

ねじりの単調・交番荷重を受ける RC 部材の三次元非線形有限要素解析

九州大学大学院 学生会員 ○ 秦 逸平
九州大学大学院 学生会員 宇山 友理
九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲

1. 目的

現在の RC 部材の設計においては、曲げとせん断に対して安全性を検討するのが一般的であり、ねじりの影響は 2 次的なものとして扱われているが、当研究室ではねじりの影響の詳細な考慮が橋の耐震性能の評価に必要である¹⁾として、数多くの供試体による実験が行われてきた。一方、RC 部材の挙動を数値計算によって把握する手法として有限要素解析があるが、ねじりの交番荷重を受ける RC 部材の解析は、三軸応力状態や交差するひび割れを表現する必要があり、難しいとされてきた。

そこで本研究では、ねじりを受ける RC 部材の挙動を解析的に明らかにすることを目的とした。そのために、当研究室で行ってきた実験のうち、純ねじり荷重を与えた 7 ケースを対象に三次元非線形有限要素解析を行い、特に履歴曲線、ひび割れ、鉄筋のひずみに着目して考察を行った。

2. 実験、解析概要

実験供試体を図 - 1 に示す。柱部分は $400 \times 400 \times 1600\text{mm}$ で、帯鉄筋は D6 を、主鉄筋は D13 を 16 本配置した。コンクリートの設計基準強度は全て 40N/mm^2 であるが、材齢等の関係で強度は供試体により異なる。パラメータは軸力（設計基準強度の 0, 5, 10%）と帯鉄筋間隔（ctc 30, 60mm）で、ねじりの正負交番、または単調漸増荷重を与える実験を行った。図 - 1, 2 にそれぞれ載荷装置とねじりジャッキの図面を示す。ねじり荷重は、頭部フーチングを固定した頭部固定用架台に 2 本のねじりジャッキで等しく荷重を加えることで与える。載荷では、まず所定の軸力を与え、その後ねじりの単調または交番載荷を行う。正負交番載荷では、各ループの最大ねじり角を降伏ねじり角の整数倍で与え、単調漸増載荷では 1 方向に徐々にねじり荷重を与えた。

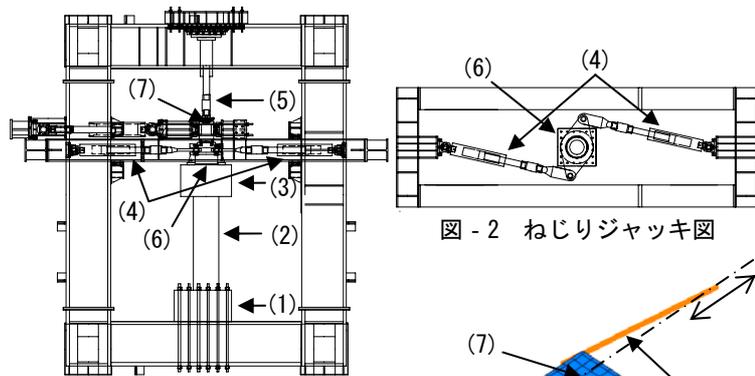


図 - 1 実験供試体、載荷装置図

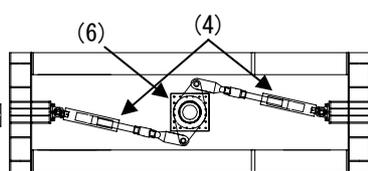


図 - 2 ねじりジャッキ図

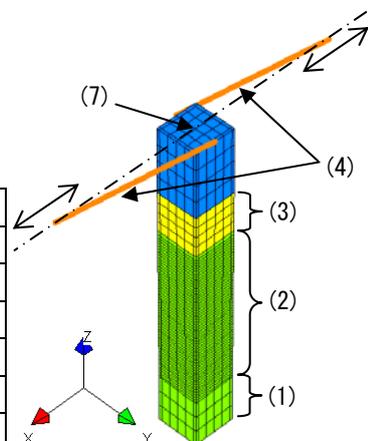


図 - 3 解析モデル

解析には FEM 解析ソフト FINAL²⁾を用いた。

図 - 3 に ctc 30mm の解析モデルの全体図を示す。基部と頭部のフーチングは柱部分と同じ断面とし、頭部フーチングの上端から軸力の載荷点までは剛体でモデル化した。また、ねじり荷重を与えるために剛なトラス要素でねじりジャッキをモデル化した。鉄筋は実験供試体と同様に配置し、コンクリートと完全付着のトラス要素でモデル化した。境界条件は基部フーチングの側面と底面、計 5 面の節点を固定とした。柱部分のコンクリート六面体要素に与えた特性を表 - 1 に示す。ねじり荷重は図 - 3 の鎖線上を自由にスライドするジャッキ端部に x 軸方向の荷重または強制変位を与えることで作用させた。交番載荷の解析では各ループの最大ねじり角が実験のねじり角と一致するような強制変位をジャッキ端部に与えた。

図 - 1, 2, 3 の凡例

| | |
|-----|---------|
| (1) | 基部フーチング |
| (2) | 柱部分 |
| (3) | 頭部フーチング |
| (4) | ねじりジャッキ |
| (5) | 軸力ジャッキ |
| (6) | 頭部固定用架台 |
| (7) | 軸力の載荷点 |

キーワード 三次元非線形有限要素解析, RC 部材, ねじり実験, 交番載荷, 帯鉄筋間隔, 初期軸力

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 TEL 092-802-3374

表 - 1 材料モデル

| | |
|--------------|--------------------|
| 圧縮強度 | 材料試験値 |
| 圧縮応力-ひずみ | 修正 Ahmad |
| 破壊条件 | Ottosen の 4 パラメーター |
| テンションスティフニング | 出雲ら $c=0.4$ |
| せん断伝達 | Al-Mahaidi |

表 - 2 検討ケース

| ケース番号 | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 | No.7 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 荷重方法 | 交番 | | | | | | 単調 |
| ctc (mm) | 30 | | | 60 | | | 30 |
| 軸力 (%) | 0 | 5 | 10 | 0 | 5 | 10 | 10 |
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 33.4 | 31.9 | 35.3 | 34.1 | 34.8 | 45.7 | 52.7 |

3. 結果

図 - 4 にケース No.1, 3, 7 のねじりモーメント - ねじり角 ($M_t - \theta$) 関係を示す。図には実験と解析でのイベント発生時点をそれぞれ○と◇で示した。解析結果は安定に計算できた点までを示す。ここで、実験のイベント (○) は、ひび割れが初めて確認されたループの最大変位を示し、解析のイベント (◇) は、 M_t の小さな順に、初ひび割れ、帯鉄筋の内側までひび割れ進展、断面中心までひび割れ進展が起こった時点を示す。

実験結果の比較により、繰返し荷重により耐力と変形性能が大きく低下すること、軸力により耐力が上昇すること、帯鉄筋比が小さいと降伏直後に最大耐力を迎え、負勾配の骨格曲線になること、軸力の増加に伴ってひび割れと部材軸のなす角が小さくなることなどが明らかになった。

解析結果より、ひび割れの進展によって剛性低下が起こり、断面の中心までひび割れが到達した時点で部材のねじり降伏が起こっていることがわかった。また、鉄筋のひずみに着目することで、ねじり降伏までは主にコンクリートがねじり荷重を受け持ち、降伏後は鉄筋がねじり荷重を負担することなどが明らかになった。

解析結果と実験結果を比較すると、初期剛性、降伏耐力はすべてのケースでほぼ一致しており、降伏までの挙動を精度よく評価できている。降伏以後については、単調載荷解析で二次剛性が大きく、耐力を過大評価し、交番載荷解析はケースにより実験の再現性に差があった。また、部材軸方向に一樣に生じる斜めひび割れの特徴を解析によって良く表現できた。

4. 結論

三次元非線形有限要素解析によって、ねじりを受ける RC 柱部材の降伏までの挙動を評価でき、ねじりに対する部材の降伏は柱全体に生じたコンクリートのひび割れが断面中心まで進展することで起きることなどが明らかとなった。また、解析によって、ねじりを受ける部材のひび割れの特徴を表現できた。しかし、降伏以後の挙動を正確に再現するには至っておらず、更なる解析精度の向上が必要である。

参考文献

- 1) 浦川, 大塚, 吉川, 角本: ねじり剛性の評価がラーメン橋の耐震性能照査に与える影響について, 第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集
- 2) (株) CRC ソリューションズ: FEM 解析ソフト FINAL

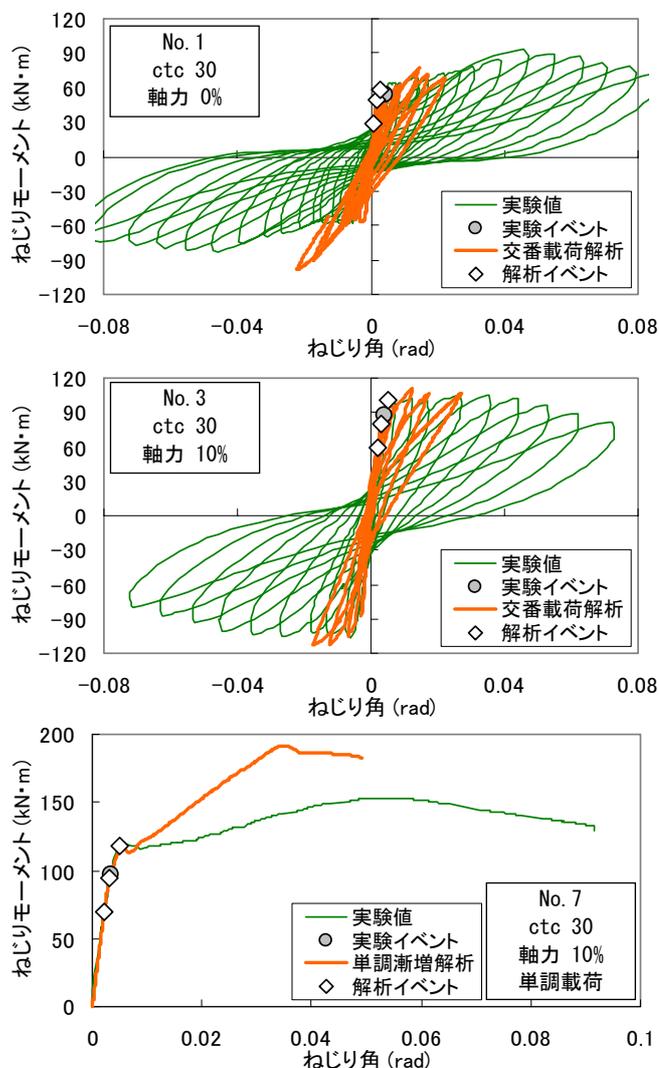


図 - 4 No. 1, 3, 7 のねじりモーメント, ねじり角関係