

論文 緩衝ゴムを設置し目付量を変化させた AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する衝撃荷重実験

鈴木 健太郎^{*1}・小室 雅人^{*2}・瓦井 智貴^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、衝撃荷重載荷時を対象として、載荷面に緩衝ゴムを設置した場合における目付量の異なる AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する検討を目的に、シートが目付量を静荷重載荷時に各破壊形式に至るように変化させ、緩衝ゴム設置の有無に対する重錘落下衝撃荷重実験を実施した。その結果、1) 静荷重載荷時に曲げ圧壊型として分類される梁は衝撃荷重載荷時には緩衝ゴム設置の有無にかかわらずシート破断型によって終局に至ること、2) 静荷重載荷時に剥離破壊型として分類される梁は緩衝ゴムを設置しない場合には剥離破壊型、設置する場合にはシート破断型によって終局に至ることが明らかとなった。

キーワード: RC 梁, FRP シート接着曲げ補強, 重錘落下衝撃荷重, 緩衝ゴム, 破壊形式

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顕在化し、設計時の落石荷重を上回る外力が構造物に作用する事例も多数確認されている。このような状況を鑑み、著者らは RC 構造物の耐衝撃性向上法の一つとして、軽量かつ耐食性・施工性に優れた連続繊維 (FRP) シート接着補強法に着目し、FRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃荷重実験を行ってきた。その結果、FRP シート補強を施すことによって、RC 梁の耐衝撃性が向上することや、シート目付量の大小によって梁の破壊形式が異なることが明らかになっている^{1),2)}。また、繰り返し衝撃荷重載荷時には、梁はシート破断や剥離に至らず、載荷点近傍部の圧縮破壊が卓越して終局に至る場合³⁾のあることも確認されている。著者らは、このような圧縮破壊を抑制するために載荷点部に緩衝ゴムを設置する手法を提案し、その効果に関する実験的検討も行っている^{4),5)}。その結果、緩衝ゴムを設置することによって、載荷点近傍部の損傷を効果的に低減可能であることや、最大衝撃力を 1/5 ~ 1/6 程度まで抑制できるものの、力積には大きな差異が生じないことから梁の応答変位を最大衝撃力の減少割合程度までは抑制できないこと、などを明らかにしている。

一方で、設計的に最も重要である終局時の破壊形式に関しては、静荷重載荷時には、計算終局曲げ耐力 P_u に対する主鉄筋降伏時の計算曲げ耐力 P_y の比が 0.7 より大きい場合には載荷点近傍上縁部が圧壊によって終局に至り、0.7 よりも小さい場合には計算終局耐力を確保できずにシート剥離によって終局に至ることが明らかになっている^{7),8)}。しかしながら、載荷点部に緩衝ゴムを設置した

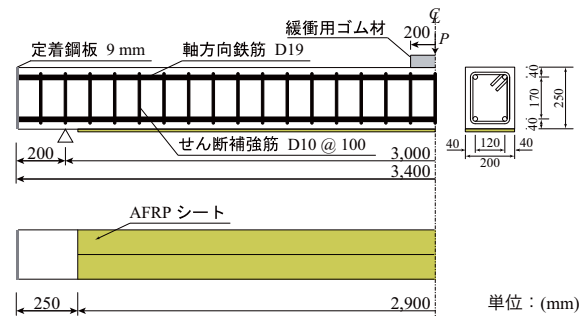


図-1 試験体概要

場合の衝撃荷重載荷時における破壊形式は、未だ明確になっ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、載荷点部に緩衝ゴムを設置した FRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷時における破壊形式の検討を目的に、シートが目付量および緩衝ゴム設置の有無を変化させ、300 kg 重錘を用いた単一の重錘落下衝撃荷重実験を実施した。なお、本研究では FRP シート材料としてアラミド繊維 FRP (AFRP) を用いることとした。シートが目付量に関しては、上述の研究成果^{7),8)}に基づき静荷重載荷時に各破壊形式に至るように設定した。また、重錘の落下高さ H に関しては、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず梁が確実に終局に至るように、既往の研究成果^{4),5)}に基づき $H = 3.5$ m と設定した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本研究で用いた試験体の形状寸法、配筋および AFRP シートによる補強状況を示している。

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士後期課程 (正会員)
 *2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 教授 博(工) (正会員)
 *3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 助教 博(工) (正会員)
 *4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 特任教授 工博 (正会員)

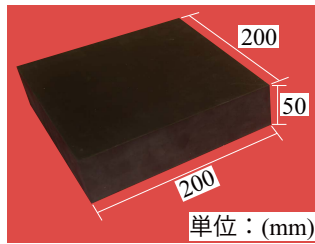


図-2 緩衝ゴムの形状寸法

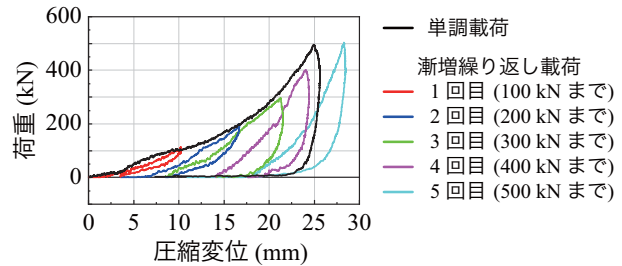


図-3 緩衝ゴムの荷重-変位関係

表-2 試験体一覧

試験体名	シート目付量 (g/m ²)	緩衝ゴムの有無	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	実測重錘衝突速度 V' (m/s)	実測入力エネルギー E (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 _{ys} (MPa)	計算降伏曲げ耐力 P _y (kN)	計算終局曲げ耐力 P _u (kN)	計算せん断耐力 V _u (kN)
A415-N	415	無し	3.5	3.35	8.11	9.9	29.5	397.1	387.9	59.4	81.4	288
A415-R		有り		3.39	8.15	10.0				64.3	98.7	288
A830-N	830	無し		3.59	8.39	10.5	28.7	384.4	374.7	62.1	97.0	280
A830-R		有り		3.59	8.39	10.5				62.1	97.0	280

表-1 AFRP シートの力学的特性値(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 ε _{au} (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75
830	1,176	0.572			

本実験に用いた試験体の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、200×250×3,000 mm である。軸方向鉄筋は、上下端に D19 を各 2 本配置し、定着長を節約するために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。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、梁底面には支点から 50 mm 手前まで AFRP シートを接着している。なお、シートの接着は、梁底面の補強範囲にブラスト処理を施してエポキシ系プライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認の後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。養生期間は 1 週間程度である。本研究では、前述のように RC 梁が静荷重載荷時にそれぞれ曲げ圧壊型と剥離破壊型で終局に至るように、AFRP シートの目付量を 415 g/m² 及び 830 g/m² とした。表-1 には、本実験で用いた AFRP シートの力学的特性を一覧にして示している。

載荷点部には図-2 に示す硬度 65 の天然ゴム緩衝材を設置することとし、その形状寸法(幅×長さ)は、梁幅および重錘円柱部直径を考慮して 200×200 mm とし、厚さ t_r に関しては t_r = 50 mm とした。なお、緩衝ゴムを設置しない場合についても同様に実験を行った。

図-3 には、緩衝ゴム単体の力学的な材料特性として静荷重載荷試験結果より得られた荷重-変位関係を示している。試験は、図-2 に示す緩衝ゴムを対象に、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返し載荷の 2 ケースを実施した。図に示す通り、単調載荷において 500 kN の荷重到達時に 25 mm 程度、すなわち 50 % 程度圧縮ひずみが生じていることが分かる。また、単調載荷時における荷重-変位関係は、5 回目載荷時(500 kN まで)を除き、繰返し載荷時の荷重-変位関係をほぼ包絡していることが分かる。なお、5 回目載荷時の場合には、変位が単調載荷時に比較して 3 mm 程度大きく示されている。

表-2 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、シート目付量や緩衝ゴム設置の有無を変化させた全 4 体である。表中の試験体名のうち、第一項目における A は AFRP シート補強を示し、後続する数値はシートの目付量を表している。また、第二項目に関しては載荷点部における緩衝ゴム設置の有無を示しており、N は緩衝ゴム無し(直接載荷)を、R は緩衝ゴム有りを表している。

設定の重錘落下高さ(以後、単に落下高さ) H に関しては、前述のように、いずれの試験体も確実に終局に至る H = 3.5 m と設定した。なお、表には、実測重錘衝突速度から算出した換算重錘落下高さのほか、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'、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y、f_{ys} も併せて示している。また、計算の主鉄筋降伏時および終局曲げ耐力 P_y、P_u に関しては、これらの値および AFRP シートの物性値(表-1 参照)を用い、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、断面の平面保持仮定およびコンクリートと 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、コンクリートの終局圧縮ひずみは、0.35% と設定している。計算せん断耐力についても同コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠して算定している。断面分割法の詳細については文献 7) を参

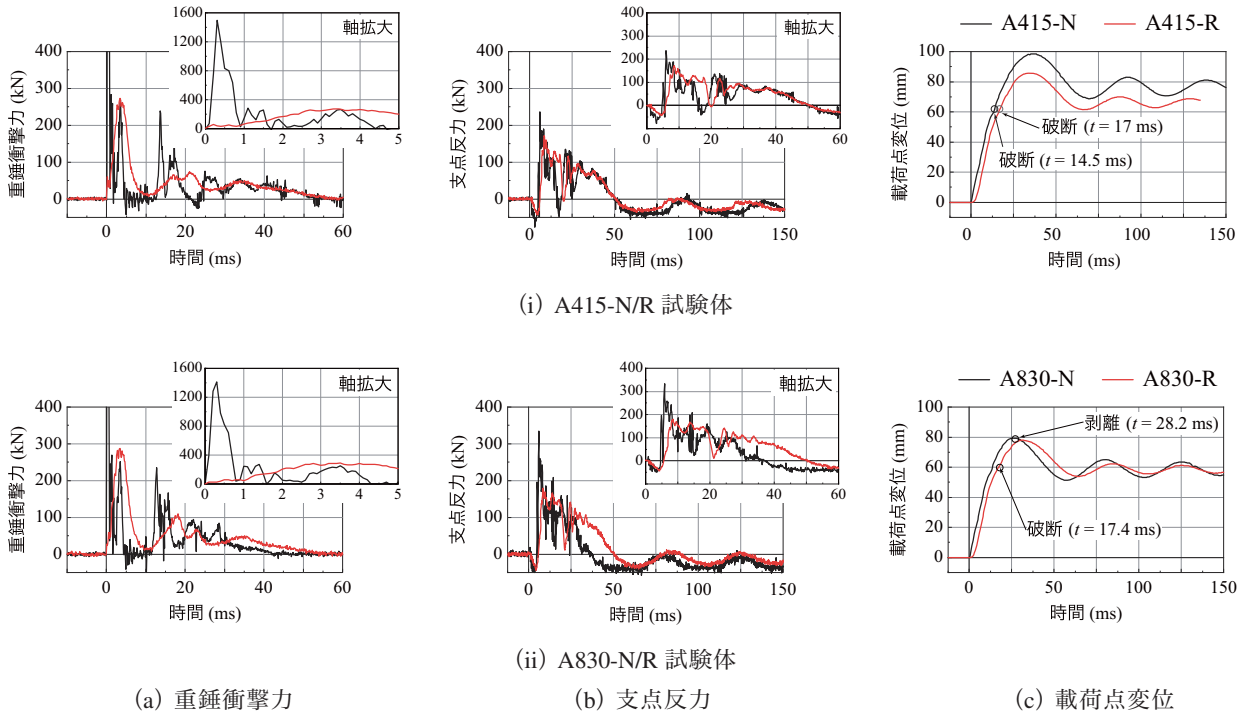


図-4 各種時刻歴応答波形

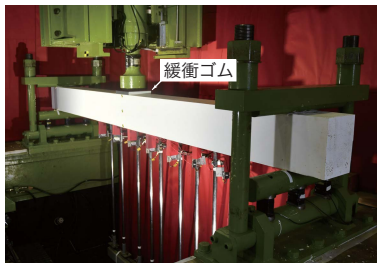


写真-1 衝撃荷重重荷実験装置

照されたい。

表-2より、A415とA830試験体の計算耐力比 P_y/P_u を求めると、それぞれ0.73、0.64/0.65となり、前者は静荷重重荷時に曲げ圧壊型、後者は剥離破壊型でそれぞれ終局に至る試験体として分類されることが分かる。

2.2 実験方法および測定項目

写真-1には、衝撃荷重時における実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃荷重重荷実験は、質量300kg、円柱部直径200mmの鋼製重錘を $H=3.5$ mから一度だけ梁のスパン中央部に自由落下させることにより行った。なお、試験体の両支点部は、回転を許容し、矩形鋼製梁によって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。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、合支点反力（以後、単に支点反力）およびスパン中央点の鉛直方向変位（以後、単に変位）である。なお、重錘衝撃力と支点反力波形は、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、変位波形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の進展状況や

表-3 各最大応答値一覧

試験体名	最大 衝撃力 P_{max} (kN)	最大 支点反力 R_{max} (kN)	最大 変位 δ_{max} (mm)
A415-N	1495	237	98
A415-R	273	172	86
A830-N	1412	334	79
A830-R	288	179	78

AFRPシートの剥離状況の他、変位計のバックアップとして2,000fpsの高速度カメラ撮影も行っている。

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図-4には、本研究で実施した全4試験体に関する重錘衝撃力、支点反力、変位の時刻歴応答波形をAFRPシートの目付量毎に比較して示している。黒線が緩衝ゴム無し、赤線が緩衝ゴムを設置した場合の結果である。なお、図中の横軸は、重錘が試験体に衝突した時点として示している。また、表-3には、全試験体の各時刻歴応答波形から得られる最大応答値を一覧にして示している。

図-4(a)の重錘衝撃力波形に着目すると、目付量が小さいA415試験体の場合において、緩衝ゴムを設置していないN試験体の場合には、重錘が試験体に衝突後0.3ms程度で最大1,495kNを示す1波目が励起した後、最大値が250kN程度で継続時間が3ms程度の2波目が後続する波形性状を示している。また、その後10ms程度で再度重錘が梁に衝突し、3波目の衝撃力波が励起している

ことも見て取れる。一方で、緩衝ゴムを設置した R 試験体の場合には、最大値が大幅に低減し、かつ継続時間が延びる傾向にあることが分かる。表-3より、最大衝撃力を確認すると、既往の研究^{4,5}と同様に緩衝ゴムを設置することによって 1/5 程度と大幅に低減している。次に、目付量の大きい A830 試験体に着目すると、緩衝ゴム設置の有無によってその性状は異なるものの、概形や最大値は A415 試験体の場合と類似であることが分かる。これより、载荷初期の衝撃力波形は衝突部近傍の材料物性に依存し、梁下面に接着した FRP シートの目付量の影響は小さいことが示唆される。

次に、図-4 (b) の支点反力波形に着目すると、A415 試験体の場合には、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず類似の波形分布を示していることが分かる。すなわち、载荷初期に負反力を示した後、継続時間が 50 ms 程度で負反力側において減衰自由振動状態に移行している。但し、緩衝ゴムを設置している R 試験体の場合における負反力発生以降の正反力の増加勾配は緩衝ゴムを設置していない N 試験体よりも小さく示されている。これは、緩衝ゴム設置の効果によるものと推察される。また、最大支点反力は、高周波成分を多く含む緩衝ゴムを設置していない N 試験体の場合が設置している R 試験体に比して大きい値を示している。さらに、载荷初期からの経過時間(以後、単に経過時間) t が $t = 15 \sim 20$ ms において、R 試験体の場合には N 試験体の場合より遅く減少傾向を示している。これは、後述の変位波形に示されているように、R 試験体の場合におけるシート破断が N 試験体の場合より遅く発生したことによるものと推察される。なお、支点反力波形の継続時間が両試験体で類似しているのは、シート破断の時間的な差が小さいことによるものと推察される。なお、载荷初期に負反力値を示しているのは、衝撃荷重载荷前に支点部のリバウンド防止用鋼製矩形梁を締め付けた後に支点反力測定用ロードセルの零バランスを取ったことによって、衝撃初期に支点部に上方へのリバウンド力が作用したことを表している。

次に、目付量が大きい A830 試験体の場合における波形性状を見ると、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず類似の波形分布を示しているものの、緩衝ゴムを設置している R 試験体の場合における負反力からの立ち上がり勾配が緩衝ゴムを設置していない N 試験体の場合より小さいことや、N 試験体の場合における波動継続時間が R 試験体の場合より 12.5 ms 以上短いことが分かる。R 試験体の場合において立ち上がり勾配が小さいのは、前述と同様に緩衝ゴムの効果によるものと推察される。また、N 試験体の継続時間が短いことは、後述の変位波形からも明らかのように、支点反力が急激に減少傾向を示す経過時間がシート剥離に至る経過時間とほぼ対応することより、

シート剥離によって著しく耐力が低減したことによるものと推察される。これに対して、R 試験体の場合には、シート破断に至る経過時間が A415 試験体の場合と類似しており、波動継続時間も対応している。

図-4 (c) の载荷点変位波形に着目すると、緩衝ゴム設置の有無やシート目付量の大小に関わらず、経過時間が $t = 30 \sim 40$ ms 程度で最大値に到達後、減衰自由振動状態に移行している様子が確認できる。なお、A415-R 試験体の波形は、経過時間が $t = 130$ ms 前後以降に示されていない。これは、シート破断による下縁かぶりコンクリートの剥落等によって、測定ができなくなったことによる。

A415 試験体に着目すると、表-3より、最大変位は、緩衝ゴムを設置している R 試験体の場合が緩衝ゴムを設置していない N 試験体に比較して 12 mm 程度小さいことが分かる。これは、シート破断がほぼ同程度の経過時間に発生していることより、緩衝ゴムの緩衝効果によるものと推察される。しかしながら、その低減割合は、前述の最大衝撃力の場合に比較して遙かに小さい。これは、まえがきにも述べているとおり、両試験体で力積に大差がない(N 試験体で 2.5 kN·s、R 試験体で 2.6 kN·s) ことによるものと推察される。また、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず、両試験体はシート破断に至っていることが分かる。

一方、A830 試験体に着目すると、緩衝ゴムを設置している R 試験体の場合における波動は、緩衝ゴムを設置していない N 試験体の場合に比較して若干遅れて励起し、最大変位も若干遅れて同程度に至っている。その後、減衰自由振動周期も時間の経過と共に類似していく傾向にあることが分かる。

R 試験体が N 試験体より遅れて最大変位に至るのは、緩衝ゴムの緩衝効果の他、R 試験体の場合におけるシート破断が N 試験体の場合におけるシート剥離よりも早期に発生したことによって、シートの補強効果がより早期に失われたことによるものと推察される。減衰自由振動周期が類似して来るのは、両試験体が共にシートの補強効果を失った状態に至ったことによるものと推察される。

3.2 実験終了後におけるひび割れ分布

図-5には、各試験体側面における実験終了後のひび割れ分布を比較して示している。なお、斜線部はコンクリートが剥離したことによる損傷領域を表している。また、図-6には、実験終了後における载荷点部の損傷状況について比較して示している。

図-5より、A415 試験体のひび割れ分布に着目すると、緩衝ゴムを設置していない N 試験体の場合には上下縁からの曲げひび割れが試験体全体に分布していることが分かる。特に、上縁から進展する曲げひび割れは、载荷初期にスパン長の短い両端固定梁に類似した曲げ波動が時間の経過と共にスパン長を伸長しつつ支点に向かって伝

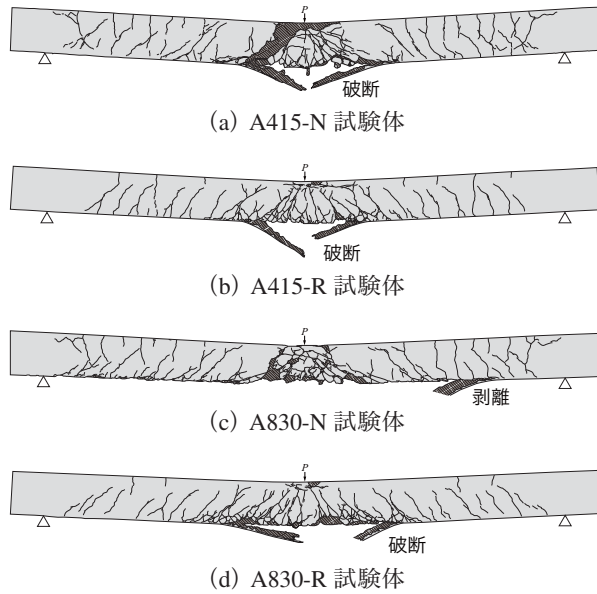


図-5 実験終了後のひび割れ分布

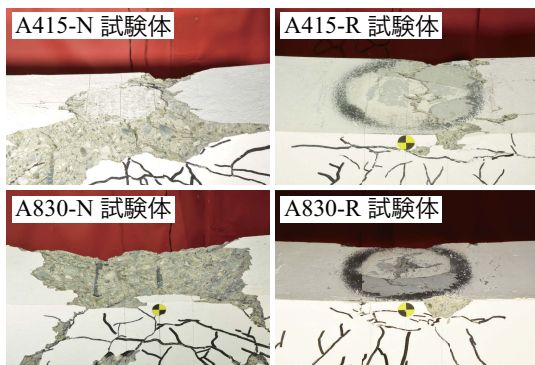


図-6 荷点部の損傷状況

播することによって生じるものと推察される。緩衝ゴムを設置したR試験体の場合には、下縁から進展する曲げひび割れはN試験体の場合と同様であるが、上縁からの曲げひび割れはN試験体の場合と比較して本数が少なくかつ上縁から下縁に向かって進展する長さも短いことが分かる。これは、緩衝ゴムの設置によって荷初期における衝撃力が大きく緩和されたことや立ち上がり時間が遅延することによって、明確な両端固定梁に類似した曲げ波が励起しなかったことによるものと推察される。荷点近傍部のひび割れ分布を見ると、N試験体の場合における斜めひび割れの進展角度は大きく、曲げひび割れが卓越して発生していることが分かる。また、R試験体の場合には、N試験体のような斜めひび割れが発生せず、曲げひび割れのみが分布していることが分かる。これは、緩衝ゴムの設置によって荷初期の最大荷重が大きく低減したことや、荷荷重が部分分布荷重のように分散して作用することによって、荷点近傍のせん断力が大きく低減したことによるものと推察される。荷点近傍部

のシート破断の状況を見ると、いずれの試験体もシートはスパン中央部から破断していることが分かる。これより、静荷重載荷時と同様に主鉄筋の降伏領域が狭いことによって、N試験体の場合には、斜めひび割れの発生領域が小さくかつその進展角度も大きくなるため、斜めひび割れ先端部のピーリング作用によるシート剥離は抑制され、荷点部を中心とした曲げ作用が卓越して梁が角折れ状態に至り、シートひずみが破断ひずみを超過したことによって、破断に至ったことが推察される。また、R試験体の場合には、上述のように斜めひび割れの発生が抑制されていることから、主鉄筋降伏領域が荷点近傍部に限定されることによってN試験体と同様の挙動を示してシート破断に至ったことが推察される。図-6より、荷点部の損傷を見ると、N試験体の場合における損傷は、R試験体よりも大きいことが分かる。しかしながら、R試験体においても荷点部が部分的に圧縮破壊に至っていることが確認できる。

一方、A830試験体に関するひび割れ分布において、梁全体に分布する曲げひび割れの性状は、緩衝ゴム設置の有無に対応して大略A415試験体と類似していることが分かる。荷点近傍部のひび割れ分布に着目すると、緩衝ゴムを設置していないN試験体の場合には、曲げひび割れと同時に角度の小さい斜めひび割れが発生していることが分かる。これは、前述のように静的な計算耐力比 P_y/P_u が0.64~0.65と小さいことによって主鉄筋降伏領域も広くなることによるものと推察される。それに対して、緩衝ゴムを設置するR試験体の場合には、A415試験体の場合と同様に斜めひび割れは発生していないことが分かる。これは、計算耐力比が小さいものの、A415-R試験体の場合と同様に緩衝ゴムの設置によって荷点近傍部におけるせん断力が大きく低減したことによるものと推察される。

各梁の終局状況を見ると、N試験体の場合にはシート剥離、R試験体の場合にはシート破断によって終局に至っていることが分かる。N試験体の場合には、角度の小さい斜めひび割れ先端部が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ったものと推察される。一方、R試験体の場合には、上述のように斜めひび割れの発生が抑制されたことによって曲げひび割れが卓越し、A415試験体と同様に荷点近傍部を中心に角折れの状態に至り、シートのひずみが破断ひずみを超過したことによって破断に至ったものと推察される。

図-6より、荷点部の損傷を見ると、N試験体の場合における損傷は、荷点部のかぶりが剥落しせん断補強筋が確認できる。一方、R試験体の損傷は軽微であることが分かる。しかしながら、A415-R試験体と同様に荷点部が部分的に圧縮破壊に至っていることが確認できる。

表－4 FRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式

試験体名	計算耐力比 P_y/P_u	静荷重載荷時 破壊形式 (予測式に基づく)	衝撃荷重載荷時 破壊形式
A415-N	0.73	曲げ圧壊型	シート破断型
A415-R			
A830-N	0.65	剥離破壊型	剥離破壊型
A830-R	0.64		シート破断型

3.3 衝撃荷重載荷時における試験体の破壊性状

表－4には、本研究で対象とした4試験体の破壊性状を、前述の計算降伏曲げ耐力 P_y と計算終局曲げ耐力 P_u の耐力比 P_y/P_u と共に示した。

表より、静荷重載荷時に曲げ圧壊型に分類される目付量の小さいA415試験体の場合には、前述のように緩衝ゴム設置の有無によらずいずれの試験体もシート破断型によって終局に至っていることが分かる。一方で、静荷重載荷時に剥離破壊型に分類され計算終局曲げ耐力を確保出来ない目付量の大きいA830試験体の場合には、緩衝ゴムを設置していないN試験体の場合には剥離破壊型、緩衝ゴムを設置したR試験体の場合にはシート破断型によって終局に至ることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、衝撃荷重載荷時において、載荷面に緩衝ゴムを設置した場合におけるFRPシート下面接着曲げ補強RC梁に関する破壊形式の検討を目的として、FRPシートとしてAFRPシートを用い、静荷重載荷時の破壊形式に準じてシートの目付量を変化させ、緩衝ゴム設置の有無による4体の試験体を対象に重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 載荷面に緩衝ゴムを設置する場合には、載荷初期に発生する最大衝撃力は1/5程度に低減される。さらに、衝撃荷重が部分分布的に作用することも相まって、載荷点近傍における斜めひび割れは抑制され、曲げひび割れが卓越する傾向にある。
- 2) しかしながら、最大変位の低減率は、力積が類似の値を示すことによって、最大衝撃力に比して著しく小さい。
- 3) 静荷重載荷時に曲げ圧壊型に分類されるFRPシート接着曲げ補強RC梁は、衝撃荷重載荷時には緩衝ゴムの設置の有無にかかわらず曲げひび割れが卓越し梁が角折れの傾向を示すことによって、シート破断型によって終局に至る。
- 4) 一方で、静荷重載荷時に剥離破壊型に分類される梁は、衝撃荷重載荷時において、緩衝ゴムを設置し

ない場合には鋭角な斜めひび割れが発生しその先端部のピーリング作用によって剥離破壊型によって終局に至る。

- 5) しかしながら、緩衝ゴムを設置することによって斜めひび割れの発生が抑制され、曲げひび割れが卓越して載荷点近傍部の角折れによってシート破断型によって終局に至る。

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)からご提供頂きました。また、本論文の取りまとめにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の永井泰圭君をはじめとする多くの学生にご協力を頂きました。ここに記して、感謝致します。

参考文献

- 1) 栗橋祐介, 今野久志, 三上浩, 岸徳光: AFRPシート曲げ補強RC梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 60A, pp. 953-962, 2014.
- 2) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 三上浩, S. L. Huy: 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.
- 3) 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.
- 4) 鈴木健太郎, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 三上浩: 緩衝ゴムを設置したAFRPシート接着曲げ補強RC梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 67A, pp. 804-815, 2021.
- 5) 鈴木健太郎, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 三上浩: 設置する緩衝ゴム厚を変化させたシート破断で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 68A, pp. 1023-1035, 2022.
- 6) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2018.
- 7) 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) 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.