

目付量 280 g/m² AFRP シート 曲げ補強 RC 梁の繰返し衝撃荷重載荷実験Consecutive impact loading test of RC beams strengthened in flexure with bonded AFRP sheet having 280 g/m² mass

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 田野順也 (Junya Tano)

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 F 会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

三井住友建設 (株) F 会員 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

室蘭工業大学大学院 学生員 瓦井智貴 (Tomoki Kwarai)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修補強工法として、軽量で現場合わせが容易な連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く普及している。一方で、既設の耐衝撃用途 RC 構造物においては、コンクリートの経年劣化や異常気象などによる落石衝撃荷重規模の増大に伴い、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 構造物の合理的な耐衝撃性向上法の確立を最終目的として、FRP 材を用いた耐衝撃性向上法について RC 梁を対象とした種々の重錘落下衝撃実験を実施してきた。これらの検討では、重錘を所定高さから一度だけ自由落下させる単一衝撃載荷実験や、FRP 材が剥離あるいは破断するような限界状態に至るまで重錘落下高を増加させて繰返し衝撃荷重を作用させる漸増繰返し衝撃載荷実験を実施してきた。

その結果、FRP 材で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を明らかにしてきたものの、これらの研究は鉄筋が降伏し、シートが剥離あるいは破断に至るような場合を想定しているものである。一方で、既設構造物の取り巻く環境を考慮すると、鉄筋が降伏しない、あるいは塑性変形が小さい範囲の入力エネルギーが繰返し作用する場合も想定されることから、このような条件下での耐衝撃挙動を検討することも重要であると考えられる。

このような観点から、本研究では AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁を対象に、入力エネルギーが比較的小さい場合における一定繰返し重錘落下衝撃載荷実験を実施した。また、比較のために静的載荷実験および漸増繰返し衝撃荷重載荷実験を実施し、累積入力エネルギーと AFRP シート補強 RC 梁の終局状況との関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、試験体の形状寸法、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。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 間隔で配筋している。また、梁底面には支点 50 mm 手前まで AFRP シート (目付 280 g/m²) を接着している。なお、シートの接着は、梁底面の補強範囲にプ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の後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。養生期間は 1 週間程度である。表-1には本実験で用いた AFRP シートの力学的特性を一覧にして示している。

表-2には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。

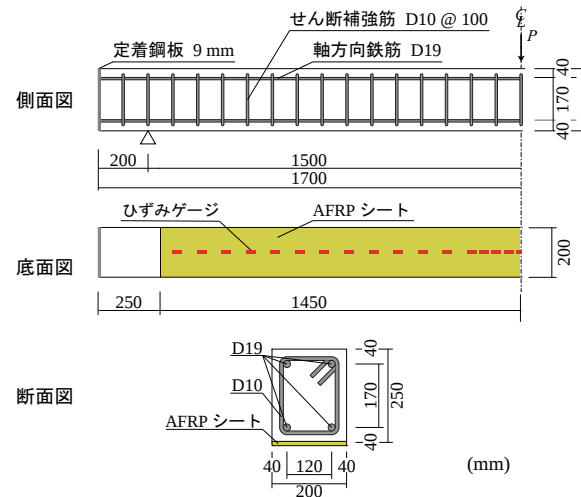


図-1 試験体概要

表-1 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

幅 B (mm)	目付量 (g/m ²)	弾性係数 E_r (GPa)	全引張耐力 f_{ru} (kN)	破断ひずみ ϵ_{ru} (%)
200	280	118.0	117.6	1.75

試験体は、載荷方法や落下高さを変化させた全 4 体である。表中の実験ケース名のうち、第一項目は AFRP シート補強、第二項目は載荷方法 (C: 一定繰返し衝撃荷重載荷, I: 漸増繰返し衝撃荷重載荷, S: 静的荷重載荷)、第三項目の H に付随する数値は衝撃載荷時の設定重錘落下高さ (m) を示している。

衝撃荷重載荷の場合にはいずれも繰返し載荷を実施しており、 $H = 0.5$ m および 1.0 m と重錘落下高さを一定とし、同一の入力エネルギーで数回載荷する一定繰返し載荷と、処女載荷時の落下高さを $H = 1.0$ m とし、2 回目載荷時には $H = 2.0$ m より落下させる漸増繰返し載荷の 2 種類、計 3 体の実験を実施している。また、重錘落下高さ $H = 0.5$, 1.0 m とした一定繰返し載荷実験、および漸増繰返し載荷実験に関して、終局に至るまでの重錘落下回数それぞれ、9, 2, 2 回であった。終局状況としては、 $H = 0.5$ m とした一定繰返し載荷実験ではコンクリート上縁部の圧壊により終局に至っているが、その他の載荷実験ではシート破断により終局に至っている。

なお、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 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y , f_{sy} も併せて示している。

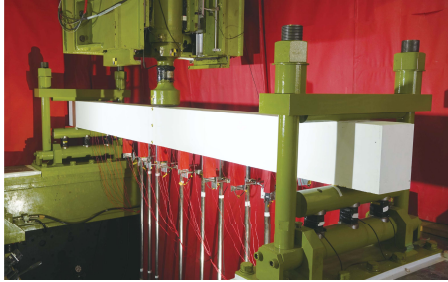
2.2 実験方法および測定項目

写真-1には、衝撃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,

表－２ 試験体一覧

試験体 No.	実験 ケース名	終局時 重錘落下 回数	載荷方法	実測 衝突速度 V' (m/s)	実測入力 エネルギー E (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)	終局状況
1	AS-C-H0.5	9	同一高さ 一定繰り返し載荷	3.19*	1.53*	34.3	393.7	373.1	上縁圧壊
2	AS-C-H1.0	2		4.59*	3.16*				シート破断
3	AS-I-H1.0	2	1 m 落下 → 2 m 落下 漸増繰り返し載荷	4.52	3.06	33.7	371.0	401.9	シート破断
	AS-I-H2.0			6.24	5.84				
4	AS-S	-	静的載荷	-	-				シート剥離

* 同一試験体全ケースの平均値



写真－１ 衝撃荷重載荷実験装置と試験体の設置状況



写真－２ 静的荷重載荷実験装置と試験体の設置状況

先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから梁のスパン中央部に自由落下させることにより行っている。また、試験体の両支点部は、回転を許容し、矩形状鋼製梁によって浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造となっている。

前述のように、設定重錘落下高さ H は、一定繰り返し衝撃載荷時には比較的梁の損傷が小さい $H = 0.5, 1.0$ m とし、漸増繰り返し載荷時には処女載荷時の落下高さ H を 1.0 m, 2 回目載荷時には $H = 2.0$ m とした。なお、AFRP シートが剥離あるいは破断に至らない場合には、載荷点部コンクリートが激しく圧壊した段階を終局状態として実験を終了することとした。

写真－２には、静的荷重載荷実験時における実験装置と試験体の設置状況を示している。静載荷時には、梁幅方向に 400 mm、梁軸方向に 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、本実験において AS-S 試験体は主鉄筋降伏後、コンクリート上縁部が圧壊しつつも荷重が増加し、変位が約 90 mm まで到達した後、シートが剥離して終局に至った。

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、単に変位)および AFRP シート各点の軸方向ひずみ(以後、単にひずみ)である。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。さらに、実験時にはひび割れ分布や AFRP シートの剥離・破断状況の他、変位計のバックアップとして高速度カメラを用いて撮影している。

3. 実験結果

3.1 累積入力エネルギーと各種応答値の関係

図－２には、衝撃荷重載荷を実施した 3 体の試験体について、各種最大および残留応答値を累積入力エネルギーを横軸に取って整理している。なお、図下段に示す絶対最大変位、累積残留変位、および絶対最大シートひずみに関し

ては、繰り返し衝撃荷重載荷による累積値を考慮した結果となっている。また、白塗りはシート破断に至ったケースである。

さらに、静的耐荷性状との関係を検討するために、絶対最大変位および累積残留変位分布図において、静載荷実験より得られた AS-S 試験体に関する鉄筋降伏時の変位 δ_y および終局時の変位 δ_u も併せて記載している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力を見ると、AS-C-H0.5 試験体の場合には、4 回目載荷時まではほぼ一定であるが、それ以降は累積入力エネルギーの増加に伴い、最大衝撃力は減少する傾向を示している。処女載荷時と 9 回目載荷時の最大衝撃力を比較すると、それぞれ約 600, 300 kN と 2 倍程度の差があることが分かる。これより、5 回目載荷時に載荷点部に圧壊の傾向が現れ、載荷回数の増加に対応して損傷が蓄積し、載荷点近傍部のコンクリートの剛性が著しく低下していくことが推察される。AS-C-H1.0 試験体や AS-I-H1.0, -2.0 試験体の場合には、いずれも重錘衝突回数が 2 回と AS-C-H0.5 試験体と比較して少なく、載荷点部の累積損傷が小さいため、最大衝撃力も増大する傾向を示しているものと推察される。

(b) 図より、最大変位の分布性状を見ると、一定繰り返し載荷の場合には、落下高さが $H = 0.5, 1.0$ m において、最大変位はいずれの場合もそれぞれ約 20, 40 mm 程度であり、累積入力エネルギーに対して若干の勾配はあるものの、著しい増加傾向は示していない。一方で、漸増繰り返し載荷の場合には、処女載荷時および 2 回目載荷時において、それぞれ約 30, 70 mm 程度を示し、入力エネルギーの増加に伴い、最大変位も線形に増加する傾向にあることが分かる。すなわち、本試験体の場合には、最大変位は入力エネルギーに依存し、累積値の影響は小さいことが推察される。また、AS-C-H0.5 試験体に着目すると、累積入力エネルギーに対して最大重錘衝撃力が減少傾向にあるが、最大変位に関しては増加傾向にあることが分かる。これは、繰り返し載荷によりコンクリート上縁の圧壊が進行し、重

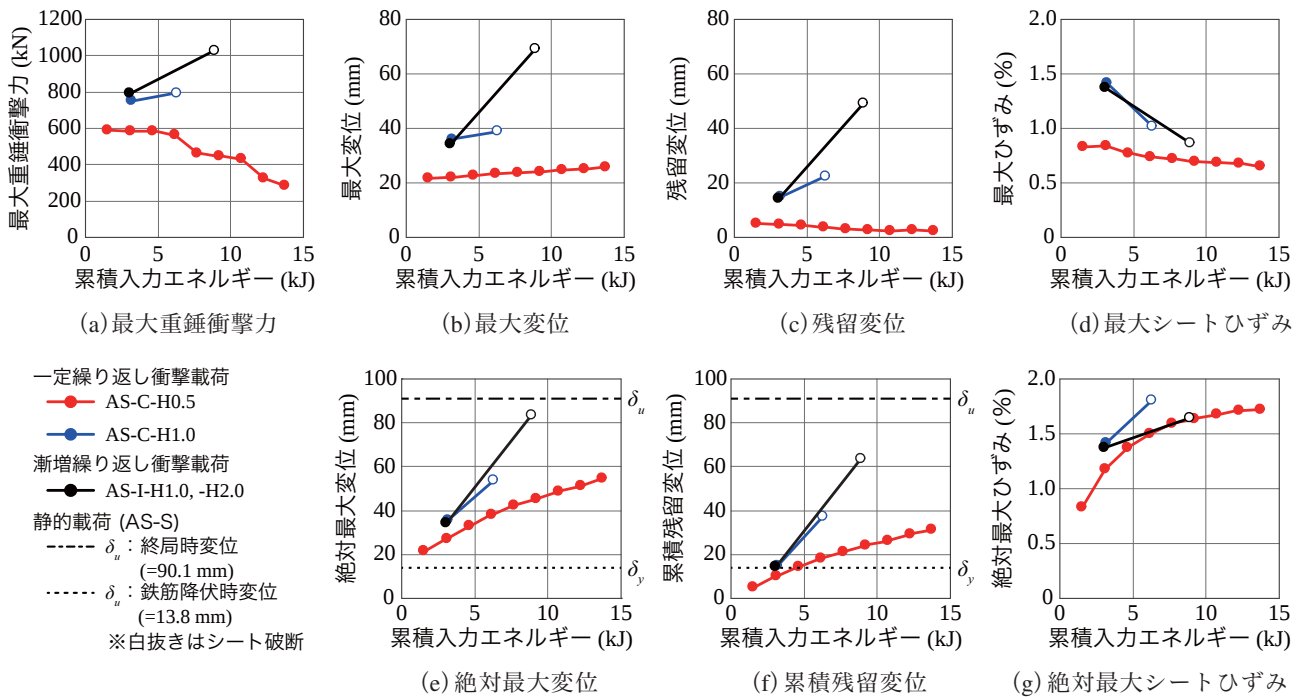


図-2 累積入力エネルギーと各種応答値の関係

錘衝撃力は低下するものの同時に载荷点近傍部の梁の剛性も低下していくことによるものと類推され、必ずしも重錘衝撃力と最大変位が対応しないことが分かる。

(c)図より、残留変位の分布性状を見ると、AS-C-H0.5試験体の場合には、累積入力エネルギーの増加に伴ってその値が減少傾向にあるが、残留変位は平均で約3.5 mmと非常に小さいことが分かる。これは、繰り返し载荷によって载荷点部の損傷も累積し圧壊の傾向が現れることにより梁の耐衝撃性が低下するが、未だAFRPシートは破断に至らず十分補強効果が発揮されていることによるものと推察される。また、シート破断に至ったAS-C-H1.0試験体やAS-I-H1.0,-2.0試験体の場合には、それぞれ20, 40 mm程度以上に到達していることが分かる。

(d)図より、载荷点直下の最大シートひずみの分布性状を見ると、AS-C-H0.5試験体の場合には、大きな減少傾向を示していないことより、最大変位と同様に、繰り返し载荷によるシートの剥離傾向が小さいものと考えられる。一方で、AS-C-H1.0試験体やAS-I-H1.0,-2.0試験体の場合には、シート破断に至っているにも関わらずひずみが大幅に減少している。これは、シート破断箇所がひずみゲージ添付位置と異なることにより、シート破断によって周辺の応力が解放傾向を示したことによるものと推察される。

(e)図より、絶対最大変位の分布性状を見ると、AS-C-H0.5試験体の場合には、入力エネルギーの増加に伴い増加勾配は徐々に小さくなることが分かる。これは、上述のように累積入力エネルギーの増加に伴って、残留変位が徐々に減少していくことが一つの要因として考えられる。静载荷実験における鉄筋降伏変位 δ_y に着目すると、いずれのケースにおいても、絶対最大変位は静载荷時の鉄筋降伏変位 δ_y を上回っており、処女载荷時点でも鉄筋は降伏しているものと推察される。また、終局時変位 δ_u に着目すると、いずれのケースにおいても静的にシートが剥離する変位よりも

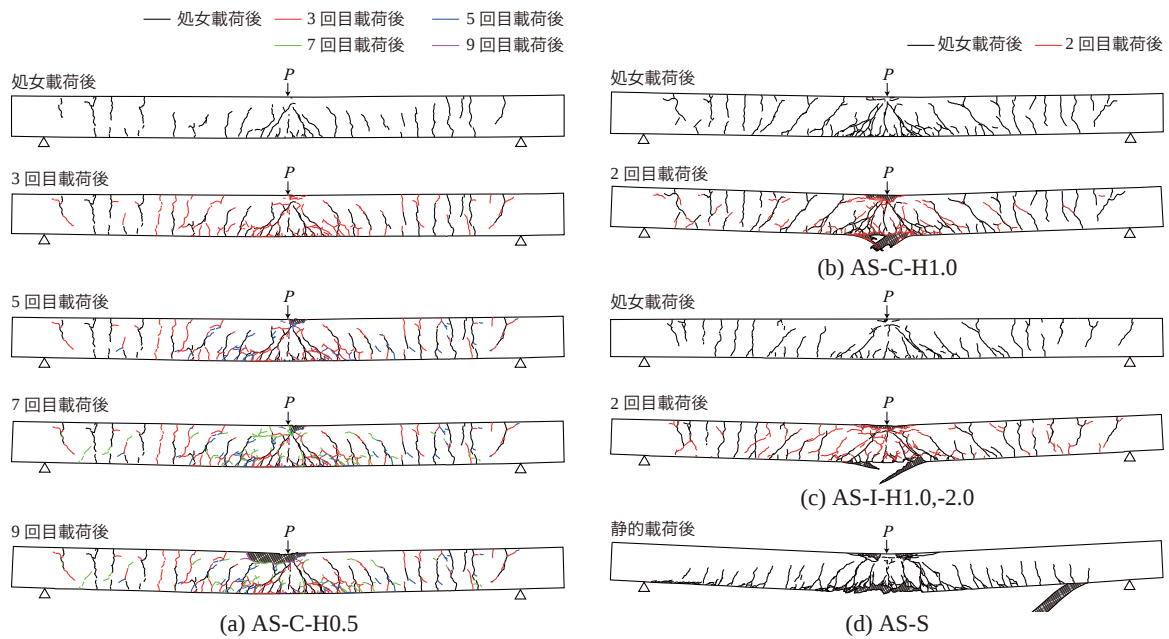
小さい状態で終局に至っていることが確認できる。なお、AS-C-H1.0, AS-I-H1.0,-2.0試験体の場合には、2回目载荷時に δ_u よりも小さい変位でシート破断により終局に至っている。(f)図の累積残留変位に関しても上述と同様の傾向を示している。

(g)図より、絶対最大シートひずみを見ると、AS-C-H0.5試験体の場合には累積入力エネルギーの増大に伴って増加勾配が小さくなっており、約1.7%程度に収束していくことが確認できる。この状態でシート破断に至っていないのは、载荷点近傍部において、繰り返し载荷によりシートの部分剥離が進行し、シートひずみが平均化されていることが一因と考えられる。一方で、AS-C-H1.0, AS-I-H1.0,-2.0試験体の場合には、2回目载荷時にシート破断に至っており、ひずみ測定箇所以外で限界ひずみに達したものと推察される。

3.2 実験終了後におけるひび割れ分布

図-3には、繰り返し衝撃载荷実験および静载荷実験終了後における各試験体側面のひび割れ分布を比較して示している。なお、落下高さ $H=0.5$ mにおける一定繰り返し载荷の場合には落下回数毎(処女载荷, 3回目, 5回目, 7回目, 9回目载荷後)に示しており、繰り返し载荷によるひび割れの進展が分かるように、処女载荷時から順にひび割れを色分けしている。

衝撃荷重载荷時には、いずれの梁においても、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発生している。衝撃荷重载荷時における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、下縁からのひび割れは主曲げの伝搬により発生したものと推察される。また、衝撃荷重载荷によって载荷点近傍部にせん断破壊型のひび割れが顕在化することが分かる。



図－3 衝撃載荷実験終了後におけるひび割れ分布の比較

(a)図には、AS-C-H0.5 試験体におけるひび割れ分布を示しており、9回目載荷時にコンクリート上縁部の圧壊により終局に至っている。3回目載荷後のひび割れ分布を見ると、荷重点上縁部は未だ圧壊せず、下縁部に細かなひび割れが多く発生している。5回目載荷後には、荷重点上縁部に圧壊の傾向が現れ、7、9回目載荷後には累積エネルギーの増加に伴って、圧壊範囲が拡大する傾向が確認できる。しかしながら、シートが破断や剥離には至っていないことより、梁は未だ角折れの傾向は示していないことが分かる。なお、コンクリート上縁部の圧壊が顕在化したことにより、AS-C-H0.5 試験体の場合は、この段階で終局と判断し実験は終了した。

(b)図には、AS-C-H1.0 試験体のひび割れ分布を示している。処女載荷後に着目すると、斜めひび割れの角度は緩やかであり、シートは未だ破断には至っていない。また、荷重点近傍下縁部には、ひび割れが密に発生している。2回目載荷後には荷重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、圧壊領域が狭くシートは破断し終局に至っている。

(c)図には、AS-I-H1.0,-2.0 試験体のひび割れ分布を示している。処女載荷後は、前述の落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ における一定繰り返し衝撃載荷実験時と大きな差異は見られない。2回目載荷後には、荷重点部に狭い領域で圧壊が生じており、シートが破断している様子が分かる。

(d)図には、AS-S 試験体のひび割れ分布を示している。静載荷の場合、曲げひび割れが梁全体に広く分布しており、コンクリート上縁部の圧壊が進展すると共に、シート破断ではなくシート剥離により終局に至っている。また、荷重点近傍の下縁かぶりコンクリートは、シートが付着した状態で剥離していることが確認できることより、AFRPシートとコンクリートの付着は良好であったものと判断される。静載荷時と衝撃荷重載荷時で終局時には共に荷重点部が圧壊しているものの、シートの剥離と破断の違いが生じたのは、静載荷時には徐々に角折れが進行し斜めひび割

れ先端部のピーリング作用が卓越するのに対して、衝撃荷重載荷時には急激に角折れが進行するために損傷が荷重点部に集中したことによるものと推察される。

以上より、静載荷時には荷重点上縁部が圧壊し、「シート剥離」によって終局に至る梁であっても、衝撃載荷実験時に比較的小さいエネルギーが繰り返し作用する場合には、シート破断に至らず、荷重点上縁部が激しく損傷し、「圧壊」により終局に至る。また、比較的大きなエネルギーが繰り返し作用する場合には、荷重点上縁部が圧壊すると共に急激に角折れが進行し損傷が荷重点部に集中することにより、「シート破断」によって終局に至るものと推察される。

4. まとめ

- 1) 比較的小さい入力エネルギーが繰り返し作用する場合には、繰り返し載荷によってコンクリート上縁部の損傷が蓄積し、圧壊が顕在化する。これにより、累積入力エネルギーの増加に伴い、最大重錘衝撃力は低下していくものの、荷重点近傍部の梁の剛性も低下することにより、最大変位は増加傾向を示す。
- 2) 静載荷時に「シート剥離」で終局に至る梁において、衝撃荷重載荷時に比較的小さい入力エネルギーが繰り返し作用する場合にはシート破断や剥離に至らずコンクリート上縁部の「圧壊」で終局に至る。
- 3) 一方で、大きな入力エネルギーが繰り返し作用する場合には角折れの傾向が顕在化し、「シート破断」によって終局に至る。

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、研究で利用した 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、感謝の意を表します。