

## AFRP シート接着工法を施した損傷度の異なる扁平 RC 梁の耐衝撃性

Upgrading effect due to AFRP sheet bonding on impact resistant capacity of damaged flat RC beams with different levels

|            |   |      |                          |
|------------|---|------|--------------------------|
| 室蘭工業大学大学院  | ○ | 学生員  | 酒井 啓介 (Keisuke Sakai)    |
| 寒地土木研究所    |   | 正 員  | 今野 久志 (Hisashi Konno)    |
| 室蘭工業大学大学院  |   | 正 員  | 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi) |
| 三井住友建設 (株) |   | フェロー | 三上 浩 (Hiroshi Mikami)    |
| 釧路工業高等専門学校 |   | フェロー | 岸 徳光 (Norimitu 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、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、これまでアラミド製連続繊維シート（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<sup>1)</sup>。また、ロックシェッドの頂版部を模擬した扁平 RC 梁を対象に、敷砂緩衝材の有無や AFRP シート補強の有無を変化させた衝撃载荷実験を実施するとともに、衝撃荷重により損傷した RC 梁を対象とした AFRP シート補強効果に関する検討も行い、AFRP シートの補強効果が期待できることを明らかにしている<sup>2)</sup>。しかしながら、衝撃荷重による損傷度合いが AFRP シートの補強効果に及ぼす影響やその補強設計に関する検討は十分に行われていないのが現状である。

このような背景より、本研究では、損傷度の異なる扁平 RC 梁を対象に AFRP シート曲げ補強による耐衝撃性向上効果を検討することを目的として、重錘衝突による損傷度、AFRP シート補強の有無、重錘落下高さなどを変化させた重錘落下衝撃実験を行った。また、緩衝材の有無や AFRP シート補強の有無に関する既往の実験結果を含めて、ロックシェッド頂版部の合理的な耐衝撃性向上法や補強設計法の提案に向けた検討を行った。

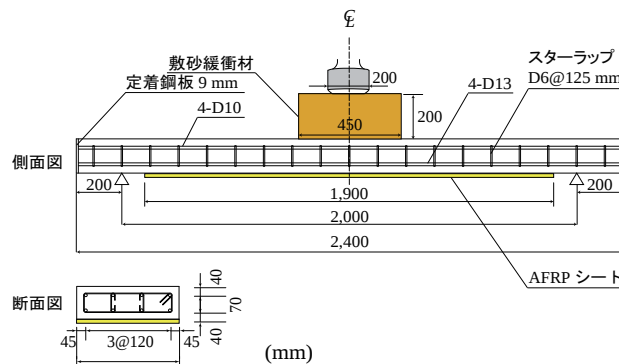


図-1 試験体概要図

## 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、補強の有無、緩衝材の有無、重錘落下高さ、補強前の損傷載荷条件を変化させた17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。試験体名の第1項目は、補強の有無（N：なし、A：あり）と緩衝材の有無（N：なし、C：あり）の組合わせを示しており、第2項目のIに付随する数値は、設定重錘落下高さを示している。損傷載荷を行っている場合には、第3項目に損傷載荷における緩衝材の有無（DN：なし、DC：あり）と設定重錘落下高さの組合わせを示している。

図-1 には、試験体の概要を示している。試験体は、断

表-1 実験ケースの一覧

| 試験体名          | 本載荷 (AC 梁は補強後の載荷) |            |                | 補強前の損傷載荷   |                | 備考          |
|---------------|-------------------|------------|----------------|------------|----------------|-------------|
|               | 補強の有無             | 緩衝材の有無     | 重錘落下高さ * H (m) | 緩衝材の有無     | 重錘落下高さ * H (m) |             |
| NN-I0.5       | なし                | なし         | 0.5 (0.45)     | -          | -              |             |
| NN-I1.0       |                   |            | 1.0 (0.91)     | -          | -              |             |
| NN-I1.5       |                   |            | 1.5 (1.34)     | -          | -              |             |
| NC-I2.0       |                   | あり         | 2.0 (1.81)     | -          | -              |             |
| NC-I3.0       |                   |            | 3.0 (2.64)     | -          | -              |             |
| NC-I4.0       |                   |            | 4.0 (3.59)     | -          | -              |             |
| AC-I4.0       | あり                | あり         | 4.0 (3.59)     | -          | -              |             |
| AC-I5.0       |                   |            | 5.0 (4.57)     | -          | -              |             |
| AC-I6.0       |                   |            | 6.0 (5.28)     | -          | -              |             |
| AC-I4.0-DC3.0 |                   |            | 4.0 (3.59)     | あり         | 3.0 (2.64)     |             |
| AC-I5.0-DC3.0 |                   |            | 5.0 (4.57)     |            | 3.0 (2.64)     |             |
| AC-I6.0-DC2.0 |                   |            | 6.0 (5.28)     |            | 2.0 (1.81)     | NC-I2.0 を補強 |
| AC-I6.0-DC3.0 |                   |            | 6.0 (5.28)     |            | 3.0 (2.64)     | NC-I3.0 を補強 |
| AC-I6.0-DC4.0 |                   |            | 6.0 (5.28)     | 4.0 (3.59) | NC-I4.0 を補強    |             |
| AC-I6.0-DN0.5 |                   |            | 6.0 (5.28)     | なし         | 0.5 (0.45)     | NN-I0.5 を補強 |
| AC-I6.0-DN1.0 |                   |            | 6.0 (5.28)     |            | 1.0 (0.91)     | NN-I1.0 を補強 |
| AC-I6.0-DN1.5 | 6.0 (5.28)        | 1.5 (1.34) | NN-I1.5 を補強    |            |                |             |

\* 設定落下高さ、( )内は実測重錘落下高さ

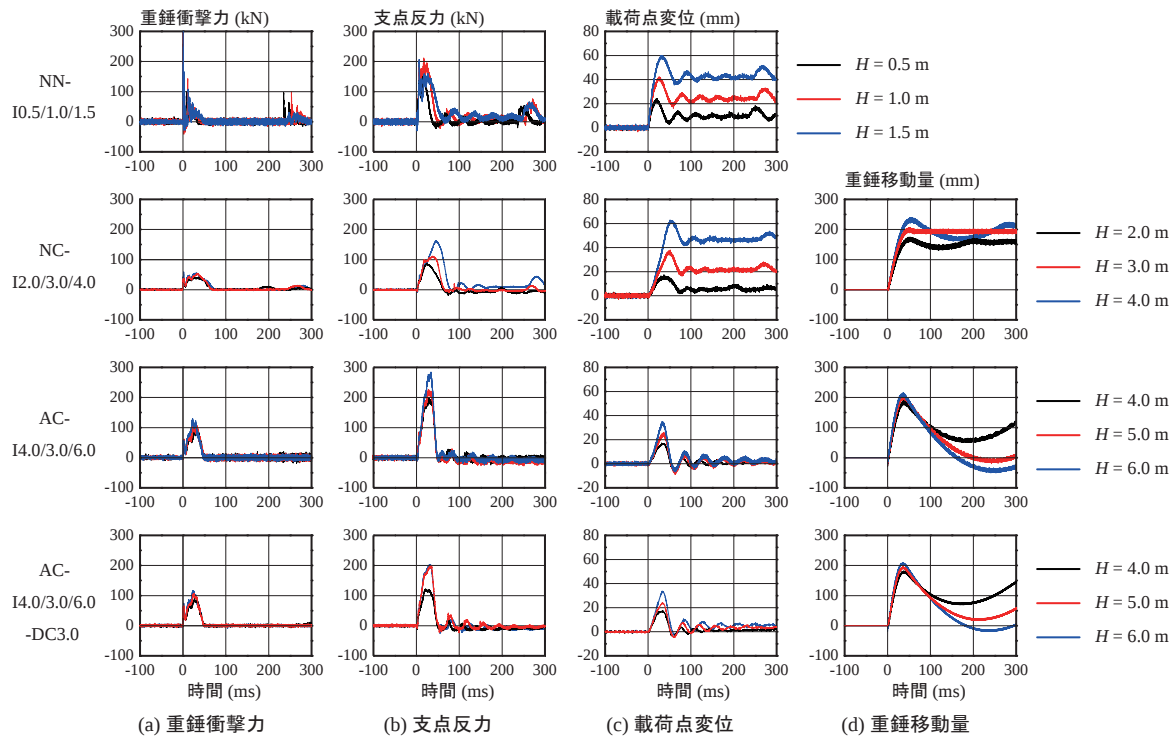


図-2 NN,NC,AC および AC-DC3.0 梁の時刻歴応答波形

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

| 繊維<br>目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 保証<br>耐力<br>(kN/m) | 厚さ<br>(mm) | 引張<br>強度<br>(GPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 破断<br>ひずみ<br>(%) |
|----------------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 830                              | 1,176              | 0.572      | 2.06              | 118               | 1.75             |

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いるため、上縁鉄筋量が下縁鉄筋量の 50 % 程度となるように設定した。すなわち、上下縁でそれぞれ D10, D13 を 4 本ずつ用い 120 mm 間隔で配置した。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 375, 377 MPa であった。

本実験で設置した敷砂緩衝材は、450 mm 四方で厚さ 200 mm のものを梁中央部の範囲に成形している。敷砂は北海道石狩市津路産で分類が細砂であり、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/cm<sup>3</sup>, 19 % となっている。また、実験時における含水率は 8 ~ 10 % 程度であった。

## 2.2 実験方法および測定方法

衝撃載荷実験は、質量 300 kg、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一回のみ自由落下させて行った。損傷載荷時の落下高さは、RC 梁の残留変位が純スパンの 2 % 程度以下になるように設定した。

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)  $R$ 、載荷点変位  $\delta$ 、重錘移動量  $D$  である。重錘移動量は敷砂への重錘貫入量と RC 梁のたわみ量が加算された物理量である。

## 2.3 ひび割れ補修およびシート補強

損傷載荷後の補修は、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。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。表-2 には、AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 時刻歴応答波形

図-2 および 図-3 には、衝撃載荷実験に関する各種時刻歴応答波形を示している。

図-2 より、NN 梁の重錘衝撃力波形は、継続時間が短く振幅の大きい波形が励起した後、振幅の小さい波形が発生している。これは、重錘が RC 梁に衝突した直後、わずかに反発し再度衝突したことによるものと考えられる。なお、最大振幅は、設定落下高さ  $H$  が大きい場合ほど大きい。NC 梁の重錘衝撃力波形は、最大振幅が 50 kN 程度で、主波動継続時間が  $t = 70$  ms 程度の波動が励起していることが分かる。なお、設定落下高さ  $H$  の増加に伴って継続時間が長くなる傾向にあるものの、最大振幅はほぼ同等である。AC 梁の場合には、損傷載荷の有無によらず、NC 梁よりも最大振幅が大きく、継続時間は短い。

NN 梁の支点反力波形は、正弦半波に高周波成分が合成された波形を示している。主波動の継続時間は、設定落下高さ  $H$  が大きい場合ほど大きい。最大振幅は、 $H = 0.5$  m の場合よりも  $H = 1.0$  m の場合が大きいものの、 $H = 1.5$  m の場合には  $H = 1.0$  m よりも小さい。これは、 $H = 1.5$  m の場合には、RC 梁が大きく損傷し、動的な耐力が低下したことによるものと考えられる。NC 梁の支点反力波形は重錘

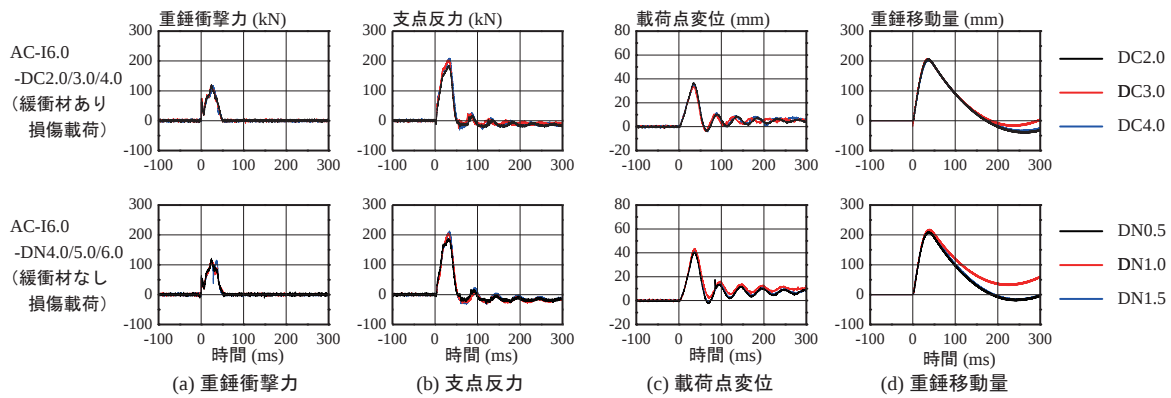


図-3 損傷荷条件の異なる AC-I6.0-DC/DN 梁の時刻歴応答波形

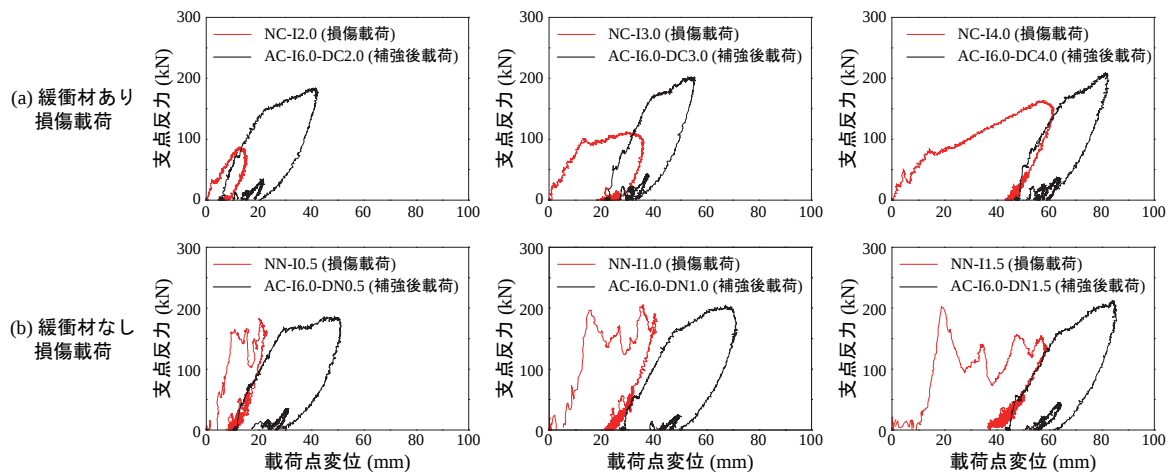


図-4 損傷荷条件および補強後荷条件における支点反力-荷点変位関係

衝撃力波形とほぼ同様な傾向である。ただし、最大振幅は、重錘衝撃力の場合よりも2倍程度大きい。これは、重錘衝撃力とRC梁の慣性力が支点部に作用したこと等によるものと考えられる。AC梁の支点反力波形はNN梁とほぼ同様な性状を示す。荷点変位波形は、どの梁も最大振幅が励起した後、減衰自由振動を呈しかつ変位が残留する性状を示している。なお、最大振幅および残留成分は、設定落下高さ $H$ が大きい場合ほど増大する傾向を示している。

重錘移動量波形は、NC梁の場合には、最大振幅を示した後、多少リバウンドする性状を示している。これは、重錘がRC梁の復元力により跳ね上げられていることによるものである。一方、AC梁の場合には、リバウンド量がNC梁の場合よりも大きい。このような傾向は、設定落下高さ $H$ が大きい場合ほど顕著に見られる。これは、 $H$ が大きい場合ほど、RC梁の応答変位が大きく、RC梁がより大きく復元するためと考えられる。なお、このような傾向は、損傷荷の有無によらずほぼ同様に認められる。

図-3には、損傷荷条件(緩衝材の有無および重錘落下高さ $H$ )がAFRPシート曲げ補強RC梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討するため、AC-I6.0-DC2.0/3.0/4.0試験体およびAC-I6.0-DN0.5/1.0/1.5試験体の時刻歴応答波形を示している。図より、損傷荷条件によらず、各試験体の応答波形はほぼ同様な性状を示していることが分かる。なお、損傷荷時に緩衝材を設置していないAC-I6.0-DN試験体の場合が、緩衝材を設置しているAC-I6.0-DC試験体より

も損傷荷時の落下高さが小さいにもかかわらず、応答変位が大きい。これは、AC-I6.0-DN試験体の方が損傷荷時における上縁コンクリートの損傷が著しいため、梁の角折れが顕在化したことによるものと考えられる。

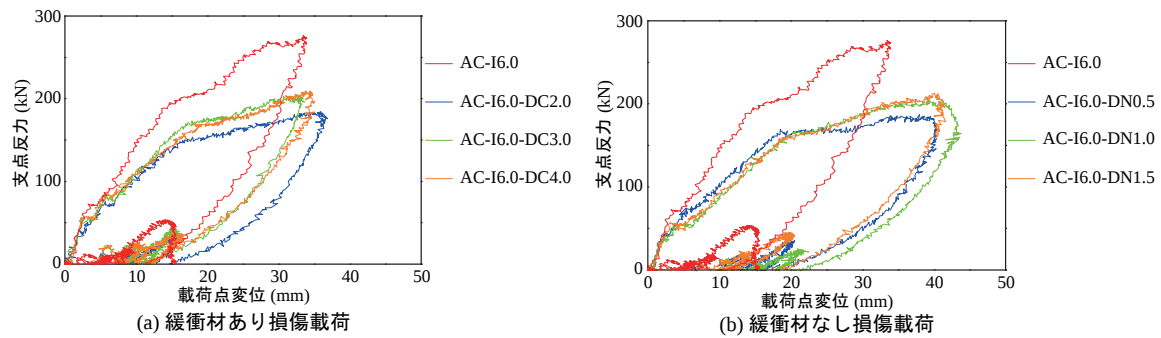
### 3.2 支点反力-荷点変位関係

図-4には、損傷荷時および補強後荷時における支点反力-荷点変位履歴曲線を示している。

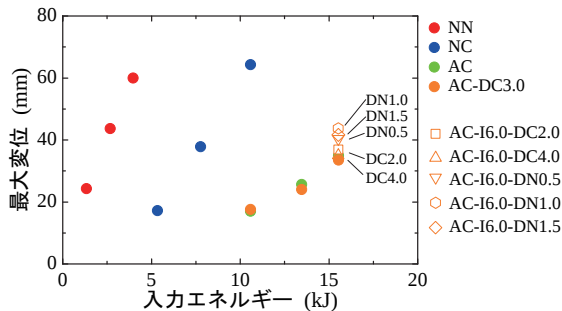
図より、損傷荷時の履歴曲線は、緩衝材の有無により大きく異なっていることが分かる。すなわち、緩衝材あり損傷荷の場合には、支点反力が100 kN程度で低下するか、もしくはその後変位の増加に伴って増加する傾向を示しているのに対し、緩衝材なし損傷荷の場合には、支点反力が160 kN～200 kN程度まで急激に増加した後、増減を繰り返す性状を示している。しかしながら、補強後荷の履歴曲線は、損傷荷条件(緩衝材の有無と落下高さ)によらずほぼ同様である。

また、緩衝材あり損傷荷の場合には、損傷荷時の最大支点反力は、落下高さ $H$ の増加に伴って増大し、徐々に補強後荷時の最大支点反力に近い値を示すのに対し、緩衝材なし損傷荷の場合には、落下高さによらず補強後荷時の最大支点反力に近い値を示している。

このことから、緩衝材なし損傷荷の場合には、落下高さ $H$ が小さいにもかかわらず、補強後荷時と同程度の支点反力が生じていることから、損傷荷時における損傷度が大きいことがうかがわれる。



図－5 補強後荷重時における支点反力－荷重点変位関係



図－6 最大変位と入力エネルギーの関係

図－5 には、補強後荷重の履歴曲線を初期変位を零として整理している。また、損傷荷重のない AC-I6.0 試験体についても併せて示している。図より、AC-I6.0 試験体は損傷荷重した試験体よりも、支点反力の増加勾配や最大支点反力が大きく、かつ最大変位は小さいことが分かる。これは、梁上縁コンクリートの圧壊やひび割れなどの損傷がないため、曲げ剛性や動的耐力が大きく出現したことによるものと考えられる。

また、損傷荷重した試験体は、損傷荷重条件によらず、ほぼ同様の履歴曲線を示していることが分かる。すなわち、変位 16～20 mm 程度までほぼ線形的に支点反力が増大し、その後増加勾配が低下し、変位 35～45 mm 程度に至った後、支点反力が零まで戻る傾向を示している。なお、緩衝材なし損傷荷重の方が、緩衝材あり損傷荷重よりも最大変位が大きい。これは、上縁コンクリートの損傷が著しいため、梁の角折れが顕在化したことによるものと考えられる。

以上のことから、損傷荷重により支点反力が低下するとともに、変位が大きくなる傾向にあることが明らかになった。また、損傷荷重条件によらず、AFRP シート補強後における RC 梁の耐衝撃挙動は、概ね同様であることが明らかになった。ただし、緩衝材なしで上縁コンクリートの損傷が著しい場合には、最大変位や残留変位が多少大きくなる。

### 3.3 最大変位と入力エネルギーの関係

図－6 には、最大変位と入力エネルギーの関係を示している。図より、最大変位は、梁の種類によらず、入力エネルギーにほぼ比例して増加していることが分かる。同一入力エネルギーにおける最大変位は、NN 梁と NC 梁の比較から緩衝材の設置により NC 梁で大きく低減されていることが分かる。また、NC 梁と AC 梁の比較から、シート補強により最大変位が大幅に低減されていることが分かる。なお、損傷荷重した RC 梁の場合には、同一入力エネルギー

において最大変位が多少大きくなる傾向にある。

既往の研究において、RC 梁に重錘を直接衝突させる場合には、最大応答変位や残留変位は入力エネルギー  $E$  と概ね線形関係にあることが明らかにされており、本実験結果においても同様の傾向を示している。また、敷砂緩衝材を設置する場合においても、入力エネルギー  $E = 5.0$  kJ 程度以上の範囲で同様の傾向が見られ、かつその勾配は緩衝材を設置しない場合よりも多少小さくなる傾向にある。一方、AFRP シート補強する場合には、さらに勾配が大幅に小さくなる。

これらのことから、緩衝材を設置する場合や AFRP シート補強する場合においても、既往の設計概念を準用して耐衝撃設計法を構築できる可能性があるものと考えられる。ただし、衝撃荷重により損傷を受ける場合には、変形量が大きくなることに留意する必要がある。

## 4. まとめ

- 1) シート補強前における損傷荷重において、上縁コンクリートが圧壊する程度においても、シート接着による扁平 RC 梁の耐衝撃性向上効果を期待できる。ただし、緩衝材あり損傷荷重に比べ、緩衝材なし損傷荷重の方が上縁コンクリートの損傷が著しいため、応答変位が多少大きくなる傾向にある。
- 2) RC 梁の最大変位は、補強の有無によらず入力エネルギーの増加に伴ってほぼ線形に増加する。緩衝材がある場合の増加勾配は、緩衝材がない場合の増加勾配よりも小さくなる傾向にあり、シート補強により変位の増加勾配は大幅に低減される。
- 3) 最大変位と入力エネルギーは直線関係にあることから、緩衝材を設置する場合や AFRP シート補強する場合においても、既往の設計概念を準用して耐衝撃設計法を構築できる可能性があるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 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, 土木学会, Vol.61A, pp.990-1001, 2015.3
- 2) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: 衝撃荷重により損傷した扁平 RC 梁の AFRP シート曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016.7