

FRP シート曲げ補強 RC 梁の定荷重繰り返し載荷時における耐荷挙動

Iterative loading test with a constant load amplitude for flexural reinforced RC beams with FRPs

岸 徳光*, 三上 浩**, 栗橋 祐介***

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, and Yusuke KURIHASHI

*フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 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 主席研究員 (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

***正会員 博(工) (独) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

In this study, in order to investigate load-carrying behavior of the flexural reinforced RC beams with FRP sheet under iterative loading, iterative pulsating loading tests with constant load amplitude for the RC beams were conducted. Here two failure types of reinforced RC beams were used which are: flexural failure type; and sheet debonding failure type. Aramid FRP sheet (AFRPs) and Carbon FRP sheet (CFRPs) were taken as reinforcing material. Two loading levels were set which are 67 % and 90 % bigger loading level from rebar yielding point in the load between rebar yielding point and ultimate point. From this study, following results are obtained: 1) 67 % loading level, both RC beams reinforced with AFRPs and CFRPs are still health after 100th iterative loading; 2) in case of 90 % loading level for flexural failure type RC beam, RC beam with AFRPs is health after 100th iterative loading but RC beam with CFRPs is failed at 12th one due to sheet debonding; and 3) ductility for debonding of AFRPs may be superior to that for CFRPs.

Key Words : FRP sheet, RC beam, flexural strengthening, iterative loading**キーワード :** FRP シート, RC 梁, 曲げ補強, 繰り返し載荷

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強法には、古くから RC 増し厚工法や鋼板接着工法がある。しかしながら、鋼板やコンクリートを用いる場合には、1) 重量が重く施工性が悪いこと、2) 補強によって構造物の重量が増加すること、3) 鋼板の場合には錆が発生すること、等未だ検討すべき課題が残されている。このような状況下、近年軽量で施工性に優れかつ高強度を有するアラミド繊維や炭素繊維等の新素材繊維を用いた連続繊維シート (以後、FRP シートあるいは単にシート) を接着する工法が採用されるようになってきた^{1),2)}。

FRP シート接着工法のうち、RC 梁の引張側底面にシートを接着して曲げ補強する場合、圧縮縁コンクリートの圧壊の後にシート剥離が生じて終局に至る場合や、シート破断の他、圧縮縁コンクリートが終局ひずみに到達する前にシート剥離が生じて終局に至る場合が想定される。著者らは、この種の合理的な補強設計法を確立することを目的として数多くの FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を実施し、その耐荷性状およびシートの剥離性状に関する検討を行ってきた^{3),4)}。その結果、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は上述のように、i) 主鉄筋降伏後、剛性勾配が

計算結果のそれを下回り、計算耐力および計算終局変位を下回る状態でシートが剥離して終局に至る剥離破壊型と、ii) 主鉄筋降伏後においても計算結果と同様の耐荷性状を示し、かつ計算結果の終局変位を上回った後に計算耐力と同程度の荷重レベルでシートが剥離し終局に至る曲げ圧壊型に、分類できることを明らかにしている。また、シートの剥離メカニズムに着目した 4 点曲げ載荷実験結果より、シートの剥離は、等せん断力区間における主鉄筋降伏領域内の載荷点近傍下縁かぶりコンクリートに発生する斜めひび割れ先端部が鉄筋のダウエル変形と相まって、下方に押し出されることによるピーリング作用によって生じることも明らかにしている。なお、上述の計算結果とは、シートが破断に至るまで完全付着状態で剥離しないものとし、平面保持仮定と、コンクリート標準示方書⁵⁾ (以下、示方書) で規定されている各材料の応力-ひずみ関係を仮定して、断面分割法に基づいて得られるものである。

著者らは、この他上述の各破壊モード予測式の提案⁴⁾や、曲げ圧壊型で終局に至る場合にはシートの必要最小接着長の決定⁶⁾、剥離破壊型で終局に至る場合にはシートを側面に接着することにより剥離を抑制し計算終局耐力を保持することが可能であることも提示している⁷⁾。このような検討は全て静的単調載荷実験結果に基づいている。

表-1 試験体の一覧

試験体名	曲げ補強シート			荷重方法	繰り返し荷重振幅 (kN)
	種類	目付量 × 層数 (g/m ²) × (層)	伸び剛性 EA (MN)		
LA-M	AFRP	623 × 1	6.6	単調	-
LA-C1				繰り返し	65.7
LA-C2					72.8
LC-M	CFRP	200 × 2	6.6	単調	-
LC-C1				繰り返し	65.7
LC-C2					72.8
HA-M	AFRP	415 × 3	13.2	単調	-
HA-C1				繰り返し	79.6
HA-C2					88.5
HC-M	CFRP	200 × 1 + 300 × 2	13.3	単調	-
HC-C1				繰り返し	79.6
HC-C2					88.5

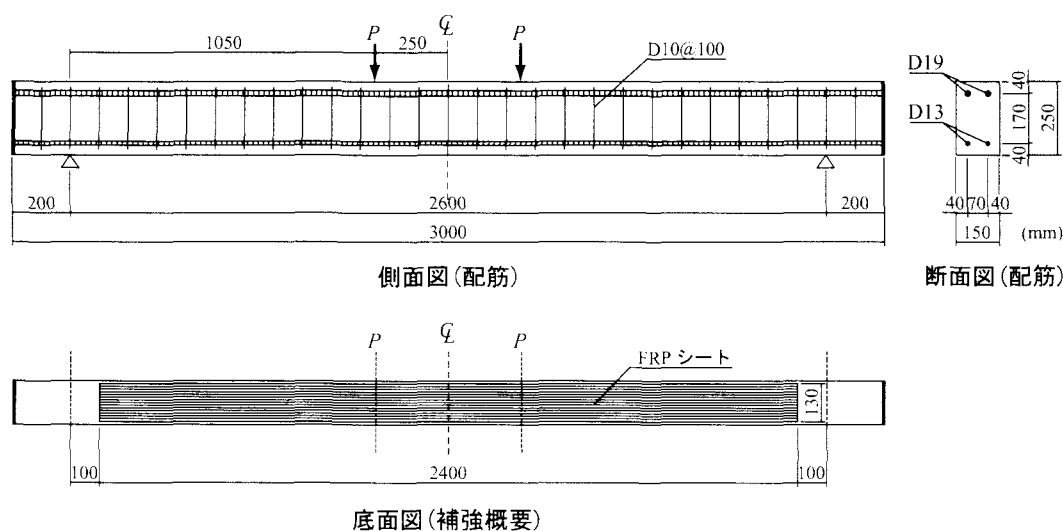


図-1 試験体概要図

一方、RC 部材は、その断面設計が通常主鉄筋の降伏強度よりも低いレベルで実施されているものの、道路橋の RC 床版部のように繰り返し荷重によってひび割れの進行とともにその開口幅も増大し、過積載車両走行時には主鉄筋が降伏域に達する場合も想定される。このような構造部材を対象として FRP シート補強を施す場合においても、所用の補強効果を確保することが要求される。しかしながら、主鉄筋が降伏域に達する領域において、荷重と除荷を繰り返す場合の FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状は未だ明らかにされていないのが現状である。

また、FRP シート曲げ補強 RC 梁の主鉄筋降伏後の領域を対象として、繰り返し荷重時の RC 梁の耐荷性状を把握しておくことは、限界耐力評価の観点や耐荷性能を規定する性能照査型設計の観点からも極めて肝要であるものと判断される。

このような観点から、本研究では FRP シートで曲げ補強した RC 梁を対象に、主鉄筋降伏後から終局に至る領域における静的繰り返し荷重時の RC 梁の定性的な耐荷性状を把握することを目的として、FRP シートで曲げ補強した RC 梁に関する片振りの定荷重繰り返し荷重実験を実施した。本研究では、RC 梁の断面寸法を同一とし、FRP シートの伸び剛性のみを変化させた破壊モードの異なる 2 種類の RC 梁を対象とし、かつ新素材繊維としてアラミド繊維 (AFRP) シートと炭素繊維 (CFRP) シートを用いる場合について検討を行っている。なお、繰り返し荷重荷重時の最大荷重値は、別途、単調荷重実験を実施して主鉄筋降伏時荷重 (以下、単に降伏時荷重) と終局時荷重を求め、主鉄筋降伏点から終局点までの増分荷重の 67% および 90% における荷重荷重 (以後、それぞれ単に 67% における荷重荷重、90% における荷重荷重) に設定した。

表-2 FRP シートの力学的特性値

種類	目付量 (g/m ²)	弾性係数 (GPa)	設計厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
AFRP シート	415	118	0.286	2.06	1.75
	623		0.430		
CFRP シート	200	230	0.111	3.40	1.48
	300		0.167		

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。表中、試験体名のうち第1項目はFRPシートの伸び剛性 EA (E : 弾性係数, A : 断面積) の大小とシート材料を示している。ここで、 L は伸び剛性 EA が 6.6 MN で小さい場合を、 H は伸び剛性 EA を L の2倍である 13.2 MN とする場合である。付随する A/C においては、 A は AFRP シートで補強した場合を、 C は CFRP シートで補強した場合を意味している。第2項目は載荷方法を示しており、 M は単調載荷、 C は定荷重繰り返し載荷を意味している。なお、 C に付随する数値は載荷する最大荷重を示している。それは前述のように 67% における載荷荷重を荷重 1、90% における載荷荷重を荷重 2 と設定している。

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法、配筋図および FRP シート接着による補強概要を示している。試験体は、断面寸法 (梁幅 × 梁高) を 150 × 250 mm、純スパン長を 2,600 mm とし、下端および上端鉄筋にそれぞれ D13、D19 を各 2 本ずつ配置した複鉄筋矩形 RC 梁である。上端鉄筋に D19 を用いたのは、上縁コンクリートの圧壊を遅延させるためである。また、せん断補強筋は、せん断余裕度 (計算せん断耐力 / 計算曲げ耐力) が 1.0 よりも十分大きく曲げ破壊先行型となるように、D10 鉄筋を梁中央部を起点として左右に 100 mm 間隔で配置した。ここで、計算せん断耐力は示方書に準拠して算出している。また、計算曲げ耐力は、断面分割法によって算出した。

曲げ補強範囲は、幅 130 mm でスパン中央部より両支点の 100 mm 手前までの範囲としている。シート接着部のコンクリート表面に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。曲げ補強用の FRP シートは、上述のようにシート材料の違いに着目して検討を行うため、AFRP シートと CFRP シートを用いることとし、それぞれの補強材の伸び剛性が同程度となるように表-2 に示すシートを組み合わせて接着している。なお、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 27.5 MPa、主鉄筋 D13 の降伏強度は 376 MPa であった。

写真-1 には、本研究に関する実験状況を示してい

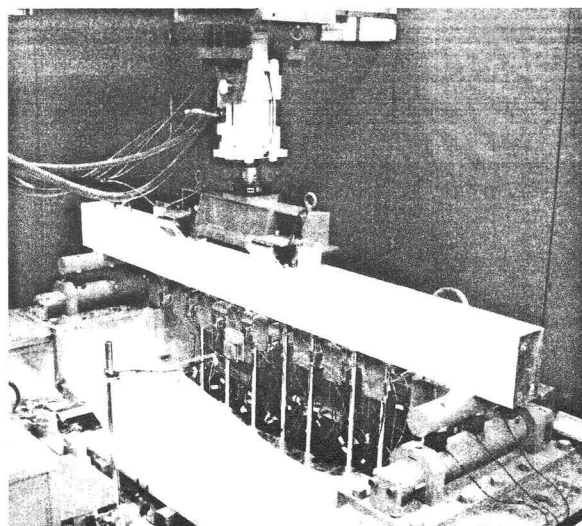


写真-1 実験状況

る。本実験では、定荷重繰り返し載荷を行うため油圧サーボ式ジャッキにより繰り返し荷重を載荷させている。本実験の測定項目は、静荷重測定用ロードセルによる載荷荷重、レーザ式変位計によるスパン中央点変位 (以後、単に変位) およびシート上に貼り付けたひずみゲージによるシートの軸方向ひずみである。これらの出力は連続的にデジタルメモリーに一括記録し、各物理量に変換している。なお、実験時には、ひび割れの進展状況を詳細に記録するため、デジタルカメラを用いて連続的に撮影を行っている。

2.2 載荷方法

本実験では、最初に曲げ補強シートが剥離するまで一方向に押し切る単調載荷実験を実施し、その結果を基準として定荷重繰り返し載荷実験における荷重値を決定している。その荷重値は、単調載荷試験体の主鉄筋降伏点から終局点までの増分荷重に対して 2 つの値を設定した。単調載荷実験では後述の図-2、表-3 に示されるように、AFRP シートと CFRP シートを用いる場合で各点の荷重値が若干異なる結果が得られている。そのため、繰り返し載荷実験では安全側の値を取ることとし、載荷荷重値の低い LA-M, HC-M 試験体に関する実験結果を基準にして載荷荷重値を決定することとした。すなわち、LA/C-C1, -C2 でそれぞれ 65.7 kN, 72.8 kN, HA/C-C1, -C2 試験体でそれぞれ 79.6 kN, 88.5 kN である。

なお、繰り返し荷重の下限値は 5 kN と設定した。これは、完全除荷時における試験体や載荷治具のズレを防止するためである。荷重は周期を 100 s とする正弦波状載荷とした。また、実験は、繰り返し回数の上限を 100 サイクルとし、上限回数に達した時点でシートが剥離していない場合には 101 サイクル目に試験体を押し切る単調載荷を実施し、シート剥離を確認の後、

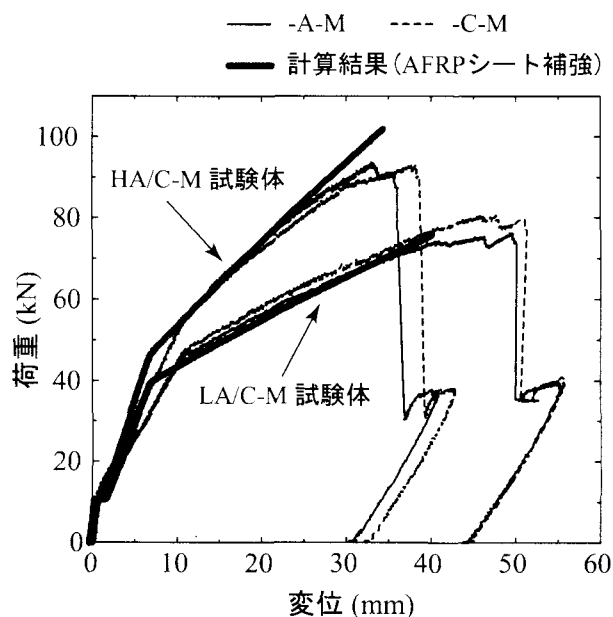


図-2 単調載荷実験における荷重－変位関係

終了している。繰り返し回数の上限を 100 サイクルとしたのは、本研究の目的が主鉄筋降伏後から終局に至る各荷重レベルに対する定荷重繰り返し載荷時の定性的な耐荷性状把握にあるためである。なお、本実験の範囲内では、このように設定した場合においても、後述のように荷重レベルや補強材料の違いによる定性的な耐荷性状に関する特徴が現れており、特に矛盾がないものと判断される。

3. 実験結果および考察

3.1 単調載荷実験

(1) 荷重－変位関係

図-2 には、各伸び剛性毎に単調載荷試験体の荷重－変位関係を計算結果と比較して示している。図中の計算結果は、断面分割法により算出したものであり、上縁コンクリートひずみが $3,500 \mu$ に至った時点を終局としている。なお、計算結果はシートの種類にかかわらず同一伸び剛性の場合にはほぼ同様の荷重－変位関係を示すことから、AFRP シート補強した試験体の結果のみを示している。ただし、LC-M 試験体の場合には、実験時にシート剥離により終局に至っているが、計算結果はシート破断により終局に至る評価となっている。

図より、破壊形式に着目すると、LA/C-M 試験体では、計算終局変位到達後に計算終局耐力以上の荷重を示して終局に至っていることより、曲げ圧壊型を示していることが分かる。一方、HA/C-M 試験体の場合には計算終局耐力に到達する前に終局に至っていることより、剥離破壊型を示していることが分かる。

表-3 単調載荷実験結果の一覧

試験 体名	実験結果				計算結果			
	降伏時		最大荷重時		降伏時		最大荷重時	
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)
LA-M	46.6	11.5	76.3	49.3	39.4	7.0	75.7	40.1
LC-M*	47.5	11.1	80.6	47.7	40.0	7.2	75.7	39.7
HA-M	57.2	11.7	93.7	33.4	45.6	7.1	101.6	34.7
HC-M	55.6	11.5	92.9	38.0	46.4	7.3	102.3	34.6

*: シート破断により計算が終了

次に、各同一伸び剛性における両試験体に関する実験結果を比較すると、伸び剛性が同等の場合には、初期勾配から主鉄筋降伏点に至るまでは両梁間で非常に良く一致していることが分かる。また、主鉄筋降伏後の第二勾配以降においても、若干の差異はあるものの両試験体とも同様の勾配を示しており、終局荷重および変位も良く対応している。

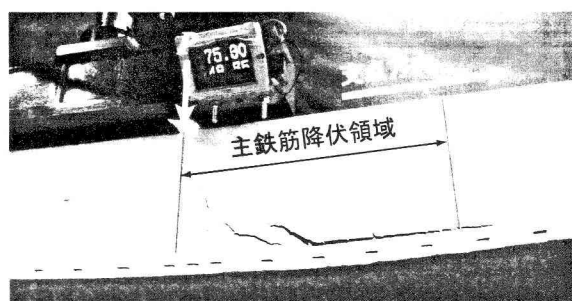
なお、断面分割法に基づいた計算結果と実験結果の荷重－変位曲線を比較すると、ひび割れ発生後の実験結果の剛性勾配は、LA/C-M、HA/C-M 試験体ともに、計算結果よりも若干小さくなる傾向を示している。また、実験結果の主鉄筋降伏時荷重は、LA/C-M 試験体の場合には $7.2 \sim 7.5 \text{ kN}$ 、HA/C-M 試験体の場合には $9.2 \sim 11.6 \text{ kN}$ だけ計算結果よりも大きく示されている。これは、断面分割法の計算過程で無視されているひび割れの発生による局所曲率や鉄筋滑りの影響によるものと推察される。また、主鉄筋降伏後の挙動に関しては、シート剥離が顕在化するまでは実験結果と計算結果で類似の剛性勾配を示しており、計算結果は実験結果を適切に評価していることが分かる。

表-3 には、図-2 より得られる単調載荷実験結果の一覧を示している。表より、主鉄筋降伏時の荷重は LA/C-M、HA/C-M 試験体でそれぞれ $47 \sim 48 \text{ kN}$ 程度、 $56 \sim 57 \text{ kN}$ 程度であることが分かる。また、主鉄筋降伏時の載荷点変位はいずれの場合も $11 \sim 12 \text{ mm}$ と良く一致している。最大荷重および最大荷重時変位に関しても A 試験体と C 試験体間の差異は、最大で 4.3 kN 、 4.6 mm 程度であり、両試験体でほぼ一致していることが明らかとなった。

以上のことから、伸び剛性が同程度の曲げ補強用 FRP シートを用いる場合において、単調載荷時にはシートの種類にかかわらず同様の耐荷性状を示すことが確認された。

(2) 破壊性状

写真-2 には、LA/C-M 試験体に関する最大荷重時のひび割れ進展状況を示している。写真より、いずれの

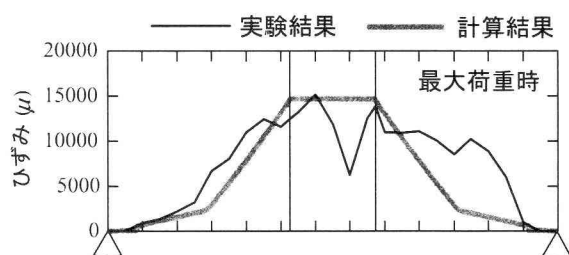


(a) LA-M 試験体

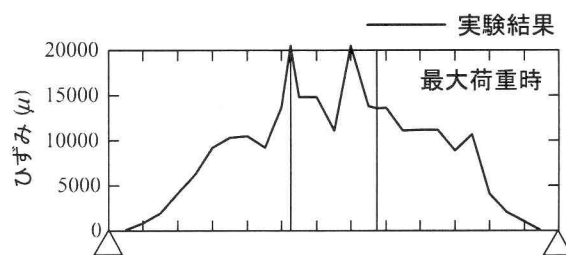


(b) LC-M 試験体

写真-2 単調載荷実験における最大荷重時のひび割れ進展状況



(a) LA-M 試験体



(b) LC-M 試験体

図-3 単調載荷実験における LA/C 試験体に関する FRP シートの軸方向ひずみ分布

試験体も等せん断力区間の梁下縁かぶりコンクリートにおいて斜めひび割れ先端部が主鉄筋のダウエル変形と相まって下方に押し出されるピーリング作用によってシートが剥離していることが部分的に確認できる。

図-3 には、写真-2 と同一の最大荷重時における FRP シートのひずみ分布性状を計算結果と比較して示している。なお、この計算結果は前述した断面分割法を適用して算出したものであり、シートとコンクリートの完全付着を仮定して求められたものである。また、(b) 図の LC-M 試験体に関しては、計算結果よりも大きい荷重状態で終局に至っていることより、実験結果のみを示している。

図より、LA-M 試験体の場合には、特に右側等せん断力区間において計算結果よりも大きなひずみが発生している。これは、下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れ先端部の押し出しによるピーリング作用によってシートの部分剥離が進展しているためと推察される。また、LC-M 試験体においても左右の等せん断力区間で LA-M 試験体と同様に大きなひずみが発生していることから、LA-M 試験体と同様の要因によりシートが部分剥離しているものと考えられる。

3.2 C1 載荷時の定荷重繰り返し載荷実験

(1) 荷重-変位関係

図-4 には、荷重レベルの低い C1 載荷時における各定荷重繰り返し載荷試験体の荷重-変位関係を単調載

荷実験および計算結果と比較して示している。本実験の場合には、いずれの試験体においても設定した上限繰り返し載荷回数である 100 サイクルまで、シートは全面剥離していない。また、表-4 には、図-4 の定荷重繰り返し載荷実験結果における主鉄筋降伏時荷重および変位（以後、単に降伏時変位）、100 サイクル後の押し切り時における最大荷重およびその時の変位、1、100 サイクル目の除荷時における残留変位とこれらの変位差を一覧にして示している。図より、いずれの試験体も繰り返し荷重載荷点までは単調載荷実験の結果と同様の性状を示している。1 サイクル目の除荷時には単調載荷時におけるひび割れ発生後の勾配と同様の勾配を示しており、2 サイクル目には 1 サイクル目の除荷時における勾配と同様の勾配で設定最大荷重レベルまで載荷されている。3 サイクル目以降ではサイクル数を重ねる毎に変位が徐々に増加するものの、1 サイクル目と同様の剛性勾配を示していることが分かる。

また、いずれの試験体も上限載荷回数である 100 サイクル目までシートが全面剥離していないことより、載荷荷重値が 67% 程度における場合には、シート材料にかかわらずピーリング作用が顕在化せず、シートの全面剥離には至らないことが明らかになった。シート材料の違いによる除荷時における残留変位に着目すると、1 サイクル目から 100 サイクル目に至るまでの残留変位の増加量は、CFRP シート補強を施した L/HC-C1

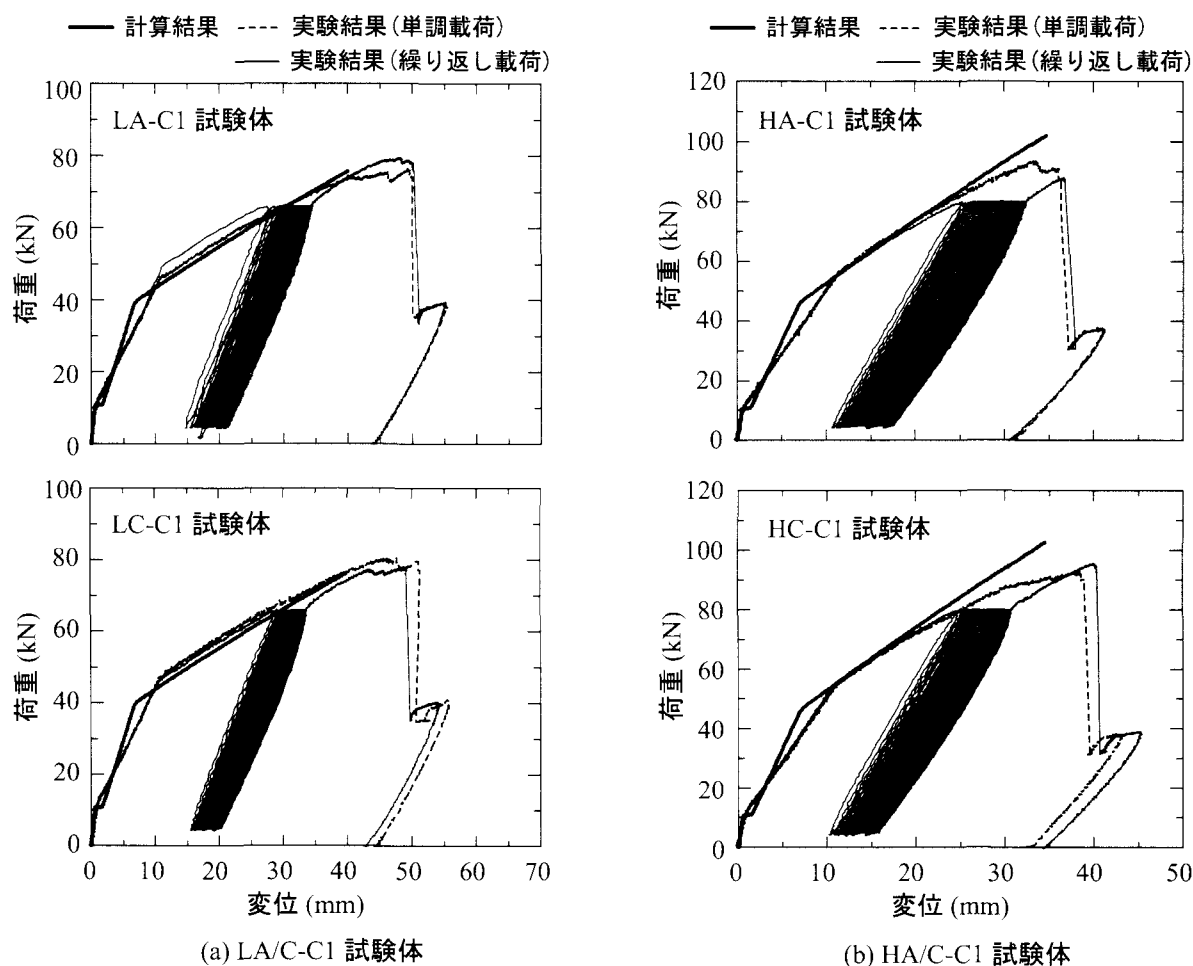


図-4 C1 載荷時の荷重-変位関係

表-4 C1 載荷時の繰り返し載荷実験結果の一覧

試験 体名	主鉄筋降伏時		100 サイクル後の 最大荷重時		各サイクル除荷時変位 (mm)		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	1 サイクル時 (1)	100 サイクル時 (2)	残留変位差 (2) - (1)
LA-C1	49.8	11.3	79.4	48.2	27.3	34.6	7.3
LC-C1	46.4	10.8	78.2	48.8	28.9	33.6	4.7
HA-C1	56.5	11.7	88.1	36.7	25.3	32.6	7.3
HC-C1	55.3	11.1	95.7	40.0	24.8	30.8	6.3

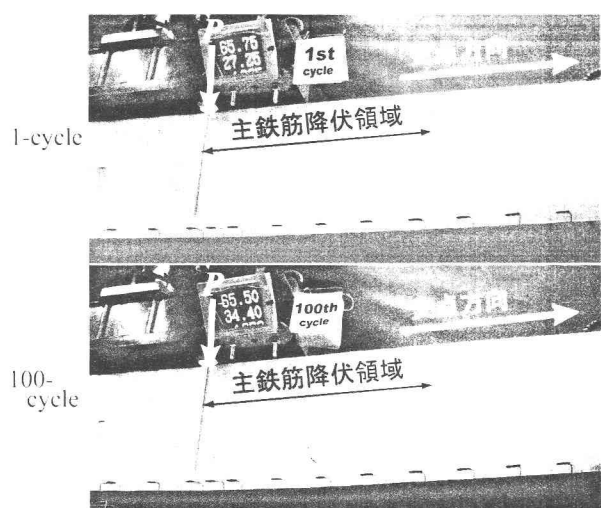
※ いずれの試験体も 100 サイクルまで全面剥離せず

試験体の場合が AFRP シート補強を施した L/HA-C1 試験体の場合よりも小さいことが分かる。この原因としては、LC/HC 試験体の伸び剛性が LA/HA 試験体よりもそれぞれ 0.041MN、0.143MN だけ大きいことより、残留変位差の大小関係が伸び剛性差と対応していないものの、伸び剛性の差異が起因しているものと推察される。なお、100 サイクル目以降の単調載荷時と、それぞれの -M 試験体に関する終局時の荷重や変位 (表-3 参照) を比較すると、HA-C1 試験体の場合における荷重値が HA-M 試験体の場合より若干小さい値 (5

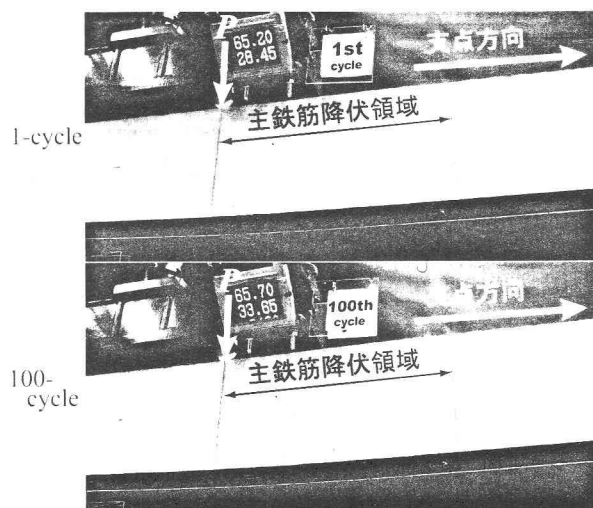
kN) を示しているものの、他の試験体では両者ほぼ同程度の荷重および変位で終局に至っていることが分かる。これより、シート材料にかかわらず、67% 程度における載荷荷重値で定荷重繰り返し載荷を 100 サイクル程度受けた後においても、単調載荷時と同程度の定着が確保されていることが明らかとなった。

(2) ひび割れ進展状況

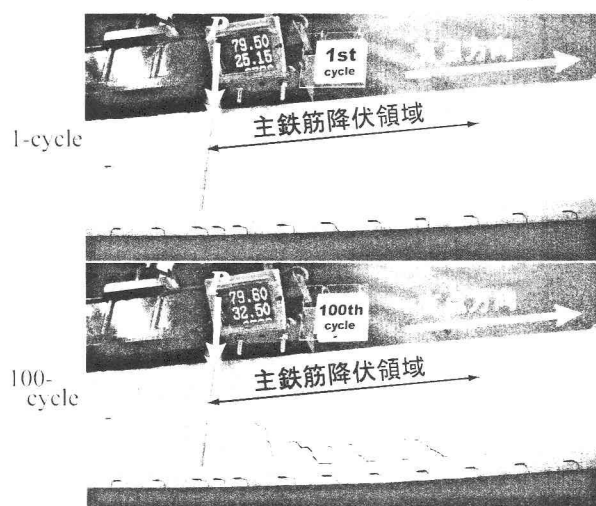
写真-3 には、C1 試験体に関する 1 サイクル目と 100 サイクル目終了後のひび割れ進展状況を示している。写真-3(a), (b) より、曲げ圧壊型で終局に至る



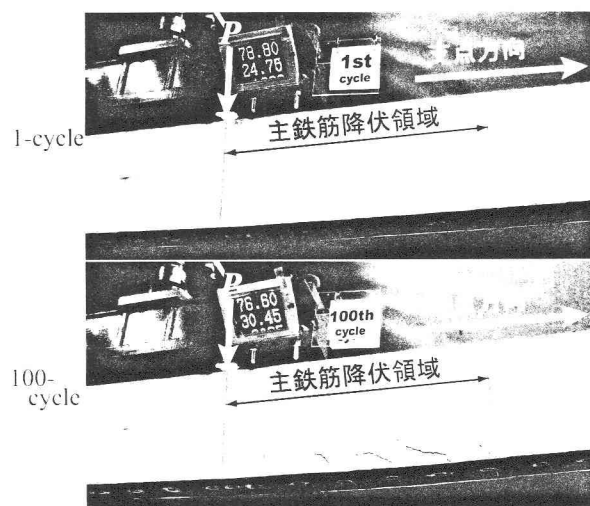
(a) LA-C1 試験体



(b) LC-C1 試験体



(c) HA-C1 試験体



(d) HC-C1 試験体

写真-3 C1 載荷時の 1 サイクル目および 100 サイクル目終了後のひび割れ状況

LA/C-C1 試験体は共に 1 サイクル目終了時には未だピーリング作用によるシートの部分剥離現象は認められないことが分かる。一方、100 サイクル目終了時には等曲げ区間には曲げひび割れが、また等せん断力区間の荷点近傍下縁かぶりコンクリートには曲げひび割れと斜めひび割れが発生し、ピーリング作用によってシートの部分剥離現象が発生していることが分かる。

写真-3(c), (d) は、剥離破壊型で終局に至る HA/C-C1 試験体に関するひび割れ分布である。HA/C 試験体の荷重荷重は LA/C 試験体に比して約 10 kN 程度大きい。このため、100 サイクル目における等せん断力区間の荷点近傍下縁かぶりコンクリートに発生する斜めひび割れの開口がより顕在化していることが分かる。特に、HA-C1 試験体の場合には、上述のひび割れの先端部が下方に押し出されるピーリング作用によって局所的な剥離現象が確認できる。なお、HC-C1 試験

体の場合には、HA-C1 試験体に比して局所的な剥離の進展度合は小さい。また、前述のように HA-C1 試験体の終局時荷重が HA-M 試験体の場合よりも若干小さくなったのは、この局所的な剥離の進展が HA-M 試験体に比較して早期に発生したことによるものと推察される。

(3) FRP シートの軸方向ひずみ分布

図-5 には、1 サイクル目から 100 サイクル目に至るまでの各サイクルにおける FRP シートの軸方向ひずみ分布を計算結果と比較して示している。

図より、LA/C-C1 試験体に関しては次のような事項が明らかになった。すなわち AFRP シート補強を施した LA-C1 試験体の場合において、1 サイクル目の等せん断力区間におけるひずみ分布は、計算結果のそれと類似な分布を示している。10 サイクルの時点では等せん断力区間の主鉄筋降伏領域において局所的に計算結果よりも大きなひずみ分布を示している。その後、そ

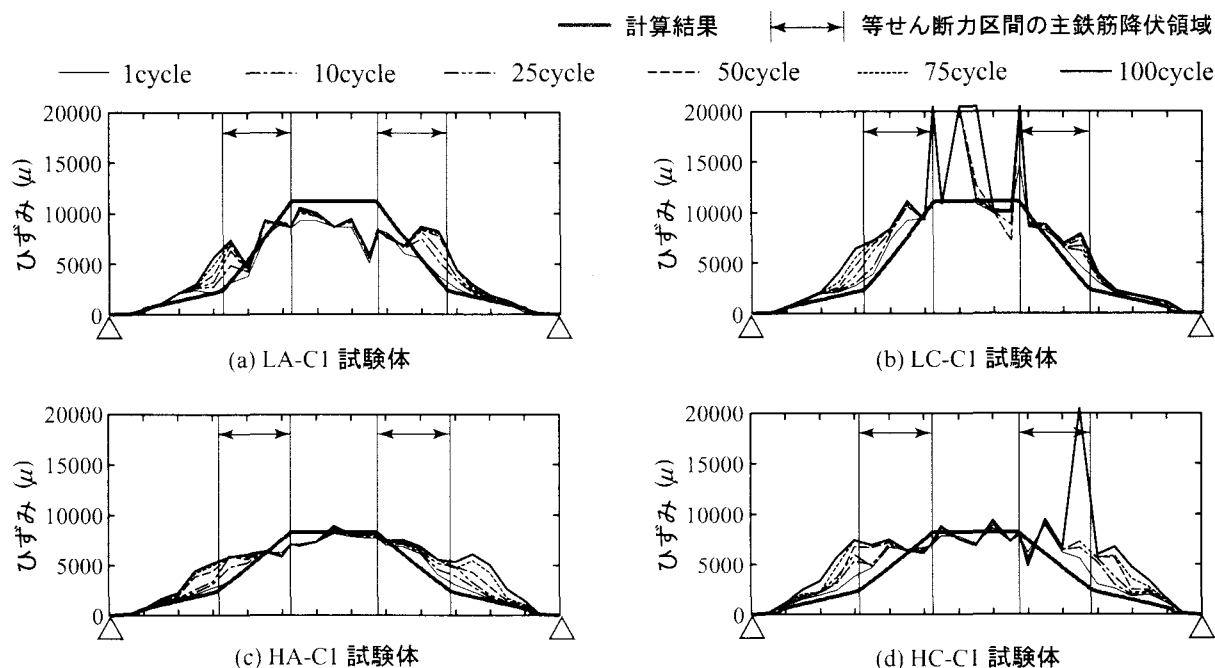


図-5 C1 載荷時の FRP シートの軸方向ひずみ分布

れらと同一の箇所におけるひずみがサイクル数の増加に対応して大きくなっており、局所的にシート剥離の進展に伴う剛性低下による劣化が進行していることが分かる。これに対して、LC-C1 試験体の場合には、1 サイクル目の時点から等曲げ区間において $20,000 \mu$ に達する局所的に大きなひずみ分布を示しており、また等せん断力区間の主鉄筋降伏領域においても広い範囲で、計算結果のひずみ分布よりも大きな分布を示している。10～100 サイクル目までの等せん断力区間におけるひずみ分布の進展状況を見ると、サイクル数の増加に対応してひずみ値も大きくなり、前述と同様の劣化が進行する傾向にあることが分かる。

一方、HA/C-C1 試験体に関する実験結果を見ると、いずれの試験体に関しても等せん断力区間におけるひずみ分布は、サイクル数の増加に対応して、ひずみ値も大きくなりかつひずみが均等化される傾向を示している。これは、いずれも等せん断力区間における荷重点近傍下縁かぶりコンクリートに形成される斜めひび割れ先端部のピーリング作用が顕在化する傾向にあることによるものと推察される。

また、L/HC-C1 試験体の場合には、等曲げ区間あるいは等せん断力区間で局所的に $20,000 \mu$ のひずみ値に達している箇所があり、局所的に破断している可能性のあることが分かる。

以上より、補強量が少なく曲げ圧壊型で終局に至る LA/C 試験体および剥離破壊型で終局に至る HA/C 試験体とも、67% における荷重荷重値では、等せん断力区間の主鉄筋降伏領域において計算結果のひずみ分布よりも大きな分布を示し、かつそのひずみがサイクル

数の増加に対応して大きくなりシート剥離の進展に伴う剛性低下による劣化が進行する傾向に有るものの、全面剥離には至らないことが明らかになった。また、補強用 FRP シート材料間で比較すると、CFRP シートで補強を施した L/HC 試験体の場合には、 $20,000 \mu$ に達する局所的に大きなひずみが発生しており、応力集中によって局所的に破断に至っている箇所のあることが明らかになった。

3.3 C2 載荷時の定荷重繰り返し載荷実験

(1) 荷重－変位関係

図-6 には、荷重レベルの高い C2 載荷時における各定荷重繰り返し載荷試験体に関する荷重－変位関係を単調載荷実験および計算結果と比較して示している。また、表-5 には、図-6 より得られる実験結果を一覧にして示している。なお、LA-C2 試験体の場合には C1 試験体同様、上限サイクル数である 100 サイクル目までシートの全面剥離が生じず、その後単調載荷によって終局に至り実験を終了している。その他の試験体は、LC-C2 試験体が 12 サイクル目で、また HA/C-C2 試験体の場合にはそれぞれ 5, 1 サイクル目でシートが剥離し終局に至っている。

図より、いずれの試験体においても繰り返し載荷時の剛性勾配は C1 試験体の場合と同様であることが分かる。図-6(a) より、LA-C2 試験体の場合において、100 サイクル終了時には単調載荷時 (LA-M 試験体) の終局時変位と同程度の値を示し、その後の載荷では単調載荷時の終局変位よりも大きい変位を示して終局に至っていることが分かる。このことは、AFRP シート

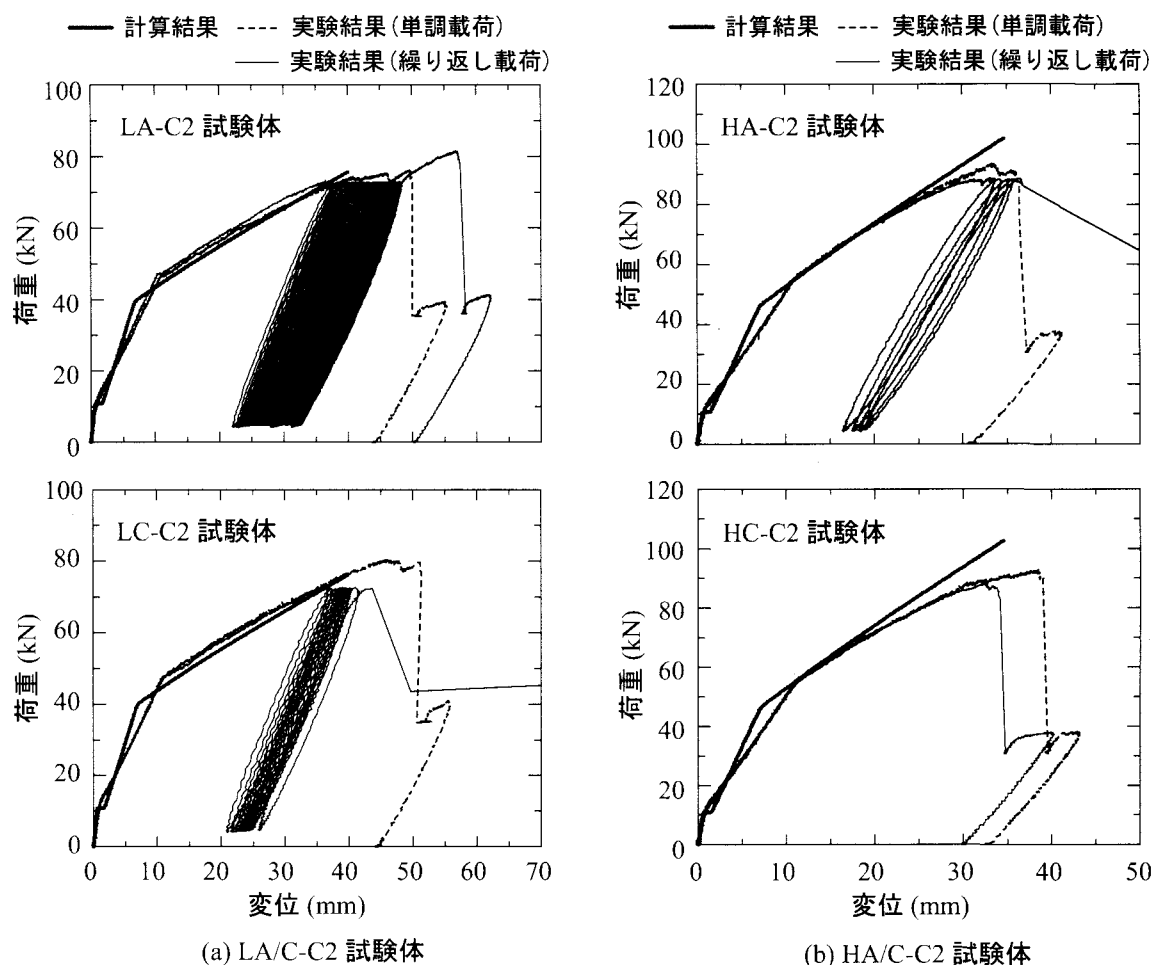


図-6 C2 載荷時の荷重-変位関係

表-5 C2 載荷時の繰り返し載荷実験結果の一覧

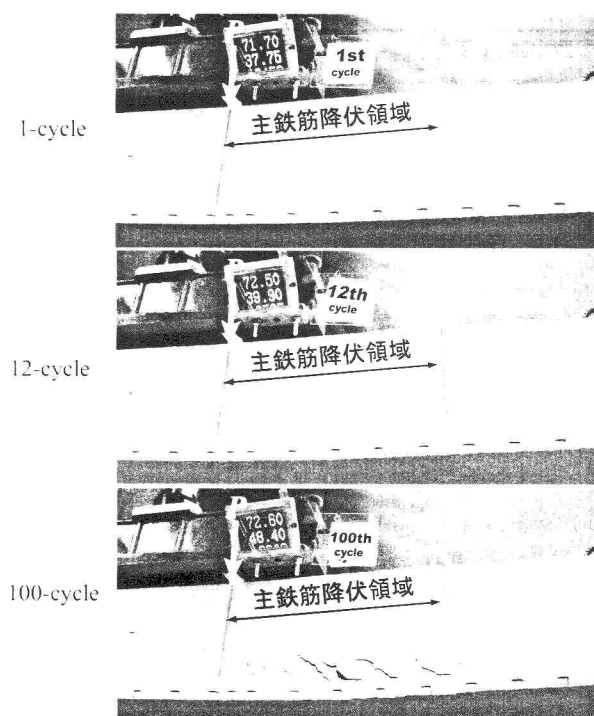
試験体名	主鉄筋降伏時		100 サイクル後の最大荷重時		各サイクル除荷時変位 (mm)		シート剥離サイクル数
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	1 サイクル時	最終サイクル時	
LA-C2	47.1	11.2	81.6	56.8	36.4	48.5	100 サイクルまで剥離せず
LC-C2	47.9	11.3	-	-	36.4	43.7	12 サイクル
HA-C2	55.8	11.2	-	-	33.2	36.5	5 サイクル
HC-C2	54.2	11.1	-	-	32.5	-	1 サイクル

補強を施して曲げ圧壊型で終局に至る RC 梁の場合には、単調載荷時に 90 % 程度における載荷荷重値で 100 サイクルの定荷重繰り返し載荷に対してもシート剥離に至るほどの劣化が進行せず、単調載荷時の終局変位をほぼ保障できることを示唆している。

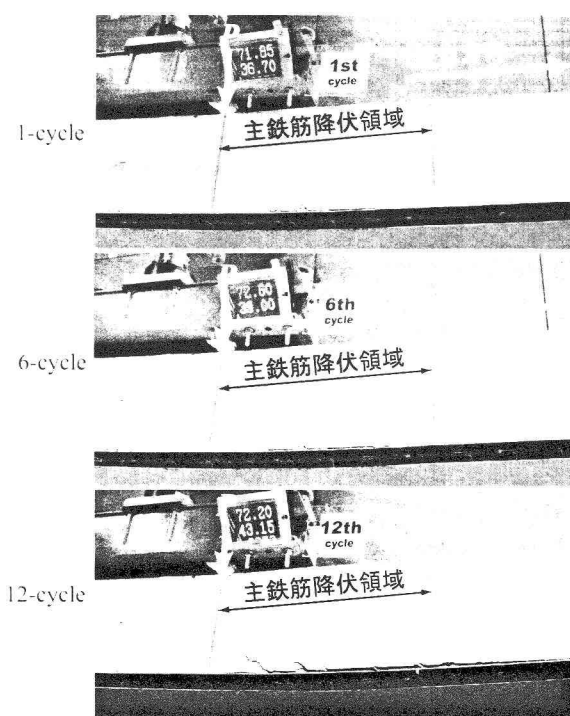
また、図-6(b) よりシート補強量が多く剥離破壊型で終局に至る HA/C 試験体の場合においても、AFRP シート補強の場合には CFRP シート補強の場合に比して終局に至る繰り返し回数が多く、剥離靱性に富んでいることが分かる。

(2) ひび割れ進展状況

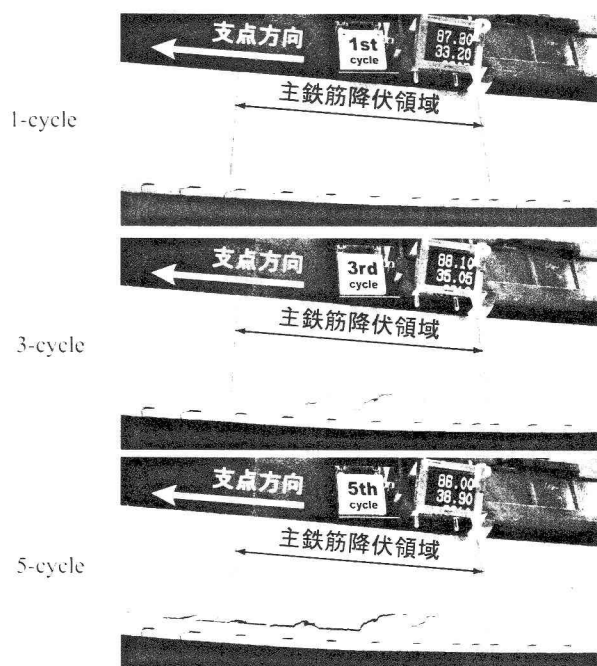
写真-4 には、第 1 と最終サイクル目を含む 3 サイクル時点の最大荷重時におけるひび割れ分布を示している。なお、写真-4(a) の LA-C2 試験体に関しては、第 1 と最終サイクル目の他、写真-4(b) の LC-C2 試験体における終局時と同一サイクル (12 サイクル) 時における結果も示している。写真-4(b),(c) の LC-C2、HA-C2 試験体に関しては、第 1 と最終サイクルの他、中間サイクル時の結果を示している。写真-4(d) の HC-C2 試験体に関しては、1 サイクル目で剥離してい



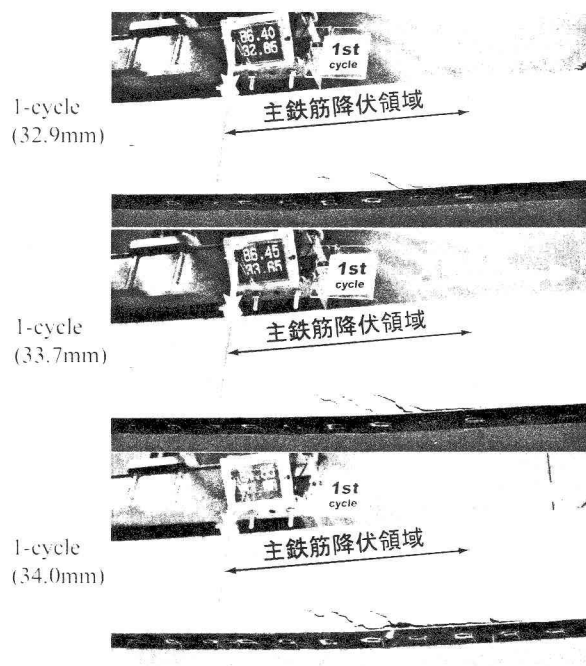
(a) LA-C2 試験体



(b) LC-C2 試験体



(c) HA-C2 試験体



(d) HC-C2 試験体 (剥離直前)

写真-4 C2 載荷時の各サイクル終了後のひび割れ状況

ることより、剥離直前のひび割れ進展状況を3つの変位時点について示している。

写真-4(a)のLA-C2試験体に関しては、LC-C2試験体が終局に至った12サイクル目においても斜めひび割れが未だ顕在化していないことが分かる。また、上限サイクル数である100サイクル時においては、写真-3(a)における100サイクル目のひび割れ分布より

は若干ひび割れの開口度合いが大きくピーリング作用によって局所的な剥離現象が示されているが、未だ全面剥離には至っていない。これに対して、写真-4(b)のLC-C2試験体の場合には、6サイクル目においても、等せん断力区間の載荷点近傍下縁かぶりコンクリートに斜めひび割れが顕在化し、ピーリング作用によって剥離が進展している様子がうかがえる。12サイクル目

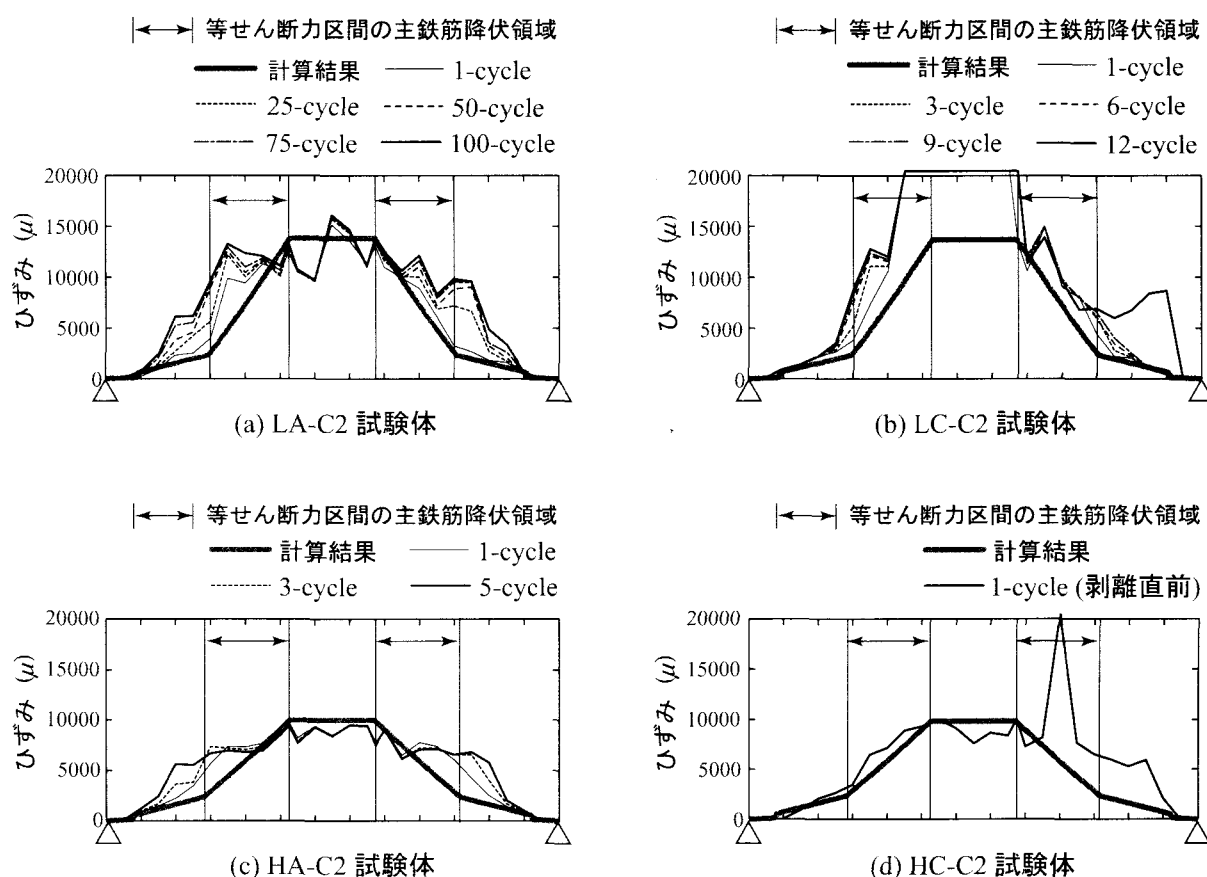


図-7 C2 載荷時の FRP シートの軸方向ひずみ分布

では、数個の斜めひび割れが発生し、それらのピーリング作用によって生じた部分剥離が連結され、シートと梁間が大きく開口している状況を確認できる。写真-4(c)の HA-C2 試験体の場合には、ほぼ写真-4(b)の各段階に対応していることが分かる。写真-4(d)の HC-C2 試験体の場合には、1 サイクル目の段階において、既に等せん断力区間の主鉄筋降伏領域における下縁かぶりコンクリートに数本の斜めひび割れが発生し、それらの先端がその下方へ押し出されることによるピーリング作用によって、変位の増加とともに徐々にシートの剥離が進展する状況を確認できる。

(3) FRP シートの軸方向ひずみ分布

図-7 には、各サイクル時における FRP シートのひずみ分布を計算結果と比較して示している。LA-C2 試験体に関する実験結果より、1 サイクル目の段階から等せん断力区間の主鉄筋降伏領域において計算結果の分布よりも大きくかつひずみが均等化されている部分が示されており、ピーリング作用によって局所的にシートが剥離している状況が推察される。また、等せん断力区間のひずみはサイクル数の増加に対応して大きくなっていることより、劣化も徐々に進行していることが分かる。LC-C2 試験体に関しては、1 サイクル目において等曲げ区間から等せん断力区間に至る広い範囲において 20,000 μ を超えるひずみ値を示し計算結

果のひずみ分布を大きく上回る分布を示しており、既にひずみ分布的にはシート破断あるいは剥離の兆候が確認でき、最終的には右側の等せん断力区間から剥離が進展していることが分かる。

HA-C2 試験体の場合には、等曲げ区間におけるひずみ分布は終局時点まで計算結果と類似している。しかしながら、等せん断力区間では 1 サイクル目から計算結果を大きく上回り、ひずみの均等化の現象も現れていることから、ピーリング現象が励起しているものと判断される。また、サイクル数に対応して、ひずみの増加傾向も示され、劣化が進展していることが確認できる。HC-C2 試験体の場合には、1 サイクル目の時点で、右側等せん断力区間の領域にはひずみが 20,000 μ に達している箇所もあり、かつ計算結果の分布を大きく上回っていることより、明らかにシートが剥離して終局に至ることが類推される。

以上より、主鉄筋降伏時点から終局点までの増分荷重の 90 % 程度における載荷荷重値による定荷重繰返し載荷条件下では、補強量が少なく曲げ圧壊型を示す L 梁の場合において、AFRP シート補強を施した LA-C2 試験体の場合には部分剥離が進行するものの 100 サイクルまではシートが全面剥離しない。これに対して、CFRP シート補強を施した LC-C2 試験体の場合には 1 サイクル目時点より等曲げ区間から等せん断

力区間に至る広い範囲で計算ひずみ分布を大きく上回り、部分剥離の傾向を示して最終的に 12 サイクル目で全面剥離に至っている。

また、補強量が多く剥離破壊型を示す H 梁の場合には、AFRP シート補強を施した場合には 5 サイクル目で、また CFRP シート補強を施した場合には 1 サイクル目で終局に至っており、曲げ圧壊型の場合に比して早期に全面剥離する傾向にあることが明らかになった。

これらの結果から総合的に判断すると、FRP シートの伸び剛性が同一である条件下では、AFRP シート補強を施した RC 梁の場合が CFRP シート補強を施す場合に比較して剥離靱性に富んでいることが類推される。

4. まとめ

本研究では、FRP シートで曲げ補強した RC 梁の繰り返し載荷時における耐荷性状を把握することを目的として、FRP シートで曲げ補強した RC 梁に関する片振りの定荷重繰り返し載荷実験を実施した。本研究では、シート補強量 (伸び剛性) を変化させて単調載荷時に曲げ圧壊型で終局に至る場合と剥離破壊型で終局に至る場合について、補強材料としてアラミド繊維 (AFRP) シートと炭素繊維 (CFRP) シートの 2 種類を用いる場合について検討を行った。各シートの補強量は伸び剛性が等しくなるように決定している。なお、設定荷重は、単調載荷時の主鉄筋降伏点から、終局点までの増分荷重の 67 % における載荷荷重と 90 % における載荷荷重の 2 種類を設定した。また、上限繰り返し回数を 100 サイクルとし、シートが全面剥離しない場合にはその後単調に終局に至るまで載荷するものとした。本研究の範囲内で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 67 % 程度における載荷荷重の場合には、曲げ圧壊型および剥離破壊型で終局に至る場合とも、シート材料にかかわらず下縁かぶりコンクリートに形成される斜めひび割れ先端部のピーリング作用によってシートの部分剥離が進行するものの、100 サイクル程度の繰り返し載荷を受けた後にもシートは全面剥離に至らず、シートの定着も単調載荷実験の場合と同程度まで確保される。
- 2) 90 % 程度における載荷荷重の場合における結果から、曲げ圧壊型で終局に至るシート補強量の場合には、AFRP シート補強を施した試験体は上述のピーリング作用によってシートの部分剥離が進行するものの 100 サイクル程度の繰り返し載荷にお

いてもシートが全面剥離に至らないのに対して、CFRP シート補強を施した試験体の場合には 12 サイクル程度で全面剥離に至っている。

- 3) これより、曲げ圧壊型となる FRP シート曲げ補強 RC 梁は AFRP シートを用いることにより、90 % 程度における載荷荷重までの曲げ耐力向上効果が繰り返し載荷時にも期待できる。
- 4) 90 % 程度における載荷荷重の場合における結果から、剥離破壊型で終局に至るシート補強量の場合には、AFRP シート補強を施す場合が若干剥離靱性に優れているものの、数サイクルでシートが全面に渡って剥離し終局に至ることより、いずれの FRP シートを用いる場合においても 90 % 程度における載荷荷重の繰り返しに対しては耐力を保証できないことが明らかとなった。

今後、繰り返し載荷に対する信頼性の高い FRP シート曲げ補強設計法を確立するためには、RC 梁の形状寸法、シートの種類、シート補強量、載荷荷重等の各種パラメーターを変化させた実験を行わなければならないものと判断される。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強設計指針 (案)、コンクリートライブラリー 95, 1999
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修・補強指針、コンクリートライブラリー 101, 2000
- 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, 2001.8
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介：FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.91-109, 2002.8
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 設計編, 2002
- 6) 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
- 7) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介, 澤田 純之：AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法に関する実験的研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.899-909, 2002.8

(2004 年 9 月 17 日受付)