

## ねじりと曲げの相関特性およびねじり非線形を考慮した動的解析手法の提案

九州大学工学研究院 フェロー ○大塚久哲  
 (株)構造計画研究所 正会員 秦逸平  
 九州大学大学院 学生会員 服部匡洋

## 1. 本研究の目的

これまでに行われたRC橋脚をモデルとした模型供試体に対する交番載荷試験により、ねじりと曲げを同時に載荷するとそれぞれの挙動に影響を与えることがわかっている。現在は一般的にねじりと曲げの相互作用を考慮せず、ねじりと曲げの相関関係を組み込んだ解析は行われていない。本稿では、ねじりと曲げの相関関係を考慮した解析に必要なツールとして相関曲線、骨格曲線、履歴復元力特性をモデル化し、そのツールを用いた非線形動的解析の手法を提案することを目的としている。

## 2. 実験概要

当研究室ではこれまでに軸力、帯鉄筋間隔、載荷比率等をパラメータとしたRC柱部材の正負交番載荷試験を行ってきた。実験供試体は400×400mmの充実矩形断面である。本稿では35体の実験結果を利用している。

## 3. 非線形動的解析手法の提案

図-1に示すように初めに弾性理論から初期剛性を算出する。その初期剛性を持つ弾性部材として弾性解析を行う。初めて載荷経路がひび割れ相関曲線を越えた時にひび割れ判定を出す。続いて定式化した剛性比から第2剛性を推定する。その際に履歴モデルとして武田モデルを選択してエネルギー吸収を考慮した降伏時の $\alpha$ (実験定数)を設定する。次に載荷経路が初めて降伏相関曲線と交わった時点で降伏と判定し、以下同様の手法を繰り返し、曲げ降伏点、終局点を算出する。相関曲線はどの象限でも対象であり、相関曲線と境界線(後述)によって区切られる領域ごとに適切な骨格曲線、履歴特性を設定するなどのルールを設定する。また軸力は自重による初期軸力一定とし、2軸曲げ相関を考慮した解析を行う。

## 4. 解析ツールのモデル化・定式化

## 4.1 相関曲線

載荷比率に応じて実験値をプロットし、ひび割れ点、降伏点、最大耐力点のイベントごとに実験値を直線で結んだ。ここでねじりの降伏の定義は剛性が急激に低下する点、曲げの降伏は主鉄筋降伏点とし、両降伏を別のイベントとして表記した。実験結果を整理すると、軸力比 $N_0$ や帯鉄筋間隔 $\rho_s$ の影響により相関曲線の形状が変化することが知られた。以上をふまえ相関曲線の実験値を図-2のようにモデル化した。モデル化の際、ねじりと曲げの一方が最大耐力

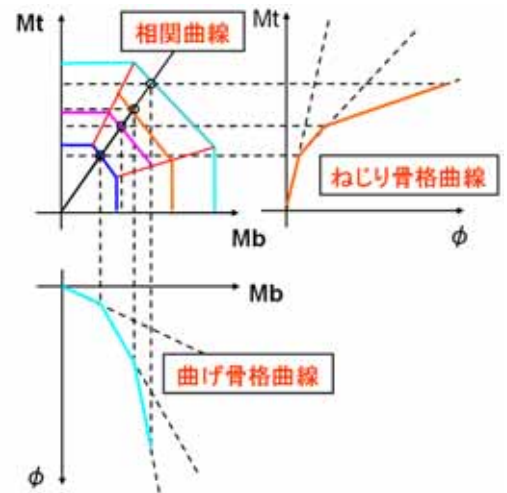


図-1 相関曲線を組み込んだ解析手法

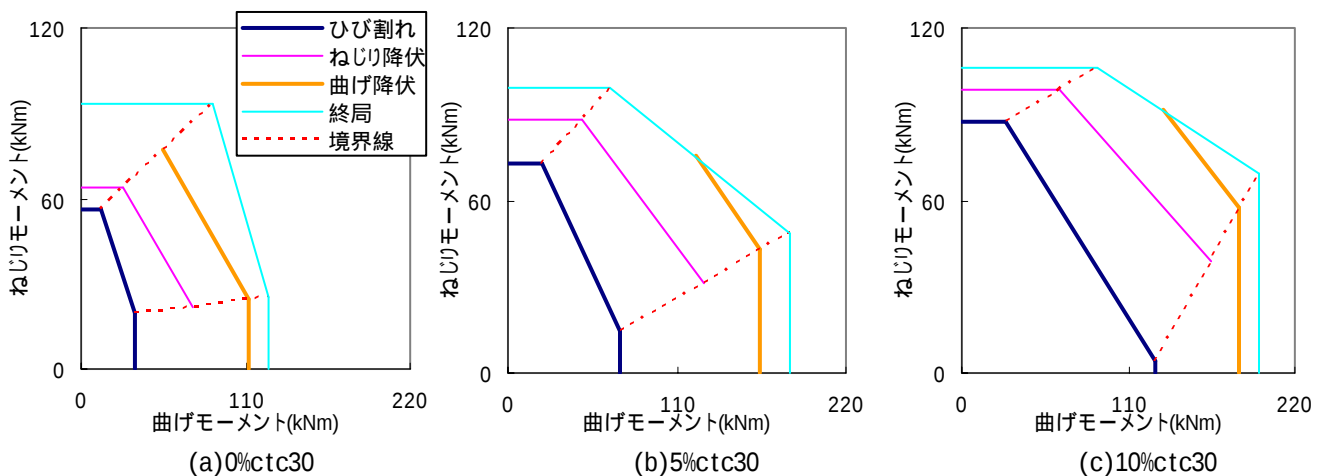


図-2 モデル化した相関曲線の一例

キーワード RC 柱部材, 複合載荷, ねじりと曲げの相関曲線, ねじり非線形

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 TEL&FAX 092-802-3374

に達した点を終局と定義した。相関曲線の実験値を純曲げ、あるいは純ねじり時の値で除して正規化し、正規化した相関曲線の定式化を行った。右に提案式一例を示す。また純荷重時の挙動、複合載荷時の挙動を示す領域を区別するため境界線を設けた。境界線より縦軸、横軸に近い領域では相関を考えない。

#### 4.2 複合載荷時のねじり骨格曲線

骨格曲線はひび割れ、降伏、終局点を直線で結んだトリリニア型とする。相関曲線を組み込んだ解析を行うには複合載荷時の骨格曲線の剛性を知る必要がある。実験結果より初期剛性は載荷比率によらずほぼ一定であり、弾性理論より算出した初期剛性ともほぼ一致することから、複合載荷時のねじり骨格曲線の初期剛性は弾性理論から導出する。第2 剛性  $K_2$ 、第3 剛性  $K_3$  は初期剛性との比を定式化し剛性を決定する。また純ねじり、ねじり卓越型の骨格曲線は降伏点まで初期剛性を保つが中間型や曲げ卓越型ではひび割れ後剛性が低下し、また後者の載荷ケースではねじり骨格曲線の形状が類似しているなどの知見を得た。実験値との誤差が最小となるような  $K_2/K_1$ 、 $K_3/K_1$  を算出すると、 $K_2/K_1$  は軸力のみ、 $K_3/K_1$  は軸力と帯鉄筋間隔の関数となった。以下に示す一例のように定式化を行った。なお複合載荷時の曲げ骨格曲線は、耐力は落ちるが剛性は落ちないと仮定し、純曲げの剛性を用いて曲率を求めることとする。

初期剛性と第3 剛性の比

$$\frac{K_3}{K_1} = (-89.796\rho_s + 0.61)N_0 + (-0.4694\rho_s + 0.0518)$$

#### 4.3 履歴復元力特性

非線形動的解析を行うには履歴モデルを設定する必要があるが、汎用ソフトには曲げ履歴モデルしか利用できない。既存のモデルの中で武田モデルはユーザーがパラメータ  $\alpha$  を設定することで履歴形状を変化させることができ、ねじり履歴モデルとして適用できると考えた。曲げでは一般的に  $\alpha = 0.4$  が用いられるが、ねじりに対する適切な  $\alpha$  を検討した。図-3のように純ねじり履歴曲線は原点指向型に近いが最大耐力以前は紡錘形で、最大耐力経験後は次第にS字型となることが既往研究よりわかっている。武田モデルでは降伏点以降の除荷勾配を変化させることが出来るため、終局点までの累積エネルギー吸収量が一致するように武田モデルのパラメータを設定する。その時の  $\alpha$  を求めると図-4 になる。ctc60 は一般的でなく、ctc30 の3 ケースにおいて  $\alpha$  の最大 0.75 を純ねじりの基準とすれば他のケースも安全側で評価できる。このときの武田モデルと実験値の比較を図-5 に示す。複合載荷時は純荷重時に比べエネルギー吸収量が小さく、純荷重時の  $\alpha$  を用いると危険側となるため、純荷重時よりも大きい  $\alpha$  を設定する必要がある。

武田モデル

$$K_d = \frac{M_y^+ - M_c^-}{\phi_y^+ - \phi_c^-} \cdot \left| \frac{\phi_{\max}}{\phi_y} \right|^{-\alpha}$$

#### 5. 結論

ねじりと曲げの相関曲線、複合載荷時のねじり骨格曲線、ねじり履歴復元力特性といった解析ツールを用いて、各イベントの剛性や耐力を決定しながら繰り返し解析を行うことで、ねじりと曲げの相関特性およびねじり非線形を考慮した解析を行うことができると考えた。また、実験結果を精度良く表現できるような解析ツールのモデル化・定式化として、軸力比・帯鉄筋体積比をパラメータとするのが適切であった。さらに、ねじり履歴モデルとして武田モデルを用いる場合、パラメータ  $\alpha$  の値として 0.75 以上を設定すべきである。

ねじり降伏提案式

$$\frac{M_{by}}{M_{by0}} = \alpha \cdot \frac{M_{by}}{M_{by0}} + \beta$$

$$\alpha = (25.918\rho_s + 4.3174)N_0 + (-56.143\rho_s - 1.0212)$$

$$\beta = (45.347\rho_s - 0.4444)N_0 + (14.143\rho_s + 1.2566)$$

$M_{by0}$ : 純ねじり時降伏ねじりモーメント (kNm)  
 $M_{by}$ : 純曲げ時降伏曲げモーメント (kNm)  
 $N_0$ : 軸力比                       $\rho_s$ : 帯鉄筋体積比

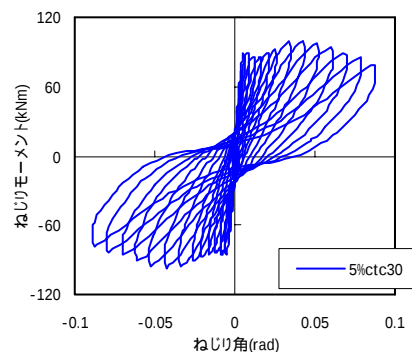


図-3 履歴曲線一例  
(5%ctc30)

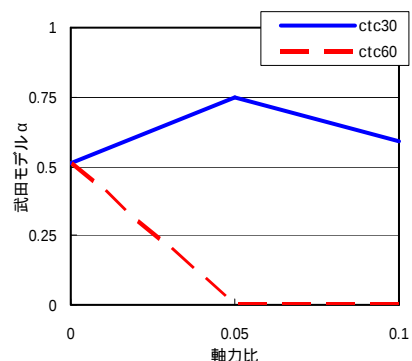


図-4 武田モデル  $\alpha$  と軸力の関係

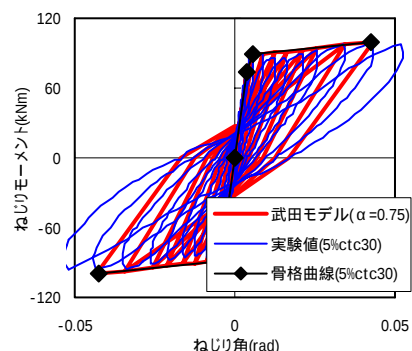


図-5 5%ctc30mm,  $\alpha=0.75$