

I-11

FRP シートで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験

室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 室蘭工業大学 正 員 安 藤 智 啓
 室蘭工業大学 ○学生員 賀 澤 友 晴

1. はじめに

著者らは、これまで耐衝撃用途のコンクリート構造物の衝撃安全性を向上させる目的で、RC 梁や PC 梁の衝撃応答特性に関する研究を行ってきた [1-2]。研究は主として、断面寸法や補強筋量が異なり静的曲げ耐力が同等な梁の耐衝撃性状、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係および梁の吸収エネルギーと載荷エネルギー（重錘の運動エネルギー）の関係に着目して行ってきた。しかしながら、FRP シートで曲げ補強された RC 梁におけるこれらの検討はいまだ行われていない。

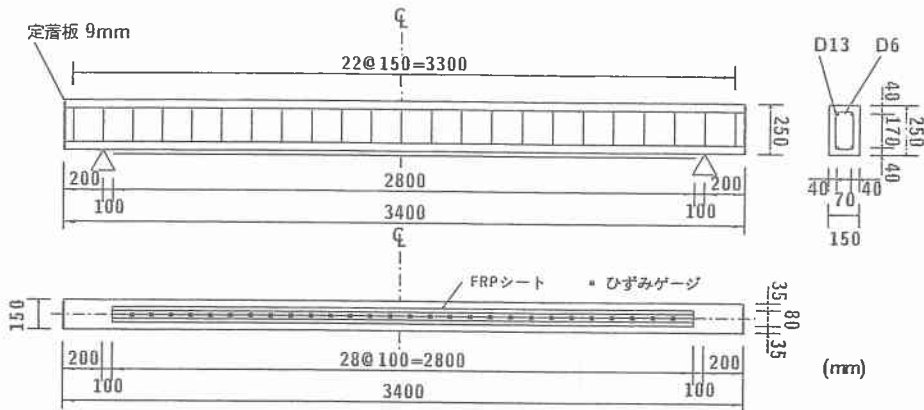
本研究では、FRPシートを貼り付けた梁における耐衝撃性状を実験的に検討することとした。なお、RC 梁の破壊は FRPシートで曲げ補強した場合にはシートが剝離した状態とし、無補強に関しては既往の研究 [2]と同様に累積残留変形量が梁の純スパンの 1/50 程度に達した状態と定義している。本論文では、FRP シートで曲げ補強した試験体と無補強の試験体の重錘衝撃力波形と梁中央部の変位波形ならびに残留変位を比較し、FRP シート補強が耐衝撃性状に与える影響を検討した。また、FRP シートの種類および目付け量を変化させ、これらの影響もあわせて検討している。最後に、FRP シートのひずみ分布性状をもとに衝撃荷重載荷時の FRP シートの剝離状況について検討を行っている。

2. 実験概要

表一 1 に試験体および実験結果の一覧を示す。試験体は梁幅 15 cm、梁高 25 cm の複鉄筋矩形梁である。試験体数は、底面にアラミドシートおよび炭素シートをそれぞれ 2 種類の目付け量で貼ったものと無補強の 5 種類を 2 体ずつ作製した合計 10 体である。試験体名は補強材のシートの種類、目付け量、載荷条件を組み合わせで表示している。本研究では重量 2.94 kN の鋼製重錘を用い、重錘衝突の初速度および増分速度を 1 m/s とする繰り返し載荷実験と、その最終載荷速度による単一載荷実験を行っている。表中の静的曲げ耐力は、表一 2, 3, 4 に示すコンクリート、シートおよび鉄筋の力学的特性を用いて断面分割法により算出した。なお、表一 4 の鉄筋の力学的特性は規格値を用いて示している。分割数はほぼ一定の解が得られる分割数以上とし、約 5 mm 刻みの 50 分割とした。また、載荷速度 4 m/s 時の重錘衝撃力、残留変位量および実験終了時のシートの状態もあわせて表中に整理している。実験に用いたコンクリートの強

表一 1 試験体および実験結果

試験体名	載荷速度 (m/s)	静的曲げ 耐力 (kN)	残留変位量 (cm)	最大重錘 衝撃力 (kN)	実験終了時の シートの状態
N-I	1~4	19.3	8.87	118.0	-
A415-I		30.3	5.35	122.6	剝離
A623-I		34.7	4.91	125.2	剝離
C300-I		30.9	5.73	123.4	破断
C445-I		35.4	4.79	127.1	剝離
N-S	4	19.3	5.27	115.6	-
A415-S		30.3	3.31	124.9	一部破断
A623-S		34.7	2.25	123.8	変化無し
C300-S		30.9	2.69	126.6	一部破断
C445-S		35.4	2.10	127.6	変化無し



図－１ 試験体の形状寸法および配筋位置

表－２ コンクリートの力学特性

コンクリート 強度 (MPa)	材令 (日)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
22.5	47	22.7	0.19

表－３ 補強材の力学特性

補強材	目付け量 (g/m ²)	シート厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)
アラミドシート	415	0.286	126.5	2.48
	623	0.429		
炭素シート	300	0.167	230.5	4.07
	445	0.248		

表－４ 補強筋の力学特性

補強筋名称	D13
材質	SD295A
公称直径 (mm)	12.7
公称断面積 (cm ²)	1.27
引張耐力 (kN)	56～75.9
降伏耐力 (kN)	37.3以上
ヤング係数 (GPa)	205.8
弾性伸び率 (%)	0.2

度は設計基準強度が $f'_{ck}=23.5$ MPa で実験時材令における圧縮強度が 22.5 MPa である。図－１に試験体の形状寸法、配筋位置およびシートに取り付けたひずみゲージの位置を示す。各梁は鉄筋の定着長を節約するために端面に 9 mm の鋼板を設置し、この鋼板に鉄筋を溶接している。主筋は D13 (SD 295A) を用い、スタラップは D6 (SD 295A) を 10 cm 間隔に配筋した。シートは支点から 10 cm 手前で貼り止め、梁幅 15 cm に対してシート幅 8 cm で貼り付けている。また、シートの中心線上にはひずみゲージを 10 cm 間隔で 28 点貼付した。本実験では支点部のリバウンドを防止するため、RC 梁の両端面から 20 cm の位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定している。治具全体は RC 梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。なお、重錘には衝撃荷重測定用に開発した歪ゲージ式のロードセルを設置して、重錘衝撃力を測定した。衝撃荷重は梁のスパン中央部に重量 2.94 kN の円柱状の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて載荷している。なお、重錘の底部は片当たりを防止するために高さ 2 mm のテーパを有する球底としている。スパン中央部にはストロークが 200mm のレーザ式変位計を設置し、変位応答ならびに残留変位を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ状況

図－２に実験終了後のひび割れ状況を示す。図より、無補強試験体が他に比べて大きく変形していることが分かる。また、FRP シート補強した試験体の方が無補強に比べて梁全体にひび割れが分散していることが分かる。補強材の違いによるひび割れ状況を比較すると、アラミドシート補強の方が炭素シート補強に比べて

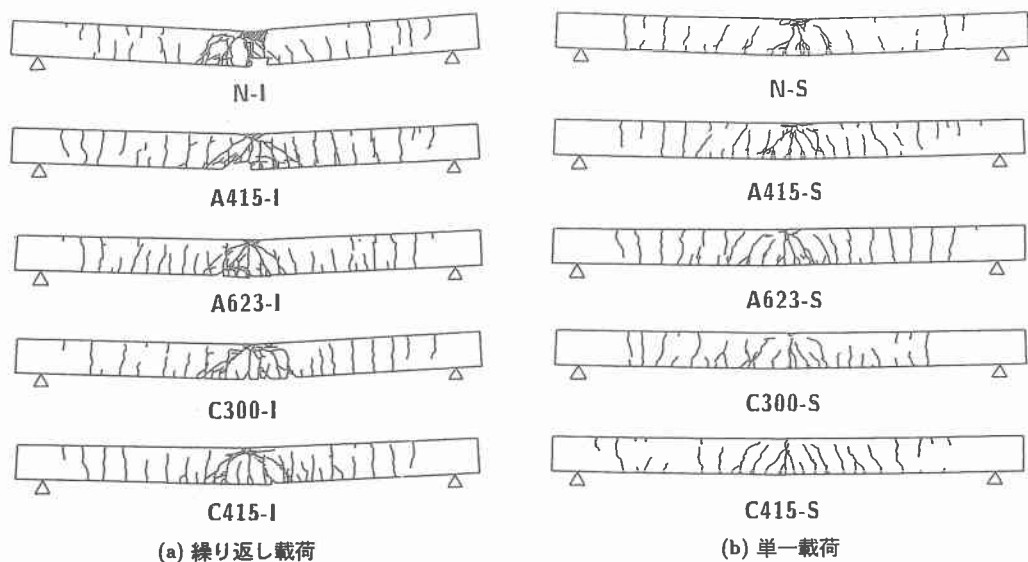


図-2 実験終了後のひび割れ状況

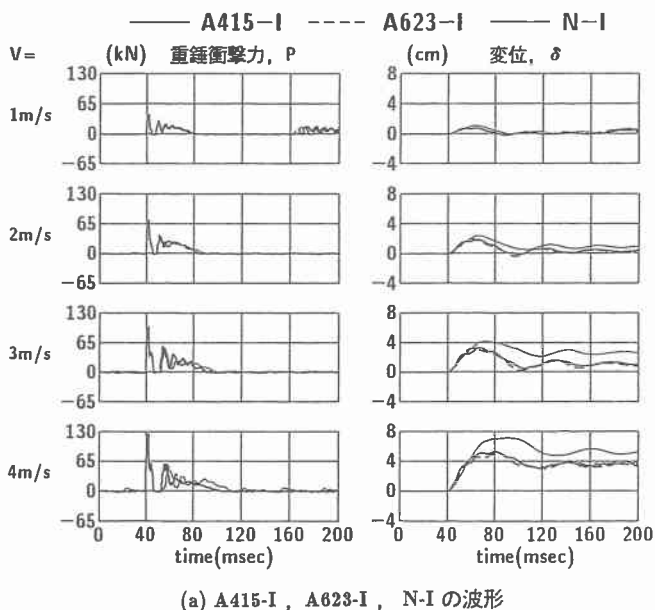
若干ひび割れが分散する傾向にある。特に単一載荷において炭素シート補強の梁は比較的中央にひび割れが集中しているのに対して、アラミドシート補強の梁では曲げひび割れが梁全体に分散しているようである。なお、目付け量によって終局時にシートが剥離または破断する違いが生じることもあるが、繰り返し載荷、単一載荷ともに目付け量はひび割れの分散性に大きな影響を与えていない。

3.2 重錘衝撃力波形および変位波形

図-3 に重錘衝撃力波形および変位波形を示す。(a) 図にはアラミドシート補強した A415-I と A623-I を無補強試験体の波形とともに示した。図より、重錘衝撃力波形は無補強の試験体で波形継続時間が若干長いもののが分かる。特に波形が立ち上がってから除荷状態に戻る間は試験体による差異は全く見られない。

2 波目の立ち上がりは無補強試験体で若干遅れるものの、A415-I と A623-I の波形は極めて良く一致している。これは、試験体の断面寸法が同一で FRP シート補強しても梁高方向の軸剛性がさほど変わらないため、どの試験体においても同様の波形が励起されたものと推察される。

一方、応答変位量は目付け量の多



(a) A415-I, A623-I, N-I の波形

図-3 重錘衝撃力波形および変位波形

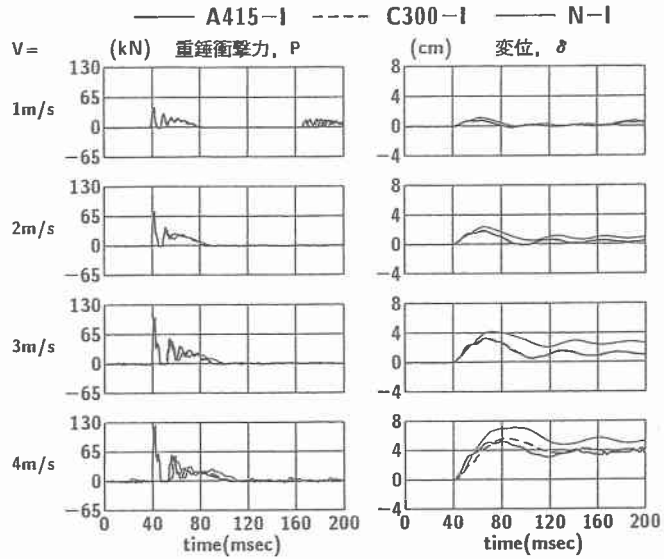
い梁で若干小さくなっている。また、無補強の梁は 1 m/s 時から補強した梁よりも最大変位量は大きく、継続時間が長く示されているのが分かる。(b) 図には静的曲げ耐力が 30 kN 程度の A415 と C300 試験体の各波形を無補強試験体の波形とともに示した。重錘衝撃力波形は (a) 図とほぼ同様の傾向を示し、シートの種類が重錘衝撃力波形に与える影響は顕著ではない。

一方、A415-I と C300-I の変位波形は C300 でシート破断が生じる前の 3m/s まで極めて良く一致しているのが分かる。この傾向は静的曲げ耐力が 35 kN 程度の A623-I と C445-I を比較した場合においても同様であった。(c) 図に単一載荷 $V = 4\text{m/s}$ の波形を示した。ここで、図の細線は N-S の波形である。単一載荷においても FRP シート補強した梁と無補強の梁の重錘衝撃力波形は繰り返し載荷と同様に載荷初期の波形性状は良く一致し、2 波目から無補強の波形継続時間が若干長くなっている。この波形継続時間が長くなる傾向は変位波形についても同様にみられる。また、変位波形の性状は繰り返し載荷と単一載荷でほぼ同様であった。

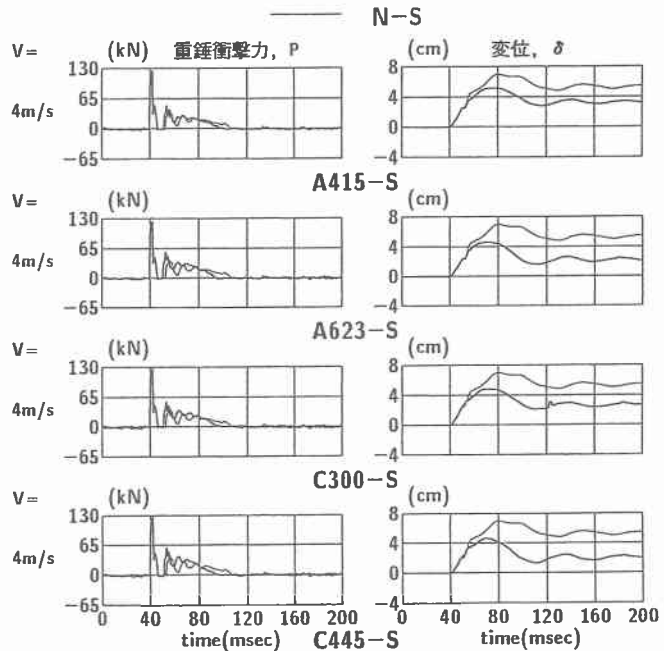
3.3 最大重錘衝撃力

図-4 に繰り返し載荷の各載荷速度における最大重錘衝撃力および単一載荷における最大重錘衝撃力をあわせて示す。図より、各載荷速度で試験体の種類に関わらず最大重錘衝撃力がほぼ等しいことが分かる。

また、単一載荷 $V = 4\text{m/s}$ の最大重錘衝撃力も繰り返し載荷 $V = 4\text{m/s}$ と良く一致している。これは、繰り返し載荷を行った梁の軸剛性が健全な梁とほとんど変わらず、著しい損傷がないことを意味するものと推察される。



(b) A415-I, C300-I, N-I の波形



(c) 単一載荷の波形

図-3 (続き) 重錘衝撃力波形および変位波形

3.4 残留変位

図- 5 に繰り返し載荷および単一載荷における残留変位を示す。図より、載荷方法に関わらず FRP シートで補強した梁の残留変位は無補強のそれに比べて小さいことが分かる。また、補強した梁のうち、A415 と C300 の残留変位が A623 と C445 のそれよりも若干大きく、目付け量が残留変位に影響を与えていることが分かる。

一方、A415 と C300 および A623 と C445 の残留変位はそれぞれほぼ対応している。これより、シートの軸剛性が同等であれば残留変位を同等に抑制できることが分かる。なお、これらの傾向は単一載荷でもほぼ同様である。

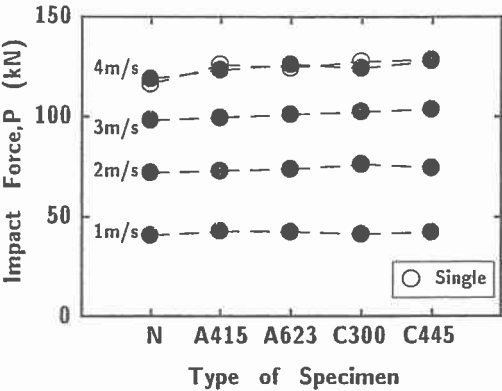
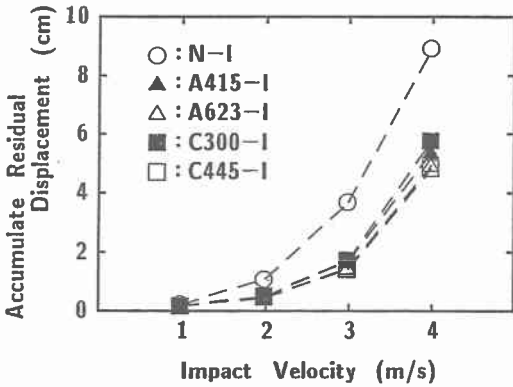
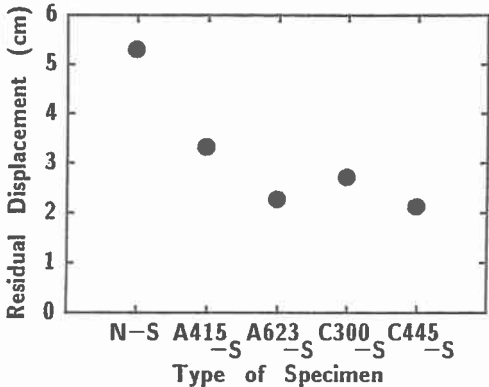


図- 4 最大重錘衝撃力

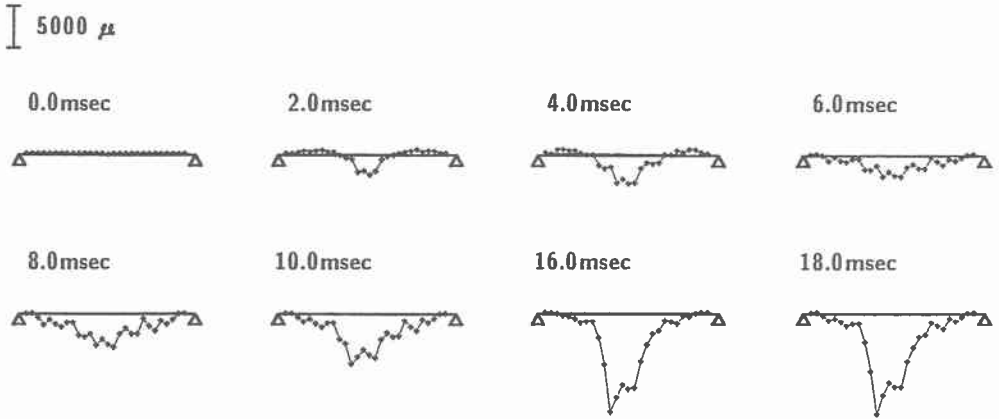


(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷 (4 m/s)

図- 5 残留変位



(a) A623-I, 3m/s

図- 6 シートのひずみ分布

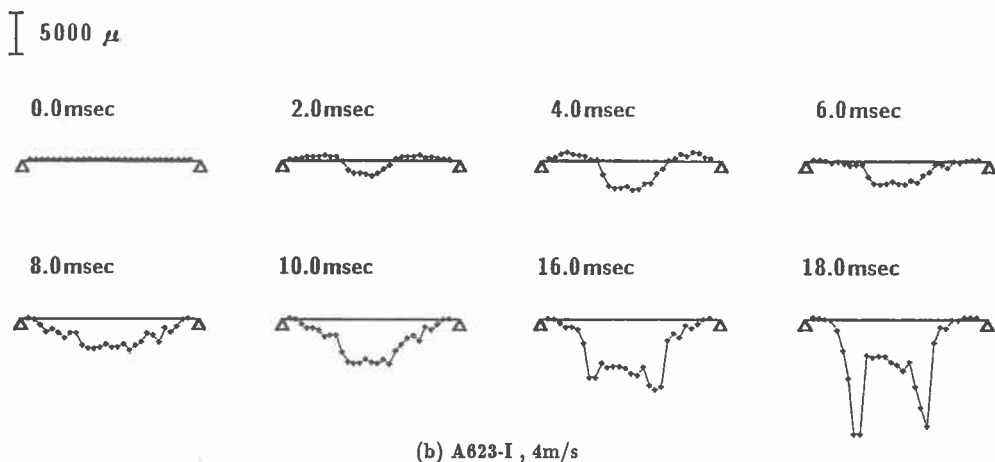


図-6 (続き) シートのひずみ分布

3.5 ひずみ分布

図-6 に A623-I を例にシートの歪分布を示した。図に示した時間は重錘衝撃力が励起する瞬間を 0 msec とした経過時間である。(a) 図は 3 m/s 時のものであり、(b) 図はシートが剝離した 4 m/s 時のものである。図より重錘衝突後 4 msec 時までは梁の支点部近傍において圧縮歪が生じているのが分かる。これは、重錘衝撃力が加わった直後に半スパンにおいて片持ち梁状態になることを示している。その後ひずみは主にスパン中央部において時間とともに増加していくが、支点近傍のひずみは中央部ほど大きく示されていない。このひずみ分布は、ひび割れが梁全体に分散するものの、載荷点直下のひび割れが進展かつ開口し、ヒンジに近い状態であることを示すものと推察される。一方、(b) 図より 16 msec 経過後において、載荷点からやや離れた位置でひずみが載荷点直下を対称に著しく大きい値を示していることが分かる。これより、シートの剝離は載荷点直下に形成されるアーチ状ひび割れを起点としたピーリングによって生じているものと考えられる。

4. まとめ

FRP シートを梁の底面に貼り付けて曲げ補強した RC 梁を用いて重錘落下衝撃実験を行い、耐衝撃性状を検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを要約すると、

- (1) 梁の底面に FRP シート補強を施すことにより曲げひび割れが梁全体に分散する。
- (2) FRP シート補強した梁の最大変位、残留変位は無補強の梁よりも小さく、目付け量が多くなるほど残留変位は小さくなる。
- (3) シート材料の種類や目付け量が重錘衝撃力や応答変位性状に与える影響は少ないが、炭素シートはアラミドシートに比べて破断しやすい。
- (4) シートが剝離して破壊する梁の剝離状況を動的計測結果をもとに明らかにすることができた。シートの剝離は、載荷点直下に形成されるアーチ状ひび割れ部を起点としたピーリングによって生じている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 安藤智啓, 三上 浩, 松岡健一: RC 梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1998.
- 2) 松岡健一, 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 1998.