

中空断面柱部材に対する純ねじり交番載荷実験の シミュレーション解析

服部匡洋¹・大塚久哲²・梶田幸秀³・崔準祐⁴

¹学生会員 工修 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻博士後期課程
(〒819-0389 福岡県福岡市西区元岡744)

²フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

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うる部材に対して初期剛性GJ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、RC部材の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思われる。

このため、本研究では充実断面、3室箱桁中空断面を有する部材に対する純ねじり及びねじりと曲げの正負交番載荷実験^{1),3),4)}を実施し、RC部材のねじりに対する耐荷機構や破壊メカニズムを明らかにした。また、ねじりの非線形性を考慮した非線形動的解析を実施するために必要なねじり骨格曲線やねじりと曲げの相関曲線等の提案を行った⁵⁾。ただし、これらの提案式は、各断面に対して個々に定式化されたため、他断面に対する汎用性が不明である。以上より、様々な断面に対して適用可能なねじり骨格曲線の提案を目的とし、新たに壁厚と帯鉄筋間隔を変化させた1室中空断面に対する純ねじり交番載荷実験を実施し、純ねじり履歴曲線や骨格曲線に対する壁厚や帯鉄筋間隔の影響を明らかにした。

本研究では、この中空断面柱部材の純ねじり交番載荷実験に対するシミュレーション解析を実施し、ねじり履歴曲線やイベント耐力、ひび割れ進展状況、鉄筋ひずみに対する3次元非線形FEM解析の再現性を検証した。また、実験及び解析より得られたひび割れ分布や鉄筋ひずみ、イベント到達状況より、本断面柱の破壊メカニズムについて詳細に考察した。

2. 中空断面に対する純ねじり交番載荷実験

写真-1に供試体のセットアップ状況を示す。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。また、帯鉄筋にはD6を使用した。

表-1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。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⁶⁾。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。また、初期軸応力としては、全ての実験ケースに対してコンクリート設計基準強度の10%である4.0N/mm²の初期軸応力を与えた。

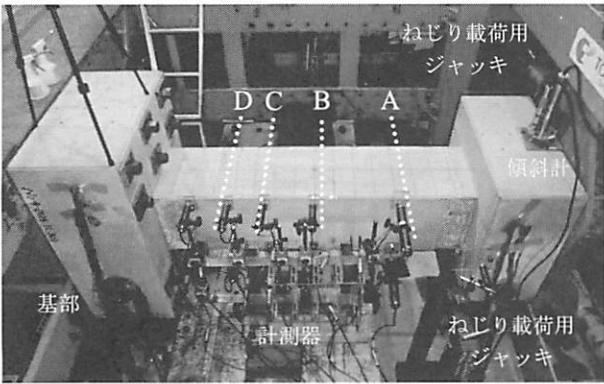


写真-1 実験供試体セットアップ状況

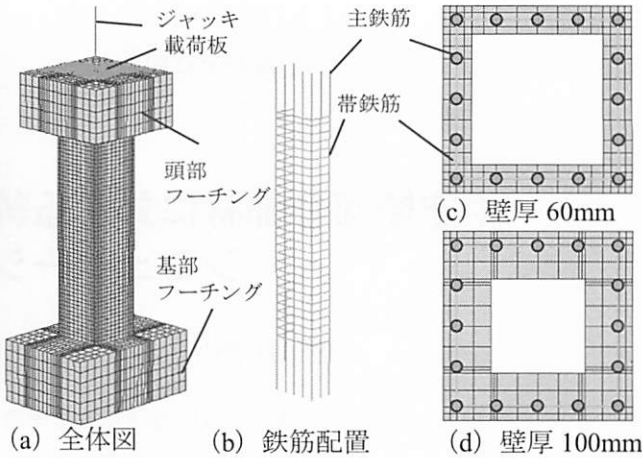


図-1 解析モデル概要

3. 解析モデル概要及び解析手法

解析モデル概要を図-1に示す。表-1に示した4体に対してシミュレーション解析を実施した。図-1に示すように、コンクリートはソリッド要素、主鉄筋及び帯鉄筋はトラス要素、頭部フーチング上端の載荷板とジャッキを剛梁要素でモデル化した。

解析手法については、非線形有限要素解析ソフトFINALを使用し、コンクリート及び鉄筋の材料特性は表-1の材料試験結果を使用した。柱部分のコンクリート要素は、ひび割れを分布ひび割れモデルで表現し、非線形特性については、FINALに組み込まれているモデルの中から以下のものを選定した。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係には修正Ahmadモデルを使用した。ただし、かぶりコンクリートの圧縮軟化域特性には、コンクリートの圧壊及び剥離を計算上考慮するために、かぶりコンクリートモデルを用いた。テンションスティフニング特性には出雲らのモデルを、ひび割れ後のせん断伝達特性には長沼の提案モデルを使用した。また、鉄筋の繰り返し応力下の履歴特性として、Ciampiらにより提案された修正Menegotto-Pintoモデルを用いた。なお、コンクリートと鉄筋の付着は完全付着とした。ジャッキ天端に鉛直荷重及び強制回転変位を与えることで、初期軸力とねじりモーメントを載荷した。

4. 3次元非線形FEM解析の再現性

(1) 純ねじり履歴曲線及びイベント耐力

図-2に実験及びFEM解析により得られた純ねじり履歴曲線の比較を示す。ここで、純ねじり履歴曲線の実験結果において、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。ねじり角は頭部フーチングに設置した傾

表-1 検討ケース及び材料試験結果

パラメータ	No.1	No.2	No.3	No.4
軸応力比 (%)	10	10	10	10
壁厚 (mm)	60	60	100	100
帯鉄筋間隔 (mm)	30	60	30	60
圧縮強度 (N/mm ²)	60.3	61.6	57.4	68.7
ヤング率 (N/mm ²)	27800	27100	25100	28800
引張強度 (N/mm ²)	3.5	3.6	3.4	3.9
主鉄筋比 (%)	2.48	2.48	1.69	1.69
帯鉄筋体積比 (%)	1.88	0.94	1.28	0.64

表-2 イベント耐力の比較

イベント耐力	No.1	No.2	No.3	No.4
ひび割れ (kNm)	実験 33.7 解析 53.4	34.2 54.0	39.3 61.6	47.9 69.4
部材降伏 (kNm)	実験 59.8 解析 63.0	53.9 60.6	72.1 76.7	79.0 84.8
最大 (kNm)	実験 106.6 解析 108.0	80.7 88.3	107.0 105.5	90.7 93.6

斜計の測定値を使用した。また、解析におけるねじりモーメントは載荷点（ジャッキ天端）の部材軸周りの反力を、ねじり角は実験と同位置の回転変位を出力した。また、図-2に示す履歴曲線の解析結果は、計算が安定して行われた時点までのものである。

図-2より、全てのケースにおいて、初期剛性や部材降伏以後の剛性、除荷勾配は比較的精度よく再現した。しかし、最大耐力以後の靱性に着目すると、No.1の実験では、最大耐力直後に急激な耐力低下が見られるのに対し、解析では最大耐力以後も靱性を保持した。実験の最大耐力直前では、写真-2に示すような付着割裂ひび割れと思われる主鉄筋軸方向のひび割れが確認された。軸方向ひび割れが発生すると、コンクリートと鉄筋の付着が消失するとともに、かぶり剥離が助長される。実験で最大耐力以後に急激な耐力低下が見られたのは、このかぶり剥離による有効断面の減少が原因であると考えられる。一方、解析では、図-3に示すように、隅角部での軸方向ひ

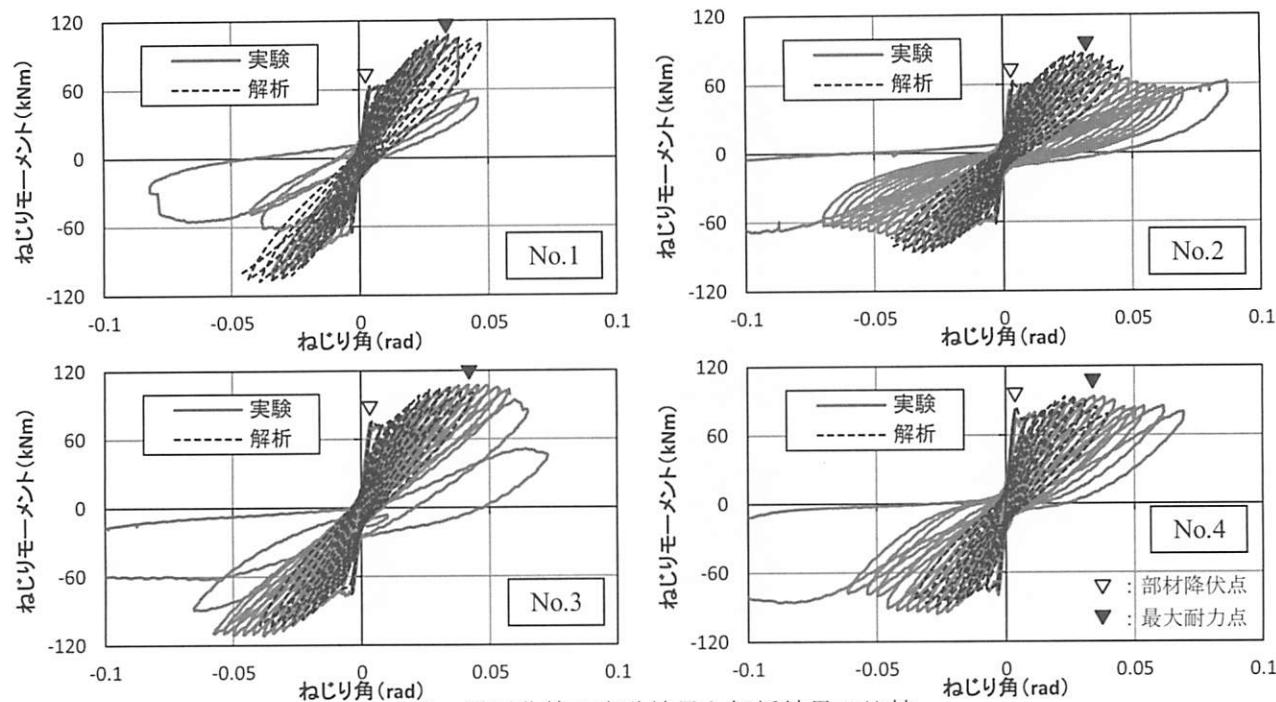


図-2 履歴曲線の実験結果と解析結果の比較

び割れが確認できず、また断面辺中央で多くの圧縮軟化要素が発生した。解析において隅角部の軸方向ひび割れやそれに伴うかぶり剥離を再現できなかったため、最大耐力後の靱性を大きく評価したと考えられる。また、壁厚の厚いNo.3, No.4についても、最大耐力到達後の靱性を再現するに至らなかった。これも、No.1と同様に、本解析モデルではコンクリートと鉄筋の付着性状を適切に表現できていないことが原因であると考えられる。

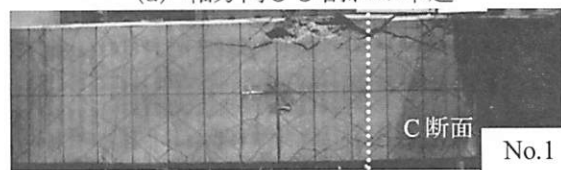
表-2にイベント耐力の比較を示す。表-2より、ひび割れ耐力は、解析値が実験値に比べ大きいことがわかる。これは、解析において、頭部、基部フーチングによるそり拘束の影響が小さく評価されたためと考えられる。また、部材降伏耐力は壁厚が厚いほど、最大耐力は帯鉄筋間隔が密なほど向上することが実験結果より考察されるが、解析においても同様の傾向を示した。したがって、部材降伏耐力、最大耐力に対する再現性は良好であるといえる。

(2) ひび割れ進展状況

図-4に部材降伏時のひび割れ分布状況の比較を示す。ここで、左図が実験でのひび割れ、右図が解析でのひび割れ分布を表す。全ての解析ケースにおいて、ひび割れの断面辺中央からの発生が確認され、実験を良好に再現した。また、軸応力の影響により、正側載荷時の部材軸に対するひび割れ角度が45度より小さくなる傾向も再現した。負側載荷時のひび割れについては、正側載荷時にひび割れが発生することにより、ひび割れ方向のせん断剛性及びせん断応力が低下するため、部材軸に対するひび割れ角度が



(a) 軸方向ひび割れの卓越



(b) かぶりコンクリートの剥離 (最大耐力)

写真-2 最大耐力時のひび割れ状況 (実験)

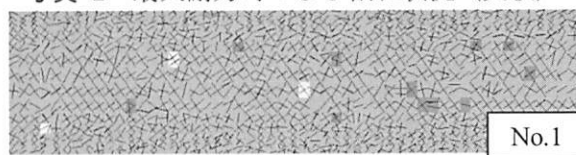


図-3 最大耐力時のひび割れ状況 (解析)

正側載荷時に比べて大きくなったと考えられる。図-5に最大耐力時のひび割れ分布状況の比較を示す。図-5より、部材降伏時に断面辺中央付近で発生していたひび割れが隅角部に向かって進展していく様子も再現された。しかし上述の通り、図-5赤線で記した軸方向ひび割れは再現されなかった。軸方向ひび割れは、付着割裂ひび割れと呼ばれる鉄筋の節とその近傍のコンクリートの界面から生じる内部ひび割れの進展と予想される。本解析モデルでは、鉄筋の節やリブを詳細にモデル化していないため、内部ひび割れが再現されなかったと考えられる。

(4) 帯鉄筋ひずみ及び主鉄筋ひずみ

図-6, 図-7に正側載荷時の各ループにおける最大

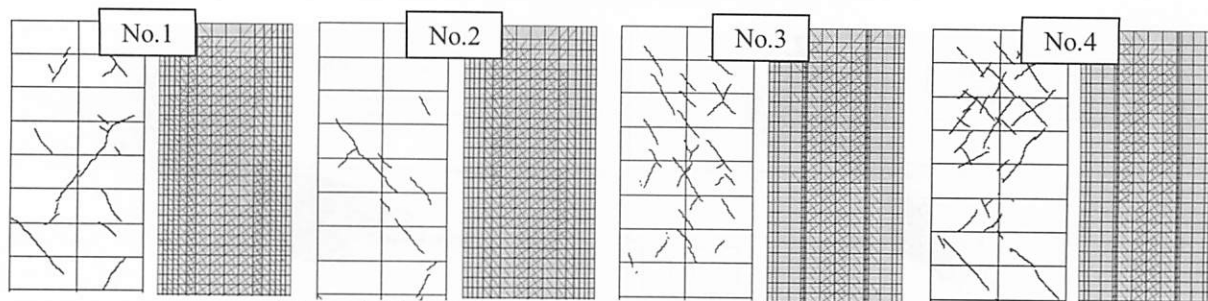


図-4 部材降伏時のひび割れ分布の比較（頭部側上面）

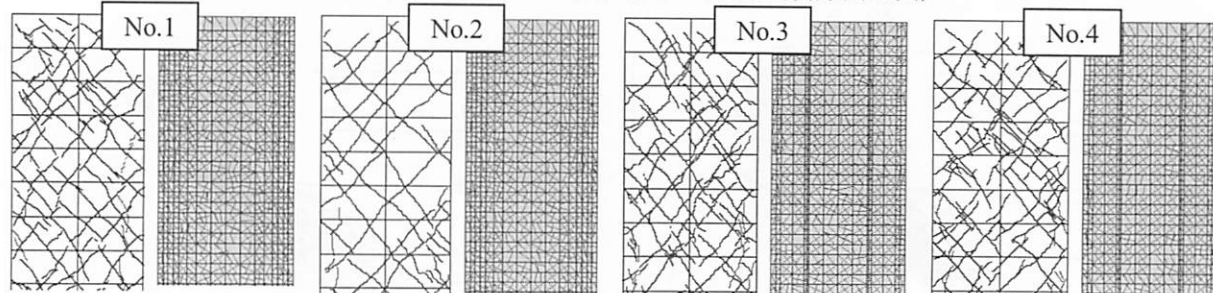


図-5 最大耐力時のひび割れ分布の比較（頭部側上面）

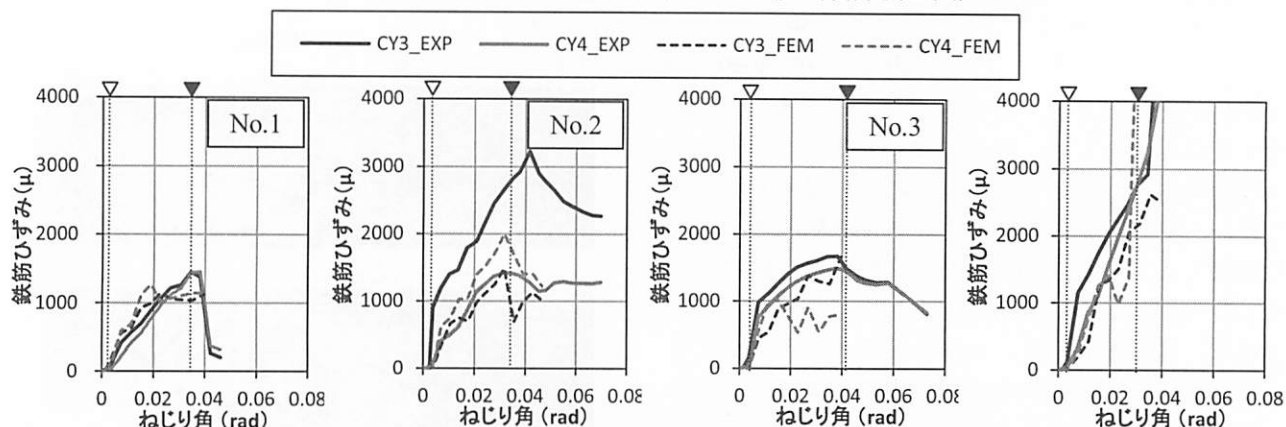


図-6 危険断面における帯鉄筋ひずみと最大ねじり角の関係

帯鉄筋、主鉄筋ひずみと最大ねじり角の関係を示す。実験に際し、写真-1に示すA～D断面の各断面において、図-8に示す主鉄筋に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。本稿では、軸方向ひび割れとそれに伴うかぶり剥離が生じたC断面を危険断面とし、図-8に示した鉄筋ひずみの内、隅角部に位置する帯鉄筋（CY3,CY4）と主鉄筋（CJ4,CJ5）に着目した。主鉄筋鉄筋引張試験より得られた降伏ひずみは、主鉄筋（D13）で2095 μ 、帯鉄筋（D6）で1950 μ であった。解析における鉄筋ひずみは実験と同一位置のものを抽出した。

図-6より、実験、解析ともに部材降伏までは帯鉄筋ひずみがほとんど発生せず、解析は実験を良好に再現した。また、部材降伏後の鉄筋ひずみの増加傾向は比較的類似したが、ほぼ全ての帯鉄筋において、解析のひずみが実験のひずみよりも小さかった。これは、解析においてコンクリートのテンションステイニング特性が大きく評価されたため、コンクリートが負担する応力負担分が実験と比べて増加し、鉄筋に生じるひずみが減少したと考えられる。また、

帯鉄筋間隔が疎なNo.2及びNo.4では、実験において帯鉄筋降伏が確認されたが、解析でも実験よりわずかに早くではあるが帯鉄筋降伏が発生しており、再現性は良好であるといえる。

また図-7より、主鉄筋についても、実験、解析ともに、部材降伏までは初期軸力による圧縮ひずみが生じているのみで、変化しなかった。部材降伏後に鉄筋ひずみが増加し始める傾向は解析で捉えられていたが、そのひずみ量は実験に比べて小さい。これは、帯鉄筋と同様に、コンクリートのテンションステイニング特性が実験よりも大きく評価されたためと考えられる。さらに、No.1の実験において、最大耐力直前で隅角部の主鉄筋に急激な圧縮ひずみが生じたが、解析では発生しなかった。実験で隅角部主鉄筋の圧縮ひずみが増大したのは、かぶり剥離による有効断面の減少により、初期軸力に対する主鉄筋の負担分が大きくなったためと予想される。上述の通り、解析において、軸方向ひび割れやそれに伴うかぶり剥離が詳細に再現できなかったことがこの圧縮ひずみを再現できなかった原因と考えられる。

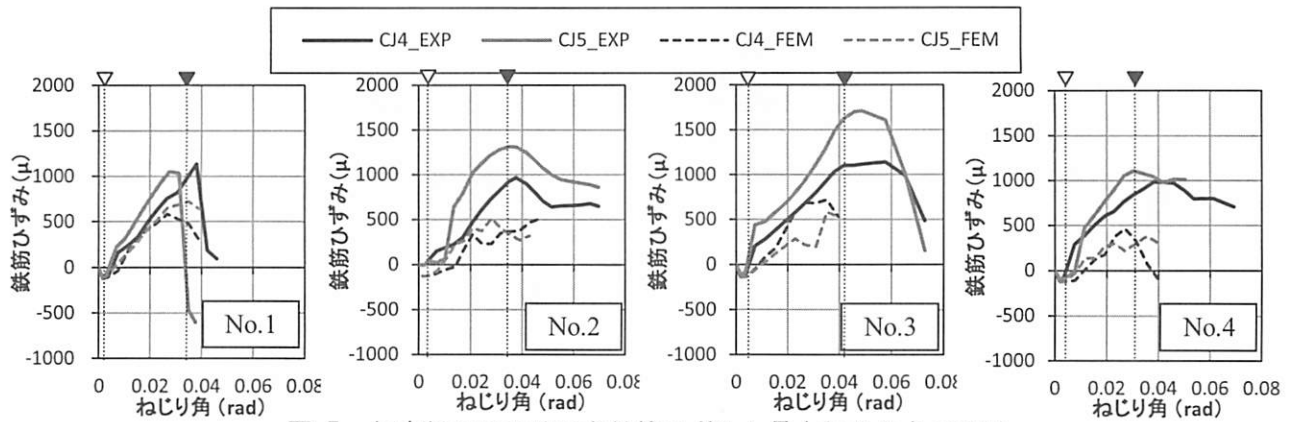


図-7 危険断面における主鉄筋ひずみと最大ねじり角の関係

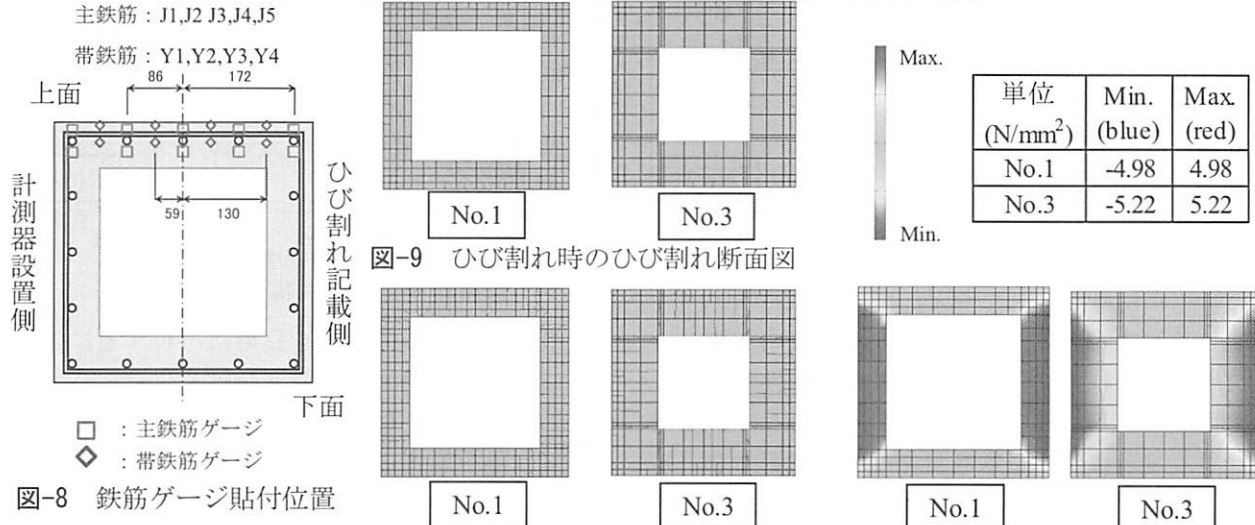


図-8 鉄筋ゲージ貼付位置

図-9 ひび割れ時のひび割れ断面図

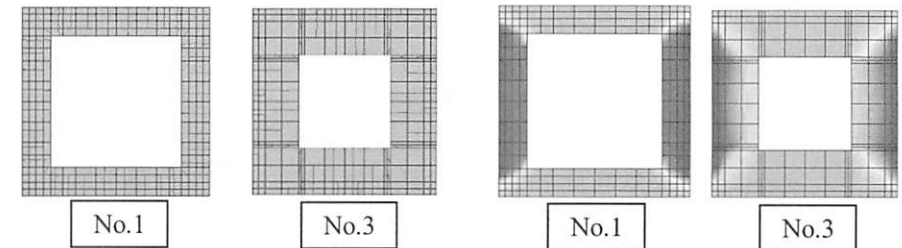


図-10 部材降伏時のひび割れ断面図 図-11 部材降伏時のせん断応力分布

5. FEM解析による破壊メカニズムに対する壁厚の影響に関する考察

図-9、図-10にNo.1とNo.3のひび割れ及び部材降伏時の柱中央部のひび割れ断面図を示す。部材降伏までは鉄筋ひずみが生じないため、主としてコンクリートがねじりに対して抵抗していると考えられる。このため、部材降伏に対する帯鉄筋間隔の影響は小さく、壁厚の影響は大きいと予想される。図-10より、壁厚の異なるNo.1とNo.3に着目すると、中空断面の場合でも、断面辺中央付近で発生したひび割れが徐々に内面に向かって進展し、内面にまで到達すると部材降伏が発生することが確認された。また、壁厚が薄い場合、部材全体のひび割れが内面まで到達したのに対し、壁厚が厚い場合は断面辺中央のひび割れのみが内面に到達した。図-11に示すせん断応力分布の比較より、No.1のように壁厚が薄い場合の部材降伏時には、中空の外周面と内面、断面辺中央と隅角部ではほぼ同等のせん断応力が発生していることがわかる。つまり、壁厚内で一様にせん断応力が発生する状態に近い。このため、部材表面の広範囲でひび割れが発生するとともに、内面にひび割れが到達するのが早く、部材降伏耐力が小さかったと

考えられる。一方、No.3のように壁厚が厚い場合、部材降伏時のせん断応力分布は、内面に比べて外周面でのせん断応力が大きく、また隅角部周辺より断面辺中央でのせん断応力が大きいことから、断面内でせん断応力が分布することがわかる。このせん断応力分布の違いが部材降伏耐力及び部材降伏時のひび割れ進展状況の違いを生じさせたと考えられる。

部材降伏後の剛性や最大耐力に関しては、帯鉄筋間隔の影響が大きい。これは、充実断面に対する純ねじり交番載荷実験でも同様の傾向が確認された。詳細な考察は参考文献3)を参照されたい。

最大耐力後の靱性に対しては、壁厚、帯鉄筋ともに影響が大きい。図-6より、帯鉄筋が疎なNo.2、No.4では、帯鉄筋降伏が最大耐力以前に発生するため、靱性に富む破壊を示したと考えられる。一方、No.1、No.3については、帯鉄筋が密に配置されているために、各鉄筋に生じるひずみが減少するのに対し、外周のコンクリートには大きな圧縮ひずみが生じる。このため、図-11に示すように、帯鉄筋が密になると小さなねじり角でコンクリートの圧壊が発生し、脆性的な破壊を示すと思われる。ただし、実験において、No.3がNo.1に比べて靱性を有したのは、壁厚が厚いため、かぶり側のコンクリートが損傷し

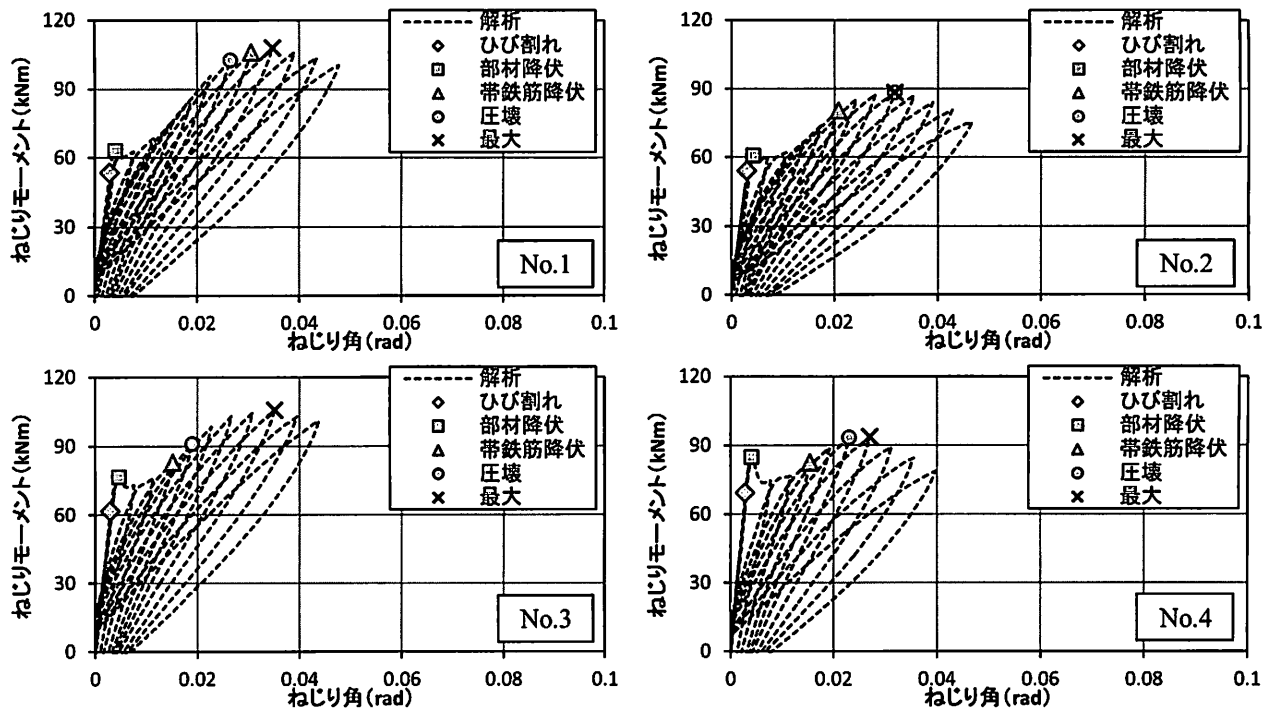


図-11 有限要素解析におけるイベント到達状況と履歴曲線

ても、それまで有効に働いていなかった内面側のコンクリートが代わりに負担することで靱性が向上したと考えられる。このため、ねじりに対して断面補強を行う場合には、帯鉄筋量を増やして耐力を上昇させるだけでなく、壁厚を増すことで靱性を向上させることが望ましいといえる。

6. まとめ

本研究では、中空断面柱部材に対する純ねじり交番載荷実験のシミュレーション解析を実施し、FEM解析の再現性を確認した。以下に知見を記す。

- 1) FEM解析は、最大耐力までの純ねじり履歴曲線、除荷勾配を精度よく再現した。また、ひび割れ耐力は大きく評価するが、部材降伏耐力、最大耐力は良好に再現した。しかし、付着割裂ひび割れ及びそれに伴うかぶり剥離が再現されなかったため、解析では靱性を大きく評価した。
- 2) ひび割れ発生位置やひび割れの進展状況、正側載荷時のひび割れ角度は精度よく再現された。
- 3) 部材降伏まで鉄筋ひずみが発生しない点は解析で再現された。部材降伏後の鉄筋ひずみの増加傾向も比較的再現できたが、解析は鉄筋ひずみを小さく評価した。
- 4) 中空断面においても、部材降伏が確認され、その現象が内面へのひび割れ到達により発生することを明らかにした。また、壁厚が部材降伏耐力、最大耐力後の靱性に及ぼす影響を示した。

- 5) 最大耐力以後の挙動を良好に再現するには、テンションスティフニング特性や付着すべりを適切に評価し、付着割裂ひび割れや隅角部のかぶり剥離を詳細にモデル化することが重要である。

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，笈島隆司，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) 笈島隆司，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。
- 5) 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，土木学会論文集A1(構造・地震工学) Vol.67(2011)，No.4，[特]地震工学論文集，Vol.32，2012。
- 6) 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，pp.1048-1057，2009。