

## 高強度中間帯鉄筋「ナットバー™」の付着特性とせん断負担の評価

田中 浩一 江尻 讓嗣

## Bond Characteristics and Shear Strength Contribution of High-Strength Steel Cross Tie “Nut-Bar™”

Koichi Tanaka Joji Ejiri

## Abstract

The longitudinal and lateral reinforcement bars of RC structures has increased after the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. After this earthquake, the design code was revised as cross ties to be placed at intervals of 1.0m or less. Therefore, reinforcement bar-arrangement in recent RC structures has become overcrowded, which makes concrete pouring work difficult. Utilizing the high-strength bars reduces the number of cross ties and eases the concrete pouring work, and the mechanical anchors for cross ties make placement work easy and quick. The high-strength cross tie “Nut-Bar” was developed in order to reduce labor for pouring concrete and placing reinforcement bars. “Nut-Bar” has mechanical anchors at both ends and its yield strength is 1275N/mm<sup>2</sup>. This paper describes the experimental results of the bond characteristics test and shear strength test using RC beams. The following results were obtained. : (1) the bond characteristics of the mechanical anchors satisfied JSCE standards, (2) and the shear strength contribution of “Nut Bar” can be estimated from the truss analogy assuming full strength.

## 概 要

兵庫県南部地震を機に、土木構造物では耐震性の観点から主鉄筋やせん断補強筋が増加しただけでなく、靱性確保の観点から断面の1.0m以内の間隔で中間帯鉄筋を配置することが義務づけられた。これにより近年の土木構造物は過密配筋となり、鉄筋組立やコンクリート打設が困難となっている。過密配筋の要因である中間帯鉄筋を高強度化し、かつ両端部に機械式定着具を配置すれば、中間帯鉄筋の配置本数削減と配筋速度向上の両方が期待できる。そこで著者らは降伏強度を1275N/mm<sup>2</sup>まで高めた中間帯鉄筋「ナットバー」を開発した。本研究では、ナットバーに使用する定着具のコンクリート中における付着特性と、せん断補強筋としてナットバーを用いた場合のせん断耐力を梁の載荷実験により確認した。その結果、ナットバーの付着特性は土木学会鉄筋定着・継手指針の要求性能を満たし、せん断耐力はナットバー母材の降伏強度を用いて評価できることがわかった。

## 1. はじめに

兵庫県南部地震において橋脚などの耐震一次部材に被害が集中した。被害の主な原因は、せん断補強筋の不足によるせん断破壊が多く、配筋詳細の見直しの気運が高まった。地震直後に道路橋示方書の暫定設計コードである「復旧仕様」が配布され、その中で中間帯鉄筋の配置を義務付け、この地震の翌年(平成8年)には改定された道路橋示方書に反映された。その後、現在に至るまで橋脚断面において1m以下の間隔で中間帯鉄筋を配置することが義務付けられている<sup>1)</sup>。これを契機に、道路以外の土木構造物においても中間帯鉄筋の配置を前提とした設計が一般的となった。

中間帯鉄筋の効果は、主に主鉄筋の座屈防止効果<sup>2)</sup>と、コンクリートを拘束する効果<sup>3)</sup>である。前者は、かぶりの剥落を遅らせて曲げ耐力低下点である終局変位を大きくする効果である。後者は、作用した曲げモーメントによるコンクリートの圧壊を延性的にすることと、作用せ

ん断力に抵抗するコンクリートの斜め圧縮ストラット<sup>4)</sup>の反力を確保する効果である。

しかしながら、中間帯鉄筋に使用する強度は、土木分野ではSD345が主流であり、高強度化によって中間帯鉄筋の本数を削減して過密配筋を避けることができなかった。加えて、中間帯鉄筋の端部にはフックを用いるために組み立てにくいだけでなく、フック部分が他の鉄筋と干渉し、過密配筋の一因にもなっている。

上記の理由から、過密配筋を回避する方法は二つ考えられる。

解決策の一つは、中間帯鉄筋を高強度化して、中間帯鉄筋の本数を削減することである。高強度のせん断補強筋の研究は、建築分野を中心にこれまで行われてきた。例えば、黒正らの研究<sup>5),6)</sup>は、高強度せん断補強筋「ウルボン<sup>7)</sup>」を対象にした研究である。黒岩らの研究<sup>8)</sup>は、SD685やSD785を対象にした研究である。しかしながら、これらは主鉄筋を取り囲んだ帯鉄筋への適用を考えた実験研究であって、コンクリートを拘束する観点では効果

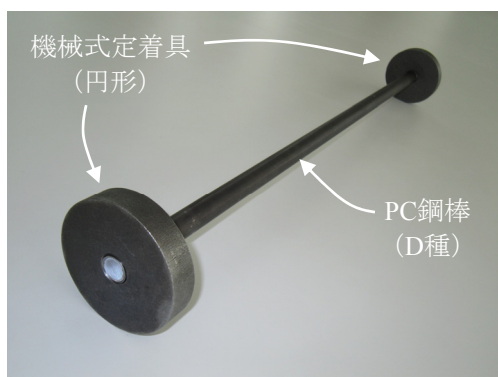


Photo 1 ナットバー  
Nut-bar

を發揮しやすい配筋状態を仮定しており、中間帯鉄筋のように両端部のフックを使って固定するせん断補強筋を対象としていない。また、鉄筋の高強度化に伴い、定着長さが通常の鉄筋を用いた場合よりも長くなるため、配筋が過密になるというジレンマがある。さらに、斜めひび割れ幅が大きくなり、コンクリートの噛み合わせ効果が減少する観点から、最新の道路橋示方書<sup>1)</sup>や鉄道標準<sup>9)</sup>においても高強度のせん断補強筋の使用に慎重になっているという課題がある。

もう一つの解決策は、中間帯鉄筋の両端部に機械式定着具を取り付けることである。これにより定着長が他の鉄筋と干渉することを防ぎ、かつ、中間帯鉄筋の組立作業を早めることができる。鉄筋端部に機械式定着具を取り付ける既往の技術として、Tヘッドバー<sup>10)</sup>やHead-bar<sup>11)</sup>がある。しかしながら、これらの鉄筋の降伏強度はSD345～SD490であり、過密配筋を緩和するほどの本数削減は期待できない。SD490よりも高強度の鉄筋を対象とした機械式定着具はマルチプルナットバー<sup>12)</sup>の機械式定着具がある。これはあと施工せん断補強における削孔径を小さくする観点から小径の機械式定着具を複数個取り付けた構造である。しかしながら、新設工事においては、この定着具よりも大径の機械式定着具を1個取り付けた

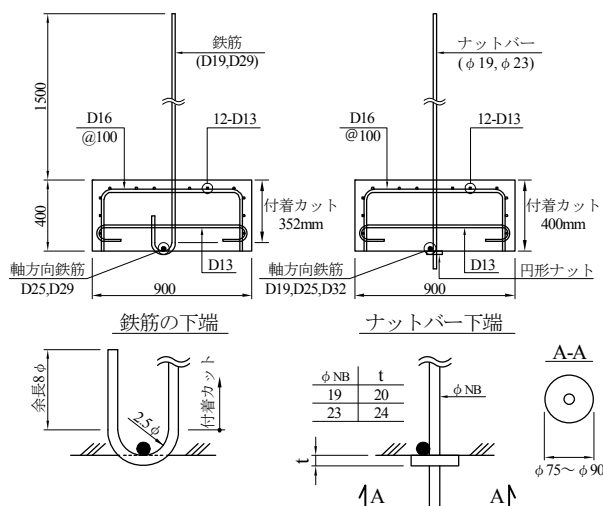


Fig. 1 付着試験体  
Specimens for Bond Characteristic

ほうがコストの観点から望ましく、マルチプルナットバーの定着具をそのまま使うには課題がある。

そこで、著者らは中間帯鉄筋の降伏強度を1275N/mm<sup>2</sup>まで高め、その両端部に円形の機械式定着を有した「ナットバー」を開発した (Photo 1)。

本研究では、ナットバーに使用する定着具のコンクリート中における付着性状を実験により確認して通常のフックとの性能比較を行った。次に、ナットバーを用いたRC梁のせん断実験を行い、ナットバーを用いた場合のせん断耐力の性能確認、ならびにナットバーの強度を考慮した設計せん断耐力評価式を提案した。

## 2. 付着実験

### 2.1 試験体とパラメーター

試験体の構造配筋図をFig.1に示す。試験体は幅×高さ  
を900mm×400mmとした鉄筋コンクリートブロックに

Table 1 付着実験の一覧  
The Outline of Bond Characteristic Test

| 試験体<br>No. | 引抜鋼材          |     |              | 定着方法         |           | 軸方向鉄筋<br>(SD345) |             | 荷重方法 |            | 拔出し量の最大値<br>(mm) |            |
|------------|---------------|-----|--------------|--------------|-----------|------------------|-------------|------|------------|------------------|------------|
|            | 鋼種            | 径   | 降伏荷重<br>(kN) | 定着体          | 支圧<br>面積比 | 径                | 軸/横<br>サイズ差 | 単調   | 高応力<br>繰返し | 単調               | 高応力<br>繰返し |
| 1          | 鉄筋<br>(SD490) | D19 | 140          | 半円形<br>フック   | -         | D25              | +2          | ○    | ○          | 2.75             | 1.62       |
| 2          |               | D29 | 315          | 半円形<br>フック   | -         | D32              | +1          | ○    | ○          | 5.43             | 3.42       |
| 3          | PC鋼棒<br>(D種)  | φ19 | 361          | 円形ナット<br>φ90 | 21.4      | D19              | ±0          | -    | ○          | -                | 0.54       |
| 4          |               |     |              |              |           | D25              | +2          | ○    | ○          | 0.63             | 0.63       |
| 5          |               |     |              |              |           | D32              | +4          | -    | ○          | -                | 0.64       |
| 6          |               | φ23 | 530          | 円形ナット<br>φ90 | 14.3      | D25              | +2          | -    | ○          | -                | 0.80       |
| 7          |               |     |              |              |           | D32              | +3          | ○    | ○          | 0.84             | 0.96       |
| 8          |               |     |              |              |           | D32              | +3          | -    | ○          | -                | 1.76       |

Table 2 コンクリートの材料試験結果  
Mechanical Properties of Concrete

| 荷重方法       | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 材令<br>(日) | No.     |
|------------|------------------------------|-----------|---------|
| 高応力<br>繰返し | 30.2                         | 26        | 3・4     |
|            | 30.9                         | 27        | 5・6・7   |
|            | 32.1                         | 28        | 1・2・8   |
| 単調         | 32.7                         | 29        | 1・2・4・7 |

Table 3 鋼材の材料試験結果  
Mechanical Properties of Steel Bars

| 鋼材                          | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひずみ<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| D19<br>(SD490)              | 530                          | 2779                          | 719                          | 191                            |
| D29<br>(SD490)              | 541                          | 2773                          | 725                          | 195                            |
| PC鋼棒：φ19<br>(SBPR1275/1420) | 1428                         | 6993                          | 1487                         | 204                            |
| PC鋼棒：φ23<br>(SBPR1275/1420) | 1422                         | 7170                          | 1497                         | 198                            |

鋼材を定着させ、それを引き抜く形状とした。土木学会の鉄筋定着・継手指針<sup>13)</sup> (以下、継手指針) において、評価基準フック (従来の鉄筋の半円形フックで余長を8φとしたもの) よりも機械式定着具を用いたほうが、引抜いたときの拔出し量は小さくなるのが要求されている。したがって、比較用として鉄筋SD490の半円形フックを用いた。一方、ナットバーに用いた機械式定着具は円形のナットとした。これは、S45C丸棒をスライスして雌ネジ加工を施したのち、熱処理を行って薄肉化を図ったものである。半円形フックおよび円形ナットの形状寸法もFig.1中に示す。なお、アンボンド区間は、鉄筋では継手指針に準じ、ナットバーでは円形ナットより上方のすべての範囲とした。

試験体一覧をTable 1に示す。パラメーターは、引き抜く鋼材の種類、定着具の形状、機械式定着具の直径および固定する相手となる軸方向鉄筋の径である。

引き抜く鋼材の種類は鉄筋 (SD490) とナットバー母材のPC鋼棒D種とした。降伏強度が大きく異なる材料のため、鉄筋の直径と降伏荷重、それぞれがφ19のPC鋼棒D種とほぼ等しくなるようにした。

機械式定着具の直径は、村上らの研究<sup>14)</sup>では機械式定着具の支圧面積比は2.5以上であればよいとしていたが、母材降伏強度をPC鋼棒C種まで高めた時、この支圧面積比は10以上必要であることが著者らの既往の研究でわかっている<sup>12)</sup>。今回の母材降伏強度はPC鋼棒C種よりも大きいため、支圧面積を10以上にするとともに軸方向鉄筋への引掛けやすさを勘案し、φ90とφ75の2種類とした。

半円フックまたはナットバーの定着具を固定する相手となる軸方向鉄筋の径は、継手指針では引き抜く鋼材の太さよりも+1~+3サイズ太くして実験することを推奨している。本実験はこれを参照し、0~+4サイズとした

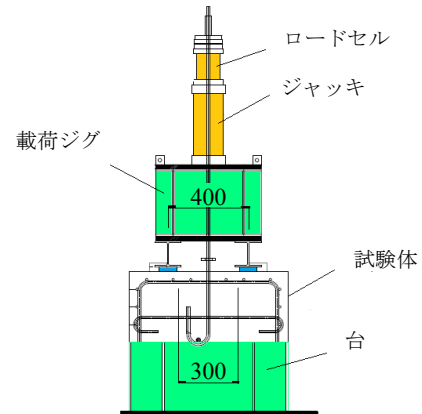


Fig. 2 付着実験の荷重装置  
Testing Set-Up for Bond Characteristic Test

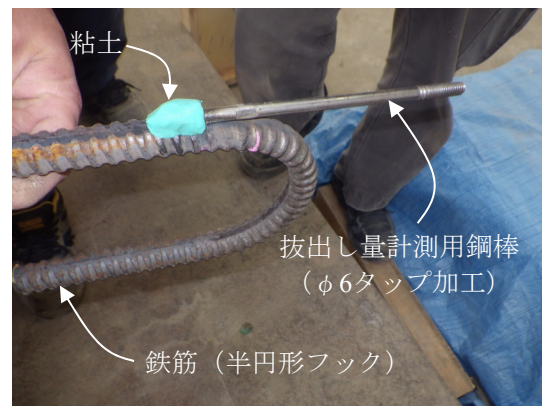


Photo 2 鉄筋における抜け出し計測用鋼棒  
Extension rod on Ordinal Reinforcing bar  
for Pull-Out Displacement Measurement

(Table 1中の「軸/横サイズ差」の数値参照)。

## 2.2 材料試験

使用したコンクリート、鉄筋およびPC鋼棒の材料試験結果をそれぞれTable 2, Table 3に示す。

## 2.3 荷重方法

荷重方法は、試験体上面に置いた鋼製ジグの上にセンターホールジャッキを置き、鋼製ジグの反力を試験体に伝える自己反力型の荷重とした (Fig.2)。鋼製ジグの支点位置は、継手指針に準じて、いずれの試験においても内法長さが引き抜く鋼材径の12倍以上となる300mm (敷鉄板幅が100mmなのでスパンは400mm) とした。

荷重方法は単調荷重と高応力繰返し荷重とし、いずれも継手指針に準じた。単調荷重では、降伏強度、引張強度 (ともに規格値) のそれぞれ1.35倍、1.0倍のいずれか小さいほうの荷重まで荷重した。高応力繰返し荷重は、降伏強度 (規格値) の0.02倍~0.95倍までを30回繰返し荷重する方法である。

いずれの荷重においても、荷重荷重と定着具がコンクリートにめり込んだ変位量 (以下、継手指針の表記に準

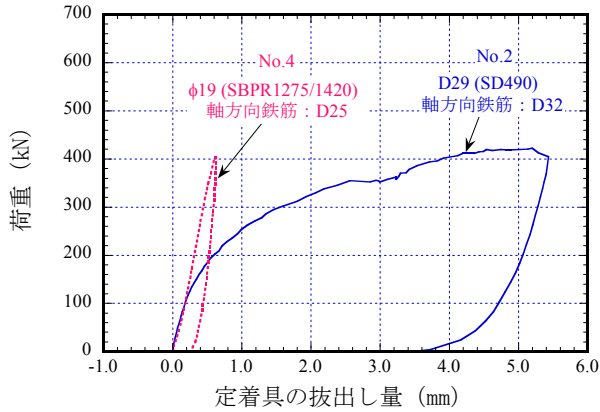


Fig. 3 単調載荷における荷重－拔出し量の関係 (試験体：No.2, No.4)  
Loading and Pull-Out Displacement Relationship on Monotonic-Loading Test (Specimen: No.2, No.4)

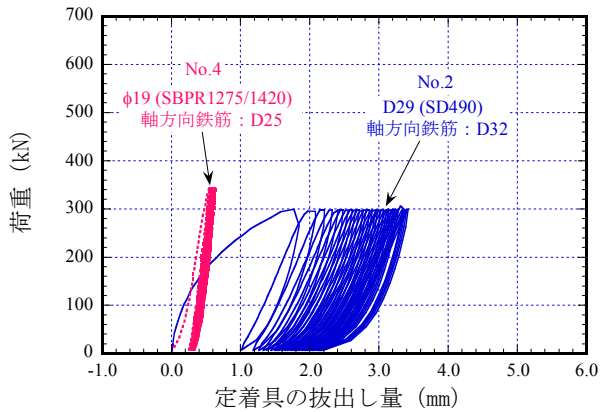


Fig. 4 繰返し載荷における荷重－拔出し量の関係 (試験体：No.2, No.4)  
Loading and Pull-Out Displacement Relationship on Cyclic-Loading Test (Specimen: No.2, No.4)

じて、抜け出し量と称す)を計測した。なお、鉄筋の場合には、Photo 2に示すようにインバー線の替わりに鉄筋φ6を溶接し、それに計測ターゲットを取り付けて抜け出し量を高感度変位計で計測した。

## 2.4 実験結果

2.4.1 半円フックとの比較 実験により得られた抜け出し量の最大値をTable 1に示す。最大荷重がほぼ等しい試験体No.2とNo.4の単調載荷および高応力繰返し載荷における荷重－抜け出し量関係を、それぞれFig.3, Fig. 4に示す。鉄筋の半円形フックの最大荷重と同程度の荷重を作用させても、ナットバーに使用する円形ナットでは、鉄筋の半円形フックよりも拔出し量が小さい。試験体No.2とNo.7の荷重－抜け出し量関係をそれぞれFig.5, Fig. 6に示す。高応力繰返し載荷におけるNo.7, No.2の最大荷重および抜け出し量の最大値は、それぞれ500kN, 300kNおよび0.96mm, 3.42mmであった。すなわち荷重が大きい場合でも、円形ナットは、鉄筋の半円形フックよりも拔出し量を小さく抑えることができる。したがって、

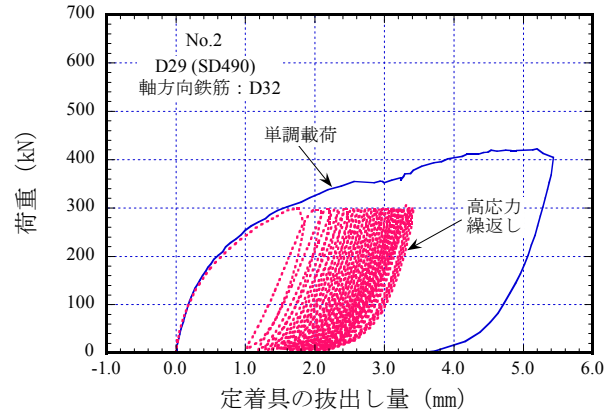


Fig. 5 荷重－拔出し量の関係 (試験体：No.2)  
Loading and Pull-Out Displacement Relationship on Monotonic and Cyclic-Loading Test (Specimen: No.2)

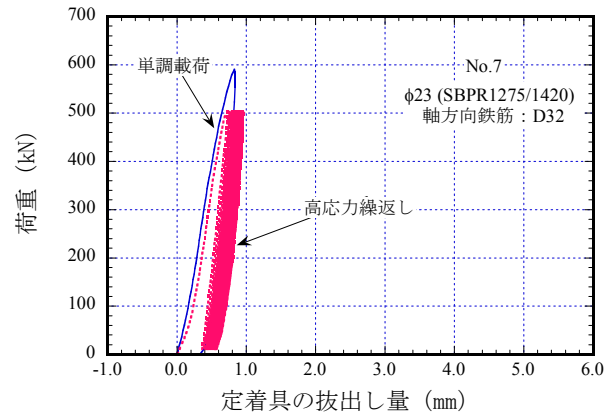


Fig. 6 荷重－拔出し量の関係 (試験体：No.7)  
Loading and Pull-Out Displacement Relationship on Monotonic and Cyclic-Loading Test (Specimen: No.7)

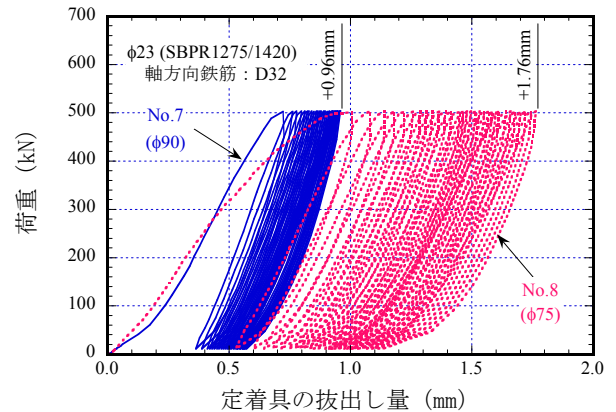


Fig. 7 繰返し載荷における荷重－拔出し量の関係 (試験体：No.7, No.8)  
Loading and Pull-Out Displacement Relationship on Cyclic-Loading Test (Specimen: No.7, No.8)

ナットバーφ19, φ23に使用する円形ナットは、継手指針の要求性能を満たしていると考えてよい。

2.4.2 軸方向鉄筋の径の影響 実験により得られた抜け出し量の最大値をTable 1に示したとおり、軸方向鉄筋の直径をナットバー径の±0～+4サイズまで変化させ

たNo.3, No.4, No.5における抜け出し量の最大値は, Table 1に示したとおり, 大きな差はなかった。このことから, 継手指針で示されているように引掛ける対象の鉄筋は +1~+3サイズの範囲でよいことがわかった。

**2.4.3 円形ナットの直径の影響** 試験体No.7とNo.8, それぞれの高応力繰返し载荷における荷重-抜け出し量の関係をFig.7に示す。抜け出し量は, 円形ナットの直径が75mmの場合のほうが90mmの場合よりも大きく, 試験体No.4とNo.6でも同様の傾向であった。Table 1に示したとおり円形ナットの直径が75mmでも継手指針の性能は満たすものの, 機械式定着具が配力筋に引っ掛かる接触距離は不十分である。そこで, 接触距離が十分確保できるφ90mmの定着具を使用することとした。

3. せん断実験

3.1 試験体

**3.1.1 ナットバー** 使用したナットバーの形状寸法をFig.8に示す。前述の付着実験で決定したφ90mmの円形ナットを両端部に取り付けたPC鋼棒 (D種) である。ナットバーφ19およびφ23の支圧面積比は, それぞれ21.4, 14.3である。なお, 円形ナットと鋼棒との嵌合接合 (ネジ接合) 部分は特に接着剤などを用いていない。

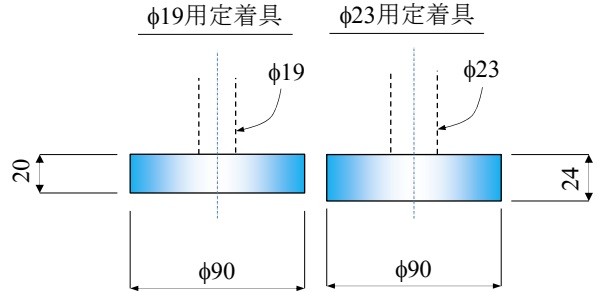


Fig. 8 ナットバーの定着具の形状寸法  
Dimensions of Mechanical Anchorage of Nut-bar

Table 4 せん断実験の試験体一覧  
Outline and Experimental Results of shear Loading Test

| No. | 試験体名         | 断面幅 B (mm) | 断面高さ D (mm) | 有効高さ d (mm) | ナットバー |            |                        |                                                     | せん断耐力 (計算値)                |                        |                                     | せん断耐力 (実験値)         |      |
|-----|--------------|------------|-------------|-------------|-------|------------|------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------|------|
|     |              |            |             |             | 本数×径  | ピッチ s (mm) | 帯筋比 p <sub>w</sub> (%) | p <sub>w</sub> ・σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | コンクリート V <sub>c</sub> (kN) | 鋼材 V <sub>s</sub> (kN) | V <sub>c</sub> +V <sub>s</sub> (kN) | V <sub>u</sub> (kN) | 実/計  |
| 1   | D075PW000    | 1000       | 750         | 680         | -     | -          | -                      | -                                                   | 545                        | 0                      | 545                                 | 502                 | 0.92 |
| 2   | D075PW009-19 | 1000       | 750         | 680         | 1-φ19 | 300        | 0.09                   | 1.20                                                | 548                        | 688                    | 1,236                               | 1,184               | 0.96 |
| 3   | D075PW014-19 | 1000       | 750         | 680         | 1-φ19 | 200        | 0.14                   | 1.81                                                | 548                        | 1,032                  | 1,580                               | 1,732               | 1.10 |
| 4   | D075PW019-19 | 1000       | 750         | 680         | 2-φ19 | 300        | 0.19                   | 2.41                                                | 558                        | 1,376                  | 1,934                               | 2,042               | 1.06 |
| 5   | D075PW013-23 | 1000       | 750         | 680         | 1-φ23 | 330        | 0.13                   | 1.60                                                | 551                        | 917                    | 1,468                               | 1,368               | 0.93 |
| 6   | D075PW017-23 | 1000       | 750         | 680         | 1-φ23 | 250        | 0.17                   | 2.12                                                | 547                        | 1,210                  | 1,757                               | 1,812               | 1.03 |

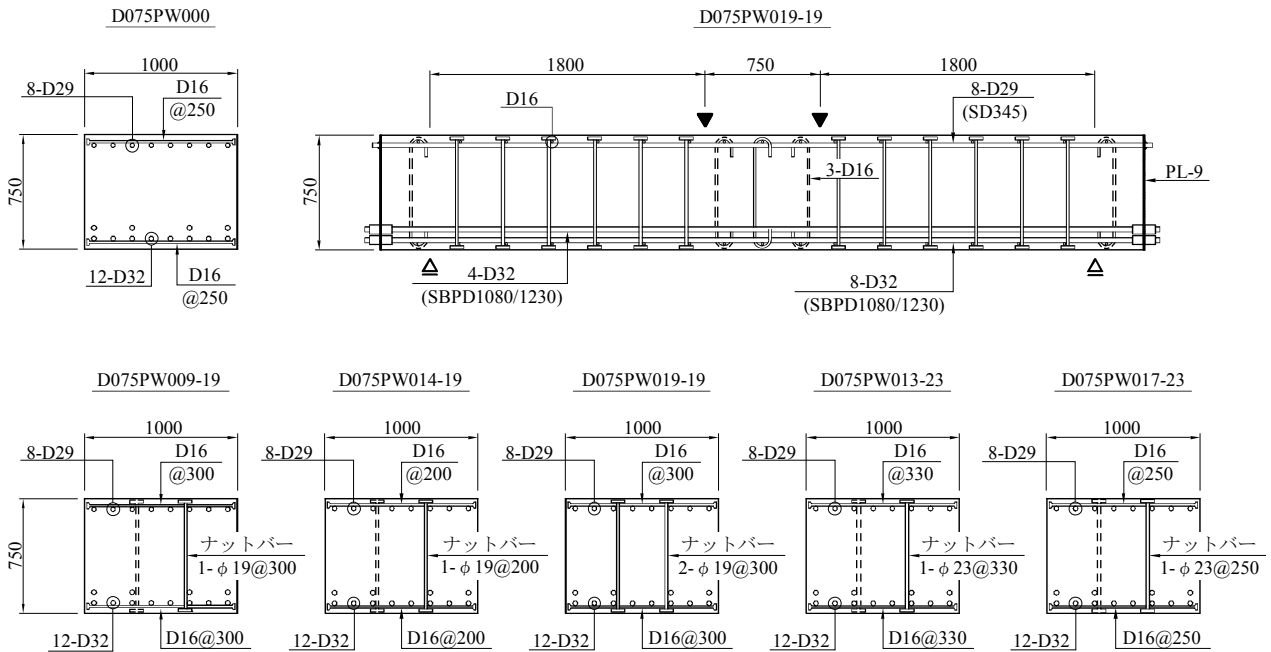


Fig. 9 せん断実験に用いた試験体の構造配筋図  
Shape and Reinforcement Details of Specimens of Shear Loading Test

Table 5 コンクリートの配合表  
Concrete Mix Proportion

| セメント<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 水<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | W/C<br>(%) | 細骨材<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 粗骨材<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 細骨材率<br>s/a (%) |
|------------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 307                          | 170                       | 55.3       | 801                         | 991                         | 45.6            |

\*空気量：4.5%。 \*\*粗骨材最大寸法：20mm。 \*\*\*セメントの種類：早強

Table 6 コンクリートの材料試験結果  
Mechanical Properties of Concrete

| 試験体名         | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 材齢<br>(日) |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------|
| D075PW000    | 35.9                         | 28.2                           | 19        |
| D075PW009-19 | 36.6                         | 28.5                           | 20        |
| D075PW014-19 | 36.5                         | 29.4                           | 21        |
| D075PW019-19 | 38.6                         | 30.1                           | 22        |
| D075PW013-23 | 37.2                         | 28.4                           | 23        |
| D075PW017-23 | 36.4                         | 28.3                           | 26        |

Table 7 鋼材の材料試験結果  
Mechanical Properties of Steel Bars

| 鋼材                          | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひずみ<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 圧縮鉄筋：D29<br>(SD345)         | 372                          | 1888                          | 583                          | 197                            |
| 引張鉄筋：D32<br>(SBPD1080/1230) | 1080*                        | 5400*                         | 1230*                        | 200*                           |
| PC鋼棒：φ19<br>(SBPR1275/1420) | 1434                         | 6861                          | 1519                         | 209                            |
| PC鋼棒：φ23<br>(SBPR1275/1420) | 1458                         | 6976                          | 1561                         | 209                            |

\*：材料試験を行っていないため、規格値とした。

3.1.2 試験体形状寸法と配筋 せん断実験に使用した梁試験体の一覧をTable 4に、構造配筋図をFig.9に示す。いずれの試験体も断面幅×断面高さは1000mm×750mmである。圧縮鉄筋はSD345の鉄筋（8本-D29）を使用した。曲げ破壊がせん断破壊よりも先行しないように引張鉄筋（12本-D32）には異形PC鋼棒（C種）を使用した。配筋筋（D16：SD345）は近年の道路構造物を考慮して主鉄筋の外側へ配置するとともに、その端部には機械式定着を設けて平面ひずみ状態に近づけた。配筋筋が最も外側となるので、ナットバーは配筋筋に円形ナットが引っかかるように配筋した。ナットバーが一本の場合、ナットバーを千鳥に配置した。なお、コンクリートは梁の上面（載荷時に圧縮となる面）より打ち込んだ。すなわち、ナットバーの円形ナット下面にブリージング水が溜まりやすい状態で打ち込んでいる。

3.1.3 使用材料 試験体に用いたコンクリートの配合表および材料試験結果をそれぞれTable 5, Table 6に、また使用した各種鋼材の材料試験結果をTable 7に示す。

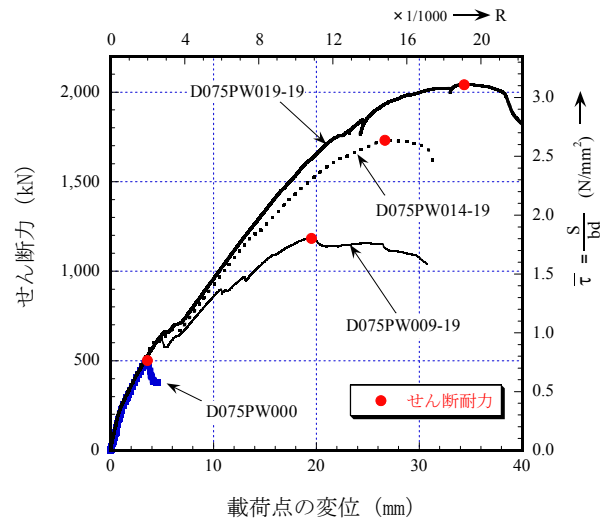


Fig. 10 せん断力-変位関係（ナットバーφ19）  
Relationship between Shear Force and Displacement at Loading Point (Nut-bar φ19)

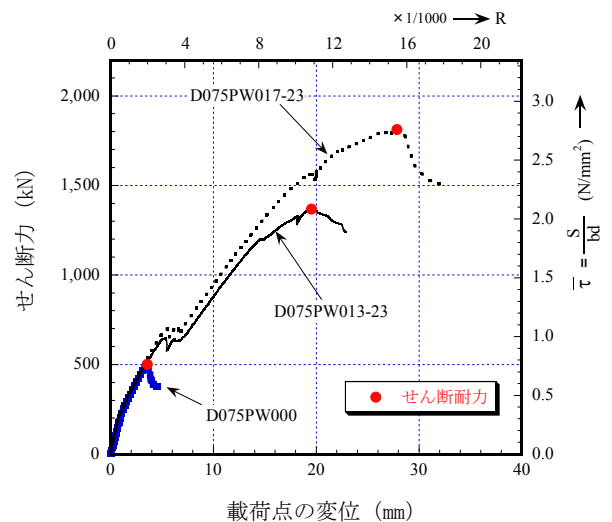


Fig. 11 せん断力-変位関係（ナットバーφ23）  
Relationship between Shear Force and Displacement at Loading Point (Nut-bar φ23)

### 3.2 載荷方法

Fig.9に示したように、いずれの載荷においてもせん断スパンを1800mm、せん断スパン比を2.65とした。すなわち、本実験ではナットバーを用いた棒部材のせん断耐力評価に着眼するため、アーチ機構よりトラス機構が卓越するせん断スパン比である2.5以上<sup>9)</sup>とした。なお、載荷は2点集中の単調載荷とした。

### 3.3 実験結果

3.3.1 せん断耐力とせん断力-変位関係 実験で得られたせん断力-変位関係を Fig.10~Fig.11 に、せん断耐力の実験結果を Table 4 に示す。全試験体のせん断耐力と帯鉄筋比との関係を Fig.12 に示す。φ19, φ23, いずれのナットバーを用いた場合も帯鉄筋比が増加するほどせん断耐力が高まることわかる。Fig.12 中には、設

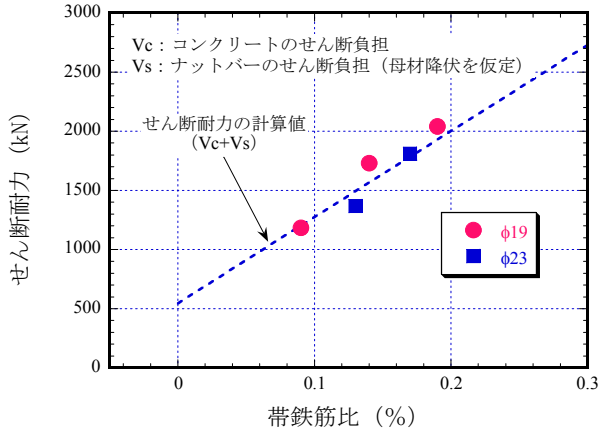


Fig. 12 せん断耐力と帯鉄筋比との関係  
Relationship between Shear Strength and Shear Reinforcement Ratio of Nut-bar

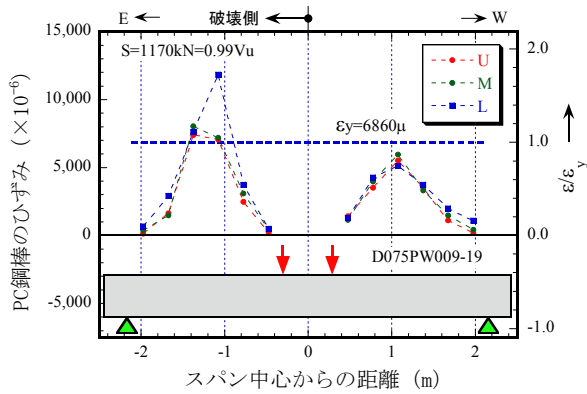


Fig. 13 PC鋼棒のひずみ分布 (D075PW009-19)  
Strain Distribution of Nut-bar

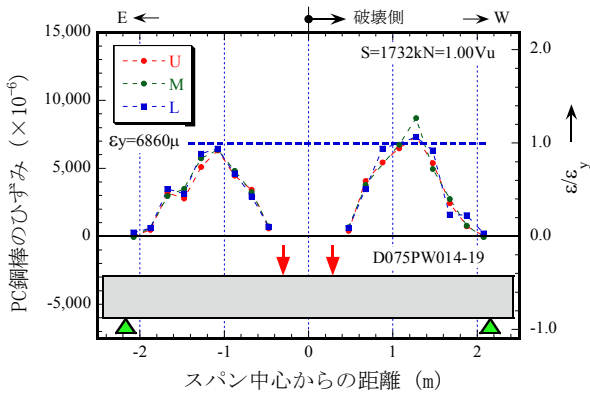


Fig. 14 PC鋼棒のひずみ分布 (D075PW014-19)  
Strain Distribution of Nut-bar

計せん断耐力式<sup>15)</sup>の内、せん断補強筋の負担分を計算する際に用いるせん断補強筋の降伏強度として、ナットバーの母材であるPC鋼棒(D種)の降伏強度を代入したせん断耐力を示している。また、Table 4中には、せん断耐力の実験値と計算値の比を示してある。これらから、実験で得られたせん断耐力は、おおむねナットバーの降伏を仮定して評価できることが明らかとなった。

3.3.2 PC鋼棒のひずみ分布 せん断耐力時におけるPC鋼棒のひずみ分布をFig.13~Fig.17に示す。また実

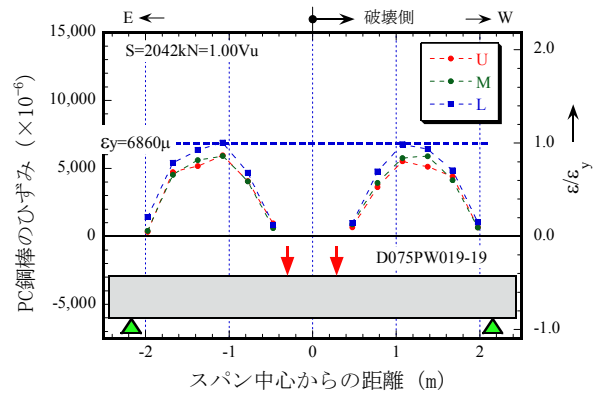


Fig. 15 PC鋼棒のひずみ分布 (D075PW019-19)  
Strain Distribution of Nut-bar

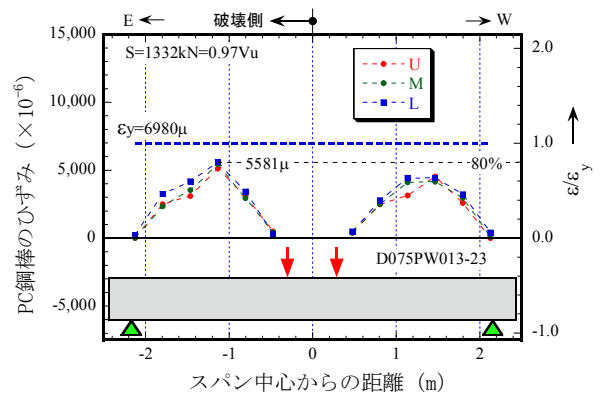


Fig. 16 PC鋼棒のひずみ分布 (D075PW013-23)  
Strain Distribution of Nut-bar

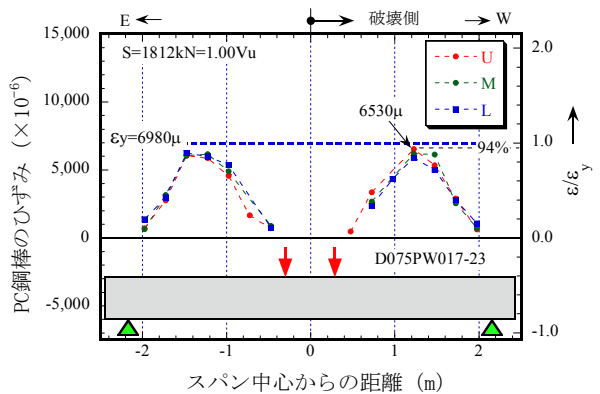


Fig. 17 PC鋼棒のひずみ分布 (D075PW017-23)  
Strain Distribution of Nut-bar

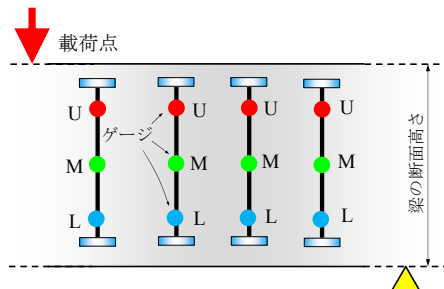


Fig. 18 ナットバーのひずみ計測位置と記号  
Position and Marks of Strain Gauge on Nut-bar

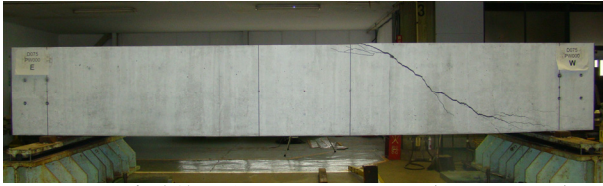


Photo 3 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW000)  
Side View of Tested Specimen

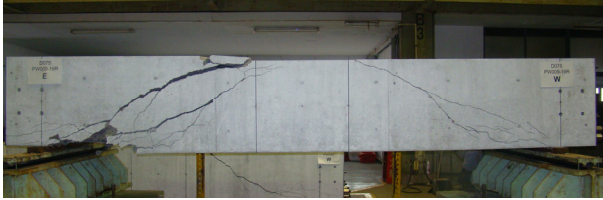


Photo 4 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW009-19)  
Side View of Tested Specimen

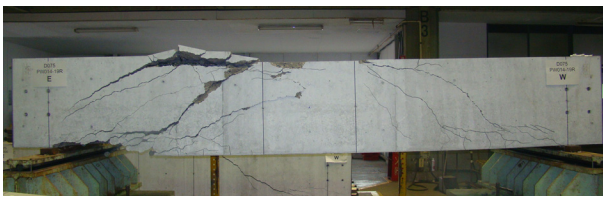


Photo 5 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW014-19)  
Side View of Tested Specimen

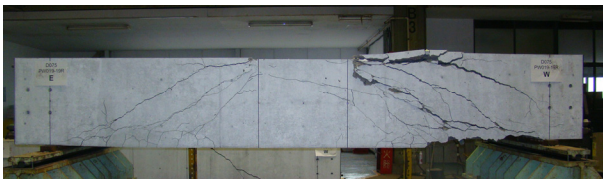


Photo 6 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW019-19)  
Side View of Tested Specimen



Photo 7 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW013-23)  
Side View of Tested Specimen

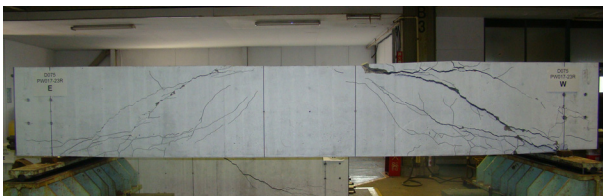


Photo 8 実験終了後のひびわれ状況 (D075PW013-23)  
Side View of Tested Specimen

実験終了後の試験体側面の状況を Photo 3~Photo 8 に示す。ナットバーに貼付したゲージ位置はナット両端部の近傍 2 点と PC 鋼棒中央 1 点、すなわち、1 本あたり 3 点を計測している (Fig.18)。いずれの場合も梁の断面方向、すなわち、U、M、L 位置で PC 鋼棒のひずみにバラツキ



Photo 9 配力筋の変形状況  
(上 : D075PW019-19, 下 : D075PW013-23)  
Status of Bending Distributing bars  
(Upper : D075PW019-19, Lower : D075PW013-23)

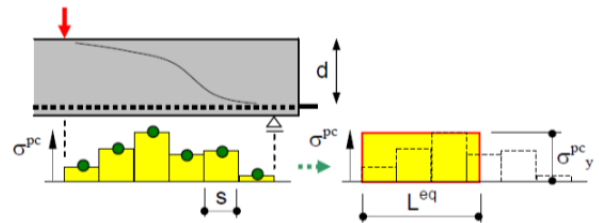


Fig. 19 PC鋼棒の等価応力ブロック長さ  
Stress Block Length of Nut Bar

が少ない。このことからナット間の PC 鋼棒は付着力による応力変化がほとんどないアンボンド状態といえる。 $\phi 19$  のナットバーでは、いずれの場合も降伏ひずみに達していた。一方、 $\phi 23$  のナットバーでは、PC 鋼棒のひずみは降伏ひずみに達していない。Photo 9 に示すように、PC 鋼棒降伏時に機械式定着具が受け持つ反力は  $\phi 19$  よりも  $\phi 23$  のほうが大きいため、PC 鋼棒が降伏する前に機械式定着具で引掛けた配力筋が曲げ降伏してしまったためと考えられる。これは、せん断力-変位関係において、最大耐力以降の破壊が延性的であったことのものである。したがって、実際の施工におけるナットバーの配置では、配力筋の曲げ剛性の選定とナットバー配置に留意する必要がある。今回の実験では配力筋として比較的細い D16 を使用しているが、実際の施工においては D16 以上の配力筋を用いる必要があることが実験結果からわかった。

**3.3.3 PC鋼棒の応力ブロック** 前述のナットバーのせん断破壊時のひずみ分布を定量的に比較するため、Fig.19に示すように、破壊したせん断スパン側におけるナットバーの単位長さあたりの応力ブロックを求めて、



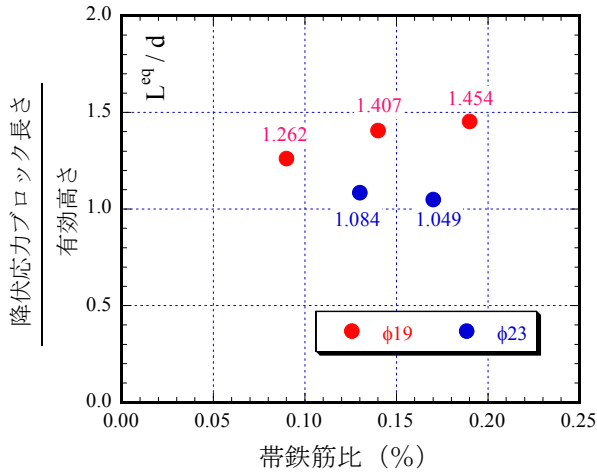


Fig. 20 等価応力ブロック長さと帯鉄筋比との関係  
Relationship between Equivalent Yield Stress Block Length and Shear Reinforcement Ratio

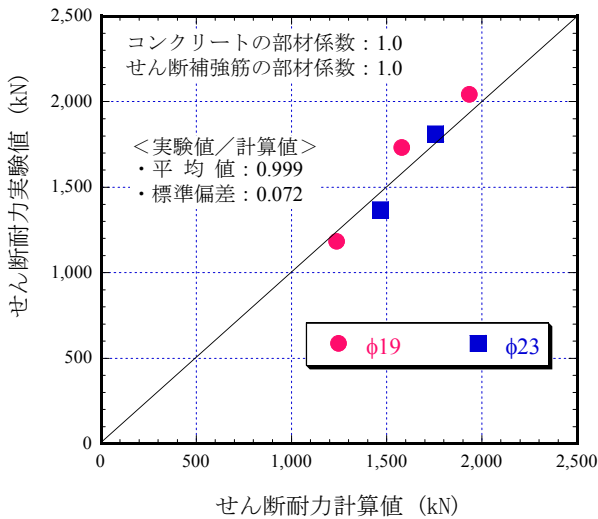


Fig. 21 せん断耐力の実験値と計算値  
Relationship between Experimental and Calculated Shear Strength

その総和を材料試験より得たナットバーの母材降伏強度で除すと、降伏強度を有した矩形応力ブロックの長さ(以下、等価応力ブロック長さと呼ぶ)になる。この値を有効高さで除した値(以下、 $L^{eq}/d$ と記す)と帯鉄筋との関係をFig.20に示す。なお、等価応力ブロック長さを算出する際の分子の値は、せん断スパン全長にわたるナットバー応力を積分した値なので、斜めひび割れ面を45度としたトラス理論値<sup>15)</sup>におけるせん断負担とは少し異なる。しかしながら、等価応力ブロック長さを観察することで、せん断スパン内のナットバー降伏領域、すなわち斜めひび割れ面を45度とした範囲よりも、ナットバーが降伏強度を発揮する範囲は広いのか狭いのかの指標になると考えた。すなわち $L^{eq}/d$ が1.0のとき、斜めひび割れは45度となっているはずであり、1.0以上となればそれより広範囲でナットバーが降伏していたことになる。Fig.20より、 $L^{eq}/d$ はφ19、φ23、それぞれ1.3~1.5、1.0~1.1とφ23のほうが狭い範囲で降伏していた。これは前述した配力筋の曲げ

降伏によりナットバーが全強度を発揮しにくくなったことが一因として考えられる。しかし、φ19およびφ23いずれの場合も $L^{eq}/d$ は1.0以上となっていたことから、斜めひび割れ角度を45度と仮定したトラス理論でナットバーの降伏メカニズムを大略評価できると考えた。

### 3.4 せん断耐力評価式

土木学会コンクリート標準示方書<sup>15)</sup>に基づき、ナットバーの母材であるPC鋼棒が降伏強度を発揮したと仮定してナットバーのせん断負担( $V_s$ )を算定し、これにコンクリート寄与分を累加して算定したせん断耐力計算値と実験値との関係を、Fig.21に示す。なお、部材係数は1.0としている。

せん断耐力の計算値は実験値を精度よく評価しており、実験値/計算値の平均値は0.999であった。このことから、上記の方法でナットバーを用いた場合のせん断耐力を評価してよいと考えている。

## 4. まとめ

新設の鉄筋コンクリート工事における過密配筋を解消するため、機械式定着具を両端に配した高強度の中間帯鉄筋帯鉄筋「ナットバー」の実用化に向けて、その定着具の付着実験およびナットバーを用いた梁のせん断実験を行った。

その結果、以下のことがわかった。

- 1) ナットバーに用いたφ90の円形定着具は、PC鋼棒D種相当の荷重を作用させても従来の鉄筋による半円形フックに比べて抜出し量が小さく、継手指針の要求性能を満足していた。
- 2) ナットバーを帯鉄筋として使用した場合のせん断耐力は、ナットバー母材の降伏強度を仮定したせん断耐力の設計計算値で評価できる。
- 3) せん断耐力を発揮する前後に、ナットバーの機械式定着具が接する位置で、配力筋が局所的に曲げ塑性変形が生じる。そのため、ナットバーをせん断補強筋として用いた場合のせん断破壊は延性的となる。実際の施工では、実験で用いたD16以上の曲げ剛性を有した配力筋を用いるとともに、配力筋の局所曲げが生じにくいようにナットバーの配置計画を行うことが重要である。
- 4) 等価応力ブロック長さは、φ23のナットバーを使用するとφ19に比べて若干短くなるが、いずれの場合も有効高さと同程度を有していた。したがって、斜めひび割れ面を45度と仮定して、ナットバーが降伏強度を発揮する範囲を定めたトラス理論は、メカニズムを大略包含しており、ナットバーによるせん断耐力増加を精度良く評価できた。

以上のことから、降伏強度を1275N/mm<sup>2</sup>まで高めたナ

ットバーを中間帯鉄筋の代わりに用いれば、母材強度を発揮したせん断耐力が期待できるので、中間帯鉄筋の本数削減が可能となり、過密配筋を改善できることがわかった。

今後の課題として、曲げ降伏後におけるナットバーの靱性補強効果を確認していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，丸善出版，pp.201-212，2012.3.
- 2) 井ヶ瀬良則，緒方紀夫，田村陽司：壁式橋脚の耐震補強工法に関する試験検討，土木学会構造工学論文集，Vol.43A，pp.1295-1300，1997.3.
- 3) 塚淳一，川島一彦：コンクリートの横拘束効果に及ぼす横拘束筋の配置間隔と中間帯鉄筋の影響，土木学会論文集，No.717/I-61，pp.91-106，2002.10.
- 4) 梁田 真広，渡辺 健，二羽 淳一郎：支圧板幅と圧縮ストラット形状に着目したRC ディープビームのせん断耐力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.217-222，2010.7.
- 5) 福原正志，黒正清治：鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究，日本建築学会論文報告集，第320号，pp.12-20，1982.10.
- 6) 黒正清治，小林克巳，光木史朗，熊谷仁志：鉄筋コンクリートはりのせん断終局強度に及ぼすせん断補強量およびコンクリート強度の影響に関する実験，日本建築学会論文報告集，第373号，pp.83-91，1987.3.
- 7) 例えば，ネツレンホームページ：  
<http://www.k-neturen.co.jp/eigyoku/koukyoudo/seihin.html>
- 8) 黒岩 俊之，谷村 幸裕，岡本 大，佐藤 勉：高強度せん断補強鉄筋を用いたRCはりのせん断耐力に及ぼすコンクリート強度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.955-960，2004.7.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善出版，pp.142-150，2004.4.
- 10) (一財)土木研究センター：建設技術審査証明報告書「Tヘッド鉄筋」，2003.11.
- 11) (一財)土木研究センター：建設技術審査証明報告書「Head-bar」，2012.8.
- 12) 田中浩一，江尻譲嗣：PC鋼棒を面外方向にあと施工したせん断補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1039-1044，2011.7.
- 13) 土木学会：コンクリートライブラリー128，鉄筋定着・継手指針 [2007年版]，pp.71-84，2007.8.
- 14) 村上雅英ほか：引き抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価，コンクリート工学論文集，第8巻，第2号，pp.1-10，1997.7
- 15) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.180-187，2012.12.