

論文 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}・栗橋 祐介^{*4}

要旨：本論文では、アラミド繊維製 FRP (AFRP) シート下面接着曲げ補強を施した RC 梁を対象に、その耐衝撃挙動やひび割れ分布の再現を目的として、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、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、軸方向要素長を小さくし、既往の研究で提案されている引張破壊エネルギー (G_f) 等価の概念をコンクリート要素に適用することにより、1) シート補強 RC 梁の重錘衝撃力、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こと、2) ひび割れ分布やシートの軸方向ひずみ分布に関してもほぼ適切に評価可能であること、が明らかとなった。

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

1. はじめに

近年、ロックシェッド等は地山の経年劣化による落石規模の拡大や異常気象の頻発などにより、当初の設計荷重を上回る衝撃外力が作用する場合が想定され、耐力不足が指摘されている。従って、この種の構造物の衝撃耐力向上法を確立することが急務となっている。

著者らの研究グループは、既設の耐衝撃用途土木構造物における耐衝撃性向上法の 1 つとして軽量で高強度かつしなやかなアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートに着目し、RC 部材の補強工法への適用性について、数多くの実験的検討を行ってきた^{1), 2)}。その結果、1) AFRP シートを用いて RC 梁を曲げ補強することで梁の変形量やひずみ増大を抑制できること、2) シートの目付量を大きくすることで梁の耐衝撃性をより向上可能であること、3) また、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斜めひび割れの開口によるピーリング作用によってシートが剥離あるいは破断し終局に至ること、などが明らかとなっている。一方で、AFRP シートを用いた合理的な補強設計法を確立するためには、上述の実験的検討と併せて、数値解析的な検討³⁾も行い、効率的に研究を遂行していくことが必要不可欠である。

このような観点から、本研究では AFRP シート下面接着曲げ補強を施した RC 梁の耐衝撃挙動やひび割れ分布の再現を目的として、別途実施した重錘落下衝撃実験結果²⁾を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。一般に、FRP シート接着補強の場合には、通常コンクリートとシートの接着強度がコンクリートの引張強度より大きいことから、数値解析上ではシートと接しているコンクリート要素にひび割れが発生した場合にはシートの補強効果が消失することとなる。このことは、分布ひび割

れを仮定することを前提にシート接着による補強効果を適切に評価するためには、実挙動と同様にひび割れ幅(軸方向要素長)を可能な限り小さくしなければならないことを意味している。一方で、無補強 RC 梁の衝撃応答解析において、コンクリート要素の軸方向要素長を 25 mm(以後、基準要素長)程度とすることにより、梁の変位波形や残留変位を適切に評価可能であることが明らかになっている。しかしながら、ひび割れ幅を適切に評価するためには、上述の基準要素長よりも小さい要素長を適用しなければならない。このようなことから、本研究では既往の研究⁴⁾で提案されている引張破壊エネルギー (G_f) 等価の概念を基準要素長よりも小さい要素長に適用した場合において、無補強およびシート補強 RC 梁を対象に数値解析を実施して、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-DYNA⁵⁾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無補強試験体(N 試験体)および AFRP シート下面接着補強試験体(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、200×250×3,000 mm である。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 度程度の環境で 7 日間以上とした。

2.2 実験方法および測定項目

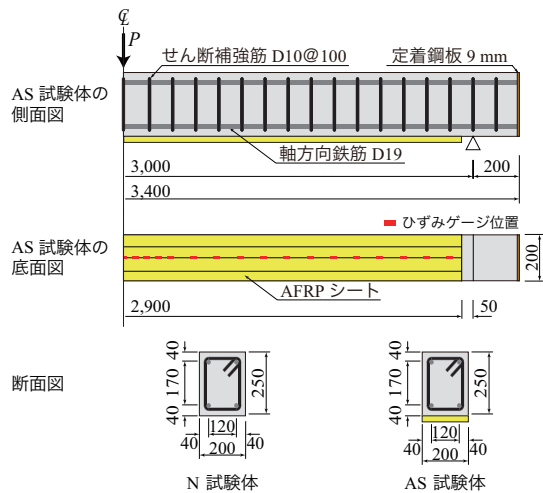
重錘落下衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径

*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)

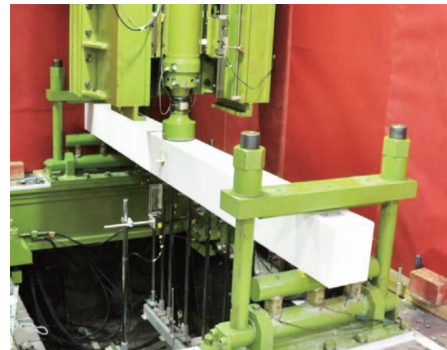
*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

*3 (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)



図－１ 試験体の形状寸法と配筋



写真－１ 実験装置と試験体の設置状況

表－１ 試験体一覧

試験 体名	補強材の 種類	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)	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)
N-H2.5	-	2.5	2.29	32.4	381.7	461.9
AS-H1.0	AFRP シート	1.0	1.12	35.4		
AS-H2.0		2.0	2.19			
AS-H2.5		2.5	2.40			

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

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。また、試験体の両支点下端部は、写真－１に示すように回転を許容するピン支持となっており、その上端部には、試験体設置後に鋼製治具を載せ、ナットを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。

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、無補強および AFRP シート補強試験体を対象に重錘落下高さ H を変化させた全 4 ケースの実験を実施した。表中の試験体名のうち、第 1 項目は補強の有無 (N : 無補強, AS : AFRP シート補強) を、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。また、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、表－２には AFRP シートの力学的特性値 (公称値) を示している。

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 AS 試験体に関する有限要素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 モデルとした。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た。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。

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、陽解法では計算コストが大きい。本研究では、シート厚を仮想的に 10 倍に設定し、軸剛性が等価となるように弾性係数を 1/10 として計算時間の短縮を図ることとした。

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。ただし、摩擦は考慮していない。なお、数値解析における重錘衝撃力はペナルティ法に基づく接触反力を用いて評価した。また、境界条件は対称切断面において、その法線方向変位を拘束し、支点下部においては実験と同様にピン支持とした。

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を仮定した。また、前述のように通常AFRPシートとコンクリートの付着強度はコンクリートの引張強度よりも大きいことから、数値解析的にはシート剥離はシートに隣接するコンクリート要素のひび割れによって評価可能になることから、コンクリートとシート間は完全付着と仮定している。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。なお、ひずみ速度効果に関しては、著者らの既往の研究^{3),4)}より、低～中速度域の载荷速度においては、ひずみ速度効果を考慮せずとも実験結果の動的応答特性を特定可能であることが明らかになっていることより、本解析においても同様に考慮しないこととした。

(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。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。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、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)を採用した。引張破壊に到達した要素には、その後引張応力は伝達されないものの、ひずみが圧縮域に到達した場合には再度圧縮応力が発生する。なお、本研究で適用した引張破壊領域の取扱に関する詳細については、次節を参照されたい。

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-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) 鉄筋

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。軸方向鉄筋とせん断補強筋の降伏応力 f_{ya} 、 f_{ys} は

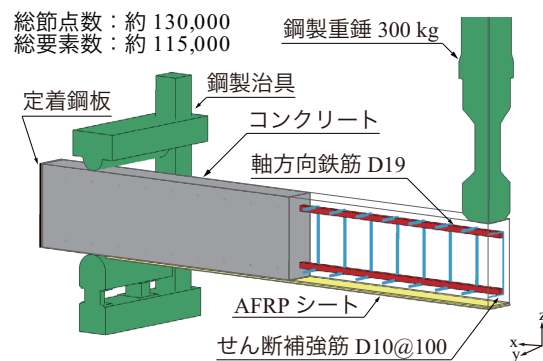


図-2 有限要素モデル(AS試験体)

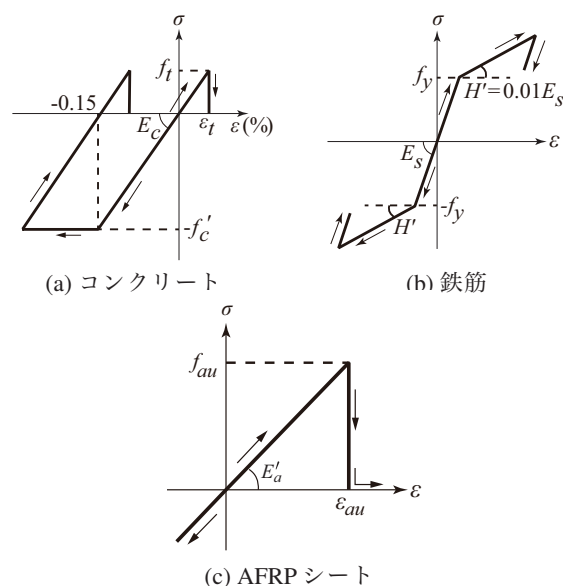


図-3 材料構成則

表-1に示す値を用いた。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。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。

(3) AFRP シート

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 ϵ_{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 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 $\rho_a = 1.451 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 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。

(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 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

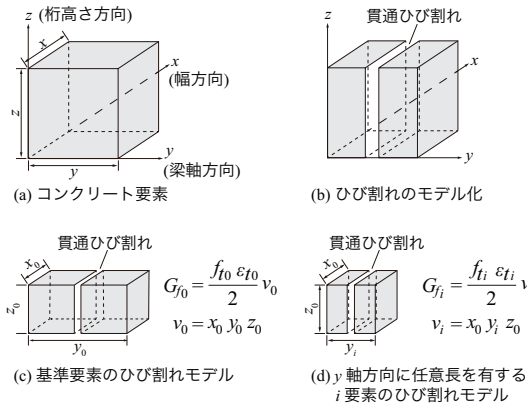


図-4 引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念

表-3 要素長 y_i と換算引張強度 f_{ti} の関係(N試験体)

要素長 y_i (mm)	換算引張強度 f_{ti} (MPa)	
	G_f を考慮しない	G_f を考慮する
100	3.24	1.62
50		2.29
25 [#]		-
12.5		4.58
6.25		6.48

[#] 基準要素長

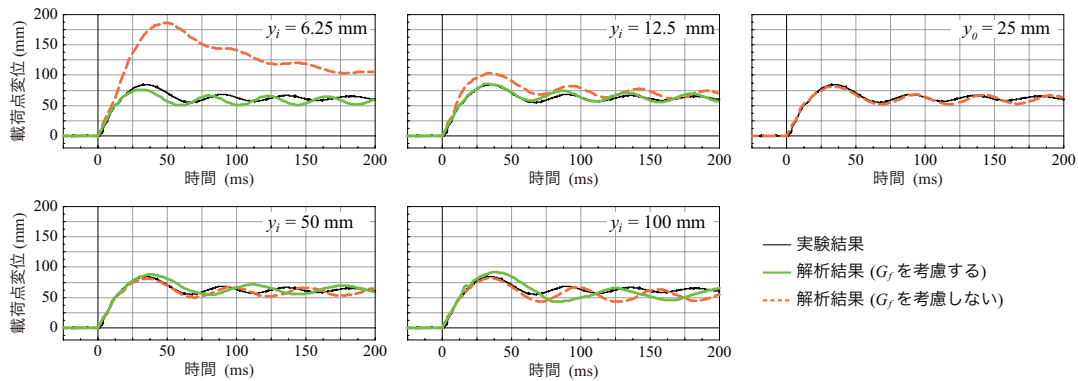


図-5 各要素長における引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念の有無による載荷点変位波形(N試験体)

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。

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実験的に確認されている。従って、「はじめに」でも述べているように、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、数値解析的にひび割れ分布の再現が極めて重要である。本研究では、既往の研究³⁾の改善も含め、引張破壊エネルギー等価(G_f)の概念⁴⁾をコンクリート要素の要素長が基準要素長よりも小さい場合に適用し、変位波形やシートの軸方向ひずみ、ひび割れ分布の再現を試みた。

図-4 には G_f 等価の概念図を示している。曲げ破壊型の RC 梁を対象とした場合において、図-4 (a) に示すコンクリートの一要素に貫通する 1 本の曲げひび割れが発生するものと仮定する(図-4b)。いま、基準要素の梁軸方向、幅方向、高さ方向の要素長をそれぞれ y_0, x_0, z_0 、コンクリート要素の引張強度を f_{t0} 、破壊ひずみを ϵ_{t0} とすると、ひび割れが発生する時の引張破壊エネルギー G_{f0} は図-4 (c) のように示される。ここで、梁軸方向に任意の要素長 y_i を有する i 要素(図-4d)においても、基準要素と等しい破壊エネルギー($G_{fi} = G_{f0}$)でひび割れが発生するものと仮定すると、 i 要素の換算引張強度 f_{ti} は、次

式で与えられる。

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

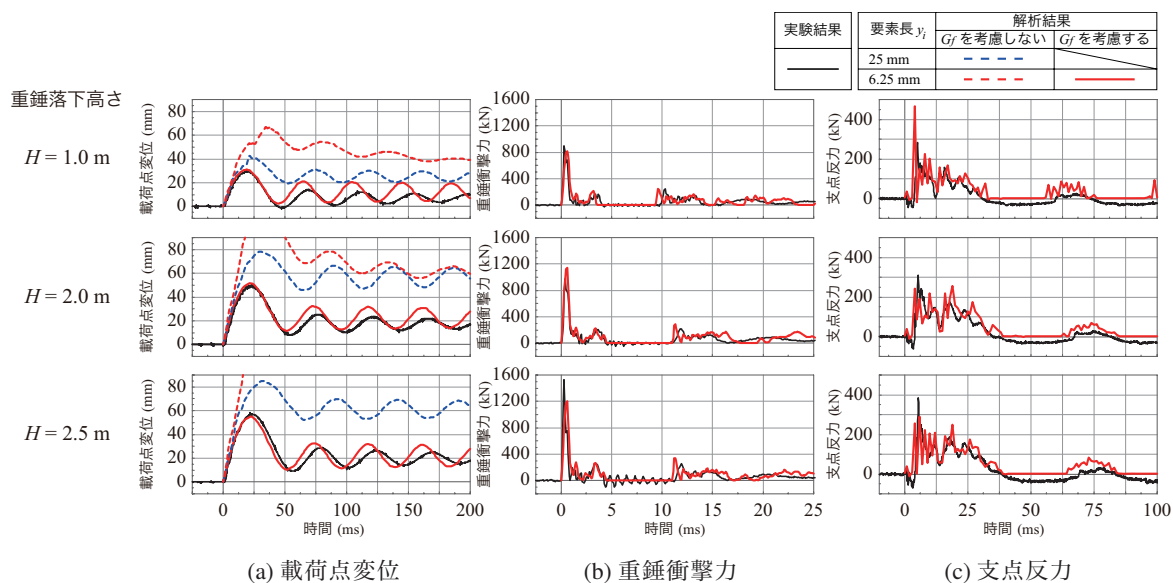
すなわち、破壊エネルギー G_f はコンクリート要素長 y (要素体積 v) に依存することより、要素長が基準要素長と異なる場合においても、図-3 (a) に示す第 1 象限の三角形領域(引張領域)が等価となるように換算引張強度 f_{ti} を (1) 式にて算出し、コンクリート要素に適用している。

4. 数値解析結果及び考察

4.1 N 試験体における基準要素長 y_0 の決定および G_f 等価の概念の適用性検討

図-5 には、落下高さ $H = 2.5$ m における N 試験体の載荷点変位波形について、数値解析結果と実験結果を比較して示している。数値解析は要素長 y_i を 5 種類に変化させ、それぞれについて G_f 考慮の有無を検討した結果である。また、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。なお、表-3 には、N 試験体に関する要素長 y_i と換算引張強度 f_{ti} の関係を示している。 G_f を考慮しない場合には引張強度を材料試験から得られた圧縮強度の 1/10 とし、 G_f を考慮する場合には式 (1) より算出した換算引張強度を用いている。なお、基準要素長 y_0 は既往の研究成果^{3), 4)}を踏まえ $y_0 = 25$ mm と設定した。

図より、基準要素長を用いた場合には、実験結果を精



図－6 AS 試験体に関する各種応答波形

度よく再現していることが分かる。次に、点線で示す G_f を考慮しない解析結果に着目すると、要素長 y_i が小さくなるほど、数値解析結果の最大変位は実験結果よりも大きく示される傾向にある。これは、要素長が小さくなるほど1要素の破壊エネルギーも小さくなることから、数値解析的には実験結果よりも損傷を過大に評価することが要因と考えられる。

一方、 G_f を考慮した数値解析結果に着目すると、要素長によって最大変位到達後の減衰自由振動周期に実験結果と若干の差異が確認されるものの、変位の立ち上がりから最大変位に至るまでの波形性状は、要素長にかかわらず実験結果を概ね再現できていることが分かる。また、最大変位および残留変位は、両者の実験結果との誤差が10%以内であることから、要素長を小さくした場合においても、 G_f 等価の概念を適用可能であるものと判断される。

4.2 AS 試験体における G_f 等価の概念の適用性検討

(1) 各種応答波形

図－6には、荷点変位、重錘衝撃力、および支点反力の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、黒線は実験結果、赤実線は G_f 等価の概念を考慮し、本研究で最も要素長を短くした要素長 $y_i = 6.25$ mm (換算引張強度 $f_{ti} = 7.08$ MPa) の場合における解析結果である。また、荷点変位波形のみ G_f 等価の概念を考慮しない場合 (要素長 $y_i = 6.25, 25$ mm) の結果 (点線) も併せて示している。

図－6 (a) の変位波形に着目すると、実験結果ではいずれの落下高さ H においても最大変位を示す主波動が励起した後に減衰自由振動に至っている。また、前節の無補強 RC 梁において変位波形を適切に評価した基準要素長 $y_0 = 25$ mm の場合には、いずれの落下高さ H においても最大変位が実験結果よりも過大に評価されることが分か

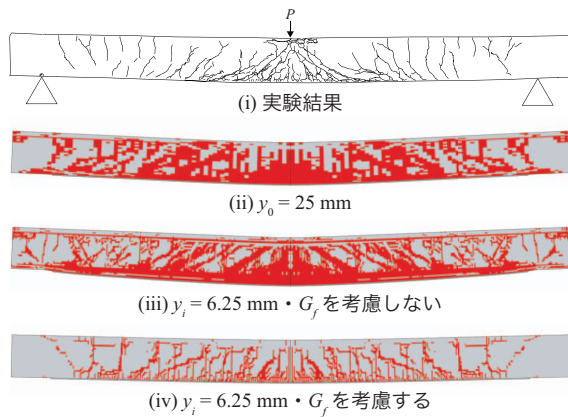
る。また、 G_f を考慮しない $y_i = 6.25$ mm の場合においても同様な傾向が確認される。一方、 $y_i = 6.25$ mm で G_f 等価の概念を適用する場合には、いずれの落下高さ H においても最大変位および残留変位をほぼ適切に評価可能であることが分かる。これより、要素長を小さくし、 G_f 等価の概念を考慮することで補強 RC 梁の変位波形を精度よく評価可能であることが明らかとなった。従って、以降の考察は、 G_f 等価の概念を考慮した要素長 $y_i = 6.25$ mm の場合についてのみ行うこととする。

次に、図－6 (b) に示す重錘衝撃力波形に着目する。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 ($t = 2.5 \sim 5$ ms) が後続する性状を示している。一方、解析結果では落下高さ $H = 2.5$ 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、それ以外では実験結果をほぼ適切に再現可能であることが分かる。

図－6 (c) 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。解析結果に着目すると、落下高さ $H = 1.0$ 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の主波動継続時間も含めた波形性状を概ね評価可能であることが分かる。

(2) ひび割れ分布

図－7には、AS 試験体に関する落下高さ $H = 2.5$ m の場合において、実験終了後の梁側面のひび割れ分布を要素長および G_f 考慮の有無を変化させた3種類の解析結果と比較して示している。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) となる要素として評価した。



図－7 側面ひび割れ分布の比較(AS 試験体, $H = 2.5$ m)

図－7より、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。一方、要素長 $y_0 = 25$ mm あるいは $y_i = 6.25$ mm とした場合の解析結果に着目すると、実験結果よりも損傷を過大に評価しており、実験結果には見られない下縁鉄筋に沿うようなひび割れも確認できる。しかしながら、要素長 $y_i = 6.25$ mm とし、かつ G_f 等価の概念を適用した場合には、概ね実験結果を再現可能であることが分かる。

(3) AFRP シートの軸方向ひずみ分布

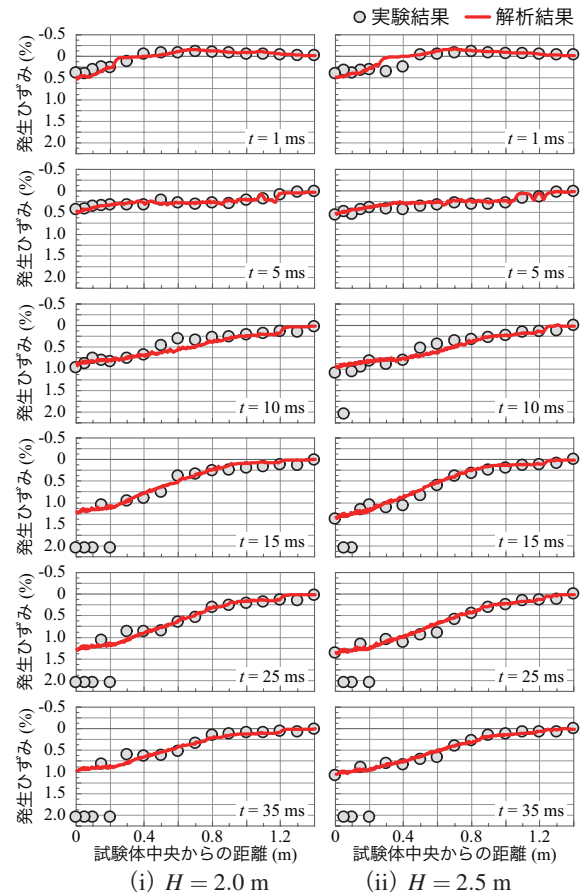
図－8には、落下高さ $H = 2.0, 2.5$ m に関する AFRP シートの軸方向ひずみ分布について、実験結果を要素長 $y_i = 6.25$ mm とし、 G_f を考慮した場合の解析結果と時系列的 ($t = 1 \sim 35$ ms) に比較して示している。

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。これは、重錘衝突初期には両端固定梁のような状態となることを意味している。その後、時間の経過とともに曲げ波動が支点に向かって伝播していくとともに最大変位到達時刻 ($t = 25$ ms) に至るまで、梁全体のひずみが増大していく様子が読み取れる。

数値解析結果に着目すると、いずれの落下高さ H においても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ことが分かる。

5. まとめ

- 1) 小型 RC 梁の三次元弾塑性衝撃応答解析において、 G_f 等価の概念を適用することで、要素長の大小にかかわらず、最大変位および残留変位をほぼ適切に評価可能である。
- 2) シート補強 RC 梁においては、要素長を小さくし、同



図－8 AFRP シートの軸方向ひずみ分布

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。

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) 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 梁の衝撃荷重実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 73 号, A-03(CD-ROM), 2017.2
- 3) 田士大輔, 小室雅人, 今野久志, 三上 浩: AFRP シートで曲げ補強された RC 梁の衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.715-721, 2013.7
- 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.
- 5) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.