

論文 機械式定着した PC 鋼棒をせん断補強筋として用いたせん断耐力

田中 浩一^{*1}・江尻 譲嗣^{*2}

要旨：兵庫県南部地震を機に鉄筋コンクリート構造物における配筋が過密となり、鉄筋の組立やコンクリート打設が困難となっている。過密配筋の要因の一つである中間帯鉄筋の高強度化、ならびにその両端を機械式定着すれば、中間帯鉄筋の配置本数削減と組立速度の向上により過密鉄筋の課題が回避できる。そこで著者らは両端部に定着具を取り付けた PC 鋼棒を中間帯鉄筋の代わりに用いた場合のせん断耐力を実験により確認した。その結果、せん断耐力は PC 鋼棒の降伏強度を期待してよいことがわかった。

キーワード：せん断，耐震，機械式定着，高強度せん断補強鉄筋，PC 鋼棒，中間帯鉄筋

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¹⁾。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と、コンクリートを拘束する効果である。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。

過密配筋を回避する方法の一つは、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²⁾は、高強度せん断補強筋を対象にした研究である。黒岩らの研究³⁾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

果を発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懸念から、最新の道路橋示方書¹⁾や鉄道標準⁴⁾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。鉄筋端部に定着具を取り付ける既往の技術^{5),6)}に用いる鉄筋は SD345～SD490 であり、過度な降伏強度を設定していない。SD490 よりも強度の高い PC 鋼棒 C 種を対象とした機械式定着の事例⁷⁾はあるが、これは既設構造物をあと施工せん断補強するため、削孔径を小さくする観点から小径の定着具を複数個取り付けた構造である。新設に適用するには、大径の定着具を両端部に 1 個ずつ取り付けたほうがコストの観点から望ましい。

そこで、過密配筋を回避するため、著者らは中間帯鉄筋の降伏強度を 1275N/mm² まで高め、その両端部に円形の定着具を設けた中間帯鉄筋（写真-1。以下、高強度中間帯鉄筋）の成立性を確認することとした。

本研究では、高強度中間帯鉄筋を用いた RC 梁のせん断実験を行い、せん断耐力の確認と、高強度中間帯鉄筋を用いた場合の設計せん断耐力評価式を提案する。

2. せん断実験

2.1 試験体

(1) 高強度中間帯鉄筋

使用した高強度中間帯鉄筋の形状寸法を図-1に示す。

*1 大林組本社技術研究所構造技術研究部 博士（工学）（正会員）

*2 大林組本社技術研究所構造技術研究部 博士（工学）（非会員）

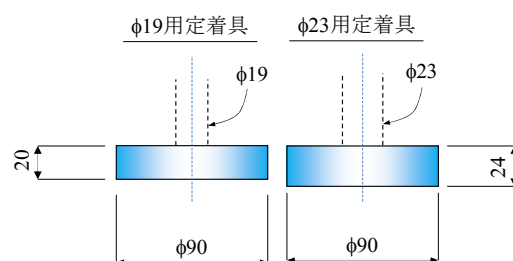
前述の付着実験で決定したφ90mmの定着具を両端部に取り付けたPC鋼棒（D種）である。φ19およびφ23に用いた定着具の支圧面積比⁷⁾は、それぞれ21.4、14.3である。なお、定着具と鋼棒との嵌合接合（ネジ接合）部分は特に接着剤などを用いていない。

(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表－1に、構造配筋図を図－2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。配力筋（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。主鉄筋の外側に配置された配力筋に高強度中間帯鉄筋の定着具を引っかけた。高強度中間帯鉄筋が一本の場合は千鳥に配置した。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。



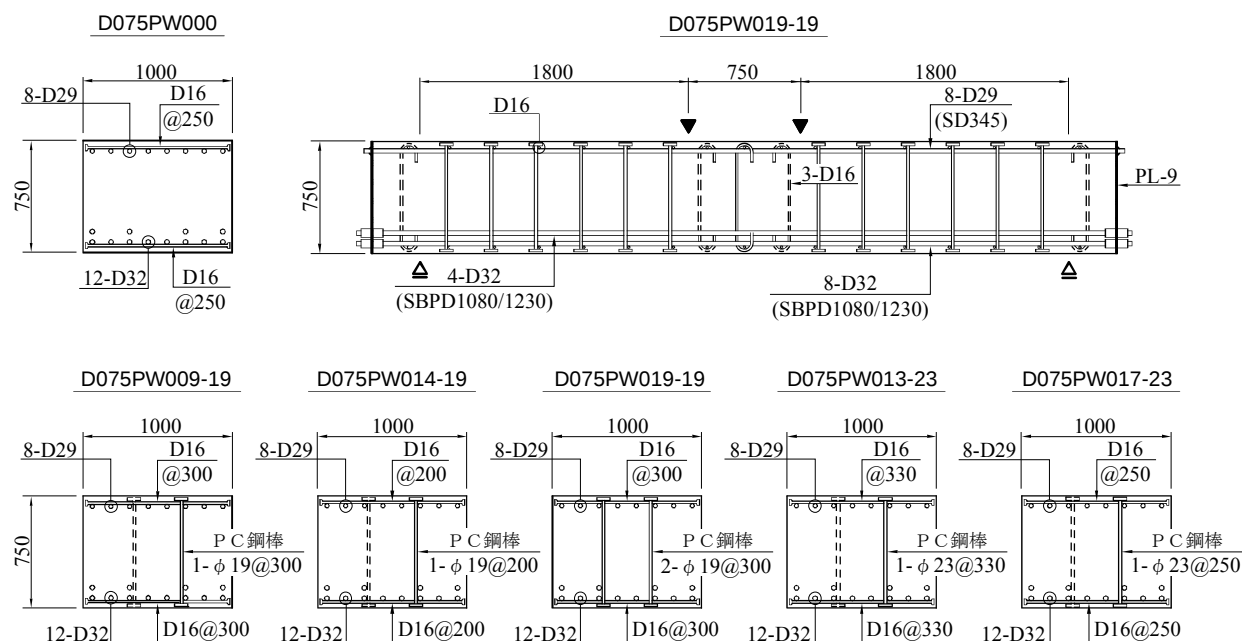
写真－1 使用した高強度中間帯鉄筋



図－1 PC鋼棒に用いた定着具の形状寸法

表－1 せん断実験の試験体一覧

試験体名	断面幅 B (mm)	断面高さ D (mm)	有効高さ d (mm)	PC鋼棒				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 _w (%)	p _w ・σ _y (N/mm ²)	コンクリート V _c (kN)	鋼材 V _s (kN)	V _c +V _s (kN)	V _u (kN)	実/計
D075PW000	1000	750	680	-	-	-	-	545	0	545	502	0.92
D075PW009-19	1000	750	680	1-φ19	300	0.09	1.20	548	688	1,236	1,184	0.96
D075PW014-19	1000	750	680	1-φ19	200	0.14	1.81	548	1,032	1,580	1,732	1.10
D075PW019-19	1000	750	680	2-φ19	300	0.19	2.41	558	1,376	1,934	2,042	1.06
D075PW013-23	1000	750	680	1-φ23	330	0.13	1.60	551	917	1,468	1,368	0.93
D075PW017-23	1000	750	680	1-φ23	250	0.17	2.12	547	1,210	1,757	1,812	1.03



図－2 せん断実験に用いた試験体の構造配筋図

表-2 コンクリートの配合表

セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	W/C (%)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材率 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：早強

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	材齢 (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

表-4 鋼材の材料試験結果

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

*：0.2%耐力。 **：降伏強度をヤング係数で除した値。

***：材料試験を行っていないため規格値。

(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表-2、表-3に、また、使用した各種鋼材の材料試験結果を表-4に示す。

2.2 荷重方法

図-2に示したように、いずれの荷重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。これは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^{8), 9)}にして、高強度中間帯鉄筋のせん断負担に着目するためである。なお、荷重は2点集中の単調荷重とした。

2.3 実験結果

(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-変位関係を図-3～図-4に、せん断耐力の実験結果を表-1に示す。全試験体のせん断耐力と帯鉄筋比との関係を図-5に示す。φ19、φ23、いずれの高強度中間帯鉄筋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。図-5中には、設計せん断耐力式¹⁰⁾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

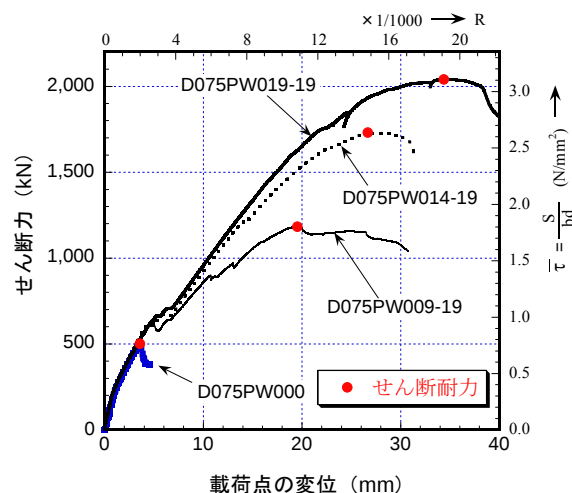


図-3 せん断力-変位関係 (φ19)

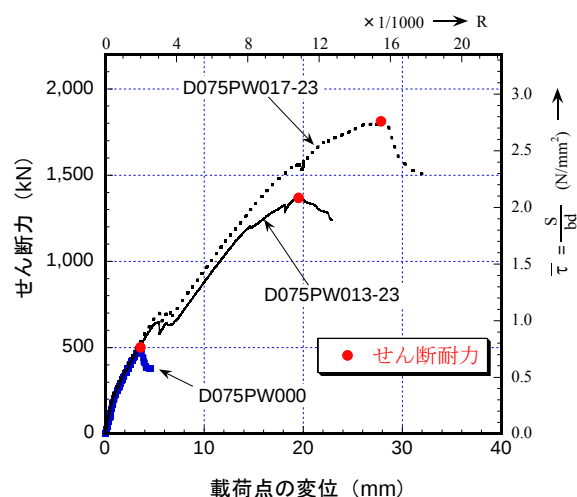


図-4 せん断力-変位関係 (φ23)

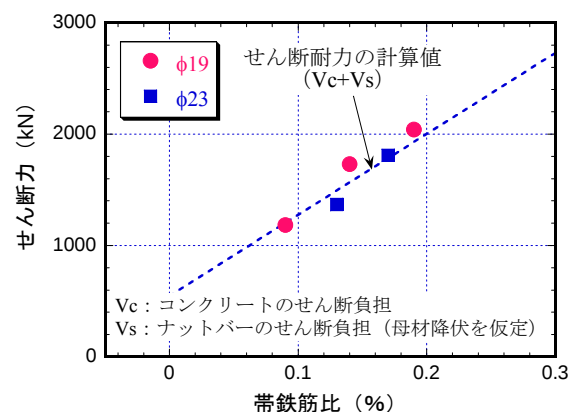


図-5 せん断耐力と帯鉄筋比との関係

して、高強度中間帯鉄筋の母材である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、表-1中に示したせん断耐力の実験値と計算値の比は0.92～1.10であった。このことから、実験で得られたせん断耐力は、高強度中間帯鉄筋の降伏を仮定して評価したせん断耐力に近い値であったと言える。

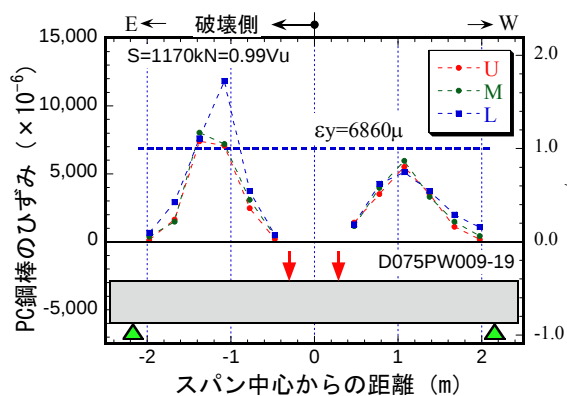


図-6 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW009-19)

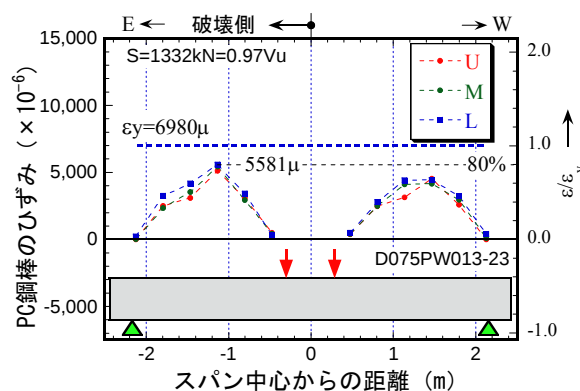


図-9 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW013-23)

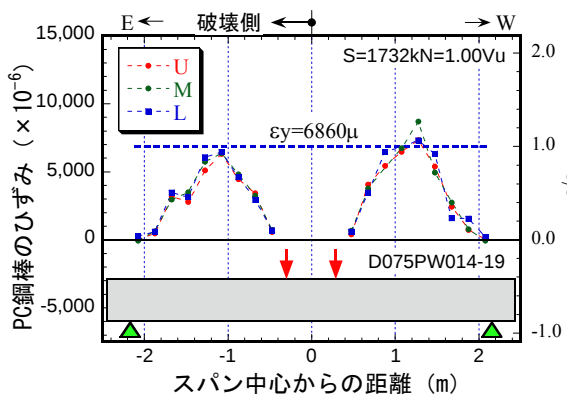


図-7 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW014-19)

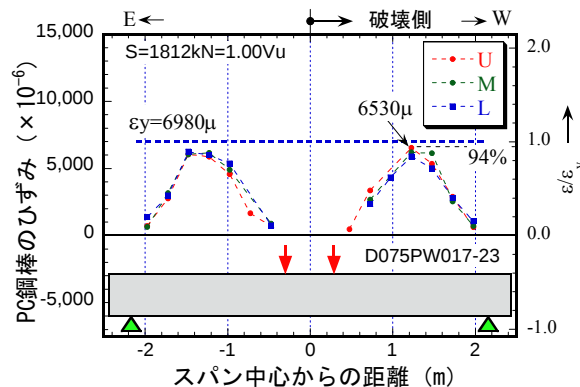


図-10 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW017-23)

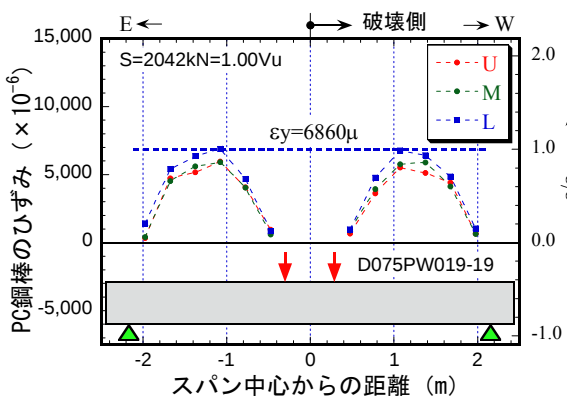


図-8 PC 鋼棒のひずみ分布 (D075PW019-19)

(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図-6～図-10に示す。また実験終了後の試験体側面の状況を写真-2～写真-7に示す。高強度中間帯鉄筋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(図-11)。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。φ19の高強度中間帯鉄筋では、いずれの場合も降伏ひずみに達していた。一方、φ23の高強度中間帯鉄筋では、PC鋼棒のひずみは降伏ひずみに

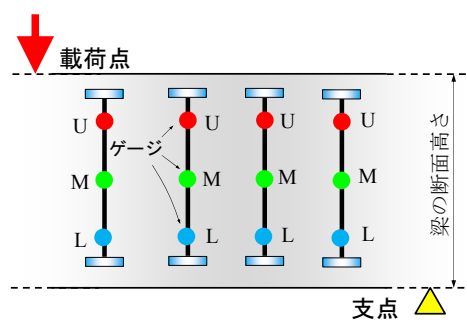


図-11 PC 鋼棒のひずみ計測位置と記号

達していない。写真-8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φ19よりもφ23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理由でもある。したがって、実際の施工においては、配筋の曲げ剛性の選定と高強度中間帯鉄筋の配置に留意する必要がある。今回の実験に使用した配筋筋はD16を使用していた。このことから、高強度中間帯鉄筋を用いる際にはD16以上の配筋筋を用いるのが良い。また、試験体D075PW013-23では高強度中間帯鉄筋の配置間隔を有効高さの1/2 (340mm)に近い330mmとしたため、せん断補強の効率が悪く、せん断耐力の実験値/計算値の値が試験体D075PW017-23の場合よりも小さくなったと考えられる。



写真-2 実験終了後 (D075PW000)

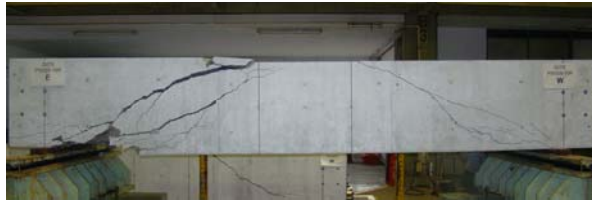


写真-3 実験終了後 (D075PW009-19)

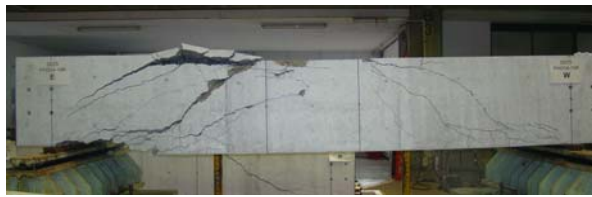


写真-4 実験終了後 (D075PW014-19)



写真-5 実験終了後 (D075PW019-19)



写真-6 実験終了後 (D075PW013-23)



写真-7 実験終了後 (D075PW017-23)

(3) PC鋼棒の応力ブロック

前述の高強度中間帯鉄筋のせん断破壊時のひずみ分布を定量的に比較するため、図-12に示すように、破壊したせん断スパン側における高強度中間帯鉄筋の単位長さあたりの応力ブロックを求めて、その総和を材料試験より得た高強度中間帯鉄筋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⁷⁾）になる。この値を有効高さで除した値（以下、 L^{eq}/d と記す）と帯鉄筋比との関係を図-13に示す。なお、等価応力ブロック長さを算出する際の分子



写真-8 配力筋の変形状況
(上: D075PW019-19, 下: D075PW013-23)

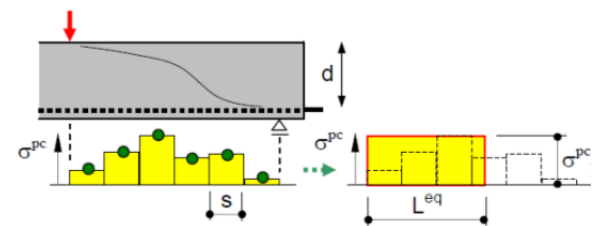


図-12 PC鋼棒の等価応力ブロック長さ

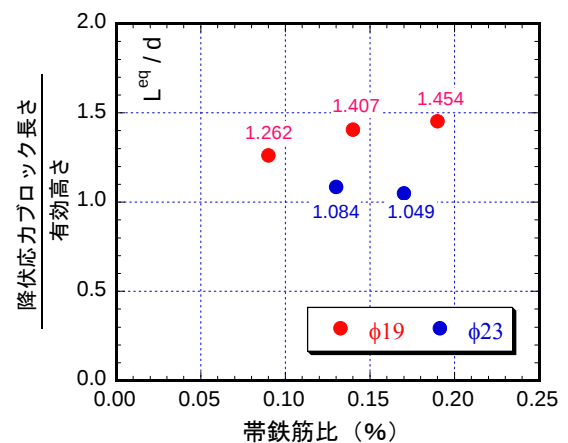


図-13 等価応力ブロック長さと帯鉄筋比との関係

の値は、せん断スパン全長にわたる高強度中間帯鉄筋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¹⁰⁾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、せん断スパン内の高強度中間帯鉄筋が降伏した領域、すなわち斜めひび割れ面を45度とした範囲よりも、高強度中間帯鉄筋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

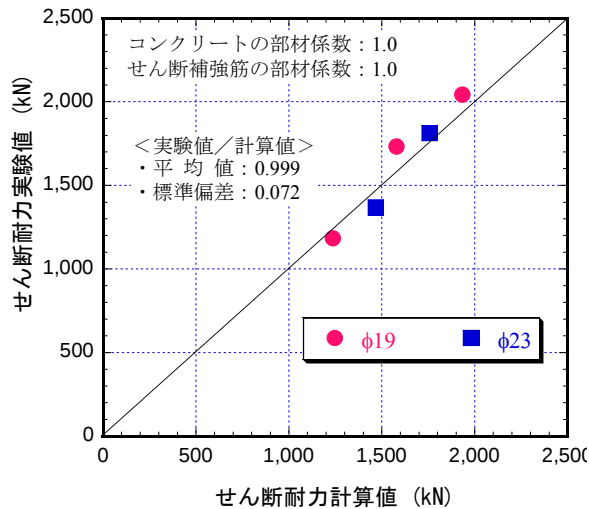


図-14 せん断耐力の実験値と計算値

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高強度中間帯鉄筋が降伏していたことになる。図-13より、 L^{eq}/d は $\phi 19$ 、 $\phi 23$ 、それぞれ1.3～1.5、1.0～1.1と $\phi 23$ 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高強度中間帯鉄筋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、 $\phi 19$ および $\phi 23$ 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高強度中間帯鉄筋を用いた場合でも概ね評価できると考えられる。

2.4 せん断耐力評価式

土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾に基づき、高強度中間帯鉄筋の母材であるPC鋼棒が降伏強度を発揮したと仮定して高強度中間帯鉄筋のせん断負担 (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、図-14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、上記の方法で高強度中間帯鉄筋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。

3. 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、定着具を両端に配した高強度の中間帯鉄筋の実用化に向けて、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) 高強度中間帯鉄筋をせん断補強筋として使用した場合のせん断耐力は、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、その適用範囲は、本実験の範囲内である拘束応力 ($p_w \times \sigma_y$) で 2.4N/mm^2 以下である。
- (2) せん断耐力を発揮する前後に、高強度中間帯鉄筋の定着具が配力筋に接する位置で、配力筋が局所的に曲げ塑性変形が生じる。そのため、せん断破壊は延性的となる。
- (3) 実際の施工では、D16以上の曲げ剛性を有した配力筋を用いるなど、配力筋に局所曲げが生じにくいような配慮が必要である。

今後の課題として、曲げ降伏後における高強度中間帯鉄筋の靱性補強効果や定着具に要求される性能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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) (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.
- 6) (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.
- 7) 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.
- 8) 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，p.141，2004.4.
- 9) 土木学会：コンクリートライブラリー [138] 2012年制定コンクリート標準示方書改定資料 [基本原則編・設計編・施工編]，pp.109-111，2012.12.
- 10) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.180-187，2012.12.