

神戸大学工学部

正 員

○ 藤 井 孝

"

"

篠 村 雄 佑

(株) 栗本鉄工所

"

佐 賀 良 助

## [1] 緒 言

コンクリートに局部荷重を作用させた場合、その荷重板直下の支圧応力はそのコンクリート強度 $\sigma_c$ と異なる値を示す。従来この支圧強度に対して多くの実験が行われてゐるが、多くは圧縮強度 $\sigma_c$ 、荷重面積比 $A/A_0$ で表示してゐる。局部荷重を受けるコンクリートの破壊機構は複雑であり、荷重板直下の局部破壊、材中心線上に生ずる割裂引張応力による割裂破壊、荷重板端の断面に生ずるひびわれによるせん断破壊等が部材寸法比 $(b/a)$ 、荷重面積比 $(A/A_0)$ 、コンクリート強度等に影響を受けて、その破壊機構を変化させてゐる。本文は $b/a$ 、 $A/A_0$ を変化させてその破壊機構および支圧強度におよぼす影響を調べ、また補強効果を実験的に検討したものである。

## [2] 実験計画

本実験では、荷重状態は2次元とし、荷重幅率 $\beta(A/A_0)$ は0.2~0.7の6種に、 $b/a$ は1.0, 2.0, 2.75の3種とした。また建築学会のPC規準による許容支圧応力を用いて定着部を設計した場合、そのコンクリート許容引張応力 $\sigma_{ta}$ の相違による破壊安全率の変化を、さらに補強筋を定着域に等配分した場合の支圧強度および破壊状況を検討した。

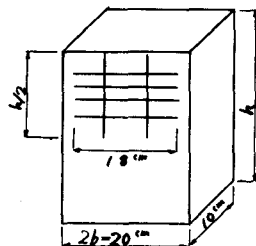


図-1. 供試体形状、寸法

## [3] 供試体の作成

供試体はコンクリート打設後24時間で脱型し、養生室で試験日まで湿布養生した。使用セメントはアサヒポセメント、砂利は吉野川産、最大粒径 $20\text{mm}$ 、砂は吉野川産、粗粒率 $2.61$ であった。コンクリート設計強度は $50\%$ 、供試体は各2個とした。

## [4] 供試体形状、寸法

供試体形状、寸法を図-1に示す。すべての実験シリーズにおいて供試体の幅および奥行き長さ $(a)$ は一定とし、それぞれ $20\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ とした。高さ $(h)$ は無筋コンクリートでは $20\text{cm}$ 、 $40\text{cm}$ 、 $55\text{cm}$ とし、補強供試体はすべて $40\text{cm}$ である。

## [5] 補強筋の形状、寸法および鉄筋量

補強筋はすべて供試体上部 $20\text{cm}$ の間に配置した。シリーズD、Eでは補強筋はIyengarの2次元解を用いて算出し、この場合、設計コンクリート圧縮強度は $50\%$ 、コンクリート引張強度 $\sigma_{ta}$ は $10$ および $20\%$ 、鉄筋許容引張応力 $\sigma_{sa}=1400$ とした。鉄筋はその重心が割裂引張力の圆心と一致するように配置した。(図-1参照)

表-1 供試体D、Eの設計荷重および鉄筋量

| (B)                               | 1 (0.2) | 2 (0.3) | 3 (0.4) | 4 (0.5) | 5 (0.6) | 6 (0.7) |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 設計荷重 (kN)                         | 16.0    | 20.7    | 25.3    | 28.3    | 31.0    | 33.4    |
| 鉄筋<br>本数<br>( $\phi 6\text{mm}$ ) | D-      | 6       | 8       | 8       | 8       | 6       |
|                                   | E-      | 5       | 7       | 6       | 5       | 4       |

設計荷重、鉄筋量を表-1に示す。鉄筋径は $6\text{mm}$ 、材質はSR24である。シリーズFでは鉄筋本数をD-2と同一の8本とし、シリーズGはFの2倍とした。補強筋は荷重面より $1\text{cm}$ の位置から $20\text{cm}$ の間に17等間隔に配置した。

# [6] 実験結果および考察

## (1) 無筋供試体のひびわれおよび破壊性状

無筋供試体の破壊性状は、その部材寸法比 $h/2b$ および載荷幅率 $\beta$ によって大きく影響を受ける。 $h/2b=1.0$ の場合、初ひびわれは $\beta$ に無関係に載荷極端より生じ(以下せん断ひびわれと記す、図-2(b)), さらに荷重上昇後圧壊した。 $h/2b=2.0$ では、 $\beta=0.2, 0.3$ において供試体軸上より初ひびわれ(以下割裂ひびわれと記す、図-2(a))が発生し、 $\beta=0.4\sim0.7$ においては、初ひびわれはせん断ひびわれであり、荷重上昇後圧壊した。

$h/2b=2.75$ では、 $\beta=0.2\sim0.6$ において割裂ひびわれを生じ、 $\beta=0.7$ の場合だけがせん断ひびわれであった。なお割裂ひびわれの場合、破壊は急激で、ひびわれ後の荷重上昇はごくわずか(表-2)であった。割裂ひびわれ域とせん断ひびわれ域は図-5に示すようになり、両者の境界線は次式で与えられる。

$$(h/2b)^{0.437} = \frac{1.3}{5.67} h (1/\beta)^{0.5}, \quad 1/2 = \sigma_{\max}/g, \quad g = P/2bt \quad (1)$$

## (2) 割裂ひびわれ時の支圧応力 $g_{cr}$ の算定法

図-3は $h=40\text{cm}$ ,  $50\text{cm}$ 供試体において、割裂ひびわれを生じたものについて、Iyengar理論値と比較したものである。ここに理論値とは、理論解における材軸上の最大引張応力 $\sigma_{\max}$ がコンクリートの引張強度 $\sigma_t$ に達したときの値である。図中各点の実測値、実線は理論解の1.3倍した値を示したもので、実測値と理論値とはよく一致している。したがって本実験においては、

$$h/2b=2.0 \quad \dots \dots \beta=0.2, 0.3$$

$$h/2b=2.75 \quad \dots \dots 0.2 \leq \beta \leq 0.6$$

の範囲において、そのひびわれ荷重は、さらにひびわれ荷重と破壊荷重との差がほとんどないことから、破壊荷重はIyengar解を用いて、かなり正確に求めることができる。また理論値と実測値がよく一致することは、ひびわれ荷重 $h$ は破壊荷重はコンクリート引張強度 $\sigma_t$ と一次比例の関係にあることを示している。なお、割裂ひびわれ時の支圧応力 $g_{cr}$ は次式で表わされる。

$$g_{cr} = A \cdot h \cdot \frac{\sigma_t}{\beta} \quad (\text{ここに } A=1.3) \quad (2)$$

## (3) せん断ひびわれ時の支圧応力 $g_{cr}$ の算定法

せん断ひびわれを生じた供試体につき、ひびわれ時の支圧応力 $g_{cr}$ と $\beta$ との関係を両対数方眼紙にプロットすると図-4のようになる。 $h=20\text{cm}$ ,  $h=40\text{cm}$ の場合の $g_{cr}$ と $\beta$ との関係を数式表示したものを同図中に示す。この式より、寸法 $(h/2b)$ 効果をも含めた $g_{cr}$ の実験式は(3)式となる。

$$g_{cr} = a (h/2b)^\alpha \sigma_t (1/\beta)^\delta \quad (\text{ここに } a=5.67, \alpha=0.437, \delta=0.5) \quad (3)$$

図-4を図-3と比較すると、 $h=20\text{cm}$ の場合、 $g_{cr}$ はIyengar理論荷重(2)式の下側にあり、また $h=40\text{cm}$ の場合は、 $\beta \geq 0.4$ のとき同様の状態となつてゐる。したがって、割裂ひびわれが発生する以前にせ

表-2. 実験結果(無筋供試体)

| (h)        | ( $\beta$ )                 | 1(0.2) | 2(0.3) | 3(0.4) | 4(0.5) | 5(0.6) | 6(0.7) |
|------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A-<br>(20) | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 461    | 461    | 461    | 461    | 461    | 461    |
|            | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 35.2   | 35.2   | 35.2   | 35.2   | 35.2   | 35.2   |
|            | $P_{cr} (\text{kg})$        | 17.82  | 21.58  | 23.48  | 32.30  | 29.40  | 30.50  |
|            | $P_{max} (\text{kg})$       | 20.40  | 24.70  | 27.88  | 40.60  | 43.90  | 46.80  |
| B-<br>(40) | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 478    | 478    | 478    | 492    | 492    | 492    |
|            | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 28.0   | 28.0   | 28.0   | 33.1   | 33.1   | 33.1   |
|            | $P_{cr} (\text{kg})$        | 20.58  | 22.53  | 25.65  | 30.40  | 39.70  | 38.50  |
|            | $P_{max} (\text{kg})$       | 21.50  | 23.48  | 30.68  | 36.75  | 43.98  | 55.07  |
| C-<br>(55) | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 560    | 560    | 560    | 520    | 520    | 520    |
|            | $\sigma_t (\text{kg/cm}^2)$ | 39.7   | 39.7   | 39.7   | 39.6   | 39.6   | 39.6   |
|            | $P_{cr} (\text{kg})$        | 25.50  | 33.95  | 39.80  | 47.15  | 58.90  | 48.80  |
|            | $P_{max} (\text{kg})$       | 25.50  | 34.55  | 45.40  | 47.15  | 59.35  | 61.60  |

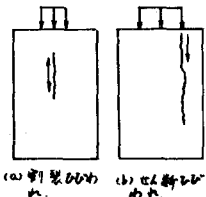


図-2. ひびわれ状況

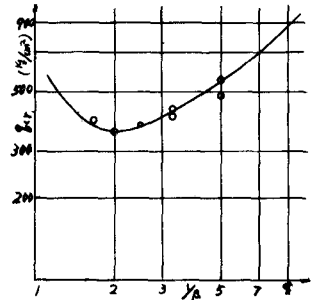
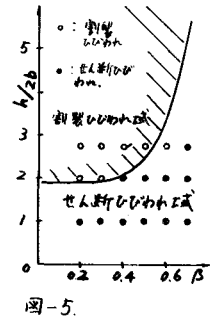
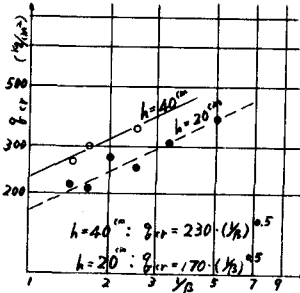


図-3. 割裂ひびわれ時の $g_{cr}$

せん断ひびわれが生ずる  $\beta$  の値は供試体の高さ  $h$  が増加するにつれて大きくなっている。割裂ひびわれの生ずる域とせん断ひびわれの生ずる域との境界線(図-5)はすでに(1)式で示したが、これは(2)式と(3)式とを等置して求めたものである。(2)式と(3)式のうち、小さい値となる方がその供試体のひびわれ荷重となる(図-6参照)。



(4) せん断ひびわれ後の破壊時支圧能力  $g_{max}$

図-4. せん断ひびわれ時の  $g_{cr}$

図-5.

(1) にありそのベタとあり、 $h=40mm$  にありはせん断ひびわれは載荷板端より垂直に生じたので、せん断ひびわれ後の供試体を図-7 のように考えると、A-A断面のひびわれ直前のせん断力  $T_0$  は、

$$T_0 = (1-\beta)\beta b g_{cr} \quad (g_{cr} = P_{cr}/2\beta b t) \quad (4)$$

さらにひびわれ直後のA-A断面のせん断力  $T$ 、底面での支圧力を  $g_1, g_2$  とすれば、力の釣り合いから

$$\beta \geq 0.5, \quad T = \frac{2(1-\beta)}{(1+\beta)^2} \cdot (7\beta^2 + 4\beta + 1) \cdot b g_{cr}, \quad g_1 = \frac{4(2-\beta)\beta}{(1+\beta)^2} g_{cr}, \quad g_2 = \frac{4(2-\beta)\beta}{(1+\beta)^2} g_{cr} \quad (5)$$

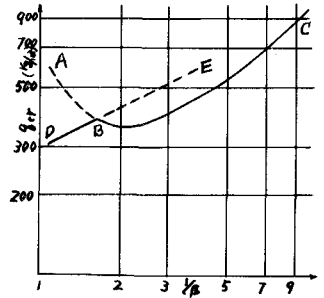


図-6. 任意供試の  $g_{cr}$

$$\beta < 0.5, \quad T = \frac{2}{\beta} \beta b g_{cr}, \quad g_1 = 0, \quad g_2 = \frac{4}{\beta} g_{cr} \quad (6)$$

したがって、境界条件の変化によりかんたんには断定できず、A-A断面のせん断力  $T$  が荷重上昇後  $T_0$  に達したとき再びA-A断面にせん断ひびわれが生ずるとすれば、初ひびわれ後A-A断面にせん断ひびわれが生ずるためには、荷重は  $T_0/T$  倍だけ上昇せねばならない。表-3によれば、 $\beta$  が大になるほど  $T_0/T$  の値は小さくなり、A-A断面よりひびわれが発生しやすくなる。またせん断ひびわれにより  $g_2$  は  $g_{cr}$  より大きくなる。したがってこの  $g_2$  と  $g_{cr}$  との比が十分大であれば、再びA-A断面にせん断ひびわれが発生し供試体は全面載荷の状態が破壊されることになる。しかし本実験ではひびわれ時に  $g_2$  は  $g_{cr}$  より  $T_0/T$  の値より小さくあり、したがって表-3に示すか、図-7. 仮想供試体のように  $g_2$  が  $g_{cr}$  に達したとき供試体は破壊すると考えられる。

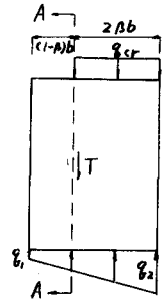


表-3. せん断ひびわれ後の支圧強度

すると考えられる。

(5) 補強効果

本実験では、補強供試体の初ひびわれはすべりの  $\beta$  によりせん断ひびわれが発生した。

| $\beta$ | $T_0/T$ | $g_2/g_{cr}$ | ひびわれ時                          |                             |              | 破壊時                             |                             | $g_c$ (%) |
|---------|---------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------|
|         |         |              | $g_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $g_2$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $g_2/g_{cr}$ | $g_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $g_c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |           |
| 0.4     | 2.64    | 1.33         | 321                            | 427                         | 1.32         | 384                             | 511                         | 478       |
| 0.5     | 2.25    | 1.33         | 304                            | 404                         | 1.32         | 368                             | 489                         | 492       |
| 0.6     | 1.83    | 1.31         | 331                            | 433                         | 1.31         | 367                             | 481                         | "         |
| 0.7     | 1.51    | 1.26         | 275                            | 347                         | 1.26         | 393                             | 495                         | "         |

表-4は供試体D,Eにおける設計荷重に対する破壊安全率を示している。供試体Dにおいてはその安全率は平均2.00、Eにおいて平均1.89であり、 $g_{cr}$ の相違によつて安全率は6%上昇した(すぎない)。

表-5は無筋供試体に対する供試体D,Eの破壊荷重の比( $P_{max}/P_{max}$ )を示したものである。無筋に対して補強供試体は  $g_{cr}=10\%$  の場合平均32%,  $g_{cr}=20\%$  の場合平均21%の重量増加を示している。以上のべ

表-4. 破壊安全率

たように  $g_{cr}$  を変化させてもその効果はあまりない。

| $\beta$      | $\beta$ | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  |
|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|
|              |         | 2.17 | 1.78 | 1.95 | 1.96 | 2.11 | 2.62 |
| $P_{design}$ | D       | 2.17 | 1.78 | 1.95 | 1.96 | 2.11 | 2.62 |
|              | E       | 1.88 | 1.94 | 1.84 | 2.04 | 1.77 | 1.89 |

表-6は供試体Fにおける補強効果を示したものである。ひびわれ荷重に対しては平均約1.07であり、水平筋により約7%の荷重増加を示している。

また破壊荷重に対しては約20~55%の増加を示している。供試体Dにおける $\beta=0.3\sim0.5$ では補強鉄筋数はこの場合と同一であるが、荷重上昇率は供試体Dでは平均35%,  $F_r$ は49%であり、鉄筋が分布させた方が補強効果が大きい。これはせん断ひびわれ後のひびわれた両部分の結合が鉄筋を分布させた方が良く、したがってひびわれによる荷重の偏心率が小さくなるためであろう。

図-8は鉄筋量の増加に対する $f_{max}$ の変化を示している。この場合コンクリート強度を $500\text{ kg/cm}^2$ として補正した。図-8によれば補強筋を増加させた場合、圧縮力 $f_{max}$ の増加は $\beta=0.2$ の場合かなり認められるが、 $\beta$ が大きくなるとあまり効果は認められない。

これは $\beta$ が小さい場合、せん断ひびわれ後のひびわれた両部分の体積比は1に近く、したがって両部分の結合が密であるほど荷重は上昇するが、 $\beta$ が大きくなるとその体積比は0に近づき、したがって補強筋の増加に対してその補強効果は増大しないと思われる。

## [7] 結論

(1) 無筋供試体のひびわれ、破壊性状は $k/b$ ,  $\beta$ によって異なり、(7)式で計算される範囲では割裂ひびわれ、(8)式で計算される範囲ではせん断ひびわれを要する。

$$(k/b)^0 \geq \frac{A}{\alpha} \cdot k \cdot (\beta)^r \quad \dots\dots (7)$$

$$(k/b)^0 \leq \frac{A}{\alpha} \cdot k \cdot (\beta)^r \quad \dots\dots (8)$$

本実験では定数の値は $\alpha=0.437$ ,  $A=1.30$ ,  $Q=5.67$ ,  $r=0.57$ であった。ひびわれ後の荷重上昇は割裂ひびわれの場合ほとんどないが、せん断ひびわれの場合は約27%上昇する。

(2) 無筋コンクリートのひびわれ時の圧縮力 $f_r$ は(7), (8)式で与えられる範囲に対して次式で求められる。

$$\text{割裂ひびわれ: } f_{cr} = A \cdot k \cdot \sigma_k / \beta, \quad k = \sigma_{cr}^{max} / f_r \quad \dots\dots (9)$$

$$\text{せん断ひびわれ: } f_{cr} = a \cdot (k/b)^0 \cdot \sigma_k \cdot (\beta)^r \quad \dots\dots (10)$$

(3) 無筋コンクリート供試体の破壊荷重 $P_{max}$ は割裂ひびわれを要する供試体に対しては(9)式より、またせん断ひびわれを要する供試体に対しては、 $P_{max}$ はコンクリート強度 $\sigma_k$ に比例して表-3に示す数値を用いて求められる。

(4) 補強筋は割裂引張力に荷重を集中して配置するよりも分散させて配置した方がひびわれ後の結合効果が大きく、したがって荷重増加倍率も大きかった。

(5) 鉄筋量を増加させた場合、その荷重増加倍率は $\beta$ の小さくなるほど認められた。

表-5. 供試体D, Eにおける補強効果

| $(\sigma_k)$ ( $\beta$ ) |                   | 1(0.2) | 2(0.3) | 3(0.4) | 4(0.5) | 5(0.6) | 6(0.7) |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D-<br>(10)               | $P_r (H)$         | 25.2   | 29.6   | 33.8   | 37.8   | 41.5   | 44.8   |
|                          | $P_{max} (H)$     | 25.2   | 29.6   | 33.8   | 40.5   | 49.3   | 59.8   |
|                          | $P_r (V)$         | 31.50  | 33.80  | 25.70  | 53.20  | 42.40  | 37.10  |
|                          | $P_{max} (V)$     | 34.65  | 36.80  | 49.45  | 55.35  | 65.40  | 67.55  |
|                          | $P_{max}/P_{max}$ | 1.38   | 1.24   | 1.46   | 1.36   | 1.33   | 1.13   |
| E-<br>(20)               | $P_r (H)$         | 27.2   | 35.2   | 36.5   | 40.9   | 44.8   | 48.3   |
|                          | $P_{max} (H)$     | 27.2   | 35.2   | 36.5   | 40.9   | 45.8   | 55.5   |
|                          | $P_r (V)$         | 25.60  | 39.20  | 29.50  | 38.20  | 46.00  | 41.70  |
|                          | $P_{max} (V)$     | 30.10  | 40.10  | 46.60  | 57.70  | 54.90  | 63.00  |
|                          | $P_{max}/P_{max}$ | 1.11   | 1.14   | 1.28   | 1.41   | 1.20   | 1.14   |

表-6 供試体Fにおける補強効果

| $\beta$ |                   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   |
|---------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 無筋      | $P_r (H)$         | 28.4  | 33.3  | 38.1  | 40.1  | 44.0  | 47.5  |
|         | $P_{max} (H)$     | 28.4  | 33.3  | 38.1  | 43.3  | 52.8  | 64.0  |
| 補強      | $P_r (H)$         | 28.90 | 38.00 | 41.70 | 59.00 | 49.40 | 47.50 |
|         | $P_{max} (H)$     | 36.40 | 49.40 | 55.90 | 66.50 | 70.30 | 77.50 |
| 比       | $P_r/P_r$         | 1.02  | 1.14  | 1.09  | 1.47  | 1.12  | 1.00  |
|         | $P_{max}/P_{max}$ | 1.28  | 1.48  | 1.47  | 1.53  | 1.33  | 1.21  |

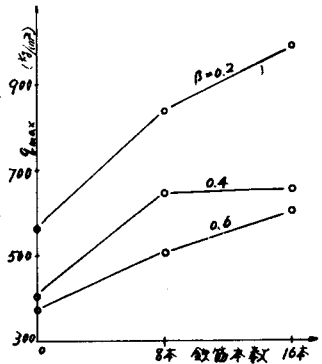


図-8. 鉄筋量による $f_{max}$ の変化