

緩衝ゴムを設置した 830 g/m² のAFRPシート接着曲げ補強RC梁に関する
繰り返し衝撃荷重載荷実験

Consecutive impact loading test of absorbing rubber setted RC beam strengthened in flexure with AFRP sheet having 830 g/m² mass

(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 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学 学生会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
室蘭工業大学 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

FRPシート接着工法は、コンクリート増し厚工法や鋼板接着工法と共に鉄筋コンクリート(RC)構造物の静的荷重に対する補修・補強工法の1つとして定着しつつある。

一方で、落石防護構造物等の耐衝撃用途RC構造物の場合には、コンクリートの経年劣化や異常気象に伴う落石規模の大型化に伴い、耐衝撃性能の向上が要求される事例も発生している。また、国際的には車両や船舶のRC橋脚への衝突に対する耐衝撃性向上も課題になっている。

このような状況を鑑み、著者等はRC構造物に関するFRPシート接着やロッドの下面埋設補強法を適用した耐衝撃設計法の確立を最終目的に、RC梁を対象に種々の重錘落下衝撃荷重載荷実験を継続して実施している。

その中で、比較入力エネルギーが小さい場合におけるFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に、重錘を直接衝突させて載荷する繰り返し衝撃荷重載荷実験も実施している。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載荷点近傍部におけるコンクリートの圧壊や断面欠損等によって衝撃荷重強度の低下が大きくなることが明らかになっている。従って、シート接着による繰り返し載荷時の補強効果に関する低減度合いを適切に評価するためには、重錘衝突近傍部におけるコンクリートの劣化損傷を抑制した形で実験を実施することが肝要であるものと推察される。

このような観点から、本研究では緩衝ゴムを設置したFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に繰り返し重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し、緩衝ゴム無しで重錘を直接衝突載荷した場合における結果との比較を行い、緩衝ゴムの有効性とシートの補強効果について検討を行うこととした。なお、FRPシートには目付が830g/m²のAFRPシートを用い、梁の下面に接着させている。また、緩衝ゴムには、硬度が65の天然ゴムを用いることとした。

2. 実験概要

表-1には、本実験の実験ケース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を変化させた2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)であり、第三項目は繰り返し載荷の順番である。

表中の実測落下高さH'は実測衝突速度から換算した自

表-1 実験ケースの一覧

試験体名	緩衝ゴム設置の有無	設定重錘落下高さH (m)	実測重錘落下高さH' (m)	実測入力エネルギーE _i (kJ)	補強材剥離の有無
AN-H1-1	無	1	1.01	2.97	無
AN-H1-2			1.04	3.06	無
AN-H1-3			1.04	3.06	無
AN-H1-4			1.04	3.06	無
AR-H1-1	有	1	1.04	3.06	無
AR-H1-2			1.01	2.97	無
AR-H1-3			1.04	3.06	無
AR-H1-4			1.04	3.06	無
AR-H1-5			1.01	3.06	無
AR-H1-6			1.04	3.06	無
AR-H1-7			1.01	2.97	無
AR-H1-8			1.04	3.06	無
AR-H1-9			1.04	3.06	無
AR-H1-10			0.98	2.88	無

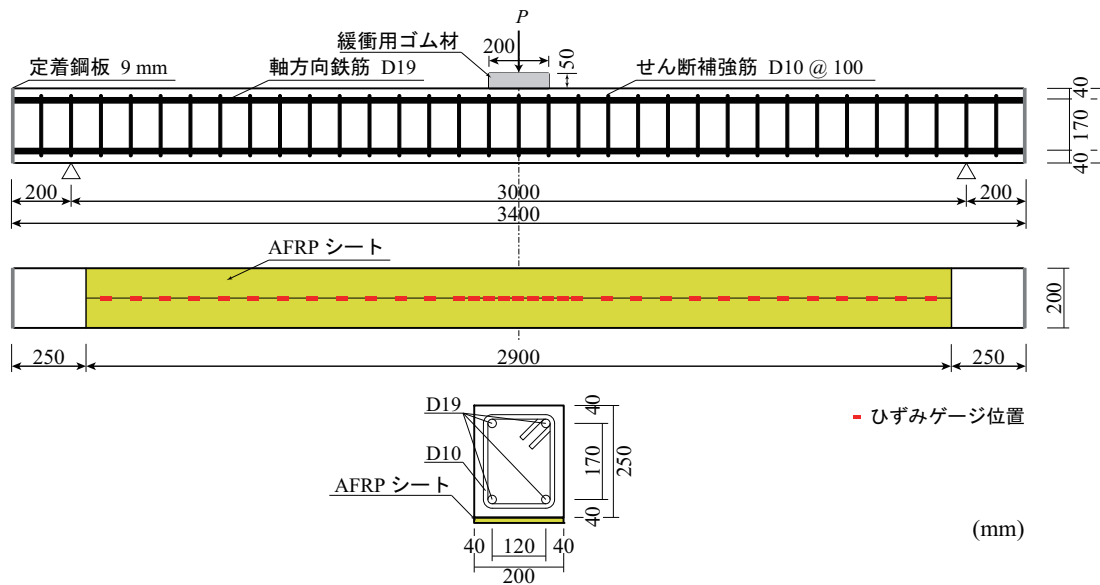
表-2 AFRPシートの静力学的特性値(公称値)

幅B (mm)	目付量 (g/m ²)	弾性係数E _s (GPa)	全引張耐力f _{su} (kN)	破断ひずみε _{su} (%)
200	830	118.0	235.7	1.75

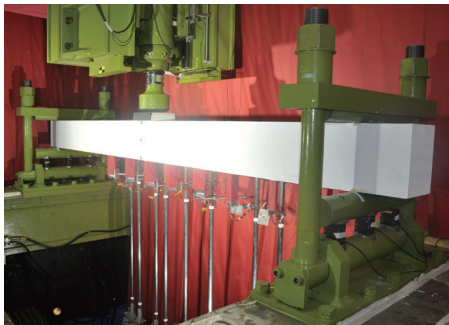
由落下高さである。表からも明らかなように、実測落下高さH'は、設定落下高さHとは必ずしも一致していないことが分かる。

なお、本実験に用いたAN試験体とAR試験体のコンクリートの圧縮強度f_c'は34 MPa, 32 MPa, 主鉄筋の降伏強度f_yは394 MPa, 379 MPa, 計算曲げ耐力P_{usc}は102 kN, 100 kN, 計算せん断耐力は284 kN, 278 kNであり、せん断余裕度は両試験体で等しく2.8である。なお、曲げ耐力は上述のコンクリートの物性値および後述のAFRPシートの物性値を用い、土木学会コンクリート標準示方書に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持仮定の下コンクリートと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3,500μに達した時点とした。計算せん断耐力V_{usc}も同コンクリート標準示方書に準拠して算定している。

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、200×250×3,000 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。



図－１ 試験体の形状寸法，配筋および補強状況



写真－１ 衝撃荷重載荷用実験装置と試験体の設置状況

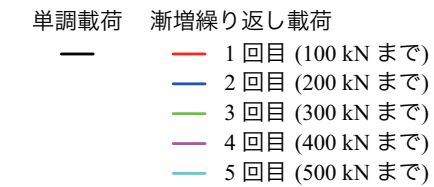
AFRPシートに関しては、目付量が 830 g/m^2 のシートをRC梁下面に1層だけ接着することとした。表－2には、AFRPシートの静力学的な物性値一覧を示している。

また、緩衝ゴムは、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部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。

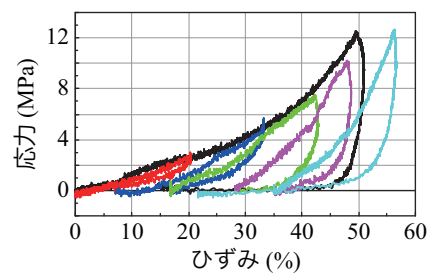
衝撃荷重載荷実験は、質量300 kg、先端直径200 mmの鋼製重錘を所定の高さからリニアウェイレールを介して自由落下させることにより行っている。なお、重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。

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。写真－1には、衝撃荷重載荷用実験装置と試験体及び緩衝ゴムの設置状況を示している。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R （以後、単に支点反力）、スパン中央点変位 D （以後、単に変位）およびシート各点の軸方向ひずみ ε （以後、単にひずみ）である。また、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の高速度カメラ撮影を行っている。



(a) 荷重－圧縮変位関係



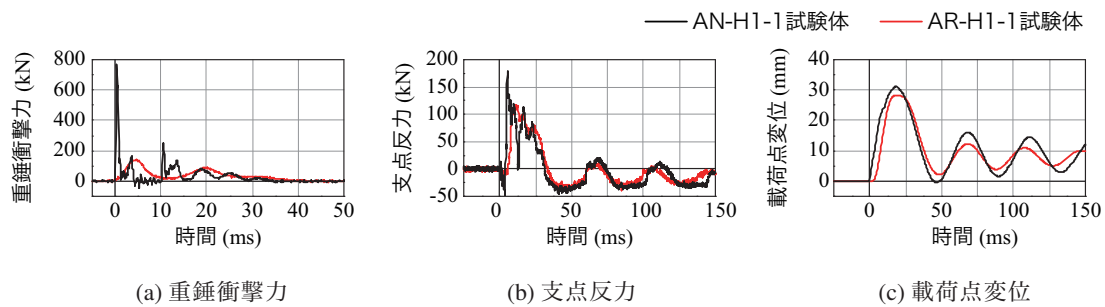
(b) 応力－ひずみ関係

図－２ 緩衝ゴムの静載荷実験結果

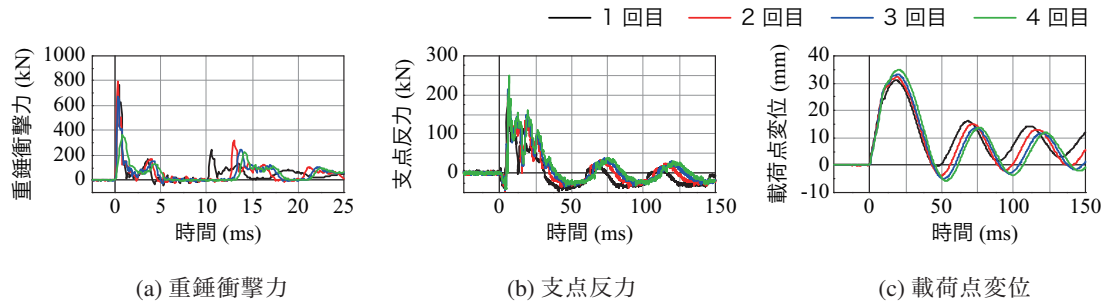
3. 実験結果

3.1 緩衝ゴムの静載荷実験

図－2には、緩衝ゴムに関する静荷重載荷実験結果の荷重－変位、載荷前の緩衝ゴムの載荷面積及び厚さを基準とした公称応力（以後、単に応力）－公称ひずみ（以後、単にひずみ）曲線を示している。荷重は500 kNまで載荷させることとし、100 kN毎に除荷・載荷を繰り返した場



図－3 第1回目載荷時における各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、載荷点変位 D に関する時刻歴応答波形の比較



図－4 AN 試験体の各載荷時における重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、載荷点変位 D に関する時刻歴応答波形の比較

合についても比較して示している。図より、載荷レベルが小さい場合には、載荷と除荷時の荷重－変位あるいは応力－ひずみ曲線は類似しており、エネルギー吸収の小さいことが分かる。一方、荷重レベルが大きい場合には、除荷勾配が大きくなり、エネルギー吸収も増加する傾向にあることが確認できる。

また、単一載荷時の荷重－変位あるいは応力－ひずみ曲線は、繰り返し載荷時の曲線をほぼ包絡していることが明らかになった。

3.2 繰り返し衝撃荷重載荷実験

図－3には、各試験体に関する第1回目載荷時における、各応答波形を比較して示している。図より、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約1msで最大衝撃力が750kN程度の三角形の波形を示しており、その後15ms程度までは最大衝撃力が200kN程度の高周波成分からなる波形が励起している。その後は周期が約5msの減衰振動が示され、約35msで零レベルに至っている。一方、緩衝ゴムを設置した場合には、載荷後緩やかな増加傾向を示し、最大衝撃力は150kN程度で、周期が約15msの波形性状を示し緩やかに零レベルまで減衰していることが分かる。これより、最大衝撃力は、緩衝ゴムを設置したことによって、1/5程度まで低減しており、その発生時間も5ms程度遅延していることが分かる。

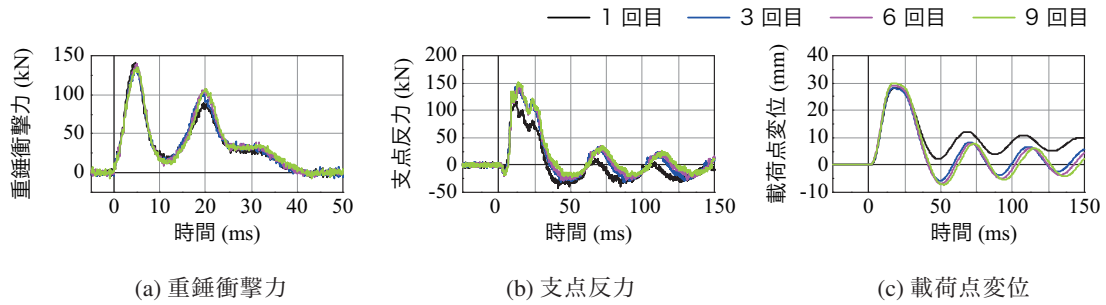
支点反力波形を見ると、AN試験体の場合には高周波成分が励起しているが、緩衝ゴムを設置することにより平滑化されほぼ正弦半波状態に至っていることが分かる。荷重除荷後は、両試験体共にほぼ類似の性状を示している。最大支点反力は、緩衝ゴムを設置することにより、50kN以上低減していることが分かる。

載荷点変位波形を見ると、緩衝ゴムを設置したAR試験

体の場合にはゴムの緩衝効果によって載荷初期から数ms程度遅れて立ち上がっていることが分かる。ただし、最大変位は最大重錘衝撃力や最大支点反力と異なり、3mm程度小さいのみであり、波形性状も緩衝ゴム設置の有無に拘わらず類似していることが分かる。これは、緩衝ゴムの設置によって最大衝撃力が大幅に低下するものの、力積的には両試験体間で類似であることによるものと推察される。

図－4には、AN試験体に関する各載荷時における応答波形を比較して示している。なお、変位波形は各載荷時点における応答変位を示しており、載荷回数毎の残留変位は考慮していない。図より、衝撃力波形を見ると、1回目と2回目載荷時にはほぼ類似の波形性状を示しているものの、第2回目以降は載荷毎に最大衝撃力の著しい低下が確認できる。これより、載荷点部は2回目載荷以降で、著しい損傷を受けていることが窺われる。それに対して、支点反力と載荷点変位波形は、除荷後に周期が延びる傾向にあるが、載荷回数によって著しい変化は確認できない。但し、各載荷毎に残留変位が発生していることより、累積残留変位は増加傾向にあるものと推察される。最大衝撃力がほぼ1/2程度に減少しているのに対して最大変位が類似していることは、載荷点近傍部が著しく損傷したことにより載荷点近傍部の曲げ剛性が著しく低下していることを暗示している。なお、第4回目載荷終了時点では、著しいひび割れが発生しているものの、シートは未だ完全な剥離状態には至っていないことを確認している。しかしながら、載荷点近傍部が著しく損傷し、シートも部分的に剥離していることにより終局と判断し、この時点で実験は終了している。

図－5には、AR試験体に関する各繰り返し載荷時の応答波形を比較して示している。図より、第1回目載荷時における最大支点反力が小さく示されており、また載荷


 図－5 AR 試験体の各載荷時における重錘衝撃力 P ，支点反力 R ，載荷点変位 D に関する時刻歴応答波形の比較

点変位波形においても残留変位が 8 mm 程度に達している。しかしながら、その他の波形性状は載荷回数によって著しい差のないことが分かる。なお、第 2 回目以降の変位波形において、残留変位が数 mm 以下となっているが累積残留変位は第 1 回目の残留変位も考慮されることは、勿論である。また、第 1 回目の残留変位が多少大きいのは、ひび割れの発生が大きく影響しているものと推察される。さらに、第 1 回目以降の残留変位が小さいのは、載荷点の損傷が小さいことによりひび割れの進展も極めて小さいことが推察される。

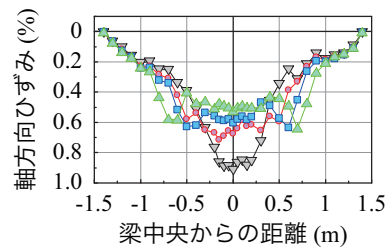
これより、AN 試験体の場合には、4 回の繰り返し載荷によって載荷点近傍部が著しく損傷し重錘衝撃力が大きく低下したのに対して、AR 試験体の場合には 10 回の繰り返し載荷によっても重錘衝撃力波形は類似の分布性状を示しており、載荷点近傍部の損傷の進行は緩衝ゴムの設置によって効果的に抑制されていることが推察される。

実験は第 10 回目載荷まで実施したが、各応答波形に著しい変化が認められないことにより、RC 梁は未だ健全であるがこの時点で実験は終了した。

図－6 には、各試験体に対して各載荷時の最大変位発生時における AFRP シートの軸方向ひずみ分布を比較して示している。図より、AN 試験体のひずみ分布を見ると、第 1 回目載荷時にはスパン中央部で最大 0.9 % 程度のひずみが発生し、中央部鉄筋も降伏しているものの、なめらかなひずみ分布を示していることから、シートは部分剥離に至っていないことが分かる。なお、載荷点部でほぼ均等なひずみ分布を示している。これは、ひび割れの発生等によって等曲げの状態になっていることによるものと推察される。しかしながら、2 回目載荷時からはスパン中央部の約 1 m の領域におけるひずみはほぼ一様な分布性状を示し、載荷回数の増加に対応してひずみ値の減少と共にその領域も拡大傾向にある。これは、載荷点近傍部を中心にひび割れが顕在化してシートが部分的に剥離していることが推察され、載荷回数の増加と共にその領域が徐々に拡大していることを暗示している。

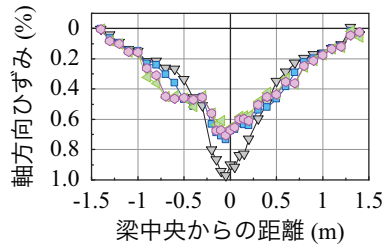
一方、AR 試験体の場合には、1 回目載荷時には載荷点中央部で AN 試験体よりも大きなひずみが発生しており、より集中荷重的に載荷していることが分かる。また、ひずみ分布の勾配が変化していることから鉄筋の降伏も確認できる。その後、繰り返し載荷時には特に右側の領域ではほぼ一様な分布勾配を示していることから、シートの部分剥離もなく、かつ 1 回目載荷後に除荷し再載荷時には加工硬化によって鉄筋は塑性域に達していないこと

▽ 1 回目 ($t = 20.1$ ms, $D_{\max} = 32$ mm)
 ● 2 回目 ($t = 19.6$ ms, $D_{\max} = 33$ mm)
 ■ 3 回目 ($t = 18.4$ ms, $D_{\max} = 34$ mm)
 ▲ 4 回目 ($t = 20.7$ ms, $D_{\max} = 35$ mm)



(a) AN 試験体

▽ 1 回目 ($t = 21.2$ ms, $D_{\max} = 28$ mm)
 ■ 3 回目 ($t = 18.4$ ms, $D_{\max} = 28$ mm)
 ◆ 6 回目 ($t = 16.9$ ms, $D_{\max} = 29$ mm)
 ▲ 9 回目 ($t = 18.1$ ms, $D_{\max} = 30$ mm)



(b) AR 試験体

図－6: 各載荷時の最大変位発生時におけるシートのひずみ分布に関する比較

が推察される。それに対して、左側の領域では第 6 回目載荷時から部分的に一様なひずみ分布を示していることから、局所的にシート剥離が発生していることが推察される。但し、その領域は載荷回数が増加しても拡大傾向にはないことが分かる。これより、AFRP シートの軸方向ひずみ分布の観点からも、緩衝ゴム設置による載荷点部のコンクリートの損傷抑止効果が確認できる。

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)からご提供頂いた。また、室蘭工業大学構造力学研究室の山越壮之助君を始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、感謝する次第である。