

引張破壊エネルギー等価の概念を適用した  
AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis for RC beams strengthened with externally bonded AFRP sheet  
by means of an equivalent fracture energy concept

室蘭工業大学大学院      ○ 学生員      瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)  
室蘭工業大学大学院      正 員      小室 雅人 (Masato Komuro)  
釧路工業高等専門学校      フェロー      岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
室蘭工業大学大学院      正 員      栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

著者らの研究グループでは既設の耐衝撃用途土木構造物の耐衝撃性向上法の1つとして軽量で高強度なアラミド繊維製 FRP (AFRP) を用いた AFRP シート接着工法を提案し、数多くの実験的検討によって、その有用性について明らかにしてきた<sup>1)~3)</sup>。その結果、入力エネルギーが大きい場合には、衝突位置近傍に生じるひび割れの開口に伴うシートの剥離や破断によって終局に至ることが明らかになっている。一方で、この種の実験を実施するには多額の費用を要することより、合理的な補強設計法を確立するためには数値解析の検討も必要不可欠である。

このような観点より、本研究では FRP シート接着 RC 梁の耐衝撃挙動およびひび割れ分布の再現を目的とし、別途実施した重錘落下衝撃実験結果<sup>3)</sup>を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、ひびわれ分布を再現するためにコンクリート要素の梁軸方向要素長を 6 mm 程度まで小さくし、かつ既往の研究で提案されている引張破壊エネルギー ( $G_f$ ) 等価の概念を適用した場合について数値解析を実施し、実験結果と比較する形で同概念の適用性を検討した。なお、本数値解析には陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 には、本研究で対象とした AFRP シート下面接着補強 RC 梁 (以後、シート補強 RC 梁) の形状寸法と配筋および補強状況を示している。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

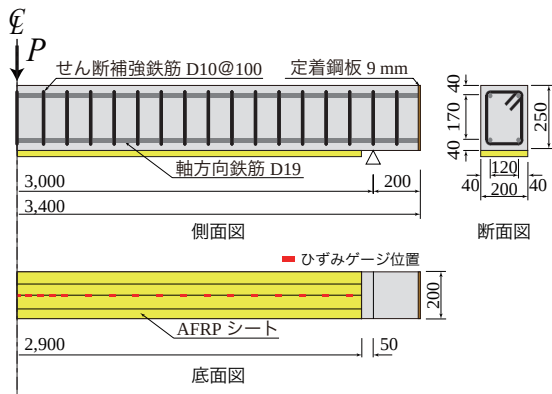


図-1 試験体の形状寸法と配筋

補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。また、AFRP シートは、RC 梁下面の補強範囲にプラスト処理を施し、エポキシ系プライマーを塗布して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接着している。なお、養生期間は気温が 20 °C 程度の環境で 7 日間以上とした。

表-1 には本実験に用いた鉄筋の材料特性値を、表-2 には AFRP シートの力学的特性値 (公称値) を示している。

2.2 実験方法および測定項目

重錘落下衝撃荷重実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ梁のスパン中央部に自由落下させる単一載荷法に基づいて実施した。試験体の両支点部は、写真-1 に示すように回転を許容し、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。

表-3 には、本研究で対象とした試験体の一覧を示している。本研究では、シート補強 RC 梁を対象に重錘落下高さ  $H$  を 1.0 ~ 3.0 m と 4 種類に変化させた実験を実施した。表中の試験体名のうち、第 1 項目は AFRP シート補強

表-1 鉄筋の材料特性値

| 呼び径 | 降伏強度<br>$f_y$ (MPa) | 破断強度<br>$f_u$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_s$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_s$ |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| D10 | 461.9               | 614.0               | 206                 | 0.3              |
| D19 | 381.7               | 582.4               |                     |                  |

表-2 AFRP シートの力学的物性値 (公称値)

| 目付量<br>( $g/m^2$ ) | 保証耐力<br>(kN/m) | 設計厚<br>(mm) | 引張強度<br>$f_{au}$ (GPa) | 弾性係数<br>$E_a$ (GPa) | 破断ひずみ<br>$\epsilon_{au}$ (%) |
|--------------------|----------------|-------------|------------------------|---------------------|------------------------------|
| 830                | 1176           | 0.572       | 2.06                   | 118                 | 1.75                         |

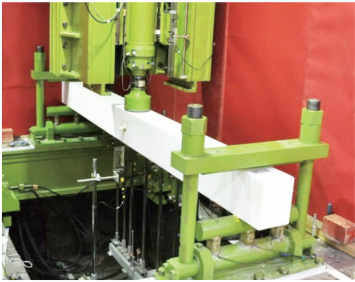


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

表-3 試験体一覧

| 試験体名    | 設定<br>落下高さ<br>$H$ (m) | 実測<br>落下高さ<br>$H'$ (m) | コンクリートの<br>圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) |
|---------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| AS-H1.0 | 1.0                   | 1.12                   | 35.4                            |
| AS-H2.0 | 2.0                   | 2.19                   |                                 |
| AS-H2.5 | 2.5                   | 2.40                   |                                 |
| AS-H3.0 | 3.0                   | 3.24                   |                                 |

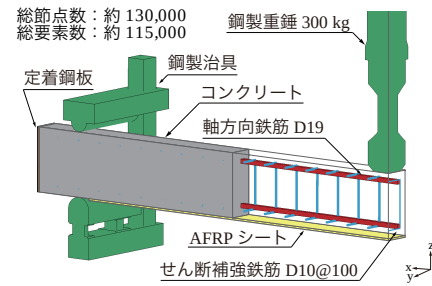


図-2 有限要素モデル

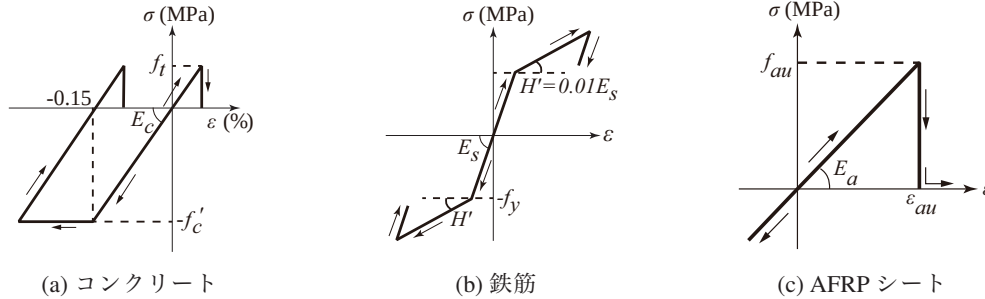


図-3 材料構成則

を示し、第2項目の $H$ に付随する数値は設定重錘落下高さ(m)を示している。なお、表中の実測重錘落下高さ $H'$ (m)は実測衝突速度から換算した自由落下高さであり、コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ は別途実施した材料試験から得られた値である。

本実験の測定項目は、(1) 重錘に内蔵されたロードセルによる重錘衝撃力、(2) 支点治具に設置されたロードセルによる支点反力の合計値(以後、単に支点反力)、(3) レーザ式非接触型変位計によるスパン中央点変位(以後、載荷点変位)、および(4) AFRPシートに貼付したひずみゲージによる軸方向ひずみ分布である。また、実験終了後にはRC梁の3面(側面、上面および底面)についてひび割れ分布を記録した。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 有限要素モデル

図-2には、本研究で用いたシート補強RC梁に関する数値解析モデルを示している。解析モデルは、対称性を考慮してスパン方向および桁幅方向にそれぞれ2等分の1/4モデルを採用した。適用した要素タイプは、せん断補強筋には2節点梁要素、それ以外には全て8節点固体要素を用いている。なお、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形断面に簡略化している。要素の積分点数に関しては、8節点固体要素に対して1点積分、2節点梁要素に対して4点積分とした。

AFRPシートに関しては表-2に示すように設計厚が0.572 mmと非常に薄く、これを8節点固体要素を用いてモデル化する場合には、陽解法では計算時間が過大になる。このため、本研究では便宜的に厚さを仮想的に10倍にすることとし、その軸剛性が等価となるように、弾性係数を1/10とした。

コンクリートと重錘間およびコンクリートと支点治具間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。また、接触反力の算定にはペナルティ

法を適用している。ただし、摩擦は考慮していない。また、コンクリートと軸方向鉄筋およびせん断補強筋要素間は滑りなどを考慮せずに完全付着と仮定した。コンクリートとAFRPシート要素間についても同様に、完全付着と仮定した。

衝撃荷重は重錘要素をRC梁に接触する形で配置し、その全節点に表-3に示す実測重錘落下高さ $H'$ に相当する衝突速度を付加することで発生させている。また、減衰定数 $h$ は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析により鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定した。

#### 3.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋およびAFRPシートの応力-ひずみ関係を示している。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

図-3(a)には、コンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は相当ひずみが0.15%に達した段階で完全降伏するバイリニア型としている。降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用し、圧縮強度 $f'_c$ に関しては別途実施した材料試験から得られた表-3に示す値を入力している。

一方、引張側に対しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に到達した段階で引張力を伝達しないモデル(カットオフモデル)を採用した。また、RC梁の場合には梁全体に多数のひび割れが生じることと、FRP接着補強の場合にはひび割れを精度よく評価しなければ剥離したと評価されることより、コンクリート要素の梁軸方向要素長 $y_i$ を6 mm程度まで小さくし、既往の文献<sup>4)</sup>を参考に $G_f$ 等価の概念を考慮した換算引張強度 $f_{ti}$ を用いることとした。なお、換算引張強度 $f_{ti}$ は次式で与えられ、本解析では基準要素長 $y_0$ を25 mmと設定した。

$$f_{ti} = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{y_0}{y_i}} \quad (1)$$

ここで、 $f_{ti}$ :換算引張強度、 $f_{t0}$ :材料試験から得られるコンクリートの圧縮強度に基づいた引張強度( $=f'_c/10$ )、 $y_0$ :

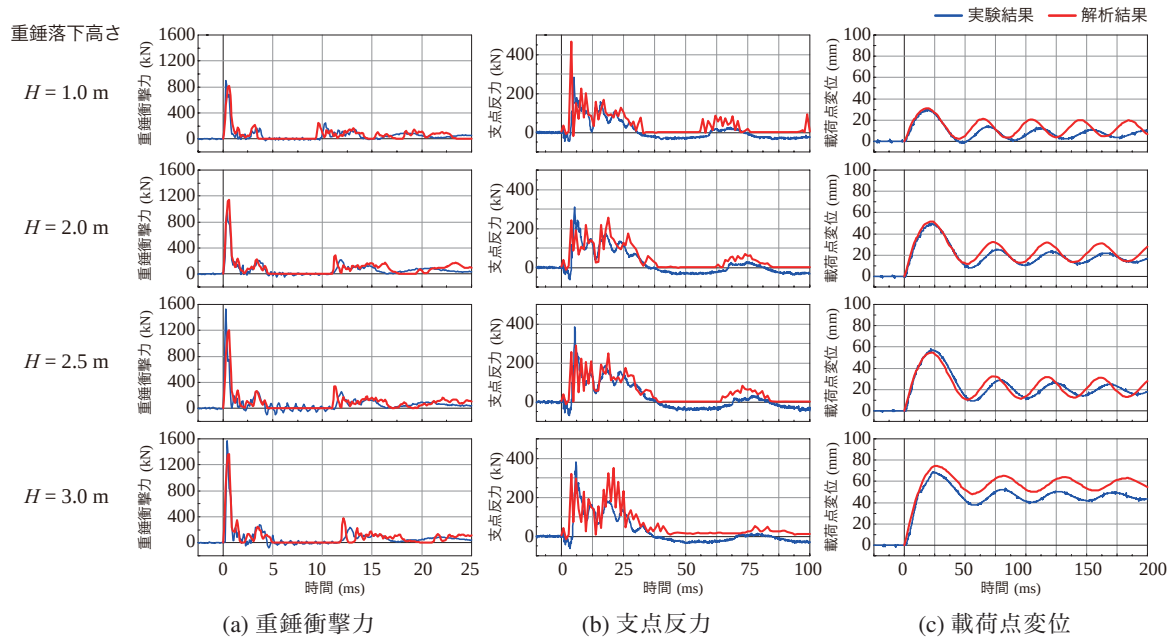


図-4 各種応答波形

基準要素長,  $y_i$ : 任意の要素分割長である. なお, 単位体積質量  $\rho_c$  およびポアソン比  $\nu_c$  は, それぞれ  $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu_c = 0.167$  を用いることとした.

図-3 (b) には, 軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関する応力-ひずみ関係を示している. 本モデルは降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の構成則モデルである. 降伏応力  $f_y$  は表-1 に示す値を用い, 単位体積質量  $\rho_s$ , 弾性係数  $E_s$  およびポアソン比  $\nu_s$  に関しては公称値を用い, それぞれ  $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $E_s = 206 \text{ GPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$  とした. また, 降伏の判定は, von Mises の降伏条件に従うこととし, 塑性硬化係数  $H'$  は弾性係数  $E_s$  の 1% と仮定している.

AFRP シートは, 図-3 (c) に示すように弾性体と仮定し, 破断ひずみ  $\varepsilon_{au}$  に達した時点でカットオフされるものとした. 単位体積質量  $\rho_a$  はシート厚さを 10 倍にしてモデル化していることより, 公称値である  $\rho_a = 1.204 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  の 1/10 とし, 弾性係数  $E_a$  も同様に表-2 に示す値の 1/10 とした. なお, 破断ひずみ  $\varepsilon_{au}$  は表-2 に示す値を用いた.

支点治具, 定着鋼板および重錘の全要素に関しては, 実験時に塑性変形が確認されていないことより, 弾性体モデルを適用している. 弾性係数  $E_s$  およびポアソン比  $\nu_s$  には公称値を用いることとし, それぞれ  $E_s = 206 \text{ GPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$  と仮定している. 単位体積質量  $\rho_s$  については, 支点治具および定着鋼板はともに公称値である  $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  を用いているが, 重錘に関しては重錘質量 300 kg を解析モデルの体積で除した値を入力している.

#### 4. 数値解析結果及び考察

##### 4.1 各種時刻歴応答波形

図-4 は, 本研究で対象とした全ケースに関して, 重錘衝撃力・支点反力・载荷点変位の時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を比較する形で示したものであり, 青線が実験結果, 赤線が解析結果を表している. なお, 横軸は重錘がコンクリートに衝突した時刻を零としている.

写真-2 実験時の AFRP シート剥離状況 ( $H = 3.0 \text{ m}$ )

まず, 図-4 (a) の重錘衝撃力波形に着目すると, 実験結果では, いずれの落下高さ  $H$  においても振幅が大きく継続時間が 1 ms 程度の第 1 波に, 振幅が小さい第 2 波目が後続する性状を示していることが分かる. 一方, 数値解析結果は落下高さ  $H = 2.5 \text{ m}$  の場合には実験結果と比較して最大重錘衝撃力を過小評価しているものの, それ以外の落下高さに関しては実験結果をほぼ適切に再現可能であることが分かる.

次に, 図-4 (b) の支点反力波形に着目すると, 実験結果は, 継続時間が 30 ~ 40 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示している. 数値解析結果に着目すると, 落下高さ  $H = 1.0 \text{ m}$  の場合には実験結果よりも最大支点反力が大きく示されているものの, その他のケースについては実験結果を概ね評価可能であることが分かる.

最後に, 図-4 (c) の载荷点変位波形に着目すると, 落下高さ  $H = 1.0 \sim 2.5 \text{ m}$  の場合には数値解析結果は実験結果を精度良く再現可能であることが分かる. 一方で, 落下高さ  $H = 3.0 \text{ m}$  の場合には, 写真-2 に示すように実験時にはシートの剥離が生じている. 本数値解析では, このようなシート剥離の現象を適切に再現可能な解析モデルの適用は行っていないことから, 両者に差異が生じたものと推察される.

##### 4.2 ひび割れ分布

図-5 には, 落下高さ  $H = 2.5, 3.0 \text{ m}$  における実験終了後の梁側面のひび割れ分布を解析結果から評価されるひび割れ分布と比較して示している.

図より, 落下高さ  $H = 2.5 \text{ m}$  の場合には実験結果およ



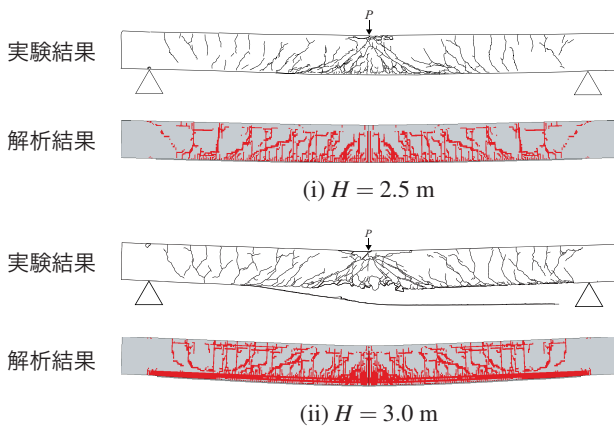


図-5 側面のひび割れ分布比較

び解析結果は、曲げひび割れやせん断ひび割れなどの分布性状が概ね一致している。また、シートの剥離で終局に至った落下高さ  $H = 3.0$  m の場合には、解析結果において下縁鉄筋に沿うように赤色のひび割れ領域が広く分布していることが分かる。この領域は、コンクリート要素に生じる応力がカットオフ値を超えたことを意味しており、解析的にはシートに引張応力が伝達しないことから、シート剥離と同様な現象が生じているものと判断される。

#### 4.3 AFRP シートの軸方向ひずみ分布

図-6 には、落下高さ  $H = 2.5, 3.0$  m に関する AFRP シートの軸方向ひずみ分布について、解析結果と実験結果を時系列的 ( $t = 1 \sim 35$  ms) に比較して示している。

図より、実験結果に関しては、いずれの落下高さ  $H$  においても、重錘衝突直後 ( $t = 1$  ms) の時点で、試験体中央部に引張ひずみが、また試験体中央部から  $0.4 \sim 1.4$  m の範囲には圧縮ひずみが生じていることが確認できる。このような分布性状より、重錘衝突初期には両端固定梁のような状態で曲げ波が支点に向かって伝播することが確認できる。その後、最大変位到達時刻 ( $t = 25$  ms) に至るまで、梁全体のひずみが増大していき、 $t = 25$  ms 以降で  $H = 3.0$  m のみにおいてシートの軸方向ひずみが均一になっていることより、シートの剥離発生が読み取れる。

数値解析結果に着目すると、 $H = 2.5$  m では重錘衝突直後から最大変位到達時刻 ( $t = 25$  ms 付近) に至るまで、実験結果のひずみ分布をよく再現している。一方、 $H = 3.0$  m の場合には、 $t = 10$  ms の時点でシートひずみが均一になっており、実験結果の適切な再現には至っていない。これは、図-5 (ii) における下縁鉄筋に沿うひび割れ分布領域が実験結果よりも早期に広がっていることを示唆しており、その現象は図-4 (c) の載荷点変位が実験結果よりも大きくなっていることから確認できる。

#### 5. まとめ

本論文では、FRP シート下面接着工法により曲げ補強された RC 梁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、AFRP シート下面接着補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験結果を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、既往の研究より提案されている  $G_f$  等価の概念をコンクリート要素の梁軸方向要素長を  $6$  mm 程度とした場合について、重錘落下高さ  $H (= 1.0, 2.0, 2.5, 3.0$  m) を  $4$  種類に変更したシート補強 RC 梁を対象に解析手

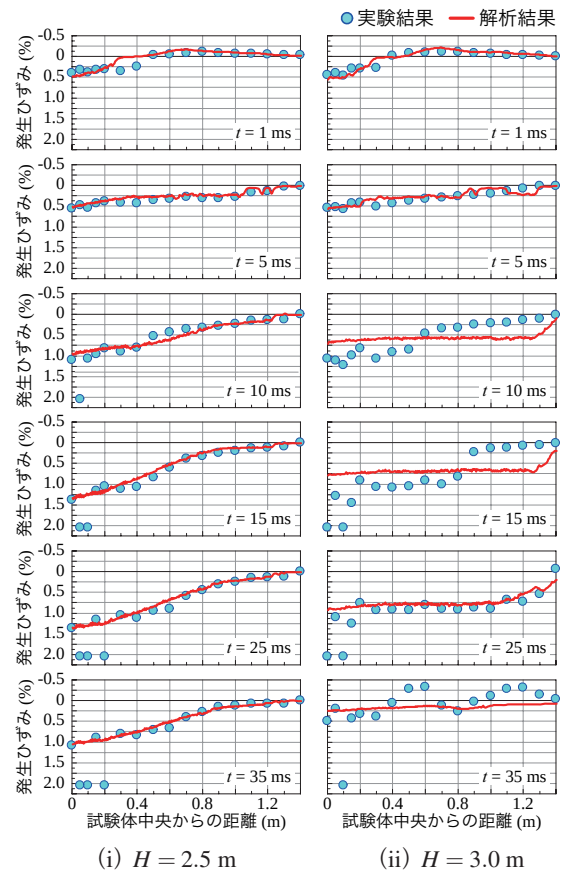


図-6 AFRP シートの軸方向ひずみ分布

法の妥当性を検討した。本研究で得られたことを整理すると、以下のように示される。

- 1)  $G_f$  等価の概念を適用することで、重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位波形をほぼ適切に再現可能である。また、ひび割れ分布や AFRP シート軸方向ひずみ分布に関しても概ね再現可能である。
- 2) ただし、入力エネルギーが大きい場合には、実験で確認されたシートの剥離現象を適切に再現できないものの、数値解析では下縁鉄筋に沿うひび割れが生じることから、シート剥離現象を数値解析的には推定できるものと考えられる。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15K06199, JP17K06527 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.953-962, 2014.3
- 2) 三上 浩, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.523-528, 2014.7
- 3) 大柳朋裕, 岸 徳光, 栗橋祐介, 小室雅人, 三上 浩: AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の衝撃載荷実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 73 号, A-03(CD-ROM), 2017.2
- 4) Kishi, N. and Bhatti, A.Q.: An equivalent fracture energy concept for nonlinear dynamic response analysis of prototype RC girders subjected to falling-weight impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.37, pp.103-113, 2010.