論文 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

田野　順也[*1]・岸　徳光[*2]・小室　雅人[*3]・三上　浩[*4]

要旨：本論文では，静的に「曲げ圧壊型」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，繰り返し衝撃荷重載荷時における耐衝撃性状を把握することを目的として，繰り返し重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。その結果，1）いずれの試験体も，処女載荷時と落下高さ漸増繰り返し載荷時も含めて，全てシート破断によって終局に至ること，2）シート破断によって終局に至る累積入力エネルギーは処女載荷と繰り返し載荷にかかわらずほぼ等しいこと，などが明らかとなった。

キーワード：RC 梁，AFRP シート，耐衝撃性，繰り返し衝撃荷重載荷

1. はじめに

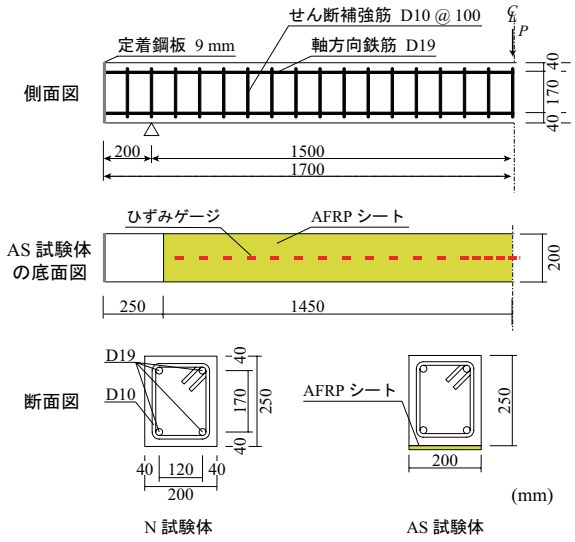
近年，鉄筋コンクリート（RC）製構造物の補修補強工法として，軽量かつ高強度で現場合わせが容易な連続繊維（FRP）シート接着工法が多く採用されるようになってきた[1)]。一方で，耐衝撃用途 RC 構造物においても，コンクリートの経年劣化や衝撃荷重規模の増大に伴って耐衝撃性向上が要求される事例も発生している。

著者らは，このような状況に鑑み，既設 RC 構造物の耐衝撃性向上を目的として FRP シート接着あるいは FRP ロッド下面埋設工法を提案し，RC 梁を対象とした重錘落下衝撃実験を実施してきた[2),3)]。その結果，FRP 材で補強を施すことによって，梁の変形量を抑制し耐衝撃性を向上可能であることが明らかになっている。

しかしながら，これらの研究成果は全て単一載荷実験に基づいたものである。実構造の場合には，単一載荷によって耐力を維持したとしても，それ以降の衝撃荷重載荷時における耐荷性能評価が課題として挙げられる。

このような観点から，本研究では著者らがこれまで実験研究に用いてきた 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た。なお，著者らの研究グループでは，FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象に，静的な 4 点曲げ載荷実験を多く実施している。その結果，シート補強量によって，計算の荷重－変位関係を満足した後に載荷点近傍部の圧壊によって終局に至る「曲げ圧壊型」梁と，上述の関係に追随できずに早期に斜めひび割れ先端部のピーリング作用によってシートが剥離して終局に至る「剥離破壊型」梁に分類されることを明らかにしている[4)]。

本研究では，特に静的に「曲げ圧壊型」で終局に至る AFRP シート曲げ補強 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することとした。AFRP シートの補強量に関しては，破壊型予測式[4)]に則って試算を行い，目付量 415 g/m^2 の AFRP シート一層を接着補強することとした。



図－1　試験体概要

2. 実験概要

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 シート下面接着曲げ補強の有無や，落下高さを変化させた全 7 体である。表中の試験体のうち，第一項目は AFRP シート下面接着の有無（N：無補強，AS：AFRP シート下面曲げ補強）を示し，第二項目は載荷方法（S：静荷重載荷，CI：繰り返し衝撃荷重載荷），第三項目の H に付随する数値は処女載荷時の設定落下高さ（m）である。また，実験ケース名は，試験体名に続けて第四項目として繰り返し載荷時の設定落下高さ（m）を示

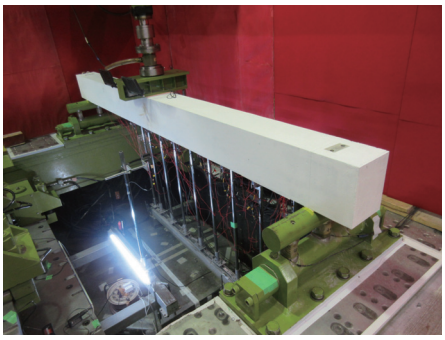
*1　室蘭工業大学大学院　工学研究科　博士前期課程　環境創生工学系専攻　（学生会員）
*2　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　特任教授　工博　（正会員）
*3　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　准教授　博（工）　（正会員）
*4　三井住友建設（株）　技術研究所　主席研究員　博（工）　（フェロー会員）

表－1　試験体一覧

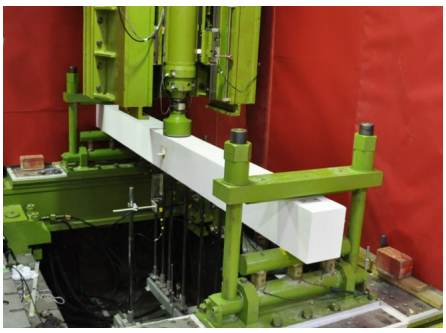
試験体名	実験ケース名	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	実測入力エネルギー E_i (kJ)	累積実測入力エネルギー E_{ai} (kJ)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{sy} (MPa)	計算曲げ耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 α	補強材剥離の有無
N-S	N-S	静的	-	-	-	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	5.98	
N-CI-H1	N-CI-H1-1	1.00	1.01	2.97	2.97	33.7	371.0	401.9	54.0	298.8	5.53	
	N-CI-H1-2	2.00	1.99	5.85	8.82							
AS-S	AS-S	静的	-	-	-	33.7	371.0	401.9	81.0	298.8	3.69	剥離
AS-CI-H1	AS-CI-H1-1	1.00	1.01	2.97	2.97							-
	AS-CI-H1-2	2.00	1.91	5.61	8.58							破断
AS-CI-H2	AS-CI-H2-2	2.00	1.99	5.85	5.85							-
	AS-CI-H2-2.5	2.50	2.49	7.33	13.18							破断
AS-CI-H2.5	AS-CI-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.33	7.33							-
	AS-CI-H2.5-3	3.00	3.04	8.95	16.28							縦割れ-剥離
AS-CI-H3	AS-CI-H3-3	3.00	2.89	8.50	8.50							破断

表－2　AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

種類	幅 B (mm)	目付量 (g/m^2)	弾性係数 E_s (GPa)	全引張耐力 f_{ru} (kN)	破断ひずみ ε_{ru} (%)
AFRP シート	200	415	118.0	117.6	1.75



写真－1　静荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況



写真－2　衝撃荷重載荷時の実験装置と試験体の設置状況

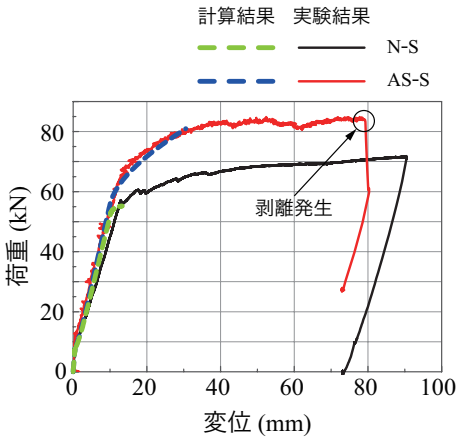
している。なお，表中の実測落下高さ H' は実測衝突速度から換算した自由落下高さである。

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 および主鉄筋とせん断補強筋の降伏強度 f_y, f_{sy} も併せて示している。また，計算曲げ耐力は，これらの値および後述の 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[5] に準拠して各材料の応力－ひずみ関係を設定し，平面保持仮定およびコンクリートと 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 3,500 μ に達した時点とした。計算せん断耐力値は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。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。**表－2** には，本実験で用いた AFRP シートの静的力学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 200 mm に対する値である。

写真－1 には，静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。静荷重載荷の場合には，梁幅方向に 400 mm，梁長さ方向に 100 mm の載荷板をスパン中央部に設置し，容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて荷重を作用させている。なお，N-S 試験体の場合において，主鉄筋降伏後，載荷点近傍部上縁に圧壊が生じるが，荷重は主鉄筋降伏後も鉄筋の塑性硬化によって漸増することより，本研究では梁が載荷点部で角折れし変位が 90 mm 前後に至るまで載荷している。一方，AFRP シートを下面接着して曲げ補強する場合には，最大荷重に到達した後シートが剥離して終局状態に至るまで載荷している。

写真－2 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，質量 300 kg，先端直径 200 mm の鋼製重錘を落下高さを増加させて終局に至るまで繰り返し自由落下させることにより行っている。落下高さは，1, 2, 2.5, 3 m に設定してい



図－2　荷重－変位関係

る。載荷実験は，処女載荷の落下高さHを1段階ずつ増加させた場合についても実施した。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。

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，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，変位は非接触型レーザ式変位計を用いて計測している。さらに，実験時にはひび割れ分布や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の高速度カメラを用いて撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 静荷重載荷実験結果

図－2には，静載荷実験から得られた無補強RC梁とAFRPシート接着曲げ補強RC梁の荷重－変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。

図より，N-S試験体およびAS-S試験体の各荷重レベルで比較すると，主鉄筋降伏荷重は，N, AS試験体に対して，それぞれ57.0, 67.8 kNであり，最大荷重は70.7, 84.8 kNであった。なお，N-S試験体の場合において，主鉄筋降伏後の荷重は，鉄筋の塑性硬化の影響によって単調増加の傾向を示すことが明らかになっている。このため，本研究では，AS-S試験体が80 mm程度の変位時点で最大荷重を示していることに着目し，N-S試験体においても変位が80 mm時点の荷重を最大荷重として評価することとした。これより，AFRPシート接着補強を施すことによって，主鉄筋降伏荷重は無補強の場合に比較して19 %程度，最大荷重は20 %程度増加することが分かる。

また，断面分割法に基づいた計算結果と比較すると，まずN-S試験体の場合には，計算結果は主鉄筋降伏後すぐに上縁圧壊により終局に至っているが，実験結果は上縁が圧壊しつつも主鉄筋の塑性硬化によって荷重が緩やかに増加する傾向にあることが分かる。一方，AS-S試験体の場合には，実験結果は計算上の終局点まで良く対応し，その後も増加の傾向を示して80 mm程度の変形量に到達後，シート剥離によって破壊した。これより，AS-S試験体は曲げ圧壊型で終局に至っていることが分かる。

過去の研究成果[4]に基づいて本試験体の破壊モードを推定すると，計算終局曲げモーメントM_uに対する計算降伏曲げモーメントM_yの比が0.71と0.70以上であることより「曲げ圧壊型」で終局に至ることが予測され，実験結果と対応していることが分かる。なお，載荷荷重は，上述のように最大荷重近傍までは計算結果とほぼ対応し除荷状態には至っていないことより，シートとコンクリート間の付着は十分確保されているものと判断される。

3.2 衝撃荷重載荷実験結果

(1) 各種時刻歴応答波形

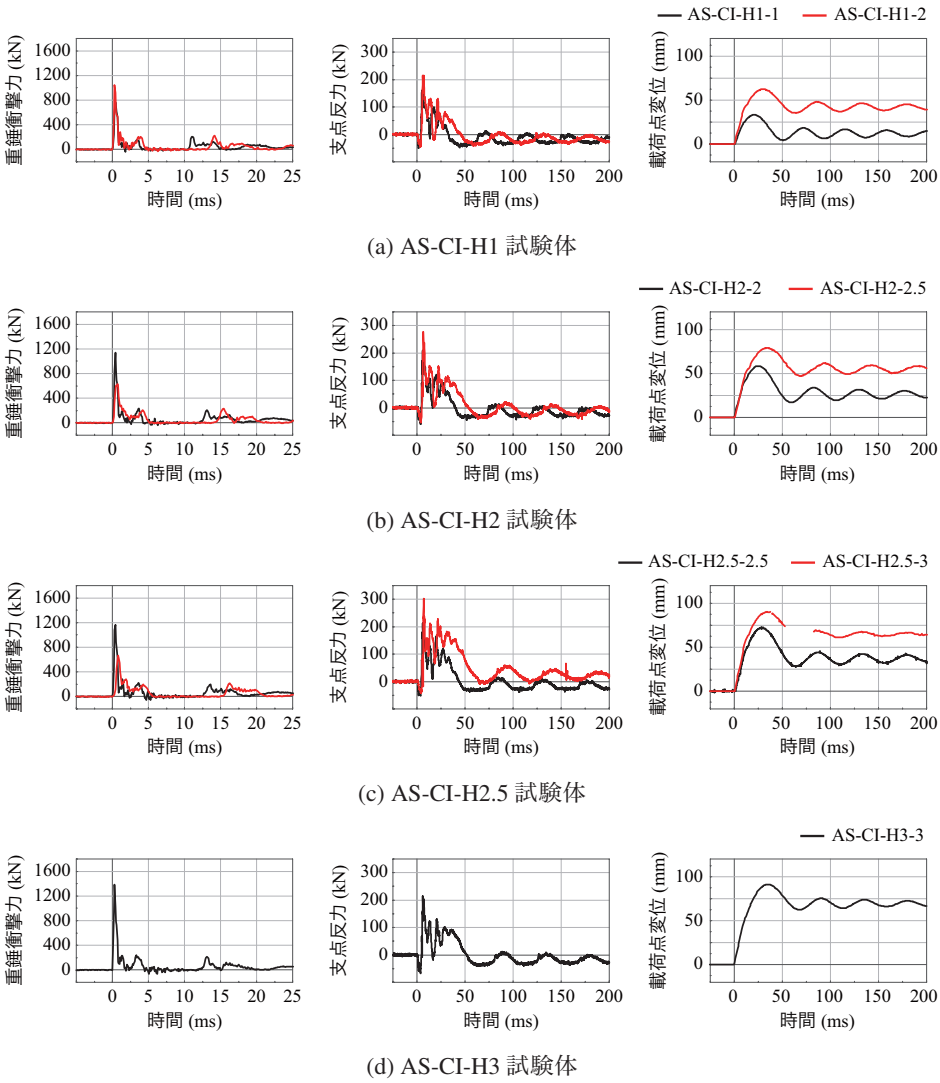
図－3には，AFRPシート接着曲げ補強を施した全試験体に関する繰り返し載荷時の重錘衝撃力波形，支点反力波形，変位波形を処女載荷時の落下高さ毎に比較して示している。なお，波形は各実験毎の応答波形であり，繰り返しによる累積値は考慮していない。

各実験ケースの波形性状を見ると，各波形の概形は，主波動の最大振幅や継続時間，除荷後の減衰自由振動状態における固有周期を除き，シート破断に至る場合も含め繰り返し載荷によって著しい差のないことが分かる。

図－3(a)は処女載荷時の設定落下高さ(以後，単に落下高さ)が$H=1$ mの場合である。図より，重錘衝撃力波形において，最大重錘衝撃力は$H=1, 2$ mでそれぞれ約770, 1040 kN程度であり，落下高さに対応して増加傾向を示している。一方，支点反力波形の場合には，最大値がそれぞれ160, 215 kN程度であり，重錘衝撃力と同様に落下高さに対応して大きくなっている。主波動の継続時間を見ると，$H=2$ m落下時には1 m落下時に比較して15 ms程度延びており，載荷点部が大きく損傷していることが窺える。

変位波形を見ると，落下高さ$H=2$ mの時点で最大変位及び残留変位ともに大きくなっていることが確認できる。また，荷重除荷後の減衰自由振動状態における固有振動周期も落下高さと共に延びている。落下高さ$H=2$ mの時点でAFRPシートは破断に至っているが，波形分布を見る限りではその傾向を確認できない。最大変位は，落下高さ毎にそれぞれ約34, 64 mm程度であり，残留変位は約12.6, 42.4 mm程度である。

図－3(b)は処女載荷時の重錘落下高さが$H=2$ mの場合である。この場合は，落下高さが$H=2.5$ mでシート破断により終局に至っている。最大重錘衝撃力は$H=2$ mの場合が$H=2.5$ mの場合よりも大きいが，最大支点反力



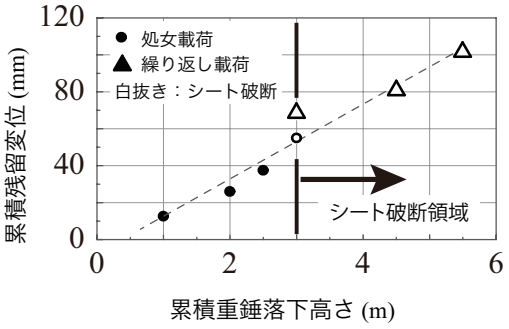
図－3　繰り返し載荷時における各種時刻歴応答波形の比較

は前述の処女載荷 $H=1$ m の場合と同様の傾向を示し，かつ AS-CI-H2-2.5 試験体の場合は AS-CI-H1-2 試験体より約 60 kN 程度大きい値を示している。

最大変位及び残留変位を調べると，最大変位はそれぞれ約 59, 79 mm，残留変位は約 26, 55 mm である。これらを前述の AS-CI-H1-2 試験体と比較すると，処女載荷時（AS-CI-H2-2）の場合における最大変位は，繰り返し載荷時（AS-CI-H1-2）の 90% 程度で履歴載荷の影響がそれほど大きくないことが分かる。一方，残留変位の場合には，繰り返し載荷時の 60% 程度となっている。これより，処女載荷が $H=1$ m の場合には，AS-CI-H1-2 試験体において最大変位到達前後にシート破断に至っていることが示唆される。$H=2.5$ m の場合（AS-CI-H2-2.5）には，最大変位は静荷重載荷時と同程度になっており，$H=2$ m 落下によって部分剥離等による劣化が進行しつつも，最大変位発生時点では未だシートの補強効果が発揮されていることが分かる。これより，シート破断は，処女載荷が $H=1$ m の場合と同様に最大変位到達前後に発生していることが示唆される。

図－3（c）は処女載荷時の重錘落下高さが $H=2.5$ m の場合である。この場合は，$H=2.5$ m 落下時にはシート破断には至らず，$H=3$ m でシートが縦割れと共に剥離し破断に近い性状を示して終局に至っている。重錘衝撃力波形を見ると，$H=3$ m の場合における最大衝撃力値は $H=2.5$ m の場合の 55% 程度に低下しており，処女載荷で大きな損傷を受けていることが窺われる。支点反力波形に関しては，前述同様に最大重錘衝撃力とは逆の傾向を示し，$H=3$ m 落下の場合が大きい。一方で，$H=3$ m の場合における主波動継続時間は，処女載荷である $H=2.5$ m の場合に比して 25 ms 程度延びており，劣化が進行していることが推察される。

変位波形を見ると，$H=3$ m 載荷時において，波形分布が一部途切れている箇所がある。これは，下縁かぶりコンクリートが剥離剥落して変位測定用のレーザ光線を遮ったことにより，データが欠損したためである。図より，最大変位は $H=2.5$, 3 m 載荷時でそれぞれ約 73, 91 mm，残留変



図－4　累積落下高さと累積残留変位の関係

位は38, 64 mmである。最大変位に関しては，処女載荷時(AS-CI-H2.5-2.5)には，前述の処女載荷時の重錘落下高さが$H=2$ mの場合における$H=2.5$ m落下時(AS-CI-H2-2.5)試験体に比較して6 mm程度小さいだけであり，処女載荷の時点で劣化が進行してることが窺われる。一方で，残留変位に関してはシート破断の有無によって差違も大きく，処女載荷で破断のないAS-CI-H2.5-2.5試験体の場合がシート破断に至ったAS-CI-H2-2.5試験体の場合の69%程度に留まっている。なお，$H=3$ mの場合には繰り返し載荷による損傷劣化によって，最大変位は静荷重載荷時のそれよりも大きく約91 mmに達しており，残留変位も最も大きく64 mmに達していることが分かる。

図－3 (d)は処女載荷時の重錘落下高さが$H=3$ mの場合である。処女載荷時の段階でシートが破断したことより，この時点で実験は終了した。重錘衝撃力波形において，最大重錘衝撃力は約1390 kNに達している。一方で，最大支点反力は約215 kN程度で比較的小さく，AS-CI-H2.5-2.5試験体と同程度であることより，シート破断の影響が窺われる。最大変位及び残留変位は，約90, 67 mm程度であり，AS-CI-H2.5-3.0試験体と同程度の値を示している。

以上より，本実験の範囲内では,繰り返し載荷の状態では重錘落下高さが$H=2$ mの時点でシート破断によって終局に至るものの，単一載荷の状態では，未だ終局に至らず，$H=3$ mで終局に至ることが明らかとなった。

3.3 累積落下高さと累積残留変位の関係

図－4には，実験結果の処女載荷時も含めた累積重錘落下高さと累積残留変位の関係を示している。図より，処女載荷及び繰り返し載荷も含めて，累積落下高さが3 mでシート破断によって終局に至っていることが分かる。また，累積残留変位は，処女載荷時及び繰り返し載荷時，さらに繰り返し載荷によってシート破断に至った場合も含めて，累積落下高さすなわち累積入力エネルギーにほぼ線形に分布していることが分かる。このような特性は，実規模無補強RC梁試験体に関する実験的研究[6]と類似した特性を示しており，限界累積最大変位あるいは残留変位を規定することによって，繰り返し衝撃荷重載荷時における耐衝撃設計が可能になるものと推察される。

3.4 実験終了後におけるひび割れ分布

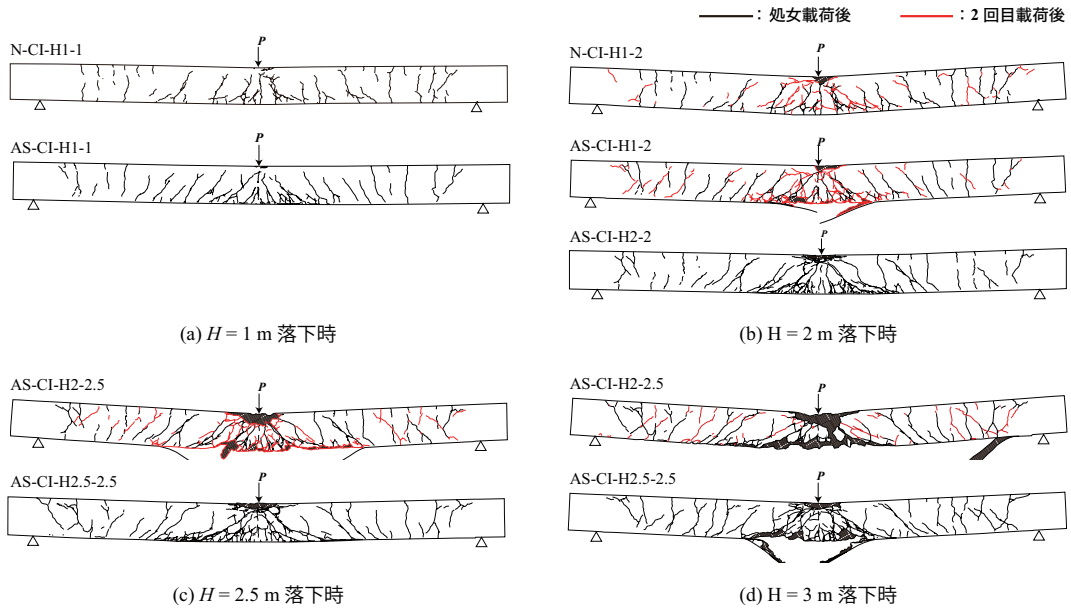
図－5には，各試験体の載荷実験終了後における試験体側面のひび割れ分布を，各落下高さ毎に比較して示している。繰り返し載荷におけるひび割れの進展が分かるように，処女載荷時から順に黒，赤線で示している。

図－5 (a)図の落下高さ$H=1$ mの場合について，N試験体とAS試験体間で比較すると，AS試験体の場合が曲げ及びせん断ひび割れがN試験体の場合より多いことが分かる。これは，AFRPシート接着によって梁の曲げ剛性が増したことによるものと推察される。

(b)図の落下高さ$H=2$ mの場合について比較すると，まずN試験体の場合には載荷点部を中心にひび割れが密に発生し，梁は載荷点を中心にほぼ直線状に折れ曲がり角折れの傾向を示している。一方，AS試験体の場合には，処女載荷時の落下高さにかかわらず載荷点部が圧壊に至っており，角折れの兆候が見て取れる。また，AS試験体で処女載荷の落下高さが異なる場合について両者を比較すると，処女載荷時の落下高さが$H=1$ mの場合(AS-CI-H1-2)には，載荷点部の圧壊領域が狭くシートは破断して終局に至っている。一方，$H=2$ mの場合(AS-CI-H2-2)には，載荷点部の圧壊領域は前者よりもやや広く，斜めひび割れの角度も前者よりは緩やかであり，シートは未だ破断には至っていない。但し，両試験体共に，載荷点近傍下縁部には，ひび割れが密に発生していることが分かる。

(c)図の落下高さ$H=2.5$ mの場合について比較すると，処女載荷の落下高さが$H=2$ mの場合には載荷点部の圧壊が深さ方向に進展し角折れの傾向を示すと共に，シートは載荷点近傍下縁部で破断に至り周辺かぶりコンクリートが剥落している。一方，処女載荷の落下高さが$H=2.5$ mの場合(AS-CI-H2.5-2.5)には，載荷履歴がないことよりAS-CI-H2-2試験体と同様に載荷点部における圧壊が広く浅く分布し，角度が緩やかな斜めひび割れが発生していることが分かる。シートは，未だ剥離あるいは破断には至っていない。

(d)図の落下高さ$H=3$ mの場合について比較すると，処女載荷の落下高さが$H=2.5$ mの場合(AS-CI-H2.5-3)には，載荷点部の圧壊が深さ方向に進展すると共に下縁では斜めひび割れのピーリング作用によってシートが剥離すると共に，ここでは示されていないが縦方向に引き裂かれた状態に至っている。また，下縁部のかぶりの剥離・剥落も著しい。梁は角折れの傾向を示している。一方，処女載荷が$H=3$ mの場合(AS-CI-H3-3)には，載荷点部が圧壊すると共に，斜めひび割れの進展角度が大きくシートが破断に至っている。この場合の損傷は，AS-CI-H2.5-3試験体に比較して載荷点近傍のより狭い領域に集中している。



(a) H = 1 m 落下時　(b) H = 2 m 落下時

(c) H = 2.5 m 落下時　(d) H = 3 m 落下時

図－5　衝撃荷重載荷実験終了後のひび割れ分布の比較

以上より，AS 試験体においてシート破断に至る場合には，いずれの試験体においても載荷点部が圧壊すると共に斜めひび割れの進展角度も大きく，梁は角折れの傾向を示す。これに対して，未だシート破断に至っていない場合には，載荷点近傍部の圧壊域が広く浅く分布し，斜めひび割れの進展角度が緩やかであることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では，無補強試験体と共に，静荷重載荷時に曲げ圧壊型で終局に至る目付量 415 g/m^2 の 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，静荷重載荷実験および繰り返しによる重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究の範囲で得られた結果を整理すると，以下のように示される。

1) 静荷重載荷実験結果から，本研究で採用した AFRP シート補強 RC 梁は「曲げ圧壊型」で終局に至り，既往の研究で示された破壊モード推定式は本実験結果と対応している。
2) 繰り返し衝撃荷重載荷実験から，重錘衝撃力，支点反力，載荷点変位の各応答波形の概形は，主波動の最大振幅や継続時間，除荷後の減衰自由振動状態における固有振動周期を除き，繰り返し載荷によって著しい差がない。
3) 本研究で採用した「曲げ圧壊型」RC 梁は，処女載荷時と繰り返し載荷時も含めて，全てシート破断によって終局に至る。その要因は，梁が載荷点を中心にほぼ直線状に折れ曲がり角折れの状態を呈し，その折れ中心近傍部の下縁軸ひずみが局所的に著しく増加することによるものと推察される。
4) 累積重錘落下高さと累積残留変位の関係はシート破断によって終局に至る場合も含めてほぼ線形の関係にあり，終局に至る累積重錘落下高さは処女載荷と繰り返し載荷にかかわらずほぼ等しい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K06527 の援助により行われたものである。また，研究で使用した 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)からご提供頂いた。ここに記して，感謝する次第である。

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，2000.7
2) 三上　浩，栗橋祐介，今野久志，岸　徳光：衝撃載荷によって損傷を受けた RC 梁の AFRP シート曲げ補強による耐衝撃性向上効果，構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 990-1001, 2015.3
3) 岸　徳光，小室雅人，栗橋祐介，三上　浩，船木隆史：2 種類の RC 梁下面埋設 FRP ロッドの耐衝撃性向上効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 64A, pp. 875-888, 2018.3
4) 岸　徳光，三上　浩，栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 683/V-52, pp. 47-64, 2001.8
5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編], 2012 年制定
6) 岸　徳光，今野久志，山口　悟，三上　浩，玉木美帆：合入力エネルギー一定下での実規模 R C 桁の繰り返し重錘落下実験，構造工学論文集，Vol. 57A, pp. 1105-1114, 2011