

ねじりを受ける RC 部材の降伏メカニズムに関する考察

九州大学大学院 学生会員 ○秦 逸平 九州大学工学研究院 フェロー 大塚 久哲
九州大学工学研究院 正会員 崔 準祐

1. はじめに

複雑な構造形式の橋梁の増加により、地震時にねじりを受ける RC 部材が増加している。従って、ねじりモーメントが作用する部材に対しては、その影響を厳密に考慮していくことが、安全で経済的な部材の設計につながると考えられる。

RC 部材のねじり挙動については、その実験例が少なく、明らかでない点が多い。本稿では、RC 部材のねじり降伏メカニズムについて、著者らの行った実験と、それらを対象とした FEM 解析結果を用いて考察する。

2. RC 部材のねじり降伏に関する既往の知見

ひび割れ発生前のねじり挙動は、この段階においてはひずみ量の小さな鉄筋の影響を無視した弾性理論で推定可能とされている。ひび割れ耐力は弾性理論により、断面内で最大のせん断応力度が生じる部分の最大主応力度が引張強度に達した時点として算出できる^{1,2)}。

一般的には、ひび割れ発生と同時に急激な剛性低下（以下、部材降伏と呼ぶ）が生じるとされており、また、弾性理論値は部材降伏耐力をかなり安全側に評価するといわれている¹⁾。ひび割れ後のねじり挙動に対して、弾性理論を等方性の完全弾塑性体に拡張した塑性理論が適用できるとの考え方もある²⁾。

一方で、著者らのねじり実験及び FEM 解析結果によると、ねじりひび割れ発生後も初期剛性を保ったまま荷重が上昇することが確認されている³⁾。

3. 検討対象、実験・解析概要

検討対象は、著者らが行った 400×400×1600mm の正方形充実断面 RC 柱に対する一定軸力下でのねじり交番荷重実験であり、実験ケースは帯鉄筋間隔と作用軸力をパラメータとした表 - 1 に示す計 6 体である。

表 - 1 検討ケース、実験・解析結果³⁾

供試体記号	S30N00	S30N05	S30N10	S60N00	S60N05	S60N10
帯鉄筋間隔(mm)	30	30	30	60	60	60
作用軸応力(N/mm ²)	0.0	2.0	4.0	0.0	2.0	4.0
圧縮強度(N/mm ²)	33.4	31.9	35.3	34.1	34.8	45.7
引張強度(N/mm ²)	3.9	3.4	4.1	2.7*	3.4	4.2
ヤング率(kN/mm ²)	22.8	22.8	23.9	20.6	23.0	27.3
ひび割れ耐力: 実験値 (kNm)	56.2	72.9	87.6	47.0	78.1	95.1
ひび割れ耐力: 解析値 (kNm)	48.6	57.6	76.7	53.9	58.2	79.6
部材降伏耐力: 実験値 (kNm)	63.6	88.4	98.5	60.6	81.0	103.8
部材降伏耐力: 解析値 (kNm)	76.3	83.2	107.2	56.4	83.6	111.0

*は入力ミスがあったため³⁾と異なる値となっている。

また、その実験を対象とした単調荷重の非線形 FEM 解析結果を考察に用いる。FEM 解析モデル図を図 - 1 に示す。実験で供試体の固定のために設けたフーチングも弾性体でモデル化し、コンクリートにはソリッド要素、鉄筋は完全付着を仮定したトラス要素を用いた。詳しい実験、解析概要は参考文献 3) を参照されたい。

実験では部材降伏までの繰り返し回数は基本的に 2 回としたことから、部材降伏までの挙動は単調荷重の FEM 解析により再現できるものとする。

4. 実験、解析結果概要

表 - 1 にひび割れ耐力と部材降伏耐力の実験結果と FEM 解析結果を示す。ひび割れ耐力は、実験でのひび割れ発見の遅れもあり、実験結果が解析結果より大きな値となった。部材降伏耐力は、解析で概ね再現できているといえる。S30N00 の実験と解析の差が大きいのは、実験での繰り返し回数が非常に多く、部材降伏までにコンクリートの損傷が進んだことが原因である。

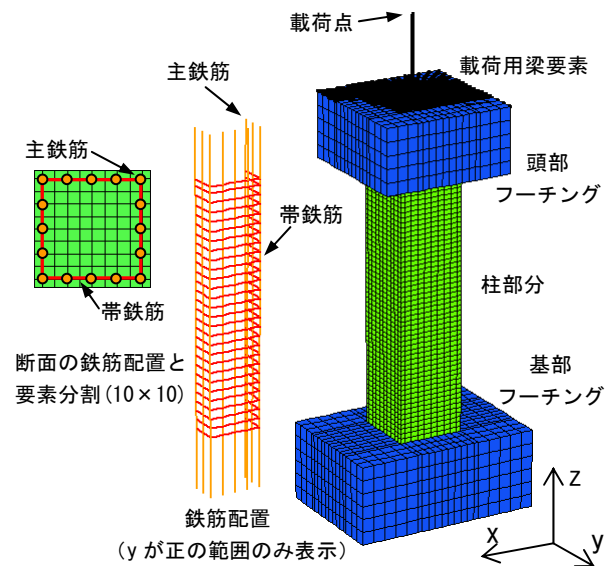


図 - 1 FEM 解析モデル図³⁾

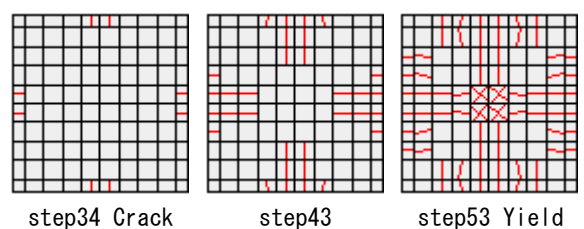


図 - 2 ひび割れ図 (S30N10)

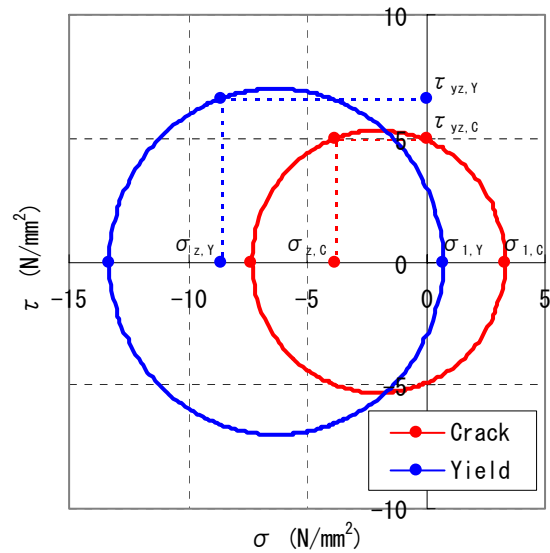
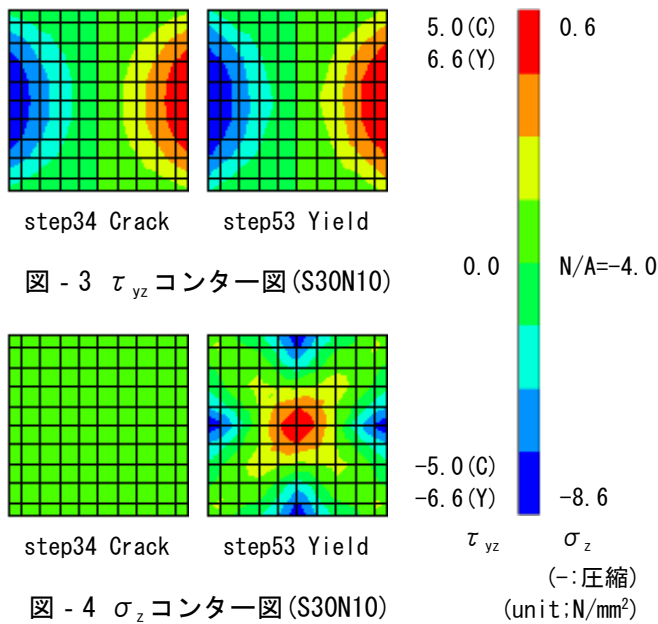


図 - 5 辺中央の応力状態 (S30N10)

5. 部材降伏メカニズム

5.1. ひび割れ状況

図 - 2 に FEM 解析より得られたひび割れ図を示す。荷重変位曲線より step53 が部材降伏点とみなしうが、この点はひび割れが断面中心まで進展した点に対応する。

5.2. 応力度分布

図 - 3 に FEM 解析より得られたせん断応力度 τ_{yz} 分布図を示す。図より、部材降伏時のせん断応力度分布はひび割れ時と概ね同一である。一方、図 - 4 に示す部材軸方向の垂直応力度 σ_z 分布はひび割れ時と部材降伏時で異なる。ひび割れ発生までは軸力を断面全体が一様に負担するのに対し、部材降伏時は σ_z が断面内で分布し、辺中央で最大となる。

ひび割れ後の挙動の解析に塑性理論が適用できるとの考え方もあるが、上記より、塑性理論は適用できないといえる。その原因はひび割れ後のコンクリートの強い異方性と軟化挙動であり、部材降伏までのせん断応力度分布は弾性理論に近いといえる。

5.3. 辺中央の応力状態

FEM 解析より得られた、ひび割れ時と部材降伏時の辺中央のモールの応力円を図 - 5 に示す。ひび割れ時は弾性理論の想定する応力状態と同一で、最大主応力 $\sigma_{1,C}$ は引張強度、 $\tau_{yz,C}$ に対応する $\sigma_{z,C}$ は軸応力 (-4.0N/mm^2) となる。一方、部材降伏時は、引張軟化により σ_1 は小さくなるものの、上記の軸力の負担性状の変化により σ_z が上昇して応力円が拡大し、ねじりモーメントに寄与するせん断応力度 τ_{yz} も上昇する。

5.4. 部材降伏メカニズムのまとめ

充実断面部材の場合、部材降伏はひび割れ発生時ではなく、ひび割れが断面中心まで進展した時点で生じる。ひび割れ発生から部材降伏までの荷重上昇域では、断面のせん断応力度分布がほぼ変わらないため概ね初期剛性を保つ。ひび割れ時は断面全体で一様に軸力を負担するが、部材降伏時は、辺中央に最大の軸圧縮応力度が生じるように分布して負担する。これによりねじりに寄与するせん断応力度が上昇し、部材降伏まで荷重が上昇する。

6. 考察

以上より、ひび割れ後に部材軸方向の垂直応力度が分布し得ない断面の小さな部材であれば、ひび割れ発生とほぼ同時に部材降伏するものと推察される。これまで一般的にひび割れと同時に部材降伏が生じるとされてきたのは、既往のねじり実験に用いられた供試体に比較的小さな断面の部材が多かったためであると考えられる。

部材降伏耐力を精度良く予測できれば、より厳密な部材の設計に有用であると考えますが、本稿に示した知見を踏まえ、弾性理論の拡張によって部材降伏耐力の算出方法を確立することが今後の検討課題である。

参考文献

- 1) (社) 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]
- 2) (社) 日本道路協会: 平成14年 道路橋示方書・同解説 III
- 3) 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 A, 55A, pp.1048-1057, 2009.