

論文 緩衝ゴムを設置したシート破断で終局に至るAFRP シート下面接着曲げ補強RC 梁の漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験

瓦井 智貴^{*1}・小室 雅人^{*2}・岸 徳光^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：本論文では、載荷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シート破断で終局に至るアラミド繊維製FRP (AFRP) 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。その結果、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ものの、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、緩衝ゴムを設置することで衝撃荷重が分散化し、せん断変形の傾向が抑制されること、緩衝ゴムを設置した場合にもシート破断によって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, 繰り返し衝撃荷重載荷, 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。このような背景を受け、著者らは構造物の耐衝撃性向上法の1つとして耐食性に優れ軽量で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) シート補強によって 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、3) 一方で、目付量が小さい場合には、重錘衝突部近傍の圧壊が卓越し、角折れの性状を示すことによって過大なひずみが発生しシート破断に至ること、などが明らかになっている。しかしながら、未だ FRP シートを用了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、終局時にシート破断が発生する比較的目標付量が小さい場合のシート補強 RC 梁に着目すると、重錘衝突による載荷点部の圧縮現象を抑制する形で実験を実施する場合には、耐衝撃性がさらに向上するとともに、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と推察される。

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、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用いることが一つの方法として考えられる。ゴムの緩衝性能に関する既往の研究としては、島ノ江⁴⁾、難波⁵⁾、結城⁶⁾などの実験的な検討が上げられる。しかしなが

ら、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。

このような観点から、本研究では載荷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、重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。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、重錘の落下高さを終局に至るまで徐々に高くして繰り返し載荷する漸増繰り返し載荷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、対象とするシート補強試験体は、単一載荷時にシート破断で終局に至る場合とした。

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 ×

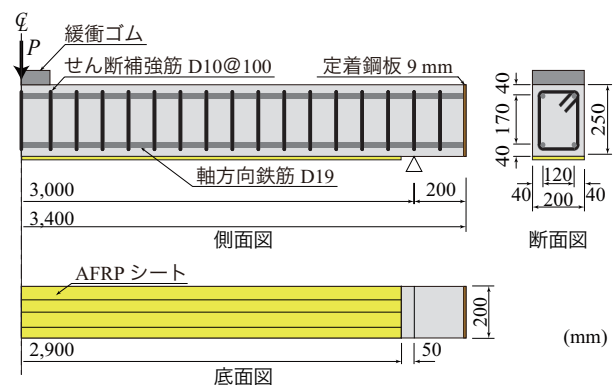


図-1 試験体の形状寸法と配筋

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 工学専攻 修(工) (学生会員)

*2 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

*4 三井住友建設(株) R&D センター 上席研究員 博(工) (フェロー会員)

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	81.0	298.8	3.69	-
	AN-H1-2	2.00	1.91	5.6							破断
AN-H2	AN-H2-2	2.00	1.99	5.8							-
	AN-H2-2.5	2.50	2.49	7.3							破断
AN-H2.5	AN-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.3							-
	AN-H2.5-3	3.00	3.04	8.9							破断(縦割れ)
AN-H3	AN-H3-3	3.00	2.89	8.5							破断
AR-H1	AR-H1-1	1.00	1.04	3.1	32.4	379.4	363.5	81.1	277.6	3.42	-
	AR-H1-2	2.00	1.99	5.8							-
	AR-H1-2.5	2.50	2.49	7.3							破断
AR-H2	AR-H2-2	2.00	1.99	5.8							-
	AR-H2-2.5	2.50	2.61	7.7							破断
AR-H2.5	AR-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.3							-
	AR-H2.5-3	3.00	3.04	8.9							破断
AR-H3	AR-H3-3	3.00	3.04	8.9							-
	AR-H3-3.5	3.50	3.39	10.0							破断

表－２ AFRP シートの力学的物性値(公称値)

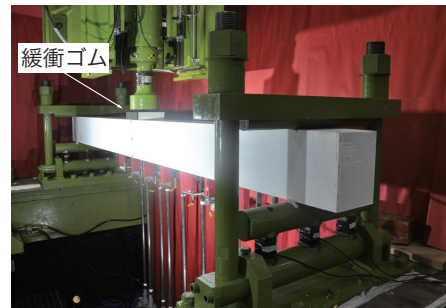
目付量 (g/m^2)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 f_{au} (GPa)	弾性 係数 E_a (GPa)	破断 ひずみ ϵ_{au} (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

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。

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。

載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、シート補強試験体を対象に、落下高さ H を $H = 1, 2, 2.5, 3$ m を基本として、漸増繰り返し衝撃荷重載荷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、終局時のシートの破壊性状に着目し、シートが破断に至るまで衝撃荷重を数度載荷した。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 回目載荷時の設定重錘落下高さ(m)を、第 3 項目は 1 回目載荷を含めた繰り返し載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



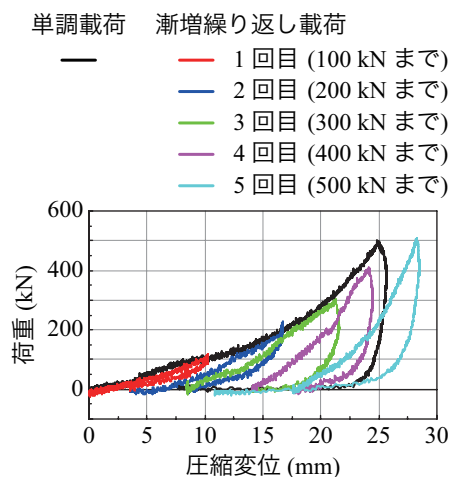
写真－１ 実験装置と試験体の設置状況

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 シートの力学的特性値(公称値)を示している。

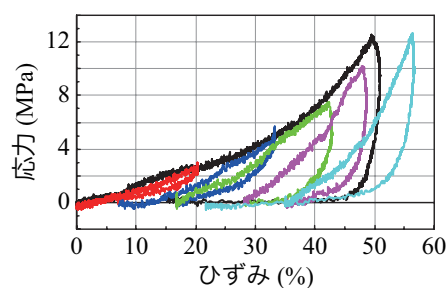
表－１に示されている計算曲げ耐力 P_{usc} は、表－２に示す AFRP シートの物性値を用い、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾に準拠して各材料の応力－ひずみ関係を設定し、コンクリートと AFRP シート間を完全付着として平面保持を仮定した断面分割法により算定した。なお、計算時の梁の終局状態は、上縁コンクリートの圧縮ひずみが $3,500 \mu$ に達した時点とした。計算せん断耐力 V_{usc} は同コンクリート標準示方書⁷⁾に準拠して算定している。

2.2 実験方法

写真－１には、衝撃荷重載荷時における実験装置と試験体の設置状況を示している。衝撃荷重載荷実験は、終局時の入力エネルギーを算定可能にするために、既往の研究²⁾を参考に質量 300 kg、円柱部直径が 200 mm、載荷点部直径が 150 mm でかつ高さが 2 mm の球形状となっている鋼製重錘を用い、落下高さを増加させて終局に至るまで繰り返し落下させることにより行った。各落下高さは、前述のように、1, 2, 2.5, 3 m に設定した。重錘落下位置はスパン中央部に限定している。なお、AR 試験体の場合



(a) 荷重－圧縮変位関係



(b) 応力－ひずみ関係

図－2 緩衝ゴムの静的圧縮試験結果

には荷重点部に緩衝ゴムを設置しているが、繰り返し荷重による緩衝ゴムの損傷劣化が梁の耐荷挙動に影響を与えないようにするために、荷重毎に新品の緩衝ゴムを設置することとした。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。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－2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。試験は衝撃実験に用いたものと同様の寸法を有する緩衝ゴムを対象に、一度に500 kNまで荷重する単調荷重と、100 kNずつ荷重を増加させながら500 kNまで荷重と除荷を繰り返す漸増繰り返し荷重の2ケースを実施した。

図－2(a)に示す荷重－圧縮変位関係に着目すると、単調荷重において500 kNの荷重到達時に25 mm程度圧縮

変形し、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。繰り返し荷重においても、変形量に差異は見られるものの単調荷重とほぼ同様な傾向が確認できる。また、100, 200 kN荷重程度では、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。

図－2(b)には圧縮試験から得られた荷重－圧縮変位関係を基に、荷重前の緩衝ゴムの面積あるいは高さから換算した応力－ひずみ関係を示している。500 kNまで荷重することで、約50%のひずみが発生し12 MPa程度の応力に到達することが確認できる。

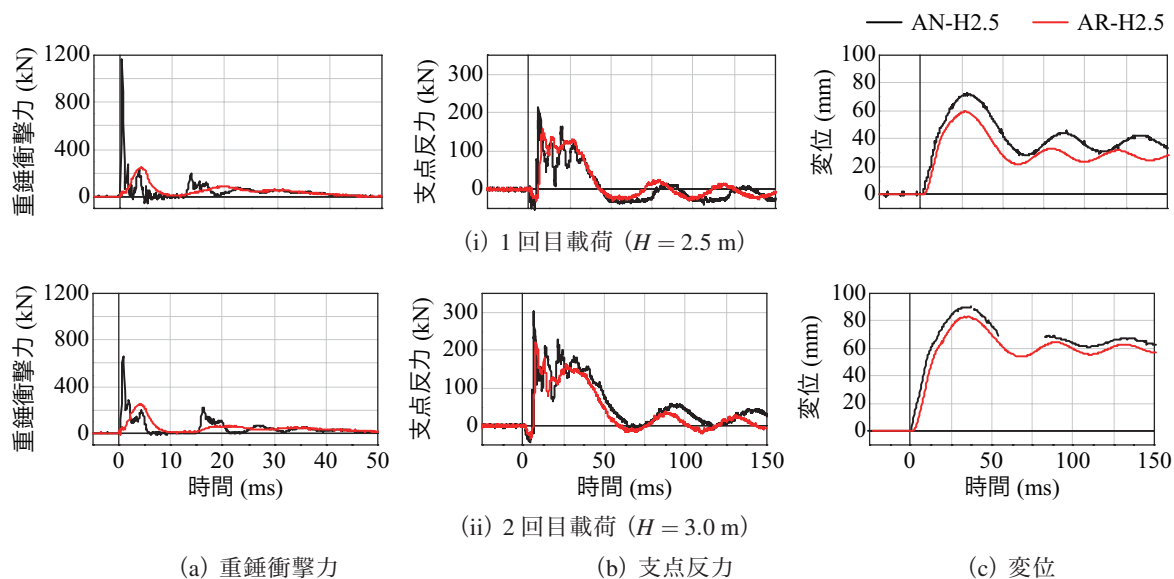
3. 衝撃荷重実験結果および考察

3.1 各種時刻歴応答波形

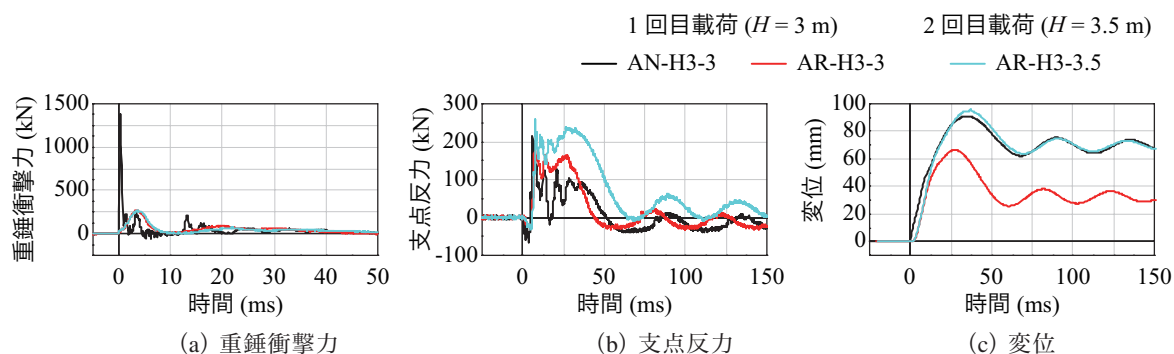
図－3には、AN/AR-H2.5試験体に関する漸増繰り返し衝撃荷重実験から得られた重錘衝撃力、支点反力、変位の各時刻歴応答波形を示している。横軸は重錘が試験体に衝突した時刻を零とした。また、いずれの試験体に関しても2回目荷重における $H=3$ m落下においてシート破断によって終局に至っている。なお、波形は実験毎に初期化しており、繰り返しによる累積値は考慮していない。

まず、図－3(a)に示す重錘衝撃力波形に着目すると、1回目荷重時において、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1,200 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3 ms程度の第2波が後続し、15 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200 kN程度で継続時間が7 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。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回目荷重時の $H=3.0$ 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分かるように、荷重点近傍部の圧壊により1回目荷重と比べて最大値が減少し、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、荷重面部の損傷は緩衝ゴムを設置したことで著しくはなく、1回目荷重時とほぼ同様な波形を示している。

次に、図－3(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45 ms程度で最大約200 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、50 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



図－3 AN/AR-H2.5 試験体に関する各種時刻歴応答波形



図－4 AN/AR-H3.0 試験体に関する各種時刻歴応答波形

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試験体よりも若干遅くなっていることが確認できる。2回目载荷においても、概ね同様な傾向を確認できるものの、1回目载荷によってRC梁が損傷し剛性が低下したことで、いずれの試験体に関しても主波動の継続時間が20～30 ms程度延びている。

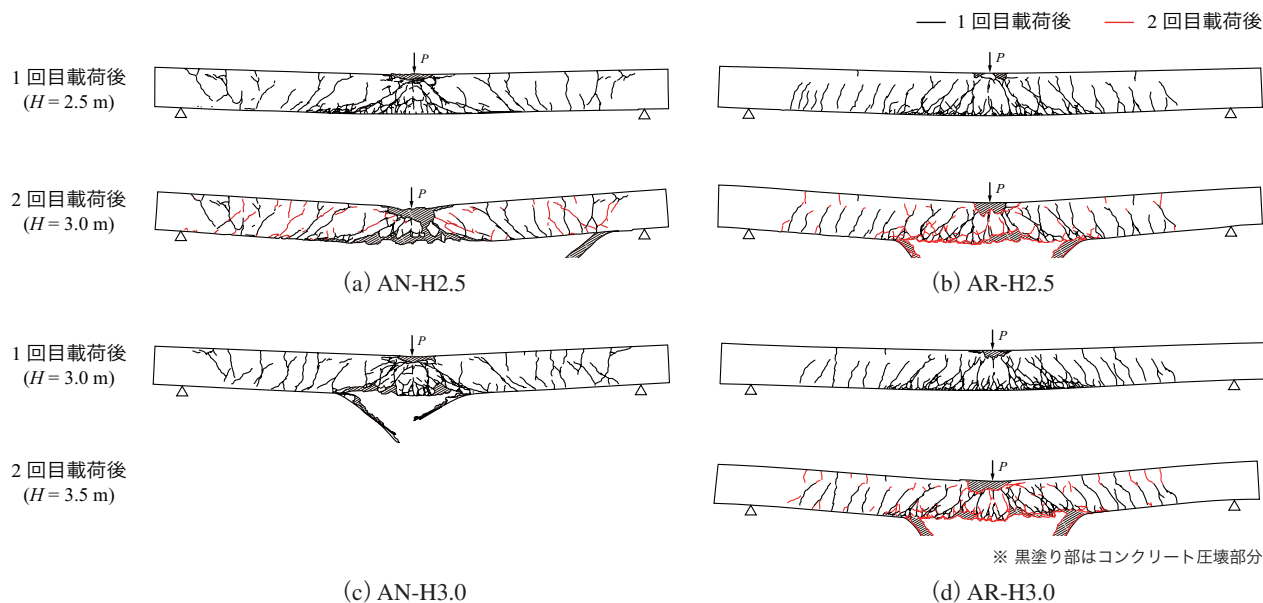
最後に、図－3 (c) に示す変位波形に着目すると、1回目载荷時において、緩衝ゴム設置の有無に関わらず、30 ms程度で最大値に到達後、減衰自由振動状態に移行している様子が確認できる。最大変位に着目すると、緩衝ゴムを設置していない場合には約91 mm、設置した場合には約83 mmとなっており、ゴムの設置によって最大衝撃力が1/6程度まで低減されたのに対して、最大変位は1/10程度しか減少していないことが分かる。これは、後述するように、いずれのケースにおいても衝撃力波形を用いて評価した力積が概ね等しいことに起因するものと推察される。なお、緩衝ゴムを設置したことで最大変位が小さく示された要因としては、図－2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・分散することで载荷点部の局所的な損傷が抑制されたことが考えられる。2回目载荷時に着目すると、1回目载荷の損傷が累積していることにより、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、残留変位に着目すると、いずれもスパン長の2%である60 mm程度の値を示しており、終局状態にあることを示唆している。

図－4には、AN/AR-H3.0試験体に関する漸増繰り返し衝撃荷重载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。AN試験体の場合には1回目载荷でシート破断が生じ終局に至っているものの、AR試験体に関しては2回目载荷の $H = 3.5$ m落下でシート破断に至った。

図－4 (a) に示す重錘衝撃力波形に着目すると、図－3と同様な傾向を示していることが分かる。図－4 (b) に示す支点反力波形の1回目载荷時に着目すると、AN試験体の場合にはシート破断に至っているため、AR試験体と比べて主波動の継続時間が長く示されている。

図－4 (c) に示す変位波形の1回目载荷に着目すると、



図－5 衝撃荷重実験終了後のひび割れ分布の比較

図－3の1回目载荷とは異なり、AN試験体がシート破断したことで緩衝ゴムの有無によって最大変位および残留変位に20～30mm程度の差異が生じている。なお、AR試験体の2回目载荷の場合にはシート破断が発生したことにより、AN試験体とほぼ同様な波形性状を示していることが分かる。

3.2 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布

図－5には、図－3および図－4で示した全ケースに関する衝撃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、繰り返し载荷によるひび割れの進展が分かるように、第1回目载荷による損傷を黒線、2回目载荷時による損傷を赤線で示している。

図－5より、AN試験体に着目すると、载荷回数によらず、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、かつ载荷点近傍下縁部には斜めひび割れが卓越している。下縁からのひび割れは主曲げの作用によって発生し、支点近傍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。

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・分散されたことで、AN試験体と比較して斜めひび割れの発生が低減される傾向が確認でき、かつ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窺える。また、AN/AR-H3試験体の結果から、緩衝ゴムの設置することでシート補強RC梁の耐衝撃性が向上することも明らかとなった。なお、いずれの試験体に関しても、最終的には損傷が蓄積されることでシート破断によって終局に至っているものの、AN-H2.5試験体の場合には、シートの横糸が切れてシートが縦に割れることで終局に至った。

3.3 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図－6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。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破断に至ったことを示している。なお、力積は重錘衝撃力波形の0～50msに着目して算出しており、残留変位は実験終了後における重錘を取り除いた状態での値である。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。

図－6(a)より、最大重錘衝撃力の分布性状を見ると、载荷回数や落下高さによらず、緩衝ゴムの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、その値はほぼ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回目载荷によって载荷面の損傷が大きい場合には、2回目载荷時の最大重錘衝撃力は低下する傾向にあることが分かる。これは、前述の図－5(a)、(c)からも明らかのように、重錘を直接作用させていることにより载荷面コンクリートの局所的な破壊の発生が大きな要因であると推察される。すなわち、これらは、図－5に示すAN/AR試験体の载荷点部における損傷状況からも明らかのように、緩衝ゴム設置の有無によって载荷面の損傷度合いが大きく異なることを示している。

図－6(b)より、力積の分布性状に着目すると、最大重錘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少ないことが確認できる。これは、梁全体の応答変位に対する緩衝ゴムの影響が比較的小さいことを意味

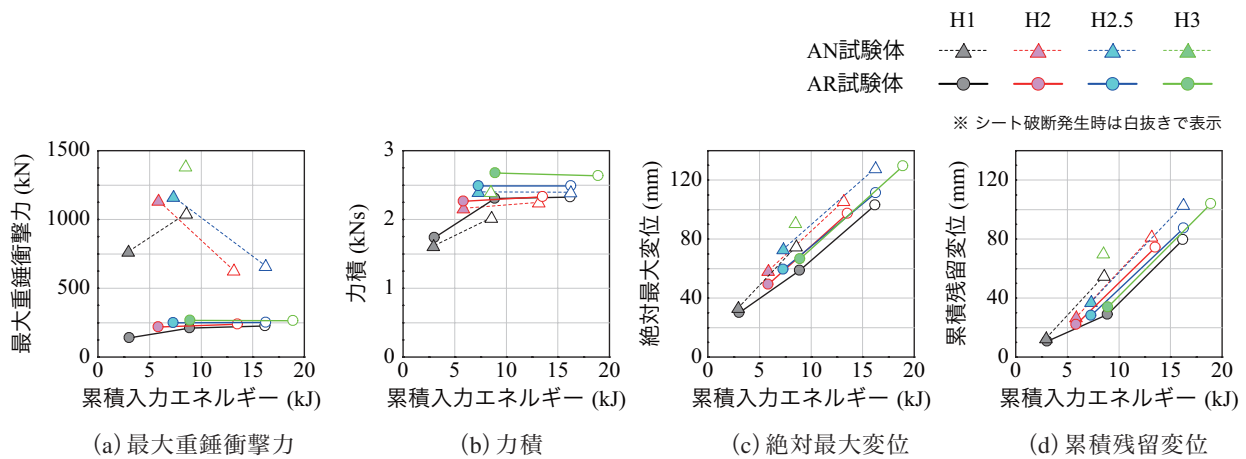


図-6 累積入力エネルギーおよび各種応答値の関係

している。なお、各落下高さにおいて、力積に関する緩衝ゴム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ない場合が若干小さく示されていることが分かる。この点に関しては、今後詳細な検討が必要である。

図-6(c)より、絶対最大変位の分布性状を見ると、AN/AR試験体によってその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分かる。また、累積入力エネルギーが9 kJ 近傍に着目すると、AN 試験体はシート破断によって終局に至っているが、AR 試験体の場合にはシートが破断していないことより、シート補強 RC 梁の耐衝撃性は緩衝ゴムを設置することで向上することが、この結果からも確認できる。なお、累積入力エネルギーが10 kJ 以上の場合には、いずれの試験体もシート破断で終局に至っていることが分かる。

図-6(d)より、累積残留変位の分布性状に着目すると、絶対最大変位と同様な傾向を示していることが分かる。

4. まとめ

本研究では、载荷点部に硬度65の天然ゴムを設置することで、重錘衝突による局所的な損傷や圧縮破壊を抑制した場合のFRPシート下面接着曲げ補強RC梁の耐衝撃挙動の検討を目的として、シート破断によって終局に至るAFRPシート補強RC梁を対象に、漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施した。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り、最大衝撃力は大幅に抑制可能であるものの、緩衝ゴムの設置の有無による力積には大きな差異は生じない。
- 2) 緩衝ゴムを設置することで衝撃力の緩和や分散化が図られ、斜めひび割れの発生が抑制される。
- 3) 緩衝ゴムを設置する場合においても、シート破断によって終局に至る。

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)からご提供頂いた。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山越壮之助君、久末和弥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、感謝の意を表する。

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) 田野順也, 岸徳光, 小室雅人, 三上浩: 静的に曲げ圧壊で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁の繰り返し衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 685-690, 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.