

論文 漸増繰り返し衝撃荷重下におけるAFRPシート下面接着曲げ補強RC梁の衝撃応答解析

瓦井 智貴^{*1}・小室 雅人^{*2}・岸 徳光^{*3}・石橋 和也^{*4}

要旨: 本論文では、アラミド繊維製FRP (AFRP) シートを用いて下面接着曲げ補強を施したRC梁を対象に、入力エネルギー漸増繰り返し衝撃荷重載荷時における耐衝撃挙動や劣化進展、シートの破断や剥離を含めた破壊現象の再現を目的に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、別途実施した実験結果との比較によって、解析手法の妥当性を検討した。その結果、コンクリート要素に引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念を適用し、要素長を6mm程度まで小さくすることにより、繰り返し衝撃荷重載荷時における載荷点変位やシートの剥離現象を再現可能であることが明らかとなった。

キーワード: RC梁, AFRPシート, 繰り返し衝撃荷重, 衝撃応答解析, 引張破壊エネルギー

1. はじめに

著者らは構造物の耐衝撃性向上法の1つとして耐食性に優れ軽量である連続繊維 (FRP) 材に着目し、FRPシート下面接着工法についてその効果を検討してきた。その結果、RC梁にFRPシート補強を施すことでその耐衝撃性が向上することや、入力エネルギーが大きい場合には、FRPシートの剥離あるいは破断により終局に至ること、などが明らかとなっている¹⁾。著者らは、補強設計法の確立のためには、数値解析の検討も併用して効率的に研究を推進することが必要不可欠であるとして、数値解析も並行して実施している。

これまではアラミド繊維製FRP (AFRP) シートを用いて下面接着曲げ補強を施したRC梁を対象に、単一衝撃荷重載荷実験を実施し、シートが破断あるいは剥離に至らない範囲内において、提案の解析手法の適用性や妥当性について検討を行ってきた²⁾。

しかしながら、実事象を考えると、構造物に小さい落石が数度衝突する場合や、過大なエネルギーが作用することによって補強材が破壊に至ることも想定される。これより、構造物の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、終局時のシートの破断や剥離を含めた破壊性状のみならず、繰り返し衝撃荷重載荷時の劣化進展状況を精度良く評価する手法の確立が重要であるものと判断される。

このような観点から、本研究では入力エネルギー漸増 (以後、単に漸増) 繰り返し衝撃荷重載荷時におけるAFRPシート下面接着曲げ補強RC梁の劣化進展状況およびシートの破壊現象の再現を目的に、別途実施した重錘落下衝撃荷重載荷実験を対象として、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお、衝撃荷重はシートが剥離あるいは

破断に至るまで繰り返し載荷させることとした。

ここでは、ひび割れ分布を実現象により近づけるため、分布ひび割れモデルを適用することを前提に、コンクリート要素の梁軸方向要素長を小さくし、かつ既往の研究³⁾で提案されている引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念を適用することとした。また、数値解析手法の妥当性検討は、実験結果と比較することにより行った。なお、本数値解析には陽解法に基づく構造解析用汎用コードLS-DYNA⁴⁾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シート下面接着曲げ補強試験体 (AS試験体) 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。軸方向鉄筋にはD19を用い梁端面に設置した厚さ9mmの定着鋼板に溶接固定をしており、せん断補強筋にはD10を用い、100

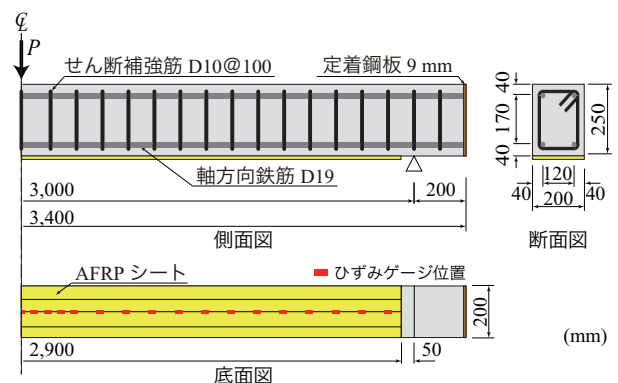


図-1 試験体の形状寸法と配筋

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 工学専攻 修(工) (学生会員)

*2 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

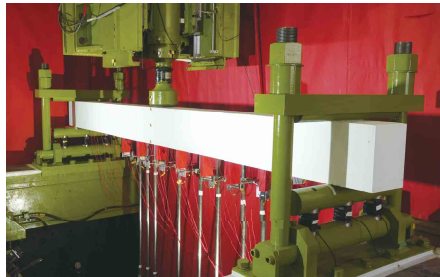
*4 室蘭工業大学 工学部 建築社会基盤系学科

表－1 試験体一覧

試験体名	実験ケース名	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	実測入力エネルギー E_i (kJ)	累積実測入力エネルギー E_{ai} (kJ)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{sy} (MPa)	補強材剥離の有無
AS-H1	AS-H1-1	1.00	1.01	2.97	2.97	33.7	371.0	401.9	-
	AS-H1-2	2.00	1.91	5.62	8.59				-
	AS-H1-2.5	2.50	2.49	7.32	15.91				剥離
AS-H2	AS-H2-2	2.00	1.99	5.85	5.85				-
	AS-H2-2.5	2.50	2.49	7.32	13.17				剥離
AS-H2.5	AS-H2.5-2.5	2.50	2.49	7.32	7.32				-
	AS-H2.5-3	3.00	3.04	8.94	16.26	剥離			

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} (%)
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

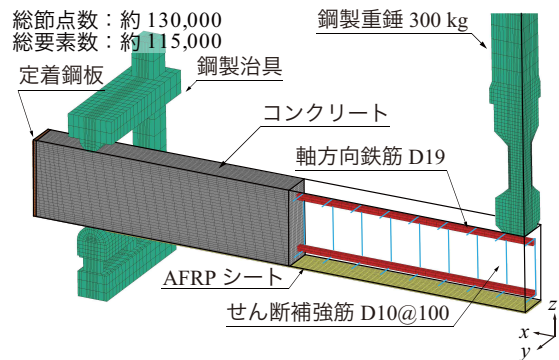
mm 間隔で配筋している。また、AFRP シートは、梁下面に支点の 50 mm 手前まで接着している。

表－1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、AFRP シート補強試験体を対象に、落下高さ H を $H = 1, 2, 2.5, 3$ m を基本として、漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施した。ここでは、終局時のシートの破壊性状に着目し、シートが剥離あるいは破断に至るまで衝撃荷重を繰り返し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、第2項目の H に付随する数値は1回目载荷時の設定重錘落下高さ (m) を、第3項目は1回目载荷を含めた繰り返し载荷時の設定重錘落下高さ (m) を示している。また、実測重錘落下高さ H' 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 、軸方向鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_{yi} は別途実施した材料試験結果から得られた値である。表－2には、本研究で用いた 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 の鋼製重錘を設定高さからガイドレールを介してスパン中央部に繰り返し自由落下させることで実施した。



図－2 有限要素モデル

試験体の両支点部は、写真－1に示すように、試験体設置後、鋼製矩形梁を用いナットで締め付けることにより浮き上がりを防止する構造となっている。また、両支点下部は回転を許容するピン支持である。

本実験の測定項目は、(1) 重錘衝撃力、(2) 支点反力の合計値 (以後、単に支点反力)、(3) スパン中央点変位 (以後、载荷点変位)、4) AFRP シートの軸方向ひずみ分布である。また、実験終了後には RC 梁の側面におけるひび割れ分布も記録した。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図－2には、本研究で採用した有限要素モデルを示している。解析モデルには、対称性を考慮してスパン方向および桁幅方向に2等分した 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 2×2 Gauss 積分とした⁴⁾。

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、これを直接8節点固体要素を用いてモデル化する場合には、軸方向要素長も対応して小さくしなければならず、クラン条件を前提に考えると計算時間が過大になる。そのため、既往の研究²⁾と同様に

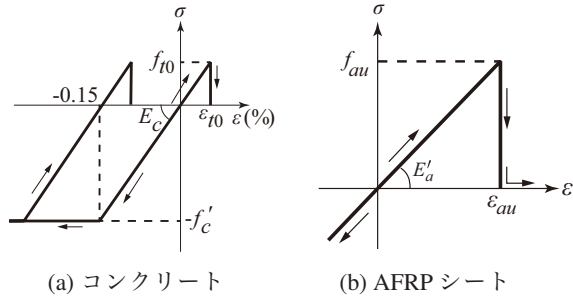


図-3 材料構成則

厚さを仮想的に10倍にすることとし、対応して軸剛性が等価となるように弾性係数を1/10とした。厚さ方向の分割は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、実験結果より終局時においてもシートとかぶりコンクリートの付着は保たれていることを確認していることより、コンクリートと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、重錘要素を試験体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、予備解析を実施し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、コンクリートと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。なお、ひずみ速度効果に関しては、1) 本研究で対象とした衝突速度が低速度域であること⁵⁾、2) 既往の研究²⁾より、このような低速度衝突の場合にはひずみ速度効果を考慮せずとも実験結果の動的応答性状を適切に評価可能であることが明らかになっていることより、本解析においても考慮しない形で解析を行うこととした。

(1) コンクリート

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。ここでは既往の研究³⁾を参考に、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簡易にモデル化した。また、降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用している。一方、引張側に対しては衝撃応答解析であることを前提に線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、引張強度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

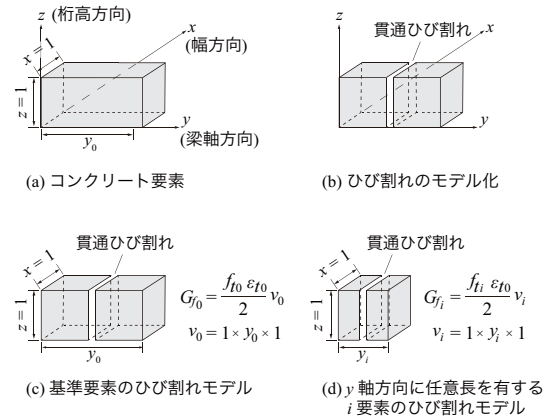


図-4 引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念

採用した。引張破壊に至った要素には、その後引張応力は伝達されないものの、ひずみが圧縮域に至る場合には再度圧縮力が伝達される。圧縮強度 f'_c に関しては、材料試験結果から得られた表-1に示す値を入力している。また、単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c は、それぞれ $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ を用いている。

(2) AFRP シート

図-3(b)には、AFRPシートの応力-ひずみ関係を示している。AFRPシートは一方向シートであるものの、梁部材を対象としていることから梁軸直角方向への影響は小さいものと判断し、等方弾性体を仮定した。また、エロージョンを設定し破断ひずみ ϵ_{au} に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 $\rho_a = 1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 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 ϵ_{au} は表-2に示す値を用いている。

(3) 鉄筋

鉄筋に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を用いた。降伏応力 f_{ys} 、 f_{ys} は材料試験から得られた表-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 は、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。

(4) 支点治具、定着鋼板および重錘

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300kgを解析モデルの体積で除した値を入力している。

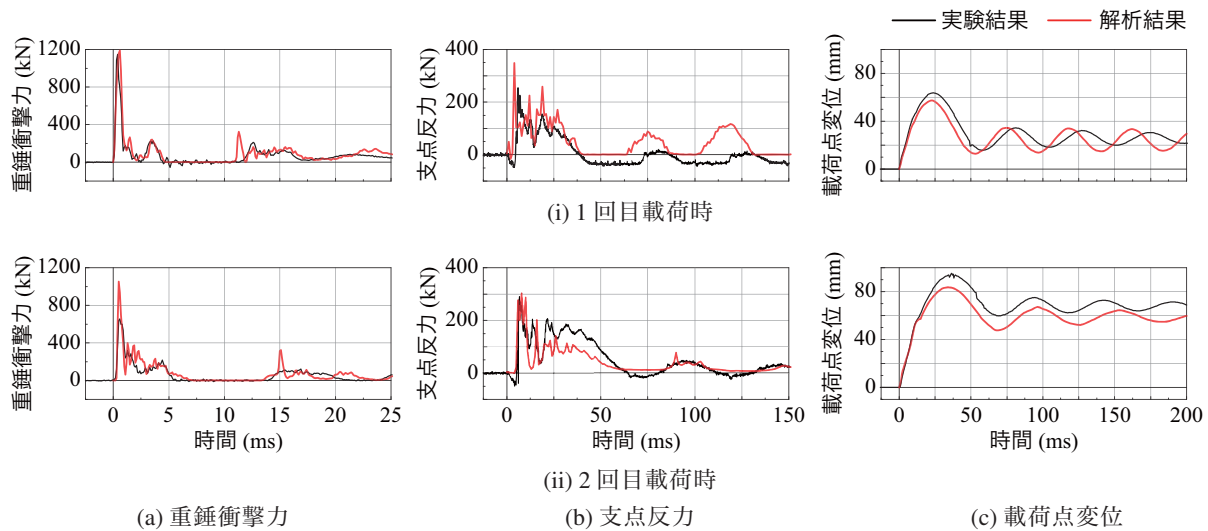


図-5 AS-H2.5 試験体の各種時刻歴応答波形

3.3 コンクリートの引張破壊モデル

AFRPシート補強RC梁は、無補強RC梁と比較して、ひび割れが梁全体に発生する傾向にあることが明らかになっている¹⁾。従って、ひび割れの開口に起因するシートの剥離や破断現象を適切に評価するためには、ひび割れ分布の再現が極めて重要である。本研究では、ひび割れの高精度化を図るために、分布ひび割れモデルの適用を前提に、コンクリート要素の要素長を可能な限り小さくし、 G_f 等価の概念を適用した場合の妥当性を検討することとした。以下に、 G_f 等価の概念について述べる。

図-4には、 G_f 等価の概念図を示している。ここでは、梁部材を対象としていることより、簡易に曲げひび割れのみが発生するものと仮定し、図-3(a)に示すようにコンクリートの引張破壊領域にカットオフモデルを適用することを前提とした定式化を行うこととした。

いま、図-4(a)に示すように、 x 軸と z 軸方向に単位長さ、 y 軸方向に y_0 を有する基準のコンクリート要素において、分布ひび割れモデルを適用する前段階として、以下のようにして概念を構築した。すなわち、1) 図-4(b)に示すように要素内に幅方向と高さ方向に貫通する1本の曲げひび割れが発生するものとする。2) この1本のひび割れを分布ひび割れモデルで評価することとし、破壊エネルギーを要素全体で評価するものとする。3) その状況下で、要素長を変化させた場合においても、等しい引張破壊エネルギー(G_f)の下で分布ひび割れが発生するものと仮定する、である。

図-4(c)に示す基準要素の引張破壊エネルギー G_{f0} は、図-3(a)に示す引張強度 f_{t0} 、その時の引張ひずみ ϵ_{t0} および要素の体積 v_0 を用いて、次式で定義される。すなわち、

$$G_{f0} = \frac{f_{t0}\epsilon_{t0}}{2}v_0 \quad (1)$$

いま、図-4(c)、(d)に示すように、梁軸方向に任意の

長さ y_i を有する i 要素の要素長を y_i とし、さらに仮定の引張強度(以後、換算引張強度) f_{ti} を導入して、上述の仮定に基づき基準要素の破壊エネルギー G_{f0} と i 要素の破壊エネルギー G_{fi} が等価であると仮定すると、 i 要素の仮定の換算引張強度 f_{ti} は、次式で与えられる。

$$f_{ti} = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{y_0}{y_i}} \quad (2)$$

これより、基準要素と異なる要素長を設定する場合には、コンクリート要素に式(2)から得られる仮定の換算引張強度 f_{ti} を設定することによって、同概念を適用した数値解析が可能になる。なお、本研究では既往の研究²⁾と同様に、無補強RC梁における再現解析結果から、基準要素の要素長を $y_0 = 25$ mm、引張強度を $f_{t0} = f'_c/10$ と設定している。

4. 数値解析結果及び考察

4.1 各種応答波形

図-5には、AS-H2.5試験体に関する各種時刻歴応答波形を実験結果と比較する形で示している。なお、梁は2回目載荷時にシート剥離により終局に至っている。まず波形全体に着目すると、1, 2回目載荷により最大応答値などを除き概形に大きな差異がないことが分かる。

図-5(a)より、重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果では、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($t = 2.5 \sim 5$ ms)が後続する性状を示している。解析結果は、2回目載荷時において実験結果よりも最大値を大きく評価する傾向にあるものの、その他の性状についてはほぼ実験結果を適切に評価していることが分かる。

図-5(b)より、支点反力波形に着目すると、実験結果は、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、作用継続時間は1回目載荷時には40 ms程度

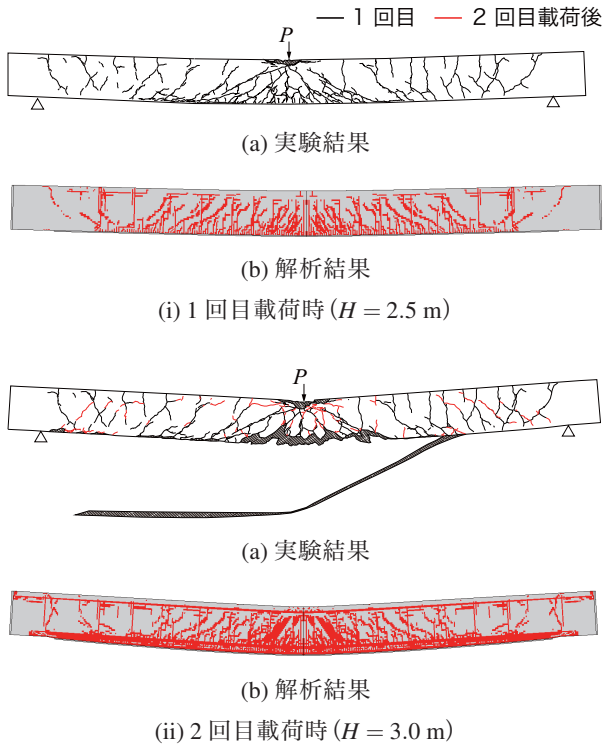


図-6 AS-H2.5 試験体のひび割れ分布

であるものの、2回目荷重時には60 ms程度と大きくなっていることが見て取れる。これは、1回目荷重の荷重履歴を有していることにより、梁の剛性が低下していることを示唆している。解析結果では、実験結果の最大応答値や、2回目荷重時における作用継続時間が延びる傾向を再現していることが確認できる。なお、減衰自由振動状態において、実験結果は支点反力が負値を示しているが、解析結果では確認できない。これは、数値解析において、支点部のリバウンド防止用鋼製矩形梁に対する締め付け力を考慮していないことが要因と考えられる。

図-5(c)の変位波形に着目すると、実験結果と解析結果の最大変位および残留変位の誤差は、いずれのケースにおいても10%程度以内に収まっていることを確認している。なお、後述のように、2回目荷重時には実験結果と同様に、解析結果においても梁下縁にひび割れが広がり、シートの剥離挙動をほぼ適切に再現していることが分かる。

以上より、提案の解析手法を適用することで、FRPシート補強RC梁の繰り返し衝撃荷重荷重時の各種時刻歴応答波形を適切に評価可能であることが明らかとなった。

4.2 ひび割れ分布

図-6には、AS-H2.5試験体を対象に、1, 2回目荷重終了後の梁側面のひび割れ分布を、解析結果と比較して示している。図中、実験結果において繰り返し荷重時に発生したひび割れ分布は赤色で示している。なお、解析結果のひび割れは、図-3(a)に示すコンクリートの材料構

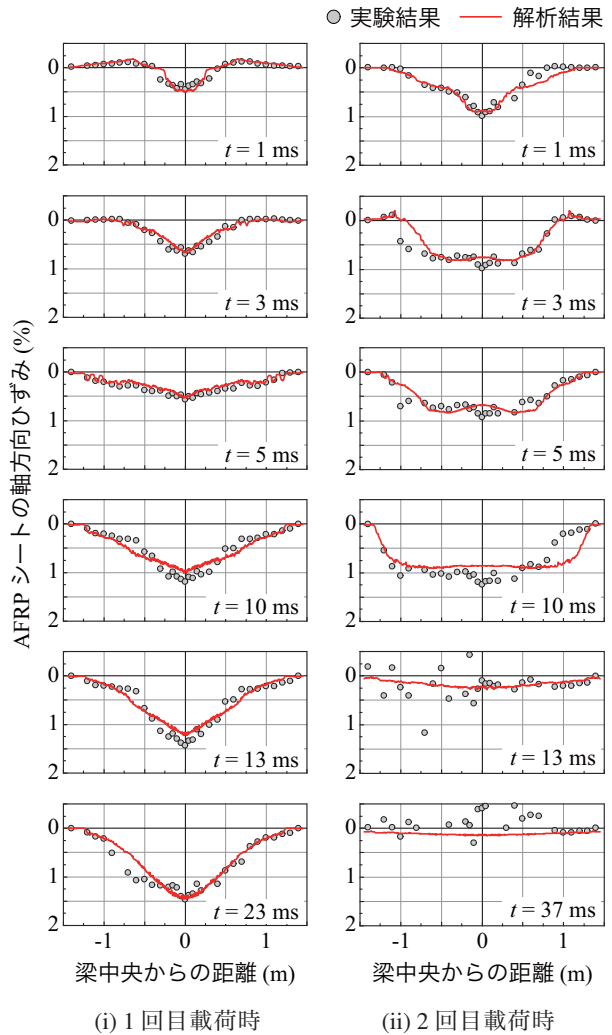


図-7 AS-H2.5 試験体のシート軸方向ひずみ分布

成則に基づき、引張応力がカットオフされた状態(第1主応力が零近傍応力)となる要素であるとして評価した。

1回目荷重時の実験結果に着目すると、梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや荷重点近傍から梁下縁に向かって進展する斜めひび割れが発生していることが分かる。また、重錘衝突初期には曲げ波が両端固定梁のような挙動を示して支点方向に伝播することにより、支点近傍部梁上縁から下縁に向かってひび割れが発生している。解析結果に着目すると、実験結果よりもひび割れを示す赤色領域が若干広く分布しているものの、荷重点部の曲げひび割れや斜めひび割れ、あるいは支点近傍部のひび割れなどをよく再現しており、概ね実験結果と対応していることが窺える。

次に、2回目荷重時の実験結果に着目すると、梁全体にひび割れを示す赤線が増えており、全体のひび割れがさらに進展している様子が見取れる。梁下縁においては、かぶりコンクリートと共にシート剥離に至り終局状態であることも確認できる。解析結果においても、同様にひび割れの範囲が増大し、かつ梁下縁にAFRPシートに沿うよ

表-3 シート剥離現象の実験および解析結果比較

試験体名	AS-H1			AS-H2		AS-H2.5	
	1.0	2.0	2.5	2.0	2.5	2.5	3.0
実験結果	○	○	× (18 ms)	○	× (17 ms)	○	× (12 ms)
解析結果	○	○	× (24 ms)	○	× (13 ms)	○	× (11 ms)

○ = 健全, × = シート剥離, () 内は剥離発生時間

うにひび割れの範囲が拡大しており、引張応力が伝達されていないことが推察される。また、本研究ではこのような状態を数値解析におけるシート剥離と定義している。

これより、本手法を適用することにより、シートの剥離現象も数値解析的に処理可能であ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-7には、AS-H2.5 試験体に関する、1, 2 回目載荷時の重錘衝突初期から実験時の最大変位到達時刻までの各時刻における AFRP シートの軸方向ひずみ分布を、解析結果と比較して示している。なお、横軸は梁中央(載荷点)からの距離を取って整理している。また、2 回目載荷時の結果は 1 回目載荷からの累積ひずみとなっている。

図-7(i)より、1 回目載荷時の実験結果に着目すると、重錘衝突初期には載荷点直下は引張ひずみ、中央から 0.5 m 程度の位置においては圧縮ひずみが生じており、曲げ波が伝播する状況が確認できる。また、 $t = 5$ ms からはスパン全域に渡って引張ひずみが生じており、静載荷時と類似の性状を示している。解析結果に着目すると、いずれの時刻においても実験結果をほぼ適切に評価しており、既往の研究²⁾と同様に単一載荷時における提案手法の妥当性が再度確認された。

図-7(ii)より、2 回目載荷時の実験結果に着目すると、重錘衝突初期には既にほぼスパン全域に引張ひずみが励起していることが分かる。また、 $t = 3 \sim 10$ ms においては、ひずみが 0.8 % 程度と均一になっている領域が支分部へと拡大していく様子が窺える。これは、前述のように徐々にシートが剥離していく傾向を表している。 $t = 13, 37$ ms においては、シートひずみが全体的に零近傍の値を呈し、シート剥離に至っていることがひずみ分布からも確認される。解析結果に着目すると、いずれの時刻においても実験結果を適切に評価していることが分かる。これより、本研究の範囲内においては 1 回目載荷後の劣化進展状況や、シート剥離による特徴的なひずみ分布も適切に評価可能であることが明らかとなった。

4.4 全ケースにおけるシートの剥離性状

表-3には、本研究で対象とした全3体の試験体においてシートの剥離状況に関する実験結果と解析結果を比較して示している。また、シート剥離が生じた場合にはその発生時刻も合わせて示している。

実験結果に着目すると、いずれの試験体に関してもシート剥離で終局に至っている。一方で、数値解析結果に着目すると、実験結果と同様にいずれもシート剥離によって終局に至っており、AFRP シートの要素削除(破断)は確認されていない。また、各試験体のシート剥離に至った時間を実験結果と比較すると、その傾向は両者で概ね一致していることが分かる。

以上より、提案の解析手法を用いることにより、繰り返し衝撃荷重載荷時におけるシートの剥離現象をほぼ再現可能であることが明らかになった。

5. まとめ

- 1) 本研究の範囲内において、提案の解析手法を用いることによって、繰り返し衝撃荷重載荷による RC 梁の劣化進展状況や各種時刻歴応答波形、AFRP シートの軸方向ひずみ分布をほぼ適切に評価可能である。
- 2) また、入力エネルギー漸増繰り返し衝撃荷重載荷時におけるシートの剥離現象も実験結果を概ね再現可能である。

今後は、目付量を小さくした場合や、より小さい入力エネルギーが何度も作用するような場合について検討を行うことで、提案手法の適用性や汎用性をさらに検証していく予定である。

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。

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
- 2) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸 徳光, 栗橋祐介: AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, pp.715-720, 2018.
- 3) 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.
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.
- 5) 土木学会構造工学委員会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.