

FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動に及ぼす主筋降伏の影響 に関する数値解析的研究

Numerical Study on Influences of Main Rebar Yielding on Failure Behavior of RC Beams
Flexural Reinforced with FRP Sheet

張 広鋒*・岸 徳光**・三上 浩***

Guangfeng ZHANG, Norimitsu KISHI and Hiroshi MIKAMI

*正会員 博(工) 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**フェロー会員 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)

***フェロー会員 博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 土木PC構造研究室長 土木研究開発部
(〒270-132 千葉県流山市駒木 518-1)

Failure behavior of RC beams flexural reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) sheet will be influenced by several factors, such as dimensional characteristics, material properties, and reinforcing conditions. This study is devoted for numerical investigation on influences of main rebar yielding on failure behavior of RC beams flexural reinforced with FRP sheet. In this study, two kinds of reinforcing material were used as main rebar: deformed steel bar and aramid FRP rod. Numerical analysis was carried out by using three-dimensional finite element method, in which, discrete crack approach is employed to take the geometrical discontinuities into account. From this study, it can be confirmed that main rebar yielding gives a significant influence on failure behavior of RC beams flexural reinforced with FRP sheet, and there is no tendency for FRP sheet to be peeled off in case that main rebar without yielding is used.

Key Words : RC beam, FRP sheet, main rebar yielding, failure behavior, nonlinear analysis

1. はじめに

連続繊維シート(FRPシート)曲げ補強鉄筋コンクリート(RC)梁に横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剥離破壊、等によって終局に至るケースも多い^{1)~2)}。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、シートが破断あるいはコンクリート底面から剥離すること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^{3)~6)}。

著者らは、このようなFRPシート曲げ補強RC梁の破壊メカニズムをより明確にするために、等曲げ区間に発生する曲げひび割れ、等せん断力区間に発生する斜めひび割れ、およびこれらのひび割れ幅と関連性のある主鉄筋すべりの影響度合を数値解析的に検討してきた⁷⁾。その結果、等せん断力区間に発生する斜めひび割れは、曲げ補強シートの剥離を励起する主要因であり、RC梁の破壊挙動に著しい影響を与えること

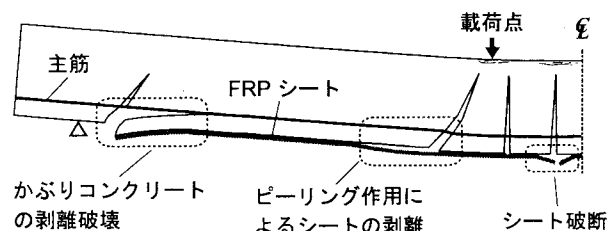


図-1 破壊モードの模式図

が数値解析的に明らかになっている。また、これらの検討結果に基づき、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確立するための離散ひび割れ配置モデルも提案している⁸⁾。このモデルでは、離散ひび割れ手法を簡易に用いるための汎用性のある離散ひび割れ配置法を提案している。さらに、スターラップの鉄筋比や配置位置、せん断スパン比、かぶり厚さ、シートの引張剛性(弾性係数 E_f ×断面積 A_f)の異なる試験体に適用することにより、提案のモデルの妥当性を検証している。

しかしながら、これまでの検討は全て主筋に降伏点を有する異形鉄筋を用いた試験体に対して行ったため、RC梁の耐荷性状や破壊挙動に及ぼす主筋降伏の影響は

表-1 試験体の一覧

試験体名	上端鉄筋 呼び径	下端 主筋材料	下端主筋の 引張剛性 $E_s \cdot A_s$ (MN)	シート 材料	補強 枚数	シートの 引張剛性 $E_f \cdot A_f$ (MN)	実験時の 破壊形式
S-0	D19	鉄筋	81.8	-	-	-	強制終了
S-1				AFRP	1	4.39	斜めひび割れによるシートの ピーリング破壊
S-2					2	8.78	
R-0	D19	AFRP ロッド	20.2	-	-	-	強制終了
R-1				AFRP	1	4.39	シート端部におけるかぶりコ ンクリートの剥離破壊
R-2					2	8.78	

表-2 コンクリートの力学的特性値

材料	弾性係数 E_c (GPa)	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	26.0	26.1	2.08	0.2

表-3 主筋の力学的特性値 (公称値)

材料	呼び名	弾性係数 E (GPa)	降伏強度 (MPa)	破断強度 (MPa)
鉄筋	D16	206	379	-
AFRP ロッド	D13	68.6	-	1,372

表-4 FRP シートの材料特性値 (公称値)

シート材料	繊維 目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 ひずみ (%)
AFRP シート	415	0.286	118	2.06	1.75

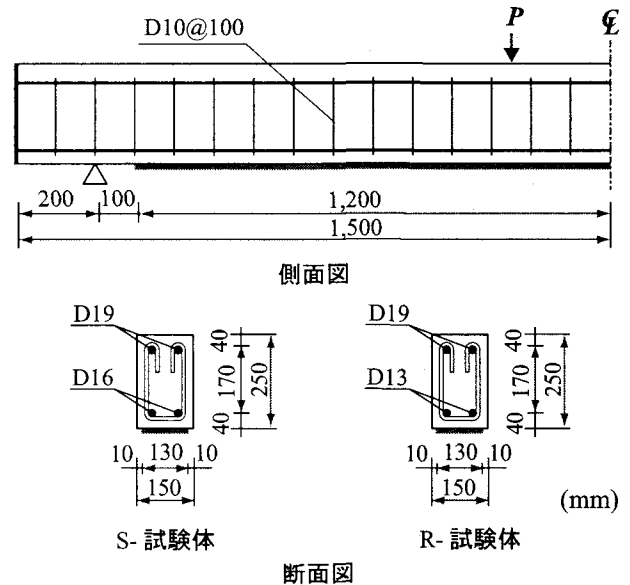


図-2 試験体概要図

明確にされていない。

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動や破壊メカニズムをより一層明確にするために、RC 梁の破壊挙動に及ぼす主筋降伏の影響を明らかにすることを目的として、主筋に異形鉄筋を用いる場合と降伏点の無いアラミドロッドを用いる場合に関する数値解析を実施し、実験結果と比較する形で数値解析手法の妥当性を検討した。また、主筋降伏の RC 梁の破壊挙動への影響や RC 梁の破壊メカニズムについて検討を行っている。検討は、実験結果のひび割れ分布をモデル化することなく、著者らが過去に提案した離散ひび割れ配置モデルを用いることにより行った。本研究では、主筋を前述の 2 種類、シート補強層数を 0 ～ 2 層の 3 種類に変化させた全 6 体の矩形 RC 梁に関する静荷重実験を行っている。なお、曲げ補強用 FRP シートにはアラミド繊維製 FRP (以後、AFRP) シートを用いている。

2. 試験体概要

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動

に及ぼす主筋降伏の影響を検討するために、試験体の主筋には、前述のように通常の異形鉄筋と降伏点の無い AFRP ロッドの 2 種類を用いることとした。表-1 には、本研究に用いた試験体の一覧を示している⁹⁾。試験体は、主筋 2 種類に対してそれぞれシート補強層数を 0 ～ 2 層の 3 種類に変化させた全 6 体の矩形 RC 梁である。表中、試験体名の第一項目は主筋の種類を示しており、S が鉄筋、R が AFRP ロッドを示している。第二項目はシートの補強層数を示しており、0 は無補強試験体を示している。

図-2 には、本研究に用いた試験体の概要図を示している。試験体はいずれも梁幅 × 梁高 が 150 × 250 mm、純スパン長が 2,600 mm である。軸方向筋は、上端には D19 を 2 本配置し、下端には表-3 に示す主筋を芯かぶり 40 mm の位置に 2 本ずつ配置している。各主筋の端部は、鉄筋の場合には端部鋼板に溶接した。また、AFRP ロッドの場合には、外径 26 mm、長さ 200 mm の鋼製定着管を作製し管内にロッドを挿入した後隙間をエポキシ樹脂で充填固定し、それを端部鋼板に溶接して定着を確保することとした。梁底面には、幅 130 mm の一方向 AFRP シートを梁中央部から両

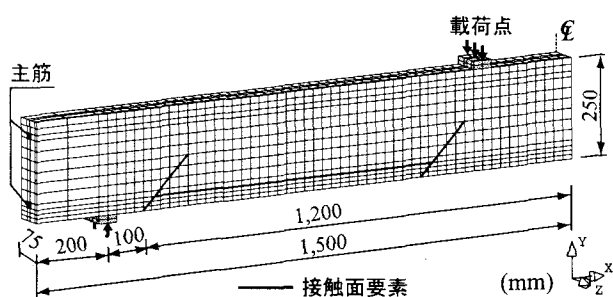


図-3 要素分割状況

支点の 100 mm 手前まで貼り付けている。なお、シート接着部のコンクリート表面は付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、各荷重段階におけるシートのひずみ分布を測定するために、ゲージ長 10 mm のひずみゲージ（測定範囲：0~20,000 μ ）をスパン中央部から両支点方向に 100 mm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。

表-2, 3, 4 には、本研究に用いた各材料の力学特性値を一覧にして示している。コンクリートの圧縮強度は材料試験から得られた値である。引張強度は CEB-FIP model code¹⁰⁾ による評価値である。また、主筋および FRP シートには全て公称値を用いている。

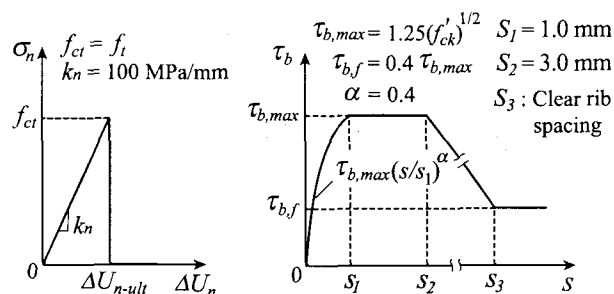
3. 解析概要

3.1 解析モデル

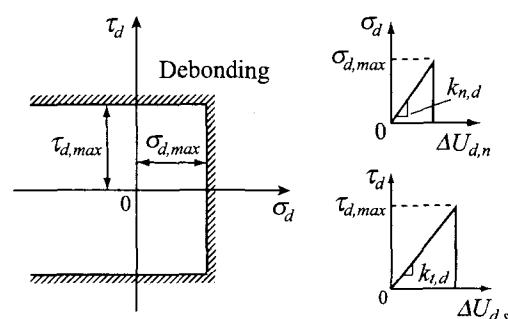
図-3 には離散ひび割れ配置モデルに適用した要素分割状況を示している。解析モデルは、RC 梁の対称性を考慮してスパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリート、上下端筋および FRP シートは、8 節点あるいは 6 節点 3 次元固体要素を用いてモデル化している。スターラップには、DIANA¹¹⁾ に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素（Embedded Reinforcement Element）を用いてモデル化している。この要素は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との完全付着を仮定し、鉄筋要素のひずみを周囲のコンクリート母要素から算出するため、節点の位置によらず簡易に鉄筋要素を配置できる特徴を有している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を拘束している。なお、解析は変位制御により行い、収束計算には一般に広く用いられている Newton-Raphson 法を採用している。

3.2 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

本研究では、ひび割れの開口、主筋のすべりおよびシートの剥離などの不連続現象を接触面要素を用いて



(a) Discrete Cracking モデル (b) Bond-Slip モデル



(c) 剥離モデル

図-4 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

モデル化している。接触面要素の配置に関しては、離散ひび割れ配置モデルを適用し、図-3 に示すように配置している。すなわち、載荷点近傍の等せん断力区間およびシート端部において傾斜角 45° で梁高方向の中央点までの斜め離散ひび割れを配置し、シートのピーリング破壊あるいはシート端部からのかぶりコンクリートの剥離破壊をモデル化することとした。離散ひび割れ配置モデルの詳細は文献 8) に譲ることとする。また、これらの接触面要素には、図-4 に示す Discrete Cracking モデル、Bond-slip モデルおよび剥離モデルを適用することにより、それぞれひび割れの開口、主筋のすべりおよびシートの剥離をモデル化している⁵⁾。

Discrete Cracking モデルの場合には、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-4(a) のように定義している。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。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。

主筋要素周囲に配置した接触面要素に適用した Bond-slip モデルには、CEB-FIP Model Code を参考にして図-4(b) に示すせん断応力-相対変位関係を適用している。法線方向引張応力-相対変位関係には、Discrete Cracking モデルに準拠して線形関係を定義している。

本研究では、異形鉄筋の他、砂付き AFRP ロッド

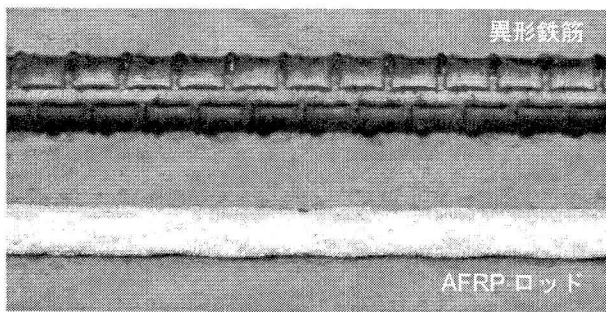


図-5 鉄筋および AFRP ロッドの写真

も主筋として用いている。図-5 には、この 2 種類の主筋材料の写真を示している。AFRP ロッドとコンクリートの付着特性に関しては、現在まで数多くの研究が行われている^{12, 13)}。本研究では、これらの研究を参考にして、ロッドとコンクリートの付着応力-相対変位関係には便宜的に異形鉄筋の場合と同様な特性を仮定した。

また、シートの全面剥離を再現するために、シートとコンクリート間に配置する接触面要素には、著者らが提案している剥離モデルを適用している (図-4c)。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ている。

$$\sigma_d > \sigma_{d,max} \quad (1)$$

$$\tau_d = \sqrt{\tau_{d-a}^2 + \tau_{d-t}^2} > \tau_{d,max} \quad (2)$$

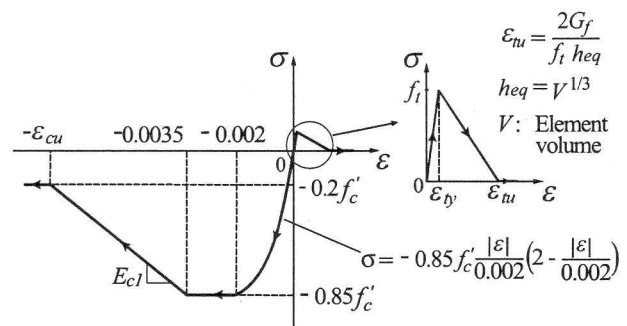
ここで、 σ_d 、 τ_{d-a} 、 τ_{d-t} は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面方向のせん断応力であり、 $\sigma_{d,max}$ 、 $\tau_{d,max}$ はそれぞれ引張応力、せん断応力の限界値である。なお、 $\tau_{d,max}$ は文献 14) を参考にして、以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{d,max} = 0.92\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

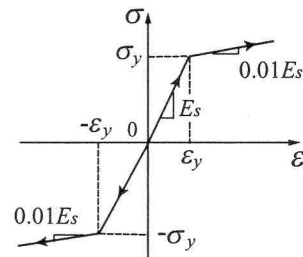
上式は、文献 14) の式の単位 (psi) を MPa の単位に換算したものである。

3.3 材料構成則

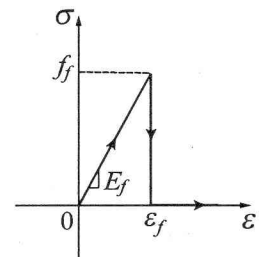
図-6(a) には本研究で採用したコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみ $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$ 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2 f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。一方、引張側に関しては線形軟化モデルを適用することとし、終局ひずみ ϵ_{tu} は文献 11) に基づき図に示すように定義している。図中の G_f はコンクリートの引張破壊エネルギーである。上下端鉄筋およびスターラップ要素



(a) コンクリート



(b) 鉄筋



(c) AFRP シートおよびロッド

図-6 材料構成則

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。降伏判定は von Mises の降伏条件に従うものとしている。AFRP シートおよびロッドには、(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. 解析結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-7 には、各試験体に関する解析結果の荷重-スパン中央点変位 (以下、単に変位) 関係を実験結果と比較して示している。表-5 には、各試験体における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} 、および解析結果の破壊形式を一覧にして示している。表-5 および表-1 より、各曲げ補強試験体に関する数値解析結果は実験結果と同様な破壊形式で終局に至っていることが分かる。両無補強試験体に関する数値解析は、実験時と同様に上縁コンクリートの著しい圧縮破壊によって終了した。

図-7(a) には、異形鉄筋を主筋とした 3 試験体に関する比較図を示している。各試験体に関する実験結果の剛性勾配を見ると、主鉄筋降伏時までは各結果間の差は小さい。主鉄筋降伏後においては、各実験結果間の差が明瞭になり、シートの引張剛性が最も大きい S-2 試験体の剛性勾配が最も大きく、無補強の S-0 試験体の剛性勾配がほぼゼロとなっていることが分かる。ただし、最大荷重時変位を見ると、シートの引張剛性が最も大きい S-2 試験体の場合が最も小さくなっている

表－5 各試験体の最大荷重値 P_{max} 、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 P_{max} (kN)		最大荷重時変位 δ_{max} (mm)		解析結果の破壊形式
	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	
S-0 *	61.7	62.3 (1.00)	80.0	80.0 (1.00)	強制終了 (実験結果とほぼ同変位時)
S-1	80.9	87.5 (1.08)	52.6	55.2 (1.05)	斜めひび割れによるシートのピーリング破壊
S-2	87.9	88.6 (1.01)	32.9	35.0 (1.06)	
R-0 *	99.7	97.4 (1.00)	80.0	80.0 (1.00)	強制終了 (実験結果とほぼ同変位時)
R-1	91.6	84.4 (0.92)	50.6	49.4 (0.98)	シート端部におけるかぶりコンクリートの剥離破壊
R-2	79.3	73.5 (0.93)	34.8	32.6 (0.94)	

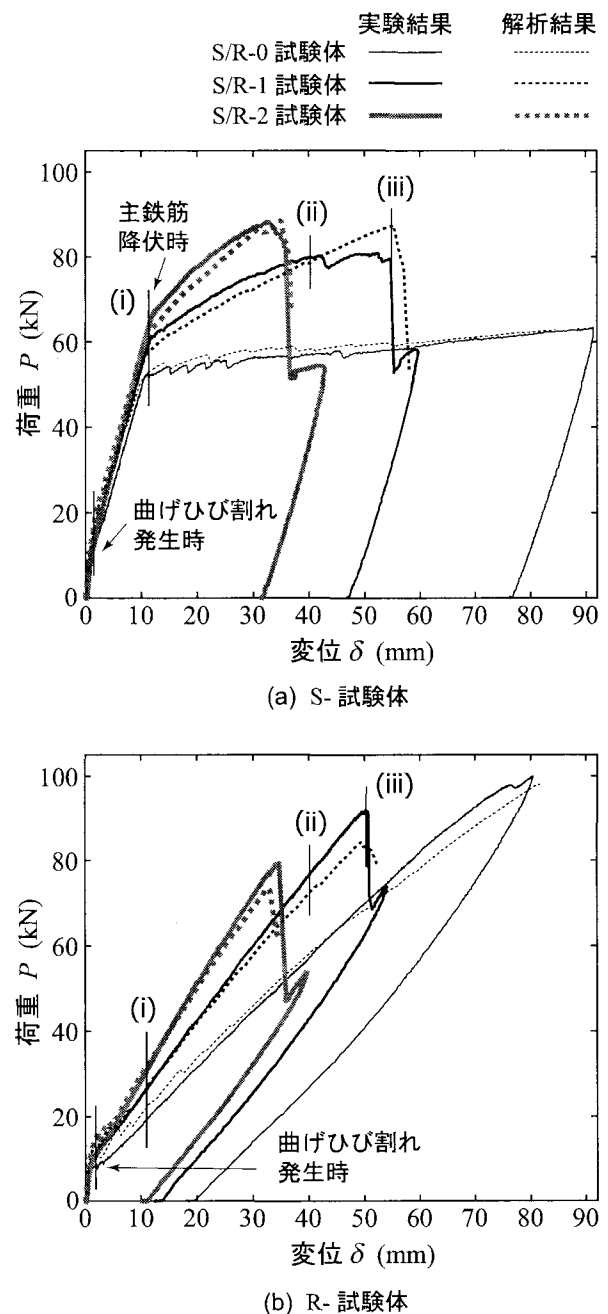
() 中の数値は実験結果に対する解析結果の比である。

* S/R-0 試験体の最大荷重および最大荷重時変位には、便宜的に終局付近における変位 80 mm 時点の結果を用いている。

ことが分かる。一方、各試験体に関する数値解析結果を見ると、剛性勾配や最大荷重時変位に関する解析結果は実験結果と同様な傾向を示しており、各解析結果はそれぞれの実験結果と精度良く対応していることが分かる。

図－7(b) には、降伏点の無い AFRP ロッドを主筋とした 3 試験体に関する比較図を示している。各試験体に関する実験結果を見ると、曲げひび割れ発生後においては、主筋が降伏しないことにより剛性勾配の明瞭な低下が現れず、荷重は終局時までほぼ直線的に増加していることが分かる。また、各試験体の剛性勾配は、曲げ補強シートの引張剛性が最も大きい R-2 試験体の場合が最も大きく、無補強の R-0 試験体の場合が最も小さい。各数値解析結果に着目すると、載荷初期からシート端部におけるかぶりコンクリートの剥離破壊によって終局に至るまで、各解析結果は実験結果と大略対応していることが分かる。これらの結果より、砂付き AFRP ロッドとコンクリートの付着特性は、図－5(b) に示すせん断応力－すべり関係を用いることにより概ね評価可能であることが明らかになった。

図－7(a) と (b) の比較より、主筋降伏の有無は AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に著しい影響を与えていることが推察される。すなわち、降伏点を有する鉄筋を主筋とする場合において (a 図)、AFRP シートの弾性係数が鉄筋より小さいため、主鉄筋降伏までは AFRP シートの曲げ補強効果が発揮されず、シートの引張剛性による影響は小さい。一方、主鉄筋降伏後にはシートの補強効果が発揮され、シートの引張剛性による影響が明瞭に現れている。これに対して、降伏点の無い AFRP ロッドを主筋とする場合には (b 図)、AFRP ロッドが降伏しないことにより、曲げひび割れ発生時点から AFRP シートの補強効果が明瞭に現れ、荷重はほぼ直線的に終局点まで増加している。なお、主筋降伏の有無に関わらず、曲げ補強シートの引張剛性が高いほど、最大荷重時変位が減少する傾向にあることが分かる。これは過去の研究結果と同様である¹⁵⁾。しか

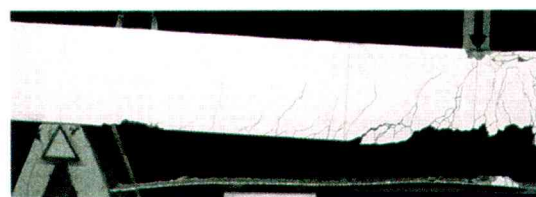
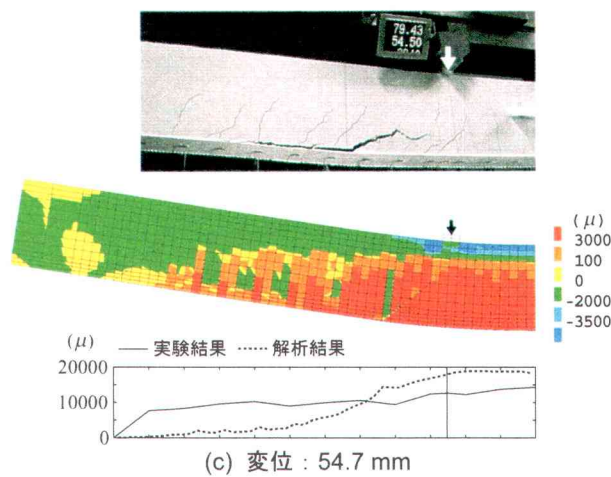
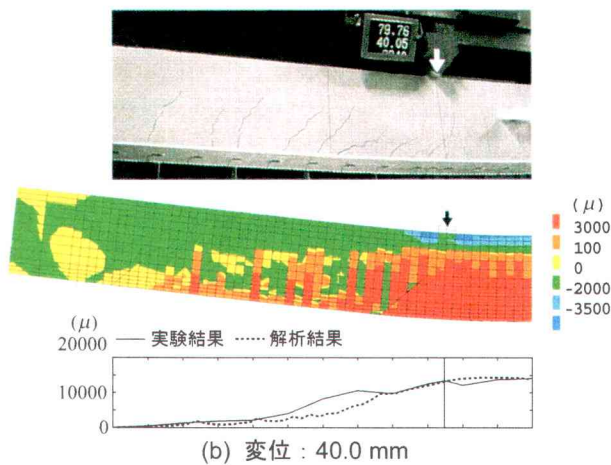
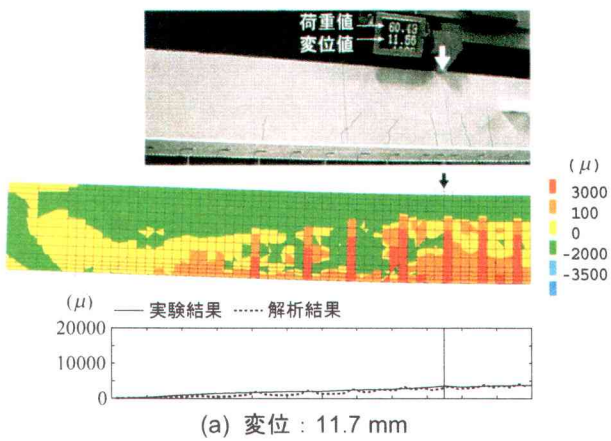


図－7 荷重－変位関係

上：実験結果の破壊状況写真

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



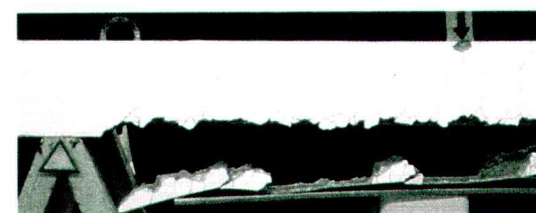
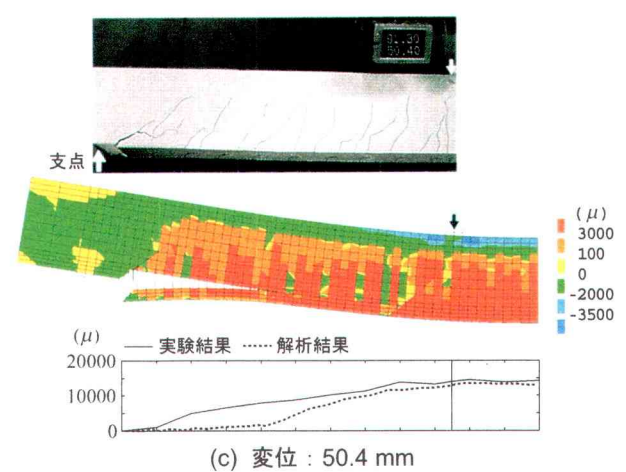
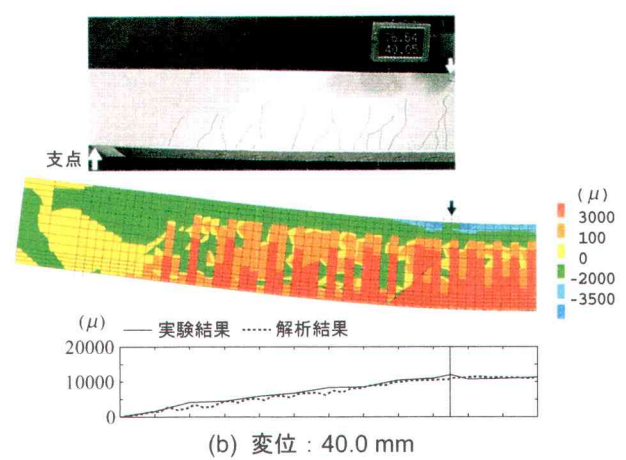
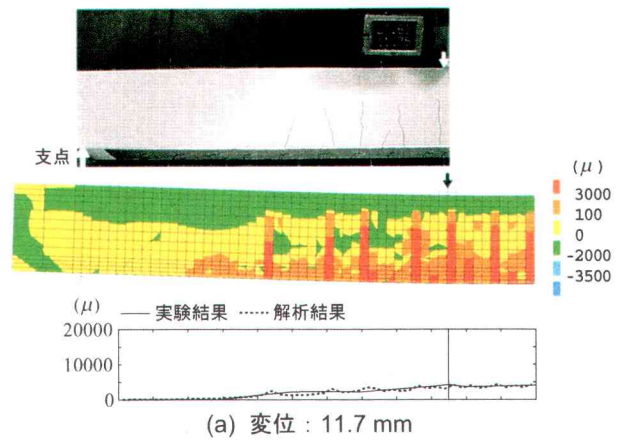
(d) 実験終了後の破壊状況

図-8 破壊状況およびシートの軸方向ひずみ分布に関する比較 (S-1 試験体)

上：実験結果の破壊状況写真

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



(d) 実験終了後の破壊状況

図-9 破壊状況およびシートの軸方向ひずみ分布に関する比較 (R-1 試験体)

しながら、AFRP ロッドを主筋とする場合には、最大荷重も低下することがうかがえる。そのメカニズムに関する検討は、4.3 節に譲ることとする。

4.2 RC 梁の破壊状況およびシートの軸方向ひずみ分布

図-8, 9 には、S/R-1 試験体における RC 梁の破壊状況およびシートの軸方向ひずみ分布に関する解析結果を実験結果と比較して示している。(a), (b), (c) 図の各変位時点は、それぞれ図-7 に示す変位時点 (i), (ii), (iii) と対応している。すなわち、(i) は S-1 試験体の主鉄筋降伏時、(ii) は中間時点、(iii) は解析結果の最大荷重時近傍である。ここで、中間時点 (ii) は、S-1 試験体において、実験結果と解析結果のいずれもピーリング破壊を励起する斜めひび割れが開口している変位時点である。実験結果の破壊状況写真は解析結果とほぼ同一変位時のものである。なお、軸方向ひずみのコンターレベルにおける $100, 3,000 \mu$ は、それぞれ、図-6(a) に示す ε_{ty} および ε_{tu} の概略値である。

図-8 に示す S-1 試験体に関する比較図より、(a) 図に示す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分布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。(b) 図の中間時点において、解析結果には分布ひび割れの他、斜め離散ひび割れも開口している。実験結果においてもシート剥離を励起する斜めひび割れの開口が確認できる。(c) 図に示す実験結果の写真を見ると、斜めひび割れは大きく開口し、シート剥離が支点側に向かって進展している様子がみられる。なお、解析結果には斜めひび割れの開口やシート剥離が発生しているものの、未だ明瞭には進行していない状態であることが分かる。また、FRP シートの軸方向ひずみ分布に着目すると、実験結果にはほぼ一様なひずみ分布を示す区域が現れている。これは、シートが部分的に剥離したことによってひずみが均等化されたことによるものと考えられる。数値解析結果では、一様ひずみ分布の領域が小さいことより、この時点までの解析結果のシート剥離範囲は実験結果より小さいことが推察される。

一方、図-9 に示す R-1 試験体に関する比較より、(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。(b) 図の中間時点までは、両結果とも曲げひび割れが数多く発生し、ひび割れ範囲はシート端部付近まで及んでいることが分かる。(c) 図に示す両結果を見ると、シート端部においてかぶりコンクリートの剥離破壊が明瞭に発生していることが分かる。また、実験結果と共に解析結果においても載荷点近傍下縁かぶり部におけるシートのピーリング破壊は発生する傾向にないことが分かる。その後の実験結果は、シート端部からのかぶりコンク

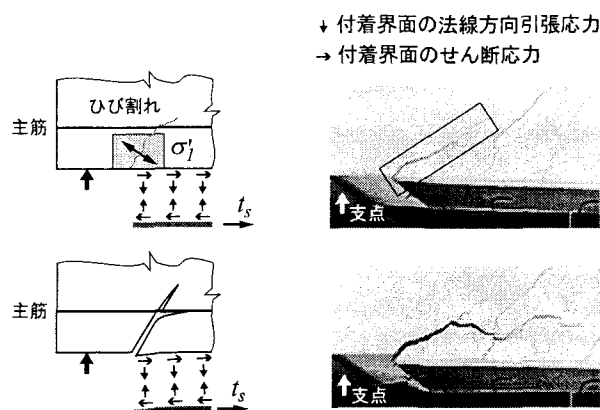


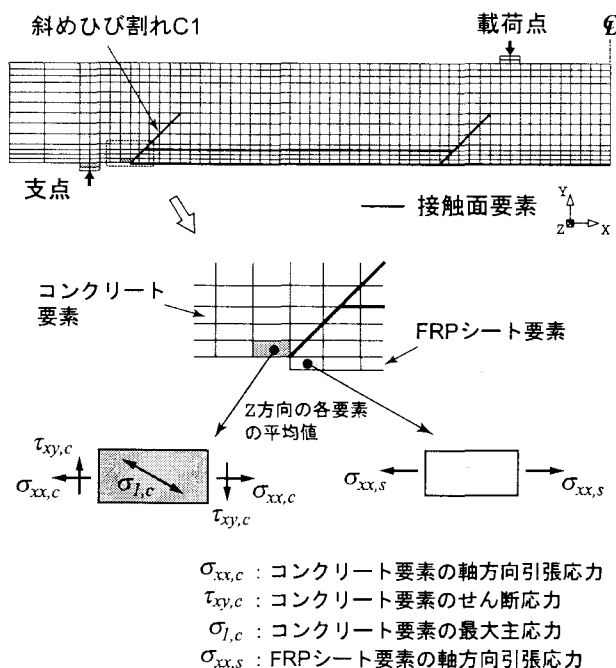
図-10 シート端部のかぶりコンクリートの剥離

リートの剥離破壊が主筋下面に沿って載荷点側に進展し、最終的にかぶりコンクリートの全面剥離によって終局に至っている。

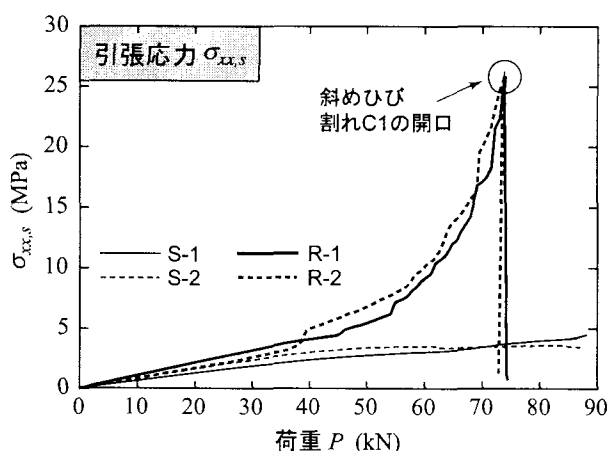
両試験体間の比較より、(a) 図の (i) 時点では、両試験体は類似なひび割れ分布性状を示している。(b) 図の中間時点では、S-1 試験体より、R-1 試験体におけるひび割れ発生本数が多く、ひび割れ範囲も広がっていることが観察できる。(c) 図の終局近傍における結果および (d) 図の実験終了後の破壊状況より、S-1 試験体の場合にはシートのピーリング破壊によって終局に至っていること、R-1 試験体の場合にはシート端部におけるかぶりコンクリートの剥離破壊によって終局に至っていることがうかがえる。これは、AFRP ロッドを主筋とする場合には、主筋が降伏しないことにより、1) RC 梁の軸方向ひずみは局所的に集中せず、広範囲に分散されること、2) 斜めひび割れは発生するものの、主筋が弾性体であることによりその開口幅の拡大が抑制され、シートのピーリング破壊を励起するために必要とされる開口幅に至らないこと、によるものと考えられる。

4.3 R-1/2 試験体の破壊メカニズムの検討

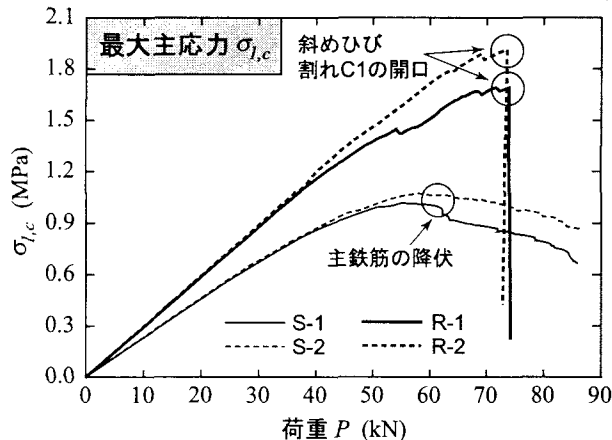
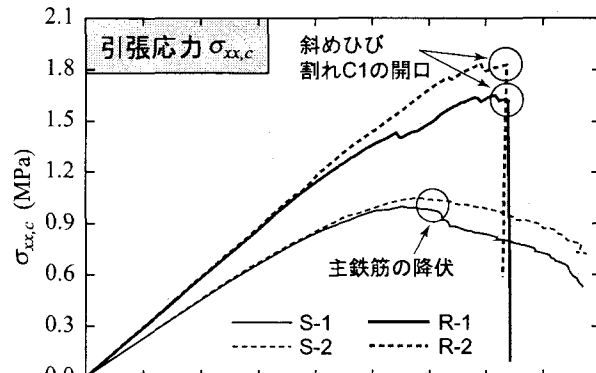
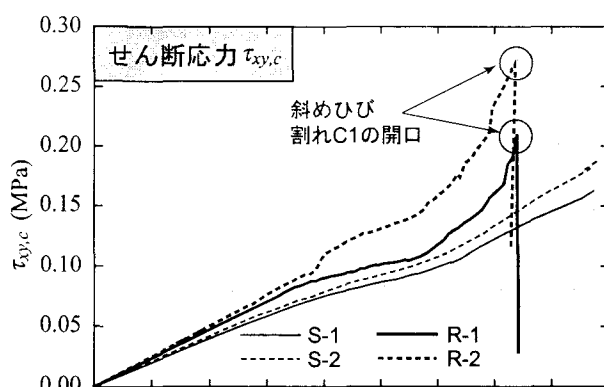
本節では、R-1/2 試験体の破壊メカニズムに関する検討を試みる。図-10 に示すように、シート端部における下縁かぶりコンクリートの破壊メカニズムは、概ね以下のようにまとめられる。1) シート端近傍部のコンクリートに発生する最大主応力 σ'_t は、コンクリートの引張強度に達するとひび割れが発生し、載荷荷重の増加に伴いそのひび割れは斜めに進展する；2) FRP シートは付着界面を介してかぶりコンクリートにせん断応力および引張応力を伝達し、かぶりコンクリートが下方に引き剥がされるように作用するため、かぶりコンクリートの剥離破壊が発生しかつ載荷点側に進行する。さらに、最大主応力 σ'_t およびシートの引張力 t_s の大きさは、かぶりコンクリートの剥離破壊の発生および進展速度に重要な影響を与えることも考えられる。



(a) 出力位置および各応力成分の説明



(c) FRPシート要素の軸方向引張応力



(b) コンクリート要素の各応力

図-11 シート端部におけるコンクリートおよびFRPシート要素の各応力

ここで、より詳細な検討を行うために、シート端部のコンクリート要素に発生する各応力成分およびシート端部に発生する引張応力の挙動性状について検討を行うこととする。

図-11には、数値解析結果におけるコンクリート要素およびFRPシート要素の各応力-荷重荷重関係を示している。なお、比較のために、S-1/2試験体の数値解析結果も示している。(b)図のコンクリート要素の各応力成分を見ると、FRPロッドを主筋としたR-1/2試験体の場合には、荷重荷重の増加に伴い、コンクリート要素に発生するせん断応力 $\tau_{xy,c}$ 、引張応力 $\sigma_{xx,c}$ および最大主応力 $\sigma_{l,c}$ の値は増加する傾向にあることが分かる。また、両試験体とも、荷重荷重 74 kN 近傍においてせん断応力 $\tau_{xy,c}$ および引張応力 $\sigma_{xx,c}$ とともに急激

に低下している。これは、シート端部における斜めひび割れ C1 が開口することにより、斜めひび割れ部を介して伝達していた応力が解放されたことによるものと考えられる。一方、異形鉄筋を主筋としたS-1/2試験体の場合には、荷重荷重 62 kN 付近で軸方向引張応力 $\sigma_{xx,c}$ や最大主応力 $\sigma_{l,c}$ が低下していることがうかがえる。これは主鉄筋が降伏したことによるものと推察される。(c)図のFRPシート要素の軸方向引張応力 $\sigma_{xx,s}$ を見ると、S-1/2試験体の場合には終局時まで応力の増加量が小さく最大 4 MPa 程度であるのに対し、R-1/2試験体の場合には荷重荷重の増加に伴い明瞭に増加していることが分かる。また、荷重初期からコンクリート要素の斜めひび割れ C1 が開口するまでは、R-1/2 両試験体は類似の分布性状を示している。ただ

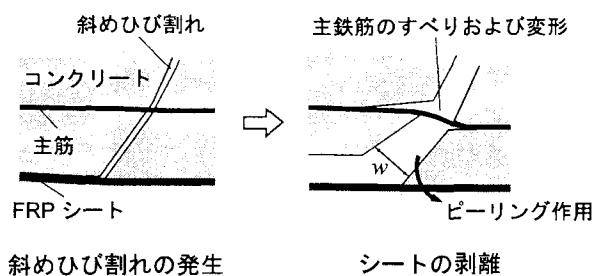


図-12 シートのピーリング破壊の模式図

し、引張応力 $\sigma_{xx,s}$ からシートの厚さを考慮して引張力 t_s を求めると、R-2 試験体の場合には R-1 試験体の場合の 2 倍になっていることが分かる。

以上の考察より、降伏しない AFRP ロッドを主筋として用いた RC 梁の場合には、1) 曲げ補強シートの補強量にかかわらず、シート端部における斜めひび割れの開口荷重がほぼ同程度になること、2) 曲げ補強シートの引張剛性が高いほど、かぶりコンクリートの剥離破壊の進展が早く、最大荷重および最大荷重時変位が小さくなる傾向にあること、等が明らかになった。

これらの結果より、R-2 試験体の最大荷重および最大荷重時変位の両方が R-1 試験体より小さくなることの現象は、以下のように類推される。すなわち、両試験体は同程度の荷重レベルでシート端部における斜めひび割れが開口するものの、R-2 試験体の場合のシート端部に発生する引張力が大きいことにより、かぶりコンクリートの剥離破壊の進展が早く、より早期に終局に至るためと推察される。

5. 主筋の影響に関するパラメータ検討

本節では、ピーリング破壊のメカニズムおよびピーリング破壊に及ぼす主筋降伏の影響に関するパラメータ検討を行う。

図-12 には、ピーリング破壊の模式図を示している。ピーリング破壊の発生過程は概ね斜めひび割れの開口および主筋のダウエル変形を伴う下縁かぶりコンクリートのピーリング作用によるシート剥離の 2 段階に整理される。すなわち、1) 載荷荷重の増大に伴い斜めひび割れが発生する；2) 斜めひび割れの開口幅の拡大に伴い、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発生する。このようなことから、シートのピーリング破壊が発生するかどうかは斜めひび割れの発生のみならず、斜めひび割れの開口幅とも密接に関係しているものと考えられる。さらに、1) 斜めひび割れの発生は試験体の寸法や梁のせん断耐力等が、また 2) 斜めひび割れの開口幅の拡大には主筋のすべりや降伏等が、影響するものと考えられる。著者らは、過去に斜めひび割れの発生メカニズムや主筋のすべりによるシート剥離の影響に関する検討を行っ

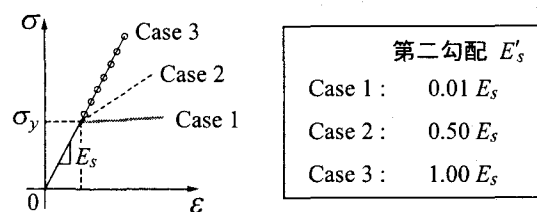


図-13 各解析ケースに適用した主筋の応力-ひずみ関係

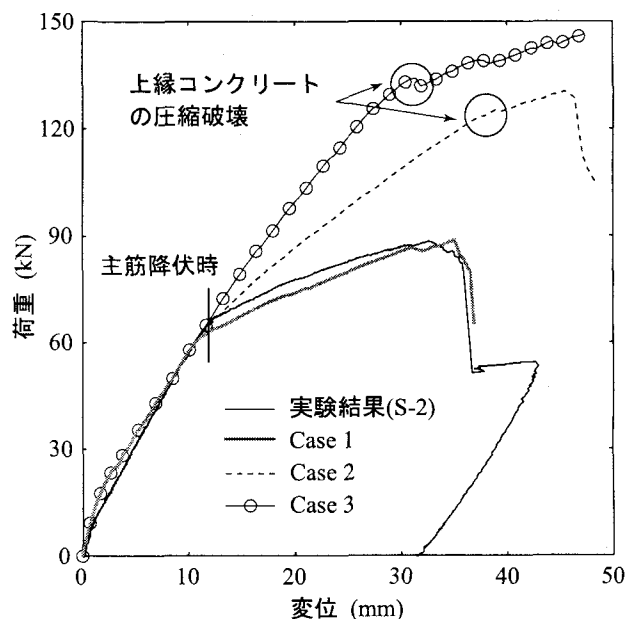


図-14 各解析ケースに関する荷重-変位関係

ている^{7), 15)}。

ここでは、主筋の降伏によるシート剥離への影響を定性的に把握するために、図-13 に示すような解析ケースを設定し、各解析結果間の比較によりその影響を検討することとする。これらの解析ケースは、S-2 試験体を基本にして下端鉄筋の降伏後の剛性勾配を変化させた 3 解析ケースである。

図-14 には、各解析ケースに関する荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。解析結果、Case 1、Case 2 は斜めひび割れの発生に起因するシートのピーリング破壊によって終局に至った。ただし、Case 2 は、上縁コンクリートが圧縮破壊しかつ主筋降伏後に終局に至っている。Case 3 は、上縁コンクリートに著しい圧縮破壊が発生したため、シートのピーリング破壊が発生しない状態で強制終了した。

以上より、主筋が降伏しない場合にはシートのピーリング破壊は生じる傾向にないことが、解析的に改めて明らかになった。

6. まとめ

本研究では、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筋降伏の影響を適切に把握するために、著者らが過去に提案した離散ひび割れ配置モデルに基づき、降伏点を有する異形鉄筋および降伏点の無い AFRP ロッド等を主筋とした RC 梁に対して数値解析を行った。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) 離散ひび割れ配置モデルは、降伏点の無い AFRP ロッドを主筋とした RC 梁にも適用可能であることが明らかになった。
- 2) 主筋の降伏は、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動に著しい影響を与えることが明らかになった。特に降伏しない FRP ロッドを主筋とする場合には、斜めひび割れの開口が抑制され、FRP シートのピーリング破壊は発生する傾向にないことが明らかになった。

参考文献

- 1) Triantafillou, T. C., and Plevris, N.: Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials, *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 201-211, 1992.
- 2) Buyukozturk, O., and Harning, B. : Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No. 3, pp. 138-144, 1998.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書, (社) 日本コンクリート工学協会, 2003.
- 7) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩, 小室雅人: 下縁かぶり厚さの異なる FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する数値解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 25, pp. 1795-1800, 2003.
- 8) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩: 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, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1037-1048, 2005.
- 9) 岸 徳光, 三上 浩, 田村富雄, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に及ぼす補強筋の剛性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27, No. 2, pp. 1417-1422, 2005.
- 10) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 11) Nonlinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 12) Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R.: Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 1, No. 2, pp. 40-51, 1997.
- 13) 松尾真紀, 二羽淳一郎, 児島孝之: コンクリートと連続繊維補強材間の付着挙動に関する数値解析的アプローチ, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp. 147-159, 2002.
- 14) Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka T.F., and Thomson T.A. : Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete, *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 2, pp. 208-217, 1996.
- 15) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: RC 梁の耐荷性状に及ぼす曲げ補強 FRP シートの引張剛性の影響に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 4, pp. 383-388, 2004.

(2005 年 4 月 15 日受付)