1 m的可拆装钢化玻璃, 背板隧道埋深处开有矩形洞, 便于隧道开挖操作。

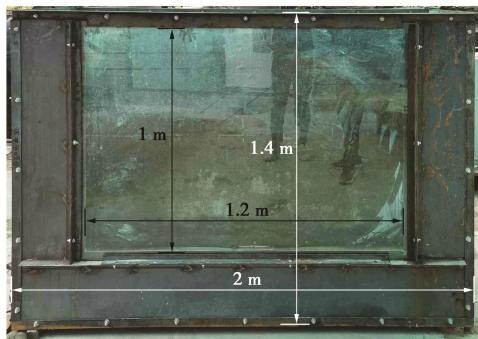
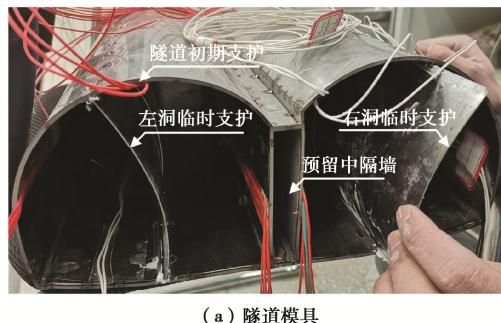


图3 相似模型试验模型箱

Fig. 3 Model test box

为尽量还原模拟连拱隧道施工所采用的CD法, 更好地模拟隧道开挖过程中各部位支护的受力及其传递情况, 设计制作了模型试验隧道开挖系统。如图4所示, 采用不锈钢预制了隧道初支, 隧道长度1.4 m。在隧道左、右洞内各设置14块单块10 cm长曲面隔板用以模拟临时支护, 在连拱隧道相交位置留空以便填入相似材料模拟隧道中隔墙, 并制作了如图4(b)所示长柄平头铲及钩耙用于模型隧道开挖及出渣工作。

使用手持式激光测距仪对开挖进尺进行精确测量。



(a) 隧道模具



(b) 隧道开挖、出渣工具



(c) 激光测距仪

图4 模型试验隧道模具及开挖、出渣工具

Fig. 4 Tunnel mould and excavation and slag removal tools

模型试验加载系统采用前拉式加载方式, 利用液压空心千斤顶提供拉力, 通过钢绞线传递至锚塞体, 使用转向滑轮调节钢绞线方向, 为保证锚塞体在拉拔过程中受力均匀且处于仅受压状态, 在后锚面处放置一块与后锚面同样大小的城门洞形钢板并用钢绞线卡扣锁紧, 使得主缆拉力均匀施加在后锚面。加载系统中各传力构件的模拟件如图5所示。



(a) 空心千斤顶



(b) 转向滑轮



(c) 钢绞线  
及卡扣、吊环



图5 模型试验加载系统传力构件示意图  
Fig. 5 Loading system and load transfer components

## 2.2 相似材料配比试验

模型试验均以相似原理为基础, 一般需满足几何相似、质量相似、荷载相似、介质物理性质相似及边界条件相似等。本试验中选取几何相似比  $C_L$  为 1:100, 加速度相似比  $C_g$  为 1:1, 预设重度相似比  $C_\gamma$  为 1:1, 根据量纲分析可得到各相似常数之间的相互换算关系为

$$\left. \begin{aligned} C_\sigma &= C_\gamma C_g C_L, \\ C_p &= C_\sigma C_L^2, \\ C_E &= C_\sigma, \\ C_\rho &= C_g = C_\varepsilon = C_\varphi = C_\mu = 1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $C_\gamma$ 、 $C_g$ 、 $C_L$ 、 $C_\sigma$ 、 $C_p$ 、 $C_\varepsilon$ 、 $C_\mu$ 、 $C_\varphi$  分别为重度、加速度、几何、应力、集中荷载、弹性模量、泊松比和内摩擦角的相似比。

由换算关系可知预设的弹性模量相似比  $C_\sigma$  为 1:100, 集中荷载相似比  $C_p$  为 1:1×10<sup>6</sup>。

参考文献[3, 10~14]并结合试验经验, 相似材料拟采用石英砂为粗骨料, 重晶石粉为细骨料, 石膏或黏土为胶凝材料, 并添加铁粉增加材料重度。试验针对围岩及锚塞体相似材料按不同比例各配制 12 组, 并对其进行物理参数测试、直剪试验及单轴压缩试验(图 6)。

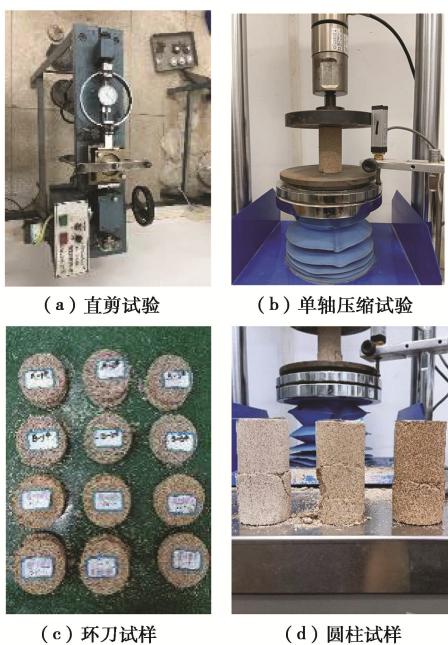


图 6 相似材料直剪试验及单轴压缩试验

Fig. 6 Direct shear tests and uniaxial compression tests on similar materials

根据试验结果, 最后选定围岩相似材料配合比为石英砂:重晶石粉:黏土:水=34:9:3:4, 材料重度实测为 17.03 kN/m<sup>3</sup>, 因此根据实测值调整围岩材料

的重度相似比  $C_\gamma$  为 1.29。选定锚塞体 C40 混凝土相似材料配合比为石膏:石英砂:重晶石粉:铁粉:水=4:50:26:11:9, 材料重度实测为 18.43 kN/m<sup>3</sup>。选定连拱隧道中隔墙 C30 混凝土相似材料配合比为石膏:重晶石粉:水=21:4:25。最终选用的相似材料参数如表 2 所示。

表 2 相似材料物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of similar materials

材料及项目	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	单轴抗压 强度 $p/kPa$	弹性模 量 $E/MPa$	黏聚 力 $c/kPa$	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$
中风化 白云质 灰岩	目标值	17.03	255.52	24.78	9.14 34.6
	实测值	17.03	234.54	28.53	10.47 41.83
锚塞体 C40 混 凝土	目标值	18.58	205.80	249.57	— —
	实测值	18.43	1480.27	281.99	— —
隧道中 隔墙 C30 混 凝土	目标值	18.58	154.35	230.37	— —
	实测值	15.13	679.11	206.03	— —

由于模型试验采用不锈钢对下穿隧道初支及临时支护进行模拟, 对此类薄壁桶状结构采用抗弯刚度等效原则进行计算。将隧道初支等效为薄壁板状结构, 根据小挠度理论计算出用于模拟隧道支护的不锈钢厚度应为 1.14 mm。

## 2.3 模型制作及测点布设

本模型试验缩尺比例大, 试验过程中的应力变化绝对值小, 预试验表明采用传统的土压力盒进行应力监测效果较差, 经比选采用应变砖进行围岩应力、应变监测。应变砖采用邵氏硬度为 80D 的聚氨酯制作, 测得该型号聚氨酯弹性模量为 29.59 MPa, 与围岩相似材料弹性模量接近。如图 7 所示, 将其切割为边长 3 cm 的立方体, 并在其中一个表面中心粘贴二轴应变花, 最后使用 704 硅橡胶涂抹封闭即可制得应变砖。

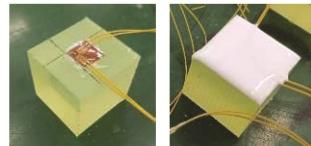


图 7 应变砖制作

Fig. 7 Fabrication of strain brick

由于锚塞体相似材料的养护时间长于围岩相似材料, 在试验开始前需先进行锚塞体的制作。锚塞体浇筑用的模具长 37 cm, 前锚面宽 9.8 cm, 高 11.4 cm; 后锚面宽 18 cm, 高 23 cm, 前、后锚面均为城门洞形。为便于脱模操作, 模具采用四块不锈钢板拼合而成, 模具连接部位采用螺栓固定。首先在模具内壁涂抹凡士林避免粘接, 并采用钢棒占位锚塞体中心穿线孔,

随后将相似材料逐层加入模具中, 进行夯实及刮毛操作。待锚塞体养护完毕后进行拆模, 并在锚塞体底部位置连接细钢丝以测定其沉降。最后将水泥均匀涂抹至锚塞体表层, 可保护应变片并防止锚塞体相似材料因摩擦掉粉, 尽量还原锚-岩接触面实际情况。制作过程如图 8 所示。

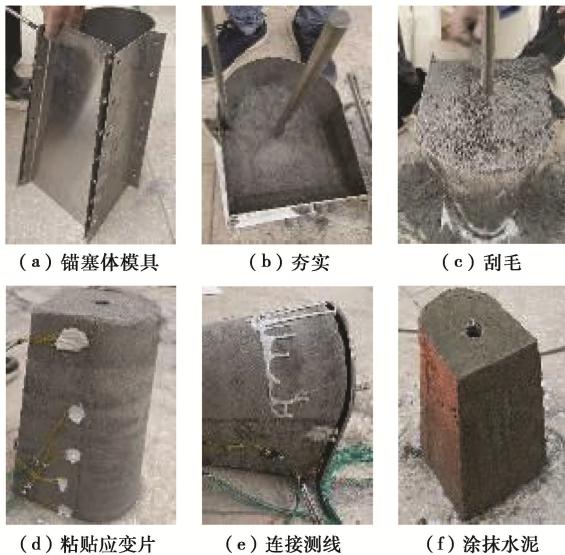


图 8 锚塞体相似模型制作

Fig. 8 Fabrication of anchor plug

在隧道初支外壁粘贴应变花并将模拟临时支护的钢片依次插入滑槽, 随后将其竖立, 在隧道洞内填满围岩相似材料并夯实, 填筑时为避免材料分层, 需使用开挖工具将已夯实材料表层刮毛。随后在隧道模具中间槽位浇入中隔墙相似材料。填筑隧道的过程如图 9 所示。

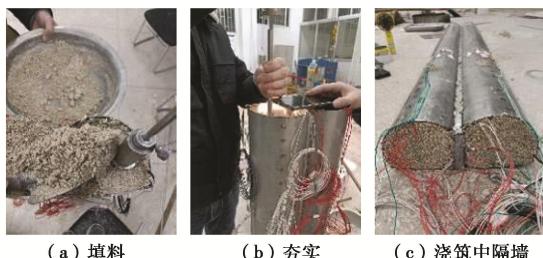


图 9 连拱隧道相似模型制作

Fig. 9 Fabrication of multi-arch tunnel

填筑围岩相似材料时, 先将模型箱组装完成并水平放置, 之后分 23 层填筑相似模型并埋置测量元件。由于每层材料用量较大, 为保证材料压实密度, 每半层进行一次夯实, 每一层进行一次平整作业。并且, 为消除填筑时材料分层对试验结果的影响, 填筑上层材料前用砖刀对下层材料表面进行刮毛。模型填筑过程如图 10 所示。室内模型的锚-隧间距、锚塞体倾角等参数均依据工程实际参数按相似比换算取得。然而

实际工程中隧道锚埋深较大, 如全采用相似材料浇筑坡体模拟实际埋深较为困难。因此在室内模型中锚塞体埋深为 40 cm, 剩余的自重应力使用砝码和重晶石粉在模型体顶部堆载模拟。

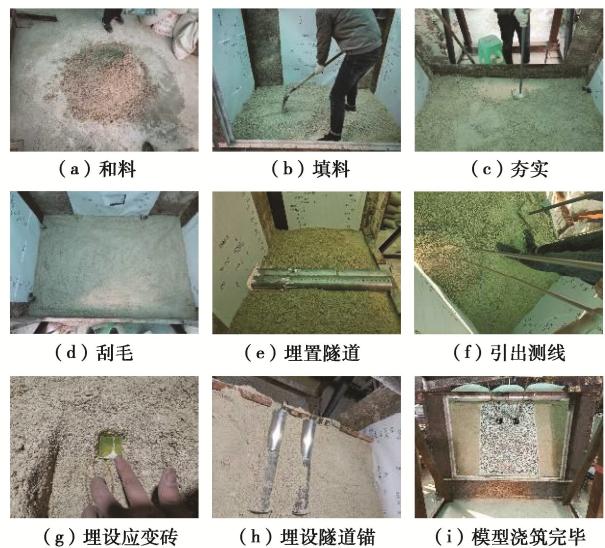


图 10 模型浇筑流程

Fig. 10 Filling process of test model

应力、应变监测的测点布置以隧道初支应变, 锚-隧间岩体应力应变为主, 依据围岩监测与建构筑物监测相结合、应变监测和位移监测相结合的原则设置。隧道初支应变监测的目的在于揭示连拱隧道 CD 法开挖过程中及隧道锚承载时各部位初支的受力特征变化; 锚-隧间岩体应力应变监测的目的在于揭示隧道开挖及隧道锚承载时, 隧道上部岩体应力响应特征。

测点位置及测点编号如图 11 所示。

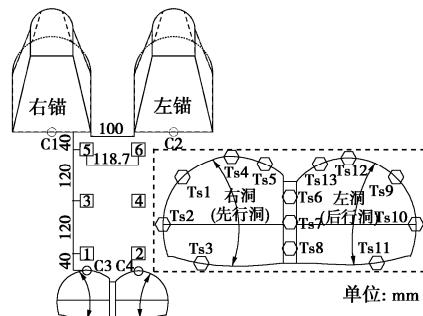


图 11 模型试验测点布置图

Fig. 11 Layout of measuring points in model tests

隧道初支应变测点分别布设在拱顶、拱肩、拱腰和拱底, 按开挖步序编号依次为 Ts1—Ts13, 其中中隔墙应变测点编号为 Ts6—Ts8。锚-隧间岩体应力测点分别布设在隧道左、右洞拱顶, 编号从下至上依次为 1—6。位移测点布置在锚塞体底部及连拱隧道初支拱顶, 分别为 C1—C4。设置完备的模型试验装置如图 12 所示。



图 12 模型试验布置图

Fig. 12 Layout of model tests

### 3 下穿隧道施工力学效应

下穿连拱隧道自隧道锚后端向前掘进至坡面, 开挖步序与实际工程一致, 连拱隧道右洞先行并施作中隔墙, 随后扩挖后行洞, 在单洞内均采用 CD 法进行开挖, 开挖过程如图 13 所示。

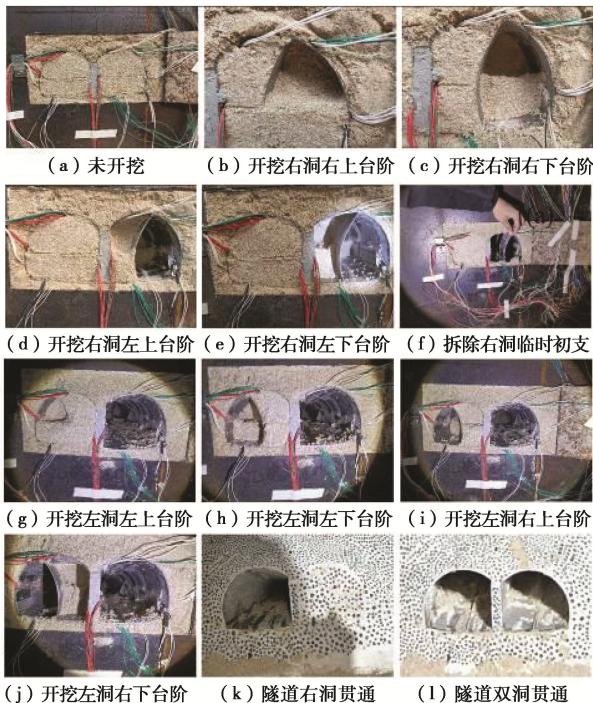


图 13 隧道开挖过程

Fig. 13 Process of tunnel excavation

#### 3.1 隧道、锚塞体沉降变化特征

拱顶沉降是隧道掘进施工中最重要的监测指标, 通过其可以推断围岩的稳定性, 动态调整预留变形量, 修改支护措施等; 对于已修建的隧道锚而言, 由于锚点位置已确定, 为保证缆索的力学性能不受影响, 对其沉降量的控制较为严格。因此在隧道掘进过程中, 对隧道拱顶和锚塞体底部沉降进行了监测, 结果如图

14 所示。

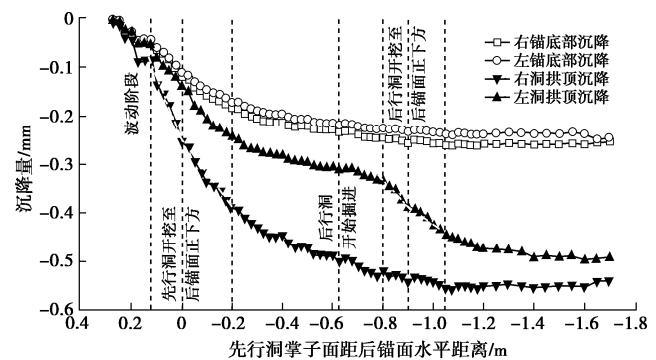


图 14 隧道及锚塞体沉降量随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 14 Variation of settlement of tunnel and anchor plug with tunnel excavation footage

从图 14 可以看出, 在开挖初期 (先行洞<sup>#1</sup>掌子面距后锚面 0.275~0.125 m) 虽能监测到一定的沉降量, 但其监测值波动较大, 且考虑到模型边界效应的影响, 此部分沉降不作为考察指标。当先行洞开挖至距掌子面水平距离 0.125 m 后, 各测点均开始加速沉降, 当其开挖至后锚面正下方时, 右洞拱顶沉降值达到 0.253 mm, 右锚底部沉降量增至 0.121 mm。在随后的 0.2 m 挖进过程中, 各测点沉降量增速均有所放缓, 其中右洞拱顶沉降量增速由 26.31  $\mu\text{m}/\text{步}$  (0.2~0 m) 下降至 17.32  $\mu\text{m}/\text{步}$  (0~−0.2 m)。在右洞掘进穿越锚塞体的过程中 (0.125~−0.2 m), 右锚共沉降 0.137 mm, 左锚共沉降 0.129 mm。在后行洞开始掘进之前, 除右洞拱顶沉降量在继续增加外, 其余测点沉降量变化幅度均较小。后行洞开始掘进后, 其拱顶沉降量逐渐增加, 同样当开挖至距后锚面 0.1 m 时开始加速沉降, 随后增速放缓。在左洞掘进穿越锚塞体的过程中 (−0.8~−1.05 m) 左锚仅沉降 13.29  $\mu\text{m}$ 。在整个下穿隧道的掘进过程中, 右、左锚塞体分别沉降 0.253, 0.246 mm。其中因先行洞开挖导致的沉降量分别为 0.234, 0.219 mm, 占总沉降量的 92.4%, 89.0%。

对沉降曲线进行分析可知, 无论是隧道拱顶还是上部锚塞体, 在隧道未掘进至监测断面时就已测到较多沉降且为加速沉降。分析其原因认为这不仅是由于开挖扰动大引起的, 与围岩岩性较差及上部锚塞体自重荷载也有一定关系。因此, 在隧道施工穿越锚塞体时, 应尽早采取加强支护措施, 提前控制围岩变形, 确保施工安全。上部锚塞体的沉降也主要由先行洞掘进时的初次扰动引起, 推断在先行洞掘进时采用超前支护、加强初支、紧跟二衬等控制初期沉降的施工方法对控制锚塞体沉降量更为有效。

#### 3.2 锚-隧道围岩应力变化特征

选取监测断面内锚-隧道围岩竖向应力和水平应

力进行分析, 研究围岩应力随开挖步数的变化规律。图 15 为锚-隧间围岩竖向应力增量随开挖步数变化曲线, 由于模型为先浇筑后开挖, 在隧道开挖前需对各测点进行平衡清零, 因此对于应力数据仅能监测到其变化值。但由于各应力测点均埋设于围岩中, 受到围岩压力影响, 因此文中各应力测点初始应力均按照测点埋深依据海姆公式进行计算, 水平应力通过侧压力系数进行换算。<sup>#1, #2, #3</sup> 测点的竖直应力分别为  $-29.06, -26.89, -24.72$  kPa。侧压力系数  $K = \mu / (1 - \mu) = 0.43$ , 由此<sup>#1, #2, #3</sup> 测点的水平应力分别为  $-12.50, -11.56, -10.63$  kPa。

由图 15 可以看出, 当先行洞开始掘进时, 拱顶竖向应力有所增大, 分析其原因为监测断面与模型边界的距离仅 0.275 m, 开挖扰动作用传递到监测断面处, 引起拱顶竖向应力发生集聚; 当先行洞开挖至后锚面正下方时, 各测点竖向应力仍未产生较大变化。但在随后的 0.2 m 掘进过程中, 不同位置测点竖向应力变化差异性逐渐显现, 此时先行洞四个掘进掌子面都已通过监测断面。随后先行洞拱顶上方<sup>#1</sup> 测点竖向应力开始阶梯状减小; 除后行洞上方<sup>#2</sup> 测点竖向应力继续增加外, 其余测点竖向应力皆有所减小。当后行洞开始掘进时, 受扰动影响先行洞上方<sup>#1</sup> 测点竖向应力急剧减小, 随后趋于稳定; 此阶段除后行洞上方<sup>#4</sup> 测点波动较大外, 其余测点竖向应力变化较小。当后行洞开挖至监测断面时, <sup>#2</sup> 测点竖向应力开始大幅度减小; <sup>#4</sup> 测点依旧维持波动状态, 分析其应变片在后行洞开挖时可能已被破坏, 后续测量值参考价值降低; <sup>#1</sup> 测点竖向应力稍有增加; 其余测点变化较小。后续随着后行洞进尺推进, <sup>#2</sup> 测点竖向应力继续减小; <sup>#1</sup> 测点竖向应力仍有少量增加, 其余测点竖向应力呈减小趋势。

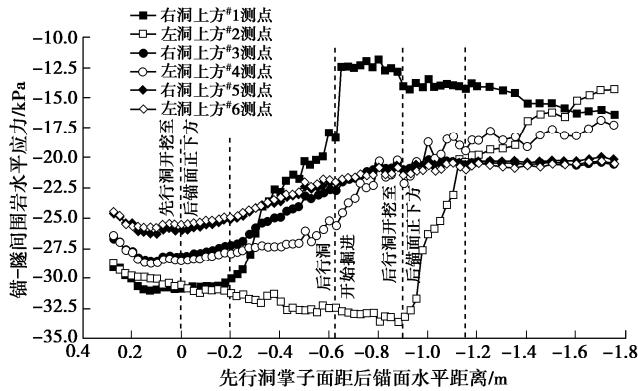


图 15 锚-隧间围岩竖向应力随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 15 Variation of vertical stress of rock between anchor and tunnel with tunnel excavation footage

由图 16 可以看出, 在先行洞掘进至监测断面前,

各测点水平应力基本未有变化。随后直到先行洞<sup>#1</sup> 掌子面掘进至  $-0.25$  m 时, <sup>#1, #2</sup> 测点水平应力开始相反趋势的变化。先行洞开挖阶段, <sup>#1</sup> 测点水平应力最大增加了  $1.82$  kPa, <sup>#2</sup> 测点水平应力最少减小了  $1.78$  kPa。<sup>#3, #4</sup> 和<sup>#5, #6</sup> 号测点水平应力变化趋势与<sup>#1, #2</sup> 测点基本相同, 变化幅值随测点距拱顶距离增加而减小。且同一埋深下左、右洞拱顶上方两测点围岩水平应力变化幅值相近, 但左洞应力变化响应时间较之右洞均滞后约  $3\sim 5$  个开挖步。先行洞<sup>#1</sup> 掌子面在  $-0.25\sim -0.625$  m 掘进期间, 各测点水平应力变化趋势向相反方向发展, 奇数测点应力减小, 偶数测点应力增加。在后行洞开始掘进至隧道开挖完毕阶段, 除<sup>#2</sup> 测点水平应力继续增大外, 各测点应力有向开挖扰动前水平应力原始值回归的趋势。

整体来说, 在连拱隧道开挖过程中, 锚-隧间围岩的应力变化情况大致可分为“应力聚集—应力转移—趋于稳定”3 个过程。对比水平应力和竖向应力变化情况可知, 分步开挖阶段围岩水平应力发生急剧变化的时间要早于竖向应力。在现场施工中可通过监测水平应力变化情况来预测前方围岩稳定性状态。

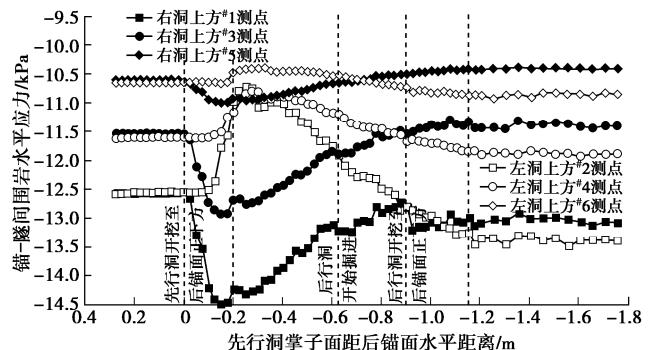


图 16 锚-隧间围岩水平应力随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 16 Variation of horizontal stress of rock between anchorage

and tunnel with tunnel excavation footage

### 3.3 隧道初支应变的变化特征

在连拱隧道不同开挖阶段, 初支的受力情况差异较大, 因此对隧道初支应变进行监测并分析有利于探究开挖方式, 优化开挖步序。如图 17 所示, 先行洞掘进初期 ( $0.275\sim 0$  m) 初支外轮廓各测点切向应变均为由零开始逐渐减小, 表明初支处于外部受压状态, 其中受开挖步序的影响,  $Ts1, Ts2$  测点响应时间较  $Ts4, Ts5$  测点提前约 4 步。因初支是预埋入模型中的, 在还未开挖至监测断面时初支外侧已经产生压应变, 进一步证明了超前支护的必要性。后行洞除拱底  $Ts1$  测点应变略有增加外, 其余各测点应变也均减小, 其中距离先行洞较近的  $Ts12$  和  $Ts13$  测点比距离较远的  $Ts9$  和  $Ts10$  测点减小幅度更大。

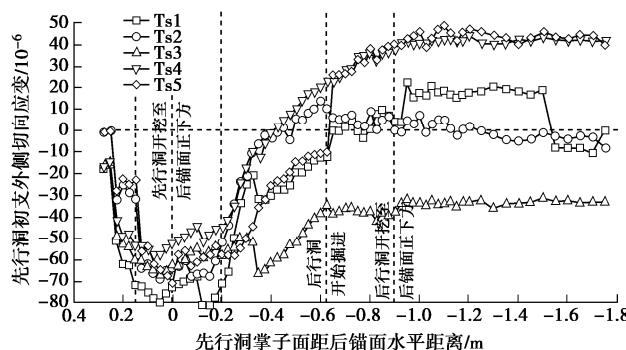


图 17 连拱隧道先行洞初支切向应变随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 17 Variation of tangential strain of initial support of multi-arch tunnel advanced section with tunnel excavation footage

在先行洞# I, # II, # III 掌子面掘进通过监测断面后 (-0.15 m), 后行洞开始掘进前 (-0.625 m), 除拱底 Ts3 测点外, 先行洞其余测点应变均开始回升至 0 附近。同时如图 18 所示连拱隧道中隔墙上 3 个测点竖向应变均减小, 说明荷载由初支承担逐渐转向由中隔墙承担。该阶段后行洞拱顶、拱肩和拱腰测点应变也有少许回升 (图 19)。

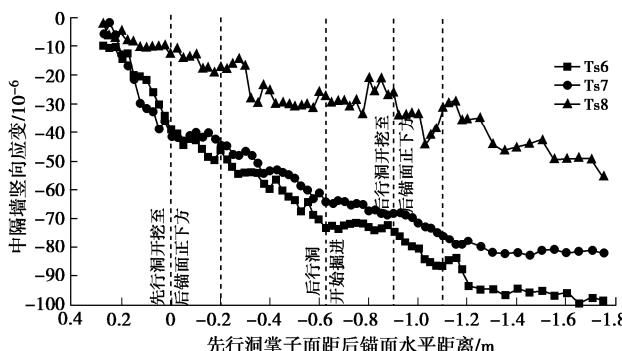


图 18 连拱隧道中隔墙竖向应变随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 18 Variation of vertical strain of middle wall in multi arch tunnel with tunnel excavation footage

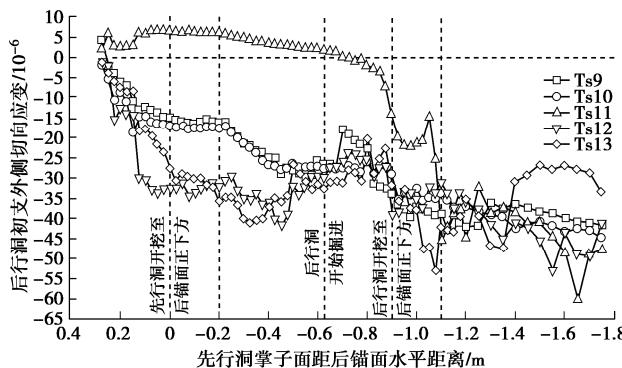


图 19 连拱隧道后行洞初支切向应变随隧道开挖进尺的变化情况

Fig. 19 Variation of tangential strain of the initial support of multi-arch tunnel following section with tunnel excavation footage

随着后行洞开挖接近监测断面, 后行洞各测点应变均开始减小, 中隔墙竖向应变也继续减小。但应力重新分布使得先行洞左侧距后行洞较近的#Ts4, #Ts5 测点开始转为受拉状态。后行洞的开挖使得后行洞各测点的应变进一步减小, 后行洞初支所承担荷载增加。同时, 因后行洞开挖导致的底部隆起效应, 后行洞拱底的 Ts11 测点也逐渐转为受压状态。

## 4 隧道锚承载时下穿隧道力学响应

### 4.1 锚-隧间围岩应力变化特征

主缆拉力通过位于后锚面的城门洞形钢板均匀传递至后锚面上, 从后锚面处向锚塞体前部及周围岩体以推力的方式传导。由于锚-岩接触面的摩擦力以及锚塞体楔形构造, 会带动周围岩体联合承载, 使锚-隧间围岩应力发生变化。为保证隧道运营期间的安全性, 对锚-隧间围岩竖向应力随荷载等级的变化情况进行监测, 结果如图 20 所示。

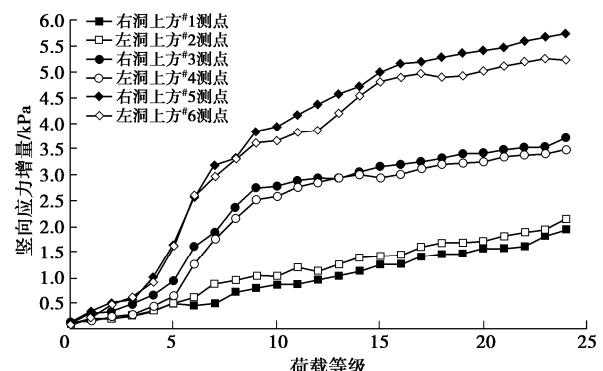


图 20 锚-隧间围岩竖向应力随荷载等级的变化情况

Fig. 20 Variation of vertical stress of rock between anchor plug and tunnel with load grade

由图 20 可以看出, 在隧道锚承载阶段, 锚-隧间围岩竖向应力随荷载等级的增加而增加, 且越是靠近锚塞体的测点其应力增量越大。在主缆拉力增加到 4 倍设计荷载 (4P) 前, 各测点竖向应力变化均较小, 最大值出现在左洞上方#6 测点处, 仅为 0.6 kPa; 在 4P~10P 时, 距锚塞体较近的#3~#6 测点竖向应力增加趋势明显, 随后其增速明显放缓。结合锚-隧间围岩水平应力变化情况 (图 21) 进行分析可知, 在 1P~9P 时, 各测点水平应力均呈上升趋势, 随后#5, #6, #3, #4 测点的水平应力分别在 10P, 11P, 13P, 14P 开始下降, 表明该测点处围岩在此荷载等级下进入塑性阶段, 无法继续承担荷载。但#1, #2 测点并未监测到围岩应力的突变情况, 因此判断在锚塞体拉拔过程中, 可带动锚塞体下方约 1/2 后锚面高度范围内的围岩联合承载。

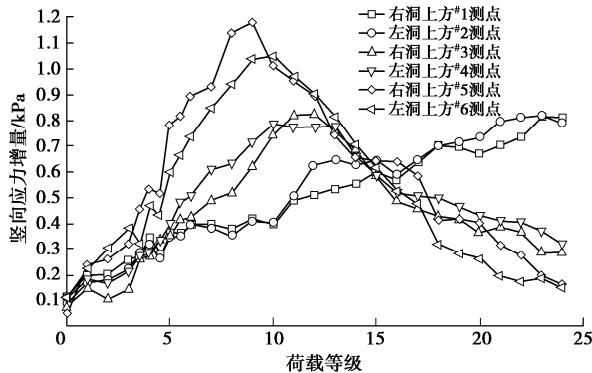


图 21 锚-隧间围岩水平应力随荷载等级的变化情况

Fig. 21 Variation of horizontal stress of rock between anchor plug and tunnel with load grade

#### 4.2 下穿隧道力学响应特征

在隧道锚运营承载阶段, 针对下穿隧道的安全性也需进行讨论, 图 22 为不同荷载等级下隧道上部初支外侧径向应变的变化趋势图。由图可知在隧道锚承载阶段, 由于隧道上部土体的运移, 会给予下穿隧道支护结构一定的拉力, 隧道初支外部切向应变随荷载等级增加逐级增大。其中距离锚塞体越近的测点变化越明显, 隧道外侧拱肩处和拱顶切向应变最大, 靠近中隔壁的拱肩测点处变化幅度最小, 表明中隔壁在一定程度上可减弱隧道锚承载时对隧道初支的拉伸作用。在无上部隧道锚的隧道设计中, 考虑初支整体受力特性, 通常会把钢拱架连接点设置在隧道拱肩处。然而在下穿隧道锚的连拱隧道中, 由于隧道锚承载后会使该处所受拉力增大, 因此建议尽量避免将钢拱架连接点设置在此处, 必要时还可在此处设置抗拉钢筋防止该处支护结构受拉破坏。

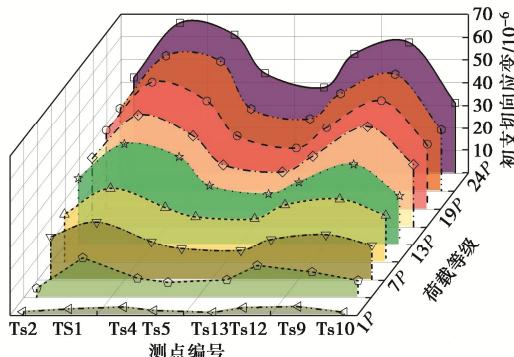


图 22 隧道初支外侧径向应变-荷载关系曲线

Fig. 22 Variation of radial strain outside initial support of tunnel with load

## 5 结 论

本文依托绿汁江大桥楚雄岸隧道锚及下穿隧道锚的白石岩# I 隧道工程, 展开展了 1:100 室内模型试验。分别就隧道开挖阶段和锚塞体承载阶段, 针对锚、隧

及围岩变形响应和应力传递特征进行了分析。研究了下穿隧道施工对锚塞体沉降和围岩应力的影响以及隧道锚承载阶段下穿隧道受力特点, 得到 4 点结论。

(1) 在下穿隧道先行洞掘进穿越锚塞体时, 锚塞体的沉降量增加较大, 是其主要沉降阶段, 后行洞掘进对锚塞体的扰动不明显。由于地质岩性特点及上部锚塞体自重荷载, 部分沉降会发生在隧道掌子面通过监测断面之前, 为保证施工安全、控制锚塞体沉降量, 宜设置超前支护措施。

(2) 在连拱隧道开挖过程中, 锚-隧间围岩的应力经历“应力集中-应力转移-趋于稳定”3 个发展阶段。围岩水平应力发生急剧变化的时间要早于竖向应力。现场施工时可通过监测水平应力变化情况来预测前方围岩稳定性状态。

(3) 隧道开挖过程中初支承载作用明显, 随着隧道掌子面的推进和临时支护的拆除, 荷载会由初支承载逐渐转向由中隔壁承载。中隔壁承担荷载较大, 宜考虑加强支护或采用强度较高的混凝土浇筑。

(4) 锚塞体承载过程中, 可带动锚塞体下方约 1/2 后锚面高度范围内的围岩联合承载。同时由于围岩的运移下穿隧道拱肩和拱顶处会受到较大的拉应力, 在隧道设计中应考虑该效应, 尽量避免在该处设置连接构件。

## 参 考 文 献:

- [1] 张宜虎, 邬爱清, 周火明, 等. 悬索桥隧道锚承载能力和变形特征研究综述[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3576 - 3584. (ZHANG Yi-hu, WU Ai-qing, ZHOU Huo-ming, et al. Review of bearing capacity and deformation characteristics of tunnel-type anchorage for suspension bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3576 - 3584. (in Chinese))
- [2] 刘新荣, 韩亚峰, 景瑞, 等. 隧道锚承载特性、变形破坏特征及典型案例分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1780 - 1791. (LIU Xin-rong, HAN Ya-feng, JING Rui, et al. Bearing characteristics, deformation failure characteristics and typical case studies of tunnel-type anchorage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1780 - 1791. (in Chinese))
- [3] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 隧道式锚碇承载机制的室内模型试验探究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 2690 - 2703. (WANG Dong-ying, TANG Hua, YIN Xiao-tao, et al. Study on the bearing mechanism of tunnel-type anchorage based on laboratory model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2690 - 2703. (in Chinese))

- [4] 余美方, 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 effect of tunnel-type anchorage at Puli bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 261 - 270. (in Chinese))
- [5] 李栋梁, 刘新荣, 李俊江, 等. 浅埋软岩隧道式锚碇稳定性原位模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2078 - 2087. (LI Dong-liang, LIU Xin-rong, LI Jun-jiang, et al. Stability of shallowly buried soft rock tunnel anchorage by in-situ model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2078 - 2087. (in Chinese))
- [6] JIANG N, WANG D, FENG J, et al. Bearing mechanism of a tunnel-type anchorage in a railway suspension bridge[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18: 2143 - 2158
- [7] 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 tests on bearing behavior of mudstone tunnel anchorage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 161 - 169. (in Chinese))
- [8] LIU X R, HAN Y F, LI D L, et al. Anti-pull mechanisms and weak interlayer parameter sensitivity analysis of tunnel-type anchorages in soft rock with underlying weak interlayers[J]. Engineering Geology, 2019, 253: 123 - 136.
- [9] 余美方, 张奇华, 高利萍, 等. 金东大桥隧道锚现场模型试验及承载能力分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 338 - 346. (YU Mei-wan, ZHANG Qi-hua, GAO Li-ping, et al. Field model tests and bearing capacity analysis of tunnel anchorage of Jindong Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 338 - 346. (in Chinese))
- [10] SONG S G, LI S C, LI L P, et al. Model test study on vibration blasting of large cross-section tunnel with small clearance in horizontal stratified surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103013.
- [11] 刘聪, 李术才, 周宗青, 等. 复杂地层超大断面隧道施工围岩力学特征模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3495 - 3504. (LIU Cong, LI Shu-cai, ZHOU Zong-qing, et al. Model test on mechanical characteristics of surrounding rock during construction process of super-large section tunnel in complex strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3495 - 3504. (in Chinese))
- [12] XU S S, LEI H, LI C, et al. Model test on mechanical characteristics of shallow tunnel excavation failure in gully topography[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104978.
- [13] 李建旺, 冯仕文, 周喻. 隧道下穿采空区施工围岩灾变演化的力学机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 543 - 554. (LI Jian-wang, FENG Shi-wen, ZHOU Yu. Mechanical mechanism of surrounding rock catastrophe evolution during construction of tunnel under goaf[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(2): 543 - 554. (in Chinese))
- [14] LI L P, SHANG C S, CHU K W, et al. Large-scale geo-mechanical model tests for stability assessment of super-large cross-section tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109: 103756.
- [15] 朱玉, 卫军, 李昊, 等. 悬索桥隧道锚与下方公路隧道相互作用分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 1(12): 57 - 61. (ZHU Yu, WEI Jun, LI Hao, et al. Analysis on interaction between tunnel-type anchorage in suspension bridge and highway tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 1(12): 57 - 61. (in Chinese))
- [16] 张奇华, 胡建华, 陈国平, 等. 矮寨大桥基础岩体稳定性问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2420 - 2430. (ZHANG Qi-hua, HU Jian-hua, CHEN Guo-ping, et al. Study of rock foundation stability of Aizhai bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2420 - 2430. (in Chinese))
- [17] 云瑞俊, 梅松华, 周湘. 金安金沙江大桥丽江侧隧道锚系统数值分析[J]. 公路, 2020, 65(12): 96 - 102. (YUN Rui-jun, MEI Song-hua, ZHOU Xiang. Numerical analysis of tunnel anchorage system on the Lijiang side of Jinsha river bridge in Jin'an[J]. Highway, 2020, 65(12): 96 - 102. (in Chinese))
- [18] 王宇华, 谢洪涛, 陈健翔, 等. 价值工程在香丽高速公路虎跳峡金沙江大桥施工成本控制中的应用[J]. 价值工程, 2017, 36(7): 26 - 28. (WANG Yu-hua, XIE Hong-tao, CHEN Jian-xiang, et al. The application of value engineering in construction cost control of Jinsha river bridge in Tiger Leaping gorge on Shangri-La-Lijiang superhighway[J]. Value Engineering, 2017, 36(7): 26 - 28. (in Chinese))