

# 清江某特大桥隧道锚承载特性数值模拟研究

尹红梅<sup>1</sup>,石谦<sup>1</sup>,张宜虎<sup>2</sup>

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司,湖北 武汉 430074;2 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,湖北 武汉 430010)

**摘要:**以清江某特大桥左岸隧道锚为例,在工程地质分析的基础上建立三维地质概化模型,利用不同软件实现对复杂岩体和隧道锚结构的近似网格化离散划分。采用FLAC<sup>3D</sup>软件进行不同工况模拟,获得隧道锚的变形特征和承载能力,明确该隧道锚的潜在破坏模式为锚碇连同锚碇上部受结构面切割的岩体,在主缆拉力作用下发生沿锚碇底部岩/混凝土胶结面的整体滑移。该文采用的研究思路及相关研究成果,一方面能够为清江某特大桥隧道锚工程实践提供技术支持,同时还有助于构建系统的隧道锚分析研究方法和评价指标体系,对后续隧道锚工程建设具有较强借鉴意义。

**关键词:**悬索桥隧道锚;三维数值模拟;承载性能;破坏模式;分析方法

中图分类号:U442.2

文献标志码:A

## Numerical Simulation on Bearing Characteristics of Tunnel-Type Anchorage of a Grand Bridge over Qingjiang River

YIN Hongmei<sup>1</sup>, SHI Qian<sup>1</sup>, ZHANG Yihu<sup>2</sup>

(1.CCCC Second Harbor Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 2.Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Ministry of Water Resources, Yangtze River Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** This paper took the tunnel-type anchorage on the left bank of a grand bridge over the Qingjiang River as an example and established a three-dimensional geological generalization model based on the engineering geological analysis. In addition, the paper used different software to realize the approximate grid discrete division of complex rock mass and tunnel-type anchorage structure. FLAC<sup>3D</sup> software was used to simulate different working conditions, and the deformation characteristics and bearing capacity of the tunnel-type anchorage were obtained. It is found that the potential failure mode of the tunnel-type anchorage is that the anchor and the rock mass cut by the structural plane on the upper part of the anchor will slide along the rock/concrete bonding surface at the bottom of the anchor under the tension of the main cable. The adopted research ideas and relevant research results can provide technical support for the practice of tunnel-type anchorage engineering of the grand bridge over the Qingjiang River. At the same time, they help to build a systematic analysis and research method and evaluation index system of tunnel-type anchorage, which is of reference significance for the subsequent construction of tunnel-type anchorage engineering.

**Keywords:** tunnel-type anchorage of suspension bridge; three-dimensional numerical simulation; bearing capacity; failure mode; analysis method

## 0 引言

悬索桥是跨越能力最强的桥梁类型,在世界范

围内被广泛采用。悬索桥有4大组成部分:加劲梁、塔架、主缆和锚碇。锚碇是悬索桥的主要承载部件。悬索桥的锚碇有自锚和地锚两类,其中地锚一般又

分重力锚和隧道锚。自1931年建成的美国乔治·华盛顿大桥采用隧道锚以来<sup>[1]</sup>,隧道锚越来越多地在后续悬索桥设计和建设中被采用<sup>[2]</sup>。隧道锚具有占地面积少、节省混凝土用量等显著优势,但是隧道锚的承载机制远比重力锚复杂。隧道锚承载时,主缆将荷载传递给锚塞体,锚塞体又将荷载传递给周边围岩。隧道锚主要依靠锚塞体周边围岩的嵌固和夹持作用提供承载力<sup>[3]</sup>。所以隧道锚的变形破坏特征和周边围岩结构特征、物理力学特性直接相关<sup>[4]</sup>。

对隧道锚承载性能的研究目前多采用数值模拟方法或模型试验方法<sup>[5-13]</sup>。其中,现场缩尺模型试验结果能较客观反映实体锚的受力变形特征,但现场缩尺模型试验投入大、工期长、可重复性差,而且一旦相似性、代表性控制不好,试验结果可能会对工程实践产生误导。相较来说,数值模拟方法在分析隧道锚承载机制方面要更为灵活。采用数值模拟方法开展隧道锚承载特征研究,其难点主要在于:如何在数值分析模型中既客观反映锚碇体的结构形态,又客观反映周边岩体的结构特征,如何合理地确定锚碇体、岩体及各类结构面和胶结面的物理力学参数。隧道锚与围岩承载特性研究是桥梁建设在岩石力学方面提出的新课题<sup>[14]</sup>。

本文以清江某特大桥隧道锚为研究对象,在工程地质分析的基础上,建立了客观的地质概化模型,采用多种方法综合研究并确定模型各部分物理力学参数,利用不同软件实现对复杂岩体和隧道锚结构的近似网格化离散划分,使数值分析模型既能准确反映隧道锚结构形态,又能客观反映实际地貌形态和围岩结构特征,然后采用FLAC<sup>3D</sup>软件,开展设计工况和超载工况下隧道锚的受力变形特征模拟,在此基础上研究隧道锚的承载性能和潜在破坏模式。研究成果不仅可为清江某特大桥隧道锚工程实践提供技术支撑,还有助于建立系统的隧道锚数值模拟方法和分析理论。

## 1 隧道锚设计方案

清江某特大桥横跨清江干流,桥轴线近南北向,采用悬索桥方案,沿桥轴线的剖面形态如图1所示。两岸锚碇都采用隧道锚。现场调查结果表明:左岸锚碇体所在部位岩体相对破碎,且有岩溶发育,建设条件要差于右岸。所以本次研究中,以左岸锚碇体

为对象开展研究工作。

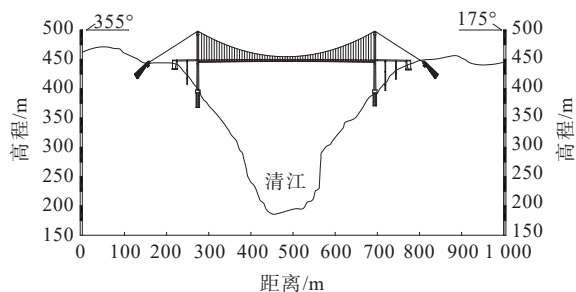


图1 桥轴线剖面

Figure 1 Bridge axis section

隧道锚结构形态如图2所示。单个锚碇体分前锚室、锚塞体和后锚室三部分。前锚室散鞍点至锚塞体前端面距离18 m,锚塞体长15 m,后锚室长2.2 m。锚塞体前端面、后端面都呈城门洞形,前端面宽7 m、高7.6 m,后端面宽8 m、高10.5 m。锚塞体中心线与水平面夹角40°,单锚设计拉力60 000 kN。散鞍点高程444.5 m,后端面中心点高程423.3 m,后端面底部高程418.5 m。两隧道锚轴向呈平行布置,中心间距13.3 m,锚塞体前端面处边-边间距6.3 m,后端面处边-边间距5.3 m。

## 2 锚碇区地形地质条件

桥位区地形主要表现为深切河谷,桥轴线剖面上清江河谷底部高程186 m,桥面高程450 m,岸坡高差约270 m,特别是300 m高程以下,岸坡陡峭,局部近直立。清江河水位高程约380 m。隧道锚所在部位地形平缓,锚碇体垂直埋深较浅。

桥位区主要出露二叠系下统茅口组( $P_{1m}$ )和栖霞组( $P_{1q}$ )地层,岩层近水平,高程420 m以上为茅口组( $P_{1m}$ )地层,420 m以下为栖霞组( $P_{1q}$ )地层。茅口组( $P_{1m}$ )地层岩性坚硬,以巨厚层状燧石灰岩和微晶灰岩为主。栖霞组( $P_{1q}$ )地层可细分为15段,其中,顶部的 $P_{1q}^{15}$ 以炭泥质生物碎屑灰岩为主,往下 $P_{1q}^{14}$ 以生物碎屑灰岩为主, $P_{1q}^{13}$ 又以炭泥质生物碎屑灰岩为主, $P_{1q}^{12}$ 较厚,岩性复杂,主要表现为生物碎屑灰岩间夹炭泥质生物碎屑灰岩,再往下的 $P_{1q}^{11}$ 直至 $P_{1q}^1$ ,岩性也以灰岩为主,但炭泥质含量渐高。桥位区地层岩性总体表现为上硬下软的组合特征。左岸锚碇体所在部位地层划分如图3所示。

受区域构造作用影响,在栖霞组各段之间,发育

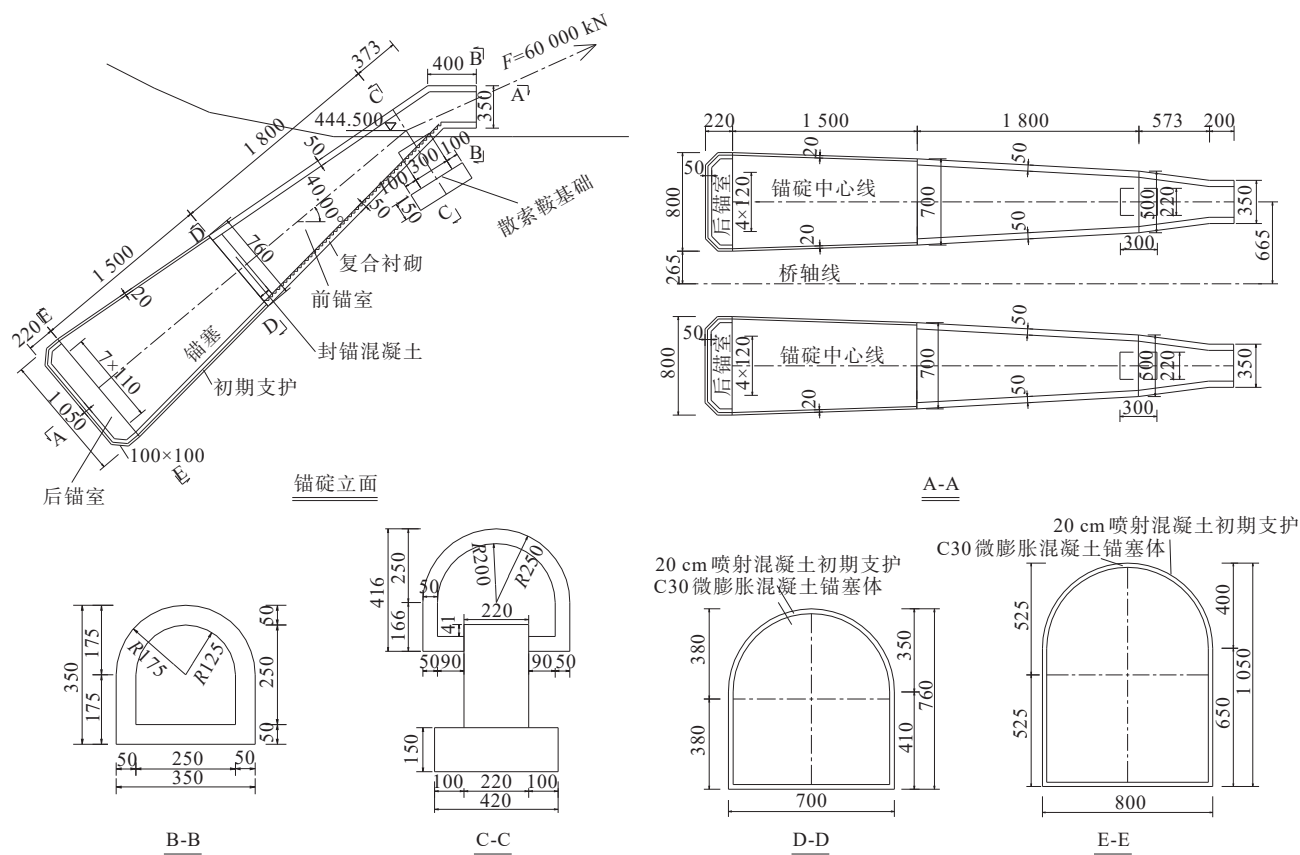


图2 左岸隧道锚结构形态(单位:cm)

Figure 2 Structure of tunnel-type anchorage on left bank(unit:cm)

不同软化程度的层间错动带,其中, $P_{1q}^{15}$ 底部的 $C_{151}^{15}$ 、 $P_{1q}^{13}$ 底部的 $C_{131}^{13}$ ,都是泥化较明显的错动带。茅口组与栖霞组交界部位的 $C_{m-q}$ ,由于岩性渐变,性状也相对软弱。这些软弱岩带的存在,对锚碇体的变形和稳定将产生显著影响。

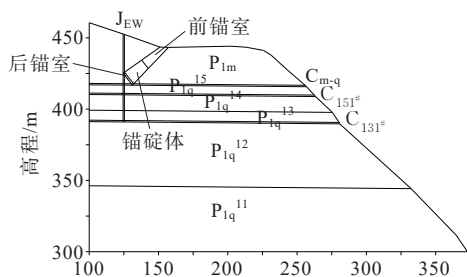


图3 左岸锚碇体所在部位地层剖面图

Figure 3 Stratum profile of anchorage on left bank

锚碇区没有大规模断层发育,但是裂隙较普遍,除层理外,主要发育两组陡倾角裂隙,一组走向近EW,另一组走向近SN。裂隙延伸长度一般为20 m左右,间距5~10 m。EW向裂隙可能构成隧道锚潜在破坏的后缘拉裂面,SN向裂隙可能构成隧道锚潜

在破坏的侧裂面。

桥位区还发育一定程度岩溶,尤其是茅口组( $P_{1m}$ )和栖霞组 $P_{1q}^{14}$ ,岩溶较发育。钻孔资料显示:左岸锚碇体所在部位的个别钻孔中,见有深度15 m左右的空腔。但是物探和其他钻孔并未揭示大规模溶洞,推测该空腔成因可能与顺陡倾角裂隙发育的溶蚀风化槽有关。

总体来说,清江某特大桥左岸锚碇体位于茅口组巨厚层状灰岩中,建设条件较好,但是存在以下潜在工程地质问题:层间剪切带问题、岩溶问题、陡倾角裂隙问题。其中,层间剪切带问题的影响可能相对更为显著。

### 3 概化分析模型及物理力学参数

以左岸隧道锚为例,建立的概化分析模型如图4所示。模型中,按隧道锚的实际形态考虑了前锚室、锚碇体、后锚室;在锚碇体后缘考虑了一条EW走向陡倾角裂隙( $J_{EW}$ ),在锚碇体两侧各考虑了一条SN走向陡倾角裂隙( $J_{SN-1}$ 和 $J_{SN-2}$ );考虑了茅口组与栖霞组

的地层分界面( $C_{m-q}$ )、栖霞组第 15 段底部的层间错动带( $C_{151\#}$ )、栖霞组第 13 段底部的层间错动带( $C_{131\#}$ );依据钻孔揭露情况在东侧锚碇体底部考虑了一个顺 EW 走向陡倾角裂隙发育的扁平溶洞。

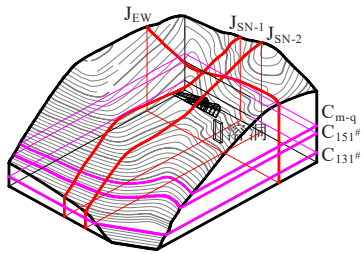


图 4 概化分析模型

Figure 4 Generalized analysis model

莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)模型适用于模拟岩土材料的力学特性。后续数值模拟屈服准则采用了

莫尔-库仑剪切屈服与拉裂破坏准则相结合的复合准则。具体见图 5 所示。

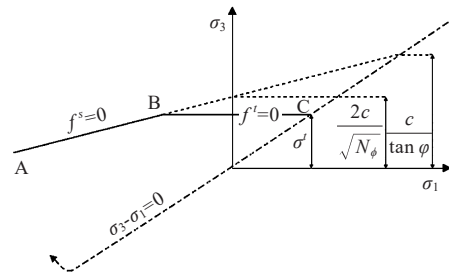


图 5 FLAC<sup>3D</sup>中的 Mohr-Coulomb 屈服准则

Figure 5 Mohr-Coulomb yield criterion in FLAC<sup>3D</sup>

依据本工程室内试验资料,同时参照临近工程现场试验资料和以往工程经验,结合数值分析需要,综合给出模型各部分的物理力学参数建议值,如表 1 所示。

表 1 模型各部分物理力学参数取值

Table 1 Physical and mechanical parameters of each part of model

岩性	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	变形 模量/ GPa	抗剪断强度		与混凝土 胶结面强度		抗拉 强度 MPa	泊松 比	对应部位
			$c/\text{MPa}$	$f$	$c/\text{MPa}$	$f$			
微细晶灰岩、燧石灰岩	27.0	15.00	1.20	1.20	1.0	1.0	0.7	0.25	$P_{1m}$
生物碎屑灰岩	26.5	15.00	1.10	1.10	1.0	1.0	0.6	0.25	$P_{1q}^{14}$
炭泥质生物碎屑灰岩	26.0	3.00	0.60	0.80	0.5	0.7	0.5	0.30	$P_{1q}^{15}, P_{1q}^{13}, \dots$
泥化剪切带	22.0	0.01	0.02	0.25				0.45	$C_{151\#}, C_{131\#}$
未泥化剪切带	23.0	0.40	0.05	0.50				0.35	$C_{m-q}$
裂隙	22.0	1.50	0.10	0.60				0.30	$J_{EW}, J_{SN-1}, J_{SN-2}$
锚碇体(C30)	24.0	30.00	1.00	1.19			0.3	0.28	

## 4 数值分析方法与数值分析模型

采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对隧道锚的受力变形特征和潜在破坏模式进行分析。

开展三维数值分析时,如何使建立的数值分析模型既考虑隧道锚等结构物的形态,又能较客观地反映岩性差异、岩体结构特征,同时还能客观地反映实际地貌形态、地下水位等信息,是三维数值建模的难点。数值分析网格划分合适,数值分析结果将更为合理;反之,网格中如果存在过多畸形单元,将极大影响模拟结果精度,还会给分析人员造成误导。

本工程中,由于存在多条不同方向裂隙和多条层间剪切带,还有溶洞等不良地质现象,地表形态和锚碇体结构也较复杂,为了使数值分析模型能综合反映

上述信息,采用如下的建模方式:首先在 AutoCAD 中建立不考虑地表形态的规则模型,如图 6(a)所示;将模型导入 Ansys,在 Ansys 中通过拖拉形成多个规则体,然后依据裂隙和层间剪切带的位置,对 Ansys 中的体进行切割,形成裂隙和剪切带,如图 6(b)所示。如此形成的体依然是规则的,在 Ansys 中采用六面体单元对这些体进行网格剖分,并将剖分之后的单元导入 FLAC<sup>3D</sup>,如图 6(c)所示。在 FLAC<sup>3D</sup> 中,通过 Fish 语言对单元逐个判别,将那些形心位于地表面以上的单元设置为空单元,余留下来的模型就是既能反映隧道锚实际结构,又能反映地貌形态、岩体结构特征,而且不存在畸形单元的数值分析模型,如图 6(d)所示。

建立的三维数值分析模型以隧道锚为中心,东西向宽 150 m,南北向长 200 m,顶面以实际地表面为



准,底面高程 380 m。为体现锚碇体与围岩相互作用,在锚碇体与围岩之间设置了接触面单元。模型中结构面的形态如图 7(a)所示,沿东侧锚碇体轴线

的剖面形态如图 7(b)所示,在东侧锚碇体下部设置一个扁平溶蚀空腔;锚塞体及其与围岩胶结面的形态如图 7(c)所示。

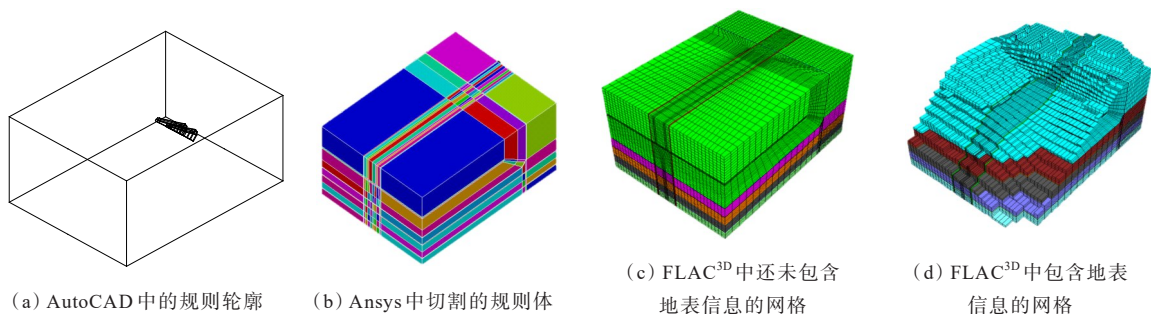


图 6 隧道锚三维数值分析模型建模过程

Figure 6 Modeling process of three-dimensional numerical analysis model of tunnel-type anchorage

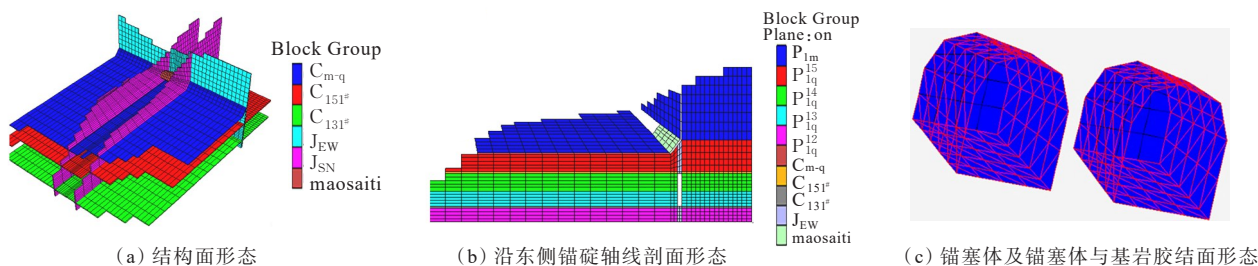


图 7 三维数值分析模型中关键部位形态

Figure 7 Morphology of key parts in three-dimensional numerical analysis model

## 5 设计工况模拟结果及分析

设计工况下,单锚拉力 60 000 kN。首先开展自重状态下的模拟,模拟完成后,将自重导致的位移场清零,然后将设计锚拉力以均布荷载的方式施加在锚塞体后端面,模拟设计荷载作用下锚塞体及周边围岩的受力及变形特征。

图 8 为三维形态下的变形云图,由于锚碇体埋置于地下,从三维图上难以看出锚碇体及其周边岩体的受力变形特征。图 9~11 分别为过东侧锚碇体轴线剖面上的变形等值线图、塑性区分布图和最大主应力等值线图(FLAC<sup>3D</sup>中,拉应力为正、压应力为负)。

从图 9~11 中可以看出:

(1) 设计荷载作用下,锚碇及围岩的变形较小,最大变形在 1 mm 以内。

(2) 后缘拉裂隙中,塑性区范围已经较大,但是作为潜在底滑面的层间剪切带内,未见塑性区。

(3) 受结构面影响,设计荷载作用下岩体中已经有一些拉应力区出现,拉应力主要出现在 3 个部位:① 锚碇体后座部位;② 前缘靠近岸坡部位;③ 锚碇

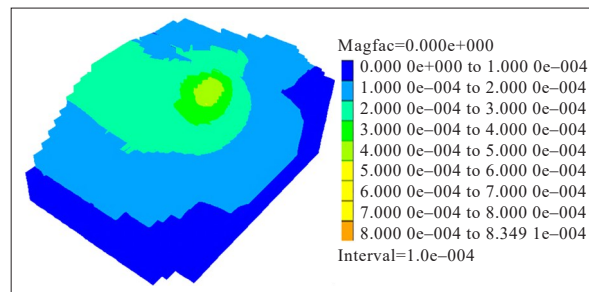


图 8 设计荷载作用下的变形云图(单位:m)

Figure 8 Deformation contour map under design load(unit:m)

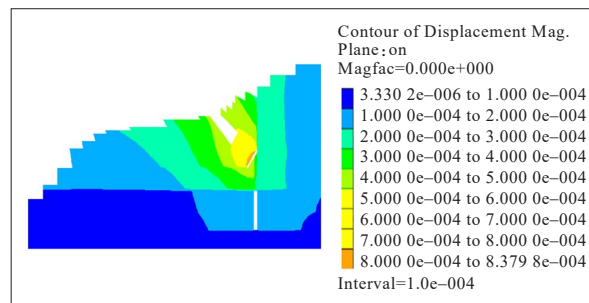


图 9 东侧锚碇体轴线剖面上的变形等值线图(单位:m)

Figure 9 Deformation contour map on axis section of east anchorage(unit:m)

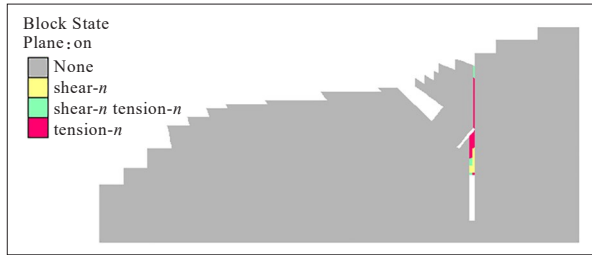


图 10 东侧锚碇体轴线剖面上的塑性区分布图(单位:m)

Figure 10 Distribution of plastic zone on axis section of east anchorage(unit:m)

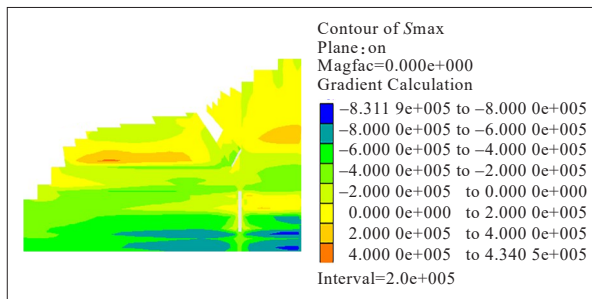


图 11 东侧锚碇体轴线剖面上的最大主应力等值线图(单位:Pa)

Figure 11 Contour map of maximum principal stress on the axis section of east anchorage(unit:Pa)

体下部溶洞后缘部位。模拟结果反映了溶洞的存在及层间剪切带的存在对应力分布的影响。

以上模拟结果综合表明:设计荷载作用下,锚碇及周边岩体虽然不是完全处于线弹性状态,但是锚碇体变形不大,最大变形小于 1 mm,锚碇体能够承担设计荷载作用。

## 6 超载工况模拟结果及分析

超载模拟时,模型各部分物理力学参数仍按表 1 取值,锚碇荷载取设计荷载  $P$  的整数倍,从 2 倍开始,逐倍增加,直至计算不收敛为止。各级荷载下分别模拟,得到模型在不同超载倍数下的应力、变形和破坏特征。表 2 为不同超载倍数下的最大变形。

由表 2 可以看出:16P 时,计算最大变形已接近 200 mm,可以认为 16P 时模型已整体破坏。图 12 为依据表 2 中的数据绘制的 1P~15P 时,最大变形随超载倍数的变化关系曲线以及 1P~14P 时,荷载每增加 1P,最大变形的增量随超载倍数的变化关系曲线。

从图 12 可以看出:14P 是明显的转折点,超载倍数从 14P 增加至 15P 时,最大变形出现了显著变化。6P 也是一个转折点,6P 以前,最大变形增量与超载

表 2 不同超载倍数下最大变形

Table 2 Maximum deformation under different overload multiples

超载倍数	最大变形/mm	超载倍数	最大变形/mm
1P	0.8	10P	12.5
2P	1.7	11P	14.8
3P	2.7	12P	17.4
4P	3.7	13P	20.5
5P	4.7	14P	24.6
6P	5.9	15P	49.4
7P	7.2	16P	185.0
8P	8.8	17P	754.0
9P	10.5	18P	不收敛

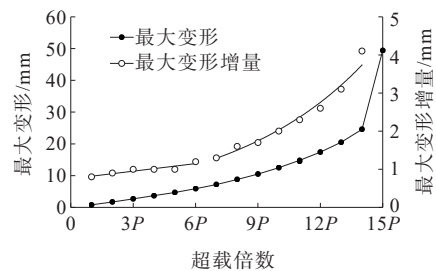


图 12 最大变形和最大变形增量随超载倍数变化曲线

Figure 12 Curve of maximum deformation and maximum deformation increment with overload multiples

倍数之间总体呈线性关系,6P 以后,最大变形增量与超载倍数之间呈明显非线性关系。依据上述变形分析结果,可以认为:14P 是模型能够承受的极限荷载,6P 为模型的屈服荷载。

图 13 中,依次给出了 1P~15P 奇数倍超载时,东侧锚碇轴线剖面上的变形等值线图,从中可以分析该隧道锚的潜在破坏模式。各级荷载下,最大变形都是出现在锚碇体底部的加载部位。超载倍数较小时,变形扩散范围较大,变形相对均匀。随着荷载的增加,特别是 7P 以后,变形局部化的特点越来越明显。发生大变形的部位主要是锚碇和锚碇上部受后缘裂隙切割的岩体。图 14 为 16P 时变形的二维和三维分布图,从图 14 可看出:本隧道锚潜在失稳部分主要是锚碇和锚碇上部受裂隙切割的岩体,潜在失稳模式为锚碇连同上部岩体沿底部岩/混凝土胶结面的整体向上滑移。

结合上述潜在破坏模式分析结果,可以进一步认识到:对本隧道锚稳定性起控制作用的主要是锚碇体底部岩/混凝土胶结面的性状、锚碇体后缘 EW 向陡倾角裂隙的分布及连通情况、锚碇体两侧 SN 向

陡倾角裂隙的分布及连通情况。锚碇体下部溶洞的存在,对隧道锚的变形破坏不会产生显著影响。

由于数值模拟时在锚塞体与围岩之间设置了接触面,可以通过检查这些接触面单元是否发生剪切滑移来判断锚塞体的承载性能。图15为7P~12P时,锚碇体周边接触面上处于剪切滑移状态的单元分布情况。从图15可以看出:7P时,仅在底部有个

别单元进入剪切滑移状态;8P时,锚碇体后缘靠上部有部分单元进入剪切滑移破坏状态;9P~10P时,锚碇体后缘基本所有单元都进入剪切滑移破坏状态;超过10P后,剪切滑移破坏部位向锚碇体前缘扩展。所以,如果以锚塞体周边是否有单元进入剪切滑移作为判断锚塞体是否屈服的标准,可以将锚塞体的屈服荷载也大致定为6P。

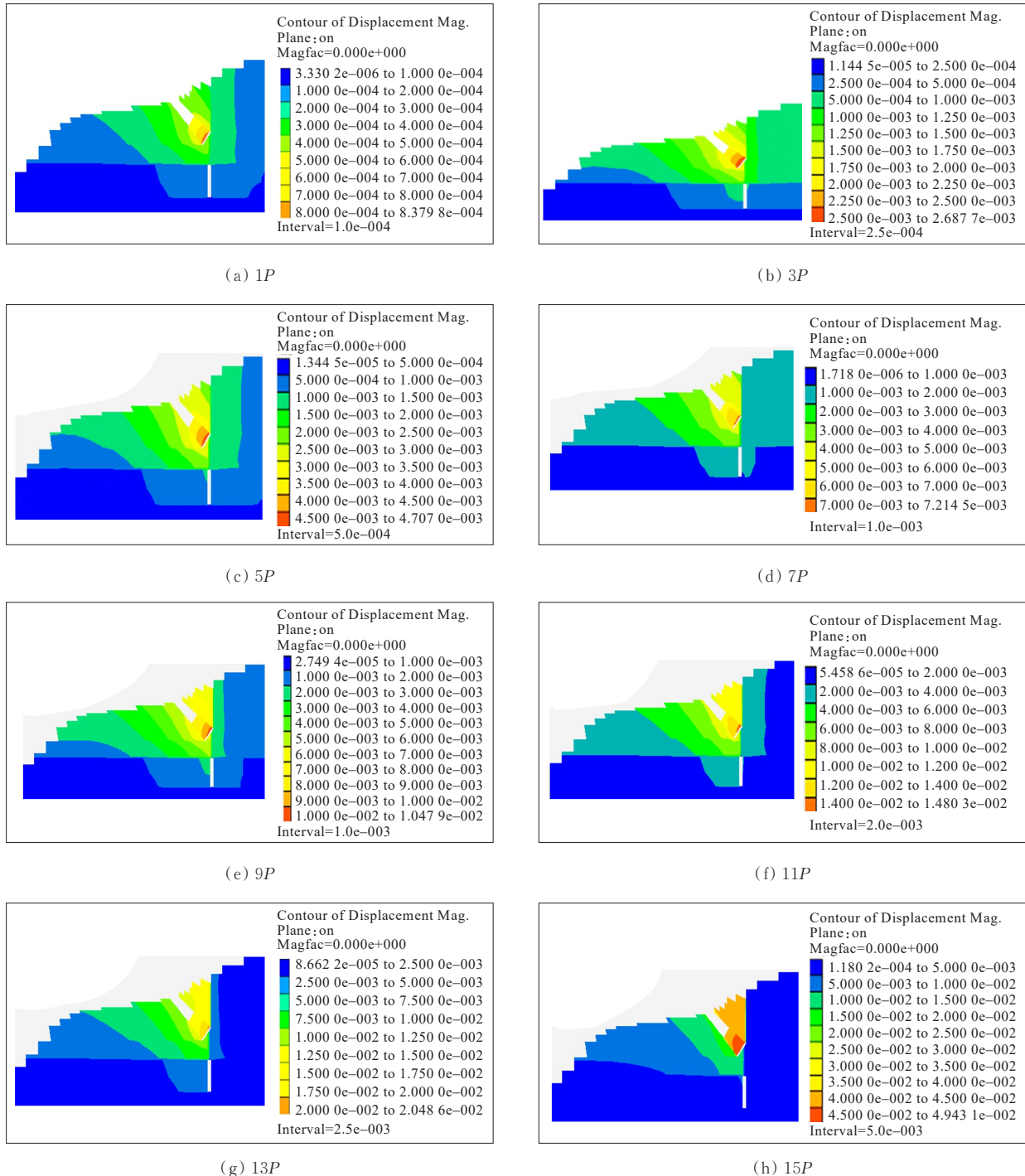
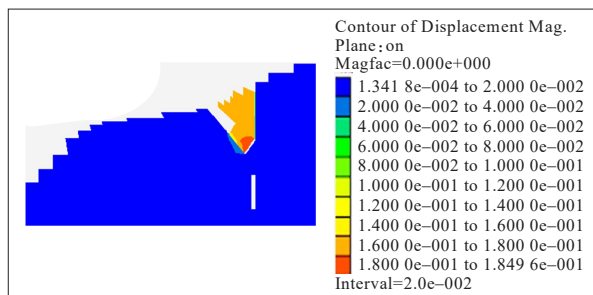


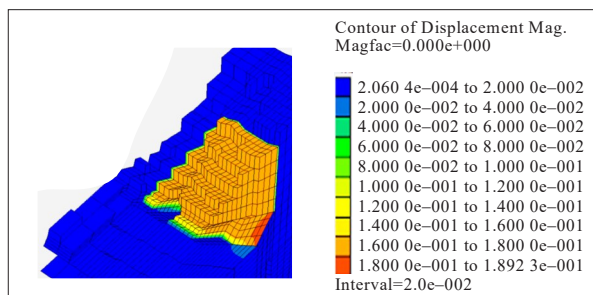
图13 不同超载倍数下东侧锚碇体轴线剖面变形等值线图(单位:m)

Figure 13 Deformation contour map on axis section of east anchorage under different overload multiples(unit:m)





(a) 过锚碇体轴线剖面上的变形分布图



(b) 变形分布三维形态图

图 14 16P 时变形分布图(单位:m)

Figure 14 Deformation distribution at overload of 16P(unit:m)

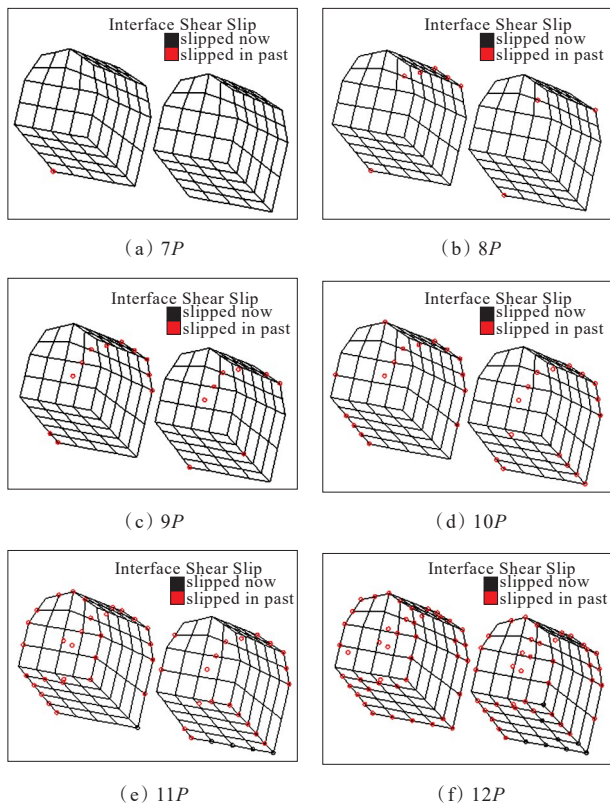


图 15 不同超载倍数下锚碇体周边剪切滑移破坏单元的分布

Figure 15 Distribution of shear slip failure elements around anchorage under different overload multiples

## 7 结论

采用FLAC<sup>3D</sup>软件,针对清江某特大桥隧道锚开展了设计工况和超载工况模拟,得到以下结论:

(1) 设计工况下,隧道锚及周边岩体变形较小,最大变形小于1 mm,隧道锚可以较好地承担设计荷载的作用。

(2) 超载倍数不大于6P时,计算出的最大变形随超载倍数的增加呈线性增加趋势,6P时的最大变形量约为6 mm;超载倍数不大于6P时,锚碇体与周边围岩之间没有剪切滑移现象出现。据此可以认为该隧道锚的屈服荷载为6P。

(3) 超载倍数大于7P后,随超载倍数继续增加,变形局部化现象渐趋明显。15P时,计算出的最大变形剧增,模型出现整体破坏迹象。可以认为该隧道锚的极限荷载为14P。

(4) 该隧道锚的潜在失稳部分主要是锚碇和锚碇上部受裂隙切割的岩体,潜在失稳模式为锚碇连同上部岩体沿底部岩/混凝土胶结面整体向上滑移。对本隧道锚稳定性起控制作用的主要是锚碇体底部岩/混凝土胶结面的性状、锚碇体后缘EW向陡倾角裂隙的分布及连通情况、锚碇体两侧SN向陡倾角裂隙的分布及连通情况。锚碇体下部溶洞的存在,对隧道锚的变形破坏不会产生显著影响。

隧道锚承载机制为利用锚塞体的倒楔形体结构,利用围岩的夹持效应带动围岩共同承载,围岩的结构特征、隧道锚所在部位的地形地貌特征等,对隧道锚的承载能力影响显著。通过详细的地质调查和分析,概化锚址区围岩结构特征和工程特性,在此基础上建立能客观反映实际工程地质条件和地貌形态特征的概化模型,据此开展数值模拟分析,才能得到对实际工程有指导意义的模拟结果。本文所采用的地质模型概化方法、数值分析网格划分方法、物理力学参数取值方法,以及数值分析过程和成果分析方法,对后续隧道锚工程设计和研究具有一定的借鉴作用。

## 参考文献:

## References:

- [1] AMMANN O H. George Washington bridge: General conception and development of design[J]. Transactions of



- the American Society of Civil Engineers,1933,97(1): 1-65.
- [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[J].地下空间与工程学报,2019,15(6): 1780-1791.
- LIU Xinrong, HAN Yafeng, 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.
- [3] 张奇华,李玉婕,余美万,等.隧道锚围岩抗拔机制及抗拔力计算模式初步研究[J].岩土力学,2017,38(3):810-820.
- ZHANG Qihua, LI Yujie, YU Meiwan, et al. Preliminary study of pullout mechanisms and computational mode of pullout force for rocks surrounding tunnel-type anchorage [J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(3): 810-820.
- [4] 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 Aiqing, PENG Yuancheng, HUANG Zhengjia, 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.
- [5] 中交公路规划设计院有限公司.公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway suspension bridge: JTG/T D65-05—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [6] 朱玉,廖朝华,彭元诚.悬索桥隧道锚设计[J].公路,2007, 52(11): 21-27.
- ZHU Yu, LIAO Chaohua, PENG Yuancheng. Design of tunnel-type anchorage of suspension bridge[J]. Highway, 2007,52(11): 21-27.
- [7] 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 Yihu, WU Aiqing, ZHOU Huoming, 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.
- [8] 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.
- [9] 朱玉,卫军,李昊,等.大跨径悬索桥隧道锚变位分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19): 3588-3593.
- ZHU Yu, WEI Jun, LI Hao, et al. Analysis of displacements of tunnel-type anchorage for a large-span suspension bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(19): 3588-3593.
- [10] 赵海斌,梅松华,彭运动,等.大型隧道锚施工优化及其稳定性分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009, 28(6): 873-876.
- ZHAO Haibin, MEI Songhua, PENG Yundong, et al. Construction optimizing and stability analyzing for large tunnel anchor[J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2009,28(6): 873-876.
- [11] 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 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.
- [12] 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):88-93.
- 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):88-93.
- [13] 张利洁,唐辉明,茅兆祥,等.重庆长江特大悬索桥隧道锚碇区岩体稳定分析[J].人民长江,2010,41(17): 19-21.
- ZHANG Lijie, TANG Huiming, MAO Zhaoxiang, et al. Research of rock mass stability of tunnel anchorage zone of huge suspension bridge in Chongqing[J].Yangtze River, 2010,41(17): 19-21.
- [14] 邬爱清,周火明,张奇华,等.悬索桥隧道锚岩石力学关键技术及应用[M].北京:科学出版社,2019.
- WU Aiqing, ZHOU Huoming, ZHANG Qihua, et al. Key technologies and application of rock mechanics for tunnel anchor of suspension bridge[M]. Beijing: Science Press, 2019.