

# 石潭溪大桥施工受力分析

陈宝春 孙 潮

[福州大学土木建筑工程学院, 350002]

**摘要:** 以 316 国道福建闽清石潭溪大桥施工受力为分析对象, 进行了索梁混合结构稳定的有限元分析并编制了程序。应用 SA P93 程序研究了管内混凝土浇筑过程中的应力和稳定问题, 提出的加载程序应用于实际施工中, 应力测试与电算结果基本吻合。

**关键词:** 钢管混凝土, 桁拱, 施工, 有限元

**中图分类号:** U 441.5

## Mechanic Analysis of the Construction Phase of Shitanxi Bridge

Chen Baochun Sun Chao

[College of Civil and Architectural Engineering, Fuzhou University, 350002]

**Abstract:** The constructional forces of Shitanxi bridge which is part of the 316 national highway in Minqing Fujian province are analyzed. The stability of cable-member mixed structure is analyzed using the finite element method and a corresponding program is also made. The SA P93 structural analytic program is used to study the stress and stability of concrete inside the steel tube during the pouring procedure. The loading procedure suggested in the paper can also be applied into the practical construction work, and the result of stress testing during the construction agrees well with those achieved by computer analysis.

**Key word:** CFST, Truss arch construction, Finite element

石潭溪大桥位于 316 国道福建省闽清县境内, 跨越水口电站库区石潭溪。桥梁结构为一净跨 136 m 的钢管混凝土中承式桁拱, 矢跨比为 1/5, 拱轴线为悬链线,  $m = 1.167$ , 主拱圈采用 4 根  $\Phi 550 \times 8$  mm 钢管,  $\Phi 400 \times 8$  mm 上下平联和  $\Phi 219 \times 8$  mm 的直腹杆和斜腹杆组成高 3.0 m, 宽 1.6 m 的桁式主拱肋, 钢管内灌筑 C40 混凝土。吊杆采用 110 丝  $\Phi 5$  高强度钢丝。桥面系采用工字型横梁和 T 型纵梁, 横梁间距为 8.1 m。桥面以上设三道横撑, 桥面以下设两道 K 撑。拱座为分离式钢筋混凝土结构, 直接坐落于岩石上。拱上建筑桥台为砌石桥

台<sup>[1]</sup>。总体布置示意图见图 1。

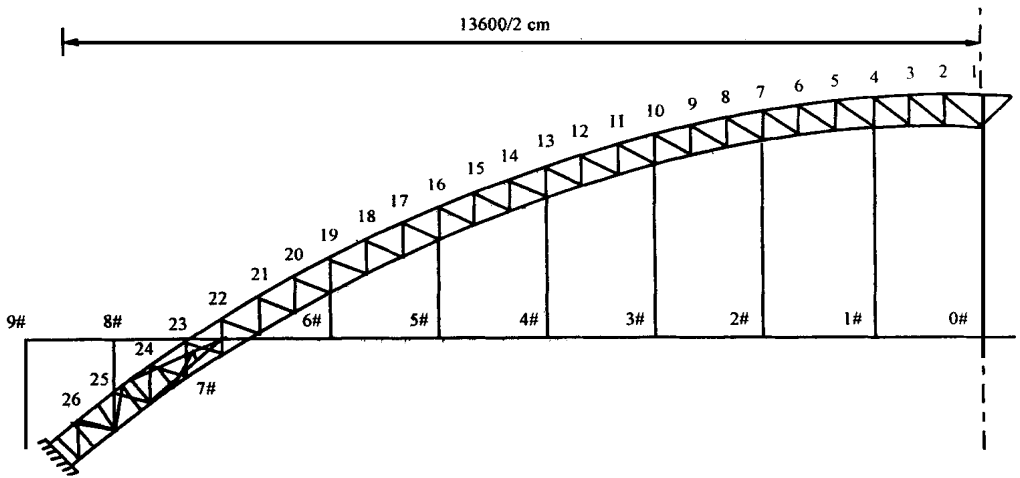


图 1 1/2 总体布置示意图

钢管混凝土拱桥的施工方法本质上属于劲性骨架施工方法,主拱圈从劲性骨架架设开始,通过浇筑混凝土逐步形成,各部分材料先后受力,施工过程的稳定问题十分突出,施工步骤对桥梁最终结构的应力分布和变形影响很大。因此要对施工全过程进行受力分析,然后提出合理施工方案和施工步骤。钢管混凝土拱桥施工问题不如此外包混凝土的劲性骨架拱桥问题突出,但对于有较大跨越能力的桁拱来说,其含钢率的降低和跨径增大以后,施工受力问题也已引起关注。但这种形式目前修建尚不多,对其施工阶段的受力与稳定分析的文献更少<sup>[2,3]</sup>。笔者采用 FORTRAN 语言编制了空间索梁混合结构稳定分析程序,应用该程序和 SAP93 程序,对吊装合拢时的稳定进行了计算,同时还采用 SAP93 程序,主要以空间梁单元建模,分析研究施工加载,主要是管内混凝土浇筑过程的强度、刚度和稳定性,为施工单位提供合理的施工方案,并进行了实桥管内混凝土浇筑过程的实测试验。

## 1 施工稳定分析

### 1.1 吊装合拢阶段 SAP93 计算分析

计算主要采用空间梁单元建模,全桥共 2581 单元,1285 个结点。加载方法是将各阶段所上荷载按公式  $w/v$  换算成承载结构的重量, $w$  为新上结构重量, $v$  为承载结构体积。泊松比对结构受力影响不大,钢材的泊松比取为 0.283,核心混凝土的泊松比取为 0.173。钢管混凝土的综合弹模、面积、惯性矩根据文献[4]所推荐的公式计算,即钢管混凝土构件刚度视为由钢管和混凝土的简单叠加而成。石潭溪大桥采用缆索吊装施工,合拢阶段用斜扣索和缆风索加强结构稳定性,但 SAP93 无法进行索梁混合结构的稳定计算。仅计钢管骨架作用时,SAP93 程序分析结果,双肋合拢的稳定系数为 4.41418。双肋吊装,单肋合拢的稳定系数为 3.56080,失稳模态均为面内。单肋吊装单肋合拢的稳定系数为 2.60906,失稳模态为空间扭倾。

### 1.2 索梁结构有限元稳定分析

由于受施工条件和工期要求,施工单位提出采用单肋吊装单肋合拢的方案。由上节可

知, 不计缆风索和扣索作用该方案稳定系数偏低, 为此笔者进行了索梁混合结构的有限元稳定分析, 并自编了程序。由于单肋吊装单肋合拢时的失稳模态为空间扭倾, 因此笔者对索梁混合结构进行了空间有限元稳定分析。将钢管构件视为空间梁单元, 将索视为不抗压的空间杆单元, 并视钢材为理想弹塑性材料, 考虑在每级荷载下钢管结构的几何非线性影响, 采用迭代法解几何非线性方程, 采用增量法求压溃荷载, 用位移判断迭代的收敛性。

石潭溪大桥在进行吊装合拢稳定性计算时, 为减少单元数, 将桁拱肋折算成一个截面。该桥吊装单元每肋分为五段, 在靠近接头处设有缆风索和斜扣索(图 2), 具体位置以图一为例在拱肋节点 9 和 19 处。对两根一组的缆风索和斜扣索的钢丝



图 2 索梁混合结构稳定计算模型

绳直径分别取  $\Phi 44.5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 33.5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 22.5 \text{ mm}$ , 考虑索作用的拱肋合拢稳定系数分别为 28、19 和 9, 且均为缆风索的破坏导致结构的失稳, 这表明索特别是缆风索对单肋合拢稳定性有较大的影响。施工单位根据实际情况采用了二根为一组  $\Phi 33.5 \text{ mm}$  的钢丝绳缆风索和单根  $\Phi 37.5 \text{ mm}$  的斜扣索, 计算所得的稳定系数仍为 19。

这里应该指出由于受工期的限制, 上述计算分析中未考虑索的下垂和初拉力对拱肋合拢稳定性的影响, 但这不影响对施工单位所采用的施工方案是可行的判断。该桥两根拱肋施工吊装已于 1997 年 10 月份完成。

### 1.3 加载过程的稳定分析

两根钢管拱肋合拢后, 用横向联结, 解除扣索, 保留缆风, 分别浇筑管内混凝土。由于自编程序将由四根钢管组成的拱肋做为单个截面考虑, 无法反映浇筑过程中的详细情况, 所以管内浇筑混凝土的稳定计算采用 SA P93 程序, 抗风索作为安全储备。计算模型及手段见 1.1 节。浇筑过程中的稳定系数均在 6 以上, 大于 4, 满足施工要求。由于浇筑过程中的失稳模态均为面外扭倾, 因此在浇筑过程中如能使面外刚度尽快加大, 稳定系数会有所提高。先浇筑上弦内外侧两根或下弦内外侧两根钢管管内的混凝土时能使面外刚度尽快加大, 是较佳的选择方案。在此原则下浇筑顺序对稳定影响不大, 其稳定系数相差不多, 如 1 号 2 号管内混凝土固结后(钢管编号见图 3 括号内数值), 浇 3 号管其稳定系数为 7.65640, 浇 4 号管其稳定系数为 7.65595, 相差很小。

计算还表明, 浇筑过程中的稳定系数要比浇筑完全跨的稳定系数大, 如浇筑到 1/4 跨的稳定系数都比相应的浇筑完全跨时的稳定系数大。管内混凝土达到强度后, 桥面系加载的稳定安全系数都在 7 以上, 不再赘述。

## 2 施工加载受力分析<sup>[5]</sup>

施工加载受力也采用 SA P93 程序进行分析, 计算模型及手段见 1.1 节。在二铰拱形成并封较后, 若将全部的钢管都灌满混凝土, 即将钢骨架和混凝土的重量都加上去, 经过线性和非线性的计算分析, 发现几何非线性引起拱顶挠度增加, 挠度由线弹性的 0.0456 m 增加为 0.0469 m, 仅增加 2.84%, 说明钢管混凝土的钢管骨架具有较大的刚度。为减少分析计算工作, 本文在进行施工加载受力分析时, 均不考虑几何非线性的影响。

## 2.1 管内混凝土加载受力分析

石潭溪大桥的施工顺序,首先形成拱座,然后吊装钢管骨架,形成空钢管拱肋,此时是二铰拱,只有钢管自身受力。封铰后形成无铰拱,开始浇筑管内混凝土。即钢管从一开始就参与受力,而管内混凝土则随着浇筑顺序依次参与受力。后期拱上建筑,桥面系恒载及活载则均由钢管混凝土组合截面共同承受。

由于浇筑过程中稳定系数都大于6,因此稳定性计算对浇筑顺序基本不控制。管内混凝土浇筑顺序计算主要考虑结构应力情况。计算表明浇筑过程中各种材料都不出现应力屈服现象。由于每次加载的承载结构都不同,各组分按先后参与受力时间不同积累着自己的应力,因此浇筑顺序对钢管及管内混凝土的应力影响较大。

根据先期荷载应力有利于后期荷载应力(视先期应力为储备应力)及过程应力最小的原则,进行了四个方案的计算比较(钢管的编号见图3括号内的数字)。方案一:2、1、4、3;方案二:3、4、1、2;方案三:4、3、1、2;方案四:4、2、1、3。所得结果见表1与表2。



图3 钢管与测点编号

表1 各方案拱脚截面钢管中混凝土应力(Pa)

项目	1号管	2号管	3号管	4号管
方案一	- 1.541 × 10 <sup>6</sup>	- 2.860 × 10 <sup>6</sup>	0	- 1.394 × 10 <sup>6</sup>
方案二	- 5.925 × 10 <sup>5</sup>	0	- 4.240 × 10 <sup>6</sup>	- 2.255 × 10 <sup>6</sup>
方案三	- 5.925 × 10 <sup>5</sup>	0	- 2.285 × 10 <sup>6</sup>	- 4.326 × 10 <sup>6</sup>
方案四	- 5.690 × 10 <sup>5</sup>	- 1.584 × 10 <sup>6</sup>	0	- 4.659 × 10 <sup>6</sup>

表2 各方案拱脚截面钢管应力(Pa)

项目	1号管	2号管	3号管	4号管
方案一	- 1.230 × 10 <sup>8</sup>	- 1.215 × 10 <sup>8</sup>	- 1.254 × 10 <sup>8</sup>	- 1.253 × 10 <sup>8</sup>
方案二	- 1.203 × 10 <sup>8</sup>	- 1.190 × 10 <sup>8</sup>	- 1.222 × 10 <sup>8</sup>	- 1.210 × 10 <sup>8</sup>
方案三	- 1.202 × 10 <sup>8</sup>	- 1.194 × 10 <sup>8</sup>	- 1.210 × 10 <sup>8</sup>	- 1.215 × 10 <sup>8</sup>
方案四	- 1.211 × 10 <sup>8</sup>	- 1.190 × 10 <sup>8</sup>	- 1.232 × 10 <sup>8</sup>	- 1.236 × 10 <sup>8</sup>

由表1和表2可见,不同浇筑顺序对钢管的最终储备应力影响不大,但对管内混凝土的最终储备应力影响较大。方案一可使拱脚截面上弦钢管内的混凝土储备1.541MPa和2.860MPa压应力,下弦储备为0与1.394MPa压应力,与其它方案比较,上弦混凝土储备压应力大,下弦混凝土储备压应力小,而后续荷载(如浇筑混凝土到1/4跨,从拱脚到拱顶加桥面系等)使上弦受拉下弦受压。因此方案一对后续荷载有利,而且对稳定有利(1.3节),于是管内混凝土浇筑顺序选定为2、1、4、3。各浇筑阶段拱脚处的钢管与混凝土的最不利应力见表3。

## 2.2 各管混凝土的浇筑程序

由于浇筑第一根管内混凝土时只有钢管受力,因而钢管应力较大,尤其浇筑到四分之一

跨时应力偏大, 因此对二号管实行分仓浇筑。将二号管分成五个仓, 从拱脚到 17 号结点(图 1)为第 1 仓, 从 17 号结点到 6 号结点为第 3 号仓, 剩下的拱顶一段为第 2 号仓。浇筑顺序从 1 号仓至 3 号仓。浇筑顺序细化后钢管的最不利应力为  $-2.407 \times 10^7$  Pa, 比直接从拱脚到拱顶浇筑, 浇筑到四分之一跨时拱脚处最不利应力  $-3.480 \times 10^7$  Pa 要小 29%。除第一根即 2 号管外, 其余各管内混凝土浇筑不分仓, 顺序为从拱脚到拱顶对称浇筑。

表 3 拱脚管内混凝土与钢管最不利应力(Pa)

项目	1号管	2号管	3号管	4号管
混凝土最不利应力	$-1.541 \times 10^6$	$-2.860 \times 10^6$	0	$-1.394 \times 10^6$
钢管最不利应力	$-1.230 \times 10^8$	$-1.215 \times 10^8$	$-1.254 \times 10^8$	$-1.253 \times 10^8$

### 2.3 桥面系的吊装

桥面系加载顺序对拱肋内力影响规律与管内浇筑混凝土的规律相似, 但此时钢管混凝土拱肋已经形成, 其刚度较大, 吊装顺序对拱肋内力影响不大。施工方案考虑在方便施工的前提下, 尽可能减小在加载过程中拱脚的最不利应力。浇筑完钢管拱内混凝土后, 先装模浇筑桥面系与拱肋相交处的 7<sup>#</sup> 固定横梁(图 1)及 8<sup>#</sup> 立柱。然后按 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 的顺序对称安装横梁。随后进行纵梁安装。纵梁先对称安装上承部分, 继而对称安装(7<sup>#</sup> ~ 0<sup>#</sup> 孔)中间二根, 供操作人员行走。再由 0<sup>#</sup> 分两边向 2<sup>#</sup> 安装, 最后由 7<sup>#</sup> ~ 2<sup>#</sup> 对称交错安装, 并及时焊接预埋的钢板和钢筋。人行道板按拱脚两边向桥中心同时对称安装。桥面铺装混凝土由两桥台向跨中对称浇筑。

## 3 浇筑管内混凝土过程的应变实测分析

### 3.1 测点布置与施工安排

为了验证电算方法的正确性并在施工中进行控制, 对石潭溪大桥管内混凝土浇筑过程进行了实桥测试。测试断面为拱顶 1/4 跨及拱脚三个截面, 每个截面在不同位置布了 8 个应变片测其应变(测点编号见图 3 中括号外数字)。

石潭溪大桥管内混凝土采用人工浇捣。为了赶工期, 管内混凝土未达到 28 天龄期就再浇下一根。同时因为人力有限, 一次只能浇一根。由于两根拱肋是通过横撑与 K 撑相联系的, 因此浇一根拱肋时对另一拱肋影响不大。施工单位根据第三节的结果并结合施工情况, 提出管内混凝土的浇筑顺序为 1、5、2、6、3、7、4、8。第 1 号与第 5 号管仍然分仓浇筑, 等到 1 号 5 号管内混凝土强度达到 60% 后, 其它管则按顺序每天浇筑一根, 每根浇筑顺序为从拱脚到拱顶连续浇筑。

### 3.2 管内混凝土弹模的计算

管内混凝土强度的增长与所用的水泥品种, 混凝土的养护方法, 龄期等主要因素有关。在正常的养护条件下, 前 7 天的强度增长较快, 一般可达到 28 天强度的 60% ~ 65%, 7~ 14 天的强度增长稍慢, 28 天以后增长更为缓慢。假设 28 天达到设计强度 C40, 根据下式推算  $n$  天时的强度, 再根据强度用线性插值得出其弹性模量进行实测试验的理论值计算<sup>[6]</sup>。

$$f_{cc28} = f_{ccn} \times \lg 28 / \lg n \quad (1)$$

式中:  $f_{cc28}$  为 28 天龄期的混凝土抗压强度;  $f_{ccn}$  为  $n$  天龄期的混凝土抗压强度;  $\lg 28$  为 28 的

常用对数;  $\lg n$  为  $n$  的常用对数。

但文献[6]认为该公式计算结果与实际相比, 早期偏低, 后期偏高。又由于试验时间较长(达 15 天), 气温有较大变化, 混凝土在管内养护与正常养护又有所不同, 因此管内混凝土强度的增长规律复杂, 较难确定。因此笔者又进行了混凝土弹模按 28 天强度计与都不计管内混凝土受力两种极端情况的电算, 以进行比较。比较表明按公式(1)的强度推算弹模的计算结果与实测值最接近。

### 3.3 现浇流体状态的混凝土对钢管受力的影响

直接应用 SA P93 程序计算的理论值见表 4、表 5 中的计算值 1, 将其与实测值比较, 可知实测值偏大, 以拱脚处差值最大, 1/4 跨处次之, 拱顶较接近。分析认为主要是由于实际结构中凝固前的混凝土处于流态, 对钢管管壁有内压力, 使钢管环向受拉, 引起轴向受压。流态混凝土对钢管的压力与高度成正比, 所以拱脚处影响最大, 1/4 跨次之, 拱顶最小。而 SA P93 程序计算中没有考虑这个因素。应根据式(2)予以修正。

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= (b^2/r^2 + 1) \times q_a / (b^2/a^2 - 1) \\ \sigma_x &= u \times \sigma_{\theta} \\ q_a &= \rho \times g \times h \end{aligned} \tag{2}$$

式中:  $\sigma_{\theta}$  为环向拉应力;  $\sigma_x$  为轴向压应力;  $q_a$  为内压力;  $a$  为钢管内半径;  $b$  为钢管外半径;  $r$  为计算点处的半径;  $\rho$  为混凝土密度;  $g$  为重力加速度;  $u$  为钢的泊松比;  $h$  为混凝土高度。由拱脚处  $h = 26.36 \text{ m}$ , 1/4 跨处  $h = 5.95 \text{ m}$  计算得拱脚处和跨处地轴向应力分别为  $6.01 \text{ MPa}$  和  $1.35 \text{ MPa}$ 。

经过修正后的计算值见表 4 和表 5 中的计算值 2, 它较计算值 1 更接近于实测值, 可见管内现浇的流态混凝土对钢管的压应力不容忽视。当然, 由于受管内混凝土强度与弹模随时间增长规律的影响, 浇筑时的温度变化, 现场试验条件引起的误差等, 计算值 2 和实测值仍有一定的误差, 但总体上本文的计算方法能够反映实际结构的受力情况。

表 4 上游拱肋混凝土浇筑应力 (MPa)

截面	拱脚截面				1/4 跨截面				拱顶截面				
	测点	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
浇 1# 管	实测值	- 15.1	- 9.49	- 16.7	- 12.1	- 22.6	- 19.1	- 11.3	- 7.88	- 23.6	- 10.7	0.80	- 3.63
	计算值 1	- 9.82	- 7.75	- 16.4	- 12.8	- 0.76	- 10.4	- 9.89	- 9.18	- 9.04	- 11.3	- 9.46	- 6.46
	计算值 2	- 15.8	- 7.75	- 16.4	- 12.8	- 2.11	- 10.4	- 9.89	- 9.18	- 9.04	- 11.3	- 9.46	- 6.46
浇 2# 管	实测值	- 8.48	- 29.1	7.07	0.40	- 5.25	- 44.6	- 3.23	3.23	- 4.64	- 3.84	16	14.5
	计算值 1	- 6.03	- 6.85	- 11.1	- 11.9	10.6	- 6.18	- 5.54	- 6.69	- 8.40	- 4.13	- 4.28	- 8.59
	计算值 2	- 6.03	- 12.8	- 11.1	- 11.9	10.6	- 7.53	- 5.54	- 6.69	- 8.40	- 4.13	- 4.28	- 8.59
浇 3# 管	实测值	13.1	13.7	- 28.5	0.20	- 8.89	- 9.89	- 14.3	- 29.1	- 0.20	8.68	- 9.29	- 10.1
	计算值 1	- 5.11	- 4.70	- 10.4	- 7.4	- 4.59	- 5.27	- 5.01	- 4.69	- 4.65	- 5.98	- 5.12	- 2.60
	计算值 2	- 5.93	- 4.70	- 16.4	- 7.4	- 4.59	- 5.27	- 6.36	- 4.69	- 4.65	- 5.98	- 5.12	- 2.60
浇 4# 管	实测值	- 4.04	- 5.05	- 4.85	- 11.3	- 11.7	- 9.29	- 11.1	- 15.3	—	- 37.2	- 2.02	- 5.05
	计算值 1	- 3.08	- 3.99	- 6.34	- 7.74	17.8	- 3.8	- 3.79	- 3.49	- 4.55	- 2.07	- 1.99	- 4.87
	计算值 2	- 3.08	- 3.99	- 6.34	- 13.7	17.8	- 3.8	- 3.79	- 4.84	- 4.55	- 2.07	- 1.99	- 4.87

表 5 下游拱肋混凝土浇筑应力 (M Pa)

截面	测点	拱脚截面				1/4 跨截面				拱顶截面			
		5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
浇 5# 管	实测值	- 9.69	- 6.87	- 14.1	- 11.7	- 17.8	- 7.27	- 3.84	- 11.9	11.3	7.07	- 9.29	- 10.7
	计算值 1	- 9.77	- 7.77	- 16.3	- 12.8	- 10.2	- 11.1	- 9.88	- 8.94	- 9.03	- 11.3	- 9.46	- 6.44
	计算值 2	- 15.8	- 7.77	- 16.3	- 12.8	- 11.5	- 11.1	- 9.89	- 8.94	- 9.03	- 11.3	- 9.46	- 6.44
浇 6# 管	实测值	- 5.25	- 32.1	16.8	10.1	6.26	- 18.6	32.5	28.5	7.88	8.68	26.9	22.6
	计算值 1	- 5.74	- 6.64	- 10.5	- 11.3	- 7.08	- 4.64	- 5.04	- 6.69	- 7.89	- 3.66	- 3.84	- 8.29
	计算值 2	- 5.74	- 12.4	- 10.5	- 11.3	- 7.08	- 5.99	- 5.04	- 6.69	- 7.89	- 3.66	- 3.84	- 8.29
浇 7# 管	实测值	- 4.24	- 3.84	- 18.4	- 10.7	- 7.07	- 4.24	- 16.6	- 9.09	—	39.8	- 14.3	- 52.9
	计算值 1	- 5.84	- 4.69	- 10.3	- 7.36	- 5.55	- 5.53	- 4.95	- 4.51	- 4.6	- 5.91	- 5.08	- 2.56
	计算值 2	- 5.84	- 4.69	- 16.3	- 7.36	- 5.55	- 5.53	- 6.3	- 4.51	- 4.6	- 5.91	- 5.08	- 2.56
浇 8# 管	实测值	- 2.02	- 4.24	- 4.85	- 19.7	- 6.87	- 5.45	- 6.66	- 18.4	49.3	7.27	- 0.2	- 2.42
	计算值 1	- 3.35	- 4.34	- 5.86	- 8.04	- 4.34	- 3.67	- 3.32	- 4.13	- 4.71	- 2.35	- 1.83	- 5.06
	计算值 2	- 3.35	- 4.34	- 5.86	- 14.0	- 4.34	- 3.67	- 3.32	- 5.48	- 4.71	- 2.35	- 1.83	- 5.06

## 4 结 语

钢管混凝土拱桥的钢管骨架吊装合拢过程中采用的扣索和缆风索对结构的稳定性提高具有较大的作用,是防止施工失稳的有效措施,施工稳定计算时也应予以考虑。索下垂、初拉力对结构稳定的影响有待进一步研究。钢管混凝土桁拱的钢管骨架具有较大的强度与刚度。石潭溪大桥的施工加载程序设计不受材料强度和稳定控制,而是以考虑使用阶段受力有利为原则让拱脚管内混凝土储备压应力。当然施工加载仍应遵循对称的原则,先下后上,并对第一根管内混凝土的浇筑进行分仓,以保证施工安全。管内混凝土实测分析表明,当各管混凝土浇筑间隔时间较短时,各管混凝土的弹模应按实际浇筑时间推算,浇筑管钢管受流态混凝土的压应力不能忽略。

## 参 考 文 献

- 1 陈宝春,郭金琼,毛承忠等. 316 国道闽清石潭溪大桥优化设计. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, (5): 157~161
- 2 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述. 桥梁建设, 1997, (2): 8~ 13
- 3 陈宝春. 钢管混凝土拱桥的设计计算. 工程力学, 1997 年增刊: 450~ 454
- 4 中国工程建设标准化协会. CECS28: 90 钢管混凝土结构设计规程. 北京: 中国计划出版社, 1992
- 5 孙 潮, 陈宝春. 石潭溪大桥施工加载程序设计. 见: 1997 年华东公路发展研讨会论文集. 上海: 华东公路专刊, 1997
- 6 饶 勃. 实用混凝土工手册. 上海: 上海交通大学出版社, 1993 303~ 304