

論文 荷点部に緩衝ゴムを設置した AFRP シート補強 RC 梁の弾塑性衝撃応答解析

永井 泰圭^{*1}・瓦井 智貴^{*2}・小室 雅人^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：本研究では、荷点部に緩衝ゴムを設置したアラミド繊維製 FRP (AFRP) シート下面接着曲げ補強 RC 梁に関して、シート破断で終局に至る程度の目付量が小さい場合を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。緩衝ゴムは材料試験結果を基に応力-ひずみ関係を定義し、固体要素を用いてモデル化を行った。また、コンクリートの要素長を 6 mm 程度として、引張破壊エネルギー等価の概念を適用する既往の解析手法を用い、その適用性について検討を試みた。検討の結果、本解析手法を適用することで、荷点部に緩衝ゴムを設置した AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動を概ね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, 緩衝ゴム, 有限要素法, 衝撃応答解析

1. はじめに

近年、斜面の経年劣化等により落石規模が大型化する場合があります。設計荷重を上回る落石荷重が構造物に作用する事例も確認されている。従って、そのような既設落石防護構造物の耐衝撃性能の向上が急務となっている。このような状況下において、構造物の耐衝撃性を向上させる方法の一つとして、軽量で高強度、かつ耐食性に優れた連続繊維補強 (Fiber Reinforced Plastics) 材を用いた接着工法に着目し、FRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁を対象に、その耐衝撃性向上効果や終局時の破壊性状等について数多くの検討が行われている^{1)~4)}。

その結果、1) FRP シート下面接着曲げ補強を施すことによって RC 梁の耐衝撃性が向上すること、2) FRP シートの目付量が小さい場合には、荷点部で角折れの傾向を呈し、荷点直下のシートに過大なひずみが発生することでシート破断に至ること、3) 一方で、目付量が大きい場合には、荷点部からの斜めひび割れの進展に伴う

ピーリング作用によってシート剥離に至ること、4) 終局エネルギーに対して 1/6 程度の小さい入力エネルギーを設定し、終局に至るまで同一入力エネルギーで複数回重錘を衝突させる場合には、シート破断や剥離が発生せず荷点部の圧壊によって終局に至ること、などが明らかになっている。

そのため、著者らは、荷点部における圧壊を抑制し効率的に耐衝撃性を向上させることを目的に、橋梁の桁端衝突部における衝撃力緩和のため用いられている緩衝ゴムに着目し、それを荷点部に設置した場合における検討も実施している^{5),6)}。その結果、緩衝ゴムを設置することで、1) 最大衝撃力は緩衝ゴムを設置していない場合と比較して 1/5 から 1/6 程度に低減されること、2) 衝突部の圧壊による損傷が軽減され鋭角な斜めひび割れが減少すること、3) 直接荷重時に目付量が小さくシート破断で終局に至る場合には、衝突部の損傷が抑制され角折れの性状が顕在化しないことからシート破断傾向も抑制されること、などが明らかになっている。

また、著者らは FRP シート接着曲げ補強設計法の確立に向けた研究を効率的に推進するために、実験結果を適切に評価可能な数値解析手法の確立についても検討を行っている。既往の研究では、シート破断や剥離の発生要因

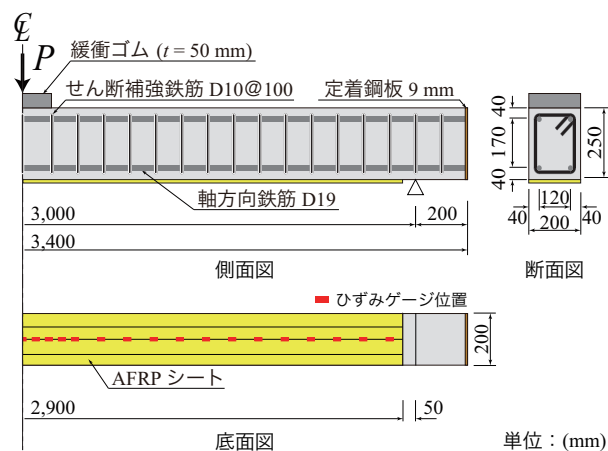


図-1 試験体の形状寸法および FRP シートの補強状況

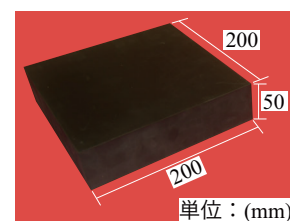


図-2 緩衝ゴムの形状寸法

- *1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)
 *2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 助教 博(工) (正会員)
 *3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 教授 博(工) (正会員)
 *4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 特任教授 工博 (正会員)

表－１ AFRP シートの力学的特性値(公称値)

目付量 (g/m ²)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)
415	0.286	2.06	118

表－２ 実験ケース一覧

No.	設定 落下高 H (m)	換算 落下高 H' (m)	実測重錘 衝突速度 V' (m/s)	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)	せん断筋 降伏強度 f_{ys} (MPa)
1	1.0	1.04	4.52	32.4	379.4	363.5
2	2.0	1.99	6.24			
3	2.5	2.49	6.99			
4	3.0	3.04	7.72			
5	3.5	3.51	8.29	29.5	397.1	387.9

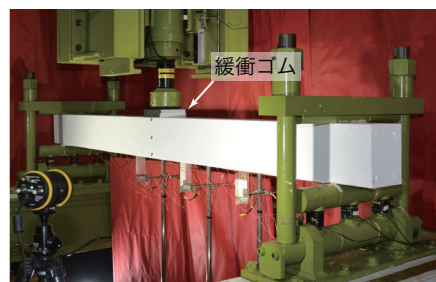
となるひび割れ分布の適切な評価を念頭に、コンクリート要素の梁軸方向要素長を 6 mm 程度まで小さくし、かつ既往の研究⁷⁾で提案されている引張破壊エネルギー (G_f) 等価の概念を適用した解析手法を提案し、その適用性について検討を行っている⁸⁾。しかしながら、これらの数値解析的検討は、いずれも RC 梁に重錘を直接衝突させた場合のみの検討に留まっており、载荷点部に緩衝ゴムを設置した場合に関する提案手法の適用性については未だ検討が行われていないのが現状である。

このような観点より、本研究では载荷点部に緩衝ゴムを設置した AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動の再現を目的とし、別途実施した重錘落下衝撃荷重載荷実験結果⁶⁾を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果と比較する形で本解析手法の適用性について検討を行った。なお、本数値解析には陽解法に基づく非線形構造解析汎用コード LS-DYNA⁹⁾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 RC 梁(以後、シート補強 RC 梁)の形状寸法と配筋、補強状況、緩衝ゴムの設置位置およびひずみゲージ接着位置を示している。試験体の形状寸法(梁幅×梁高×純スパン長)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。せん断補強筋には D10 を使い、100 mm 間隔で配筋した。図－２には本研究で用いた緩衝ゴムの形状寸法を示している。本研究では、载荷点部の圧壊を抑制することを目的に緩衝ゴムを設置した。なお、緩衝ゴム側面と梁上面は粘着テープで接着固定している。緩衝ゴムには、通常緩衝用として用いられる硬度 65 の天然ゴムを採用し、その形状



図－３ 衝撃荷重載荷実験の様子

寸法(幅×長さ×厚さ)は、梁幅および重錘先端直径を考慮して 200×200×50 mm とした。

AFRP シートの接着範囲は、RC 梁下面に支点の 50 mm 手前までとした。シート接着は、梁底面を上向きにした状態で補強範囲に深さ 1 mm 程度の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した後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。なお、養生期間は 1 週間程度である。また、表－１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。

表－２には、本研究で対象とした試験体の一覧⁶⁾を示している。本研究では、図－１に示す試験体を対象に、後述するように重錘落下高(以後単に、落下高) H を 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 m と 5 段階に変化させ、常に未使用の試験体を用いて実験を実施した。実験時には、梁は落下高 $H = 3.5$ m の場合に AFRP シートの破断によって終局に至っている。なお、表中の実測落下高 H' (m) は実測衝突速度 V' 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 f_{ya} およびせん断筋の降伏強度 f_{ys} は、別途実施した材料試験から得られた値である。

2.2 実験方法および測定項目

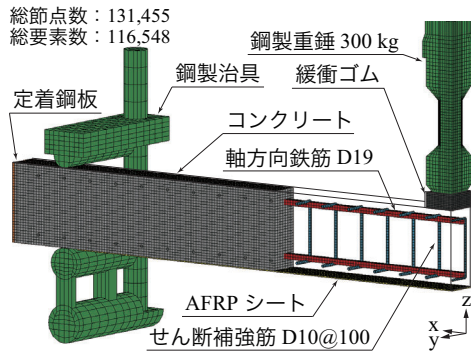
図－３には、衝撃荷重載荷実験の様子を示している。実験は、円柱部直径が 200 mm、载荷部直径が 150 mm であかつ高さが 2 mm の球形状をした質量 300 kg の鋼製重錘を所定の高さ(= 1～3.5 m)から梁のスパン中央部に自由落下させることで実施した。試験体の両支点部は、回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。

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)、および(4) 図－１に示すように AFRP シートに接着したひずみゲージによる軸方向ひずみ分布、である。なお、重錘衝撃力と支点反力は起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを、载荷点変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。

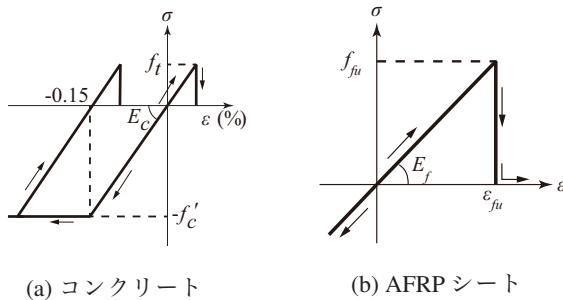
3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図－４には、本研究で用いたシート補強 RC 梁に関する



図－４ 有限要素モデル

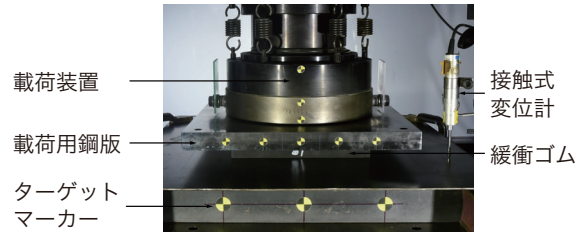


図－５ 材料構成則

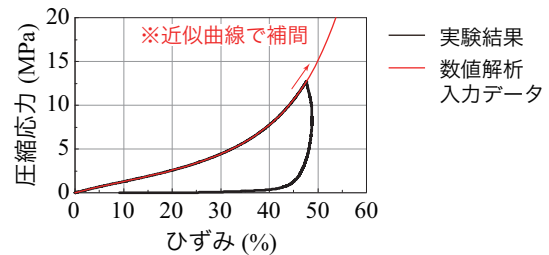
有限要素モデルを示している。モデルは、対称性を考慮しスパン方向および梁幅方向にそれぞれ2等分の1/4モデルを採用した。適用した要素タイプは、せん断補強筋には2節点梁要素、コンクリート、緩衝ゴムを含むその他全ての要素には8節点固体要素を用いている。なお、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形断面に簡略化している。要素の積分点数に関しては、8節点固体要素に対して1点積分、2節点梁要素に対して4点積分とした。

AFRPシートに関しては、表－1に示すように設計厚が0.286 mmと非常に薄いことより、これを8節点固体要素を用いてモデル化する場合には、陽解法の場合には計算時間が過大になる。このことから、本研究では仮想的にシートの厚さを10倍にすることとし、質量および軸剛性が等価となるように、弾性係数と密度を1/10とした。

重錘と緩衝ゴム間およびコンクリートと緩衝ゴム間、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。なお、摩擦係数に関しては、コンクリートと支点治具間には既往の研究⁸⁾と同様に考慮していない。しかしながら、重錘と緩衝ゴム間およびコンクリートと緩衝ゴム間には予備解析に基づき0.2を設定した。さらに、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、既往の実験結果²⁾から明らかなようにシートとコンクリートの付着が剥離時まで保たれていることから、



図－６ 緩衝ゴムの静载荷実験



図－７ 緩衝ゴムの応力－ひずみ関係

完全付着と仮定している。

衝撃荷重は、重錘要素を緩衝ゴムに接触する形で配置し、その全節点に表－2に示す実測衝突速度 V' を付加することで作用させている。また、減衰定数 h は質量比例分のみを考慮することとし、既往の研究⁸⁾と同様に鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定した。

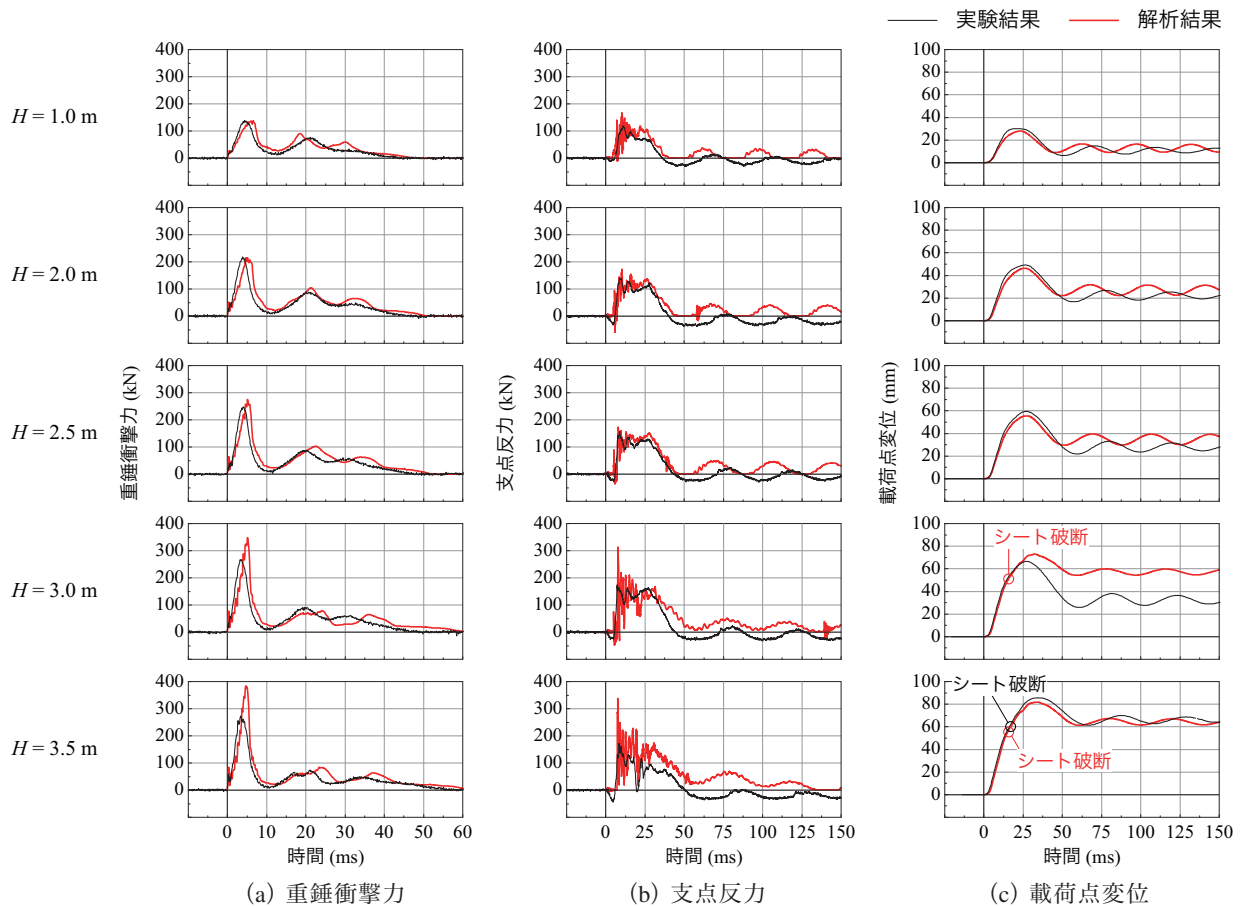
3.2 材料構成則

図－5には、本数値解析で用いたコンクリートおよびAFRPシートの応力－ひずみ関係を示している。図－5(a)より、コンクリートは、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た。圧縮強度 f'_c に関しては、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、既往の文献⁸⁾を参考に、コンクリート要素の梁軸方向要素長 L_i を6 mm程度まで小さくし、かつ引張破壊エネルギー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} は次式で与えられる。本解析では既往の研究⁸⁾を参考に基準要素長 L_0 を25 mmと決定した。

$$f_{ti} = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L_i}} \quad (1)$$

ここで、 f_{t0} は、基準要素の引張強度($=f'_c/10$)である。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。

AFRPシートは、図－5(b)に示すように弾性体と仮定し、破壊ひずみ ϵ_{fu} ($=1.9\%$)に到達した時点で要素を削除するエロージョン機能を用いて破断を評価している。単位体積質量 ρ_f はシート厚さを10倍にしてモデル化して



図－8 全ケースに関する各種時刻歴応答波形の比較

いることより、公称値である $1.451 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の $1/10$ とし、弾性係数 E_f も同様に 表－1 に示す値の $1/10$ とした。

図－6 には、本実験で用いた緩衝ゴム単体の静荷重載荷実験の状況を示している。また、図－7 には、実験より得られた緩衝ゴムの応力－ひずみ関係を示している。実験では、载荷装置の都合上、ひずみが 50 % 程度に至るまで载荷を行った。その時の応力は 12.5 MPa 程度である。本研究では、図－7 に黒線で示す実験結果を基に、赤線で示す応力－ひずみ関係を緩衝ゴムの構成則として設定した。50 % 程度以上の大ひずみ領域に関しては、実験結果を基に近似曲線を用いて補間している。なお、本数値解析結果では最大 57 % 程度の圧縮ひずみの発生を確認している。また、単位体積質量 ρ_r およびポアソン比 ν_r は、それぞれ $\rho_r = 1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_r = 0.495$ と設定した。

軸方向鉄筋およびせん断補強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適用した。これらの降伏応力 f_{ya} 、 f_{ys} には、表－2 に示す値を用いた。また、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。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。

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た。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。一方で、単位体積質量 ρ_s は、支点治具および定着鋼板に関しては公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いているが、重錘に関しては質量 300 kg を解析モデルの体積で除した値を入力した。

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種時刻歴応答波形

図－8 には、衝撃荷重載荷実験より得られた全ケースに関する重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位波形を、落下高毎に実験結果と数値解析結果を比較する形で示している。なお、実験結果および数値解析結果はそれぞれ黒線、赤線で示しており、横軸は重錘が緩衝ゴムに衝突した時間を零としている。

図－8 (a) の重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果の波形はいずれのケースにおいても概ね同様であり、継続時間が 10 ms 程度で最大衝撃力を示す第一波が励起した後、最大 100 kN 程度の第二波が励起していることが見て取れる。また、最大衝撃力や二波目の継続時間は落下高に対応して増大する傾向にあることも分かる。数値解析結果に着目すると、いずれのケースにおいても、最大衝

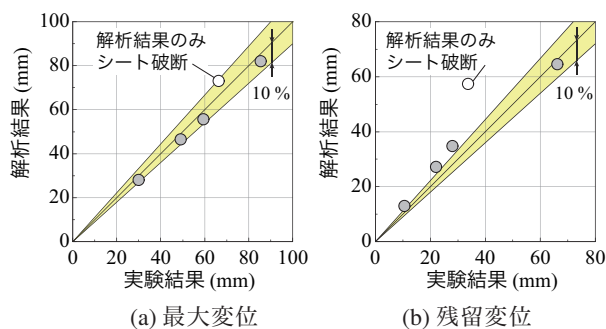


図-9 最大および残留変位の比較

撃力は実験結果と比較してやや過大に評価する傾向にあることが見て取れる。さらに、その傾向は落下高が大きくなるにつれて顕著に表れている。これは、数値解析結果における緩衝ゴムの最大圧縮ひずみが、 $H=3, 3.5$ m時にそれぞれ 55, 57 %を示し、図-7に示す応力-ひずみ関係において近似曲線によって補間した大ひずみ領域に到達しているためと推察される。一方で、第二波および第三波が励起している様子や、それらの継続時間は実験結果と概ね対応していることが分かる。

図-8 (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 ~ 50 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された波形性状を示しており、落下高が大きくなるにつれて、主波動の継続時間が大きくなる傾向が読み取れる。数値解析結果に着目すると、 $H=1 \sim 2.5$ mにおいては、最大支点反力および主波動の継続時間は実験結果と概ね一致していることが分かる。 $H=3$ mに着目すると、数値解析結果の場合には、早期にシート破断に至っていることから、支点反力波形の継続時間は実験結果と比較して長くなっている様子が見て取れる。さらに、 $H=3, 3.5$ mの場合には、数値解析結果は、高周波成分が卓越しており、実験結果と必ずしも対応していない。これは、数値解析結果の場合には、実験結果よりも入力エネルギーの小さい段階でシート破断が発生し終局に至ったことによるものと推察される。

図-8 (c)の载荷点変位波形に着目すると、いずれのケースにおいても、数値解析結果は実験結果と共に、最大変位を示した後に、減衰自由振動状態に至っていることが分かる。波形の立ち上がり勾配に着目すると、いずれの試験体においても、数値解析結果は実験結果と概ね対応していることが見て取れる。 $H=3$ mの場合において、数値解析結果の場合には実験結果と異なりシート破断が発生したことによって、最大変位および残留変位は過大に評価される傾向にあることが分かる。一方で、 $H=3.5$ mの場合には、両者ともにシート破断が発生し終局に至っていることより、最大変位および残留変位は概ね類似の傾向を示しており、さらに減衰自由振動周期も同様であることが見て取れる。

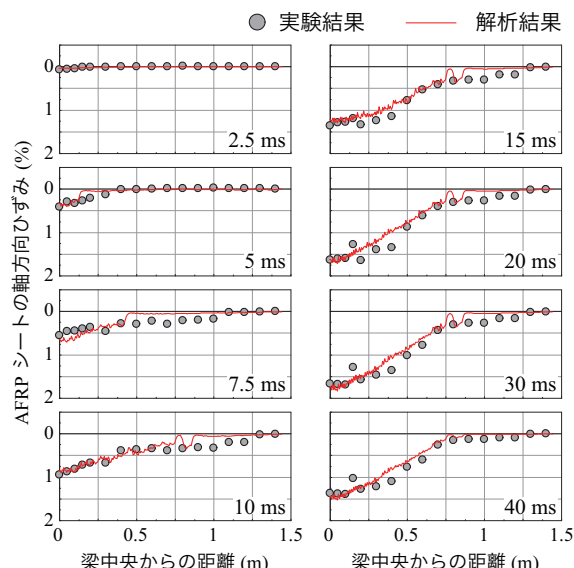


図-10 AFRP シートの軸方向ひずみ分布 ($H=2.5$ m)

4.2 最大および残留変位分布

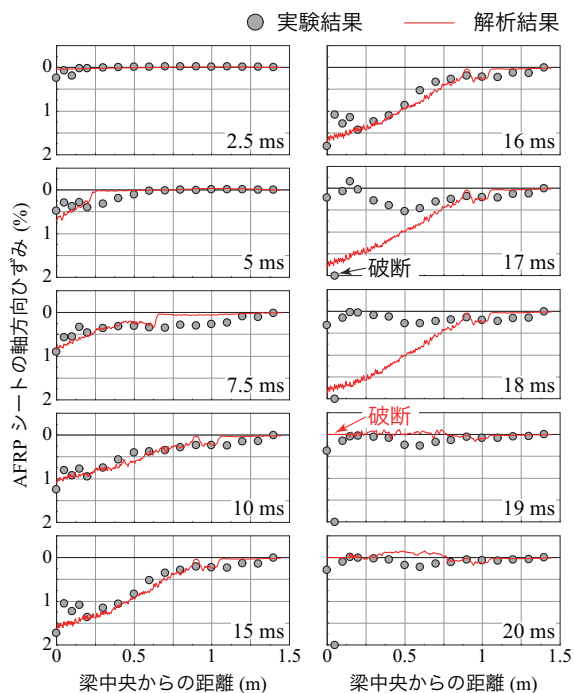
図-9は、各試験体の最大および残留変位に関して、横軸に実験結果を、縦軸に数値解析結果を取って整理したものである。なお、白抜きは数値解析においてのみシート破断が発生した $H=3$ m の場合の結果を表している。また、黄色の領域は数値解析結果の実験結果に対する誤差 $\pm 10\%$ の範囲である。

図より、図-9 (a)の最大変位の場合に着目すると、全ケースにおいて、数値解析結果は実験結果と概ね対応しており、その誤差は 10 % 以内であることが分かる。また、図-9 (b)の残留変位の場合に関しても、 $H=3$ m 落下時を除き、数値解析結果の実験結果に対する誤差は概ね 10 % 程度であることが見て取れる。

4.3 AFRP シートの軸方向ひずみ分布図

図-10には実験結果と数値解析結果がともに終局に至っていない $H=2.5$ m の場合、図-11には両結果がシート破断によって終局に至った $H=3.5$ m の場合における AFRP シートの軸方向ひずみ分布に関して、数値解析結果と実験結果を比較して示している。なお、実験結果は黒丸、数値解析結果は赤線で示している。

図-10より、 $t=2.5$ ms 時点では、数値解析結果と実験結果は共にほぼひずみが生じていない様子が見て取れる。これは、緩衝ゴムと重錘が衝突した時間を 0 ms としていることより、未だ梁としては応答していないことを示唆している。その後、 $t=5$ ms 時点では、ひずみの発生が確認できるものの、その範囲は数値解析結果が若干局所的であることが分かる。 $t=7.5 \sim 30$ ms 時点では、数値解析結果は、実験結果と共に引張ひずみの領域がスパン中央部から支点に向かって徐々に進展していく様子が見て取れ、スパン中央部の最大ひずみも増大していく傾向が確認できる。 $t=30$ ms 時点程度では図-8 (c)からも明らか



図－11 AFRP シートの軸方向ひずみ分布 ($H = 3.5$ m)

なように最大変位を示し、 $t = 40$ ms 時点では、両結果は共にひずみが若干復元していく様子が見て取れる。

図－11 より、シート破断で終局に至った $H = 3.5$ m の場合に注目すると、図－10 と同様に $t = 2.5$ ms 時点では、両者でひずみが発生していない様子が見て取れる。 $t = 5 \sim 15$ ms 時点では、数値解析結果は実験結果と比較して局所的にややひずみが増大する傾向を示すものの、スパン中央部の最大ひずみは概ね一致している。 $t = 16$ ms 時点では、両者ともに支点近傍まで引張ひずみ領域が進展しており、それらの分布性状はほぼ対応している。一方で、 $t = 17$ ms 時点では、実験結果はスパン中央部のひずみが 2 % を超過し、シート破断に至っている傾向が確認できる。しかしながら、数値解析結果は、スパン全長において正曲げのひずみ分布を呈しており未だ破断には至っていない。 $t = 19$ ms 時点では、数値解析結果はシート要素が設定した破断ひずみ (= 1.9 %) を超過し、エロージョン機能によって要素削除に至った。すなわち、数値解析においてもシートが破断現象に至ったことが分かる。

以上より、本数値解析手法を用いることで、シート破断現象も含めた AFRP シートの軸方向ひずみ分布を概ね再現できることが明らかになった。

5. まとめ

- 1) 既往の研究において提案されているコンクリートの要素長を 6 mm 程度に小さくし、引張破壊エネルギー等価の概念を適用する手法を用いることで、載荷点部に緩衝ゴムを設置した AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動やシートの軸方向ひずみをほぼ適

切に再現可能である。

- 2) 入力エネルギーが大きい場合には、数値解析結果の場合は実験結果よりも早期に終局に至るものの、実験結果と同様にシートの破断現象を再現可能である。

謝辞

本研究で用いた AFRP シートはファイベックス (株)、接着剤等は住友ゴム工業 (株)、緩衝ゴムはシバタ工業 (株) からご提供頂いた。また、本研究は、JSPS 科研費 23K13391 の助成を受けたものである。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Pham, T. M., and H. Hao : Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading, *Structures*, Vol. 7, pp. 59-70, Aug.2016
- 2) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 三上浩, L. H. Sinh : 衝撃荷重載荷時における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.3
- 3) 田野順也, 小室雅人, 岸徳光, 三上浩 : 静的に剥離破壊型で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の一定繰り返し衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 619-624, 2020.6
- 4) N. Kishi, M. Komuro, T. Kawarai, and H. Mikami: Low-Velocity Impact Load Testing of RC Beams Strengthened in Flexure with Bonded FRP Sheets, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.24, pp.103-113, Jul.2020
- 5) 鈴木健太郎, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸 徳光, 三上浩 : 設置する緩衝ゴム厚を変化させたシート破断で終局に至る AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.1023-1035, 2022.3
- 6) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 鈴木健太郎 : 衝撃荷重作用時にシート破断で終局に至る載荷点部に緩衝ゴムを設置した AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.69A, pp.1071-1081, 2023.3
- 7) 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, Jan.2010
- 8) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸 徳光 : 衝撃荷重載荷時の FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する数値解析－コンクリート構成則の適用性検討－, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.1004-1015, 2020.3
- 9) ANSYS, Inc.:LS-DYNA User's Manual R15, Mar.2024