

# 緩衝ゴムを設置したシート剥離で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷実験

Impact loading tests of cushion rubber set RC beams for  
flexural debonding failure type RC beams strengthened with AFRP sheet

瓦井智貴\*, 小室雅人\*\*, 岸徳光\*\*\*, 鈴木健太郎\*\*\*\*, 三上浩\*\*\*\*\*

Tomoki Kawarai, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Kentaro Suzuki, Hiroshi Mikami

\*博(工), 室蘭工業大学助教, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*博(工), 室蘭工業大学教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*修(工), (株) 構研エンジニアリング, 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

\*\*\*\*\*博(工), 三井住友建設(株), R&D センター 上席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

キーワード: RC 梁, AFRP シート, 衝撃荷重載荷, 緩衝ゴム

Keywords: RC beams, AFRP sheet, impact loading, cushion rubber

## 1. はじめに

近年, 斜面の経年劣化や異常気象などに伴う落石規模の大型化が問題視されており, 既設落石防護構造物の耐衝撃性能の向上が要求される事例も発生している。このような背景を受け, 著者らは構造物の耐衝撃性向上法の 1 つとして耐食性に優れ軽量で施工性に優れた連続繊維 (FRP) 材に着目し, FRP シート下面接着曲げ補強 (以後, 単にシート補強) を施した RC 梁に関する耐衝撃性向上効果や終局時の破壊性状について検討を行ってきた<sup>1)-3)</sup>。

その結果, 1) シート補強によって RC 梁の耐衝撃性が向上すること, 2) FRP シートの目付量が大きい場合には, 重錘衝突後に斜めひび割れが進展し, シートを押し下げるピーリング作用によってシート剥離に至ること, 3) 一方で, 目付量が小さい場合には, 重錘衝突部近傍の圧壊が卓越し, 角折れの性状を示すことによって過大なひずみが発生しシート破断に至ること, などが明らかになっている。しかしながら, 未だ FRP シートを用いた合理的な耐衝撃設計法の確立には至っていないのが現状である。

また, 一連の検討の中で, シート補強 RC 梁を対象に, 同一の落下高さから重錘を繰り返し衝突させる落下高一定繰り返し衝撃荷重載荷も実施している<sup>3)</sup>。このような場合には, ひび割れ進展に伴うシート接着による補強効果の低減よりも, 重錘衝突によって生じる

損等による断面剛性の低下が補強効果に大きく影響することが明らかになっている。従って, 重錘衝突部近傍におけるコンクリートの劣化損傷を抑制することによって, 耐衝撃性がさらに向上するものと推察される。

一方で, 衝撃荷重載荷時における構造物の局所的な損傷を抑制する工法としては, 地震時を想定した橋梁の桁間あるいは桁端衝突緩和用として用いられる緩衝ゴムを用いることが一つの方法として考えられる。ゴムの緩衝性能に関する既往の研究としては, 島ノ江ら<sup>4)</sup>, 難波ら<sup>5)</sup>, 結城ら<sup>6)</sup>などの実験的な検討が上げられる。しかしながら, 緩衝ゴムを設置した場合における構造物の動的応答性状に着目した検討例は少ない。

このような背景により, 本研究では, FRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に, 載荷点部に緩衝ゴムを設置した場合におけるシート補強 RC 梁の耐衝撃性向上効果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。本研究では, 緩衝ゴム設置の効果を

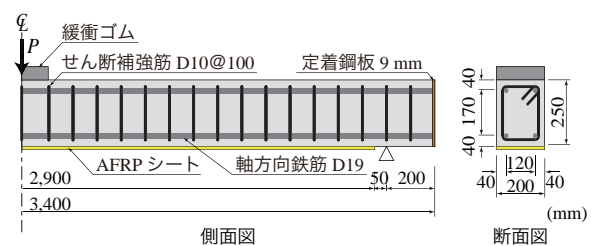


図-1 AR 試験体の形状寸法および配筋

表-1 試験体一覧

試験体名	設定重錘 落下高さ $H$ (m)	実測重錘 落下高さ $H'$ (m)	実測入力 エネルギー $E_i$ (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)	せん断 余裕度 $\alpha$	補強材 剥離の の有無
AN-H2.5	2.5	2.49	7.3	34	371	402	100	299	3.0	無
AN-H3.0	3.0	3.04	9.0							有
AR-H2.5	2.5	2.57	7.5	32	379	364	100	278	2.8	無
AR-H3.0	3.0	3.21	9.4							無

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 $\epsilon_{au}$ (%)
830	1176	0.572	2.06	118	1.75

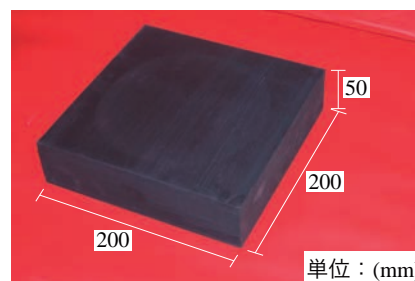


図-2 緩衝ゴムの形状寸法

明らかにするために、緩衝ゴムを設置しない場合についても実験を行い、両者の結果を比較検討することとした。なお、対象とするシート補強 RC 梁は、単一載荷時にシート剥離で終局に至る場合とした。

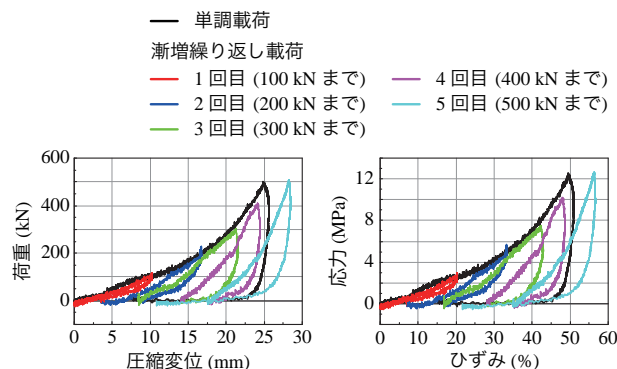
## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の形状寸法および材料の力学的特性

図-1には、試験体の形状寸法と配筋および AFRP シートの接着位置を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法 (梁幅 × 梁高 × 純スパン長) は、 $200 \times 250 \times 3,000$  mm である。また、軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置し、梁軸方向端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。また、AFRP シートは、梁下面に支点 50 mm 手前まで接着している。接着方法は以下の通りである。すなわち、(1) RC 梁下面の AFRP シート接着部に深さ 1 mm 程度のチップング処理を施す、(2) その後、プライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認した後、(3) エポキシ系接着材を塗布してシートを接着させる、である。養生期間は 1 週間程度である。

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、AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁を対象に、緩衝ゴム設置の有無や、落下高さを変化させた全 4 体である。表中の試験体のうち、第一項目は緩衝ゴム設置の有無 (AN:無し, AR:有り) を示し、第二項目の H に付随する数値は設定落下高さ (m) である。なお、表中の実測落下高さ  $H'$  は実測衝突速度から換算した自由落下高さである。

表には、本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  および主鉄筋とせん断補強筋の降伏強度  $f_y, f_{sy}$  も併せて示している。また、計算曲げ耐力  $P_{usc}$  は、これらの値および後述の AFRP シートの物性値を



(a) 荷重-圧縮変位関係 (b) 応力-ひずみ関係

図-3 緩衝ゴムの静的圧縮試験結果

用い、土木学会コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持仮定とコンクリートと AFRP シート間の完全付着を仮定して断面分割法により算定した。なお、計算時の梁の終局状態は、上縁コンクリートの圧縮ひずみが  $3,500 \mu$  に達した時点とした。計算せん断耐力  $V_{usc}$  は同コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に準拠して算定している。表-2には、本実験で用いた AFRP シートの静力学的特性値を一覧にして示している。

図-2には本研究で用いた緩衝ゴムを示している。本研究では、重錘の載荷点部直径が 200 mm であることより、硬度が 65 で、大きさが 200 mm 四方、厚さが 50 mm の天然ゴムを用いることとした。これより、載荷面積に対する側面の面積の総和の比で定義される緩衝ゴムの形状率は 1 となる。

図-3には、緩衝ゴムの基本的な材料特性を把握するために実施した静的圧縮試験の結果を示している。

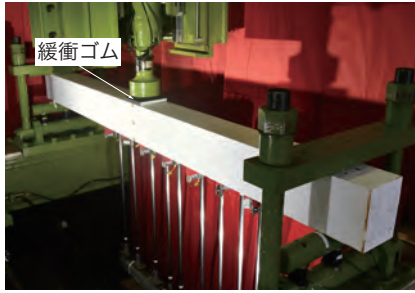


写真-1 衝撃荷重載荷実験状況

試験は、載荷用鋼版を介して一度に 500 kN まで載荷する単調載荷と、100 kN ずつ荷重を増加させながら 500 kN まで載荷と除荷を繰り返す漸増繰り返し載荷の 2 ケースを実施した。

図-3(a) に示す荷重-圧縮変位関係に着目すると、単調載荷において 500 kN の荷重到達時に 25 mm 程度圧縮変形し、大変形によってゴムが損傷したことで除荷後 7.5 mm 程度の残留変位が生じている。繰り返し載荷においても、変形量に差異は見られるものの単調載荷とほぼ同様な傾向が確認できる。また、100, 200 kN 載荷程度では、残留変形が小さく緩衝ゴム単体でのエネルギー吸収が小さいことも見て取れる。

図-3(b) には圧縮試験から得られた荷重-圧縮変位関係を基に、載荷前の緩衝ゴムの面積あるいは高さから換算した応力-ひずみ関係を示している。図より 500 kN まで載荷することで、約 50 % のひずみが発生し 12 MPa 程度の応力に到達することが確認できる。

## 2.2 実験方法および測定項目

写真-1 には、衝撃荷重載荷実験装置と試験体および緩衝ゴムの設置状況を示している。衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さからリニアウェイレールを介して自由落下させることにより行っている。落下高さ  $H$  は、過去の研究成果を下にシートが剥離する程度の比較の入力エネルギーの大きい  $H = 2.5, 3.0$  m を設定した。なお、重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。また、試験体の両支点部は、回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$ 、スパン中央点変位  $D$  およびシート各点の軸方向ひずみ  $\varepsilon$  である。なお、重錘衝撃力  $P$  と支点反力  $R$  は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測している。また、変位  $D$  はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。さらに、実験時にはひび割れ分布やシートの剥離状況記録の他、変位計のバックアップとして 2,000 fps の高速度カメラを用いて撮影を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 各種時刻歴応答波形

図-4 には、緩衝ゴムを設置した場合と設置しない場合における重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$ 、載荷点変位  $D$  の波形を各落下高さ毎に比較して示している。

重錘衝撃力波形を見ると、緩衝ゴムを設置しない場合には衝撃初期に継続時間が 1 ms 程度で振幅の大きい三角形波と後続の低周波成分と高周波成分が合成された波形成分から構成されている。また、衝撃初期の振幅は、落下高さに対応して増加傾向にあることも確認できる。一方、緩衝ゴムを設置する場合には、緩衝ゴムを設置しない場合における衝撃初期の振幅の大きい三角形の波形成分は出現せず、後続の低周波成分と高周波成分が合成された波形成分に対応した周期が約 15 ms 程度の低周波成分のみが励起している。また、最大振幅は、落下高さによらず類似した値を示している。荷重の継続時間は、緩衝ゴムの設置の有無によらず、ほぼ類似している。

表-3 には、各試験体における各応答値の最大値と重錘衝撃力による力積を一覧にして示している。最大衝撃力に着目すると、緩衝ゴムを設置することによって最大衝撃力は大幅に低減可能であることが分かる。しかしながら、力積は緩衝ゴム設置の有無にかかわらず類似している。

次に支点反力波形を見ると、載荷時の波形は緩衝ゴムを設置することによって高周波成分の振幅が平滑化された以外は衝撃初期の負反力の発生や継続時間も含め、両者は類似した波形性状を示していることが分かる。除荷後の自由振動状態に移行後の振動周期は、緩衝ゴムを設置した場合が若干短くなっている。これは、緩衝ゴムの設置によって最大衝撃力値の大幅な低減等によって梁の損傷も軽減したことによるものと推察される。表-3 から、最大支点反力を見ると、前述の重錘衝撃力の低減率と比較して小さくなっている。これは、緩衝ゴム設置によって最大重錘衝撃力は大きく低減するものの、力積は類似していることから、載荷初期の衝撃力による損傷の差を除き、両者の損傷や剛性低下に対する緩衝ゴム設置の影響が小さいことを示唆している。

変位波形に着目すると、緩衝ゴム設置の場合にはいずれの落下高さにおいても波形の立ち上がりが数 ms 程度遅れていることが分かる。これは、載荷初期における重錘衝撃力波形の立ち上がりが遅れたことによるものと推察される。また、除荷後の自由振動性状を比較すると、いずれの落下高さにおいても緩衝ゴムの設置によって振動周期が短くなっている。表-3 から、最大変位を比較すると、緩衝ゴムの設置によって、10~20% 低減しており、 $H = 3.0$  m 落下時の低減率が大きい。実験終了後の残留変位に関しては、 $H = 2.5$  m 落下時には 20% 程度低減しているが、 $H = 3.0$  m 落下時には 40% 程度まで達している。これは、後述の

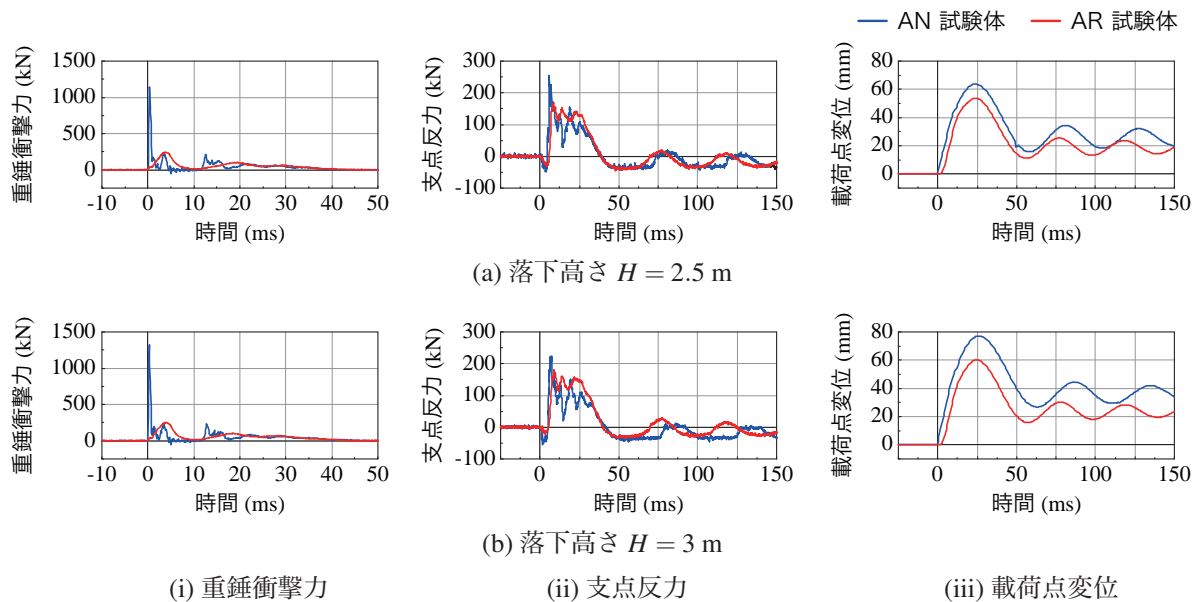


図-4 各試験体の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および載荷点変位  $D$  に関する時刻歴応答波形の比較

ように AN-H3.0 試験体の場合には、シートが部分剥離に至っていることにより残留変位が大きくなったためと判断される。

### 3.2 実験終了後における試験体の損傷状況

図-5には、載荷実験終了後における梁側面のひび割れ分布を、各落下高さ毎に比較して示している。

図-5より、緩衝ゴムを設置しない AN 試験体の場合には、下縁のみならず上縁からも曲げひび割れが進展し、載荷点近傍部には著しい斜めひび割れが発生していることが分かる。また、上縁からのひび割れの発生は、衝撃荷重載荷初期に両端固定梁の状態で波動が支点に向かって進展することによるものと推察される。 $H = 3$  m の場合には、明確な斜めひび割れの発生と共に載荷点近傍部のコンクリートがブロック化し剥落の傾向を示しており、かつ FRP シートは斜めひび割れ先端部のピーリング作用によって部分的に剥離していることが確認できる。載荷面のコンクリートの損傷状況については、いずれの場合も載荷点部は圧壊に至っており、上縁かぶりコンクリートは細かく破碎され剥離していることを確認している。

一方、緩衝ゴムを設置した AR 試験体の場合には、図よりひび割れがスパン全体に分布しているものの、曲げひび割れが下縁から上縁に進展しており、上縁からのひび割れはゴムを設置しない場合と比較して極端に減少していることが分かる。これは、載荷初期の衝撃荷重が緩和されたことにより、前述の緩衝ゴムを設置しない場合における両端固定梁に類似した性状を示さないことを暗示している。また、載荷点近傍部における鋭角な斜めひび割れも発生していないことより、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によるシート剥

表-3 最大応答値および力積一覧

試験体名	最大衝撃力 (kN)	力積 (kNs)	最大支点反力 (kN)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)
AN-H2.5	1,147 (1.0)	2.5 (1.0)	254 (1.0)	64 (1.0)	26 (1.0)
AR-H2.5	242 (1/4.7)	2.6 (1.04)	169 (0.67)	54 (0.89)	21 (0.81)
AN-H3.0	1,324 (1.0)	2.7 (1.0)	224 (1.0)	77 (1.0)	37 (1.0)
AR-H3.0	251 (1/5.27)	2.7 (1.0)	179 (0.80)	60 (0.78)	23 (0.62)

(注): 下段は低減倍率・割合

離も抑制される傾向にあることが分かる。載荷面の損傷状況については、いずれの落下高さにおいても重錘が緩衝ゴムに衝突したことによって、コンクリート面には著しい圧壊の傾向は見られなかった。

### 3.3 シートのひずみ分布と載荷点近傍部におけるひび割れ分布の時間的な推移状況

図-6には、落下高さが  $H = 3.0$  m の場合における AFRP シートの軸方向ひずみ分布と載荷点近傍部側面に発生するひび割れ分布の時間的な推移状況を比較して示している。

図-6において、緩衝ゴムを設置しない AN 試験体の結果を見ると、時間が  $t = 1 \sim 5$  ms で、載荷点近傍で正、その周辺で負のひずみ分布を示し、時間と共に正の領域が拡大し、 $t = 5$  ms 時点で負の値が消失していることが分かる。これは、衝撃荷重初期には荷重が集中荷重的に作用し、スパン長の短い両端固定梁に類似したひずみ分布性状を示し、時間の経過とともにやがて正の曲げ波が支点に到達することにより、単純支

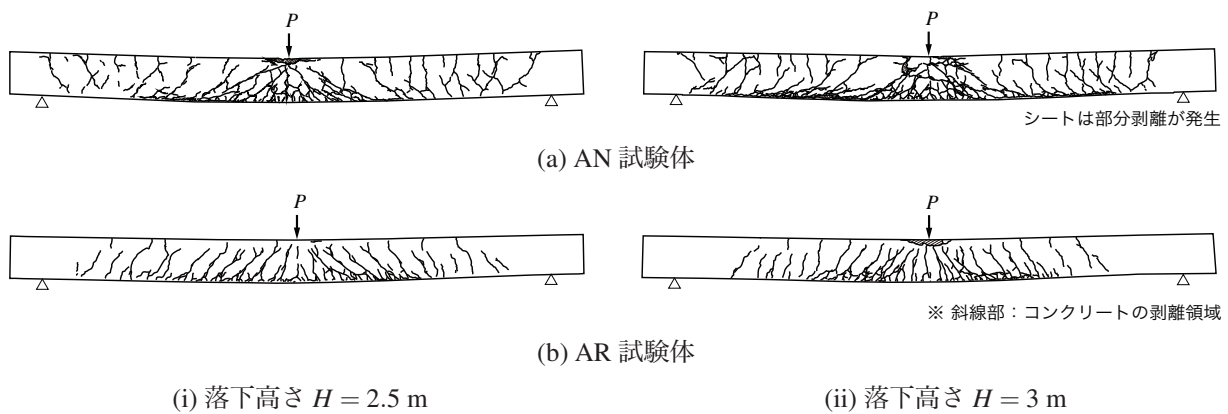


図-5 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布の比較

持梁の条件に対応した分布性状を示すためと推察される。  $t = 5 \text{ ms}$  時点では最大ひずみが  $0.5\%$  に達していることから、荷重点部の主鉄筋は降伏域に達しているものと推察される。

$t = 10 \text{ ms}$  時点のひずみ分布を見ると、荷重点中央部は  $1\%$  以上のひずみに達している。これは、勾配が変化する高速度カメラ撮影範囲境界近傍のひずみが  $0.3\%$  程度に達していることより、荷重点近傍部を含む高速度カメラの撮影範囲内における主鉄筋は塑性化が進行していることが推察される。この時点でのひび割れ分布を見ると、斜めひび割れが  $t = 5 \text{ ms}$  時点に比較してより顕在化していることが分かる。これは、荷重点近傍部の主鉄筋の塑性化が進行し主鉄筋のせん断剛性も著しく低下したことによるものと推察される。しかしながら、 $t = 20 \text{ ms}$  以降ではスパン中央点から  $0.4 \text{ m}$  程度離れた点における  $0.2 \text{ m}$  程度の領域で  $1\%$  程度の一様なひずみ分布を呈し、 $t = 40 \text{ ms}$  にはスパン中央点から両側  $1 \text{ m}$  の領域まで拡大している。これは、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によってシートが部分的に剥離し、ひずみが平均化したためと推察される。これより、AN-H3.0 試験体の場合には、AFRP シートが明らかに部分剥離に至ったことが確認できる。

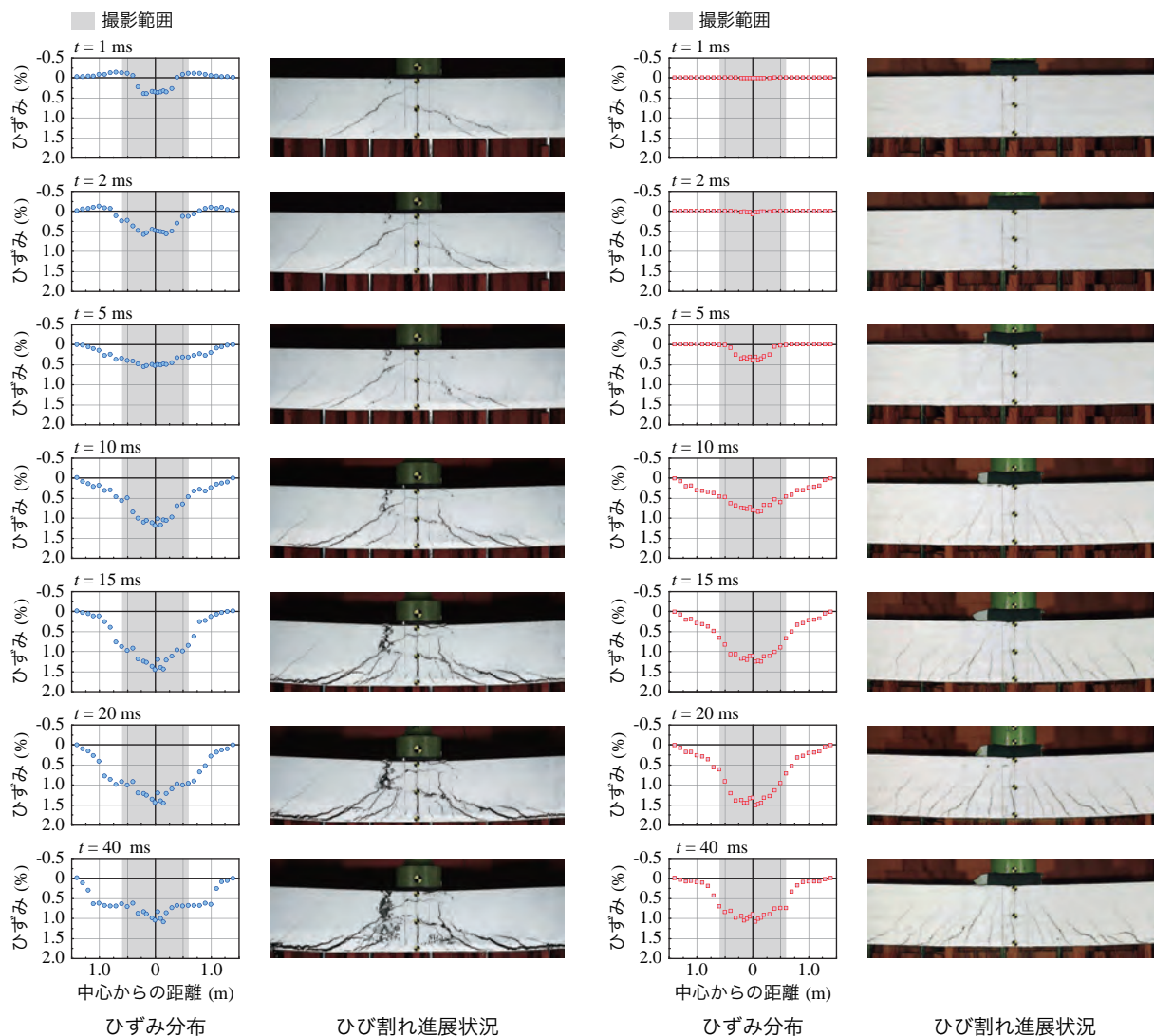
一方、緩衝ゴムを設置した AR 試験体の場合には、 $t = 2 \text{ ms}$  まではシートにひずみがほとんど生じていないことから、緩衝ゴムの衝撃力緩和効果の大きいことが分かる。対応して、荷重点近傍にもひび割れは確認できない。 $t = 5 \text{ ms}$  時点では、荷重点部で均等な  $0.3 \sim 0.4\%$  前後のひずみが発生し、ひずみ分布はスパン中央部  $1 \text{ m}$  程度の範囲に限定している。その後、 $t = 10 \text{ ms}$  時点では、正の曲げ波動が支点まで達し、単純支持の状態に至っている。従って、緩衝ゴムを設置することによって、単純支持状態に至る経過時間は  $5 \text{ ms}$  程度遅延することが確認できる。

$t = 15 \text{ ms}$  時点では、スパン中央部の  $0.6 \sim 0.7 \text{ m}$  の

領域で、 $1\%$  程度のひずみがほぼ均等に分布し、その後急激にひずみが減少する分布を示しており、明らかに緩衝ゴムを設置していない場合とは異なった分布性状を示している。最大ひずみが  $1\%$  程度でかつ中央部のひずみが均等に分布しているのは、緩衝ゴムを設置したことにより集中的に作用する衝撃荷重が緩衝ゴム内で均等化されかつ等分布的に分散して作用することによるものと推察される。ひび割れ分布を見ると、緩衝ゴムを設置していない場合には斜めひび割れは荷重点を中心に分布しかつ大きく開口しているが、緩衝ゴムを設置する場合には斜めひび割れの分布角度も大きく、それぞれがほぼ等間隔に平行に分布しかつひび割れの開口も小さいことが分かる。 $t = 20 \text{ ms}$  においては、緩衝ゴムを設置しない場合と同様に最大ひずみが  $1.5\%$  に達し時間の経過とともにひび割れの開口が大きくなる傾向を示すものの著しくはない。また、 $t = 40 \text{ ms}$  以降で、試験体右側中間部の約  $0.2 \text{ m}$  の領域で約  $0.75\%$  の均等なひずみ分布を示しているが、ピーリング作用による部分剥離には至っていないことが分かる。

#### 4. まとめ

- 1) 緩衝ゴムを設置することにより、衝撃荷重初期の最大衝撃力は大略  $1/5$  程度に低減するものの、力積は緩衝ゴムの設置の有無に拘わらず類似の値を示す。
- 2) 最大支点反力や最大変位は、緩衝ゴムを設置しない場合に対してそれぞれ  $70\%$ 、 $80\%$  程度となる。
- 3) 緩衝ゴムを設置することによって、支点部近傍の上縁から進展する曲げひび割れが著しく減少し、かつ斜めひび割れの分布角度も大きく、ほぼ均等に分布しせん破壊は抑制される傾向にある。従って、斜めひび割れ先端部におけるピーリング作用も抑制され、対応して AFRP シートの剥離も抑制されることより、梁の耐衝撃性は向上する。



(a) AN-H3.0 試験体

(b) AR-H3.0 試験体

図-6 落下高さ  $H = 3\text{ m}$  の場合におけるシートのひずみ分布とひび割れ分布の時間的な推移状況比較

### 謝辞

本研究で使用した 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) からご提供頂きました。ここに記して、感謝致します。

### 参考文献

- 1) 栗橋祐介, 三上 浩, 今野久志, 佐藤元彦, 岸徳光: AFRP シート曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制法に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 62A, pp. 1043-1052, 2016.
- 2) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, Le Huy 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, Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.
- 3) 田野順也, 岸徳光, 小室雅人, 三上浩: 静的に曲げ

圧壊で終局に至る 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, No. 2, pp. 685-690, 2019.

- 4) 島ノ江哲, 長谷川恵一, 川島一彦, 庄司学: 衝突力を受けるゴム製緩衝装置の動的特性, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp. 219-234, 2001.
- 5) 結城洋一, 玉井宏樹, 宇野まり子, 園田佳巨, 春日井俊博: 形状や拘束条件に着目した緩衝ゴムの緩衝特性に関する基礎実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 61A, pp. 313-321, 2015.
- 6) 難波達郎, 木村修一, 本間重雄, 近藤博: ゴム緩衝材設置時の桁間衝突応力に及ぼす桁長の影響, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 23-31, 2008.
- 7) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.