

鉄筋コンクリート部材の崩壊挙動モデル

Models for Concrete Cover Spalling and Reinforcement Buckling of Reinforced Concrete

須田 久美子
増川 淳二

要 約

橋脚や主塔などの鉄筋コンクリート柱部材を対象に、かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈といった崩壊挙動を解析的に追跡するためのマクロモデルを新しく提案した。さらに、提案した崩壊挙動モデルをコンクリート用3次元非線形有限要素プログラム-COM3-に組み込み、高さ30m以上の高橋脚の地震時挙動を解析事例として、曲げ、せん断及びねじりの組合せ断面力が交番加力された中空断面鉄筋コンクリート部材に適用し、実験結果と比較して、モデルの妥当性を確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. かぶりコンクリート剥離の検討
- III. 崩壊挙動モデル
- IV. 検証解析
- V. おわりに

I. はじめに

鉄筋コンクリート部材の地震時における崩壊挙動は、部材の具体的な配筋状態や地震時に作用する断面力(軸力、曲げ、せん断、ねじり)の組み合わせによって異なる。例えば、土木構造物の橋脚などでは断面寸法が大きいために、相対的に細径の鉄筋が多数本配筋されるという配筋上の特徴を持っている。これに対して、建築構造物の柱部材では、通常、断面寸法は数十cmであり、軸方向鉄筋には相対的に太径のものが少数本配筋され、鉄筋自身の曲げ剛性が大きく、かぶりコンクリートの剥離後の座屈抑制に及ぼす影響が無視できない。また、軸圧縮力は一般橋脚の場合で $1\sim 2\text{N/mm}^2$ 以下、高さ30m以上の高橋脚でも 3N/mm^2 程度、これは軸力比(コンクリートの圧縮強度に対する平均軸圧縮応力度の比)で0.1以下に相当し、建築構造物の柱部材に比べて少ない。その結果として、横拘束筋(帯鉄筋、中子筋、中間帯鉄筋など内部コンクリートの拘束と軸方向鉄筋の座屈抑制を目的に配筋する鉄筋)の量が前者に比べ後者では相対的に多いため、建築分野ではかぶりコンクリートの剥離時期は特に問題にならず、かぶりコンクリートの剥離後の鉄筋座屈防止という観点から崩壊挙動が注目されてきた。

かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈といった鉄筋コンクリート部材の崩壊挙動に関する研究は古くから行われており、例えば、これらの挙動をマクロ的に「コンクリートの圧壊」ととらえ、コンクリートの応力ひずみ関係における圧壊ひずみを規定して部材の変形性能を評価する方法はその一例である。しかし、前述のような、土木構造物と建築構造物における配筋詳細の違いによる影響や地震

時に作用する組合せ断面力などの影響を一般化して取り扱うには、「コンクリートの圧壊」という捉え方では自ずと限界がある。

崩壊挙動を直接取り扱ったものとして、かぶりコンクリートの剥離では島ら¹⁾、村山ら²⁾の研究があり、鉄筋の座屈ではPapiaら^{3,4)}、丸山ら⁵⁾、加藤ら⁶⁾の研究がある。

加藤ら⁶⁾は圧縮軸力が卓越する建築構造物の柱部材を対象に、Papiaら^{3,4)}が用いた等価弾性係数を用いて潜在座屈開始点(設定した座屈長の横拘束筋のない軸方向鉄筋におけるオイラー座屈応力度)を決定し、軸方向鉄筋の座屈変形によるたわみ分布をSin分布と仮定して横拘束筋による拘束を考慮した力の釣り合いと変形の適合性から軸方向鉄筋の応力-平均ひずみ関係を導き、これと単調に軸圧縮加力した鉄筋の応力-ひずみ関係を比較して応力が最小になる経路を圧縮時における軸方向鉄筋の骨格曲線とした。さらに圧縮方向累積塑性ひずみの考え方を導入し⁷⁾、交番繰返し加力についても単調加力と同様に鉄筋の座屈開始ひずみ及び座屈後の応力-ひずみ関係を定義した。実務的には、軸圧縮応力度が降伏応力度を超えて潜在座屈開始点を經由して再び降伏応力度まで低下したときの圧縮方向累積塑性ひずみを座屈軸ひずみ度と定義してその推定式を提案し⁸⁾、中間主筋がある場合や高強度の材料を用いた場合、変動軸力への適用にも拡張を試みている^{9)~15)}。

しかし、橋脚や主塔などの土木構造物を視野に入れたうえで、具体的な配筋方法と組合せ断面力の影響を考慮できる一般化した崩壊挙動の解析モデルはなく、特に、かぶりコンクリートの剥離と同時に鉄筋が座屈する場合の研究例は非常に少ない。

ここでは、かぶりコンクリートが剥離すると同時に軸方向鉄筋が座屈する場合にも適用できる新しい崩壊挙動モデルを提案し、曲げ、せん断、ねじりの組合せ断面力が交番で作用する中空断面橋脚部材への適用性を検証する。

II. かぶりコンクリート剥離の検討

かぶりコンクリートの剥離を検討するために、軸方向鉄筋に沿っ

キーワード: 鉄筋コンクリート, 耐震, 変形性能, かぶりコンクリート, 剥離, 座屈, 崩壊挙動, FEM, 配筋, 組合せ断面力

たひび割れは鉄筋の微小な座屈変形に起因して発生すると仮定し、座屈変形に伴うポテンシャルエネルギーの釣り合いを考える。軸方向鉄筋は部材の曲げ変形に伴う初期変形が生じた状態で圧縮力を受けるので、モデル化に当たってはこれを考慮することとした。また、軸方向鉄筋の座屈長さ ℓ は、弾性理論から導いた次式により、軸方向鉄筋の塑性化による見掛けの弾性係数 E の変化を逐次考慮し、横拘束筋による拘束バネ β を具体的な配筋状態に配慮して設定することにより、ある程度精度良く推定できることが分かっているので²⁾、座屈長さが与えられることを前提に座屈モデルを考える。なお、記号や誘導の仮定の複雑な式は巻末にまとめて示した。

$$\ell = 4.4 \sqrt{\frac{EI}{\beta}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

1. モデル化

かぶりコンクリートがあり初期変形を有する軸方向鉄筋の状態として、Fig.1 のように線形バネ k_c をスパン中央に取り付けた初期たわみのある両端固定梁を考える。

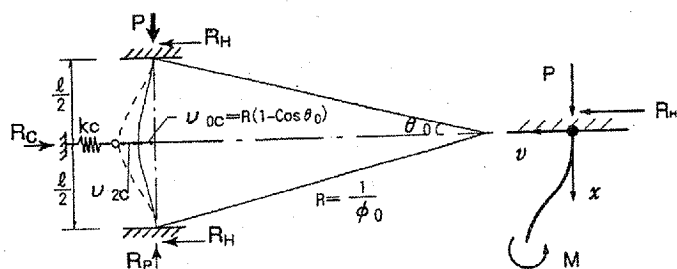


Fig.1 座屈モデル
(A Model of Buckling)

Fig.1 に示す系の座屈変形に関する釣り合い方程式は(2)式となる。

$$-EI \frac{d^2 v_2}{dx^2} = P(v_0 + v_2) - \frac{k_c v_2 C}{2} x \quad \dots \dots \dots (2)$$

初期たわみの形状は、両端固定梁の半波長の座屈モード¹⁰⁾を参考に(3)式のように仮定する。

$$v_0 = v_{0C} \sin^2 \frac{\pi x}{\ell} \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)式を(2)式に代入し、境界条件を満足する解を求めると、座屈変形に関するたわみ式が(4)式のように導かれる。

$$v_2 = \frac{v_{0C} \alpha}{2(1-\alpha)} \xi \left(\frac{x}{\ell} \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

2. 鉄筋の塑性化による限界荷重

$$M = -EI \frac{d^2 v_2}{dx^2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

であるから(5)式に(4)式を代入することにより、鉄筋の座屈変形による曲げモーメント式が(6)式のように求められる。

$$M = -\frac{P_{E0} v_{0C} \alpha}{2(1-\alpha)} \left\{ -\alpha \cot \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{2} \sin \frac{2\pi \sqrt{\alpha} x}{\ell} + \alpha \cos \frac{2\pi \sqrt{\alpha} x}{\ell} - \cos \frac{2\pi x}{\ell} \right\} \quad \dots (6)$$

鉄筋の最大曲げモーメントが全塑性モーメントに達した時の荷重が上限であると考え、鉄筋の材料特性による限界荷重 $P_{m,cr2}$ は(7)式のように求めることができる。

$$P_{m,cr2} = 4P_{E0} - \frac{42P_{E0}^2 v_{0C}}{d^3 \sigma_y + 12P_{E0} v_{0C}} \quad \dots \dots \dots (7)$$

3. かぶりコンクリートによる拘束力の検討

Fig.1 では簡単のためにかぶりコンクリートによる拘束バネ k_c を線形バネと仮定したが、ここでは k_c とかぶりコンクリートの引張特性を関連付けておく。

かぶりコンクリートの引張応力 σ_c とひび割れ幅 ω の関係を(8)式で仮定する。

$$\sigma_c(\omega) = f_t \left(1 - \frac{\omega}{\omega_u} \right) \quad \dots \dots (8)$$

まず、かぶりコンクリートに軸方向鉄筋に沿って発生する縦ひび割れのひび割れ幅が、座屈変形によって生じる増分変位 v_2 に等しいと考える(すなわち、 $v_2 = \omega$)。 $x = x_0$ のときにひび割れ幅が引張限界ひび割れ幅 ω_u になるとすると、(6)式より

$$\omega_u = \frac{v_{0C}}{2} \frac{\alpha}{1-\alpha} \xi \left(\frac{x_0}{\ell} \right) \quad \dots \dots \dots (9)$$

と表せる。(8)式に(4)式及び(9)式を代入し、 x 軸に沿って積分すると、かぶりコンクリートの拘束バネの反力 R_c が(10)式のように求められる。

$$R_c = 2 \int_0^{x_0} \sigma_c \left(\frac{x}{\ell} \right) \cdot a \cdot \ell \cdot d \frac{x}{\ell} = 2 f_t a \ell \int_0^{x_0} \left\{ 1 - \frac{\xi \left(\frac{x}{\ell} \right)}{\xi \left(\frac{x_0}{\ell} \right)} \right\} d \frac{x}{\ell}$$

$$\frac{R_c}{f_t a \ell} = 2 \left\{ \frac{x_0}{\ell} - \frac{1}{\xi \left(\frac{x_0}{\ell} \right)} \int_0^{x_0} \xi \left(\frac{x}{\ell} \right) d \frac{x}{\ell} \right\} \quad \dots \dots \dots (10)$$

(9)式から分かるように、 ω_u と v_{0C} が与えられれば、 x_0 と α の関係が一意的に決定され、一方、(10)式によって R_c と x_0 が関係付けられるので、 R_c と ω の関係を一意的に決定することができる。

この関係は、着目する軸方向鉄筋が初めて圧縮力を受けて座屈変形を起こし、鉄筋に沿ったひび割れが発生する場合の拘束力とひび割れ幅の関係を規定するものであり、さらに、Fig.2 に示すような除荷、再載荷の履歴を考慮すると Fig.3 のような関係が得られる。これは、 $\omega_u/v_{0C} = 0.1$ という条件で、繰返し軸圧縮荷重が作用した場合の一例である。計算に用いた諸量は、IV章で述べる検証解析に用いた試験体を想定して設定した。

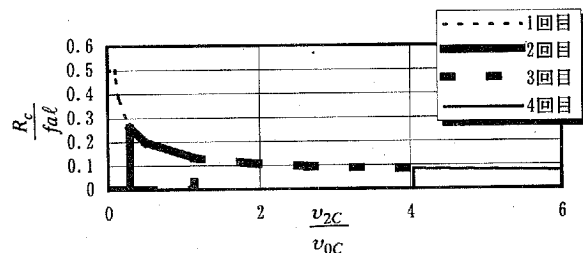


Fig.3 繰返し圧縮力を受ける場合の拘束力の変化
(Change of Restriction Force in case of Reversed Loading)

Fig. 3は、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが既に発生している場合のかぶりコンクリートによる拘束力の変化についての理解を助けるために示したものであり、繰返しによるコンクリートの材料的な劣化を考えているのではないことに注意されたい。したがって、1回目～4回目という繰返数には特に意味はない。1回目～4回目のそれぞれに、かぶりコンクリートの拘束パネに蓄積される内部エネルギーはFig. 3の各曲線が囲む面積(A_G)に $f_t a \ell \cdot v_{0C}$ を乗じた値である。 A_G は ω_u/v_{0C} と v_{2C}/v_{0C} のみをパラメータとする関数である。

4. 座屈に対する安定性判定式の誘導

式(3)を用い、座屈に対する系の安定・不安定を判定するための条件を、Timoshenkoのエネルギー法¹⁶⁾によって誘導する。

安定な釣合状態においては全ポテンシャルエネルギー π が最小値をとることから、この釣合状態の近傍におけるすべての状態に対して、全ポテンシャルエネルギーの変化 $\Delta\pi$ は(11)式で表せる。

$$\Delta\pi = \Delta U + \Delta V \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 ΔU は釣合状態の近傍のごくわずかな変位により貯えられる内部エネルギーの増分、 ΔV はその間の外力ポテンシャルエネルギーの増分である。 ΔT を外力仕事の増分とすると、 $\Delta V = -\Delta T$ であるから、

$$\Delta\pi = \Delta U - \Delta T \quad \dots\dots\dots (12)$$

となって、 $\Delta U > \Delta T$ ($\Delta\pi > 0$)のときに安定な釣合状態、 $\Delta U < \Delta T$ ($\Delta\pi < 0$)のときに不安定な釣合状態となる。

Fig. 1の構造系の座屈変形に関する軸方向鉄筋に中心軸圧縮力 P が作用するときの釣合状態として次の二つを考える。

- ① 初期たわみ $v_0(x)$ の釣合状態
- ② ①ときわめて近接した別の釣合状態 (座屈により $v_2(x)$ のたわみが生じた状態)

①から②の状態に移るときの鉄筋には微小なたわみの増加を考えており、軸方向圧縮力 P の大きさに変化はなく常に同じ方向を向いていと仮定する。①から②の状態へ移行する間に、鉄筋の曲げ変形及びかぶりコンクリートの非線形パネに貯えられる内部エネルギー ΔU は(13)式のように表される。

$$\Delta U = 2 \left[\frac{1}{2} EI \int_0^{\ell} \left(\frac{d^2 v_2}{dx^2} \right)^2 dx \right] + \int_0^{v_{2C}} R_c(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (13)$$

一方、座屈による鉄筋の曲げ変形により、軸方向圧縮力 P は鉛直下向きに e_2 だけ移動し、そのために外力仕事 ΔT を行う。 ΔT は(14)式のように表される。

$$\Delta T = P \cdot e_2 = P \int_0^{\ell} \left\{ \left(\frac{dv_2}{dx} \right)^2 + 2 \left(\frac{dv_2}{dx} \right) \left(\frac{dv_0}{dx} \right) \right\} dx \quad \dots\dots\dots (14)$$

(13)式の第二項は、拘束パネの縮小量が v_{2C} になるまでにパネに貯えられる内部エネルギーとして(15)式のように表すことができる。

$$\int_0^{v_{2C}} R_c(\omega) d\omega = f_t a \ell v_{0C} \cdot A_G \left(\frac{\omega_u}{v_{0C}}, \frac{v_{2C}}{v_{0C}} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

(12)式に(13)式～(15)式を代入し式を整理すると、座屈に対する安定性判定式を(16)式のように誘導することができる。

$$\frac{\Delta\pi}{P_{E0} \ell} = \frac{v_{0C}^2}{\ell^2} \frac{a^4}{(1-\alpha)^2} \cdot g(\alpha) + \frac{v_{0C} f_t a}{P_{E0}} A_G \left(\frac{\omega_u}{v_{0C}}, \frac{v_{2C}}{v_{0C}} \right) \quad \dots\dots (16)$$

(16)式は $\Delta\pi$ を $P_{E0} \cdot \ell$ で除して無次元化しており、第一項は与えられた系の幾何学的形状(鉄筋のスパン長及び初期たわみ)と軸圧縮荷重比 α の関数であり、第二項はかぶりコンクリートの剥離エネルギーと両端固定された直棒鉄筋の座屈荷重の比によって表されている。

5. 安定性の検討

(16)式を理解し易くするため、Fig. 4に第一項と α の関係、Fig. 5に第二項と α の関係、Fig. 6に無次元化した $\Delta\pi$ と α の関係の一例を示す。計算に用いた諸量は、IV章で述べる検証解析に用いた試験体を想定して設定した。

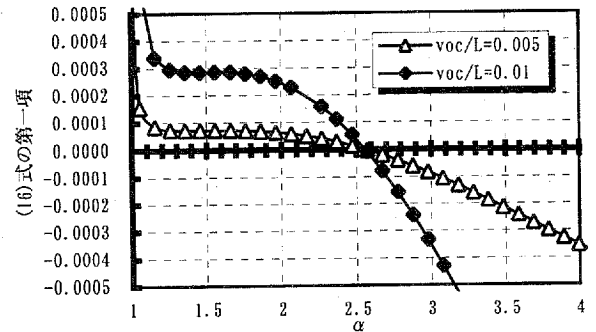


Fig. 4 (16)式の第一項と α の関係
(Relationship between the First Clause of Eq.(16) and α)

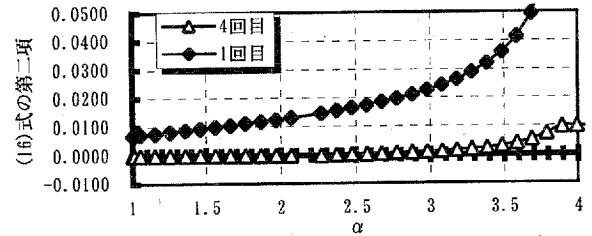


Fig. 5 (16)式の第二項と α の関係
(Relationship between the Second Clause of Eq.(16) and α)

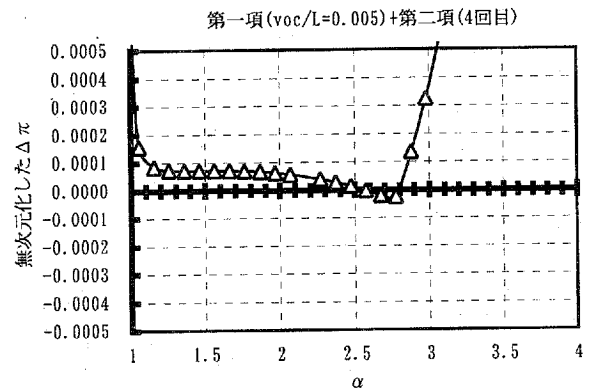


Fig. 6 無次元化した $\Delta\pi$ と α の関係
(Relationship between no-dimensional $\Delta\pi$ and α)

第一項は系の幾何学的形状(v_{0C}/ℓ)と α のみの関数であり、値の正負は α のみで決まる。第一項は v_{0C}/ℓ の値にかかわらず $\alpha=2.56$ のときにゼロとなる(Fig. 4)。Fig. 5には、Fig. 3に示した1回目と4回目に対応する第二項の値をそれぞれ示した。1回目の場合には第二項の値が第一項に比べて遥かに大きく、第一項が負になる $\alpha=2.56$

以上においても $\Delta\pi$ は負にならない。一方、4 回目の場合には、 $\alpha = 2.56$ 以上でもある程度座屈変形が進むまでは (Fig. 3 参照) 第二項がゼロのままなので、Fig. 6 に示すとおり $\Delta\pi$ が負に転じる。

以上より、部材中の鉄筋の場合、初期たわみ v_{0C} が逐次変化するが、第一項に比べて、第二項のポテンシャルエネルギーが 2 オーダー程度大きいことから、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが入っても、かぶりコンクリートが存在してはいるもののわずかで拘束力があれば $\Delta\pi$ は負にならないことが容易に想像できる。

III. 崩壊挙動モデル

かぶりコンクリートが剥離したあとの鉄筋についても、II 章と同様の検討を行い、鉄筋の座屈長さに関する既往の知見²⁾を総合し、Fig. 7 ような崩壊挙動モデルを提案する。概略の検討フローは次のとおりである。

- ①鉄筋に作用する圧縮力 P 、鉄筋の塑性化を考慮した見掛けの弾性係数 E 、部材の曲率 ϕ_0 をメインの解析ルーチンから引き継ぐ
- ②座屈長さ $\ell_{0,cr}$ の計算
- ③初期たわみ v_{0C} の計算
- ④かぶりコンクリート剥離の判定 (剥離しない場合はメインへ)
- ⑤鉄筋座屈の判定 (剥離しない場合はメインへ)
- ⑥これ以降、鉄筋の応力-ひずみ関係に座屈後の履歴則を適用

1. かぶりコンクリートの剥離判定

かぶりコンクリートが剥離する条件として、次の二つを考えた。

- a. 想定した $\ell_{0,cr}$ の全ての範囲において、それ以前の過去の加力履歴で既に引張応力を負担できない限界ひび割れ幅以上のひび割れが発生している。
- b. 軸方向鉄筋の内部エネルギーの増分より外力仕事の増分が大きくなっている。

条件 a は、着目する軸方向鉄筋に繰返し圧縮・引張が作用する場合と、単調に圧縮力が作用する状態で軸方向鉄筋の塑性化が進み見掛けの弾性係数が小さくなって $\ell_{0,cr}$ が小さくなる場合に満足される可能性がある。すなわち、この条件により、単調加力と交番加力を統一的に表現することを可能にした。圧縮応力流の方向と鉄筋の軸方向がほぼ一致していると見なせる場合については、かぶりコンクリートの拘束によるポテンシャルエネルギーが他に比べて遥かに大きいことから、このような簡単なモデル化を行ってもかぶりコンクリートの剥離判定には重大な影響を及ぼさないと考えた。

条件 b は、軸方向鉄筋の初期変形によらず、かぶりコンクリートの拘束を無視すると軸圧縮荷重比 $\alpha = 2.56$ の時に満足される。

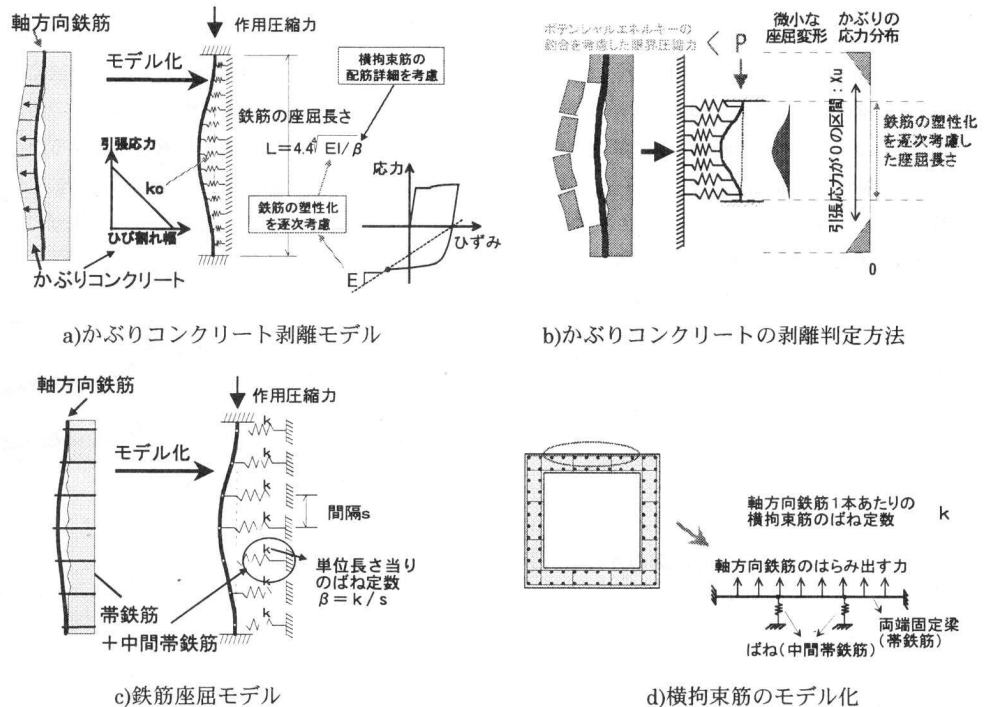


Fig. 7 崩壊挙動モデルの概念図

(Concept of Modelling for Spalling of Cover Concrete and Buckling of Re-bar)

したがって、条件 a が満たされ、かつ、条件 b が満たされたときに かぶりコンクリートが剥離したと判定する。

なお、かぶりコンクリートの拘束バネをスパン中央に集中させて単純化したため、かぶりコンクリートがスパン全区間で拘束する状況をモデル化しておらず、結果として端部の増分変位を過大に評価している。ここでは座屈長さの上限値 (最大座屈長さ $\ell_{0,cr,max}$) を設定することでこれに対処した。さらに、全塑性モーメントから算定される材料特性による限界荷重 $P_{m,cr2}$ を鉄筋に作用する圧縮力の上限とした。 $P_{m,cr2}$ の計算に用いる σ_y には規格降伏強度または引張り試験時の降伏強度を用いることを想定しているが、既に塑性化した鉄筋の限界荷重としては矛盾もある。しかし、ここで対象とする橋脚のような土木構造物では、座屈時に鉄筋が負担できる圧縮力が比較的小さく限界荷重 $P_{m,cr2}$ の精度が判定結果に及ぼす影響は極めて少ないものと考えた。

2. 軸方向鉄筋の座屈判定

軸方向鉄筋の座屈は、かぶりコンクリートが無く横拘束筋で拘束された直棒鉄筋の座屈モデルにより誘導した座屈荷重 $P_{0,cr}$ を基に判定する。鉄筋に作用する圧縮力が $P_{0,cr}$ を超えたときに座屈開始と判定し、これ以降は当該鉄筋要素の応力ひずみ関係に座屈後の履歴特性²⁾を用いる。

厳密には、鉄筋の初期変形に応じて任意の座屈変形時に鉄筋が負担できる圧縮力は異なるが、座屈変形が無限大のときには $P_{0,cr}$ になることから、座屈の有無の判定結果には大きな影響を及ぼさないと考えた。また、鉄筋座屈以降における履歴吸収エネルギーの問題を議論する場合には初期変形と圧縮力の関係を基に発展させる必要が

あると考えられるが、土木構造物の場合には、部材寸法に比べ鉄筋径が細いため、かぶりコンクリートが剥離した後に鉄筋が負担できる圧縮力は、太径の鉄筋を用いた場合に比べて相対的に小さく、鉄筋座屈荷重の微妙な変化が部材の耐力及び変形やその破壊挙動に及ぼす影響が比較的少ないと思われる。

かぶりコンクリートの無い鉄筋の座屈判定においても、全塑性モーメントから算定される材料特性による限界荷重 $P_{m,cr1}$ を設定した。限界荷重 $P_{m,cr1}$ の精度が問題になるような場合や鉄骨鉄筋コンクリートなど軸方向鋼材の曲げ剛性が大きく、かぶりコンクリートの剥落以降にも、鋼材だけで圧縮力を負担できるような構造部材の場合には、例えばⅠ章で概説した加藤らの方法⁶⁾⁷⁾⁸⁾などの適用を検討する必要がある。

鉄筋座屈と判定された場合は、鉄筋座屈後の平均応力-平均ひずみ関係の履歴則²⁾を用いる。土木構造物のように断面寸法に対して相対的に細径の鉄筋が用いられている場合には、後述の検証解析に示すような履歴則の単純化も可能である。

Ⅳ. 検証解析¹⁷⁾

新しく提案した崩壊挙動モデルを鉄筋コンクリート用 3 次元有限要素解析プログラム-COM3-に組み込み、組合せ断面力が交番で作用する中空断面鉄筋コンクリート橋脚模型実験¹⁸⁾のシミュレーション解析を行った。

中空断面部分は Fig. 8 に示すような RC 積層シェル要素とした。

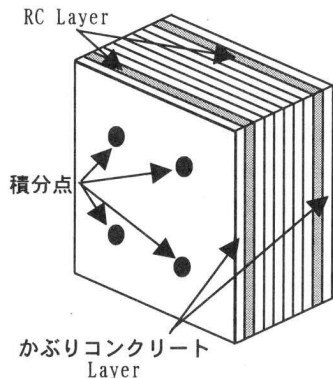


Fig. 8 断面厚さ方向の分割
(Division of wall Section)

対象とする中空断面試験体には断面の内外それぞれに軸方向鉄筋が配筋されているため、解析のモデル化に当たってもこれを考慮し、鉄筋コンクリート積層シェル要素には内外二層の鉄筋 Layer を設定した。かぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈の判定と、その後の取り扱いには RC Layer の積分点毎 (1 Layer につき 4 点) に行った。かぶりコンクリートの剥離と鉄筋の座屈が判定された場合、それぞれ以下の様に処理を行った。

[かぶりコンクリートが剥離している場合]

- ・ 着目している積分点の RC Layer より外側のコンクリート Layer (要素の 1/4 に相当) の応力をゼロにする。

[鉄筋が座屈している場合]

- ・ 着目している積分点の RC Layer より外側のコンクリート

Layer の応力をゼロにする。

- ・ 着目している RC Layer の軸方向鉄筋応力度が圧縮のときには応力をゼロに、引張の時にはひずみから求められた値の 8 割に減じる。

Fig. 9 に解析結果と実験結果を併記する。

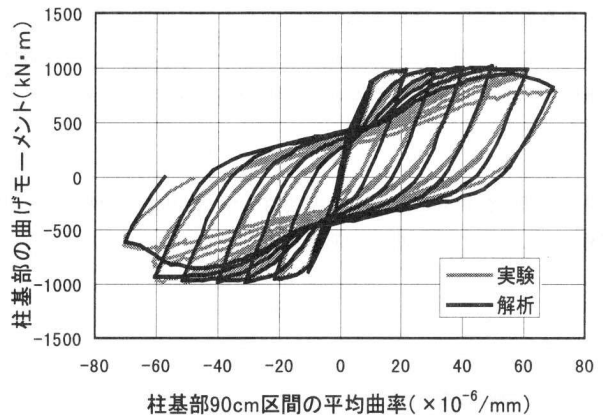


Fig. 9 解析結果と実験結果の比較
(Comparison between Analytical Result
and Experimental data)

かぶりコンクリートの剥離及び鉄筋の座屈時期と発生位置及び順序を比較的良く追跡できた結果、耐力低下傾向を精度良く評価することができた。

Ⅴ. おわりに

新しく提案したかぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈に関する崩壊挙動モデルの特徴をまとめると次のとおりである。

- 鉄筋の座屈変形に起因して発生する軸方向鉄筋に沿ったひび割れの進展によって、かぶりコンクリートが剥離すると仮定し、座屈変形に伴うポテンシャルエネルギーの釣り合いを考えたモデルである。
- 鉄筋コンクリート部材の変形解析の過程で得られる鉄筋の応力、割線弾性係数及び部材曲率を逐次考慮して、座屈長さの設定、かぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈の判定ができる。
- かぶりコンクリートの剥離判定に必要なコンクリートの引張特性は限界ひび割れ幅のみである。そのため、繊維補強コンクリートの場合、あるいは鋼板や繊維補強シート巻きたて補強が施されている場合などへの応用が考えられる。
- 鉄筋の配筋詳細が直接解析結果に反映できる。軸方向の鉄筋径、鉄筋間隔、横拘束筋 (帯鉄筋及び中間帯鉄筋それぞれ) の鉄筋径、鉄筋間隔、中間帯鉄筋の断面内間隔などである。
- 鉄筋の座屈はかぶりコンクリートの剥離の後に起こると考え、横拘束筋で補強された座屈モデルを仮定し、弾性座屈理論で導かれた式をもとに得られた座屈荷重、座屈長さの近似解を基に求める。横拘束筋の拘束 (帯鉄筋の曲げ剛性と中間帯鉄筋の軸剛性) 及び軸方向鉄筋自身の曲げ剛性を考慮できる。

本研究の成果により、これまで構造細目で決定されることが多か

った具体的な配筋方法について、直接解析に取り込み、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート部材の変形性能に及ぼす影響を解析的に比較検討することが可能になった。これによって、より合理的な配筋決定が可能になるとともに、これまで比較的根拠の明確でなかった構造細目の意義付けを行うことができると考える。

また、中空断面鉄筋コンクリート高橋脚においては、横拘束筋の量もさる事ながら、横拘束筋の機能性を十分に吟味するする必要があると明らかなり、本研究で提案されたかぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈に関する崩壊挙動モデルの重要性を改めて確認することができた。

謝辞 本研究の実施に当たっては東京大学 前川宏一教授のご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

記号

$\Delta\pi$; 全ポテンシャルエネルギーの変化量

$\alpha = \frac{P}{P_{E0}}$; 軸圧縮荷重比

$P_{E0} = \frac{4\pi^2 EI}{\ell^2}$; 両端固定された直棒鉄筋の座屈荷重

P ; 鉄筋に作用する軸圧縮荷重

$P_{m,cr1} = \frac{d^3 \sigma_y}{4.8 v_{0C}} + 0.025 P_{0,cr}$

; かぶりコンクリートが無い場合の材料特性による限界荷重

d ; 軸方向鉄筋の直径

$v_{0C} = \frac{\phi_0 \ell^2}{8}$; 鉄筋のスパン中央における初期たわみ量

ϕ_0 ; 座屈直前における鉄筋の平均曲率 (=部材の平均曲率)

$\ell, \ell_{0,cr}$; 鉄筋の座屈長さ

$$g(\alpha) = \frac{\left\{ -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2} + \frac{1-\alpha}{4\alpha^2} \right) \sin^2 \frac{\pi\sqrt{\alpha}}{2} + \frac{\sin(2\pi\sqrt{\alpha})}{2\pi\sqrt{\alpha}(1-\alpha)} + \frac{\sqrt{\alpha}\sin(\pi\sqrt{\alpha})}{\pi(1-\alpha)} \right\}}{\sin^2 \frac{\pi\sqrt{\alpha}}{2}}$$

; 軸圧縮荷重関数

f_t ; コンクリートの引張強度

a ; 軸方向鉄筋の純間隔

$A_G \left(\frac{\omega_u}{v_{0C}}, \frac{v_{2C}}{v_{0C}} \right)$; かぶりコンクリートの剥離エネルギー指数

(鉄筋の座屈変形に伴うひび割れ幅の増大に伴い、全座屈スパンのかぶりコンクリートに蓄積される内部エネルギーを $f_t a \ell v_{0C}$ で無次元化した値)

ω_u ; コンクリートの引張限界ひび割れ幅

x_u ; 過去最長の限界ひび割れ幅進展長

$v_{2C} = \frac{\pi v_{0C} \alpha \sqrt{\alpha}}{2(1-\alpha)} \cot \frac{\pi\sqrt{\alpha}}{2}$; 鉄筋の座屈変形によるスパン中央の増分

たわみ (=鉄筋に沿ったひび割れのスパン中央における幅)

$$\xi \left(\frac{x}{\ell} \right) = \cot \frac{\pi\sqrt{\alpha}}{2} \sin 2\pi\sqrt{\alpha} \frac{x}{\ell} - \cos 2\pi\sqrt{\alpha} \frac{x}{\ell} + \cos 2\pi\sqrt{\alpha} \frac{x}{\ell} - 2\pi\sqrt{\alpha} \frac{x}{\ell} \cot \frac{\pi\sqrt{\alpha}}{2}$$

; たわみ分布のモード

参考文献

1) 島, 伊藤, 北西, 水口; RC 橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす

帯鉄筋配置の影響, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 33-40, 1990. 5.

2) 村山, 須田, 一宮, 新保弘; 繰返し荷重下における柱筋の座屈モデル, 鹿島技術研究所年報, 42 号, pp. 93-98, 1994. 10.

3) Papia, M., Russo, G. and Zingone, G.; Instability of longitudinal bars in RC columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 445-461, 1988.

4) Papia, M. and Russo, G.; Compressive Concrete Strain at Buckling of Longitudinal Reinforcement, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 382-397, 1989.

5) 丸山, 趙, 清水; RC 柱の主筋座屈に関する基礎的研究, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 47-60, 1990. 5

6) 加藤, 金谷; RC 造角柱の主筋の座屈性状の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 433-438, 1990.

7) 加藤, 金谷; 繰返し加力を受ける RC 造柱の主筋の座屈性状の評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 369-374, 1991.

8) 加藤, 鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 436 号, pp. 135-143, 1992.

9) 加藤, 大矢; RC 部材における中間主筋の座屈性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 425-430, 1993.

10) 加藤, 鉄筋コンクリート造部材の配筋設計法に関する研究—コンクリートの拘束筋と主筋の座屈防止筋に関する考察—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 452 号, pp. 99-107, 1993. 10.

11) 加藤, 若月; 高強度材料を用いた RC 部材の主筋の座屈性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, pp. 141-147, 1993. 11.

12) 加藤, 菊地, 本多, 鈴木; 変動軸力を受ける RC 部材の主筋とコンクリートの拘束法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 461-466, 1994.

13) 大矢, 加藤, 大矢; RC 部材における中間主筋の座屈性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 473-478, 1994.

14) 本多, 加藤, 大矢; 主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける RC 柱の静的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 455-460, 1994.

15) 加藤, 鈴木, 本多; 主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける高強度 RC 柱の静的加力実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 351-356, 1995.

16) 福本, 秀士; 構造物の座屈・安定解析, 新体系土木工学 9, 土木学会編, 技報堂出版.

17) 増川, 須田, 前川; かぶりコンクリートの剥離と鉄筋座屈を考慮した中空断面 RC 橋脚の 3 次元非線形 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 37-42, 1999.

18) 須田, 天野, 増川, 一宮; 高橋脚の耐震性能に及ぼすねじり加力の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 789-794, 1997.