



长安大学

二〇〇八届毕业设计

济源逢石河特大桥设计书

学 院：公路学院
专 业：桥梁工程
姓 名：郝龙
学 号：2102040337
指导教师：陈偕民
完成时间：2008-6-10

二〇〇八年六月



毕业设计（论文）任务书

课题名称 济源逢石河特大桥设计

学院(部) 公路学院

专 业 桥梁工程

班 级 21020403

学生姓名 郝龙

学 号 2102040337

4 月 28 日至 6 月 12 日共 7 周

指导教师(签字) _____

教学院长(签字) _____

2008 年 月 日

一、设计内容（论文阐述的问题）

- 1、桥梁结构的总体布置—根据设计原始资料拟定 3—4 个桥型初步方案
- 2、方案比选—从材料（造价），施工设备和能力，工期，维修与运营，抗震性能，修复，美观等诸方面对各初步方案进行全面比较和分析，确定推荐方案
- 3、上部结构设计—选择类型、拟定截面尺寸、完成内力计算和配筋设计、完成强度验算、疲劳验算、稳定性验算、变形验算
- 4、下部结构设计—选择材料类型、拟定结构和主要截面尺寸
- 5、施工方法设计—根据桥梁所处环境和施工条件，选择合理可行的施工方法和程序
- 6、绘制施工图纸
- 7、编写计算说明书

二、设计原始资料（实验、研究方案）

- 1、桥型地质、地形图（见附图）
- 2、设计荷载：公路 I 级
- 3、桥面净空：2×净 10.75 米（两侧各设 0.5 米护栏）
- 4、桥下净空：满足泄洪要求
- 5、气温：最高有效温度 34℃，最低有效温度-10℃
- 6、冲刷深度：一般冲刷线低于河床 1m，最大冲刷线低于河床 2m
- 7、其它：地震动峰值加速度 0.2g，设计水位和最低水位见附图

三、设计完成后提交的文件和图表（论文完成后提交的文件）

1、计算说明书部分：

- （1）桥梁结构的总体布置和初步方案拟定
- （2）方案比选论述
- （3）结构设计
 - 内力计算和配筋计算
 - 强度验算、疲劳验算、稳定性验算、变形验算
- （4）施工方法介绍
- （5）对所完成设计的总结和体会
- （6）中文摘要和外文摘要

2、图纸部分：

- (1) 桥型方案比较图
- (2) 推荐方案的总体布置图
- (3) 推荐方案结构的一般构造图及主要工程数量
- (4) 推荐方案的钢筋构造图
- (5) 施工方法示意图

要求：提交的图纸中既要有计算机绘制图纸，也要有手工绘制的图纸。

四、毕业设计（论文）进程安排

序号	设计（论文）各阶段名称	日期（教学周）
1	开题报告及外文文献翻译	4月28日—5月4日
2	比选方案确定	5月5日—5月11日
3	桥梁构造设计	5月12日—5月18日
4	各部分图纸绘制	5月19日—5月25日
5	桥梁设计计算与结构内力验算	5月26日—6月1日
6	设计计算说明书书写	6月2日—6月12日

五、主要参考资料

《土木工程专业毕业设计指南—桥梁工程分册》陈忠延 等编著，水利水电出版社出版

《桥梁工程》教材

《结构设计原理》教材

《基础工程》教材

《桥涵水文》教材

《桥梁计算示例集》人民交通出版社

《桥梁上部结构计算示例（二）》重庆交通学院等校合编

《桥梁设计常用数据手册》人民交通出版社出版

长安大学毕业设计（论文）开题报告

课题名称	济源逢石河特大桥				
课题来源	自选项目	课题类型	工程设计	指导教师	陈偕民
学生姓名	郝龙	学 号	2102040337	专 业	桥梁工程

（内容包括：课题的意义，国内外发展状况，本课题的研究内容、方法、手段及预期成果，任务完成的阶段安排及时间安排，完成任务所具备的条件因素等。）

一、课题意义

这次毕业设计的济源逢石河大桥为双塔钢混组合结构斜拉桥，其主塔部分采用钢筋混凝土结构，主梁采用单箱四室钢主梁结构。在三项比选方案中，根据实用、经济结构美观的原则最终选择主跨为 260m 的钢主梁斜拉桥，其结构轻盈、受力均匀，充分体现了斜拉桥的优势和特色。

二、国内外发展情况

斜拉桥桥型虽然很早就有了，但近 40 年才得到广为应用。这是因为 18 世纪初期，有几座这种形式的桥垮了，加之法国工程师纳维（Navier）调查事故原因，得到悬索桥的形式较为理想的结论，致使斜拉桥形式长期得不到应用。

1938 年，德国的迪辛格尔（F.Dischinger）对斜拉桥开始作新的研究，1949 年发表了他的研究成果，这对德国及世界都有所触动。

斜拉桥很快发展的主要原因：

- （1）超静定结构理论分析的发展。
- （2）钢桥面板的发展。
- （3）钢索材料、制造、锚固方式和各种防腐工艺的发展。
- （4）模型试验和电子计算机计算技术的发展。

以上技术的发展，证明斜拉桥在许多方面比悬索桥优越。首先，斜拉桥型在刚性、经济性及架设方面都比悬索桥优越；其次，斜拉桥的最大优点是不需要像悬索桥那样笨重的钢索锚固装置；另外，为了获得长大桥良好的抗风稳定性，斜拉桥的主梁采用扁平断面，这种截面减震性能相当高，所以在抗风抗震方面比悬索桥更优秀；最后，斜拉桥可以用钢索来抵抗主梁的扭转振动，而悬索桥必须以加劲梁来抵抗扭矩，这也是悬索桥的不足之处。

国外，对近代悬索桥和斜拉桥做了比较。结果表明，在许多方面斜拉桥比悬索桥优越。莱翁哈特（Leonhardt.F.）和蔡尔奈尔（Zellner.W.）曾在“关于跨度大于 600m 悬索桥和斜拉桥的对比”（《国际桥协论文集》第 32 卷，1972 年）一文中

指出：就刚度讲，悬索桥比斜拉桥差，就拉索用钢量来说，悬索桥比斜拉桥多。

一般来说，斜拉桥的优点有以下：

（1）斜拉桥的活载挠度比悬索桥小。当由于集中荷载引起的挠度均在容许值范围内时，斜拉桥主梁所需的变曲刚度可以比悬索桥小。

（2）假定塔高度相同时，斜拉桥的钢索重量比悬索桥小 30%—50%。

（3）对于钢斜拉桥来说，由于钢索拉力的水平分力所引起的主梁钢重的增加，虽然对于跨度为 300m 以上的斜拉桥是有影响的。但即使跨度在 1400m 以上，随着钢重增加而增加的费用，比悬索桥的钢索锚固费还要便宜。这是因为钢桥面板是由最小板厚所决定的，它对于承受活载弯矩是有富余的，因此它还可以承受轴向力。

（4）不论用何种方法架设斜拉桥都比悬索桥方便，节省费用。

（5）斜拉桥属于高次超静定结构，其结构的刚度好，只要有一个好的主梁断面，就可以得到较好的抗风稳定性。还因为有斜缆索的斜拉桥，尤其是密索斜拉桥，索能很快干扰主梁的振动，以使整个超静定结构减震，防止危险振动的形成。而悬索桥则较容易形成大振幅的共振状态，因此，斜拉桥的主梁不需要很大的抗扭振动。

斜拉桥有一些明显的优点，这是值得肯定的。但是，斜拉桥和悬索桥哪一个优点多，应该是有一定前提条件来决定的，不能一概而论。从现有各式桥的跨度记录来看，斜拉桥目前已经达到 890m；1998 年日本建成的明石海峡桥已经达到 1990m。而悬索桥早在 1931 年就已经达到了 1067m（美国华盛顿桥），1985 年英国建成的恒比尔桥已达到 1410m。此外，有人认为，在特大跨度范围内，就材料用量来讲，悬索桥的梁和塔要比斜拉桥的梁和塔省得多。虽然悬索桥的主缆耗费钢材甚多，但因主缆是由高强钢丝所制成的受拉构件，容许应力高，截面应力均匀，其承载的效率也就比那由结构钢制成的梁和塔为高。这样，悬索桥用的料也不一定比斜拉桥多。故何种桥型用料较省，还需定量分析。

虽然经历近几年的发展，斜拉桥仍存在一定的技术难点和困境需进一步解决：

（1）超大跨径斜拉桥的结构体系和力学性能问题。为避免过深和过于昂贵的深水基础，跨海工程常常要建造主跨 2000m 以上的超大跨桥梁。当海峡很宽时，还需要考虑采用连续多跨地超大跨度桥梁方案。如果基岩很难以修筑悬索桥的锚碇时，就只有考虑斜拉桥方案了，甚至要采用多跨连续的斜拉桥方案。而跨度超过 2000m

斜拉桥结构存在一系列的问题尚待解决：超大跨度斜拉桥的面内屈曲稳定问题；风载下的空气静力扭转发散和侧向弯扭屈问题；超大跨度主梁的侧向变形和颤振稳定性问题。

(2) 轻质、高强、耐腐蚀高性能材料的开发。为减轻超大跨径斜拉桥结构的自重，研究高性能材料至关重要。不仅须发展耐腐蚀混凝土，纤维加劲塑料(Fiber-reinforced-plastics)也是一个方向。

(3) 超大跨斜拉桥抗灾性能及措施研究。

三、本课题研究的内容和方法、手段及预期成果：

这次设计初步掌握斜拉桥的设计流程，对斜拉桥设计中存在问题得到注意，并有了更深层次的理解。此次设计分析采用 MIDAS CIVIL 软件进行，本次设计预期完成全桥设计相关的计算和验算，并对于斜拉桥相关的优势和缺点有进一步熟悉，并提高有限元软件 MIDAS CIVIL 和 AUTOCAD2004 使用技能。

四、任务完成阶段安排及时间安排：

1	开题报告及外文文献翻译	4 月 28 日—5 月 4 日
2	比选方案确定	5 月 5 日—5 月 11 日
3	桥梁构造设计	5 月 12 日—5 月 18 日
4	各部分图纸绘制	5 月 19 日—5 月 25 日
5	桥梁设计计算与结构内力验算	5 月 26 日—6 月 1 日
6	设计计算说明书书写	6 月 2 日—6 月 12 日

五、完成任务所具备的条件要素：

这次设计主要用到的工具有：个人家用计算机、MICROSOFT OFFICE2003、韩国 MIDAS CIVIL、桥梁 CAD 绘图软件 (AUTOCAD2004)、图板、丁字尺等

指导教师意见及建议：

指导教师签名：

年 月 日

注：1、课题来源分为：国家重点、省部级重点、学校科研、校外协作、实验室建设和自选项目；课题类型分为：工程设计、专题研究、文献综述、综合实验。

2、此表由学生填写，交指导教师签署意见后方可开题。

摘要

本设计的步骤为：根据设计任务要求，依据现行公路桥梁设计规范, 综合考虑桥位的地质、地形条件，经初选后提出了斜拉桥方案、悬索桥、拱桥三个比选桥型。按“实用、经济、安全、美观”的桥梁设计原则，比较三个方案的优缺点。比选后把斜拉桥作为主推荐设计方案，进行了结构细部尺寸拟定、静活载内力计算、钢主梁应力强度、疲劳验算、斜拉桥整体稳定验算、斜拉桥整体强度应力验算、拉索应力及疲劳验算、钢主梁细部结构设计。经分析比较及验算表明该设计计算方法正确，内力分布合理，符合设计任务的要求。

关键词：方案;斜拉桥；拱桥；悬索桥；主推荐设计方案；结构分析；验算。

ABSTRACT

Topic: Cable—stayed bridge

Department: Bridge, Highway College, Chang'an University

Abstract: the process of designment: According to the design assignment and the present Highway Bridge Specifications, Take the geological and the landform of the bridge site for further analysis, after preliminary selection, three bridge type schemas are presented, they are Cable-stayed bridge, Suspension bridge and Arch bridge. Comparing their characters comprehensively, the Cable-stayed bridge is selected as the main design scheme by the philosophy of bridge design as “Practicability, Economy, Security, Beauty”. Through drawing up of structure's dimension, internal force calculation of dead and living load, steel beam stress and strength calculation, fatigue stress calculation, the whole bridge strength calculation, checking computation of cable stress and fatigue stress, living load distortion, drawing up of steel beam's dimension. The conclusion can be drawn that the design is up to the assignment.

Key word: Design ; cable-stayed bridge; Arch bridge; Suspension Bridge; Steel beam; Fitague stress; the main design scheme for further analysis ; Structure analysis and checking computation

目录

第一章	概 述	1
	1.1 设计依据	
	1.2 技术标准	
	1.3 地质条件	
	1.4 本桥采用材料.....	3
	1.5 采用规范	
第二章	桥型方案比选.....	4
	2.1 构思宗旨	
	2.2 比选标准	
	2.3 比选方案	
	2.4 方案点评	9
	2.5 方案确定	
第三章	斜拉桥构造设计	10
	3.1 总体设计	
	3.2 主梁设计	
	3.3 索塔设计	18
	3.4 基础设计	
	3.5 斜拉索设计	
	3.6 辅助墩设计	21
	3.7 边跨临时压重设计	
	3.8 附属设施设计	
	3.9 桥面铺装设计	
第四章	模型建立信息.....	22
	4.1 作用	
	4.2 计算方法概述	23
	4.3 模型建立	
	4.4 模型分块.....	24

4.5 主梁及索塔截面特性	26
4.6 初索力计算	27
4.7 斜拉桥基频计算	29
第五章 整体静力分析	30
5.1 主梁和索塔控制断面内力和应力值	
5.2 主梁主要内力图	31
5.3 主塔主要内力图	32
5.4 主梁主要应力图	
5.5 斜拉索索力	
第六章 施工阶段内力分析	37
6.1 施工方法介绍	
6.2 倒装施工分析流程	
6.3 主要施工阶段图示	38
6.4 施工阶段主梁内力计算图	40
第七章 强度验算	43
7.1 钢主梁强度验算	
7.2 主塔单元强度验算	59
第八章 拉索强度与疲劳验算及钢主梁疲劳验算	63
8.1 拉索强度与疲劳验算	
8.2 钢主梁疲劳验算	53
第九章 斜拉桥主梁稳定性验算	71
9.1 验算原理	
9.2 斜拉索修正弹性模量计算	71
9.3 缆索弹簧刚度 K 求解	74
9.4 主梁面内稳定临界轴力计算	77
9.5 主梁稳定性验算及屈曲安全度计算	74
第十章 斜拉桥变形验算	80
10.1 验算规定	

致谢.....	83
参考文献.....	84
附录：科技论文翻译.....	85

订

线

第一章 概述

该桥在济源逢石河原桥旧址改建而成，原桥为六跨连续刚构桥，由于交通量增加且年久失修已无法满足当地的经济发展。因此在 2008 年 4 月 24 日，××市交通局决定予以拆除重建。新桥桥位位于济源逢石河旧桥处，桥跨方向由南至北，桥宽 22.5m，采用四车道设置，桥梁总长 530m，连接南北高速主干道，不设人行道。此桥被列为该市规划的“三纵三横”公路主骨架的重要组成部分，北连 A 市高速公路，南同时连接 B 市和 C 市两个历史名城。

1.1、设计依据

(1) 桥位地质、地形剖面图（见图纸 1—1）

(2) ××市交通局提供的测定桥址气温状况：最高有效温度 34°C ，最低有效气温 -10°C 。

(3) 桥址处河床冲刷深度：一般冲刷线低于河床 1m，最大冲刷线低于河床 2m。

(4) ××市交通局提供的测定桥址地震动峰值 $0.2g$ 。

(5) 桥址处设计水位和最低水位（见图纸 1—1）

1.2、技术标准

(1) 路线道路等级：城市 II 级主干道

(2) 设计行车速度：100km/h

(3) 桥面总宽 22.5m，其中机动车道为双向四车道 $2\times 7.5\text{m}$ ；机动车分隔带 2.5m；栏杆 $2\times 2.5\text{m}$ ，不设人行道。

(4) 设计荷载：公路 I 级

(5) 桥上纵坡，平、竖曲线半径等按《城市道路设计规范》（CJJ37—90）及规划所给的标高综合考虑。

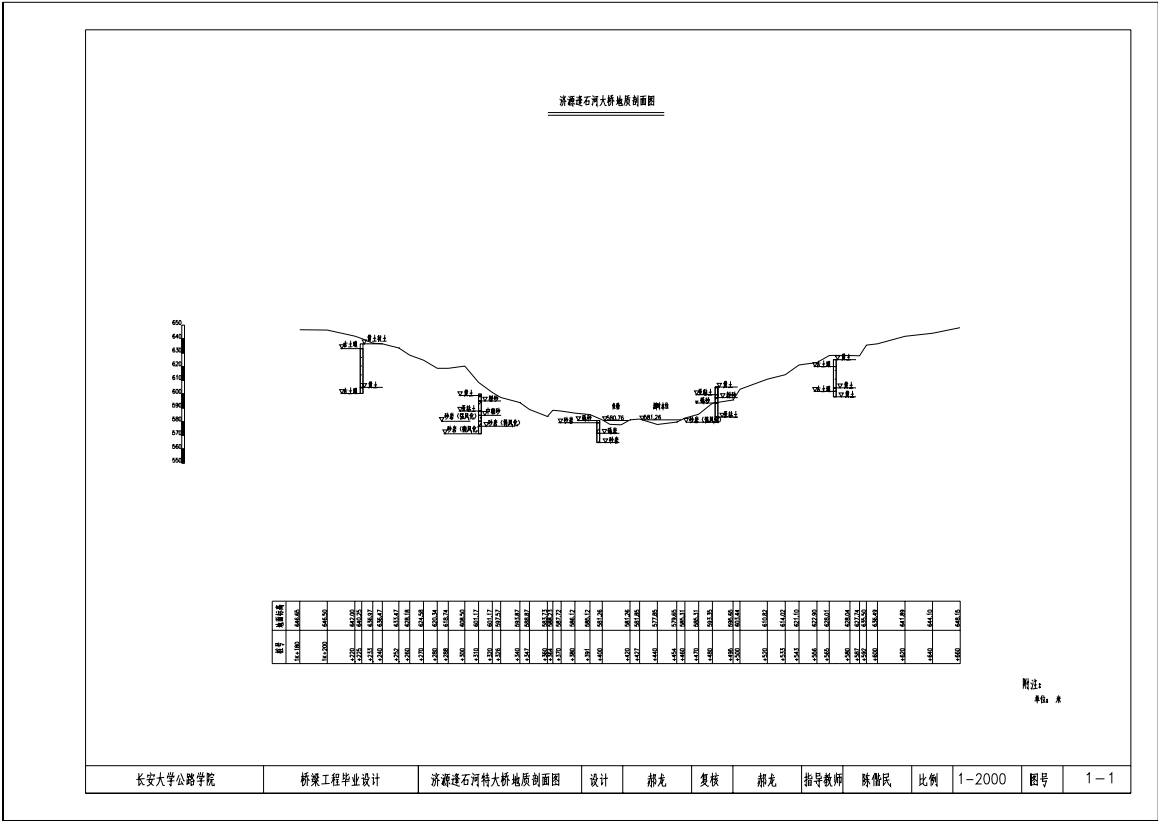
(6) 设计洪水频率：百年一遇

1.3、地质条件

(1) 基本干枯。

(2) 地形图（见插图—1）：此处桥址为典型长年干枯河谷地质条件，河谷底部有一鱼塘，水位甚低。

装
订
线



插图一1

(3) 地质条件表：单位设置（米、千牛）

地质取样报告		
ZK1+224		
标高 636.50	相对标高 550+86.5	黄土状土
633.00	83	古土壤
604.80	54.8	黄土
600.50	50.5	古土壤
K1+310		
598.87	48.87	黄土
596.87	46.87	粉砂
594.97	44.97	亚粘土
587.67	37.67	中粗砂
584.57	34.57	亚粘土
580.17	30.17	砂岩（强风化）
576.57	26.57	砂岩（弱风化）
571.17	21.17	砂岩（微风化）
K1+407		
580.76	30.76	砾砂

579.16	29.16	砂岩
571.56	21.56	砾岩
564.76	14.76	砂岩
K1+529		
605.02	55.02	黄土
599.52	49.52	亚粘土
597.47	47.47	粉砂
593.52	43.52	砾砂
583.32	33.32	亚粘土
579.52	29.52	砂岩（强风化）
K1+605		
624.99	74.99	黄土
619.99	69.99	古土琅
604.49	54.49	黄土
601.99	51.99	古土琅
597.99	47.99	黄土

1.4、本桥采用材料：

混凝土：C50

混凝土桥面铺装材料：C40 混凝土

钢桥面板铺装材料：改性沥青 SMA；

预应力筋： ϕ^s15 钢绞线

非预应力钢筋：直径 $\geq 12mm$ 的用 HRB335 螺纹钢，直径 $\leq 12mm$ 的用 R235 光圆钢筋

锚具：OVM 锚

钢板：GB03（S） R345 钢材

1.5、采用规范：

- （1）、JTG D60-2004 《公路桥涵设计通用规范》
- （2）、JTG D61-2005 《公路桥涵及混凝土桥涵设计规范》
- （3）、JTJ 025-86 《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》 / 《公路钢桥规范》
- （4）、JTJ 027-96 《公路斜拉桥设计规范》
- （5）、JTJ D63-2007 《公路桥涵地基与基础设计规范》

第二章 桥型方案比选

2.1、构思宗旨

(1) 符合××市发展规划，满足当地快速发展的经济的交通需要，分孔分跨与原桥位错开。

(2) 桥梁结构造型简洁、轻巧，不与原桥型相似，形成当地一道新的风景线，以体现当地的经济实力，和现代建桥风格，国家的建桥水平。

(3) 设计方案力求结构新颖，尽量采用新式桥型，既要满足美观要求，又要是受力合理，结构力线鲜明，轻盈可靠且施工方便。

2.2、比选标准：

主要依据安全、功能、经济 and 美观。其中以安全 and 经济为重。至于桥梁美观，要视经济与环境条件而定。

2.3、比选方案

2.3.1 比选方案一：双塔斜拉桥方案

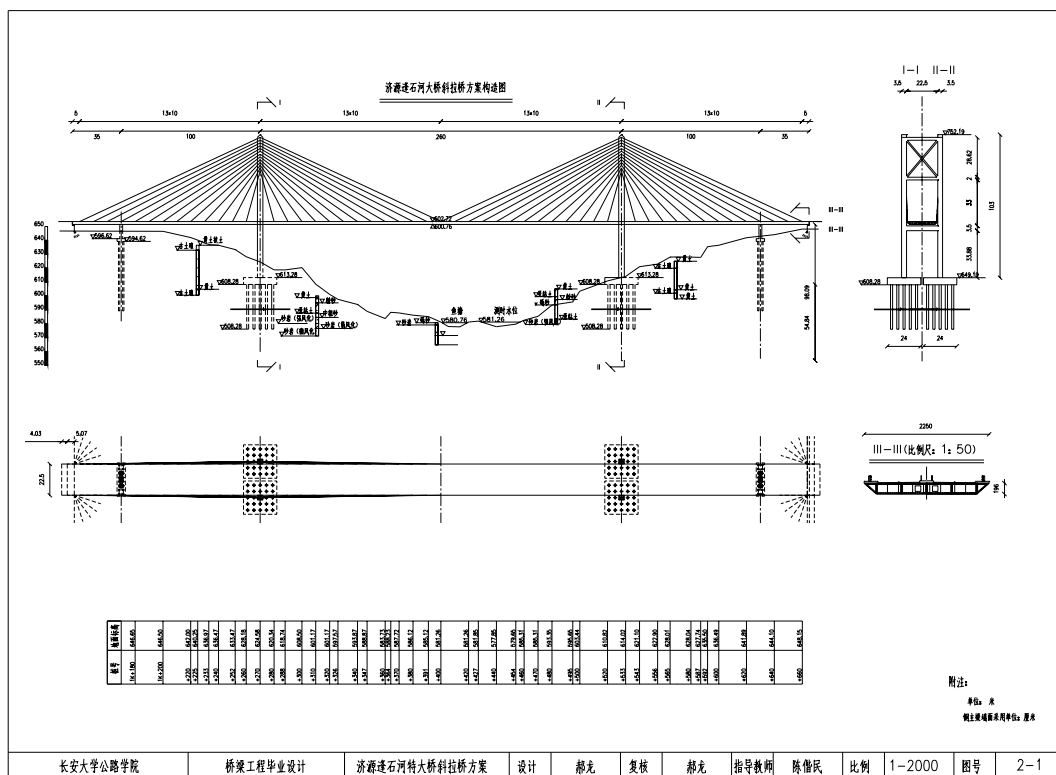


插图-2

(1) 孔径布置: 跨径 35+100+260+100+35 (米), 全长 530 米。此桥面较宽, 采用 3% 横坡; 护栏采用金属制桥梁护栏 ($D \geq 25\text{cm}$); 其桥梁结构纵横端面、桥宽及桥面横坡布置见 (插图-2)

(2) 结构构造:

1) 主梁: 采用单箱六室钢主箱梁, 主梁高 1.96m, 为主跨的 1/132, 顶板厚度 20mm, 腹板厚度 30mm, 底板厚度 30mm, 四车道桥面布置 (细部尺寸见图纸 3-4)。

2) 索塔: 为双塔混凝土结构, 桥面以上塔高 62.62m, 横桥向宽 3.5m, 纵向 4m, 塔顶做成尖头, 塔墩固结, 塔梁分离, 采用漂浮体系。

3) 斜拉索: 索塔采用扇形布置, 每个索面张拉 13 对拉索, 索距 10m, 采用密索布置, 全桥共 4 个索面。所有拉索一端锚固在钢主梁内部, 另一端锚固在主塔塔壁。

4) 辅助墩: 采用空心薄壁矩形钢筋混凝土墩, 长 1800cm, 宽 200cm。

5) 承台: 采用钢筋混凝土结构。辅助墩承台: 尺寸: $2400 \times 600 \times 200$ (厘米); 主塔承台: 尺寸: $2400 \times 600 \times 500$ (厘米); 承台内布置构造钢筋和局部承压钢筋。

6) 群桩基础: 采用圆柱形摩擦桩 (锤击, 静压锤撞), 主塔群桩基础单桩尺寸: $\phi 150$ 辅助墩群桩基础单桩尺寸 $\phi 100$; 群桩采用矩形对称形。(见图纸 3-2、图纸 3-5、图纸 3-7)

其中中距符合公路桥涵地基与基础设计规范 (JTG D63-2007) 规定: 摩擦桩: 锤击桩、静压沉桩, 在桩端处的中距不应小于桩径 (或边长) 的 3 倍, 对于软土地基宜适当增大; 振动沉入砂土内的桩, 在桩端处的中距不应小于桩径 (或边长) 的 4 倍。桩在承台处的中距不应小于桩径 (或边长) 的 1.5 倍。

主塔处桩基础桩径中距: 横向 450cm、纵向 450cm。

辅助墩承台处桩基础桩径中距: 横向 300cm、纵向 200cm。

主塔处桩基础群桩设置: 5 排 5 列矩形对称陈列桩。

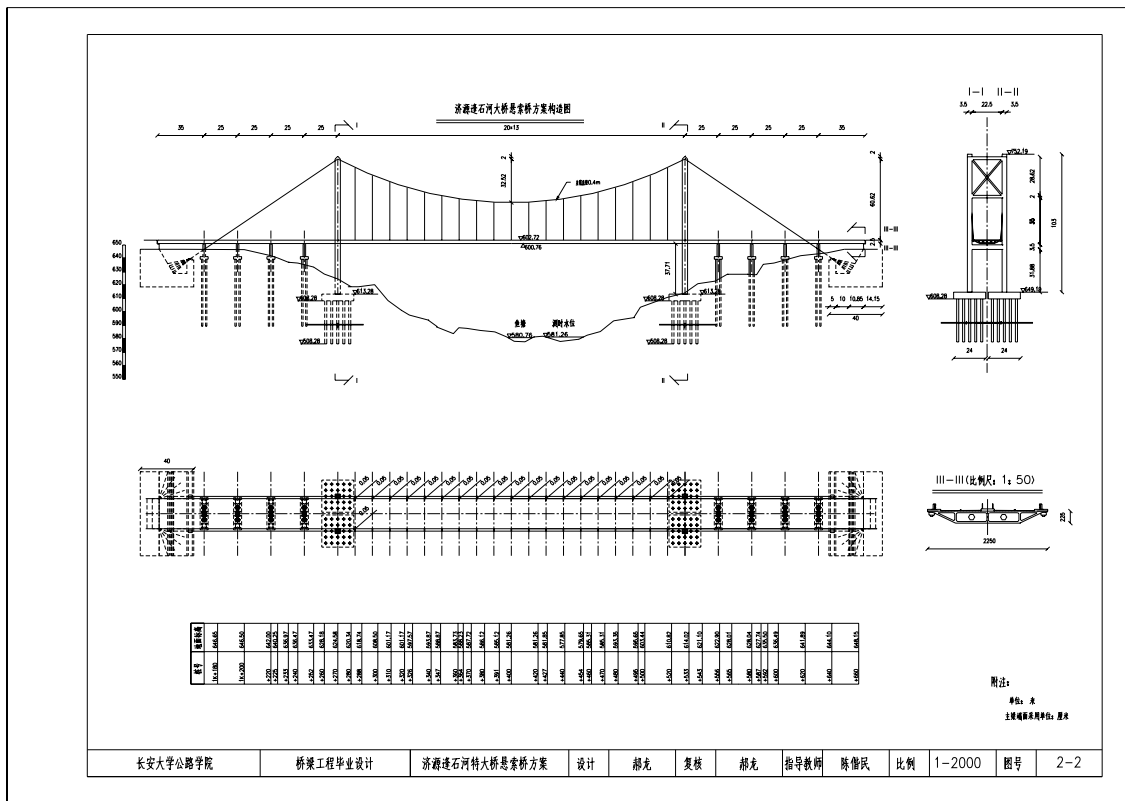
辅助墩处桩基础群桩设置: 2 排 8 列矩形对称陈列桩。

7) 施工方案: 采用脚手架设置边跨施工, 后采用对称张拉方法, 从边跨向中跨悬臂施工, 悬臂施工阶段采用移动模架施工。两边钢主箱梁采用同时拼装, 后再中跨合拢。

8) 主要工程量:

斜拉桥方案主要工程量				
结构	材料	混凝土（吨）	钢材（吨）	钢绞线（吨）
上部结构	主梁		28.86	—
	主塔	19.09	—	—
	拉索	—	—	2.27
下部结构	辅助墩	5.80	—	—
	承台	79.20	—	—
合计		104.09	28.86	2.27

2.3.2 比选方案二：地锚式悬索桥方案



插图—3

（1）孔径布置：跨径跨径 35m+4×25m+260m+4×25m+35m，全长 530 米。此桥面较宽，采用 3%横坡；护栏采用金属制桥梁护栏（D≥25cm）；桥梁结构纵横端面、桥宽及桥面横坡布置见（插图—3）。垂跨比：1/8，类型：混凝土；梁高 2.25m 梁高/跨径=1/115，高宽比=1/10；塔数：2。

（2）结构构造：

1）主梁：采用单箱四室混凝土主箱梁，主梁高 2.25m，为主跨的 1/116，顶板

厚度 30cm，腹板厚度 30cm，底板厚度 30cm，四车道桥面布置，桥梁宽度、桥面横坡与方案一一致（细部尺寸见图纸 3-3）。

2)、索塔：为双塔混凝土结构，桥面以上塔高 62.62m，横桥向宽 3.5m，纵向 4m，塔顶做成尖头。

3)、下部结构：同方案一，两个主墩基础均采用群桩基础，分别以基岩为持力层。边墩亦采用群桩基础。（分别见图纸 3-2、图纸 3-7）

4)、加劲梁架设：主梁采用预制块预制，吊机起吊挂篮，进行箱梁拼装。

5) 群桩基础：与方案一一致。（见图 3-2、图 3-5、图 3-7）

6、施工方案：岸跨及边跨采用有支架施工，主塔建成后，进行主缆架设，主缆架设采用空中送丝法（AS 法）。

7) 主要工程量：

悬索桥方案主要工程量				
	材料			
结构		混凝土（吨）	钢材（吨）	钢绞线（吨）
上部结构	主梁	93.73	—	—
	主塔	19.09	—	—
	吊杆	—	0.06	—
	主缆	—	—	21.16
下部结构	边墩	32.00	—	—
	承台	79.20	—	—
合计		224.02	0.06	21.16

2.3.3 比选方案三：下承式拱桥方案

（1）、孔径布置：跨径 35m+5×26m+200m+5×26m+35m，全长 530 米。此桥面较宽，采用 3%横坡；护栏采用金属制桥梁护栏（D≥25cm）；桥梁结构纵横端面、桥宽及桥面横坡布置见（图纸 2-3、图纸 3-3）。矢跨比 1/5，类型：混凝土；梁高 2.25m；梁高/跨径=1/89，高宽比=1/10；主墩数 2 个。

（2）结构构造：

1) 主梁：采用单箱四室混凝土主箱梁，主梁高 2.25m，为主跨的 1/116，顶板厚度 30cm，腹板厚度 30cm，底板厚度 30cm，四车道桥面布置，桥梁宽度、桥面横坡与方案一一致（细部尺寸见图 3-3）。

2)、主墩：为混凝土结构，横桥向宽 3.5m，纵向 4m（见插图—4）。

3)、主拱圈：钢管混凝土结构，钢管壁厚 1cm，外直径 1m，内充 C50 混凝土。

4)、下部结构：同方案一，两个主墩基础均采用群桩基础，分别以基岩为持力层。边墩亦采用群桩基础。（分别见图纸 3-2、图纸 3-7）

5) 主梁施工：主梁采用加劲骨架下的挂篮现浇施工。

7) 施工方案: 岸跨及边跨采用有支架施工, 主拱圈建成后, 进行进行骨架下吊篮现浇施工。



拱桥方案主要工程量				
	材料	混凝土（吨）	钢材（吨）	钢绞线（吨）
结构				
上部结构	主梁	93.73	—	—
	主墩	18.90	—	—
	吊杆	—	0.04	—
	主拱圈	6.74	4.97	—
下部结构	边墩	40.00	—	—
	承台	79.20	—	—
合计		238.58	5.01	0.00

各方案中细部构造材料工程量分项计算表格:

正文 共 94 页 第 8 页

钢主箱梁	1.44	260.00	374.86	76.98	28856.50	28.86
混凝土箱梁	14.42	260.00	3749.31	25.00	93732.83	93.73
（悬索桥、拱桥）边墩	16.00	10.00	160.00	25.00	4000.00	4.00
主塔+主墩	7.56	101.00	763.56	25.00	19089.00	19.09
主塔处承台	576.00	5.00	2880.00	25.00	72000.00	72.00
边墩/辅助墩处承台	144.00	2.00	288.00	25.00	7200.00	7.20
斜拉桥拉索	0.00	7280.00	28.89	78.50	2268.20	2.27
悬索桥吊杆	0.00	356.88	0.70	78.50	55.00	0.06
拱桥吊杆	0.00	263.62	0.52	78.50	40.62	0.04
悬索桥主缆	0.50	537.08	269.61	78.50	21164.71	21.16
拱圈（钢圈）	0.60	106.00	63.27	78.50	4966.80	4.97
拱圈（混凝土填充）	2.54	106.00	269.74	25.00	6743.46	6.74
拱桥主墩	7.56	100.00	756.00	25.00	18900.00	18.90
斜拉桥辅助墩	23.20	10.00	232.00	25.00	5800.00	5.80

2.4、方案点评

（1）根据设计构思宗旨，桥型方案应满足结构新颖、受力合理、技术可靠、施工方便、造价合理的原则。以上三个方案都基本满足这一要求。

（2）、从结构外形上看，三个方案分为拱式、斜拉桥、悬索桥三种桥式。从受力上看，都是组合体系桥梁，各具特点。但是方案一力线更加鲜明，且基础工程量较少，外形明朗。斜拉桥方案体现了设计构思的基本思想，符合高速公路地区规划的要求，并与周围景致相协调。此方案满足城市长远规划，技术先进、结构合理、工艺成熟。

（3）受力方面，斜拉桥 260m 跨，塔高适中，采用钢主梁，大为减轻自重，提高了使用性能。采用塔墩固结、塔梁分离的漂浮体系，使结构受力明确，提高了抗震性能。主梁采用箱梁结构，提高了抗扭和抗风性能。

（4）从材料用量上，第一方案虽然在钢材使用上较多，不过混凝土用量仅为第二、第三方案的一半。充分发挥了，钢主梁混凝土斜拉桥，钢混合用的良好结合。节省了工程量和工程代价。

（5）从施工难度上，济源逢石河大桥水位太低，不适宜用起吊机起吊拼装，但采用钢主梁的斜拉桥可依靠挂篮在桥头拼装的办法施工。

2.5、方案确定：

总结：经过反复思索和比较，方案一表现突出，符合安全、功能、美观要求，体现了当前的建桥技术水平，能够胜任××市的交通建设规划要求。因此确定方案一为推荐方案。

第三章 斜拉桥构造设计

3.1 总体设计

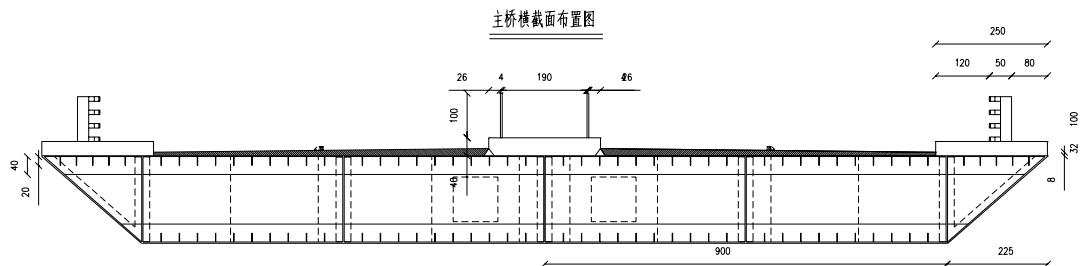
济源逢石河大桥为 35m+100m+260m+100m+35m 五跨连续双塔钢箱梁斜拉桥，见图 2-1。采用门形双立柱混凝土塔，截面采用 4×3.5m 矩形空心截面。南北双塔均高 103m，两个索塔均为群桩基础。主梁采用全焊扁平封闭钢箱梁，其上缘采用正交异性板结构设，不等间距纵横加劲肋。钢主梁高 1.96m，宽 22.5m。横隔板间距为 5m，内不设纵向横隔板。斜拉索采用平行钢绞线拉索，标准索距为 10m，为密索结构。索塔下不设竖向支撑，采用全飘浮体系。斜拉索下端锚固于钢箱梁内部边室的斜拉索锚固梁上。上端对称锚固于索塔上部塔柱矩形断面的锚固块上。拉索索面采用沿塔中心线完全对称布置，索面为扇形布置，在边跨桥墩处，设定施工阶段临时压重 100KN，以消除辅助墩在施工阶段的负反力，使用阶段不设压重。

3.1.1 采用材料：单位设置（米、千牛）

序号	类型	材料	标准	名称	弹性模量	泊松比	热膨胀系数[T]	容重 kn/m ³
1	C50	混凝土	JTG04(RC)	C50	3.45E+07	0.2	1.00E-05	2.50E+01
2	拉索一 Strand1 860	钢材	JTG04(S)	Strand1 860	1.95E+08	0.3	1.20E-05	7.85E+01
3	R235	钢材	无		2.10E+08	0.3	1.20E-05	7.70E+01
4	HRB335	钢材	无		2.00E+08	0.3	1.20E-05	7.70E+01
5	C50 无重量	用户定义	无		3.45E+07	0.2	1.00E-05	0.00E+00
6	钢主梁	钢材	GB03(S)	Q345	2.06E+08	0.3	1.20E-05	7.70E+01

3.2 主梁设计

3.2.1、总体布置：



插图—5

主梁为扁平封闭钢箱梁，其上翼缘为正交异性板结构。（见插图—5）。桥面布置按 $7.5 \times 2\text{m}$ 四车道布置，车道宽 3.75m ，两侧各设 2.5m 路缘带，护栏外侧布置 0.8m 检修道，桥面总宽 22.5m 。

3.2.2、主梁材料的要求：

钢箱梁主体结构和临时匹配件均采用 Q345D 钢，符合 GB/T-03 的要求，为保证钢板的焊接性能及低温冲击韧性，要求其碳当量 (C_{eq}) 不大于 0.44% 。因其外侧锚箱受力要求，腹板钢材要求做抗层状撕裂试验。为满足抗层状撕裂要求，腹板钢材的硫、磷量均不应大于 0.01% 。钢箱梁使用 F5004-H08A 系列钢结构埋弧焊接材料。

3.2.3、主梁断面选择：

桥址处位于河谷之处，谷深达 100m ，长年风力较强，扁平箱梁风阻较小，迎风面较小。因此，选择扁平钢箱梁是合理的。

3.2.4、钢箱梁设计：

3.2.4.1 钢箱梁的主要尺寸拟定：

钢箱梁高（中心线处） 1.96m ，顶面设双向 3% 横坡。顶板宽 22.5m ，底板宽 18m ，斜底板宽 2.25m 。顶板厚 2.0cm ，底板厚 3.0cm ，腹板厚 3.0cm ，斜底板厚 3.3cm 。

顶板和底板均采用矩形实心肋加劲，腹板采用钢板加劲。

3.2.4.2 细部构造设计与验算：

1) 顶底板板厚验算：

顶底板最小板厚计算：

受压翼缘必须满足的最小板厚：

受压翼缘板最小板厚 t					
钢材种类(相当于国标 GB)		SS400, SM400 (Q235)	SM490(Q345)	SM490Y, SM520(Q370)	SM570(Q420)
钢材板厚	$40 \geq t$	$b/(56fn)$	$b/(48fn)$	$b/(46fn)$	$b/(40fn)$
	$40 < t \leq 75$	$b/(58fn)$	$b/(50fn)$	$b/(46fn)$	$b/(40fn)$

mm	75<t≤100	b/(58fn)	b/(50fn)	b/(48fn)	b/(42fn)
----	----------	----------	----------	----------	----------

注： $f = 0.65\varphi^2 + 0.13\varphi + 1.0$ ； $\varphi = [\sigma_1 - \sigma_2] / \sigma_1$ ； σ_1 、 σ_2 ：板件边缘应力（压应力为正）， $\sigma_1 > \sigma_2$ ，n—被加劲肋分隔的局部板件数目。

按照规定此处受压翼缘必须满足： $t \geq \frac{b}{48fn}$

受拉翼缘必须满足下式： $t \geq \frac{b}{80fn}$ ；

由于加劲肋围成的四边简支板，双边受压应力基本相等，影响极微，因此取 $\sigma_1 = \sigma_2$

(顶底板) 受压翼缘板最小板厚 t (米)					
单元	t0	f	n	b	ϕ
顶板 1	0.0151389	1	6	2.18	0
顶板 2	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 3	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 4	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 5	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 6	0.0151389	1	6	2.18	0
底板 1	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 2	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 3	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 4	0.0169318	1	11	4.47	0

(顶底板) 受拉翼缘板最小板厚 t (米)					
单元	t0	f	n	b	ϕ
顶板 1	0.0075694	1	6	2.18	0
顶板 2	0.0084659	1	11	4.47	0
顶板 3	0.0084659	1	11	4.47	0
顶板 4	0.0084659	1	11	4.47	0
顶板 5	0.0084659	1	11	4.47	0
顶板 6	0.0075694	1	6	2.18	0
底板 1	0.0084659	1	11	4.47	0
底板 2	0.0084659	1	11	4.47	0
底板 3	0.0084659	1	11	4.47	0
底板 4	0.0084659	1	11	4.47	0

由于顶板厚 2.0cm，底板厚 3.0cm，斜底板厚 3.3cm，因此满足最小板厚规定。

2) 顶底板加劲肋设计与验算：

钢箱梁桥顶底板的宽度与板厚之比（宽厚比）较大，设置纵横加劲肋可以防止顶底板在弯曲压应力或者制作、运输、安装架设中不可预料的压应力作用下的局部失稳。

模型简化：由于钢箱梁桥的整体刚度比顶底板刚度大得多，顶底板的局部稳定分析，近似简化为由箱梁腹板和横隔板围成的四边简支加劲板。

此处采用等间距等刚度均部设计：拟定纵横加劲肋间：0.4m

加劲肋进行刚性加劲设计，控制参数： $\gamma_l \geq \gamma_l^*$

加劲肋刚度比 γ_l 定义：

$$\gamma_l = EI_l / D$$

式中：E——弹性模量；

I_t ——单根加劲肋对被加劲板的抗弯惯矩；

D——被加劲板的抗弯刚度；

$$D = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)} ;$$

t——被加劲板板厚；

ν ——泊松比；

对加劲肋均匀布置并且等刚度时，根据正交异性板的稳定理论，临界刚度比为：

$$\begin{cases} \gamma_l^* = 4\alpha^2 n(1+n\delta_l) - \frac{(\alpha^2+1)^2}{n} & (\alpha \leq \alpha_0) \\ \gamma_l^* = \frac{1}{n} [\{2n^2(1+n\delta_l) - 1\}^2 - 1] & (\alpha > \alpha_0) \end{cases}$$

式中： α ——加劲板的长宽比 $\alpha = a/b$ ；

a——加劲板的长度（横向加劲肋的间距）

b——加劲板的宽（腹板间距）；

n——被加劲肋分隔的局部板件数目 $n = n_l + 1$ ；

n_l ——纵向加劲肋数目；

δ_l ——单根加劲肋的截面面积与被加劲肋的面积之比 $\delta_l = A_l / bt$ ， A_l 为单根加劲肋的截面面积；

α_0 ——加劲肋的临界长宽比，由下式计算：

$$\alpha_0 = \sqrt[4]{1+n\gamma_l}$$

式中： γ_l 为加劲肋的刚度比；

详细计算内容：

顶底板加劲肋参数初步设计：

顶底板加劲肋参数（米）		
类型	H	B
矩形截面	0.2	0.01

加劲肋刚度比计算：

(顶底板) 加劲肋刚度比					
γ_l	E	lt	D	t	v
7.28E-01	2.06E+08	2.67E-05	7545.788	0.02	0.3

δl 求解：单位设置（米、千牛）

单元	δl	A1	bt
顶板 1	4.59E-02	2.00E-03	4.36E-02
顶板 2	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
顶板 3	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
顶板 4	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
顶板 5	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
顶板 6	4.59E-02	2.00E-03	4.36E-02
底板 1	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
底板 2	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
底板 3	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02
底板 4	2.24E-02	2.00E-03	8.94E-02

临界刚度比 γ_{l*} 求解：单位设置（米、千牛）

(顶底板) 临界刚度比求解										
单元	γ_{l*}	α	n1	δl	γ_{l-1*}	γ_{l-2*}	a	b	α_0	验算
顶板 1	6.14E-01	1.83E-01	5.00E+00	4.59E-02	6.14E-01	7.31E+00	4.00E-01	2.18E+00	1.52E+00	通过
顶板 2	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
顶板 3	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
顶板 4	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
顶板 5	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
顶板 6	6.14E-01	1.83E-01	5.00E+00	4.59E-02	6.14E-01	7.31E+00	4.00E-01	2.18E+00	1.52E+00	通过
底板 1	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
底板 2	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
底板 3	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过
底板 4	2.90E-01	8.95E-01	1.00E+00	2.24E-02	2.90E-01	5.94E+00	4.00E-01	4.47E+00	1.73E+00	通过

不考虑加劲板局部稳定时必须满足的最小板厚 t_0 规定：

不考虑加劲板局部稳定时必须满足的最小板厚				
钢材种类(相当	SS400, SM400	SM490 (Q345)	SM490Y, SM520 (Q	SM570 (Q420)

于国标)	(Q235)		370)	
T0	b/(28fn)	b/(24fn)	b/(22fn)	b/(22fn)

不考虑加劲板局部稳定时必须满足的最小板厚 t_0 计算:

(顶底板) 不考虑加劲板局部稳定时满足的最小板厚 t_0 (米)					
单元	t_0	f	n	b	ϕ
顶板 1	0.0151389	1	6	2.18	0
顶板 2	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 3	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 4	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 5	0.0169318	1	11	4.47	0
顶板 6	0.0151389	1	6	2.18	0
底板 1	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 2	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 3	0.0169318	1	11	4.47	0
底板 4	0.0169318	1	11	4.47	0

纵横加劲肋参数确定, 竖向加劲肋采用设计值, 横向加劲肋采用保守设置:

顶底板纵向加劲肋参数 (米)			顶底板横向加劲肋参数 (米)		
类型	H	B	类型	H	B
矩形截面	0.2	0.01	矩形截面	0.4	0.01

3) 横隔板间距设计:

对于横隔板间距 L_D , 这里参照日本经验公式:

$$\begin{cases} L_D \leq 6 & (L \leq 50) \\ L_D \leq 0.14L - 1 \text{ 且 } \leq 20 & (L > 50) \end{cases}$$

式中: L —桥梁等效跨径。

本桥采用拉索间距 10m 的密索设置, 采用多支点弹性支撑的连续梁调索。

最终内力基本符合连续梁内力分布, 因此等效跨径取 10m。

钢箱梁的横隔板标准间距采用 5m, 见插图—6, 该间距能充分保证钢箱梁的横向刚度、抗扭刚度, 满足支承其上的正交异性板的局部变形要求。为减小钢箱梁的加工制作难度, 除支座处外, 横隔板上下与顶底板相焊。横隔板板厚 30mm。

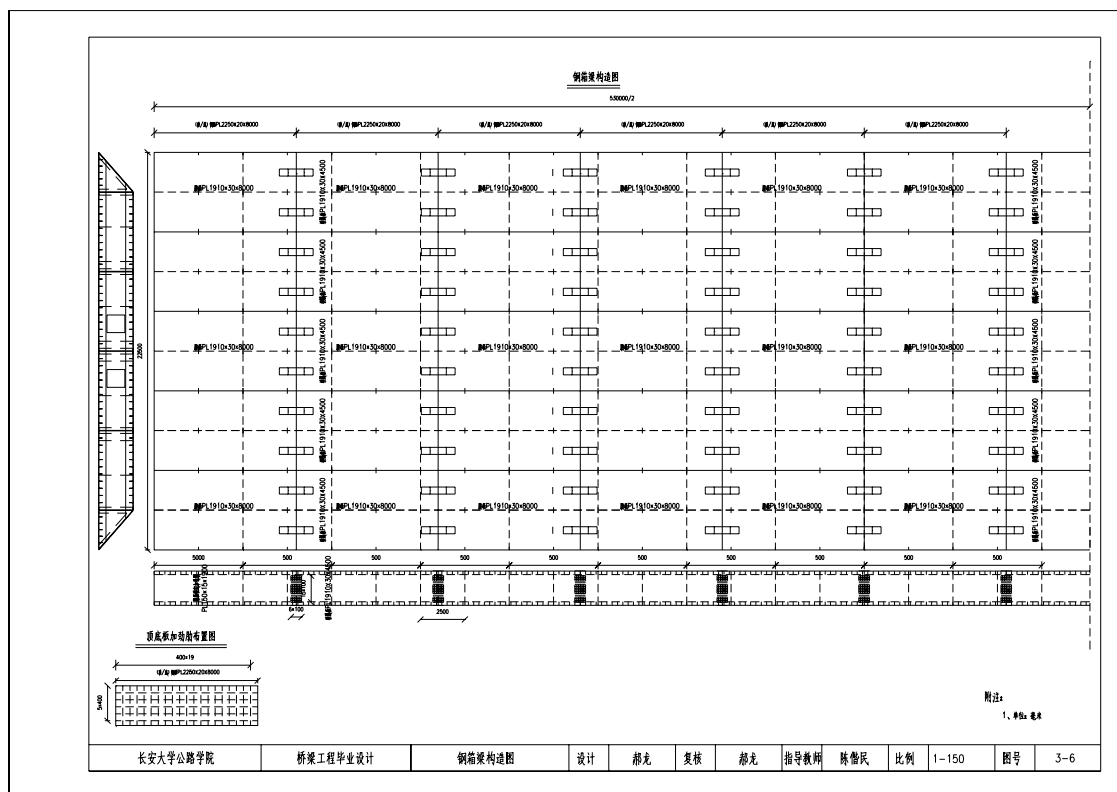


插图-6

4) 腹板加劲肋设计与验算:

1、腹板高厚比: 单位 (米、千牛)

横向和纵向加劲肋设置与最大腹板高厚比 H_w/T_w					
规范	钢材种类	不设竖向和纵向加劲肋	仅设横向加劲肋	横向加劲肋和一段纵向加劲肋	横向加劲肋和二段纵向加劲肋
中国公路钢桥	Q235	70	160	280	-
	Q345	60	140	240	-

规范: 公路钢桥规范 (公路桥涵钢结构及木结构设计规范 JTG JTJ025-86);

2、横向加劲肋计算: 单位 (米、千牛)

腹板高厚比				
单元	hw	tw	hw/tw	结果
腹板边	2.95	0.032	90.39	设一条横向加劲肋
腹板中	1.91	0.03	63.66	设一条横向加劲肋

为防止腹板剪切失稳, 公路钢桥规范规定, 腹板高厚比 $hw/tw \geq 60$ (Q345) 时设置中间横向加劲肋。

公路钢桥规范规定:

横向加劲肋间距设置		
横向加劲肋间距 a	$a \leq 950t_w/\tau^2$	≤ 2

式中：a——横向加劲肋的间距（mm）；
 t_w ——腹板的厚度（mm）；
 τ ——验算板梁处腹板平均剪应力；

横向加劲肋计算：

腹板处中间横向加劲肋间距 a		
a	≤ 12086.69	取值 2500

式中：单位（mm）

公路钢桥规范规定：腹板两侧对称设置横向加劲肋时，横向加劲肋截面对腹板中线的惯性矩，或者腹板单侧设置横向加劲肋时，横向加劲肋截面对腹板与加劲肋的焊接线的惯性矩，不应小于：

$$I_t = 3h_0t_w^3$$

式中： t_w ——腹板的厚度； h_0 ——腹板净高度。

同时，其两侧加劲肋的伸出肢肢宽不宜小于 $40 + \frac{h_0}{30}$ ，肢厚不宜小于肢宽的 1/15；

腹板处中间横向加劲肋对腹板及加劲肋的焊接线惯性矩计算				
腹板	I_t	h_0	t_w	I_t 取值
中间腹板	1.55E-04	1.91	0.03	6.63E-03
边腹板	1.86E-04	1.91	0.0319	

单位：（米）

每侧加劲肋伸出肢肢宽				
H 限制	t 限制	h_0	H 取值	t 取值
0.1036667	0.01	1.91	0.15	0.015

单位：（米）

腹板中间横向加劲肋确定						
H	B	t	I_{yy}	A	h	I 对于腹板中心线
0.15	1.9	0.015	5.34E-04	0.285	0.075	6.63E-03

单位（米）

3.2.4.3 主梁与拉索锚固梁设计

构造设计如插图-6

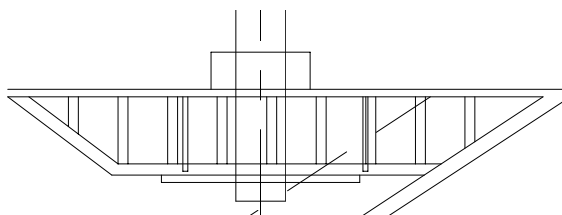


插图-6

锚固梁用焊接与主梁连接，拉索固定在锚固梁上，索力以剪力的方式由锚固梁传

递给主梁。锚固梁板厚 30mm，支撑板厚度 20mm。

3.2.4.4 钢箱梁防护涂装设计方案

钢箱梁防护涂装方案			
部位	防护方案	道数	厚度 (μm)
钢箱梁外表面，检修道外表面及路缘带外表面	无机富锌涂装	1	78
	环氧封闭漆	1	25
	环氧云母氧化铁	2	50+50
	聚氨酯面漆	2	40+40
钢箱梁内表面	环氧底漆	1	60
	环氧面漆	1	60
行车道路面下及中央分隔带钢箱梁外表面	环氧富锌底漆	1	60-80

3.3 索塔设计

3.3.1、索塔选型：

索塔整体造型既须考虑造型也要考虑受力需要，且方便施工。由于本桥桥面宽，跨径不大，索塔不高，采用 H 型，门型塔是合适的。

3.3.2、尺寸拟定和构造设计：

索塔总高度：南北相同，塔高 62.62m，塔的高跨比 0.241。南北塔墩高 40.03m，主塔垂直布置。双塔间间距 22.5m。索塔构造图见插图-7

塔柱采用矩形截面，塔墩采用同一断面。壁厚顺桥向 60cm，横桥向 60cm。

塔柱顺桥向内壁上设有斜拉索锚块。

根据受力需要，索塔设置三道横梁，为使受力均匀，下横梁在塔墩交汇处。中横梁在下横梁上 33m 处，上横梁在塔顶设置。上下横梁设置斜撑 1×3.5m。上中横梁尺寸：2×4m；下横梁尺寸：3.5×4m；

3.4 基础设计

索塔基础均设计为群桩基础，由 25 根 $\phi 150$ cm 沉桩组成，桩中心距 450cm，南北塔桩 100m。塔墩承台布置如插图-8、插图-9：

3.5 斜拉索设计

3.5.1、类型选择

斜拉索分为平行钢丝束拉索、平行钢绞线拉索。平行钢丝束拉索由工厂预制，在工地安装，质量可靠，但跨径较大时，斜拉索质量较大，需要大型吊装设备。平行钢绞线拉索在工地组装，可单根穿束，方便灵活。

本桥采用平行钢绞线，主要考虑以下几点：1、钢绞线拉索可以在不影响桥梁正常使用的前提下，在桥梁使用期限内的任何时间，对钢绞线的无粘结钢绞线进行应力检测，必要时可进行单根钢绞线换索，方便对桥梁的质量进行监控。2、斜拉索外护套管表面附有双螺旋线，可以减少斜拉索的风雨振动。3、平行钢绞线拉索具有较

装
订
线

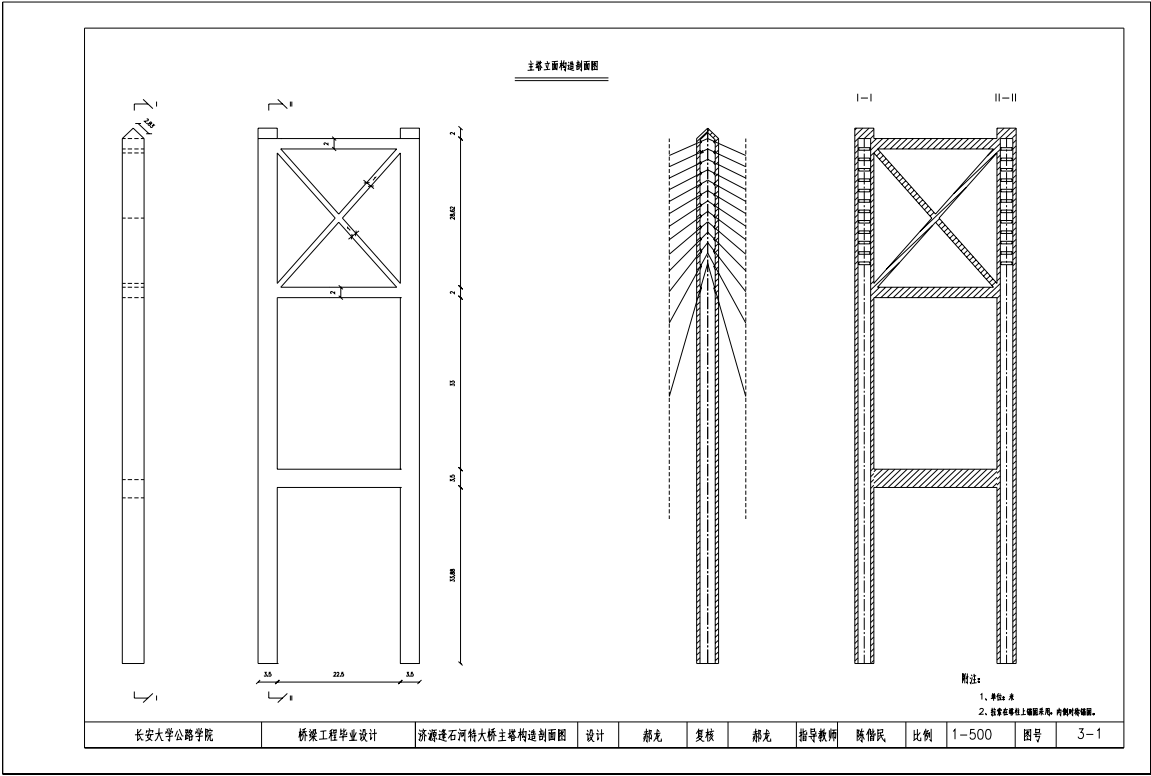


插图-7

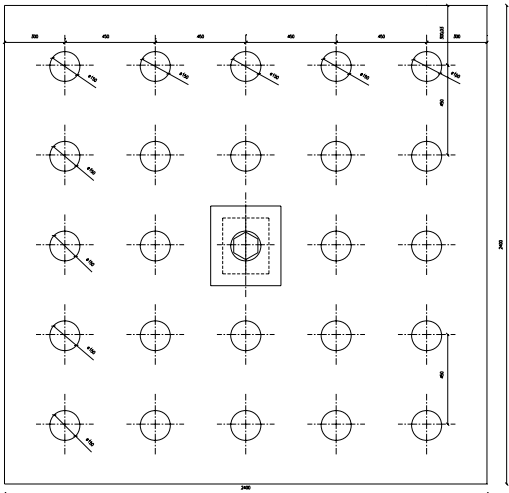


插图-8

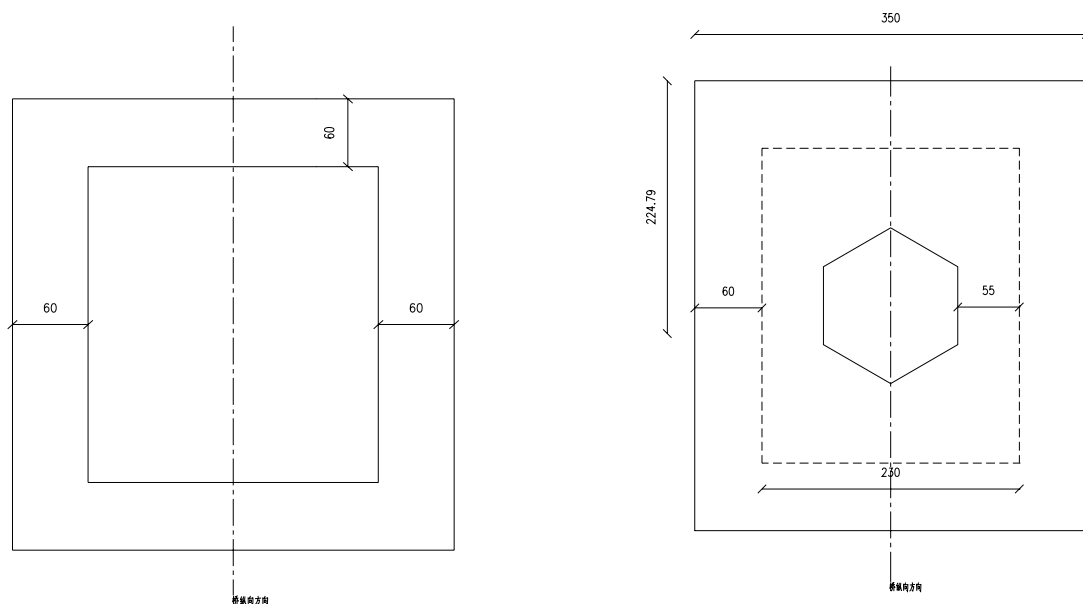


插图-9

的抗疲劳应力幅值，符合三跨钢斜拉桥应力幅值大的特点。

3.5.2、斜拉索设计

斜拉索采用平行钢绞线拉索体系。拉索由多股无粘结高强度钢绞线组成，整根拉索的防护共有三层，由单根钢绞线外涂油脂并带 PE 护套、拉索外层的 HDPE 外防护套等组成。在锚固区，钢绞线有 PE 导管组件防护，其端部浸泡于油脂中。

3.5.2.1 无粘结 PE 钢绞线

1) 拉索无粘结 PE 钢绞线，直径 15.24mm，涂油脂并且带 PE 护套的低松弛非镀锌钢绞线。

2) 斜拉索用 PE 钢绞线符合 ASTM A416-90a（以下简称 PE 钢绞线）

3) PE 钢绞线技术标准

- ✧ 抗拉强度：1860MPa
- ✧ 最小破断载荷：260.7KN
- ✧ 松弛性能：1000h 最大松弛 $\leq 2.5\%$
- ✧ 伸长率：大于 3.5%
- ✧ 不松散性：钢绞线在不绑扎的情况下切断不松散。
- ✧ 弯曲度：钢绞线自由放置在一个平面上，从 1m 长基线测量弯曲最大不大于 25mm
- ✧ 性能均匀稳定的应力/应变曲线
- ✧ 抗疲劳性能：PE 钢绞线在最大应力 $0.45 R_y^b$ ，最大应力幅 300MPa 经 200 万次疲劳试验不断裂。

◇ 单丝无焊接接头

公称直径及允许偏差

公称直径: $\phi 15.24 \text{ mm}$ ($-0.15 \sim +0.66 \text{ mm}$)

公称截面积: 140 mm^2

线密度: 1102 g/m

3.5.2.2 斜拉索 HDPE 外护套管

1) 斜拉索 HDPE 外护套, 采用双层同步挤压圆形截面的 HDPE 管, 内侧黑色, 厚度 1.5 mm 。外侧颜色经 VR 紫外线测试, 表面色泽并无任何明显褪色和改变。内外层均应具有较好的抗老化及抗紫外线的性能。

2) HDPE 外护套管由黑色内侧及带颜色外层组成, 两侧皆为同一聚合物基地 PE—HD 材料。

3.5.2.3 斜拉索锚具设计

锚具型号采用 OVM15-31。

3.6 辅助墩设计

墩身采用矩形空心薄壁墩, 横桥向宽 18 m , 纵桥向 2 m 。辅助墩基础采用 2×8 的矩形群桩组成, 桩径 $\phi 100$, 桩中距 3 m 。承台采用 $18 \times 6 \times 2 \text{ m}$ 设置。

3.7 边跨临时压重设计

由于布索采用对称布置, 在计算中辅助墩不出现拉应力。在施工阶段边跨采用临时压重, 使其在施工阶段不出现拉应力应力。因此采用施工阶段临时边跨压重设计。压重位置位于辅助墩处, 采取集中力压重, 取值 200 kN 。

3.8 附属设施设计

3.8.1、伸缩缝

根据济源逢石河大桥的活载梁端位移、温度位移, 在桥台处设置伸缩量为 200 mm 的伸缩缝。

3.8.2、支座

本桥在辅助墩处设置支座。支座采用盆式橡胶支座, 型号 GPZ7000SX, 顺桥向位移量 100 mm 。为简化钢箱梁桥在支座处的构造, 要求支座在垫石顶面滑动。

3.8.3、避雷系统和航空障碍灯

按照规范在每个索塔的塔顶位置设置避雷设施和航空障碍灯。

3.8.4、塔内爬梯

为方便索塔的养护维修, 在每个索塔的塔柱内部均设有爬梯。

3.9 桥面铺装设计

铺装面层采用: 改性沥青 SMA;

粘层：改性沥青 SMA；
铺装下层：浇注式沥青混凝土；
粘结层：溶胶型沥青橡胶；
钢板：喷砂除锈；

其中：两层浇注式沥青混凝土之间不需粘层，当浇注式沥青混凝土用于表面层时，表面撒布的浅色碎石为耐磨光材料，粒径为 2~7mm，磨光值应大于 60，颜色宜浅色尽可能接近白色。粘结层涂装 2~3 层，用量 0.2~0.3L/m²。

第四章 模型建立信息

4.1 荷载

4.1.1、永久作用

一期恒载包括主梁、塔、索及防腐材料荷载。混凝土索塔容重 25 kn/m³，钢容重为 78.5 kn/m³，梁、塔按实际断面计取荷载；斜拉索所需钢绞线荷载 $G \times (1+10\%)$ 计（其中 10% 为防腐材料荷载）；主梁横隔板以集中力计。纵横加劲肋采用均部荷载计入。

二期恒载为桥面（路缘石、防撞护栏、栏杆、灯柱、泄水管、桥面铺装等），梁内电缆、管线包含在内。桥面铺装厚度采用 8cm，检修道铺装 32cm 厚的 C50 混凝土层，容重 25 kn/m³。二期恒载取值 121.25KN/m。

4.1.2、可变作用

采用公路—I 级车道荷载。

取值按照 JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》规定选取：公路—I 级车道荷载的均布荷载标准值为 $q_k = 10.5 \text{KN/m}$ ；集中荷载标准值选取 $p_k = 360 \text{kN}$ ；计算剪应力时乘以 1.2 系数。

本桥布四车道，应进行多车道效应折减，折减系数采用：

折减系数取值：0.67

4.1.3、温度作用

地址处最高温度 34⁰C，极端最低气温-10⁰C，设计基准气温取 20⁰C。

1、主梁结构正温差取 14⁰C，负温差取-30⁰C。

2、主梁温度梯度 ±5⁰C

2、主梁温度梯度 ±10⁰C

4.1.4、作用组合

荷载组合表		
组合 1	1. 0D	恒载
组合 2	1. 0D+1. 0MV	恒载+汽车荷载
组合 3	1. 0D+1. 0ST	恒载+温度荷载
组合 4	1. 0D+1. 0ST+1. 0MV	恒载+汽车荷载+温度荷载
组合包络	组合 1—4	

4.2 计算方法概述

整体静力计算采用空间有限元分析，分析软件采用 MIDAS CIVIL。总体结构根据结构形成过程进行施工阶段计算，成桥分析根据荷载组合要求的内容进行内力、应力计算，通过对索力的调整使结构在施工阶段和使用阶段的内力、应力及刚度均符合规范要求。

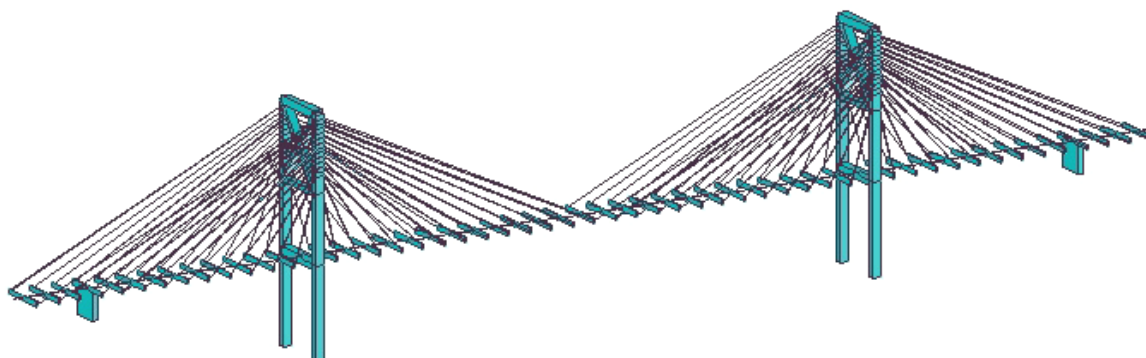
这里在计算分析斜拉桥，采用的一些基本假定如下：

- ✧ 视斜拉桥为线性空间框架结构。
- ✧ 斜拉索的自重垂度及受力后垂度发生变化时，对其变形计算的影响不予考虑，即视钢索为一直线。
- ✧ 塔的抗弯刚度取常值。
- ✧ 在斜拉桥跨度不大的情况下，斜缆的非线性影响可以通过修正弹性模量的办法加以考虑。弹性模量的取值按厄恩斯特(Ernst)公式计算：

$$E = \frac{E_c}{1 + \frac{(rL)^2}{12\sigma^3} E_c}$$

式中：r——拉索材料比重；L——斜缆水平投影长度； σ ——斜钢缆索中应力。

4.3 模型建立

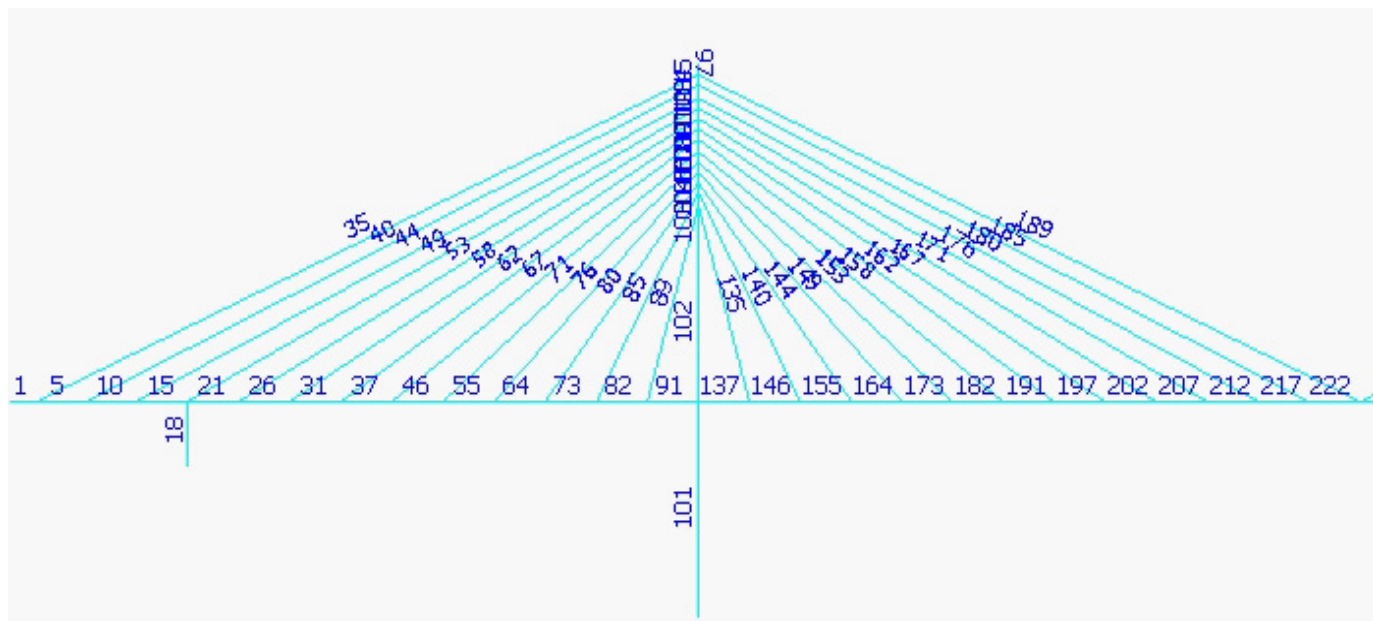


模型如图，将桥面板模拟为梁系模型，这里采用单主梁鱼骨结构。单主梁模型的中间轴线通过主梁截面的扭转中心。把主梁的拉伸刚度 EA、竖向抗弯刚度 EI_y、横向抗弯刚度 EI_d 以及分布质量 m 和质量惯性矩 I_m 都集中在中间轴线上。双索面斜拉桥的主梁通过短钢臂和拉索形成“鱼骨式”模型。这种模型的优点是主梁的刚度系统和

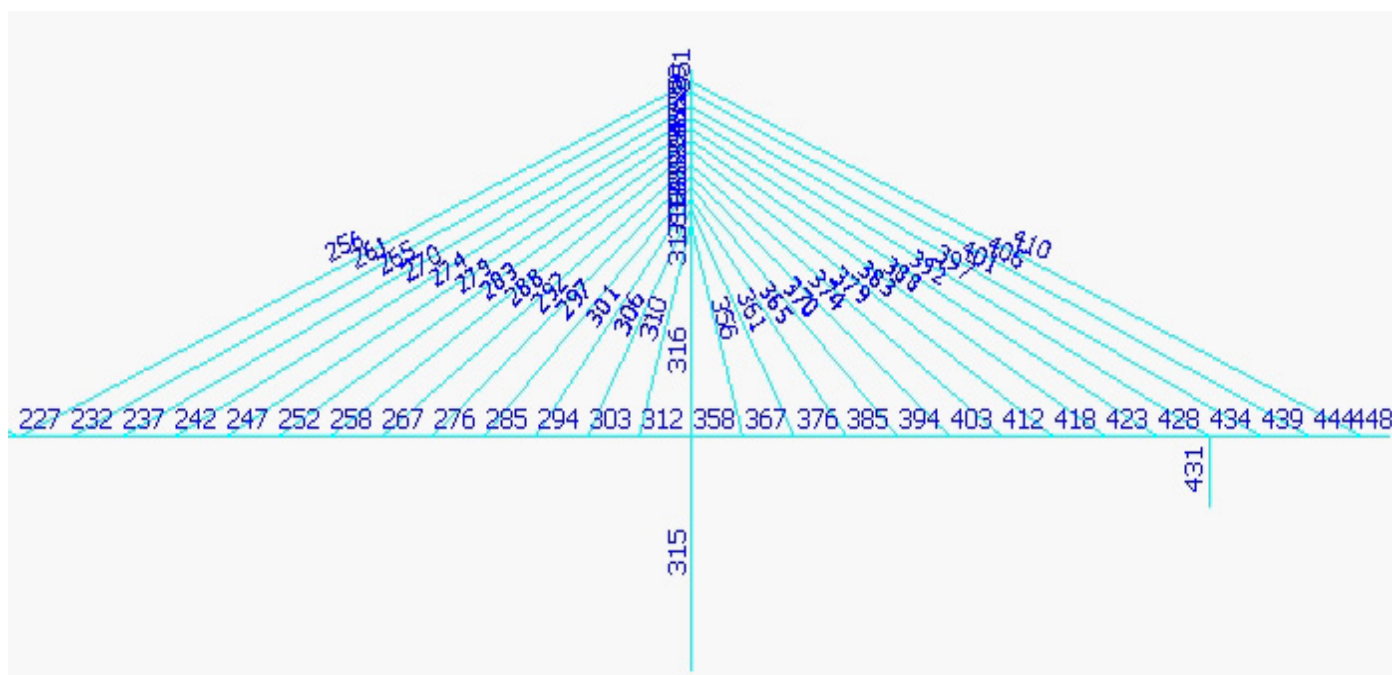
质量系统是正确的，缺点在于无法考虑主梁的约束扭转刚度的贡献。对于自由扭转刚度较小的开口截面，这种模型会直接影响起重要作用的桥面扭转频率的精度，给正确评价大桥的汽动稳定性带来了一定困难。但本桥采用闭口薄臂抗扭刚度大的钢箱梁，采用此中模型是合理的。

4.4 模型分块

4.4.1、主梁单元分块

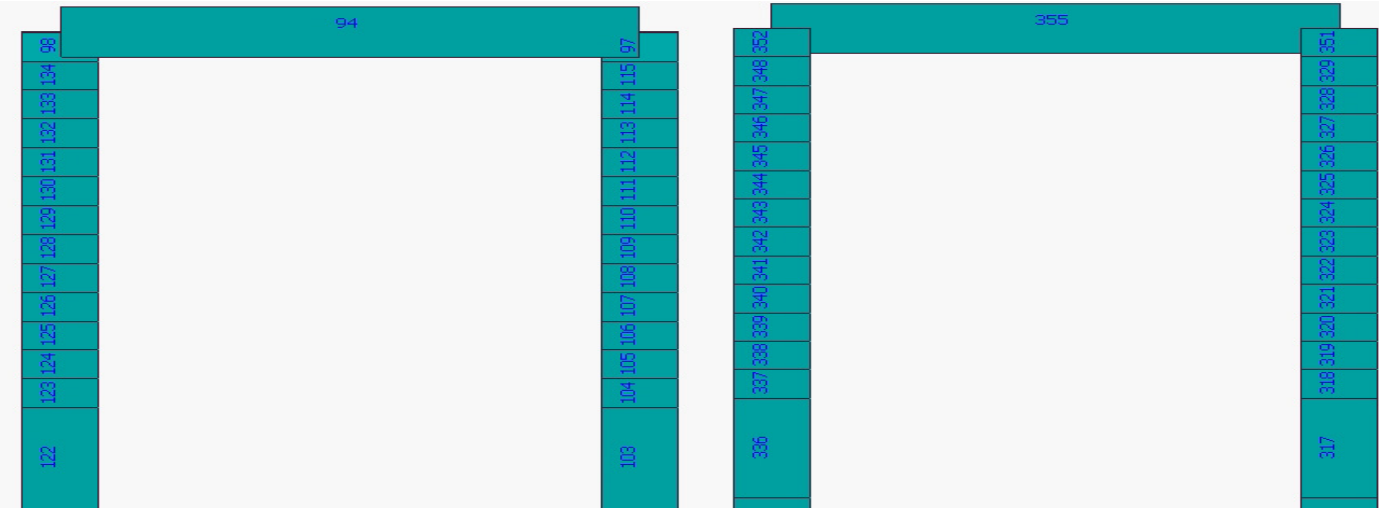


主梁左侧单元分块

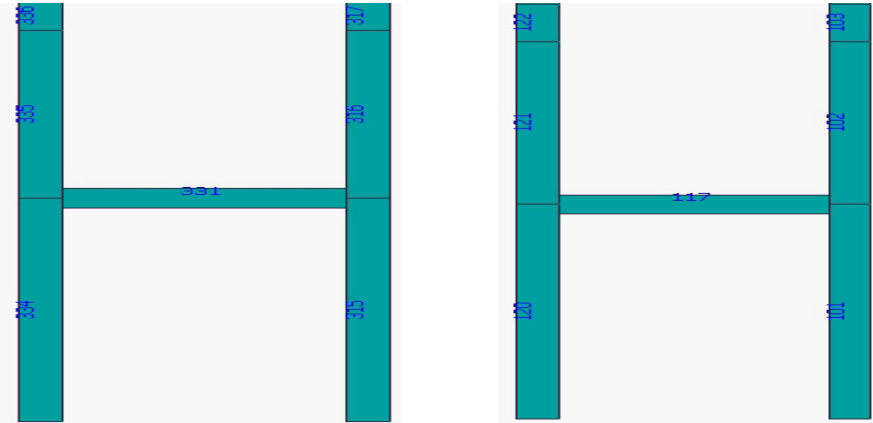


主梁右侧单元分块

4. 4. 2、左右主塔单元分块

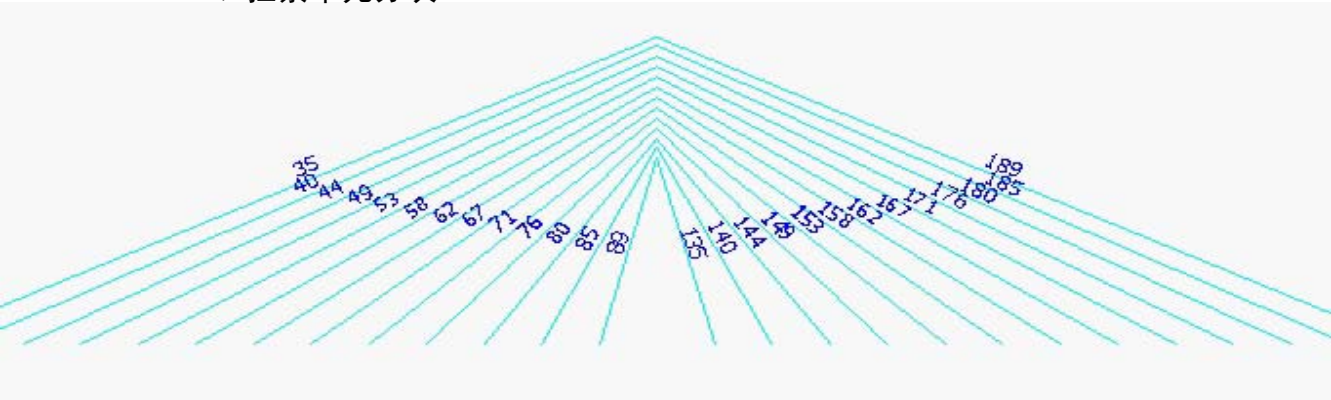


左、右塔柱上部单元分块

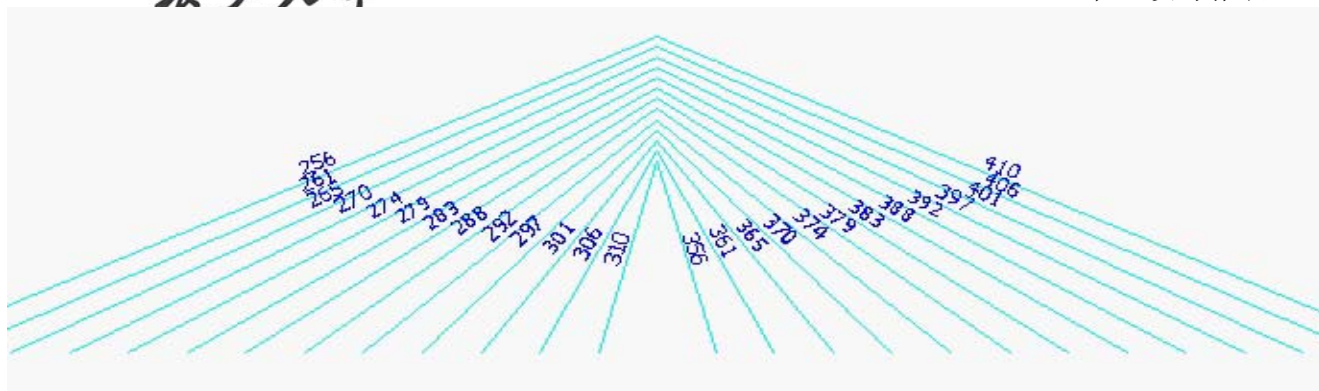


左、右塔柱下部单元分块

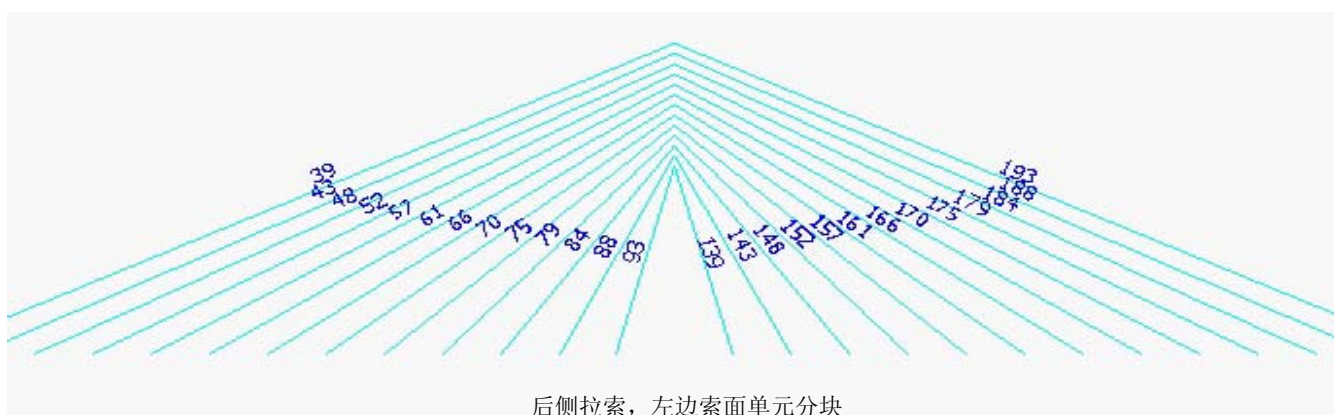
4. 4. 3、拉索单元分块



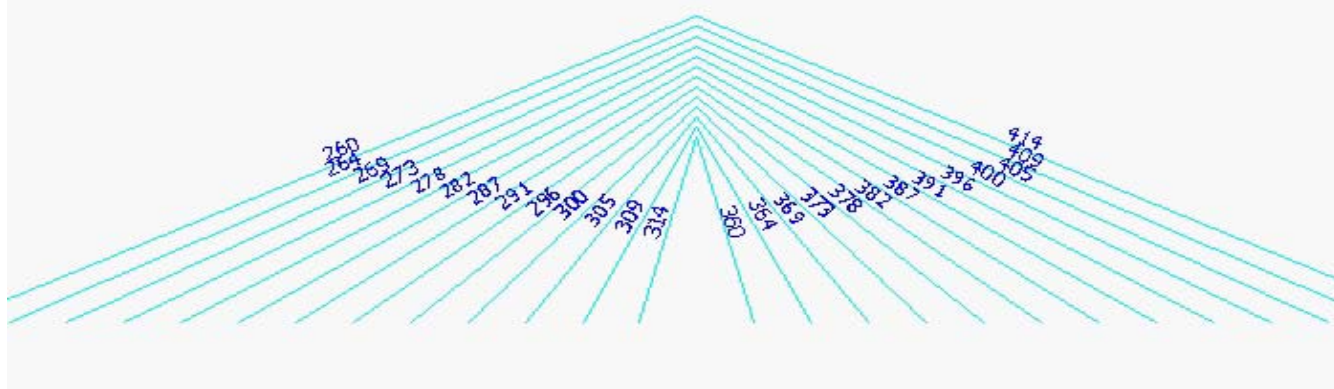
前侧拉索，左边索面单元分块



前侧拉索，右边索面单元分块



后侧拉索，左边索面单元分块



后侧拉索，右侧索面单元分块

4.5 主梁及索塔截面特性

截面特性值（长度单位 m）		
项目	钢主梁	主塔
面积	1.4418	7.56
Asy	0.9314	4.8
Asz	0.2316	4.2
Ixx	3.3448	18.518
Iyy	1.0611	11.4527
Izz	61.3313	14.4592
Cyp	11.2501	2

Cym	11.2499	2
Czp	1.0341	1.75
Czm	0.9259	1.75
Qyb	2.497	3.5612
Qzb	2.0648	3.955
周长（外）	46.4915	15
周长（内）	65.0416	10.2

4.6 初索力计算

拉索初拉力采用主梁和索塔变位控制调整，使主梁模拟为多支点弹性支撑的连续梁且内力分布均匀。

计算工具：MIDAS CIVIL 未知荷载求解

计算原理：将拉索的未知内力，设为未知数求解。将主梁和主塔主要节点变位设为约束条件，用力法的原理进行矩阵位移方程采用反复迭代的方法求解。

限定节点：所有主梁节点、主塔顶节点，采用限定 Dz 位移，限定量值为：上限 0.01m，下限-0.01m。

未知量：所有索力初拉力值。

求解结果：

拉索单元号	拉索组	拉力值 (KN)
35	张拉 1—1 (ST)	2640.176
39	张拉 1—1 (ST)	2640.176
40	张拉 2—1 (ST)	2519.295
43	张拉 2—1 (ST)	2519.295
44	张拉 3—1 (ST)	2422.312
48	张拉 3—1 (ST)	2422.312
49	张拉 4—1 (ST)	2336.099
52	张拉 4—1 (ST)	2336.099
53	张拉 5—1 (ST)	2209.806
57	张拉 5—1 (ST)	2209.806
58	张拉 6—1 (ST)	2100.298
61	张拉 6—1 (ST)	2100.298
62	张拉 7—1 (ST)	2024.956
66	张拉 7—1 (ST)	2024.956
67	张拉 8—1 (ST)	1969.156
70	张拉 8—1 (ST)	1969.156
71	张拉 9—1 (ST)	1849.017
75	张拉 9—1 (ST)	1849.017
76	张拉 10—1 (ST)	1639.171
79	张拉 10—1 (ST)	1639.171
80	张拉 11—1 (ST)	1517.157

84	张拉 11—1 (ST)	1517. 157
85	张拉 12—1 (ST)	1639. 189
88	张拉 12—1 (ST)	1639. 189
89	张拉 13—1 (ST)	2006. 884
93	张拉 13—1 (ST)	2006. 884
135	张拉 13—2 (ST)	1981. 288
139	张拉 13—2 (ST)	1981. 288
140	张拉 12—2 (ST)	1594. 97
143	张拉 12—2 (ST)	1594. 97
144	张拉 11—2 (ST)	1486. 131
148	张拉 11—2 (ST)	1486. 131
149	张拉 10—2 (ST)	1630. 142
152	张拉 10—2 (ST)	1630. 142
153	张拉 9—2 (ST)	1890. 273
157	张拉 9—2 (ST)	1890. 273
158	张拉 8—2 (ST)	2081. 826
161	张拉 8—2 (ST)	2081. 826
162	张拉 7—2 (ST)	2222. 284
166	张拉 7—2 (ST)	2222. 284
167	张拉 6—2 (ST)	2287. 05
170	张拉 6—2 (ST)	2287. 05
171	张拉 5—2 (ST)	2345. 435
175	张拉 5—2 (ST)	2345. 435
176	张拉 4—2 (ST)	2411. 049
179	张拉 4—2 (ST)	2411. 049
180	张拉 3—2 (ST)	2460. 387
184	张拉 3—2 (ST)	2460. 387
185	张拉 2—2 (ST)	2436. 519
188	张拉 2—2 (ST)	2436. 519
189	张拉 1—2 (ST)	2265. 979
193	张拉 1—2 (ST)	2265. 979
256	张拉 1—2 (ST)	2265. 979
260	张拉 1—2 (ST)	2265. 979
261	张拉 2—2 (ST)	2436. 519
264	张拉 2—2 (ST)	2436. 519
265	张拉 3—2 (ST)	2460. 387
269	张拉 3—2 (ST)	2460. 387
270	张拉 4—2 (ST)	2411. 049
273	张拉 4—2 (ST)	2411. 049
274	张拉 5—2 (ST)	2345. 435
278	张拉 5—2 (ST)	2345. 435
279	张拉 6—2 (ST)	2287. 05
282	张拉 6—2 (ST)	2287. 05
283	张拉 7—2 (ST)	2222. 284

装
订
线

287	张拉 7—2 (ST)	2222.284
288	张拉 8—2 (ST)	2081.826
291	张拉 8—2 (ST)	2081.826
292	张拉 9—2 (ST)	1890.273
296	张拉 9—2 (ST)	1890.273
297	张拉 10—2 (ST)	1630.142
300	张拉 10—2 (ST)	1630.142
301	张拉 11—2 (ST)	1486.131
305	张拉 11—2 (ST)	1486.131
306	张拉 12—2 (ST)	1594.97
309	张拉 12—2 (ST)	1594.97
310	张拉 13—2 (ST)	1981.288
314	张拉 13—2 (ST)	1981.288
356	张拉 13—1 (ST)	2006.884
360	张拉 13—1 (ST)	2006.884
361	张拉 12—1 (ST)	1639.189
364	张拉 12—1 (ST)	1639.189
365	张拉 11—1 (ST)	1517.157
369	张拉 11—1 (ST)	1517.157
370	张拉 10—1 (ST)	1639.171
373	张拉 10—1 (ST)	1639.171
374	张拉 9—1 (ST)	1849.017
378	张拉 9—1 (ST)	1849.017
379	张拉 8—1 (ST)	1969.156
382	张拉 8—1 (ST)	1969.156
383	张拉 7—1 (ST)	2024.956
387	张拉 7—1 (ST)	2024.956
388	张拉 6—1 (ST)	2100.298
391	张拉 6—1 (ST)	2100.298
392	张拉 5—1 (ST)	2209.806
396	张拉 5—1 (ST)	2209.806
397	张拉 4—1 (ST)	2336.099
400	张拉 4—1 (ST)	2336.099
401	张拉 3—1 (ST)	2422.312
405	张拉 3—1 (ST)	2422.312
406	张拉 2—1 (ST)	2519.295
409	张拉 2—1 (ST)	2519.295
410	张拉 1—1 (ST)	2640.176
414	张拉 1—1 (ST)	2640.176

4.7 斜拉桥基频计算

斜拉桥基频计算(参照公路桥涵设计通用规范 JTG D60-2004)		
F(Hz)	L	公式
0.576923	260	150/L

第五章 整体静力分析

5.1 主梁和索塔控制断面内力和应力值

主梁和索塔主要控制断面内力与应力值（拉力为正，压力为负）								
断面位置	轴向 (kN)	剪力-y (kN)	剪力-z (kN)	扭矩 (kN*m)	弯矩-y (kN*m)	弯矩-z (kN*m)	上缘应力 (N/mm ²)	下缘应力 (N/mm ²)
辅助墩处 主梁断面	-13173.4	0	-1585.17	0	-7717.45	0	-1.62	-15.90
塔处主梁 断面	-32714.3	0	42.23	0	6542.13	0	-29.10	-17.00
塔下横隔 梁处索塔 断面	-58825.5	-77.98	-83.09	11.03	-2221.69	411.99	-7.50	-8.18
跨中处主 梁断面	2534.96	0	-1794.22	0	-10632.3	0	12.10	-7.52
辅助墩处 主梁断面	-12983.2	2.67	-1301.78	603.9	-2496.08	2019.36	4.16	-11.70
塔处主梁 断面	-32687.4	0.14	265.22	3263.33	9156.39	4533.32	-27.80	-14.80
塔下横隔 梁处索塔 断面	-58773.3	46.53	-53.25	808.47	-1677.14	1894.29	-7.48	-8.16
跨中处主 梁断面	2806.11	9.83	-1537.6	2851.19	-4562.17	5292.56	12.60	-2.29
辅助墩处 主梁断面	-13106.2	0	-1311.6	1.85	2278	3.87	-11.30	-7.10
塔处主梁 断面	-69263.8	0.01	144.86	-0.38	11651.36	7.59	-59.40	-37.90
塔下横隔 梁处索塔 断面	-58032.6	23.86	-244.1	13.01	7555.41	-3703	-8.32	-6.01
跨中处主 梁断面	-34068	0	-1787.69	0.56	-2454.04	1.47	-21.20	-25.80
辅助墩处 主梁断面	-12916	2.67	-1028.2	605.75	7499.38	2023.23	-5.53	-2.97
塔处主梁 断面	-69236.8	0.14	367.85	3262.95	14265.61	4540.92	-58.10	-35.70
塔下横隔 梁处索塔	-57980.5	148.37	-214.25	810.45	8099.95	-2220.7	-8.30	-5.99

装
订
线

断面								
跨中处主梁断面	-33796.9	9.84	-1531.07	2851.75	3616.07	5294.02	-20.70	-20.50
辅助墩处主梁断面	-12916	2.67	-1028.2	605.75	7499.38	2023.23	4.16	-2.97
塔处主梁断面	-32687.4	0.14	367.85	3263.33	14265.61	4540.92	-27.80	-14.80
塔下横隔梁处索塔断面	-57980.5	148.37	-53.25	810.45	8099.95	1894.29	-7.48	-5.99
跨中处主梁断面	2806.11	9.84	-1531.07	2851.75	3616.07	5294.02	12.60	-2.29
辅助墩处主梁断面	-13742	-0.08	-2181.36	-3344.95	-13596.8	-63.27	-7.21	-21.00
塔处主梁断面	-33983	-27.03	-181.15	-3394.75	4404.17	-573.97	-32.10	-20.10
塔下横隔梁处索塔断面	-60542.9	-223.83	-84.15	-936.33	-2240.57	233.74	-7.99	-8.53
跨中处主梁断面	2426.1	-9.35	-2131.65	-2572.96	-11243.5	-296.6	5.63	-8.47
辅助墩处主梁断面	-13674.8	-0.08	-1907.78	-3343.1	-3601.39	-59.4	-16.90	-12.30
塔处主梁断面	-70532.4	-27.02	-78.52	-3395.13	9513.4	-566.38	-62.50	-41.00
塔下横隔梁处索塔断面	-59750	-121.99	-245.16	-934.35	7536.53	-3881.25	-8.81	-6.36
跨中处主梁断面	-34176.9	-9.35	-2125.13	-2572.4	-3065.28	-295.13	-27.70	-26.70
辅助墩处主梁断面	-13742	-0.08	-2181.36	-3344.95	-13596.8	-63.27	-16.90	-21.00
塔处主梁断面	-70532.4	-27.03	-181.15	-3395.13	4404.17	-573.97	-62.50	-41.00
塔下横隔梁处索塔断面	-60542.9	-223.83	-245.16	-936.33	-2240.57	-3881.25	-8.81	-8.53
跨中处主梁断面	-34176.9	-9.35	-2131.65	-2572.96	-11243.5	-296.6	-27.70	-26.70

5.2 主梁主要内力图

5.2.1、恒载内力图（插图-10）；

5.2.2、恒载+汽车荷载内力图（插图-11）；

5.3 主塔主要内力图

5.3.1、恒载内力图（插图-12）；

5.3.2、恒载+汽车荷载内力图（插图-13）；

5.4 主梁主要应力图

5.4.1、恒载应力图（插图-14）；

5.4.2、恒载+汽车荷载应力图（插图-15）；

5.5 斜拉索索力

5.5.1、恒载单根斜拉索索力图（插图-16）；

5.5.2、恒载+汽车荷载单根斜拉索索力图（插图-17）；

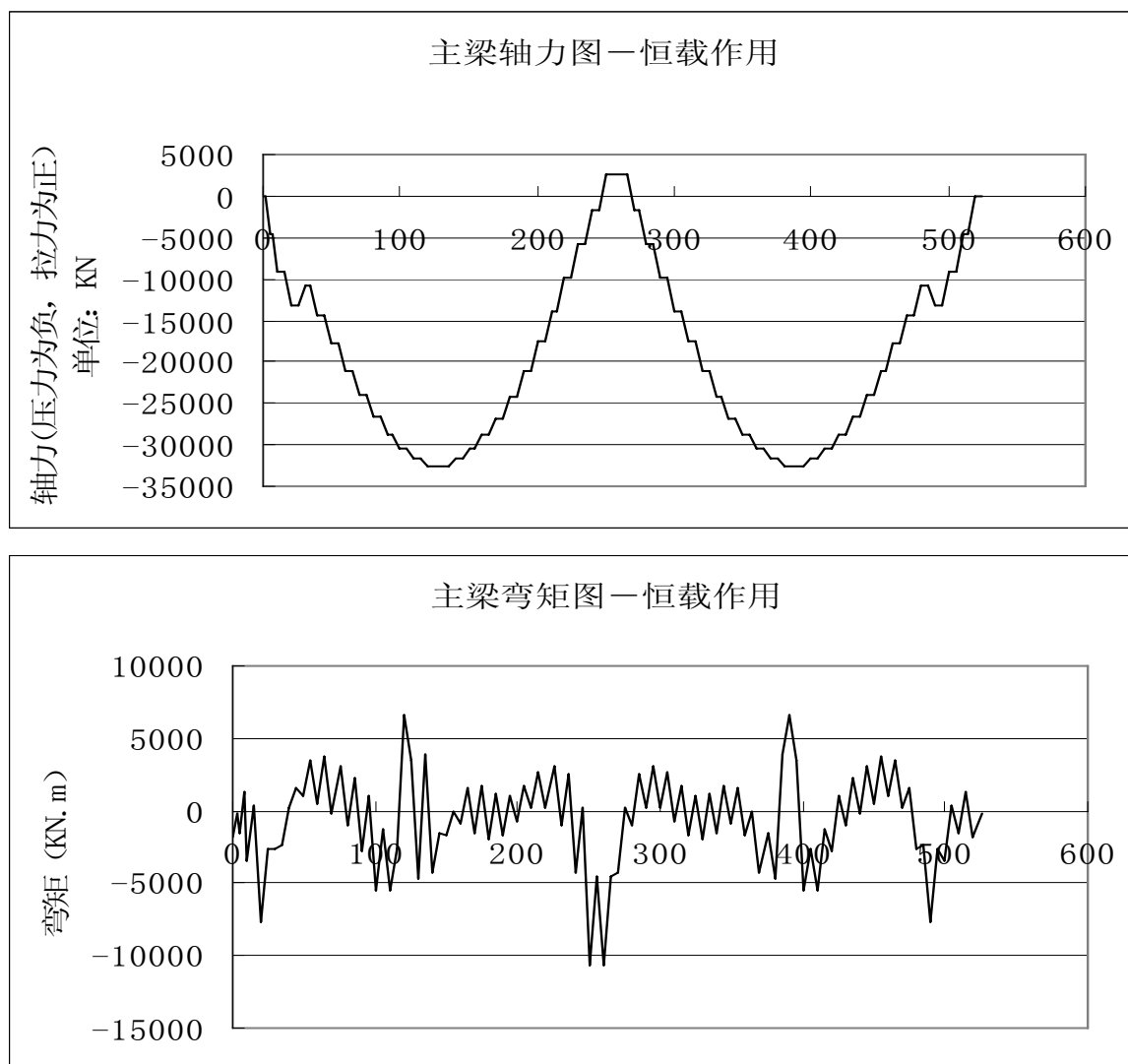


插图-10

装
订
线

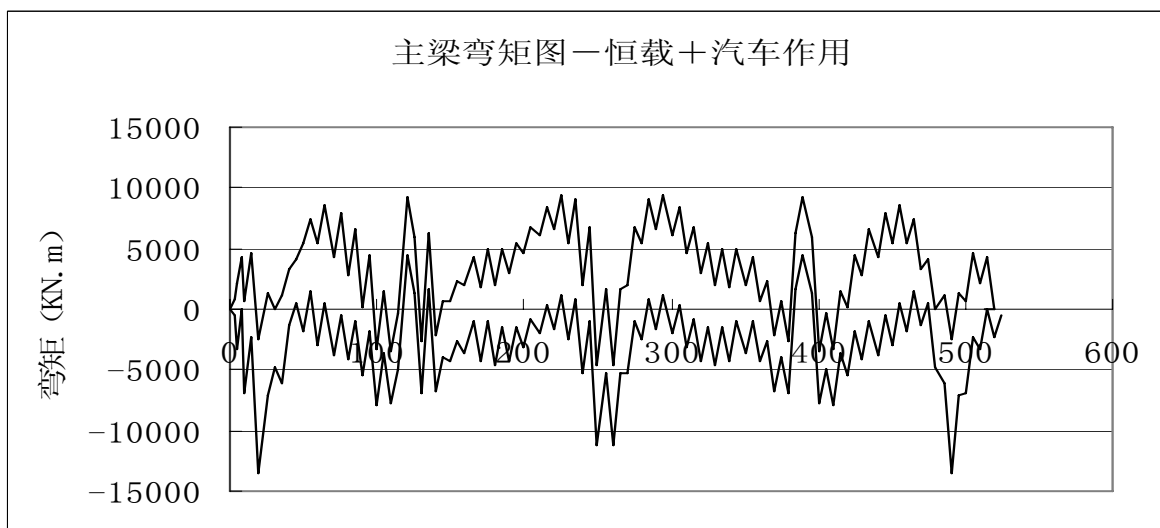
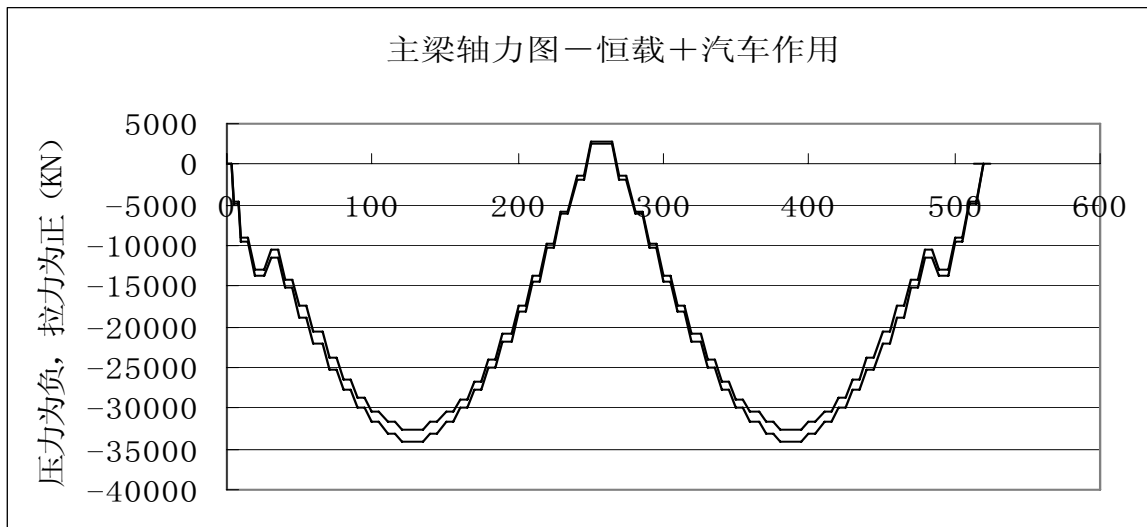
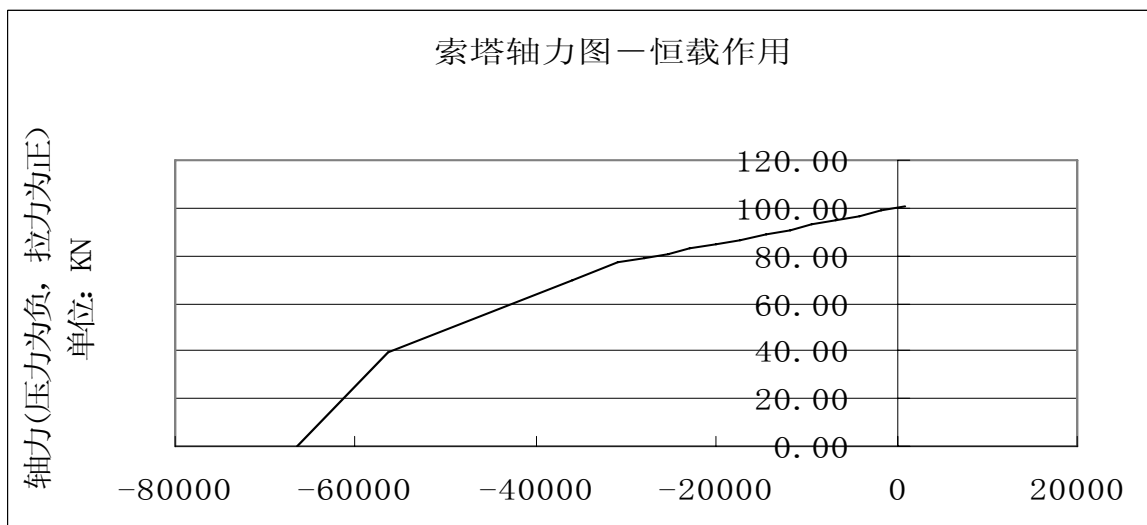


插图-11



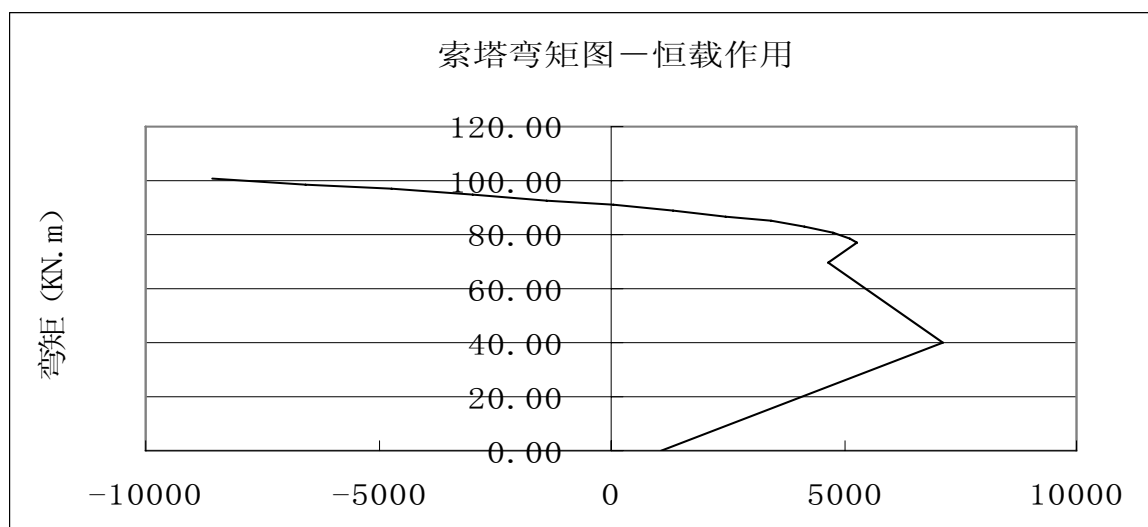


插图-12

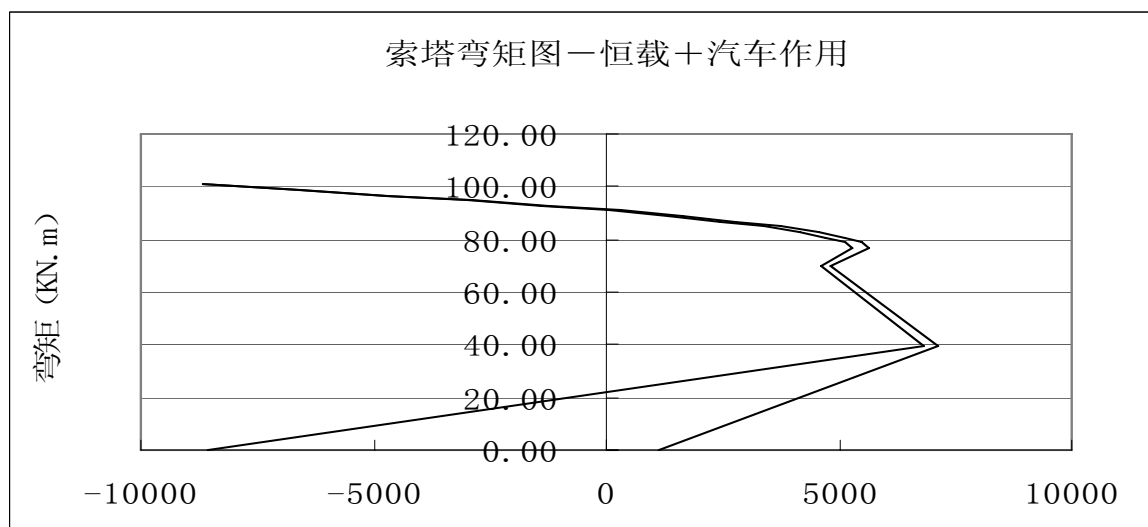
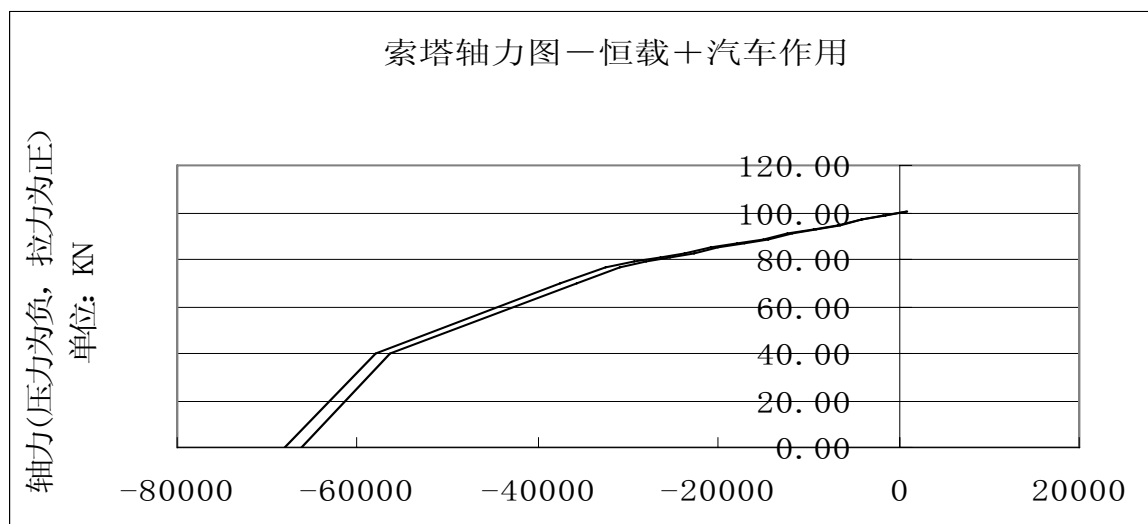
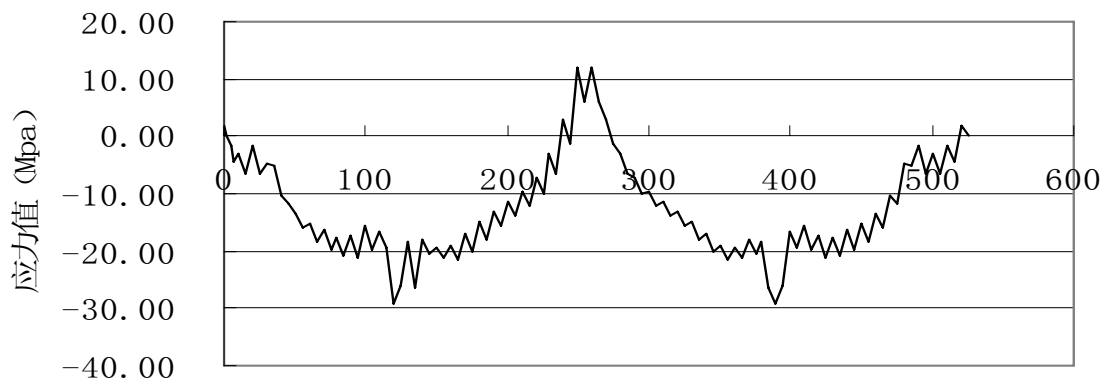


插图-13

装
订
线

主梁上缘应力图—恒载作用



主梁下缘应力图—恒载作用

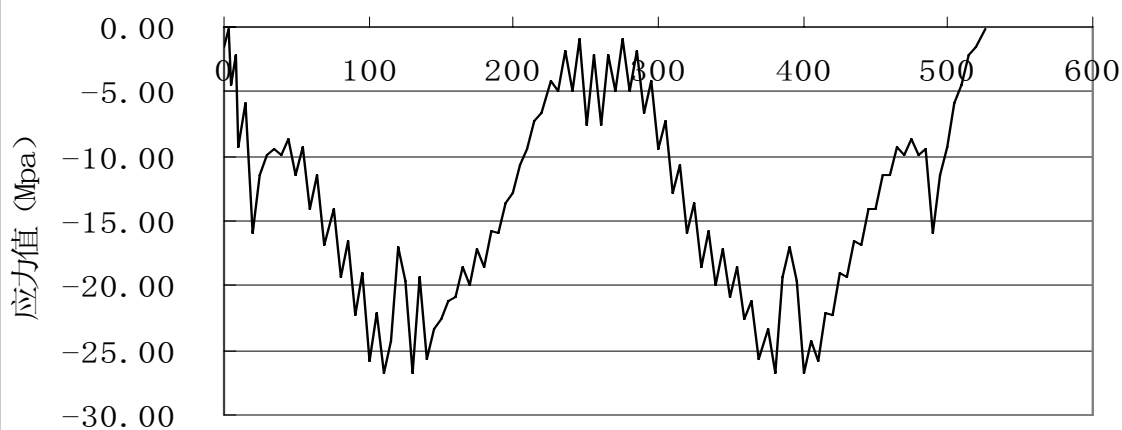
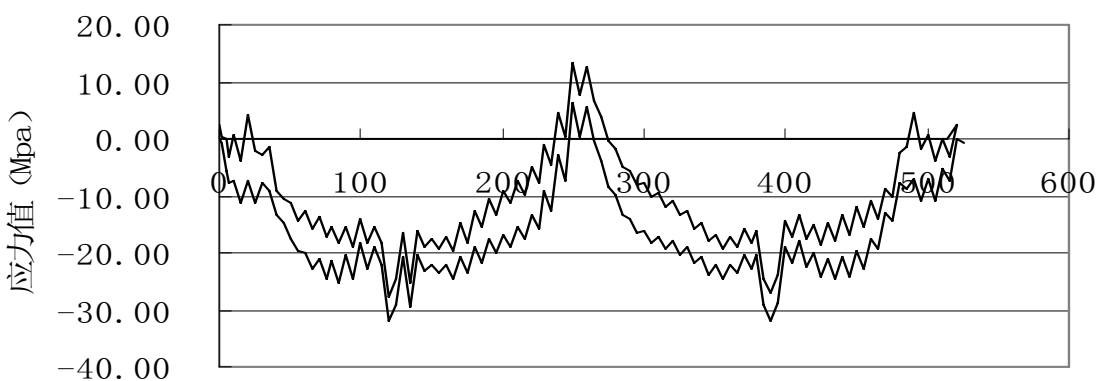


插图-14

主梁上缘应力图—恒载+汽车作用



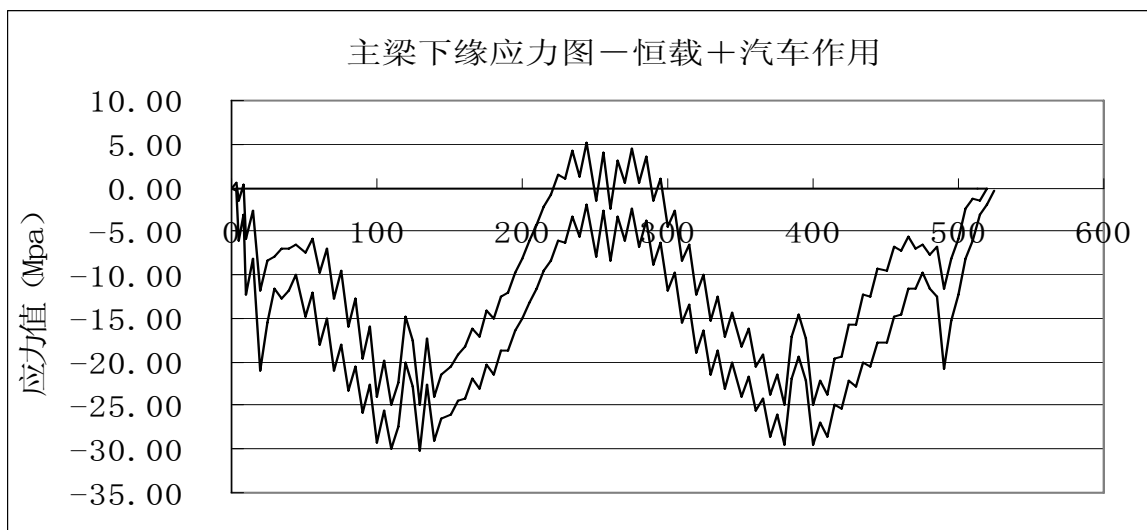


插图-15

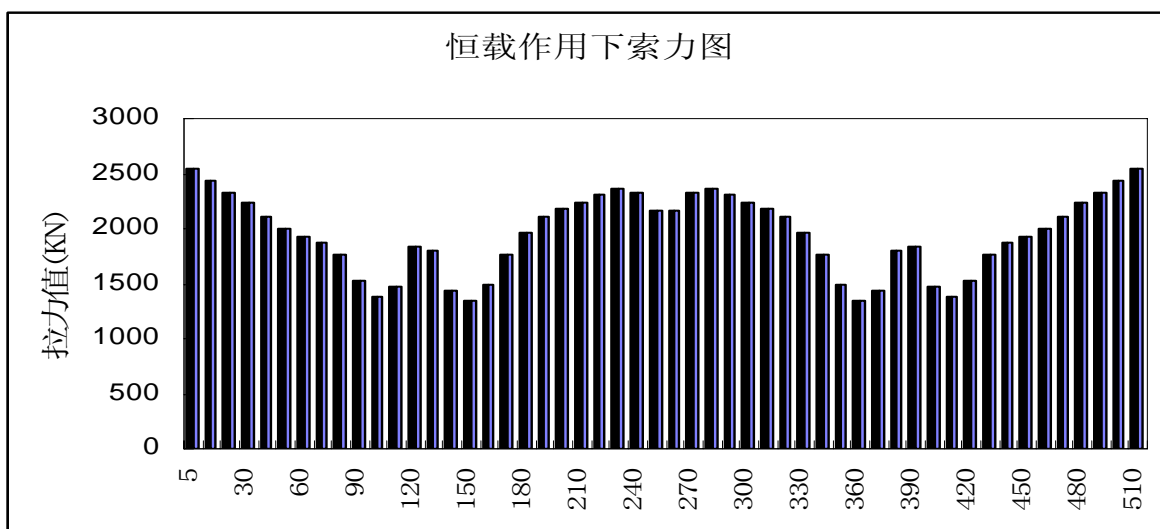
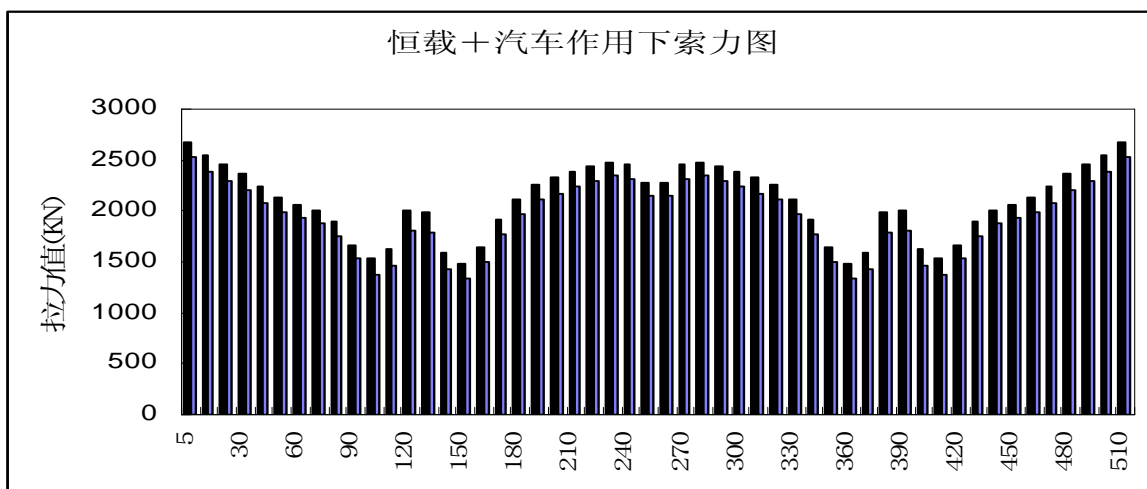


插图-16



左侧为最大索力，右侧为最小索力

插图-17

第六章 施工阶段内力分析

6.1 施工方法介绍

斜拉桥施工计算时，应对主梁架设期间的施工荷载给出一个较为准确的数值。施工计算的计算图式应按照不同的施工阶段拟定，并考虑该施工阶段的所有作用荷载。

本桥施工采用倒拆法施工。

倒拆法简介：

倒拆法是从斜拉桥的成桥状态出发（即理想的恒载状态出发），用与实际施工步骤相反的顺序，进行逐步倒退计算来获得各施工阶段的控制参数，根据这些参数对施工进行控制与调整，并按正装顺序施工。成桥后，理论上斜拉桥的恒载内力和主梁线形便可达到预定的理想状态。

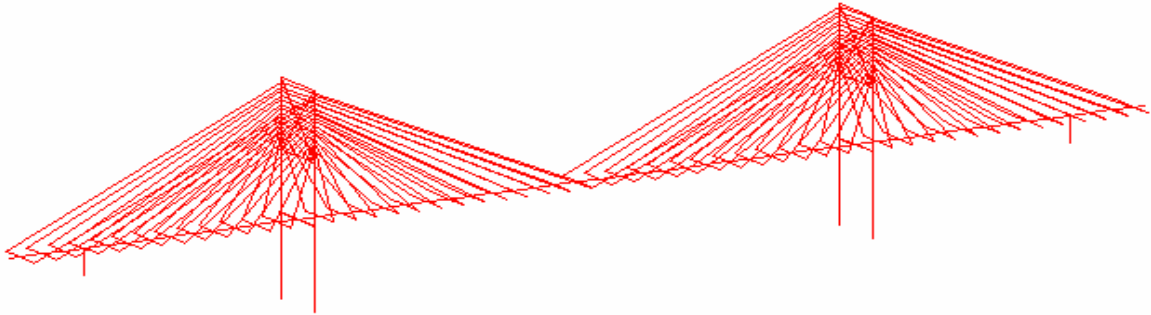
原则上倒拆法无法就算混凝土徐变对结构的影响，由于本桥为钢主梁斜拉桥，并不考虑徐变效应，因此这里采用倒拆法是合理的。

6.2 倒装施工分析流程

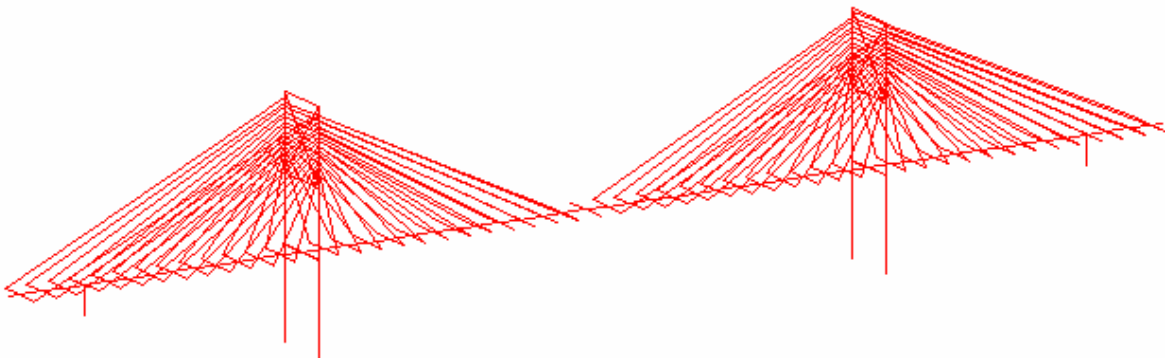
施工步骤			
CS0	成桥阶段（自重+二期恒载+初拉力）	CS21	拆除拉索组 7—2
CS1	拆除二期恒载	CS22	拆除拉索组 7—1
CS2	添加临时架设	CS23	拆除主梁组 7
CS3	拆除拉索组 1—2	CS24	拆除拉索组 8—2
CS4	拆除拉索组 1—1	CS25	拆除拉索组 8—1
CS5	拆除主梁组 1	CS26	拆除主梁组 8
CS6	拆除拉索组 2—2	CS27	拆除拉索组 9—2
CS7	拆除拉索组 2—1	CS28	拆除拉索组 9—1
CS8	拆除主梁组 2	CS29	拆除主梁组 9
CS9	拆除拉索组 3—2	CS30	拆除拉索组 10—2
CS10	拆除拉索组 3—1	CS31	拆除拉索组 10—1
CS11	拆除主梁组 3	CS32	拆除拉索组 10
CS12	拆除拉索组 4—2	CS33	拆除拉索组 11—2
CS13	拆除拉索组 4—1	CS34	拆除主梁组 11—1
CS14	拆除主梁组 4	CS35	拆除拉索组 11
CS15	拆除拉索组 5—2	CS36	拆除拉索组 12—2
CS16	拆除拉索组 5—1	CS37	拆除拉索组 12—1

CS17	拆除主梁组 5	CS38	拆除拉索组 12
CS18	拆除拉索组 6—2	CS39	拆除主梁组 13—2
CS19	拆除拉索组 6—1	CS40	拆除拉索组 13—1
CS20	拆除主梁组 6		

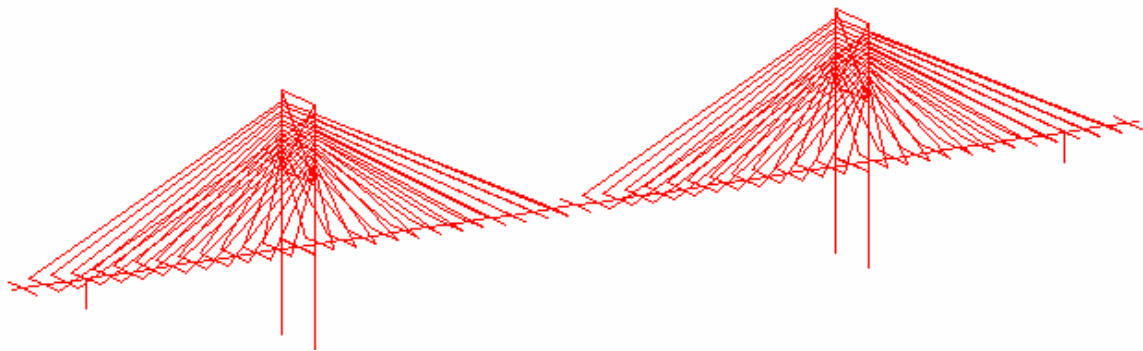
6.3 主要施工阶段图示：



CS0~2 阶段

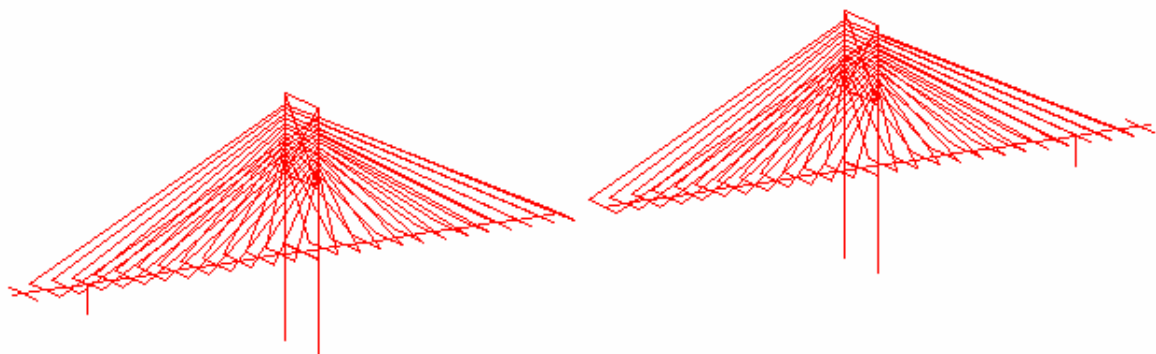


CS3

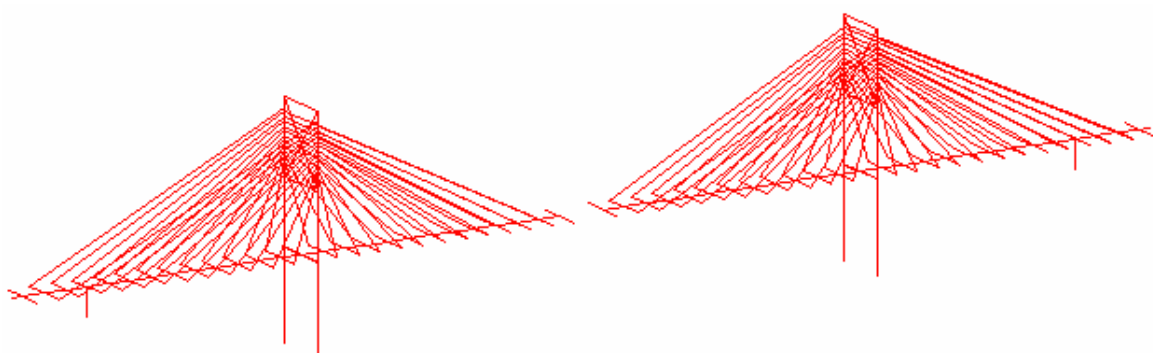


CS4

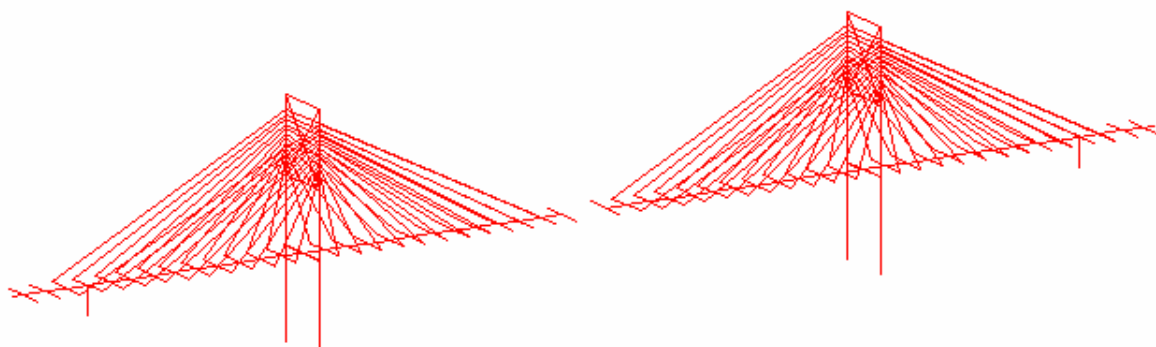
装
订
线



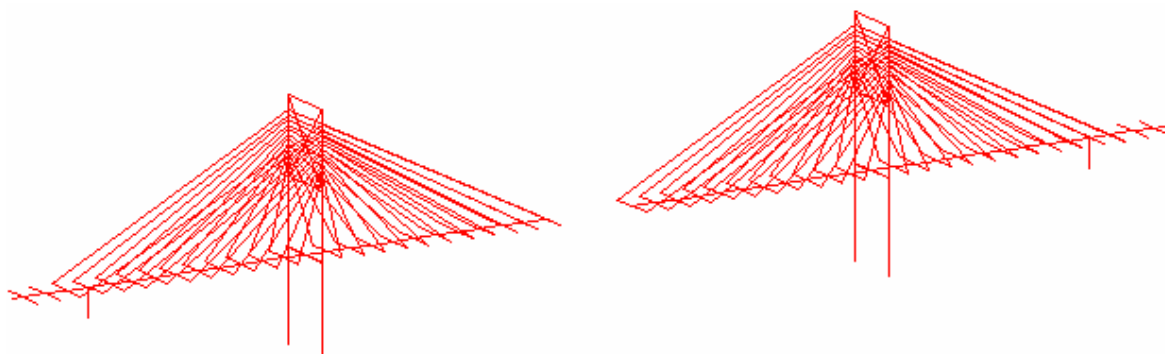
CS5



CS6

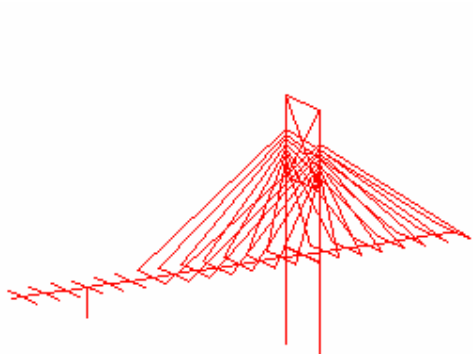


CS7

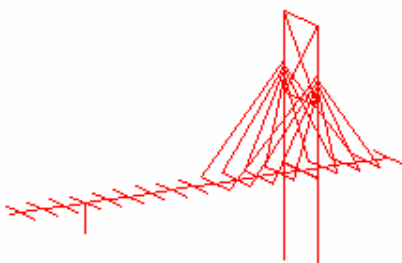
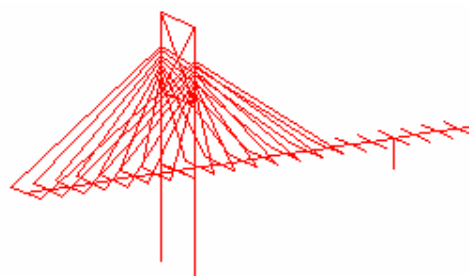


CS8

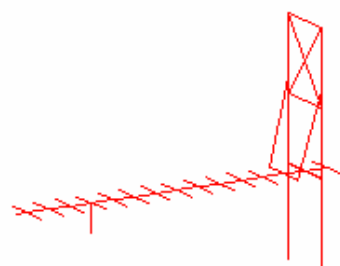
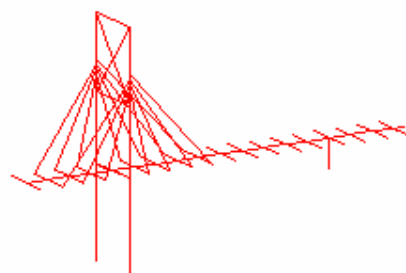
依次类推：



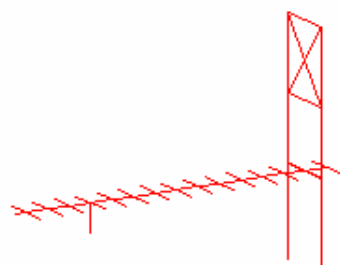
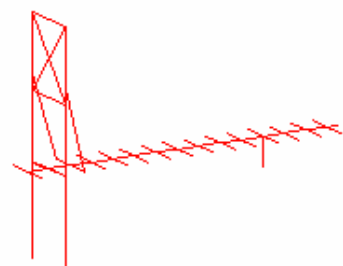
CS20



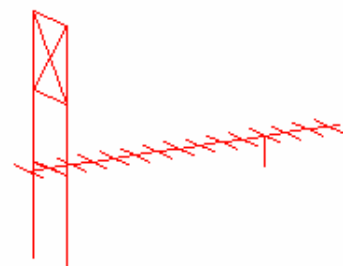
CS30



CS39



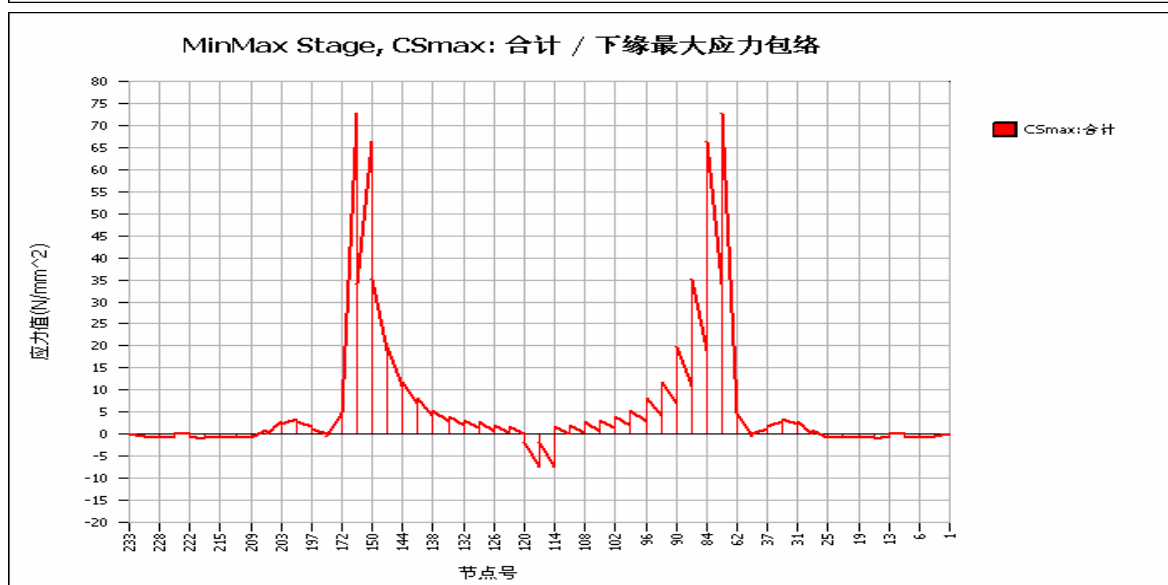
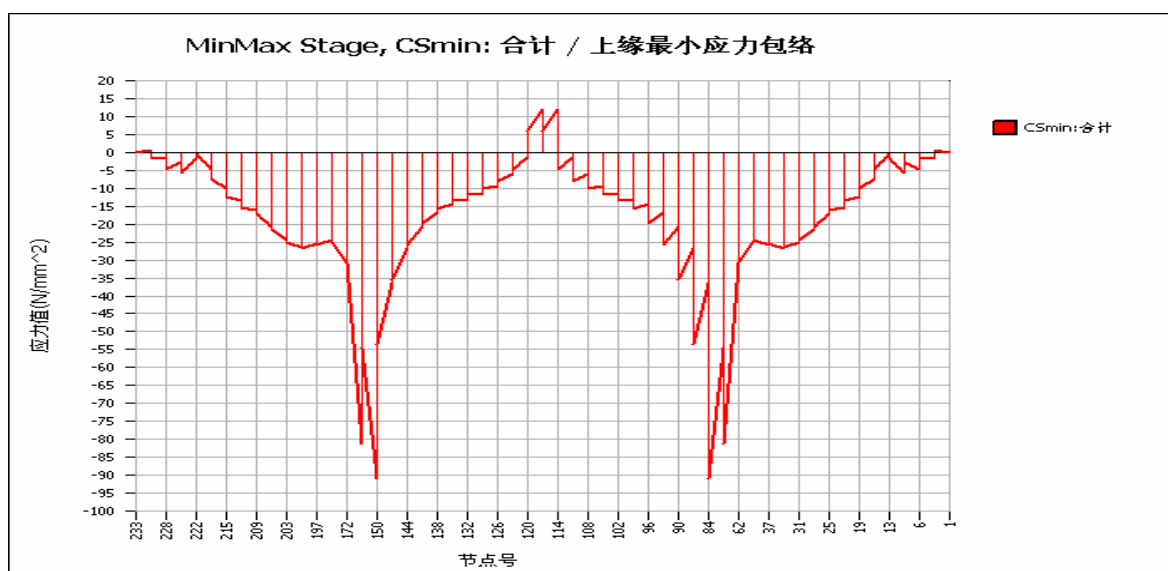
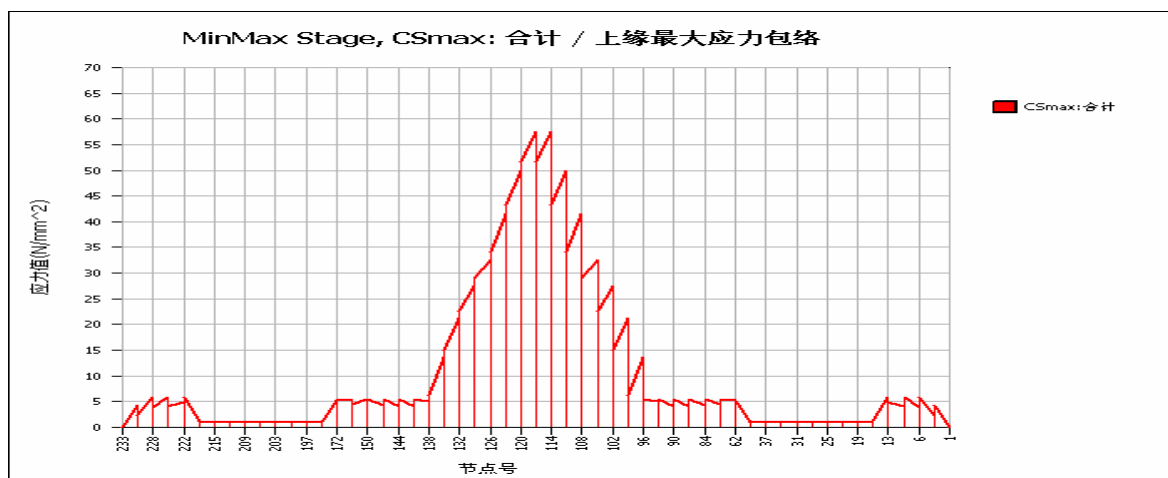
CS40

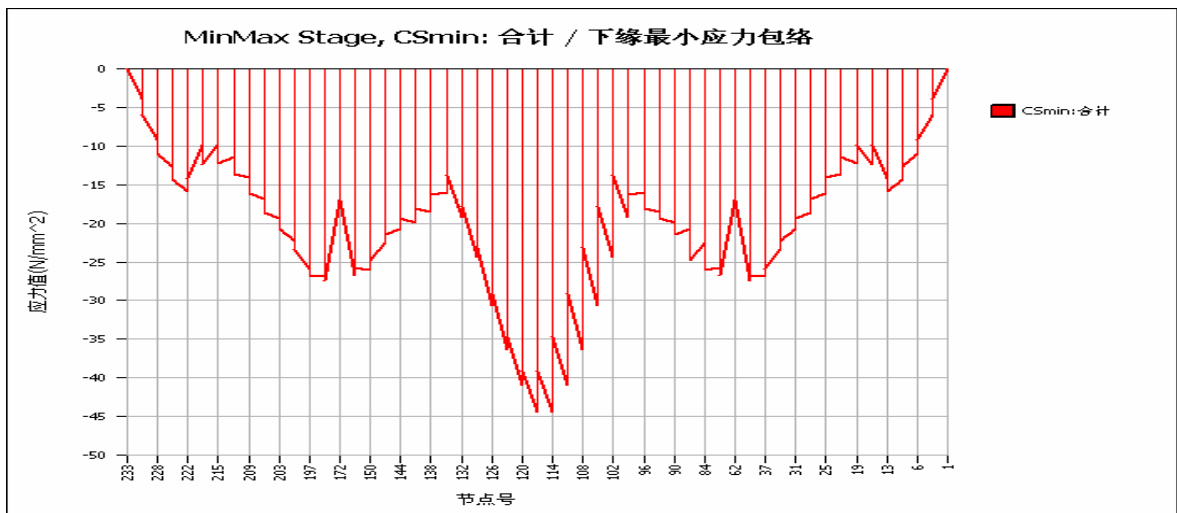


步骤图示如上。

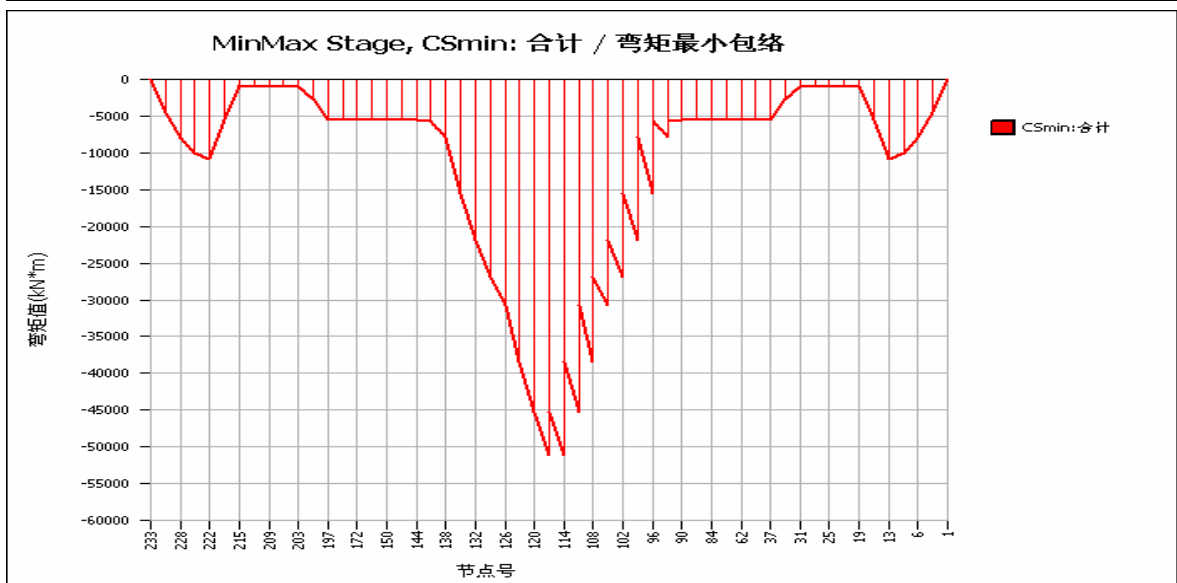
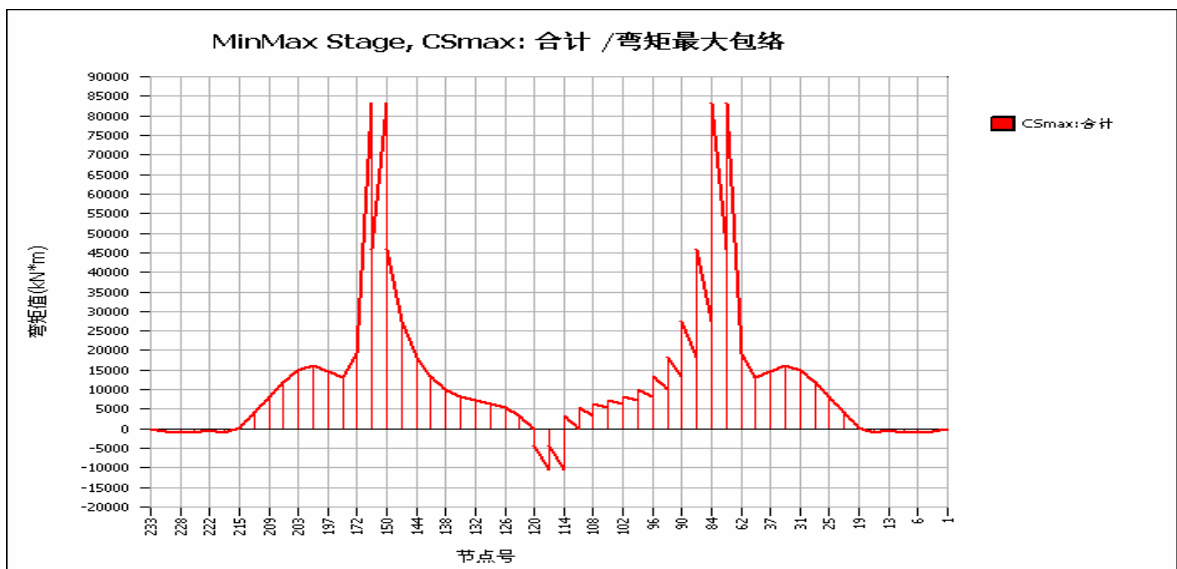
6.4 施工阶段主梁内力计算图：（这里仅列出组合包络图）

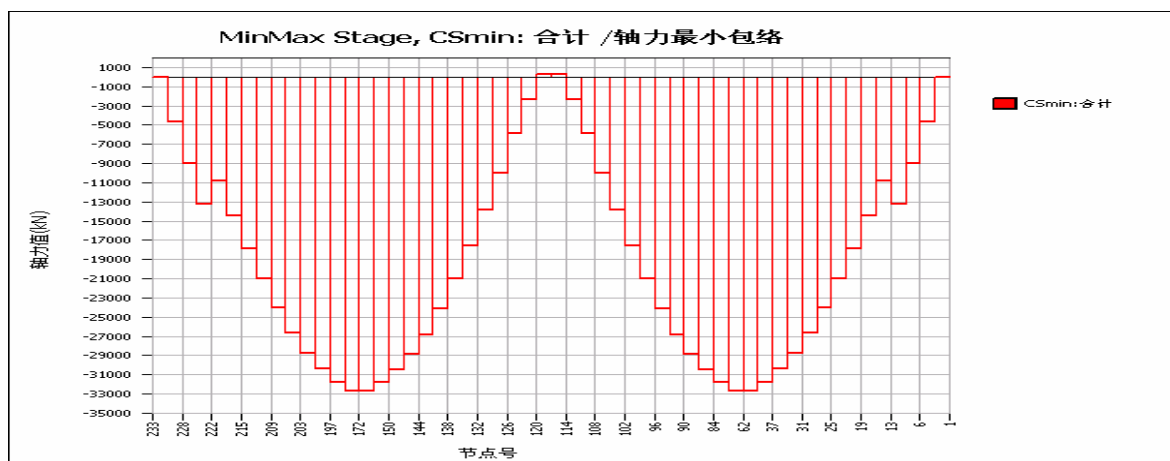
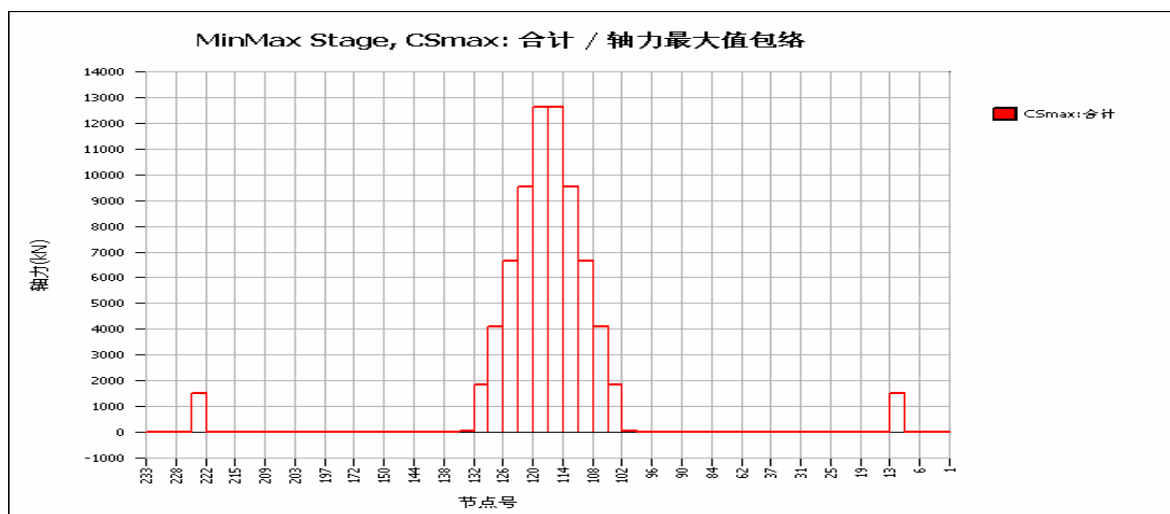
6.4.1、施工阶段应力包络图





6.4.2、施工阶段内力包络图





第七章 强度验算

7.1 钢主梁强度验算

7.1.1、验算原理:

目前,国内外钢桥设计主要采用容许应力法和半概率半极限状态设计法。我国采用容许应力法。

计算公式:

$$\sigma \leq \gamma[\sigma]$$

式中: σ ——结构标准荷载的计算应力,不考虑荷载组合系数(即所有荷载组合系数为 1.0);

$[\sigma]$ ——设计规范规定的容许应力,对于钢桥结构约 $f_y/1.7$;

f_y ——钢材屈服强度;

1. 7——综合安全系数;

γ ——不同荷载组合的容许应力提高系数。

本桥根据《公路钢桥设计规范》JTJ 025-86 进行容许应力法验算。

钢材容许应力参考《公路钢桥规范》JTJ 025-86:

钢材容许应力 (Mpa) ——公路钢桥规范							
应力种类	钢材种类						
	Q235	Q345	ZG25II	ZG35II	ZG45II	45 号钢	35 号钢
轴向应力	140	200	130	150	170	210	
弯曲应力	145	210	135	155	180	220	220
剪应力	85	120	80	90	100	125	110
端部承压应力	210	300					
紧密接触的承压应力	70	100	65	75	85	105	105
自由接触的承压应力	5.5	8	5	6	7	8.5	8.5
节点销子的空壁承压应力	210	300	195	225	255		180
节点销子的弯曲应力	210	340				360	

容许应力提高系数参考《公路钢桥规范》JTJ 025-86:

容许应力提高系数		
构造物性质	荷载组合	提高系数值
永久性结构	组合 I	1
	组合 II、III、IV	1.25
	组合 V	1.30~1.40
临时性结构	组合 I	1.3
	组合 II、III、IV、V	1.4

注: 节点销子的容许弯应力在任何荷载作用下, 均不得提高

验算控制应力				
构造物性质	荷载组合	容许应力×提高系数值		
		轴向应力	剪应力	弯曲应力
永久性构造	组合 I	200	120	210
	组合 II、III、IV	250	150	262.5
	组合 V	260	156	273

注意: 以下验算应力单位: Mpa。

7.1.2、成桥主梁单元强度验算:

此处进行保守验算, 若包络值通过最小组合容许控制应力, 则无需进行全部组合验算。

单元	荷载	位置	轴向	剪应力	弯曲应力 (+z)	弯曲应力 (-z)	上缘应力 (+z)	下缘应力 (-z)	验算结果
1	组合包络(最大)	I[3]	0.00	-0.62	2.29	1.27	2.29	1.27	通过
1	组合包络(最大)	2/4	0.00	0.86	0.44	1.34	0.44	1.34	通过

1	组合包络(最大)	J[1]	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
5	组合包络(最大)	I[6]	-3.16	-1.36	3.28	5.77	0.08	2.44	通过
5	组合包络(最大)	2/4	-3.16	1.54	-0.07	6.31	-3.26	2.98	通过
5	组合包络(最大)	J[3]	-3.16	4.49	2.29	1.27	-0.95	-1.97	通过
10	组合包络(最大)	I[9]	-6.14	-2.03	6.78	6.90	0.58	0.42	通过
10	组合包络(最大)	2/4	-6.14	0.82	2.20	9.10	-4.00	2.61	通过
10	组合包络(最大)	J[6]	-6.14	3.73	3.28	5.77	-2.93	-0.71	通过
15	组合包络(最大)	I[13]	-8.96	-2.42	13.30	6.54	4.16	-2.97	通过
15	组合包络(最大)	2/4	-8.96	0.31	6.98	8.74	-2.08	-0.74	通过
15	组合包络(最大)	J[9]	-8.96	3.08	6.78	6.90	-2.26	-2.59	通过
21	组合包络(最大)	I[16]	-7.26	-0.32	4.67	7.42	-2.65	-7.86	通过
21	组合包络(最大)	2/4	-7.26	2.54	5.89	9.13	-1.45	-6.90	通过
21	组合包络(最大)	J[13]	-7.26	5.42	13.30	6.54	5.89	-10.10	通过
26	组合包络(最大)	I[19]	-9.77	-1.13	1.34	9.21	-9.11	-7.03	通过
26	组合包络(最大)	2/4	-9.77	1.72	-0.45	10.50	-10.40	-6.57	通过
26	组合包络(最大)	J[16]	-9.77	4.59	4.67	7.42	-5.18	-10.50	通过
31	组合包络(最大)	I[22]	-12.10	-1.85	1.72	10.10	-11.30	-7.39	通过
31	组合包络(最大)	2/4	-12.10	0.98	-1.40	12.30	-14.40	-5.75	通过
31	组合包络(最大)	J[19]	-12.10	3.86	1.34	9.21	-11.60	-9.41	通过
37	组合包络(最大)	I[25]	-14.40	-2.35	2.85	9.17	-12.50	-9.67	通过
37	组合包络(最大)	2/4	-14.40	0.47	-0.55	12.30	-15.90	-6.98	通过
37	组合包络(最大)	J[22]	-14.40	3.34	1.72	10.10	-13.70	-9.65	通过
46	组合包络(最大)	I[28]	-16.50	-2.53	3.64	7.50	-13.80	-12.80	通过
46	组合包络(最大)	2/4	-16.50	0.28	0.41	11.00	-17.10	-9.61	通过
46	组合包络(最大)	J[25]	-16.50	3.14	2.85	9.17	-14.70	-11.80	通过
55	组合包络(最大)	I[31]	-18.30	-2.52	4.00	5.67	-15.30	-16.00	通过
55	组合包络(最大)	2/4	-18.30	0.29	0.97	9.24	-18.40	-12.70	通过
55	组合包络(最大)	J[28]	-18.30	3.14	3.64	7.50	-15.70	-14.70	通过
64	组合包络(最大)	I[34]	-19.90	-2.74	5.24	3.19	-15.50	-19.70	通过
64	组合包络(最大)	2/4	-19.90	0.07	1.75	7.07	-19.00	-16.00	通过
64	组合包络(最大)	J[31]	-19.90	2.92	4.00	5.67	-16.80	-17.50	通过
73	组合包络(最大)	I[37]	-21.00	-2.97	7.74	0.27	-14.20	-23.90	通过
73	组合包络(最大)	2/4	-21.00	-0.16	3.61	4.36	-18.30	-19.80	通过
73	组合包络(最大)	J[34]	-21.00	2.71	5.24	3.19	-16.70	-21.00	通过
82	组合包络(最大)	I[40]	-22.00	-2.17	7.52	0.59	-15.30	-25.00	通过
82	组合包络(最大)	2/4	-22.00	0.65	4.76	3.07	-18.10	-22.30	通过
82	组合包络(最大)	J[37]	-22.00	3.52	7.74	0.27	-15.10	-24.90	通过
91	组合包络(最大)	I[62]	-22.70	0.87	-4.29	12.40	-27.80	-14.80	通过
91	组合包络(最大)	2/4	-22.70	3.71	-1.26	9.18	-24.70	-17.60	通过
91	组合包络(最大)	J[40]	-22.70	6.59	7.52	0.59	-16.00	-25.70	通过
137	组合包络(最大)	I[81]	-22.70	-4.82	6.80	3.06	-16.60	-25.00	通过
137	组合包络(最大)	2/4	-22.70	-2.00	-1.61	10.40	-25.10	-17.30	通过
137	组合包络(最大)	J[62]	-22.70	0.87	-4.29	12.40	-27.80	-14.80	通过
146	组合包络(最大)	I[84]	-22.00	-2.03	6.55	4.09	-16.30	-23.90	通过

146	组合包络(最大)	2/4	-22.00	0.80	3.79	6.21	-19.00	-21.50	通过
146	组合包络(最大)	J[81]	-22.00	3.68	6.80	3.06	-16.00	-24.30	通过
155	组合包络(最大)	I[87]	-21.10	-1.54	4.25	6.93	-17.70	-20.50	通过
155	组合包络(最大)	2/4	-21.10	1.29	2.51	8.15	-19.40	-19.10	通过
155	组合包络(最大)	J[84]	-21.10	4.17	6.55	4.09	-15.30	-22.90	通过
164	组合包络(最大)	I[90]	-20.00	-1.96	3.57	8.20	-17.10	-18.30	通过
164	组合包络(最大)	2/4	-20.00	0.87	1.03	10.20	-19.70	-16.20	通过
164	组合包络(最大)	J[87]	-20.00	3.74	4.25	6.93	-16.50	-19.30	通过
173	组合包络(最大)	I[93]	-18.50	-2.29	4.21	8.16	-14.90	-17.00	通过
173	组合包络(最大)	2/4	-18.50	0.53	1.01	10.80	-18.10	-14.20	通过
173	组合包络(最大)	J[90]	-18.50	3.40	3.57	8.20	-15.60	-16.80	通过
182	组合包络(最大)	I[96]	-16.70	-2.22	4.58	8.33	-12.50	-15.00	通过
182	组合包络(最大)	2/4	-16.70	0.60	1.52	10.90	-15.60	-12.40	通过
182	组合包络(最大)	J[93]	-16.70	3.46	4.21	8.16	-13.00	-15.00	通过
191	组合包络(最大)	I[99]	-14.50	-2.02	4.17	9.19	-10.60	-12.00	通过
191	组合包络(最大)	2/4	-14.50	0.79	1.50	11.40	-13.30	-9.70	通过
191	组合包络(最大)	J[96]	-14.50	3.65	4.58	8.33	-10.30	-12.70	通过
197	组合包络(最大)	I[102]	-12.10	-1.85	3.06	10.70	-9.08	-8.07	通过
197	组合包络(最大)	2/4	-12.10	0.97	0.75	12.60	-11.40	-6.11	通过
197	组合包络(最大)	J[99]	-12.10	3.82	4.17	9.19	-8.04	-9.42	通过
202	组合包络(最大)	I[105]	-9.51	-1.87	1.98	12.10	-7.45	-4.12	通过
202	组合包络(最大)	2/4	-9.51	0.94	-0.34	14.00	-9.79	-2.11	通过
202	组合包络(最大)	J[102]	-9.51	3.79	3.06	10.70	-6.42	-5.36	通过
207	组合包络(最大)	I[108]	-6.80	-2.07	1.63	12.60	-4.99	-0.88	通过
207	组合包络(最大)	2/4	-6.80	0.73	-1.05	15.00	-7.68	1.55	通过
207	组合包络(最大)	J[105]	-6.80	3.59	1.98	12.10	-4.66	-1.29	通过
212	组合包络(最大)	I[111]	-3.96	-2.40	2.48	11.70	-1.21	1.09	通过
212	组合包络(最大)	2/4	-3.96	0.41	-0.80	14.80	-4.50	4.22	通过
212	组合包络(最大)	J[108]	-3.96	3.25	1.63	12.60	-2.08	2.07	通过
217	组合包络(最大)	I[114]	-1.02	-2.86	5.13	8.85	4.51	1.19	通过
217	组合包络(最大)	2/4	-1.02	-0.07	0.96	12.90	0.28	5.29	通过
217	组合包络(最大)	J[111]	-1.02	2.77	2.48	11.70	1.79	4.13	通过
222	组合包络(最大)	I[117]	1.95	-3.60	11.00	3.16	13.40	-1.53	通过
222	组合包络(最大)	2/4	1.95	-0.81	5.15	8.59	7.57	3.95	通过
222	组合包络(最大)	J[114]	1.95	2.02	5.13	8.85	7.50	4.23	通过
227	组合包络(最大)	I[117]	1.95	-3.60	11.00	3.16	12.60	-2.29	通过
227	组合包络(最大)	2/4	1.95	-0.79	5.15	8.59	6.78	3.18	通过
227	组合包络(最大)	J[120]	1.95	2.02	5.13	8.85	6.79	3.47	通过
232	组合包络(最大)	I[120]	-1.02	-2.86	5.13	8.85	3.85	0.49	通过
232	组合包络(最大)	2/4	-1.02	-0.05	0.96	12.90	-0.34	4.60	通过
232	组合包络(最大)	J[123]	-1.02	2.77	2.48	11.70	1.17	3.47	通过
237	组合包络(最大)	I[123]	-3.96	-2.40	2.48	11.70	-1.76	0.50	通过
237	组合包络(最大)	2/4	-3.96	0.43	-0.80	14.80	-5.06	3.63	通过
237	组合包络(最大)	J[126]	-3.96	3.25	1.63	12.60	-2.65	1.50	通过

装
订
线

242	组合包络(最大)	I[126]	-6.80	-2.07	1.63	12.60	-5.49	-1.38	通过
242	组合包络(最大)	2/4	-6.80	0.76	-1.05	15.00	-8.19	1.05	通过
242	组合包络(最大)	J[129]	-6.80	3.59	1.98	12.10	-5.18	-1.77	通过
247	组合包络(最大)	I[129]	-9.51	-1.87	1.98	12.10	-7.88	-4.53	通过
247	组合包络(最大)	2/4	-9.51	0.96	-0.34	14.00	-10.20	-2.52	通过
247	组合包络(最大)	J[132]	-9.51	3.79	3.06	10.70	-6.86	-5.76	通过
252	组合包络(最大)	I[132]	-12.10	-1.85	3.06	10.70	-9.44	-8.39	通过
252	组合包络(最大)	2/4	-12.10	0.98	0.75	12.60	-11.80	-6.44	通过
252	组合包络(最大)	J[135]	-12.10	3.82	4.17	9.19	-8.39	-9.75	通过
258	组合包络(最大)	I[135]	-14.50	-2.02	4.17	9.19	-10.80	-12.20	通过
258	组合包络(最大)	2/4	-14.50	0.81	1.50	11.40	-13.50	-9.96	通过
258	组合包络(最大)	J[138]	-14.50	3.65	4.58	8.33	-10.50	-13.00	通过
267	组合包络(最大)	I[138]	-16.70	-2.22	4.58	8.33	-12.60	-15.20	通过
267	组合包络(最大)	2/4	-16.70	0.62	1.52	10.90	-15.70	-12.60	通过
267	组合包络(最大)	J[141]	-16.70	3.46	4.21	8.16	-13.00	-15.20	通过
276	组合包络(最大)	I[141]	-18.50	-2.29	4.21	8.16	-14.80	-17.10	通过
276	组合包络(最大)	2/4	-18.50	0.55	1.01	10.80	-18.00	-14.40	通过
276	组合包络(最大)	J[144]	-18.50	3.40	3.57	8.20	-15.50	-16.90	通过
285	组合包络(最大)	I[144]	-20.00	-1.96	3.57	8.20	-16.80	-18.30	通过
285	组合包络(最大)	2/4	-20.00	0.89	1.03	10.20	-19.40	-16.20	通过
285	组合包络(最大)	J[147]	-20.00	3.74	4.25	6.93	-16.10	-19.40	通过
294	组合包络(最大)	I[147]	-21.10	-1.54	4.25	6.93	-17.20	-20.50	通过
294	组合包络(最大)	2/4	-21.10	1.31	2.51	8.15	-18.90	-19.10	通过
294	组合包络(最大)	J[150]	-21.10	4.17	6.55	4.09	-14.80	-22.90	通过
303	组合包络(最大)	I[150]	-22.00	-2.03	6.55	4.09	-15.70	-23.80	通过
303	组合包络(最大)	2/4	-22.00	0.82	3.79	6.21	-18.40	-21.40	通过
303	组合包络(最大)	J[153]	-22.00	3.68	6.80	3.06	-15.30	-24.20	通过
312	组合包络(最大)	I[153]	-22.70	-4.82	6.80	3.06	-16.00	-24.90	通过
312	组合包络(最大)	2/4	-22.70	-1.98	-1.61	10.40	-24.40	-17.10	通过
312	组合包络(最大)	J[172]	-22.70	0.87	-4.29	12.40	-27.00	-14.50	通过
358	组合包络(最大)	I[172]	-22.70	0.87	-4.29	12.40	-27.00	-14.50	通过
358	组合包络(最大)	2/4	-22.70	3.73	-1.26	9.18	-23.90	-17.30	通过
358	组合包络(最大)	J[194]	-22.70	6.59	7.52	0.59	-15.10	-25.50	通过
367	组合包络(最大)	I[194]	-22.00	-2.17	7.52	0.59	-14.50	-24.80	通过
367	组合包络(最大)	2/4	-22.00	0.67	4.76	3.07	-17.30	-22.10	通过
367	组合包络(最大)	J[197]	-22.00	3.52	7.74	0.27	-14.40	-24.60	通过
376	组合包络(最大)	I[197]	-21.00	-2.97	7.74	0.27	-13.50	-23.70	通过
376	组合包络(最大)	2/4	-21.00	-0.14	3.61	4.36	-17.70	-19.60	通过
376	组合包络(最大)	J[200]	-21.00	2.71	5.24	3.19	-16.00	-20.70	通过
385	组合包络(最大)	I[200]	-19.90	-2.74	5.24	3.19	-15.00	-19.50	通过
385	组合包络(最大)	2/4	-19.90	0.08	1.75	7.07	-18.50	-15.70	通过
385	组合包络(最大)	J[203]	-19.90	2.92	4.00	5.67	-16.30	-17.10	通过
394	组合包络(最大)	I[203]	-18.30	-2.52	4.00	5.67	-14.90	-15.70	通过
394	组合包络(最大)	2/4	-18.30	0.31	0.97	9.24	-17.90	-12.30	通过

394	组合包络(最大)	J[206]	-18.30	3.14	3.64	7.50	-15.20	-14.30	通过
403	组合包络(最大)	I[206]	-16.50	-2.53	3.64	7.50	-13.50	-12.50	通过
403	组合包络(最大)	2/4	-16.50	0.30	0.41	11.00	-16.70	-9.37	通过
403	组合包络(最大)	J[209]	-16.50	3.14	2.85	9.17	-14.20	-11.50	通过
412	组合包络(最大)	I[209]	-14.40	-2.35	2.85	9.17	-12.10	-9.53	通过
412	组合包络(最大)	2/4	-14.40	0.49	-0.55	12.30	-15.50	-6.83	通过
412	组合包络(最大)	J[212]	-14.40	3.34	1.72	10.10	-13.20	-9.46	通过
418	组合包络(最大)	I[212]	-12.10	-1.85	1.72	10.10	-11.00	-7.30	通过
418	组合包络(最大)	2/4	-12.10	1.00	-1.40	12.30	-13.90	-5.62	通过
418	组合包络(最大)	J[215]	-12.10	3.86	1.34	9.21	-11.00	-9.25	通过
423	组合包络(最大)	I[215]	-9.77	-1.13	1.34	9.21	-8.68	-6.95	通过
423	组合包络(最大)	2/4	-9.77	1.73	-0.45	10.50	-10.10	-6.42	通过
423	组合包络(最大)	J[218]	-9.77	4.59	4.67	7.42	-5.00	-10.20	通过
428	组合包络(最大)	I[218]	-7.26	-0.32	4.67	7.42	-2.56	-7.64	通过
428	组合包络(最大)	2/4	-7.26	2.54	5.89	9.13	-1.31	-6.67	通过
428	组合包络(最大)	J[222]	-7.26	5.42	13.30	6.54	6.09	-9.87	通过
434	组合包络(最大)	I[222]	-8.96	-2.42	13.30	6.54	4.43	-2.84	通过
434	组合包络(最大)	2/4	-8.96	0.32	6.98	8.74	-1.90	-0.46	通过
434	组合包络(最大)	J[225]	-8.96	3.08	6.78	6.90	-2.14	-2.28	通过
439	组合包络(最大)	I[225]	-6.14	-2.03	6.78	6.90	0.66	0.62	通过
439	组合包络(最大)	2/4	-6.14	0.84	2.20	9.10	-3.93	2.82	通过
439	组合包络(最大)	J[228]	-6.14	3.73	3.28	5.77	-2.85	-0.50	通过
444	组合包络(最大)	I[228]	-3.16	-1.36	3.28	5.77	0.11	2.55	通过
444	组合包络(最大)	2/4	-3.16	1.55	-0.07	6.31	-3.23	3.09	通过
444	组合包络(最大)	J[231]	-3.16	4.49	2.29	1.27	-0.91	-1.89	通过
448	组合包络(最大)	I[231]	0.00	-0.62	2.29	1.27	2.29	1.27	通过
448	组合包络(最大)	2/4	0.00	0.86	0.44	1.34	0.44	1.34	通过
448	组合包络(最大)	J[233]	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
1	组合包络(最小)	I[3]	0.00	-2.51	-1.41	-2.05	-1.41	-2.05	通过
1	组合包络(最小)	2/4	0.00	-1.13	-1.50	-0.39	-1.50	-0.39	通过
1	组合包络(最小)	J[1]	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
5	组合包络(最小)	I[6]	-3.35	-3.32	-6.45	-2.93	-9.85	-6.14	通过
5	组合包络(最小)	2/4	-3.35	-0.41	-7.05	0.06	-10.40	-3.15	通过
5	组合包络(最小)	J[3]	-3.35	2.45	-1.41	-2.05	-4.78	-5.36	通过
10	组合包络(最小)	I[9]	-6.52	-4.23	-7.71	-6.07	-14.30	-12.30	通过
10	组合包络(最小)	2/4	-6.52	-1.31	-10.20	-1.97	-16.80	-8.20	通过
10	组合包络(最小)	J[6]	-6.52	1.57	-6.45	-2.93	-13.10	-9.16	通过
15	组合包络(最小)	I[13]	-9.53	-5.13	-7.31	-11.90	-16.90	-21.00	通过
15	组合包络(最小)	2/4	-9.53	-2.25	-9.76	-6.25	-19.40	-15.40	通过
15	组合包络(最小)	J[9]	-9.53	0.65	-7.71	-6.07	-17.40	-15.20	通过
21	组合包络(最小)	I[16]	-33.10	-2.78	-8.29	-4.18	-41.40	-29.30	通过
21	组合包络(最小)	2/4	-33.10	-0.04	-10.20	-5.28	-43.50	-29.80	通过
21	组合包络(最小)	J[13]	-33.10	2.69	-7.31	-11.90	-40.60	-35.80	通过
26	组合包络(最小)	I[19]	-35.80	-3.10	-10.30	-1.20	-45.50	-30.70	通过

26	组合包络(最小)	2/4	-35.80	-0.29	-11.70	0.41	-47.60	-28.30	通过
26	组合包络(最小)	J[16]	-35.80	2.45	-8.29	-4.18	-44.20	-31.80	通过
31	组合包络(最小)	I[22]	-38.20	-3.52	-11.30	-1.54	-48.80	-34.70	通过
31	组合包络(最小)	2/4	-38.20	-0.67	-13.70	1.25	-51.30	-31.40	通过
31	组合包络(最小)	J[19]	-38.20	2.13	-10.30	-1.20	-48.00	-33.20	通过
37	组合包络(最小)	I[25]	-40.60	-3.79	-10.20	-2.55	-50.10	-38.90	通过
37	组合包络(最小)	2/4	-40.60	-0.93	-13.70	0.49	-53.60	-35.40	通过
37	组合包络(最小)	J[22]	-40.60	1.88	-11.30	-1.54	-51.20	-37.10	通过
46	组合包络(最小)	I[28]	-42.70	-3.82	-8.37	-3.25	-50.40	-42.50	通过
46	组合包络(最小)	2/4	-42.70	-0.96	-12.30	-0.37	-54.30	-39.20	通过
46	组合包络(最小)	J[25]	-42.70	1.87	-10.20	-2.55	-52.30	-41.10	通过
55	组合包络(最小)	I[31]	-44.60	-3.83	-6.34	-3.58	-50.30	-45.20	通过
55	组合包络(最小)	2/4	-44.60	-0.96	-10.30	-0.87	-54.30	-42.20	通过
55	组合包络(最小)	J[28]	-44.60	1.87	-8.37	-3.25	-52.40	-44.40	通过
64	组合包络(最小)	I[34]	-46.10	-4.03	-3.56	-4.69	-49.00	-48.10	通过
64	组合包络(最小)	2/4	-46.10	-1.15	-7.90	-1.57	-53.40	-44.80	通过
64	组合包络(最小)	J[31]	-46.10	1.68	-6.34	-3.58	-51.90	-46.70	通过
73	组合包络(最小)	I[37]	-47.20	-4.18	-0.30	-6.93	-46.90	-51.40	通过
73	组合包络(最小)	2/4	-47.20	-1.30	-4.87	-3.24	-51.50	-47.80	通过
73	组合包络(最小)	J[34]	-47.20	1.53	-3.56	-4.69	-50.30	-49.30	通过
82	组合包络(最小)	I[40]	-48.20	-3.41	-0.66	-6.73	-48.40	-51.80	通过
82	组合包络(最小)	2/4	-48.20	-0.54	-3.42	-4.26	-51.10	-49.50	通过
82	组合包络(最小)	J[37]	-48.20	2.29	-0.30	-6.93	-48.00	-52.40	通过
91	组合包络(最小)	I[62]	-48.90	-0.43	-13.90	3.84	-62.50	-41.00	通过
91	组合包络(最小)	2/4	-48.90	2.44	-10.30	1.13	-58.80	-44.20	通过
91	组合包络(最小)	J[40]	-48.90	5.25	-0.66	-6.73	-49.20	-52.50	通过
137	组合包络(最小)	I[81]	-48.90	-6.15	-3.42	-6.09	-52.00	-50.10	通过
137	组合包络(最小)	2/4	-48.90	-3.27	-11.60	1.44	-60.20	-43.00	通过
137	组合包络(最小)	J[62]	-48.90	-0.43	-13.90	3.84	-62.50	-41.00	通过
146	组合包络(最小)	I[84]	-48.20	-3.30	-4.57	-5.86	-52.40	-48.50	通过
146	组合包络(最小)	2/4	-48.20	-0.43	-6.94	-3.39	-54.70	-46.30	通过
146	组合包络(最小)	J[81]	-48.20	2.39	-3.42	-6.09	-51.30	-49.30	通过
155	组合包络(最小)	I[87]	-47.30	-2.76	-7.74	-3.81	-54.60	-45.10	通过
155	组合包络(最小)	2/4	-47.30	0.11	-9.10	-2.25	-55.90	-43.70	通过
155	组合包络(最小)	J[84]	-47.30	2.92	-4.57	-5.86	-51.30	-47.50	通过
164	组合包络(最小)	I[90]	-46.20	-3.14	-9.15	-3.20	-54.80	-43.00	通过
164	组合包络(最小)	2/4	-46.20	-0.28	-11.40	-0.92	-57.00	-40.90	通过
164	组合包络(最小)	J[87]	-46.20	2.53	-7.74	-3.81	-53.30	-43.90	通过
173	组合包络(最小)	I[93]	-44.70	-3.46	-9.12	-3.77	-53.30	-41.90	通过
173	组合包络(最小)	2/4	-44.70	-0.61	-12.10	-0.91	-56.20	-39.20	通过
173	组合包络(最小)	J[90]	-44.70	2.20	-9.15	-3.20	-53.20	-41.50	通过
182	组合包络(最小)	I[96]	-42.80	-3.40	-9.30	-4.10	-51.60	-40.20	通过
182	组合包络(最小)	2/4	-42.80	-0.55	-12.20	-1.36	-54.40	-37.50	通过
182	组合包络(最小)	J[93]	-42.80	2.25	-9.12	-3.77	-51.30	-40.00	通过

191	组合包络(最小)	I[99]	-40.50	-3.21	-10.30	-3.74	-50.40	-37.40	通过
191	组合包络(最小)	2/4	-40.50	-0.37	-12.70	-1.35	-52.80	-35.10	通过
191	组合包络(最小)	J[96]	-40.50	2.43	-9.30	-4.10	-49.30	-37.90	通过
197	组合包络(最小)	I[102]	-38.00	-3.04	-11.90	-2.74	-49.60	-33.80	通过
197	组合包络(最小)	2/4	-38.00	-0.21	-14.00	-0.67	-51.70	-31.80	通过
197	组合包络(最小)	J[99]	-38.00	2.59	-10.30	-3.74	-47.80	-35.00	通过
202	组合包络(最小)	I[105]	-35.30	-3.07	-13.50	-1.78	-48.50	-30.10	通过
202	组合包络(最小)	2/4	-35.30	-0.23	-15.60	0.30	-50.60	-28.10	通过
202	组合包络(最小)	J[102]	-35.30	2.56	-11.90	-2.74	-46.90	-31.20	通过
207	组合包络(最小)	I[108]	-32.60	-3.28	-14.10	-1.46	-46.30	-26.90	通过
207	组合包络(最小)	2/4	-32.60	-0.45	-16.70	0.94	-48.90	-24.60	通过
207	组合包络(最小)	J[105]	-32.60	2.35	-13.50	-1.78	-45.70	-27.40	通过
212	组合包络(最小)	I[111]	-29.60	-3.66	-13.10	-2.22	-42.40	-24.70	通过
212	组合包络(最小)	2/4	-29.60	-0.82	-16.50	0.72	-45.80	-21.80	通过
212	组合包络(最小)	J[108]	-29.60	1.98	-14.10	-1.46	-43.40	-24.00	通过
217	组合包络(最小)	I[114]	-26.60	-4.19	-9.89	-4.60	-36.20	-24.00	通过
217	组合包络(最小)	2/4	-26.60	-1.35	-14.40	-0.86	-40.80	-20.30	通过
217	组合包络(最小)	J[111]	-26.60	1.44	-13.10	-2.22	-39.40	-21.70	通过
222	组合包络(最小)	I[117]	-23.70	-5.02	-3.52	-9.81	-26.90	-26.20	通过
222	组合包络(最小)	2/4	-23.70	-2.18	-9.59	-4.61	-33.00	-21.00	通过
222	组合包络(最小)	J[114]	-23.70	0.62	-9.89	-4.60	-33.20	-21.00	通过
227	组合包络(最小)	I[117]	-23.70	-5.02	-3.52	-9.81	-27.70	-26.70	通过
227	组合包络(最小)	2/4	-23.70	-2.20	-9.59	-4.61	-33.80	-21.50	通过
227	组合包络(最小)	J[120]	-23.70	0.62	-9.89	-4.60	-34.10	-21.50	通过
232	组合包络(最小)	I[120]	-26.60	-4.19	-9.89	-4.60	-37.10	-24.40	通过
232	组合包络(最小)	2/4	-26.60	-1.37	-14.40	-0.86	-41.60	-20.70	通过
232	组合包络(最小)	J[123]	-26.60	1.44	-13.10	-2.22	-40.20	-22.10	通过
237	组合包络(最小)	I[123]	-29.60	-3.66	-13.10	-2.22	-43.20	-25.10	通过
237	组合包络(最小)	2/4	-29.60	-0.84	-16.50	0.72	-46.60	-22.20	通过
237	组合包络(最小)	J[126]	-29.60	1.98	-14.10	-1.46	-44.10	-24.40	通过
242	组合包络(最小)	I[126]	-32.60	-3.28	-14.10	-1.46	-46.90	-27.30	通过
242	组合包络(最小)	2/4	-32.60	-0.47	-16.70	0.94	-49.50	-24.90	通过
242	组合包络(最小)	J[129]	-32.60	2.35	-13.50	-1.78	-46.30	-27.70	通过
247	组合包络(最小)	I[129]	-35.30	-3.07	-13.50	-1.78	-49.00	-30.40	通过
247	组合包络(最小)	2/4	-35.30	-0.25	-15.60	0.30	-51.10	-28.40	通过
247	组合包络(最小)	J[132]	-35.30	2.56	-11.90	-2.74	-47.40	-31.50	通过
252	组合包络(最小)	I[132]	-38.00	-3.04	-11.90	-2.74	-50.00	-34.10	通过
252	组合包络(最小)	2/4	-38.00	-0.22	-14.00	-0.67	-52.00	-32.10	通过
252	组合包络(最小)	J[135]	-38.00	2.59	-10.30	-3.74	-48.20	-35.20	通过
258	组合包络(最小)	I[135]	-40.50	-3.21	-10.30	-3.74	-50.70	-37.60	通过
258	组合包络(最小)	2/4	-40.50	-0.39	-12.70	-1.35	-53.10	-35.30	通过
258	组合包络(最小)	J[138]	-40.50	2.43	-9.30	-4.10	-49.60	-38.10	通过
267	组合包络(最小)	I[138]	-42.80	-3.40	-9.30	-4.10	-51.80	-40.30	通过
267	组合包络(最小)	2/4	-42.80	-0.57	-12.20	-1.36	-54.60	-37.60	通过

267	组合包络(最小)	J[141]	-42.80	2.25	-9.12	-3.77	-51.60	-40.00	通过
276	组合包络(最小)	I[141]	-44.70	-3.46	-9.12	-3.77	-53.40	-41.80	通过
276	组合包络(最小)	2/4	-44.70	-0.63	-12.10	-0.91	-56.40	-39.00	通过
276	组合包络(最小)	J[144]	-44.70	2.20	-9.15	-3.20	-53.40	-41.40	通过
285	组合包络(最小)	I[144]	-46.20	-3.14	-9.15	-3.20	-54.80	-42.80	通过
285	组合包络(最小)	2/4	-46.20	-0.30	-11.40	-0.92	-57.10	-40.60	通过
285	组合包络(最小)	J[147]	-46.20	2.53	-7.74	-3.81	-53.40	-43.60	通过
294	组合包络(最小)	I[147]	-47.30	-2.76	-7.74	-3.81	-54.50	-44.70	通过
294	组合包络(最小)	2/4	-47.30	0.09	-9.10	-2.25	-55.80	-43.30	通过
294	组合包络(最小)	J[150]	-47.30	2.92	-4.57	-5.86	-51.30	-47.10	通过
303	组合包络(最小)	I[150]	-48.20	-3.30	-4.57	-5.86	-52.20	-48.00	通过
303	组合包络(最小)	2/4	-48.20	-0.45	-6.94	-3.39	-54.60	-45.80	通过
303	组合包络(最小)	J[153]	-48.20	2.39	-3.42	-6.09	-51.10	-48.80	通过
312	组合包络(最小)	I[153]	-48.90	-6.15	-3.42	-6.09	-51.70	-49.50	通过
312	组合包络(最小)	2/4	-48.90	-3.28	-11.60	1.44	-59.90	-42.40	通过
312	组合包络(最小)	J[172]	-48.90	-0.43	-13.90	3.84	-62.10	-40.40	通过
358	组合包络(最小)	I[172]	-48.90	-0.43	-13.90	3.84	-62.10	-40.40	通过
358	组合包络(最小)	2/4	-48.90	2.42	-10.30	1.13	-58.40	-43.60	通过
358	组合包络(最小)	J[194]	-48.90	5.25	-0.66	-6.73	-48.80	-51.90	通过
367	组合包络(最小)	I[194]	-48.20	-3.41	-0.66	-6.73	-48.10	-51.20	通过
367	组合包络(最小)	2/4	-48.20	-0.56	-3.42	-4.26	-50.80	-48.90	通过
367	组合包络(最小)	J[197]	-48.20	2.29	-0.30	-6.93	-47.60	-51.80	通过
376	组合包络(最小)	I[197]	-47.20	-4.18	-0.30	-6.93	-46.70	-50.90	通过
376	组合包络(最小)	2/4	-47.20	-1.32	-4.87	-3.24	-51.20	-47.20	通过
376	组合包络(最小)	J[200]	-47.20	1.53	-3.56	-4.69	-49.90	-48.80	通过
385	组合包络(最小)	I[200]	-46.10	-4.03	-3.56	-4.69	-48.70	-47.60	通过
385	组合包络(最小)	2/4	-46.10	-1.17	-7.90	-1.57	-53.00	-44.40	通过
385	组合包络(最小)	J[203]	-46.10	1.68	-6.34	-3.58	-51.50	-46.30	通过
394	组合包络(最小)	I[203]	-44.60	-3.83	-6.34	-3.58	-49.90	-44.80	通过
394	组合包络(最小)	2/4	-44.60	-0.98	-10.30	-0.87	-53.90	-41.90	通过
394	组合包络(最小)	J[206]	-44.60	1.87	-8.37	-3.25	-52.00	-44.00	通过
403	组合包络(最小)	I[206]	-42.70	-3.82	-8.37	-3.25	-50.10	-42.10	通过
403	组合包络(最小)	2/4	-42.70	-0.98	-12.30	-0.37	-54.00	-38.90	通过
403	组合包络(最小)	J[209]	-42.70	1.87	-10.20	-2.55	-52.00	-40.70	通过
412	组合包络(最小)	I[209]	-40.60	-3.79	-10.20	-2.55	-49.90	-38.60	通过
412	组合包络(最小)	2/4	-40.60	-0.95	-13.70	0.49	-53.40	-35.10	通过
412	组合包络(最小)	J[212]	-40.60	1.88	-11.30	-1.54	-50.90	-36.70	通过
418	组合包络(最小)	I[212]	-38.20	-3.52	-11.30	-1.54	-48.70	-34.40	通过
418	组合包络(最小)	2/4	-38.20	-0.69	-13.70	1.25	-51.20	-31.10	通过
418	组合包络(最小)	J[215]	-38.20	2.13	-10.30	-1.20	-47.80	-32.80	通过
423	组合包络(最小)	I[215]	-35.80	-3.10	-10.30	-1.20	-45.40	-30.40	通过
423	组合包络(最小)	2/4	-35.80	-0.30	-11.70	0.41	-47.20	-27.90	通过
423	组合包络(最小)	J[218]	-35.80	2.45	-8.29	-4.18	-43.80	-31.70	通过
428	组合包络(最小)	I[218]	-33.10	-2.78	-8.29	-4.18	-41.20	-29.20	通过

428	组合包络(最小)	2/4	-33.10	-0.04	-10.20	-5.28	-43.20	-29.70	通过
428	组合包络(最小)	J[222]	-33.10	2.69	-7.31	-11.90	-40.30	-35.60	通过
434	组合包络(最小)	I[222]	-9.53	-5.13	-7.31	-11.90	-16.70	-20.80	通过
434	组合包络(最小)	2/4	-9.53	-2.26	-9.76	-6.25	-19.20	-15.20	通过
434	组合包络(最小)	J[225]	-9.53	0.65	-7.71	-6.07	-17.00	-15.10	通过
439	组合包络(最小)	I[225]	-6.52	-4.23	-7.71	-6.07	-14.10	-12.20	通过
439	组合包络(最小)	2/4	-6.52	-1.33	-10.20	-1.97	-16.50	-8.13	通过
439	组合包络(最小)	J[228]	-6.52	1.57	-6.45	-2.93	-12.80	-9.10	通过
444	组合包络(最小)	I[228]	-3.35	-3.32	-6.45	-2.93	-9.72	-6.11	通过
444	组合包络(最小)	2/4	-3.35	-0.43	-7.05	0.06	-10.30	-3.12	通过
444	组合包络(最小)	J[231]	-3.35	2.45	-1.41	-2.05	-4.65	-5.31	通过
448	组合包络(最小)	I[231]	0.00	-2.51	-1.41	-2.05	-1.41	-2.05	通过
448	组合包络(最小)	2/4	0.00	-1.13	-1.50	-0.39	-1.50	-0.39	通过
448	组合包络(最小)	J[233]	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	通过

7.1.3 施工阶段主梁单元强度验算:

单元	步骤	位置	轴向应力	剪力应力	弯曲应力 (+z)	弯曲应力 (-z)	上缘应力 (+z)	下缘应力 (-z)	验算结果
1	max	I[3]	0.00	-0.91	4.34	-0.48	4.34	-0.48	通过
1	max	2/4	0.00	-0.26	1.83	0.06	1.83	0.06	通过
1	max	J[1]	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
1	min	I[3]	0.00	-2.75	0.54	-3.89	0.54	-3.89	通过
1	min	2/4	0.00	-2.10	-0.07	-1.64	-0.07	-1.64	通过
1	min	J[1]	0.00	-1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
5	max	I[6]	0.00	-1.39	7.86	-0.82	5.77	-0.82	通过
5	max	2/4	0.00	0.06	4.75	1.11	2.66	0.56	通过
5	max	J[3]	0.00	2.80	4.34	-0.48	2.25	-0.48	通过
5	min	I[6]	-3.22	-2.67	0.91	-7.04	-1.77	-9.13	通过
5	min	2/4	-3.22	-0.85	-1.24	-4.25	-4.47	-6.34	通过
5	min	J[3]	-3.22	0.46	0.54	-3.89	-1.50	-5.98	通过
10	max	I[9]	0.00	-1.33	9.73	-0.90	5.77	-0.90	通过
10	max	2/4	0.00	-0.02	7.44	0.37	3.48	0.35	通过
10	max	J[6]	0.00	2.27	7.86	-0.82	3.89	-0.82	通过
10	min	I[9]	-6.26	-3.20	1.01	-8.71	-2.88	-12.70	通过
10	min	2/4	-6.26	-0.47	-0.41	-6.66	-6.67	-10.60	通过
10	min	J[6]	-6.26	0.85	0.91	-7.04	-4.81	-11.00	通过
15	max	I[13]	1.05	-1.17	10.60	-0.47	4.93	0.42	通过
15	max	2/4	1.05	0.14	8.80	0.49	3.15	1.49	通过
15	max	J[9]	1.05	1.73	9.73	-0.90	4.08	0.14	通过
15	min	I[13]	-9.14	-3.73	0.52	-9.47	-1.62	-15.90	通过
15	min	2/4	-9.14	-1.00	-0.54	-7.88	-6.52	-13.50	通过
15	min	J[9]	-9.14	1.10	1.01	-8.71	-5.75	-14.40	通过
21	max	I[16]	0.00	-0.05	5.38	-0.91	1.10	-0.99	通过
21	max	2/4	0.00	1.26	6.63	0.48	1.92	0.48	通过
21	max	J[13]	0.00	3.92	10.60	-0.47	5.87	-0.47	通过

21	min	I[16]	-7.48	-1.55	1.01	-4.82	-4.87	-9.82	通过
21	min	2/4	-7.48	-0.14	-0.54	-5.93	-5.24	-10.60	通过
21	min	J[13]	-7.48	1.17	0.52	-9.47	-0.35	-14.20	通过
26	max	I[19]	0.00	-0.09	0.90	0.14	0.90	-0.80	通过
26	max	2/4	0.00	1.22	1.51	1.43	-0.36	0.36	通过
26	max	J[16]	0.00	3.40	5.38	-0.91	1.10	-0.91	通过
26	min	I[19]	-10.00	-2.06	-0.16	-0.80	-10.20	-9.87	通过
26	min	2/4	-10.00	0.03	-1.60	-1.35	-11.60	-8.58	通过
26	min	J[16]	-10.00	1.33	1.01	-4.82	-7.40	-12.40	通过
31	max	I[22]	0.00	-0.24	0.90	3.66	0.90	-0.81	通过
31	max	2/4	0.00	1.07	-0.45	3.05	-0.45	0.41	通过
31	max	J[19]	0.00	2.93	0.90	0.14	0.90	-0.80	通过
31	min	I[22]	-12.40	-2.53	-4.08	-0.81	-13.40	-11.50	通过
31	min	2/4	-12.40	0.00	-3.41	0.41	-15.80	-9.33	通过
31	min	J[19]	-12.40	1.30	-0.16	-0.80	-12.50	-12.20	通过
37	max	I[25]	0.00	-0.39	0.90	7.06	0.90	-0.81	通过
37	max	2/4	0.00	0.92	-0.45	6.57	-0.45	0.40	通过
37	max	J[22]	0.00	2.62	0.90	3.66	0.90	-0.81	通过
37	min	I[25]	-14.60	-2.84	-7.89	-0.81	-16.20	-14.10	通过
37	min	2/4	-14.60	-0.11	-7.34	0.40	-18.20	-11.40	通过
37	min	J[22]	-14.60	1.31	-4.08	-0.81	-15.60	-13.70	通过
46	max	I[28]	0.00	-0.45	0.90	10.20	0.90	0.96	通过
46	max	2/4	0.00	0.85	-0.45	9.86	-0.45	0.59	通过
46	max	J[25]	0.00	2.55	0.90	7.06	0.90	-0.81	通过
46	min	I[28]	-16.70	-2.91	-11.40	-0.81	-20.70	-16.80	通过
46	min	2/4	-16.70	-0.18	-11.00	0.40	-20.30	-14.00	通过
46	min	J[25]	-16.70	1.31	-7.89	-0.81	-17.20	-16.20	通过
55	max	I[31]	0.00	-0.57	0.93	13.00	0.90	2.85	通过
55	max	2/4	0.00	0.73	-0.45	12.80	-0.45	2.70	通过
55	max	J[28]	0.00	2.56	0.90	10.20	0.90	0.13	通过
55	min	I[31]	-18.50	-2.91	-14.50	-0.83	-24.60	-19.30	通过
55	min	2/4	-18.50	-0.18	-14.30	0.40	-24.40	-16.50	通过
55	min	J[28]	-18.50	1.31	-11.40	-0.81	-21.50	-18.70	通过
64	max	I[34]	0.00	-1.03	2.63	14.00	0.90	3.28	通过
64	max	2/4	0.00	0.28	-0.45	14.70	-0.45	3.97	通过
64	max	J[31]	0.00	2.32	0.93	13.00	0.90	2.24	通过
64	min	I[34]	-19.90	-3.14	-15.60	-2.36	-26.30	-22.30	通过
64	min	2/4	-19.90	-0.41	-16.40	0.40	-27.10	-19.00	通过
64	min	J[31]	-19.90	1.31	-14.50	-0.83	-25.20	-20.80	通过
73	max	I[37]	0.00	-1.31	5.38	12.80	0.91	1.60	通过
73	max	2/4	0.00	0.00	1.18	14.60	-0.45	3.43	通过
73	max	J[34]	0.00	2.07	2.63	14.00	0.90	2.84	通过
73	min	I[37]	-21.10	-3.40	-14.20	-4.81	-25.40	-25.90	通过
73	min	2/4	-21.10	-0.66	-16.30	-1.05	-27.40	-22.10	通过

73	min	J[34]	-21.10	0.97	-15.60	-2.36	-26.80	-23.40	通过
82	max	I[40]	0.00	-1.25	5.35	11.50	0.91	-0.02	通过
82	max	2/4	0.00	0.06	2.53	13.40	-0.45	1.80	通过
82	max	J[37]	0.00	2.74	5.38	12.80	0.91	1.20	通过
82	min	I[40]	-22.00	-2.72	-12.90	-4.79	-24.40	-26.80	通过
82	min	2/4	-22.00	-0.33	-14.90	-2.27	-26.50	-24.30	通过
82	min	J[37]	-22.00	0.98	-14.20	-4.81	-25.80	-26.80	通过
91	max	I[62]	0.00	0.12	5.23	16.80	5.23	4.92	通过
91	max	2/4	0.00	2.83	1.60	15.40	1.60	3.49	通过
91	max	J[40]	0.00	5.56	5.35	11.50	0.91	-0.37	通过
91	min	I[62]	-22.70	-2.41	-18.80	-4.68	-30.70	-17.00	通过
91	min	2/4	-22.70	-1.10	-17.20	-1.43	-29.10	-19.70	通过
91	min	J[40]	-22.70	0.21	-12.90	-4.79	-24.80	-27.50	通过
137	max	I[81]	0.00	19.60	5.38	72.70	5.38	72.70	通过
137	max	2/4	0.00	20.90	1.67	35.20	1.67	35.20	通过
137	max	J[62]	0.00	22.20	5.23	16.80	5.23	4.92	通过
137	min	I[81]	-22.70	-5.37	-81.20	-4.82	-81.20	-26.70	通过
137	min	2/4	-22.70	-2.63	-39.30	-1.50	-39.30	-19.30	通过
137	min	J[62]	-22.70	0.10	-18.80	-4.68	-30.70	-17.00	通过
146	max	I[84]	0.00	-0.01	5.38	40.10	4.47	34.10	通过
146	max	2/4	0.00	1.30	1.48	57.40	1.34	51.00	通过
146	max	J[81]	0.00	2.83	5.38	72.70	5.39	66.30	通过
146	min	I[84]	-22.00	-10.20	-44.80	-4.82	-54.70	-25.70	通过
146	min	2/4	-22.00	-8.91	-64.10	-1.33	-74.20	-23.40	通过
146	min	J[81]	-22.00	-7.60	-81.20	-4.82	-91.00	-26.10	通过
155	max	I[87]	0.00	-0.01	5.39	24.00	4.32	19.00	通过
155	max	2/4	0.00	1.30	2.00	33.20	1.34	28.30	通过
155	max	J[84]	0.00	3.33	5.38	40.10	5.39	35.10	通过
155	min	I[87]	-21.10	-6.11	-26.80	-4.83	-36.60	-22.60	通过
155	min	2/4	-21.10	-4.80	-37.10	-1.79	-46.30	-21.20	通过
155	min	J[84]	-21.10	-3.50	-44.80	-4.82	-53.60	-24.80	通过
164	max	I[90]	0.00	0.00	5.41	16.00	4.17	11.00	通过
164	max	2/4	0.00	1.30	2.97	20.50	1.73	16.20	通过
164	max	J[87]	0.00	2.92	5.39	24.00	5.39	19.90	通过
164	min	I[90]	-20.00	-4.43	-17.90	-4.84	-26.80	-20.80	通过
164	min	2/4	-20.00	-3.12	-22.90	-2.66	-32.50	-18.60	通过
164	min	J[87]	-20.00	-1.81	-26.80	-4.83	-35.60	-21.50	通过
173	max	I[93]	0.00	0.00	5.47	11.70	4.02	7.04	通过
173	max	2/4	0.00	1.31	3.47	15.00	2.06	10.60	通过
173	max	J[90]	0.00	2.61	5.41	16.00	5.41	11.80	通过
173	min	I[93]	-18.60	-3.80	-13.10	-4.90	-20.70	-19.90	通过
173	min	2/4	-18.60	-2.50	-16.80	-3.11	-24.60	-17.10	通过
173	min	J[90]	-18.60	-1.19	-17.90	-4.84	-25.80	-19.30	通过
182	max	I[96]	0.00	0.00	7.59	8.86	5.03	4.23	通过

182	max	2/4	0.00	1.31	4.11	11.40	2.60	7.33	通过
182	max	J[93]	0.00	2.63	5.47	11.70	5.43	8.01	通过
182	min	I[96]	-16.70	-3.42	-9.90	-6.79	-16.90	-18.50	通过
182	min	2/4	-16.70	-2.12	-12.70	-3.68	-19.60	-15.70	通过
182	min	J[93]	-16.70	-0.81	-13.10	-4.90	-19.70	-18.10	通过
191	max	I[99]	0.00	0.01	15.10	7.17	13.70	2.73	通过
191	max	2/4	0.00	1.32	10.00	9.23	8.57	5.20	通过
191	max	J[96]	0.00	2.80	7.59	8.86	6.16	5.27	通过
191	min	I[99]	-14.60	-3.14	-8.01	-13.50	-14.60	-16.00	通过
191	min	2/4	-14.60	-1.83	-10.30	-8.95	-16.50	-13.60	通过
191	min	J[96]	-14.60	-0.53	-9.90	-6.79	-15.70	-16.30	通过
197	max	I[102]	0.05	0.01	21.30	6.44	21.20	1.98	通过
197	max	2/4	0.05	1.32	16.90	8.00	16.70	3.96	通过
197	max	J[99]	0.05	2.96	15.10	7.17	15.00	3.86	通过
197	min	I[102]	-12.20	-3.22	-7.19	-19.10	-13.10	-19.20	通过
197	min	2/4	-12.20	-1.91	-8.93	-15.10	-14.50	-15.20	通过
197	min	J[99]	-12.20	-0.61	-8.01	-13.50	-13.30	-13.80	通过
202	max	I[105]	1.27	0.02	26.30	5.52	27.50	1.49	通过
202	max	2/4	1.27	1.32	22.40	7.11	23.70	3.26	通过
202	max	J[102]	1.27	2.94	21.30	6.44	22.60	3.16	通过
202	min	I[105]	-9.60	-3.31	-6.16	-23.50	-11.50	-24.40	通过
202	min	2/4	-9.60	-2.00	-7.94	-20.10	-13.00	-19.50	通过
202	min	J[102]	-9.60	-0.70	-7.19	-19.10	-11.80	-17.80	通过
207	max	I[108]	2.83	0.02	29.90	4.69	32.50	0.69	通过
207	max	2/4	2.83	1.33	26.50	6.31	29.40	2.92	通过
207	max	J[105]	2.83	2.75	26.30	5.52	29.10	2.73	通过
207	min	I[108]	-6.90	-3.35	-5.24	-26.80	-9.32	-30.60	通过
207	min	2/4	-6.90	-2.04	-7.05	-23.80	-11.10	-25.60	通过
207	min	J[105]	-6.90	-0.73	-6.16	-23.50	-10.20	-23.10	通过
212	max	I[111]	4.61	0.03	37.40	2.95	41.50	0.22	通过
212	max	2/4	4.61	1.34	32.30	5.03	36.40	2.30	通过
212	max	J[108]	4.61	2.64	29.90	4.69	34.10	1.98	通过
212	min	I[111]	-4.08	-3.26	-3.30	-33.50	-6.04	-36.30	通过
212	min	2/4	-4.08	-1.95	-5.62	-28.90	-8.36	-31.50	通过
212	min	J[108]	-4.08	-0.65	-5.24	-26.80	-7.98	-29.10	通过
217	max	I[114]	6.61	0.03	44.20	0.00	49.90	-0.01	通过
217	max	2/4	6.61	1.34	39.40	2.69	45.20	1.33	通过
217	max	J[111]	6.61	2.65	37.40	2.95	43.20	1.60	通过
217	min	I[114]	-1.61	-3.50	0.00	-39.50	-1.35	-41.00	通过
217	min	2/4	-1.61	-1.72	-3.00	-35.30	-4.36	-36.60	通过
217	min	J[111]	-1.61	-0.41	-3.30	-33.50	-4.65	-34.60	通过
222	max	I[117]	8.75	0.03	49.90	-9.29	57.50	-7.53	通过
222	max	2/4	8.75	1.34	45.70	-4.00	53.30	-2.24	通过
222	max	J[114]	8.75	2.64	44.20	-3.77	51.80	-2.01	通过

222	min	I[117]	0.23	-4.22	10.40	-44.70	12.10	-44.50	通过
222	min	2/4	0.23	-1.49	4.46	-40.90	6.22	-40.60	通过
222	min	J[114]	0.23	-0.12	4.21	-39.50	5.96	-39.20	通过
227	max	I[117]	8.75	0.03	49.90	-9.29	57.50	-7.53	通过
227	max	2/4	8.75	1.34	45.70	-4.00	53.30	-2.24	通过
227	max	J[120]	8.75	2.64	44.20	-3.77	51.80	-2.01	通过
227	min	I[117]	0.23	-4.22	10.40	-44.70	12.10	-44.50	通过
227	min	2/4	0.23	-1.49	4.46	-40.90	6.22	-40.60	通过
227	min	J[120]	0.23	-0.12	4.21	-39.50	5.96	-39.20	通过
232	max	I[120]	6.61	0.03	44.20	0.00	49.90	-0.01	通过
232	max	2/4	6.61	1.34	39.40	2.69	45.20	1.33	通过
232	max	J[123]	6.61	2.65	37.40	2.95	43.20	1.60	通过
232	min	I[120]	-1.61	-3.50	0.00	-39.50	-1.35	-41.00	通过
232	min	2/4	-1.61	-1.72	-3.00	-35.30	-4.36	-36.60	通过
232	min	J[123]	-1.61	-0.41	-3.30	-33.50	-4.65	-34.60	通过
237	max	I[123]	4.61	0.03	37.40	2.95	41.50	0.22	通过
237	max	2/4	4.61	1.34	32.30	5.03	36.40	2.30	通过
237	max	J[126]	4.61	2.64	29.90	4.69	34.10	1.98	通过
237	min	I[123]	-4.08	-3.26	-3.30	-33.50	-6.04	-36.30	通过
237	min	2/4	-4.08	-1.95	-5.62	-28.90	-8.36	-31.50	通过
237	min	J[126]	-4.08	-0.65	-5.24	-26.80	-7.98	-29.10	通过
242	max	I[126]	2.83	0.02	29.90	4.69	32.50	0.69	通过
242	max	2/4	2.83	1.33	26.50	6.31	29.40	2.92	通过
242	max	J[129]	2.83	2.75	26.30	5.52	29.10	2.73	通过
242	min	I[126]	-6.90	-3.35	-5.24	-26.80	-9.32	-30.60	通过
242	min	2/4	-6.90	-2.04	-7.05	-23.80	-11.10	-25.60	通过
242	min	J[129]	-6.90	-0.73	-6.16	-23.50	-10.20	-23.10	通过
247	max	I[129]	1.27	0.02	26.30	5.52	27.50	1.49	通过
247	max	2/4	1.27	1.32	22.40	7.11	23.70	3.26	通过
247	max	J[132]	1.27	2.94	21.30	6.44	22.60	3.16	通过
247	min	I[129]	-9.60	-3.31	-6.16	-23.50	-11.50	-24.40	通过
247	min	2/4	-9.60	-2.00	-7.94	-20.10	-13.00	-19.50	通过
247	min	J[132]	-9.60	-0.70	-7.19	-19.10	-11.80	-17.80	通过
252	max	I[132]	0.05	0.01	21.30	6.44	21.20	1.98	通过
252	max	2/4	0.05	1.32	16.90	8.00	16.70	3.96	通过
252	max	J[135]	0.05	2.96	15.10	7.17	15.00	3.86	通过
252	min	I[132]	-12.20	-3.22	-7.19	-19.10	-13.10	-19.20	通过
252	min	2/4	-12.20	-1.91	-8.93	-15.10	-14.50	-15.20	通过
252	min	J[135]	-12.20	-0.61	-8.01	-13.50	-13.30	-13.80	通过
258	max	I[135]	0.00	0.01	15.10	7.17	13.70	2.73	通过
258	max	2/4	0.00	1.32	10.00	9.23	8.57	5.20	通过
258	max	J[138]	0.00	2.80	7.59	8.86	6.16	5.27	通过
258	min	I[135]	-14.60	-3.14	-8.01	-13.50	-14.60	-16.00	通过
258	min	2/4	-14.60	-1.83	-10.30	-8.95	-16.50	-13.60	通过

258	min	J[138]	-14.60	-0.53	-9.90	-6.79	-15.70	-16.30	通过
267	max	I[138]	0.00	0.00	7.59	8.86	5.03	4.23	通过
267	max	2/4	0.00	1.31	4.11	11.40	2.60	7.33	通过
267	max	J[141]	0.00	2.63	5.47	11.70	5.43	8.01	通过
267	min	I[138]	-16.70	-3.42	-9.90	-6.79	-16.90	-18.50	通过
267	min	2/4	-16.70	-2.12	-12.70	-3.68	-19.60	-15.70	通过
267	min	J[141]	-16.70	-0.81	-13.10	-4.90	-19.70	-18.10	通过
276	max	I[141]	0.00	0.00	5.47	11.70	4.02	7.04	通过
276	max	2/4	0.00	1.31	3.47	15.00	2.06	10.60	通过
276	max	J[144]	0.00	2.61	5.41	16.00	5.41	11.80	通过
276	min	I[141]	-18.60	-3.80	-13.10	-4.90	-20.70	-19.90	通过
276	min	2/4	-18.60	-2.50	-16.80	-3.11	-24.60	-17.10	通过
276	min	J[144]	-18.60	-1.19	-17.90	-4.84	-25.80	-19.30	通过
285	max	I[144]	0.00	0.00	5.41	16.00	4.17	11.00	通过
285	max	2/4	0.00	1.30	2.97	20.50	1.73	16.20	通过
285	max	J[147]	0.00	2.92	5.39	24.00	5.39	19.90	通过
285	min	I[144]	-20.00	-4.43	-17.90	-4.84	-26.80	-20.80	通过
285	min	2/4	-20.00	-3.12	-22.90	-2.66	-32.50	-18.60	通过
285	min	J[147]	-20.00	-1.81	-26.80	-4.83	-35.60	-21.50	通过
294	max	I[147]	0.00	-0.01	5.39	24.00	4.32	19.00	通过
294	max	2/4	0.00	1.30	2.00	33.20	1.34	28.30	通过
294	max	J[150]	0.00	3.33	5.38	40.10	5.39	35.10	通过
294	min	I[147]	-21.10	-6.11	-26.80	-4.83	-36.60	-22.60	通过
294	min	2/4	-21.10	-4.80	-37.10	-1.79	-46.30	-21.20	通过
294	min	J[150]	-21.10	-3.50	-44.80	-4.82	-53.60	-24.80	通过
303	max	I[150]	0.00	-0.01	5.38	40.10	4.47	34.10	通过
303	max	2/4	0.00	1.30	1.48	57.40	1.34	51.00	通过
303	max	J[153]	0.00	2.83	5.38	72.70	5.39	66.30	通过
303	min	I[150]	-22.00	-10.20	-44.80	-4.82	-54.70	-25.70	通过
303	min	2/4	-22.00	-8.91	-64.10	-1.33	-74.20	-23.40	通过
303	min	J[153]	-22.00	-7.60	-81.20	-4.82	-91.00	-26.10	通过
312	max	I[153]	0.00	19.60	5.38	72.70	5.38	72.70	通过
312	max	2/4	0.00	20.90	1.67	35.20	1.67	35.20	通过
312	max	J[172]	0.00	22.20	5.23	16.80	5.23	4.92	通过
312	min	I[153]	-22.70	-5.37	-81.20	-4.82	-81.20	-26.70	通过
312	min	2/4	-22.70	-2.63	-39.30	-1.50	-39.30	-19.30	通过
312	min	J[172]	-22.70	0.10	-18.80	-4.68	-30.70	-17.00	通过
358	max	I[172]	0.00	0.12	5.23	16.80	5.23	4.92	通过
358	max	2/4	0.00	2.83	1.60	15.40	1.60	3.49	通过
358	max	J[194]	0.00	5.56	5.35	11.50	0.91	-0.37	通过
358	min	I[172]	-22.70	-2.41	-18.80	-4.68	-30.70	-17.00	通过
358	min	2/4	-22.70	-1.10	-17.20	-1.43	-29.10	-19.70	通过
358	min	J[194]	-22.70	0.21	-12.90	-4.79	-24.80	-27.50	通过
367	max	I[194]	0.00	-1.25	5.35	11.50	0.91	-0.02	通过

367	max	2/4	0.00	0.06	2.53	13.40	-0.45	1.80	通过
367	max	J[197]	0.00	2.74	5.38	12.80	0.91	1.20	通过
367	min	I[194]	-22.00	-2.72	-12.90	-4.79	-24.40	-26.80	通过
367	min	2/4	-22.00	-0.33	-14.90	-2.27	-26.50	-24.30	通过
367	min	J[197]	-22.00	0.98	-14.20	-4.81	-25.80	-26.80	通过
376	max	I[197]	0.00	-1.31	5.38	12.80	0.91	1.60	通过
376	max	2/4	0.00	0.00	1.18	14.60	-0.45	3.43	通过
376	max	J[200]	0.00	2.07	2.63	14.00	0.90	2.84	通过
376	min	I[197]	-21.10	-3.40	-14.20	-4.81	-25.40	-25.90	通过
376	min	2/4	-21.10	-0.66	-16.30	-1.05	-27.40	-22.10	通过
376	min	J[200]	-21.10	0.97	-15.60	-2.36	-26.80	-23.40	通过
385	max	I[200]	0.00	-1.03	2.63	14.00	0.90	3.28	通过
385	max	2/4	0.00	0.28	-0.45	14.70	-0.45	3.97	通过
385	max	J[203]	0.00	2.32	0.93	13.00	0.90	2.24	通过
385	min	I[200]	-19.90	-3.14	-15.60	-2.36	-26.30	-22.30	通过
385	min	2/4	-19.90	-0.41	-16.40	0.40	-27.10	-19.00	通过
385	min	J[203]	-19.90	1.31	-14.50	-0.83	-25.20	-20.80	通过
394	max	I[203]	0.00	-0.57	0.93	13.00	0.90	2.85	通过
394	max	2/4	0.00	0.73	-0.45	12.80	-0.45	2.70	通过
394	max	J[206]	0.00	2.56	0.90	10.20	0.90	0.13	通过
394	min	I[203]	-18.50	-2.91	-14.50	-0.83	-24.60	-19.30	通过
394	min	2/4	-18.50	-0.18	-14.30	0.40	-24.40	-16.50	通过
394	min	J[206]	-18.50	1.31	-11.40	-0.81	-21.50	-18.70	通过
403	max	I[206]	0.00	-0.45	0.90	10.20	0.90	0.96	通过
403	max	2/4	0.00	0.85	-0.45	9.86	-0.45	0.59	通过
403	max	J[209]	0.00	2.55	0.90	7.06	0.90	-0.81	通过
403	min	I[206]	-16.70	-2.91	-11.40	-0.81	-20.70	-16.80	通过
403	min	2/4	-16.70	-0.18	-11.00	0.40	-20.30	-14.00	通过
403	min	J[209]	-16.70	1.31	-7.89	-0.81	-17.20	-16.20	通过
412	max	I[209]	0.00	-0.39	0.90	7.06	0.90	-0.81	通过
412	max	2/4	0.00	0.92	-0.45	6.57	-0.45	0.40	通过
412	max	J[212]	0.00	2.62	0.90	3.66	0.90	-0.81	通过
412	min	I[209]	-14.60	-2.84	-7.89	-0.81	-16.20	-14.10	通过
412	min	2/4	-14.60	-0.11	-7.34	0.40	-18.20	-11.40	通过
412	min	J[212]	-14.60	1.31	-4.08	-0.81	-15.60	-13.70	通过
418	max	I[212]	0.00	-0.24	0.90	3.66	0.90	-0.81	通过
418	max	2/4	0.00	1.07	-0.45	3.05	-0.45	0.41	通过
418	max	J[215]	0.00	2.93	0.90	0.14	0.90	-0.80	通过
418	min	I[212]	-12.40	-2.53	-4.08	-0.81	-13.40	-11.50	通过
418	min	2/4	-12.40	0.00	-3.41	0.41	-15.80	-9.33	通过
418	min	J[215]	-12.40	1.30	-0.16	-0.80	-12.50	-12.20	通过
423	max	I[215]	0.00	-0.09	0.90	0.14	0.90	-0.80	通过
423	max	2/4	0.00	1.22	1.51	1.43	-0.36	0.36	通过
423	max	J[218]	0.00	3.40	5.38	-0.91	1.10	-0.91	通过

423	min	I[215]	-10.00	-2.06	-0.16	-0.80	-10.20	-9.87	通过
423	min	2/4	-10.00	0.03	-1.60	-1.35	-11.60	-8.58	通过
423	min	J[218]	-10.00	1.33	1.01	-4.82	-7.40	-12.40	通过
428	max	I[218]	0.00	-0.05	5.38	-0.91	1.10	-0.99	通过
428	max	2/4	0.00	1.26	6.63	0.48	1.92	0.48	通过
428	max	J[222]	0.00	3.92	10.60	-0.47	5.87	-0.47	通过
428	min	I[218]	-7.48	-1.55	1.01	-4.82	-4.87	-9.82	通过
428	min	2/4	-7.48	-0.14	-0.54	-5.93	-5.24	-10.60	通过
428	min	J[222]	-7.48	1.17	0.52	-9.47	-0.35	-14.20	通过
434	max	I[222]	1.05	-1.17	10.60	-0.47	4.93	0.42	通过
434	max	2/4	1.05	0.14	8.80	0.49	3.15	1.49	通过
434	max	J[225]	1.05	1.73	9.73	-0.90	4.08	0.14	通过
434	min	I[222]	-9.14	-3.73	0.52	-9.47	-1.62	-15.90	通过
434	min	2/4	-9.14	-1.00	-0.54	-7.88	-6.52	-13.50	通过
434	min	J[225]	-9.14	1.10	1.01	-8.71	-5.75	-14.40	通过
439	max	I[225]	0.00	-1.33	9.73	-0.90	5.77	-0.90	通过
439	max	2/4	0.00	-0.02	7.44	0.37	3.48	0.35	通过
439	max	J[228]	0.00	2.27	7.86	-0.82	3.89	-0.82	通过
439	min	I[225]	-6.26	-3.20	1.01	-8.71	-2.88	-12.70	通过
439	min	2/4	-6.26	-0.47	-0.41	-6.66	-6.67	-10.60	通过
439	min	J[228]	-6.26	0.85	0.91	-7.04	-4.81	-11.00	通过
444	max	I[228]	0.00	-1.39	7.86	-0.82	5.77	-0.82	通过
444	max	2/4	0.00	0.06	4.75	1.11	2.66	0.56	通过
444	max	J[231]	0.00	2.80	4.34	-0.48	2.25	-0.48	通过
444	min	I[228]	-3.22	-2.67	0.91	-7.04	-1.77	-9.13	通过
444	min	2/4	-3.22	-0.85	-1.24	-4.25	-4.47	-6.34	通过
444	min	J[231]	-3.22	0.46	0.54	-3.89	-1.50	-5.98	通过
448	max	I[231]	0.00	-0.91	4.34	-0.48	4.34	-0.48	通过
448	max	2/4	0.00	-0.26	1.83	0.06	1.83	0.06	通过
448	max	J[233]	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	通过
448	min	I[231]	0.00	-2.75	0.54	-3.89	0.54	-3.89	通过
448	min	2/4	0.00	-2.10	-0.07	-1.64	-0.07	-1.64	通过
448	min	J[233]	0.00	-1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	通过

7.2 主塔单元强度验算：

7.2.1、验算原理：

主塔单元进行应力验算，配置构造钢筋。由于采用材料为 C50 混凝土，因此验算时进行构件上下缘应力验算。

根据《常用数据手册》C50 混凝土抗拉强度设计值为：1.83Mpa，抗压设计值：22.4Mpa。因此构件上下缘应力抗拉强度不得超过 1.83Mpa，抗压强度不得超过 22.4Mpa。

7.2.2、使用阶段主塔强度验算

单元	荷载	位置	上缘应力验算	下缘应力	验算结果	荷载	上缘应力验算	下缘应力	验算结果
94	组合包络(最大)	I[42]	1.80	1.40	通过	组合包络(最小)	-0.36	-0.85	通过
94	组合包络(最大)	J[43]	1.80	-0.61	通过	组合包络(最小)	1.63	-0.86	通过
97	组合包络(最大)	I[42]	1.78	0.54	通过	组合包络(最小)	-0.15	-1.58	通过
97	组合包络(最大)	J[60]	1.40	0.81	通过	组合包络(最小)	-0.54	-1.32	通过
98	组合包络(最大)	I[43]	-1.51	1.60	通过	组合包络(最小)	-2.11	1.71	通过
98	组合包络(最大)	J[79]	-1.23	1.81	通过	组合包络(最小)	-1.94	1.32	通过
101	组合包络(最大)	I[46]	-7.48	-5.99	通过	组合包络(最小)	-8.81	-8.53	通过
101	组合包络(最大)	J[45]	-8.86	-4.92	通过	组合包络(最小)	-11.70	-10.20	通过
102	组合包络(最大)	I[47]	-4.76	-5.49	通过	组合包络(最小)	-7.21	-8.38	通过
102	组合包络(最大)	J[46]	-8.47	-5.10	通过	组合包络(最小)	-9.03	-6.91	通过
103	组合包络(最大)	I[48]	-4.98	-1.37	通过	组合包络(最小)	-7.35	-3.93	通过
103	组合包络(最大)	J[47]	-5.22	-1.78	通过	组合包络(最小)	-7.26	-4.21	通过
104	组合包络(最大)	I[49]	-4.38	-0.81	通过	组合包络(最小)	-6.82	-3.42	通过
104	组合包络(最大)	J[48]	-4.50	-0.88	通过	组合包络(最小)	-6.86	-3.44	通过
105	组合包络(最大)	I[50]	-3.86	-0.42	通过	组合包络(最小)	-6.36	-3.05	通过
105	组合包络(最大)	J[49]	-4.02	-0.45	通过	组合包络(最小)	-6.46	-3.06	通过
106	组合包络(最大)	I[51]	-3.37	-0.11	通过	组合包络(最小)	-5.90	-2.75	通过
106	组合包络(最大)	J[50]	-3.55	-0.11	通过	组合包络(最小)	-6.05	-2.74	通过
107	组合包络(最大)	I[52]	-2.87	0.17	通过	组合包络(最小)	-5.37	-2.45	通过
107	组合包络(最大)	J[51]	-3.06	0.21	通过	组合包络(最小)	-5.59	-2.44	通过
108	组合包络(最大)	I[53]	-2.34	0.42	通过	组合包络(最小)	-4.78	-2.14	通过
108	组合包络(最大)	J[52]	-2.54	0.50	通过	组合包络(最小)	-5.05	-2.12	通过
109	组合包络(最大)	I[54]	-1.81	0.61	通过	组合包络(最小)	-4.17	-1.87	通过
109	组合包络(最大)	J[53]	-2.01	0.75	通过	组合包络(最小)	-4.46	-1.82	通过
110	组合包络(最大)	I[55]	-1.31	0.72	通过	组合包络(最小)	-3.56	-1.67	通过
110	组合包络(最大)	J[54]	-1.49	0.93	通过	组合包络(最小)	-3.85	-1.56	通过
111	组合包络(最大)	I[56]	-0.85	0.75	通过	组合包络(最小)	-2.98	-1.54	通过
111	组合包络(最大)	J[55]	-1.00	1.03	通过	组合包络(最小)	-3.26	-1.36	通过
112	组合包络(最大)	I[57]	-0.39	0.73	通过	组合包络(最小)	-2.43	-1.48	通过
112	组合包络(最大)	J[56]	-0.54	1.06	通过	组合包络(最小)	-2.68	-1.24	通过
113	组合包络(最大)	I[58]	0.07	0.67	通过	组合包络(最小)	-1.89	-1.49	通过
113	组合包络(最大)	J[57]	-0.09	1.03	通过	组合包络(最小)	-2.13	-1.19	通过
114	组合包络(最大)	I[59]	0.57	0.60	通过	组合包络(最小)	-1.36	-1.54	通过
114	组合包络(最大)	J[58]	0.38	0.97	通过	组合包络(最小)	-1.60	-1.20	通过
115	组合包络(最大)	I[60]	1.12	0.54	通过	组合包络(最小)	-0.81	-1.60	通过
115	组合包络(最大)	J[59]	0.87	0.89	通过	组合包络(最小)	-1.08	-1.25	通过
117	组合包络(最大)	I[65]	1.62	-0.50	通过	组合包络(最小)	0.48	-1.51	通过
117	组合包络(最大)	J[46]	1.49	-0.41	通过	组合包络(最小)	0.41	-1.38	通过
120	组合包络(最大)	I[65]	-8.09	-4.95	通过	组合包络(最小)	-10.10	-7.84	通过
120	组合包络(最大)	J[64]	-8.76	-7.22	通过	组合包络(最小)	-9.79	-10.20	通过
121	组合包络(最大)	I[66]	-7.72	-3.11	通过	组合包络(最小)	-9.83	-5.30	通过
121	组合包络(最大)	J[65]	-6.40	-5.26	通过	组合包络(最小)	-9.14	-8.94	通过

122	组合包络(最大)	I[67]	-3.35	-3.43	通过	组合包络(最小)	-5.52	-5.45	通过
122	组合包络(最大)	J[66]	-3.78	-3.25	通过	组合包络(最小)	-6.04	-5.54	通过
123	组合包络(最大)	I[68]	-2.80	-2.96	通过	组合包络(最小)	-4.94	-4.90	通过
123	组合包络(最大)	J[67]	-2.88	-2.96	通过	组合包络(最小)	-5.04	-4.98	通过
124	组合包络(最大)	I[69]	-2.41	-2.57	通过	组合包络(最小)	-4.50	-4.41	通过
124	组合包络(最大)	J[68]	-2.45	-2.62	通过	组合包络(最小)	-4.59	-4.55	通过
125	组合包络(最大)	I[70]	-2.11	-2.21	通过	组合包络(最小)	-4.12	-3.93	通过
125	组合包络(最大)	J[69]	-2.11	-2.28	通过	组合包络(最小)	-4.20	-4.12	通过
126	组合包络(最大)	I[71]	-1.85	-1.81	通过	组合包络(最小)	-3.74	-3.40	通过
126	组合包络(最大)	J[70]	-1.81	-1.90	通过	组合包络(最小)	-3.81	-3.63	通过
127	组合包络(最大)	I[72]	-1.61	-1.37	通过	组合包络(最小)	-3.35	-2.82	通过
127	组合包络(最大)	J[71]	-1.53	-1.49	通过	组合包络(最小)	-3.41	-3.08	通过
128	组合包络(最大)	I[73]	-1.42	-0.93	通过	组合包络(最小)	-3.00	-2.21	通过
128	组合包络(最大)	J[72]	-1.28	-1.05	通过	组合包络(最小)	-3.03	-2.50	通过
129	组合包络(最大)	I[74]	-1.32	-0.50	通过	组合包络(最小)	-2.71	-1.62	通过
129	组合包络(最大)	J[73]	-1.11	-0.61	通过	组合包络(最小)	-2.68	-1.90	通过
130	组合包络(最大)	I[75]	-1.28	-0.09	通过	组合包络(最小)	-2.51	-1.08	通过
130	组合包络(最大)	J[74]	-1.01	-0.19	通过	组合包络(最小)	-2.41	-1.32	通过
131	组合包络(最大)	I[76]	-1.29	0.30	通过	组合包络(最小)	-2.38	-0.55	通过
131	组合包络(最大)	J[75]	-0.98	0.21	通过	组合包络(最小)	-2.21	-0.78	通过
132	组合包络(最大)	I[77]	-1.34	0.70	通过	组合包络(最小)	-2.30	-0.04	通过
132	组合包络(最大)	J[76]	-1.00	0.60	通过	组合包络(最小)	-2.08	-0.25	通过
133	组合包络(最大)	I[78]	-1.41	1.11	通过	组合包络(最小)	-2.25	0.48	通过
133	组合包络(最大)	J[77]	-1.05	0.99	通过	组合包络(最小)	-2.00	0.26	通过
134	组合包络(最大)	I[79]	-1.50	1.55	通过	组合包络(最小)	-2.22	1.04	通过
134	组合包络(最大)	J[78]	-1.13	1.39	通过	组合包络(最小)	-1.96	0.77	通过
315	组合包络(最大)	I[156]	-7.30	-6.92	通过	组合包络(最小)	-9.53	-8.15	通过
315	组合包络(最大)	J[155]	-7.70	-6.01	通过	组合包络(最小)	-12.60	-8.85	通过
316	组合包络(最大)	I[157]	-5.25	-6.22	通过	组合包络(最小)	-7.97	-8.89	通过
316	组合包络(最大)	J[156]	-8.33	-6.03	通过	组合包络(最小)	-9.72	-6.54	通过
317	组合包络(最大)	I[158]	-5.41	-1.87	通过	组合包络(最小)	-7.85	-4.38	通过
317	组合包络(最大)	J[157]	-5.48	-2.29	通过	组合包络(最小)	-7.76	-4.47	通过
318	组合包络(最大)	I[159]	-4.86	-1.31	通过	组合包络(最小)	-7.34	-3.93	通过
318	组合包络(最大)	J[158]	-4.93	-1.38	通过	组合包络(最小)	-7.37	-3.90	通过
319	组合包络(最大)	I[160]	-4.41	-0.95	通过	组合包络(最小)	-6.92	-3.63	通过
319	组合包络(最大)	J[159]	-4.51	-0.95	通过	组合包络(最小)	-6.98	-3.57	通过
320	组合包络(最大)	I[161]	-4.00	-0.69	通过	组合包络(最小)	-6.51	-3.41	通过
320	组合包络(最大)	J[160]	-4.11	-0.64	通过	组合包络(最小)	-6.61	-3.33	通过
321	组合包络(最大)	I[162]	-3.59	-0.49	通过	组合包络(最小)	-6.07	-3.20	通过
321	组合包络(最大)	J[161]	-3.69	-0.38	通过	组合包络(最小)	-6.20	-3.10	通过
322	组合包络(最大)	I[163]	-3.14	-0.32	通过	组合包络(最小)	-5.57	-2.98	通过
322	组合包络(最大)	J[162]	-3.26	-0.16	通过	组合包络(最小)	-5.74	-2.87	通过
323	组合包络(最大)	I[164]	-2.65	-0.18	通过	组合包络(最小)	-5.00	-2.76	通过
323	组合包络(最大)	J[163]	-2.81	0.00	通过	组合包络(最小)	-5.23	-2.65	通过

324	组合包络(最大)	I[165]	-2.12	-0.05	通过	组合包络(最小)	-4.37	-2.51	通过
324	组合包络(最大)	J[164]	-2.34	0.14	通过	组合包络(最小)	-4.67	-2.43	通过
325	组合包络(最大)	I[166]	-1.53	0.09	通过	组合包络(最小)	-3.68	-2.26	通过
325	组合包络(最大)	J[165]	-1.81	0.26	通过	组合包络(最小)	-4.05	-2.20	通过
326	组合包络(最大)	I[167]	-0.88	0.24	通过	组合包络(最小)	-2.95	-2.01	通过
326	组合包络(最大)	J[166]	-1.23	0.39	通过	组合包络(最小)	-3.37	-1.95	通过
327	组合包络(最大)	I[168]	-0.19	0.40	通过	组合包络(最小)	-2.18	-1.77	通过
327	组合包络(最大)	J[167]	-0.59	0.54	通过	组合包络(最小)	-2.64	-1.70	通过
328	组合包络(最大)	I[169]	0.54	0.55	通过	组合包络(最小)	-1.41	-1.57	通过
328	组合包络(最大)	J[168]	0.10	0.69	通过	组合包络(最小)	-1.88	-1.47	通过
329	组合包络(最大)	I[170]	1.28	0.67	通过	组合包络(最小)	-0.67	-1.44	通过
329	组合包络(最大)	J[169]	0.83	0.84	通过	组合包络(最小)	-1.12	-1.28	通过
331	组合包络(最大)	I[175]	1.64	-0.47	通过	组合包络(最小)	0.50	-1.49	通过
331	组合包络(最大)	J[156]	1.50	-0.40	通过	组合包络(最小)	0.42	-1.36	通过
334	组合包络(最大)	I[175]	-7.89	-5.91	通过	组合包络(最小)	-10.80	-7.45	通过
334	组合包络(最大)	J[174]	-7.61	-7.99	通过	组合包络(最小)	-10.60	-9.08	通过
335	组合包络(最大)	I[176]	-8.21	-3.90	通过	组合包络(最小)	-10.60	-5.81	通过
335	组合包络(最大)	J[175]	-6.11	-6.18	通过	组合包络(最小)	-9.92	-8.57	通过
336	组合包络(最大)	I[177]	-3.77	-3.92	通过	组合包络(最小)	-6.05	-5.91	通过
336	组合包络(最大)	J[176]	-4.01	-3.72	通过	组合包络(最小)	-6.56	-5.81	通过
337	组合包络(最大)	I[178]	-3.28	-3.47	通过	组合包络(最小)	-5.48	-5.42	通过
337	组合包络(最大)	J[177]	-3.30	-3.46	通过	组合包络(最小)	-5.58	-5.44	通过
338	组合包络(最大)	I[179]	-2.96	-3.11	通过	组合包络(最小)	-5.08	-5.01	通过
338	组合包络(最大)	J[178]	-2.93	-3.12	通过	组合包络(最小)	-5.13	-5.07	通过
339	组合包络(最大)	I[180]	-2.75	-2.80	通过	组合包络(最小)	-4.75	-4.61	通过
339	组合包络(最大)	J[179]	-2.67	-2.82	通过	组合包络(最小)	-4.78	-4.71	通过
340	组合包络(最大)	I[181]	-2.57	-2.48	通过	组合包络(最小)	-4.45	-4.18	通过
340	组合包络(最大)	J[180]	-2.44	-2.50	通过	组合包络(最小)	-4.45	-4.31	通过
341	组合包络(最大)	I[182]	-2.42	-2.12	通过	组合包络(最小)	-4.14	-3.67	通过
341	组合包络(最大)	J[181]	-2.26	-2.16	通过	组合包络(最小)	-4.12	-3.85	通过
342	组合包络(最大)	I[183]	-2.29	-1.73	通过	组合包络(最小)	-3.83	-3.11	通过
342	组合包络(最大)	J[182]	-2.10	-1.80	通过	组合包络(最小)	-3.81	-3.35	通过
343	组合包络(最大)	I[184]	-2.15	-1.29	通过	组合包络(最小)	-3.51	-2.48	通过
343	组合包络(最大)	J[183]	-1.98	-1.42	通过	组合包络(最小)	-3.51	-2.79	通过
344	组合包络(最大)	I[185]	-2.00	-0.79	通过	组合包络(最小)	-3.18	-1.79	通过
344	组合包络(最大)	J[184]	-1.85	-0.98	通过	组合包络(最小)	-3.20	-2.17	通过
345	组合包络(最大)	I[186]	-1.84	-0.24	通过	组合包络(最小)	-2.88	-1.06	通过
345	组合包络(最大)	J[185]	-1.71	-0.50	通过	组合包络(最小)	-2.88	-1.48	通过
346	组合包络(最大)	I[187]	-1.65	0.38	通过	组合包络(最小)	-2.59	-0.32	通过
346	组合包络(最大)	J[186]	-1.54	0.06	通过	组合包络(最小)	-2.58	-0.77	通过
347	组合包络(最大)	I[188]	-1.47	1.04	通过	组合包络(最小)	-2.33	0.43	通过
347	组合包络(最大)	J[187]	-1.35	0.68	通过	组合包络(最小)	-2.30	-0.03	通过
348	组合包络(最大)	I[189]	-1.35	1.68	通过	组合包络(最小)	-2.10	1.17	通过
348	组合包络(最大)	J[188]	-1.18	1.33	通过	组合包络(最小)	-2.05	0.71	通过

351	组合包络(最大)	I[191]	1.70	1.70	通过	组合包络(最小)	-0.03	-1.44	通过
351	组合包络(最大)	J[170]	1.55	0.95	通过	组合包络(最小)	-0.40	-1.16	通过
352	组合包络(最大)	I[192]	-1.36	1.70	通过	组合包络(最小)	-2.00	1.82	通过
352	组合包络(最大)	J[189]	-1.07	1.80	通过	组合包络(最小)	-1.84	1.43	通过
355	组合包络(最大)	I[191]	1.77	1.35	通过	组合包络(最小)	-0.44	-0.93	通过
355	组合包络(最大)	J[192]	1.74	-0.66	通过	组合包络(最小)	1.61	-0.90	通过

第八章 拉索强度与疲劳验算及钢主梁疲劳验算

8.1 拉索强度与疲劳验算

8.1.1、验算原理:

根据钢材的受力特性,当拉索的荷载超过破断荷载的 50% 时,钢的非弹性应变将快速的增加,因而对于一般荷载组合,拉索的最大荷载只能到它的破断强度的 40%。

另外,拉索应具有足够的抗疲劳能力,即在规定的应力变幅下,拉索在承受 200 万次的荷载循环后,其强度不应小于原来强度的 95%。拉索的抗疲劳强度与钢材的锚具有关,目前生产的成品拉索应力变幅为 220~250Mpa。

本桥采用的 PE—钢绞线,在最大应力 $0.45 R_y^b$, 最大应力幅值 300Mpa 经 200 万次疲劳试验不断裂。

因此本桥拉索验算时拉索控制取 $40\% \times 1860 \times K$ (Mpa), 应力变幅值取 300Mpa。

《公路斜拉桥设计规范》JTJ 027-96 规定: 验算拉索在荷载作用下时,其容许应力需乘以提高系数 K

荷载组合	提高系数值
组合 I	1
组合 II、III、IV	1.25
组合 V	1.30~1.40

这里进行组合包络验算,暂不乘以提高系数,验算控制应力取各组合最小值 $40\% \times 1860 = 744\text{Mpa}$, 进行保守验算,若通过,将无需进行各组合验算。

8.1.2、使用阶段拉索强度与疲劳验算

单元	荷载	应力 I	应力 J	荷载	应力 I	应力 J	控制应力	应力验算	应力变幅	疲劳强度
35	包络(最大)	673.30	678.10	包络(最小)	632.00	636.70	744	通过	300	通过
39	包络(最大)	667.60	672.40	包络(最小)	628.50	633.20	744	通过	300	通过

装
订
线

40	包络(最大)	643.30	647.90	包络(最小)	599.80	604.40	744	通过	300	通过
43	包络(最大)	637.00	641.60	包络(最小)	595.80	600.40	744	通过	300	通过
44	包络(最大)	618.70	623.10	包络(最小)	574.50	579.00	744	通过	300	通过
48	包络(最大)	612.20	616.60	包络(最小)	569.80	574.20	744	通过	300	通过
49	包络(最大)	596.20	600.50	包络(最小)	553.60	557.90	744	通过	300	通过
52	包络(最大)	589.70	594.00	包络(最小)	547.80	552.10	744	通过	300	通过
53	包络(最大)	565.90	570.00	包络(最小)	525.20	529.30	744	通过	300	通过
57	包络(最大)	558.80	562.90	包络(最小)	518.80	522.90	744	通过	300	通过
58	包络(最大)	539.70	543.70	包络(最小)	502.00	505.90	744	通过	300	通过
61	包络(最大)	531.00	534.90	包络(最小)	495.60	499.50	744	通过	300	通过
62	包络(最大)	522.20	526.00	包络(最小)	486.30	490.10	744	通过	300	通过
66	包络(最大)	511.30	515.10	包络(最小)	480.60	484.40	744	通过	300	通过
67	包络(最大)	510.70	514.30	包络(最小)	473.00	476.60	744	通过	300	通过
70	包络(最大)	496.00	499.60	包络(最小)	468.10	471.70	744	通过	300	通过
71	包络(最大)	480.80	484.30	包络(最小)	441.40	444.90	744	通过	300	通过
75	包络(最大)	464.50	468.00	包络(最小)	437.00	440.50	744	通过	300	通过
76	包络(最大)	425.80	429.20	包络(最小)	385.00	388.30	744	通过	300	通过
79	包络(最大)	407.90	411.30	包络(最小)	380.50	383.90	744	通过	300	通过
80	包络(最大)	390.70	393.80	包络(最小)	347.70	350.90	744	通过	300	通过
84	包络(最大)	371.80	375.00	包络(最小)	340.90	344.10	744	通过	300	通过
85	包络(最大)	417.40	420.40	包络(最小)	368.10	371.10	744	通过	300	通过
88	包络(最大)	397.80	400.80	包络(最小)	360.60	363.60	744	通过	300	通过
89	包络(最大)	514.10	517.00	包络(最小)	455.80	458.70	744	通过	300	通过
93	包络(最大)	491.00	493.90	包络(最小)	447.20	450.10	744	通过	300	通过
135	包络(最大)	501.60	504.50	包络(最小)	447.40	450.20	744	通过	300	通过
139	包络(最大)	478.50	481.40	包络(最小)	438.80	441.60	744	通过	300	通过
140	包络(最大)	399.80	402.80	包络(最小)	353.00	356.00	744	通过	300	通过
143	包络(最大)	380.20	383.20	包络(最小)	345.50	348.50	744	通过	300	通过
144	包络(最大)	375.10	378.30	包络(最小)	333.30	336.50	744	通过	300	通过
148	包络(最大)	358.20	361.40	包络(最小)	326.50	329.70	744	通过	300	通过
149	包络(最大)	414.50	417.90	包络(最小)	375.50	378.80	744	通过	300	通过
152	包络(最大)	399.40	402.80	包络(最小)	369.30	372.60	744	通过	300	通过
153	包络(最大)	482.20	485.70	包络(最小)	444.40	448.00	744	通过	300	通过
157	包络(最大)	468.20	471.70	包络(最小)	438.90	442.40	744	通过	300	通过
158	包络(最大)	532.10	535.80	包络(最小)	494.70	498.30	744	通过	300	通过
161	包络(最大)	518.90	522.60	包络(最小)	490.10	493.80	744	通过	300	通过
162	包络(最大)	569.10	572.90	包络(最小)	531.20	535.00	744	通过	300	通过
166	包络(最大)	556.60	560.40	包络(最小)	527.60	531.40	744	通过	300	通过
167	包络(最大)	586.00	590.00	包络(最小)	548.50	552.40	744	通过	300	通过
170	包络(最大)	574.20	578.20	包络(最小)	545.60	549.50	744	通过	300	通过
171	包络(最大)	600.20	604.30	包络(最小)	563.50	567.60	744	通过	300	通过
175	包络(最大)	589.00	593.20	包络(最小)	561.20	565.30	744	通过	300	通过
176	包络(最大)	614.90	619.20	包络(最小)	579.60	583.90	744	通过	300	通过
179	包络(最大)	604.50	608.80	包络(最小)	577.90	582.20	744	通过	300	通过

装
订
线

180	包络(最大)	625.10	629.50	包络(最小)	590.60	595.10	744	通过	300	通过
184	包络(最大)	615.40	619.90	包络(最小)	589.50	593.90	744	通过	300	通过
185	包络(最大)	617.00	621.60	包络(最小)	582.70	587.30	744	通过	300	通过
188	包络(最大)	608.10	612.70	包络(最小)	582.00	586.60	744	通过	300	通过
189	包络(最大)	573.10	577.90	包络(最小)	538.00	542.80	744	通过	300	通过
193	包络(最大)	564.80	569.50	包络(最小)	537.90	542.60	744	通过	300	通过
256	包络(最大)	573.10	577.90	包络(最小)	538.00	542.80	744	通过	300	通过
260	包络(最大)	564.80	569.50	包络(最小)	537.90	542.60	744	通过	300	通过
261	包络(最大)	617.00	621.60	包络(最小)	582.70	587.30	744	通过	300	通过
264	包络(最大)	608.10	612.70	包络(最小)	582.00	586.60	744	通过	300	通过
265	包络(最大)	625.10	629.50	包络(最小)	590.60	595.10	744	通过	300	通过
269	包络(最大)	615.40	619.90	包络(最小)	589.50	593.90	744	通过	300	通过
270	包络(最大)	614.90	619.20	包络(最小)	579.60	583.90	744	通过	300	通过
273	包络(最大)	604.50	608.80	包络(最小)	577.90	582.20	744	通过	300	通过
274	包络(最大)	600.20	604.30	包络(最小)	563.50	567.60	744	通过	300	通过
278	包络(最大)	589.00	593.20	包络(最小)	561.20	565.30	744	通过	300	通过
279	包络(最大)	586.00	590.00	包络(最小)	548.50	552.40	744	通过	300	通过
282	包络(最大)	574.20	578.20	包络(最小)	545.60	549.50	744	通过	300	通过
283	包络(最大)	569.10	572.90	包络(最小)	531.20	535.00	744	通过	300	通过
287	包络(最大)	556.60	560.40	包络(最小)	527.60	531.40	744	通过	300	通过
288	包络(最大)	532.10	535.80	包络(最小)	494.70	498.30	744	通过	300	通过
291	包络(最大)	518.90	522.60	包络(最小)	490.10	493.80	744	通过	300	通过
292	包络(最大)	482.20	485.70	包络(最小)	444.40	448.00	744	通过	300	通过
296	包络(最大)	468.20	471.70	包络(最小)	438.90	442.40	744	通过	300	通过
297	包络(最大)	414.50	417.90	包络(最小)	375.50	378.80	744	通过	300	通过
300	包络(最大)	399.40	402.80	包络(最小)	369.30	372.60	744	通过	300	通过
301	包络(最大)	375.10	378.30	包络(最小)	333.30	336.50	744	通过	300	通过
305	包络(最大)	358.20	361.40	包络(最小)	326.50	329.70	744	通过	300	通过
306	包络(最大)	399.80	402.80	包络(最小)	353.00	356.00	744	通过	300	通过
309	包络(最大)	380.20	383.20	包络(最小)	345.50	348.50	744	通过	300	通过
310	包络(最大)	501.60	504.50	包络(最小)	447.40	450.20	744	通过	300	通过
314	包络(最大)	478.50	481.40	包络(最小)	438.80	441.60	744	通过	300	通过
356	包络(最大)	514.10	517.00	包络(最小)	455.80	458.70	744	通过	300	通过
360	包络(最大)	491.00	493.90	包络(最小)	447.20	450.10	744	通过	300	通过
361	包络(最大)	417.40	420.40	包络(最小)	368.10	371.10	744	通过	300	通过
364	包络(最大)	397.80	400.80	包络(最小)	360.60	363.60	744	通过	300	通过
365	包络(最大)	390.70	393.80	包络(最小)	347.70	350.90	744	通过	300	通过
369	包络(最大)	371.80	375.00	包络(最小)	340.90	344.10	744	通过	300	通过
370	包络(最大)	425.80	429.20	包络(最小)	385.00	388.30	744	通过	300	通过
373	包络(最大)	407.90	411.30	包络(最小)	380.50	383.90	744	通过	300	通过
374	包络(最大)	480.80	484.30	包络(最小)	441.40	444.90	744	通过	300	通过
378	包络(最大)	464.50	468.00	包络(最小)	437.00	440.50	744	通过	300	通过
379	包络(最大)	510.70	514.30	包络(最小)	473.00	476.60	744	通过	300	通过
382	包络(最大)	496.00	499.60	包络(最小)	468.10	471.70	744	通过	300	通过

383	包络(最大)	522.20	526.00	包络(最小)	486.30	490.10	744	通过	300	通过
387	包络(最大)	511.30	515.10	包络(最小)	480.60	484.40	744	通过	300	通过
388	包络(最大)	539.70	543.70	包络(最小)	502.00	505.90	744	通过	300	通过
391	包络(最大)	531.00	534.90	包络(最小)	495.60	499.50	744	通过	300	通过
392	包络(最大)	565.90	570.00	包络(最小)	525.20	529.30	744	通过	300	通过
396	包络(最大)	558.80	562.90	包络(最小)	518.80	522.90	744	通过	300	通过
397	包络(最大)	596.20	600.50	包络(最小)	553.60	557.90	744	通过	300	通过
400	包络(最大)	589.70	594.00	包络(最小)	547.80	552.10	744	通过	300	通过
401	包络(最大)	618.70	623.10	包络(最小)	574.50	579.00	744	通过	300	通过
405	包络(最大)	612.20	616.60	包络(最小)	569.80	574.20	744	通过	300	通过
406	包络(最大)	643.30	647.90	包络(最小)	599.80	604.40	744	通过	300	通过
409	包络(最大)	637.00	641.60	包络(最小)	595.80	600.40	744	通过	300	通过
410	包络(最大)	673.30	678.10	包络(最小)	632.00	636.70	744	通过	300	通过
414	包络(最大)	667.60	672.40	包络(最小)	628.50	633.20	744	通过	300	通过

8.2 钢主梁疲劳验算

8.2.1、验算原理：

根据现行《公路钢桥设计规范》：

凡承受动应力的结构构件或连接件，应进行疲劳验算。构件受轴向力并在同一主平面受弯曲或受与此相当地偏心受拉构件或受压的疲劳强度按下式计算：

$$\frac{N}{A_j} + \frac{M}{W_j} \leq [\sigma_n]$$

式中：N、M——计算轴向力、弯矩；

A_j——验算截面处的净面积；

W_j——验算截面对主轴的净截面面积抵抗矩；

[σ_n]——结构构件的疲劳容许应力，按下式计算：

$$\text{最大应力（绝对值）为拉应力时：} [\sigma_n] = \min\left(\frac{[\sigma_{n0}]}{1 - 0.6\rho}, [\sigma]\right)；$$

$$\text{最大应力（绝对值）为压应力时：} [\sigma_n] = \min\left(\frac{[\sigma_{n0}]}{0.6 - \rho}, [\sigma]\right)；$$

式中：[σ]——钢材的基本容许应力。

钢材容许应力（Mpa）——公路钢桥规范							
应力种类	钢材种类						
	Q235	Q345	ZG25II	ZG35II	ZG45II	45 号钢	35 号钢
轴向应力	140	200	130	150	170	210	
弯曲应力	145	210	135	155	180	220	220
剪应力	85	120	80	90	100	125	110
端部承压应力	210	300					
紧密接触的承压应力	70	100	65	75	85	105	105
自由接触的承压应力	5.5	8	5	6	7	8.5	8.5

节点销子的空壁承压应力	210	300	195	225	255		180
节点销子的弯曲应力	210	340				360	

$$\rho = \pm \frac{|\sigma|_{\max}}{|\sigma|_{\min}} \quad (\text{同号应力为正, 反力应力为负});$$

$[\sigma_{n0}]$ ——不同连接类别的基本疲劳容许应力按下表采用:

各种构件或连接的基本疲劳容许应力						
连接类别	A	B	C	D	E	F
容许应力	245	190	165	145	110	70

本桥使用 F5004-H08A 系列钢结构埋弧焊接材料, 属于 A 类连接构件。

8.2.2、钢主梁疲劳强度验算:

应力单位: Mpa

单元	位置	最大包络上缘	最小包络下缘	最小包络上缘	最小包络下缘	ρ 上缘	ρ 下缘	最大应力判断	拉容许应力	压容许应力	疲劳应力验算
1	I[3]	2.3	1.3	-1.4	-2.1	0.6	-0.6	拉 压	200.0	-155.8	通过
1	2/4	0.4	1.3	-1.5	-0.4	-0.3	-0.3	压 拉	161.8	-200.0	通过
5	I[6]	0.1	2.4	-9.9	-6.1	0.0	-0.4	压 压	189.1	-190.5	通过
5	2/4	-3.3	3.0	-10.4	-3.2	-0.3	-1.0	压 压	159.9	-122.9	通过
5	J[3]	-1.0	-2.0	-4.8	-5.4	-0.2	0.4	压 压	169.8	-200.0	通过
10	I[9]	0.6	0.4	-14.3	-12.3	0.0	0.0	压 压	185.5	-200.0	通过
10	2/4	-4.0	2.6	-16.8	-8.2	-0.2	-0.3	压 压	166.3	-200.0	通过
10	J[6]	-2.9	-0.7	-13.1	-9.2	-0.2	0.1	压 压	167.5	-200.0	通过
15	I[13]	4.2	-3.0	-16.9	-21.0	-0.3	0.1	压 压	165.6	-200.0	通过
15	2/4	-2.1	-0.7	-19.4	-15.4	-0.1	0.1	压 压	178.5	-200.0	通过
15	J[9]	-2.3	-2.6	-17.4	-15.2	-0.1	0.2	压 压	176.3	-200.0	通过
21	I[16]	-2.7	-7.9	-41.4	-29.3	-0.1	0.3	压 压	183.0	-200.0	通过
21	2/4	-1.5	-6.9	-43.5	-29.8	0.0	0.2	压 压	186.3	-200.0	通过
21	J[13]	5.9	-10.1	-40.6	-35.8	-0.2	0.3	压 压	174.8	-200.0	通过
26	I[19]	-9.1	-7.0	-45.5	-30.7	-0.2	0.2	压 压	169.6	-200.0	通过
26	2/4	-10.4	-6.6	-47.6	-28.3	-0.2	0.2	压 压	168.0	-200.0	通过
26	J[16]	-5.2	-10.5	-44.2	-31.8	-0.1	0.3	压 压	177.5	-200.0	通过
31	I[22]	-11.3	-7.4	-48.8	-34.7	-0.2	0.2	压 压	166.8	-200.0	通过
31	2/4	-14.4	-5.8	-51.3	-31.4	-0.3	0.2	压 压	162.6	-200.0	通过
31	J[19]	-11.6	-9.4	-48.0	-33.2	-0.2	0.3	压 压	165.9	-200.0	通过
37	I[25]	-12.5	-9.7	-50.1	-38.9	-0.3	0.3	压 压	165.3	-200.0	通过
37	2/4	-15.9	-7.0	-53.6	-35.4	-0.3	0.2	压 压	161.3	-200.0	通过
37	J[22]	-13.7	-9.7	-51.2	-37.1	-0.3	0.3	压 压	163.7	-200.0	通过
46	I[28]	-13.8	-12.8	-50.4	-42.5	-0.3	0.3	压 压	163.2	-200.0	通过
46	2/4	-17.1	-9.6	-54.3	-39.2	-0.3	0.3	压 压	159.8	-200.0	通过
46	J[25]	-14.7	-11.8	-52.3	-41.1	-0.3	0.3	压 压	162.6	-200.0	通过
55	I[31]	-15.3	-16.0	-50.3	-45.2	-0.3	0.4	压 压	160.7	-200.0	通过

55	2/4	-18.4	-12.7	-54.3	-42.2	-0.3	0.3	压	压	157.9	-200.0	通过
55	J[28]	-15.7	-14.7	-52.4	-44.4	-0.3	0.3	压	压	161.1	-200.0	通过
64	I[34]	-15.5	-19.7	-49.0	-48.1	-0.3	0.4	压	压	159.7	-200.0	通过
64	2/4	-19.0	-16.0	-53.4	-44.8	-0.4	0.4	压	压	156.6	-200.0	通过
64	J[31]	-16.8	-17.5	-51.9	-46.7	-0.3	0.4	压	压	159.1	-200.0	通过
73	I[37]	-14.2	-23.9	-46.9	-51.4	-0.3	0.5	压	压	160.8	-200.0	通过
73	2/4	-18.3	-19.8	-51.5	-47.8	-0.4	0.4	压	压	156.6	-200.0	通过
73	J[34]	-16.7	-21.0	-50.3	-49.3	-0.3	0.4	压	压	158.4	-200.0	通过
82	I[40]	-15.3	-25.0	-48.4	-51.8	-0.3	0.5	压	压	159.7	-200.0	通过
82	2/4	-18.1	-22.3	-51.1	-49.5	-0.4	0.5	压	压	156.7	-200.0	通过
82	J[37]	-15.1	-24.9	-48.0	-52.4	-0.3	0.5	压	压	159.8	-200.0	通过
91	I[62]	-27.8	-14.8	-62.5	-41.0	-0.4	0.4	压	压	150.0	-200.0	通过
91	2/4	-24.7	-17.6	-58.8	-44.2	-0.4	0.4	压	压	151.8	-200.0	通过
91	J[40]	-16.0	-25.7	-49.2	-52.5	-0.3	0.5	压	压	159.0	-200.0	通过
137	I[81]	-16.6	-25.0	-52.0	-50.1	-0.3	0.5	压	压	159.5	-200.0	通过
137	2/4	-25.1	-17.3	-60.2	-43.0	-0.4	0.4	压	压	152.0	-200.0	通过
137	J[62]	-27.8	-14.8	-62.5	-41.0	-0.4	0.4	压	压	150.0	-200.0	通过
146	I[84]	-16.3	-23.9	-52.4	-48.5	-0.3	0.5	压	压	160.1	-200.0	通过
146	2/4	-19.0	-21.5	-54.7	-46.3	-0.4	0.5	压	压	157.2	-200.0	通过
146	J[81]	-16.0	-24.3	-51.3	-49.3	-0.3	0.5	压	压	160.1	-200.0	通过
155	I[87]	-17.7	-20.5	-54.6	-45.1	-0.3	0.5	压	压	159.1	-200.0	通过
155	2/4	-19.4	-19.1	-55.9	-43.7	-0.4	0.4	压	压	157.3	-200.0	通过
155	J[84]	-15.3	-22.9	-51.3	-47.5	-0.3	0.5	压	压	161.2	-200.0	通过
164	I[90]	-17.1	-18.3	-54.8	-43.0	-0.3	0.4	压	压	160.0	-200.0	通过
164	2/4	-19.7	-16.2	-57.0	-40.9	-0.4	0.4	压	压	157.4	-200.0	通过
164	J[87]	-16.5	-19.3	-53.3	-43.9	-0.3	0.4	压	压	160.2	-200.0	通过
173	I[93]	-14.9	-17.0	-53.3	-41.9	-0.3	0.4	压	压	162.7	-200.0	通过
173	2/4	-18.1	-14.2	-56.2	-39.2	-0.3	0.4	压	压	159.2	-200.0	通过
173	J[90]	-15.6	-16.8	-53.2	-41.5	-0.3	0.4	压	压	161.6	-200.0	通过
182	I[96]	-12.5	-15.0	-51.6	-40.2	-0.2	0.4	压	压	165.9	-200.0	通过
182	2/4	-15.6	-12.4	-54.4	-37.5	-0.3	0.3	压	压	162.1	-200.0	通过
182	J[93]	-13.0	-15.0	-51.3	-40.0	-0.3	0.4	压	压	164.9	-200.0	通过
191	I[99]	-10.6	-12.0	-50.4	-37.4	-0.2	0.3	压	压	168.7	-200.0	通过
191	2/4	-13.3	-9.7	-52.8	-35.1	-0.3	0.3	压	压	165.1	-200.0	通过
191	J[96]	-10.3	-12.7	-49.3	-37.9	-0.2	0.3	压	压	168.8	-200.0	通过
197	I[102]	-9.1	-8.1	-49.6	-33.8	-0.2	0.2	压	压	171.2	-200.0	通过
197	2/4	-11.4	-6.1	-51.7	-31.8	-0.2	0.2	压	压	167.8	-200.0	通过
197	J[99]	-8.0	-9.4	-47.8	-35.0	-0.2	0.3	压	压	172.6	-200.0	通过
202	I[105]	-7.5	-4.1	-48.5	-30.1	-0.2	0.1	压	压	174.0	-200.0	通过
202	2/4	-9.8	-2.1	-50.6	-28.1	-0.2	0.1	压	压	170.2	-200.0	通过
202	J[102]	-6.4	-5.4	-46.9	-31.2	-0.1	0.2	压	压	175.6	-200.0	通过
207	I[108]	-5.0	-0.9	-46.3	-26.9	-0.1	0.0	压	压	178.5	-200.0	通过
207	2/4	-7.7	1.6	-48.9	-24.6	-0.2	-0.1	压	压	173.6	-200.0	通过
207	J[105]	-4.7	-1.3	-45.7	-27.4	-0.1	0.1	压	压	179.1	-200.0	通过

212	I[111]	-1.2	1.1	-42.4	-24.7	0.0	0.0	压	压	186.8	-200.0	通过
212	2/4	-4.5	4.2	-45.8	-21.8	-0.1	-0.2	压	压	179.4	-200.0	通过
212	J[108]	-2.1	2.1	-43.4	-24.0	-0.1	-0.1	压	压	184.7	-200.0	通过
217	I[114]	4.5	1.2	-36.2	-24.0	-0.1	-0.1	压	压	176.8	-200.0	通过
217	2/4	0.3	5.3	-40.8	-20.3	0.0	-0.3	压	压	189.2	-200.0	通过
217	J[111]	1.8	4.1	-39.4	-21.7	-0.1	-0.2	压	压	185.0	-200.0	通过
222	I[117]	13.4	-1.5	-26.9	-26.2	-0.5	0.1	压	压	146.3	-200.0	通过
222	2/4	7.6	4.0	-33.0	-21.0	-0.2	-0.2	压	压	167.0	-200.0	通过
222	J[114]	7.5	4.2	-33.2	-21.0	-0.2	-0.2	压	压	167.3	-200.0	通过
227	I[117]	12.6	-2.3	-27.7	-26.7	-0.5	0.1	压	压	149.3	-200.0	通过
227	2/4	6.8	3.2	-33.8	-21.5	-0.2	-0.2	压	压	169.6	-200.0	通过
227	J[120]	6.8	3.5	-34.1	-21.5	-0.2	-0.2	压	压	169.7	-200.0	通过
232	I[120]	3.9	0.5	-37.1	-24.4	-0.1	0.0	压	压	178.9	-200.0	通过
232	2/4	-0.3	4.6	-41.6	-20.7	0.0	-0.2	压	压	189.1	-200.0	通过
232	J[123]	1.2	3.5	-40.2	-22.1	0.0	-0.2	压	压	186.7	-200.0	通过
237	I[123]	-1.8	0.5	-43.2	-25.1	0.0	0.0	压	压	185.5	-200.0	通过
237	2/4	-5.1	3.6	-46.6	-22.2	-0.1	-0.2	压	压	178.4	-200.0	通过
237	J[126]	-2.7	1.5	-44.1	-24.4	-0.1	-0.1	压	压	183.4	-200.0	通过
242	I[126]	-5.5	-1.4	-46.9	-27.3	-0.1	0.1	压	压	177.5	-200.0	通过
242	2/4	-8.2	1.1	-49.5	-24.9	-0.2	0.0	压	压	172.8	-200.0	通过
242	J[129]	-5.2	-1.8	-46.3	-27.7	-0.1	0.1	压	压	178.1	-200.0	通过
247	I[129]	-7.9	-4.5	-49.0	-30.4	-0.2	0.2	压	压	173.3	-200.0	通过
247	2/4	-10.2	-2.5	-51.1	-28.4	-0.2	0.1	压	压	169.7	-200.0	通过
247	J[132]	-6.9	-5.8	-47.4	-31.5	-0.1	0.2	压	压	174.8	-200.0	通过
252	I[132]	-9.4	-8.4	-50.0	-34.1	-0.2	0.3	压	压	170.7	-200.0	通过
252	2/4	-11.8	-6.4	-52.0	-32.1	-0.2	0.2	压	压	167.2	-200.0	通过
252	J[135]	-8.4	-9.8	-48.2	-35.2	-0.2	0.3	压	压	172.0	-200.0	通过
258	I[135]	-10.8	-12.2	-50.7	-37.6	-0.2	0.3	压	压	168.5	-200.0	通过
258	2/4	-13.5	-10.0	-53.1	-35.3	-0.3	0.3	压	压	164.9	-200.0	通过
258	J[138]	-10.5	-13.0	-49.6	-38.1	-0.2	0.3	压	压	168.6	-200.0	通过
267	I[138]	-12.6	-15.2	-51.8	-40.3	-0.2	0.4	压	压	165.8	-200.0	通过
267	2/4	-15.7	-12.6	-54.6	-37.6	-0.3	0.3	压	压	162.0	-200.0	通过
267	J[141]	-13.0	-15.2	-51.6	-40.0	-0.3	0.4	压	压	165.1	-200.0	通过
276	I[141]	-14.8	-17.1	-53.4	-41.8	-0.3	0.4	压	压	162.9	-200.0	通过
276	2/4	-18.0	-14.4	-56.4	-39.0	-0.3	0.4	压	压	159.5	-200.0	通过
276	J[144]	-15.5	-16.9	-53.4	-41.4	-0.3	0.4	压	压	161.8	-200.0	通过
285	I[144]	-16.8	-18.3	-54.8	-42.8	-0.3	0.4	压	压	160.5	-200.0	通过
285	2/4	-19.4	-16.2	-57.1	-40.6	-0.3	0.4	压	压	157.8	-200.0	通过
285	J[147]	-16.1	-19.4	-53.4	-43.6	-0.3	0.4	压	压	160.9	-200.0	通过
294	I[147]	-17.2	-20.5	-54.5	-44.7	-0.3	0.5	压	压	159.8	-200.0	通过
294	2/4	-18.9	-19.1	-55.8	-43.3	-0.3	0.4	压	压	157.9	-200.0	通过
294	J[150]	-14.8	-22.9	-51.3	-47.1	-0.3	0.5	压	压	162.0	-200.0	通过
303	I[150]	-15.7	-23.8	-52.2	-48.0	-0.3	0.5	压	压	161.0	-200.0	通过
303	2/4	-18.4	-21.4	-54.6	-45.8	-0.3	0.5	压	压	158.0	-200.0	通过

303	J[153]	-15.3	-24.2	-51.1	-48.8	-0.3	0.5	压	压	161.1	-200.0	通过
312	I[153]	-16.0	-24.9	-51.7	-49.5	-0.3	0.5	压	压	160.2	-200.0	通过
312	2/4	-24.4	-17.1	-59.9	-42.4	-0.4	0.4	压	压	152.7	-200.0	通过
312	J[172]	-27.0	-14.5	-62.1	-40.4	-0.4	0.4	压	压	150.7	-200.0	通过
358	I[172]	-27.0	-14.5	-62.1	-40.4	-0.4	0.4	压	压	150.7	-200.0	通过
358	2/4	-23.9	-17.3	-58.4	-43.6	-0.4	0.4	压	压	152.5	-200.0	通过
358	J[194]	-15.1	-25.5	-48.8	-51.9	-0.3	0.5	压	压	160.3	-200.0	通过
367	I[194]	-14.5	-24.8	-48.1	-51.2	-0.3	0.5	压	压	160.9	-200.0	通过
367	2/4	-17.3	-22.1	-50.8	-48.9	-0.3	0.5	压	压	157.8	-200.0	通过
367	J[197]	-14.4	-24.6	-47.6	-51.8	-0.3	0.5	压	压	160.8	-200.0	通过
376	I[197]	-13.5	-23.7	-46.7	-50.9	-0.3	0.5	压	压	161.9	-200.0	通过
376	2/4	-17.7	-19.6	-51.2	-47.2	-0.4	0.4	压	压	157.4	-200.0	通过
376	J[200]	-16.0	-20.7	-49.9	-48.8	-0.3	0.4	压	压	159.3	-200.0	通过
385	I[200]	-15.0	-19.5	-48.7	-47.6	-0.3	0.4	压	压	160.4	-200.0	通过
385	2/4	-18.5	-15.7	-53.0	-44.4	-0.4	0.4	压	压	157.1	-200.0	通过
385	J[203]	-16.3	-17.1	-51.5	-46.3	-0.3	0.4	压	压	159.7	-200.0	通过
394	I[203]	-14.9	-15.7	-49.9	-44.8	-0.3	0.4	压	压	161.1	-200.0	通过
394	2/4	-17.9	-12.3	-53.9	-41.9	-0.3	0.3	压	压	158.4	-200.0	通过
394	J[206]	-15.2	-14.3	-52.0	-44.0	-0.3	0.3	压	压	161.7	-200.0	通过
403	I[206]	-13.5	-12.5	-50.1	-42.1	-0.3	0.3	压	压	163.6	-200.0	通过
403	2/4	-16.7	-9.4	-54.0	-38.9	-0.3	0.2	压	压	160.3	-200.0	通过
403	J[209]	-14.2	-11.5	-52.0	-40.7	-0.3	0.3	压	压	163.3	-200.0	通过
412	I[209]	-12.1	-9.5	-49.9	-38.6	-0.2	0.3	压	压	165.9	-200.0	通过
412	2/4	-15.5	-6.8	-53.4	-35.1	-0.3	0.2	压	压	161.8	-200.0	通过
412	J[212]	-13.2	-9.5	-50.9	-36.7	-0.3	0.3	压	压	164.4	-200.0	通过
418	I[212]	-11.0	-7.3	-48.7	-34.4	-0.2	0.2	压	压	167.3	-200.0	通过
418	2/4	-13.9	-5.6	-51.2	-31.1	-0.3	0.2	压	压	163.4	-200.0	通过
418	J[215]	-11.0	-9.3	-47.8	-32.8	-0.2	0.3	压	压	167.0	-200.0	通过
423	I[215]	-8.7	-7.0	-45.4	-30.4	-0.2	0.2	压	压	170.5	-200.0	通过
423	2/4	-10.1	-6.4	-47.2	-27.9	-0.2	0.2	压	压	168.4	-200.0	通过
423	J[218]	-5.0	-10.2	-43.8	-31.7	-0.1	0.3	压	压	177.8	-200.0	通过
428	I[218]	-2.6	-7.6	-41.2	-29.2	-0.1	0.3	压	压	183.2	-200.0	通过
428	2/4	-1.3	-6.7	-43.2	-29.7	0.0	0.2	压	压	186.6	-200.0	通过
428	J[222]	6.1	-9.9	-40.3	-35.6	-0.2	0.3	压	压	174.2	-200.0	通过
434	I[222]	4.4	-2.8	-16.7	-20.8	-0.3	0.1	压	压	163.9	-200.0	通过
434	2/4	-1.9	-0.5	-19.2	-15.2	-0.1	0.0	压	压	179.4	-200.0	通过
434	J[225]	-2.1	-2.3	-17.0	-15.1	-0.1	0.2	压	压	176.7	-200.0	通过
439	I[225]	0.7	0.6	-14.1	-12.2	-0.1	-0.1	压	压	184.8	-200.0	通过
439	2/4	-3.9	2.8	-16.5	-8.1	-0.2	-0.4	压	压	166.2	-200.0	通过
439	J[228]	-2.9	-0.5	-12.8	-9.1	-0.2	0.1	压	压	167.6	-200.0	通过
444	I[228]	0.1	2.6	-9.7	-6.1	0.0	-0.4	压	压	188.7	-186.8	通过
444	2/4	-3.2	3.1	-10.3	-3.1	-0.3	-1.0	压	压	159.9	-119.5	通过
444	J[231]	-0.9	-1.9	-4.7	-5.3	-0.2	0.4	压	压	170.1	-200.0	通过
448	I[231]	2.3	1.3	-1.4	-2.1	0.6	-0.6	拉	压	200.0	-155.8	通过

第九章 斜拉桥主梁稳定性验算

9.1 验算原理

在外荷载作用下，斜拉桥的梁和塔都承受很大的压力，当压力达到一定值时，斜拉桥就可能产生平面屈曲或平面弯扭屈曲。

这里采用平面屈曲临界荷载的近似方法计算，本桥斜拉桥的桥塔的刚度远远大于缆索的刚度，根据理论分析，主梁的屈曲近似为一根两端铰支的弹性支承的连续梁。这样它的临界轴力 N_{cr} 就可按照敞开口式桁架桥上弦杆的临界轴力计算公式计算：

$$N_{cr} = \sqrt{\frac{EI k}{a}}$$

式中：I——主梁惯性矩

a——斜拉索间距

k——弹簧刚度

考虑到实际斜拉桥计算模型与上述研究的弹性支承连续梁有三个主要不同：

- 1、弹性支承梁的弯曲刚度为常量 EI，斜拉索的弯曲刚度可能是水平坐标 x 的函数 $E(x)I(x)$ ；
- 2、弹性支承梁的轴力为常力 P，斜拉索的梁内轴力是 x 的函数 $N(x)$ 。
- 3、弹性支承梁的弹性介质系数 β 为常量，斜拉索的等效介质系数为 x 的变量 $\beta(x)$ 。

9.2 斜拉索修正弹性模量计算

9.2.1、计算原理

拉索修正弹性模量采用厄恩斯特（Ernst）公式，斜索的修正弹性模量 E_{eq} 为：

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{\gamma^2 l_x^2 E}{12 \sigma^3}}$$

式中：E——斜索钢材的弹性模量；

γ ——索的容重；

l_x ——斜索的水平投影长度；

σ ——拉索的应力；

9.2.2、修正弹性模量 E_{eq} 计算

单位：应力 KN/m^2 、长度 m、拉力 KN

装
订
线

拉索等效弹性模量计算								
单元	Eeq	E	γ	lx	拉索应力 σ	面积	拉索初拉力	拉索组
35	1.94E+08	1.95E+08	78.5	130	6.65E+05	3.97E-03	2640.176	张拉 1—1 (ST)
39	1.94E+08	1.95E+08	78.5	130	6.65E+05	3.97E-03	2640.176	张拉 1—1 (ST)
40	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.35E+05	3.97E-03	2519.295	张拉 2—1 (ST)
43	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.35E+05	3.97E-03	2519.295	张拉 2—1 (ST)
44	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.10E+05	3.97E-03	2422.312	张拉 3—1 (ST)
48	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.10E+05	3.97E-03	2422.312	张拉 3—1 (ST)
49	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	5.89E+05	3.97E-03	2336.099	张拉 4—1 (ST)
52	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	5.89E+05	3.97E-03	2336.099	张拉 4—1 (ST)
53	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.57E+05	3.97E-03	2209.806	张拉 5—1 (ST)
57	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.57E+05	3.97E-03	2209.806	张拉 5—1 (ST)
58	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.29E+05	3.97E-03	2100.298	张拉 6—1 (ST)
61	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.29E+05	3.97E-03	2100.298	张拉 6—1 (ST)
62	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.10E+05	3.97E-03	2024.956	张拉 7—1 (ST)
66	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.10E+05	3.97E-03	2024.956	张拉 7—1 (ST)
67	1.94E+08	1.95E+08	78.5	60	4.96E+05	3.97E-03	1969.156	张拉 8—1 (ST)
70	1.94E+08	1.95E+08	78.5	60	4.96E+05	3.97E-03	1969.156	张拉 8—1 (ST)
71	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.66E+05	3.97E-03	1849.017	张拉 9—1 (ST)
75	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.66E+05	3.97E-03	1849.017	张拉 9—1 (ST)
76	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.13E+05	3.97E-03	1639.171	张拉 10—1 (ST)
79	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.13E+05	3.97E-03	1639.171	张拉 10—1 (ST)
80	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.82E+05	3.97E-03	1517.157	张拉 11—1 (ST)
84	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.82E+05	3.97E-03	1517.157	张拉 11—1 (ST)
85	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.13E+05	3.97E-03	1639.189	张拉 12—1 (ST)
88	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.13E+05	3.97E-03	1639.189	张拉 12—1 (ST)
89	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	5.06E+05	3.97E-03	2006.884	张拉 13—1 (ST)
93	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	5.06E+05	3.97E-03	2006.884	张拉 13—1 (ST)
135	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	4.99E+05	3.97E-03	1981.288	张拉 13—2 (ST)
139	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	4.99E+05	3.97E-03	1981.288	张拉 13—2 (ST)
140	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.02E+05	3.97E-03	1594.97	张拉 12—2 (ST)
143	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.02E+05	3.97E-03	1594.97	张拉 12—2 (ST)
144	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.74E+05	3.97E-03	1486.131	张拉 11—2 (ST)
148	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.74E+05	3.97E-03	1486.131	张拉 11—2 (ST)
149	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.11E+05	3.97E-03	1630.142	张拉 10—2 (ST)
152	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.11E+05	3.97E-03	1630.142	张拉 10—2 (ST)
153	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.76E+05	3.97E-03	1890.273	张拉 9—2 (ST)
157	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.76E+05	3.97E-03	1890.273	张拉 9—2 (ST)
158	1.95E+08	1.95E+08	78.5	60	5.25E+05	3.97E-03	2081.826	张拉 8—2 (ST)
161	1.95E+08	1.95E+08	78.5	60	5.25E+05	3.97E-03	2081.826	张拉 8—2 (ST)
162	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.60E+05	3.97E-03	2222.284	张拉 7—2 (ST)
166	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.60E+05	3.97E-03	2222.284	张拉 7—2 (ST)

167	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.76E+05	3.97E-03	2287.05	张拉 6—2(ST)
170	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.76E+05	3.97E-03	2287.05	张拉 6—2(ST)
171	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.91E+05	3.97E-03	2345.435	张拉 5—2(ST)
175	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.91E+05	3.97E-03	2345.435	张拉 5—2(ST)
176	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	6.07E+05	3.97E-03	2411.049	张拉 4—2(ST)
179	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	6.07E+05	3.97E-03	2411.049	张拉 4—2(ST)
180	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.20E+05	3.97E-03	2460.387	张拉 3—2(ST)
184	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.20E+05	3.97E-03	2460.387	张拉 3—2(ST)
185	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.14E+05	3.97E-03	2436.519	张拉 2—2(ST)
188	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.14E+05	3.97E-03	2436.519	张拉 2—2(ST)
189	1.93E+08	1.95E+08	78.5	130	5.71E+05	3.97E-03	2265.979	张拉 1—2(ST)
193	1.93E+08	1.95E+08	78.5	130	5.71E+05	3.97E-03	2265.979	张拉 1—2(ST)
256	1.93E+08	1.95E+08	78.5	130	5.71E+05	3.97E-03	2265.979	张拉 1—2(ST)
260	1.93E+08	1.95E+08	78.5	130	5.71E+05	3.97E-03	2265.979	张拉 1—2(ST)
261	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.14E+05	3.97E-03	2436.519	张拉 2—2(ST)
264	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.14E+05	3.97E-03	2436.519	张拉 2—2(ST)
265	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.20E+05	3.97E-03	2460.387	张拉 3—2(ST)
269	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.20E+05	3.97E-03	2460.387	张拉 3—2(ST)
270	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	6.07E+05	3.97E-03	2411.049	张拉 4—2(ST)
273	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	6.07E+05	3.97E-03	2411.049	张拉 4—2(ST)
274	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.91E+05	3.97E-03	2345.435	张拉 5—2(ST)
278	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.91E+05	3.97E-03	2345.435	张拉 5—2(ST)
279	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.76E+05	3.97E-03	2287.05	张拉 6—2(ST)
282	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.76E+05	3.97E-03	2287.05	张拉 6—2(ST)
283	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.60E+05	3.97E-03	2222.284	张拉 7—2(ST)
287	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.60E+05	3.97E-03	2222.284	张拉 7—2(ST)
288	1.95E+08	1.95E+08	78.5	60	5.25E+05	3.97E-03	2081.826	张拉 8—2(ST)
291	1.95E+08	1.95E+08	78.5	60	5.25E+05	3.97E-03	2081.826	张拉 8—2(ST)
292	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.76E+05	3.97E-03	1890.273	张拉 9—2(ST)
296	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.76E+05	3.97E-03	1890.273	张拉 9—2(ST)
297	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.11E+05	3.97E-03	1630.142	张拉 10—2(ST)
300	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.11E+05	3.97E-03	1630.142	张拉 10—2(ST)
301	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.74E+05	3.97E-03	1486.131	张拉 11—2(ST)
305	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.74E+05	3.97E-03	1486.131	张拉 11—2(ST)
306	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.02E+05	3.97E-03	1594.97	张拉 12—2(ST)
309	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.02E+05	3.97E-03	1594.97	张拉 12—2(ST)
310	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	4.99E+05	3.97E-03	1981.288	张拉 13—2(ST)
314	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	4.99E+05	3.97E-03	1981.288	张拉 13—2(ST)
356	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	5.06E+05	3.97E-03	2006.884	张拉 13—1(ST)
360	1.95E+08	1.95E+08	78.5	10	5.06E+05	3.97E-03	2006.884	张拉 13—1(ST)
361	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.13E+05	3.97E-03	1639.189	张拉 12—1(ST)
364	1.95E+08	1.95E+08	78.5	20	4.13E+05	3.97E-03	1639.189	张拉 12—1(ST)
365	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.82E+05	3.97E-03	1517.157	张拉 11—1(ST)
369	1.95E+08	1.95E+08	78.5	30	3.82E+05	3.97E-03	1517.157	张拉 11—1(ST)

370	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.13E+05	3.97E-03	1639.171	张拉 10—1 (ST)
373	1.95E+08	1.95E+08	78.5	40	4.13E+05	3.97E-03	1639.171	张拉 10—1 (ST)
374	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.66E+05	3.97E-03	1849.017	张拉 9—1 (ST)
378	1.95E+08	1.95E+08	78.5	50	4.66E+05	3.97E-03	1849.017	张拉 9—1 (ST)
379	1.94E+08	1.95E+08	78.5	60	4.96E+05	3.97E-03	1969.156	张拉 8—1 (ST)
382	1.94E+08	1.95E+08	78.5	60	4.96E+05	3.97E-03	1969.156	张拉 8—1 (ST)
383	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.10E+05	3.97E-03	2024.956	张拉 7—1 (ST)
387	1.94E+08	1.95E+08	78.5	70	5.10E+05	3.97E-03	2024.956	张拉 7—1 (ST)
388	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.29E+05	3.97E-03	2100.298	张拉 6—1 (ST)
391	1.94E+08	1.95E+08	78.5	80	5.29E+05	3.97E-03	2100.298	张拉 6—1 (ST)
392	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.57E+05	3.97E-03	2209.806	张拉 5—1 (ST)
396	1.94E+08	1.95E+08	78.5	90	5.57E+05	3.97E-03	2209.806	张拉 5—1 (ST)
397	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	5.89E+05	3.97E-03	2336.099	张拉 4—1 (ST)
400	1.94E+08	1.95E+08	78.5	100	5.89E+05	3.97E-03	2336.099	张拉 4—1 (ST)
401	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.10E+05	3.97E-03	2422.312	张拉 3—1 (ST)
405	1.94E+08	1.95E+08	78.5	110	6.10E+05	3.97E-03	2422.312	张拉 3—1 (ST)
406	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.35E+05	3.97E-03	2519.295	张拉 2—1 (ST)
409	1.94E+08	1.95E+08	78.5	120	6.35E+05	3.97E-03	2519.295	张拉 2—1 (ST)
410	1.94E+08	1.95E+08	78.5	130	6.65E+05	3.97E-03	2640.176	张拉 1—1 (ST)
414	1.94E+08	1.95E+08	78.5	130	6.65E+05	3.97E-03	2640.176	张拉 1—1 (ST)

9.3 缆索弹簧刚度 K 求解

9.3.1、计算原理

斜拉索的等效弹簧刚度 K 可按式计算：

$$k = \frac{1}{\delta_1 + \delta_2} = \lambda \frac{E_c A_c \sin^2 \alpha_c}{l_c}$$

式中：

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{\cos^2 \alpha_c \gamma h}{3l_c}}, \quad \alpha_c \text{——索与梁的夹角；}$$

l_c ——斜拉索的长度；

$E_c A_c$ ——斜拉索轴向拉伸刚度

$$\gamma = \frac{E_c A_c h^2}{E_t I_t} \text{——索、塔刚度比；}$$

$E_t I_t$ ——塔的弯曲刚度；

9.3.2、缆索弹簧刚度 K 计算

计算基准单位：长度单位 m、力值 KN

单元	K	λ	l_c	γ	h	l_x	α_c 弧度	h_x	E_c	A_c	E_t	I_t
35	5.87E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5

装 订 线	39	5.87E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	40	6.30E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	43	6.30E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	44	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	48	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	49	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	52	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	53	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	57	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	58	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	61	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	62	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	66	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	67	1.87E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	70	1.87E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	71	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	75	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	76	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	79	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	80	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	84	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	85	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	88	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	89	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	93	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	135	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	139	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	140	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	143	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	144	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	148	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	149	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	152	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	153	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	157	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	158	1.88E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	161	1.88E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	162	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	166	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	167	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	170	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	171	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	175	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
	176	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5

179	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
180	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
184	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
185	6.29E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
188	6.29E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
189	5.86E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.93E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
193	5.86E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.93E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
256	5.86E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.93E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
260	5.86E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.93E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
261	6.29E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
264	6.29E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
265	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
269	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
270	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
273	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
274	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
278	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
279	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
282	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
283	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
287	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
288	1.88E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
291	1.88E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
292	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
296	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
297	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
300	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
301	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
305	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
306	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
309	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
310	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
314	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
356	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
360	1.54E+04	0.8	38.0	6.1	62.6	10.0	1.3	36.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
361	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
364	8.67E+03	0.6	43.5	6.1	62.6	20.0	1.1	38.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
365	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
369	5.25E+03	0.5	50.5	6.1	62.6	30.0	0.9	40.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
370	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
373	3.49E+03	0.5	58.5	6.1	62.6	40.0	0.8	42.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
374	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
378	2.49E+03	0.5	67.0	6.1	62.6	50.0	0.7	44.6	1.95E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
379	1.87E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5

382	1.87E+03	0.5	76.0	6.1	62.6	60.0	0.7	46.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
383	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
387	1.47E+03	0.5	85.2	6.1	62.6	70.0	0.6	48.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
388	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
391	1.19E+03	0.5	94.7	6.1	62.6	80.0	0.6	50.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
392	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
396	9.89E+02	0.5	104.3	6.1	62.6	90.0	0.5	52.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
397	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
400	8.38E+02	0.5	113.9	6.1	62.6	100.0	0.5	54.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
401	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
405	7.21E+02	0.6	123.7	6.1	62.6	110.0	0.5	56.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
406	6.30E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
409	6.30E+02	0.6	133.6	6.0	62.6	120.0	0.5	58.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
410	5.87E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5
414	5.87E+02	0.6	144.3	6.0	62.6	130.0	0.4	62.6	1.94E+08	3.97E-03	3.45E+07	14.5

9.4 主梁面内稳定临界轴力计算

9.4.1、计算原理

斜拉桥主梁面内稳定临界轴力计算采用以下公式：

$$N_{cr} = 2\sqrt{E(x)I(x)\beta(x)}$$

它是 x 的函数，将某 x 带入上式得到的临界轴力称为名义临界轴力。名义临界轴力与该处梁的实际轴力比之称为该点的名义安全度，取其最小值作为加劲梁的屈曲安全系数。

9.4.2、名义临界轴力计算

单位：长度 m、力值 KN

单元号	Ncr	E	I	K	a
5	-1.13E+05	2.06E+08	1.06	587.26	10
10	-1.17E+05	2.06E+08	1.06	629.60	10
15	-1.26E+05	2.06E+08	1.06	721.21	10
21	-1.35E+05	2.06E+08	1.06	837.63	10
26	-1.47E+05	2.06E+08	1.06	988.88	10
31	-1.61E+05	2.06E+08	1.06	1191.18	10
37	-1.79E+05	2.06E+08	1.06	1471.14	10
46	-2.02E+05	2.06E+08	1.06	1874.99	10
55	-2.33E+05	2.06E+08	1.06	2488.62	10
64	-2.76E+05	2.06E+08	1.06	3485.61	10
73	-3.39E+05	2.06E+08	1.06	5249.44	10
82	-4.35E+05	2.06E+08	1.06	8672.39	10
91	-5.80E+05	2.06E+08	1.06	15397.69	10
137	-5.80E+05	2.06E+08	1.06	15397.65	10
146	-4.35E+05	2.06E+08	1.06	8672.13	10

155	-3.39E+05	2.06E+08	1.06	5249.16	10
164	-2.76E+05	2.06E+08	1.06	3485.55	10
173	-2.33E+05	2.06E+08	1.06	2488.81	10
182	-2.02E+05	2.06E+08	1.06	1875.41	10
191	-1.79E+05	2.06E+08	1.06	1471.80	10
197	-1.61E+05	2.06E+08	1.06	1191.78	10
202	-1.47E+05	2.06E+08	1.06	989.28	10
207	-1.35E+05	2.06E+08	1.06	837.83	10
212	-1.26E+05	2.06E+08	1.06	721.31	10
217	-1.17E+05	2.06E+08	1.06	629.39	10
222	-1.13E+05	2.06E+08	1.06	586.12	10
227	-1.13E+05	2.06E+08	1.06	586.12	10
232	-1.17E+05	2.06E+08	1.06	629.39	10
237	-1.26E+05	2.06E+08	1.06	721.31	10
242	-1.35E+05	2.06E+08	1.06	837.83	10
247	-1.47E+05	2.06E+08	1.06	989.28	10
252	-1.61E+05	2.06E+08	1.06	1191.78	10
258	-1.79E+05	2.06E+08	1.06	1471.80	10
267	-2.02E+05	2.06E+08	1.06	1875.41	10
276	-2.33E+05	2.06E+08	1.06	2488.81	10
285	-2.76E+05	2.06E+08	1.06	3485.55	10
294	-3.39E+05	2.06E+08	1.06	5249.16	10
303	-4.35E+05	2.06E+08	1.06	8672.13	10
312	-5.80E+05	2.06E+08	1.06	15397.65	10
358	-5.80E+05	2.06E+08	1.06	15397.69	10
367	-4.35E+05	2.06E+08	1.06	8672.39	10
376	-3.39E+05	2.06E+08	1.06	5249.44	10
385	-2.76E+05	2.06E+08	1.06	3485.61	10
394	-2.33E+05	2.06E+08	1.06	2488.62	10
403	-2.02E+05	2.06E+08	1.06	1874.99	10
412	-1.79E+05	2.06E+08	1.06	1471.14	10
418	-1.61E+05	2.06E+08	1.06	1191.18	10
423	-1.47E+05	2.06E+08	1.06	988.88	10
428	-1.35E+05	2.06E+08	1.06	837.63	10
434	-1.26E+05	2.06E+08	1.06	721.21	10
439	-1.17E+05	2.06E+08	1.06	629.60	10
444	-1.13E+05	2.06E+08	1.06	587.26	10

9.5 主梁稳定性验算及屈曲安全度计算

单位：长度 m、力值 KN

单元	荷载	位置	轴向 (kN)	荷载	轴向 (kN)	稳定性验算	安全度
5	组合包络(最大)	I[6]	-4.56E+03	组合包络(最小)	-4.83E+03	通过	23
10	组合包络(最大)	I[9]	-8.85E+03	组合包络(最小)	-9.40E+03	通过	12
15	组合包络(最大)	I[13]	-1.29E+04	组合包络(最小)	-1.37E+04	通过	9

21	组合包络(最大)	I[16]	-1.05E+04	组合包络(最小)	-4.77E+04	通过	4
26	组合包络(最大)	I[19]	-1.41E+04	组合包络(最小)	-5.16E+04	通过	4
31	组合包络(最大)	I[22]	-1.75E+04	组合包络(最小)	-5.51E+04	通过	4
37	组合包络(最大)	I[25]	-2.07E+04	组合包络(最小)	-5.85E+04	通过	4
46	组合包络(最大)	I[28]	-2.37E+04	组合包络(最小)	-6.16E+04	通过	4
55	组合包络(最大)	I[31]	-2.64E+04	组合包络(最小)	-6.43E+04	通过	4
64	组合包络(最大)	I[34]	-2.86E+04	组合包络(最小)	-6.64E+04	通过	4
73	组合包络(最大)	I[37]	-3.03E+04	组合包络(最小)	-6.81E+04	通过	5
82	组合包络(最大)	I[40]	-3.17E+04	组合包络(最小)	-6.95E+04	通过	6
91	组合包络(最大)	I[62]	-3.27E+04	组合包络(最小)	-7.05E+04	通过	8
137	组合包络(最大)	I[81]	-3.27E+04	组合包络(最小)	-7.05E+04	通过	8
146	组合包络(最大)	I[84]	-3.17E+04	组合包络(最小)	-6.96E+04	通过	6
155	组合包络(最大)	I[87]	-3.04E+04	组合包络(最小)	-6.82E+04	通过	5
164	组合包络(最大)	I[90]	-2.88E+04	组合包络(最小)	-6.66E+04	通过	4
173	组合包络(最大)	I[93]	-2.67E+04	组合包络(最小)	-6.44E+04	通过	4
182	组合包络(最大)	I[96]	-2.41E+04	组合包络(最小)	-6.17E+04	通过	5
191	组合包络(最大)	I[99]	-2.09E+04	组合包络(最小)	-5.84E+04	通过	5
197	组合包络(最大)	I[102]	-1.74E+04	组合包络(最小)	-5.48E+04	通过	6
202	组合包络(最大)	I[105]	-1.37E+04	组合包络(最小)	-5.10E+04	通过	5
207	组合包络(最大)	I[108]	-9.80E+03	组合包络(最小)	-4.69E+04	通过	4
212	组合包络(最大)	I[111]	-5.71E+03	组合包络(最小)	-4.27E+04	通过	6
217	组合包络(最大)	I[114]	-1.47E+03	组合包络(最小)	-3.84E+04	通过	5
222	组合包络(最大)	I[117]	2.81E+03	组合包络(最小)	-3.42E+04	通过	4
227	组合包络(最大)	I[117]	2.81E+03	组合包络(最小)	-3.42E+04	通过	4
232	组合包络(最大)	I[120]	-1.47E+03	组合包络(最小)	-3.84E+04	通过	4
237	组合包络(最大)	I[123]	-5.71E+03	组合包络(最小)	-4.27E+04	通过	4
242	组合包络(最大)	I[126]	-9.80E+03	组合包络(最小)	-4.69E+04	通过	4
247	组合包络(最大)	I[129]	-1.37E+04	组合包络(最小)	-5.10E+04	通过	4
252	组合包络(最大)	I[132]	-1.74E+04	组合包络(最小)	-5.48E+04	通过	4
258	组合包络(最大)	I[135]	-2.09E+04	组合包络(最小)	-5.84E+04	通过	4
267	组合包络(最大)	I[138]	-2.41E+04	组合包络(最小)	-6.17E+04	通过	4
276	组合包络(最大)	I[141]	-2.67E+04	组合包络(最小)	-6.44E+04	通过	4
285	组合包络(最大)	I[144]	-2.88E+04	组合包络(最小)	-6.66E+04	通过	4
294	组合包络(最大)	I[147]	-3.04E+04	组合包络(最小)	-6.82E+04	通过	5
303	组合包络(最大)	I[150]	-3.17E+04	组合包络(最小)	-6.96E+04	通过	6
312	组合包络(最大)	I[153]	-3.27E+04	组合包络(最小)	-7.05E+04	通过	8
358	组合包络(最大)	I[172]	-3.27E+04	组合包络(最小)	-7.05E+04	通过	8
367	组合包络(最大)	I[194]	-3.17E+04	组合包络(最小)	-6.95E+04	通过	6
376	组合包络(最大)	I[197]	-3.03E+04	组合包络(最小)	-6.81E+04	通过	5
385	组合包络(最大)	I[200]	-2.86E+04	组合包络(最小)	-6.64E+04	通过	4
394	组合包络(最大)	I[203]	-2.64E+04	组合包络(最小)	-6.43E+04	通过	4
403	组合包络(最大)	I[206]	-2.37E+04	组合包络(最小)	-6.16E+04	通过	4
412	组合包络(最大)	I[209]	-2.07E+04	组合包络(最小)	-5.85E+04	通过	4
418	组合包络(最大)	I[212]	-1.75E+04	组合包络(最小)	-5.51E+04	通过	4

423	组合包络(最大)	I[215]	-1.41E+04	组合包络(最小)	-5.16E+04	通过	4
428	组合包络(最大)	I[218]	-1.05E+04	组合包络(最小)	-4.77E+04	通过	4
434	组合包络(最大)	I[222]	-1.29E+04	组合包络(最小)	-1.37E+04	通过	9
439	组合包络(最大)	I[225]	-8.85E+03	组合包络(最小)	-9.40E+03	通过	12
444	组合包络(最大)	I[228]	-4.56E+03	组合包络(最小)	-4.83E+03	通过	23

屈曲安全度取值：取最小安全值 4，符合规范要求。

第十章 斜拉桥变形验算

10.1 验算规定：

根据《公路斜拉桥设计规范》（试行）JTJ 027-96 规定，主梁在汽车荷载（不计冲击力）作用时的最大竖向挠度：当为混凝土主梁时不应大于 $L/500$ ；钢主梁时不应大于 $L/400$ （ L 为中跨跨径）

10.2 主梁挠度验算：

此处验算采用组合包络下的主梁各节点最大竖向挠度，挠度控制值为： $L/400 = 260/400 = 0.65\text{m}$ 。

单位：长度 m、力值 KN

节点	荷载	DZ (m)	挠度验算
1	组合包络(最大)	0	通过
3	组合包络(最大)	0.002443	通过
6	组合包络(最大)	0.00525	通过
9	组合包络(最大)	0.006325	通过
13	组合包络(最大)	0.005336	通过
16	组合包络(最大)	0.008381	通过
19	组合包络(最大)	0.012497	通过
22	组合包络(最大)	0.017247	通过
25	组合包络(最大)	0.021801	通过
28	组合包络(最大)	0.025204	通过
31	组合包络(最大)	0.026753	通过
34	组合包络(最大)	0.026054	通过
37	组合包络(最大)	0.02252	通过
40	组合包络(最大)	0.015375	通过
62	组合包络(最大)	0.005545	通过
81	组合包络(最大)	0.00236	通过
84	组合包络(最大)	-0.00056	通过
87	组合包络(最大)	-0.00448	通过
90	组合包络(最大)	-0.00374	通过
93	组合包络(最大)	-0.00267	通过
96	组合包络(最大)	-0.0016	通过

99	组合包络(最大)	-0.0007	通过
102	组合包络(最大)	0.000147	通过
105	组合包络(最大)	0.001381	通过
108	组合包络(最大)	0.003377	通过
111	组合包络(最大)	0.006145	通过
114	组合包络(最大)	0.009076	通过
117	组合包络(最大)	0.010667	通过
120	组合包络(最大)	0.009076	通过
123	组合包络(最大)	0.006145	通过
126	组合包络(最大)	0.003377	通过
129	组合包络(最大)	0.001381	通过
132	组合包络(最大)	0.000147	通过
135	组合包络(最大)	-0.0007	通过
138	组合包络(最大)	-0.0016	通过
141	组合包络(最大)	-0.00267	通过
144	组合包络(最大)	-0.00374	通过
147	组合包络(最大)	-0.00448	通过
150	组合包络(最大)	-0.00056	通过
153	组合包络(最大)	0.00236	通过
172	组合包络(最大)	0.005545	通过
194	组合包络(最大)	0.015375	通过
197	组合包络(最大)	0.02252	通过
200	组合包络(最大)	0.026054	通过
203	组合包络(最大)	0.026753	通过
206	组合包络(最大)	0.025204	通过
209	组合包络(最大)	0.021801	通过
212	组合包络(最大)	0.017247	通过
215	组合包络(最大)	0.012497	通过
218	组合包络(最大)	0.008381	通过
222	组合包络(最大)	0.005336	通过
225	组合包络(最大)	0.006325	通过
228	组合包络(最大)	0.00525	通过
231	组合包络(最大)	0.002443	通过
233	组合包络(最大)	0	通过
1	组合包络(最小)	0	通过
3	组合包络(最小)	-0.00078	通过
6	组合包络(最小)	-0.002	通过
9	组合包络(最小)	-0.0015	通过
13	组合包络(最小)	-9.9E-05	通过
16	组合包络(最小)	-0.00696	通过
19	组合包络(最小)	-0.01477	通过
22	组合包络(最小)	-0.02093	通过
25	组合包络(最小)	-0.02425	通过
28	组合包络(最小)	-0.02472	通过

31	组合包络(最小)	-0.02284	通过
34	组合包络(最小)	-0.01954	通过
37	组合包络(最小)	-0.01627	通过
40	组合包络(最小)	-0.01496	通过
62	组合包络(最小)	-0.01594	通过
81	组合包络(最小)	-0.01699	通过
84	组合包络(最小)	-0.02125	通过
87	组合包络(最小)	-0.02768	通过
90	组合包络(最小)	-0.03936	通过
93	组合包络(最小)	-0.05085	通过
96	组合包络(最小)	-0.06205	通过
99	组合包络(最小)	-0.07286	通过
102	组合包络(最小)	-0.08274	通过
105	组合包络(最小)	-0.09094	通过
108	组合包络(最小)	-0.09659	通过
111	组合包络(最小)	-0.09938	通过
114	组合包络(最小)	-0.0997	通过
117	组合包络(最小)	-0.09893	通过
120	组合包络(最小)	-0.0997	通过
123	组合包络(最小)	-0.09938	通过
126	组合包络(最小)	-0.09659	通过
129	组合包络(最小)	-0.09094	通过
132	组合包络(最小)	-0.08274	通过
135	组合包络(最小)	-0.07286	通过
138	组合包络(最小)	-0.06205	通过
141	组合包络(最小)	-0.05085	通过
144	组合包络(最小)	-0.03936	通过
147	组合包络(最小)	-0.02768	通过
150	组合包络(最小)	-0.02125	通过
153	组合包络(最小)	-0.01699	通过
172	组合包络(最小)	-0.01594	通过
194	组合包络(最小)	-0.01496	通过
197	组合包络(最小)	-0.01627	通过
200	组合包络(最小)	-0.01954	通过
203	组合包络(最小)	-0.02284	通过
206	组合包络(最小)	-0.02472	通过
209	组合包络(最小)	-0.02425	通过
212	组合包络(最小)	-0.02093	通过
215	组合包络(最小)	-0.01477	通过
218	组合包络(最小)	-0.00696	通过
222	组合包络(最小)	-9.9E-05	通过
225	组合包络(最小)	-0.0015	通过
228	组合包络(最小)	-0.002	通过
231	组合包络(最小)	-0.00078	通过

致谢

首先感谢陈偕民老师在百忙之中抽空辅导了我这次毕业设计的每一个环节，陈老师对待学生认真负责、和蔼耐心的态度和对待工作一丝不苟的作风给我留下了深刻的印象，为我今后的学习工作树立了榜样。

通过这次毕业设计，我比较系统的串连了我大学本科四年所学的知识，深感我们这门专业系统的博大精深，觉得自己存在的差距还很大。但是，在这炎炎夏日工作的几十天，我的收获也是很大的。在毕业设计的反复修改，一遍一遍的看书，和同学一次又一次的讨论，一次又一次的请教老师的过程中，通过集中的毕业设计和专业系统的培养，我提高了自己综合运用所学的基础理论，基本知识和基本技能，分析解决问题的能力。在老师的指导下，通过独立系统的完成一个工程项目的设计，比较具体的了解了一个工程设计的全过程，巩固已学课程的基础上，培养了自己考虑问题，分析问题，解决问题的能力，同时接触到和掌握一些新的专业知识和技能。这次毕业设计为自己提供了一次很好的实践机会，为我将来的学习工作做了很好的铺垫，是我人生中很重要的一次经历。

最后，感谢公路学院的领导和老师在百忙之中为我们细心指导设计，我衷心的感谢各位老师！

参考文献

- 【1】 王国周，翟履谦。钢结构——原理与计算[M]。北京：清华大学出版社，2000
- 【2】 吴冲，强士中。现代钢桥（上）[M]，人民交通出版社
- 【3】 公路斜拉桥设计规范（试行）[S]，中华人民共和国交通部发布 1996-5-20
- 【4】 顾安邦，桥梁工程（下册）[M]，人民交通出版社
- 【5】 邵旭东，程祥云，桥梁设计与计算[M]，人民交通出版社
- 【6】 公路桥涵设计通用规范[S]，中华人民共和国交通部发布 2004-06-28
- 【7】 吴胜东，润扬长江大桥建设（斜拉桥）第四册[M]，人民交通出版社。
- 【8】 黄绳武，桥梁施工及组织管理[M]，人民交通出版社
- 【9】 叶见曙主编，结构设计原理[M]，北京 1997
- 【10】 《桥梁设计常用数据手册》编委会，桥梁设计常用数据手册[M]，人民交通出版社。
- 【11】 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]，中华人民共和国交通部
- 【12】 周孟波，斜拉桥手册[M]，人民交通出版社
- 【13】 陈忠延，土木工程专业毕业设计指南（桥梁工程分册）[M]，中国水利水电出版社
- 【14】 公路桥涵地基与基础设计规范[S]，中华人民共和国交通部
- 【15】 徐光辉主编，《桥梁计算示例集》—预应力混凝土钢架桥[M]。1995
- 【16】 李廉锟主编，结构力学[M]，北京教育出版社，1996
- 【17】 中华人民共和国交通部标准，公路施工技术规范（JTJ041-89）[S]

附录：科技论文翻译

【正题名】:Fatigue crack growth behavior of cables and steel wires for the cable-stayed portion of Runyang bridge: Disproportionate loosening and/or tightening of cables

【作者】: Sih, GC; Tang, XS; Li, ZX; Li, AQ; Tang, KK

【作者单位】:E China Univ Sci & Technol, Sch Mech & Power Engr, Shanghai 200237, Peoples R China;

Lehigh Univ, Dept Mech Engr & Mech, Bethlehem, PA 18015 USA;

Changsha Univ Sci & Technol, Sch Bridge & Struct Engr, Changsha 410076, Hunan, Peoples R China;

Southeast Univ, Coll Civil Engr, Nanjing 210096, Peoples R China

【刊名】:Theoretical and Applied Fracture Mechanics

【年卷期】:vol. 49 【出版年】:2008 【ISSN】:0167-8442 【期号】:no. 1

【关键词】:fatigue crack growth; cable tension; tightening and loosening; traffic loading; mean stress and stress amplitude; energy density; micro- and macro-crack; steel wire; energy density; local and global failure

【文摘】:

The cable-stayed portion of the Runyang bridge has a main span of 400 m supported between towers by 52 cables on each side. The cable length and location differ contributing to different tension that would vary depending on the traffic conditions. High stresses prevail in cables near the free ends of the cantilever while the low stresses occur near quarter way of the main span and at the middle of the bridge. Such a variation has the tendency of tightening and loosening the cables in a complicated manner. The ways with which this variation would affect the damage of the cables by fatigue crack growth becomes increasingly more important in time, particularly for developing the methodology of inspection and maintenance of the bridge cables the failure of which by fatigue is likely to be location specific. One of the objectives of this work is to develop a model that can systematically determine the fatigue crack growth in pre-tensioned bridge cables that are made of stranded steel wires. The idealized cable containing 100% solidly packed wires correspond to $\beta = 1.0$ in the model. This parameter is shown to have a significant effect on the fatigue strength of the cables when using a dual scale crack growth rate relation that accounts for both macro- and micro-effects in geometry and material property. The combined influence of mean stress and stress amplitude on crack growth is shown to depend on tightening and loosening of the cables and steel wires. Variation of the tension in the cable and/or wire can be assessed by a parameter α such that $\alpha = 1$ (normal tension) can serve as the reference. More and less tension correspond, respectively, to $\alpha \geq 1$ and $\alpha \leq 1$. In this way, the effect of traffic on fatigue can be delineated from that without the traffic. The results are presented graphically

and discussed systematically for the cables subjected to high and low stresses. This provides an overall assessment of the fatigue crack growth behavior in the Runyang cable-portion of the bridge for a total of two million cycles. In general, it can be said that Varying max stress in cable with traffic: cable fatigue life can be enhanced and impeded, respectively, by tightening and loosening of tension in cable. Since geometric symmetry of the 52 cables cannot be satisfied exactly about the middle of the bridge, the high stresses in cable #3 is only approximately equal to that in cable #50. The same applies to the low stresses in cable #14 when compared to that in cable #28. Because of the significant difference in the fatigue life of cable #50 and #28, it is worthwhile to use a higher modulus material for cables #3 and #50 in contrast to that for cables #14 and #28. This conclusion is based on using energy density function of the dual scale micro-/macro-crack growth model. Since the results depend on the choice of the fatigue crack growth criterion, validation of engineering application should rely on minimizing contradictions and inconsistencies. Moreover, multiple criteria may be considered for the future design of bridges similar to the design of airborne vehicles that incorporate the concept of "fail safe". (c)

2007

Published by Elsevier Ltd.

【正题名】:润扬长江大桥斜拉桥部分的拉索和钢绞线疲劳裂缝成长特性:斜拉索不成比例的松弛和张紧

【作者】: Sih, GC; Tang, XS; Li, ZX; Li, AQ; Tang, KK

【作者单位】: E China Univ Sci & Technol, Sch Mech & Power Engn, 上海 200237, 中国; Lehigh Univ, Dept Mech Engn&Mech 、伯利恒, PA 18015 美国;

Changsha Univ Sci & Technol, Sch Bridge & Struct Engn, 长沙 410076, 湖南, 中国; 东南大学, 土木工程学院, 南京 210096, 中国

【刊名】: 断裂力学的理论和应用

【年卷期】:vol. 49

【出版年】:2008

【国际标准期刊编号】:0167-8442

【期号】:N0. 1

【关键词】:疲劳裂缝增长; 拉索拉力; 张紧与松弛; 车道荷载; 平均应力与应力幅度; 能量密度; 细微裂纹; 钢绞线; 能量密度; 局部与全局疲劳断裂

【文摘】: 润扬长江大桥斜拉桥部分在 400 米主跨间主梁两侧各设 52 根拉索支持。不同的拉索长度和位置产生不同的拉索拉力, 拉力在车道荷载作用下产生变化。高应力常分布在悬臂的自由端, 然而低应力产生在 1/4 主跨和 1/2 跨处。应力的变化使拉索以复杂的特点张紧和松弛。应力的变化将影响拉索的疲劳裂纹增长, 这个方法随时间的增长越来越重要, 特别是为发展桥梁拉索在特定位置疲劳断裂的检测和维修方法。这个工作其中的一个目的就是建立一个可以系统的决定疲劳裂纹增长的模型, 其中斜拉桥拉索由标准钢绞线组成。这个理想的拉索包括由 100%坚硬包裹的钢绞线, 在模型中相应分贝等于 1.0。包含被坚硬包装的电线的 100%的被理想化的电缆符

合贝它 $\alpha=1.0$ 在模型中。这个参数显示当使用双倍裂缝相对增长速率时，对于斜拉索的疲劳强度有重要影响，这个可以解释在几何和材料特性下的总体和细部效应。裂缝增长处的平均应力和应力幅度的组合影响依赖于斜拉索和钢绞线的张紧&松弛。拉索和钢绞线的拉力变化可以由一个参数估计，这个参数可以用阿尔发 $\alpha=1$ （正常拉力值）的值作为参考。相应的增大和变小的拉力值，分别地对应于阿尔发 $\alpha>1$ 和阿尔发 $\alpha<1$ 。通过这个方法，交通对于疲劳的影响在没有交通的情况下得以描述。这个结果以图解的方式呈现而且对于受高低应力拉索有系统的讨论。这个对于润扬长江大桥斜拉索部分做了二百万个周期的疲劳裂缝增长行为提供了总体评估。总体上，这个是考虑交通影响的拉索的最大应力改变值。斜拉索疲劳寿命通过张紧和放松拉索的方式，相对地，可以得到提高和降低。由于这 52 根拉索的几何对称轴在桥梁中心处不能够很好吻合，#3 斜拉索的高值拉应力和 #50 斜拉索大致相等。相同的情况也出现在 #14 拉索的低值拉应力相对于 #28 拉索的比较。由于 #50 和 #28 斜拉索在疲劳寿命上的重要差异，对于 #3 和 #50 与 #14 和 #28 拉索的差异，对其使用更高弹性模量材料是值得的。这个结论是基于使用双倍扩大的细微/总体裂缝增长模型的能量密度函数。由于这个结果依赖与对于疲劳裂缝增长标准的选择，工程申请的确认应当取决于微小的差异和不一致。而且，在未来桥梁设计中多标准被考虑类似于空中客车对于“失效安全值”概念的考虑。

Research activity in Europe

Post-tensioned concrete rail bridge analysis

Ove Arup and Partners carried out an inspection and assessment of the superstructure of a 160 m long post-tensioned, segmental railway bridge in Manchester to determine its load-carrying capacity prior to a transfer of ownership, for use in the Metrolink light rail system.

Particular attention was paid to the integrity of its post-tensioned steel elements. Physical inspection, non-destructive radar testing and other exploratory methods were used to investigate for possible weaknesses in the bridge.

Since the sudden collapse of Ynys-y-Gwas Bridge in Wales, UK in 1985, there has been concern about the long-term integrity of segmental, post-tensioned concrete bridges which may be prone to ‘brittle’ failure without warning. The corrosion protection of the post-tensioned steel cables, where they pass through joints between the segments, has been identified as a major factor affecting the long-term durability and consequent strength of this type of bridge. The identification of voids in grouted tendon ducts at vulnerable positions is recognized as an important step in the detection of such corrosion.

Description of bridge

General arrangement

Besses o’ th’ Barn Bridge is a 160 m long, three span, segmental, post-tensioned concrete railway bridge built in 1969. The main span of 90 m crosses over both the M62 motorway and A665 Bury to Prestwick Road. Minimum headroom is 5.18 m from the A665 and the M62 is cleared by approx 12.5 m.

The superstructure consists of a central hollow trapezoidal concrete box section

6.7 m high and 4 m wide. The majority of the south and central spans are constructed using 1.27 m long pre-cast concrete trapezoidal box units, post-tensioned together. This box section supports the *in site* concrete transverse cantilever slabs at bottom flange level, which carry the rail tracks and ballast.

The center and south span sections are of post-tensioned construction. These post-tensioned sections have five types of pre-stressing:

1. Longitudinal tendons in grouted ducts within the top and bottom flanges.
2. Longitudinal internal draped tendons located alongside the webs. These are deflected at internal diaphragm positions and are encased in *in site* concrete.
3. Longitudinal macalloy bars in the transverse cantilever slabs in the central span.
4. Vertical macalloy bars in the 229 mm wide webs to enhance shear capacity.
5. Transverse macalloy bars through the bottom flange to support the transverse cantilever slabs.

Segmental construction

The pre-cast segmental system of construction used for the south and center span sections was an alternative method proposed by the contractor. Current thinking suggests that such a form of construction can lead to 'brittle' failure of the entire structure without warning due to corrosion of tendons across a construction joint, The original design concept had been for *in site* concrete construction.

Inspection and assessment

Inspection

Inspection work was undertaken in a number of phases and was linked with the testing required for the structure. The initial inspections recorded a number of visible problems including:

- 1、 Defective waterproofing on the exposed surface of the top flange.
- 2、 Water trapped in the internal space of the hollow box with depths up to 300 mm.
- 3、 Various drainage problems at joints and abutments.
- 4、 Longitudinal cracking of the exposed soffit of the central span.
- 5、 Longitudinal cracking on sides of the top flange of the pre-stressed sections.
- 6、 Widespread sapling on some *in site* concrete surfaces with exposed rusting reinforcement.

Assessment

The subject of an earlier paper, the objectives of the assessment were:

- 1、 Estimate the present load-carrying capacity.
- 2、 Identify any structural deficiencies in the original design.
- 3、 Determine reasons for existing problems identified by the inspection.

Conclusion to the inspection and assessment

Following the inspection and the analytical assessment one major element of doubt still existed. This concerned the condition of the embedded pre-stressing wires, strands, cables or bars. For the purpose of structural analysis these elements, had been assumed to be sound. However, due to the very high forces involved, a risk to the structure, caused by corrosion to these primary elements, was identified.

The initial recommendations which completed the first phase of the assessment were:

1. Carry out detailed material testing to determine the condition of hidden structural elements, in particular the grouted post-tensioned steel cables.
2. Conduct concrete durability tests.
3. Undertake repairs to defective waterproofing and surface defects in concrete.

Testing procedures

Non-destructive radar testing

During the first phase investigation at a joint between pre-cast deck segments the observation of a void in a post-tensioned cable duct gave rise to serious concern about corrosion and the integrity of the pre-stress. However, the extent of this problem was extremely difficult to determine. The bridge contains 93 joints with an average of 24 cables passing through each joint, i.e. there were approx. 2200 positions where investigations could be carried out. A typical section through such a joint is that the 24 draped tendons within the spine did not give rise to concern because these were protected by *in site* concrete poured without joints after the cables had been stressed.

As it was clearly impractical to consider physically exposing all tendon/joint intersections, radar was used to investigate a large numbers of tendons and hence locate duct voids within a modest timescale. It was fortunate that the corrugated steel ducts around the tendons were discontinuous through the joints which allowed the radar to detect the tendons and voids. The problem, however, was still highly complex due to the high density of other steel elements which could interfere with the radar signals and the fact that the area of interest was at most 102 mm wide and embedded between 150 mm and 800 mm deep in thick concrete slabs.

Trial radar investigations.

Three companies were invited to visit the bridge and conduct a trial investigation. One company decided not to proceed. The remaining two were given 2 weeks to mobilize, test and report. Their results were then compared with physical explorations.

To make the comparisons, observation holes were drilled vertically downwards into the ducts at a selection of 10 locations which included several where voids were predicted and several where the ducts were predicted to be fully grouted. A 25-mm diameter hole was required in order to facilitate use of the chosen horoscope. The results from the University of Edinburgh yielded an accuracy of around 60%.

Main radar survey, horoscope verification of voids.

Having completed a radar survey of the total structure, a baroscopic was then used to investigate all predicted voids and in more than 60% of cases this gave a clear confirmation of the radar findings. In several other cases some evidence of honeycombing in the *in site* stitch concrete above the duct was found.

When viewing voids through the baroscopic, however, it proved impossible to determine their actual size or how far they extended along the tendon ducts although they only appeared to occupy less than the top 25% of the duct diameter. Most of these voids, in fact, were smaller than the diameter of the flexible baroscopic being used (approximately 9 mm) and were seen between the horizontal top surface of the grout and the curved upper limit of the duct. In a very few cases the tops of the pre-stressing strands were visible above the grout but no sign of any trapped water was seen. It was not possible, using the baroscopic, to see whether those cables were corroded.

Digital radar testing

The test method involved exciting the joints using radio frequency radar antenna: 1 GHz, 900 MHz and 500 MHz. The highest frequency gives the highest resolution but has shallow depth penetration in the concrete. The lowest frequency gives the greatest depth penetration but yields lower resolution.

The data collected on the radar sweeps were recorded on a GSSI SIR System 10. This system involves radar pulsing and recording. The data from the antenna is transformed from an analogue signal to a digital signal using a 16-bit analogue digital converter giving a very high resolution for subsequent data processing. The data is displayed on site on a high-resolution color monitor. Following visual inspection it is then stored digitally on a 2.3-gigabyte tape for subsequent analysis and signal processing. The tape first of all records a 'header' noting the digital radar settings together with the trace number prior to recording the actual data. When the data is played back, one is able to clearly identify all the relevant settings —making for accurate and reliable data reproduction.

At particular locations along the traces, the trace was marked using a marker switch on the recording unit or the antenna.

All the digital records were subsequently downloaded at the University's NDT laboratory on to a micro-computer. (The raw data prior to processing consumed 35 megabytes of digital data.) Post-processing was undertaken using sophisticated signal processing software. Techniques available for the analysis include changing the color transform and changing the scales from linear to a skewed distribution in order to highlight certain features. Also, the color transforms could be changed to highlight phase changes. In addition to these color transform facilities, sophisticated horizontal and vertical filtering procedures are available. Using a large screen monitor it is possible to display in split screens the raw data and the transformed processed data. Thus one is able to get an accurate indication of the processing which has taken place. The computer screen

displays the time domain calibrations of the reflected signals on the vertical axis.

A further facility of the software was the ability to display the individual radar pulses as time domain wiggle plots. This was a particularly valuable feature when looking at individual records in the vicinity of the tendons.

Interpretation of findings

A full analysis of findings is given elsewhere, Essentially the digitized radar plots were transformed to color line scans and where double phase shifts were identified in the joints, then voiding was diagnosed.

Conclusions

1. An outline of the bridge research platform in Europe is given.
2. The use of impulse radar has contributed considerably to the level of confidence in the assessment of the Besses o' th' Barn Rail Bridge.
3. The radar investigations revealed extensive voiding within the post-tensioned cable ducts. However, no sign of corrosion on the stressing wires had been found except for the very first investigation

欧洲的研究动态

后张法混凝土铁路桥研究

Ove Arup 和他的合作者对曼彻斯特的一座长 160M 的后张法分段预制施工建造的铁路桥的上部结构的长期稳定性进行了检测和评估, 这种技术已被运用于城市轻轨系统。

特别需要关注的是后张力法施工的桥梁的完整性。物理检查、非损伤雷达检测及其它的研究方法均已被用来去调查桥梁中潜在的缺陷。

自从 1985 年 2 月 1 日英国威尔士地区的一座名叫 Ynys-y-Gwas 桥梁突然坍塌以来。采用后张力法分段预制施工的桥梁在长期稳定性方面受到关注。因为这种桥梁可能会毫无预兆地出现脆性断裂, 后张法钢绞线在预制段搭接部位的防腐工作是影响这种类型桥梁长期稳定性的主要因素。对容易发生脆性破坏处锚套管中的沙浆孔隙的鉴定被认为是防腐检测中最为重要的步骤之一。

桥梁描述

总体布局

Besses o' th' Barn 大桥始建于 1969 年, 是一座三跨总长 160m 的后张法分段预制施工的混凝土铁路桥。它的主跨跨径 90 米, 横跨 M62 公路和巴利 A665 公路与 Prestwick 公路衔接, 与 A665 公路最小桥下净空高度为 5.18 米, 与 M62 公路的桥下净空则大约为 12.5 米。

桥梁上部结构由空心梯形混凝土箱梁组成。箱体横截面高 6.7m, 宽 4m。桥梁南部分引桥和中央主跨径均采用这种长为 1.27M 的梯形混凝土箱梁结构, 后张法施工。这种箱形构件的作用是支撑用来承受铁轨和行车荷载的现浇混凝土悬臂梁。

大桥中跨和南部引桥跨径均采用后张法装配式预制结构, 这些后张法预制构件包括五种类型的预应力张拉措施。

- 1、缘内部的顶端和底部布置纵向锚索管道, 管道内的钢筋束用沙浆封住;
- 2、分布在横隔板部位的腹板两侧挠曲钢筋束, 钢筋束被包裹在现浇混凝土内;
- 3、桥梁跨中悬臂梁内布置纵向钢绞束;

4、在 229mm 宽的腹板内侧布置用以提高抗剪切能力的竖直钢绞束；

5、布置穿过翼缘底部用以支撑悬臂梁的横向钢绞束。

分段施工

使用分段预制施工体系是包工单位针对大桥南部和中央跨径建议的备选方案之一，Current thinking 认为这种施工体系在对穿越构件铰接点处的钢筋束没有足够的腐蚀措施时可能会导致整个结构的脆性断裂，最初的设计构思是想采用现浇的混凝土结构。

检测和评估

检测

各个阶段的检修工作贯穿在桥梁结构所需的试验中，初期检查主要记录如下的一些明显的缺陷：

- 1、在翼缘上表面的不合格的防水材料。
- 2、空心箱梁内部 300mm 深度内雨水的渗透情况。
- 3、铰接缝和支座处有关排水装置各种的问题。
- 4、中央跨径下端背面暴露出的纵向裂缝。
- 5、翼缘顶部预应力构件旁边的纵向裂缝。
- 6、现浇混凝土表面大片的剥落部位和暴露在外的生锈的加强筋。

评估

参照最初的设计构想，评估以下目标项：

- 1、估算现存的承载能力。
- 2、挖掘原始设计资料中在结构上的缺陷部分。
- 3、根据检测出的问题作出判断。

检测和评估的结论

根据检测和评估，仍然存在着一个主要的可疑因素，它就是埋藏在构件里面的预应力钢绞线、电缆或杆件，虽然从结构原理的角度进行分析，这些假定均不成立。然而，它们一旦被腐蚀，就会对桥梁结构的稳定性带来非常高的风险，这个基本原理已经得到证实。

对第一阶段评估的全部内容作如下处理：

- 1、进行详细是材料试验，去判定隐藏在结构内部的情况，特别是预埋后张法钢绞线的沙浆。
- 2、混凝土结构耐久性试验。

修理不合格防水材料和混凝土表面的瑕疵。

检测方法

非损伤雷达检测

首期调查包括对预制构件铰接缝裂缝的勘测以及后张法钢绞线管道中预应力筋腐蚀和完整性的检测。然而，对出现问题的严重性会很难做出判断。这座桥梁一共有 93 个铰接缝，平均每个铰接缝有 24 根钢绞线贯穿，也就是说，那儿大约有 2200 个要用来进行检测的部位。一个标准的铰接缝横端面，主梁内部的 24 根钢筋束很难被检测到，因为除了铰接缝外，钢绞线在施加预应力之后又被现浇的混凝土所包裹。

显然，铰接缝处钢筋束完全暴露在外是不切实际的，因此相比较而言，用雷达检测钢筋束管道中的孔隙十分高效的，庆幸的是通过铰接缝的放置钢绞束的钢制管道是断开的，可以用雷达检测管道槽内的钢绞束和孔隙。但是，仍然存在的问题是管道周围的高密度的铁元素会对雷达信号

产生强烈的干扰，而实际上在这一宽 102mm，150mm~800mm 的混凝土区域内正埋有许多高致密的钢板。

雷达测试试验

有三家公司被邀请前来参观和指挥试验研究工作，其中一家放弃，剩下的两家被要求用两周的时间去准备试验和撰写报告，再把他们的研究成果与物理勘探的结果进行比较。

为了对比，选定了 10 个观测孔，小孔是垂直向下钻进导管。这十个小孔中有几个在铰接缝处，还有几个在充满沙浆的管道处。为了便于使用内径表面检测仪，小孔直径必须有 25mm 宽，结果显示爱丁堡大学的研究成果的准确度在 60%左右。

雷达测绘为主 内径表面检查仪检验裂缝为辅

在完成对桥梁结构雷达检测后，再使用内径表面检查仪来验证被预知的裂缝。结果显示，在超过 60%的案例中，雷达的检测是准确的。在其它几个事例中，一些证据表明在管道上面的现浇混凝土层中发现了蜂窝状的孔洞。

然而用内径表面检查仪检测时，很难判定裂缝的实际尺寸大小以及在锚索套管中延伸的距离，尽管这些裂缝仅占套管不到 25%的部分。但事实上，大多数存在于沙浆表面与套管上部曲面边界上的裂缝要比内径表面检查仪所检测到的要窄得多，（内径表面检查仪的分辨率大约在 9mm 左右）。在少数几个案例中，在沙浆表面能明显地看到预应力钢绞线，但没有迹象表明有水渗透了进去。而且使用内径表面检查仪是不可能看到钢绞线被腐蚀的情况。

数字雷达测试

这种测试方法是利用无线电频率的雷达天线的穿透性。有以下几个常用频率：1GHZ，900MHZ，和 500MHZ。最高的频率能带来最好的分辨率，但会减小其在混凝土中的穿透深度。最低频率的穿透能力最强，但是分辨率最低。

雷达扫描到的数据被记录到 GSSISIR 系统中，这种系统与雷达发射脉冲和记录数据相对应。雷达天线所收到的数据从模拟信号被转换成了数字信号。这种转换是使用一种 16 位的模拟信号变流器，它能使数据获得相当高的分辨率，以便用于后续的数据处理。这些数据被显示在一个高分辨率的彩色监测器上。在可视化校对之后，将这些数据储存在一个 2.3 千兆字节的磁带上，用于后面的分析和处理。首先通过磁带记录下数字化雷达所扫描到的原始数据，再通过相关的设置和处理程序转化为精确和可靠的数据。

沿着轨迹做特别的标记，再通过记录元件或天线把这个轨迹描述下来。

在大学实验室里进行非破坏性试验后，将所有的数字记录从微机上拷贝下来，（原始数据资料处理将会消耗 35 兆字节的内存。）后张法分析需要运用特殊的处理软件。这种分析是通过变换的颜色和线形来显示出特征点，也可以通过颜色的变换显示相位的变化。除了这些能变换颜色的设备外，还可能使用用来过滤水平线和竖直线的特殊程序。用一个大型荧屏测试器同时显示原始数据和处理过的数据，从而就能很清晰地看到被处理过数据是在那些地方做过修改的，同时电脑显示器将把反馈信息标注到纵坐标上。

一个更为先进的软件能够显示专用雷达脉冲扫描的区域，在单独检测锚索周围状况时，它是一种特别有价值元件。

调查研究结果的分析

在别处已经有对调查结果非常充分的研究，数字化雷达绘图的本质就是将扫描到的被确认有双重相位位移的节点转化为着色线条，从而缺陷部位即被诊断出来。

结论

1、一个关于桥梁研究平台的雏形已经在欧洲诞生。

2、雷达脉冲波检测技术的运用大大增加了对 Besses o' th' Barn 铁路桥评估结论的可信度。

3、雷达勘察可以显示后张法钢绞线孔道内部的大部分缺陷区域。然而，即使运用了极其一流的研究手段，也没有迹象表明已发现受拉钢丝的腐蚀原因。

2007

根据 Elsevier 公司出版

装
订
线