

FRP シート補強 RC 版の重錘落下衝撃実験

Weight Falling Impact Test of RC Slabs Strengthened with FRP Sheet

室蘭工業大学 ○正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学 正 員 安藤 智啓 (Tomohiro Ando)
 室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi G. Matsuoka)

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強方法として、各種の連続繊維シート (以後、FRPシート) を用いる工法が盛んに採用されるようになった。FRPシート補強工法は、施工が簡便で材料が軽量なため重機を必要としない、現場合わせの施工が可能であり工期を短縮できる、耐食性に優れているなどの特徴を有している。しかし、壁や版などの面部材を補強するためには、1方向強化 FRP シートを直交して最低2枚貼り付ける必要があり、さらなる工費削減、工期短縮が望まれている。FRP シートを接着した RC 版の静的耐荷性状に関する研究例^{1),2)}はいくつかみられるものの、衝撃荷重作用下の耐荷性状についてはほとんど研究されていない。

本研究では、衝撃的外力を受ける版部材を FRP シート工法で補強した際の耐衝撃性状を検討するため、RC 版下面に FRP シートを接着した試験体を用いて重錘落下衝撃実験を行った。用いた FRP シートは、アラミド繊維製 (AFRP) および炭素繊維製 (CFRP) 1方向シートとアラミド繊維製2方向シートである。AFRP 2方向シートは、アラミド繊維束を直交して織り上げてシート状にしたもので、1回の施工で2方向補強が可能となるため、工費削減、工期短縮に資するものと考えられる。

2. 実験概要

表-1に試験体の一覧を示す。また、図-1に試験体の形状・寸法と配筋状況およびシートの貼り付け範囲を示す。試験体は無補強RC版とその下面に表-2に示す各種 FRP シートを接着した合計5体である。

A1, C1 試験体は各々 AFRP または CFRP 1方向シートを直交して1層ずつ接着し、A2-1, A2-2試験体は AFRP 2方向シートを各々1層、2層接着した試験体である。なお、A1, C1, A2-1 試験体の FRP シートの直交2方向の引張剛性 ($E \cdot t$) はほぼ同等であり、A2-2 試験体の FRP シートの引張剛性は他の試験体の約2倍である。

RC 版の寸法は、1,650 × 1,650 × 150 mm で下端主鉄筋および配力筋として D13 を 150 mm ピッチで配筋した。なお、RC 版の一对辺は支持間隔が 1,400 mm で、支点部は回転を許容するが浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造とし、他対辺は自由とした。用いたコンクリートの実験時の材令における圧縮強度は 16.7 MPa、弾性係数 13.9 GPa、ポアソン比 0.23 である。鉄筋は

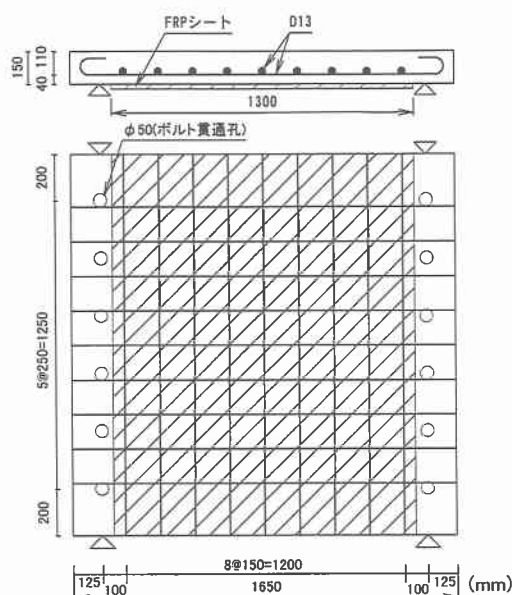


図-1 試験体の概要

表-1 試験体一覧

試験体名	補強方法	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 FRP シートの特性

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)
AFRP 1方向シート	415	0.286	2.48	126.5	36.2
CFRP 1方向シート	300	0.167	4.07	230.5	38.5
AFRP 2方向シート	435/435	0.3/0.3	2.48	126.5	38.0/38.0

SD295A で降伏強度は 354.5 MPa であった。

各種 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し、次にプライマーを2度塗りして、その後 FRP シートを貼り付けた。1方向シートは1層目を主筋方向に接着した後、直交して配力筋方向に2層目を接着している。また、2方向シートはラップ長を 10 cm としてシートを貼り付け、2層目のラップ位置は1層目のラップ位置と重ならないようにした。衝撃力の載荷は質量 300 kg、先端部直径 60 mm の鋼製重錘を所定

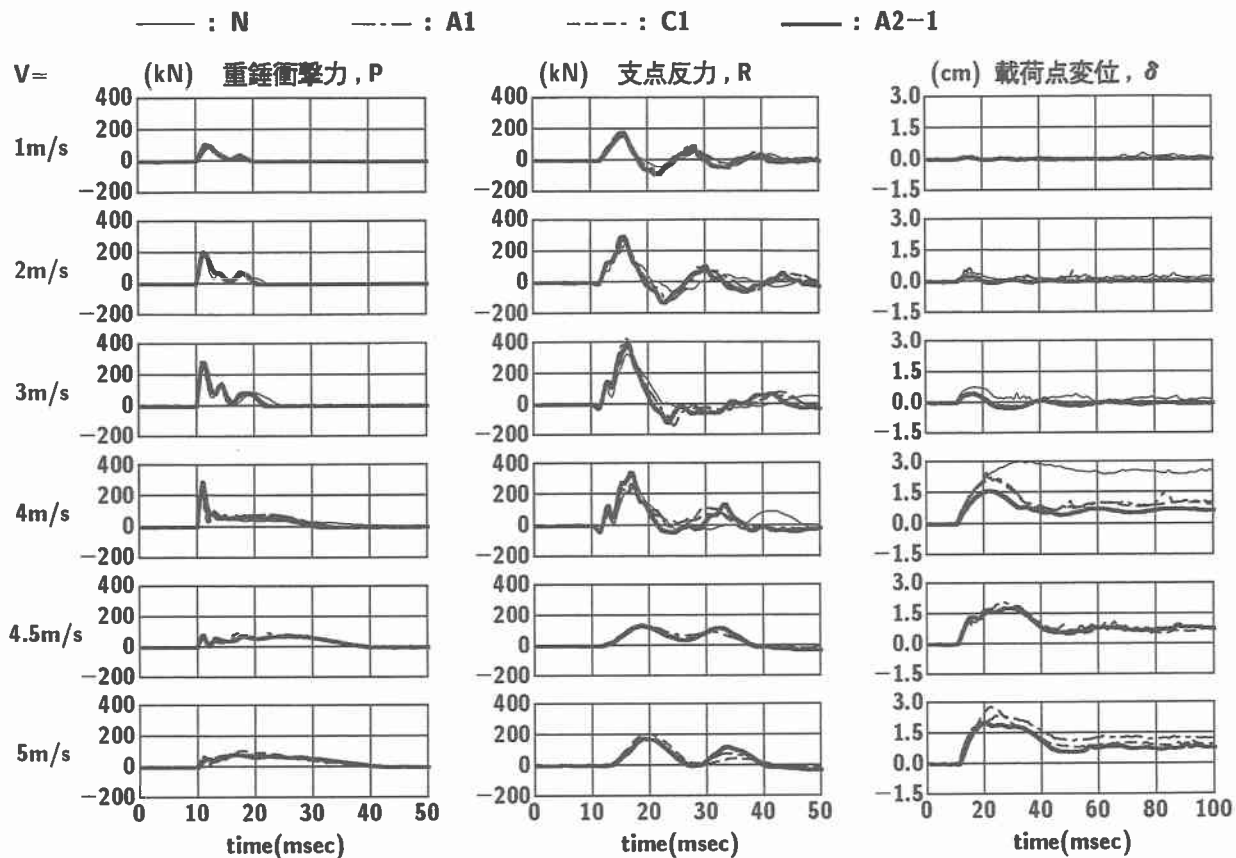


図-2 各種応答波形

の高さから自由落下させて行った。なお、本実験では重錘の衝突速度を漸増させ、載荷点直下の累積残留変位が支持間隔の $1/50$ (2.8 cm) 程度になるまで繰り返し衝撃載荷を行っている。計測項目は重錘衝撃力、支点反力および RC 版の変位であり、実験終了後には主鉄筋方向に版中央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に各試験体の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形を衝突速度ごとに示す。なお、図が不明瞭になることを避けるため A2-2 の波形を除いて示したが、他と同様な波形性状を示すことを確認している。

重錘衝撃力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 $V = 3 \text{ m/s}$ まで衝突速度の増加に対応して増大している。 $V = 4 \text{ m/s}$ 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生じている。 $V = 4.5 \text{ m/s}$ 以降では、載荷初期の急激な立ち上がりが消失し、継続時間が 30 ms 程度の低振幅の波形を示すのみである。

一方、支点反力波形は N 試験体と FRP シート補強試験体で若干異なるものの、全試験体でほぼ同様の波形性状を示している。支点反力の第1波目の振幅は重錘衝撃力波形と同様に $V = 3 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増加に比例して大きくなるものの $V = 4 \text{ m/s}$ では減少し、 $V =$

4.5 m/s 以降では正弦波的性状を示している。

各試験体の載荷点変位は $V = 3 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増加に対応して増大しているが、残留変位はほぼ零である。また、N 試験体で若干応答値が大きいものの波形性状は各試験体で大略同様である。 $V = 4 \text{ m/s}$ で応答変位は大幅に増加し、各試験体の残留変位も増大した。特に N 試験体では最大応答変位程度の変位が残留して終局に至った。なお、N 試験体を除いた試験体の $V = 4.5 \text{ m/s}$ 以降の変位波形性状は大略同様であった。

以上を要約すると、 $V = 3 \text{ m/s}$ までは各試験体の残留変位も小さく弾性応答が支配的であるが、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降において変位は大きく残留し、塑性応答が支配的になったものと考えられる。すなわち、後述するように重錘衝撃力や支点反力が最大となる $V = 3 \text{ m/s}$ は、シート補強の有無に関わらず試験体の示す弾性限界であると考えられる。

3.2 支点反力-変位関係

図-3に弾性限界と考えられる $V = 3 \text{ m/s}$ と塑性化が進行する $V = 4 \text{ m/s}$ における各試験体の支点反力-変位関係を示す。図より、 $V = 3 \text{ m/s}$ では N 試験体の変位レベルが他よりも大きく、 $V = 4 \text{ m/s}$ では A2 試験体の変位レベルが他よりも小さいものの各試験体の支点反力-変位関係は類似していることがわかる。 $V = 3 \text{ m/s}$ では各試験体の支点反力はほぼ弾性的に増大し、同じ経路で除荷されている。すなわち、この衝突速度では

試験体の吸収エネルギーはわずかである。一方、 $V = 4 \text{ m/s}$ まではいずれの試験体も三角形の支点反力-変位関係を示し、試験体は塑性化してエネルギーを大きく吸収していることがわかる。すなわち、後述する押し抜きせん断面が形成されるのは、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以上の衝突速度であると考えられる。

3.3 衝突速度と各種衝撃力および累積残留変位

図-4に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。図-4(a)より、A2-1、A2-2試験体の重錘衝撃力は、 $V = 3 \text{ m/s}$ と $V = 4 \text{ m/s}$ でほぼ同等であり、他試験体の重錘衝撃力は $V = 3 \text{ m/s}$ で最大値を示した後、 $V = 4 \text{ m/s}$ で若干低下していることがわかる。また、 $V = 4.5 \text{ m/s}$ では全試験体で $80 \sim 90 \text{ kN}$ 程度に大きく低下している。

図-4(b)より、支点反力は N 試験体で最も小さなレベルを示し、一般的に A2-1、-2 試験体で大きいことがわかる。A1、C1 試験体はいずれも $V = 3 \text{ m/s}$ で最大値を示し、特に A1 試験体の支点反力は A2-2 試験体と同程度に大きい。しかし、A1、C1 試験体はいずれも $V = 4 \text{ m/s}$ で支点反力が大きく減少している。一方、A2試験体では重錘衝撃力と同様に、 $V = 4 \text{ m/s}$ における支点反力の低下は A1、C1 試験体ほど顕著ではない。以上から、漸増繰り返し衝撃载荷を受ける場合、2方向シート補強した試験体がより壊滅的破壊に至りにくいことがわかる。ただし、2方向シートの層数による影響はさほど顕著ではなかった。これは、2方向シートの応力分配性能が1方向シートを直交して貼り付ける場合よりも優れているためと推察される。

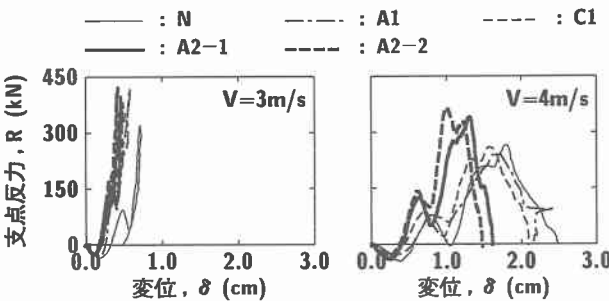


図-3 支点反力-変位関係

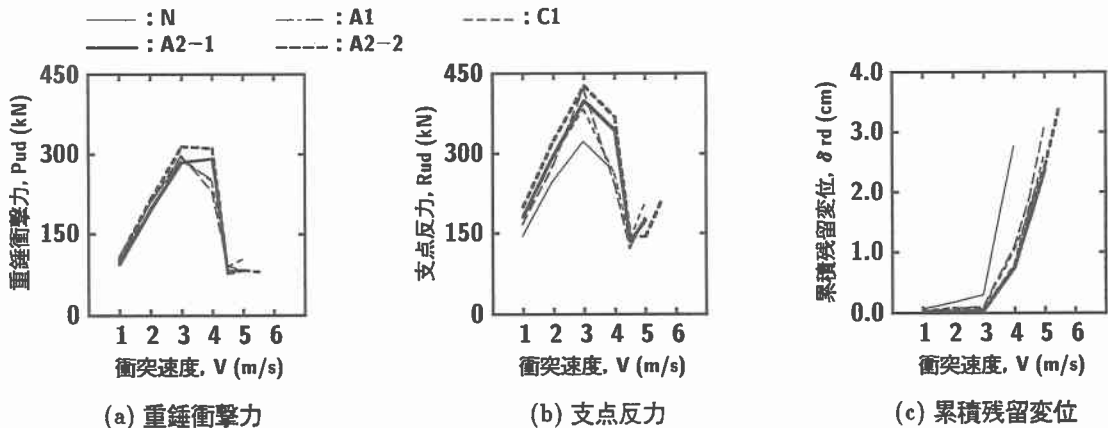


図-4 衝突速度と各種衝撃力および累積残留変位の関係

図-4(c)より、累積残留変位は $V = 3 \text{ m/s}$ 程度までは全試験体で衝突速度の増加とともにほぼ線形に増加し、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降では双曲線的に増大していることがわかる。変位レベルは N 試験体で最も大きく、A2-2 試験体の変位レベルが最も小さい。なお、最大支点反力は全試験体において $V = 3 \text{ m/s}$ で生じているが、この速度での残留変位は N 試験体で 3 mm 程度、他は 1 mm 以下と極めて微少である。

3.4 静的、動的耐力

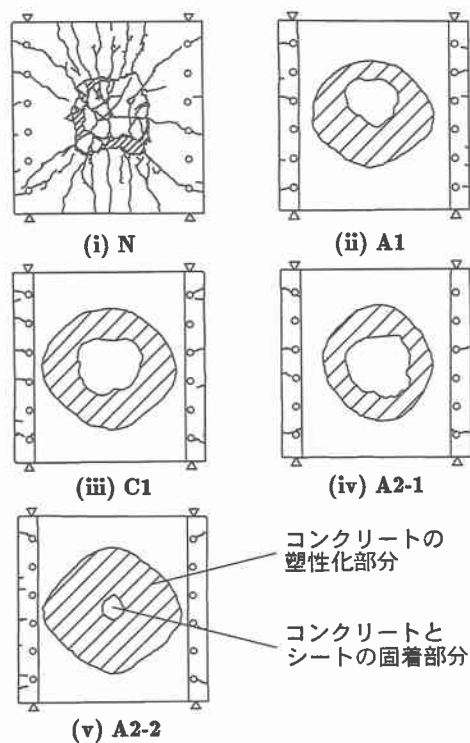
別途実施した静载荷実験では全ての試験体が押し抜きせん断破壊に至ったことから、表-3に押し抜きせん断耐力と本実験における最大支点反力を取りまとめた。ここでは最大支点反力を動的耐力と見なした。N 試験体を基準とした動的耐力比は、A2-2 試験体が最大で 1.33、次が A1 試験体で 1.31 であり、他は 1.2 程度であった。すなわち、FRP シートの方向性や材料特性および補強層数に関わらず、FRP シート補強することで 1.2 ～ 1.3 倍ほど動的耐力が向上している。一方、静的耐力比は FRP シートの引張剛性がほぼ等しい A1、C1、A2-1 試験体で 1.3 程度、A2-2 試験体で 1.5 弱であり、衝撃载荷よりも耐力比が大きくなっている。なお、動的耐力と静的耐力の比である動的倍率は、一般的に 2 程度であった。

3.5 押し抜きせん断性状

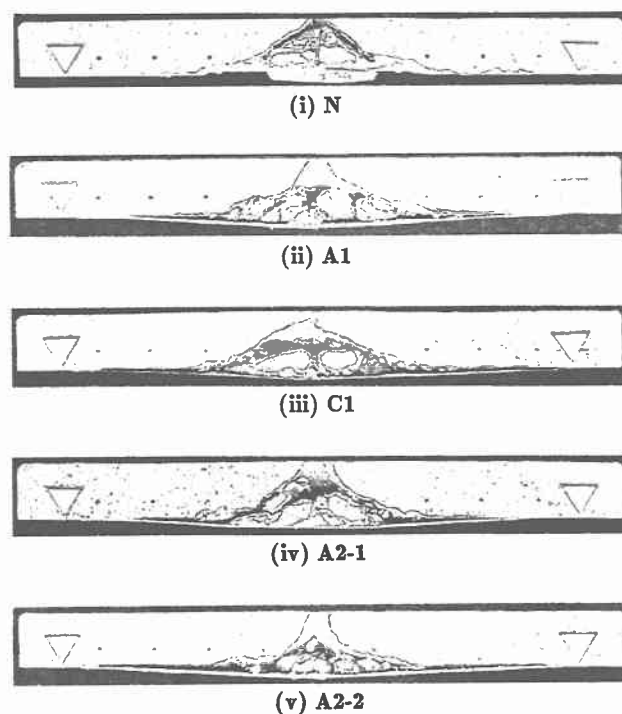
図-5に試験終了後の RC 版裏面および版中央部切断面のひびわれ性状を示す。N 試験体裏面には、主鉄筋方向の曲げひびわれとねじりモーメントによる対角線状

表-3 静的および動的耐力

試験体名	動的耐力 (kN) (1)	動的耐力比	静的耐力 (kN) (2)	静的耐力比	動的倍率 (1)/(2)
N	320.5	1.0	141.5	1.0	2.27
A1	421.1	1.31	186.4	1.32	2.26
C1	382.3	1.19	183.4	1.30	2.08
A2-1	398.5	1.24	187.8	1.33	2.12
A2-2	426.8	1.33	206.4	1.46	2.07



(a) 裏面



(b) 版中央部切断面

図-5 試験終了後の RC 版裏面および版中央部切断面のひびわれ性状

のひびわれおよび押し抜きせん断による円形のひびわれが生じている。一方、引張剛性がほぼ同等の FRP シートで補強した A1, C1, A2-1 試験体の裏面の状況はほぼ同様であり、版中央部ではシートにコンクリートが円形状に固着し、その外周ではコンクリートがリング状に塑性化し、それよりも外周ではコンクリートとシートが完全に接着している。なお、A2-2 試験体ではコンクリートがシートに固着した荷重点直下の円形部分が小さく、その外周に広範囲なコンクリートの塑性化部分が見られる。

切断面の状況から、N 試験体では版上面から約 45° の押し抜きせん断面が形成されて破壊していることがわかる。一方、FRP シート補強した試験体の押し抜きせん断面の性状は、FRP シートの引張剛性がほぼ同等の A1, C1, A2-1 試験体でほぼ同様であり、N 試験体と異なり版の高さ中央付近からより緩やかな角度で押し抜きせん断面が形成されている。さらに引張剛性の大きなシートを用いた A2-2 試験体では、押し抜きせん断面が形成される高さがさらに下がり版下面に近づいている。このように、FRP シート補強した試験体では、押し抜きせん断面が版の上面から形成されるのではなく、シートの剛性が高くなるほど版下面近くに形成され、裏面剝離に近い状態となる。したがって、版の有効高さが見かけ上小さくなり、衝撃耐力が大幅には向上しないものと考えられる。

4. まとめ

衝撃的外力を受ける RC 版の補強方法として版下面に FRP シートを接着する工法に着目し、シートの材料特性、シートの強化方向（貼り付け方法）およびシート層

数が耐衝撃性状に与える影響を重錘落下衝撃実験によって検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると下記の通りである。

- 1) 重錘衝撃力、支点反力、荷重点変位波形の性状には試験体による差異は少ない。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、 $V = 4 \text{ m/s}$ において一気に塑性化が進行する。
- 2) AFRP 2 方向シートで補強した方が支点反力の低下が抑制され、2 方向シート補強試験体は他に比べて壊滅的破壊に至りにくい。
- 3) 無補強試験体の耐力を基準とした補強試験体の耐力は、静荷重では $1.30 \sim 1.46$ 倍、衝撃荷重では $1.19 \sim 1.33$ 倍であり、衝撃荷重の方が補強効果が若干低い。また、衝撃耐力を静的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) 押し抜きせん断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、引張剛性が大きくなるほど裏面剝離に近くなり、押し抜きせん断面が形成される高さが版下方に移行する。このため、FRP シート補強による衝撃耐力の向上効果は静荷重時よりも小さい。

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, 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.