

論文 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

張 広鋒^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・小室雅人^{*4}

要旨：本研究では、連続繊維 (FRP) シート曲げ補強 RC 梁における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曲げと斜めひび割れ、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による RC 梁の破壊挙動への影響を検討するために、FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する三次元弾塑性有限要素解析を試み、実験結果と比較することによりその影響を検討した。検討の結果、1) 主鉄筋すべりは RC 梁の破壊形式や耐荷性状に重要な影響を与える、2) 等せん断力区間に発生する曲げと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る、等が解析的に明らかになった。

キーワード：RC 梁, FRP シート, 曲げ補強, ひび割れ, 破壊挙動, 非線形解析

1. はじめに

連続繊維シート (以後、FRP シート) 曲げ補強 RC 梁に曲げ荷重を行う場合には、上縁コンクリートの圧縮破壊や FRP シートの破断の他、FRP シートの全面剥離によって終局に至る場合も多いことが実験的に明らかになっている。また、シート剥離には、等曲げ区間に発生する曲げひび割れや、等せん断力区間に発生する曲げとせん断ひび割れの影響によることが考えられる。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は、上述の各ひび割れによる RC 梁の耐荷性状や破壊挙動に関する影響度を明らかにすることが肝要である。

現在まで、著者らは離散ひび割れ手法を用い、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動や耐荷性状に関する検討を解析的に行ってきた¹⁾。しかしながら、ここまでの研究は主に実験結果の再現を目的としているため、RC 梁の耐荷性状やシートの剥離挙動に及ぼす上述の各ひび割れの影響に関する検討は行っていない。

このような背景より、本研究では、各ひび割れ

表-1 各試験体の一覧

試験体名	せん断スパン比	補強枚数	シート材料	実験結果の破壊形式
A	5.00	1	AFRP	ピーリング作用によるシートの全面剥離
B	2.92	2	AFRP	
C	2.44	1	CFRP	

や、ひび割れ幅と関連性のある主鉄筋すべりが RC 梁の破壊挙動に与える影響を適切に検討することを目的として、著者ら¹⁾が過去に提案した解析手法に基づき、FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する三次元弾塑性有限要素解析を試みた。なお、各項目の影響割合に関する検討は、実験結果と比較する形で行っている。

2. 試験体概要

表-1 には、解析対象である 3 試験体の概要を示している。A, B 試験体は、著者ら^{1,2)}が過去に実施した実験試験体であり、C 試験体は、岳尾ら³⁾より報告された実験試験体である。現在のところ、FRP シート曲げ補強 RC 梁の曲げ耐荷挙動に関する実験的研究は数多く報告されている。本

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所構造研究室 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 助手 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの力学的特性値

試験体名	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
A	24.0	1.92	21.0	0.2
B	29.6	2.34	22.1	0.2
C	39.0	2.85	28.8	0.2

表-3 鉄筋の力学的特性値

試験体名	鉄筋	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
A, B	主鉄筋 (D16)	406	206	0.3
	帯鉄筋 (D10)	380		
C	主鉄筋 (D13)	356	200	0.3
	帯鉄筋 (D6)	340		

表-4 FRP シートの力学的特性値

シート材料	繊維目付量 (g/m ²)	設計厚さ t_f (mm)	引張強度 f_f (MPa)	弾性係数 E_f (GPa)
AFRP	415	0.286	2,060	118
CFRP	300	0.167	3,480	230

研究では RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼすひび割れの影響をより一般的な形で検討するために、上述のように試験体寸法、荷重幅、シートの材料物性、補強範囲、および実施機関等の異なる試験体を取り上げることとした。

図-1 には、各試験体の断面寸法、荷重点位置および配筋状況を示している。A, B 試験体には、幅 130 mm の一方向アラミド繊維 (AFRP) シートを用い、梁下面に 1 層もしくは 2 層をスパン中央部を中心に所定の範囲まで接着している。C 試験体は、断面寸法 (幅 × 高さ) が 160 × 260 mm であり、曲げ補強材には幅 140 mm の一方向炭素繊維 (CFRP) シートを用いた矩形 RC 梁である。この試験体の詳細は文献 3) (No.5 供試体) に譲ることとする。

表-2, 3, 4 には、各試験体に用いたコンクリート、鉄筋および FRP シートの力学的特性値の一覧を示している。

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

図-2 には、要素分割図の一例として、C 試験

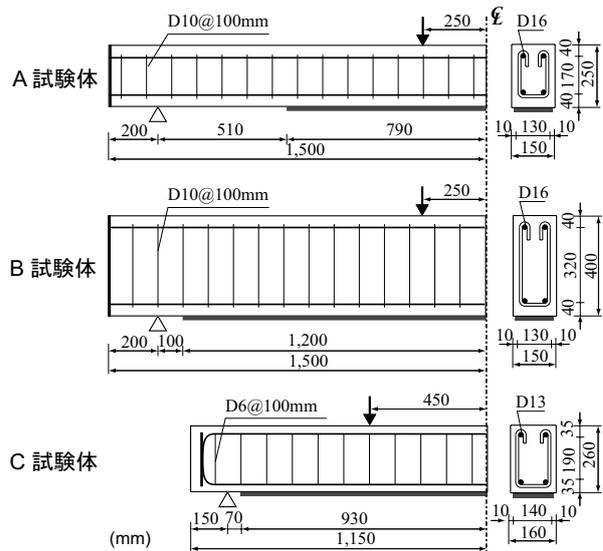


図-1 試験体の概要

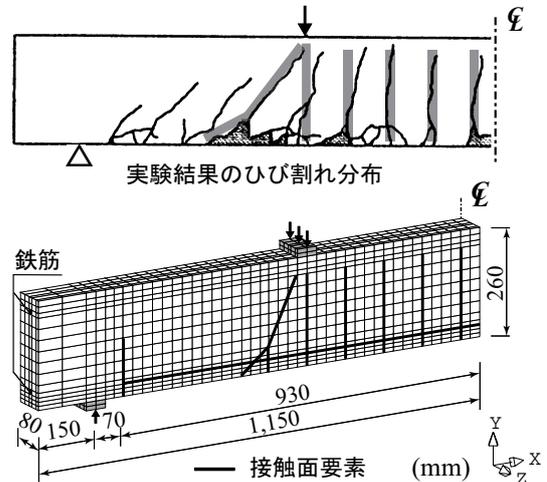


図-2 要素分割図の一例 (C 試験体)

体に関する要素分割状況を示している。解析モデルは、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、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。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面ではその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部では節点の鉛直方向変位成分を拘束している。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 材料構成則

コンクリート材料に関しては、圧縮側には圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみ 3,500 μ 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 μ 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で 0.2

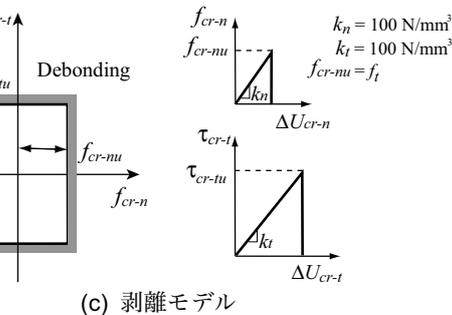
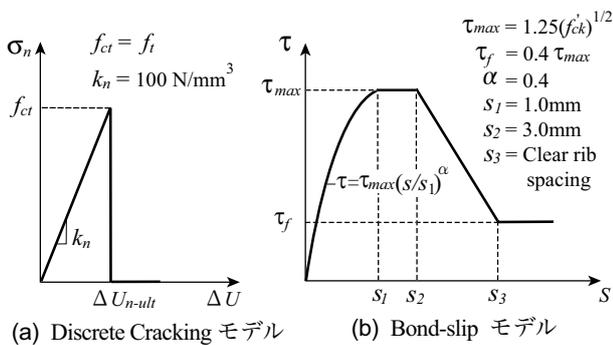


図-3 応力-相対変位関係

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し、ひび割れ開口ひずみ ϵ_{tu} は CEB-FIP コードに即し、破壊エネルギー G_f を定義している。

上下端鉄筋とスターラップ要素には、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 シートは、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¹⁾。

3.3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

本研究では、ひび割れの開口、主鉄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離散化している。図-3には、これらの接触面要素に適用した3種類の応力-相対変位関係を示している¹⁾。

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破壊強度 f_t と等価であるものと設定した。Bond-slip モデルには CEB-FIP によるすべり-付着応力関係式を採用した。また、シートの全面剥離を再現するため、著者らが提案した剥離モデルを用いている。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

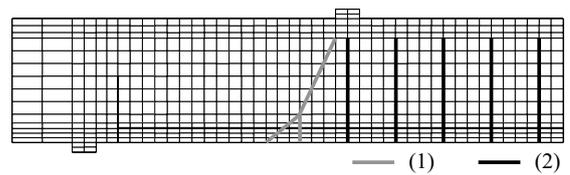


図-4 各ひび割れの種類

表-5 解析ケースの一覧

解析ケース	検討内容	解析モデル (図-4 参照)
ケース 1	実験結果の再現	全条件を考慮
ケース 2	主鉄筋すべりの影響	主鉄筋のすべりを無視
ケース 3	曲げひび割れの影響	(2) のひび割れ無視
ケース 4	斜めひび割れの影響	(1) のひび割れ無視

無視している。なお、 τ_{cr-tu} は文献4)を参考にし、SI 単位系で整理した次式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

接触面要素の配置に関しては、いずれの試験体においても、実験結果の破壊状況を参考にして顕著な曲げおよび斜めひび割れの発生位置に配置している。また、かぶりコンクリートの剥落を再現するため、シートの接着範囲において主鉄筋の下面にも接触面要素を配置している。なお、シート端部における斜めひび割れは、解析モデルを簡略化するために、便宜的に梁高さの半分まで直線で配置する接触面要素を用いてモデル化している。

3.4 解析ケース

各ひび割れの影響を検討するために、いずれの試験体においても、図-4に示しているひび割れの種類に基づき、表-5に示す4解析ケースを設定した。ケース1は、実験結果に即して等曲げ区間に発生する曲げひび割れ(以後、曲げひび割れ)、等せん断力区間に発生する曲げと斜めひび割れ(以後、曲げと斜めひび割れ)、および主鉄筋すべりを全てモデル化する場合である。また、他の3解析ケースは、ケース1を基準にして、それぞれ、主鉄筋すべり、曲げひび割れ、および曲げと斜めひび割れを無視する場合の解析ケースである。なお、上述の各解析ケースでは、離散ひび割れの他、全てのコンクリート要素には分散ひび割れを考慮している。本研究では、離散ひび割

れの影響のみに着目しているため、分散ひび割れに適用した各パラメータの影響に関する検討は行わないこととする。

4. 数値解析結果および考察

図-5には、各試験体における荷重-スパン中央点変位(以後、変位)関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。数値解析の結果、ケース4の曲げと斜めひび割れを無視する場合を除いた全ての解析ケースにおいて、RC梁は実験結果と同様に斜めひび割れに起因するピーリング作用によってシートが全面剥離して終局に至るように評価されている。

図-5より、ケース1における解析結果を見ると、いずれの試験体においても、主鉄筋降伏時や終局時の荷重および変位が、実験結果と若干異なっているものの、載荷初期から終局に至るまで、解析結果は実験結果を大略再現していることが分かる。また、ケース1におけるRC梁の破壊性状は、いずれの試験体においても、実験結果と同様に斜めひび割れに起因するピーリング作用によって斜めひび割れの先端部からシートの剥離が発生し、かつ梁の変形の増大に伴い剥離範囲が支点側に拡大して、最終的にシートの全面剥離によって終局に至っている。

以下では、実験結果やこれらの解析結果と比較することにより、シート剥離への主鉄筋すべり、曲げひび割れや曲げと斜めひび割れの影響を検討することとする。

4.1 主鉄筋すべりの影響

図-5(a)に示すA試験体に関する比較図より、曲げひび割れ発生時から主鉄筋降伏までの領域において、ケース2の解析結果は実験結果やケース1の結果より若干大きい剛性勾配を示していることが分かる。また、主鉄筋降伏後においては、実験結果やケース1の解析結果よりも若干大きい荷重を示し、変位43mm付近からシートの全面剥離によって荷重が急激に低下している様子が見られる。B、C試験体に関する結果を見ると、主鉄筋降伏後において、ケース2の結果はA

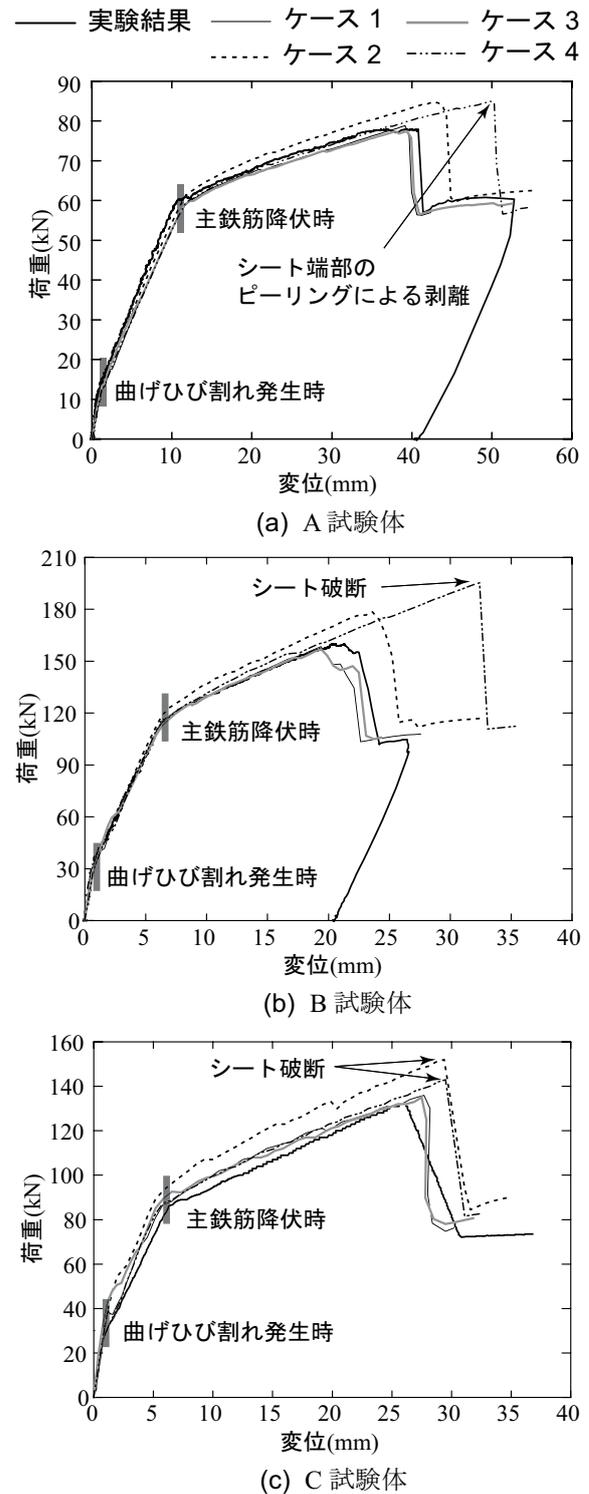


図-5 荷重-変位関係

試験体の場合と同様にケース1の結果よりも大きい荷重分布を示していることが分かる。

図-6には、一例としてA試験体に関する実験終了後の破壊状況写真、変位39.1mm時におけるケース1およびケース2における分散ひび割れの発生状況を示している。なお、ひずみのコンターレベル100, 3,000 μ は、それぞれ図-3に示すひび割れ発生ひずみ ϵ_{ty} とひび割れ開口ひず

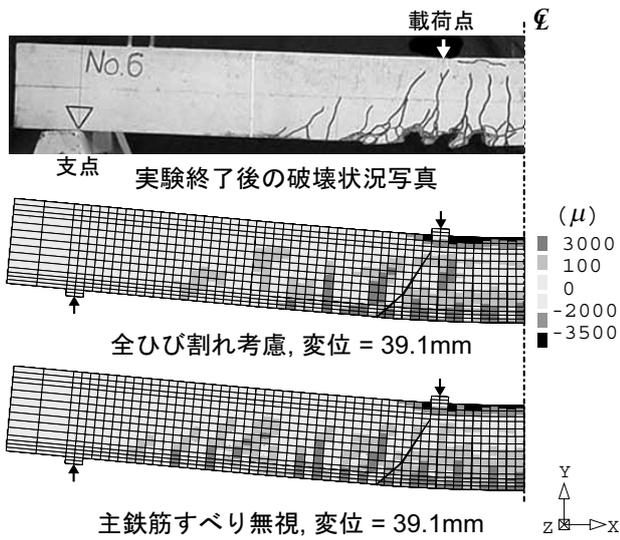


図-6 軸方向ひび割れ分布の一例 (A 試験体)

み ε_{tu} の概略値である。図より、ケース 2 の場合における分散ひび割れは、実験結果や主鉄筋すべりを考慮してモデル化するケース 1 より広い範囲に分布していることが分かる。

以上より、主鉄筋すべりを無視してモデル化する場合には、ひび割れの開口が抑制されるため、主鉄筋すべりを考慮してモデル化する場合と比較して、ひび割れの開口による RC 梁の曲げ剛性の低下が小さく、耐荷荷重が大きく評価される傾向にあり、ひび割れの数が増え、かつ分布範囲が広く評価される傾向にあることも明らかになった。

4.2 曲げひび割れの影響

図-5 の A, B 試験体に関する曲げひび割れを離散化しないケース 3 の解析結果を見ると、載荷初期からシートの全面剥離によって終局に至るまでケース 1 の解析結果と殆ど一致している。また、載荷点間隔が最も広い C 試験体の場合における荷重-変位関係は、曲げひび割れ発生時近傍の荷重値がケース 1 の解析結果より大きく示されているが、その後は類似の分布を示している。これより、コンクリートの引張破壊を分散ひび割れモデルを用いてモデル化する場合において、等曲げ区間に発生する主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が明らかになった。

4.3 曲げと斜めひび割れの影響

図-5(a) に示す A 試験体に関する曲げと斜め

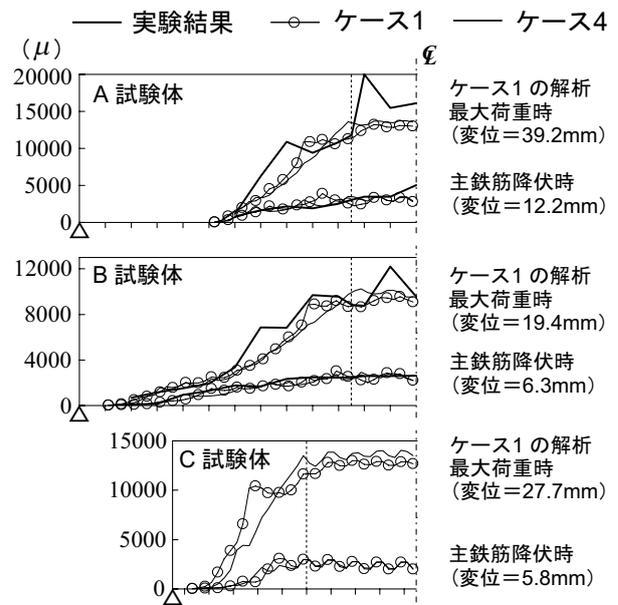


図-7 FRP シートの軸方向ひずみ分布

ひび割れを離散化しないケース 4 の結果を見ると、変位 20 mm 付近までは、ケース 1 の結果と同様な荷重-変位関係を示している。その後、剛性勾配の低下は見られず荷重がほぼ直線的に増加し、変位 50 mm 付近でシートが端部ピーリングによって剥離し荷重が急激に低下していることが分かる。これは、離散的な曲げや斜めひび割れを考慮していないために、載荷点近傍部におけるピーリング現象を数値解析的に再現することができず、結果として載荷点近傍部におけるシート剥離が抑制されるように評価されるためと考えられる。また、B, C 試験体の場合においても、A 試験体の場合と同様に、ケース 4 の解析結果は斜めひび割れ開口時 (B 試験体：変位 = 9.6 mm, C 試験体：変位 = 19.6 mm) までケース 1 の結果とよく対応している。その後、荷重がほぼ線形に増加し、最終的には、いずれの梁もシートの接着長が十分長いために A 試験体のような端部ピーリングも発生せず、シートの破断によって終局に至っている。

図-7 には、各試験体において、主鉄筋降伏時およびケース 1 の解析最大荷重時における FRP シートの軸方向ひずみ分布を比較して示している。なお、C 試験体に関しては、文献から実験結果のひずみ分布を得ることができないため³⁾、解析結果のみを示している。

表-6 各結果における最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} の一覧

試験体名	出力項目	実験結果	解析結果			
			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
A	P_{max} (kN)	78.0	78.8 (1.00)	84.8 (1.08)	77.4 (0.98)	85.0 (1.08)
	δ_{max} (mm)	39.4	39.2 (1.00)	42.8 (1.09)	39.4 (1.01)	49.8 (1.27)
B	P_{max} (kN)	160.1	158.4 (1.00)	178.6 (1.13)	157.0 (0.99)	195.4 (1.23)
	δ_{max} (mm)	19.9	19.4 (1.00)	23.6 (1.22)	19.4 (1.00)	32.4 (1.67)
C	P_{max} (kN)	132.0	136.3 (1.00)	152.3 (1.12)	134.9 (0.99)	142.8 (1.05)
	δ_{max} (mm)	25.9	27.8 (1.00)	29.4 (1.06)	27.5 (0.99)	29.5 (1.06)

() 中の数値は、ケース1の解析結果との比である。

図より、いずれの試験体においても、ケース4の主鉄筋降伏時における解析結果はケース1の解析結果と類似であることが分かる。一方、ケース1の解析最大荷重時の結果に着目すると、ケース4のひずみ分布曲線にはシートの部分剥離によって生じるひずみの均等化された区域が現れていないことより、曲げと斜めひび割れを離散化しない場合にはシートの剥離現象をよくシミュレートできないことが分かる。

これより、斜めひび割れに起因するピーリング作用は、シート剥離を促進させる主要な要因であり、RC梁の破壊挙動や耐荷性状に重要な影響を与えることが明らかになった。これより、曲げと斜めひび割れを離散化しない場合には、1) RC梁の終局荷重および終局荷重時変位を過大に評価される、2) RC梁は、シート接着長が短い場合には端部ピーリングによるシート剥離、シートの接着長が十分長い場合にはシートの破断によって終局に至るように評価される、傾向にあることが明らかになった。

表-6には、各試験体に関する実験結果および各解析結果の最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} を一覧に示している。表より、ケース1やケース3の解析結果は、実験結果と大略対応していることが分かる。一方、ケース2およびケー

ス4の場合には、終局荷重および終局荷重時変位が実験結果より大きく評価されることが示されている。

5. 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曲げと斜めひび割れ、およびこれらのひび割れ幅と密接に関係する主鉄筋すべりの影響について、実験結果と比較する形で数値解析的に検討を行った。

本研究より得られた結果を整理すると、

- 1) 等せん断力区間の載荷点近傍に発生する曲げと斜めひび割れは、曲げ補強シートの剥離を励起する主要因であり、RC梁の破壊形式や耐荷性状に重要な影響を与えることが数値解析的に明らかになった。
- 2) FRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動や耐荷性状を数値解析的に再現する場合において、主鉄筋すべりや等せん断力区間に発生する曲げと斜めひび割れを離散化しない場合には、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が明らかになった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, 澤田純之: AFRPシート曲げ補強RC梁のシートの必要接着長評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp.987-997, 2002
- 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) 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