

# 論文 有開口短スパン梁の構造性能に関する実験的研究

小田 稔\*1・山中 久幸\*1

要旨：本研究は、主筋の配筋方法，開口部の有無，開口部の補強量をパラメータとした短スパン梁の曲げせん断実験を行い、高応力状態における部材のせん断，付着性状の把握と、高配筋で補強した有開口梁の耐力，変形性能について検討している。その結果、既往の設計式を用いて設計した短スパン梁は靱性の優れた性能を示し、また有開口梁は補強量に応じて変形性能が向上することが分かった。

キーワード：鉄筋コンクリート造，短スパン梁，有開口梁，変形性能，X型配筋

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造の短スパン梁は、一般にせん断破壊，付着破壊等の脆性破壊が生じやすく、耐力，変形性能を確保するための十分な検討が必要である。特に、建物の高層化に伴い部材応力が増大したり、さらに開口部を設ける場合には高配筋の補強（高補強）となり、耐力，変形性能の確保は極めて困難となる。これまで、開口部を高補強した梁（せん断スパン比  $a/D=2.0$ ）のせん断性状の研究[1]や有開口梁（ $a/D=1.7, 2.0, 2.8$ ）の変形性能についての研究[2],[3]は既に行われている。本論文では、より短スパンで開口部を高補強した梁を対象とした部材実験を行い、耐力や変形性能に関する短スパン梁の構造性能を把握することを目的とする。

## 2. 実験概要

表-1，2に試験体の形状寸法，使用材料，および耐力の計算結果を示す。また、図-1は、試験体形状を示したものである。試験体は、 $b \times D=320 \times 400$ ，試験長さ1000，せん断スパン比  $a/D=1.25$ の短スパン梁で、想定した部材の60%縮尺である。試験体は7体で、変動要因は主筋の配筋方法，開口の有無，開口部の補強量とした。

主筋の配筋方法は、平行配筋（No.1～5）とX型配筋（No.6，7）の2種類である。各試験体の主筋は2段配筋で、上端，下端とも4-D19，4-D16（ $P_t=1.79\%$ ）である。X型主筋は、上端，下端の各4本ずつ（全主筋断面積の

1/2）とした。無開口のNo.1（平行配筋）と、No.6（X型配筋）の設計では、せん断は文献[4]に、付着は文献[6]に基づき、せん断破壊や付着破壊に先行して曲げ降伏するように設計している。また、両試験体のせん断耐力はほぼ同程度であり、横補強筋は、No.1で  $P_w=0.84\%$ ，No.6で  $P_w=0.44\%$  である。

表-1 試験体一覧

| 試験体  | 試験区間長さ (mm) | 試験体断面 $b \times D$ (mm) | コンクリート強度 $\sigma_B$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 主筋             |             | 横補強筋*1              | 開口補強筋        |         |
|------|-------------|-------------------------|---|----------------|-------------|---------------------|--------------|---------|
|      |             |                         |   | 平行             | X型          |                     | 側筋*1         | 斜め筋*2   |
| No.1 | 1,000       | 320 × 400               | 339                                       | 4-D19<br>4-D16 | -----       | 2-S8<br>2-S6<br>@60 | 4-S8<br>4-S6 | -----   |
| No.2 |             |                         | 363                                       |                |             |                     |              | 3-RB5.1 |
| No.3 |             |                         | 373                                       |                |             |                     |              | 3-RB7.4 |
| No.4 |             |                         | 345                                       |                |             |                     |              | 4-RB7.4 |
| No.5 |             |                         | 325                                       |                |             |                     |              | 6-RB7.4 |
| No.6 |             |                         | 353                                       | 2-D19<br>2-D16 | 2-S8<br>@70 | -----               |              |         |
| No.7 |             |                         | 364                                       | 2-D16<br>2-D16 | -----       | 6-S8                |              |         |

\*1:  $\sigma_y=8,000\text{kg/cm}^2$ 級 \*2:  $\sigma_y=13,000\text{kg/cm}^2$ 級

\*1 三井建設（株）技術研究所（正会員）

表一 2 試験体耐力の計算結果

| 試験体  | 曲げ耐力*1<br>CQM<br>(ton) | せん断耐力*2<br>CQS<br>(ton) | 付着耐力   |  |                        |
|------|------------------------|-------------------------|--|--|------------------------|
|      |                        |                         | 文献[4]  |  | 文献[6]                  |
|      |                        |                         | 設計用<br>付着応力<br>$\tau f$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 付着強度<br>$0.8 \tau bu$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 付着耐力*3<br>CQb<br>(ton) |
| No.1 | 47.9                   | 55.6<br><1.16>          | 58.2   | 39.4<br>{0.68}                                 | 52.6<br><1.10>         |
| No.2 |                        | 38.1<br><0.80>          |  | 40.8<br>{0.70}                                 | 54.6<br><1.14>         |
| No.3 |                        | 43.4<br><0.91>          |  | 41.3<br>{0.71}                                 | 55.4<br><1.16>         |
| No.4 |                        | 45.8<br><0.96>          |  | 39.7<br>{0.68}                                 | 53.1<br><1.11>         |
| No.5 | 45.8                   | 52.1<br><1.14>          | 55.6   | 39.3<br>{0.71}                                 | 52.4<br><1.14>         |
| No.6 | 47.2                   | 64.5<br><1.37>          | 58.2   | 63.4<br>{1.09}                                 | 67.7<br><1.43>         |
| No.7 |                        | 49.7<br><1.05>          |  | 64.4<br>{1.11}                                 | 68.5<br><1.45>         |

注) <>は、曲げ耐力に対する比率を示す。

{ }は、設計用付着応力に対する比率を示す。

\* 1 : 曲げ耐力は建築センター指針略算式を用いた。

\* 2 : せん断耐力は文献[4]を用いた。

X型配筋の試験体は文献[4]、文献[5]を用いた。

有開口試験体のせん断耐力は広沢修正式を用いた。

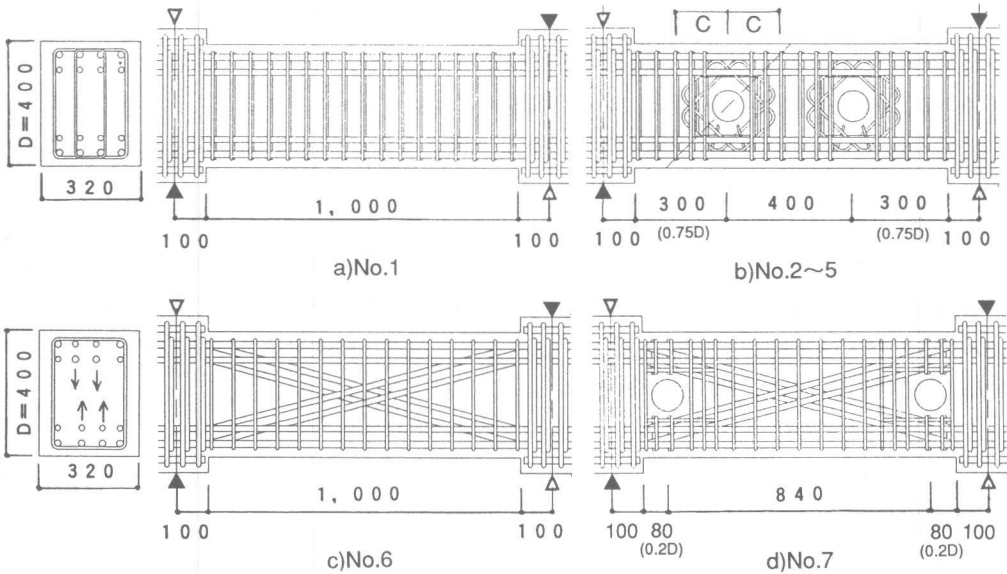
\* 3 : 平均付着強度低減係数は、k=1とした。

表一 3 鉄筋材料試験結果

|       |       | 降伏強度<br>$\sigma_y$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>ES<br>( $\times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|-------|---|--|
| 主筋    | D19   | 4,085 [3,922]                               | 1.93 [1.86]  |
|       | D16   | 4,020 [3,823]                               | 1.87 [1.68]  |
| 横補強筋  | S8    | 9,887 [9,887]                               | 2.10 [2.08]  |
|       | S6    | 8,803 [9,155]                               | 2.06 [2.06]  |
| 開口補強筋 | RB5.1 | 14,366                                      | 2.05   |
|       | RB7.4 | 13,944 [14,260]                             | 2.15 [1.98]  |

注) [ ]はNO.5試験体

横補強筋および開口補強筋の降伏強度は、0.2%永久伸びによって求めた。



図一 1 試験体形状

No.6の横補強筋量は、X型配筋とすることで平行配筋の半分程度となっている。No.1の付着耐力については、文献[6]により付着耐力が曲げ耐力を上回るように設計しているが、文献[4]によると付着強度は設計用付着応力を下回る結果となっている。

有開口の試験体は、平行配筋がNo.2~5の4体で、X型配筋がNo.7の1体である。開口位置は、平行配筋では梁端から0.75D (D:梁せい)、X型配筋では0.2Dであり、孔径は0.25Dである。開口補強の範囲は図一 1 に示す 2 C 区間とし、せん断耐力の計算値は、2 C 区間内の横補強筋 (側筋) と補強金物の斜め45度方向の鉄筋 (斜め筋) を考慮し広沢修正式で評価した。開口部以外の横補強筋は無開口試験体と同じ配筋とした。No.2~5は、側筋を4-S8,4-S6の共通とし、斜め筋補強量を順次増加させている。曲げ耐力に対するせん断余裕度は、それぞれ0.80, 0.91, 0.96, 1.14

となっている。No.7は、X型配筋で有開口の試験体であり、開口部上下部には横補強筋と同じ材質のコの字型の鉄筋を組み合わせた副帯筋を設けている。No.7の開口部せん断耐力の計算では、開口部補強筋の側筋が負担するせん断力とX型主筋が負担するせん断力を累加して求めている。

表-1にコンクリートの材料試験結果を、表-3に鉄筋の材料試験結果を示す。横補強筋には8,000kg/cm<sup>2</sup>級の、開口補強筋には13,000kg/cm<sup>2</sup>級の高強度鉄筋を用いている。

実験は大野式逆対称モーメント形式で、正負交番繰返し加力とした。加力は変形制御で行い、加力ルールは部材変形角で1/400, 1/200radを1回、1/100, 1/66, 1/50radを2回、1/33, 1/20radを1回繰り返した。

### 3. 破壊経過および荷重-変形関係

表-4に実験結果を、図-2, 3に部材変形角R=1/100rad時におけるひび割れ状況と、各試験体の荷重-変形関係を示す。いずれの試験体も1/150~1/110radの間に主筋が降伏しており、最大耐力は49.4~53.6tonである。

無開口のNo.1(平行配筋), No.6(X型配筋)は、1/20rad時に

表-4 実験結果

| 試験体  | 最大耐力<br>eQ <sub>max</sub><br>(ton) | 限界変形角<br>R <sub>u</sub><br>(rad) | 破壊形式 <sup>1)</sup> |
|------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| No.1 | 52.5                               | 1/20 ↑                           | B                  |
| No.2 | 51.0                               | 1/66                             | BO                 |
| No.3 | 49.4                               | 1/50                             | BO                 |
| No.4 | 50.6                               | 1/38                             | BO                 |
| No.5 | 51.1                               | 1/20 ↑                           | B                  |
| No.6 | 53.6                               | 1/20 ↑                           | B                  |
| No.7 | 50.7                               | 1/33                             | BO                 |

\*1:破壊形式

B:曲げ降伏

BO:曲げ降伏後開口部せん断破壊

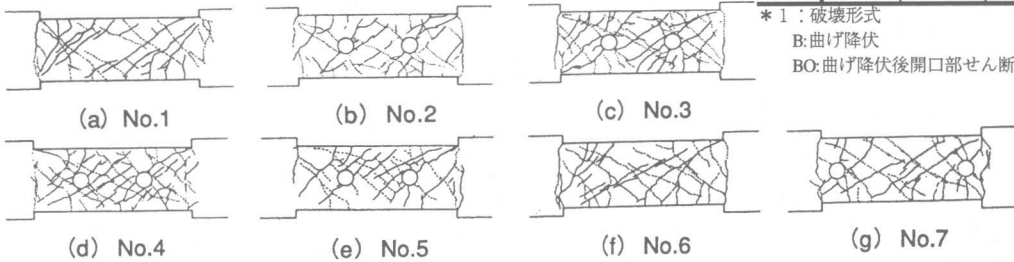


図-2 ひび割れ状況 (R=1/100rad時)

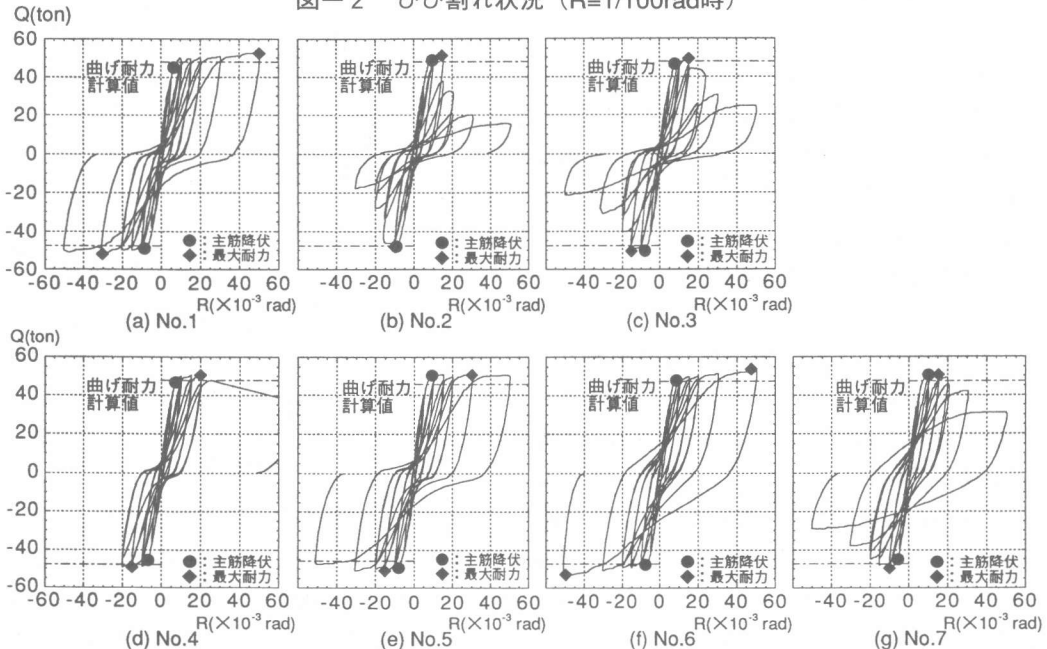


図-3 荷重-変形関係

においても耐力低下が見られず、優れた変形性能を示した。両試験体において、曲げひび割れは約6ton（約1/5000rad）で、せん断ひび割れは約13ton（約1/1000rad）で発生している。No.1は、表-2に示すように文献[4]による設計では付着耐力が曲げ耐力を下回っているが、最終段階においても付着ひび割れはほとんど見られなかった。したがって、本実験では文献[6]の付着割裂の検討結果に対応している。せん断ひび割れとしては、No.1、No.6とも最終変形時には材端部のひび割れが大きいが、No.6では33ton（1/230rad）で材中央部にX型主筋にほぼ沿ったせん断ひび割れが生じ、進展しているのが特徴的である。このひび割れは、X型主筋が交差している材中央部において、コンクリートがX型主筋に沿って引張、圧縮の応力を受けるため発生したものと推測される。

平行配筋で有開口の試験体では、No.2およびNo.3は1/66,1/50radの繰返し時に、No.4は加力中1/38rad時に開口部から加力点に接するひび割れが拡大し耐力が低下している。No.2~4は、広沢修正式で評価したせん断余裕度が1.0以下であったが、曲げ降伏に達しており、それ後の繰返しで開口部がせん断破壊した。せん断余裕度が1.14のNo.5は、1/20rad時まで耐力は低下せず、無開口のNo.1とほぼ同じ性状を示した。No.2~5のひび割れ状況を比較すると、開口部の補強量が多くなるに従ってひび割れが分散している。

X型配筋で有開口のNo.7は、1/50radまで無開口のNo.6と同じ性状を示しているが、その後開口上部が破壊し耐力が低下した。X型配筋部材の開口位置は梁端部に設けることになり、開口の上下部は大きな圧縮力とせん断力を受け、厳しい応力状態となる。今後、さらに開口部上下部の補強方法を検討する必要がある。

#### 4. 平行配筋とX型配筋についての検討

図-4に平行配筋とX型配筋試験体の各サイクルにおける等価粘性減衰定数を示す。X型配筋のNo.6の等価粘性減衰定数は、平行配筋のNo.1に比べて変形角が進むにつれて大きくなり、X型配筋は大変形時においても大きなエネルギー吸収力があることが分かる。

図-5に平行配筋とX型配筋の試験体の横補強筋の応力度分布を示す。平行配筋のNo.1では、外周筋、中子筋ともに材端部のせん断ひび割れが横切る補強筋の応力が大きくなっており、外周筋端部では最大耐力時には降伏している。部材中央部の補強筋は、最大耐力時に材端部の半分程度である。一方、X型配筋の試験体は、材端部の鉄筋だけでなく中央部の鉄筋の応力も大きい。

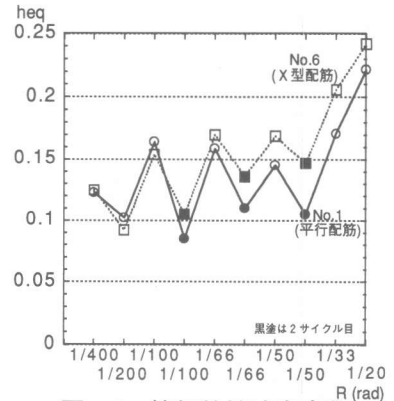
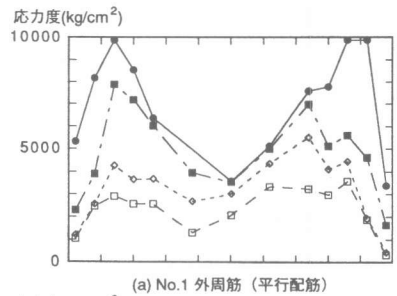
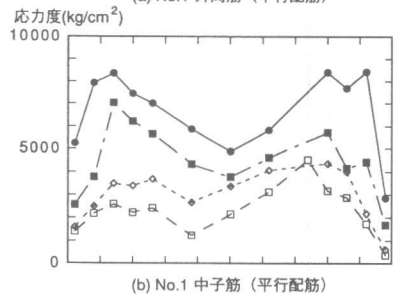


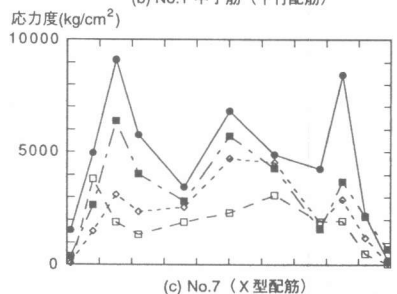
図-4 等価粘性減衰定数



(a) No.1 外周筋 (平行配筋)



(b) No.1 中子筋 (平行配筋)



(c) No.7 (X型配筋)



図-5 横補強筋ひずみ分布

これは、3.で述べたように、X型配筋の試験体では平行配筋に比べて材中央部のせん断ひび割れが顕著であることと対応している。

## 5. 開口部の補強効果に関する検討

### 5. 1 開口部補強筋の性状

図-6にNo.3, 5の開口部補強筋のひずみ分布の変化を示す。斜め筋では孔際のひずみが外側よりも大きく、最大耐力時のひずみの比率はNo.3で4.3倍, No.5で1.8倍である。一方、側筋では初期には孔際と外側でほぼ同じひずみであるが、最大耐力時では外側が大きくなっている。

図-7に各試験体の斜め筋孔際のR1および側筋孔際のS1のひずみと部材変形角の関係を包絡線で示す。ひずみの推移としては、最大耐力までは斜め筋、側筋とも増加しており、増加の割合は斜め筋の方が大きい。最大耐力以降は、斜め筋のひずみが減少するの

に対し、側筋のひずみは増加している。これは、最大耐力以降、変形が増加するにつれてひび割れが拡大し、斜め筋の定着耐力が減少して応力が低下したためと考えられる。その結果、側筋は、せん断力の負担割合が大きくなり、ひずみが増加するものと判断される。また、斜め筋では補強量が少ない程、最大耐力までのひずみの増加の割合は大きく、それ以降のひずみの減少の割合も大きい。一方、側筋は最大耐力までは各試験体とも同様な推移を示すが、それ以降、斜め筋が少ない程ひずみの増加量は大きくなっている。なお、最大耐力時のひずみは斜め筋ではNo.2で降伏ひずみの60%, No.5で20%程度であり、側筋では各試験体でほぼ同様で15~25%程度である。

### 5. 2 最大耐力

表-4に開口部補強量と広沢修正式によるせん断強度計算値 ( $c \tau_{max}$ )、および最大耐力の実験値 ( $e \tau_{max}$ )を示す。図-8は、開口補強量 ( $Pw_0 \cdot \sigma_{wy}$ )とせん断強度 ( $\tau_{max}$ )の関係を示したものである。図中には開口部を高補強してせん断実験を行った文献[1]および高強度補強金物 ( $\sigma_y = 13,000 \text{ kg/cm}^2$ )を用いてせん断実験を行った文献[7]のデータも併せて示している。ここで、既往の文献の試験体の開口補強量は、本実験の試験体と同様に2C区間に含まれる鉄筋すべてを考慮して評価した。既往の研究によるせん断強度は、補強量が比較的少ない範囲 ( $Pw_0 \cdot \sigma_{wy} < 100 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ )では、実験値は計算値に対して2~3割の余裕率を示し、補強量の多い範囲 ( $Pw_0 \cdot \sigma_{wy} > 100 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ )においては1~2割程度の余裕率を有している。本実験のNo.2~4では、せん断強度の計算値は曲げ耐力時の強度を下回っているが、実験では曲げ降伏して最大耐力が決まっている。このことは、本実験の補強量における既往の実験のせん断強度が本実験の

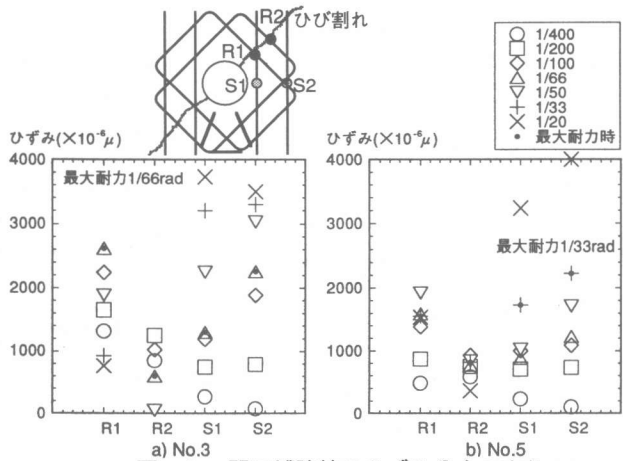


図-6 開口補強筋のひずみ分布の変化

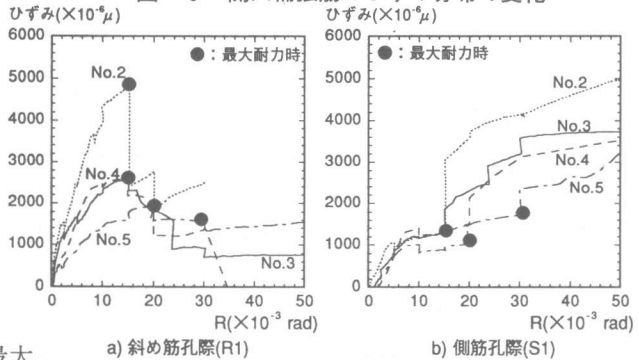


図-7 開口補強筋のひずみの推移

曲げ耐力時の強度を上回っていることと  
も対応している。

### 5. 3 変形性能

図-9 に広沢修正式によるせん断余裕度 ( $cQs/cQM$ ) と限界変形角 ( $Ru$ ) の関係を示す。また、図中には無開口梁の No.1 も併せて示す。限界変形角は、最大耐力が80%低下した時とし、正負で小さい値とする。ただし、No.4, No.5は加力中に耐力が低下した時としている。限界変形角は、せん断余裕度が大きくなるに従って大きくなる。せん断余裕度が1.14のNo.5では、1/20rad以上の変形性能があり、無開口のNo.1とほぼ同等な性能を有している。

### 6. まとめ

せん断スパン比1.25かつ開口部を高補強した短スパン梁の曲げせん断実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 無開口の平行配筋とX型配筋の試験体は、1/20radの大変形においても耐力低下や付着割裂の現象は見られず、靱性に優れた性状を示した。X型配筋は、平行配筋よりも大変形時においてエネルギー吸収の大きい性状を示した。
- (2) 開口部に高補強を施した有開口の梁において、広沢修正式によるせん断余裕度が1.0以下 (0.80, 0.91, 0.96) の試験体においても曲げ降伏が先行した。また、開口部の補強量が増加するに従って、変形性能が向上し、せん断余裕度が1.14の試験体では、無開口の梁とほぼ同等の変形性能があった。

【謝辞】川鉄テクノワイヤ (株) には、開口部補強金物を提供して頂きました。ここに、感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- [1] 佐々木 勇, 松崎 育弘ほか:  $w\sigma wy=8000\text{kgf/cm}^2$ 級のせん断補強筋を用いたRC有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、pp.931-932、1994
- [2] 飯塚 正義, 八木 敏行ほか: ヒンジゾーンに開口を設けたハーフプレキャスト鉄筋コンクリート梁の耐震性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2 pp.389-394、1994
- [3] 石渡 康弘, 林 郁夫ほか: 鉄筋コンクリート造有孔梁の変形能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2 pp.395-400、1994
- [4] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990
- [5] 建設省住宅局建築指導課: X型配筋部材の設計と施工、(社)日本建築士事務所協会連合会、1990
- [6] 奥手 久人, 高木 仁之ほか: 付着割裂破壊に支配される梁のせん断耐力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2 pp.81-86、1989
- [7] 中澤 淳, 三原 重郎ほか: 高強度開口補強筋を用いたRC有孔梁のせん断破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2 pp.293-298、1993

表-4 開口部補強量とせん断強度の  
計算値、実験の最大値

| 試験体  | 側筋補強量<br>$kPwo \cdot k \sigma wy$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 斜め筋補強量<br>$sPwo \cdot s \sigma wy$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 開口部補強量<br>$Pwo \cdot \sigma wy$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 計算値<br>$c \tau \max$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 実験値*1<br>$e \tau \max$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------|--|---|--|---|---|
| No.2 | 60   | 48  | 108  | 40.4  | 54.0  |
| No.3 | 60   | 94  | 154  | 45.9  | 52.3  |
| No.4 | 60   | 125   | 185  | 48.6  | 53.6  |
| No.5 | 59   | 186   | 245  | 53.6  | 52.5  |

\*1: 実験値はすべて曲げ耐力により決まっている。

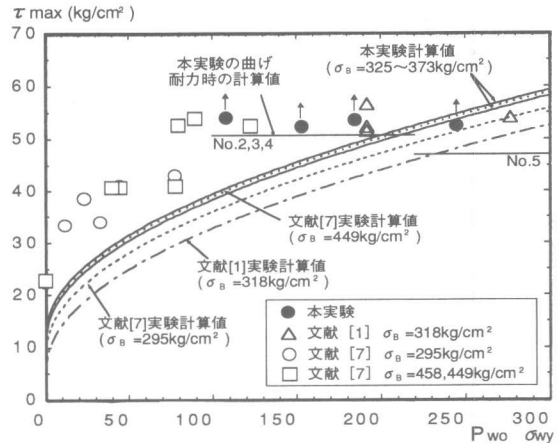


図-8 開口部補強量とせん断強度の関係

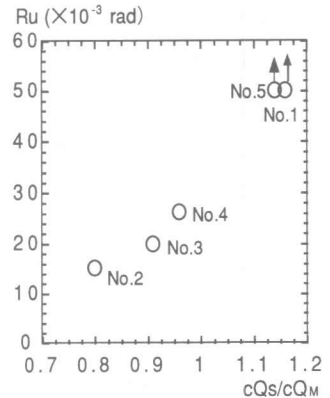


図-9 せん断余裕度と  
限界変形角の関係