

論文 漸増繰り返し衝撃荷重を受ける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梁の耐衝撃挙動

永井 泰圭^{*1}・瓦井 智貴^{*2}・小室 雅人^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本論文では、荷重点部の局所的な損傷を抑制するために緩衝ゴムを設置したアラミド繊維製FRP(AFRP)シートを用いて下面接着曲げ補強を施したRC梁を対象に、漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施した。ここでは、重錘を直撃させた場合にシート剥離で終局に至る梁を対象に検討を行った。その結果、1) 緩衝ゴムを設置することによって最大衝撃力を大幅に低減可能であり、衝撃荷重が分散化し、斜めひび割れ発生の傾向が抑制されること、2) 一方で、力積は緩衝ゴムの設置の有無によって大きな差異がないこと、3) それによって漸増繰り返し荷重時には緩衝ゴム設置の有無によらずシート剥離で終局に至ること、などが明らかとなった。

キーワード: RC梁, AFRPシート, 漸増繰り返し衝撃荷重, 緩衝ゴム

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。このような状況の下、著者らは構造物の耐衝撃性向上法の1つとして軽量で高強度、耐食性・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¹⁾³⁾。

その結果、1) FRPシート下面接着曲げ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、2) FRPシートの目付量が比較的小さい場合には、主鉄筋降伏領域が相対的に小さく、角折れの性状を示すことによって荷重点直下のFRPシートに過大なひずみが発生しシート破断に至ること、3) 一方で、目付量が比較的大きい場合には、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、4) 終局入力エネルギーに対して1/6程度の比較的小さい入力エネルギーを設定し、終局に至るまで同一入力エネルギーで複数回重錘を衝突させる場合には、シート剥離や破断が発生せず荷重点部の圧壊によって終局に至ること、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。

ここで、重錘衝突による荷重点部の圧壊現象を抑制する形で実験を実施する場合には、FRPシート補強RC梁の耐衝撃性が更に向上することが予想され、シートの補強効果と入力エネルギーとの関係などをより明確化することが可能になるもの推察される。

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、衝突体が大きい場合には敷砂あるいは三層緩衝構造を設置することが考えられるものの、衝突体が小さい場合には、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設置することが一つの方法として考えられる。また、ゴム材料の動的な緩衝性能に関しては、島ノ江ら⁴⁾、難波ら⁵⁾、結城ら⁶⁾などの実験的研究が挙げられるものの、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のが現状である。

このような観点から、本研究では荷重点部の局所的な損傷を抑制するために、緩衝ゴムを設置した場合におけるAFRPシート下面接着曲げ補強RC梁に関する耐衝撃性能の検討を目的として、重錘落下衝撃荷重実験を実施した。ここでは、終局時の入力エネルギーやシートの破壊性状を検討するために、重錘落下高さを徐々に高くして終局に至るまで繰り返し荷重する漸増繰り返し荷重実験を行うこととし、緩衝ゴムを設置していない場合²⁾との比較検討も行った。なお、本研究では既往の研究¹⁾を

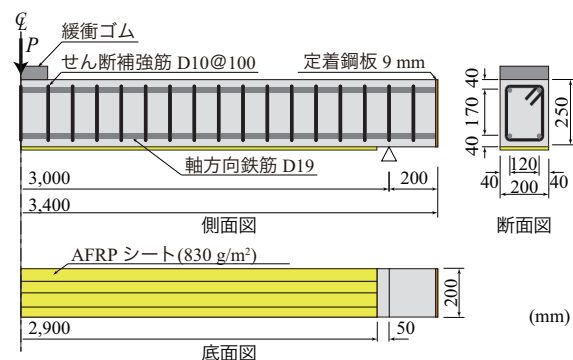


図-1 試験体の形状寸法と配筋

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)
 *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 助教 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 教授 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)

表-1 試験体一覧

試験体名	実験ケース名	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 α	終局時のシートの破壊性状						
AN-H1	AN-H1-1	1.00	1.01	3.0	33.7	371.0	401.9	100.0	298.8	3.0	-						
	AN-H1-2	2.00	1.91	5.6							-						
	AN-H1-2.5	2.50	2.49	7.3							剥離						
AN-H2	AN-H2-2	2.00	1.99	5.8							-						
	AN-H2-2.5	2.50	2.49	7.3							剥離						
AN-H2.5	AN-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.3							-						
	AN-H2.5-3	3.00	3.04	8.9							剥離						
AN-H3	AN-H3-3	3.00	3.04	8.9							剥離						
AR-H1	AR-H1-1	1.00	1.04	3.1							32.4	379.4	363.5	99.5	277.6	2.8	-
	AR-H1-2	2.00	1.99	5.8													-
	AR-H1-2.5	2.50	2.61	7.7													剥離
AR-H2	AR-H2-2	2.00	2.08	6.1													-
	AR-H2-2.5	2.50	2.61	7.7	剥離												
AR-H2.5	AR-H2.5-2.5	2.50	2.57	7.5	-												
	AR-H2.5-3	3.00	3.04	8.9	剥離												
AR-H3	AR-H3-3	3.00	3.21	9.4	-												
	AR-H3-3.5	3.50	3.65	10.7	剥離												

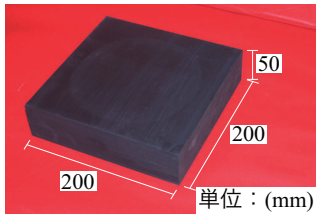


写真-1 緩衝ゴムの形状寸法

参考に重錘を一度だけ直接载荷した場合にシート剥離で終局に至る目付量に着目して検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、試験体の形状寸法と配筋、補強状況および緩衝ゴムの設置位置を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法(梁幅×梁高×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間隔で配筋した。

AFRPシートの接着は、梁底面を上向きにした状態で補強範囲に深さ1 mm程度の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した後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。なお、養生期間は1週間程度である。

写真-1には、本研究で用いた緩衝ゴムの形状寸法を示している。载荷点部に設置した緩衝ゴムに関しては、通常緩衝用として用いられる硬度65の天然ゴムを採用し、その形状寸法(幅×長さ×高さ)は、梁幅および重錘先端直径を考慮して200×200×50 mmとした。

表-1には、本研究で対象とした試験体の一覧を示している。本研究では、FRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に、落下高さ H を $H=1, 2, 2.5, 3$ mを基本として、漸

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} (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

増繰り返し衝撃荷重実験を実施しており、いずれも緩衝ゴムの有無を変化させた計8体の試験体について検討を行った。ここでは、終局時のシート破壊性状に着目し、シートが剥離に至るまで衝撃荷重を1度あるいは数度载荷している。

表中の試験体名のうち、第1項目は緩衝ゴム設置の有無(AN:緩衝ゴム無し²⁾, AR:緩衝ゴム有り)を、第2項目の H に付随する数値は1回目载荷時の設定重錘落下高さ(m)を、第3項目は1回目载荷を含めた繰り返し载荷時の設定重錘落下高さ(m)を示している。また、実測重錘落下高さ H' は実測衝突速度から換算した自由落下高さであり、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、軸方向鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y, f_{sy} は別途実施した材料試験から得られた値である。なお、表-2には本研究で用いたAFRPシートの力学的物性値(公称値)を示している。

表-1に示されている計算曲げ耐力 P_{usc} は、表-2に示す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⁷⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、コンクリートとAFRPシート間を完全付着として平面保持を仮定した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 μ 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⁷⁾に準拠して算定している。

2.2 実験方法

写真-2には、実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃荷重実験は、重錘の片当たり防止を目的に図-3に示す通り円柱部直径が200 mm、载荷部直径が

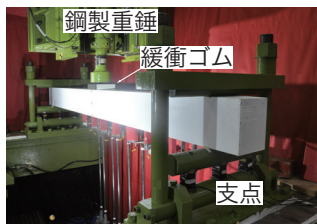


写真-2 試験体の設置状況

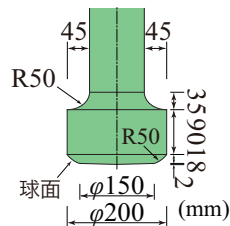


図-3 重錘先端形状

150 mm であつ高さが2 mm の球形状をした質量 300 kg の鋼製重錘を用い、終局に至るまで落下高さを増加させて繰り返し重錘を落下させる漸増繰り返し載荷を行った。載荷位置はスパン中央部に限定し、落下高さは前述のように、1, 2, 2.5, 3 m に設定した。なお、AR 試験体の場合には載荷点部に緩衝ゴムを設置しているものの、繰り返し載荷による緩衝ゴムの損傷劣化が梁の耐衝撃挙動に与える影響を排除するために、載荷毎に新品の緩衝ゴムを設置することとした。なお、緩衝ゴムは、衝撃荷重載荷におけるゴムの跳ね上がりを防止するために、緩衝ゴム側面と梁上面を粘着テープでL字型に接着している。また、両支点下端部は回転を許容するピン支持となっており、試験体は矩形状鋼製治具を用いナットで締め付けることにより、浮き上がりを防止している。

衝撃荷重載荷実験における測定項目は、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)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、変位はレーザー式非接触型変位計を用いて計測した。実験終了後には、梁側面のひび割れ分布を記録している。

2.3 緩衝ゴムの材料特性

図-4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。試験は写真-1に示す緩衝ゴムを対象に、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-4に示す荷重-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程度変位し、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、変位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の荷重範囲では、残留変位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。

3. 衝撃荷重載荷実験結果および考察

3.1 各種時刻歴応答波形

図-5には、AN/AR-H1試験体に関する漸増繰り返し衝

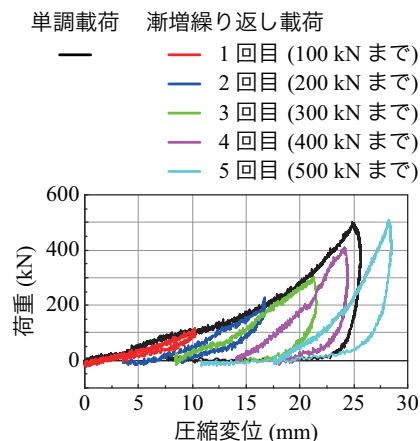


図-4 緩衝ゴムの荷重-変位関係

撃荷重載荷実験から得られた重錘衝撃力、支点反力、変位の各時刻歴応答波形を示している。横軸は重錘が試験体に衝突した時刻を零とした。また、(c)図においてAN試験体3回目載荷時には一部データの欠測があった。これは、実験時に下縁かぶりの剥離剥落によってレーザー光線が遮断されたことによるものである。なお、波形は実験毎に初期化しており、繰り返し載荷による累積値は考慮していない。いずれの試験体に関しても3回目載荷の $H=2.5$ m落下においてシート剥離によって終局に至っている。

まず、図-5(a)に示す重錘衝撃力波形に着目すると、1回目載荷時において、緩衝ゴムを設置していないAN試験体の場合には、重錘がRC梁に衝突後1 ms程度で最大約850 kNを示す第一波が励起していることが分かる。その後、最大値が200 kN程度で継続時間が2 ms程度の第2波が後続し、10 ms程度で再度重錘が衝突し衝撃力が励起していることが確認できる。一方で、緩衝ゴムを設置したAR試験体の場合には、最大150 kN程度で継続時間が10 ms程度の正弦半波の波形が確認でき、緩衝ゴムを設置していない場合と比較すると、その波形性状は大きく異なっていることが分かる。これは、緩衝ゴムを設置したことによって、衝撃荷重の低減・分散化が図られたことによるものと推察される。最大衝撃力に関しては、緩衝ゴムを設置することで1/6程度まで低減していることも読み取れる。2回目載荷時の $H=2.0$ m落下に着目すると、AN/AR試験体の最大重錘衝撃力はそれぞれ1,100, 200 kN程度となっており、1回目載荷時と同様に緩衝ゴムを設置することで最大衝撃力を1/6程度まで低減していることが分かる。3回目載荷時の $H=2.5$ m落下に着目すると、AN試験体の場合には後述のひび割れ分布からも明らかなように、載荷点部の圧壊により1,2回目載荷時と比較して重錘衝撃力の最大値が減少し、継続時間が延びる傾向が見て取れる。一方で、AR試験体の場合には、緩衝ゴムを設置したことで載荷面部の損傷が大きく減少したことに

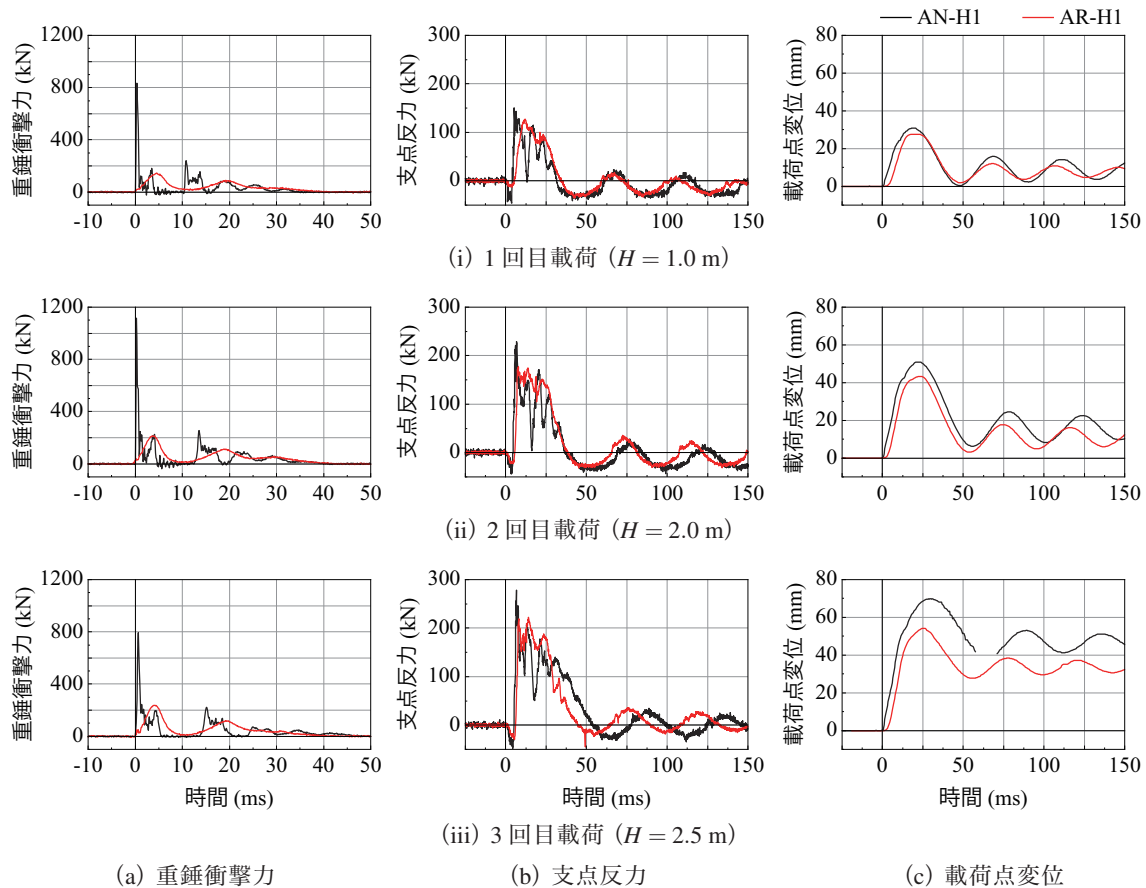


図-5 AN/AR-H1 試験体に関する各種時刻歴応答波形

よって、1, 2 回目荷重時とほぼ同様な波形を示している。

次に、図-5 (b) に示す支点反力波形に着目すると、1 回目荷重時において、AN 試験体の場合には、重錘衝突直後に負値を示した後、継続時間が 30 ms 程度で最大約 150 kN の値を示す、高周波成分が合成された正弦半波の波形性状を示している。また、40 ms 以降には減衰自由振動状態に移行していることも分かる。緩衝ゴムを設置した場合には、設置していない場合の高周波成分を取り除いた波形性状を示していることが見て取れる。また、重錘衝撃力波形と対応して、最大値に到達する時刻が AN 試験体の場合よりも若干遅くなっていることが確認できる。

2 回目荷重時においても、1 回目荷重時と概ね同様な傾向が確認できるものの、3 回目荷重時には繰り返し荷重によって荷重点近傍が損傷したことで、いずれの試験体に関しても、1 回目荷重時と比較して主波動の継続時間が 15~30 ms 程度伸びていることが分かる。なお、AN 試験体の場合が継続時間が長く示されていることより、緩衝ゴムを設置していないことによって AR 試験体の場合よりも荷重点近傍部の損傷度合の大きいことが推察される。

最後に、図-5 (c) に示す変位波形に着目すると、1 回目荷重時において、緩衝ゴム設置の有無に関わらず、20 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。最大変位に着目すると、緩衝ゴ

ムを設置していない場合には約 30 mm、設置した場合には約 28 mm を示し、ゴムの設置によって最大衝撃力が 85 % 程度まで減少したのに対して、最大変位は 7 % 程度の減少に留まっている。これは、後述するように、衝撃力波形を用いて評価した力積がいずれのケースにおいても概ね等しいことに起因するものと推察される。なお、緩衝ゴムを設置したことで最大変位が小さく示された要因としては、図-4 に示す通り緩衝ゴムが 250 kN 程度の荷重を受けた場合に多少なりともエネルギーを吸収することに加えて、緩衝ゴムが衝撃荷重を等分布荷重のような形で緩和・分散することで荷重点部の局所的な損傷が抑制されたことが想定される。2, 3 回目荷重時に着目すると、繰り返し衝撃荷重荷重による RC 梁の損傷が累積することにより、緩衝ゴムの有無によらず最大変位および残留変位が増加していることが確認できる。なお、3 回目荷重時の残留変位は AN/AR 試験体においてそれぞれ約 47/34 mm であり、いずれもシート剥離によって終局に至った。

3.2 衝撃荷重荷重実験終了後におけるひび割れ分布

図-6 には、図-5 で示した全ケースに関する衝撃荷重荷重実験終了後の梁側面のひび割れ分布を比較して示している。なお、漸増繰り返し荷重によるひび割れの進展が分かるように、第 1 回目荷重による損傷を黒線、2 回目荷重時による損傷を赤線、3 回目荷重時による損傷を

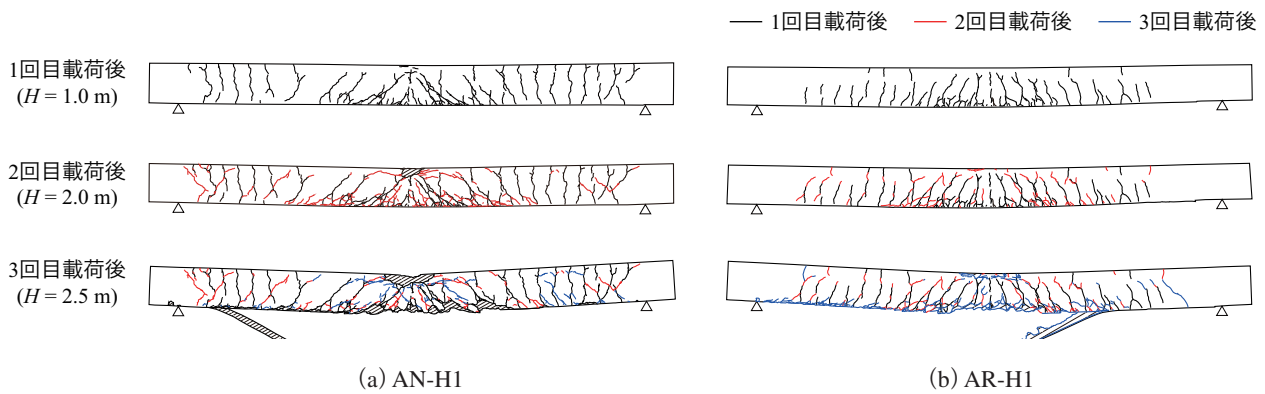


図-6 AN/AR-H1 試験体に関する衝撃荷重実験終了後のひび割れ分布

青線で示している。

図-6より、AN 試験体に着目すると、荷回数によらず、スパン全長に渡って下縁のみならず上縁からもひび割れが進展し、かつ荷点近傍下縁部には鋭角な斜めひび割れが発生している。また、荷回数の増加に対応してひび割れの進展およびひび割れ本数の増加が確認できる。なお、下縁からのひび割れは主曲げの作用によって発生することはもちろんではあるが、上縁からのひび割れの進展は、衝撃初期に曲げ波が見かけ上両端固定梁のような状態で支点側に伝播することにより発生したものと推察される。3回目荷時には、鋭角な斜めひび割れの発生に伴うピーリング作用によってシート剥離に至っていることが見て取れる。

一方で、AR 試験体に着目すると、緩衝ゴムの設置によって衝撃荷重が緩和・分散されたことによって、AN 試験体と比較して荷回数によらず斜めひび割れや梁上縁部からのひび割れの発生が減少する傾向が確認できる。上縁から発生するひび割れの減少に関しては、図-5(a)に示す衝撃力波形や文献(8)からも明らかのように、緩衝ゴムの緩衝効果によって衝突初期数msで最大値を示す第1波の発生が抑制され、前述の曲げ波が両端固定梁のような状態で支点に向かって伝播する傾向が顕在化しなかったためと推察される。また、荷点近傍部に着目すると、圧壊の傾向も小さくゴムの緩衝効果が発揮されていることがうかがえる。しかしながら、3回目荷時には、AN 試験体と同様に繰り返し荷によって徐々に損傷が累積したことで、シート剥離に至っている。なお、AN 試験体の場合と比較すると、AR 試験体の場合には緩衝ゴムの効果によって曲げひび割れが卓越するとともに、斜めひび割れの発生角度は大きいことより、シート剥離を発生させるピーリング作用は小さいものと考えられる。

3.3 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図-7には、本研究で実施した全ケースを対象に、最大衝撃力、力積、累積値を考慮した絶対最大変位および累積残留変位について、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。各ケースにおける実測入力エネルギーに関しては表-1に示す通りである。また、点線がAN 試験体、実線がAR 試験体を表し、白抜きのマーカーはシート剥離に至ったことを示している。力積に関しては、重錘衝撃力波形(図-5(a)参照)の0~50msに着目して算出しており、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。なお、絶対最大変位および累積残留変位図に関しては、前述の断面分割法によって算出した計算降伏変位($\delta_y = 10\text{ mm}$)および計算終局変位($\delta_u = 32\text{ mm}$)を合わせて示している。

図-7(a)より、最大重錘衝撃力の分布性状を見ると、荷回数や落下高さにかかわらず、緩衝ゴムを設置することで最大衝撃力を大幅に低減可能であることが分かる。またAR 試験体に着目すると、いずれのケースにおいても、その値は同程度の値を示していることが分かる。一方、AN 試験体の場合においてAN-H2/H2.5 試験体のような1回目荷時に荷荷面の損傷が大きい場合には、2回目荷時の最大衝撃力は低下することが分かる。これは、漸増繰り返し荷によって荷点近傍部における損傷が増大化することが要因であるものと推察される。また、これは、緩衝ゴムの設置の有無によって荷荷面の損傷度合いが大きく異なることを示唆している。

図-7(b)より、力積の分布性状に着目すると、図-7(a)の最大衝撃力分布とは大きく異なり、ゴム設置の有無による影響は小さいことが確認できる。また、図-7(c)の絶対最大変位分布からも明らかのように、緩衝ゴムの梁全体の応答変位への影響が比較的小さいことを暗示している。なお、力積に関する緩衝ゴムの設置の有無による影響を詳細に確認すると、いずれも緩衝ゴムを設置しているAR 試験体の方が若干大きく示されていることが分かる。

図-7(c)より、絶対最大変位の分布性状を見ると、AN/AR 試験体によってそれらの増加勾配は異なるものの、いずれもほぼ線形に分布していることがわかる。また、累積

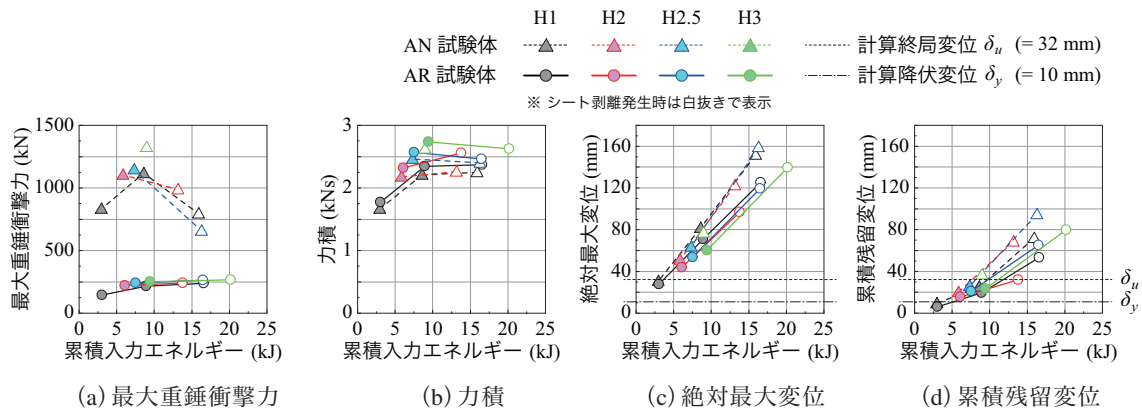


図-7 累積入力エネルギーおよび各種応答値の関係

入力エネルギーが 10 kJ 以上の場合には、いずれの試験体もシート剥離で終局に至っていることが確認できる。

図-7 (d)より、累積残留変位の分布性状を見ると、図-7 (c)の絶対最大変位分布と類似の傾向を示していることが分かる。ここで、断面分割法によって算出した計算降伏変位 δ_y および計算終局変位 δ_u に着目すると、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず、終局であるシート剥離発生時には絶対最大変位および累積残留変位ともに計算終局変位 δ_u 以上であることが確認できる。すなわち、静的に算出した計算終局変位を用いることによって、衝撃荷重載荷時におけるシート剥離発生時の変位を安全側で評価可能であることが推察される。

4. まとめ

本研究では、重錘衝突による局所的な損傷の抑制を目的に載荷点部に硬度 65 の天然ゴムを設置した FRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁を対象に漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した。ここでは、既往の研究結果¹⁾に基づき、重錘を直接載荷した場合にシート剥離によって終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に、その耐衝撃挙動について検討を行った。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) 緩衝ゴムを設置することによって最大衝撃力を大幅に低減可能であり、衝撃荷重が分散化し、斜めひび割れの発生が抑制される。
- 2) しかしながら、力積は緩衝ゴムの設置の有無によって大きな差異がなく、応答変位は大きく変化しない。
- 3) それによって、漸増繰り返し載荷時には、緩衝ゴム設置の有無にかかわらず、いずれもシート剥離によって終局に至る。
- 4) また、静的に算出した計算終局変位を用いることによって、衝撃荷重載荷時におけるシート剥離発生時の変位を安全側で評価できる可能性がある。

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、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岸徳光, 小室雅人, 瓦井智貴, 三上浩: 繰り返し衝撃荷重載荷時における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 964-974, 2019.
- 3) N. Kishi, M. Komuro, T. Kawarai, and H. Mikami: Low-velocity impact load testing of RC beams strengthened in flexure with bonded FRP sheets, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.24, pp.103-113, 2020.
- 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) 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, Vol. 54A, pp. 23-31, 2008.
- 6) 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, Vol. 61A, pp. 313-321, 2015.
- 7) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.
- 8) 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 梁の重錘落下実験, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 804-815, 2021.