

論文 付着割裂ひび割れが生じる RC 造梁の破壊挙動に関する 3 次元 FEM 解析

伊東 大地*1・田嶋 和樹*2・白井 伸明*3

要旨： 逆対称曲げが作用するディープビームの破壊実験を解析対象として、3次元 FEM 解析におけるモデル化の検討を行った。ボンドリンク要素、くさびバネ要素および離散ひび割れ界面要素を組み合わせることにより、付着割裂ひび割れの発生を模擬できる解析モデルを構築した。これにより、付着割裂ひび割れの発生に伴う耐力低下挙動を模擬することができた。さらに、構築した解析モデルをあばら筋比の異なる試験体へ適用し、解析モデルの検証を行い、離散ひび割れ界面の引張特性に関する検討課題を確認した。

キーワード： 付着割裂ひび割れ, FEM 解析, RC 造梁, 付着すべり, くさびバネ要素, 離散ひび割れ

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）部材の破壊挙動を説明する場合、FEM 解析は極めて有効なツールである。その背景には、鉄筋-コンクリート間の付着挙動のモデル化に取り組んだ既往の研究の存在がある。とりわけ Ngo と Scordelis により提案されたボンドリンク要素¹⁾の登場により、鉄筋-コンクリート間に生じる相対すべりと、それに伴って生じる付着力の伝達を表現することが可能となった。今日においては、RC 部材の FEM 解析において必要不可欠なモデルとなっている。

一方、異形鉄筋を用いた RC 部材の場合、鉄筋のふし部分が周辺コンクリートを押し広げようとする応力が発生し、コンクリートには円周方向の引張応力（リングテンション）が生じる。これにより、かぶりコンクリートが薄い場合には、鉄筋に沿って付着割裂ひび割れが生じる場合がある。このように複雑な挙動を示す付着割裂ひび割れの発生に関しては、これまで実験的に様々な研究²⁾³⁾が行われ、現象の解明が進められているものの、解析的な検討が不足している。

付着割裂ひび割れが生じる部材に対して FEM 解析を適用する場合には、付着すべり挙動のみならず付着割裂作用を考慮したモデル化が必要となる。本研究では、付着割裂ひび割れの発生が確認された既往のディープビームの破壊実験⁴⁾を解析対象として、付着割裂作用を考慮可能な解析モデルを構築する。

2. 解析対象実験

渡辺ら⁴⁾が実施した、逆対称曲げを作用させたディープビームの破壊実験を解析対象とし、3次元 FEM 解析のモデル化について検討する。

2.1 試験体概要

解析対象試験体の概要を図-1 に示す。左右にフーチング部を有する矩形断面の RC 梁であり、せん断スパン $a=800\text{mm}$ 、有効高さ $d=400\text{mm}$ および幅 $b_w=300\text{mm}$ である。試験体諸元を表-1 に、鋼材の材料特性を表-2 に示す。解析対象試験体はせん断補強筋が配筋されていない DB800、せん断補強筋比 p_w が 0.48% である DB804 および p_w が 0.84% である DB808 の 3 体である。

荷重は、4 点曲げ単調荷重であり、試験区間中央においてモーメントの正負が反転する逆対称曲げモーメントを作用させている。荷重点及び支点は拘束を取り除くためにローラー支承となっており、幅 250mm の支圧板が設置されている。

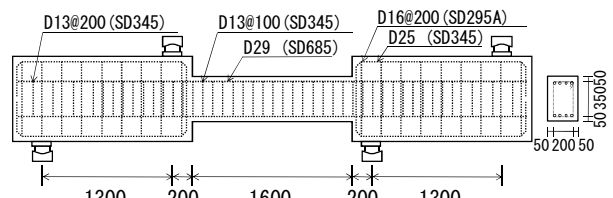


図-1 試験体形状および配筋

表-1 試験体諸元

No.	名称	a/d	a (mm)	d (mm)	せん断補強筋		f_c (N/mm ²)	V_{max} (kN)
					呼び名	p_w (%)		
5	DB800	2	800	1300	—	0.00	29.3	138
11	DB804				D10	0.48	26.9	394
12	DB808				D13	0.84	29.3	519

表-2 鋼材の材料特性

呼び名	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D29	642	721	1.94×10^5
D16	199	383	1.94×10^5
D13	127	369	1.91×10^5
D10	71	390	1.83×10^5

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科助教 (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 (正会員)

2.2 実験結果

各試験体のせん断力-層間変形角関係を図-2 に示す。DB800, DB804, DB808 のせん断力の最大値 V_{max} は、それぞれ 138kN, 394kN, 519kN であった。図-3 に試験体のひび割れ状況を示す。DB800 は、片側せん断スパンに斜めひび割れが発生したのと同時に最大耐力に達し、その後耐力が低下している。一方、DB804 と DB808 は、軸方向鉄筋付近にてせん断補強筋の降伏が確認された後、最大耐力に達している。また、軸方向鉄筋に沿うひび割れも観察されている。主筋のひずみに関する記載がないため降伏の有無は確認できないが、塑性率が 4.0 を超えていること、引張鉄筋比が釣合い鉄筋比以上であることから曲げ圧縮破壊と推測される。

3. 基本モデルの構築

付着割裂ひび割れの発生が顕著であった DB808 に基づいて解析モデルを構築する。ここでは、解析モデルの構築において基本となる解析モデルを示す。なお、解析には汎用コード DIANA9.3 を用いた。

3.1 要素分割

解析モデルの要素分割図を図-4 に示す。解析対象試験体には、付着割裂ひび割れおよびせん断ひび割れが発生していることを考慮し、その傾向を表現できるように比較的細かい要素分割を採用した。要素形状は基本的に正方形であり、要素寸法は 50mm (一部 67mm) である。コンクリート部分はソリッド要素でモデル化し、回転ひび割れモデルを採用した。鉄筋は主筋、あばら筋ともにトラス要素でモデル化した。なお、支点および荷重点は剛体要素を介してピンおよびローラー支承としている。

3.2 材料構成則

図-5 にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は上昇域と下降域は異なる放物線で近似し、下降域は圧縮破壊エネルギー G_c を考慮した軟化モデルとした。なお、 G_c (N/mm) は中村ら⁹⁾の提案式より求めた。また、要素代表長さ L_c は、要素体積 V と等価な体積を持つ球の直径とした。一方、引張側は上昇域は引張強度 f_t までを線形弾性と仮定し、下降域は大岡らの 3 直線モデル⁷⁾を採用した。破壊エネルギー G_f も大岡らの提案式から求め、要素代表長さ L_c は圧縮側と同様に仮定した。なお、文献には圧縮強度しか記載されていないため、引張強度 f_t およびヤング係数 E_c はそれぞれ CEB⁸⁾ および RC 規準⁵⁾ 式より算出した。両式を(1)式および(2)式に示す。

$$f_t = 1.4 \sqrt[3]{f_c/10} \quad (1)$$

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここで、 γ : コンクリートの気乾単位体積重量 (kN/m³) である。

図-6 に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。降伏値を折点とする bi-linear モデルとし、降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 1/100 とした。また、鉄筋-コンクリート間の付着は完全付着を仮定した。

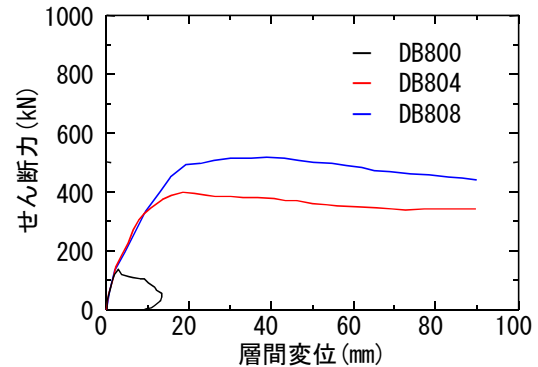


図-2 せん断力-層間変位関係

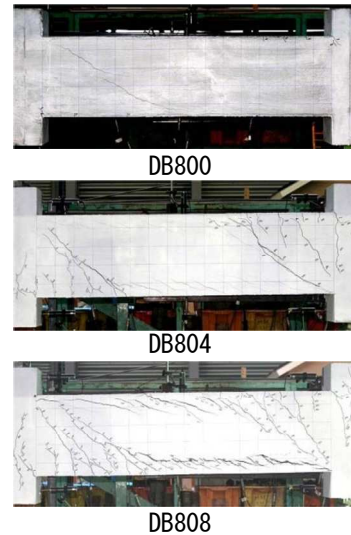


図-3 試験体のひび割れ状況

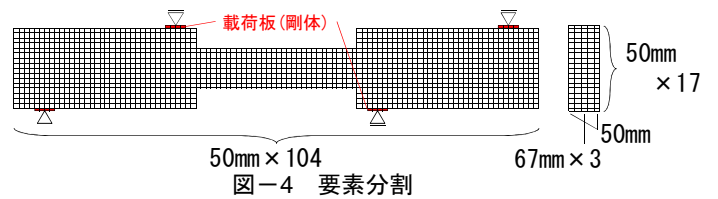


図-4 要素分割

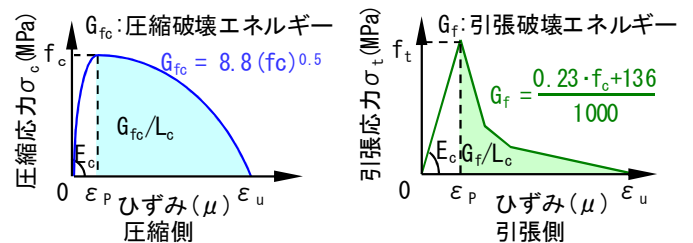


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

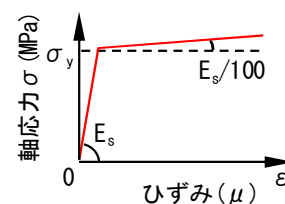


図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

3.3 基本モデルの解析結果

図-7 に基本モデルの解析から得られたせん断力-層間変位関係を示す。解析結果は、最大耐力までは良好に実験結果を模擬しているが、ポストピーク領域において急激に耐力が低下する傾向を示した。また、現段階においては、鉄筋-コンクリート間において完全付着を仮定しており、付着割裂作用のモデル化も行っていないため、解析結果の剛性および耐力は実験結果に比べて高くなるのが妥当である。解析結果の耐力が低くなった原因を解明するために FEM 解析による変形図を確認したところ、主筋のトラス要素に図-8 に示すような変形が見られた。これは、主筋のトラス要素があばら筋節点間において節点を有しており、この節点があばら筋の拘束を受けないために、主筋が局所的に変形していることを示している。これにより、材軸方向の圧縮力に対する主筋の抵抗力が大きく低下したと考えられる。

4. 基本モデルの改良

前章で示したように、基本モデルの解析結果は剛性および耐力を過小評価している可能性が高く、またポストピーク挙動に至っては傾向を捉えていない。本章では、基本モデルに適宜改良を加えることにより、最終的な解析モデルを構築する。

4.1 主筋のモデル化に関する検討

本検討では、主筋のモデル化に着目する。基本モデルでは主筋をトラス要素でモデル化した。ここでは梁要素によるモデル化を検討する。図-9 に解析結果を示す。梁要素で主筋をモデル化することで、剛性および耐力が増大し、最大耐力後に緩やかな耐力低下を示すなど、ポストピーク挙動も若干改善された。これは、材軸と直交する方向に対する抵抗力を持つ梁要素で主筋をモデル化したことにより、主筋の局所的な変形を抑制でき、圧縮力に対する主筋の抵抗を發揮できるようになったためと考えられる。以降の検討では主筋を梁要素でモデル化することとする。

4.2 付着すべり挙動のモデル化に関する検討

基本モデルでは、主筋-コンクリート間の付着に完全付着を仮定している。ここでは、主筋-コンクリート間に界面要素を設け、鉄筋-コンクリート間の付着すべり挙動をボンドリンク要素でモデル化する。ボンドリンク要素の概念図を図-10 に示す。ボンドリンク要素は部材軸方向および直交方向のバネで構成されている。ここでは、直交方向のバネは剛とし、部材軸方向のバネに付着すべり特性を付与する。なお、付着すべり特性は CEB モデル⁹⁾を用いてモデル化する。図-11 に CEB モデルの概念図を示す。また、表-3 に CEB モデルのパラメー

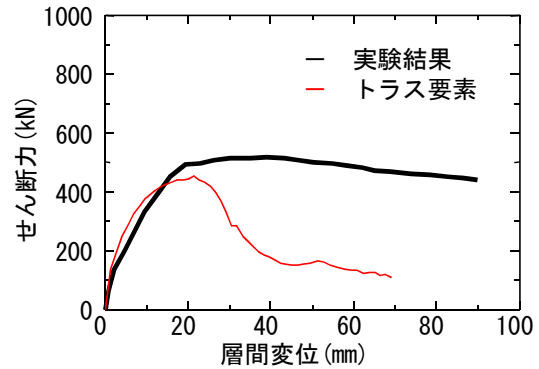


図-7 せん断力-層間変位関係

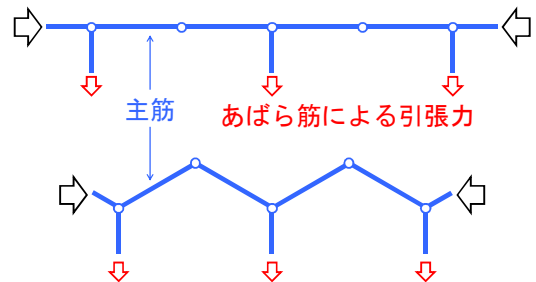


図-8 圧縮を受ける主筋（トラス要素）の模式図

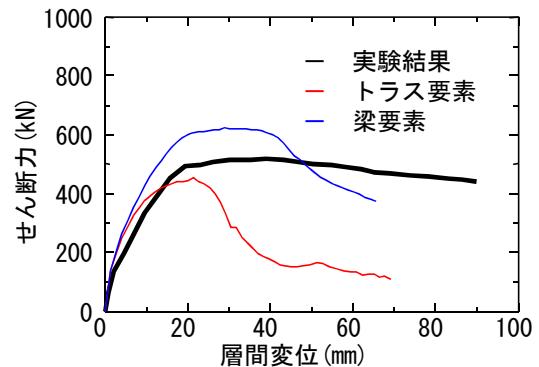


図-9 せん断力-層間変位関係

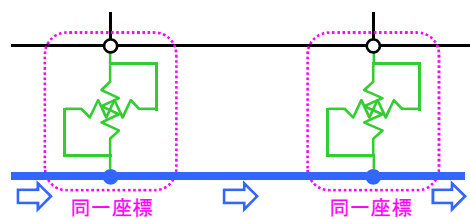


図-10 ボンドリンク要素

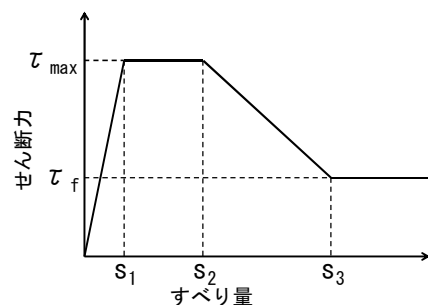


図-11 CEB モデル

タを示す。ここでは、CEBモデルにおける confined モデルと unconfined モデルの両方を検討する。confined モデルは、コンクリートによる拘束力が低下しない、いわゆる付着が良好な場合のモデルである。一方、unconfined モデルは、割裂破壊などによりコンクリートによる拘束力が低下するモデルである。また、これらのモデルに対して、最大付着応力度 τ_{max} を CEB 式⁹⁾および AIJ 式⁹⁾から算出して検討することにし、解析ケースを Case1~4 まで設定する。

本検討で用いる解析モデルの概要を図-12に示す。ここでは、梁に配置されたすべての主筋にボンドリンク要素を導入した。

解析結果を図-13に示す。 τ_{max} を AIJ 式から求めた Case2 および Case4 はいずれも最大耐力付近で解析が終了しているが、いずれの解析ケースにおいても最大耐力に至るまでの剛性を良好に模擬している。さらに、 τ_{max} を CEB 式から求めた Case1 および Case3 においては、ポストピークにおける耐力低下も緩やかとなった。また、confined モデルと unconfined モデルの相違点は最大耐力到達直後の耐力低下に現れる程度であった。したがって、付着すべりモデルにおいて付着割裂の影響を考慮したとしても、付着割裂ひび割れが生じる部材の挙動を模擬することは困難であり、異なるモデルを付加する必要があると考えられる。

4.3 くさび作用のモデル化に関する検討

前節において付着すべり挙動をモデル化したことにより、最大耐力に至るまでの剛性は模擬することができた。しかし、最大耐力は過大評価したままである。この原因として、異形鉄筋のふしからコンクリートへ伝達される応力伝達（くさび作用）がモデル化されていない点が挙げられる。そこで、主筋-コンクリート間の応力伝達を模擬するため、くさびバネ要素¹⁰⁾を導入する。

くさびバネ要素の概念図を図-14に示す。ボンドリンク要素を斜め45°に傾け、斜めに傾いた2本のバネは圧縮に対してのみ抵抗し、引張に対しては抵抗しないようなモデル化を行う。これにより、鉄筋の抜け出し時に生じるコンクリートへの斜め方向の応力伝達の模擬を試みる。圧縮時バネ剛性 K_w は、藤井¹⁰⁾の提案する次式より算出した。

$$K_w = \frac{\pi(d+l)LE \cos^2 \theta}{1} \quad (3)$$

ここで、 d ：鉄筋径、 l ：局所変形領域（ $=d20$ ）、 L ：1本あたりのバネの負担長さ ϕ はくさびバネの角度である。

本検討で用いる解析モデルの概要を図-15に示す。ここでは、梁の4隅に配筋された主筋にのみくさびバネ要素を導入し、主筋-コンクリート間にボンドリンク要素とくさびバネ要素を交互に配置した。この場合、くさび

作用の重複を避けるため、ボンドリンク要素には丸鋼に対する CEB の付着すべりモデルを採用した。また、隅角部以外の主筋に対してはボンドリンク要素のみ配置し、付着すべりモデルとして confined モデルを付与した。

解析結果を図-16に示す。比較のため、前節の Case3 の結果も併せて示す。最大耐力に至るまでは Case3 とほぼ等しい結果となったが、ポストピークにおける耐力低下がやや緩やかになった。しかし、最大耐力を過大評価している点は改善されなかった。この原因として、コンクリートに応力は伝達されたものの、付着割裂ひび割れの発生まで模擬できていない点が挙げられる。

表-3 CEBモデルのパラメータ

	Confined		Unconfined	
	Case1	Case2	Case3	Case4
s1	1.0mm		0.6mm	
s2	3.0mm		0.6mm	
s3	リブ間隔 (6.0mm)		1.0mm	
τ_{max} (N/mm ²)	CEB 式 $2.5\sqrt{f_c}$ (13.37)	AIJ 式 $0.7\sqrt[3]{f_c}$ (6.55)	CEB 式 $2.0\sqrt{f_c}$ (10.70)	AIJ 式 $0.56\sqrt[3]{f_c}$ (5.24)
τ_f	0.40 τ_{max}		0.15 τ_{max}	

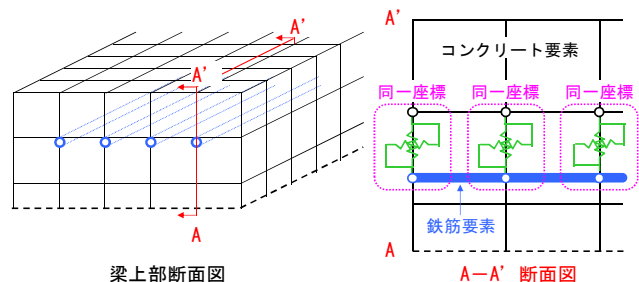


図-12 ボンドリンク要素を導入した解析モデル

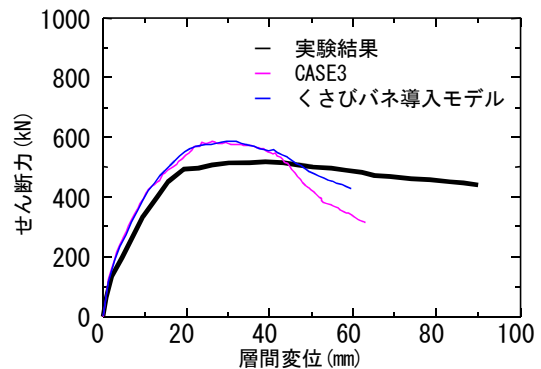


図-13 付着すべりモデルの検討結果

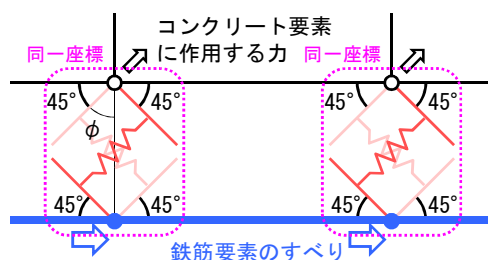


図-14 くさびバネ要素の概念図

4.4 ひび割れのモデル化に関する検討

本節では、付着割裂ひび割れを離散ひび割れによってモデル化する。図-17に離散ひび割れ部分のモデル化の概要を示す。付着割裂ひび割れは、付着割裂ひび割れを生じさせる可能性の高い梁隅角部の主筋に対して2方向設定し、離散ひび割れを平面界面要素によってモデル化した。平面界面要素の直交方向に対しては圧縮を剛とし、引張に対してはコンクリートの1軸引張強度に達した後引張抵抗を失う脆性ひび割れを仮定した。また、離散ひび割れ発生後は、せん断応力およびせん断剛性をゼロとした。主筋は、離散化した梁隅角部のコンクリート要素と梁本体のコンクリート要素の間に配置し、梁本体側にはボンドリンク要素を、梁隅角部側にはくさびバネ要素を配置した。

なお、この離散ひび割れを用いた解析モデルでは、バネ要素が多数混在して複雑であるため、解析途中で解が発散してしまう恐れがある。そこで、求解法として、標準 Newton Raphson 法、修正 Newton Raphson 法および一定剛性法の3つを検討した。その結果、最も解析結果が安定した一定剛性法を採用することにした。

離散ひび割れを用いた解析結果を図-18に示す。比較のため、前節のくさびバネ導入モデルも併せて示す。離散ひび割れを導入したことにより、くさびバネ導入モデルと比較して最大耐力が低下し、実験結果と良い対応を示していることがわかる。図-19および図-20にせん断力500kN時の材軸方向圧縮応力度分布を示す。図中の赤い部分は圧縮応力の高い位置を示している。図より、離散ひび割れ導入モデルでは、圧縮応力発生位置が梁内部に移動したことが確認できる。したがって、この現象に起因する応力中心間距離の減少が本モデルにおける耐力低下の要因であると考えられる。

5. 解析モデルの検証

本節では、前節までに構築した解析モデルを試験体 DB800 および DB804 に適用し、解析・検証を行う。

図-21に解析結果を示す。DB804に関しては、解析結果は剛性およびポストピーク挙動の傾向を良く捉えているが、最大耐力を若干過大評価する結果となった。一方、DB800に関しては、解析結果は最大耐力を大幅に過大評価している。図-3に示した試験体の破壊状況から確認できるように、DB808に比べてDB804は付着割裂ひび割れの発生はわずかであり、その影響は小さい。また、DB800においては、付着割裂ひび割れが生じせん断破壊をしている。しかし、解析結果では、いずれも付着割裂ひび割れが発生したため、付着割裂作用を過大評価していると考えられる。このことは、基本モデルによるDB800の解析結果が比較的实验結果に近いことから

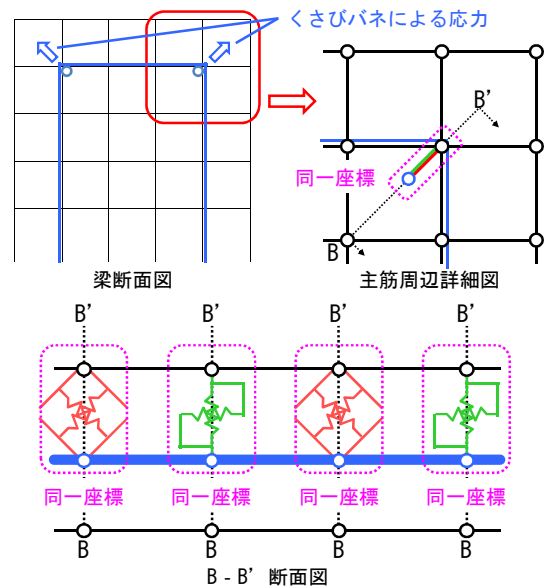


図-15 くさびバネ要素を導入した解析モデル

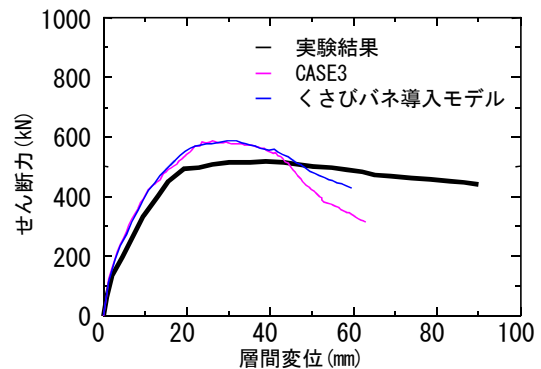


図-16 くさびばね要素の検討結果

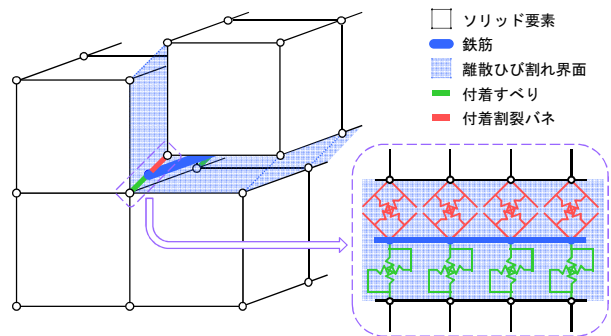


図-17 離散ひび割れおよび付着挙動のモデル化

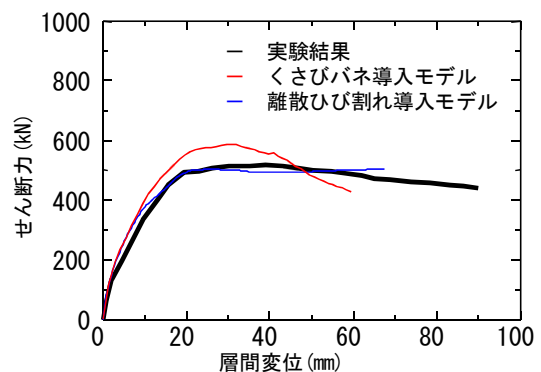


図-18 離散ひび割れ要素の検討結果

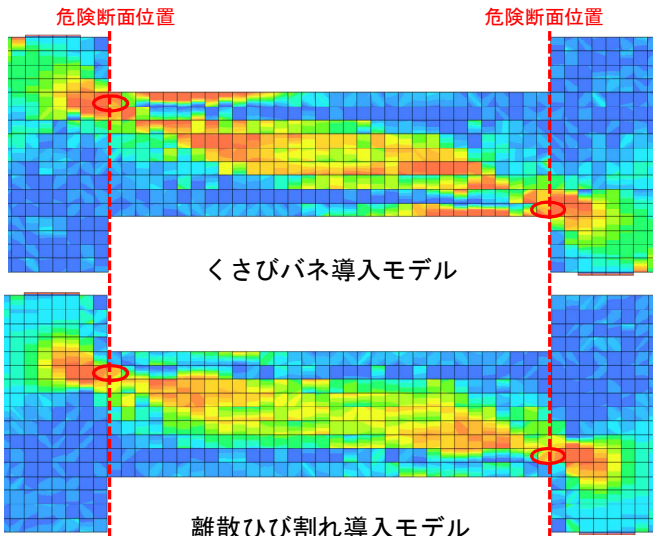


図-19 材軸方向圧縮応力分布図 (Q=500kN 時)

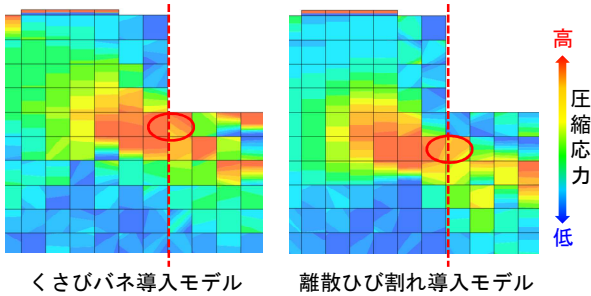


図-20 圧縮応力作用位置の変化

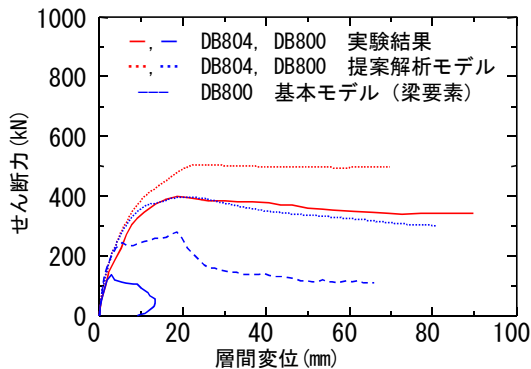


図-21 提案解析モデルの検証結果

も説明できる。本解析モデルにおいては、離散ひび割れ界面が引張耐力に達した後に引張抵抗が消失する脆性ひび割れを採用している。そのため、付着割裂ひび割れの影響を過大評価している可能性が高く、DB800においても離散ひび割れが生じる結果となったと考えられる。今後、離散ひび割れ界面の引張耐力後の挙動として引張軟化特性を考慮した解析モデルの検討が必要である。

6. まとめ

- (1) くさびバネ要素および離散ひび割れを導入することにより、付着割裂ひび割れの発生を模擬可能な解析モデルを構築した。

- (2) 付着割裂ひび割れが発生した場合、梁端の圧縮応力作用位置が梁内部に移動する現象を確認した。これにより、応力中心間距離が減少し、梁の耐力低下が生じると考えられる
- (3) 離散ひび割れ界面に脆性ひび割れを仮定した結果、付着割裂ひび割れの影響を過大評価する傾向が確認できた。今後、離散ひび割れ界面においてコンクリートの引張軟化特性を考慮した検討が必要である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究(C) 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) Ngo, D and Scordelis, A. C., :Finite Element Analysis of Rein-forced Concrete Beams, ACI Journal, Vol.64, No.3, March 1967, pp.152-163
- 2) 島弘ほか：ひび割れ近傍における鉄筋とコンクリートの付着力の低下，コンクリート工学年次論文集，Vol.31(2)，pp.643-648，2009
- 3) 金久保利之ほか：2 段配筋を有する鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度：その 1 実験概要と軽量コンクリートの付着割裂強度，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），1991.9
- 4) 渡辺健，田所敏弥，谷村幸裕，黒川浩嗣：逆対称曲げが作用したディープビームの破壊性状に関するせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.691-696，2007
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1999
- 6) Nakamura, H., and Higai, T.:Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 7) 大岡督尚ほか：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響，日本建築学会構造系論文集，第 529 号，pp.1-6，2000.3
- 8) CEB：CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd., 1993
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，2003
- 10) 藤井栄：鉄筋コンクリートにおける付着・定着特性とその部材性能に及ぼす影響に関する研究，京大大学学位論文，1992.1