

AFRP ロッドで下面埋設曲げ補強した RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis of RC beams strengthened with near surface mounted AFRP rod

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 学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
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

本研究では、AFRP ロッド下面埋設 RC 梁(以後、ロッド補強 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、別途実施した重錘落下衝撃実験結果¹⁾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²⁾により提案されている引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念をコンクリート要素に適用した場合について、重錘落下高さ H を 0.5~2.5 m の 5 種類に変化させたケースを対象に数値解析を実施した。また、得られた解析結果と実験結果を比較する形で、同概念の適用性を検証している。なお、本研究では衝撃・構造解析用汎用プログラム LS-DYNA (Ver. R9)³⁾を使用した。

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ロッド補強 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。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。せん断補強筋には D10 を使い、100 mm 間隔で配筋している。また、図に示すように 2 本の AFRP ロッド($\phi 11$)を RC 梁の下面に支点の 100 mm 手前まで埋設することで曲げ補強を施している。なお、AFRP ロッドは、梁下面のロッド埋設位置に所定の深さで溝を切り、溝切部を清掃後、プライマーを塗布し指触乾燥状態であることを確認した後に、エポキシ系パテ状接着樹脂を溝切部に塗布して埋設・接着を行っている。養生期間は 1 週間程度である。表-1 には、本実験で使用した AFRP ロッドの力学的特性

値(公称値)を一覧にして示している。

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-2 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、ロッド補強 RC 梁に関する重錘落下高さを $H = 0.5 \sim 2.5$ (m) とした 5 体を対象としている。表中の試験体名のうち、第 1 項目は AFRP ロッド補強を示し、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る。また、コンクリートの圧縮強度 f'_c および各鉄筋の降伏強度 f_{ya} , f_{ys} 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から得られた重錘衝撃力、(2) 支点治具に設置されたロードセルから得られた支点反力の合計値(以後、単に支点反力)、(3) レーザ式非接触型変位計から得られたスパン中央点変位(以後、載荷点変位)、および(4) AFRP ロッドに貼付したひずみゲージによる軸方向ひずみである。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。

表-1 AFRP ロッドの力学的特性値(公称値)

直径 D (mm)	断面積 A (mm ²)	弾性係数 E_r (GPa)	破断強度 f_{ru} (MPa)	破断ひずみ ϵ_{ru} (%)
11	95	69	1178.9	1.71

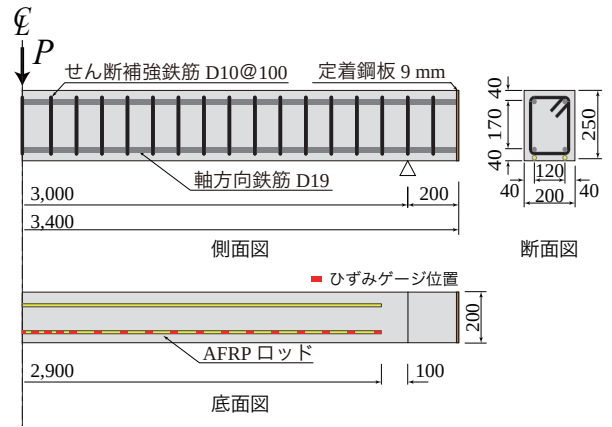


図-1 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

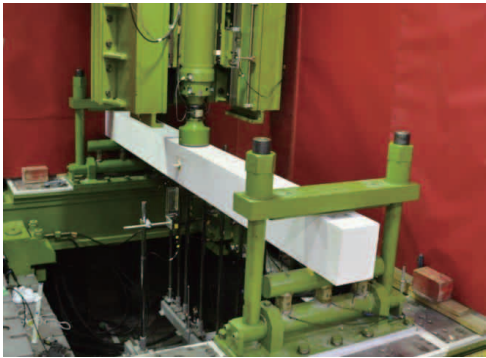


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

表-2 試験体一覧

試験 体名	設定重錘 落下高さ H (m)	実測重錘 落下高さ H' (m)	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	軸方向鉄筋 降伏強度 f_{ya} (MPa)	せん断補強筋 降伏強度 f_{ys} (MPa)	補強材 剥離/破断 の有無
AR-H0.5	0.50	0.52	35.7	406.7	431.3	無
AR-H1.0	1.00	1.08	35.4	381.7	461.9	
AR-H1.5	1.50	1.58	35.7	406.7	431.3	
AR-H2.0	2.00	2.19	35.4	381.7	461.9	
AR-H2.5	2.50	2.52				

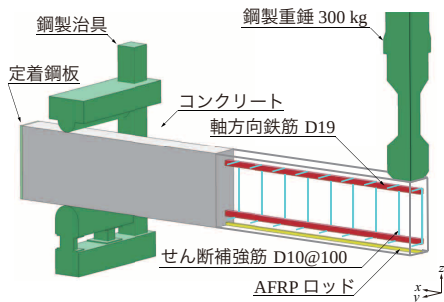
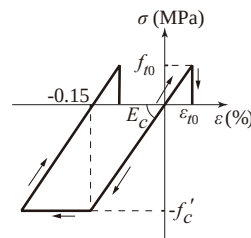
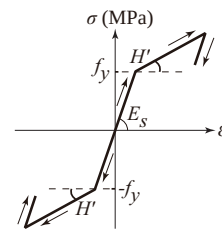


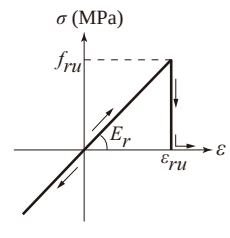
図-2 有限要素モデル



(a) コンクリート



(b) 鉄筋



(c) AFRP ロッド

図-3 材料構成則

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-2には、本研究で用いたロッド補強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、軸方向鉄筋およびAFRPロッド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点積分を、2節点梁要素に対して4点積分とした。

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、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の滑りは考慮せずに完全付着と仮定した。コンクリートとAFRPロッド要素間については、実験時にその界面においてAFRPロッドのずれや剥離が生じていないことより、完全付着と仮定している。

なお、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-1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、予備解析結果に基づいて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、本数値解析で用いているコンクリート、鉄筋およびAFRPロッドの応力-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-2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、補強RC梁の場合にはFRP材の補強効果により梁全体に多数のひび割れが生じることより、コンクリート要素の梁軸方向要素長 y_i を6mm程度まで小さくし、既往の文献²⁾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、本解析では過去の研究結果を基に基準要素長 y_0 を25mm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 :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 ρ_c およびポアソン比 ν_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。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-2に示す値を用い、単位体積質量 ρ_s 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_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ロッドは、図-3(c)に示すように弾性体と仮定し、破断ひずみ ϵ_{ru} 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 ρ_r は公称値である $\rho_r = 1.204 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用い、弾性係数 E_r および破断ひずみ ϵ_{ru} は表-1に示す値を用いた。

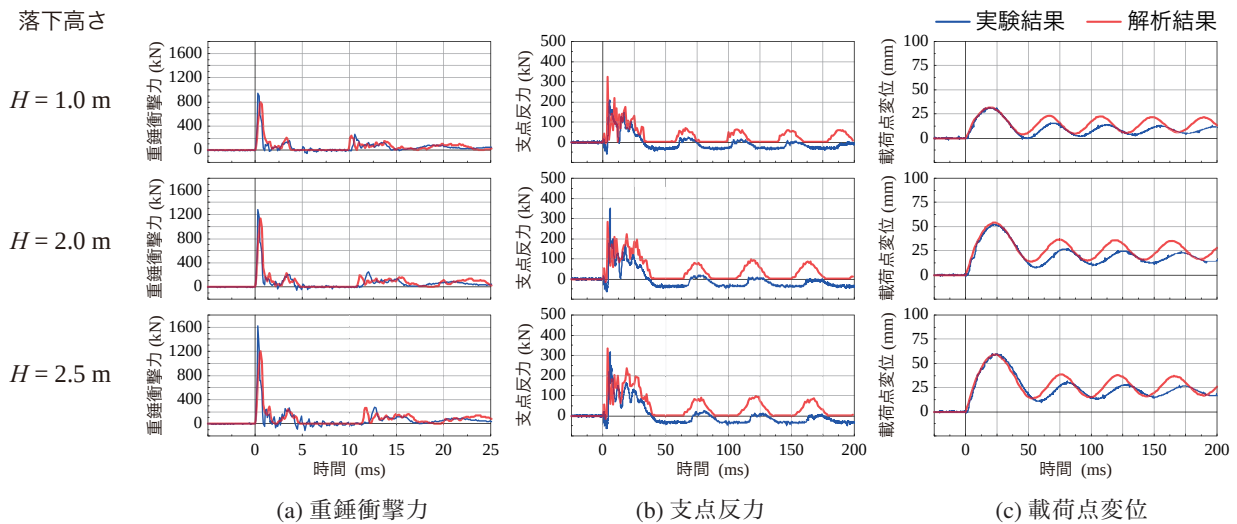


図-4 各種時刻歴応答波形

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 ν_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 ρ_s に関しては、支点治具および定着鋼板の場合には共に公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いているが、重錘に対しては重錘質量 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、重錘落下高さ $H = 1.0, 2.0, 2.5 \text{ m}$ に関して、重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の時刻歴応答波形を実験結果と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原点として整理している。

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衝撃力を小さく評価しているものの、それ以外の場合には実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。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 $30 \sim 40 \text{ ms}$ 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 にかかわらず主波動部および除荷後の減衰自由振動部を含め、実験結果を概ね再現していることが分かる。図-4 (c) の載荷点変位波形に着目すると、実験結果および数値解析結果ともに、最大振幅を示す第1波が励起した後、減衰自由振動状態に至っており、両者の誤差が小さいことが読み取れる。

4.2 各種最大応答値

図-5は、本研究において対象とした全5ケースに関する重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位の最大値を、実験結果を横軸に解析結果を縦軸に取って整理したものであり、図の45度の直線は解析結果と実験結果が等しいことを意味している。また、黄色の網掛け部分は各図に示

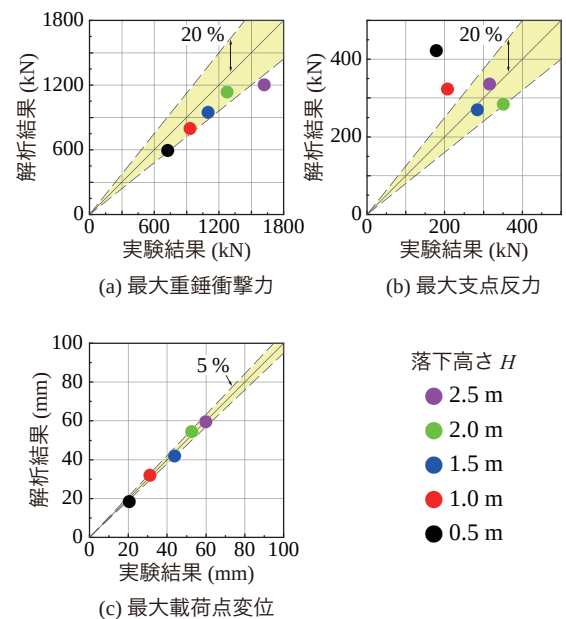


図-5 実験結果と解析結果の各種最大応答値比較

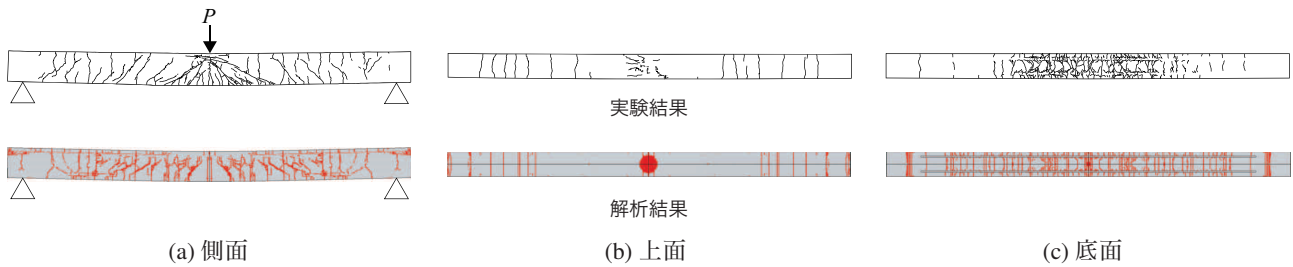
した誤差 (%) 以内の領域を表している。

図-5 (a) の最大重錘衝撃力に着目すると、いずれのケースにおいても解析結果は実験結果を 20% 程度過小に評価していることが分かる。図-5 (b) の最大支点反力の場合には、落下高さ $H = 0.5, 1.0 \text{ m}$ を除き、その誤差は 20% 以内である。図-5 (c) の最大載荷点変位の場合には、いずれのケースにおいても誤差は 5% 以内であり、解析結果は実験結果と大略対応していることが分かる。

4.3 ひび割れ分布

図-6には、重錘落下高さ $H = 2.0 \text{ m}$ の場合に着目し、解析結果から評価される梁上面、側面および底面におけるひび割れ分布を実験結果と比較して示している。なお、数値解析結果では、図-3 (a) に示すコンクリートの材料構成則に基づいて、要素の第1主応力が零近傍応力 ($\pm 0.001 \text{ MPa}$) 状態に至った場合には引張応力が解放され要素にひび割れが発生した状態であると評価し、その要素を赤色で示している。

図より、実験結果の側面のひび割れ分布に着目すると、

図-6 実験結果と解析結果のひび割れ分布比較 ($H = 2.0$ m)

梁下縁から鉛直方向に曲げひび割れの進展や荷点近傍から梁下縁に向かって斜めひび割れが進展していることが分かる。梁上面では、重錘衝突部でひび割れが確認されると共に、支点近傍にもひび割れが発生している。これは、重錘衝突初期には荷点を中心にスパン長の短い両端固定梁の状態が形成され、時間と共にスパン長が伸張し支点到達後単純支持状態が形成されることに起因している。また、梁底面の損傷状態は、荷点直下近傍で大きいことが分かる。

数値解析結果を見ると、側面の実験結果に見られる曲げひび割れや荷点近傍から梁下縁に向かう斜めひび割れをほぼ適切に再現していることが分かる。さらに、上面の支点近傍部に発生しているひび割れや底面のひび割れ分布も、実験結果を大略再現していることが分かる。

4.4 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布

図-7には、落下高さ $H = 2.0$ m に関する AFRP ロッド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 ($t = 1 \sim 30$ ms) に比較して示している。

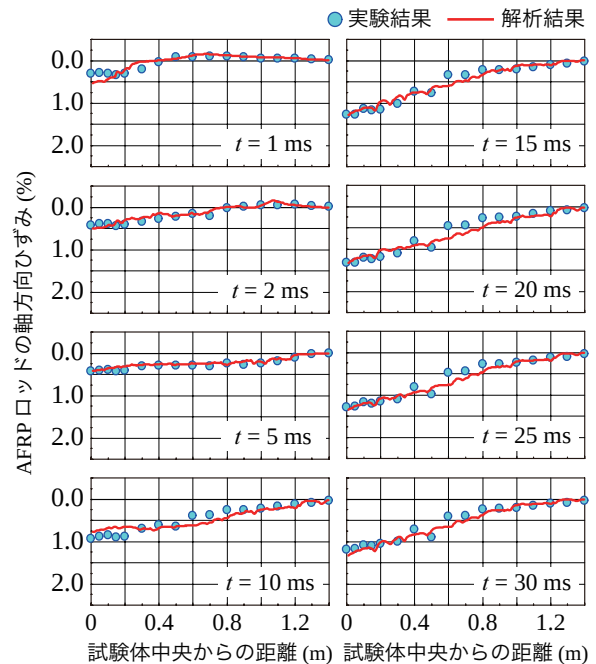
図より、実験結果に関しては、重錘衝突初期 ($t = 1$ ms) の時点では、試験体中央部に引張ひずみが、また試験体中央部から $0.4 \sim 1.4$ m の範囲には圧縮ひずみが生じていることが分かる。このような分布性状は前述のひび割れ分布と対応しており、重錘衝突初期には曲げ波が上述の両端固定梁のような状態で支点に向かって伝播することが確認できる。その後、最大変位到達時刻 ($t = 25$ ms 付近) に至るまで、時間の経過とともに荷点 (スパン中央部) から支点に向かって引張ひずみが広がっていく様子が見て取れる。

次に数値解析結果に着目すると、重錘衝突初期の時点から最大変位到達時 ($t = 25$ 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ことが分かる。

5. まとめ

本論文では、FRP ロッド埋設 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 ロッド下面埋設曲げ補強 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、既往の研究で提案されている G_f 等価の概念をコンクリート要素長 $L = 6$ mm 程度とした場合について適用し、重錘落下高さを5種類 ($H = 0.5 \sim 2.5$ m) に変更させたロッド補強 RC 梁を対象に、解析手法の妥当性を検討した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 要素長が基準長よりも小さい場合に対しても、 G_f 等価の概念を適用することで重錘衝撃力、支点反力および荷点変位波形や、ひび割れ分布及びロッドの

図-7 ロッド軸方向ひずみ分布の比較 ($H = 2.0$ m)

軸方向ひずみ分布をほぼ適切に再現可能である。

- 2) また、実験結果と解析結果の誤差は最大重錘衝撃力および最大支点反力は 20 % 程度、最大荷点変位は 5 % 以内である。

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) 岸 徳光, 小室雅人, 栗橋祐介, 三上 浩, 船木隆史: AFRP ロッド下面埋設曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性向上効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 1188-1200, 2017.
- 2) 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.
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.