

# 支井河特大桥桥台/锚索受力计算分析

颜炳玲, 李术才, 李景龙

(山东大学 山东 济南 250061)

**摘 要:** 支井河特大桥的桥台在施工过程中, 兼起锚碇的作用, 所以除对其自身加固效果进行计算外, 还必须对锚索张拉阶段的稳定性进行分析。该文应用理论计算和有限元数值模拟的方法对桥台的受力状况进行了分析, 为工程的安全施工提供了保障。

**关键词:** 桥台; 锚碇; 数值模拟

支井河特大桥位于巴东县野三关镇支井河村, 桥梁全长 545.54 m, 主桥为  $1 \times 430$  m 钢管混凝土拱桥, 横跨支井河峡谷, 该峡谷两岸悬崖陡立, 山顶高程 1 415 m, 河床高程 660 m, 相对高差 755 m, 谷底宽 30 m, 地形复杂, 施工条件极为困难。

主拱肋利用无支架缆索起重机起吊, 扣挂体系采用无塔架设计, 利用两岸桥台作为锚索锚梁。两岸桥台台身均采用预应力锚索结构进行加固, 锚索共计 48 根, 设计长度 26~36 m, 采用  $\phi 15.24$ 、强度 1 860 MPa 级无粘结钢绞线。桥台在施工过程中, 兼做锚碇, 必须校核其自身的锚固效果及在扣索张拉时, 锚杆是否在

安全许可值内。

## 1 岩锚作用下岩石与桥台接触面的应力

一根岩锚的实际张拉力为  $P = 180$  t, 上、下各排 12 根, 共计 24 根。岩锚张拉完成后, 计算接触面由于岩锚的作用而产生的压应力。

### 1.1 理论计算

宜昌岸桥台计算分析理论计算模型简化如图 1 所示, 不计自重, 岩锚与 A 面近似垂直 ( $88.43^\circ$ ), 不考虑岩锚的分力作用, 且简化均趋向更安全。

## 3 结论

(1) 利用非线性弹性材料的应力-应变和余能公式, 推导出较长柱桩的桩身压缩变形量  $S_e$ , 借助弹性力学中半无限体表面圆形区域内受均匀分布压力作用中点沉降计算公式和岩土损伤力学理论推导出桩底面沉降量  $S_p$  计算公式, 进一步得到  $P-S$  曲线计算模型。

(2) 在具体工程应用时, 可根据地基土层勘探成果、桩体设计参数和桩体混凝土物理力学指标、桩底持力层岩土的三轴剪切应力-应变关系曲线, 利用该文提出的模型式(19)推算  $P-S$  曲线, 可不做或少做静载试验, 降低了工程成本。

(3) 本文在推导模型的过程中应用了材料力学、弹性力学、损伤力学等理论, 缺乏深层次的论证, 仅通过工程实例对计算模型的正确性进行了验证, 因此还有待进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 凌治平, 易经武. 基础工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 孙训方, 等. 材料力学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [3] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.
- [4] 洪毓康. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [5] 赵锡宏. 损伤土力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.
- [6] 吴政, 张红娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996(3).

收稿日期: 2007-06-12

作者简介: 颜炳玲, 女, 硕士研究生, E-mail: forever627@163.com

则上、下缘的应力为:  $\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I}y$

其中:  $N$  为锚杆力;  $M$  为锚杆力引起的弯矩;  $A$  为接触面面积;  $I$  为接触面惯性矩;  $y$  为上、下边缘距中性层的距离。结果表明: 接触面上缘出现极小拉应力, 下缘拉应力值约为 1.8 MPa。

恩施岸桥台计算方法同宜昌岸, 计算后接触面上缘出现较小拉应力, 下缘最大压应力为 2.16 MPa。

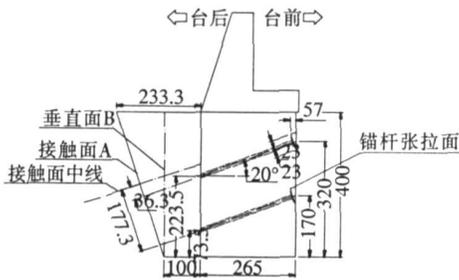


图1 宜昌岸桥台理论计算模型(单位: cm)

## 1.2 数值模拟

模拟中, 桥台按弹性体模型进行计算, 网格单元计算中采用 4 节点实体单元,  $X$  方向为桥轴线方向, 向河侧为正;  $Y$  方向为竖直方向, 向上为正。钢筋混凝土材料参数近似取  $E=41$  GPa,  $\nu=0.17$ ,  $\rho=4\ 000$  kg/m<sup>3</sup>。模型底部和接触面上分别加法向和切向两向约束, 其他面为自由面。锚杆力以同方向集中力模拟。宜昌岸和岩体接触面 A 上的应力分布见图 2。

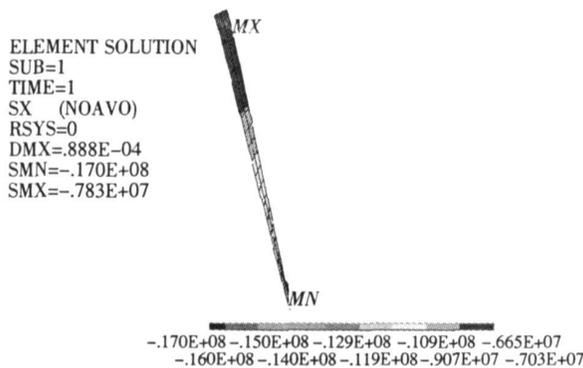


图2 宜昌岸接触面应力分布图(单位: Pa)

由图 2 可知: 宜昌岸接触面不出现拉应力, 压应力由上至下逐渐增大, 最大压应力在接触面底部, 数值为 0.955 MPa。恩施岸数值计算方法同宜昌岸, 结果表明: 接触面上不出现拉应力, 压应力自上至下逐渐减小, 最大压应力出现在接触面底部, 为 0.64 MPa。

综合两岸情况, 数值计算结果较理论值偏小, 这是由于有限元计算中计入了桥台自重, 且考虑了实际约

束情况。由此可见, 此处桥台理论计算也是偏于安全的, 用这个结果来控制张拉扣挂也是偏于安全的。

## 2 最大锚索张拉力计算

### 2.1 单独张拉锚索阶段最大锚索张拉力计算

单独张拉后锚索时, 由于引桥桥面空心板顶住了桥台和过渡墩, 锚索的索力通过过渡墩转换到桥台, 因此, 桥台上的受力实际上是后锚索的张拉力与空心板的顶力构成的一对力偶。在这个阶段, 锚索最大控制张拉力控制力偶的大小, 即: 力偶产生的 A 面下缘应力与岩锚产生的相等, 此时, 接触面下缘压应力为 0。宜昌岸桥台计算分析模型简化如图 3 所示, 经过计算, 可得锚索力为 13 170 kN。

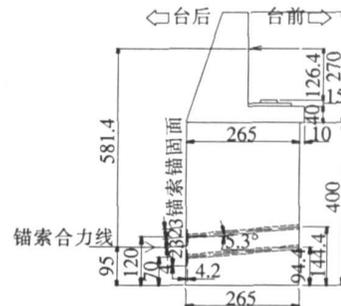


图3 宜昌岸桥台单独张拉锚索阶段计算模型(单位: cm)

数值模拟中锚索张拉力可通过在锚索作用点施加法向约束, 进而通过约束的支座反力求出。底面加  $X$ 、 $Y$  向约束, 锚索作用点处、引桥作用点处分别加法向约束, 以使锚索张拉力和引桥对桥台的顶力形成力偶。宜昌岸桥台由数值计算得到的锚索索力为 20 220 kN。

恩施岸桥台理论分析方法同宜昌岸, 得到理论锚索最大张拉力为 17 125 kN。数值模拟时约束情况同宜昌岸桥台, 计算得到最大锚索张拉力为 21 000 kN。

### 2.2 张拉扣索阶段极限张拉力

张拉扣索相当于箱梁的顶力卸载, 极端状况为顶力为 0, 此时桥台上的力只有锚索产生的力。

宜昌岸桥台计算分析, 对宜昌侧桥台, 理论计算为接触面达到极限平衡, 得到锚索最大张拉力为 44 550 kN。利用有限元进行数值计算时, 底面加法向约束, 锚索力可通过在相应位置的支座反力求得, 计算后, 可以得到锚索张力为 40 800 kN。

恩施岸桥台计算分析, 理论计算方法同宜昌岸, 得到的最大锚索张力为 43 490 kN。在数值计算时, 约束情况同宜昌岸桥台, 得到的索力为 40 800 kN。

综上所述,引桥小箱梁—桥台—台后岩面构建交界墩锚梁的支撑系统,使锚梁可以先承受较大的向岸侧的不平衡锚索水平力。结果表明:此锚索力计算结果是偏安全的。

### 3 锚索受力分析

#### 3.1 注浆体强度验算

选择净面积最小的承载板进行验算,注浆体为 50<sup>#</sup> 水泥浆,每个承压板的设计荷载为  $T=400\text{ kN}$ ,承压板净面积为  $S=0.011\ 08\text{ m}^2$ ,则:

$$P=T/S=36\text{ MPa}<50\text{ MPa.}$$

#### 3.2 极限抗拔安全系数计算

根据公式  $F_s=\pi Ldq_s/T$

式中: $F_s$  为极限抗拔安全系数; $T$  为单个承压板设计荷载; $L$  为锚固段长度; $d$  为锚索直径(160 mm); $q_s$  为粘结摩阻强度(风化岩为 600~1 000 kPa,本文取 700 kPa)。

$$F_s=1.76>1.5(\text{永久性锚固工程安全系数})$$

综上所述,锚索的强度在许可范围内。

### 4 应用 FLAC 程序计算桥台与周围岩体的相互作用及锚杆受力情况

桥台工作的最不利情况即为锚索全部张拉后,桥台和岩体在自重及锚杆的作用下工作的情况。

采用 FLAC 进行数值模拟时,锚杆的几何及力学参数参考 GB 1499—98,桥台周围岩体的力学参数参考支井河详勘报告。桥台采用 Elastic 弹性模型进行模拟,周围岩体采用 Mohr—Coulomb 进行模拟。模型底部全部约束,左、右两侧及前后两端施加法向约束。

经计算,在最不利情况下,桥台及其周围的岩体均未出现塑性区,从最大主应力等值线图(图 4)可看出,桥台与岩体接触面不出现拉应力,与 ANSYS 计算结果吻合。桥台锚杆受轴向拉应力,分布合理,宜昌岸和恩施岸最大拉应力分别为 840 和 840.1 MPa,均在许可范围内。两岸桥台和岩体发生的最大不均匀变形在 0.13 mm 以内(图 5),锚杆的剪应力可以忽略不计。

### 5 结论

本文应用理论计算和数值模拟对支井河特大桥桥

FLAC3D 2.00  
Step 45245 Model Perspective  
21:15:40 Sun Dec 3 2006  
Center: Rotation:  
X:3.259e+000 X:100.000  
Y:-3.203e+000 Y:0.000  
Z:1.661e+001 Z:0.000  
Dist 3.298e+002 Mag:3.81  
Ang:22.500  
Contour of SMax  
Gradient Calculation  
-6.4902e+005 to -5.0000e+005  
-5.0000e+005 to -4.0000e+005  
-4.0000e+005 to -3.0000e+005  
-3.0000e+005 to -2.0000e+005  
-2.0000e+005 to -1.0000e+005  
-1.0000e+005 to 0.0000e+000  
0.0000e+000 to 1.0000e+005  
1.0000e+005 to 2.0000e+005  
2.0000e+005 to 3.0000e+005  
3.0000e+005 to 4.0000e+005  
4.0000e+005 to 4.6953e+005  
Interval=1.0e+005  
Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, Minnesota USA



图 4 宜昌岸桥台最大主应力等值线图

FLAC3D 2.00  
Step 45245 Model Perspective  
21:21:58 Sun Dec 3 2006  
Center: Rotation:  
X:-2.128e+000 X:100.000  
Y:1.727e+000 Y:0.000  
Z:1.574e+001 Z:0.000  
Dist 3.298e+002 Mag:11.6  
Ang:22.500  
Plane Origin: Plane Normal:  
X:0.000e+000 X:0.000e+000  
Y:0.000e+000 Y:0.000e+000  
Z:0.000e+000 Z:1.000e+000  
Sketch  
Line style  
Displacement  
Plane: on  
Maximum=3.568e-004  
Line style  
Itasca Consulting Group, Inc.  
Minneapolis, Minnesota USA

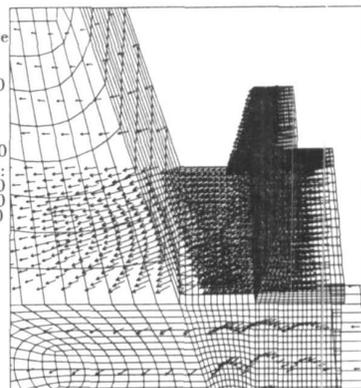


图 5 宜昌岸桥台位移矢量图

台在不同施工阶段的稳定性及锚索的工作情况进行了研究。结果表明,桥台在岩锚作用下及锚索张拉阶段,岩石与桥台接触面不出现拉应力,并且锚索承受的拉力在许可范围内,可安全施工。

#### 参考文献:

- [1] 彭振斌. 锚固工程设计计算与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [2] 张立明. Algor, Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] 金波, 蒋高桥, 郝红卫. 预应力水平对拉锚索施工方法在桥台加固中的应用[J]. 路基工程, 2003(2).