

# 钢桥课程设计

## 设计任务书

### 简支上承式焊接双主梁钢桥设计

学 生 姓 名	刘逸凡
学 号	130840110
班 级	1312105
成 绩	
指 导 教 师	唐海红

土木工程系 2015 —2016 学年 夏季学期  
2016 年 7 月 7 日

## 目录

一、	设计题目与基本资料.....	3
1.1.	设计资料.....	3
1.1.1.	桥梁跨径及桥宽.....	3
1.1.2.	设计荷载.....	3
1.1.3.	材料.....	3
1.2.	设计依据.....	3
1.3.	设计内容及步骤.....	4
1.3.1.	设计内容.....	4
1.3.2.	设计步骤.....	4
二、	内纵梁设计.....	6
2.1.	永久作用效应计算.....	6
2.2.	可变作用效应计算.....	6
2.3.	内纵梁和横梁的连接.....	8
三、	外纵梁设计.....	8
3.1.	永久作用效应计算.....	8
3.2.	可变作用效应计算.....	9
2.3.	外纵梁与横梁连接.....	10
四、	中横梁设计.....	11
4.1.	主跨部分的弯矩和剪力.....	11
4.1.1.	永久作用效应.....	11
4.1.2.	可变作用效应.....	12
4.2.	主跨截面.....	13
4.2.1.	最大弯曲正应力验算.....	14
4.2.2.	最大剪应力验算.....	14
4.2.3.	刚度验算.....	15
4.2.4.	折算应力验算:.....	15
4.2.5.	整体稳定验算:.....	15
4.2.6.	局部稳定验算:.....	16
4.2.7.	疲劳验算.....	16
4.3.	横纵梁连接点加劲肋和螺栓计算.....	16
4.4.	加劲肋和横梁的焊缝设计.....	18
4.4.1.	横梁翼缘与腹板焊缝设计.....	18
4.4.2.	连接加劲肋焊缝设计:.....	19
4.5.	横梁悬挑部分设计.....	19
五、	主梁设计.....	21
5.1.	主梁荷载及强度计算.....	21
5.2.	主梁尺寸的选取和主梁验算.....	26
5.2.1.	主梁尺寸选取.....	26
5.2.2.	主梁验算.....	29
5.3.	加劲肋和螺栓设计.....	31

5.3.1. 加劲肋设置.....	31
5.3.2. 螺栓设计.....	33
5.4. 翼缘与腹板焊接 .....	33
六、 水平纵联的设计.....	34
6.1. 平纵联轴心压杆设计 .....	34
6.2. 节点设计 .....	37

Yifan Liu

# 一、设计题目与基本资料

设计题目：简支上承式焊接双主梁钢桥设计

## 1.1. 设计资料

### 1.1.1. 桥梁跨径及桥宽

桥梁跨径 33m，梁长 32.96m，计算跨径 32.4m

桥宽：净 9+2×0.75m

### 1.1.2. 设计荷载

公路—II 级，人群荷载 3.1kN/m，每侧的栏杆及人行道构件的自重作用力为 5kN/m；

计算风荷载时，按照桥梁建于甘肃武威进行考虑。

### 1.1.3. 材料

设计用钢板：

型号为 A3，即 Q235qD，其技术标准应符合《桥梁用结构钢》GB/T 714-2008  
弹性模量  $E_s=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ，热膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，抗拉、抗压及抗弯  
强度  $f_d=190 \text{MPa}$ ，抗剪强度  $f_{vd}=110 \text{MPa}$ ，剪切模量  $G=0.79 \times 10^5 \text{MPa}$ ；

其他普通钢筋：

采用热轧 R235、HRB335 钢筋，凡钢筋直径  $\geq 12 \text{mm}$ ，均采用 HRB335 钢筋；凡钢筋直径  $< 12 \text{mm}$ ，均采用 R235 钢筋

桥面板混凝土：C50 微膨胀钢纤维混凝土，容重取  $25 \text{kN/m}^3$

## 1.2. 设计依据

参考书：

《现代钢桥》（上册），吴冲主编，人民交通出版社，2006 年 9 月第一版，  
P117~P163

《钢桥》(第二版),徐君兰,孙淑红主编,人民交通出版社,2011年4月第二版,P9~P21

《钢桥构造与设计》,苏彦江主编,西南交通大学出版社,2006年12月第一版,P12~P28

设计规范:

《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2015

《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTG D64-2015

《公路工程技术标准》JTG B01-2014

《桥梁用结构钢》GB/T 714-2008

《钢结构设计规范》GB50017-2003

其他相关规范

### 1.3. 设计内容及步骤

#### 1.3.1. 设计内容

主要承重构件的设计荷载计算:包括内纵梁、外纵梁、中横梁、主梁、联接系等;  
根据设计荷载选择适合的构件截面及型式;  
相关的强度及稳定性验算;  
设计图纸的绘制:包括钢板梁桥的平面布置图,横梁的断面布置图,连接件的细部构造图等。

#### 1.3.2. 设计步骤

荷载传递路径:桥面板→纵梁→横梁→主梁

1) 混凝土桥面板:

板厚为 20cm;

设计为支承于纵梁之间的简支板;

2) 内纵梁 S2:

中到中之间的间距为 2.5m,两端简支;

承受的荷载主要有:恒载(桥面板)+活载(汽车荷载+冲击力);

根据计算出的荷载值选择合适的构件截面型式;

3) 外纵梁 S1:

两端简支,承受人行道、桥面板等的恒载及汽车荷载;

根据计算出的荷载值选择合适的构件截面型式；

#### 4) 中横梁 B2:

按照简支梁进行设计，两边还有对称的悬臂。

B2 承受自重和混凝土桥面自重引起的均布荷载，同时还承受纵梁 S1 上传来的集中荷载以及和从几个支于其上的纵梁 S2 上传来的集中荷载；

根据计算出的荷载值选择合适的构件截面型式；

对选定的构件进行相关的焊缝或螺栓连接的验算；

#### 5) 中横梁 B2 的悬臂部分设计:

一般设计为变截面，从悬臂根部向外，腹板高度递减；

根据悬臂部分承受的负弯矩设计悬臂部分和横梁的连接；

根据悬臂部分承受的剪力设计悬臂部分和主梁的连接；

对设计的尺寸进行相关的验算；

#### 6) 主梁:

两端简支，承受的荷载大部分是由横梁通过集中力的形式传递过来的。计算时，可视为直接从桥面板传来的均布荷载，以简化计算；

取车道荷载，按最不利位置加载；

根据计算出的荷载值选择合适的构件截面型式，要确定主梁的腹板尺寸、翼缘的尺寸、横向加劲肋等；

支座处还要进行支承加劲肋的设计；

#### 7) 联结系——水平纵联:

主梁的每块翼缘板都各承受一半的横向风荷载；桥面板协同上翼缘共同抵抗风荷载，故上缘不需要水平纵联。需进行下翼缘水平纵联的设计；

将风荷载视为均布可变荷载，垂直作用在主梁上；

根据计算出的荷载值选择合适的构件截面型式；

对选定的构件进行水平方向屈曲和竖直方向屈曲的验算；

纵联的连接验算

注：如无特殊说明，本计算书中图示单位均为 cm

## 二、 内纵梁设计

### 2.1. 永久作用效应计算

内纵梁距主梁 2.5m，两端简支，内纵梁跨度 5.4m，纵梁布置如图 2-1

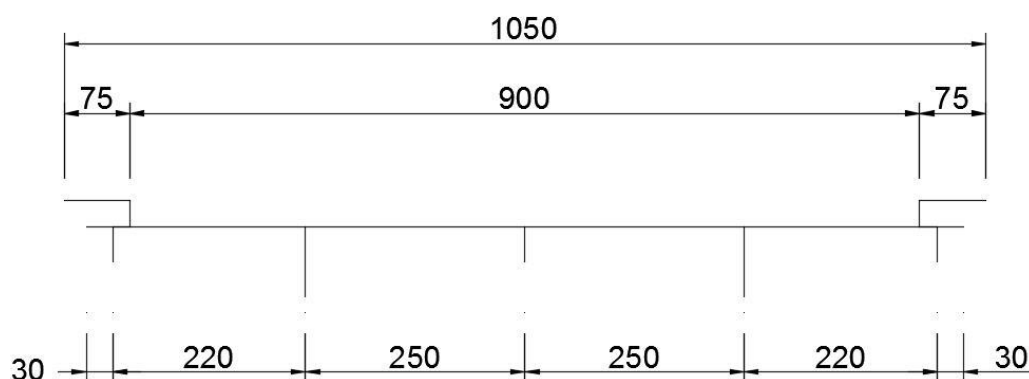


图 2-1

内纵梁的恒载值见表 2-1

表 2-1 内纵梁上的恒载 (kN/m)

桥面板	$25 \times 0.2 \times 2.5 = 12.5$
梗肋 (假定)	0.5
纵梁 (假定)	1
每根纵梁上的恒载	14

由恒载引起的最大弯矩位于跨中:  $M_{DL} = \frac{14 \times 5.4^2}{8} = 51.03$

由恒载引起的最大剪力位于支撑处:  $V_{DL} = \frac{14 \times 5.4}{2} = 37.8$

### 2.2. 可变作用效应计算

#### 1、冲击系数

拟选用 HW400×400 的 H 型钢，其提供的截面模量为 3340cm<sup>3</sup>,腹板面积为 46.54cm<sup>2</sup>，结构跨中的单位长度质量为 172kg/m，结构跨中的惯性矩为  $6.69 \times 10^{-4} m^4$ ，由此得到结构的基频为

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} = \frac{\pi}{2 \times 5.4^2} \sqrt{\frac{2.06 \times 10^{11} \times 6.69 \times 10^{-4}}{172}} = 48 \text{ Hz}$$

根据《公路桥规》第 4.3.2 条规定，当  $f > 14\text{Hz}$  时， $\mu=0.45$

2、计算横向分布系数，布载情况见图 2-2。

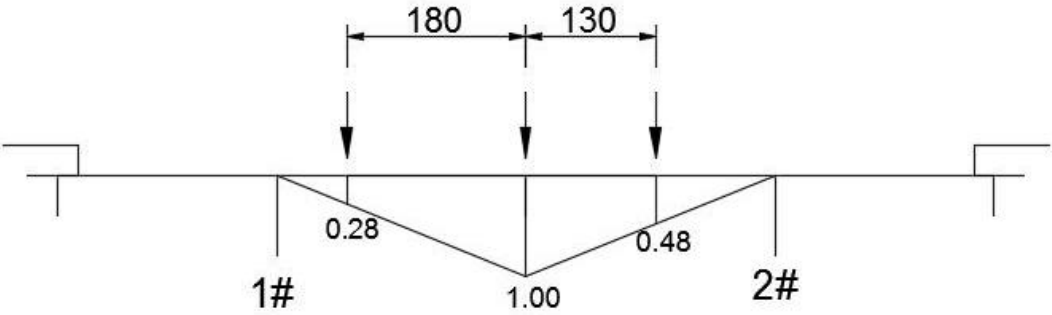


图 2-2 内纵梁横向分布系数图

由图 2 可知，横向分布系数为：

$$m_{cq} = \frac{0.28 + 1.00 + 0.48}{2} = 0.88$$

3、纵向布载图式见图 2-3，经分析可知：最大弯矩发生在跨中截面，最大剪力发生在支撑截面处。

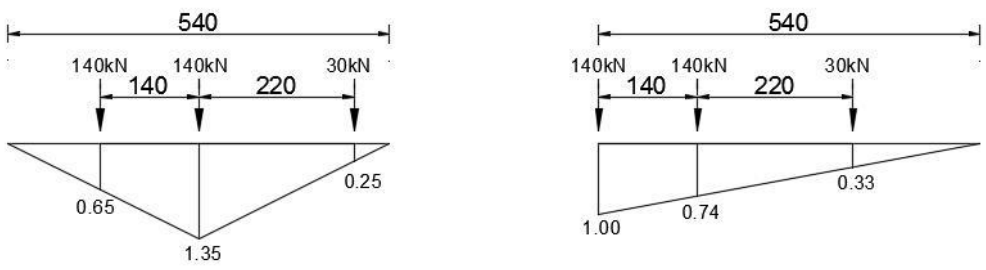


图 2-3 内纵梁最不利荷载布置图（左图弯矩，右图剪力）

可变作用（汽车）引起的跨中最大弯矩：

$$M_{\max} = (1 + 0.45) \times 0.88 \times (140 \times 1.35 + 140 \times 0.65 + 30 \times 0.25) = 366.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

可变作用（汽车）引起的支撑处最大剪力：

$$V_{\max} = (1 + 0.45) \times 0.88 \times (140 \times 1 + 140 \times 0.74 + 30 \times 0.25) = 323.47 \text{ kN}$$

内纵梁的最大弯矩和剪力见表 2-2

表 2-2 内纵梁上的最大弯矩和最大剪力

内力	恒载	活载	总计
弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	51.03	366.85	417.88
剪力 ( $\text{kN}$ )	37.80	323.47	361.27

A3 钢制成的纵梁，其容许弯曲应力为  $[\sigma_w] = 180 \text{ MPa}$ ，所需截面模量为



$$W = \frac{M}{[\sigma_w]} = \frac{417.88 \times 10^3}{180 \times 10^6} = 2321 \text{cm}^2$$

A3 钢制成的纵梁，其容许剪应力为  $[\tau] = 105 \text{MPa}$ ，所需腹板面积为：

$$S = \frac{V}{[\tau]} = \frac{361.27 \times 10^3}{105 \times 10^6} = 34.4 \text{cm}^2$$

选用  $HN700 \times 300$  的 H 型钢，其提供的截面模量为  $5760 \text{cm}^3$ ，腹板面积为  $84.76 \text{cm}^2$ ，符合要求。

## 2.3. 内纵梁和横梁的连接

采用 10.9 级 M24 单个高强螺栓，其抗剪承载力为  $225 \text{MPa}$ ，表面采用喷砂的处理方法，单个摩擦型连接高强螺栓抗剪承载力为：

$$N_v^b = \frac{n_f \mu P}{k} = \frac{2 \times 0.45 \times 225}{1.7} = 119.1 \text{kN}$$

k 为系数，根据《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86 第 1.2.6 条取 1.7

故所需螺栓个数为： $n = \frac{1.1V}{119.1} = \frac{1.1 \times 361.27}{119.1} = 3.33$ ，取 6 个螺栓。

# 三、 外纵梁设计

## 3.1. 永久作用效应计算

外纵梁两端简支，跨度为  $5.4 \text{m}$ ，承受人行道荷载及汽车荷载，距离主梁  $2.2 \text{m}$ 。加载在外纵梁上的恒载荷载集度由杠杆原理法求出。外纵梁上的恒载集度请见表 3-1

表 3-1 外纵梁上的恒载集度

栏杆及人行道	$5 \times 2.5 / 2.2 = 5.68$
桥面板	$25 \times 0.15 \times 2.5 \times 1.25 / 2.2 = 5.32$
纵梁、挑梁及横向联系的假定	1.6
每根纵梁上的恒载	12.6

跨中由荷载引起的最大弯矩： $M = \frac{12.6 \times 5.4^2}{8} = 45.93 \text{kN} \cdot \text{m}$

支承处由恒载引起的最大剪力： $V = \frac{12.6 \times 5.4}{2} = 34.02kN$

## 3.2. 可变作用效应计算

冲击系数

为施工方便，外纵梁仍选用  $HW400 \times 400$  的 H 型钢，其提供的截面模量为  $3340cm^3$ ，腹板面积为  $46.54cm^2$ ，结构跨中的单位长度质量为  $172kg/m$ ，结构跨中的惯性矩为  $6.69 \times 10^{-4} m^4$ ，由此得到结构的基频为

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} = \frac{\pi}{2 \times 5.4^2} \sqrt{\frac{2.06 \times 10^{11} \times 6.69 \times 10^{-4}}{172}} = 48Hz$$

根据《公路桥规》第 4.3.2 条规定，当  $f > 14Hz$  时， $\mu=0.45$

横向分布系数计算，横向布载简图如图 3-1 所示。

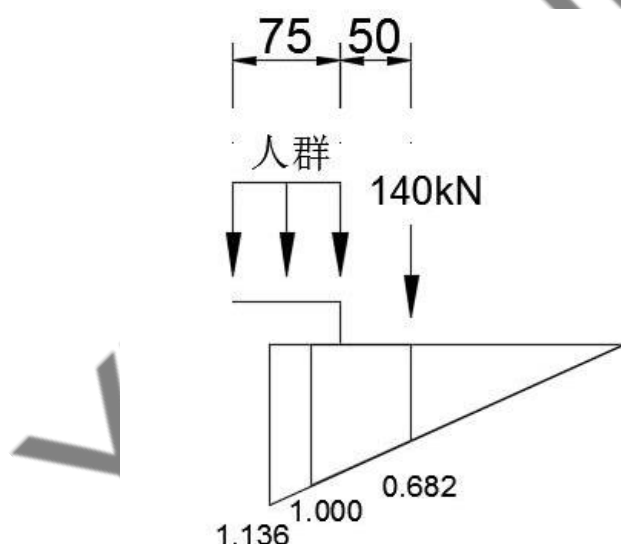


图 3-1 外纵梁横向分布系数简图

横向影响系数：

$$m_{汽} = \frac{0.682}{2} = 0.341$$

经分析知，最大弯矩发生在跨中截面，最大剪力发生在支撑处。最不利荷载布载见图 3-2

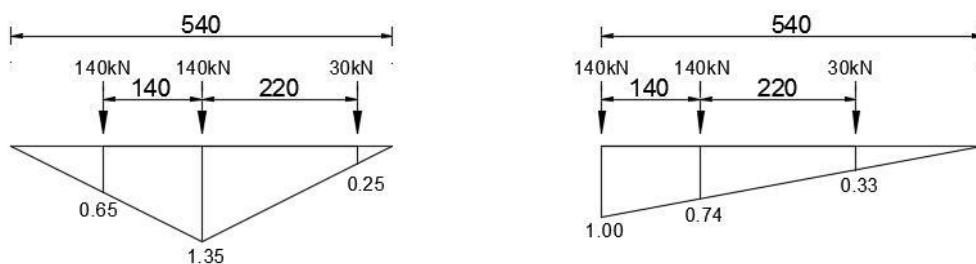


图 3-2 外纵梁最不利荷载布置图（左图弯矩，右图剪力）  
可变作用（汽车）标准效应：

$$M_{\max} = (140 \times 0.65 + 140 \times 1.35 + 30 \times 0.25) \times 0.341 = 98.04 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = (140 \times 1 + 140 \times 0.74 + 30 \times 0.33) \times 0.341 \times 1.2 = 103.77 \text{ kN}$$

可变作用（汽车）冲击效应：

$$M = 98.04 \times 0.45 = 44.12 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V = 103.77 \times 0.45 = 46.70 \text{ kN}$$

可变作用（人群）标准效应：

$$M_{\max} = 3.1 \times 1.136 \times 0.5 \times 1.35 \times 5.4 = 12.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = 3.1 \times 1.136 \times 0.5 \times 1 \times 5.4 = 9.51 \text{ kN}$$

外纵梁最大剪力值见表 3-2

表 3-2 外纵梁最大弯矩及剪力

内力	恒载	活载	冲击作用	总计
弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	45.93	110.88	44.12	200.93
剪力 ( $\text{kN}$ )	34.02	113.28	46.70	194

A3 钢制成的纵梁，其容许弯曲应力为  $[\sigma_w] = 180 \text{ MPa}$ ，所需截面模量为：

$$W = \frac{M}{[\sigma_w]} = \frac{200.93 \times 10^3}{180 \times 10^6} = 1116 \text{ cm}^3$$

A3 钢制成的纵梁，其容许剪应力为  $[\tau] = 105 \text{ MPa}$ ，所需腹板面积为：

$$S = \frac{V}{[\tau]} = \frac{194 \times 10^3}{105 \times 10^6} = 18.5 \text{ cm}^2$$

选用  $HN500 \times 200$  的 H 型钢，其提供的截面模量为  $1910 \text{ cm}^3$ ，腹板面积为  $46.8 \text{ cm}^2$ ，符合要求。

## 2.3. 外纵梁与横梁连接

M24 单个高强螺栓抗剪承载力为 ，表面采用喷砂的处理方法，单个摩擦型连接高强螺栓抗剪容许承载力为：

$$N_v^b = \frac{n_f \mu P}{k} = \frac{2 \times 0.45 \times 225}{1.7} = 119.1 \text{ kN}$$

k 为系数, 根据《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86 第 1.2.6 条取 1.7

故所需螺栓个数为:  $n = \frac{1.1V}{119.1} = \frac{1.1 \times 194}{119.1} = 1.79$  , 取 4 个螺栓。

## 四、 中横梁设计

中横梁跨径 5 米, 悬挑长度两边各 2.75m。假设悬臂部分自重和混凝土以及梗肋自重引起均布荷载  $3.06\text{kN/m}$ , 外纵梁上传来集中荷载:  $2 \times 34.02 = 68.04\text{kN}$ , 内纵梁上传来集中荷载:  $2 \times 37.8 = 75.6\text{kN}$  , 自重恒载及集中荷载布置如图 4-1 所示。

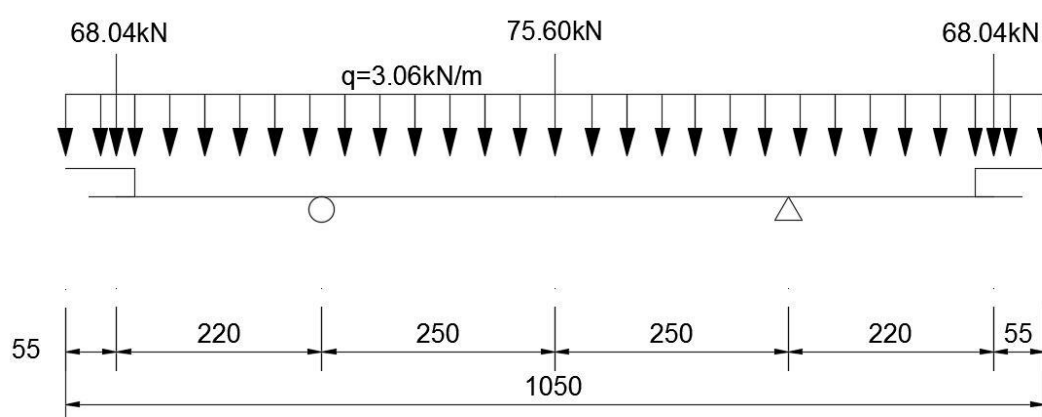


图 4-1 中横梁恒载布置图

### 4.1. 主跨部分的弯矩和剪力

#### 4.1.1. 永久作用效应

由于悬臂部分的存在, 支撑处将产生负弯矩并达到最大值。由恒载引起的最大负弯矩为:

$$M_{\text{外}} = \frac{1}{2}ql^2 + S_{\text{外}}d = -(\frac{1}{2} \times 3.06 \times 2.75^2 + 68.04 \times 2.2) = -161.26\text{kN} \cdot \text{m}$$

对称荷载下每个支座反力:

$$R = \frac{1}{2}(2 \times 68.04 + 3.06 \times 10.5 + 75.60) = 121.91\text{kN}$$

悬臂部分恒载引起的最大剪力为:

$$V = 68.04 + 3.06 \times 2.75 = 76.46\text{kN}$$

横梁中间段引起最大剪力:

$$V = 121.91 - 76.46 = 45.45\text{kN}$$

跨中最大弯矩:

$$M = 121.19 \times 2.5 - \frac{1}{2} \times 3.06 \times (2.5 + 2.75)^2 - 68.04 \times (2.2 + 2.5) = -58.98 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

横梁上的最大活载在纵梁上的荷载位置见图 4-2

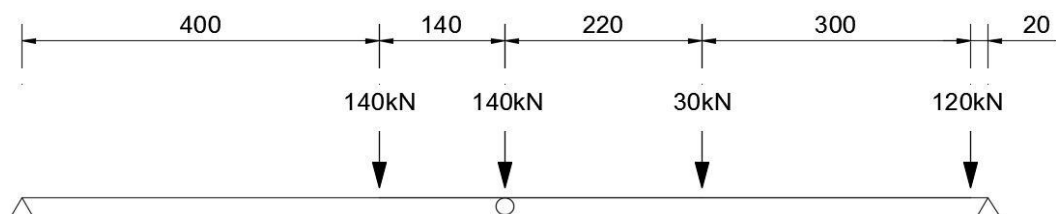


图 4-2 横梁上最大活载在纵梁上的荷载位置

作用于中横梁的车轮荷载大小为:

$$V = 70 + 70 \times \frac{4.0}{5.4} + 15 \times \frac{3.2}{5.4} + 60 \times \frac{0.2}{5.4} = 132.96 \text{ kN}$$

### 4.1.2. 可变作用效应

可变作用效应活载在中横梁中产生的最大弯矩发生在跨中，行车道宽 9m，布载的车道数只能是两车道。布载形式见图 4-3

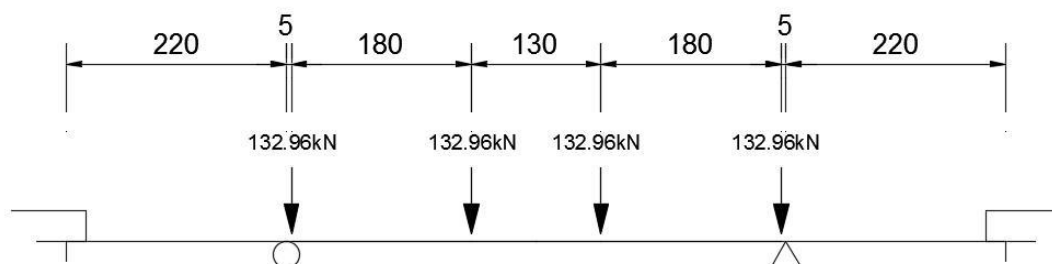


图 4-3 中横梁最大弯矩布载情况示意图

此时横梁最大弯矩为:

$$M = 132.96 \times (2 \times \frac{5}{2} - 2.45 - 0.65) = 262.63 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当卡车一个车轮离人行道边缘 0.5m 时，悬臂根部产生最大负弯矩:

$$M = -132.96 \times 0.5 = -66.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当车辆活载都靠近支承点时，活载在横梁中引起的最大剪力发生在支承处，布载形式如图 4-4.

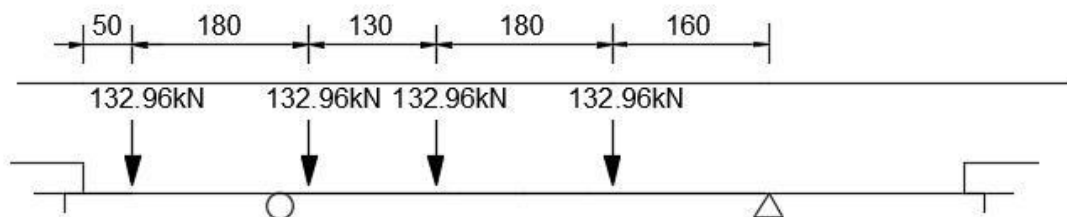


图 4-4 中横梁最大剪力布载示意图

这时

$$V = 132.96 \times (1.6 + 3.4 + 4.7 + 6.5) \times \frac{1}{5} = 430.79kN$$

在上述荷载作用的情况下，扣除悬臂部分剪力的影响将给出中横梁中间梁段由活载引起的最大剪力，其值为：

$$V = 430.79 - 132.96 = 297.83kN$$

冲击系数：由于中横梁截面未确定，故偏于安全地假定  $\mu = 0.45$

人群荷载通过外纵梁传至中横梁，大小等于

$$2 \times 9.51 = 19.02kN$$

这将会在中横梁悬臂部分产生剪力

$$V = 19.02kN$$

同时，也会产生支反力

$$R = \frac{19.02 \times 7.375}{5} = 28.05kN$$

扣除悬臂部分剪力可得到中横梁中间梁段最大剪力

$$V = 28.05 - 19.02 = 9.03kN$$

由人群荷载引起的最大负弯矩为

$$M = -19.02 \times 2.2 = -41.84kN \cdot m$$

中横梁受力见表 4-1

表 4-1 中横梁上的荷载

内力	恒载	活载	冲击作用	人群荷载	总计
负弯矩 ( $kN \cdot m$ )	-161.26	-66.48	-29.92	-41.84	-299.50
正弯矩 ( $kN \cdot m$ )	-58.98	262.63	118.18	0.00	321.83
主跨部分剪力 ( $kN$ )	45.45	297.83	134.02	9.03	486.33
悬臂部分剪力 ( $kN$ )	76.46	132.96	59.83	19.02	288.27
支座反力 ( $kN$ )	121.91	430.79	193.86	28.05	774.61

## 4.2. 主跨截面

根据给定的 A3 钢的相关力学性质，假定横梁采用焊接工字钢，腹板厚 1.3cm，高 80cm，翼缘板宽 20cm，厚 2.2cm。其几何性质见表 4-2。

表 4-2 中横梁焊接工字钢截面几何性质

cm	腹板厚	1.3
	腹板高	80
	翼缘宽	20
	翼缘厚	2.2
cm <sup>2</sup>	腹板面积	104
	单翼缘面积	44
	总面积	192
cm	中性轴距上缘距离	42.2
cm <sup>3</sup>	面积矩	2848.4
cm <sup>4</sup>	Y 轴惯性矩	2947.98
	X 轴惯性矩	204152.64
cm <sup>3</sup>	截面模量	4837.74
翼缘宽厚比		9.09
腹板高厚比		61.54

#### 4.2.1. 最大弯曲正应力验算

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{321.83 \times 10^3}{4837.74} = 66.53 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 180 \text{ MPa}$$

#### 4.2.2. 最大剪应力验算

$$\tau_{\max} = \frac{V_0 S_x}{I_x t_w} = \frac{486.33 \times 10^3 \times 2848.4 \times 10^{-6}}{204152.64 \times 10^{-8} \times 1.3 \times 10^{-2}} = 52.20 \text{ MPa} < [\tau_w] = 105 \text{ MPa}$$

不计冲击力跨中弯矩

$$M_p = -58.98 + 262.63 = 203.65 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 4.2.3. 刚度验算

$$\frac{\omega}{l} = \frac{5l}{48EI_x} M_p = \frac{5 \times 5}{48 \times 2.06 \times 10^{11} \times 204152.64 \times 10^{-8}} \times 203.65 \times 10^3 = 2.52 \times 10^{-4} < 0.002$$

满足刚度要求。

### 4.2.4. 折算应力验算：

取横梁的四分点做折算应力验算，将横梁弯矩图假想为均布荷载作用下的抛物线，而实际的弯矩图由于有车辆荷载的作用，并不是呈抛物线，假想偏于安全。

$$M_{l/4} = M_{l/2} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) = 431.72 \times \left(1 - \frac{4 \times \left(\frac{l}{4}\right)^2}{l^2}\right) = 431.72 \times 0.75 = 323.79 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{l/4} = 0.5 \times V_{\max} = 0.5 \times 363.85 = 181.93 \text{ kN}$$

在截面受拉翼缘与腹板交界处应力为

$$\sigma = \frac{M_{l/4}}{W} = \frac{323.79 \times 10^3}{4837.74 \times 10^{-6}} = 66.93 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}$$

剪力

$$\tau = \frac{V_{l/4} S}{I_x t_w} = \frac{181.93 \times 10^3 \times 2848.4 \times 10^{-6}}{204152.64 \times 10^{-8} \times 1.3 \times 10^{-2}} = 19.53 \text{ MPa} < [\tau] = 105 \text{ MPa}$$

折算应力

$$\sigma_{req} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(66.93)^2 + 3 \times 19.53^2} = 74.99 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}$$

满足要求。

### 4.2.5. 整体稳定验算：

设横梁的侧向支撑自由长度为 2.5m，由 JTG D64-2015 《公路钢结构桥梁设计规



范》

$$\frac{L_1}{B_1} = \frac{2500}{200} = 12.50 < 16$$

#### 4.2.6. 局部稳定验算:

由 JTJ025-86 横梁翼缘宽厚比须不大于 12, 本例中:

$$\frac{b}{t} = \frac{20}{2.2} = 9.09 < 12 ,$$

符合要求

#### 4.2.7. 疲劳验算

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{58.98}{321.83} = 0.183$$

根据《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86 表 1.2.17-2, 疲劳容许拉应力为:

$$[\sigma_n] = \frac{165}{1-0.6\rho} = \frac{165}{1-0.6 \times 0.183} = 185.35 \text{MPa} > [\sigma_w] = 145 \text{MPa}$$

故取:  $[\sigma_n] = 145 \text{MPa}$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{321.83 \times 10^3}{2710.01} = 118.76 \text{MPa} < [\sigma_n] = 145 \text{MPa} , \text{ 故满足要求。}$$

### 4.3. 横纵梁连接点加劲肋和螺栓计算

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{800}{13} = 61.54 \leq 70 \text{ 根据《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86 要求}$$

可不设置竖向加劲肋及水平加劲肋, 只需在横梁与纵梁连接处设置连接加劲肋。  
连接加劲肋的设计:

JTJ 025-86 规定加劲肋:

外伸长度

$$b_l \geq 40 + \frac{h_w}{30} = 40 + \frac{800}{30} = 66.7 \text{mm} , \text{ 取 } 100 \text{mm}$$

厚度

$$\delta_l \geq \frac{b_l}{15} = \frac{68}{15} = 5mm, \text{ 取 } 20mm$$

切割直角边

$$l \leq 5t_w = 5 \times 13 = 65mm, \text{ 取 } 20mm$$

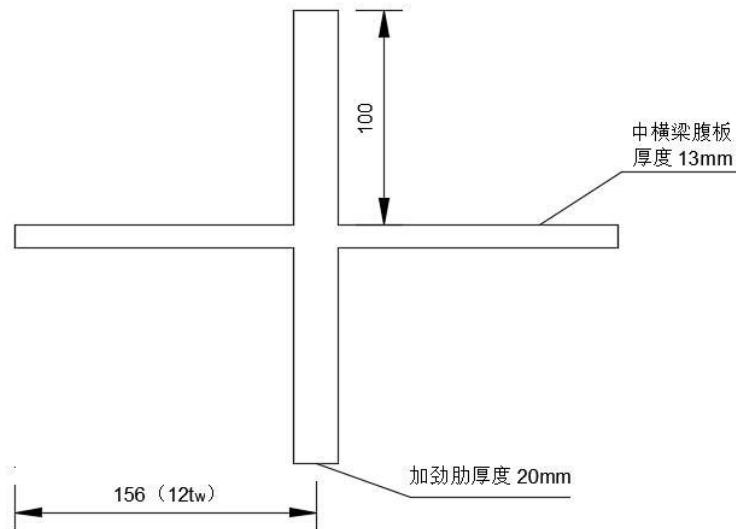


图 4-5 中横梁加劲肋承压面积示意图（单位：mm）

加劲肋高度 800mm，由于加劲肋与腹板和翼缘焊接的部位有焊缝的作用，为了避免焊接压力的影响，需要在加劲肋与焊缝衔接部位切割一部分，形成三角形缺口。端部承压面积需要减去这部分，因而端部承压面积为

$$A_{ce} = (L - l) \times t \times 2 = (100 - 20) \times 20 \times 2 = 3200mm^2$$

由规范计算出加劲肋的相关几何性质见表 4-3

表 4-3 横梁加劲肋几何性质

加劲肋计算承压面积(mm <sup>2</sup> )	8056
对 z 轴 I <sub>z</sub> (mm <sup>4</sup> )	16159455.33
回转半径 i(mm)	44.79
长细比 λ	17.86
端部承压面积 mm <sup>2</sup>	3200

压力取横梁最大剪力，由 λ 查得 φ 为 0.976，平面外失稳验算

$$\sigma = \frac{N}{\phi A} = \frac{486.33 \times 10^3}{0.9 \times 8056} = 67.08MPa < [\sigma] = 180MPa, \text{ 满足要求}$$

端部承压

$$\sigma_{ce} = \frac{N}{A_{ce}} = \frac{486.33 \times 10^3}{3200} = 151.98 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}, \text{ 满足要求}$$

螺栓设计:

在横梁与纵梁交接处焊有加劲肋, 并通过 10.9 级摩擦型高强螺栓将纵梁连接在横梁加劲肋上, 采用平接的连接方式, 构件均采用机切加工而成。公路桥规规定螺栓承载的剪力在实际基础上应放大 1.2 倍, 故摩擦型高强螺栓需要承载的剪力为:

$$V = 1.2V_0 = 1.2 \times 361.27 = 433.52 \text{ kN}$$

根据平接的连接方式, 螺栓布置的有效区域范围为:  $615 \times 90 \text{ mm}$ 。拟采用 10.9 级摩擦型高强螺栓 M27, 预紧力 290kN, 连接处构件接触面采用喷砂处理, 抗滑移系数为 0.45, 单个螺栓的抗剪承载力为

$$N_v^b = 0.9n_f \mu P = 0.9 \times 1 \times 0.45 \times 290 = 117.45 \text{ kN}$$

共需螺栓

$$n = 433.52 / 117.45 = 3.69 \text{ 个}$$

取 6 个, 螺栓的中心间距为 90mm, 顺内力方向距加劲肋边缘  $83 \text{ mm} > 1.5d_0 = 45 \text{ mm}$ , 垂直内力方向距加劲肋边缘  $45 \text{ mm} \geq 1.3d_0 = 39 \text{ mm}$ , 满足《公路钢结构桥梁设计规范 (JTG D64-2015)》要求。螺栓具体布置图见图纸。

## 4.4. 加劲肋和横梁的焊缝设计

### 4.4.1. 横梁翼缘与腹板焊缝设计

翼缘对中性轴毛面积矩

$$S_0 = 20 \times 2.2 \times 44.1 = 1808.4 \text{ cm}^3$$

横梁腹板与翼缘连接焊缝处水平剪力为

$$\tau = \frac{VS_0}{2I_x t_w} = \frac{486.33 \times 10^3 \times 1808.4 \times 10^{-6}}{2 \times 204152.64 \times 10^{-8} \times 13 \times 10^{-3}} = 16.57 \text{ MPa}$$

单位长度上两条焊缝水平剪应力

$$T_1 = 2\tau t_w \times 1 = \frac{VS_0}{I} = \frac{486.33 \times 10^3 \times 1808.4 \times 10^{-6}}{204152.64 \times 10^{-8}} = 429.84 \text{ N/mm}$$

集中荷载在焊缝处分布长度

$$I_n = \frac{20 \times 2.2^3}{12} + 20 \times 2.2 \times 41.1^2 = 74343 \text{ cm}^4$$

$$Z = c\sqrt[3]{I_n / t_w} = 3.25 \times \sqrt[3]{74343 / 1.3} = 125.213 \text{ cm} = 1252.13 \text{ mm}$$

400mm < 1252mm < 1800mm, 表明算出的 Z 有效。

集中力 45 度角扩散至翼缘分布长度

$$\lambda = a_0 + 2t = 200 + 2 \times 18 = 236 \text{ mm}$$

总的分布长度:

$$b = Z + \lambda = 1252.13 + 236 = 1488.13 \text{ mm}$$

角焊缝单位长度上竖向压力:

$$V_1 = \frac{P}{b} = \frac{132.96 \times 10^3}{1488.13} = 89.35 \text{ N / mm}$$

所需要的焊脚尺寸:

$$h_f \geq \frac{1}{1.4[\tau_f]} \sqrt{T_1^2 + V_1^2} = \frac{1}{1.4 \times 105} \sqrt{429.84^2 + 89.35^2} = 2.99 \text{ mm}$$

由焊缝设计构造要求:

$$1.5\sqrt{t_{\max}} = 1.5 \times \sqrt{22} = 7.03 \text{ mm} \leq h_f \leq t_{\min} - 2 = 18 - 2 = 16 \text{ mm}, \text{ 取 } 12 \text{ mm}。$$

#### 4.4.2. 连接加劲肋焊缝设计:

四分点处连接加劲肋受到的最大剪力为 181.93kN

焊脚取 12mm, 采用引弧板焊接, 剪应力和压应力验算:

公路桥规规定承受动荷载时  $l_w \leq 50h_f = 50 \times 12 = 600 \text{ mm}$

$$\tau_v = \frac{V}{\sum h_e \times l_w} = \frac{181.93 \times 10^3}{0.7 \times 12 \times 4 \times 50 \times 12} = 9.02 \text{ MPa} < [\tau] = 105 \text{ MPa}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{\sum h_e \times l_w} = \frac{181.19 \times 10^3}{0.7 \times 12 \times 4 \times (100 - 20)} = 67.41 \text{ MPa} < [\sigma] = 200 \text{ MPa}$$

经验算焊脚尺寸取 12mm 满足要求。

#### 4.5. 横梁悬挑部分设计

悬挑部分外纵梁距离悬挑根部 2.2m, 焊接工字钢和焊脚尺寸与中横梁相同。

挑部分进行变截面设计, 根部腹板高度与中横梁相同为 800mm, 边缘高度渐变为 500mm, 翼缘宽度与厚度不变。取外纵梁与悬挑根部的中间截面即距离根部 0.7m 处进行强度验算, 冲击系数取与中横梁相同的 0.45, 在此截面, 恒载引起的弯矩:

$$M_{DL} = -\frac{3.06 \times 1.65^2}{2} - 34.02 \times 1.1 \times 2 = -79.01 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

计算弯矩时，悬臂部分自重和混凝土以及梗肋自重引起的均布荷载取不变值 3.06kN/m, 相对于变截面来说是偏于安全的。

恒载引起的剪力

$$V_{DL} = 3.06 \times 1.65 + 34.02 \times 2 = 76.09 \text{ kN}$$

活载 132.96kN，根据车辆荷载其作用位置距离此截面 0.4m，则

$$M_{LL} = -132.96 \times 0.4 = -53.18 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

冲击作用

$$M_f = -53.18 \times 0.45 = -23.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

人行道活载引起的弯矩和剪力

$$M_{SL} = -3.0 \times 0.75 \times 5.4 \times 1.375 = -16.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{SL} = 3.0 \times 0.75 \times 5.4 = 12.15 \text{ kN}$$

总弯矩为

$$M = -79.01 - 53.18 - 23.93 - 16.71 = -172.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

总剪力为

$$V = 76.09 + 132.96 + 132.96 \times 0.45 + 12.15 = 281.03 \text{ kN}$$

由于截面高度渐变，验算截面处的几何性质见表 4-4

表 4-4 挑梁验算截面处几何性质

腹板高(mm)	705
腹板厚(mm)	13
翼缘宽(mm)	200
翼缘厚(mm)	22
$I_x (\text{mm}^4)$	1542721577
$W_x (\text{mm}^3)$	4119417
$S (\text{mm}^3)$	2407066

弯矩正应力

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{172.83 \times 10^6}{4119417} = 41.95 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}$$

剪应力

$$\tau=\frac{VS}{I_x t}=\frac{281.03\times10^3\times2407066}{1542721577\times13}=35.73MPa<[\tau]=105MPa$$

挑梁边缘的弯矩和剪力越来越小，当验算截面满足要求时，则挑梁所有截面均可满足要求，此外挑梁与外纵梁的连接和中横梁与内纵梁的连接相同，加劲肋和挑梁以及挑梁自身的焊缝与中横梁的设置一致。

## 五、主梁设计

### 5.1. 主梁荷载及强度计算

主梁的恒载见表 5-1

表 5-1 主梁恒载计算表

桥面板	25×10.5×0.2=52.5
栏杆和人行道	5
主梁	0.6
横纵梁	2.5
纵联	0.1
公共设备	0.1
合计	60.8
单根主梁恒载	30.4

主梁上的活载采用车道荷载计算，由于为双主梁，可采用杠杆原理法计算横向影响线

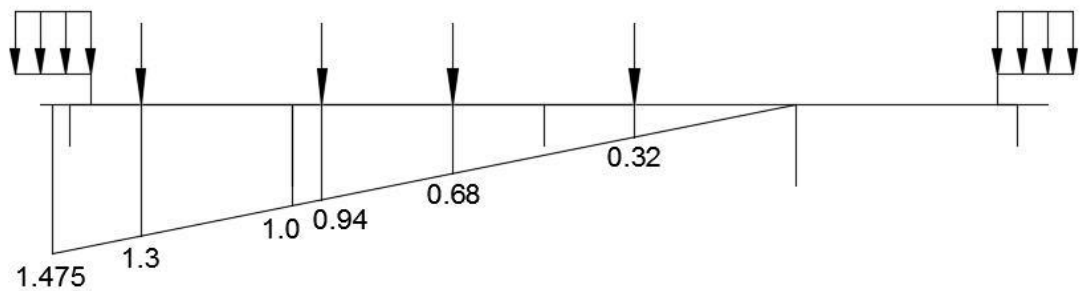


图 5-1 主梁横向影响线计算图

由图可得

$$m_{\lambda}=1.475$$

$$m_{\text{汽}}=(1.3+0.94+0.68+0.32)/2=1.62$$

根据规范要求，公路—II级车道荷载均布荷载标准值 $q_k$ 和集中荷载标准值 $P_k$ 按公路—I级车道荷载的0.75倍采用。公路—I级车道荷载均布荷载标准值为 $q_k=10.5\text{kN}/\text{m}$ ；集中荷载按下列取值：当桥梁计算跨径小于5m时， $P_k=270\text{kN}$ ；

桥梁计算跨径大于等于50m时， $P_k=360\text{kN}$ ；桥梁计算跨径在5m~50m时， $P_k$ 按线性内插求得。计算剪力效应时，集中荷载值应乘以1.2的系数。由规范得到公路—II级车道荷载：  
均布荷载标准值

$$q_k=10.5\times 0.75=7.875\text{kN}/\text{m}$$

集中荷载标准值

$$P_k=2(L_0+130)=2\times(32.4+130)=324.8\text{kN}$$

计算剪力时

$$P_k=1.2\times 324.8=389.76\text{kN}$$

荷载效应计算公式

$$S=mq\Omega+mP_k y$$

主梁恒载作用效应计算：

由上表的恒载作用集度 $g=30.4\text{kN}/\text{m}$

设计算截面距离左支座的距离为 $x$ ，令 $\alpha=x/l$

主梁的弯矩和剪力计算公式分别为

$$M_{\alpha}=\frac{1}{2}\alpha(1-\alpha)l^2 g$$

$$Q_{\alpha}=\frac{1}{2}(1-2\alpha)lg$$

主梁各截面恒载的作用效应：

表 5-2 主梁各截面恒载作用效应

作用效应	跨中	四分点	六分点	支点
弯矩(kN·m)	3989.09	2991.82	2216.16	0.00
剪力(kN)	0.00	246.24	328.32	492.48

主梁可变作用效用计算：

计算跨中截面最大弯矩和最大剪力采用直线加载求可变作用效应，图 5-2 为主梁跨中截面活载计算图式，计算公式为：

$$S = mq_k \Omega + mP_k y$$

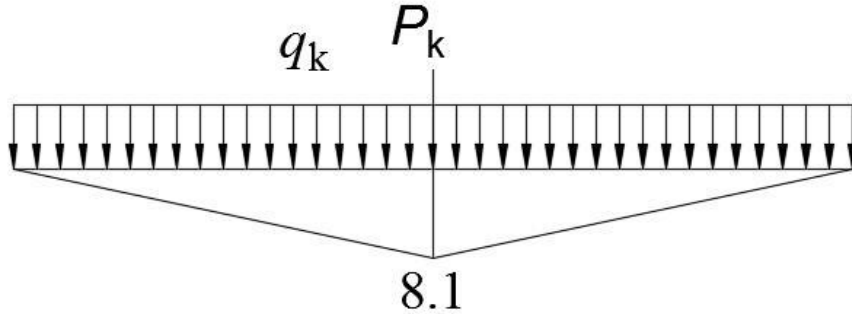


图 5-2- (1) 弯矩影响线

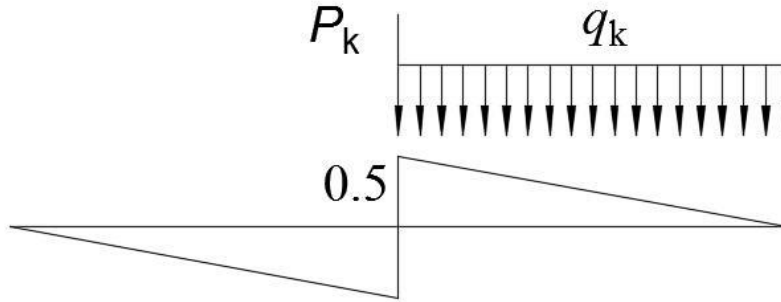


图 5-2- (2) 剪力影响线

图 5-2 主梁跨中截面活载计算示意图

汽车荷载可变作用标准效应：

$$M_{\max} = 1.62 \times 7.875 \times 1/2 \times 8.1 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 8.1 = 5936.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = 1.62 \times 7.875 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 0.5 = 314.76 \text{ kN}$$

汽车荷载可变作用冲击效应：

拟采用截面翼缘宽 80cm，厚 7cm，腹板高 250cm，厚 2cm，求得惯性矩为 0.211m<sup>4</sup>。

由主梁恒载可的结构跨中处的单位长度质量为

$$m_c = 30.4 \times 1000 / 9.81 = 3098.88 \text{ kg} / \text{m}$$

则

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} = \frac{\pi}{2 \times 32.4^2} \sqrt{\frac{2.06 \times 10^{11} \times 0.211}{3098.88}} = 5.6 \text{ Hz}$$

冲击系数

$$\mu = 0.1767 \ln f - 0.0157 = 0.29$$

$$M_{\text{冲击}} = \mu M_{\max} = 0.29 \times 5936.06 = 1721.46 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



$$V_{\text{冲击}} = \mu V_{\text{max}} = 0.29 \times 314.76 = 91.28 \text{ kN}$$

人群荷载可变作用标准效应

$$M_{\text{max}} = 1.475 \times 3.1 \times 1/2 \times 8.1 \times 32.4 = 600.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{max}} = 1.475 \times 3.1 \times 1/2 \times 0.5 \times 0.5 \times 32.4 = 18.52 \text{ kN}$$

四分点截面的最大弯矩和最大剪力

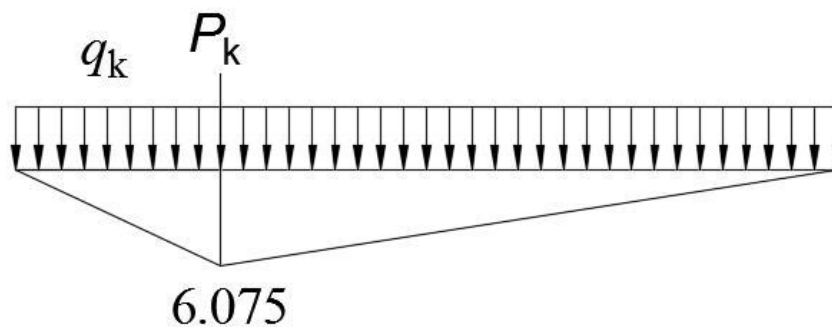


图 5-3-（1）弯矩影响线

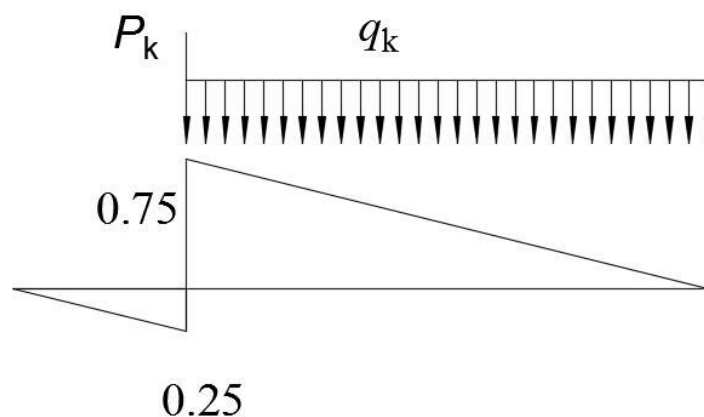


图 5-3-（2）剪力影响线

图 5-3 主梁四分点截面活载计算示意图

汽车荷载可变作用标准效应：

$$M_{\text{max}} = 1.62 \times 7.875 \times 1/2 \times 6.075 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 6.075 = 4452.05 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{max}} = 1.62 \times 7.875 \times 0.75 \times 1/2 \times 0.75 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 0.75 = 510.88 \text{ kN}$$

汽车荷载可变作用冲击效应：

$$M_{\text{冲击}} = \mu M_{\text{max}} = 0.29 \times 4452.05 = 1291.09 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{冲击}} = \mu V_{\text{max}} = 0.29 \times 510.88 = 148.16 \text{ kN}$$

人群荷载可变作用效应

$$M_{\max} = 1.475 \times 3.1 \times 1/2 \times 6.075 \times 32.4 = 450.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = 1.475 \times 3.1 \times 0.75 \times 0.5 \times 0.75 \times 32.4 = 41.67 \text{ kN}$$

六分点截面的最大弯矩和最大剪力：

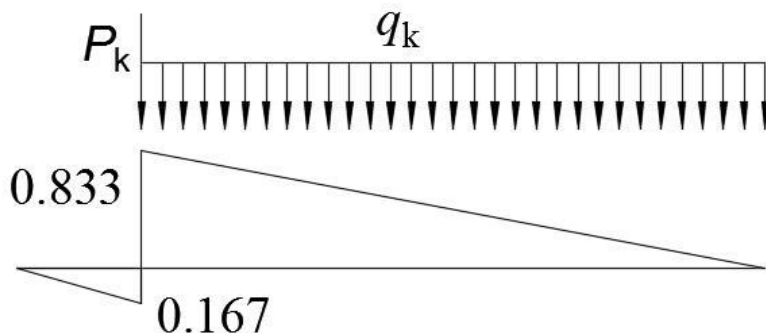


图 5-4-（1）弯矩影响线

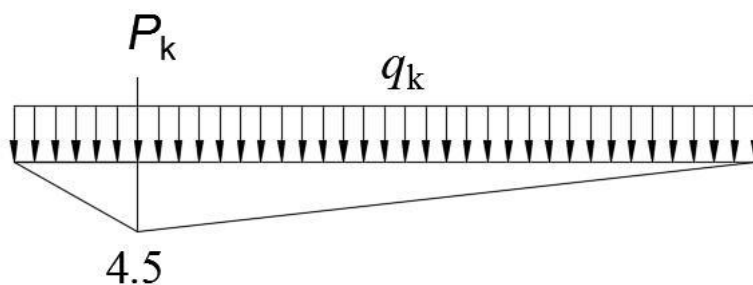


图 5-4-（2）剪力影响线

图 5-4 主梁六分点处截面活载计算示意图

汽车荷载可变作用标准效应：

$$M_{\max} = 1.62 \times 7.875 \times 1/2 \times 4.5 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 4.5 = 3297.81 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = 1.62 \times 7.875 \times 0.833 \times 1/2 \times 0.833 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 0.833 = 581.71 \text{ kN}$$

汽车荷载可变作用冲击效应：

$$M_{\text{冲击}} = \mu M_{\max} = 0.29 \times 3297.81 = 956.36 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{冲击}} = \mu V_{\max} = 0.29 \times 581.71 = 168.70 \text{ kN}$$

人群荷载可变作用效应

$$M_{\max} = 1.475 \times 3.1 \times 1/2 \times 4.5 \times 32.4 = 333.33 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{\max} = 1.475 \times 3.1 \times 0.833 \times 0.5 \times 0.833 \times 32.4 = 51.40 \text{ kN}$$

支点截面的最大剪力：

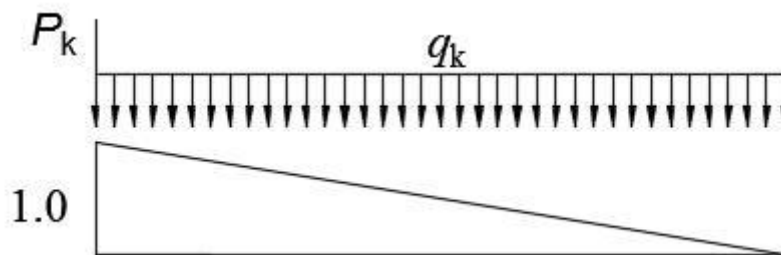


图 5-5 主梁支点截面活载计算示意图

汽车荷载可变作用标准效应:

$$V_{\max} = 1.62 \times 7.875 \times 0.833 \times 1/2 \times 1 \times 32.4 + 1.62 \times 324.8 \times 1 = 732.85 \text{ kN}$$

汽车荷载可变作用冲击效应:

$$V_{\text{冲击}} = \mu V_{\max} = 0.29 \times 732.85 = 212.53 \text{ kN}$$

人群荷载可变作用标准效应:

$$V_{\max} = 1.475 \times 3.1 \times 1 \times 0.5 \times 1 \times 32.4 = 74.07 \text{ kN}$$

综上，整个主梁的荷载如表 5-3

表 5-3 主梁荷载效应总表

截面位置	作用效应类别	恒载	汽车作用效应	冲击效应	人群作用效应	总计
跨中	弯矩 M(kN·m)	3898.09	5936.06	1721.46	600.00	12155.61
	剪力((kN)	0.00	314.76	91.28	18.52	424.56
四分点	弯矩 M(kN·m)	2991.82	4452.05	1291.09	450.00	9184.96
	剪力((kN)	246.24	510.88	148.16	41.67	946.95
六分点	弯矩 M(kN·m)	2216.16	3297.81	956.36	333.33	6803.66
	剪力((kN)	328.32	581.71	168.70	51.40	1130.13
支点	剪力((kN)	492.48	732.85	212.53	74.07	1511.93

## 5.2. 主梁尺寸的选取和主梁验算

### 5.2.1. 主梁尺寸选取

拟采用截面翼缘宽 80cm, 厚 7cm, 腹板高 250cm, 厚 2cm, 求得惯性矩为 0.211m<sup>4</sup>。

根据主梁的荷载情况，初拟主梁尺寸如图所示。由于主梁跨径较大，跨中弯矩大而支点处弯矩小，故主梁采用翼缘厚度渐变。变截面点选在六分点处。根据给定的 Q235 钢的相关性质，假定采用焊接工字梁，腹板厚 2cm，高 250cm，翼缘板宽 80cm，厚 7cm，由两层钢板组成，外层钢板厚 3cm，内层钢板厚 4cm，六分点处切断外层钢板，翼缘板厚度变为 4cm，六分点处延伸长度 1110mm。由规范：

$$h_f = 16\text{mm} < 0.75t = 0.75 \times 30 = 22.5\text{mm}$$

$$l_1 \geq 1.5b = 1.5 \times 740 = 1110\text{mm}$$

故延伸长度取 1110mm。

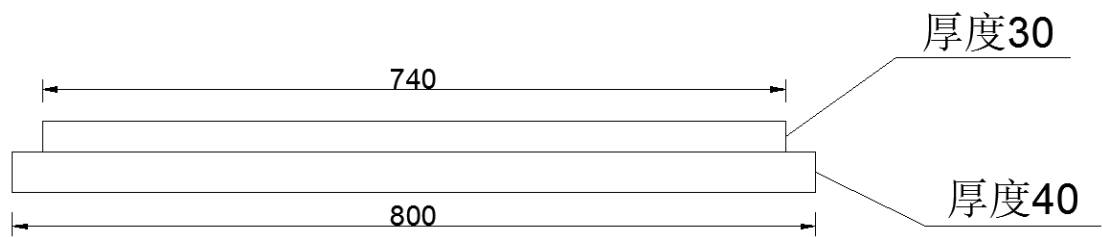


图 5-6 主梁变截面翼缘宽度示意图（单位：mm）

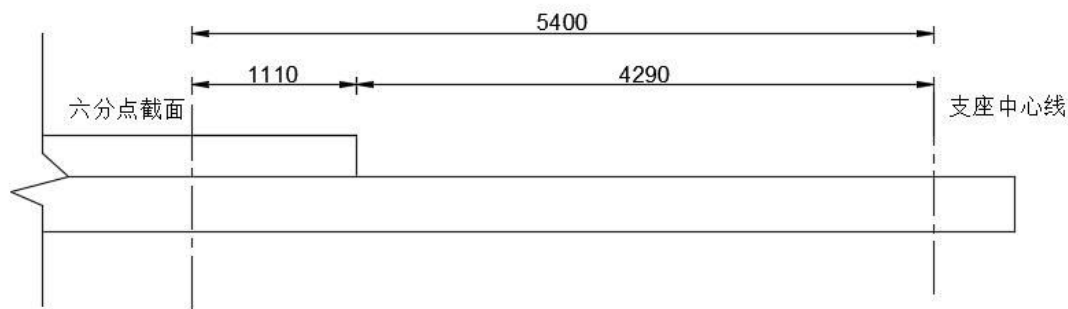


图 5-7 梁变截面延伸长度示意图（单位：mm）

相关几何性质见表 5-4 及表 5-5

表 5-4 主梁焊接工字钢跨中截面几何性质

cm	腹板厚	2
	腹板高	250
	翼缘宽（外、内）	74、80
	翼缘厚（外、内）	3、4
cm <sup>2</sup>	腹板面积	50
	单翼缘面积	542
	总面积	1134
cm	中性轴距上缘距离	132
cm <sup>3</sup>	面积矩	85236
cm <sup>4</sup>	Y 轴惯性矩	54112
	X 轴惯性矩	20489344
cm <sup>3</sup>	截面模量	155222
翼缘宽厚比		5.57
腹板高厚比		125

表 5-5 主梁焊接工字钢 1/6 截面至支点截面处几何性质

cm	腹板厚	2
	腹板高	250
	翼缘宽	80
	翼缘厚	4
cm <sup>2</sup>	腹板面积	500
	单翼缘面积	320
	总面积	1140
cm	中性轴距上缘距离	129
cm <sup>3</sup>	面积矩	71890
cm <sup>4</sup>	Y 轴惯性矩	341500
	X 轴惯性矩	12927580
cm <sup>3</sup>	截面模量	100213
翼缘宽厚比		9.75
腹板高厚比		125

### 5.2.2. 主梁验算

横梁工字钢跨中的受力验算：

弯矩正应力

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{12155.61 \times 10^6}{155222 \times 10^3} = 78.31 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}$$

最大剪应力

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} S}{I_x t_w} = \frac{1511.93 \times 10^3 \times 71890 \times 10^3}{12927580 \times 10^4 \times 20} = 42.04 \text{ MPa} < [\tau] = 105 \text{ MPa}$$

取主梁的四分点截面做折算应力计算：

弯矩应力

$$\sigma = \frac{M_{l/4}}{W} = \frac{9186.96 \times 10^6}{155222 \times 10^3} = 59.19 \text{MPa} < [\sigma] = 180 \text{MPa}$$

剪应力

$$\tau = \frac{V_{l/4} S}{I_x t_w} = \frac{946.95 \times 10^3 \times 103210 \times 10^3}{20489344 \times 10^4 \times 20} = 23.85 \text{MPa} < [\tau] = 105 \text{MPa}$$

折算应力

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{59.19^2 + 3 \times 23.85^2} = 72.18 \text{MPa} < [\sigma] = 180 \text{MPa}$$

同理可验算六分点处，翼缘厚度取 40mm，进行验算：

弯矩应力

$$\sigma = \frac{M_{l/6}}{W} = \frac{6803.66 \times 10^6}{100213 \times 10^3} = 67.89 \text{MPa} < [\sigma] = 180 \text{MPa}$$

剪应力

$$\tau = \frac{V_{l/6} S}{I_x t_w} = \frac{1130.13 \times 10^3 \times 71890 \times 10^3}{12927580 \times 10^4 \times 20} = 31.42 \text{MPa} < [\tau] = 105 \text{MPa}$$

折算应力

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{67.89^2 + 3 \times 31.42^2} = 87.01 \text{MPa} < [\sigma] = 180 \text{MPa}$$

六分点强度满足要求。

各截面应力满足标准时，疲劳强度也满足，故主梁的强度满足要求。

整体稳定验算：

由 JTG D64-2015 《公路钢结构桥梁设计规范》第 5.3.2 条可知

$$\frac{L_1}{B_1} = \frac{5400}{800} = 6.75 < 16$$

可不计算梁的整体稳定性。

局部稳定验算：

由 JTJ 025-86 主梁翼缘宽厚比须不大于 12，本设计中

跨中截面

$$\frac{b}{t} = \frac{39}{7} = 5.57 < 12$$

变截面

$$\frac{b}{t} = \frac{39}{4} = 9.75 < 12$$

则局部稳定满足要求。

刚度验算：

不计冲击力跨中弯矩

$$M_p = 5936.06 + 600.00 = 6536.06 \text{kN} \cdot \text{m}$$

则刚度：

$$\frac{\omega}{l} = \frac{5M_p}{48EI_x} = \frac{5 \times 6536.06}{48 \times 2.06 \times 21102460} = 1.57 \times 10^{-5} < \frac{1}{600}, \text{ 满足刚度要求}$$

### 5.3. 加劲肋和螺栓设计

#### 5.3.1. 加劲肋设置

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{2500}{20} = 125 > 60 \text{ 且 } < 160, \text{ 故需设置竖向加劲肋}$$

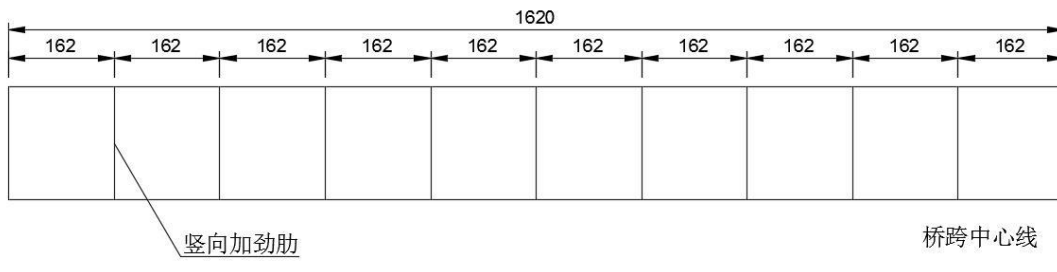


图 5-8 主梁加劲肋布置图

支撑处加劲肋间距验算：

$$\tau = \frac{V}{h_w t_w} = \frac{1511.93 \times 10^3}{2500 \times 20} = 30.23 \text{ MPa}$$

设置间距：

$$a \leq \frac{950 t_w}{\sqrt{\tau}} = \frac{950 \times 20}{\sqrt{30.24}} = 3455.12 \text{ mm} > 2000 \text{ mm}, \text{ 按规范取 } 1250 \text{ mm}$$

1/4 处加劲肋间距验算

$$\tau = \frac{V}{h_w t_w} = \frac{946.95 \times 10^3}{2500 \times 20} = 18.94 \text{ MPa}$$

设置间距：

$$a \leq \frac{950 t_w}{\sqrt{\tau}} = \frac{950 \times 20}{\sqrt{18.94}} = 4365.80 \text{ mm} > 2000 \text{ mm}, \text{ 按规范取 } 1250 \text{ mm}$$

外伸长度：

$$b_1 \geq 40 + \frac{h_w}{30} = 40 + \frac{2000}{30} = 106.6 \text{ mm}, \text{ 取 } 280 \text{ mm}$$

厚度：



$$\delta_1 \geq \frac{b_1}{15} = \frac{200}{15} = 13.3mm，取 24mm$$

切割直角边

$$l \leq 5t_w = 5 \times 20 = 100mm \text{ 取} 30mm$$

加劲肋高度 1200mm

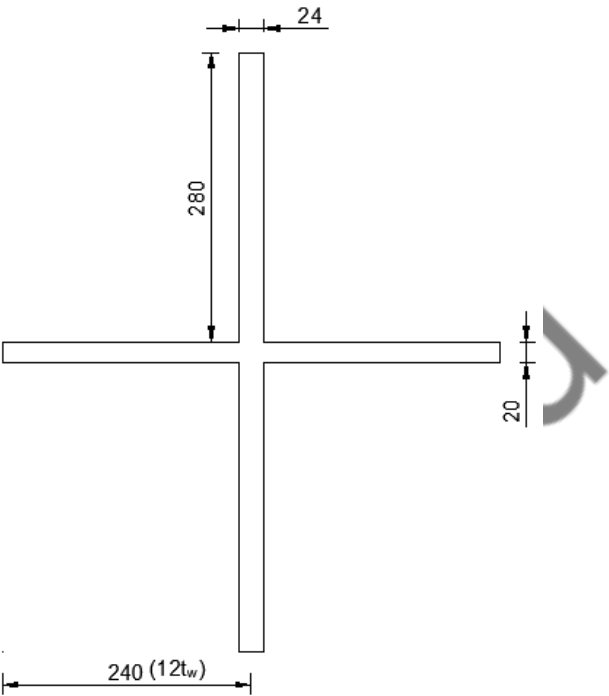


图 5-9 主梁支承加劲肋承压面积计算图

表 5-6 主梁加劲肋几何性质

加劲肋计算承压面积 (mm²)	23040
对 Z 轴 I <sub>z</sub> (mm⁴)	390528000
回转半径 (mm)	130.19
长细比 λ	19.2
端部承压面积 (mm²)	12000

由 λ 查表得 φ=0.9，平面外失稳验算

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{1511.93 \times 10^3}{0.9 \times 23040} = 72.91MPa < [\sigma] = 180MPa$$

端部承压：

$$\sigma_{ce} = \frac{N}{A_{ce}} = \frac{1511.93 \times 10^3}{12000} = 125.99 \text{ MPa} < [\sigma] = 180 \text{ MPa}$$

均满足要求，

### 5.3.2. 螺栓设计

在横梁与主梁交接处焊有加劲肋，并通过 10.9 级摩擦型高强螺栓将横梁连接在主梁加劲肋上，采用平接的连接方式，构件采用机切的加工方式。公路桥规规定螺栓承载的剪力在实际基础上应该放大 1.2 倍，故摩擦型高强螺栓需要承载的剪力为

$$V = 1.2V_0 = 1.2 \times 1511.93 = 1814.32 \text{ kN}$$

根据平接的连接方式，螺栓布置的有效区域范围为：630×270mm。拟采用 10.9 级摩擦型高强螺栓 M27，预紧力 290kN，连接处构件接触面采用喷砂处理，抗滑移系数为 0.45，单个螺栓的抗剪承载力为

$$N_v^b = 0.9n_f \mu P = 0.9 \times 1 \times 0.45 \times 290 = 117.45 \text{ kN}$$

共需螺栓

$$n = 1814.32 / 117.45 = 16 \text{ 个}$$

取 18 个，采取 6 列 3 行的布置方式。螺栓的中心间距为 90mm，顺内力方向距加劲肋边缘 90mm > 1.5d<sub>0</sub> = 45mm，垂直内力方向距加劲肋边缘 45mm，满足《公路钢结构桥梁设计规范（JTG D64-2015）》要求。螺栓具体布置图见图纸。

### 5.4. 翼缘与腹板焊接

翼缘对中性轴毛面积矩

$$S_0 = 80 \times 4 \times 127 = 40640 \text{ cm}^3$$

主梁腹板与翼缘连接焊缝处水平剪力为

$$\tau = \frac{VS_0}{2I_x t_w} = \frac{1511.93 \times 10^3 \times 40640 \times 10^{-6}}{2 \times 12927580 \times 10^{-8} \times 20 \times 10^{-3}} = 11.88 \text{ MPa}$$

单位长度上两条焊缝水平剪应力

$$T_1 = 2\tau t_w \times 1 = \frac{VS_0}{I} = \frac{1511.93 \times 10^3 \times 40640 \times 10^{-6}}{12927580 \times 10^{-8}} = 475.30 \text{ N/mm}$$

$$I_n = \frac{80 \times 4^3}{12} + 80 \times 4 \times 127^2 = 5161707 \text{ cm}^4$$

$$Z = c\sqrt[3]{I_n / t_w} = 3.25 \times \sqrt[3]{5161707 / 2} = 445.8\text{cm} = 4458\text{mm}$$

4458>1800mm, Z 取有效值 1800mm。

总的分布长度

$$b = Z + a_0 + 2t = 1800 + 200 + 2 \times 200 = 2400\text{mm}$$

角焊缝单位长度上竖向压力:

$$V = \frac{P}{b} = \frac{1511.93 \times 10^3}{2400} = 629.97\text{N/mm}$$

所需要的焊脚尺寸:

$$h_f \geq \frac{1}{1.4[\tau_f]} \sqrt{T_1^2 + V_1^2} = \frac{1}{1.4 \times 160} \times \sqrt{475.30^2 + 629.97^2} = 3.5\text{mm}$$

由焊缝设计构造要求:

$$1.5\sqrt{t_{\max}} = 1.5\sqrt{25} = 7.5\text{mm} \leq h_f \leq 1.2t_{\min} = 1.2 \times 20 = 24\text{mm}$$

取焊脚尺寸为 10mm。

连接加劲肋焊缝设计:

主梁支点连接加劲肋受到的最大剪力为 1511.93kN, 焊脚取 16mm, 采用引弧板焊接, 剪应力和压应力验算:

公路桥规规定承受动荷载时

$$l_w \leq 50h_f = 50 \times 16 = 800\text{mm}$$

$$\tau_v = \frac{V}{\sum h_e l_w} = \frac{1511.93 \times 10^3}{0.7 \times 16 \times 4 \times 800} = 42.19\text{MPa} < f_f^w = 160\text{MPa}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{\sum h_e l_w} = \frac{1511.93 \times 10^3}{4 \times 0.7 \times 16 \times (280 - 30)} = 134.99\text{MPa} < f_f^w = 160\text{MPa}$$

经验算焊脚尺寸取 16mm 满足要求。

## 六、 水平纵联的设计

### 6.1. 平纵联轴心压杆设计

主梁的每块翼缘板均承受一半的横向风荷载, 混凝土桥面板和上翼缘共同工作抵抗风荷载, 上翼缘处不需要设置水平纵联。下面介绍主梁水平纵联的设计。

图 6-1 给出侧向桁架系统的布置情况。该系统位于主梁底部的同一平面内。

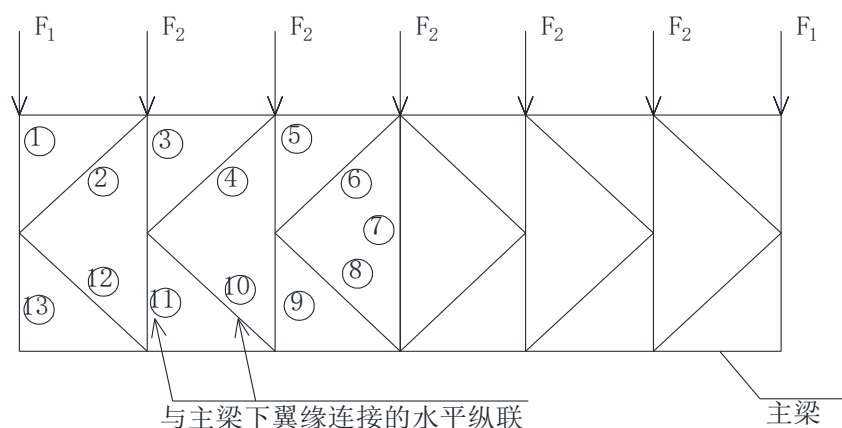


图 6-1 平纵联各杆编号示意图

风荷载作用面积

表 6-1 单位长度主梁风荷载面积

构件类别	外露面积 (m <sup>2</sup> /m)
桥面栏杆	0.5
桥面板	0.5
主梁	2.12
总计	3.12

根据规范 JTG D60-2004，查得武威地区的海拔高度为 1530.9m，C 类地表，假定桥面距离地面 20m，计算甘肃地区的风荷载计算公式：

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh}$$

$$W_d = k_2^2 \times k_5^2 \times W_0$$

根据规范要求和工程实际情况，取  $k_0=0.9$ ， $k_1=1.3$ ， $k_2=0.92$ ， $k_3=1.0$ ， $k_5=1.70$ ， $W_0=0.35\text{kN/m}^2$ ，则：

$$W_d = 0.92^2 \times 1.70^2 \times 0.35 = 0.86\text{kN/m}^2$$

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh} = 0.9 \times 1.3 \times 0.92 \times 0.86 \times 3.12 = 2.89\text{kN}$$

1，7 号梁受的风荷载：

$$F_1 = 2.89 \times 5 \times 0.5 = 7.22\text{kN}$$

2、3、4、5、6 号梁受的风荷载：

$$F_2 = 2.89 \times 5 \times 0.2 \times 2 = 14.45\text{kN}$$

假设联接系和横梁组成平民桁架铰接体系，各杆按轴心压杆设计和验算，把均布风荷载转化为集中力加在节点上，用杠杆原理法和节点法算出每根压杆内力见下表：

表 6-2 平纵联各杆内力表

编号	各杆内力 (kN)	计算长度 (cm)
1	-7.22	250
2	5.11	764
3	-21.66	250
4	18.05	764
5	-27.20	250
6	28.26	764
7	54.41	500
8	-28.26	764
9	12.76	250
10	-18.05	764
11	3.61	250
12	-5.11	764
13	0.00	250

轴心压杆:

最大的内力为 7 号的 54.41kN, 计算长度为 1000cm, 按公路桥规平纵联接系长

细比最大为  $\lambda = 130$ , 则回转半径  $i = \frac{l}{\lambda} = \frac{1000}{130} = 7.69\text{cm}$

取  $\varphi = 0.5$ , 则  $A_{req} = \frac{N}{\varphi\sigma} = \frac{54.41 \times 10}{0.5 \times 200} = 5.441\text{cm}^2$

根据回转半径和容许面积, 查型钢表选取 HW200×200 型钢, 其几何参数如下:

$$A = 64.28\text{cm}^2$$

$$i_x = 8.61\text{cm}$$

$$i_y = 4.99\text{cm}$$

考虑到两个方向上的失稳, 选取型钢双轴的回转半径都满足要求。

轴心斜压杆:

最大轴心压力为 8 号的 28.26kN, 计算长度为 707cm, 按公路桥规平纵联接系长

细比最大为  $\lambda=130$ ，则回转半径  $i = \frac{l}{\lambda} = \frac{707}{130} = 5.4\text{cm}$

查表得  $\varphi=0.5$ ，则  $A_{req} = \frac{N}{\varphi\sigma} = \frac{28.26 \times 10}{0.5 \times 200} = 2.826\text{cm}^2$

根据回转半径和容许面积，查型钢表选取 TM250×300 的 T 型钢，其几何参数如下：

$$A = 73.23\text{cm}^2$$

$$i_x = 6.83\text{cm}$$

$$i_y = 6.80\text{cm}$$

考虑到两个方向上的失稳，选取型钢双轴的回转半径都满足要求。

根据规范规定，用单个 T 形杆的翼缘板连接的联接系构件，不论其为组合型钢或组合构件，截面积均按减少 10% 计算。

所以  $\sigma = \frac{N}{0.9A} = \frac{28.26 \times 10^3}{0.9 \times 7323} = 4.29\text{MPa} < \varphi[\sigma] = 0.47 \times 200 = 94\text{MPa}$

构建满足要求。

## 6.2. 节点设计

联接系与主梁的连接拟采用 M20 的摩擦型高强螺栓进行连接，连接处接触面采用喷砂处理

$$N_v^b = 0.9n_f\mu P = 0.9 \times 1 \times 0.45 \times 155 = 62.78\text{kN}$$

故所需的螺栓数目

$$n = \frac{54.14}{62.78} = 1$$

故联接系与主梁的连接采用  $2 \times 4$  个摩擦型高强螺栓。