

論文 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

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

要旨：本研究では、著者らが提案しているシートの剥離を伴う FRP シート曲げ補強 RC 梁の数値解析手法の汎用性を検証することを目的に、せん断スパン比およびかぶり厚さを変化させた全 9 体の AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する数値解析を行い、実験結果と比較する形で検討を行った。検討の結果、1) 提案した解析手法を用いることにより、下縁かぶり厚さにかかわらず、実験結果の荷重－変位関係やシートの剥離挙動を大略評価可能である、2) 同一せん断スパン比を有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の場合には、下縁かぶり厚さが厚いほどシートが早期に剥離する傾向にある、等が明らかとなった。

キーワード：RC 梁, FRP シート, かぶり厚さ, 非線形解析, 離散ひび割れ

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として軽量かつ高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRP シート) を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。このため、各研究機関では、FRP シートを用いた RC 構造物の合理的かつ実用的な補強設計手法の確立を目的とした実験的・解析的研究が盛んに行われている。

著者らも FRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁部材の耐荷性状およびシートの剥離挙動を適切に評価可能な数値解析手法を確立するために、シートの剥離モデルを含む解析手法を提案し、その妥当性を実験結果と比較することによって検討している¹⁾。

本研究では、提案の解析手法の汎用性を検討することを目的として、下縁かぶり厚さの異なるアラミド連続繊維 (AFRP) シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する数値解析を行い、実験結果と比較する形でその汎用性に関する検討を行った。

2. 実験概要

表－1 には、解析対象とした試験体²⁾の一覧を示している。試験体は、せん断スパン比およびかぶり厚をそれぞれ 3 種類に変化させた全 9 体の AFRP シート曲げ補強 RC 梁である。表中、試験体名の第一項目の R に付随する数値はせん断スパン比の概略値を示し、第二項目の C に付随する数値は芯かぶり (以後、単にかぶり) 厚さを示している。図－1 には、本実験に

表－1 試験体の一覧

試験体名	断面寸法 幅 × 高さ (mm)	純スパン 長 (mm)	せん断 スパン比	かぶり 厚さ c (mm)
R3-C25	150 × 235	1,800	3.1	25
R3-C40	150 × 250			40
R3-C60	150 × 270			60
R5-C25	150 × 235	2,600	5.0	25
R5-C40	150 × 250			40
R5-C60	150 × 270			60
R7-C25	150 × 235	3,400	6.9	25
R7-C40	150 × 250			40
R7-C60	150 × 270			60

*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 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 室長 技術研究所構造研究室 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 助手 工学部建設システム工学科 博(工) (正会員)

表－２ コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	圧縮 強度 f'_c (MPa)	引張 強度 f_t (MPa)	降伏 強度 f_y (MPa)	弾性 係数 E (GPa)	ポアソン 比 ν
コンクリート	33.7	2.63	-	24.0	0.2
主鉄筋 D16	-	-	365	206	0.3
帯鉄筋 D10	-	-	365		

表－３ AFRP シートの力学的特性値

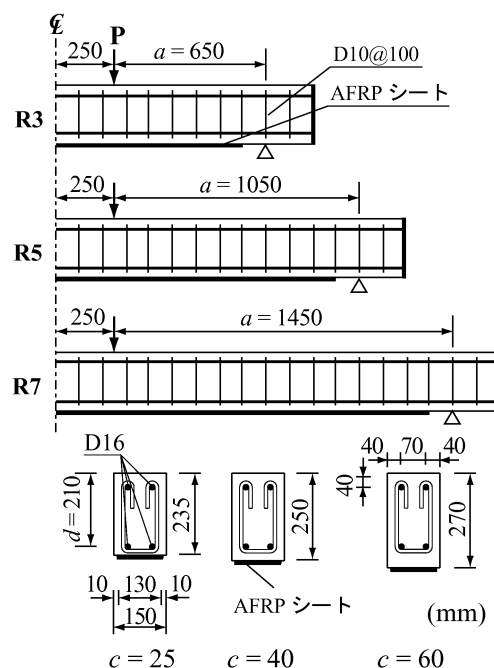
シート 材料	繊維 目付量 (g/m ²)	厚さ t_f (mm)	引張 強度 f_f (MPa)	弾性 係数 E_f (GPa)	破断 歪 ε_{fu} (%)
AFRP	415	0.286	2,480	131	1.89

用いた RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。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。また、断面の有効高さ d はいずれも 210 mm であり、かぶり厚さ c を 25, 40 および 60 mm と設定している。全ての試験体において、曲げ補強材には強化方向が一方向の AFRP シートを用い、梁下面に 2 層をスパン中央部から支点の 100 mm 手前の範囲まで接着している。シート上には、その補強効果や剥離挙動を精査するために箔歪ゲージを 100 mm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。表－２には、材料試験から得られたコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値、表－３には AFRP シートの力学的特性の公称値を示している。

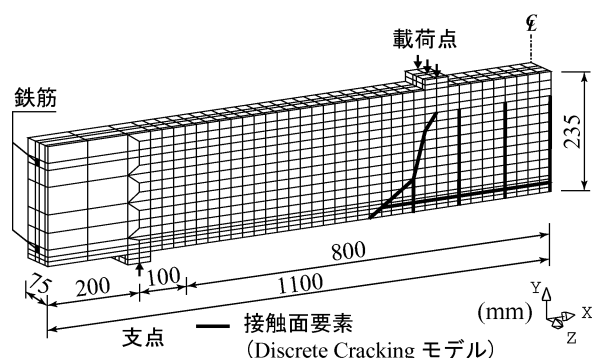
3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

図－２には、要素分割図の一例として、R3-C25 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、鉄筋および AFRP 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、支点部では節点の鉛直方向変位成分を拘束している。また、収束計算には一般に広く用いられている



図－１ 試験体概要図

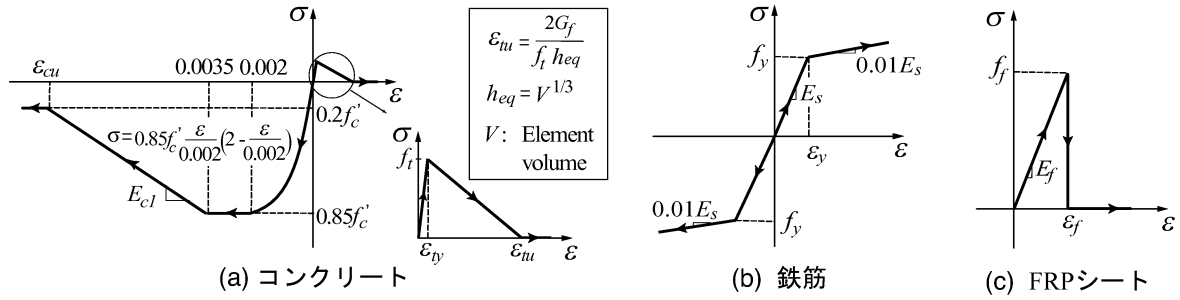


図－２ 要素分割図 (R3-C25 試験体)

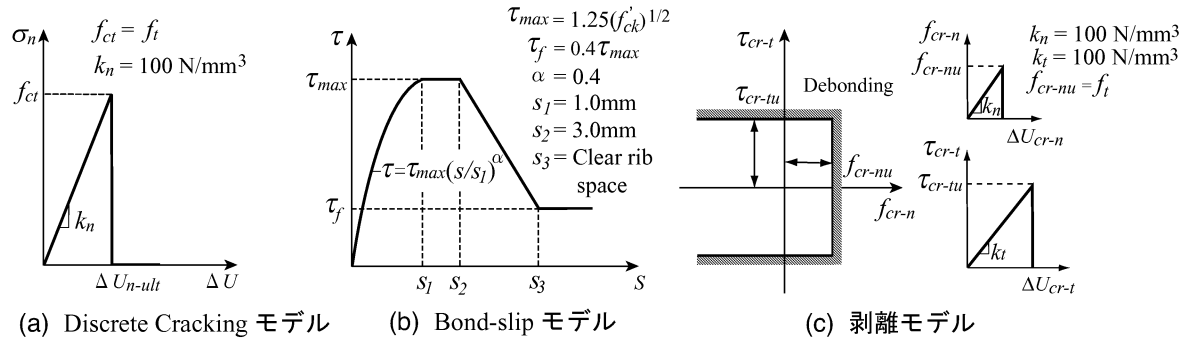
Newton-Raphson 法を採用している。

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 $0.2 f'_c$ 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、終局歪 ε_{tu} は図に示す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



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

件に従うものとしている。AFRP シートには、**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 接触面要素の応力－相対変位関係

本数値解析では、RC 梁の実挙動に即してひび割れ状況やシートの剥離性状に着目した検討を行うために、**図－2**に示しているように予め規定したコンクリートの一部、コンクリート－主鉄筋間、コンクリート－FRP シート間に接触面要素を配置して、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幾何学的不連続現象をモデル化している。本数値解析では、**図－4**に示している3種類の応力－相対変位関係を設定している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。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (1)$$

$$\tau_{cr-t} = \sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu} \quad (2)$$

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 3) を参考にして、以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

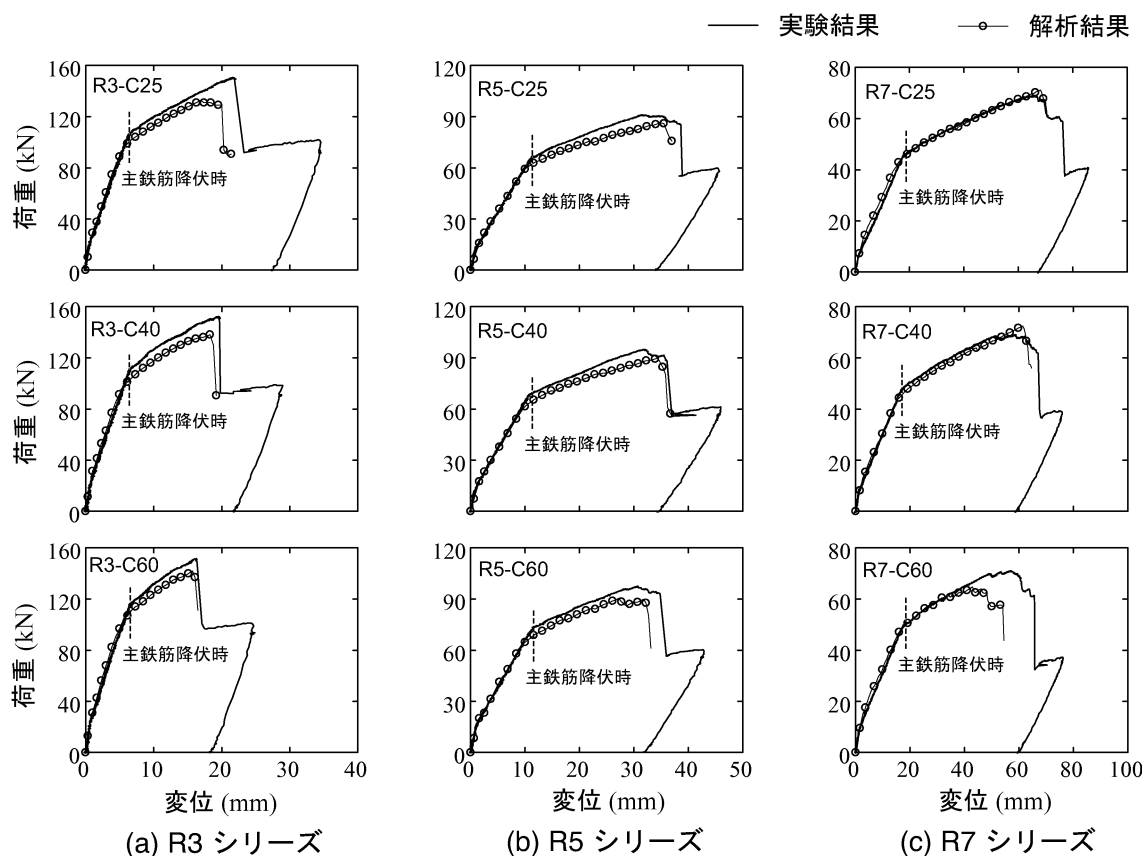
上式は、文献 3) の式の単位 (psi) を MPa の単位に換算したものである。

一方、離散ひび割れの形状や配置は、解析モデルを簡略化するために、**図－2**に示すように実験結果の破壊状況を参考にして、全試験体に対して等しく設定している。

4. 数値解析結果および考察

4.1 荷重－変位関係

図－5には、各試験体の荷重－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。各解析は、実験結果と同様にシートの全面剥離によって計算を終了している。



図－5 荷重－変位関係

図－5(a) の R3 シリーズの 3 試験体に関する比較図より、各解析結果はそれぞれの実験結果と主鉄筋降伏時まではよく対応していることが分かる。主鉄筋降伏後、解析結果は、実験結果とほぼ同様な勾配で増加し、実験結果の終局点付近でかぶりコンクリートのピーリング作用によってシート剥離が発生し、かつそれが全面に進行したことにより終局に至った。

また、図－5(b), (c) の R5 および R7 シリーズの各比較図を見ると、解析結果は、R5/R7-C60 試験体において実験結果より早期に終局に至る傾向を示しているが、その他の試験体に関しては載荷初期から終局時まで大略実験結果と対応していることが分かる。

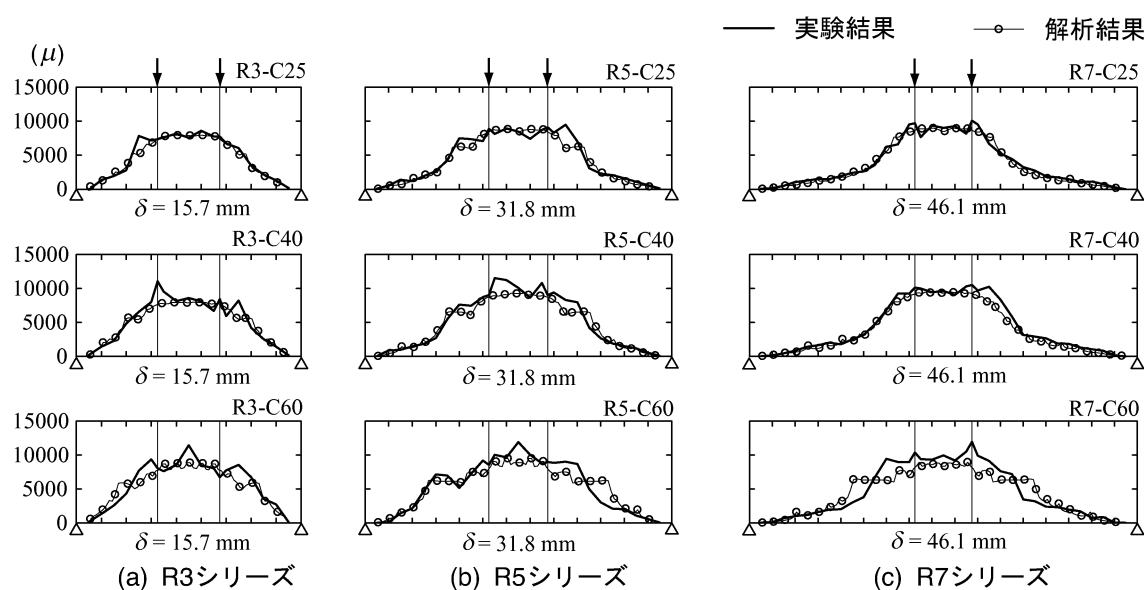
表－4 には各試験体に関する実験結果および解析結果の降伏荷重、降伏時変位、最大荷重、最大荷重時変位を一覧にして示している。表より、せん断スパン比にかかわらず、降伏荷重は、かぶり厚さ c が厚いほど大きくなる傾向にあることが実験・解析的に明らかになった。これは、かぶり厚さが大きい場合には断面高さが

大きくなることにより、シートによる断面の抵抗モーメントも増加することによるものと考えられる。また、かぶり厚さ $c = 25 \text{ mm}$ と $c = 60 \text{ mm}$ における最大荷重時変位に着目すると、解析結果は実験結果と共に、せん断スパン比にかかわらずかぶり厚さ c が厚いほど小さくなる傾向にあることが分かる。これは、かぶり厚さの大きい場合には、梁に発生した曲げおよび斜めひび割れの交叉により形成されたコンクリートブロックが大きくなるため、ピーリング作用が発生しやすくシート剥離の進行も速くなることによるものと推察される。しかしながら、 $c = 40 \text{ mm}$ 試験体の結果は $c = 25 \text{ mm}$ や $c = 60 \text{ mm}$ との差異が小さい。

一方、同一せん断スパン比を有する各試験体の最大荷重値を比較すると、それらの差は小さく、上述の変位と同様な傾向は示されていない。これは、同一変位時において、かぶり厚さが大きい試験体の載荷荷重は、かぶり厚さが小さい場合よりも大きくなる傾向を示すものの、シートが早期に全面剥離に至るため、必ずしも大き

表－４ 各試験体の降伏荷重，降伏時変位，最大荷重および最大荷重時変位の一覧

試験体名	降伏荷重 (kN)		降伏時変位 (mm)		最大荷重 (kN)		最大荷重時変位 (mm)	
	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果
R3-C25	106.5	95.0	6.4	5.6	149.9	132.9	21.7	16.9
R3-C40	111.2	97.7	6.5	5.6	151.3	137.7	19.6	18.4
R3-C60	116.7	103.6	6.6	5.6	150.3	141.8	16.3	15.7
R5-C25	66.7	60.5	11.5	10.5	90.2	86.4	35.0	35.1
R5-C40	68.7	61.4	10.9	10.0	94.8	89.9	32.1	34.4
R5-C60	73.7	63.2	11.5	9.5	97.0	89.8	30.8	31.8
R7-C25	46.2	42.9	18.3	16.0	68.8	71.2	66.3	68.2
R7-C40	47.9	43.8	17.1	15.5	68.9	72.4	58.7	61.4
R7-C60	49.5	46.1	17.8	15.5	70.8	64.0	57.1	46.1



図－６ AFRP シートの軸方向歪分布

くならないためと推察される。

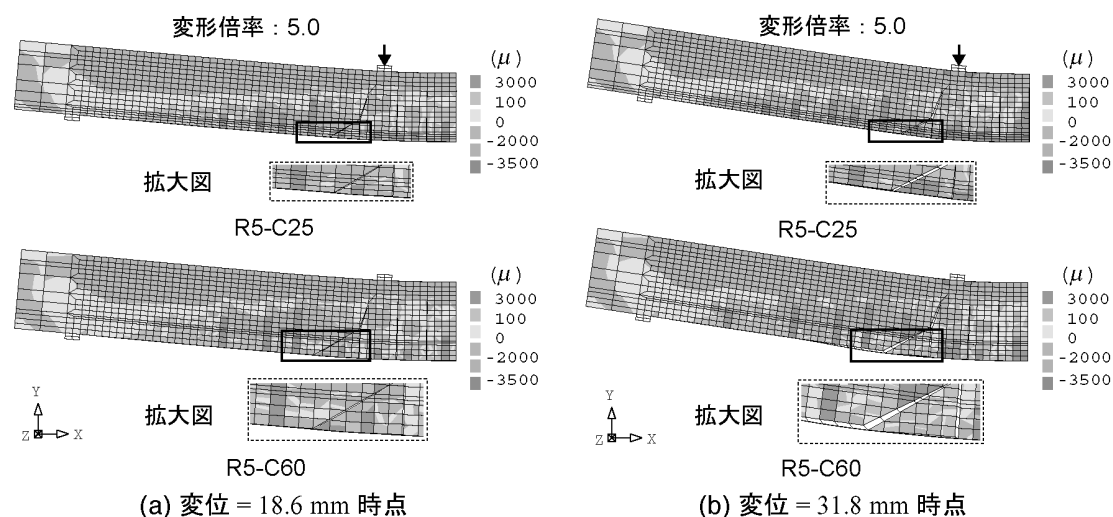
4.2 AFRP シートの軸方向歪分布

ここでは，解析結果の妥当性や FRP シートの歪分布性状に及ぼす下縁かぶり厚さの影響を考察するため，シートの軸方向歪分布性状に関する実験結果と解析結果の比較を行うこととする。図－6 には，同一変位時の歪分布を比較するために，各 R3/R5/R7-C60 試験体の数値解析結果の最大荷重到達時付近である， $\delta = 15.7$ mm, $\delta = 31.8$ mm, $\delta = 46.1$ mm における結果を実験結果と比較して示している。

まず，実験結果に着目すると，図－6(a) の R3 シリーズの結果より，等曲げ区間ではほぼ同程度の歪レベルを示している。等せん断力区間に関しては，R3-C60 試験体において，シート歪が均等化された区域が現れておりシートの剥離が発生しそれが支点に向かって進行して

いることが推察される。R3-C25/C40 試験体にもシート歪の均等化された区域が見られる。また，R5 シリーズや R7 シリーズの各実験結果を見ると，R3 シリーズとほぼ同様な歪分布性状を示していることが分かる。しかしながら，せん断スパン比の大きさにかかわらず，かぶり厚さ $c = 60$ mm を有する試験体の場合には，同一せん断スパン比を有する試験体の中で，シート歪の均等化区間が最も広いことが観察できる。これより，同一変位時では，かぶり厚さが厚いほど，コンクリートブロックによるピーリング作用が顕在化してシートの剥離範囲も広くなるものと推察される。

解析結果に着目すると，せん断スパン比やかぶり厚さの大きさにかかわらず，シート歪が均等化された区域が現れており，実験結果と大略対応していることが分かる。



図－7 梁変形状況，軸方向歪分布，およびシートの剥離性状

4.3 離散ひび割れ分布およびシート剥離性状

図－7(a), (b)には，一例として，R5-C60試験体の斜めひび割れ開口時付近 ($\delta = 18.6$ mm)，および解析終局時 ($\delta = 31.8$ mm)における R5-C25/C60 試験体に関する解析結果の軸方向歪分布，ひび割れ分布およびシートの剥離性状を比較して示している。歪コンターレベルの 100 および 3000 μ は，それぞれ，図－3(a)に示している ε_{xy} および ε_{uu} の概略値である。

(a) 図より，この時点では，両試験体とも曲げおよび斜めひび割れが開口する傾向を示しているものの，シートは未だ剥離に至っていないことが確認できる。(b) 図の R5-C60 試験体の解析終局時の結果より，かぶりコンクリートのピーリング作用によってシートの剥離が進行している様子がうかがえる。これに対して，R5-C25 試験体の場合には，斜めひび割れが開口しているものの，明確なシート剥離の兆候が見られない。これより，同一変位時において，かぶり厚さが厚いほどシートが早期に剥離する傾向にあることが解析的にも明らかになった。

5. まとめ

本研究では，著者らが提案しているシートの剥離を伴う FRP シート曲げ補強 RC 梁の数値解析手法の汎用性を検証することを目的に，下縁かぶり厚さが異なる場合の曲げ補強 RC 梁に

関する数値解析を行い，実験結果と比較する形で検討を行った。

- (1) 著者らが提案した解析手法を用いることにより，せん断スパン比やかぶり厚さの大きさにかわらず，実験結果の荷重－変位関係やシートの剥離挙動を大略評価可能であることが明らかとなった。
- (2) 同一せん断スパン比を有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の場合には，下縁かぶり厚さが厚いほど降伏荷重が大きくなるが，シート剥離も早期に発生する傾向にあることが実験的・解析的に明らかになった。

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-58，255-272，2003
- 2) 岸 徳光，三上 浩，澤田純之，鈴木健太郎：AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離性状に及ぼすかぶり厚の影響，土木学会北海道支部論文報告集，第 59 号，pp.760-763
- 3) 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