

FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすひび割れの影響に関する数値解析

Numerical Study on Influence of Cracks on Load-carrying Behavior of RC Beams Flexural Strengthened with FRPs

室蘭工業大学  
 室蘭工業大学  
 三井住友建設(株)  
 (独)北海道開発土木研究所

○ 学生員  
 フェロー  
 フェロー  
 正 員

張 広鋒 (Guangfeng Zhang)  
 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
 三上 浩 (Hiroshi Mikami)  
 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

連続繊維シート(以後、FRPシート)曲げ補強 RC 梁を曲げ載荷する場合、等せん断力区間に発生する曲げおよびせん断ひび割れは、RC 梁の破壊形式や耐荷性状と密接に関係のあることが実験的に明らかになっている。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、これらの各ひび割れのシート剥離に関する影響度合を明らかにすることが肝要である。

このような観点から、本研究では、これらの各ひび割れや、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<sup>1)</sup>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。また、解析結果を実験結果と比較することにより、その影響に関する検討を行っている。

2. 試験体概要

表-1には解析に用いた3試験体の一覧を示している。図-1には、各試験体の断面寸法、載荷点位置および配筋状況を示している。A、B 試験体は、著者ら<sup>1,2)</sup>が過去に実施した実験試験体である。両試験体は、断面寸法(幅×高さ)が A 試験体で 150×250 mm、B 試験体で 150×400 mm であり、いずれも軸方向筋として D16 (SD345) を用いている。また、曲げ補強材には、幅 130 mm の一方向アラミドケブラー (AFRP) 繊維シートを用い、梁下面に 1 層もしくは 2 層をスパン中央部から支点の 100 mm 手前の範囲まで

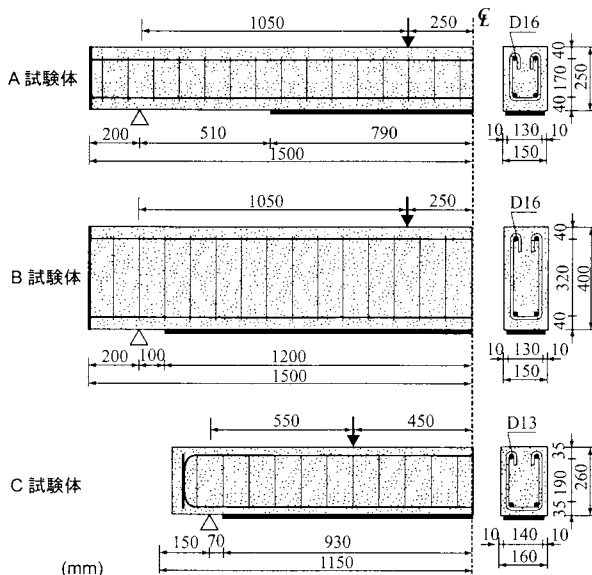


図-1 試験体の概要

接着している。一方、C 試験体は、岳尾ら<sup>3)</sup>より報告された実験試験体である。この試験体の詳細は文献 2) (No.5 試験体)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。

表-1 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	5.0	1	アラミドケブラー	ピーリング作用によるシートの全面剥離
B	2.92	2	アラミドケブラー	
C	2.44	1	炭素	

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 $\nu$
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 $E_f$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$
A, B	主鉄筋 (D16)	406.0	206.0	0.3
	帯鉄筋 (D10)	380.0		
C	主鉄筋 (D13)	356.0	200.0	0.3
	帯鉄筋 (D6)	340.0		

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 <sup>2</sup> )	設計厚さ $t_f$ (mm)	引張強度 $f_f$ (MPa)	弾性係数 $E_f$ (GPa)
アラミドケブラー (AFRP)	415	0.286	2,060	118.0
炭素 (CFRP)	300	0.167	3,480	230.0

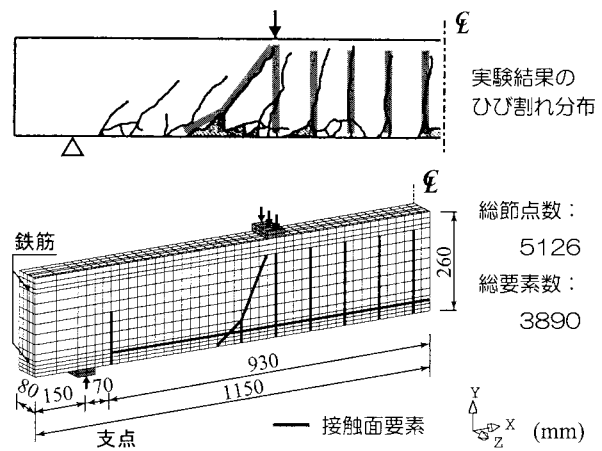


図-2 要素分割図の一例 (C 試験体)

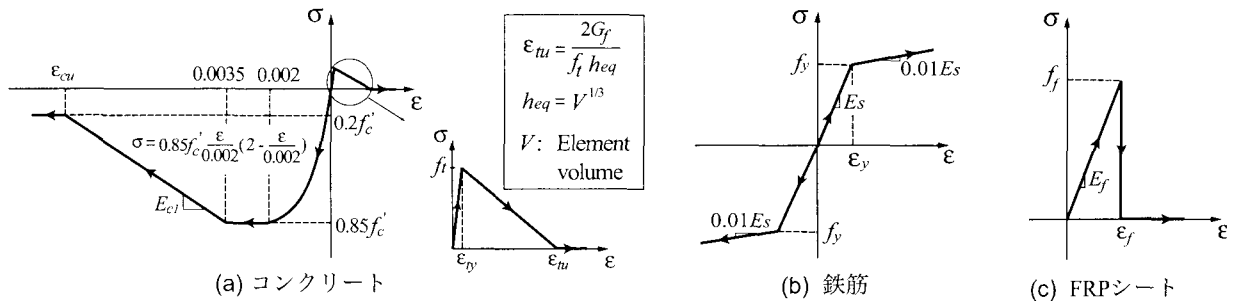


図-3 材料構成則

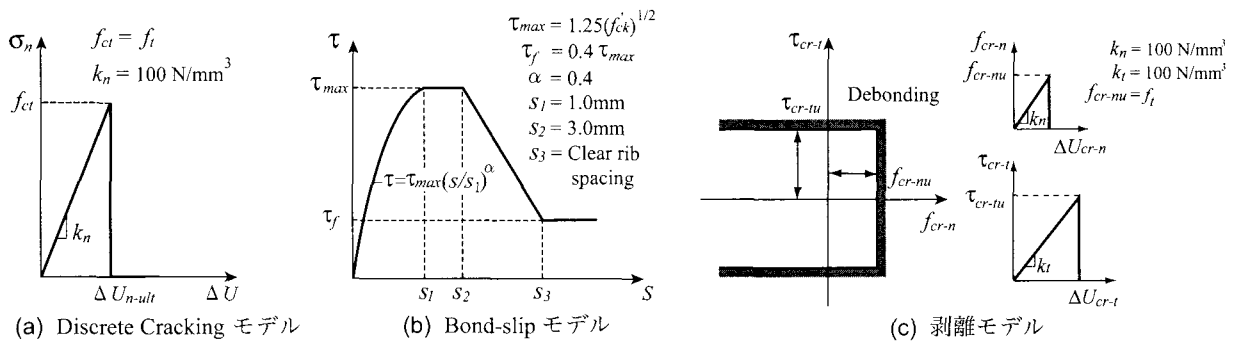


図-4 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

### 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。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

図-3(a)にはコンクリートの応力-歪関係を示している。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、圧縮歪 $3,500\mu$ 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 $0.2f'_c$ 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 $\epsilon_{tu}$ はCEB-FIPコードに即し、破壊エネルギー $G_f$ を用いて図示のように定義している。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、図-3(b)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シートは、図-3(c)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。

#### 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-4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<sup>1)</sup>。

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

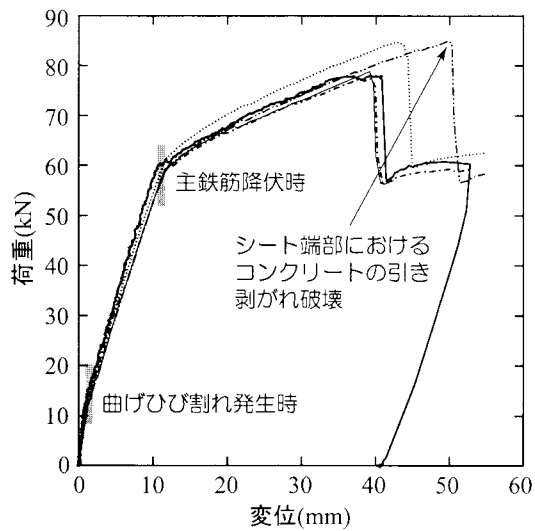
応力値 $f_{ct}$ は、コンクリートの引張破壊強度 $f_t$ と等価であるものと設定した。Bond-slipモデルにはCEB-FIPによるすべり-付着応力関係式を採用した。また、シートの全面剥離を再現するため、著者らが提案した剥離モデルを用いている。剥離モデルの詳細は文献1)に譲ることとする。なお、図-4(c)に示すパラメータ $\tau_{cr-tu}$ は文献4)を参考にし、SI単位系で整理した次式を用いて評価することとした。

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

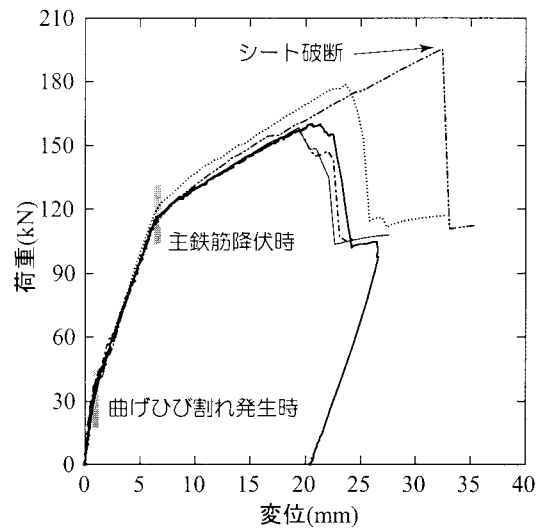
接触面要素の配置に関しては、いずれの試験体においても、実験結果の破壊状況を参照にして顕著な曲げおよび斜めひび割れの発生位置に配置している。また、かぶりコンクリートの剥落を再現するため、シートの接着範囲において主鉄筋の下面にも接触面要素を配置している。なお、シート端部における斜めひび割れは、解析モデルを簡略化するために、便宜的に梁高さの半分まで直線で配置する接触面要素を用いてモデル化している。

### 4. 数値解析結果および考察

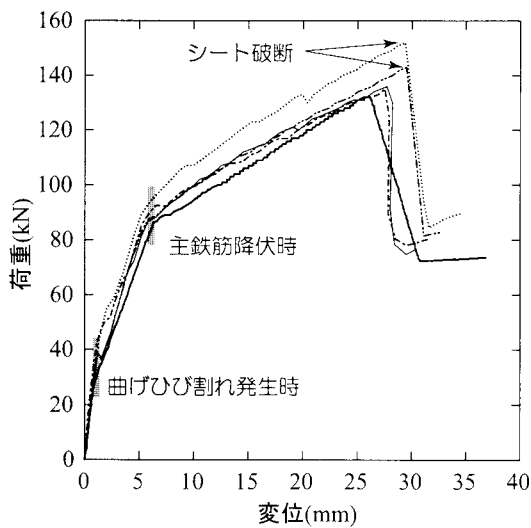
図-5には、各試験体における荷重-スパン中央点変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。ここで、各解析ケース(図-5を参照)において、全ひび割れを考慮する解析ケースは、実験結果に即して等曲げ区間に発生する曲げひび割れ(以後、曲げひび割れ)、等せん断力区間に発生する曲げと斜めひび割れ(以後、曲げと斜めひび割れ)、および主鉄筋すべりを全てモデル化する場合である。また、他の3解析ケースは、この全ひび割れを考慮したモデルを基準にして、それぞれ、主鉄筋すべり、曲げひび割れおよび曲げと斜めひび割れの影響を検討する解析ケースである。なお、上述の各解析ケースでは、離散ひび割れの他、全てのコンクリ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。なお、各解析



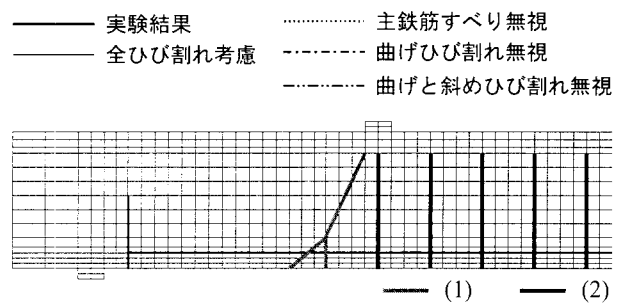
(a) A 試験体



(b) B 試験体



(c) C 試験体



解析ケース	検討内容	解析モデル
全ひび割れ考慮	実験結果の再現	図-2 に示しているモデル
主鉄筋すべり無視	主鉄筋すべりの影響	主鉄筋のすべりを無視
曲げひび割れ無視	曲げひび割れの影響	(2) を無視
曲げと斜めひび割れ無視	斜めひび割れの影響	(1) を無視

図-5 荷重-変位関係

ケースの終局原因に関しては、図に説明している解析ケースを除き、全ての解析は斜めひび割れに起因するピーリング作用によりシートの全面剥離によって終了した。

図-5より、全ひび割れ考慮の場合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、載荷初期から斜めひび割れに起因するピーリング作用によりシートの全面剥離によって終局に至るまで、解析結果は実験結果を大略再現していることが分かる。以下には、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、曲げひび割れおよび曲げと斜めひび割れの影響を検討するとする。

#### 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、主鉄筋降伏時において、主鉄筋すべり無視の解析結果は実験結果や全ひび割れ考慮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、実験結果や全ひび割れ考慮の解析結果よりも高い剛性勾配を示し、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。なお、B、C試験体に関する比較図を見ると、主鉄筋降伏後の主鉄筋すべり無視の結果は、A試験体と同様、全ひび割れ考慮の結果を大

きく上回っ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ひび割れ分布、スパン中央点変位39.1mm時における全ひび割れ考慮および主鉄筋すべり無視の軸方向分散ひび割れを示している。なお、歪コンターレベルの100, 3000 $\mu$ は、それぞれ図-3に示すひび割れ発生歪 $\epsilon_{ty}$ とひび割れ開口 $\epsilon_{tu}$ の概略値である。図より、主鉄筋すべり無視の場合におけるひび割れ分布は、実験結果や主鉄筋すべりを考慮してモデル化する場合より広い範囲に分布していることが分かる。

以上より、主鉄筋すべりを考慮せずに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、荷重-変位曲線の剛性勾配が高くなる傾向にあることが推察される。また、主鉄筋すべりを無視する場合には、ひび割れの発生本数や分布範囲が増える傾向にあることが明らかとなった。

#### 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無視の場合における結果を見ると、載荷初期からシートのピーリング作用によって終局に至るまで全ひび割れ考慮の解析結果と殆ど一致していることが分かる。また、載荷幅の最も広い

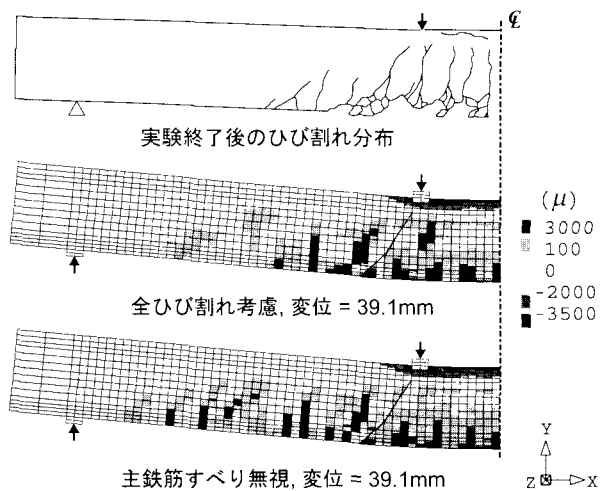


図-6 軸方向ひび割れ分布の一例 (A 試験体)

C 試験体に関する曲げひび割れ無視の場合の載荷荷重は、曲げひび割れ開口時付近において、全ひび割れ考慮の場合より大きくなっているが、その後の両者の分布曲線はほぼ同様であることが分かる。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している場合において、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ものと考えられる。

#### 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ひび割れ無視の結果を見ると、変位 20 mm 付近までは、全ひび割れ考慮の結果と同様な分布を示している。その後、剛性勾配の低下は見られず荷重がほぼ直線で増加し、変位 50 mm 付近で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によって急激に低下していることが分かる。これは、全ひび割れ考慮の場合における解析では変位 20 mm 付近から斜めひび割れが明瞭に開口し、シート剥離の進展によって荷重-変位曲線の剛性勾配が多少低下しているのに対して、曲げと斜めひび割れ無視の場合、斜めひび割れに起因するピーリング作用によるシートの剥離が発生しないためと考えられる。また、B、C 試験体に関する比較図より、これらの試験体の場合も A 試験体の場合と同様に、斜めひび割れ無視の場合の結果は、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)まで全ひび割れ考慮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、最終的にシートの破断によって終局に至っている。

これより、曲げと斜めひび割れの開口に起因するピーリング作用はシートの剥離を励起する主要な要因であり、RC 梁の破壊挙動や耐荷性能に重要な影響を与えることが明らかになった。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が大きく評価される、2) RC 梁がシートの剥離ではなく破断によって終局に至る、等の傾向にあることが解析的に明らかとなった。

一方、表-5 には、各試験体における実験結果および各解析結果の最大荷重および最大荷重時変位を一覧に示している。表より、全ひび割れ考慮や曲げひび割れ無視の場合の結果は実験結果と大略対応している。一方、主鉄筋すべり無視および曲げと斜めひび割れ無視の場合には、終局荷

表-5 各結果における最大荷重および最大荷重時変位の一覧

試験体名	解析ケース	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	破壊形式
A	実験結果	78.0	39.4	シート剥離
	全ひび割れ考慮	78.8 (1.00)	39.2 (1.00)	
	主鉄筋すべり無視	84.8 (1.08)	42.8 (1.09)	
	曲げひび割れ無視	77.4 (0.98)	39.4 (1.01)	
	曲げと斜めひび割れ無視	85.0 (1.08)	49.8 (1.27)	*
B	実験結果	160.1	19.9	シート剥離
	全ひび割れ考慮	158.4 (1.00)	19.4 (1.00)	
	主鉄筋すべり無視	178.6 (1.13)	23.6 (1.22)	
	曲げひび割れ無視	157.0 (0.99)	19.4 (1.00)	
	曲げと斜めひび割れ無視	195.4 (1.23)	32.4 (1.67)	シート破断
C	実験結果	132.0	25.9	シート剥離
	全ひび割れ考慮	136.3 (1.00)	27.8 (1.00)	
	主鉄筋すべり無視	152.3 (1.12)	29.4 (1.06)	
	曲げひび割れ無視	134.9 (0.99)	27.5 (0.99)	
	曲げと斜めひび割れ無視	142.8 (1.05)	29.5 (1.06)	シート破断

\* シート端部におけるコンクリートの引き剥がれ破壊

( ) 中の数値は、それぞれ全ひび割れ考慮解析結果との比である

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、また、破壊形式も実験と異な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能に重要な影響を与えることが解析的に明らかとなった。
- 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 梁の耐荷性能を過大に評価し、破壊形式を正しく再現できない可能性の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