

1室中空断面柱部材のねじりモーメントに対する挙動特性

九州大学大学院	工修	○服部	匡洋
九州大学大学院	正会員	工博	大塚 久哲
九州大学大学院	博(工)	崔	準祐
久留米市役所		西木	友宏

Abstract : This study aims for clarifying the torsional performance of hollow RC columns subjected to cyclic torsional loading. The experiments of 4 hollow RC columns with 400×400 mm cross-section and 1600mm length were conducted under torsion. Two types of wall thickness (60mm and 100mm) and pitch of hoop ties (30mm and 60mm) were prepared. These results are also compared to those of solid cross section columns. The pure torsional hysteresis curves, the torsional skeletons, and the failure mechanism are shown and the effects of thicknesses and pitch of hoop ties are clarified.

Key words : Hysteresis curve of column , Hollow section , Torsion , Thickness, Pitch of hoop ties

1. はじめに

橋梁の長大化や立地条件の制約に伴い、RCアーチ橋のアーチリブや逆L字型の橋脚等、大きなねじりモーメントが生じる部材が増加しつつある。ねじりモーメントが曲げモーメント、せん断力と同時に部材に作用すると、それらが単独で作用した場合に比べ部材の耐力が大きく低下することが知られている¹⁾。しかし、一般的な地震応答解析においては、ねじりひび割れの発生が想定される場合に、ねじりモーメントが生じる部材に対して初期剛性の1/10程度の等価剛性を有する線形部材として考慮した等価線形解析を実施するのみ²⁾で、ねじりの非線形特性やねじりと曲げの相関特性は考慮されていない。このため、これらが橋梁の地震時応答にどの程度の影響を及ぼすのかについてもあまり認識されていない。これは、ねじりに対する挙動特性について、未だに不明な点が多いためと考えられる。

このため、本研究室ではこれまで充実断面に対する純ねじり³⁾及びねじりと曲げの複合載荷実験¹⁾を実施し、ねじり破壊メカニズムや耐荷機構について明らかにしてきた。また、ねじり非線形を考慮した非線形動的解析を実施するために必要な純ねじり骨格曲線、ねじりと曲げの相関曲線等について提案⁴⁾した。さらに、RCアーチ橋に対してこれらを考慮した非線形動的解析を実施することにより、等価線形解析では、アーチリブに生じるねじりモーメントを過小評価することを示した。ただしこれらの検討は、全て充実断面実験結果から導いたものであり、他断面に対する汎用性は不明である。

以上より、本検討では新たに1室中空断面に対する純ねじり載荷実験を実施した。過去に中空断面部材に対する純ねじり載荷実験は検討されてきた。本研究室でも、アーチリブを想定した3室箱桁断面に対する純ねじり及び複合載荷試験を実施⁵⁾⁶⁾し、ねじり骨格曲線やねじりと曲げの相関曲線、ねじりに対する炭素繊維の補強効果及び帯鉄筋比への換算方法等を明らかにした。しかし、中空断面を有する部材に対する純ねじり載荷実験の数は充実断面に比べて非常に少なく、現段階では中空断面部材のねじり挙動を詳細に把握できているとは言い難い。このため、本研究では既往の知見の適用性を把握する前段階として、壁厚と帯鉄筋間隔をパラメータとし、一定軸力下での純ねじり載荷実験を実施し、1室中空断面部材の純ねじり履歴曲線や骨格曲線、ひび割れ進展状況、破壊メカニズム等のねじり挙動を明らかにするとともに、壁厚及び帯鉄筋間隔がねじり挙動に及ぼす影響について詳細に考察した。なお、本稿では、ねじりと曲げの複合荷重に対してねじり荷重のみ作用する場合を純ねじりと呼んだ。

2. 実験概要及び実験ケース

写真-1に供試体のセットアップ状況、図-1に鉄筋ゲージ貼付位置を示す。また、表-1に鉄筋引張試験結果を示す。実験供試体の柱部分は400×400mmの中空矩形断面で、全長1600mmの鉄筋コンクリート(RC)製である。供試体には、柱上下端にフーチングを設け、頭部フーチングを載荷装置に固定した。コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とした。鉄筋は全てSD295である。主鉄筋はD13を16本均等に配置した。帯鉄筋にはD6を使用し、溶接長60mmのフレアー溶接を施して閉合した。

表-2に実験ケース及び材料試験結果を示す。本検討では、壁厚と帯鉄筋間隔をパラメータとし、壁厚60mmと100mm、帯鉄筋間隔30mmと60mmの計4体に対してねじり角制御による純ねじり正負交番載荷実験を実施した。同表には、過去に実施した充実断面の実験ケースも併せて示す。ここで、No.5, No.6は他に比べて供試体の材齢が短いために、圧縮強度が小さくなったと考えられる。また、中空断面の場合、充実断面に比べて作用する軸応力比が大きくなると予想されること、既往の充実断面実験と同一軸応力比で比較検討することから、全ての実験ケースに対して、初期軸応力としてコンクリート設計基準強度の10%である4.0N/mm²を与えた。

ねじり荷重は2本のねじり載荷用ジャッキにより供試体頭部に偶力を作用することにより与えた。また、軸力は軸力用ジャッキにより供試体頭部に作用させた。なお、軸力は頭部が水平に変位しても常に軸方向に作用させることができるようにスライドする構造である。交番載荷において、1ループ目では正負にひび割れが入るまで、2ループ目では部材降伏するまで載荷した。ここで、初期剛性が急激に低下する状態を部材降伏と定義しており、充実断面の場合、断面中心までのひび割れの進展と考えられている⁷⁾。3ループ目以降は部材降伏耐力時のねじり角の整数倍として繰り返し載荷を実施した。

3. 純ねじり載荷実験結果

3.1 純ねじり履歴曲線

純ねじり履歴曲線において、ねじりモーメントは写真-1右に位置する2本のねじり載荷用ジャッキに設置したロードセルにより測定された荷重より計算した値を使用した。また、ねじり角は頭部フーチ

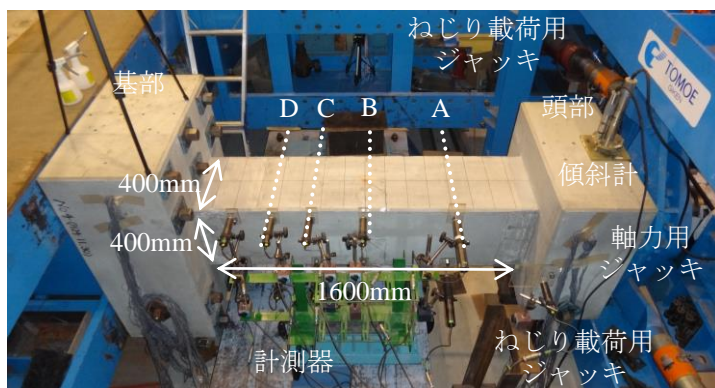


写真-1 供試体のセットアップ状況

表-2 実験ケース及び材料試験結果

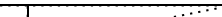
パラメータ	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
断面形状	中空				充実	
軸応力比(%)	10					
壁厚(mm)	60		100			
帯鉄筋間隔(mm)	30	60	30	60	30	60
主鉄筋比*(%)	2.48	2.48	1.69	1.69	1.27	1.27
帯鉄筋体積比(%)	1.88	0.94	1.28	0.64	0.96	0.48
圧縮強度(N/mm ²)	60.3	61.6	57.4	68.7	35.3	45.7
引張強度(N/mm ²)	3.8	4.4	4.6	3.9	4.1	4.2
ヤング率(N/mm ²)	27800	27100	25100	28800	23900	27300

表-1 鉄筋引張試験結果

	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング率 (N/mm ²)
D13	353	2095	181000
D6	421	1950	201000

主鉄筋：

計測器設置側から J1,J2,J3,J4,J5

帯鉄筋：

計測器設置側から Y1,Y2,Y3,Y4

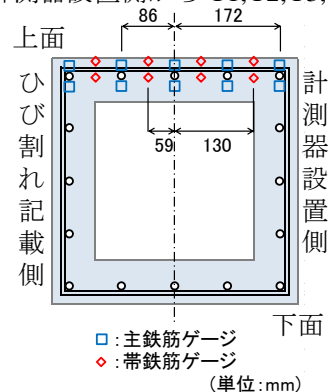


図-1 鉄筋ゲージ貼付位置

^{*}主鉄筋比 ρ_s : $\rho_s = A_s / A_c$

A_s : 鉄筋の全断面積

A_c : コンクリートの全断面積

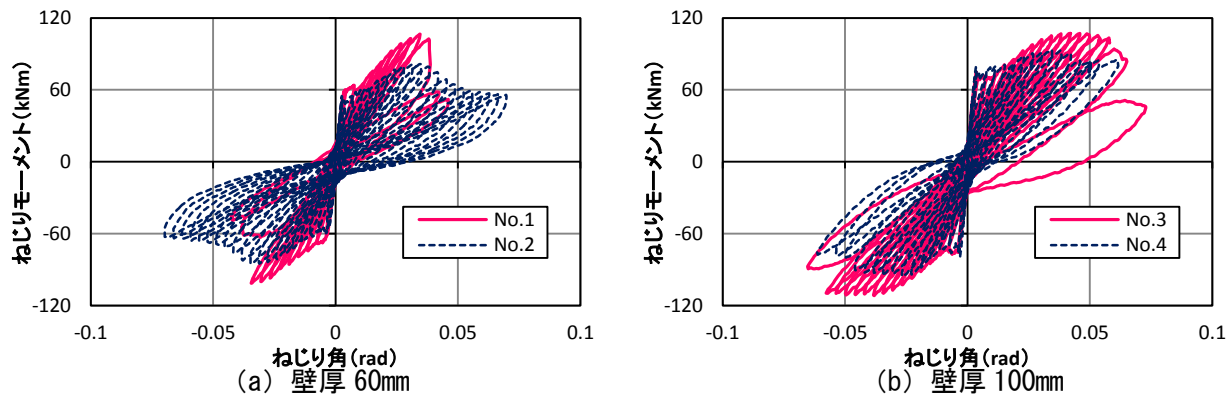


図-2 純ねじり履歴曲線の比較 (帯鉄筋間隔の影響)

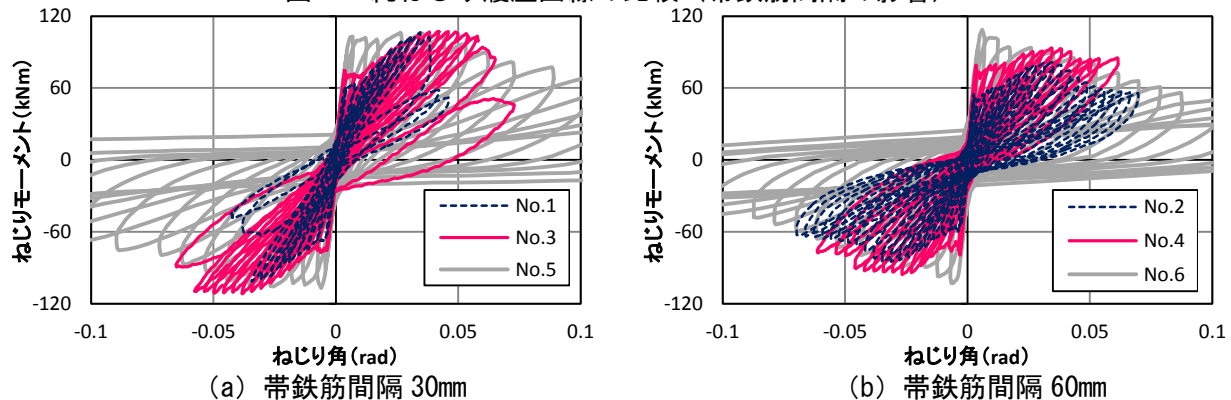


図-3 純ねじり履歴曲線の比較 (壁厚の影響)

ングに設置した傾斜計の測定値を使用した。図-2より、同一壁厚の純ねじり履歴曲線を比較し、帯鉄筋間隔の影響に着目すると、初期剛性に関してはほとんど差異がなかったものの、部材降伏後の勾配は、帯鉄筋間隔が密になるほど大きくなる傾向が見られた。しかし、最大耐力後の勾配は、帯鉄筋間隔が密なほど急であり、靱性に乏しかった。この傾向は充実断面の場合と異なる。

また、図-3に同一帯鉄筋間隔の純ねじり履歴曲線の比較を示す。過去に実施した充実断面における純ねじり履歴曲線を併せて記した。初期剛性には壁厚の影響は見られなかった。部材降伏後の勾配は壁厚が厚いほど緩やかになる傾向が確認された。また、最大耐力後の勾配も、壁厚が厚いほど緩やかであり、壁厚が厚いほど高い靱性を有した。

3.2 骨格曲線 (イベント耐力)

図-4に各実験ケースの正側載荷時の骨格曲線の比較を示す。ここで、骨格曲線は、ひび割れ点、部材降伏点、最大耐力点の3点を結んだものである。まず、中空断面を有する全ての供試体において、充実断面と同様にひび割れ発生後も剛性を維持したまま耐力が上昇しており、中空断面部材についても部材降伏点の存在が確認された。また、図-4(a)(b)より各イベント耐力における壁厚の影響に着目すると、ひび割れ耐力、部材降伏耐力は壁厚が大きくなるほど向上した。充実断面の場合、部材降伏耐力はひび割れ耐力に対して15%程度増加したのに対し、中空断面の場合どの供試体についても50%以上の耐力の上昇が見られた。特に、No.3においてはひび割れ耐力に比べ84%耐力が上昇した。最大耐力は帯鉄筋間隔30mmの場合は壁厚によらずほぼ一致したが、帯鉄筋間隔60mmの場合は、壁厚が厚くなると最大耐力も向上した。

一方、図-4(a)(b)の比較により、帯鉄筋間隔の影響はひび割れ、部材降伏耐力ではほとんど見られなかった。しかし、最大耐力において帯鉄筋間隔の影響は大きく、帯鉄筋間隔が密なほど最大耐力の向上が確認された。また、壁厚が薄い場合に最大耐力の向上が顕著であった。

3.3 ひび割れ状況

図-5に部材降伏時及び最大耐力時の供試体上面頭部側のひび割れ状況を示す。全ての供試体におい

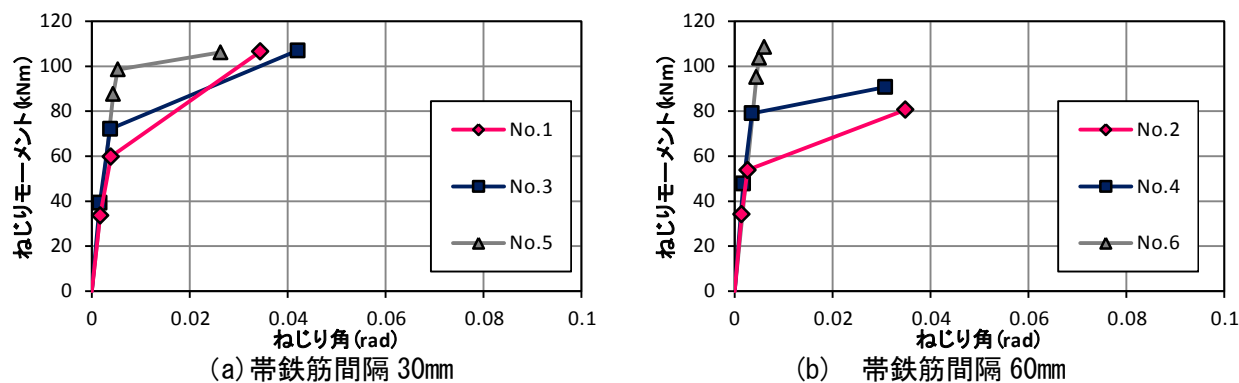


図-4 純ねじり骨格曲線

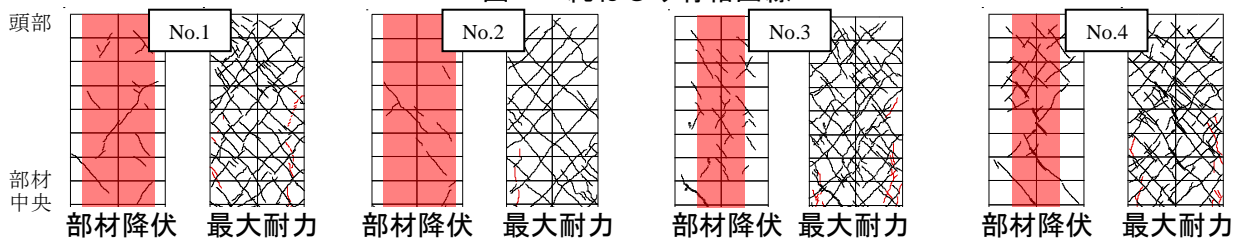


図-5 部材降伏時及び最大耐力時ひび割れ分布（上面）

て、初めに断面辺中央付近に斜めひび割れが生じた。軸力の影響により、斜めひび割れが部材軸となす角度は45°よりも小さかった。また、部材降伏時には、初めに断面の辺中央において発生したひび割れが進展する様子が確認された。このとき、図-5赤色で示すように、壁厚が厚い場合は薄い場合に比べ、ひび割れが断面の辺中央で卓越した。また、帯鉄筋間隔が密であると、ひび割れ本数が増加し、ひび割れが分散する傾向にあった。

最大耐力時のひび割れは、隅角部にまでひび割れが進展しており、その本数、幅ともに部材降伏時よりも増加した。また、最大耐力直前では斜めひび割れ以外に赤線で示した軸方向のひび割れが発生し、主に部材中央位置における隅角部の主鉄筋に沿って確認された。この点に関する考察は、4.で述べる。

3.4 鉄筋ひずみ

実験に際し、写真-1に示すA～D断面の各断面において、図-1のように主鉄筋に10箇所、帯鉄筋に8箇所のひずみゲージを貼付け、鉄筋ひずみを測定した。

図-6、7に供試体No.1及びNo.2の正側載荷時の各ループの最大ねじり角における鉄筋ひずみを示す。鉄筋ひずみは写真-2に示すようにかぶりが剥離し、破壊に寄与したと想定されるC断面のひずみ値を採用し、ねじりモーメントの包絡線を併せて示した。主鉄筋には初期軸力により圧縮ひずみが一様に生じたが、部材降伏以前は同一の圧縮ひずみを保った。部材降伏以後は、最大耐力まで引張ひずみが一様に上昇した。最大耐力以後は、ひずみが断面内で分布し、特に隅角部の主鉄筋CJ5では大きな圧縮ひずみが生じていた。主鉄筋の降伏はどの供試体においても確認されなかった。

また、部材降伏以前は帯鉄筋ひずみがほぼ0であったのに対し、部材降伏以後は主鉄筋と同様に引張ひずみが一様に生じ始め、最大耐力到達後は減少に転じた。No.2において、位置によって帯鉄筋ひずみが異なるのは、帯鉄筋間隔が疎なため、1本のひび割れが卓越しやすく、ひび割れ直下のひずみが増大するためと考えられる。帯鉄筋降伏は帯鉄筋間隔が疎な供試体であるNo.2のC断面とNo.4のD断面で確認された。帯鉄筋間隔が密な供試体No.1及びNo.3では帯鉄筋降伏は確認されなかった。

4. 純ねじり破壊メカニズムに関する考察

部材降伏以前においては、主鉄筋ひずみと帯鉄筋ひずみは全ての供試体でほとんど変化しないため、充実断面と同様に、部材降伏までは主としてコンクリートがねじりモーメントを負担したと考えられる。このため、中空断面の壁厚60mm、100mm、充実断面と壁厚を厚くすると、コンクリートの有効

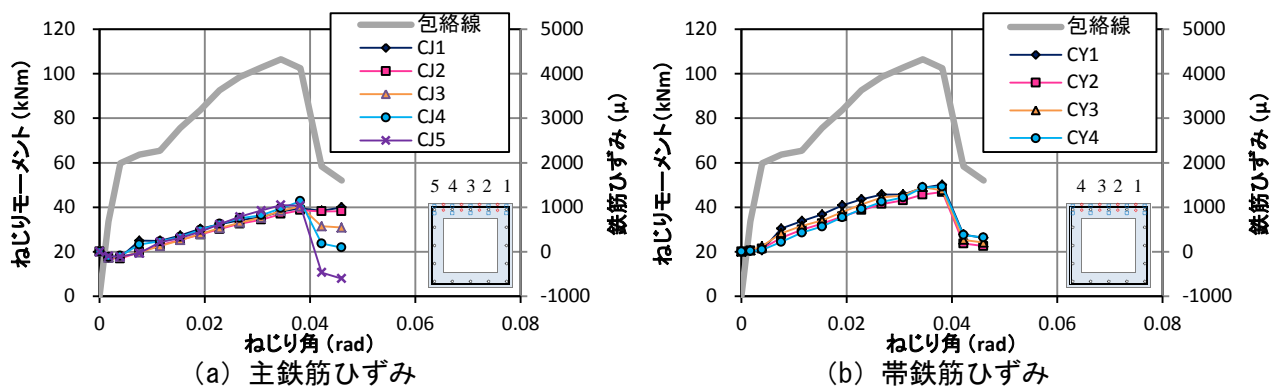


図-6 鉄筋ひずみ包絡線とねじりモーメントとの関係 (No. 1)

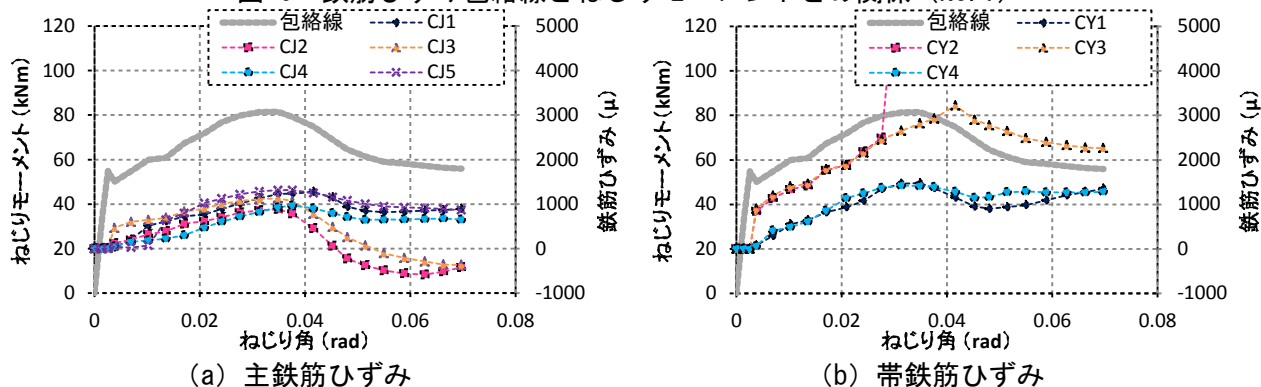


図-7 鉄筋ひずみ包絡線とねじりモーメントとの関係 (No. 2)



(a) 軸方向ひび割れの進展

(b) かぶりの剥離

写真-2 供試体 No. 1 の破壊メカニズム (側面)

断面が大きくなり、ひび割れ耐力及び部材降伏耐力も大きくなったと考えられる。また、帯鉄筋間隔の影響が小さかったのもコンクリートのみが負担したためと考えられる。

部材降伏以降は、主鉄筋及び帯鉄筋に引張ひずみが生じ始めるため、ねじりモーメントをコンクリートと鉄筋の両方で負担すると考えられる。また、主鉄筋ひずみ、帯鉄筋ひずみはどの位置でもほぼ一様に生じたため、部材降伏から最大耐力にかけては、部材全体が一様にねじられる立体トラス形式³⁾によりねじりモーメントに対して抵抗すると考えられる。

最大耐力直前では、図-5及び写真-2に示すような隅角部主鉄筋に沿ったひび割れが発生し、卓越した。これは、全ての供試体で確認することができた。この軸方向ひび割れは、せん断破壊の1つであるせん断付着破壊⁸⁾と類似する。せん断付着ひび割れには、コンクリートと鉄筋の付着が破壊されることにより急激な耐力低下を引き起こす特徴がある。隅角部の鉄筋に沿ってのみひび割れが発生したのは、主鉄筋近傍から生じたひび割れが主鉄筋の並びに沿って連結し、そのひび割れが部材表面まで進展した⁹⁾と推定される。軸方向ひび割れが斜めひび割れと連結すると、写真-2(b)のようにかぶり剥離の発生を助長させる。かぶりが剥離するとコンクリートの有効断面が減少するため、剥離した周辺のコンクリートに対して局所的なひずみが発生し、コンクリートの圧壊を発生させ、脆性的な破壊となる。図-3(a)のように、帯鉄筋間隔が密で、中空断面供試体であるNo.1, No.3において脆性的な破壊を示したのは、中空断面であるためにかぶり剥離が生じた後に負担しうるコンクリートの有効断面が小さくなったためと考えられる。このため、壁厚が薄いNo.1供試体ではその影響が顕著であったといえる。一方、帯鉄筋間隔が疎な供試体No.2及びNo.4では、最大耐力以前でコンクリートの圧壊に先行して帯

鉄筋降伏が発生したため、ねじり変形が帯鉄筋に集中し、靱性に富む破壊を示したと考えられる。充実断面の場合、中空断面とは異なり、帯鉄筋間隔によらず帯鉄筋降伏が先行した破壊を呈し、帯鉄筋が密なほど靱性のある破壊を示した。

図-6(a)及び図-7(a)より、最大耐力以後はかぶり剥離が確認された位置の主鉄筋ひずみが断面の辺中央を原点とした直線的な分布を示した。このため、最大耐力以降はねじり変形によるひずみが部材全体に生じる立体トラス形式から、ねじり変形によるひずみが局所的に集中する斜め曲げ形式³⁾に移行したと考えられる。

以上より、中空断面を部材断面として採用する場合、帯鉄筋間隔を密にすることで最大耐力を向上させることができる。また、充実断面に比べひび割れ耐力及び部材降伏耐力は低下するが、充実断面とはほぼ同程度の最大耐力が確保される。ただし、壁厚が薄いとせん断付着ひび割れと思われる軸方向に沿ったひび割れの進展とそれに伴うかぶり剥離の影響が顕著に表れる。かぶり剥離はコンクリートの圧壊に伴う脆性的破壊を引き起こす場合があり、靱性の観点からは十分な壁厚を確保することが望ましいといえる。

5. まとめ

本研究によって得られた知見をまとめると以下のようである。

- 1) 中空断面部材についても、部材降伏点が存在することが確認できた。ひび割れから部材降伏にかけての耐力上昇は、充実断面部材に比べ大きいことがわかった。
- 2) 壁厚の影響はひび割れ耐力、部材降伏耐力及び最大耐力後の靱性に対して顕著に表れた。また、帯鉄筋間隔の影響は最大耐力に対して大きいことが明らかとなった。
- 3) 破壊メカニズムは充実断面と同様に、立体トラス形式から斜め曲げ形式へと移行すると考えられる。
- 4) 中空断面の特徴として、充実断面と同一鉄筋量であっても脆性的な破壊を示すことが明らかになった。これは、せん断付着ひび割れと思われる軸方向ひび割れの進展によりかぶり剥離が発生した際に、ねじりモーメントを負担しうるコンクリート有効断面が少なく、かぶり剥離の影響を顕著に受けるためと考えられる。

参考文献

- 1) 大塚久哲, 竹下永造, 浦川洋介: 軸力, 曲げ/せん断, 及びねじりの複合荷重を同時に受けるRC部材の耐震性能と相関特性, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.123-139, 2005.
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料-PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜長橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例-, 3. 鉄筋コンクリートアーチ橋の設計計算例, pp.49-52, 1998.
- 3) 秦逸平, 大塚久哲, 箆島隆司, 陶媛媛: コンクリート系部材のねじり破壊メカニズムに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.3, pp.745-750, 2009.
- 4) 大塚久哲, 服部匡洋: ねじりと曲げの相関曲線及びねじり非線形を考慮した動的解析手法の提案, 土木学会論分集A1 (構造・地震工学) Vol.67 (2011), No.4, [特]地震工学論文集, Vol.32, 2012.
- 5) 箆島隆司, 大塚久哲, 福永靖雄, 山崎智彦: 曲げとねじりを受ける3室中空断面RC部材の力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.691-696, 2010.
- 6) 大塚久哲, 箆島隆司, 今村 壮宏: CFS巻き立て補強を施した3室中空断面RC部材の複合荷重下における力学特性に関する研究, 土木構造・材料論文集, 第27号, pp53-60, 2011.
- 7) 大塚久哲, 秦逸平, 宇山友理: 純ねじり荷重を受けるRC部材の三次元非線形有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.55A, pp1048-1057, 2009.
- 8) 小林和夫: 基礎土木工学シリーズ6 コンクリート構造学, pp.75-96, 森北出版, 2002.
- 9) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究. 土木学会論文報告集. 第294号. pp85-100.1980.