

# 論文 静的曲げ圧壊型 AFRP シート接着 RC 梁に緩衝ゴムを設置した場合に関する載荷方法の異なる衝撃荷重載荷時におけるシート破断現象

鈴木 健太郎<sup>\*1</sup>・小室 雅人<sup>\*2</sup>・瓦井 智貴<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文では、載荷点部に緩衝ゴムを設置した場合における静的に曲げ圧壊型で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象として、衝撃荷重載荷方法の違いが梁の耐荷性状やシートのひずみ応答に与える影響を検討することを目的に、重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。検討の結果、単一載荷時に終局に至る程度以上の入力エネルギーが作用する場合には、ひび割れが載荷点部に集中してシート破断に至ること、シート破断に至らない程度入力エネルギー一定繰り返し載荷の場合には、載荷回数にかかわらずシートひずみも一定値に漸近する傾向を示し、シート破断には至らないこと、等が明らかとなった。

**キーワード:** RC 梁, AFRP シート, シート破断, 衝撃荷重, 緩衝ゴム

## 1. はじめに

従来より、RC 製橋脚など既設構造物の静的耐力向上法としては、コンクリート増し厚工法や鋼板巻き立て工法などが採用されている。また、それらに加えて、近年では軽量で高強度かつ現場合わせが容易な連続繊維 (FRP) シート接着工法も広く用いられるようになった。

FRP シート接着工法の静的耐力向上効果に関しては、1990 年代頃から国内外において数多くの研究が実施され、各国で設計指針やガイドラインが提示されている<sup>1),2)</sup>。一方で、本工法による耐衝撃性向上効果に関しては、構造物の損傷進展状況や破壊モード、あるいはそのメカニズムを含め未だ十分に明らかになっていないのが現状である。

このような状況を鑑みて、著者らはアラミド繊維製 FRP (AFRP) シート接着補強を施した RC 梁を対象に、単一重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施している<sup>3)</sup>。その結果、1) シート接着補強を施すことによって耐衝撃性能を向上可能であること、2) 静荷重載荷時に曲げ圧壊型で終局に至る場合にはシート破断、剥離破壊型の場合にはシート剥離で終局に至る傾向にあることが明らかになっている。

また、FRP シート接着補強 RC 梁の残存耐力や終局状態に至るまでの損傷進展状況を明らかにするために、繰り返し衝撃荷重載荷実験も実施している<sup>4)~6)</sup>。その結果、1) 衝撃荷重の入力エネルギーが比較的大きい場合には、シート破断や剥離によって終局に至る傾向にあること、2) 入力エネルギーが比較的小さい場合には、シートの剥離・破断に至らず梁上縁の圧壊によって終局に至ることが明らかになっている。

さらに、載荷点部の圧壊を抑制した場合の耐衝撃性に関する検討を行うために、静的に曲げ圧壊型で終局に至

る RC 梁を対象に、載荷点部に緩衝ゴムを設置した場合の繰り返し衝撃荷重載荷実験も実施している<sup>7),8)</sup>。その結果、1) 緩衝ゴムを設置することによって載荷点部の損傷が抑制され、入力エネルギー漸増繰り返し載荷の場合にはシート破断で終局に至ること、2) 入力エネルギーが比較的小さい一定繰り返し載荷の場合には、破断に至らず梁の耐衝撃性は向上することが明らかになっている。

しかしながら、これらはいずれも同一載荷方法での検討結果であり、載荷方法の違いが RC 梁の耐衝撃性やシートのひずみ分布性状に与える影響については十分に検討が行われていないのが現状である。

このような観点から、本研究では AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に、緩衝ゴムを設置して載荷点部の損傷を抑制した条件下において、入力エネルギー漸増と一定繰り返し載荷時における RC 梁の耐衝撃性状およびシートのひずみ応答に与える影響に着目して、重錘落下による衝撃荷重載荷方法を変化させた実験を実施した。本研究では、単一衝撃荷重載荷時にシートが破断して終局に至る場合に限定して検討を行うこととした。載荷方法に関しては、重錘を一度だけ自由落下させる単一載荷、徐々に落下高を大きくしていく漸増繰り返し載荷、および落下高を一定にして繰り返し衝突させる入力エネルギー一定繰り返し載荷の 3 種類を対象に検討を行うこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 には、試験体の形状寸法、配筋および AFRP シートの接着位置、緩衝ゴムの設置位置を示している。試験体の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、200×250×3,000

\*1 (株)構研エンジニアリング 防災施設部 修(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 社会基盤ユニット 教授 博(工) (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 社会基盤ユニット 助教 博(工) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 社会基盤ユニット 特任教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	荷重方法	荷重回数	設定重錘落下高さ $H$ (m)	実測重錘衝突速度 $V$ (m/s)	実測入力エネルギー $E_i$ (kJ)	累積入力エネルギー $\Sigma E_i$ (kJ)	コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	主鉄筋降伏強度 $f_y$ (MPa)	せん断筋降伏強度 $f_{sy}$ (MPa)	計算曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	計算せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	シートの破壊性状	
S-H3.5	単一	1回	3.5	8.29	10.32	10.32	29.5	397.1	387.9	81.4	287.9	破断	
G-H1/2/2.5 <sup>7)</sup>	漸増繰返	1回目	1.0	4.52	3.06	3.06	32.4	379.4	363.5	81.1	277.1	-	
		2回目	2.0	6.24	5.84	8.90						-	
		3回目	2.5	6.99	7.33	16.22						破断	
C-H1	一定繰返	10回	1.0	4.51*	3.05*	30.50**						-	
C-H0.5 <sup>8)</sup>	一定繰返	10回	0.5	3.13*	1.47*	14.69**							-

\*同一試験体全ケースの平均値, \*\*最終荷重時

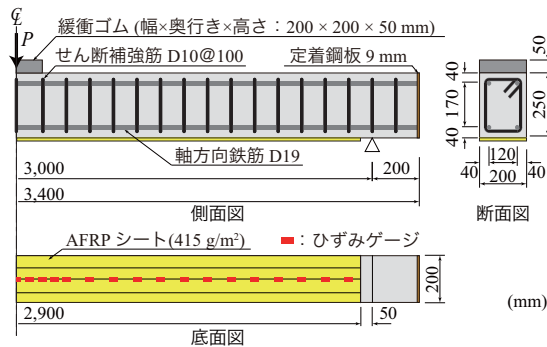


図-1 試験体概要

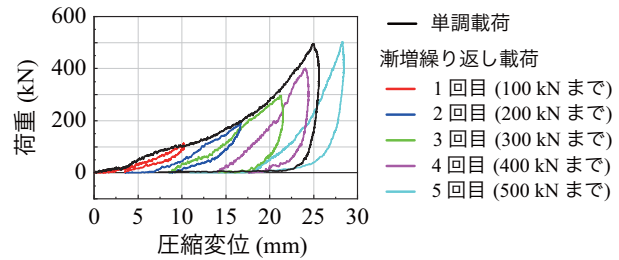


図-2 緩衝ゴムの荷重-変位関係

表-2 AFRPシートの力学的物性値(公称値)

目付量 ( $g/m^2$ )	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 $f_{au}$ (GPa)	弾性係数 $E_a$ (GPa)	破断ひずみ $\epsilon_{au}$ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

mmである。軸方向鉄筋は上下端にD19を各2本配置し、梁端面に設置した厚さ9mmの定着鋼板に溶接固定している。せん断補強筋にはD10を用い、100mm間隔で配筋している。また、梁底面にはAFRPシートを支点の50mm手前まで接着している。表-2には、シートの力学的特性を一覧にして示している。

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、荷重方法を変化させた全4体である。表中の試験体名のうち、第一項目は荷重方法(S:単一荷重, G:落下高さ漸増繰返し荷重, C:落下高一定繰返し荷重)を、第二項目のHに付随する数値は設定重錘落下高さ(m)を示している。なお、単一荷重に関しては、既往の研究を参考に一度で終局に至るように、落下高を $H=3.5$ mとした。漸増繰返し荷重の場合には重錘を合計3回落下させており、試験体名の通り、1, 2, 2.5mと徐々に落下高を大きくした。また、C試験体の場合には、荷重回数の増加によって損傷に著しい変化が現れないことから、10回の荷重で実験を終了することとした。

表には、実験時の実測衝突速度 $V$ と対応する実測入力エネルギー $E_i$ 、コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 $f_y, f_{sy}$ も示している。なお、重

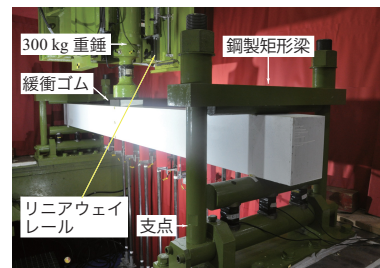


写真-1 衝撃荷重荷重実験の状況

錘質量は $M=300$ kgである。

## 2.2 緩衝ゴムの概要

本研究で用いた緩衝ゴムは硬度65の天然ゴムである。その形状寸法(幅×奥行き×厚さ)は、直接荷重による荷重点部の損傷を抑制するために形状係数を1とし後述の重錘径を考慮して $200 \times 200 \times 50$ mmとした。

図-2には、緩衝ゴム単体の静的圧縮試験より得られた荷重-変位関係を示している。試験は荷重用鋼版を介して一度に500kNまで荷重する単調荷重と、100kNずつ荷重を増加させながら500kNまで荷重と除荷を連続的に繰り返す漸増繰返し荷重の2ケースを実施した。図より、単調荷重の場合には、500kNの荷重到達時に25mm程度変形し、50%程度の圧縮ひずみが生じていることが分かる。また、繰返し荷重の場合には、単調荷重時の荷重-変位曲線を包絡するような性状を示しており、荷重が200kN程度以内で除荷に至る場合には吸収エネルギーが小さいことがうかがえる。

## 2.3 実験方法および測定項目

写真-1には、衝撃荷重荷重時の荷重装置と試験体の設

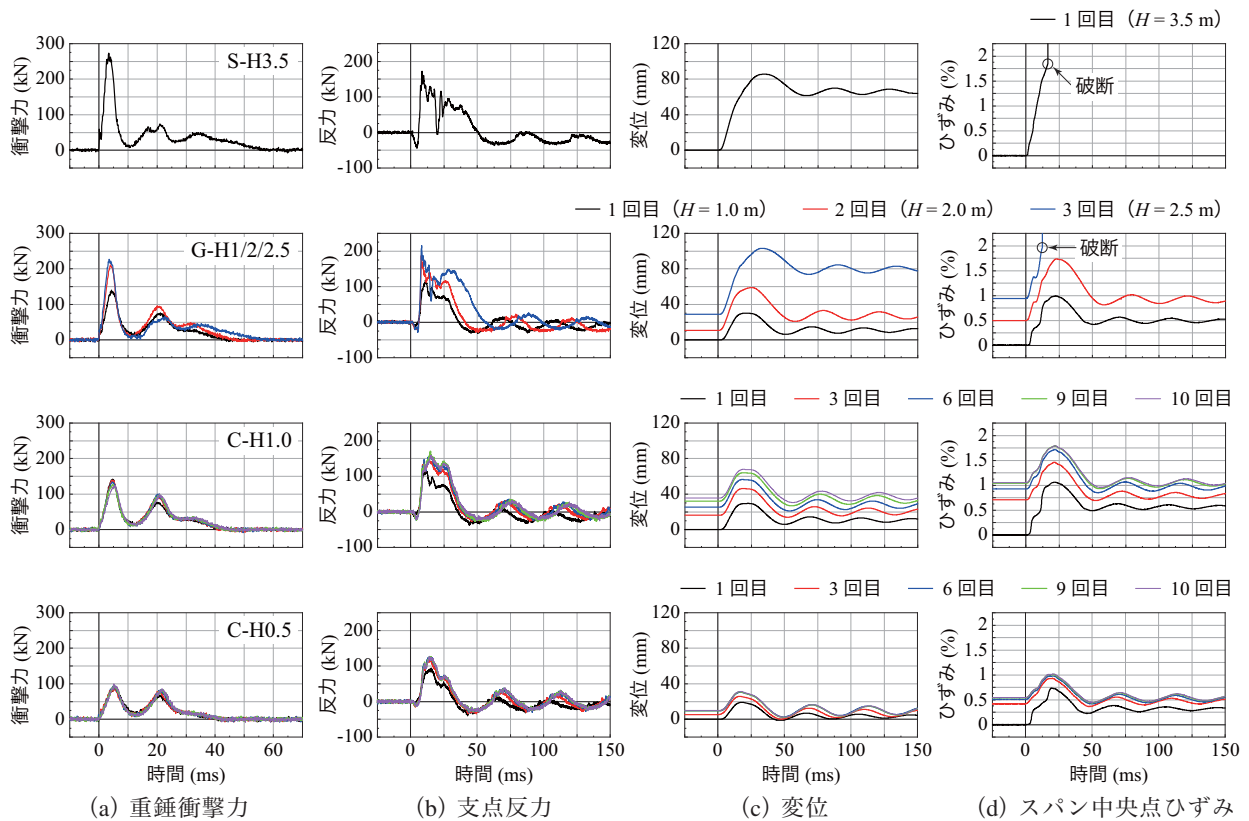


図-3 各試験体に関する各種時刻歴応答波形

置状況を示している。実験は、円柱部直径 200 mm，先端部直径 150 mm，高さ 2 mm の球形状，質量  $M = 300$  kg の鋼製重錘を，リニアウェイレール(写真-1 参照)を介して自由落下させることにより行った。載荷位置は梁のスパン中央部に限定した。試験体の両支点部は，回転を許容し，矩形鋼製梁を用いて梁の浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造となっている。なお，梁の上下面及び側面部は，凹部にパテを埋め込みサンドペーパーを用いて平滑化の後白色ポスターカラーを塗布している。緩衝ゴムは載荷点部に直接設置し，側面を粘着テープを用いて梁上面に固定させ，重錘衝突時の飛び跳ねを防止した。

本実験の測定項目は，重錘衝撃力(以後，単に衝撃力)，合支点反力(以後，単に支点反力)，スパン中央点における変位(以後，単に変位)および AFRP シートの軸方向ひずみ(以後，単にひずみ)分布である。衝撃力と支点反力は起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセル，変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測している。これらの出力は，サンプリングタイムを 0.1 ms としてデジタルデータレコーダにて一括収録している。また，実験時にはひび割れ分布や AFRP シートの剥離状況の他，変位計のバックアップとして 2,000 fps の高速度カメラ撮影も行っている。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各種時刻歴応答波形

図-3には，全4試験体に関する各種時刻歴応答波形を

示している。なお，(c)，(d)図に示す変位およびひずみに関しては載荷毎の残留変位あるいはひずみ値を考慮した結果である。(a)図に示す衝撃力波形に着目すると，いずれの落下高さあるいは載荷回数においても，載荷初期の 5 ms 程度において最大衝撃力を示しており，その後除荷するものの再載荷に至る性状が確認できる。最大衝撃力値および波動継続時間は，落下高に対応して増加する傾向を示している。また，繰り返し載荷で落下高さが同一の場合には，最大衝撃力および波動継続時間は載荷回数にかかわらず類似していることが分かる。これは，緩衝ゴムの緩衝効果によって，載荷点部の局所的な損傷が抑制されたことと，シート接着部の損傷が顕在化していないことによるものと推察される。

次に，(b)図に示す支点反力波形に着目すると，衝撃力波形と対応し，いずれの試験体についても類似の波形性状を示していることが分かる。すなわち，載荷初期に負の反力が励起して試験体端部が浮き上がるような傾向を示した後，25 ms 程度で最大支点反力を示す主波動が形成されている。また，G 試験体の場合には，入力エネルギーの増加に対応して損傷も進行し梁の剛性が低下することによって，主波動の継続時間も延びていることが見て取れる。なお，衝撃荷重除荷後(a図参照)は，いずれの試験体も減衰自由振動状態に至っていることも確認できる。

(c)，(d)図には変位およびひずみ波形を示している。図より，S 試験体の場合には，約 15 ms 時点でひずみが急

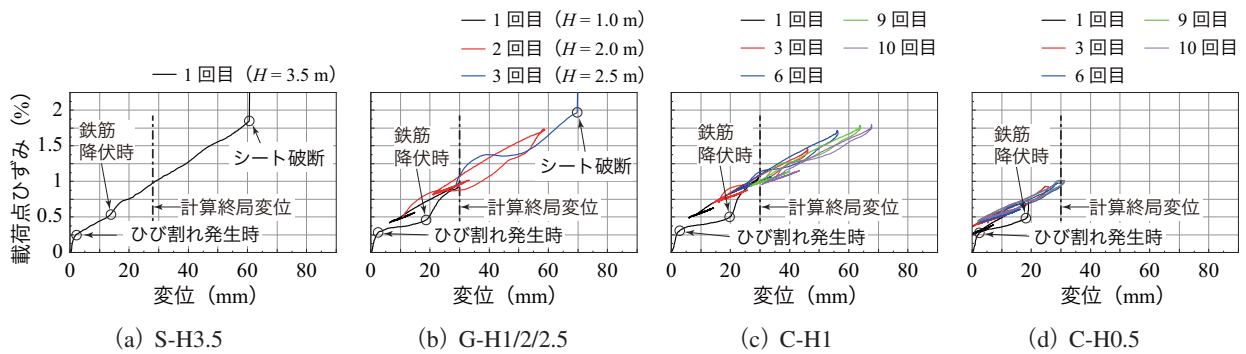


図-4 シートひずみと変位に関する履歴曲線

激に増大し、2%程度以上の値を示している。これは、表-2よりAFRPシートの破断ひずみが1.75%であることから、シートが破断に至ったことによるものと推察される。残留変位は65mm程度を示し、純スパン長の2%以上に至っている。G試験体に着目すると、1,2回目载荷時には、変位およびひずみともに最大値を示した後にFRPシートの補強効果によって大きく復元している様子がうかがえる。しかしながら、3回目载荷時には12ms時点でひずみが急激に増大し、シート破断に至っている。シート破断後の残留変位はS試験体よりも10mm程度大きい。これは、1,2回目载荷時の損傷と残留変位が累積したことによるものと推察される。

C試験体に着目すると、いずれの試験体に関しても载荷回数の増加に対応して徐々に損傷が蓄積されている様子が分かる。但し、損傷の程度は载荷回数の増加に対応して減少傾向にあり、载荷回数をさらに増加させることによって一定値に漸近し、両試験体はシート破断あるいは剥離に至らないものと推察される。その傾向は、入力エネルギーのより小さいC-H0.5試験体の場合が、C-H1試験体の場合よりも大きい。

### 3.2 シートひずみと変位に関する履歴曲線

図-4には、シートひずみと変位に関する履歴曲線を全4試験体で比較して示している。図中には、比較のために表-1に示した各材料強度を基に断面分割法を用いて求められる計算終局変位も示している。断面分割法に関しては、上縁コンクリートの圧縮ひずみが0.35%に到達した段階を終局としている。

(a)図より、S試験体の場合には、変位が1~2mm程度時点で履歴曲線(以後、単に曲線)の勾配が急激に変化していることが分かる。これは、梁下縁に曲げひび割れが発生したことによるものと推察される。さらに、変位が15mm弱の時点で曲線の勾配が増加傾向を示している。これは、鉄筋が降伏したことによってシートひずみがより増加傾向を示したことによるものと推察される。その後はシートが破断に至るまで、ひび割れ発生後と類似の勾配で線形に増加している。これは、鉄筋の補強効果と

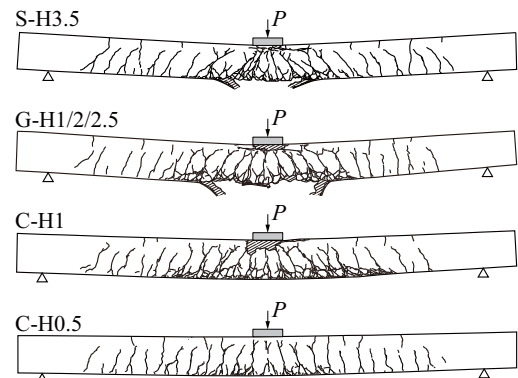


図-5 実験終了後におけるひび割れ分布

鉄筋降伏後のシート接着による補強効果が類似であることを意味しているものと推察される。

次に、(b)図のG試験体に関する履歴曲線を見ると、ひび割れ発生後の勾配は、S試験体の場合よりも小さく示されている。これは、1回目落下の落下高さが $H=1m$ であることにより、曲げひび割れの開口と進展が小さいこと等によるものと推察される。2回目载荷時には、S試験体の場合と類似の勾配でほぼ線形に、変位が57mm程度、ひずみが公称破断ひずみである1.75%程度まで進展し、自由振動状態に移行している。残留変位は計算終局変位よりも若干小さく、残留ひずみは約0.8%であることが見て取れる。3回目载荷時には落下高さが2回目载荷時よりも大きいことにより、変位とひずみがほぼ単調に増加しシート破断に至っていることが分かる。シート破断時のひずみは2%に達しており、公称破断ひずみよりも大きく示されている。

(c)図に示すC-H1試験体に着目すると、1回目载荷時の曲線は落下高さが等しいことによりG試験体の1回目载荷と類似である。また、2回目以降の繰り返し载荷時には、6回目载荷時までは载荷毎の最大変位およびひずみの増加が確認できる。しかしながら、6回目以降10回目载荷までは、勾配が徐々に減少の傾向にある。一方、最大ひずみは载荷回数にかかわらず類似して1.75%程度を示し、シート破断には至っていないことが分かる。最

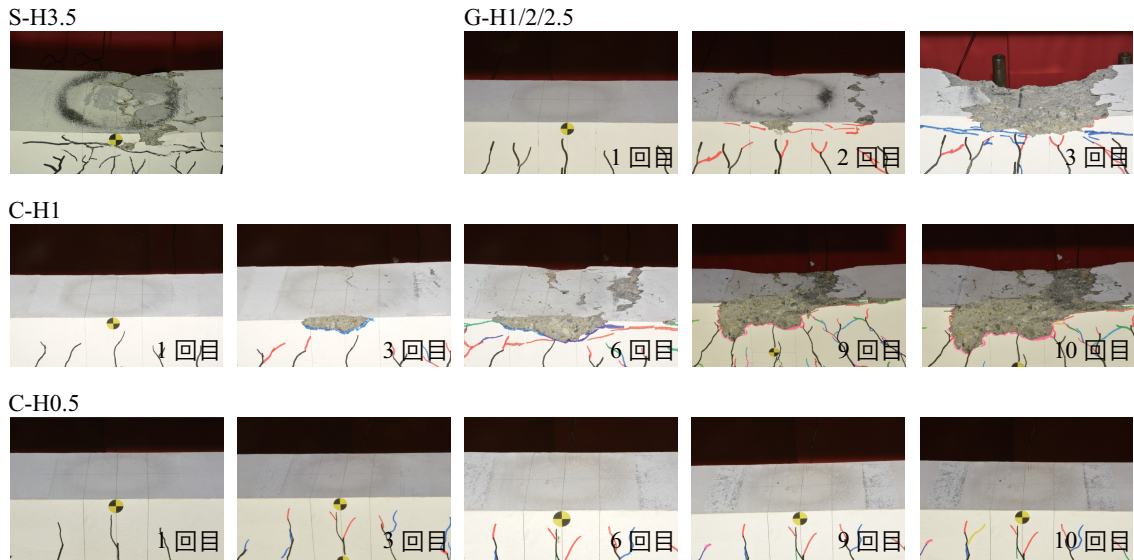


図-6 各試験体の載荷点近傍の損傷状況

大ひずみが類似していることは、スパン中央部におけるひび割れ幅が6回目載荷以降において類似していることを示している。このことは、鉄筋が塑性状態にあることから、除荷後にはAFRPシートの線形弾性特性に基づくシートの復元力によってひび割れ幅が減少するとともに、再載荷時にはシートに引張力が作用し既存ひび割れの開口によって入力エネルギーを吸収することを暗示している。また、勾配が載荷回数と共に減少傾向にあることは、後述のように載荷点近傍角部におけるコンクリート塊の剥落によって、断面剛性が多少減少傾向にあることによるものと推察される。

(d)図のC-H0.5試験体に着目すると、落下高さが $H=0.5$  mと最も小さいことにより、3回目載荷以降においても最大変位が計算終局時と同程度かつ最大ひずみも1%程度であり、C-H1.0試験体の場合よりも小さい。これより、梁の損傷程度が小さく、曲線の勾配は載荷回数にかかわらず類似していることが分かる。

以上より、繰り返し載荷時において、シート破断に至らない程度で一定の入力エネルギーの場合にはひずみも一定値に漸近する傾向を示し、載荷回数が増加した場合においてもシート破断には至らない。一方、入力エネルギーが増加する繰り返し載荷の場合には、ひずみも増加傾向を示しやがてシート破断に至ることが明らかになった。

### 3.3 ひび割れ分布

図-5、図-6には、実験終了後における梁側面のひび割れ分布および各載荷回数毎の載荷面近傍の損傷状況を示している。ひび割れ図中、斜線部は圧壊を示している。

S試験体のひび割れ分布を見ると、1載荷あたりの入力エネルギーが最も大きいことにより、他の試験体と比較して載荷点部近傍にひび割れが集中している傾向がうか

がえる。また、図-6を見ると、著しい圧壊の傾向は確認できない。これは、緩衝ゴムを設置したことによって載荷面の損傷が効果的に抑制されたことや、重錘の衝突速度が大きいことによって載荷点直下の曲げひび割れが大きく開口し、シートひずみが局所的かつ急激に増大したことによってシート破断に至ったことによるものと推察される。なお、梁全スパンに渡って上縁からもひび割れが進展していることが確認できる。これは、重錘衝突直後に曲げ波が両端固定梁に類似した状態で支点に向かって伝播していくことを暗示している。

G試験体の場合には、梁全体に等間隔に曲げひび割れが生じており、曲げ変形の傾向が見て取れる。図-6を見ると、1,2回目載荷後の損傷は軽微であるが、3回目載荷後には載荷面が大きく損傷している。これは、後述するひずみ分布からも明らかのように、2回目載荷時にシート破断に至る程度の大きなひずみが励起していることや、2回目載荷時よりもさらに大きい衝撃荷重載荷によってシートが破断したことから、梁が角折れ状態に至り載荷点部が大きく圧壊したことによるものと推察される。

C-H1試験体のひび割れ分布に着目すると、G試験体と同様に曲げひび割れが等間隔に生じているものの、載荷回数が多いことにより梁下縁のシート近傍に短く密な曲げひび割れが多数発生していることが分かる。

一方で、C-H0.5試験体の場合には、曲げひび割れがスパン全体にわたって等間隔に生じているものの、C-H1試験体のような密な曲げひび割れは載荷点近傍に限定しており、損傷は4試験体中最も軽微であることが分かる。図-6を見ると、C-H1試験体の場合には、入力エネルギーが多少大きいことによって載荷回数の増加に対応して載荷点近傍角部のコンクリート塊の剥落や曲げ圧壊が顕在

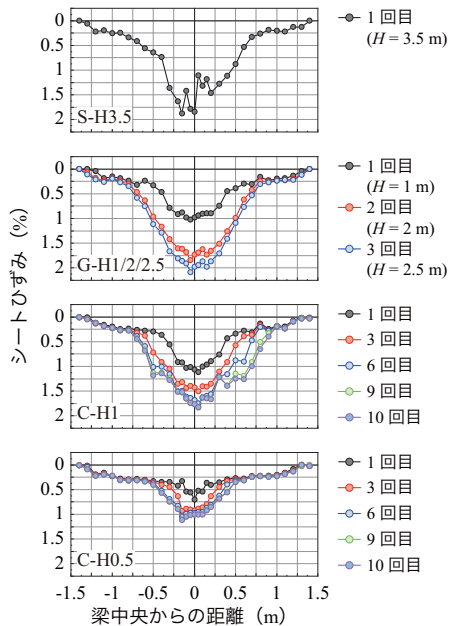


図-7 シートのスパン方向ひずみ分布

化する傾向を示している。一方、C-H0.5試験体の場合には、入力エネルギーが小さいことにより、10回目載荷後においても載荷面の損傷はほとんどないことが分かる。

### 3.4 シートのスパン方向ひずみ分布

図-7には、各試験体に関する最大変位到達時あるいはシート破断発生時刻近傍におけるシートのスパン方向ひずみ分布を載荷回数毎に比較して示している。なお、図中の各ひずみ値は、各載荷時の残留ひずみを考慮した値となっている。図より、S試験体に着目すると、スパン中央部において2%程度のひずみが発生しており、破断直前の状態であることが分かる。また、梁中央部から左右0.7m程度の領域においてひずみ分布の勾配が急変していることから、鉄筋はこの領域において降伏しているものと推察される。

G試験体の場合には、累積落下高さが3mの2回目載荷において最大ひずみが公称値のシートの破断ひずみである1.75%よりも大きく示されており、シート破断に至った3回目載荷時と類似したひずみ分布を示している。

C-H1試験体に着目すると、前述の図-4と同様に6回目載荷時までは鉄筋降伏領域におけるひずみが増加傾向を示している。しかしながら、それ以降は載荷回数にかかわらず類似の分布を示していることが分かる。

C-H0.5試験体の場合には、鉄筋の降伏領域がスパン中央部の1mの範囲に限定しており、前述の通り6回目載荷以降の最大ひずみは1%程度であることが分かる。

## 4. まとめ

- 1) 単一載荷時に終局に至る以上の入力エネルギーが作用する場合には、ひび割れが載荷点部に集中し、鉄筋の降伏領域が拡大する前にシート破断に至る。

- 2) 漸増繰り返し載荷の場合には、シートの最大ひずみも増加傾向を示し、梁はやがてシート破断により終局に至る。
- 3) シート破断に至らない程度の入力エネルギー一定繰り返し載荷の場合には、シートひずみも一定値に漸近する傾向を示し、載荷回数が増加してもシート破断には至らない。

## 謝辞

本研究で用いたAFRPシートはファイベックス(株)、接着剤等は住友ゴム工業(株)、緩衝ゴムはシバタ工業(株)からご提供頂いた。また、本論文の作成にあたり元三井住友建設(株)三上浩氏に多大なるご支援を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 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号，2000。
- 2) FIB Bulletin No 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures, 2019.
- 3) 瓦井智貴，小室雅人，岸徳光，三上浩，L. H. Sinh：衝撃荷重載荷時におけるAFRPシート接着曲げ補強RC梁の破壊形式に関する実験的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.
- 4) 田野順也，岸徳光，小室雅人，三上浩：静的に曲げ圧壊型で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の繰り返し衝撃荷重載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, pp. 685-690, 2019.
- 5) 瓦井智貴，小室雅人，岸徳光，三上浩，田野順也：静的に曲げ圧壊型で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の一定繰り返し衝撃荷重載荷実験，構造工学論文集，土木学会，Vol. 66A, pp. 1059-1068, 2020.
- 6) 田野順也，小室雅人，岸徳光，三上浩：静的に剥離破壊型で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の一定繰り返し衝撃荷重載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 2, pp. 625-630, 2020.
- 7) 瓦井智貴，小室雅人，岸徳光，三上浩：緩衝ゴムを設置したシート破断で終局に至るAFRPシート下面接着曲げ補強RC梁の漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 43, No. 2, pp. 433-438, 2021.
- 8) 瓦井智貴，小室雅人，岸徳光，鈴木健太郎：厚さの異なる緩衝ゴムを設置したシート破断で終局に至るAFRPシート曲げ補強RC梁の落下高さ一定繰り返し衝撃荷重載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44, No. 2, pp. 931-936, 2022.