

論文 中空断面 RC 梁におけるせん断耐力の実験的研究

山田 章史^{*1}・木野 淳一^{*2}・築嶋 大輔^{*3}・石橋 忠良^{*4}

要旨: T 型断面や中空断面のようにフランジを有する RC 梁部材のせん断耐力は、フランジ部の影響を無視した矩形断面として算定される。一方、T 型断面 RC 梁のせん断耐力は、矩形断面として算定されたせん断耐力では過少評価することが確認されているが、中空断面 RC 梁のせん断耐力を検証した研究例は少ない。本論では、中空断面 RC 梁の載荷実験を実施し、ウェブに発生した斜めひび割れがフランジを貫通して破壊に至る場合と、ウェブがフランジを押し抜いて破壊に至る場合の 2 種類の破壊形態が存在することを確認した。また、それぞれの破壊形態を想定したフランジのせん断耐力とウェブのせん断耐力を考慮することで中空断面 RC 梁のせん断耐力が算定可能か検討を行った。

キーワード: 中空断面, せん断耐力, 押抜きせん断破壊

1. はじめに

現行の設計基準において、鉄筋コンクリート棒部材のせん断耐力 V_y は、修正トラス理論に基づきコンクリートが負担するせん断耐力 V_c と、せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 V_s の和として算定される¹⁾。このうち、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c の算定においては、矩形断面梁部材による実験結果をもとにした算定式が用いられている。また、T 型断面や中空断面のようにフランジを有する梁部材の場合、フランジの影響を無視して腹部の幅を用いた矩形断面としてせん断耐力を算定することとなっている。

しかし、T 型断面梁部材のせん断耐力は矩形断面として算定されたせん断耐力では過少評価することが確認されている^{2),3)}。そのため、T 型断面梁部材においてフランジの影響をせん断耐力に評価することにより、耐力式の精度向上に寄与すると提唱されている。一方、長大スパン化が進む橋梁上部工等では、中空断面形状が多く採用されているが、中空断面梁部材を対象としたせん断耐力の検証事例は少ない。T 型断面梁部材と同様に中空断面梁部材においても、せん断耐力算定時にフランジの影響を評価することで部材の縮小化や鉄筋量の低減等が可能となり、経済的かつ施工性のよい構造物の設計に繋がると考えられる。

そこで、著者らはフランジ部をパラメータとした中空断面 RC 梁供試体による載荷実験を実施し、その破壊性状を観察してせん断耐力の評価を試みた。破壊性状の観察結果から、ウェブに斜めひび割れが発生した後のフランジ部の破壊形態は、ウェブに発生した斜めひび割れがフランジを貫通して破壊に至る場合と、ウェブがフラン

ジを押し抜くように破壊に至る場合の 2 種類に分類されることが確認された。よって、各破壊形態を想定したフランジ部のせん断耐力と従来の算定方法であるウェブのみのせん断耐力を考慮することで、中空断面 RC 梁のせん断耐力の算定が可能となると考えてせん断耐力の算定式を検討した。

2. 実験の概要

2.1 供試体概要

供試体の形状寸法および諸元を図-1~3 および表-1 に示す。実験は図-1~3 に示すように、フランジ内に軸直交方向鉄筋を配置しない供試体 (B シリーズ) と軸直交方向鉄筋を配置する供試体 (MA シリーズ) について実施した。フランジによるせん断耐力の影響を比較するためのパラメータとして、フランジの幅、厚さ、フランジ鉄筋量、圧縮フランジおよび引張フランジの有無を設定した。

供試体の形状および配筋状況は図-1~3 に示す通りであり、全ての供試体において引張側フランジ軸方向鉄筋はねじふし鉄筋を使用し、端部は定着板とナットで定着した。なお、有効高さを同じとし、せん断破壊とするため引張鉄筋比を $p_c=5.8\%$ 程度として各供試体で同程度とした。また、供試体 MA-2 以外の供試体において、圧縮側フランジ軸方向鉄筋は 2 段配置とし、フックをつけて梁内端部に定着した。そのうち供試体 MA-1 は、圧縮フランジに閉合型の軸直交方向鉄筋を配置している。供試体 MA-2 は圧縮フランジ軸方向鉄筋を 1 段配置としてねじふし鉄筋を使用し、端部は定着板とナットで定着した。更に両フランジとも軸直交方向鉄筋を 1 段配置し、

*1 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 工修 (正会員)

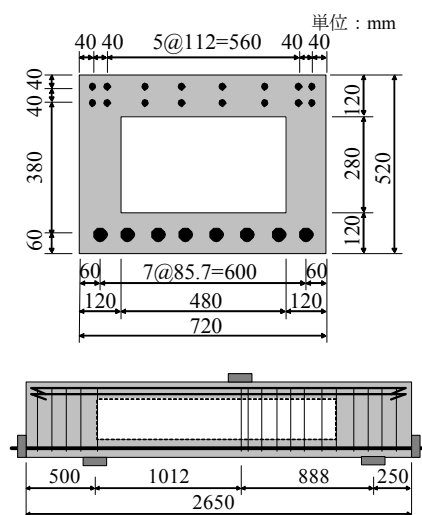
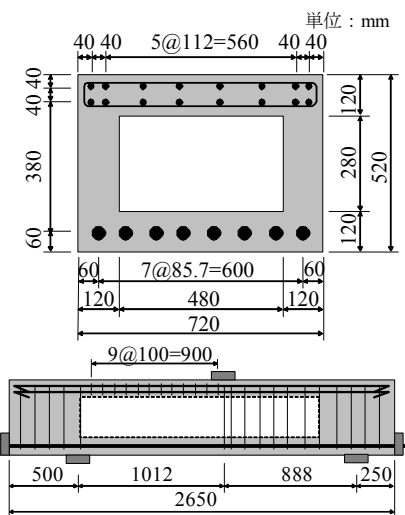
*2 東日本旅客鉄道 (株) 東北工事事務所 工修 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 課長 (正会員)

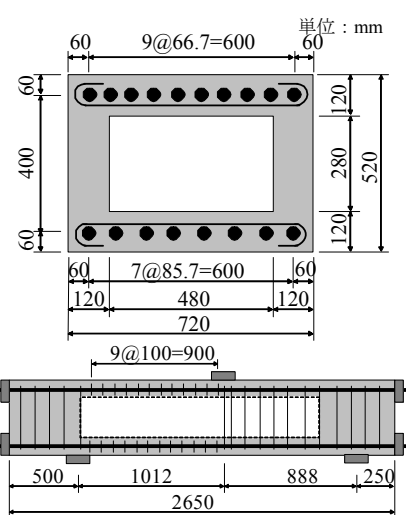
*4 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 顧問 工博 (正会員)

表－1 供試体諸元

供試体	形状	断面 B×H (mm)	a/d	圧縮フランジ（上フランジ）			引張フランジ（下フランジ）				コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)
				フランジ厚 t _f (mm)	軸方向 鉄筋	軸直交方向 鉄筋	フランジ厚 t _f (mm)	軸方向鉄筋		軸直交方向 鉄筋	
					段数, 規格 径, 間隔	段数, 規格 径, 間隔		段数, 規格 径, 間隔	降伏強度 (N/mm ²)	段数, 規格 径, 間隔	
B-1		720×520	2.2	120	2段, SD295A D10@112	—	120	1段, SD345 D32@85.7	380.6	—	24.1
B-2		900×520						1段, SD345 D32@97.5			24.6
B-3		720×520		180			180	1段, SD345 D32@85.7			24.6
B-4				120			—				24.8
B-5				—			120				376.1
MA-1				120	2段, SD295A D10@100	1段, SD345 D13@100		23.9			
MA-2					1段, SD345 D32@66.7			1段, SD345 D13@100	1段, SD345 D13@100	23.8	

図－1 供試体 B シリーズ概要図
(例：供試体 B-1)

図－2 供試体 MA-1 概要図



図－3 供試体 MA-2 概要図

ウェブ内に配置される軸方向鉄筋にフックを掛けて定着した。

荷重方法は一点集中荷重であり、試験区間のせん断スパン比は 2.2 としてせん断補強鉄筋を配置していない。また、試験区間外側のせん断スパン比は 1.93 としてせん断補強鉄筋を配置している。

2.2 荷重概要

荷重は、2 点単純支持状態の RC 梁に対して 1 点集中荷重で変位制御による静的な一方向単調荷重により行った。試験区間側の支点はテフロン板を用いて水平方向の拘束を取り除いた可動条件とした。荷重板および支点板は供試体全幅の鋼板を使用し、軸方向の幅は 100mm とした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状の確認

破壊性状の観察および破壊断面形状の確認より、フラ

ンジ部の破壊経緯が 2 種類に分類されることを確認した。それぞれの破壊経緯の代表的な供試体について破壊状況を示す。

(1) 供試体 B-2

供試体 B-2 の荷重変位曲線を図－4 に、破壊後の供試体のひび割れ状況を写真－1, 2 に示す。

試験区間のせん断力 233kN 荷重時に側面に斜めひび割れが発生した。このひび割れは、概ね支点および荷重点に向かって進展しており、ウェブの上下端付近まで繋がっているがフランジ内までは進展していない。その後も荷重を続けると荷重は上がり続け、ひび割れは開口しながらフランジ内に進展していった。280kN 荷重時に圧縮フランジ面のウェブ近辺に荷重点から支点方向へ軸方向のひび割れが片側のみ発生したが、その後も荷重は増加を続けた。332kN 荷重時に圧縮フランジ面の反対側のウェブに沿う位置にも同様な軸方向のひび割れが発生した。更に 341kN 付近で側面のひび割れがフランジ部を完全に

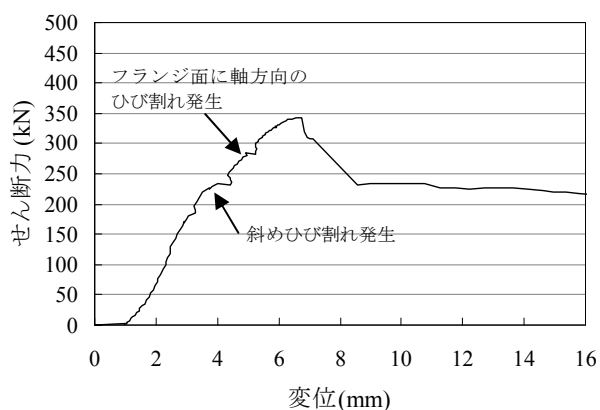


図-4 B-2 荷重変位曲線



写真-1 B-2 破壊状況（側面）

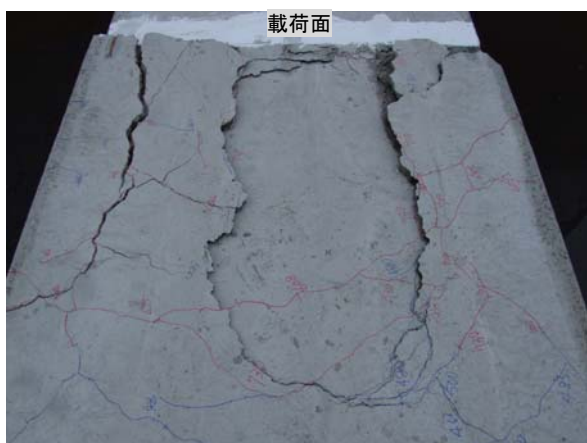


写真-2 B-2 破壊状況（上フランジ）

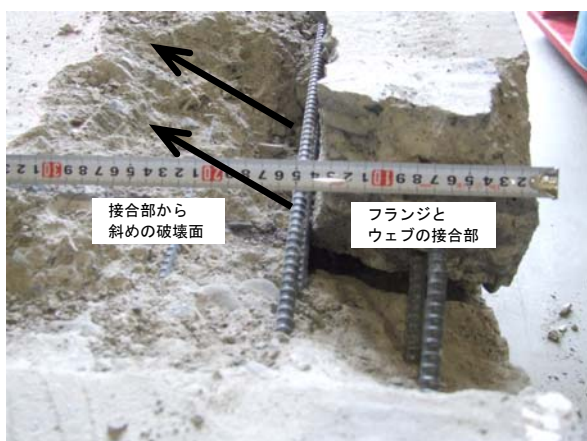


写真-3 B-2 破壊状況（上フランジ詳細）

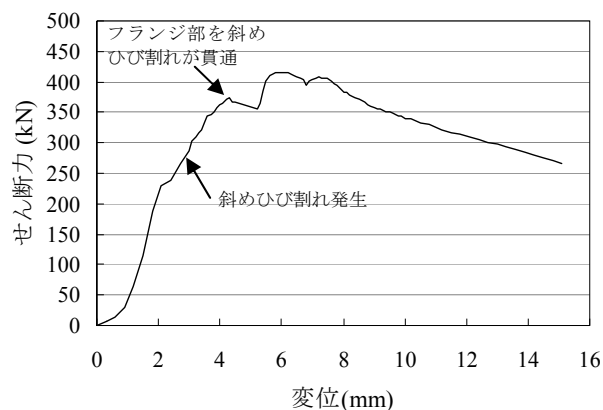


図-5 MA-2 荷重変位曲線



写真-4 MA-2 破壊状況（側面）



写真-5 MA-2 破壊状況（上フランジ）

貫通しつつ、最大せん断力 343kN 載荷時にウェブ直上付近のフランジコンクリートが持ち上がるように破壊に至った。

持ち上がったウェブ直上付近のフランジコンクリートを取り除くと、ウェブとフランジの接合部からフランジ上面に向けて斜めに破壊面が進展しており、圧縮・引張側ともにウェブでフランジを押し抜くような破壊性状となっていた。写真-3 に破壊面の状況を示す。なお、供試体 B-1, B-3 (上フランジ), B-4, B-5, MA-1 (下フランジ) が同様な破壊性状であった。

(2) 供試体 MA-2

供試体 MA-2 の荷重変位曲線を図-5 に、破壊後の供試体のひび割れ状況を写真-4, 5 に示す。

試験区間のせん断力 266kN 載荷時において、側面下方

に支点から載荷点に向かって斜めひび割れが発生した。ただし、引張フランジ内までは進展していない。その後、載荷を続けるに従い、斜めひび割れは載荷点方向へ進展しながらひび割れが開口していった。327kN 載荷付近から斜めひび割れは圧縮・引張フランジ内に進展していき、374kN 載荷付近で圧縮・引張フランジともに載荷板および支点板前面に向かって貫通した。その際、フランジ面には供試体 B-2 に発生したような軸方向のひび割れは発生せず、載荷板（支点板）前面の位置でフランジがずれるようなせん断破壊となった。その後、フランジ部に貫通した斜めひび割れが更に開口して、フランジ部のずれが拡大していくとともに最大せん断力 411kN に達した。なお、供試体 B-3（下フランジ）、MA-1（上フランジ）が同様な破壊性状であった。

4. せん断耐力の検証

4.1 設計式と実験結果の比較

一般に中空断面形状におけるせん断耐力の算定には、腹部（ウェブ）幅のみを有効としている。そこで、ウェブ部のせん断耐力を式(1)で算出する。なお、載荷板と支点板の前面間をせん断スパン a_l とした場合、前面間せん断スパン比 $a_l/d=1.98$ 程度となり、ディープビーム部材に相当するためコンクリートが負担するせん断耐力 V_c の算定には低せん断スパン領域における実験式を用いた^{4),5)}。

$$V_{web} = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.76(a_l/d)^{-1.166} \sqrt{f'_c} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_w \cdot d \cdot \beta_n$$

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} (\beta_s \sin \theta_s + \cos \theta_s) z / s_s$$

ここに、

a_l ：支点前面から載荷点前面までの距離(mm)

式(1)でウェブ部のみを有効としたせん断耐力 V_{web} を算出し、実験で得られた最大せん断力 V_{exp} と比較したものが表-2である。

ウェブ部のみのせん断耐力 V_{web} と比較して、実験で得

られた最大せん断力 V_{exp} は大幅に大きく、 V_{exp}/V_{web} は中空断面の供試体で1.58～2.18、圧縮フランジのみの供試体 B-4で1.45、引張フランジのみの供試体 B-5で1.40となっている。現行の中空断面の設計におけるウェブのみを有効としたせん断耐力の算定方法では、明らかに実験値を過少評価していることが確認できる。

なお、中空断面である供試体 B-1 の寸法および配筋を中実矩形断面としてせん断耐力を計算した場合、 $V_j=494.5\text{kN}$ となり実験で得られた最大せん断力 ($V_{exp}=313.8\text{kN}$) よりも大幅に大きな値となる。

4.2 フランジの各パラメータの検証

フランジの各パラメータの検証を行うため、基準供試体である B-1 と各供試体の実験結果の比較を行う。

基準供試体に対してフランジ厚を 1.5 倍にした供試体 B-3 は最大せん断力が大きくなっており、実験値 V_{exp} からウェブのみのせん断耐力 V_{web} を差し引いたフランジのせん断耐力($V_{exp}-V_{web}$)で比較した場合、1.6 倍程度の耐力増加が認められた。よって、フランジの厚さがせん断耐力の増加に寄与していることが分かる。また、基準供試体に対してフランジ幅を 1.4 倍にした供試体 B-2 も最大せん断力は大きくなっているが、フランジのせん断耐力($V_{exp}-V_{web}$)で比較した場合、1.2 倍程度の耐力増加に留まっている。

フランジの有無をパラメータとした B-4,5 について基準供試体である B-1 と比較した場合、圧縮フランジもしくは引張フランジの片方のみである B-4,5 の最大せん断力は、両方のフランジがある基準供試体の最大せん断力に対して小さい。また、フランジのせん断耐力($V_{exp}-V_{web}$)で比較した場合、B-4,5 は基準供試体に対して 2～3 割程度の耐力低下が認められた。

フランジ鉄筋量をパラメータとした MA-1,2 は、基準供試体 B-1 と比較して最大せん断力は大きくなった。また、フランジのせん断耐力($V_{exp}-V_{web}$)で比較した場合、基準供試体に対して 1.9～2.0 倍程度の耐力増加が認められた。よって、フランジの配筋状況がせん断耐力に与える影響が大きいことが分かる。

表-2 実験値と計算結果の比較

供試体	最大 せん断力 V_{exp} (kN)	ウェブ せん断耐力 V_{web} (kN)	$V_{exp} - V_{web}$ (kN)	V_{exp}/V_{web}
B-1	313.8	198.7	115.1	1.58
B-2	342.9	200.1	142.8	1.71
B-3	384.2	200.1	184.1	1.92
B-4	290.9	200.6	90.3	1.45
B-5	280.4	200.6	79.8	1.40
MA-1	432.2	198.2	234.0	2.18
MA-2	416.3	197.9	218.4	2.10

5. フランジの影響を考慮したせん断耐力式

5.1 せん断耐力式の検討

中空断面 RC 梁のせん断において、現行設計手法であるウェブのみを有効したせん断耐力と比較して実験値が大きくなることから、フランジの耐力を考慮することを試みた。前述のフランジ破壊性状の観察結果から、フランジに軸方向のひび割れが発生してウェブに押し抜かれるように破壊に至る場合（以下、case1）と、フランジが軸直交方向のみの破壊面によってせん断破壊に至る場合（以下、case2）の 2 種類の破壊形態で破壊が進行するこ

とが確認されている。よって、フランジに対していくつかの破壊面が想定される中で、この2種類の破壊形態に対応するフランジのせん断耐力のうち、小さい方がフランジの破壊形態を決定すると考えた。

破壊状況の観察結果からフランジ部のせん断耐力算定方法として、ウェブに押し抜かれるように破壊に至る case1 は面部材の押抜きせん断耐力で評価され、フランジが軸直交方向のせん断破壊に至る case2 はフランジを梁と見なした棒部材のせん断耐力で評価されると考えた。そこで、中空断面のせん断耐力 V_y の算定において、フランジのせん断耐力を考慮した式(2)で評価を試みた。

$$V_y = V_{web} + V_{fla1} + V_{fla2} \quad (2)$$

ここに、

V_{web} : ウェブ部が負担するせん断耐力(kN)

V_{fla1} : 上フランジ部のせん断耐力(kN)

V_{fla2} : 下フランジ部のせん断耐力(kN)

$$V_{fla1,2} = \min(V_{flap}, V_{flay}) \quad (3)$$

ここに、

V_{flap} : 押抜きせん断耐力(kN)

V_{flay} : 棒部材のせん断耐力(kN)

$$V_{flap} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pc} \cdot u_p \cdot d_f \quad (4)$$

ここで、

$$f_{pc} = 0.20 f_c^{1/2}$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4}$$

$$\beta_p = (100 p_c)^{1/3}$$

$$\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d_f)$$

u : 載荷面の周長 $(= 2 \times (b_w + 2 \times t_f) \times 2)$ (mm)

u_p : 押抜き周長の有効範囲 $(= 2 \times (t_f + t_f \times \pi / 4))$ (mm)

d_f : フランジの有効高さ (mm)

p_c : 引張鉄筋比

$$(= l_1 / (l_1 + l_2) \times p_{cc} + l_2 / (l_1 + l_2) \times (p_{cc} + p_{cl}) / 2)$$

ここに、

p_{cc} : 軸直交方向の引張鉄筋比

p_{cl} : 軸方向の引張鉄筋比

l_1 : 押抜き周長の有効範囲のうち、直線部分

l_2 : 押抜き周長の有効範囲のうち、曲線部分

$$V_{flay} = 0.76 (a_f / d_f)^{-1.166} \sqrt{f_c} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_e \cdot d_f \cdot \beta_n \quad (5)$$

ここに、

a_f : 押抜き載荷面前面から載荷点前面までの距離 (mm)

d_f : フランジの有効高さ (mm)

b_e : フランジの有効幅 $(= 2 \times t_f)$ (mm)

フランジ部の押抜きせん断耐力 V_{flap} の算定にあたって

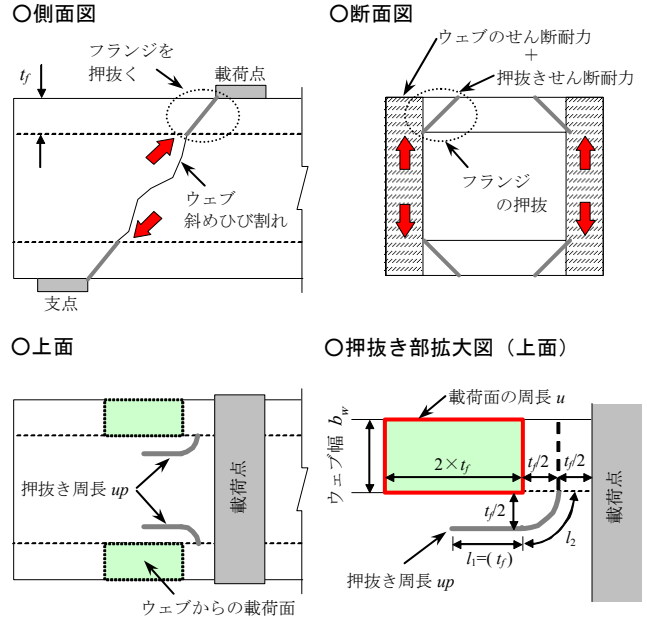


図-6 フランジの押抜きせん断に対する照査断面

は、図-6 に示すようにウェブからフランジに作用する載荷面を想定し、載荷面全周の押抜き周長がせん断に抵抗するのではなく、載荷点側の押抜き周長が抵抗するものと仮定した。なお、押抜き周長 u_p の形状は実験で発生した破壊面を参考に、ウェブ内は載荷面と載荷点に平行で、ウェブを外れた箇所からウェブに平行な破壊面へと移行する形状としている。また、引張鉄筋比 p_c は破壊面と交差する鉄筋量であり、押抜き周長の直線部分 l_1 は軸直交方向の引張鉄筋比とし、曲線部分 l_2 は軸方向と軸直交方向の二方向の平均引張鉄筋比として算出している。

フランジを棒部材として評価したせん断耐力 V_{flay} の算定にあたっては、押抜きせん断耐力算定時に想定した載荷面から載荷点に向かってせん断力が発生すると仮定した。よって、フランジ部のせん断スパン a_f は、押抜き載荷面前面から載荷点前面までの距離とし、デュービー梁式を採用している。また、フランジの有効幅 b_e はウェブとフランジの接合部から 45° の範囲が有効と考えフランジ厚さ t_f と仮定した。

なお、ウェブ部のせん断耐力は V_{web} に計上されているので、 V_{flap} 算定時の押抜き周長 u_p および V_{flay} 算定時の有効幅 b_e はウェブ部を控除している。

5.2 せん断耐力式の検証

式(3)を用いて今回の実験結果の検証を行う。式(3)による判定結果と各供試体の破壊性状の比較を表-3に示す。なお、フランジの有効高さ d_f 算定について、フランジ内の鉄筋がフランジ厚さの中心位置に配置されている場合、有効高さ d_f をフランジ厚さ t_f の0.8倍として耐力を算定した。表-3により、破壊性状の判定結果は概ね一致していることがわかる。ただし、供試体 B-1,2,5,MA-1 における引張フランジの判定結果は不整合となっているが、

表-3 式(3)による判定結果と破壊性状の比較

供試体	圧縮フランジ (上フランジ)				引張フランジ (下フランジ)			
	V_{flap1} (kN)	V_{flay1} (kN)	破壊 性状	判定 結果	V_{flap2} (kN)	V_{flay2} (kN)	破壊 性状	判定 結果
B-1	33.4	36.5	case1	OK	94.3	87.7	case1	NG
B-2	33.7	36.8	case1	OK	91.2	88.3	case1	NG
B-3	76.2	95.9	case1	OK	164.3	133.9	case2	OK
B-4	33.9	36.9	case1	OK	—	—	—	—
B-5	—	—	—	—	95.6	88.6	case1	NG
MA-1	56.7	36.4	case2	OK	93.9	87.5	case1	NG
MA-2	109.3	87.4	case2	OK	106.9	87.4	case2	OK

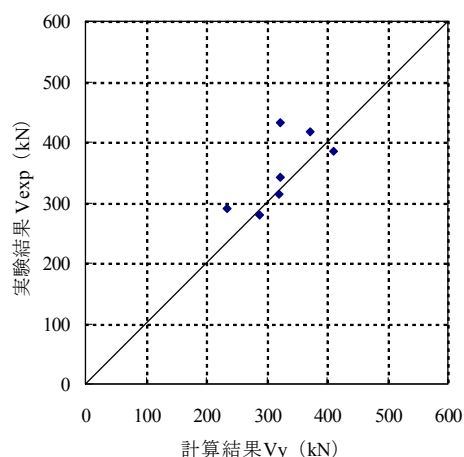


図-7 実験結果と式(2)による計算結果の比較

表-4 実験結果と式(2)による計算結果の比較

供試体	最大 せん断力 V_{exp} (kN)	ウェブ せん断耐力 V_{web} (kN)	上フランジ せん断耐力 V_{fla1} (kN)	下フランジ せん断耐力 V_{fla2} (kN)	中空断面 せん断耐力 V_y (kN)	V_{exp}/V_y
B-1	313.8	198.7	33.4	87.7	319.8	0.98
B-2	342.9	200.1	33.7	88.3	322.1	1.06
B-3	384.2	200.1	76.2	133.9	410.2	0.94
B-4	290.9	200.6	33.9	—	234.5	1.24
B-5	280.4	200.6	—	88.6	289.2	0.97
MA-1	432.2	198.2	36.4	87.5	322.1	1.34
MA-2	416.3	197.9	87.4	87.4	372.7	1.12

V_{flap} と V_{flay} の耐力差が十分ではないため、破壊形態の判別が困難であったと推測される。以上より、フランジの各破壊形態を想定したせん断耐力式 (3)を用いて耐力を算出・比較し、その小さい方で耐力が決定するという考え方は妥当であると考えられる。

今回の実験結果と式(2)による各供試体のせん断耐力算定結果を図-7 および表-4 に示す。ウェブのみを有効としたせん断耐力 V_{web} は実験値を過少評価するのに対し、フランジのせん断耐力を考慮した式(2)は、バラつきがあるものの実験結果を概ね評価できている。なお、 V_{exp}/V_y (実験値/計算値) の平均値は 1.09、変動係数は

13.8%であった。

今回の中空断面のせん断耐力式(2)において、フランジのせん断耐力算定に用いる押抜き周長の有効範囲 u_p および有効幅 b_e はフランジ厚さの関数と仮定しているが、今後は更なる実験データの蓄積および検証を行い、フランジがせん断耐力に寄与する有効範囲の精度向上が課題と考える。

6. 結論

本実験結果および提案式の適用により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 中空断面 RC 梁のせん断実験では、ウェブ部の斜めひび割れ発生後におけるフランジの破壊過程は、ウェブがフランジを押し抜く破壊形態と斜めひび割れがフランジを貫通する破壊形態の2種類に分類される。
- (2) 中空断面 RC 梁のせん断耐力算定方法について、現行のウェブのみを有効としたせん断耐力の場合、実験値を過少評価する結果が得られた。よって、せん断耐力の算定にはフランジのせん断耐力を考慮する必要があることが分かった。
- (3) 中空断面 RC 梁のせん断実験におけるフランジ破壊形状の観察結果と、式(3)によるフランジせん断耐力評価の判定結果は概ね一致した。つまり、フランジの各破壊形態を想定したせん断耐力式を用いて耐力を算定・比較し、その小さい方で耐力が決定するという考え方は妥当である。今後は式(2)において、フランジがせん断耐力に寄与する有効範囲の精度向上が課題である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007
- 2) 岡本大，川村力，服部尚道，酒谷弘行：せん断補強鉄筋を有する鉄筋コンクリートT型梁のせん断耐力の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.3，pp.403-408，2005.6
- 3) 岡本大，鬼塚良介，金森真，松岡茂：軸方向鉄筋に丸鋼を用いたT形RC梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.715-720，2007
- 4) 石橋忠良，松田好史，斉藤啓一：少数本のくいを有したフーチングのせん断設計について，土木学会論文報告集，No.337，pp.197-204，1983.9
- 5) 石橋忠良，松本浩一，菅野貴浩，築嶋大輔，小林将志：鉄筋コンクリート壁式橋脚のせん断耐力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.3/Vol.65，pp.300-310，2009