

緩衝ゴムを設置した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 梁の衝撃荷重載荷実験

Impact loading test of cushion rubber set RC beams strengthened in flexure with AFRP sheet
statically reaching ultimate state with sheet debonding

(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 正 員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)
室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

連続繊維(FRP)シート接着工法は、強度重量比が大きき現場合わせが容易であることにより、阪神大震災を契機に鉄筋コンクリート(RC)製橋脚に関する耐震補強やRC製床版の補修・補強に多く採用されるようになった¹⁾。また、研究的には1980年代頃から国内外においてFRPシート接着工法の耐力向上効果に関する種々の検討が行われている。一方で、ロックシェッド等の耐衝撃用途RC構造物に関しては、近年の異常気象による集中豪雨や地山の経年変化によって落石規模が大型化し、衝撃力のより一層の緩和あるいは構造物自体の耐衝撃性向上が要求される事例も発生している。

このような状況を鑑み、著者らは、AFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象として荷重点部に緩衝ゴムを設置した場合における重錘落下衝撃荷重載荷実験を試みている²⁾。その結果、最大衝撃力は緩衝ゴムを設置していない場合に比して大略1/5程度に著しく低減されるものの、荷重点変位は最大衝撃力と同程度の低減効果が期待できないことや、緩衝ゴムを設置することによって衝突部の損傷や荷重点近傍における鋭角な斜めひび割れの発生が抑制されること、などを明らかにしている。しかしながら、緩衝ゴムを設置しない場合の単一荷重時にシート破断あるいは剥離に至るような大きい入力エネルギー下における耐衝撃挙動に関しては、十分に検討が行われていない。

このような観点から、本研究では荷重点部に緩衝ゴムを設置した場合におけるFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に、単一荷重時に終局に至る入力エネルギーが大きい重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し、梁の耐衝撃挙動に関する検討を行うこととした。なお、本研究では静的に剥離破壊型³⁾で終局に至るシート補強量が大きい場合を対象に検討を行うこととした。また、緩衝ゴム設置による緩衝効果を明らかにするために、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った。

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、AFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に、緩衝ゴム設置の有無や、重錘の落下高さ(以後、単に落下高さを)を変化させた全7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に付随する数値は重錘の設定落下高さ(m)である。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋およびAFRPシ-

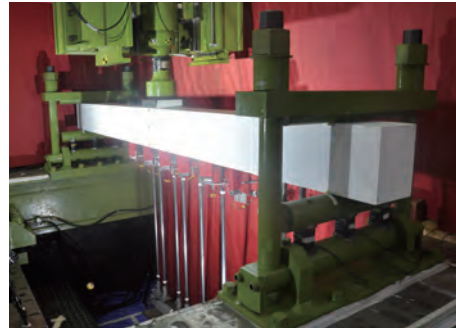


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

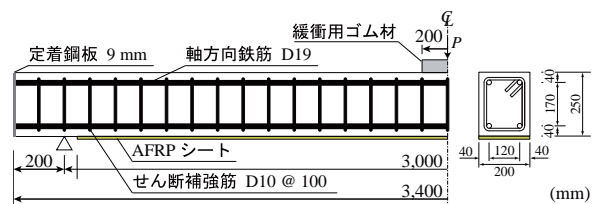


図-1 試験体概要 (AR試験体)

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、過去の研究^{2),3)}と同一とし、200×250×3,000mmとした。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9mm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、100mm間隔で配筋している。いずれの試験体においても、RC梁下面には支点の50mm手前までAFRPシートを接着している。表-2には、本実験で用いたAFRPシートの静力学的な特性値を一覧にして示している。表中の全引張耐力は、シート幅200mmに対する値である。なお、本研究では前述の通り静荷重載荷時に剥離破壊型で終局に至る場合を対象としていることから、計算曲げモーメント比 M_y/M_u が0.65以下となるように、目付量が830g/m²のAFRPシートを1層接着することとした。

2.2 実験方法

写真-1には、衝撃荷重載荷装置と荷重点部に緩衝ゴムを設置したAR試験体の設置状況を示している。実験に用いた重錘は、質量が300kg、円柱部の直径が200mmで、荷重部がさらに直径150mmまで絞られかつ2mmのテーパが設けられている。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。実験は、重錘を所定の高さからリニアウェイレールを

表-1 試験体一覧

試験体名	設定重錘 落下高さ H (m)	設定衝突 速度 V (m/s)	実測重錘 速度 V' (m/s)	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 α
AN-H2.5	2.5	7	6.99	7.3	34	371	402	100	297	3.0
AN-H3	3	7.67	7.72	8.9						
AN-H3.5	3.5	8.29	8.25	10.2						
AR-H2.5	2.5	7	7.09	7.5	32	379	364	100	277	2.8
AR-H3	3	7.67	7.93	9.4						
AR-H3.5	3.5	8.29	8.22	10.1						
AR-H4	4	8.86	8.91	11.9	30	397	388	99	288	2.9

表-2 AFRP シートの力学的物性値(公称値)

幅 B (mm)	目付量 (g/m^2)	弾性係数 E_f (GPa)	全引張耐力 f_{fu} (kN)	破断ひずみ ϵ_{fu} (%)
200	830	118.0	117.6	1.75

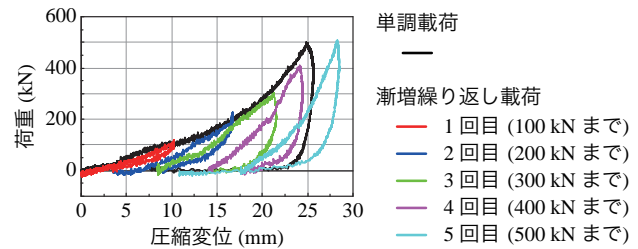


図-2 緩衝ゴムの荷重-圧縮変位関係

介して自由落下させることにより行っている。重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。具体的な落下高さ H は、過去の研究成果^{2),3)}に基づいて、 $H = 2.5 \sim 4.0$ m を設定した。

本実験の測定項目は、重錘からの衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、単に支点反力)、および载荷点変位 D (以後、単に変位)である。なお、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損傷状況記録の他、緩衝ゴムの変位評価や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うこととした。

2.3 緩衝ゴムの静荷重載荷実験結果

図-2 には、本研究で用いた緩衝ゴム単体の静荷重載荷実験より得られた荷重-変位関係を示している。本実験においては、硬度65の天然ゴムを緩衝ゴムとして採用することとした。その形状寸法は、重錘の円柱部直径が200 mm であることより、200 mm 四方とし、厚さを50 mm (形状係数: 1)とした。また、静荷重は、緩衝ゴムよりも十分に広い载荷盤を介して500 kN まで载荷させることとし、単調載荷および100 kN 毎に荷重を漸増させ載荷・除荷を繰り返す交番載荷を実施した。

図より、漸増繰り返し載荷時において、荷重レベルが小さい場合には載荷と除荷時の荷重-変位曲線は類似しており、エネルギー吸収が小さいことが分かる。一方、荷重レベルが大きい場合には、載荷時と共に除荷時も剛性勾配が大きくなる傾向を示し、エネルギー吸収量も大きくなることが確認できる。また、漸増繰り返し載荷時の荷重-変位曲線において、載荷時には単調載荷時の剛性勾配よりも大きくかつ前荷重レベルの除荷時と類似した剛性勾配を示し、単調載荷時の荷重レベルに達すると両方で類似の性状を示している。しかしながら、変位は、荷重レベルが400 kN 程度以降から正方向に若干平行移動したような性状を示している。その推移量は、荷重レベルが500 kN の場合において2.5 mm 程度に達しており、ひずみ換算で5%程度となっていることが分かる。

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図-3 には、緩衝ゴムを設置した AR 試験体と緩衝ゴムを設置しない AN 試験体における重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、変位 D の時刻歴応答波形を落下高さ毎に比較して示している。なお、AR-H3.5 試験体の重錘衝撃力は、計測に不具合が生じたため示していない。

図-3 (a) 図の重錘衝撃力波形を見ると、AN 試験体の場合には、载荷初期に継続時間が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。一方、AR 試験体の場合には、AN 試験体における载荷初期の振幅の大きい三角形の波形成分は出現せず緩やかな低周波成分のみが励起している。図より、緩衝ゴムを設置した場合の最大衝撃力値は設置しない場合の1/5程度に著しく低減していることが分かる。また、波形継続時間に注目すると、シートが剥離あるいは破断に至っていない落下高さ $H = 3$ m までは、緩衝ゴムの設置の有無にかかわらず共に45~50 ms 程度であり、両者に差異のないことが分かる。しかしながら、剥離に至った落下高さ $H = 3.5$ m の AN 試験体の場合における荷重継続時間は、落下高さが低い場合と大差がないのに対して、 $H = 4$ m で破断に至った AR 試験体の場合には60 ms 程度に達しており、大幅に延びていることが分かる。これより、AR-H4 試験体の場合には損傷が進行していることが示唆される。衝撃力波形を用いて力積を評価すると、AN 試験体の場合には落下高さ $H = 2.5, 3, 3.5$ m に対してそれぞれ2.46, 2.62, 2.56 kN·s であるのに対して、AR 試験体の場合には2.59, 2.73, - kN·s であり、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず類似していることから、梁の損傷程度はシートが破断に至るまでは類似であることが推察される。

図-3 (b) 図の支点反力波形を見ると、波形性状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载荷初期の負反力の発生や荷重載荷時における波

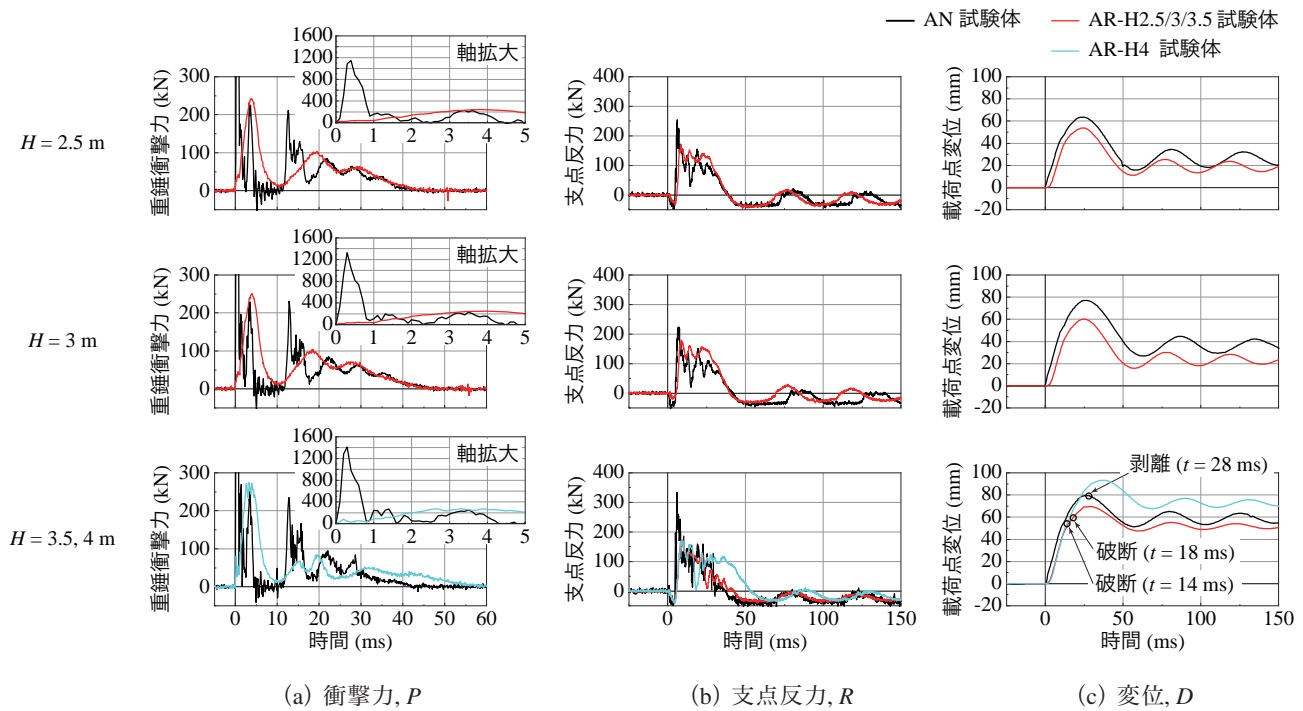


図-3 各試験体の衝撃力 P 、支点反力 R および変位 D に関する時刻歴応答波形の比較

動継続時間も含め、AN試験体およびAR試験体ともに類似した波形性状を示していることが分かる。これは、前述のように力積が類似していることによるものと推察される。

図-3(c)図の変位波形を見ると、緩衝ゴム設置の有無やAFRPシート剥離や破断にかかわらず、荷重時には正弦半波状の波形を示し、荷重除荷後は変位が残留して正弦減衰波形に移行していることが分かる。緩衝ゴム設置の有無による比較を行うと、AR試験体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数ms程度遅れていることや波形の振幅が緩衝ゴムを設置していない場合よりも若干小さいことが分かる。除荷後における波動の周期を見ると、緩衝ゴムを設置していないAN試験体の場合には設置したAR試験体の場合に比較して周期が伸びていることが明確に示されている。また、シート剥離や破断後における波動の周期は緩衝ゴム設置の有無にかかわらず類似であることも確認できる。これは、いずれの梁においても、シート接着による補強効果が失われたことによるものと判断される。後述のように、 $H=3.5\text{ m}$ の場合には、AN試験体がシート剥離 ($t=28\text{ ms}$ 時)、AR試験体がシート破断 ($t=18\text{ ms}$ 時)によって終局に至っている。また、 $H=4\text{ m}$ 時においてもAR試験体はシート破断によって終局に至っている。これらの結果は、緩衝ゴムを設置しない場合において、静的に剥離破壊型で終局に至るFRPシート接着曲げ補強RC梁は、衝撃荷重荷重時にもシート剥離によって終局に至るとする既往の研究結果^{2),3)}と異なっている。

3.2 実験終了後におけるひび割れ分布

図-4には、荷重実験終了後における梁側面のひび割れ分布を比較して示している。

図より、緩衝ゴムを設置していないAN試験体の場合には、荷重点近傍部はいずれも著しく損傷し、鋭角な斜めひび割れも多数発生していることが分かる。また、梁下縁には曲げと共に斜めひび割れが発生しており、梁上縁からも

曲げひび割れが進展していることを確認できる。上縁からの曲げひび割れの発生は、衝撃荷重初期に両端固定梁の状態で波動が支点に向かって伝播することによるものと推察される。AN-H3試験体の場合には、荷重点近傍を除く斜めひび割れ先端部から支点に向かってシートが部分剥離状態であることから、梁はほぼ終局状態に至っている状況であることが確認できる。AN-H3.5試験体の場合には、荷重点直下の下縁かぶり部がブロック化して剥落しており、荷重点近傍部ではせん断補強筋の一部が露出している。また、梁下縁ではシートが完全に剥離したことにより、下端鉄筋位置近傍部でのひび割れはAN-H3試験体よりも少なく示されている。

これに対して、緩衝ゴムを設置したAR試験体の場合には、荷重点部の損傷は角部におけるコンクリート塊の剥落のみであり、緩衝ゴムの設置によって損傷が著しく減少していることが分かる。また、荷重点近傍部には鋭角な斜めひび割れは発生せず、曲げひび割れが卓越して発生しており、梁上縁からの曲げひび割れの発生も減少している。下縁かぶり部には細かな曲げひび割れが発生している。AR-H3試験体の場合には、荷重点直下近傍よりもその周辺の下縁かぶり部では曲げひび割れと共に水平ひび割れも発生したことによって、小さなブロックが多く形成されている。AR-H3.5試験体の場合には、シートが荷重点直下近傍で破断し、AR-H3試験体の場合と同様に梁下縁の小さなブロックはシートと共に剥落していることが確認できる。AR-H4試験体の場合には、シートの剥離範囲がAR-H3.5試験体よりも小さい状態で、シート破断によって終局に至っている。これは、AR-3.5試験体よりも損傷が進んでいない早期にシート破断に至ったことが要因の一つであるものと推察される。

図-3(c)図の変位波形図からも明らかのように、AN-H3.5試験体の場合にはシート剥離によって終局に至っているが、

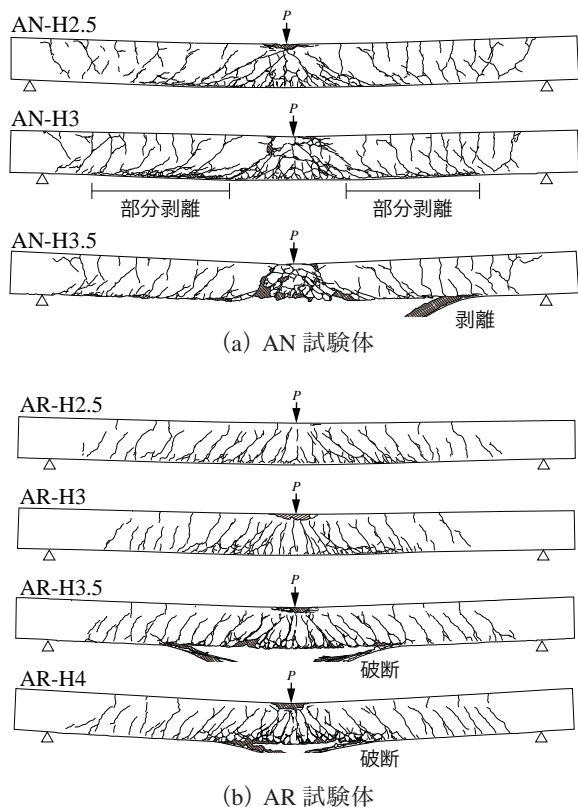


図-4 実験終了後におけるひび割れ分布の比較

AR-H3.5 および H4 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。一般に、曲げとせん断が作用する荷重点近傍でのシート剥離は、主鉄筋降伏領域において容易に鋭角な斜めひび割れが発生し、その先端部がシートを押し下げるピーリング作用によって発生することが明らかになっている。

これに対して、シート破断は、主鉄筋降伏領域が狭い場合において斜めひび割れの発生が抑制され曲げひび割れが卓越することにより、対応して荷重点近傍の梁の曲率も増加し縁ひずみがシートの破断ひずみを超過することによって発生することが明らかになっている。このことは、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発生する領域ではピーリング作用によるシート剥離の進展はなく、シート破断が生じることを暗示している。

3.3 各試験体の破壊形式

表-3 には、本研究で対象とした各試験体に関して、衝撃荷重載荷実験終了後の破壊形式を一覧にして示している。また、断面分割法に基づいて算出した計算曲げモーメント比 M_u/M_y およびその値によって決定される静荷重載荷時の破壊形式についても併せて示している。

表より、いずれの試験体に関しても計算曲げモーメント比が 0.65 以下を示しており、静荷重載荷時の破壊形式は剥離破壊型として示されている。一方で、既往の研究結果³⁾に基づくと、静荷重載荷時に剥離破壊型で終局に至る梁の場合には、衝撃荷重を直接作用させる場合においても同様にシート剥離で終局に至ることが明らかとなっている。しかしながら、本研究のように荷重点部に緩衝ゴムを設置する場合には、斜めひび割れが抑制され曲げひび割れが卓越して発生することにより、入力エネルギーが大きく荷

表-3 破壊形式の一覧

試験体名	計算結果		衝撃荷重 載荷実験 結果
	曲げモーメント比 M_u/M_y	静荷重 載荷時	
AN-H2.5	0.59	剥離破壊型	-
AN-H3			部分剥離
AN-H3.5			剥離
AR-H2.5	0.62	剥離破壊型	-
AR-H3			-
AR-H3.5			破断
AR-H4			破断

点部の曲率が大きくなる場合には、シート剥離は発生せずシート破断によって終局に至ることが明らかになった。

4. まとめ

- 1) 緩衝ゴムを設置する場合には、設置しない場合における荷重初期の継続時間が短く振幅の大きい衝撃力波形は時間的に大幅に緩和され、振幅も 1/5 程度に低減される。また、重錘衝突による荷重点部の損傷は大きく低減し、荷重点に向かう鋭角な斜めひび割れは発生せず、曲げひび割れが卓越して発生する。
- 2) その結果、緩衝ゴムを設置することによって、入力エネルギーが大きい場合にはピーリングによるシート剥離は発生せず、梁は荷重点部の下縁曲げひずみが増加しシート破断によって終局に至る。従って、静荷重載荷時に剥離破壊型で終局に至る場合において、衝撃荷重載荷時に荷重点部に緩衝ゴムを設置しない場合には静荷重載荷時と同様にシート剥離によって終局に至るが、緩衝ゴムを設置することによってシート破断によって終局に至ることが明らかになった。

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、本論文を取り纏めるに当たり、元三井住友建設技術研究所の三上 浩博士にご指導を頂いた。さらに、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学生諸君に多大なるご支援を頂いた。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

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) 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.
- 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.