

FRP シートで下面補強した RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究

Experimental study on impact resistance of RC slabs strengthened with FRP sheet

三上 浩* 岸 徳光** 安藤 智啓*** 栗橋 祐介****

Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Tomohiro ANDO and Yusuke KURIHASHI

* 博(工) 三井建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

** 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*** 博(工) 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

**** 修(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

In order to investigate the impact resistance of RC slabs strengthened with FRP sheet, static and falling-weight impact tests are conducted. Here, two impact loading methods (iterative and single) are applied by using 300 kg steel weight. The total 14 RC slabs are used for these experiments, in which sheet material, strengthening method and the number of FRP sheet layers are varied. The results obtained from this study are as follows: 1) impact resistance of RC slabs can be upgraded by strengthening with FRP sheet; 2) resisting mechanism of RC slabs is depended upon loading methods and strengthening level; 3) dynamic amplification factor is about two which is independent of resisting mechanism of RC slab, strengthening level and tensile rigidity of FRP sheet.

Keywords: RC slab, impact resistance, FRP sheet, loading method

キーワード: RC 版, 耐衝撃性, FRP シート, 載荷方法

1. はじめに

近年, 道路落石防護施設, 原子力発電関連施設, 砂防ダムなどの構造物を衝撃的な外力に対してより安全に構築するために, これら構造物を構成する鉄筋コンクリート(RC)あるいはプレストレストコンクリート(PC)部材の耐衝撃性に関する研究が各機関で盛んに行われている¹⁾. 特に, $V = 10 \text{ m/s}$ 程度以下の比較的低速の衝突速度下におけるせん断スパンが十分に長い RC 梁の衝撃荷重載荷時の曲げ耐荷性状やせん断スパンが比較的短くスターラップを有しない RC 梁の衝撃荷重載荷時のせん断耐荷性状が徐々に明らかにされ, 合理的かつ簡易な耐衝撃設計法が提案されるに至っている^{2), 3)}.

一方, 耐衝撃用途として用いられる版部材に関しては, 数 10 m/s 以上の比較的高速の衝突速度下での RC 版の耐衝撃性が古くから日本を始め諸外国の多くの機関で研究され⁴⁾, 実験結果に基づく設計式が種々提案されている. また, RC 版裏面に設置した鋼製のライナープレートによる耐衝撃性の向上効果に関しても既に研究・報告されている^{5), 6)}. しかしながら, これらの実験では RC 版に衝突する衝突体の速度が全般的に数 10 m/s 程度以上の中, 高速であるため, RC 版の破壊形式は貫入や裏面剝離あるいは貫通であり, 静荷重載荷時に見られる版構造固有の押し抜きせん断型破壊とは異なるのが一般的である. 一方, 耐衝撃構造物のなかには道路落石防護施設のように, 衝突体の質量が大きいために 10 m/s 程度以下の比較的低速の衝突現象でも壊滅的に破壊する構造物もあることから, 比較的低速の衝突速度下における RC

版の耐衝撃性の検討や合理的な耐衝撃補強法の検討も極めて重要であるものと考えられる.

このような観点から, 本研究では比較的低速の衝突速度下における RC 版の耐衝撃性を実験的に検討することとし, あわせて最近, 道路橋 RC 床版の劣化および活荷重増加対策や橋脚などの耐震補強工法として多用されている連続繊維シート(以後, FRP シート)接着工法に着目し, RC 版下面に FRP シートを接着した場合の耐衝撃性を検討した. なお, FRP シート補強 RC 版の静荷重載荷時および衝撃荷重載荷時における耐荷挙動に関する既往の研究例は, 著者等の研究^{7), 8)}を除いて極めて少ないのが現状である. FRP シートには補修・補強材としての施工実績が最も多い炭素繊維(CFRP)シートと耐衝撃性に優れ防弾チョッキなどに使用されているアラミド繊維(AFRP)シートの2種類を使用した. また, アラミド繊維シートとして, 通常の1方向シート(強化繊維束を1方向に織り上げたシート)と2方向シート(直交2方向に強化繊維束を織り上げたシート)の2種類を使用し, 各々が耐衝撃性に与える影響を検討した. なお, 2方向シートは1回の施工で2方向補強が可能となるため, 工期短縮・コスト削減に資するものと考えられる.

衝撃載荷実験は重錘落下方式で行い, 試験体が破壊するまで落下高さを徐々にあげ重錘を繰り返し落下させる繰り返し載荷実験を標準としたが, 一部の試験体では1回の重錘落下のみを行う単一載荷実験も行っている. なお, 耐衝撃性は重錘衝撃力, 支点反力, 応答変位および

表-1 試験体一覧

試験体名	補強方法	載荷方法	衝突速度 V (m/s)
N-S	無補強	静的	—
N-II		繰り返し	1, 2, 3, 4
N-IS-4		単一	4
N-IS-5		単一	5
A1-S	AFRP シート補強	静的	—
A1-II	1 方向 (直交貼り)	繰り返し	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
C1-S	CFRP シート補強	静的	—
C1-II	1 方向 (直交貼り)	繰り返し	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-1-S	AFRP シート補強 2 方向 1 層	静的	—
A2-1-II		繰り返し	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-1-IS-5		単一	5
A2-1-IS-6		単一	6
A2-2-S	AFRP シート補強	静的	—
A2-2-II	2 方向 2 層	繰り返し	1, 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5

表-2 FRP シートの材料特性

名称	目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性係数 E (GPa)	引張剛性 E・t (kN/mm)
AFRP1方向シート	415	0.286	2.48	126.5	36.2
CFRP1方向シート	300	0.167	4.07	230.5	38.5
AFRP2方向シート	435/435	0.3/0.3	2.48	126.5	38.0/38.0

* FRP シートの材料特性はカタログ値である。

残留変位、重錘の試験体への貫入量、鉄筋や FRP シートの歪などを基に検討し、併せて試験終了後には試験体を中央部で切断して破壊面の観察を行った。本文では、これらの知見を基に無補強 RC 版と FRP シート補強 RC 版の衝撃耐荷機構を比較検討し、併せて耐衝撃性に与える載荷方法の影響についても検討を行った。最後に、衝撃実験と同時に実施した静載荷実験結果を用いて、FRP シート補強試験体の無補強試験体を基準とした静的耐力比と動的耐力比および動的倍率 (動的耐力 / 静的耐力) を明らかにした。

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

表-1 に試験体 (実験ケース) の一覧を示す。また、表-2 に使用した FRP シートの材料特性を示す。試験体の種類は補強の有無、FRP シートの材質、シートの強化方法 (貼り付け方法)、シートの層数を変化させた全 5 種類であり、載荷方法を 3 種類として全 14 体の実験を実施した。試験体名のうち第 1 項目は試験体の種類を

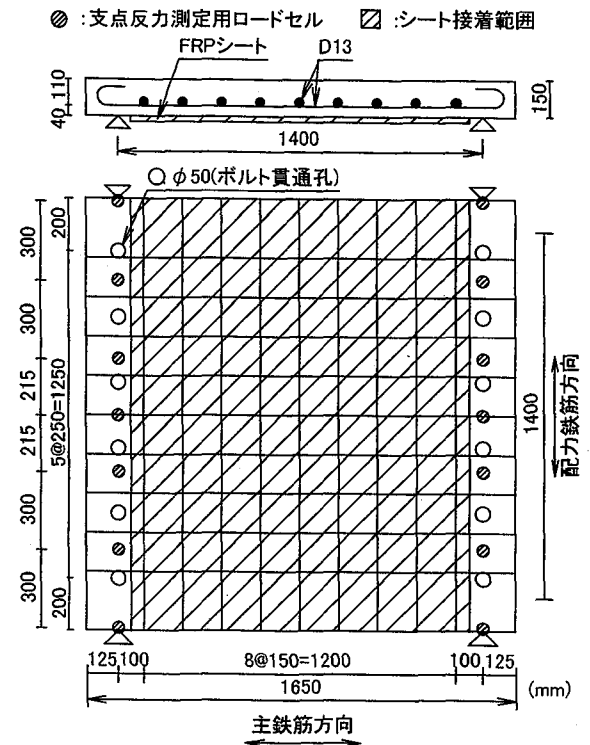


図-1 試験体の概要

示し、N- は無補強 RC 版を、A1-、C1- は各々 1 方向アラミド繊維シート、1 方向炭素繊維シートを、また A2-1-、A2-2- は 2 方向アラミド繊維シートを各々 1 層、2 層で補強したことを示す。なお、A1-、C1- および A2-1- 試験体に用いた FRP シートの直交 2 方向の引張剛性 ($E \cdot t$) は、表-2 に示すようにほぼ同等であり、A2-2- 試験体のそれは他の約 2 倍である。

試験体名のうち第 2 項目は載荷方法を示し、S は静載荷、II は繰り返し衝撃載荷 (以後、繰り返し載荷)、IS は単一衝撃載荷 (以後、単一載荷) したことを示す。繰り返し載荷では、初回の衝突速度を 1 m/s とし、以後の増分速度を 1 m/s (終局近傍では 0.5 m/s) として破壊するまで版中央部に繰り返し重錘を落下している。なお、本研究では繰り返し載荷時の破壊を既往の RC 梁の研究と同様に曲げ破壊を想定して、累積残留変位が支点間距離の 1/50 (28 mm) 程度に達した時点とした。これは、FRP シート補強した RC 版では押し抜きせん断面の形成とともに重錘が RC 版内に貫入するが、貫入量の増加に対応して累積残留変位量も増大するなど累積残留変位は局部破壊と全体破壊の程度を統一的に評価し得る因子であると考えたためである。また、本研究では衝突速度の大きさや補強の有無などで RC 版の破壊様式が必ずしも同一でないことが予想されたため、曲げ破壊を想定した累積残留変位で破壊を定義することで試験体を十分破壊に至らしめることとした。単一載荷は試験体名の末尾に示す衝突速度で 1 回の重錘を落下している。なお、単一載荷時の衝突速度は繰り返し載荷時の最大衝

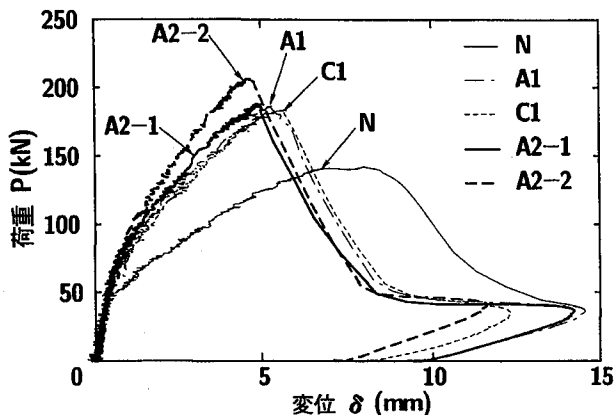


図-2 静載荷実験における荷重-変位関係

突速度および 1 m/s 増加させた速度とした。ここで、衝突速度とは重錘が RC 版に衝突する直前の重錘の速度である。

図-1に本実験に用いた RC 版の形状寸法と配筋状況および FRP シートの接着範囲を示す。RC 版の寸法は 1,650 × 1,650 × 150 mm であり、鉄筋は下端のみに配筋した。下端主鉄筋および配力鉄筋には D13 を用い、150mm 間隔で配筋している。各 FRP シートの接着は、最初に RC 版下面をショットブラスト処理 (処理深さ 1 ~ 2 mm 程度) し、プライマーを 2 度塗りした後に実施した。1 方向シートの場合は 30cm 幅のシートを用いて 1 層目を主鉄筋方向に接着した後、2 層目を直交して配力鉄筋方向に接着した。2 方向シートの場合は 1 m 幅のシートを主鉄筋方向中央部に接着し、その左右はラップ長 10cm として対称になるように 42.5 cm 幅のシートを接着した。なお、A2-2-試験体の 2 方向シート 2 層目は、配力鉄筋方向に 1 層目と同様に接着した。なお、いずれの試験体でも FRP シート端部は定着のための特別な処理は施していない。

実験時のコンクリートの材令は 107 日であり、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比はそれぞれ 16.7 MPa, 13.9 GPa, 0.23 である。鉄筋には SD295A を使用し、その降伏強度は 354.5 MPa である。

2.2 実験方法の概要

RC 版の支持条件は静載荷実験、衝撃載荷実験ともに同様で、1 対辺は支持間隔 1,400 mm で、その支点部は支点反力測定用ロードセル付き支点治具を用いて試験体の浮き上がり防止し、かつ、回転のみを許容するピン支持に近い構造としている。なお、他対辺は自由としている。衝撃荷重の載荷は重量 2.94 kN、先端部の直径が 60 mm で底部に高さ 2 mm のテーパが付いた球面状の鋼製重錘を所定の高さから版中央部に自由落下させて行った。なお、重錘は既存のものを用いたが、衝撃荷重の載荷によって生じる押し抜きせん断面が支点をよぎらないように直径の小さい重錘を選定している。静荷重は直

径 60 mm、高さ 100 mm の鋼製円柱を載荷板として版中央部に設置し、油圧ジャッキにより載荷している。

実験における測定項目は、重錘に内蔵された起歪柱型のロードセルによる重錘衝撃力 P (静荷重載荷時には静荷重測定用ロードセル)、支点治具に取り付けられた起歪柱型のロードセルによる合支点反力 R (以下、支点反力)、RC 版下面に設置した非接触式レーザ変位計による変位ならびに鉄筋と FRP シート各点の歪である。なお、衝撃実験時には重錘の RC 版内部への貫入量も併せて計測した。ここで、 P の測定に用いたロードセルの容量および応答周波数はそれぞれ 1,470 kN, DC ~ 4.0 kHz, R の測定に用いたロードセル 1 個の容量および応答周波数は各々 490 kN, DC ~ 2.4 kHz である。また、変位計のストロークおよび応答周波数はそれぞれ 200 mm, DC ~ 915 Hz である。各種の応答波形は高帯域用データレコーダ (応答周波数: DC ~ 40 kHz) に一括収録し、0.1 ms/word で A/D 変換を施している。また、A/D 変換後、 P および R に関しては高周波成分を除去するために 1.0 ms の矩形移動平均法により数値的なフィルター処理を行って平滑化している。なお、実験中には RC 版裏面の性状を観察し、終了後には配力鉄筋方向の版中央部で切断して破壊面の状況を観察している。

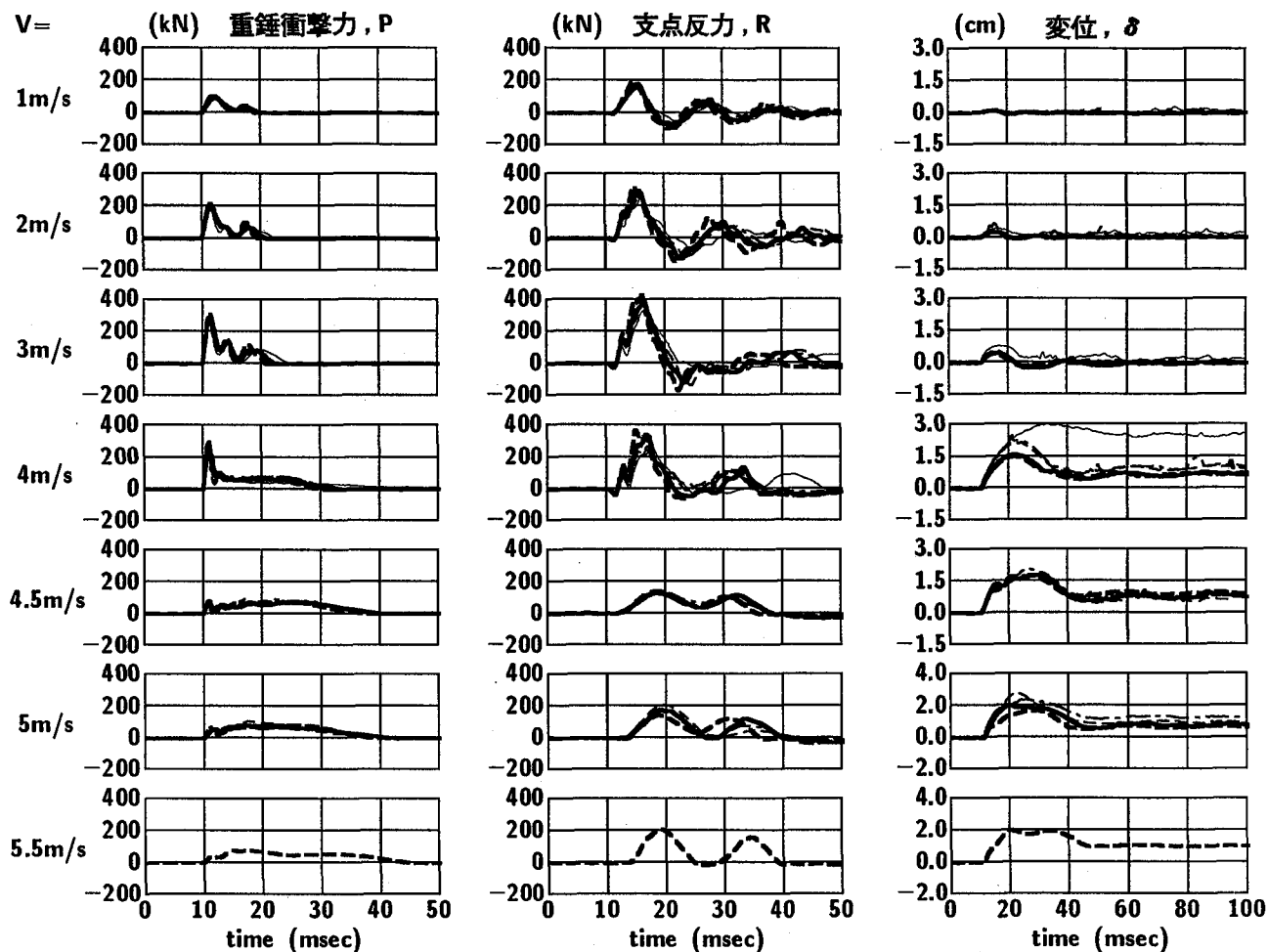
3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係と各種応答波形

図-2に静載荷実験時における荷重と版中央部変位の関係を示す。無補強の N 試験体は 40 kN 程度で曲げひびわれが発生し、版の曲げ剛性が大きく低下して変位が急増している。その後、荷重は変位 7 mm 程度までほぼ線形に増加し、最大荷重時近傍で 1mm 程度変位が増加した後、押し抜きせん断破壊に至った。一方、FRP シート補強試験体は、N 試験体のような急激な剛性低下が見られず、荷重増加と共に徐々に変位も増大し、変位が 5 mm 程度に達した時点で押し抜きせん断破壊に至った。剛性低下が最も抑制されているのは A2-2 試験体であり、最大荷重が最も大きく最大荷重時変位が最も小さく示されている。このように FRP シート補強試験体の剛性低下が小さいのは、シート補強によってかぶりコンクリート部におけるひびわれの発生やひびわれ幅の拡大が抑制されるためであり、その傾向はシートの引張剛性が大きいほど顕著である。なお、いずれの試験体もシート破断が発生していないことを確認している。

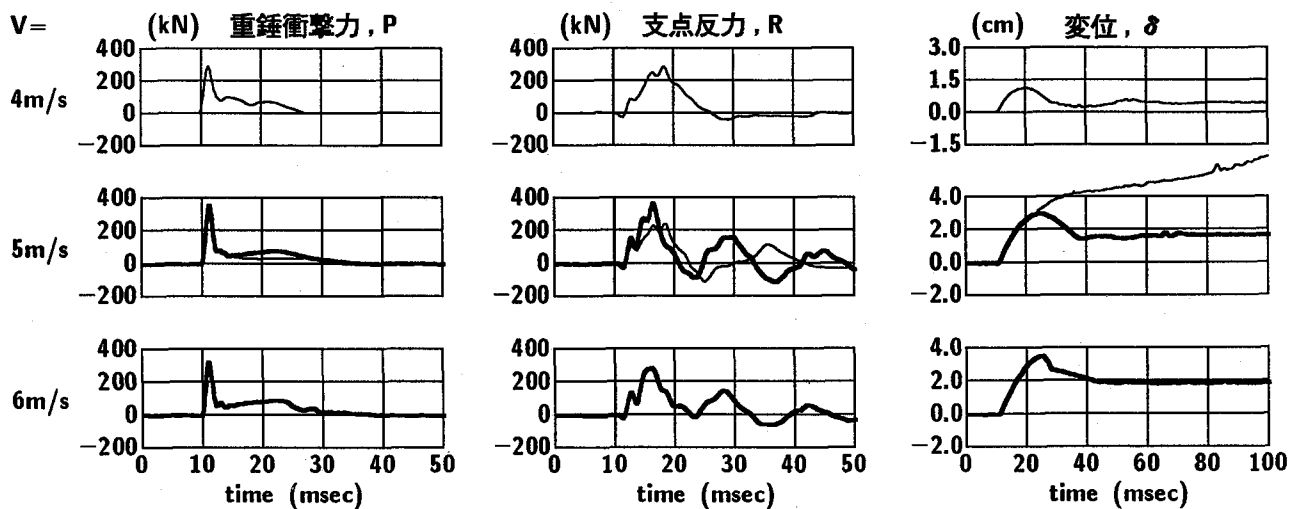
図-3に衝撃載荷実験時における各試験体の重錘衝撃力 (P)、支点反力 (R) および変位 (δ) の応答波形を各衝突速度ごとに示す。上段は繰り返し載荷時、下段は単一載荷時の応答波形である。まず、繰り返し載荷時の応答波形性状に関して考察する。重錘衝撃力の応答波形は各試験体で大差がなく、載荷初期に急激に立ち上がる第 1 波目の振幅は $V = 3$ m/s までは衝突速度の増加に対応し

— : N-II - - - : A1-II - - - : C1-II — : A2-1-II - - - : A2-2-II



(a) 繰返し載荷

— : N-IS — : A2-1-IS



(b) 単一載荷

図-3 重錘衝撃力、支点反力および変位の応答波形

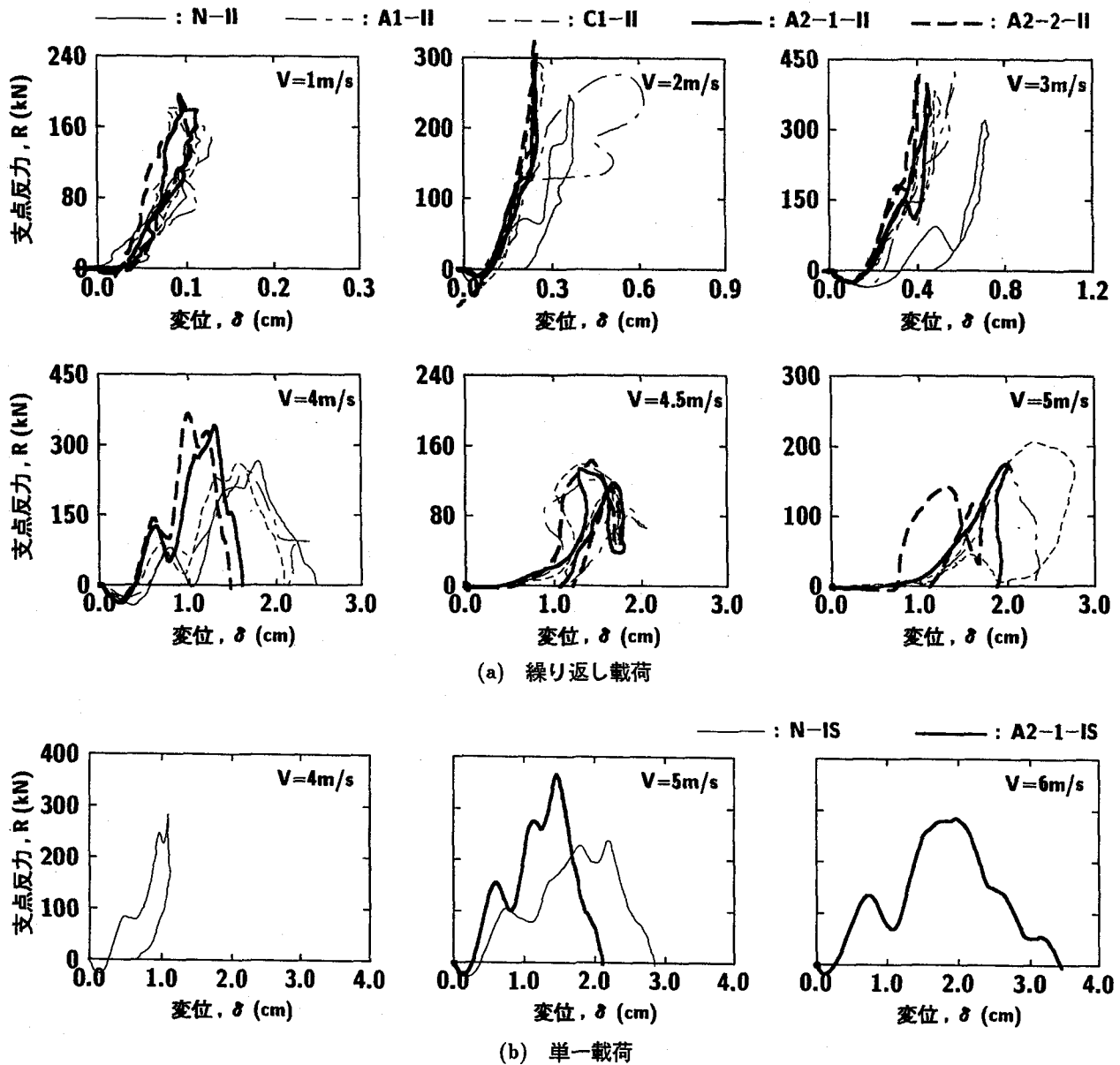


図-4 支点反力-载荷点変位関係

で増大している。 $V = 4$ m/s では第 1 波の振幅が減少に転じ、その後、継続時間が 20 ms 程度の低振幅の波形が続いている。 $V = 4.5$ m/s 以降では、载荷初期の急激な立ち上がりは認められず、継続時間が 30 ms 程度で低振幅の正弦半波状の波形が生じている。

一方、支点反力波形は N 試験体と FRP シート補強試験体で多少の差異が見られるものの、全試験体でほぼ同様の波形性状を示している。第 1 波目の振幅は重錘衝撃力波形と同様に $V = 3$ m/s までは衝突速度の増加に対応して増大し、 $V = 4$ m/s で減少に転じ、 $V = 4.5$ m/s 以降では継続時間が 25 ms 程度の低振幅の正弦波の波形性状を示している。変位波形の最大振幅は $V = 3$ m/s までは衝突速度の増加に対応して増大しているが、この衝突速度までは全試験体の残留変位はほぼ零である。また、N 試験体の振幅が他よりも若干大きいものの全試験体で波形性状はほぼ同様である。 $V = 4$ m/s

では各試験体の応答変位が大幅に増大し、かつ、変位が残留していることが分かる。特に N 試験体では最大応答変位と同程度の変位が残留して終局に至っている。なお、 $V = 4.5$ m/s 以降の FRP シート補強試験体の変位波形性状は 2 方向 AFRP シートで補強した A2 試験体で振幅が小さくなる傾向にあるものの大略同様である。

また、FRP シート補強試験体の $V = 4.5$ m/s 以降の変位波形性状は、N 試験体の終局時 ($V = 4$ m/s) のそれと大きく異なっていることが分かる。これは、両試験体の繰り返し载荷時における終局近傍において耐荷機構が大きく異なることを暗示している。そこで、繰り返し载荷時における耐荷機構を波形性状の差異に着目して整理した。すなわち、1) $V = 3$ m/s までの残留変位が少なく弾性応答が支配的な領域、2) $V = 4$ m/s のように全試験体で残留変位が発生し、弾性応答と塑性応答が混在する領域、3) FRP シート補強試験体の $V = 4.5$ m/s 以

降で見られる塑性応答が支配的な領域、である。RC版の耐荷機構はこれらの3つに分類されるものと考えられる。

次に単一載荷時の各種応答波形性状に関して考察する。N試験体の単一載荷時における $V = 4, 5 \text{ m/s}$ の各種応答波形性状は、いずれの場合も各々 $V = 1 \text{ m/s}$ 小さい繰り返し載荷時の波形性状とほぼ対応している。これは、せん断破壊型 RC 梁の繰り返し載荷時の最大衝突速度における波形性状と同一の衝突速度における単一載荷でのそれがほぼ対応する³⁾ことと若干相違している。すなわち、RC 版の場合は繰り返し載荷の影響を RC 梁よりも顕著に受けているものと推察される。一方、A2-1 試験体の単一載荷時における $V = 5, 6 \text{ m/s}$ の各種応答波形性状は繰り返し載荷時の $V = 4 \text{ m/s}$ におけるそれとほぼ対応し、前述した弾性応答と塑性応答が混在する耐荷領域にあるものと考えられる。一方、繰り返し載荷時の終局近傍の衝突速度 ($V = 4.5, 5 \text{ m/s}$) で見られる塑性応答が支配的な応答波形性状は、単一載荷実験では出現していない。このように、FRP シート補強試験体の終局近傍の衝突速度における各種応答波形性状は載荷方法の影響を顕著に受けており、耐衝撃性評価の上で留意すべき点であると考えられる。なお、衝撃載荷実験においても静載荷実験と同様にシート破断が発生していないことを確認している。

3.2 支点反力と載荷点変位および (累積) 重錘貫入量

図-4 に各衝突速度における全試験体の支点反力-載荷点変位の関係を示す。(a)図に繰り返し載荷時、(b)図に単一載荷時の結果を示す。(a)図より、繰り返し載荷時の $V = 3 \text{ m/s}$ までの弾性応答が支配的な領域では、 $V = 2 \text{ m/s}$ において A1 試験体が他と多少異なる分布性状を示していることや、N 試験体の応答変位が他に比べて全般的に大きい他は、大略同様な分布性状を示していることが分かる。すなわち、最大支点反力は衝突速度の増加に対応して増大し、最大支点反力到達後にほぼ同様な経路で徐荷している。これは、 $V = 3 \text{ m/s}$ までは支点反力と載荷点変位で囲まれる面積として定義される試験体の吸収エネルギーがわずかであることを示している。一方、 $V = 4 \text{ m/s}$ の弾性応答と塑性応答が混在する耐荷領域では、2 方向シート補強試験体が他に比べて最大支点反力が大きく、最大支点反力到達時の応答変位が小さい傾向にあるものの、分布形状はいずれの試験体も大略三角形形状を示し、試験体は載荷エネルギーを大きく吸収していることが分かる。

一方、FRP シート補強試験体の $V = 4.5 \text{ m/s}$ における最大支点反力は、押し抜きせん断面が $V = 4 \text{ m/s}$ で既に形成されたために $V = 4 \text{ m/s}$ よりも小さく示されている。ただし、この状態でも FRP シートは RC 版裏面の端部近傍でコンクリートと良好に接着して載荷点の残留変位を抑制している。その結果、支点反力の減少と相まって吸収エネルギーは $V = 4 \text{ m/s}$ よりも大幅に小さくなっている。 $V = 5 \text{ m/s}$ では載荷エネルギーが V

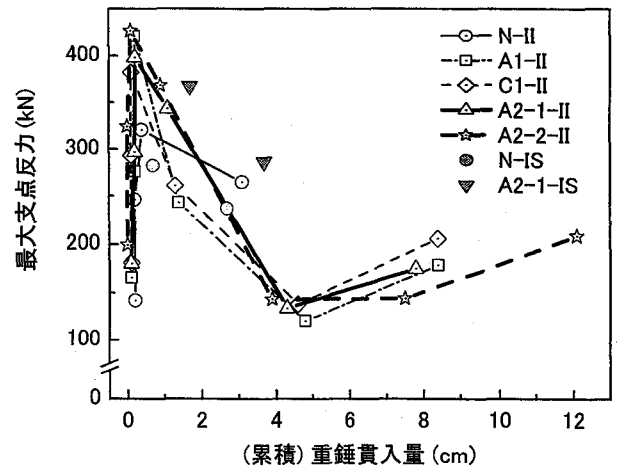


図-5 最大支点反力- (累積) 重錘貫入量の関係

$= 4.5 \text{ m/s}$ よりも大きいため、最大支点反力や吸収エネルギーが $V = 4.5 \text{ m/s}$ よりも大きくなる傾向にある。この傾向は C1 試験体で最も顕著であった。また、A2-2 試験体の最大支点反力や吸収エネルギーは $V = 5 \text{ m/s}$ と $V = 4.5 \text{ m/s}$ でほぼ同等であった。なお、 $V = 4.5 \text{ m/s}$ 以降では、後述する破壊面の状況から明かなように、主として押し抜きせん断コーン部のコンクリートの粉砕や FRP シートの引き剥がれ領域の拡大などによって載荷エネルギーが吸収されているものと推察される。

次に、単一載荷時の支点反力-載荷点変位関係について考察する。N 試験体の $V = 4 \text{ m/s}$ では、多少の残留変位が認められるものの未だ弾性応答が支配的であることが分かる。一方、 $V = 5 \text{ m/s}$ では最大支点反力が若干低下する一方、残留変位は大きく従ってエネルギー吸収量も大きくなっている。他方、A2-1 試験体の $V = 5 \text{ m/s}$ では N 試験体と同様に三角形の分布性状を示し、弾性応答と塑性応答が混在する耐荷領域にあるものと考えられる。 $V = 6 \text{ m/s}$ の A2-1 試験体の分布性状も三角形形状を示しているが、最大支点反力は $V = 5 \text{ m/s}$ に比べて低下し残留変位が増大していることから、 $V = 6 \text{ m/s}$ はこの試験体の限界状態を超えた衝突速度であるものと考えられる。なお、比較的低速度の繰り返し載荷試験体および単一載荷試験体では、衝撃載荷初期の段階で負の支点反力のもとに正 (下に凸) の変位が生じていることが分かる。ここで、負の支点反力は、衝撃初期に載荷点部に生じた変位波動が試験体の自由端まで伝播して反射することによって試験体端部が負載荷状態に陥るために生じるものと推察される。従って、この負支点反力は試験体の損傷が軽微で剛性が高く減衰の程度が小さい場合に顕著に示される。また、載荷点部に生じる衝撃初期の変位は、支点の存在の有無に拘わらず重錘落下衝撃荷重によって発生することは勿論である。また、支点反力波形は波動伝播に若干の時間がかかるために重錘衝撃力波形よりも立ち上がりが遅いことから、載荷初期に生じている正の変位は重錘衝撃力の作用によるものと考えられ

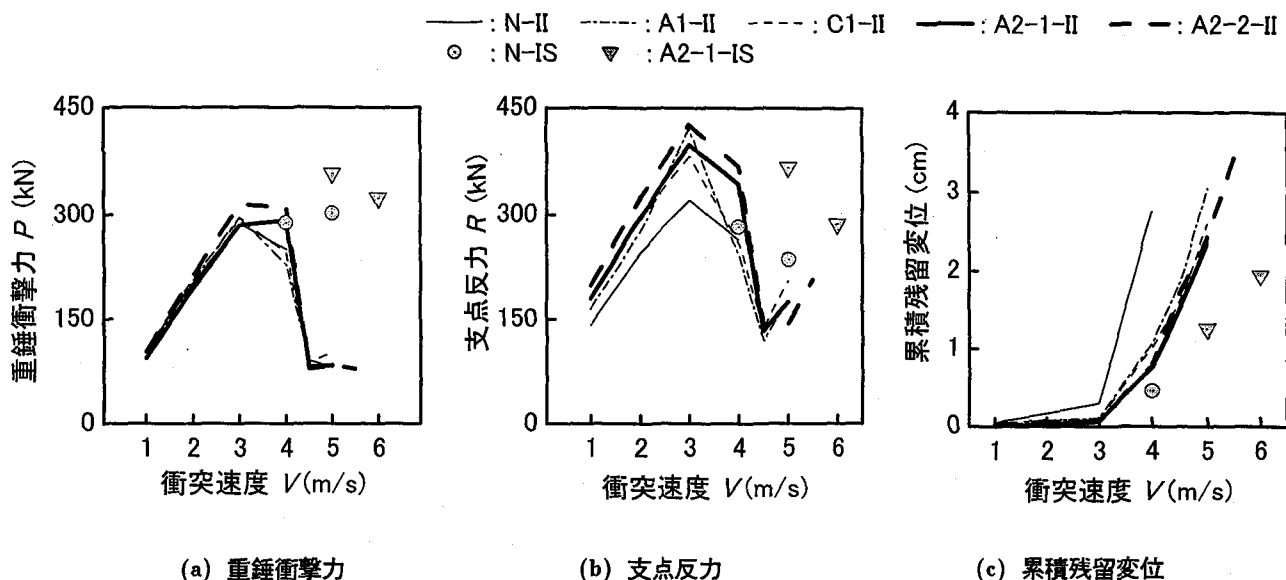


図-6 衝突速度と各衝撃力および累積残留変位の関係

る。このように、載荷初期において支点反力と変位の関係に動的荷重載荷特有の現象が発生するものの、支点反力は後述するように耐衝撃性を評価する因子として重錘衝撃力よりも優れており、また載荷初期の部分がエネルギー収支に与える影響も軽微であることから、支点反力と変位の関係で耐衝撃性を評価することが可能であると考えられる。

図-5に最大支点反力と(累積)重錘貫入量の関係を示す。なお、繰り返し載荷では重錘貫入量の累積値を、単一載荷では1回の載荷による重錘貫入量を示している。図より、繰り返し載荷時の最大支点反力は累積重錘貫入量が数 mm までの範囲では線形的に増大して最大値を示した後、累積重錘貫入量の増加とともに大きく減少する傾向にあることが分かる。なお、貫入量の増加に対応する支点反力の低下勾配は1方向シート補強試験体が最も大きく、次が2方向シート補強試験体、最も低下勾配が小さいのはN試験体であった。N試験体の場合には、支点反力の低下が比較的小さく無補強のために累積重錘貫入量が大きく増加するのに対して、1方向シート補強試験体の場合には、累積重錘貫入量のわずかな増加で支点反力が著しく低下し勾配が大きくなるためと考えられる。なお、FRPシート補強試験体では、累積重錘貫入量が4 cm程度でいずれの試験体も極小の最大支点反力を示している。すなわち、FRPシート補強試験体の繰り返し載荷時には累積重錘貫入量が数 mm 程度までは弾性応答が支配的で、数 mm から1 cm程度の範囲では弾性応答と塑性応答が混在し、それ以上の状態では塑性応答が支配的になっているものと考えられる。なお、N試験体の場合には3 cm程度までが弾性と塑性応答が混在する領域であり、FRPシート補強試験体の場合には1 cm程度までであるのに比べて大きい。

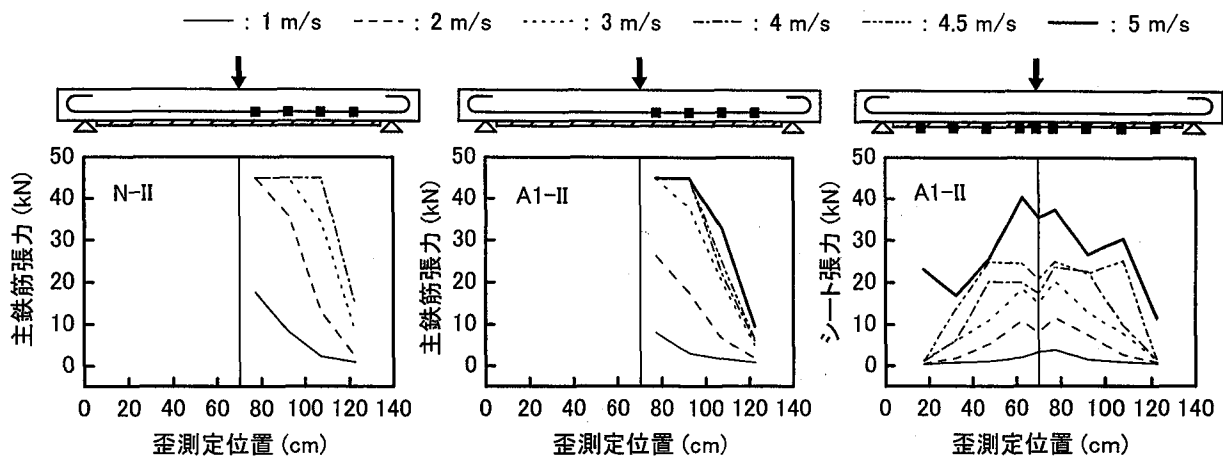
一方、N試験体の単一載荷時における最大支点反力と重錘貫入量の関係は繰り返し載荷時の最大支点反力と累

積重錘貫入量の関係とほぼ同様である。これは、耐荷機構が両載荷方法とともに弾性応答と塑性応答が混在する領域であるためと考えられる。一方、A2-1試験体の繰り返し載荷時と同等な重錘貫入量における単一載荷時の最大支点反力は繰り返し載荷時のそれに比べてかなり大きい。これは、FRPシート補強試験体が同程度の重錘貫入量を示す場合の耐荷領域が、単一載荷時には弾性と塑性が混在する領域であるのに対して、繰り返し載荷時には塑性が支配的な領域となり両者で異なっているためと考えられる。このように、最大支点反力と(累積)重錘貫入量の関係は載荷方法や補強の有無などに影響されるものの密接に関連していることが分かる。

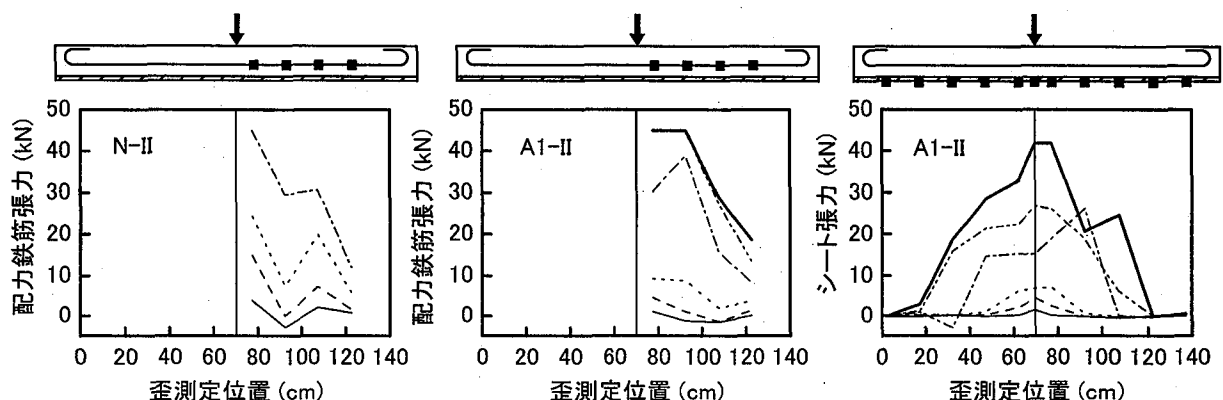
3.3 衝突速度と各衝撃力および累積残留変位

図-6に繰り返し載荷、単一載荷時における衝突速度と重錘衝撃力、支点反力および累積残留変位の関係を示す。(a)図の重錘衝撃力と衝突速度の関係より、繰り返し載荷時の2方向シートで補強した試験体は $V = 3$ m/sと4 m/sでほぼ同等な重錘衝撃力を示しているが、他の試験体は $V = 3$ m/sで最大値を示した後 $V = 4$ m/sで若干低下し、 $V = 4.5$ m/sでは全試験体で80～90 kN程度まで低下していることが分かる。なお、N試験体の単一載荷時には繰り返し載荷時の最大重錘衝撃力とほぼ同程度の衝撃力が発生し、衝突速度の増加に対応して重錘衝撃力は若干増加している。一方、A2-1試験体の単一載荷時には、繰り返し載荷時よりも大きな重錘衝撃力が発生し、重錘衝撃力は衝突速度の増加に対応して若干低下している。

(b)図の支点反力と衝突速度の関係より、繰り返し載荷時において、支点反力はN試験体が最も小さく、一般的に2方向シート補強試験体で大きいことが分かる。A1、C1試験体はいずれも $V = 3$ m/sで最大値を示している。特にA1試験体の支点反力はA2-2と同程度に



(a) 配筋鉄筋方向中央断面における主鉄筋とシートの張力分布



(b) 主鉄筋方向中央断面における配筋鉄筋とシートの張力分布

図-7 鉄筋およびシートの張力分布図

大きく示されている。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ では両者とも N 試験体と同程度にまで大きく減少している。一方、A2-1、-2 試験体では、重錘衝撃力分布の場合と同様に $V = 4 \text{ m/s}$ における支点反力の低下が A1、C1 試験体ほど顕著ではない。支点反力は既往の研究³⁾でも明らかなように、重錘衝撃力波形が有する 1) 衝撃初期の振幅が大きくかつ継続時間の短い高周波成分を含むために計測やデータ処理方法によっても最大衝撃力が変動する可能性がある、2) ほとんど変位が生じない衝撃初期の段階で急激に発生するためにエネルギー収支関係が評価しにくい、などの欠点がなく、耐衝撃性の評価因子として適しているものと考えられる。そこで、支点反力を衝撃荷重載荷時の部材の耐力（動的耐力）とすると、FRP シート補強試験体の動的耐力は無補強試験体よりも大きく、FRP シート補強試験体の中では A2 試験体の方が動的耐力の低下が抑制され耐衝撃性により優れていることが分かる。これは、FRP シート補強が衝撃荷重載荷時においても RC 版の動的耐力を向上させる効果があること、2 方向シートのひびわれ抑制効果が 1 方向

シートを直交して重ね貼りした場合よりも優れていることを示すものと考えられる。また、2 方向シートの層数を増加させることで支点反力が増大していることから、補強材の引張剛性を増加させることは動的耐力の向上につながるものと考えられる。なお、本文では静荷重載荷と衝撃荷重載荷および無補強 RC 版と FRP シート補強 RC 版で破壊様式等が必ずしも同一でないものを統一的に比較検討するため、その部材が有した最大荷重（衝撃荷重載荷時には最大支点反力）を耐力と総称することとした。

一方、単一載荷時の N 試験体の支点反力は、 $V = 4 \text{ m/s}$ では繰り返し載荷時の同じ衝突速度での支点反力とほぼ同様でかつ最大支点反力を若干下回る程度であった。 $V = 5 \text{ m/s}$ では低下して最大支点反力と大きな差異が生じている。また、A2-1 試験体では $V = 5 \text{ m/s}$ の単一載荷時に繰り返し載荷時の最大支点反力を若干下回る支点反力が発生し、 $V = 6 \text{ m/s}$ では支点反力が 280 kN 程度に低下している。このように、補強の有無に関わらず単一載荷時の支点反力の最大値は繰り返し載荷時

の最大支点反力と大略同等である。従って、繰り返し載荷時の最大支点反力や単一載荷時の支点反力の最大値を動的耐力とみなすことは可能と考えられる。しかしながら、補強の有無に関わらず繰り返し載荷時の最大支点反力は弾性応答が支配的な耐荷領域で、単一載荷時の支点反力の最大値は弾性応答と塑性応答が混在する領域で生じていることに留意する必要がある。

図-6 (c)の累積残留変位と衝突速度の関係より、全試験体の累積残留変位(以後、残留変位)は $V = 3 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増加とともにほぼ線形に増加し、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降では指数関数的に増大していることが分かる。また、 $V = 4 \text{ m/s}$ で比較すると、残留変位は N 試験体で最も大きく、2 方向シート補強試験体で最も小さい。単一載荷の場合、N 試験体では $V = 5 \text{ m/s}$ において RC 版中央のコンクリートが円錐状に脱落して破壊したため残留変位は示されていない。 $V = 4 \text{ m/s}$ では 5 mm 以下の残留変位を示し、弾性に近い状態であることが分かる。一方、A2-1 試験体では、衝突速度の増加に対応して残留変位が増大しているものの、 $V = 5 \text{ m/s}$ における残留変位は繰り返し載荷時の同一衝突速度における残留変位の半分程度と小さい。なお、繰り返し載荷において最大支点反力が生じた $V = 3 \text{ m/s}$ における残留変位は N 試験体で 3 mm 程度、FRP シート補強試験体で 1 mm 以下と極めて微小である。このことから繰り返し載荷における最大支点反力が弾性応答の支配的な領域で生じていることが分かる。

3.4 張力分布

図-7 に N および A1 試験体の繰り返し載荷時における鉄筋および FRP シートの張力分布性状を主鉄筋方向(a図)および配力鉄筋方向(b図)について示す。張力は鉄筋およびシートに貼り付けた歪ゲージの値を用いて算出した。なお、鉄筋の張力は 1 本あたり、シートの張力は鉄筋の配置間隔に対応させて幅 15 cm 分の張力とした。

N 試験体の主鉄筋張力は載荷点直下に集中し、 $V = 2 \text{ m/s}$ で既に降伏時張力に至っていることが分かる。その後、衝突速度の増加に対応して主鉄筋の降伏範囲が支点方向に拡大している。一方、配力鉄筋の分担張力は全般的に主鉄筋に比べて小さく、 $V = 3 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増加に対応して増大し、 $V = 4 \text{ m/s}$ で分担張力は大きく増加している。なお、 $V = 4 \text{ m/s}$ では載荷点直下近傍の配力鉄筋も降伏していることが分かる。以上より、 $V = 4 \text{ m/s}$ における支点反力の低下や累積残留変位の急増は主として配力鉄筋方向の耐荷機構が大きく変化したことに関連するものと考えられる。

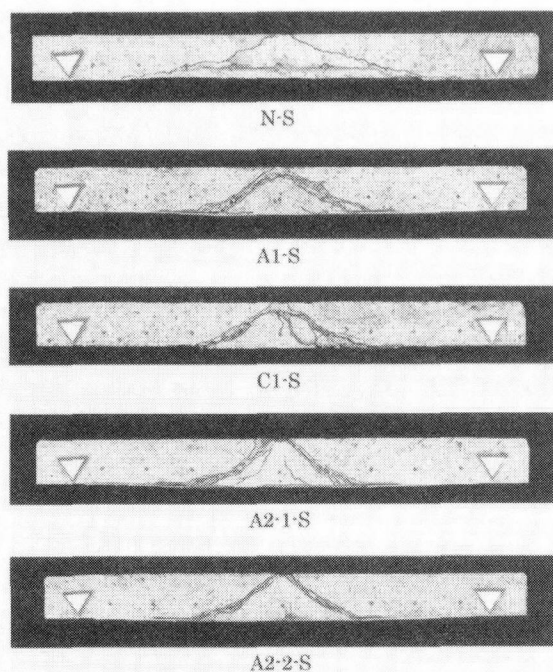
A1 試験体の主鉄筋張力は載荷点直下近傍に集中する傾向にあるものの $V = 3 \text{ m/s}$ 以降では分布性状に大きな変化は見られず、主鉄筋の降伏範囲が支点方向に拡大する傾向も N 試験体ほどは顕著でない。また、張力の大きさは N 試験体に比べて全般的に小さい。これは、主

鉄筋方向のシートが主鉄筋の張力より小さいものの張力を分担しているためと考えられる。なお、主鉄筋方向のシートの張力分担性状はほぼ台形状であり $V = 5 \text{ m/s}$ を除いて衝突速度の影響を顕著には受けていない。一方、配力鉄筋の張力は $V = 3 \text{ m/s}$ までは 10 kN 以下と N 試験体よりも小さいものの $V = 4 \text{ m/s}$ では急増し、主鉄筋と同程度の張力を分担している。また、配力鉄筋方向の FRP シートの分担張力も $V = 3 \text{ m/s}$ までは主鉄筋方向の張力に比べて小さいものの、 $V = 4 \text{ m/s}$ で急増して主鉄筋方向とほぼ同程度の分担張力を示している。このように、A1 試験体の配力鉄筋の張力分担性状は $V = 4 \text{ m/s}$ で N 試験体よりも明瞭に変化している。これは、 $V = 3 \text{ m/s}$ まではシート補強によって配力鉄筋の張力分担が軽減されるが、 $V = 4 \text{ m/s}$ で配力鉄筋方向に明瞭な押し抜きせん断面が一気に形成され張力分担が軽減されなくなるためと考えられる。

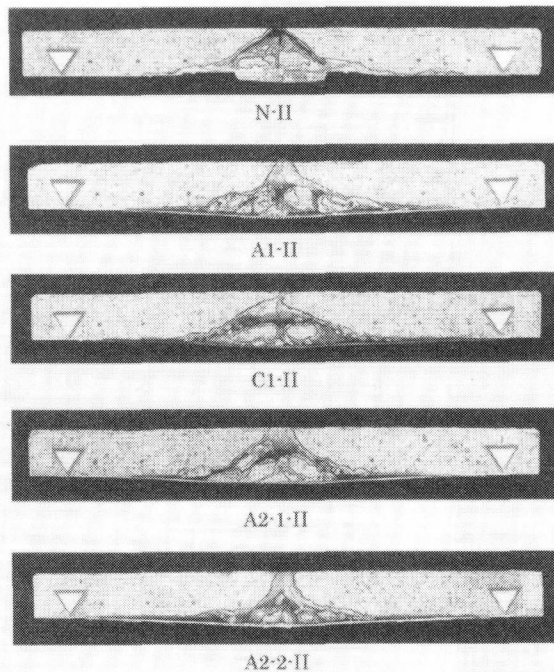
3.5 破壊性状

図-8 に実験終了後の RC 版配力鉄筋方向中央部における切断面の状況を示す。(a)図が静載荷実験、(b)図が繰り返し載荷実験、(c)図が単一載荷実験結果である。図より、N 試験体の静載荷時には、RC 版頂部から緩やかな角度で押し抜きせん断面が形成されている。一方、繰り返し載荷時にはほぼ 45° の角度で押し抜きせん断面が形成され、載荷方法によって押し抜きせん断面の角度が大きく異なることが分かる。一方、単一載荷時には繰り返し載荷時とほぼ同様な角度で押し抜きせん断面が形成されているものの、 $V = 5 \text{ m/s}$ の載荷点直下では円錐状にせん断コーンが脱落し、かつ鉄筋も大変形するなどして壊滅的に破壊していることが分かる。なお、静載荷時と単一載荷の $V = 4 \text{ m/s}$ では、形成される押し抜きせん断面の角度が異なるものの、ともに円錐状のせん断コーン部のコンクリートにはひびわれが少なく比較的健全であることが分かる。これに対して繰り返し載荷時のせん断コーン部には多数のひびわれが発生し、特に上部ではコンクリートが細かく粉砕されていることが分かる。このように、載荷方法によってせん断面の形成角度やせん断コーン部の損傷程度が大きく異なっている。これらは前述した応答波形などの耐荷性状に密接に関連しているものと考えられる。

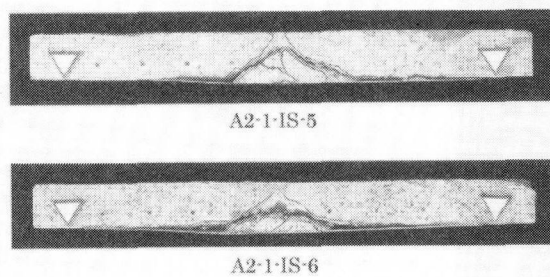
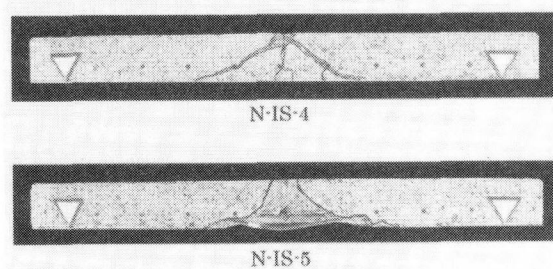
FRP シート補強試験体の静載荷時には、N 試験体と異なり、シートの引張剛性が大きくなるほど形成される押し抜きせん断面の角度が 45° に近づいている。一方、繰り返し載荷時には、静載荷時よりも緩やかな角度で押し抜きせん断面が形成されている。この傾向は FRP シートの引張剛性が大きいほど顕著である。これは、繰り返し載荷時には押し抜きせん断面が RC 版頂部から形成されるのではなく、シートの引張剛性が大きいほど RC 版下面近傍から形成されるためと考えられる。また、N 試験体と同様に、繰り返し載荷時の FRP シート補強試験体の押し抜きせん断コーン部ではコンクリートが細か



(a) 静載荷実験



(b) 繰り返し載荷実験



(c) 単一載荷実験

図-8 破壊性状

く粉砕されている。一方、A2-1 試験体の $V = 5 \text{ m/s}$ における単一載荷時の押し抜きせん断面は繰り返し載荷時とほぼ同様な角度で形成されているが、 $V = 6 \text{ m/s}$ ではより RC 版下面近傍から押し抜きせん断面が形成されるために緩やかな角度となっている。

以上を要約すると、1) N 試験体では静載荷時に緩やかな角度の押し抜きせん断面が形成され、衝撃載荷時には 45° に近い角度でせん断面が形成される。これは、N 試験体の場合には版の曲げ剛性が小さく、変形しやすいためである。他方、衝撃載荷時には見かけ上版の剛性が高くなり、また、シート補強もされていないことから、 45° に近い押し抜きせん断面が形成されたものと考えられる。2) FRP シート補強試験体の静載荷時には、N 試験体に比べて押し抜きせん断面の角度が 45° に近く、逆に繰り返し載荷時には N 試験体よりも緩やかとなる。この傾向はシートの引張剛性が大きいほど顕著である。

これは、静載荷時には FRP シート補強することによって版の剛性が増大し変形量が減少するのに対して、繰り返し載荷時にはシートの剛性が大きいほど押し抜きせん断面が版の下方近傍から形成されるためである。3) 単一載荷時の場合、N 試験体で形成される押し抜きせん断面の角度は繰り返し載荷時と大差がない。ただし、衝突速度が大きい場合にはせん断コーン部が脱落して壊滅的な破壊を示す。一方、FRP シート補強試験体の場合には、衝突速度が大きくなることで押し抜きせん断面がより版下方から形成される傾向にある。これは、衝突速度が大きくなると裏面剝離型破壊の傾向を示すことによるものと考えられる。4) 繰り返し載荷時には、押し抜きせん断コーン部のコンクリートは細かく粉砕されているが、この傾向は単一載荷時には見られない。FRP シート補強試験体の繰り返し載荷時には、 $V = 4 \text{ m/s}$ で押し抜きせん断面が形成され、それ以降の衝突速度では

表－3 繰り返し載荷実験結果

試験体名	静的耐力 (1) (kN)	静的耐力比	最大支点反力 (2) (kN)	動的耐力比	動的倍率 (2)/(1)
N	142	1.00	321	1.00	2.27
A1	186	1.32	421	1.31	2.26
C1	183	1.30	382	1.19	2.08
A2-1	188	1.33	399	1.24	2.12
A2-2	206	1.46	427	1.33	2.07

表－4 単一載荷実験結果

試験体名	静的耐力 (1) (kN)	動的耐力 (2) (kN)	動的耐力比	動的倍率 (2)/(1)
N-IS-4	142	283	1.00	2.00
N-IS-5		237	0.83	1.67
A2-1-IS-5	188	367	1.30	1.95
A2-1-IS-6		287	1.01	1.53

せん断コーンの脱落をFRPシートが抑制しているため、コーン部の粉碎される領域が衝突速度の増加に対応して同心円状に拡大して載荷エネルギーを吸収しているものと推察される。なお、実験時にはRC版裏面の打音検査を実施して、コーン部の粉碎領域（FRPシートの引き剥がれ領域）が衝突速度の増加に対応して同心円状に拡大することを確認している。

3.6 静的及び動的耐力と耐衝撃性

RC版の耐衝撃性は吸収エネルギー量や動的耐力および繰り返し載荷時には破壊に至るときの衝突速度の大きさ（最大衝突速度）で評価可能と考えられる。本文では最大衝突速度および動的耐力でRC版の耐衝撃性を評価することとした。最大衝突速度は表－1に示すようにN試験体よりもFRPシート補強試験体の方が大きく、FRPシート補強試験体の中ではシートの引張剛性が大きいほど大きくなり、耐衝撃性に優れているものと考えられる。

表－3に耐力の観点から静載荷実験結果と繰り返し載荷実験結果を整理した。表中、静的耐力比及び動的耐力比は各々N試験体を基準とした耐力比であり、動的倍率は最大支点反力を静的耐力で除した値である。これから、1) 静載荷時にはFRPシート補強することで1.3倍程度から1.5倍程度まで耐力が増加し、2) 同等な引張剛性を有する補強材で補強する場合には材料特性や補強方法に関わらずほぼ同等の耐力向上効果が期待できる、3) シートの引張剛性を増加させることで耐力は増大するが、剛性の増加率（2倍）に対応して耐力の増加率（約1.5倍）は向上しないことが分かる。一方、繰り返し載荷時にはFRPシート補強することで1.2倍から1.3倍程度まで動的耐力は向上するが、引張剛性の影響は静載荷時ほど明瞭ではない。これは、繰り返し載荷時の動的耐力（最大支点反力）は全試験体で $V = 3 \text{ m/s}$ の弾性応答

が支配的な状態で励起され、FRPシートの剛性が小さいことから版の剛性に顕著な影響を与えていないためと推察される。なお、動的倍率は補強の有無やシートの材質および引張剛性に関わらずいずれの試験体でも2程度以上である。

表－4に耐力の観点からNおよびA2-1試験体の静載荷実験結果と単一載荷実験結果を整理した。NおよびA2-1試験体ともに繰り返し載荷実験の最大衝突速度よりも $V = 1 \text{ m/s}$ 大きい衝突速度における単一載荷での動的耐力は、最大衝突速度における単一載荷での動的耐力に比べて小さい。このことから、最大衝突速度よりも $V = 1 \text{ m/s}$ 大きい衝突速度における単一載荷では、版の限界状態を超えてしまうものと考えられる。そこで、最大衝突速度における単一載荷での動的耐力を基に各試験体の耐衝撃性を検討する。

N-IS-4の動的耐力を基準とするとA2-1-IS-5の動的耐力比は1.3程度で静的耐力比とほぼ同等であり、繰り返し載荷時の動的耐力比よりも若干大きい。一方、動的倍率は両試験体ともに2程度であり、繰り返し載荷時とほぼ同等である。このように、繰り返し載荷実験の最大衝突速度における単一載荷では、弾性応答と塑性応答が混在した耐荷挙動を示し、その時の動的耐力比は静的耐力比とほぼ同等の1.3程度であり、動的倍率は弾性応答が支配的な状態での動的倍率とほぼ同等の2程度である。

以上から、1) FRPシート補強による動的耐力向上効果は、弾性応答が支配的な状態ではシートの剛性が小さいために静的耐力向上効果に比べて若干小さいが、弾性応答と塑性応答が混在する領域では静的耐力向上効果とほぼ同等の効果が期待できる。2) 動的倍率は限界を大きく超えた衝突速度における結果を除いて弾性応答が支配的な領域や弾性と塑性応答が混在する領域では2程度である。この結果は、補強の有無やシートの材質および引張剛性に顕著には影響されない。なお、動的耐力比や

動的倍率は耐衝撃設計法を確立する上で重要な項目であるが、今後はエネルギー収支の検討を追加して耐衝撃設計法を確立すべく、より多くの単一載荷実験を行う必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、比較的低速の衝突速度下における無補強 RC 版と下面を FRP シートで補強した RC 版の耐衝撃性を繰り返し衝撃載荷および単一衝撃載荷実験によって検討した。なお、FRP シート補強試験体ではシートの材質、シートの強化方法および層数に着目し、これらが耐衝撃性に与える影響を検討した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下の通りである。

- (1) 繰り返し載荷における破壊時の衝突速度で耐衝撃性を評価すると、無補強よりも FRP シート補強試験体の方が、FRP シート補強試験体の中ではシートの引張剛性が大きいほど耐衝撃性に優れている。
- (2) 繰り返し載荷における無補強試験体の耐荷領域は、弾性応答が支配的な領域と弾性と塑性応答が混在する領域に大別される。一方、FRP シート補強試験体では、塑性応答が支配的な領域がその後に継続して出現する。
- (3) 最大支点反力と（累積）重錘貫入量の関係は、載荷方法や試験体の種類によって異なるものの両者は密接に関連している。
- (4) 繰り返し載荷時の最大衝突速度における単一載荷の場合には、繰り返し載荷時の最大支点反力と大略同程度の支点反力が発生する。
- (5) 鉄筋および FRP シートの配筋鉄筋方向の張力分担性状は $V = 4 \text{ m/s}$ で大きく変化する。これは、この衝突速度で配筋鉄筋方向に押し抜きせん断面が明瞭に形成されるためと考えられる。
- (6) RC 版の破壊性状は補強の有無、シートの引張剛性および載荷方法と衝突速度の影響を受ける。特に衝撃載荷時の押し抜きせん断面は版下面付近から形成され、この傾向はシートの引張剛性や衝突速度が大きいほど顕著である。
- (7) FRP シート補強による動的耐力の向上効果は、弾性と塑性応答が混在する耐荷領域では静的耐力の向

上効果と同程度に期待できる。

- (8) RC 版の動的倍率（動的耐力 / 静的耐力）は補強の有無やシートの引張剛性および耐荷領域の違いに関わらずほぼ 2 程度である。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院建設システム工学科構造力学研究室の澤田純之君および盛田行彦君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2000
- 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 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No. 619/I-47, pp. 215-233, 1999
- 3) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊二: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1809-1818, 2000
- 4) 構造工学シリーズ 6, 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, 1993
- 5) 大沼博志, 伊藤千浩, 白井孝治: 飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃補強工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 1579-1584, 1999
- 6) 森川博司, 河西良幸, 坪田張二, 内田 孝, 大野友則, 小暮幹太: 飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板の耐衝撃性に関する実験と解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 477 号, pp. 107-114, 1995
- 7) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介, 松岡健一: FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 847-852, 2001
- 8) 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓, 今野久志: FRP シートを下面接着した RC 版の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 1363-1368, 2001

(2001 年 9 月 14 日受付)