論文 壁付き柱を想定した T 型 RC はりの正負交番載荷実験と数値解析

村田 裕志*1·福浦 尚之*2

要旨:地下の土木構造物にあるような,T型断面で側方鉄筋を有する比較的壁厚が厚いRC壁付き柱のせん断 挙動に関する研究は少ない。本研究では,RC壁付き柱の基本的なせん断挙動を把握するため,せん断補強鉄 筋のないRC壁付き柱を対象に実験的,解析的検討を行った。RC壁付き柱を側方鉄筋を有するT型RCはり としてモデル化し,軟化域を含めた正負交番載荷実験を行った。その結果,ウェブ(柱部)に斜めひび割れ が発生後も荷重は増加し,フランジ(壁部)に斜めひび割れが発生して荷重低下に至りせん断破壊した。ま た,3次元非線形有限要素解析を行い,数値解析的にT型RCはりのせん断耐荷機構について考察を行った。 キーワード:せん断,壁付き柱,T型はり,正負交番載荷,非線形有限要素解析

1. はじめに

地下の土木構造物には, RC の壁付き柱構造が多くあ る。これらの部材の耐震性能を評価する際に, そのせん 断挙動を知ることが重要である。RC 柱部材では側方鉄 筋が存在するが, これによってせん断耐力に影響を与え ることや¹⁾, T型断面の RC はり部材では, フランジの 存在によって斜めひび割れが発生した後も荷重が増加 することが報告されている^{2), 3)}。しかしながら, これら の特性を組み合わせた形式である RC 壁付き柱部材のせ ん断挙動に関しては, 壁厚が薄い構造に関しては報告は あるが⁴⁾, 壁厚が厚い構造に関しては検討されていない。 また, 最大荷重以降の軟化挙動の研究も少ないのが現状 である。

本研究では、比較的壁厚が厚い RC 壁付き柱部材の基本的なせん断特性について検討を行う。せん断補強鉄筋を有しない RC 壁付き柱部材を、側方鉄筋を有する T 型断面の RC はりとしてモデル化し、軟化域も含めた正負交番載荷実験を行った。また、3次元非線形有限要素解析によって RC はり部材の単調載荷をシミュレートし、側方鉄筋やフランジ(壁部)の有無が RC 部材のせん断挙動にどのような影響を与えるかを数値解析的に把握することを試みた。なお、本論文では柱部をウェブ、壁部をフランジと称する。

2. 側方鉄筋を有する T型 RC はりの正負交番載荷実験 2.1 実験概要

(1) 試験体概要

表-1 に試験体諸元を、図-1 に試験体概要を示す。 本論文中では、荷重とたわみを上方からの載荷時を正、 下方からの載荷時を負とする(以降,正載荷時,負載荷 時と称す)。

試験体は壁付き柱部材を想定したT型RCはりであり, 軸方向鉄筋として,引張鉄筋,圧縮鉄筋に加えて側方鉄 筋を有している。軸方向鉄筋のかぶりは全て25mmであ る。スターラップは軸方向鉄筋の定着部と等曲げモーメ ント区間にのみ配置し,せん断スパン内は一切せん断補

設計圧縮強度 <i>f</i> _c '	30MPa
せん断スパン a	800mm
ウェブ幅 b_w	200mm
有効高さ <i>d</i>	266mm
せん断スパン有効高さ比 a/d	3.0
鉄筋比 pw [*] (正載荷時)	5.63%
鉄筋比pw [*] (負載荷時)	4.55%

表-1 試験体諸元

※鉄筋比は曲げ終局時に中立軸より引張側にある軸方向鉄筋 を全て考慮し、その総断面積 A_sを b_w・d で除して算出した。



*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム 博(工) (正会員) *2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム課長 博(工) (正会員)

表-2 耐力の計算

	正載荷時	負載荷時
せん断破壊時の荷重 $P_s[kN]$	199	185
曲げ降伏荷重 $*P_y$ [kN]	367	353
せん断余裕度 P _s /P _y	0.54	0.52

表-3 使用した鉄筋の材料特性

鉄筋の種類	降伏強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
D19 SD345	410	186
D10 SD345	379	183
D6 SD345	369	183

※鉄筋の降伏強度を400MPaとして算出した。

表-4 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法	水セメント比	空気量	細骨材率		単	位量[kg/ı	m ³]	
[mm]	[%]	[%]	[%]	水*	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
20	71.8	5.0	45.2	152	212	876	1088	2.12

※水は AE 減水剤を含む。

強をしていない。なお,鉄筋の材質は全て SD345 である。 最下縁の D19 の軸方向鉄筋が 4 本であるのに対し,最上 縁の D19 の軸方向鉄筋を 3 本としたのは,コンクリート 打込み時にバイブレータの挿入を容易にするためであ る。このため,フランジの上縁側の組立て鉄筋に D10 を 4 本用いることで,D19 の 1 本分の断面積を補完した。 側方鉄筋の端部は全て水平方向にフック形状として定 着してある。

表-2 に試験体の耐力の計算結果を示す。試験体は, 確実にせん断破壊を先行させるため、せん断余裕度は正 載荷時は 0.54, 負載荷時は 0.52 となっている。睦好ら¹⁾ によれば、側方鉄筋を有する RC はり部材のせん断耐力 は、計算上の曲げ終局時での中立軸より引張側にある軸 方向鉄筋を考慮すれば、既往の算定式で精度良くせん断 耐力を求められることが報告されている。そこで、以下 の二羽ら³⁾が提案した式(1)に表-1の p_w を用いてせん断 耐力 V_c を求め、せん断力が荷重の半分であることから $P_s = 2V_c$ としてせん断破壊時の荷重を算出した。

$$V_c = 0.2 f_c t^{1/3} \left(\frac{d}{1000}\right)^{-1/4} (100 p_w)^{1/3} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_w d$$
(1)

(2) 使用材料

使用した鉄筋の材料特性について表-3 に示す。コン クリートの配合を表-4 に示す。コンクリートは目標圧 縮強度を 30MPa とし,フレッシュ性状はスランプ値 17.5cm,空気量 5.7%となった。コンクリート打込み後は 屋外で2週間の湿潤養生を行った。

(3) 載荷試験

材齢 22 日で載荷試験を行った。載荷は 10MN 万能試 験機を用いて,正負交番載荷を行った。

図-2 に載荷装置の概要を示す。支点部は、門型フレ ームを用いて試験体を上下から回転すべり支承で挟ん で固定した。載荷点は回転支承を用いて上下から直接試 験体を載荷する形式とした。正載荷時には負載荷時の載



荷治具が離れ,負載荷時には正載荷時の載荷治具が離れ るようになっている。載荷は全て1サイクルずつとし, 斜めひび割れが発生するまでは±25kNずつ荷重制御で 載荷し,斜めひび割れ発生後はスパン中央のたわみでコ ントロールし,±6,8,10mmと2mmずつ増分させた。 その後約+11mmで上方からの載荷でせん断破壊をした ため,-14mm,+12mm,-17mmと載荷した。

2.2 実験結果

表-5 にコンクリートの材料試験結果を示す。コンク リートは設計強度(=30MPa)を満足し,T型はり試験体 には乾燥ひび割れなどの初期ひび割れは観察されなか った。

図-3 に荷重-スパン中央たわみ関係を示す。図中に は正載荷時の斜めひび割れ発生以降の載荷サイクルも 示している。曲げひび割れは,正載荷時には荷重が+ 27kNの時,負載荷時には-60kNの時に発生した。斜め ひび割れ発生荷重は,正載荷時では+182kN,負載荷時 は-178kNであった。斜めひび割れは南側,北側の両方 のせん断スパンにほぼ同時に複数発生し,剛性が低下し た。最大荷重は正載荷時はたわみが+10mmの時に+ 292kN,負載荷時はたわみが+10mmの時に+ 292kN,負載荷時はたわみが-8mmの時に-240kNであ った。それぞれこの時に,スパン中央での引張縁の軸方 向鉄筋のひずみが最大となった。正載荷時は下縁の鉄筋 ひずみが 1670×10⁶,負載荷時は上縁の鉄筋ひずみが 1460×10⁻⁶を示し,降伏には至っていない。その後,正 載荷時にスパン中央たわみが+11mm,荷重が+262kN の時に南側のせん断スパン内の圧縮側のフランジに斜 めひび割れが発生し、このひび割れが開口してせん断破 壊をし、急激に荷重が低下した。この次のサイクルの負 載荷時に、スパン中央たわみが-13mm、荷重が-206kN の時に、正載荷時と同様に南側のせん断スパン内の引張 側のフランジに斜めひび割れが発生してせん断破壊を し、緩やかに荷重が低下した。

図-4 に載荷スパン内のたわみ分布を示す。このグラ フでは、正載荷時において試験体が鉛直下側にたわむ時 を正のたわみとしているため、グラフの縦軸の下側を正 として示している。このグラフから、正載荷時、負載荷 時の両方で、斜めひび割れ発生後も南側、北側でほぼ対 称なたわみ分布であったのが、せん断破壊後に非対称な たわみ分布に変化したことがわかる。

図-5 に載荷終了時のひび割れ性状を示す。最初の斜 めひび割れ発生後もせん断破壊に至るまで、ウェブに多 数の斜めひび割れが発生し、それぞれのひび割れがほぼ 均等に開口していった。しかし、せん断破壊直前に発生 したフランジの斜めひび割れは、正載荷時、負載荷時と もに1本のひび割れがが大きく開口した。

3. 考察

3.1 既往のせん断耐力式との比較

コンクリートの実強度を用いて式(1)でせん断破壊時 の荷重の再計算を行った。計算結果と、実験での斜めひ び割れ発生荷重と最大荷重とを比較したものを表-6 に





示す。その際,**表-2**での計算の時と同様に睦好ら¹⁾が 提案した鉄筋量の方法(**表-6**中の*P_{cal.1}*)と,石橋ら⁶⁾ の提案を参考に,式(2)のように重み付けをして鉄筋量を 算出する方法(**表-6**中の*P_{cal.2}*)で計算を行った。

$$A_{s} = A_{s1} + A_{s2} \frac{d_{2}}{d_{1}} + A_{s3} \frac{d_{3}}{d_{1}} + \dots + A_{sn} \frac{d_{n}}{d_{1}}$$
(2)

ただし、 A_s :鉄筋量、 A_{sn} :引張縁からn段目の鉄筋断面 積、 d_n :引張縁からn段目の鉄筋の有効高さ、である。 なお、式(2)は中立軸より引張側の鉄筋で計算した。

これより、中立軸より引張側の鉄筋に関して重み付け をして算出した鉄筋量を用いると、既往のせん断耐力算 定式で側方鉄筋を有する T型 RC はりの斜めひび割れ発 生荷重を非常に良い精度で予測できることが確認でき た。しかし、鉄筋量の重み付けによらず、算定式は最大 荷重を過小評価することがわかる。既往の研究ⁿでは、 側方鉄筋を有する矩形断面の RC はりの破壊性状は、側 方鉄筋を配置することによって斜めひび割れが分散し、 斜めひび割れ発生荷重が増加する傾向があるものの、側 方鉄筋を有しない RC はりと同様に斜めひび割れ発生後

 表-5
 コンクリートの材料試験結果

 圧縮強度
 引張強度
 ヤング係数

圧縮強度	引張強度	ヤング係数
[MPa]	[MPa]	[GPa]
34.8	2.49	28.3





図-4 荷重-スパン中央たわみ関係



に直ちに荷重が低下することが報告されている。このこ とから,算定式によって本実験の斜めひび割れ発生荷重 を予測できたのは妥当であるといえる。

3.2 斜めひび割れ後の荷重増加と軟化挙動

実験において正載荷時,負載荷時の両方で斜めひび割 れ発生後も荷重が増加した理由としては,アーチ作用へ と耐荷機構が推移したことが考えられるが,この理由と して主に以下の2点が挙げられる。1)フランジの存在に よって斜めひび割れの進展が妨げられた,2)鉄筋比が高 く,鉄筋の径もD19とコンクリート断面に対して相対的 に太いためにダウエル作用が強く働いた,である。

1)に関しては、比較的フランジ厚の大きい T型 RC は りのせん断挙動に関する既往の研究^{2),3)}において、斜め ひび割れはフランジ下縁まですみやかに進展するが、そ の後も荷重は増加し、最終的にはフランジのせん断破壊 によって最大荷重に至った実験結果が報告されている。 また、斜めひび割れ発生後の荷重増加は a/d が小さいほ ど顕著である傾向も報告されており、本実験の a/d が 3 程度でもこの現象は見られている。これより、フランジ の存在がせん断挙動に与えた影響は大きいと考えられ る。本研究の試験体も、地下の土木構造物を想定したも のであるため、フランジ厚がはり高さの3分の1と、比 較的フランジ厚が厚いT型断面であることがせん断耐力 向上の要因であったと推測される。また、本実験では負 載荷時においても, 正載荷時ほどではないが斜めひび割 れ発生後に荷重が35%増加しており、引張側にフランジ がある逆T型はりの形式であっても、フランジがせん断 耐力に影響を与えることを示唆している。

2)に関しては、図-6 に示した実験でせん断破壊した 南側せん断スパンでの鉄筋ひずみの挙動から考察する。 ひずみゲージはそれぞれの箇所に鉄筋の上下に添付し て計測し、グラフ内の凡例の末尾の文字の U は上側、L は下側のひずみを示している。図-6(a), (b)から,正載 荷時に斜めひび割れ発生前までは SU8, SU9 の上下とも に圧縮を示しているが、SU8 では斜めひび割れ発生後に 上側の圧縮がさらに増加し、下側は圧縮から引張へと推 移し, SU9 では逆に上側が引張, 下側が圧縮へと推移し ている。これより, SU8 と SU9 の間でずれ変形が起きて いることがわかる。図-6(c), (d)からは、負載荷時に斜 めひび割れ発生後, SL8 では上側が引張, 下側が圧縮へ と推移し, SL9 では逆に上側が圧縮, 下側が引張へと推 移しており、この2つの区間内でずれ変形が起きている ことがわかる。また、図-7に示すダウエル作用に関す る実験結果⁸⁾より、本実験の配筋および鉄筋ひずみの状 態において推定されるダウエル作用のせん断力への寄 与分は無視できる程度ではないと考えられる。これらよ り、軸方向鉄筋のダウエル作用が斜めひび割れ発生後の

表-6 せん断耐力算定式との比較

	正載荷時	負載荷時
鉄筋量の重み付けなしP _{cal.1} [kN]	+209	-195
鉄筋量の重み付けありP _{cal.2} [kN]	+187	-183
斜めひび割れ発生荷重 <i>P_{cr}</i> [kN]	+182	-178
$P_{cr}/P_{cal.l}$	0.87	0.91
$P_{cr}/P_{cal.2}$	0.97	0.97
最大荷重 Pmax [kN]	+292	-240
$P_{max}/P_{cal.l}$	1.40	1.23
$P_{max}/P_{cal,2}$	1.56	1.31





荷重増加に寄与している可能性を示した。

最大荷重後の軟化挙動に関しては、正載荷時の急激な 荷重低下後も負載荷時において耐荷力の急激な低下は なかった。また、荷重-スパン中央たわみ関係(図-3) の包絡線から見れば、負載荷側の方が軟化は緩やかであ ることから、圧縮側にフランジ、引張側にフランジがあ ることで、メカニズムは異なるものと推測される。

3.3 非線形有限要素解析

(1) 解析概要

側方鉄筋とフランジがはり部材のせん断挙動にどの ような影響を与えるか数値解析により把握するため、3 次元非線形有限要素解析を行った。解析を行ったのは側 方鉄筋を有しない矩形はり、側方鉄筋を有する矩形はり、 側方鉄筋を有するT型はり(実験を行った試験体)であ る。矩形はりは実験の試験体からフランジを除去したも のである。メッシュ分割図を図-8 に示す。解析コード は COM3 Ver.9.12 を用い^{9),10)},試験体の4分の1を8節 点ソリッド要素を用いてモデル化した。

材料物性値は,コンクリートの引張強度以外は実験値 を用いた。構造体中の引張強度は,試験体の乾燥状態, 鉄筋の存在によりテストピース試験より得られる引張



図-10 荷重-スパン中央たわみ関係の比較

表-7 各荷重の比較

	斜めひび割れ 発生荷重[kN]	最大荷重 [kN]
実験	182	292
矩形側方鉄筋なし(解析)	139	139
矩形側方鉄筋あり(解析)	191	201
T 型側方鉄筋あり(解析)	195	234

強度より低くなる可能性があることから¹⁰⁾,実験におけ る荷重-たわみ関係での曲げひび割れ発生による勾配 との適合性に基づいて設定し,解析での引張強度はテス トピース強度の70%とした。コンクリートの引張軟化モ デルは図-9に示すモデルであり,軟化係数Cは,全要 素でX,Y,Z それぞれの方向について,要素内に鉄筋 があり,さらに鉄筋の軸と一致する方向は0.4,その他 (鉄筋が無い方向)は全て2.0とした。解析では正載荷 の単調載荷を行った。

(2) 解析結果

図-10 に解析から得られた荷重-スパン中央たわみ 関係を実験結果とあわせて示す。解析を行った3ケース 全てにおいて、図中の最大荷重の直後のステップにおい て荷重が大幅に低下し、斜めひび割れが大きく開口した ため、この時点でせん断破壊をしたと判定した。

側方鉄筋を有しない矩形はりの解析では,荷重が 139kN で最大となり,直後のステップで斜めひび割れが 発生すると同時に大きく開口してせん断破壊をした。側 方鉄筋を有する矩形はりでは,荷重が 191kN の時に斜め ひび割れが発生し,実験とほぼ同等であった。その後わ ずかに荷重は増加して 201kN で最大となった後,直後の ステップで斜めひび割れが大きく開口してせん断破壊 をした。試験体をモデル化した,側方鉄筋を有する T型 はりの解析では,荷重が 195kN の時にウェブに斜めひび 割れが発生し,その後荷重は増加して 234kN で最大とな り,直後のステップでウェブの斜めひび割れが大きく開





ロしてせん断破壊をした。斜めひび割れ発生荷重と最大 荷重を表-7にまとめる。これら3ケースの解析結果か ら、側方鉄筋を配置することによって斜めひび割れ発生 荷重が向上はするが、斜めひび割れ発生後の荷重増加は ほとんど見られないこと、また、フランジが付くことに よって、斜めひび割れ発生荷重はフランジがない矩形は りと同等であるが、その後も荷重は増加することが確認 できた。この傾向は既往の研究²⁾の実験現象とも一致し ている。

解析での破壊の1例として,側方鉄筋を有するT型は りの斜めひび割れ発生時とせん断破壊直後の引張主ひ ずみ分布と変形図を重ねたものを図-11に示す。変形は 2倍にスケールアップして示している。この図より,ウ ェブに発生した斜めひび割れが,フランジまでは進展せ ずにウェブ内でのみ開口して破壊している様子がわか る。実験ではフランジに斜めひび割れが発生してせん断 破壊をしたが,解析ではこの現象とは異なる傾向を示し た。これが実験よりも低い荷重でせん断破壊をしたこと の理由ではないかと考えられる。フランジでの斜めひび 割れの発生によるせん断破壊の現象を捉えるには,さら なる検討が必要である。

4. まとめ

側方鉄筋を有するT型RCはりのせん断挙動について、 本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 正負交番載荷実験により、側方鉄筋を有する T型 RC はりでは、圧縮側にフランジがある正載荷時、引張 側にフランジがある負載荷時の両方でウェブに斜め ひび割れが発生した後も荷重は増加し、フランジに 斜めひび割れが発生することでせん断破壊をした。
- (2) 中立軸より引張側にある鉄筋に重み付けをして算出した鉄筋量を用いれば,既往のせん断耐力算定式によって側方鉄筋を有する T型 RC はりの斜めひび割れ発生荷重を予測できるが,せん断破壊時の荷重は斜めひび割れ発生荷重を大きく上回る。
- (3) 斜めひび割れ発生後の荷重増加について、フランジの影響が大きいことを示し、また本実験での鉄筋ひずみの履歴から軸方向鉄筋のダウエル作用が影響を

与えている可能性を示した。

- (4) 最大荷重後の軟化挙動に関しては、正載荷時のせん 断破壊では急激に荷重が低下し、負載荷時ではせん 断破壊時の荷重低下が緩やかであることから、圧縮 側にフランジ、引張側にフランジがあることで、メ カニズムは異なるものと推測される。
- (5) 非線形有限要素解析によって側方鉄筋とフランジが RC はりのせん断挙動に与える影響を確認した。解析 では既往の実験的研究と同様に、側方鉄筋は斜めひ び割れ発生荷重を増加させるが、斜めひび割れ発生 後の荷重増加にはほとんど寄与しないことと、フラ ンジは斜めひび割れ発生荷重には影響はないが、斜 めひび割れ発生後の荷重増加には大きく影響するこ とが示された。

参考文献

- 睦好宏史,町田篤彦:側方鉄筋を有する鉄筋コンクリート部材のせん断耐力,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.9,No.2,pp.335-340,1987.6
- (2) 斉藤聡彦,藤田郁美,渡辺忠明,佐藤 勉,谷村幸裕: T 型断面梁のせん断耐力に関する実験的研究,土木学 会北海道支部論文報告集,No.58/V-18, pp.814-817, 2002.1
- 3) 田村隆弘,重松恒美,原隆,中野修治:軸方向引張り力を受ける鉄筋コンクリートT型梁のせん断耐力, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1255-1263, 1992.3
- 例えば,金紅日,芳村学,中村孝也:せん断破壊型 RC 柱の崩壊に対する直交壁の影響,コンクリート工学年 次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.193-198, 2005.7
- 5) 二羽淳一郎,山田一宇,横沢和夫,岡村 甫:せん断 補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 石橋忠良,斉藤啓一,寺田年夫: RC はりの腹部に配置 された軸方向鉄筋のせん断耐力におよぼす影響につい て,第40回土木学会年次講演会講演概要集,V-161, pp.321-322, 1985.9
- 土屋智史,三島徹也,前川宏一:高強度構成材料を用 いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価,土木学会 論文集,No.697/V-54, pp.65-84, 2002.2
- Poli, S. D., Prisco, M.D. and Gambarova, P. G.: Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel Bar Embedded in Concrete, ACI Structural Journal, Vol.89, No.6, pp.665-675, Nov.1992.
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, London, 2003
- 10) 岡村 甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析 と構成則,技報堂出版,1991