

# 論文 鉄筋コンクリート造有孔梁の曲げせん断実験

土田尚子\*1 ・ 山本俊彦\*2 ・ 山田和夫\*3

要旨：RC 造有孔梁の正負繰り返し荷重下でのせん断強度および変形挙動について調べるため、9 体の補強金物を用いた RC 造有孔梁試験体による実験を行った。実験の結果、RC 造有孔梁の開口部補強筋は降伏歪みに達し、十分な耐力と変形性能を発揮した。また、開口部のせん断耐力が梁の曲げ耐力を上廻る場合は、開口を梁端  $1.0d$  ( $d$ ：有効せい) に設けても曲げ降伏が先行した。さらに、実際の開口部のせん断耐力が梁主筋の歪み硬化による上昇曲げ耐力以上の場合、より大きな変形性能が得られた。この他、大変形時に中子肋筋による効果が見られた。

キーワード：有孔梁、鉄筋コンクリート、補強金物、せん断、変形性能

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造有孔梁の開口部の補強に、施工性の改善をはかることを目的に種々の補強金物が開発されてきている。これらの補強金物を用いた梁のせん断耐力については多くの実験が行われているが、開口部のせん断耐力と曲げ降伏耐力との比が、曲げ降伏前後のせん断耐力及び変形性能に及ぼす影響については実験例も少なくその性状については十分解明されていないのが現状である。このため、本実験では、2 種類の補強金物 (I、II) を用いて、鉄筋コンクリート造有孔梁の曲げせん断実験を行い、せん断耐力及び変形性状について検討を行った。実験 I (No.1~4 試験体) では曲げ降伏耐力と広沢式[1]による開口部のせん断耐力計算値とをほぼ等しくし、実験 II (No.5~9 試験体) では開口部のせん断耐力計算値を曲げ降伏耐力以下として、正負繰り返し荷重下でのせん断強度および変形挙動について調べた。実験要因は、せん断応力レベル、補強金物の形状、肋筋形状、試験体の寸法とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図-1 及び表-1 に試験体を示す。

試験体は、全部で9 体で、断面  $30\text{cm} \times 45\text{cm}$  の試験体 7 体、断面  $30\text{cm} \times 60\text{cm}$  の試験体 2 体とした。せん断耐力と曲げ耐力との関係で曲げスパンは、 $100\text{cm}$  (No.1~4 試験体)、 $90\text{cm}$  (No.5~7 試験体)、 $120\text{cm}$  (No.8、9 試験体) でシアスパン比は、2.5

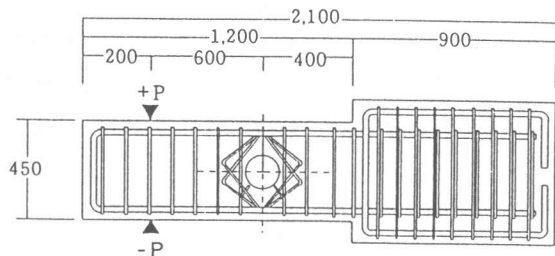


図-1 No.1~No.4 試験体 (単位：mm)

\*1 大同工業大学大学院 工学部建設工学科建築学専攻 (正会員)

\*2 大同工業大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

\*3 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

(No.1～4 試験体)、2.25 (No.5～7 試験体)、2.18 (No.8,9 試験体) とした。開口は直径 15cm、20cm (Ho/D=1/3) で梁端部から 1.0d (40cm、55cm) の位置とした。試験体は、実験 I (No.1～4 試験体) では曲げ降伏耐力と開口部のせん断耐力計算値[1]がほぼ等しくなるようにし、実験 II (No.5～9 試験体) では開口部のせん断耐力計算値[1]が曲げ降伏耐力以下となるようにして、正負繰り返し荷重下でのせん断強度および変形挙動について調べた。試験体の主筋は D25、D29 を用い、曲げ主筋比 (pt) 1.27%～2.14%、一般部のせん断補強筋比 (pw) 0.47%～1.06%、開口補強筋比 0.92%～1.91% とした。なお、試験体 No.4、No.7、No.9 では主筋の拘束効果などの影響を調べるため、中子筋を用いた。

表-1 試験体一覧

| 実験 | 試験体  | 実験要因   | 金物 | 断面<br>DxB<br>(cm) | 孔径<br>H <sub>0</sub><br>(mm) | 曲げ主筋<br>配筋 | せん断補強筋<br>配筋 | 開口補強金物<br>配筋 | wPwo<br>(%) | 開口補強筋<br>配筋 | sPwo<br>(%) | 開口補強<br>Pwo<br>(%) |
|----|------|--------|----|-------------------|------------------------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| I  | No.1 | 補強筋比   | II | 45x30             | 150                          | 3-D25      | 2-D10-@100   | 2-D10        | 0.77        | 2-D10       | 0.27        | 1.04               |
|    | No.2 | //     | // | //                | 150                          | 4-D25      | 2-D13-@85    | 2-D13        | 1.37        | 2-D13       | 0.48        | 1.85               |
|    | No.3 | //     | I  | //                | 150                          | //         | 2-D13-@85    | 2-D13        | 1.37        | 2-D13       | 0.48        | 1.85               |
|    | No.4 | 中子筋    | II | //                | 150                          | //         | 4-D10-@95    | 2-D13        | 1.37        | 4-D10       | 0.54        | 1.91               |
| II | No.5 | 補強筋比   | II | 45x30             | 150                          | 4-D25      | 2-D10-@100   | 2-D10        | 0.77        | 2-D10       | 0.27        | 1.04               |
|    | No.6 | //     | // | //                | 150                          | 4-D29      | 4-D10-@90    | 2-D13        | 1.37        | 4-D10       | 0.54        | 1.91               |
|    | No.7 | 中子筋    | // | //                | 150                          | //         | 4-D10-@90    | 2-D13        | 1.37        | 4-D10       | 0.54        | 1.91               |
|    | No.8 | 寸法     | // | 60x30             | 200                          | //         | 2-D10-@100   | 2-D10        | 0.54        | 4-D10       | 0.38        | 0.92               |
|    | No.9 | 寸法・中子筋 | // | //                | 200                          | //         | 4-D10-@100   | 2-D13        | 0.96        | 8-D10       | 0.76        | 1.72               |

## 2.2 補強金物

図-2 に開口補強金物を示す。補強金物は、いずれも連続した折れ曲がり鉄筋からなり、金物 I は、一辺 240mm の正方形とこれに外接する 8 角形を基本とした形状で、外寸 333mm×333mm である。斜め筋の角度は 45° とし、斜め 45° のひび割れに対して有効となるようにした。金物 II は、開口中心上下部を折れ曲がり頂点とし、2 組の長方形を異なる角度に配置したものである。折曲げ部を損傷の少ない梁開口上下部とし、また、開口に接して発生する 30°～

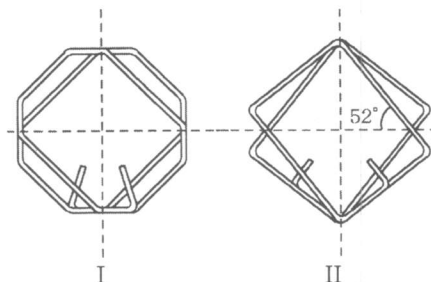


図-2 補強金物

45° のひび割れに対して有効となるように内側鉄筋の角度を 52° とした。孔径 150mm 用は、外寸 384mm×371mm (D10) および外寸 395mm×385mm (D13) とし、孔径 200mm 用は、外寸 448mm×443mm (D10) および外寸 478mm×464mm (D13) とした。

## 3. 使用材料

表-2 に使用したコンクリートの材料特性を示す。コンクリート圧縮強度は試験体打設時に同時に採取し封緘養生した供試体の部材実験時の圧縮強度とした。実験時のコンクリートの圧縮強度は 200kgf/cm<sup>2</sup> および 261kgf/cm<sup>2</sup> であった。表-3 に使用した鉄筋の機械的性質を示す。

表-2 コンクリートの材料特性

| 実験 | 養生条件 | 圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 割裂強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 比重   |
|----|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| I  | 現場封緘 | 200                            | 19.3                           | 2.03×10 <sup>5</sup>           | 2.35 |
| II | 現場封緘 | 261                            | 24.0                           | 2.92×10 <sup>5</sup>           | 2.32 |

#### 4. 加力および測定方法

試験体は PC 鋼棒により反力床に固定し、50tf の油圧ジャッキ 2 台により正負交番繰り返し加力を行った。加力は、部材角  $R=1/1000$ 、 $R=1/400$  で正負 1 回繰り返し、 $R=1/200$ 、 $R=1/100$ 、 $R=1/50$  で正負 2 回繰り返し、 $R=1/25$  で正負一回繰り返しし載荷を行った後、最大耐力を確認するまで加力することを原則とした。測定は、ひび割れ状態、変形、鉄筋歪みについて行った。鉄筋の歪みは、曲げ主筋、せん断補強筋、開口金物の全周（8 箇所）について測定した。

表-3 鉄筋の機械的性質

| 実験 | 用途 | 種類  | 降伏強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%)          |
|----|----|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| I  | 主筋 | D25 | 4080                           | 6140                           | $2.02 \times 10^6$             | -                  |
|    |    | 肋筋  | D10                            | 3590                           | 4910                           | $2.03 \times 10^6$ |
|    |    | D13 | 3640                           | 5170                           | $2.04 \times 10^6$             | 23.3               |
|    | 金物 | D10 | 4490                           | 5600                           | $2.16 \times 10^6$             | 17.0               |
|    |    | D13 | 3590                           | 4600                           | $2.02 \times 10^6$             | 19.2               |
| II | 主筋 | D25 | 4050                           | 6150                           | $2.17 \times 10^6$             | 22.6               |
|    |    | D29 | 3730                           | 5700                           | -                              | 24.6               |
|    | 肋筋 | D10 | 3650                           | 5440                           | $1.93 \times 10^6$             | 27.7               |
|    |    | D10 | 3760                           | 5710                           | $2.07 \times 10^6$             | 28.1               |
|    | 金物 | D13 | 4010                           | 5390                           | $2.04 \times 10^6$             | 21.0               |

#### 5. 実験結果

実験結果の一覧を表-4 に示す。鉄筋コンクリート造梁のせん断耐力( $Q_s$ )の計算には大野-荒川 min 式を、開口部の終局耐力( $Q_o$ )の計算には、修正広沢式[1]を用いた。

表-4 実験結果一覧

| 実験 | 試験体  | 曲げ耐力<br>$Q_m$<br>(tf) | せん断耐力<br>$Q_s$<br>(tf) | 開口部耐力         |               |               | 実験値<br>$Q_e$<br>(tf) | 最大時変形<br>(rad) | 比<br>$Q_e/Q_o$ | 比<br>$Q_e/Q_m$ |
|----|------|-----------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
|    |      |                       |                        | $Q_c$<br>(tf) | $Q_r$<br>(tf) | $Q_o$<br>(tf) |                      |                |                |                |
| I  | No.1 | 22.3                  | 20.5                   | 4.05          | 19.4          | 23.5          | 26.4                 | 0.0400         | 1.13           | 1.18           |
|    | No.2 | 29.8                  | 26.4                   | 4.32          | 23.1          | 27.4          | 35.3                 | 0.0400         | 1.29           | 1.18           |
|    | No.3 | 29.8                  | 26.4                   | 4.32          | 23.1          | 27.4          | 34.9                 | 0.0400         | 1.27           | 1.17           |
|    | No.4 | 29.8                  | 26.3                   | 4.32          | 24.3          | 28.6          | 36.9                 | 0.0400         | 1.29           | 1.24           |
| II | No.5 | 32.0                  | 23.8                   | 5.55          | 18.0          | 23.6          | 33.6                 | 0.0200         | 1.43           | 1.05           |
|    | No.6 | 38.3                  | 30.2                   | 5.86          | 24.4          | 30.3          | 41.1                 | 0.0200         | 1.36           | 1.07           |
|    | No.7 | 38.3                  | 30.2                   | 5.86          | 24.4          | 30.3          | 40.4                 | 0.0200         | 1.34           | 1.05           |
|    | No.8 | 39.5                  | 32.9                   | 7.71          | 23.1          | 30.8          | 42.1                 | 0.0200         | 1.37           | 1.07           |
|    | No.9 | 39.5                  | 39.6                   | 7.71          | 31.6          | 39.3          | 45.9                 | 0.0352         | 1.17           | 1.16           |

$Q_c$ : コンクリート負担分、 $Q_r$ : 補強筋負担分、 $Q_o$ : 梁開口部終局耐力

##### 5.1 実験経過およびひび割れ状況

試験体の最終ひび割れ状況の例を図-3 および図-4 に、荷重変形関係の例を図-5 に示す。開口梁試験体は、いずれも部材角  $1/1000$  前後で梁端部に曲げひび割れ、続いて開口部にせん断ひび割れが生じ、その後は開口周辺に数多くのひび割れが発生した。部材角  $1/100$  までに主筋が

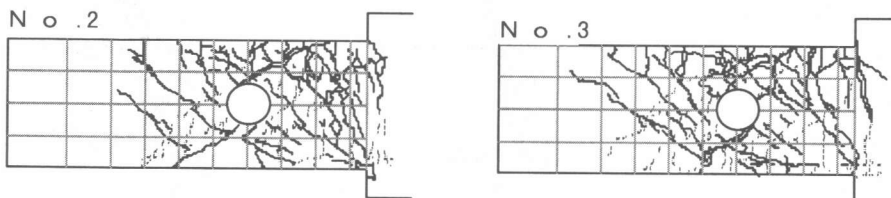


図-3 最終ひび割れ図

降伏歪みに達し、変形が増大した。その後、主筋の歪み硬化により耐力が再上昇した。最終的には、部材角 1/50 および 1/25 の繰り返し時点で最大耐力に至り、開口部の斜めひび割れの拡大によって破壊した。ただし、No.9 試験体は部材角 1/25 に至る過程で開口部の斜めひび割れの拡大に加え開口部回りのコンクリートの剥落によって破壊した。金物の種類によるひび割れ発生状況に違いはあまり見られなかった。

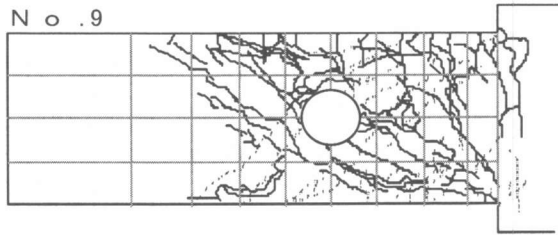


図-4 最終ひび割れ図

### 5.2 せん断耐力

試験体の曲げ降伏耐力計算値に対する開口部せん断耐力計算値の比は 0.74~1.05 であったが、いずれの試験体も曲げ降伏が先行した。曲げ耐力計算値に対する実験値は、1.05~1.24 となった。繰り返し加力を受け、曲げ降伏する場合は、開口部せん断耐力計算値に対する全試験体の最大耐力の比は 1.13~1.43 となり、平均 1.29 となった。

### 5.3 変形状

実験 I では、いずれの試験体も部材角 1/50 の繰り返し返しでは、耐力の低下もなく安定した挙動を示し、十分な変形能力が見られた。せん断応力レベル  $\tau=25\text{kgf/cm}^2$  の No.1 試験体と、 $\tau=35\text{kgf/cm}^2$  で中子筋を有する No.4 試験体は、部材角 1/25 の正負繰り返し加力後破壊に至った。部材角 1/50 を超える繰り返しでは、応力レベル並びに筋形状による変形性能への影響が見られた。No.2 および No.3 試験体

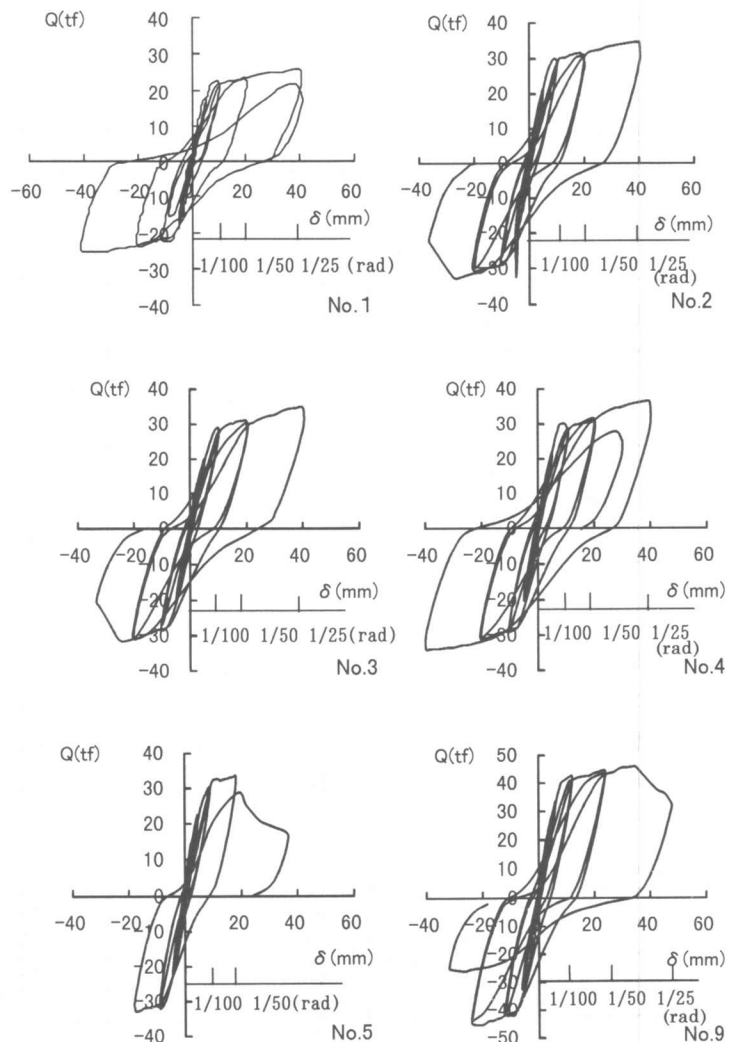


図-5 荷重-変形曲線

は、いずれも部材角 1/25 の負加力時に破壊に至った。また、補強金物による差は見られなかった。No.5~No.8 試験体は、部材角 1/50 の繰り返しで耐力低下した。部材角 1/50 では、中子筋の有無による違いはほとんど見られなかった。開口補強に金物 II を使用した試験体のせん断強度比と限界変形角の関係を図-6 に示す。せん断強度比は、試験体のせん断破壊時の強度 ( $Q_e$ ) と曲げ降伏強度計算値 ( $Q_m$ ) との比を表す。強度比が大きくなるほど、限界変形角が大きくなっている。強度比

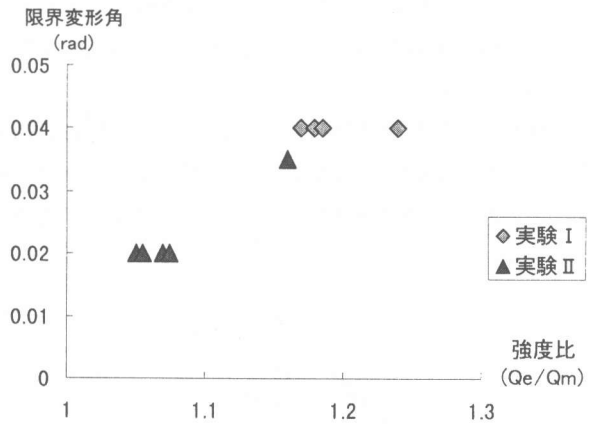


図-6 強度比と限界変形

が 1.07 以下では限界変形は 1/50、1.17 以上では 1/25 程度となっている。曲げ主筋の歪み硬化による耐力上昇以上のせん断耐力がある場合には十分な変形性能が得られると考えられる。

#### 5.4 開口部周辺の鉄筋の歪み

図-7 に、歪みゲージ位置を示す。

図-8、図-9 に最大耐力時まで測定された No.4 試験体の筋筋と開口補強金物の歪みの例を示す。筋筋歪み S3 と S4 は、開口を挟んで加力側と固定端側を示す。開口補強金物歪み D1,2 (歪みゲージ 2 枚の平均)、D3,4、D5,6、D7,8 は、いずれも内側の鉄筋歪みで D1,2 は正加力時に引っ張りを生ずる固定端下側で、順次 90 度ずつ反時計回りの位置である。いずれもほぼ降伏歪みに達したが、最終的に固定端側筋筋の歪みの増大が顕著となり破壊に至った。

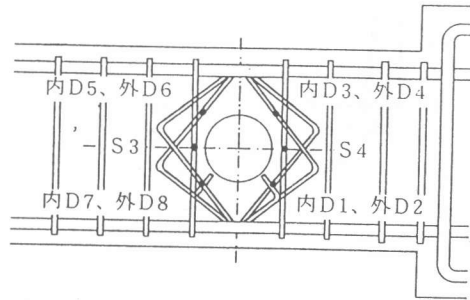


図-7 ゲージ位置

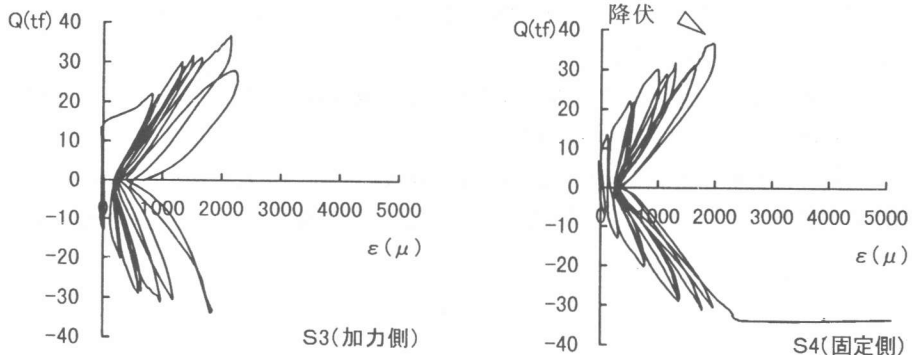


図-8 開口際の筋筋の歪み

実験 I では、筋筋は最終加力時固定端側の歪みが増大した。開口補強金物では、最終加力時までにいずれも降伏歪みを超えた。また、開口補強金物外側の歪みは、これより小さく降伏歪み以下であった。

実験 II もほぼ同様の傾向を示し、筋筋および開口補強金物の内側では、最終加力時までに降伏歪みを超えた。開口補強金物外側の歪みは、これより小さく降伏歪み以下であった。ほとんどの試験体の筋筋ならびに補強金物はこの時点までにいずれも降伏歪みを超えた。

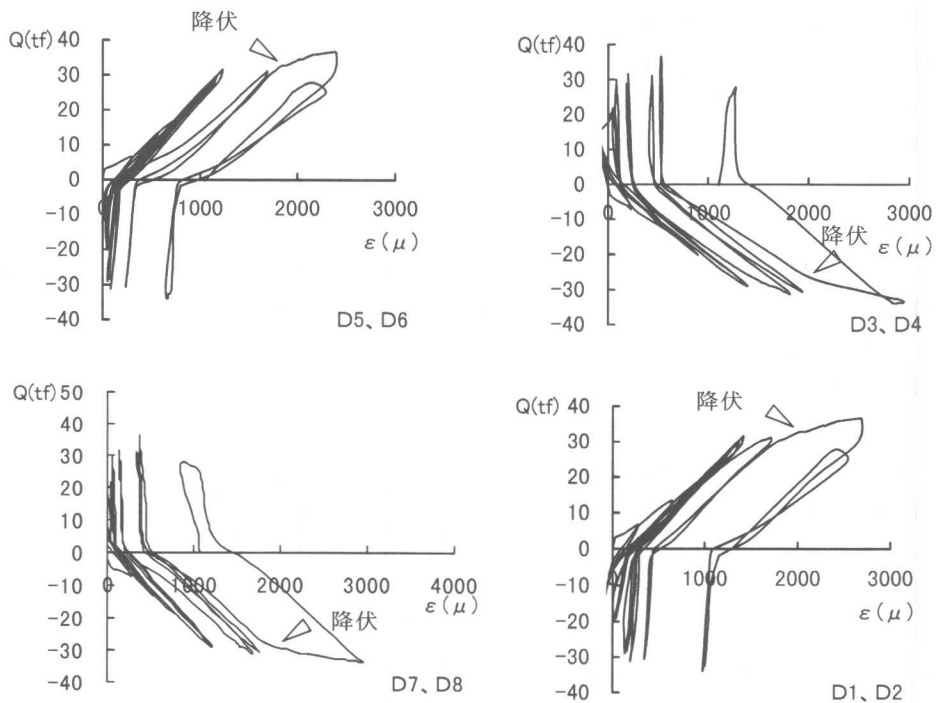


図-9 補強金物の歪み

## 6. まとめ

9体の試験体による鉄筋コンクリート造有孔梁の曲げせん断実験から、次のことが明らかになった。

- 1) 金物 I、II で補強された RC 造有孔梁の開口部の金物および筋筋は降伏歪みに達し、試験体は十分な耐力と変形性能を発揮した。
- 2) 繰り返し加力を受け、曲げ降伏する RC 造有孔梁のせん断耐力は、広沢式による計算値に対して 1.13~1.43、平均 1.29 であった。
- 3) 曲げ降伏耐力に対する開口部せん断耐力の比率が高いほど、優れた変形性能を示した。
- 4) 中子筋を用いた試験体では、部材角 1/50 を超える繰り返しにおいて変形性能に効果が見られた。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1991.