

目付量 415 g/m^2 AFRP シート 曲げ補強 RC 梁の繰り返し衝撃荷重載荷実験Consecutive impact loading test of RC beams strengthened with AFRP sheet having 415 g/m^2 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)
 三井住友建設 (株) F 会員 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

室蘭工業大学大学院 F 会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 室蘭工業大学大学院 学生員 瓦井智貴 (Tomoki Kawai)
 室蘭工業大学大学院 学生員 Le Huy Sinh

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た。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荷重の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。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よりも複数回の繰り返し載荷状態が想定される。繰り返し載荷の場合には、FRP 材接着面の剥離が進展することが想定されることから、RC 梁の耐衝撃性向上は単一載荷時とは大きく異なるものと判断される。従って、FRP 材を用いて補強を施した RC 部材の耐衝撃性向上法を確立するためには、単一載荷時は勿論のこと繰り返し載荷時における耐衝撃性状を把握することが肝要であるものと判断される。

このような観点から、本研究では之まで実験研究に用いてきた RC 梁 (幅 × 高さ: $200 \times 250 \text{ mm}$, 純スパン長: 3 m) を対象に、目付 415 g の AFRP シートを下面接着した場合を対象に、繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した。実験は、 300 kg 重錘を用い、重錘落下高さを $1, 2, 2.5, 3 \text{ m}$ に設定して、シートが剥離や破断で終局に至るまで落下高さを増加させて実験を行うこととした。また、処女載荷の落下高さを順次上げた場合についても実施している。

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 12 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 シート下面接着補強) 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目として繰り返し載荷時の設定落下高さ (m) を示している。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

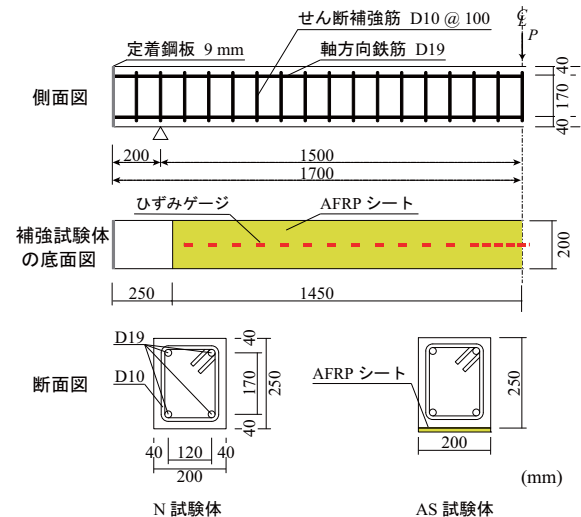


図-1 試験体概要

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¹⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持仮定とコンクリートと 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 $3,500 \mu$ 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、上述のように $200 \times 250 \times 3,000 \text{ mm}$ 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。

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、上述のように $1, 2, 2.5, 3 \text{ m}$ に設定している。繰り返し載荷においては、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。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。

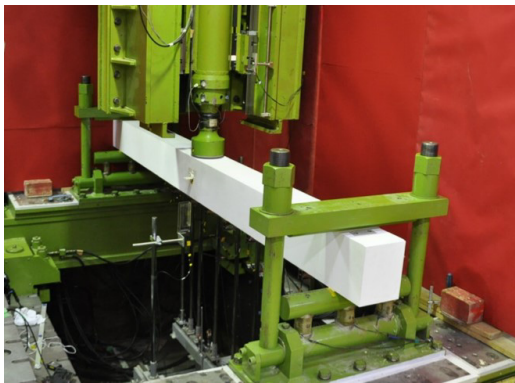
本実験の測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、単に支点反力)、スパン中央点変位 D (以後、単に変位) およびシート各点の軸方向ひずみ ε (以後、単にひずみ) で

表－1 試験体一覧

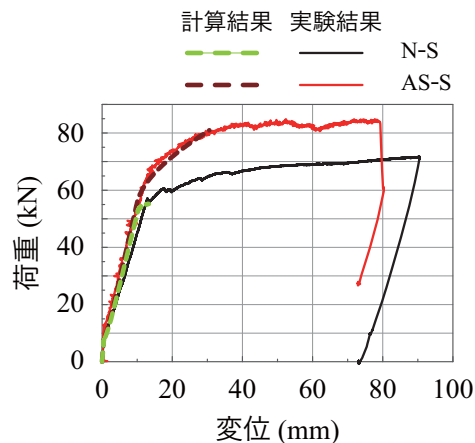
試験体名	実験ケース名	設定重錘 落下高さ H (m)	実測重錘 落下高さ H' (m)	実測入力 エネルギー E_i (kJ)	累積実測入力 エネルギー E_{qi} (kJ)	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋 降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋 降伏強度 f_{sy} (MPa)	計算曲げ 耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断 耐力 V_{usc} (kN)	せん断 余裕度 α	補強材 剥離の の有無
N-S	N-S	静的	-	-	-	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	5.98	
N-CI-H1	N-CI-H1-1	1.00	1.01	2.97	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							
N-CI-H2.5	N-CI-H2.5-2.5	2.50	2.29	6.73	6.73	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	6.0	
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 FRP補強材の力学的特性値(公称値)

種類	幅 B (mm)	目付量 (g/m ²)	弾性係数 E_r (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 衝撃荷重載荷実験装置と試験体の設置状況



図－2 荷重－変位関係

ある。なお、重錘衝撃力 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、変位 D はレーザ式非接触型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

3.1 静載荷実験

図－2には、静載荷実験から得られたAFRPシート接着

曲げ補強RC梁と無補強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、本論文では、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。なお、この時のスパン長に対する変位の割合は2.7%程度である。

これより、目付415 g/m²の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27%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、まず無補強試験体である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上々に増加する傾向にあることが分かる。一方、AS試験体の場合には、実験結果は計算結果と終局点まで良く対応していることが分かる。実験結果は、その後も増加の傾向を示し、80 mm程度の変形量に到達後剥離破壊によって終局に至っており、曲げ圧壊型で終局に至っている。過去の研究成果に基づいて本試験体の破壊モードを推定すると、計算終局モーメントに対する計算降伏曲げモーメントが0.71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 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 P 、支点反力波形 R 、載荷点変位波形 D を処女載荷時の落下高さ毎に比較して示している。

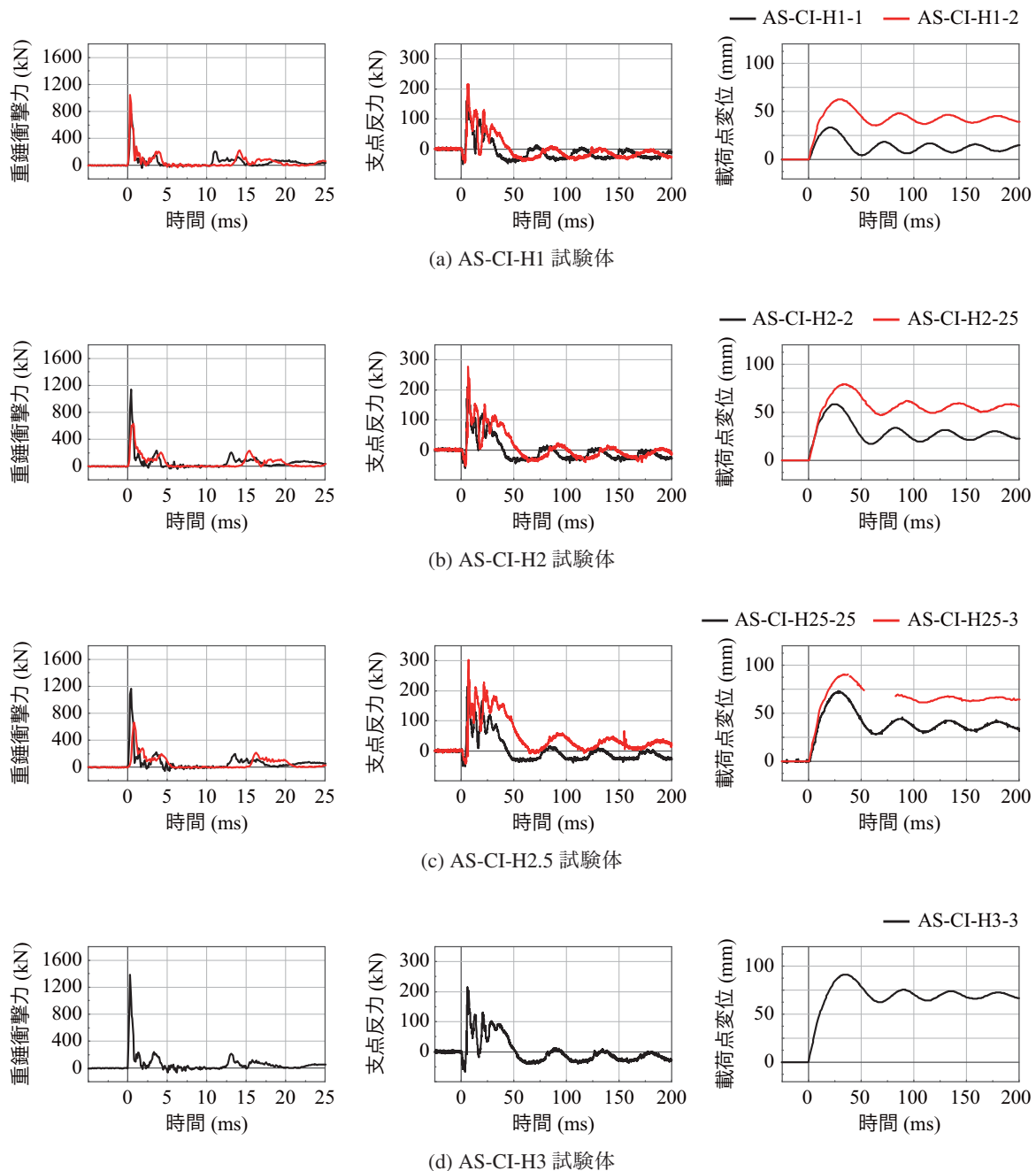


図-3: 繰り返し載荷時における各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 D に関する時刻歴応答波形の比較

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されていない。

各実験ケースの波形性状を見ると、重錘衝撃力波形 P 、支点反力 R 、変位 D 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 P 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 程度伸びており、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。最大変位値は、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 $H=2\text{m}$ の場合が $H=2.5\text{m}$ の場合よりも大きい。最大支点反力は前述の処女載荷 $H=1\text{m}$ の場合と同様の傾向を示し、かつ処女載荷 $H=1\text{m}$ の場合より約 60kN 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 $59, 79\text{mm}$ 、残留変位は約 $26, 55\text{mm}$ である。これらを前述の処女載荷が $H=1\text{m}$ の場合における $H=2\text{m}$ 落下の場合と比較すると、処女載荷時の場合における最大変位は繰り返し載荷時の 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、 60% 程度となっている。これより、処女載荷が $H=1\text{m}$ の場合には、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。また、 $H=2.5\text{m}$ の場合にはシート破断によって終局に至っているが、最大変位及び残留変位はそれぞれ約 $79\text{mm}, 55\text{mm}$ に達している。最大変位は静載荷時と同程度になっており、 $H=2\text{m}$ 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いま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 $H=1\text{m}$ 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 $H=2.5\text{m}$ の場合である。この場合は、 $H=2.5\text{m}$ 落下時にはシート破断には至らず、 $H=3\text{m}$ 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。重錘衝撃力を見ると、 $H=3\text{m}$ の場合における最大衝撃力値は $H=2.5\text{m}$ 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、 $H=3\text{m}$ 落下の場合が大きい。一方で、 $H=3\text{m}$ の場合における主波動継続時間は、処女載荷である $H=2.5\text{m}$ の場合に比して 25ms 程度伸びており、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、最大変位は $H=2.5\text{m}, 3\text{m}$ 載荷時でそれぞれ約 $73, 91\text{mm}$ 、残留変位は $38, 64\text{mm}$ である。最大変位に関しては、前述の処女載荷が $H=2\text{m}$ の場合における $H=2.5\text{m}$ 落下時には最大変位到達前後に破断に至っている可能性が高いことより、 6mm 程度小さいだけである。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 の場合がシート破断に至った AS-CI-H2.5-2.5 の場合の 69% 程度に留まっている。なお、 $H=3\text{m}$ の場合には繰り返し載荷による損傷によって、最大変位は静載荷時のそれよりも大きく約 91mm に達しており、残留変位も最も大きく 64mm 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 $H=3\text{m}$ 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 1390kN に達している。一方で、最大支点反力は約 215kN 程度で比較的小さく、処女載荷時の落下高さが $H=2.5\text{m}$ の $H=2.5\text{m}$ 落下時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 $90, 67\text{mm}$ 程度であり、処女載荷時の重錘落下高さが $H=2.5\text{m}$ における $H=3\text{m}$ 落下時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、以下の事項が明らかに

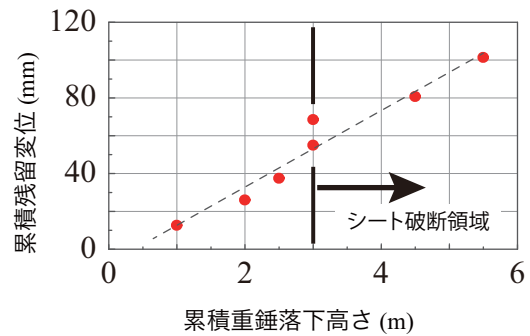


図-4 累積落下高さと累積残留変位の関係

なった。すなわち、(1) 繰り返し載荷の状態では重錘落下高さが $H=2\text{m}$ の時点でシート破断によって終局に至る。(2) 但し、単一載荷の状態では、未だ終局に至らず、 $H=3\text{m}$ で終局に至る。(3) シート破断によって終局に至る累積落下高さを調べると 3m 以上となっており、終局に至る損傷が累積入力エネルギーと線形関係にある可能性が示唆される。

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。図中、処女載荷及び繰り返し載荷も含めて、累積落下高さが 3m でシート破断によって終局に至っている。図より、累積残留変位は、処女載荷時及び繰り返し載荷時、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、累積落下高さ言い換えると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。

4. まとめ

本研究では、無補強試験体と共に、補強材料として目付が 415g/m^2 のアラミド繊維 (AFRP) シートをを用いた RC 梁を対象に、静荷重載荷実験と共に質量 300kg の重錘を用いた繰り返し載荷による重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本実験では、落下高さを $1, 2, 2.5, 3\text{m}$ に設定し、シート剥離あるいは破断によって終局に至るまで順次落下高さを増加させて実験を行った。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では、FRP シート接着曲げ補強を施す場合には、無補強試験体のような角折れは発生せず、梁は斜めひび割れ先端部がシートを押し下げるピーリング作用によってシートが剥離し、終局に至る。
- 2) 衝撃荷重載荷の場合には、静載荷時には繰り返し載荷回数に関係なく、シート破断により終局に至る。
- 3) 累積重錘落下高さと累積残留変位の関係を調べると、そ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ることが明らかになった。

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。