論文 AFRP ロッドで曲げ補強した RC 梁の衝撃応答解析

瓦井 智貴*1・岸 徳光*2・小室 雅人*3・栗橋 祐介*4

要旨:本論文では,アラミド製連続繊維棒材(AFRP ロッド)を下面埋設して曲げ補強された RC 梁を対象に, コンクリート要素に引張破壊エネルギー等価の概念を適用して三次元弾塑性有限要素解析を実施した。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,引張破壊エネル ギー等価の概念を考慮してコンクリートの軸方向要素長を小さくすることによって,1) AFRP ロッド補強 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) また,ひび割れ分布 やロッドのひずみ分布に関してもほぼ適切に再現できること,が明らかとなった。 **キーワード**: RC 梁, AFRP ロッド,曲げ補強,衝撃応答解析,有限要素法,破壊エネルギー

1. はじめに

近年,既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の静的耐力向 上法の一つとして,軽量で高強度な連続繊維(FRP)シー トを接着する工法が広く採用されている。一方,落石等 の衝撃的外力を受ける既設耐衝撃用途構造物は,経年劣 化や設計荷重の見直しによる耐力不足も報告されており, この種の構造物の衝撃耐力向上法の確立が必要とされて いる。

このような状況の中,著者らは,耐衝撃用途 RC 構造物 の耐衝撃性向上法として FRP シート接着工法を提案し, 種々の重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施してきた。その 結果,1) アラミド繊維製 FRP(AFRP)シートで RC 梁を曲 げ補強することにより,変形量やひび割れ幅を低減可能 であること、2)シート目付量の増加によりRC梁の耐衝 撃性が向上すること,等を明らかにしている^{1)~3)}。しか しながら、入力エネルギーが大きい場合には、せん断コー ンの形成に伴うひび割れの開口によって発生する応力集 中により、AFRP シートが破断して終局に至る傾向にある ことが明らかになっている。このような応力集中による AFRP シートの破断を防ぐ1つの方法として,破断抵抗性 に優れるアラミド繊維を組紐状に成形した AFRP ロッド に着目し, RC 梁下面に埋設する工法について実験的な検 討を行っている。その結果,1)シート接着工法と同様に, 衝撃荷重を受ける RC 梁の応答変位を抑制可能であるこ とや、2) AFRP シート接着工法よりも補強材料の破断抵 抗性が高く、耐衝撃性向上効果に優れていることなどが 明らかになっている4)。一方,この種の研究を実験のみで 遂行することは、多大な費用を要することより数値解析 的研究も実施して, 効率的に推進されなければならない。

このような観点から、本研究では、FRP ロッドを下面埋 設して曲げ補強を施した 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 AFRP ロッド下面埋設補強 RC 梁(以後、ロッド補強 RC 梁)の重 錘落下衝撃実験結果⁴⁾を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解 析を試みた。ここでは、既往の解析手法^{5),6)}をロッド補強 RC 梁に適用すると共に、コンクリート要素には引張破壊 エネルギー等価の概念^{5),6)}を適用して、要素長を変化させ た場合についても検討を行った。なお、本解析には衝撃・ 構造解析用汎用ソフトウエア LS-DYNA⁷⁾を使用した。

2. 実験概要

表-1には、本解析で対象とした試験体を一覧にして示 している。表中、試験体名の第1項目は補強法の種類(N:無補強,R:ロッド埋設),第2項目のHに付随する数 値は設定落下高さH(m)を示している。なお、表中の実 測落下高さ H_a は、実測重錘衝突速度に基づき換算した自 由落下高さである。また、表には本実験に用いた各試験 体のコンクリート強度 f'_c も併せて示している。

衝撃荷重載荷実験は,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自由落下させる単一 載荷法により行っている。重錘落下位置は梁のスパン中 央点であり,試験体の両支点部は回転を許容し,浮き上



写真-1 実験装置と試験体の設置状況

*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Ⅰ	二学系専攻	(学生会員)
*2	高專機構 釧路工業高	5等専門学校	校長 工博	(正会員)		
*3	室蘭工業大学大学院	くらし環境系	領域 社会基	盤ユニット	准教授 博	(工) (正会員)
*4	室蘭工業大学大学院	くらし環境系	領域 社会基	盤ユニット	講師 博(□	二) (正会員)



表一	2	鉄筋の	力学的特性	値
-1.	~			

呼び径	降伏	破断	弾性	ポア
	強度	強度	係数	ソン比
	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	V_s
D10	461.9	614.0	200	0.2
D19	381.7	582.4	206	0.3

表 - 3	AFRP ロッド	の力学的特性値(公称値)
-------	----------	--------------

直径	断面積	密度	弾性係数	破断強度	破断ひずみ
D	Α	$ ho_a$	E_a	fru	ε_{ru}
(mm)	(mm^2)	(g/cm^3)	(GPa)	(MPa)	(%)
11	95	1.204	69	1178.9	1.72



図-1 R 試験体の形状寸法, 配筋および補強状況

がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。**写 真-1**には実験装置と試験体の設置状況を示している。

図-1には、R 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。軸方向鉄筋は上下端 にD19を各2本配置しており、梁端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接している。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 に充填してロッドを埋設・接着を行っている。なお、養 生期間は1週間程度である。

表-2および表-3には,鉄筋およびAFRPロッドの力 学的特性値を示している。なお,鉄筋は引張試験結果よ り得られた実測値を,AFRPロッドは公称値を用いた。

本実験の測定項目は,(1)重錘衝撃力,(2)合支点反力 (以後,支点反力),(3)載荷点点変位(以後,変位),および



図-3 載荷点変位波形(N試験体)

(4) AFRP ロッドの軸方向ひずみである。また,実験終了 後には,RC 梁のひび割れや AFRP ロッドの剥離状況を撮 影している。なお,重錘衝撃力と支点反力波形は起歪柱 型の衝撃荷重測定用ロードセルを用い,変位波形はレー ザー式非接触型変位計を用いて計測している。

3. 数值解析概要

3.1 有限要素モデル

図-2には、本研究で用いた数値解析モデルを示してい る。本数値解析では、RC 梁の対称性を考慮して梁幅方向 およびスパン方向にそれぞれ2等分した1/4モデルとし た。重錘および支点治具に関しても実形状を極力再現す る形で詳細にモデル化を行っている。

要素タイプに関しては、せん断補強鉄筋には2節点梁要素で積分点数が4、それ以外は全て8節点固体要素で積分 点数を1とした。なお、軸方向鉄筋およびは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。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には,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 している。ここで定義している接触面は,2面間の接触 と分離に伴う解析が可能であり,ペナルティ法を適用し て接触反力が算定可能となっている。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要素間, コンクリートとせん断補強鉄筋間には完全付着を仮定し ている。R試験体の実験結果を見ると,下縁かぶり部の コンクリートは剥落するもののAFRPロッドと近傍コン クリートは一体として挙動していることから,ロッドと コンクリート間も完全付着と仮定した。境界条件は,対



称切断面において法線方向変位成分を,支点部では鉛直 方向変位成分を拘束した支持状態としている。

3.2 数値解析手法と要素分割長

数値解析は重錘要素を RC 梁に接触する形で配置し、その全節点に実測衝突速度を付加することにより衝撃荷重 を発生させている。また、減衰定数 h は、質量比例分の みを考慮するものとし、N 試験体を対象とした事前解析 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。

なお、本研究では、既往の研究成果5,60を踏まえ、コン クリートの梁軸方向基準要素長を 25 mm として数値解析 を行っている。図-3には、N 試験体における載荷点変 位波形を実験結果と比較して示している。図より、N試 験体の場合には、コンクリートの軸方向要素長を25 mm とすることにより、実験結果をほぼ適切に再現可能であ ることが分かる。しかしながら、ロッド補強 RC 梁を対 象に要素長を25mmとする場合には、後述のようにロッ ドの補強効果を数値解析的に適切に評価できず, 載荷点 変位は実験結果と比較して過大に評価されることが明ら かになっている。これは、1)後述の図-8に示すように、 コンクリート要素には分散ひび割れを仮定しているため, 引張強度に達してコンクリート要素にひび割れが発生す ると、要素内の引張応力が開放され、2)その要素と連続 しているロッド材要素にも引張応力が伝達されなくなり, 3) ロッド材要素には剥離時と類似した均一の引張力が作 用することとなる、4) コンクリート要素が軸方向に長い 場合にはその影響が益々大きくなり、対応してロッドの 曲げ補強効果も小さくなること,によるものと考えられ る。従って,実挙動を数値解析的に適切に再現するため には, ひび割れの発生によってコンクリート要素が開放 する引張応力を適切に評価できる程度の軸方向に小さい 要素長にしなければならない。

このような観点から、本論文ではコンクリート要素の



軸方向長さを小さくすることを前提に,既往の研究^{5),6)}で 提案されているコンクリート要素の引張破壊エネルギー (*G_f*)等価の概念を適用することを提案し,実験結果と比 較する形でその妥当性について検討を行うこととした。

なお、 G_f 等価の概念とは、図-4に示されるようなコ ンクリート要素において、幅方向と梁高方向に貫通する 軸方向に1個の曲げひび割れが発生する状況を想定し、 そのひび割れが軸方向の要素長にかかわらず等しい G_f の 下に発生するとした考え方である。

本解析では,梁軸方向の要素長を基準要素長である 25 mm の他,その 1/2,および 1/4 である 12.5 mm, 6.25 mm の三種類に変化させて解析を実施した。図-5には R 試験体における要素分割長のイメージを示している。

3.3 材料構成則

(1) コンクリート

図-6(a)には、コンクリートの応力一ひずみ関係を示 している。圧縮側は、相当ひずみが 0.15% に達した段階 で完全降伏するものと仮定した。一方、引張側に対して は、前述のように要素分割長による影響を考慮して、 G_f 等価の概念に基づいて換算引張強度 f_t を導入し、引張応 力がその値に到達した時点でカットオフされるモデルと した。設定した要素長 y_i に対する換算引張強度 f_t は、次 式で与えられる。

$$f_t = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{y_0}{y_i}}$$

ここで、 f_{t0} : 圧縮強度試験を基にしたコンクリートの引 張強度 (= $f'_c/10$)、 y_0 : 基準要素長である。

なお、本解析では、図-3に示すように要素長を25 mm とした場合が、N 試験体の実験結果を適切に再現してい ることから、基準要素長は25 mm と設定した。

表-4には,設定した各要素長*L*と*G_f*の有無による換 算引張強度 *f_t*の関係を示している。なお,単位体積重量



図-7 要素分割長 L と Gf の有無による各種応答波形(R 試験体)

表-4 要素分割長と G_fの有無による換算引張強度

要素分割長	換算引張強度 ft (MPa)		
L (mm)	<i>G_f</i> を考慮しない	<i>G_f</i> を考慮する	
25#1		3.54	
12.5	3.54	5.01	
6.25		7.08	

#1 基準要素長

 $\rho_c には公称値である <math>\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \text{ c}, \quad \exists \text{ r} \text{ r} \text{ r} \text{ r} \text{ r})$ には $v_c = 0.167 \text{ c}, \quad E縮強度 f'_c$ には **表** - 1 の値を用いた。

(2) 鉄筋

図-6(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋に 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 ,弾性係数 E_s およびポアソン比 v_s に関しては, **表**-2に示す値を用いた。また、単位体積重量 ρ_s には公 称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³を用いることとした。な お,降伏の判定は von Mises の降伏条件に従い、塑性硬化 係数 H'は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。

(3) AFRP ロッド

図-6 (c) に示すように弾性体と仮定し,破断ひずみ ε_{ru} = 1.72% に達した時点でカットオフされるものとした。また,断面積 A,密度 ρ_a ,弾性係数 E_a には,表-3に示す 公称値を用いている。

(4) 重錘, 支点治具および定着鋼板

重錘,支点治具および定着鋼板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。各要素の弾性係数 E_s ,ポアソン比 v_s ,単位体積質量 ρ_s には鋼材の公称値を用いることとし,それぞれ $E_s = 206$ GPa, $v_s = 0.3$, $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³ と設定した。

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種応答波形

図-7には、R 試験体に関する要素長 L を変化させた 各種時刻歴応答波形について、実験結果と解析結果を比 較して示している。また、解析結果には、G_f 等価の概念 を考慮する場合(赤線)と考慮しない場合(青線)について 示している。横軸は重錘がコンクリートに衝突した時点 を基準に取って整理している。なお、基準要素長である L=25 mmの場合には、G_f 等価の概念に関わらず同一結 果であるため、青線で示している。

まず,図-7(a)の重錘衝撃力波形に着目すると,実験 結果の場合には,振幅が大きく継続時間が1ms程度の第 1波と振幅が小さい第2波が後続していることが分かる。

数値解析結果に着目すると、 G_f 等価の概念の有無や要素長に関わらず第1波、第2波をよく再現できていることが分かる。これは、重錘衝撃力波形が重錘とコンクリートの局所的な剛性に依存することによるものと推察される。

図-7(b)には,支点反力波形を比較して示している。 図より,実験結果は継続時間が40ms程度の主波動に高



図-8 ひび割れ分布の比較

周波成分が合成された分布性状を示していることが分か る。数値解析結果に着目すると、基準要素長 L=25 mmの場合(i図参照)には、衝突直後の波形の立ち上がりが 実験結果と一致しているものの、最大値は実験結果より も 100 kN 程度小さな値を示し、かつ継続時間は 20 ms 程 度長い。 G_f を考慮した場合には、L=12.5 mmの場合に おいて、最大反力が実験結果よりも大きく示されている。 また、L=6.25 mmの場合を見ると、最大支点反力や継続 時間を含めた波形性状が実験結果と非常によく対応して いることが分かる。一方、 G_f を考慮しない場合には、支 点反力の継続時間が実験結果と比較して長く、かつ、実 験結果に見られる変動状況が再現できていない。

図-7(c)には載荷点変位波形を比較して示している。 図より、実験結果は最大振幅を示す第1波が励起した後、 減衰自由振動状態に至っていることが分かる。最大変位 は約60mm、残留変位は20mm 程度となっている。数値 解析結果を見ると、 G_f 等価の概念を考慮しない場合には、 要素長が小さいほど最大変位を過大に評価する傾向にあ ることが分かる。一方、 G_f を考慮する場合には、要素長 L = 6.25mmにおいて、最大変位や残留変位をほぼ適切に 評価していることが分かる。

以上より,実験結果の各種応答波形を適切に評価する ためには, G_f 等価の概念を適用し,かつ要素長をL=6.25 mm 程度まで小さくする必要があることが明らかに なった。

4.2 ひび割れ状況

図-8には、実験終了後のR試験体上面、側面および底面のひび割れ分布と各解析結果から評価されるひび割れ分布を比較して示している。ここでは、要素長をL=25mmとした場合と、 G_f を考慮しL=6.25mmとした場合について示している。数値解析結果のひび割れ分布は、ひび割れ発生位置を特定するために、図-6(a)で仮定したコンクリートの材料構成則に基づき、第1主応力が零近傍応力(±0.001 MPa)状態を示す要素を赤色で示している。 図-8(a)より、実験結果の側面のひび割れ分布に着目 すると,梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや, 載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。図-8(b)の梁上面では,重 錘衝突部に圧壊によるひび割れが確認されるとともに,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 期に両端固定梁のような状態で曲げ波動が支点に向かって 伝播することによるものと推察される。また,図-8(c) の梁底面のひび割れ分布より,曲げひび割れは載荷点直 下から支点に向かって発生していることが分かる。

数値解析結果を見ると、基準要素長 L = 25 mm の場合 には、ひび割れを示す赤色領域が梁側面に幅広く分布し、 かつロッドに沿うように水平のひび割れが発生しており、 実験結果と大きく異なっている。すなわち、基準要素長の 場合には、ロッド要素周辺のコンクリート要素にひび割 れが発生しかつその要素長が大きいことによりロッドが 剥離と類似した状態になるため、ロッドに作用する引張 力が均一化され、ロッドによる曲げ補強効果が適切に表 現できないことが分かる。また、上面や底面に関しても、 実験結果のひび割れの再現性は低いことが確認される。

一方, G_f を考慮した L = 6.25 mm の場合には, L = 25 mm で見られたロッドに沿うひび割れは発生せず,実験 結果に見られる曲げひび割れや載荷点近傍から梁下縁に 向かう斜めひび割れを適切に再現していることが分かる。 さらに,上面の支点部近傍に発生しているひび割れ分布 や底面のひび割れ性状等,実験結果を適切に再現可能で あることが分かる。なお,支点部の要素は赤色分布を示 しているが,これは支点部に接している要素の第一主応 力値が零付近の値であることによるものであり,ひび割 れが発生したことによるものではないものと推察される。 4.3 ロッドのひずみ分布

図-9には、要素長 L=6.25 mm の場合におけるロッド の軸方向ひずみ分布について、数値解析結果と実験結果 を時系列的に比較して示している。また、各時刻のひび 割れ分布の経時変化についても併せて示している。

図より,実験結果は,重錘衝突直後(t=1ms)の時点で



図-9 ロッドの軸方向ひずみ分布(L=6.25 mm)

は,試験体中央部に引張ひずみが,また0.4~1.4 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 衝突初期には両端固定梁のような状態で曲げ波が支点に 向かって伝播することが確認できる。その後,最大変位 到達時点(*t* = 25 ms)に至るまで,時間の経過とともに載 荷点(スパン中央部)から支点に向かって引張ひずみが広 がっていく様子が窺える。

数値解析結果を見ると、いずれの時刻においても実験 結果のひずみ分布を非常によく再現していることが分か る。なお、t = 15 ms以降で実験結果の一部に2%を超え る大きなひずみが発生しているが、これはパテ状接着樹 脂の割れによってひずみゲージ箔が破断されたことによ るものであり、ロッドが破断したものではないことを確 認している。

5. まとめ

本論文では、アラミド製連続繊維棒材(AFRP ロッド)を 下面に埋設補強した RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を対 象に、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、 コンクリート要素に対して引張破壊エネルギー(G_f)等価 の概念を適用して要素長を小さくする手法を提案し、実験 結果と比較することによってそ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、以下のとおりである。

- G_f等価の概念を適用し、軸方向の要素長を小さくすることで重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形を ほぼ適切に再現可能である。
- 2) ひび割れ分布に関しては、実験結果と比較して過大 に評価する箇所が見られるものの、ほぼ適切に評価

可能である。

ロッドのひずみ分布に関しても、解析結果は実験結果をほぼ適切に評価可能である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K06199 の助成により行われ たものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 今野久志,西 弘明,栗橋祐介,岸 徳光:AFRPシート 接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動,コンクリート工 学年次論文集, Vol.35, pp.721-726, 2013.7
- 2) 三上浩,今野久志,栗橋祐介,岸徳光:AFRPシート曲 げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp. 523-528, 2014.7
- (3) 栗橋祐介,三上 浩,今野久志,佐藤元彦,岸 徳光: AFRP シート曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制法に関 する実験的研究,構造工学論文集, Vol. 62A, pp, 1043-1052, 2016.3
- 4) 岸 徳光,栗橋祐介,三上 浩,佐藤元彦:AFRPロッド 下面埋設曲げ補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.38, pp. 1375-1380, 2016
- 5) 岸 徳光, A.Q. Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉: 破壊エネルギー 等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手 法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp.1227-1238, 2007.3
- 6) Kishi, N, and A. Q. Bhatti: 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*, 37(1), pp. 103-113, 2010.1
- Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R8 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2015.