

# 掩护式液压支架掩护梁扭转 强度分析\*

王本瑞      吴关轩      魏平西  
(郑州工学院)      (郑州煤矿机械厂)

**摘 要:** 本文从空间受力出发,研究了顶梁、掩护梁、前连杆及后连杆在图1所示荷载情况下的受力和变形,解决了掩护梁的外力矩计算及扭矩的分布问题。最后,以JY<sub>320</sub>掩护式液压支架掩护梁为例,做了数值计算,其结果与实验值对比符合较好。

**关键词:** 掩护梁, 扭转强度,

实际使用中发现,液压支架的掩护梁破坏较为严重,并以顶梁偏载,掩护梁受扭的工况最恶劣。关于掩护梁的扭转计算,通常是把荷载简化到支架的对称平面内进行强度计算,并以适当增加安全系数的办法进行结构设计。这样的计算方法与实际工况不符,安全系数的选取又常具有片面性。为此,我们从偏载工况的实际受力出发,找出了外力矩的计算公式。但是,掩护梁是多箱式变截面的薄壁静不定结构,在研究扭矩的分布规律时,须考虑变形。为了计算方便,引出等效常数的概念,结合弹性力学的薄膜比拟法,找出了等效常数及截面剪力流的计算公式。从而得出了掩护梁扭矩的分布规律。本文以郑州煤矿机械厂生产的JY<sub>320</sub>两柱掩护式液压支架掩护梁为例,做了数值计算,求出了各截面的剪力流,并且与实验结果对比,符合程度较好,说明提出的计算方法是合理的。

## 1 基本理论

### 1.1 掩护梁承受的外力偶矩

根据实际考察,顶梁偏心加载的实验条件对掩护梁最不利,就以此种工况计算掩护梁的外力矩。顶梁的受力分析及其结构尺寸,如图1所示。已知两个液压立柱的内压 $R''$ 和平衡千斤顶的内压力 $P$ ,偏心加载合力 $R$ 的大小及作用位置未知。

由顶梁的平衡条件,求得:

$$\begin{aligned} N_1 &= R'' \cos E_1 + 0.5P_1, & N_2 &= R'' \sin E_1 + 0.5P_2 \\ N_3 &= -R'' \cos E_1 - 0.5P_1 + R, & N_4 &= -R'' \sin E_1 - 0.5P_2 + R \end{aligned}$$

\* 收稿日期: 1989.05.18

式中:  $\mu = 0.15$  (摩擦系数), 这里的  $N_3$ 、 $N_4$  仍为未知, 为此研究掩护梁的平衡。

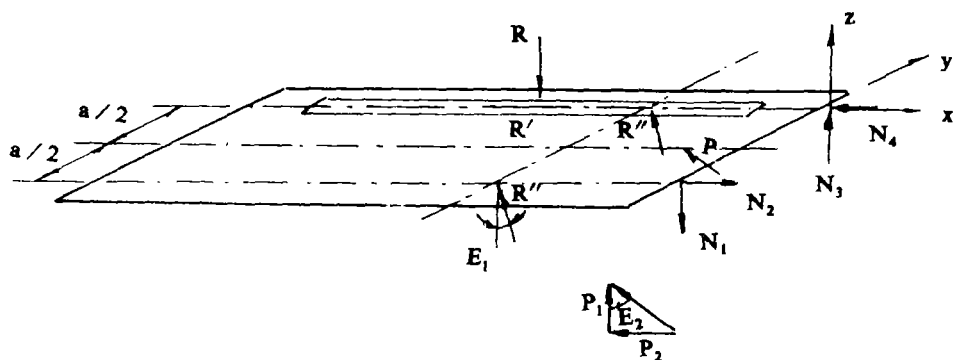


图1 顶梁偏载工况

掩护梁的尺寸及受力情况, 如图2(a)所示。图中EFD'为掩护梁的中面, 中面到上盖板中线的距离为  $f$ 。C、D为前、后连杆与掩护梁的交点,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 为前、后连杆的轴力, 将各轴力的作用线延长, 得交点I和J。由于掩护梁、前后连杆均为对称, 所以交点I、J的连线IJ与y轴平行。线段IJ到中面的距离为  $IG'$ , 设  $IG' = h_1$ ,  $IG - h_1 = h_1'$ ,  $G'A' = c$ ,  $BF = h_1''$ 。另外, H点为平衡千斤顶与掩护梁的交点, 该点到上盖板中线的距离为  $g$ , H'点为H点在中面EF上的投影。

在图2(b)中:

$$\left. \begin{aligned} \angle IAB &= PM + E_3 \\ \angle IBA &= 180^\circ - PM - E_4 \\ \therefore \angle AIB &= 180^\circ - \angle IAB - \angle IBA \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由三角关系得:

$$\left. \begin{aligned} AB &= d / \cos \delta \\ IA &= AB \sin \angle IBA / \sin \angle AIB \\ IG' &= IG - h_1' = IA \sin(\angle IAB - \delta) - h_1' \\ c &= IA \cos(\angle IAB - \delta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

把图2(a)中所有的力对IJ轴取力矩, 并令其各为零, 得:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{[(l_1 + \mu h_1) \cos \beta + (h_1 - \mu l_1) \sin \beta]} \times \{ [b \cos \beta - (g - f) \sin \beta] P_1 \\ &\quad + [-b \sin \beta - (g - f) \cos \beta] P_2 + 2R'' \cos E_1 (l_1 \cos \beta + h_1 \sin \beta) \\ &\quad + 2R'' \sin E_1 (h_1 \cos \beta - l_1 \sin \beta) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $l_1 = b + c + e$ ;  $l_2 = c + e$ ;  $h_1 = IG'$ ;  $h_2 = h_1 + g - f$ 。

$$\text{掩护梁的外力偶矩: } T_{KP} = \frac{a}{2} R \cos \beta \quad (5)$$

## 1.2 掩护梁等效常数及剪力流的计算

把变截面多室箱形的掩护梁看成是分段等截面多室箱形的掩护梁, 如图3(a)所示。当

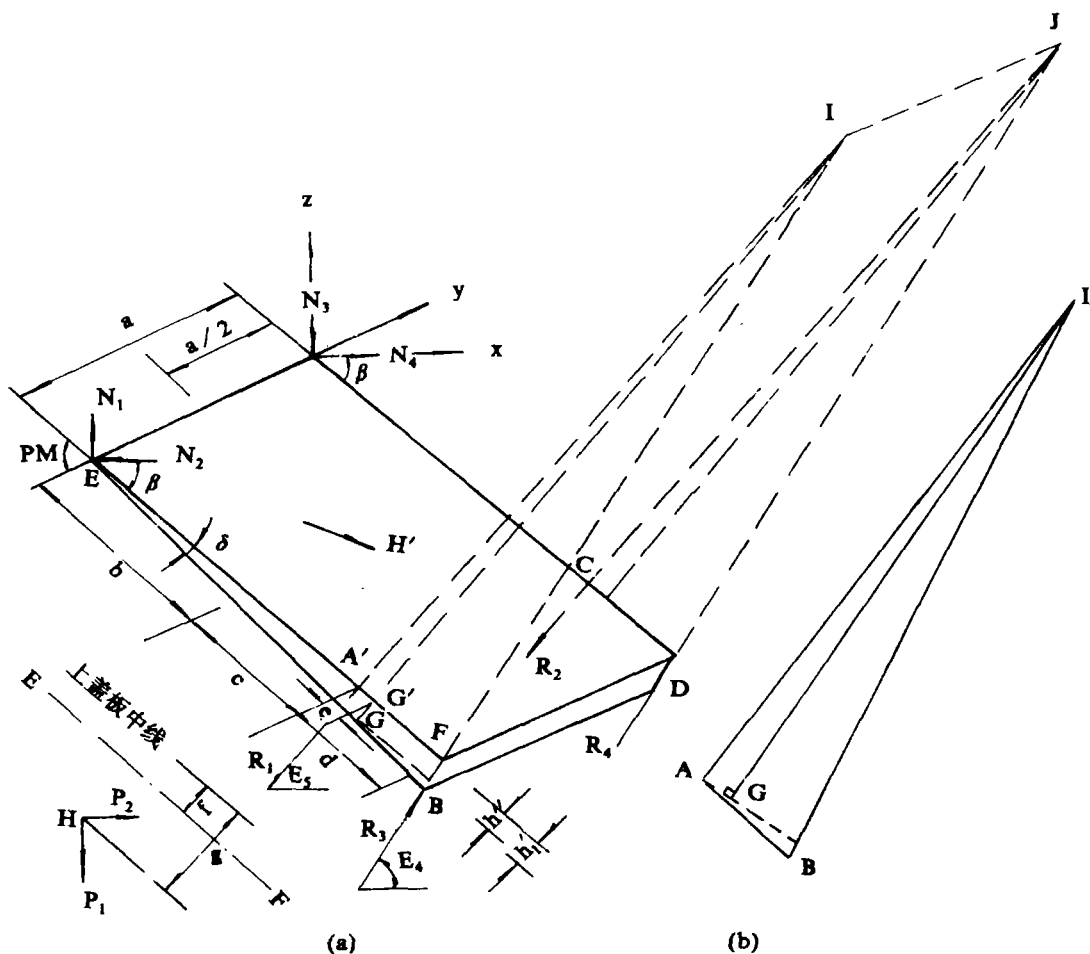


图2 掩护梁偏载工况

然分段愈多愈接近实际情况，愈精确。图3(b)为一等截面多室箱形掩护梁，其材料与图3(a)之梁相同，跨度 $l$ 等于图3(a)各段长度之和。若两梁在同一扭矩 $T$ 的作用下，自由段的扭转角相等，图3(b)就是图3(a)的等效系统。图3(b)之梁的扭转常数 $K^*$ ，即为图3(a)梁的等效扭转常数。其计算公式为：

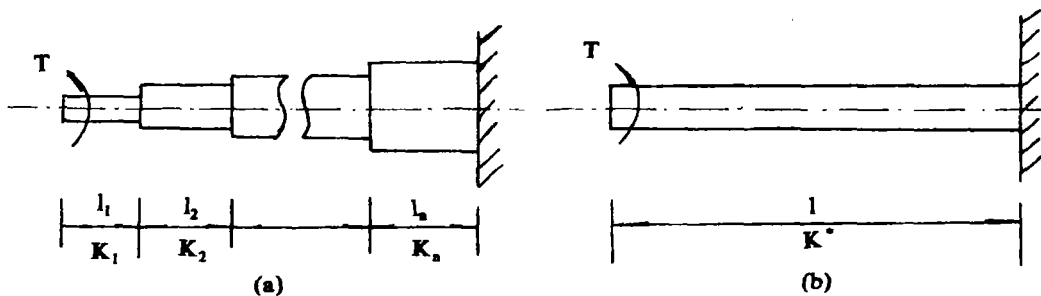


图3

$$K^* = \frac{l_1 + l_2 + \cdots + l_n}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2} + \cdots + \frac{l_n}{K_n}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i}} \quad (6)$$

式中的  $K_1$ 、 $K_2$ ... $K_n$  分别为各段的扭转常数。其数值根据薄膜与扭转构件的比拟关系计算。由弹性力学的薄膜比拟法可知薄膜的挠度函数  $W(x, y)$  就等于构件扭转时的应力函数  $\Phi(x, y)$ ; 薄膜在  $x$ 、 $y$  方向的斜率  $\frac{\partial W}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial W}{\partial y}$  分别等于扭转构件截面上  $x$ 、 $y$  方向的剪力  $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{xz}$ ; 薄膜鼓起的体积的 2 倍, 就等于构件的扭矩等关系, 可以推导出计算多室箱形薄壁构件纯扭的剪力流公式:

$$q_i \oint_{i, l} \frac{dS}{t} - \sum_k q_k \int_{i, k} \frac{dS}{t} = \frac{2T}{K_j} F_i \quad (7)$$

式中:  $T$ —扭矩;

$q_i$ —各室剪力流, ( $i=1, 2, \cdots, n$ );

$k$ —与  $i$  室相邻的室;

$F_i$ —各室截面壁厚中心线所围面积;

$\oint_{i, l} \frac{dS}{t}$ —沿各室壁厚中心线闭合积分;

$\int_{i, k} \frac{dS}{t}$ —沿  $i$  室与  $k$  室交线的积分;

$K_j$ —掩护梁各段的扭转常数, ( $j=1, 2, \cdots, m$ )。

公式(7)为  $n$  个线性方程, 从中解出  $n$  个室的剪力流  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $\cdots$ 、 $q_n$ 。具体计算时, 可先解出  $2T/K_j=1$  时的剪力流  $\bar{q}_i$ , 然后再求实际的剪力流  $q_i$  及截面的扭转常数  $K_j$ 。

$$q_i = \frac{2T}{K_j} \bar{q}_i \quad (8)$$

$$K_j = 4 \sum_{i=1}^n \bar{q}_i F_i \quad (9)$$

### 1.3 后连杆等效弯曲常数的计算

掩护梁扭转时, 后连杆的主要变形是弯曲变形。后连杆弯曲等效常数的计算方法与掩护梁等效扭转常数计算方法类似。只须把图 3(a)和 3(b), 看成后连杆的分段等截面多室箱形系统和等效系统。把图中扭矩  $T$  换成弯矩  $M$ , 各段的扭转常数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $\cdots$ 、 $K_n$  换成各段的弯曲常数 (惯性矩)  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $\cdots$ 、 $I_n$ , 最后把等效扭转常数  $K^*$  换成等效弯曲常数  $I^*$ , 经过与前面同样的分析, 即可得出后连杆等效弯曲常数的计算公式:

$$I^* = \frac{l_1 + l_2 + \cdots + l_n}{\frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2} + \cdots + \frac{l_n}{I_n}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i}} \quad (10)$$

### 1.4 掩护梁的扭转变形分析

由式(5)求得从顶梁到掩护梁的扭转力偶矩之后, 就可以进行掩护梁的变形分析, 图 4(a)为掩护梁的等效系统。如果前连杆非常刚硬 (刚度为无限大), 它就可以限制掩护梁

的转动, 承担全部扭矩, 后连杆承担的扭矩为零。反之, 如果前连杆的刚度很小, 则掩护梁的扭矩全部由后连杆承担。实际前、后连杆的刚度介于零和无限大之间, 即为弹性支承。其分别承担多少扭矩, 现设想在前连杆支承处的右端, 沿掩护梁的边缘把掩护梁切开, 并在切口处加上未知的扭矩  $M_{24}$ 。这样就把掩护梁分成两个静定支承的杆件, 然后分别研究它们的平衡。先研究第一段的平衡, 受力图为图 4(d),  $M_2$  为支承给掩护梁的约束反力偶矩, 由平衡条件得:

$$M_2 = T_{KP} - M_{24}$$

支承 2 的扭转角  $\Phi_2$ , 由图 4(f) 得:

$$\Phi_2 = \frac{M_2}{\mu_2} = (T_{KP} - M_{24}) / \mu_2$$

式中  $\mu_2$  为支承 2 发生单位转角须要的力矩。

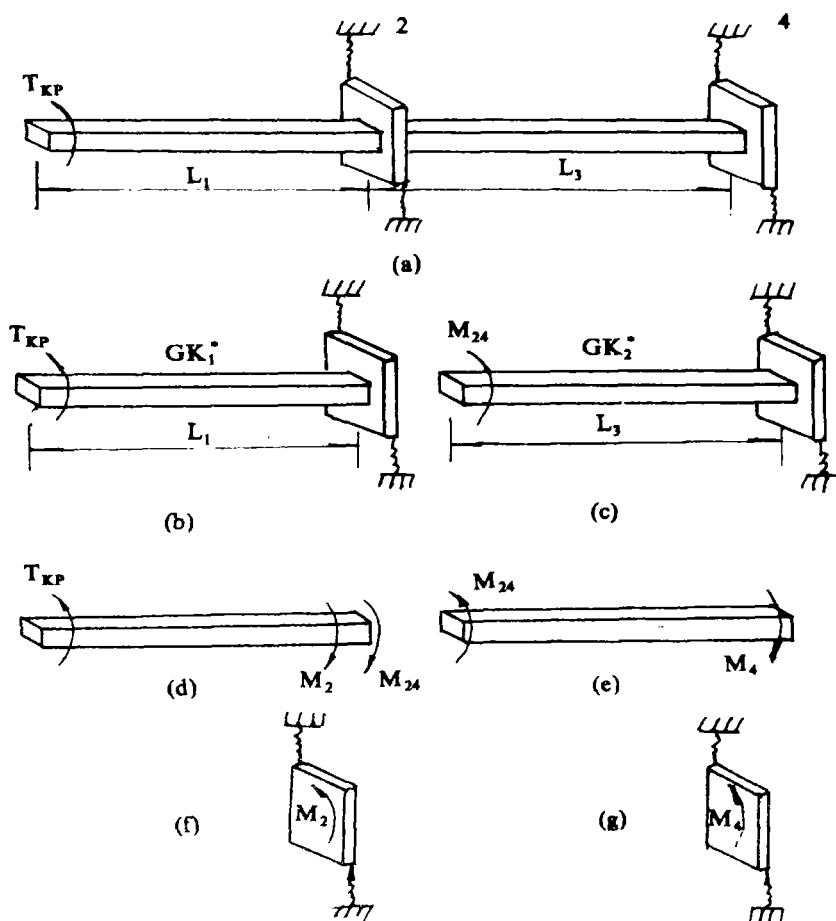


图 4

研究第二段平衡, 受力图为图 4(e), 由平衡条件得:

$$M_4 = M_{24}$$

支承4的转角 $\Phi_4$ , 由图4(g)可得:

$$\Phi_4 = \frac{M_4}{\mu_4} = \frac{M_{24}}{\mu_4}$$

式中 $\mu_4$ 为支承4发生单位转角须要的力矩。第二段的左端面实际的转角应为:

$$\Phi_{24} = \frac{M_{24}L_3}{GK_2} + \frac{M_{24}}{\mu_4} = \left(\frac{L_3}{GK_2} + \frac{1}{\mu_4}\right)M_{24}$$

显然 $\Phi_2$ 式应等于 $\Phi_{24}$ 式, 所以

$$M_4 = M_{24} = \frac{T_{KP}}{1 + \frac{\mu_2}{\mu_4} + \frac{\mu_2 L_3}{GK_2}} \quad (11)$$

式中:  $G = E / 2(1 + \gamma)$ ,  $E$  为弹性模量,  $\gamma$  为泊松比。

这里支承2及支承4发生单位转角须要的力矩 $\mu_2$ 及 $\mu_4$ 尚未知。根据前连杆及后连杆的实际联接情况, 可把它们简化为一端固定(与底座联接处), 另一端受集中力偶的悬臂梁。设梁的跨度为 $l$ , 抗弯刚度为 $EI$ 。当支承在图5所示的位置I及位置II时, 令自由端所承受的力偶矩分别为 $M_1$ 及 $M_2$ , 如图所示。根据悬臂梁自由转角计算公式, 位置I及位置II的转角分别为:

$$\psi_1 = \frac{M_1 L}{EI}, \quad \psi_2 = M_2 L / EI$$

现在通过位置II的 $\psi_2$ 式, 求出位置I, 当 $\psi_1 = 1$ 时,  $M_1$  (即支承发生单位转角须要的力矩 $\mu_2$ 或 $\mu_4$ ) 的值。

显然:

$$M_2 = M_1 \cos \varphi$$

$$\psi_2 = \psi_1 / \cos \varphi$$

代入得:

$$\frac{\psi_1}{\cos \varphi} = \frac{M_1 L}{EI} \cos \varphi$$

当 $\psi_1 = 1$ 时:

$$M_1 = \mu = \frac{EI}{L \cos^2 \varphi} = \frac{EI}{L \cos^2 \theta}$$

$$\text{所以: } \mu_2 = \mu_{\text{前}} = \frac{EI}{L \sin^2 \theta_1} \quad (12)$$

$$\mu_4 = \mu_{\text{后}} = \frac{EI}{L \sin^2 \theta_2} \quad (13)$$

式中:  $\theta_1 = \text{PM} + E_5$ ,  $\theta_2 = \text{PM} + E_4$

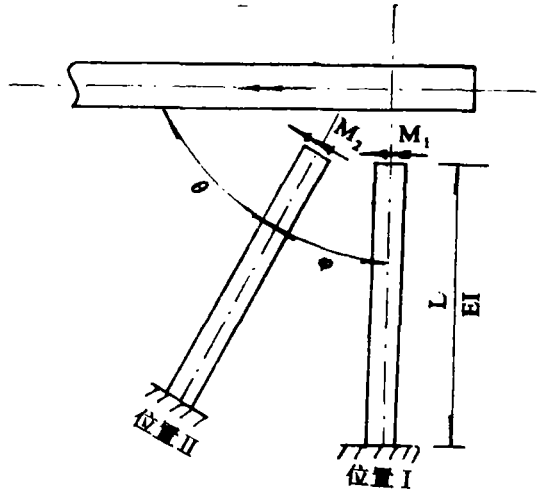


图 5

## 2 数值算例

现以 JY<sub>320</sub> 掩护式液压支架掩护梁为例做数值计算。支架的每根立柱工作阻力  $R'' = 160t$ ，平衡千斤顶工作阻力  $P = 64t$ ，支架的自重不计，几何尺寸及有关角度如下：

$a = 800mm$ ,  $b = 915mm$ ,  $c = 824mm$ ,  $d = 356mm$ ,  $f = 104mm$ ,  $g = 256mm$ ,  
 $h'_1 = 190mm$ ,  $h''_1 = 229mm$ .

$PM = 47.36869^\circ$ ,  $\delta = 6.25185^\circ$ ,  $E_1 = 18.63397^\circ$ ,  $E_2 = 56.12820^\circ$ ,  
 $E_4 = 57.65084^\circ$ ,  $E_5 = 45.12636^\circ$ ,  $\beta = PM - \delta = 41.11684^\circ$ .

### 2.1 掩护梁外力偶矩计算

把以上的有关数据代入到式(1)~(5)，可得合力  $R$  及扭矩  $T_{KP}$  为：

$$R = 292.80682t, \quad T_{KP} = 8823.676 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

### 2.2 掩护梁的扭矩分布

#### 2.2.1 掩护梁各截面扭转常数及等效扭转常数的计算

为叙述方便，以距上交线（掩护梁与顶梁的交线）的距离为截面的标号。下面以截面 1739 为例，说明计算方法。截面的几何尺寸及各室的标号，如图 6 所示。

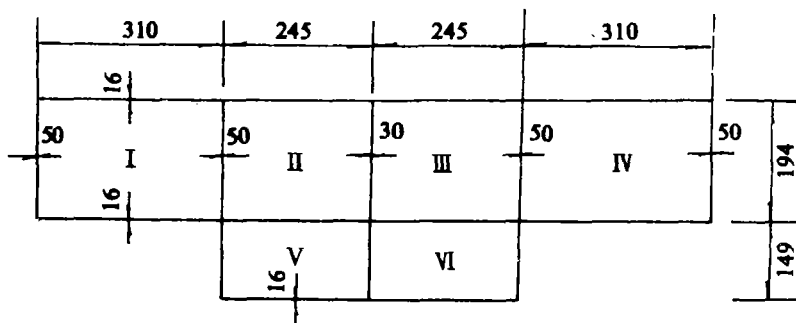


图 6

根据公式(8)，令  $2T/K = 1$ ， $q_i = \bar{q}_i$ ，考虑到截面对称， $\bar{q}_1 = \bar{q}_4$ ， $\bar{q}_2 = \bar{q}_3$ ， $\bar{q}_5 = \bar{q}_6$ ，得线性方程组如下：

$$\begin{aligned} 46.51\bar{q}_1 - 3.88\bar{q}_2 &= 601.4 \\ -3.88\bar{q}_1 + 34.505\bar{q}_2 - 15.313\bar{q}_5 &= 475.3 \\ -15.313\bar{q}_2 + 33.605\bar{q}_5 &= 364.05 \end{aligned}$$

解得： $\bar{q}_1 = \bar{q}_4 = 15.052$ ， $\bar{q}_2 = \bar{q}_3 = 25.43$ ，

$$\bar{q}_5 = \bar{q}_6 = 22.451$$

由公式(9)算得：

$$K_1 = 4 \sum_{i=1}^n \bar{q}_i F_i = 234.6791 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

用同样的办法, 可以求得其他各截面的扭转常数如下:

$$\text{截面 1635} \quad K_2 = 151.96 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 1660} \quad K_3 = 239.11 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 1790} \quad K_4 = 239.52 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 1854} \quad K_2 = 227.27 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 1910} \quad K_2 = 56.45 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 2000} \quad K_2 = 265.85 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 2040} \quad K_2 = 176.47 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$\text{截面 2095} \quad K_2 = 112.95 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

最后, 根据公式(6), 求得掩护梁在前后连杆之间部分的等效扭转常数:

$$K_2^* = 177.3 \times 10^3 \text{ cm}^4 \quad (14)$$

## 2.2.2 后连杆的等效弯曲常数及 $\mu_{\text{前}}$ 和 $\mu_{\text{后}}$ 的计算

$$\text{由公式(10)} \quad I^* = \frac{69 + 24.9}{69 / 747106 + 24.9 / 722413.6} \text{ cm}^4 \quad (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{由公式(12)} \quad \mu_{\text{前}} = 237.05E \\ \text{由公式(13)} \quad \mu_{\text{后}} = 8452.59E \end{array} \right\} \quad (16)$$

把公式(16)代入公式(11)得后连杆的扭矩为:

$$M_4 = 7743.77 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

再由掩护梁的整体平衡条件, 求得:

$$M_2 = 1079.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

掩护梁的扭矩分布规律为:

$$8823.68 \times 10^3$$



图 7

根据前、后连杆分别承担的扭矩, 很容易求得它们之间的比例:

$$\frac{1079.9 \times 10^3}{8823.68 \times 10^3} : \frac{7743.77 \times 10^3}{8823.68 \times 10^3} = 0.122 : 0.878$$

另外由扭转的计算公式可以看出, 此比值与前、后连杆的方位和刚度以及掩护梁的等效常数有关。据此, 可以进一步研究英国加利克公司 (GULLICK DOBSON) 提出的前、后连杆分别承担的扭矩为 0.2 : 0.8 之经验数据是否为最佳参数。

## 2.3 掩护梁各截面的剪力流的计算

根据公式(8)计算掩护梁各截面的剪力流。

对于截面 480, 已知:

$$K = 154.12 \times 10^3 \text{ cm}^4, T = 8823.68 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}, \overline{q_1} = 15.02, \overline{q_2} = 17.04,$$



$\overline{q_3} = 17.40$ ,  $\overline{q_4} = 15.02$ 。把以上数据代入式(8)可得:

$$q_1 = q_4 = 1719.37 \text{ kg/cm}$$

$$q_2 = q_3 = 1951.06 \text{ kg/cm}$$

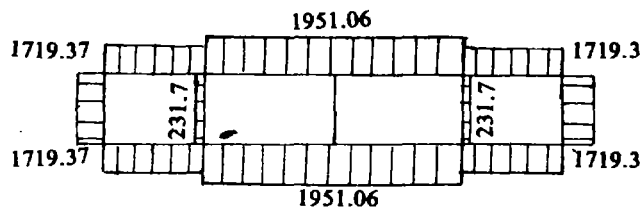
$$q_{1,2} = q_1 - q_2 = -231.68 \text{ kg/cm}$$

$$q_{2,3} = 0$$

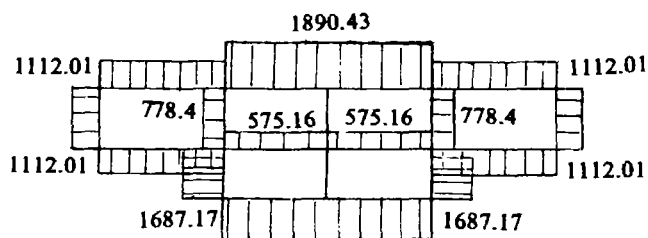
$$q_{3,4} = q_3 - q_4 = 231.68 \text{ kg/cm}$$

用同样的办法, 可以求得其他各截面的剪力流。掩护梁各截面的剪力流, 如图 8 所示。

截面 480



截面 1660 (实测截面)



截面 1365

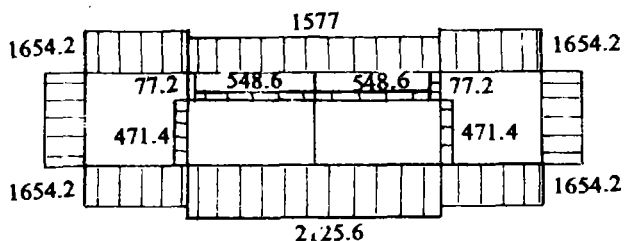


图 8

## 2.4 计算的剪应力与实验结果对比

截面 1660	节点 1	节点 2
实验结果	$\tau = 638.23 \text{ kg/cm}^2$	$\tau = 635.22 \text{ kg/cm}^2$
本文结果	$\tau = 695.1 \text{ kg/cm}^2$	$\tau = 695.1 \text{ kg/cm}^2$
相对误差	8.2%	8.7%

### 3 讨 论

3.1 本文的简化计算, 仅考虑掩护梁的自由扭转。但是, 由于掩护梁是变截面的多室箱形结构, 梁体会伴随发生约束扭转。可是, 考虑到梁体无分布力偶, 梁体两端又无限制截面翘曲的约束, 所以约束扭转的影响不大, 故略去。

3.2 通过 JY<sub>320</sub> 掩护式液压支架掩护梁的具体计算, 以及与实验结果的对比, 符合得较好, 并且计算值大于实验值, 另外该方法计算公式简单, 工作量小等。说明本文提出的方法是可行的, 可供设计人员参考。

本课题在研究过程中, 得到寿楠椿教授的帮助, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- (1) 黄剑源编. 薄壁结构的扭转分析. 中国铁道出版社, 1983年
- (2) 沈立山, 孙幼兰. 支架结构的扭转分析. 煤矿机械, 1986年第3期

## Analysis of Torsion Strength of the Shielded Powered Support

Wang Benrui

(ZhengZhou Inst. of Techno.)

Wu Guanxuan Wei Pingxi

(ZhengZhou Coal Mine Machinery Factory)

**Abstract:** In this article, from place forces system, studied forces relation and deformations relation of roof, shield canopy, and front and rear linkages which were acted by forces figure 1 signaled; resolved outer moment calculation and internal moment distribution of shield canopy. At last, calculated numerically JY<sub>320</sub> shield canopy of the Shielded Powered Support, and compared the results of calculation with experimant. The comparision proved that the method of the essay is accurate.

**Keywords:** Shield Canopy, Torsion Stength