

FRP シートで下面補強した RC 床版の耐衝撃挙動に関する一考察

A STUDY ON IMPACT RESISTANT BEHAVIOR OF RC SLABS STRENGTHENED WITH FRP SHEET

栗橋祐介*, 三上 浩**, 田口史雄***, 岸 徳光****

Yusuke KURIHASHI, Hiroshi MIKAMI, Fumio TAGUCHI and Norimitsu KISHI

*博(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

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

***北海道開発土木研究所室長 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

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

キーワード: RC 版, FRP シート, 重錘落下衝撃実験, 耐衝撃挙動

(RC slab, FRP sheet, weight-falling impact test, impact resistant behavior)

1. はじめに

近年, 道路・鉄道橋などに代表される既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の活荷重増加対策や耐震補強工法として, 連続繊維シート (以後, FRP シート) を用いた接着工法が採用されるようになってきた. FRP シートは, 軽量でかつ高引張強度を有し施工性および耐久性に優れた補強材料であることから, 今後より多くの構造物に適用されるものと考えられる. 一方, FRP シートを用いて壁や版などの面部材を補強するためには, 通常 1 方向強化 FRP シートを直交して最低 2 枚接着する必要がある, さらに工費縮減, 工期短縮が望まれている. また, FRP シートを接着した RC 版の静的耐荷性状に関する研究^{1),2)}はいくつか見られるものの, 衝撃荷重作用下の耐荷挙動に関する研究は極めて少ないのが現状である.

本研究では, FRP シートで補強した RC 版の耐衝撃挙動を検討するために, 各種 FRP シートを下面接着した RC 版に関する重錘落下衝撃実験を行った. 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, AFRP シートとしては, 通常の 1 方向シート (繊維束を 1 方向に織り上げたシート) と 2 方向シート (繊維束を直交 2 方向に織り上げたシート) の 2 種類を使用し, 各シートが耐衝撃挙動に及ぼす影響につい

て検討を行った. なお, 2 方向シートは 1 回の施工で直交 2 方向の補強が可能となるため, 工期短縮・コスト縮減に資するものと考えられる.

2. 実験概要

表-1 には, 各試験体に関するシート貼付方法および重錘の衝突速度の一覧を示している. 試験体数は, 無補強 RC 版 (N) および表-2 に示している各種 FRP シートを下面接着した RC 版の計 5 体である. A1, C1 はそれぞれ AFRP および CFRP 1 方向シートを直交して 1 層ずつ, A2-1, A2-2 は, AFRP 2 方向シートをそれぞれ 1 層および 2 層接着した RC 版である. なお, A1, C1 および A2-1 に用いた各 FRP シートの直交 2 方向の引張剛性 $E \cdot t$ (E : 弾性係数, t : シート厚さ) はほぼ同等であり, A2-2 のそれは他試験体の約 2 倍となっている.

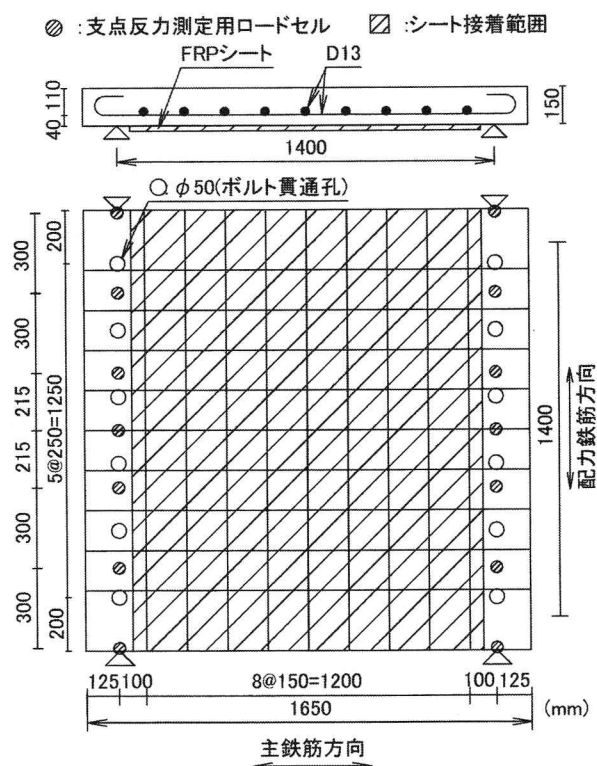
表-1 試験体一覧

試験体名	シート貼付方法	衝突速度 (m/s)
N	無補強	1, 2, 3, 4
A1	AFRP 1 方向シート直交	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
C1	CFRP 1 方向シート直交	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-1	AFRP 2 方向シート 1 層	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-2	AFRP 2 方向シート 2 層	1, 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5

表－２ 各種シートの材料特性

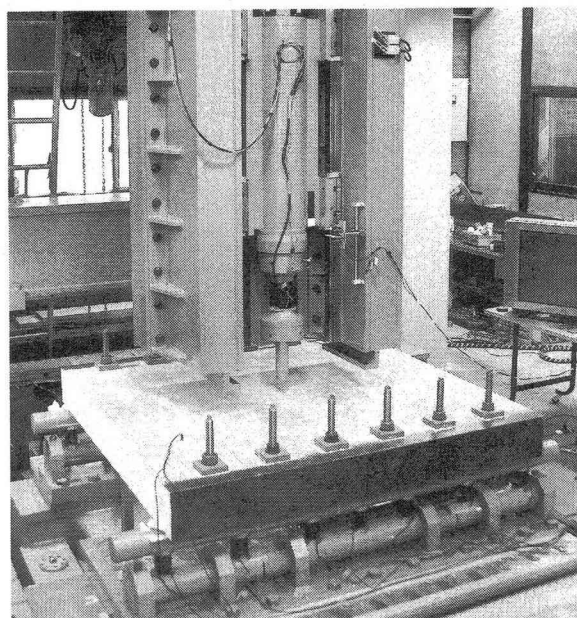
シート の種類	目付 量 (g/m ²)	厚さ <i>t</i> (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 <i>E</i> (GPa)	引張 剛性 <i>E</i> ・ <i>t</i> (kN/mm)
AFRP 1 方向	415	0.286	2.48	126.5	36.2
CFRP 1 方向	300	0.167	4.07	230.5	38.5
AFRP 2 方向	435*	0.3*	2.48	126.5	38.0*

*縦・横方向繊維のそれぞれの値



図－１ 試験体の概要

図－１には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状況およびシートの接着範囲を示している。RC 版の寸法は 1,650×1,650×150 mm であり、鉄筋は下端のみに配置した。主鉄筋および配力鉄筋には D13 を用い、150 mm 間隔で配置している。FRP シートの接着は、まず 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 度塗りした後実施した。1 方向シート接着の場合には 30 cm 幅のシートを用い、1 層目を主鉄筋方向に接着した後、2 層目を配力鉄筋方向に接着している。2 方向シート接着の場合には、1 m 幅のシートを用い、A2-1 の場合には主鉄筋方向中央部に接着し、その左右をラップ長 10 cm として対称になるように 42.5 cm 幅で接着している。A2-2 の場合に



写真－１ 実験状況

はさらに配力鉄筋方向に A2-1 と同様に接着することとした。また、いずれの場合もシートの端部には定着のための特別な処理を施していない。

RC 版の一対辺は支持間隔が 1,400 mm であり、その支点部は鋼製治具を用いて試験体の浮き上がりを防止し、かつ回転のみ許容するピン支持に近い構造となっている。なお、他対辺は自由としている。実験は、質量 300 kg、先端部が直径 60 mm で 2 mm のテーパがついた球面状の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行った。载荷方法としては、初回の衝突速度を 1 m/s とし、増分速度を 1 m/s（終局時近傍では 0.5 m/s）として、終局に至るまで版中央部に载荷する漸増繰り返し载荷法を採用した。なお、本研究では、RC 版の破壊基準を既往の RC 梁に関する研究成果³⁾を参考にして、最大累積残留変位が支点間距離の 1/50 (28 mm) に達した時点と設定した。写真－１には、本実験の状況写真を示している。

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 であった。また、鉄筋には SD295A を使用し、その降伏強度は 354.5 MPa であった。測定項目は、重錘および支点治具に内蔵されたロードセルによる重錘衝撃力 *P* および合支点反力 *R*（以後、支点反力）と、非接触式レーザ変位計による RC 版の载荷点変位 δ （以後、変位）の各応答波形である。各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

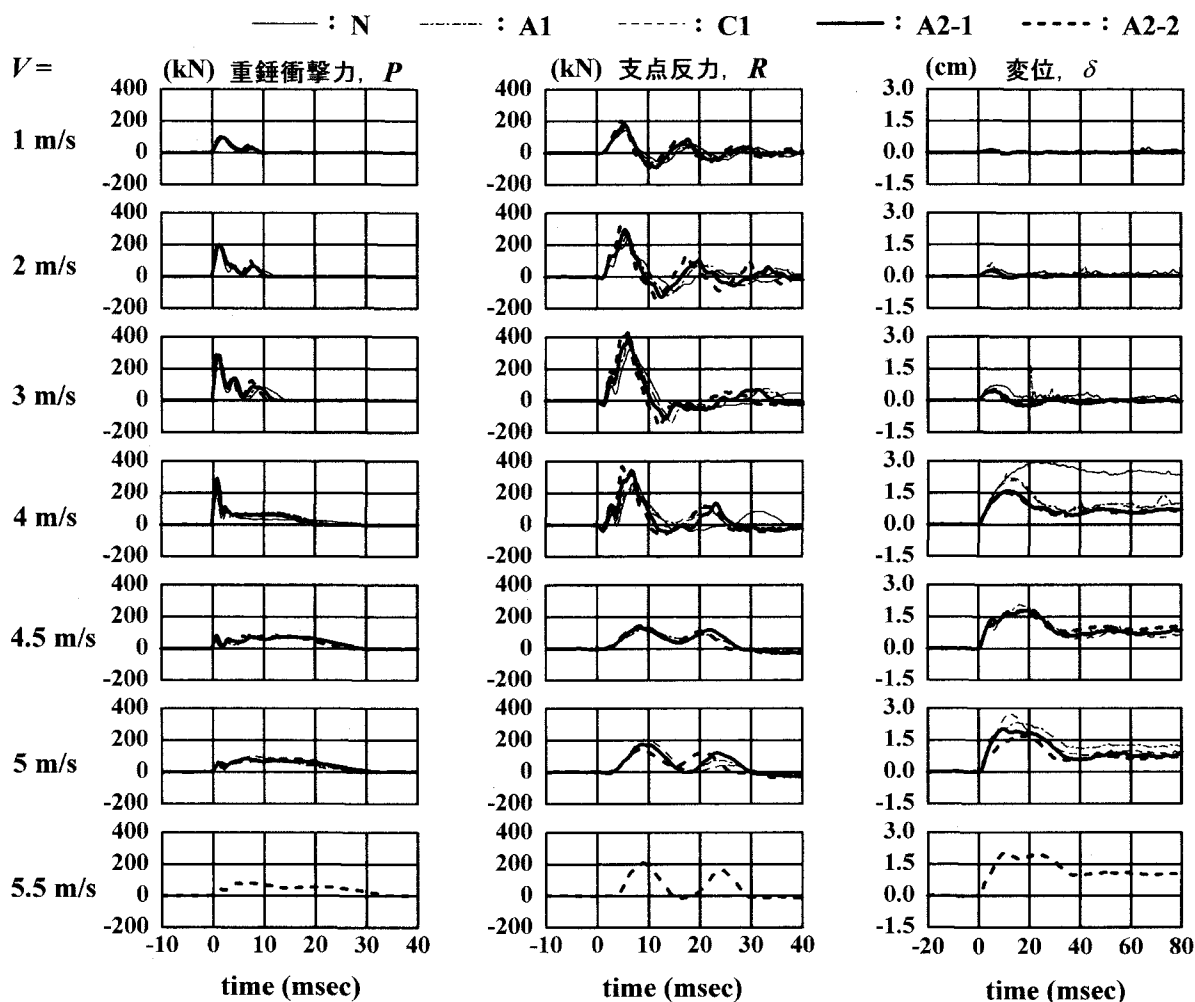


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

で A/D 変換を施している。また、実験終了後には配力鉄筋方向の版中央部を切断して破壊面を観察した。

3. 実験結果

3. 1 各種応答波形

図-2には、各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する応答波形を各衝突速度について示している。図より、重錘衝撃力波形 P の性状は各試験体で大差がなく、 $V=3$ m/s までは载荷初期に急激に立ち上がる第1波目の振幅が衝突速度の増加に対応して増大していることが分かる。 $V=4$ 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が消滅し、継続時間が 30 ms 程度でほぼ正弦半波状の波形を示している。

一方、支点反力波形 R は無補強試験体 N と FRP シート補強試験体で多少の差異がみられるものの、全試験体でほぼ同様の波形性状を示している。

また、支点反力の第1波目の振幅は、重錘衝撃力波形の場合と同様に $V=3$ m/s までは衝突速度の増加に対応して大きくなるものの、 $V=4$ m/s の場合には減少し、 $V=4.5$ m/s 以降では継続時間が 25 ms 程度の低振幅の正弦波的な波形性状を示している。

変位波形 δ は、いずれの試験体の場合も $V=3$ m/s までは最大振幅が衝突速度の増加に対応して増大しているものの、残留変位はほぼ零となっている。一方、 $V=4$ m/s では、各試験体の応答変位が大幅に増加し、かつ残留成分も発生している。特に、N の場合には、最大応答変位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 シート補強した各試験体の波形性状は、A2-1/2 で振幅が小さくなる傾向にあるものの大略同様である。

このように、全試験体において $V=3$ m/s までは残留変位が小さく、弾性応答が支配的であることが分かる。一方、 $V=4$ m/s では変位波形の残留成分が増大していることより塑性化が進行し始め、 $V=4.5$ m/s 以降ではさらに塑性応答が支配的になるものと

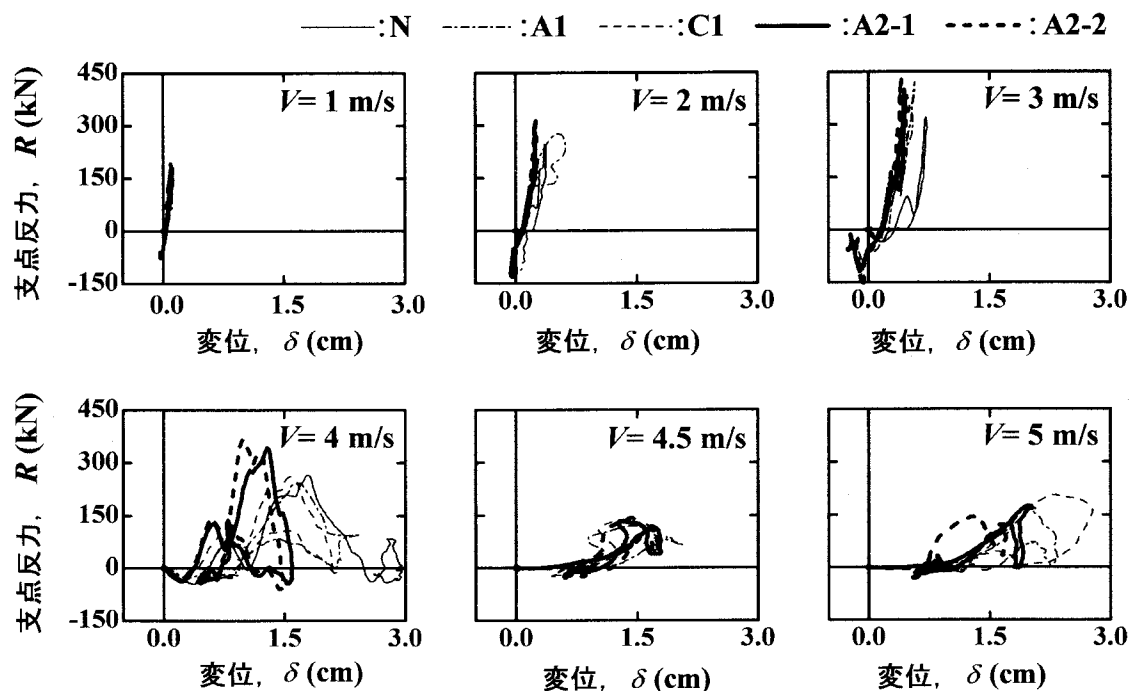


図-3 支点反力-载荷点変位の関係

考えられる。

3.2 支点反力-変位関係

図-3には、各衝突速度における全試験体の支点反力-载荷点変位の関係を示している。図より、 $V=3$ m/s までは N の応答変位が他試験体のそれよりも大きいものの、いずれの試験体も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はほぼ同様な経路で除荷している。これは、 $V=3$ m/s までは支点反力-変位曲線のループ内の面積として定義される吸収エネルギーが小さく、弾性応答が支配的であることを示している。

$V=4$ m/s では、A2-1/2 の最大支点反力が他試験体のそれに比較して大きく、かつ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状を呈していることより、試験体は载荷エネルギーを大きく吸収していることが分かる。ただし、補強試験体は支点反力除荷後、変位が 10 mm 以下のレベルに収束しているのに対し、無補強の N の場合には破壊基準 (28 mm) を超える 30 mm 程度の残留変位が生じている。以上より、後述する押し抜きせん断面は、 $V=4$ m/s において形成され、無補強の場合には終局に至っていることが分かる。

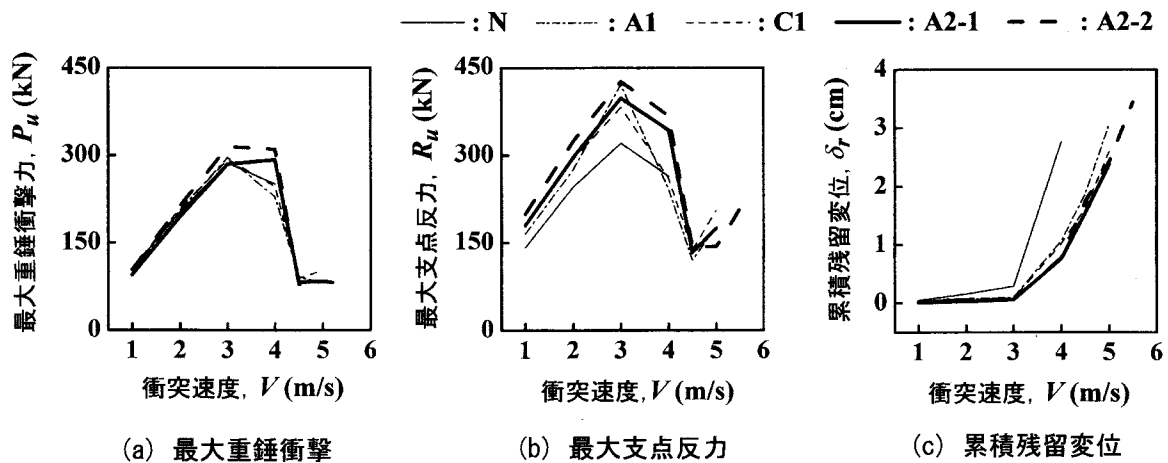
一方、FRP シート補強試験体の $V=4.5$ m/s における最大支点反力は、押し抜きせん断面が $V=4$ m/s

で既に形成されているために $V=4$ m/s の場合よりも小さく示されており、塑性応答がより支配的となっている。ただし、この状態においても FRP シートは RC 版裏面の端部近傍でコンクリートとの付着を維持しており、载荷部の残留変位を抑制している。そのため、支点反力の減少と相まって吸収エネルギーが $V=4$ m/s よりも大幅に小さくなっている。 $V=5$ m/s では、载荷エネルギーが $V=4.5$ 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 $V=4.5$ m/s の場合よりも大きくなる傾向にある。この傾向は C1 で最も顕著であった。なお、 $V=4.5$ m/s 以降では、 $V=4$ m/s で形成された押し抜きせん断コーン内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载荷エネルギーが吸収されているものと推察される。

3.3 衝突速度と各衝撃力および累積残留変位

図-4には、衝突速度 V と最大重錘衝撃力 P_u 、最大支点反力 R_u および累積残留変位 δ_r の関係を示している。図-4 (a) より、A2-1/2 の最大重錘衝撃力 P_u は $V=3, 4$ m/s でほぼ同等であるが、他試験体の場合は $V=3$ m/s で最大値を示した後、 $V=4$ m/s で若干低下していることが分かる。また、 $V=4.5$ m/s では全試験体で 80~90 kN 程度まで大きく低下している。

図-4 (b) より、最大支点反力 R_u は N で最も小さく、全般的に A2-1/2 で大きいことが分かる。A1,



図－４ 衝突速度と最大重錘衝撃力、最大支点反力および累積残留変位の関係

表－３ 動のおよび静的耐力

試験体名	静的最大耐力 (kN) (1)	静的耐力比	動的最大耐力 (kN) (2)	動の耐力比	動の倍率 (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

C1 の場合にはいずれも $V=3$ m/s で最大値を示し、特に A1 の支点反力が A2-2 と同程度に大きく示されている。しかしながら、 $V=4$ m/s では A1, C1 とともに N と同程度にまで大きく減少している。一方、A2-1/2 の場合は、最大重錘衝撃力の場合と同様に $V=4$ m/s における支点反力の低下が A1, C1 ほど顕著ではない。以上より、最大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、補強試験体の動的耐力は無補強試験体よりも大きく、補強試験体の中では A2-1/2 の場合において動的耐力の低下が抑制され耐衝撃性に優れていると云える。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や、2 方向シートのひび割れ抑制効果が 1 方向シートを直交して重ね貼りする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最大支点反力が增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。

図－４ (c) より、各試験体の累積残留変位 δ_r (以

後、残留変位) は $V=3$ m/s 程度までは衝突速度の増加とともにほぼ線形に増加し、 $V=4$ 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、 $V=4$ m/s で残留変位を評価すると、N の場合が最も大きく、A2-1/2 で最も小さい。なお、最大支点反力がピークを示す $V=3$ m/s における残留変位は、N で 3 mm 程度、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、最大支点反力のピークが、弾性応答の支配的な領域で発生していることが分かる。

3. 4 静的最大耐力および動的最大耐力

別途実施した静載荷実験⁴⁾では全ての試験体が押し抜きせん断破壊に至ったことから、表－３には押し抜きせん断耐力（以後、静的最大耐力）と本実験より得られた最大支点反力のピーク値を合わせて示している。ここでは、 $V=3$ m/s の最大支点反力を動的最大耐力として整理している。また、表中には N を基準として無次元化した静的耐力比と動的耐力比および動的最大耐力を静的最大耐力で除した動的倍率も合わせて示している。なお、静載荷実験は載荷治具の先端形状が衝撃実験の場合と等しく、載荷速度（衝突速度）のみが異なるだけである。

表より、静載荷時には、FRP シート補強することにより、耐力が 1.30～1.46 倍増大しており、その傾向はシートの引張剛性 $E \cdot t$ が大きい A2-2 の場合に顕著であることが分かる。一方、衝撃載荷時には、補強試験体の動的耐力比が 1.2～1.3 程度となっており、静載荷時よりも FRP シートによる補強効果が小さく示されている。これは、衝撃載荷の場合にはいずれの試験体も動的最大耐力が弾性応答の支配的な $V=3$ m/s 時に励起されているため、RC 版に比べて剛性の小さい FRP シートが各試験体の弾性

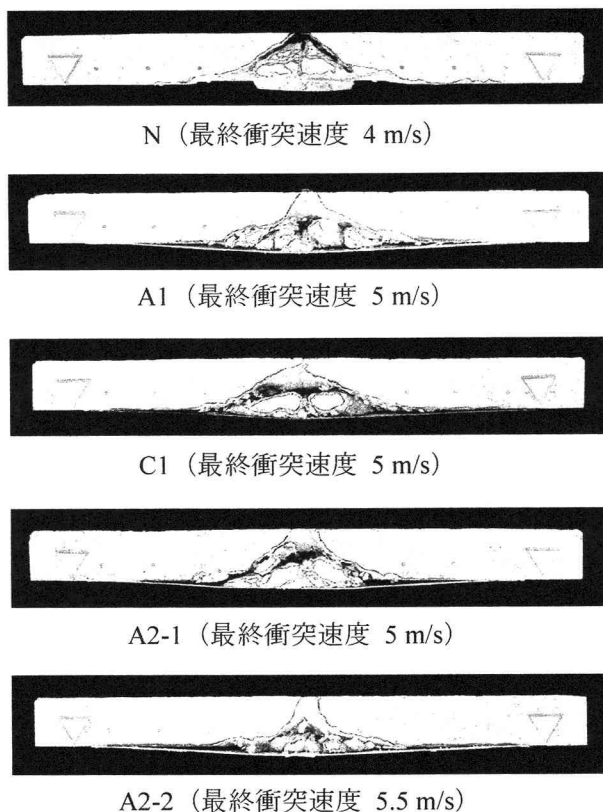


図-5 破壊性状

挙動に及ぼす影響が小さいためと推察される。なお、動的倍率は補強の有無、シートの材質および引張剛性にかかわらずいずれの試験体においても 2 程度以上である。

3.5 押し抜きせん断性状

図-5 には、実験終了後における RC 版の中央部切断面のひび割れ性状を示している。図より、N では版上面から約 45° の押し抜きせん断面が形成されて終局に至っており、下縁かぶり部のコンクリートが広範囲に渡って剥落していることが分かる。一方、補強試験体の押し抜きせん断面は、無補強の場合と異なり、版厚中心付近から下方に緩やかな角度で形成され、せん断コーン内のコンクリートが細かく粉砕されている。これは、FRP シート補強試験体の場合には、 $V=4\text{ m/s}$ 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せん断コーンの脱落を FRP シートが抑制しているため、载荷速度の増加とともにコーン部におけるコンクリートの粉砕やシートの剥離領域が同心円状に拡大して、载荷エネルギーを吸収していることによるものと推察される。なお、A2-2 の場合には、押し抜きせん断面が他の補強試験体よりも下方に形成されている。これは、A2-2 のシートの引張剛性が大きく最終衝突速度も大きいために、裏面剥離破壊の傾向を示したことに

よるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、FRP シートを下面接着した RC 版の耐衝撃挙動を検討するために、材料特性、強化方向および補強量の異なる FRP シート補強 RC 版の重錘落下衝撃実験を行った。本実験で得られた知見を要約すると、以下の通りである。

- (1) FRP シートを下面接着することにより、RC 版の耐衝撃性能が向上する。特に、2 方向 AFRP シートを用いる場合やシートの引張剛性が大きい場合に、その効果が大きくなる傾向にある。
- (2) 補強試験体の重錘衝撃力、支点反力、変位波形の性状には大きな差異は見られない。いずれの試験体も $V=3\text{ m/s}$ までは弾性応答が支配的であり、 $V=4\text{ m/s}$ において塑性化し始め、 $V=4.5\text{ m/s}$ 以降では塑性応答が支配的になる。
- (3) 無補強試験体を基準とした補強試験体の耐力は、静载荷では 1.30 ～ 1.46 倍、衝撃载荷では 1.19 ～ 1.33 倍であり、衝撃载荷時の補強効果が若干低い。また、衝撃最大耐力を静的最大耐力で除した動的倍率は 2 程度であり、補強の有無や補強方法による差異は少ない。
- (4) 衝撃荷重载荷時における RC 版の押し抜きせん断耐荷性状は、補強の有無や補強材の引張剛性に大きく影響される。特に、引張剛性が大きい場合には押し抜きせん断面の形成される位置が下方に推移し、裏面剥離破壊の傾向を示す。

参考文献

- 1) 中島規道, 三上 浩, 角田 敦, 鍋島益弘: 二方向アラミド繊維シートによる RC スラブの押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp. 1465-1470, 1999.
- 2) 森 成道, 若下藤紀, 松井繁之, 西川和廣: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究, 橋梁と基礎, 1995.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静载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) 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.