緩衝ゴムの厚さを変化させたシート破断で終局に至る AFRP シート曲げ補強 RC 梁の一定繰り返し衝撃荷重載荷実験

Consecutive and constant impact loading test of cushion rubber set on RC beams strengthened in flexure with bonded AFRP sheet reaching ultimate state with sheet failure in case of varying rubber thickness

（株）構研エンジニアリング　○正　員　鈴木　健太郎 (Kentaro Suzuki)
室蘭工業大学大学院　正　員　小室　雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院　名誉会員　岸　徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院　正　員　瓦井　智貴 (Tomoki Kawarai)
三井住友建設（株）　フェロー　三上　浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修補強工法として，強度重量比が大きく耐食性・施工性に優れた連続繊維 (FRP) シート接着工法が多く採用されている[1)]．一方で，耐衝撃用途 RC 構造物である落石防護工は，最近の異常気象による集中豪雨や地山の経年劣化によって落石規模が大型化し，衝撃荷重のより一層の緩和あるいは落石防護工自体の耐衝撃性向上が要求される事例も発生している．

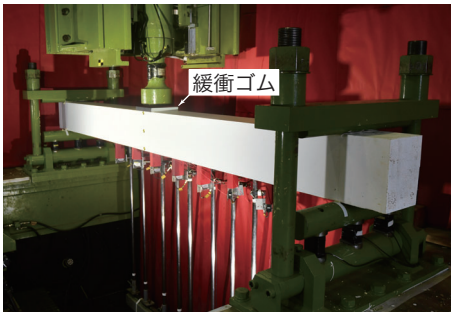
このような状況に鑑み，著者らは FRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に，単一あるいは繰り返し重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し，RC 部材に関する FRP 材の耐衝撃性向上効果に関する検討を継続して行ってきた[2)-3)]．その結果，RC 梁は FRP シートで曲げ補強することによって耐衝撃性を向上可能であることが明らかとなっている．一方で，単一載荷時にシート破断やシート剥離によって終局に至る場合においても，その 1/6 ～ 1/3 程度の入力エネルギーで繰り返し作用する場合には，載荷点部における圧壊等の損傷が先行しシート破断や剥離が生じる前に終局に至る場合がある．従って，繰り返し載荷時のシート接着による補強効果の低減度合いを適切に評価するためには，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した形で検討を行うことが肝要であるものと判断される．

このような背景により，本研究では，載荷点部に緩衝ゴムを設置した場合におけるシート破断で終局に至る FRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に，単一載荷時に終局に至る場合の 1/6 程度の一定エネルギー入力での繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した．緩衝ゴムは厚さを 25 mm と 50 mm の 2 種類に変化させ，基準試験体として緩衝ゴムを設置しない場合についても実験を実施し，耐衝撃挙動について比較検討を行った．

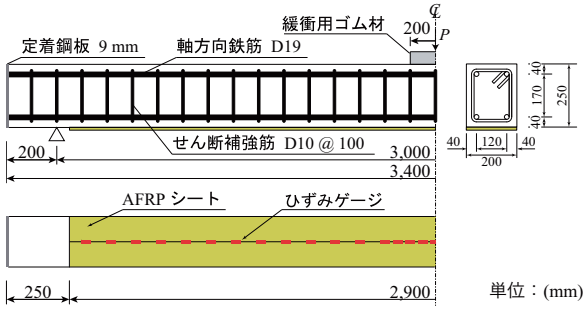
2. 実験概要

2.1 試験体概要

表－１には，本実験に用いた試験体の一覧を示している．試験体は，緩衝ゴム設置の有無や厚さを変化させた全 3 体である．表中の試験体名のうち，第一項目に関して，AN は緩衝ゴム無し（直接載荷）を，AR は緩衝ゴム有りを表しており，付随する数値はゴム厚 (mm) を示している．また，第二項目の H に付随する数値は衝撃荷重載荷時の設定重錘落下高さ (m) を示している．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，主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y, f_{sy} も併せて示している．表より，緩衝ゴムを設置しない AN 試験体は，9 回目載荷時に載荷点部上縁コンクリートが損傷してかぶりコンクリートが剥落し，上縁軸方向鉄筋やせん断補強筋が露出したため終局状態と判断し，実験を終了している．一方，緩衝ゴムを設置した AR 試験体の場合には，両者ともに 10 回目載荷においても各応答波形に著しい変化が認められないため，RC 梁は未だ終局状態に至っていないものの実験を終了した．



写真－１　衝撃荷重載荷実験装置



図－１　試験体概要

図－１には，試験体の形状寸法，配筋および補強状況を示している．本実験に用いた試験体の形状寸法（梁幅 × 梁高 × 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，梁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，梁底面にはアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを支点の 50 mm 手前まで接着している．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エポキシ系プライマーを塗布して，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．**表－２**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．

表－１　試験体一覧

No.	試験体名	終局時 重錘落下 回数	設定 落下高さ H (m)	実測 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_{sy} (MPa)	終局状況
1	AN-H0.5	9	0.5	3.14	1.48	34.3	394	373	上縁損傷
2	AR25-H0.5	10		3.13	1.47	36.6	400	377	－
3	AR50-H0.5	10		3.13	1.47	32.4	379	364	－

＊同一試験体全ケースの平均値

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 ε_{au} (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

2.2 緩衝ゴムの概要

図－１に示すように，載荷点部には硬度 65 の天然ゴム緩衝材を設置した．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 とした．また，厚さ t に関しては t = 25,50 mm の 2 種類を用いた．**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 500 kN まで連続して載荷する単調載荷と，100 ～ 500 kN まで 100 kN 毎に載荷と除荷を繰り返す漸増繰り返し載荷を実施した．

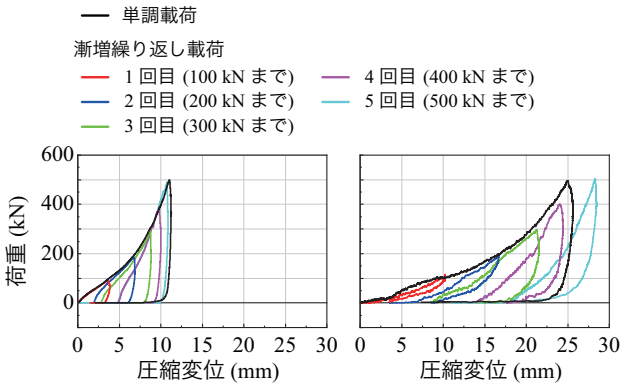
図－２ (a) の厚さ t = 25 mm の場合に着目すると，単調載荷において 500 kN の荷重到達時に 11 mm 程度変形している．載荷前の形状寸法から公称応力および公称ひずみを求めると 12.5 MPa の応力発生時に 45 % 程度のひずみが生じていることが分かる．また，繰り返し載荷時においても，単調載荷時の荷重－変位曲線に包絡する性状を示していることが確認できる．

図－２ (b) の厚さ t = 50 mm の場合には，単調載荷において 500 kN の荷重到達時に 25 mm 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．繰り返し載荷時には，厚さ t = 25 mm の場合と同様に単調載荷時の荷重－変位曲線に包絡する性状を示しているが，除荷勾配は厚さ t = 25 mm の場合よりも小さいことが分かる．

2.3 実験方法および測定項目

写真－１には，衝撃荷重載荷時における載荷装置と試験体の設置状況を示している．衝撃荷重載荷実験は，先端部直径 150 mm，高さ 2 mm の球形状を有している質量 300 kg 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．なお，重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している．試験体の両支点部は，回転を許容し，矩形状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），スパン中央点変位（以後，単に変位）および**図－１**に示す各点における AFRP シートの軸方向ひずみ（以後，単にひずみ）である．なお，重錘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を用いて計測している．また，変位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 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．



(a) 厚さ t = 25 mm　　(b) 厚さ t = 50 mm

図－２　緩衝ゴムの荷重－変位関係

3.　実験結果

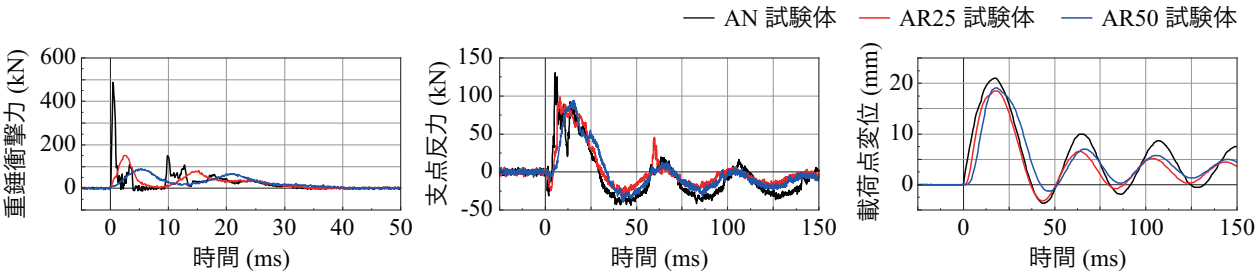
3.1　１回目載荷時における各種応答波形

図－３には，各試験体に関する 1 回目載荷時における重錘衝撃力 P，支点反力 R，変位 D の各応答波形を比較して示している．**図－３** (a) の重錘衝撃力波形に着目すると，緩衝ゴムを設置していない AN 試験体の場合には，載荷初期に継続時間が 1 ～ 2 ms で最大衝撃力が 500 kN 程度の三角形状の波形を示しており，その後 15 ms 程度までは 最大振幅が 100 kN 程度で除荷と載荷を 2 度繰り返している．その後は半周期が 15 ms 程度と周期が 8 ms 程度の波形が合成された性状を示し，約 35 ms で零レベルに至っている．

一方，AR25, AR50 試験体の場合には，緩衝ゴムを設置しない場合における振幅の大きい第 1 波目の波形は出現せず，半周期が 30 ms 程度の正弦半波と周期がそれぞれ 12, 15 ms 程度の 2～3 波の減衰波形が合成された状態で，継続時間が 40 ms 程度で除荷に至っている．最大衝撃力は，AR25, AR50 試験体でそれぞれ 150 kN, 90 kN であり，ゴム厚の増加に対応して最大衝撃力は減少傾向を示している．

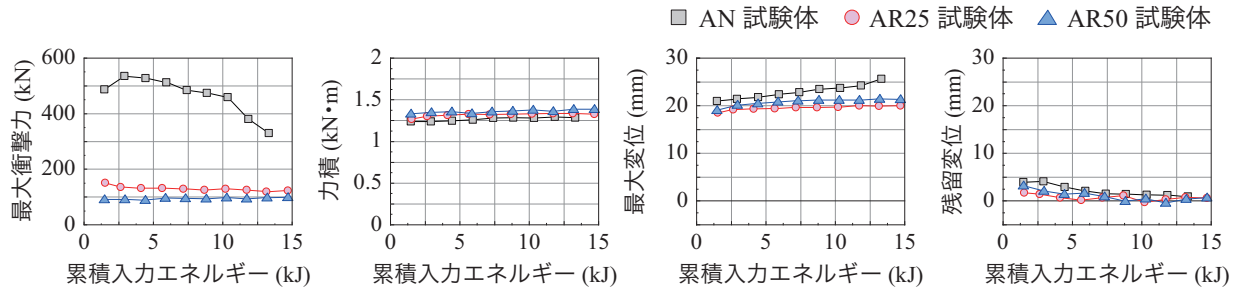
図－３ (b) の支点反力波形を見ると，AN 試験体の場合には初期に高周波成分が励起している．一方，AR 試験体の場合には高周波成分の振幅が減少傾向にある．それ以外は，載荷初期の負反力の発生や継続時間も含め，3 試験体共に類似した波形性状を示していることが分かる．除荷後の減衰自由振動状態に移行後の振動性状は，3 試験体間で類似していることが分かる．これより，緩衝ゴム設置の有無によって最大重錘衝撃力が大きく異なるが，支点反力波形は大略類似していることが明らかになった．

図－３ (c) の変位波形において，AR 試験体の場合には波形の立ち上がりが数 ms 遅れていることが分かる．これは，緩衝ゴムによって重錘衝撃力の第 1 波目が大きく減衰し，主荷重が遅れて作用したことによるものと推察される．また，除荷後の減衰自由振動性状は，AR 試験体の場合には



(a) 重錘衝撃力　(b) 支点反力　(c) 載荷点変位

図－３　１回目載荷時に関する各種時刻歴応答波形



(a) 最大重錘衝撃力　(b) 力積　(c) 最大載荷点変位　(d) 残留変位

図－４　各種応答値の比較

AN 試験体よりも若干周期が短くなっている．これは，緩衝ゴムを設置することによって梁の損傷が低減していることによるものと推察される．

3.2 各種応答値

図－４には，最大重錘衝撃力，力積，最大変位，残留変位について，実測累積入力エネルギー（以下，単に累積入力エネルギー）を横軸に取って比較して示している．なお，力積は重錘衝撃力波形の 0 ～ 50 ms に着目して算出することとした．また，残留変位は実験終了後の重錘を取り除いた状態での値である．**図－４** (a)図より，AN 試験体の最大衝撃力は 330 ～ 530 kN 程度であり，2 回目載荷が最も大きく，3 回目載荷以降は減少傾向にあることが分かる．これは，緩衝ゴムを設置していないことにより，載荷面の損傷が進行することによって，衝撃エネルギーの吸収量も増加傾向にあることによるものと推察される．一方，緩衝ゴムを設置した場合には載荷回数によらずほぼ同程度の値を示しており，AR25 試験体は 120 ～ 140 kN，AR50 試験体は 90 ～ 100 kN と AN 試験体の 1/3 ～ 1/2 程度以下となっていることが分かる．これは，**図－６**に示すように，ゴム設置の有無によって衝突部における損傷の進行度合いが大きく異なることに起因しているものと推察される．

図－４ (b)より，力積の分布性状は，最大重錘衝撃力分布とは異なり，3 試験体共に類似していることが分かる．前述の支点反力波形および変位波形が類似した傾向を示すのは，このような力積の性状によるものと推察される．

図－４ (c)より，最大変位は，1 回目載荷時には緩衝ゴムの設置にかかわらず同程度である．しかしながら，2 回目載荷以降は，AN 試験体は徐々に増加傾向にあり，AR 試験体は載荷回数によらず同程度の値を示している．

図－４ (d)より，残留変位は 3 試験体共に 5 mm 未満と小さく，5 回目載荷以降からはほぼ零レベルとなっていることが分かる．

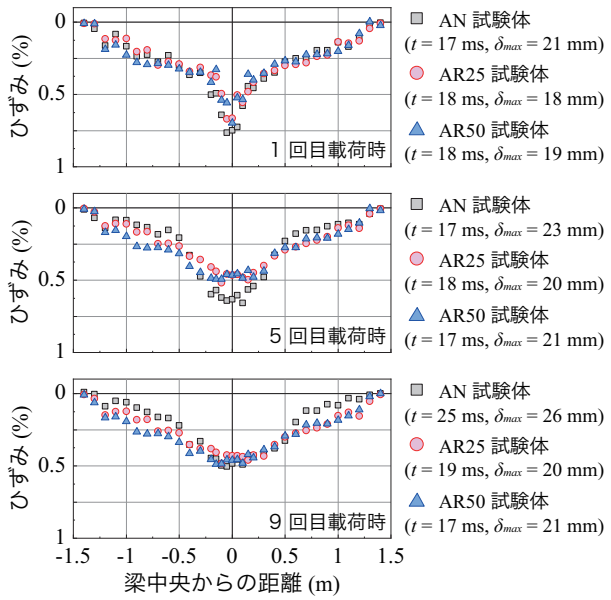
3.3 シートの軸方向ひずみ分布

図－５には，1, 5, 9 回目載荷時における最大変位発生時の AFRP シートの軸方向ひずみ分布を比較して示している．なお，図中の各ひずみ値には，各載荷時の残留ひずみは考慮していない．図より，1 回目載荷時には 3 試験体共に載荷点直下のスパン中央部約 1 m の範囲で 0.25%以上のひずみが発生しており，主鉄筋は降伏に達していることが示唆される．

5 回目載荷時のスパン中央部では，AR 試験体の場合には 0.5% 程度ほぼ一定したひずみ分布を示しており，緩衝ゴムによって荷重が部分分布的に作用していることがうかがわれる．一方，AN 試験体の場合には，中央部で 0.7% 程度まで達し，ほぼ線形に減少している．9 回目載荷時には 3 試験体共にスパン中央部で最大 0.5%程度のひずみを示し，中央部から 0.5 m 以遠では AN 試験体の場合が AR 試験体の場合よりも小さなひずみ分布を示している．これは，AN 試験体の場合には，載荷点近傍断面の損傷が激しいために剛性低下も著しく，載荷点を中心に角折れ的に挙動することによるものと考えられる．これに対して，AR 試験体の場合には，中央部は荷重が部分分布的に作用することにより放物線状に分布しており，中央部から 0.5 m 以遠では 5 回目載荷時と類似の分布性状を示しており，載荷回数の増加に対して劣化が進行していないことが示唆される．

3.4 ひび割れ分布

図－６には，1, 5, 9 回目載荷終了後の試験体側面におけるひび割れ分布を示している．図中，各色のひび割れ線は各載荷後に進展した，あるいは新たに生じたひび割れを表しており，斜線部は圧壊を示している．**図－６** (a)より，AN 試験体の場合には，1 回目載荷時において載荷点近傍に曲げひび割れに加えて多数の斜めひび割れが発生していることが見て取れる．また，上縁からもひび割れが進展していることが確認できる．5 回目載荷時には既存のひび割れの



図－５　最大変位発生時におけるシートのひずみ分布

進展のほか新たなひび割れも発生している．さらに，載荷点近傍の損傷も確認され，9 回目載荷後には上縁かぶりコンクリートが完全に剥落していることが確認できる．

一方，**図－６** (b), (c) より，AR 試験体の場合には斜めひび割れが発生していないことや載荷点近傍の細かい曲げひび割れも少ないことが分かる．また，繰り返し載荷によって曲げひび割れの進展は確認できるものの，載荷点近傍部の損傷は確認できない．さらに，AR50 試験体の場合には，1 回目載荷時に上縁からのひび割れも発生していない．本実験では 10 回目載荷においても載荷点近傍における損傷も確認されないため，実験終了とした．

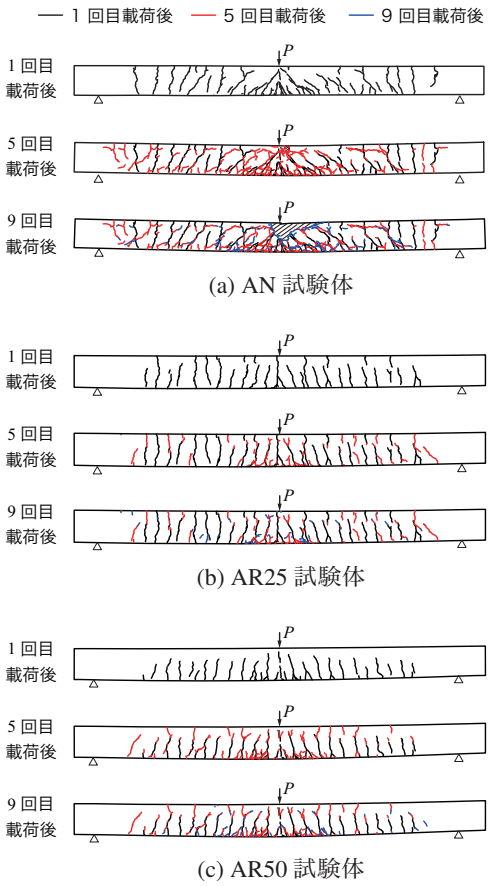
以上より，載荷点部に緩衝ゴムを設置することによって，斜めひび割れや上縁からの曲げひび割れの発生，載荷点部の損傷が効果的に抑制されることが明らかとなった．

4.　まとめ

本研究では，緩衝ゴムを設置した場合におけるシート破断で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に，入力エネルギー一定の繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した．緩衝ゴムは厚さを 25 mm と 50 mm の 2 種類に変化させ，基準試験体として緩衝ゴムを設置しない場合についても実験を行い，耐衝撃挙動について比較検討を行った．本研究の範囲内で得られた結果を整理すると，以下のように示される．

1) 最大重錘衝撃力は，緩衝ゴムを設置することにより 1/3 ～ 1/2 程度に低減される．一方，重錘衝撃力波形から算出される力積は緩衝ゴムの設置にかかわらず同程度であることにより，支点反力，変位は類似の波形性状を示し，最大変位および残留変位は概ね同程度となる．

2) 緩衝ゴムを設置しない場合には，繰り返し載荷によって載荷点部にて圧壊等の損傷が累積し，かぶりコンクリートが剥落して終局状態に至る．一方，緩衝ゴムを設置する場合には，下縁からの曲げひび割れの発生および進展，斜めひび割れや上縁からの曲げひび割れの発生が抑制され，10 回目載荷時においても載荷点部は損傷しないことから，耐衝撃性が著しく向上することが明らかになった．



図－６　実験終了後におけるひび割れ分布の比較

3) 緩衝ゴムの厚さが大きいほど，重錘衝撃力波形の最大応答値が小さく，その発生時刻が遅延するものの，力積，最大変位，残留変位，ひび割れ分布性状に明瞭な違いは見受けられない．

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，室蘭工業大学構造力学研究室の村上駿介君をはじめとする学生諸君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) 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.
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