

## FRP シートで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験

WEIGHT FALLING IMPACT TEST OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH FRP SHEET

栗橋祐介\*, 岸 徳光\*\*, 三上 浩\*\*\*, 安藤智啓\*, 佐藤良一\*\*\*\*

Yusuke KURIHASHI, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Tomohiro ANDO, Ryoichi SATO

\* 工修 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)

\*\* 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)

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

\*\*\*\* 計測技販株式会社 (〒065-0020 札幌市東区北 20 条東 15 丁目 3-1)

キーワード: RC 梁, 曲げ補強, FRP シート, 衝撃荷重, 耐衝撃性

( RC beam, flexural strengthening, FRP sheet, impact loading, impact resistance )

## 1. はじめに

著者らは、これまで主として曲げ破壊型の鉄筋コンクリート (RC) 梁の耐衝撃性に関する実験的・数値解析的研究<sup>1)~3)</sup>を行ってきた。その結果、1) 重錘落下衝撃実験において、重錘の衝突速度を梁が終局に至るまで 1 m/s ずつ漸増させて行う実験 (以下、繰り返し載荷実験) 結果は、実現象に即した単一載荷実験と照らして大略類似の性状を与えること、2) 梁終局時の最大合支点反力と静的曲げ耐力の関係および載荷エネルギーと吸収エネルギーの関係を工学的に定式化できること、3) それらの関係式を用いることにより、静的曲げ耐力に基づく曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計が可能であること、等が明らかになった<sup>1), 2)</sup>。一方、近年北海道積丹半島周辺の国道上で発生した大規模岩盤崩落に代表されるように、地山の経年変化により落石規模が大きくなる傾向にある。落石防護構造物はこのような状況に対しても、補強等によって十分な安全性を確保しなければならない。

本研究では、このような状況に鑑み、既設耐衝撃用 RC 部材を新素材繊維 (FRP) シートで曲げ補強した場合の耐衝撃性向上効果および耐衝撃補強法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、FRP シート曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷実験を行った。また、この種の実験例は極めて少ないこと

より載荷方法の影響にも着目し、繰り返し載荷および単一載荷の2種類の載荷方法による実験を試みた。本実験に用いた試験体は、材質や目付け量の異なる FRP シートで曲げ補強した RC 梁および無補強 RC 梁である。また、いずれの試験体も静載荷時において曲げ破壊が卓越し、かつ後述の計算静的曲げ耐力を満足することを確認している。

## 2. 実験概要

表-1 に試験体および実験結果の一覧を示す。試験体数は、アラミド繊維 (以下、AFRP) シートおよび炭素繊維 (以下、CFRP) シートを2種類の目付け量で補強した梁と無補強梁の5種類に対して2体ずつ製作した計10体である。試験体名はシートの材質 (N: 無補強, A: アラミド繊維, C: 炭素繊維)、目付け量 (AFRP シートの場合: 415, 623 g/m<sup>2</sup>, CFRP シートの場合: 300, 445 g/m<sup>2</sup>)、載荷方法 (I: 繰り返し載荷, S: 単一載荷) を組み合わせて表示している。静的曲げ耐力  $P_{usc}$  は、表-2, 3, 4 に示すコンクリート、FRP シートおよび主鉄筋の力学的特性を用いて断面分割法により算出している。また、表中には、衝突速度  $V = 4$  m/s 時の最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、最大支点反力  $R_{ud}$ 、累積残留変位  $\delta_{cr}$ 、および実験終了時におけるシートの状態も合わせて示している。

表-1 試験体および実験結果の一覧

試験体名	衝突速度 V (m/s)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	累積残留変位 $\delta_{cr}$ (cm)	最大重錘衝撃力 $P_{ud}$ (kN)	最大支点反力 $R_{ud}$ (kN)	実験終了時 シートの状態
N-I	1~4	19.3	8.87	118.0	113.7	-
A415-I		30.3	5.35	122.6	93.2	剝離
A623-I		34.7	4.91	125.2	102.8	剝離
C300-I		30.9	5.73	123.4	109.9	破断
C445-I		35.4	4.79	127.1	104.7	剝離
N-S	4	19.3	5.27	115.6	66.4	-
A415-S		30.3	3.31	124.9	52.5	一部破断
A623-S		34.7	2.25	123.8	50.5	変化なし
C300-S		30.9	2.69	126.6	78.3	一部破断
C445-S		35.4	2.10	127.6	78.1	変化なし

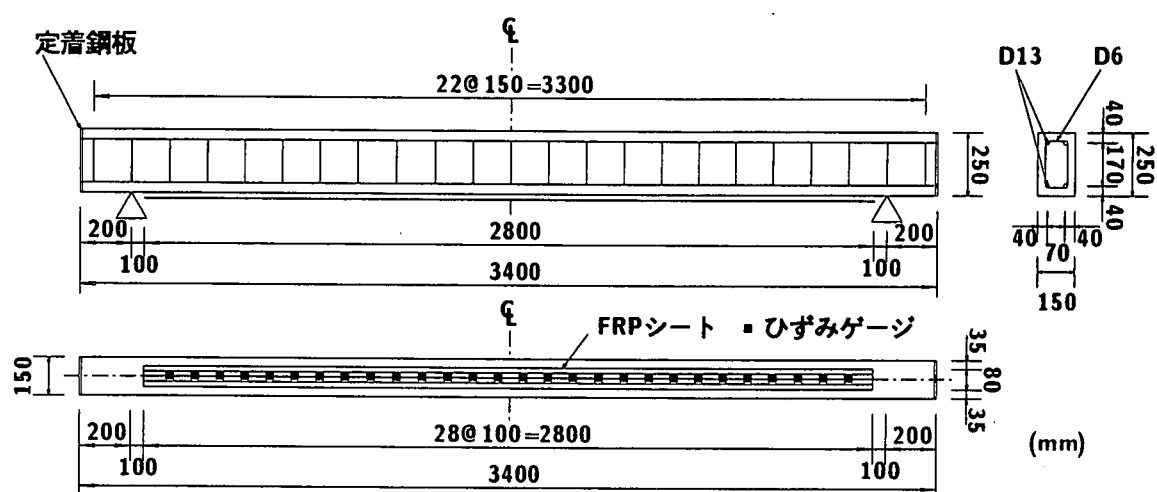


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置

図-1に試験体の形状寸法、配筋位置およびシートに貼付したひずみゲージ位置を示す。各試験体は梁高および梁幅がそれぞれ25 cm、15 cmの複鉄筋矩形梁である。また、梁端部には主鉄筋の定着長を節約するため9 mm厚の鋼板を設置し、この鋼板に鉄筋を溶接している。スターラップはD6(SD295 A)を15 cmピッチに配筋している。各FRPシートは、幅8 cmのものを用い、シートとの付着性を向上させるためにコンクリートのシート接着面に2.5 mm深さのチップングを施し、梁下面の梁幅中央部に両支点10 cm手前まで貼り付けている。また、シート中心線上にはゲージ長10 mmのひずみゲージを10 cm間隔で28点貼付している。なお、梁支点部は端面から20 cmの位置で鋼製治具により固定し、梁のリバウンドを防止している。治具全体は梁の回転を許容し、ピン支持に近い境界条件となっている。

実験はRC梁のスパン中央部に重量2.94 kN、載

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
47	22.5	22.7	0.19

表-3 FRPシートの力学的特性

材質	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	目付け量 (g/m <sup>2</sup> )	シート厚 (mm)	軸剛性 (MN/m)
アラミド	2.48	127	415	0.286	36.2
			623	0.429	54.3
炭素	4.07	231	300	0.167	38.5
			445	0.248	57.2

表-4 主鉄筋の力学的特性

主鉄筋 名称	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D13	379	546	206	0.3

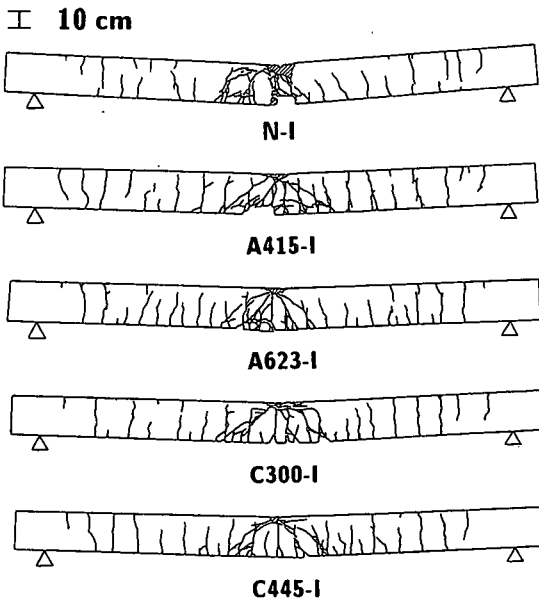
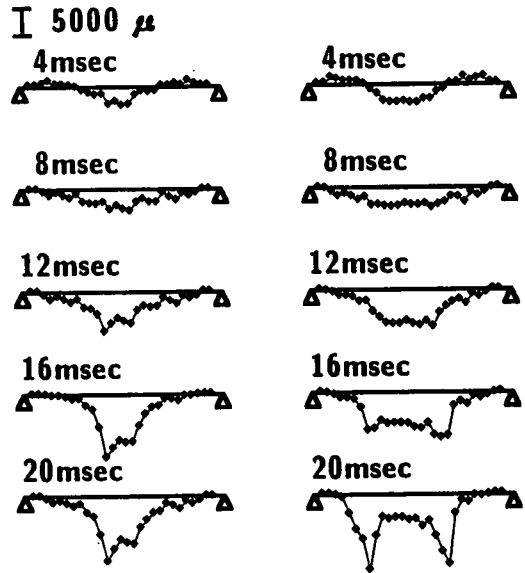


図-2 繰り返し載荷実験終了後のひび割れ分布



(a)  $V = 3 \text{ m/s}$  (b)  $V = 4 \text{ m/s}$

図-3 シートのひずみ分布 (A623-I)

荷部直径 15 cm の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて行っている。重錘落下は、繰り返し載荷の場合には初速度、増分速度を 1 m/s とし梁が終局に至るまで行い、単一載荷の場合には繰り返し載荷の最終衝突速度と同一速度で行っている。RC 梁の破壊は、全て曲げ破壊型であるものと推察されることより、既往の研究<sup>1)</sup>と同様にスパン中央部の累積残留変位が純スパン長の 2% (本試験体の場合にはいずれも 6 cm) 程度に達した状態と規定している。なお、測定項目は重錘衝撃力、支点反力、シートのひずみ、スパン中央部の変位 (以下、載荷点変位) 波形である。重錘衝撃力および支点反力の測定にはそれぞれ容量 1470, 500 kN, 応答周波数 4.0, 2.4 kHz のひずみゲージ型ロードセルを、載荷点変位の測定には容量 200 mm, 応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いている。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひび割れ分布

図-2に繰り返し載荷実験終了後の各 RC 梁のひび割れ分布を示している。図より、FRP シート補強した試験体の変形量は無補強試験体のそれに比べて小さいことがわかる。また、シート補強した試験体の曲げひび割れ本数は無補強試験体のそれに比べて多い。シートの材質および目付け量の影響についてみると、AFRPシート補強の試験体、また目付

け量の多い試験体の方が曲げひび割れ本数が若干多く、ひび割れ分散効果が大きく示されている。

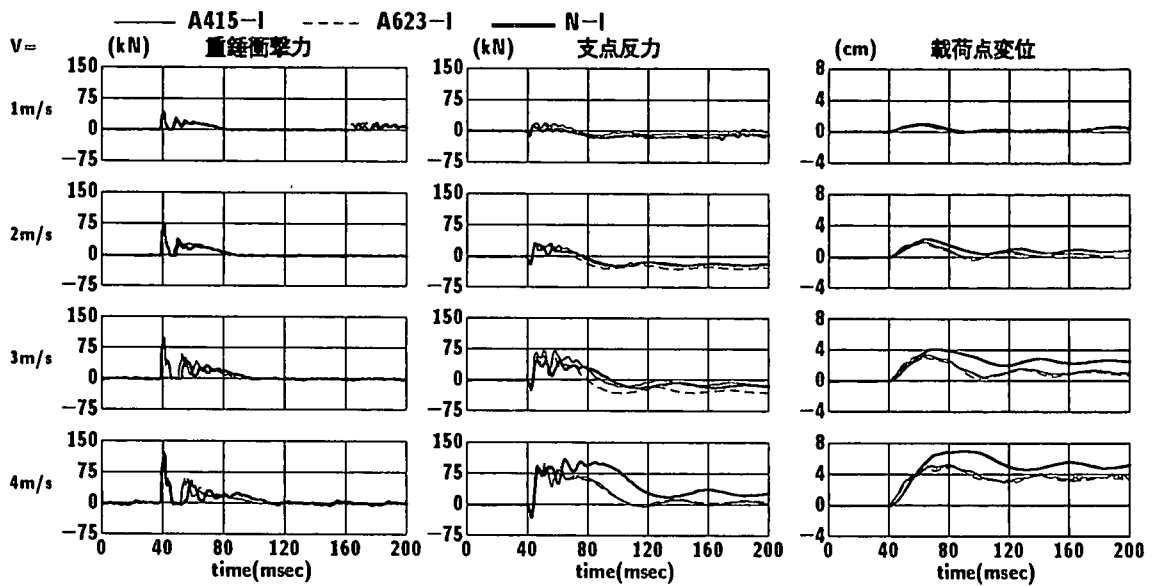
#### 3.2 シートのひずみ分布

図-3には A623-I 梁を例に、シートのひずみ分布の時間的推移状況を示している。図中の時間は重錘衝撃力が励起する時刻を 0 ms とした経過時間であり、ひずみの符号は上下をそれぞれ圧縮、引張としている。(a) 図は衝突速度  $V = 3 \text{ m/s}$ , (b) 図はシートの剝離を伴い終局に至った  $V = 4 \text{ m/s}$  時の分布である。

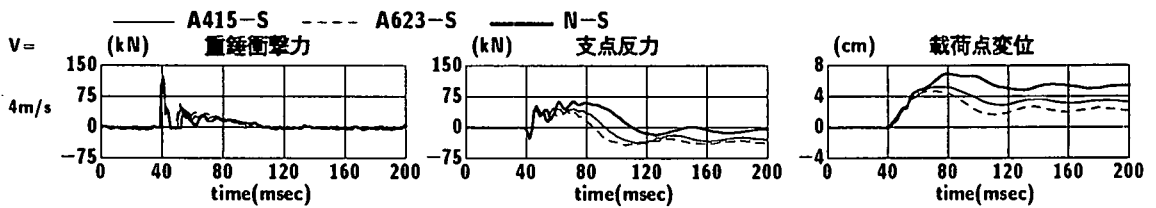
両図とも、重錘衝突後 4 ms 時に梁支点部近傍に圧縮ひずみが生じていることがわかる。これは、重錘衝撃力が梁に作用した直後に、3次モードが励起されたことを示唆している。しかしながら、8 ms 経過時には最低次モードのみの分布となっている。16 ms 時以降には、(a)図では載荷点部近傍で大きな引張ひずみが生じているのに対して、(b)図では載荷点から多少離れた位置で大きな引張ひずみが生じている。これは、図-2にみられるように、載荷点近傍に発生した曲げひび割れおよび斜めひび割れの交差により形成されたコンクリートブロックが、シートを押し抜く形で引き剥がすピーリング現象の発生によるものと考えられる。

#### 3.3 重錘衝撃力波形、支点反力波形および載荷点変位波形

図-4は、AFRPシート補強した A415 と A623



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷

図-4 重錘衝撃力波形, 支点反力波形および載荷点変位波形 (A415, A623)

梁の重錘衝撃力, 支点反力および載荷点変位波形を無補強梁の各波形と合わせて示したものである。

(a), (b) 図はそれぞれ繰り返し載荷と単一載荷の結果を示している。ここで, 支点反力は両支点反力の合計としている。

(a) 図より, シート補強した試験体の各波形の継続時間は, いずれも無補強試験体のそれに比べて衝突速度の増大とともに相対的に短くなる傾向にあることがわかる。これは, FRP シート補強をすることにより梁の曲げ剛性が無補強に比して大きくなり, 梁の固有振動周期が短くなるとともに, ひび割れの発生および進行が抑制されたことによるものと推察される。また, 重錘衝撃力および支点反力の最大値は補強の有無によらず大略類似しているが, 載荷点変位の最大値はシート補強することにより減少している。一方, 目付け量の異なる A415, A623 に着目すると, 目付け量が多い A623 の支点反力および載荷点変位波形の継続時間が, A415 のそれに比べて若干短い傾向にある。また, 載荷点変位の最大値も

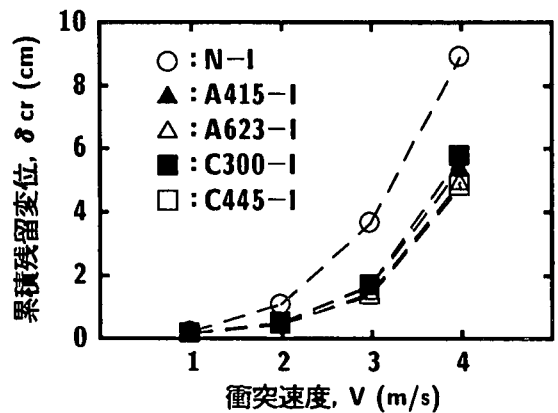
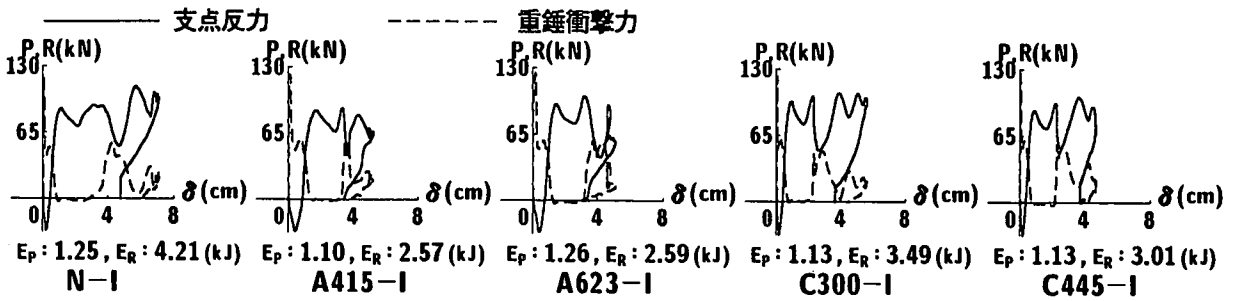


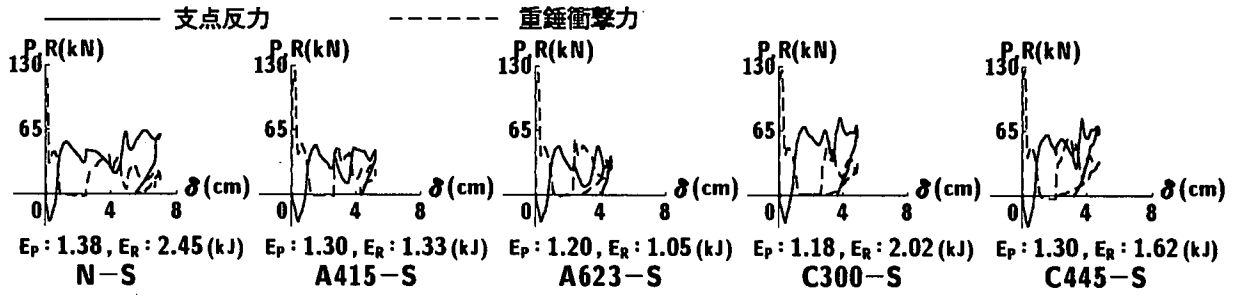
図-5 累積残留変位

A623 の方が若干小さいようである。

(b) 図より, (a) 図の場合と同様, シート補強の場合は, 無補強の場合に比較して各波形の継続時間が短かつ載荷点変位の最大値も小さく示されている。一方, 目付け量の違いをみても, A623 の支点反力, 載荷点変位波形の継続時間の方が短かつ載



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷

図-6 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線 ( $V = 4 \text{ m/s}$ )

荷点変位の最大値も小さい。また、この傾向は (a) 図の場合よりも顕著に示されている。これは、表-1 に示したように単一載荷の場合にはシートの剝離あるいは著しい破断が生じなかったことより、目付け量によるシート軸剛性の違いが梁の応答性状に顕著に現れたためと推察される。

なお、これらの結果は CFRP シートで補強した試験体の場合にも大略同様であった。

### 3.4 累積残留変位

図-5 に繰り返し載荷における各 RC 梁の累積残留変位を示している。図より、シート補強した試験体の累積残留変位は、無補強試験体のそれに比べて小さいことがわかる。また、シート補強した試験体の目付け量の違いに着目すると、A415 と C300 の累積残留変位は、それぞれ A623 と C445 のそれよりも若干大きい。さらに、シートの材質の違いに関してみると、A415 と C300 および A623 と C445 の累積残留変位は大略一致していることがわかる。なお、表-1 に示されているように、これらの結果は単一載荷の残留変位に対しても同様である。これより、梁の応答変位の抑制効果は、シートの材質によらずシートの軸剛性が同等であれば同程度であるものと判断される。

### 3.5 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線

図-6 は、 $V = 4 \text{ m/s}$  における各 RC 梁の重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線を示したものである。(a)、(b) 図はそれぞれ繰り返し載荷と単一載荷の結果である。また、図中  $E_p$ 、 $E_R$  は、それぞれ重錘衝撃力および支点反力の履歴曲線から求まる吸収エネルギー量である。なお、N-I 試験体では、その累積残留変位が破壊基準を大きく越えている点に留意する必要がある。

まず、重錘衝撃力-載荷点変位曲線についてみると、載荷方法によらず、重錘衝撃力は梁の変位が励起されない段階で急激に増加していることがわかる。また、最大値を示した後少ない変位量で一旦急激に除荷されている。なお、この第1ループの形状は、試験体によらず大略類似している。その後、再度急激に増加し、第2ピーク発生後変位の増大とともに徐々に減少している。この第2ループは試験体によりその形状や面積が若干異なっている。特に、無補強試験体の吸収エネルギーは、シート補強した試験体のそれに比べて大きい。これは、無補強の場合にはシート補強の場合に比べて梁の損傷による曲げ剛性の低下が著しく、この時点の耐衝撃性が乏しいこ

とを暗示している。

次に、支点反力-載荷点変位曲線についてみると、支点反力は、載荷方法によらず衝撃初期に重錘衝撃力波形が大きな値を示すのと対照的に負反力を呈し、その後正方向に増加している。そして、重錘衝撃力が零状態に除荷された時点で最大値を示している。ここでも無補強試験体の吸収エネルギーは、シート補強した試験体のそれより大きく示されている。また、同材質のシートでは目付け量が多い試験体の吸収エネルギーが小さく、同程度の軸剛性では AF RP シート補強の試験体の吸収エネルギーが小さい傾向にある。これは、同一衝突速度では吸収エネルギーの小さい梁が耐衝撃上健全である点を考慮すると、RC 梁を目付け量が多い AFRP シートで補強した場合が最も健全であることを示唆している。

### 3.6 最大支点反力と静的曲げ耐力の関係

図-7は、各 RC 梁破壊時における最大支点反力の静的曲げ耐力に対する比（以下、耐力比率）を示したものである。なお、重錘衝撃力波形は衝撃初期に継続時間が著しく短かつ振幅の大きい第1波を含む複雑な性状を示すことより、ここではそれらの影響を間接的に含む最大支点反力に着目して検討することとした。また、図-5より、N-I 試験体の累積残留変位は  $V = 4 \text{ m/s}$  時に破壊基準を大きく越えていることから、一段低い  $V = 3 \text{ m/s}$  時のデータを用いて評価している。

図より、各載荷方法における耐力比率は試験体により若干異なるものの、繰り返し載荷の場合で 3.0 程度、単一載荷の場合で N 試験体を除き 2.0 程度である。なお、載荷方法による耐力比率の違いは、実験時におけるシートの剝離や破断の有無が大きく影響しているものと考えられる。以上より、既往の研究結果<sup>1),2)</sup>と同様、FRP シート補強した RC 梁も、シートの材質や目付け量に関わらず耐力比率を 2.0 程度と評価することで、衝撃荷重に対する設計が可能であるものと推察される。

### 4. まとめ

アラミド繊維および炭素繊維シートで曲げ補強した RC 梁の衝撃荷重載荷実験を行い、各 RC 梁の耐

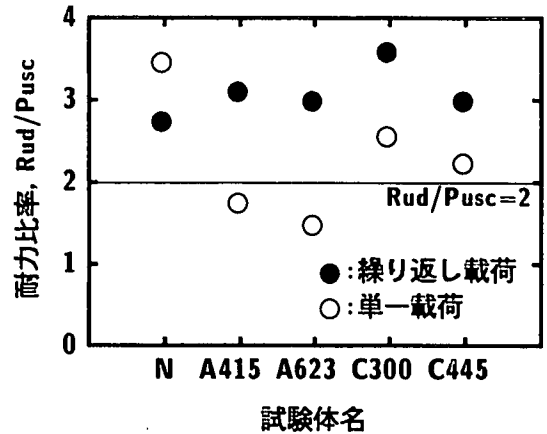


図-7 耐力比

衝撃性を検討した。本実験結果を要約すると、

- (1) 梁下面にシート補強を施すことで曲げひび割れが分散し、梁の損傷が抑制される。また、シートが目付け量が多いほどその分散性は高く、かつ梁の損傷抑制効果は大きい。
- (2) シートの材質によらず、その軸剛性が同等であれば梁の応答変位は同程度に抑制される。
- (3) 梁の吸収エネルギーはシート補強により低減し、耐衝撃性は向上する。
- (4) FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃設計は、静的曲げ耐力の2倍程度を動的耐力(最大支点反力)と評価することで可能であるものと判断される。

### 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.
- 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 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.