

RC 梁のアラミド繊維シート接着曲げ補強による 耐衝撃性向上効果に関する実験的研究

岸 徳光*, 栗橋 祐介**, 今野 久志***, 三上 浩****

Experimental study on upgrading effect of flexural reinforcement with AFRP sheet on impact resistant capacity of RC beams

Norimitsu Kishi*, Yusuke Kurihashi**, Hisashi Kon-No***, and Hiroshi Mikami****

Abstract – In this paper, in order to investigate the upgrade effects of AFRP sheet bonding on impact resistant capacity of the RC beams, falling-weight impact tests were carried out taking sheet volume and falling height of the weight as variables. From these experiments, the following results were obtained that: 1) impact resistant capacity of the RC beams can be upgraded by flexural reinforcing with AFRP sheet; 2) Even though flexural reinforced RC beams with AFRP sheet reach the ultimate state in the compressive failure mode under static loading, the beams may collapse with the sheet ruptured under impact loading; and 3) the sheet may rupture due to suddenly sever tensile force applying when the upper concrete cover collapse in the compressive failure mode.

Key Words : RC beam, impact resistant capacity, falling-weight impact test, AFRP sheet

1. はじめに

近年、劣化した既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維シート (FRP シート) 接着工法が用いられている。本補強工法において、FRP シートを RC 部材の引張作用面に接着して曲げ補強する場合には、FRP シートとコンクリート界面の付着性能が補強効果に大きな影響を及ぼすことが明らかになっている。そのため、FRP シートとコンクリートの面内付着性状や RC 梁を曲げ補強する場合の補強効果等に関する研究が種々行われている。著者らもこの種の研究を継続的に行っており、FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する破壊形式予測式を提案している¹⁾。

一方、既設 RC 構造物には、静的荷重のみならず落石や車両からの落下物、車両衝突等による衝撃荷重が作用する場合もある。これらの構造の耐衝撃性を向上するためには、緩衝材の緩衝能力を向上させて衝撃力

を緩和させる方法の他、静的荷重載荷時と同様に直接曲げ剛性を向上させる方法があり、例えばコンクリート増し厚工法や鋼板接着工法、FRP シート接着工法が考えられる。

これらの向上法の選定に当たっては、要求される耐衝撃性の向上程度と費用の大きさを考慮して決定されなければならない。一方で、衝撃荷重載荷時における残留変位の低減や残存耐力を向上させる等の場合には、FRP シート接着工法が施工性の観点から最も優位であるものと推察される。

無補強 RC 梁の耐衝撃性に関する研究は、著者らによって実験的^{2),3)}にも数値解析的^{4),5)}にも数多く実施されている。現在は、衝撃応答特性を考慮し、静的耐力を用いて断面設計を可能にするための評価式を提案するに至っている^{6),7)}。しかしながら、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性向上法に関しては、研究事例が極めて少ないのが現状である。

このような背景より、本研究では、FRP シート接着曲げ補強法を適用した場合における RC 梁の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施した。

本研究では、FRP シート補強量を一定にして、接着補

* 釧路工業高等専門学校 校長

** 室蘭工業大学大学院 講師

*** 寒地土木研究所 総括主任研究員

**** 三井住友建設(株) 技術開発センター
副センター長

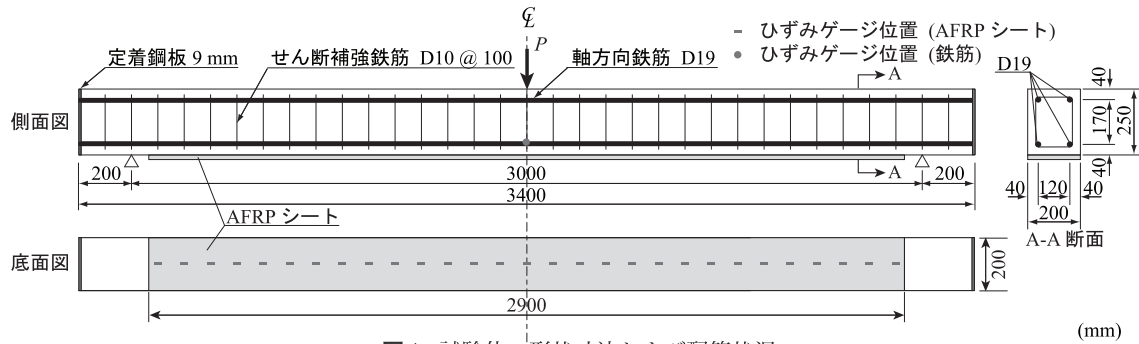


図1 試験体の形状寸法および配筋状況

表1 試験体のケース一覧

試験 体名	補強の 有無	載荷 方法	計算 曲げ耐力 (kN)	落下 高さ H (m)	入力 エネルギー E (kJ)
N-S	無	静的	50.2	-	-
N-I-H1.0		衝撃		1.0	2.9
N-I-H1.5				1.5	4.4
N-I-H2.0				2.0	5.9
N-I-H2.5				2.5	7.4
A-S	有	静的	73.7	-	-
A-I-H1.5		衝撃		1.5	4.4
A-I-H2.0				2.0	5.9
A-I-H2.5				2.5	7.4
A-I-H3.0				3.0	8.8



写真1 衝撃荷重実験の実験状況

強の有無や重錘落下高さを変化させて実験を行った。なお、FRPシートにはしなやかで高伸び特性を有するアラミド繊維 (AFRP) シートを採用した。

2. 実験概要

表1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、AFRPシート補強の有無や荷重方法を変化させた全10体である。荷重方法は静荷重および衝撃荷重の2種類である。表中の試験体名のうち、第一項目は補強の有無 (N: 無, A: 有) を示し、第二項目は荷重方法 (S: 静荷重, I: 衝撃荷重), 第三項目は重錘落下高さ (m) を示している。

静荷重実験では、梁幅方向に200 mm、梁の長さ方向に100 mmの荷重板をスパン中央部に設置し、容量500 kNの油圧ジャッキを用いて荷重を作用させることとした。一方、衝撃荷重実験は、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荷重法により実験を行った。衝撃荷重位置はスパン中央部である。なお、梁の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。また、衝撃荷重実験では、

終局状態を最大残留たわみが純スパン長の2%に達した状態になるか、シートが剥離・破断した状態と定義することとした。写真1には、衝撃荷重実験の実験状況を示している。

図1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法 (梁幅×梁高×純スパン長) は200×250×3,000 mmである。軸方向鉄筋にはD19を用い、上下端に複鉄筋配置している。また、せん断補強筋にはD10を用い、100 mm間隔で配筋した。軸方向鉄筋は定着長を節約するために梁端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接している。FRPシートには保証耐力588 kN/mのAFRPシートを用いた。AFRPシートは、RC梁底面の補強範囲にブラスト処理 (処理深さ1 mm程度) を施してプライマーを塗布し指触乾燥状態にあることを確認した後、含浸接着樹脂を用いて接着した。養生は20°C程度の環境下で7日間以上行った。

表2には、本実験に用いたAFRPシートの力学的特性値 (公称値) を示している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は23.4 MPaであった。また、鉄筋の降伏強度は、D10で359 MPa、D19で355 MPaであった。

測定項目は重錘衝撃力 (静荷重の場合は荷重荷重) P ,

表2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

合支点反力 (以後, 支点反力) R , 載荷点における鉛直方向変位 (以後, 変位) δ , および AFRP シートの軸方向ひずみ分布である. 実験終了後には, RC 梁の側面を撮影して, ひび割れ性状を観察している.

3. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

(1) 荷重－変位関係

図2には, RC 梁の荷重－変位関係に関する実験結果および計算結果を比較して示している. なお, 計算曲げ耐力は, 土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾に準拠して各材料の応力－ひずみ関係を設定し, さらにコンクリートとシートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した. 図より, N-S および A-S 試験体を比較すると, AFRP シートを接着して曲げ補強を行うことにより, 無補強の場合よりも主鉄筋降伏荷重が 20 kN 程度向上し, 降伏後の剛性勾配及び最大荷重が増大していることが分かる.

また, A-S 試験体の実験結果と計算結果を比較すると, 実験結果は計算終局時まで計算結果とほぼ対応していることが分かる. 従って, シートとコンクリートの付着は計算終局時まで十分確保されているものと判断される. また, 実験では計算終局変位到達後も荷重が低下せず, 変位 $\delta = 50$ mm 近傍で上縁コンクリートが圧壊し, 変位 $\delta = 70$ mm 近傍でシートが全面剥離に至った.

(2) ひび割れ分布性状

図3には, 静載荷実験終了後における各 RC 梁側面のひび割れ分布性状を示している. 図より, いずれの試験体も曲げ変形が卓越し, ほぼ左右対称のひび割れ分布を示していることが分かる. なお, N-S 試験体の場合には載荷点近傍に曲げひび割れが集中して発生しているが, A-S 試験体の場合には曲げひび割れが広く分散して発生していることがわかる.

また, A-S 試験体の場合には梁下縁かぶり部に斜めひび割れが発生している. この斜めひび割れは上縁コンクリート圧壊後に発生したものであり, 実験では斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き

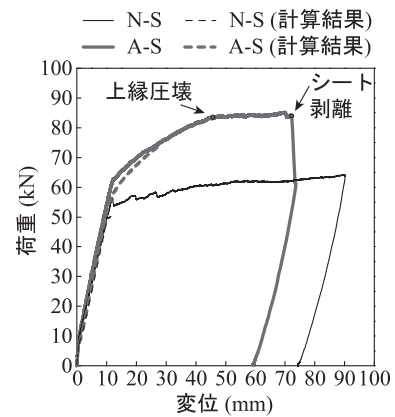


図2 静載荷実験における荷重－変位関係

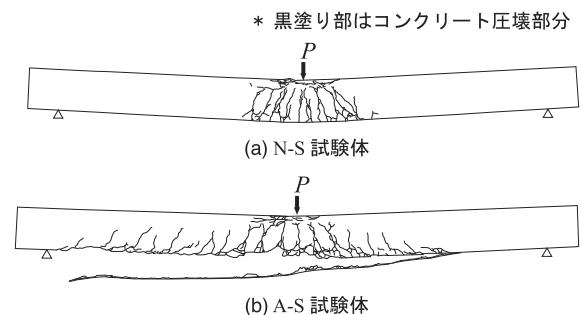


図3 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

剥がすピーリング作用によりシートが剥離したことを確認している.

3.2 衝撃荷重載荷実験結果

(1) 時刻歴応答波形

図4には, 各種時刻歴応答波形を示している. 図4(a)より, 重錘衝撃力波形は, 補強の有無に関わらず類似の性状を示していることが分かる. すなわち, 振幅が大きく継続時間が 3 ms 程度の第 1 波に振幅の小さい第 2 波および第 3 波が後続する性状を示している.

図4(b)より, 支点反力波形は, いずれの試験体も重錘落下高さ H によらず, 継続時間の長い主波動に高周波成分が合成された波形性状を示していることが分かる. ただし, 主波動継続時間はシート補強を施している A-I 試験体が無補強試験体である N-I 試験体の場合よりも短い. これは, シート補強を施すことによって曲げ剛性が増大したことや, AFRP シートが 1.75 % 前後のひずみまで弾性状態を保持することにより, ひび割れ発生後の梁の剛性低下が抑制されることによるものと推察される.

図4(c)より, 変位波形はいずれの試験体も類似の性状を示していることが分かる. すなわち, 衝撃荷重

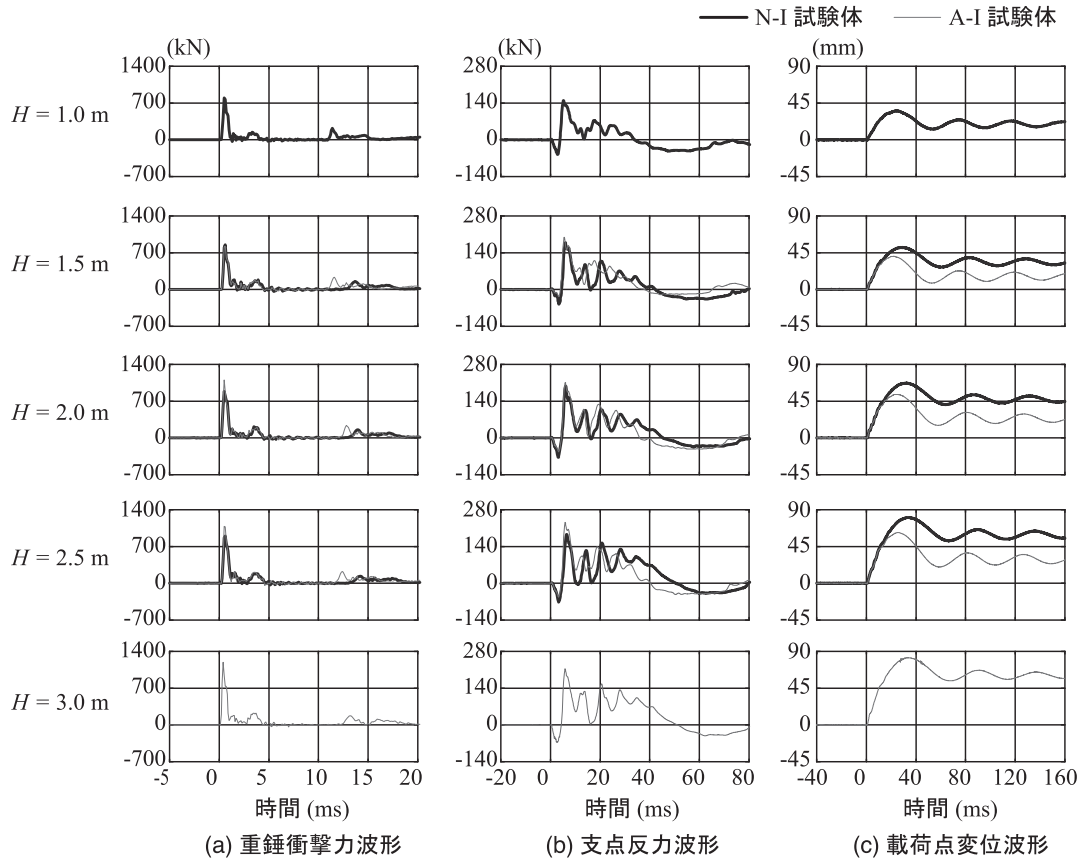


図4 重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起した後，変位が残留して減衰自由振動状態に至っている。しかしながら，除荷後の固有振動周期は，シート補強を施すことによって無補強試験体よりも小さくなっていることが分かる。

また，変位量は，重錘落下高さ H によらずシート補強を施している A-I 試験体が無補強試験体である N-I 試験体の場合よりも小さい。

これより，AFRP シート用いて曲げ補強を施すことにより，梁の曲げ剛性が大きくなることや AFRP シートの高弾性域の効果によってひび割れ発生後の梁の剛性低下が抑制され，最大応答変位量や残留変位量を低減できることが明らかになった。

(2) ひび割れ分布性状

図5 には，衝撃荷重載荷終了後における各 RC 梁側面のひび割れ分布性状を示している。図より，衝撃荷重載荷時には，いずれの試験体もスパン全長にわたって梁の上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約 45° の角度で進展する斜めひび割れが発生していることが分かる。

ここで，上縁から曲げひび割れが進展するのは，以下の現象によるものと推察される。すなわち，(1) 衝

撃初期に曲げの主波動が支点に向かって伝播する場合には，波動が到達していない領域では変位零の状態が保持されるため，(2) 曲げ波の伝播は，あたかも固定梁の固定端が支点に向かって伝播する状況に類似している。(3) これより，曲げ波の振幅が大きい場合には，対応して固定端部の負曲げの値も大きくなるため，梁上縁にひび割れが発生することとなる。

シート補強を施している A-I 試験体に着目すると，梁は静載荷時には上縁圧壊後にシート剥離によって終局に至っているのに対して，衝撃荷重載荷時には落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ でシート破断によって終局に至っている。これは，静載荷時には上縁コンクリート圧壊後にシートの部分剥離領域が逐次的に進展し，やがて全面剥離に至るのに対し，衝撃荷重載荷の場合には上縁コンクリート圧壊後に載荷点近傍の梁の変形曲率が急激に増大するとともにひび割れが大きく開口して AFRP シートが破断したものと推察される。

シート補強の有無によるひび割れ分布を比較すると，載荷点近傍部や支点近傍部共に下縁のみならず上縁から進展するひび割れも含め，シート補強を施した A-I 試験体の場合が無補強試験体である N-I 試験体よりもひび割れが多く発生していることが分かる。これ

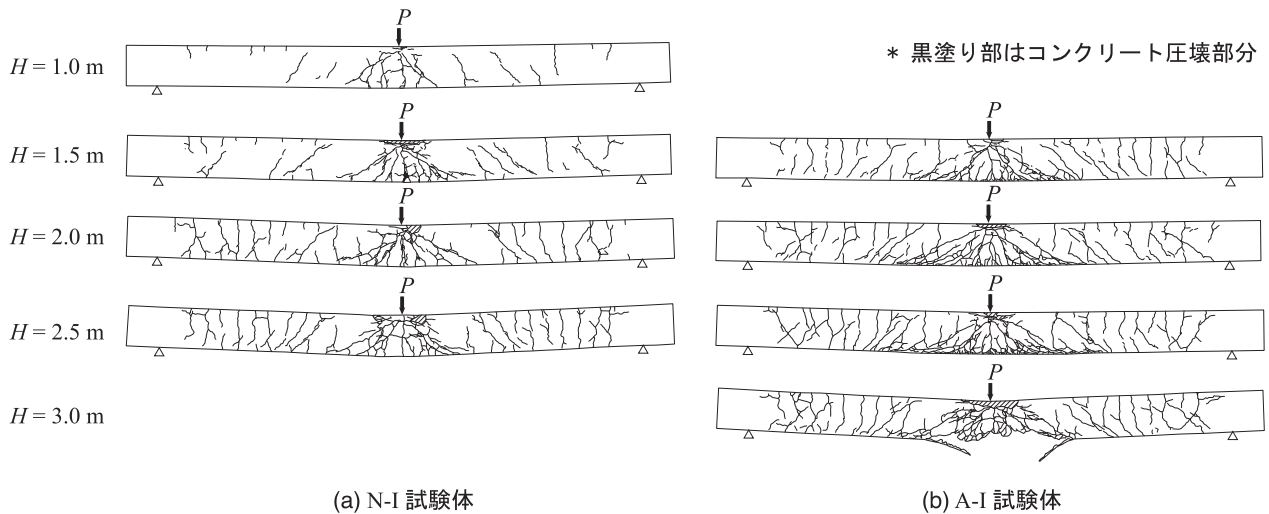


図5 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状

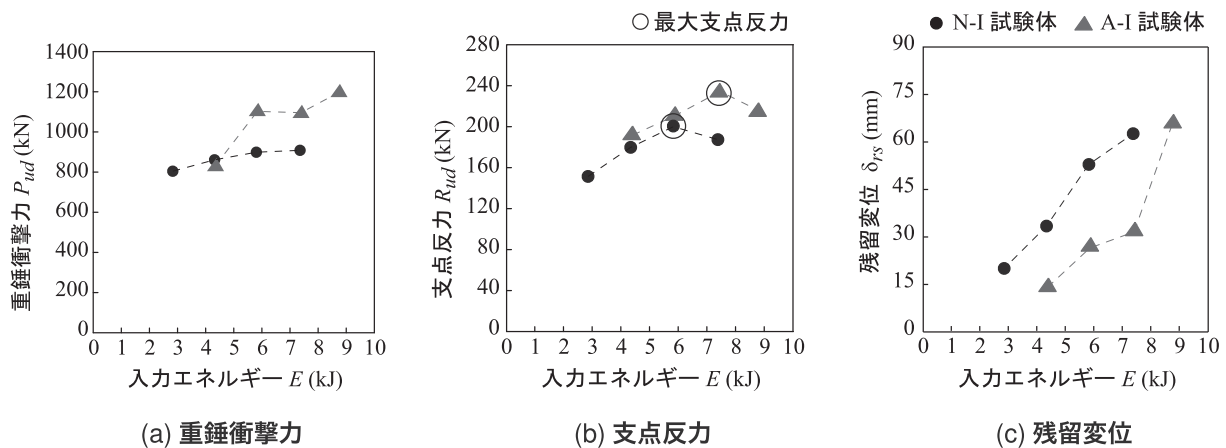


図6 各種応答値と入力エネルギーの関係

は、無補強の場合には鉄筋が 0.2 % 程度のひずみで塑性に至り梁の角折れやエネルギー吸収が促進されるのに対して、AFRP シート接着の場合にはシートが 1.75 % 前後まで弾性状態が確保されるため梁の曲げ剛性が増加すると共にひび割れ発生後の梁の剛性低下が抑制されることより、角折れ状態にも至らずひび割れが分散して発生する傾向を示すためと推察される。

(3) 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図6には、(a) 重錘衝撃力 P_{ud} 、(b) 支点反力 R_{ud} および (c) 残留変位 δ_{rs} と入力エネルギー E との関係を示している。図6(a)より、重錘衝撃力 P_{ud} は A-I 試験体の場合が N-I 試験体の場合に比べて大きな値を示す傾向にあることが分かる。これはシート補強によって曲げ剛性が増加することに関係しているものと考えられる。また、 P_{ud} は、補強の有無に関わらず入力エネルギー E の増加に伴って大きくなる傾向を示している。

図6(b)より、支点反力 R_{ud} は入力エネルギー E に

関わらずシート補強した A-I 試験体の場合が無補強である N-I 試験体よりも大きな値を示していることが分かる。これは、重錘衝撃力 P_{ud} の場合と同様に、シート補強を施すことによって RC 梁の曲げ剛性が向上することとシートの弾性域が広いことにより、無補強試験体 (N-I 試験体) の場合に比較してエネルギー吸収が小さくなることによるものと推察される。なお、支点反力 R_{ud} は、シート補強の有無に関わらず入力エネルギー E の増加に伴い増加する傾向にあるものの、最大値を示した後は減少する傾向にある。これは、無補強試験体である N-I 試験体の場合には、重錘荷重部近傍からの角折れにより塑性化が進行することによるものと推察される。一方、シート補強を施した A-I 試験体の場合には、過大な衝撃力が作用してシートが破断したことにより N-I 試験体と同様の傾向を示したことによるものと推察される。なお、最大支点反力 (支点反力の最大値) は、無補強試験体である N-I 試験体の場合に

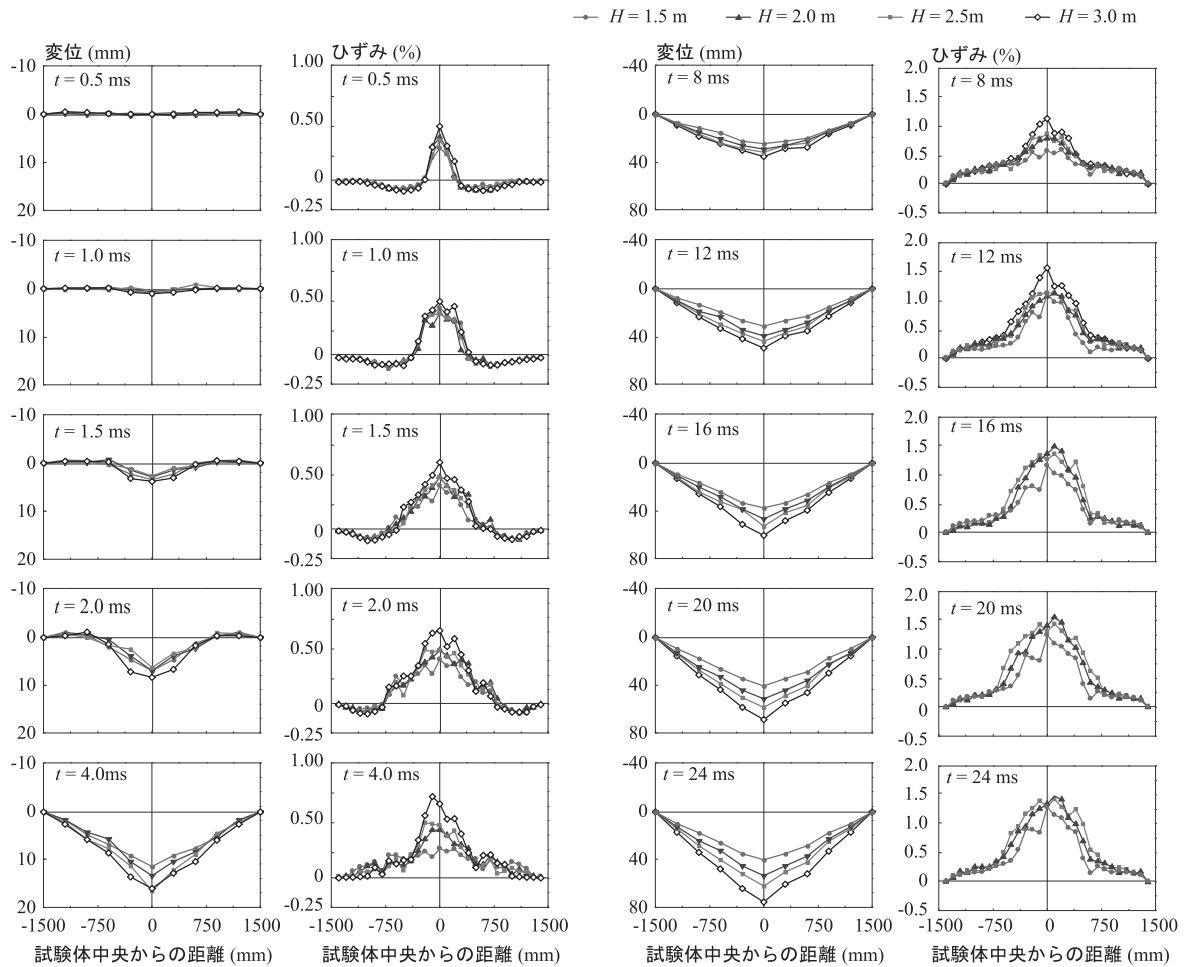


図7 衝撃荷重実験における RC 梁の変位分布性状および AFRP シート軸方向ひずみ分布性状

は入力エネルギー $E = 5.9 \text{ kJ}$ で 200 kN 程度、シート補強を施した A-I 試験体の場合には $E = 7.4 \text{ kJ}$ で 232 kN 程度である。

以上より、シート補強を施すことによって、RC 梁の最大支点反力は 1.2 倍程度、最大支点反力を示す入力エネルギーも 1.2 倍程度に増大することが明らかになった。

(4) ひずみ分布性状

図7には、AFRP シート曲げ補強を施した A-I 試験体に関する変位分布および AFRP シートの軸方向ひずみ分布の推移状況を経過時間 $t = 0.5 \text{ ms}$ から 24.0 ms について示している。なお、 $t = 0.5 \sim 2.0 \text{ ms}$ までは 0.5 ms きざみで、 $t = 4.0 \text{ ms} \sim 24.0 \text{ ms}$ までは 4.0 ms きざみで示している。また、ここでは各試験体がほぼ最大変位に到達するまでの状況について整理している。

図より、経過時間 $t = 0.5 \sim 2.0 \text{ ms}$ における変位分布を見ると、 $t = 1.5 \text{ ms}$ 以降で梁中央部から $\pm 750 \text{ mm}$ 前後の範囲において変位が大きいくことが分かる。また、その支点側では、負の変位がわずかに発生している。

一方、ひずみ分布を見ると、経過時間 $t = 0.5 \text{ ms}$ で载荷点近傍において 0.25% から 0.5% 程度のひずみが発生しており、経過時間 $t = 2.0 \text{ ms}$ までは時間の経過とともにひずみ値とその分布範囲が大きくなる傾向を示している。また、両支点近傍領域では、負のひずみが発生している。これは、この領域で負曲げの状態であることを示しており、前述の曲げの主波動伝播時における固定端部の負曲げの状況に対応している。

経過時間 $t = 4.0 \text{ ms}$ では、変位およびひずみは共に正の分布を示している。これは、前述のように、曲げ波動が梁全体に十分伝播し、実境界条件に対応して単純支持状態で応答していることを示唆している。また、载荷点近傍のひずみは、落下高さ $H = 1.5 \sim 2.5 \text{ m}$ の場合には若干低下する傾向を示しているのに対して、 $H = 3.0 \text{ m}$ の場合には局所的に増加していることが分かる。

経過時間 $t = 8.0 \text{ ms}$ 以降の変位分布において、 $t = 8 \text{ ms}$ 時にはいずれの場合にもなめらかな放物線状の変位分布を示している。一方、 $t > 8 \text{ ms}$ の場合には载荷点で角折れする逆三角形の分布を示しており、各変位は時間の経過と共に単調に増加している。また、落

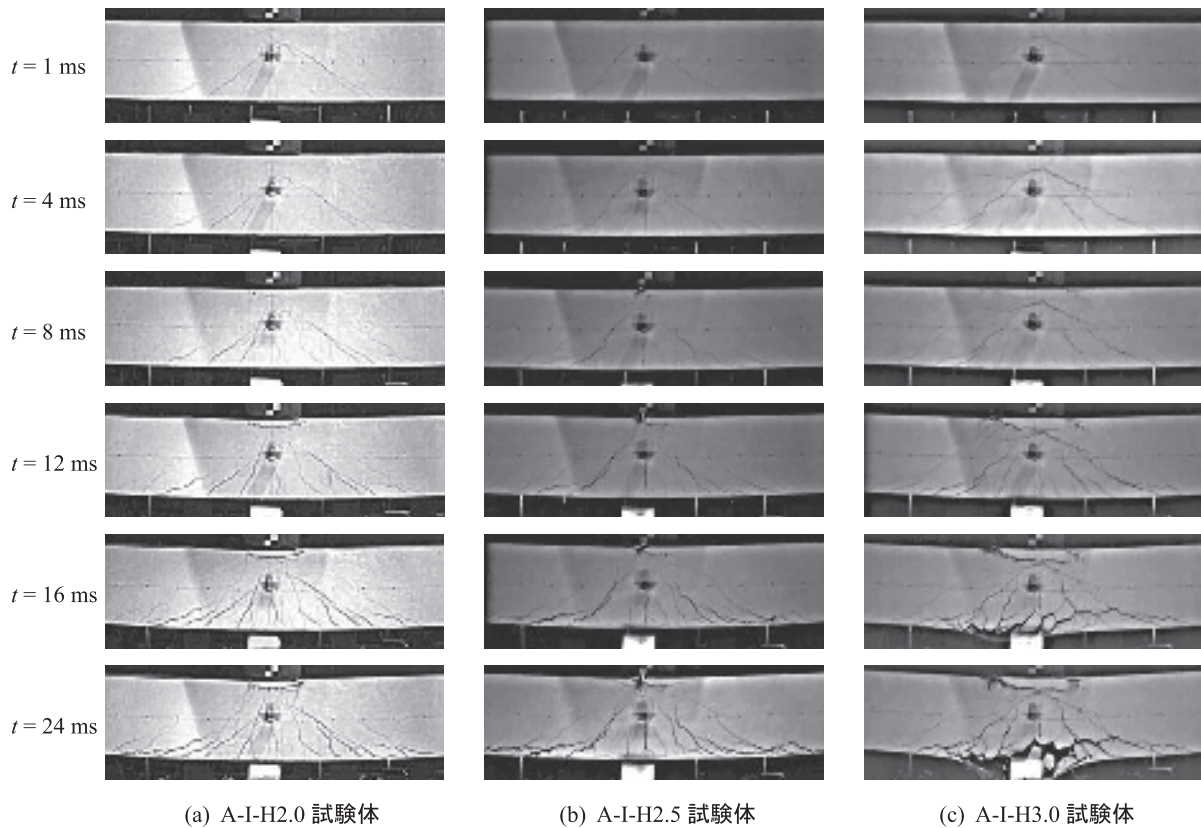


写真2 衝撃荷重载荷における A-I 試験体のひび割れ性状

下高さ H が大きい場合ほど大きくなる傾向にあることが分かる。

一方、ひずみ分布は、载荷点周辺において大ひずみが発生しており、かつ時間の経過とともにその発生領域が拡大している。これは、主鉄筋降伏領域が拡大していることを示唆している。また、ひずみ値は落下高さ H が大きい場合ほど大きくなる傾向を示している。特に、 $H = 3.0$ m の場合には、経過時間 $t = 12.0$ ms において载荷点部でシートの破断ひずみ (1.75 %) に近い値を示しているが、実験時にはこの直後にシートが破断していることを確認している。

以上より、AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状の推移から、経過時間 $t = 2.0$ ms 程度までの衝撃荷重载荷初期には、曲げの主波動があたかも固定梁の固定端が支点に向かって伝播する状況に類似して挙動し、梁はやがて回転自由の境界条件に対応した変形状態に移行する過渡的な状態であることを確認できた。また、変位分布においても同様の性状を確認することができた。経過時間 $t = 4.0$ ms 以降においては、梁は角折れと共に変位量の増大に伴い主鉄筋の降伏領域が拡大することが明らかになった。

(5) 载荷点近傍における梁の破壊性状

写真2 には、シート補強を施した A-I 試験体の载荷

点近傍における破壊状況について、高速度カメラによる記録写真を経過時間 $t = 1 \sim 24$ ms まで示している。写真より、いずれの試験体も経過時間 $t = 1$ ms において、载荷点近傍に曲げおよび斜めひび割れが発生していることが分かる。また、 $t = 4, 8$ ms では、ひび割れの発生範囲が両支点側に拡大していることが確認できる。 $t = 12$ ms 以降では、上縁コンクリートの圧壊が顕在化しひび割れの発生間隔が密になると共に、それぞれのひび割れが大きく開口していることが分かる。これは、図7においてAFRPシートの軸方向ひずみ分布で見られた主鉄筋降伏領域の拡大に深く関連しているものと考えられる。

落下高さ $H = 2.0, 2.5$ m の場合には、経過時間 $t = 24$ ms において、载荷点近傍の下縁かぶりコンクリート部に角度の浅い斜めひび割れが数多く発生し、それらのひび割れがシートを下方に押し下げて引き剥がすピーリング作用によってシートが部分的に剥離している状況が見られる。このような状況は、 $H = 2.5$ m の場合においてより顕著である。なお、前述の図7を見ると、経過時間 $t = 16$ ms 以降では落下高さ $H = 2.5$ m の場合において、载荷点近傍のひずみ分布に若干の乱れが見られる。これは、ピーリング作用によるシートの部分剥離に起因するものと考えられる。また、落下

高さ $H = 3.0 \text{ m}$ の場合には、経過時間 $t = 12 \text{ ms}$ において他の試験体の場合よりも上縁コンクリートが著しく圧壊の後、 $t = 16 \text{ ms}$ においてシートが破断していることが分かる。

従って、落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ の場合にシート破断に至った主要因の1つは、上縁コンクリートが圧壊して梁の変形曲率が著しく増加し、AFRP シートに過大な引張力が急激に作用したことによるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の耐衝撃性を検討することを目的に、静的および重錘落下方式による衝撃荷重実験を行った。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) RC 梁は、AFRP シートで曲げ補強することによって耐衝撃性を向上可能である。本実験の範囲内では、最大支点反力は 1.2 倍程度、最大支点反力を示す入力エネルギーも 1.2 倍程度に向上できることが明らかになった。AFRP シートの目付量を増加させることにより、梁の耐衝撃性も一層向上可能であるものと推察される。
- 2) AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊性状は、静載荷時には上縁圧壊後シート剥離するのに対し、衝撃荷重載荷時には上縁の圧壊を伴ったシート破断で終局に至った。シート目付量を増加させた場合の破壊性状に関しては、今後の課題である。
- 3) 無補強 RC 梁の場合には、衝撃荷重載荷によって補強筋が降伏領域に達し梁が角折れの状態に至る。AFRP シートで曲げ補強する場合には、補強筋が塑性域に達するもののシートが 1.75 %前後まで弾性挙動を示すことによりひび割れ発生後も剛性勾配の低下が抑制され、ひび割れが梁全体に分散し残留変位や除荷後の固有振動周期が小さくなる傾向を示す。
- 4) 衝撃荷重載荷時における AFRP シートの破断には、上縁コンクリートの圧壊に伴って梁の変形曲率が著しく増加し、AFRP シートに引張力が急激に作用することが大きく影響しているものと推察される。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 安藤 智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4
- 3) N.Kishi, H.Mikami, K.G.Matsuoka, and T.Ando: Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar, *International J. of Impact Engineering*, No. 27, pp. 955-968, 2002
- 4) N. Kishi and B. A. Qadir: 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, No. 1, 103-113, 2010.1
- 5) N. Kishi, S. Ghadimi Khasraghy, and H. Kon-No: Numerical Simulation of Reinforced Concrete Beams under Consecutive Impact Loading, *ACI Structural Journal*, Vol. 108, No. 4, pp. 444-452, 2011.
- 6) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp.1251-1260, 2007.3
- 7) N.Kishi and H. Mikami: Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading, *ACI Structural Journal*, Vol.109, No.4, 2012.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007 年制定