

# 均布荷载作用下钢筋混凝土弯筋梁 斜截面强度的试验研究

丁自强 黄相才 葛友庭

(水利系)

## 提 要

本文根据23根承受均布荷载的弯筋梁和无腹筋梁的试验成果,对均载梁的斜裂缝种类、破坏形态、破坏斜截面的位置和影响抗剪强度的因素进行了分析,并给出了弯筋梁抗剪强度的建议公式:建议公式一为适用于均布荷载梁和集中荷载梁的通用公式;建议公式二则适用于承受均布荷载的低配筋弯筋梁。对于无腹筋梁,两式也可应用,只要在弯筋梁公式中不计弯筋的抗剪强度项即可。

为了保证斜截面抗弯强度,笔者认为只要满足本文建议的构造要求,就可不必进行斜截面强度计算。

仅配弯筋(或斜筋)的钢筋混凝土梁(简称“弯筋梁”)在均布荷载作用下的斜截面强度,是一个比弯筋梁承受集中荷载的情况更具有水工特点的问题。因此,我们在集中荷载钢筋混凝土弯筋梁抗剪性能试验取得初步成果后<sup>[1]</sup>,进行了承受均布荷载弯筋梁的斜截面强度试验。要求试验针对水工特点,使作用荷载为真正均布荷载,而且通过破坏斜截面的纵筋配筋率要低。为此,共做了23根钢筋混凝土弯筋梁和无腹筋梁的试验。本文主要就试验的斜截面强度成果作一阐述和探讨。

## 一、试验方法

### (一)、加载装置

采用通过水袋加载的方法对试验梁施加均布荷载,如图1。橡胶水袋充满水后置于试验梁上,并用槽形盖梁扣住。盖梁上置工字形荷载分配梁。加载千斤顶则置于台座加力架横梁与荷载分配梁之间,通过横梁的反作用将荷载通过水袋均布在试验梁上。

### (二)、试验梁设计

考虑到对比的方便,试验梁分两类:弯筋梁17根和无腹筋梁6根。梁的设计宽度均为20厘米,设计跨度为200厘米和220厘米两种。混凝土设计标号为200号,用500号普通硅酸盐水泥、中粒河砂、一级配卵石骨料浇筑,水泥:砂:石=1:2.15:4.59,水灰比0.53,钢筋为I级与II级钢筋。

试验梁变动的的设计参数主要有三,

1、跨高比 $l/h_0=4\sim13$ 。由于梁的度跨基本固定,故梁的设计高度为20~60厘米。



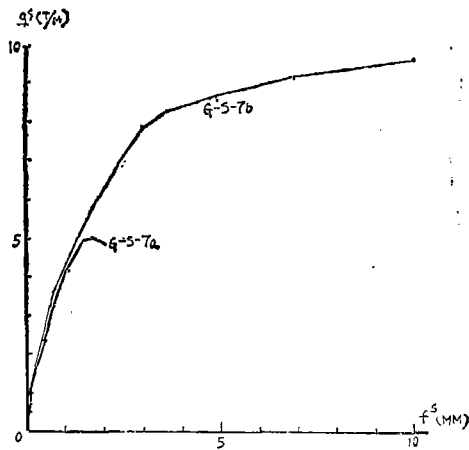


图3 荷载—挠度关系

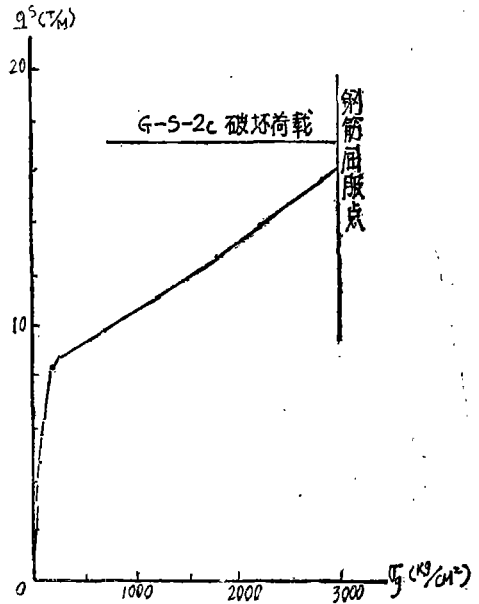


图4 荷载—钢筋应力关系

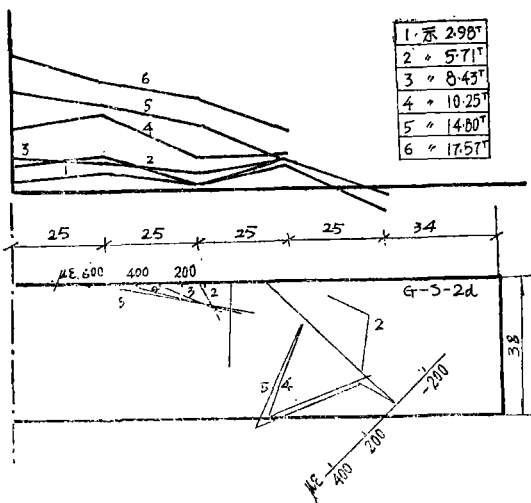


图5 混凝土表面的应变变化

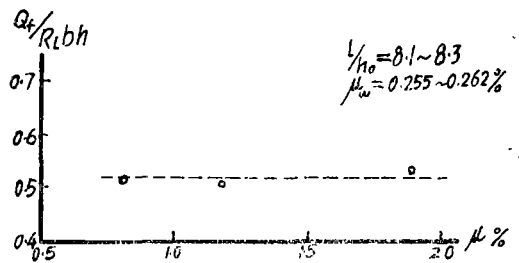


图6 荷载—配筋率关系

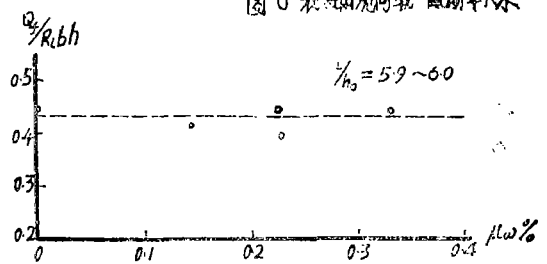


图7 荷载—配筋率关系

图6、7 裂缝出现荷载—配筋率关系

单跨简支均载梁裂缝出现的顺序,与集载梁相同:总是先出现跨中正裂缝,随着荷载的增加,将在正裂缝两侧出现弯剪缝,这两种裂缝都是先在梁的底缘朝垂直于梁轴的方向出现,但弯剪缝在向上延伸时受剪拉复合应力的作用其走向向跨中弯转;随着荷载的继续增加,对于跨高比小于10的梁,将在梁端附近的中心轴与纵筋重心线之间出现腹缝剪,先向下发展,

至梁底缘形成根状,随后向上发展,破坏时多数形成一与梁上表面平行的水平段。参看图8a。

除了以上三种主要的裂缝以外,试验梁还产生过两种局部裂缝,即水平撕裂裂缝和端部裂缝,如图8b—8c。前者是梢栓力过大的结果,后者只在无腹筋梁中出现过。

裂缝出现后产生应力重分布现象。通过钢筋的应力急剧增加,裂缝出现时荷载—钢筋应力曲线有明显的拐点,如图4,由于开裂,混凝土卸载给钢筋承担。与此同时,混凝土受压区的压力也重新调整了。如图9所示为G—S—8a梁斜裂缝伸向接近梁顶缘时的压应变变化图。实践表示开裂前的压应变,符合平截面变化;虚线为斜裂缝通过后的应变,已不符合平截面变化,裂缝以下的压应变与开裂前基本相同,但裂缝以上的压应变则大大增加了。这表示斜裂缝以上的压区混凝土承担很大的压力,也表示斜裂缝以下的混凝土也还承担压力。

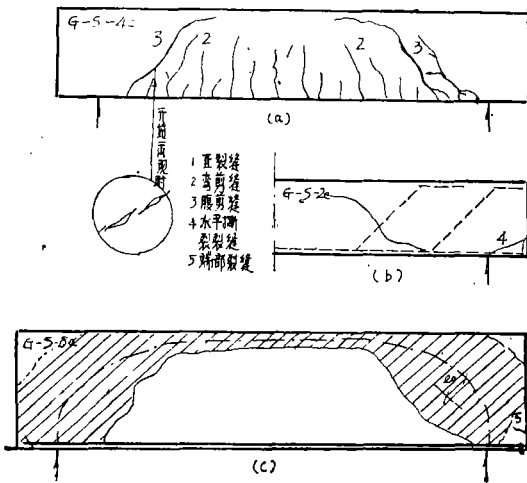


图 8 裂缝型式图

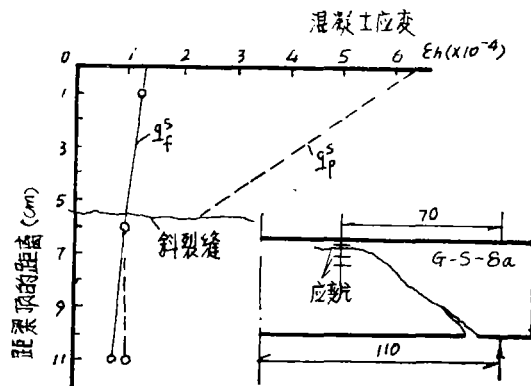


图 9 斜裂缝末端应变变化

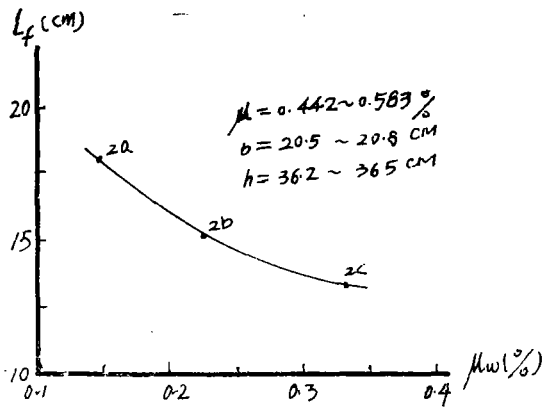


图 10 裂缝间距—配弯率关系

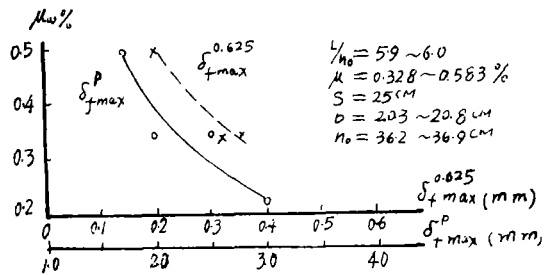


图 11 最大裂缝宽度—配弯率关系

梁的裂缝间距和裂缝宽度与弯筋配置的多少有关,如图10图11所示,配弯率 $\mu_w$ 越高,裂缝间距 $l_f$ 和裂缝开展宽度越小。

斜裂缝尤其是临界斜裂缝出现以后, 梁的受力性能就逐步由梁作用转入拱作用性能。对于无腹筋梁, 则与拉杆拱相似, 纵筋相当于拉杆, 受压混凝土相当于拱圈。在拱圈内, 由于压力线偏离拱圈轴, 使梁的端部受拉, 破坏时突然出现端部裂缝, 如图8c。对于弯筋梁, 则与桁架拱相似, 由于弯筋传力至拱圈, 故试验梁尚未发生破坏时像无腹筋梁产生过的那种端部裂缝, 但支座顶部实测到有拉应变, 如图5, 这是拱作用的有力证明。

梁达到破坏阶段时, 挠度和裂缝开展宽度急剧加大。受拉纵筋和受压混凝土边缘都会产生应变集中现象。混凝土受压边缘最大应变实测值为 $30.1 \times 10^{-4}$ 。弯筋实测应力在与临界斜截面相交处都达到了屈服点。

## (二)、低配筋率均载梁的破坏形态

### 1、斜拉破坏 (图12a)

临界斜裂缝出现时, 裂缝比较宽, 发展迅速, 斜裂缝末端形成一长约25~30厘米的水平段。破坏时水平段起点和纵筋处被剪成“ $\sim$ ”形, 有时在水平段起点形成断口, 错距10~14厘米。

裂缝出现荷载 $q_i^*$ 与破坏荷载 $q_u^*$ 很接近, 如表1。荷载—挠度曲线如图3的线①, 为脆性破坏, 无预兆。这种破坏在无腹筋梁和弯筋配置很少的弯筋梁中产生。破坏时纵筋应力能达到屈服点。

表1 各种破坏形态的 $q_i^*/q_u^*$ 值表

破坏形态	$q_i^*/q_u^*$ 均值
斜拉破坏	0.823
剪弯破坏	0.435
斜弯破坏	0.443

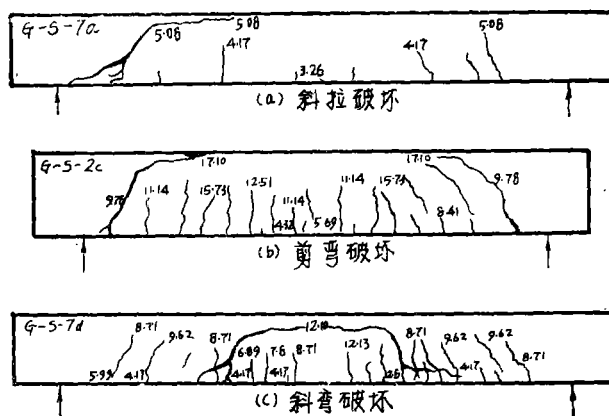


图12 破坏形态图

### 2、剪弯破坏 (图12b)

临界斜裂缝出现后, 还能继续承受相当大的荷载。荷载—挠度曲线如图3的线②。破坏时由于在挠度和裂缝方面的逐步发展和较大的量值而有充分的预兆。裂缝下端形成根状, 上端在破坏时形成一长约10~15厘米的水平段。剪压区在开始破坏时往往达不到混凝土抗压强度, 只有在裂缝开展宽度和挠度都很大时, 混凝土才可能被压碎, 如图12b所示。破坏时纵筋应力基本上能达到屈服点, 破坏斜裂缝两侧的错距为2~4毫米, 为塑性破坏。这种破坏在纵筋配筋率很低的弯筋梁中产生 ( $\mu < 1.0\%$ ), 可能是剪—弯破坏界限配筋率附近的抗剪强度, 应为抗剪强度的下限。

### 3、斜弯破坏 (图12c)

这种破坏在梁跨中附近剪力较小的区域产生。裂缝出现后还能承受较大的荷载, 无明显的相对错动。破坏斜裂缝出现在跨中附近, 末端弯向跨中, 压区混凝土被压碎, 纵筋应力达到屈服点。破坏斜裂缝宽度为下宽上窄, 最大宽度在梁的底缘。这种破坏是在弯筋配置较强

的梁中弯矩较大的区段产生的。

### (三)、破坏斜截面位置及其水平投影长度

均载梁破坏斜截面的位置不同于集载梁。集载梁的位置比较固定，往往在集中荷载作用点下面。这是因为梁的剪切破坏总是伴随着弯矩的共同作用而产生的，如图13a为一般试验常用的两点对称加载试验梁，这种梁剪跨段的剪力为常量，而弯矩以集中荷载作用点截面为最大，该截面的剪力和弯矩都达到最大值，故破坏斜截面终止于荷载作用点。

均载梁的内力变化情况则不同，剪力随弯矩的增加而减小。支座和跨中截面都不可能是剪切危险截面；因为支座截面剪力虽最大，但弯矩等于零；跨中剪力等于零，但弯矩最大。

可以想象，剪切破坏将在剪力和弯矩都较大的截面产生，试验也证实了这一点。

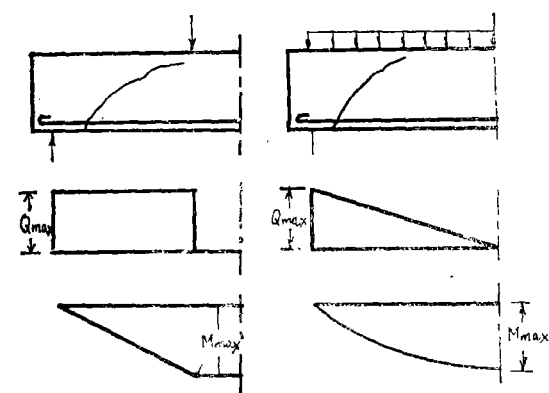
将实测的斜截面末端至支座截面的水平距离 $a_p$ 值，按 $a_p/h_0$ 与 $l/h_0$ 的关系点绘如图14。在 $l/h_0 = 4 \sim 13$ 的试验梁范围内，二者可近似地取为线性关系， $a_p = 1 \sim 3h_0$ 。用最小二乘法分析得出其回归方程为

$$\frac{a_p}{h_0} = 0.23 + 0.20 \frac{l}{h_0} \quad (1)$$

将试验实测的 $a_p$ 值与按该式计算所得的 $a_p$ 比， $a_p^*/a_p$ 的平均比值为1.014，标准差为0.185，离散率为0.182，说明该式相当好地代表了 $a_p/h_0 \sim l/h_0$ 的关系。

将式(1)的各项除以 $l/h_0$ ，得 $a_p/l$ 与 $1/h_0$ 的关系式为

$$\frac{a_p}{l} = \frac{0.23}{1/h_0} + 0.20 \quad (2)$$



(a) 图 13 梁内力图 (b)

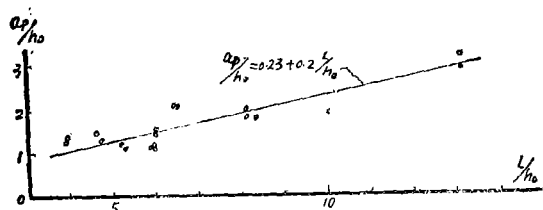


图 14 破坏斜截面位置与梁的跨度关系

在试验梁的范围内，取 $l/h_0 = 4 \sim 13$ ，代入式(2)，得

$$\frac{a_p}{l} = 0.26 \sim 0.22, \text{ 即 } a_p = 0.22 \sim 0.26l$$

其变化微小，大致在距离支座为 $1/4 \sim 1/5$ 梁跨范围以内，近似值可取为 $a_p \approx 0.25l$ 。在这一范围内，均载梁的弯矩和剪力都是比较大的。

破坏斜截面的水平投影长度 $C$ 值列于附表，平均的 $C \approx 0.9h_0$ 。考虑到斜裂缝始端一般要出现根状裂缝，而附表所列的实测 $C$ 值都是从始端根状裂缝靠近跨中一侧算起的，取值偏小，故可近似地取 $C = h_0$ ，即认为斜裂缝与梁轴线的夹角为 $45^\circ$ 。

### (四)、影响斜截面抗剪强度的因素

#### 1、抗剪强度与跨高比的关系

从试验梁的结果可知，均载梁的抗剪强度随跨高比的增大而降低。图15为试验资料所

显示的二者的关系(图中 $Q_p^s$ 为支座剪力, 本节均同此), 说明无论对无腹筋梁和弯筋梁, 这种关系均存在。当 $l/h_0 > 10$ 时, 跨高比将不再对抗剪强度有明显影响。

跨高比的关系反映了剪跨比的关系。参看图13b, 破坏斜截面的广义剪跨比 $\frac{M}{Qh_0}$ 为

$$\frac{M}{Qh_0} = \frac{\frac{1}{2}q_p l a_p - \frac{1}{2}q_p a_p^2}{(\frac{1}{2}q_p l - q_p a_p)h_0} = \frac{\frac{a_p}{l}(1 - \frac{a_p}{l})l}{(1 - 2\frac{a_p}{l})h_0} \quad (3)$$

$$\text{当 } \frac{a_p}{l} = 0.25, \quad \frac{M}{Qh_0} = 0.375 \frac{l}{h_0} \quad (4)$$

由此可知, 均载梁的抗剪强度随广义剪跨比的增大而降低, 其关系与图15的曲线相似。这一规律与集中荷载弯筋梁的结果相同。说明用广义剪跨比 $M/Qh_0$ 作为影响抗剪强度的因素, 对集中荷载和均布荷载两种情况都适用, 是一个较有普遍意义的参数。

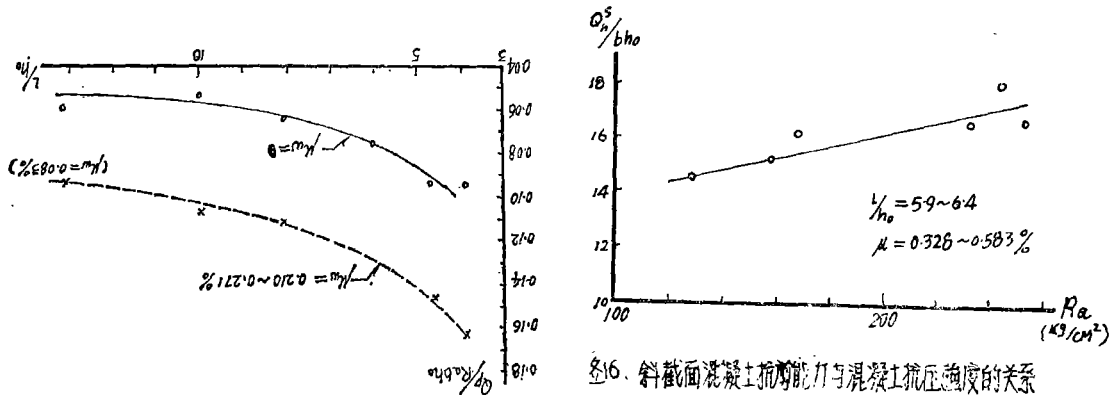


图 15 破坏剪力与跨高比的关系

## 2、抗剪强度与混凝土强度的关系

取图16的纵坐标 $\frac{Q_p^s}{bh_0} = \frac{Q_p^s}{bh_0} - \frac{0.8R_g A_w \sin \alpha}{bh_0}$ 代表混凝土所承担的抗剪强度。从该图可

知, 抗剪强度随混凝土抗压强度的增长而增长, 并存在线性关系。

## 3、纵筋对抗剪强度的影响

图17表示, 在其他条件相同的条件下, 抗剪强度随纵筋配筋率的提高而增长, 二者近似于线性关系。根据图17的资料, 当纵筋配筋率 $\mu$ 由1.9%降低到0.7%时, 抗剪强度约降低了30%。抗剪强度随纵筋配筋率降低的原因为:

(1)、低配筋率的纵筋在剪、拉共同作用下, 当纵向拉应力达到屈服点时, 所承担的稍栓力大大降低。

(2)、配筋率低时, 抑制斜裂缝开展的作用较小, 以致斜裂缝迅速上升, 剪压区的高度减小; 同时, 缝宽较大, 咬合力降低。

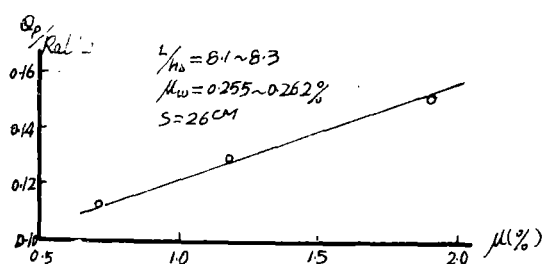


图 17 破坏剪力与配筋率的关系

(3)、由于斜裂缝出现后的内力重分布,使处于斜截面始端的纵筋应力,由弯矩较大的斜截面终端截面控制,所以虽已通过作抵抗弯矩图保证了正截面纵筋的抗弯强度,但斜截面始端配筋率低的纵筋仍易达到屈服点。

#### 4、弯筋对抗剪强度的影响

在梁内配弯筋能提高抗剪强度,如图15的虚线,其抗剪强度比相应的无腹筋梁

高,由于大多数点子的配筋率比较接近,所以虚线和实线也接近平行。说明若弯筋面积一样,则弯筋的剪切承载能力也接近相同。

由试验结果的分析可知,弯筋的作用可归结为:

- (1)、提高抗剪强度;
- (2)、抑制斜裂缝的开展;
- (3)、改善破坏性质。

### 三 关于斜截面强度计算

#### (一)、概述

目前我国水工钢筋混凝土梁承受均布荷载时的抗剪强度计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$KQ \leq Q_p = Q_{kh} + Q_w \quad (5)$$

$$\text{式中} \quad Q_{kh} = 0.07R_a b h_0 + 1.5 \frac{A_k}{S} R_g h_0 \quad (5a)$$

$$Q_w = 0.8R_g A_w \sin \alpha \quad (5b)$$

将式(5a)(5b)代入式(5),得

$$KQ \leq Q_p = 0.07R_a b h_0 + 1.5 \frac{A_k}{S} R_g h_0 + 0.8R_g A_w \sin \alpha \quad (6)$$

式中 K—抗剪强度安全系数;

Q—计算截面的剪力;

$Q_{kh}$ —剪压区混凝土和箍筋共同承担的剪力;

$Q_w$ —弯筋承担的剪力;

$R_a$ —混凝土轴心抗压强度;

$R_g$ —钢筋的抗拉强度;

b—截面的宽度;

$h_0$ —截面的高度;

$A_k$ ——配置在同一截面箍筋各肢的全部截面面积;

S——箍筋沿长度方向的间距;

$A_w$ ——配置在同一弯起平面内的弯筋截面面积;



$\alpha$ ——弯筋与构件纵向轴线的夹角。

在应用式(6)计算弯筋时,系从支座截面开始向跨中计算(参看图18),直到最后一排弯筋进入 $Q_{yk}$ 所能满足的区段为止。

上述计算方法与试验研究结果相比,存在以下几个问题:

1. 没有考虑跨高比(剪跨比)和纵筋配筋率的影响。

2. 最危险的破坏斜截面位置在支座截面。本试验和以往的均布荷载和多点等代集中荷载的试验<sup>[2][3][8]</sup>都表明,这是与试验结果不符的。这样,就可能使支座附近多配了抗剪钢筋,而离支座距离为1/4梁跨附近梁段内可能不够。

3. 关于破坏斜截面位置,在按式(6)进行抗剪强度计算时,当梁顶作用有均布荷载时,应取斜截面末端的剪力进行计算。但是,根据文献[6]的分析,这样计算将导致不安全,因此,只好取斜截面始端的剪力作为计算剪力,不考虑斜截面范围内均布荷载作用于梁顶对抗剪强度的有利作用。

水工钢筋混凝土结构设计规范<sup>[5]</sup>附录七针对水工厚板承受分布荷载的情况,给出了弯筋面积 $A_v$ 的计算公式<sup>[7]</sup>

$$A_v = \frac{KQ - 0.07R_s b h_0}{0.8R_s A_v \sin \alpha} \left( 0.075 \frac{l}{h_0} + 0.4 \right) \quad (7)$$

$$\text{当 } \frac{l}{h_0} > 8 \text{ 时, 取 } \frac{l}{h_0} = 8;$$

$$\text{当 } \frac{l}{h_0} < 4 \text{ 时, 取 } \frac{l}{h_0} = 4。$$

该式考虑了跨高比 $l/h_0$ 的影响,但实质上认为混凝土承担的剪力为常量( $=0.07R_s b h_0$ ),最危险的斜截面在支座截面。

## (二) 基本假定

1. 以斜截面破坏极限状态的受力特征为依据建立计算图式,如图19。斜截面上的抗力由以下几部分组成:

- (1)、斜截面末端剪压区混凝土所承受的剪力为 $Q_b$ ,压力为 $D$ ;
- (2)、纵筋所承受的梢栓力为 $Q_s$ ,拉力为 $T$ ;
- (3)、斜截面接触面上混凝土骨料咬合等所承受的剪力为 $Q_a$ ;
- (4)、弯筋所承受的拉力为 $T_v$ 。

为了满足斜截面强度要求,须进行抗剪强度计算和抗弯强度计算(或满足构造要求)。

2. 在进行斜截面抗剪强度计算时,除了 $Q_v$ 外,其他各力由于彼此的相互影响而难于单独计算,因此用 $Q_k$ 综合代表 $Q_s$ 、 $Q_a$ 和剪压区混凝土所承受的剪力。

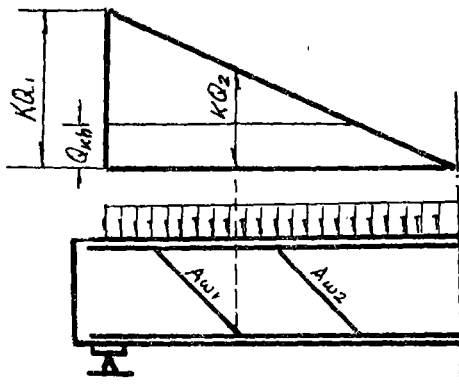


图 18

3、在进行斜截面抗弯强度计算时, 不考虑 $Q_a$ 和 $Q_s$ 的作用。

取静力平衡条件

$$\text{当 } \Sigma Y = 0 \quad Q_p = Q_h + Q_w \dots \quad (8)$$

$$\text{当 } \Sigma M = 0 \quad M_p = TZ + T_w Z_w \dots \quad (9)$$

式中  $Q_p$ ——斜截面所承受的极限剪力, 为外力在Y方向的和;

$M_p$ ——斜截面所承受的极限弯矩, 为支座反力和支座至斜截面末端作用的均布荷载对斜截面末端所取力矩之和。

关于 $Q_w$ , 根据试验结果, 可足够安全地如下式计算:

$$\begin{aligned} Q_w &= T_w \sin \alpha \\ &= 0.8 R_s A_w \sin \alpha \end{aligned} \quad (5b)$$

根据实测资料, 弯筋的应力都在破坏时达到了屈服点, 因此系数0.8可取得更大一些, 在0.8~1.0之间取值, 这里取的是偏安全的数值。

### (三) 弯筋梁抗剪强度的建议公式

1. 建议公式一——适用于各种荷载情况的通用公式

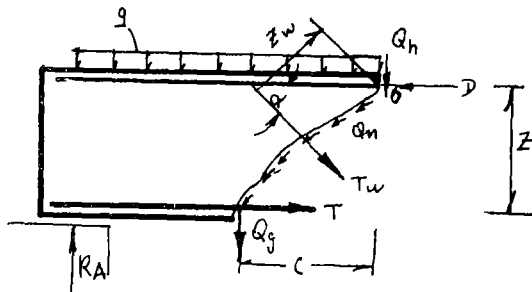


图 19

我们在集中荷载弯筋梁试验研究<sup>[1]</sup>中, 曾将式(8)表达为一考虑剪跨比、混凝土强度和纵筋配筋率等的公式。该式的剪跨比若以广义剪跨比表示, 应能应用于均载梁。但当时依据的集载试验资料的纵筋配率都比较高( $\mu \geq 1.87\%$ ), 所以得引入一考虑低配筋率影响的折减系数 $\eta$ 。故建议公式一为:

$$Q_p = \eta \frac{0.07 + 3.5\mu}{m - 0.3} R_s b h_0 + 0.8 R_s A_w \sin \alpha \quad (10)$$

式中  $\mu$ ——通过斜截面始端的纵筋配筋率, 当 $\mu > 3\%$ 时, 取 $\mu = 3\%$

$m = \frac{M}{Q h_0}$ ——广义剪跨比。当 $m < 1$ 时, 取 $m = 1$ ; 当 $m > 4$ 时, 取 $m = 4$ ;

$M$ 、 $Q$ ——斜截面末端的弯矩和剪力

$\eta$ ——考虑低配筋率影响的折减系数。当 $\mu \geq 1.5\%$ 时, 取 $\eta = 1.0$ ; 当 $\mu < 1\%$ 时, 取 $\mu = 0.7\%$ ;  $\mu = 1.0 \sim 1.5\%$ 时,  $\eta$ 按线性内插取值。

用本试验14根产生剪切破坏的弯筋梁的试验值 $Q_p^i$ 与按式(10)计算值 $Q_p^j$ 值相比, 平均比值 $\bar{X} = 0.983$ , 标准差 $\sigma = 0.216$ , 离散率 $C_v = 0.220$ , 符合性甚好。

若认为式(10)右边第一项是无腹筋梁的抗剪强度 $Q_{p无}$ , 即:

$$Q_{p无} = Q_h = \eta \frac{0.07 + 3.5\mu}{m - 0.3} R_s b h_0 \quad (11)$$

将本试验与文献[2][8]的均载无腹筋梁共22根的试验值 $Q_p^i$ 与按式(11)计算所得的计算值 $Q_p^j$ 相比, 平均比值 $\bar{X} = 1.043$ , 标准差 $\sigma = 0.146$ , 离散率 $C_v = 0.140$ , 符合性相当好。

现就式(11)作一简要分析。

以低配筋率的无腹筋梁为分析对象。设 $\mu = 0.5\%$ , 则 $\eta = 0.7$ , 并与式(3)的 $M/Qh_0$ 值一起代入式(11), 得

$$Q_{P无} = Q_h = \frac{0.0613}{\frac{\frac{Q_P}{l}(1 - \frac{a_P}{l})}{1 - 2\frac{a_P}{l}} \cdot \frac{1}{h_0} - 0.3} R_s b h_0 = \xi R_s b h_0 \quad (12)$$

式中

$$\xi = \frac{0.0613}{\frac{\frac{a_P}{l}(1 - \frac{a_P}{l})}{1 - 2\frac{a_P}{l}} \cdot \frac{1}{h_0} - 0.3}$$

若以 $\frac{a_P}{l}$ 代表可能破坏斜截面位置对梁跨的比值, 对不同的跨高比 $\frac{1}{h_0}$ ,  $\xi$ 的变化绘如图20,

该图为一簇以 $1/h_0$ 为参数的曲线。

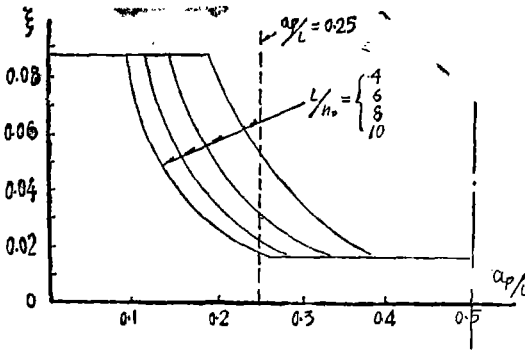


图 20  $\xi \sim a_P/l$  关系 (一)

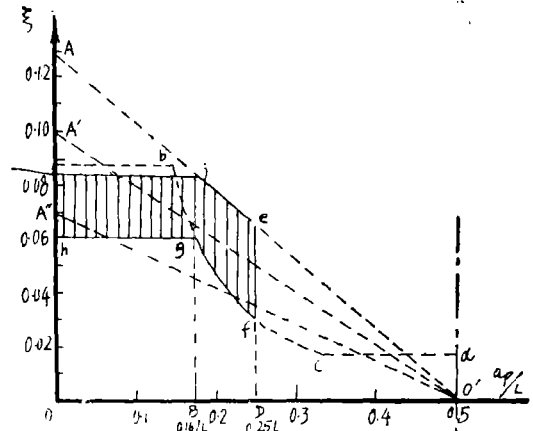


图 21  $\xi \sim a_P/l$  关系 (二)

现以 $\frac{1}{h_0} = 6$ 的 $\xi$ 曲线为例, 绘如图21的曲线abgfcd。若梁承受均布荷载产生的支座剪力为 $0.13 R_a b h_0$ 。(文献[5]附录七的上限), 剪力图以 $O'A$ 线代表。仍从支座开始向跨中计算, 第一个计算截面取距支座的距离为 $h_0$ , 则 $h_0 = \frac{1}{6} = 0.167l = OB$ 。由图21可知, 在OB范围内, 应按 $O'A$ 线与abgfcd线在B截面的差值gj的大小配抗剪钢筋。同理, 在D截面, 即 $a_P = 0.25l$ 的截面, 应按ef的大小配抗剪钢筋。图21的阴影线范围(iefgh范围), 其纵距基本上相等, 也就是说在OD范围内可以配等量的抗剪钢筋(如弯筋)。这是外剪力达到上限时的情况。

如果外剪力比上限小,  $\xi = 0.10$  (以 $O'A'$ 代表), 或 $\xi = 0.7$  (以 $O'A''$ 代表)。则前者

B 截面配抗剪钢筋将小于 D 截面的, 后者 B 截面已不需要而 D 截面还需要。因此, 为慎重起见, 建议支座截面 B 的配弯筋量应不少于跨内截面的计算值。与现行计算方法相比, 支座截面的抗剪钢筋将有所减少, 而剪力和弯矩都较大的  $1/4 \sim 1/5$  梁跨截面将有所加强。

## 2、建议公式二——适用于承受均布荷载的低配筋率钢筋混凝土梁

结合水工特点, 对于承受均布荷载的配筋率低的钢筋混凝土梁拟作如下简化:

- (1)、以跨高比  $l/h_0$  代替剪跨比  $m$  来计算  $Q_h$ ;
- (2)、由于配筋率低, 在计算公式中不计纵筋配筋率  $\mu$  的影响;
- (3)、按斜截面始端的剪力作强度计算, 不考虑斜截面范围内均布荷载的抗剪作用;
- (4)、抗剪强度计算从支座截面开始, 支座截面的  $Q_h$  支按无腹筋梁试验资料的下包线 (即抗剪强度下限) 确定。

从式 (11) 可知, 当  $\mu = 0$ , 则  $Rab h_0$  的系数只有变量  $m$ , 而  $m$  又可表达为  $l/h_0$  的函数, 则  $Rab h_0$  的系数可设想为如下形式:

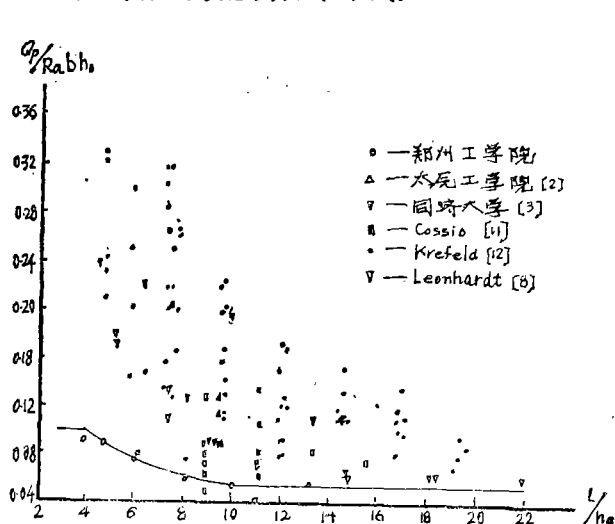


图 22

$$\frac{a}{b \frac{1}{h_0} + c},$$

$a, b, c$  为待定常数。

将搜集到的国内外承受均布荷载和多点等代集中荷载的无腹筋梁 118 根的试验资料, 按支座剪力  $Q_P/R_a b h_0$  与  $l/h_0$  的关系点绘如图 22, 其数据相当离散, 但总趋势是  $Q_P/R_a b h_0$  随  $l/h_0$  的增大而降低。数据离散的原因之一可能与纵筋配筋率的变化较大有关 ( $\mu = 0.47 \sim 4.93\%$ ,  $\mu > 1.5\%$  的占 94.2%)。取图 22 的下包线确定系数  $a = 0.55$ ,  $b = 0.75$ ,  $c = 2.5$ , 则

$$Q_{P\text{无}} = Q_{h\text{支}} = \frac{0.55}{0.75l/h_0 + 2.5} R_a b h_0 = \frac{0.11}{0.15 \frac{1}{h_0} + 0.5} R_a b h_0 \quad (13)$$

式中跨高比  $\frac{1}{h_0} < 10$  时, 取  $\frac{1}{h_0} = 4$ ; 当  $\frac{1}{h_0} > 10$  时, 取  $\frac{1}{h_0} = 10$

所以

$$Q_{h\text{支}} = (0.055 \sim 0.10) R_a b h_0$$

为了适当地增强跨内的弯筋量, 将  $Q_{h\text{支}}$  作为  $Q_h$  时, 应考虑一降低系数  $\zeta$ , 故建议公式二为

$$Q_P = \zeta \frac{0.11}{0.15 \frac{1}{h_0} + 0.5} R_a b h_0 + 0.8 R_g A_w \sin \alpha \quad (14)$$

式中 $\xi$ ——系数。计算截面在支座时,  $\xi = 1.0$ ; 计算截面离支座的距离 $\geq h_0$ 时。取 $\xi = 0.75$ 。两截面间为线性变化, 如图23且要求

$$\xi \frac{0.11}{0.15 \frac{1}{h_0} + 0.5} \geq 0.055$$

以14根均载弯筋梁支座剪力的试验值与按式(14)计算所得的计算值比, 得平均比值 $\bar{X} = 1.185$ ; 标准差 $\sigma = 0.232$ , 离散率 $C_v = 0.195$ , 符合性甚好。

#### (四) 关于斜截面抗弯强度

按式(9)计算斜截面抗强度, 此时取纵筋和弯筋都达到抗拉强度 $R_g$ , 则式

(9) 成为

$$M_p = R_g A_g Z + R_g A_w Z_w \quad (15)$$

式中  $Z_w$ ——弯筋合力至斜截面剪压区合力点的距离

$Z$ ——纵筋合力至剪压区合力点的距离。

在满足以下的构造要求时, 斜截面抗弯强度可不作计算。

1. 必须有相当于跨中纵筋面积的3/4通过1/4梁跨截面向支座延伸。这是因为按前述的关于破坏斜截面的分析, 危险破坏斜截面末端一般在1/4梁跨位置, 该截面的弯矩在均布荷载的情况下为跨中截面的3/4。

2. 通过1/4梁跨截面的纵筋可以在梁跨截断, 但必须延伸至斜截面始端, 再加一段锚固长度, 以保证抗弯强度。即

$$\begin{aligned} \omega &\geq C + l_m \\ &\geq h_0 + l_m \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $\omega$ ——纵筋伸过1/4梁跨(或计算不需要点)截面所伸出的长度;

$C$ ——斜截面水平投影长度, 近似取 $c = h_0$ 。

$l_m$ ——纵筋的锚固长度。

3. 纵筋伸过计算不需要点(或1/4梁跨)截面后可以弯起, 但必须在距该点 $0.5h_0$ 以外开始起弯。这样做, 就可以保证弯筋能承担没有弯起时那么大的抗弯强度。

## 四 结 语

1. 有两种类型的斜裂缝——弯剪缝和腹剪缝。在试验梁跨高比的范围( $l/h_0 = 4 \sim 13$ )内, 破坏斜截面末端的位置可用下式计算

$$\frac{a_p}{l} = \frac{0.23}{l/h_0} + 0.20 \quad (2)$$

斜裂缝的水平投影长度可近似地取 $c = h_0$ 。

2. 低配筋率梁的斜截面破坏形态有: 斜拉破坏、剪弯破坏和斜弯破坏。影响斜截面抗剪强度的主要因素有剪跨比(或跨高比)、混凝土强度、截面尺寸、纵筋和弯筋的配置数量

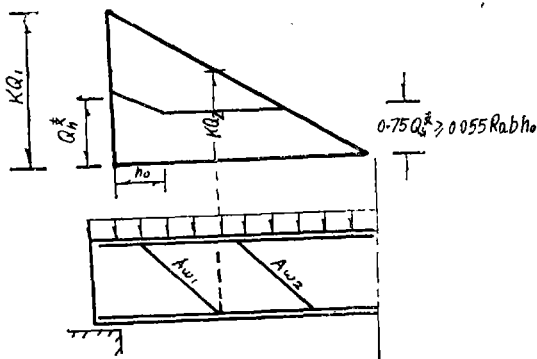


图 23

及其强度等。纵筋配筋率低对抗剪强度有明显影响。

配置弯筋能提高抗剪强度, 限制斜裂缝的开展, 改善破坏性质。

3、对于承受均布荷载或集中荷载中的弯筋梁, 抗剪强度可按下式计算 (建议公式一)

$$KQ \leq Q_p = \eta \frac{0.07 + 3.5\mu}{m - 0.3} R_s b h_0 + 0.8 R_g A_w \sin \alpha \quad (10)$$

式中  $\mu$ ——纵筋配筋率。当  $\mu > 3\%$  时, 取  $\mu = 3\%$ ;

$m = \frac{M}{Q h_0}$ ——剪跨比,  $1 \leq m \leq 4$ ;

$\eta$ ——低配筋影响系数,  $\eta = 0.7 \sim 1.0$ 。

$$\text{当 } KQ \leq \eta \frac{0.07 + 3.5\mu}{m - 0.3} R_s b h_0$$

时, 对于板可不配弯筋。

4、对于承受均布荷载的低配筋率弯筋梁, 抗剪强度可按下式计算 (建议公式二):

$$KQ \leq Q_p = \xi \frac{0.11}{0.15 \frac{1}{h_0} + 0.5} R_s b h_0 + 0.8 R_g A_w \sin \alpha \quad (14)$$

式中  $\frac{1}{h_0}$ ——跨比高,  $\frac{1}{h_0} = 4 \sim 10$ ;

$\xi$ ——系数。  $\xi = 0.75 \sim 1.0$ , 参看图23。

$$\text{当 } KQ \leq \xi \frac{0.11}{0.15 \frac{1}{h_0} + 0.5} R_s b h_0$$

时, 对于板可不配弯筋。

5、为了保证斜截面抗弯强度, 须满足以下构造要求:

(1)、必须有不少于一跨中纵筋面积的3/4通过1/4梁跨截面, 向支座方向延伸。

(2)、在跨中截面的纵筋须伸出计算不需要点截面  $\omega$  长度。

$$\omega \geq h_0 + l_m \quad (16)$$

式中  $l_m$ ——锚固长度。

(3)、纵筋弯起作弯筋时, 应离计算不需要点截面  $0.5h_0$  才允许弯起。

均布荷载试验梁特征及主要成果表 (见附页)

附表 均布荷载试验梁特征及主要成果表

梁号	实际尺寸(cm)			跨度 l (cm)	R Kg cm <sup>2</sup>	l/h <sub>0</sub>	跨中纵筋			支座纵筋			弯			a <sub>p</sub> (cm)	e <sup>*</sup> (cm)	q <sub>f</sub> <sup>*</sup> (T/m)	q <sub>0.2</sub> <sup>*</sup> (T/m)	q <sub>p</sub> <sup>*</sup> (T/m)	破坏 形态
	b	h	h <sub>0</sub>				根数× 直径	R <sub>g</sub> cm <sup>2</sup>	μ (%)	根数× 直径	kg cm <sup>2</sup>	μ (%)	根数× 直径	kg cm <sup>2</sup>	μ <sub>ω</sub> (%)						
G-S-1a	20.4	36.4	33.4	200	167	6.0	1Φ12 3000 9Φ14 2584	2.339 3000 2.584	0.452	2.339 2Φ14 2584	2.584	0.452	—	—	—	50	26	5.01	5.10	6.01	斜拉
G-S-1c	20.0	45.8	42.8	200	198.4	4.7	1Φ14 2584 9Φ16 2361	2.407 2584 2.361	0.470	2.407 2Φ16 2361	2.361	0.470	—	—	—	52	49	10.73	—	11.18	斜拉
G-S-2a	20.6	36.5	33.5	200	362.5	6.0	4Φ8 3236 1Φ12 3000 6Φ16 2361 1Φ22 2880	2.928 3236 3.000 2.361 2.880	0.583	2.928 2Φ16 2361	2.361	0.583	2Φ8 3236 1Φ8 3236 1Φ8 3236	3236 3236 3236	0.146 0.073 0.073	38.5	35	7.96	10.78	14.32	剪弯
G-S-2b	20.8	36.5	33.5	200	225.8	6.0	4Φ10 3519 4Φ14 2584 3Φ16 2361 1Φ22 2880	2.920 3519 2.584 2.361 2.880	0.442	2.920 2Φ14 2584	2.584	0.442	2Φ10 3519 1Φ10 3519 1Φ10 3519	3519 3519 3519	0.225 0.112 0.112	45	39	6.07	—	15.40	剪弯
G-S-2c	20.5	36.2	33.2	200	332.4	6.0	4Φ12 3000 7Φ14 2584 1Φ22 2880	2.986 3000 2.584 2.880	0.453	2.986 2Φ14 2584	2.584	0.453	2Φ10 3000 1Φ12 3000 1Φ12 3000	3000 3000 3000	0.332 0.166 0.166	34	21.2	7.73	10.68	17.10	剪弯
G-S-2d	20.4	37.7	34.2	220	248.5	6.4	6Φ12 4297 4Φ14 4151 2Φ16 3846	2.544 4297 4.151 3.846	0.489	2.544 3Φ12 4297	4.297	0.489	3Φ12 4297 2Φ10 4812	4297 4812	0.225 0.225	90	15	7.98	14.71	21.07	斜弯
G-S-2e	20.1	37.3	34.3	220	238.8	6.4	6Φ12 4297 4Φ14 4151 2Φ16 3846	2.614 4297 4.151 3.846	0.492	2.614 3Φ12 4297	4.297	0.492	2Φ10 4812 1Φ10 4812	4812 4812	0.228 0.114	67.8	38	5.34	8.60	16.03	剪弯
G-S-2f	20.2	37.2	34.2	220	182.4	6.4	6Φ12 4297 4Φ14 4151 2Φ16 3846	2.609 4297 4.151 3.846	0.491	2.609 3Φ12 4297	4.297	0.491	1Φ10 4812 1Φ10 4812	4812 4812	0.114 0.114	69	45.7	3.75	6.25	11.11	剪弯
G-S-3b	20.0	41.0	38.0	200	285.6	5.3	1Φ10 3519 6Φ12 3000 2Φ14 2584 2Φ16 2361 1Φ20 2972	2.475 3519 3.000 2.584 2.361 2.972	0.531	2.475 1Φ14 2584 1Φ12 3000	2.584 3.000	0.531	1Φ10 3519 1Φ12 3000 1Φ12 3000	3519 3000 3000	0.252 0.149 0.149	48.75	35	11.16	11.84	17.12	剪弯
G-S-3c	19.7	41.0	38.0	200	317.5	5.3	6Φ12 3000 2Φ14 2584 4Φ16 2361	2.525 3000 2.584 2.361	0.537	2.525 2Φ16 2361	2.361	0.537	2Φ12 3000 1Φ12 3000 1Φ12 3000	3000 3000 3000	0.302 0.151 0.151	41.5	35	6.02	12.46	20.56	剪弯
G-S-4a	20.3	36.9	33.9	200	346.8	5.9	4Φ8 4497 5Φ12 4243 3Φ16 3811	2.114 4497 4.243 3.811	0.328	2.114 2Φ12 4243	4.243	0.328	2Φ10 4497 1Φ10 4497 1Φ10 4497	4497 4497 4497	0.228 0.114 0.073	36.6	25	7.28	9.53	18.46	剪弯
G-S-4b	20.2	41.3	38.3	200	324.8	5.2	4Φ10 4497 6Φ14 4177	4.497 4.177	0.398	1.688 2Φ14 4177	4.177	0.398	2Φ10 4497 1Φ10 4497 1Φ10 4497	4497 4497 4497	0.203 0.102 0.102	44.1	30	7.75	12.66	22.75	剪弯
G-S-7c	20.1	46.3	43.3	200	360.8	4.6	3Φ10 4497 3Φ12 4243	4.497 4.243	0.462	1.661 2Φ16 3811	3.811	0.462	2Φ10 4497 1Φ10 4497	4497 4497	0.181 0.090	61	50	11.21	16.99	32.12	剪弯

附表 (续)

梁 号	实际尺寸 (cm)			跨度 l (cm)	R kg cm <sup>2</sup>	l <sub>h</sub> /c	跨 中 纵 筋		支 座 纵 筋		弯 筋	p <sub>a</sub> <sup>*</sup> (cm)	C <sup>*</sup> (cm)	P <sub>f</sub> <sup>*</sup> (Tm)	q <sub>0.2</sub> <sup>*</sup> (Tm)	q <sub>0.2</sub> <sup>*</sup> (Tm)	破 坏 形 态
	b	h	h <sub>0</sub>				根数× 直 径	R <sub>g</sub> kg cm <sup>2</sup>	μ (%)	根数× 直 径	R <sub>g</sub> kg cm <sup>2</sup>	μ <sup>ω</sup> (%)					
G-S-5a	20.2	19.8	16.8	220	273.2	13.1	6φ10 2φ16	3378 2287	2.735	2φ10	3378	0.463	—	—	—	2.51	3.42 斜拉
G-S-5b	20.3	19.8	16.8	220	251.8	13.1	6φ12 2φ16	3378 2287	2.722	2φ10 1φ16	3378 2287	0.050	—	—	—	4.13	5.01 斜拉
G-S-6a	20.9	25.0	22.0	220	242.5	10.0	6φ12 2φ16	2269 2287	2.463	2φ12	2269	0.492	—	—	—	3.05	3.67 斜拉
G-S-6b	20.2	25.0	22.0	220	262.0	10.0	6φ12 2φ16	2269 2287	2.548	4φ12	2269	0.107	—	—	—	3.89	4.95 7.87 斜拉
G-S-7a	20.3	30.2	27.2	220	229.2	8.1	5φ12 5φ14	2269 2685	2.610	1φ12 1φ14	2269 2685	0.484	—	—	—	3.71	5.08 斜拉
G-S-7b	20.3	29.6	26.2	220	250.8	8.3	5φ12 5φ14	2269 2285	2.673	1φ12 2φ14	2269 2685	0.494	—	—	—	5.51	7.06 9.60 1 拉
G-S-7c	20.4	30.2	27.2	220	244.7	8.1	6φ12 4φ14	2269 2686	2.519	2φ12 2φ14	2269 2689	0.962	—	—	—	5.53	10.08 11.12 剪斜弯
G-S-7d	20.5	30.0	26.5	220	228.5	8.3	6φ12 4φ14	2269 2686	2.527	2φ12 2φ14	2269 2685	0.965	—	—	—	5.53	8.92 12.10 剪拉
G-S-8a	20.5	59.7	56.7	220	198.7	3.9	6φ18 4φ20	2338 2833	2.483	1φ18 2φ20	2338 2833	0.489	—	—	—	10.69	13.87 斜拉
G-S-8b	20.1	59.9	56.9	220	259.0	3.9	6φ18 4φ20	2338 2833	2.523	2φ18 2φ20	2338 2833	0.994	—	—	—	12.51	15.01 0.78 斜拉

注: (1) 表中符号意义: R—混凝土标号; L/h<sub>0</sub>—跨高比; R<sub>g</sub>—钢筋抗拉强度; μ = A<sub>g</sub>/b h<sub>0</sub>—纵筋配筋率; μ<sub>w</sub> = A<sub>w</sub>/b h<sub>0</sub>—排弯筋的配率; A<sub>g</sub>—纵筋面积; A<sub>w</sub>—弯筋面积; a<sub>p</sub>—破坏斜截面末端至支座的水平距离; c<sup>\*</sup>—破坏斜截面的水平投影长度; q<sub>0.2</sub><sup>\*</sup>—最大斜裂缝宽度0.2毫米0.2毫米时的荷载; c<sub>p</sub><sup>\*</sup>—破坏荷载。

(2) 弯筋栏内, 每根梁自上而下的数字代表 A<sub>w1</sub>, A<sub>w2</sub>, A<sub>w3</sub>。

(3) 表中数据均为实测数据



## 参 考 文 献

- [1] 丁自强、黄相才: “集中荷载钢筋混凝土弯筋梁抗剪强度的试验研究”, 《水力发电》, 1980年第5期
- [2] 梁复诸: “在均布荷载作用下钢筋混凝土梁的斜截面强度研究”, 太原工学院土木系研究生毕业论文, 1966年2月
- [3] 同济大学工程结构研究室: “钢筋混凝土简支梁考虑剪跨比影响的抗剪强度计算”, 《钢筋混凝土结构研究报告选集(2)》中国建筑工业出版社, 1977年5月
- [4] 国家基本建设委员会: “钢筋混凝土结构设计规范(TJ10—74)”, 建筑工业出版社, 1974年
- [5] 水利电力部: “水工钢筋混凝土结构设计规范(SDJ20—78)”, 水利电力出版社, 1978年
- [6] 抗剪强度计算研究组: “钢筋混凝土梁的抗剪强度计算”, 《钢筋混凝土结构研究报告集》, 中国建筑工业出版社, 1977年5月
- [7] 丁自强、亢文慎: “钢筋混凝土水工厚板的抗剪配筋计算”, 《水利水电技术》, 1982年第8期
- [8] Leonhardt, F, und Walther “R. Beitrage zur Behandludg der schprobleme fm stahlbetonbau”, (Beton und Stalbetonbau), 1961—12, 1962—2、6、8
- [9] Whitney, C, S: “Ultimate Shear Strength of Refnforced Concrete Flat Slab Footings Beams and Frame Members Without Shear Reinforcement.” 《Journal ACI》, 1957, 10
- [10] ACI Standard 318—77: “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318—77)”, 1977
- [11] Cossio R.D, etc: “Behavior and Strength in Shear of Beams and Frames Without Web Reinforcement”, 《Journal ACI》, 1960, 2
- [12] Krefeld W, J. etc: “Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams”, 《Journal ACI》, 1966, 4