

離散ひび割れ配置モデルの FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する 数値解析への適用性

An applicability of a proposed crack distribution model in numerical analysis of
RC beams reinforced with FRP sheet

張 広鋒*, 岸 徳光**, 三上 浩***

Guangfeng ZHANG, Norimitsu KISHI, and Hiroshi MIKAMI

*修(工) 室蘭工業大学大学院博士後期課程 工学研究科 建設工学専攻(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*** 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-132 千葉県流山市駒木 518-1)

In order to establish a numerical analysis method for rational predicting load-carrying behavior of RC beams reinforced with FRP sheet, here, a crack distribution model was proposed based on the experimental results for twenty-four reinforced RC beams. These experiments were conducted taking shear rebar ratio, allocating position of shear rebar referring to loading point, shear span ratio, reinforcement volume ratio and material of FRP sheet as variables. Three-dimensional elasto-plastic FE analyses on load-carrying behavior of the RC beams were conducted applying the proposed crack distribution model. Comparing these analytical results with experimental ones, it is seen that load-carrying behavior of the RC beams reinforced with FRP sheet can be rationally predicted by applying the proposed crack distribution model.

Key Words : RC beam, FRP sheet, Crack distribution, nonlinear analysis

キーワード : RC 梁, FRP シート, ひび割れ分布, 非線形解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 梁の引張面に連続繊維シート (FRP シート) を貼り付けて曲げ補強を実施することにより, RC 梁の耐荷性能は飛躍的に向上できることが実験的・解析的に明らかになっている^{1)~4)}。しかしながら, このような FRP シート曲げ補強 RC 梁に鉛直荷重を載荷する場合には, 通常の RC 梁における上縁コンクリートの圧縮破壊の他, 図-1 に示すような破壊モード, すなわち, 1) シートの破断, 2) 等せん断力区間に発生する斜めひび割れに起因するピーリング破壊, 3) シート端部におけるかぶりコンクリートの引き剥がれ破壊, 等によって終局に至るケースも多い。特に破壊形式 1), 2), 3) のいずれかによって RC 梁が終局に至る場合には, シートの破断あるいはコンクリート底面からの剥離によってシートの補強効果が急激に失われ, RC 梁の耐荷性能も低下することが実験的・解析的に明らかになっている。すなわち, FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や変形性能は破壊形式と密接に関連している。

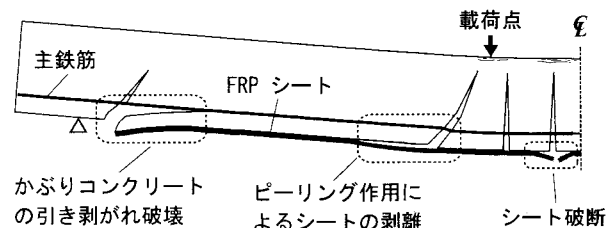


図-1 破壊モードの模式図

著者

表－１ 各試験体の一覧

シリーズ	試験体名	断面寸法 幅 b × 高さ h (mm)	純スパン 長 (mm)	かぶり 厚さ c (mm)	せん断 スパン比	スター ラップ径	スター ラップ間隔 (mm)	補強材料 および枚数	引張剛性 $E_f \cdot A_f$ (MN)	備考欄
A	A-200-D10	150 × 340	3,000	40	4.0	D10	200	AK, 2 層	8.78	スターラップ 間隔 (鉄筋径 を統一)
	A-150-D10 *1)					D10	150			
	A-100-D10 *2)					D10	100			
	A-50-D10					D10	50			
	A-200-D13	150 × 340	3,000	40	4.0	D13	200	AK, 2 層	8.78	スターラップ 間隔 (鉄筋比 を統一)
	A-100-D10 *2)					D10	100			
	A-50-D6					D6	50			
	A-150-D10 *1)	150 × 340	3,000	40	4.0	D10	150	AK, 2 層	8.78	スターラップ の配置位置
	A-150-D10-R					D10	150			
B	B-250-C1	150 × 250	2,600	40	5.0	D10	100	C1, 1 層	10.58	曲げ補強シー トの引張剛性 の異なる試験 体
	B-250-C2							C2, 1 層	4.99	
	B-250-AK							AK, 1 層	4.39	
	B-2									

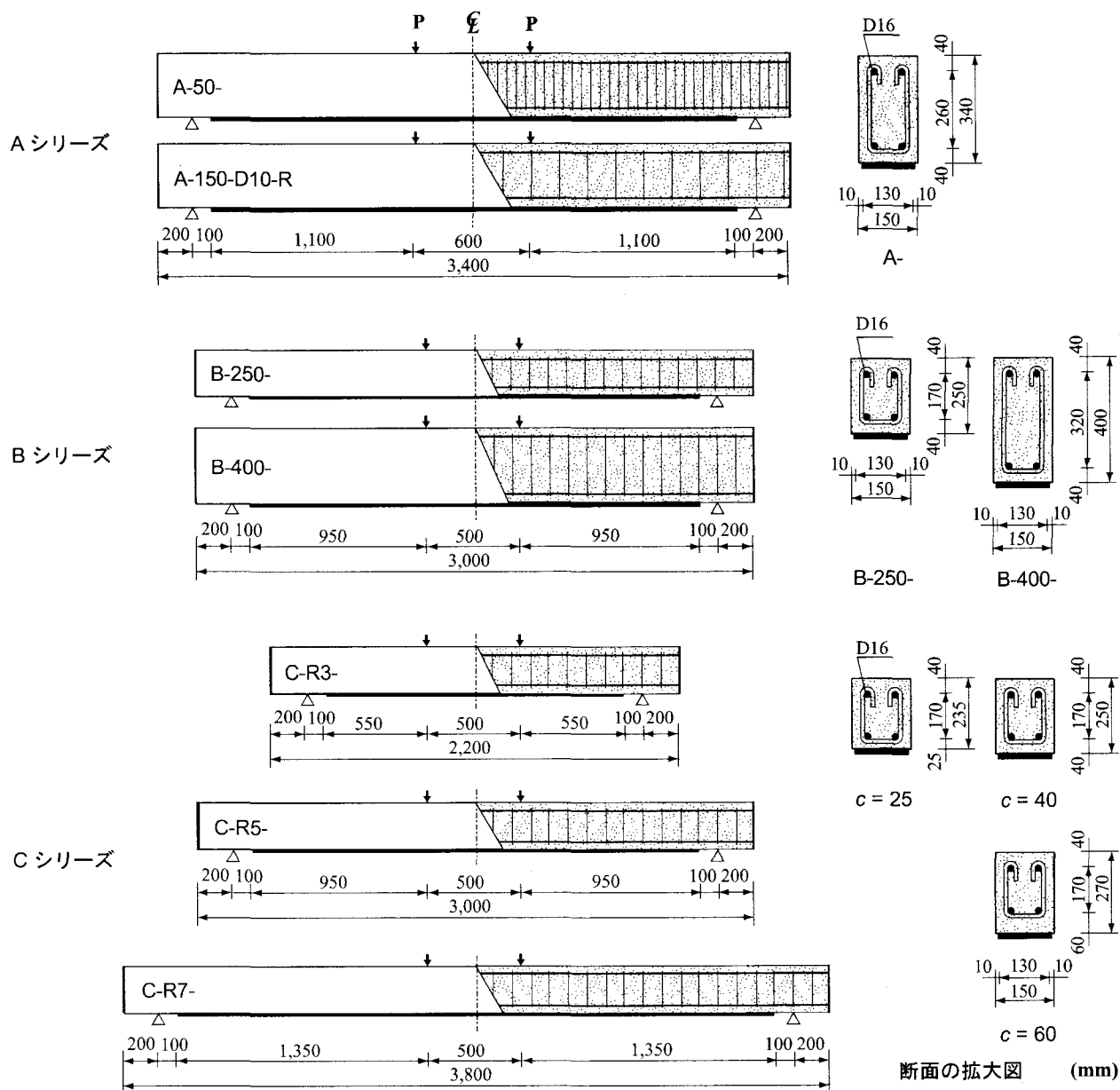


図-2 試験体概要図

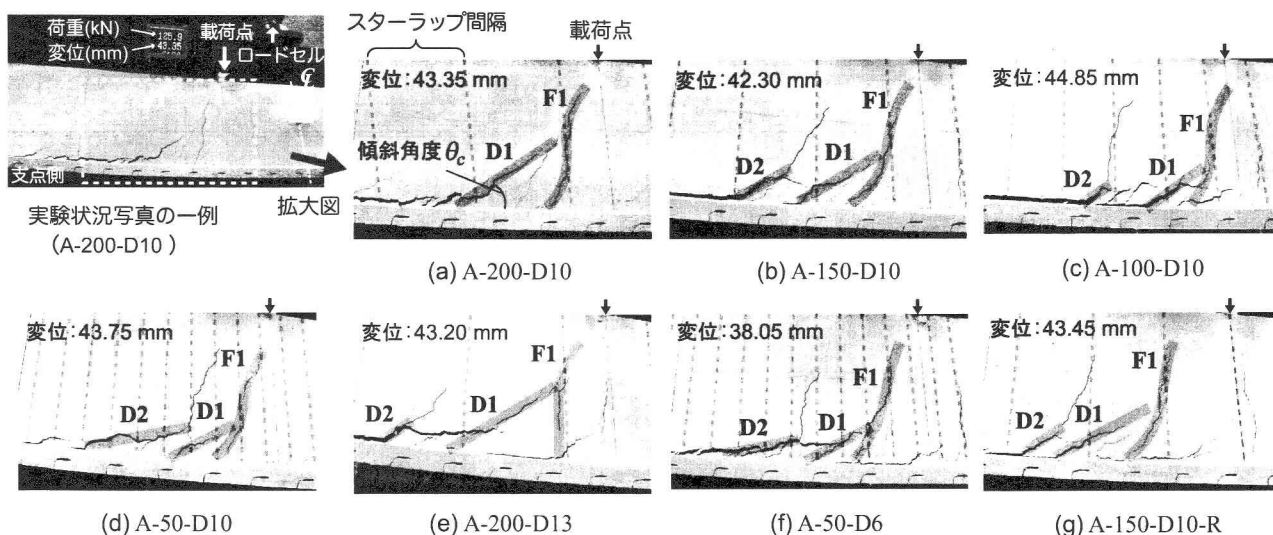
を実施し、実験結果と比較することにより検討を行っている。なお、本研究では、スターラップの鉄筋比、スターラップ間隔を等しくした場合の載荷点とスターラップの空間的な位置関係（以後、単にスターラップの配置位置）、せん断スパン比、かぶり厚さ、FRPシートの引張剛性（弾性係数 $E_f \times$ 断面積 A_f ）の異なる全 24 体の矩形 RC 梁を用いて検討を行っている。

2. 実験概要

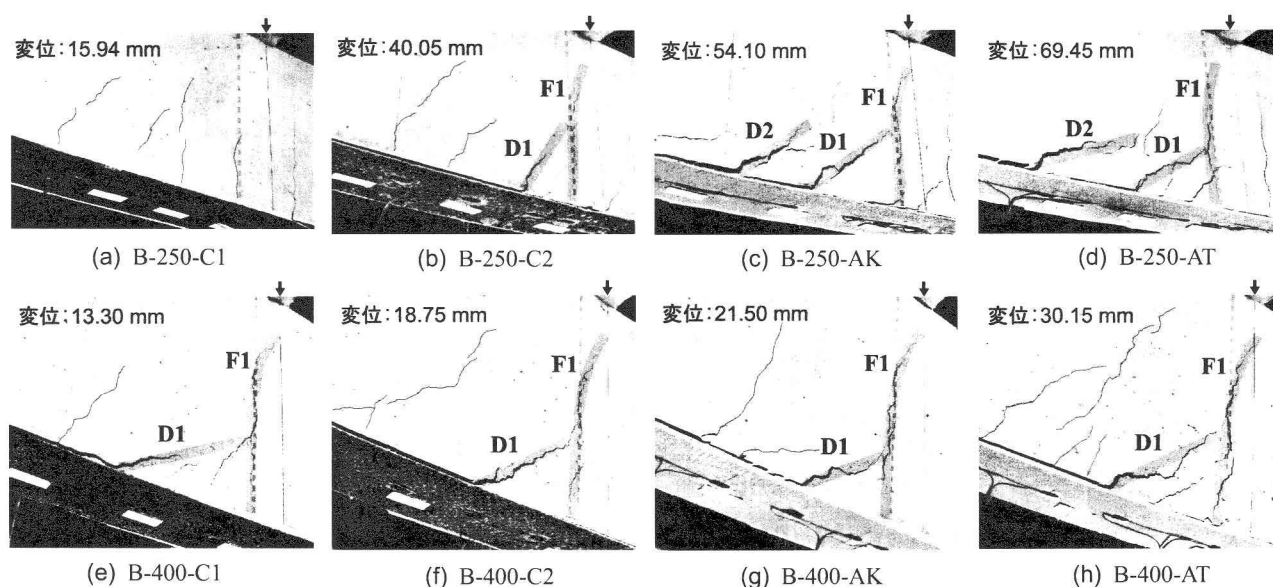
表-1 には、本研究に用いた試験体の一覧を示している^{8),9)}。これらの試験体は、検討項目に対応して表に示す A, B, C の 3 シリーズに分類されている。すなわち、A シリーズはスターラップの鉄筋比や配置位置による影響を検討するための試験体である。試験体名

の第 1 項目はシリーズ名、第 2 項目はスターラップ間隔 (mm)、第 3 項目はスターラップの鉄筋径を表している。B シリーズは補強シートの引張剛性による影響を検討するためのものである。試験体名の第 1 項目はシリーズ名、第 2 項目は断面高さ (mm)、第 3 項目は補強用の FRP シート材料（後述）である。また、C シリーズはかぶり厚さやせん断スパン比による影響を検討するための試験体である。試験体名の第 1 項目はシリーズ名、第 2 項目はせん断スパン比、第 3 項目はかぶり厚さ (mm) を表している。ここで、せん断スパン比は小数点以下を丸め整数値で示している。

図-2 には、各試験体の形状寸法および配筋状況を示している。これらの試験体は、いずれも軸方向鉄筋に D16 (SD345) を用いた複鉄筋矩形 RC 梁である。各 RC 梁の底面には、幅 130 mm の一方向 FRP シートを



写真－1 最大荷重時付近におけるひび割れ分布およびシート剥離状況 (A シリーズ)



写真－2 最大荷重時付近におけるひび割れ分布およびシート剥離状況 (B シリーズ)

梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に貼り付けている。なお、シート接着部のコンクリート表面には附着性能の向上に有効であるショットブラスト処理(処理深さ 1~2 mm 程度)を施している。シート上には、ゲージ長 10 mm のひずみゲージ(測定範囲: 20,000 μ)をスパン中央部から両支点方向に 100 mm 間隔および载荷点直下に貼り付けている。本実験における測定項目は、载荷荷重、スパン中央点変位(以後、単に変位)および FRP シート各点のひずみであり、それぞれ静荷重測定用ロードセル、非接触式レーザ変位計およびひずみゲージを用いて測定している。各センサーからの出力データは、アンプ内蔵のデジタルメモリーレコーダを用いてサンプリング周波数 10 Hz にて一括収録している。

表－2 には、各試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の力学特性値を示している。コンクリートの圧縮

強度 f'_c および鉄筋の降伏強度 f_y は、それぞれ圧縮試験および引張試験結果によるものである。また、コンクリートの引張強度 f_t や弾性係数 E_c は、解析手法の一般性を考慮して、全て CEB-FIP Model Code⁽¹⁰⁾を参考にして、以下のように推算している。

$$E_c = E_{c0} \cdot (f'_c/10)^{1/3} \quad (1)$$

$$f_t = 1.4 \cdot (f'_{ck}/10)^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 $E_{c0} = 2.15 \times 10^4$ (MPa), $f'_{ck} = f'_c - 8</$

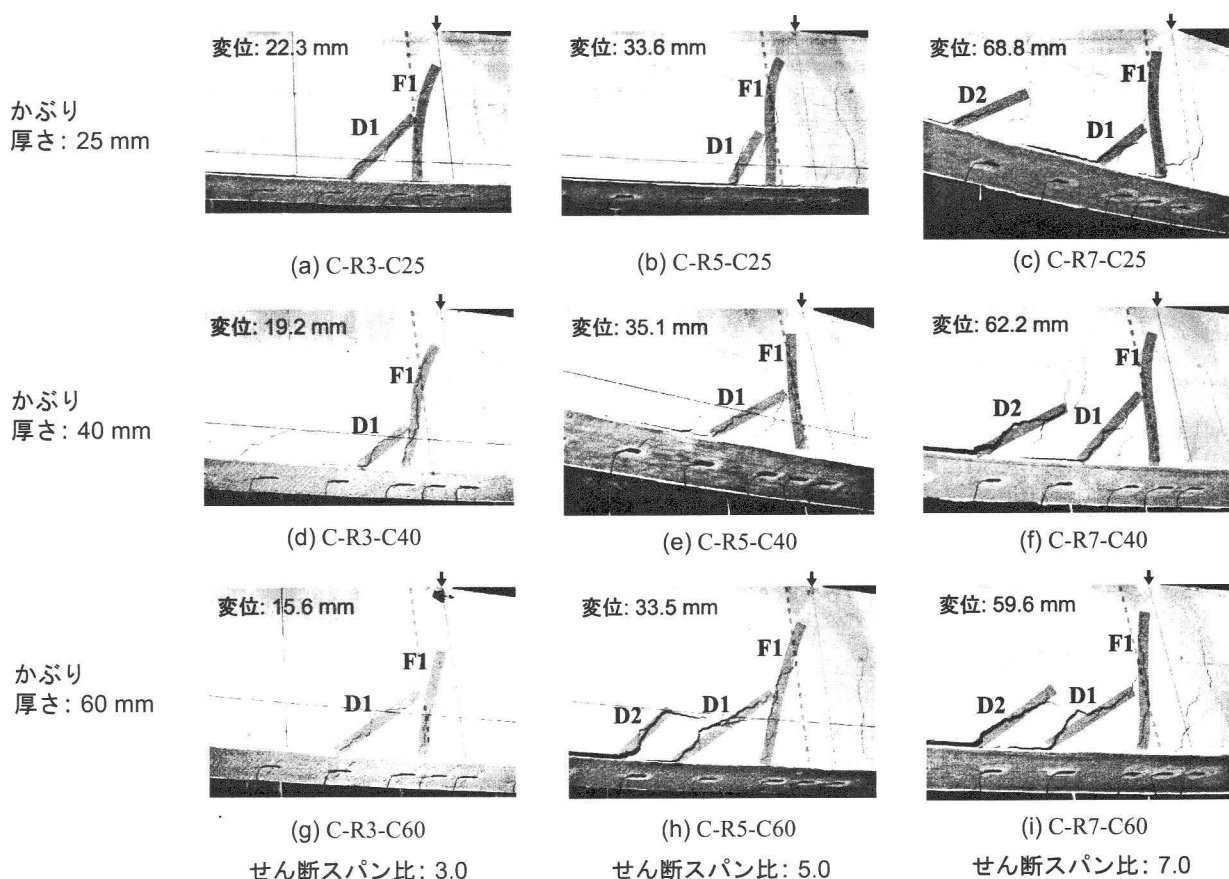


写真-3 最大荷重時付近におけるひび割れ分布およびシート剥離状況 (C シリーズ)

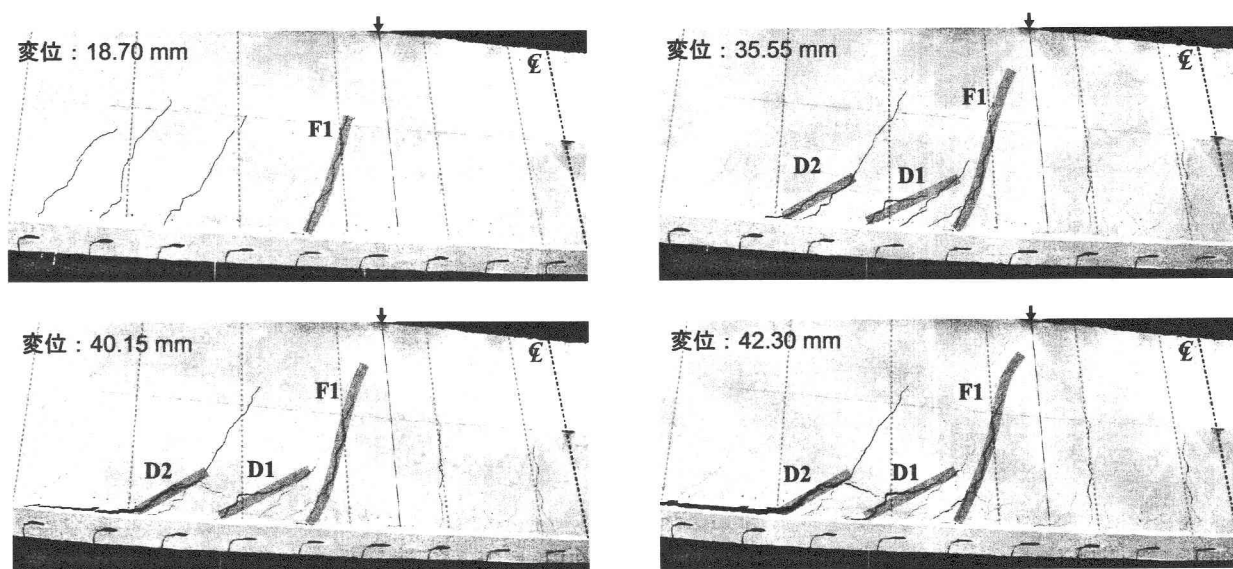


写真-4 ひび割れの開口およびシート剥離の進展 (A-150-D10 試験体)

写真は、いずれも最大荷重時付近における載荷点近傍に発生する斜めひび割れの分布状況を拡大したものである。

写真-1 は、A シリーズの各試験体に関する写真である。図中、(a)、(b)、(c)、(d) 図はスターラップの鉄筋径を一定にして配置間隔を変化させた試験体、(c)、

(e)、(f) 図はスターラップの鉄筋比を一定にしてその鉄筋径と配置間隔を同時に変化させた試験体、(b)、(g) 図はスターラップの鉄筋径や配置間隔を等しくして載荷点の直下にスターラップを配置している試験体と配置していない試験体の破壊状況写真である。これらの写真より、スターラップの鉄筋径や配置位置が異なる

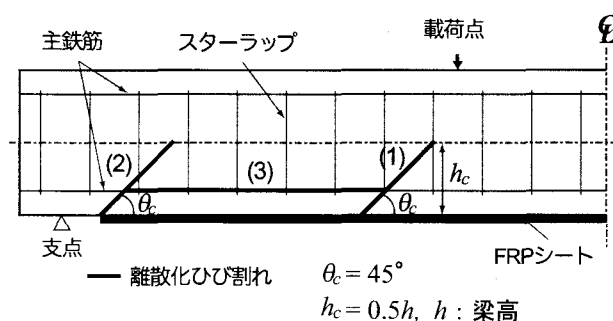
場合 (c, e, f, g 図) には, シート剥離を励起する斜めひび割れの発生位置や分布形状がお互いに異なっていることが分かる. しかしながら, いずれの試験体においても, (a) 図の A-200-D10 試験体と同様, 1) 荷重点から支点側の第 1 本目のスターラップ付近に曲げひび割れ **F1** が開口している, 2) かつ斜めひび割れ **D1** が梁底面から曲げひび割れ **F1** の中央部に向かって発生している, 3) 斜めひび割れ **D1** の他, **D1** より支点側に斜めひび割れ **D2** が発生している試験体もある, また, 4) 斜めひび割れ **D1** あるいは **D2** の先端部から FRP シート剥離が発生している, 等が分かる.

写真-2 には, B シリーズの各試験体の実験結果について示している. (a)~(d) 図は, 断面高さ 250 mm の試験体, (e)~(h) 図は, 断面高さ 400 mm の試験体に関する結果である. これらの写真より, シート破断によって終局に至った (a) 図の B-250-C1 試験体を除き, 他の全ての試験体の場合には曲げひび割れ **F1** および斜めひび割れ **D1** が開口している. なお, (c), (d) 図には, 斜めひび割れ **D2** も大きく開口していることが分かる. 曲げひび割れ **F1** と斜めひび割れ **D1** の発生位置は A シリーズの場合と類似している.

写真-3 の C シリーズに関する各実験結果を見ると, いずれの試験体においても, 上述の曲げひび割れ **F1** および斜めひび割れ **D1** が開口していることが分かる. 一方, (c), (f), (i) 図の C-R7-C25/40/60 試験体および (h) 図の C-R5-C60 試験体の場合には, 斜めひび割れ **D2** も大きく開口している. また, 曲げひび割れ **F1** と斜めひび割れ **D1** の発生位置は, A, B シリーズと同様な傾向を示している.

次に, 写真-4 に示した A-150-D10 試験体に関するひび割れの開口とシート剥離の進展状況写真をもとに, それらの進展過程を考察する. これらの写真より, 1) 変位が 18.70 mm 時には, 等せん断力区間の荷重点に近接しているスターラップ近傍に曲げひび割れ **F1** が発生し, また, 数本の斜めひび割れが発生している. 2) 変位が 35.55 mm 時には, 斜めひび割れ **D2** が明瞭に開口してくる. また, **F1** と **D2** 間に斜めひび割れ **D1** も曲げひび割れ **F1** の中間部に向かって進展していることが確認できる. 3) 変位が 40.15 mm 時には, せん断ずれによる斜めひび割れ **D2** がシートを下方に押し下げて引き剥がすピーリング作用によって, シート剥離が開始している様子が確認できる. 4) 変位が 42.30 mm 時には, シートの剥離が大きく進行し, **D1** も明瞭に開口していることが分かる.

以上の考察より, シート剥離によって終局に至った試験体の場合には, まず, 等せん断力区間の荷重点に近接して配筋されているスターラップ近傍に曲げひび割れ **F1** が発生し, その後下縁かぶり部に斜めひび割れ **D1** が必ず発生し, それが **F1** の中間部に向かって進展している. また, 写真-1~4 の結果に基づいて,



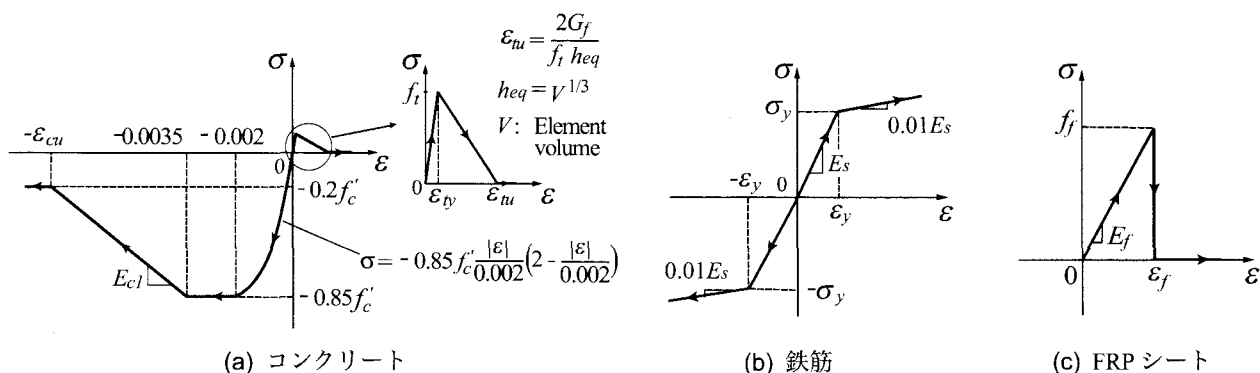


図-5 材料構成則

とが明らかになっている。すなわち、1) 等せん断力区間に発生する斜めひび割れや主鉄筋のすべりを離散化してモデル化しない場合には、RC 梁の耐荷性状を過大に評価し、破壊形式を正しく再現できない可能性があること、2) 一方、等曲げ区間に発生する曲げひび割れを離散化することの有無は、RC 梁の破壊挙動や耐荷性状に殆ど影響しないこと、である。ここでは、これらの検討結果と前章における斜めひび割れの発生位置や進展状況に関する検討結果を考慮して、図-3 に示す模式図に基づいて離散ひび割れ配置モデルを設定することとする。

図に示されているように、提案のモデルにはシートとコンクリート間、離散ひび割れ (1), (2), (3) および主鉄筋周囲に配置する離散ひび割れを用いることにより、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動に及ぼす主要因をモデル化している。すなわち、1) シート剥離を励起する斜めひび割れにおいて、3 章に述べられている斜めひび割れ **D1** は、離散ひび割れ (1) を用いてモデル化している。離散ひび割れ (1) の配置に関しては、載荷点から支点側の第 1 本目のスターラップと梁高さの中央線との交差点を起点として、傾斜角 $\theta_c = 45^\circ$ で梁底面まで進展する形で簡略化して配置している。なお、3 章に述べられている斜めひび割れ **D2** に関しては、最終的に **D1** によるピーリング作用が顕在化することが確認されていることにより、梁の終局挙動への影響が小さいものと判断して離散化しないこととした。

2) シート端部に発生する斜めひび割れおよびシート端部からのかぶりコンクリートの引き剥がれ破壊は、離散ひび割れ (2) および (1) と (2) 間における主鉄筋底面に配置する離散ひび割れ (3) を用いてモデル化している。なお、離散ひび割れ (2) の形状寸法は便宜的に (1) と同様に設定している。

3) 主鉄筋のすべりは、主鉄筋周囲に配置する離散ひび割れに Bond-slip モデルを適用することによりモデル化している。

なお、その他のコンクリート要素に発生する曲げひ

び割れは全て分散ひび割れモデルを用いてモデル化している。

5. 解析の概要

5.1 解析モデル

図-4 には上述の仮定に基づいた要素分割図の一例として、A-200-D10 試験体に関する要素分割状況を示している。解析モデルは、RC 梁の対称性を考慮してスパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリート、上下端鉄筋および FRP シートは、8 節点あるいは 6 節点 3 次元固体要素を用いてモデル化している。スターラップには、DIANA¹¹⁾ に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素 (Embedded Reinforcement Element) を用いてモデル化している。この要素は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との

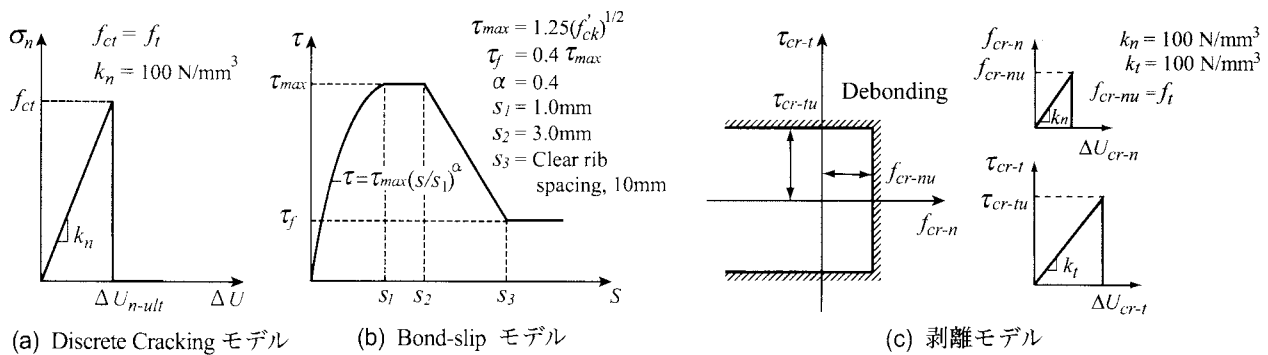


図-6 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

ている。図中の G_f はコンクリートの引張破壊エネルギーである。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、(b) 図に示すような塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルを適用した。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとしている。FRP シートには、(c) 図に示すように引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを適用している⁴⁾。

5.3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

本研究では、図-6 に示している Discrete Cracking モデル、Bond-slip モデルおよび剥離モデルを用い、ひび割れの開口、主鉄筋のすべりおよびシートの剥離をモデル化している⁴⁾。

Discrete Cracking モデルは接触面要素の法線方向の開口とその方向の引張応力との関係を図-6(a) のようにモデル化している。限界応力値 f_{ct} は、コンクリートの引張強度 f_t と等価であるものと設定した。このモデルでは、引張応力 σ_n が限界引張応力値 f_{ct} に達すると伝達されている引張応力が解放され、ひび割れが完全に開口するものと仮定している。なお、接線方向応力-変位関係に関しては、便宜的にせん断剛性 k_t を $k_t = k_n$ と仮定し、法線方向応力によってひび割れが開口するまで線形関係が保たれるものと仮定した。また、法線方向の引張応力 σ_n が限界引張応力 f_{ct} に達した後は、ひび割れ開口後の咬み合わせ効果等を無視して、せん断剛性 k_t も消失するものと仮定している。

主鉄筋要素周囲に配置した Bond-slip モデルから成る接触面要素において、主鉄筋方向の付着応力 τ と相対変位 S 関係は、CEB-FIP Model Code¹⁰⁾ を参考にして図-6(b) のように定義した。主鉄筋とコンクリート要素間の法線方向引張応力-相対変位関係には、Discrete Cracking モデルに準拠した線形関係を定義している。

また、シートの剥離を再現するために、著者らが提案している図-6(c) のようなモデルを適用した。このモデルでは、付着界面の法線方向引張応力と面内せん断応力間の相互作用を無視し、法線方向およびせん断方向の剥離基準を簡易に次のように定義した。

表-4 各試験体の最大荷重値 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} および破壊形式の一覧

試験体名	最大荷重値 P_{max} (kN)		最大荷重時変位 δ_{max} (mm)		破壊形式	
	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
A-200-D10	126.7	123.5 (0				

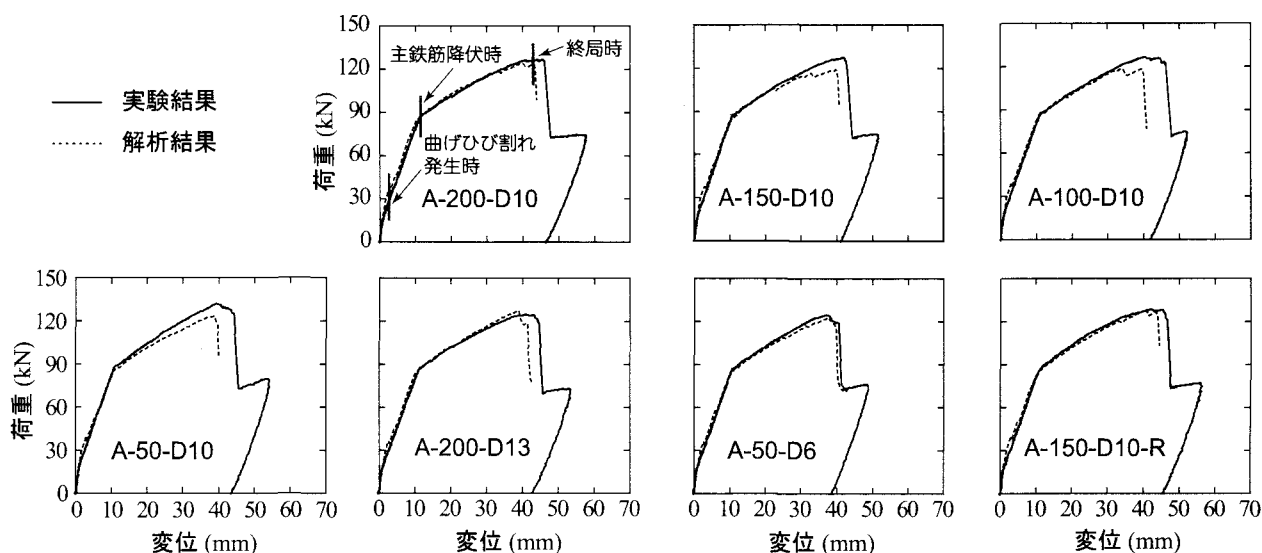


図-7 荷重-変位関係 (A シリーズ)

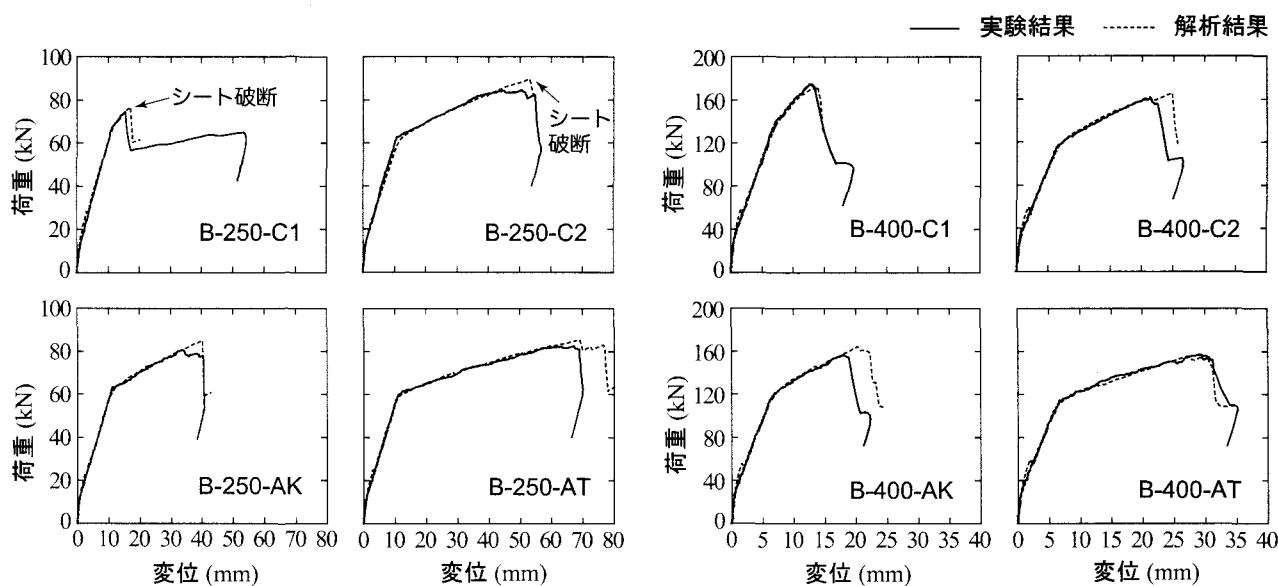


図-8 荷重-変位関係 (B シリーズ)

ここで、 f_{cr-n} , τ_{cr-ts} , τ_{cr-tt} は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面方向のせん断応力であり、 f_{cr-nu} , τ_{cr-tu} はそれぞれ引張応力、せん断応力の限界値である。なお、 τ_{cr-tu} は文献 12) を参考にして、以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f_c'} \quad (5)$$

上式は、文献 12) の式の単位 (psi) を MPa の単位に換算したものである。

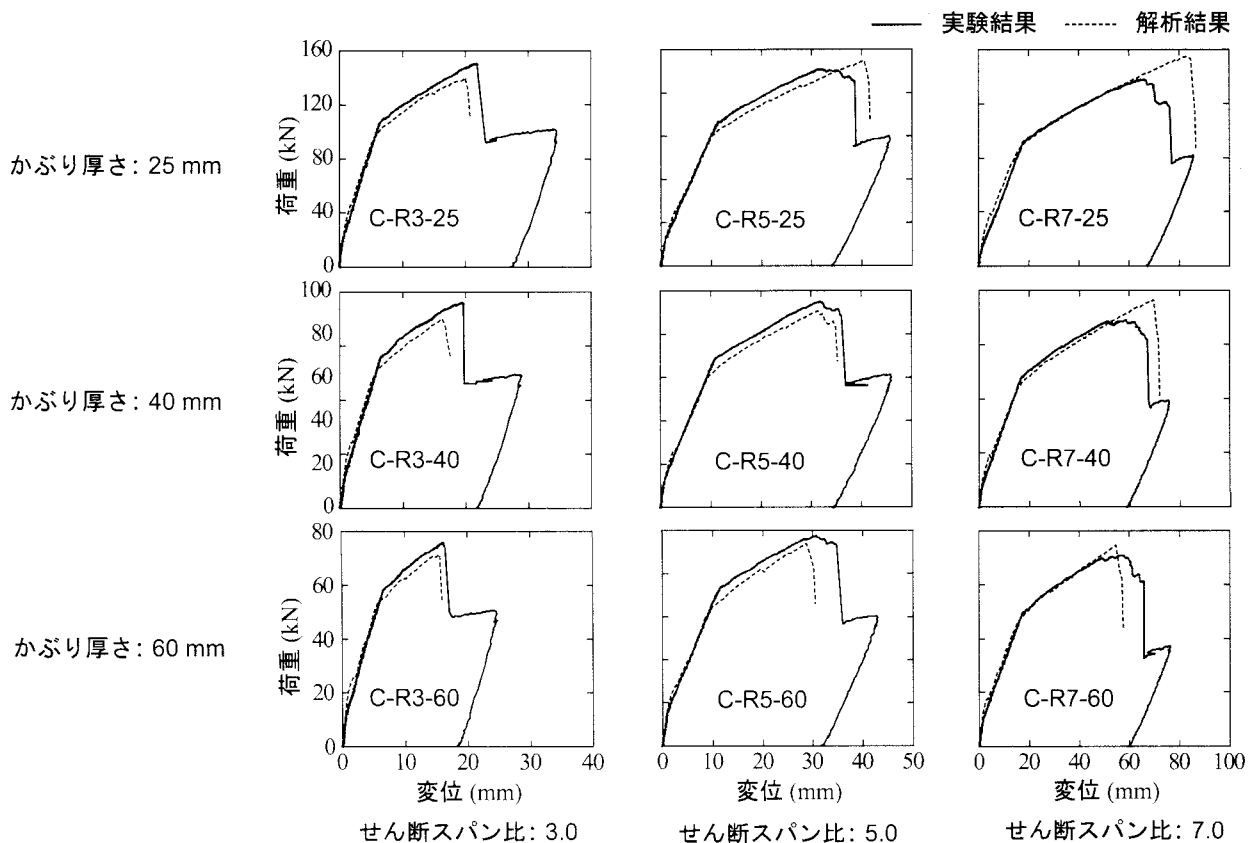
以上の応力-相対変位関係において、Discrete Cracking モデルは 図-3 の離散ひび割れ (1), (2), (3) に、Bond-slip モデルは主鉄筋周囲に、剥離モデルはシートとコンクリート間に配置している接触面要素に適用している。

6. 解析結果および考察

6.1 荷重-変位関係

図-7, 8, 9 には、各シリーズの各試験体に関する解析結果の荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。また、表-4 には、各試験体の解析結果および実験結果の最大荷重値 P_{max} 、最大荷重時変位 δ_{max} および破壊形式を一覧にして示している。以下に各シリーズ毎に考察を行う。

図-7 は、A シリーズの各試験体に関する比較図である。A-200-D10 試験体を例として考察すると、曲げひび割れ発生時付近において、解析結果は実験結果より若干高い荷重レベルを示していることが分かる。これは、全ての曲げひび割れを離散化していないことによるものと考えられる⁵⁾。主鉄筋降伏時点では、両結



図－9 荷重－変位関係（Cシリーズ）

果はほぼ一致している。その後、解析結果では、変位 43 mm 付近から斜めひび割れの開口と下方への押し出しによるピーリング作用によってシートが全面剥離に至り、荷重が急激に低下している。解析結果の最大荷重値 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} は、実験結果よりそれぞれ約 2.5% および 5.9% 程度小さい。また、他の試験体に関する比較図を見ると、解析結果は最大荷重値 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} が実験結果と若干異なっているものの、載荷初期からシート全面剥離によって終局に至るまでの実験結果を大略再現しているものと判断される。

図－8 は、シート引張剛性の異なる B シリーズの各試験体に関する比較図である。図より、いずれの試験体においても、解析結果の終局時まで、解析結果は実験結果とほぼ対応していることが分かる。なお、B-250-AT および B-400-C2 試験体における解析結果の最大荷重時変位 δ_{max} は、実験結果との差が約 12% となっている。しかしながら、シート引張剛性が大きいほど RC 梁の変形が小さくなる実験結果の傾向は解析結果においても示されており、提案の離散ひび割れ配置モデルの妥当性が確認できる。

また、図－9 に示す C シリーズの各比較図に着目すると、解析結果の最大荷重値 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} は、実験結果に対してそれぞれ最大 13%、25% 程度の誤差を示している。しかしながら、解析結

果は実験結果の耐力性状や変形性能を大略再現していることが分かる。また、実験結果はかぶり厚さが大きいほどシート剥離が早期に発生し、変形能も小さくなる傾向を示しているが、解析結果もこれらの特性をよく再現しているものと判断される。

以上より、提案の離散ひび割れ配置モデルを適用することにより、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐力性状を大略再現可能であることが明らかになった。

6.2 シートの剥離状況および梁の破壊状況

本節では、解析結果におけるシート剥離およびシートの軸方向ひずみ分布と RC 梁の破壊状況を実験結果と比較することにより、提案の離散ひび割れ配置モデルの妥当性について検討を行うこととする。ここでは、斜めひび割れ **D1** のみが発生する A-200-D10 試験体および斜めひび割れ **D1** と **D2** の両方が発生する A-150-D10 試験体を例として比較検討を行うものとする（図－1 参照）。図－10, 11 には、それぞれ A-200-D10, A-150-D10 試験体に関する解析結果を実験結果と比較して示している。各図において、(a) 図は主鉄筋降伏時近傍、(b) 図は解析結果の斜めひび割れ開口時近傍、および (c) 図は解析結果のシート全面剥離直前における比較図である。ひずみのコンターレベルにおける 100, 3,000 μ は、それぞれ、図－5(a) に示す ε_{fy} および ε_{tu} の概略値である。

上左：□ 部分の拡大図 上右：梁の破壊状況写真
 中：変形図および軸方向ひずみコンター図（変形倍率：3.0）
 下：FRP シートの軸方向ひずみ分布

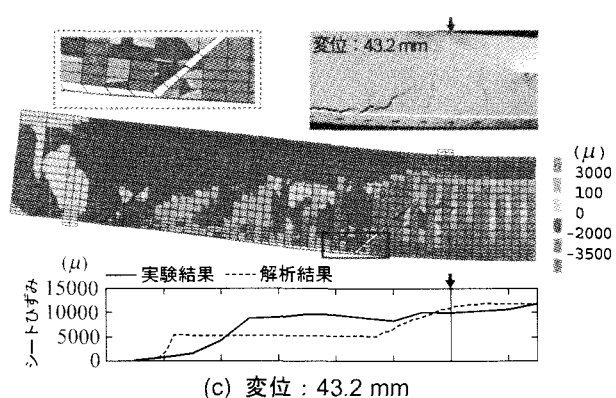
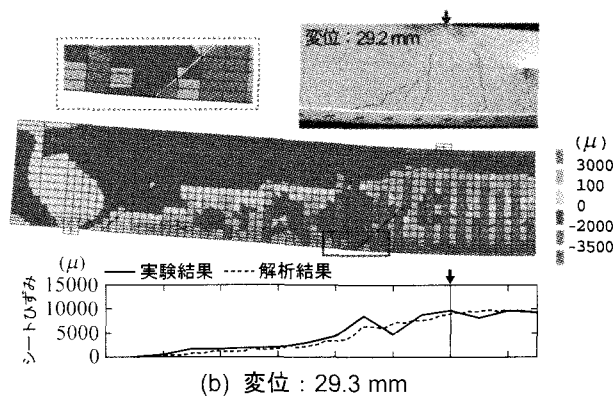
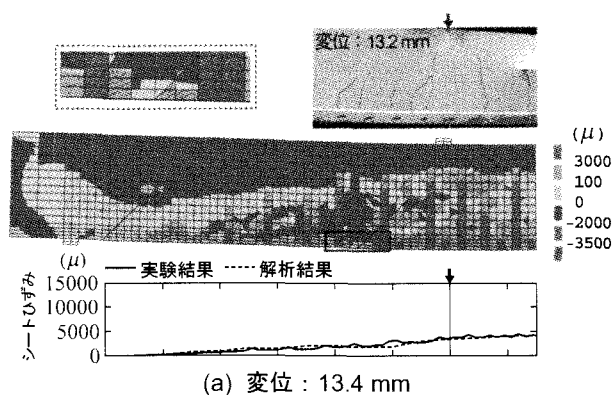


図-10 実験結果の破壊状況写真，解析結果の変形図，コンクリートの軸方向ひずみコンター図およびシートの軸方向ひずみ分布 (A-200-D10)

図-10 に示す A-200-D10 試験体に関する比較図において，(a) 図における写真には等曲げ区間のみならず等せん断力区間にもひび割れが発生していることが確認できる．一方，解析結果のひずみコンター図には数本のひび割れが発生している様子がうかがえる．解析結果のシートの軸方向ひずみ分布は実験結果とよく対応していることが分かる．(b) 図の変位が 29.3 mm 時において，解析結果は分散ひび割れの外，斜め離散ひび割れも開口している．一方，実験結果においても

上左：□ 部分の拡大図 上右：梁の破壊状況写真
 中：変形図および軸方向ひずみコンター図（変形倍率：3.0）
 下：FRP シートの軸方向ひずみ分布

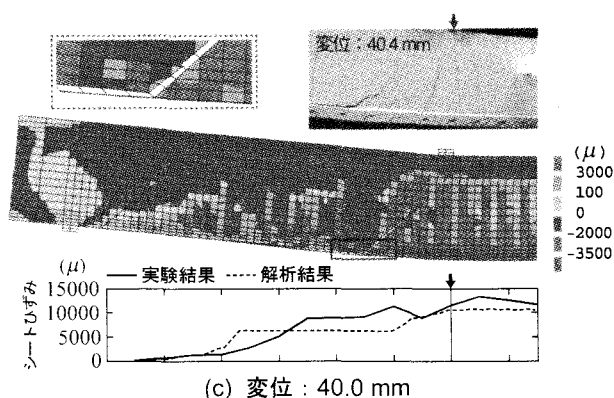
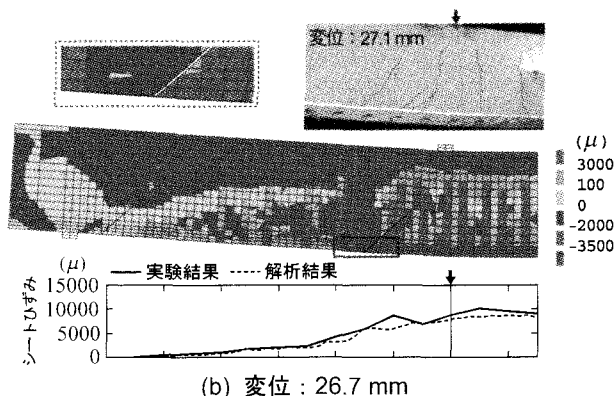
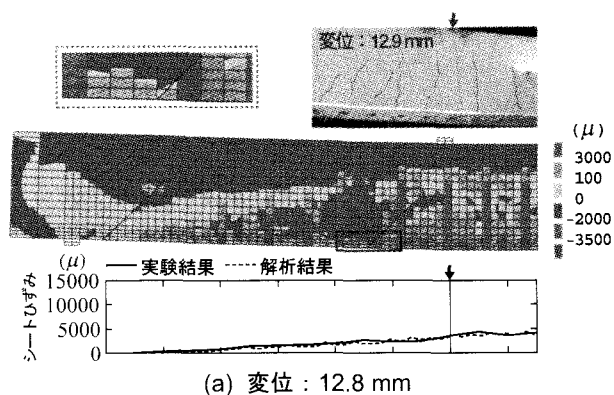


図-11 実験結果の破壊状況写真，解析結果の変形図，コンクリートの軸方向ひずみコンター図およびシートの軸方向ひずみ分布 (A-150-D10)

シート剥離を励起する斜めひび割れ D1 の開口が確認できる．(c) 図より，この時点において，両結果とも斜めひび割れが大きく開口し，シートの剥離が支点側に向かって大きく進展している様子が見られる．また，FRP シートの軸方向ひずみ分布に着目すると，両結果ともひずみ値がほぼ一樣になっている区域が現れている．これは，シートが剥離した区域においてひずみが均

くなっていることが推察される。

一方、図-11に示すA-150-D10試験体の結果を見ると、(a)図の時点では、両結果のひび割れ発生状況やシートの軸方向ひずみ分布は大略一致していることが分かる。(b)図の解析結果の斜めひび割れ開口時近傍の時点において、実験結果では、斜めひび割れD1とD2の両方が発生している。(c)図の時点では、両結果ともにシート剥離が進行していることが確認できる。また、実験時の記録写真では、斜めひび割れD2の他に斜めひび割れD1も明瞭に開口している。なお、FRPシートの軸方向ひずみ分布を見ると、この時点における解析結果の剥離範囲は実験結果の約2倍であることが分かる。

以上の考察より、提案の離散ひび割れ配置モデルを著者らが提案している解析手法に適用することにより、実験結果の斜めひび割れの開口やシート剥離の進展を含むFRPシート曲げ補強RC梁の耐荷挙動を大略予測可能であることが明らかになった。

7. 結論

本研究では、FRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動や耐荷性状を適切に予測可能な解析手法を提案することを目的に、実験結果のひび割れ分布性状を考察することにより、数値解析に適用可能な汎用性のある離散ひび割れ配置モデルの提案を試みた。提案のモデルの妥当性は、スターラップ鉄筋径およびその配置位置、シートの引張剛性、せん断スパン比およびかぶり厚さの異なる全24体のRC梁を対象として提案の離散ひび割れ配置モデルを適用し、著者らが提案している3次元弾塑性有限要素解析手法のもとに数値解析を実施し、実験結果と比較する形で検討を行った。本研究で得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

- 1) FRPシート曲げ補強RC梁を曲げ載荷する場合には、シート破断によって終局に至った試験体を除き、いずれの試験体にも、等せん断力区間の載荷点に近接するスターラップ近傍に曲げひび割れが、また下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、梁高さの中心点に向かって進展する傾向を示す。
- 2) これらの実験結果をもとにシート剥離を励起する斜めひび割れとして、載荷点から支点側の第1本目のスターラップと梁高さの中央線との交点を起点として傾斜角45°で梁底面まで進展する離散ひび割れモデルを提案した。
- 3) RC梁のせん断スパン比、かぶり厚さ、スターラップ鉄筋径、その配置位置、シートの引張剛性の異なる場合に対しても、曲げ補強RC梁の破壊挙動や耐荷性状を数値解析的に大略再現可能であることが明らかになった。

- 4) 解析結果の実験結果に対する誤差は、本研究の範囲内では、最大荷重、最大荷重時変位に対してそれぞれ13%と25%以内になっている。

参考文献

- 1) 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補強梁の曲げ載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.205-210, 1999
- 2) 上原子晶久, 下村 匠, 丸山久一, 西田浩之: 連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析, 土木学会論文集, No. 634 / V-45, pp.197-208, 1999
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683 / V-52, pp.47-64, 2001
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRPシート曲げ補強RC梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.255-272, 2003
- 5) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩, 小室雅人: FRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動に及ぼす各種ひび割れの影響に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1621-1626, 2004
- 6)