

鋼板およびCFシートで補強されたRCはりの2次元弾塑性FE解析

松田 浩*¹ 崎山 毅*¹ 林山 豊*²
平嶋健太郎*³ 佐野 正*⁴ 岳尾 弘洋*⁴

2D elasto-plastic FE analysis of RC beams strengthened with bonded steel plates and CF sheets

by

Hiroshi MATSUDA*¹ Takeshi SAKIYAMA*¹ Yutaka HAYASHIYAMA*²Kentaro HIRASHIMA*³ Masashi SANNO*⁴ Kouyou TAKEO*⁴

Bonded steel plates reinforcement and bonded CF sheets reinforcement are adopted for repairing and strengthening of deteriorated concrete structures. In this study, two dimensional non-linear FE analysis of RC beams strengthened with bonded steel plates or bonded CF sheets were carried out. Taking epoxy resin in FE model into consideration, delamination of experimental results could be simulated.

1 まえがき

コンクリートは従来から鋼に比べ耐久性に優れており、劣化のないメンテナンスフリーな材料といわれていた。本来、コンクリート構造物は設計・施工計画が適切で適切な管理下で施工されたものであれば、耐久性を十分に発揮し社会的使命が終わるまで機能が失われるものではない。

しかし、この20年の間に海岸付近の塩害によるコンクリートの劣化から始まり、下水道関連施設のコンクリートの劣化、融雪剤によるコンクリート床版の劣化、鉄筋の腐食膨張によるコンクリート片の剥落など、厳しい環境下だけではなく通常的环境下でのコンクリート構造物の耐久性に対する信頼性が問題視されるようになってきた。また、これまでに建設されてきた多くのコンクリート構造物は耐用年数に達し補修の段階を迎えており、さらには、昨今の自動車交通車両の大型化と交通量の増加に伴ない、既設道路橋のコンクリート床版を補修・補強する必要に迫られている。

コンクリート構造物の防食・補修・補強技術として、鋼板や繊維強化プラスチック(FRP)、高強度ポリマーコンクリート薄板などを補修・補強材として用いた多くの工法が考案されるとともに、それらの耐荷性能が実験的に検討されている。

筆者らもこれまでポリマー含浸コンクリート(Polymer Impregnated Concrete:以後PICと略記)製薄板を曲げ引張縁および曲げ圧縮縁に設置したRCはりを製作し、ひびわれ発生から破壊に至るまでの弾塑性挙動について実験および解析により検討を行ってきた[1]~[5]。

PIC薄板とRC部材の接合面はPIC板表面を粗面仕上げしているため、実験でも接合部からはく離は生じなかった。したがって、解析においても完全付着状態と仮定してFEM解析を実施した。FEM解析結果は実験結果をよくシミュレートできることが確認された。

一方、鋼板や炭素繊維シート(以後CFシートと略記)を接着したRCはりの載荷実験では、接合面では

平成14年4月25日受理

*¹ 構造工学科 (Department of Structural Engineering)*² 大学院博士前期課程環境システム工学専攻 (Graduate Student, Dept. of Structural Engng.)*³ 横河ブリッジ(株) (研究当時:長崎大学大学院博士前期課程学生)*⁴ ショーボンド建設(株)

く離が生じることが確認されている[6][7][8].

本研究は、種々の補強材を用いてRCはりを補強する場合の最適補強設計法を確立することを最終目的とし、まず鋼板やCFシートを接着したRCはりの載荷実験を2次元FEM解析によりシミュレートすることを試みたものである。FEM解析結果は載荷実験をよくシミュレートできることがわかった。

2 鋼板を接着したRCはり

2.1 曲げ載荷実験

2.1.1 実験概要

鋼板接着により補強されたRCはりの力学的性質を明らかにすることを目的として曲げ載荷実験[7]が実施された。図-1に供試体形状寸法、表-1に供試体の諸元、また表-2に使用材料の物性値を示す。供試体は図-1に示すように、200×250×2100mm（スパン長:1900mm）である。

供試体はRCはりの曲げ引張縁に鋼板をエポキシ樹脂で接着させたものであり、表-1に示すようにRC部材の曲げ引張縁に接着された鋼板の厚さおよび接着長が異なっている。また、比較の基準となる無補強RCはりも含まれている。

表-1の供試体呼び名で、Nは比較の基準となる無補強RCはり、PおよびPSはRCはりの曲げ引張縁にエポキシ樹脂にて鋼板を接着補強したRCはりを示す。

PSシリーズの供試体は、曲げモーメントが最大となる載荷点直下より支点方向へはり高さの1.5倍（250×1.5=375mm）の長さを定着長とし、鋼板接着全長を900mmとした。

Pシリーズの供試体の鋼板接着長は、コンクリートの圧壊時まで鋼板端部で剥離を生じなかった過去の実験結果[6]より定めた。すなわち、はり高200mm、幅100mm、スパン長1500mmのRCはりに長さ1400mm、幅50mmの鋼板を定着して曲げ載荷を行った実験を参考にしたもので、コンクリートの圧壊時にも鋼板端部で剥離を生じなかった。鋼板補強供試体のうちPS-1およびP-1は、N-2に主鉄筋1本分に相当する断面積の鋼板を接着している。したがって鋼材量はN-1と同量である。また、PS-2およびP-2は主鉄筋2本分に相当す

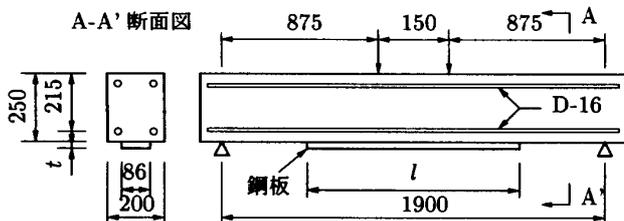


図-1 供試体概略図（単位：mm）

る鋼板を接着している。

表-1 供試体諸元

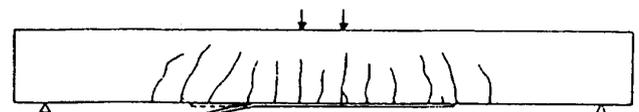
供試体呼び名	鋼板 (SS400)			主鉄筋		備考
	l(mm)	t(mm)	f _t (N/mm ²)	SD295	f _y (N/mm ²)	
N 1	-	-	-	3D16	337	無補強RC梁
N 2	-	-	-			
PS-1	900	2.3	243	2D16		銅板の剥離あり
PS-2	900	4.5				
P-1	1800	2.3				
P-2	1800	4.5				

表-2 材料物性値

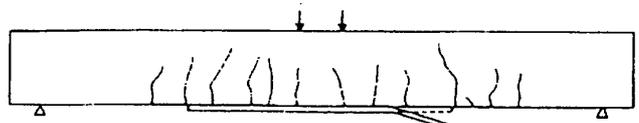
エポキシ樹脂	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
		82.3	56.0	15.5
鋼材	鋼材種類	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
	鉄筋 D16	483	337	1.76×10 ⁵
	鋼板 t=2.3mm	435	243	1.93×10 ⁵
	鋼板 t=4.5mm	434	285	1.93×10 ⁵
コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
	38.8	2.93	2.0×10 ⁴	

2.1.2 実験結果

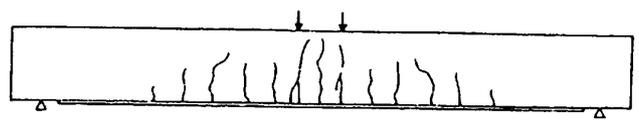
PS供試体の場合、初期ひびわれの発生位置はスパン中央付近であったが、荷重が増加すると鋼板先端のRCはり下縁にも曲げひびわれが発生した。鋼板先端に発生したひびわれは荷重の増加に伴って進展し、斜めひびわれを形成しスパン中央付近のひびわれよりも早い時期に圧縮域に達した。鋼板は、斜めひびわれの進展中に鋼板端部付近の約200mmの範囲でコンクリー



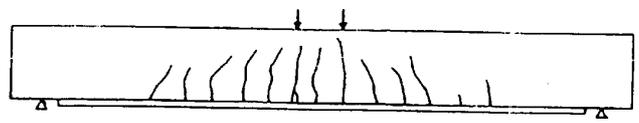
(a) PS-1 (鋼板剥離時)



(b) PS-2 (鋼板剥離時)



(c) P-1 (破壊時)



(d) P-2 (破壊時)

図-2 ひびわれ発生状況

ト面からはく離した。

Pシリーズの供試体の場合、曲げモーメントが最大となるスパン中央付近で初期ひびわれが発生したのち、鋼板の降伏、主鉄筋の降伏、上縁コンクリートの圧壊に至る曲げ破壊のプロセスを示し、鋼板のはく離は見られなかった。

図-2(a)~(d)にPS-1およびPS-2供試体における鋼端部ではく離が発生した時点でのひびわれ状況、およびP-1およびP-2供試体の圧壊時におけるひびわれ状況を示す。同図より、PSシリーズの供試体においては、鋼板端部に発生したひびわれはスパン中央付近に発生したひびわれよりも進展が早く、鋼板のはく離しないPシリーズの供試体の場合とは異なったひびわれ進展状況を示している。

2.2 FEM解析

2.2.1 解析モデル

供試体NシリーズおよびPシリーズの解析モデルは、構造系および荷重条件が左右対称であることから1/2モデルを採用した。また、供試体PSシリーズに関しては鋼板のはく離が片端部から発生したので、そのことを考慮するため全体モデルを用いて解析を行った。2次元弾塑性解析を行なうために、コンクリートを8節点平面ひずみ要素、鉄筋を8節点平面ひずみリバー要素、鋼板およびエポキシ樹脂層を8節点平面応力要素でモデル化した[9]。荷重荷重は荷重制御型の弧長増分を与えた。作成した解析モデルの一例として、PS-2のメッシュ分割図を図-3に示す。

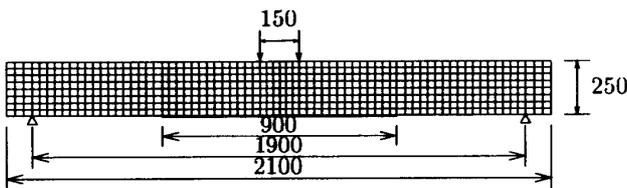


図-3 メッシュ分割図(PS-2) (単位: mm)

2.2.2 構成則

本解析に用いた構成則を図-4に示す。RCはりの非線形解析を行うにあたり、鉄筋とコンクリートの構成則を適切に定める必要がある。本解析に使用する構成則について、コンクリート、鋼板およびエポキシ樹脂の構成則は材料試験結果を参考として作成した。また、鉄筋の構成則においては、RCはりのひびわれ発生後における鉄筋とコンクリートの平均応力-平均ひずみを算定する解析プログラムを用いて鉄筋とコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を算定して作成した[10]~[13]。平均応力-平均ひずみ関係を作成する

プログラムのフローチャートを図-5に示す。また、平均応力-平均ひずみを算定する場合、引張鉄筋の有効断面積が大きく影響する。本解析では次式(1)より有効断面積を算定した[14]。

$$h_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot d_b \cdot \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \quad (1)$$

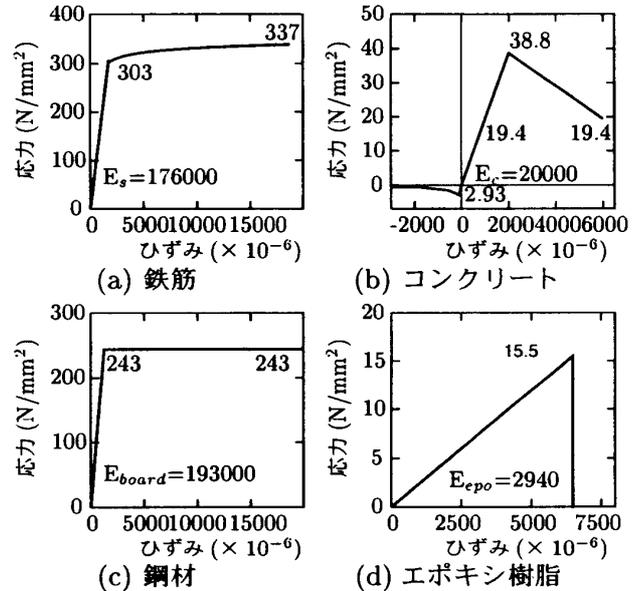


図-4 構成則

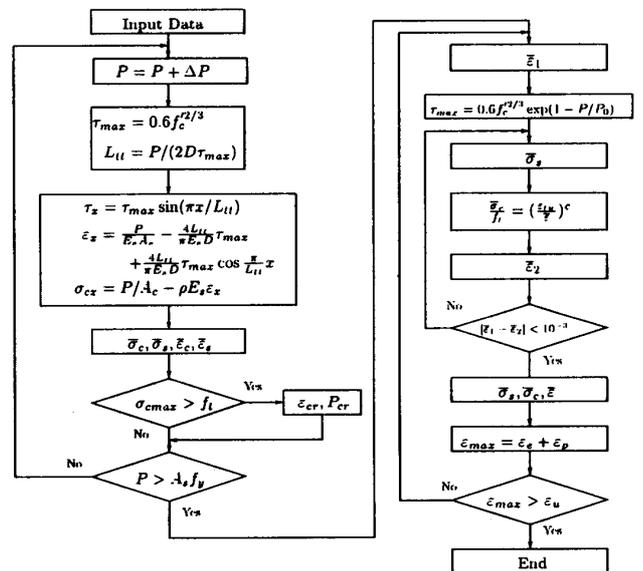


図-5 平均応力-平均ひずみ関係算定フロー

2.2.3 解析結果

図-6に実験および解析結果における荷重-スパン中央のたわみ関係を示す。同図(a), (b)より、無補強RCはり(Nシリーズ)および鋼板のはく離がない場合(Pシリーズ)において、本解析結果は実験結果とほぼ一致していることがわかる。また、同図(c), (d)に鋼板のはく離が生じたPS-1, PS-2供試体の荷重-スパン

ン中央のたわみ関係を示す。実験では、鉄筋降伏とほぼ同時に鋼板のはく離が生じた。

図-6(c), (d)において、解析①は鋼板とコンクリートを完全付着として、鋼板がはく離しないと仮定した場合の解析結果である。同図より、鋼板がはく離するまでの実験結果とよく一致しているが、はく離後の実験結果と異なる。解析②は鋼板のはく離を考慮した場合の解析結果である。同図より、樹脂層をモデル化することによって鋼板のはく離が解析的にシミュレートできることがわかる。なお、解析でははく離が急速に進展して計算が終了した。

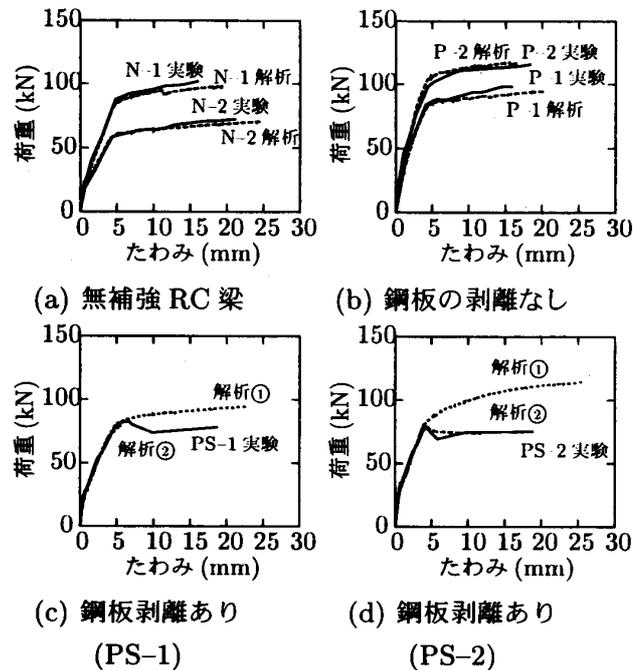


図-6 荷重とたわみの関係

図-7に鋼板はく離時におけるPS-2の解析結果での変形状況図を示す。同図より、鋼板端部付近のエポキシ樹脂層ではせん断変形が生じていることがわかる。

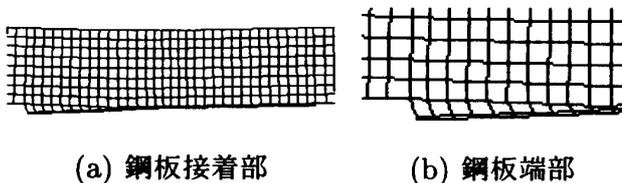


図-7 変形状況図 (変形量は2倍に拡大)

3 炭素繊維シートを接着したRCはり

3.1 曲げ載荷実験

3.1.1 実験概要

CFRP接着工法により曲げ補強した曲げ破壊先行型のRCはりを用い、載荷時のせん断スパン比と炭素繊維シート補強量を変化させた曲げ載荷試験が実施された[8]。表-3に実験供試体の諸元、図-8に実験供

試体の概略図を示す。

表-3に示す実験パラメータと各試験体の破壊形状、ひびわれ状況を考察することにより、各種破壊パターンの分類と補強効果について検討を行った。実験供試体は無補強RCはり、また炭素繊維シートを1層、2層、3層と補強量を変化させたもの、さらに、炭素繊維シートを1層貼付した供試体のせん断スパン比を変化させたもの、計7体作成した。

表-4に実験供試体に使用した材料の物性値を示す。

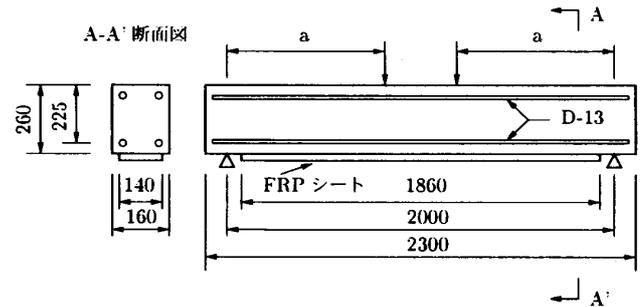


図-8 供試体概略図 (単位: mm)

表-3 供試体諸元

供試体呼名	補強量	せん断スパン a(mm)	せん断スパン比 a/d
case 1	無補強	1000	4.4
case 2	1層	800	3.56
case 3		700	3.11
case 4		550	2.44
case 5	2層	1000	4.44
case 6	3層		

表-4 材料物性値

CFシート	引張強度 (N/mm ²)	設計厚さ (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	日付量 (g/mm ²)
		3.48×10^3	0.167	2.30×10^5
鉄筋	鉄筋の種類および呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
	SD295, D13	356	2.0×10^5	
コンクリート	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	供試体の種類
	2.65 2.85	31.3 39.0	2.35×10^4 2.85×10^4	

3.1.2 実験結果

無補強供試体case 1は、鉄筋降伏後にコンクリートが圧壊する一般的な曲げ破壊性状を示した。CFシートで接着補強された供試体 (case 2 ~ case 7) は、鉄筋降伏後もCFシートが引張力を負担し、case 1と異なる破壊性状を示した。

図-9(a)~(g)に載荷実験後の各供試体のひびわれ分布を示す。なお、CFシートを接着補強した供試体は、CFシートの片面が全面剥離した時点で載荷を終えている。剥離面はすべて表層部の凝集破壊であった。

せん断スパン比が小さくなると、ひびわれ性状は曲げひびわれから曲げせん断ひびわれへと移行していることがわかる。また、せん断スパン比が2.44の供試体において、かぶりコンクリートが多く欠落していることにより、ビーム作用の消失がうかがえる。

また、CFシート補強量を多くすることにより、曲げせん断ひびわれが多くなってきており、CFシートの補強効果によって実験体の曲げ剛性が上がり、せん断破壊モードに移行していることがわかる。

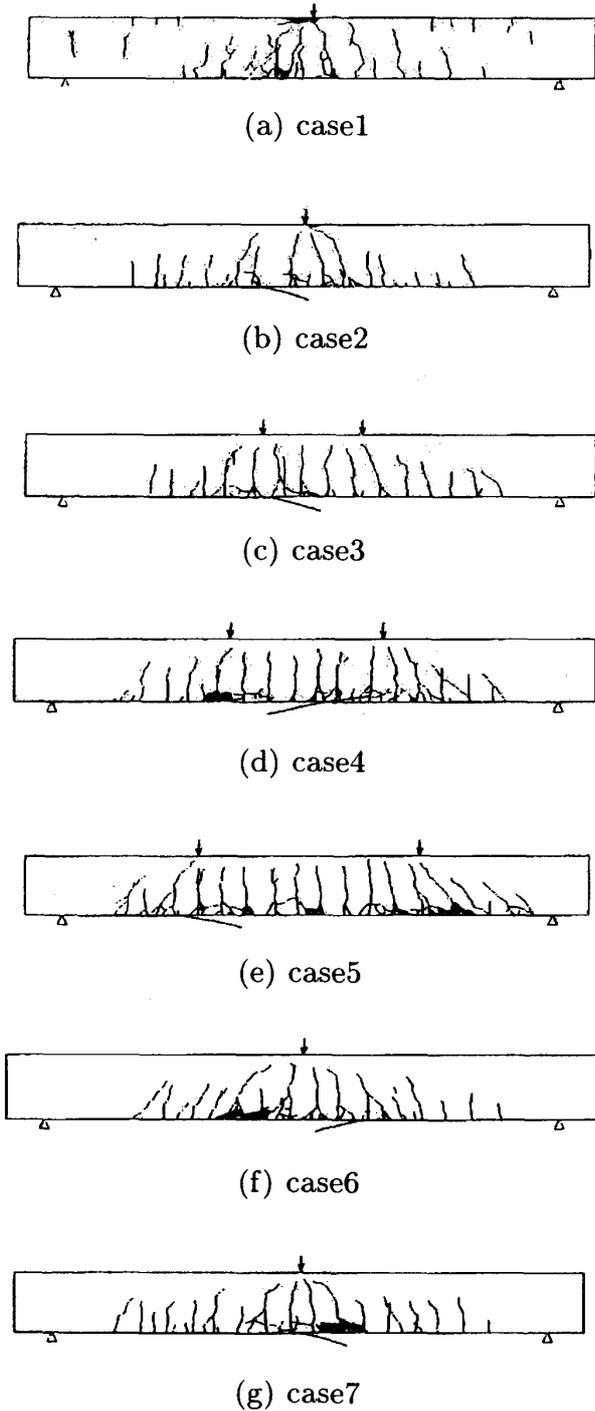


図-9 ひび割れ分布

3.2 FEM解析

3.2.1 解析モデル

供試体は構造系および荷重条件が左右対称であるが、CFシートの剥離を考慮するため全体モデルで解析を行なった。コンクリートを4節点平面ひずみ要素で、鉄筋を4節点平面ひずみリバー要素で、CFシートおよびエポキシ樹脂層を4節点平面応力要素でモデル化した[9]。荷重載荷は荷重制御型の弧長増分を与えた。

3.2.2 構成則

本解析で用いた構成則を図-10(a)~(d)に示す。前節で述べたように、コンクリートおよびCFシートは材料試験結果を参考とし、鉄筋については平均応力-平均ひずみ関係を算出して作成した。

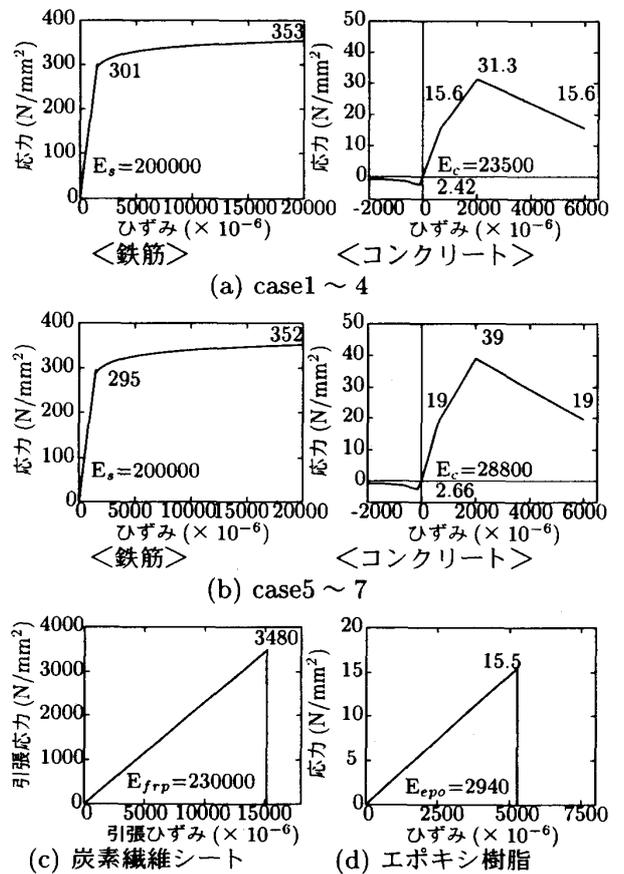


図-10 構成則

3.2.3 解析結果

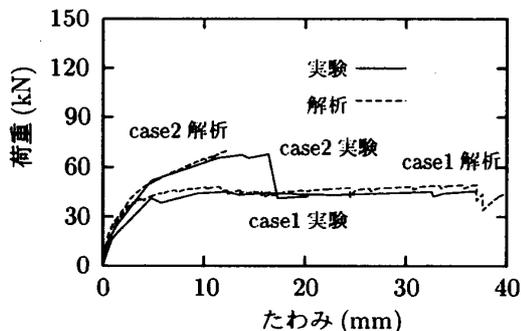
図-11にcase 1~7の実験および解析結果における荷重とスパン中央のたわみの関係を示す。(a)図はCFシートの有無、(b)図はせん断スパン比、(c)図はCFシート接着枚数に注目して比較したものである。

図-12(a)より、無補強のRCはり (case 1) の解析結果は実験結果と耐力も変形能もよく一致している。

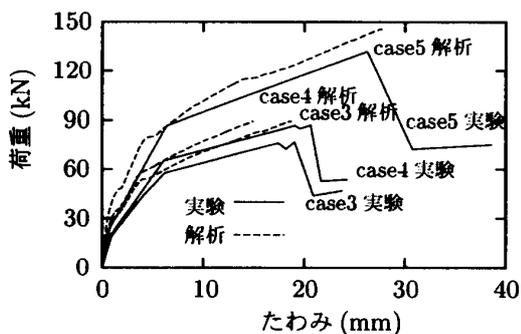
また、シート補強したcase 2のはく離までの解析結

果は、耐力はほぼ実験結果と一致しており、変形能は少し小さくなっている。図-11(b)のせん断スパン比を変化させた解析結果も、CFシートがはく離するまでは、耐力も変形能もほぼ実験結果と一致している。CFシートの接着枚数を変化させた図-11(c)の解析結果は、実験結果と比べると、耐力は少し大きく、変形能は小さく評価されている。本解析結果より、CFシートがはく離するまでの実験結果をシミュレートできていることがわかる。

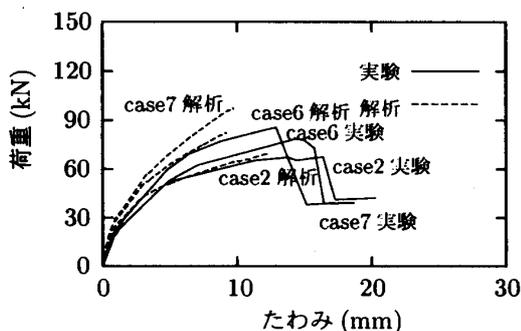
なお、解析においては、CFシートのひずみは破断ひずみに達する前に、荷点直下近傍のエポキシ樹脂層の要素が収束せずに計算が終了した。実験においても、荷点直下近傍でまずCFシートのはく離が生じ、さらに支点方向にはく離が進行し破壊に至っている。CFシートを接着して補強したRCはりにおいてはシートのはく離が終局限界状態とみなせるので、本解析で



(a) case 1, 2 (補強有無での比較)



(b) case 3, 4, 5 (せん断スパン比での比較)



(c) case 6, 7 (シート接着枚数での比較)

図-11 荷重とたわみの関係

も計算がストップした時点で十分であると考えられる。

4 考察およびまとめ

本研究では、鋼板およびCFシートなどの補強材を接着したRCはりの力学的挙動特性を調べるために実施された実験結果を弾塑性FEM解析によりシミュレーションすることを試みた。本研究成果は以下のようにまとめられる。

1. 鋼板を接着したRCはり

- (a) 接着層であるエポキシ樹脂層を解析モデルに取り入れることにより、鋼板がはく離するまでをシミュレーションすることができた。
- (b) 鋼板を接着したRCはりでは、鋼板のはく離は支点側の端部から発生した。解析でも実験と同様に鋼板の支点側の端部がせん断変形していることが示された。
- (c) はく離が生じた供試体のひびわれ発生・進展状況は、実験結果とほぼ同じような結果が解析でも得られ、鋼板端部付近からせん断ひびわれが発生していることが認められる。
- (d) 鋼板を接着したRCはりでは、はく離の発生は鋼板の接着長に依存しており、接着長が長くなれば、はく離は生じない。本解析でははく離が生じなかった供試体に対しては完全付着の仮定の下で解析したが、実験と同様に接着長に依存することを確認するため後日再計算することになっている。

2. CFシートを接着したRCはり

- (a) 接着層であるエポキシ樹脂層を解析モデルに取り入れることにより、CFシートがはく離するまでをシミュレーションすることができた。
- (b) CFシートを接着したRCはりでは、CFシートのひずみが破断ひずみに達する前に、荷点直下近傍のエポキシ樹脂層の要素が収束せずに計算が終了した。実験においても、荷点直下近傍でまずCFシートのはく離が生じ、さらに支点方向にはく離が進行し破壊に至っている。鋼板接着の場合とはこの点が異なっている。CFシートを接着して補強したRCはりにおいてはシートのはく離が終局限界状態とみなせるので、本解

析でも計算がストップした時点で終了して十分と考えられる。

- (c) CFシート補強の有無，せん断スパン比を変化させた場合，およびCFシートの接着枚数を変化させた場合，いずれの場合も本解析により実験結果をシミュレートすることができた。

3. RCはりの構成則

RCはりの非線形解析を行うにあたり，鉄筋とコンクリートの構成則を適切に定める必要がある。本研究においては，コンクリート，鋼板およびエポキシ樹脂の構成則は材料試験結果を採用した。鉄筋の構成則は，RC部材の一軸引張部材モデルから算出したひびわれた鉄筋コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を算定して作成した。また，平均応力-平均ひずみを算定する場合，引張鉄筋の有効断面積は式(1)により決定した。このようにして構成則を定めて，非線形FEM解析を実施するとほぼ実験結果をシミュレートできることが確認された。

5 あとがき

本研究では，鋼板およびCFシートなどの補強材を接着したRCはりの弾塑性FEM解析は実験結果をよくシミュレートできることが示された。今後，種々の材料特性をもつ補強材を接着する場合も，あらかじめ解析によりはく離荷重を推定することにより，最適な補強設計ができるものと考えられる。

最後に，本研究の数値解析は出水享君（長崎大学大学院修士課程）に協力して戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 松田浩，彦坂熙，鶴田健，出光隆，崎山毅，山口浩平：高耐久性埋設型枠接合部をひびわれ誘導目地としたRC構造物のひびわれ解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.47-54，1998
- [2] H.Matsuda, T.Sakiyama, K.Tsuruta, H.Hikosaka and T.Idemitsu : Crack Analysis of RC Beams with Optimally Spaced PIC Boards, CONSEC'98 Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, pp.1566-1575, 1998
- [3] 鶴田健，松田浩，彦坂熙，山口浩平：高耐久性埋設型枠接合部をひびわれ誘導目地としたRCはりの2次元FEM解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.587-592，1998
- [4] K.Tsuruta, H.Matsuda, T.Sakiyama, C.Morita, A.Koga and T.Idemitsu : Ultimate Behavior of RC beams with PIC boards in flexural compression zone, CONSEC'01 Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, Univ. of British Columbia, Vol.2, pp.1997-2006, 2001
- [5] 松田浩：高耐久性埋設型枠接合部をひびわれ誘導目地としたRC構造物のひびわれ解析，平成7～9年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)成果報告書，1997
- [6] 佐野正：鋼板接着によるコンクリート構造物の補強設計法に関する研究，東北大学学位論文，1996
- [7] 佐野正，三浦尚：鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.117-129，1996
- [8] 岳尾弘洋，松下博通，佐川康貴，牛込敏幸：せん断スパン比を変化させたCFRP補強はりの曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.205-210，1999
- [9] 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，村上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力，土木学会論文集，No.689，I-57，pp.239-249，2001.10
- [10] 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，1991
- [11] 篠原賢至，島弘：一軸鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生過程および引張剛性の解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.2，pp.159-164，1989.
- [12] 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.239-247，1987.
- [13] H.Salem, K.Maekawa : Spatially Averaged Tensile Mechanics for Cracked Concrete and Reinforcement under Highly Inelastic Range, J.Materials, Conc.Struct, Pavements, JSCE, No.613/V-42, 1999.
- [14] X.An, K.Maekawa, H. Okamura : Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Concrete Library of JSCE, No.31, 1998