

論文 あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋における端部プレート形状と RC 部材のせん断補強効果に関する検討

河村 圭亮*1・趙 唯堅*2・新藤 竹文*3・岡本 晋*4

要旨：著者らは端部にプレートを接合したせん断補強鉄筋（以下、PHB と略記）を用いたあと施工による耐震補強工法を開発してきた。今回、本工法の施工性向上を目的として、新たに補強鉄筋両端部ともに小型の円形プレートを取り付けたタイプ、および機械式継手で接続したタイプの PHB を開発した。本研究では、D25～D29 の比較的大径鉄筋の PHB を適用した場合のせん断補強効果について、RC 梁試験体の載荷実験により検証した。その結果、これらの PHB で補強した RC 部材は高いせん断耐力が得られるとともに、従来の PHB と同様に端部プレートの定着性能を考慮した設計手法で評価できることが明らかとなった。

キーワード：あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋, 耐震補強, せん断補強, 施工性向上, 機械式継手

1. はじめに

著者らは主に地中 RC 構造物に対して片側からのみの施工でせん断補強が可能な、あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋¹⁾（以下、PHB と略記）を用いた耐震補強工法を開発し、これまで多くの既設構造物に適用してきた。これら従来の PHB は、写真-1(a)に示すように定着用として埋込側端部は小型の円形プレート、手前側端部はそれより一回り大きい矩形プレートを取り付けた「片端矩形プレート型 PHB」であった。今回、本工法の施工性のさらなる向上を目的として、新たに2つのタイプの PHB を開発した。

1 つは、写真-1(b)に示す補強鉄筋両端部ともに小型の円形プレートを取り付けた「両端円形プレート型 PHB」である。従来型では既設コンクリートに手前側矩形プレートを掛ける構造であった。手前側も埋込側と同じく孔内に埋込される小型の円形プレートとすると、若干の定着性能低下が想定されるが、矩形プレート部分挿入のための拡大削孔やそれに伴う断面修復の工程を削減することができ、施工性向上だけでなくコスト削減や工期短縮にも繋がるものである。

他方は、写真-1(c)に示す補強鉄筋を機械式継手で接続した「機械式継手型 PHB」である。作業空間が狭い場合、補強対象部材の厚さによっては、所定の全長では挿入が困難であった。そこで、機械式継手を用いることで、このような条件下でも PHB の挿入が可能となるものである。機械式鉄筋継手工法のガイドライン²⁾等では、機械式継手の適用範囲は軸方向鉄筋が基本とされており、せん断補強鉄筋への適用性については部材実験レベルでの検討が必要であると考えられる。



(a) 片端矩形プレート型 PHB (従来型)



(b) 両端円形プレート型 PHB



(c) 機械式継手型 PHB [両端円形プレート]



(d) 端部定着プレート (左: 矩形, 右: 小型の円形)

* (a)～(c)は写真左側が手前側, 右側が埋込側

写真-1 あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋

本研究では、両端円形プレート型 PHB、機械式継手型 PHB で補強した RC 部材のせん断補強効果について検証することを目的として、せん断破壊する RC 梁試験体の載荷実験を実施した。ここで、大径鉄筋の PHB を用いることで施工本数を減らすことができ、削孔に伴う既設部材への影響軽減や施工合理化に繋がる。一方、先施工で補強筋端部に定着体がない場合、大径鉄筋によるせん断補強では、せん断補強効果が低下するという検討事例³⁾もある。これらも考慮して今回の実験は比較的大径鉄筋の PHB を用いて実施した。実験結果より、修正トラス理論に基づくコンクリート標準示方書[設計編]⁴⁾（以下、コ示と略記）のせん断耐力式⁴⁾を基に、通常のせん断補強鉄筋を用いる場合に対して小型の円形プレート側端部の

*1 大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 主任 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 次長 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 荣誉研究員 工博 (フェロー会員)

*4 成和リニューアルワークス(株) 工事統括部 工事部 品質・技術室 担当部長 工博

表-1 実験ケース一覧

実験ケース		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
PHB挿入部の削孔径 (mm)		46	55	46	65
PHB	鉄筋種類	異形鉄筋	ネジ節鉄筋	異形鉄筋	ネジ節鉄筋
	材質, 鉄筋径	SD345, D25	SD345, D25	SD345, D29	SD345, D29
	端部定着プレート種類, 材質, サイズ	S35C	S35C	S35C	S35C
		φ38mm, t=16mm	φ42mm, t=19mm	φ42mm, t=19mm	φ48mm, t=19mm
	機械式継手の有無	無	有	無	有
	継手長 (mm)	—	180	—	200
	PHB全長 (mm)	655	655	655	655
	配置間隔	2本@350mm	2本@350mm	2本@350mm	2本@350mm
	せん断補強鉄筋比 p_w	0.36%	0.36%	0.46%	0.46%
	鉄筋降伏強度 f_y (N/mm ²)	396	391	389	400
	鉄筋ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	187	188	189	192
主鉄筋	仕様	ネジ節鉄筋, SD490, D51×5本, 主鉄筋比 $p_v=1.74%$			
	材料試験結果	降伏強度 $f_y=525$ N/mm ² , ヤング係数 $E_s=192$ kN/mm ²			
コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)		40.7	36.8	34.1	34.7
$p_w \cdot f_y / f_c$ (N/mm ²)		0.035	0.038	0.052	0.053
モルタル圧縮強度 f_m (N/mm ²)		63.5	63.5	65.4	65.2

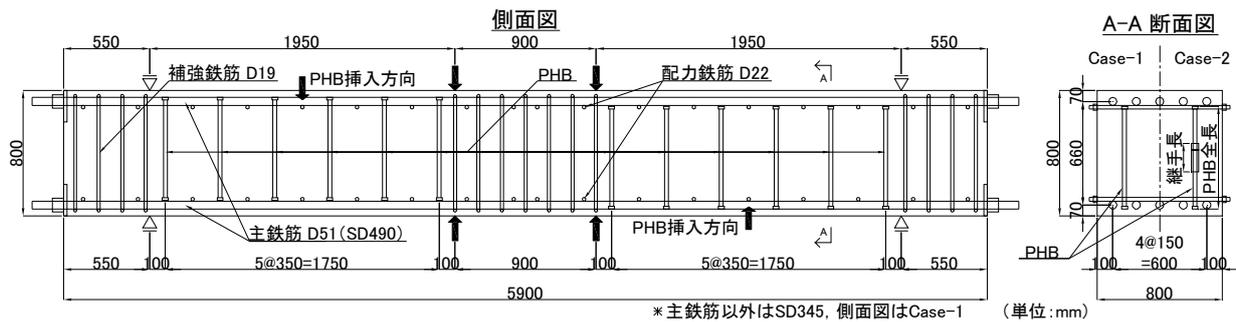


図-1 RC 梁試験体概要

定着性能低下を考慮する有効係数を用いた手法によれば、補強後のせん断耐力を安全側に評価できることを示した。

2. PHB によるせん断補強効果確認実験

2.1 RC 梁試験体概要

実験ケースの一覧と使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-1に示す。RC 梁試験体は、図-1に示す幅 800mm×高さ 800mm×全長 5,900mm, せん断スパン比 $a/d=2.67$ のものが計 4 体である。それぞれ挿入する PHB の鉄筋径 (D25, D29) および機械式継手の有無が異なる条件とした。使用したコンクリートは粗骨材最大寸法 20mm, 呼び強度 21N/mm² のもので配合を表-2に示す。PHB による補強後のせん断耐力確認が目的であるため、せん断破壊型の諸元となるよう主鉄筋は SD490, D51 のネジ節鉄筋を 5 本ずつ配置しており、引張主鉄筋比は 1.74% である。その他に一般的な土木構造物の配筋を想定して配力鉄筋を配置した。いずれもせん

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	早強セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
62.4	43.3	158	253	818	1096	2.15

断スパンにはせん断補強鉄筋が配置されていない試験体に対して、材齢 19 日で PHB をあと施工で挿入してせん断補強を行った。PHB はドリルで削孔した孔内にモルタルを充填した後に挿入, 定着した。ここで、挿入方向は片側のせん断スパンは上面から、もう一方のせん断スパンは底面からとした。PHB の挿入深さは削孔面と反対側の主鉄筋の 5mm 手前までとした。Case-2,4 では、すべての PHB はネジ節鉄筋を用いたものとし、その中央部にトルク固定方式の機械式継手を設けた。なお、本実験では機械式継手は同列配置 (いも継ぎ配置) としている。PHB のせん断スパン方向の配置間隔 350mm は、コ示⁴⁾の構造細目に準じて標準施工範囲のほぼ上限に相当する有効高



写真-2 載荷試験状況

さ d ($=730\text{mm}$) の $1/2$ に近い条件とした。この範囲より大きい配置間隔で補強を行った場合には、トラス機構の維持が困難になることも指摘されており⁵⁾、今回の実験条件は標準施工範囲内でせん断補強に対して不利なものである。また、試験体高さは土木構造物の壁部材を想定すると比較的厚さが小さいものであるが、その分、端部定着性能が及ばず影響が大きくなり、不利な条件である⁶⁾と考える。

2.2 載荷方法および測定項目

地震力の作用を想定して、計算上の最大荷重の $1/5$ 程度の荷重を中央 2 点で正負交互に漸増させる載荷方法とした。ここで、上側からの載荷を正側載荷、下側からの載荷を負側載荷とする。

載荷試験状況を写真-2 に示す。載荷板および支承板にはそれぞれ幅 100mm の鋼板を用いた。試験体中央における鉛直変位およびすべての PHB でひずみの測定を行った。PHB のひずみは、機械式継手がない Case-1,3 は部材高さ方向中央位置、Case-2,4 は機械式継手を避けた鉄筋部分 2 ヶ所にひずみゲージを貼付けた。

2.3 実験結果

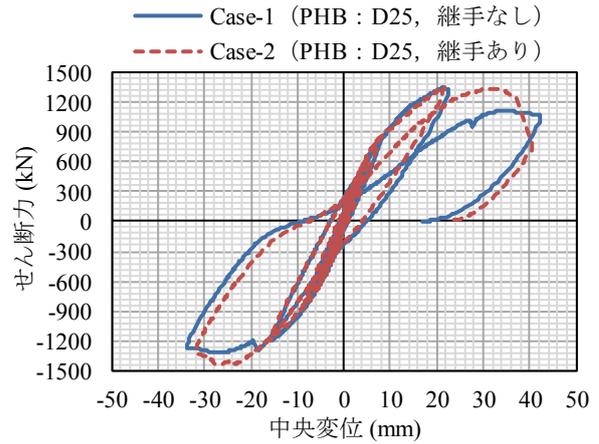
(1) せん断耐力

各ケースのせん断力-中央変位関係を図-2 に、最終的にせん断破壊に至ったスパンでの斜めひび割れ発生時のせん断力 $V_{c,exp}$ と最大せん断力 V_{exp} を表-3 にそれぞれ示す。

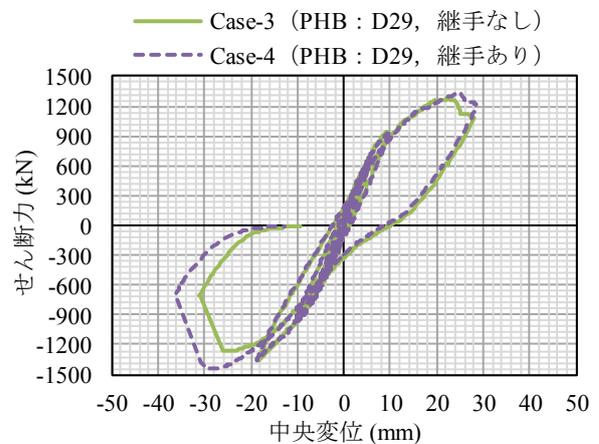
すべてのケースで、正側、負側の載荷ともに $150\sim 200\text{kN}$ 程度で等曲げ区間から曲げひび割れが生じ始め、 $410\sim 575\text{kN}$ でせん断スパン内に斜めひび割れの発生が確認されたが、その後もせん断力は増加し続け、斜めひび割れと交差する PHB がせん断力を負担していることが示唆される。

Case-1 は、正側載荷の $+1,341\text{kN}$ でせん断力が最初に低下し、その次の負側載荷において $-1,317\text{kN}$ でせん断力が低下した。

Case-2 は、負側載荷の $-1,441\text{kN}$ でせん断力が最初に低下し、その次の正側載荷では 1 つ前の正側載荷での最大せん断力 $+1,354\text{kN}$ に到達する前にせん断力が低下した。



(a) Case-1,2 (PHB : D25)



(b) Case-3,4 (PHB : D29)

図-2 せん断力-中央変位関係

表-3 斜めひび割れ発生時のせん断力と最大せん断力

実験ケース	正側載荷		負側載荷	
	$V_{c,exp}$	V_{exp}	$V_{c,exp}$	V_{exp}
Case-1	+455 kN	+1,341 kN	-575 kN	-1,317 kN
Case-2	+495 kN	+1,354 kN	-575 kN	-1,441 kN
Case-3	+480 kN	+1,275 kN	-410 kN	-1,352 kN
Case-4	+575 kN	+1,333 kN	-545 kN	-1,443 kN

$V_{c,exp}$: 斜めひび割れ発生時のせん断力
(せん断破壊に至ったスパンでの値)

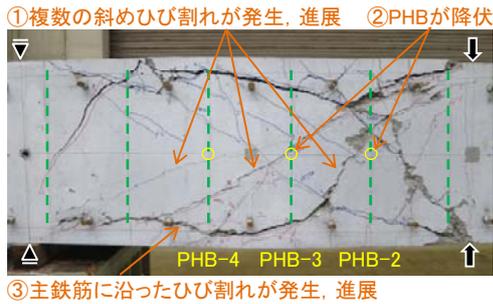
V_{exp} : 最大せん断力

* 網掛けは正側、負側の内、最初に発生した方を示す。

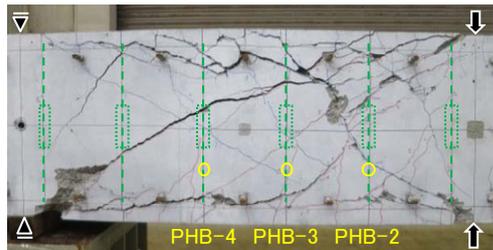
Case-3 は、正側載荷の $+1,275\text{kN}$ でせん断力が最初に低下し、その次の負側載荷では 1 つ前の負側載荷での最大せん断力 $-1,352\text{kN}$ に到達する前にせん断力が低下した。

Case-4 は、正側載荷の $+1,333\text{kN}$ でせん断力が最初に低下し、その次の負側載荷において $-1,443\text{kN}$ でせん断力が低下した。

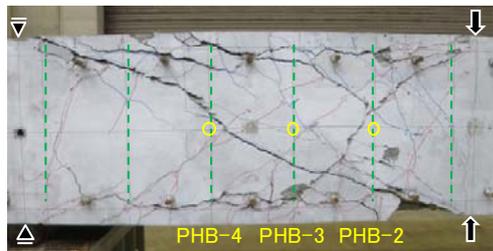
PHB の鉄筋径 D25, D29 のケースともに、機械式継手の有無によるせん断力-中央変位関係の履歴や最大せん断力



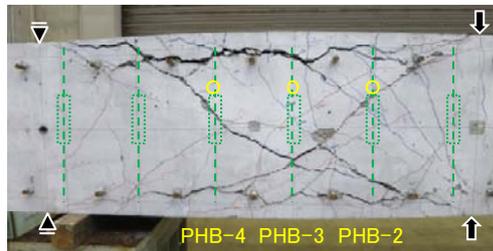
(a) Case-1 (PHB : D25, 継手なし)



(b) Case-2 (PHB : D25, 継手あり)



(c) Case-3 (PHB : D29, 継手なし)



(d) Case-4 (PHB : D29, 継手あり)

*いずれもせん断破壊に至ったスパンを示す。

写真-3 実験終了後のひび割れ状況

断力に大差は見られなかった。機械式継手ありのケースの方が僅かに最大せん断力が高くなったのは、機械式継手の断面部分を含めるとせん断補強鉄筋断面積が増加していることや止端部の付着によるものと考えられる。

(2) 破壊性状

実験終了後のせん断破壊に至ったスパン内のひび割れ状況を写真-3に示す。試験体表面の赤線は正側載荷時、青線は負側載荷時に発生したひび割れをそれぞれ示している。また、写真中には機械式継手を含めてPHBの位置を緑の破線で示している。いずれのケースもPHBを上面側から挿入した方のせん断スパンで破壊に至ったが、最

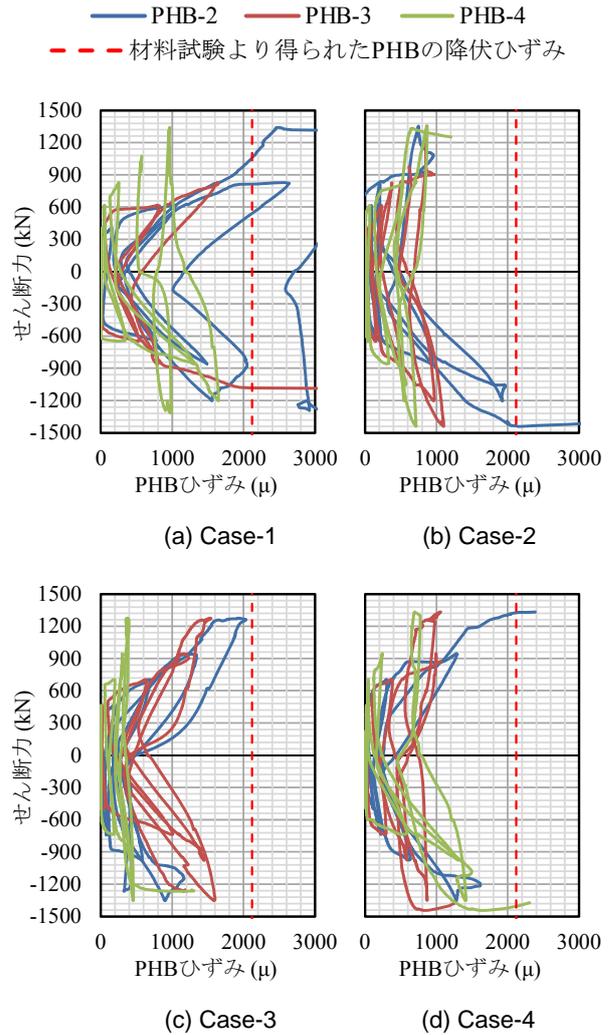


図-3 せん断力-PHBひずみ関係

初のせん断力低下の段階に載荷方向による偏りは認められないことから、PHBの挿入方向が破壊性状に及ぼす影響はないと考えられる。

写真-3(a)に Case-1 正側載荷時の主要な変状の発生順序を示す。この順序は他の3ケースでも同様であった。曲げひび割れ発生後に、斜めひび割れが分散して複数生じている。これはPHB、充填モルタル、コンクリートの各材料間の一体性が確保され、PHBが受け持つ引張力が十分にコンクリートに伝達されたことによると考えられる。その後、部材厚さ方向の中央部でPHBが降伏している。これより、PHBは主鉄筋に掛かる構造ではないが、端部プレートによる定着性能を有するため、トラス機構が卓越する耐荷機構を形成していると考えられる。最大せん断力時には、1本の斜めひび割れが大きく開口するとともに、主鉄筋に沿ったひび割れも急激に進展して大きく開口した。この過程では、PHBが通常のせん断補強鉄筋のように主鉄筋を囲い込む配置になっていないことによる影響が生じていると言える。

なお、PHBの鉄筋径D25、D29のケースともに、機械

式継手の有無による破壊性状の差は見られなかった。

(3) PHB のひずみ

せん断力-PHB ひずみ関係について、写真-3 中に黄色の丸で示す位置での結果を材料試験より得られた PHB の降伏ひずみと併せて図-3 に示す。

いずれのケースでも斜めひび割れ発生まではほとんどひずみが生じていないが、斜めひび割れ発生後はせん断力の増加に伴って、ひずみが増加した。これより、斜めひび割れの開口に対して PHB が機能して抵抗しているものと言える。最大せん断力作用時には、Case-3 を除いて少なくとも 1 本の PHB が降伏している。Case-3 はひずみゲージ位置と斜めひび割れ位置に若干の差があり降伏には至っていないが、1 本の PHB が降伏ひずみに近い値まで増加している。また、いずれのケースも斜めひび割れが大きく開口した最大せん断力付近では断線の影響により計測不能となっているひずみゲージもある。

以上のことから、通常のせん断補強鉄筋と構造や定着性能が異なっても、PHB はせん断力に対する補強材として十分な補強効果を発揮しているものと考えられる。

3. PHB によるせん断補強効果の評価手法の提案

3.1 補強後のせん断耐力算定式

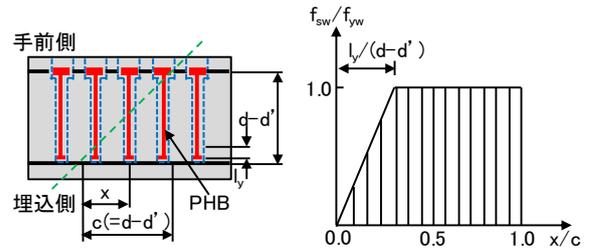
寸切り鉄筋とは異なり、端部プレートを有する PHB で補強した RC 部材は、トラス機構が卓越する挙動となる。そのため、従来の片端矩形プレート型 PHB で補強した RC 部材のせん断耐力 V_{yd} は、修正トラス理論に基づくコ示のせん断耐力式⁴⁾に、PHB により受け持たれるせん断耐力 V_{phbd} を累加する式(1)で安全側に評価できることが確認されている。ここで、PHB は標準フックを主鉄筋に掛ける通常のせん断補強鉄筋とは構造や定着性能が異なるため、 V_{phbd} は式(2),(3)に示すようにトラス理論より算出される値に PHB のせん断耐力分担の有効性を示す係数(有効係数) β_{aw} を乗じて評価するものである。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{phbd} \quad (1)$$

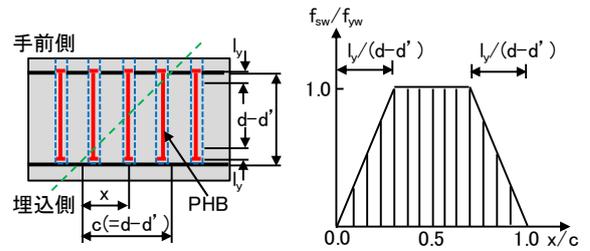
$$V_{phbd} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} \\ = \beta_{aw} \cdot \{A_{aw} f_{awyd} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw}\} z / \gamma_b \quad (2)$$

$$\beta_{aw} = 1 - l_y / \{2 \cdot (d - d')\} \quad \text{if } (d - d' \geq l_y) \quad (3)$$

ここで、 V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない RC 部材のせん断耐力⁴⁾、 V_{sd} : 既存のせん断補強鋼材により受け持たれる RC 部材のせん断耐力⁴⁾、 V_{awd} : PHB を通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力、 β_{aw} : PHB のせん断耐力分担の有効性を示す係数(有効係数)、 A_{aw} : 区間 S_{aw} における PHB の鉄筋総断面積、 f_{awyd} : PHB の設計降伏強度、 α_{aw} : PHB が部材軸となす角度、 S_{aw} : PHB の配置間隔、 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離、 γ_b : 部材係数、 l_y : PHB 円形プレート側の必要定着長¹⁾、 $d - d'$: 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張



(a) 片端矩形プレート型 PHB の場合¹⁾



(b) 両端円形プレート型 PHB の場合

図-4 斜めひび割れ内の PHB 負担応力分布

表-4 せん断耐力の実験値と計算値の比較

実験ケース	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
V_{exp} (kN)*	1,329	1,397	1,313	1,388
V_{cd} (kN)**	522	505	492	495
V_{phbd} (kN)**	576	569	687	707
V_{cal} (kN)**	1,099	1,074	1,180	1,202
V_{exp} / V_{cal}	1.21	1.30	1.11	1.15

* 実験における正側と負側の最大せん断力の平均値

** 各種安全係数を1として、鉄筋およびコンクリートの実強度を用いて式(1),(2),(4)により計算した結果

鉄筋の間隔である。

この評価手法では、斜めひび割れと交差する PHB が負担する応力分布を図-4(a)に示す通りとして算定する。図中の f_{yw} は PHB の降伏応力、 f_{sw} は PHB が負担できる応力を示す。これは、PHB の矩形プレート側は端部まで定着が確保されているが、円形プレート側は、端部ではせん断応力を負担することができず、端部から必要定着長 l_y 以上離れた位置では降伏強度相当のせん断応力を負担できるとし、端部から l_y の区間は負担できる応力を線形で仮定したものである。

式(3)より算出される有効係数 β_{aw} は、前述の通り小型の円形プレートで定着される埋込側端部の定着性能に応じた低減係数である。両端円形プレート型 PHB では、手前側端部も小型の円形プレートであることから、図-4(b)に示すように埋込側端部と同様に負担できる応力が低減するものと考えると有効係数 β_{aw} は式(4)より算出できる。

$$\beta_{aw} = 1 - l_y / (d - d') \quad \text{if } (d - d' \geq 2l_y) \quad (4)$$

なお、補強効果確認実験結果より機械式継手の有無に

よる差が見られなかったことから、機械式継手型 PHB を用いた場合は機械式継手がない場合と同様の方法でせん断耐力を算出できると考えられる。

3.2 実験結果に基づくせん断耐力算定式の検証

式(4)による β_{aw} と式(1),(2)によって算出されるせん断耐力を実験結果と併せて表-4 に示す。いずれのケースもせん断耐力の実験値 V_{exp} は計算値 V_{cal} を上回っている。補強設計においてはさらに安全係数（材料係数、部材係数）を考慮することから、提案するせん断耐力算定式によって安全側の評価ができると考えられる。なお、いずれのケースも実験値は計算値に対して余裕のある結果となっており、通常のせん断補強鉄筋を今回の実験条件に近い鉄筋量で検討した既往の実験的検討⁷⁾や解析的検討⁸⁾と同じ傾向である。

PHB の鉄筋径 D25 の Case-1,2 に対して鉄筋径 D29 の Case-3,4 では、せん断補強鉄筋比が大きくなり、 V_{phbd} の増加に伴って V_{cal} が大きくなるが、 V_{exp} はほとんど差がない結果であった。これは、いずれも PHB が降伏していることを考慮すると、コンクリート負担分のせん断力のばらつき、もしくはコンクリートに対する PHB の強度比（表-1 中の $p_w \cdot f_y / f_c$ ）の増加が影響していることが考えられる。

この評価手法では、せん断補強鉄筋端部の定着性能が標準フックとは異なるが、トラス機構が保持されるせん断力に対する耐荷機構を想定しているため、トラス機構の成立が前提条件となる⁹⁾。今回の実験では、いずれのケースの破壊状況も圧縮部コンクリートの圧壊や引張鉄筋の降伏は生じなかった。最大せん断耐力に達する直前までは主鉄筋に沿ったひび割れも生じておらず、通常のせん断補強鉄筋を用いた一般的な斜め引張破壊と同様の挙動を呈していた。また、斜めひび割れと交差する PHB は降伏もしくは降伏に近い応力を負担しており、PHB により受け持たれるせん断耐力は式(2),(4)で評価できた。これらの結果から総合的に判断して、両端円形プレート型 PHB でせん断補強した RC 部材は、せん断力の作用に対してトラス機構と同様の耐荷機構が形成されているものと考えられる。今回の実験検討は既設のせん断補強鉄筋がない条件で実施したが、主鉄筋に掛かる既設のせん断補強鉄筋がある部材に対する補強では、より安定したトラス機構の形成が期待できる。

なお、提案した補強後のせん断耐力評価手法を用いる場合には、斜め引張破壊が生じるモードとなることが前提条件である。そのため、コ示ではコンクリート強度との比 $p_w \cdot f_y / f_c \leq 0.1$ の上限が設けられている^{4),8)}ように、PHB の適用に際してはせん断補強鉄筋量が過大にならないような設計的配慮が必要であると言える。

4. まとめ

本研究では、RC 梁試験体の載荷実験により、施工性向上を目的として新たに開発した両端円形プレート型 PHB および機械式継手型 PHB のせん断補強効果を検証した。得られた知見は以下に示す通りである。

- (1) 両端円形プレート型 PHB は斜めひび割れの開口に対して有効に機能し、十分なせん断補強効果を得ることができる。
- (2) 機械式継手型 PHB で補強した試験体のせん断耐力や破壊性状は機械式継手のない PHB と同様であり、同等のせん断補強効果を発揮する。
- (3) 両端円形プレート型 PHB による補強後のせん断耐力は、既往の修正トラス理論の考え方を基に、提案した両端部の定着性能を考慮した有効係数 β_{aw} を用いた手法によって安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書（建技審証第 0522 号）後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」, 2015.
- 2) 機械式鉄筋継手工法技術検討委員会：現場打ちコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン, p15, 2017.
- 3) 小林薫, 鷹野秀明, 佐々木尚美：棒状せん断補強鉄筋を配置した RC 部材のせん断破壊挙動に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1033-1038, 2013.
- 4) 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, pp.325-327, 2013.
- 5) 熊谷祐二ほか：あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋による RC はりのせん断補強効果, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.1, pp.118-132, 2017.
- 6) 松本敏克ほか：あと施工型せん断補強工法の極厚部材への適用性に関する解析的評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72, V-198, 2017.
- 7) 梶貝勇：鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, Vol.279, pp.113-126, 1978.
- 8) 坂口淳一ほか：せん断補強鉄筋を多量に配置した RC 梁部材のせん断破壊耐力に関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.192-206, 2013.
- 9) 前川宏一, 中村光, 佐藤靖彦, Kukrit Toongoenthong：せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.973-978, 2004.