

丫髻沙大桥主桥的施工控制

徐升桥 任为东 李艳明

U448.225.4

【摘要】丫髻沙大桥主桥采用76m+360m+76m三跨连续自锚钢管混凝土拱桥跨越珠江南航道，本文介绍了主桥的设计概况和各关键工序的施工控制

【关键词】珠江 钢管混凝土 拱桥 施工控制

一、设计简介

1. 工程概况

丫髻沙大桥是广州市环城高速公路西南环上跨越珠江南航道的一座特大桥，跨越主航道采用76+360+76(m)三跨连续自锚中承式钢管混凝土拱桥(图1)，跨越副航道采用86+160+86(m)三跨连续预应力混凝土刚构桥，全桥长1084m。总工期22个月，1998年8月开工，2000年6月建成。桥面净宽32.5m，主桥两侧还分别预留了2.0m宽的人行道。

2. 结构设计

(1) 结构体系

根据航道的要求，拱桥跨度布置为76+360+76(m)，边跨、主跨拱脚均固结于拱座，边跨曲梁与边墩之间设置轴向活动盆式橡胶支座。在

两边跨端部之间设置钢绞线系杆，通过边拱拱肋平衡主拱拱肋所产生的水平推力，每束系杆总长约520m。

(2) 主拱拱肋

采用中承式双肋悬链线无铰拱，矢跨比1/4.5。每肋由6 Φ 750钢管混凝土组成，由横向平联板、腹杆连接成为钢管混凝土桁架，这种截面布置具有较大的单肋刚度可以适应转体、大节段吊装等施工方法，对特大跨度拱桥具有较好的经济性。沿拱轴采用变高度(拱脚钢管中心距8.039m，拱顶钢管中心距4.00m)、等宽度(3.45m)截面，两肋中心距35.95m，共设置6组“米”字、2组“K”字横撑。在拱肋的弦管和横联板内灌注50号高强混凝土，腹杆和横撑钢管内则不灌混凝土。为了便于转体施工，两组“K”撑置于

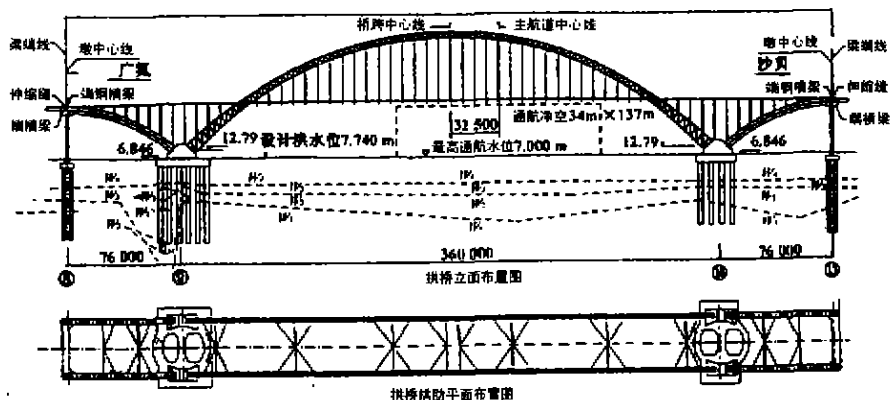


图1 丫髻沙大桥主桥平、立面布置图(单位: mm)

徐升桥、任为东: 铁道部专业设计院

桥梁建设

拱顶。

(3) 边拱拱肋

矢跨比为1/5.2, 每肋由高4.5m、宽3.45m的50号钢筋混凝土箱梁组成, 两肋间设有一组“K”字和一组“米”字钢管桁架式横撑, 它们与同边拱端固结的预应力混凝土端横梁一起, 组成了一个稳定的空间梁系结构。

为了便于传递水平力, 将主拱拱肋、边拱拱肋的轴线置于同一直线上, 且拱肋宽度相等。为使主桥能采用转体法施工, 将边拱设计为劲性骨架结构, 在转体施工时, 每肋由4 Φ 600钢管混凝土组成。

(4) 拱上建筑与桥面结构

立柱除拱座上及之相临的边拱共两组采用 Φ 1300外, 其余所有皆为 Φ 1000的钢管混凝土构件。吊杆采用镀锌高强低松弛91 Φ 7钢丝束, $R^b_y=1670\text{MPa}$, OVM-LZM型冷铸墩头锚。钢横梁长约38m, 梁高1719~1974mm, 每梁约重30.0t。桥面板由预制11形50号钢筋混凝土板和现浇桥面铺装层构成, 板厚22m(含12cm厚桥面铺装), 桥面铺装由8cm厚铣削钢纤维混凝土和4cm厚中粒式改性沥青混凝土组成, 并将8cm厚现浇钢纤维混凝土计入桥面板的受力截面中。

桥面结构由钢横梁、钢纵梁、桥面板组成了长约512m、宽32.4m的连续板结构, 钢横梁与立柱间以KQGZ型双向活动抗震球形钢支座相连, 以释放弯矩及温度力。

(5) 系杆

采用OVMXG15-37钢绞线拉索体系, $R^b_y=1860\text{MPa}$, 系杆外包双层PE热挤塑护套。

二、拱座基础及承台的施工

1. 基础施工

拱桥桥址处江面宽广, 江中水位、水深及流速均受珠江口海水潮汐的控制。丫髻沙岛将珠江江面分隔成两条航道, 南侧为主航道、北侧为副

航道, 在岛的南岸有次级断裂构造。基岩岩性组合复杂, 风化层厚, 弱风化岩面起伏很大。承台下采用 Φ 3.0m、 Φ 2.5m大直径嵌岩灌注桩, 滑道下采用 Φ 2.0m、 Φ 1.5m直径嵌岩灌注桩。为了加快施工速度, 保证施工质量, 以桩长、桩底基岩岩性双控桩底标高, 对少数成孔困难的桩, 根据具体情况分别采用旋喷桩、冷冻法作防水处理。

2. 拱座及承台施工

承台设计成能让由边拱拱肋、拱座、主拱拱肋及施工用索塔组成的体系在承台上平转, 承台及滑道均能承受达13600t的施工荷载。为了能让主拱拱肋竖转施工, 还在主拱拱肋与拱座间设置了竖转铰(图2)。其中铰座为钢结构、铰轴为钢管混凝土结构, 铰座、铰轴的接触面机加工光洁度为12.5。在两者的接触面上涂抹黄油以减小摩擦力和防锈。铰座、铰轴的接触面按在压力、摩擦力共同作用的条件计算其接触压力, 以第四强度理论进行强度校核。承台及拱座均为大体积混凝土, 经与施工单位协商, 提出了以下措施以控制温度变形裂缝。

(1) 在承台及拱座内设置多层冷却水管, 施工时进水管口、出水管口温度差控制在15~20 $^{\circ}\text{C}$;

(2) 选用矿渣水泥, 掺加适量的粉煤灰、减水剂、缓凝剂;

(3) 采用分层、分块法施工, 并设置一定的温度筋;

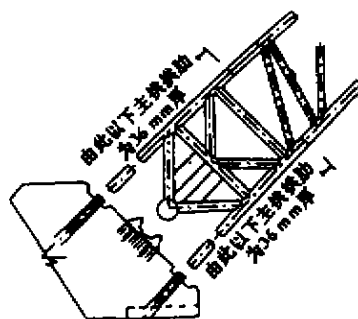


图2 竖转铰简图(单位: mm)

桥梁建设

(4) 委托有经验的科研单位进行温度监控。

三、钢管拱肋的制造与安装

1. 技术设备

(1) 工艺设备设计

工艺设备设计应以工期短、造价省为原则、做到结构简单、保证精度、安全可靠、主要工装可分为：

a. 放样、试装平台

b. 专用胎具：①圆管对接焊胎具；②弯曲弦管成型胎架；③片体拼装、焊接胎架；④整体节段组焊用胎型；

c. 下料及样板

(2) 编制制造工艺

a. 编制原则

(a) 确保结构几何尺寸能满足设计要求；

(b) 制造误差引起的结构附加应力控制在设计范围内；

(c) 焊接、矫形过程对材料基本力学性能影响下明显；

(d) 各工序的制造、安装误差及累积误差要与测试手段、检测精度相适应。

b. 编制焊接工艺文件

焊接工艺是指指导焊接施工的重要技术文件。编制的焊接工艺文件应包括以下内容：①焊接方法；②焊接材料；③焊接接头形式、坡口角度及加工方法、组装要求及允许偏差；④焊接工艺参数、焊接顺序；⑤大间隙对接焊缝、补焊等应规定最大、最小层间预热温度；⑥减少焊接变形、消除焊接应力的措施等。

c. 绘制施工详图

按工艺程序要求，绘制零件图、单元（片体）构件图、节段构成图、试装图及工艺流程图。在下料排版、构件组装时应避免焊接交叉及焊缝间距过小。

d. 编制检查记录表

按有关规定要求，编制各种检查记录表作为控制制造精度、检查质量、工序交接、产品运输及验收的依据。

2. 焊接控制

钢管拱肋是本桥的生命工程，由于采用了较厚板件、大量使用半自动焊和人工电弧焊，确保焊接结构具有足够的韧性和塑性以防裂防断为本桥钢结构设计的重要指导思想。

焊接接头抗断裂能力不仅与焊接强度密切相关，还与焊接韧性和塑性有关，所有焊接工艺评定满足设计要求后方可实施。

(1) 焊接强度的控制

要求对接焊缝屈服强度（ σ_s ）、极限强度（ σ_b ）不低于基材标准，并不超过基材120MPa，超过时用0℃韧强比 $\Phi_k = A_k / \sigma_s$ 控制（ $\Phi_k \geq 0.15$ ）。

焊接接头力学不均质性，对接头断裂性能有显著影响，焊接与母材等强具有最佳抗脆断性能。

(2) 焊接韧性的控制

对接焊缝的各部位（包括焊接、熔合线、热影响区）-5℃的却贝V冲击功不低于35J。对热影响区的韧性检查用于限制施焊输入热量。

为保证其冲击韧性并避免出现裂缝，必须对焊接工艺细则特别注意，输入的热量太高将使钢的晶粒变粗。

(3) 焊接塑性的控制

对接焊缝的延伸率不低于母材，即 $t \leq 25\text{mm}$ ， $\delta_s \geq 20\%$ ， $t = 26 \sim 50\text{mm}$ ， $\delta_s \geq 19\%$ 。

3. 钢管拱肋的验收

验收标准应以钢结构制造的工期短、造价省、符合有关强制性规范为原则，保证结构安全工作、便于施工及检查。

(1) 拱肋节段工厂组装后的尺寸允许偏差

桥梁建设

a. 钢管椭圆度 钢管端部 $\Delta/D \leq \pm 3/1000$

中间部位 $\Delta/D \leq \pm 5/1000$

b. 钢管端部不平度 $\Delta \leq \pm 0.3\text{mm}$

c. 桁架宽度误差 $\Delta \leq \pm 3\text{mm}$

d. 腹杆组合误差 $\Delta/L \leq \pm 1/1000$

e. 腹杆中心距误差 $\Delta \leq \pm 3\text{mm}$

f. 板件局部翘曲 $\Delta \leq \pm 3\text{mm}$

g. 桁架高度偏差 $+3\text{mm} \quad -1\text{mm}$

h. 桁架节段截面扭曲偏差 $\Delta \leq 1\text{mm/m}$

节段最大不超过 5mm

i. 桁架断面对角线差 $\Delta \leq 4\text{mm}$

j. 桁架节段轴线竖向偏差 $\Delta \leq \pm 3\text{mm}$

k. 桁架节段轴线横向偏差 $\Delta \leq \pm 3\text{mm}$

l. 桁架节段轴线弧长偏差 $\Delta \leq \pm 10\text{mm}$

(2) 在工地组拼半跨拱肋的允许误差

a. 节段间接缝错边量

拱肋中间钢管 $\Delta \leq 3\text{mm}$

拱加其余钢管 $\Delta \leq 2\text{mm}$

b. 拱轴线横向偏差 $\Delta \leq \pm 12\text{mm}$

c. 拱轴线竖向偏差 $-6 \leq \Delta \leq \pm 12\text{mm}$

(3) 合龙状态精度控制目标

(1) 两岸对称点高程差 偏差同号且 $\Delta \leq 20\text{mm}$

(2) 拱肋扭转拱肋内、外侧钢管顶高差 $\Delta \leq 3\text{mm}$

(3) 拱线横向偏差 沿X (0, 344) 偏差值 $\Delta_v \leq -0.0014873X^2 + 0.05116X + 6\text{mm}$

(4) 拱轴线竖向偏差 偏差值 $\Delta_z \leq -0.0025014X^2 + 0.86050X + 6\text{mm}$ 且两岸对称点不得反号。

四、拱肋安装的转体施工法

根据广州市建委和建设单位的要求, 按两个施工方案(既转体施工法与三大段施工法)进行施工图设计和指导性施工组织设计, 供施工单位选用。通过施工招标, 推荐转体施工法的单位中

标。

1. 编制施工方案的原则

(1) 由于丫髻沙大桥主桥为跨度大、精度要求高, 如何确保拱肋的线形和制造质量非常关键, 因此要尽量减少高空焊接的工作量;

(2) 由于桥址处珠江航运繁忙, 正常施工阶段不能长期占用航道, 亦不宜封航;

(3) 因丫髻沙大桥拱桥施工技术复杂、要求高, 施工方案应尽量减少不确定因素, 质量便于控制, 造价尽量节省。

2. 转体施工法指导思想

对桥址珠江水域的水文、气候、通航情况进行了详细调查, 实地踏勘, 利用主拱拱肋、拱座、边拱拱肋及扣索、塔柱撑脚组成竖转、平转的转动体系(图3)。整个转动体系由承台上直径为33m的转体环道支撑, 转体施工时不用封航, 其施工步骤如下:

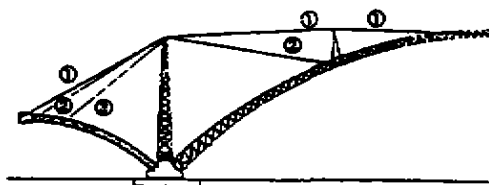


图3 转体安装施工法

(1) 安装承台上的转体环道、拱座及竖转铰, 沿江岸搭设边拱劲性拱架、主拱拱肋卧拼用支架;

(2) 安装转体塔架、边拱劲性骨架、主拱拱肋;

(3) 安装边拱端部及其他设计规定部位压重钢筋混凝土;

(4) 安装转体用扣索、千斤顶及施工监测设备;

(5) 两岸主拱拱肋分别竖转;

(6) 两岸转动体系分别平转到桥位。

3. 转体施工的控制计算

(1) 转体施工的技术指标

桥梁建设

a. 转动体系

几何尺寸：长×宽×高为258.1m×39.4m×86.3m

结构总重：13600t

环道尺寸：直径33m、宽度1.1m

扣索①：每肋7组18×7Φ5钢绞线束

扣索②：每肋3组18×7Φ5钢绞线束

扣索③：每肋2组18×7Φ5钢绞线束

b. 竖转技术指标

主拱拱肋竖转结构总重：2050t

竖转设备：同济大学液压同步千斤顶

竖转角度：24.701°

竖转速度：角速度 $\omega=0.0025\text{rad/min}$ ，主拱端部垂直线速度 $v\leq 0.42\text{m/min}$

c. 平转技术指标

平转结构重心：位于轴线上偏向边拱侧距中心转轴0.03m，距下转盘高19.49m

平转设备：柳州建筑机械总厂ZTD-200型同步提升千斤顶

平转角度：9号拱座侧117.112°，10号拱座侧92.233°

平转速度：角速度 $\omega\leq 0.01\text{rad/min}$ ，主拱端部水平线速度 $v\leq 1.2\text{m/min}$

(2) 施工控制计算

丫髻沙大桥转体施工采用竖转与平转相结合的施工工艺，技术复杂，竖转施工是整个转体施工过程的关键。按竖转-0.701°（起始状态），3°，6°，9°，12°，15°，18°，21°，24°的9个阶段和平转阶段进行施工计算，保证转动体系各构件的应力、位移、整体稳定都能满足设

计和施工的要求。转体施工时，最直观、最可靠、最及时的控制系数就是拱肋的高程等指标，因此在转体施工过程中以高程为主、索力或应力为辅进行指挥、监控。根据计算结果，转体施工时保证转体体系结构安全的控制指标如下：

a. 风速不大于10m/s，相当于6级风力；

b. 边拱颈性骨架顶部高程差及两肋相对高差不大于50mm；

c. 主拱拱肋顶部两肋相对高差不大于200mm，轴线偏位不大于100mm；

d. 塔顶水平偏位不大于50mm；

e. 施工索力与设计索力（见表1）差不大于10%

(4) 竖转工艺

扣索的张拉端布置在边拱拱肋的端部，在竖转过程中，主拱拱肋的角度在不断改变，扣索的索力也相应地不断变化，竖转时，将随动测取的油压值、位移值送到计算机内，经过计算对泵站比例阀发出控制信号，通过调节流量达到每束钢绞线受力均匀、运动同步，采取以高程为主、索力为辅的原则进行施工控制，具体施工步骤如下：

a. 扣索①、扣索②预紧至设计索力的50%，然后将平衡索③预紧至设计索力的50%；

b. 分级张拉扣索①、扣索②直至主拱拱肋起吊脱架，再将平衡索③张拉至设计索力，保持脱架状态12h进行结构观察；

c. 正式开始竖转，竖转到位后测取边拱支架的内力，进行边拱称重，按从拱脚到拱顶的顺序解除边拱支架的约束，必要时，调整边拱端部的

表1 转体过程扣索索力表（单位：KN）

扣索	竖转开始	竖转3°	竖转6°	竖转9°	竖转12°	竖转15°	竖转18°	竖转21°	竖转就位	平转
①	19471	19631	19735	19822	19839	19814	19767	19590	19484	19547
②	9725	8838	7998	7175	6421	5708	5019	4466	3842	3770
③	3620	3618	3614	3609	3605	3600	3595	3590	3585	3581

桥梁建设

配重,使转动体系处于平衡状态。

d.在塔顶索鞍部位锁定扣索①、扣索②,并将主拱脚临时固结。

(5)平转工艺

a.上转盘

上转盘由拱座、撑脚、中心转轴等组成(见图4),转动体系的重量由撑脚传递给下转盘,中心转轴仅起定位作用。

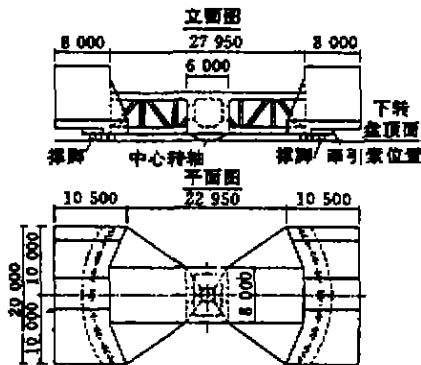


图4 上转盘构造(单位: mm)

b.下转盘

下转盘由环道、牵引体系、中心转轴等组成(见图5),为保证环道的平整度、光洁度,施工时将预埋环道顶面钢板的颈性骨架,用螺栓连接钢板与颈性骨架,精确调平后再灌注钢板下混凝土。任意3m弧长环道的高差不大于1mm。

c.牵引体系

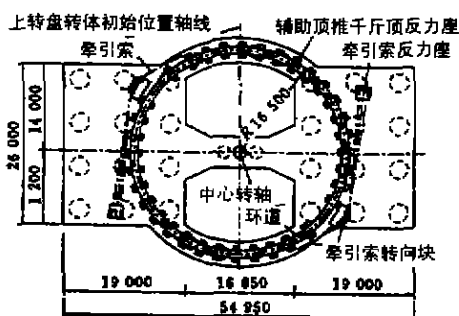


图5 下转盘平面布置图(单位: mm)

牵引体系主要包括牵引钢绞线、2组牵引千斤顶(每组4台)、多台辅助千斤顶组成,起动牵引力按静摩擦系数 $\mu_s=0.1$ 、转动时牵引力按动摩擦系数 $\mu_d=0.05$ 准备,实测起动牵引力约800t、静摩擦系数 $\mu_s=0.06$,实测转动时牵引力约400t、动摩擦系数 $\mu_d=0.03$ 。

d.施工步骤

(a) 调试牵引系统、清理、润滑环道,拆除有碍平转的障碍物。

(b) 先让辅助千斤顶达到预定吨位,再启动牵引千斤顶使转动体系起动,然后由牵引千斤顶拉动牵引平转。

(c) 在平转就位处设置限位卡梁,阻止撑脚到位后继续往前走。

(d) 平转基本到位后降低平转速度,采用点控牵引法对好主拱拱肋的中线。

(e) 恢复边拱支架,焊接上、下转盘的钢骨架,绑扎钢筋,清除杂物后浇注上、下转盘间的混凝土。

(6)合龙控制

平转施工完成后,对照表2加临时合龙时的温度修正值于半夜调整好主拱拱肋的标高,然后立即在主拱拱肋顶安装临时合龙构件,使之能承受两铰拱状态的温度力,保证合龙段在无应力状态下定位、焊接。

五、施工过程的稳定与拱轴线控制

1.钢管混凝土拱桥的非线性稳定分析

考虑大位移变形、拱轴线偏移、构件的极限承载力,进行拱桥的非线性稳定分析。

采用基于U.L列式的非线性有限元,以增量求解方式计算施工全过程。

表2 施工阶段主拱拱肋高程表

截面	制造坐标	平转合龙时	两铰拱	安装完钢纵横梁	灌注完拱肋混凝土	运营状态
L/4 X=92	77.280	77.082	77.250	77.234	77.174	77.105
L/2 X=172	92.131	91.961	91.995	91.938	91.818	91.615

桥梁建设

(1) 加载路径 (见图6)

工况0——钢管合龙, 形成无铰拱;

工况1~16——灌注主拱拱肋内混凝土。

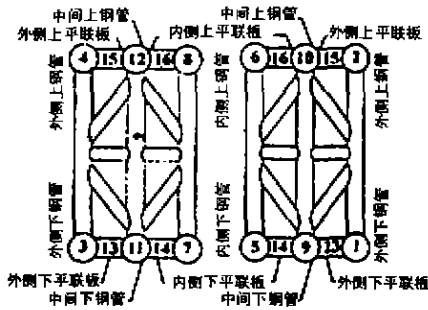


图6 管内混凝土灌注顺序图

(2) 非线性稳定计算模式

为了能模拟混凝土灌注过程的影响, 对每个灌注拱肋内混凝土的工况再细分为三个子工况。第一个子工况为灌注水平坐标为 (0, 62), 拱脚段、第二个子工况为灌注水平坐标 (62, 122) 中间段、第三个子工况为灌注水平坐标 (122, 172) 拱顶段, 极限荷载 P_{cr} 为

$$P_{cr} = K_2(P_c + P_d) \quad (1)$$

其中, P_c 本阶段为施工荷载, P_d 为此阶段前的外荷载。

按增量法求解非线性有限元方程组, 得出了结构的荷载-位移曲线, 曲线顶点对应的荷载就是拱桥所能承受的极限荷载, 本桥在施工阶段的稳定安全系数见表3。如果按

$$P_{cr} = \lambda_{cr} P_c + P_d, \quad K_2 = P_{cr} / (P_c + P_d) \quad (2)$$

计算稳定安全系数, 则工况1~16中的第二子工况的 K_2 在1.3~1.4之间不能通过, 这将使合理的施工加载方法无法采用, 丫髻沙大桥的顺利建成、充

分证实了由 K_2 判定施工稳定安全性的正确与合理性。

2. 拱肋内混凝土灌注顺序与拱轴线纠偏

由转体施工法形成的主拱拱肋, 由于摩擦力的影响拆除扣索后拱肋的轴线会发生横向偏移, 如果不采取措施而继续加载, 将会使这种偏移越来越大。本桥采用在灌注拱肋混凝土时偏载的方法进行纠正, 最后成桥的横向偏移值在15mm以内, 效果很好。

3. 混凝土收缩、徐变的影响

考虑钢管内混凝土的收缩、徐变后, 拱顶的挠度增加, 各截面钢管应力增大、混凝土应力减小 (见表4)。

表4 恒载作用下拱顶截面的挠度及应力

计入徐变	挠度 (m)	0.516	不计徐变	挠度 (m)	0.429
	应力 (MPa)	209.0		应力 (MPa)	170.8

六、结语

丫髻沙大桥主桥的规模和施工技术居同类型桥梁世界第一, 通过设计与施工的紧密结合, 将以上关键工序的设计要求编入施工图设计文件中, 有效地控制了施工单位的施工组织设计文件及相关工艺设计文件, 保证了大桥的顺利建成。

本桥解决了钢管混凝土拱肋的截面优化、非线性稳定分析、钢管内混凝土的徐变分析, 钢管拱肋的制造与安装技术标准、钢管拱肋的转体施工法等大跨径钢管混凝土拱桥的关键设计、施工技术, 为在平原地区大江大河上建设跨度500m左右的铁路、公路拱桥积累了宝贵的经验。

表3 施工阶段稳定安全系数

工况	K ₂	工况	K ₃	工况	K ₃	工况	K ₃	工况	K ₃	工况	K ₃	工况	K ₃	工况	K ₃
1-1	4.3	3-1	3.7	5-1	3.8	7-1	3.8	9-1	3.9	11-1	3.9	13-1	3.5	15-1	3.1
1-2	4.0	3-1	3.8	5-2	3.7	7-2	3.8	9-2	3.8	11-2	3.9	13-2	3.4	15-2	3.1
1-3	3.5	3-3	3.6	5-3	3.3	7-3	3.5	9-3	3.5	11-3	3.6	13-3	3.2	15-3	3.0
2-1	3.7	4-1	3.7	6-1	3.5	8-1	3.6	10-1	3.6	12-1	3.7	14-1	3.0	16-1	2.9
2-1	3.5	4-2	3.6	6-2	3.4	8-2	3.5	10-2	3.5	12-2	3.6	14-2	2.8	16-2	2.9
2-3	3.1	4-3	3.2	6-3	3.1	8-3	3.2	10-3	3.2	12-3	3.3	14-3	2.7	16-3	2.6