

衝撃荷重载荷により損傷した扁平 RC 梁に対する AFRP シート接着補強効果

Strengthening effects of AFRP sheet for flat RC beams damaged due to impact loading

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
寒地土木研究所
三井住友建設
釧路工業高等専門学校

○ 学生会員 酒井 啓介 (Keisuke Sakai)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
正会員 今野 久志 (Hisashi Konno)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、国内外において、地震や集中豪雨に起因する落石や土石流、強風や竜巻による飛来物被害などの発生件数が増加している。そのため、衝撃的な外力によって構造物が損傷し、時には人命が危機に晒され、財産に損害が及ぶ災害が数多く報告されている。従って、種々の既設構造物の耐衝撃性向上法の確立が急務となっている。

著者らは、これまでアラミド繊維製連続シート（以後、AFRP シート）接着工法による既設鉄筋コンクリート（RC）部材の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、AFRP シート曲げ補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施してきた。その結果、AFRP シート接着工法により RC 梁の耐衝撃性を向上可能であることを明らかにしている。

また、この種の補強工法を実用化するためには、実構造物を想定し、モデル化した試験体による検討を行う必要がある。しかしながら、これまでの実験は、緩衝材を有しない矩形 RC 梁に限定した検討となっており、実用化を考慮した検討には至っていないのが現状である。

このような観点より、本研究では、衝撃荷重载荷により損傷を受けた既設 RC 製ロックシェッド頂版部の補強方法として、AFRP シート接着工法に着目し、その補強効果を検討することを目的に、敷砂緩衝材を設置した扁平 RC 梁を対象とした重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は AFRP シート補強の有無、補強前の損傷の有無および重錘落下高さを変化させた全 5 体である。本試験体は一般的な RC 覆工の頂版部を模擬しているため、緩衝材として敷砂を設置している。緩衝材の寸法は実規模 RC 覆工の寸法に相似則を適用して決定した。試験体名の第 1 項は、損傷および補強の有無（N: 無補強, A: AFRP シート補強, DA: 損傷を与えた後シート補強）を示しており、第 2 項の H に付随する数値は落下高さ (m) を示している。

図-1 には、試験体の概要を示している。試験体は、断

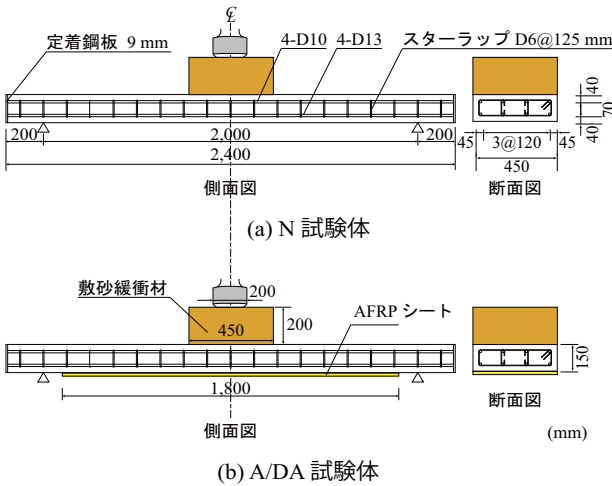


図-1 試験体の形状寸法



写真-1 ひび割れ注入の状況

面寸法（幅×高さ）が 450×150 mm の扁平断面を有する複鉄筋 RC 梁である。試験体の配筋状況は、一般的な RC 覆工の頂版部を模擬しており、上縁および下縁鉄筋には、それぞれ D10 および D13 を 4 本ずつ配置している。

かぶり厚は、鉄筋からの芯かぶりで高さ方向 40 mm、幅方向 45 mm としている。また、中間拘束筋として軸直角方向に D6 を 120 mm 間隔で配筋している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 25.2 MPa、軸方向鉄筋の降伏強度は D10 および D13 でそれぞれ 379, 383 MPa であった。スターラップ D6 の降伏強度は 363 MPa であった。

DA 試験体は、事前载荷として質量 300 kg の鋼製重錘を $H = 3.0$ m から敷砂緩衝材上に落下させる衝撃载荷を行い、ひび割れ補修を施した後 AFRP シートを接着している。なお、図-2 には事前载荷終了後におけるひび割れ分布性状と残留変位を示している

2.2 実験方法および測定方法

衝撃载荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製

表-1 実験ケース

試験体名	載荷履歴	載荷方法	設定落下高さ H(m)	シート目付け量 (g/m ²)
N-H4.0	無	単一載荷	4.0	-
A-H4.0			4.0	830
A-H6.0			6.0	
DA-H4.0	4.0			
DA-H6.0	有 *		6.0	

* 質量 300 kg の重錘を $H = 3.0$ m から落下

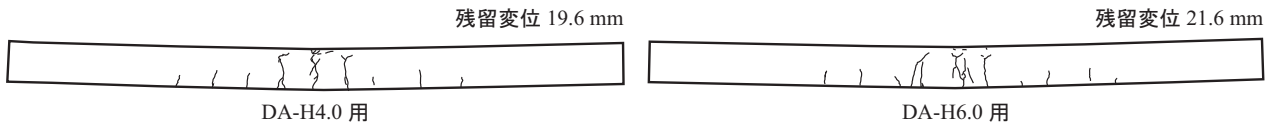


図-2 事前载荷終了後のひび割れ分布性状

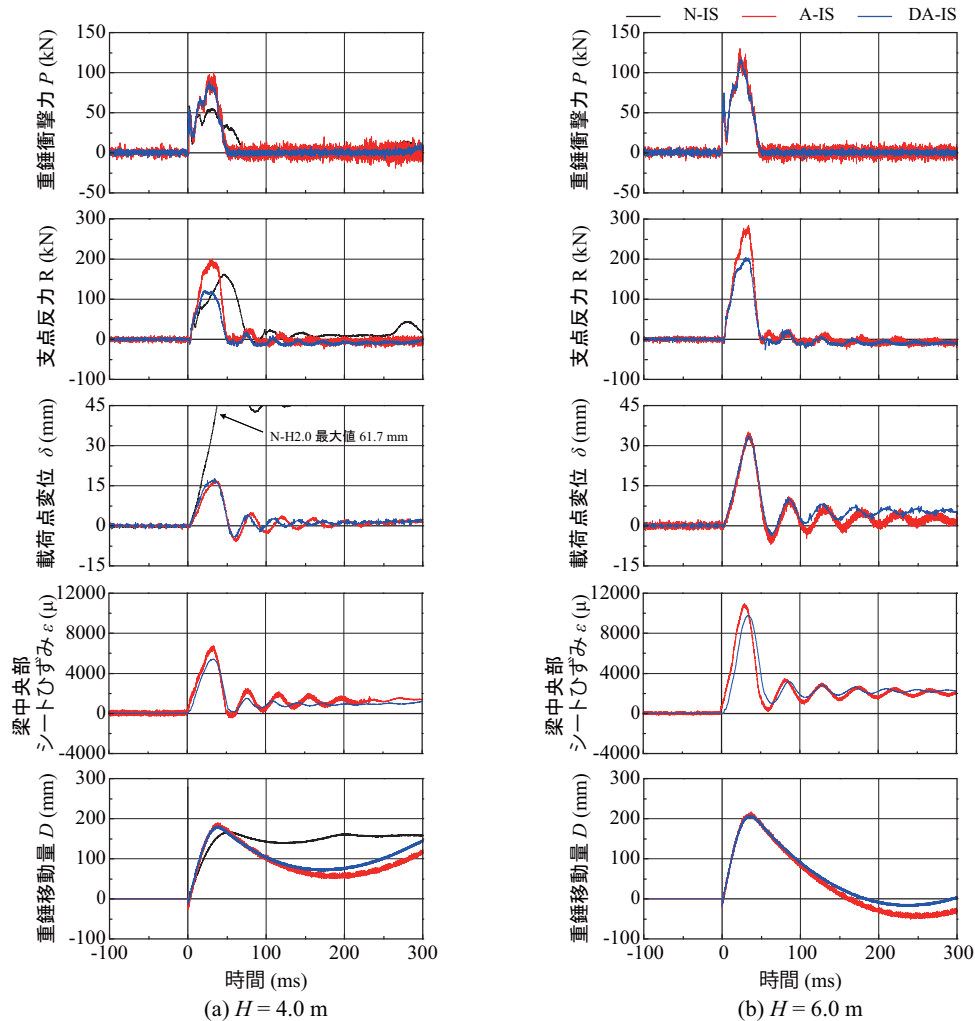


図-3 各種時刻歴応答波形

重錘を所定の高さから扁平RC梁のスパン中央部に一回のみ自由落下させて行った。重錘底部は、2 mm のテーパを有する球面状となっている。扁平RC梁は、浮き上がり防止治具付きの支点上に設置しており、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっている。測定項目は重錘衝撃力 P 、両支点の合支点反力(以後、支点反力) R 、载荷点変位 δ 、重錘移動量 D および AFRP シートひずみ ε である。なお、実験終了後には扁平RC梁を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

2.3 ひび割れ補修およびシート補強

事前载荷によって損傷を受けたRC梁の補修は、長期耐久性に対して有害であるとされる 0.2 mm 以上のひび割れ部を対象にひび割れ注入材としてエポキシ樹脂を注入することにより行っている(写真-1参照)。なお、本研究ではしなやかな補強材であるアラミド繊維製連続シートを使用することから、樹脂注入後にRC梁底面を平滑化する

などの表面処理は行っていない。また、補修に用いたエポキシ樹脂の圧縮強度および引張強度の公称値はそれぞれ 60 MPa および 30 MPa 以上となっている。AFRP シートの接着は、梁底面のブラスト処理面(処理深さ 1 mm 程度)にプライマーを塗布し、指触乾燥状態にあることを確認した後、含浸接着樹脂を用いて実施した。DA 試験体のブラスト処理は作業性等を考慮し、事前载荷前にあらかじめ実施している。表-2には、AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している。

2.4 緩衝材概要

本実験においては、厚さ 200 mm の敷砂緩衝材を梁中央部の 450 mm 四方の範囲に設置している。用いた緩衝材は北海道石狩市知津狩産で分類が細砂の敷砂であり、粗粒率、最大乾燥密度および最適含水比はそれぞれ 1.37, 1.516 g/cm³, 19% となっている。緩衝材は、鋼製枠を使用し、厚さ 100 mm ごとに足踏みによって各層ごとの締め

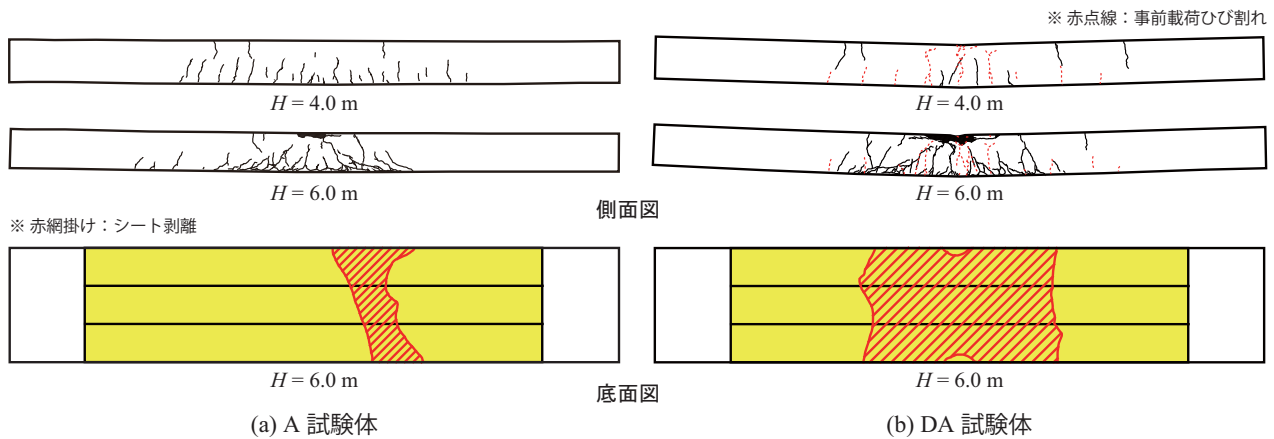


図-4 実験終了後のひび割れ性状

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維 目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
830	1176	0.572	2.06	118	1.75

を行い、所定の厚さである 200 mm に成形した。また、実験時における敷砂の含水率は 8 ~ 10 % 程度であった。

3. 実験結果と考察

3.1 時刻歴応答波形

図-3 には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位、梁中央部シートひずみ、および重錘移動量に関する応答波形を示している。図より、試験体の種類によらず、重錘落下高さ H が大きい場合ほど各応答値が大きくなる傾向にあることが分かる。また、重錘落下高さ $H = 4.0$ m の結果より、AFRP シート補強の場合には、無補強の場合に比較して、重錘衝撃力や支点反力の主波動継続時間が短く、かつ載荷点変位が小さくなっていることが分かる。これは、AFRP シート補強により、扁平 RC 梁の曲げ剛性が向上したことによるものと考えられる。

各種応答波形に及ぼす損傷の有無の影響を見ると、重錘衝撃力波形は、損傷の有無によらず同様の波形性状を示していることが分かる。また、支点反力は、損傷を有する DA 試験体の場合が無損傷の A 試験体に比較して振幅が小さい。これは、DA 試験体における上縁コンクリートの損傷や、曲げひび割れおよび残留変形などが影響しているものと考えられる。

載荷点変位および梁中央部のシートひずみは、損傷の有無によらず概ね同様の性状を示しているものの、主波動励起後の減衰自由振動の周期は損傷を有する DA 試験体の場合が若干短くなる傾向にある。これは、シート補強前の事前載荷により梁の主鉄筋が降伏したため、鉄筋のひずみ硬化の影響が現れていることによるものと推察される。

重錘移動量においては、その最大振幅は A, DA 試験体ともにほぼ同様であるものの、その後のリバウンド(復元)量は損傷を有する DA 試験体の方が小さい。これは、DA 試験体の場合には、残留変形を有する状態でシート接着しているため、損傷を有しない A 試験体よりも AFRP シートによる変位の復元力が小さいことによるものと推察さ

れる。

3.2 ひび割れ性状

図-4 には、実験終了後における各試験体側面のひび割れ分布および底面のシートの剥離状況を示している。側面図における赤点線は事前載荷時に発生したひび割れである。また、底面図において、落下高さ $H = 4.0$ m の場合には、シートの剥離は確認されなかったため示していない。

図より、落下高さ $H = 4.0$ m における DA 試験体の場合には、事前載荷時に発生したひび割れと異なる位置にひび割れが発生していることが分かる。このことから、ひび割れ注入によりひび割れが適切に補修されていることが分かる。また、損傷を有する DA 試験体の場合が A 試験体よりもひび割れ本数が少ない。これは、DA 試験体の場合には、ひび割れ注入箇所以外の位置にひび割れが発生するため、ひび割れ本数が少なく、開口幅が大きくなる傾向になったためと考えられる。

落下高さ $H = 6.0$ m における DA 試験体の場合においても事前載荷時に発生したひび割れと異なる位置にひび割れが発生している。また、DA 試験体の場合 A 試験体よりも上縁コンクリートの圧壊が著しく、底面におけるシートの剥離範囲も広い。これは、事前載荷で純スパンの 1 % 程度の残留変位が生じ、上縁コンクリートにもひび割れ等の損傷が生じるなど、初期損傷の影響を受けたためと考えられる。

3.3 ひずみ分布性状

図-5 には、AFRP シートのひずみ分布の推移状況に及ぼす損傷の有無の影響を検討するため、経過時間 $t = 10, 20, 30, 35$ ms におけるひずみ分布を比較して示している。

落下高さ $H = 4.0$ m における A 試験体の場合には、スパン中央部を頂点とする左右対称の三角形分布を示し、時間の経過とともにひずみレベルが大きくなる傾向にあることが分かる。一方、DA 試験体の場合には、分布性状は A 試験体の場合と概ね同様であるものの、載荷点近傍における数箇所分布勾配が急激に変化する状況が認められる。これは、図-4 に示したように、DA 試験体の場合には開口幅の大きいひび割れが局所的に発生していることが影響しているものと推察される。

落下高さ $H = 6.0$ m における A 試験体の場合には、経過時間 $t = 20$ ms までは概ね三角形のひずみ分布を呈し

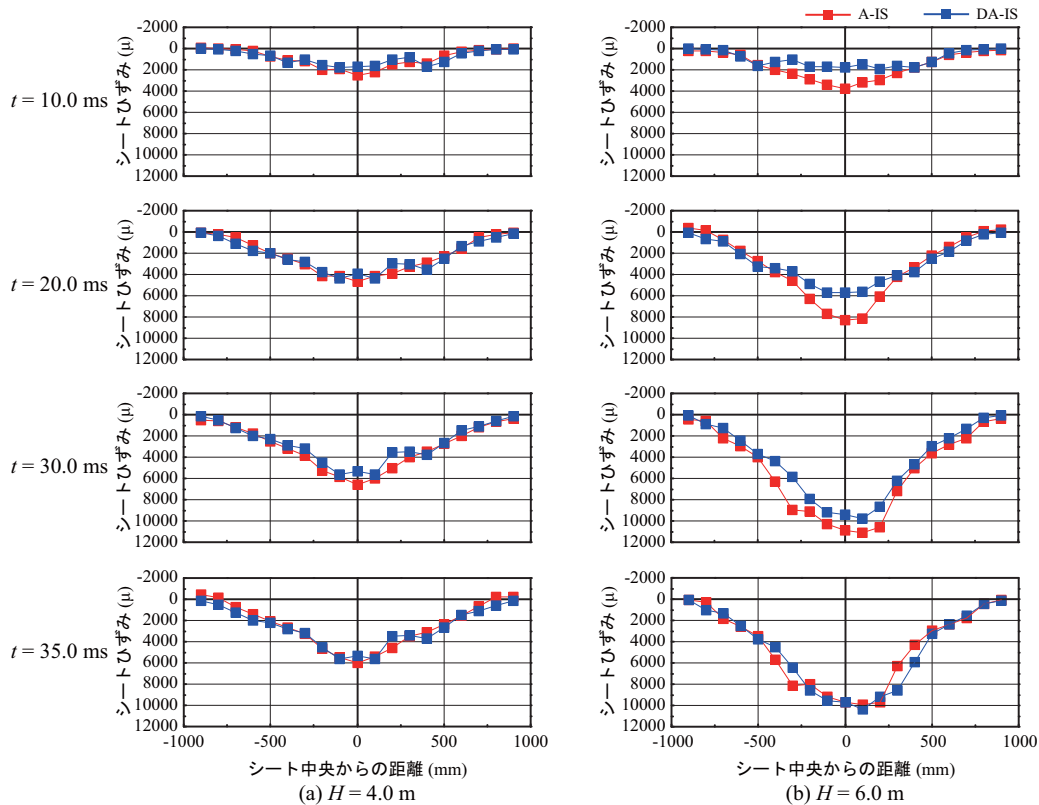


図-5 AFRP シートひずみ分布性状

ているものの、 $t = 30$ ms 以降においては、分布勾配が急激に変化する箇所が見受けられる。これは、図-4における底面のシートの剥離状況に示されているように、部分剥離を生じている箇所と対応しているものと考えられる。

一方、DA 試験体の場合には、 $t = 20$ ms までは A 試験体よりも荷重点近傍のひずみが小さい傾向にある。これは、DA 試験体の場合には、前述の図-2や図-4に示されているように事前荷重による残留変形や残留ひずみを有しているため、衝撃応力の伝播が A 試験体よりも遅れることなどによるものと推察される。また、 $t = 30$ ms 以降においては、A 試験体と同程度のひずみが荷重点近傍に発生している。これは、上縁コンクリートの圧壊が顕在化するとともに梁の曲率が増加し、A 試験体と同程度の荷重点変位を示したことに対応している。

以上のことから、衝撃荷重荷重によって残留変位がスパン長の 1% 程度に至る損傷を受けた場合においても、AFRP シート接着工法により、無損傷の場合と同程度の耐衝撃性向上効果を期待できることが明らかになった。ただし、落下高さが大きい場合には事前荷重による損傷の影響が顕在化しやすいことに留意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、衝撃荷重荷重により損傷した RC 部材の合理的な耐衝撃性向上法として、AFRP シート接着工法を提案し、その効果を扁平 RC 梁の重錘落下衝撃実験により検討した。本検討では特に、損傷の有無、および重錘落下高さに着目して扁平 RC 梁の衝撃荷重実験を行った。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 衝撃荷重による損傷を有する場合においても AFRP シート接着補強によって、扁平 RC 梁の耐衝撃性を向上可能である。
- 2) AFRP シート接着した扁平 RC 梁は、シートの部分剥離を伴い、上縁コンクリートが圧壊して終局に至る。
- 3) 損傷の有無によって最大支点反力は大きく異なるが、その他の応答波形の性状は大略同様である。ただし、落下高さが大きい場合には、損傷の有無がひび割れ性状やシートの剥離性状に大きな影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 今野久志，西 弘明，栗橋祐介，岸 徳光：AFRP シート接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.721-726，2013.7
- 2) 岸 徳光，今野久志，西 弘明，三上 浩：衝撃荷重を受けた RC 梁のひび割れ補修前後における残存衝撃耐力，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1251-1260，2005.3
- 3) 三上 浩，栗橋祐介，今野久志，岸 徳光：衝撃荷重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，2015.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2007.
- 5) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案)，1998.