

論文 直交壁を有する円形RC部材のせん断破壊性状に関する実験的研究

篠田 健次^{*1}・小林 将志^{*2}

要旨: 土留め壁等と一体となった柱は、せん断耐力が増加すると考えられるものの、その評価手法が確立されていないのが現状である。本研究では、壁を有する円形RC柱の壁面外方向のせん断耐力の評価を目的として、壁の設置位置を変化させて円形梁の壁直交方向への単調曲げ載荷試験を行った。その結果、壁部材を有していない場合に比べ、せん断耐力が3~6割増加し、壁位置が圧縮側にあるほど、耐力の増加が大きいことが確認された。また、壁部とのつなぎ鉄筋が少ないと、せん断耐力の増加量が減少するという結果が得られた。

キーワード: 円形柱, 壁部材, せん断, 曲げ載荷試験

1. はじめに

近年、鉄道の鉄筋コンクリート（以下、RCという）ラーメン高架橋やRC橋脚などの耐震補強が盛んに行われている。ラーメン高架橋の柱は、矩形断面が一般的ではあるが、一部に円形断面の柱もみられる。さらに、円形の柱に土留め壁等の袖壁がついている場合もある。現状では、これらの円形柱のせん断耐力を評価する場合、円形柱と等断面積となる矩形断面に換算し、主鉄筋も円形の1/4範囲の鉄筋を引張鉄筋として評価するのが一般的である。また直交壁を有する矩形柱のせん断耐力については、T形梁の床スラブと同じくその効果を評価して算定する方法が提案されているが¹⁾、実験値の方がかなり大きくなる傾向が明らかにされている²⁾。しかし、直交壁を有する円形RC柱のせん断耐力については、研究が少なくその知見が十分に得られているとはいえない。

そこで本報告では、壁のついた円形柱のせん断耐力について壁面外方向の単調曲げ載荷実験により確認を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では、壁付円形部材の最大せん断耐力の把握を行うため、梁試験体を用いて単調曲げ載荷試験を行った。供試体は、壁なしの円形試験体1体、壁の設置位置を変化させた試験体3体と、梁部と壁部をつなぐ鉄筋量を減らした1体の合計5体とした。試験体の諸元を表-1に示す。また供試体の形状寸法の一例として供試体BW2-1の配筋図を図-1に示す。これらの供試体は、梁形式とし梁部の支点及び載荷点用の治具を製作し、円弧にそって支持するものとした。壁部分には支点は設けず、端部は自由端となっている。

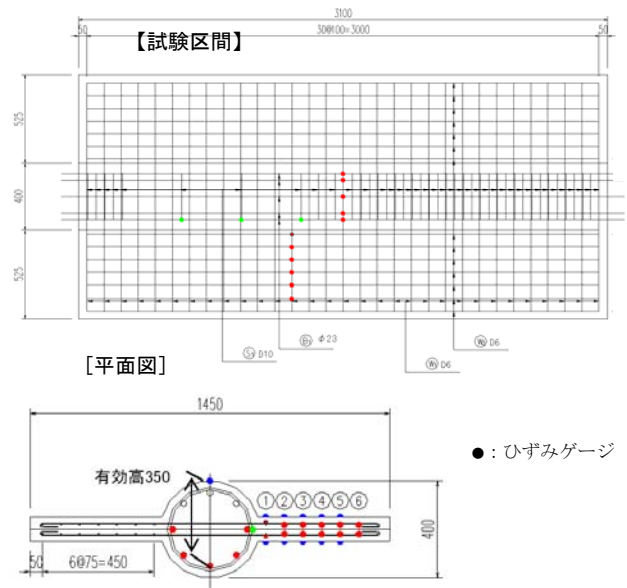


図-1 BW2-1 試験体配筋図

表-1 試験体諸元 (1)

梁部	円直径	400mm
	軸方向鉄筋	φ22-8本 (SBPD930/1080)
	帯鉄筋	D10-1組-350ctc (SD345) D10-1組-50ctc* (SD345)
壁部	鉄筋 (軸)	D6-75ctc (SD345)
	鉄筋 (横) (つなぎ鉄筋)	D6-100ctc (SD345) D6-350ctc (SD345) **
	せん断スパン比	2.99

* 試験区間以外 ** BW8-1

表-2 試験体諸元 (2)

試験体No	壁位置	壁の偏心量	壁厚さ
BW1	(壁なし)	—	—
BW2-1	中心	0mm	100mm
BW3-1	圧縮側	+50mm	100mm
BW4-1	引張側	-50mm	100mm
BW8-1	圧縮側	+50mm	100mm

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務局構造技術センター (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務局構造技術センター課長 工修 (正会員)

供試体は、実物の1/3程度を想定した。梁部の断面形状はφ400mmとし、壁部の位置は断面の圧縮側、中心、引張側の3種類とした。壁部は、梁部の高さ1/4の厚さ100mmとして、鉄筋は複鉄筋で配筋し、横鉄筋は梁部を貫通させている。鉄筋量は鉄道構造物の構造細目における最小鉄筋量D13を300mmピッチで配置した場合を想定した鉄筋量 ($p_w=0.63\%$) としている。³⁾

なお、本実験はせん断破壊による挙動やせん断耐力の確認を目的であるため、曲げ耐力がせん断耐力より大きくなるように軸方向鉄筋を十分に配置した。また、梁の支持条件により拘束の影響を受けないように自由端を設け、梁の自由端側をせん断破壊区間(試験区間)とし、固定端側の区間では、せん断破壊を起こさないようにした。梁の支間は低せん断スパンとならないようせん断スパン比を約3.0とした。

使用材料の材料試験値を表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は実験時のもので、鉄筋は、供試体で使ったものと同一ロットの鉄筋について3本ずつ引張試験を行った結果の平均値である。なお、供試体の軸方向鉄筋には異形PC鋼棒SBPD930/1080を用い、帯鉄筋、壁鉄筋については全供試体でSD345を用いた。

表-3 材料強度

試験体 No	f ck N/mm ²	f py N/mm ²	fsy1 N/mm ²	fsy2 N/mm ²
		φ22	D6	D10
BW1	24.9	-	381.4	375.0
BW2-1	20.2		降伏	降伏
BW3-1	20.3		ひずみ	ひずみ
BW4-1	24.5		1785 μ	2073 μ
BW8-1	23.6			

2.2 載荷概要

載荷点には円形梁の円弧状に合わせた載荷治具を用いた。載荷は、静的な一方単調載荷を変位制御により行い、最大荷重時以降、載荷点変位の増加に伴い荷重が大きく低下した時点で載荷を終了した。

2.3 計測概要

載荷試験時における主な計測項目は、軸方向鉄筋・帯鉄筋・壁軸方向鉄筋・供試体のコンクリートのひずみ、載荷点荷重、載荷点変位である。

3. 実験結果

3.1 ひび割れの発生状況

試験体BW2-1, BW3-1, BW4-1の破壊後のひび割れ状況を図2~4に示す。(ハッチング部：浮き上がり発生箇所)

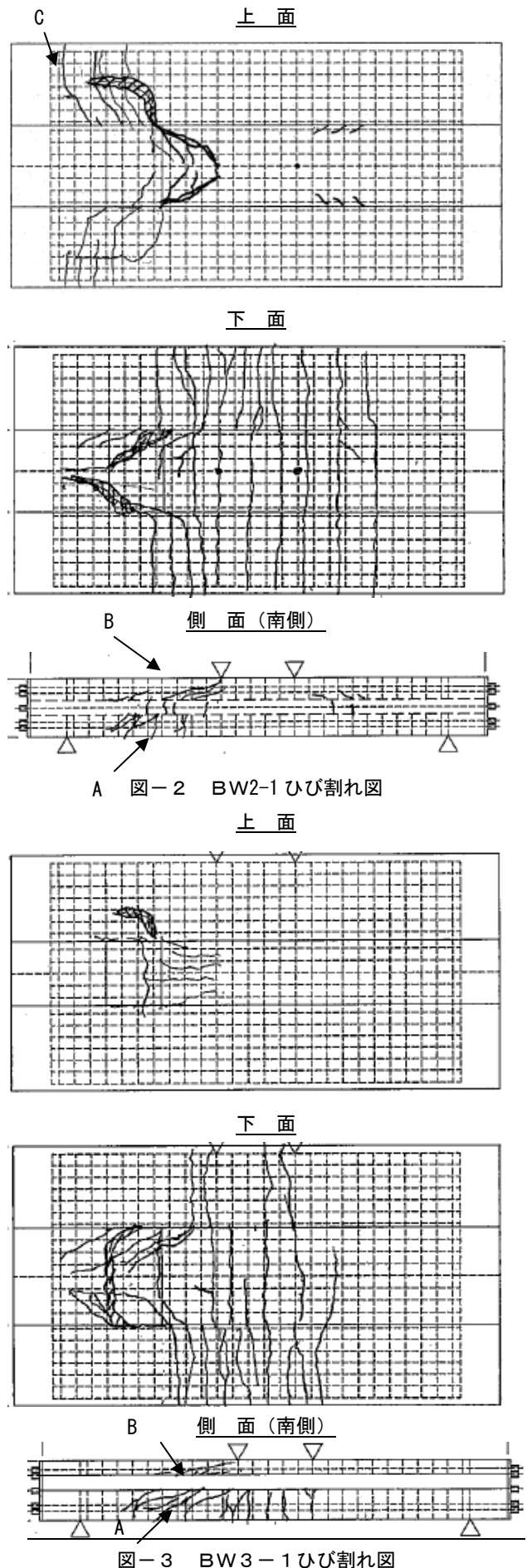


図-3 BW3-1 ひび割れ図

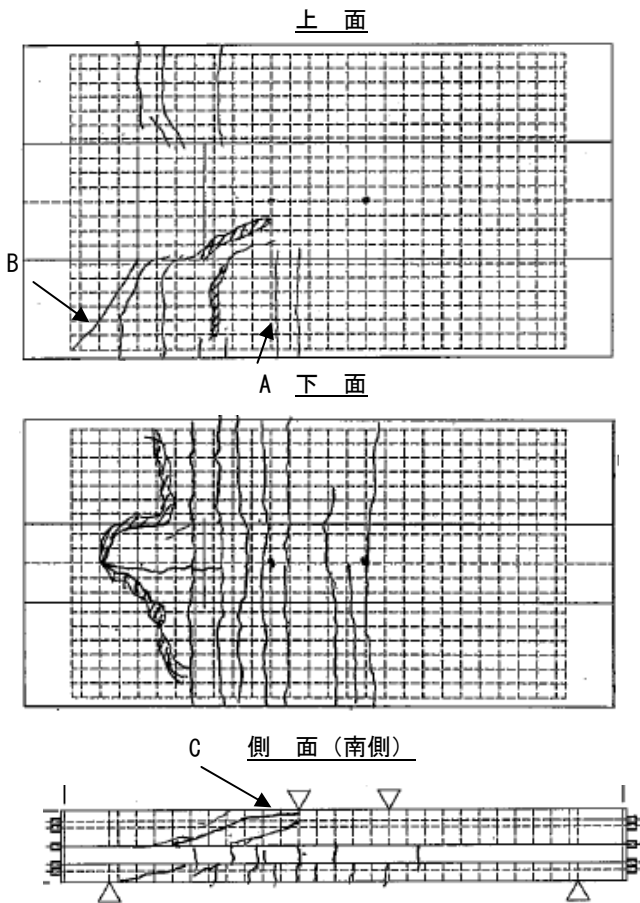


図-4 BW4-1 ひび割れ図

ひび割れ形状の特徴としては、BW3-1では、壁部の上側にはほとんどひび割れが発生していない。

壁を有する試験体では、梁部試験区間の載荷点～支点到に大きな斜めひび割れを生じ、BW2-1, 3-1, 4-1の各試験体においては、壁部まで斜めひび割れが達し、浮き上がりを生じている。

3.2 ひび割れの発生順序と荷重との関係

(1) 円形の場合 (BW1)

壁のない円形の場合の荷重変位関係を図-5に示す。

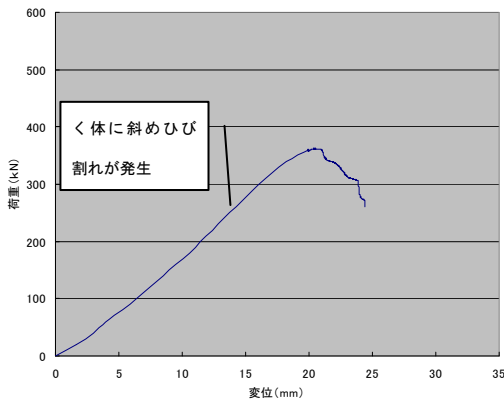


図-5 BW1荷重変位関係

(2) 壁が中心にある場合 (BW2-1)

壁が円中心付近にある場合、最初に梁部中央の等曲げ区間下側に曲げひび割れが発生し(70kN前後)、次第に壁部の下側へと進展(150kN)するとともに、曲げひび割れの本数が支点側に増加した(200~250kN)。壁のないBW-1の最大耐力(350kN程度)を超えるあたりで梁部と壁部の境界下側に斜めひび割れが生じ(図-2:A)、その後境界上側にも同様のひび割れが発生した(図-2:B)。次に、壁部上側に斜め方向のひび割れが生じる(400kN以上、図-2:C)。斜めひび割れが支点側に伸び、ひび割れ幅が広がっていき最大耐力に達した。その後荷重を続けると、徐々に荷重が低下し、壁部に斜めひび割れが進展し、浮き上がるように破壊し急激に荷重が低下したところで実験を終了した。(写真-1参照)

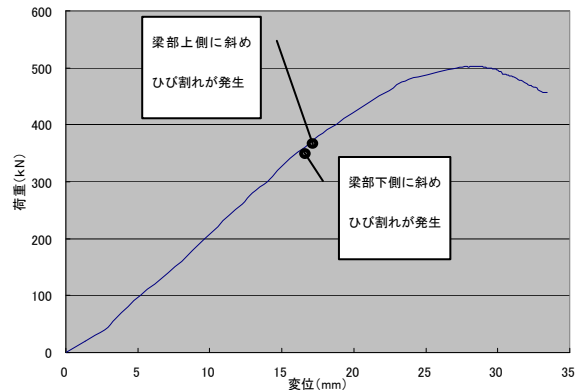


図-6 BW2-1荷重変位関係



写真-1 BW2-1破壊状況(壁部上側)

(3) 壁が圧縮側にある場合 (BW3-1)

壁が圧縮側にある場合は、最初に梁部中央に曲げひび割れが生じるのはBW2-1と同様であるが、最初のひび割れの発生荷重がやや小さい(60kN)。次に、BW2-1と同様、壁部の下側に曲げひび割れが進展したが(120kN)。その後、梁部下側に斜めひび割れを生じるが(280kN、図-3:A)、壁部の下側まで達してからは暫くの間、ひび割れはほとんど進展しなかった。梁部上部に斜めひび割れが発生後(440kN、図-3:B)、梁部下部の斜めひ

び割れの幅が大きくなり最大荷重に達した。最大荷重以後は荷重低下が急激に進み、壁部上側に斜めひび割れが貫通したところで実験を終了した。ひび割れ発生状況で特徴的であったのは、梁部下側に斜めひび割れを生じてから、ひび割れが梁部上側に達するまでの荷重の増加量が大きい点である。

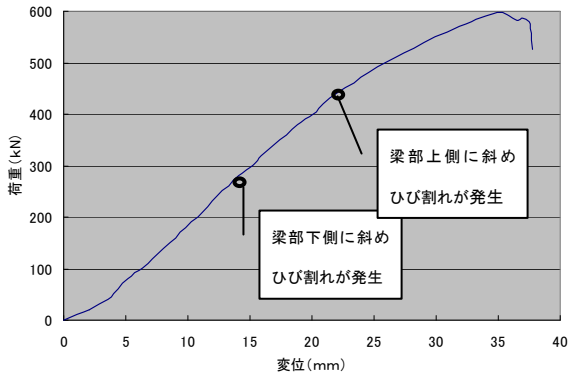


図-7 BW3-1 荷重変位関係



写真-2 BW3-1破壊状況（壁上側）

(4) 壁が引張側にある場合 (BW4-1)

壁が引張側にある場合も、最初に梁部中央に曲げひび割れを生じるが、ひび割れ発生荷重はBW2-1よりも大きい(80kN前後)。壁部の下側にひび割れが進展(170kN)するのは他のケースと同様であるが、そのひび割れが壁部側面へ達した後、そのまま壁部の上側へも進展する(図-4:A)。(200kN)その後、壁に発生するひび割れが横方向から、斜め方向に変化する(図-4:B)。梁部と壁部の境界部分上下に小さい斜めひび割れが発生し始め、壁部より上側部分に斜めひび割れが先に進展する。(350kN, 図-4:C)斜めひび割れの進展にともない、荷重に対する変位の増加が大きくなり最大耐力に達する。最大耐力以後、载荷を続けると他のケースに比べ荷重の低下が緩やかで最大耐力の8~9割程度の荷重を保ち変位が増加していったが、壁部が上側に斜めひび割れが貫通したところで実験を終了した。(写真-3参照)ひび割れの発生状況の特徴は、梁部の斜めひび割れの発生が、梁部上側が先行している点である。

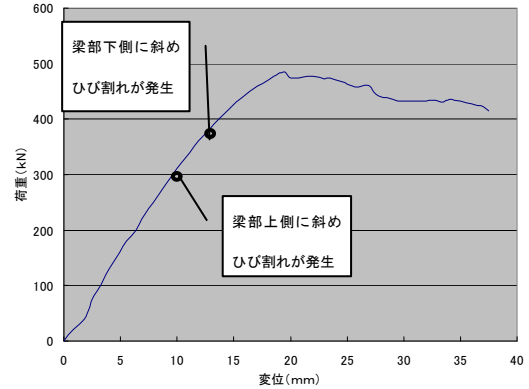


図-8 BW4-1 荷重変位関係



写真-3 BW4-1破壊状況（壁上側）

(5) つなぎ鉄筋が少ない場合 (BW8-1)

BW8-1では、概ねBW3-1と同様のひび割れの発生経過となったが、250kN付近から梁部と壁部の境界下部付近に、壁軸方向に沿ってひび割れが生じ、最大荷重を迎える付近では、壁部の上下で境界面でのひび割れの発生が顕著となった。破壊時において、他の試験体と異なり、壁部に斜めひび割れが進展せず、斜めひび割れによる浮き上がりを生じなかった。(写真-4参照)BW3-1との比較では、荷重-変位関係は途中まで大きな違いはないものの、ひび割れの発生において、梁部上側の斜めひび割れの発生が早く、最大荷重までの伸びが小さかった。

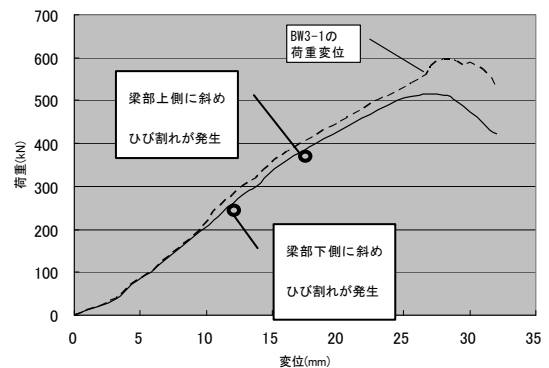


図-9 BW8-1 荷重変位関係

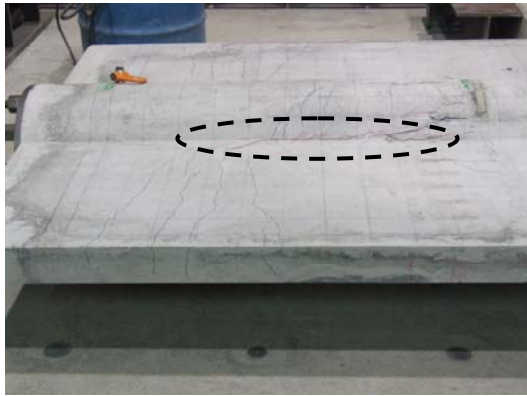


写真-4 BW8-1破壊状況（壁上側）

(6) ひび割れ発生状況と荷重との関係の考察

壁のない試験体では、斜めひび割れが発生すると、一気に中立軸程度の高さまでひび割れが進展するが、偏心のある直交壁を有する試験体では、梁部に生じる斜めひび割れが壁を貫通するまでに一定の荷重増加がみられ、壁部分において斜めひび割れの進展を抑制していることが考えられる。中心に直交壁を有する場合においても、上下に斜めひび割れを生じて、壁部を斜めひび割れが貫通しないため、斜めひび割れ発生後も荷重増加が大きくなっている。また、斜めひび割れが生じる荷重が円柱試験体より壁ありの試験体が大きくなっており、これは壁があることにより、有効断面が増加していることによるものと考えられる。

3.3 鉄筋のひずみ

(1) 壁軸方向鉄筋のひずみ

供試体BW3-1, 8-1の壁軸方向鉄筋のひずみの測定結果を図-10, 11に示す。壁の軸方向鉄筋のひずみは、今回の試験結果では、各試験体とも、梁部からの離れが変わっても大きく変化することはなく壁部内側と外側では同じような挙動を示していた。両試験体とも全体の变化傾向は似たような形状となっているが、BW8-1の方が特に下側（引張側）のひずみ量が小さく、400 kN付近で比べると、BW3-1が1200 μ 程度であるのに対して、BW8-1は600 μ 程度と約半分程度に留まっている。

(2) 壁横方向鉄筋のひずみ

供試体BW3-1, 8-1の壁横方向鉄筋のひずみの測定図を図-12に示す。

壁横方向鉄筋は、初期段階ではあまりひずみが生じていないが、帯鉄筋が降伏した400 kN付近からひずみが増加し、最大耐力付近では大きくひずみが増加している。

また、横鉄筋が少ないBW8-1では、BW3-1に比べて横鉄筋のひずみが2倍程度となっている。

(3) 鉄筋ひずみの考察

壁の軸方向鉄筋は、荷重の増加とともにひずみが増加しているが、今回の試験の範囲では壁の位置による差がほとんどなく、壁は一体となって変形していると考えられる。壁横鉄筋の量による違いとしては、引張側の軸方向鉄筋のひずみが横鉄筋の少ないBW8-1の方が少なくなっており、一方壁横鉄筋のひずみが大きくなっていることより、壁が梁の変形に追従していない可能性がある。

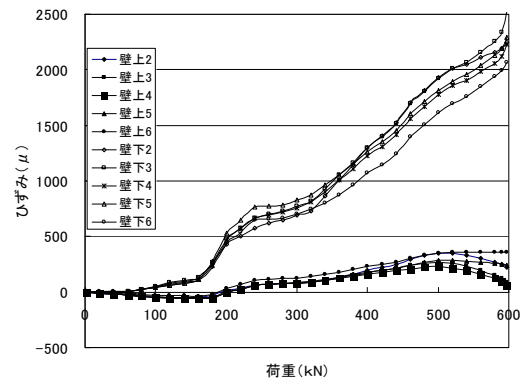


図-10 BW3-1壁軸鉄筋の荷重-ひずみ関係

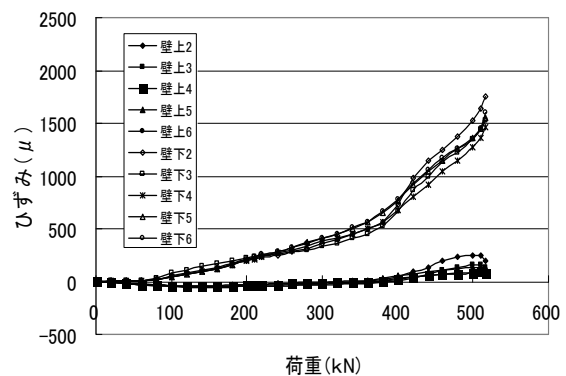


図-11 BW8-1壁軸鉄筋の荷重-ひずみ関係

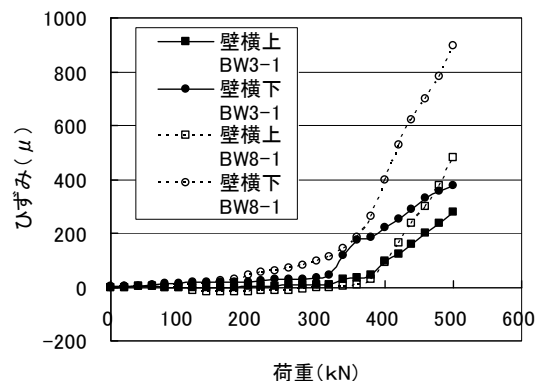


図-12 BW3-1・8-1壁横方向鉄筋の荷重-ひずみ関係

4. せん断耐力に関する検討

各試験体の最大荷重の試験値を表-4に示す。

参考値として、円形断面を同面積の矩形換算断面として鉄道構造物等設計標準³⁾の式で計算した場合のせん断耐力も合わせて示した。なお、供試体のコンクリート強度の補正を行っていない試験値を示す。

壁付の試験体 BW2-1, 3-1, 4-1 においては、いずれの試験体も円形試験体 BW-1 よりも最大荷重 V_{max} が大きくなり、1.34~1.65 倍の値となった。また、直交壁のない円形試験体 BW-1 でも矩形換算で算出するせん断耐力よりも 1 割程度実験値のせん断耐力は大きくなっている。

表-4 最大せん断耐力

試験体No	最大荷重 V_{max} (kN)	BW1との比
矩形換算	159.2	0.88
BW1	181.0	(1.00)
BW2-1	251.5	1.39
BW3-1	298.9	1.65
BW4-1	242.7	1.34
BW8-1	258.0	1.44

壁位置での違いは、圧縮側に壁が位置する方が、せん断耐力は大きくなっている。圧縮側での耐力が大きことから、T型梁において圧縮突縁がせん断耐力に寄与するという既往の研究⁴⁾結果をもとに圧縮突縁増加分のせん断耐力を計算した。これは、梁部の有効幅 b_w 分の圧縮突縁の梁部終局耐力時の中立軸より圧縮側の断面積をコンクリートの有効断面に算入してせん断耐力の検討を行うものである。

上記方法による計算結果は表-5 のようになる。比較のため、圧縮側断面のない BW4-1 と比較した。コンクリート強度の違いを補正していないことや壁軸方向鉄筋の影響があると思われるが、せん断耐力の増加分が実験値に近い値となった。これから壁が圧縮側にある場合に、T型梁と同様な検討方法でせん断耐力が増加する量を評価できると考えられる。

表-5 圧縮突縁によるせん断耐力の増加影響

試験体No	ΔV (kN)	BW4-1との差	差
BW2-1	16.1	8.8	-7.3
BW3-1	54.2	56.2	2.0

* ΔV : 圧縮フランジ増加による増加せん断耐力

圧縮側に壁がある場合におけるせん断耐力の増加の要因は推定できたものの、引張側に壁がある場合 (BW4-1) でも 3~4 割とせん断耐力が大きく増加していることから引張側に壁がある場合についても、せん断耐力が増加する要因があることが想定される。

また、壁横鉄筋が少ない BW8-1 と同形状で壁横鉄筋が多い BW3-1 との差が 40kN 程度ある。これは、ひび割れが梁と壁の境界部に壁軸方向に生じたことや、横鉄筋のひずみ量が大きいことから、梁部分に作用した荷重を横鉄筋によって壁部に伝達しているが、横鉄筋量が少ないと壁部分への力の伝達が不十分となり、壁部のせん断耐力が発揮しきれない状態となると考えられる。

今回 BW8-1 の横鉄筋量の設定は、BW-1 と BW3-1 のせん断耐力の差と比べ、横鉄筋のせん断降伏耐力が下回る設定とした。 $(p_w=0.18\%)$ 今回の結果では、最大耐力時でも横鉄筋は降伏しなかったが、梁部から壁部への応力の伝達は、壁の断面幅が小さいことからコンクリートによる影響は小さく、壁横鉄筋による影響が大きいものと考えられる。

5. まとめ

本文では、直交壁を有する円形部材に関するせん断耐力および破壊形態に着目し、供試体による単調曲げ載荷実験を行い、主にひび割れの発生状況や発生順序、鉄筋のひずみ、せん断耐力について検討、考察を行った。コンクリートの圧縮強度; 20.2~24.9N/mm², せん断スパン比 a/d ; 2.99, 横方向鉄筋比 p_w ; 0.18~0.63% を範囲とする供試体の載荷実験から得られた結果を以下に示す。

- (1) 直交壁を有する円形試験体では、円形試験体に比べてせん断耐力が 3~6 割増加した。せん断耐力の増加の要因として、ひび割れの発生過程から、壁が位置する部分で斜めひび割れが発生するのを抑制する効果があることが考えられる。
- (2) 直交壁は、圧縮側に壁が位置している方が、せん断耐力の増加が大きく、圧縮側の壁が T 型断面と同様に圧縮フランジとして評価し、せん断耐力の増加分を評価することができると考えられる。
- (3) 壁と梁をつなぐ横鉄筋の量は、壁の構造細目程度を確保すれば壁によるせん断耐力の増加に寄与すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能 (1990)、1990
- 2) HFW 研究推進委員会：中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造の耐震性能に関する一連の研究成果季刊カラム、No.112、1989
- 3) (財) 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、2004
- 4) 黒川他：逆対称曲げモーメントを受ける T 形 RC 梁のせん断耐力に関する実験 コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、2008