

高等学校试用教材

# 桥梁上部结构计算示例

(一)

(道路与桥隧专业用)

同济大学等三校合编

人民交通出版社

高等学校试用教材

# 桥梁上部结构计算示例

(一)

(道路与桥隧专业用)

同济大学等三校合编

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书为配合《桥梁工程》(上册)教学而编写的。全书列举了五个示例,即:钢筋混凝土简支空心板梁桥和简支T梁桥、预应力混凝土简支T梁桥、双曲拱桥及其无支架施工计算。为使学生学习方便起见,书后还附有空心板横断面经验尺寸表、G-M法的荷载横向分布系数图表、无支架吊装缆索计算原理等资料。

本书作为道路与桥隧专业学生在学习《桥梁工程》专业课时、做课程设计或毕业设计所用的参考书;亦可供有关专业人员工作和学习参考。

## 高等学校试用教材 桥梁上部结构计算示例

(一)

(道路与桥隧专业用)

同济大学等三校合编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{8}$  印张: 12 字数: 280 千

1980年7月 第1版

1980年7月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—5,300册 定价: 1.25元

# 前 言

为配合《桥梁工程》(上册)的教学,针对本课程的重点内容、结合近年我国公路桥梁工程的实际情况、依据交通部现行的公路桥梁规范编写了《桥梁上部结构计算示例》(一)。本书共有五个示例和三个附录,可以作为在校学生课程设计与毕业设计时的参考书,对于生产设计也有一定参考价值。

学生们通过对本书的学习,可以加深对桥梁工程基本理论和重要概念的理解,了解具体工程设计的内容、步骤和方法等等,使理论与实际较快、较好地结合起来。

为了使学生了解国际制计量单位,本书第一个示例同时采用了国际制和公制计量单位,其余四个示例仍采用公制计量单位。

本书示例一、示例二、示例三分别由同济大学肖振群、杨健、潘洪萱编写,示例四与示例五由湖南大学钟圣斌编写,附录三由湖南大学周义武编写。同济大学主编,重庆交通学院主审。

配合教学编写计算示例尚属尝试,缺点错误在所难免,切望读者批评指正。

# 目 录

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 例一、钢筋混凝土简支空心板梁桥计算示例 ( $l_p = 9.7$ 米) .....                    | 1   |
| 例二、装配式钢筋混凝土简支 T 梁桥计算示例 ( $l_p = 19.5$ 米) .....                | 14  |
| 例三、预应力混凝土简支 T 梁桥计算示例 ( $l_p = 29.16$ 米) .....                 | 40  |
| 例四、双曲拱桥计算示例 ( $l_0 = 50$ 米, $f_0/l_0 = 1/6$ ) .....           | 96  |
| 例五、双曲拱桥无支架施工计算示例 .....                                        | 118 |
| 附录一、空心板横断面经验尺寸表 .....                                         | 164 |
| 附录二、G-M 法的荷载横向分布系数 $K_0$ 、 $K_1$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu_1$ 图表 ..... | 165 |
| 附录三、无支架吊装缆索计算原理 .....                                         | 175 |

# 例一、钢筋混凝土简支 空心板梁桥计算示例( $l_p = 9.7$ 米)

|                     |    |
|---------------------|----|
| 一、设计资料 .....        | 1  |
| 二、桥面横断面布置 .....     | 2  |
| 三、荷载横向分布系数的计算 ..... | 2  |
| 四、内力计算 .....        | 5  |
| (一)恒载内力(先加恒载) ..... | 5  |
| (二)活载内力计算 .....     | 5  |
| (三)后加恒载——栏杆 .....   | 7  |
| (四)内力汇总 .....       | 8  |
| 五、钢筋估算和正应力验算 .....  | 8  |
| 六、剪应力验算 .....       | 11 |
| 七、分布钢筋 .....        | 12 |
| 八、挠度计算及预拱度 .....    | 13 |
| 九、预制板吊钩计算 .....     | 13 |

## 一、设计资料

### 1.设计荷载

汽车-20级、挂车-100

### 2.跨径

板全长10米；计算跨径9.70米；净跨径9.00米

### 3.桥宽

车道净宽  $B_0 = 7.00$ 米(双车道)

缘石  $2 \times 0.20 = 0.40$ 米

总宽  $B = 7.40$ 米，不设人行道

桥面铺装厚度：中央8厘米，靠近缘石3厘米，另加填平层5厘米

### 4.材料

300\*混凝土 弯曲受压 $[\sigma_w] = 130$ 公斤力/平方厘米 ( $12.75 \times 10^3$ 千帕)

16Mn钢筋  $[\sigma_s] = 1850$ 公斤力/平方厘米 ( $181.4 \cdot 10^3$ 千帕)

构造钢筋 3号钢 $[\sigma_s] = 1350$ 公斤力/平方厘米 ( $132.4 \cdot 10^3$ 千帕)

### 5.设计依据与参考资料

《公路桥涵设计规范》(试行) 简称《桥规》 1975 人民交通出版社

公路桥梁荷载横向分布计算 1977 人民交通出版社

## 二、桥面横断面布置

参考本书附录一（空心板横截面经验尺寸表），对本桥跨结构横截面的布置与尺寸具体确定如图1-1，当应力验算不能通过或很不合理时，再作局部修改或有可能重新确定横截面的布置与尺寸。

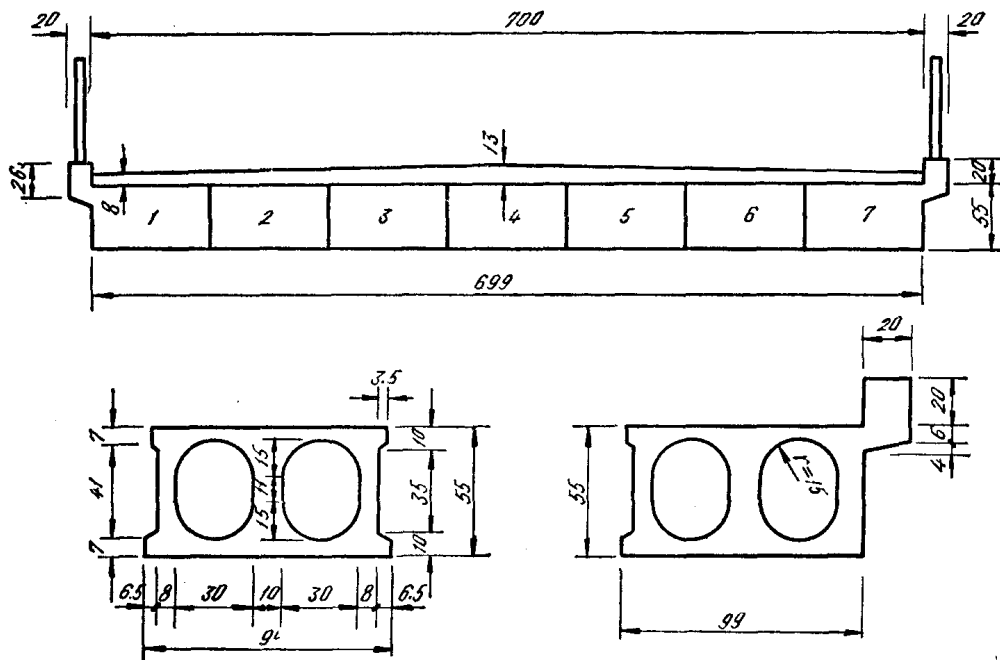


图 1-1  
尺寸单位：厘米

## 三、荷载横向分布系数的计算

设计本桥时，考虑有两类荷载，一是恒载，一是活载。前者又有先加的和后加的区别。所谓先加恒载，就是各空心板联结成整体之前所加的恒载（如板自重和桥面铺装）。这部分恒载将由各空心板分别承担。至于后加恒载（如栏杆），则需要按荷载横向分布的原理，分配给各板。为此，本节先求各种荷载的荷载横向分布系数，然后再求恒载和活载在空心板中产生的最大内力。

荷载横向分布系数有跨中的（ $m_c$ ）和支点的（ $m'_c$ ）两种。计算弯矩 $M$ 时，只需考虑跨中横向分布系数 $m_c$ ；而在计算剪力 $Q$ （特别是支点剪力 $m_{\max}Q$ ）时，应考虑荷载横向分布系数沿桥跨方向的变化（图1-2），其变化规律可见图1-2 b），或按习惯采用图1-2 c）。

跨中荷载横向分布系数 $m_c$ 的计算，在本示例中，采用铰接板法，先求出参数 $\gamma$ ，然后查出荷载横向分布影响线坐标值，最后算出各种荷载的 $m_c$ 值。

### 1. 求参数 $\gamma$ 值

按教材式（2-6-18）

$$\gamma = 5.8 \cdot \frac{I}{I_T} \cdot \left( \frac{b}{l} \right)^2$$

式中:  $b$ ——为邻近两铰中到中的距离, 等于  
 $99+1$ (联结缝宽度)=100厘米;  
 $l$ ——为主梁计算跨径, 等于970厘米;  
 $I$ ——为板横截面(包括全部混凝土,  
 但不计钢筋截面积)对中性轴的  
 惯性矩(图1-3);

$I_T$ ——为板横截面抗扭惯矩(图1-4)。

在计算  $I$  时, 由于截面特征对计算  $m_c$  的精度影响不大, 可以近似地认为截面上下对称, 且上面的尺寸和下面的相同。其中性轴在半高(55/2厘米)的位置上。估计这种简化计算误差很小。

$$I \cong \frac{BH^3}{12} - 2 \times \frac{d \cdot c^3}{12} - 2 \left( \frac{\pi d^4}{64} + \frac{c \cdot d^3}{6} + \frac{\pi \cdot c^2 \cdot d^2}{16} \right) - 2 \cdot \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$= \frac{99 \times 55^3}{12} - 2 \cdot \frac{30 \times 11^3}{12} - 2 \cdot \left( \frac{\pi \times 30^4}{64} + \frac{11 \times 30^3}{6} + \frac{\pi \times 11^2 \times 30^2}{16} \right) - 2 \cdot \frac{6.5 \times 35^3}{12}$$

$$= 10.98 \cdot 10^6 \text{ cm}^4$$

在计算  $I_T$  时, 可将截面简化为图1-4所示, 并忽略中间肋板按单箱进行。

按高等学校《桥梁工程》上册图2-6-13, 当  $b/t_1 = 78/7 = 11.14$  时,  $\alpha_1 = 0.315$ ; 当  $a/t_3 = 48/8 = 6$  时,  $\alpha_3 = 0.299$ 。

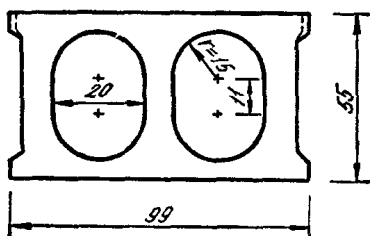


图 1-3  
尺寸单位: 厘米

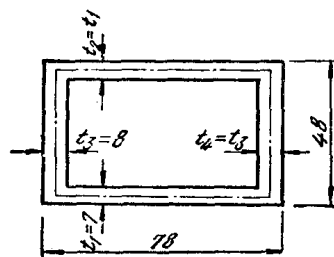


图 1-4  
尺寸单位: 厘米

$$I_T = \oint \frac{4A^2}{ds} + \sum \alpha_i \cdot b_i \cdot t_i^3, \text{ 而}$$

$$\oint \frac{4A^2}{ds} = \frac{4a^2 \cdot b^2}{2 \cdot \frac{b}{t_1} + 2 \cdot \frac{a}{t_3}} = \frac{4 \times 48^2 \times 78^2}{2 \times \frac{78}{7} + 2 \times \frac{48}{8}} = 16.35 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

及

$$\sum \alpha_i \cdot b_i \cdot t_i^3 = 2 \times 0.315 \times 78 \times 7^3 + 2 \times 0.299 \times 48 \times 8^3$$

$$= 0.32 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

$$\therefore I_T = (16.35 + 0.32) \cdot 10^5 = 16.67 \cdot 10^5 \text{ cm}^4$$

$$\text{最后 } \gamma = 5.8 \times \frac{10.98}{16.67} \times \frac{100^2}{970^2} = 0.0405$$

## 2. 荷载横向分布影响线

按《公路桥梁荷载横向分布计算》213~214页, 查出七块板铰接桥梁的荷载横向分布影响线, 并根据  $\gamma = 0.0405$  求出内插值如下表:

表1-1

| 板块号 | 荷载作用点(板块中心) |       |       |       |       |       |       | 校核    |
|-----|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 1           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |       |
| 1   | 0.310       | 0.236 | 0.159 | 0.109 | 0.078 | 0.059 | 0.051 | 1.002 |
| 2   | 0.236       | 0.233 | 0.185 | 0.127 | 0.091 | 0.069 | 0.059 | 1.000 |
| 4   | 0.109       | 0.127 | 0.167 | 0.193 | 0.167 | 0.127 | 0.109 | 0.999 |

在板块2和4之间, 板块3的荷载横向分布系数一般不起控制设计作用; 所以, 《公路桥梁荷载横向分布计算》一书中没有列出其影响线坐标值。

### 3. 荷载横向分布系数 $m_c$ 和 $m'_c$

图 1-5 示出板块 1、2、4 的荷载横向分布影响线, 及其对各板的荷载最不利的位置与相应轮重下的影响线坐标。对于板块 1 和 2, 轮重宜尽量按《桥规》规定的最小距离靠近缘石; 对于板块 4, 因影响线为凸曲线, 最好有一列荷载布置在影响线坐标值最大的位置上, 以便取得最大的  $m_c$  值。

各种荷载横向分布系数  $m_c$ , 计算列于表 1-2 中。

由表 1-2 可见, 板块 4 的  $m_c$  最小, 不控制设计。

支点截面荷载横向分布系数  $m'_c$  采用杠杆法求得 (图 1-6), 荷载布置采用最大值。

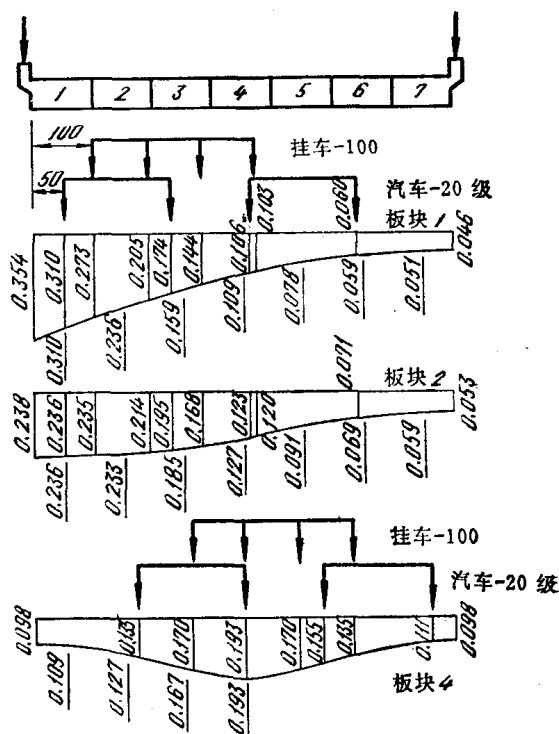


图 1-5  
尺寸单位: 厘米

表1-2

| 荷载种类<br>板号 | $M_{c\text{汽车-20级}}$ (两行)                            | $m_{c\text{挂车100}}$                                  | $m_{c\text{栏}}$         |
|------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1          | $\frac{1}{2}(0.310 + 0.174 + 0.106 + 0.060) = 0.325$ | $\frac{1}{4}(0.273 + 0.205 + 0.144 + 0.103) = 0.181$ | $0.354 + 0.046 = 0.4$   |
| 2          | $\frac{1}{2}(0.236 + 0.195 + 0.123 + 0.071) = 0.312$ | $\frac{1}{4}(0.235 + 0.214 + 0.168 + 0.120) = 0.184$ | $0.238 + 0.053 = 0.291$ |
| 4          | $\frac{1}{2}(0.135 + 0.193 + 0.155 + 0.111) = 0.297$ | $\frac{1}{4}(0.170 + 0.193 + 0.170 + 0.135) = 0.167$ | $0.098 + 0.098 = 0.196$ |

$$m'_{c\text{汽}} = \frac{1}{2} \times 1.00 = 0.5$$

$$m'_{c\text{挂}} = \frac{1}{4}(1 + 0.1 + 0.1) = 0.3$$

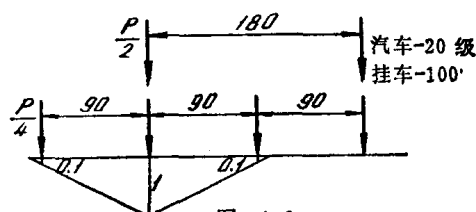


图 1-6  
尺寸单位: 厘米

## 四、内力计算

### (一)恒载内力 (先加恒载)

#### 1. 恒载估算

按图1-1所给尺寸估算恒载, 列于表1-3。板的容重采用  $2.5\text{t/m}^3$  ( $24.5\text{kN/m}^3$ ), 铺装层和铰  $2.4\text{t/m}^3$  ( $23.5\text{kN/m}^3$ )。

表1-3

| 项 目                    | 序 号                         | 重 量                                                                                                                                                                                                                                                |                             |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                        |                             | 按 公 制<br>(tf/m)                                                                                                                                                                                                                                    | 按国际单位制<br>(kN/m)            |
| 预制中板<br>$g_1$          | (1)                         | $[0.99 \times 0.55 - 2 \times 3.14 \times 0.15^2 - 2 \times 0.11 \times 0.3 - 2 \times 0.45 \times 0.03 - 2 \times 0.38 \times 0.035] \times 2.5 = (0.5445 - 0.1413 - 0.066 - 0.027 - 0.027) \times 2.5 = 0.2836 \times 2.5 = 0.709$               | $0.2836 \times 24.5 = 6.95$ |
| 预制边板<br>$g_1'$         | (2)                         | $[0.995 \times 0.55 - 2 \times 3.14 \times 0.15^2 - 2 \times 0.11 \times 0.3 - 0.027 + \frac{1}{2}(0.06 + 0.1) \times 0.2 + 0.2 \times 0.2] \times 2.5 = [0.5473 - 0.1413 - 0.066 - 0.027 + 0.016 + 0.040] \times 2.5 = 0.3690 \times 2.5 = 0.922$ | $0.3690 \times 24.5 = 9.04$ |
| 桥面铺装<br>(中板)<br>$g_2$  | (3)                         | $\frac{1}{2}(0.094 + 0.109) \times 2.4 = 0.1015 \times 2.4 = 0.244$                                                                                                                                                                                | $0.1015 \times 23.5 = 2.39$ |
| 桥面铺装<br>(边板)<br>$g_2'$ | (4)                         | $\frac{1}{2}(0.080 + 0.094) \times 2.4 = 0.087 \times 2.4 = 0.209$                                                                                                                                                                                 | $0.087 \times 23.5 = 2.04$  |
| 铰 缝<br>$g_3$           | (5)                         | $(0.027 + 0.027) \times 2.4 = 0.054 \times 2.4 = 0.130$                                                                                                                                                                                            | $0.054 \times 23.5 = 1.27$  |
| 中板恒载<br>$g$            | (1) + (3) + (5)             | 1.083                                                                                                                                                                                                                                              | 10.61                       |
| 边板恒载<br>$g'$           | (2) + (4) + $\frac{(5)}{2}$ | 1.196                                                                                                                                                                                                                                              | 11.72                       |

10米预制板吊装重量

中板  $0.709 \times 10 = 7.09\text{tf}$  (69.48kN)

边板  $0.922 \times 10 = 9.22\text{tf}$  (90.37kN)

2. 恒载内力计算  $l_p = 9.70\text{m}$  (见表1-4)

表1-4

| 单<br>位<br>制 | $g$          | 弯 矩 $M$                            |                                     | 剪 力 $Q$                         |              |
|-------------|--------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------|
|             |              | $M_{0..s,l} = \frac{1}{8} g l_p^2$ | $M_{0..s,l} = \frac{3}{32} g l_p^2$ | $Q_0 = \frac{1}{2} g \cdot l_p$ | $Q_{0..s,l}$ |
| 公<br>制      | 中板 1.083t/m  | 12.74t·m                           | 9.55t·m                             | 5.25t                           | 0            |
|             | 边板 1.196t/m  | 14.07t·m                           | 10.55t·m                            | 5.80t                           | 0            |
| 国<br>际<br>制 | 中板 10.61kN/m | 124.8kN·m                          | 93.59kN·m                           | 51.5kN                          | 0            |
|             | 边板 11.72kN/m | 137.8kN·m                          | 103.4kN·m                           | 56.8kN                          | 0            |

### (二)活载内力计算

#### 1. 弯矩计算

##### 1) 汽车-20级产生的弯矩

## 计算公式

$$M_{汽-20} = (1 + \mu) m_{c汽} \cdot q_{汽} \cdot \phi \cdot \omega$$

式中:  $1 + \mu$ ——冲击系数, 其值为  $1 + \frac{0.3}{40} (45 - 9.7) = 1.265$

$m_{c汽}$ ——横向分布系数, 对中板0.312, 边板0.325

$q_{汽}$ ——一列汽车-20级的等代荷载, 对跨中弯矩 4.42tf/m (43.4kN/m), 对四分点弯矩 4.76tf/m (46.66kN/m)

$\omega$ ——弯矩影响线面积;

$\phi$ ——考虑两行汽车-20级的折减系数,  $\phi = 0.9$ 。

现列表计算如下:

表1-5

| 单位制   | 计算位置  | $q_{汽}$   | $\omega$<br>( $m^2$ )                                   | $M_{汽-20}$ |           |
|-------|-------|-----------|---------------------------------------------------------|------------|-----------|
|       |       |           |                                                         | 中 板        | 边 板       |
| 公 制   | 跨 中   | 4.42tf/m  | $\frac{1}{8} l_p^2 = \frac{1}{8} \times 9.7^2 = 11.76$  | 18.46tf·m  | 19.23tf·m |
|       | 四 分 点 | 4.76tf/m  | $\frac{3}{32} l_p^2 = \frac{3}{32} \times 9.7^2 = 8.82$ | 14.91tf·m  | 15.53tf·m |
| 国 际 制 | 跨 中   | 43.40kN/m | 11.76                                                   | 181.3kN·m  | 188.8kN·m |
|       | 四 分 点 | 46.66kN/m | 8.82                                                    | 146.2kN·m  | 152.2kN·m |

## 2) 挂车-100产生的弯矩

### 计算公式

$$M_{挂-100} = m_{c挂} \cdot q_{挂} \cdot \omega$$

式中:  $m_{c挂}$ ——横向分布系数, 对中板0.184, 边板0.181, 由于两者在数值上差别不大, 故取用同一数值, 即  $m_{c挂} = 0.184$ , 偏安全。

$q_{挂}$ ——挂车-100的等代荷载, 对跨中弯矩为 9.94t/m (97.5kN/m), 对四分点 11.53tf/m (113.1kN/m)

对中板和边板

$$M_{挂0.5l} = 0.184 \times 9.94 \times 11.76 = 21.51tf \cdot m (211kN \cdot m)$$

$$M_{挂0.25l} = 0.184 \times 11.53 \times 8.82 = 18.71tf \cdot m (183.5kN \cdot m)$$

## 2. 剪力计算

### 1) 跨中剪力

#### 计算公式

$$Q_{汽} = (1 + \mu) \phi \sum m_{c汽} \cdot P_i \cdot \eta_i$$

$$Q_{挂} = \sum m_{c挂} \cdot P_i \cdot \eta_i$$

式中:  $P$ ——轮轴重;

$\eta$ ——与  $P$  相对应的剪力影响线坐标值 (图1-7);

$m_c$ ——荷载横向分布系数。

汽车荷载

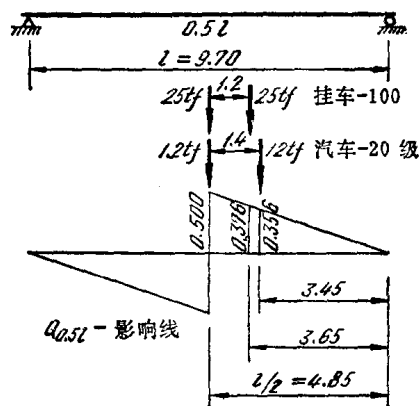


图 1-7

尺寸单位, 米

对中板  $Q_{汽} = 1.265 \times 0.9 \times (12 \times 0.5 + 12 \times 0.356) \times 0.312$   
 $= 3.65 \text{tf} \quad (35.8 \text{kN})$

对边板  $Q_{汽} = 1.265 \times 0.9 \times 12 \times 0.856 \times 0.325$   
 $= 3.80 \text{tf} \quad (37.3 \text{kN})$

挂车荷载

对中板和边板  $Q_{挂} = 25 \times (0.5 + 0.376) \times 0.184 = 4.03 \text{tf} \quad (39.5 \text{kN})$

2) 支点剪力

计算支点剪力时, 应考虑荷载横向分布系数沿桥跨方向的变化, 图 1-8 表示荷载位置及相应的  $\eta$  和  $m_c$  座标值。

汽车荷载

中板  $Q_{汽} = 1.265 \times 0.9 (12 \times 1 \times 0.5 + 12 \times 0.856 \times 0.391 + 6 \times 0.443 \times 0.312)$   
 $= 1.1385 (6 + 4.02 + 0.83) = 12.35 \text{tf} \quad (121.1 \text{kN})$

边板  $Q_{汽} = 1.265 \times 0.9 (6 + 0.856 \times 12 \times 0.399 + 6 \times 0.443 \times 0.325)$   
 $= 1.1385 (6 + 4.10 + 0.86) = 12.48 \text{tf} \quad (122.4 \text{kN})$

挂车荷载

中板和边板  $Q_{挂} = 25 (1 \times 0.3 + 0.876 \times 0.243 + 0.464 \times 0.184 + 0.340 \times 0.184)$   
 $= 25 (0.3 + 0.213 + 0.085 + 0.063) = 25 \times 0.661$   
 $= 16.52 \text{tf} \quad (162.1 \text{kN})$

(三) 后加恒载——栏杆

单侧栏杆  $q = 0.1 \text{t/m} \quad (0.98 \text{kN/m})$

1. 弯矩计算

跨中 对中板  $M_{栏} = \frac{1}{8} \times 0.1 \times 9.7^2 \times 0.291$   
 $= 0.342 \text{tf} \cdot \text{m} \quad (3.36 \text{kN} \cdot \text{m})$

对边板  $M_{栏} = \frac{1}{8} \times 0.1 \times 9.7^2 \times 0.40$   
 $= 0.47 \text{tf} \cdot \text{m} \quad (4.61 \text{kN} \cdot \text{m})$

四分点 对中板  $M_{栏} = \frac{3}{32} \times 0.1 \times 9.7^2 \times 0.291$   
 $= 0.257 \text{tf} \cdot \text{m} \quad (2.52 \text{kN} \cdot \text{m})$

$M_{栏} = \frac{3}{32} \times 0.1 \times 9.7^2 \times 0.40$   
 $= 0.353 \text{tf} \cdot \text{m} \quad (3.46 \text{kN} \cdot \text{m})$

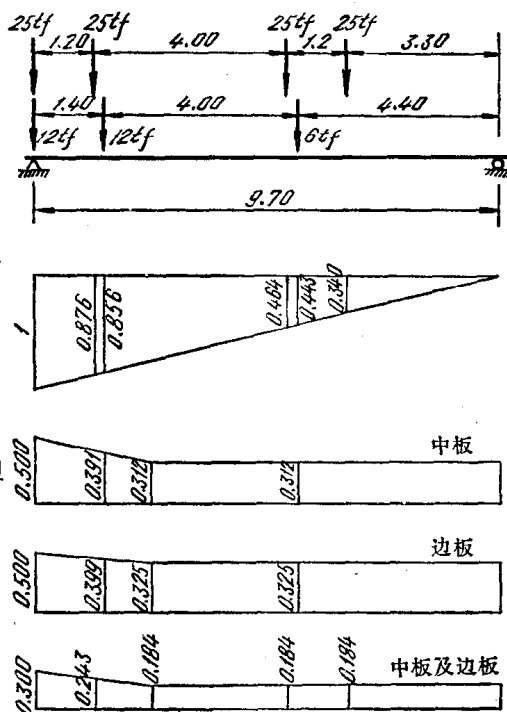


图 1-8

尺寸单位: 米

2. 剪力计算

跨中剪力为 0。

因为栏杆荷载很小, 且均布于全跨, 因此可粗略地考虑在支点处的荷载横向分布系数仍和跨中一样, 因此,

对于中板  $Q_0 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 9.7 \times 0.291 = 0.141 \text{tf} \quad (1.38 \text{kN})$

对于边板  $Q_0 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 9.7 \times 0.400 = 0.194\text{tf} \quad (1.90\text{kN})$

#### (四)内力汇总

表1-6

| 项 目                            | 板位<br>内 力 | 中 板                          |                               |                  |                       | 边 板                          |                               |                  |                       |
|--------------------------------|-----------|------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|
|                                |           | $M_{0.5l}$<br>t·m,<br>(kN·m) | $M_{0.25l}$<br>t·m,<br>(kN·m) | $Q_0$<br>t, (kN) | $Q_{0.5l}$<br>t, (kN) | $M_{0.5l}$<br>t·m,<br>(kN·m) | $M_{0.25l}$<br>t·m,<br>(kN·m) | $Q_0$<br>t, (kN) | $Q_{0.5l}$<br>t, (kN) |
| 先 加 恒 载                        | (1)       | 12.74<br>(124.8)             | 9.55<br>(93.6)                | 5.25<br>(51.5)   | 0<br>0                | 14.07<br>(137.8)             | 10.55<br>(103.4)              | 5.80<br>(56.8)   | 0<br>0                |
| 汽车-20级                         | (2)       | 18.46<br>(181.3)             | 14.91<br>(146.2)              | 12.35<br>(121.1) | 3.65<br>(35.8)        | 19.23<br>(188.8)             | 15.53<br>(152.2)              | 12.48<br>(122.4) | 3.80<br>(37.3)        |
| 挂车-100                         | (3)       | 21.51<br>(211.0)             | 18.71<br>(183.5)              | 16.52<br>(162.1) | 4.03<br>(39.5)        | 21.51<br>(211.0)             | 18.71<br>(183.5)              | 16.52<br>(162.1) | 4.03<br>(39.5)        |
| 后 加 恒 载                        | (4)       | 0.34<br>(3.4)                | 0.26<br>(2.5)                 | 0.14<br>(1.4)    | 0<br>0                | 0.47<br>(4.6)                | 0.35<br>(3.5)                 | 0.19<br>(1.9)    | 0<br>0                |
| (1) + (2) + (4)                | (5)       | 31.54<br>(309.5)             | 24.72<br>(242.3)              | 17.74<br>(174.0) | 3.65<br>(35.8)        | 33.77<br>(331.2)             | 26.43<br>(259.1)              | 18.47<br>(181.1) | 3.80<br>(37.3)        |
| $\frac{(1) + (3) + (4)}{1.25}$ | (6)       | 27.67<br>(271.4)             | 22.82<br>(223.7)              | 17.53<br>(172.0) | 3.22<br>(31.7)        | 28.84<br>(282.7)             | 23.69<br>(232.3)              | 18.01<br>(176.6) | 3.22<br>(31.7)        |
| 控制设计值                          | (7)       | 31.54<br>(309.5)             | 24.72<br>(242.3)              | 17.74<br>(174.0) | 3.65<br>(35.8)        | 33.77<br>(331.2)             | 26.43<br>(259.1)              | 18.47<br>(181.1) | 3.80<br>(37.3)        |

注: 1.表中( )中的数值为国际单位制计算结果;

2.第(6)行中除1.25, 表示用附加组合计算时, 混凝土和钢筋的容许应力可提高25%。

## 五、钢筋估算和正应力验算

最大设计弯矩  $M_{0.5l} = 33.77\text{tf} \cdot \text{m} \quad (331.2\text{kN} \cdot \text{m})$

$M_{0.25l} = 26.43\text{tf} \cdot \text{m} \quad (259.1\text{kN} \cdot \text{m})$

估计钢筋截面积, 是一种粗略的计算, 所以, 可以把7厘米厚的桥面板作为整个混凝土的抗压区域, 而忽略其它应力较小部分的抗压作用。

尽管我们所设计的是“空心板”梁桥, 但就其工作性能而言是属于梁的结构, 因此, 钢筋的布置, 要符合《桥规》有关梁的构造要求, 梁内主钢筋至梁底面的净距应不小于3厘米。现初设钢筋直径为 $\Phi 20$  (外径22毫米), 则主筋中心离梁底面的距离为4.1cm, 梁的有效高度为 $55 - 4.1 = 50.9\text{cm}$ 。所以, 内力矩臂长 $z$ 为

$$z = h_0 - 7.00/2 = 50.9 - 3.5 = 47.4\text{cm}$$

跨中所要求钢筋截面积为

$$A_g = \frac{M_{0.5l}}{[\sigma_g] \cdot z} = \frac{3377000}{1850 \times 47.4} = 38.51\text{cm}^2$$

选用6 $\Phi 22$ 和5 $\Phi 20$

$$A_g = 22.81 + 15.70 = 38.51\text{cm}^2 \quad (\text{与要求刚好符合})。$$

1/4跨处所要求的钢筋截面积为

$$38.51 \times \frac{M_{0.25l}}{M_{0.5l}} = 38.51 \times \frac{26.43}{33.77} = 30.14\text{cm}^2$$

考虑在1/4跨处已有两根Φ22的钢筋弯起, 余下钢筋截面积为  $15.20 + 15.70 = 30.70 > 30.14\text{cm}^2$ , 故与要求符合, 但需进一步验算。

按《桥规》所规定的主筋间距的要求, 上面所选用的钢筋数量, 可以布置在一层。因此, 实际钢筋中心至梁底的距离为  $3.0 + 2.4/2 = 4.20\text{cm}$ , 而梁的实际有效高度为  $55 - 4.2 = 50.80\text{cm}$ 。

在应力验算时, 换算截面中性轴的位置务求正确, 但是, 板的受压翼缘的形状特殊, 准确的计算是繁琐的。因此, 我们采用近似计算方法。

初设截面由7cm厚的桥面板和钢筋组成, 其中性轴离上翼缘的距离, 很容易按下式计算出来。

设  $t$  为板厚, 则

$$x = \frac{nA_g \cdot h_0 + bt^2/2}{nA_g + bt} = \frac{385.1 \times 50.8 + 93 \times 7^2/2}{385.1 + 93 \times 7} \\ = \frac{19563 + 2279}{385.1 + 651} = \frac{21842}{1036} = 21.08\text{cm}$$

这个结果显然是粗糙的, 但离精确位置不可能很远。现在我们可以把  $x = 21.08\text{cm}$  范围内的肋板截面积  $(8 + 8 + 10)(21.08 - 7) = 366\text{cm}^2$  考虑进去, 其对板上缘增加的静矩  $\Delta S$  为  $366 \times (21.08 + 7)/2 = 5139\text{cm}^3$ , 因此

$$x = \frac{21842 + \Delta S}{1036 + \Delta F} = \frac{21842 + 5139}{1036 + 366} = \frac{26981}{1403} = 19.24\text{cm}$$

在计算的中和轴位置变动不大时, 截面的计算惯性矩  $I$  的变动可以忽略。但是对抗弯模量  $W$  来说, 变动并不很小。当  $x = 21.08\text{cm}$  时, 混凝土的压应力比  $x = 19.24\text{cm}$  大10%左右, 相反, 钢筋应力却小6%左右。然而,  $x = 19.24\text{cm}$  仍是一个近似值。

除了7cm厚的桥面板和厚度为  $8 + 8 + 10\text{cm}$  的板肋外, 还可以把其余的截面积考虑进去。这些面积一方面离中和轴近, 抗压作用不大; 另一方面形状复杂而计算繁琐。所以, 可在方格图纸上直观地将曲边三角形当作边长为9cm的直角三角形(图1-9)。这样, 受压区域增加的截面积  $\Delta F = 2 \times 3 \times 3.5/2 + 4 \times 9^2/2 = 10.5 + 162 = 172.6\text{cm}^2$ , 对板上缘所增加的静矩  $\Delta S = 10.5 \times 8 + 162 \times 10 = 84 + 1620 = 1704\text{cm}^3$ 。当取  $x = 19.24\text{cm}$ , 板面积为  $26(19.24 - 7) = 318$ , 对上缘的静矩  $318 \times 13.12 = 4172\text{cm}^3$ 。

因此

$$x \approx \frac{21842 + 4172 + 1704}{1036 + 318 + 172.5} = \frac{27718}{1526.5} = 18.16 \approx 18.2$$

按曲边三角形计算面积和静矩所得到的  $x = 18.0\text{cm}$ 。可见上述结果已达到相当精确的程度, 应力误差不超过1%。

中和轴的位置尽可能精确一些, 如果按有些计算书计算到  $x = 21.1\text{cm}$  为止, 其混凝土应力的计算误差达17%, 而钢筋应力的计算误差达-10%。如果计算到  $x = 19.24\text{cm}$  为止, 两者应力的计算误差也分别有+7%和-4%。

当  $x = 18.2\text{cm}$  求出后, 可按表1-7计算换算截面惯性矩  $I$ 。

钢筋应力

$$\sigma_s = n \cdot \frac{M \times 32.6}{J} = \frac{10 \times 3377000 \times 32.6}{577500} = 1906\text{kgf/cm}^2 \quad (187 \cdot 10^3 \cdot \text{kPa})$$

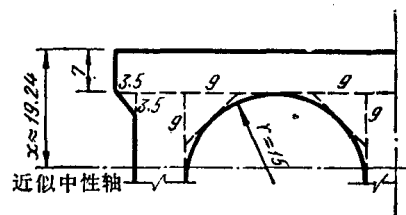


图 1-9  
尺寸单位: 厘米

表1-7

| 项 目                | 换算截面积 $A_i$<br>( $\text{cm}^2$ ) | 换算截面对中和轴距<br>$x_i$<br>( $\text{cm}$ ) | $x_i^3$<br>( $\text{cm}^3$ ) | $A_i$ 对本截面形心的<br>惯性矩 $I_{oi}$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $A_i \cdot x_i^2$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $A_i$ 对中和轴之<br>惯性矩 $I_{oi}$<br>( $\text{cm}^4$ ) |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 钢 筋                | 385.1                            | $50.8 - 18.2 = 32.6$                  | 1063                         | $\approx 0$                                        | 409360                                 | 409360                                           |
| 7cm桥面板             | 651                              | $18.2 - 3.5 = 14.7$                   | 216                          | $\frac{1}{12} \times 93 \times 7^3 = 2658$         | 104620                                 | 143280                                           |
| (8+8+10)<br>cm宽的板肋 | $26 \times 11.2 = 291$           | $11.2/2 = 5.6$                        | 31.4                         | $\frac{1}{12} \times 26 \times 11.2^3 = 3044$      | 9140                                   | 12180                                            |
| 小三角形<br>(二块)       | 10.5                             | $18.2 - 8 = 10.2$                     | 104                          | $\approx 0$                                        | 1090                                   | 1090                                             |
| 曲边三角形<br>(四块)      | 162                              | $18.2 - 10 = 8.2$                     | 67.2                         | $\frac{4}{36} \times 9^4 = 729$                    | 10890                                  | 11619                                            |

$$\Sigma I = 577500 \text{cm}^4$$

## 混凝土应力

$$\sigma = \frac{3377000 \times 18.2}{577500} = 106.4 \text{kgf/cm}^2 \quad (10.43 \cdot 10^3 \cdot \text{kPa})$$

计算表明,钢筋应力超过其容许值 $1850 \text{kg/cm}^2$  ( $181.4 \cdot 10^3 \text{kPa}$ ) 的 3.0%,按设计习惯,未超过5%者,勉强通过。而混凝土应力则未超过容许值 $130 \text{kgf/cm}^2$  ( $12.75 \cdot 10^3 \cdot \text{kPa}$ )。

四分跨处的应力验算,与上述相同。在此处已有2根22钢筋弯起。

中性轴位置,当仅考虑桥面板和钢筋截面积时,

$$x = \frac{307 \times 50.8 + 2279}{307 + 651} = \frac{17879}{958} = 18.7 \text{cm}$$

如将板肋考虑进去  $\Delta F = (18.7 - 7) \times 26 = 304 \text{cm}^2$

$$\Delta S = 304 \times 25.7/2 = 3910 \text{cm}^3$$

$$x = \frac{17879 + 3910}{958 + 304} = \frac{21789}{1262} = 17.27 \text{cm}$$

最后将其它面积考虑进去,  $\Delta F = 172.5 \text{cm}^2$ ,  $\Delta S = 1704 \text{cm}^3$ ,其时板肋面积为  $26 \times 10.27 = 267 \text{cm}^2$ , 静矩为  $267 \times 12.135 = 3240 \text{cm}^3$ , 因此

$$x = \frac{17879 + 3240 + 1704}{958 + 267 + 172.5} = \frac{22823}{1397.5} = 16.33 \text{cm}$$

换算截面惯性矩计算见表1-8。

表1-8

| 项 目           | 换算截面积<br>$A_i$ ( $\text{cm}^2$ ) | $x_i$<br>( $\text{cm}$ ) | $x_i^3$<br>( $\text{cm}^3$ ) | $I_{oi}$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $A_i x_i^2$<br>( $\text{cm}^4$ ) | $I_{oi}$<br>( $\text{cm}^4$ ) |
|---------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 钢 筋           | 307                              | $50.8 - 16.33 = 34.47$   | 1188                         | $\approx 0$                   | 364716                           | 364716                        |
| 桥 面 板         | 651                              | $16.33 - 3.5 = 12.83$    | 165                          | 2658                          | 107420                           | 110080                        |
| 板 肋           | $26 \times 9.33 = 243$           | 4.67                     | 21.8                         | 1760                          | 5300                             | 7050                          |
| 小三角形<br>(二块)  | 10.5                             | $16.33 - 8 = 8.33$       | 69.4                         | $\approx 0$                   | 730                              | 730                           |
| 曲边三角形<br>(四块) | 162                              | $16.33 - 10 = 6.33$      | 40.1                         | 1090                          | 6500                             | 7590                          |

$$\Sigma I = 490200 \text{cm}^4$$

## 钢筋应力

$$\sigma_s = \frac{10 \times 2643000 \times 34.47}{490200} = 1858 \text{ kgf/cm}^2 \quad (182.1 \cdot 10^3 \text{ kPa})$$

## 混凝土应力

$$\sigma = \frac{2643000 \times 16.33}{490200} = 88 \text{ kgf/cm}^2 \quad (8.63 \times 10^3 \cdot \text{kPa})$$

计算表明, 钢筋应力略有超过, 而混凝土应力远小于容许值。

## 六、剪应力验算

最大剪力 跨中 3.8tf (37.3kN)

支点 18.47tf (181.1kN)

在剪应力验算时, 板肋的厚度  $b$  应取中性轴以下 (受拉区) 最小的肋厚, 即  $b = 8 + 8 + 10 = 26 \text{ cm}$

### 1. 跨中截面的剪应力

跨中截面的换算惯矩  $I = 577500 \text{ cm}^4$ ,  $S = 385.1 \times 32.6 = 12554 \text{ cm}^3$ , 因此, 内力距的力臂长为

$$z = \frac{I}{S} = 577500 / 12554 = 46.00 \text{ cm}$$

剪应力  $\tau = 3800 / (26 \times 46.00) = 3.18 \text{ kgf/cm}^2$  (311kPa) 小于容许剪应力  $[\sigma_{s1}] = 8.5 \text{ kgf/cm}^2$  (833kPa)

### 2. 支点截面的剪应力

设支点截面保持有4Φ20的钢筋通过, 其钢筋截面积为  $12.56 \text{ cm}^2$ 。由于钢筋截面积减少, 中性轴将上升。初步估计中性轴的位置

$$x = \frac{125.6 \times 50.8 + 2279}{125.6 + 651} = \frac{8660}{776.6} = 11.15 \text{ cm}$$

已接近矩形截面中性轴的位置  $x = 10.46 \text{ cm}$  ( $\mu = 12.56 / 50.8 \times 93 = 0.266\%$ , 查表  $\alpha = 0.206$ ,  $x = 0.206 \times 50.8 = 10.46 \text{ cm}$ )。因此, 内力距的力臂长可以认为是

$$z = 50.8 - x/3 = 50.8 - 3.49 = 47.3 \text{ cm}$$

剪应力  $\tau = 18470 / (26 \times 47.3) = 15.02 \text{ kgf/cm}^2$  ( $1.472 \times 10^3 \cdot \text{kPa}$ ) 未超过容许值  $[\tau_{s1}] = 21 \text{ kgf/cm}^2$  ( $2.058 \times 10^3 \text{ kPa}$ )。

### 3. 应力图及其面积

剪应力图形如图1-10所示, 其总面积为

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} (15.02 + 3.18) \times 485 \\ &= 4414 \text{ kgf/cm} \quad (4324 \text{ kN/m}) \end{aligned}$$

现分配如下:

(1) 箍筋按构造设置时, 由混凝土承受部分  $a_1$ 。

按《桥规》规定, 该部分剪应力应不大于  $[\sigma_{s1}]/2 = 4.25 \text{ kgf/cm}^2$  ( $417 \times 10^3 \text{ kPa}$ ), 且  $a_1 \leq 0.2A = 882.8 \text{ kgf/cm}$  (865kN/m) 根据前一条件确定  $a_1$  范围。按三角形相似关系

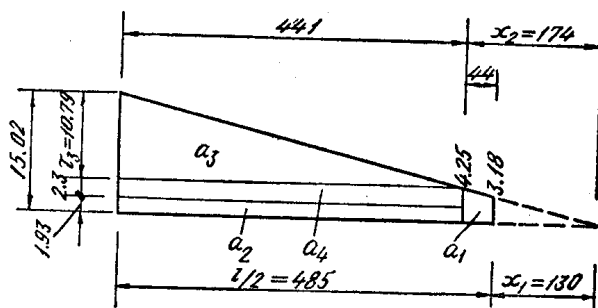


图 1-10

尺寸单位: 厘米

$$\frac{x_1}{3.18} = \frac{485}{15.02 - 3.18} = 40.96, \quad x_1 = 130.3 \text{ cm} \approx 130 \text{ cm}$$

当  $\tau = [\sigma_{x1}]/2 = 4.25$  时,

$$\frac{x_2}{4.25} = 40.96, \quad x_2 = 174.1 \text{ cm} \approx 174 \text{ cm}$$

故  $a_1$  沿跨径的长度为  $174.1 - 130.3 = 44 \text{ cm}$

$$a_1 = \frac{1}{2}(4.25 + 3.18) \times 44 = 163.5 \text{ kgf/cm} (160.2 \text{ kN/m}) < 0.2A$$

(2) 其它由混凝土承受部分  $a_2$

按《桥规》规定, 该部分应不大于  $0.2(A - a_1)$ 。其长度为  $485 - 44 = 441 \text{ cm}$ , 而  $0.2(A - a_1) = 0.2(4414 - 163.5) = 850.1 \text{ kg/cm} (834 \text{ kN/m})$ 。其时, 相当的剪应力值为  $850.1/441 = 1.93 \text{ kg/cm}^2 (189 \text{ kPa})$ 。

(3) 由斜筋承受部分  $a_3$

《桥规》规定, 该部分不小于  $0.7(A - a_1 - a_2) = 0.7(4414 - 163.5 - 850.1) = 2380 \text{ kgf/cm} (2331 \text{ kN/m})$

因为  $\frac{1}{2}(15.02 - 4.25) \times 441 = 2375 \text{ kg/cm} < 2380 \text{ kg/cm}$ , 故  $a_3$  为一梯形, 鉴于  $2375 \approx 2380$ , 故相应于  $a_3$  的支点剪应力为

$$\frac{1}{2}\tau_3 \cdot 441 = 2380 \quad \therefore \tau_3 = 10.79 \text{ kgf/cm}^2 (1.057 \cdot 10^3 \text{ kPa})$$

(4) 由箍筋承受部分  $a_4$

《桥规》规定,  $a_4 = 4414 - (a_1 + a_2 + a_3) = 4414 - (163.5 + 850.1 + 2380) = 1020.4 \text{ kg/cm} (998.8 \text{ kN/m})$

4. 斜筋和箍筋

$$a_3 = 2380 \text{ kgf/cm} (2331 \text{ kN/m})$$

要求斜筋截面积

$$A_g = 2380 \times 26 / 1850 \times \sqrt{2} = 23.66 \text{ cm}^2$$

按国际单位制计算

$$A_g = 233.1 \times 10^3 \times 26 / (181.4 \times 10^3 \times \sqrt{2}) = 23.63 \text{ cm}^2$$

现有6 $\Phi$ 22和1 $\Phi$ 20的主筋弯起, 其截面积为  $22.81 + 3.14 = 25.95 \text{ cm}^2$ 。尽管总的斜筋截面积足够, 但考虑到《桥规》有关斜筋的构造要求, 故仍需设置若干附加斜筋和两次弯起的主钢筋。关于斜筋布置从略。

设采用4支 $\Phi 8@30 \text{ cm}$ 的箍筋,  $A_g = 2.01 \text{ cm}^2$ , 则能承受剪应力  $2.01 \times 1350 / (30 \times 26) = 3.48 \text{ kgf/cm}^2 [341 \cdot 10^3 \text{ kPa}]$ 。在441cm范围内所能承受的剪力为  $3.48 \times 441 = 1535 \text{ kg/cm}$ , 大于  $a_4 (= 1020.4 \text{ kgf/cm})$ , 故可用。

## 七、分布钢筋

《桥规》规定, 桥面板内垂直于主筋的分布钢筋, 其截面积在单位长度上不少于单位长度上主筋截面积的15%。在所有主钢筋的弯折处, 均应设置分布钢筋。在受力钢筋直线段