

論文 不連続回転ひびわれモデルによる RC 梁の有限要素解析

飯塚敬一*¹・中村光*²・足立正信*¹・檜貝勇*³

要旨：RC構造物の終局挙動を解析的に精度良く捉えるには、材料の特性上、ひびわれの正確な評価が重要である。しかしながら、従来用いられている固定ひびわれモデル、回転ひびわれモデルでは、モデルの特性上、その適用範囲が限られてしまうのが実情である。そこで本研究では、これらのひびわれモデルの特性を明らかにすると共に、両者の特性を備え、曲げ、せん断に関わらず構造物の破壊挙動を精度良く評価できるモデルとして不連続回転ひびわれモデルを取り上げ、その適用性を解析的に示した。

キーワード：不連続回転ひびわれモデル, FEM, 曲げ破壊, せん断破壊, 破壊エネルギー

1. はじめに

RC構造物の終局挙動を非線形有限要素解析によって精度良く捉えるには、適切な材料モデルや力学特性の解析への導入が肝要である。また、RC構造物の場合、初期の荷重状態から生じるひびわれが、その後の挙動に大きな影響を及ぼすことから、ひびわれの正確な評価は特に重要な要素の一つとなる。近年提案されている代表的なひびわれモデルとしては、固定ひびわれモデル、回転ひびわれモデル等が挙げられるが、それぞれの特性には一長一短があり、例えば、回転ひびわれモデルではせん断耐荷機構を評価し得る [1] 反面、曲げ問題のようにひびわれが分散する挙動に対しての適用性が不明確であるといったように、その適用範囲が限られてしまうのが実情である。そこで、本研究では、破壊エネルギー基準に基づく材料モデルを用いて、これらのひびわれモデルの特性および適用範囲を明らかにすることを試みた。さらに、固定ひびわれモデルと回転ひびわれモデル両者の特性を備えたひびわれモデルとして不連続回転ひびわれモデルを取り上げ、曲げ、せん断といったRC構造物の種々の破壊挙動に対する本解析手法の適用性を梁の破壊実験のシミュレーションによって解析的に検討した。

2. 解析概要

2.1 解析モデルおよび解析条件

本解析で対象としたRC梁は図-1に示す4つのモデルであり、モデルA, BおよびDについては併せて実験を実施した。曲げ破壊を想定したモデルA, B, Cについてはスパンが2.0m, せん断スパン比 (a/d) が6.25であり、梁幅は15cm, 梁高は20cmである。また、引張鉄筋は、モデルAが2D13 (引張鉄筋比 $p_t=1.0\%$)、モデルB, Cが2D16 ($p_t=1.7\%$) であり、モデルCについては帯鉄筋比 $p_w=0.5\%$ のスターラップを想定した。次にせん断破壊を想定したモデルDは、スパンが2.0mであり、梁幅は20cm, 梁高は30cmである。また、せん断スパン比は $a/d=3.8$ 、引張鉄筋比は3.7%であり、せん断破壊モードとして斜め引張破壊となるように設計した。なお、全てのモデルで、荷重はスパン中央の幅8.0cmの載荷板に集中載荷している。

*¹ 東電設計 (株) 技術開発本部 (正会員)

*² 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

*³ 山梨大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

解析モデルを図-2に示すが、各モデルは対称性を考慮して1/2モデルとした。要素は4節点のアイソパラメトリック要素を用いており、要素分割はモデルA, B, Cについては断面高さ方向5分割とし、モデルDについては8分割とした。また、鉄筋はRC要素でモデル化している。非線形求解法は、最大荷重点以降の軟化挙動を捉えるため変位制御の増分解析とし、Newton-Raphson法に従い収束計算を行った。

2.2 材料構成則およびひびわれモデル

解析に用いた材料諸元を表-1に示す。ひびわれ前のコンクリートはDarwin-Pecknold [2] の直交異方性モデルとし、ひびわれ発生後は、ひびわれモデルとして固定ひびわれモデル、回転ひびわれモデルおよび不連続回転ひびわれモデルをそれぞれ用いた。ここで不連続回転ひびわれモデルとは、固定ひびわれモデルと回転ひびわれモデルの特性を併せ持つモデルであり、常に主軸とひびわれ軸が直交する回転ひびわれモデルに対して、主軸とひびわれ軸のずれ θ がある一定の値を越えたとき、ひびわれ方向を回転させるモデルである。すなわち、 θ の設定によって回転ひびわれモデルと固定ひびわれモデルの間を自由に变化させられるモデルであり、 $\theta = 0^\circ$ で回転ひびわれモデルと、 $\theta = 180^\circ$ で固定ひびわれモデルと一致する解が得られる。また、 θ を大きくするという事は、ひびわれ面で伝達されるせん断力の許容値を大きくすることを意味する。

次にコンクリートの応力-ひずみ関係を図-3に示すが、圧縮応力域では、応力が最大圧縮強度(f'_c)まで二次放物線で増加した後、コンクリートの圧縮破壊エネルギー $GF=0.0018f'_c$ (N/m) [3]に基づいて算定される ϵ_u まで直線的に減少するモデルであり、2軸応力下におけるコンクリートの圧縮強度の増減は考慮していない。一方、

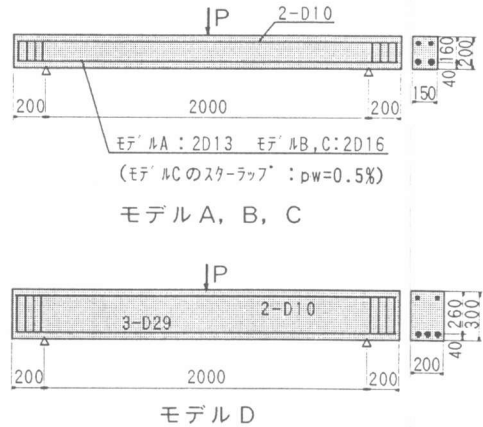


図-1 解析に用いたRC梁

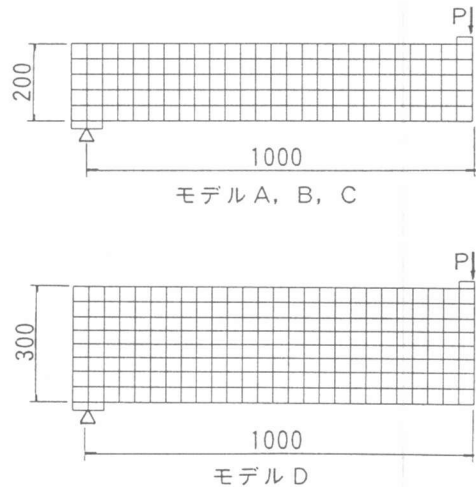


図-2 解析モデル

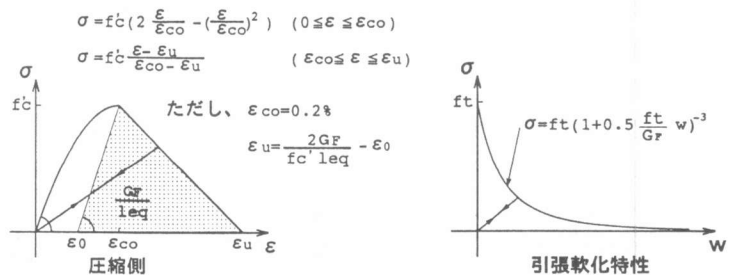


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

引張応力域については応力が引張強度(f_t)まで一定の傾きで増加した後、それ以降は引張軟化特性として-3乗モデル [4]を用いた。このとき、圧縮、引張とも簡易的に原点指向型の除荷経路を考慮している。また、このような破壊エネルギー基準を導入することによってある程度、解の要素寸法依存性は解消されるが、引張軟化特性は応力-

ひびわれ幅の関係で与えられるため、分布ひびわれモデルではひびわれ幅(w)を要素の等価長さ(l_{eq})を考慮してひずみ量(ϵ)に変換する必要があり、本解析では l_{eq} を要素短辺の長さとしている。この l_{eq} の設定については、破壊エネルギーと要素寸法の関数として表される圧縮側の応力-ひずみ関係についても同様に要素短辺の長さとした。なお、固定ひびわれモデルおよび不連続回転ひびわれモデルのせん断減係数は共に 0.2 ($\tau=0.2G\cdot\gamma$)と一定とした。また、鉄筋の応力-ひずみ関係は降伏点以降の勾配が零となる完全弾塑性モデルとした。

3. 曲げ破壊するRC梁の解析

検討対象としたRC梁のうち、モデルA, Bの実験結果と固定ひびわれモデル、回転ひびわれモデル、不連続回転ひびわれモデルの解析結果を対比した荷重-変位関係を図-4および図-5に示す。このとき、荷重(P)は載荷板に作用する鉛直荷重を表し、変位(δ)は載荷点直下の鉛直変位を表す。また、不連続回転ひびわれモデルでは、適切な θ の値を検討するため、 $\theta=2^\circ$ および 5° の解析を行った。

まず、モデルA ($\rho_t=1.0\%$)の結果について見てみると、図中実線で示した実験値では、 $\delta=5.6\text{mm}$ で主筋が降伏した後、徐々に荷重が上昇して最大荷重(32.9kN)に達している。解析では、固定ひびわれモデルが他の解析結果と比較して若干硬い性状を示している。一方、回転ひびわれモデルでは最大荷重点以降 $\delta=18.5\text{mm}$ で荷重が低下し、挙動が変化したことを示している。また、図中○印で示した鉄筋降伏点の荷重と変位は、実験値が解析値をやや下回っている。これは、実際にはコンクリート中の鉄筋が、あるひびわれ面で降伏しても他の位置で降伏していなければ、そのときの鉄筋の平均ひずみと平均応力は、鉄筋降伏点よりも低くなる [5]が、解析で用いたRC要素ではこの効果を考慮していないためであると考えられる。このことは、後述する

表-1 材料諸元

		モデル A	モデル B	モデル C	モデル D
コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	26	41	41	23
	引張強度 f_t (N/mm ²)	2.5	3.2	3.2	2.3
	引張破壊エネルギー (N/m)	108	157	157	108
主鉄筋	配筋 (引張鉄筋比)	2D13 (1.0%)	2D16 (1.7%)	2D16 (1.7%)	3D29 (3.7%)
	ヤング率 E_s (kN/mm ²)	178	178	178	182
	降伏強度 f_y (N/mm ²)	346	375	375	357

※モデルCの材料諸元はモデルBに準じ、スタブの諸元は主筋と同値

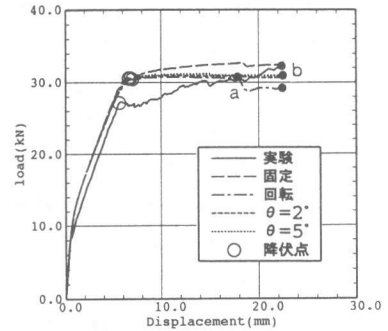


図-4 荷重-変位関係(モデルA)

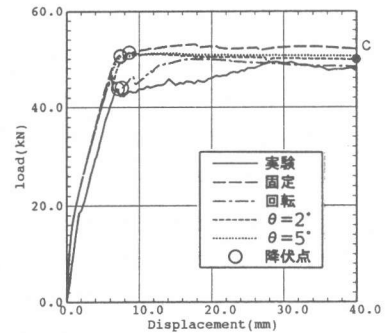


図-5 荷重-変位関係(モデルB)

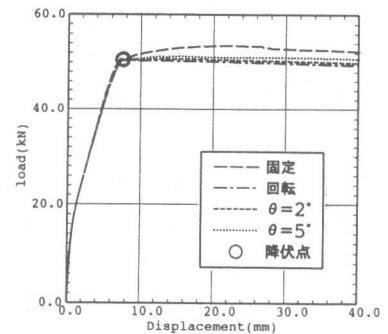


図-6 荷重-変位関係(モデルC)

モデルBの結果についても同様である。しかしながら、荷重-変位曲線、および最大荷重値は、いずれのひびわれモデルの解析結果も実験結果と概ね一致している。図-7に実験と解析の最終時点(図-4のb点)のひびわれ状況を対比して示す。回転ひびわれモデルでは荷重が低下した $\delta = 18.5\text{mm}$ 直前(図-4のa点)の結果も併せて示す。これらを比較すると固定ひびわれモデルと不連続回転ひびわれモデルでは、ひびわれが分散した後、梁中央部の曲げひびわれが卓越して破壊に至るといった曲げ破壊モードがほぼ再現されているが、回転ひびわれモデルでは、荷重低下後に鉄筋に沿うようなひずみの局所化が生じており、明らかに実験結果のような曲げ破壊とは違う挙動を終局時に示している。

次にモデルB($p_t=1.7\%$)の実験結果では、主筋が $\delta = 7.3\text{mm}$ で降伏した後、 $\delta = 29.0\text{mm}$ で最大荷重(49.3kN)を示して軟化に至った。一方、解析では、最大荷重値はどのひびわれモデルもほぼ一致しているものの、回転ひびわれモデルの荷重-変位関係で鉄筋降伏直後に一旦荷重低下が生じている。この時点では、モデルAの解析結果と同様、鉄筋に沿うようなひずみの局所化が生じており、曲げ破壊とは異なる挙動が生じている。また、 $\theta = 2^\circ$ の不連続回転ひびわれモデルでは、荷重-変位関係に実験との顕著な違いは現れていないが、図-8に示すひびわれ状況(図-5のc点に対応)を見ると斜めひびわれが進展する現象が生じ、明らかに実験結果と異なる挙動を示した。一方、固定ひびわれモデルと $\theta = 5^\circ$ の不連続回転ひびわれモデルの結果には、このような斜めひびわれが進展する現象は現れていない。

これらの結果より、曲げ破壊するRC梁を解析する場合には、ひびわれ面のせん断伝達を無視する回転ひびわれモデルでは、その挙動を終局時まで評価することが困難なことが明らかとなった。特に鉄筋比が比較的大きい場合には、早期に曲げの挙動とは異なる現象が生じる。また、 θ が小さく、せん断伝達量が小さい不連続回転ひびわれモデルでも回転ひびわれモデルと同様の結果を示す可能性が高いことが示された。これは、回転ひびわれモデルや θ が小さい不連続回転ひびわれモデルでは、鉄筋の有無による剛性のコントラストが大きい位置で、ひびわれが剛性が大きい鉄筋軸方向に向かって回転しやすくなり、ひずみの局所化が生じてしまうためであると考えられる。したがって、曲げ破壊する梁を解析する場合

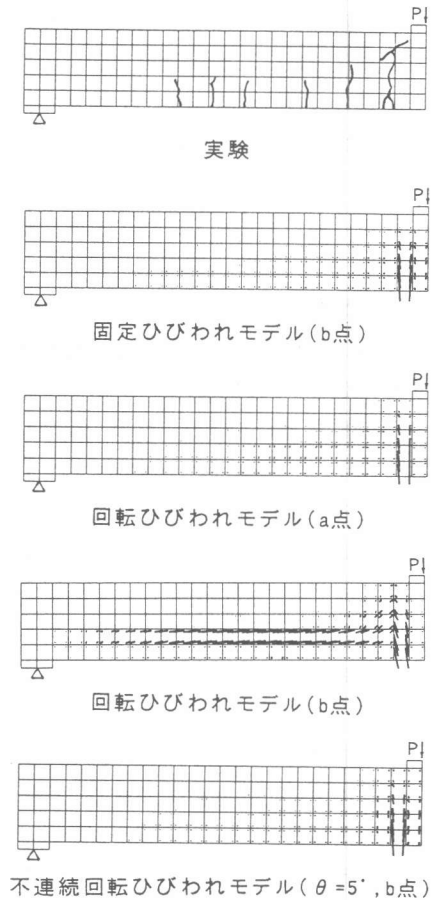


図-7 ひびわれ図(モデルA)

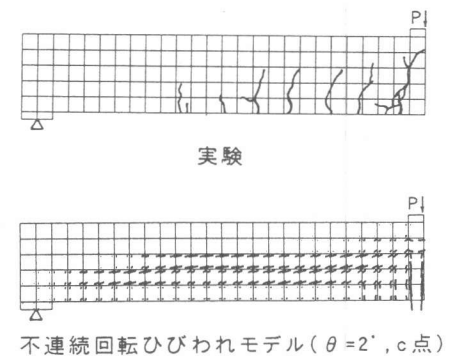


図-8 ひびわれ図(モデルB)

には、固定ひびわれモデル、あるいは、ひびわれ面にある程度のせん断伝達量を生じるような不連続回転ひびわれモデル（今回の解析では $\theta=5^\circ$ 以上）の適用が必要となる。

さらに、参考としてモデルBにスターラップを配置したモデルCに対する各ひびわれモデルの適用性を検討した。図-6に示す荷重-変位関係では、固定ひびわれモデル、回転ひびわれモデル、不連続回転ひびわれモデル（ $\theta=2^\circ, 5^\circ$ ）の4モデルとも経路に顕著な差異はなく、スターラップを配置した場合、回転ひびわれモデルにおいてもモデルA, Bのような鉄筋に沿ったひずみの局所化は生じていない。これは、スターラップを考慮したことにより断面内での剛性のコントラストが小さくなり、軸直角方向の変形も拘束されるためであると考えられ、スターラップによってせん断補強されている曲げ破壊型の構造物に対しては、いずれのひびわれモデルも解析へ適用できる可能性が高いことを示している。

4. せん断破壊するRC梁の解析

せん断破壊するRC梁を想定したモデルDの実験結果と各ひびわれモデルによる解析結果を対比した荷重-変位関係を図-9に示す。このとき、不連続回転ひびわれモデルについては、適切な θ の値を検討するため、 $\theta=2^\circ, 5^\circ$ および 10° の3通りの解析を行った。図中、実線で示した実験結果は、変位がおよそ3.2mmを越えたあたりで斜め引張ひびわれにより最初の荷重低下が生じ、それ以降徐々に耐力が回復して、 $\delta=5.4$ mm付近で第二のピークを迎えてから荷重が再び低下していく性状を示した。これは、実験供試体のせん断スパン比が $a/d=3.8$ とやや小さいため、典型的な斜め引張破壊とはならず、斜め引張ひびわれ発生後に耐荷機構がアーチ機構に移行することで、荷重-変位関係に2つのピークが現れたものと考えられる。図-9に示す各ひびわれモデルの荷重-変位関係を見てみると、回転ひびわれモデルおよび $\theta=2^\circ$ と 5° の不連続回転ひびわれモデルでは第二ピークまでは実験結果をよく再現している。しかし、 $\theta=10^\circ$ の不連続回転ひびわれモデルについては、解析値は第一ピークあたりから実験値よりも硬い結果を示す。このことから、せん断破壊するRC梁に対しては、 θ を大きくし、ひびわれ面に伝達されるせん断力を大きく許容するほど精度の良い解析を行うことが困難になるといえる。また、固定ひびわれモデルでは、実験の第一ピークあたりから解析値は実験値と大きな差異を示しており、本供試体の適切な評価は不可能である。したがって、不連続回転ひびわれモデルを用いてせん断問題を解析するためには、ひびわれ面に過大なせん断力が発生しないような θ を選択することが必要となる。特に今回の解析では、せん断低減係数を0.2と一定にした場合、 $\theta=5^\circ$ までを用いるのが、適切であると考えられる。

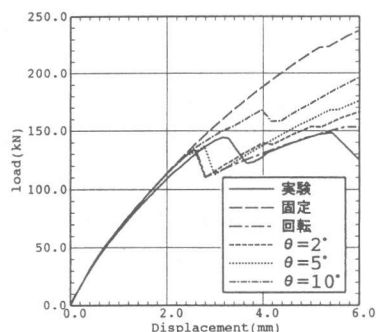


図-9 荷重-変位関係(モデルD)

5. 圧縮破壊エネルギーの適用

構造物の破壊に至る挙動を精度良く捉えるには、破壊の局所化領域での挙動を正確に評価することが重要である。しかしながら、破壊局所化挙動の多くの研究成果は引張領域について得られたものであり、圧縮領域についての研究はほとんどなされていない。ここでは、本研究で用いた圧縮破壊エネルギー基準の適用によって、解の要素寸法依存性が改善されることを検証するため、圧縮破壊エネルギー基準を考慮した場合（図-3）としない場合の応力-ひずみ関係をモデルBの

解析に適用し、要素寸法をパラメータとして比較検討を行った。このとき、要素寸法の小さなモデルは、先に解析で用いた断面高さ方向5分割のモデル(図-2、一辺4cmの正方形要素)であり、大きなモデルは、断面高さ方向3分割(要素の一辺は6ないし7cm)としたモデルである。なお、解析に用いたひびわれモデルは $\theta=5^\circ$ の不連続回転ひびわれモデルとし、エネルギー基準を考慮しない応力-ひずみ関係は、要素寸法に関わらず、応力が最大圧縮強度(f'_c)以降 $\epsilon_u=1.0\%$ まで直線的に減少するモデルを仮定した。解析の荷重-変位関係を図-10に示すが、エネルギー基準を考慮しない解析では、断面高さ方向3分割の要素寸法が大きいモデルに比較して断面高さ方向5分割の要素寸法が小さいモデルの荷重-変位曲線は、早期に荷重低下する性状を示している。これは、要素寸法に依存しない応力-ひずみ関係を用いた場合、要素寸法が小さくなることで圧縮応力下にある局所化する要素のエネルギー吸収能が小さくなるためである。一方、圧縮破壊エネルギー基準を適用した解析では、要素寸法に関わらず同じ経路を辿っている。このように圧縮破壊エネルギー基準を導入することによって、局所化する要素内に吸収されるエネルギーは要素寸法に関わらず一定となり、解の要素寸法依存性はかなり解消される。

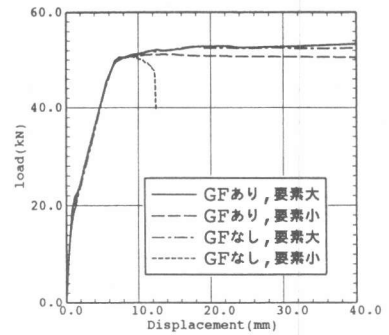


図-10 荷重-変位関係(モデルB)

6. まとめ

- 1) 不連続回転ひびわれモデルでは、せん断低減係数を0.2と一定にした場合、 θ を 5° 程度に設定すれば、RC構造物の曲げ挙動およびせん断挙動のいずれに対しても適用性が高くなる。
- 2) 固定ひびわれモデルは、曲げ問題に対しては適用性が高いが、せん断問題に対しては適用が困難である。一方、回転ひびわれモデルは、せん断問題に対する適用性はあるが、せん断補強筋を配置せず曲げ破壊する梁に対しては、適切に挙動を評価できない。
- 3) 圧縮破壊エネルギーの導入により、解の要素寸法依存性はかなり軽減される。このことは、コンクリートの圧縮応力下のひずみ軟化挙動に支配される領域の解析を行う場合には、要素寸法に依存しない応力-ひずみ関係を用いると、解の唯一性が保証されないことを示すものである。したがって、引張側の応力-ひずみ関係と同様に圧縮側の応力-ひずみ関係にも破壊エネルギーを考慮したモデルを用いる必要がある。

【参考文献】

- [1] 山谷敦, 中村光, 飯塚敬一, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.359~364, 1996.6
- [2] Darwin, D., Pecknold, D.A: Nonlinear Biaxial Law for Concrete, J.Eng.Mech.Div, ASCE, Vol.103, pp.229~241, Apr.1977
- [3] Nakamura, H. and Higai, T.: Fracture Zone and Fracture Energy of Concrete under Uniaxial Compressive Stress, Int. Conf. on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century, pp.D105-D110, Nov.20-23, 1996, Bangkok, Thailand
- [4] Hillerborg, A: Stability Problems in Fracture Mechanics Resting, Fracture of concrete and Rock, Elsevier Applied Science, pp.369~378, 1989
- [5] 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991