

論文 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

三上 浩^{*1}・今野 久志^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では, 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を検討することを目的に, 目付量の異なる AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁を対象に重錘落下衝撃実験を実施した。その結果, 1) 目付量の大きい AFRP シートを用いて曲げ補強することにより RC 梁の変形量を抑制可能である, 2) AFRP シートの目付量によらず静載荷時にはシートが剥離して終局に至るのに対し, 入力エネルギーの大きな衝撃荷重載荷時にはシート破断に至る, 3) シートの破断には, 重錘衝突位置近傍におけるアーチの形成とその内部に発生する曲げひび割れが大きな影響を及ぼすこと, などが明らかになった。

キーワード: AFRP シート, RC 梁, 耐衝撃挙動, シート目付量, 重錘落下衝撃実験

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として, 連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く採用されるようになってきた。一方で, 最近では既設の耐衝撃用途構造物の経年劣化や耐力不足も報告されており, 衝撃荷重に対する耐力向上法の確立も急務となっている。著者らは, これまで耐衝撃用途 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ている。また, FRP シートには耐衝撃性に優れたアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを採用することとし, その適用性についても検討を行ってきた¹⁾。

既往の著者らの研究では, AFRP シート曲げ補強により RC 梁の耐衝撃性が向上することや, 静載荷時にはシート剥離によって終局に至る RC 梁が入力エネルギーの大き

な衝撃荷重載荷時にはシート破断に至ることなどを明らかにしている。しかしながら, これらの知見は限定された目付量に対しての結果であり, 目付量が異なる場合等, 詳細な検討を行うまでには至っていない。

このような背景より, 本研究では, AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響を検討することを目的に, 既往の研究よりも目付量が大きい AFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を行い, その影響について検討を行った。

2. 実験概要

表-1には, 本実験に用いた試験体を一覧にして示している。表中, 試験体名の第1項目は無補強の場合には N と示し, シート補強の場合には A とシート目付量 (g/m²)

表-1 試験体一覧

試験体名	補強の有無	荷重方法	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)	せん断余裕度	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)	コンクリート圧縮強度 (MPa)	主鉄筋降伏強度 (MPa)
N-S	無	静的	50.2	276.7	5.51	-	-	23.4	358
N-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
N-I-H2.5						2.5	7.4		
A415-S	有	静的	73.7	276.7	3.75	-	-	23.4	358
A415-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
A415-I-H2.5						2.5	7.4		
A415-I-H3.0						3.0	8.8		
A830-S	有	静的	98.2	285.4	2.91	-	-	32.0	369
A830-I-H2.0		衝撃				2.0	5.9		
A830-I-H2.5						2.5	7.4		
A830-I-H3.0						3.0	8.8		

*1 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 上席研究員 博(工)(正会員)

*2 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工)(正会員)

*3 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)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博(正会員)

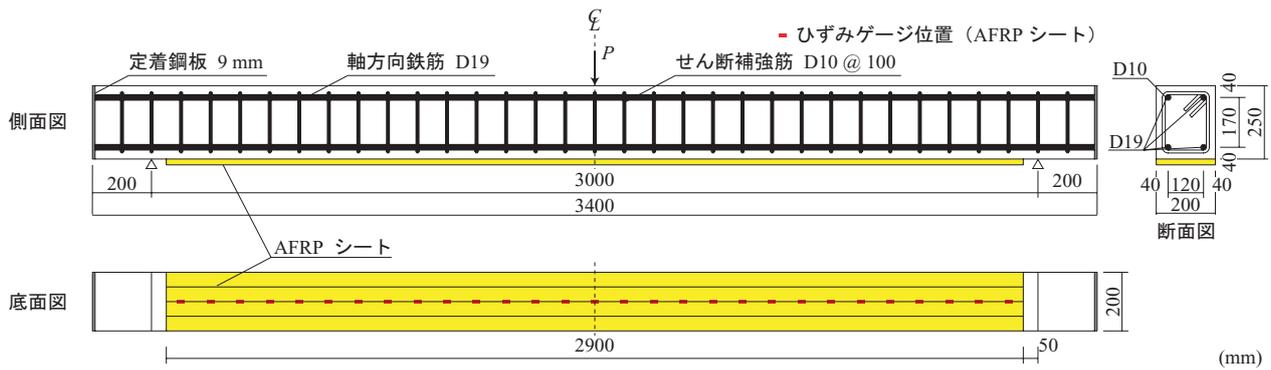


図-1 試験体の形状寸法、配筋および補強状況

の組合せで示している。また、第2項目は荷重方法（S：静的，I：衝撃），第3項目のHに付随する数値は重錘落下高さ（m）を示している。表には、本実験に用いた各試験体のコンクリート強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示している。なお、計算曲げ耐力とせん断耐力は、コンクリート標準示方書²⁾に準拠し、前述の材料強度を用いて算出した。曲げ耐力はAFRPシートとコンクリートの完全付着を仮定し、断面分割法によって梁上縁が圧縮破壊（ひずみ $3,500\ \mu$ ）に至った時点を終局として求めた。なお、せん断耐力にはシートの補強効果は考慮していない。また、入力エネルギーは重錘の落下高さに応じた位置エネルギーとして算出している。

静荷重実験の場合には、梁幅方向に200 mm、スパン方向に100 mmの鋼製載荷板を梁のスパン中央部に設置し、油圧ジャッキを用いて荷重した。重錘落下衝撃実験の場合には、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落下させる単一荷重法により実施している。重錘落下位置はスパン中央部である。試験体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。なお、衝撃荷重実験における重錘衝撃力および支点反力は、各々重錘および支点治具に内蔵された動的応答衝撃荷重測定用ロードセルによって計測した。また、既往の研究成果^{3)~5)}に基づいて、重錘落下衝撃実験の場合における終局状態は、残留変位が梁の純スパン長の2%に達した状態になるか、またはシートが剥離もしくは破断した状態とした。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋および補強状況を示している。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 $200 \times 250 \times 3,000\ \text{mm}$ であり、軸方向鉄筋は上下端にそれぞれD19を各2本配置し、梁の端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接している。また、せん断補強筋にはD10を用い、100 mm間隔で配筋している。AFRPシートは、梁底面の補強範囲にプラスト処理を施し、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

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
830	1,176	0.572			

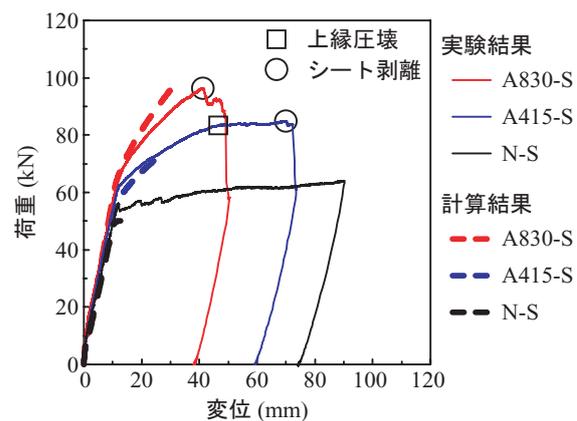


図-2 荷重—変位関係（静荷重実験）

用いて接着を行っている。養生は気温が 20°C 程度の環境で7日間以上行った。

表-2には、本実験で用いたAFRPシートの力学的特性値を示している。本実験の測定項目は、静荷重実験における荷重荷重、衝撃荷重実験における重錘衝撃力と支点反力、スパン中央点変位（以後、変位）およびシート各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC梁のひび割れやAFRPシートの剥離および破断状況を連続的に撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 静荷重実験結果

図-2には、RC梁の荷重—変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。

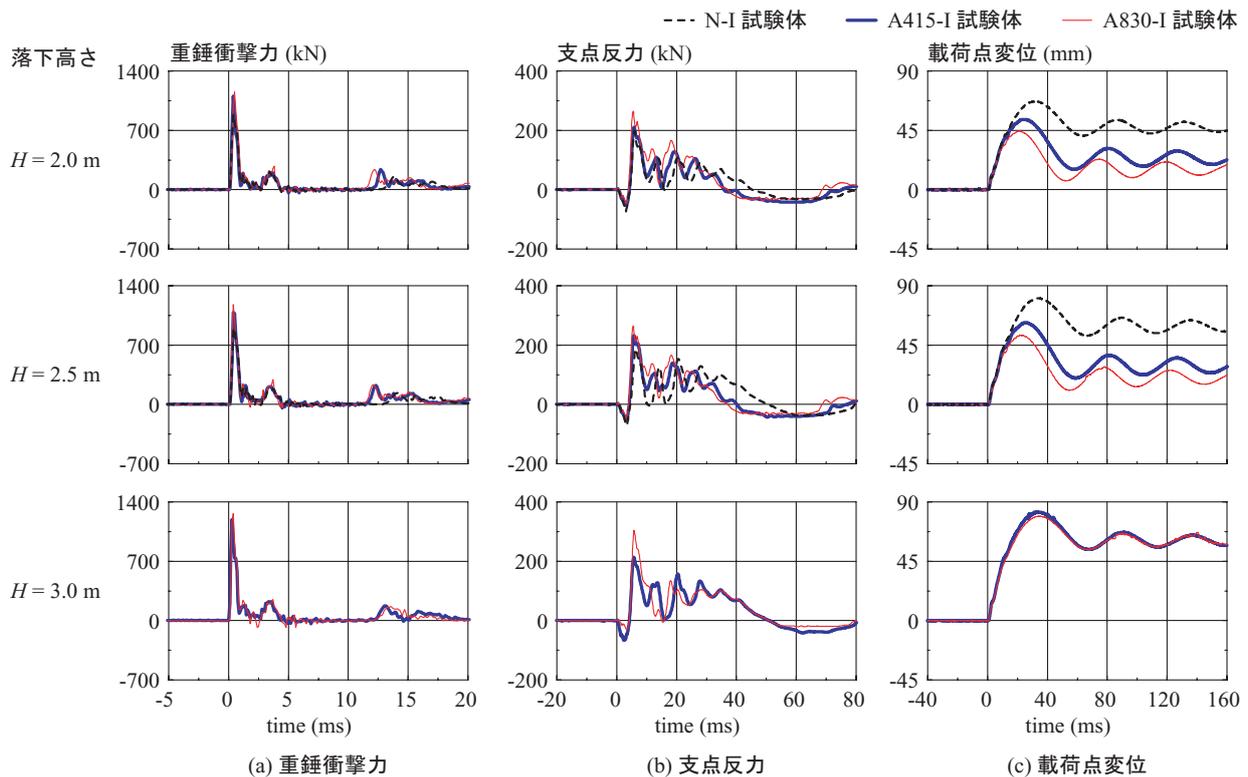


図-3 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

図より、各試験体の耐荷性状は、主鉄筋降伏時までは補強の有無によらず、ほぼ同様であることが分かる。また、降伏荷重はシート目付量に対応して向上していることが分かる。一方、主鉄筋降伏後は、無補強の場合には荷重がほとんど増加しないのに対して、シートで曲げ補強した場合には剛性勾配の低下が抑制されるとともに最大荷重も増加している。このような傾向は、シート目付量が大きい A830-S 試験体の場合に顕著である。

また、実験結果と計算結果の比較から、各試験体の破壊形式は、A415-S 試験体の場合には実測荷重が計算耐力を上回り上縁コンクリートが圧壊した後シートが剥離していることから「曲げ圧壊型」であり、A830-S 試験体の場合には実測荷重が計算耐力を下回る状況で圧壊前にシートが剥離して終局に至っていることから「剥離破壊型」に分類される。

3.2 重錘落下衝撃実験結果

(1) 各種時刻歴応答波形

図-3には、全試験体の各種時刻歴応答波形を示している。図-3(a)より、重錘衝撃力波形は、試験体や落下高さによらず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波目が後続する性状を示していることが分かる。また、最大振幅はシート補強した試験体において、落下高さによらず1,200 kN程度でありほぼ同等である。

図-3(b)より、支点反力は継続時間が40～50 ms程度の主波動に高周波成分が合成された性状を示していることが分かる。最大振幅は、シート目付量の大きい A830-I 試験体の場合が最も大きく、落下高さの増加に対応して増大する傾向にある。また、主波動継続時間は曲げ補強した場合が無補強の場合よりも小さいものの、シート目付量による違いは顕著ではない。

図-3(c)より、載荷点変位は、いずれの試験体においても最大振幅を示す第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。また、落下高さ $H = 3.0$ m の場合を除き、最大振幅およびその周期はシート目付量の大きい A830-I 試験体の場合が最も小さい。これは、A830-I 試験体の曲げ剛性が最も大きいことによるものと推察される。なお、落下高さ $H = 3.0$ m において、A415/830-I 試験体の載荷点変位波形が同様の性状を示しているのは、最大変位に達する前（衝撃荷重載荷後10 ms程度）にシートが破断したためであり、無補強と類似の挙動を示していることが分かる。

以上のことから、AFRPシートを接着して曲げ補強を施すことにより、衝撃荷重載荷時の変形量を抑制できることや、その効果はシート目付量の増加に伴って増大することが明らかになった。

(2) 各種応答値と落下高さの関係

図-4には、(a)重錘衝撃力、(b)支点反力、(c)最大変

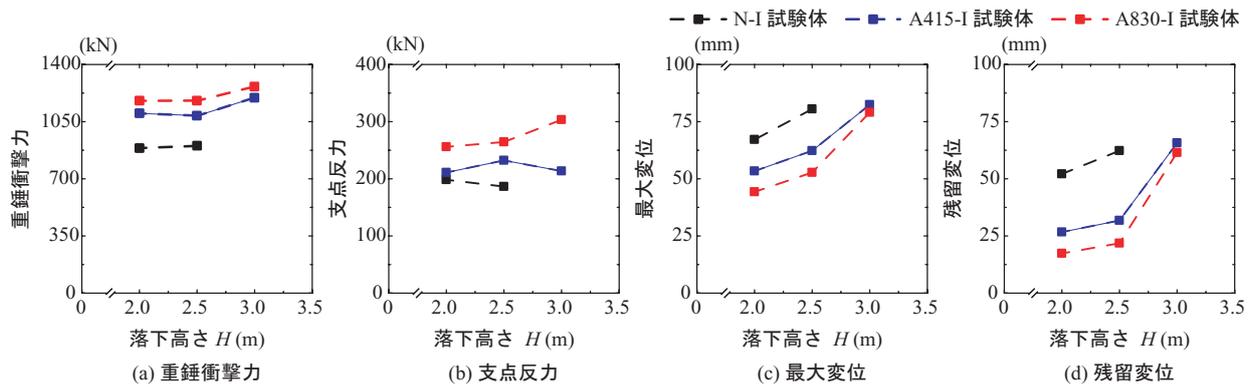


図-4 各種応答値と落下高さの関係

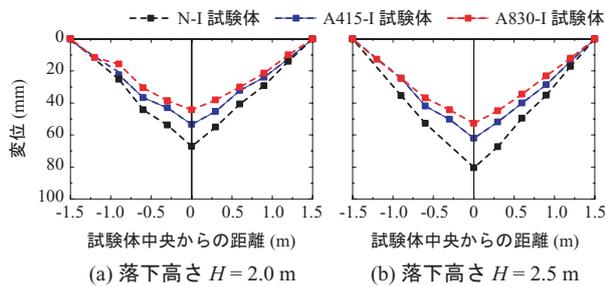


図-5 最大変位発生時における変位分布

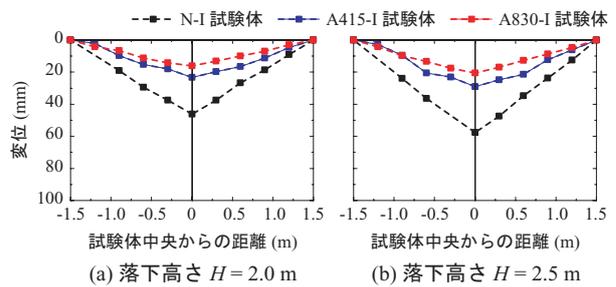


図-6 残留変位分布

位および(d) 残留変位，と落下高さ H の関係を示している。図-4 (a) より，重錘衝撃力は，N-I 試験体と比較して A415/830-I 試験体の場合に大きな値を示していることが分かる。これは，AFRP シートを用いて補強することにより曲げ剛性が向上することに関係しているものと考えられる。また，前述したように，重錘衝撃力は N-I 試験体および A415/830-I 試験体において落下高さによらず同程度であることが分かる。

図-4 (b) より，支点反力は，落下高さによらず A415/830-I 試験体は 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，AFRP シートを用いて補強することにより梁の曲げ耐力が向上しているためであると推察される。

図-4 (c) より，最大変位は A415/830-I 試験体の場合には N-I 試験体に比較して小さいことが分かる。これは，前述のようにシート補強によって RC 梁の曲げ剛性が増加することにより変形が抑制されたことを暗示している。一方，落下高さ $H=3.0$ m において，A415/830-I 試験体は両者同程度の値を示している。これは，ともにシート破断したことによるものと推察され，N-I 試験体と類似の値となっている。図-4 (d) より，残留変位は最大変位と同様の傾向を示していることが分かる。このことから，シート破断に至るまでは，シート目付量によらずシート補強することによって変形を大幅に抑制可能であることが明らかになった。

(3) 変位分布性状

図-5 および図-6 には，それぞれ各試験体の最大変位発生時の変位分布および残留変位分布を落下高さ毎に整理して示している。なお， $H=3.0$ m の場合には，シートが破断して無補強と同様の状況となっているため，ここでは示していない。

最大変位発生時の変位分布より，いずれの試験体においても落下高さが大きいほど変位量も大きくなるのが分かる。また，同一落下高さにおける A415/A830-I 試験体の変位量は，無補強試験体の場合に比較してそれぞれ 25 および 40 % 程度抑制されていることが分かる。このような傾向は，残留変位分布においても同様に認められるが，無補強試験体との差異は残留変位の場合顕著であり，残留変位の抑制効果が明瞭に現れている。これは，AFRP シートが完全弾性体に近い特性を有していることより，除荷状態において変位が大きく復元するためと考えられる。

(4) ひび割れ分布性状

写真-1 には，実験終了後における RC 梁のひび割れ分布性状を静載荷時と衝撃荷重載荷時と比較して示している。ここでは，重錘衝突位置近傍におけるひび割れの発生・開口状況およびシートの状況を検討するため，スパン中央部から左右に $a/2$ (a : せん断スパン長) 程度の範囲に着目して示すこととした。

写真より，無補強の N-I 試験体の場合には，重錘衝突

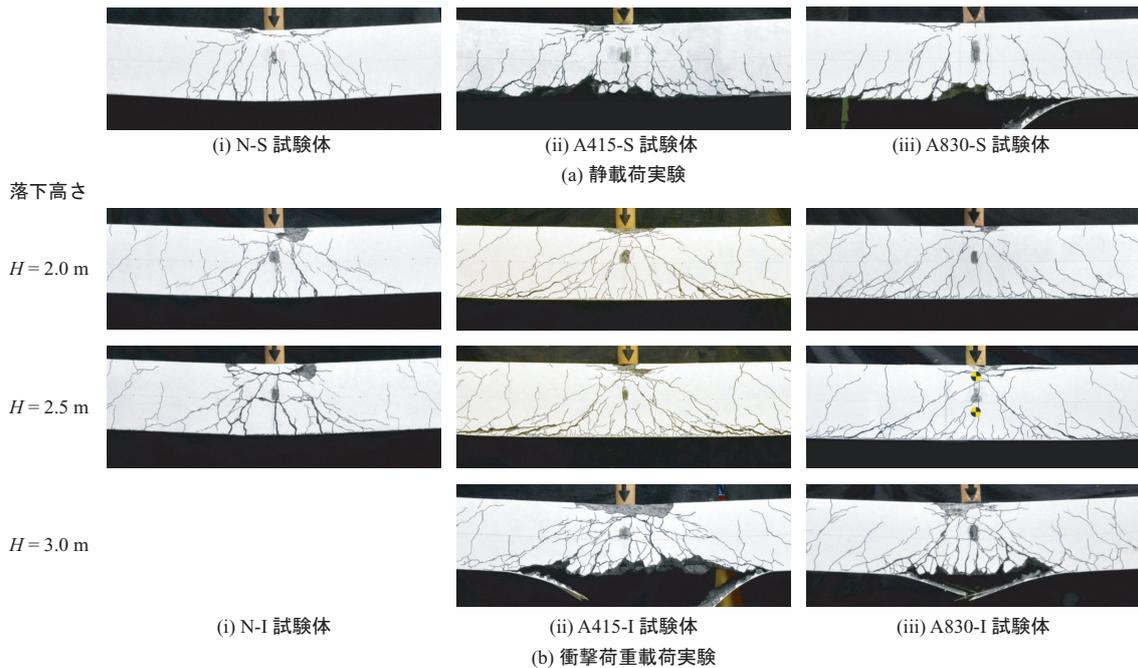


写真-1 静載荷時と衝撃荷重載荷時におけるひび割れ分布性状の比較

位置から斜め下方に進展するひび割れとスパン中央部に曲げひび割れの開口が見られる。これらの傾向は、重錘落下高さ H が大きい場合ほど顕著である。

一方、AFRP シートで曲げ補強した A415/830-I 試験体の場合には、無補強の場合と異なり著しいひび割れの開口は見られない。ただし、多数の曲げひび割れやアーチ状および斜めひび割れが発生している。なお、落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$ の場合には、下縁かぶりコンクリート部に斜めひび割れの開口が見られる。これは、AFRP シートがかぶりコンクリートを付着させた状態で部分的に剥離しているためである。このような傾向は、目付量の小さい A415-I 試験体の場合において顕著である。また、落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ の場合には、目付量によらず両試験体とも AFRP シートが破断に至っているものの、A415-I 試験体における上下縁かぶりコンクリートの損傷が著しい。

一方、静載荷実験終了後のひび割れ性状は衝撃載荷実験終了後と大略同様であるが、衝撃載荷実験の場合の損傷が激しく、特に梁の上下縁において損傷が顕在化している。また、静載荷時に比べてアーチ内部に多数のひび割れが発生しており、アーチ内部のコンクリートが細かく破碎されていることが分かる。なお、衝撃載荷時と同様に静載荷時においても AFRP シートの目付量が大きい場合に損傷が抑制される傾向にあることが分かる。以上より、載荷方法に関わらず、AFRP シートの目付量を大きくすることで RC 梁の損傷を抑制可能であるものと判断される。

4. 衝撃荷重載荷時におけるシート破断のメカニズム

前章で示したように本実験結果において、AFRP シート

曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、シート目付量によらず静載荷時にはシート剥離、落下高さ $H = 3.0 \text{ m}$ の衝撃荷重載荷時にはシート破断となっている。ここでは、衝撃荷重載荷時におけるシート破断のメカニズムについて検討する。

前述の 写真-1 を見ると、A415/830-I 試験体の場合には、載荷点から少し下方の点をピークにアーチ状とも取れる斜め下方に発生したひび割れ（以後、これをアーチ状ひび割れと呼ぶ）が卓越していることが分かる。また、その内部には多数の曲げひび割れが発生している。

図-7 には、AFRP シートが破断に至る過程を検討するために、A830-I-H3.0 試験体に関するシートの軸方向ひずみ分布と高速度カメラで撮影したひび割れ性状を示している。ここでは、重錘衝突後、0.5, 1.0, 4.0, 8.0, 9.5 および 10 ms 経過後の状況について整理している。

図より、載荷点近傍の破壊過程は、1) 重錘衝突直後に斜め方向にひび割れが発生し (i), 2) そのひび割れが進展・開口してアーチ状ひび割れを形成する (ii, iii), 3) その後、アーチ内部に微細な曲げひび割れが多数発生し開口する (iv, v), 4) 上記のひび割れ開口に伴いシートひずみが急増してシートが破断する (vi), であることが分かる。なお、このような状況は A415-I-H3.0 試験体においても同様であった。

このように、シート破断時には載荷点直下にアーチの形成とアーチ内部に発生した曲げひび割れの開口が密接に関連していることが明らかになった。また、シートが破断したのは、梁の耐荷機構が、図-7 の (iv) ~ (v) へ 1.5 ms 程度の短期間で移行したことが要因であると推察される。すなわち、シート破断は、梁の耐荷機構が、(1) アーチ構

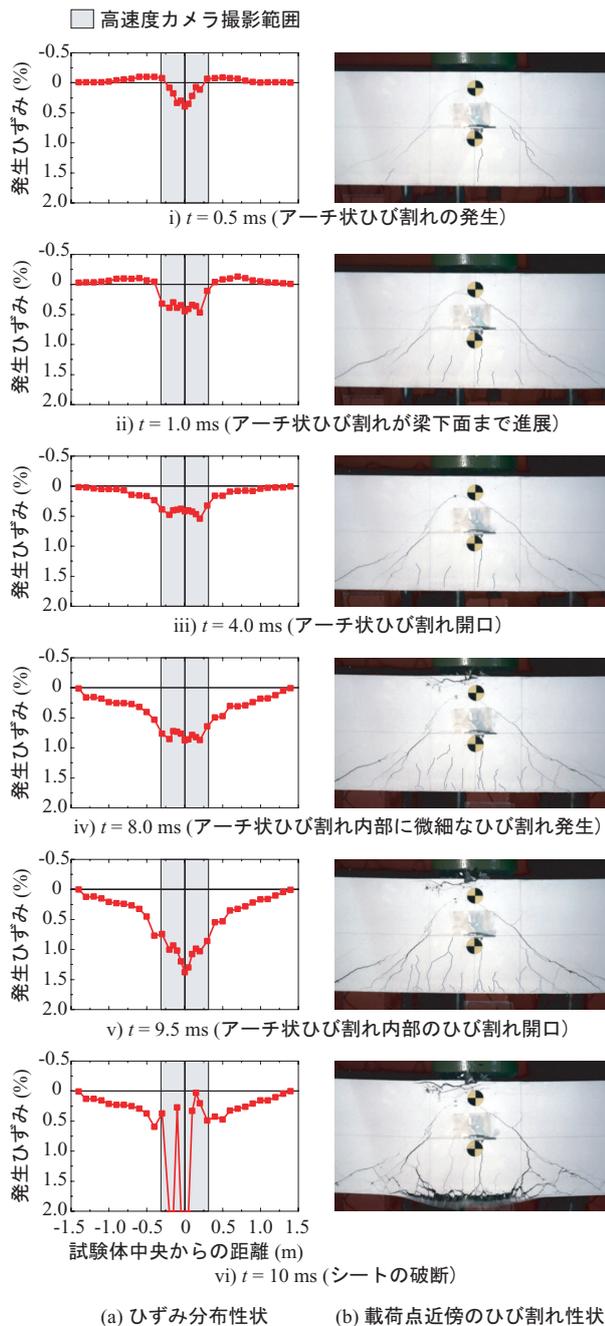


図-7 ひずみ分布と載荷点近傍のひび割れ性状

造の形成, (2) アーチ内部の下方および水平移動, (3) アーチクラウン部の圧縮破壊にともなう角折れによるアーチ内部での局所的な曲げが顕在化することで, シートに大きな引張力が作用し, それが引張耐力を上回ったためと推察される。この破断を抑制するためには, さらなる目付量の増加が必要とも考えられる。なお, アーチ状ひび割れはスラブのスキヤビングに類似した挙動によって発生し, かつシート補強によってアーチ構造を形成するものの, アーチクラウン部の角折れによって瞬間的に曲げに移行したものと推察される。

5. まとめ

本研究では, AFRPシートで曲げ補強されたRC梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響を検討することを目的に, 既往の研究よりも目付量が多いAFRPシートを用いて補強したRC梁の重錘落下衝撃実験を行い, シート目付量の影響について検討を行った。本実験により得られた知見をまとめると, 以下の通りである。

- 1) AFRPシート曲げ補強により, 衝撃荷重載荷時における載荷点変位や残留変位を抑制可能であり, その効果はシート目付量が多いほど大きい。
- 2) 衝撃荷重載荷時には, 載荷点近傍にアーチ状のひび割れが卓越して発生する傾向にある。
- 3) 目付量に関わらず落下高さ $H = 3.0$ m でシート破断したのは, アーチクラウン部の角折れによりその内部が局所的な曲げに移行し, 曲げ作用がシートの引張耐力を上回ったためと考えられる。なお, 曲げには $1 \sim 2$ ms 程度のわずかな時間で移行している。

謝辞

本実験における試験体製作にあたり, ファイベックス(株)よりアラミド繊維シートを提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007年制定
- 3) 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
- 4) 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
- 5) N.Kishi and H. Mikami: Empirical formulas for deesigning reinforced concrete beams under impact loading, ACI Structural Journal, Vol.109, No.4, 2012.