

目付415g/m² AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の
繰り返し衝撃荷重載荷時の衝撃応答解析

Numerical analysis for RC beams strengthened with externally bonded AFRP sheet with 415 g/m² mass
under consecutive impact loading

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)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学 田口 将大 (Shota Taguchi)

1. はじめに

著者らはこれまで耐衝撃性向上方法の1つとして耐食性に優れ軽量であるFRP材に着目し、シート下面接着工法についてその耐衝撃性向上効果を明らかにしてきた。しかしながら、これらの検討はいずれも単一重錘落下衝撃実験を対象としたものであり、合理的な補強設計法の確立のためには、繰り返し衝撃荷重載荷時における劣化進展状況を把握し、シートが剥離あるいは破壊に至るメカニズムを解明することが肝要である。一方で、実験的研究のみでは費用の面で限界があることより、数値解析的研究も併用して推進することが重要である。

このような観点より、本研究ではアラミド繊維(AFRP)シート下面接着曲げ補強RC梁(以後、単にシート補強RC梁)の繰り返し衝撃荷重載荷時における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、ひび割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6mm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汎用構造解析用コード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、200×250×3,000mmである。また、軸方向鉄筋は上下端にD19を各2本配置

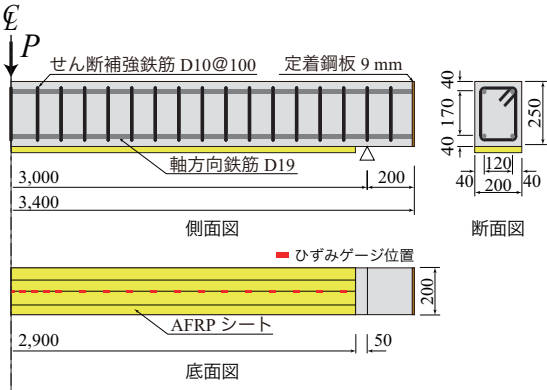


図-1 試験体の形状寸法と配筋

し、梁端面に設置した厚さ9mmの定着鋼板に溶接固定している。せん断補強筋にはD10を用い、100mm間隔で配筋している。また、目付415g/m²のAFRPシートは、RC梁下面の補強範囲にブラスト処理を施し、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℃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

重錘落下衝撃荷重載荷実験は、質量300kg、先端直径200mmの鋼製重錘を設定高さから終局に至るまでスパン中央部に自由落下させる繰り返し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、試験体設置後に鋼製矩形梁状治具を載せボルトを介して締めることで浮き上がりを防止する構造となっている。

表-3には、本研究で対象とした試験体の一覧を示し

表-1 鉄筋の材料特性値

呼び径	降伏強度 f_y (MPa)	破断強度 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D10	401.9	575.1	206	0.3
D19	371.0	542.5		

表-2 AFRPシートの力学的物性値(公称値)

目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 f_{au} (GPa)	弾性係数 E_a (GPa)	破断ひずみ ϵ_{au} (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

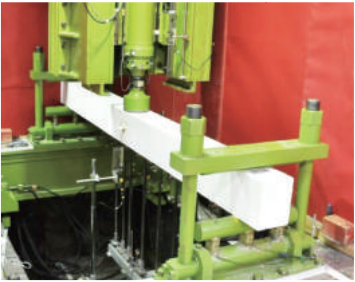


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

表-3 試験体一覧

試験体名	設定 落下高さ H (m)	実測 落下高さ H' (m)	コンクリートの 圧縮強度 f'_c (MPa)
AS-H1.0-1.0	1.0	1.01	33.7
AS-H1.0-2.0	2.0	1.91	

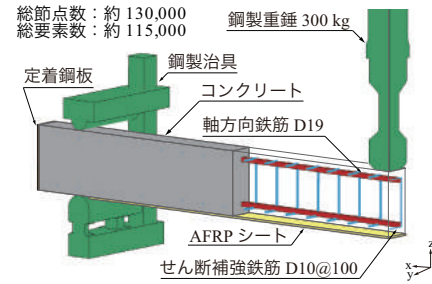


図-2 有限要素モデル

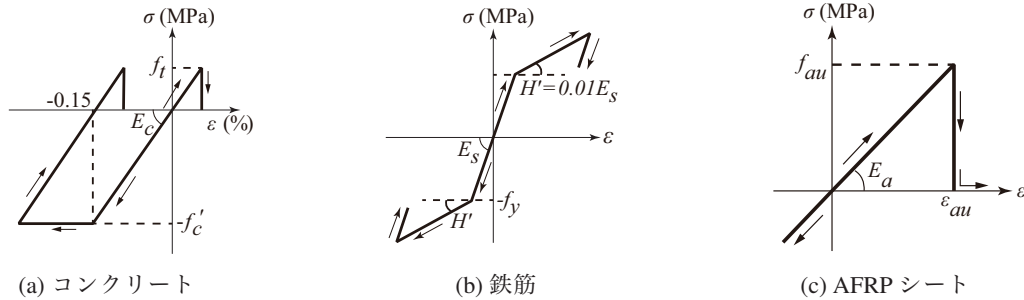


図-3 材料構成則

ている。本研究では、シート補強 RC 梁を対象に落下高さ $H = 1$ m から重錘を落下させ、破壊性状などを確認した後、 $H = 2$ m から繰り返し衝撃荷重を作用させることとした。表中の試験体名のうち、第1項目は AFRP シート補強を示し、第2項目の H に付随する数値は処女載荷時の落下高さ (m) を示しており、第3項目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 梁の側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。

目付 415 g/m^2 の AFRP シートに関しては、表-2 に示すように設計厚が 0.286 mm と非常に薄く、これを直接8節点固体要素を用いてモデル化する場合には、計算時間が過大になる。このため、本研究では厚さを仮想的に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。また、高さ方向の分割は1分割としている。

コンクリート-重錘間およびコンクリート-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。コンクリートと軸方向鉄筋およびせん断補強筋要素間には滑り等を考慮せずに完全付着と仮定した。また、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を仮定した。

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より、その補強効果を適切に評価するためにはひび割れを精度よく評価することが必要になる。本研究では、予備解析

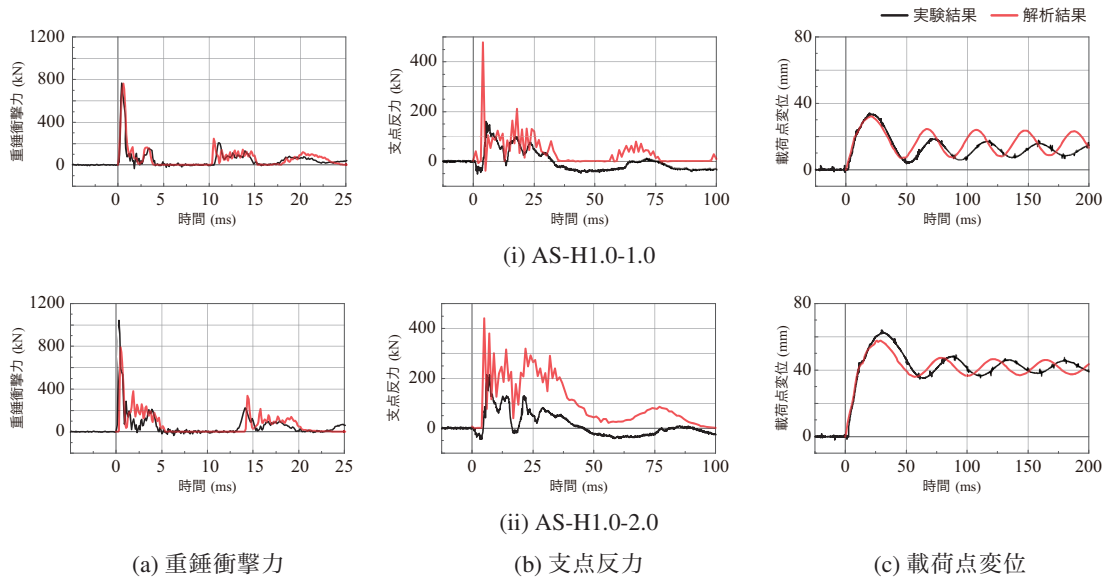


図-4 各種応答波形

の基に任意の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、既往の研究を参考に G_f 等価の概念を考慮した仮想的な換算引張強度 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(= $f'_c/10$)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。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 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シートは、図-3 (c)に示すように弾性体と仮定した。また、エロージョンを設定し破断ひずみ ϵ_{au} に到達した時点で要素が削除されるものとした。単位体積質量 ρ_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 もシート要素の軸剛性が等価になるように表-2に示す値の 1/10 とした。なお、破断ひずみ ϵ_{au} は表-2に示す値を用いている。

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 については、支点治具および定着鋼板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 2 ケースに関して、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解析結果を比較する形で示したものであり、黒線が実験結果、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いる。

まず、図-4 (a)に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果では、いずれのケース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、数値解析結果は処女載荷時には最大衝撃力や第 2 波目以降の波形性状を非常によく再現しているものの、繰返し載荷時には最大衝撃力を若干過小評価しており、第 2 波の継続時間が 1 ms 程度大きく示されている。

次に、図-4 (b)に示す支点反力波形に着目すると、実験結果は、継続時間が 30 ~ 45 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。また、繰返し載荷時には、主波動の継続時間が長くなっていることから処女載荷時よりも剛性が低下していることが推察される。数値解析結果に着目すると、いずれのケースも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、実験結果と同様に、繰返し載荷時にはその継続時間が長くなっていることが確認できる。

最後に、図-4 (c)に示す載荷点変位波形に着目すると、繰返し載荷時には若干最大変位を過小評価しているものの、自由減衰振動状態や残留変位をほぼ適切に再現していることが分かる。また、後述のように繰返し載荷の場合には、実験時に FRP シートが破断し終局に至っているが、解析結果においてもシート要素が削除されておりシートの破断を確認している。

4.2 各時刻におけるひずみ分布および損傷性状比較

図-5 には、繰返し載荷時における 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

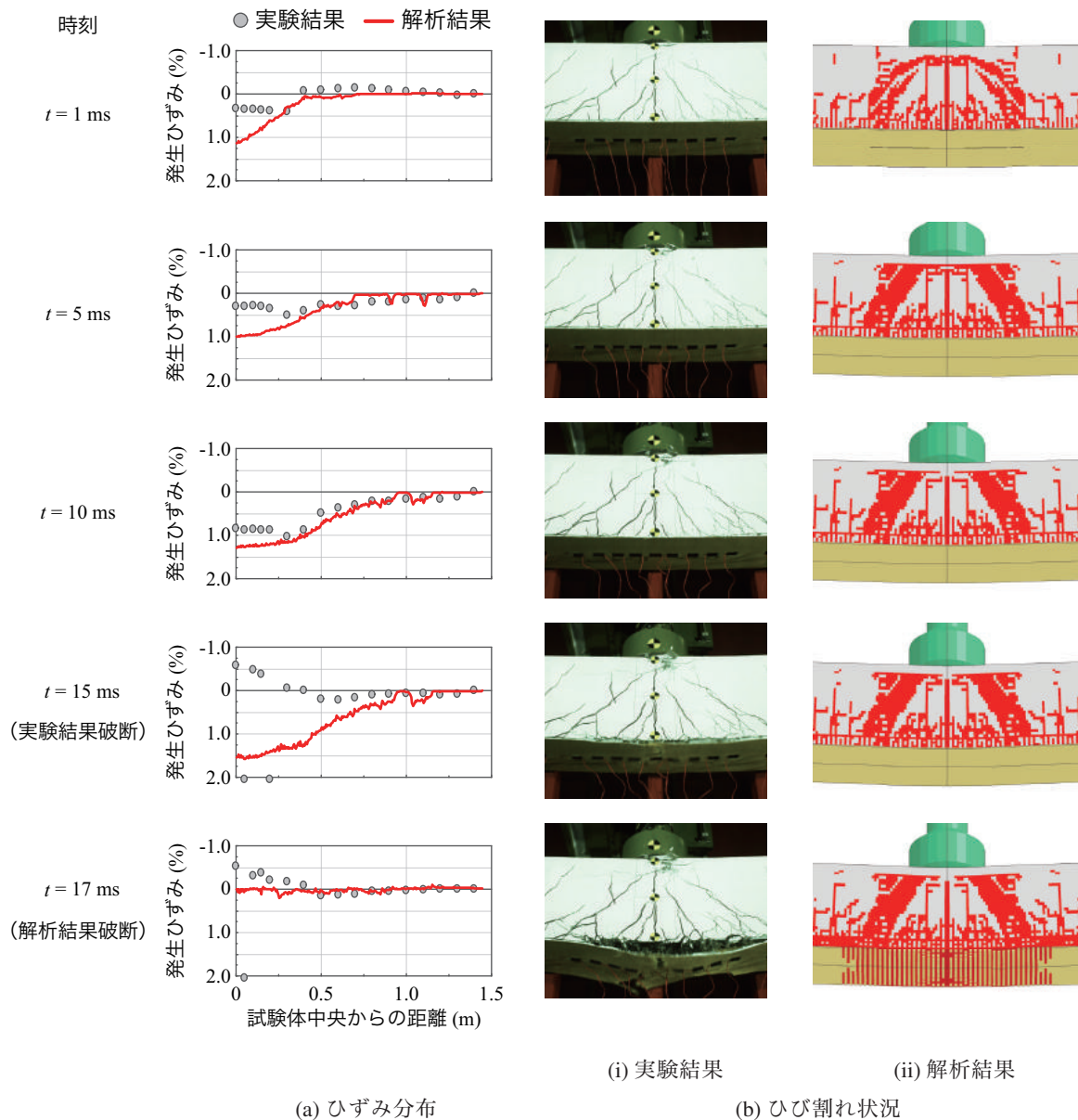


図-5 各時刻におけるひずみ分布とひび割れ状況比較

的 ($t = 1 \sim 17 \text{ ms}$) に比較して示している。また、併せて実験結果と解析結果のひび割れ性状も示している。

まず、ひずみ分布の実験結果に着目すると、 $t = 10 \text{ ms}$ までは引張ひずみが中心部から支点方向に伝播して行く様子が確認できる。その後、 $t = 15 \text{ ms}$ 時点では、梁が下方に変形した状態であるにも拘わらず、荷重点近傍部で圧縮ひずみの状態を呈している。この時点では、スパン中央部でFRPシートが剥離の状態を示していることから、FRPシートが中央部で破断の傾向を示し上ぞりの状態を呈したものと推察される。

一方で数値解析結果からは、 $t = 15 \text{ ms}$ まで引張ひずみが支点部まで広がっていき、 $t = 17 \text{ ms}$ においてシート全面において零ひずみの状況を呈している。また、 $t = 17 \text{ ms}$ 時点では、荷重点直下のシート要素が破断ひずみに到達して削除されている状況が示されており、シート破断に至っていることが確認できる。

以上より、解析結果は、シート破断に至る時刻が1～2

ms程度異なるものの、繰り返し荷重時のFRPシートのひずみ分布性状やシート破断の傾向等実験結果をほぼ適切に再現しているものと判断される。

5. まとめ

- 1) 解析結果より、コンクリート要素に G_f 等価の概念を適用することで、繰り返し衝撃荷重荷重時の梁の荷重点変位波形をほぼ適切に再現可能である。
- 2) また、実験結果のFRPシートのひずみ分布性状や破断時刻に関しても概ね適切に評価可能であることが明らかになった。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP17K06527 の助成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。