

# 钢筋混凝土四边简支整浇双向板 抗剪性能试验研究\*

韩菊红

(郑州工学院水环系)

**摘 要:** 本文依据所做的二十五块集中荷载下无腹筋钢筋混凝土四边简支整浇双向板的剪切试验结果, 分析了试件的破坏机理和受力特征, 讨论了影响剪切强度的主要因素, 并提出抗剪强度建议计算方法。

**关键词:** 双向板, 剪切

**中图分类号:** TU31

随着交通运输事业的蓬勃发展, 大型的集装箱、起重运输机械等作用在码头面板上的集中荷载越来越大。按照现行的港工规范计算方法, 抗剪设计是决定板厚的主要因素。尤其对于受集中荷载的双向板, 按单向板来进行抗剪设计缺乏必要的试验研究依据, 设计结果过于保守。因此, 钢筋砼双向板在集中荷载作用下的抗剪性能已成为迫切需要解决的课题。

本文对集中荷载下无腹筋钢筋砼简支整浇双向板的抗剪性能进行了研究。

## 1 国内外研究概况

双向板在集中荷载作用下的抗剪强度, 自塔尔博特 (Talbot) 1913 年发表第一篇论文以来, 已进行了相当多的研究, 在国外先后做了约 500 个构件的试验。试验结果表明, 集中荷载作用于双向板的剪切破坏形态均为冲切破坏。在国内, 冲切强度专题组也进行了大量的试验研究, 但是, 这些试验基本上都是以板柱连接的型式 (或柱下基础)、大体取反弯点范围大小的板进行的, 与码头面板、桥面板不尽相同, 没有考虑荷载位置移动、板面较大和支座约束等的影响。因此, 还不能确切阐明码头面板、桥面板等的剪切问题。但是, 从前人的研究来看, 所谓双向板的抗剪强度, 实际上等同于冲切强度。

---

\* 收稿日期: 1994-03-19

## 2 试验内容及方法

本试验主要研究: 在集中荷载作用下, 当板的边长比、集中荷载作用位置、纵向钢筋配筋率、板厚和加载面积等变化时, 无腹筋简支整浇双向板的抗剪性能。

### 2.1 试件设计

共设计了 25 块无腹筋简支整浇双向板。这些板都呈矩形、四边简支、无腹筋、整体浇筑成型和施加单个集中荷载。共有以下六种参变量:

2.1.1 板的边长比: 设计边长比  $L_b/L_a=0.5$ 、1.0、1.5、2.0 四种情况。其中  $L_a$  和  $L_b$  分别表示双向板的两边支承跨度, 在  $L_b=150\text{cm}$  不变的情况下,  $L_a$  取 300cm、150cm、100cm 和 75cm 四种不同长度。见图 1。

#### 2.1.2 集中荷载作用位置

选择六种具有代表性的加载位置, 即中置荷载 A、中偏置荷载 B、中边置荷载 C、偏中置荷载 D、双偏置荷载 E、偏边置荷载 F 等 (见图 1)。

2.1.3 配筋率: 对  $L_a=L_b=150\text{cm}$ 、 $h=15\text{cm}$  的方板, 在中心加载情况下, 设计了六种配筋率:

$$\rho=2.28\%、2.02\%、1.74\%、1.30\%、0.87\%、0.43\%$$

其中

$\rho$  为平均配筋率。

2.1.4 板厚: 设计了两种板厚, 即  $h=15\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ , 相应有效高度为  $12\text{cm}$ 、 $7.6\text{cm}$ 。

2.1.5 加载面积: 设计加载面均为正方形, 有三种不同面积  $c^2=15\times 15\text{cm}^2$ 、 $23\times 23\text{cm}^2$ 、 $30\times 30\text{cm}^2$ 。

变化板厚和加载面积的板均为中心加载, 配筋率亦均为  $1.74\%$ ,  $L_a=L_b=150\text{cm}$ 。

2.1.6 砼强度: 板的砼强度受龄期等的影响, 变化较大,  $f_{cu}=14.82\sim 49.04\text{MPa}$ 。

### 2.2 试验装置及测试内容

试验板放在支承钢框上, 用荷载稳压器通过液压千斤顶正向加载, 用荷载传感器和 X-Y 函数记录仪测绘  $V\sim f_{\max}$  曲线, 在试验板和支承钢框间设置钢球窝支座及可调式反力传感器, 以测取支反力分布。

本试验主要测试: 各级荷载下的板面挠度, 支座反力, 钢筋及砼应变, 裂缝观测, 板边转角和板体破坏特征等。

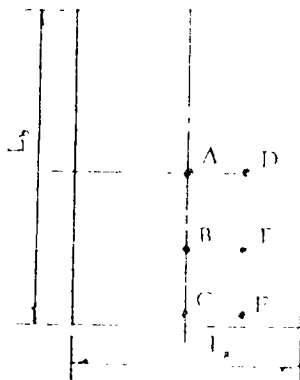


图 1 加载位置示意图

## 3 试验结果及分析

双向板抗剪试验结果见表 1。

| 表 1 抗剪强度试验结果 |                           |                                     |           |               |                |                 |                       |                             |         |
|--------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------|---------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|---------|
| 序号           | 板 号                       | $L_a \times L_b \times h_0$<br>(cm) | C<br>(cm) | $\rho$<br>(%) | $f_t$<br>(MPa) | $V_u^0$<br>(KN) | $\frac{V_u''}{V_u^0}$ | $\frac{V_{u,0.2}''}{V_u^0}$ | 破坏类型    |
| 1            | SB-L300-A <sub>0</sub>    | 300× 150× 12                        | 15        | 2.40          | 1.74           | 320.0           | 0.17                  | 0.66                        | 完全冲切破坏  |
| 2            | SB-L150-A <sub>0</sub>    | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 2.10           | 320.0           | 0.19                  | 0.47                        | 完全冲切破坏  |
| 3            | SB-L75-A <sub>0</sub>     | 75× 150× 12                         | 15        | 1.71          | 1.63           | 240.0           | 0.10                  | 0.53                        | 完全冲切破坏  |
| 4            | SB-L150-A                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 2.14           | 299.8           | 0.15                  | 0.53                        | 完全冲切破坏  |
| 5            | SB-L150-B                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 1.81           | 355.5           | 0.19                  | 0.62                        | 不完全冲切破坏 |
| 6            | SB-L150-C                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 1.92           | 447.1           | 0.16                  | 0.52                        | 冲压破坏    |
| 7            | SB-L150-D                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 1.39           | 207.0           | 0.25                  | 0.68                        | 不完全冲切破坏 |
| 8            | SB-L150-E                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 1.39           | 245.4           | 0.18                  | 0.93                        | 不完全冲切破坏 |
| 9            | SB-L150-F                 | 150× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 2.08           | 522.2           | 0.16                  | 0.65                        | 冲压破坏    |
| 10           | SB-L100-A                 | 100× 150× 12                        | 15        | 2.28          | 1.64           | 260.0           | 0.14                  | 0.58                        | 完全冲切破坏  |
| 11           | SB-L75-A                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 2.10           | 332.7           | 0.14                  | 0.66                        | 完全冲切破坏  |
| 12           | SB-L75-B                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 1.90           | 331.0           | 0.16                  | /                           | 不完全冲切破坏 |
| 13           | SB-L75-C                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 2.22           | 481.7           | 0.09                  | 0.41                        | 冲压破坏    |
| 14           | SB-L75-D                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 1.65           | 300.0           | 0.23                  | 0.60                        | 冲压破坏    |
| 15           | SB-L75-E                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 1.44           | 254.0           | 0.21                  | /                           | 冲压破坏    |
| 16           | SB-L75-F                  | 75× 150× 12                         | 15        | 2.28          | 1.91           | 440.0           | 0.25                  | 0.89                        | 冲压破坏    |
| 17           | SB-L150-A <sub>1</sub>    | 150× 150× 11.8                      | 15        | 2.02          | 2.46           | 352.8           | 0.23                  | 0.64                        | 完全冲切破坏  |
| 18           | SB-L150-A <sub>2</sub>    | 150× 150× 11.8                      | 15        | 1.74          | 2.32           | 343.0           | 0.15                  | /                           | 完全冲切破坏  |
| 19           | SB-L150-A <sub>3</sub>    | 150× 150× 11.8                      | 15        | 1.30          | 2.34           | 284.2           | 0.16                  | 0.52                        | 完全冲切破坏  |
| 20           | SB-L150-A <sub>4</sub>    | 150× 150× 12                        | 15        | 0.87          | 2.35           | 313.6           | 0.21                  | 0.53                        | 完全冲切破坏  |
| 21           | SB-L150-A <sub>5</sub>    | 150× 150× 12                        | 15        | 0.43          | 2.18           | 274.4           | 0.29                  | 0.64                        | 弯曲冲切破坏  |
| 22           | SBC <sub>2</sub> -L150-A  | 150× 150× 12                        | 30        | 1.74          | 3.08           | 575.3           | 0.11                  | 0.64                        | 完全冲切破坏  |
| 23           | SBH-L150-A                | 150× 150× 7.6                       | 15        | 1.74          | 2.67           | 254.8           | 0.10                  | 0.38                        | 完全冲切破坏  |
| 24           | SBC <sub>1</sub> -L150-A  | 150× 150× 7.6                       | 23        | 1.74          | 2.73           | 279.3           | 0.09                  | 0.38                        | 完全冲切破坏  |
| 25           | SBHC <sub>2</sub> -L150-A | 150× 150× 7.6                       | 30        | 1.74          | 2.95           | 323.4           | 0.07                  | 0.41                        | 完全冲切破坏  |

3.1 双向板的受力阶段

从加载开始到破坏，双向板的受剪切行为特征可分为三个阶段：

3.1.1 第Ⅰ阶段：从开始加载到第一条裂缝出现，板的荷载挠度曲线呈线性变化，板基本上处于弹性工作阶段，如图2的线段0a。裂缝出现时的荷载约为破坏荷载的（9~29%）。开裂位置在板加载中心点附近的底面，初始裂缝平行于板边。

3.1.2 第Ⅱ阶段：从裂缝出现到破坏，各种裂缝相继出现出齐并开展，板体挠度随荷载而增大的速率较第Ⅰ阶段大，如图2的ab段。受拉区砼逐渐脱离工作，钢筋的应变较前阶段增加许多。

3.1.3 第Ⅲ阶段：达到破坏荷载

（ $V_u^0$ ）时，板顶加载面周边出现下陷，板沿着冲切锥面突然失去承载力，如图2的bc段。此阶段说明板体产生了无予告的脆性破坏。

### 3.2 裂缝种类及特征：

双向板在集中荷载作用下产生的裂缝种类有：板底正裂缝、幅射缝、冲切缝及板侧斜裂缝和板顶冲陷缝等。

3.2.1 板底正裂缝：板底面加载中心处产生的平行于板边方向的正交十字裂缝，此种裂缝根数很少，随荷载增大向板边延伸，形成第一圈环缝。主要是由于板底面的双向弯矩所引起的正应力超过砼抗拉强度而产生的张开型裂缝，类似于梁的正裂缝。

3.2.2 板底幅射缝：以板底面加载中心为圆心，向板四周边发展的幅射状裂缝。也属于张开缝。主要是板底面加载中心外的受拉区砼在双向弯矩及扭矩的共同作用下引起的主拉应力过大而产生的。

3.2.3 板底冲切裂缝：板底面距加载中心一定距离处产生的有较大水平和竖直错动的环状裂缝。此环状冲切裂缝外的板体沿缝边缘的砼有局部挤压破碎及掉块现象。此缝属剪错缝，主要是由于加载面附近的板体斜截面剪应力过大而引起的。

3.2.4 板顶冲陷缝：此种裂缝在板体破坏时产生，而且是冲切破坏时必然出现的现象。从板表面看有明显的错动，这是由于局部范围内剪力过大所产生的。

从更为广义的分类角度来看，正裂缝和幅射缝都是张开缝，主要作用是弯矩；冲切缝和冲陷缝是剪错缝，主要作用是剪力，从敞开的板体来看，冲切缝和冲陷缝在破坏时相连接形成破坏锥体的锥面，如图3。

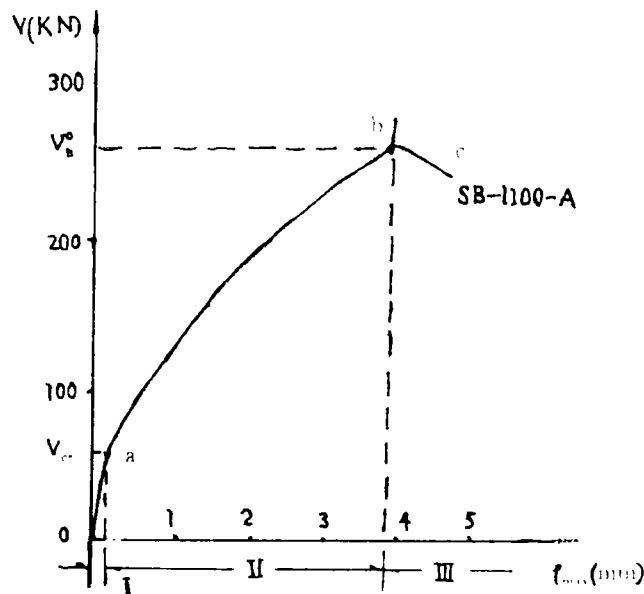


图2 V- $f_{max}$ 关系曲线

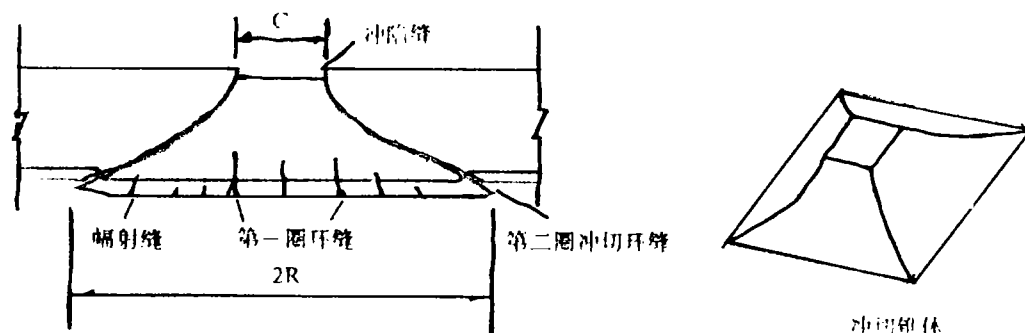


图3 冲切破坏锥体及典型裂缝示意图

### 3.3 双向板的剪切破坏形态和种类

3.3.1 破坏特征: 25 块试验板的破坏形态总的来说都属于冲切破坏, 有如下特点:

- ① 破坏时无予告, 属脆性破坏;
- ② 形成冲切锥体, 此破坏锥体与四周板体之间有明显的错动, 锥体底面形成下凹如锅底状的曲面;
- ③ 破坏时受力钢筋部分屈服, 通过破坏斜锥面的钢筋形成局部弯转。

### 3.3.2 破坏形态

双向板在集中荷载下的破坏形态可归结为以下三种: (图 4)

① 完全冲切破坏: 板顶加载面下的砼被冲陷下去, 同时板底面形成一个正方形或矩形的完全连贯环状冲切缝, 缝内板体底面呈锅底状。产生这类破坏的原因是集中荷载附近的板体斜截面上主拉应力超过了砼的抗拉强度而产生的斜拉破坏。

② 不完全冲切破坏: 也属于斜拉破坏。和完全冲切破坏不同的是, 板顶沿加载面周边冲下的是一个不对称的、各边冲陷深度和砼压碎程度都不同的砼块体, 板底面形成一个不完全的环状冲切裂缝。主要是由于加载中心到各支承边的距离相差较大, 使沿加载中心周围内力分布不对称而引起加载面附近各方向的板体破坏程度不同而引起的。

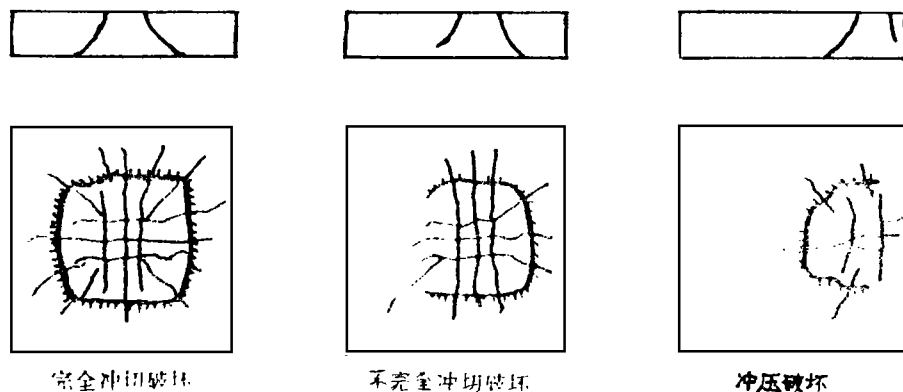


图4 板破坏形态示意图

③ 冲压破坏: 加载中心距支承边很近的方向板底面正裂缝经由板侧而上升到板顶加载面附近, 产生较宽的贯穿性裂缝, 而加载中心距支承边较远方向的板体仍产生明显的冲切裂缝。产生此类破坏的原因有二: 一是紧靠支承边方向的板体在顶面荷载及支承边的共

同作用下产生斜压破坏,二是远离支承边方向的板体仍产生斜拉破坏。

以上三种破坏均为无予告的脆性破坏。

### 3.4 集中荷载下双向板的受力反应

根据所测到的挠度、支反力、钢筋及砼应变等可知,双向板的受力反应具有明显的局部性:

3.4.1 双向板上的集中荷载通过荷载四周的砼和钢筋向支座传递。从试验可知,板体抗剪反应的集度从加载点向四周迅速降低;

3.4.2 板底裂缝围绕集中荷载向四周传播,但集中荷载周围的裂缝较密;

3.4.3 板的挠度以集中荷载作用点处最大,向四周逐渐减小;

3.4.4 钢筋及砼的应变在集中荷载区及其周围最大,向四周迅速降低;

3.4.5 距集中荷载越近的支座反力越大。

试验已经证实<sup>[1]</sup>,抗剪反应最强裂的区域在集中荷载周围,破坏时也出现了一冲切锥体,冲切锥体的顶面周长即为荷载作用面的周长,底面的边长在中心加载时为  $c+2h_0$ ,高度为板体有效高度  $h_0$ 。

## 4 整浇双向板的抗剪强度

由试验知,双向板的受剪破坏形态都是冲切破坏。因此,双向板的抗剪强度问题实际上等同于抗冲切强度问题。

### 4.1 影响抗冲切强度的主要因素

4.1.1 荷载作用位置:抗冲切强度以荷载作用于板中心时最低,荷载作用位置愈靠近板边其抗冲切强度愈高,见图 5。

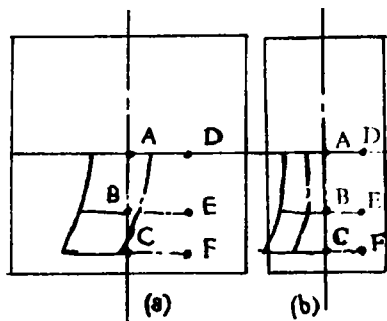


图 5 抗冲切强度与加载位置关系

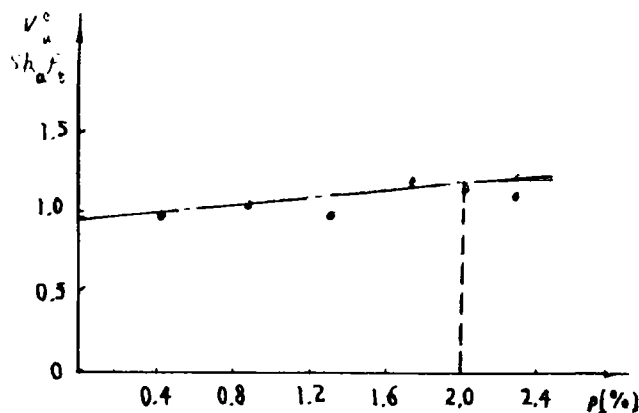


图 6 抗冲切强度与配筋率的关系

4.1.2 配筋率:试验表明(图 6),抗冲切强度随纵筋配筋率的提高而提高,但强度提高的幅度不如配筋率提高的幅度大。

4.1.3 板的有效高度:试验表明,抗冲切强度随板厚的增加而提高,两者为线性关系。

4.1.4 边长比:图 7 为中心加载板的抗冲切强度与边长比的关系。由图可知,在双向板的范围内,抗冲切强度和板的边长比的变化无关。

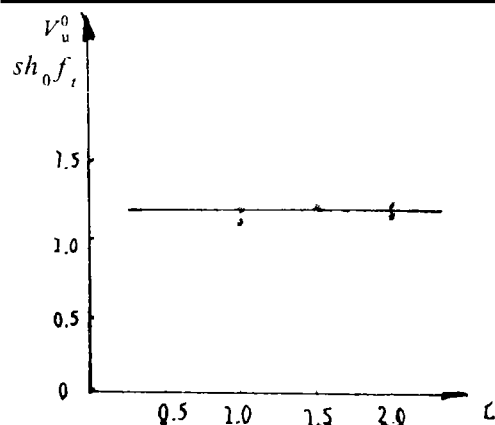
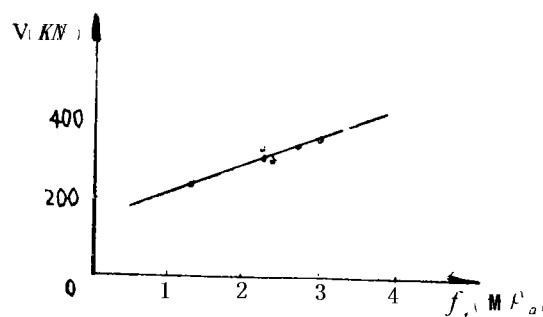


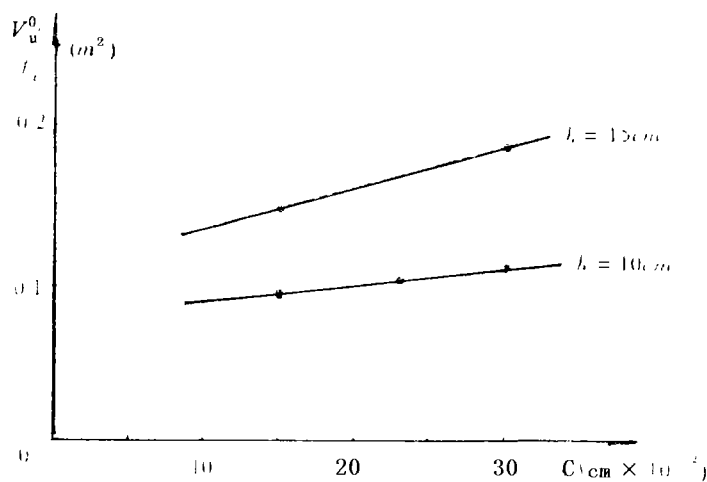
图7 抗冲切强度与板边长比的关系

图8  $V_u^0 \sim f_t$  关系曲线

4.1.5 砼强度: 试验表明, 砼强度越高, 板的抗冲切强度越高。且抗冲切强度和砼抗拉强度成线性关系, 见图8

4.1.6 加载面积: 试验表明, 抗冲切强度随加载周长的增加而提高, 两者呈线性关系, 见图9。但是, 若以加载面边长与有效高度的比值  $c/h_0$  作为参数, 则抗冲切强度随  $c/h_0$  的增大而降低, 如图10。

4.2 双向板抗剪强度计算的建议公式

图9  $V_u^0 \sim c$  关系曲线

根据上述各主要影响因素分析, 和塑性极限分析<sup>[1]</sup>,

对各因素与抗剪强度的关系, 可得出如下结论: 砼抗拉强度、板的有效高度和冲切锥体的周长是主要影响因素, 抗剪强度与上述三者之间呈线性关系; 其它因素也都在不同程度上影响抗剪强度。

经回归拟合分析, 给出四边简支整浇双向板在集中荷载作用下的抗剪强度计算公式如下:

$$V_u = \xi_1 \xi_2 \xi_3 f_t s h_0 \quad (1)$$

式中:  $\xi_1$ ——荷载位置影响系数; 通过资料拟合, 取  $\xi_1 = 0.9 + \frac{1}{1 + \lambda^2}$ ,

$\lambda$  为集中荷载至最近板边的剪跨比; 当  $\lambda > 3$  时, 取  $\lambda = 3$ ; 当  $\lambda < 1$  时, 取  $\lambda = 1$ 。

$\xi_2$ ——纵筋配筋率影响系数; 参照图6取  $\xi_2 = 0.95 + 12.5\rho$ ,

$\rho = \sqrt{\rho_a \rho_b}$ , 当  $\rho > 0.02$  时,  $\rho = 0.02$ ; 当  $\rho < 0.004$  时, 取  $\rho = 0.004$ 。

$\rho_a$ 、 $\rho_b$  为双向板两个方向的配筋率。

$\xi_3$ ——加载边长与有效板厚之比 $c/h_0$ 的影响系数,参照图10,取

$$\xi_3=0.70+\frac{1}{2+c/h_0}.$$

$s$ ——距集中荷载作用面周边 $h_0/2$ 的周长,当作用面周边距支座距离均大于 $h_0$ 时, $s=4(c+h_0)$ ;当作用面某侧边距支座距离小于 $h_0$ 时,则该边的周长取该距离的1/2处来计算。

$f_t$ ——砼抗拉强度。

$h_0$ ——板的平均有效高度, $h_0=(h_{aa}+h_{ab})/2$ 。

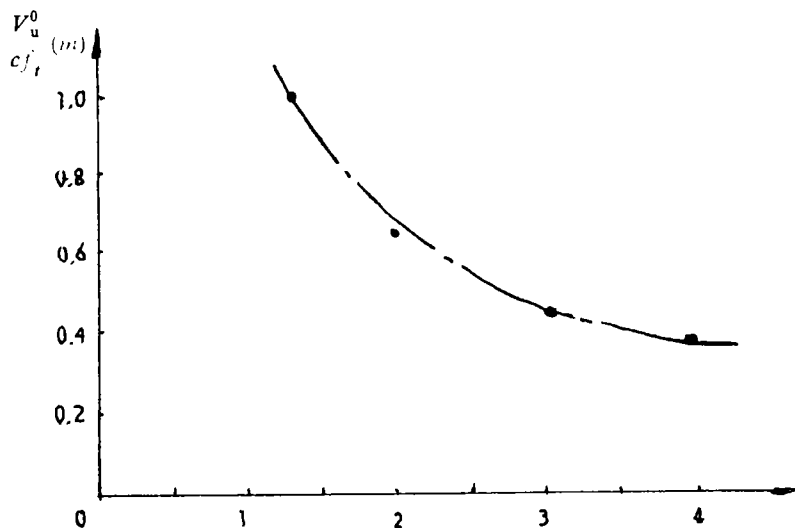


图 10  $V_u^0 \sim c/h_0$  关系曲线

试验板抗剪强度试验值  $V_u^0$  与按式 (1) 计算的计算值比较可发现其符合性很好,平均比值为 1.020, 标准差为 0.124, 说明式 (1) 是一个考虑因素较全面的公式。采用此建议公式进行工程设计, 将比现行港工规范设计方法节约砼约 20%, 由此可带来显著的经济效益<sup>〔2〕</sup>。

## 5 结语

根据上述试验结果分析, 对四边简支整浇钢筋砼双向板在集中荷载作用下的抗剪性能可得出如下结论:

- 5.1 双向板在集中荷载下的受力反应主要集中在局部荷载周围的板体。
- 5.2 双向板的裂缝形态主要有三种: 板底正裂缝, 幅射缝和环状冲切缝。
- 5.3 双向板的破坏形态主要有三种: 完全冲切破坏, 不完全冲切破坏和冲压破坏, 所有破坏均为脆性破坏。
- 5.4 双向板的抗剪强度随砼强度、板厚、加载面周长、配筋率的增大而提高, 随加载边长与有效厚度比值的增大而降低。集中荷载作用在板中心时的抗剪强度最低。



5.5 建议计算公式为  $V_u = \xi_1 \xi_2 \xi_3 f_t s h_0$ , 此公式与试验资料符合性好, 考虑因素全面。

### 参 考 文 献

- 1 丁自强, 韩菊红, 赵广田. 钢筋混凝土简支整浇双向板抗剪性能试验研究. <钢筋砼双向板抗剪性能试验研究>分报告之一, 1989年12月, 郑州工学院.
- 2 “钢筋砼双向板抗剪性能试验研究综合报告”, 郑州工学院, 1991年4月.
- 3 Nilsen M.P.: “Limit Analysis and Concrete Plasticity”, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.

## Experimental Investigation of shear Strength of Two-Way Reinforced Concrete Simply Supported Slabs

Han Juhong  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** According to the shear test results of 25 specimens of two-way reinforced concrete simply supported slabs without web reinforcement under concentrated load, the patterns of failure and the behavior of the specimens subjected to increasing loading are described and analysed, and the main influencing factors are discussed. A proposed method of calculating shear strength of such elements are put forward.

**Keywords:** two-way slabs, shear.